

日本船舶振興会昭和56年度補助事業  
“海洋構造物に関する基礎的研究”

研究資料 No.346

## 第179研究部会

### 箱型海洋構造物の運動特性及び 係留システムに関する研究

報 告 書

昭和57年3月

社 団 法 人

日本造船研究協会

浅海域における浮遊式箱型海洋構造物の運動特性及び波浪外力については、従来実験設備等の制約から研究の不足する分野であったが、これらについて総合的に研究調査を行い浮体の動揺及び漂流力、係留時の波力及び運動等を解明し、海洋構造物に対する安全適切な係留システム設計基準確立の資を得ることを目的として、本研究は3カ年計画をもって行うものであるが、その第3年度である本年度は箱型海洋構造物の運動特性及び係留システムの研究、係留システムの設計指針の作成を行った。

## はしがき

本報告書は、日本船舶振興会昭和56年度 補助事業「海洋構造物の基礎的研究」の一部として日本造船研究協会第179研究部会において実施した「箱型海洋構造物の運動特性及び係留システムに関する研究」の成果をとりまとめたものである。

本研究部会の委員は次の通りである。

### 第179研究部会委員名簿

(敬称略、順不同)

部会長	安藤 定雄 (船舶技術研究所)		
委員	井上 義行 (横浜国立大学)	小寺山 亘 (九州大学)	
	前田 久明 (東京大学)	大川 豊 (船舶技術研究所)	
	寺田 泰治 (日本海事協会)	日笠 則明 (日本海事協会)	
	岩崎 晃 (三菱重工業)	太田垣 由夫 (石川島播磨重工業)	
	小保方 準 (住友重機械工業)	小段範久 (日本鋼管)	
	小林 正典 (三井造船)	森 康寛 (日本鋼管)	
	岡武秀雄 (三井造船)	小川和夫 (日本鋼管)	
	高田 美津雄 (日立造船)	池上国広 (三菱重工業)	
	田中 陽 (川崎重工業)	酒井義雄 (日本鋼管)	
	根間 清 (川崎重工業)	島田潔 (三井造船)	
	松原直哉 (三井造船)	村山敬一 (石川島播磨重工業)	

## 目 次

第1章 緒 言 .....	1
第2章 箱型海洋構造物の運動特性の研究 .....	3
1. 流 体 力 .....	3
1.1 座 標 系 .....	3
1.2 運動方程式 .....	4
1.3 2次元流体力係数のテーブル .....	5
1.4 Heave, Roll の減衰係数の実験的修正法 .....	14
1.5 3次元流体力 .....	17
2. 流れによる力 .....	51
2.1 技術の現情調査 .....	51
2.2 模型試験の実施範囲 .....	51
2.3 流れによる3分力の数値表 .....	51
2.4 今後に残された諸点 .....	52
3. 旋回時の流体力微係数 .....	55
3.1 技術の現情調査 .....	55
3.2 模型試験の実施範囲 .....	55
3.3 実験結果と設定値との比較 .....	56
3.4 旋回時の流体力微係数の設定 .....	57
3.5 今後に残された諸点 .....	57
4. 運 動 特 性 .....	62
4.1 計 算 諸 元 .....	62
4.2 無 次 元 化 .....	63
4.3 計 算 結 果 .....	64
4.4 水槽試験結果と理論計算との比較 .....	71
第3章 箱型海洋構造物の係留システムの研究 .....	78
1. 係 留 ラ イ ン の 静 的 特 性 .....	78
1.1 まえがき .....	78
1.2 理 論 式 .....	78
1.3 数 値 計 算 .....	79
1.4 境 界 条 件 .....	80
1.5 数 値 計 算 プ ロ グ ラ ム .....	82
1.6 数 値 計 算 の 有 敹 性 .....	82
1.7 係 留 設 計 に 関 す る 考 察 .....	86
2. 係 留 ラ イ ン の 動 的 特 性 .....	91
2.1 計 算 法 の 適 用 範 囲 .....	91
2.2 ランプドマス法による係留ラインの動的解析 .....	93
3. ドルフィンダンパーの静的特性 .....	99

3.1 定反力型フェンダー	99
3.2 空気式フェンダー	99
4. ドルフィンダンパーの変動特性	106
4.1 製造誤差	106
4.2 経年変化	106
4.3 周期温度依存性	106
4.4 クリープ特性	106
4.5 周波数(速度)依存性	106
4.6 圧縮回数依存性	107
4.7 剪断力作用時の圧縮特性	107
5. 多点係留方式	111
5.1 計算法	111
5.2 水槽模型試験	114
5.3 水槽模型試験と理論計算との比較	114
5.4 長周期運動と係留力	115
5.5 適用範囲	116
6. 一系係留方式	135
6.1 計算法	135
6.2 水槽模型試験	142
6.3 計算と模型試験結果との比較	142
6.4 振れまわり運動の判定	143
6.5 適用範囲	146
7. ドルフィン・ダンパー係留方式	174
7.1 計算法	174
7.2 水槽模型試験	180
7.3 水槽模型試験と理論計算との比較	183
7.4 地震の影響	191
7.5 適用範囲	196
第4章 係留システムの設計指針	222
1. 設計指針案	222
2. 索鎖の強度	242
2.1 ワイヤーロープ	242
2.2 チューン	250
3. 各種設計基準の比較	256
3.1 各国船級協会規則の比較	256
3.2 船級協会規則以外の各種基準、指針の比較	259
第5章 結言	268
付録1. 大型模型による多点係留方式の水槽模型試験	269
付録2. 大型模型による一点係留方式の水槽模型試験	288

# 第1章 緒 言

近年、海洋をめぐる世界的な情勢が急変し、その結果として海洋の持っている意味、重要性及び利用価値などが飛躍的に増大して来ている。それを端的に表わしている事例としては、海洋における各種鉱物資源の採取計画、国際海洋法に基づく経済水域の200海里問題、海洋エネルギーの有効利用計画及び海洋空間等の有効利用計画等であるといえる。

この様に世界各国は、国の総力を結集して豊かな海洋の有効利用計画を強力に進めているが、それらの基盤となる各種海洋構造物の設計、建造及び施工等には、これまで長期間に亘り造船業界が蓄積して来た船舶及び船舶関連の優れた技術と能力とを積極的に活用すべき分野であるといえる。その活用すべき代表的な事例としては、貯蔵船方式による石油、石炭や液化ガス等の海上備蓄基地システム及び海外からの輸入物資、石炭や鉄鉱石等の沖合中継基地システム等である。そして、これらの海洋空間等の有効的な利用計画の多くは、ここ当分の間比較的沿岸や島に近く水深の浅い海域が対象海域になるといえよう。

それらの社会情勢を勘案した場合、浅海域における海洋構造物に作用する外力とその外力に対する海洋構造物の運動特性等に関する高精度予測手法を確立すること及び海洋構造物を定位位置保持させるための係留システムの設計基準を作成すること等が共通的・基盤的技術及び早急に充実すべき技術の中で最も重要な課題であるといえる。

そこで、本研究部会は昭和54年度から3ヶ年計画で海洋構造物の基本形状である一様矩形断面形状を有する浮遊式の箱型海洋構造物を浅海域に設置することを対象にして広範囲に亘る系統的な技術開発を行い、箱型海洋構造物の運動特性の高精度予測手法の確立とその係留システムの設計指針の作成とについて取り組んで来た。

本報告書は、それらの調査研究の総括篇ともいべきものであり、以下に本研究部会が最終年度となる昭和56年度において実施して来た概要を記述する。

## (1) 箱型海洋構造物の運動性能の研究

### (a) 箱型海洋構造物に作用する流体力

まず、本報告書で取り扱う箱型海洋構造物の座標系や運動方程式を設定した。

つぎに、箱型海洋構造物の波浪中における運動特性を計算する上で必要となる運動方程式の各係数（2次元流体力）を2次元領域分割法（正確には固有関数展開法という）にて求めて数表化した。

また、箱型海洋構造物の波浪中における運動特性の予測精度を向上させるために、上下揺れ及び横揺れの減衰係数の実験的修正法及び3次元流体力の計算法とその結果の図表等を示した。

最後に、2次元流体力と3次元流体力との比較図を示した。なお領域分割法の無限水深域への適用性については、本研究部会の昭和55年度版を参考されたし。

### (b) 箱型海洋構造物に働く潮流力

箱型海洋構造物の大型模型を用いた系統的な水槽模型試験の結果に基づいて潮流力（一様流れ中）のX方向成分力とY方向成分力の無次元値を数表化して示した。

### (c) 箱型海洋構造物の旋回時の流体力微係数

箱型海洋構造物模型を用いて系統的な拘束旋回及び斜航試験を行い、旋回時の抗力係数、揚力係数及びモーメント係数を求めて図表化して示した。その結果を用いて旋回時の流体力微係数を求めて数表化して示した。

### (d) 箱型海洋構造物の運動特性

まず、3次元箱型海洋構造物の波浪中における運動特性を3次元特異点分布法にて長さ・幅比が変化した場合の理論計算結果を図示した。

つぎに、3次元箱型海洋構造物の波浪中における運動特性の推定精度の検証として水槽模型試験結果と理論計算結果との比較図を示した。なお、理論計算法としては、3次元特異点分布法と2次元特異点分布法で流体力を計算し、2次元理論計算では通常のストリップ法と船の長さ方向と幅方向を交換した計算法を試みた。

最後に、波浪中における波浪漂流力について水槽模型試験結果と理論計算結果との比較図を示した。

## (2) 箱型海洋構造物の係留システムの研究

### (a) 索・鎖の係留ラインの静的特性と動的特性

まず、係留ラインの静的特性では、海底との摩擦力、スコープ、海底傾斜、海底の凹凸、中間ブイと中間シンカーの有無及び係留ラインの伸び等の影響を表わす設計図表を提示した。

つぎに、係留ラインの動的特性では、係留ラインに働く変動張力の計算法（簡易計算法を含む）と適用限界を示した。

最後に、ランプドマス法による係留ラインの変動張力の計算結果と模型試験結果との比較図を示し、理論計算法の有効性を示した。

### (b) ドルフィン・ダンパーの静的特性と動的特性

まず、ダンパーの静的特性では、ドルフィン・ダンパー係留方式に用いる大型・大容量のダンパーとして定反力型のセル型フェンダーと空気式フェンダーとについて形状や寸法及び圧縮特性とヒステリシス特性を図示した。

つぎに、ダンパーの動的特性では、セル型フェンダーについて製造誤差、経年劣化、周囲温度依存性、クリープ特性、周波数依存性及び圧縮回数依存性等の変動特性を図表化した。

### (c) 多点係留方式

箱型海洋構造物を索・鎖の多条係留ラインで係留した場合に関し、その計算法、水槽模型試験、水槽模型試験結果と理論計算結果との比較、長周期運動と係留力及び係留方式の適用範囲等について詳細に検討して数値計算法を完成させた。

### (d) 一点係留方式

箱型海洋構造物がブイを介して一点係留した場合に関し、その計算法、水槽模型試験、水槽模型試験結果と理論計算結果との比較、振れ廻り運動、数値シミュレーション法、係留方式の適用範囲等について詳細に検討して数値計算法を完成させた。

### (e) ドルフィン・ダンパー係留方式

箱型海洋構造物を定反力型フェンダーで係留した場合に関し、その計算法、水槽模型試験、水槽模型試験結果と理論計算結果との比較、地震時の応答特性及び係留方式の適用限界等について詳細に検討して数値計算法を完成させた。

## (3) 係留システムの設計指針

### (a) 設計指針案

昭和54年度から実施して来た系統的な技術開発及び公表されている設計基準等を勘案して現時点において最善であるといえる浮遊式海洋構造物の係留システムに関する設計指針案を完成させた。

### (b) 係留ライン用の索・鎖の強度

既存の資料を広範囲に調査収集し、索の種類、索の比強度、鎖の規格、鎖の静的強度及び鎖の疲労強度等について詳細検討を行った。

### (c) 各種設計基準の比較

本研究部会が係留システムの各種設計基準等を調査した結果を総括して比較表にして示した。

## 第2章 箱型海洋構造物の運動特性の研究

浅海域において、箱型海洋構造物に作用する流体力および波強制力については、昭和54年度および55年度に亘り、次の事項について調査、研究を行なってきた。

- 1) 箱型断面に作用する2次元流体力の各種計算法による計算結果の比較。
- 2)  $H/d$  および  $B/d$  に関するシリーズ計算(2次元領域分割法)による水深-喫水比および幅-喫水比の流体力に及ぼす影響の調査。
- 3) 箱型海洋構造物の波浪中運動特性の調査、研究

これらの諸流体力に関する調査研究の中で問題提起された

- イ) 領域分割法による計算法の無限水深域への適用性
- ロ) 粘性横搖減衰力
- ハ)  $L/B$  変化による3次元影響

等の問題についても昭和55年度に一部検討を加えた。

本年度は、本研究部会の最終年度でもあり、今迄の研究成果のまとめも含め、次の項目について調査、研究を行なった。

- 1) 浅海域における箱型海洋構造物に働く2次元流体力(付加質量係数、減衰係数他)のテーブル化。
- 2) 箱型海洋構造物の波浪中動搖特性についての計算値と水槽実験値との比較検討。
- 3) 2次元計算を基とした、Strip法による計算の適用性把握のための3次元特異点分布法による計算値との比較検討(3次元影響の調査)。
- 4) Heave, Rollに関する粘性減衰力。

### 1. 流 体 力

#### 1.1 座 標 系

座標系を図2.1.1.1に示すように定める。

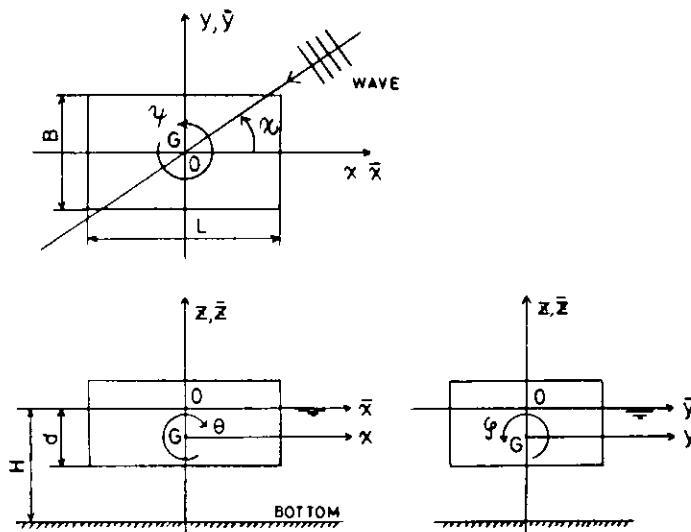


図2.1.1.1 座 標 系

O -  $\bar{x} \bar{y} \bar{z}$  ; 静止空間座標系  
(原点を静止自由表面におく)

G -  $x y z$  ; 浮体固定座標系  
(原点を中心Gにおく)

$\chi$  は浮体への波の入射角を示し、応答の基準は波頂が船体中心を通過した時とし、位相遅れを正とする。

ここで、 $x_G, y_G, z_G$  は浮体重心の前後揺、左右揺、上下揺をあらわし、 $\varphi, \theta, \psi$  は横揺、縦揺、船首揺をそれぞれあらわすものとする。

## 1.2 運動方程式

無係留時の箱型浮体の波浪中動揺は6自由度の微少定常周期運動を仮定し、粘性項を考慮しない場合、次のような線形運動方程式によって表現できる。

$$[M]\{\ddot{X}\} + [N]\{\dot{X}\} + [K]\cdot\{X\} = \{F\}$$

ここで、 $[M], [N], [K]$  は慣性力係数、造波減衰係数及び復原力係数よりなるマトリックスであり、 $\{X\}, \{F\}$  は運動変位及び波強制力の列ベクトルをあらわす。 $\{\dot{X}\}, \{\ddot{X}\}$  は $\{X\}$  の時間微分を意味する。箱型浮体の場合、各成分は次のようになる。

$$[M] = \begin{bmatrix} A_{xx} & 0 & 0 & 0 & a_{x\theta} & 0 \\ 0 & A_{yy} & 0 & a_{y\varphi} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & A_{zz} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & a_{\varphi y} & 0 & A_{\varphi\varphi} & 0 & 0 \\ A_{\theta x} & 0 & 0 & 0 & A_{\theta\theta} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & A_{\psi\psi} \end{bmatrix}$$

$$\text{ただし, } A_{xx} = M + a_{\chi\chi}, \quad A_{\varphi\varphi} = I_\varphi + a_{\varphi\varphi}$$

$$A_{yy} = M + a_{yy}, \quad A_{\theta\theta} = I_\theta + a_{\theta\theta}$$

$$A_{zz} = M + a_{zz}, \quad A_{\psi\psi} = I_\psi + a_{\psi\psi}$$

M : 浮体質量       $I_\varphi, I_\theta, I_\psi$  : 慣性モーメント      a : 付加質量

$$[N] = \begin{bmatrix} b_{xx} & 0 & 0 & 0 & b_{x\theta} & 0 \\ 0 & b_{yy} & 0 & b_{y\varphi} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & b_{zz} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & b_{\varphi y} & 0 & b_{\varphi\varphi} & 0 & 0 \\ b_{\theta x} & 0 & 0 & 0 & b_{\theta\theta} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & b_{\psi\psi} \end{bmatrix}$$

$$\text{ただし, } b ; \text{ 造波減衰係数}$$

$$[K] = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & c_{zz} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & c_{\varphi\varphi} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & c_{\theta\theta} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$\text{ただし, } c_{zz} = \rho g LB, \quad c_{\varphi\varphi} = W \cdot GM_T, \quad c_{\theta\theta} = W \cdot GM_L$$

W ; 排水量 G M<sub>T</sub> ; 横メタセンター G M<sub>L</sub> ; 縦メタセンター  $\rho$  ; 流体密度

$g$  ; 重力加速度

$$\{X\} = \{\bar{X}\} \cdot e^{-i\omega t} \quad \{F\} = \{\bar{F}\} \cdot e^{-i\omega t}$$

$$\{\bar{X}\} = \begin{bmatrix} x_G \\ y_G \\ z_G \\ \varphi \\ \theta \\ \psi \end{bmatrix} \quad \{\bar{F}\} = \begin{bmatrix} F_x \\ F_z \\ F_z \\ F_\varphi \\ F_\theta \\ F_\psi \end{bmatrix}$$

ただし,  $\{\bar{X}\}$  ; 変位の複素振幅

$\{\bar{F}\}$  ; 波強制力の複素振幅

流体力がO点まわりの値で与えられる場合には、上記諸係数の内回転運動に関係のある  $a_{\theta\theta}, a_{x\theta}, a_{\theta x}, b_{\theta\theta}, b_{x\theta}, b_{\theta x}$  並びに  $a_{\varphi\varphi}, a_{y\varphi}, a_{\varphi y}, b_{\varphi\varphi}, b_{y\varphi}, b_{\varphi y}, F_\varphi$  を次のように置換すれば良い。ただし、相反定理により  $a_{x\theta} = a_{\theta x}, b_{x\theta} = b_{\theta x}, a_{y\varphi} = a_{\varphi y}, b_{y\varphi} = b_{\varphi y}$  が成り立つ。以下  $a'$ ,  $b'$ ,  $F'$  は重心回り,  $a$ ,  $b$ ,  $F$  はO点回り流体力とすれば次のようになる。

$$a'_{\theta\theta} = a_{\theta\theta} - 2 \cdot a_{x\theta} \cdot \bar{OG} + a_{xx} \cdot \bar{OG}^2$$

$$a'_{x\theta} = a'_{\theta x} = -a_{x\theta} + a_{xx} \cdot \bar{OG}$$

$$b'_{\theta\theta} = b_{\theta\theta} - 2 \cdot b_{x\theta} \cdot \bar{OG} + b_{xx} \cdot \bar{OG}^2$$

$$b'_{x\theta} = b'_{\theta x} = -b_{x\theta} + b_{xx} \cdot \bar{OG}$$

$$F'_\theta = F_\theta + F_x \cdot \bar{OG}$$

$$a'_{\varphi\varphi} = a_{\varphi\varphi} - 2 \cdot a_{y\varphi} \cdot \bar{OG} + a_{yy} \cdot \bar{OG}^2$$

$$a'_{y\varphi} = a'_{\varphi y} = a_{y\varphi} - a_{yy} \cdot \bar{OG}$$

$$b'_{\varphi\varphi} = b_{\varphi\varphi} - 2 \cdot b_{y\varphi} \cdot \bar{OG} + b_{yy} \cdot \bar{OG}^2$$

$$b'_{y\varphi} = b'_{\varphi y} = b_{y\varphi} - b_{yy} \cdot \bar{OG}$$

$$F'_\varphi = F_\varphi - F_y \cdot \bar{OG}$$

$\bar{OG}$  はGがO点より下方にある時を正とする。

### 1.3 2次元流体力係数のテーブル

運動特性を推定するためには1.2で述べた流体力の諸数値が必要である。しかしながら、これらの値を得るためにには境界値問題を解く必要があるため、電子計算機による複雑な計算を必要とする。そこで運動特性の推定計算を簡便ならしめるため、流体力をシリーズ計算して数表を作成することにした。

計算精度の点からは3次元境界値問題を正確に解く計算法が好ましい。しかし演算時間が膨大となるため、ここでは2次元領域分割法(固有関数展開法)プログラムを使用して2次元流体力を計算した。シリーズ計算の組合せは次の通りである。

$$B/d = 5, 10, 15, 20$$

$$H/d = 1.2, 1.4, 2.0, 3.0, 10.0$$

2次元流体力の3次元影響については第2章1.5.3で述べられる。2次元流体力無次元値のテーブルを表2.1.3.1

から表 2.1.3.20 に示す。回転の中心は O 点まわりに取っている。

上下揺を H, 左右揺を S, 横揺を R であらわすものとすれば 2 次元座標系は図 2.1.1.1 において波の入射角  $\chi$  を  $-90^\circ$  とした場合に相当する。

$$\xi_B = \frac{\omega^2}{g} \cdot \frac{B}{2}$$

$$\bar{M}_H = M_H / \rho_S$$

$$\bar{M}_S = M_S / \rho_S$$

$$\bar{M}_R = M_R / \rho_S \left(\frac{B}{2}\right)^2$$

$$\bar{M}_{SR} = \bar{M}_{RS} = M_{SR} / \rho_S \left(\frac{B}{2}\right)$$

$$\bar{N}_H = N_H / \omega \rho_S$$

$$\bar{N}_S = N_S / \omega \rho_S$$

$$\bar{N}_R = N_R / \omega \rho_S \left(\frac{B}{2}\right)^2$$

$$\bar{N}_{SR} = \bar{N}_{RS} = N_{SR} / \omega \rho_S \left(\frac{B}{2}\right)$$

ただし,  $S = B + d$

$\omega$  ; 運動の円周波数

$M_H, M_S, M_R$  ; 付加質量及び付加慣性モーメント

$M_{SR}, M_{RS}$  ; 連成付加質量

$N_H, N_S, N_R$  ; 造波減衰係数

$N_{SR}, N_{RS}$  ; 連成造波減衰係数

$$\bar{E}_H \cdot e^{i\epsilon_H} = E_H / \rho g \zeta_a \left(\frac{B}{2}\right)$$

$$\bar{E}_S \cdot e^{i\epsilon_S} = E_S / \rho g \zeta_a \left(\frac{B}{2}\right)$$

$$\bar{E}_R \cdot e^{i\epsilon_R} = E_R / \rho g \zeta_a \left(\frac{B}{2}\right)$$

ここで入射波は次のように与えられる。

$$\zeta = \zeta_a \cdot e^{-i(\omega t - ky)}$$

ただし,  $\zeta_a$  ; 波振幅  $k$  ; 波数

$E_H, E_S, E_R$  ; 波強制力  $\epsilon_H, \epsilon_S, \epsilon_R$  ( IN DEG. )

参考として発散波と造波減衰係数及び波強制力無次元値との関係を次に示す。

$$\bar{N}_H = \alpha \cdot \bar{A}_H^2 \quad \bar{N}_S = \alpha \cdot \bar{A}_S^2 \quad \bar{N}_R = \alpha \cdot \bar{A}_R^2$$

$$\alpha = \frac{2g}{k \omega^2 B d} \times n$$

$$n = \frac{1}{2} \left( 1 + \frac{2kH}{\sinh 2kH} \right) \quad H ; \text{水深}$$

$$\bar{E}_H = \beta \cdot \bar{A}_H \quad \bar{E}_S = \beta \cdot \bar{A}_S \quad \bar{E}_R = \beta \cdot \bar{A}_R$$

$$\beta = \frac{2}{k \left(\frac{B}{2}\right)} \times n$$

$H/d = 1.2$        $B/d = 5.0$

表 2.1.3.1 2 次元流体力学 - ブル

$\xi_B$	$\bar{M}_H$	$\bar{N}_H$	$\bar{M}_S$	$\bar{N}_S$	$\bar{M}_R$	$\bar{N}_R$	$M_{SR}$	$N_{SR}$	$\bar{E}_H$	$\epsilon_H$	$\bar{E}_S$	$\epsilon_S$	$\bar{E}_R$	$\epsilon_R$
0.1	12.697	11.167	0.571	1.675	1.124	0.535	-0.261	-0.946	1.955	-26.4	0.757	-44.8	0.428	135.2
0.2	12.716	7.701	0.298	1.247	1.037	0.388	-0.106	-0.695	1.907	-37.6	0.768	-50.5	0.428	129.5
0.4	12.754	5.169	0.150	0.897	0.991	0.264	-0.023	-0.487	1.814	-54.0	0.756	-62.8	0.410	117.2
0.6	12.794	4.004	0.098	0.730	0.978	0.205	0.005	-0.386	1.724	-67.3	0.736	-74.1	0.390	105.9
0.8	12.836	3.272	0.071	0.627	0.972	0.166	0.018	-0.322	1.634	-79.0	0.715	-84.6	0.368	95.4
1.0	12.880	2.757	0.055	0.554	0.970	0.138	0.025	-0.277	1.547	-89.9	0.693	-94.6	0.346	85.4
1.5	12.999	1.909	0.033	0.436	0.972	0.092	0.031	-0.201	1.339	-115.2	0.640	-118.4	0.294	61.6
2.0	13.128	1.367	0.022	0.362	0.978	0.063	0.030	-0.151	1.145	-139.2	0.589	-141.5	0.246	38.5
2.5	13.267	0.984	0.016	0.308	0.985	0.043	0.026	-0.115	0.968	-163.2	0.542	-164.8	0.203	15.2
3.0	13.409	0.702	0.013	0.265	0.993	0.029	0.019	-0.087	0.809	172.6	0.497	171.4	0.164	-8.6

$H/d = 1.2$        $B/d = 10.0$

表 2.1.3.2 2 次元流体力学 - ブル

$\xi_B$	$\bar{M}_H$	$\bar{N}_H$	$\bar{M}_S$	$\bar{N}_S$	$\bar{M}_R$	$\bar{N}_R$	$M_{SR}$	$N_{SR}$	$\bar{E}_H$	$\epsilon_H$	$\bar{E}_S$	$\epsilon_S$	$\bar{E}_R$	$\epsilon_R$
0.1	46.162	31.939	0.310	1.234	3.948	2.734	-0.396	-1.837	1.978	-37.1	0.389	-51.0	0.579	129.0
0.2	46.180	22.286	0.161	0.895	3.614	1.978	-0.172	-1.328	1.953	-52.7	0.391	-62.5	0.582	117.5
0.4	46.217	15.378	0.082	0.638	3.442	1.382	-0.056	-0.939	1.906	-75.2	0.388	-81.9	0.571	98.1
0.6	46.254	12.252	0.056	0.521	3.386	1.101	-0.017	-0.758	1.860	-92.8	0.384	-98.2	0.558	81.8
0.8	46.293	10.337	0.042	0.451	3.360	0.933	0.003	-0.647	1.814	-108.1	0.379	-112.6	0.545	67.4
1.0	46.333	9.002	0.034	0.401	3.346	0.813	0.014	-0.570	1.768	-121.8	0.373	-125.8	0.531	54.2
1.5	46.436	6.862	0.022	0.323	3.332	0.618	0.028	-0.447	1.656	-152.4	0.359	-155.4	0.497	24.6
2.0	46.546	5.514	0.017	0.275	3.331	0.494	0.033	-0.369	1.547	-179.9	0.346	-177.7	0.463	-2.3
2.5	46.662	4.556	0.013	0.242	3.335	0.407	0.036	-0.314	1.441	154.4	0.332	152.4	0.431	-27.6
3.0	46.783	3.818	0.011	0.217	3.342	0.339	0.036	-0.271	1.339	129.7	0.319	128.0	0.399	-52.0

$H/d = 1.2$        $B/d = 15.0$

表 2.1.3.3 2 次元流体力  $\tau - \tau_{\infty}$

$\xi_B$	$\bar{M}_H$	$\bar{N}_H$	$\bar{M}_S$	$\bar{N}_S$	$\bar{M}_R$	$\bar{N}_R$	$\bar{M}_{SR}$	$\bar{N}_{SR}$	$\bar{E}_H$	$\epsilon_H$	$\bar{E}_S$	$\epsilon_S$	$\bar{E}_R$	$\epsilon_R$
0.1	100.460	58.884	0.213	1.018	8.148	5.649	-0.434	-2.403	1.985	-45.4	0.261	-57.0	0.615	123.0
0.2	100.478	41.258	0.110	0.733	7.574	4.067	-0.190	-1.726	1.968	-64.4	0.262	-72.6	0.618	107.4
0.4	100.514	28.741	0.057	0.521	7.281	2.848	-0.065	-1.222	1.938	-91.6	0.261	-97.3	0.610	82.7
0.6	100.551	23.078	0.039	0.429	7.184	2.296	-0.023	-0.990	1.906	-112.8	0.260	-117.3	0.601	62.7
0.8	100.589	19.654	0.029	0.368	7.138	1.959	-0.002	-0.851	1.875	-130.9	0.257	-134.8	0.592	45.2
1.0	100.627	17.283	0.024	0.329	7.111	1.723	0.010	-0.754	1.844	-147.2	0.255	-150.6	0.582	29.4
1.5	100.725	13.507	0.016	0.267	7.081	1.347	0.026	-0.599	1.768	177.2	0.249	174.6	0.558	-5.4
2.0	100.828	11.178	0.013	0.229	7.072	1.115	0.033	-0.505	1.693	146.0	0.242	143.8	0.535	-36.2
2.5	100.934	9.529	0.010	0.203	7.071	0.949	0.037	-0.439	1.619	117.3	0.236	115.4	0.511	-64.6
3.0	101.045	8.271	0.009	0.183	7.074	0.823	0.039	-0.388	1.547	90.2	0.230	88.6	0.488	-91.4

$H/d = 1.2$        $B/d = 20.0$

表 2.1.3.4 2 次元流体力  $\tau - \tau_{\infty}$

$\xi_B$	$\bar{M}_H$	$\bar{N}_H$	$\bar{M}_S$	$\bar{N}_S$	$\bar{M}_R$	$\bar{N}_R$	$\bar{M}_{SR}$	$\bar{N}_{SR}$	$\bar{E}_H$	$\epsilon_H$	$\bar{E}_S$	$\epsilon_S$	$\bar{E}_R$	$\epsilon_R$
0.1	175.590	90.767	0.162	0.882	13.729	9.158	-0.451	-2.852	1.988	-52.4	0.196	-62.5	0.632	117.5
0.2	175.608	63.799	0.083	0.637	12.918	6.527	-0.198	-2.042	1.976	-74.3	0.198	-81.4	0.632	98.6
0.4	175.644	44.571	0.043	0.453	12.506	4.606	-0.069	-1.445	1.953	-105.5	0.197	-110.5	0.628	69.5
0.6	175.681	35.975	0.030	0.370	12.370	3.716	-0.026	-1.175	1.930	-129.7	0.196	-133.7	0.620	46.3
0.8	175.718	30.755	0.023	0.322	12.303	3.186	-0.004	-1.011	1.906	-150.3	0.195	-153.8	0.613	26.2
1.0	175.756	27.181	0.019	0.286	12.265	2.815	0.008	-0.898	1.883	-168.8	0.193	-171.8	0.606	8.2
1.5	175.852	21.493	0.013	0.232	12.219	2.230	0.025	-0.719	1.825	151.1	0.190	148.7	0.588	-31.3
2.0	175.951	18.012	0.010	0.200	12.201	1.867	0.033	-0.611	1.768	116.3	0.186	114.3	0.569	-65.7
2.5	176.053	15.568	0.008	0.178	12.195	1.613	0.037	-0.535	1.712	84.7	0.183	82.9	0.551	-97.1
3.0	176.158	13.719	0.007	0.161	12.195	1.421	0.040	-0.478	1.656	55.2	0.179	53.6	0.533	-126.4

$H/d = 1.4$        $B/d = 5.0$

表 2.1.3.5 2 次元流体力学 - ブル

$\xi_B$	$\bar{M}_H$	$\bar{N}_H$	$\bar{M}_S$	$\bar{N}_S$	$\bar{M}_R$	$\bar{N}_R$	$\bar{M}_{SR}$	$\bar{N}_{SR}$	$\bar{E}_H$	$\epsilon_H$	$\bar{E}_S$	$\epsilon_S$	$\bar{E}_R$	$\epsilon_R$
0.1	6.731	10.292	0.827	1.312	0.768	0.377	-0.357	-0.708	1.947	-24.4	0.695	-55.6	0.373	124.4
0.2	6.750	7.070	0.479	1.083	0.666	0.304	-0.168	-0.570	1.892	-34.9	0.740	-57.4	0.392	122.6
0.4	6.792	4.726	0.258	0.823	0.603	0.216	-0.049	-0.422	1.788	-50.3	0.746	-65.8	0.383	114.2
0.6	6.835	3.636	0.174	0.687	0.582	0.167	-0.005	-0.340	1.686	-62.8	0.733	-74.8	0.362	105.2
0.8	6.881	2.947	0.129	0.598	0.573	0.135	0.016	-0.284	1.585	-74.0	0.714	-83.8	0.340	96.2
1.0	6.930	2.460	0.101	0.533	0.569	0.111	0.029	-0.244	1.487	-84.5	0.693	-92.6	0.316	87.4
1.5	7.063	1.655	0.061	0.427	0.568	0.071	0.042	-0.174	1.257	-109.1	0.638	-114.5	0.260	65.5
2.0	7.211	1.142	0.040	0.357	0.573	0.046	0.043	-0.127	1.046	-133.0	0.584	-136.7	0.209	43.3
2.5	7.367	0.785	0.028	0.305	0.581	0.028	0.040	-0.093	0.858	-157.2	0.534	-159.7	0.163	20.3
3.0	7.526	0.530	0.020	0.263	0.589	0.017	0.032	-0.066	0.694	178.0	0.489	176.3	0.124	-3.7

$H/d = 1.4$        $B/d = 10.0$

表 2.1.3.6 2 次元流体力学 - ブル

$\xi_B$	$\bar{M}_H$	$\bar{N}_H$	$\bar{M}_S$	$\bar{N}_S$	$\bar{M}_R$	$\bar{N}_R$	$\bar{M}_{SR}$	$\bar{N}_{SR}$	$\bar{E}_H$	$\epsilon_H$	$\bar{E}_S$	$\epsilon_S$	$\bar{E}_R$	$\epsilon_R$
0.1	23.761	29.504	0.480	1.035	2.718	2.192	-0.605	-1.499	1.974	-34.4	0.370	-58.7	0.538	121.3
0.2	23.780	20.585	0.267	0.793	2.258	1.671	-0.291	-1.152	1.947	-48.9	0.382	-66.4	0.555	113.6
0.4	23.819	14.164	0.143	0.589	1.996	1.204	-0.111	-0.841	1.893	-69.8	0.386	-82.0	0.552	98.0
0.6	23.860	11.241	0.099	0.487	1.906	0.972	-0.048	-0.687	1.840	-86.3	0.383	-96.0	0.541	84.0
0.8	23.902	9.452	0.077	0.423	1.862	0.822	-0.015	-0.589	1.788	-100.6	0.378	-108.8	0.527	71.2
1.0	23.945	8.209	0.063	0.378	1.837	0.715	0.004	-0.520	1.737	-113.6	0.373	-120.7	0.512	59.3
1.5	24.058	6.189	0.043	0.308	1.809	0.539	0.029	-0.407	1.610	-142.6	0.359	-148.0	0.475	32.0
2.0	24.180	4.919	0.033	0.264	1.802	0.426	0.040	-0.336	1.487	-169.0	0.345	-173.3	0.438	6.7
2.5	24.310	4.007	0.026	0.234	1.803	0.345	0.046	-0.284	1.369	166.1	0.331	162.6	0.402	-17.4
3.0	24.447	3.307	0.021	0.210	1.809	0.283	0.048	-0.244	1.256	141.8	0.317	139.0	0.367	-41.0

$H/d = 1.4$        $B/d = 15.0$

表 2.1.3.7 2 次元流体力学 - ブル

$\xi_B$	$\bar{M}_H$	$\bar{N}_H$	$\bar{M}_S$	$\bar{N}_S$	$\bar{M}_R$	$\bar{N}_R$	$\bar{M}_{SR}$	$\bar{N}_{SR}$	$\bar{E}_H$	$\epsilon_H$	$\bar{E}_S$	$\epsilon_S$	$\bar{E}_R$	$\epsilon_R$
0.1	51.120	54.395	0.340	0.878	5.390	4.736	-0.692	-2.030	1.982	-42.1	0.252	-62.7	0.585	117.3
0.2	51.139	38.164	0.185	0.658	4.547	3.528	-0.330	-1.525	1.965	-59.7	0.258	-74.4	0.597	105.6
0.4	51.177	26.479	0.099	0.479	4.084	2.532	-0.130	-1.105	1.928	-84.9	0.259	-95.3	0.596	84.7
0.6	51.217	21.234	0.069	0.396	3.925	2.052	-0.061	-0.902	1.893	-104.7	0.258	-113.0	0.588	67.0
0.8	51.257	18.050	0.054	0.344	3.847	1.753	-0.026	-0.778	1.858	-121.6	0.256	-128.9	0.579	51.3
1.0	51.299	15.832	0.045	0.310	3.801	1.546	-0.005	-0.691	1.822	-136.9	0.255	-143.1	0.569	36.9
1.5	51.406	12.301	0.032	0.252	3.745	1.204	0.023	-0.550	1.736	-170.4	0.249	-175.2	0.543	4.8
2.0	51.518	10.113	0.025	0.217	3.723	0.990	0.037	-0.463	1.651	160.0	0.242	156.0	0.517	-24.0
2.5	51.635	8.561	0.021	0.193	3.716	0.835	0.044	-0.402	1.568	132.6	0.236	129.2	0.490	-50.8
3.0	51.758	7.375	0.018	0.175	3.715	0.719	0.049	-0.355	1.487	106.6	0.229	103.7	0.464	-76.3

表 2.1.3.8 2 次元流体力学 - ブル

$\xi_B$	$\bar{M}_H$	$\bar{N}_H$	$\bar{M}_S$	$\bar{N}_S$	$\bar{M}_R$	$\bar{N}_R$	$\bar{M}_{SR}$	$\bar{N}_{SR}$	$\bar{E}_H$	$\epsilon_H$	$\bar{E}_S$	$\epsilon_S$	$\bar{E}_R$	$\epsilon_R$
0.1	89.069	83.895	0.264	0.771	8.771	7.821	-0.736	-2.463	1.986	-48.5	0.190	-66.7	0.606	113.3
0.2	89.088	59.008	0.142	0.574	7.538	5.770	-0.348	-1.825	1.974	-68.8	0.195	-81.8	0.617	98.2
0.4	89.126	41.170	0.076	0.416	6.876	4.132	-0.139	-1.314	1.947	-97.8	0.196	-106.9	0.617	73.1
0.6	89.166	33.168	0.053	0.344	6.650	3.352	-0.067	-1.074	1.920	-120.3	0.195	-127.7	0.610	52.3
0.8	89.205	28.328	0.041	0.299	6.538	2.878	-0.031	-0.927	1.893	-139.6	0.195	-145.9	0.603	34.1
1.0	89.246	24.989	0.034	0.268	6.472	2.543	-0.009	-0.825	1.867	-156.8	0.193	-162.4	0.596	17.6
1.5	89.349	19.670	0.025	0.218	6.389	2.008	0.020	-0.662	1.801	165.6	0.190	161.2	0.575	-18.8
2.0	89.457	16.410	0.020	0.188	6.353	1.678	0.035	-0.562	1.736	132.8	0.186	129.1	0.555	-50.9
2.5	89.568	14.117	0.017	0.168	6.337	1.444	0.043	-0.493	1.672	102.8	0.182	99.7	0.535	-80.3
3.0	89.684	12.378	0.015	0.153	6.331	1.265	0.048	-0.439	1.610	74.7	0.179	71.9	0.515	-108.1

表 2.1.3.9 2 次元流体力テ - ブル

$\xi_B$	$H/d = 2.0$	$B/d = 5.0$	$\bar{M}_H$	$\bar{N}_H$	$\bar{M}_R$	$\bar{N}_R$	$\bar{M}_{SR}$	$\bar{N}_{SR}$	$\bar{E}_H$	$\epsilon_H$	$\bar{E}_S$	$\epsilon_S$	$\bar{E}_R$	$\epsilon_R$
0.100	2.974	2.600	0.915	0.656	0.140	0.163	-0.127	-0.329	1.829	-2.014	0.536	-71.7	0.266	106.3
0.200	3.038	3.032	0.442	0.659	0.140	0.163	-0.127	-0.329	1.862	-2.014	0.536	-69.8	0.310	106.3
0.300	3.096	3.212	0.321	0.654	0.140	0.163	-0.127	-0.329	1.895	-2.014	0.536	-67.1	0.320	106.3
0.400	3.154	3.241	0.245	0.654	0.140	0.163	-0.127	-0.329	1.928	-2.014	0.536	-64.4	0.327	106.3
0.500	3.212	3.245	0.173	0.654	0.140	0.163	-0.127	-0.329	1.961	-2.014	0.536	-61.7	0.334	106.3
0.600	3.270	3.245	0.125	0.654	0.140	0.163	-0.127	-0.329	1.994	-2.014	0.536	-59.0	0.341	106.3
0.700	3.328	3.245	0.087	0.654	0.140	0.163	-0.127	-0.329	2.027	-2.014	0.536	-56.3	0.348	106.3
0.800	3.386	3.245	0.059	0.654	0.140	0.163	-0.127	-0.329	2.060	-2.014	0.536	-53.6	0.355	106.3
0.900	3.444	3.245	0.039	0.654	0.140	0.163	-0.127	-0.329	2.093	-2.014	0.536	-50.9	0.362	106.3
1.000	3.502	3.245	0.020	0.654	0.140	0.163	-0.127	-0.329	2.126	-2.014	0.536	-48.2	0.369	106.3
1.100	3.559	3.245	0.010	0.654	0.140	0.163	-0.127	-0.329	2.159	-2.014	0.536	-45.5	0.376	106.3
1.200	3.617	3.245	0.005	0.654	0.140	0.163	-0.127	-0.329	2.192	-2.014	0.536	-42.8	0.383	106.3
1.300	3.675	3.245	0.002	0.654	0.140	0.163	-0.127	-0.329	2.225	-2.014	0.536	-40.1	0.390	106.3
1.400	3.732	3.245	0.001	0.654	0.140	0.163	-0.127	-0.329	2.258	-2.014	0.536	-37.4	0.397	106.3
1.500	3.789	3.245	0.000	0.654	0.140	0.163	-0.127	-0.329	2.281	-2.014	0.536	-34.7	0.404	106.3
1.600	3.847	3.245	-0.001	0.654	0.140	0.163	-0.127	-0.329	2.314	-2.014	0.536	-32.0	0.411	106.3
1.700	3.904	3.245	-0.002	0.654	0.140	0.163	-0.127	-0.329	2.347	-2.014	0.536	-29.3	0.418	106.3
1.800	3.961	3.245	-0.005	0.654	0.140	0.163	-0.127	-0.329	2.380	-2.014	0.536	-26.6	0.425	106.3
1.900	4.018	3.245	-0.010	0.654	0.140	0.163	-0.127	-0.329	2.413	-2.014	0.536	-23.9	0.432	106.3
2.000	4.075	3.245	-0.015	0.654	0.140	0.163	-0.127	-0.329	2.446	-2.014	0.536	-21.2	0.439	106.3
2.100	4.132	3.245	-0.020	0.654	0.140	0.163	-0.127	-0.329	2.519	-2.014	0.536	-18.5	0.446	106.3
2.200	4.189	3.245	-0.025	0.654	0.140	0.163	-0.127	-0.329	2.582	-2.014	0.536	-15.8	0.453	106.3
2.300	4.246	3.245	-0.030	0.654	0.140	0.163	-0.127	-0.329	2.645	-2.014	0.536	-13.1	0.460	106.3
2.400	4.303	3.245	-0.035	0.654	0.140	0.163	-0.127	-0.329	2.748	-2.014	0.536	-10.4	0.467	106.3
2.500	4.360	3.245	-0.040	0.654	0.140	0.163	-0.127	-0.329	2.851	-2.014	0.536	-7.7	0.474	106.3
2.600	4.417	3.245	-0.045	0.654	0.140	0.163	-0.127	-0.329	2.944	-2.014	0.536	-5.0	0.481	106.3
2.700	4.474	3.245	-0.050	0.654	0.140	0.163	-0.127	-0.329	3.077	-2.014	0.536	-2.3	0.488	106.3
2.800	4.531	3.245	-0.055	0.654	0.140	0.163	-0.127	-0.329	3.180	-2.014	0.536	-0.6	0.495	106.3
2.900	4.588	3.245	-0.060	0.654	0.140	0.163	-0.127	-0.329	3.323	-2.014	0.536	1.1	0.502	106.3
3.000	4.645	3.245	-0.065	0.654	0.140	0.163	-0.127	-0.329	3.466	-2.014	0.536	3.8	0.509	106.3
3.100	4.702	3.245	-0.070	0.654	0.140	0.163	-0.127	-0.329	3.609	-2.014	0.536	6.5	0.516	106.3
3.200	4.759	3.245	-0.075	0.654	0.140	0.163	-0.127	-0.329	3.752	-2.014	0.536	9.2	0.523	106.3
3.300	4.816	3.245	-0.080	0.654	0.140	0.163	-0.127	-0.329	3.895	-2.014	0.536	11.9	0.530	106.3
3.400	4.873	3.245	-0.085	0.654	0.140	0.163	-0.127	-0.329	4.038	-2.014	0.536	14.6	0.537	106.3
3.500	4.930	3.245	-0.090	0.654	0.140	0.163	-0.127	-0.329	4.181	-2.014	0.536	17.3	0.544	106.3
3.600	4.987	3.245	-0.095	0.654	0.140	0.163	-0.127	-0.329	4.324	-2.014	0.536	20.0	0.551	106.3
3.700	5.044	3.245	-0.100	0.654	0.140	0.163	-0.127	-0.329	4.467	-2.014	0.536	22.7	0.558	106.3
3.800	5.101	3.245	-0.105	0.654	0.140	0.163	-0.127	-0.329	4.610	-2.014	0.536	25.4	0.565	106.3
3.900	5.158	3.245	-0.110	0.654	0.140	0.163	-0.127	-0.329	4.753	-2.014	0.536	28.1	0.572	106.3
4.000	5.215	3.245	-0.115	0.654	0.140	0.163	-0.127	-0.329	4.896	-2.014	0.536	30.8	0.579	106.3
4.100	5.272	3.245	-0.120	0.654	0.140	0.163	-0.127	-0.329	5.049	-2.014	0.536	33.5	0.586	106.3
4.200	5.329	3.245	-0.125	0.654	0.140	0.163	-0.127	-0.329	5.202	-2.014	0.536	36.2	0.593	106.3
4.300	5.386	3.245	-0.130	0.654	0.140	0.163	-0.127	-0.329	5.355	-2.014	0.536	38.9	0.600	106.3
4.400	5.443	3.245	-0.135	0.654	0.140	0.163	-0.127	-0.329	5.508	-2.014	0.536	41.6	0.607	106.3
4.500	5.500	3.245	-0.140	0.654	0.140	0.163	-0.127	-0.329	5.661	-2.014	0.536	44.3	0.614	106.3
4.600	5.557	3.245	-0.145	0.654	0.140	0.163	-0.127	-0.329	5.814	-2.014	0.536	47.0	0.621	106.3
4.700	5.614	3.245	-0.150	0.654	0.140	0.163	-0.127	-0.329	5.967	-2.014	0.536	49.7	0.628	106.3
4.800	5.671	3.245	-0.155	0.654	0.140	0.163	-0.127	-0.329	6.120	-2.014	0.536	52.4	0.635	106.3
4.900	5.728	3.245	-0.160	0.654	0.140	0.163	-0.127	-0.329	6.273	-2.014	0.536	55.1	0.642	106.3
5.000	5.785	3.245	-0.165	0.654	0.140	0.163	-0.127	-0.329	6.426	-2.014	0.536	57.8	0.649	106.3

表 2.1.3.10 2 次元流体力テ - ブル

$\xi_B$	$H/d = 2.0$	$B/d = 10.0$	$\bar{M}_H$	$\bar{N}_H$	$\bar{M}_R$	$\bar{N}_R$	$\bar{M}_{SR}$	$\bar{N}_{SR}$	$\bar{E}_H$	$\epsilon_H$	$\bar{E}_S$	$\epsilon_S$	$\bar{E}_R$	$\epsilon_R$
0.100	2.974	2.600	0.915	0.656	0.140	0.163	-0.127	-0.329	1.829	-2.014	0.536	-71.7	0.266	106.3
0.200	3.038	2.762	0.442	0.659	0.140	0.163	-0.127	-0.329	1.862	-2.014	0.536	-69.8	0.310	106.3
0.300	3.096	2.924	0.321	0.654	0.140	0.163	-0.127	-0.329	1.895	-2.014	0.536	-67.1	0.320	106.3
0.400	3.154	3.085	0.231	0.654	0.140	0.163	-0.127	-0.329	1.928	-2.014	0.536	-64.4	0.327	106.3
0.500	3.212	3.245	0.173	0.654	0.140	0.163	-0.127	-0.329	1.961	-2.014	0.536	-61.7	0.334	106.3
0.600	3.270	3.245	0.125	0.654	0.140	0.163	-0.127	-0.329	1.994	-2.014	0.536	-59.0	0.341	106.3
0.700	3.328	3.245	0.077	0.654	0.140	0.163	-0.127	-0.329	2.027	-2.014	0.536	-56.3	0.348	106.3
0.800	3.386	3.245	0.039	0.654	0.140	0.163	-0.127	-0.329	2.060	-2.014	0.536	-53.6	0.355	106.3
0.900	3.444	3.245	0.001	0.654	0.140	0.163	-0.127	-0.329	2.093	-2.014	0.536	-50.9	0.362	106.3
1.000	3.501	3.245	-0.039	0.654	0.140	0.163	-0.127	-0.329	2.126	-2.014	0.536	-48.2	0.369	106.3
1.100	3.559	3.245	-0.087	0.654	0.140	0.163	-0.127	-0.329	2.159	-2.014	0.536	-45.5	0.376	106.3
1.200	3.617	3.245	-0.135	0.654	0.140	0.163	-0.127	-0.329	2.192	-2.014	0.536	-42.8	0.383	106.3
1.300	3.675	3.245	-0.183	0.654	0.140	0.163	-0.127	-0.329	2.225	-2.014	0.536	-40.1	0.390	106.3
1.400	3.732	3.245	-0.231	0.654	0.140	0.163	-0.127	-0.329	2.257	-2.014	0.536	-37.4	0.397	106.3
1.500	3.789	3.245	-0.279	0.654	0.140	0.163	-0.127	-						

表2.1.3.13 2次元流体力学 - ブル

表2.1.3.14. 2次元流体カテーブル

表2.1.3.15 2次元流体カーテンブル

表2.1.3.16 2次元液体力学 - ブル

表2.1.3.17 - 2次元流体力テープル

$\xi_B$	$H/d = 10.0$	$B/d = 5.0$	$\bar{N}_H$	$\bar{M}_S$	$\bar{N}_R$	$\bar{M}_{SR}$	$\bar{N}_{SR}$	$\bar{E}_H$	$\epsilon_H$	$\bar{E}_S$	$\epsilon_S$	$\bar{E}_R$	$\epsilon_R$
0.100	3.950	0.614	0.052	0.223	-0.129	-0.023	-0.043	1.806	-10.9	-0.316	0.093	91.8	81.4
0.200	2.766	0.511	0.104	0.319	-0.137	-0.023	-0.043	1.627	-15.9	-0.444	0.131	94.1	84.0
0.300	2.149	0.412	0.145	0.327	-0.139	-0.023	-0.043	1.511	-4.0	-0.444	0.131	100.7	94.0
0.400	1.765	0.312	0.184	0.327	-0.139	-0.023	-0.043	1.492	-6.4	-0.444	0.131	109.7	94.0
0.500	1.454	0.212	0.223	0.327	-0.139	-0.023	-0.043	1.463	-7.9	-0.444	0.131	109.7	94.0
0.600	1.254	0.112	0.262	0.327	-0.139	-0.023	-0.043	1.434	-9.4	-0.444	0.131	109.7	94.0
0.700	1.104	0.012	0.262	0.327	-0.139	-0.023	-0.043	1.405	-10.9	-0.444	0.131	109.7	94.0
0.800	1.004	0.012	0.262	0.327	-0.139	-0.023	-0.043	1.376	-12.4	-0.444	0.131	109.7	94.0
0.900	0.904	0.012	0.262	0.327	-0.139	-0.023	-0.043	1.347	-13.9	-0.444	0.131	109.7	94.0
1.000	0.804	0.012	0.262	0.327	-0.139	-0.023	-0.043	1.318	-15.4	-0.444	0.131	109.7	94.0
1.100	0.704	0.012	0.262	0.327	-0.139	-0.023	-0.043	1.289	-16.9	-0.444	0.131	109.7	94.0
1.200	0.604	0.012	0.262	0.327	-0.139	-0.023	-0.043	1.260	-18.4	-0.444	0.131	109.7	94.0
1.300	0.504	0.012	0.262	0.327	-0.139	-0.023	-0.043	1.231	-19.9	-0.444	0.131	109.7	94.0
1.400	0.404	0.012	0.262	0.327	-0.139	-0.023	-0.043	1.202	-21.4	-0.444	0.131	109.7	94.0
1.500	0.304	0.012	0.262	0.327	-0.139	-0.023	-0.043	1.173	-22.9	-0.444	0.131	109.7	94.0
1.600	0.204	0.012	0.262	0.327	-0.139	-0.023	-0.043	1.144	-24.4	-0.444	0.131	109.7	94.0
1.700	0.104	0.012	0.262	0.327	-0.139	-0.023	-0.043	1.115	-25.9	-0.444	0.131	109.7	94.0
1.800	0.004	0.012	0.262	0.327	-0.139	-0.023	-0.043	1.086	-27.4	-0.444	0.131	109.7	94.0
1.900	-0.104	0.012	0.262	0.327	-0.139	-0.023	-0.043	1.057	-28.9	-0.444	0.131	109.7	94.0
2.000	-0.204	0.012	0.262	0.327	-0.139	-0.023	-0.043	1.028	-30.4	-0.444	0.131	109.7	94.0
2.100	-0.304	0.012	0.262	0.327	-0.139	-0.023	-0.043	1.000	-31.9	-0.444	0.131	109.7	94.0
2.200	-0.404	0.012	0.262	0.327	-0.139	-0.023	-0.043	971	-33.4	-0.444	0.131	109.7	94.0
2.300	-0.504	0.012	0.262	0.327	-0.139	-0.023	-0.043	942	-34.9	-0.444	0.131	109.7	94.0
2.400	-0.604	0.012	0.262	0.327	-0.139	-0.023	-0.043	913	-36.4	-0.444	0.131	109.7	94.0
2.500	-0.704	0.012	0.262	0.327	-0.139	-0.023	-0.043	884	-37.9	-0.444	0.131	109.7	94.0
2.600	-0.804	0.012	0.262	0.327	-0.139	-0.023	-0.043	855	-39.4	-0.444	0.131	109.7	94.0
2.700	-0.904	0.012	0.262	0.327	-0.139	-0.023	-0.043	826	-40.9	-0.444	0.131	109.7	94.0
2.800	-0.104	0.012	0.262	0.327	-0.139	-0.023	-0.043	800	-42.4	-0.444	0.131	109.7	94.0
2.900	-0.204	0.012	0.262	0.327	-0.139	-0.023	-0.043	771	-43.9	-0.444	0.131	109.7	94.0
3.000	-0.304	0.012	0.262	0.327	-0.139	-0.023	-0.043	742	-45.4	-0.444	0.131	109.7	94.0
3.100	-0.404	0.012	0.262	0.327	-0.139	-0.023	-0.043	713	-46.9	-0.444	0.131	109.7	94.0
3.200	-0.504	0.012	0.262	0.327	-0.139	-0.023	-0.043	684	-48.4	-0.444	0.131	109.7	94.0
3.300	-0.604	0.012	0.262	0.327	-0.139	-0.023	-0.043	655	-49.9	-0.444	0.131	109.7	94.0
3.400	-0.704	0.012	0.262	0.327	-0.139	-0.023	-0.043	626	-51.4	-0.444	0.131	109.7	94.0
3.500	-0.804	0.012	0.262	0.327	-0.139	-0.023	-0.043	600	-52.9	-0.444	0.131	109.7	94.0
3.600	-0.904	0.012	0.262	0.327	-0.139	-0.023	-0.043	571	-54.4	-0.444	0.131	109.7	94.0
3.700	-0.104	0.012	0.262	0.327	-0.139	-0.023	-0.043	542	-55.9	-0.444	0.131	109.7	94.0
3.800	-0.204	0.012	0.262	0.327	-0.139	-0.023	-0.043	513	-57.4	-0.444	0.131	109.7	94.0
3.900	-0.304	0.012	0.262	0.327	-0.139	-0.023	-0.043	484	-58.9	-0.444	0.131	109.7	94.0
4.000	-0.404	0.012	0.262	0.327	-0.139	-0.023	-0.043	455	-60.4	-0.444	0.131	109.7	94.0
4.100	-0.504	0.012	0.262	0.327	-0.139	-0.023	-0.043	426	-61.9	-0.444	0.131	109.7	94.0
4.200	-0.604	0.012	0.262	0.327	-0.139	-0.023	-0.043	400	-63.4	-0.444	0.131	109.7	94.0
4.300	-0.704	0.012	0.262	0.327	-0.139	-0.023	-0.043	371	-64.9	-0.444	0.131	109.7	94.0
4.400	-0.804	0.012	0.262	0.327	-0.139	-0.023	-0.043	342	-66.4	-0.444	0.131	109.7	94.0
4.500	-0.904	0.012	0.262	0.327	-0.139	-0.023	-0.043	313	-67.9	-0.444	0.131	109.7	94.0
4.600	-0.104	0.012	0.262	0.327	-0.139	-0.023	-0.043	284	-69.4	-0.444	0.131	109.7	94.0
4.700	-0.204	0.012	0.262	0.327	-0.139	-0.023	-0.043	255	-70.9	-0.444	0.131	109.7	94.0
4.800	-0.304	0.012	0.262	0.327	-0.139	-0.023	-0.043	226	-72.4	-0.444	0.131	109.7	94.0
4.900	-0.404	0.012	0.262	0.327	-0.139	-0.023	-0.043	200	-73.9	-0.444	0.131	109.7	94.0
5.000	-0.504	0.012	0.262	0.327	-0.139	-0.023	-0.043	171	-75.4	-0.444	0.131	109.7	94.0
5.100	-0.604	0.012	0.262	0.327	-0.139	-0.023	-0.043	142	-76.9	-0.444	0.131	109.7	94.0
5.200	-0.704	0.012	0.262	0.327	-0.139	-0.023	-0.043	113	-78.4	-0.444	0.131	109.7	94.0
5.300	-0.804	0.012	0.262	0.327	-0.139	-0.023	-0.043	84	-79.9	-0.444	0.131	109.7	94.0
5.400	-0.904	0.012	0.262	0.327	-0.139	-0.023	-0.043	56	-81.4	-0.444	0.131	109.7	94.0
5.500	-0.104	0.012	0.262	0.327	-0.139	-0.023	-0.043	27	-82.9	-0.444	0.131	109.7	94.0
5.600	-0.204	0.012	0.262	0.327	-0.139	-0.023	-0.043	-	-	-	-	109.7	94.0

$\xi_B$	$H/d = 10.0$	$B/d = 10.0$	$\bar{N}_H$	$\bar{M}_S$	$\bar{N}_R$	$\bar{M}_{SR}$	$\bar{N}_{SR}$	$\bar{E}_H$	$\epsilon_H$	$\bar{E}_S$	$\epsilon_S$	$\bar{E}_R$	$\epsilon_R$
0.100	2.765	0.412	0.052	0.223	-0.129	-0.023	-0.043	1.806	-10.9	-0.316	0.093	91.8	81.4
0.200	2.149	0.312	0.104	0.319	-0.137	-0.023	-0.043	1.627	-15.9	-0.444	0.131	94.1	84.0
0.300	1.765	0.212	0.145	0.327	-0.139	-0.023	-0.043	1.511	-15.2	-0.444	0.131	94.1	84.0
0.400	1.454	0.112	0.184	0.327	-0.139	-0.023	-0.043	1.434	-16.4	-0.444	0.131	94.1	84.0
0.500	1.254	0.012	0.223	0.327	-0.139	-0.023	-0.043	1.376	-17.6	-0.444	0.131	94.1	84.0
0.600	1.054	0.012	0.262	0.327	-0.139	-0.023	-0.043	1.318	-18.8	-0.444	0.131	94.1	84.0
0.700	8.54	0.012	0.262	0.327	-0.139	-0.023	-0.043	1.260	-20.0	-0.444	0.131	94.1	84.0
0.800	6.54	0.012	0.262	0.327	-0.139	-0.023	-0.043	1.192	-21.2	-0.444	0.131	94.1	84.0
0.900	4.54	0.012	0.262	0.327	-0.139	-0.023	-0.043	1.134	-22.4	-0.444	0.131	94.1	84.0
1.000	2.54	0.012	0.262	0.327	-0.139	-0.023	-0.043	1.076	-23.6	-0.444	0.131	94.1	84.0
1.100	0.54	0.012	0.262	0.327	-0.139	-0.023	-0.043	1.018	-24.8	-0.444	0.131	94.1	84.0
1.200	-0.46	0.012	0.262	0.327	-0.139	-0.023	-0.043	960	-26.0	-0.444	0.131	94.1	84.0
1.300	-1.46	0.012	0.262	0.327	-0.139	-0.023	-0.043	902	-27.2	-0.444	0.131	94.1	84.0
1.400	-2.46	0.012	0.262	0.327	-0.139	-0.023	-0.043	844	-28.4	-0.444	0.131	94.1	84.0
1.500	-3.46	0.012	0.262	0.327	-0.139	-0.023	-0.043	786	-29.6	-0.444	0.131	94.1	84.0
1.600	-4.46												

る。また  $B/d$  が 5 と 10 の間では大略の値を推定できるであろう。振幅の影響は対応する実験値が少ないためここでは明らかにすることはできないが、強制動揺試験における振幅は  $1^\circ$  である。 $H/d$  が無限大のときの山下の理論から  $b_R$  を換算してみると、振幅  $1^\circ$  で  $B/d = 5$  のとき  $0.031 (\xi_B = 0.25) \sim 0.0103 (\xi_B = 2.25)$ ,  $B/d = 10$  のとき  $0.055 (\xi_B = 0.25) \sim 0.0185 (\xi_B = 2.25)$  の範囲にある。

上下揺れ減衰係数についても同様な考えに基づき

$$\hat{N}_{HE} - \hat{N}_{HW} = b_H(z_a) \xi_B \quad (2.1.4.6)$$

として  $b_H$  を求めた。但し、 $N_{HE}$  は強制動揺試験で求めた減衰係数、 $N_{HW}$  は線形計算で求めた造波減衰係数で

$$\left. \begin{aligned} \hat{N}_{HE} &= N_{HE} \sqrt{B/2g/\rho Bd} \\ \hat{N}_{HW} &= N_{HW} \sqrt{B/2g/\rho Bd} \end{aligned} \right\} \quad (2.1.4.7)$$

である。 $(\hat{N}_{HE} - \hat{N}_{HW})$  を図 2.1.4.4, 図 2.1.4.5 に示す。この場合も  $B/d$  が大きくかつ  $H/d$  が小さい場合は、ある周波数から上は一定になったり、下がったりしているが、 $\xi_B$  に対して直線と思われるところまでとて係数を出した。従ってこの係数を用いる場合はある状態においては周波数的にも適用範囲が限定されるので、その範囲は同図によって判断されたい。得られた係数を図 2.1.4.6 に示す。

以上、実験結果に基づいて減衰係数を推定するために、造波減衰以外の成分が  $\xi_B$  に比例するとして比例係数を求めた結果、ある適用範囲内ではあるが、 $B/d$  および  $H/d$  に対する傾向を示すことができた。なお本来この問題は流体力学的に検討すべき問題であるので、今後その方面的研究成果に期待したい。また、減衰係数が運動の推定に及ぼす影響についても別に考察する必要がある。

### 参考文献

- 1) 日本造船研究協会：第179研究部会、箱型海洋構造物の運動特性及び係留システムに関する研究報告書、昭和56年3月
- 2) 高木幹雄、田才福造：横運動方程式の流体力について、西部造船会会報、第46号(1973)
- 3) 大川 豊：浮体に働く流体力(その2)，第26回船研発表会講演集(1975)
- 4) 池田良穂、姫野洋司、田中紀男：裸殻の横揺れ減衰力について、造船学会論文集、第142号(1977)
- 5) 山下誠也、片桐徳二：浅喫水箱型浮体の横揺れに関する系統的実験結果、西部造船会会報、第60号(1980)

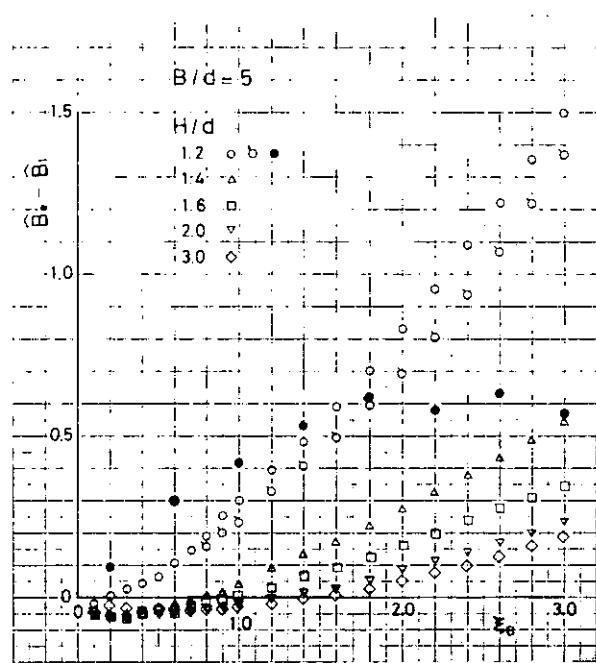


図 2.1.4.1

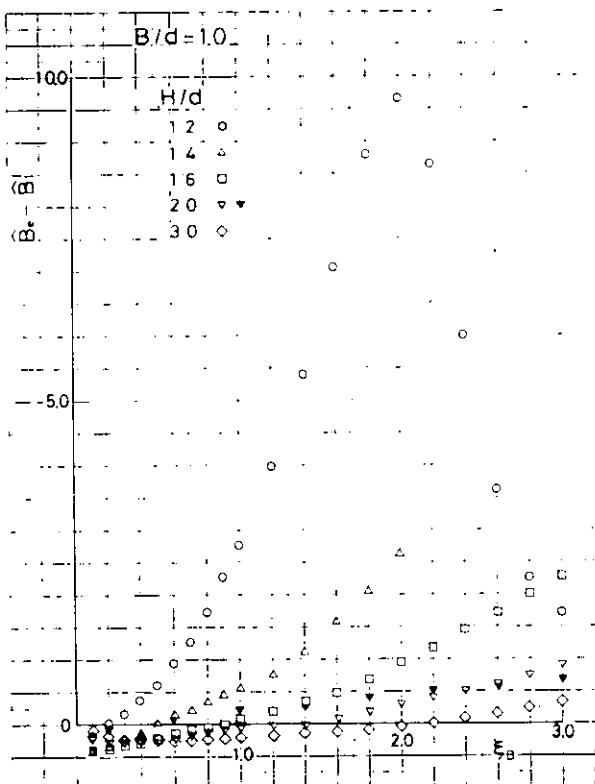


図 2.1.4.2

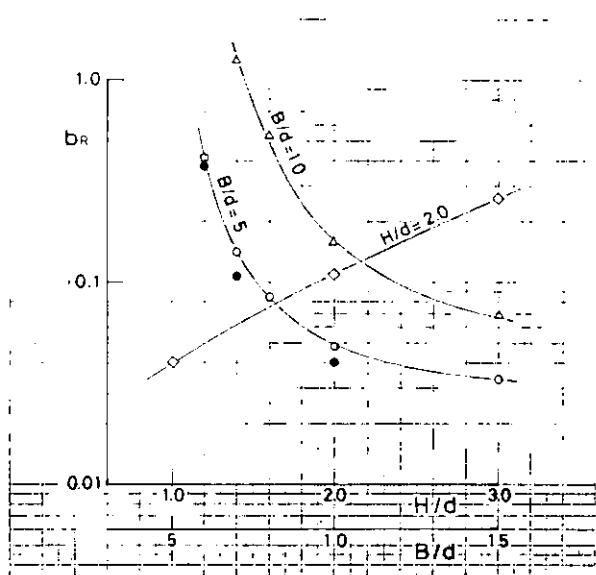


図 2.1.4.3

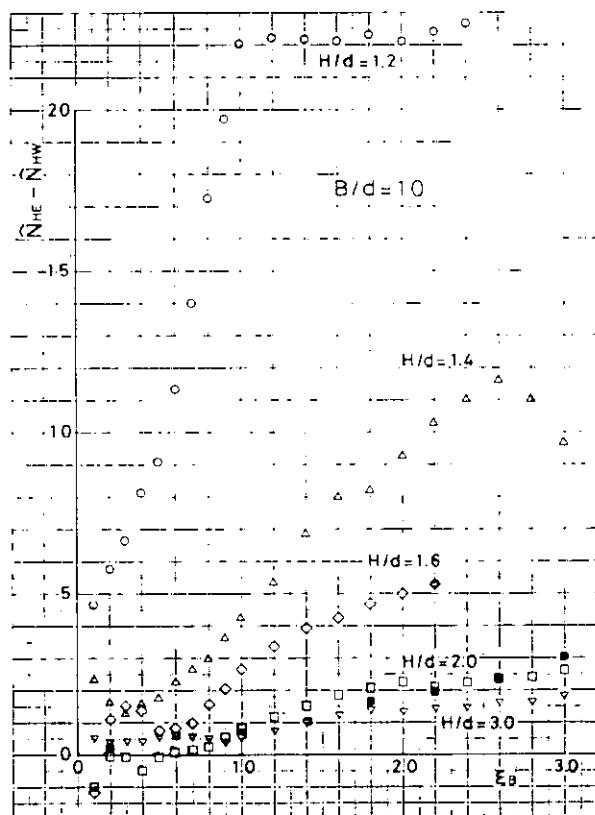


図 2.1.4.4

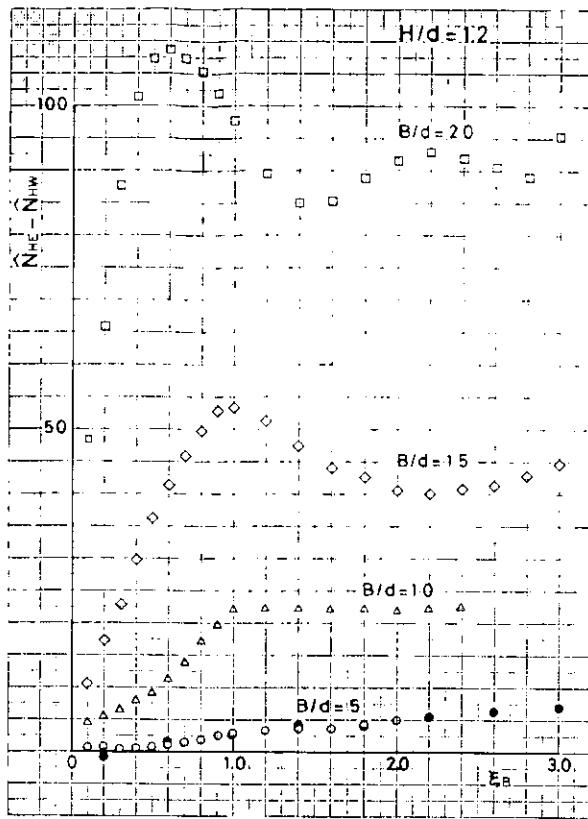


図 2.1.4.5

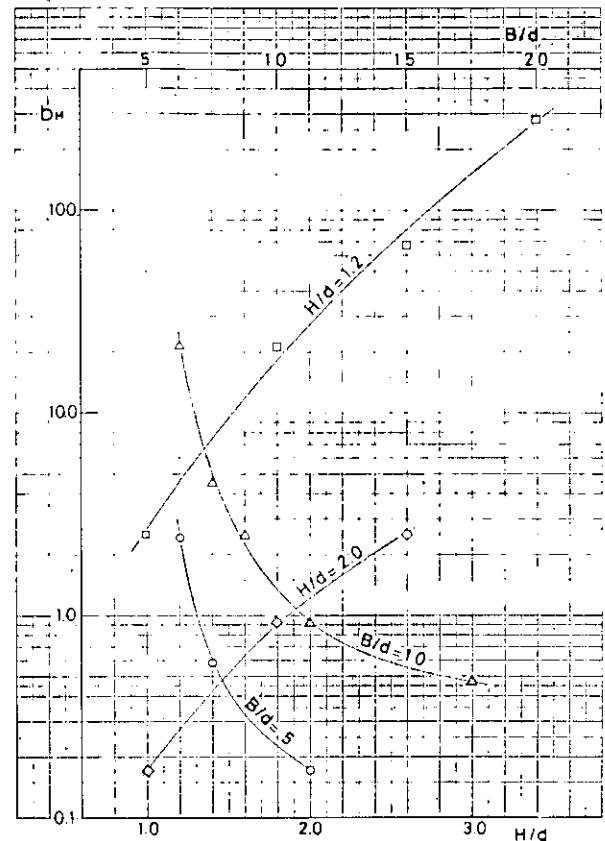


図 2.1.4.6

## 1.5 3 次元流体力

箱型海洋構造物では  $L/B$  が 1.0 に近くなると波浪中動揺特性に対する 3 次元影響が大きく現われるものと考えられ、1.3 節で記した 2 次元流体力を用いたストリップ法計算では推定が不可能な場合も考えられる。

本節では、主として箱型海洋構造物に働く 3 次元流体力についてその計算法の概要、 $L/B$  および  $H/d$  に対するシリーズ計算、2 次元計算値との比較検討について述べる。

### 1.5.1 各種計算法の概要

箱型海洋構造物の 3 次元流体力を求める計算法として、浮体表面に source をおく特異分布法、浮体の側面の外側の外域と底面下の内域に分けて解く領域分割法（固有関数展開法）、そして  $B/d$  が相対的に非常に小さい時に有利な計算法として用いられる圧力分布法等がある。

ここでは、箱型海洋構造物の計算法について、それらに関する文献から要約して述べる。

なお、何れの計算法についても流体運動は、非圧縮性、非回転完全流体での微小運動と仮定して述べられている。

#### (1) 3 次元特異点分布法

3 次元特異点分布法は最も汎用性のある計算法の一つであり、箱型海洋構造物に限らず任意の形状に適用できる点に特長がある。

本方法についての詳しい説明は Faltinsen et al.<sup>1)</sup>, Oortmerssen<sup>2)</sup> 等に示されている。

一般に、非回転完全流体の調和振動流れ場は速度ポテンシャルによって決定され、そのポテンシャル  $\phi e^{-i\omega t}$  は下記の条件を満たす関数として一意に決定される。

$$\nabla^2 \phi = 0 \quad \text{Laplace の式} \quad (2.1.5.1)$$

$$\frac{\partial \phi}{\partial z} - K\phi = 0 \quad \text{at } z = 0 \quad \text{自由表面条件} \quad (2.1.5.2)$$

$$\frac{\partial \phi}{\partial z} = 0 \quad \text{at } z = -h \quad \text{水底条件} \quad (2.1.5.3)$$

$$\sqrt{R} \left( \frac{\partial \phi}{\partial R} - ik\phi \right) \rightarrow 0 \quad \text{as } R \rightarrow \infty \quad \text{発散条件} \quad (2.1.5.4)$$

$$\frac{\partial \phi}{\partial n} = f \quad \text{on } S \quad \text{浮体表面条件} \quad (2.1.5.5)$$

ただし、

$$K = \frac{\omega^2}{g}, \quad k = \frac{2\pi}{\lambda} : \text{波数}, \quad \omega : \text{角周波数 (rad./sec)}$$

$$R = \sqrt{x^2 + y^2}$$

であり、 $\frac{\partial}{\partial n}$ は法線成分を示す。いま、(2.1.5.2)～(2.1.5.5)式の境界条件を満たす基本解G(Green関数)

$$\nabla^2 G = \delta(P - Q) \quad (2.1.5.6)$$

ただし、 $\delta$ ：デルタ関数

が求められていれば $\phi$ は次式で表わされる。

$$\phi(P) = \iint_S \sigma(Q) G(P, Q) dS_Q \quad (2.1.5.7)$$

ただし、

P：流体中の任意点，Q：浮体表面S上の点， $\sigma$ ：S上の吹出分布密度

(2.1.5.7)式の両辺を法線方向に微分し、PをQに近づけると一重層ポテンシャルの法線微分の性質により

$$\frac{\partial \phi}{\partial n} = \frac{1}{2} \sigma + \iint_S \sigma \frac{\partial G}{\partial n} dS \quad (2.1.5.8)$$

となる。(2.1.5.8)式の右辺は(2.1.5.5)によって与えられているので(2.1.5.8)式は $\sigma$ に関する積分方程式であり、これを解けば $\sigma$ 及び $\phi$ が求められる。

(2.1.5.8)式を解析的に解くことは困難であるので浮体の表面Sを有限個の平面要素の和( $S = \sum_{m=1}^N S_m$ )で近似し、各 $S_m$ 上の $\sigma$ を一定として離散化を行なうと(2.1.5.8)式は次の連立一次方程式に還元される。

$$\frac{1}{2} \sigma(P_\ell) + \sum_{m=1}^N \sigma(Q_m) \iint_{S_m} \frac{\partial}{\partial n} G(P_\ell, Q) dS_Q = f(P_\ell) \quad (2.1.5.9)$$

$(\ell = 1 \sim N)$

$\sigma(P_\ell)$ が求まれば $\phi$ は(2.1.5.7)式より近似的に

$$\phi(P) = \sum_{m=1}^N \sigma(Q_m) \iint_{S_m} G(P, Q) dS_Q \quad (2.1.5.10)$$

と表わされる。ただし、 $P_\ell, Q_m$ は面要素 $\ell, m$ の代表点である。

ポテンシャル $\phi$ が求まれば具体的な流体力の諸量を求めるのは容易である。単位速度振幅の $j$ -モードの動揺によるポテンシャルを $\phi_j$ とすれば

$j = 1$  : Surge

$= 2$  : Sway

$= 3$  : Heave

$= 4$  : Roll

= 5 : Pitch

= 6 : Yaw

これらは (2.1.5.5) 式において  $f = n_j$  としたときの解である。ただし、

$$\begin{pmatrix} n_1 \\ n_2 \\ n_3 \end{pmatrix} = \mathbf{n} \quad , \quad \begin{pmatrix} n_4 \\ n_5 \\ n_6 \end{pmatrix} = (\mathbf{r} - \mathbf{r}_c) \times \mathbf{n} \quad (2.1.5.11)$$

ここに、  $\mathbf{n}$  : 浮体表面の単位法線(外向)ベクトル

$\mathbf{r}, \mathbf{r}_c$  : 表面上の点および重心の位置ベクトル

上記の  $\phi_j$  に対して、付加慣性 ( $\mu_{ij}$ ) および減衰係数 ( $\lambda_{ij}$ ) は次式で求められる。

$$\mu_{ij} = \rho \operatorname{Re} \iint_s \phi_j n_i dS \quad (i, j = 1 \sim 6) \quad (2.1.5.12)$$

$$\lambda_{ij} = -\rho \omega \operatorname{Im} \iint_s \phi_j n_i dS \quad (i, j = 1 \sim 6) \quad (2.1.5.13)$$

一方、規則波中に浮体が固定されているときの反射波のポテンシャル (diffraction potential) を  $\phi_d$ 、入射波のポテンシャルを  $\phi_i$  とすると、 $\phi_d$  は (2.1.5.5) 式で  $f = \partial \phi_i / \partial n$  とおいたときの解である。 $\phi_d$  が求められれば波強制力  $F_j$  は

$$F_j = i \rho \omega \iint_s (\phi_i + \phi_d) n_j dS \quad (j = 1 \sim 6) \quad (2.1.5.14)$$

で与えられる。(2.1.5.14) 式は Haskind の公式を用いて radiation potential  $\phi_j$  から次式でも表わされる。

$$\begin{aligned} F_j &= i \rho \omega \iint (\phi_i \frac{\partial \phi_j}{\partial n} - \frac{\partial \phi_i}{\partial n} \phi_j) dS \\ &= \frac{\rho g \zeta_a}{k} D \cdot H_j(\chi + \pi) \end{aligned} \quad (2.1.5.15)$$

ここに

$$D = (2kh + \sinh 2kh) / (1 + \cosh 2kh)$$

$$H_j(\theta) = -\frac{k^2}{k^2 h - K^2 h + K} \iint_s \sigma_j \frac{\cosh k(\zeta_3 + h)}{\cosh h k} e^{-ik(\zeta_1 \cos \theta + \zeta_2 \sin \theta)} dS$$

$H_j(\theta)$  は Kochin 関数と呼ばれる。

浮体が入射波を受けて 6 mode の運動をする一般の場合、 $\phi_j$  ( $j = 1 \sim 6$ ) および  $\phi_d$  が求められていれば、これらより運動方程式が定まり、それを解いて動揺が決定される。その複素振幅を  $X_j$  ( $j = 1 \sim 6$ ) とすると、流れ場全体のポテンシャル  $\phi$  は

$$\phi = \phi e^{-i\omega t} = \left\{ \sum_{j=1}^6 -i\omega X_j \phi_j + \phi_i + \phi_d \right\} e^{-i\omega t} \quad (2.1.5.16)$$

と表わされる。

## (2) 領域分割法(固有関数展開法)

領域分割法では浮体の側面より外側の外域(領域 I)と浮体の底面下の内域(領域 II)に分けて、各々の速度ポテンシャルを水面と水底の条件を満足する様な  $Z$  に関する直交関数系により未定定数を係数とする無限級数に展開し、領域間の力学的連続条件を満足する様に決定する方法である。

領域分割法についての詳細な説明は文献 3), 4) にあり、ここでは 3) から抜粋して記す。

図 2.1.5.1 において、各領域における速度ポテンシャルをそれぞれ  $\phi_I e^{-i\omega t}$ ,  $\phi_{II} e^{-i\omega t}$  とすると  $\phi_I, \phi_{II}$  は Laplace の方程式他 (2.1.5.1) ~ (2.1.5.5) 式と同様の境界条件を満足し、

$$\nabla^2 \phi_{I,II} = 0 \quad (2.1.5.17)$$

$$\frac{\partial \phi_{1,II}}{\partial z} = 0 \quad \text{at } z = -h : \text{水底条件} \quad (2.1.5.18)$$

$$\lim_{R \rightarrow \infty} \sqrt{R} \left\{ \frac{\partial \phi}{\partial R} - i K \phi \right\} \rightarrow 0 : \text{発散条件} \quad (2.1.5.19)$$

$$\frac{\partial \phi_1}{\partial z} - K \phi_1 = 0 \quad \text{on } z = 0 : \text{自由表面条件} \quad (2.1.5.20)$$

$$\frac{\partial \phi_1}{\partial x} = -i \omega \{ x_1 - x_6 y + x_5 (z - \bar{z}) \} \quad x = \pm a \quad (2.1.5.21)$$

$$\frac{\partial \phi_1}{\partial y} = -i \omega \{ x_2 - x_6 x + x_4 (z - \bar{z}) \} \quad x = \pm b \quad (2.1.5.21)$$

: 浮体側面条件

$$\frac{\partial \phi_2}{\partial z} = -i \omega (x_3 - x_5 x + x_4 y) \quad z = -q h \quad (2.1.5.22)$$

: 浮体底面条件

入射波  $\zeta_1$  を

$$\zeta_1 = \zeta_0 e^{i k (x \cos \chi + y \sin \chi)} e^{i \omega t} \quad (2.1.5.23)$$

とすれば、(2.1.5.18), (2.1.5.20)式の境界条件を満足する、

領域 I, 領域 II の速度ポテンシャル  $\phi_1, \phi_{II}$  は各々

$$\phi_1 = \frac{g \zeta_0}{\omega} \left\{ f_0(x, y) + f_1(x, y) \frac{\cosh(z+h)}{\cosh kh} + \sum_{n=1}^{\infty} f_2^{(n)}(x, y) \frac{\cos k_n(z+h)}{\cos k_n h} \right\} \quad (2.1.5.24)$$

$$\begin{aligned} \phi_{II} = & \frac{g \zeta_0}{\omega} \left[ \varphi_0(x, y) + \sum_{s=1}^{\infty} \varphi_s(x, y) \cos \bar{s}(z+q h) \right. \\ & + i \frac{K h}{2 q} \left\{ \left( -\frac{x_3}{\zeta_0} - \frac{x_4 y}{\zeta_0} + \frac{x_6 x}{\zeta_0} \right) \left( 1 + \frac{z}{h} \right)^2 \right. \\ & \left. \left. + \frac{1}{4} \left( \frac{2 x_3}{\zeta_0} + \frac{x_4 y}{\zeta_0} - \frac{x_6 x}{\zeta_0} \right) \left( 1 + \frac{z}{h} \right)^2 \right\} \right] \end{aligned} \quad (2.1.5.25)$$

ただし、  
 $\bar{s} = s \pi / \sqrt{q} h, \quad \bar{q} = 1 - q, \quad f_0(x, y) = -i e^{-k(x \cos \chi + y \sin \chi)}$   
 で与えられる。(2.1.5.24), (2.1.5.25)式の  $f_1(x, y), f_2^{(n)}(x, y), \varphi_0(x, y)$  および  $\varphi_s(x, y)$  は、

Helmholtz および Laplace の方程式

$$\begin{aligned} \nabla^2 f_1 + k^2 f_1 = 0, \quad \nabla^2 f_2^{(n)} - k_n^2 f_2^{(n)} = 0 \\ \nabla^2 \varphi_0 = 0, \quad \nabla^2 \varphi_s - \bar{s}^2 \varphi_s = 0 \end{aligned} \quad (2.1.5.26)$$

及び Sommerfeld の発散条件 (2.1.5.19) 式を満足する (2.1.5.26) 式の特解 (Green関数) を用いて、  
 領域 I, II 間の境界 D 上での力学的連続性、すなわち

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial n} \phi_1 &= \frac{\partial x_j}{\partial n} \quad (0 \leq z \leq -q h) \\ &= \frac{\partial \phi_{II}}{\partial n} \quad (-q h \leq z \leq -h) \\ \phi_1 &= \phi_{II} \quad (-q h \leq z \leq -h) \end{aligned} \quad (2.1.5.27)$$

及び Green の定理、浮体形状の対称性を用い、そして、境界 D を N 個の要素に分割し、積分方程式の離散化を行なうことにより、(2.1.5.24), (2.1.5.25) 式の速度ポテンシャルが決定される。

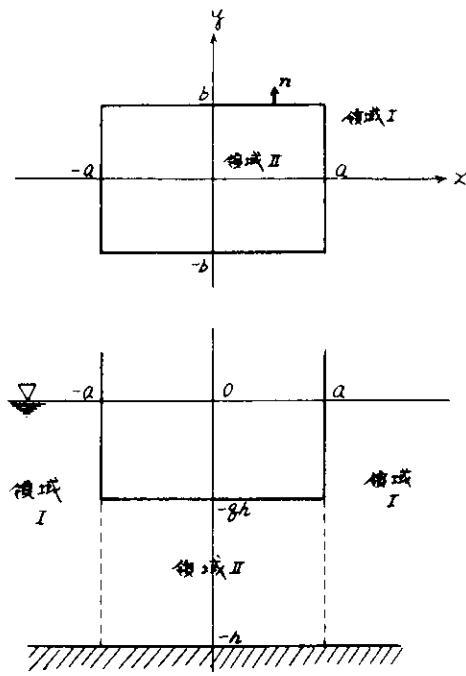


図 2.1.5.1

$$\left. \begin{aligned} f_1(x, y) &= -\frac{1}{2} \sum_{j=1}^N \{ \bar{A}_{xj} f_1(j) - A_{xj} \bar{f}_1(j) \} \\ f_2^{(n)}(x, y) &= -\frac{1}{2} \sum_{j=1}^N \{ \bar{B}_{xj} f_2^{(n)}(j) - B_{xj} \bar{f}_2^{(n)}(j) \} \\ \varphi_0(x, y) &= \frac{1}{2} \sum_{j=1}^N \{ \bar{E}_{xj} \varphi_0(j) - E_{xj} \bar{\varphi}_0(j) \} \\ \varphi_s(x, y) &= \frac{1}{2} \sum_{j=1}^N \{ \bar{F}_{xj} \varphi_s(j) - F_{xj} \bar{\varphi}_s(j) \} \end{aligned} \right\} \quad (2.1.5.28)$$

ここに  $f(j)$ ,  $\varphi(j)$ ,  $A_{xj}$ ,  $B_{xj}$ ,  $E_{xj}$ ,  $F_{xj}$  ……等については文献3)に詳細に述べられている。速度ボテンシャルが求まれば特異点分布法と同方法で諸流体力 (2.1.5.12), (2.1.5.13), (2.1.5.15) 式が得られる。

### (3) 圧力分布法 (3次元)

喫水が極めて小さく、その影響が無視できる様な箱型浮体の流体力計算に対して、圧力分布を用いる計算法5)が適用される。この計算法では、浮体の喫水を zero とし、浮体の底面に働く圧力だけを考慮する。

速度ボテンシャル、水面変位、浮体の底面の圧力をそれぞれ

$$\left. \begin{aligned} \phi(x, y, z; t) &= \operatorname{Re} [i \omega X \phi(x, y, z) e^{i \omega t}] \\ Z(x, y, z; t) &= \operatorname{Re} [X \zeta(x, y) e^{i \omega t}] \\ P(x, y; t) &= \operatorname{Re} [-\rho g X P(x, y) e^{i \omega t}] \end{aligned} \right\} \quad (2.1.5.29)$$

と定義する。境界条件から、浮体の底面  $S_B$  上で

$$\zeta_j = -\frac{\partial \phi_j}{\partial z} = \begin{cases} 1 & j = 1 \quad \text{上下揺れ} \\ y(B/2) & j = 2 \quad \text{横揺れ} \\ x(L/2) & j = 3 \quad \text{縦揺れ} \\ e^{im_0(x \cos \chi + y \sin \chi)} & j = d \quad \text{diffraction} \end{cases} \quad (2.1.5.30)$$

である。ただし、 $K = m_0 \tanh m_0 h$  とする。

境界条件の積分方程式は

$$\zeta_j(x, y) = P_j(x, y) + K \int_{S_B} P_j(x', y') S(x, y, o; x', y', o) dx' dy'$$

と表わされる。 $S(x, y, z; x', y', z')$  は核関数であり、無限水深と有限水深の場合で異なる式を用いる。数値計算にあたっては、 $S_B$  を等分割し、各要素では圧力は一定であるとみなし、この積分方程式を連立一次方程式に変換して解く方法である。

各境界条件に対して方程式を解き、圧力が求まると

付加質量、減衰係数、Kochin 関数は次式で計算される。

$$\left. \begin{aligned} m_{zz}/\rho \\ m_{\phi\phi}/\rho (B/2)^2 \\ m_{\theta\theta}/\rho (L/2)^2 \end{aligned} \right\} = \frac{1}{K} \iint_{S_B} (\zeta_j - P_j, o) \zeta_j dx dy \quad (2.1.5.31)$$

$$\left. \begin{aligned} N_{zz}/\rho \omega \\ N_{\phi\phi}/\rho \omega (B/2)^2 \end{aligned} \right\} = \frac{1}{K} \iint_{S_B} P_{j,s} \zeta_j dx dy \quad (2.1.5.32)$$

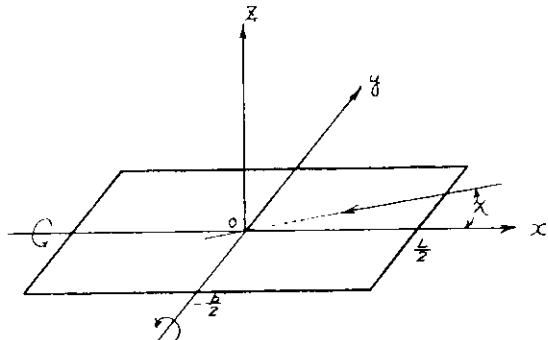


図 2.1.5.2

$$N_{\theta\theta} / \rho \omega (L/2)^2 = \int_{S_B} P_j(x, y) e^{im_0(x \cos \chi + y \sin \chi)} dx dy$$

また、diffractionに対する圧力も求められているから、波浪中で動揺するときの全変動圧力は次式で計算される。

$$P_T(x, y) = -(Z_A / \zeta_A) e^{-i\varepsilon_z} P_1(x, y) - (\phi_A B / 2\zeta_A) \quad (2.1.5.33)$$

ここに、 $Z_A, \phi_A, \theta_A$  および  $\zeta_A$  は、それぞれ上下揺れ、横揺れ、縦揺れ、および入射波の振幅であり、 $\varepsilon_z, \varepsilon_\phi, \varepsilon_\theta$  は動揺の位相である。圧力分布法による計算では、圧力が直接的に求まり、全変動圧力の計算は非常に簡単である。

### 参考文献

- 1) Faltinsen, O. M., Michelson, F. C. : Motions of Large Structures in Waves at Zero Froude Number, International Symposium on the Dynamics of Marine Vehicles and Structures in Wave (1974)
- 2) Van Oortmersen, G. : The Motions of a Ship in Shallow Water, Ocean Eng. Vol. 3 (1976)
- 3) 井島武士 : 有限水域の構造物および浮体による波の変形(2次元および3次元問題), 土木学会水工学夏季研修会講義集 (1974)
- 4) 井島武士他 : 有限水深域における矩形浮体の3次元係留運動, 土木学会論文報告集, 第48巻, 第3号(1975)
- 5) 山下誠也 : 浅喫水箱形浮体の波浪中動揺と変動圧力, 日本造船学会論文集, No.146 (1979)

### 1.5.2 3次元特異点分布法によるシリーズ計算

箱型海洋構造物に作用する流体力については、先に2次元領域分割法を用いた  $B/d, H/d$  の両シリーズ計算で幅一喫水影響、水深一喫水影響を調査したが、ここでは流体力の3次元影響及び水深影響を調査することを目的として、3次元特異点分布法を用いた  $L/B$  および  $H/d$  を系統的に変化させた流体力および波強制力についてのシリーズ計算を行なった。

#### (1) 計算諸元

本シリーズ計算で行なった浮体の形状、水深、喫水、メタセンター高さ、慣動半径等の計算諸元を表2.1.5.1に示す。波条件としては

無次元波周波数 :

$$\xi_B = \frac{\omega^2}{g} \cdot \frac{B}{2} = 0.1, 0.2, 0.3, 0.5, 0.75, 1.0, 1.5, 2.0, 2.5, 2.75$$

$$\text{波入射角 } (\chi) = 0, 30, 45, 90 \text{ (deg)}$$

各々について計算した。なお、計算に際しての分割数は表2.1.5.2の通りである。

#### (2) 無次元化

シリーズ計算結果の流体力(附加質量、減衰係数)および波強制力についての無次元化は次の通りである。

附加質量 :

$$\left. \begin{aligned} A_{11} &= a_{xx} / \rho \nabla, & A_{22} &= a_{yy} / \rho \nabla, & A_{33} &= a_{zz} / \rho \nabla \\ A_{44} &= a_{\varphi\varphi} / \rho \nabla \left(\frac{B}{2}\right)^2, & A_{55} &= a_{\theta\theta} / \rho \nabla \left(\frac{L}{2}\right)^2, & A_{66} &= a_{\psi\psi} / \rho \nabla \left(\frac{L}{2}\right)^2 \end{aligned} \right\}$$

$$A_{15} = a_{x\theta} / \rho \nabla \left( \frac{L}{2} \right), \quad A_{24} = a_{y\varphi} / \rho \nabla \left( \frac{B}{2} \right), \quad A_{42} = a_{\varphi y} / \rho \nabla \left( \frac{B}{2} \right)$$

$$A_{51} = a_{\theta x} / \rho \nabla \left( \frac{L}{2} \right),$$

減衰係数：

$$B_{11} = b_{xx} / \rho \nabla \omega, \quad B_{22} = b_{yy} / \rho \nabla \omega, \quad B_{33} = b_{zz} / \rho \nabla \omega$$

$$B_{44} = b_{\varphi\varphi} / \rho \nabla \left( \frac{B}{2} \right)^2 \omega, \quad B_{55} = b_{\theta\theta} / \rho \nabla \left( \frac{L}{2} \right)^2 \omega, \quad B_{66} = b_{\psi\psi} / \rho \nabla \left( \frac{L}{2} \right)^2 \omega$$

$$B_{15} = b_{x\theta} / \rho \nabla \left( \frac{L}{2} \right) \omega, \quad B_{24} = b_{y\varphi} / \rho \nabla \left( \frac{B}{2} \right) \omega, \quad B_{42} = b_{\varphi y} / \rho \nabla \left( \frac{B}{2} \right) \omega$$

$$B_{51} = b_{\theta x} / \rho \nabla \left( \frac{L}{2} \right) \omega$$

(2.1.5.34)

波強制力

$$F_1 = F_x / \rho g \zeta_a B \left( \frac{L}{2} \right)$$

$$F_2 = F_y / \rho g \zeta_a L \left( \frac{B}{2} \right)$$

$$F_3 = F_z / \rho g \zeta_a L \left( \frac{B}{2} \right)$$

$$F_4 = F_\varphi / \rho g \zeta_a L \left( \frac{B}{2} \right)^2$$

$$F_5 = F_\theta / \rho g \zeta_a B \left( \frac{L}{2} \right)^2$$

$$F_6 = F_\psi / \rho g \zeta_a B \left( \frac{L}{2} \right)^2$$

}

(2.1.5.35)

### (3) 計算結果

表2.1.5.1に従って行なったシリーズ計算の結果を(2.1.5.34),(2.1.5.35)式に従って無次元表示して図2.1.5.3～図2.1.5.20に示す。

$H/d$ についてのシリーズ計算結果を

慣性力係数：図2.1.5.3～図2.1.5.12

減衰力係数：図2.1.5.13～図2.1.5.22

波強制力：図2.1.5.23～図2.1.5.46

に、また  $L/B$ についてのシリーズ計算結果を

慣性力係数：図2.1.5.47～図2.1.5.56

減衰力係数：図2.1.5.57～図2.1.5.66

波強制力：図2.1.5.67～図2.1.5.90

に示している。波強制力については波の入射角 $0^\circ, 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ, 90^\circ$ の場合について6-modeの値を各々表わしている。また、 $L/B$ シリーズについては、3次元領域分割法による計算値を $L/B=2.0, \chi=0^\circ, 90^\circ$ の場合にのみ、④印で併記した。

分割数による計算精度の差異、計算点の不足等を原因とする曲線の不自然さを残すものの、これらのシリーズ計算結果から、概略次のことが考察される。

- 1) 全体的に見て  $H/d=5.0$  以上では低周波(長波長)域を除き、何れの流体力、波強制力についても、水深影響が小さくなる。このことは、2次元のシリーズ計算で得られた結果ともほぼ一致している。
- 2) 附加慣性力、減衰力については、 $L/B=4.0$  以上では、低周波(長波長)域を除き、3次元影響は小さい。 $L/B$ 変化に対する3次元影響についての詳細は1.5.3に述べる。
- 3)  $L/B=2.0$  については3次元の特異点分布法と領域分割法による計算結果では、低周波(長波長)域で多少の差異はあるものの概略一致している。

表2.1.5.1 箱型浮体シリ - ズ計算諸元

	H/d	L/B	B/d	H	Lm	Bm	Dm	d m	$\nabla m^3$	KG m	GM <sub>Lm</sub>	GM <sub>r m</sub>	K <sub>xx m</sub>	K <sub>yy m</sub>	K <sub>zz m</sub>	
H/d	1	1.2	2	5	12	100	50	20	10	50.00	10	78.33	15.83	15.55	29.44	32.28
	2	1.4	2	5	14	100	50	20	10	50.00	10	78.33	15.83	15.55	29.44	32.28
	3	2	2	5	20	100	50	20	10	50.00	10	78.33	15.83	15.55	29.44	32.28
	4	5	2	5	50	100	50	20	10	50.00	10	78.33	15.83	15.55	29.44	32.28
	5	10	2	5	100	100	50	20	10	50.00	10	78.33	15.83	15.55	29.44	32.28
	6	$\infty$ 相当	2	5	<sup>(1)</sup> $\infty$ 相当	100	50	20	10	50.00	10	78.33	15.83	15.55	29.44	32.28
	7	2	2	5	20	100	50	20	10	50.00	10	78.33	15.83	15.55	29.44	32.28
	8	2	1	5	20	50	50	20	10	25.00	10	15.83	15.83	15.55	15.55	20.41
	9	2	1.5	5	20	75	50	20	10	37.50	10	41.88	15.83	15.55	22.41	26.02
	10	2	4	5	20	200	50	20	10	100.00	10	328.33	15.83	15.55	58.02	59.51
	11	2	8	5	20	400	50	20	10	200.00	10	1328.33	15.83	15.55	115.61	116.37

(1) H/d =  $\infty$ 相当とは H = MAX(1/2λ, 100) の計算を意味する。

表 2.1.5.2 計算に際しての分割数

		$H/d$	$L/B$	$\frac{1}{4}$ 浮体に対する分割数			備 考
				L方向	B方向	d方向	
$H/d$ シリ ーズ	1	1.2	2	6	3	2	
	2	1.4	2	6	3	2	
	3	2.0	2	6	3	2	
	4	5.0	2	6	3	2	
	5	10.0	2	6	3	2	
	6	$\infty$ 相当	2	6	3	2	
$L/B$ シリ ーズ	7	2	2	6	3	2	
		2	2	5	5	—	3次元領域分割法
	8	2	1	3	3	2	
	9	2	1.5	4	3	2	
	10	2	4	9	3	2	
	11	2	8	4~15	2	2	$\zeta_B = 0.1 \sim 0.3$

付  $\zeta_B = 0.1 \sim 0.3 : 4$   
     = 0.5 : 6  
     = 0.75 : 7  
     = 1.0 : 8  
     = 1.5 : 11  
     = 2.0 : 13  
     = 2.5 ~ 2.75 : 15

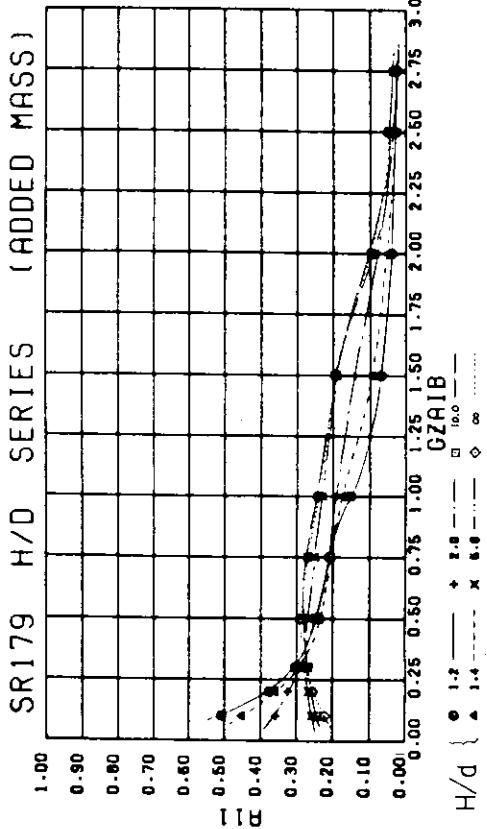


図 2.1.5.3

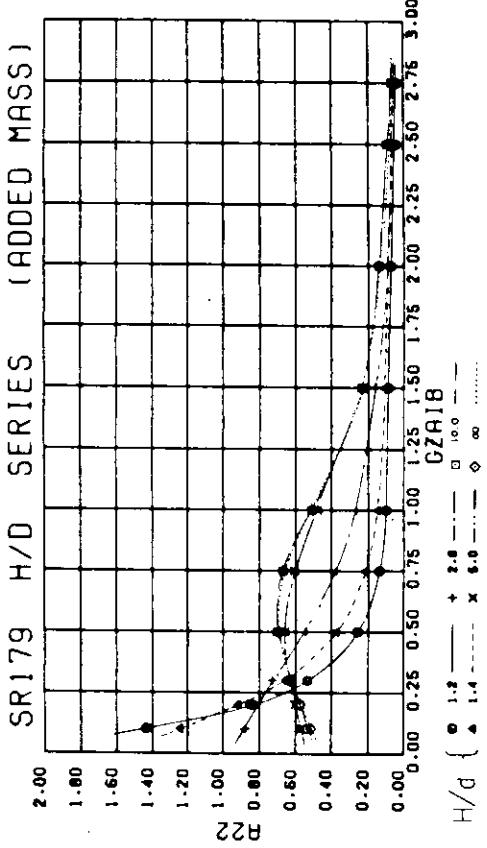


図 2.1.5.4

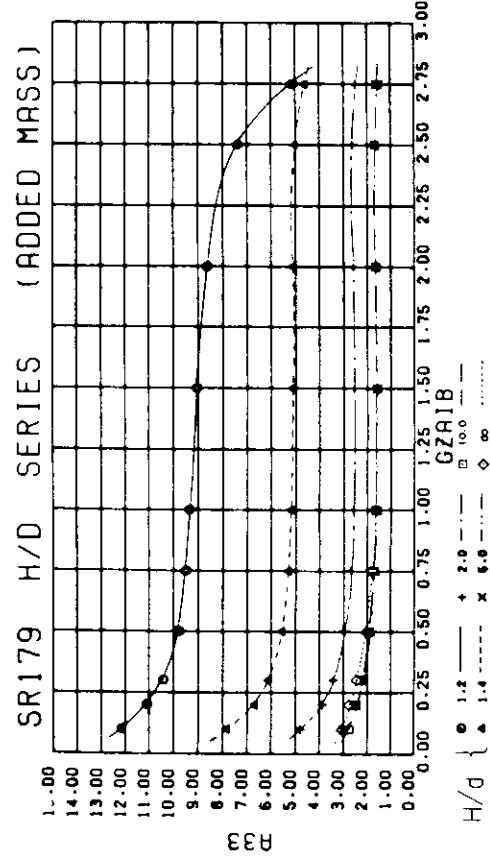


図 2.1.5.5

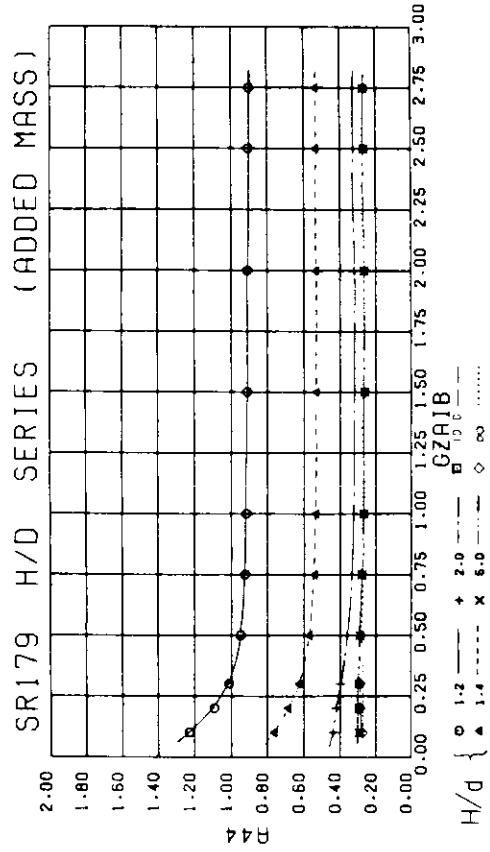


図 2.1.5.6

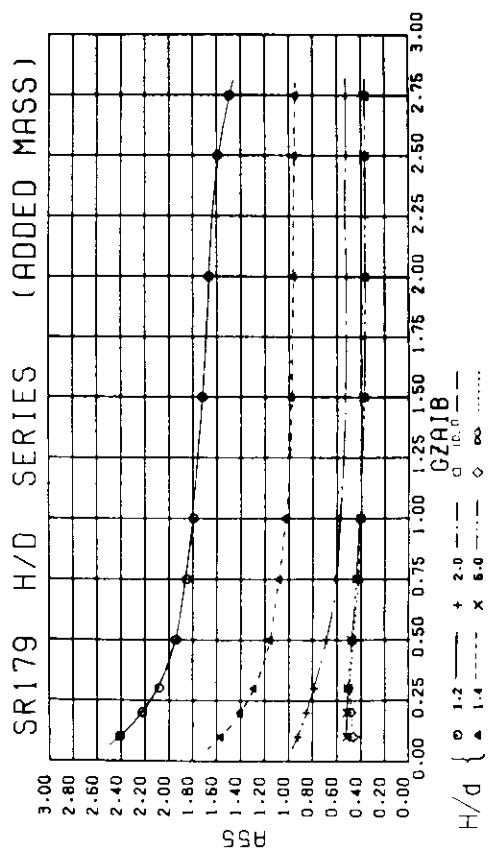
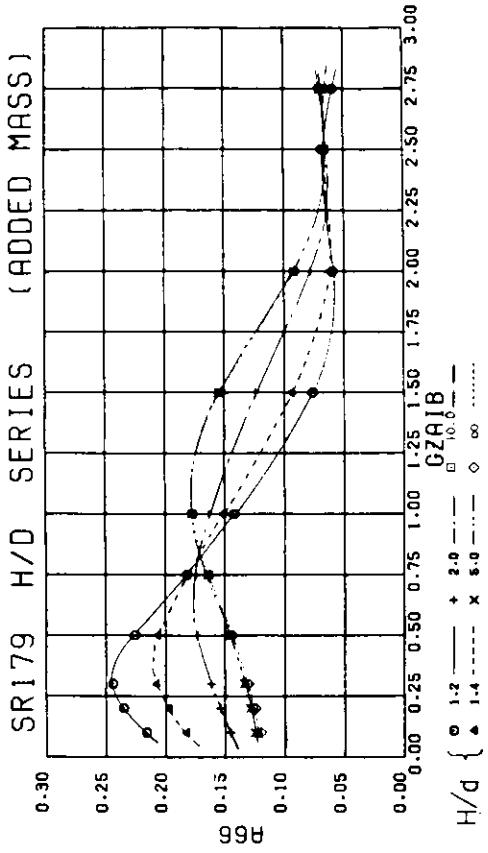


图 2.1.5.7



四 2.1.5.8

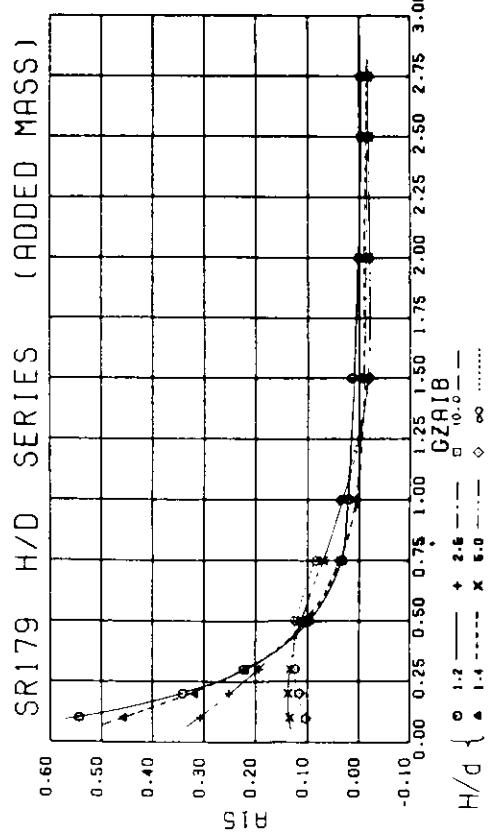


図 2.1. 5. 9

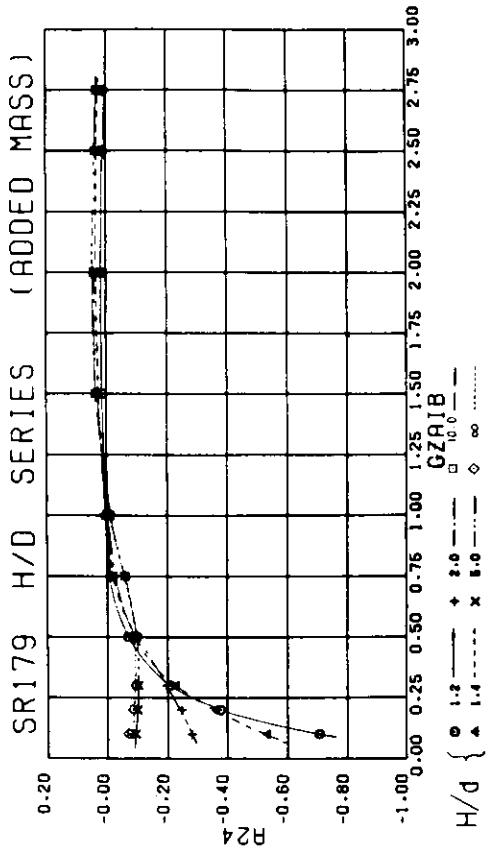


図 2.1.5.10

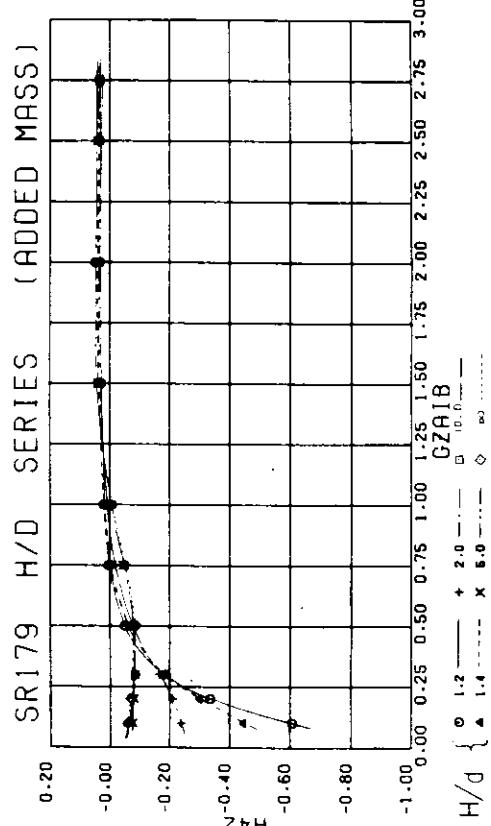


図 2.1.5.11

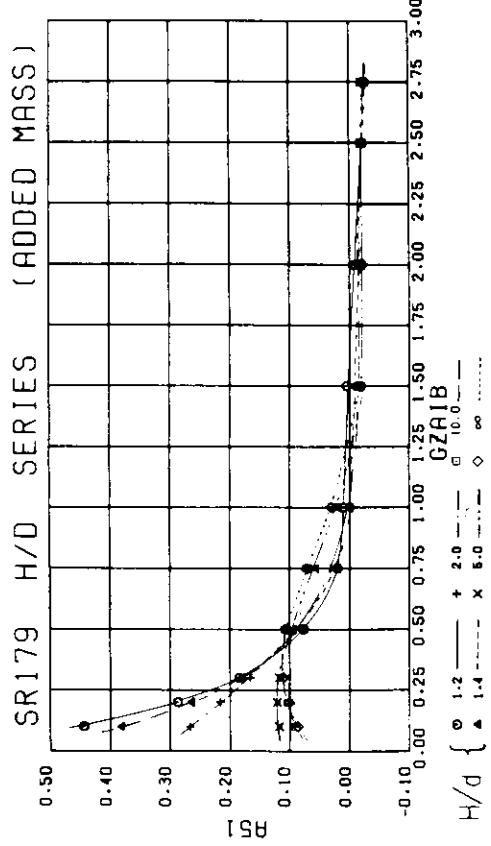


図 2.1.5.12

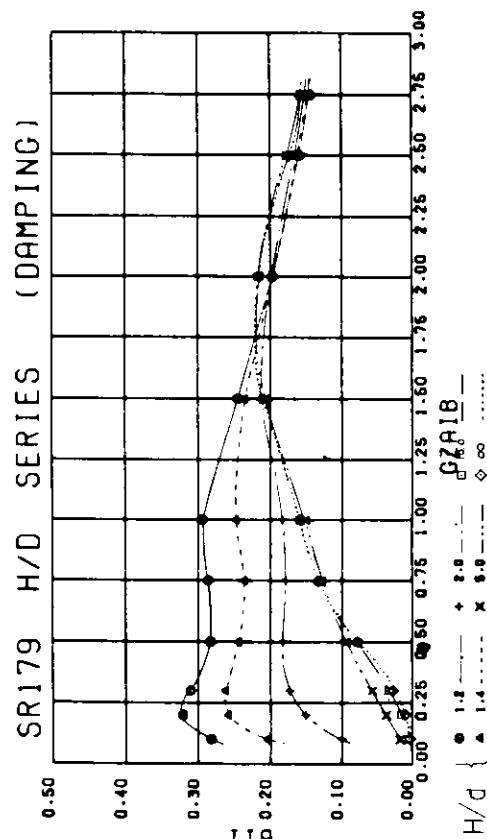


図 2.1.5.13

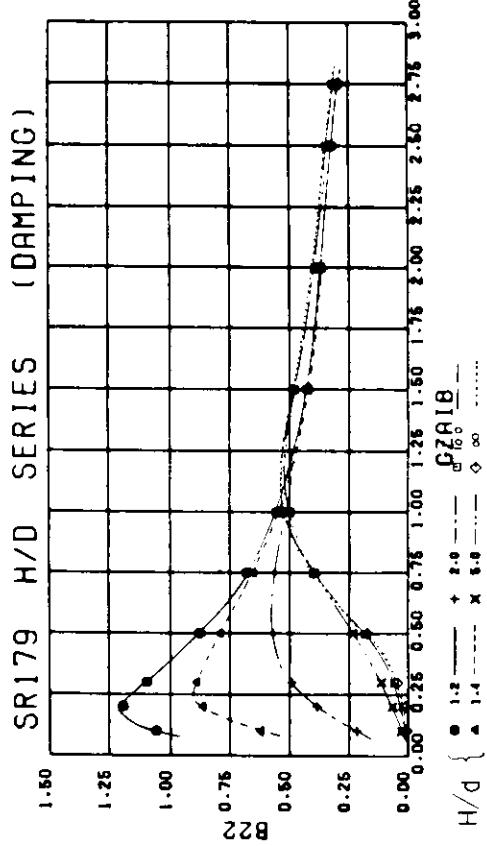


図 2.1.5.14

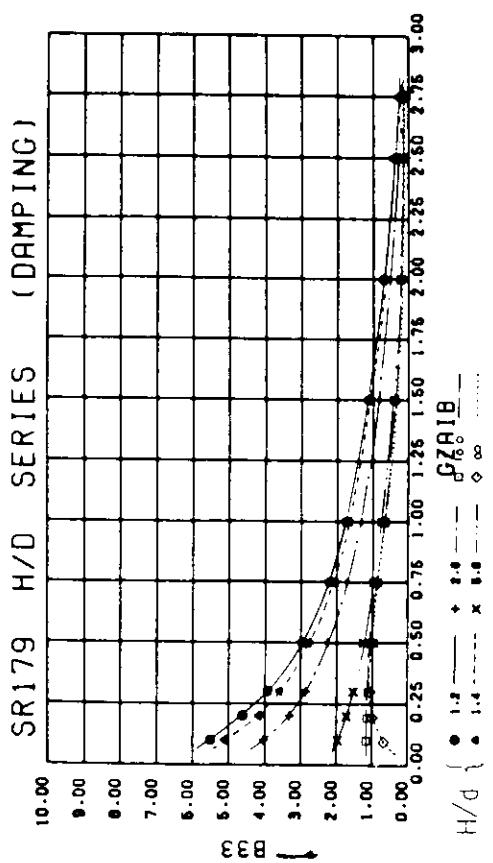


図 2.1.5.15

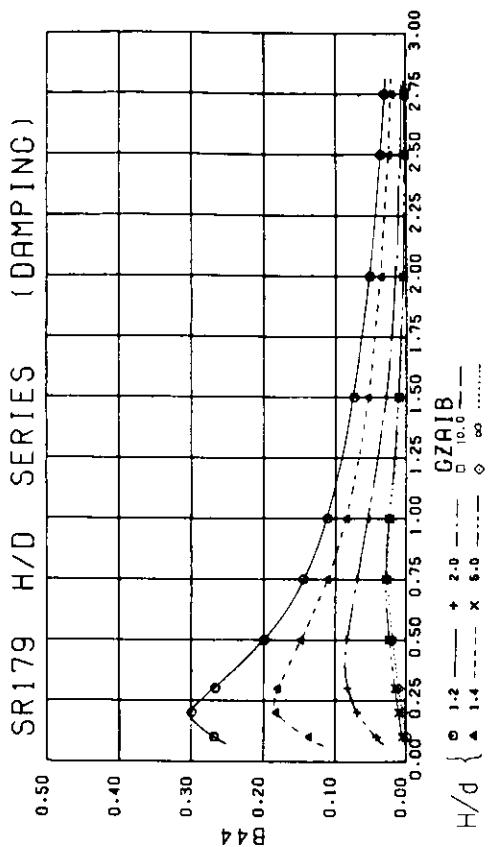


図 2.1.5.16

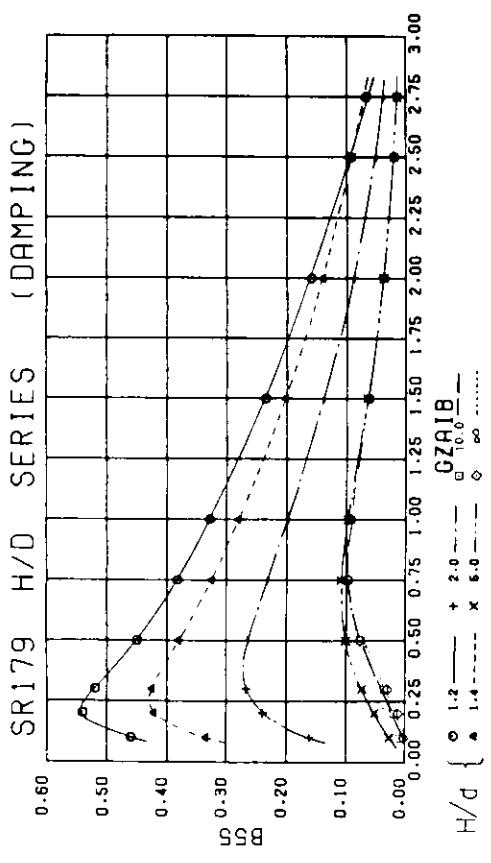


図 2.1.5.17

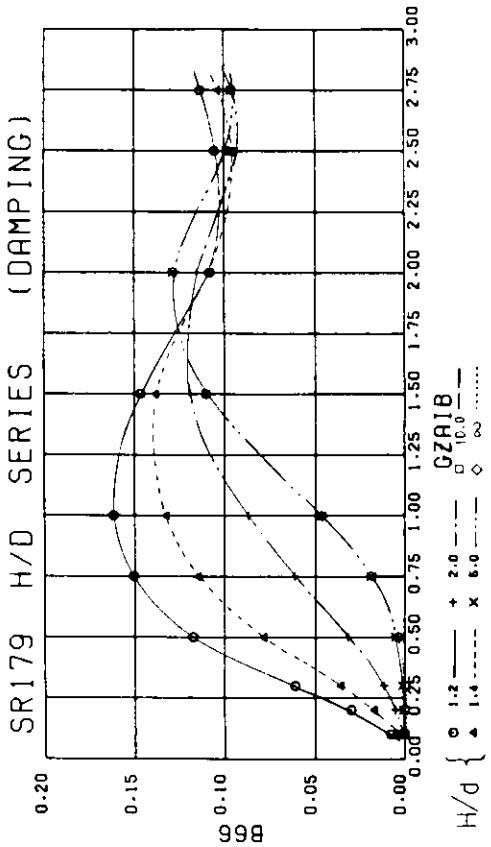


図 2.1.5.18

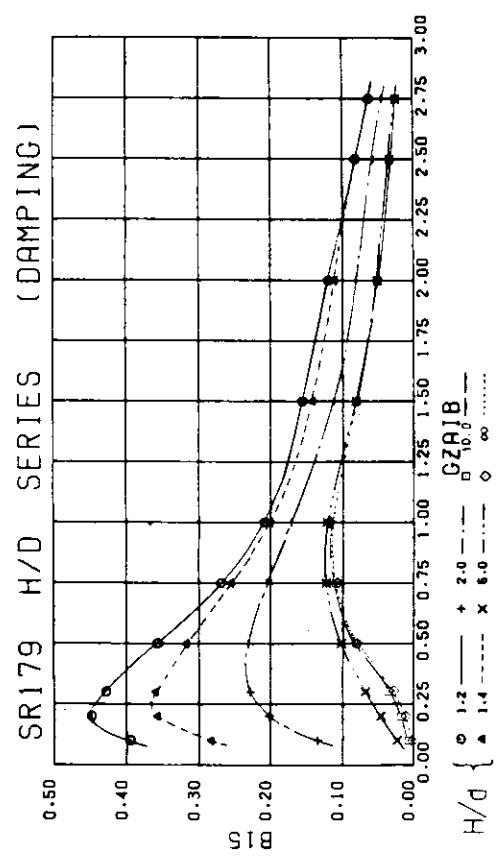


図 2.1.5.19

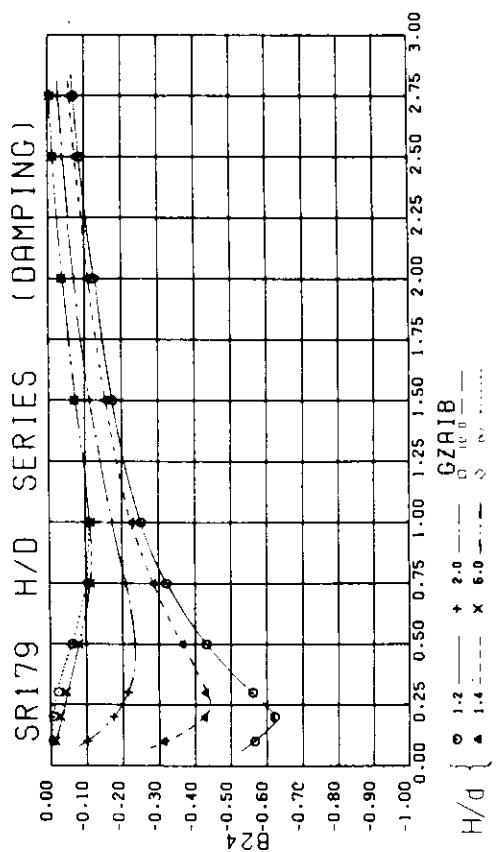


図 2.1.5.20

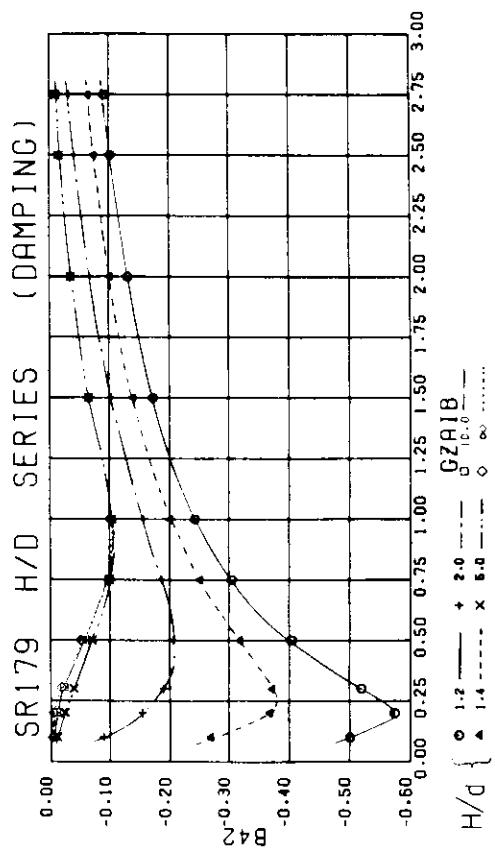


図 2.1.5.21

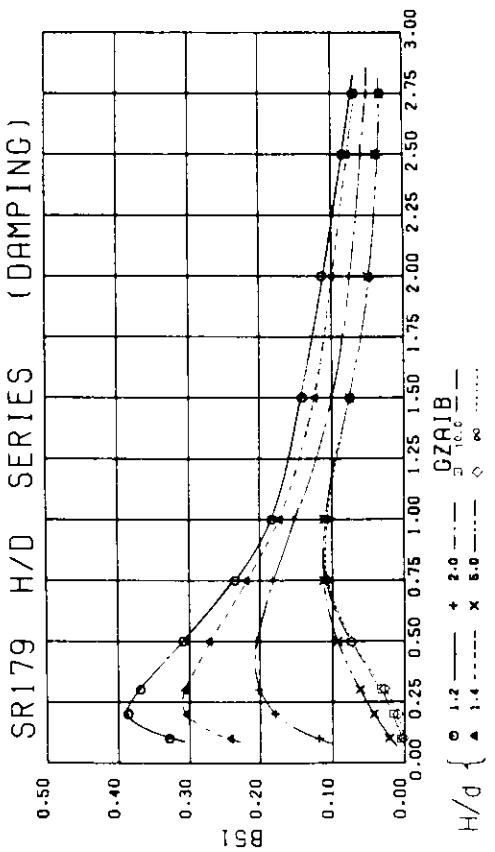


図 2.1.5.22

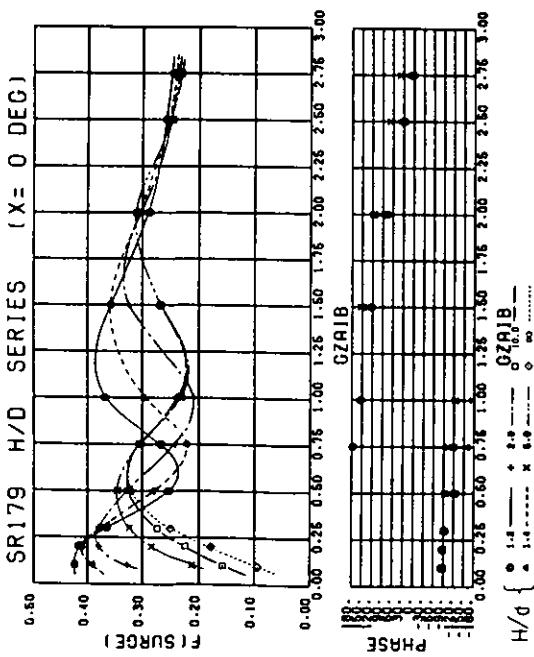


図 2.1.5.23

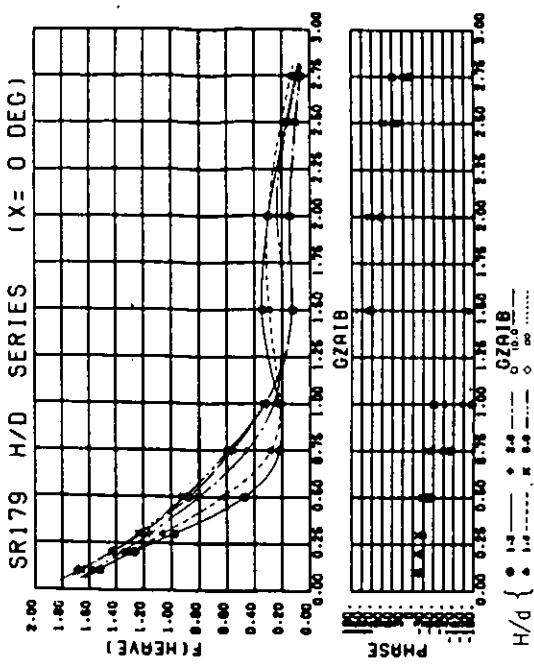


図 2.1.5.24

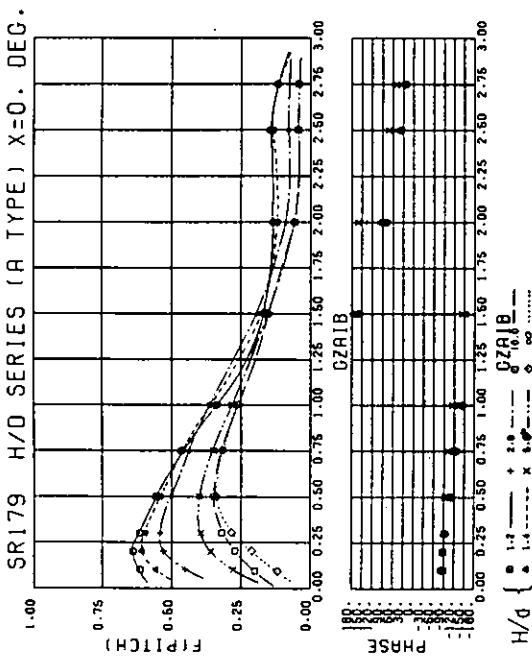


図 2.1.5.25

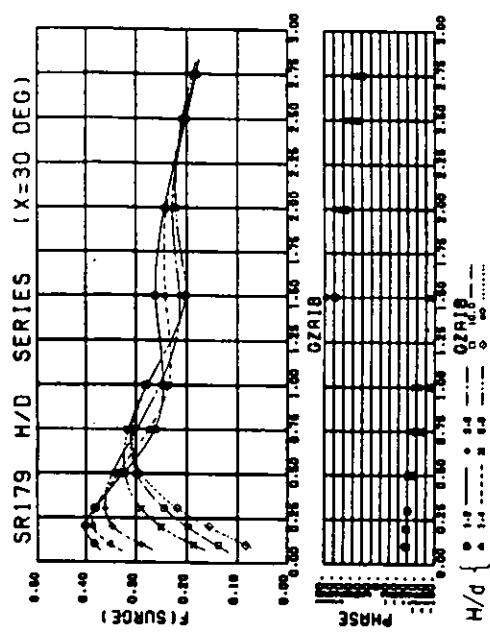


図 2.1.5.26

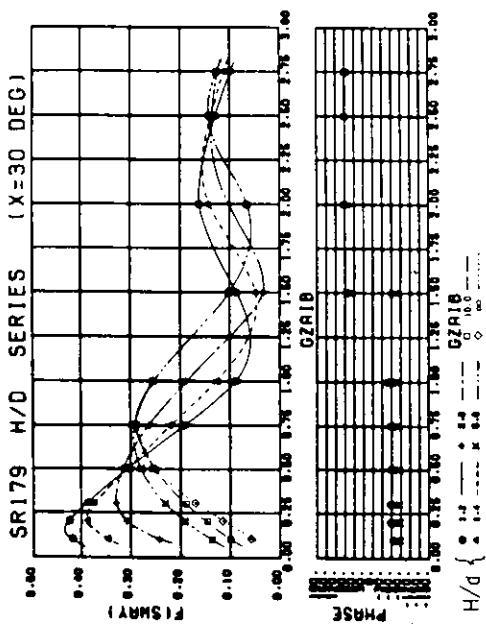


图 2.1.5.27

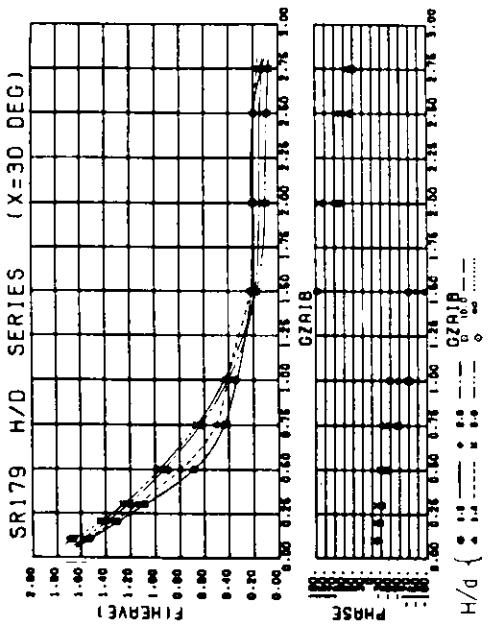


图 2.1.5.28

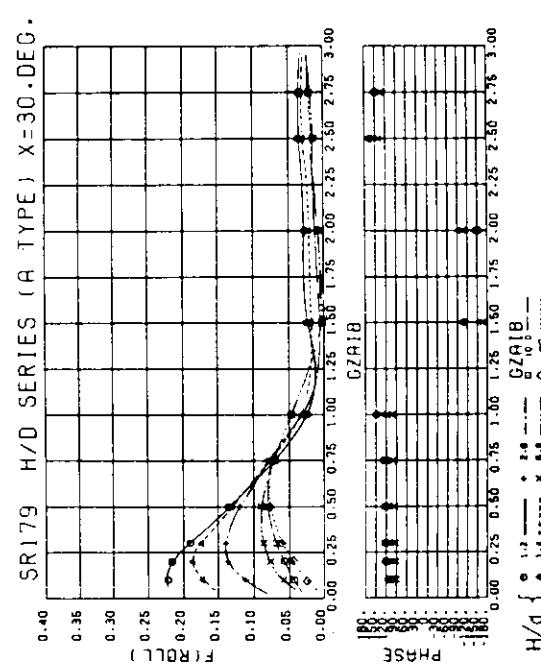


图 2.1.5.29

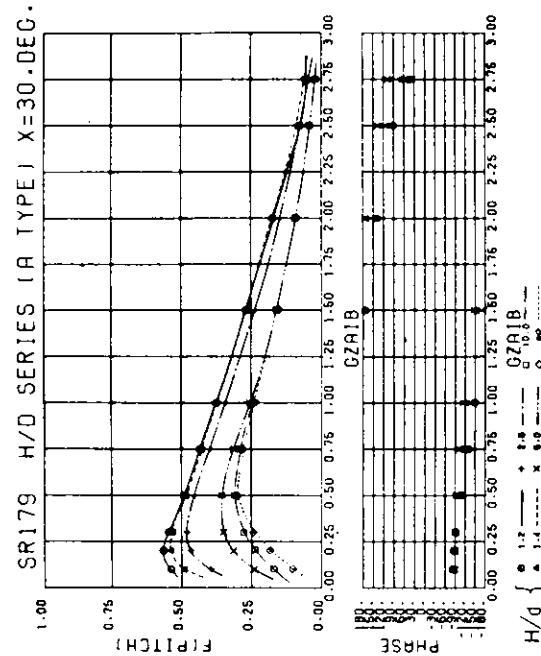


图 2.1.5.30

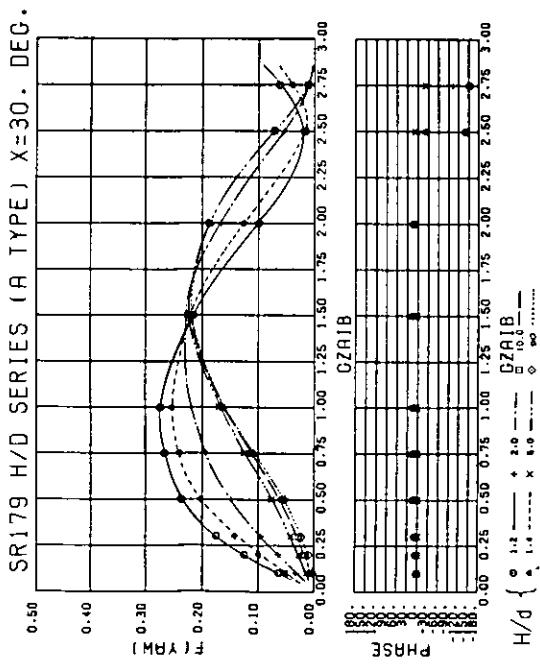


图 2.1.5.31

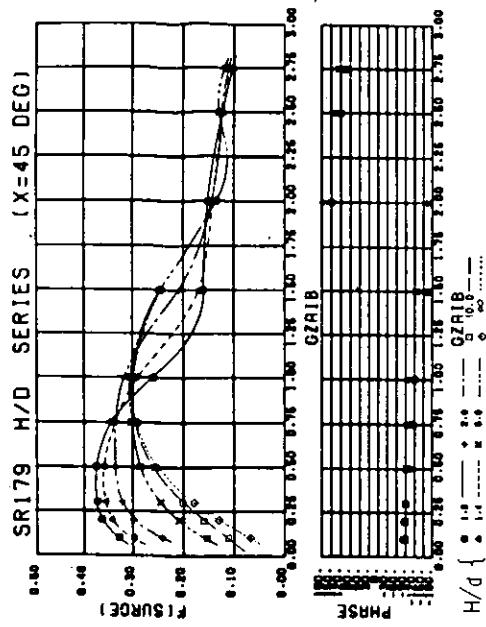


图 2.1.5.32

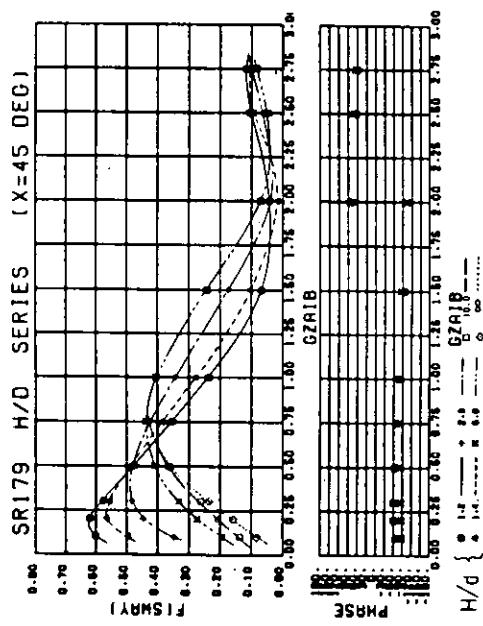


图 2.1.5.33

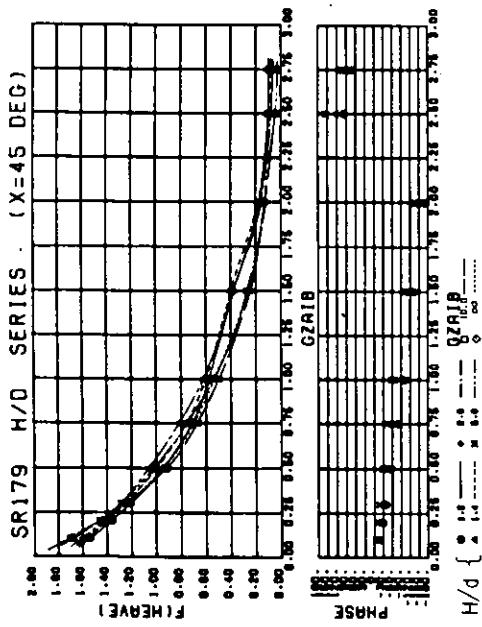


图 2.1.5.34

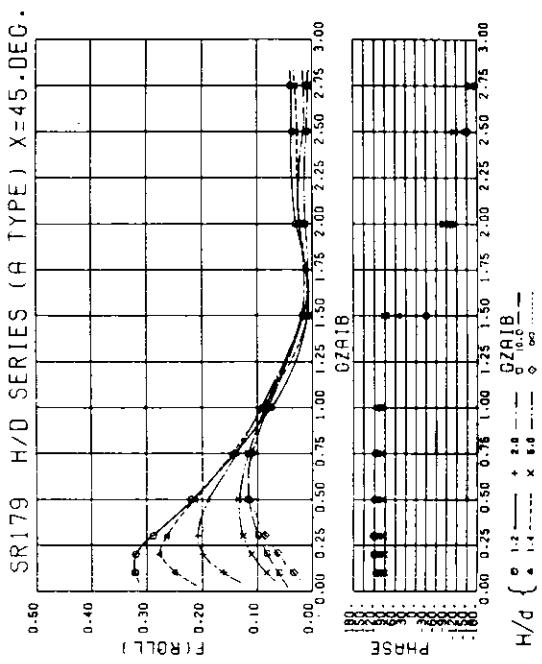


図 2.1.5.35

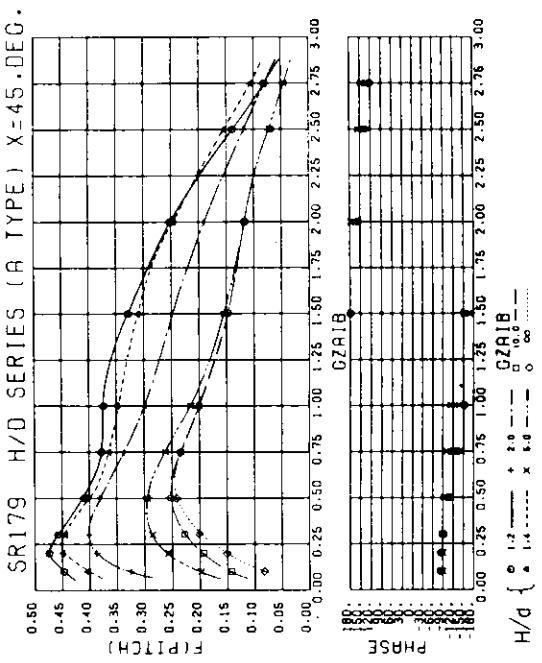


図 2.1.5.36

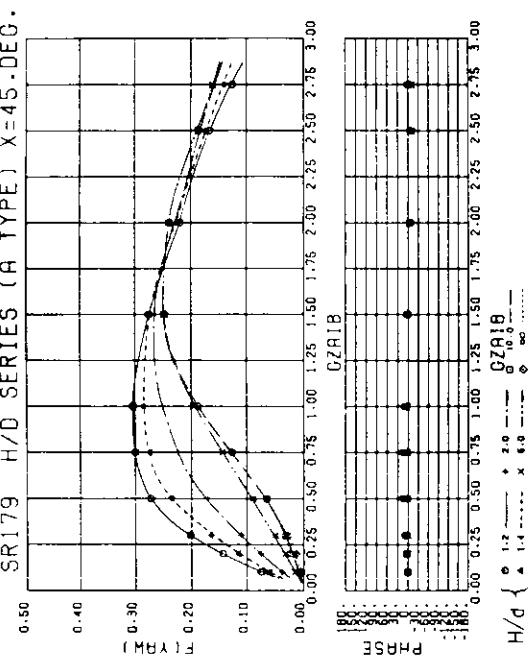


図 2.1.5.37

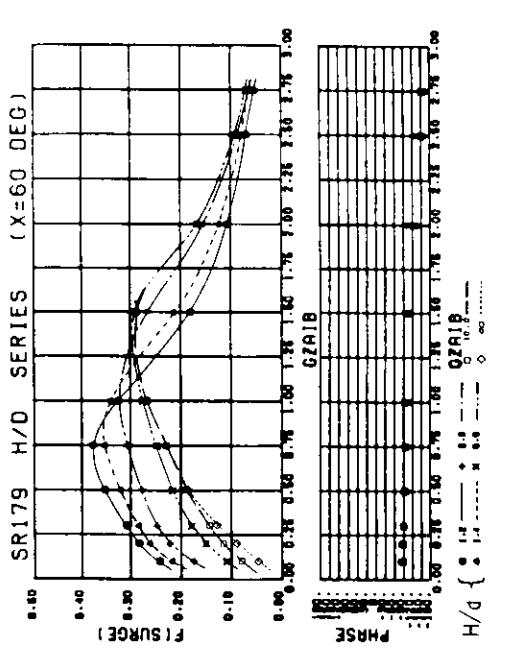


図 2.1.5.38

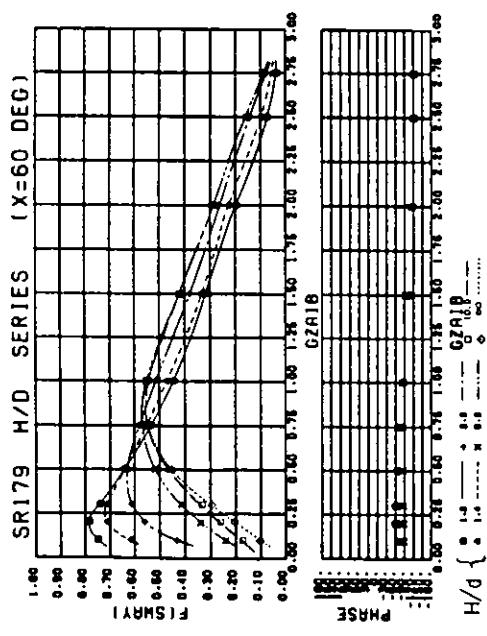


图 2.1.5.39

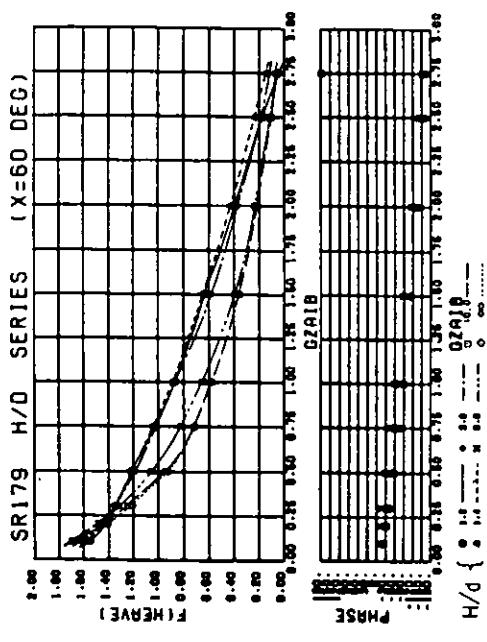


图 2.1.5.40

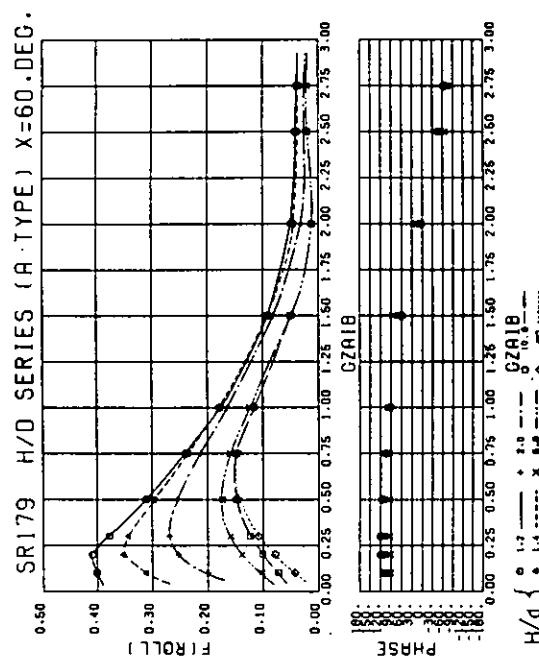


图 2.1.5.41

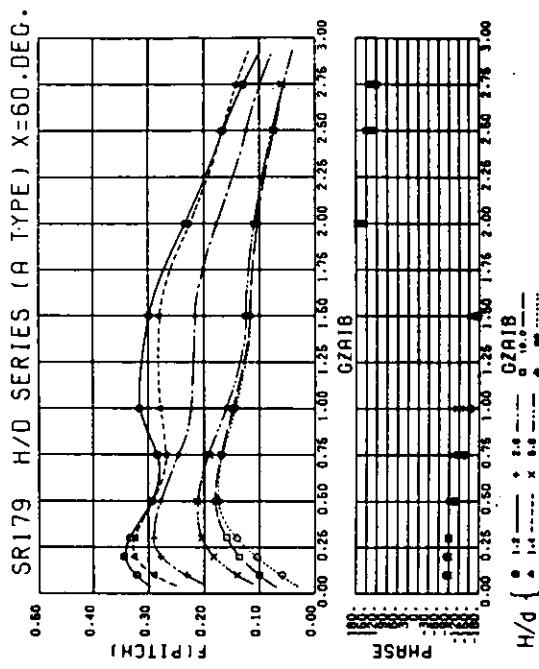


图 2.1.5.42

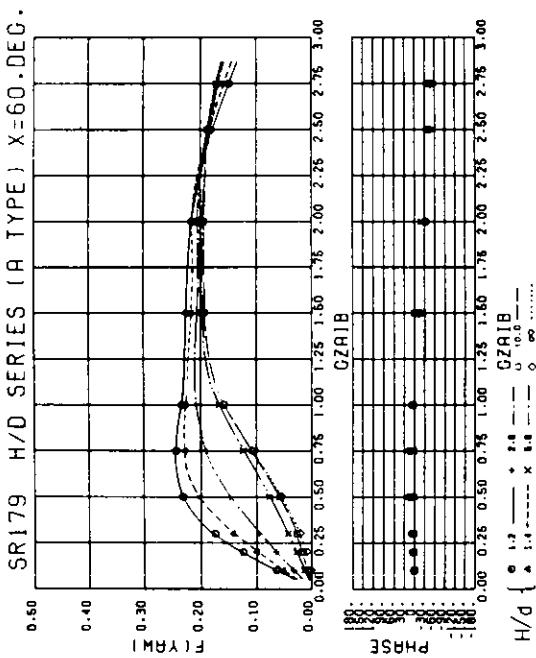


図 2.1.5.43

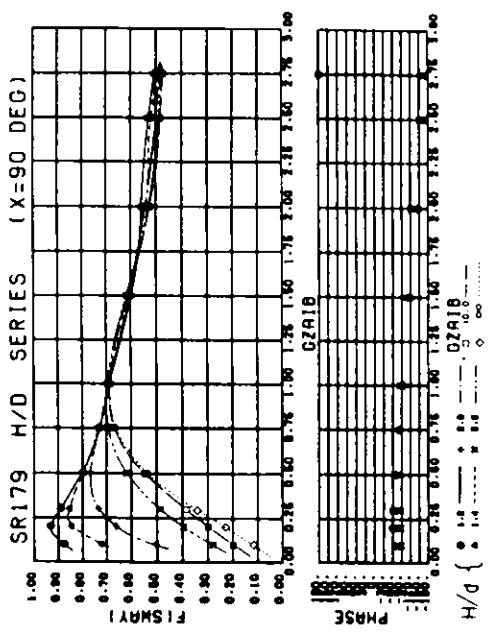


図 2.1.5.44

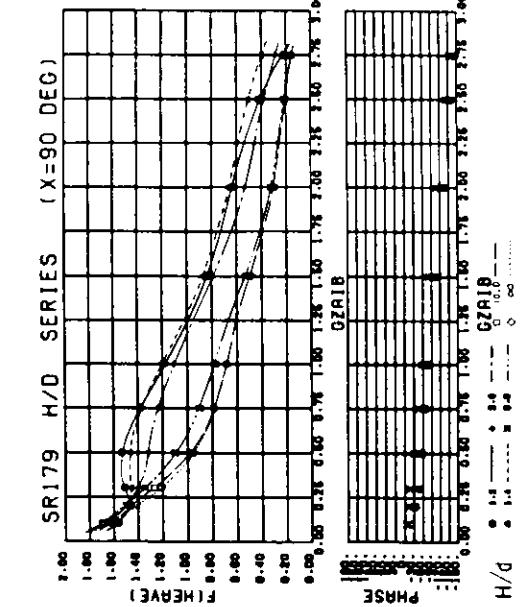


図 2.1.5.45

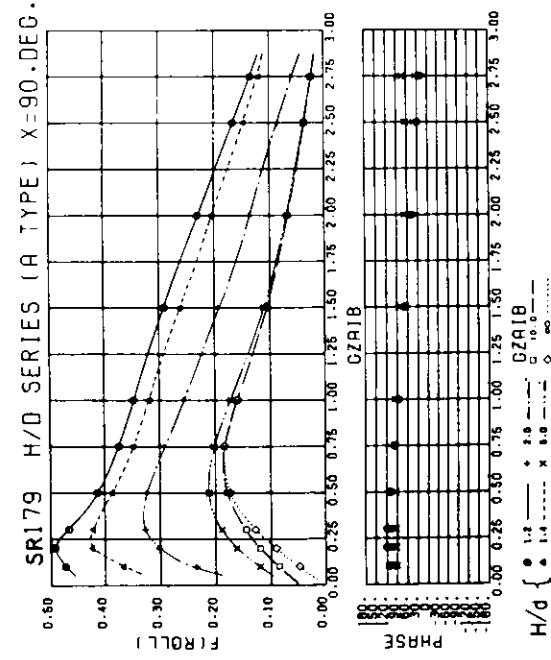


図 2.1.5.46

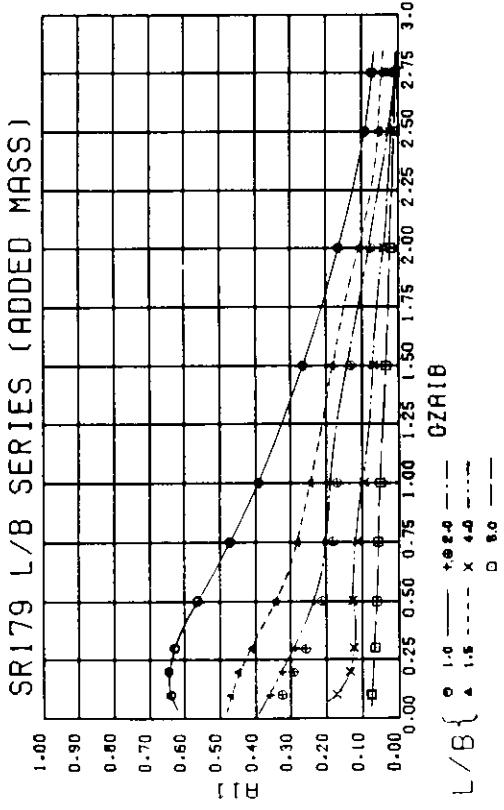


図 2.1.5.47

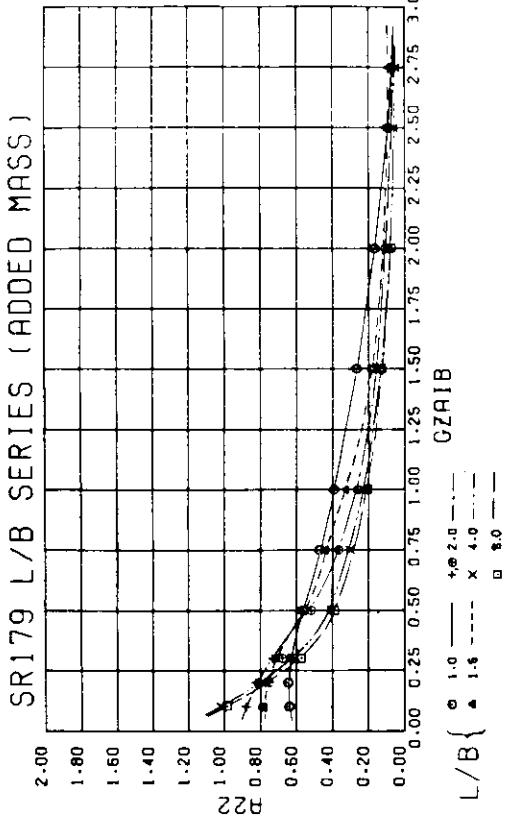


図 2.1.5.48

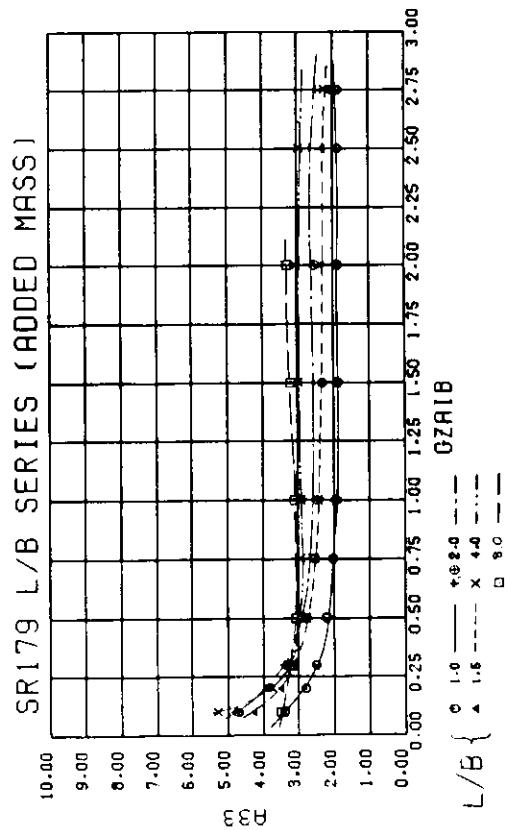


図 2.1.5.49

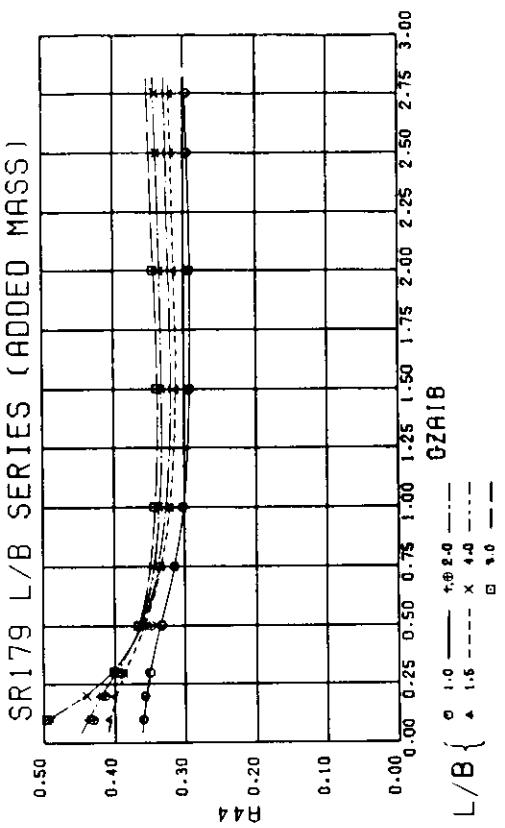


図 2.1.5.50

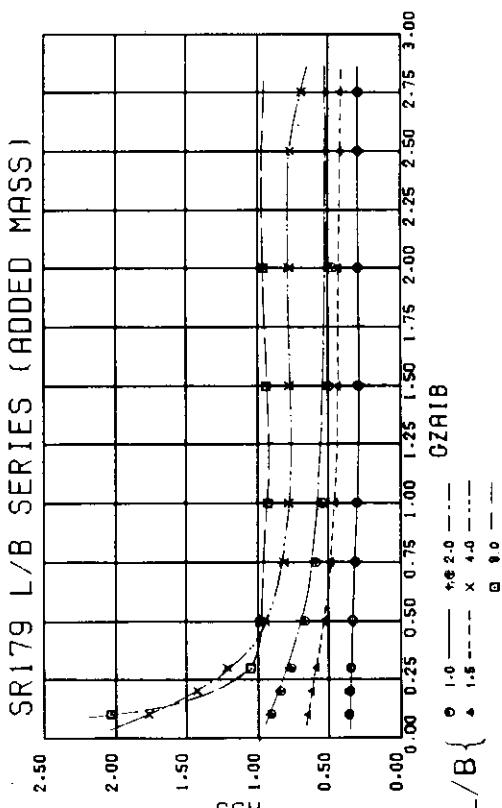


図 2.1.5.51

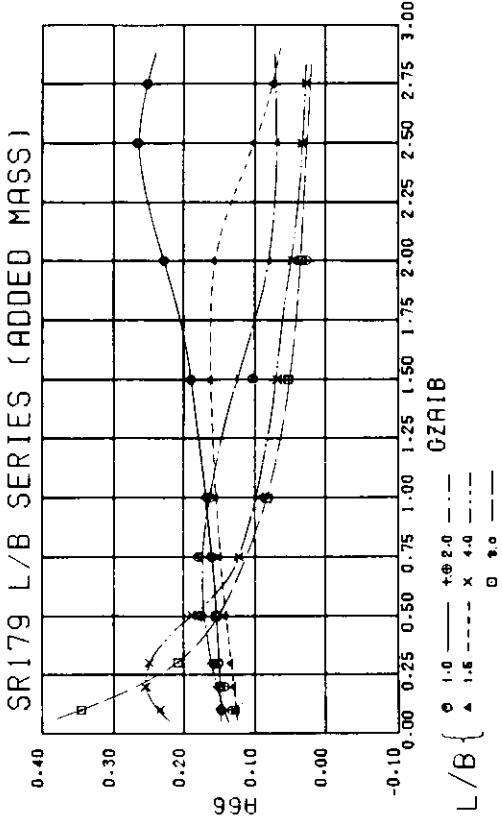


図 2.1.5.52

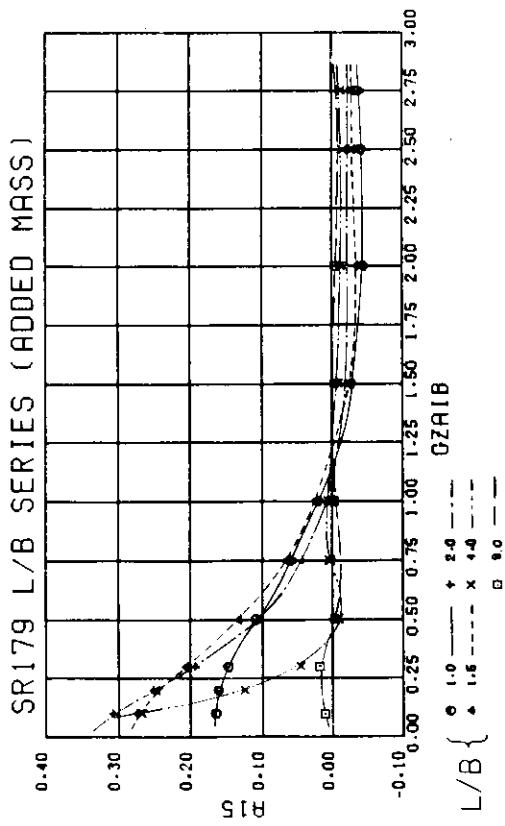


図 2.1.5.53

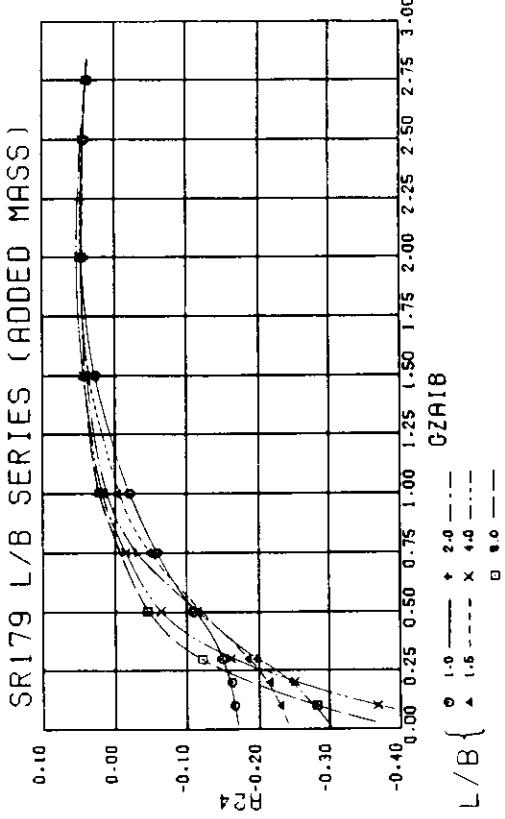


図 2.1.5.54

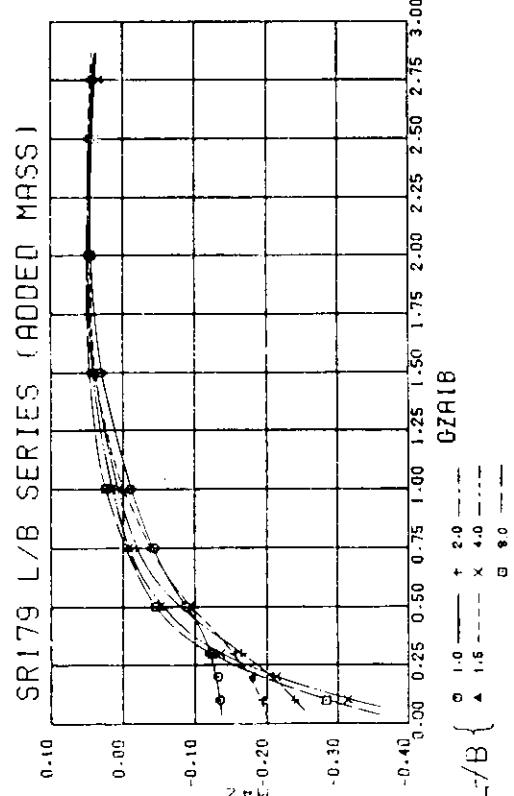


图 2.1.5.55

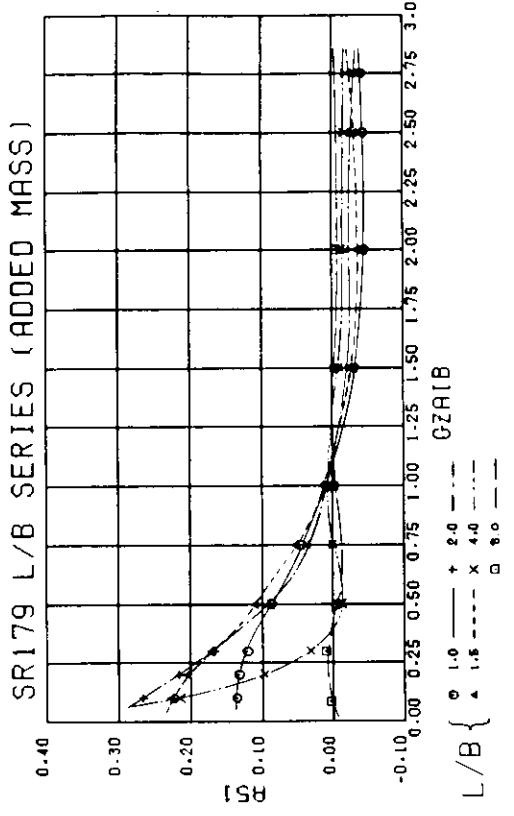


图 2.1.5.56

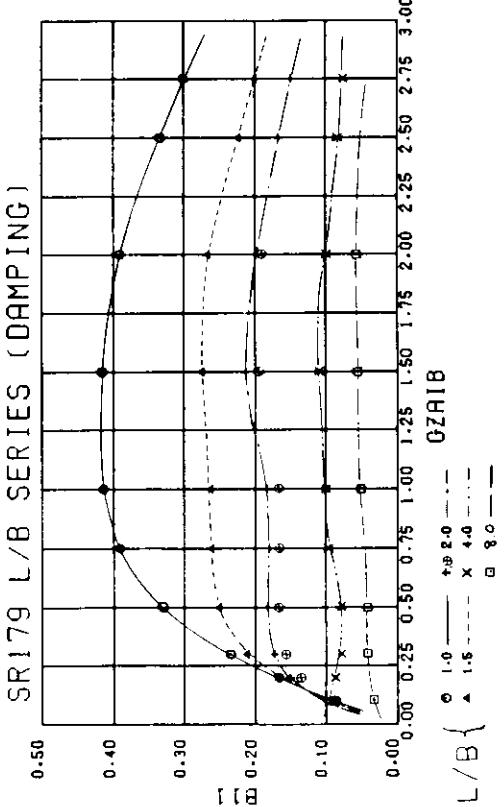


图 2.1.5.57

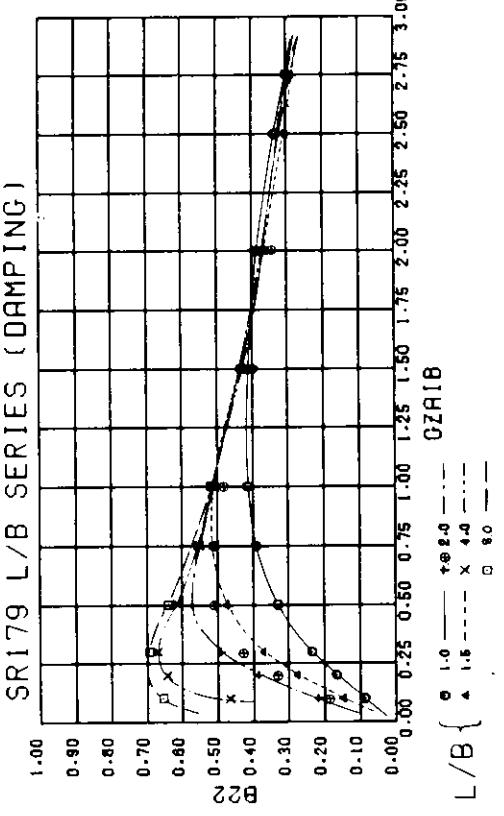


图 2.1.5.58

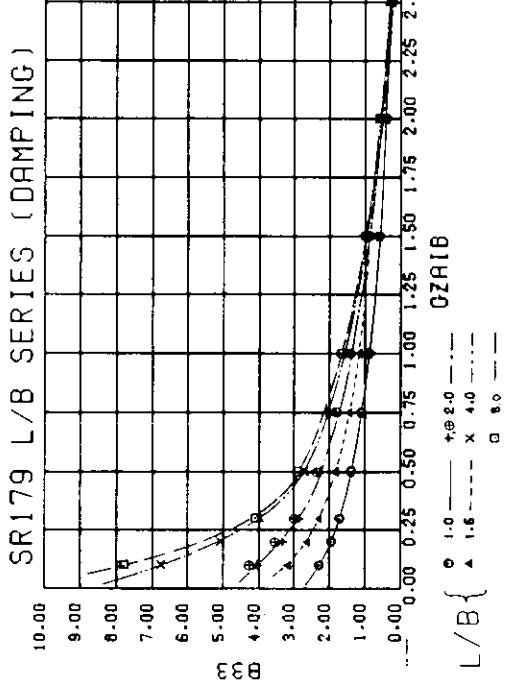


図 2.1.5.59

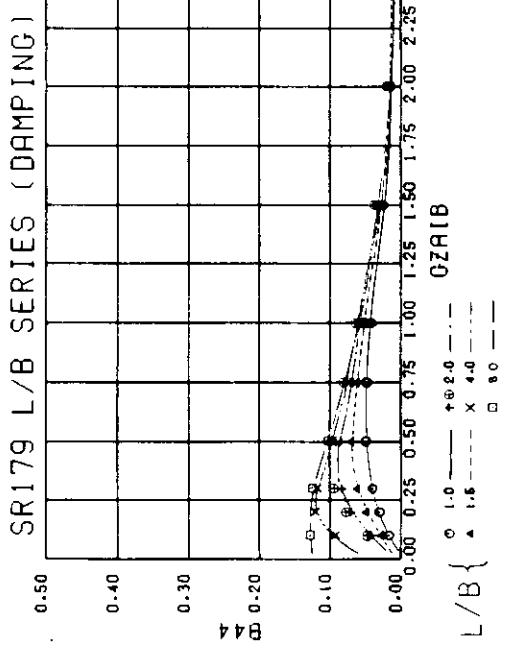


図 2.1.5.60

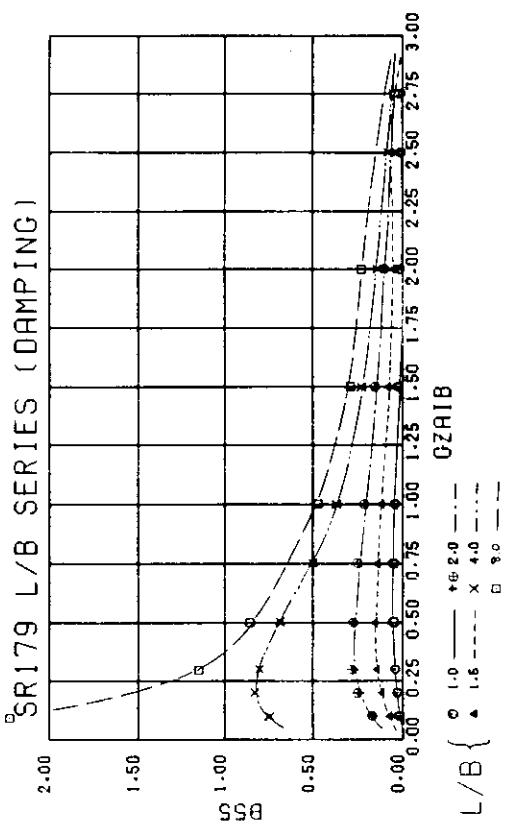


図 2.1.5.61

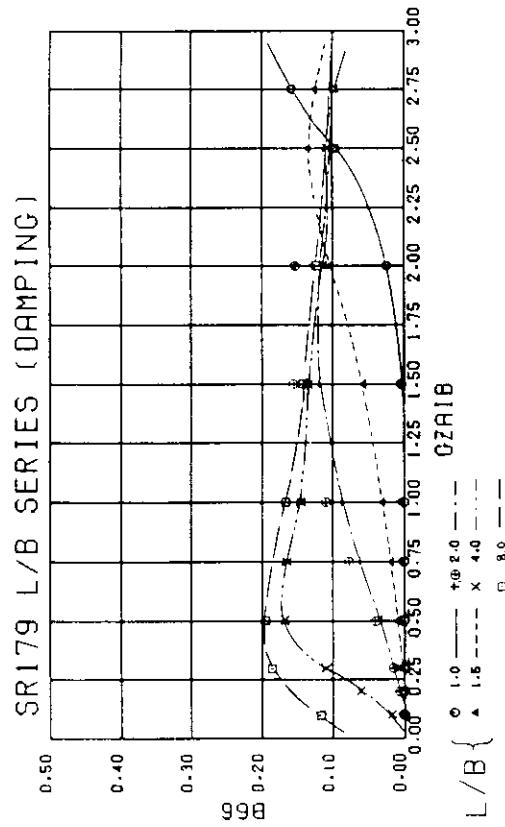


図 2.1.5.62

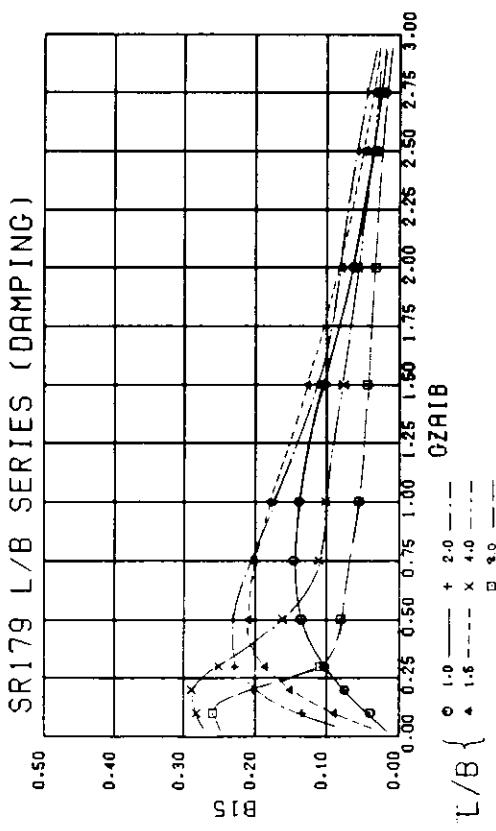


図 2.1.5.63

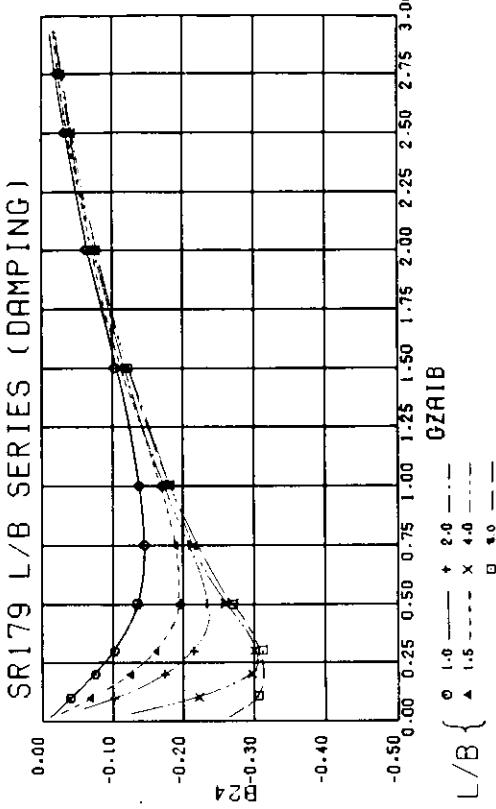


図 2.1.5.64

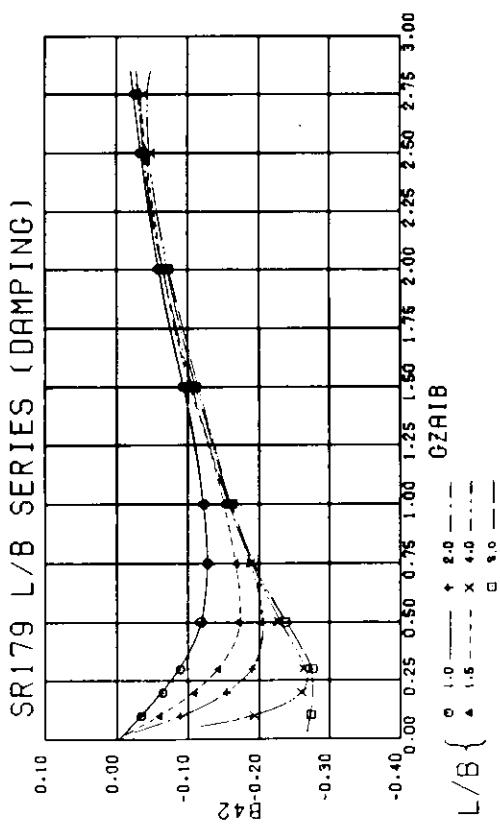


図 2.1.5.65

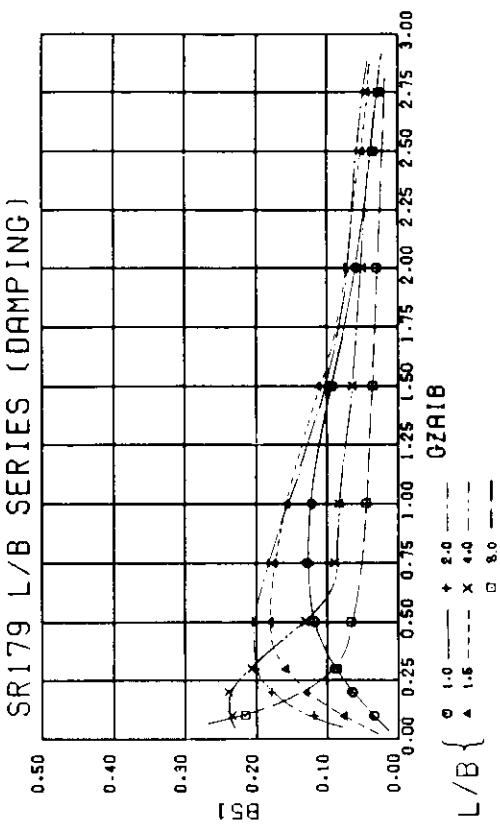


図 2.1.5.66

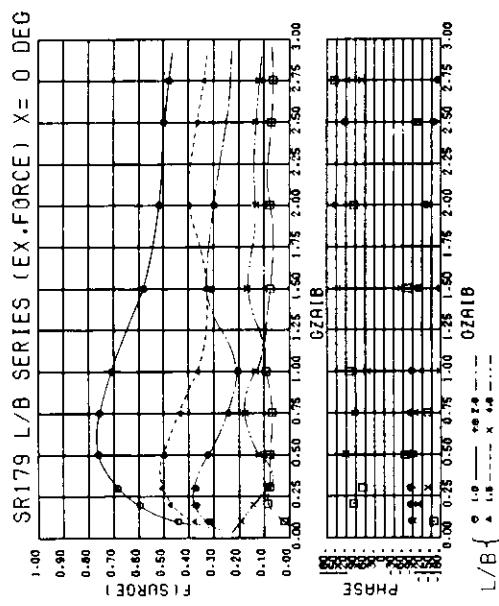


图 2.1.5.67

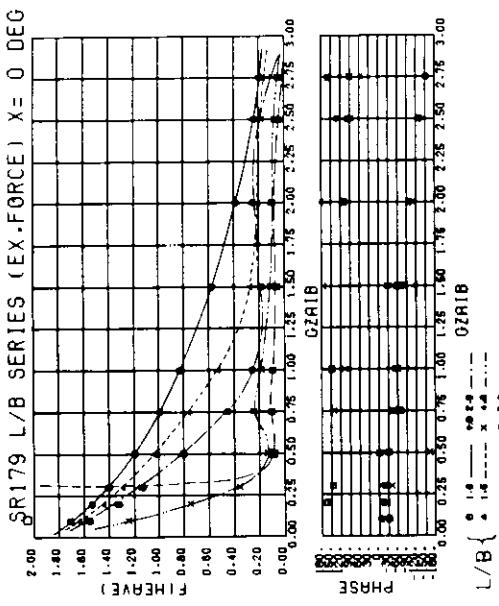
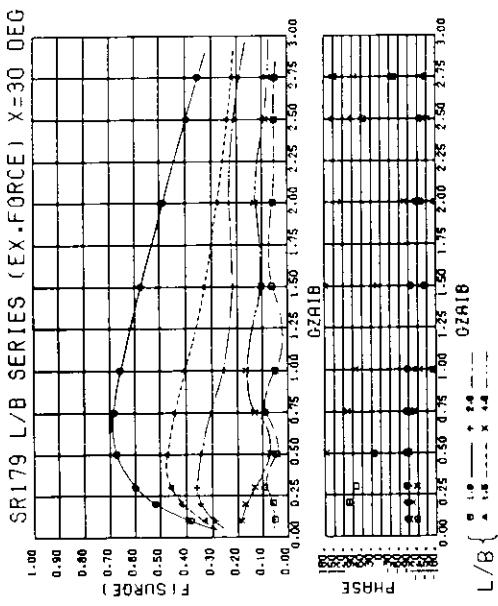
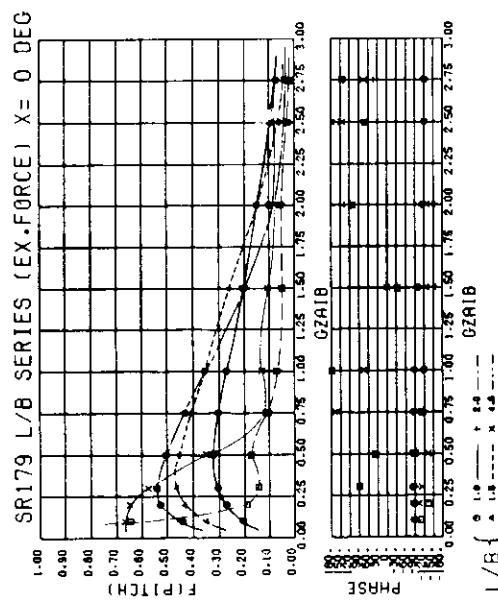


图 2.1.5.68



91570



四〇一六〇

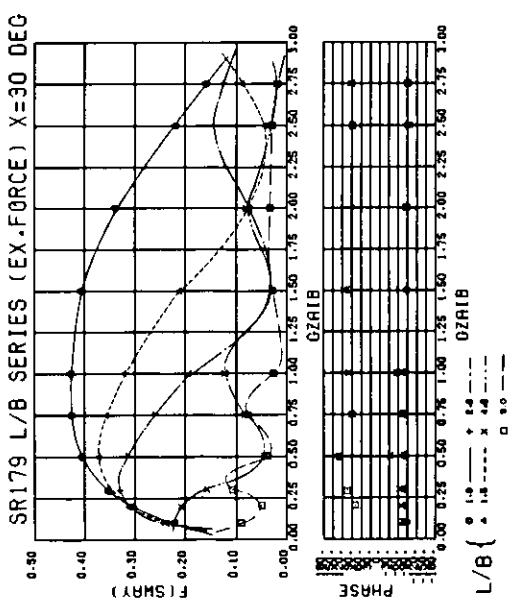


図 2.1.5.71

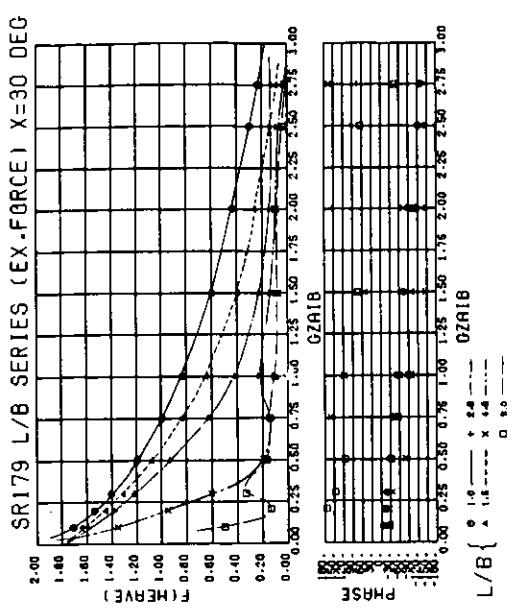


図 2.1.5.72

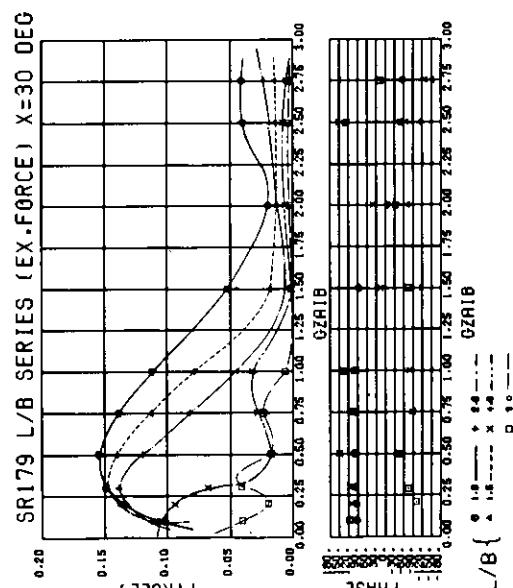


図 2.1.5.73

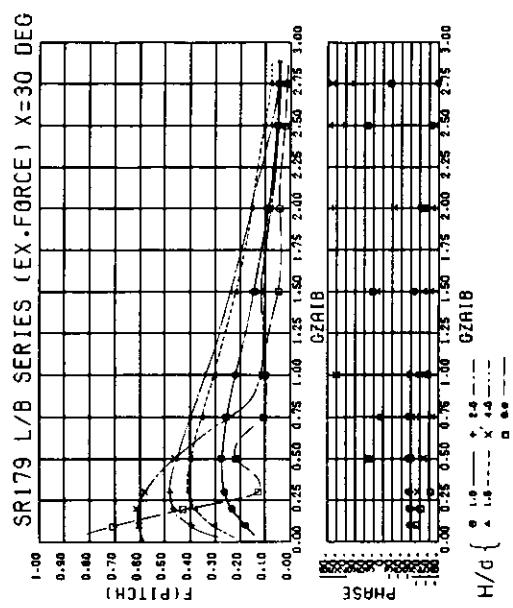


図 2.1.5.74

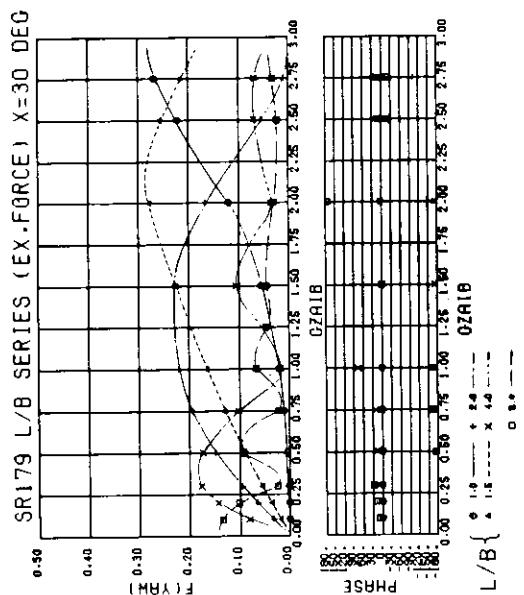


图 2.1.5.75

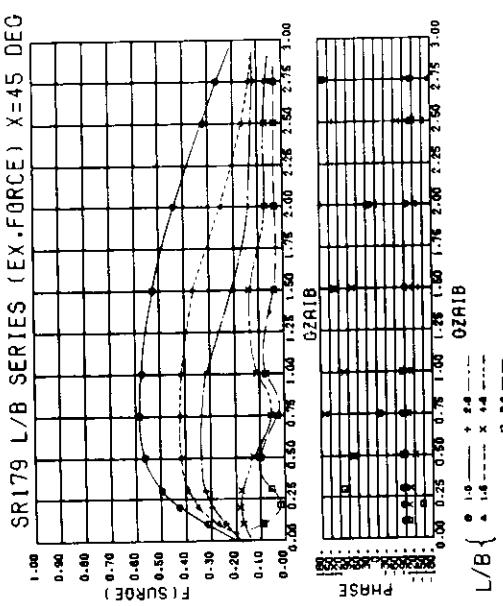


图 2.1.5.76

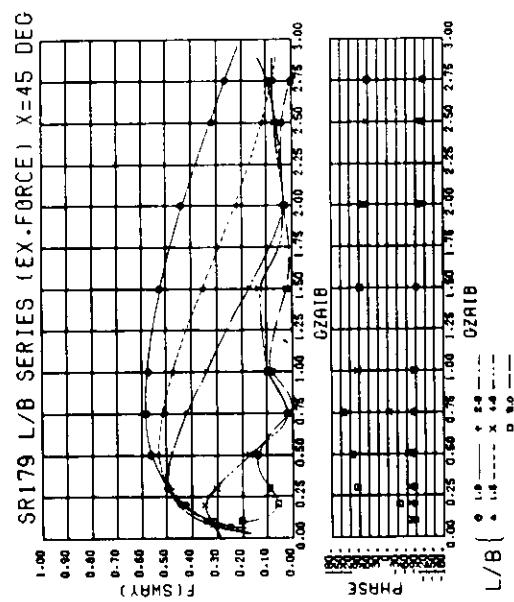


图 2.1.5.77

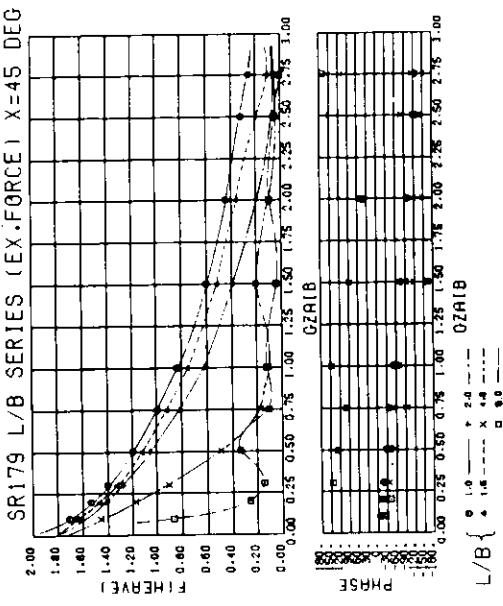


图 2.1.5.78

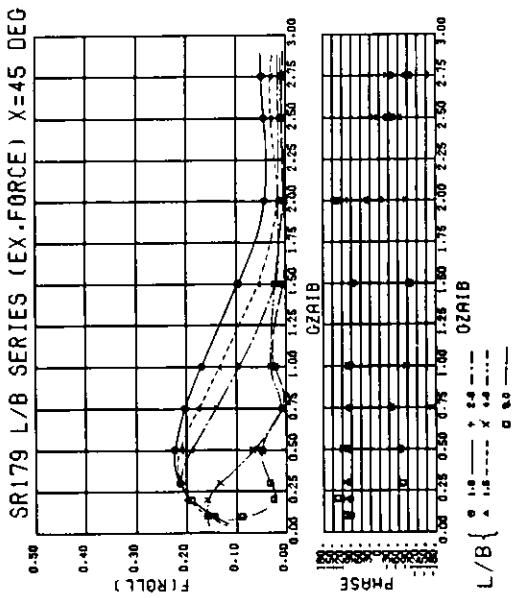


図 2.1.5.79

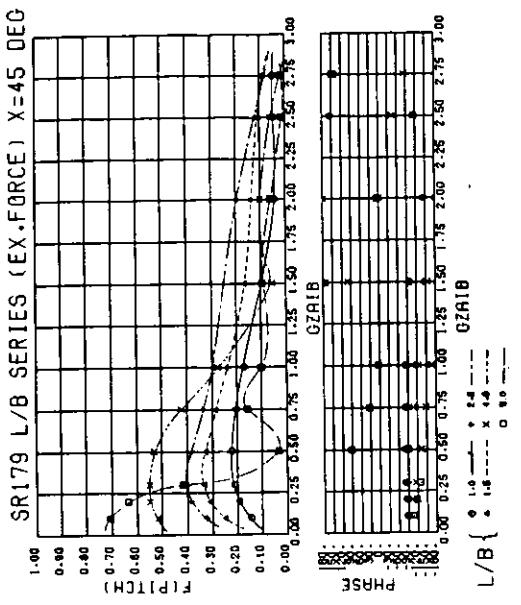
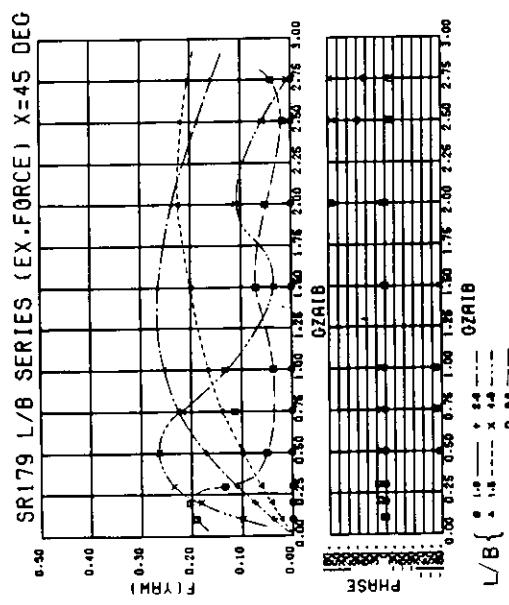


図 2.1.5.80



- 45 -

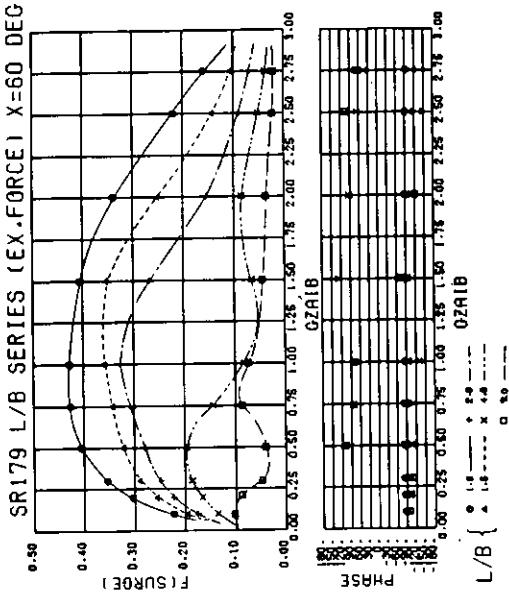


図 2.1.5.81

図 2.1.5.82

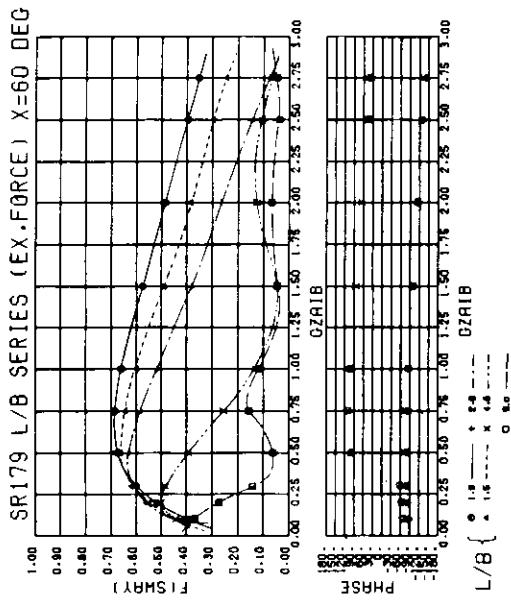


图 2.1.5.83

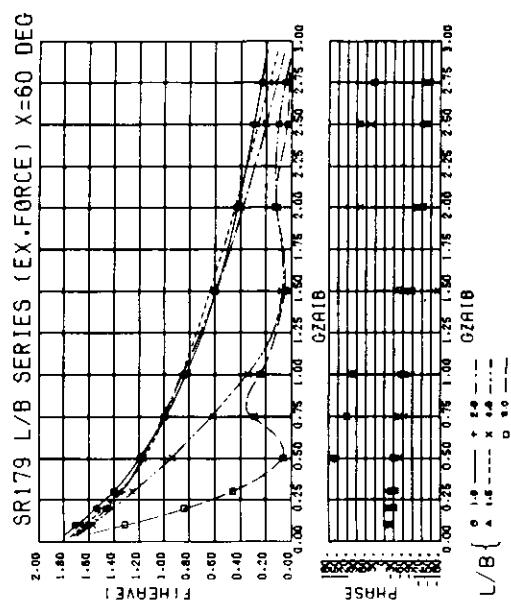


图 2.1.5.84

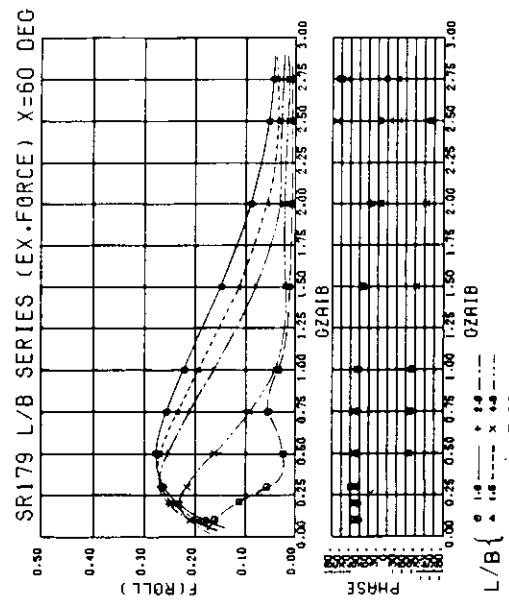


图 2.1.5.85

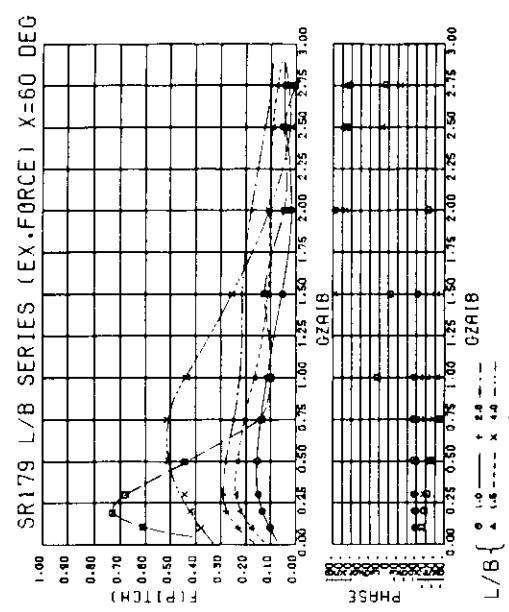


图 2.1.5.86

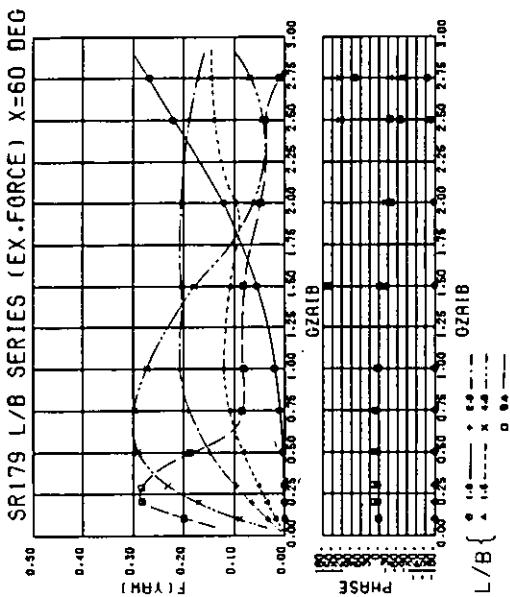


图 2.1.5.87

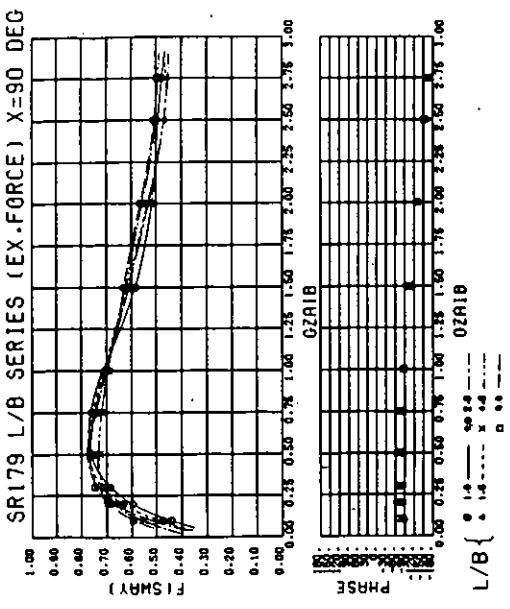


图 2.1.5.88

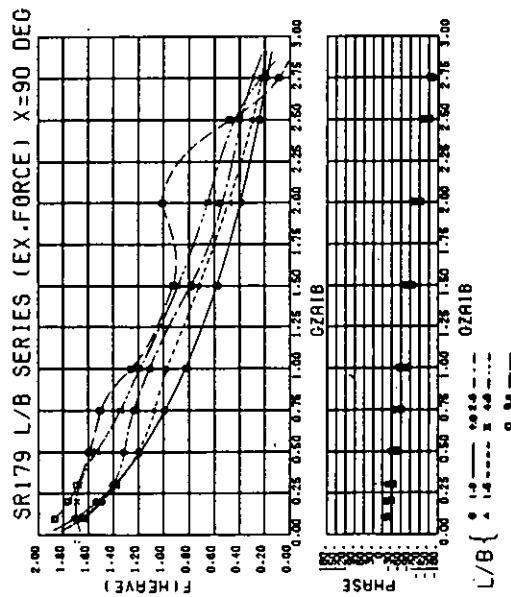


图 2.1.5.89

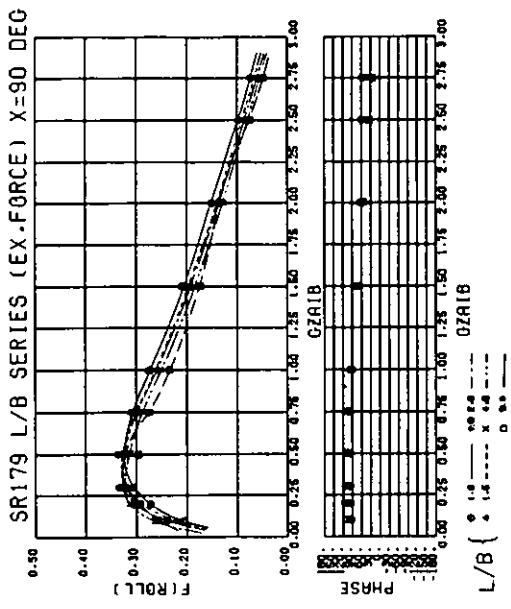


图 2.1.5.90

### 1.5.3 2次元と3次元計算の比較

前節に示した3次元特異点分布法によるシリーズ計算の結果と、1.3節に示した2次元領域分割法による流体力係数のテーブルに基づき、 $H/d = 2$ ,  $B/d = 5$ における両者の比較を行ない、 $L/B$ ベースに整理した。

それらの結果を図2.1.5.91以下に示す。

同図によれば、周波数にも依存するが、概して $L/B = 5$ 程度で3次元影響は可成り小さくなることが認められる。しかし、両者の計算法特有の誤差と思われる相違もあるために、これらの図は1.3節に示したテーブルを使用する際の目安としての使用が望まれる。

また、具体的な波浪中応答に及ぼす両計算法の相違に関しては、4.4節に示した。

なお、図中に用いている文字は下記の通りである。

$M$  : 3次元計算による付加質量係数

$N$  : " 減衰係数

$F$  : " 波浪外力

$m$  : 2次元計算による付加質量係数

$n$  : " 減衰係数

$f$  : " 波浪外力

$\xi_B$  :  $\frac{\omega^2}{g} \cdot \frac{B}{2}$

添字 H: Heave, S: Sway, R: Roll

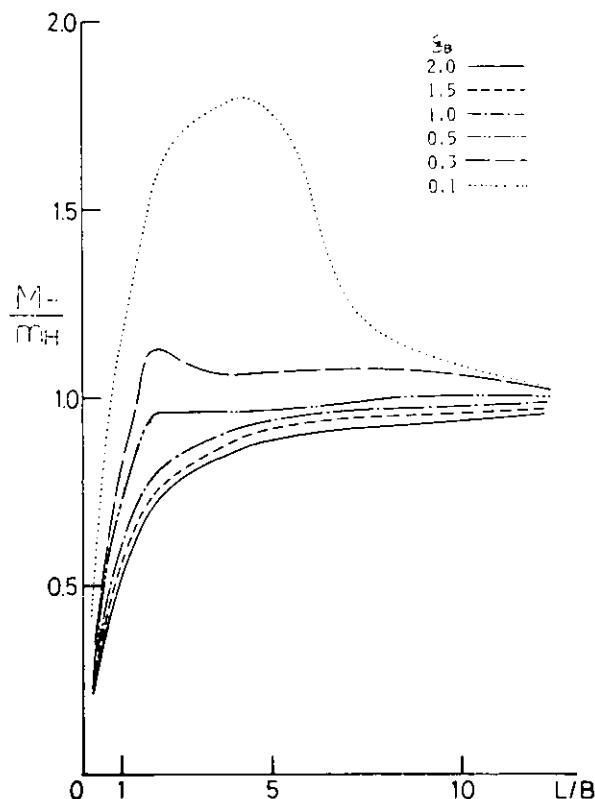


図2.1.5.91 Heave付加質量係数の比較

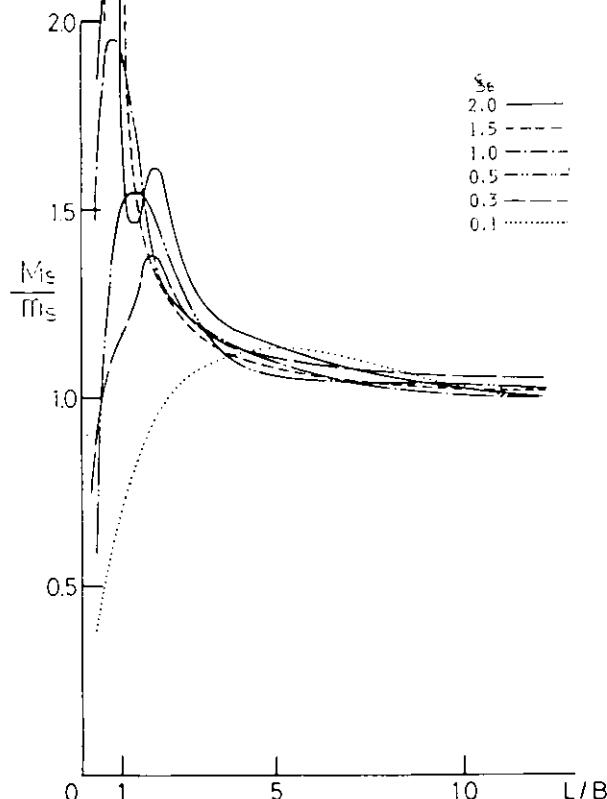


図2.1.5.92 Sway付加質量係数の比較

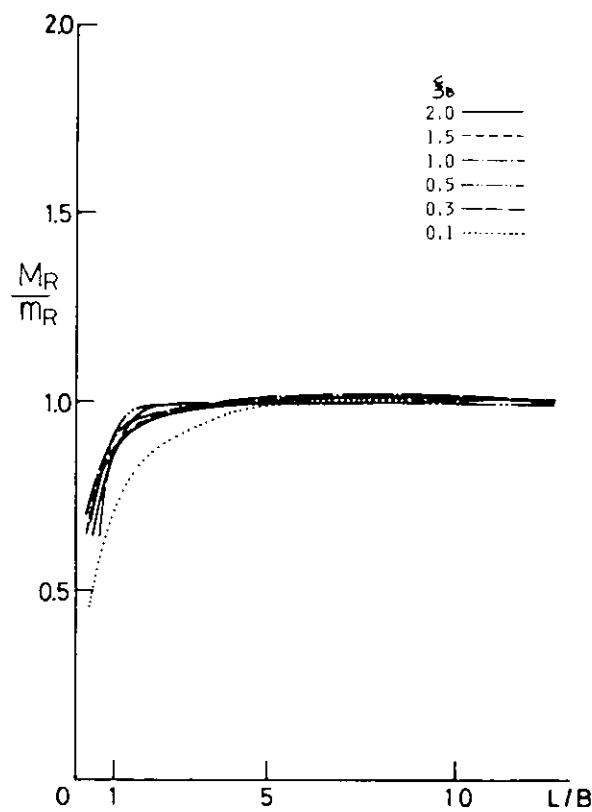


図 2.1.5.93 Roll付加質量係数の比較

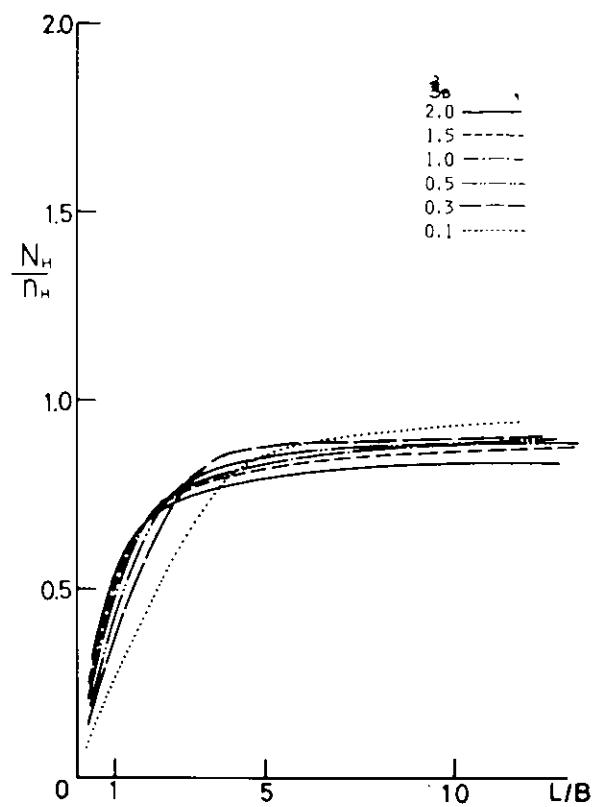


図 2.1.5.94 Heave減衰係数の比較

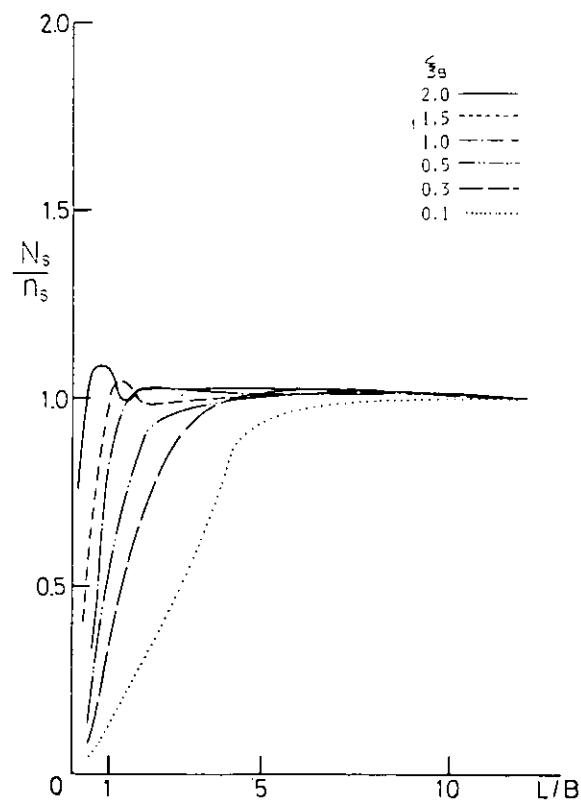


図 2.1.5.95 Sway減衰係数の比較

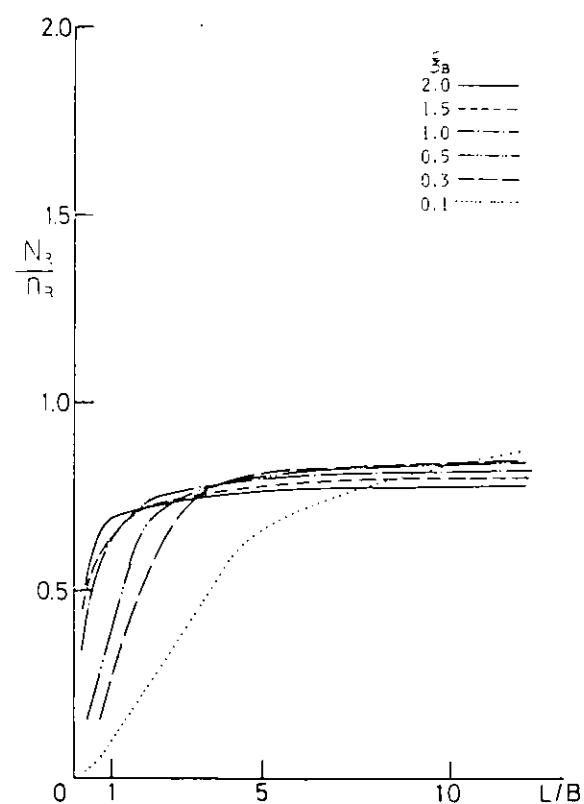


図 2.1.5.96 Roll減衰係数の比較

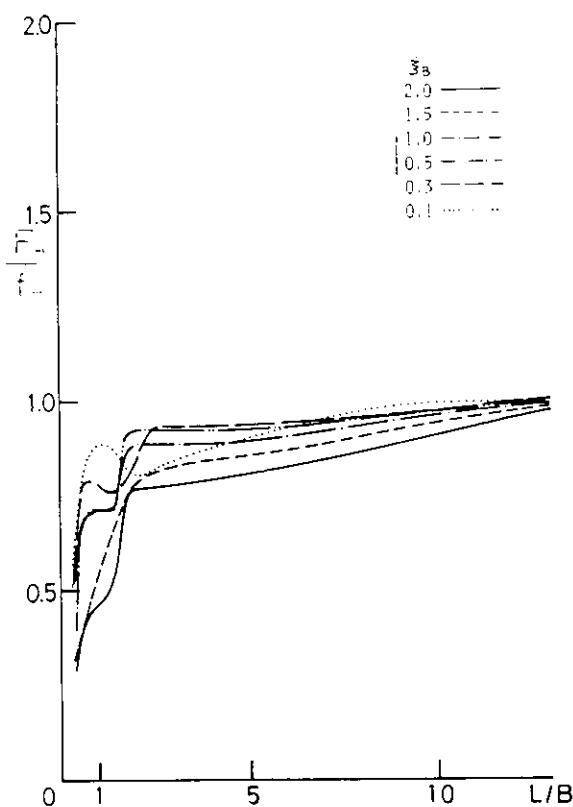


図 2.1.5.97 Heave 波浪外力の比較

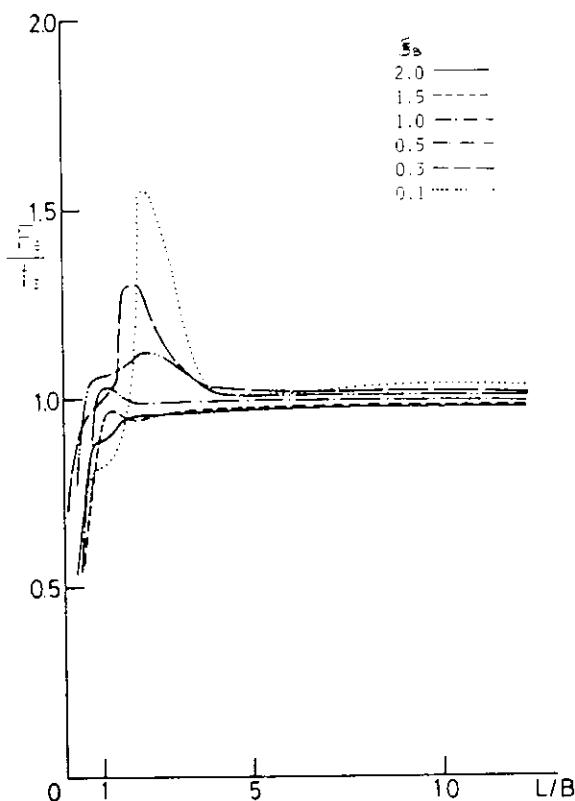


図 2.1.5.98 Sway 波浪外力の比較

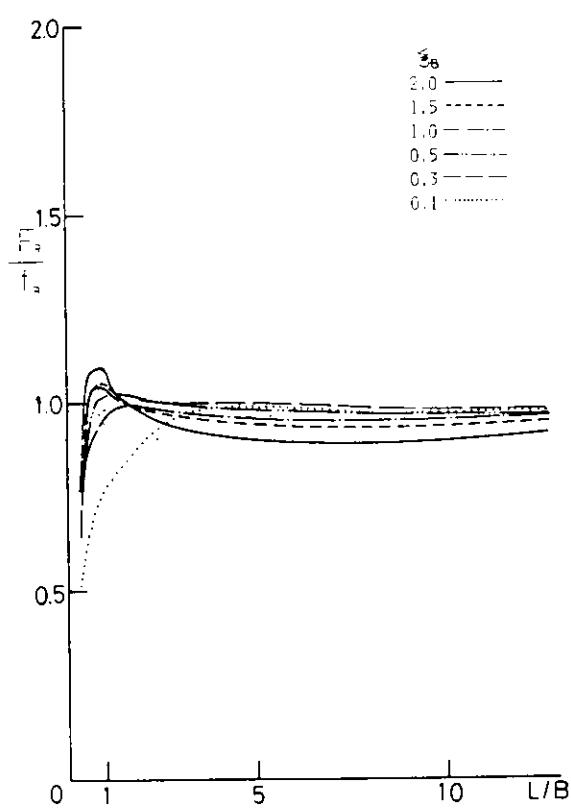


図 2.1.5.99 Roll 波浪外力の比較

## 2. 流れによる力

### 2.1 技術の現情調査

一様矩形断面形状を有する箱型海洋構造物が一様流中に置かれた場合に箱型海洋構造物に作用する3成分（抗力、揚力及びモーメント）に関しては、水深が深い場合または曳航している場合について若干の水槽模型試験例があるものの一様流れ中において水深・喫水比、長さ・幅比、幅・喫水及び流入角等を系統的に変化させた水槽模型試験はほとんど資料がないといつても過言ではないといえる。

なお、一般商船または被曳航バージについての資料は、風洞試験または曳航試験によって求めたものがほとんどである。

### 2.2 模型試験の実施範囲

一様流れ中における箱型海洋構造物に働く3分力を水槽模型試験にて求めた範囲は、これまで箱型海洋構造物の運動特性の研究において流体力に関する各種水槽模型試験を実施して来た範囲と一様流れ中の3分力特性とを充分考慮して次の様に設定した。

#### (1) 供試模型（木製の大型模型）

M 3 A ; 長さ 3.000 m, 幅 2.500 m, 高さ 0.750 m,  $L/B = 1.20$

M 3 B ; 長さ 3.872 m, 幅 1.936 m, 高さ 0.600 m,  $L/B = 2.00$

#### (2) 喫水

$B/d = 10.0$  を主体にし, 5, 15 及び 20

#### (3) 水深

$H/d = 1.0 \sim 36.0$

#### (4) 流速

$U_m = 0.20 \sim 0.70 \text{ m/sec}$

#### (5) 流入角

$\chi = 0.0^\circ \sim 90.0^\circ$

#### (6) 計測項目

供試模型の前方約 3.0 m 付近における流速の分布を超音波流速計と翼車型流速計にて計測し、大型箱型海洋構造物に働く抗力、揚力及び模型中心廻りのモーメントを3分力計にて計測した。

### 2.3 流れによる3分力の数値表

一様流れ中において箱型海洋構造物に働く3分力（X方向成分力、Y方向成分力及び船体中心廻りのモーメント）を各状態について流速変化に対して水槽模型試験にて計測した。そして、X方向成分力及びY方向成分力ともに流速の自乗に大略比例するものと仮定して最小2乗法にてX方向成分力及びY方向成分力の係数を求めた。各成分力の無次元化は次の通りである。

$$X\text{方向成分力係数} (C_x) = F_x / \left( \frac{1}{2} \rho B \cdot d \cdot U_m^2 \right)$$

$$Y\text{方向成分力係数} (C_y) = F_y / \left( \frac{1}{2} \rho L \cdot d \cdot U_m^2 \right)$$

$$\text{モーメントレバー} (\ell/L) = M_z / [L \cdot \sqrt{F_x^2 + F_y^2}]$$

ここで,  $F_x$  : X方向成分力（長さ方向）

$F_Y$	: $Y$ 方向成分力 (幅方向)
$M_z$	: 船体中心における $Z$ 軸廻りのモーメント
$\ell$	: モーメントレバー
$\rho$	: 液体の密度
$L$	: 3 次元箱型海洋構造物の長さ
$B$	: 3 次元箱型海洋構造物の幅
$d$	: 3 次元箱型海洋構造物の喫水
$U_m$	: 一様流の流速

である。

$X$  方向成分力係数の数値表を表 2.2.3.1 ~ 表 2.2.3.3 に示す。表 2.2.3.1 は、長さ・幅比が 1.20 の  $B/d$  及び  $H/d$  の変化と流入角の変化に対する  $X$  方向成分力係数であり、表 2.2.3.2 は、長さ・幅比が 2.00 の  $B/d$  及び  $H/d$  の変化と流入角の変化に対する  $X$  方向成分力係数であり、表 2.2.3.3 は、長さ・幅比が 2.00 で流入角が  $0^\circ$  の場合についての  $B/d$  及び  $H/d$  の変化に対する  $X$  方向成分力係数である。

$Y$  方向成分力係数の数値表を表 2.2.3.4 ~ 表 2.2.3.6 に示す。これらの数値表は、 $X$  方向成分力係数と同様な状態に対する  $Y$  方向成分力係数を示している。

モーメントレバー ( $\ell/L$ ) は、数値表で示す程信頼性がないために図表または算出式にて示す。長さ・幅比が 2.00 の場合には、大略流入角 ( $\chi$ ) に対して  $0.09 \sin 2\chi^{1.2}$  で求められ、長さ・幅比が 1.2 の場合には、大略図 2.2.3.1 の傾向を示す。

## 2.4 今後に残された諸点

今回実施した水槽模型試験は、水槽底面が平坦なコンクリート製であり、かつ、模型を計測台車に拘束した状態で箱型海洋構造物に働く 3 分力を計測した。

したがって、実際の海面に箱型海洋構造物が設置されている状態に対しては、次の諸点が相違している。

- (1) 箱型海洋構造物は何んらかの方法で係留されており、トリム変化及び沈下等に対して拘束されていない。
- (2) 箱型海洋構造物は、外力に対して 6 自由度の運動が許されている。特に船首搖れが流れによる力に影響を及ぼすものと思われる。
- (3) 箱型海洋構造物が設置される海域の海底地形は平坦でなく傾斜や凹凸があり、また、海底が軟弱地盤になっているために流れは鉛直方向及び水平方向に一様であるとはいえない。
- (4) 実機への縮尺影響及びレイノルズ影響等に関しては水槽模型試験から解明することができない。

それ故に、今後機会があれば以上の諸点を多少なりとも考慮されて流れによる力の推定精度の向上を計る必要があろう。

表 2.2.3.1 X 方向成分力係数  
 $L/B = 1.20$

B/d	H/d	DIRECTION OF CURRENT						
		0°	15°	30°	45°	60°	75°	90°
10.0	1.05	1.54	1.86	2.02	1.78	0.98	0.28	0.00
	1.11	1.30	1.53	1.54	1.22	0.67	0.26	0.00
	1.19	0.94	1.06	0.98	0.77	0.39	0.18	0.00
	1.30	0.91	0.98	0.99	0.87	0.58	0.32	0.00
	1.40	0.95	1.01	0.97	0.84	0.61	0.32	0.00
	14.00	0.93	1.02	0.96	0.79	0.55	0.28	0.00
15.0	21.00	0.98	0.94	0.86	0.70	0.48	0.22	0.00

表 2.2.3.2 X 方向成分力係数  
 $L/B = 2.00$

B/d	H/d	DIRECTION OF CURRENT						
		0°	15°	30°	45°	60°	75°	90°
5.0	1.20	1.42	1.47	1.67	1.65	1.18	0.45	0.00
	1.60	1.25	1.30	1.40	1.35	0.80	0.33	0.00
	9.00	0.92	0.91	0.91	0.77	0.57	0.29	0.00
10.0	1.20	1.76	2.00	2.43	2.33	1.55	0.55	0.00
	1.60	1.36	1.41	1.59	1.63	1.12	0.43	0.00
	18.00	0.93	0.91	0.89	0.75	0.55	0.28	0.00
15.0	1.20	1.37	1.40	1.50	1.47	1.02	0.40	0.00
	1.60	1.81	1.88	2.11	2.17	1.57	0.60	0.00
	27.00	0.94	0.92	0.87	0.72	0.51	0.26	0.00
20.0	1.20	1.13	1.15	1.20	1.12	0.76	0.31	0.00
	1.60	1.39	1.44	1.63	1.65	1.17	0.47	0.00
	36.00	0.95	0.92	0.85	0.69	0.49	0.25	0.00

表 2.2.3.3 X 方向成分力係数  
 DIRECTION OF CURRENT ; 0° (L/B=2.00)

WATER DEPTH DRAFT	H / d								
	1.20	1.40	1.56	1.60	2.00	2.33	3.00	9.0~36.0	
D / B	5.0	1.42	1.30	—	1.25	1.22	—	1.18	0.92
	10.0	1.76	1.51	—	1.36	1.27	—	1.19	0.93
	10.8	1.85	—	—	—	—	—	—	—
	13.7	—	1.85	—	—	—	—	—	—
	15.0	1.37	1.60	1.85	1.81	1.38	—	1.20	0.94
	15.5	—	—	—	1.85	—	—	—	—
	19.0	—	—	—	—	1.83	—	—	—
	20.0	1.13	1.25	—	1.39	1.63	1.82	1.45	0.95

表 2.2.3.4 Y 方向成分力係数  
 $L/B = 1.20$

B/d	H/d	DIRECTION OF CURRENT						
		0°	15°	30°	45°	60°	75°	90°
10.0	1.05	0.0	1.31	2.21	2.67	2.81	2.55	1.90
	1.11	0.0	0.93	1.63	1.88	1.81	1.61	1.67
	1.19	0.0	0.58	1.03	1.32	1.36	1.21	0.95
	1.30	0.0	0.53	1.00	1.21	1.25	1.08	0.90
	1.40	0.0	0.47	0.85	1.25	1.22	0.91	0.81
	14.00	0.0	0.21	0.48	0.71	0.85	0.91	0.92
15.0	21.00	0.0	0.16	0.39	0.59	0.74	0.81	0.81

表 2.2.3.5 Y 方向成分力係数  
 $L/B = 2.00$

B/d	H/d	DIRECTION OF CURRENT						
		0°	15°	30°	45°	60°	75°	90°
5.0	1.2	0.0	0.18	0.83	1.33	1.49	1.50	1.47
	1.6	0.0	0.28	0.69	0.97	1.13	1.21	1.24
	9.0	0.0	0.15	0.40	0.60	0.75	0.83	0.88
10.0	1.2	0.0	0.24	1.12	2.02	2.18	2.22	2.22
	1.6	0.0	0.31	0.80	1.19	1.40	1.50	1.57
	18.0	0.0	0.13	0.25	0.55	0.69	0.76	0.80
15.0	1.2	0.0	0.21	1.01	1.73	1.94	1.97	1.97
	1.6	0.0	0.32	1.20	1.80	2.08	2.22	2.31
	27.0	0.0	0.12	0.31	0.50	0.64	0.72	0.77
20.0	1.2	0.0	0.19	0.89	1.46	1.62	1.62	1.59
	1.6	0.0	0.34	0.89	1.30	1.52	1.64	1.70
	36.0	0.0	0.11	0.28	0.46	0.60	0.68	0.74

表 2.2.3.6 Y 方向成分力係数  
 DIRECTION OF CURRENT : 90° (  $L/B = 2.00$  )

WATER DEPTH	H / d							
	1.20	1.40	1.58	1.60	2.00	2.45	3.00	9.0 ~ 36.0
DRAFT	5.0	1.47	1.33	—	1.24	1.16	—	1.09 0.88
	10.0	2.22	1.83	—	1.57	1.35	—	1.21 0.80
	11.5	2.42	—	—	—	—	—	—
	12.8	—	2.37	—	—	—	—	—
	14.9	—	—	2.31	—	—	—	—
	15.0	1.97	2.09	—	2.31	1.79	—	1.35 0.77
	17.5	—	—	—	—	2.18	—	—
	20.0	1.59	1.65	—	1.70	1.81	2.09	1.44 0.74

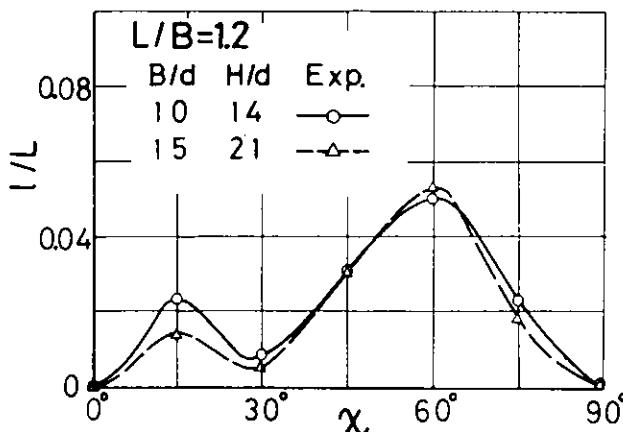


図 2.2.3.1 モーメントトレーバー

### 3. 旋回時の流体力微係数

#### 3.1 技術の現情調査

ここで、旋回時の流体力微係数を取り扱う必要性が生じた理由は、浅海域に箱型海洋構造物が一点係留方式で係留されている状態に外乱が働くと箱型海洋構造物は振れ廻り運動を起す可能性があるので、箱型海洋構造物の振れ廻り運動の特性及びその時の係留力特性を把握しておく必要があるためである。

箱型海洋構造物の振れ廻り運動は、一般船舶の操縦運動と同様な取り扱いを行うことによりある程度振れ廻り運動が解明されるものと考えられる。

そこで、一般船舶の操縦性の運動方程式を用いて船の安定・不安定なわち箱型海洋構造物の振れ廻り運動が起るか、起らないかの判定を行うために必要な資料は、箱型海洋構造物の旋回時における流体力微係数である。

しかしながら、振れ廻り運動に関する資料は、一般商船や多目的作業船等の一点係留に関するものが多く、旋回中の流体力微係数となると一般商船または被曳航バージに関するものだけである。したがって、箱型海洋構造物のように一様矩形断面を有する浮体に関しては安藤らの拘束旋回時における流体力微係数があるだけで、この資料も長さ・幅比を変化させているものの幅・喫水比や浅水影響に関しては調査していない。

それ故に、箱型海洋構造物に関する旋回時の流体力微係数は、ほとんど資料がないといつても過言ではないといえる。

#### 3.2 模型試験の実施範囲

旋回時の流体力微係数を水槽模型試験にて求めた範囲は、これまでに箱型海洋構造物の運動特性の研究において流体力に関する各種水槽試験を実施して来た範囲を充分考慮して次の様に設定した。

また、水槽模型試験法としては、これまで一般船舶の旋回時の流体力微係数を求める手法が各種確立しているが、今回は施設、計測精度及び実験期間等を考慮し、旋回腕水槽及び角型水槽を用いて旋回及び斜航試験にて流体力微係数を求めた。

##### (1) 供試模型（アルミニウム製）

長さ 1.500 m, 幅 0.750 m, 高さ 0.500 m,  $L/B = 2.00$

##### (2) 喫水

$B/d = 10.0, 20.0$

(3) 水深

$$H/d = 1.20, 1.50, 3.00, 8.00$$

(4) 偏角

$$\beta = 0^\circ \sim 60^\circ \text{ または } 90^\circ$$

(5) 傾航速度

$$V_m = 0.32 \text{ m/sec}$$

流体力学係数は、低速にあっては傾航速度によって変化しないものと仮定した。ただし、傾航速度影響を確認するために数状態について傾航速度を2~3種類変化させて模型試験を行った。

(6) 旋回半径

$$L/R = 0.00, 0.333, 0.40, 0.50$$

旋回半径は、上記の4種類を標準としたが、 $L/R$ が0.00と0.333との間で0.131, 0.161及び0.216に旋回半径を変化させて模型試験を行っている。

(7) 計測項目

旋回及び斜航時に模型に働く抗力、揚力及び模型中心廻りのモーメントを3分力計にて計測した。

### 3.3 実験結果と設定値との比較

旋回時の流体力学係数を求めるために実施した水槽模型試験は、2.3.2に示す範囲について行ったが、莫大な図面になるために試験で得られた値を用いて最小2乗法(L.S.M.)にて流体力学係数を求めた。

流体力学係数は、偏角( $\beta$ )が零に対して対称または非対称であるかによって抗力係数( $C_x$ )、揚力係数( $C_y$ )及びモーメント係数( $C_m$ )を(2.3.2)式のべき級数で表示することとした。

3分力の無次元化は(2.3.1)式で行った。

$$\left. \begin{aligned} C_x &= F_x / \frac{1}{2} \rho L d V^2 \\ C_y &= F_y / \frac{1}{2} \rho L d V^2 \\ C_m &= M / \frac{1}{2} \rho L^2 d V^2 \end{aligned} \right\} \quad (2.3.1)$$

ここで、 $F_x$  : 抗力

$F_y$  : 揚力

$M$  : 模型中心廻りのモーメント

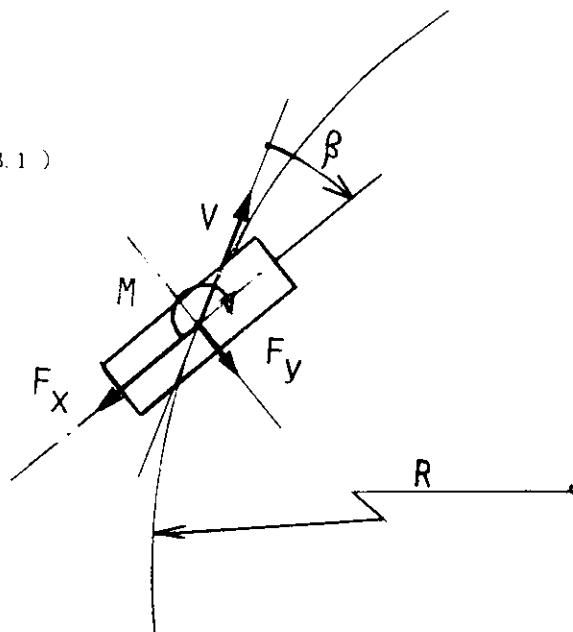
$\rho$  : 流体密度

$L$  : 船の長さ

$d$  : 喫水

$V$  : 傾航速度

である。



$$C_x = A_0 + A_1 \beta^2 + A_2 r^2 + A_3 \beta r + (A_8 \beta^2 r^2) + A_4 \beta^3 r + A_5 \beta r^3 + A_6 \beta^4 + A_7 r^4 \quad \left. \right\} \quad (2.3.2)$$

ここで、 $A_8$ は省略した。

$$C_y, C_m = A_0 + A_1 \beta + A_2 r + A_3 \beta^2 r + A_4 \beta r^2 + A_5 \beta^3 + A_6 r^3$$

ここで、 $\beta$  : 偏角

$$r : L/R$$

R : 旋回半径

である。

$C_x$ ,  $C_y$  及び  $C_m$  の水槽模型試験によって得られた流体力係数と最小 2 乗法で求めた流体力微係数との比較は、 $L/R = r = 0.00$ , 0.333, 0.40 及び 0.50 について  $B/d$  及び  $H/d$  を変化したものについて図 2.3.2.1～図 2.3.2.4 に旋回時の抗力係数を、図 2.3.2.5～図 2.3.2.8 に旋回時の揚力係数を、図 2.3.2.9～図 2.3.2.12 に旋回時のモーメント係数を示す。

これらの図から判るように、偏角及び旋回半径のべき級数にして  $B/d$  及び  $H/d$  に対して求めた旋回時の流体力微係数は、水槽模型試験によって得られた流体力係数と多少の相異が見受けられる箇所があるものの全体としては非常によく実験点を推定しているといえる。したがって、旋回時の流体力微係数は、実験式として相当精度よく設定されているといえる。

### 3.4 旋回時の流体力微係数の設定

今回実施した水槽模型試験によって得られた実験点を用いて前述のごとく最小 2 乗法で旋回時の流体力微係数を設定する実験式を求めた。

旋回時の流体力微係数は  $L/B$  が 2.00 について表 2.3.4.1 及び表 2.3.4.2 に示す。これらの表中には  $B/d$  及び  $H/d$  の変化に対する旋回時の流体力微係数が示されている。

なお、ここに提示した旋回時の流体力微係数は、拘束した箱型海洋構造物に対してであるが、通常箱型海洋構造物は曳航することによってトリム及び沈下を生じるので拘束状態と無拘束状態とでは相異するといえる。しかしながら、箱型海洋構造物の振れ廻り運動には、ここで提示した旋回時の流体力微係数を用いても曳航速度が遅いために十分精度が保証され得るといえる。

なお、今回実施した水槽模型試験は、船の長さ・幅比が 2.0 だけに関して行ったために箱型海洋構造物の長さ・幅比が変化した場合の旋回時の流体力微係数を推定することができない。

そこで、 $H/d \approx 20$  程度であるが、安藤らの拘束旋回時における流体力係数（船研第 20 回発表会）を用いて  $L/B$  が 1.00 ～ 3.00 の範囲の旋回時の流体力微係数を求めた結果を表 2.3.4.3 に示す。

以上の旋回時の流体力微係数によって  $L/B$ ,  $B/d$  及び  $H/d$  が変化した場合の箱型海洋構造物の旋回時の流体力微係数を大略推定することが可能になったといえる。

### 3.5 今後に残された諸点

ここでは、旋回時の流体力微係数の設定に関する節であるために箱型海洋構造物の振れ廻り現象を取り扱うことにはしないが、既存の一般船舶の一点係留された船の運動解析法を示している HANS-ROAR SORHEIM によると今回提示した旋回時の流体力微係数の他に、 $Z$  軸廻りの付加慣性モーメント係数や左右揺れの付加質量係数などが必要である。

また、一点係留方式の係留ラインに働く張力やホーザーに働く張力の最大値を推定するためには、箱型海洋構造物の長周期前後動に関する流体力係数も必要となる。

したがって、一点係留方式の箱型海洋構造物の振れ廻り現象をより高精度に数値シミュレーション計算を行うとするならば、次に列挙する項目を究明することが必要であろう。

- (イ) 箱型海洋構造物の長さ・幅比、幅・喫水比を系統的に変化させ、少なくとも今回実施した範囲で旋回時の流体力微係数を求める。
- (ロ) 箱型海洋構造物の左右揺れの付加質量、 $Z$  軸廻りの付加慣性モーメント及び前後揺れの付加質量と減衰係数

などに関しては、長さ・幅比及び幅・奥水比の変化に対し水深影響、運動量と周波数との関係などを求める。

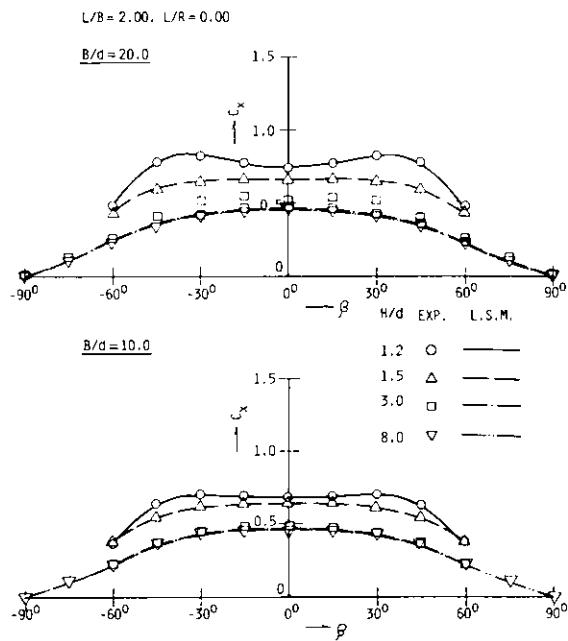


図 2.3.3.1 旋回時の抗力係数

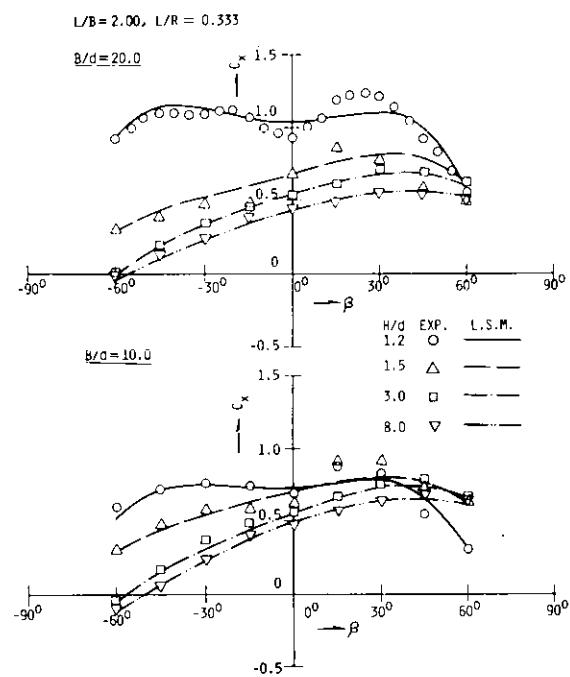


図 2.3.3.2 旋回時の抗力係数

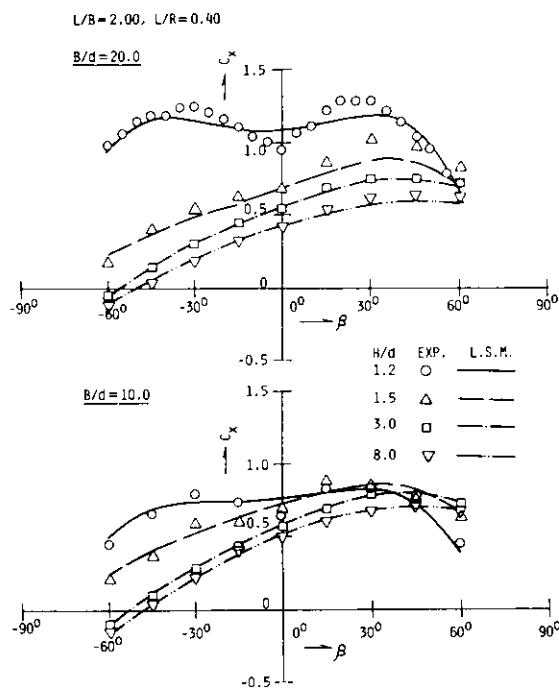


図 2.3.3.3 旋回時の抗力係数

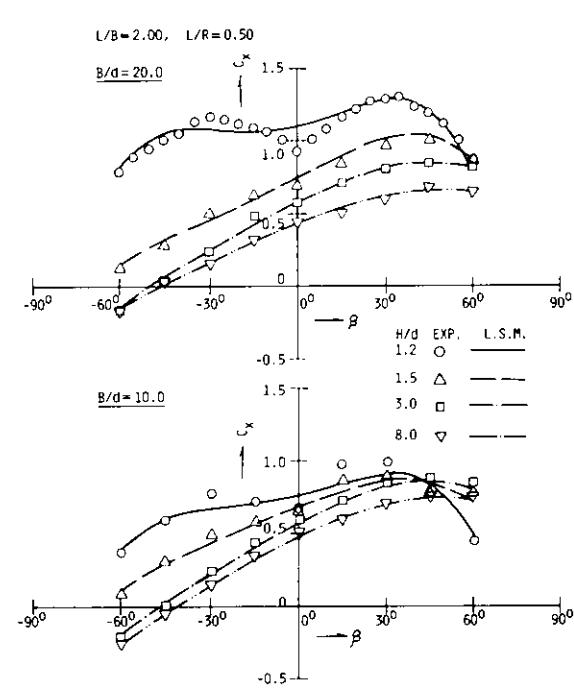


図 2.3.3.4 旋回時の抗力係数

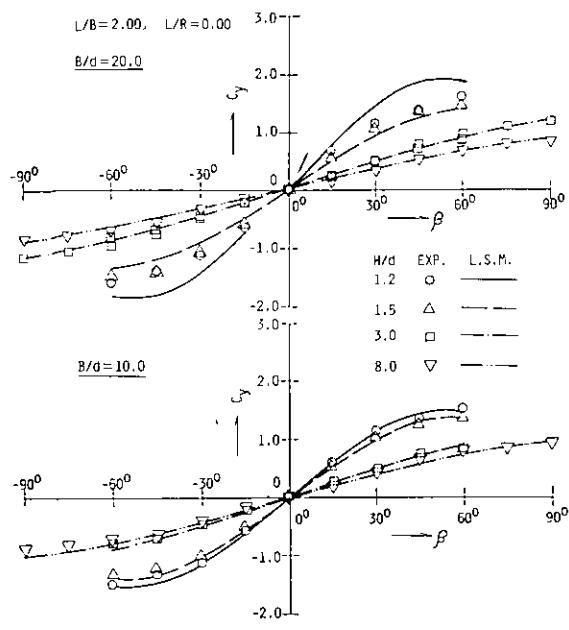


図 2.3.3.5 旋回時の揚力係数

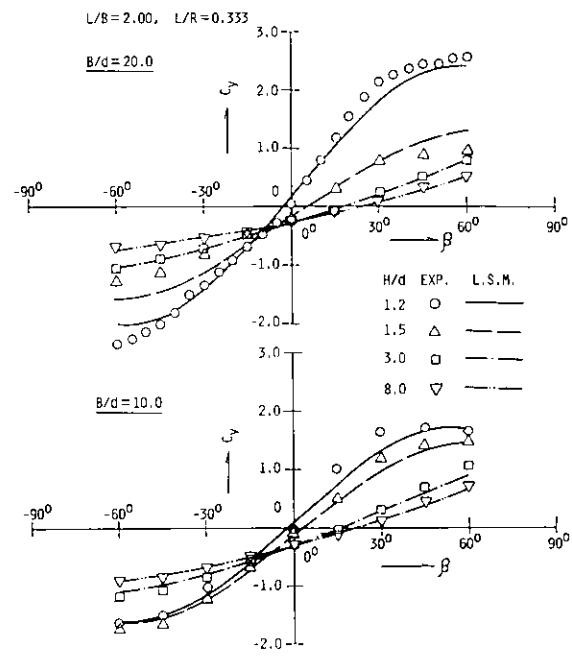


図 2.3.3.6 旋回時の揚力係数

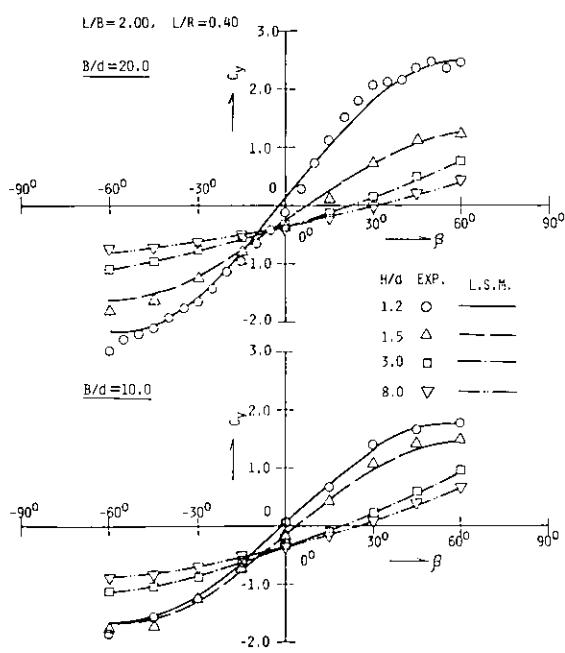


図 2.3.3.7 旋回時の揚力係数

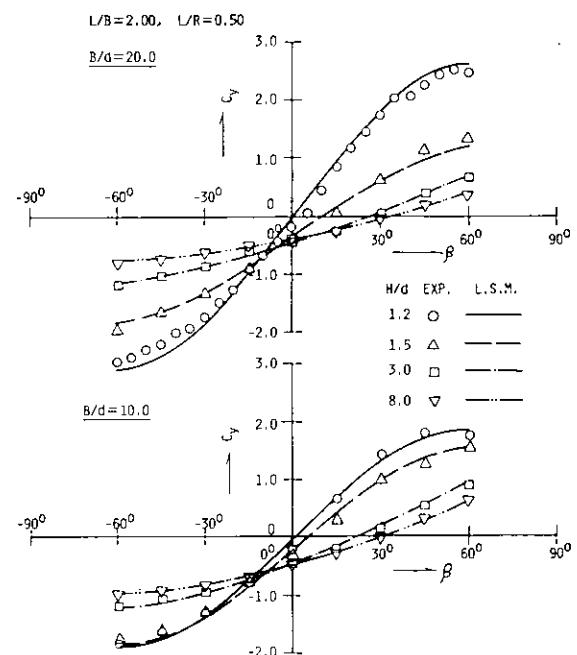


図 2.3.3.8 旋回時の揚力係数

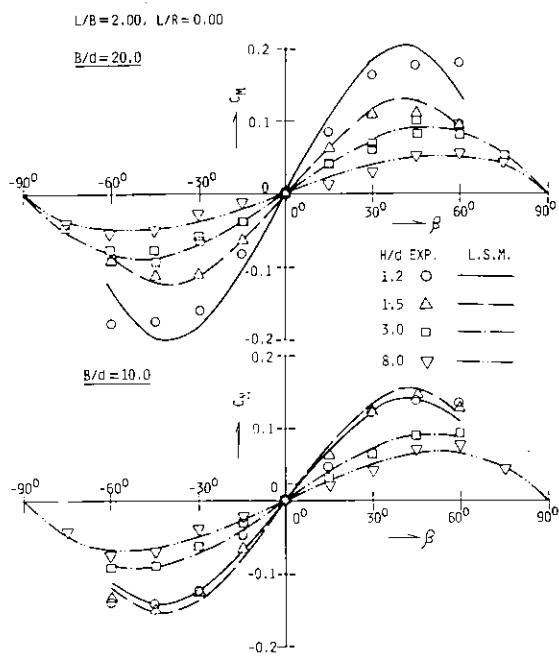


図 2.3.3.9 旋回時のモーメント係数

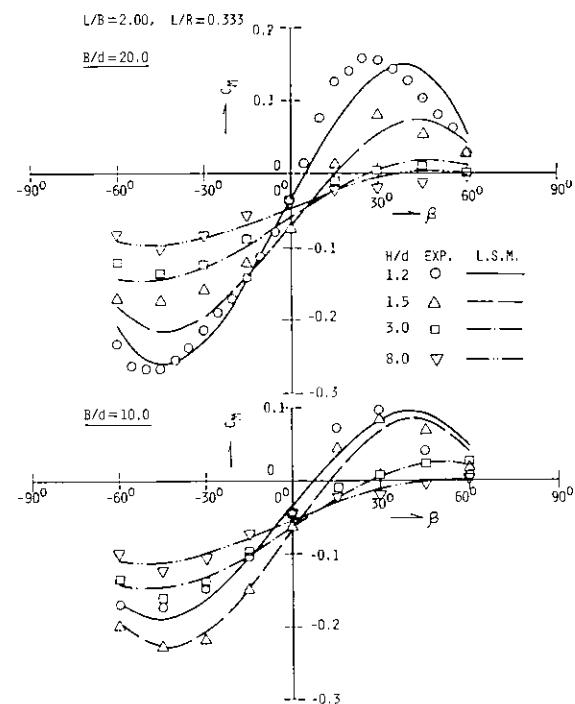


図 2.3.3.10 旋回時のモーメント係数

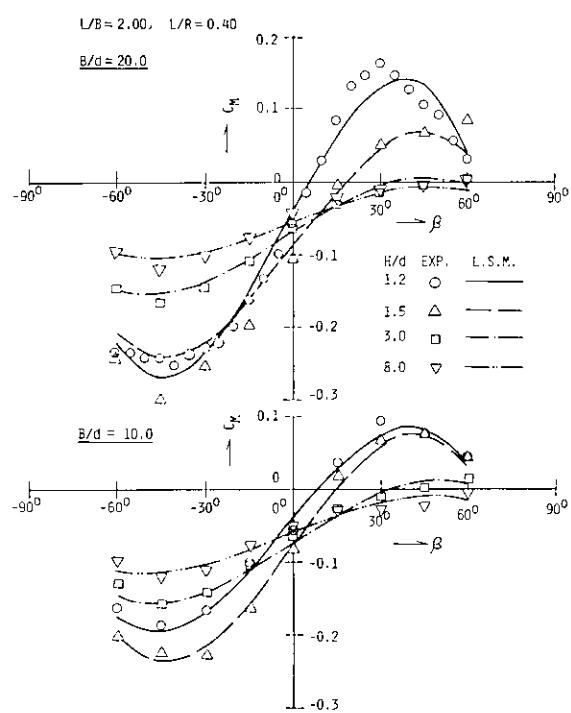


図 2.3.3.11 旋回時のモーメント係数

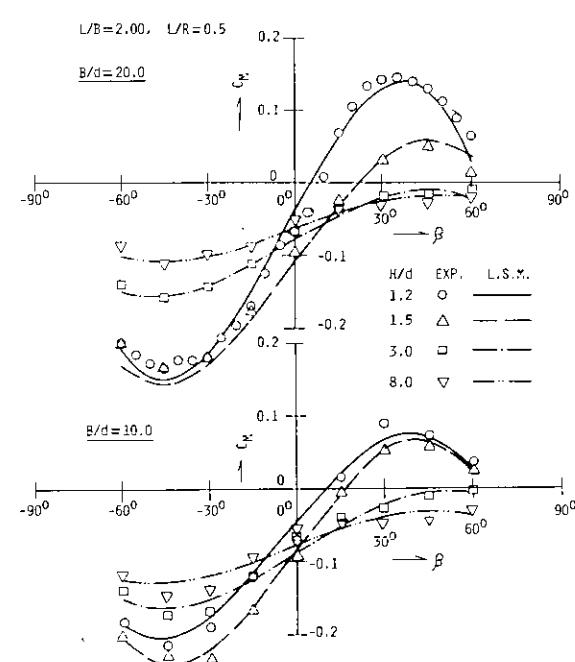


図 2.3.3.12 旋回時のモーメント係数

表 2.3.4.1 旋回時の流体力微係数（抗力）  
 $L/B = 2.00$

	B/d	H/d	A <sub>0</sub>	A <sub>1</sub>	A <sub>2</sub>	A <sub>3</sub>	A <sub>4</sub>	A <sub>5</sub>	A <sub>6</sub>	A <sub>7</sub>
$C_x = F_x / 1/2 \rho L d v^2$	20.0	1.2	0.7392	0.4915	3.7045	-0.3162	-0.4972	3.3238	-0.6916	-9.2433
		1.5	0.6607	0.0266	0.0981	0.8019	-0.4263	1.4729	-0.2149	0.8152
		3.0	0.4624	-0.1151	1.0055	1.0015	-0.1398	0.3668	-0.0961	-2.3880
		8.0	0.4438	-0.1323	-0.0095	0.9661	-0.0724	-0.3675	-0.0458	-0.1595
$C_y = F_y / 1/2 \rho L d v^2$	10.0	1.2	0.6736	0.2407	0.6670	-0.1303	-0.4579	2.8884	-0.4847	-1.1367
		1.5	0.6430	-0.0522	0.9659	0.7215	-0.2878	0.6951	-0.1675	-3.1651
		3.0	0.4780	-0.1131	1.1231	1.2852	-0.2134	-0.2896	-0.1206	-3.0097
		8.0	0.4786	-0.1690	0.3069	1.2419	-0.1154	-0.6158	-0.0470	-1.1415

$$C_x = A_0 + A_1 \beta^2 + A_2 r^2 + A_3 \beta r + A_4 \beta^3 r + A_5 \beta r^3 + A_6 \beta^4 r + A_7 r^4$$

表 2.3.4.2 旋回時の流体力微係数（揚力及びモーメント）  
 $L/B = 2.00$

	B/d	H/d	A <sub>0</sub>	A <sub>1</sub>	A <sub>2</sub>	A <sub>3</sub>	A <sub>4</sub>	A <sub>5</sub>	A <sub>6</sub>
$C_y = F_y / 1/2 \rho L d v^2$	20.0	1.2	0.0078	3.0638	0.9279	0.0677	2.9579	-1.1935	-4.0490
		1.5	0.0039	1.8878	-0.4458	0.1073	0.5256	-0.5216	-1.1820
		3.0	-0.0003	0.8667	-0.9056	0.3989	0.1735	-0.0117	-0.0591
		8.0	0.0018	0.6271	-0.8904	0.3742	-0.3385	0.0186	0.3625
$C_m = M / 1/2 \rho L^2 d v^2$	10.0	1.2	0.0040	2.4548	0.4406	-0.0316	1.4032	-0.9514	-1.9587
		1.5	0.0013	2.1813	-0.4124	0.1433	1.1298	-0.7754	-0.1215
		3.0	0.0004	0.9759	-0.9424	0.6010	0.6205	-0.0839	-0.1131
		8.0	-0.0005	0.7843	-0.9399	0.5806	-0.1226	-0.0078	-0.2138
$C_x = F_x / 1/2 \rho L^2 d v^2$	20.0	1.2	0.0001	0.4234	-0.1428	-0.1158	-0.0120	-0.2723	0.2862
		1.5	0.0009	0.2590	-0.2200	0.0008	0.2134	-0.1604	0.0173
		3.0	0.0004	0.1563	-0.2074	-0.0138	-0.0935	-0.0667	0.2090
		8.0	0.0000	0.0853	-0.1630	0.0000	-0.0306	-0.0346	0.1565
$C_m = M / 1/2 \rho L^2 d v^2$	10.0	1.2	-0.0003	0.2778	-0.1068	-0.0679	-0.0237	-0.1581	0.0575
		1.5	-0.0001	0.3130	-0.2266	-0.0191	-0.0144	-0.1844	0.2413
		3.0	0.0000	0.1582	-0.1958	0.0123	-0.0635	-0.0685	0.0749
		8.0	-0.0002	0.1043	-0.1533	-0.0060	-0.0984	-0.0357	-0.0065

$$C_y, C_m = A_0 + A_1 \beta + A_2 r + A_3 \beta^2 r + A_4 \beta r^2 + A_5 \beta^3 + A_6 \beta r^3$$

表 2.3.4.3  $L/B$  変化に対する旋回時の流体力微係数  
 $H/d = 20.0$

	L/B	B/d	A <sub>0</sub>	A <sub>1</sub>	A <sub>2</sub>	A <sub>3</sub>	A <sub>4</sub>	A <sub>5</sub>	A <sub>6</sub>	A <sub>7</sub>	
$F_y / 1/2 \rho L d v^2$	1.00	10.0	0.0075	0.6857	-2.1387	0.9530	0.8969	0.0740	-1.4886	—	
		1.50	10.0	0.1203	0.6347	-1.8355	0.7298	0.6598	0.0291	1.1258	
		2.25	10.0	0.0628	0.6397	-1.6486	0.9962	-3.5265	0.3180	4.3995	
		3.00	10.0	0.1319	0.6493	-0.9496	0.4321	0.0951	0.1933	0.2160	
$M / 1/2 \rho L^2 d v^2$	1.00	10.0	-0.0018	-0.0624	-0.1568	-0.1144	-0.2043	0.0319	-0.9691	—	
		1.50	10.0	0.0041	0.0449	-0.1442	-0.0743	-0.0329	0.0063	-0.2650	
		2.25	10.0	-0.0100	0.1155	-0.1368	-0.0389	-0.0022	-0.0232	-0.0468	
		3.00	10.0	0.0057	0.0884	-0.1151	-0.0792	-0.0298	-0.0343	-0.0290	
$F_x / 1/2 \rho L^2 d v^2$	1.00	10.0	0.8946	-0.3051	0.3176	2.1008	-0.1357	-2.1376	-0.1716	8.5177	
		1.50	10.0	0.5850	-0.2196	0.1802	1.5374	-0.0819	-0.3864	-0.0921	1.8764
		2.25	10.0	0.3922	-0.1268	-0.1543	1.0428	-0.0436	-0.7267	-0.0536	-0.0946
		3.00	10.0	0.3531	-0.0115	-0.2789	0.8075	-0.0714	-0.0477	-0.1236	0.5703

## 4. 運動特性

箱型海洋構造物の波浪中の運動特性は、流体力が精度良く推定できていれば、復原力項を加えた運動方程式を解いて求めることができる。

昭和56年度の本研究部会の報告書では、2次元と3次元の箱型海洋構造物の運動特性について述べているので、ここで、その結果のみ簡単に紹介しておく。（詳しくはS R 179研究部会昭和55年度報告書p.49~54を参照のこと）

まず、2次元の箱型海洋構造物の運動であるが、これはボテンシャル理論で求めた流体力に、本章の1.4節および昭和55年度報告書の1.2節で述べた粘性減衰力を付加してやれば実用上十分の精度で推定が可能であることが明らかとなった。

つぎに、3次元の運動の推定には、(1)2次元断面の流体力を用いるOSM、(2)3次元領域で流体力を直接求める3次元計算法の2通りの方法がある。

この2つの方法の差は、縦波中で波長が短くなってくると顕著になる傾向があり、さらに、 $L/B$ が小さくなって1.0に近くなるにつれてその差は広がってくる。両者の差の原因は、流体力の差異によるところが大であるが、各断面の流体力を2次元的に求め長手方向に積分するストリップ法の手法そのものによる原因も認められる。

このように、3次元の運動特性の推定を行う場合、 $L/B$ が1.0に近い3次元性が強い箱型海洋構造物に対してはストリップ法を適用することに多少無理があるケースが出てくることに注意しなければならない。

そこで、以下に述べる4.1~4.3節で3次元直接計算法のひとつである3次元特異点分布法<sup>1)</sup>を用いて $L/B=1.0, 1.5, 2.0, 4.0$ の箱型海洋構造物について、波浪中の運動を計算し、運動特性に及ぼす $L/B$ の影響をより明確にすることにした。さらに、4.4節では $L/B=1.2$ および2.0の構造物について行なわれた水槽試験の結果と上記計算法との比較を行い、上記計算法が運動特性の3次元性を良く表現し、実験結果と良い一致を示すことを確認している。

なお、上記計算法では構造物の粘性減衰力を無視しているため、回転運動の同調点付近では応答が過大になっているので注意を要する。また、箱型海洋構造物の3次元粘性減衰力の推定法はいまだ確としたものがなく、なおいっそく高精度の運動特性の推定を行うまでの今後の課題のひとつと考えられる。

### 4.1 計算諸元

$L/B = 1.0, 1.5, 2.0, 4.0$ の箱型海洋構造物の諸元を次に示す。

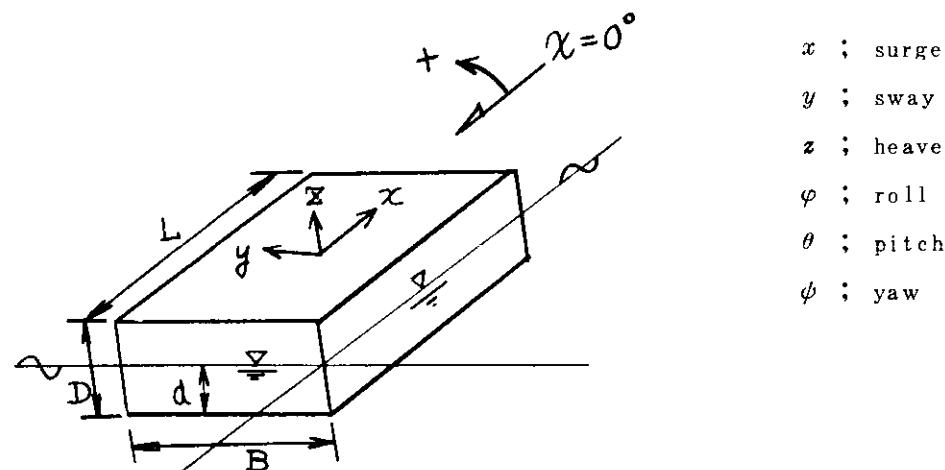


表 2.4.1.1 運動特性  $L/B$  シリーズ計算諸元

	$L/B = 1.0$	$L/B = 1.5$	$L/B = 2.0$	$L/B = 4.0$
$L$	50.0 m	75.0 m	100.0 m	200.0 m
$B$	50.0 m	同左	同左	同左
$D$	20.0 m	同左	同左	同左
$d$	10.0 m	同左	同左	同左
$V$	$25,000. m^3$	$37,500. m^3$	$50,000. m^3$	$100,000. m^3$
$KG$	10.0 m	同左	同左	同左
$K_{xx}$	15.6 m	同左	同左	同左
$K_{yy}$	15.6 m	22.4 m	29.4 m	58.0 m
$K_{zz}$	20.4 m	26.0 m	32.3 m	59.5 m
$H$	20.0 m	同左	同左	同左
$B/d$	5.0	同左	同左	同左
$H/d$	2.0	同左	同左	同左
$L/d$	5.0	7.5	10.0	20.0

## 4.2 無次元化

運動は 6 自由度で、その方向と呼称は表 2.4.1.1 の付図のとおりである。応答は、入射波の円周波数  $\omega$  ベースで表わし、位相は、波の山が重心点に来たときを 0 とする。例えば heave の場合、次のように書かれる。

$$z = z_a \cos(\omega t - \epsilon_z)$$

$z$  : heave の応答

$z_a$  : heave の応答の振幅

$\omega$  : 入射波の円周波数 ( $\omega = 2\pi f$ )

$\epsilon_z$  : heave の応答の位相ずれ

さらに無次元化は、並進運動である surge, sway, heave については、波振幅  $\zeta_a$  をもって行ない、回転運動である roll, pitch, yaw については、波数  $K (= 2\pi/\lambda)$  と波振幅の積  $K\zeta_a$  をもって行う。従って下記のような一覧表ができる。

表 2.4.2.1 運動特性の無次元化

モード	応答の表示	無次元表示	位相
surge	$x = x_a \cos(\omega t - \epsilon_x)$	$x_a / \zeta_a$	$\epsilon_x$
sway	$y = y_a \cos(\omega t - \epsilon_y)$	$y_a / \zeta_a$	$\epsilon_y$
heave	$z = z_a \cos(\omega t - \epsilon_z)$	$z_a / \zeta_a$	$\epsilon_z$
roll	$\varphi = \varphi_a \cos(\omega t - \epsilon_\varphi)$	$\varphi_a / K\zeta_a$	$\epsilon_\varphi$
pitch	$\theta = \theta_a \cos(\omega t - \epsilon_\theta)$	$\theta_a / K\zeta_a$	$\epsilon_\theta$
yaw	$\psi = \psi_a \cos(\omega t - \epsilon_\psi)$	$\psi_a / K\zeta_a$	$\epsilon_\psi$

$$(K = 2\pi/\lambda)$$

#### 4.3 計算結果

3次元特異点分布法<sup>1)</sup>を用いて  $L/B$  を系統的に変えた場合の波浪中運動特性を計算した。

計算結果は、向い角・モード別に  $L/B$  シリーズを図示した。向い角  $0^\circ$  (向い波) について図 2.4.3.1 ~ 図 2.4.3.3 に、向い角  $30^\circ$  が図 2.4.3.4 ~ 図 2.4.3.9 に、向い角  $45^\circ$  が図 2.4.3.10 ~ 図 2.4.3.15 に、向い角  $60^\circ$  が図 2.4.3.16 ~ 図 2.4.3.21 に、向い角  $90^\circ$  (横波) が図 2.4.3.22 ~ 図 2.4.3.24 に示されている。

全体的に眺めると、向い波から斜め波にかけて heave と roll の応答に  $L/B$  の影響が顕著であるように見受けられる。これは、横軸に  $\xi_B = \frac{\omega^2}{g} \frac{B}{2}$  を採用したため、同じ  $\xi_B$  のところでも  $L/B$  によって  $\lambda/L$  が異なることがひとつ的原因と考えられる。

例えば、向い波中の heave (図 2.4.3.2) の場合、 $\xi_B$  と  $\lambda/L$  の関係は下表の如くであり、 $L/B$  の増加に伴って、同じ  $\lambda/L$  に対する  $\xi_B$  は小さくなる。応答のピークの位置も  $L/B$  の増加に伴って  $\xi_B$  の小さい方にずれピークの出る波長が  $\lambda/L$  に依存していることをうかがわせる。

$L/B$  の運動特性に及ぼす影響は、 $L/B = 2.0$  と  $4.0$  の間にはかなり差があるよう見受けられるが、 $L/B = 4.0$  以上になると、それ以上大きい  $L/B$  とあまり差がなくなるものと思われる。

表 2.4.3.1  $L/B$  シリーズ計算における  $\lambda/L$

$\xi_B$	$\lambda$	$\lambda/L$ ( $B=50\text{m}$ , $H=20\text{m}$ )			
		$L/B=1.0$	$L/B=1.5$	$L/B=2.0$	$L/B=4.0$
0.1	438.4 m	8.77	5.85	4.38	2.19
0.2	305.8 m	6.12	4.08	3.06	1.53
0.3	246.2 m	4.92	3.28	2.46	1.23
0.5	185.4 m	3.71	2.47	1.85	0.93
0.75	145.9 m	2.92	1.95	1.46	0.73
1.0	121.7 m	2.43	1.62	1.22	0.61
1.5	91.9 m	1.84	1.23	0.92	0.46
2.0	73.6 m	1.47	0.98	0.74	0.37
2.5	60.8 m	1.22	0.81	0.61	0.30
2.75	55.9 m	1.12	0.75	0.56	0.28

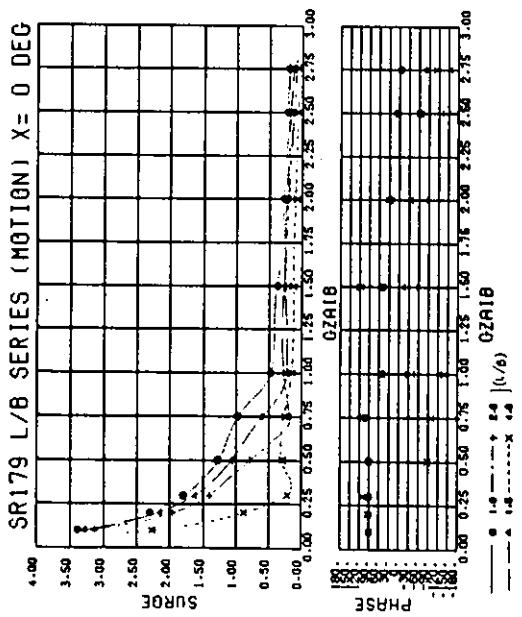


図 2.4.3.1 向い波中の運動特性に及ぼす  $L/B$  の影響

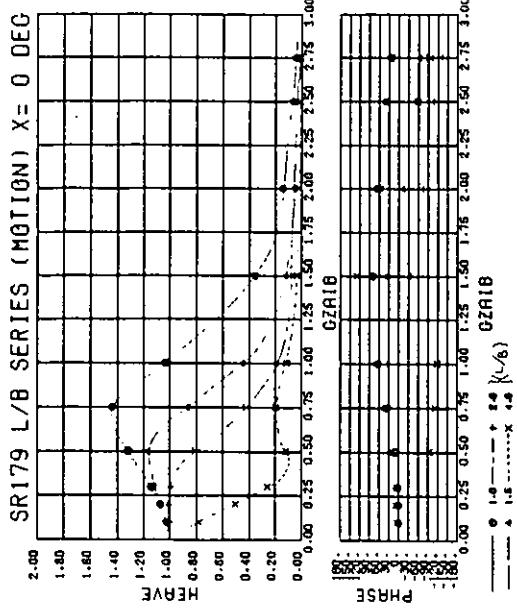


図 2.4.3.2 向い波中の運動特性に及ぼす  $L/B$  の影響

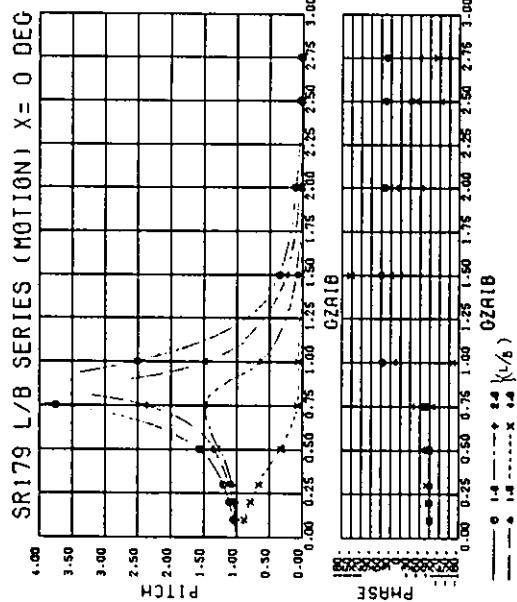


図 2.4.3.3 向い波中の運動特性に及ぼす  $L/B$  の影響

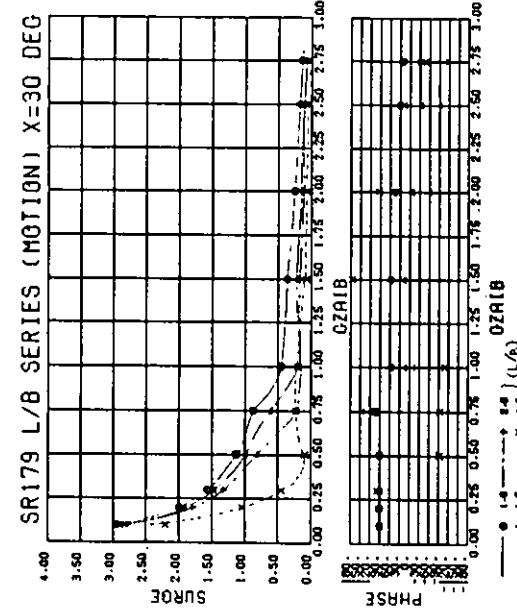


図 2.4.3.4 絶波中の運動特性に及ぼす  $L/B$  の影響

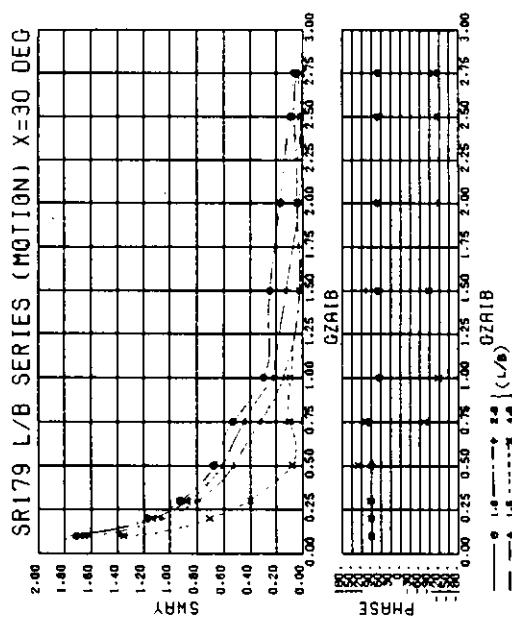


図 2.4.3.5 斜波中の運動特性に及ぼす  $L/B$  の影響

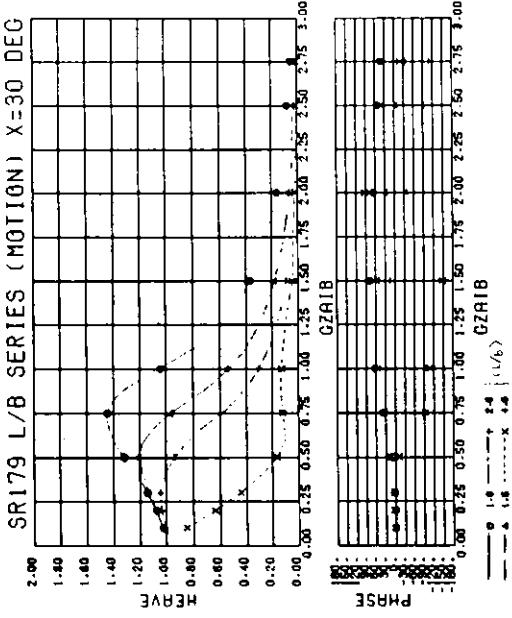


図 2.4.3.6 斜波中の運動特性に及ぼす  $L/B$  の影響

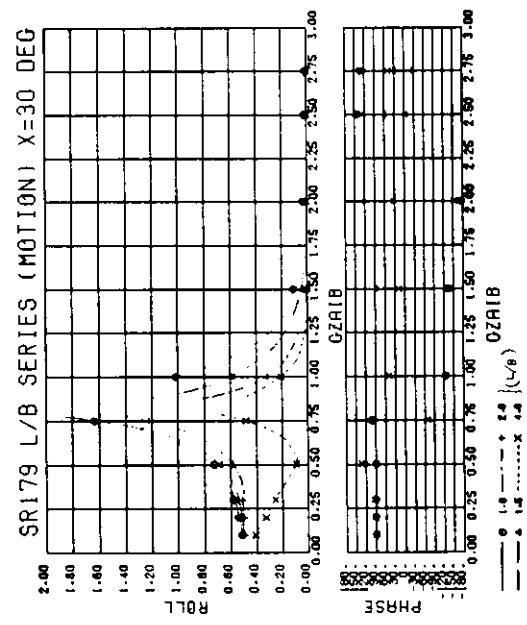


図 2.4.3.7 斜波中の運動特性に及ぼす  $L/B$  の影響

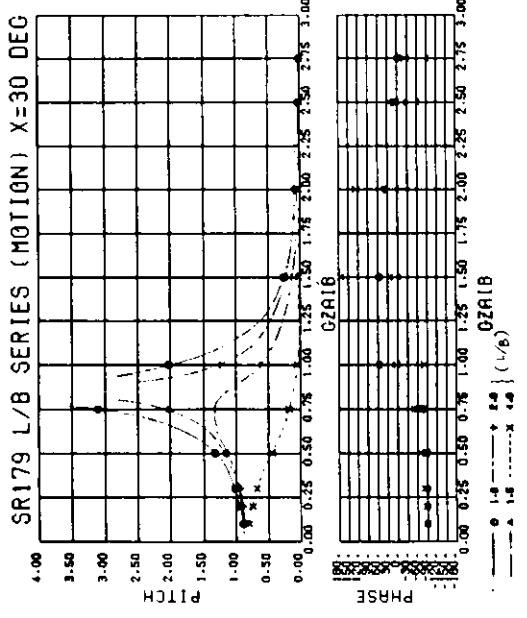


図 2.4.3.8 斜波中の運動特性に及ぼす  $L/B$  の影響

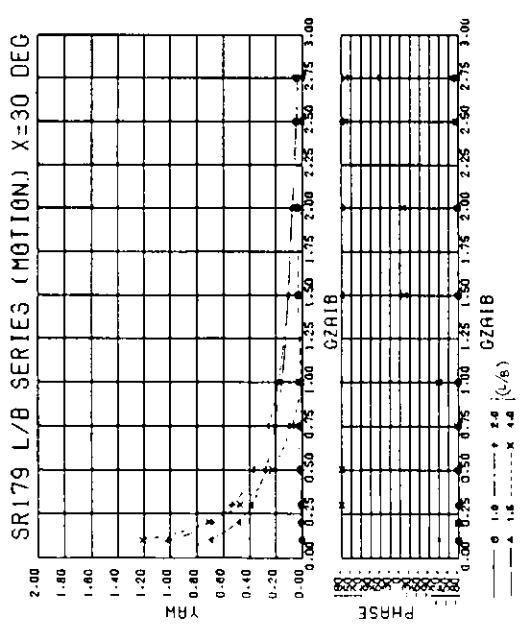


図 2.4.3.9 斜波中の運動特性に及ぼす  $L/B$  の影響

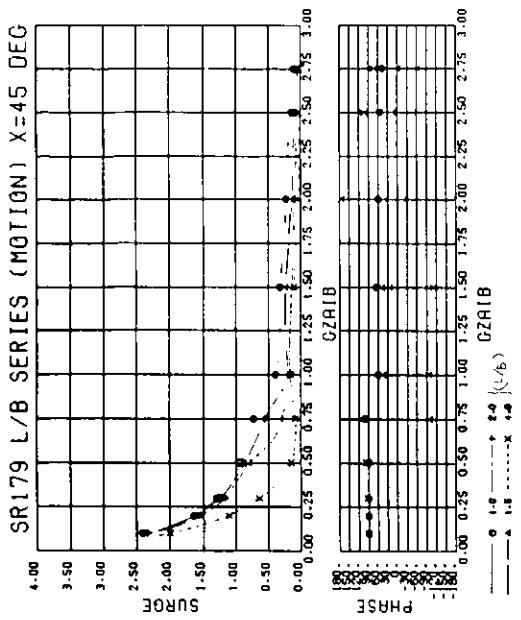


図 2.4.3.10 斜波中の運動特性に及ぼす  $L/B$  の影響

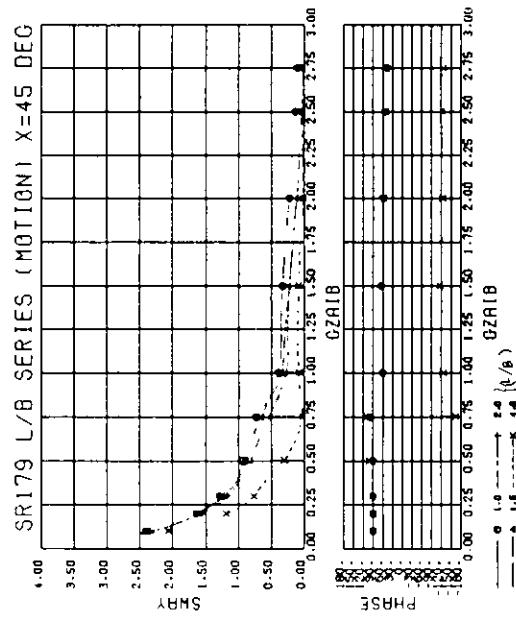


図 2.4.3.11 斜波中の運動特性に及ぼす  $L/B$  の影響

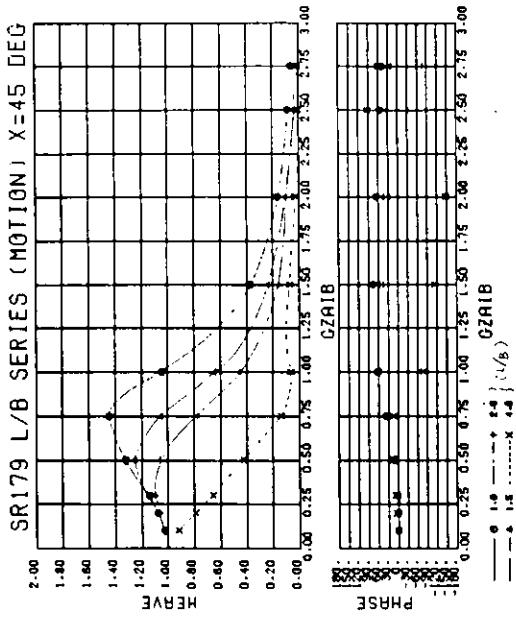


図 2.4.3.12 斜波中の運動特性に及ぼす  $L/B$  の影響

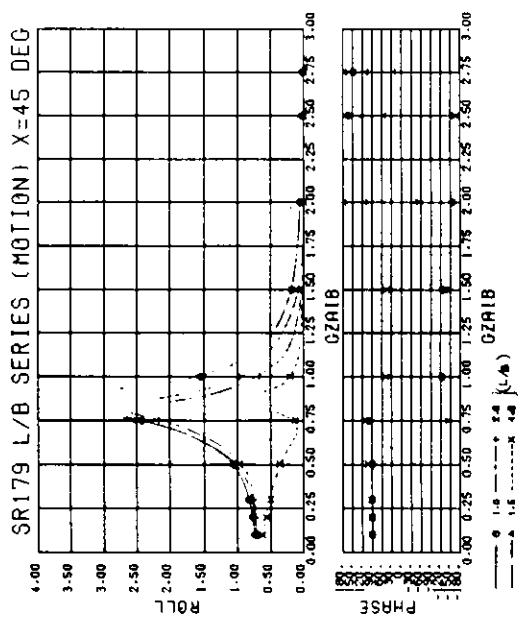


図 2.4.3.13 斜波中の運動特性に及ぼす  $L/B$  の影響

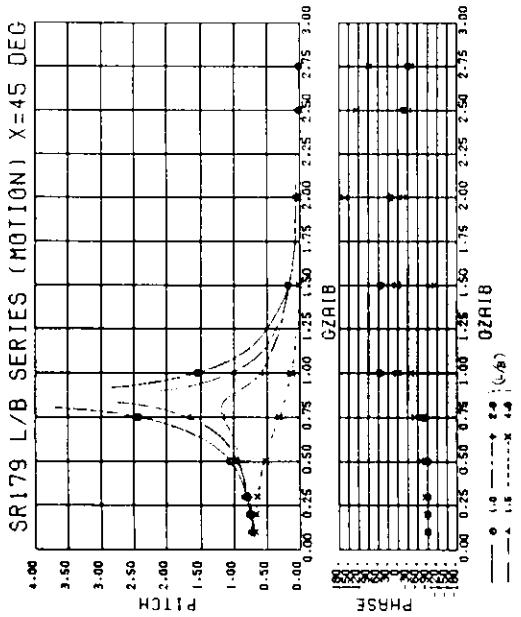


図 2.4.3.14 斜波中の運動特性に及ぼす  $L/B$  の影響

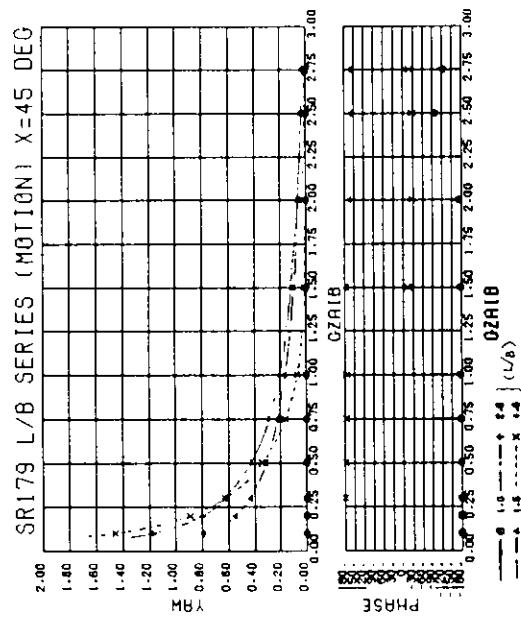


図 2.4.3.15 斜波中の運動特性に及ぼす  $L/B$  の影響

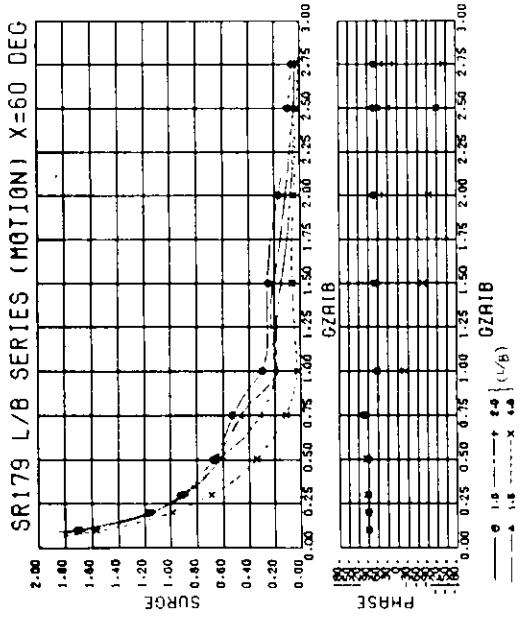


図 2.4.3.16 斜波中の運動特性に及ぼす  $L/B$  の影響

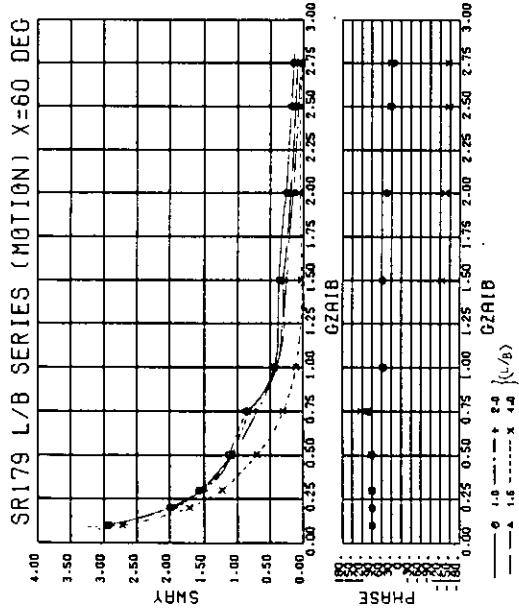


図 2.4.3.17 斜波中の運動特性に及ぼす  $L/B$  の影響

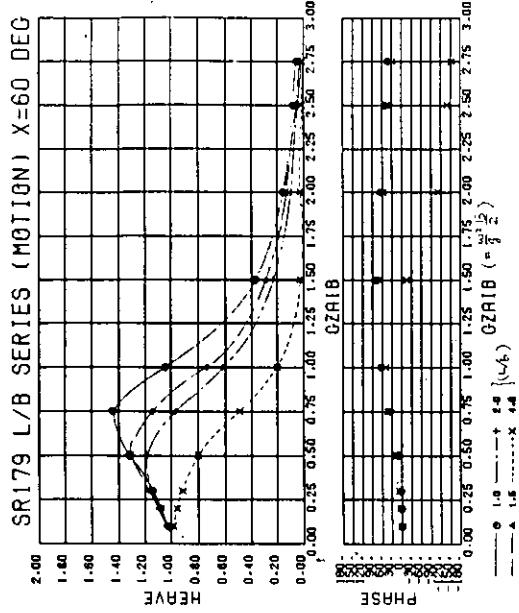


図 2.4.3.18 斜波中の運動特性に及ぼす  $L/B$  の影響

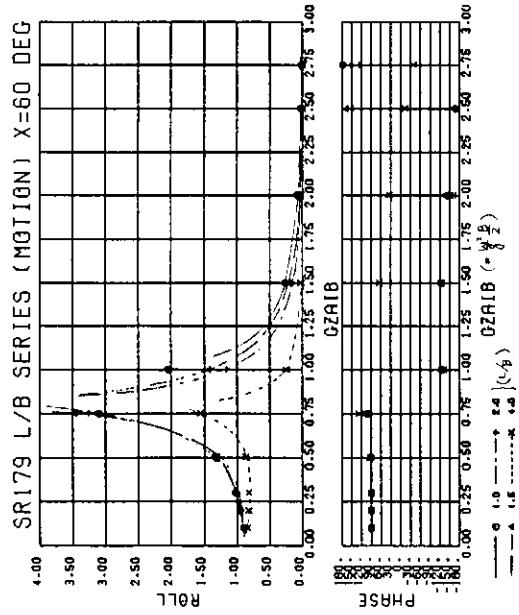


図 2.4.3.19 斜波中の運動特性に及ぼす  $L/B$  の影響

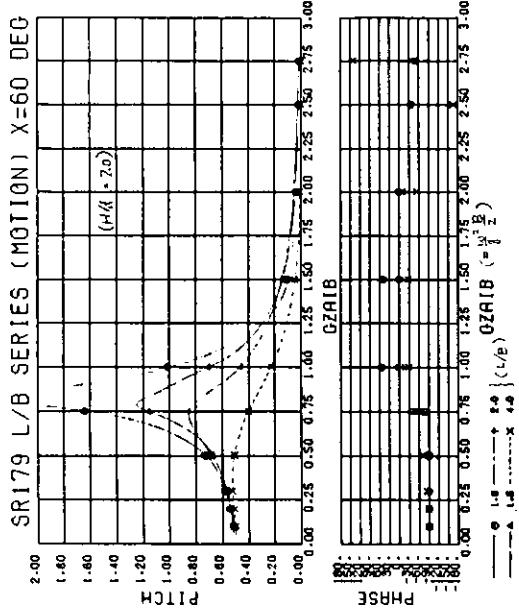


図 2.4.3.20 斜波中の運動特性に及ぼす  $L/B$  の影響

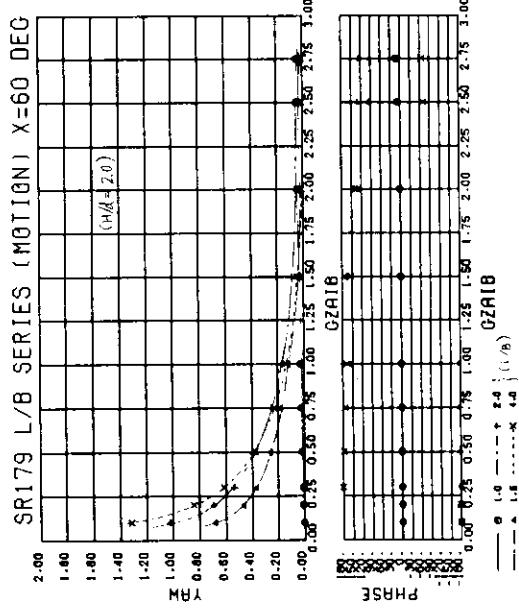


図 2.4.3.21 斜波中の運動特性に及ぼす  $L/B$  の影響

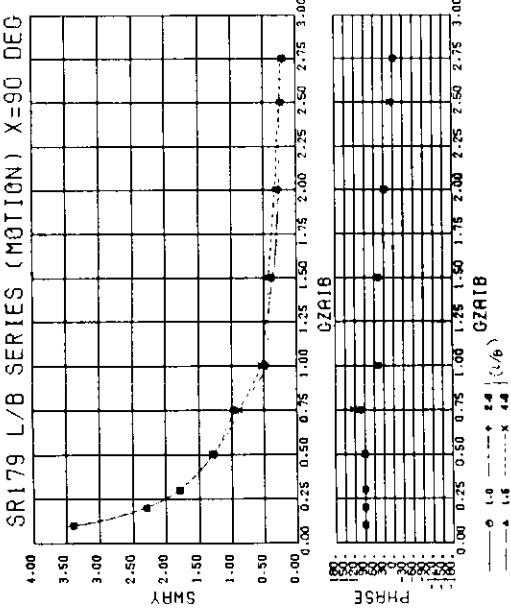


図 2.4.3.22 横波中の運動特性に及ぼす  $L/B$  の影響

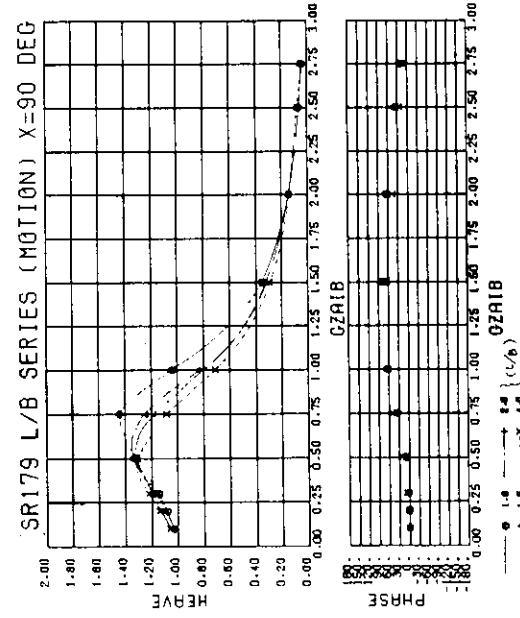


図 2.4.3.23 斜波中の運動特性に及ぼす  $L/B$  の影響

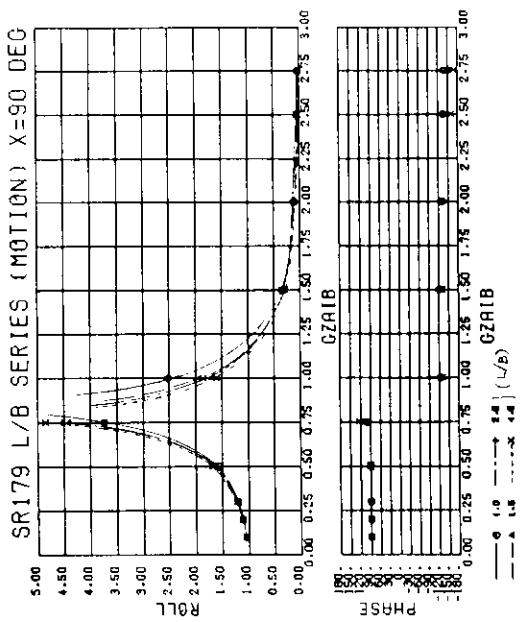


図 2.4.3.24 横波中の運動特性に及ぼす  $L/B$  の影響

#### 4.4 水槽試験結果と理論計算との比較

水槽試験結果の詳細は本報告書の付録1に示す。ここでは、付録1.のなかから無係留状態の試験結果を選び、流体力の3次元影響などが、運動特性、波浪漂流力に及ぼす影響を調査する。

水槽試験結果と理論計算との比較を行なった状態を表2.4.4.1に示す。また、その結果を図2.4.4.2以下に示す。 $B/d = 10$ に示す2次元の理論計算値は、無限水深における2次元特異点分布法による流体力に対して、大川<sup>2)</sup>の粘性修正を行ない、通常のストリップ法で計算したものである。 $B/d = 20$ に示す2次元の理論計算値は、有限水深における領域分割法<sup>3), 4)</sup>による流体力を用いたストリップ法で計算したものであり、粘性修正は行なっていない。

また、これらに対比して行なった3次元計算は有限水深の3次元特異点分布法による流体力を用いた波浪中応答計算で、粘性修正は行なっていない。

流体力計算に際して、2次元特異点分布法に於ては、分割数を1断面で70ヶとし、領域分割法に於ては、固有関数の級数項を20ヶとし、3次元特異点分布法に於ては、 $\frac{1}{2}$ 船長方向に5～6ヶ、 $\frac{1}{2}$ 船幅方向に3～4ヶ、吃水方向に1～2ヶに分割した船体表面でそれぞれ近似した。

$B/d = 10$ に示す2次元の理論計算に於ては通常のストリップ法の他に、船の幅と長さ方向を交換した計算、すなわち縦方向を横方向と見做したストリップ法による計算も試みた。その結果、図2.4.4.2～図2.4.4.7に見られる様に、 $L/B$ が小さい故に通常のストリップ法では推定不能な縦方向の運動に対しても、これを横方向の運動と見做したストリップ法の計算が可成り有力であることがわかる。

また、3次元流体力を用いた理論計算値は、いずれの状態に対しても、その特性を良好に説明できている。しかし、運動の固有周波数付近においては、理論計算値は実験値を大きく上まわっており、やはり粘性修正の必要性があることがわかる。

波浪漂流力に関する水槽試験結果と3次元特異点分布法による理論計算値との比較を図2.4.4.8以下に示す。同図によれば両者は良好な一致を呈していると云って良く、3次元計算の有効性が認められる。

また、理論計算値で急激に値が変化する周波数が存在するが、これは理想流体の仮定に基づく計算値であるからあって、他にも同様の例が見られる<sup>3)</sup>ことである。

#### 参考文献

- 1) 野尻信弘：3次元浮体に働く変動圧力および波浪荷重の研究、造船学会論文集、第148号
- 2) 大川 豊：浮体に働く流体力（その2）、第26回船研研究発表会講演集（1976年3月）
- 3) 日本造船研究協会：第179研究部会、箱型海洋構造物の運動特性及び係留システムに関する研究報告書（昭和56年3月）
- 4) 野尻信弘、村山敬一：規則波中の2次元浮体に働く漂流力に関する研究、西部造船会会報、第51号（1976）

表 2.4.4.1 供試模型主要要目

		M 3 A		M 3 B	
長さ L		3.000 m		3.872 m	
幅 B		2.500 m		1.936 m	
深さ D		0.750 m		0.600 m	
喫水 d	0.250 m	0.125 m	0.194 m	0.097 m	
排水量 △	1,875 Kg	937.5 Kg	1,451 Kg	725.6 Kg	
重心高さ KG	0.550 m	0.315 m	0.458 m	0.255 m	
回転半径	$k_{xx}$	0.929 m	0.850 m	0.674 m	0.579 m
	$k_{yy}$	0.933 m	0.970 m	1.120 m	1.230 m
	$k_{zz}$	1.276 m	1.265 m	1.408 m	1.356 m
同調周期	T <sub>Roll</sub>	2.07 sec	1.50 sec	1.78 sec	
	T <sub>Pitch</sub>	1.87 sec	1.68 sec	1.87 sec	
	T <sub>Heave</sub>	—	—	—	
L/B		1.2		2.0	
B/d	10	20	10	20	
H/d	4.8	9.6	6.2	12.4	
KG/d	2.20	2.52	2.36	2.63	
$k_{xx}/B$	0.372	0.340	0.348	0.298	
$k_{yy}/L$	0.311	0.323	0.289	0.318	
$k_{zz}/L$	0.425	0.422	0.364	0.350	
$\xi_B$ Roll	1.175	2.238	1.231		
$\xi_B$ Pitch	1.440	1.784	1.115		
$\xi_B$ Heave	—	—	—		
備考	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ 水深 H = 1.2 m</li> <li>○ Heaving の同調周期は減衰が大きくて測定できず。</li> <li>○ M 3 B の B/d = 20 は実施していない。</li> </ul>				

## Motion Amplitudes of Barge

○ Exp. by Ship Research Institute

— Cal. by 3-dimensional Source Method

— Cal. by Strip Method  
(2-dimensional Source Method)---- Cal. by Inversed Strip Method  
(L → B, B → L, 2-dimensional Source Method)----- Cal. by Strip Method  
(2-dimensional Potential Continuation Method)

図 2.4.4.1 周波数応答記号説明

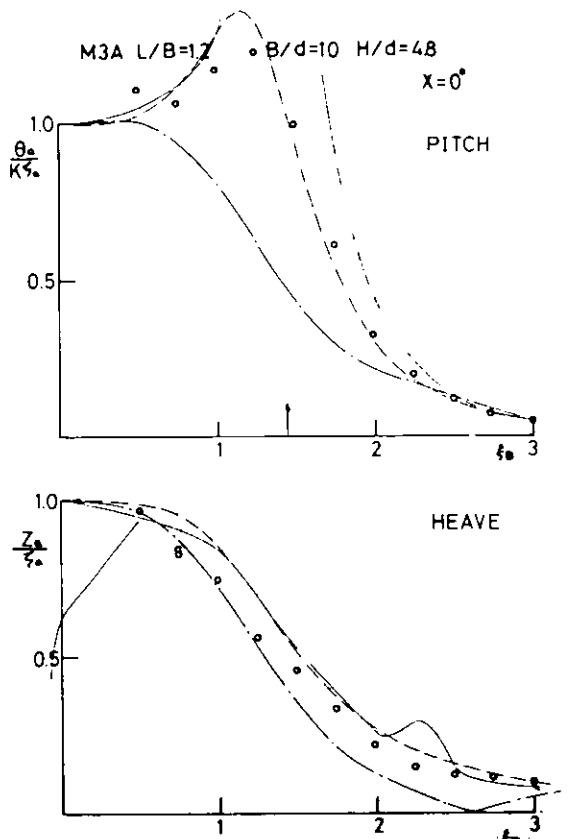


図2.4.4.2-1 M3A,  $H/d = 4.8$ ,  $\chi = 0^\circ$   
周波数振幅応答

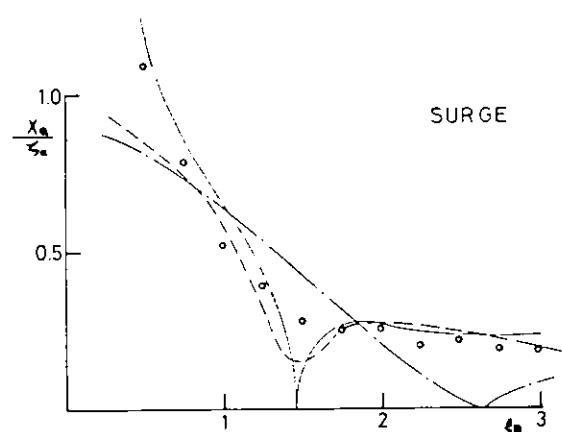


図2.4.4.2-2

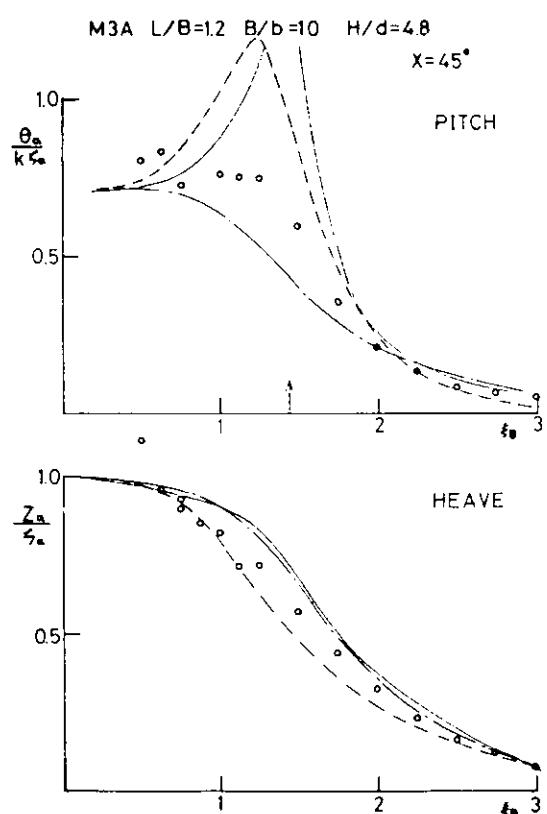


図2.4.4.3-1 M3A,  $H/d = 4.8$ ,  $\chi = 45^\circ$   
周波数振幅応答

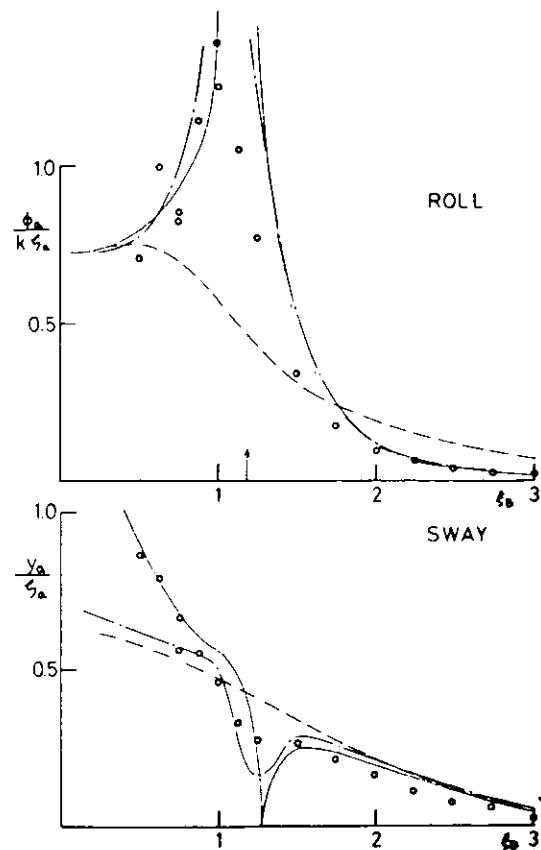


図2.4.4.3-2

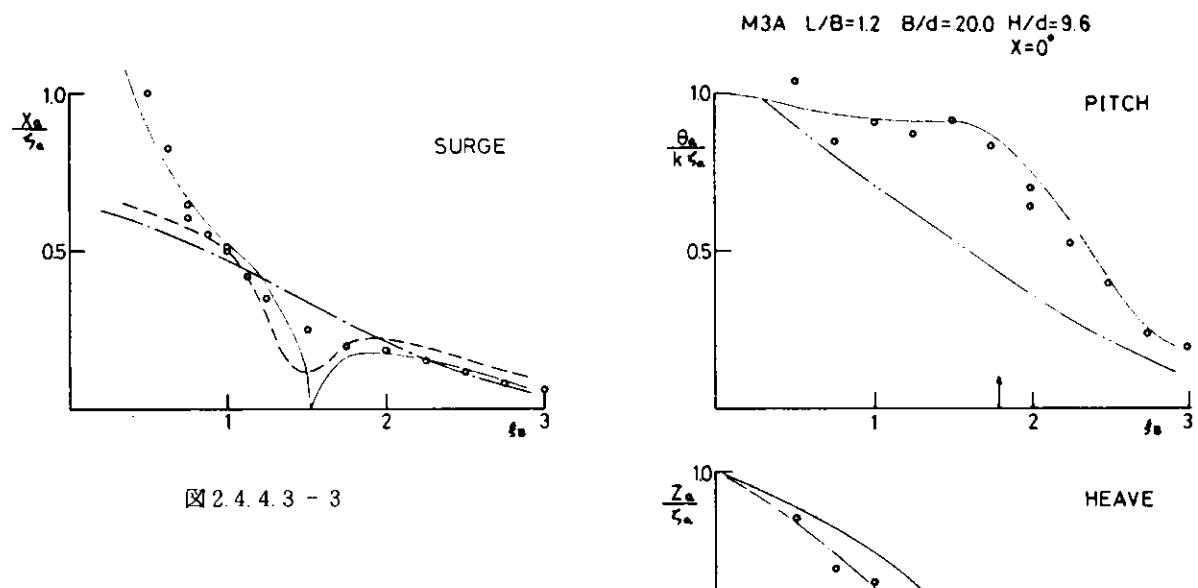


図2.4.4.3-3

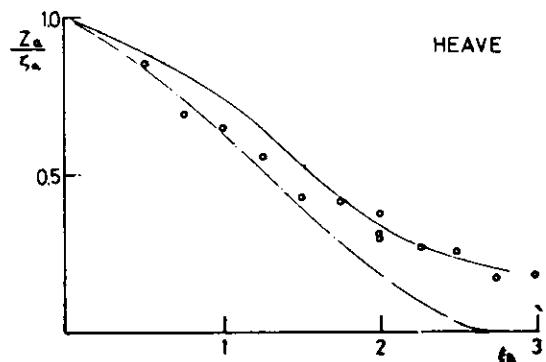


図 2.4.4.4-1 M 3 A,  $H/d = 9.6$ ,  $\chi = 0^\circ$   
周波数振幅応答

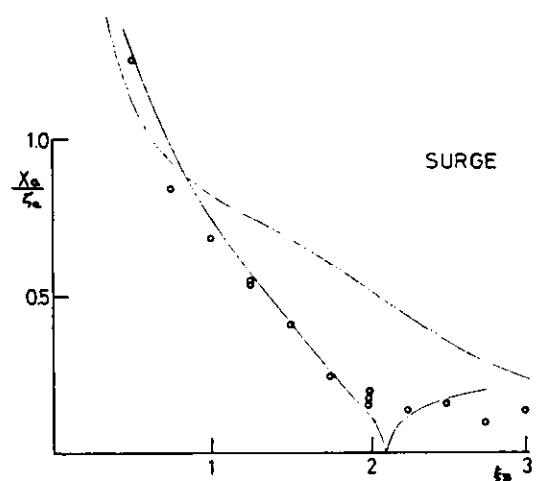


图 2.4.4.4-2

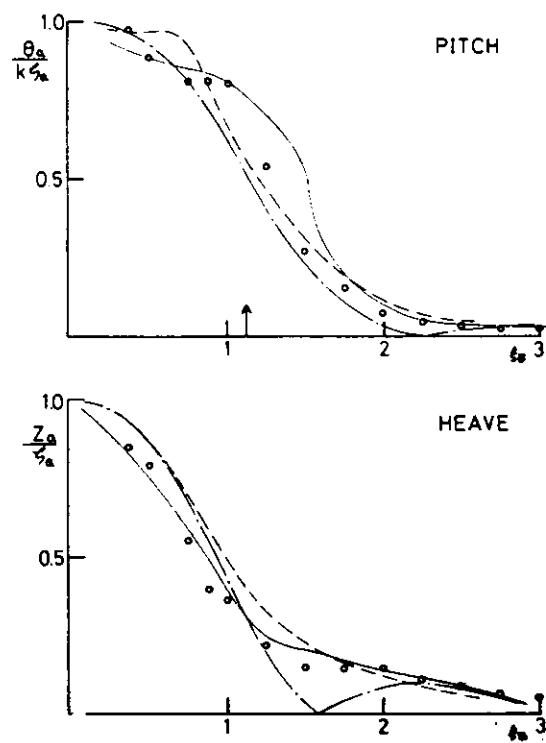


图 2.4.4.5-1 M3B,  $H/d = 6.2$ ,  $\chi = 0^\circ$   
周波数振幅応答

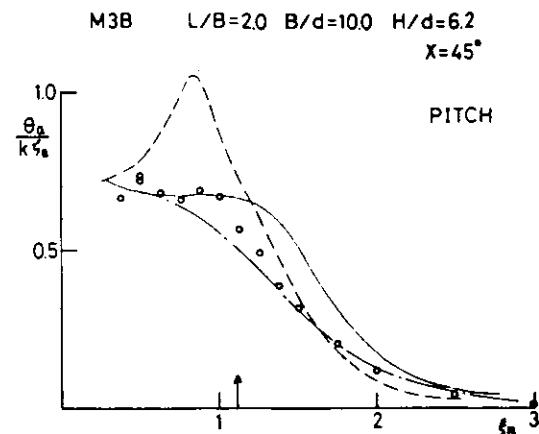
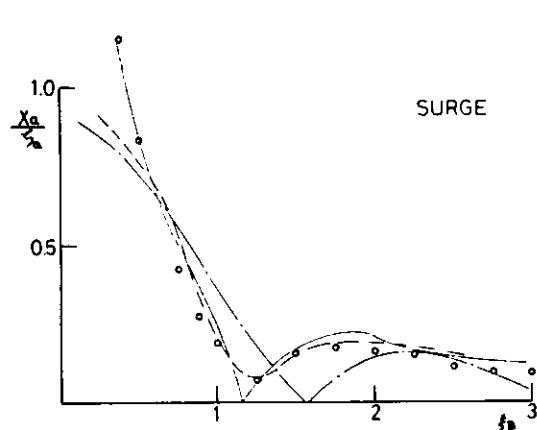


図 2.4.4.5-2

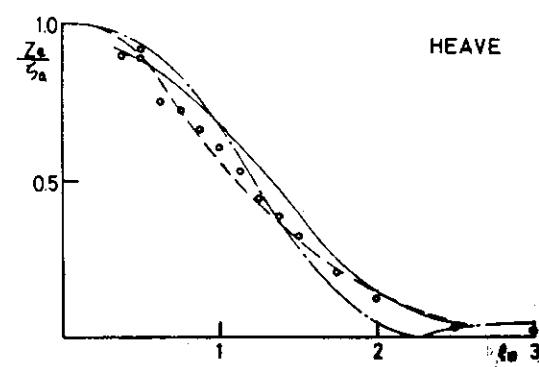


図 2.4.4.6-1 M3B, H/d = 6.2,  $\chi = 45^\circ$   
周波数振幅応答

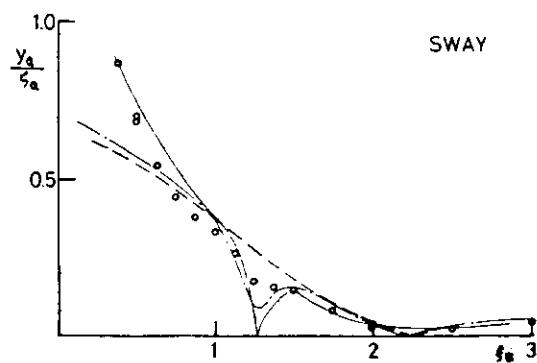
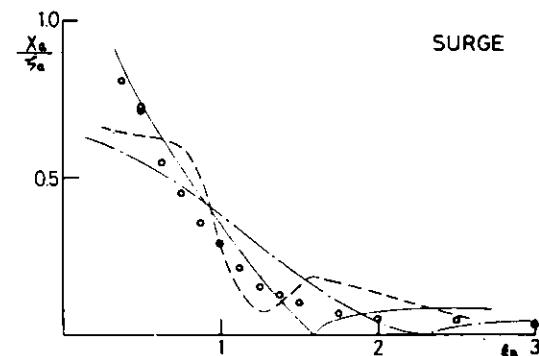
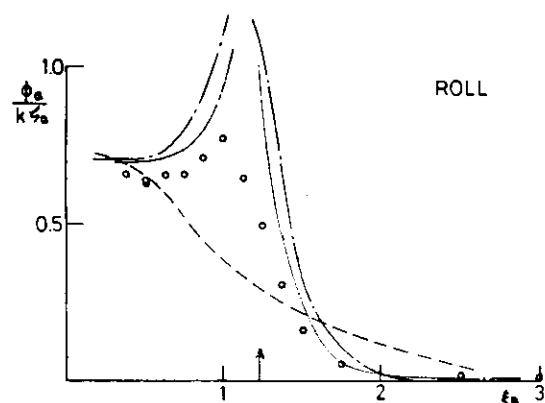


図 2.4.4.6-2

図 2.4.4.6-3

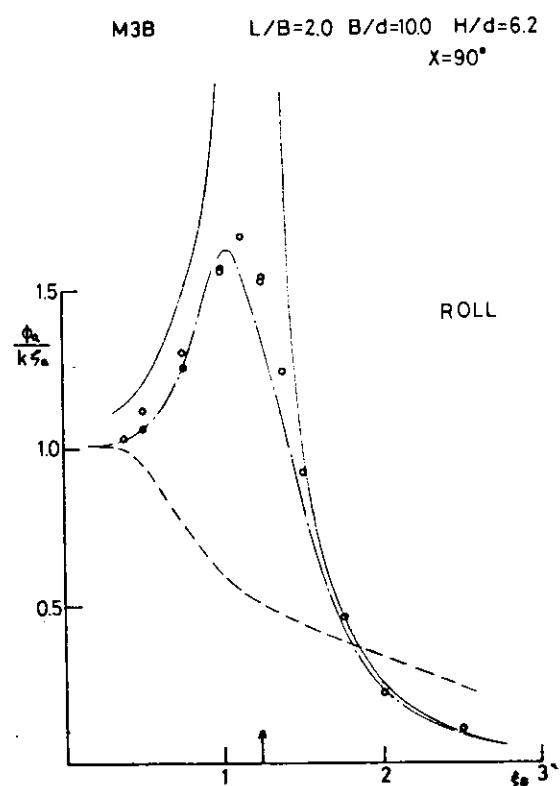


図 2.4.4.7-1 M 3 B,  $H/d = 6.2$ ,  $\chi = 90^\circ$   
 周波数振幅応答

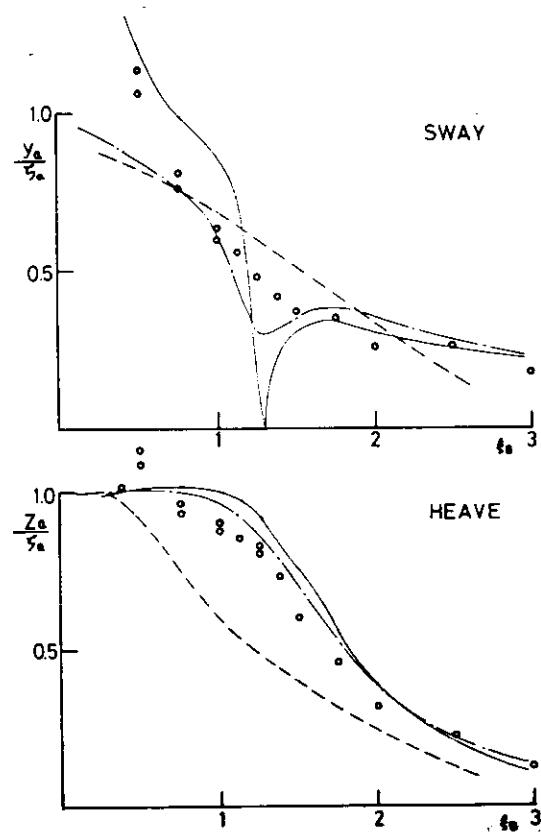


図 2.4.4.7-2

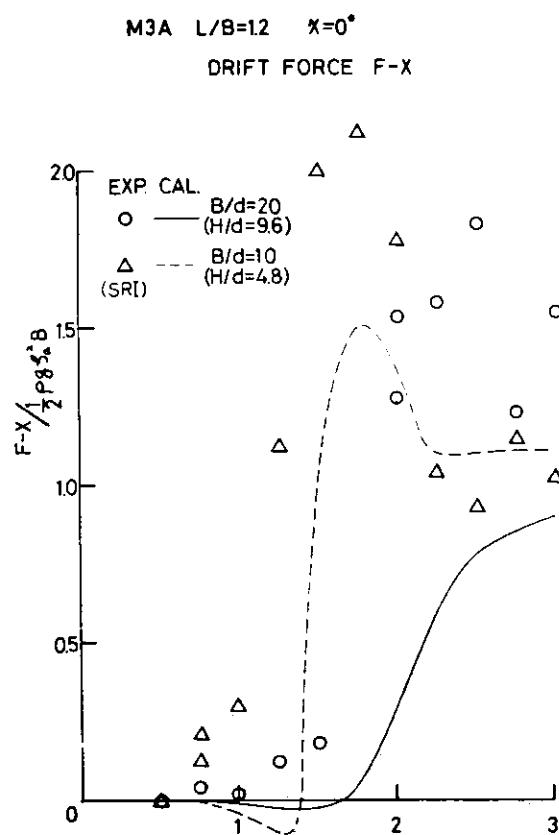


図 2.4.4.8 M 3 A,  $\chi=0^\circ$   
 波浪漂流力

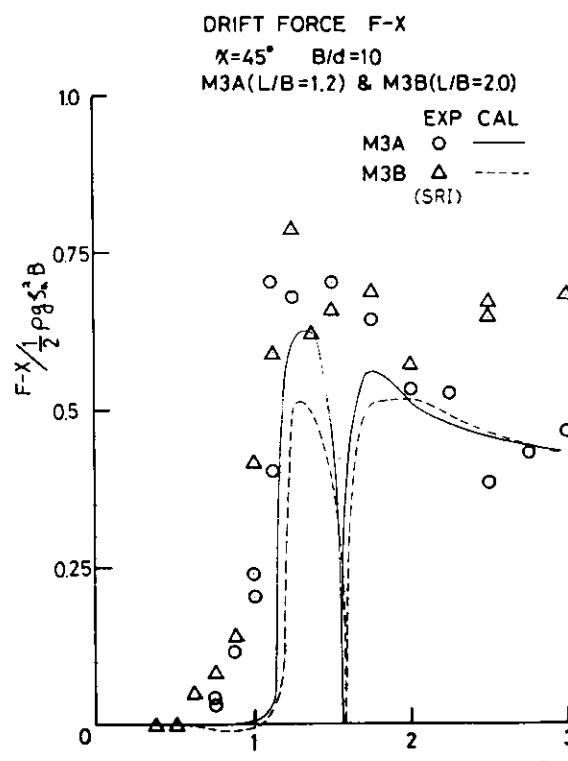


図 2.4.4.9  $\chi=45^\circ$ ,  $B/d=10$   
 波浪漂流力(縦方向)

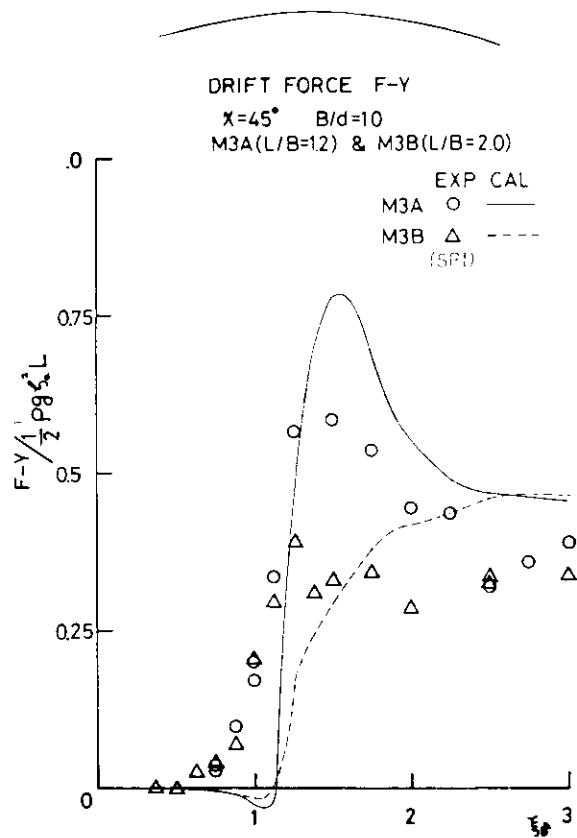


图 2.4.4.10  $\chi=45^\circ, B/d=10$   
波浪漂流力(横方向)

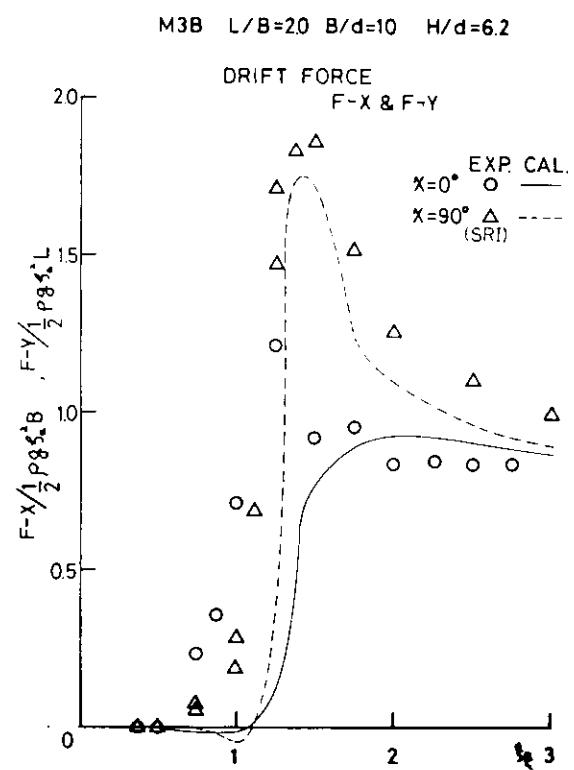


图 2.4.4.11 M3B,  $H/d=6.2$   
波浪漂流力

# 第3章 箱型海洋構造物の係留システムの研究

## 1. 係留ラインの静的特性

### 1.1 まえがき

係留ラインの静的特性計算については、海底が平坦な場合についてカテナリー理論ほかいくつかの計算方法<sup>5)</sup>があるが、ここでは海底地形に変化がある場合についての計算法を実験結果とあわせて報告する。さらに係留ラインの静的特性に及ぼす係留ラインと海底との摩擦力を始めとして、scope、海底傾斜、海底の凹凸、ブイ、シンカーの有無とその大きさ及びラインの伸びの影響を表わす設計図表を作成した。

### 1.2 理論式

係留ラインの静的特性を求める場合カテナリー理論が広く用いられる<sup>1)</sup>が、カテナリー理論ではラインに集中荷重<sup>2)</sup>が作用したりライン重量が不均一な場合は煩雑な解となる事はさけられない。

ここでは、カテナリー理論式を誘導する前提条件に立ち返り、係留ラインの力の平衡条件から得られる特性方程式を簡単な差分近似<sup>5)</sup>によって数値解析し、任意係留ラインの静的特性を求ることにする。

図3.1.1.2および図3.1.2.2に示すように鉛直方向にz軸を、水平方向にx軸をとり係留ラインの微小部分に働く力をラインが海底面にある時とない時とに分けて考える。問題は海底も含めてすべて2次元的に扱うものとする。

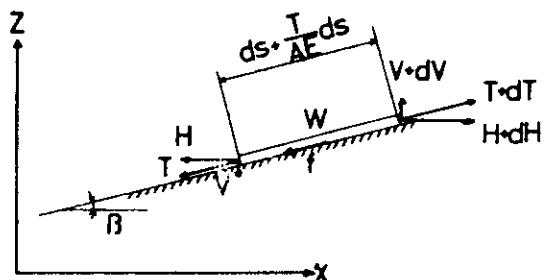


図3.1.2.1 Forces on mooring line segment on the sea bed

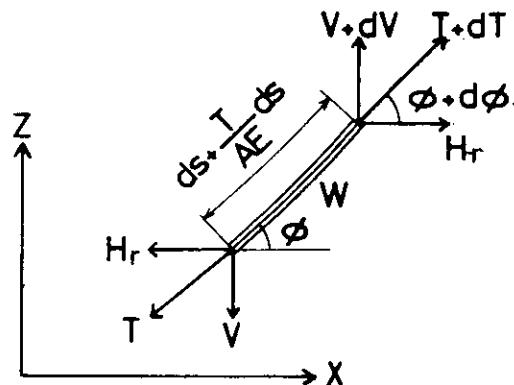


図3.1.2.2 Forces on mooring line segment in water.

ラインが海底面にある時には図3.1.2.1に示すようにラインの動く方向とは逆方向に摩擦力が働く事を考慮する。微小部分の左端に作用する張力をT、その水平、鉛直方向分力をH、V、とし海底の傾斜角をβ、ラインの左端部がX軸となす角をφとする。各々の値の微小部分における増分をdT、dH、dV、dφとすると、右端部における値はそれぞれT+dT、H+dH、V+dV、φ+dφとなる。微小部分の長さ(ds)は張力(T)の作用によって(ds + T ds/AE)に伸びる(AEはラインの伸び率)。係留ラインに張力が働くかない状態で、単位長さ当たりの重量をwとすると、鉛直方向の力の平衡条件から、

$$dV = w ds \quad (3.1.1)$$

であり、また張力は鉛直方向分力と水平方向分力の合力であるから、次式の関係が成立する。

$$\left. \begin{aligned} (T + dT)^2 &= (V + dV)^2 + (H + dH)^2 \\ T^2 &= V^2 + H^2 \end{aligned} \right\} \quad (3.1.2)$$

これより、2次の項を省略すると次式を得る。

$$TdT = VdV + HdH \quad (3.1.3)$$

$$\begin{aligned} dT &= \frac{V}{T} dV + \frac{H}{T} dH \\ &= \sin \phi dV + \cos \phi dH \\ &= \sin \phi w ds + \cos \phi dH \end{aligned} \quad (3.1.4)$$

ラインが海底面にある時には(3.1.4)式における $\phi$ は $\beta$ であり、接地圧( $w ds \cos \beta$ )に比例する摩擦係数を $\mu$ とすると、図3.1.2.1で摩擦力 $f$ は、

$$f = \mu w ds \cos \beta \quad (3.1.5)$$

と書ける。故に、 $f$ がXの負の方向(アンカー側)に働く時を正とすると、張力の増分は、

$$dT = w ds \sin \beta + \mu w ds \cos \beta \quad (3.1.6)$$

となり、(3.1.4)式と比べると、

$$dH = \mu w ds \quad (3.1.7)$$

の関係を得る。また、ラインが海底面にあるための条件は $d\phi = 0$ で、 $\phi = \beta$ の一定値である。

次に、ラインが海底から離れた場合は、ラインに作用する潮流抵抗などの外力を無視すると、(3.1.4)式において $dH = 0$ となるので、

$$dT = w ds \sin \phi \quad (3.1.6)'$$

となる。また、図3.1.2.3から微分幾何によって

$$d\phi = \frac{w}{T} \cos \phi ds \quad (3.1.8)$$

の関係を得る。ラインが海底面にあるなしにかかわらず $dX, dZ$ は、

$$dX = \left(1 + \frac{T}{AE}\right) \cos \phi ds \quad (3.1.9)$$

$$dZ = \left(1 + \frac{T}{AE}\right) \sin \phi ds \quad (3.1.10)$$

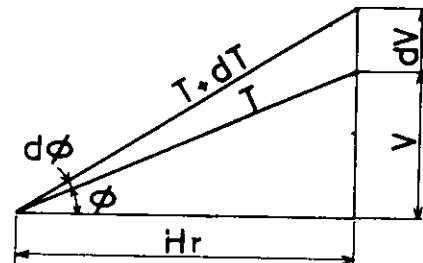


図3.1.2.3 Force diagram

である。ここで、(3.1.1)、(3.1.6)～(3.1.10)の関係式をラインに沿って積分すれば、それぞれから $V, T, \phi, X, Z$ が求められる。

### 1.3 数値計算<sup>5)</sup>

前節で求められた微分方程式を差分方程式で近似すると、(3.1.1)、(3.1.6)～(3.1.10)式に対して

$$\Delta V_i = w_i \cdot \Delta S_i \quad (3.1.11)$$

$$\Delta H_i = \mu w_i \cdot \Delta S_i \quad (3.1.12)$$

$$\Delta T_i = w_i \sin \phi_{i-1} \cdot \Delta S_i + \mu w_i \cos \phi_{i-1} \cdot \Delta S_i \quad (3.1.13)$$

$$\Delta \phi_i = \frac{w_i}{T_i} \cos \phi_{i-1} \cdot \Delta S_i \quad (3.1.14)$$

$$\Delta X_i = \left(1 + \frac{T_{i-1}}{AE_i}\right) \cos \phi_{i-1} \cdot \Delta S_i \quad (3.1.15)$$

$$\Delta Z_i = \left(1 + \frac{T_{i-1}}{AE_i}\right) \sin \phi_{i-1} \cdot \Delta S_i \quad (3.1.16)$$

となる。ここで、各式をラインが海底面にある時とない時に対して使いわける。つまり、ラインが海底面にある時

は $\Delta\phi_i = 0$ であり、(3.1.15), (3.1.16)式の $\phi_{i-1}$ は $\beta$ である。また海底面からラインが離れると、(3.1.12), (3.1.13)式で、 $\mu = 0$ と見做す。係留ライン全長をN個のセグメントに分割し、端部(アンカーポイント)における境界条件を $V_0$ ,  $H_0$ ,  $T_0$ ,  $\phi_0$ ,  $X_0$ ,  $Z_0$ とすれば、n番目のセグメントにおける値は、

$$V_n = V_0 + \sum_{i=1}^n \Delta V_i \quad (3.1.17)$$

$$H_n = H_0 + \sum_{i=1}^n \Delta H_i \quad (3.1.18)$$

$$T_n = T_0 + \sum_{i=1}^n \Delta T_i \quad (3.1.19)$$

$$\phi_n = \phi_0 + \sum_{i=1}^n \Delta\phi_i \quad (3.1.20)$$

$$X_n = X_0 + \sum_{i=1}^n \Delta X_i \quad (3.1.21)$$

$$Z_n = Z_0 + \sum_{i=1}^n \Delta Z_i \quad (3.1.22)$$

で各々求められる。(3.1.17)～(3.1.22)式から明らかな様に、端部の境界条件を定めれば、係留ライン上のすべての点における値が順次求められることになる。

ラインが海底面にある時は、 $\beta$ ,  $\mu$ ,  $w_i$ ,  $\Delta S_i$ , および $A E_i$ が既知であれば、(3.1.11)～(3.1.16)式より、 $\Delta V_i$ ,  $\Delta H_i$ ,  $\Delta T_i$ ,  $\Delta X_i$ ,  $\Delta Z_i$ が計算できる。また、海底から離れた場合は、ラインが海底から離れるラインセグメントの張力の水平方向成分 $H_r$ を用いて、

$$T_{i-1} = H_r / \cos \phi_{i-1} \quad (3.1.23)$$

と置換しておけば、既知の $w_i$ ,  $\Delta S_i$ ,  $A E_i$ ,  $H_r$ に対してある境界条件のもとに $\phi_n$ が定まり、従属的に $T_n$ ,  $V_n$ ,  $X_n$ ,  $Z_n$ も決まることになる。

## 1.4 境界条件

数値計算は係留ラインの端部(アンカーポイント)から出発し、他端部(浮体側係留点)まで順次同一計算を繰り返すことになる。境界条件として以下を考慮する。

### (1) 係留ラインの端部の条件

アンカーポイントをラインセグメント番号(i)の始点とし、ここをラインの座標原点( $X_0 = 0$ ,  $Z_0 = 0$ )とする。

浮体側係留点高さを $Z = Z_c$ とし、そこをラインセグメント番号の終点(N)とする。終点でラインセグメントの高さ $Z_N$ が $Z_c$ と一致する( $Z_N = Z_c$ )ように初期条件 $\phi_0$ を仮定する。 $(\phi_0$ を与えれば、(3.1.14), (3.1.16), (3.1.20), (3.1.22)式より $Z_N$ は一義的に定まる。)ただし、これだけの条件では係留ラインは海底及び海面の境界条件を満足しない。したがって、これらの取扱い方法を以下に示す。

### (2) 海底の条件

海底地形を表わすために図3.1.4.1に示すようにアンカーポイントを原点とするライン座標と同一の座標を用いる。

海底地形はこの座標上に与えられた点を順次直線で結ぶことによって表現する。さらに( $k-1$ )番目の点と $k$ 番目の点を結ぶ直線がX軸となす角を $\beta_k$ と表わし、この直線を $k$ 番目の海底セグメントと呼ぶことにする。このように表現した海底に対してラインは海底以下になる事はないものとする。すなわち、もしラインセグメントの座標

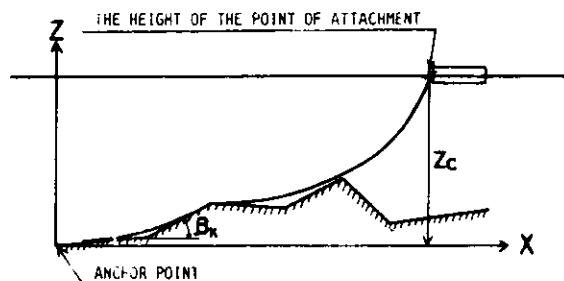


図3.1.4.1 Coordinate of sea bed  
and line segment

$(X_i, Z_i)$  が海底セグメントの直線に接すれば、ラインセグメントは海底セグメントに沿って這うものとする。ところで、ここではラインセグメントの長さは海底セグメントの長さに比して十分短いものとして取扱う。したがって、複雑な海底地形においては、ラインセグメントの分割数をより多く取ることにする。

### 1) ラインが海底から離れる条件

いま、 $i$ 番目のラインセグメントが $k$ 番目の海底セグメントの直線上から離れる事を考える。この場合の条件は、図 3.1.4.2 より次の通りである。

$$\phi_i > \beta_k \quad (3.1.24)$$

### 2) ラインが海底の上に凸のナックル点から離れる条件

図 3.1.4.3 に示したようにラインセグメントが海底セグメントの接続点となる上に凸のナックル点から離れる場合は、そこのラインセグメント番号( $i+1$ )の位置を固定し、 $\phi_{i+1}$ を新たな初期条件に仮定して $Z_N = Z_c$ となるための収束計算を行なう。

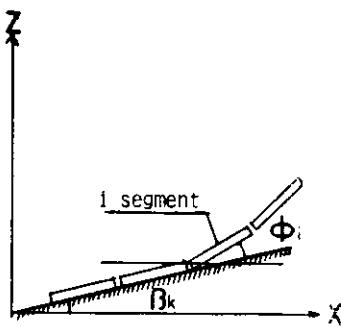


図 3.1.4.2 Line segment rise from slope

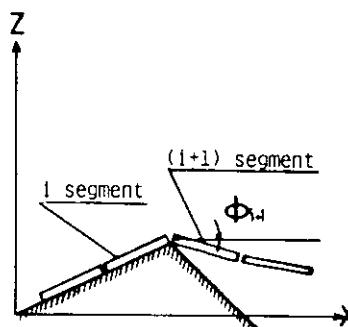


図 3.1.4.3 Line segment rise from knuckle point

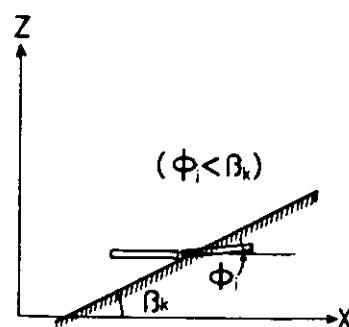


図 3.1.4.4-a Line segment intersected the sea bed

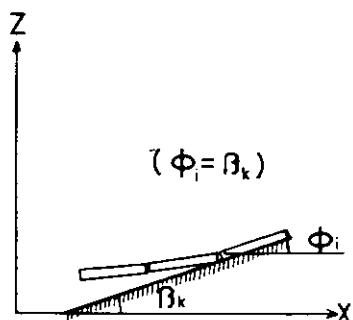


図 3.1.4.4-b Line segment re-touched the sea bed

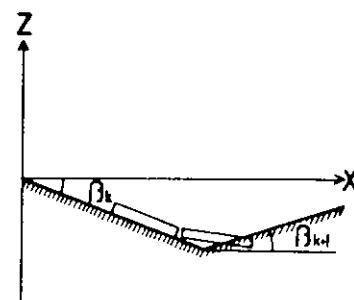


図 3.1.4.4-c Line segment intersected the sea bed at the point close to knuckle point

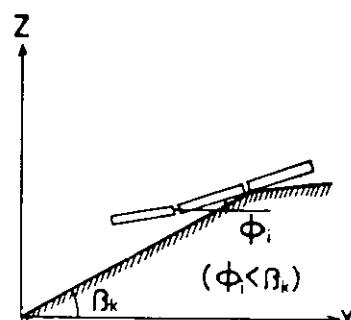


図 3.1.4.5 Line segment re-touched at knuckle point

### 3) ラインが海底に再接地する場合

ラインセグメントが海底セグメントを離れてから再び別の海底セグメントに接地する場合は、その再接地したラインセグメントを固定し、それ以降の収束計算を行なう。ラインが海底に再接地するかどうかの判定は、再接地の条件を無視して $Z_N = Z_c$ となる収束計算をさせた後、ライン上で図 3.1.4.4-a のように $i$ 番目のラインセグメントの座標 $(X_i, Z_i)$ が海底セグメントよりも下にくるか否かによって判定する。また、図 3.1.4.4-c のようにラインセグメントが海底セグメントの下に凸のナックル点近傍で離れる時も図 3.1.4.4-a と同様の事が生じる。この場合も図 3.1.4.4-a の場合と同じ扱い方をする。ただし、海底セグメント間の角度

差が小さい場合（ $1^\circ$ 以下）は、再接地はないものと考えてもほとんど同じ結果が得られるので、これを無視する。図3.1.4.4-aのラインセグメントと海底セグメントの交点においては、

$$\phi_i < \beta_K \quad (3.1.25)$$

となっている。しかし、図3.1.4.4-bの如くラインセグメントが海底セグメントに再接地し、ラインセグメントが海底セグメントに沿って這う条件は

$$\phi_i = \beta_K \quad \text{及び} \quad (X_i, Z_i) = (X_b, Z_b) \quad (3.1.26)$$

でなければならない。このために、海底セグメントに沿って再接地すべきラインセグメント番号を順次繰上げつつ、(3.1.26)式の条件を満足するラインセグメントの初期条件を求める。

上述の手段で(3.1.26)式を満たす点が存在しない図3.1.4.5に示したような場合は、 $\phi_i < \beta_K$ の条件のままでラインをその海底セグメントの端部となるナックル点に収束させる。そして、そのナックル点からはそこ

のラインセグメントを新たな始点とし1),2)に示した手順に従って、 $Z_N = Z_c$ とするための収束計算を行なう。

### (3) 海面の条件

ブイのセグメント（ $w_i$ を負（-）とする）が水面より上に出た時には浮力によるブイの効果はなく、 $w_i = 0$ （ $i$ 番目のセグメントの位置変化はない）として、それ以降の計算は新たに $\phi_{i+1}$ を仮定して $Z_N = Z_c$ となるよう収束計算を行なう。ところで、ブイが水面上に出ない条件として $\phi_{i+1}$ はブイの全没浮力（B）に対して鉛直方向の力の平衡条件から

$$Hr (\tan \phi_{i-1} - \tan \phi_{i+1}) \leqq B \quad (3.1.27)$$

の関係にある（図3.1.4.6）。したがって、ブイが水面にあるときの（ $i+1$ ）セグメントの鉛直方向分力（V）の範囲は、

$$B - Hr \tan \phi_{i-1} \geqq -V > -Hr \tan \phi_{i-1} \quad (3.1.28)$$

であり、 $\phi_{i+1}$ の初期値の範囲は、

$$-\tan^{-1} \{ (B - Hr \tan \phi_{i-1}) / Hr \} \leqq \phi_{i+1} < \phi_{i-1} \quad (3.1.29)$$

である。したがって、この範囲内で $Z_N = Z_c$ となる $\phi_{i+1}$ を決定する。ただし、 $\phi_{i+1} = \phi_{i-1}$ としても、 $Z_N = Z_c$ に収束せず、 $Z_N < Z_c$ であれば、ブイは水面上になければならないので、 $w_i = 0$ としたままで海面の条件を無視する。

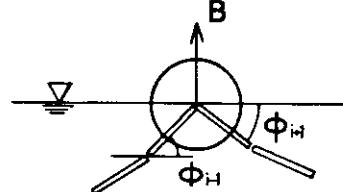


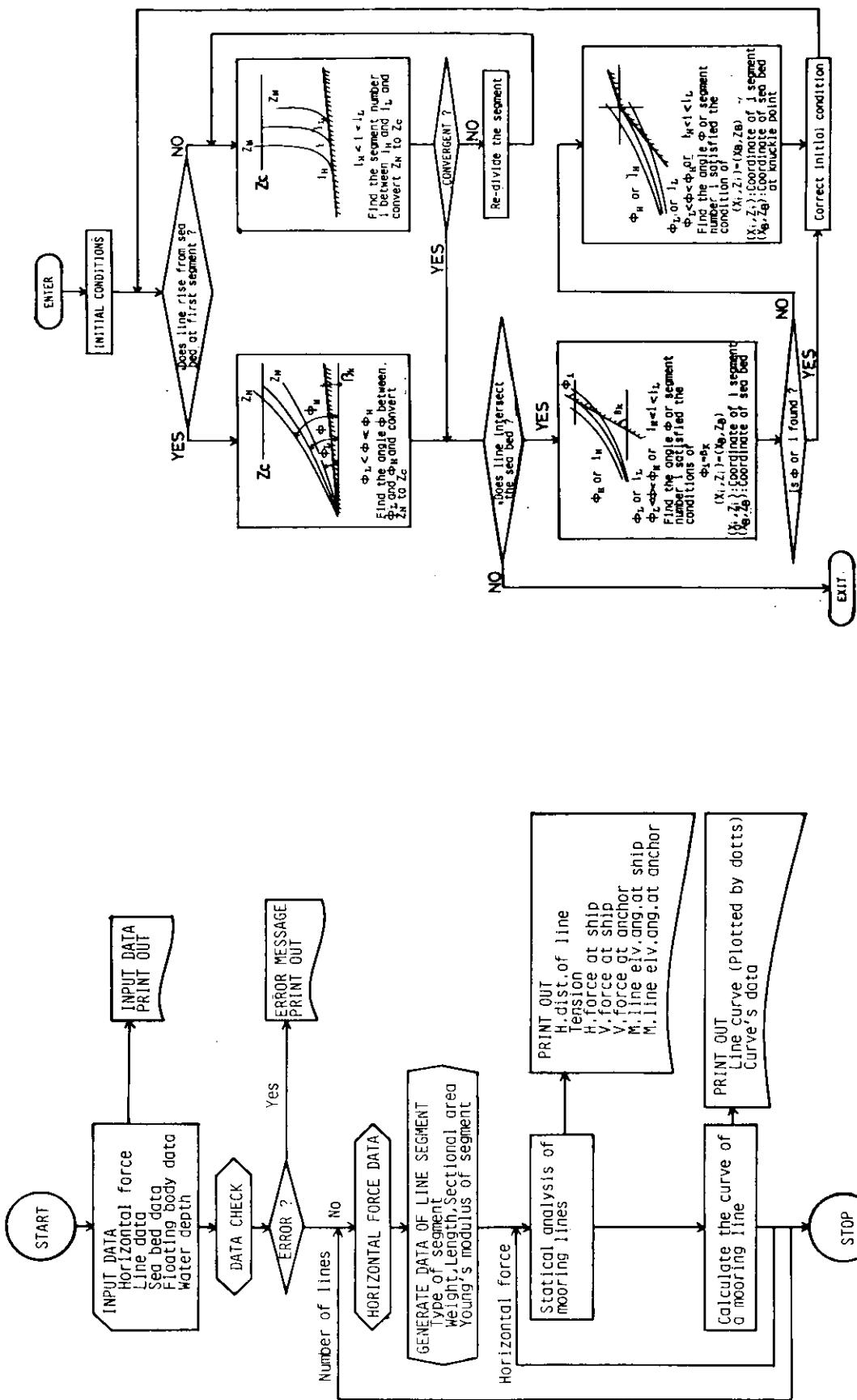
図3.1.4.6 Balance of vertical force at buoy segment

## 1.5 数値計算プログラム

以上に示した関係式と境界条件に従って、係留設計に供する事を目的とした静的特性計算プログラムを開発した。同プログラムのフローチャートを図3.1.5.1に示す。

## 1.6 数値計算の有効性

ここに示したような数値計算はセグメントの分割数を増やせば、それだけ精度よく計算する事ができる。しかしながら、設計上必要な計算精度が得られれば十分である。そこで、今回は海底が一定傾斜の場合についてのカタナリ理論解（Appendix参照）と比較して、誤差が0.1%未満となることを目標に、セグメントの分割数を決定した。したがって、両者のグラフ表示による差異は見られない。一例として、ラインの全長が900mで、 $Z_c = 160m$ 、 $\beta = 5^\circ$ 、 $w = 80.6 \text{ kg/m}$ についての両者の比較を表3.1.6.1に示す。同表はラインセグメントの分割数を200と



## Flow chart of statical analysis of arbitrary mooring lines

### 图 3.1.5.2 Sub-Flow

したものであり、これに必要な計算時間は東京大学大型計算機センターの HITAC M200-H で合計約 1.5 分程度であった。このような差分近似法による計算値がより複雑な条件に対して、どの程度の有効性があるかを実験によって確認したので、以下にその概要を記す。

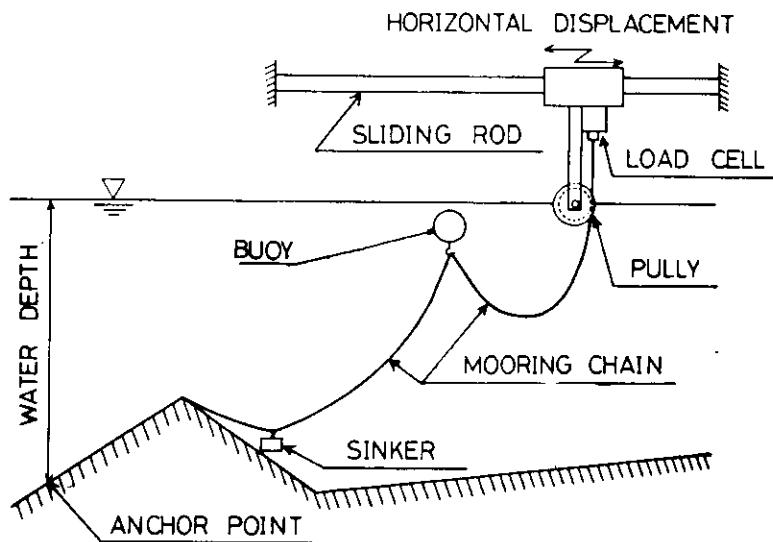


図 3.1.6.1 Testing apparatus for mooring line tension

表 3.1.6.1 Comparison of results calculated by Catenary theory and calculated by present method

H(ton)	X <sub>N</sub> by catenary theory	X <sub>N</sub> by present method	Error (%)
1.0	860.667 m	860.464 m	0.0236
4.0	874.210 m	874.038 m	0.0197
6.0	876.714 m	876.796 m	0.0094
10.0	879.591 m	879.595 m	0.0005
20.0	882.822 m	882.428 m	0.0446
30.0	883.452 m	883.705 m	0.0280
40.0	884.492 m	884.502 m	0.0011
50.0	884.913 m	884.897 m	0.0018
70.0	885.280 m	885.243 m	0.0042
90.0	885.432 m	885.429 m	0.0004
110.0	885.508 m	885.512 m	0.0004
130.0	885.552 m	885.556 m	0.0004
150.0	885.580 m	885.570 m	0.0011

横浜国立大学の水中振動台を用いて、図 3.1.6.1 に示すような実験要領により水平距離と係留ライン張力を測定した。実験に供した係留ラインの単位長さ当り重量( $w$ )は空中で  $78.6 \text{ g/m}$  (水中:  $67.5 \text{ g/m}$ ) であり、カテナリ－係留、シンカーフき係留およびブイつき係留について表 3.1.6.2 に示す種々の海底地形模型に対して実験を行なった。これらの実験結果を図 3.1.6.2 に示す。同図において横軸はアンカー点からの水平距離( $X$ )であり、縦軸は係留ライン張力の増分 ( $T - T_0$ ) を示す。張力の増分を用いた理由は、ロードセルの零点が実験中にドリフトする影響を少なくするためである。すなわち、 $T_0$  は張力の水平成分が零の時の張力で、 $T$  は水平距離が  $X$  の時の張力である。計算値は摩擦力を考慮してはいない。同図より計算値と実験値はブイあるいはシンカーフきを除いて、良好に一致している事が認められる。ブイあるいはシンカーフきのラインにおいて、計算ではこれらを質点荷重として取り扱っているために、実験値と計算値のあいだには若干の差異がある。しかし、これは境界条件の相違によるものである。<sup>5)</sup>

したがって、複雑な海底地形、係留ラインであっても数値計算精度は維持できているものと推察される。

表3.1.6.2 Sea bed coordinates

Condition	Coordinate (X,Z) (cm)
No.1	( 0.0, 0.0)(326.8, 73.5)
No.2	( 0.0, 0.0)(157.7, 0.8)(319.2,-70.1)
No.3	( 0.0, 0.0)( 49.6,-29.3)(224.0,-49.5)
No.4	( 0.0, 0.0)( 94.6, 26.3)(171.7, 12.1)(321.6, 65.0)
No.5	( 0.0, 0.0)(326.6,-74.5)
No.6	( 0.0, 0.0)( 98.0, 7.0)(166.6, 44.5)(324.5, 59.0)

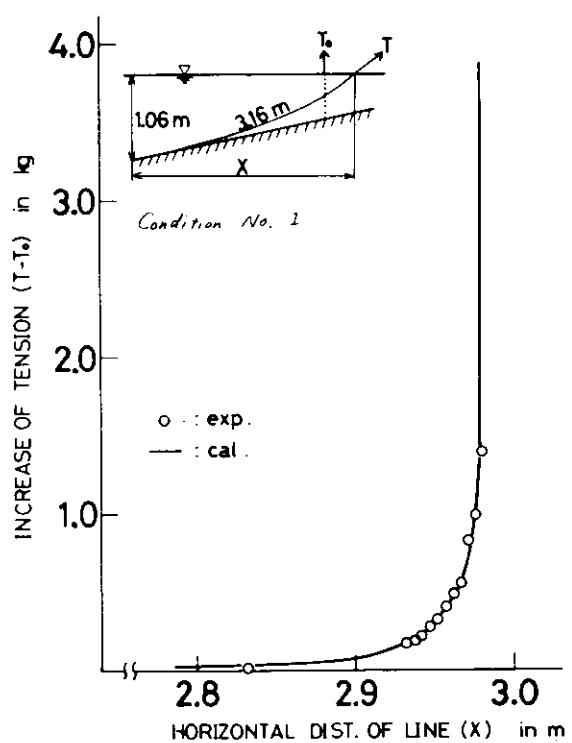


図 3.1.6.2

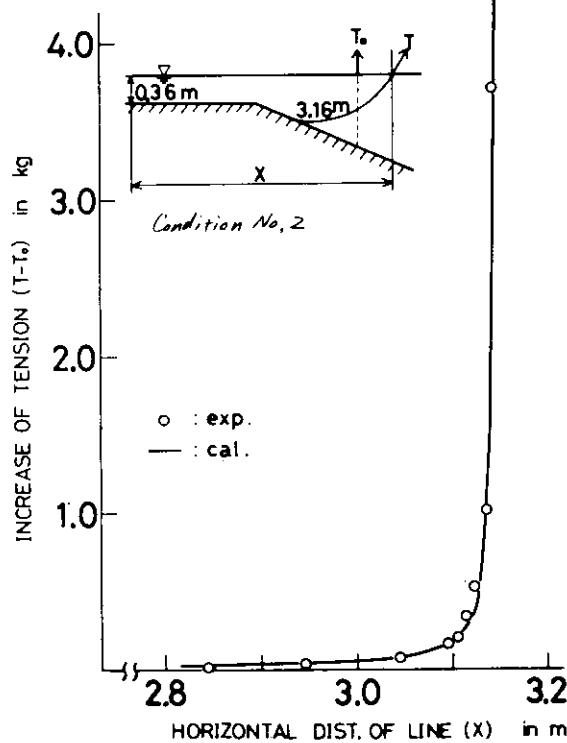


図 3.1.6.2

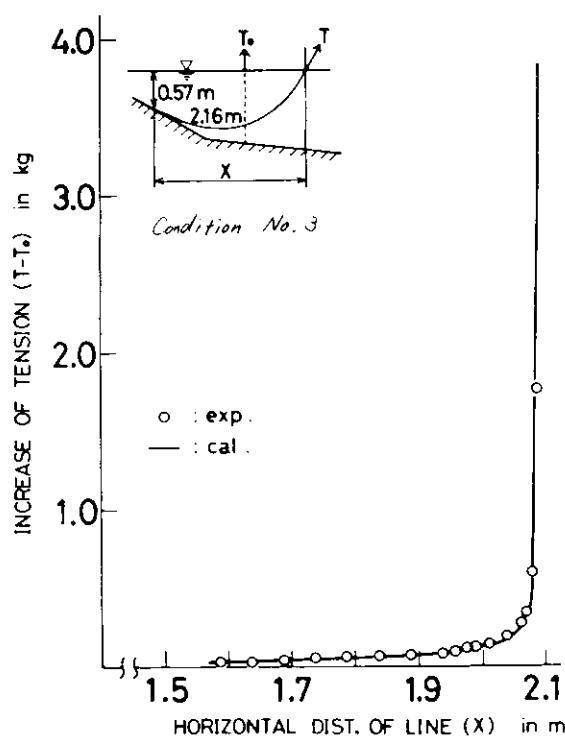


図 3.1.6.2

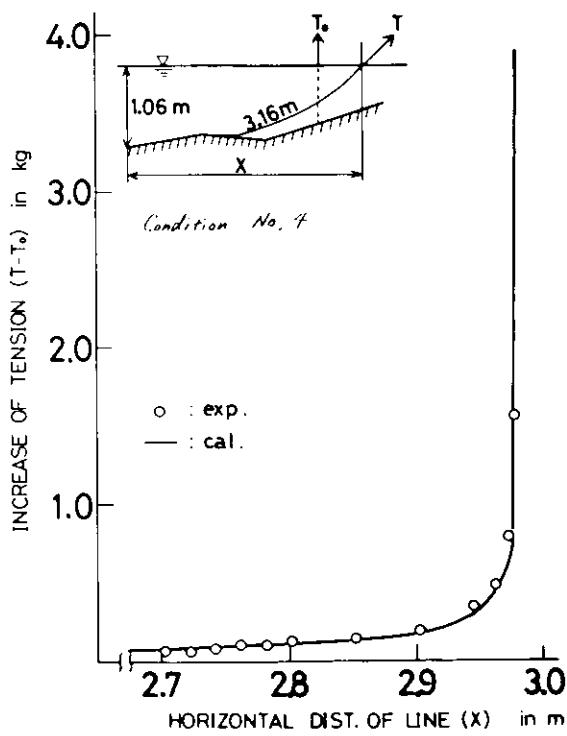


図 3.1.6.2

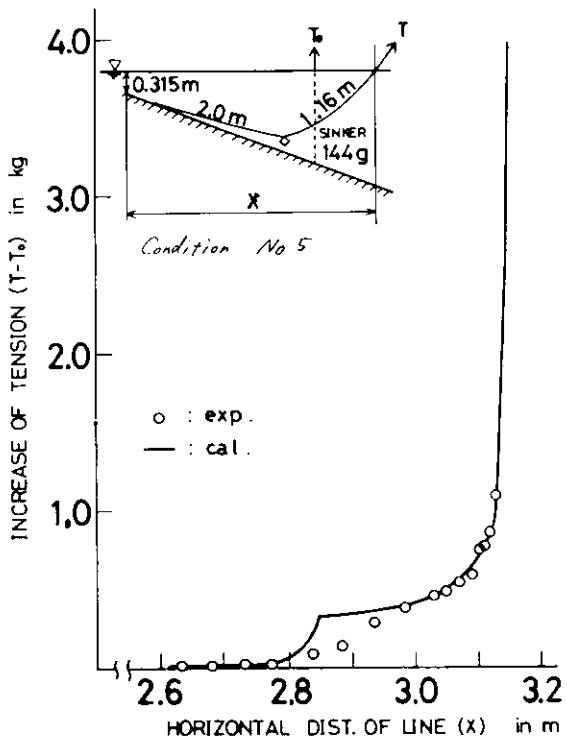


図 3.1.6.2

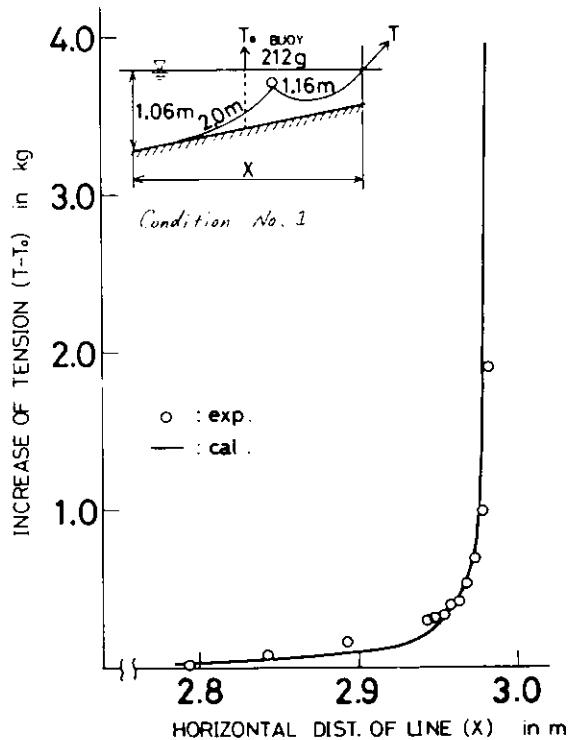


図 3.1.6.2

### 1.7 係留設計に関する考察

水槽実験及びカテナリー理論解などとの比較によって本論文に示した数値計算法の有効性が認められたので、その応用として係留設計の初期検討に資するための設計図表を作成し、係留ラインの静的特性に及ぼす各種のパラメータの影響について考察する。

パラメーターとしてラインと海底の間に働く摩擦力、scope (= (ラインの長さ : L) / (ラインの鉛直高さ :  $Z_c$ ))、海底傾斜、海底地形の凹凸、ブイ、シンカーの有無、その大きさ及びラインの伸びを取り上げる。海底地形の凹凸は図 3.1.7.1 に示す如く直線で表わす波形で代表して考えることにする。係留ライン張力( $T$ )はラインの自重( $wL$ )で無次元化し、アンカーポイントから浮体側係留点までの水平変位( $X$ )はラインが伸びないものとし、その張力が無限大のときの最大水平変位( $\sqrt{L^2 - Z_c^2}$ )で無次元化して表示した。なお、これらの係留特性の図表は伸びの影響を見るもの以外は、伸びを無視して作成してある。

#### 1.7.1 係留ラインと海底との摩擦力の影響

アンカーポイント付近のラインと海底面とに働く摩擦力の影響に対しては図 3.1.7.2 に示したように、一例として、 $scope = 3.26$  の場合(海底は平坦)において、摩擦係数を変化させたときのラインの水平距離とアンカーポイントにおける張力の関係を示した。同図より、同一の水平距離、すなわち同一の浮体側係留点での張力で、摩擦係数が大きいほど、アンカーポイントに鉛直方向の力が作用しない範囲で、アンカーポイントでの張力が小さくなることがわかる。このように、ラインと海底との摩擦力を考慮することによって、アンカーの把駆力を落とし

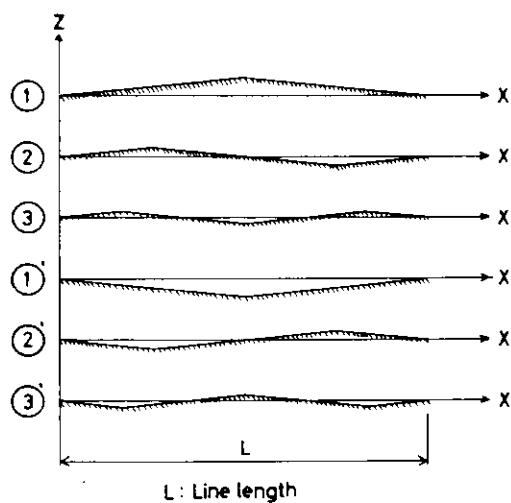


図 3.1.7.1 Sea bed models used for chart

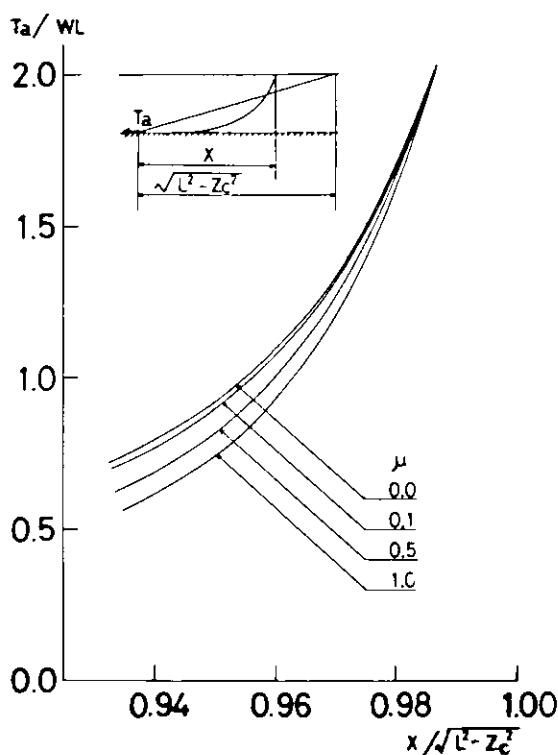


図3.1.7.2 Design chart using friction coefficient

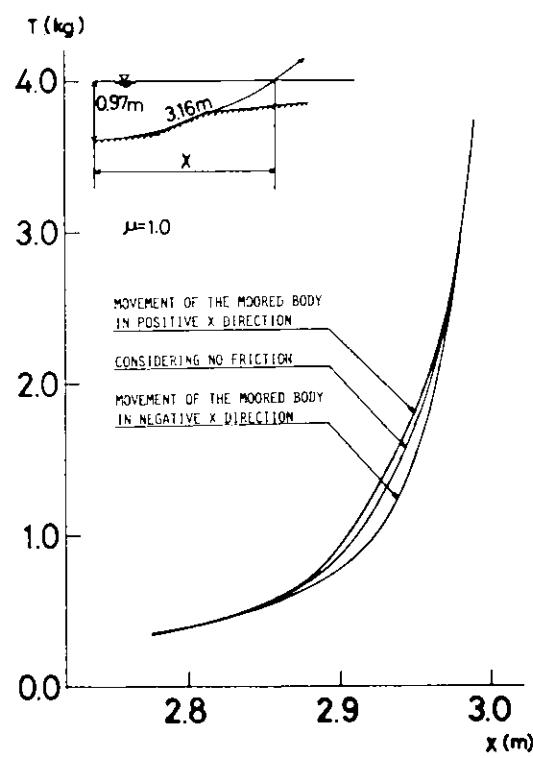


図3.1.7.3 Example of an effect of friction on mooring lines characteristics

た係留設計が可能な事がわかる。

ラインが凹凸のある海底に再接地する場合には、張力の増加時と減少時とでは摩擦力の方向が逆になるために、図3.1.7.3に示したように係留特性にヒステリシスが生じる。同図に示した例は、海底地形を表3.1.6.2のNo.6とし、摩擦係数( $\mu$ )を1.0としたものである。

### 1.7.2 scope の影響

係留ラインのscopeを2から10まで変化させて、各々のscopeに対する係留特性を無次元化したもの図3.1.7.4に示す。同図は海底を平坦としたものである。scope小のときは、アンカー点に小さな相対水平変位( $X / \sqrt{L^2 - Z_c^2}$ )で鉛直方向分力が働き、張力が緩かな増加を示す。また、scopeが大きくなるにつれて、ラインの最大水平変位に対する変位の大きい部分で、張力が急激に増加する事がわかる。浮体側係留点が静水面にあれば、scopeの逆数は係留ラインの長さに対する水深の比でもあり、scopeが大きいほど、係留ラインの長さに比して水深が浅いことになる。したがって、浅海域での係留ラインは水平変位に対する張力の増加が急激になる、あるいは逆に、係留浮体に働く外力の増加に伴なう係留ライン張力の増加に比して水平変位が小さいとも言える。

### 1.7.3 海底傾斜の影響

海底の地形変化に対する設計図表(図3.1.7.5, 6)を作成するのに先立ち、海底地形が係留特性に大きく影響したと考えられる実機の施工例を参考にし、海底地形のパラメーター等を決定した。

scopeの値を固定して( $L / Z_c = 6$ )、海底に一定の傾斜がある場合の係留特性を図3.1.7.5に示す。海底の傾斜として、

$$\tan(\beta) = \pm 1/100, \pm 1/50, \pm 1/20, \pm 1/10$$

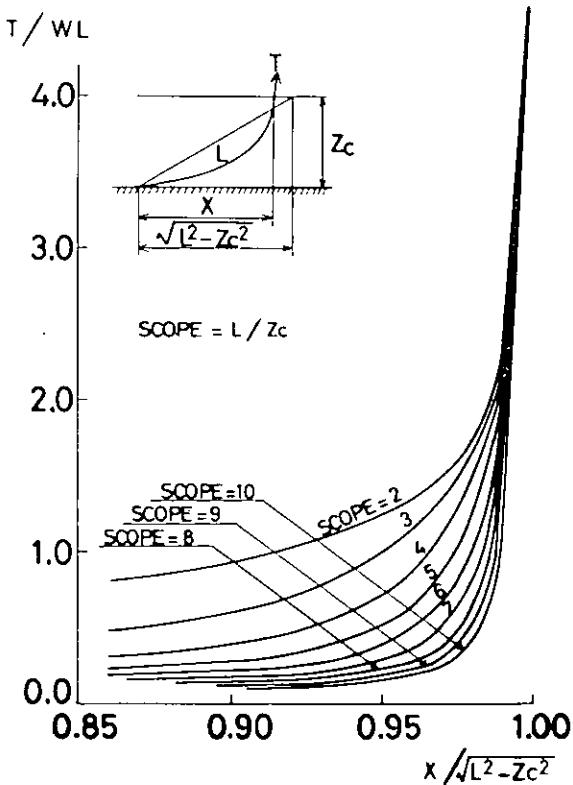


図 3.1.7.4 Design chart using scope parameter

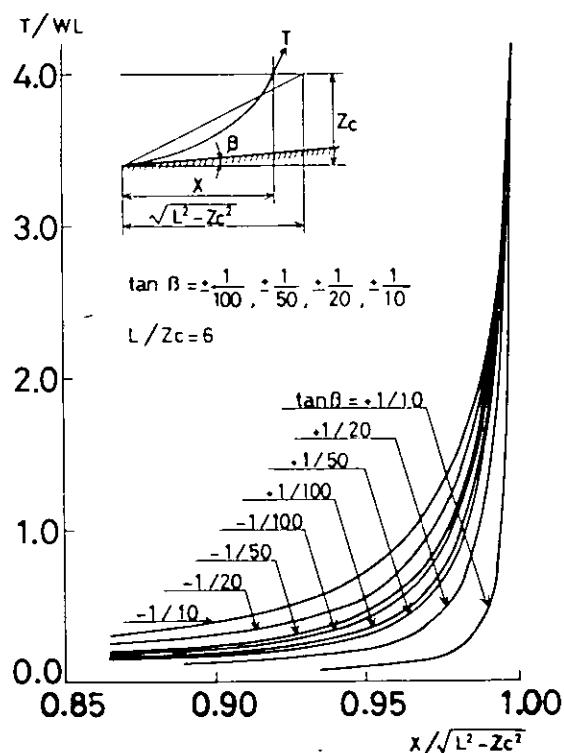


図 3.1.7.5 Design chart using slope parameter

とした場合を図示した。係留特性は傾斜角が小さくなる（アンカーポイントの水深よりも浮体側係留点での水深の方が深くなる）に従って、変位に対する張力の増加が緩やかであることがわかる。すなわち、係留特性に及ぼす海底傾斜角の大小の影響は scope のそれと同傾向である。

#### 1.7.4 海底地形の凹凸の影響

図 3.1.7.6 に海底地形の凹凸の影響を見るための設計図表を示す。同図において海底地形の山の数が 1 つの場合で、アンカーポイントにおける海底傾斜が正のとき (①) が一番下の特性曲線で、負のとき (②) が一番上にある。山の数を増やしていくに従って係留特性は両者の曲線の間で変化していく、次第に平坦な海底条件の係留特性に近づく様子が見取れる。このように、図 3.1.7.1 に示した海底地形でアンカーポイントにおける海底傾斜が正と負では、係留特性に明らかな相違がある。また、波形の山の数が多くなるに従って山の高さが小さくなり（傾斜角は一定）、徐々に平坦な海底条件に近づくことがわかる。しかし、同時に、海底地形の凹凸は、

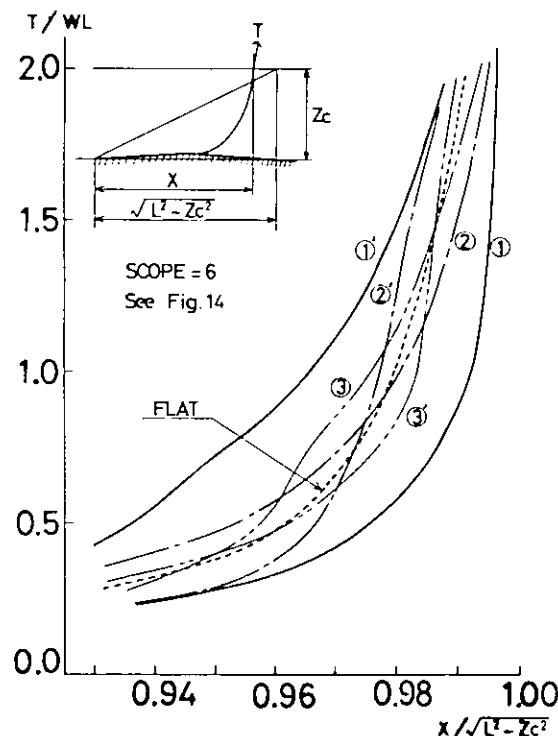


図 3.1.7.6 Design chart using roughness parameter

従来その取り扱いの煩雑さが故に、無視されることが多かったにもかかわらず、係留特性にかなり影響を及ぼすことも理解できる。

### 1.7.5 シンカー、ブイの影響

図3.1.7.7、図3.1.7.8にそれぞれシンカー及びブイが係留ラインに付加された場合の設計図表を示す。図3.1.7.7によれば、シンカーの重量が増すに従って変位に対する張力の特性は、シンカーが海底から離れる水平変位付近で、急激に増加する事がわかる。また、シンカーが海底から離れた後の係留特性を見ると、より重いシンカーを付ける事はラインの自重を増すこと、あるいはscopeの値を小さくすることに対応しているともいえる。

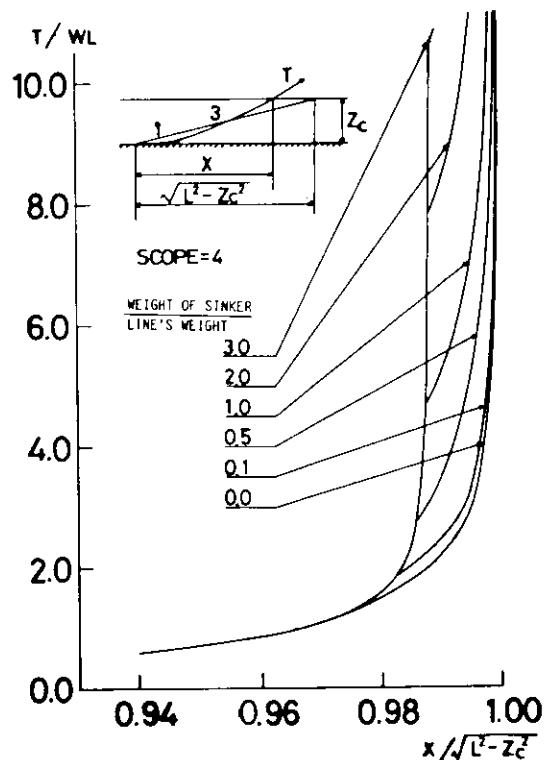


図3.1.7.7 Design chart using sinker parameter

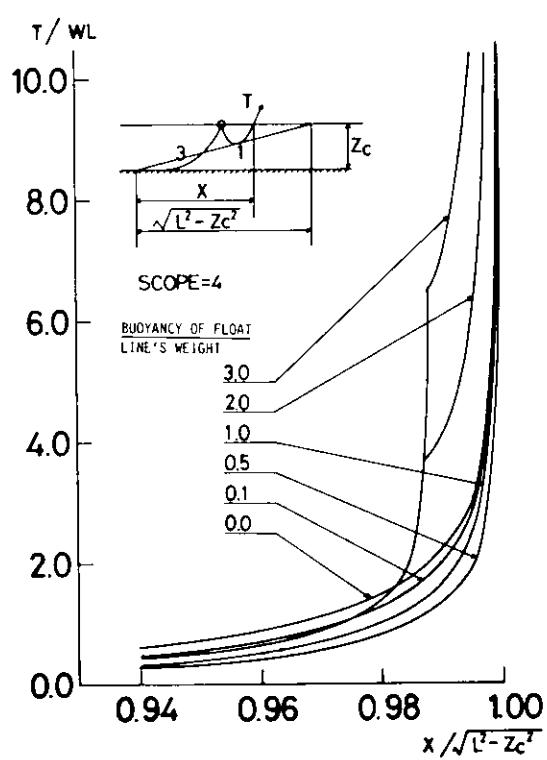


図3.1.7.8 Design chart using buoy parameter

次に図3.1.7.8からブイ付の場合を見ると、浮力がラインの自重よりも小さい時は、ブイが水面上に出る事はなく、係留特性はブイが付いていない場合よりもラインの自重を軽くすること、あるいは、scopeを大きくしたときの係留特性の傾向を示す。これに対して、浮力がラインの自重よりも大きくなると、ブイが水面上に浮上する事により、上述の傾向が反転する。また、この場合、ブイが水面から沈み始める点で係留特性は変化し、その後の傾向はシンカー付の場合と同傾向となる。

### 1.7.6 ラインの伸びの影響

係留ラインとして一般に使用されているチューインやワイヤーロープのうちで、比較的伸びることが知られている<sup>7)</sup>ワイヤーロープについて、その伸びが係留特性に与える影響を図3.1.7.9に示した。同図でワイヤーロープの破断荷重は無次元値(T/wL)で20~23である。係留ラインの張力の小さい時(T/wL=2~3)は、伸びの影響は余り大きくなりが、破断荷重に対する安全率が1.5~2程度に相当する張力(T/wL=10~15)においては、伸びの影響が大きい事がわかる。したがって、ワイヤーロープを用いた係留においては、その伸びを考慮した設計が必要となる。

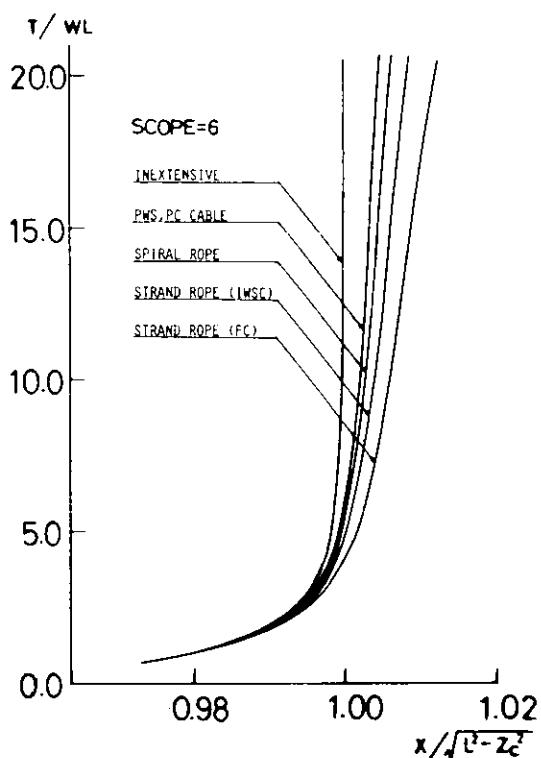


図3.1.7.9 Design chart using extension parameter

#### 参考文献

- 1) 上田茂, 白石悟 : カテナリー理論による最適係留鎖の選定法および計算図表, 港湾技研資料No.379(1981.6)
- 2) 床司邦昭 : 係留浮体の運動と係留索の張力に関する研究, 日本造船学会論文集, Vol.1, 138(1975), pp 233~246
- 3) M. Deha Korkut, E. J. Hebert : Some Notes on Static Anchor Chain Curves OTC - 1160 (1970. 4)
- 4) 日本造船学会 : 第2回海洋工学シンポジウム—浮遊構造物の係留問題を中心として (1976. 6)
- 5) 井上義行 : 任意係留ラインの静的特性計算, 石川島播磨技報, 第16巻, 第5号 (1976. 9)
- 6) フローティングベース "RED SEA" "YARM OUK" の概要, 石川島播磨技報, 第18巻, 第6号(1978.11)
- 7) 日本造船研究協会 : 第187研究部会, 海洋構造物の深海係留に関する調査研究報告書, 昭和57年3月
- 8) 中川清七 : 海底地形の変化を考慮した任意係留ラインの静的特性計算, 横浜国立大学工学部船舶・海洋工学科, 昭和55年度, 卒業論文

#### Appendix 一定傾斜がある場合のカテナリー理論解

- T : ライン張力      H : ライン水平力  
 w : ライン単位重量      V : ライン垂直力  
 S : ライン長(カテナリー部分)  
 X : 接地点と浮体側係留点との水平距離  
 Z : 接地点と浮体側係留点との鉛直距離  
 $\beta$  : 海底傾斜角  
 $\phi$  : 浮体側係留点でのラインの立上り角

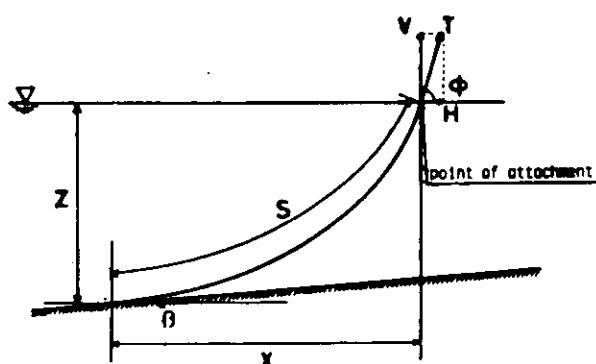


図3.1.A-1 Catenary line with sea bed condition of constant slope

X, Z, Sを $\phi$ ,  $\beta$ , Hで表現すると次式の如くなる。

$$\begin{aligned} S &= a (\tan \phi - \tan \beta) \\ X &= a \{ \sinh^{-1}(\tan \phi) - \sinh^{-1}(\tan \beta) \} \\ Z &= a (\sec \phi - \sec \beta) \\ &\quad (\text{ただし, } a = H/w) \end{aligned}$$

## 2. 係留ラインの動的特性

### 2.1 計算法の適用範囲

係留浮体が波、風等の変動外力を受けて運動する時、係留ラインには変動張力が生ずる。この変動張力の計算は従来は係留ラインの静的復原力だけを考えて行っていたが、海象が厳しく係留ラインの運動加速度が大きい時には係留鎖に加わる慣性力、流体力を考慮に入れないと変動張力を過少に見積る事になる。また、係留鎖が構造物に対して比較的大きい場合には、構造物の運動推定にも誤差を生ずる。動的影響については近年種々の計算法が提案されているが、変動張力の計算法は簡便でしかも精度がよいことが望ましいので、各計算法の適用限界をあらかじめ知っていることが必要である。係留鎖の状態は図3.2.1.1に示すようにその重心の運動加速度が非常に小さい状態から、加速度が大きくなるに従って順次(I)準静的平衡状態、(II)調和振動状態、(III)弛緩、緊張状態、(IV)自由落下、緊張状態に分類される。<sup>1), 2)</sup> この4つの状態の内、(I)の準静的平衡状態では静的復原力だけを考えて計算すれば十分である。また(II)の調和振動状態では係留鎖の運動はカテナリー理論から求めて、運動によって生ずる慣性力、粘性抗力を静的復原力にたし合せて張力を計算する簡易計算法<sup>3), 4)</sup>が有効である。(III), (IV)の状態では伸びを考慮に入れたランプドマス法<sup>1), 5)</sup>、有限要素法<sup>6)</sup>等の数値計算法によらなければならない。それぞれの状態は係留ラインの無次元平均運動加速度  $\alpha$  ( $= \frac{\omega^2 Z_m}{g}$ ) で区分することができる。それは簡易計算法によって次のように求められる(ただし、ここでは中間ブイ、シンカー等のついていない場合を考える)。

カテナリーラインに加わる動的変動張力の鉛直成分  $F_v^{(d)}$  は近似的に次式で求められる。

$$\left. \begin{aligned} F_v^{(d)} &= \omega^2 (M + \Delta M) Z_m \cos \omega t + \frac{4 \rho_w C_d D c S_0 \cos^3 \theta_m Z_m^2 \omega^2 \sin \omega t} {3 \lambda} \\ &\equiv F_{v1} \cos \omega t + F_{v2} \sin \omega t \end{aligned} \right\} \quad \dots \quad (3.2.1)$$

$\omega$ は係留点の運動円周波数、Mはカテナリーラインの質量、 $\Delta M$ は付加質量、 $\rho_w$ は水の密度、 $C_d$ は抗力係数、 $D c$ は鎖の等価直径、 $S_0$ はカテナリーラインの全長、 $\theta_m$ はラインの平均傾斜角である。また、 $Z_m$ は係留ライン重心の鉛直方向運動変位でカテナリー理論により次式で求められる。

$$\begin{aligned} Z_m &= \frac{T_{ht}}{w} \left( \frac{1}{2} \cosh(Dt) - 1 + \frac{(Dt)}{2 \sinh(Dt)} \right) \\ &- \frac{T_{ho}}{w} \left( \frac{1}{2} \cosh(Do) - 1 + \frac{Do}{2 \sinh(Do)} \right) \end{aligned} \quad \dots \quad (3.2.2)$$

ただし、添字tは係留ラインが運動によって張力が最大になった時を示し、oは初期張力の状態を示す。 $T_h$ は係留ラインの水平方向張力成分、wは単位長さ当たりの係留ライン水中重量、 $D = wX_o / T_{ho}$ ( $X_o$ はカテナリーラインの水平方向長さ)で、 $T_h$ 、Dともにカテナリー理論で求められる。

運動する係留ラインの全張力の鉛直成分  $T_v$  は次式で求められる。

$$\begin{aligned} T_v &= T_{vo} + F_v^{(s)} - F_v^{(d)} \\ &= T_{vo} + (F_v^{(s)} - F_{v1}) \cos \omega t - F_{v2} \sin \omega t \end{aligned} \quad \dots \quad (3.2.3)$$

ただし、 $T_{vo}$ は初期張力の鉛直成分、 $F_v^{(s)}$ は静的復原力で次式で求められる。

$$F_v^{(s)} = C_{xz} X_A + C_{zz} Z_A \quad \dots \dots \dots (3.2.4)$$

ただし、 $X_A$ ,  $Z_A$ は係留点のX-Z方向変位、 $C_{xz}$ ,  $C_{zz}$ は係留鎖の線形バネ定数でカテナリー理論により次のように求められる。

$$\left. \begin{aligned} C_{xx} &= \frac{w \sinh D}{D \sinh D - 2(\cosh D - 1)} \\ C_{xz} &= \frac{w(\cosh D - 1)}{D \sinh D - 2(\cosh D - 1)} \\ C_{zz} &= \frac{w(D \cosh D - \sinh D)}{D \sinh D - 2(\cosh D - 1)} \end{aligned} \right\} \quad \dots \dots \dots (3.2.5)$$

また水平方向の全張力 $T_H$ は次式で求められる。

$$T_H = T_{HO} + (F_H^{(s)} - F_{Ht}) \cos \omega t - F_{HD} \sin \omega t \quad \dots \dots \dots (3.2.6)$$

ただし、 $F_{Ht}$ ,  $F_{HD}$ はそれぞれ運動する係留ラインに加わる慣性力、粘性抗力の水平成分である。また $F_H^{(s)}$ は静的復原力で次式で求められる。

$$F_H^{(s)} = C_{xx} X_A + C_{xz} Z_A \quad \dots \dots \dots (3.2.7)$$

ここでカテナリーの形状が運動中も変わらないと仮定すれば $F_{Ht}$ ,  $F_{HD}$ は次式で求められる。

$$\left. \begin{aligned} F_{Ht} &= F_H^{(s)} - \frac{T_{HO}}{T_{vo}} (F_v^{(s)} - F_{vt}) \\ F_{HD} &= \frac{T_{HO}}{T_{vo}} F_D \end{aligned} \right\} \quad \dots \dots \dots (3.2.8)$$

準静的平衡状態(I)と調和振動状態(II)の境界では変動張力成分の中で慣性力が静的復原力の2倍程度であるので境界での加速度 $\alpha_H$ は(3.2.4)式と(3.2.1)式から次のように求められる。

$$\alpha_H = \frac{2(C_{xz} X_A + C_{zz} Z_A)}{S_0 w_a + C_a S_0 \rho_w \frac{\partial}{\partial V}} \quad \dots \dots \dots (3.2.9)$$

ただし、 $w_a$ は係留ラインの単位長さ当たりの空中重量、 $C_a$ は係留ラインの垂直方向付加質量係数、 $\rho_w$ は海水の密度、 $\Delta V$ は係留ラインの単位長さ当たりの排水体積。

調和振動状態(II)と弛緩・緊張状態(III)の境界の運動加速度 $\alpha_S$ は張力の最小値が0になるので、(3.2.1), (3.2.3)式から次のように求められる。

$$\alpha_S = \frac{1 - \frac{\rho_w}{\rho_c}}{\left[ \left( 1 + \frac{\Delta M}{M} \right)^2 + \left( \frac{16 \rho_w C_d \cos^3 \theta_m Z_m}{3 \pi^2 \rho_c D_c} \right)^2 \right]^{1/2}} \quad \dots \dots \dots (3.2.10)$$

ただし、 $\rho_c$ は係留鎖の密度。

また弛緩・緊張状態(II)と自由落下、緊張状態(III)の境界の無次元運動加速度 $\alpha_F$ は重力の加速度と平均運動加速度が等しくなったとするので次式で求められる。

$$\alpha_F = 1.0 \quad \dots \dots \dots (3.2.11)$$

中間ブイ、シンカー等についていない場合は以上のように考えてよい。

中間ブイ、シンカー等がついている場合の係留鎖変動張力に及ぼす動的影響についてはまだ研究が不十分であるが、本研究で行った実験的研究によれば、中間ブイがついている場合は、動的影響が比較的小さい。しかしながら、この事は中間ブイ、シンカーの位置及び大きさによって変ると思われる所以、結論は今後の研究に待たねばならない。したがって当面は、係留点の運動加速度が比較的大きいと思われる場合は模型実験あるいはランプドマス法、

有限要素法による動的計算を行うことが必要と思われる。次項にランプドマス法<sup>5)</sup>の簡単な紹介をする。

## 2.2 ランプドマス法による係留ラインの動的解析

### 2.2.1 係留ラインの運動方程式

図3.2.2.1に示すように係留ラインをN等分の要素に分割し、各要素jの質量 $M_j$ 及び各要素に作用する力を一点に集中して考える。また、各質点間は重さのない直線バネで結ばれているものとして各質点の運動と各質点間の張力を計算する。この時、各質点間の自重 $W_j$ は両端を除く( $N-1$ )個の分割点に集中するので、全体の係留ラインの重量を合わせる為に $j=2$ 及び $j=N$ の集点の重量を $1.5W_j$ に修正する。図3.2.2.2において、質点jに水平及び垂直に作用する力 $F_{xj}$ ,  $F_{zj}$ が働くときの質点jの運動方程式は質点jの質量を $M_j$ 、法線方向、接線方向の付加質量をそれぞれ $A_{nj}$ ,  $A_{tj}$ とすると(3.2.12)式、(3.2.13)式で与えられる。

$$[M_j + A_{nj} \sin \bar{\gamma}_j + A_{tj} \cos^2 \bar{\gamma}_j] \ddot{x}_j + [A_{tj} + A_{nj}] \dot{z}_j \sin \bar{\gamma}_j \cdot \cos \bar{\gamma}_j = F_{xj} \quad (3.2.12)$$

$$[M_j + A_{nj} \cos^2 \bar{\gamma}_j + A_{tj} \sin^2 \bar{\gamma}_j] \ddot{z}_j + [A_{tj} - A_{nj}] \dot{x}_j \sin \bar{\gamma}_j \cdot \cos \bar{\gamma}_j = F_{zj} \quad (3.2.13)$$

(  $j = 2, 3, \dots, N$  )

また、

$$F_{xj} = T_j \cos \bar{\gamma}_j - T_{j-1} \cos \bar{\gamma}_{j-1} - f_{dxj} \quad (3.2.14)$$

$$F_{zj} = T_j \sin \bar{\gamma}_j - T_{j-1} \sin \bar{\gamma}_{j-1} - f_{dzj} - \delta_j \quad (3.2.15)$$

上式中、 $f_{dxj}$ 及び $f_{dzj}$ は係留ラインの受ける抗力のx及びz方向成分であり、近似的に次式で与えられているとする。又、 $\delta_j$ は質点jの水中重量である。

$$f_{dxj} = -\frac{\rho}{2} D_c \bar{\ell} [C_{dn} \sin \bar{\gamma}_j |u_{nj}| u_{nj} - C_{dt} \cos \bar{\gamma}_j |u_{tj}| u_{tj}] \quad (3.2.16)$$

$$f_{dzj} = \frac{\rho}{2} D_c \bar{\ell} [C_{dn} \cos \bar{\gamma}_j |u_{nj}| u_{nj} + C_{dt} \sin \bar{\gamma}_j |u_{tj}| u_{tj}] \quad (3.2.17)$$

また、

$$u_{nj} = -(\dot{x}_j - C_j) \sin \bar{\gamma}_j + \dot{z}_j \cos \bar{\gamma}_j \quad (3.2.18)$$

$$u_{tj} = (\dot{x}_j - C_j) \cos \bar{\gamma}_j + \dot{z}_j \sin \bar{\gamma}_j \quad (3.2.19)$$

ここで、 $D_c$ は係留ラインの等価円断面の直径、 $C_{dn}$ ,  $C_{dt}$ はそれぞれ法線方向及び接線方向の抗力係数、 $C_j$ は潮流速度、 $\bar{\ell}$ は要素長さである。又一方、各質点間に次式で示す様な拘束条件式が存在する。

$$(x_j - x_{j-1})^2 + (z_j - z_{j-1})^2 = \bar{\ell}^2 [1 + T_{j-1} / A \cdot E]^2 \quad (3.2.20)$$

$$( j = 2, 3, \dots, N+1 )$$

ただし、Aは係留ラインの断面積、Eはヤング係数である。

### 2.2.2 運動方程式の解法

係留ラインの運動及び張力を求めるには(3.2.12)式、(3.2.13)式及び(3.2.20)式を解けばよいが、これらを直接解くことは極めて困難である。本解析法では(3.2.21)式、(3.2.22)式に示すような差分方程式(Houbolt法)と(3.2.12)式及び(3.2.13)式を組合わせて係留ラインのx方向及びz方向の運動方程式を(3.2.23)式、(3.2.24)式に示す張力 $T_j$ の関数の形に直すことによって解いていく。

$$\ddot{s}_j^{n+1} = (2s_j^{n+1} - 5s_j^n + 4s_j^{n-1} - s_j^{n-2}) / \Delta t^2 \quad (3.2.21)$$

$$s_j^{n+1} = (11s_j^{n+1} - 18s_j^n + 9s_j^{n-1} - 2s_j^{n-2}) / 6 \cdot \Delta t \quad (3.2.22)$$

ただし、 $S_j$  は任意の運動 ( $x_j$  又は  $z_j$ ) を示し、 $\Delta t$  は時間刻み幅、肩字は時刻  $t = n\Delta t$  を表わす。

$$x_j^{n+1} = \frac{5}{2}x_j^n - 2x_j^{n-1} + \frac{1}{2}x_j^{n-2} + (R_j^{n+1} \cdot T_j^{n+1} - P_j^{n+1} \cdot T_{j-1}^{n+1} + U_j^{n+1}) / 2 \quad (3.2.23)$$

$$z_j^{n+1} = \frac{5}{2}z_j^n - 2z_j^{n-1} + \frac{1}{2}z_j^{n-2} + (S_j^{n+1} \cdot T_j^{n+1} - Q_j^{n+1} \cdot T_{j-1}^{n+1} + V_j^{n+1}) / 2 \quad (3.2.24)$$

ここで、

$$\begin{aligned} R_j &= \Delta t^2 [ I_3 \cdot \cos \bar{\gamma}_j - I_2 \cdot \sin \bar{\gamma}_j ] / \lambda \\ P_j &= \Delta t^2 [ I_3 \cdot \cos \bar{\gamma}_{j-1} - I_2 \cdot \sin \bar{\gamma}_{j-1} ] / \lambda \\ S_j &= \Delta t^2 [ I_1 \cdot \sin \bar{\gamma}_j - I_2 \cdot \cos \bar{\gamma}_j ] / \lambda \\ Q_j &= \Delta t^2 [ I_1 \cdot \sin \bar{\gamma}_{j-1} - I_2 \cdot \cos \bar{\gamma}_{j-1} ] / \lambda \\ U_j &= \Delta t^2 [ I_2(f_{dzj} + \delta_j) - I_3 \cdot f_{dxj} ] / \lambda \\ V_j &= \Delta t^2 [ I_2f_{dxj} - I_1(f_{dzj} + \delta_j) ] / \lambda \\ I_1 &= M_j + A_{nj} \sin^2 \bar{\gamma}_j + A_{tj} \cos^2 \bar{\gamma}_j \\ I_2 &= [ A_{tj} - A_{nj} ] \sin \bar{\gamma}_j \cdot \cos \bar{\gamma}_j \\ I_3 &= M_j + A_{nj} \cos^2 \bar{\gamma}_j + A_{tj} \sin^2 \bar{\gamma}_j \\ \lambda &= I_1 \cdot I_3 - I_2^2 \end{aligned}$$

今、次式に示す様な関数  $\psi_j^{n+1}$  を考える。

$$\begin{aligned} \psi_j^{n+1} &= (x_j^{n+1} - x_{j-1}^{n+1})^2 + (z_j^{n+1} - z_{j-1}^{n+1})^2 - \bar{\ell}^2 (1 + T_{j-1}^{n+1} / E \cdot A)^2 \\ &= \psi_j^{n+1} (T_{j-2}^{n+1}, T_{j-1}^{n+1}, T_j^{n+1}) \equiv 0 \quad (3.2.25) \end{aligned}$$

$$T_j^{n+1} = \tilde{T}_j^{n+1} + \Delta T_j^{n+1} \quad (3.2.26)$$

また、張力  $T_j^{n+1}$  を(3.2.26)式の様に考へて(3.2.25)式をテーラー展開し  $\tilde{T}_j^{n+1}$  が  $T_j^{n+1}$  に十分近い値として高次の項を省略すると  $\Delta T_j^{n+1}$  を求める際に使用する(3.2.27)式が導かれる。<sup>5)</sup>

$$\begin{bmatrix} \Delta T_1^{n+1} \\ \Delta T_2^{n+1} \\ \Delta T_3^{n+1} \\ \vdots \\ \vdots \\ \Delta T_N^{n+1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\tilde{F}_2^{n+1} & \tilde{G}_2^{n+1} \\ \tilde{E}_3^{n+1} & -\tilde{F}_3^{n+1} & \tilde{G}_3^{n+1} \\ \tilde{E}_4^{n+1} & -\tilde{F}_4^{n+1} & \tilde{G}_4^{n+1} \\ & \ddots & \ddots \\ & & \tilde{E}_N^{n+1} & -\tilde{F}_{N+1}^{n+1} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} -\tilde{\psi}_2^{n+1} \\ -\tilde{\psi}_3^{n+1} \\ -\tilde{\psi}_4^{n+1} \\ \vdots \\ \vdots \\ -\tilde{\psi}_{N+1}^{n+1} \end{bmatrix} \quad (3.2.27)$$

ここで

$$\begin{aligned} \tilde{\psi}_j^{n+1} &= \tilde{X}_j^{n+1} + \tilde{Z}_j^{n+1} - \bar{\ell}^2 (1 + \tilde{T}_{j-1}^{n+1} / E \cdot A)^2 \\ \tilde{E}_j^{n+1} &= \tilde{P}_j^{n+1} \cdot \tilde{X}_j^{n+1} + \tilde{Q}_j^{n+1} \cdot \tilde{Z}_j^{n+1} \\ \tilde{F}_j^{n+1} &= (\tilde{P}_j^{n+1} + \tilde{R}_{j-1}^{n+1}) \cdot \tilde{X}_j^{n+1} + (\tilde{Q}_j^{n+1} + \tilde{S}_j^{n+1}) \cdot \tilde{Z}_j^{n+1} + 2\bar{\ell}^2 (1 + \tilde{T}_{j-1}^{n+1} / E \cdot A) / EA \\ \tilde{G}_j^{n+1} &= \tilde{R}_j^{n+1} \cdot \tilde{X}_j^{n+1} + \tilde{S}_j^{n+1} \cdot \tilde{Z}_j^{n+1} \\ \tilde{x}_j^{n+1} &= \frac{5}{2}x_j^n - 2x_j^{n-1} - \frac{1}{2}x_j^{n-2} + [\tilde{R}_j^{n+1} \cdot \tilde{T}_j^{n+1} - \tilde{P}_j^{n+1} \cdot \tilde{T}_{j-1}^{n+1} + \tilde{V}_j^{n+1}] / 2 \\ \tilde{z}_j^{n+1} &= \frac{5}{2}z_j^n - 2z_j^{n-1} - \frac{1}{2}z_j^{n-2} + [\tilde{S}_j^{n+1} \cdot \tilde{T}_j^{n+1} - \tilde{P}_j^{n+1} \cdot \tilde{T}_{j-1}^{n+1} + \tilde{V}_j^{n+1}] / 2 \\ \tilde{X}_j^{n+1} &= \tilde{x}_j^{n+1} - \tilde{x}_{j-1}^{n+1}, \quad \tilde{Z}_j^{n+1} = \tilde{z}_j^{n+1} - \tilde{z}_{j-1}^{n+1} \end{aligned}$$

### 2.2.3 計算の手順と計算例

計算の手順としては、まず係留ラインの初期状態を静的計算<sup>7)</sup>によって求め、次の時間ステップにおける張力  $T_j^{n+1}$  を(3.2.26)式、(3.2.27)式を繰返し計算する事によって計算する。また、この計算の際に各質点の位置 ( $x_j^{n+1}$ ,  $z_j^{n+1}$ ) も同時に得られる。計算が終了すると次の時間ステップに移り同様の計算を逐次行なっていく。

図3.2.2.3は昨年度実施した係留ライン強制動揺試験結果のうちChain単独の強制上下揺試験についてランプドマス法による計算結果と試験結果の比較を示している。また、図3.2.2.4は安藤ら<sup>8)</sup>の実施した係留ライン強制動揺試験と計算値との比較例であり、いずれもランプドマス法による計算値が妥当な結果を与えていている。

なお、55年度実施した係留ライン強制動揺試験結果を修正したものを図3.2.2.5～図3.2.2.8に再録する。カッコ内の図番は55年度報告書の図番を示している。

### 参考文献

- 1) 栖原寿郎, 小寺山亘, 田才福造, 肥山央, 渡辺邦夫 : 振動する繩留鎖の挙動と張力, 日本造船学会論文集, 第148号
- 2) 栖原寿郎, 小寺山亘, 田才福造, 肥山央, 渡辺邦夫, 佐尾邦久 : Dynamic Behavior and Tension of Oscillating mooring chain, Offshore Technology Conference (1981).
- 3) 小寺山亘 : 係留浮体の運動と係留鎖張力について, 西部造船会会報, 第53号
- 4) 小林正典, 島田潔, 日根野元裕 : 係留ラインの張力に対する動的影響について, 西部造船会会報, 第60号
- 5) 中嶋俊夫, 元良誠三, 藤野正隆 : 係留浮体の運動を考慮した係留ラインの動的挙動について, 日本造船学会論文集150号
- 6) 片山正敏, 則松康文, 三和英一 : 浮遊式海洋構造物の係留解析法, 三菱重工技報 Vol.13, No.4
- 7) 中嶋俊夫, 元良誠三, 藤野正隆 : 特殊係留ラインの動的特性について, 第5回海洋工学シンポジウム, 日本造船学会 (1981)
- 8) 安藤定雄, 加藤俊司 : 鎮係留ラインの静的・動的特性について, 第38回船舶技術研究所研究発表会講演集 (1981)

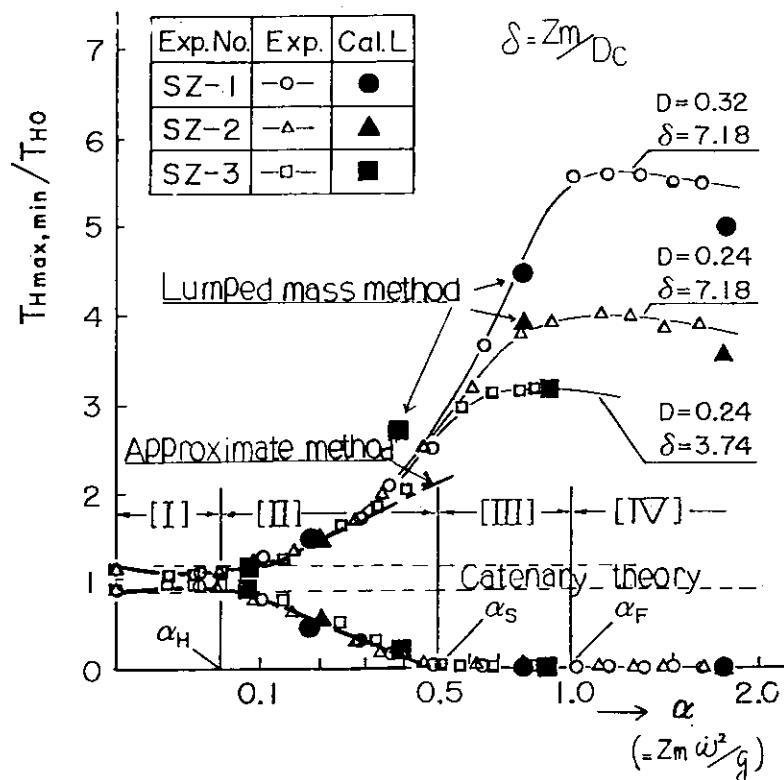


図 3.2.1.1 係留鎖動的変動張力の実験結果と計算値の比較

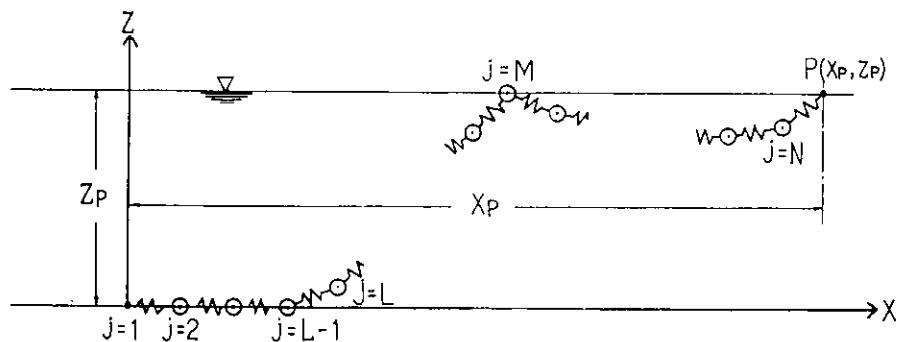


図 3.2.2.1 係留ラインの分割方法

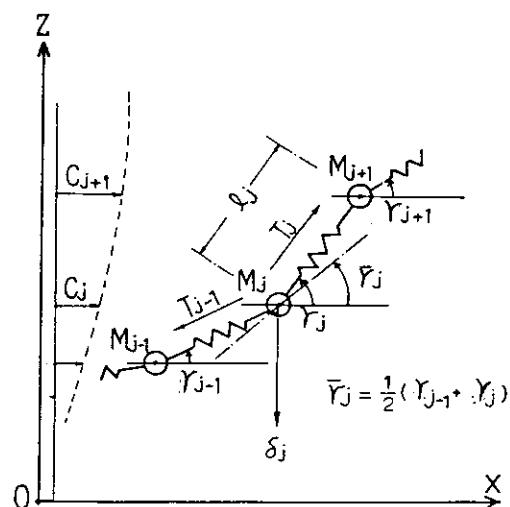


図 3.2.2.2 質点に作用する力

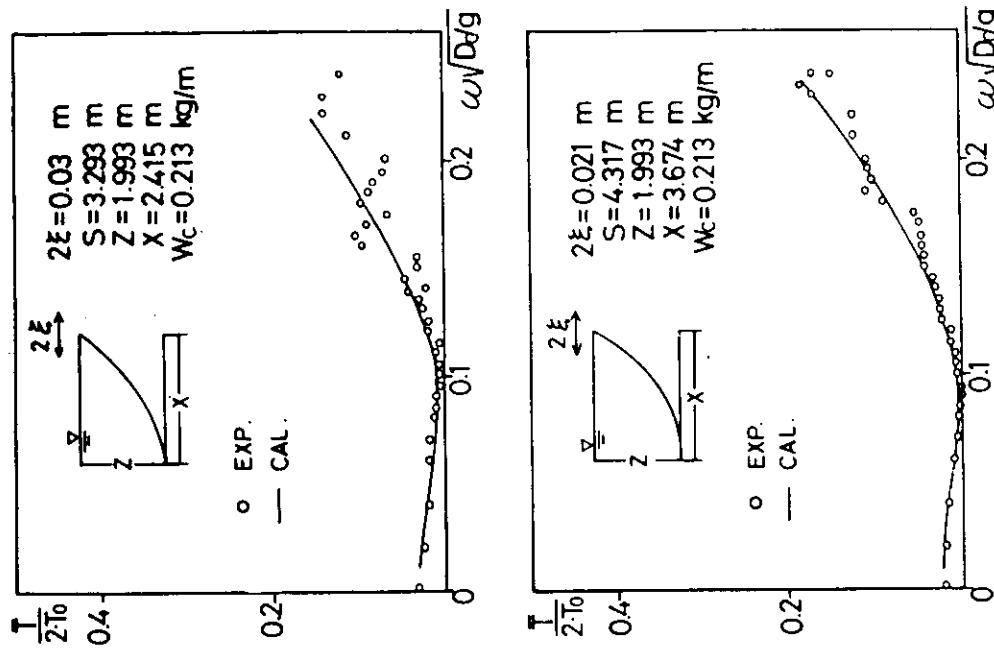
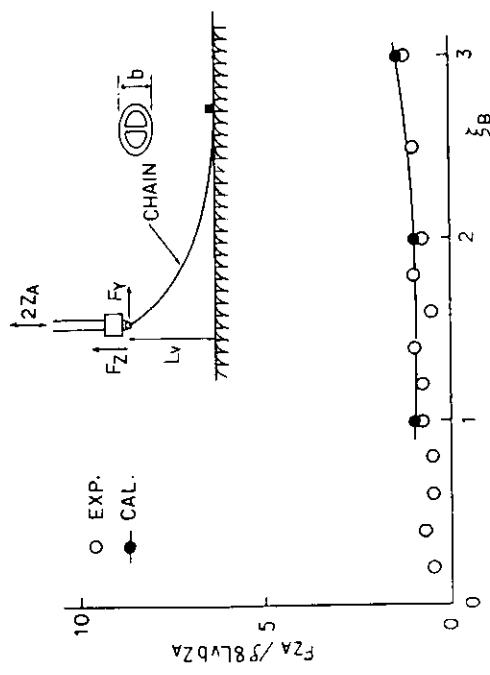


図 3.2.2.3 係留ラインの強制上下搖試験結果と計算値との比較

図 3.2.2.4 係留ラインの強制左右搖試験結果と計算値との比較

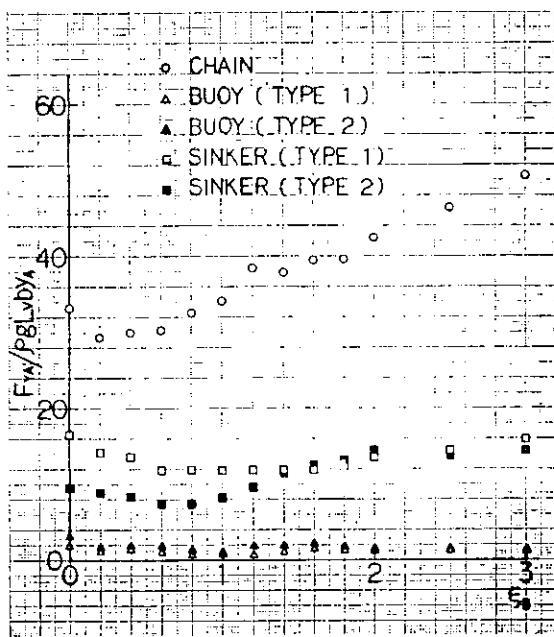


図 3.2.2.5 変動係留力の水平方向成分（図 3.2.1.17）

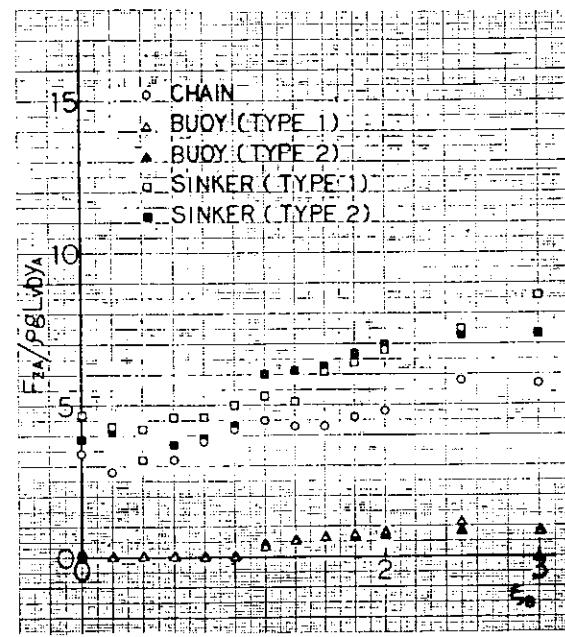


図 3.2.2.6 変動係留力の鉛直方向成分（図 3.2.1.18）

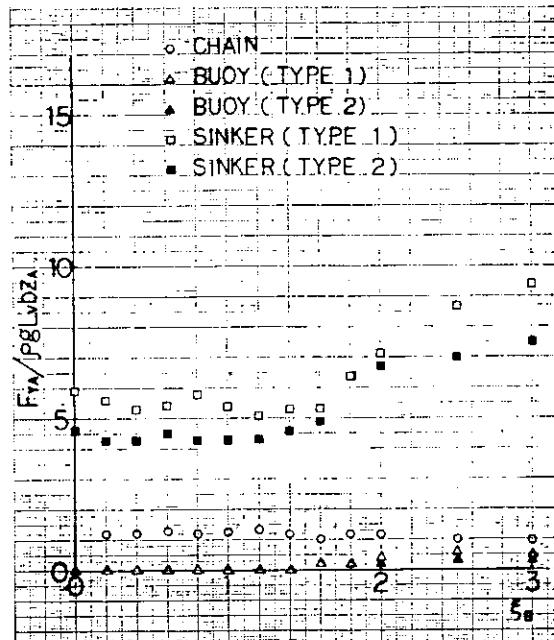


図 3.2.2.7 変動係留力の水平方向成分（図 3.2.1.23）

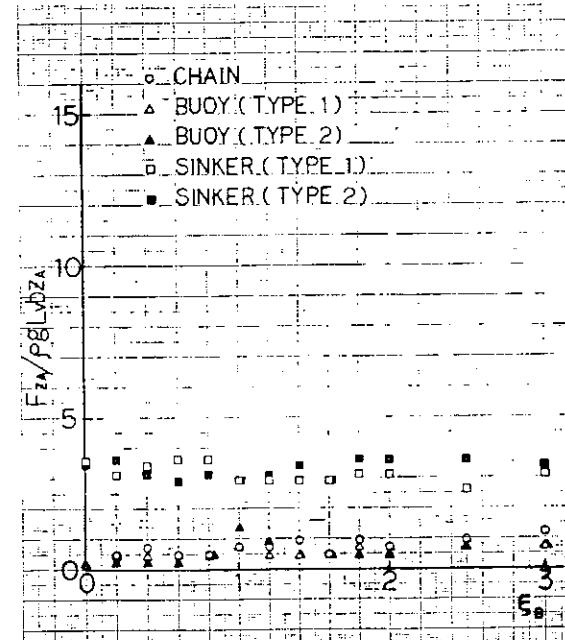


図 3.2.2.8 変動係留力の鉛直方向成分（図 3.2.1.24）

### 3. ドルフィン・ダンパーの静的特性

大型でかつシーバース等でのある程度の実績があり、ドルフィン・ダンパー係留方式に用いられる得るダンパーの代表的なものとしては、定反力型フェンダーおよび空気式フェンダーが考えられる。ここでは、この2種のフェンダーの静的特性について調査を行った。

#### 3.1 定反力型フェンダー

このフェンダーの特徴は、歪に対する反力の立上がりが大きく、かつ歪量がある値を越えると反力がほぼ一定となる圧縮特性を示すことである。この型式のフェンダーはメーカにより、セル型、H型、サークル型、パイ型等々種々のものが提案されている。なお大型の実績を多く有し、かつ、現在進行中の海上石油備蓄システムにおいて採用されているのはセル型である。セル型フェンダーの形状、寸法を図3.3.1.1に示す。そのサイズ構成は、C400HからC3000Hまであり、各々相似形状を有している。

中空円筒型ゴムフェンダーの圧縮特性は、内径、外径、高さ、フランジ部R、ゴム質等により変化するが、セル型フェンダーはすべて相似形状を有しているので、その静的特性も相似関係にある。代表的なサイズの圧縮特性を図3.3.1.2および図3.3.1.3に示す。

常用最大変位は、高さの47.5%，許容最大変位は50%とされている。0～47.5%歪の範囲では、高さの25%歪で最大反力を示す。

一方、圧縮特性において、除荷時は加荷時より低い荷重でヒステリシスループを描く。ヒステリシス特性に関する実験データの一例を図3.2.1.4に示す。この現象は、ゴム変形により蓄えられたポテンシャルエネルギーの一部が熱エネルギーに変換され内部歪が減少することによるものである。

セル型フェンダーをオーバーロードさせた場合の特性、いわゆる過圧縮特性は図3.3.1.4に示すとおり、反力が急激に増加する。このような場合、フェンダー自体の破壊が危惧されるが、正常圧縮試験結果によれば、

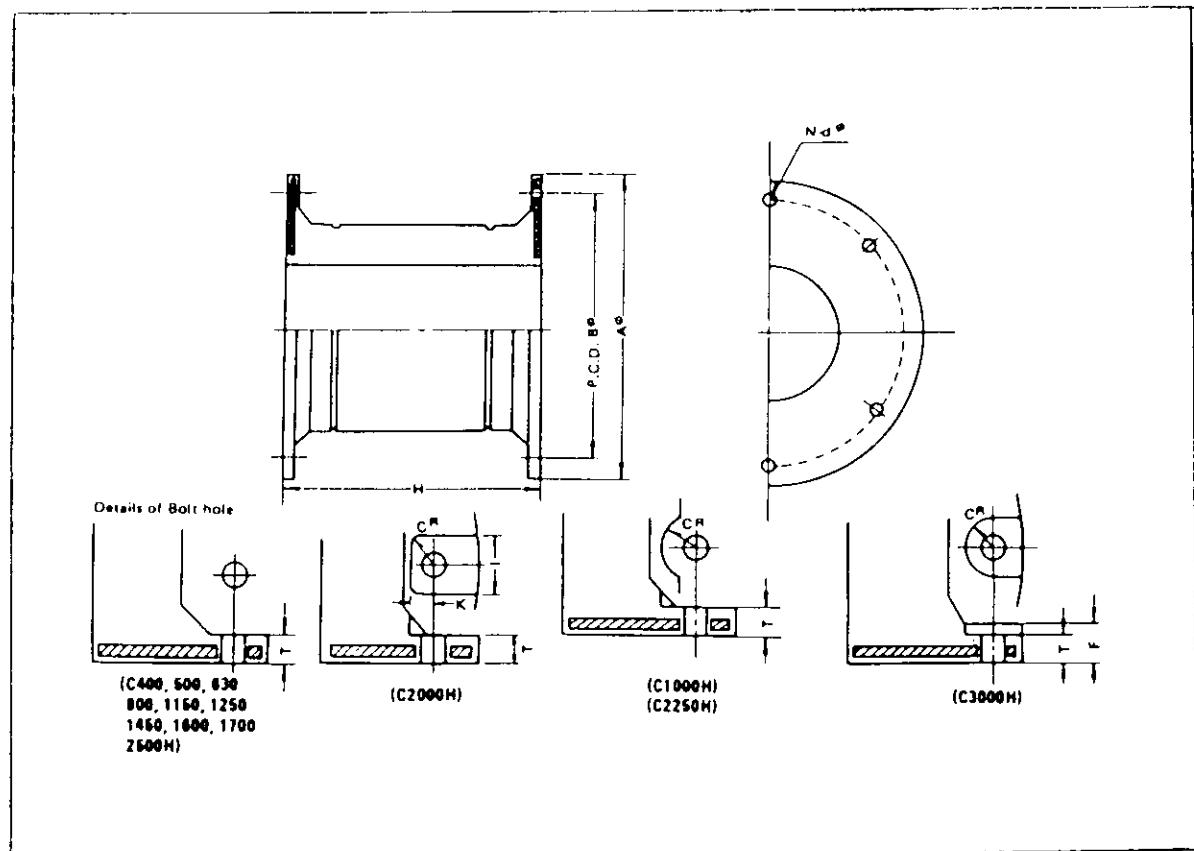
- ① フェンダーの破壊点を永久歪でとらえるなら80～85%歪となる。
- ② しかしながら、正常圧縮のみによる過圧縮はまれであり、実際には傾斜圧縮、剪断圧縮等が普通であることを考慮すれば、実質的な破壊点は、55～60%歪程度と予想される。

#### 3.2 空気式フェンダー

空気式フェンダーの特徴は、定反力型フェンダーとは逆に歪に対する反力の立上がりが小さく、索鎖係留ラインに似た圧縮特性を示す。標準的な空気式フェンダーの形状、寸法を図3.3.2.1に示す。そのサイズ構成は、 $0.5m\phi$ から $4.5m\phi$ のものまである。

空気式フェンダーの特性は、内圧、受圧面形状、ゴム質等によって変化するが、代表的なサイズの圧縮特性を図3.3.2.2に示す。許容最大変位はサイズにより若干異なるが、平均的には直徑の55%程度である。

空気式フェンダーの場合も、その圧縮特性において、除荷時は加荷時より低い荷重でヒステリシスループを描く。ヒステリシスループの例を図3.3.2.3に示す。空気フェンダーの場合のヒステリシスは、内圧の変化に対する表皮の伸びの追従に起因している。したがって内圧変化すなわち圧縮スピードが遅ければ遅いほどヒステリシスロスは小さくなる。また圧縮量が少ない範囲では表皮の伸びが小さいためヒステリシスはほとんどない。



Size	C400H	C500H	C630H	C800H	C1000H	C1150H	C1250H	C1450H	C1600H	C1700H	C2000H	C2250H	C2500H	C3000H
H	400	500	630	800	1000	1150	1250	1450	1650	1700	2000	2250	2500	3000
Aφ	650	650	840	1050	1300	1500	1650	1850	2000	2100	2200	2550	2950	3500
Bφ	550	550	700	900	1100	1300	1450	1650	1800	1900	2000	2300	2700	3250
CR	—	—	—	—	48	—	—	—	—	—	40	77.5	—	90
dφ	30	32	39	40	47	50	53	61	61	66	74	74	74	90
F	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	100
N	4	4	4	6	6	6	6	6	8	8	8	10	10	12
T	25	25	25	30	35	37	40	42	45	50	50	57	70	75
I	—	—	—	—	—	—	—	—	—	200	—	—	—	—
K	—	—	—	—	—	—	—	—	—	62.5	—	—	—	—
Approx. weight (kg)	75	95	220	400	790	1200	1500	2300	3000	3700	5000	7400	10700	18500

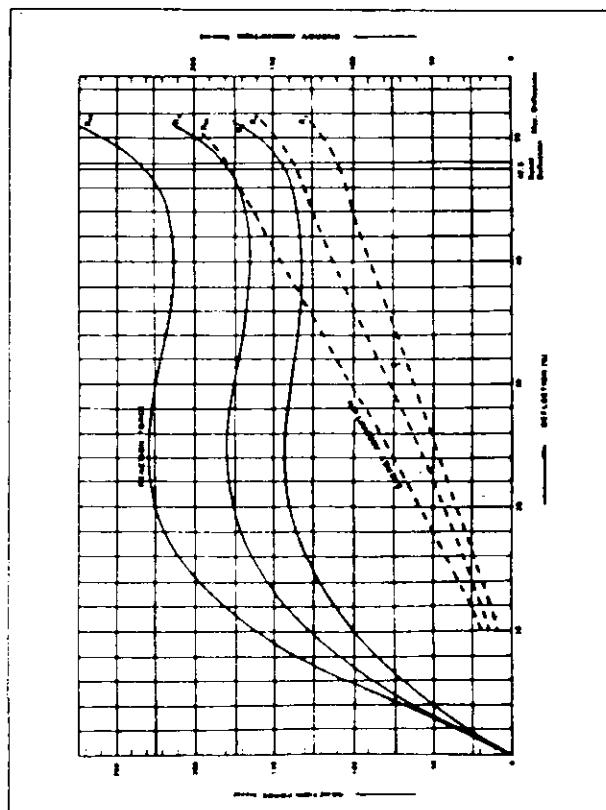
図 3.3.1.1 セル型 フェンダーの形状、寸法

## C2000H

Number grade	Reduced viscosity [dl/g]	No. adhesion reduction [Nm (kgf)]	Reduced viscosity [dl/g]	No. adhesion reduction [Nm (kgf)]
R <sub>H</sub>	230.0	294.1	179.00	193.20
R <sub>g</sub>	177.5	186.0	130.30	141.70
R <sub>f</sub>	142.0	164.0	106.00	111.20

Reduced deflection: 47.5%  
Maximum deflection: 80%

Tension: ± 10%



## C2250H

Number grade	Reduced viscosity [dl/g]	No. adhesion reduction [Nm (kgf)]	Reduced viscosity [dl/g]	No. adhesion reduction [Nm (kgf)]
R <sub>H</sub>	230.0	294.1	225.0	295.0
R <sub>g</sub>	177.5	186.0	216.0	215.0
R <sub>f</sub>	142.0	164.0	208.0	166.0

Reduced deflection: 47.5%  
Maximum deflection: 80%

Tension: ± 10%

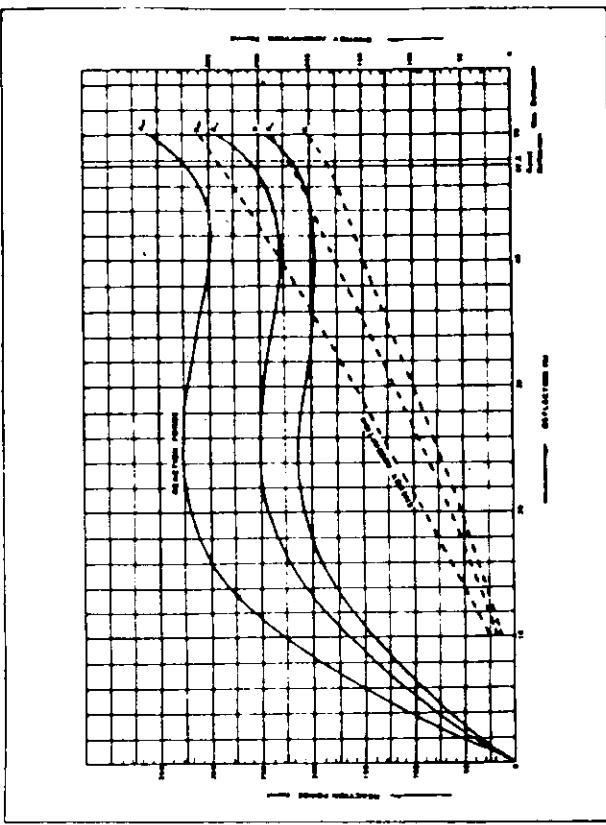


図3.3.1.2-1 セル型フェンダの圧縮特性

## C2500H

Number of coil	Revolving magnetic field	Maximum reaction force (kg)	Maximum torque (kg cm)	Maximum current (ampere)
R <sub>11</sub>	405.0	410.0	200.00	471.00
R <sub>10</sub>	364.0	365.0	205.00	370.00
R <sub>1</sub>	268.0	265.0	250.00	275.00

Total airgap: 47.5%  
Max. current: 100%  
Total torque: 100%

Number of coil	Revolving magnetic field	Maximum reaction force (kg)	Maximum torque (kg cm)	Maximum current (ampere)
R <sub>10</sub>	600.0	600.0	600.0	670.00
R <sub>9</sub>	560.0	560.0	560.0	610.00
R <sub>1</sub>	371.0	440.0	440.0	445.00

Total airgap: 47.5%  
Max. current: 100%  
Total torque: 100%

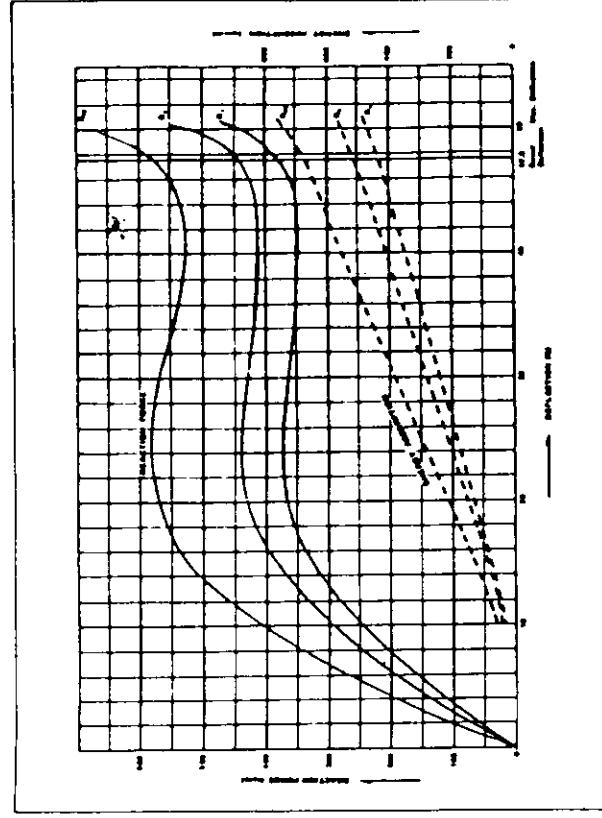
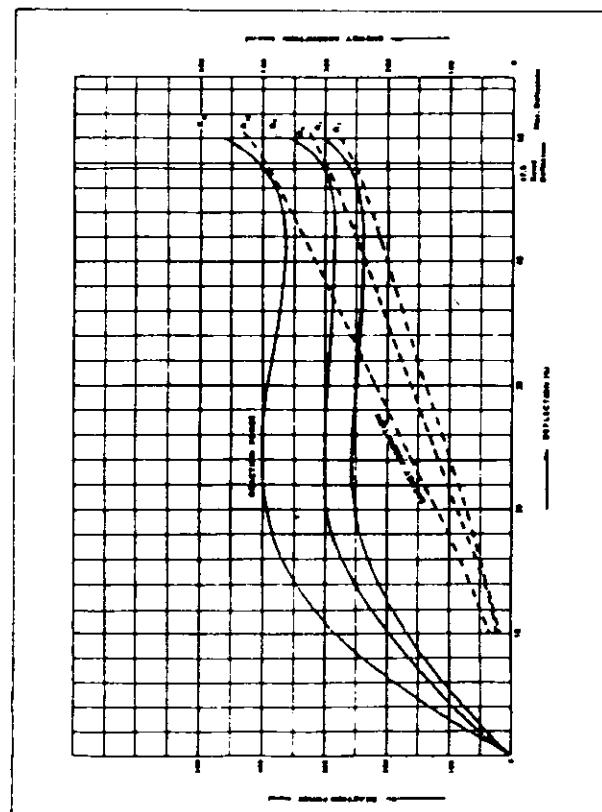


図 3.3.1.2-2 セル型フェンダードの圧縮特性

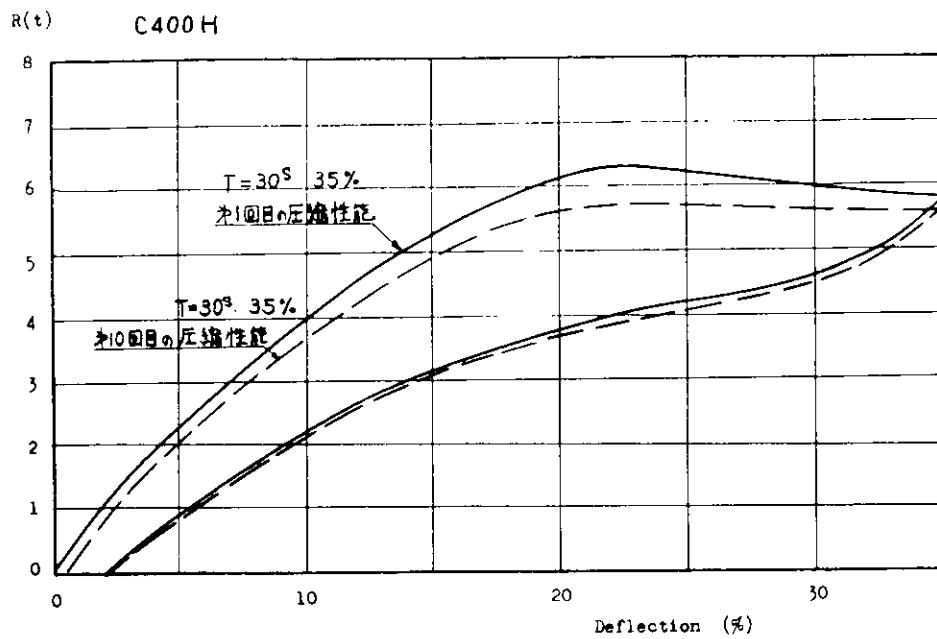


図 3.3.1.3 セル型フェンダーのヒステリシス特性

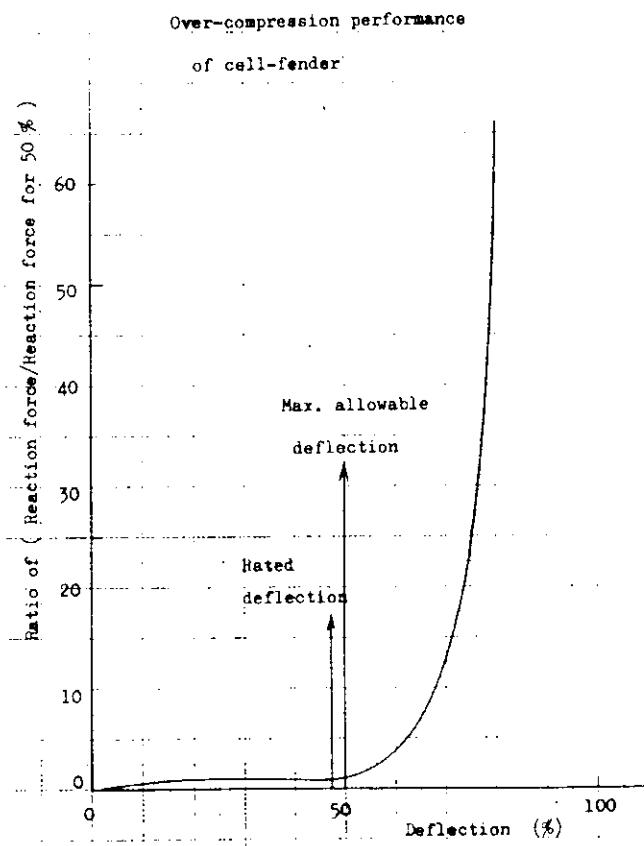
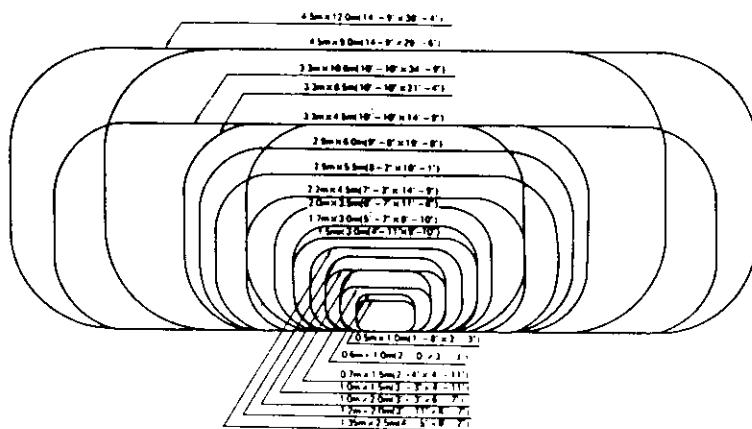


図 3.3.1.4 セル型フェンダーの過圧縮特性

## 1) STANDARD SIZES

Following sizes of Yokohama Pneumatic Rubber Fender are available and they are generally expressed in terms of a diameter by length.  
For other sizes please consult us.



Nominal size (m) (m)	Type	Initial pressure (kg/cm <sup>2</sup> )	Standard energy absorption and reaction (at 50% def.)		Maximum energy absorption and reaction (at 50% def.)		Approx. fender thickness (mm.)	Safety value pressure setting (kg/cm <sup>2</sup> )	Weight of net-type			Weight of sling type (kg)	
			E (ton-m)	R (ton)	E (ton-m)	R (ton)			Approx. fender body weight (kg)	Approx. net weight (kg)	Approx. chain net weight (kg)	Approx. wire net weight (kg)	
0.6 x 1.0	A	0.5	0.32	3.80	0.43	4.86	9	—	1.5	24	—	—	20
0.6 x 1.0	B	0.5	0.44	4.38	0.59	5.72	9	—	1.5	30	—	—	22
0.7 x 1.5	A	0.5	0.56	8.10	1.28	10.8	9	—	1.5	47	130	—	37
1.0 x 1.5	A	0.5	1.8	16.8	2.4	14.0	9	—	1.5	72	240	150	51
1.0 x 2.0	A	0.5	2.0	16.2	3.4	18.8	9	—	1.5	92	260	160	57
1.2 x 2.0	A	0.5	3.8	17.6	4.7	22.9	9	—	1.5	110	320	210	63
1.38 x 2.5	B	0.5	8.7	26.3	7.7	32.9	10	—	1.5	210	380	270	—
1.5 x 3.0	A	0.5	6.6	34.2	11.8	44.6	10	—	1.5	275	460	320	—
1.7 x 3.0	B	0.5	10.8	37.8	14.8	48.2	12	—	1.5	370	560	430	—
2.0 x 3.8	A	0.5	17.4	61.8	22.3	67.4	12	—	1.5	800	1110	680	—
2.2 x 4.8	B	0.5	28.0	76.6	37.5	98.6	13	1.5	1.5	780	1370	870	—
2.5 x 5.5	A	0.5	44.9	107	80.1	130	13	1.5	1.5	1010	1670	1230	—
2.8 x 6.8	A	0.5	78.0	163	105	206	17	1.7	2.0	1600	2100	1480	—
3.3 x 4.8	A	0.5	67.0	127	90.6	167	18	1.7	2.0	1700	2100	1680	—
3.3 x 6.5	A	0.5	104	194	120	244	18	1.7	2.0	2300	3000	2040	—
3.3 x 10.8	A	0.5	174	326	220	416	18	1.7	2.0	3000	4000	4400	—
4.8 x 9.0	A	0.5	272	386	384	466	20	1.7	2.0	4000	5020	4220	—
4.8 x 12.0	A	0.5	368	500	464	638	23	1.7	2.0	5000	6100	5000	—
4.8 x 12.0	A	0.5	532	601	600	846	23	2.0	2.5	6000	8200	6040	—

Note:

- "A" indicates net-type fender, and "B" indicates sling-type fender with lifting hooks.
- "Standard energy absorption" represents the amount of energy absorption at about 50% deflection.
- "Maximum energy absorption" represents the maximum allowable energy absorption at about 50% deflection.
- Each reaction force figure in the table may vary ±10%.
- Each reaction force is measured under static conditions.
- Testing pressure rate indicates the testing pressure at consumer's side.

- Approximate fender body weight may vary as follows:  
0.6m x 1.0m to 1.2m x 2.0m fenders .... ±10%  
1.38m x 2.5m to 2.5m x 3.5m fenders .... ±20%  
2.8m x 4.8m to 4.8m x 12.0m fenders .... ±10%
- The weight of the net may also vary ±10%.

図3.3.2.1 空気式フェンダーの形状、寸法

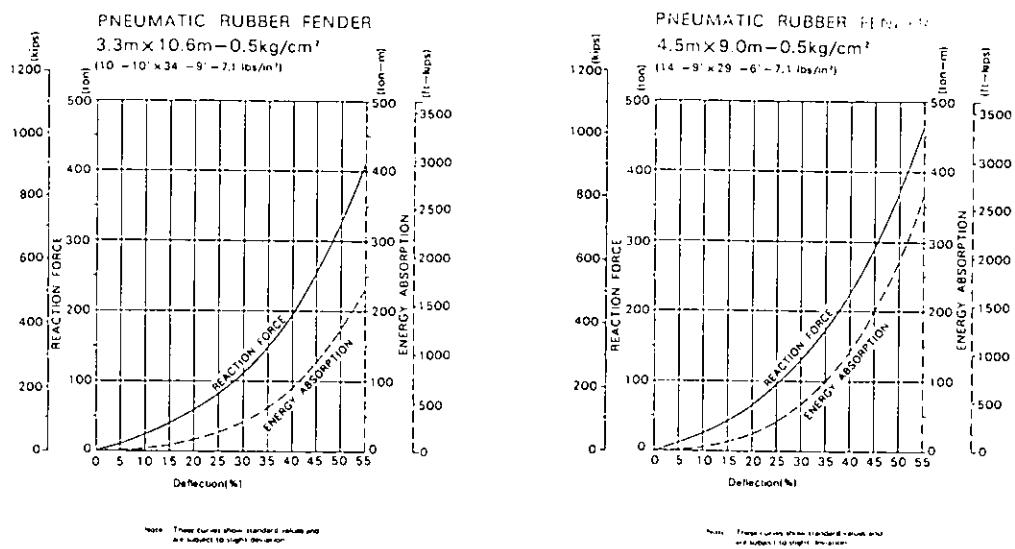


図3.3.2.2-① 空気式フェンダーの圧縮特性

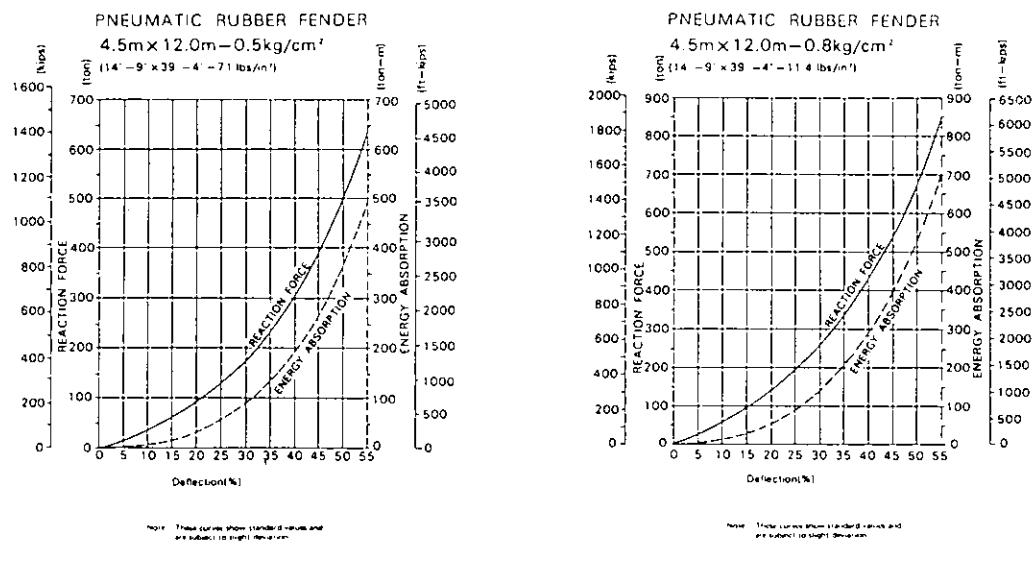


図3.3.2.2-② 空気式フェンダーの圧縮特性

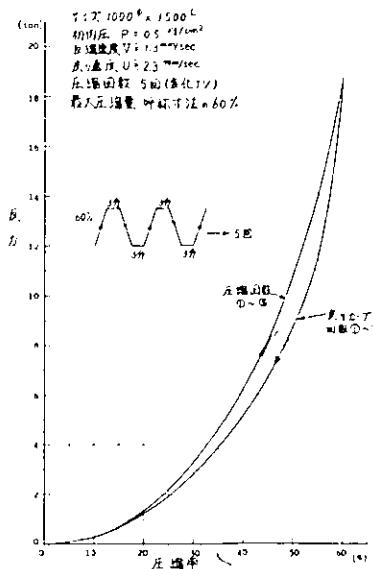


図3.3.2.3 空気式フェンダーのヒステリシス特性

## 4. ドルフィン・ダンパーの変動特性

ゴムフェンダーをダンパーとして使用する場合、製造誤差、環境条件に加え、外力条件によりその特性が基準特性から変動する。したがって、ドルフィンダンパー係留方式の計画設計に際しては、この変動特性を適確に把握して評価する必要がある。ここでは、定反力型フェンダー（セル型フェンダー）について、その変動特性について調査を行った。

### 4.1 製 造 誤 差

製造誤差はフェンダーの材質および寸法誤差に起因して発生する。この誤差範囲について公的な基準は無いが、メーカーの品質管理（寸法チェック、同一配合設計、加硫によるヤング率分布の平滑化等）により個々のフェンダー性能については±10%以内に収めている。

規格特性曲線と実測特性曲線の対応例を図3.4.1.1に示す。

### 4.2 経 年 変 化

製造後の時間経過に基づく経時要因と環境条件（酸素、オゾン、紫外線、放射線等）による環境要因が考えられる。フィールドより取り寄せた2～24年使用の実機フェンダーの分析結果の一例を図3.4.2.1に示す。データは少ないが、これらの分析結果より、

- (1) 単なる経時要因のみからは、ゴム特性に何ら変化をもたらさない。
  - (2) 経時要因に環境要因が加わると、オゾン・酸素等による微小クラックが発生するが、基準特性及び変動特性を変えるものではない。
  - (3) 経年劣化に関する限り、少なくとも約30年間は問題ないと考える。
- などが結論として得られている。

### 4.3 周囲温度依存性

ゴムは周囲温度により硬化又は軟化し、見かけの弾性率が変化する。そのため防舷材の圧縮反力も周囲温度に左右される。本特性に関する実験結果を図3.4.3.1に示す。本図に示すとおり低温部の反力変化率の立ち上がりが大きいが、常温付近（15～50°C）においては、±5%程度である。

### 4.4 クリープ特性

ゴムを一定荷重のまま保持すると、変形が時間と共に徐々に増加するクリープ現象を生じる。模型フェンダーでの実験結果を図3.4.4.1および図3.4.4.2に示す。図3.4.4.1より、定常外力（静的クリープ荷重）が初期変位10%相当の反力以下であれば、比較的小さな変位で収束することがわかる。したがってクリープ特性により、過大なフェンダー歪を発生させぬ様にするためには定常荷重を防舷材10%歪に対応する反力以下におさえる必要がある。

また、変動外力による動的クリープ（図3.4.4.2）は短周期で荷重振幅が大きいほど初期のクリープ進行は大きく、その後は逆に進行は小さい傾向を示している。また、この場合の平均的なフェンダー歪は、ほぼ静的クリープの延長線上で変化している。

### 4.5 周波数（速度）依存性

作用変動荷重の周期が短かい場合（圧縮速度が増加すると）一般に剛性が増加し、防舷材の圧縮反力は増加する。

変動荷重の周期および振幅を変えて実施した縮尺模型での実験結果を図3.4.5.1に示す。

周期5 sec以下の領域において周波数依存性は顕著になり、T=1 secでは静的特性の約10%増加となる。周期10 sec以上の領域においては特性値の大きな変化は認められない。

#### 4.6 圧縮回数依存性

変動荷重による繰返し圧縮回数が増加すると、物理的要因(分子鎖切断)および熱的要因(温度上昇によるゴム軟化)により、一般にフェンダーの圧縮反力が減少し、いわゆる動的応力緩和現象を示す。一般に常温下で繰り返し回数が少ない場合は、物理的要因が支配的である。

模型フェンダーでの実験結果を図3.4.6.1および図3.4.6.2に示す。これらの結果より、応力緩和は初期の短時間(数分)で進行し、その後は時間と共に進行が小さくなって行くこと、振動周期が長い程、応力緩和の進行は小さいことなどがわかる。

#### 4.7 剪断力作用時の圧縮特性

軸方向力だけでなく、剪断方向の力が作用すると一般にフェンダーの特性が変化する。本特性を評価するため実施した実験結果を図3.4.7.1に示す。軸方向に圧縮力をかけた状態で剪断方向に荷重を作用させ圧縮力の変化を見た実験結果に基づく曲線であり、軸方向圧縮力による応力緩和効果を含んだ値となっている。

洋上石油備蓄システムに対する安全基準<sup>1)</sup>では、以上のような定反力型フェンダーの特性の変動幅の標準として次のような値を設定している。ただし、温度特性については、低温部でゴム性状が著しく硬化するので、現地の自然条件を適切に評価して、適切な数値を定めてよいとしている。

- 1) 製造誤差……………0.9～1.10
- 2) 経年変化……………1.0～1.05
- 3) 動的特性(周波数依存性)……………1.0～1.1
- 4) クリープ特性…………防舷材に作用する定常外力又は平均荷重が当該防舷材の10%値を上回る場合、特性が著しく不安定になるので、定常外力又は平均荷重はこの範囲内にあるものとし、クリープ特性を考慮した特性曲線を用いる。
- 5) 繰返し性状(圧縮回数依存性)…………0.8～0.9(40%変形、波数10波に相当する特性)
- 6) 傾斜圧縮特性…………軸直角方向を軸方向力の10%以上とする特性
- 7) 温度特性……………0.95～1.25(ただし、20°Cを標準とするが、低温部変動幅が大きい)

なお、本節において示した、定反力フェンダーの変動特性に関する諸実験データは、参考文献<sup>2)</sup>によるものを使用した。

#### 参考文献

- 1) 日本港湾協会：“海上貯油基地に係る港湾の施設の技術上の基準・同解説” 昭和55年9月
- 2) ブリヂストンタイヤ株式会社：“セル型防舷材をダンパに使用する場合の特性及び耐久性に関する調査研究” 昭和54年10月

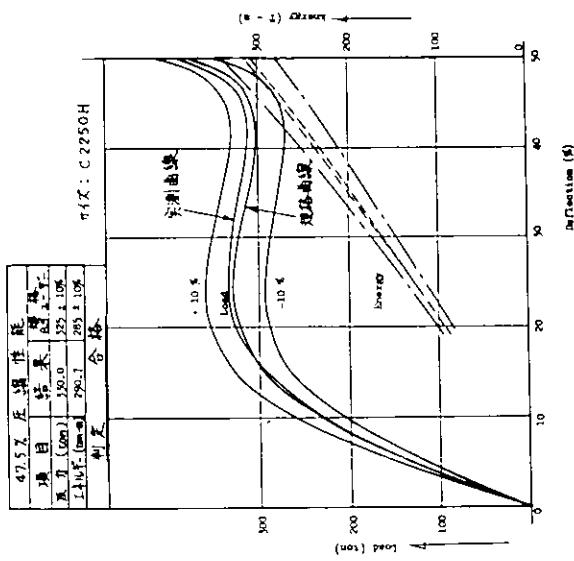


図 3.4.1.1 規格特性曲線と実測特性曲線の対応例

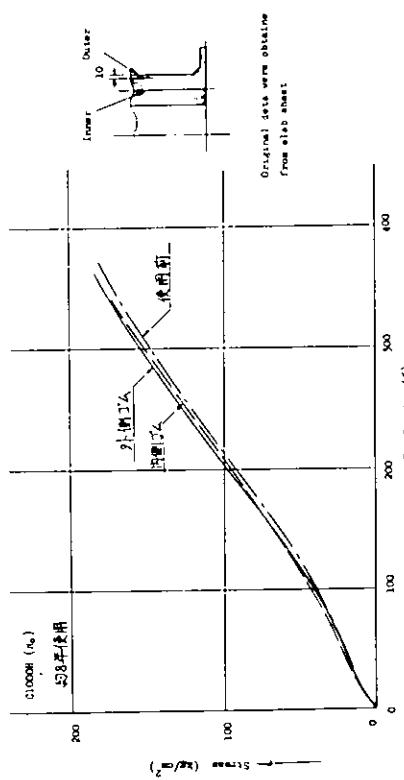


図 3.4.2.1 経年変化

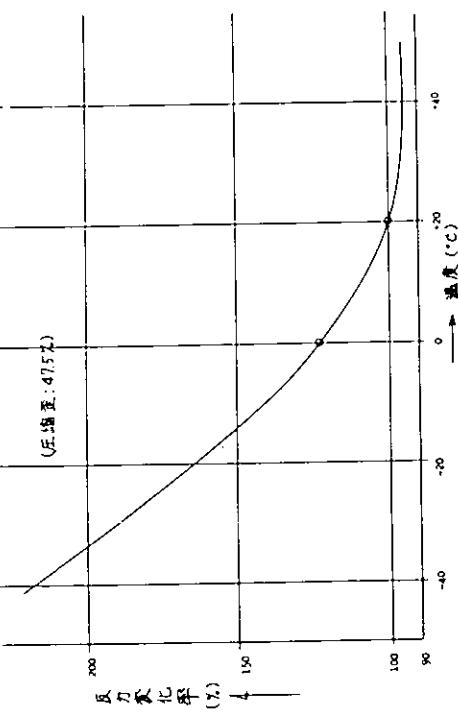


図 3.4.3.1 溫度による性能変化

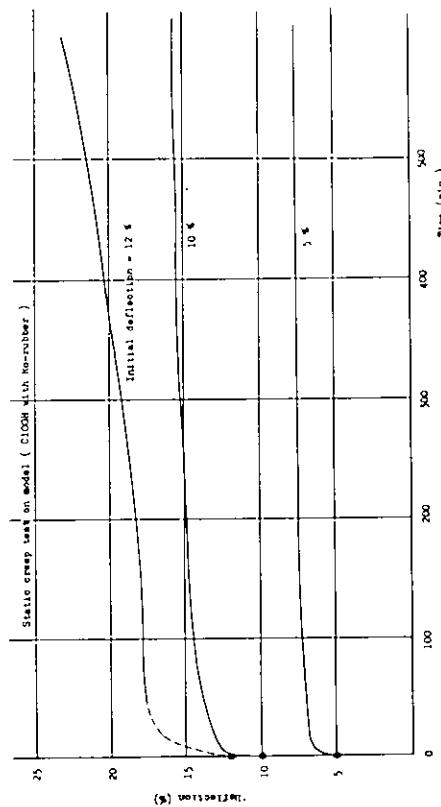


図 3.4.4.1 静的クリープ特性

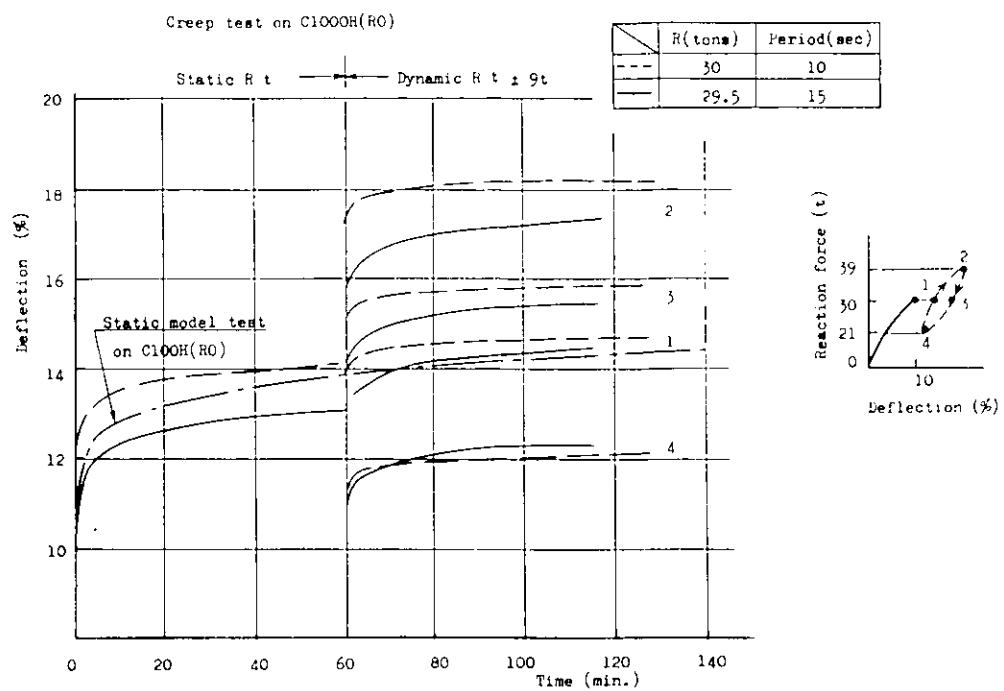


図3.4.4.2 動的クリープ特性

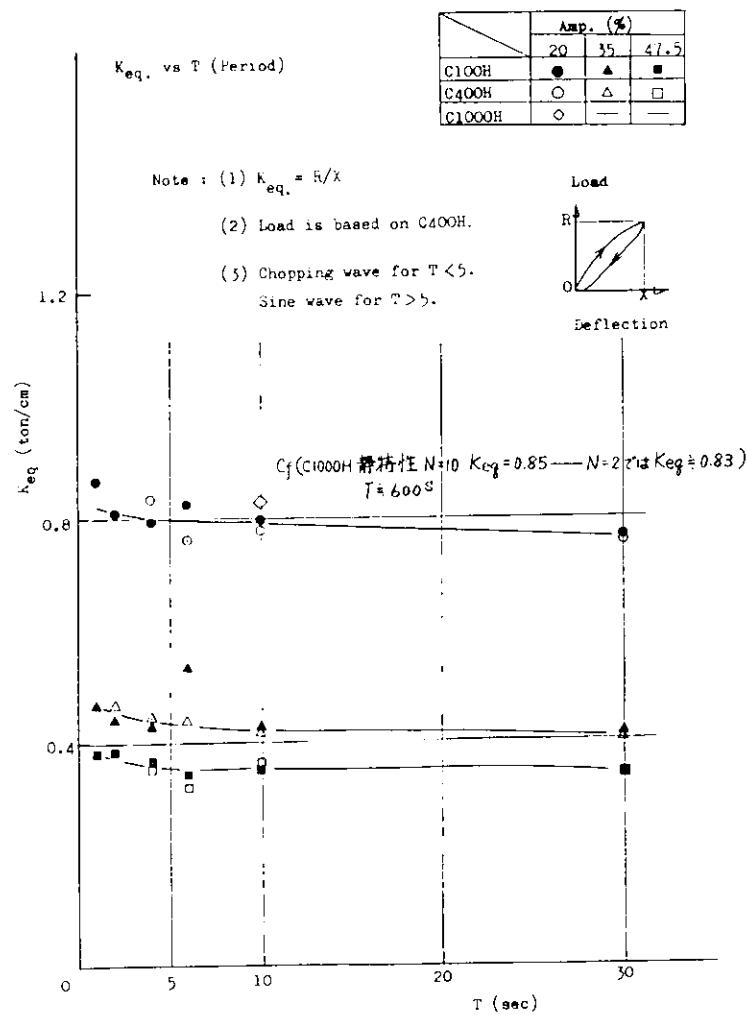
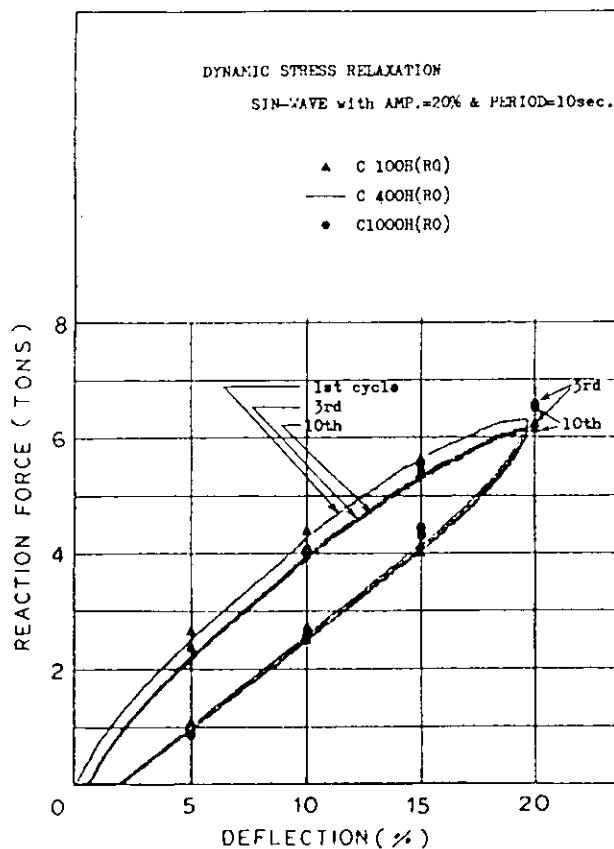
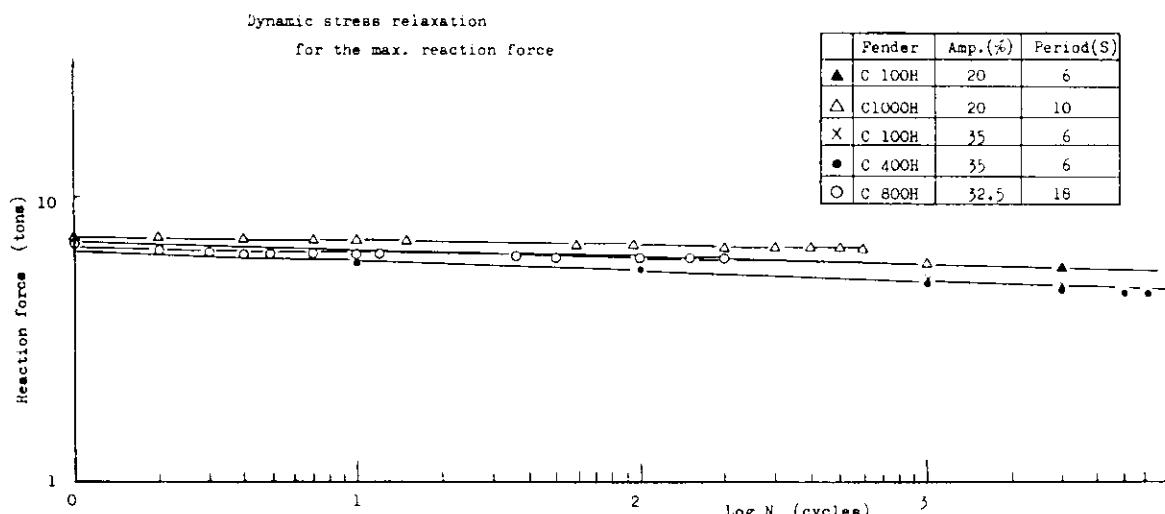


図3.4.5.1 周波数依存性



NOTE: Reaction force is based on C400H.

図3.4.6.1 動的応力緩和現象



Note : (1) Tests were made by sin-wave displacement control.  
(2) Reaction force is based on C 400H.

図3.4.6.2 動的応力緩和

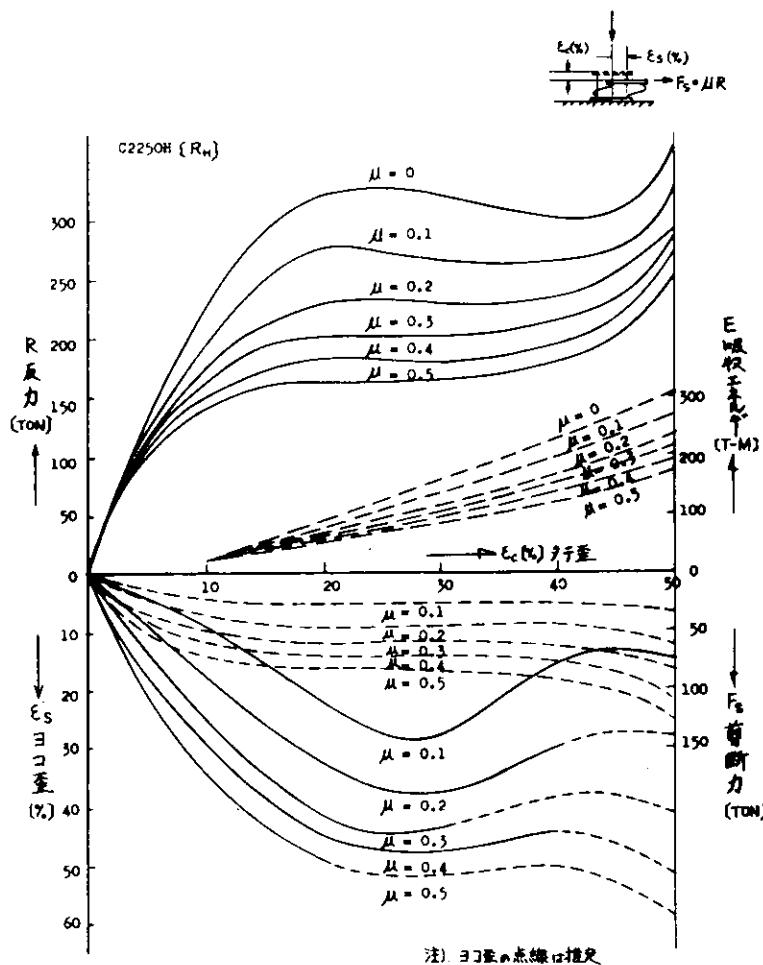


図 3.4.7.1 剪断力作用時の圧縮特性

## 5. 多点係留方式

浅海域で多点係留されている箱型海洋構造物に対して、各種の外力条件下における係留力特性を把握することは係留機器、係留システム等の設計にとって重要である。ここでは浅海域での箱型海洋構造物に対する多点係留方式について、係留力特性に及ぼす各種外力条件等の影響に関する検討を行うために、簡易計算、不規則波中でのシミュレーション計算、および水槽試験を実施した。

### 5.1 計 算 法

風、潮流、波浪等による定常外力および変動外力を含んだ複合外力が作用する環境条件下で、多点係留された浮体に作用する係留力を推定する計算法として、静的釣合いを基本とした簡易計算法と、時間領域で問題を取扱うシミュレーション計算法を考える。簡易計算法は初期設計の段階で係留系の概略を決定するのに有効であり、シミュレーション計算法は実際の現象を確認するのに有効であるが、それぞれの計算法には一長一短があり、場合によって両者の計算法の使い方に注意を必要とする。

以下に、ここで用いた両計算法について述べる。

#### 5.1.1 簡易計算法

一般に索鎖の係留力特性は非線形であるため、浮体と係留系の連成を考慮して波浪中における索鎖の係留力特性を推定するのは容易ではない。したがって初期設計段階で係留系の概略特性を把握する場合には、定常外力

に基づく係留力の定常成分と、係留系の影響を無視した浮体の動揺に基づく係留力の変動成分の重ね合わせとして係留力を求める簡易計算法が有効である。本簡易計算法では、係留力の推定値として安全側の値を与えるように自由浮体の各運動を同位相として考えているが、係留系全体の固有周期に近い変動外力成分が多く存在する場合には同調現象を起こし、係留浮体の運動は自由浮体の運動より大きくなるので、本簡易計算法による係留力の推定値は実際の値よりも過小評価される。したがって、本簡易計算を行う前に、係留系全体の固有周期を検討しておく必要がある。

本計算法の流れ図を図3.5.1.1に示す。本簡易計算法では環境条件として風、潮流、波を考え、波は対象とする不規則波の有義波高および平均波周期をそれぞれ両振幅および波周期に置換えた規則波として扱う。浮体に働く風抗力、潮流力および波漂流力等の定常外力としては係留力に大きく影響する水平面内の3成分のみについて考え、与えられた係留系要目に対してこれらの定常外力が係留力と釣合うように浮体の位置を次の方針で求める。

図3.5.1.2に示すように空間固定座標系( $O-X Y$ )および浮体に固定した座標系( $o-x y$ )を考える。浮体の位置を( $X, Y$ )とし、 $X$ 軸に対する傾きを $\phi$ とする。係留ライン本数をN本とし、 $i$ 番目の係留点の( $X, Y$ )および( $x, y$ )座標をそれぞれ( $X_i, Y_i$ )および( $x_i, y_i$ )、アンカーポイントの( $X, Y$ )座標を( $X_{ai}, Y_{ai}$ )とする。また係留ラインの $X$ 軸に対する傾きを $\psi_i$ とする。このとき、浮体が釣合うための位置修正量( $\Delta X, \Delta Y, \Delta \phi$ )は次式によって求められる。

$$\begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \Delta X \\ \Delta Y \\ \Delta \phi \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} b_1 \\ b_2 \\ b_3 \end{pmatrix} \quad (3.5.1.1)$$

ここで、

$$\begin{aligned} a_{11} &= \sum_{i=1}^N \left( \frac{f_i}{\ell_i} \sin^2 \psi_i + \frac{\partial f_i}{\partial \alpha} \cos^2 \psi_i \right) \\ a_{12} &= \sum_{i=1}^N \left( \frac{\partial f_i}{\partial \alpha} - \frac{f_i}{\ell_i} \right) \cos \psi_i \sin \psi_i \\ a_{13} &= \sum_{i=1}^N \left\{ \left( \frac{\partial f_i}{\partial \alpha} - \frac{f_i}{\ell_i} \right) \cos \psi_i \sin \psi_i B_i - \left( \frac{\partial f_i}{\partial \alpha} \cos^2 \psi_i + \frac{f_i}{\ell_i} \sin^2 \psi_i \right) A_i \right\} \end{aligned}$$

$$a_{21} = a_{12}$$

$$\begin{aligned} a_{22} &= \sum_{i=1}^N \left( \frac{f_i}{\ell_i} \cos^2 \psi_i + \frac{\partial f_i}{\partial \alpha} \sin^2 \psi_i \right) \\ a_{23} &= \sum_{i=1}^N \left\{ \left( \frac{\partial f_i}{\partial \alpha} \sin^2 \psi_i + \frac{f_i}{\ell_i} \cos^2 \psi_i \right) B_i + \left( \frac{f_i}{\ell_i} - \frac{\partial f_i}{\partial \alpha} \right) \cos \psi_i \sin \psi_i A_i \right\} \end{aligned}$$

$$a_{31} = a_{13}$$

$$a_{32} = a_{23}$$

$$\begin{aligned} a_{33} &= \sum_{i=1}^N \left\{ f_i (A_i \sin \psi_i + B_i \cos \psi_i) + \frac{f_i}{\ell_i} (A_i \sin \psi_i + B_i \cos \psi_i)^2 \right. \\ &\quad \left. + \frac{\partial f_i}{\partial \alpha} (A_i \cos \psi_i - B_i \sin \psi_i)^2 \right\} \end{aligned}$$

$$b_1 = F_x + \sum_{i=1}^N f_i \cos \psi_i$$

$$b_2 = F_y + \sum_{i=1}^N f_i \sin \psi_i$$

$$b_3 = M_z + \sum_{i=1}^N f_i (B_i \sin \psi_i - A_i \cos \psi_i)$$

$$A_i = x_i \sin \phi + y_i \cos \phi$$

(3.5.1.2)

$$B_i = x_i \cos\phi - y_i \sin\phi$$

$$\ell_i = \sqrt{(X_{ai} - X_i)^2 + (Y_{ai} - Y_i)^2}$$

$f_i$  :  $i$  番目の係留ラインの静的水平係留力

$\frac{\partial f_i}{\partial \alpha}$  :  $i$  番目の係留ラインの静的水平係留力の水平方向微係数

$F_x, F_y, M_z$  : 浮体に作用する定常外力の水平面内3成分

である。浮体の初期位置を適当に与え、浮体の位置修正量 ( $\Delta X, \Delta Y, \Delta \phi$ ) が十分小さくなるまで (3.5.1.1) 式の収束計算を繰返すことにより、定常外力による浮体の釣合位置およびその時の係留力を求めることができる。なお、係留ラインの静的係留力特性  $f_i, \frac{\partial f_i}{\partial \alpha}$  は、伸びを考慮した懸垂線理論により求める。このようにして浮体の定常外力に対する釣合位置が求められれば、さらに波による自由浮体の6自由度運動を同位相にして重ね合わせ、各係留点の位置を求める。係留点とアンカー点の位置を用いて懸垂線理論により各係留点における係留力を求め、そのうちで最大のものを係留ラインに生じる最大係留力の推定値とする。

### 5.1.2 シミュレーション計算法

ここで述べるシミュレーション計算法とは、多点係留された浮体と係留系の相互作用を考慮して時間領域で浮体の運動方程式を解き、浮体の運動および係留力の時系列を求める計算法である。

シミュレーション計算法の詳細については第3章 7.1.2 「Non-linear Time History Simulation Method」で述べるので、ここでは概要を示すことにとどめる。なお、シミュレーション計算法の流れ図を図3.5.1.3に示す。

本シミュレーション計算法では波スペクトルとして Bretschneider 一光易のスペクトルを、変動風スペクトルとして Davenport のスペクトルを用いる。また、規則波中の波漂流力係数として自由浮体のものを用い、F. H. Hsu<sup>1)</sup> によって波漂流力の時系列を作成する。その他の外力成分についても時系列を作成し、浮体に作用する全外力の時系列を求める。浮体の付加質量係数および減衰係数については平均波周期に対するものを代表値として使用する。

係留力特性の計算方法としては、計算時間を節約するため、あらかじめ水平および鉛直方向の変位に対する静的係留力特性を計算してテーブル化しておく、必要なときに、テーブルから補間して求める方法を用いる。なお、運動方程式の時間積分は Runge-Kutta-Gill 法によって行う。

以上のようにして求められる浮体の運動および係留力の時系列の統計処理に、線形かつ正規過程の仮定に基づく従来のスペクトル解析法を用いることは時系列に非線形性があることから必ずしも適当ではないが、非線形現象の統計解析法および各種統計値の推定法が確立されていない現段階では、従来のスペクトル解析法によって得られる統計値を目安として用いることとする。

各種統計値としてはゼロクロス周期  $T_{zero}$ 、ピーク・トゥ・ピーク周期  $T_{pp}$ 、バンド幅パラメータ  $\epsilon$ 、標準偏差  $\sigma$ 、有義値  $\bar{X}_{1/3}$  および  $1/1000$  最大期待値  $X_{1/1000}$  を求める<sup>4)</sup>。バンド幅パラメータはパワースペクトルのモーメントから

$$\epsilon = \sqrt{1 - \frac{m_2^2}{m_0 m_4}} \quad (3.5.1.3)$$

$m_i$  : パワースペクトルの  $i$  次モーメント ( $i = 0, 2, 4$ )

によって求められる<sup>2)</sup>。有義値はバンド幅パラメータによって定まる定数  $C$  を用いて

$$\bar{X}_{1/3} = C \sigma \quad (3.5.1.4)$$

によって求められる。<sup>3)</sup>  $1/1000$  最大期待値はバンド幅パラメータの関数として、

$$X_{1/1000} = \left\{ \sqrt{2 \ell n(n \sqrt{1 - \varepsilon^2})} + \frac{\gamma}{\sqrt{2 \ell n(n \sqrt{1 - \varepsilon^2})}} \right\} \sigma \quad (3.5.1.5)$$

$\gamma$  : オイラーの定数 (= 0.5772)

に  $n=1000$  を代入して求められる。しかし、浮体の運動および係留力変動等のピーク・トゥ・ピーク周期が必ずしも一致しないことが考えられるので、単純に  $n=1000$  を (3.5.1.5) 式に代入して求めた  $1/1000$  最大期待値は対象とする継続時間が各モードによって異なり、合理的な統計値とは言えない。したがって、ここでは平均波周期の 1000 倍の継続時間内における浮体の運動および係留力変動の最大期待値を求ることとする。具体的には各モードごとに

$$n = 1000 \times \frac{\bar{T}_w}{T_{pp}} \quad (3.5.1.6)$$

$\bar{T}_w$  : 平均波周期

によって  $n$  を求め、これを (3.5.1.5) 式に代入して求める。

## 5.2 水槽模型試験

多点係留システムのシミュレーション計算法の妥当性を確認することを主目的として、2種類の大型模型を用いて水槽試験を行った。実施した試験は無係留および係留状態における規則波中試験と、係留状態における不規則波中試験の2種類であり、使用した係留ラインはチェーンおよび中間シンカー付きチェーンの2種類とした。試験時の水深・喫水比は 4.8 ~ 9.6 とかなり大きく、必ずしも浅海域を対象とした水槽試験とはいえないが、シミュレーション計算法の検証という目的には支障ないものと考えられる。

無係留および係留状態における規則波中試験の結果によれば、チェーン係留方式および中間シンカー係留方式とも浮体の運動に及ぼす係留系の影響はほとんど見られない。これは、係留系による水平面内の 3 モードの運動の固有周期が、入射波の周期に比べて十分に長いためと考えられる。

係留状態における不規則波中試験の結果によれば、チェーン係留方式の場合および中間シンカー係留方式の場合ともに浮体の水平面内の 3 モードの長周期運動が顕著に見られており、中でもチェーン係留方式の場合の長周期運動が大きい。しかし、係留力に関しては、2種類の係留方式による差は水平面内の長周期運動の場合ほど顕著ではない。

なお、試験の詳細については、付録 1 「大型模型による多点係留方式の水槽模型試験」に示す。

## 5.3 水槽模型試験と理論計算との比較

多点係留方式に対するシミュレーション計算法の妥当性を確認するために、前項の不規則波中試験の中から 2 状態を選んでこれらに対応するシミュレーション計算を実施し、試験結果との比較を行った。試験およびシミュレーション計算の条件は表 3.5.3.1 に示すとおりであり、浮体、チェーンおよび中間シンカー等の模型の詳細については付録 1 「大型模型による多点係留方式の水槽模型試験」に示してある。

チェーン係留方式および中間シンカー係留方式に対する浮体の運動および係留力の時系列のシミュレーション計算結果を図 3.5.3.2 ~ 図 3.5.3.3 に、これらの標準偏差を表 3.5.3.2 に、それぞれ試験結果と比較して示す。なお、係留力の No. 1 ~ 4 は、それぞれ図 3.5.3.1 に示す位置の係留ラインの係留力を示している。これらの図および表によると、応答の標準偏差値においては試験結果と計算結果は大略一致しており、また応答の時系列ではサージおよび係留力の長周期変動が試験結果、計算結果にも現われており、全般的に計算結果は試験結果を説明しているとい

える。したがって、本シミュレーション計算法は係留力の推定法としてほぼ有効であろう。ただし、模型試験における係留系の固有周期で運動する長周期運動については、その原因として長周期変動波漂流力だけではなく、入射波に含まれる非常に小さな長周期成分や過渡的な自由振動<sup>4)</sup>等が考えられるので、試験結果に対応させたシミュレーション計算を正確に実施するためには、これらの長周期運動の原因を明らかにしておくことが望ましい。

## 5.4 長周期運動と係留力

一般に、多点係留された浮体の水平面内運動の固有周期は非常に長いため、浮体と係留系からなる振動系の減衰力の主成分である造波減衰力は系の固有振動時において非常に小さくなる。したがって、この振動系の固有周期と同じ周期を有する長周期変動外力が作用した場合には、たとえ小さな外力でも非常に大きな同調運動を誘起し、係留ラインの破断、さらには浮体の漂流等の重大事態が発生する可能性が考えられる。この長周期変動外力としては、変動波漂流力および変動風抗力等が考えられるが、さらには長周期運動の原因として、係留系の非線形性に基づく分数調和振動等も考えられる。ここでは、シミュレーション計算法による長周期運動の推定に関する問題点、および浅海域における長周期運動の可能性について述べる。

### 5.4.1 シミュレーション計算法による長周期運動の推定に関する問題点

ここで用いたシミュレーション計算法では、本節 5.1.2 「シミュレーション計算法」で示したように、強制外力として変動波漂流力および変動風抗力の長周期外力を考慮しているが、浮体の減衰力を单一の周期に対するもので代表させている。しかし、長周期運動が生じる場合には、短周期から長周期まで浮体の運動の周波数成分は広範囲にわたるので、減衰力を单一周期に対するもので代表させるのは必ずしも適当ではなく、将来は時間領域における流体力係数（特に減衰係数）を取込んだシミュレーション計算法の開発が必要と思われる。<sup>5)</sup> その際、長周期運動で重要な要素となる粘性減衰力の正確な推定が必要となってくる。また、シミュレーション計算で長周期運動を推定する場合、長周期変動外力が小さく、また周期も長いので、長周期運動が定常状態にまで発達するには長時間のシミュレーション計算が必要なことにも留意しなければならない。

### 5.4.2 浅海域における長周期運動と係留力

水深が20m以下の極端に浅い海域においては、多点係留方式の場合の係留点の許容変位量は非常に小さいので、浮体の若干の変位によっても係留ラインは容易にトート状態となり、係留系の平均的なバネ係数は比較的大きくなる。したがって、このような極端に浅い海域においては浮体一係留系の固有周期はあまり長くならず、通常の意味での長周期運動は生じないと考えられる。しかし、固有周期が短くなるので、変動波漂流力等の高次強制外力ではなく、通常の波周波数範囲における線形の波強制力による同調運動の可能性があり、注意を要する。

浅海域であっても水深が20m以下の極端に浅い海域を除けば浮体一係留系の固有周期はかなり長くなることが考えられるので、変動波漂流力および変動風抗力等の長周期外力によって長周期運動が生じ、過大な係留力が作用する可能性が考えられる。したがって、浮体に作用する波強制力および変動風抗力の周波数成分を推定し、これらの変動外力の存在しない周期に浮体一係留系の固有周期を設定するよう係留系を設計をすることは勿論であるが、必要以上に固有周期を長くし、高次の変動外力である変動波漂流力による長周期運動が生じることのないように注意せねばならない。

なお、長周期運動の標準偏差  $\sigma_x$  の略算式として、(3.5.4.1) 式が与えられている。<sup>6)</sup>

$$\sigma_x = \frac{x_s}{2\nu} \quad (3.5.4.1)$$

ここで、

$$\begin{aligned}
 x_s &:= \text{定常変位} \left( = \frac{F_0}{C} \right) \\
 \nu &:= \text{無次元減衰係数} \left( = N / \sqrt{\left( \frac{W}{g} + M \right) C} \right) \\
 W &:= \text{浮体の排水量} \\
 M &:= \text{浮体の付加質量} \\
 N &:= \text{浮体の減衰係数} \\
 C &:= \text{係留系の復原力係数} \\
 F_0 &:= \text{定常波漂流力}
 \end{aligned}$$

である。(3.5.4.1)式を用いることにより比較的容易に係留浮体の長周期運動を求めることができ、長周期運動の影響を考慮した係留力を推定することが可能である。

## 5.5 適用範囲

### 5.5.1 簡易計算法によるシリーズ計算

浅海域での多点係留方式に対して、係留ラインの種類および各種環境条件が係留特性に及ぼす影響を把握することは、係留機器および係留システム等の設計にとって重要なことである。係留系の初期設計の段階で、簡易計算による検討が有効であることは前に述べたとおりである。ここでは、2種類の箱型浮体に対して水深、係留ライン本数、各種外力条件等が最大係留力特性に及ぼす影響を調べるために、簡易計算法によるシリーズ計算を行った。実施したシリーズ計算は、

- a) 波高・風速シリーズ
- b) 水深シリーズ
- c) 波周期シリーズ
- d) 係留ライン本数シリーズ

の4種類である。

#### (1) 計算条件

計算に用いた箱型浮体の要目を表3.5.5.1に示し、チェーン、中間ブイ付きチェーン、および中間シンカーフィッティング付きチェーンの3種類の係留ラインの要目を表3.5.5.2に示す。その他の計算条件は表3.5.5.3に示すが、波、風、潮流の方向をすべて60°としたのは、斜め方向からの外力に対しては浮体のヨーイングも生じ、係留系にとっては厳しい条件と考えられるためである。使用した座標系は図3.5.5.1に示す右手座標系であり、係留ライン配置も図3.5.5.1に示すように係留点を静止水面に一致させたものであり、12本係留を基本として、24本、36本係留の場合は係留ラインの単重を、それぞれ2倍、3倍として計算を行った。また、係留ラインの初期長さは、係留点が水平変位したときに係留力の許容値の目安となる破断張力の40%の値までスラック状態を保つように決めた。その結果を表3.5.5.4に示す。

#### (2) 計算結果

簡易計算によるシリーズ計算で得られた各係留ライン張力の中で最大のものを浮体Aについて図3.5.5.2～図3.5.5.6に、浮体Bについては図3.5.5.7～図3.5.5.10に、各シリーズごとにまとめて示す。なお、これらの図中には係留力の許容値の目安として0.4T<sub>B</sub>(=680ton)と、さらにT<sub>B</sub>(=1700ton)を点線で示してある。ここで用いた条件範囲内において、これらの図から得られる主な結果を、各シリーズごとに示すと次のようになる。

#### a) 波高・風速シリーズ

波高・風速の増加に伴い、当然のことながら係留力は増大するが、水深が浅い場合、中間シンカーフィッティング

式の場合に比べてチェーン係留方式および中間ブイ係留方式の場合にその傾向が著しい。これは水深が浅い場合、チェーン係留方式および中間ブイ係留方式の係留力特性は立ち上がりが急激であるのに対して、中間シンカー係留方式の係留力特性はシンカーの持ち上がりに基づく緩衝効果によって立ち上がりが抑えられているためである。水深が深い場合にはこれら3種類の係留方式による差はあまりなく、また波高・風速の増加による影響は少ない。これは水深の深い場合はいずれの係留方式でも係留力特性の立ち上がりがあり急激でなく、係留点の変位による影響が少ないと想するものである。

#### b) 水深シリーズ

水深が浅くなるにしたがって、最大係留力は急激に増加する。特に、水深20m以下の極端に浅い海域では係留点の許容変位量が非常に小さくなり、係留ラインが容易にトート状態になるため、最大係留力は非常に大きくなる。中間シンカー係留方式の場合には、定常外力に対する定常変位を中間シンカーの持上がりによって抑えるため、変動外力に対する係留点の許容変位量は他の2種類の係留方式に比べて大きくなり、極端に浅い海域においても係留力の最大値はあまり大きくならない。

#### c) 波周期シリーズ

水深が浅い場合には波周期が増加するにつれて最大係留力も増加しているが、水深が深い場合には最大係留力に及ぼす波周期の影響は小さい。水深が浅い場合には係留力特性の立ち上がりが急激であり、波周期の増加に伴う浮体の運動振幅の増加によって係留力が増加するが、水深が比較的深い場合には係留力特性の立ち上がりが緩やかであるため、係留力は波周期の変化に基づく浮体の運動振幅の変化によってあまり影響を受けないと考えられる。

#### d) 係留ライン本数シリーズ

チェーン係留方式および中間ブイ係留方式の場合、係留ライン本数が増加すると最大係留力は減少するが、中間シンカー係留方式の場合は今回の計算条件においては係留本数を変えてもほとんど変化しない。これは中間シンカー係留方式の場合にはシンカーの持ち上がりによって定常外力に対する浮体の定常変位が小さく抑えられ、係留ライン本数を変化させても浮体の定常外力との釣合位置があまり変化しないためである。

### 5.5.2 簡易計算結果とシミュレーション計算結果との比較

簡易計算法によるシリーズ計算の結果を確認するために、数10点の計算条件を選んでシミュレーション計算を行った。シミュレーション計算では、各係留ラインに対して平均波周期の1000倍の継続時間における変動係留力の最大期待値と平均値の和を求め、そのうち最大の係留力を図3.5.5.2～図3.5.5.10に簡易計算結果と比較して示した。また、シミュレーション計算結果の例として、図3.5.5.11～図3.5.5.13に浮体の運動、係留力等の時系列を、表3.5.5.5にそれらの統計値を示す。

各シリーズごとに簡易計算との比較結果を示すと次のようになる。

#### a) 波高・風速シリーズ

シミュレーション計算結果は平均波周期15秒に対する結果を示しているが、A浮体の水深20mに対する結果以外では、シミュレーション計算の結果は、いずれの波高・風速に対しても簡易計算の結果とはほぼ同等の値かそれ以下の値を示しており、簡易計算によって係留力を安全側にほぼ推定できることがわかる。

A浮体の水深20mに対する結果では、有義波高1.5m、平均風速25m/sにおける3種の係留方式に対する計算結果、および有義波高3.0m、平均風速35m/sにおける中間シンカー係留方式に対する計算結果を除いて、シミュレーション計算による最大係留力は簡易計算によるものに比べてかなり大きく、破断張力以上となっている。これは波高の増大に伴う浮体の運動振幅の増大によって係留系の平均的バネ係数が増大し、系全体の固有周期が短くなって波との同調現象を起こしやすくなつたためと思われる。

### b) 水深シリーズ

図3.5.5.4および図3.5.5.9に示すシミュレーション計算の結果は、平均波周期15秒のときのそれぞれA浮体およびB浮体に対するものである。図3.5.5.4によると、水深50mではシミュレーション計算結果と簡易計算結果とは、ほぼ同程度の値を示しているが、水深20m以下の極端に浅い海域におけるチェーン係留方式および中間ブイ係留方式に対する係留力のシミュレーション計算値は破断張力を越えている。これは波高・風速シリーズで述べたものと同様の原因であると思われる。チェーン係留方式およびブイ係留方式に対しては、簡易計算による係留力の計算値も水深20m以下で非常に大きくなってしまっており、水深20m以下という条件は多点係留方式にとって非常に厳しい環境条件であることがわかる。

図3.5.5.9によると、水深40mの場合にシミュレーション計算結果は簡易計算結果より小さな値を示している。これは、水深が比較的深くなると系全体の固有周期が入射波周期に比べて長くなり、同調運動が起こりにくくなることと、簡易計算法では安全側の推定法となるように各モードの運動を同位相となるように重ね合わせていることによると思われる。

### c) 波周期シリーズ

図3.5.5.5および図3.5.5.10に示すように、シミュレーション計算はA浮体に対しては水深20m、B浮体に対しては水深40mの条件で実施した。図3.5.5.5によると、水深20mという環境条件では系全体の固有周期が比較的短いため、平均波周期を10秒から15秒、20秒と増加することにより、同調現象が生じやすくなっている。シミュレーション計算法による係留力は急激に増加することがわかる。

一方、B浮体に対するシミュレーション計算結果はA浮体に対するシミュレーション計算結果に比べて小さくなっています。また同じ計算条件で実施した簡易計算の結果に比べても小さい。さらに平均波周期の変化に対する係留力の変化も小さくなっています。これはB浮体の排水量がA浮体に比べて8倍とかなり大きく、またシミュレーション計算を行った水深も40mと比較的深いので、系の固有周期がA浮体の場合に比べて長くなり、平均波周期が10秒～20秒では同調現象を生じなかっただためと考えられる。

### d) 係留ライン本数シリーズ

水深20m、平均波周期15秒の条件で、A浮体に対して行ったシミュレーション計算結果を図3.5.5.6に簡易計算結果と比較して示す。シミュレーション計算結果では、簡易計算結果とは逆に係留ライン本数が増加すると係留力も増加するという傾向が見られている。これは、係留ライン本数が増すと系全体の固有周期が短かくなってしまって平均波周期に近づき、簡易計算では考慮されていない浮体と係留系の同調現象がシミュレーション計算の結果に現れたためと考えられる。したがって、係留ライン本数を増せば必ずしも安全側になるというわけではなく、系全体の固有周期と波周期との関係によって、かえって危険側になる場合もあるので、係留ライン本数の選定には注意を要する。

以上、示した簡易計算結果とシミュレーション計算結果との比較結果をまとめると次のようになる。

- i) 水深が20m以下の極端に浅い海域では係留点の許容移動量が非常に少くなり、係留ラインは容易にトート状態となるので系全体の固有周期が短くなる。したがって15秒程度の平均波周期を有する波浪条件下でも浮体の同調運動の可能性が無視できないので、簡易計算法による係留力の推定値を用いる場合には、系全体の固有周期をあらかじめ推定しておき、簡易計算法の有効性を確認しておく必要がある。
- ii) 水深が比較的深い場合には系全体の固有周期は非常に長くなり、浮体が同調運動する可能性はほとんどないと考えられるので、簡易計算法による係留力の推定値は安全側の値でもあり、係留系の初期設計段階においては有效地に利用できる。

### 5.5.3 適用範囲についての考察

水深が20m以下のような極端な浅海域においては、多点係留方式の場合の係留点の許容変位量は非常に小さく、浮体の運動によって係留ラインは容易にトート状態となるため、係留によるバネ系は水深が深い場合に比べてかなりかたいものとなり、浮体の水平面内運動の固有周期は平均波周期に比べて十分長くはなくなる。この場合、同調現象が生じて係留ラインが破断するという結果が今回実施したシミュレーション計算で数点見られており、水深20m以下の極端に浅い海域においては比較的海象条件の穏やかな場合を除いて、多点係留方式の適用性は低いといえる。なお中間シンカー係留方式の場合には、定常外力に対して生じる浮体の定常変位量を中間シンカーの持ち上がりによって減少させる効果があるので、チェーン係留方式および中間ブイ係留方式に比べて変動外力に対する許容変位量が大きくなり、極端に浅い海域においても比較的適用性がある係留方式といえる。

水深が比較的深い場合（今回の計算では40m以上）には、係留系に生じる係留力の最大値は、水深20m以下の極端に浅い海域の場合に比べて極端に小さくなり、今回計算を実施した範囲では係留ラインの設計の目安となる破断張力の40%を越える例は少ない。したがって、浅海域といえども水深40m～100mの範囲では多点係留方式の適用性は高いといえる。また、チェーン係留方式、中間ブイ係留方式および中間シンカー係留方式の3種類の係留方式の差が係留力に及ぼす影響は、水深の増加と共に少なくなる。

### 参考文献

- 1) F. H. Hsu and K. A. Blenkarn : Analysis of Peak Mooring Force Caused by Slow Vessel Drift Oscillation in Random Seas, OTC 1159, 1970
- 2) 山内保文 : 海洋波中の応答、耐航性シンポジウムテキスト、日本造船学会、1969
- 3) 平山次清 : 海洋波の統計的性質、日本造船学会誌、第609号、1980
- 4) 井上義行 : 横波中の係留浮体の長周期運動（その1），日本造船学会論文集，第143号，1978
- 5) T. Ikebuchi : Hydrodynamic Forces on a Body Moving Arbitrarily in Time on a Free Surface, J. Kansai Soc. N.A., Japan, № 181, 1981
- 6) 井上義行 : 横波中の係留浮体の長周期運動（その2），日本造船学会論文集，第144号，1978

表 3.5.3.1 試験条件および計算条件

浮 体 模 型		M 3 B	
係 留 ラ イ ン 模 型		チ ェ ー ン 模 型	シ ン カ ー 付 き チ ェ ー ン
不 規 則 波	有 義 波 高	11.33 cm	11.20 cm
	平 均 波 周 期	2.19 s	
	入 射 角	0°	
水 深		1.2 m	

表 3.5.3.2 模型試験およびシミュレーション計算による標準偏差の比較 (上段: 実験値)  
(下段: 計算値)

モード 係留方式	(cm) 波	(cm) サーボ	(cm) ヒープ	(deg) ピッチ	(kg) 係留力(No.1)	(kg) 係留力(No.2)	(kg) 係留力(No.3)	(kg) 係留力(No.4)
チェーン 係留方式	3.00	7.16	1.48	1.11	0.625	0.942	0.635	0.375
	2.71	9.14	1.51	1.53	0.764	0.764	0.757	0.757
中間シンカー係留方式	2.97	4.87	1.46	1.10	0.637	0.637	0.401	0.424
	2.71	3.75	1.51	1.53	0.538	0.538	0.473	0.473

表 3.5.5.1 浮体要目

浮体 要目	A	B
長さ L	100 m	200 m
幅 B	50 m	100 m
型深さ D	20 m	30 m
喫水 d	10 m	20 m
排水量 △	51,250 ton	410,000 ton
重心高さ KG	10 m	20 m
メタセンター高さ GM <sub>T</sub>	15.83 m	31.67 m
メタセンター高さ GM <sub>L</sub>	78.33 m	156.67 m
環動半径(ロール) K <sub>xx</sub>	15.55 m	30.55 m
環動半径(ピッチ) K <sub>yy</sub>	29.44 m	58.59 m
環動半径(ヨー) K <sub>zz</sub>	32.28 m	64.55 m

表 3.5.5.2 係留ライン要目

	チェーン	中間ブイ	中間シンカー
チェーン			
中間ブイ付き チェーン	呼び径: 142 mm 水中単重: 406 kg/m ヤング率: 7000 kg/mm <sup>2</sup>	(A浮体)(B浮体) 直 径: 6 m, 7 m 高 底: 4 m, 4.5 m 重 量: 15ton, 20ton	
中間シンカ付き チェーン			水中重量: 100 ton

表3.5.5.3 計算条件

条件	A 浮体	B 浮体	
水深 : H (m)	[14] [40]	[20] [40] [60]	[50]
初期水平張力 : T <sub>Ho</sub> (ton)			[40] [60]
有義波高 : H <sub>w</sub> (m)	[1.5] [2.5]	[3.0] [3.5] [5.0]	[4.5] [2.5] [6.0] [3.5] [8.0]
平均風速 : U <sub>w</sub> (m/s)			
平均波周期 : T <sub>w</sub> (s)		10, 15, 20	
波・風方向 : χ <sub>w</sub> (deg)		60	
潮流速 : U <sub>c</sub> (knot)		3	
潮流方向 : χ <sub>c</sub> (deg)		60	
係留ライン本数 : N		12, 24, 36	
係留方式	チャーン係留方式, 中間ブイ係留方式, 中間シンカー係留方式		

(\*) HとT<sub>Ho</sub>, およびH<sub>w</sub>とU<sub>w</sub>は組みになっている。

表3.5.5.4 係留ラインの初期長さ

水深	チャーン係留方式	中間ブイ係留方式	中間シンカー係留方式
14	220	21	50
		175	220
20	260	30	50
		200	260
40	370	60	75
		270	370
50	420	75	50
		285	420
100	570	150	75
		360	570

(単位 : m)

(上段 : 浮体 — シンカー間ライン長さ)  
(下段 : シンカー — アンカー間ライン長さ)

表 3.5.5.5 シミュレーション計算結果の統計値の例

浮体 : A  
 係留ラン本数 : 12 本  
 初期水平張力 : 40 ton  
 水深 : 20 m

有義波高 : 4.5 m  
 平均波周期 : 10 s  
 波方向 : 60°

平均風速 : 50 m/s  
 風向 : 60°  
 潮流速 : 3 knot  
 潮流方向 : 60°

モード	下周期	ゼロクロス周期	ビーカ・トゥ・ビーク	パラメータ	平均偏航	標準偏差	有義偏航	1000 波最大期待値	平均偏航	有義偏航	1000 波最大期待値
									上段	中段	下段
サ - ジ	11.1	9.8	0.468	0.99	0.37	0.72	1.43	1.71	2.42	2.22	2.92
	11.0	9.7	0.474	1.50	0.37	0.72	1.42	1.53	2.36	2.23	2.36
ス - ウ	13.1	10.0	0.640	0.75	0.42	0.78	1.61	1.53	2.44	2.33	3.58
	11.7	10.3	0.469	1.35	0.58	1.09	2.23	2.44	3.58	2.98	4.08
ヒ - ブ	11.7	10.2	0.485	1.86	0.58	1.12	2.22	2.24	2.65	3.77	3.77
	12.7	10.5	0.562	1.53	0.59	1.12	2.24	2.24	2.66	4.12	4.12
ヒ - ル	11.3	10.4	0.404	-0.07	0.69	1.35	2.23	2.23	2.73	3.63	3.63
	11.3	10.4	0.404	-0.02	0.69	1.34	2.22	2.22	2.64	3.36	3.36
ヒ - チ	11.3	10.3	0.405	-0.16	0.69	1.35	2.22	2.22	2.66	3.51	3.51
	10.9	10.5	0.250	0.002	0.84	0.166	0.322	0.322	0.168	0.324	0.324
モード	10.9	10.7	0.207	0.000	0.082	0.163	0.317	0.317	0.163	0.317	0.317
	10.5	10.0	0.298	0.006	0.074	0.147	0.287	0.287	0.153	0.293	0.293
モード	10.6	10.0	0.332	-0.0004	0.0206	0.0406	0.0795	0.0795	-0.0410	-0.0799	-0.0799
	10.6	10.0	0.331	0.0000	0.0200	0.0394	0.0772	0.0772	0.0394	0.0772	0.0772
モード	10.4	9.7	0.350	-0.0010	0.0205	0.0401	0.0791	0.0791	-0.0411	-0.0801	-0.0801
	10.9	9.3	0.519	-0.0074	0.0112	0.0214	0.0433	0.0433	-0.0288	-0.0507	-0.0507
モード	10.9	9.3	0.525	-0.0079	0.0112	0.0214	0.0431	0.0431	0.0293	0.0510	0.0510
	11.0	9.3	0.529	-0.0106	0.0109	0.0203	0.0419	0.0419	-0.0309	-0.0525	-0.0525
モード	9.1	6.6	0.686	1.35	8.3	1.49	3.22	3.22	2.84	4.57	4.57
	9.2	6.9	0.667	1.35	8.0	1.44	3.12	3.12	2.79	4.47	4.47
モード	8.4	5.2	0.788	1.60	8.8	1.52	3.43	3.43	3.12	5.03	5.03

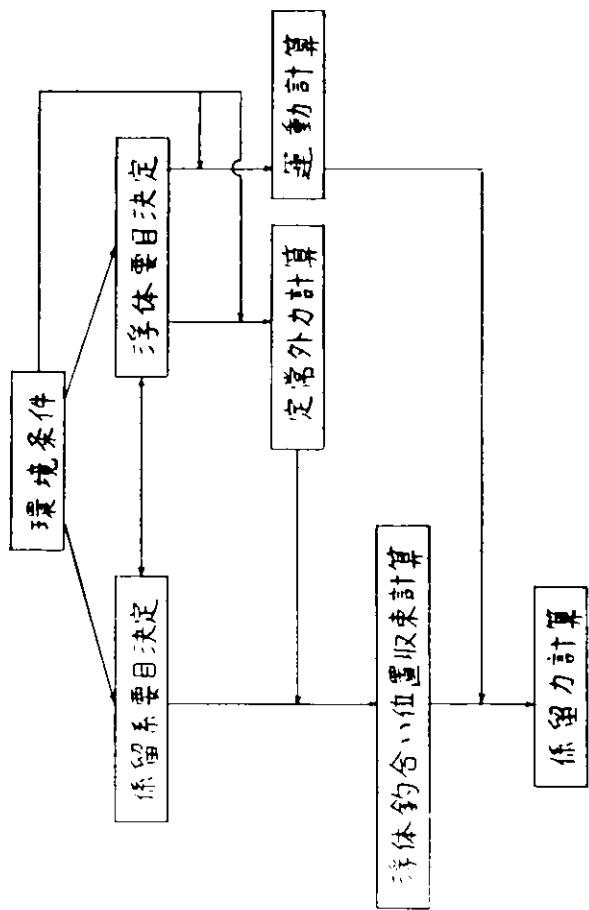


図 3.5.1.1 簡易計算法の流れ図

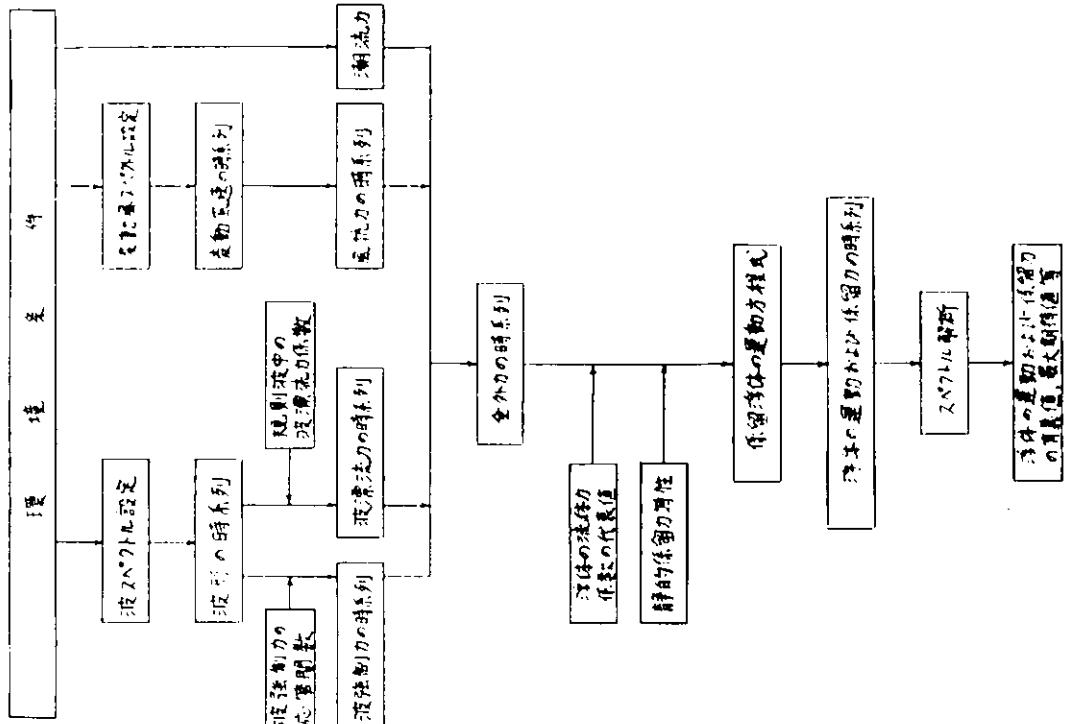


図 3.5.1.2 座標系

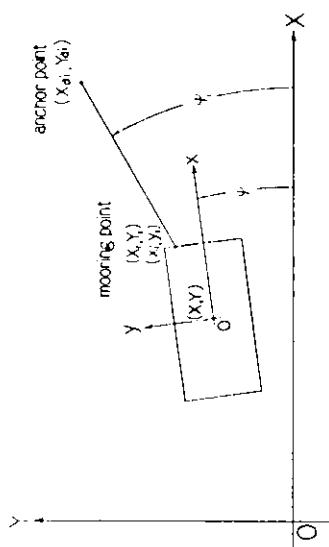


図 3.5.1.3 シミュレーション計算法の流れ図

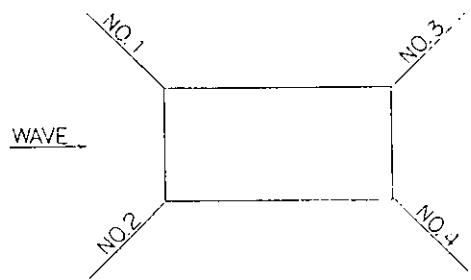


図 3.5.3.1 係留ライン配置

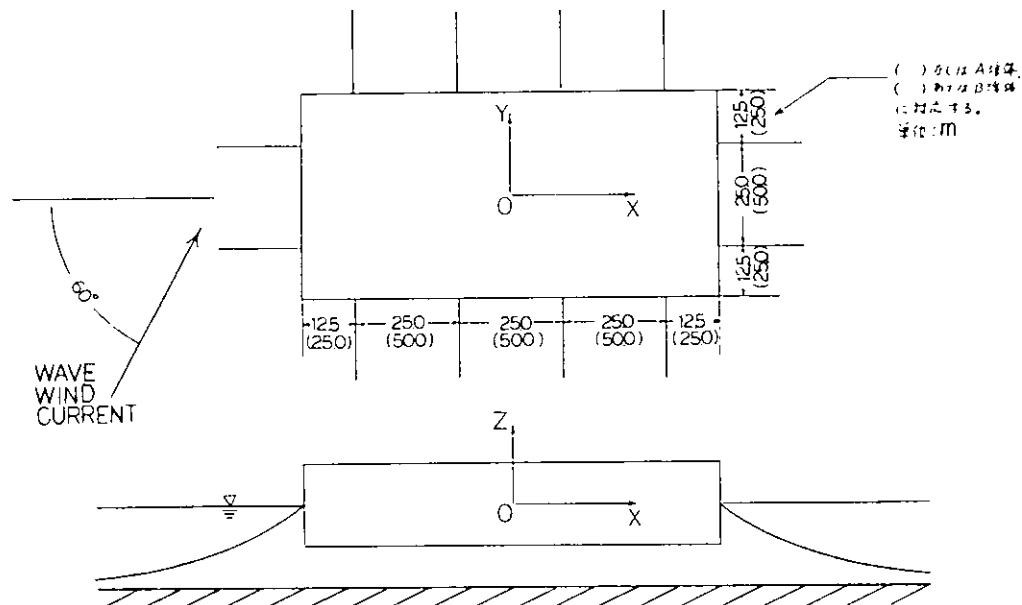


図 3.5.5.1 座標系および係留ライン配置

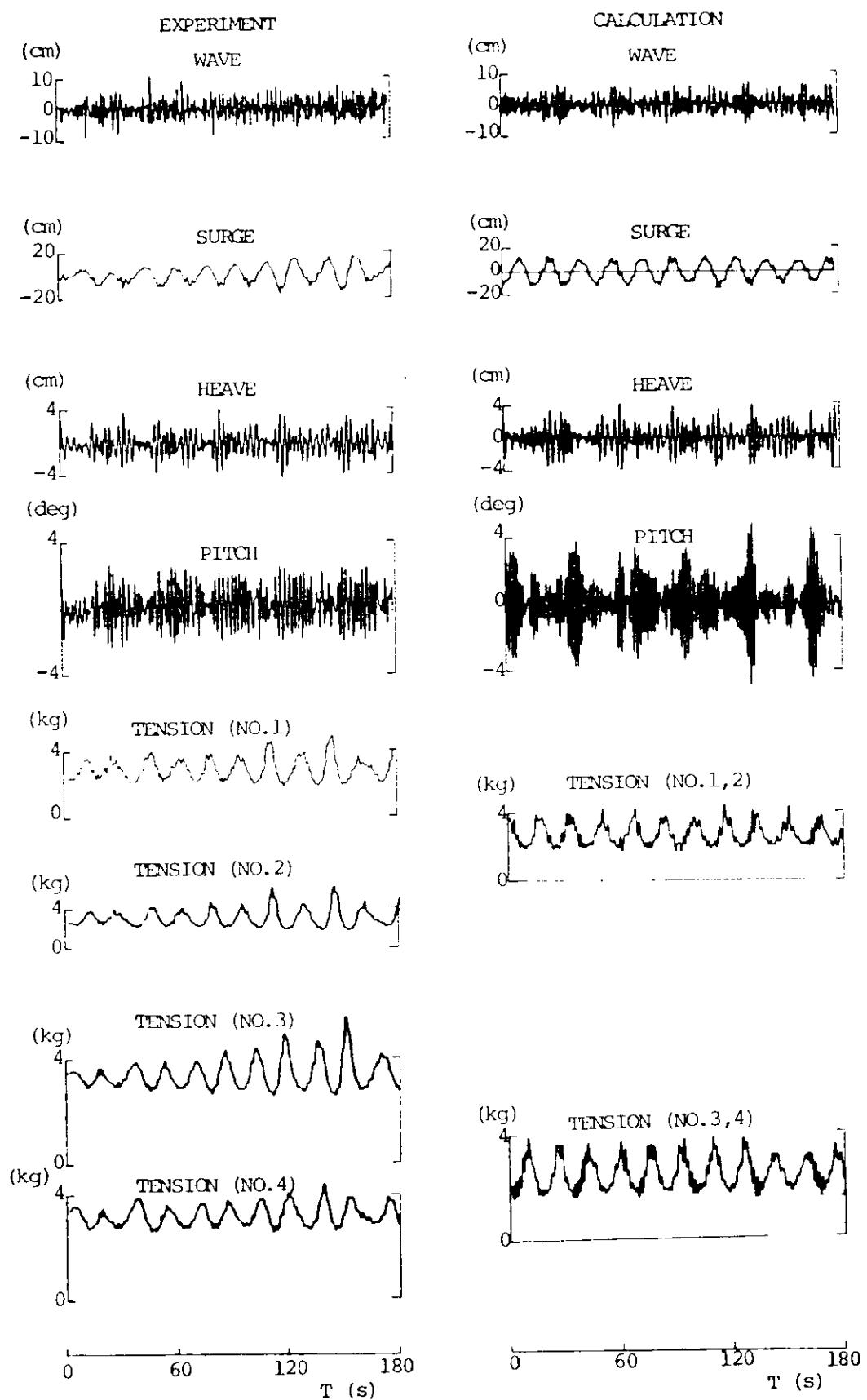


図3.5.3.2 模型試験結果およびシミュレーション計算結果の比較（チューインガム方式）

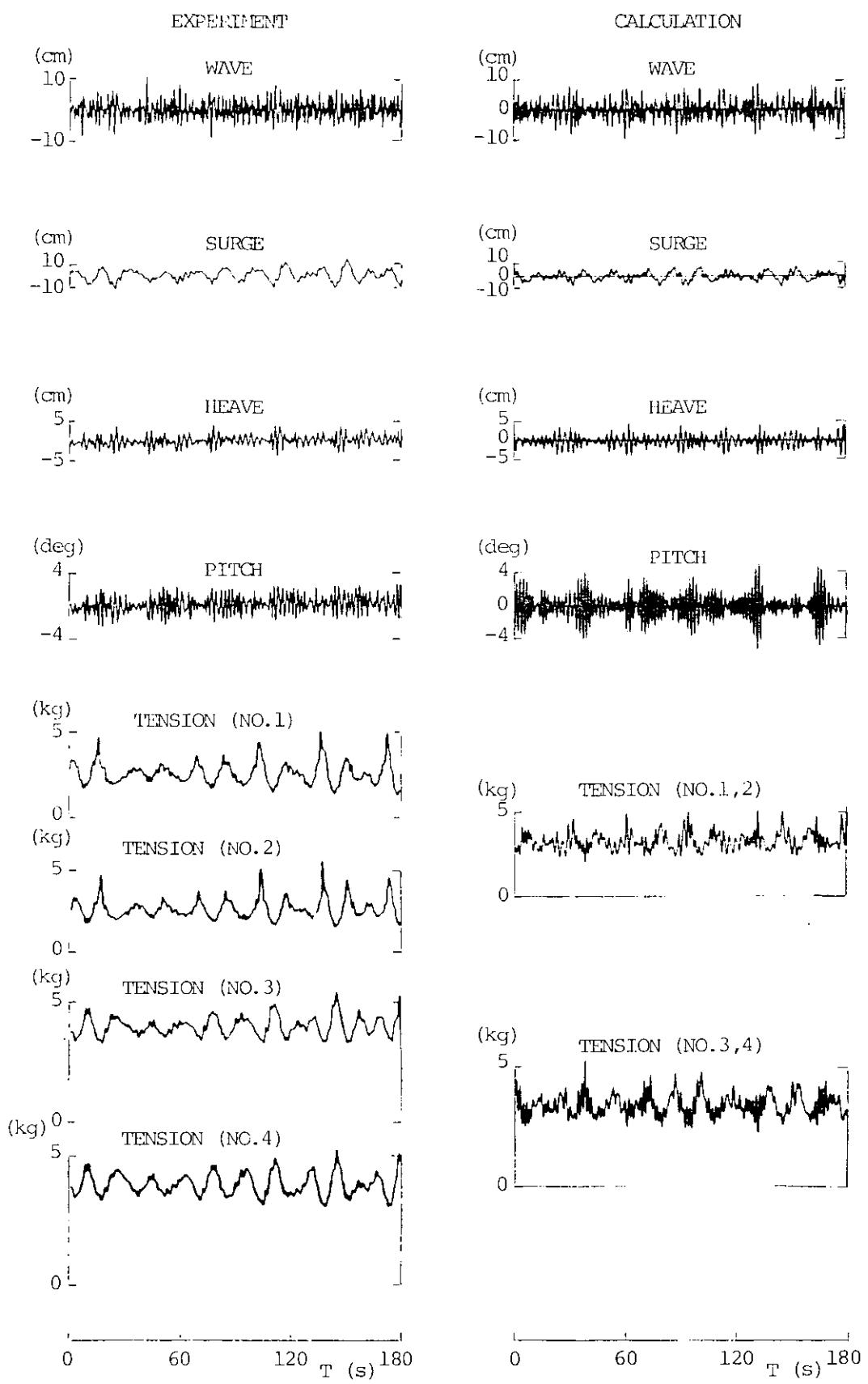


図 3.5.3.3 模型試験結果およびシミュレーション計算結果の比較（中間シンカー係留方式）

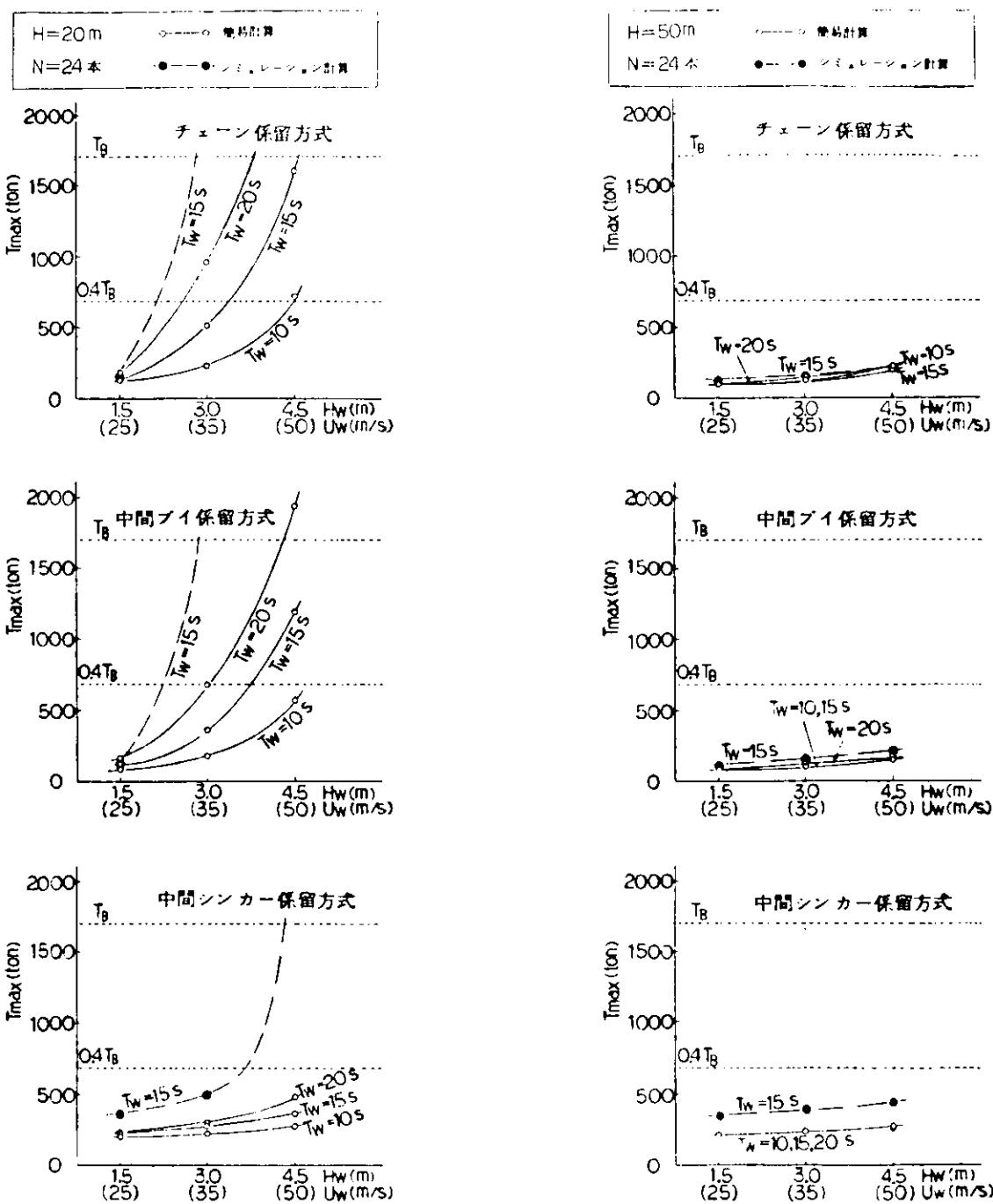


図 3.5.5.2 最大係留力に対する波高・風速影響  
(A 浮体)

図 3.5.5.3 最大係留力に対する波高・風速影響  
(A 浮体)

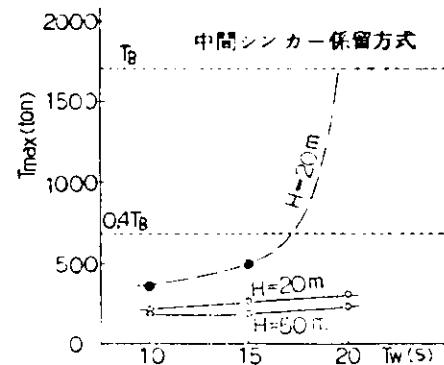
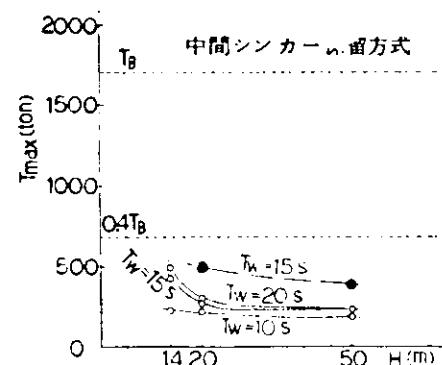
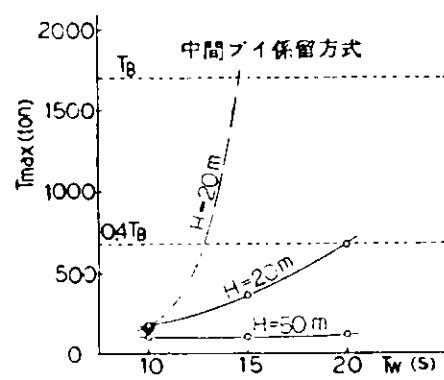
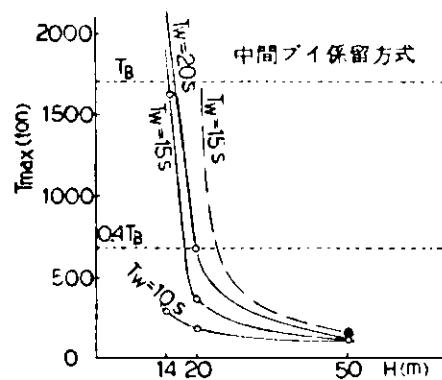
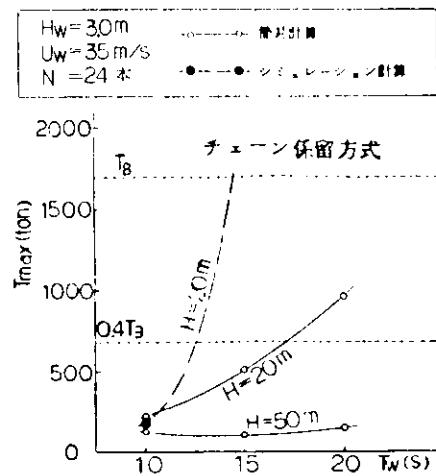
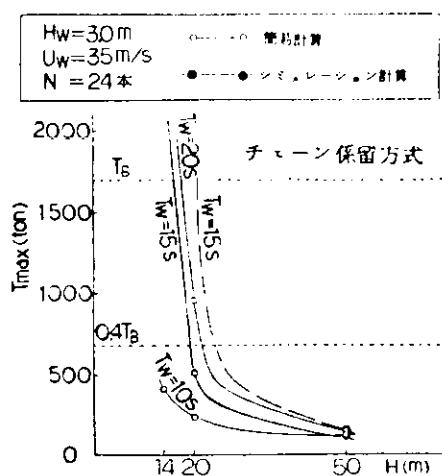


図 3.5.5.4 最大係留力に対する水深影響  
(A 浮体)

図 3.5.5.5 最大係留力に対する波周期影響  
(A 浮体)

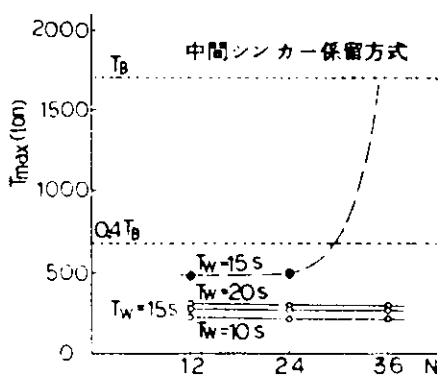
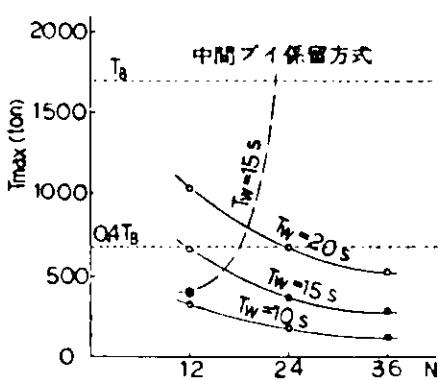
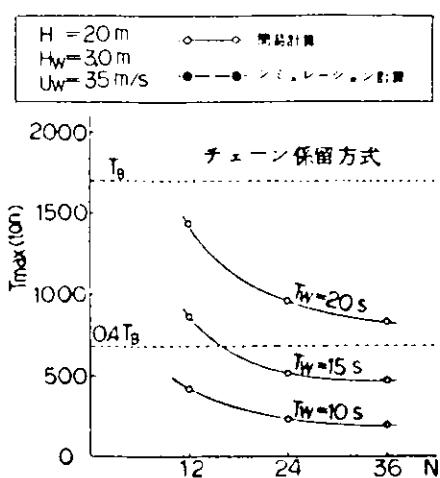


図3.5.5.6 最大係留力に対する係留ライン本数影響  
(A浮体)

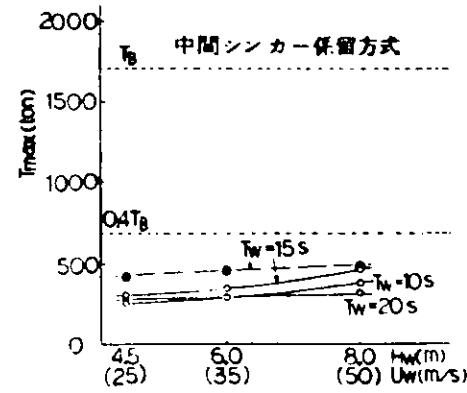
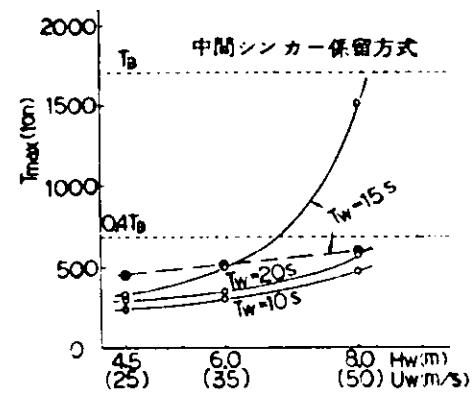
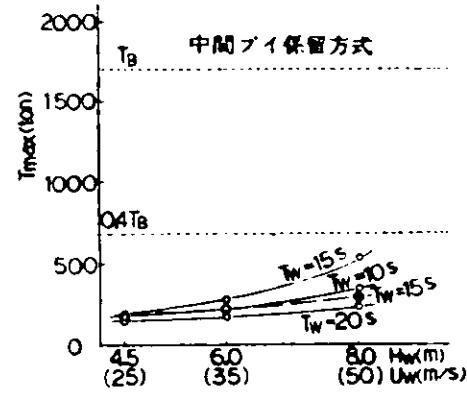
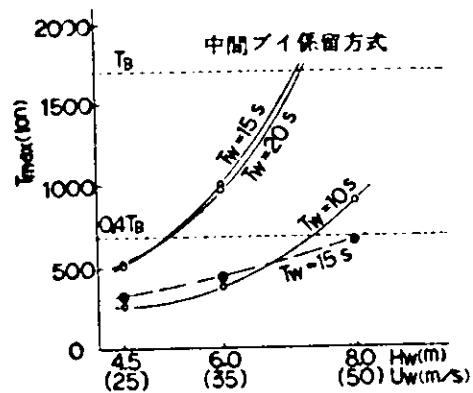
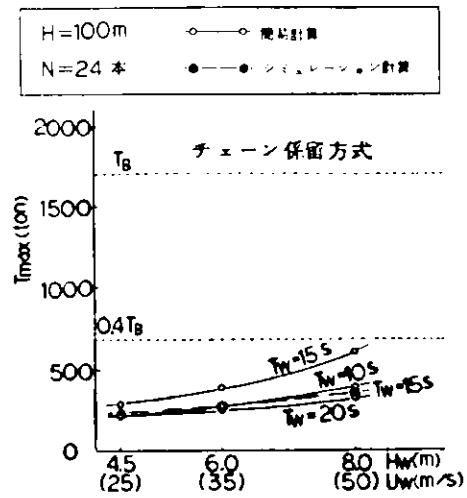
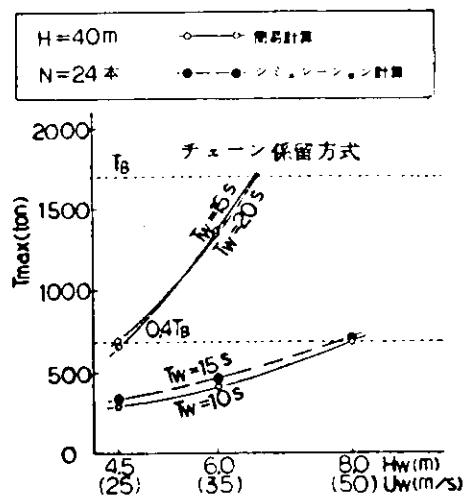


図 3.5.5.7 最大係留力に対する波高・風速影響  
(B 浮体)

図 3.5.5.8 最大係留力に対する波高・風速影響  
(B 浮体)

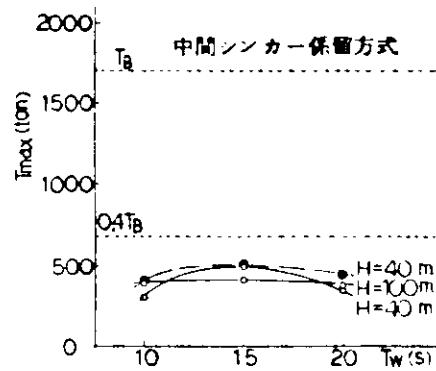
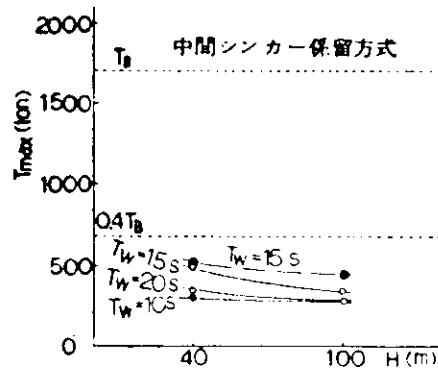
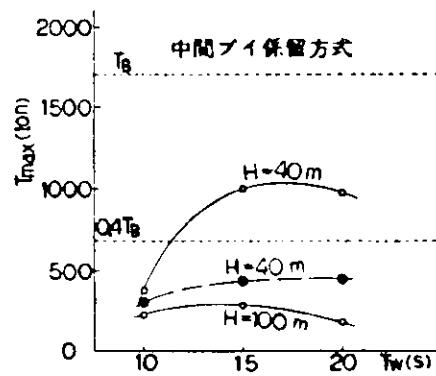
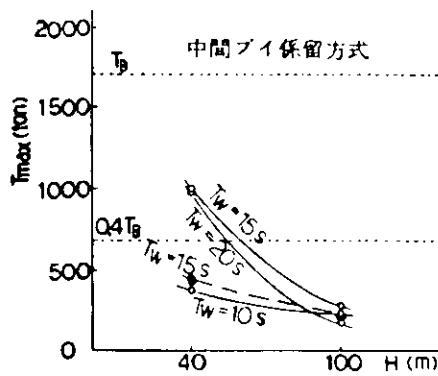
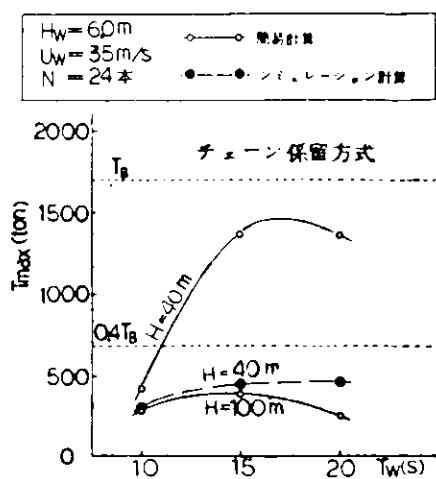
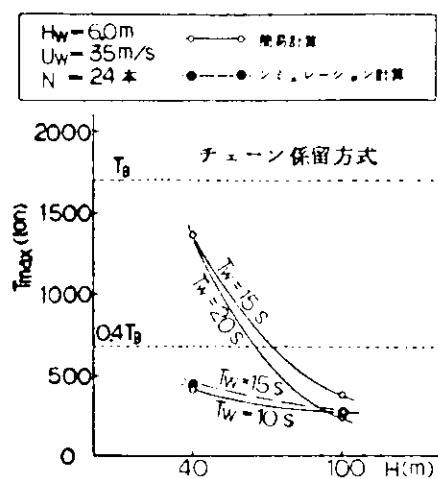


图3.5.5.9 最大係留力に対する水深影響  
(B浮体)

图3.5.5.10 最大係留力に対する波周期影響  
(B浮体)

浮 体 : A  
 係留ライン本数 : 12本  
 初期水平張力 : 40 ton  
 水 深 : 20 m

有義波高 : 4.5 m  
 平均波周期 : 10 s  
 波 方 向 : 60°

平均風速 : 50 m/s  
 風 向 : 60°  
 潮 流 速 : 3 knot  
 潮流方向 : 60°

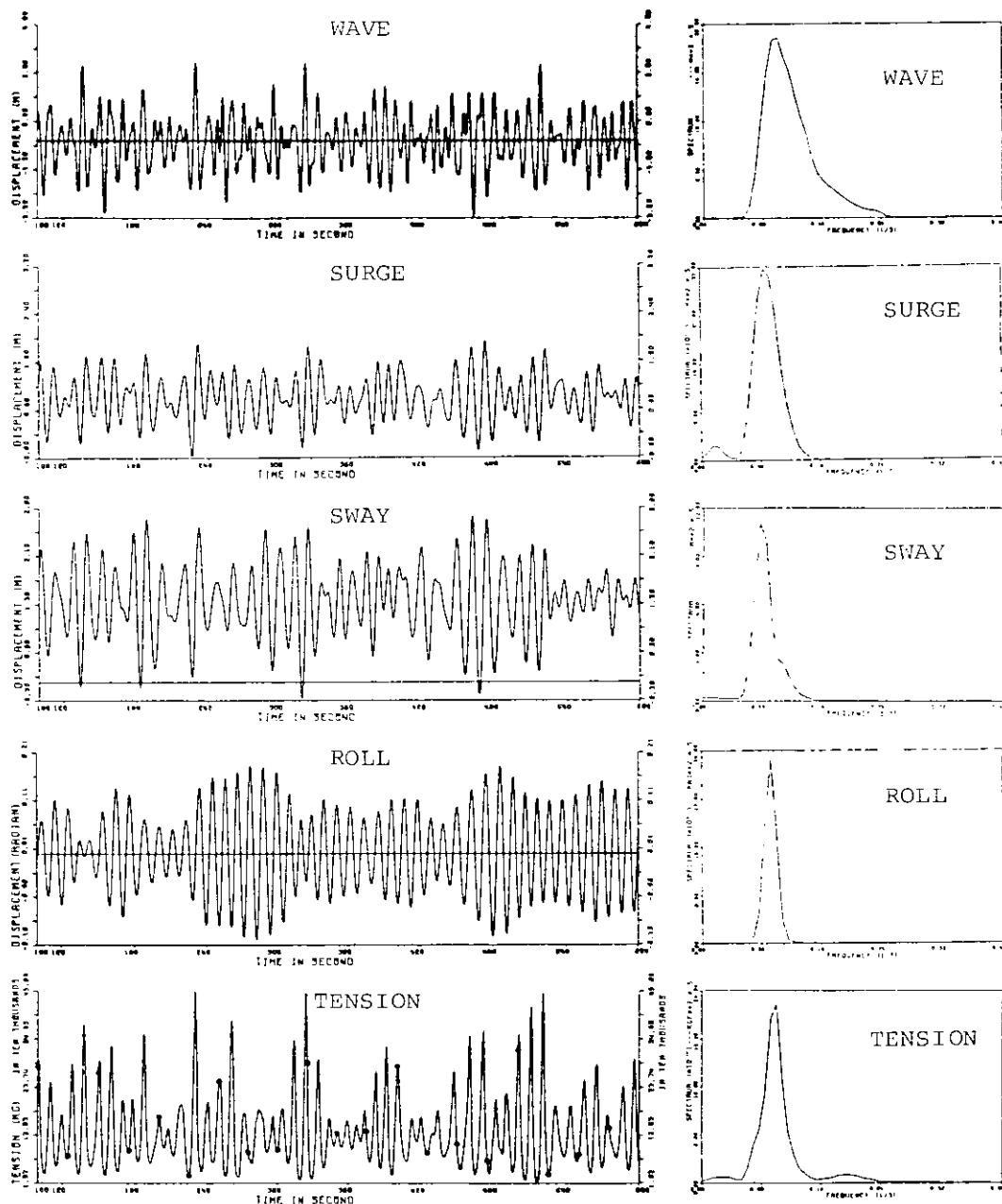


図3.5.5.11 シミュレーション計算例（チェーン係留方式）

浮 体 : A  
 係留ライン本数: 12本  
 初期水平張力 : 40 ton  
 水 深 : 20 m

有義波高 : 4.5 m  
 平均波周期: 10 s  
 波 方 向 : 60°

平均風速 : 50 m/s  
 風 向 : 60°  
 潮 流 速 : 3 knot  
 潮流方向 : 60°

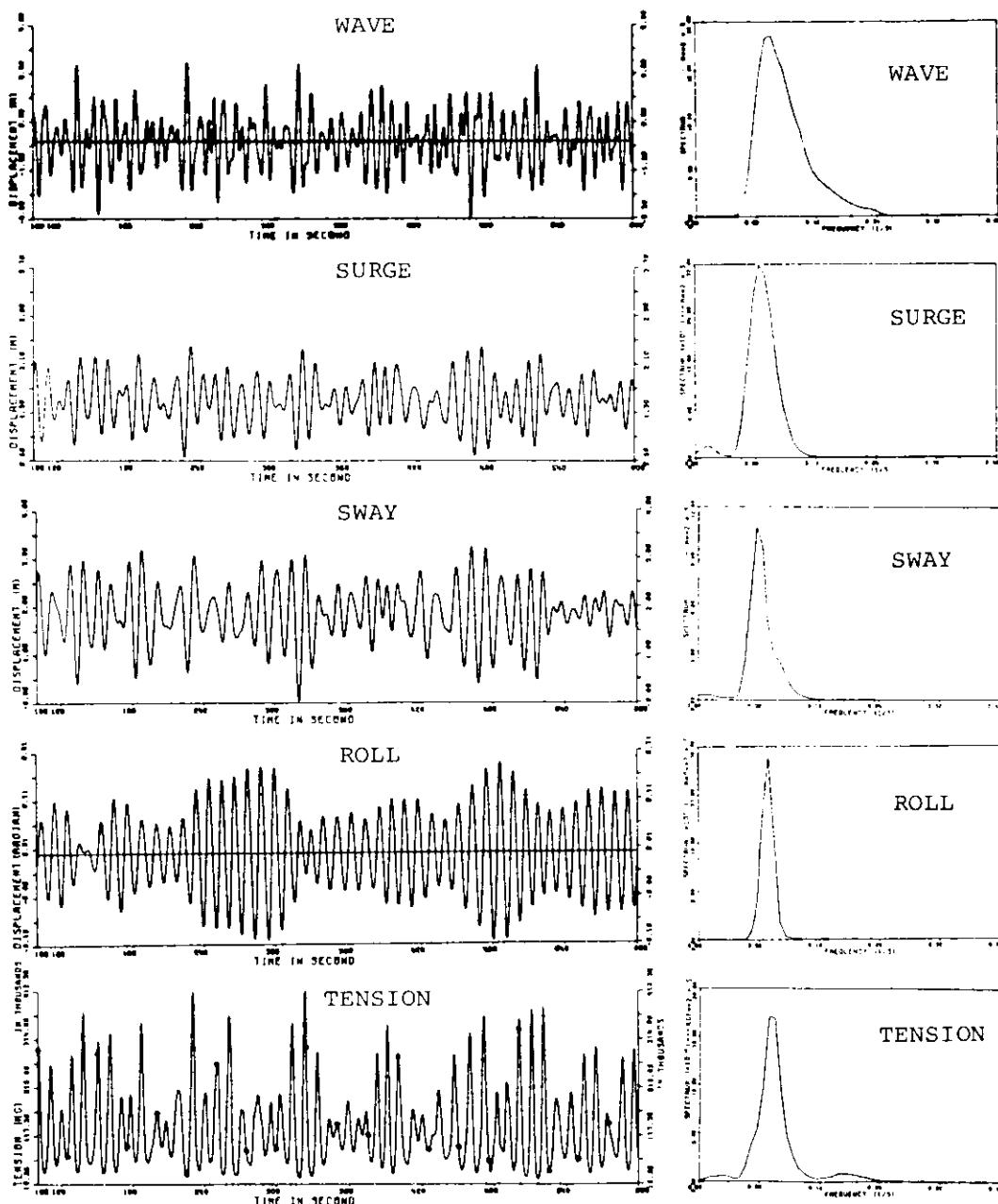


図 3.5.5.12 シミュレーション計算例(中間ブイ係留方式)

浮 体 : A 有義波高 : 4.5 m 平均風速 : 50 m/s  
 係留ライン本数 : 12本 平均波周期 : 10 s 風 向 : 60°  
 初期水平張力 : 40 ton 波 方 向 : 60° 潮 流 速 : 3 knot  
 水 深 : 20 m 潮流方向 : 60°

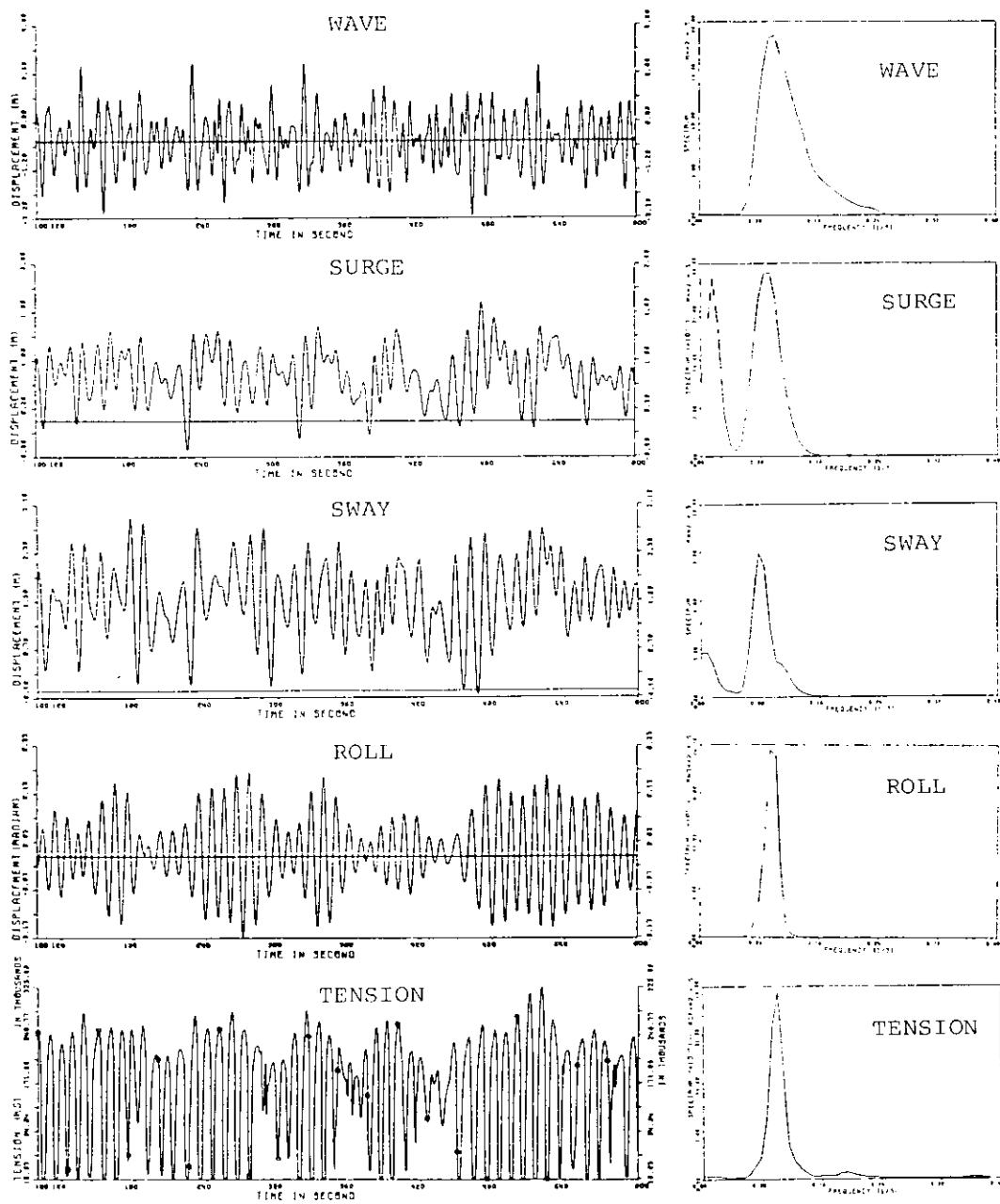


図 3.5.5.13 シミュレーション計算例（中間シンカー係留方式）

## 6. 一点係留方式

### 6.1 計算法

#### 6.1.1 概要

一点係留時の船体挙動を解析するための計算方法は主として大型タンカーと C A L M (Catenary Anchor Leg Mooring), S A L M (Single Anchor Leg Mooring) に代表されるターミナルとの係留を対象として確立されてきている。現在までに公表されている計算方法には、大きく分けて 2 つの流れがある。その 1 つは平水中的船体運動を表わす式を減衰項  $e^{-\lambda t}$  を含む形で仮定し (3.6.1) 式に示すような運動方程式から  $\lambda$  に関する特性方程式を導びき、得られた解から、運動が発散するか減衰するかを求める方法であり、この手法は被曳船の針路安定性の解法として A. G. Strandhagen<sup>1)</sup> らによって最初に発表され、その後一点係留問題への応用として H. R. Sorheim の研究等<sup>2)</sup> がある。本方法は一点係留において問題とされている係留浮体の振れまわり運動が起こるか否かを判別するのに有効であり、振れまわり運動そのものの大きさを求めることはできないが割合い簡単に振れまわりの判別をすることができ、システムを設計する上での目安としては便利な手段であると思われる。一方、別の方針は本研究部会でも採用した方法であり (3.6.1) 式を逐次的に解き構造物の運動と係留ラインの張力等の時系列を求める。本方法は実際の振れまわり運動をシミュレートできるが計算に時間(すなわち費用)がかかり過ぎる欠点を持つ。一般には、振れまわり運動のみを考え波浪中の動揺を無視する方法<sup>3)</sup> と、振れまわり運動と波浪中動揺の周期は十分にかけ離れているものとし両者の運動を別途に求めて重ね合わせる方法<sup>4)</sup> とがあり、本研究部会では後者の方法で計算した。

シミュレーション計算の目的は与えられた外象条件における係留系に作用する荷重を推定する場合と、逆に、特定の係留系に対する許容外象条件を推定する場合の両方がある。最適設計を行なうためには各種の設計パラメータに対する系統的計算を実行する必要があるが、本研究部会で示した計算方法はその目的からすると計算時間がかかり過ぎる難点はある。本報告書ではいくつかのパラメータに対する計算を行ない、必ずしも十分ではないが設計データとして活用できるようにまとめてある。計算法については、今後効率のよい手法の確立が望まれる。

#### 6.1.2 運動方程式、フローチャート

本計算プログラムは図 3.6.1.1 に示すような係留システムに対して適用することができる。振れまわり運動及び波浪中動揺を時系列解析する場合、両運動の周期は十分にかけ離れているものとし、各々、別個の運動方程式を解いて単純に加え合わせる。(3.6.1) 式に振れまわり運動の方程式、(3.6.2) 式に波浪中動揺の運動方程式を示す。また、座標系を各々図 3.6.1.2、図 3.6.1.3 に示す。

(振れまわり運動方程式)

$$\left. \begin{array}{l} (M + m_x) \ddot{u} - (M + m_y) v r = F_x + T_x \\ (M + m_y) \ddot{v} + (M + m_x) u r = F_y + T_y \\ (J + j_\phi) \dot{r} = M_\phi + T_y \cdot \ell_p \end{array} \right\} \quad (3.6.1)$$

ここに、  $M$ 、 $J$  : 構造物の質量、重心を通る垂直軸まわりの慣性モーメント

$m_x, y, j_\phi$  : 構造物の前後、左右方向付加質量及び重心を通る垂直軸まわりの付加慣性モーメント

$u, v, r$  : 構造物の前後、左右方向速度及び旋回角速度

$F_x, y$ ,  $M_\phi$  : 構造物に働く外力(前後、左右及び旋回モーメント)

$T_x, y$  : 係留ラインによる水平力(前後、左右)

$\ell_p$  : 重心から係留ライン接続点までの距離

(波浪中動揺運動方程式)

$$[\mathbf{A}_{ij}] \begin{bmatrix} \ddot{x} \\ \ddot{y} \\ \ddot{z} \\ \ddot{\varphi} \\ \ddot{\theta} \\ \ddot{\psi} \end{bmatrix} + [\mathbf{B}_{ij}] \begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{z} \\ \dot{\varphi} \\ \dot{\theta} \\ \dot{\psi} \end{bmatrix} + [\mathbf{C}_{ij}] \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \\ \varphi \\ \theta \\ \psi \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_{wx} + T_{wx} \\ F_{wy} + T_{wy} \\ F_{wz} + T_{wz} \\ M_{w\varphi} + T_{w\varphi} \\ M_{w\theta} + T_{w\theta} \\ M_{w\psi} + T_{w\psi} \end{bmatrix} \quad (3.6.2)$$

ただし,  $i, j : 1 \sim 6$  (順に surge, sway, heave, roll, pitch, yaw)

$\mathbf{A}_{ij}$  : 見掛け質量, 見掛け慣性モーメントマトリックス

$\mathbf{B}_{ij}$  : 減衰項マトリックス

$\mathbf{C}_{ij}$  : 復原項マトリックス

$x, F_{wx}, T_{wx}$  : surge, surge 波浪強制力及び係留力の surge 成分

$y, F_{wy}, T_{wy}$  : sway, sway 波浪強制力及び係留力の sway 成分

$z, F_{wz}, T_{wz}$  : heave, heave 波浪強制力及び係留力の heave 成分

$\varphi, M_{w\varphi}, T_{w\varphi}$  : roll, roll 波浪強制モーメント及び係留力の roll モーメント成分

$\theta, M_{w\theta}, T_{w\theta}$  : pitch, pitch 波浪強制モーメント及び係留力の pitch モーメント成分

$\psi, M_{w\psi}, T_{w\psi}$  : yaw, yaw 波浪強制モーメント及び係留力の yaw モーメント成分

以上の運動方程式では次のような仮定をしている。

振れまわり運動方程式 (3.6.1) 式では

イ) 構造物及びブイの運動は水面での平面運動のみ考える。

ロ) 波浪中の動揺及び波浪強制力は考えない。

ハ) ブイの質量及びブイに働く流体力は無視する。

ニ) ホーサーの延び及び重さはないものとする。

ホ) ブイ係留ラインの動的影響は考えない、準静的取扱いをする。

ヘ) ブイ係留ラインに働く流体力は考えない。

波浪中動揺運動方程式 (3.6.2) 式では

イ) ホーサーの長さは十分に長いか、あるいはブイが構造物に固定されているかのいずれかとする。

ロ) ホーサーが十分に長いときは、ブイの運動は水面上の平面運動のみ考える。

ハ) ブイの質量及びブイに働く流体力は無視する。

ニ) ホーサーの延び及び重さはないものとする。

ホ) ホーサーが十分に長いとき船体に働くホーサーによる heave 力、pitch モーメントは無視できるものとする。

ヘ) ブイ係留ラインの動的影響、ブイ係留ラインに働く流体力は無視する。

なお、以下ではブイ係留ラインは単に係留ラインと呼ぶ。

図 3.6.1.4 に計算フローチャートを示す。入力データとして以下の項目をインプットする。

Ⅰ) 構造物の要目

ii) 係留ライン、ホーザーの要目

iii) 外象条件

iv) 波浪中動揺運動方程式の微係数、波強制力係数

v) 波漂流力係数

vi) 流体力係数(旋回微係数)

vii) 風圧力係数

viii) 潮流力係数

以上の項目のうち vi) の流体力係数と viii) の潮流力係数は、同時に必要とせず、どちらか一方を使用すれば良い。大型構造物のように振れまわり運動中の角速度が小さい場合には潮流力を使用して、角速度の影響は別途近似的に与えても計算精度はそれ程悪くはならないが、水槽模型試験等のように比較的角速度が大きい場合をシミュレートするときには角速度項が計算式に含まれている流体力係数を使用した方が良い。今回の計算では実船も含めて全て第2章3節の旋回試験から得られた流体力係数を使い、潮流力係数は使用しなかった。また振れまわり運動のみを計算する場合には iv) の項目は不要である。

計算では最初に静的つり合い位置を計算する。つり合い位置の計算方法は先ず(3.6.3)式に示すようにホーザー接続点まわりモーメントが0になる構造物の船首角を求める。

$$\begin{aligned} M(\alpha) &= \ell_p \cdot F_{EY}(\alpha) - M_e(\alpha) \\ &= 0 \end{aligned} \quad (3.6.3)$$

ただし、 $F_{EY}$ ：構造物に働く係留力を除いた外力のY方向成分

$M_e$ ：構造物に働く係留力を除いた重心まわり外力モーメント

$M(\alpha)$ が0になるような船首角( $\alpha_0$ )が得られたならば構造物がどの位置にあってもホーザーはホーザー接続点まわりモーメントとしては作用しないから $\alpha_0$ は変化しない。したがって静的つり合い位置における船首角は $\alpha_0$ となる。次に、この状態での外力の方向とホーザーの向き( $\hat{\mu}$ )が等しい状態で構造物に働く外力と係留力がつり合う位置( $X_0, Y_0$ )を求める。通常は静的つり合い位置からシミュレーション計算を始めるよりも不均衡な位置からの方が、振れまわり運動の収束、発散あるいは定常を速やかに判定できる。本計算プログラムでは不均衡位置から計算を始める場合は、静的つり合い時の船首角( $\alpha_0$ )から適当な偏角を与える、その船首角についてモーメントを除く外力と係留力のつり合う位置を求める方法を探っている。すなわち、モーメントが不均衡でX、Y方向の力はつり合った位置からシミュレーションを開始する。

波浪中動揺を計算する場合、振れまわり運動シミュレーションの計算ステップ内では構造物の平均船首角、平均位置は変化しないものと仮定し、振れまわり運動計算のステップを更に細分して計算する。したがって、波浪中動揺の計算時に構造物に作用する力は変動力のみ、すなわち、波浪強制力と平均位置からの動揺変位に対応する係留力の変動分である。

構造物の運動は以上のように(3.6.1)式より求められる振れまわり運動と、(3.6.2)式より求められる波浪中動揺を各計算ステップで加え合わせることにより得られる。ホーザー及び係留ラインの張力は各ステップでの合成運動から求める。ホーザー接続点の座標( $X_p, Y_p$ )は(3.6.4)式で与えられ、ブイの座標( $X_b, Y_b$ )は(3.6.5)式で求める。

$$\left. \begin{aligned} X_p &= X_0 + \ell_p \cdot \psi \cdot \sin \alpha + \ell_d \cdot \varphi \sin \alpha + x \cos \alpha - y \sin \alpha \\ Y_p &= Y_0 + \ell_p \cdot \psi \cdot \cos \alpha - \ell_d \cdot \varphi \cdot \cos \alpha + x \sin \alpha + y \cos \alpha \end{aligned} \right\} \quad (3.6.4)$$

ただし、

$X_0, Y_0$  : 振れまわり運動計算による構造物重心のX, Y座標

$\alpha$  : 振れまわり運動計算による構造物方位

$\ell_p, \ell_d$  : 重心からホーサー接続点までの距離及び高さ

$\psi, \varphi, x, y$  : Yaw, Roll, Surge, Sway

$$\left. \begin{aligned} X_B &= X_p + \ell_B \cos \beta \\ Y_B &= X_p + \ell_B \sin \beta \end{aligned} \right\} \quad (3.6.5)$$

ただし、

$\ell_B$  : ホーサー長さ

$\beta$  : ホーサーの向き

( $X_B, Y_B$ )が求まれば係留ライン張力はカテナリー理論から計算できる。また、ホーサー張力は係留ライン張力水平成分の合成功力として求める。

### 6.1.3 外 力

構造物に作用する外力のうち係留力を除いたものとしては風圧力、潮流力、波漂流力、波強制力及び構造物が運動することにより流体から受ける流体力がある。ただし、潮流力に関しては、今回の一連の計算では流速を潮流速を含めた構造物と流体との相対速度と考えることにより潮流力は流体力に含めた扱いをしている。

#### (1) 振れまわり運動に関する外力

##### (a) 風 圧 力

風圧力係数は本研究部会54年度に実施した一様流れ中において箱型海洋構造物に働く3分力計測結果第2章3節から推定したもので表3.6.1.1に入射角に対する各係数を示す。また、座標系は図3.6.1.5に示した。

風圧力成分は(3.6.6)式で与えられる

$$\left. \begin{aligned} F_{wx} &= -C_{wx} \cdot \frac{1}{2} \rho_a \cdot B (D-d) V_w^2 \\ F_{wy} &= -C_{wy} \cdot \frac{1}{2} \rho_a \cdot L (D-d) V_w^2 \\ M_{wz} &= -a \cdot L \cdot \sqrt{F_{wx}^2 + F_{wy}^2} \end{aligned} \right\} \quad (3.6.6)$$

ただし、

$F_{wx}, F_{wy}, M_{wz}$  : 風圧力のx, y軸方向の力及びZ軸まわりのモーメント (ton-m)

$C_{wx}, C_{wy}$  : 風圧力係数

$a$  : 偶力てい

$\rho_a$  : 空気の密度 (0.000125 ton sec<sup>2</sup>/m<sup>2</sup>)

L : 構造物長さ (m)

B : 構造物幅 (m)

D : 構造物深さ (m)

d : 構造物吃水 (m)

$V_w$  : 風速 (m/sec)

また、風速はDavenportのスペクトルを用いた変動風として(3.6.7)式で与えている。

$$\left. \begin{aligned} V_w(t) &= U + u(t) \\ u(t) &= \sum_{i=1}^n \sqrt{2 S_u(f_i) d f_i} \cdot \cos(2\pi f_i t + \epsilon_i) \end{aligned} \right\} \quad (3.6.7)$$

$$Su(f) = \frac{8640 f}{\{1 + (1200f/U)^2\}^{1/3}}$$

$$f = 10^{-3} \sim 1$$

$$K = 15$$

ただし、

$f$  : 周波数

$\epsilon$  : ランダム位相

$U$ は本来海面上  $10m$ における10分間平均風速となっているが、ここでは構造物に働く平均風速と考える。

表 3.6.1.1 風圧力係数

入射角 $\chi$ (度)	$C_{wx}$	$C_{wy}$	$a/L$
0	1.00	0.00	0.000
15	0.98	0.17	0.039
30	0.91	0.42	0.076
45	0.75	0.64	0.090
60	0.54	0.81	0.076
75	0.28	0.93	0.039
90	0.00	1.00	0.000

### (b) 流体力

構造物が受ける流体力は、今回の計算では潮流力と構造物が運動することにより作用する抵抗力の加え合わさしたものとしている。流体力係数は第2章3節に示す旋回試験から得られた値を使用した。流体力の各成分は(3.6.8)式で与えられる。座標系を図3.6.1.6に示す。

$$\left. \begin{aligned} F_{Hx} &= -C_x \cdot \frac{1}{2} \rho L d V^2 - \underbrace{(M+m_y) V_o r}_{\text{}} \\ F_{Hy} &= -C_y \cdot \frac{1}{2} \rho L d V^2 + \underbrace{(M+m_x) U_o r}_{\text{}} \\ M_{Hz} &= -C_m \cdot \frac{1}{2} \rho L^2 d V^2 \end{aligned} \right\} \quad (3.6.8)$$

ただし、

$F_{Hx}, y, M_{Hz}$  : 前後力、横力及び回頭モーメント

$C_{x,y,m}$  : 旋回試験から得られた前後力係数、横力係数及びモーメント係数

$\rho$  : 水密度

$L$  : 構造物長さ

$d$  : 構造物吃水

$V$  : 相対流速

$U_o$  : 相対流速の  $x$  軸方向成分

$V_o$  : 相対流速の  $y$  軸方向成分

$r$  : 旋回角速度

$M$  : 構造物の質量

$m_{x,y}$  : 構造物に働く付加質量

旋回試験の結果には、いわゆる遠心力に相当する慣性力が含まれているため、その修正として(3.6.8)式には~~~~~~~~~線で示す項が加えられている。付加質量 $m_{x,y}$ は第2章1節の流体力3次元計算値から $\omega=0$ における値を読みとった。

$C_{x,y,m}$ は $\tau=0$ のときを除いて $\beta=-60^\circ \sim 60^\circ$ の範囲の計測値から最小二乗法で $\beta, \tau' (= L\tau/V)$ の多項式近似として与えられているため $\beta$ が余り大きくなると誤差も大きくなるので、風圧力等の他の外力の影響で $\beta$ の絶対値が $90^\circ$ よりも大きい場合は $\pm 180^\circ$ を加えて $\beta$ は必ず $\pm 90^\circ$ の範囲にあるようにしている。 $\beta$ を修正した場合 $F_{Hx,y}$ の符号は逆になる。

#### (c) 波漂流力

一点係留計算では不規則波中の漂流力は(3.6.9)式、(3.6.10)式で計算される一様な平均漂流力として扱い変動漂流力は考えていない。これは、一般船舶の場合には変動漂流力よりもいわゆる振れまわり運動が係留系に対し主要な影響を与えると考えていたためであるが、本研究部会での研究の結果、対象としている箱型海洋構造物は振れまわり運動がほとんど起きないため相対的に変動漂流力の影響も表われてくるものと思われる。その影響分については本年度の模型試験結果(付録2)から推定することとする。

入射角 $\chi$ の不規則波中平均波漂流力 $\bar{F}_D$ は

$$\bar{F}_D(\chi) = \rho g L \sum_{i=1}^M R_w^2(\omega_i, \chi) S(\omega_i) \Delta \omega \quad (3.6.9)$$

$$R_w(\omega, \chi) = F_D(\omega, \chi) / \frac{1}{2} \rho g L \zeta_a^2 \quad (3.6.10)$$

ただし、

$F_D$  : 規則波中の波漂流力

$R_w$  : 規則波中の波漂流力係数

$\rho$  : 水の密度

$L$  : 構造物長さ

$\zeta_a$  : 規則波振幅

$S(\omega)$  : 不規則波スペクトル

$\omega, \omega_i$  : 波の円周波数

波スペクトルはBretschneider-光易型を使用している

$$S(f) = 0.257 \left( \frac{H_w}{g T_{1/3}^2} \right)^2 \frac{g^2}{f^5} \exp \left\{ -1.03 / (T_{1/3} \cdot f)^4 \right\} \quad (3.6.11)$$

ただし、 $H_w$  : 有義波高

$T_{1/3}$  : 平均周期/0.9

$f$  : 波の振動数

また、今回の計算では(3.6.9)式の級数項は $M=10$ としている。

#### (d) 波浪強制力

波浪中動揺を計算する場合、波浪強制力の応答関数 $F_{wc}(\omega, \chi), F_{ws}(\omega, \chi)$ と波スペクトル $S(\omega)$ から(3.6.12)式で波浪強制力の時系列を計算する。応答関数の添字C, Sはcos成分、sin成分を表わす。

$$F_w(\chi; t) = \sum_{i=1}^N \sqrt{2 F_{wc}(\omega_i, \chi)^2 S(\omega_i) \Delta \omega} \cos(\omega_i t + \epsilon_i) \\ + \sum_{i=1}^N \sqrt{2 F_{ws}(\omega_i, \chi)^2 S(\omega_i) \Delta \omega} \sin(\omega_i t + \epsilon_i) \quad (3.6.12)$$

ただし,  $F_w$  : 時刻  $t$ , 入射角  $\chi$  における波浪強制力

波スペクトルは Bretschneider - 光易型を使用している。また, スペクトルの分割数は  $N = 50$ とした。

#### 6.1.4 係留力

構造物に作用する係留力は中間ブイ方式では, ホーサーの張力であり, 接触ブイ方式では係留ライン張力である。係留ラインの弾性は考えず張力はカテナリー理論で計算している。ホーサー接続点の座標は(3.6.4)式で求められるが, 接触ブイ方式ではこの点をブイの座標と同じにしている。中間ブイ方式ではブイの上下動はないものとし, ブイの座標は(3.6.5)式で与えている。(3.6.5)式はブイの位置は常に原点(外力がないときのブイの位置)とホーサー接続点を結ぶ線上にあると仮定していることを示す。一方, ホーサーは伸び, 重量がないものと仮定するため中間ブイの運動は構造物の運動に拘束されている。ただし, ホーサーには圧縮力は働くないとし, 計算過程で係留ライン張力合成がホーサーの圧縮方向になるような場合が生じたときにはホーサー張力は0としブイの座標は原点にあるものとする。

ホーサー張力は図3.6.1.7の座標系に従い(3.6.13)式で計算される。

$$T_L = \sum_{i=1}^N T_H i \cos(\theta_i - \beta) \quad (3.6.13)$$

$$T_L \geq 0$$

ただし,

$N$  : 係留ライン本数

$T_H$  : 係留ラインの張力水平成分

$\theta$  : 係留ラインの角度

$\beta$  : ホーサーの角度

係留ライン張力は(3.6.14)式～(3.6.16)式に示すカテナリー理論で計算することができる。

##### (a) 海底に係留ラインの一部が横たわっている場合( Slack 状態 )

$$\left. \begin{aligned} \frac{V}{a} &= \cos h \left\{ \frac{H - S_0 + \sqrt{V(V+2a)}}{a} \right\} \\ \bar{S} &= \sqrt{V(V+2a)} \\ T_H &= a w \\ T_v &= \bar{S} w \end{aligned} \right\} \quad (3.6.14)$$

ただし,

$V$  : 係留ラインのアンカーから上端までの垂直距離

$H$  : 係留ラインのアンカーから上端までの水平距離

$S_0$  : 係留ライン長さ

$\bar{S}$  : 係留ラインのカテナリー部分長さ

$w$  : 係留ライン単重

$T_v$  : 係留ライン張力の垂直成分

最大 scope を抑える場合のように, 係留ラインが海底に横たわることなく海底に接する場合( $\bar{S} = S_0$ )を計算するとき,  $a$ は(3.6.15)式で計算すればよい。

$$a = \frac{S_0^2 - V^2}{2V} \quad (3.6.15)$$

##### (b) 係留ラインのアンカー点でラインが海底とある角度を持っている場合

$$\left. \begin{aligned} S_0^2 - V^2 &= 4a^2 \sinh^2 \frac{H}{2a} \\ V &= 2a \sinh \frac{2H' + H}{2a} \sinh \frac{H}{2a} \\ \bar{S} &= a \sinh \frac{H' + H}{a} \end{aligned} \right\} \quad (3.6.16)$$

## 6.2 水槽模型試験

一点係留システムの水槽模型試験は昭和55年度と本年度に実施した。昭和55年度に実施した試験の目的はシミュレーション計算の精度チェックと風向と波及び潮流の方向が互いに異なる場合の構造物の運動と係留ライン、ホーサー張力の大きさを調べることにあったが、本年度では昭和55年度の作業で明らかになった計算上の要改善点、すなわち、波浪中動揺を計算に入れる点、流体力係数を厳密に与える点を改善したシミュレーション計算との比較をすることを主目的としている。

昭和55年度に実施した水槽模型試験の模型要目を表3.6.2.1に、模型試験状態を表3.6.2.2に、また、模型試験配置を図3.6.2.1に示す。詳細は本研究部会昭和55年度報告書（研究資料No.340）を参照のこととし、模型試験結果の一例として、係留ライン、ホーサー張力を図3.6.2.2に示す。

本年度の水槽模型試験に使用した模型は、本研究部会の一連の水槽試験において使用したM3Bであり、長さ3.872m、幅1.936m、高さが0.600mである。模型船状態はB/d=10, 20の2種であり、係留方法としては通常の一点ブイ係留（中間ブイ方式）とブイが船体に固定された方式（接触ブイ方式）の2種である。試験の種類は次の3通りとした。

- イ) 不規則波中における水槽試験
- ロ) 潮流中における水槽試験
- ハ) 不規則波と潮流との組み合わせ中における水槽試験

以上の試験から、昨年度の試験結果と同様に振れまわり運動が非常に小さいこと、また今回の試験では中間ブイ方式と接触ブイ方式について係留力及び船体運動を比較すると両方式による差異がほとんどないこと等が明らかになった。なお、試験の詳細については、付録2「大型模型による一点係留方式の水槽模型試験」に示す。

## 6.3 計算と模型試験結果との比較

シミュレーション計算の精度を確認するために本研究部会で実施した模型試験結果との比較検討を行なった。表3.6.3.1に比較検討をした試験の要目と結果を示している。CASE-A, Bは付録2に示す本年度実施した試験でCASE-Aは付録2表3の略記号WC3, CASE-Bは同じく付録2表4のWC32に対応している。また、CASE-Cは昨年度実施した試験で55年度報告書の3.2節、表3.3.2.2, Case-I 風向45°、潮流14cm/s、風速2.3m/s、波高3.9cm、λ/L=1.0規則波に対応している。なおCASE A, Bでは計算と模型試験で要目の異なる点がある。すなわち、

- イ) 模型試験ではホーサーは2本でBridle形式となっているが、計算では1本でBridleにはなっていない。
- ロ) 係留ラインのブイへの接続点は計算ではブイ中心の1点としているが、CASE-Aの模型試験ではブイの円周部に接続している。
- ハ) 係留ラインの配置は模型試験では3本になっているが計算では波上下側対称の4本としている。

図3.6.3.1、図3.6.3.2に試験略号WC3, WC32のシミュレーション計算結果を、また、対応する模型試験記録を図3.6.3.3、図3.6.3.4に示す。シミュレーション計算は360sec行なっているが、始めの240secは定常力の

みを与えて振れまわり運動の様子を表わし 240 sec 以降に不規則波も重ねている。模型試験結果と計算結果を比較すると、WC 3 では初期偏位からつり合い位置に収束するまでの時間は両者よく一致しているが、模型試験では短周期の振れまわり運動が顕著に表われているのに対し計算ではほとんど出でていない。図 3.6.3.1 中には模型試験結果の係留ライン張力、Pitch の有義値を書き入れてあるが、係留ライン張力、Pitch 共に模型試験結果よりも計算値はやや低めである。係留ライン張力のこの原因は模型試験に使用した不規則波の 2 次変動による振れまわり運動の影響とみられ、この振れまわり運動の小さい範囲のみで比較すると 1 次の張力変動振幅については両者は良く合っている。一方、ホーサーの張力は表 3.6.3.1 からわかるように、模型試験の結果は計算値の 4 倍程度になっている。この差はブイ自体の運動に起因している。すなわち、計算ではブイの質量を無視し、かつ、ブイの運動は構造物の運動にホーサーを介して拘束されている（ただし、ホーサーにテンションが生じている場合）と仮定しているのに対し、模型試験では、ブイ自体が構造物の運動とかなり大きな連成運動を起こしていることによる。Pitchについても計算値は模型試験に比べて小さいが、波の平均周期に潮流の影響が含まれていないこと及びそれに関連して計算に使用した波スペクトル形状が模型試験とは一致していないことが原因として考えられる。図 3.6.3.2 の WC 32 についても WC 3 とほぼ同じ結果になっている。初期偏位から収束していく過程での振れまわり運動は WC 32 の方が WC 3 よりも小さい。係留ラインの初期張力が計算の方が小さいため WC 3 に比べると張力の有義値は模型試験結果に比べ計算結果は更に小さくなっている。一方、CASE-C についてホーサー張力の比較をすると模型試験と計算は割合的良好く一致している。この理由の一つには CASE-C が規則波中の試験であることが考えられるが、別の理由としてはブイの重量が CASE-C では CASE-A に比べて非常に小さいことがあげられる。すなわち CASE-C では 0.13 Kg、CASE-A では 5.8 Kg で、構造物との重量比でも CASE-C は CASE-A の 40% 程度である。ブイの重量影響を簡単に考え、ホーサーに働く張力がブイの質量を無視した値とブイの運動がホーサーによって急激に拘束されることにより発生する力との合計であるとする。後者はブイの慣性力すなわち質量に比例すると考え、後者の力、すなわち、模型試験結果からシミュレーション計算を差引いたホーサー張力のブイ重量に対する比を求めると CASE-A では約 0.4、一方 CASE-C ではこの比はほとんど 0 となるが、逆にブイ重量の 40% を計算値に加えると CASE-C では合計は 0.50 Kg に対し模型試験結果は 0.45 Kg であり、試験精度も考えると両者の差はないと考えられ以上の簡単な方法でもブイの動的影響を概算できるものと思われる。

以上、模型試験結果と計算結果の比較から以下のことがわかった。

- i) 係留ライン張力は本研究部会で示したシミュレーション計算法で妥当な値を推定できる。
- ii) 不規則波中の変動漂流力による係留ライン張力への影響は、実際の海面では模型試験に比べて小さいと思われるが設計上は 20% 程度考慮すれば良い。
- iii) ホーサー張力については、シミュレーション計算結果に比べブイの重量が著しく大きい場合はブイの動的影響を考慮する必要がある。
- iv) 箱型海洋構造物では振れまわり運動はほとんど起きないが、初期偏位から定常状態に収束する過程は計算結果と模型試験結果は良好に一致していることから構造物が一般船型のように振れまわりを起こし易いものになったとしても、計算で精度良く振れまわり運動をシミュレートできることが判った。

#### 6.4 振れまわり運動の判定

一点係留された浮体が振れまわり運動を起こすか否かの判定条件は 6.1 節の概要でも述べたように、被曳船の保針性能の判定条件と同じように考えることができる。文献 1)によれば被曳船の運動を原針路からの微小変位として扱い各変位を減衰項  $e^{-\lambda t}$  を含む形で仮定することにより (3.6.17) 式の特性方程式が得られる。座標系は図 3.6.4.1 に示す。

$$\lambda^4 + A\lambda^3 + B\lambda^2 + C\lambda + D = 0 \quad (3.6.17)$$

ただし、

$$\begin{aligned} A &= \frac{Y_\beta}{(m+m_y)U} - \frac{N_r}{I_z + J_z} \\ B &= \frac{N_\beta Y_r - Y_\beta N_r}{(I_z + J_z)(m+m_y)U} + \frac{F_o}{\ell(I_z + J_z)} \left( \frac{I_z + J_z}{m+m_y} + a^2 + a\ell \right) \\ C &= \frac{F_o}{(I_z + J_z)(m+m_y)} \left[ -\frac{1}{U} (N_\beta - aY_\beta) + \frac{a}{\ell} \{ Y_r + (m+m_y)U \} \right. \\ &\quad \left. + \frac{a}{U\ell} (aY_\beta - N_\beta) - \frac{N_r}{\ell} \right] \\ D &= \frac{F_o}{(I_z + J_z)(m+m_y)} \frac{1}{\ell} (aY_\beta - N_\beta) \end{aligned}$$

$Y_{\beta, r}$  : 横力の  $B, r$  に関する微係数

$N_{\beta, r}$  : 旋回モーメントの  $\beta, r$  に関する微係数

$m+m_y$  : 被曳船の横方向見掛け質量

$I_z + J_z$  : 被曳船の見掛け旋回慣性モーメント

被曳船が針路安定であるための条件は Routh-Hurwitz の条件から

$$\left. \begin{array}{l} A + B + C + D > 0 \\ AB C - C^2 - A^2 D > 0 \end{array} \right\} \quad (3.6.18)$$

を満足しなければならない。

一方、一点係留問題では  $V=0$  となり、 $u, v$  は共に微小となるため浮体の運動により受ける流体力も小さくなるが、新たに潮流、風及び波による外力が加わる。この場合の静的つり合い位置まわりの微小運動の特性運動方程式係数（添字  $m$ ）は以下のようになる。<sup>2)</sup>

$$\begin{aligned} A_m &= -\frac{Y_v}{m+m_y} - \frac{N_r}{I_z + J_z} \\ B_m &= \frac{Y_v N_r - Y_r N_v}{(m+m_y)(I_z + J_z)} + \frac{F_o}{\ell(I_z + J_z)} \left( \frac{I_z + J_z}{m+m_y} + a^2 + a\ell \right) - \frac{N_\phi^{en}}{I_z} \\ C_m &= \frac{F_o}{(m+m_y)(I_z + J_z)} \left[ \left( 1 + \frac{a}{\ell} \right) (N_v - aY_v) - \frac{1}{\ell} (N_r - aY_r) \right] \\ &\quad - \frac{Y_\phi^{en} N_v - N_\phi^{en} Y_v}{(m+m_y)(I_z + J_z)} \\ D_m &= \frac{F_o}{(m+m_y)(I_z + J_z)} \frac{1}{\ell} (aY_\phi^{en} - N_\phi^{en}) \end{aligned}$$

ここで “en” は外力を示している。浮体の振れまわり速度は小さいとして運動方程式における減衰項  $Y_v v, N_v v, Y_r r, \dots$  を省略し、かつ外力としては潮流のみを考えた運動方程式を (3.6.19) 式とする

$$\left. \begin{array}{l} (m+m_y) \dot{v} = F_o r + Y_\phi^{en} \dot{\psi} \\ (I_z + J_z) \dot{r} = a F_o r + N_\phi^{en} \dot{\psi} \end{array} \right\} \quad (3.6.19)$$

$r$  : 係留ラインの船体中心線に対する角

$\phi$  : 潮流の方向

(3.6.19) 式から得られる特性方程式は

$$\lambda^4 + B_m \lambda^2 + D_m = 0 \quad (3.6.20)$$

$$B_m = \frac{F_o}{\ell(I_z + J_z)} \left( \frac{I_z + J_z}{m + m_y} + a^2 + a\ell \right) - \frac{N\psi^{en}}{I_z}$$

となり (3.6.20) 式の解は

$$\lambda = \pm \left( \frac{-B_m \pm \sqrt{B_m^2 - 4D_m}}{2} \right)^{1/2} \quad (3.6.21)$$

となる。

安定条件の一つは  $B_m > 0$ ,  $D_m > 0$  であるが  $D_m > 0$  は常になりたつ。 (3.6.21) 式の  $\lambda$  は  $B_m^2 - 4D_m$  の値により次のような解となる。

i)  $B_m^2 - 4D_m > 0$  のとき

$\lambda$  は全て純虚数となり (3.6.19) 式の解は定常振動

ii)  $B_m^2 - 4D_m < 0$  のとき

2 つの実部が正となるため解は発散する。

したがって (3.6.20) 式からは運動が収束するための条件式は得られず、減衰項は必要になってくるが、  $B_m^2 - 4D_m > 0$  の方が安定に近い条件式であるので、  $B_m$  と  $B_m^2 - 4D_m$  の値について船型影響を検討した。

$B_m$ ,  $B_m^2 - 4D_m$  を無次元化する。

$$B_m \rightarrow C_x \{ I_z' + m_y' \zeta (\zeta + \xi) \} - \xi m_y' \frac{dC_N}{d\phi} \quad (3.6.22)$$

$$B_m^2 - 4D_m \rightarrow [ C_x \{ I_z' + m_y' \zeta (\zeta + \xi) \} - \xi m_y' \frac{dC_N}{d\phi} ]^2 \\ - 4\xi m_y' I_z' C_x \left( \zeta \frac{dC_Y}{d\phi} - \frac{dC_N}{d\phi} \right) \quad (3.6.23)$$

$$C_x = F_o / \frac{1}{2} \rho L d V_c^2$$

$$C_Y = Y / \frac{1}{2} \rho L d V_c^2$$

$$C_N = N / \frac{1}{2} \rho L^2 d V_c^2$$

$$\zeta = a / L$$

$$\xi = \ell / L$$

$$m_y' = (m + m_y) / \frac{1}{2} \rho L^2 d$$

$$I_z' = (I_z + J_z) / \frac{1}{2} \rho L^4 d$$

ただし,  $V_c$  : 流速

$Y$  : 横力

$N$  : 旋回モーメント

各種の船型についての判別式 (3.6.22) 式, (3.6.23) 式を計算した。流速は 1.0 ノットとし係留方法は簡単にするため単錨泊である。水深は 50 m, チャーン長 250 m, 単重 0.26 トン/m とした。また  $dC_Y/d\phi$ ,  $dC_N/d\phi$  は箱型については 2.2 節の潮流力試験結果から、他船型は文献 5) の値から、 $\phi = 10^\circ, 20^\circ, 30^\circ$  における  $C_Y/(\phi \cdot \frac{\pi}{180})$ ,  $C_N/(\phi \cdot \frac{\pi}{180})$  の平均値として求めた。箱型については  $L/B$  の影響はないものとしている。

まとめを表 3.6.4.1 に示す。図 3.6.4.2 は実際に振れまわりシミュレーション計算をした結果であり、判別式と振れまわり運動とはほぼ一致を示している。なお、この計算では潮流力係数を使用しており、流体力係数は使用していない。

箱型では判別式が不安定になっておらず、本研究部会で検討した箱型海洋構造物が振れまわりをほとんど起こさない現象は簡単な(3.6.22)式、(3.6.23)式でも判別できる。潮流のみでなく他の外力も加わった場合、静的つまり合い位置まわりの  $dC_y/d\phi$ 、 $dC_x/d\phi$  がわかれば同様な判別をすることができる。

以上のように、簡単な安定判別式からも箱型海洋構造物が振れまわりを起こしにくい船型であることが明らかになつたが、箱型でも  $L/B$  が大きくなると不安定域に近づくことが表3.6.4.1からわかる。箱型が安定な原因は同じく表3.6.4.1から他船型に比べ  $C_x$  が大きく  $dC_x/d\phi$  が小さいことがあげられる。

## 6.5 適用範囲

### 6.5.1 シミュレーション計算

6.3節に示した一点係留シミュレーションプログラムを用いて実機のシリーズ計算を実施した。対象としたシステムは付録2の模型試験で示した中間ブイ方式、及び接触ブイ方式のうち主として接触ブイ方式である。一点係留方式としては中間ブイ方式の方がより一般的ではあるが接触ブイ方式を主対象とした理由は以下の通りである。

- イ) 係留浮体の動きまわる領域(exursive area)を小さくすることができる。
  - ロ) 係留ラインの係留力はチューンの本数によって容易に増減することができるが、中間ブイ方式のホーザーについては極端に強度を増すことが困難である。
  - ハ) 係留ラインの単重、本数を増やすことが容易である。一方、中間ブイ方式ではブイの排水量に制限される。
- 接触ブイ方式の欠点とされる点については
- ニ) 前年度の水槽試験結果では接触ブイ方式の場合に構造物の動揺が直接ブイの係留ラインに伝わるため非常に大きな張力が発生したが、本年度の模型試験結果から外力方向が全て同じ方向であるときには大きな張力にならないことがわかった。
  - ホ) 中間ブイ方式と比べて係留及び離脱作業が困難ではあるが、対象とする構造物についてはその種の作業頻度は一般船舶に比べて小さいと考える。

シリーズ計算の種類は表3.6.5.1に示すA、B両タイプの箱型海洋構造物について以下のように実施した。シミュレーション計算では波は不規則波、風は変動風としており、以下で波高とあるのは有義波高を、波周期は平均波周期を、また、単に風速となっているのは平均風速を意味している。

#### 1) 初期張力シリーズ計算

係留ラインの初期張力をAタイプでは3種(5トン、10トン、15トン)、Bタイプでは2種(30トン、60トン)、水深はAタイプでは4種(12m、14m、20m、50m)、Bタイプでは3種(24m、40m、100m)とした。

波高、風速及び潮流はAタイプでは2種とし、各々1.5m、25m/s及び1.5ノットの組合せと3.0m、35m/s及び1.5ノットの組合せ、またBタイプでは1種で各々4.5m、50m/s及び1.5ノットである。波周期についてはAタイプでは10秒(初期張力15トンのときのみ)と15秒の2種、Bタイプでは10秒のみとした。外力の方向は全て同一方向である。

#### 2) 外力シリーズ計算

外象条件の係留システムに対する影響を調べるために、風速、波高、潮流を変化させた計算を実施した。水深はAタイプでは14m、Bタイプでは40mとし、係留ラインの初期張力はAタイプでは15トン、Bタイプでは60トンである。風速と波高は組になっており、その組合せを表3.6.5.2に示す。A、Bタイプとも最大3種類の組合せについて計算した。波周期は全て10秒とした。このシリーズ計算では係留ライン本数の効果も検討す

るため係留ラインの本数を6本, 12本, 18本(Aタイプのみ)の3種類に変えて計算した。ただし、計算上は12本の場合は2本を1本で置き換える、18本の場合は3本を1本で置き換えて、係留ラインの単重を見掛け上2倍、3倍とし、張力の計算結果を後述している。

### 3) 外力方向シリーズ計算

1), 2)では風、波及び潮流の方向は全て同一としたが、ここでは、潮流と風波の相対方向を変化させ外力方向がシステムに対し与える影響を調べた。

風と波は常に同一方向である。相対方向は $0^\circ$ から $180^\circ$ まで $30^\circ$ きざみで計算した。水深はAタイプでは14m, Bタイプでは40m、また、外象条件は、Aタイプは波高1.5m、風速25m/s及び潮流1.5ノット、Bタイプでは同じく3.0m, 35m/s及び1.5ノットと4.5m, 50m/s及び1.5ノットの2種について計算した。波周期は全て10秒、係留ライン初期張力はAタイプでは15トン、Bタイプでは60トンである。

表3.6.5.2 風速と波高の組合せ

風速(m/s)	波高(m)
25	1.5
35	3.0
45	4.0
50	4.5

計算結果のまとめを表3.6.5.3～表3.6.5.5に示す。計算は主として接触ブイ方式について実施しているが、表中で( )付ホーサー張力となっているのは係留ライン張力の水平成分のベクトル和を示している。外力が全て同一方向で、かつ振れまわりがほとんどない場合は、実際に中間ブイ方式で計算したときのホーサー張力とこのベクトル和は計算上ほとんど差がない。接触ブイ方式の場合、ブイが浮体と一緒に上下動する分だけ接触ブイ方式から計算したホーサー張力の方が中間ブイ方式から直接計算したものよりやや大きくなっている。図3.6.5.1に両者のシミュレーション計算結果の比較を示している。

なお、ホーサー張力にはブイの動揺影響分は含めていない。係留ライン張力は最大張力になるラインについての値である。張力は全て有義値を示している。ただし、ここでの有義値とは定常値+変動振幅 $\times \frac{2}{3}$ としており、ピーク値は有義張力から静的つり合い時張力を差し引いた値の1.3倍を静的つり合い時張力に加えた値になる。最小scopeは張力のピーク値に対して係留ラインのアンカー位置での接地角が $0^\circ$ になるときの係留ライン長さと水深との比を示しており、係留ライン長さがこれ以上短くなるとtaut状態になって張力が急激に増大する恐れがある。

また、係留ラインの静的つり合い時張力とは、外力が加わった状態での静的つり合い位置で張力が最大となっている係留ラインの張力である。

図3.6.5.2～図3.6.5.9にはシミュレーション計算例を示している。シミュレーション時間は数ケースを除いて1200秒とし、初期値は静的つり合い位置から船首角の偏角を $2^\circ$ 与えた状態としている。計算の前半は波浪強制力を加えないで振れまわり運動のみをシミュレートし、波浪強制力を重ねた計算は波の平均周期により変わっている。計算後半の600～800秒がそれに相当する。大きな長周期の振れまわり運動がない場合にはシミュレーション時間を長くしても結果はほとんど変わらない。

図中の略記号の内容は次の通りである。

WIND 風速 (m/s)

WAVE 波高 (m)

CHAN, CHA1, CHA2	係留ライン張力 (ton)
T O T L	係留ライン張力水平成分ベクトル和 (ton)
L I N E	ホーサー張力 (ton)
S U R G	前後揺 (m)
P I T C	縦揺 (deg)
H E A V	上下揺 (m)
X B U Y	ブイの X 軸方向運動 (m)
Y B U Y	ブイの Y 軸方向運動 (m)
H E A D	船首角 (deg)

振れまわり運動は10秒ステップで、波浪中動揺は2秒ステップで計算している。船首角は振れまわり運動として解いており10秒ごとに変化するものとし各10秒間では変化しないものとしている。同様に風速についても10秒ごとに変化させている。その他は2秒ごとに計算しているが、ブイの運動は10秒ごとの振れまわり運動と2秒ごとの波浪中動揺が重なったものとして計算されている。

図3.6.5.2は初期張力シリーズ計算から同水深に対して初期張力を変えた場合の比較を例示したものであるが、この場合、構造物の運動は初期張力によってほとんど変わらないが、係留ラインの張力は初期張力の小さい方が張力変動も小さく全張力も小さい。図3.6.5.3は図3.6.5.2の計算番号A8に対して初期張力を一定として水深を変化させた例であるが、水深が浅い程係留ラインの張力は大きくなり、運動も係留ラインの影響もあって変化している。この傾向は更に水深が浅くなった図3.6.5.1ではより顕著になっている。

なお、いずれの計算でも船首角は初期偏角(2°)から400秒程度で偏角が0°付近になり振れまわりはほとんど起きない。

図3.6.5.4～図3.6.5.7は外力シリーズ計算の一部である。図3.6.5.4はAタイプの計算であるが最も緩やかな条件下(計算番号A29)では係留ライン張力の非線型性は余り目立たないが、やや厳しい条件下(計算番号A33)では非線型性が顕著になる。一方、図3.6.5.5のBタイプでは計算した範囲での厳しい条件下(計算番号B45)でも船型がAタイプに比べて大型であるため相対的な応答は小さく係留ライン張力の非線型性はほとんどない。

図3.6.5.6は図3.6.5.4の計算番号A33に比べると潮流が2倍となり係留ライン本数も12本から18本に増えているが heave, pitch は両者ほとんど変わらないのに対し、surgeには係留ライン張力の影響が表われている。図3.6.5.7のBタイプでは図3.6.5.5と比べればわかるように surge を含めた波浪中動揺に対する係留ライン張力の影響はほとんどない。

図3.6.5.8は風波に対し潮流の方向が変化した場合の計算例であるが、相対角が大きくなると係留ライン張力、roll, sway共に大きくなっている。すなわち、潮流の風波に対する相対角が大きくなると潮流力の影響で構造物の船首角が変わり波との出会い角が大きくなることから roll, sway, yaw が増大し、接触ブイ方式では構造物の運動が係留ラインに直接影響することにより係留ライン張力が大きくなっている。一方、中間ブイ方式では係留ラインの張力に関係するのはブイの運動であり、構造物の運動が大きくなてもホーサーが長ければ計算上ブイの運動は小さくなり、図3.6.5.9に示すように同じ条件下でも接触ブイ方式に比べ中間ブイ方式の係留ライン張力は小さくなる。

## 6.5.2 計算結果まとめ

シリーズ計算結果から箱型海洋構造物の一点係留方式適用範囲が推定できるように図3.6.5.10～図3.6.5.24に示す設計チャートを作製した。

### (1) 初期張力の影響

図3.6.5.10はAタイプ、図3.6.5.11はA、B両タイプについて初期張力シリーズ計算結果をまとめたものである。一般的な傾向として初期張力一定ならば水深が深くなる程、また、水深が一定ならば初期張力の小さい程係留ライン張力は減少する。ただし、当然のことながら初期張力はブイから垂直に係留ラインが海底まで達しているときの張力、すなわち、水深×係留ライン単重以下にはできない。図中の曲線の範囲が適用可能水深の範囲も示している。一方、ある水深以下に浅くなつた場合、係留ライン張力は急激に増大する傾向があるが、Aタイプではこの水深は約15m、Bタイプでは約35mである。

### (2) 外力の影響

図3.6.5.12～図3.6.5.19に外力の大きさと係留ライン張力の関係を示す。

図3.6.5.12、図3.6.5.13はAタイプの係留ライン張力と外力との関係であるが、破断張力の40%（0.4B）を使用限界と考えると潮流1.5ノットのとき6本ラインでは風速35m/s、波高3m程度まで、12本ラインでは風速40m/s、波高3.5m程度まで、同じく18本では風速45m/s、波高4.0m程度までが限度である。係留ラインの本数を変えずに単重を6本から12本のときは2倍に6本から18本のときは3倍に変えたものと考えてもよい。ただし、6本ラインでは風速30m/s付近から、12本ラインでは35m/s付近から、18本ラインでは40m/s付近から張力は急激に増大する傾向にある。潮流が3ノットになると6本ラインではほとんど破断張力に達し、12本ラインにすると潮流1.5ノットのときの6本ラインと同程度に、18本ラインにすると潮流1.5ノットのときの12本ラインと同程度の張力になる。図中Dynamicはシミュレーション計算結果を表わし、Staticは静的つり合い時の張力である。外力が大きくなると構造物の動揺影響が急激に増大する。

図3.6.5.14、図3.6.5.15のBタイプでは計算を行なった範囲での最も厳しい状態、すなわち、風速50m/s、波高4.5m、潮流3ノットでも係留ラインの張力は破断張力の40%内にほぼ収まっており問題はない。Bタイプでは動揺による影響は小さくDynamicとStaticの差はAタイプに比べると小さい。

図3.6.5.16～図3.6.5.19は接触ブイ方式の計算値から推定した中間ブイ方式のホーサー張力である。外力が全て同一方向のときは今回検討した箱型海洋構造物のように振れまわり運動がほとんどない場合、構造物の運動は外力方向と一致し、接触ブイ方式における係留ライン張力の水平成分ベクトル和と中間ブイ方式のホーサー張力はほとんど等しくなる。ホーサー張力の傾向は係留ライン張力とほとんど等しい。計算によるホーサー張力はかなり大きいが、計算ではホーサーは延びを考慮していないsteel wireのような扱いになっているので、ナイロンホーサー等のごとく延びを期待できるホーサーであれば張力は減少するものと思われる。なお、ここでのホーサー張力にはブイの動揺影響は含まれていない。

図3.6.5.20に示すような組ホーサー<sup>6)</sup>では、現在破断張力1000トン程度のものまで開発されており、Bタイプでは実用上問題はないと思われるが、Aタイプでは外象条件でかなり制約を受けるように思われる。また、Aタイプでは係留ラインの本数によってホーサー張力も変化するがBタイプでは係留ラインの本数はほとんど影響しない。

### (3) 外力方向の影響

図3.6.5.21、図3.6.5.22は風波に対して潮流の方向が変化した場合の影響を計算したものである。

図3.6.5.21のAタイプでは、接触ブイ方式(Turret Mooring)のシミュレーション計算(Dynamic)による係留ライン張力は、潮流方向が60°以上になると構造物に対する波の入射角が大きくなることによる構造物の動揺影響のために急に大きくなり90°程度までが適用限度になっている。一方、同じ外象条件下で中間ブイ方式(Buoy Mooring)にすると、構造物の動揺影響は軽減され係留ライン張力は小さくなる。中間ブイ方式では潮流の方向が30°～45°のとき係留ライン張力は最大になり、この計算結果は54年度に実施した

模型試験（潮流の代りに風向を変化させている）とも傾向的に一致している。

図3.6.5.22のBタイプでは構造物の動揺影響が小さいため係留ライン張力の潮流方向に対する傾向はAタイプの中間ブイ方式と似ている。外力が全て同一方向のときと比較して潮流方向が $30^\circ \sim 45^\circ$ になった場合の係留ライン張力は約1.3～1.4倍になっている。また、静的計算値(Static)に比べてシミュレーション計算値(Dynamic)は約1.2～1.4倍になっており、Aタイプと比較するとその差は小さく、Bタイプについては静的計算のみを実施してその結果を1.4倍程度して使用しても大きな誤差にはならないものと思われる。

図3.6.5.23、図3.6.5.24には静的つり合い時の風波に対する船首角を示す。

以上の結果をまとめると

#### a) Aタイプ接触ブイ方式

係留ラインの初期張力はできるだけ小さくした方が良い。

水深が15m以下になると係留ライン張力は急激に増大する。

水深14mにおいて係留ライン数が6本、12本、18本のときの適用可能な外象範囲は、潮流1.5ノットのとき各々の本数に対し、風速 $35\text{ m/s}$ 、 $40\text{ m/s}$ 及び $45\text{ m/s}$ である。3ノットのときには係留ライン12本に対し $32\text{ m/s}$ 、18本に対し $38\text{ m/s}$ 程度である。波周期は全て10秒、係留ライン初期張力は15トン、波高と風速の関係は表3.6.5.2による。以上の条件下で係留ラインの有義張力は200トン程度である。

変動漂流力を考慮する場合20%程度考慮する。

潮流と風波の相対角の適用限界は $90^\circ$ 以内であり、 $30^\circ \sim 45^\circ$ の場合最大40%増となる。

#### b) Aタイプ中間ブイ方式

係留ラインについては、接触ブイ方式とほとんど同じであるが潮流の方向については適用制限はない。

係留ライン12本のとき、水深14mで適用限界時のホーサー(2本組)張力は1本当たり約200トンである。

変動漂流力、潮流の方向影響は(a)と同じと考える。ブイの重量が大きい場合はブイの動揺を考慮する必要がある。

#### c) Bタイプ接触ブイ方式

構造物の動揺影響は小さく、検討した条件範囲のほとんどで適用可能である。

係留ライン6本、初期張力60トンとすると、潮流の方向影響も含め最も厳しい条件、すなわち、水深40mにおいて、風速 $50\text{ m/s}$ 、潮流3ノットのとき係留ライン張力は約740トン( $0.5 \times$ 破断張力B)になる。

水深が35m以下になると係留ライン張力は急激に増大する。

### 参考文献

- 1) A. G. Strandhagen, et al. : "The Dynamic Stability on Course of Towed Ships" SNAME 1950
- 2) H. R. Sorheim : "Analysis of Motion in Single-point Mooring Systems" MODELING, IDENTIFICATION AND CONTROL 1980 Vol.1 №13
- 3) 日本造船研究協会第155研究部会 : "係船システムの研究" 研究資料№269, 昭52. 3
- 4) B Molin, et al. : "A Simulation Model for The Dynamic Behavior of Tankers Moored to Single Point Mooring" International Symposium on Ocean Engineering Ship Handling 1980
- 5) 小保方準他 : "模型試験による船体に働く流体力の推定" 関西造船協会誌, 第180号, 昭56. 3
- 6) J Linehan, et al. : "Instrumentation of a 1000 ton Nylon Single Point Mooring Hawser" OTC 2210, 1975

表 3.6.2.1 模 型 要 目

項 目	模 型	実 船 換 算
長 さ (L)	1.500 m	180.00 m
幅 さ (B)	0.750 m	90.00 m
高 さ (D)	0.500 m	60.00 m
吃 木 (d)	0.075 m	9.00 m
L / B	2.0	
B / d	10.0	
排 水 容 積	84.375 cm <sup>3</sup>	145.800 m <sup>3</sup>
K G	0.149 m	17.91 m
K G / d	1.99	
K <sub>yy</sub> / L	0.287	
ブ イ 直 径	0.083 m	10.00 m
ブ イ 高 さ	0.060 m	7.20 m
ブ イ 吃 木	0.040 m	4.80 m
ブ イ 排 水 容 積	216 cm <sup>3</sup>	377 m <sup>3</sup>
係 留 ラ イ ン 長 さ	1.500 m	180.00 m
係 留 ラ イ ン 単 重 (水 中)	3.0 g/m	421 kg/m
係 留 ラ イ ン 本 数	3 本	
ホ サ エ 長 さ	0.500 m	60.00 m
ホ サ エ 径	1.0 mmφ	

表 3.6.2.2 模 型 試 験 状 態

状 態	係 留 方 式	風 速 V <sub>w</sub>	風 向 ϕ <sub>w</sub>	流 速 V <sub>c</sub>	流 向 ϕ <sub>c</sub>	波 高 H <sub>w</sub>	波 長 λ	波 向 ϕ <sub>d</sub>	水 深 H
Case-I	A-Type	2.3 m/s (25 m/s)	0° 45° 90° 135° 180°	0.14 m/s (3 knot)	0°	3.9 cm (4.7 cm)	λ/L = 1.0 λ/L = 2.0	0°	
Case-II	A-Type	5.5 m/s (60 m/s)	90° 135° 180° 0° 45° 90° 135° 180°	0.14 m/s	0°	3.9 cm	λ/L = 1.0 λ/L = 2.0	0°	46.5 cm (55.8 m)
Case-III	B-Type	5.5 m/s	45° 135°	0.14 m/s	0°	3.0 cm (3.6 m)	λ/L = 1.0 λ/L = 2.0	0°	

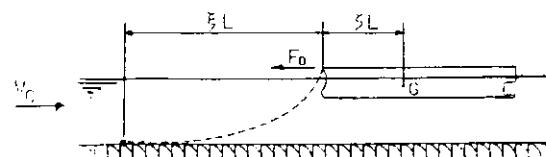
( ) 内は実船換算値を示す。

表 3.6.3.1 計算と模型試験比較

	A	B	C
模型長さ (m)	3.872	3.872	1.500
幅 (m)	1.936	1.936	0.750
高さ (m)	0.600	0.600	0.500
吃水 (m)	0.194	0.194	0.075
重量 (kg)	1.451	1.451	84.4
ホーサー長さ (m)	1.25	0	0.50
係留ライン長さ (m)	6.285	6.285	1.50
水中単重 (kg/m)	0.42	0.42	0.03
水深 (m)	1.20	1.20	0.465
有義波高 (cm)	5.57	5.83	3.9(規則波)
平均波周期 (sec)	2.19	2.19	0.98
潮流 (cm/sec)	15.9	15.1	14.0
風速 (m/sec)	0	0	2.3
ホーサー張力 (kg)	模型試験 2.95	—	0.45
	計算 0.75	—	0.45
係留ライン張力 (kg)	模型試験 1.18 *	1.29 *	0.49
	計算 0.99	0.98	0.61
振れまわり周期 (sec)	模型試験 35	32	13
	計算 32	22	16
係留ライン初期張力 (kg)	模型試験 0.72 *	0.82 *	0.09
	計算 0.72	0.72	0.09

\* 係留ライン張力は波上側左右2条の平均値を示している。

表 3.6.4.1 振れまわり判別式



	T 1 タンカー満載	C 3 細長船	B 1 バージ	A 1 箱型 $L/B=2, B/d=10$	A 2 箱型 $L/B=5, B/d=10$
L (m)	176.7	243.1	179.9	126.0	232.0
B (m)	29.7	24.3	49.2	63.0	46.4
d (m)	11.4	14.6	6.9	6.3	4.64
C_b	0.83	0.58	0.819	1.0	1.0
$m_y'$	0.505	0.285	0.623	1.260	0.504
$I_z'$	0.026	0.018	0.036	0.072	0.036
$\xi$	1.173	0.854	1.158	1.630	0.934
$\zeta$	0.468	0.514	0.511	0.5	0.5
$C_x$	0.027	0.014	0.051	0.465	0.184
$dC_x/d\psi$	0.525	0.775	0.361	0.552	0.552
$dC_N/d\psi$	0.102	0.157	0.018	0.028	0.028
$C_x \{ I_z' + m_y' \zeta (\zeta + \xi) \} \text{ (i)}$	0.011	0.003	0.029	0.657	0.073
$\xi m_y' dC_N/d\psi \text{ (ii)}$	0.060	0.038	0.013	0.058	0.013
(i) - (ii)	-0.049	-0.035	0.016	0.599	0.060
$4\xi m_y' I_z' \text{ (iii)}$	0.062	0.018	0.104	0.591	0.068
$C_x (\zeta \frac{dC_x}{d\psi} - \frac{dC_N}{d\psi}) \text{ (iv)}$	0.004	0.003	0.008	0.115	0.046
(iii) × (iv)	0.002	0.0001	0.008	0.068	0.003
$\{(i)-(ii)\}^2 - (iii) \times (iv)$	0.002	0.001	-0.001	0.291	0.001

不安定 不安定 不安定

表 3.6.5.1 係留システム要目

		A タイプ	B タイプ
海洋構造物要目	L (m)	100.0	200.0
	B (m)	50.0	100.0
	D (m)	15.0	25.0
	d (m)	10.0	20.0
ブイ要目	D_B (m)	8.0	12.0
	$d_B$ フラーン付 (m)	3.0	6.0
係留索鎖要目	ホーザー L (m)	25.0	50.0
	係留ライン単重 ( $\text{ton}/m$ )	0.2414	0.506
	係留ライン破断張力 (ton)	785	1471

表 3.6.5.3 初期張力シリーズ計算結果（潮流 1.5 ノット）

番号	波高 (m)	波周期 (sec)	風速 (m/s)	水深 (m)	ブイ係留ライン(6本)				ホーザー 有義張力 (ton)	係留システム
					単重 (ton/m)	初期張力 (ton)	静的つり合い及び 有義張力 (ton)	最小 scope		
A 1	1.5	15	25	12	0.2414	5	35	190	11.7	290 中間ブイ
A 2				14			32	70	6.4	128
A 3				↓		15	37	142	9.5	230 ↓
A 4				12		5	35	200	12.1	(314) 接触ブイ
A 5				14		5	32	97	7.7	(168)
A 6				↓		10	34	115	8.5	(190)
A 7				↓		15	37	118	8.5	(189)
A 8				20		5	28	37	3.7	(58)
A 9				↓		10	30	47	4.3	(68)
A 10				↓		15	31	53	4.7	(77)
A 11				50		15	33	34	2.1	(37)
A 12		10		12		5	33	54	5.7	(88)
A 13				↓		15	39	74	6.8	(116)
A 14				14		5	32	48	5.0	(82)
A 15				↓		15	38	60	5.7	(90)
A 16				20		5	30	35	3.5	(56)
A 17				↓		15	35	42	3.9	(57)
A 18				50		15	33	35	2.2	(41)
A 19	3.0		35	14		10	63	213	11.5	(358)
A 20				↓		15	65	261	12.9	(430)
A 21				20		10	54	101	6.6	(166)
A 22				↓		15	56	108	6.8	(173)
A 23				50		15	50	52	2.7	(71)
B 24	4.5		50	24	0.506	30	262	480	8.5	(807)
B 25				↓		60	276	533	13.1	(875)
B 26				40		30	243	281	4.9	(452)
B 27				↓		60	261	324	5.4	(516)
B 28				100		60	293	295	3.2	(343) ↓

表 3.6.5.4 外力シリーズ計算結果（波周期10秒）

番号	波高 (m)	風速 (m/s)	潮流 (Kts)	水深 (m)	ブイ係留ライン					ホーザー 有義張力 (ton)	係留システム	
					単重 (ton/m)	本数	初期張力 (ton)	静的つり合い時及 び有義張力(ton)	最小 scope			
A 29	1.5	25	1.5	14	0.2414	6	15	38	60	5.7	(90)	接触ブイ
A 30	3.0	35						65	261	12.9	(430)	
A 31	1.5	25				12		25	37	4.4	(95)	
A 32	3.0	35						37	78	6.7	(245)	
A 33	3.5	40						45	215	11.8	(650)	
A 34	3.0	35				18		29	46	5.0	(200)	
A 35	4.0	45						39	220	12.0	(1,130)	
A 36	4.5	50						45	×		×	
A 37	1.5	25	3.0			12		40	65	6.0	(200)	
A 38	3.0	35						55	340	15.0	(770)	
A 39	1.5	25				18		31	45	4.9	(199)	
A 40	3.0	35						40	103	7.9	(380)	
A 41	3.5	40						45	268	13.3	(1,410)	
A 42	4.5	50						57	×		×	
B 43	1.5	25	1.5	40	0.506	6	60	116	125	3.2	(150)	
B 44	3.0	35						165	182	3.9	(255)	
B 45	4.5	50						261	324	5.4	(516)	
B 46	3.0	35				12		106	119	3.1	(266)	
B 47	4.5	50						150	182	4.0	(501)	
B 48	1.5	25	3.0			6		242	280	4.9	(430)	
B 49	3.0	35						295	338	5.4	(534)	
B 50	1.5	25				12		141	155	3.6	(425)	
B 51	3.0	35						166	185	4.0	(522)	
B 52	4.5	50						213	268	4.9	(793)	

表 3.6.5.5 外力方向シリーズ計算結果(波周期10秒)

番号	波高 (m)	風速 (m/s)	潮流1.5 Kts 方向 (deg)	静的つり 合い船首 角(deg)	水深 (m)	ブイ係留ライン					ホーザー 有義張力 (ton)	係留システム
						単重 (ton/m)	本数	初期張力 (ton)	静的つり合い時及 び有義張力(ton)	最小 scope		
A 53	1.5	25	0	0	14	0.2414	6	15	38	60	5.7	(90)
A 54			30	15					42	97	7.6	
A 55			60	31					44	100	7.7	
A 56			90	45					34	230	12.3	
A 57			120	55					28	×		
A 58			150	63					21	×		
A 59			180	70					18	×		
A 60			0	0			12		25	37	4.4	(95)
A 61			30	14					53	80	6.5	
A 62			60	30					54	77	6.4	
A 63			90	47					36	103	7.9	
A 64			120	54					41	×		
A 65			30	14			6		42	86	7.0	102 中間ブイ
A 66			60	31					44	80	6.7	90
A 67			90	44					35	60	5.8	72
A 68			120	55					29	45	4.9	55
B 69	3.0	35	0	0	40	0.506		60	165	182	3.9	(255) 接触ブイ
B 70			30	16					186	225	4.5	
B 71			60	27					192	210	4.2	
B 72			90	36					163	173	3.8	
B 73			120	43					121	127	3.2	
B 74			150	48					98	108	4.4	
B 75			180	41					78	92	2.8	
B 76	4.5	50	0	0					261	324	5.4	(516)
B 77			30	10					311	448	6.5	
B 78			60	17					319	441	6.4	
B 79			90	22					277	362	5.8	

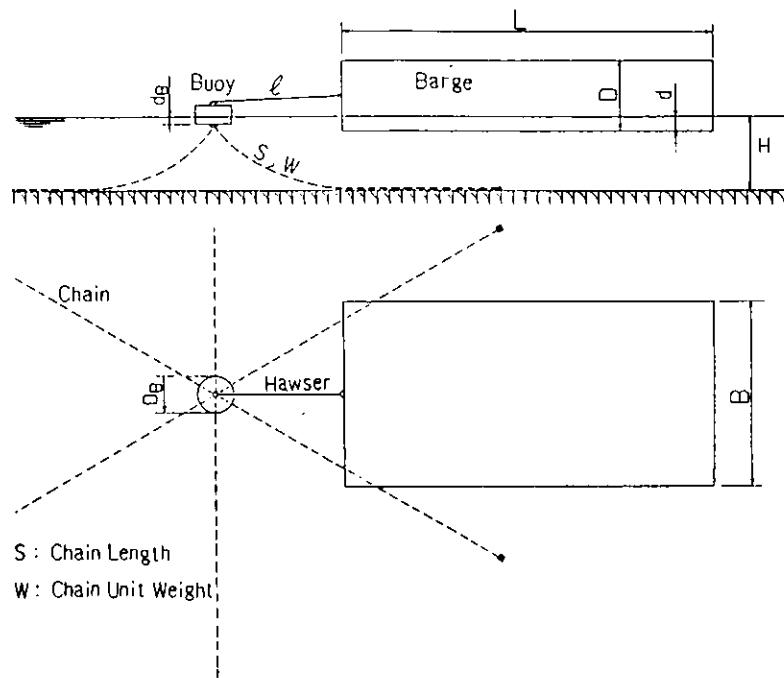


図 3.6.1.1 箱型海洋構造物の一点係留配置

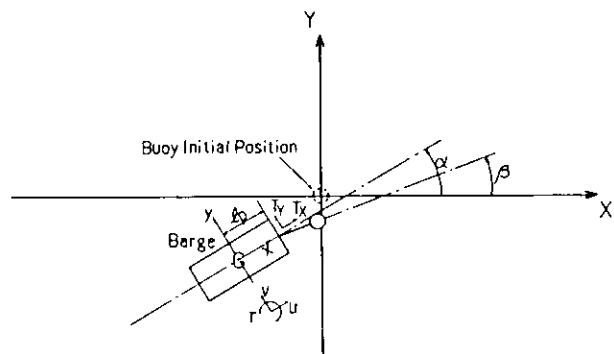


図 3.6.1.2 振れまわり運動の座標系

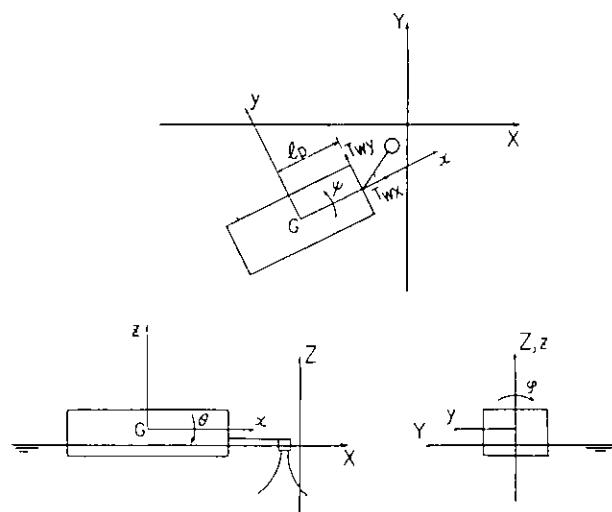


図 3.6.1.3 波浪中動揺の座標系

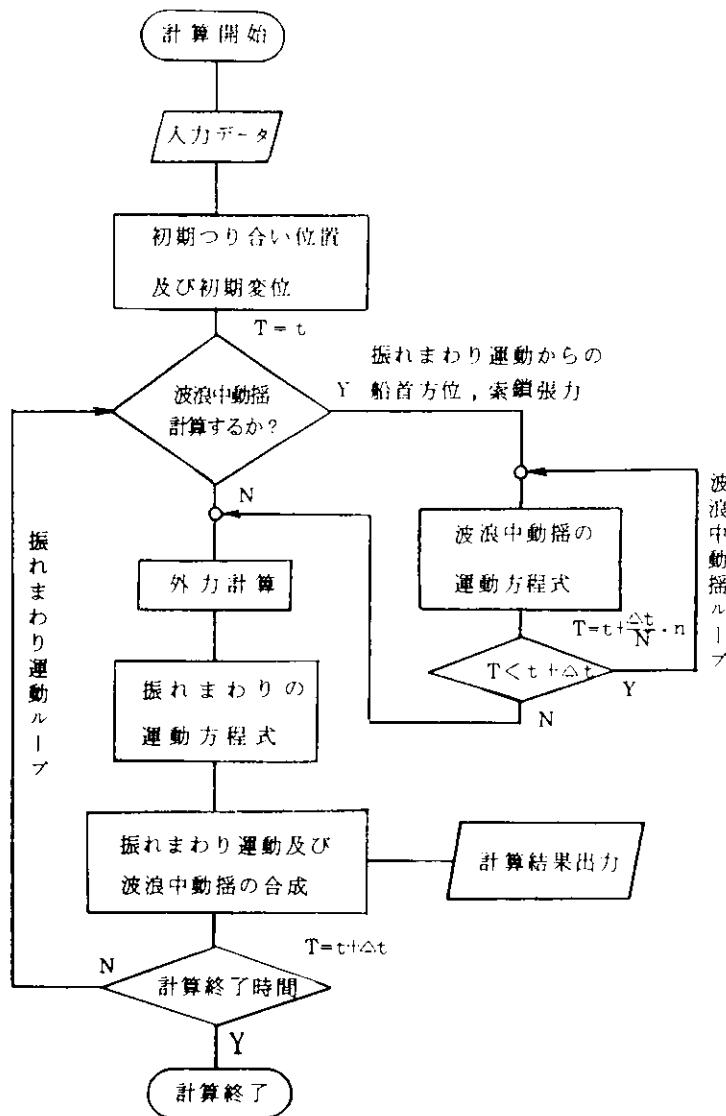


図 3.6.1.4 一点係留計算フローチャート

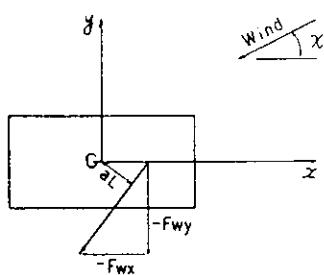


図 3.6.1.5 風圧力計算の座標系

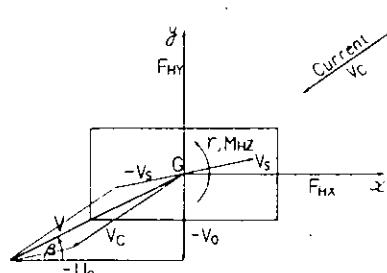


図 3.6.1.6 流体力計算のフロー

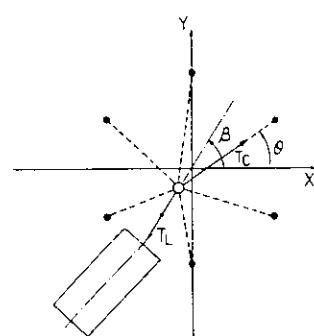


図 3.6.1.7 係留力計算の座標系

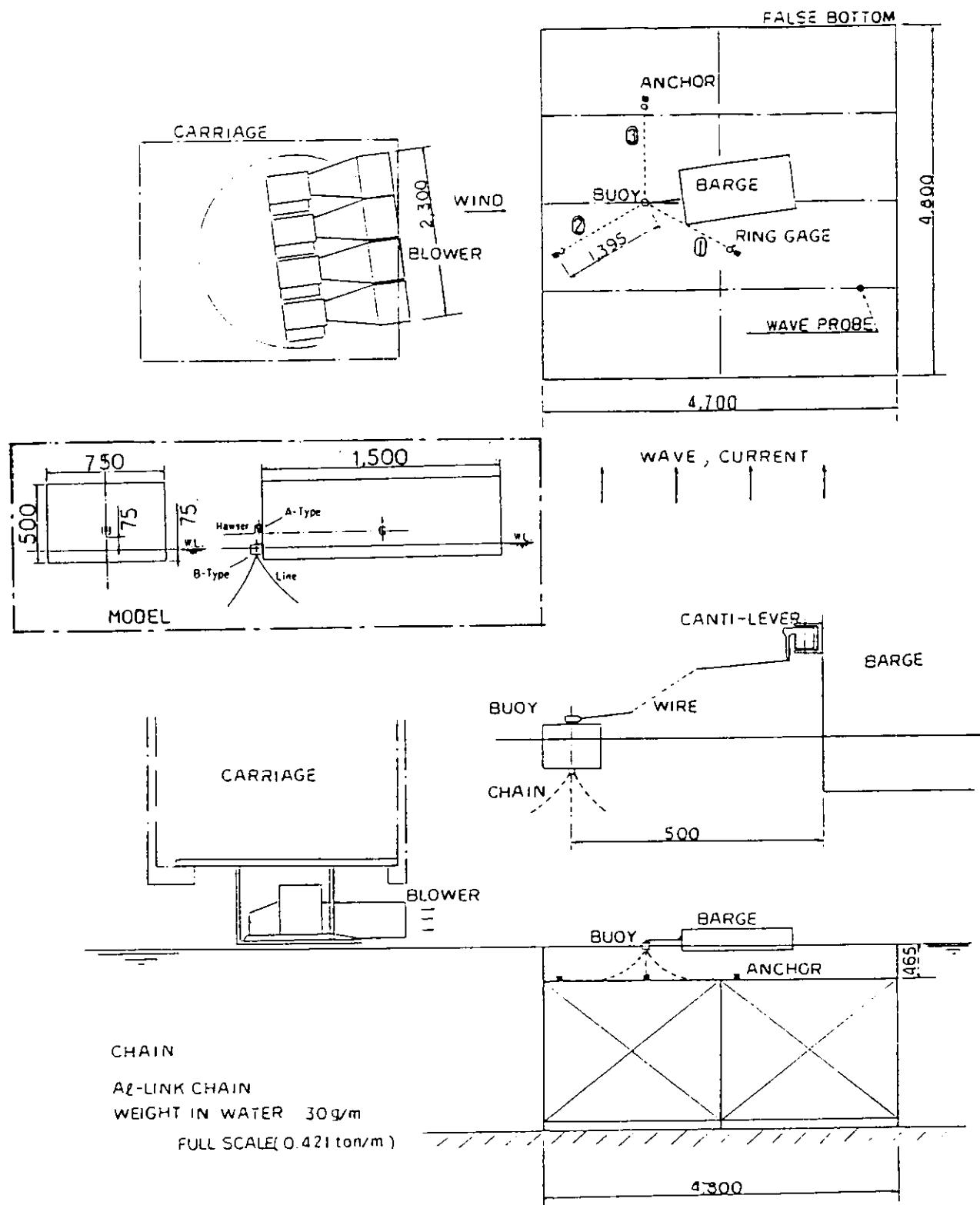


図3.6.2.1 模型試験配置

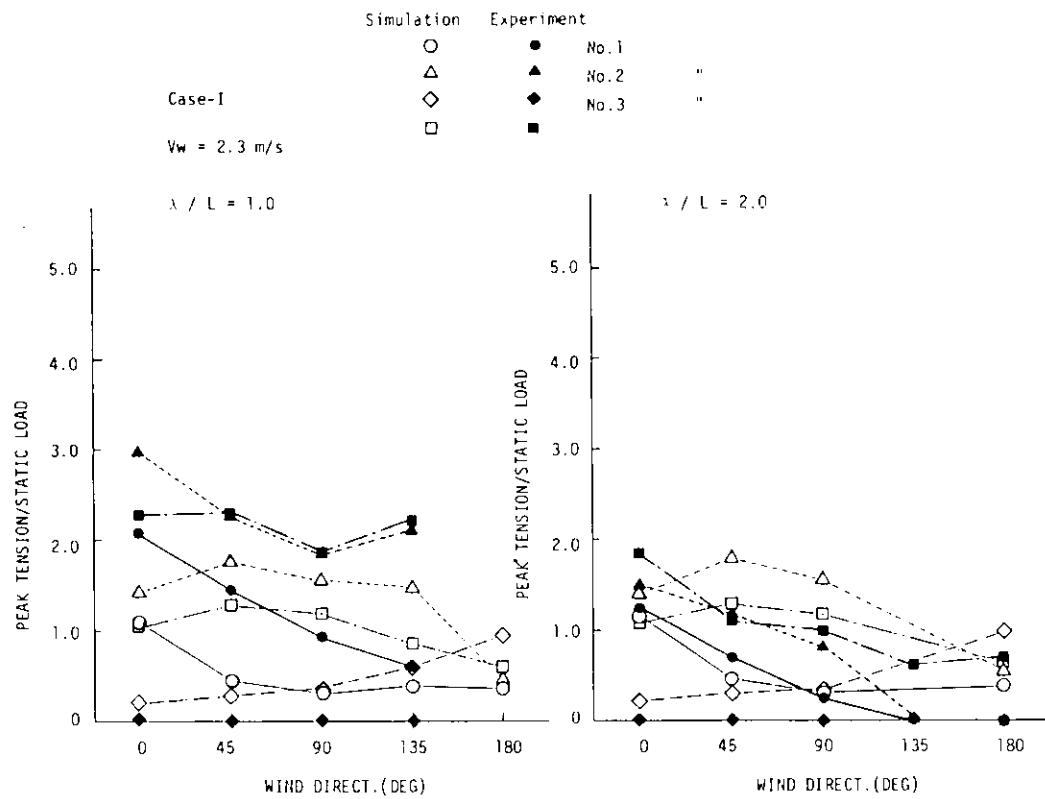


図3.6.2.2 係留ライン及びホーサー張力

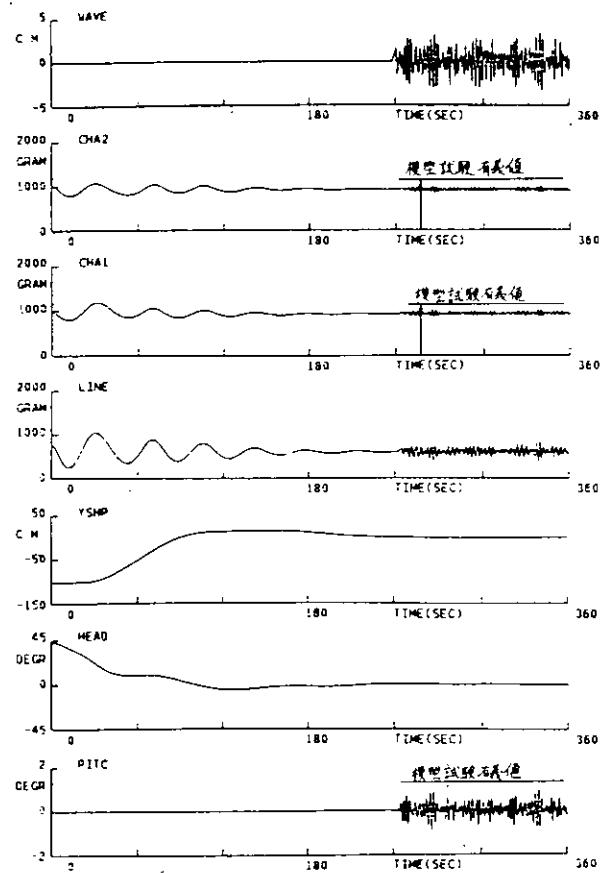


図3.6.3.1 模型試験状態のシミュレーション計算（中間ブイ方式 WC 3）

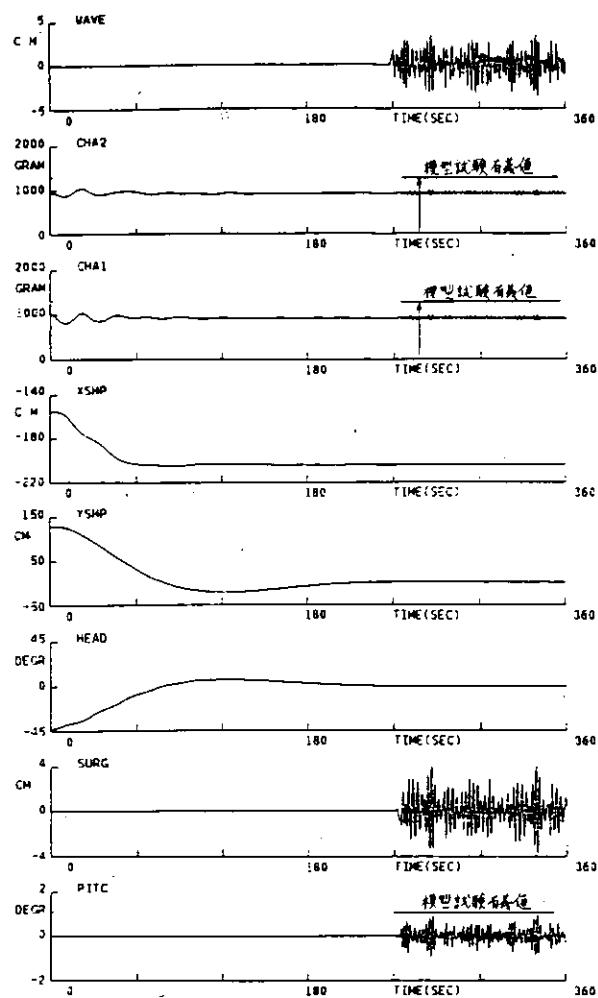


図 3.6.3.2 模型試験状態のシミュレーション計算（接触ブイ方式 WC32）

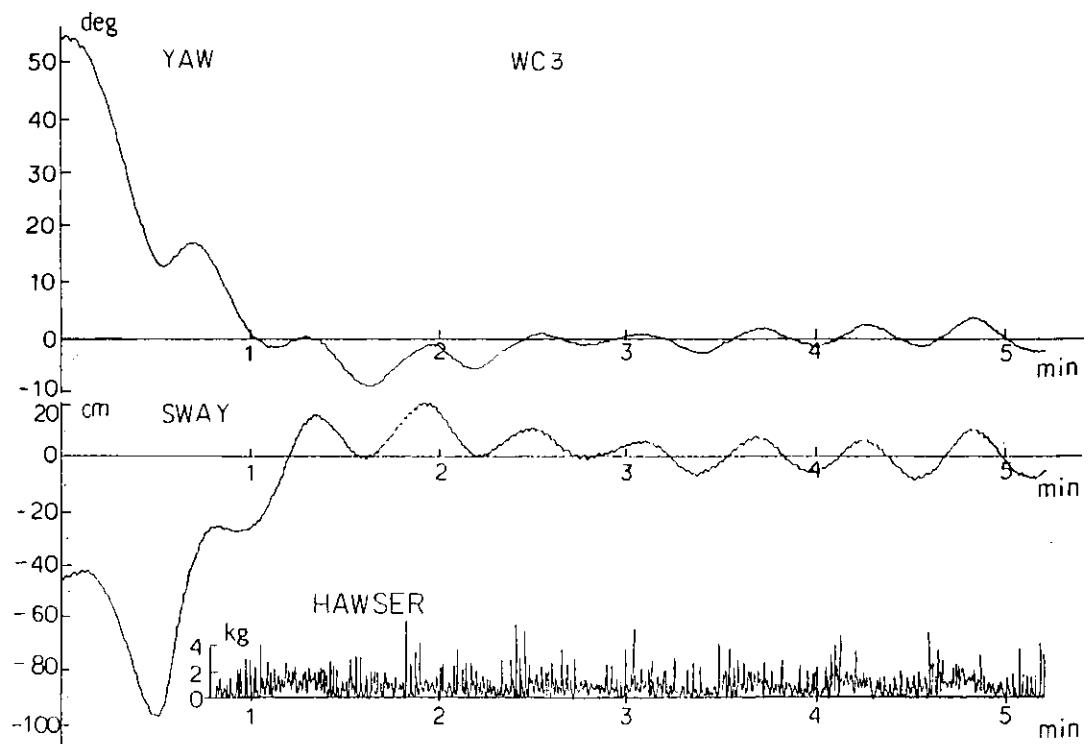


図 3.6.3.3 模型試験記録例（中間ブイ方式 WC3）

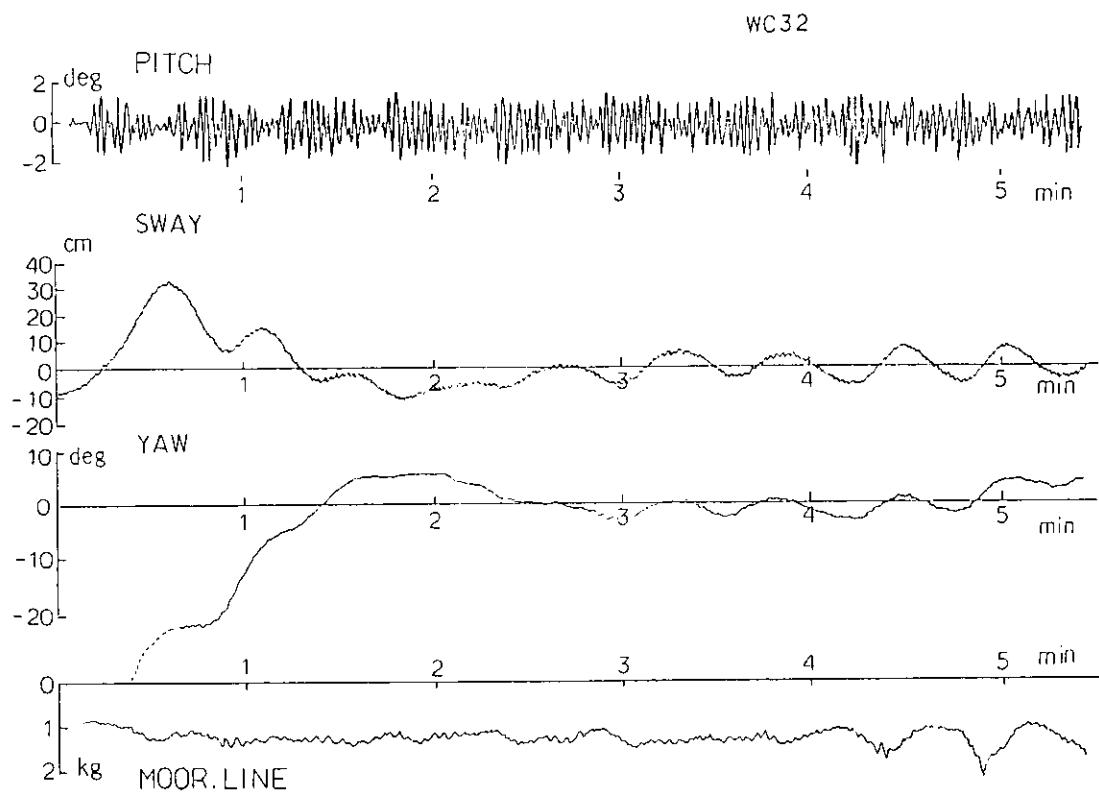


図 3.6.3.4 模型試験記録例（接触ブイ方式 WC 32）

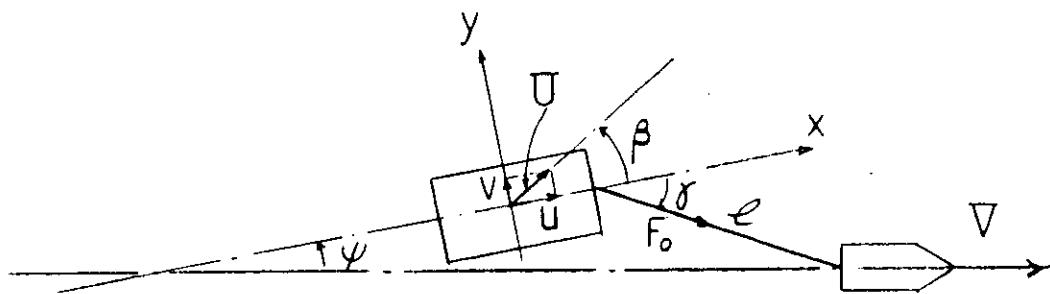


図 3.6.4.1 振れまわり安定判別式の座標系

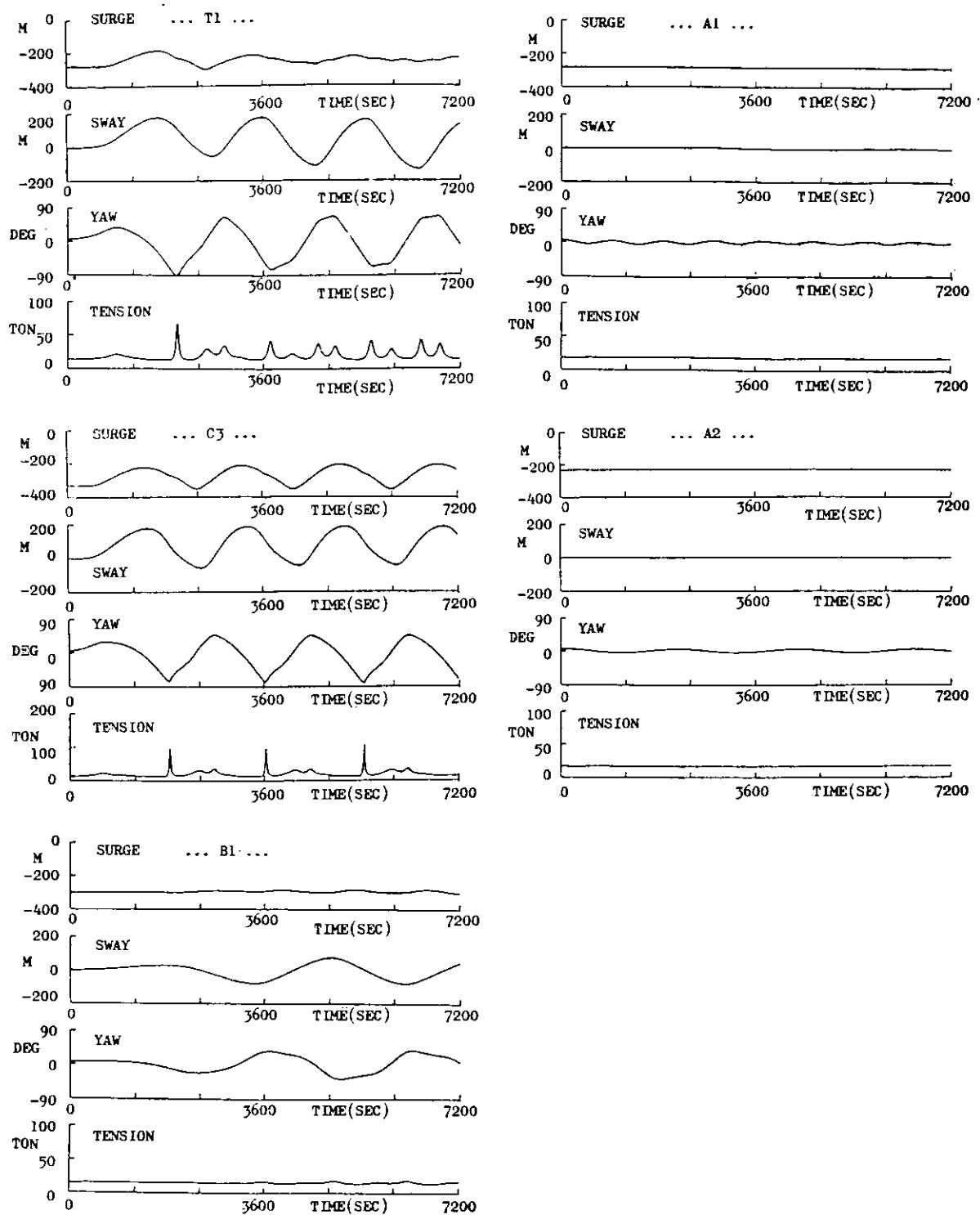


図3.6.4.2 各種船型の振れまわりシミュレーション計算

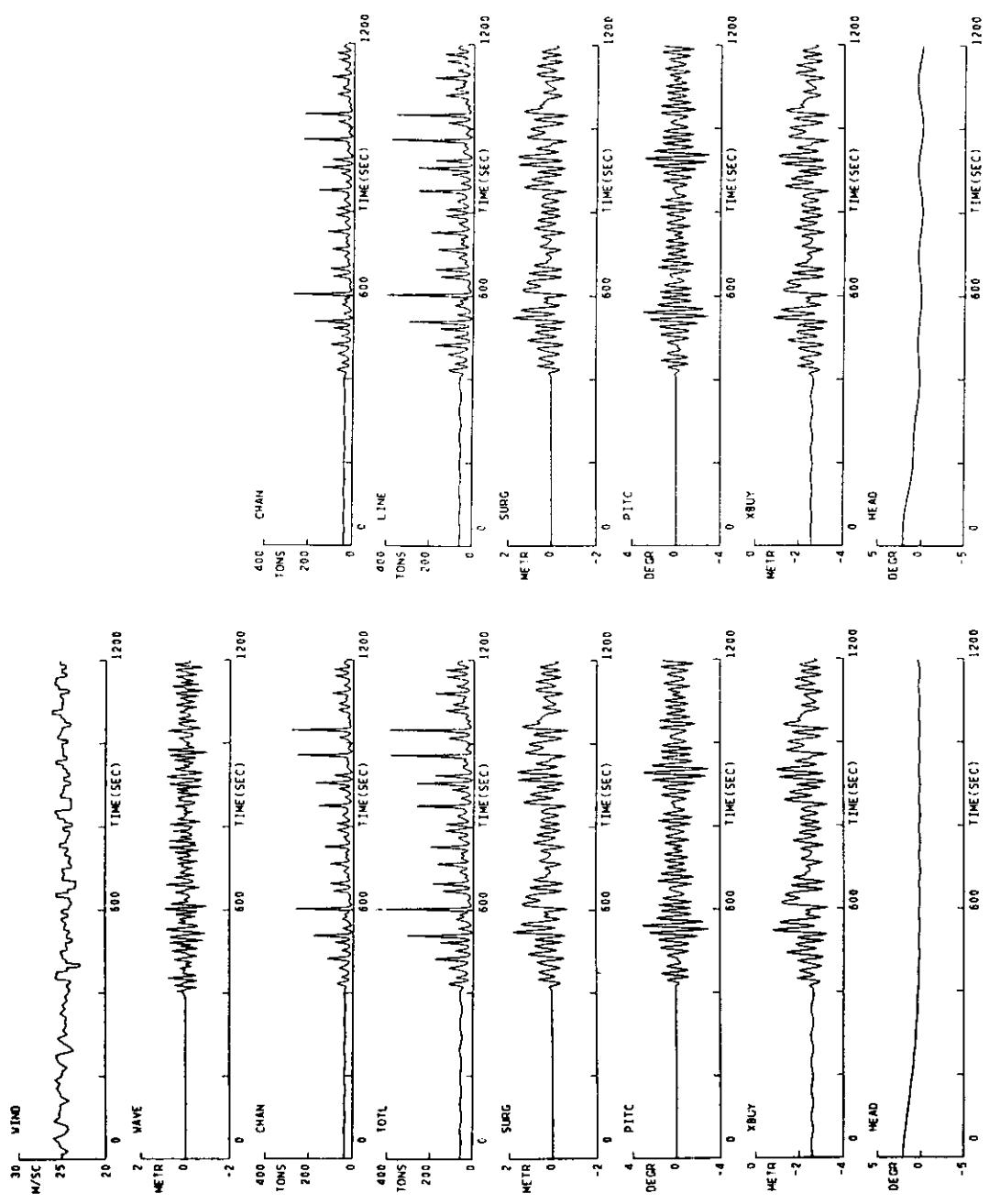


図 3.6.5.1 接触ブイと中間ブイの計算比較

(計算番号 A 4 ) (計算番号 A 1 )

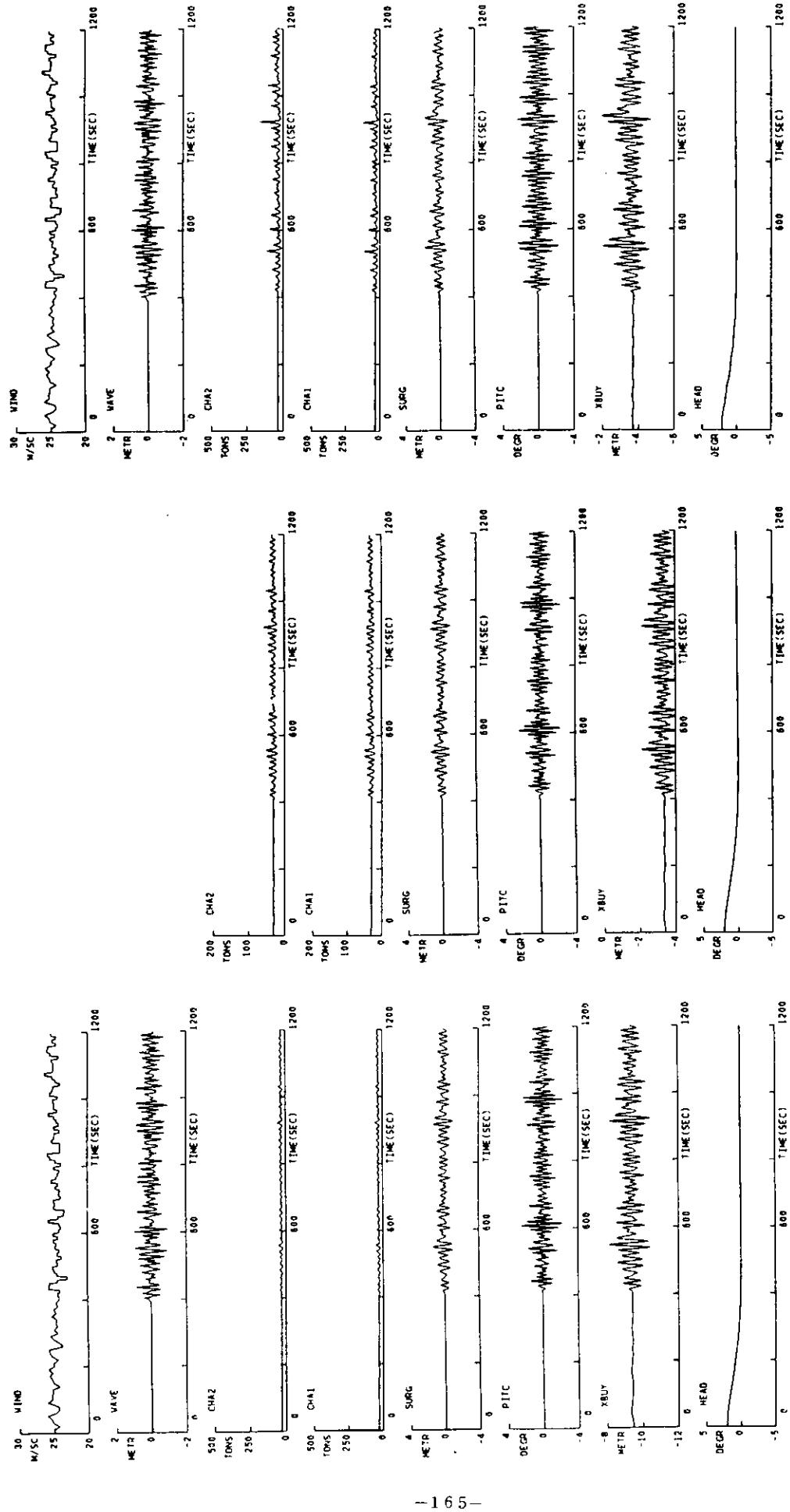


図 3.6.5.2 初期張力シリーズ計算例

( 計算番号 A 9 )

( 計算番号 A 2 )

図 3.6.5.3 初期張力シリーズ計算例(水深の影響)

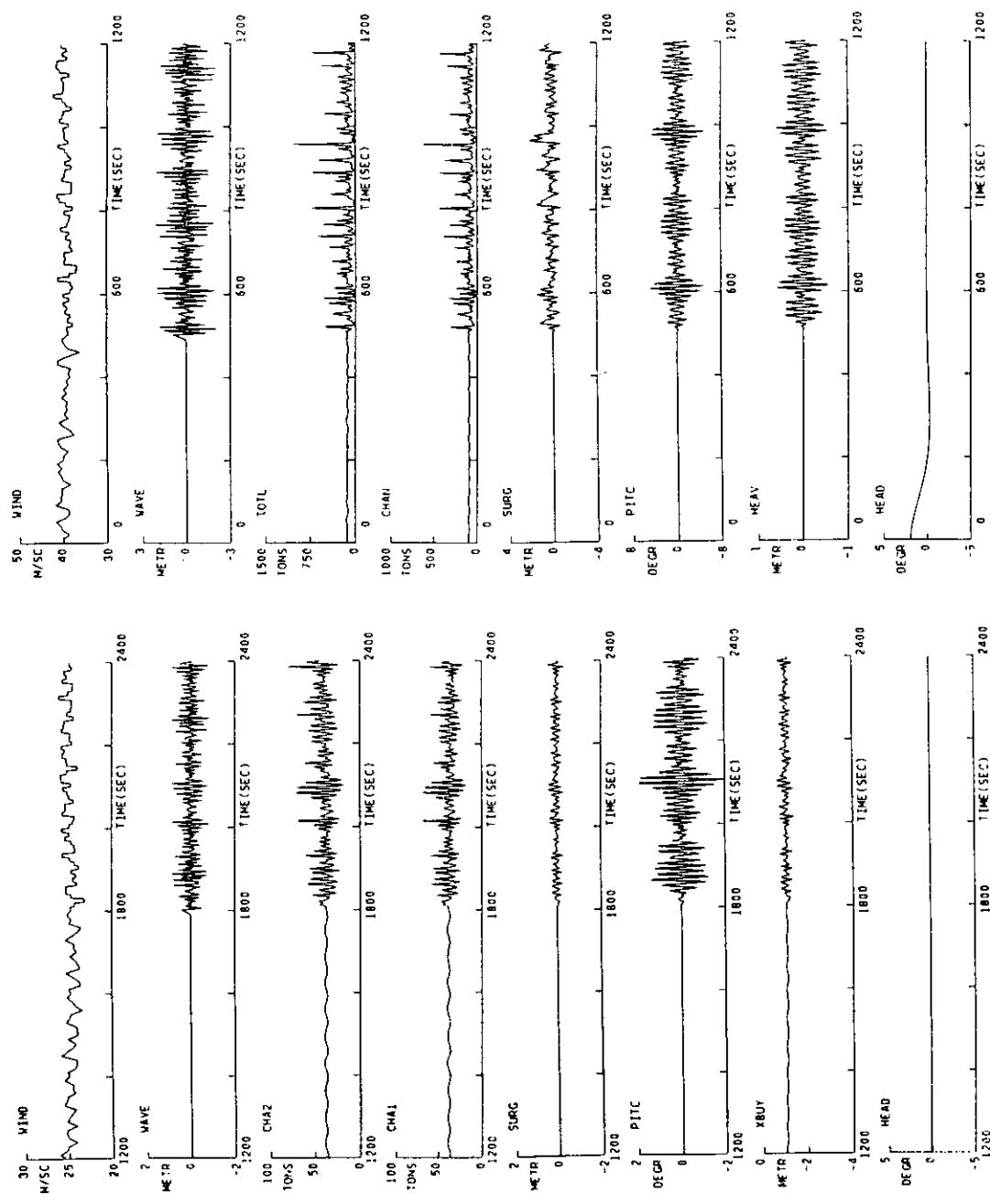
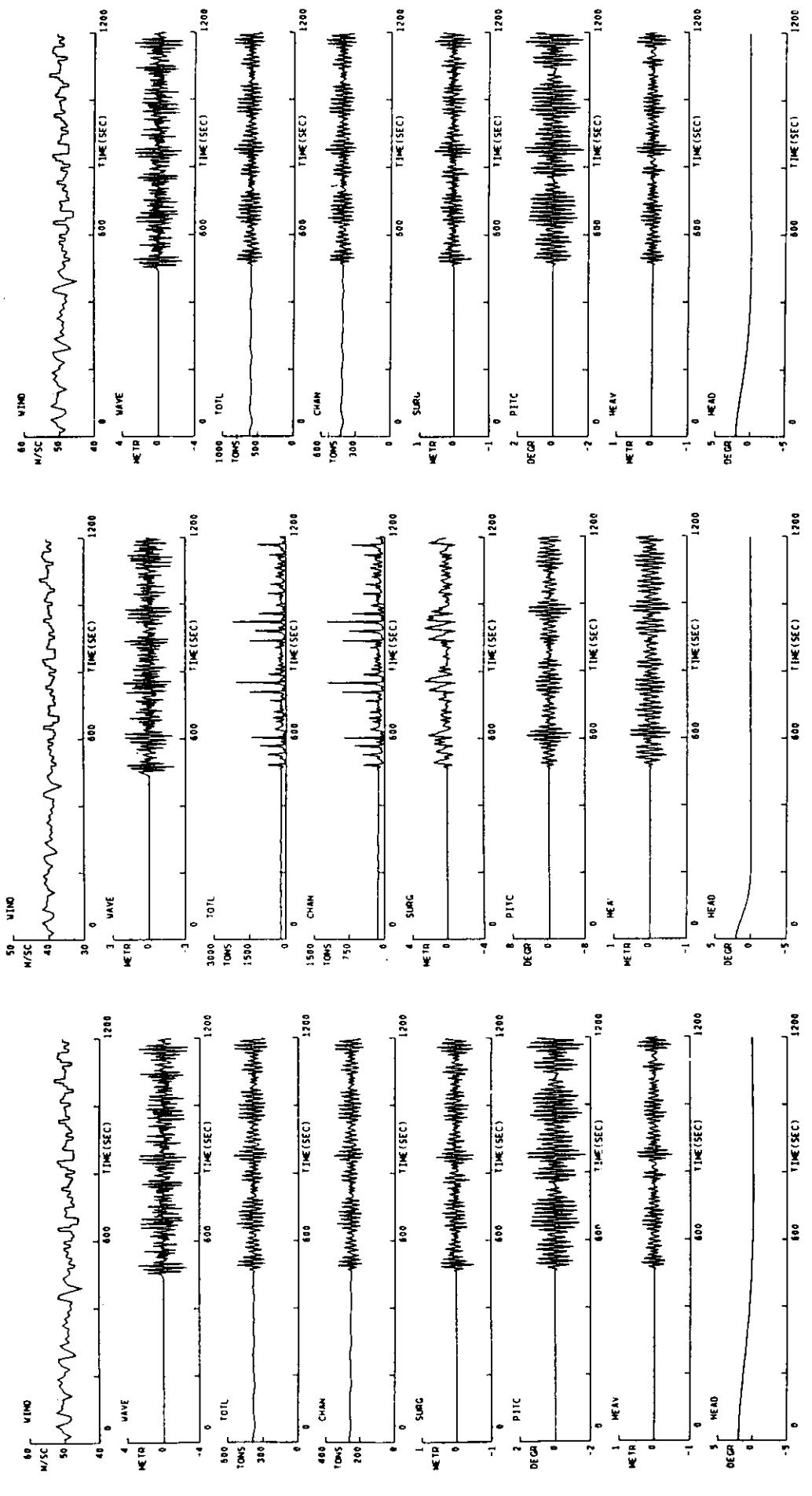


図 3.6.5.4 外力シリーズ計算例

( 計算番号 A 29 ) ( 計算番号 A 33 )



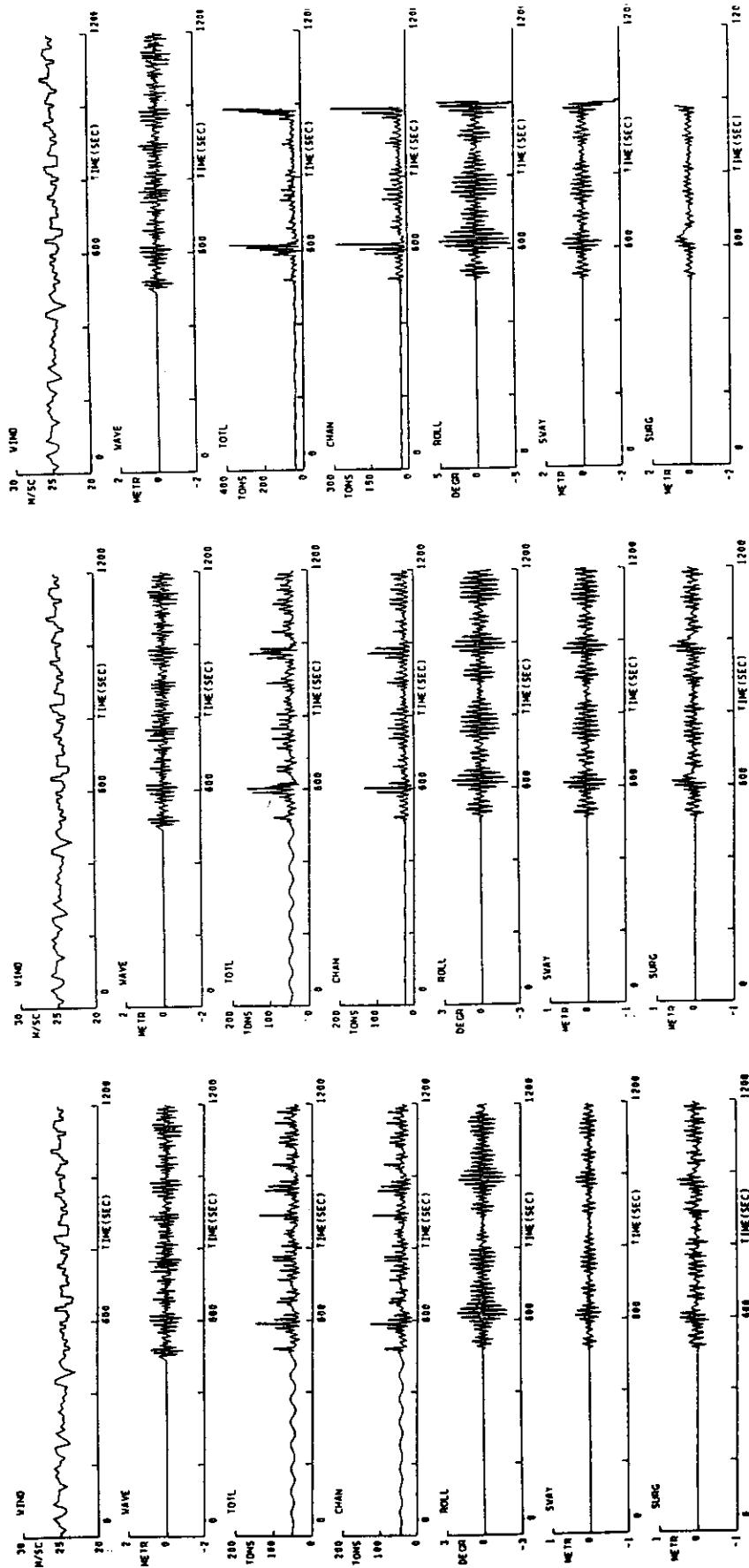
- 167 -

( 計算番号 B 45 )

( 計算番号 A 41 )

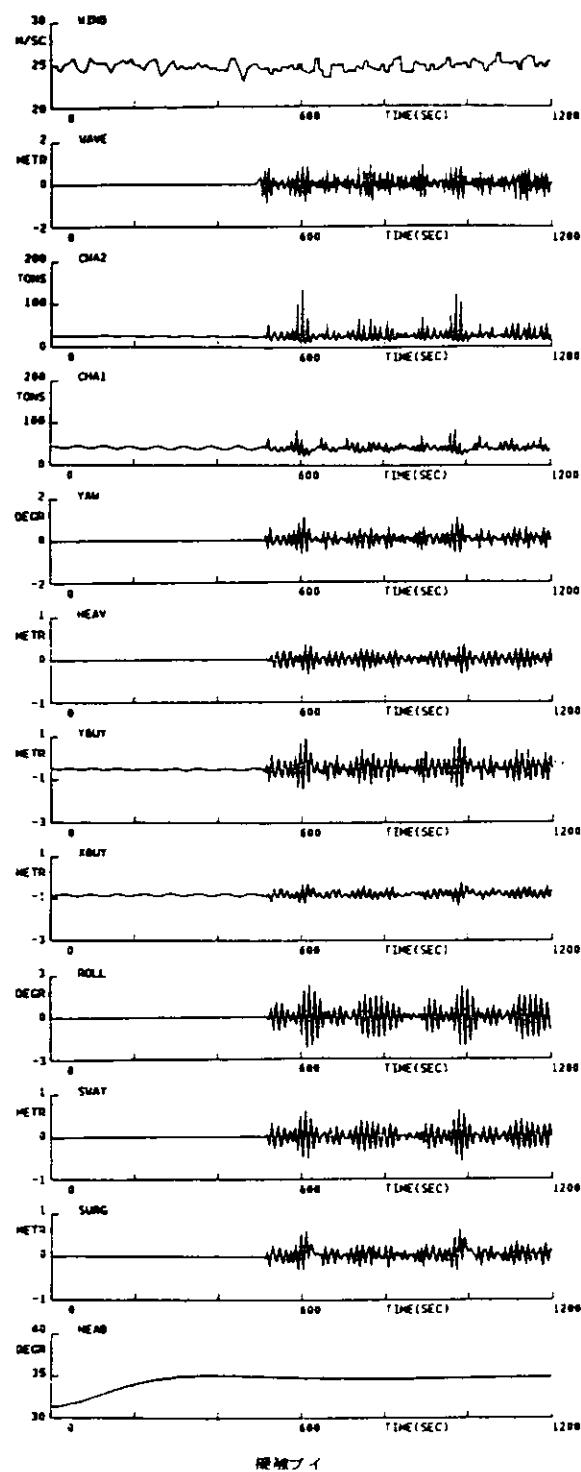
図 3.6.5.5 外力シリーズ計算例（船型大型化の影響） 図 3.6.5.6 外力シリーズ計算例（保留ラインの影響 B型）

（計算番号 B 52 ）



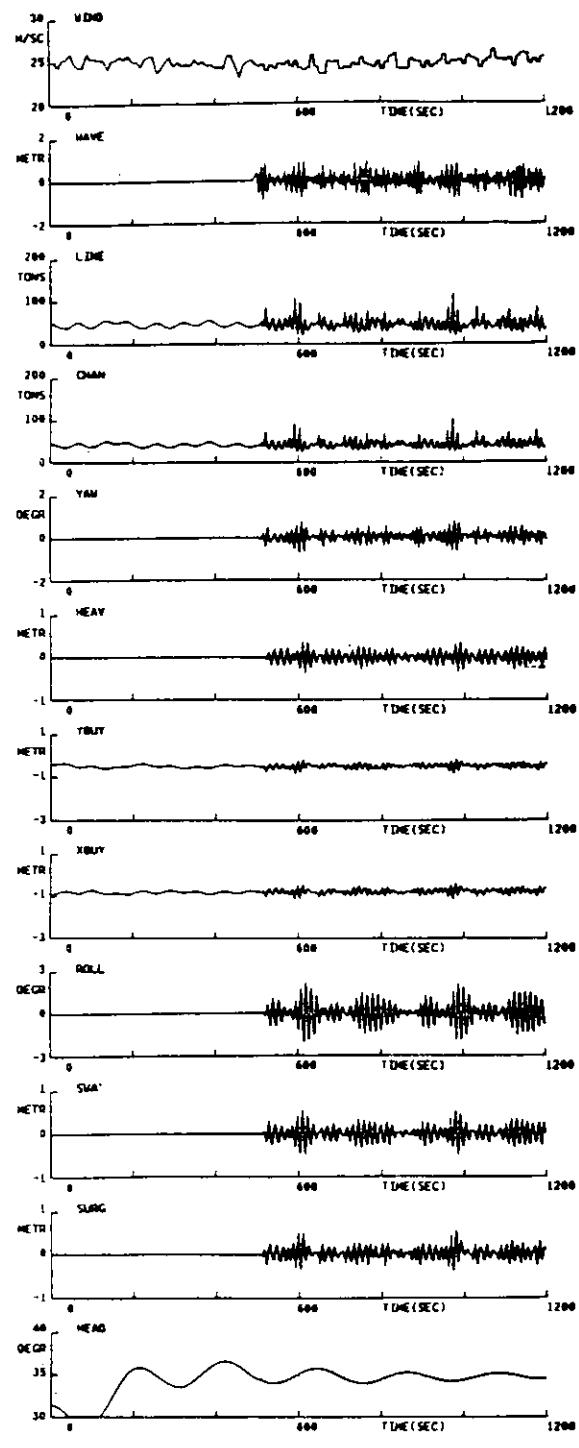
( 計算番号 A 54 流向  $30^\circ$  ) ( 計算番号 A 56 流向  $90^\circ$  ) ( 計算番号 A 56 流向  $90^\circ$  )

図 3.6.5.8 外力方向シリーズ計算例



接觸ブイ

(計算番号 A 55)



(計算番号 A 66)

図3.6.5.9 外力方向に対する接觸ブイと中間ブイの計算比較

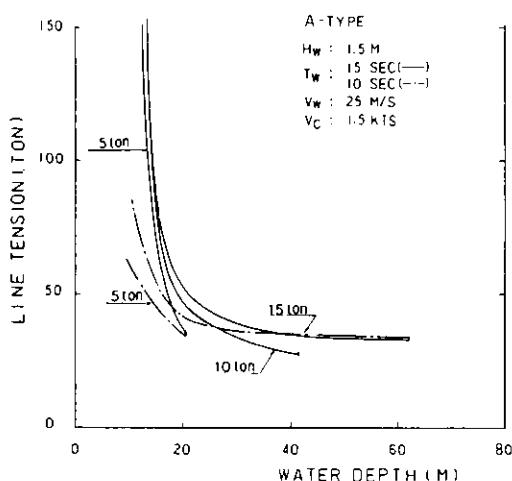


図 3.6.5.10 係留ライン初期張力の影響（Ⅰ）

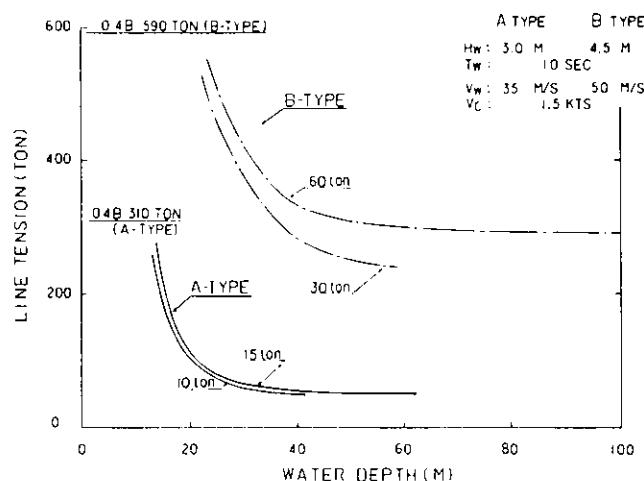


図 3.6.5.11 係留ライン初期張力の影響（Ⅱ）

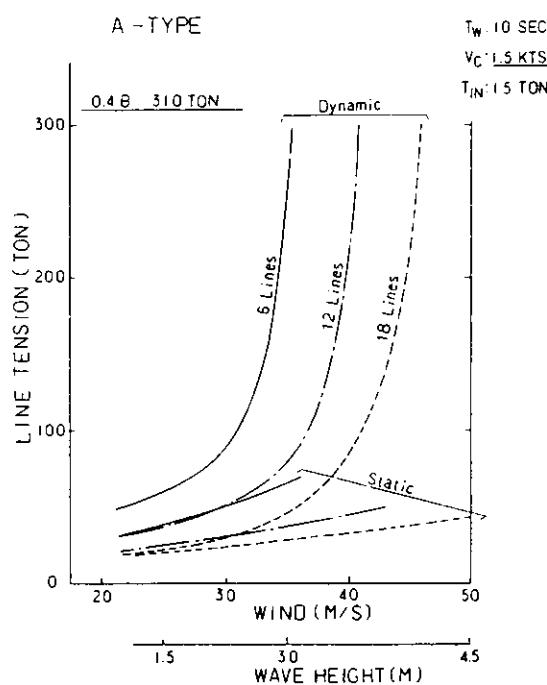


図 3.6.5.12 係留ライン張力に対する外力の影響（Ⅰ）

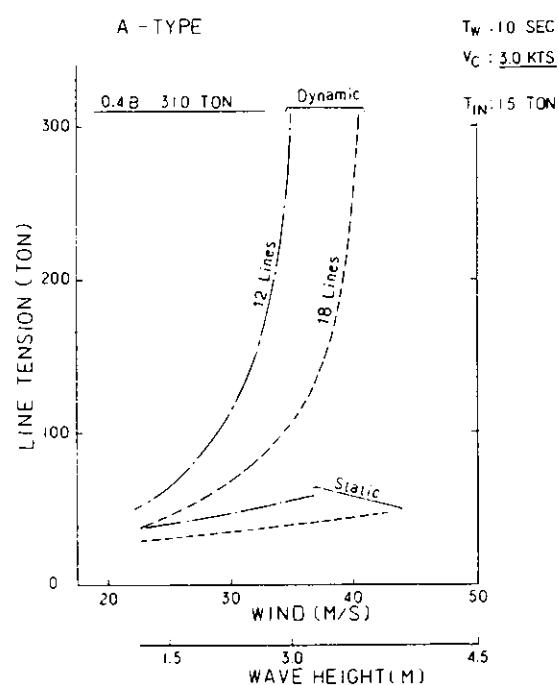


図 3.6.5.13 係留ライン張力に対する外力の影響（Ⅱ）

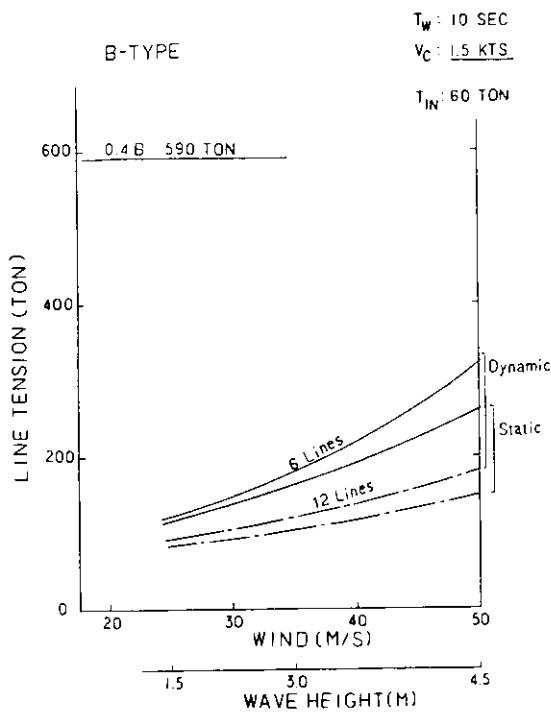


図 3.6.5.14 係留ライン張力に対する外力の影響(Ⅲ)

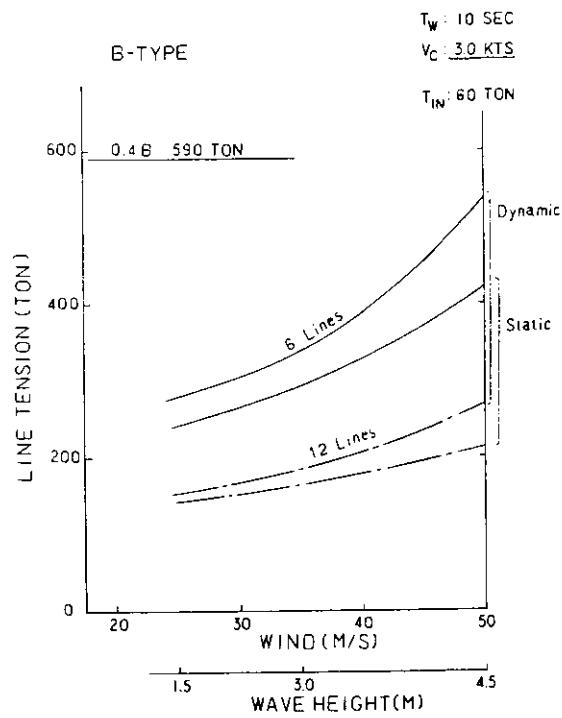


図 3.6.5.15 係留ライン張力に対する外力の影響(Ⅳ)

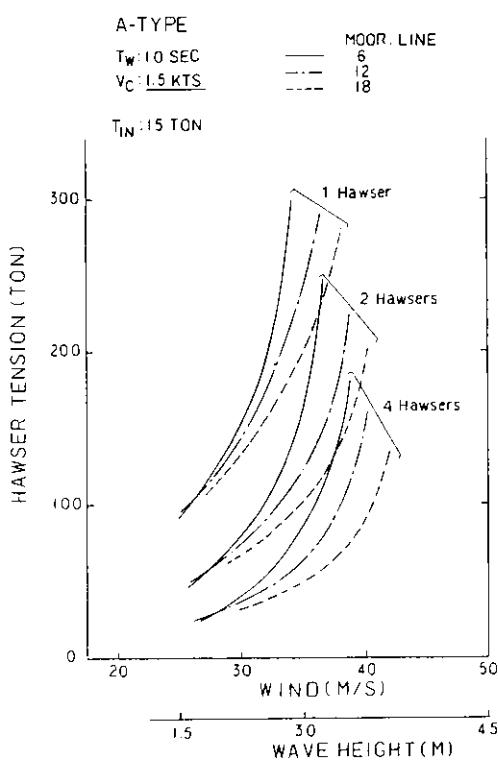


図 3.6.5.16 ホーサー張力に対する外力の影響(Ⅰ)

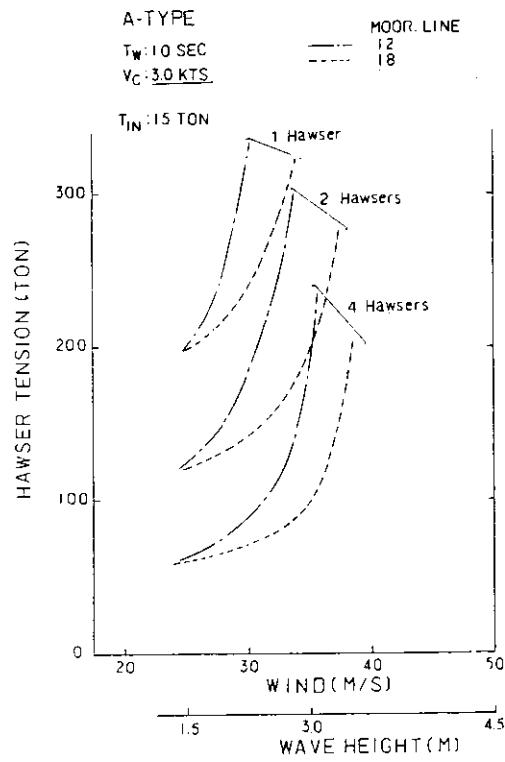


図 3.6.5.17 ホーサー張力に対する外力の影響(Ⅱ)

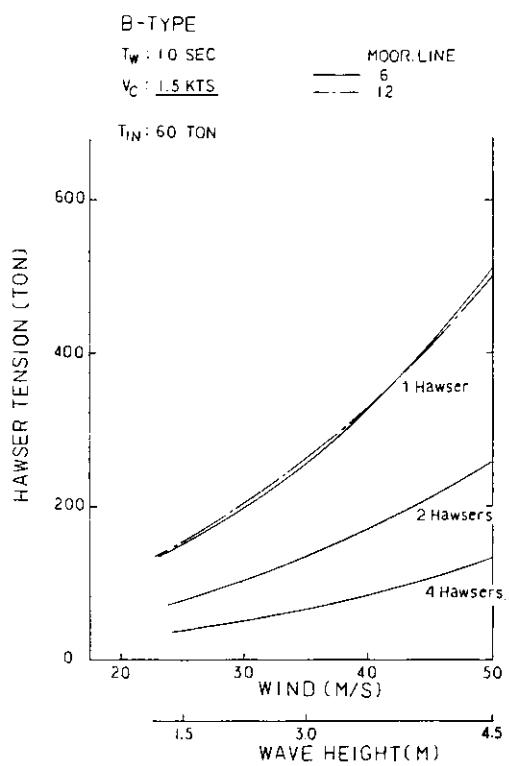


図 3.6.5.18 ホーサー張力に対する外力の影響 (III)

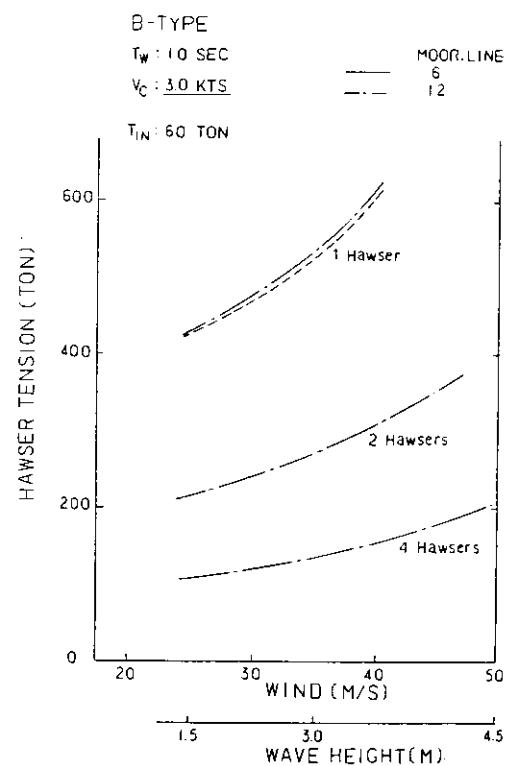


図 3.6.5.19 ホーサー張力に対する外力の影響 (IV)

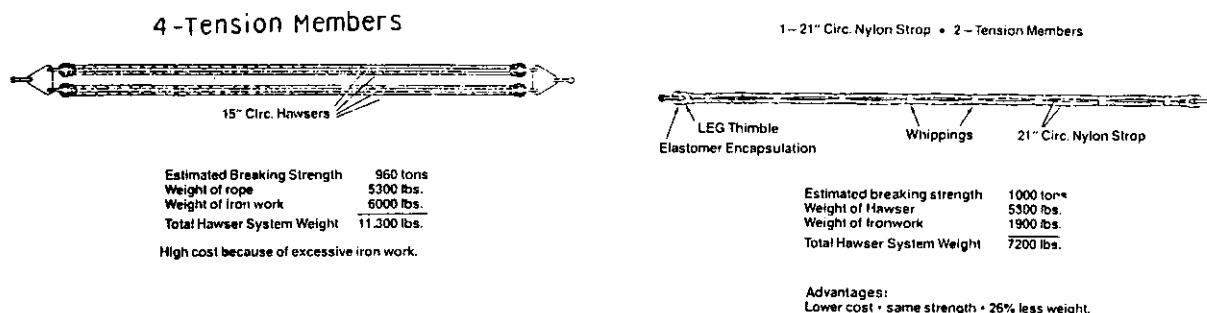


図 3.6.5.20 4 本組及び 2 本組ホーサー形状

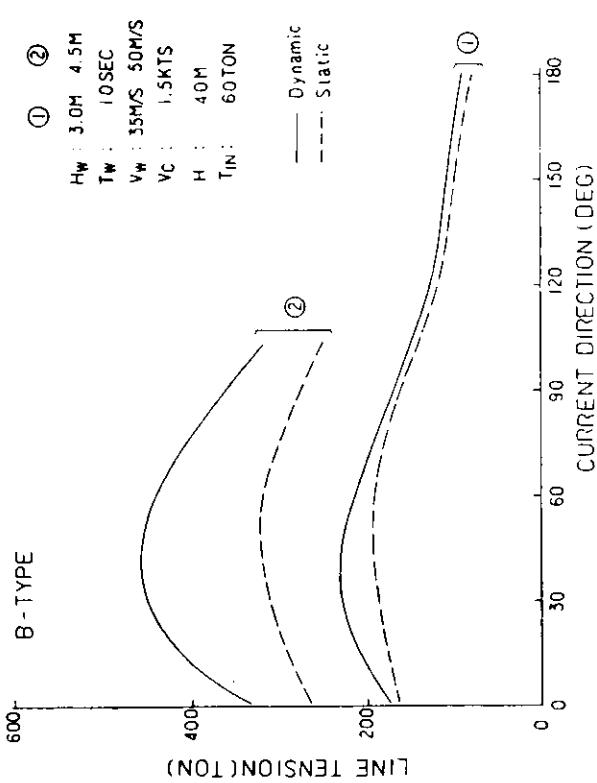


図 3.6.5.21 外力方向の影響 (A Type)

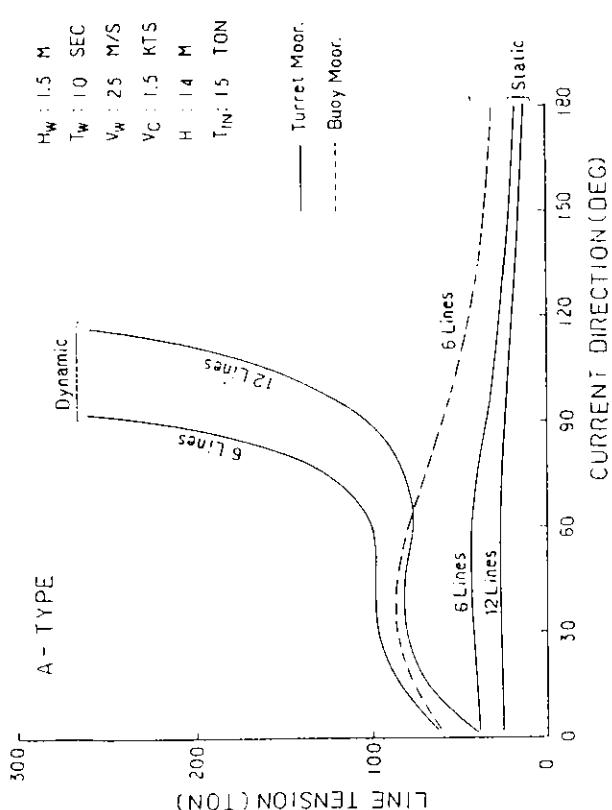


図 3.6.5.21 外力方向の影響 (A Type)

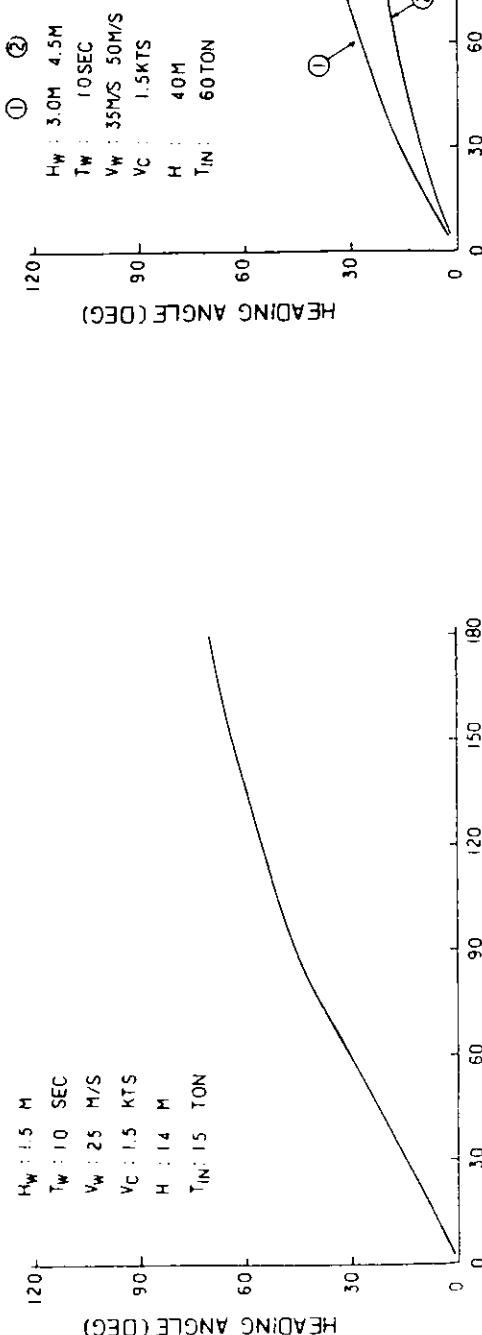


図 3.6.5.23 静的つり合い時の船首角 (A Type)

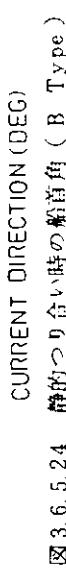


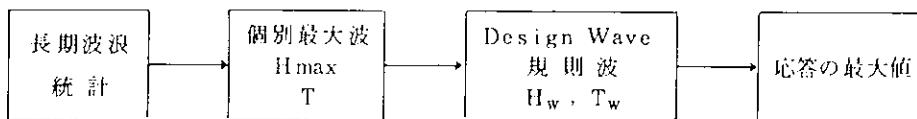
図 3.6.5.24 静的つり合い時の船首角 (B Type)

## 7. ドルフィン・ダンパー係留方式

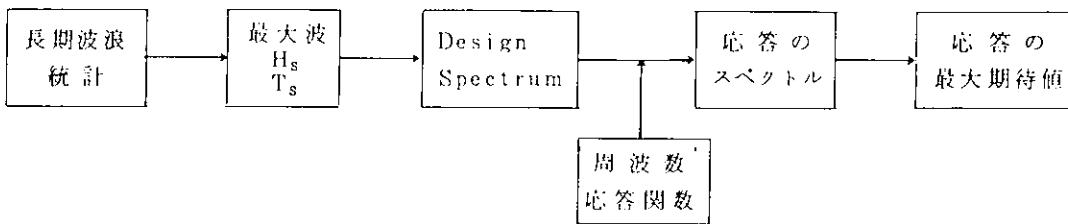
### 7.1 計 算 法

各種海洋機器、係留システムの設計に際しては、浮体、係留システムを含めた係留系の運動特性を正しく把握することが重要であるが、その手法は、次の三つに分類することができる。<sup>1)</sup>

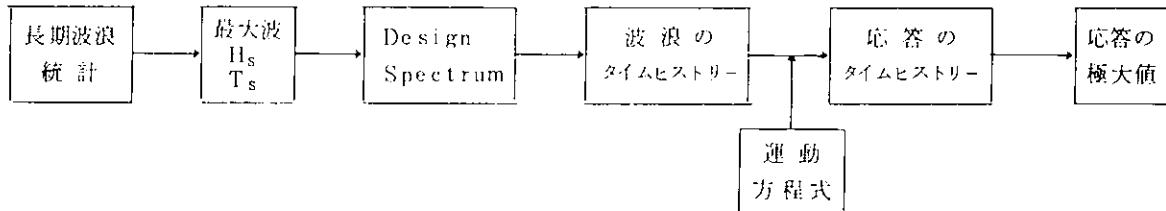
(1) Design Wave Method : —



(2) Design Spectrum Method : —



(3) Non-linear Time History Simulation Method : —



このうち、最も一般的に用いられているのは、Design Spectrum Methodである。これは、設計条件として有義波高と平均波周期が設定された波スペクトルと周波数応答関数から線形重ね合せの理論により、応答のエネルギースペクトルを求め、それから応答の最大期待値を設定する方法で、船舶の不規則波応答の推定法を「短期予測」<sup>2)</sup>と称している方法に相当する。この方法は、線形理論に基づく統計的手法であり、通常の船舶の波浪中動揺などの、現象が線形理論で取扱うことのできる応答に対しては、非常に有効な方法である。

しかしながら、一般に係留系は非線形性を有し、特に定反力型フェンダー等の非線形性は著しい。かつ外力条件も、波、風、潮流等、種々の外力が重畠されるため、その挙動は非常に複雑な様相を呈する。

したがって、その係留検討は、Design Spectrum Methodによる検討だけでは不十分であり、上記条件を考慮した浮体の挙動解析が必要である。このような問題を取扱う有力な手段が、Non-linear Time History Simulation Methodである。この方法は、時間領域で応答のシミュレーション計算を行い、応答の極大値を推定する方法であり、海上空港や洋上石油備蓄タンクなどの大型浮遊式海洋構造物の係留問題に対して新しく開発された方法であり、本研究部会における係留設計に対してもこの方法を適用している。

これらの手法には、それぞれ特徴があり、検討対象の構造物や係留システムの特性に応じて、併用あるいは使い分けるのが望ましい。

#### 7.1.1 Design Spectrum Method

フェンダーを介したドルフィン係留方式の場合、その安全性検討は、フェンダーの許容歪内で浮体の運動をおさえることができるか否かの判定に帰着する。Design Spectrum Methodによる係留検討のフローを図3.

7.1.1に検討のダイヤグラムを図3.7.1.2に示す。

定常外力と変動外力を全く分離して考え、それぞれの外力によるフェンダー歪量を求め、それらを加え合せるこことによって、フェンダーの全歪量を求め、その大きさがフェンダーの許容歪内にあるか否かを判定する方法である。

#### (1) 定常外力によるフェンダー歪量の推定

定常外力としては、風、潮流、波浪（波漂流力）を考える。風抗力、潮流力については第2章、第4章において述べられている方法により推定することができる。不規則波中における波漂流力は、規則波中波漂流力係数と波スペクトルを用いて、次式にて表される。

$$\overline{F}_d = \rho g L \int_0^{\infty} R(\omega) S'(\omega) d\omega \quad (3.7.1.1)$$

$R(\omega)$  : 波漂流力係数 ( $= \frac{F_d}{\frac{1}{2} \rho g L h_a^2}$ )

$S'(\omega)$  : 波スペクトル

定常外力が求まれば、図3.7.1.2に示すようにフェンダーの特性曲線を用いて定常外力によるフェンダー歪量を求めることができる。

#### (2) 変動外力によるフェンダー歪量の推定

変動外力としては、波浪のみを考え、風は考慮に入れない。

不規則波中における浮体の運動は、線形重ね合せの理論を応用したエネルギースペクトル法を用いて推定する。すなわち、浮体の運動の標準偏差は、その規則波中応答関数および波スペクトルより、次式にて求められる<sup>2)</sup>。

$$R^2 = \int_0^{\infty} S'(\omega) [A(\omega)]^2 d\omega \quad (3.7.1.2)$$

$R$  : 浮体の運動の標準偏差

$S'(\omega)$  : 不規則波の波スペクトル

$[A(\omega)]$  : 浮体の運動の周波数応答関数

$\omega$  : 波円周波数

このようにして、浮体の運動の短期のパラメータ  $R$  (標準偏差) が求められれば、この  $R$  を用いて、短期不規則波浪海面における浮体の運動の統計的予測を行うことができる。ここでは、暴風海面の継続時間を約2～3時間と想定し、波浪に対する浮体の各応答の最大値としては  $1/1000$  最大期待値をとる。浮体の運動の極値分布は Rayleigh 分布に従うとすると、浮体の運動の最大値は次式にて求めることができる。

$$1/1000 \text{ 最大期待値} = 3.87 R \quad (3.7.1.3)$$

また、浮体の運動の推定におけるフェンダー特性の取扱いは、線形バネに置換して行う。波浪中における浮体の運動によるフェンダー歪は係留点の左右方向あるいは前後方向運動により、このような方法で求めることができる。

以上のようにして、変動外力によるフェンダー歪量が求まれば、その量を定常外力によるフェンダー歪量に加え合すことにより、フェンダーの全歪量が求まる。

#### 7.1.2 Non-linear Time History Simulation Method

この方法は、時間領域で応答のシミュレーション計算を行い、応答の極大値を推定するという方法であり、波浪に対する応答だけでなく、風（含変動風）、波、潮流の複合外力の影響をまとめて取扱うことができるため、

非線形な係留系を持つ海洋構造物の応答を求める手法として極めて有用である。。

以下に計算法<sup>3)</sup>の概要を記す。

### (1) 係留浮体の運動方程式

ドルフィン係留された浮体の運動方程式は、次のように表わされる。

$$\sum_{k=1}^6 [A_{jk}\ddot{\eta}_k + B_{jk}\dot{\eta}_k + C_{jk}\eta_k] + G_j(\eta_1, \eta_2, \dots, \eta_6) = E_j(t) \quad (3.7.1.4)$$

ここに

$$j = 1, 2, \dots, 6$$

ただし、 $j, k$ は運動モードのサフィックスで

1 : Surge, 2 : Sway, 3 : Heave,

4 : Roll, 5 : Pitch, 6 : Yaw

を表わす。

$\eta_k$  : 重心の  $k$  方向の運動変位

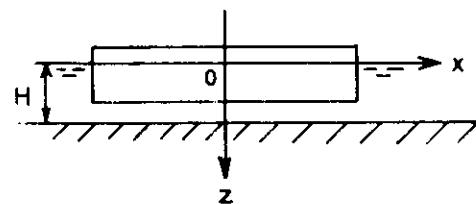
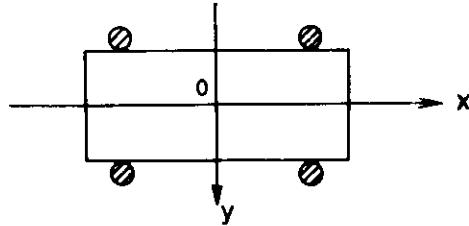
$A_{jk}$  : 見掛け質量または見掛け慣性モーメント

$B_{jk}$  : 減衰力係数

$C_{jk}$  : 復原力係数

$G_j$  : 変位  $\eta_k$  に対する  $j$  方向のフェンダー復原力

$E_j(t)$  : 強制外力



運動方程式は、Runge-Kutta-Gill 法を用いて解き、運動変位、フェンダー反力などについて時間履歴を計算する。

### (2) 流体力係数： $A_{jk}, B_{jk}, C_{jk}$

流体力係数は、周波数に依存する量であるが、不規則外力下における浮体運動の時間履歴を計算する場合には代表周波数を設定して（例えば強制外力の平均周期），それに対応する流体力係数を用いることとする。

これらの流体力係数は3次元特異点分布法によって求められた値を用いることとする。

### (3) 強制外力

強制外力としては、波、風、潮流の3種の外力が重複した複合外力を考え、次のように表わす。

$$E_j(t) = E_{jw}(t) + E_{ja}(t) + E_{jc}(t)$$

ただし、サフィックス  $w, a, c$  は外力の要因でそれぞれ、波、風、潮流を表わす。

#### 1) 波による強制外力： $E_{jw}(t)$

波による強制外力は、波による変動強制力  $E_{jw1}(t)$  と波漂流力  $E_{jw2}(t)$  の和として

$$E_{jw}(t) = E_{jw1}(t) + E_{jw2}(t)$$

と表わす。

##### a) 波強制力： $E_{jw}(t)$

不規則波の波スペクトルを  $S'(\omega)$  とすると、不規則波形  $\zeta(t)$  は次のように表わすことができる。

$$\zeta(t) = \int_0^\infty \sqrt{2S'(\omega)} d\omega \cos \{\omega t + \epsilon(\omega)\}$$

ただし、 $\epsilon(\omega)$  は  $0 \sim 2\pi$  の間にランダムに分布する位相角

この場合、波強制力の時系列は、その周波数応答関数  $\overline{E_{jw1}(\omega)}$  と位相角  $\epsilon_{w1}(\omega)$  を用いて、次のように求めることができる。

$$\zeta(t) = \int_0^\infty \sqrt{2S'(\omega) d\omega} \cos \{\omega t + \epsilon(\omega)\}$$

ただし、 $\epsilon(\omega)$ は $0 \sim 2\pi$ の間にランダムに分布する位相角

この場合、波強制力の時系列は、その周波数応答関数 $\overline{E_{jw_1}(\omega)}$ と位相角 $\epsilon_w(\omega)$ を用いて、次のように求めることができる。

$$E_{jw_1}(t) = \int_0^\infty \sqrt{2S'(\omega) d\omega} \cdot \overline{E_{jw_1}(\omega)} \cdot \cos \{\omega t + \epsilon(\omega) + \epsilon_w(\omega)\}$$

波スペクトルとしては Bretscheider・光易のスペクトルを用いることとする。

$$S'(f) = 0.43 \left( \frac{\bar{H}}{g\bar{T}^2} \right)^2 \frac{g^2}{f^5} \exp \left[ -0.675 \left( \frac{1}{\bar{T}f} \right)^4 \right]$$

ただし、 $f = 2\pi\omega$

$\bar{H}$ ：平均波高（= 0.625 H<sub>1/3</sub>）

$\bar{T}$ ：平均波周期（= 1.1 T<sub>01</sub>）

b) 波漂流力： $E_{jw_2}(t)$

不規則波中における波漂流力については、F. H. Hsu や F. M. Remery の仮定に従い、不規則波の1山または1谷を規則波の半波長とみなし、その時間に作用する波漂流力として、その波高を有する規則波中の値をとることとする。すなわち、横波中では

$$[E_{jw_2}(t)]_i = \frac{1}{2} \rho g L \zeta_{Ai}^2 \cdot C_{DF}(\omega_i) \quad (3.7.1.5)$$

ただし、 $[E_{jw_2}(t)]_i$ ：不規則波のゼロクロスから次のゼロクロスの間に作用する波漂流力

$\zeta_{Ai}$ ：規則波とみなしたときの波振幅

$C_{DF}(\omega_i)$ ：波漂流力係数

2) 風による外力： $E_{jA}(t)$

風による強制外力も波の場合と同様、定常風による荷重と、変動風による荷重とを考える。すなわち、風速 $U(t)$ を平均風速 $\bar{U}$ と変動風速 $u(t)$ の和として次のように表わすことができる。

$$U(t) = \bar{U} + u(t) \quad (3.7.1.6)$$

変動風速 $u(t)$ は、変動風のスペクトル $S'_A(\omega)$ を用いて、次のように表わすことができる。

$$u(t) = \int_0^\infty \sqrt{2S'_A(\omega) d\omega} \cdot \cos \{\omega t + \epsilon_A(\omega)\} \quad (3.7.1.7)$$

この変動風を考慮して、風による強制外力は次のように計算する。

$$\left. \begin{aligned} E_{1A}(t) &= \frac{1}{2} \rho_a A_T \{ \bar{U} + u(t) \}^2 \cdot C_x \\ E_{2A}(t) &= \frac{1}{2} \rho_a A_L \{ \bar{U} + u(t) \}^2 \cdot C_y \\ E_{3A}(t) &= 0 \\ E_{4A}(t) &= -F_{2A}(t) \cdot Z^* \\ E_{5A}(t) &= F_{1A}(t) \cdot Z^* \\ E_{6A}(t) &= \frac{1}{2} \rho_a A_T L \{ \bar{U} + u(t) \}^2 \cdot C_m \end{aligned} \right\} \quad (3.7.1.8)$$

ただし、

$C_x$ ：x方向抗力係数

$C_y$ ：y方向抗力係数

$C_m$ ：Z軸まわりのモーメント係数

- $\rho_a$  : 空気密度  
 $A_T$  : 水面上正面投影面積  
 $A_L$  : 水面上側面投影面積  
 $Z^*$  : 重心から風圧中心までの高さ

変動風のスペクトルとしては Davenport のスペクトルを用いることとする。

$$S'_A(\omega) = 2 \times \frac{1200 K U_{10}}{\pi} \cdot \frac{X_D}{(1+X_D^2)^{3/4}} \quad (3.7.1.9)$$

ただし,  $X_D = \frac{600}{\pi} \cdot \frac{\omega}{U_{10}}$

$U_{10}$  : 高度 10 mにおける 10 分間平均風速

$K$  : 表面摩擦係数 (水面上で  $K=0.003$ )

### 3) 潮流による外力 : $E_{jc}(t)$

潮流による外力は定常力として、次のように計算する。

$$\left. \begin{aligned} E_{1C}(t) &= \frac{1}{2} \rho B \cdot d \cdot V_c^2 \cdot C_{cx} \\ E_{2C}(t) &= \frac{1}{2} \rho L \cdot d \cdot V_c^2 \cdot C_{cy} \\ E_{6C}(t) &= \frac{1}{2} \rho L^2 d \cdot V_c^2 \cdot C_{c\phi} \end{aligned} \right\} \quad (3.7.1.10)$$

ただし、

$C_{cx}$  :  $x$  方向抗力係数

$C_{cy}$  :  $y$  方向抗力係数

$C_{c\phi}$  :  $Z$  軸まわりのモーメント係数

$V_c$  : 潮流速度

### 4) フェンダー特性 : $G_j$

フェンダーによる復原力は、係留点の変位の関数として与えられているものとする。ただしモーメントは伝えないものとする。

ところで、フェンダーの場合は、他の係留方式に比べてその特性が特殊であり、係留検討に際してはこのフェンダーの特性を的確に把握する必要がある。定反力型フェンダーを例にとると、その基本特性だけでなく、経年変化、周囲温度依存性、クリープ特性等による特性変化およびヒステリシス特性が係留系の挙動に大きく影響を与える。したがって、フェンダー反力  $R$  は、フェンダー歪み  $\xi$  と特性変化率  $\gamma$  の関数として次式で表現する。

$$R = (1 - \gamma) f(\xi) \quad (3.7.1.11)$$

ここで  $f(\xi)$  は、カタログ表示のフェンダー特性とし、 $\gamma$  の値は検討条件に適合するように各特性変化を評価し、組合せて設定する。

ヒステリシス特性は、メーカーによる模型フェンダーでの実験結果等を参考にしてモデル化を行う必要がある。

### 5) 計算結果の評価

浮体の運動のタイムヒストリーの計算結果からその最大値を評価する場合、例えば、出会い波数 1000 波のタイムヒストリー計算で得られた最大値が  $1/1000$  最大期待値とは限らず、結局、極値の確率分布を仮定して最大値を求める方法が一般的である。図 3.7.1.3 にはシミュレーション計算における係留点の横方向変位の極大値の確率分布の一例を示す。図には、その標準偏差を用いて計算した Rayleigh 分布の理論曲線も示して

いる。係留系は著しい非線形性を有してはいるが、浮体の動揺は線形性が強く、Rayleigh 分布はほぼ妥当に係留点の横方向変位の極大値分布の傾向を表現している。この場合 Design Spectrum Method と同様に、最大値として  $1/1000$  最大期待値をとることとすれば、フェンダーの最大変形量は次式にて求めることができる。

$$Y_{MAX} = (m - C) + 3.87 \sigma \quad (3.7.1.12)$$

ただし、

$m$  : 時系列の平均値

$\sigma$  : 振幅の標準偏差

$C$  : フェンダーと船体間のクリアランス

### 参考文献

- 1) 高橋 雄他 : 海洋構造物の設計と海象, 日本造船学会誌, 第609号, 昭和55年3月
- 2) 福田淳一 : 船体応答の統計的予測, 日本造船学会, 耐航性に関するシンポジウム, 昭和44年7月
- 3) 珠久正憲他 : 浅海浮上式備蓄タンクの係留に関する研究 — 非線形数学モデルによる数値シミュレーション, 造船学会論文集第146号, 昭和54年12月

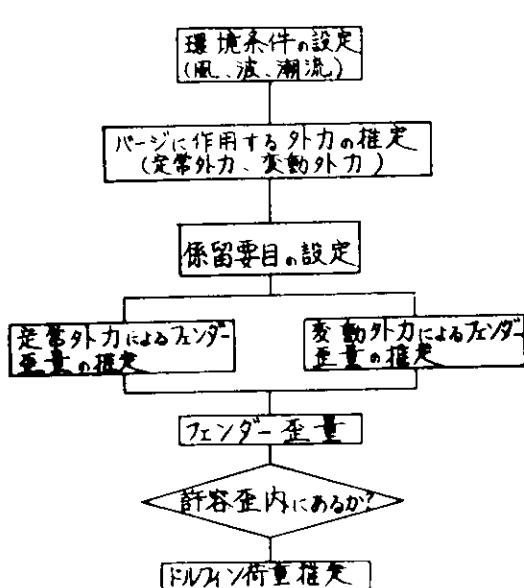


図3.7.1.1 Design spectrum methodによる  
係留検討

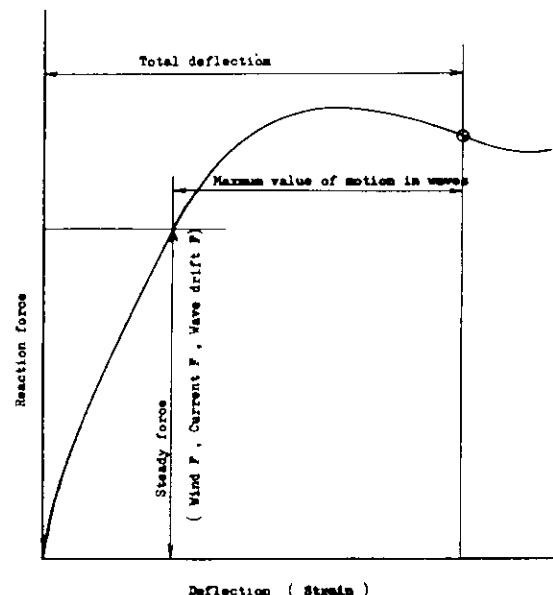


図3.7.1.2 Design spectrum methodによる  
フェンダー最大歪の推定

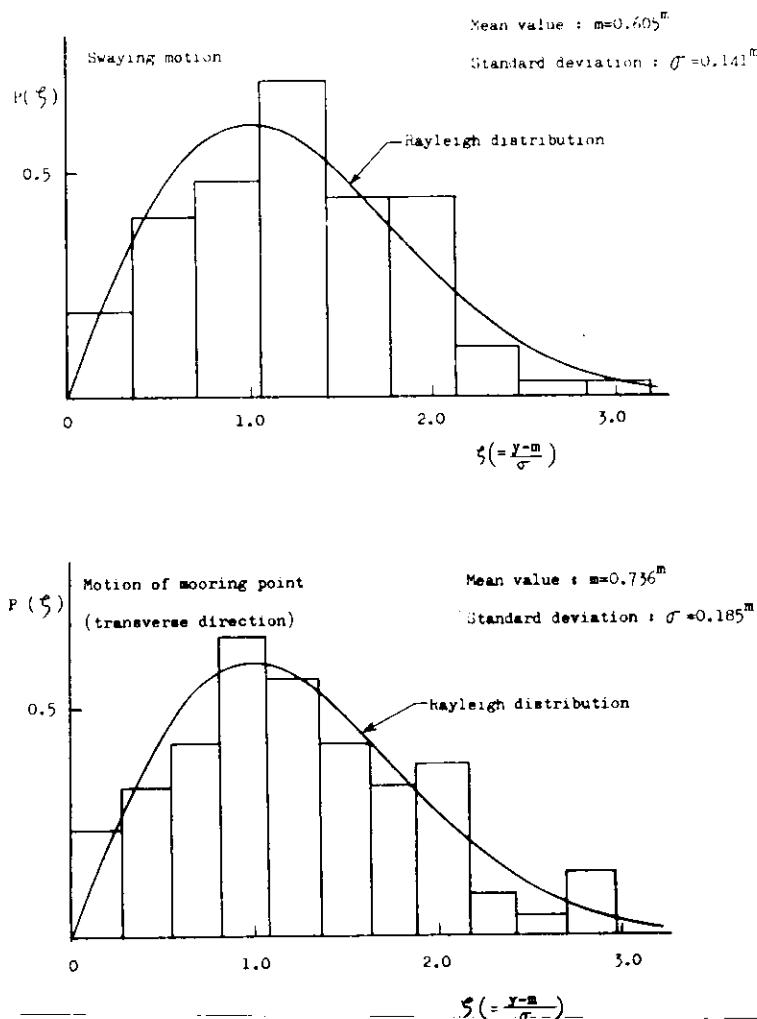


図3.7.1.3. 浮体の運動の確率分布の例

## 7.2 水槽模型試験

### 7.2.1 実験水槽及び供試模型

水槽実験は横浜国立大学の水中振動台（図3.7.2.1）を用いて行なった。浮体模型は鉄骨フレームにアルミ外板を張った矩形断面の柱状模型で、水槽幅（内寸法988mm）に対して両端6mmづつの間隙をとり、横波中における2次元的な実験とした。供試模型の主要目は次のとおりである。

長さ	(L)	976 mm
幅	(B)	500 mm
深さ	(D)	253 mm
吃水	(d)	100 mm
排水量	(△)	48.8 kg
重心高さ	(KG)	92.9 mm
横メタセンタ	(GM)	129.1 mm
横搖慣性半径	(KT)	181 mm

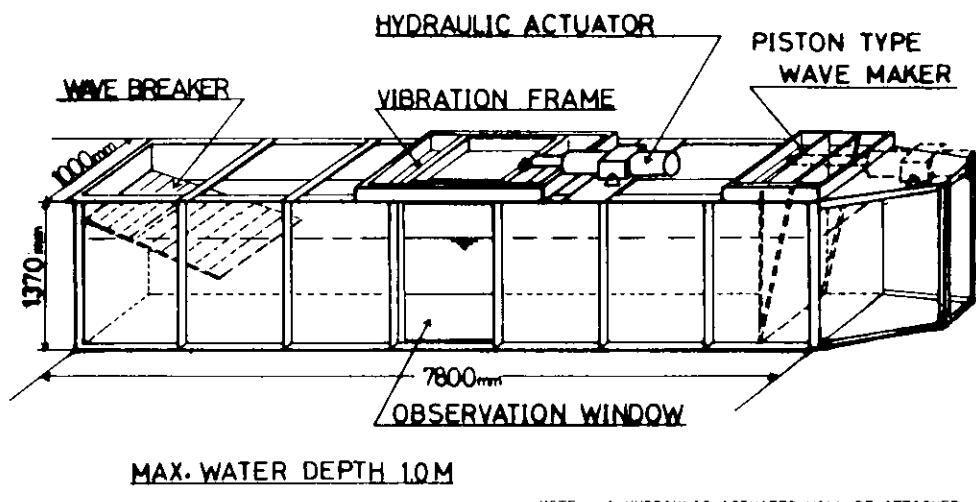


図3.7.2.1 Bird eye view of vibration tank

### 7.2.2 波浪中動揺実験

供試模型を水槽の中央にセットし、左右揺れのみを fender model でバネ係留する状態で規則波中における実験を行なった。計測項目は、浮体動揺 (sway, heave, roll), 入射波、及び係留力である。これらはデータレコーダに記録すると共に電磁オシログラフでモニターした。なお、測定記録は水槽長が比較的短いことから、水槽端部からの反射波の影響が入りやすいので、その影響が少ない入射波と、それに対応する応答値とを標準として解析した。

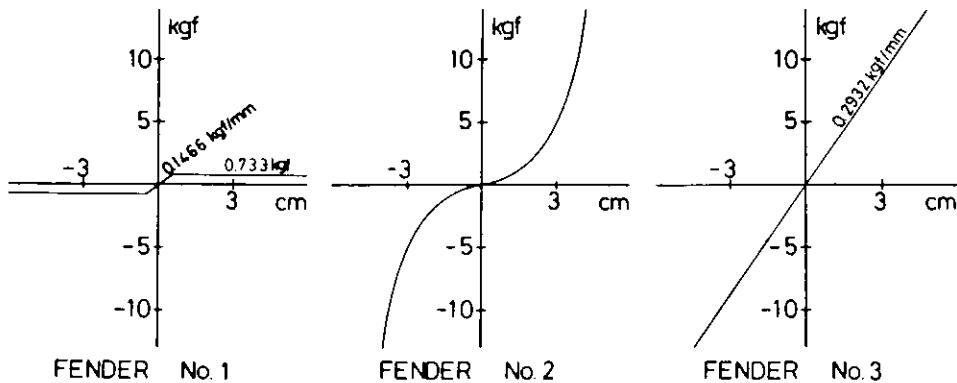


図3.7.2.2 Characteristics of mooring restoring forces

波浪中実験に用いた fender model は 2 種類である。ひとつは、rubber fender の特性を近似した fender No.1 で、線形の特性を持つ coil spring と重鉛を用いて図3.7.2.3 の取付要領により、図3.7.2.2 に示す変位反力特性を得ている。もうひとつは、pneumatic type fender の特性を近似した fender No.2 である。これは軟式テニスボールを用いることで図3.7.2.2 に示す非線形特性を得ている。fender No.2 の取付要領を図3.7.2.4 に示す。

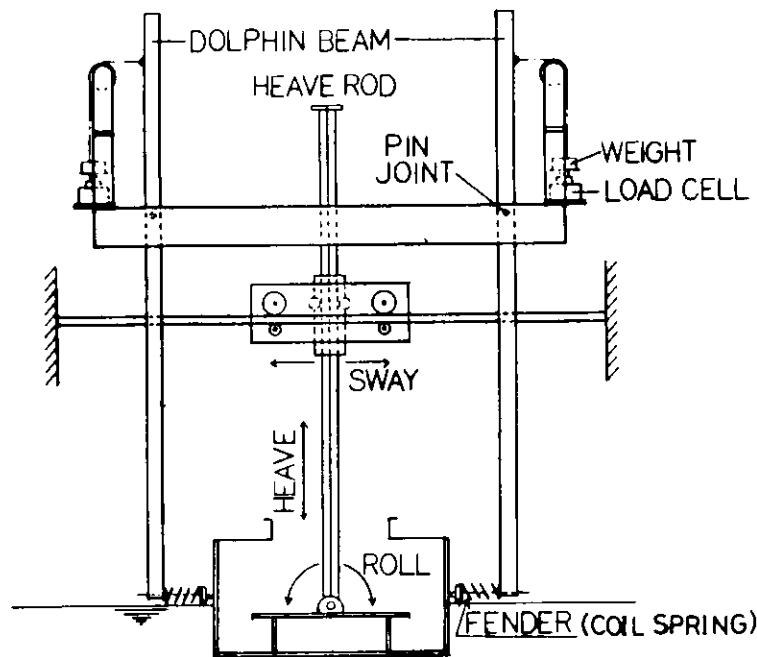


図3.7.2.3 Model support arrangement for fender No.1

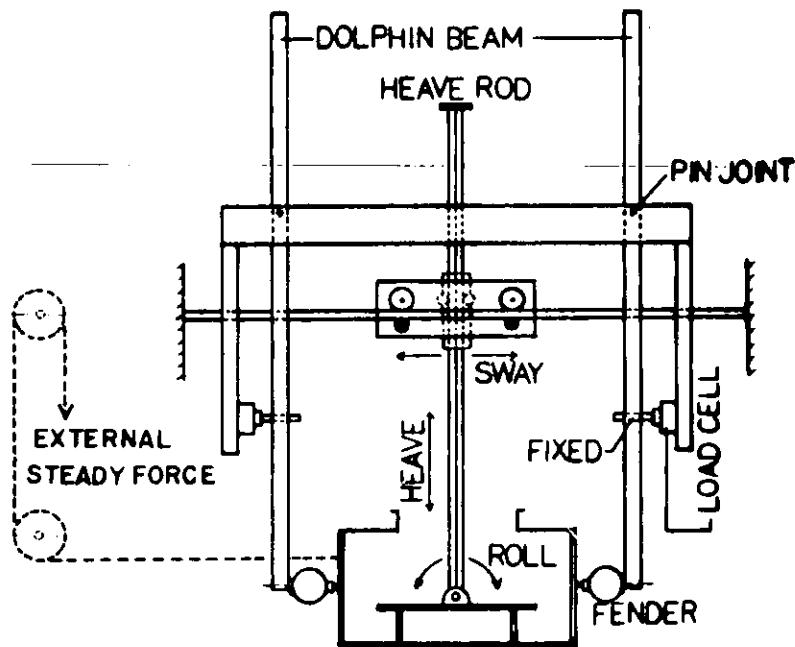


図3.7.2.4 Model support arrangement for fender No.2

上記2種類の係留状態で、規則波中における動揺実験を行ない、係留特性の影響を調査した。さらに、定常外力のある場合と、岸壁からの反射波の影響のある場合の2通りについての実験を行なった。

風荷重、潮流抵抗等に対応する定常外力が上流側から加わった場合を想定した実験を行なう為に、浮体模型の想定外力中心に滑車と重錘を用いて一定の張力を加えて、定常外力下の実験を行なった。

また、ドルフィン係留は両側が開けた海のときばかりでなく、片側が岸壁で片側が海に開けているという場合

の係留も少なくない。そこで、岸壁の model として図 3.7.2.5 に示すつい立てを供試模型の下流側の直後に置き、岸壁からの反射波の影響がみられるようにした。

上述した規則波中における実験状態の一覧表を表 3.7.2.1 に示す。なお、水槽実験での設定波高は、 $1\text{ cm}, 2\text{ cm}$ ,  $3\text{ cm}$ で、波周波数領域は  $0.4 \sim 2.0\text{ (Hz)}$  (無次元周波数 :  $\omega\sqrt{B/g} = 0.57 \sim 2.84$ ) である。

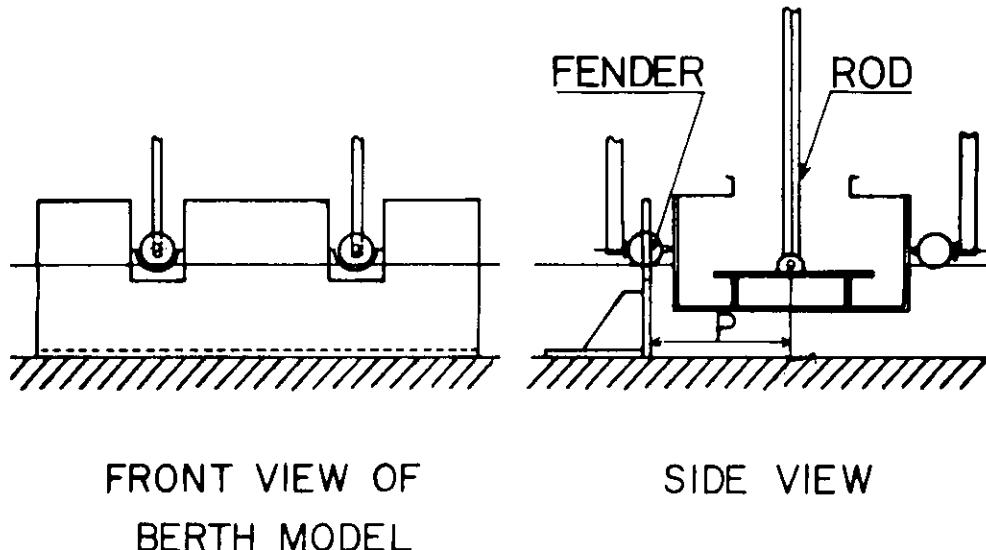


図 3.7.2.5 Berth Model System

表 3.7.2.1 Experimental conditions in waves

FENDER NO.	FENDER TYPE	EXTERNAL STEADY FORCE (kg)	WATER DEPTH (cm)	WAVE HEIGHT (cm)	WAVE FREQUENCY (Hz)	P (cm)
FENDER No.1	APPROXIMATE TYPE OF THE RUBBER FENDER	0	20	1 2 3	0.4 {} 2.0	30
		0.17				
		0.50				
FENDER No.2	PNEUMATIC TYPE	1.00				
		0	0			
		0.17				
		0.50				
		0				

### 7.3 水槽模型試験と理論計算との比較

#### 7.3.1 結果および考察

##### (1) 係留特性の影響

実験及び理論解析の結果は、低周波数領域での特徴をあらわすのに好都合な無次元周波数 ( $\omega\sqrt{B/g}$ ) を横軸にとり、各変動量を次のように無次元化してグラフ表示した。

浮体動揺 sway  $y/\zeta$

roll  $\phi/\zeta$

係留力  $R/\rho g V^{2/3} \zeta$

ただし, $\omega$	: 円周波数	$R$	: 係留力の振幅
$\zeta$	: 入射波の振幅	$\rho$	: 流体の密度
$k$	: 波数 ( $= 2\pi/\lambda$ , $\lambda$ : 波長)	$g$	: 重力の加速度
$y$	: sway の振幅	$V$	: 排水容積
$\phi$	: roll の振幅	$h$	: 水深

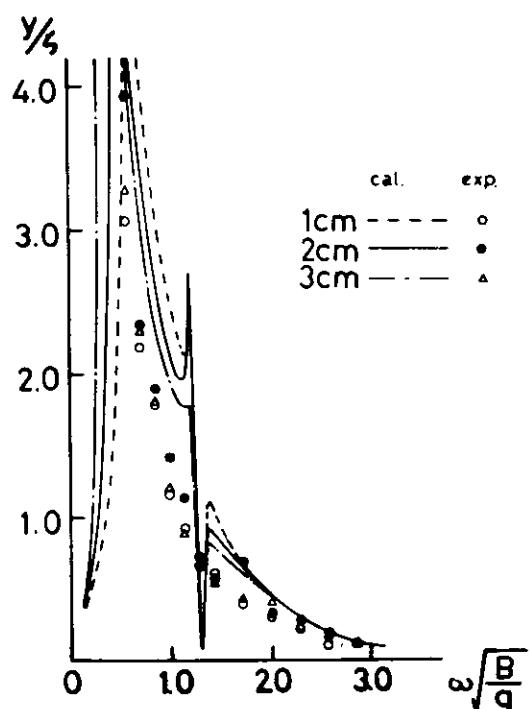


図 3.7.3.1.a Response function of sway motion (fender No.1)

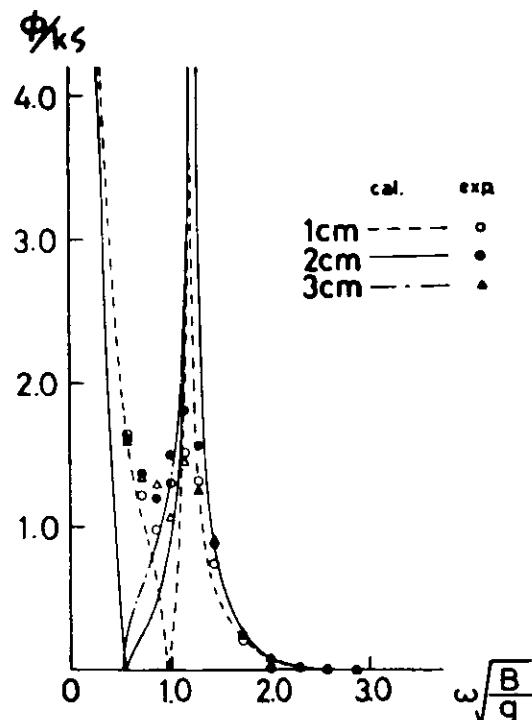


図 3.7.3.1.b Response function of roll motion (fender No.1)

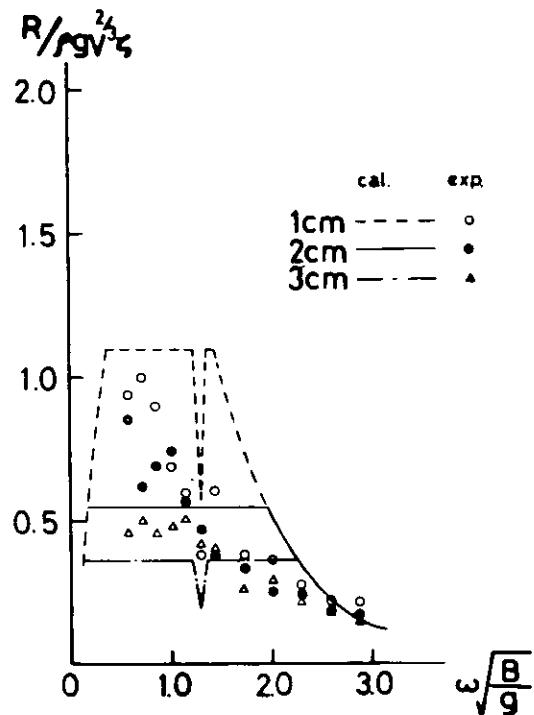


図 3.7.3.1.c Response function of mooring force (fender No.1)

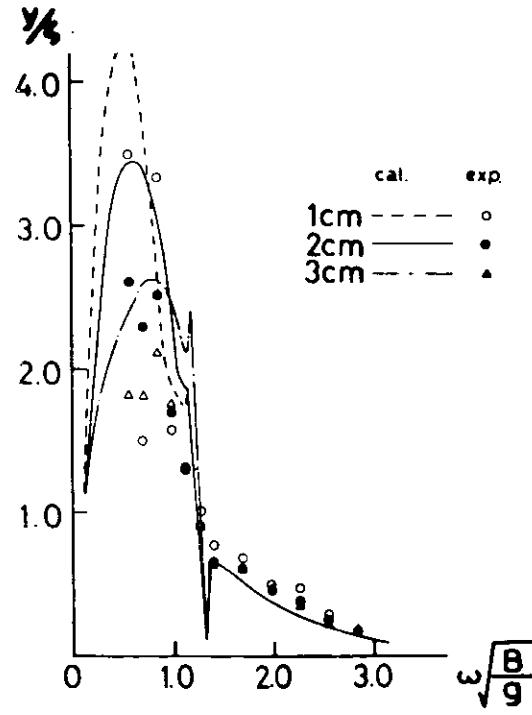


図 3.7.3.2.a Response function of sway motion (fender No.2)

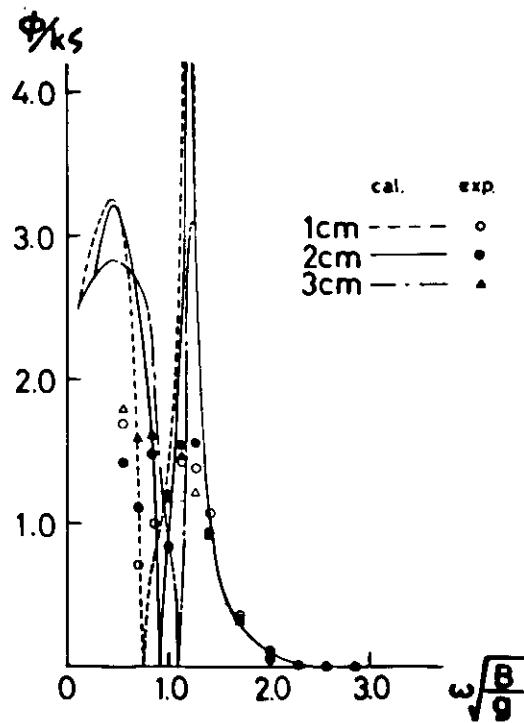


図3.7.3.2.b Response function of roll motion (fender No. 2)

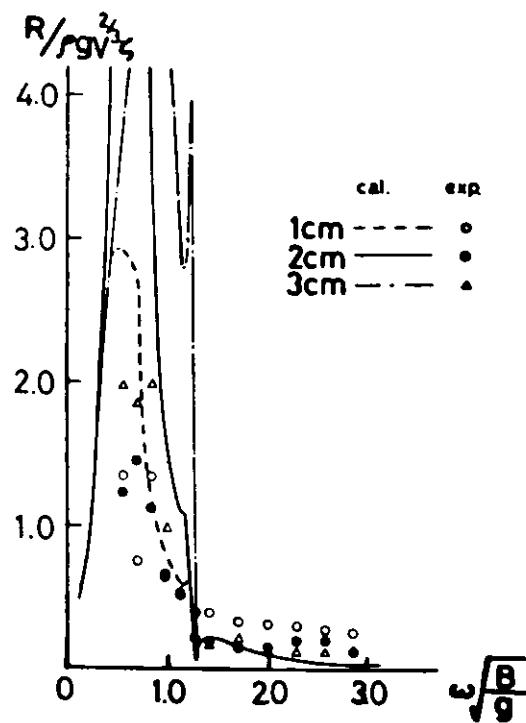


図3.7.3.2.c Response function of mooring force (fender No. 2)

heaveは今回行なったような実験方法（図3.7.2.3, 3.7.2.4参照）では、係留復原力を無視できるものと考えられるので、省略した。

図3.7.3.1のfender No.1は、fender反力の上限があるので反力は適当に抑えることができるが、sway modeの運動はその変位が同調周波数付近で非常に大きくなる。したがって、実際のフェンダーでは許容変位があることを考えると、係留設計に際しては、swayの固有周波数を波浪の周波数から十分はなして、共振させないようにすることが望ましい。又、理論値は波高の増大につれて、swayの共振点が低周波側へ移動することを示しており、この点からも、swayの固有周波数を波浪の周波数より低周波数側に避けることが望ましい。

図3.7.3.2のfender No.2では、fender No.1とは逆に、波高が大きくなるにつれて、fender反力は大きくなるが、swayの変位はおさえられている。fenderの反力をおさえるためには、swayの固有周波数を十分考慮することはもちろん必要であるが、荒天時で波高が増大する場合は、swayの固有周波数が高くなる故、特に注意をはらう必要がある。

上述の如く、等価線形近似<sup>4),6)</sup>の理論値は実験精度の落ちる低周波数領域での現象を明確に説明できるものと考えられる。また、同計算の有効性を確認するためにfender No.2 ( $h/d = 2.0$ , 波高3cm)について、シミュレーション計算から求めた応答振幅との比較を行なった。両計算法の比較を図3.7.3.3に示す。同図によれば、swayの固有周波数のある低周波数領域、およびrollとの連成による同調周波数領域で、等価線形近似計算に比べてシミュレーション計算の結果は、過大な値を示していることがわかる。同じシミュレーション計算法であっても、前年度の報告書<sup>4)</sup>による値は過小であり、係留復原力係数の僅かな差異がシミュレーション計算の結果に大きく影響しているようである。なお、図3.7.3.3の計算及び実験状態は先に示したものとは重心等が若干異なり、KG=85mm, GM=137mm, KT=181mmである。

## (2) 定常外力による影響

図3.7.2.6に示す定常外力を fender No.1 および No.2 の係留状態において加えて、規則波中動搖実験を行なった。その結果を図3.7.3.4, 3.7.3.5に示す。これらによると、定常外力が加わっても sway の変位は fender No.1, No.2 共に大きな変化はない。しかし、fender の反力は、fender No.1 では変化がわずかしか見られないのに対し、fender No.2 では定常外力の増加に伴なって反力も増加する。特に高周波数領域での増加は著しい。このように定常外力の影響は fender No.2 の方が大きいといえる。

## (3) 反射波の影響

fender No.2 を用いて、模型の中央から岸壁模型までの距離を 0.3 m とし、図3.7.2.6の状態で、水深を 20 cm、設定波高を 1 cm, 2 cm, 3 cm、波周波数領域を 0.4 ~ 2.0 Hz (無次元周波数:  $\omega\sqrt{B/g} = 0.57 \sim 2.84$ ) で実験を行なった。

実験結果に対する考察に先立ち、岸壁からの反射波の影響に関する近似的な理論解析を下記のように

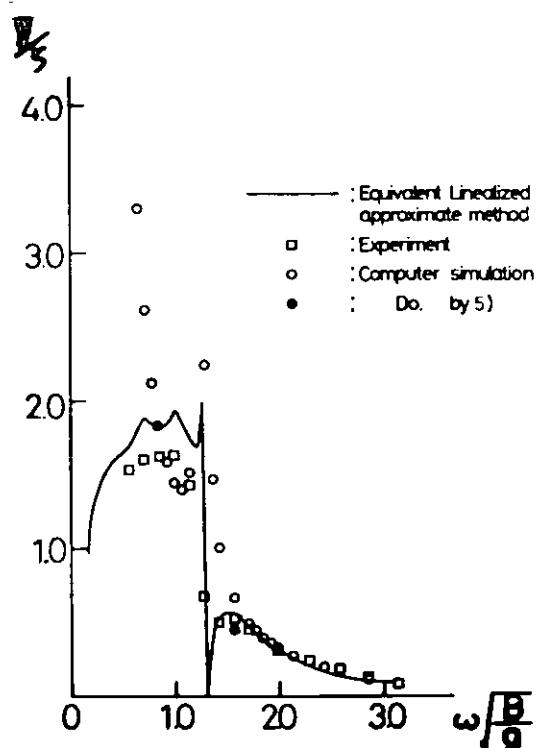


図3.7.3.3 Results of calculations by equivalent approximate method and computer simulation

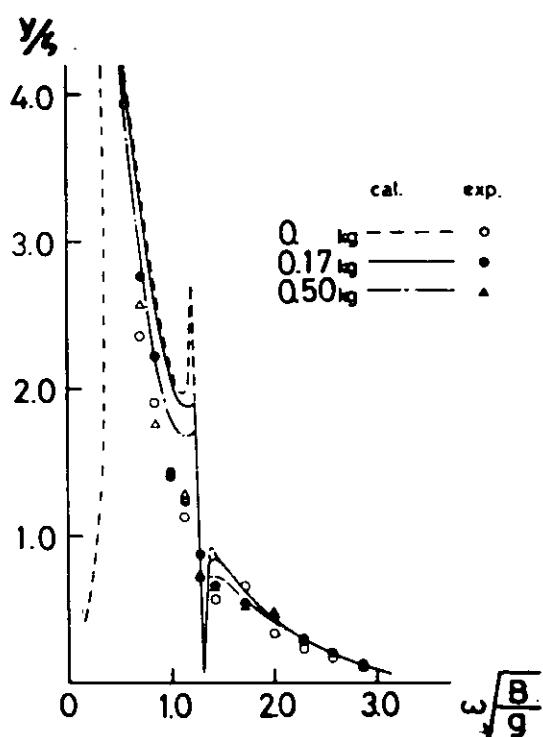


図3.7.3.4.a Response function of sway motion under external steady force (fender No.1)

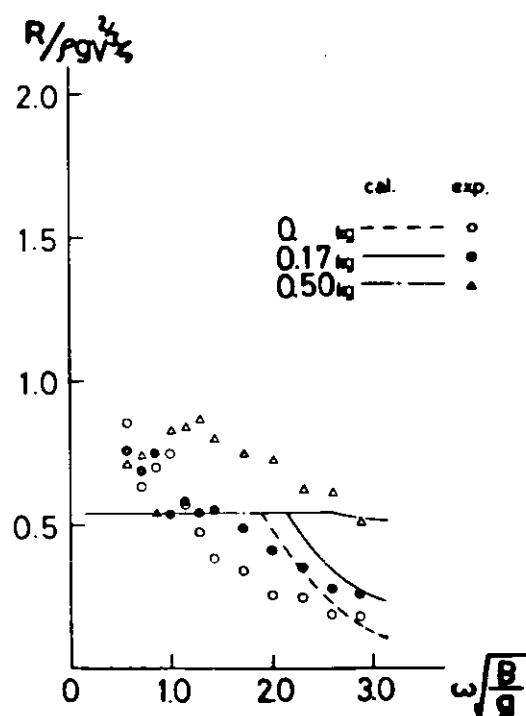


図3.7.3.4.b Response function of mooring force under external steady force (fender No.1)

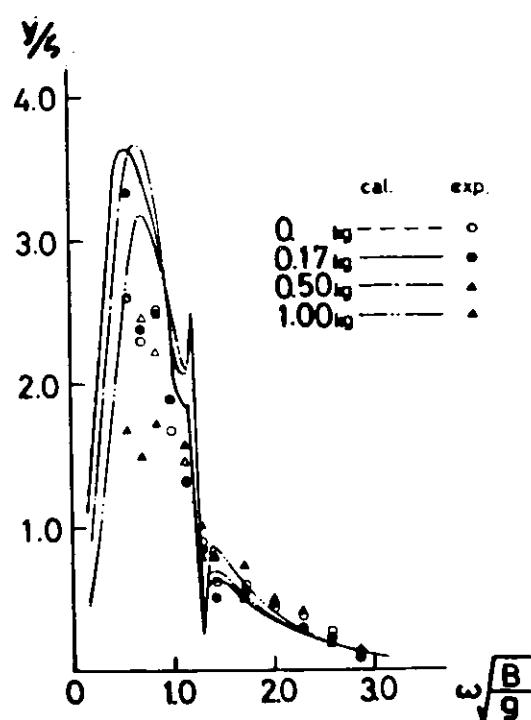


図3.7.3.5.a Response function of sway motion under external steady force (fender № 2)

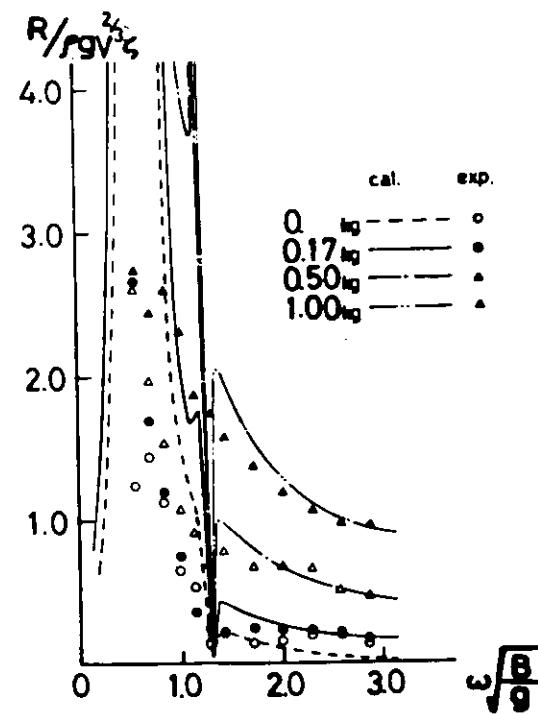


図3.7.3.5.b Response function of mooring force under external steady force (fender № 2)

行なった。すなわち、座標系を図3.7.3.6のようにとて、岸壁付近における矩形断面の2次元浮体の運動と波を考える。ただし、図中の文字は次のように定める。

$\zeta_1$  : 入射波

$\zeta_T^*$  : 岸壁からの反射波

$\zeta_R$  : 浮体からの反射波

$h$  : 水深

$\zeta_T$  : 透過波

$P$  : 浮体中央から岸壁までの距離

### COORDINATE SYSTEM

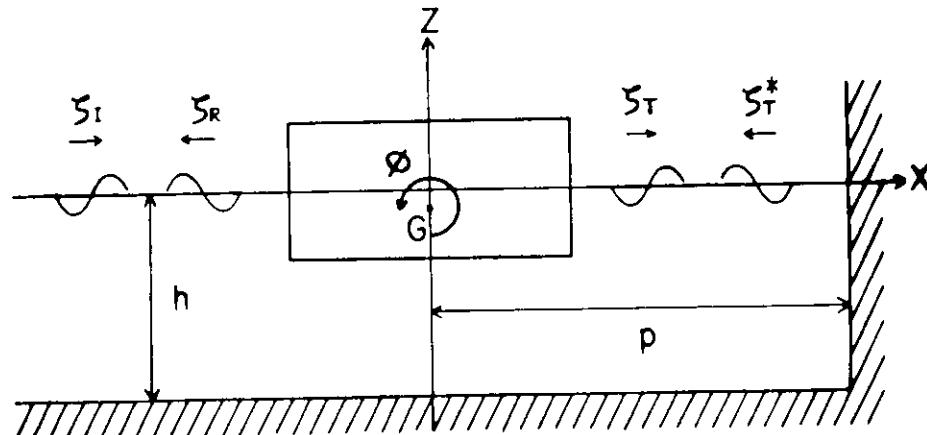


図3.7.3.6 Coordinate System

図3.7.3.6で示された入射波( $\zeta_1$ )に対する浮体運動の応答を次のように仮定する。

$$\text{Heave} : Z_A e^{-i(\omega t + \epsilon_z)}$$

$$\text{Sway} : X_A e^{-i(\omega t + \epsilon_x)} \quad (3.7.3.2)$$

$$\text{Roll} : \phi_A e^{-i(\omega t + \epsilon_\theta)} \quad (3.7.3.3)$$

$\epsilon_z, \epsilon_x, \epsilon_\theta$  : 入射波に対する各運動の位相差

このときの浮体からの発散波は、

$$\text{Heave} : Z_A \bar{A}_H e^{i(kx - \omega t - \epsilon_H)} \quad (3.7.3.4)$$

$$\text{Sway} : X_A \bar{A}_S e^{i(kx - \omega t - \epsilon_S)} \quad (3.7.3.5)$$

$$\text{Roll} : \phi_A \bar{A}_R \left( \frac{B}{2} \right) e^{i(k - \omega t - \epsilon_R)} \quad (3.7.3.6)$$

$\epsilon_H, \epsilon_S, \epsilon_R$  : 各運動と発散波の位相差

であり、ここで、Kochin 関数  $H^\pm(k)(= i e^{-i\epsilon_H} \cos \epsilon_H \mp e^{-i\epsilon_S} \sin \epsilon_S)$  を用いると入射波、反射波、透過波は、

$$\zeta_I = \bar{\zeta}_I e^{i(kx - \omega t)} \quad (3.7.3.7)$$

$$\begin{aligned} \zeta_R &= \bar{\zeta}_R e^{-i(kx + \omega t + \delta_R)} \\ &= \bar{\zeta}_I [i H^-(k) + \cos(\epsilon_z - \epsilon_H) e^{-i(\epsilon_z + \epsilon_H)} \\ &\quad - \cos(\epsilon_x - \epsilon_S) e^{-i(\epsilon_S + \epsilon_x + \pi)}] e^{-i(kx + \omega t)} \end{aligned} \quad (3.7.3.8)$$

$$\begin{aligned} \zeta_T &= \bar{\zeta}_T e^{i(kx - \omega t - \delta_T)} \\ &= \bar{\zeta}_I [1 + i H^+(k) + \cos(\epsilon_z - \epsilon_H) e^{-i(\epsilon_z - \epsilon_H)} \\ &\quad - \cos(\epsilon_x - \epsilon_S) e^{-i(\epsilon_S + \epsilon_x)}] e^{i(kx - \omega t)} \end{aligned} \quad (3.7.3.9)$$

と表わせる。<sup>6)</sup> ここで、

$$a_R = \frac{\bar{\zeta}_R e^{-i\delta_R}}{\bar{\zeta}_I}, \quad a_T = \frac{\bar{\zeta}_T e^{-i\delta_T}}{\bar{\zeta}_I}$$

とおくと、

$$\bar{a}_R = |a_R|, \quad \delta_R = \tan^{-1} \left[ \frac{I_m(a_R)}{R_e(a_R)} \right]$$

$$\bar{a}_T = |a_T|, \quad \delta_T = \tan^{-1} \left[ \frac{I_m(a_T)}{R_e(a_T)} \right]$$

ただし、

$\bar{a}_R, \bar{a}_T$  : 入射波に対する反射波、透過波の振幅比

$\delta_R, \delta_T$  : 入射波に対する反射波、透過波の位相差

である。

一方、透過波は岸壁により全反射されると仮定し、 $x = P$  での境界条件（水平方向の速度成分が 0 であること）を考慮すると、岸壁からの反射波  $\zeta_T^*$  は

$$\zeta_T^* = \bar{\zeta}_T e^{-i(kx - 2kp + \omega t + \delta_T)} \quad (3.7.3.10)$$

で与えられる。したがって、入射波と岸壁からの反射波の合成波  $\zeta$  は、

$$\begin{aligned} \zeta &= \zeta_I + \zeta_T^* = \bar{\zeta}_I \{ e^{i(kx - \omega t)} + \bar{a}_T e^{-i(kx - 2kp + \omega t + \delta_T)} \} \\ &= \bar{\zeta}_I \{ e^{-i\omega t} + \bar{a}_T e^{-i(\omega t + \delta_T - 2kp)} \} \\ &= \bar{\zeta}_I e^{-i\omega t} \{ 1 + \bar{a}_T e^{i(\delta_T - 2kp)} \} \end{aligned} \quad (3.7.3.11)$$

となる。振幅  $|\zeta|$  と位相差  $\arg(\zeta)$  は、

$$|\zeta| = |\bar{\zeta}_t (1 + \bar{a}_T e^{i(\delta_T - 2kp)})| \\ = \sqrt{(1 + \bar{a}_T \cos \chi)^2 + \bar{a}_T^2 \sin^2 \chi} \cdot \bar{\zeta}_t \quad (3.7.3.12)$$

$$\arg(\zeta) = \tan^{-1} \left( \frac{\bar{a}_T \sin \chi}{1 + \bar{a}_T \cos \chi} \right) \quad (3.7.3.13)$$

ただし、 $\chi = \delta_T - 2kp$

で得られる。また、(3.7.3.12)式より入射波に対する振幅比は、

$$\pi = |\zeta| / \bar{\zeta}_t = \sqrt{(1 + \bar{a}_T \cos \chi)^2 + \bar{a}_T^2 \sin^2 \chi} \quad (3.7.3.14)$$

である。

ここでもし、運動が波振幅に対して線形な系であるとし、付加質量、造波減衰力に岸壁影響が無いものと仮定すれば、合成波  $\zeta$  に対する周波数応答振幅は、入射波  $\zeta_t$  のそれに対して  $\pi$  倍されるものと考えられる。

以上のような仮定のもとで、入射波の周波数ベースに倍率曲線  $\pi$  を描き、実験から得られた岸壁のある場合の周波数応答振幅の岸壁のない場合のそれに対する倍率と比較したものを、図 3.7.3.7～3.7.3.9 に波高別に示した。

これらの図によると、理論値、実験値共に倍率が 2.0 を越えることはなく、概略値ながら前述の理論による値がほぼ実験値の上限を示している。すなわち、理論値は設計上の安全サイドであり、簡便な方法ながら岸壁影響のある場合を説明できるように思う。

又、波高の変化による影響は、係留復原力の非線形特性が余り影響しない高周波数領域ではほとんどみられず、もっぱら低周波数領域にあらわれている。そして、波高の増大とともに倍率  $\pi$  の理論曲線は、低周波数領域で同様の形状を示しながら、しだいにピークが小さくなり高周波数側へ移動していく事が見られる。これは、(1)の項でも同様の現象が fender No. 2 にあらわれている事とも一致している。

#### (4) 不規則波中の動揺

fender No. 2 を用いて、水深を 20 cm、設定有義波高を 1 cm, 2 cm, 3 cm、設定平均波周期を 0.6, 0.8, 1.0, 1.2 sec で不規則波中の動揺実験を行った。計測項目は、浮体動揺 (sway, roll), 入射波、及び係留力であ

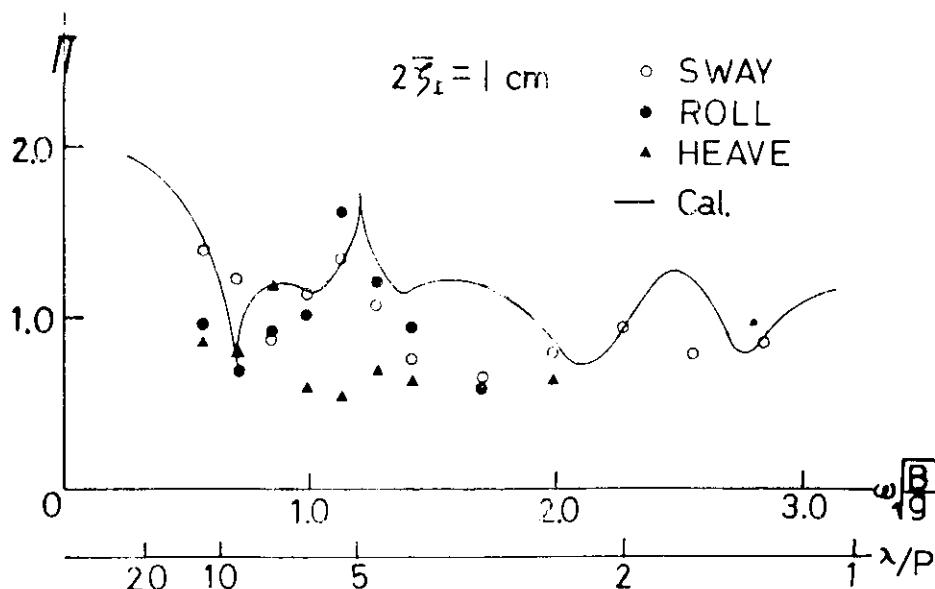


図 3.7.3.7 Motion Amplitude ratio in the vicinity of the berth  
(wave height = 1.0 cm)

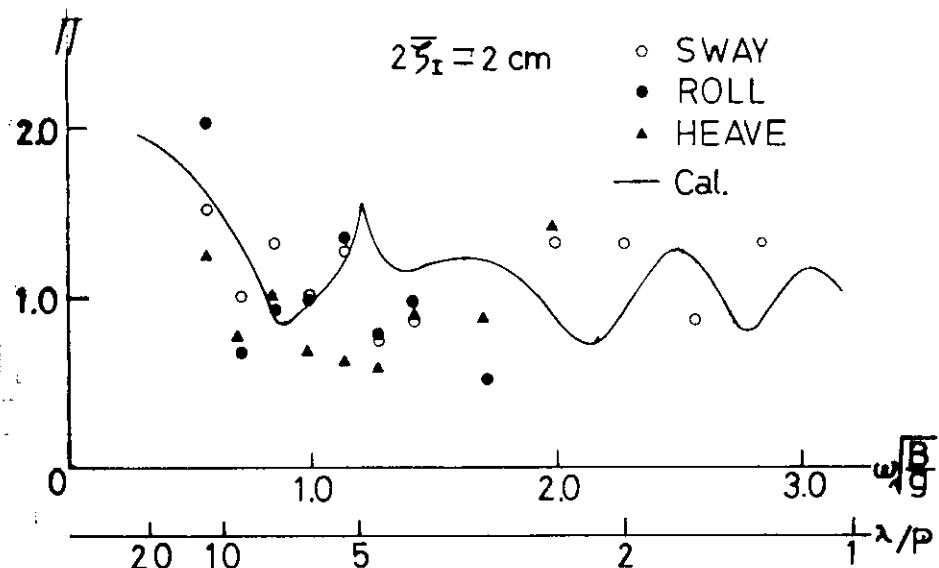


図3.7.3.8 Motion Amplitude ratio in the vicinity of the berth  
(wave height = 2.0cm)

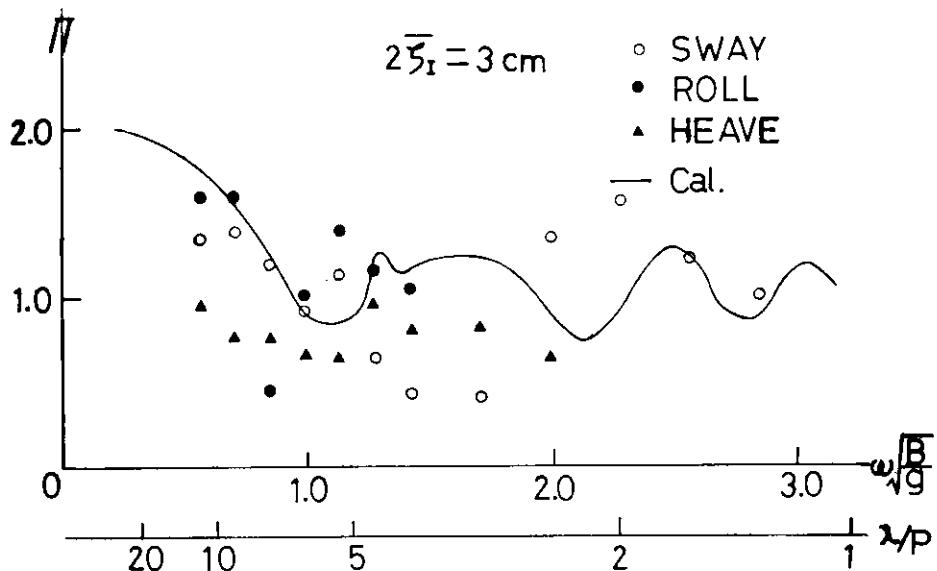


図3.7.3.9 Motion Amplitude ratio in the vicinity of the berth  
(wave height = 3.0cm)

る。これらの電磁オシログラフの記録を zero-up-cross 法により統計処理して、各有義値を求めた。その結果を表 3.7.3.1 に示す。なお、実験に使用した波スペクトルは、光易一 Bretschneider のスペクトルを目標に作成した。

### 7.3.2 結論

波浪中動揺実験では、係留復原力特性、定常外力、岸壁からの反射波の影響、不規則波等についてドルフィン係留方式に関する系統的な水槽模型実験を行ない、係留浮体の波浪中動揺及び係留力の周波数振幅応答を求めた。そして、これらに対応する等価線形近似計算法による理論解析を行ない、実験結果とのほぼ満足できる一致を得ると共に、ドルフィン係留時の係留復原力特性、定常外力及び岸壁からの反射波の影響が明らかになった。またシミュレーション計算から求めた応答振幅と等価線形近似計算法による計算値との比較を行なったところ、同調

表3.7.3.1 Significant values of responses in irregular waves

$\bar{T}$ (sec)	$H_{1/3}$ (mm)	$\frac{Z_{P1}}{H_{1/3}}$	$\frac{Z_{P2}}{H_{1/3}}$ ( $\times 10^4$ rad/mm)	$\frac{Z_{P3}}{K H_{1/3}}$	$\frac{Z_{R1}}{f g V^{1/3} H_{1/3}}$
0.6	19.8	0.244	0.00	0.00	0.152
	25.2	0.205	5.17	0.045	0.124
	28.3	0.222	3.36	0.029	0.156
0.8	35.3	0.267	33.5	0.474	0.184
	29.5	0.214	6.21	0.054	0.135
	32.0	0.248	8.95	0.126	0.133
1.0	17.2	0.486	19.3	0.372	0.236
	26.2	0.450	22.5	0.433	0.184
	34.6	0.241	23.7	0.458	0.173
1.2	18.8	0.783	41.2	0.993	0.250
	28.2	0.823	36.1	0.875	0.272
	37.4	0.941	33.2	0.804	0.338

周波数のある低周波数領域で両者の間に若干の差異があることなどもわかった。

## 参考文献

- 井上義行：ドルフィン係留の係留力に関する研究，第4回海洋工学シンポジウム，日本造船学会（1979.2）
- 井上義行，山岸直人：ドルフィン係留時の浮体運動と流体力に関する研究，石川島播磨技報，Vol.19，No.6（1979.11）
- 珠久正憲ほか：浅海浮上式備蓄タンクの係留力に関する研究—非線形数学モデルによるシミュレーション，日本造船学会論文集，第146号（1979.2）
- 日本造船研究協会：第179研究部会，箱型海洋構造物の運動特性及び係留システムに関する研究報告書（1981.3）
- 野尻信弘，村山敬一：規則波中の2次元浮体に働く漂流力に関する研究，西部造船会会報，第51号（1976）
- 鳥井正志，山本規雄：ドルフィン係留された箱型海洋構造物の挙動と係留力に関する研究，横浜国立大学工学部船舶・海洋工学科卒業論文（1981.3）

## 7.4 地震の影響

### 7.4.1 地震時応答実験

地震時応答実験で用いた係留復原力特性は、図3.7.2.7に示したfender No.3で、線形復原力特性のものである。実験は図3.7.4.1に示す要領で行なった。同図において、供試模型はドルフィンビームのガタなどによる無駄な振動を減らす為に、coil springで両側から強く押え付けられている。振動フレームは、油圧アクチュエータで駆動され、その振動はロードセル取り付けビームと一体であり、ロードセルを介してドルフィンビームに、そして、fenderを介して浮体に伝わる。すなわち、海底地盤の地震動が振動フレームとロードセル取付ビームの振動で置き換えられ、fenderに比べて非常に剛性の高いドルフィンをドルフィンビームで置き換えてい るわけである。

このような実験装置によって振動フレームを規則振動( $a e^{i\omega t}$ )させた場合の浮体の振動及び係留力を測定し

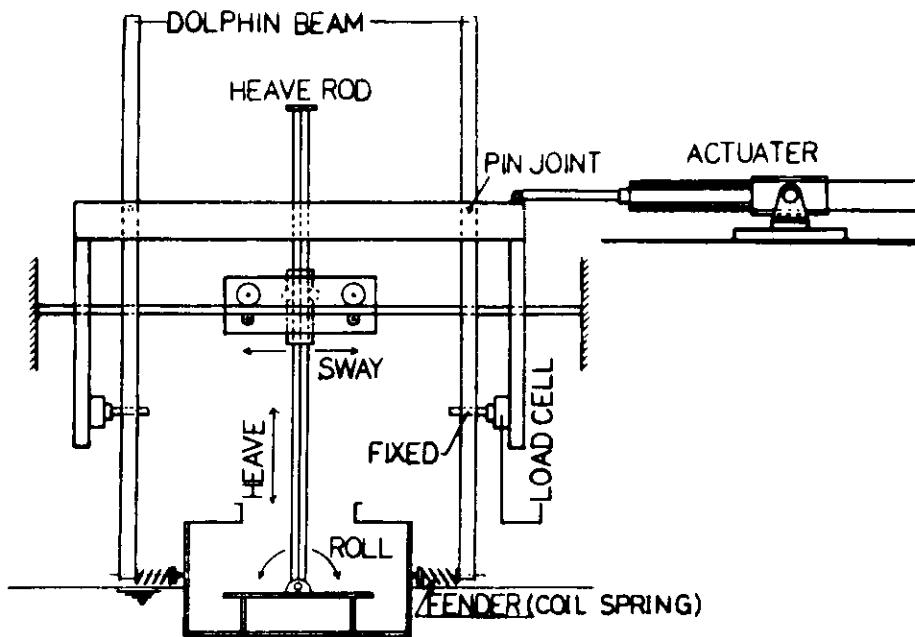


図3.7.4.1 Model support arrangement for simulated earthquake motion

た。浮体の振動は、波浪中動揺計測装置を用いている為に、高周波数の地震動に対しては、浮体の振動がほとんど計測されなかった。また、ロードセルによる係留力の測定の際には、浮体模型を取り付けていない状態で、フレームを振動させたときの値を差し引いたものを係留力として扱った。これはドルフィンビームなどの慣性力その他の影響を取り除く為である。

なお、実験は、水深を20cmとし、振動フレームの振幅( $a$ )を、1.25, 2.5, 5.0, 及び 10.0 cmに変えて、0.5, 1.0, 2.0, 4.0, 6.0, 8.0, 10.0 Hz の7周波数について行なった。

さらに、実際の地震波の記録(加速度表示)から、上記と同様の実験要領で実際の地震動に対するシミュレーション実験を行なった。

一般に微小地震の測定には変位計が用いられるが、耐震設計にあたって必要な強震時の地表面変位記録は乏しい。また、強震時の記録はもっぱら加速度計型の地震計で測定されているので、変位の概略値は知り得ても、正確な値はわからない。<sup>1)</sup>そこで、地震波の加速度の数値を2回積分することで、地震の変位の時刻歴を求めてみた。数値表示された実際の地震波の記録はその時間間隔がまばらなものが多いので、数値補間を行い、台形則を用いて数値積分を行なった。数値積分による誤差が考えられる為、速度、変位共に積分の最終値は0になるよう修正をほどこした。

今回使用した地震記録は、文献<sup>1)</sup>に載せられていた明石地震(1963)の記録と Imperial Valley 地震(1940)の El Centro における記録の2種類であり、最大変位、平均周波数(Zero-up-cross 法で井上らが算出したもの)をそれぞれ 1.734 cm ~ 0.169 cm, 15.75 Hz ~ 1.97 Hz (AKASHI), 1.5 cm ~ 0.156 cm, 41.5 Hz ~ 5.19 Hz (El Centro) と変えて実験を行なった。表3.7.4.1に実験状態の一覧表を示す。

#### 7.4.2 結果および考察

シミュレーション計算から求めた係留力の振幅( $R$ )は振動フレームの加速度振幅( $\omega^2 a$ )と浮体の空中質量( $M$ )の積で割って無次元化し、無次元周波数  $\omega \sqrt{B/g}$  ベースに表わした。その結果を図3.7.4.2に示す。

図3.7.4.2で、 $R/\omega^2 a M = 1.0$  は地震荷重の推定法のひとつである震度法による値に相当する。ドルフィン係留方式での sway の固有周波数が地震動の卓越周波数に比べて十分小さければ、地震動の係留力は非常に小さ

表3.7.4.1 Experimental conditions in case of earthquake

FENDER NO.	FENDER TYPE	WATER DEPTH (cm)	EARTHQUAKE TYPE	MAEN FREQUENCY (Hz)	MAXIMUM DISPLACEMENT (cm)
FENDER NO. 3	LINEAR	20	SINUSOIDAL	0.5	
				1.0	
				2.0	1.25
				4.0	2.5
				6.0	5.0
					10.0
			AKASHI	15.75	1.734
				7.88	0.859
				3.94	0.446
				1.97	0.334
			EL CENTRO	41.5	0.163
				20.75	1.50
				10.32	0.737
				5.19	0.381
					0.313
					0.156

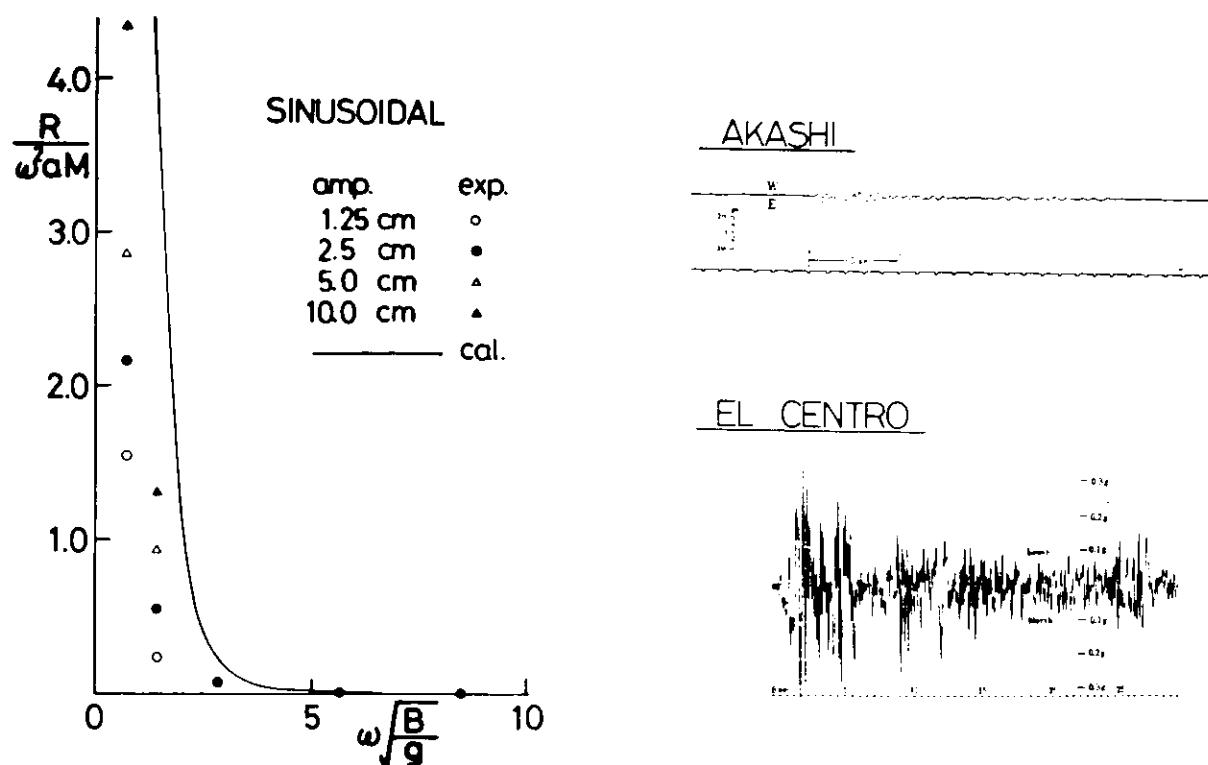


図3.7.4.2 Reaction force of the model moored with linear type fenders in case of sinusoidal earthquake motion

くなることが認められる。同図によれば、シミュレーション計算の結果と実験結果はほぼ一致しており、計算の有効性が認められる。

図3.7.4.3 Seismic motion records of AKASHI and El Centro

さらに 7.4.1 で述べたように、同じ係留状態で実際の地震動に対するシミュレーション実験を行なった。図 3.7.4.3 に実験に用いた地震の加速度変動を示す。実験では、この加速度表示の地震波形を時間で 2 回積分したものを変位記録と見做してアクチュエータの駆動変位とした。実験結果は、最大係留力を地震動の最大加速度を用いて無次元化し、平均周波数ベースに図 3.7.4.4、図 3.7.4.5 に示した。参考のために、地震応答実験での記録の一例を図 3.7.4.6、図 3.7.4.7 に示す。図 3.7.4.6 は scale  $1/25$  の model が明石地震の 1.25 倍の大きさの地震動を受けた場合の地震波形（変位）と、それに対応する sway, roll, 係留力（上流側、下流側）の応答記録である。図 3.7.4.7 は同様に、El Centro 地震の 0.25 倍の地震動を受けた場合である。どちらも sway は地震動の長周期成分に対する応答はみられるが、地震加速度としては大きい高周波数成分に対しては sway の固有周波数を大きくはずれているために、sway の応答はほとんど現われていない。ところで、このように係留浮体の応答として重要な長周期の地震変位は、今回行なったような加速度の時間積分の値では誤差が大きくて確かに欠けており、現実には、応答としてあまり問題にならない加速度の大きい高周波数領域の記録が豊富にあるというシレンマに落ち入る。したがって、耐震設計の立場からは信頼できる強震時の変位記録が望まれる。

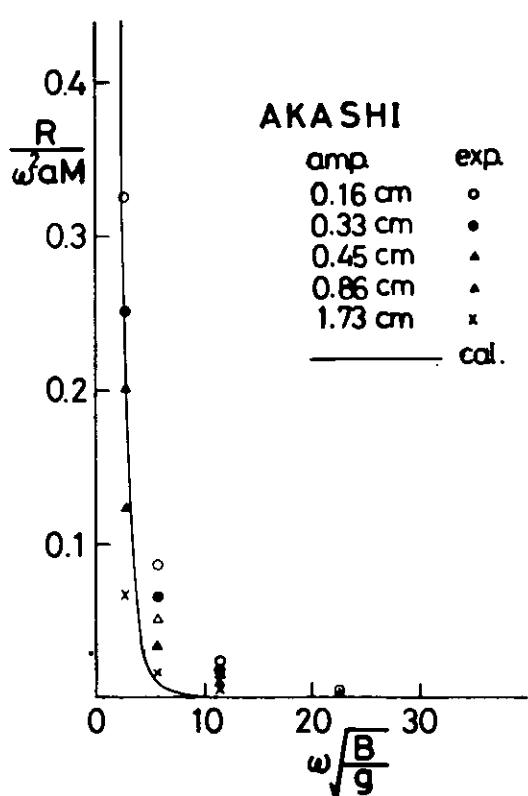


図 3.7.4.4 Reaction force of the model moored with linear fenders in case of AKASHI type earthquake

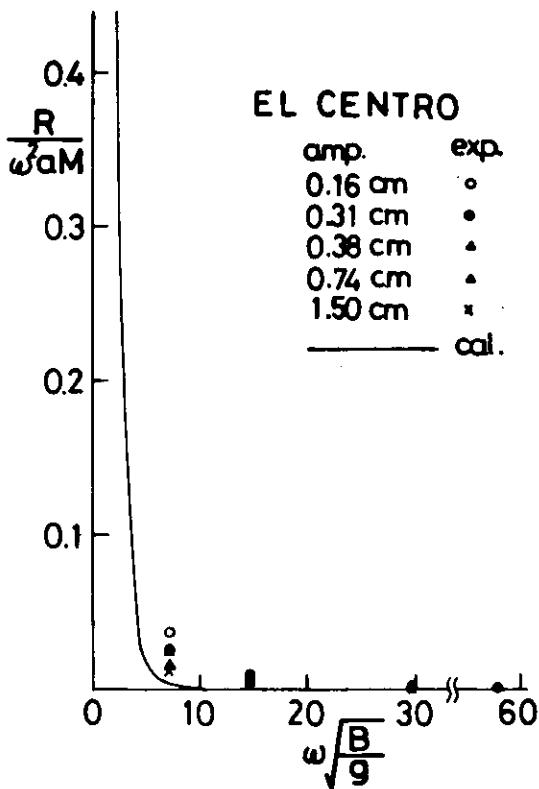


図 3.7.4.5 Reaction force of the model moored with linear type fenders in case of El Centro type earthquake

### 7.4.3 結論

従来ほとんど行なわれていなかったドルフィン係留方式の地震時における応答に関する水槽実験とシミュレーション計算を行なった。その結果、今回用いたような数学モデルで地震応答のシミュレーションが可能であることがわかった。また、地震時においては、SWAY の固有周波数を十分に低周波数側へ避けた係留設計を行っておけば、地震時の係留力を非常に小さくできることが可能であることを推測できた。同時に、係留浮体の地震応答においては、加速度よりも長周期の変位が重要であることも指摘された。

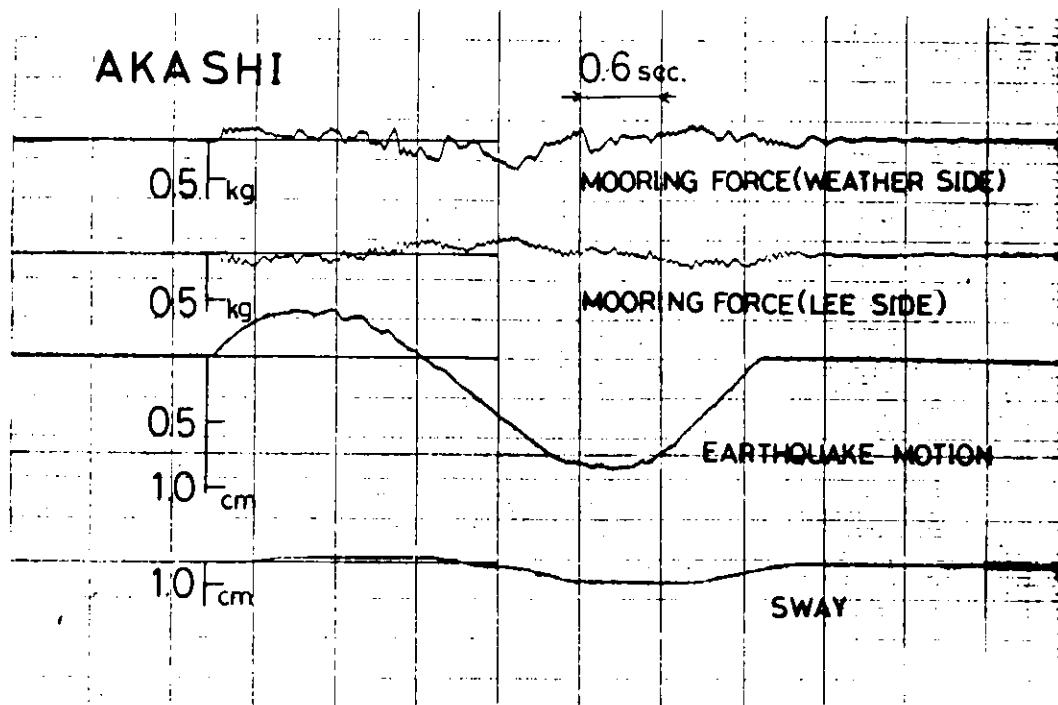


図3.7.4.6 Experimental result of  $1/25$  scale model in case of 1.25 times as large as AKASHI earthquake

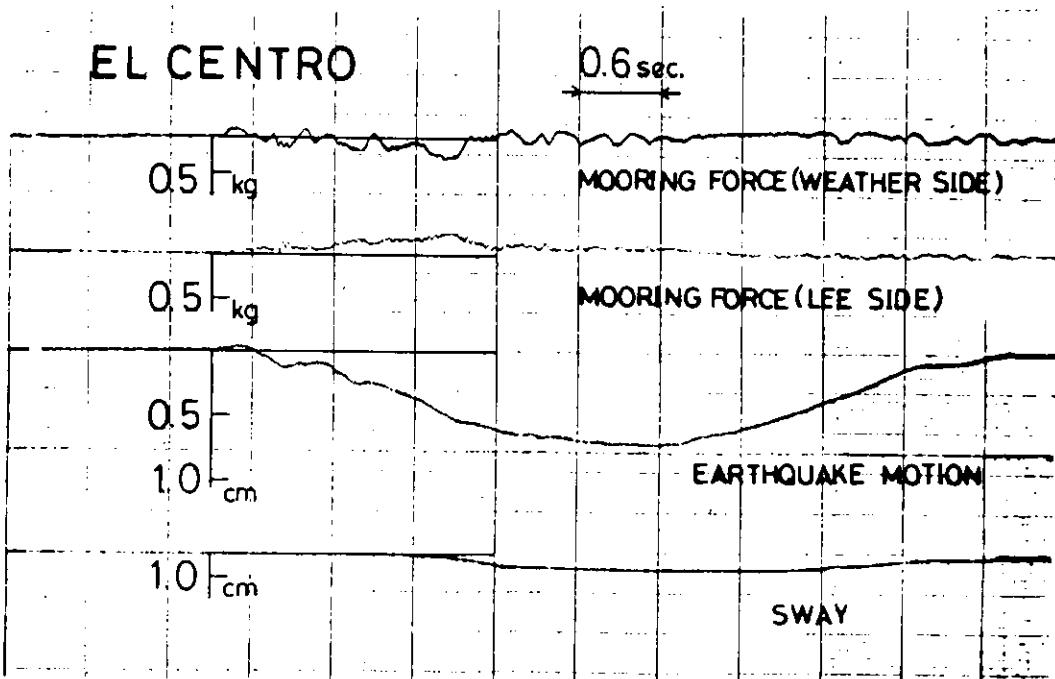


図3.7.4.7 Experimental result of  $1/25$  scale model in case of 0.25 times as large as El Centro earthquake

## 参考文献

- 1) 土木学会 本州四国連絡橋技術調査委員会：本州四国連絡橋技術調査報告書，付属資料2，耐震設計指針（1967），同解説および耐震設計詳説（昭和42年7月）
- 2) 鳥井正志，山本規雄：ドルフィン係留された箱型海洋構造物の挙動と係留力に関する研究，横浜国立大学工学部船舶・海洋工学科卒業論文（1981.3）

## 7.5 適用範囲

ドルフィン・ダンパー係留方式は、海上空港や洋上石油備蓄システム等の大型浮遊式構造物を浅海域において、係留する方式として有望とされている。しかしながら、これまでの研究において、この係留方式は、比較的静穏な海域における係留に適用できる方式であり、環境外力条件が厳しくなると、フェンダーの数が極端に増加し、経済的に非現実的なものとなることが指摘されている。そこで、本研究部会においても、検討対象の箱型海洋構造物に対して、環境外力条件、フェンダー個数を変更したシリーズ計算を実施して、ドルフィン・ダンパー係留方式の適用限界の検討を行うとともに、代表的数例についてシミュレーション計算（試設計）を行った。

### 7.5.1 シリーズ計算の計算条件

シリーズ計算は、本章7.1.1において説明したDesign Spectrum Methodを用いて行った。計算条件は、次のように設定した。

#### (1) 対象浮体、係留要目

A-type (L=100m) : 定反力型フェンダー C 2000 H

B-type (L=200m) : 定反力型フェンダー C 3000 H

浮体の主要目を表3.7.5.1に、係留配置図を図3.7.5.1に示す。フェンダーは、線形バネに置換するが、そのバネ定数は、フェンダーの微小歪におけるバネ定数とすることとし、

C 2000 H : 700 ton/m

C 3000 H : 1200 ton/m

と設定した。

計算は、このフェンダーの個数を変更して行った。図3.7.5.2、図3.7.5.3には、定反力型フェンダーC 2000 H、C 3000 Hの個数を変更した場合の特性曲線を示す。

#### (2) 環境外力条件

##### イ) 水深

A-type : 12m, 14m, 20m, 50m (H/d = 1.2, 1.4, 2.0, 5.0)

B-type : 40m, 100m (H/d = 2.0, 5.0)

##### ロ) 波浪

波スペクトル : ISSCスペクトル

有義波高 : 1m ~ 5m

平均波周期 : 6 sec, 8 sec, 10 sec

波方向 : 90° (真横波)

##### ハ) 風

最大風速 : 25 m/s, 50 m/s

##### ニ) 潮流

流速 : 1.5 kn, 3.0 kn

## 7.5.2 計算結果

### (1) 定常外力

ドルフィンに作用する静的風荷重を風向ベースに図3.7.5.4および図3.7.5.5に示す。風抗力係数に関しては、本研究部会において実施した潮流力に関する実験結果をそのまま適用した。No.1 ドルフィンに作用する静的風荷重は風向が110°付近で最大となる。

潮流力に対する同様の計算結果を図3.7.5.6および図3.7.5.7に示す。本計算の場合、載荷状態が満載状態であり、水面上の風圧面積が小さいこと、潮流速度が3 knotと速いこともあって、静的風荷重と潮流力が同程度の値となっている。

不規則波中における波漂流力は、波漂流力係数と波スペクトルを用いて計算できる。平均波周期6 sec, 8 sec, 10 secの不規則波中における波漂流力を、有義波高ベースに、図3.7.5.8および図3.7.5.9に示す。

### (2) 浮体の運動

ドルフィン位置における浮体の左右方向運動の標準偏差をフェンダーの個数をパラメータとして図3.7.5.10および図3.7.5.11に示す。これらの結果を見ると、浮体の運動に対するフェンダーの影響の様子がよく把握される。

平均波周期10 secの不規則波中におけるドルフィン位置での浮体の左右方向運動(フェンダーの変形量)の最大値(1/1000最大期待値)を有義波高ベースに図3.7.5.12および図3.7.5.13に示す。A-typeにおいてはフェンダーの個数が1個の場合、B-typeにおいてはフェンダーの個数が5個の場合が最も運動が大きくなっている。このような図は、水深、平均波周期の組み合せに対してそれぞれ得られるので、浮体の設置海域の条件によって最適なフェンダーの個数が選定できる。

## 7.5.3 適用範囲の検討

以上の計算結果をベースに、ドルフィン・ダンパー係留方式の適用限界波高の検討を行う。定常外力および浮体の運動によるフェンダーの全重量は有義波高ベースに図3.7.5.14および図3.7.5.15に示すように整理できる。ここで、フェンダーの最大許容重量を35%(洋上石油储蔵システムに対する安全基準<sup>1)</sup>の値)と仮定すると、フェンダーの個数と係留可能な限界波高との関係が求まる。すなわち、A-typeの場合、フェンダーの個数を増やすにしたがって限界波高は高くなる。フェンダー1個の場合は、限界の有義波高は0.35 mであるが、フェンダー3個の場合は0.9 mとなっている。一方、B-typeの場合、フェンダー1個のとき、有義波高が1.5 mの波浪条件まで係留可能であるのに対し、フェンダー3個の場合は逆に限界波高は1.05 mになっている。このようにして先に示した計算条件について係留可能な限界波高を求めたが、それを整理して以下に示す。

限界波高を平均波周期ベースに整理すると図3.7.5.16のようになる全般的に波周期が長くなると、限界波高は低くなる傾向にある。このような傾向はフェンダーの個数が少ない場合はほど顕著である。フェンダーの個数が多くなると、しだいに逆の傾向を示すようになるが、その場合の波周期に対する限界波高の変化は小さい。

限界波高を水深ベースに整理して図3.7.5.17に示す。全般的に水深が浅いほど限界波高は低くなる傾向にあるが、その変化の度合は非常に小さい。

風速および潮流速を変更した場合の限界波高の変化を図3.7.5.18および図3.7.5.19に示す。当然のことながら、風速あるいは潮流速が小さい方が限界波高は大きい。また、この傾向は、フェンダーの個数が少ないほど顕著に現れている。

## 7.5.4 シミュレーション計算

前項の適用範囲の検討結果に基づき、代表的な数例について7.1において説明した計算法によりシミュレーション計算(試設計)を実施した。

浮体の主要目、係留配置は前項のシリーズ計算の場合と全く同様であるが、フェンダー前面と浮体の舷側の間には0.5mのクリアランスを設けている。また、外力の方向はすべて真横から作用するとしている。シミュレーション計算のタイムヒストリーを図3.7.5.20～図3.7.5.31に示す。各図において上から順に、波、Sway, Heave, Roll、フェンダー位置の変位およびフェンダー反力のタイムヒストリーを示している。シミュレーション計算の計算条件および計算結果をまとめて表3.7.5.2に示す。

浮体の運動については、Heave, SwayおよびRoll振幅の有義値 $z(\frac{1}{3})$ ,  $y(\frac{1}{3})$ および $\phi(\frac{1}{3})$ を示した。またフェンダーの変形量に関しては平均値 $Y_0$ 、変動の有義値 $Y(\frac{1}{3})$ 、変動の標準偏差 $\sigma$ を示した。平均値 $Y_0$ はフェンダー歪の定常成分（フェンダーの作動点の移動量）である。

変動分に関しては、前述のように変動の極値分布がRayleigh分布に従う場合の標準偏差と $1/1000$ 最大期待値との関係、すなわち、 $Y_{(1000)} = 3.87\sigma$ を用いて、フェンダーの変形量の変動分の最大値とした。したがってフェンダーの最大変形量は $Y_0 + Y_{(1000)}$ として係留可否の判定をすることとした。

洋上石油備蓄システムに対する安全基準<sup>1)</sup>では、定反力型ゴムフェンダーによる係留可否の判定基準として、定常外力による静的歪量を10%以下、変動分も含めた最大歪量を35%以下と規定している。したがって、ここでもその基準に準じて係留可否の判定を行うこととした。

設計の手順として、まず、定常外力による静的歪量（Yos）が10%以下という条件を満足するフェンダーサイズを選定し、それに対してシミュレーション計算を実施して、変動分も含めたフェンダーの最大歪量が35%以下という条件で係留可否の判定を行う。

フェンダーの静的歪量および動的最大歪量を最右欄に示す。静的歪量はすべて基準値以下となっているが、動的最大歪量は基準値を越える場合があり、その場合はフェンダーサイズを変更して再度シミュレーション計算を行い、係留可否を判定するということをくり返してフェンダーサイズを決定している。

A-typeの場合、波周期が6sec程度の短い領域においてはフェンダーサイズがC2000Hで係留可能であるが、波周期が10secになるとC3000Hのフェンダーが必要となる。B-typeの場合は、いずれもフェンダーサイズC3000Hで係留可能となっている。

このシミュレーション計算結果において、平均値 $Y_0$ （フェンダーの作動点の移動量）は、定常外力による静的フェンダ歪Yosより2～3割程度大きくなっている。これはフェンダー特性の非線形性やヒステリシス等を考慮した動的影響によるものであり、線形理論に基づくDesign spectrum methodなどでは考慮できない量である。このことからも、この種の係留検討に際しては、シミュレーション計算による検討が重要であることがうかがわれる。

## 参考文献

- 1) 日本港湾協会：“海上貯油基地に係る港湾の施設の技術上の基準・同解説” 昭和55年9月

表3.7.5.1 浮体要目

		A - type	B - type
Length	L	100.0 <sup>m</sup>	200.0 <sup>m</sup>
Breadth	B	50.0 <sup>m</sup>	100.0 <sup>m</sup>
Depth	D	20.0 <sup>m</sup>	30.0 <sup>m</sup>
Draft	d	10.0 <sup>m</sup>	20.0 <sup>m</sup>
Displacement	$\Delta$	51250 ton	410000 ton
Center of gravity	KG	10.0 <sup>m</sup>	20.0 <sup>m</sup>
Metacentric height	$GM_T$	15.83 <sup>m</sup>	31.67 <sup>m</sup>
	$GM_L$	78.33 <sup>m</sup>	156.67 <sup>m</sup>
Gyroradius	$K_{xx}$	15.55 <sup>m</sup>	30.55 <sup>m</sup>
	$K_{yy}$	29.44 <sup>m</sup>	58.59 <sup>m</sup>
	$K_{zz}$	32.28 <sup>m</sup>	64.55 <sup>m</sup>

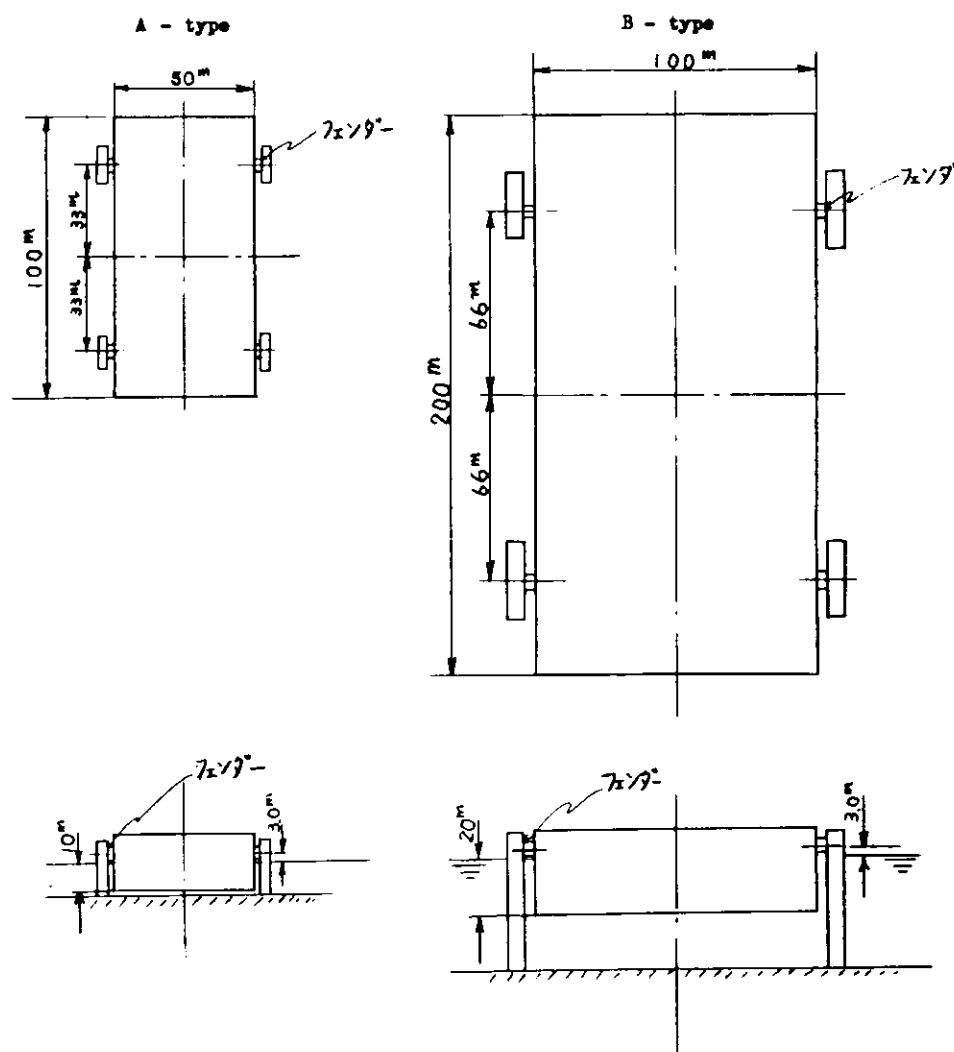


図3.7.5.1 係留配置

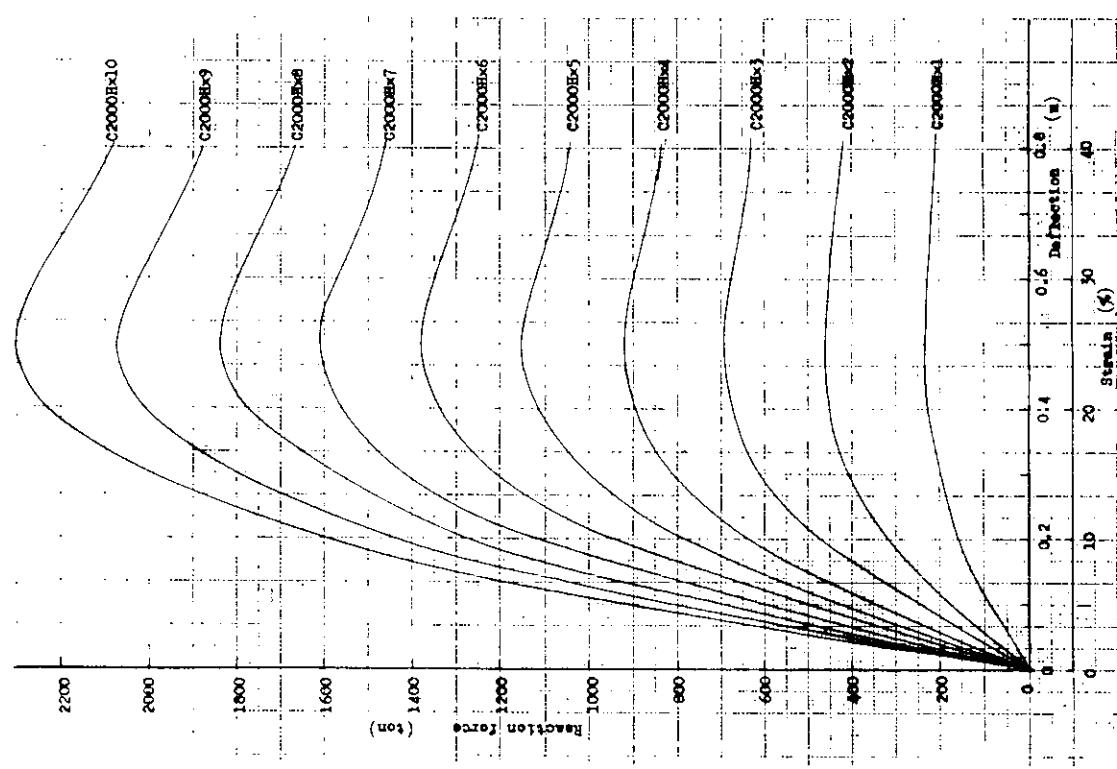


図 3.7.5.2 ファンダム特性 (C 2000 H)

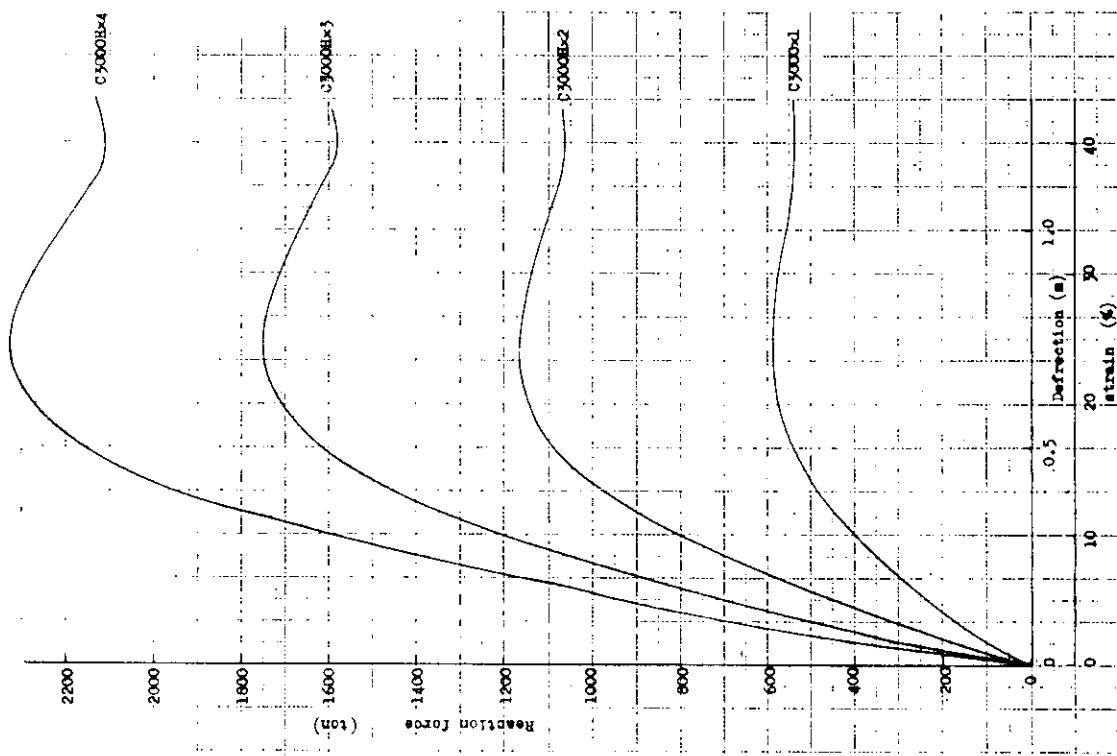


図 3.7.5.3 ファンダム特性 (C 3000 H)

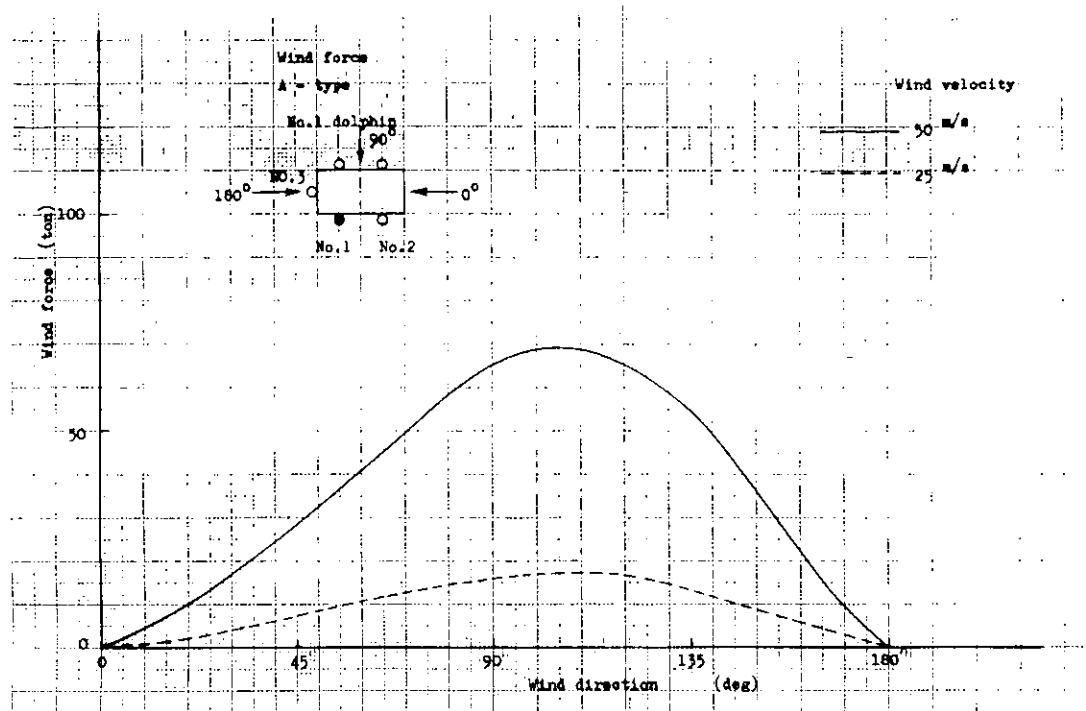


図3.7.5.4 ドルフィンに作用する風荷重（A-type）

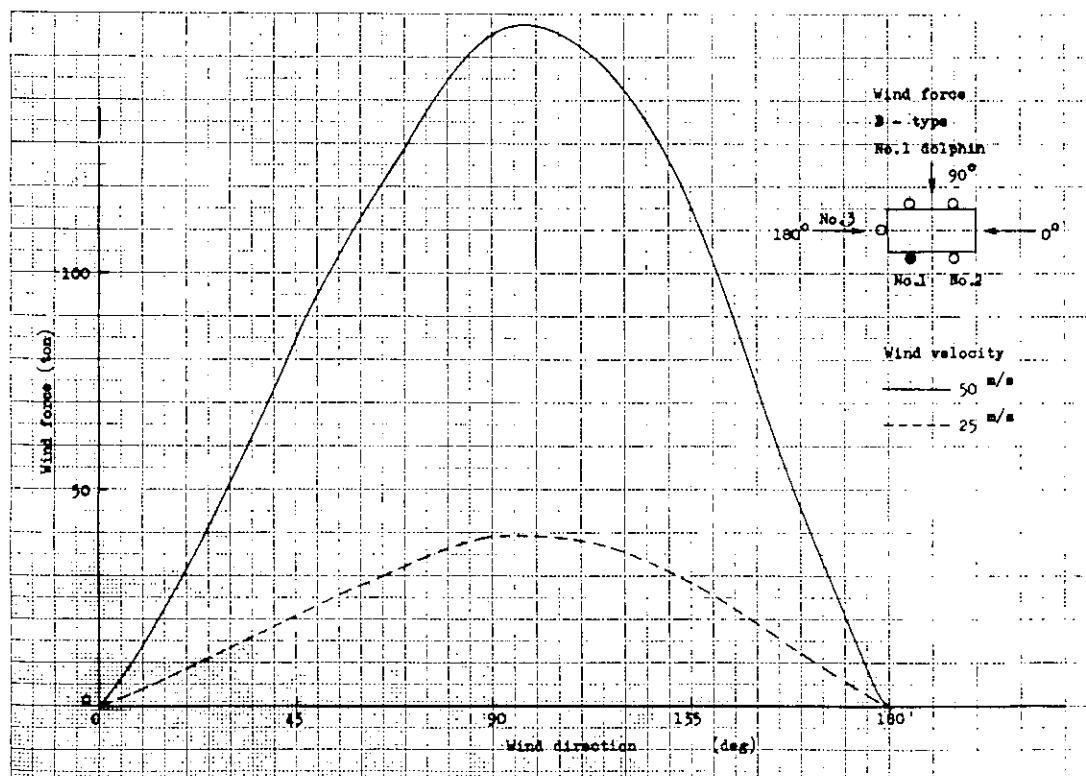


図3.7.5.5 ドルフィンに作用する風荷重（B-type）

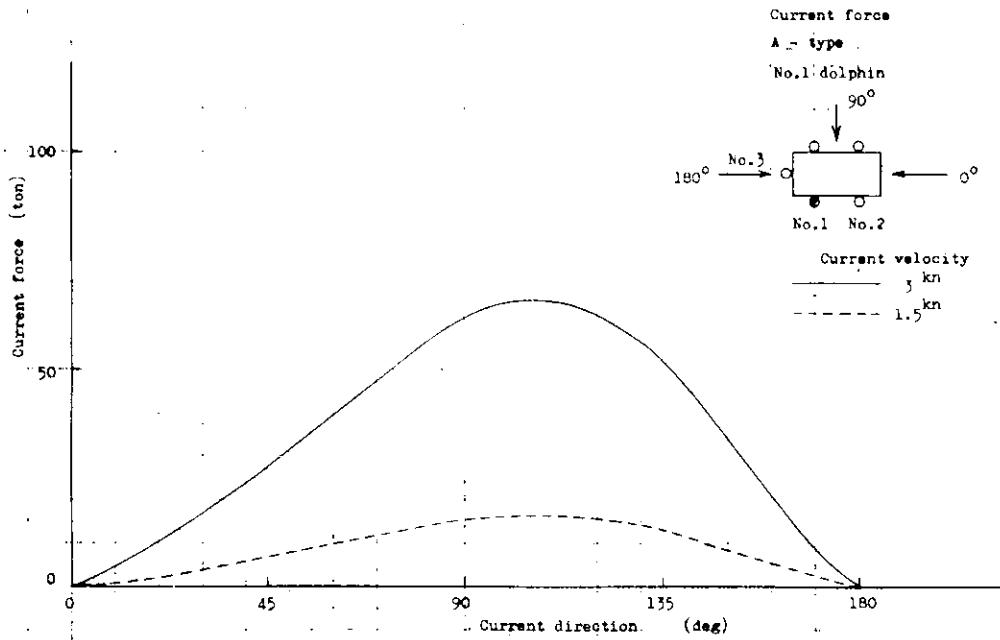


図 3.7.5.6 ドルフィンに作用する潮流力 (A-type)

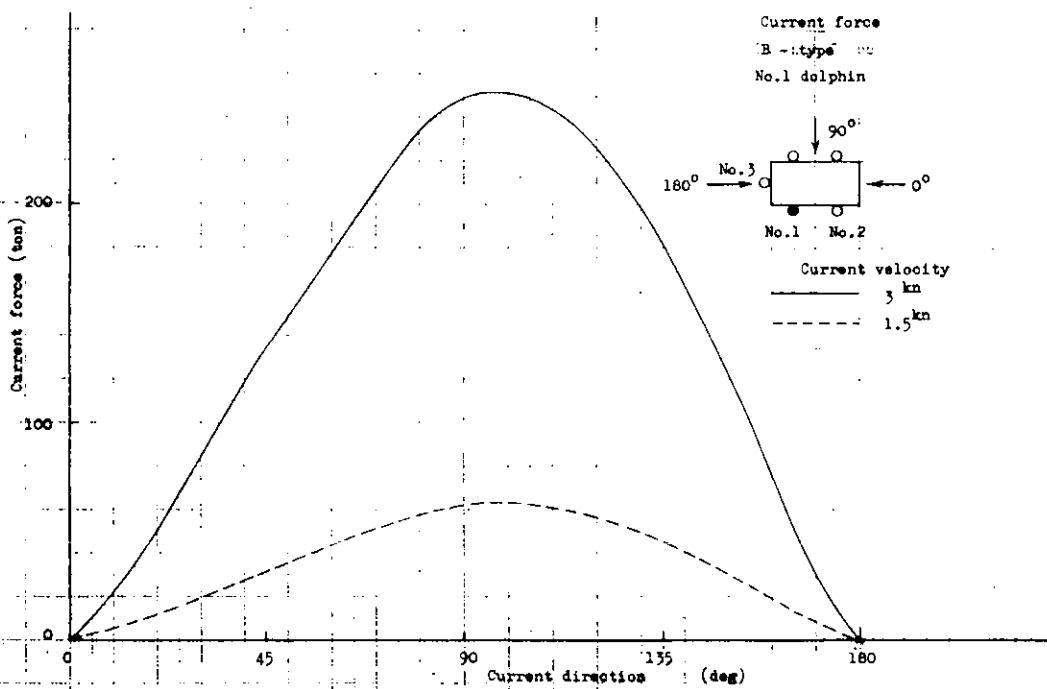


図 3.7.5.7 ドルフィンに作用する潮流力 (B-type)

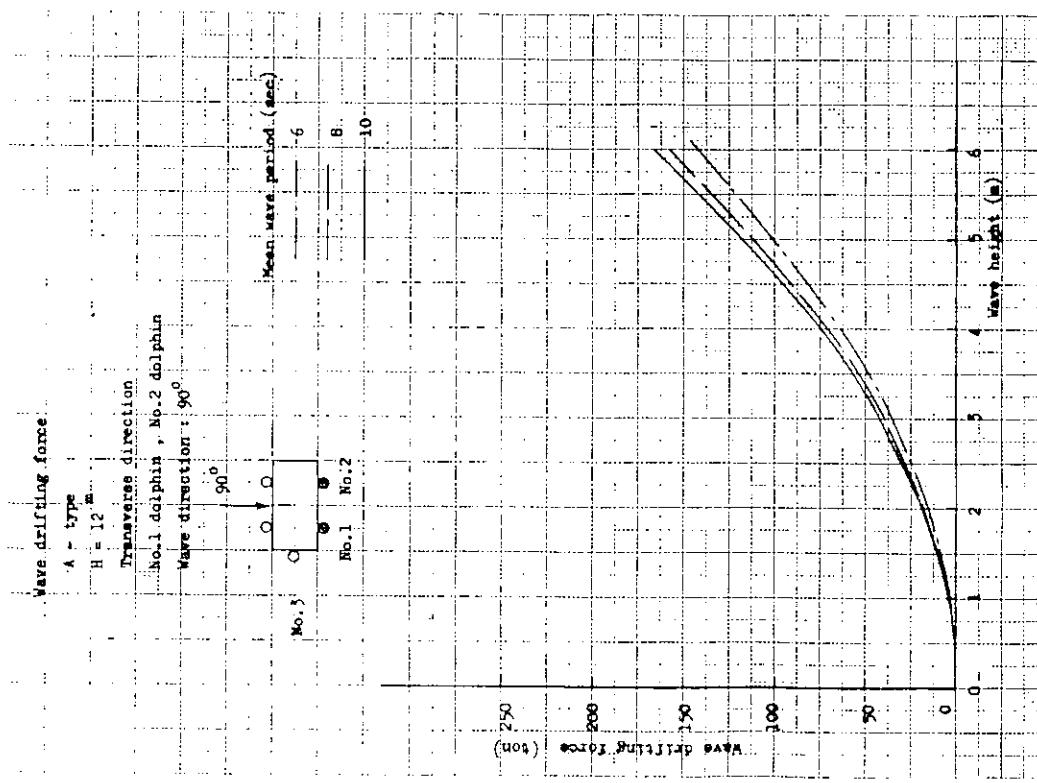


図 3.7.5.8 ドルフィンに作用する波漂流力 (A-type)

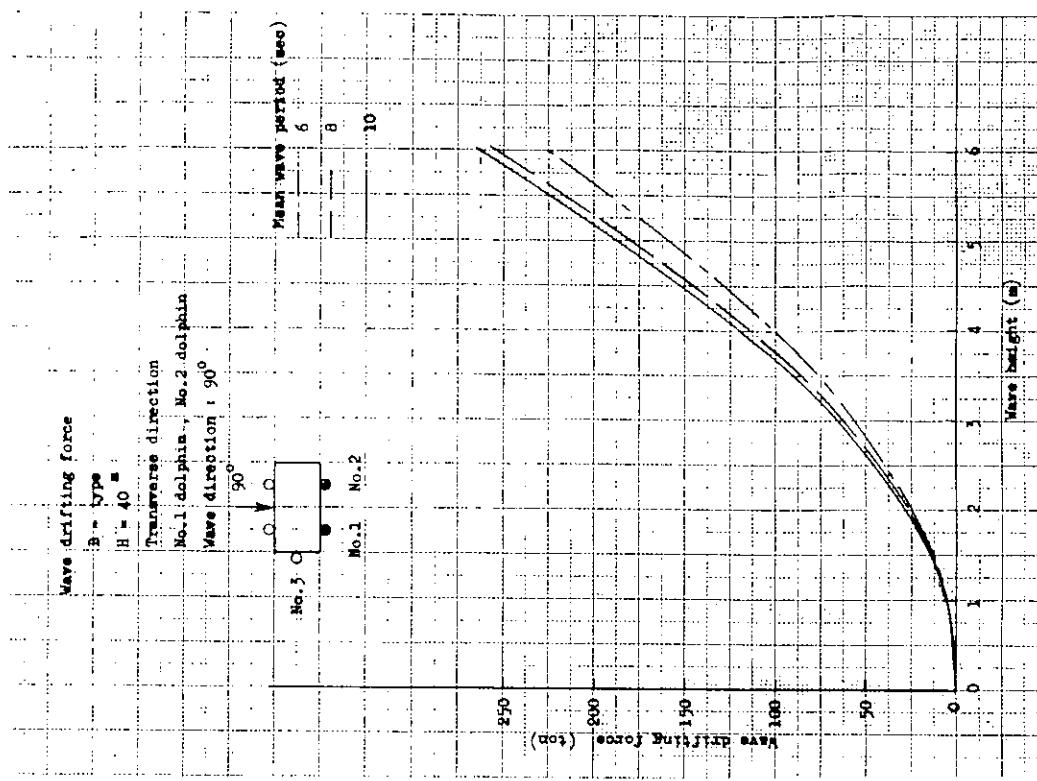


図 3.7.5.9 ドルフィンに作用する波漂流力 (B-type)

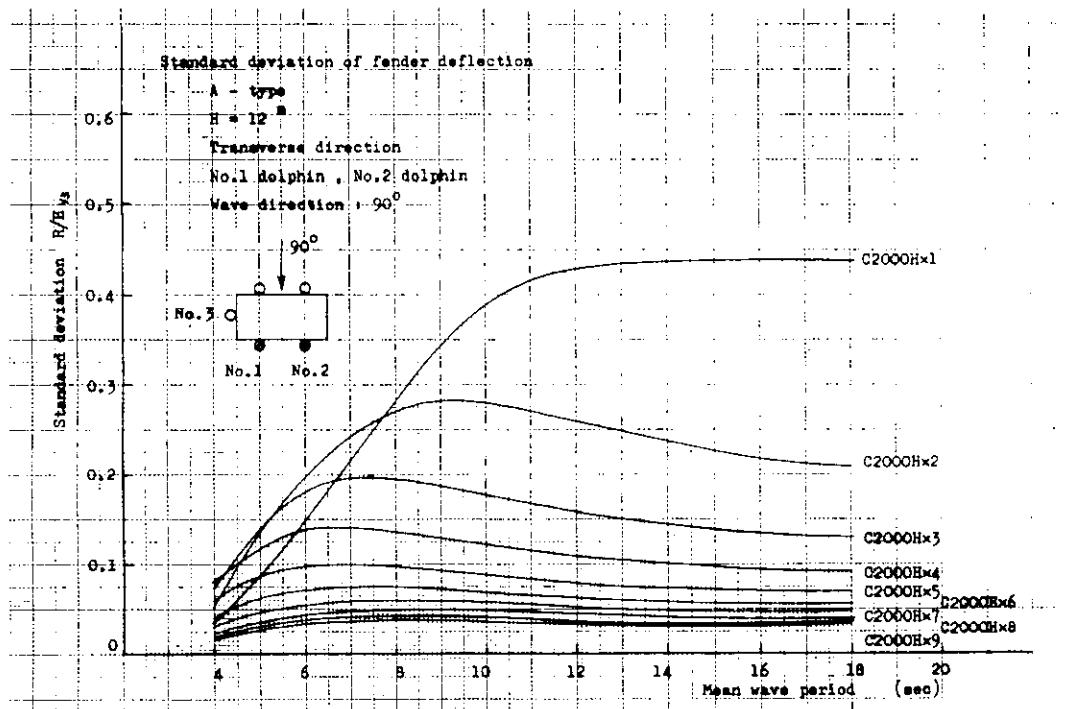


図 3.7.5.10 不規則波中における係留点の運動 (A - type)

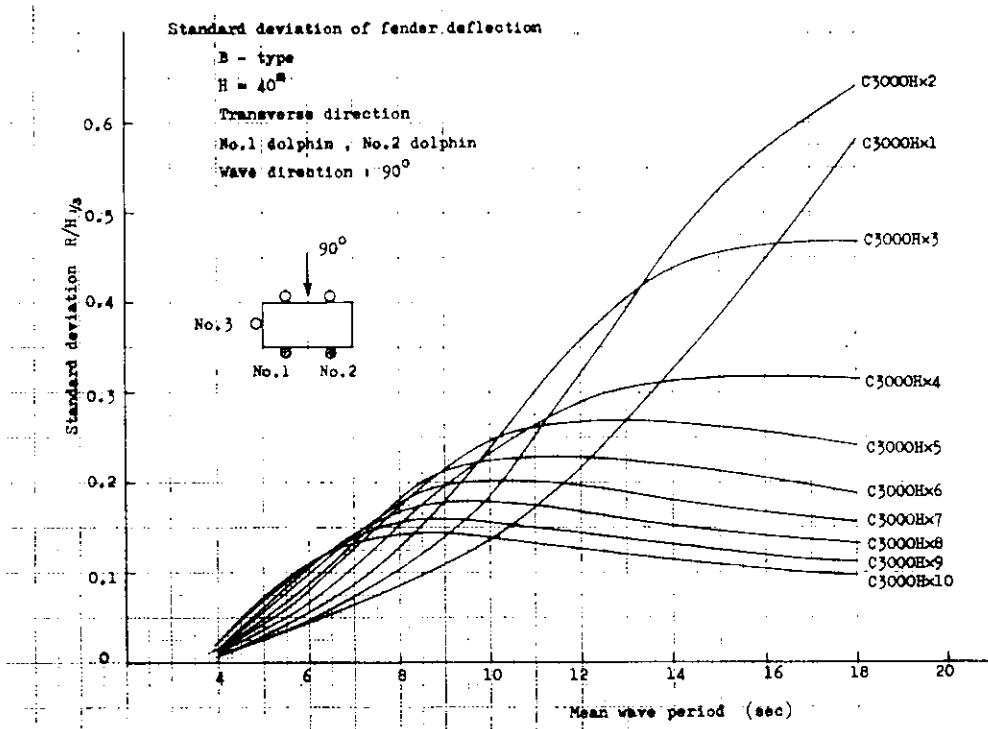


図 3.7.5.11 不規則波中における係留点の運動 (B - type)

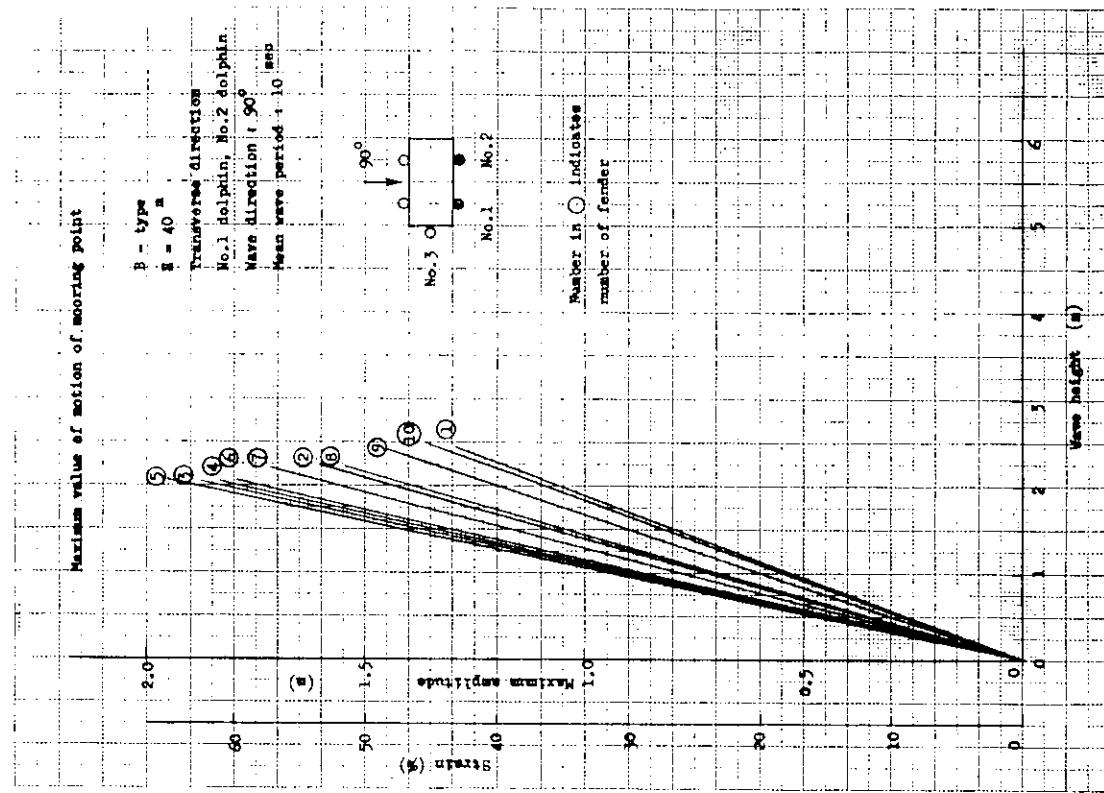
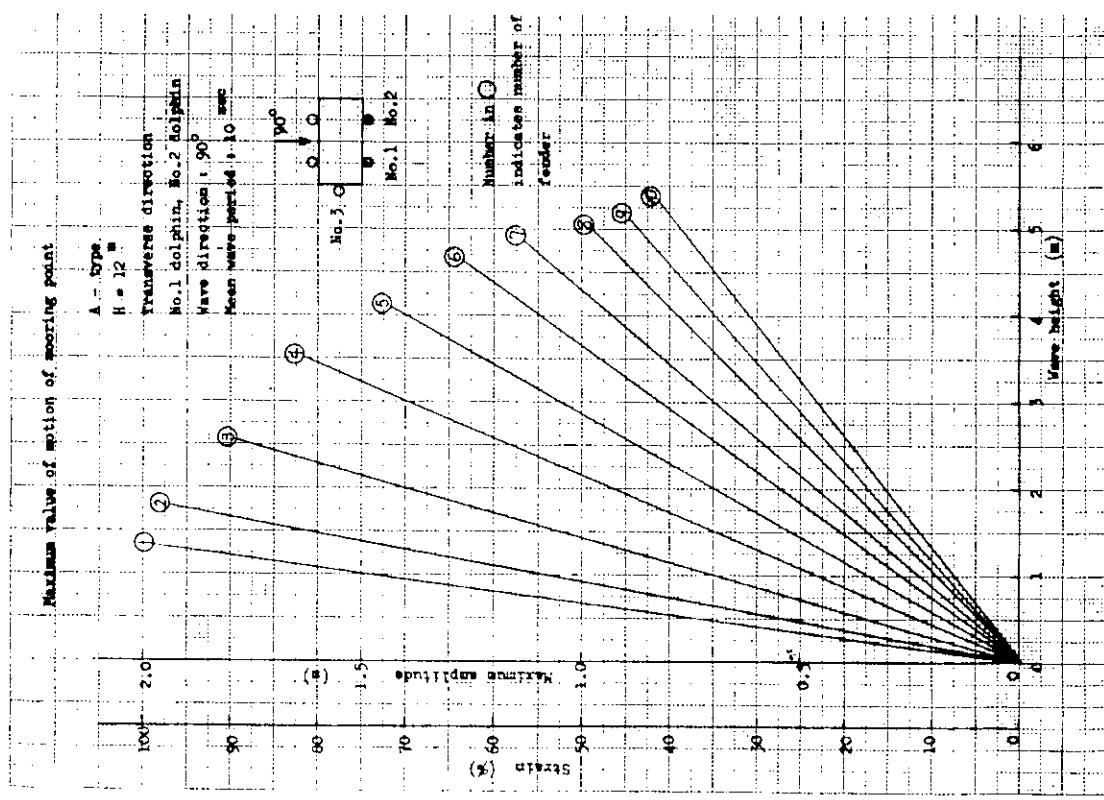


図 3.7.5.12 不規則波中における係留点の運動の最大値 (A - type )

図 3.7.5.13 不規則波中ににおける係留点の運動の最大値 (B - type )

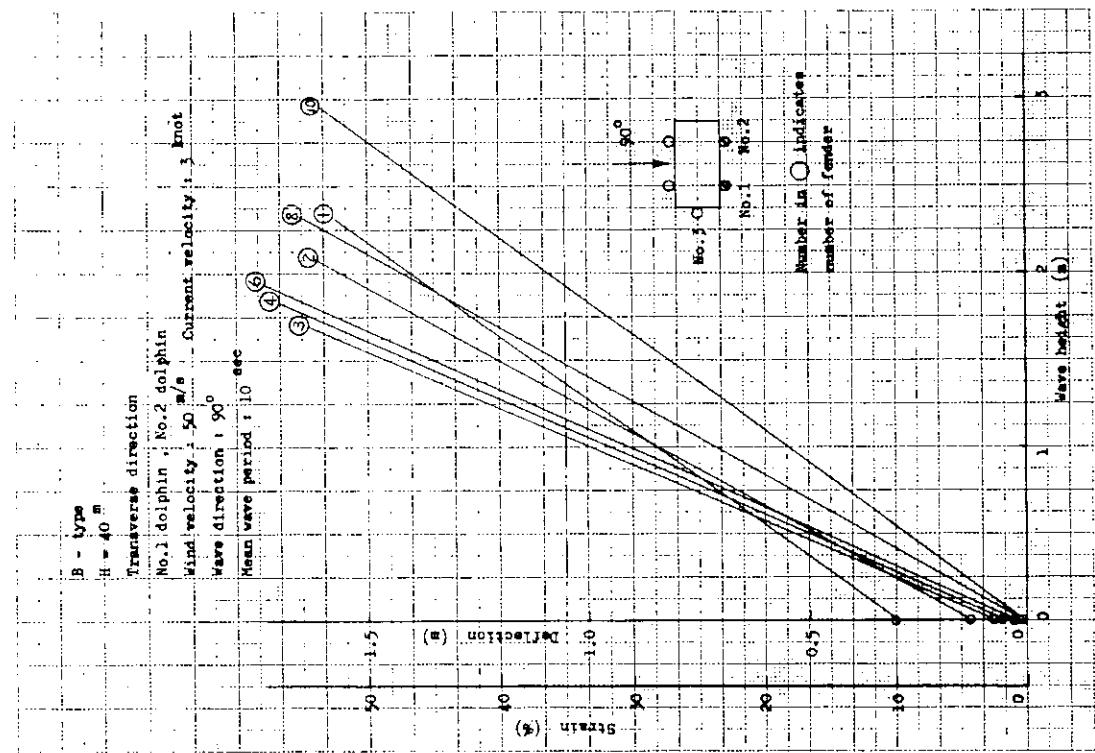
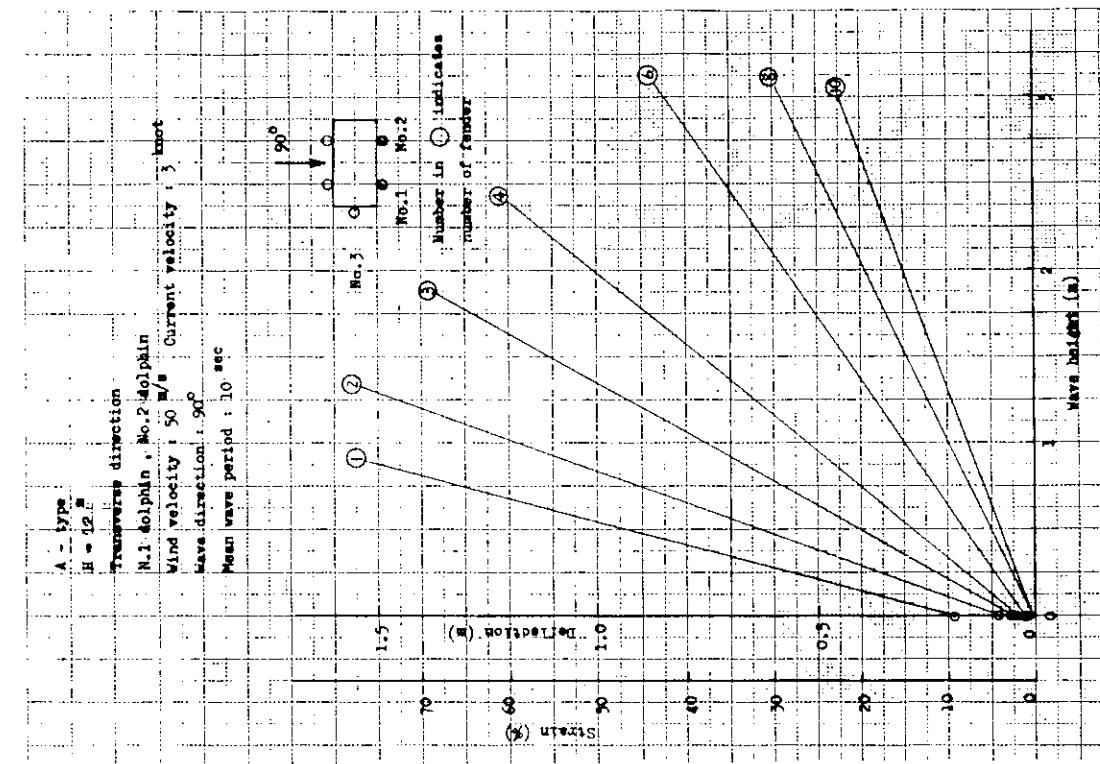


図 3.7.5.14 フェンダードの最大値 (A-type)

図 3.7.5.15 フェンダードの最大値 (B-type)

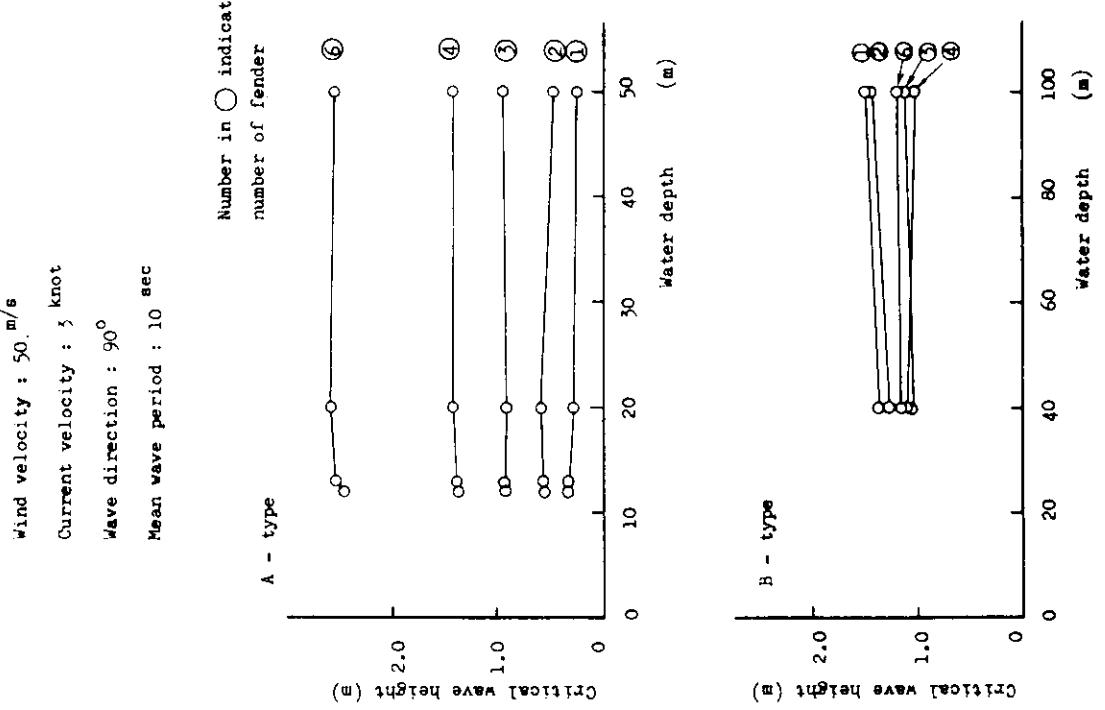
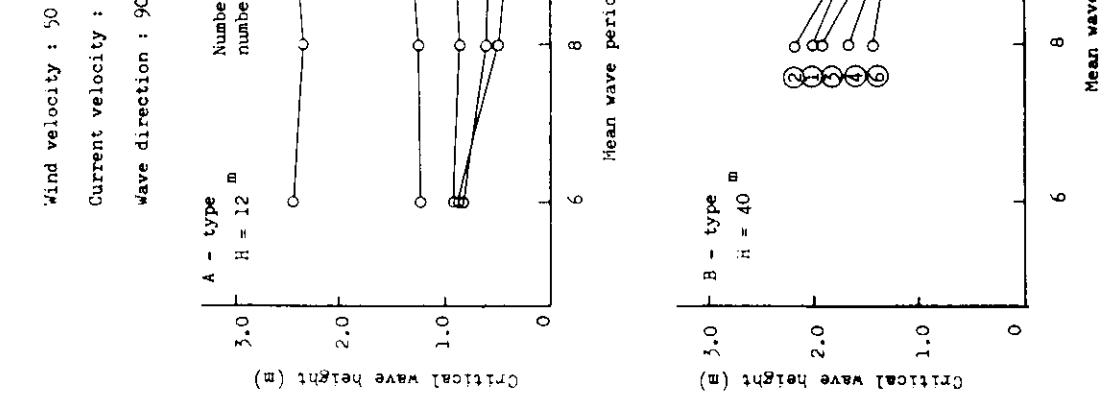


図 3.7.5.16 限界波高に対する波周期の影響

図 3.7.5.17 限界波高に対する水深の影響

Current velocity : 3 knot  
 Wave direction :  $90^\circ$   
 Mean wave period : 10 sec

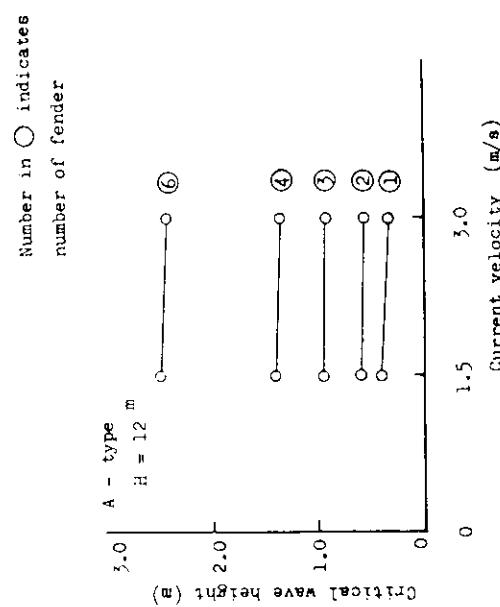
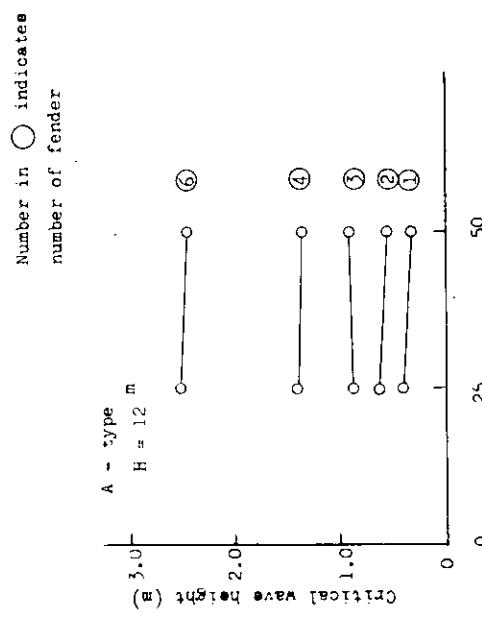


図 3.7.5.18 限界波高に対する風速の影響

図 3.7.5.19 限界波高に対する潮流速の影響

表3.7.5.2 フルブイ・ダンバー保留シミュレーション計算結果

浮体	水深	風速	潮流	波高	波周期	波		Heave		Sway		Roll		Pitch - の変形量		$\frac{Y_0 + Y(1000)}{Stroke}$
						$\sigma_{\text{波}}$	$\sigma_{\text{周期}}$	$y(\frac{Y_0}{3})$	$z(\frac{Y_0}{3})$	$Y_0$	$Y(1/3)$	$\sigma$	$Y(1000)$	$Y_0 + Y(1000)$	$(\frac{Y_0 + Y(1000)}{Stroke})$	
A-type	12 m	3 km 50 m/s	8 sec	C 2000 H	6 sec	0.008 m	0.156 m	0.141 kg	0.220 m	0.177 m	0.085 m	0.329 m	0.549 m	0.19 m ( 9.5%)	27.5 %	
				C 2333	C 2000 H	0.233	0.308	0.337	0.259	0.316	0.152	0.588	0.847	0.19 m ( 9.5%)	42.4	
				C 2500 H	C 2333	0.281	0.371	0.135	0.289	0.145	0.561	0.696	0.11 m ( 4.4%)	27.8		
				C 2500 H	C 2500 H	0.050	0.415	0.655	0.117	0.428	0.209	0.809	0.926	0.11 m ( 4.4%)	37.0	
				C 3000 H	C 3000 H	0.050	0.397	0.564	0.053	0.407	0.215	0.832	0.885	0.10 m ( 3.3%)	29.5	
				C 2000 H	C 2000 H	0.059	0.302	0.603	0.260	0.325	0.154	0.596	0.856	0.19 m ( 9.5%)	42.8	
				C 2500 H	C 2500 H	0.059	0.272	0.621	0.134	0.290	0.145	0.561	0.695	0.11 m ( 4.4%)	27.8	
				C 2500 H	C 2500 H	0.142	0.248	1.308	0.135	0.273	0.136	0.526	0.661	0.11 m ( 4.4%)	26.4	
				C 2500 H	C 2500 H	0.266	0.249	1.522	0.140	0.282	0.136	0.526	0.666	0.11 m ( 4.4%)	26.6	
				C 3000 H	C 3000 H	0.034	0.172	0.126	0.333	0.173	0.084	0.325	0.658	0.30 m (10.0%)	21.9	
B-type	20 m	1.5 m	8 sec	C 3000 H	C 124	0.124	0.287	0.653	0.433	0.319	0.152	0.588	1.021	0.30 m (10.0%)	34.0	
				C 3000 H	C 3000 H	0.234	0.270	1.231	0.425	0.288	0.138	0.534	0.959	0.30 m (10.0%)	32.0	

1 - 1

A-type      Fender : C2000H      Water depth=12<sup>m</sup>  
 Wind vel.=50<sup>m/s</sup>, Current vel.=3<sup>kn</sup>  
 Sig.wave height=1<sup>m</sup>, Mean wave period=6<sup>sec</sup>

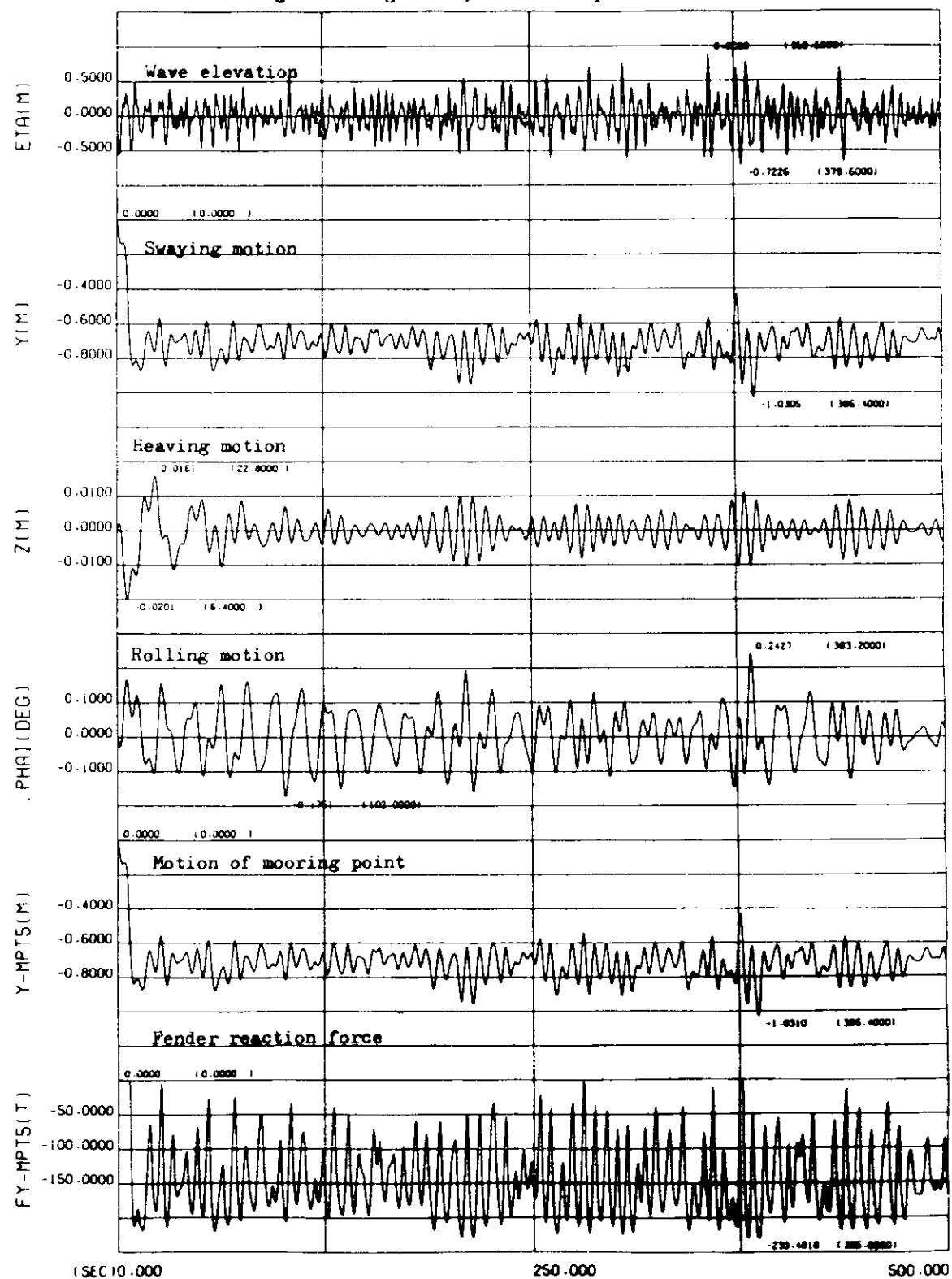


図 3.7.5.20 シミュレーション計算タイムヒストリー(1)

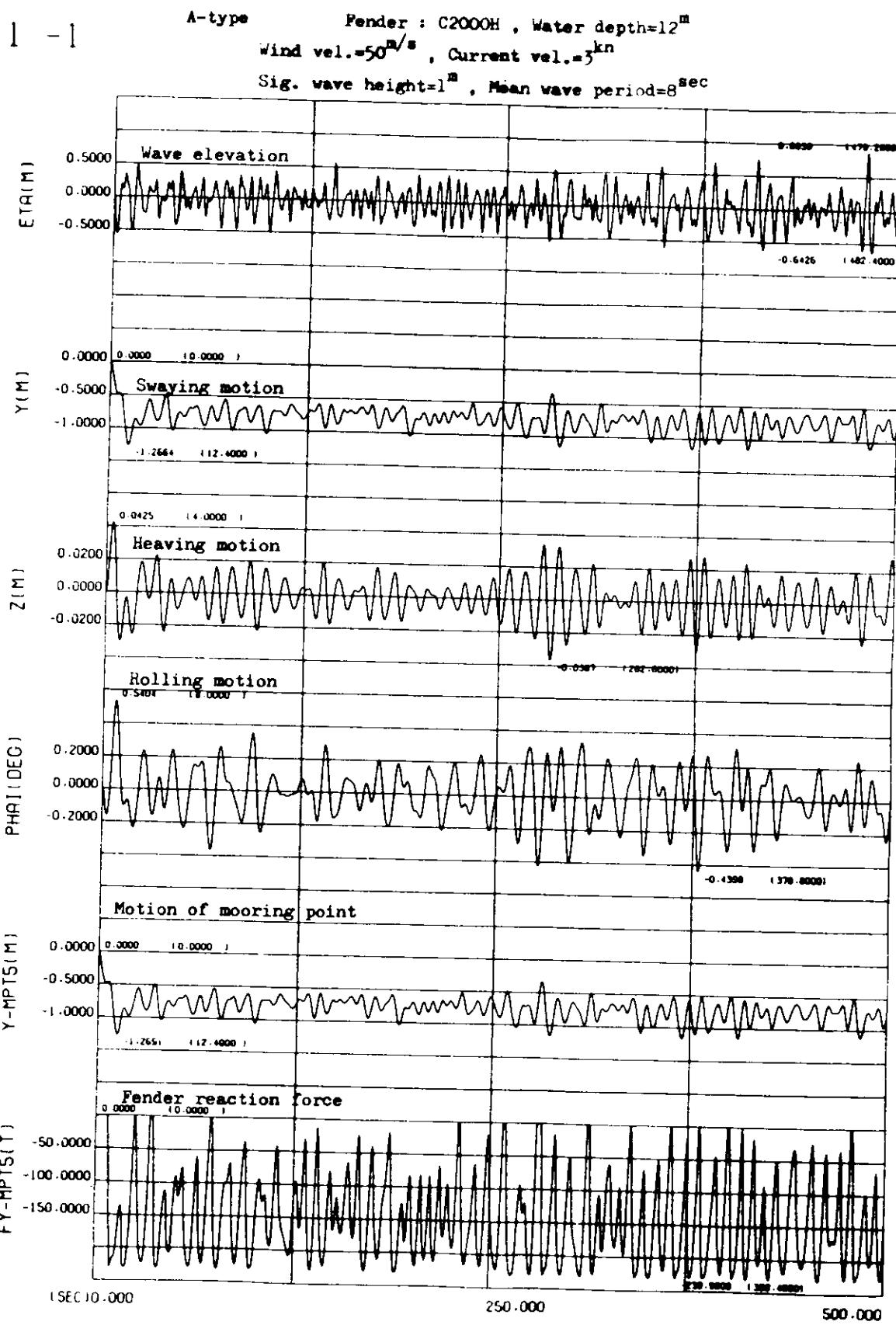


図3.7.5.21 シミュレーション計算タイムヒストリー(2)

A-type                  Fender : C2500H , Water depth=12<sup>m</sup>  
 Wind vel.=50<sup>m/s</sup> , Current vel.=3<sup>kn</sup>  
 Sig.wave height=1<sup>m</sup> , Mean wave period=8<sup>sec</sup>

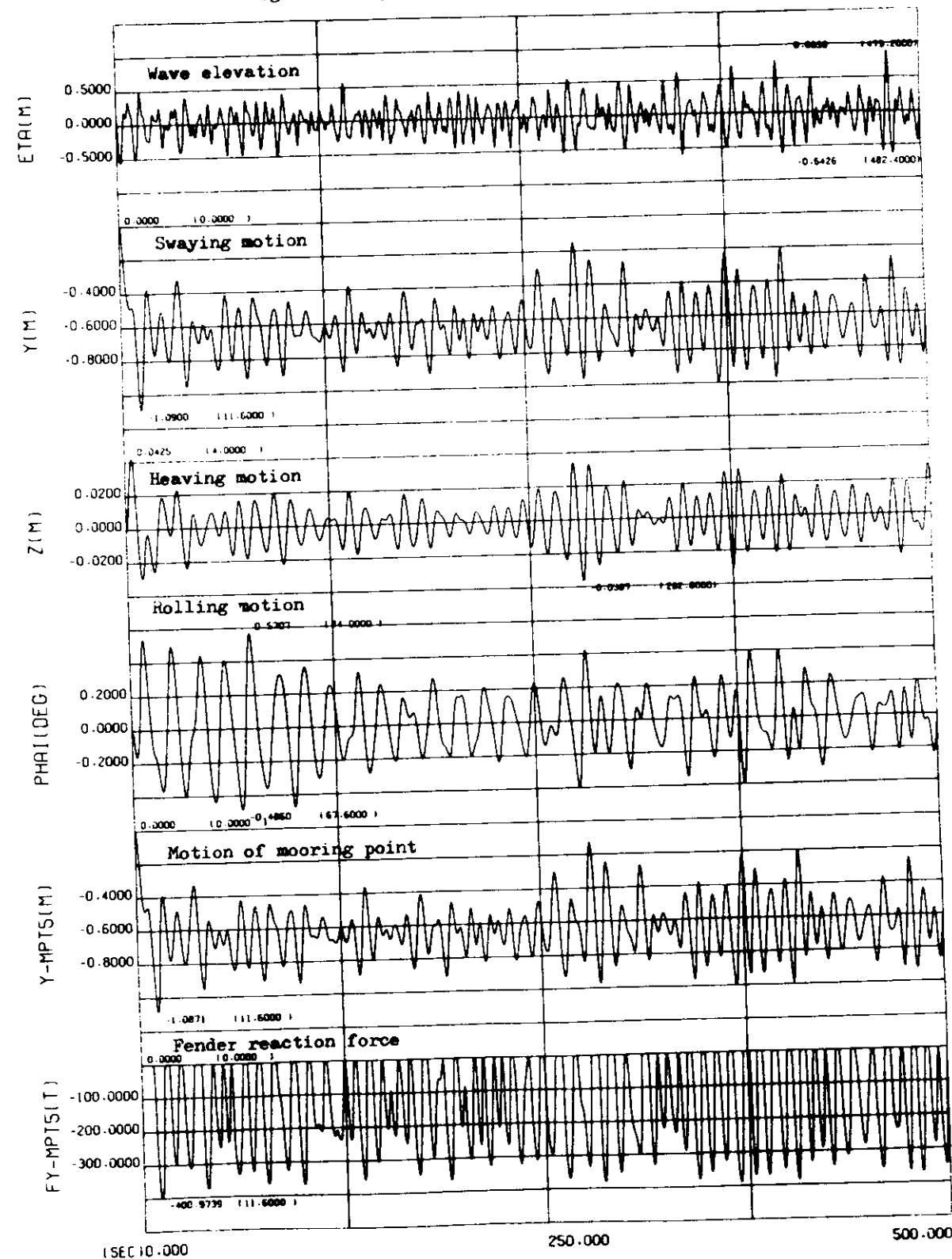


図 3.7.5.22 シミュレーション計算タイムヒストリ-(3)

A-type              Fender : C2500H , Water depth=12<sup>m</sup>  
 Wind vel.=50<sup>m/s</sup>   Current vel.=3<sup>kn</sup>  
 Sig wave height=1<sup>m</sup>   Mean wave period=10<sup>sec</sup>

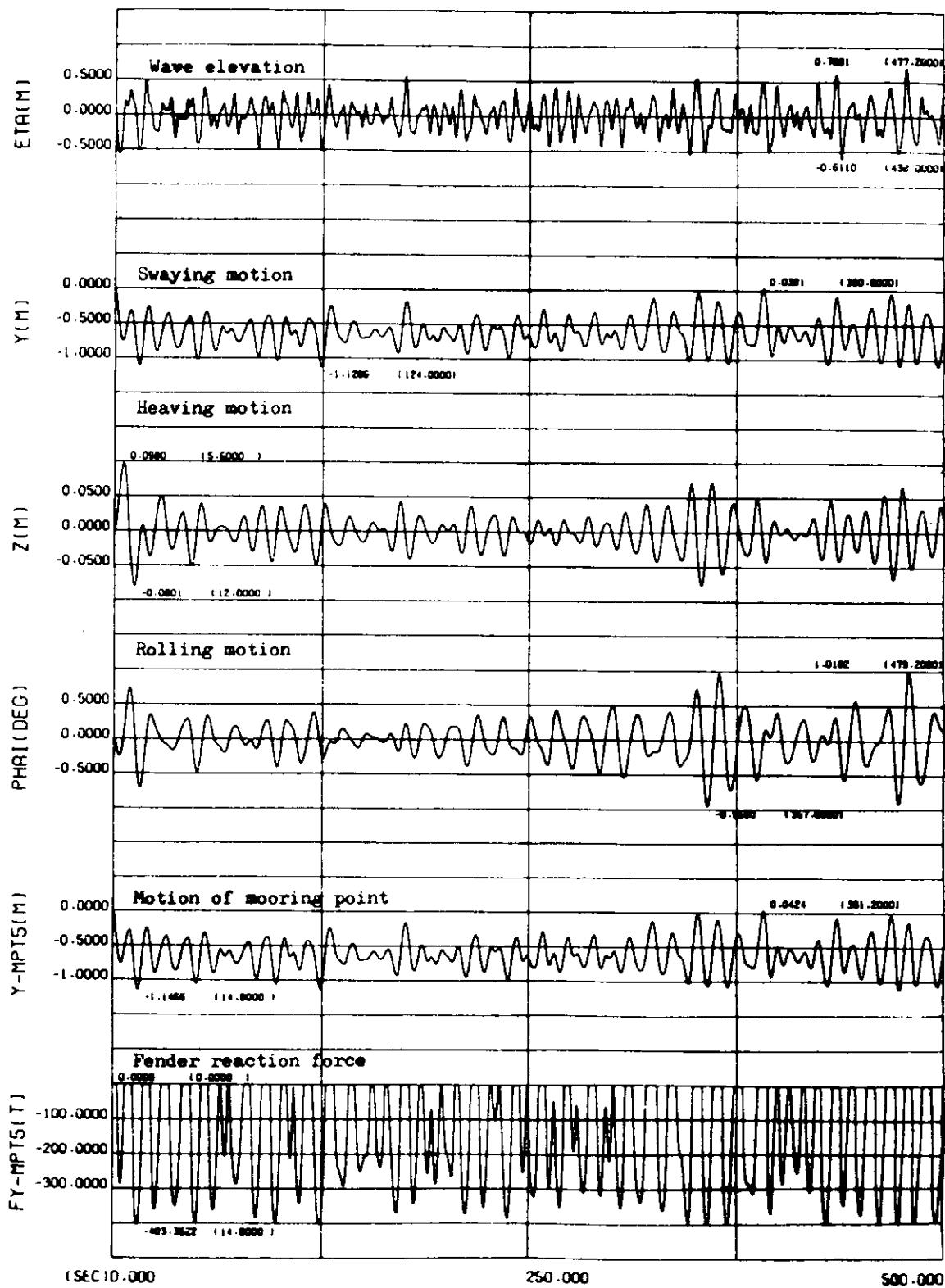


図 3.7.5.23 ～ 3.7.5.26 ～ 3.7.5.27 計算結果 (4)

A-type      Fender : C3000H , Water depth=12<sup>m</sup>  
 Wind vel.=50<sup>m/s</sup> , Current vel.=5<sup>kn</sup>  
 Sig. wave height=1<sup>m</sup> , Mean wave period=10<sup>sec</sup>

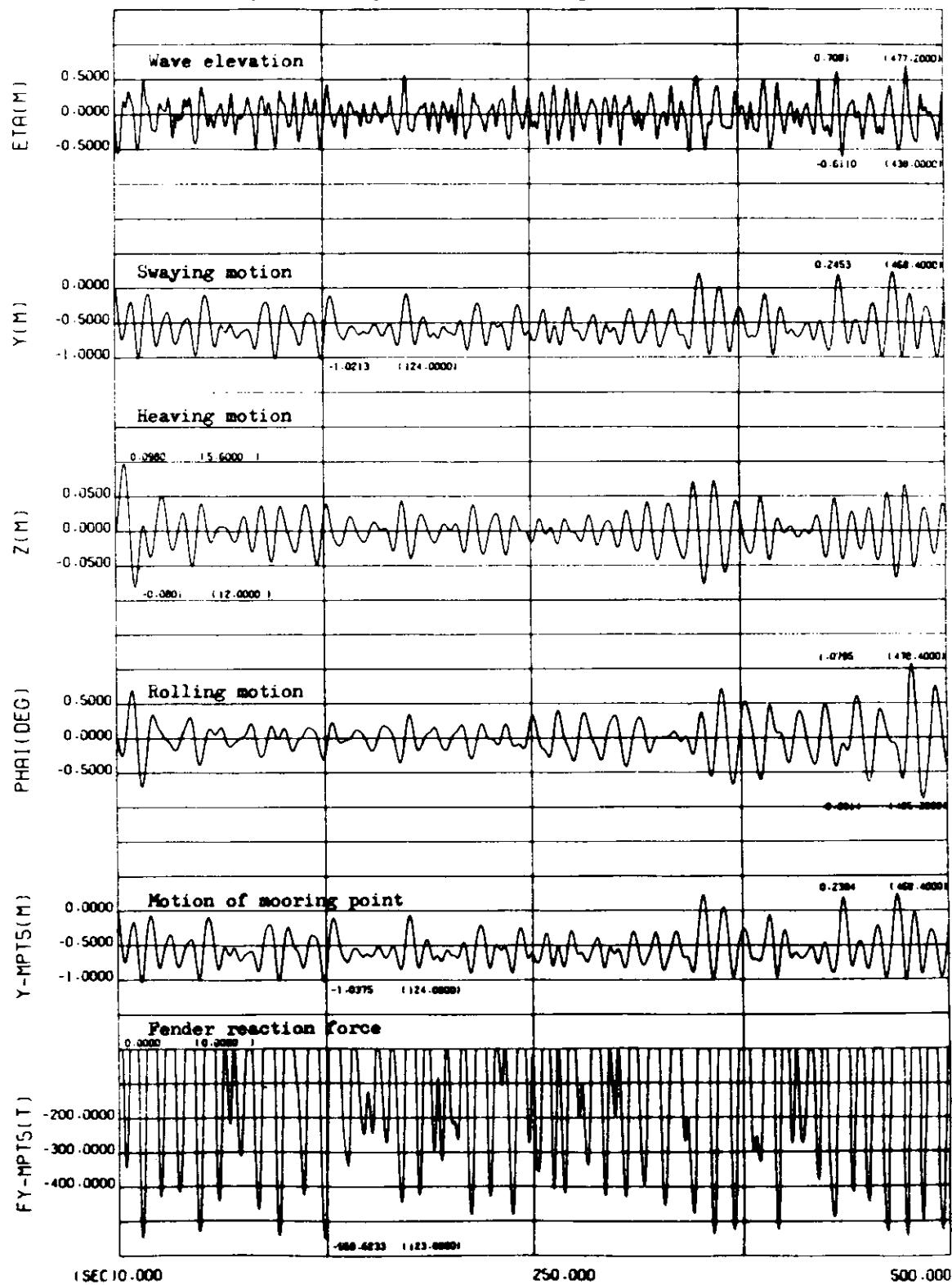


図3.7.5.24 シミュレーション計算タイムヒストリー(5)

A-type Fender : C2000H , Water depth=14<sup>m</sup>  
 Wind vel.=50<sup>m/s</sup> , Current vel.=3<sup>kn</sup>  
 Sig.wave height=1<sup>m</sup> , Mean wave period=8<sup>sec</sup>

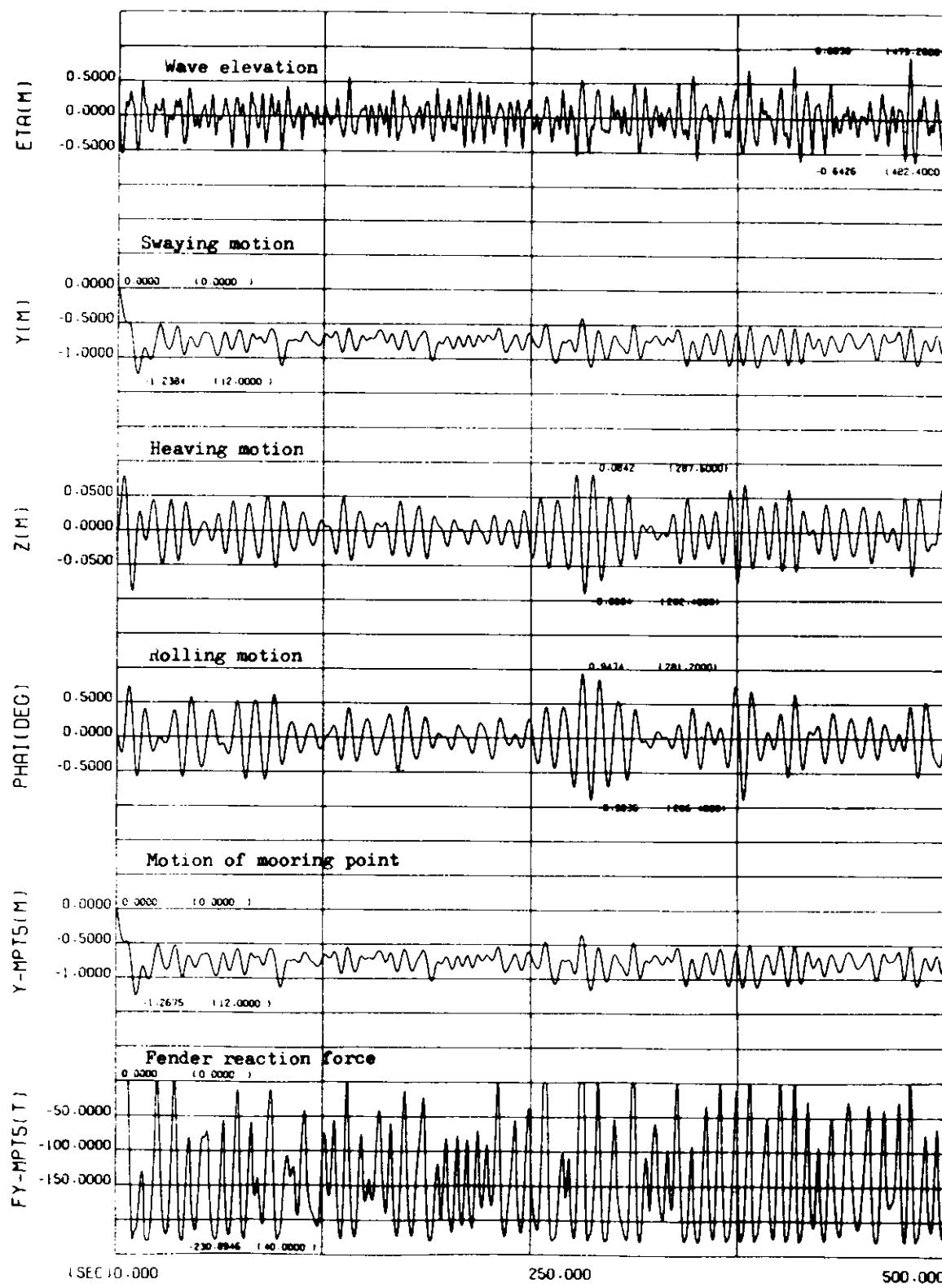


図3.7.5.25 シミュレーション計算タイムヒストリー(6)

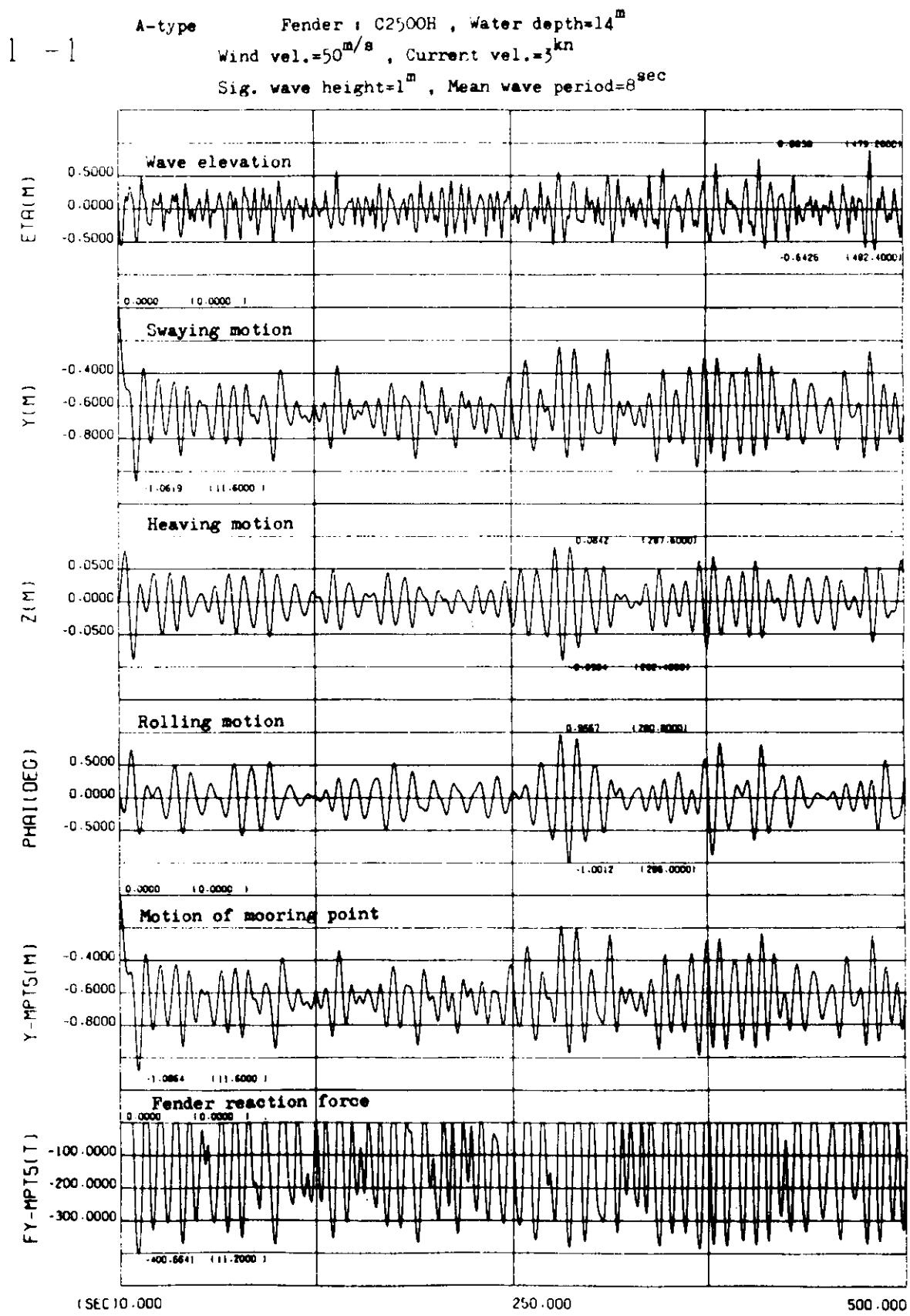


図3.7.5.26 シミュレーション計算タイムヒストリー(7)

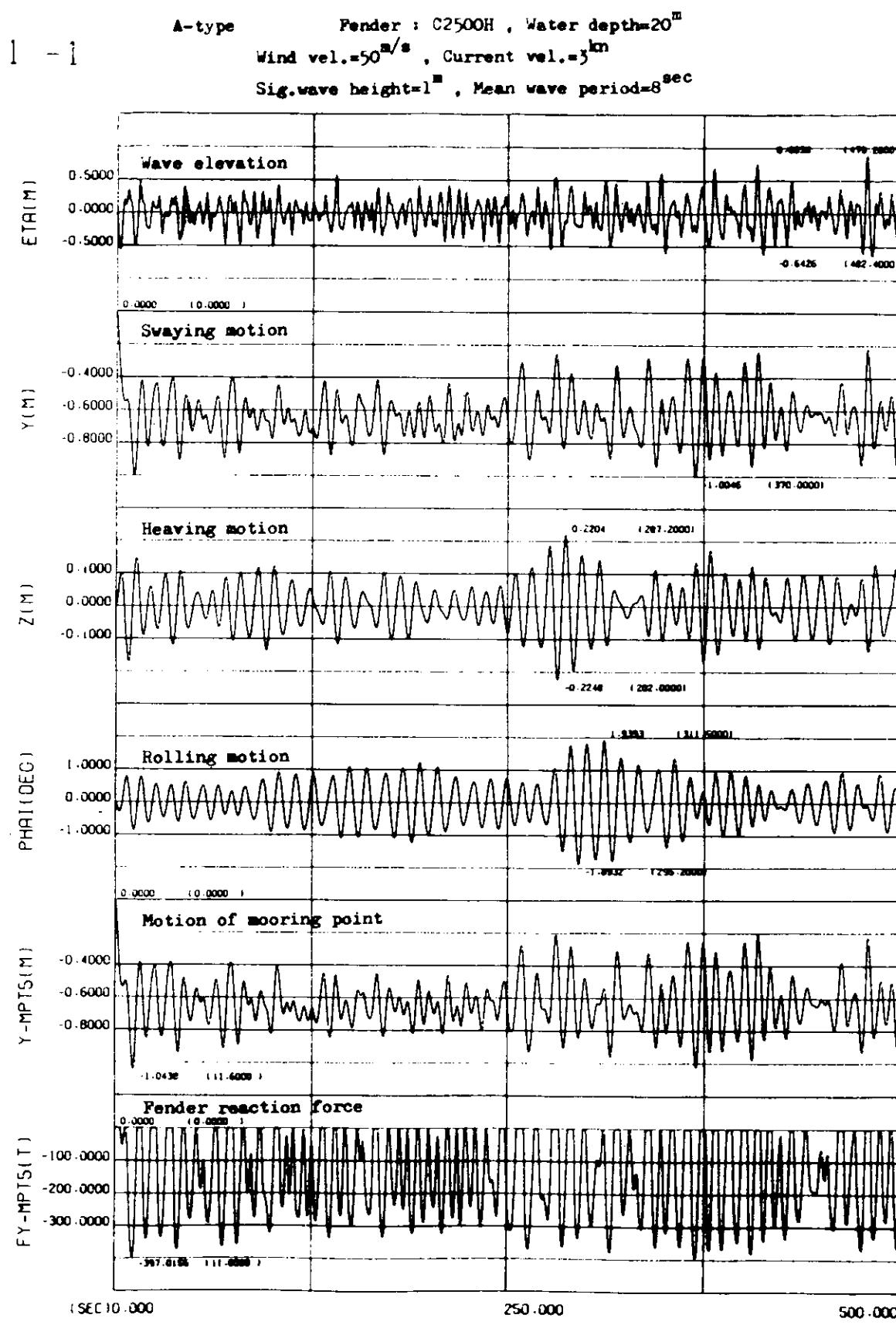


図3.7.5.27 シミュレーション計算タイムヒストリー(8)

A-type              Fender : C2500H , Water depth=50<sup>m</sup>  
 1 - 1              Wind vel.=50<sup>m/s</sup> , Current vel.=3<sup>kn</sup>  
 Sig. wave height=1<sup>m</sup> , Mean wave period=8<sup>sec</sup>

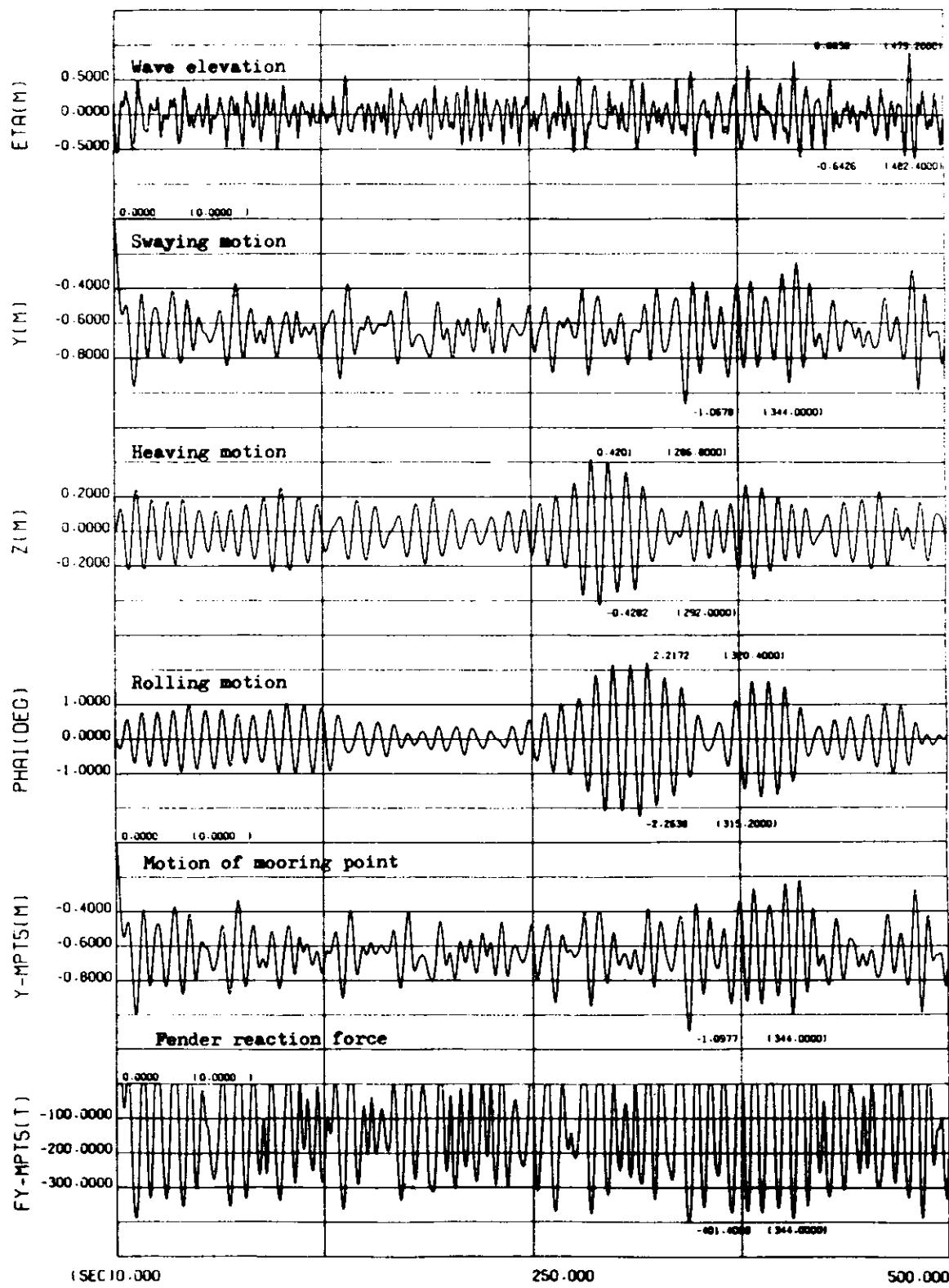


図3.7.5.28 シミュレーション計算タイムヒストリー(9)

B-type

Fender : C3000H , Water depth=40<sup>m</sup>

Wind vel.=50<sup>m/s</sup> , Current vel.=5<sup>kn</sup>

Sig. wave height=1.5<sup>m</sup> , Mean wave period=8<sup>sec</sup>

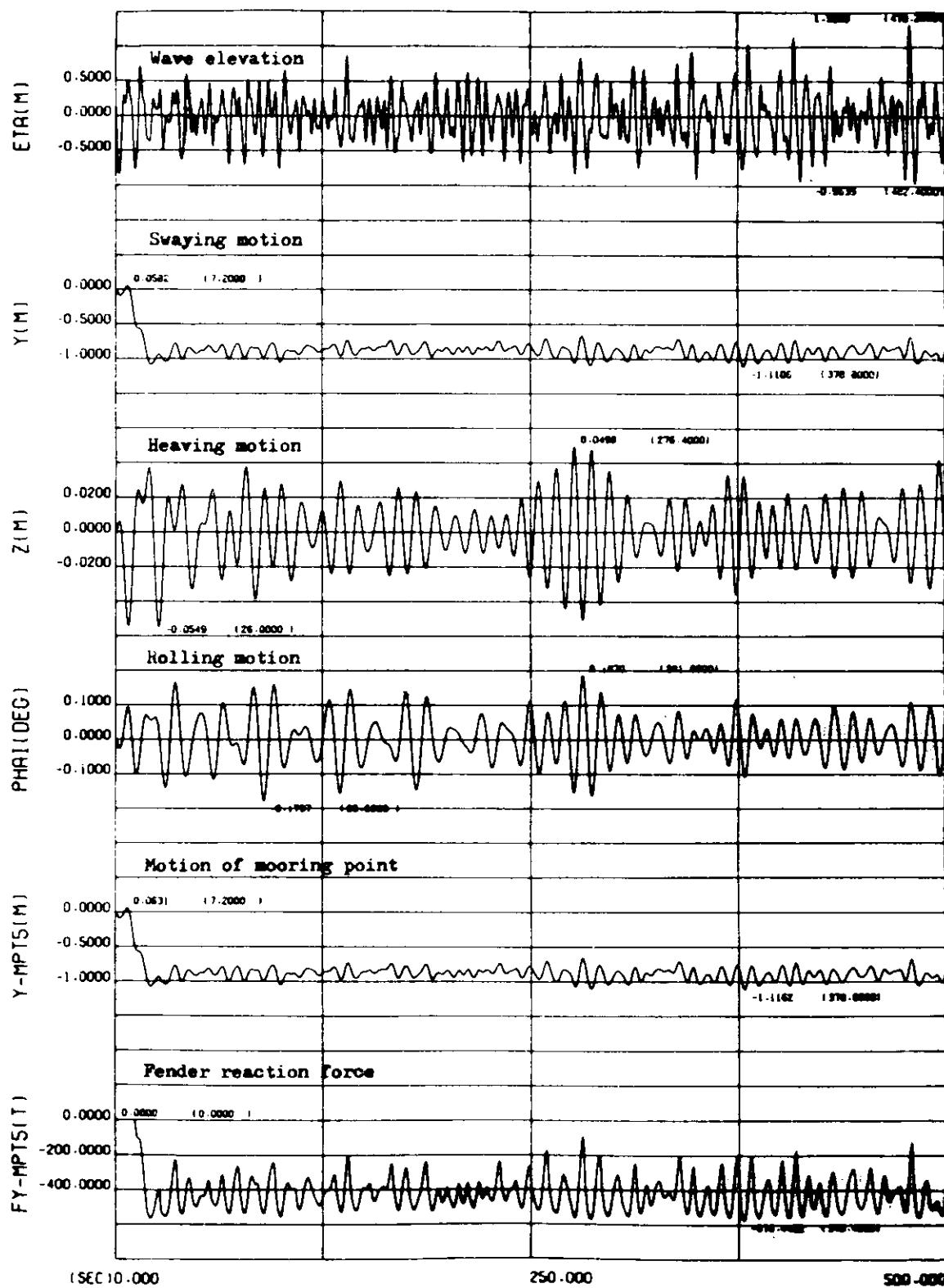


図3.7.5.29 シミュレーション計算タイムヒストリー(10)

B-type Fender : C5000H , Water depth=40"  
 Wind vel.=50  $\text{m/s}$ , Current vel.=3  $\text{kn}$   
 Sig. wave height=1.5  $\text{m}$ , Mean wave period=10  $\text{sec}$

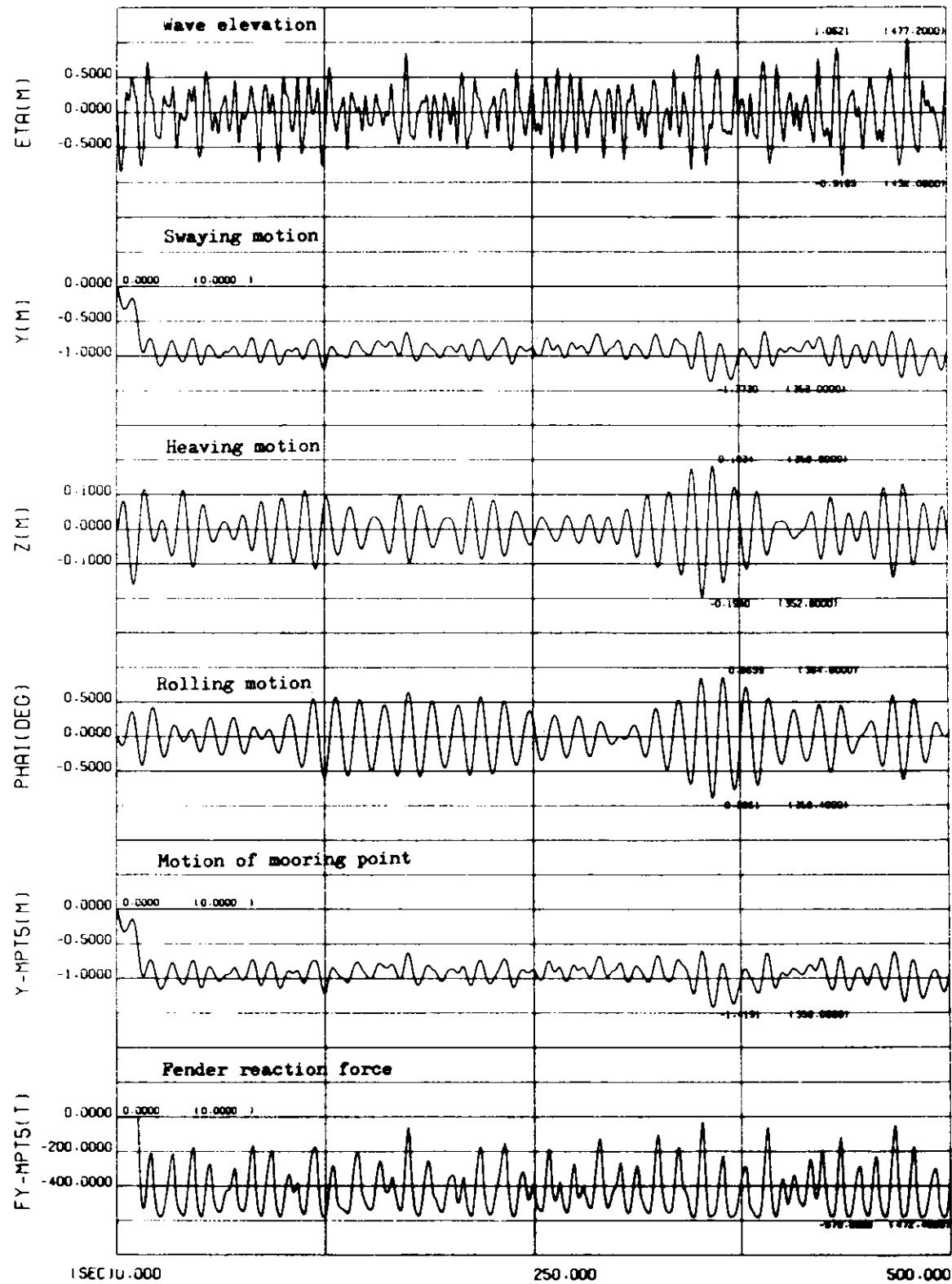


図3.7.5.30 シミュレーション計算タイムヒストリー(1)

B-type Fender : C3000H , Water depth=100<sup>m</sup>  
 1 - 1 Wind vel.=50<sup>m/s</sup>, Current vel.=3<sup>kn</sup>  
 Sig. wave height=1.5<sup>m</sup>, Mean wave period=10<sup>sec</sup>

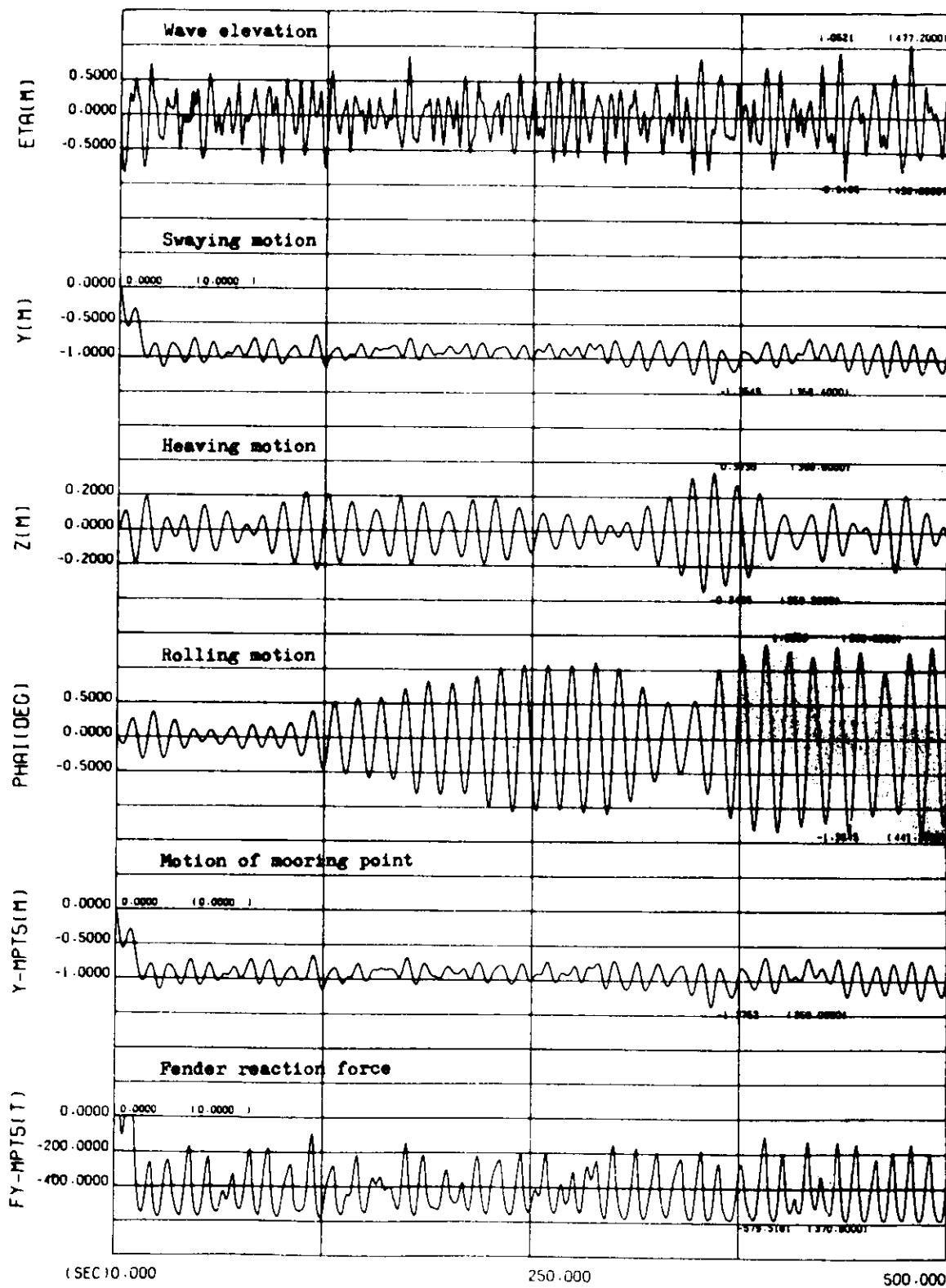


図 3.7.5.31 シミュレーション計算タイムヒストリー ⑫

# 第4章 係留システムの設計指針

## 1. 設計指針案

本研究部会発足以来の三年間に亘る調査・研究の成果を踏まえて、以下に「係留システムの設計指針(案)」を示す。

### 係留システムの設計指針(案)

#### 第1篇 概論

##### 第1章 適用範囲

本設計指針は、浅海域に係留された浮遊式箱型海洋構造物の運動および係留システムの設計、検討に適用することができる。

この指針は、係留浮体のうちでも特に、浅海域に係留された、水面下が一様な矩形断面を有する浮遊式箱型海洋構造物について、その特殊性に重点を置いて作成したものである。その特殊性とは、まず第一に流体力と波強制力における浅水効果であり、第二に浅海域における係留方式である。

これらのうち、係留方式に関しては第2篇以降において、多点係留、一点係留およびドルフィン・ダンパー係留について取り扱いを示しているが、これ以外の係留方式についても、また箱型以外の形状のものについても、第1篇の考え方則り、関連する項目を適宜選択のうえで、修正して適用することができる。

#### 第2章 係留システムの検討手順

海洋構造物の係留システムは、予想されるいかなる外力状態に対しても、構造物を一定地点に安全に保持するものでなくてはならない。

係留システムの性能および安全性を検討する手順を図1に示す。図中➡は処理手順の流れを、→は他の箇所で得られた結果を引用する事を示している。検討に際しては図の下半分のように、仮定した係留システムの妥当性を段階を追って確め、もしも与えられた設計条件に適合しなければ、係留方式を一部修正して検討を繰り返すということになる。なお本指針は係留システムの検討が目的であるから、係留される構造物の形状、および設置海域は既定のものとしているが、検討の結果如何によっては、それらの計画変更の已むなきに到る事もある。

図1に示した手順の内容の詳細については、以下の各章において説明する。

#### 第3章 自然環境条件

##### 3.1 一般

構造物の運動および係留システムの設計、検討を行なう際には、構造物の形式、係留方式および設置海域に応じて、以下に掲げる自然環境条件のうち、関係のあるものを選んで設計条件としなくてはならない。

- (1) 風 (2) 波 (3) 潮位 (4) 海流、潮流、沿岸流 (5) 土質 (6) 漂砂
- (7) 地震 (8) 津波 (9) 高潮 (10) 海底地形 (11) 気温、水温 (12) 流氷
- (13) その他必要な自然環境条件

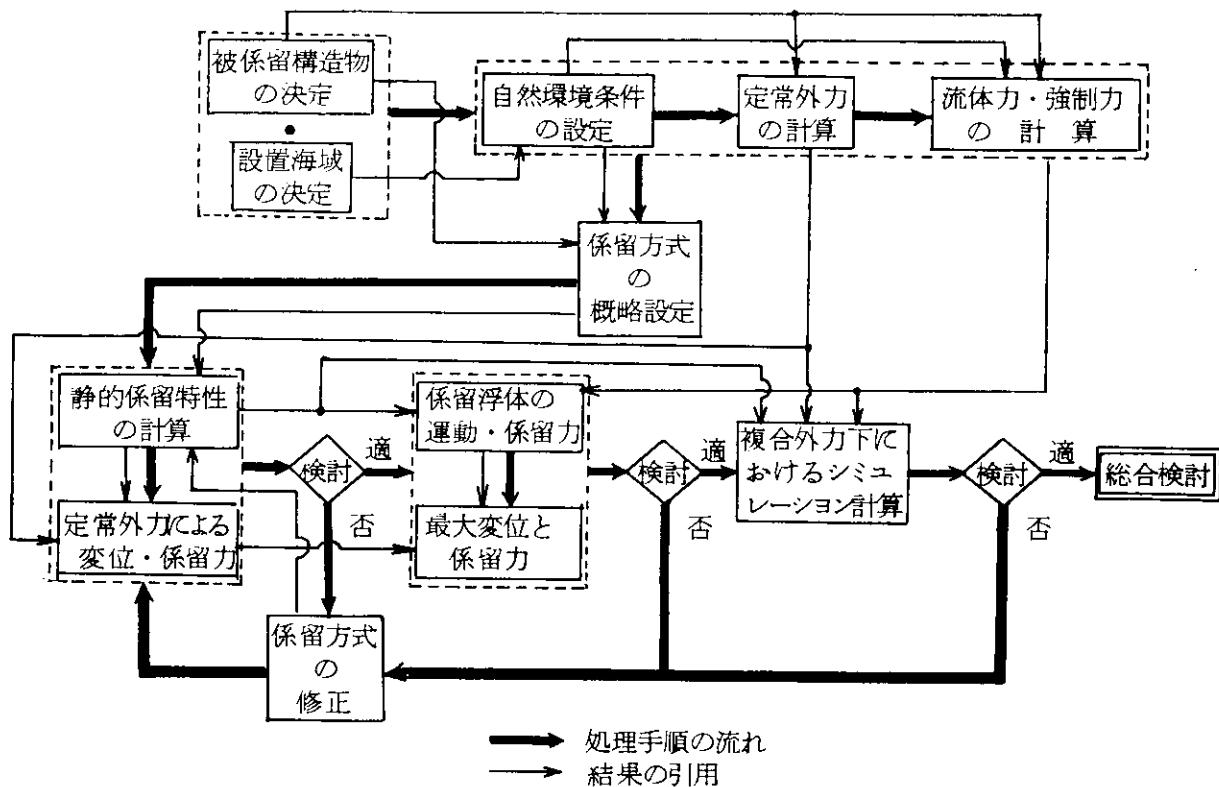


図1 係留システム設計検討手順

構造物の運動および係留システムの、設計および検討に影響をおよぼす要因としては、主として、操作上の即ち人為的なものと、周囲の環境条件によるものとに大別されるが、ここでは後者についてのみ述べる。(1)～(4)に掲げたものの他に、ボアや段波が問題になることもある。

自然環境条件のうち、特に重要なものについては、3.3以降において標準的な取り扱いを述べる。

### 3.2 再現期間

自然環境条件の再現期間は、次式により算定される値以上とする。

$$R = \frac{1}{1 - q^{\frac{1}{T}}}$$

Tは、耐用年数

qは、期間Tの間に自然環境条件がある設定値を超えない確率

設計に用いる自然環境条件は、設置海域における長期の統計資料に基づいて定めなくてはならない。この際の再現期間は、構造物または係留システムの耐用年数、その期間に設定値を超える自然環境条件に遭遇する確率、構造物または係留システムの安全性に対する要請の度合、設計・施工技術の信頼度等を勘案して定められる。

船級協会規則では、再現期間を50年または100年としているが、これは海洋構造物本体に対する規定であるから、一時的な係留設備に関しては必ずしもこの値を採用する必要はない。但し恒久的な係留設備であり、且つ重要度の高いもの場合には、構造物本体と同じ再現期間を用いるべきである。

再現期間が数十年を超えると、これに対する最大予測値の増大はあまり顕著ではなくなる。

### 3.3 風

- 1. 設置海域の、海面上10mの高さにおける10分間平均風速をもって、基本風速  $U_{10}$  ( $m/sec$ ) とする。
- 2. 基本風速の設定は、設置海域における長期間の実測値に基づいて行なわなければならない。

- 3. 風速の発現確率は、二重指數分布則に従うものとする。
- 4. 高度Hにおける設計風速は、次式により算定する。

$$U_w = C_H U_{10} \quad (m/sec)$$

$C_H$  は、高度係数

ある地点における設計風速を設定する場合には、設置海域における長期間の実測値に基づくのが原則であるが、これが与えられていない場合には、近傍の観測点における資料を用いて推定してもよい。但しその際には、地形等を考慮して観測値を補正することはもとより、設置海域において最低1年間は実測を行ない、推定方法の妥当性を確認する必要がある。

観測された各年の年間最大風速を  $U_i$  とするとき、風速の発現確率分布は次のような二重指數分布に従うものとする。

$$P(y) = \exp \{ -\exp(-y) \}$$

$$y = a(U_i - b)$$

観測値からパラメータ  $a$  および  $b$  を定めると、任意の再現期間に対応する最大風速を求めることができる。

風速の鉛直方向分布に関しては、通常

$$U_w = U_{10} \left( \frac{H}{10} \right)^{\alpha}$$

のように幕法則で表わすことが行なわれている。 $\alpha$ の値は、地表の粗度、風速の評価時間によって変化し、 $1/3 \sim 1/15$ 程度の範囲に大きく散らばっている。表1に、高度係数  $C_H$  の標準的な値を示すが、この表では  $\alpha$  の値は  $1/12 \sim 1/14$  程度に相当している。

表1 高度係数  $C_H$

H (m)		$C_H$	H (m)		$C_H$
以上	未満		以上	未満	
	15.3	1.000	137.0	152.5	1.265
15.3	30.5	1.049	152.5	167.5	1.277
30.5	46.0	1.095	167.5	183.0	1.292
46.0	61.0	1.140	183.0	198.0	1.304
61.0	76.0	1.170	198.0	213.5	1.311
76.0	91.5	1.196	213.5	228.5	1.323
91.5	106.5	1.217	228.5	244.0	1.330
106.5	122.0	1.233	244.0	259.0	1.338
122.0	137.0	1.249	259.0		1.342

### 3.4 波

- 1. 波浪は、有義波高  $H_{1/3}$  (m) と平均波周期  $T_m$  (sec) とで表示する。また必要に応じ、有義波周期  $T_{H_{1/3}}$  (sec) を用いてもよい。
- 2. 波浪の諸元は - 1.の表示法に従うが、必要に応じ最高波その他の代表波の諸元に換算して用いる。
- 3. 設計波の設定は、設置海域における長期間の実測値に基づいて行なわなければならない。
- 4. 異常時の波浪の設定にあたっては、- 3.の他に、気象資料を用いた波浪推算を行ない、係留システムにとって最も不利なものを採用しなくてはならない。
- 5. 波浪の長周期成分についても、充分な考慮を払わなくてはならない。

係留された浮体にとって、通常最も大きな影響をおよぼすのは波浪であるので、設計波の設定には特に注意が必要である。波浪は不規則波として、有義波高と平均波周期とで表示するのが一般的であるが、最悪の波状態における構造物および係留システムの安全性を検討する際には、海面を单一の波で置き換えて、これに対する応答を求めるという代表波法が用いられることがある。

構造物の運動、係留反力等は、通常は固有周期をもつから、波浪の観測資料は有義波高のみではなく、有義波高と平均波周期との同時発現確率分布の形で与えられている事が望ましい。

設置海域における、長期間の実測資料が与えられていない場合には、近傍の観測点における資料から、地形による波の変形を考慮して推定してもよいが、この際にも設置海域において最低1年間は実測を行ない、推定方法の妥当性を確認する必要がある。

また最大有義波の推定にあたっては、これらの実測資料による推定の他に、気象資料を用いて、

- (1) 過去最大級の台風が、設置海域にとって最も危険な経路を通過する場合に対する波浪推算
- (2) 過去の主要な高波のすべてに対する波浪推算

を行ない、それらのうちで最も不利なものを選ぶ必要がある。

波浪の長周期成分は、津波や高潮などによる他に、長周期のうねりにより湾内または港内に強制振動が惹き起こされて生ずる事もある。またそればかりではなく、湾または港の形状に固有の周期で共振することもある。これらの場合の波高は小さいが、波長が長いために水平方向の水の動きが大きくなるので、係留システムに大きな影響をおよぼすことがある。また索鎖係留された構造物は、通常左右揺の長い固有周期をもつので、この点の検討も必要である。

### 3.5 潮位

潮位の設定は、長期間に亘る実測値、または異常気象条件に対する推定値等に基づいて行なわなければならない。

潮位に関しては、高潮、津波などによる異常高潮位、ならびに津波などによる異常低潮位の両方について検討する必要がある。

なお、仮想台風に対する異常高潮位に関しては、朔望平均満潮面に、推定最大潮位偏差を加えた高さを標準とする。

### 3.6 津波

津波の設定は、長期間に亘る実測値、または過去の記録による推定値等に基づいて行なわなければならない。

津波の諸元としては、最高潮位、最低潮位、津波偏差および周期を考慮するものとする。津波の波高は、湾の形状、固有周期などによって大きく変化し、理論的な推定は困難であるから、実測値または災害記録から推定するのが妥当と思われる。

周期については、実測値のほかに、湾の固有周期と同じ周期の津波についても検討しておくのが望ましい。

## 第4章 係留特性

個々の係留装置および係留システム全体について、静的および動的な係留特性を考慮しなくてはならない。

係留ラインの解析には大きく分けて

- (1) 定常外力に対する静的解析
- (2) 変動外力に対する動的解析

の二つの方法があり、それぞれについて種々の解法が行なわれている。

まず静的解析については、性状が一様な係留ラインの場合に用いられるカテナリー理論がその代表的なものであるが、この理論ではラインの単位長さあたりの重量および水深は不变としているので適用範囲がかなり制限される。このような場合にはラインをいくつかの要素に分割し、それぞれについてたてた釣合方程式を解く方法を採用するとよい。この方法はラインの性状や海底の地形が変化する場合、中間にブイやシンカーを設ける場合など全ての場合に適用できる。詳細は本報告書第3章1.を参照のこと。

次に動的解析の場合には、上の静的解析から得られる反力に加えて、慣性力および粘性抗力を考慮する。本報告書第3章2.に述べるように、強制動搖試験の結果によると周波数依存は明らかに存在し、また場合によっては二次、三次の成分が一次成分と同程度のオーダーで含まれている。このような動的影響により、ラインの張力が大きくなることがあるので注意が必要である。

構造物が複数のラインにより係留されている場合には、上のようにして得られた個々のラインの特性を、その配置を考慮して重ね合わせることにより、全体の係留特性が求められる。

ドルフィン・ダンパー係留の場合にも、以上と同じ考え方で処理するが、個々の装置の設計によって特性が大きく異なるので、充分な注意が必要である。

## 第5章 外力の推定

### 5.1 一般

- 1. 構造物および係留システムに加わる外力は、定常外力と変動外力とに分けて考える。
- 2. 外力は一般に、構造物および係留システムにとって最も不利となるものを選ばなければならない。但しその可能性が非常に低いと考えられる場合には適当に参照してもよい。

構造物および係留システムに加わる外力としては、第3章に挙げた自然環境条件の各項目によるものが考えられるが、これらを用いて構造物および係留システムの応答を求める場合の考え方として、ある一定値をとるとするもの、規則的な変動をするもの、および不規則な変動をするものとに分ける。以下ではこれらのうち、一定値をとるもの定常外力と呼ぶこととし、規則的および不規則的な変動をするものを併せて変動外力と呼ぶこととする。本指針では、外力は一般に定常外力として取り扱い、風と波とについては更に、変動外力としての取り扱い方についても説明する。

第3章で定めた自然環境条件の設定値の範囲内で、通常はその最大値が構造物および係留システムにとって最も不利な影響をおよぼすが、固有周期をもつような応答の場合には、最大値よりも小さい値で最悪の状態になることがある。また疲労強度を検討する際には、値そのものは最大でなくとも、繰り返し回数の多いものの方が不利になることもある。このように自然環境条件の最大値が、必ずしも最悪条件とはならないという事に注意する必要がある。

### 5.2 風による力

- 1. 風による定常荷重は次式により算定する。

$$F = \frac{1}{2} \rho_w C_d U_w^2 A \quad (t)$$

$\rho_w$  は、空気の密度 ( $t \cdot sec^2/m^4$ ) で通常は  $0.125 \times 10^{-3}$  としてよい。

$C_d$  は、抗力係数

$U_w$  は、3.3 - 4.に定める設計風速 ( $m/sec$ )

Aは、風向に垂直な面に投影した物体の面積 ( $m^2$ )

- 2. 變動風のスペクトルは、次のような式で示されるものを用いる。

(1) Davenport の式

$$S_u(f) = 4K U_{10}^2 \frac{X}{(1+X^2)^{1/3}}$$

$$X = \frac{1200f}{U_{10}}$$

(2) 日野の式

$$S_u(f) = 2.856 \frac{K U_{10}^2}{\beta} \left\{ 1 + \left( \frac{f}{\beta} \right)^2 \right\}^{-5/6}$$

$$\beta = 1.169 \times 10^{-2} \frac{U_{10}\alpha}{\sqrt{K}} \left( \frac{H}{10} \right)^{2m\alpha-1}$$

$f$  は、周波数 ( $1/\text{sec}$ )

$U_{10}$  は、3.3 - 1 に定める基本風速 ( $\text{m/sec}$ )

$K$  は、地表面の粗度を表わす係数で、水面上では通常、0.003 とする。

$\alpha$  は、鉛直方向の風速分布の幕指數

$H$  は、海面からの高さ ( $m$ )

$m$  は、大気の安定度に関する修正係数で、暴風のもとでは 2 とする。

物体に作用する風の力としては、質量力を無視して抗力のみを考えることにした。風荷重の式中の抗力係数  $C_d$  は、物体の形状、流れの方向、レイノルズ数等によって変化し、また物体要素間の相互干渉もあって非常に複雑になる。よって可能な限り風洞試験等を行なって推定するのが望ましいが、これらの値が得られていない時には、簡単な形状を有する単一部材に対する表2の標準的な数値を使用してよい。

表2  $C_d$  の標準値

海洋構造物全体の風抗力およびモーメントは、次式の形で推定することができる。

$$F_w = \frac{1}{2} \rho_w C_w U_w^2 (A_f \cos^2 \phi_w + A_s \sin^2 \phi_w)$$

$$F_{wx} = - F_w \cos \theta_w$$

$$F_{wy} = - F_w \sin \theta_w$$

$$M_{w\phi} = F_{wy} (\ell_w - \bar{x} G)$$

$$A_f = B (D - d) + a_f$$

$$A_s = L (D - d) + a_s$$

$\rho_w$  : 空気の密度

$U_w$  : 風速

$\phi_w$  : 風向

$C_w$  : 風抗力係数

$\ell_w$  :  $L$  の中央から風抗力の作用中心までの距離

$\theta_w$  : 風抗力の作用角度

$L$  : 構造物の長さ

$B$  : ハイブリッド

$D$  : ハイブリッド

$d$  : ハイブリッド

構 造 部 分	$C_d$
球殻構造	0.4
円筒形構造	0.5
主 船 壁	1.0
甲 板 室	1.0
独立した構造部材 (クレーン、形鋼、梁等)	1.5
甲板下の部分 (平滑面)	1.0
甲板下の部分 (暴露した梁、桁等)	1.3
作業用やぐら (各面)	1.25

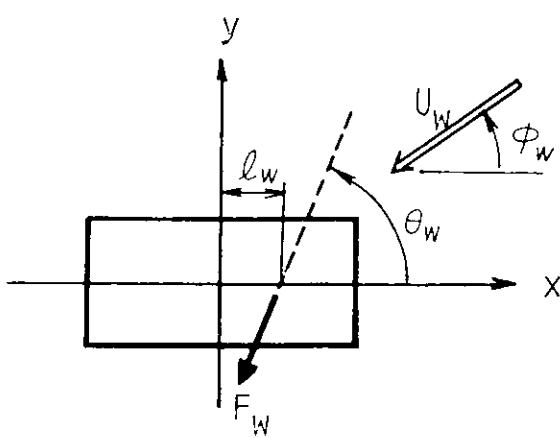


図2 風向と風抗力

$a_f$  : 上部構造の正面投影面積

$a_s$  : ハーフ側面

$\overline{xG}$  : 構造物の重心の  $x$  座標

$C_w$ ,  $\ell_w$ ,  $\theta_w$ について、タンカーカー船型に対する実験値が日本造船研究協会第155研究部会報告書(研究資料No.269、昭和52年3月)に掲載されているほか、本報告書の第2章2の潮流力に関する値を準用してもよいであろう。

変動風のスペクトルに現われる  $\alpha$ については、3.3で説明したが、例えば船級協会規則ではおよそ  $1/\lambda_1$  に相当する値を高度係数の形で、また土木学会の「海洋鋼構造物設計指針(案)解説」では  $1/\lambda$  を与えている。

風速が空間的に不均一な場合には、構造物に対してセーメントを生ずることになり、係留システムにとって不利な影響を与えることも考えられる。しかし風の空間的変動については未だ充分解明されていないので、現在の段階ではこの点の検討をする際に、大気の流れの乱れのスケールを検討し、構造物および係留システムに最も大きさ影響をおよぼすような大気流の乱れのスケールを考慮する。

### 5.3 波による力

- 1. 波長に対して充分小さい部材に働く波力は、次式により算定してよい。

$$F = \frac{1}{2} \rho C_D u |u| A + \rho C_M \frac{\partial u}{\partial t} V \quad (t)$$

$\rho$  は、海水の密度 ( $t \cdot sec^2/m^4$ ) で通常は 1.025 としてよい。

$C_D$  は、抗力係数

$u$  は、部材位置における波粒子の速度 ( $m/sec$ ) で、水深、波長、波高に応じて適当な波理論によって求めなくてはならない。また潮流などの流れが存在する場合には、 $u$  は波粒子の速度に流れの速度を加えたものとする。

$A$  は、 $u$  に垂直な面上に投影した部材の面積 ( $m^2$ )

$C_M$  は、質量力係数

$V$  は、部材の体積 ( $m^3$ )

- 2. 浮体に働く波漂流力は、次式により算定してよい。

$$F_b = \frac{1}{2} \rho g L h^2 C_R \left( 1 + \frac{2kH}{\sinh 2kH} \right) \quad (t)$$

$L$  は、入射波の進行方向に垂直に測った浮体の長さ ( $m$ )

$h$  は、入射波の振幅 ( $m$ )

$C_R$  は、漂流力係数

$k$  は、波数 ( $rad/m$ ) で波長  $\lambda$  ( $m$ ) を用いて次式で表わされる。

$$k = \frac{2\pi}{\lambda} \quad (rad/m)$$

$H$  は、水深 ( $m$ )

- 3. 波のスペクトルは、水深、地形等を考慮して適当な表示式を用いなければならない。

海中にあって波の影響を受ける部材の寸法が、波長に対して充分小さいと考えられる場合には、所謂モリソン式を用いて波力を算定してよい。この場合、波粒子の速度  $u$  は抗力成分に対して 2乗で寄与し、場合によっては線形理論では過小評価になる事もあるので、その推定は精度よく行なわなければならない。

波力のうちの抗力成分は、5.1 - 1 の風荷重の場合と同じく、抗力係数  $C_D$  を用いて表示されている。抗力係数は

本来は、定常流に対して与えられるものであるが、波の場合のように速度が時間的に変化する場合についても、便宜的に同じ形で用いられている。流れが定常流の場合と変動流の場合とでは、 $C_D$  の値も若干異なるが、通常は同一の値を用いる事が多い。

表 3  $C_M$  の標準値<sup>1)</sup>

質量係数  $C_M$  についても標準的な値を表 3 に示しておく。  
なおこれらの式の適用にあたり、海洋生物等の付着により部材の見掛けの径が増加する事も考慮しておく必要がある。

波漂流力は、厳密には第 6 章と第 7 章とから反射波および発散波を求めて算定する必要があるが、他の波力と較べて二次のオーダーの外力であるので、簡略な方法を用いても良い。漂流力係数  $C_R$  は、例えば浮体形状が舟型の場合には日本造船研究協会第 155 研究部会の推定法（研究資料 No.269）が使用できる。また、箱型浮体に対しては、本報告書第 2 章 1.3 の表から漂流力および漂流モーメントを求めることができる。

波のスペクトルは、一般に次のように周波数スペクトル  $S(\omega)$  と方向分布函数  $G(\omega, \phi)$  とから成っている。

$$S(\omega, \phi) = S(\omega) \cdot G(\omega, \phi)$$

$S(\omega)$  としては種々のものが知られているが、深海波の場合には次のような式がよく用いられる。

#### (1) ISSC の式

$$S(\omega) = 0.11 H_v^2 \frac{T_v^2}{2\pi} \left( \frac{\omega}{\omega_v} \right)^{-5} \exp \left\{ -0.44 \left( \frac{\omega}{\omega_v} \right)^{-4} \right\}$$

$\omega$  は、円周波数 ( $\text{rad/sec}$ )

$H_v$  は、目視平均波高 ( $m$ ) で通常は有義波高  $H_{1/3}$  を用いる。

$T_v$  は、目視平均波周期 ( $\text{sec}$ ) で平均波周期  $T_m$  と等しいものとする。

$\omega_v$  は、次式により与えられる周波数 ( $\text{rad/sec}$ )

$$\omega_v = \frac{2\pi}{T_v}$$

#### (2) 光易—Bretschneider の式

$$S(f) = 0.257 \left( \frac{H_{1/3}}{T_h^{1/3}} \right)^2 f^{-5} \exp \left\{ -1.03 \left( \frac{H_{1/3}}{T_h^{1/3} f} \right)^{-4} \right\}$$

$f$  は、周波数 ( $1/\text{sec}$ )

$H_{1/3}$ ,  $T_h^{1/3}$  は、3.4-1 に定める有義波高 ( $m$ ) および有義波周期 ( $\text{sec}$ )

#### (3) JONSWAP の式

$$S(f) = \alpha g^2 (2\pi)^{-4} f^{-5} \exp \left\{ -\frac{5}{4} \left( \frac{f}{f_p} \right)^{-4} \right\} \gamma \exp \left\{ -\frac{(f-f_p)^2}{2\sigma^2 f_p^2} \right\}$$

$$\sigma = \begin{cases} \sigma_a & \dots f \leq f_p \\ \sigma_b & \dots f > f_p \end{cases}$$

$$\tilde{T}_p = 3.5 \tilde{x}^{-0.33}$$

$$\alpha = 0.076 \tilde{x}^{-0.22}$$

物 体 の 形 状 (柱の場合、輪方) (向は紙面に直角)	基準体積 (柱の場合) (は単位長)	質 量 係 数 (I:柱の長さ)
円 柱		$\frac{\pi}{4} D^3$
正 角 柱		$D^3$
長方形板		$\frac{\pi}{4} D^2$
球		$\frac{\pi D^3}{6}$
立 方 体		$D^3$

1) 土木学会「水理公式集」、昭和46年度改訂版

$$\tilde{f}_p = \frac{f_p U_{10}}{g}$$

$$\tilde{x} = \frac{g x}{U_{10}}$$

$x$  は、 フェッチ ( $m$ )

$\gamma$ ,  $\sigma_a$ ,  $\sigma_b$  は、 スペクトルの形状を決定する定数で、 次の値を用いてよい。

$$\gamma = 3.3, \quad \sigma_a = 0.07, \quad \sigma_b = 0.09$$

$U_{10}$  は、 3.3 - 1.に定める基本風速 ( $m/sec$ )

これらのうち、 ISSC の式と光易—Bretschneider の式とはいずれも Pierson-Moskowitz 型のスペクトルであり、 特に  $H_v = H_1 \sqrt{3}$ ,  $T_v = 0.9 T_1 \sqrt{3}$  とすると殆んど一致する。また JONSWAP の式は、 Pierson-Moskowitz 型のスペクトルにおいて、 ピークの値を  $\gamma$  倍に持ち上げたものとなっている。

方向分布函数  $G(\omega, \phi)$  は、 水深、 地形等により大きく変化するが、 これが与えられていない場合には次のような簡略式を用いてよい。

$$G(\omega, \phi) = \begin{cases} a_n \cos^n \phi & \dots \dots \dots \phi_1 \leq \phi \leq \phi_2 \\ 0 & \dots \dots \dots \text{上の範囲以外} \end{cases}$$

$\phi_1, \phi_2$  は、 不規則波の卓越方向からの最小、 最大偏角。

$$\int_{\phi_1}^{\phi_2} a_n \cos^n \phi d\phi = 1$$

$$n = 4, [\phi_1, \phi_2] = [-\frac{\pi}{2}, \frac{\pi}{2}] \text{ とするとき, } a_n = \frac{8}{3\pi} \text{ となる。}$$

#### 5.4 流れによる力

流れによる力は次式により算定する。

$$F = \frac{1}{2} \rho C_D U^2 A$$

$\rho$ ,  $A$  は、 5.3 - 1 の規定による。

$C_D$  は、 抗力係数

$U$  は、 部材位置における流れの速度 ( $m/sec$ )

流れとしては、 海流、 潮流および風による吹送流が一般的なものであるが、 特別な場合として高潮、 津波などに伴う流れによる抗力を求める場合にもこの式を用いてよい。

流速  $U$  は、 一般に水深方向に一様ではなく、 海面における流速  $U_0$  を基準にして、 海面下  $z$  の位置における流速は

$$U = (1 - \frac{z}{H})^\alpha U_0 \quad (m/sec)$$

のように幂法則で表わすことができる。但し  $H$  は水深 ( $m$ ) である。吹送流のように海面付近で励起されたものは  $\alpha$  が大きく、 潮流のようなものでは  $\alpha$  が小さい。前者に対しては  $\alpha = 1$ 、 後者に対しては  $\alpha = 1/2$  程度の値を用いる。

定常風による吹送流の流速は、 次式により推定できる。

$$U_0 = 0.01 U_{10} \quad (m/sec)$$

但し、  $U_{10}$  は 3.3 - 1.に定める基本風速 ( $m/sec$ ) である。

#### 5.5 地震による力

- 1. 地震による荷重は、 補度法または修正補度法によるものとする。
- 2. 係留された構造物の固有周期が長い場合には、 地震による変位についても考慮しなくてはならない。
- 3. 特に重要な構造物の場合には、 地震応答解析を行なわなくてはならない。

震度法とは、構造物の重量と震度との積で表わされる地震力が、構造物に静的に作用するとみなす設計法である。仮に構造物および係留システムが地盤と一体となって振動するときには、全体について同じ震度としてよいが、係留された構造物の固有周期が地震の周期に対して充分長くなると構造物は振動しないと考えてよい。但しこの場合には、地盤側と構造物側との相対的な変位量が問題となる。

係留された構造物の固有周期が上記の中間にある場合には、修正震度法が用いられる。

## 第6章 波強制力と流体力

浅海域における浮遊式海洋構造物の、動揺に関する流体力および波強制力は、水深の影響を考慮した理論によって求めなくてはならない。但し、横揺の減衰係数については、実験その他の適当な方法によって推定するのが望ましい。

浅海域における流体力の計算理論としては、多重極展開法、特異点分布法、直交函数展開法、有限要素法などがあるが、浮体形状が箱型の場合には、特異点分布法または直交函数展開法が適しているようである。

箱型浮体の幅喫水比  $B/d$  および水深喫水比  $H/d$  を表4の組合せについて計算した二次元流体力が、本報告書第2章1.3に数表化されている。浮体の形状を箱型とする場合には、主要目が定まった段階でこれらの数表から読み取った数値を  $B/d$ ,  $H/d$  に関して補間し、流体力係数を求めればよい。

横揺および、 $H/d$  の小さい場合の上下揺の減衰係数に関しては、粘性影響により非線形性が強くボテンシャル理論では取り扱えないもので、模型実験や既存資料などからの推定により、適当な値を用いる必要がある。この修正法については、本報告書第2章1.4において述べている。

以上に述べた流体力は全て二次元流体力であるが、 $L/B$  が有限の場合の三次元影響については、本報告書第2章1.5において述べている。

表4 計算状態

$B/d$	5	10	15	20
$H/d$				
1.2	○	○	○	○
1.4	○	○	○	○
2.0	○	○	○	○
3.0	○	○	○	○
$\infty$	○	○	○	○

## 第7章 係留浮体の運動と係留力

### 7.1 定常外力による変位

- 1. 定常外力による係留浮体の変位は、第5章に定める外力のうちの定常成分と、第4章の係留特性とを用いて求められる。
- 2. 浮体が索鎖により一点係留されている場合には、本章に拘わらず、振れまわり運動を考慮しなくてはならない。

風、潮流、波漂流力などの定常外力により、浮体は係留反力が外力と釣り合う位置まで変位するが、この変位量は第4章の静的係留特性図を用いて求められる。この場合、外力の作用方向の組み合わせは、それが著しく非現実的でない限り、係留システムにとって最も不利なものとする必要がある。

浮体が一点係留されている場合には、定常外力の下で所謂振れまわり運動をするが、これについては第2篇第5章において説明する。

### 7.2 浮体の運動

- 1. 係留浮体の運動は、自由浮体の運動方程式に係留特性から定まる力を考慮して解析する。
- 2. 係留浮体の運動に対する係留システムの影響は、変位に伴う復原力を考慮し、必要に応じ係留システムの慣性力および減衰力を附加するものとする。

係留されていない自由浮体の運動方程式は、次のような形で与えられる。

$$\frac{W}{g} \ddot{x} = -M\ddot{x} - N\dot{x} - Cx + F$$

ここで左辺は慣性力であり、右辺は第1項から順に、附加慣性力、減衰力、復原力および波強制力である。またM, N, Fは第5章および第6章から定まる流体力係数および波強制力である。

次に係留システムの影響としては、通常は変位に伴う係留反力を復原力の項に加えるだけであるが、ドルフィン・ダンバー係留のような場合には、ダンバーの負荷・除荷曲線の囲むヒステリシスの面積に相当するエネルギーが消費されるので、これを減衰力の項に加えることもある。慣性力、附加慣性力および波強制力に関する係留システムの影響は、一般に小さいので無視してよい。

このようにして立てられた微分方程式を解く方法としては、係数をすべて線形化、ないしは等価線形化し、微小変位を仮定して解く解析的方法と、非線形な微分方程式をそのまま数値的に解く方法がある。

以上は、浮体の重心に関する運動方程式であるが、これを解いてxが求まれば、浮体上の任意の点における変位は直ちに求められる。

係留ラインの影響を線形ばねとして取り扱う場合のばね定数、および係留ラインの動的影響については、本報告書第3章1.および2.において説明してある。

### 7.3 係 留 力

係留システムに働く係留力は、7.2で求めた浮体側の係留点の変位と、第4章の係留特性とを用いて求められる。

係留浮体は、7.1-1の定常変位位置を中心にして運動する。このときの最大変位は、定常変位に運動の変位を加えたものになるが、この変位に対する係留力は、第4章の係留特性図を用いて求められる。

### 7.4 不規則変動外力中の応答

不規則変動外力中の、浮体の運動および係留力は、線形重ね合わせ法またはシミュレーションにより推定する。

外力に対する、浮体または係留システムの応答が線形とみなされる場合には、線形重ね合わせの原理により次式が成立する。

$$S_0(\omega) = A_0^2(\omega) A_1(\omega)$$

但し  $S_0(\omega)$  は外力のスペクトル、  $S_0(\omega)$  は応答のスペクトル、  $A(\omega)$  は周波数応答函数である。 $S_0(\omega)$  が得られれば、種々の統計的予測値はこれを用いて推定できる。この方法は理論が簡潔であり、計算も容易であるが、係留システムの解析のように非線形性の強い問題では適用に難がある。

シミュレーション解析を行なう場合には、非線形な係留特性をそのまま取り扱う事が可能であるが、初期条件、外力の時系列などの与え方により異なった結果を生ずるので、数回の計算を実施する必要がある。

このように、両方法はそれぞれ一長一短があるので、問題の性質に応じて使い分けるのが良いと考えられる。

## 第8章 総合検討

第7章において得られた係留浮体の変位および係留力については、次の条件に適合している事を確認しなくてはならない。

- (1) 許容変位量
- (2) 係留装置の破断強度
- (3) 係留装置の疲労強度
- (4) その他の与えられた設計条件

第7章においては、係留浮体に加わる荷重に対する浮体の変位および係留力を求めた。これらの値はそれぞれ、ある定められた範囲内になくてはならないが、その許容値の設定について説明する。

海洋構造物およびその係留システムの設計においては、一般に荷重状態を「通常時」および「異常時」に分けて考えることが多い。通常時では、比較的頻度の高い荷重条件の下で構造物が正常に稼働し、その所期の機能を発揮するという機能面を重視し、異常時では、与えられた再現期間内において構造物が遭遇する最も苛酷な条件下で、通常の機能を一時停止しても、係留システムの破壊、構造物の漂流を防止するという安全面からの検討が行なわれる。

異常時の荷重は第5章でも述べたように、設置海域、構造物の形状、係留方式、再現期間等から定まる最悪状態に対して定まるものであるが、通常時については上述のようにこれとは別の観点から決定される。通常時の荷重条件を低く抑えることは、構造物や係留システムの規模、寸法の軽減をもたらすが、同時に稼働可能日数の減少につながるので、それらを勘案しながら決定する必要がある。

これら、通常時および異常時のそれぞれに対し(1)~(4)の条件も変化することになる。

次に係留ラインの安全率については、資料が少ないが、例えば土木学会の「海洋鋼構造物設計指針(案)解説」では、通常時荷重に対して3.5~4.0を、また異常時荷重に対しては2.5~3.0を目安としている。

また、索鎖の強度については本報告書第4章2において述べられている。

(1)~(3)以外に予想される条件としては、例えばアンカーの把駐力の問題、ラインの形状などが考えられる。後者は主として索鎖係留の場合に発生する問題であるが、係留ラインが水中および海底付近で描く形状によっては、附近を航行する船舶の妨げとなったり、海底の自然環境を破壊するというような問題が生じ得るからである。

## 第2篇 多点係留方式

### 第1章 係 留 方 式

海洋構造物の係留システムは、設置場所、構造物の形式、外力などの設計条件に応じた適当な方式を選ばなくてはならない。

海洋構造物を複数条の索鎖で係留する場合の、各係留ラインの形式としては次のようなものがある。

- 索鎖係留方式（索方式、鎖方式、索・鎖複合方式）
- 中間ブイ係留方式
- 中間シンカー係留方式
- テンションレグ係留方式

これら各方式のうち本指針が対象としている浅海域においては、索鎖の自重のみに頼った索鎖係留方式では索鎖の

単位長さあたりの重量が非常に大きくなり現実的でない。また水線面積の大きい箱型浮体では外力の変動が大きく、テンションレグ係留方式の適用は困難である。中間ブイおよび中間シンカーはブイの水没やシンカーの持ち上りによる緩衝効果が期待できるが、許容変位量の小さい浅海域においては中間シンカー係留方式の方が有効なようである。その理由は、シンカーの持ち上りにより係留浮体の定常変位が小さく抑えられるので、波等による変動変位に対して余裕があるからである。これに対し、中間ブイ係留方式は係留力の立ち上がりが緩やかであるので、変位量はやゝ大きくなるが、波漂流力、風抗力、潮流力などの定常外力が小さい海域では有効である。

中間ブイ係留方式、中間シンカー係留方式の全般的な特徴および問題点としては、次のような事項が挙げられる。

- (1) 二次元係留時の浮体の運動特性は、スラック係留であれば、線形ポテンシャル理論による流体力を用い、係留ラインの影響を線形ばね定数に基づく復原力として考慮した運動方程式を解くことにより、実用上充分な精度で推定できる。但し運動の同調点附近では、別途考慮が必要である。
- (2) 係留ラインに作用する衝撃的な張力を緩和する目的で、ブイとシンカーとを併用する場合には、初期張力と外力との関連で、通常の係留よりも衝撃力が大きくなる可能性があるので、充分な注意が必要である。
- (3) 中間ブイの形状は、種々変化させても特性上は大差ないので、製作が容易な円筒型でよい。
- (4) 三次元係留では不均一な張力が生ずるので、二次元係留の場合の検討結果をそのまま用いる事はできない。

## 第2章 係 留 特 性

個々の係留装置および係留システム全体について、静的および動的な係留特性を考慮しなくてはならない。

一般に、索鎖のみによる係留方式に較べて、中間ブイあるいは中間シンカーを設置した場合には、ブイの水没やシンカーの持ち上りによる緩衝効果のため、係留力の増加は抑えられる。しかし、水深、初期張力および各種外力条件等により、必ずしもブイおよびシンカーの効果が顕著に見られない場合や逆効果となる場合もあるので注意を要する。

なお、本報告書第3章1で、係留力の静的特性に及ぼす各種パラメーターの影響をシミュレーション計算によって明らかにし、本報告書第3章2で、係留力の動的特性の各種計算法の概要について述べている。

## 第3章 初期張力

多点係留方式の場合には、構造物の許容変位量等を考慮して、適当な初期張力を加えるものとする。

多点係留方式を採用した場合には、通常はアンカーを布設した後で索鎖を巻き込んで初期張力を加える。この目的はアンカーの安定性を良くするためであるが、これに伴ない図3のようにカーネリー曲線の傾斜の大きい部分を用いることになるので係留反力は大きくなり、浮体の変位量は小さく抑えられるが、浅海域ではすぐトート状態となるので初期張力はあまり大きくしない方が良い。

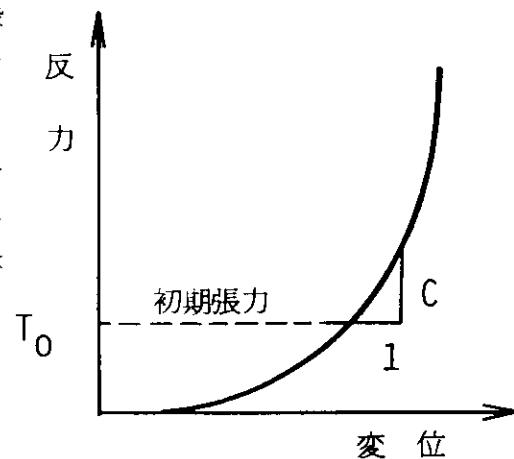


図3 初期張力とばね定数

#### 第4章 定常変位と係留力

係留システムに作用する外力のうちの定常成分による定常変位とそのときの係留力とは、第2章の係留特性と第1篇第5章の外力とにより求められる。

定常外力による変位および係留力は、係留システム全体に関する釣合方程式を解くことにより得られる。個々の係留ラインの水平係留力とその微係数を用い、逐次近似法によって平衡状態を求める方法が本報告書第3章5.1.1に述べられている。

#### 第5章 係留浮体の運動と係留力

- 1. 波による係留浮体の運動と、これによる係留力とは、第1篇第7章7.2ないし7.4による。
- 2. 多点係留された浮体の長周期運動の可能性についても検討しなくてはならない。

一般に、索鎖等による係留方式の係留力特性は強い非線形性を示すので、波浪等の変動外力が作用する環境条件下において係留力を精度良く推定するためには、時間領域での数値解法であるシミュレーション計算法によらねばならない。しかし、シミュレーション計算法は膨大な計算時間を要するので、係留システムの概略要目を決定するために初期設計段階で用いられる計算法としては必ずしも適当なものではない。そこで、浮体の運動に及ぼす係留システムの影響を無視して、定常外力との釣合位置に自由浮体の運動を重ね合わせて係留力を推定する簡易計算法が有効となる。この簡易計算法の詳細は本報告書第3章5.1.1に示してあり、また係留方式および環境条件を変化させて実施したシリーズ計算結果も本報告書第3章5.5.1に示してある。このシリーズ計算結果から、各種環境条件が係留力に及ぼす影響を把握することが可能である。なお、この簡易計算法では浮体と係留システムとの同調現象を考慮していないので、この点に関しては別途考慮する必要がある。

索鎖により緩い係留をされた浮体は一般に左右揺の長い固有周期をもっており、外力にそのような成分が含まれていると浮体は長周期運動をする。これについては第6章において説明する。

#### 第6章 長周期運動

不規則波中の長周期運動の標準偏差  $\sigma_x$  は、次式により推定できる。

$$\sigma_x = \frac{x_s}{2\nu}$$

但し、

$\sigma_x$  ; 長周期運動の標準偏差

$$x_s = \frac{F_0}{C}$$

$$\nu = N / \sqrt{\left( \frac{W}{g} + M \right) C}$$

W 浮体の排水量

M 附加質量

N 減衰係数

C 復原力

$F_0$  外力のうちの定常成分

係留されない浮体は一般に水平面内の変位に対して復原力をもたないので、固有周期も存在しないが、索鎖で緩やかに係留された場合には非常に長い固有周期をもつ。このような低周波数域では減衰力も小さいために、何らかの原因で長周期運動が惹き起こされるとかなり大きい運動になる事がある。この原因としては次のようなものが考えられる。

- 長周期の変動波漂流力
- 長周期の変動風抗力
- 長周期波

上記の設計用略算式は長周期の変動波漂流力に対するものであって<sup>1)</sup>、それぞれの係数は第1篇第7章7.2に示した運動方程式を変形して

$$\left( \frac{W}{g} + M \right) \ddot{x} + N \dot{x} + Cx = F_o + f(t)$$

と表わした時の各項の係数である。 $x_s$  は定義により定常波漂流力による変位であるから、この略算式によれば定常波漂流力による変位から長周期運動の振幅を求めることができる。

更に詳しくは本報告書第3章5.4に述べている。

## 第7章 総合検討

第5、6章において得られた係留浮体の変位および係留力の検討は、第1篇第8章による。

## 第3篇 一点係留方式

### 第1章 係留方式

海洋構造物の一点係留用の施設、配置は、構造物を一定地点に安全に保持するよう計画しなくてはならない。

ここで言う一点係留とは、構造物自体が一点を介して係留されている状態を指すものとする。一点係留方式は、多点係留方式あるいはドルフィン係留方式に較べて構造が簡単で費用も安い。また一般的に、他の係留方式よりも係留力を小さくすることができる。これは、外力の作用する方向に応じて構造物が自由に向きを変えることによるものであるが、逆に言えば構造物が自由に動きまわるだけの広い海面を必要とする。

一点係留方式を更に大きく分けると、通常船舶の単錨泊のように構造物を直接係留

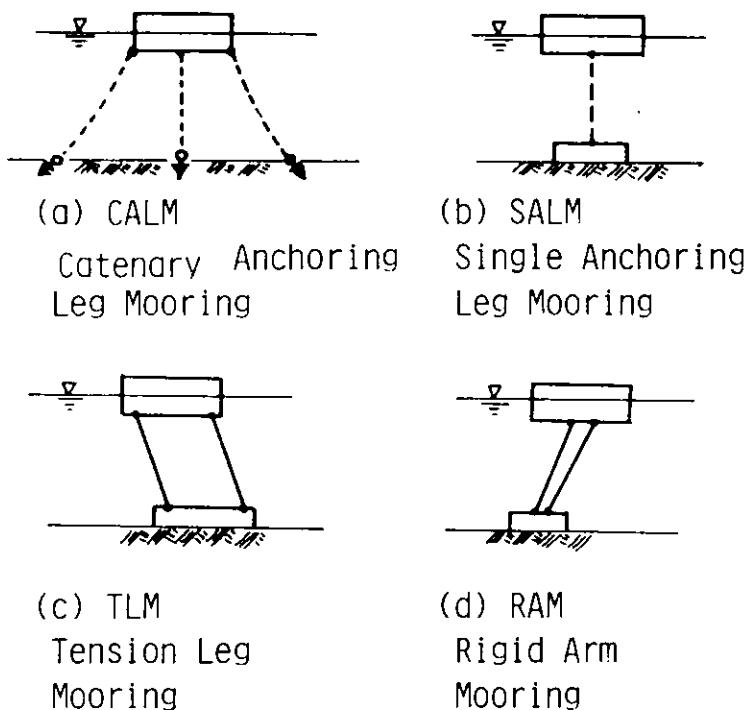


図4 ブイの係留方式

1) 井上義行「横波中における係留浮体の長周期運動」、日本造船学会論文集第143、144号、1978年6月、12月

するものと、ブイまたは固定構造物に係船するものと考えられるが、本指針では主にブイ係留を対象としている。

ブイ自身の係留には図4のような各種の方式がある。

C A L Mは索鎖によりカテナリー係留されており、場合によっては中間シンカーが併用されることもある。この方式は複数条の係留索が係留されているので、大きい外力に耐えることが可能であり、また万一係留索のうち一本が破断しても機能の喪失には至らず、信頼度が高いと言える。この方式は構造は簡単であるが、ブイの水平面内移動量が他の方式に較べて大きいという欠点がある。但しこの点は第2篇第1章において述べたように、中間シンカーを併用することによりある程度改善できる。

一条の索鎖でカテナリー係留されたものとしては、小型の係船ブイが実績も多いが、図4(b)に示したS A L Mはこれとはやや異なり、一本の索鎖によって浮力を拘束された係留方式となっている。これは図4(c)のT L Mの一種と考えることもできる。

S A L M, T L M, およびR A Mはブイの移動量が小さく抑えられるが、構造が複雑であり、また外力の変動が大きい場合には種々の問題が生ずる。

ブイの係留方式の決定にあたっては、上記の得失を考慮する必要がある。

次に、係留ブイと構造物との連結方法としては図5のようなものが考えられる。

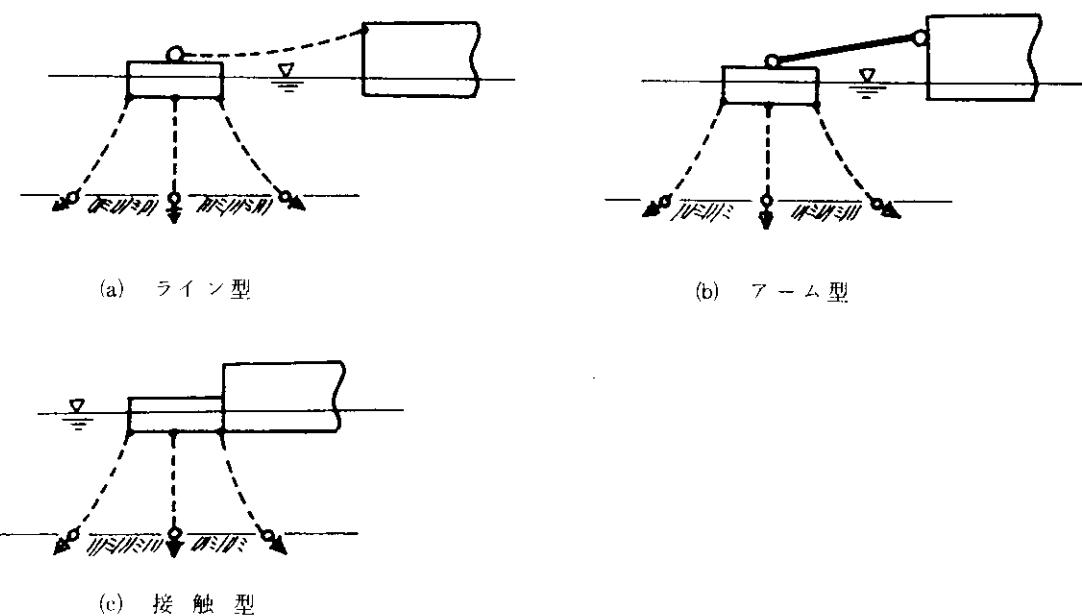


図5 浮体の係留方式

## 第2章 係 留 特 性

一点係留方式のシステム全体について、静的および動的な係留特性を考慮しなくてはならない。

ブイ係留の場合には、ブイと構造物とを連結する索はもとより、ブイ自身を係留する索鎖の係留特性を検討する必要がある。ブイを係留する個々の係留ラインの特性から、ブイ全体の係留特性を求める際には、ブイ上の代表点における変位に対する係留反力を求めておくとよい。

代表点の変位として、通常は水平方向の変位だけを取り扱えばよいが、ブイと構造物との連結方法によっては回転変位に対する係留特性が必要になる。

### 第3章 定常変位と係留力

- 1. 係留システムに作用する外力のうちの定常成分による定常変位と、そのときの係留力とは、第2章の係留特性と第1篇第5章の外力とにより求められる。
- 2. 定常外力による振れまわり運動の可能性についても検討しなくてはならない。

定常外力による変位は、係留システム全体に関する静的釣り合い方程式を解くことにより得られる。またその時の各係留ラインの係留力は、個々のラインについて求めた係留特性から直ちに得られる。

一点係留方式の場合には、定常外力の下でも所謂振れまわり運動をすることがある。振れまわり運動が大きくなると、構造物の慣性力の影響で係留力は急激に大きくなるので、この点の検討が必要である。振れまわり運動については、第5章において説明する。

### 第4章 係留浮体の運動と係留力

波による係留浮体の運動と、これによる係留力とは、第1篇第7章7.2ないし7.4による。

一点係留された構造物が、風、潮流および波を受けるときには係留浮体は一般に振れまわり運動と、波による運動とをする。振れまわり運動と波による運動とが共存する場合の流体力については解明すべき問題も多く、これについては第5章で説明するが、ここではこれら二種類の運動が互いに独立に取り扱えるものと仮定する。このとき係留浮体の運動と、これによる係留ラインの張力は、第1篇第7章に述べた方法により求められる。

図5の(c)のような係留方法では、構造物の運動がダイレクトに直接伝えられるため、他の係留方法の場合に較べて係留ラインの張力が大きくなることが考えられる。

### 第5章 振れまわり運動

- 1. 一点係留方式の場合には、振れまわり運動とそれによる係留力とを考慮しなくてはならない。
- 2. 振れまわり運動については、可能な限り模型実験等を行なうのが望ましい。

(1) 振れまわり運動は一種の不安定現象であり、船を曳航するときの進路安定性と同じ問題と考えられる。しかし係留問題では船体自体の前進速度がないため被曳航船の進路安定条件式とは若干内容が異なり、流体による減衰項よりも外力の影響が大きい。従って、外力と船体の見掛け質量からでも概略の振れまわり運動に対する判別ができるが、その方法については本報告書第3章6.4に示している。

一点係留された箱型海洋構造物の振れまわり運動は、通常船型の場合と較べて小さいことが理論的考察、模型試験およびシミュレーション計算などから確かめられている。

(2) 振れまわり運動は一般に、次のように操縦性の運動方程式に基づいた式で記述される。

$$\left. \begin{aligned} (M+m_x)\ddot{u} - (M+m_y)v \cdot r &= F_x + T_H \cos(\alpha - \beta) \\ (M+m_y)\ddot{v} + (M+m_x)u \cdot r &= F_y - T_H \sin(\alpha - \beta) \\ (J + j_\phi)\ddot{r} &= M_\phi - T_H \cdot \ell_p \cdot \sin(\alpha - \beta) \end{aligned} \right\}$$

M : 構造物の質量

J : 船搖慣性二次モーメント

$m_x$   $m_y$  : x, y 方向の附加質量

$j_\phi$  : 船体附加慣性モーメント

$u, v$  :  $x, y$  方向の速度

$\dot{\gamma}$  : 旋回角速度

$F_x, F_y, M_\phi$  : 外力およびモーメント

$T_H$  : 係留反力

$\ell_p$  : 構造物の重心から係留点までの距離

ここでは構造物の運動は平面運動のみとし、波による運動は考えない。外力としては、潮流力、風圧力、波漂流力を考慮する。

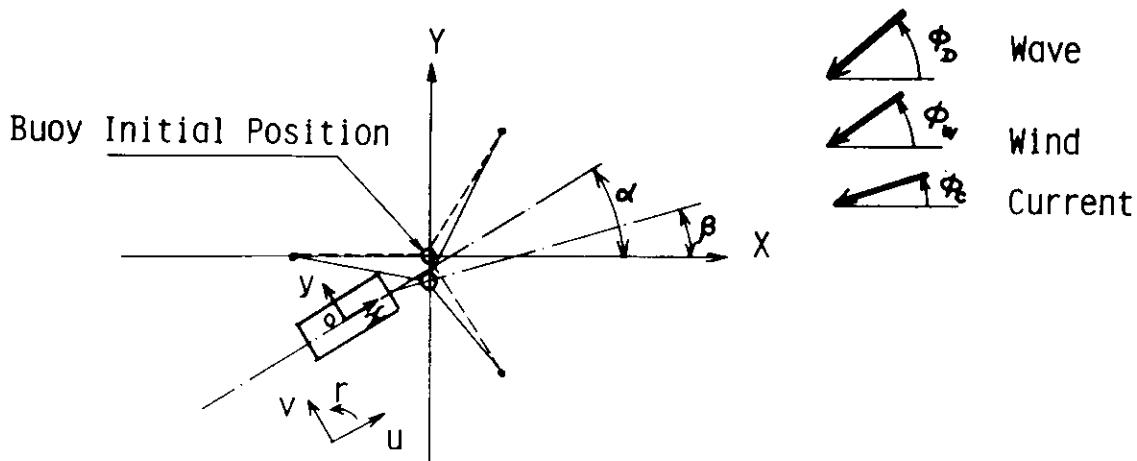


図 6 座標系

(3) 附加質量  $m_x, m_y$  および附加慣性モーメント  $j_\phi$  については、振れまわり運動の速度は小さいので、 $\omega = 0$  に対する数値を推定して用いてよい。

(4) 外力およびモーメントは、第1篇第5章により求められる。潮流による力を求める場合、動的解析においては船体の速度と潮流流速との合成速度を流速とする。なお、潮流によるセーメントに次式による旋回抵抗を考慮することもある。

$$\left\{ \begin{array}{l} -M_{c\phi}' = 0.125 \rho \dot{\alpha} |\dot{\alpha}| + C_y' \left\{ \left( \frac{L}{2} - \overline{\otimes} G \right)^4 + \left( \frac{L}{2} + \overline{\otimes} G \right)^4 \right\} d \\ \dot{\alpha} : 旋回の角速度 \\ C_y' : 横方向成分力係数 \end{array} \right.$$

(5) (2)で述べた運動方程式を解くには、計算開始時の構造物の位置と姿勢とを与え、その状態において係留反力  $T_H$  を計算する。またこの時の風、潮流、波などの相対入射角を求めて外力を計算し、次の時刻における構造物の位置と姿勢とを求める。以下このようにして次々と繰り返していくば、時々刻々の構造物の位置や係留力が得られる。

(6) 波による船体運動を考慮する場合

第4章では振れまわり運動と波による運動とが互いに独立であるとしたが、これは振れまわり運動が小さくて構造物に対する波の平均入射角度が変化しない場合を想定している。振れまわり運動が存在する場合には、微小時間、例えば(5)のシミュレーションのきざみ時間の間は構造物に対する波の平均入射角度を一定と考えて、振れまわり運動とは独立に船体運動を求める。

## 第6章 総合検討

第4、5章において得られた係留浮体の変位および係留力の検討は、第1篇第8章による。

## 第4篇 ドルフィン・ダンパー係留方式

### 第1章 係 留 方 式

係留ドルフィンおよびダンパーは、構造物の動揺等によって生ずる外力を考慮して適当な方式を選ばなくてはならない。

浮遊式の海洋構造物を、ダンパーを介して海底に固定されたドルフィンに係留する方式は、索鎖係留と較べて構造物の変位を小さく抑えることができるが、大外力の下では規模が大きくなり過ぎて実現不可能な場合がある。故にドルフィン係留方式が採用されるのは一般に、比較的平穏な海域にあって且つ浮体の動揺を極力小さく抑える必要があるような場合である。

ドルフィンの形式には図7のようなものが  
ある。

ドルフィンに係留された構造物の動揺を考  
える場合には、ドルフィンは剛体と考えて係  
留特性はダンバーのものだけを考慮すればよ  
いが、地盤が弱い場合やドルフィンの剛性が  
小さい場合にはドルフィン自体の変位が問題  
になることもある。

### 第2章 係 留 特 性

ダンパーは、構造物の動揺等による外  
力を有効に吸収するとともに、繰り返し  
荷重に対する疲労強度の充分なもの選  
定しなくてはならない。

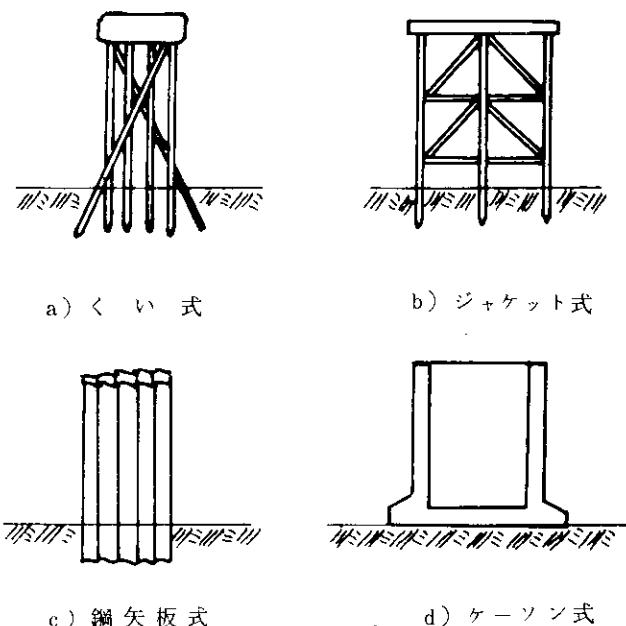


図7 係留ドルフィンの形式

第1章においても述べたように、ドルフィン係留方式の場合には通常ドルフィンを剛体として取扱うので、係留特性は即ちダンバーの特性であることになる。ダンバーは吸収エネルギーが大きく、且つその時生ずる反力が小さいものが望ましい。

現在用いられているダンバーは、殆んどがゴム製であるが、大きく分けてソリッド式と空気式とがある。まずソリッド式は、ゴムの形状変化によってエネルギーを吸収するものであり、その形状によりV型、π型、サークル型などがある。これらソリッド型ダンバーの特徴は、ある歪の範囲内においては反力は増加せずにエネルギー吸収のみが行なわれることである。但しその範囲を超えて更に圧縮すると、急激に反力が増加するので注意が必要である。

次に空気式ダンバーは、ゴムの弾性ではなく空気の圧縮弾性でエネルギーを吸収するものであり、その反力特性は図8(b)のように歪の増加に従って反力が緩かに増加する。ソリッド式と比較すると初期反力が小さいため、一定の外力の下では変位が大きくなるという欠点があるが、更に外力が増加しても反力が緩かに増加すること、また構造が比較的単純なため取扱いが簡単で且つあらゆる方向の外力に対して容易に対応できるという利点がある。

ゴムダンバーは、作用荷重のパターン(荷重速度、荷重傾斜等)、繰り返し荷重、温度変化等によりその圧縮特性が変化するので、次に掲げる項目についてその特性を十分は握るものとする。

#### ○動的荷重時の圧縮特性

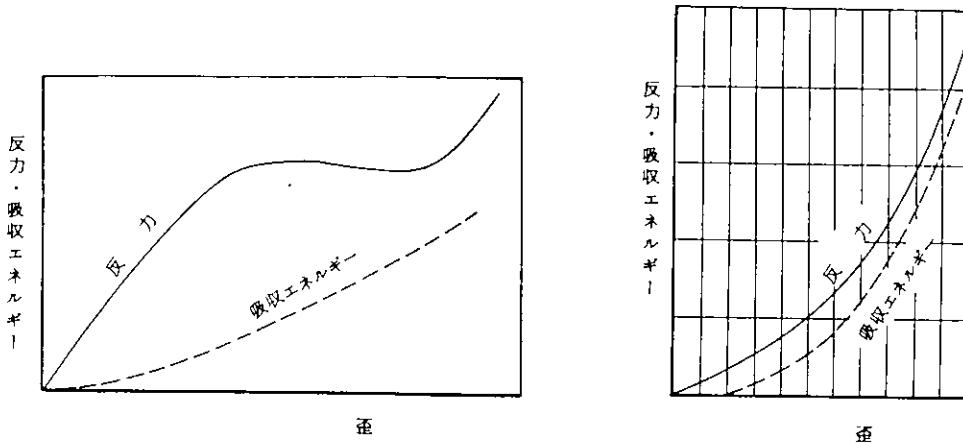


図 8 ダンパーの特性

- 繰り返し荷重(疲労を含む)時の圧縮特性
- 傾斜荷重時の圧縮特性
- 温度変化時の圧縮特性
- 経年変化(劣化)後の圧縮特性
- クリープ後の圧縮特性

### 第3章 定常変位と係留力

係留システムに作用する外力のうちの定常成分による定常変位とそのときの係留力とは、第2章の係留特性と第1篇第5章の外力とにより求められる。

係留された構造物が定常外力を受けた場合、構造物はダンパーの反力が外力と静的に釣り合う位置まで変位する。洋上石油備蓄システムに対する安全基準<sup>1)</sup>ではフリッド式のゴムダンパーに対して、定常外力による歪量を10%以下と規定している。これは10%を超える歪に相当する荷重のもとでは特性が不安定となり、クリープを生ずる可能性があるからである。

### 第4章 係留浮体の運動と係留力

波による係留浮体の運動とこれによる係留力とは、第1篇第7章7.2ないし7.4による。なおその際に可能な限り忠実に係留特性を評価するのが望ましい。

浮体の運動の計算は、他の係留方式の場合と同様に行なうが、ドルフィン係留の場合にはそのダンパーの係留特性が、図8に示すように著しい非線形性を有するので、変位反力曲線を折線で近似する等してできるだけ忠実に評価するのが望ましい。但しその場合には計算の実施に膨大な時間を要するので、設計初期の検討段階では係留特性を何らかの方法で線形化してもよいと思われる。本報告書第3章7.5にはこのような線形計算によりダンパー個数、環境外力条件を変化させたシリーズ計算を行なってドルフィン係留方式の適用限界を検討した結果を示す。

前出の洋上石油備蓄システムに対する安全基準<sup>1)</sup>では、フリッド式のゴムダンパーに対して、定常歪を含んだ最大

1) 日本港湾協会「港湾の施設の技術上の基準・同解説」、昭和55年9月；のうち、Ⅱ海上貯油基地施設

歪を35%以下と規定している。これは通常のソリッド式のゴムダンパーでは、図8(a)において50%歪までは一定反力でこれを超えると反力が急激に増加するように設計されている点を考慮し、これにある程度の安全率を見込んだものである。但し上記ダンパーの許容歪量は数値シミュレーションに基づく値に対するものである。

## 第5章 地震に対する応答

ドルフィン係留方式の場合には、地震に対する応答を考慮しなくてはならない。

ドルフィン係留方式の場合にはドルフィンが海底地盤に固定されているために、地震発生時にはその変位がドルフィンに伝わる。この影響を簡単に検討する場合には第1篇第5章5.5の震度法によることができる。すなわちドルフィンが動いても浮体は動搖しないものとし、ドルフィンに作用する慣性力はドルフィンの重量と震度との積で表わされる。また地震動によるダンパー位置の変位に対応するダンパー反力が浮体およびドルフィンに作用すると考えるのである。

浮体の動搖を考慮する場合には、修正震度法によることもできるが、本報告書第3章7.4においてはシミュレーションによる地震応答解析を行なっている。

## 第6章 総合検討

第4、5章において得られた係留浮体の変位および係留力の検討は、第1篇第8章による。

## 2. 索鎖の強度

海洋構造物の係留システムとして、索鎖を用いた多点係留、および一点係留を採用する場合には、係留材料としての索鎖の強度について十分な配慮が必要である。本節では、係留材料として使用される索鎖の一般的な特徴について調査し、更に、特に恒久的な係留構造物の場合に問題となる疲労強度について検討した。

### 2.1 ウイヤーロープ

#### 2.1.1 ウイヤーロープの種類<sup>1)</sup>

ウイヤーロープは、その構成、配置、あるいは撚り方等によって様々な種類があるが、大略、次のように分類できる。

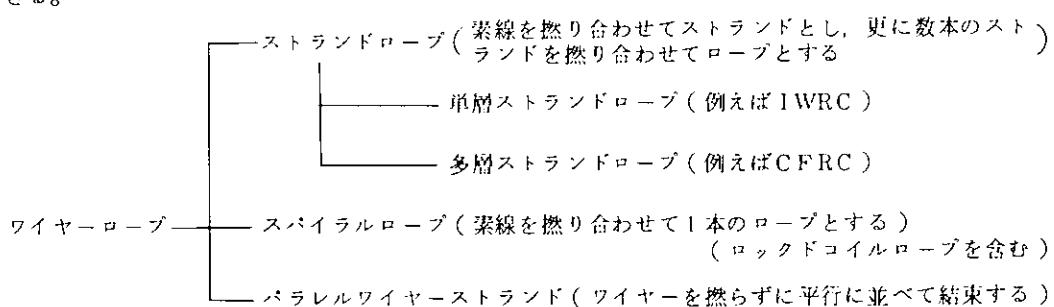


図4.2.1.1 ウイヤーロープの分類

##### (1) ストランドロープ

ストランドロープは、最も一般的に用いられているロープで、1本の心綱の周りに3~9本のストランドが

撲り合わされているが、通常は6ストランドが最も多い。1本のストランドは、7～数10本の素線が撲り合わされており、ストランドの数と、1本のストランドの素線の数でロープ構成を表わす。心綱は繊維を用いたもの（FC）と鋼心を用いたものがあり、いずれも整形とグリス保持の役目を果す。鋼心のうち、心ロープと外層ストランドを密着させ、一体として撲り上げたものをCenter Fit wire Rope Core (CFRC)と呼び、独立した心ロープと外層ロープを別工程で撲ったものをIndependent Wire Rope Core (IWRC)と呼ぶ。一般には、柔軟性に富んだIWRCが多く使われている。

ストランドロープの撲り方には、普通撲りとラング撲りの2通りがある。普通撲りは、ロープの撲り方向とストランドの撲り方向が反対になっており、ラング撲りは、ロープの撲り方向とストランドの撲り方向が同一になっている。また、それぞれの撲り方には、撲りの向きによってZ撲りとS撲りがあるが、特殊な目的以外は通常、Z撲りである。

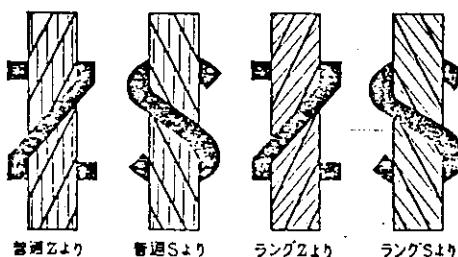


図4.2.1.2 ストランドロープの撲り方

撲り方の違いによる特性の違いをまとめると、表4.2.1.1のようになる。

表4.2.1.1 ストランドロープの撲り方による特徴

	普通 撲り	ラング 撲り
操作性	キンクしにくく取扱いが容易	自転トルクが大きくキンクしやすい
機械的特性	耐摩耗性に劣る	耐摩耗性、曲げ疲労に強い

ストランドロープに張力がかかると、撲りによるトルクが発生するが、多層ストランドロープの中には、各層間で撲りの向きを逆にし、非自転性をもたせたものもある。

## (2) スパイラルロープ

スパイラルロープは数本から数百本の素線を撲り合わせて1本のロープにしたものと総称で、小径のものは主として、プレストレストコンクリート用などに用いられるが、構造用ケーブルとしては素線数200、ロープ径100%程度のものまで製造されている。また、スパイラルロープのうち外側の1～3層を、特殊な断面形状の素線を緊密にかみ合わせて撲ったものを、特にロックドコイルロープと呼び、耐摩耗性、耐腐食性の向上が図られている。ロックドコイルロープの断面形状の代表例を図4.2.1.3に示す。

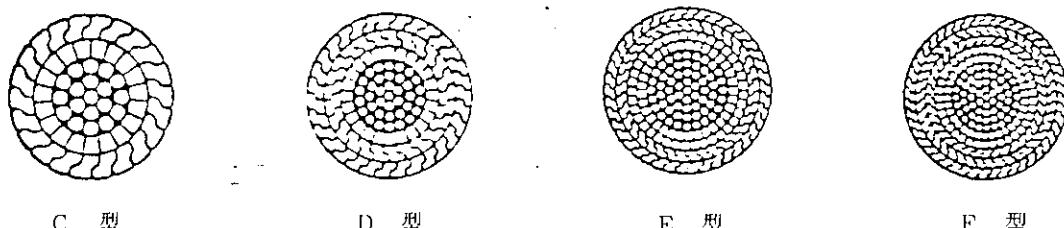


図4.2.1.3 ロックドコイルロープ断面

### (3) パラレルワイヤーストランド (PWS)

パラレルワイヤーストランドは、20～200本程度の素線を撚らずに平行に並べて結束したもので、主として長大吊橋や斜張橋のメインロープとして用いられているものであるが、近年、海中での使用についても見直されつつある。代表的なパラレルワイヤーストランドの断面形状を図4.2.1.4に示す。

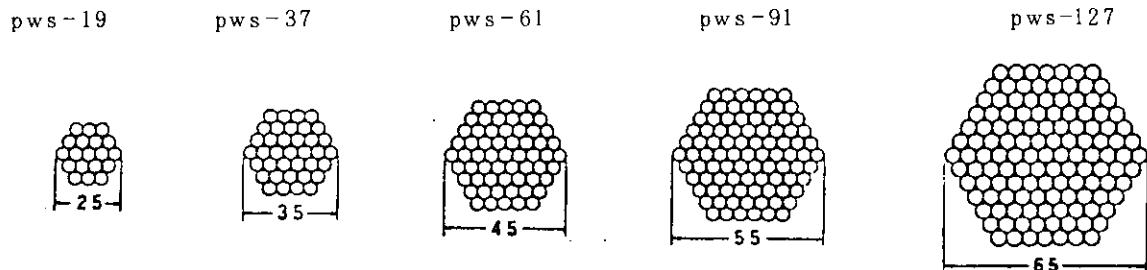


図4.2.1.4 P W S 断面

#### 2.1.2 ワイヤーロープの比強度

ワイヤーロープの種類による静的切断荷重の差を比較するため、代表的なワイヤーロープについて比強度（切断荷重／単位長さ当り重量）を求めるとき図4.2.1.5の如くなる。なお、図中には比較のためにチェーンの比強度も記入した。一般的にワイヤーロープはチェーンに比べて5～7倍の比強度を有しているが、ワイヤーロープ相互間では、

$$\text{ストランドロープ} < \text{スパイラルロープ} < \text{PWS}$$

の順に比強度が大きくなることがわかる。しかし、ロックドコイルロープは、構造的にはスパイラルロープに近いにもかかわらず、比強度はかなり低い。ロックドコイルロープは、同径のストランドロープに比べて切断荷重が大きい事がひとつ特徴であるが、係留材料として考える場合には自重と強度の関係についても注意が必要である。

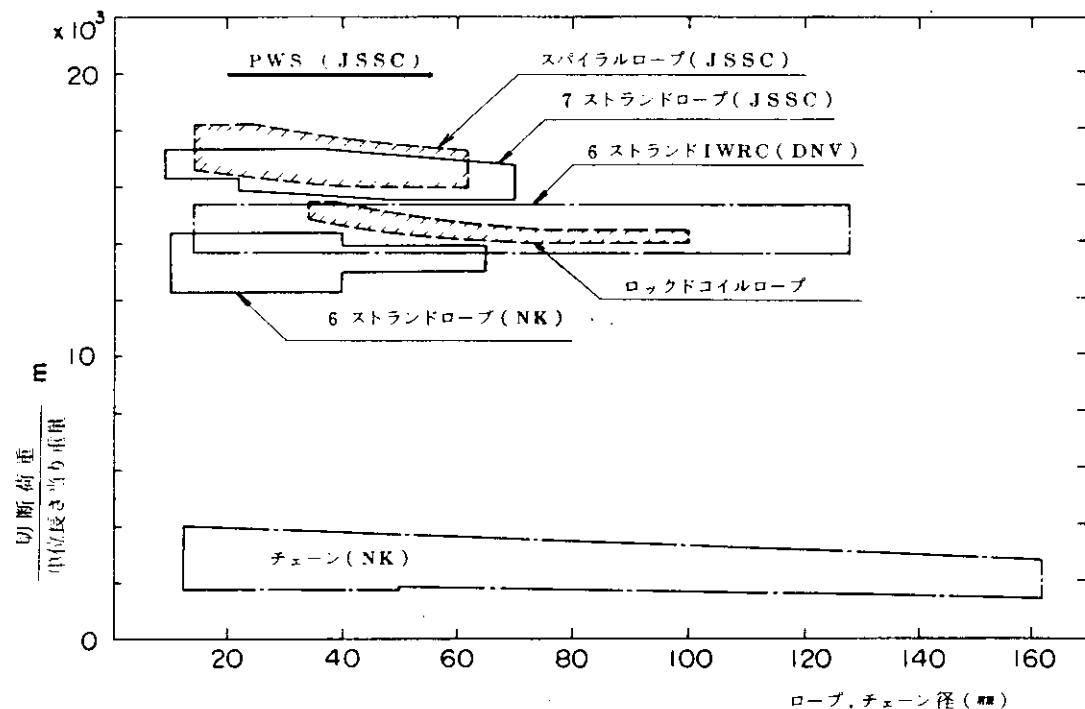


図4.2.1.5 各種ワイヤーロープの比強度

### 2.1.3 ワイヤーロープに関する規格

ワイヤーロープに関する規格は、JIS<sup>2)</sup>、日本鋼構造協会（JSSC）構造用ケーブル材料規格<sup>3)</sup>など、一般的な使途を対象とした規格と、各船級協会の係留用ケーブルとしての規格がある。

#### (1) 船級協会規則

NK<sup>4)</sup>、ABS<sup>5)</sup>、BV<sup>6)</sup>、DNV<sup>7)</sup>、LRS<sup>8)</sup>の5つの船級協会の係留用ワイヤーロープについて調査した。ワイヤーロープに関する規定がないABSを除く4つの船級協会の規格を比較して表4.2.1.2に示す。なお船級協会が規定するワイヤーロープは全て6ストランドロープである。これらの規定はいずれも船舶に関するものであり、曳索あるいは係留索を対象としている。また、海洋構造物を対象とした規定においても、一時的な係留に関しては船舶に関する規定を準用するものとしている。

#### (2) その他の規格

日本鋼構造協会（JSSC）は、構造用ストランドロープ、構造用スパイラルロープ、構造用ロックドコイルロープ、平行線ストランドを対象とした、構造用ケーブル材料規格を判定している。これは主として建築、土木分野での使用を対象としている。

一方、American Petroleum Institute (API)<sup>9)</sup>は、Petroleum Industryの要求に答えるべくワイヤーロープに関する規格を制定している。この規格は、素線の径別の機械的性質を詳細に規定していること、および最大径154mmまでのストランドロープの公称強度を規定していることが特徴である。

各種規則が切断強度を規定しているワイヤーロープの種類と公称径を図4.2.1.6に示す。

### 2.1.4 ワイヤーロープの疲労強度

ワイヤーロープの曲げ疲労強度については運搬用等の動索を対象とした数多くの研究成果があるが、ワイヤーロープ便覧<sup>10)</sup>に示されているのでここでは省略し、海洋構造物の係留用ロープで問題となる軸力疲労強度について調査を行った。

図4.2.1.7は井野<sup>11)</sup>によってまとめられたワイヤーロープの疲労強度線図である。縦軸は全荷重範囲の公称破断荷重に対する比を対数で、横軸は繰返し回数を対数でそれぞれ示す。データは、大きなばらつきを呈している。このばらつきの原因としていくつかの要因が考えられるが、主なものとして次のような項目があげられる。

- (1) ワイヤーロープの種類と構成
- (2) 疲労寿命の定義
- (3) 予荷重
- (4) 平均荷重
- (5) 端末処理

疲労強度はワイヤーロープの種類、構成で大きく変化すると言われている。<sup>12)</sup> ワイヤーロープには数多くの種類があるが、ストランドロープの中でIWRC型ロープについての文献が非常に多く、Heller<sup>13)</sup>他、Matanzo<sup>14)</sup>、土井他<sup>15)</sup>、Stonesifer他<sup>16)</sup>、Lucht他<sup>17)</sup>等々による研究がある。また、繊維のコアを持つタイプ(F C)についてもIWRC型と共に研究が報告されている。<sup>18),19)</sup>一方、CFRC型ストランドロープについては、本四連絡橋のハンガーロープに採用された事を契機に奥川他<sup>12)</sup>・半沢他<sup>18)</sup>の研究が行われている。

図4.2.1.8～10にそれぞれIWRC、CFRC、FC型ストランドロープの疲労強度線図を示す。データの数、実験条件の違いがあるため、これらの間での強度差を明確にする事はできないが、ここで取り扱った範囲ではCFRCよりIWRCの方が多少疲労強度が高いと言えよう。

ストランドロープの場合には燃り方、すなわち、ラング燃りか普通燃りかによって疲労強度に差があると言われている。Heller<sup>13)</sup>とMatanzo<sup>14)</sup>はIWRC型とFC型ストランドロープについて海水中および空気中で燃

表4.2.1.2 ワイヤーロープに関する船級協会規則

船級協会	素線強度の規定	規定又は推奨されているロープとしての切断荷重規定	表面處理規定	備考
N K	$150 \text{ Kg}/\text{mm}^2$	FC単層ストランドロープ JIS 1号～6号及び21号 $6 \times 7$ , $6 \times 30$ , $6 \times 12$ , $6 \times 37$ , $6 \times 19$ , $6 \times \text{WS}$ (36) $6 \times 24$ ,	有 galvanized	
B V	$1375 \text{ N}/\text{mm}^2$ ( $140 \text{ Kg}/\text{mm}^2$ ) $1570 \text{ N}/\text{mm}^2$ ( $160 \text{ Kg}/\text{mm}^2$ )	$6 \times 19$ $6 \times 24$ } FC for $1375 \text{ N}/\text{mm}^2$ $6 \times 37$ FC for $1570 \text{ N}/\text{mm}^2$	無 galvanized	
Dn V	$1570 \text{ N}/\text{mm}^2$ ( $160 \text{ Kg}/\text{mm}^2$ ) $1770 \text{ N}/\text{mm}^2$ ( $180 \text{ Kg}/\text{mm}^2$ )	$6 \times 19 \text{ #ループ}$ $6 \times 36 \text{ #ループ}$	有 coated or uncoated	gal. or bright
L R S	$1420 \sim 1570 \text{ N}/\text{mm}^2$ ( $145 \sim 160 \text{ Kg}/\text{mm}^2$ ) $1570 \sim 1770 \text{ N}/\text{mm}^2$ ( $160 \sim 180 \text{ Kg}/\text{mm}^2$ ) $1770 \sim 1960 \text{ N}/\text{mm}^2$ ( $180 \sim 200 \text{ Kg}/\text{mm}^2$ )	$6 \times 24$ $6 \times 26$ $6 \times 30$ $6 \times 31$ FC, $6 \times 36$ $6 \times 37$ $6 \times 41$	(備考) 有	G1 : Heavy Coating, gal. 後伸線 for $6 \times 24$ G2 : " " , 最終 gal. G3 : Light Coating, gal. 後伸線 for $6 \times 37$

	Construction	Wire rope nominal dia. (mm)	20	40	60	80	100	120	140	160
JIS (NK)	6x7									
	6x12									
	6x19									
	6xW(19)									
	6x37									
	6xS(19)									
	8xS(19)									
	6xFi(29)									
	6x24									
	6x80									
DNV	6xS(19)									
	6xFi(25)									
	6xFi(25) IWRC									
	6xFi(29) IWRC									
	6xWS(81)									
	6xF{ (3x2+3)+7 }									
	6xWS(41)									
	6x61									
	6xF{ (3x2+3)+12+12 }									
JSC	6x19 FC									
	6x19 IWRC									
	6x36 FC									
	6x36 IWRC									
	7x7									
	7x19									
	7x87									
	1x19									
	1x37									
	1x61	スパイラル ロープ								
API	1x91									
	1x127									
	C									
	D									
	E	ロッドコイル ロープ								
	F									
	PWS 正六角形									
	PWS 变形六角形									
	6x7 FC, IWRC									
	6x19 .6x37 FC									
	6x19 IWRC									
	6x37 IWRC									
	6x61 IWRC									
	6x91 IWRC									
	8x19 IWRC									
	18x7 FC									
	19x7 WSC									
		Note : BV, LRS は、ワイヤーロープに対する切断強度規定なし。								

図 4.2.1.6 各種規則が切断強度を規定しているロープ種類と公称径

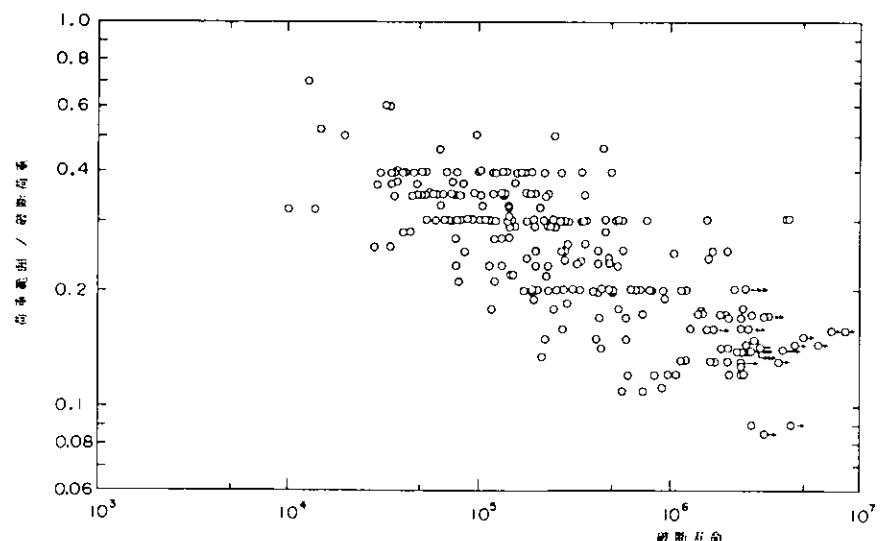


図 4.2.1.7 ワイヤーロープの疲労強度

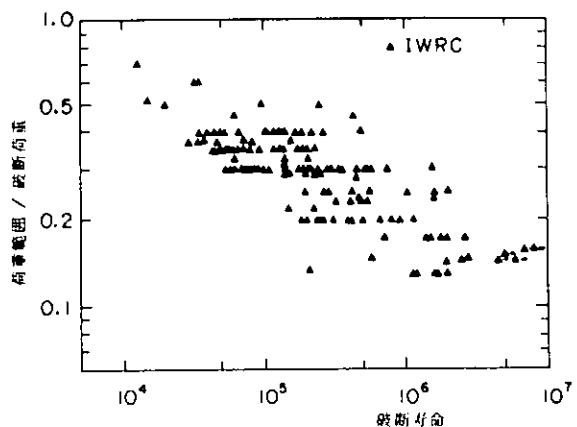


図4.2.1.8 IWRC型ワイヤーロープの疲労強度

り方による疲労強度の比較を行い、海水中ではラング燃り IWRC の強度が最も低く、空中では最も高くなる事を示した。一方、井野<sup>11)</sup>は多くのストランドロープについて普通燃り IWRC を基準にして比較を行い、その差は疲労寿命のばらつきの中に入る程度であるとしており、いずれにせよ燃り方による強度差は二次的なものであると言えよう。

スパイラルロープおよびバラレルワイヤーストランド (PWS) の疲労強度に関するデータは少く、ロックドコイルについて Hanzawa 他<sup>19)</sup>の、また PWS について新家他<sup>20)</sup>、光島他<sup>21)</sup>、横山他<sup>22)</sup>のデータが散見されるにすぎない。これらの結果をまとめた図4.2.1.11に示す。

図4.2.1.7の疲労強度線図がばらつく最も大きな要因は、研究者の間で寿命の定義が異なる点である。寿命の定義方法は、荷重減少率による定義と素線断線率による定義の2種類に大別できる。前者は小径ロープに適用された場合が多い。素線断線率の検知方法は破壊予知を目的として研究されており、近年、大径ロープ等の寿命の定義として素線断線率が使用

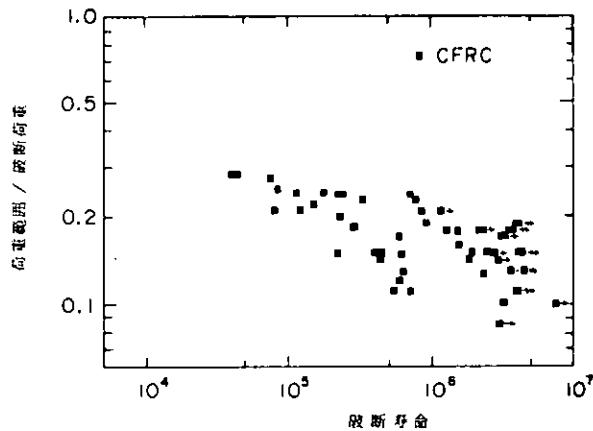


図4.2.1.9 CFRC型ワイヤーロープの疲労強度

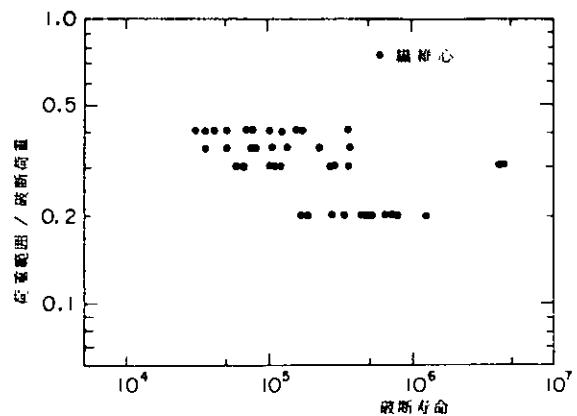


図4.2.1.10 繊維心ワイヤーロープの疲労強度

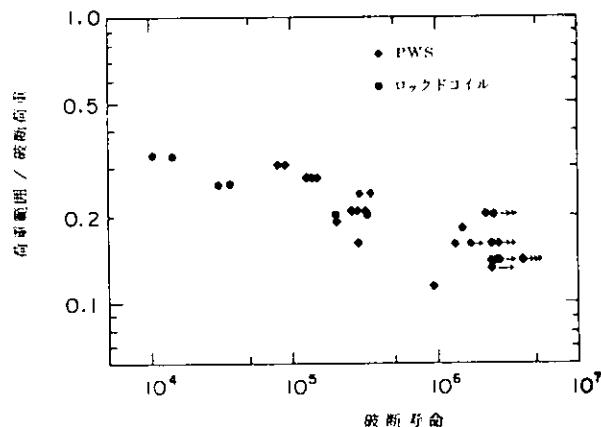


図4.2.1.11 PWS, ロックドコイルの疲労強度  
線図

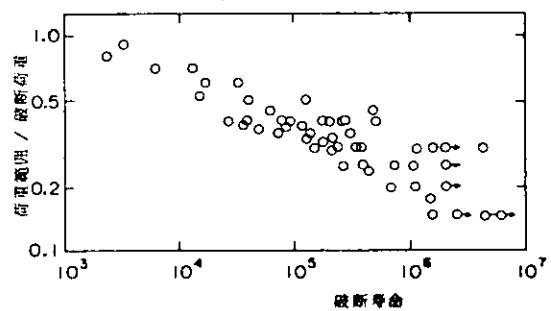


図4.2.1.12  
小径ストランドロープの疲労強度線図<sup>11)</sup>

されている。

井野<sup>11)</sup>は、 $50\phi$ 未満の小径ロープだけを抜き出し、図4.2.1.12に示す疲労強度線図を描き、小さいばらつきでまとめる事を示した。これは、小径ロープに関しては寿命を荷重減少率で定義している場合が多いためと考えられる。

一方、Hanzawa他<sup>19)</sup>は、 $50\phi$ C F R C型ロープについて素線断線率の値により疲労寿命が大きく変る事を示した(図4.2.1.13参照)。これによると初期破断が起きた繰返し回数と断線率が30%になる回数との間では、ほぼ10倍の違いがあり、寿命の定義を断線率何%とするかによって、寿命が大きく違うことを示唆した。

予荷重の有無の影響については、予荷重を与えた場合、疲労強度が向上すると言われており Stonesifer<sup>16)</sup>はIWRC型ロープについて、降伏荷重まで過大荷重をかけた場合に疲労強度が最も増大すると報告している。これは予荷重をかける事によりワイヤー相互の接触移動量が少なくなる事に起因するとしている。

平均荷重が疲労強度におよぼす影響については、ほとんど無視できるとする論文が比較的多い。しかしながら、金綱他<sup>23)</sup>は多くのデータを再検討し、有意な差があるとしており、定説があるとは言い切れない。

ワイヤーロープを海洋構造物の係留を目的として使用する場合には、海水による腐食の影響を考慮しなければならない。Heller他<sup>13)</sup>は予荷重をかけた裸のワイヤーロープを2~12週間海水中に放置した後、腐食疲労試験を行い放置期間が2週間のものと12週間のものではほぼ10倍疲労寿命に差が出るという結果を示している。一例として図4.2.1.14に $\frac{1}{2} \times 37$  IWRC型ラング撚りのワイヤーロープの疲労強度線図を示す。また Matanzo<sup>14)</sup>も同様の結果を得ておらず、海水中で使用するワイヤーロープには防食対策は不可欠である。

ワイヤーロープの強度を考える際、ワイヤーロープの端末処理は、必要かつ重要な問題

である。Matcalf他<sup>24)</sup>は、 $13mm\phi \sim 51mm\phi$ のストランドロープに関して9種類の端末加工を行い、静的荷重、および繰返し荷重に対する性能について実験を実施し、表4.2.1.3に示す結論を得ている。

最後に、変動荷重下での疲労寿命を考える場合、累積疲労被害則、すなわちマイナー則が適用可能かどうかは最も重大な問題である。上野他<sup>1</sup>は厳密な意味ではマイナー則は成立しない事を示したが、工学的な見地からは、適用できると考えて良いであろう。

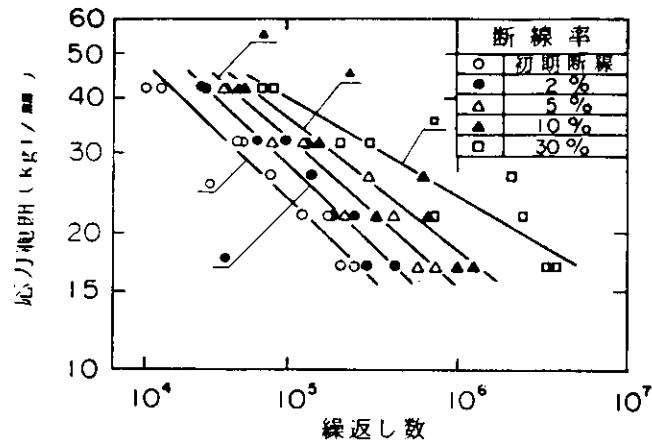


図4.2.1.13 断線率による寿命の差の一例<sup>19)</sup>

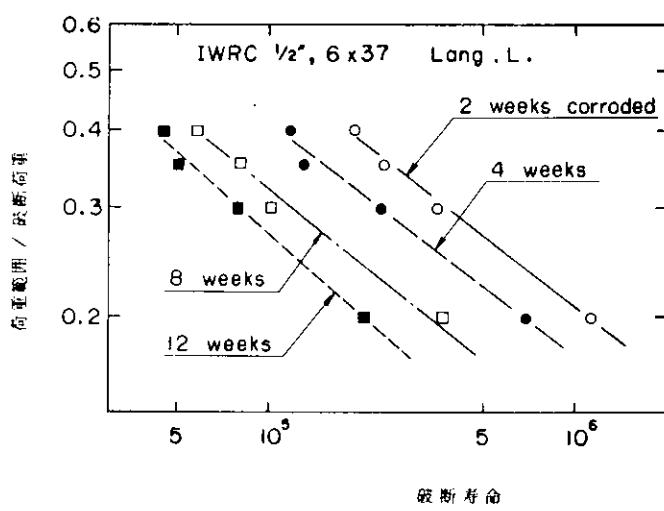
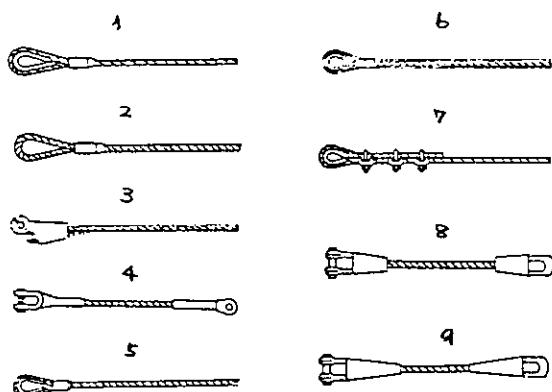


図4.2.1.14 腐食期間の差による強度差の一例<sup>13)</sup>

表 4.2.1.3 各種端末加工の良否<sup>24)</sup>

- 端木加工方法
1. Flemish loop with steel sleeve and thimble
  2. Flemish loop with steel sleeve, no thimble
  3. Wedge socket
  4. Swaged socket
  5. Turn back loop with aluminum sleeve and thimble
  6. Thimble splice with four tucks
  7. U-Bolt clips with thimble
  8. Zinc poured socket
  9. Epoxy resin poured socket.



静的荷重下でのランク

Rope Diameter mm (in.)

Rank	13 (½)	19 (3/4)	25 (1)	38 (1½)	51 (2)
I	9	9	9	4	8
II	4	1	8	8	4
III	5, 8	2, 7	4	1	9
IV	2	4	1, 5, 7	7, 9	7
V	1	5	2	2, 5	5
VI	3	8	3	6	2
VII	7	6	6	3	1
VIII	6	3	-	-	6
IX	-	-	-	-	3

繰返し荷重下でのランク

Rope Diameter mm (in.)

Rank	13 (½)	19 (3/4)	25 (1)	38 (1½)	51 (2)
I	4	9	4, 9	4	4
II	1	4	1	7	9
III	9	1	5	5	7
IV	2	2	3	2	1
V	5	5	-	1	3
VI	6	7	6	8, 9	5
VII	8	8	8	3	6
VIII	3	3	2	6	8
IX	7	6	-	-	2

## 2.2 チェーン

### 2.2.1 チェーンに関する規格

チェーンには様式、製造方法、材料等によりいくつかの種類があるが、大略、次のように分類できる。

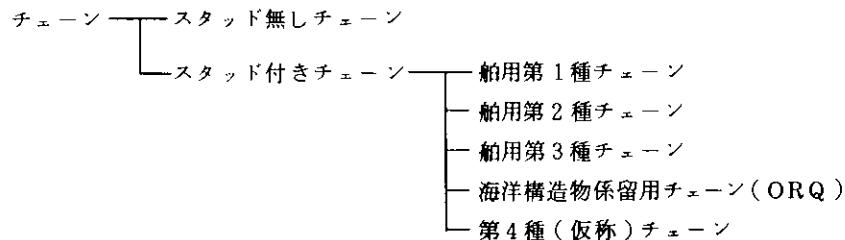


図 4.2.2.1 チェーンの分類

これらのチェーンのうち船用チェーンについては、各船級協会の鋼船規則に、ほぼ統一された内容の規定があ

る。海洋構造物に関する各船級協会の規則においては、すべて鋼船規則<sup>4)~8)</sup>と準用する形で規定しているが、これらの規定は、一時的な係留についてのみ適用できるとしている。

一方、American Petroleum Institute (A P I) は、海洋構造物の係留用チーンの規格<sup>25)</sup>を定めており、長期間の係留に対する配慮がある程度なされている点で、前述の船級協会の規則と異なる。表4.2.2.1に、船級協会規則と A P I 規格の内容の詳細と両者の比較を示す。表中、船級協会規則の欄は、主として第3種チーンに関して記述した。両者で大きく異なるのは、A P I 規格では、チーンは長尺連続で製造する事となって

表4.2.2.1 チーンに関する規則

項目	船級協会規則 (N K)	A P I 規格
規定しているチーンの種類	スタッド無しチーン スタッド付チーン └ 第1種チーン └ 第2種チーン └ 第3種チーン 注: 以下、第3種チーンに関して比較する	1種類だけ (O R Q)
材	化学成分 (%) C : 0.36 以下 Si : 0.15 ~ 0.55 Mn : 1.00 ~ 1.90 P : 0.04 以下 S : 0.04 以下	C : 0.33 以下      Si : 0.20 ~ 0.35 Mn : 1.90 "      P : 0.04 以下 S : 0.04 "      N : 0.015 " Cr : 0.25 "      Cu : 0.35 " Nb : 0.05 "      Ni : 0.40 " V : 0.10 "      Al : 0.065 " Mo : 0.08 "
料	機械的性質 引張強さ T.S. > 70 kgf/mm <sup>2</sup> 伸び E.ε. > 17 % 絞り R.A. > 40 % 衝撃試験 母材部 6 kg-m 以上 / 0°C 溶接部 5 kg-m 以上 / 0°C	T.S. > 65 kgf/mm <sup>2</sup> 同左 " " " "
チーンの普通リンクの寸法	外長 a = 6 d + 0.15 d, - 0 d 外幅 c = 3.6 d + 0.10 d, - 0.10 d 径 d : d の許容誤差は、d の大きさに応じて定められている。 	外長 同左 外幅 c = 3.6 d + 0.05 d, - 0.05 d 径 d 規定なし 〔その他〕 e = 0° ± 2° b = 3 d ± 0.1 d
チーンの長さ	一連 27.5 m とする。 10リンクで 42 d + 1.25 d - 0.0 d	連続長尺で製造する。 5リンクで Min. ℓ = 22 d Max. ℓ = 22.55 d
熱処理	焼入れ、焼もどし又は承認した方法で熱処理を行う。	焼準

表4.2.2.1 (続き)

項目	船級協会規則(NK)	A P I 規格
リンクの表面処理	規定なし	ショットブラスト、又はサンドブラストを施す事
表面検査	規定なし	傷があれば深さが1.6mmを超えない様にグラインダーで傷を取り去る。取り去れない場合は、そのリンクを切りはずす。
スタッドの溶接	規定なし	片側(フラッシュバット溶接部と反対側)全周溶接による。 溶接寸法について規定有
フラッシュバット溶接部の検査	規定なし	傷があれば深さが0.8mmを超えない様グラインダーで取り去る。検査はマグナフラックス又は、ダイチェックにより行う。
重量	最小 0.0219 d <sup>2</sup> (Kg/m)	約 0.02288 d <sup>2</sup> (Kg/m)
耐力試験荷重	1.4 d <sup>2</sup> (44 - 0.08 d) (Kgf) 全数実施の事	1.428 d <sup>2</sup> (44 - 0.08 d) (Kgf) 同左
切斷試験荷重	2.0 d <sup>2</sup> (44 - 0.08 d) (Kgf) 抜きとり実施	2.153 d <sup>2</sup> (44 - 0.08 d) (Kgf) 同左
スタッド端部の形状	規定なし	端部に突起物を持たない事

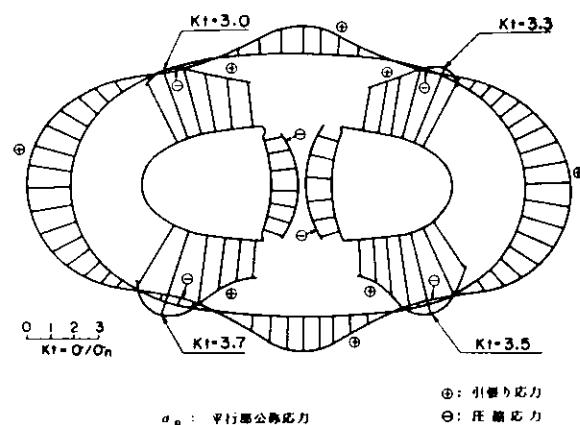
いる点、A P I 規格では材料の引張り強さが65Kgf/mm<sup>2</sup>と低くなっているにも拘らず、切斷試験荷重が船級協会規則より数%高く定められている点、スタッドの溶接、形状、配置等の細かい規定がある点等々である。

ここに示した規則に規定していないチェーンの中で、第4種(仮称)チェーン<sup>26)</sup>は、海洋構造物係留用チェーンとして有望であると思われる。材料の引張り強さを100Kgf/mm<sup>2</sup>にし、従来のチェーンより比強度を高めている。このチェーンは一部で試験的に用いられており、一部の船級協会では、これに対する規則制定の動きがある。

## 2.2.2 チェーンの静的強度

浜野<sup>27)</sup>はチェーンの破断試験を行ない、塑性理論を用いた解析結果と良く一致する事を示した。引張り荷重に対する弹性応力状態についてのデータは応力計測によるもの<sup>28),29)</sup>、FEMによるもの、光弾性実験によるもの等が公表されている。図4.2.2.2に三次元光弾性実験結果を一例として示す。これらの結果によると、弹性状態での最大応力はリンク内側のベンド部に生じ、その応力集中係数(リンク平行部に生じる公称応力を基準とした)は、ほぼ3.5になる。

一方、チェーンの曲げ強度に対する考慮

図4.2.2.2 チェーンのリンクの弹性応力状態<sup>28)</sup>

も必要である。Flory 他<sup>30)</sup>はチェーンがフェアリーダ等の円筒面に接して張力を受ける場合、引張荷重に曲げ荷重が重畠し強度が下がる可能性があることを指摘している。また、Berg 他<sup>31)</sup>は、DnVへ報告された1976年から、1980年におけるチェーンに関する事故例の解析を行い、事故の多くは、チェーンがフェアリーダ等を通る時に受ける曲げ荷重が引き金になった脆性破壊等によるものである事を示した。

最後に各種チェーンの比強度（切断荷重／単位長さあたりの重量）を図4.2.2.3に示す。

切断荷重、単位長さ重量は、各規則の値を採用した。ただし、第4種チェーンの切断荷重は文献32)に依り、重量は第3種チェーンと同じとして作図を行った。

### 2.2.3 チェーンの疲労強度

旧来、海洋におけるチェーンの使用は船舶等の一時的な係留に限られていたためか、その疲労強度に関する研究は極めて少なく、Gilbert<sup>33)</sup>、Celandier<sup>34)</sup>、川面他<sup>35)</sup>、閔口他<sup>36)</sup>、浅野<sup>37)</sup>によるデータが散見されるにすぎない。こ

こでは、これらのデータをまとめて疲労強度線図の形で示し、チェーンの疲労強度特性について述べる。

図4.2.2.4に電気溶接スタッド付チェーンの疲労強度線図を示す。図中、縦軸はチェーンリンク平行部に生じる公称応力範囲を材料の公称引張り強さで無次元化した値を示し、横軸は破断寿命を示す。材料の公称引張り強さは、第2種、第3種、ORQチェーンのそれぞれに対し、 $490\text{N/mm}^2$  ( $50\text{Kgf/mm}^2$ )、 $690\text{N/mm}^2$  ( $70\text{Kgf/mm}^2$ )、 $641\text{N/mm}^2$  ( $65\text{Kgf/mm}^2$ )とした。図4.2.1.6に示したワイヤーロープの疲労強度線図と比較すると、ばらつきは小さい。これは、ワイヤーロープの場合に問題となつた、構成による差、寿命の定義による差が、チェーンでは

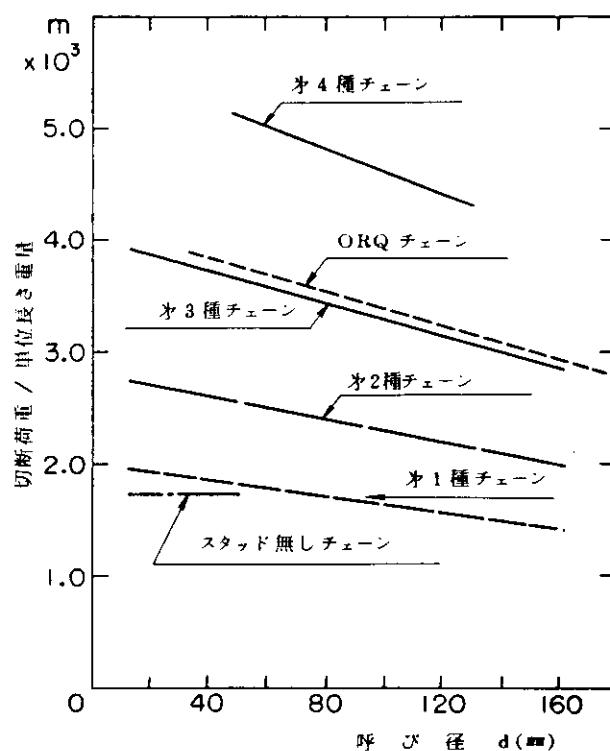


図4.2.2.3 チェーンの比強度

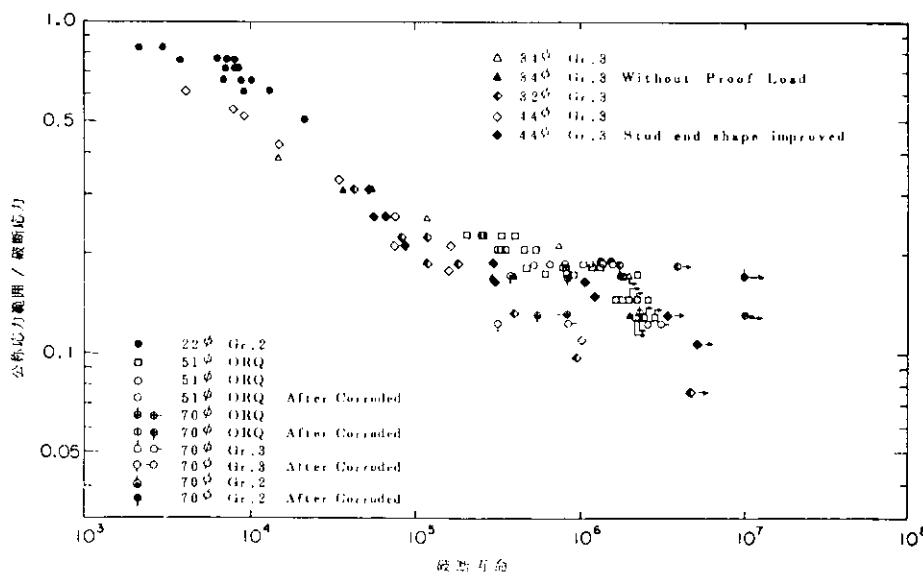


図4.2.2.4 電気溶接スタッド付チェーンの疲労強度

問題とならない事に依るものと考えられる。この図をもとに、チェーンの疲労強度特性に関して次に示す要因について述べる。

(1) チェーンの種類による差異

(2) 予荷重、平均荷重の影響

(3) 腐食の影響

(4) 破壊の様式

チェーンの種類による差を明確にするために、すべてのデータの中から腐食の影響がなく、かつ、耐力試験済のデータだけを取り出し、図4.2.2.5に示す。図中○、△、□印はそれぞれ第2種、第3種、ORQチェーンを表す。高サイクル領域でデータはばらつくが、チェーンの種類による強度差はないと言えよう。

予荷重の影響についての研究は、関口他<sup>36)</sup>、Gilbert<sup>33)</sup>により行なわれており、予荷重をかけた試験体の方が予荷重なしのものより強度が上昇する事が示されている。特に、Gilbert<sup>33)</sup>は、予荷重の大きさを変化させ、予荷重が大きい程寿命が延びる事を示した。耐力試験荷重に等しい予荷重をかけると、チェーンは応力集中の大きい場所がほぼ全面塑性に近い応力状態となり、周囲の拘束によって圧縮側の残留応力が生じる。予荷重による強度上昇は、このためと推察される。

平均応力の影響についてのデータはほとんどなく、今後の研究が待たれるところである。

Gilbert<sup>33)</sup>は、第2種、第3種、ORQチェーンについて4ヶ月間海水中に浸けた後、空中で疲労試験を実施し、大幅な寿命低下がある事を示した。一方、海水中での疲労強度に関しては、そのデータが少ない<sup>28)</sup>事から現状ではその特性を明確にすることはできないが、限られたデータから判断すると、明らかな寿命低下が、特に高サイクル領域に見られる。

ここで調査したすべてのチェーンの破壊様式をまとめて図4.2.2.6に示す。クラウン部からの破壊は極低サイクル領域に多く見られる。一方、ベンド部は、応力集中が最も大きくなる部分であり、この部分からの破壊が多く起きている。スタッド端部からの破壊

は、チェーン製作時のスタッドのリンクへの押し込みにより生じる切欠きに起因する。この切欠きは、特に高サイクル領域の疲労強度を低下させる事が報告されており、チェーンを半恒久的な係留に使用する場合には、十分考慮する必要があろう。

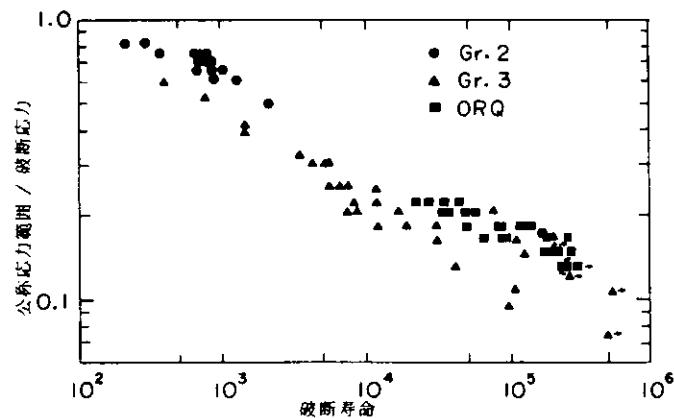


図4.2.2.5 チェーンの種類と疲労強度

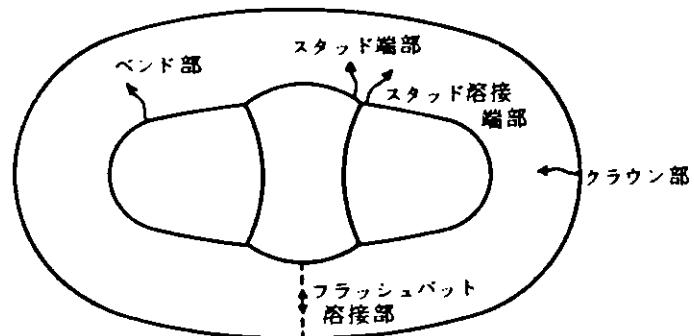


図4.2.2.6 チェーンの疲労破壊様式

## 参考文献

番号	著 者	表 題	出 典
1	たとえば、東京製鋼	ワイヤーロープ	No. 13 A
2	日本規格協会	ワイヤーロープ	G 3525
3	日本鋼構造協会	構造用ケーブル材料規格	
4	日本海事協会	鋼船規則集	1979
5	American Bureau of Shipping	Rules for Building and Classing Steel Vessels	1979
6	Bureau Veritas	Rules and Regulations for the Construction and Classification of Steel Vessels	1980
7	Det norske Veritas	Rules for Classification Steel Ships	1980
8	Lloyd's Register of Shipping	Rules and Regulations for the Classification of Ships	1980
9	American Petroleum Institute	Specification for Wire Rope	API Spec. 9A 22Edi., 1976
10		ワイヤーロープ便覧	白雁書房
11	井野 幸雄	索鎖の強度	日本海事協会 係留研究委員会資料 MA-5-6
12	奥川 淳志	吊橋ハンガーロープの引張および疲労強度	本四技報 Vol. 2, No. 5, 1978
13	Heller, S.R.Jr.他	Axial Fatigue of Corroded Wire Rope Specimens	Catholic Univ. Rept. No. 0024-72-C-5394
14	Matanzo, F	Axial Fatigue of Wire Rope in Sea Water	OTC 1579, 1972
15	土井 明他	中心ワイヤーロープ入りストランドロープ	材料第25巻, 276号, 1976
16	Stonesifer, F.R.他	Tensile Fatigue in Wire Rope	OTC 3419, 1979
17	Lucht, W.A.	Factors Affecting Wire Rope Life in a Marine Environment	OTC 2924, 1977
18	平沢 貢他	ワイヤーロープの引張り疲労特性について —海洋構造物用鋼索の疲労特性に関する研究(3)	鉄と鋼, 第65年, 第11号, 553, 1979
19	Hanzawa, M.他	Fatigue Behaviour of Large-Diameter Wire Ropes	OTC 3999, 1981
20	新家 敏他	PWSの疲労強度	神戸製鋼技報( R & D ) Vol. 28, No. 2, 1978
21	光島 功雄他	ケーブルワイヤの疲労強度	神戸製鋼技報( R & D ) Vol. 25, No. 1, 1975
22	横山 邦彦他	PWSの疲労特性について —海洋構造物用鋼索の疲労特性に関する研究(2) —	鉄と鋼, 第65年, 第11号, 552, 1979
23	金綱 正夫他	テンションレグ プラットフォームに関する テクニカルレポート	日本造船学会第4回海洋工学シンポジウム C-6, 1979
24	Metcalf, J.T.他	Wire Rope Terminations, Section, and Replacement Criteria	OTC 3853, 1980

番号	著 者	表 题	出 典
25	American Petroleum Institute	Specification for Mooring Chain	API Spec 2F, 3rd Edi. 1981
26		海洋で使用する高張力チェーンの開発研究	日本舶用機器開発協会, 事業報告書, 昭和51年
27	浜野 和夫	鉄鋼錨鎖の強度について	日本造船協会会報第83号, 1948
28	日本钢管, 津研究所	チェーンの疲労強度	日本海事協会, 係留研究委員会資料, MA-5-1
29	神戸製鋼, 構造研究所	係留アンカーチェーンの破壊強度特性	同上 MA-2-3
30	Flory, J.F. 他	Strength of Chain Tensioned over a Curved Surface	OTC 3855, 1980
31	Berg, A. 他	Long-term Mooring and Anchoring of Large Structure and Drilling Units (Reliability and Safety of Anchor Chain System)	OTC 3813, 1980
32	浜中 製鎖	ORQチェーンLOAD一覧表	山本氏よりの私信
33	Gilbert, L.	Fatigue Tests on Anchor Chain-Cable	OTC 1503, 1971
34	Celander, I.	Preload Influence on Fatigue Characteristics of Chain Cable Exposed to Salt Water and Atmospheric Conditions	OTC 1578, 1972
35	川面 武雄 他	係留索鎖用低サイクル疲労試験機の概要と実験結果の一例について	船舶技術研究所研究発表会講演集, 1975
36	関口 進 他	ハイテンチェーンの実物疲労特性について(太径ハイテンチェーンに関する研究Ⅳ)	鉄と鋼, 第63年, 第4号, 1977

### 3. 各種設計基準の比較

係留システムの設計指針の作成にあたり、本研究部会に於ては、浅水域での箱型海洋構造物の係留を対象として実験的、理論的研究を行なうと共に、他方既存の各種設計基準の調査、検討を行なってきた。

これら各種設計基準は特殊の用途を目的としたものが多く、その適用範囲が限定され、細部に於ては必ずしも一般的でないものもある。

しかし、基本的な考え方には共通するものが多く、この様なものについては本研究部会での設計指針の内容にも反映させる事とした。

ここでは各種設計基準の調査、検討結果をとりまとめる意味でこれらを比較した結果を示す。

#### 3.1 各国船級協会規則の比較

標記船級協会規則に関する文献調査は55年度本研究部会に於て実施した。

各国の船級協会の係留に関して、海洋構造物(一般船舶を含む)の一時係留と長期間または永久係留とに大別して取り扱うと、一般には前者のみを船級条件としている。そして、一時係留の設備は、一般船舶の場合と同様な規

定であり、艤装数によってアンカー、チェーン、索類の設備が定められている。但し、艤装数の計算法は、一般船舶の場合、各國の船級協会の間でほぼ統一されているが、海洋構造物に対する艤装数の場合には、各國の船級協会の間で多少の相違が見受けられる。

そこで、各國の船級協会における一時係留に関する艤装数の計算方法を比較した結果を表4.3.1に示す。

表4.3.1 各國の船級協会の艤装数の計算式比較

協会名	艤装数	特記事項
L R <sup>1)</sup>	$W^{\frac{2}{3}} + 2.5 A_N + 0.1 A_P$	遮蔽効果は考慮しない。
A B <sup>2)</sup>	$W^{\frac{2}{3}} + 2 B h + 0.1 A$	
N V <sup>3)</sup>	$W^{\frac{2}{3}} + A_N$	風は最も不利な方向から吹くものとする。
B V <sup>4)</sup>	$W^{\frac{2}{3}} + 2 A_F + 0.1 A_L$	<p><math>A_F, A_L</math> の計算においては遮蔽効果は考慮せず、また次式のように各要素の形状、高度に応じた重みをつける。</p> $A = \sum_i K_1 K_2 K_3 S_i$ <p>但し <math>S_i</math> : 個々の要素の投影面積</p> $K_1 = \begin{cases} 1 & : \text{平面(円柱以外)} \\ 0.5 & : \text{円柱} \end{cases}$ $K_2 = \begin{cases} 1 & : \text{吹き抜け構造以外} \\ 3.2 - \frac{2S}{S_T} & : \text{吹き抜け構造} \end{cases}$ <p><math>S</math> は実質部分の投影面積、<math>S_T</math> は風が吹き抜けないとしたときの投影面積</p> <p><math>K_3</math> : 高度係数</p> $\begin{cases} 1 & \cdots \cdots \quad h < 40 \\ 1.2 & \cdots \cdots \quad 40 \leq h < 60 \\ 1.3 & \cdots \cdots \quad 60 \leq h < 80 \\ 1.4 & \cdots \cdots \quad 80 \leq h < 100 \\ 1.5 & \cdots \cdots \quad 100 \leq h \end{cases}$
G L <sup>5)</sup>	$W^{\frac{2}{3}} + 2.5 A_N$	
R I <sup>6)</sup>	個々に決定	<p>次の書類を提出すること。</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>○アンカーの個数と性状</li> <li>○チェーン、ケーブルの性状</li> <li>○係船索の性状</li> </ul>
N K <sup>7)</sup>	<ul style="list-style-type: none"> <li>○船型、バージ型の場合 <math>W^{\frac{2}{3}} + 2 B h + 0.1 A</math></li> <li>○セミサブ型、シャッキアップ型の場合 <math>W^{\frac{2}{3}} + 2 A_N + 0.1 A_P</math></li> </ul>	シャッキアップ型の場合の脚の部分は算入しなくてよい。

この表中において各記号は

$W$  : 一時係留状態における排水量(t)

$B h$  : 喫水線上の正面の投影面積  
A : 喫水線上の側面の投影面積

$A_F$  : 喫水線上の正面投影面積 ( $m^2$ )

$A_L$  : 喫水線上の側面投影面積 ( $m^2$ )

$A_N$  : 風向に垂直な面に対する喫水線上の投影面積 ( $m^2$ )

$A_P$  : 風向に平行な面に対する喫水線上の投影面積 ( $m^2$ )

である。

表4.3.1に示すように、各国の船級協会の規則では水線下の部分すなわち潮流荷重による項は全て同じであるが、風荷重に対する評価が船級協会によってそれぞれ異なっていることがわかる。

舾装数に対するアンカー、チェーン等の要求値は、通常船舶と同じ表を用いているので、船級協会によって差異はないが、係留設備として設けなければならないものの範囲となると、船級協会によって若干の相違が生じる。

次に、長期係留または作業用係留については各国の船級協会の規則で述べられている内容をまとめると表4.3.2のようになる。

表4.3.2 各国の船級協会の長期係留に関する規則の内容

協会名	内 容
L R	○なし
A B	○なし
N V	○直接計算を行なって係留系の解析をする場合には、係留力は適当なばね定数として運動方程式に付加する。索の張力に大きな影響をおよぼすのは水平方向の変位であるから、上下揺、縦揺および横揺は無視してよい。 ○簡易計算による場合には、係留力は風および潮流による力と釣り合うものとする。 ○特に大きな波力を受ける場合の係留力は、特別な考慮を要する。
B V	○最も苛酷な海象条件において直接計算を行なう。
G L	○係留系の設計に関しては、潮流、風、波、水深、海底土基礎、許容移動量等を考慮する。 ○係留装置の各要素の許容応力は次の通りとする。 曲げ応力 $\sigma_b = 0.8 \sigma_y$ 剪断応力 $\tau = 0.5 \sigma_y$ 等価応力 $\sigma_e = \sqrt{\sigma_b^2 + 3\tau^2} = 0.9 \sigma_y$ $\sigma_y$ は使用材料の降伏応力 ○アンカーが海底において所要の把駐力を発生する事を確認しなくてはならない。
R I	○直接計算を行なう場合には、係留力を適当なばね定数として運動方程式に付加する。係留索の張力に影響をおよぼすのは、前後揺、左右揺および航揺であるから、上下揺、横揺および縦揺による張力変動は無視してよい。 ○簡易計算による場合には係留力の水平方向成分は、風および潮流による力と釣り合うものとする。
N K	○協会の適当と認めるところによる。

以上述べて来たように、一般の海洋構造物を半永久的に係止しようとする係留システムを設計するに当っては、各国の船級協会の規則が不十分であることがわかる。したがって、各民間企業各社は、海洋構造物の係留システムを設計する場合には過去の経験や実績に基づいて独自の設計基準を定めているのが実情である。

## 参考資料

- 1) Rules for the Construction and Classification of Mobile Offshore Units, Lloyd's Register of Shipping, 1972
- 2) Rules for Building and Classing Steel Vessels, American Bureau of Shipping, 1981
- 3) Rules for Classification of Mobile Offshore Units, Det norske Veritas, 1981
- 4) Rules and Regulations for the Construction and Classification of Offshore Platforms, Bureau Veritas, 1975
- 5) Rules for the Construction and Inspection of Offshore Installations, Germanischer Lloyd, 1976
- 6) Guide for the Construction and Classification of Mobile Offshore Drilling Units and Other Similar Industrial Units, Registro Italiano Navale, 1978
- 7) Rules for Mobile Offshore Units, Nippon Kaiji Kyokai, 1978

### 3.2 船級協会規則以外の各種基準、指針の比較

標記各種基準、指針に関する文献調査は昭和55年度本研究部会に於て実施した。これらはいずれも石油の海上備蓄システム及び大型タンカーの係留システムに関するものが中心となっており、本部会の研究主旨である係留システムの設計指針の作成に際しては非常に参考となるものである。

以下に項目別にこれら基準、指針の内容比較を行なうと共にその主旨を明確にする。

なお、比較対象とした資料は表4.3.3に示すものに限定した。

表4.3.3 係留システムの設計基準の資料リスト

資料	表題	出典
A	石油の海洋備蓄システムの開発調査 (フローティングタイプ総合設計指針(案))	日本海洋開発産業協会 昭和54年3月
B	液化ガス貯蔵船の構造設備に関する調査研究報告書	日本造船研究協会第14基準研究部会 昭和56年3月
C	港湾の施設の技術上の基準・同解説 Ⅱ 海上貯油基地施設	日本港湾協会 昭和55年9月
D	浮遊式海洋構造物(貯蔵船方式)による石油備蓄システムの安全指針に関する答申	運輸省技術審議会 昭和53年4月7日
E	海洋鋼構造物設計指針(案)解説	土木学会, 昭和48年8月
F	港湾の施設の技術上の基準・同解説	日本港湾協会, 昭和54年3月

#### 3.2.1 目的・適用の比較

先ず、これら基準、指針の目的及びその適用範囲を明確にする意味でその冒頭に述べられている主旨の概要を示す。

資料	概要
A	本指針は石油の海洋備蓄システムに係る安全を確保すると共に、その全体システムの設計が容易にできる事を目的としている。
B	本基準案は、沿岸に近く、水深が浅く、かつ海象条件が比較的静穏な海域に液化ガス貯蔵船がゴム防舷材を介して係船ドルフィンに係留している場合、及び地形に恵まれ、沖合波浪が直接作用しない海域に液化ガス貯蔵船が鉄鎖の多条の係留ラインで係留している場合に適用可能である。
C	本基準は海上貯油基地に係る港湾の施設を建設し、改良し又は維持する場合に適用される。
D	本指針は、浮遊式海洋構造物による石油備蓄システムのうち、貯蔵船及びその係留施設、港湾の施設、保安防災用施設並びにこれらを管理する施設に対して適用する。
E	この指針は海洋鋼構造物の設計に適用する。
F	この基準は港湾の施設を建設し、改良し、又は維持する場合に適用される。

### 3.2.2 設定自然条件の比較

自然環境条件の設定に際しては、構造物の稼働場所、用途、重要度等々に依り多様性が見られるが、ここでは主として再現期間の考え方及び係留システムの設計に於て最も重要なファクターと思われる風、波、潮流、地震等についての考え方を中心に比較する。

資料	概要
A	<p>耐用年数： 15年以上</p> <p>再現期間： 100年</p> <p>風： 海面上10mでの10分間平均最大風速とする。</p> <p>波： 有義波によって代表する。</p> <p>潮位： 天文潮、高潮、津波、副振動等</p> <p>潮流： 海流、潮流、沿岸流等（水深方向の流速分布は<math>\frac{1}{r}</math>乗則に依る）</p> <p>地震： 設計震度は水平方向は0.3を最大とし、鉛直方向は0とする。</p> <p>その他： 漂砂、海底地形・地質、気温、水温、雨、雪、霧、雷、台風等</p>
B	<p>再現期間： 100年</p> <p>風： 海面上10mでの10分間平均風速を基本風速とする。</p> <p>風速の出現確率分布は二重指數分布則を標準とする。</p> <p>風速のスペクトラム表示はDavenportまたは日野の式を用いる。</p> <p>波： 有義波によって代表する。</p> <p>波の不規則変動性は方向スペクトラムを用いて表示する。</p> <p>周波数スペクトラムはBretschneider及び光易の式を用いる。</p> <p>地形的影響として回折、屈折、反射、浅水変形、碎波などを考慮する。</p> <p>地震： ドルフィン係留施設に対しては震度法又はこれと併せて地震応答解析等に基づいて検討する。</p> <p>その他： 潮位、潮流、土質、漂砂、津波、高潮、海底地形、気温、水温、雷、海水等</p>
C	再現期間： 100年

資料	概要
C	<p>風 ; 10分間平均風速とする。 海面上の突風率は1.2～1.5を標準とする。 風速の変動性はスペクトラムを用いて表示する。</p> <p>波 ; 有義波によって代表する。 波の不規則変動性は方向スペクトラムを用いて表示する。 周波数スペクトラムはBretschneider及び光易の式を用いる。 地形的影響として回折、屈折、反射、浅水変形、碎波などを考慮する。</p> <p>その他 ; 潮位、津波、副振動、潮流、漂砂、地震等</p>
D	<p>再現期間 ; 100年</p> <p>風 ; 風速の出現確率分布を推定した上で所要の再現期間に対応する値を用いる。</p> <p>波 ; 所要の再現期間に対応する値を用いるものとするが、地形的影響に依る波の変形等も考慮する。</p> <p>その他 ; 潮位、潮流、土質、漂砂、地震、津波、高潮、気温、水温、霧、雷、海水等</p>
E	<p>再現期間 ; 次式に依り定める。</p> $R = \frac{1}{1 - q^{1/T}}$ <p>R : 再現期間 T : 耐用年数 q : 非超過確率</p> <p>風 ; 海面上10mでの10分間平均最大風速とする。</p> <p>波 ; 最大有義波に対する最高波を用いる。</p> <p>その他 ; 潮流、地震等</p>
F	<p>耐用年数 ; 機能的、経済的、物理的なものについて検討を加え適切に決める。</p> <p>風 ; 海面上10mでの10分間平均風速</p> <p>波 ; 有義波によって代表する。ただし目的によっては最高波、その他に換算して使用する。 波のスペクトラムについては周波数スペクトラム形及び方向分布関数形について考慮する。 うねりの推算はBretschneider法に依る。</p> <p>地形的影響として、回折、屈折、反射、浅水変形、碎波などを考慮する。</p> <p>地震 ; 設計震度は次式により定める。 設計震度 = 地域別震度 × 地盤種別係数 × 重要度係数 固有振動数が比較的短く減衰性の大きい構造物に作用する地震力は震度法に依って算定する。</p> <p>その他 ; 潮位、津波、副振動、潮流、河口水理、漂砂、土質等</p>

### 3.2.3 設計荷重及びその推定法の比較

設定自然条件の下に考慮すべき荷重の項目及びその算定法の概略を示す。

流体力、地震力等についてはやや具体性に欠けるきらいがあるが、現象が複雑であるだけに基準、指針として規定する上に於て困難さが伴なうものと思われる。

資料	概要
A	<p>風荷重： 風荷重は次式により算定する。</p> $F = 0.0625 V^2 C_s C_h \cdot A$ <p>F ; 風荷重 (<math>R_f</math>)</p> <p>A ; 構造物の投影面積 (<math>m^2</math>)</p> <p>V ; 風速 (<math>m/sec</math>)</p> <p>C<sub>s</sub> ; 形状係数</p> <p>C<sub>h</sub> ; 高度係数</p> <p>波力： 該当する波理論により算定するか又は模型試験による。</p> <p>潮流力： 潮流力は流向方向の抗力と直角方向の揚力とに分けられ、次式により算定する。</p> $F_D = C_D W_0 A \frac{V^2}{2g}$ $F_L = C_L W_0 A \frac{V^2}{2g}$ <p><math>F_D, F_L</math> ; 抗力及び揚力 (<math>ton</math>)</p> <p><math>C_D, C_L</math> ; 抗力係数及び揚力係数</p> <p>V ; 流速 (<math>m/sec</math>)</p> <p>A ; 構造物の流向方向の投影面積 (<math>m^2</math>)</p> <p>g ; 重力加速度 (<math>m/sec^2</math>)</p> <p><math>W_0</math> ; 海水の単位体積重量 (<math>ton/m^3</math>)</p> <p>地震力： 地震力は次のいずれかに依り算定する。</p> <p>震度法又は修正震度法</p> <p>動的解析</p> <p>その他適当な方法</p> <p>固定荷重： 自重、固定搭載荷重、積載荷重</p> <p>変動荷重： 倉庫原油重量、置換水重量、静水圧及び浮力、衝撃荷重、積雪荷重、曳航時動荷重</p>
B	<p>風荷重： 時間的、空間的変動を考慮した不規則変動外力として取扱うものとする。</p> <p>風抗力係数については風洞実験に依り適切に設定する。</p> <p>波力： 浅水影響を考慮して波強制力及び波漂流力を推定する。</p> <p>潮流力： 算定法は資料-Aと同じ。</p>
C	<p>風荷重： 風圧の算定は次のいずれかに依る。</p> <p>建築基準法施行令</p> <p>クレーン構造規格</p> <p>移動式クレーン構造規格</p> <p>デリック構造規格</p> <p>道路橋示方書</p> <p>波力： 構造物に作用する波力は、構造物の形態、海底地形、水深及び波の諸元等を考慮して適切な模型実験あるいは、算定式により算定する。</p> <p>潮流力： 算定法は資料-Aと同じ。</p> <p>地震力： 固有振動周期が比較的短かく減衰性の大きい構造物に作用する地震力は震度法によって算定するものとし、次のいずれかの不利な方をその重心に作用させるものとする。</p> <p>地震力① = 自重 × 設計震度</p> <p>地震力② = (自重 + 載荷重) × 設計震度</p>

資料	概要
C	<p>なお特に重要なものについては震度法と併せて地震応答解析に基づき検討するのがぞましい。</p> <p>その他：漂流物等による衝撃荷重</p>
D	<p>風荷重；算定法の記載なし</p> <p>波力；〃</p> <p>潮流力；〃</p> <p>その他；自重、載荷重及び甲板荷重 水圧及び浮力等の静荷重 荷油の移動による動荷重 地震による荷重 係留時の荷重 接岸時の荷重 えい航時の荷重 漂流物等による衝突荷重 土圧 流氷による荷重 雪及び着氷による荷重</p>
E	<p>風荷重；算定法は資料-Aと同じ。</p> <p>波力；海洋構造物に作用する波力は次のものからなる。 抗力、慣性力、揚力、碎波による衝撃力、碎波圧、重複波圧 特に大型浮体構造物に作用する波力及び流体力等は線形近似の下に理論的に算定するかもしくは実験に依り求める。 波スペクトラムに対する波力スペクトラム又は構造物の応答スペクトラムは、波力又は構造物の周波数応答特性を用いて算定する事が出来る。</p> <p>潮流力；算定法は資料-Aと同じ。</p> <p>地震力；通常構造物を設計する場合には、震度法を採用するものとし、特に重要な構造物の場合には、動的解析によって基本設計を検討する。 水平方向設計震度 <math>K_h</math> は次式によって算定する。</p> $K_h = A \times B \times C \times K_b$ <p>A；地盤種別係数 B；減衰常数による係数 C；構造物固有周期別係数 K<sub>b</sub>；地域別震度</p> <p>その他；自重及び搭載荷重 衝撃荷重 静水圧及び浮力 浮遊曳航時の動荷重</p>
F	<p>風荷重；算定法は資料-Cと同じ</p> <p>波力；〃</p> <p>潮流力；〃</p>

資料	概要
F	地震力；算定法は資料-Cと同じ その他；土圧 水圧 自重 載荷重 浮力

### 3.2.4 浮体動搖特性推定法の比較

係留システムの設計に際しての最大の関心事は、不規則波浪、潮流、変動風等の条件の下で係留浮体がどのような挙動を示し、それに伴なって係留系の各要素に作用する荷重がどの程度のものになるかという事を過不足なく推定する事にある。

一般に係留系の応答特性は非線形性が強い上に係留方式、係留浮体、係留場所等に多様性がある為、その挙動を的確に推定する事は困難である。従って各基準、指針共模型実験に依る応答特性の確認を第1位に規定している。

他方、模型実験と併用する形での数値シミュレーションによる算定法の有用性を指摘しているものもある。

以下にこの点に重点を置いて各基準指針の考え方を比較する。

資料	概要
A	浮体の動特性は、必要に応じて水槽実験を行なって確認する。
B	係留浮体の挙動を推定する手法としては、模型実験と電子計算機による数値シミュレーションとがあり、それぞれの特徴を生かして使用する事が望ましい。 数値シミュレーションに用いる係留系のモデルは、模型実験によってその適用性を確認する。 数値シミュレーションに際しての注意事項は次の通り。 ① ドルフィン・ゴム防舷材に依る係留システムの場合には、係船ドルフィン及び防舷材の特性を忠実に表現する事。 ② 索鎖に依る係留システムの場合には係留ラインの特性を忠実に表現する事。なお係留ラインの途中に中間シンカーまたは中間ブイがある場合には、これも忠実に考慮した係留ラインの特性を用いる事。 ③ 波については設置場所における波の特性をよく表現し得るものに入力波として使用する。この場合、波の方向性を有する不規則波として与える。 ④ 風については不規則変動外力として取扱う。 ⑤ 潮流については定常力として取扱う。 ⑥ 波漂流力については、長周期変動を起す可能性を配慮して変動外力として取扱う。 ⑦ 地震については、出現すると思われる地震動の周波成分を含ませた不規則変動外力として取扱う。 ⑧ 長周期成分波については、貯蔵船が長周期運動を起す可能性があるので、設置地点において出現すると思われる周期成分を含ませた不規則変動外力として取扱う。
C	浮体の動搖量の算定にあたっては、模型実験と数値シミュレーションとを適切に組み合わせて、実際に起こる現象を適切に推定するものとする。 模型実験は次の項目につき実施する。 ① 波の非線形効果をは握する為の波の変形実験

資料	概要
C	<p>(2) 浮体動揺の減衰効果、風抗力係数、防げん材の非線形効果などの諸量が浮体の動揺及び係留力に及ぼす影響を把握する為の基礎実験</p> <p>(3) 基礎実験では得られなかった波の変形効果、浮体配置効果等を把握するための波の変形を考慮した地形模型を用いた実験</p> <p>数値シミュレーションの実施に際しては次に掲げる事項に留意する。</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>① 浮体のモデル化にあたってはその形状を適切に表現する三次元モデルとして取扱うのが望ましい。</li> <li>② 係留システムのモデルは、これらの各要素及びその合成された特性を適切に表現するものとする。</li> <li>③ 防げん材の特性をモデル化する場合は当該荷重変形特性を十分表現する事。なお防げん材と浮体との間にクリアランスがある場合には、この特性も考慮するものとする。</li> <li>④ 係留鎖の特性は、近似的にはカテナリー曲線として与える事ができる。</li> <li>⑤ 波は原則として現地の波の特性を表現しうるものを入力波として使用する。なお不規則波をスペクトラムから発生させる場合には、二次元スペクトラムを用いる。</li> <li>⑥ 風は不規則変動外力として取扱う。</li> <li>⑦ 潮流については定常力として取扱う。</li> <li>⑧ 流体力係数については浅海影響を考慮して求めるものとする。</li> <li>⑨ 漂流力については浅海影響を考慮して求めるものとする。</li> <li>⑩ 長周期漂流力に基づく運動については Hsu 及び Pinkstar 等の解析法により検討する事が出来る。</li> </ul>
D	浮体の挙動の解析に当たっては、係留系の特性をできるだけ忠実に表現し得るモデルを使用しなければならない。また、貯蔵船の振れ回り運動についても十分な配慮をしなければならない。
E	構造物の波浪中での運動性能を検討し、該構造物の作業性、居住性等を確認しなければならない。一般に浮体構造物の波浪中での運動性能を算定するのは困難であるので、その定量的把握にあたっては、適宜水槽試験を行う事が望ましい。
F	固定式係留施設における船舶の波浪動揺による衝突力、けん引力は、防げん材の特性、係留索の特性等によって異なり、これらが主要な外力となる場合には条件に応じた模型実験により検討することがぞましい。

### 3.2.5 係留機器に関する基準の比較

ここでは、係留施設内、直接浮体挙動特性と密接な関係にあるドルフィン防舷材、索鎖、アンカー、シンカー、ブイ等の係留機器に関する基準の比較を行なう。

係留方式としては、ドルフィン係留、索鎖多点係留、索鎖一点係留の3方式について述べるが、これら3方式の選択に関しての基準は特にふれていない。

係留方式の選択に際しては性能面のみならず稼働目的、稼働方式、立地条件、経済性等の見地から決められる場合が多いものと思われる。

資料	概要
A	<p>ドルフィン係留；(1) ドルフィンに作用する外力及び荷重は次の通りである。</p> <p>浮体係留時の衝撃力</p> <p>浮体の係留力</p> <p>構造物に作用する波力、潮流力</p>

資料	概要
A	<p>② 防舷材は係留中の衝撃力を効果的に吸収するタイプのものが望ましい。</p> <p>索鎖多点係留； ① アンカーチューンは可能な限り外力の影響が少ないように位置、方向に留意し、特定のアンカーチューンに荷重が集中することを避け、アンカーチューンが十分な耐力を保持する様に配置しなければならない。</p> <p>索鎖一点係留； ① 一点係留パイの位置は、パイの回りを浮体が自由に回転でき、かつ隣接の浮体や防衝堤などに近接し過ぎない様に相互の位置を定めなくてはならない。</p> <p>② パイは浮体としての十分な強度を持つほか、係留外力及びチューンなどの反力に対して十分な全体及び局部強度をもたなければならぬ。</p>
B	<p>ドルフィン係留； ① 定常外力（周期10分以上の長周期変動外力を含む）によるゴム防舷材の変形量の目安としては、ゴム防舷材の高さの10%以下とする。</p> <p>② 変動外力を含めた全荷重に対するゴム防舷材の最大変形量はゴム防舷材の高さの35%以下とする事。ただし、実験及び精度よい数値シミュレーション計算を実施し、安全が十分確認される場合にはこの限りではない。</p> <p>③ 移動または動搖が多少増大しても反力または張力は急激に増大しないこと。</p> <p>④ 当該機器の破壊が係留施設の破壊に直結しないこと。</p> <p>⑤ 当該機器の破損状況が容易に点検されやすいこと。</p> <p>⑥ 係船ドルフィン・ゴム防舷材係留方式に係留索・鎖を用いた場合、係留索・鎖に作用する張力は浮体の挙動に関する数値シミュレーション計算により算出された浮体移動量の1.5倍の移動量に相当する値を標準とする。なお係留索・鎖の安全率は3.3とする。</p> <p>⑦ 係船ドルフィンに作用する浮体の荷重は数値シミュレーションにより算出されたゴム防舷材反力の1.5倍、または⑥で算出された係留索・鎖張力を標準とする。</p> <p>索鎖多点係留； ① 1条の係留ラインの初期張力の目安としては、索・鎖の破断荷重の10%以下とすること。</p> <p>② 初期張力、定常外力及び変動外力を含めた全荷重に対して、いずれかの1条の係留ラインに働く最大の張力は索鎖の規定破断荷重の40%以下とすること。</p> <p>③ 浮体の移動量及び動搖量を軽減する目的で、係留ラインの途中に中間シンカーを取り付けてもよい。</p> <p>④ 係留ラインに働く張力の軽減及び浮体の移動量及び動搖量を軽減する目的で係留ラインの途中に中間パイを取り付けてもよい。</p>
C	<p>ドルフィン係留； ① 係船ドルフィンは、浮体の動搖によって生ずる外力等に対して十分に安全な構造とするものとする。</p> <p>② 防げん材反力は、数値シミュレーションにより算定された防げん材最大反力の1.5倍とすること。ただし、使用される防げん材は、定反力型ゴム防げん材とし、かつ次に掲げる条件を満足すること。</p> <p>1) 数値シミュレーションにより算定された定常外力による防げん材変形が10%以下であること。</p> <p>2) 数値シミュレーションにより算定された変動外力も含めた全荷重による最大防げん材変形が35%以下であること。</p> <p>索鎖多点係留； ① 係留鎖張力は、数値シミュレーションにより算定された定常外力による浮体移動量に、変動外力による浮体動搖量の1.5倍を加えた距離に相当する値とする。</p>

資料	概要
C	<p>② 係留鎖は、鋼船規則（日本海事協会）に規定するスタッド付電気溶接アンカーチェーンに適合するもの、又はこれと同等以上の機械的性質を有するものであること。</p> <p>③ 係留鎖の許容引張力は摩耗の最も甚しい箇所における平均径に対して、上記規則に規定する当該切断試験荷重の<math>\frac{1}{3}</math>以下であること。</p> <p>④ 係留鎖が疲労破壊のおそれのある場合は、それを考慮して許容引張力を定めること。</p>
D	<p>ドルフィン係留； ① 係船ドルフィンは、船舶によって生ずる外力等に対して十分に安定な構造としなければならない。</p> <p>② 防衝設備は、船舶によって生ずる外力の吸収及び船体と係留施設の損傷の防止等を考慮し、適切な材質、構造を選定するとともに、その配置についても十分に配慮しなければならない。</p>
E	<p>索鎖多点係留； ① 構造物の形式、状態に応じて係留計算を行ない、係留設備には適宜、次の機能をもたせなければならない。</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1) 構造物を定点に保持すること。</li> <li>2) 構造物の漂流を防止すること。</li> </ol> <p>② 定点保持のためには、その時の外力に耐えるのはもちろんのこと、係留索に適当な初期張力を与えて、外力による変位を許容値以内におさえるようにしなければならない。</p> <p>③ 係留索の安全率は常時荷重に対して3.5～4.0とし、非常時荷重に対して2.5～3.0とする。</p>
F	<p>ドルフィン係留； ① 防げん材の配置は、防げん材が所定の船舶の接岸エネルギーを吸収する以前に、船舶が直接係留船岸に接触することがないようにするものとする。</p> <p>② ゴム式、空気式防げん材は次の事項を考慮して選定する。</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1) 接岸力は係船岸の許容荷重以内とする。</li> <li>2) 波浪の影響を受けるところや、小型船も接岸する係船岸では、せん断力に強い防げん材を用いる。</li> </ol> <p>索鎖多点係留； ① 外力としては次の組み合わせのうち最も大きなものを使用する。</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1) 船舶接岸力+潮流力</li> <li>2) 船舶けん引力+潮流力</li> <li>3) 波力+潮流力</li> </ol> <p>② 係留鎖の長さは水深の5倍に潮差を加えたものとすることが多い。</p> <p>③ 鎖の許容張力はJISの規格に示された破断試験荷重の<math>\frac{1}{3}</math>とする。</p> <p>④ 各鎖に作用する最大張力は、浮体と鎖の径を動力学的に解明して求めることがのぞましい。</p> <p>⑤ アンカー重量及び設置方法は、アンカーに設計外力が作用したとき、アンカーが十分安定となるよう決定する。</p>

## 第5章 結 言

以上が浅海域における箱型海洋構造物の運動特性と係留システムの設計指針に関する研究として第179研究部会が昭和54年度から3ヶ年計画で実施して来た成果の内容を詳述したものである。

今回本研究部会が実施して来た内容は、実施した期間及び使用した調査研究経費等に対して充分自負できるものであり、これは本研究部会に参加した各委員と事務局の方々の努力と熱意によるものであるといえる。

したがって、本報告書を完成しただけに止まらず、本報告書の内容の充実及び発展を機会あるごとに進捗させることを希望する。また、新しい海洋空間等の有効利用構想の創出や計画の作成等に本報告書の数値計算法、図表及び係留システムの設計指針等が大いに活用されると同時に、浅海域に大型の箱型海洋構造物が実現する日が近く来ることを祈って止まない。

# 付録1. 大型模型による多点係留方式の水槽模型試験

## 1. 目的及び概要

浅海域における箱型海洋構造物の係留システムの一つとして多点係留方式が考えられるが、浅海という制約のために係留索鎖に種々の条件が付加される。その様な条件の中で構造物及び係留索鎖の十分な安全性を保持するためには種々の条件を考慮したシステムの数値シミュレーションを確立し、係留システムの設計基準作成に資する様にしておく必要がある。

そこで、多点係留システムの数値シミュレーションを確立するための基礎資料を得るとともに、シミュレーション手法の妥当性を検証する事を目的として大型模型を用いて水槽試験を行なった。

浅海における多点係留の方式としては、通常の slack な鎖によるもの他に、中間シンカー又は中間ブイをつけたものが考えられるが、全体の試験点数の制約上、鎖係留をとりあげた。また、箱型海洋構造物の基本的な動揺特性も知る必要がある事から、無係留時の動揺試験も行なった。この結果は、第2章箱型海洋構造物の運動特性の研究における計算法の検証にも用いられる。

## 2. 供試模型

本試験に用いた箱型海洋構造物模型は、長さ×幅×深さが  $3.0 \times 2.5 \times 0.75$  (単位 m) の M 3 A 模型 (長さ・幅比 1.2) と、同じく  $3.872 \times 1.936 \times 0.6$  の M 3 B 模型 (長さ・幅比 2.0) の 2 隻である。想定実機に対する縮尺比は M 3 A 型は 1/36、M 3 B 型は 1/46.5 である。

係留鎖は単位長さ当たり重量が空気中で  $0.996 \text{ kg/m}$ 、水中で  $0.871 \text{ kg/m}$  のスタッドのない市販品である。リンクの形状、寸法を図 1.1 に示す。

中間シンカーはアルミのアングルを組みあわせ、その中に鉛を入れたもので重量は空気中で  $3.26 \text{ kg}$ 、水中で  $2.87 \text{ kg}$  である。その形状、寸法を図 1.2 に示す。

## 3. 試験方法

無係留時は、通常の動揺試験であるが、漂流を防ぐために図 1.3 の様に細いワイヤロープでループを作り、カウンターウェイトで漂流力を測定した。このため Yawing は強く拘束されている。また、Rolling、Pitching も弱く拘束されるが、強制力に比して無視できる程度である。運動の計測は、回転運動をパーティカルジャイロ (Roll, Pitch)、方位ジャイロ (Yaw) で、直線運動の Sway, Surge をサーボ機構のついた 6 自由度運動測定装置で計測した。

係留時は図 1.3 の拘束をはずし、4 条の係留ラインを浮体の 4 角につなぎ、浮体側の係留点にリングゲージを入れて係留力を計測した。アンカー点の張力は、slack な係留では水槽底と鎖の摩擦のために計測する事が困難であるので今回は計測していない。

波は造波板より約 8 m 離れた水槽側壁に近い点で、サーボ式波高計によって計測した。

## 4. 試験状態

### 4.1 水 深

浅海域における試験としては  $H/d$  が 3.0 以下が重要であると考えられるが、本試験に使用した水槽（船舶技術研究所・海洋構造物試験水槽）の造波特性の関係上、水深を 1.2 m と定めた。このため後に示す様に  $H/d$  (水

深・喫水比)が4.8~9.6とかなり大きくなつた。しかしながら、シミュレーション計算の検証という目的には支障はないと思われる。

#### 4.2 箱型海洋構造物模型の状態

M3A, M3B型共に幅・喫水比( $B/d$ )が10と20について試験をしたので、浮体模型の状態である。その要目を表1.1に示す。なお、重心および回転半径は、ウェイトを載せない模型だけの値を吊り式及び二本吊りねじりの方式で求め、それに積載したウェイトの分を計算で加えて求めた値である。また、固有周期は平水中の自由揺れ試験から求めたが、上下揺れの固有周期は減衰が大きくて測定できなかつた。

#### 4.3 係留状態

図1.4に示す様に4条の係留ラインを浮体に対して45°の角度で係留した。なお、これは実機も4条で係留するという事ではなく、何条かを1条で代表させたものであり、ラインの角度も比較的安定性があると思われるためである。これもシミュレーション計算の検証という目的に対しても支障がないと思われる。係留系の距離等の関係を図1.4と表1.2に示す。また、浮体を係留した時の初期張力および浮体運動の固有周期を表1.3に示す。初期張力の実験値は4点の平均である。また実験値が理論値より若干大きくなっているのは、実験状態では鎖のねじれのために理想的なライン長さより若干短くなっているためと思われる。固有周期は係留状態で自由動揺させて求めたものである。

#### 4.4 波

波は規則波と不規則波について試験をした。

規則波の周期は無次元周波数  $\xi_B = \frac{\omega^2}{g} \frac{B}{2}$  が 0.375~3.0 (M3Aでは3.17~1.30秒, M3Bでは2.79~1.14秒) 波高はM3Aでは13cm, M3Bでは10cm(想定実機で4.7m, 通常時最大波高に相当する。)を目標としたが、想定海象の平均周期より短い周期では波傾斜を一定とし、周期が長い範囲では造波特性の関係上波高が目標値より低くなっている。なお、波周波数の点数は15点程度とした。

不規則波は平均周期2.19秒のI.S.S.C型スペクトルを与える、所要の有義波高に換算可能とするために有義波高を3種類変えて実験した。具体的には不規則信号の入力時に係留器で0.9, 0.7, 0.5倍とした。スペクトラム解析から得られた結果では0.5のとき $\tilde{H}_{1/3} = 6.8\text{ cm}$ , 0.7のとき $\tilde{H}_{1/3} = 8.5\text{ cm}$ , 0.9のとき $\tilde{H}_{1/3} = 11.3\text{ cm}$ であった。

#### 4.5 試験結果

浮体の状態、係留の状態に加え、波との出会い角を0°, 45°, 90°と変えた。これらのパラメータを組み合わせて表1.4に示す様な14の状態について試験を実施した。

### 5. 試験結果

#### 5.1 規則波中試験の解析

無係留時の動揺応答は通常の解析の様に変位の振幅は波振幅で、回転の振幅を波傾斜で無次元化する。即ち

$$\begin{array}{lll} \text{Sway} & y_A / \zeta_A & ; \quad \text{Roll} & \phi_A / K \zeta_A \\ \text{Heave} & z_A / \zeta_A & ; \quad \text{Yaw} & \psi_A / K \zeta_A \\ \text{Surge} & x_A / \zeta_A & ; \quad \text{Pitch} & \theta_A / K \zeta_A \end{array}$$

ここでKは波数で $2\pi/\lambda$ である。また $\zeta_A$ は波振幅である。

係留時にはSway, Surgeおよび係留力は漂流力と係留力がバランスする位置まで風下側に流される。しかも係留系のスプリングのために長周期で振動するため図1.5に示す様になる。これらの値は係留系の設計には極めて重要な要素である。そこで、波の周期による変動の他に、この漂流によって変位がバランスするであろう点

のゼロからのシフト量を読みとる。変位の場合、このシフト量を Sway を  $Y_D$  , Surge を  $X_D$  とし、それぞれ波高で無次元化する。

係留力は、今回の試験はシミュレーション計算の検証を主目的としている事をかんがみ、想定最大波高 (M3A では  $13\text{cm}$ , M3B では  $10\text{cm}$ ) に換算した有次元量 ( $\text{kg}$ ) で表わした。換算は変動張力は波高に、先に述べたシフト量は漂流力に基づくものであるので波高の自乗に比例するとした。なお、シフト量は波上例では + 側 ( 張力の増す方向 ), 波下側では - 側に出る事は当然である。

周波数は無次元周波数 ( $\xi_B$ ) で表わすこととする。

## 5.2 不規則波中試験の解析

不規則波中試験の結果はデータレコーダに収録し、FFT を用いたスペクトラム解析装置でデータ処理した。

FFT 法ではサンプリングしたデータ数だけのペリオドグラムの形でスペクトラムが計算されるので、B-K 法に相当するスペクトラムの形を求めるために何点かのペリオドグラムを加えてその中央の周波数におけるスペクトラムの値とし、更に Hamming Window をかけた。 $\chi = 0^\circ$  と  $45^\circ$  の場合でサンプリングタイム、データ収録時間を変えたので、関連する諸量とともに次の表に示す。

$\chi$	データ数	サンプリングタイム	データ長	ペリオドグラムを加える個数	B-K 法のラグ数	等価自由度
$0^\circ$	1024	0.2 sec	204.8 秒	7	約 146	約 14
$45^\circ$	1024	0.1 sec	102.4 秒	5	約 205	約 10

求められたスペクトラムから分散  $m_0$  ( スペクトラムの面積 ) を求めた。標準偏差  $\sqrt{m_0}$  からは各種の統計量が求まるので参考までに  $\epsilon = 0$  のレイレイ分布とした場合 ( 波のみは  $\epsilon = 0.59$  の P-M 型スペクトルの場合も載せた ) の  $\tilde{H}$  ( 平均値 ),  $\tilde{H}_{1\%}$  ( 有義値 ) および  $\tilde{H}_{\max}(100)$  を求めて表 1.5 及び 1.6 に示した。また、実測記録から直接的に求まる  $H_{\max}$  を測り、合わせて載せた。なお、 $\sqrt{m_0}$  と  $\tilde{H}, \tilde{H}_{1\%}, \tilde{H}_{\max}(100)$  の関係は以下の様である。

$$\begin{aligned} \epsilon = 0 \text{ (Rayleigh 分布の場合)} & \quad \tilde{H} = 2.506 \sqrt{m_0} & \epsilon = 0.59 \text{ (P-M 型)} & \quad \tilde{H} = 2.024 \sqrt{m_0} \\ \tilde{H}_{1\%} = 4.004 \sqrt{m_0} & & \tilde{H}_{1\%} = 3.774 \sqrt{m_0} & \\ \tilde{H}_{\max}(100) = 6.45 \sqrt{m_0} & & \tilde{H}_{\max}(100) = 6.316 \sqrt{m_0} & \end{aligned}$$

## 5.3 規則波中試験結果と考察

無係留および係留時の動揺の応答を各状態毎に図 1.5 から図 1.19 に示す。これから、どの動揺モードとも無係留、チーン係留、シンカー付チーン係留の間に有意な差が認められない事がわかる。

次に、縦波中係留時における漂流力による前後揺れのシフト量、係留各点における張力変動、張力のシフト量を図 1.20 から図 1.25 に示す。前後揺れのシフト量と張力のシフト量は当然の事ながら同じ様な傾向を示す。シフト量はシンカー付の方が小さく、シンカーの効果が現われているが、張力変動は特に全体の漂流力の大きい M3A 型で、シンカー付の方が著しく大きくなっている。M3A では  $\xi_B$  が 2 のとき、M3B では  $\xi_B$  が 1.2~1.3 で張力変動又はシフト量に大きなピークを示す場合があるが、この原因については不明である。M3B ではシンカーによる前後揺れのシフト量の減少効果が大きい割りには張力の変動量、シフト量に両係留法で差異が少ない。

## 5.4 不規則波中試験結果と考察

不規則波中の試験の記録例を図 1.26 から図 1.32 に示す。これらの波形はスペクトラム解析をした範囲である。また、いずれも有義波高  $11.3\text{cm}$  のもので、 $\chi = 0^\circ$  のチーン係留、シンカー付チーン係留および  $\chi = 45^\circ$  のシンカー付チーン係留の場合である。これらの波形から、 $\chi = 0^\circ$  の場合は長周期の振動が未発達で、前半

は過渡状態にあると考えられる。また、 $\chi = 45^\circ$  の場合は長周期運動の統計的解析としては記録が短かすぎるくらいがある。したがって、ここで求めた長周期成分の著しい現象に対する統計量はあくまで参考にすぎない事を強調しておく。

図 1.33、図 1.34は $\chi = 0^\circ$ において得られた波と運動のスペクトラムを示している。ここでも上下揺れ、縦揺れはシンカーの有無に依らず、前後揺れはシンカー付の方が著しく減少している事がわかる。この前後揺れは長周期変動量であるが、中間シンカーは長周期前後動を減少させる効果があることになる。張力のスペクトラムは図を省いたが（形としてはほぼ前後揺のスペクトラムと同じ様になる。）中間シンカーの効果は表 1.5 からみると、前後揺の場合の様には現われていない。次に $\chi = 45^\circ$ の有義波高11.3 cmの場合をシンカーの有無でスペクトラムの比較をしたもののが図 1.35、図 1.36である。なお、波スペクトラムが $\chi = 0^\circ$ の場合と異なって双峰形になっているが、これは構造物からの反射で波高計測点付近で定在波が発達したためと考えられる。これは規則波においても第 2 の峰に相当する周波数付近で著しく波高が歪められた事からもうかがえる。これらの図からやはり、前後揺れ、左右揺れ、船首揺れの長周期成分は中間シンカーによってかなり減少させられることがわかる。

表 1.5、表 1.6 は 5.2 で述べた様に  $\sqrt{m_0}$  とそれから得られる統計量および実測最大値をまとめたものである。統計量で実質的に意味のあるものは、波、上下揺れ、縦揺れ、横揺れである。これらのピークの数は $\chi = 0^\circ$  で約 100 であるが、 $\chi = 45^\circ$  では 40~50 である。したがって、 $\tilde{H}_{\max}(100)$  と実測の差異は表 1.6 の方が著しくなっている。係留点の張力に関しては長周期変動の波形も非対称、かつ、現象も非線形と考えられるので統計量は更に意味がなくなるが  $\sqrt{m_0}$  は係留力の大きさを示す指標にはなると思われる。したがって、 $\chi = 0^\circ$  の波上側はシンカーの有無で同程度か、ややシンカー無しの方が大きめなのに対し、 $\chi = 45^\circ$  の波上側は一本で極めて張力が大きくなるためか、シンカー付チーンの方が大きくなっている事がわかる。なお、表 1.6 中の有義波高と波の  $\tilde{H}_{1\%}$  の値が著しく違うのは、有義波高は $\chi = 0^\circ$  の場合の平均値を示し、 $\tilde{H}_{1\%}$  は上述の様に反射の影響で変容した実測値から求めたそのままの値を示しているからである。

表 1.1 三次元模型要目

		M 3 A		M 3 B	
長さ L		3.000 m		3.872 m	
幅 B		2.500 m		1.936 m	
深さ D		0.750 m		0.600 m	
喫水 d		0.250 m	0.125 m	0.194 m	0.097 m
排水量 △		1,875 kg	937.5 kg	1,451 kg	725.6 kg
重心高さ KG		0.550 m	0.315 m	0.458 m	0.255 m
回転半径	k <sub>xx</sub>	0.929 m	0.850 m	0.674 m	0.579 m
	k <sub>yy</sub>	0.933 m	0.970 m	1.120 m	1.230 m
	k <sub>zz</sub>	1.276 m	1.265 m	1.408 m	1.356 m
同調周期	T <sub>roll</sub>	2.07 sec	1.50 sec	1.78 sec	
	T <sub>pitch</sub>	1.87 sec	1.68 sec	1.87 sec	
	T <sub>heave</sub>	—	—	—	
L/B		1.2		2.0	
B/d		1.0	2.0	1.0	2.0
H/d		4.8	9.6	6.2	12.4
KG/d		2.20	2.52	2.36	2.63
k <sub>xx</sub> /B		0.372	0.340	0.348	0.298
k <sub>yy</sub> /L		0.311	0.323	0.289	0.318
k <sub>zz</sub> /L		0.425	0.422	0.364	0.350
$\tilde{\xi}_B$ roll		1.175	2.238	1.231	
$\tilde{\xi}_B$ pitch		1.440	1.784	1.115	
$\tilde{\xi}_B$ heave		—	—	—	
備考		◦ 水深 H = 1.2 m ◦ Heaving の同調周期は減衰が大きくて測定できず。 ◦ M 3 B の B/d = 20 は実施していない。			

表 1.2 係留鎖の長さ

	LH (m)	LV (m)	S <sub>0</sub> (m)	S <sub>1</sub> (m)	S <sub>2</sub> (m)	$\ell$ (m)
CHAIN	7.100	1.200	7.530			
CHAIN with SINKER	7.100	1.200	7.482	3.355	3.957	0.170

表 1.3 初期張力と係留系の固有周期

MODEL	係 留	初期張力 (kg)		固 有 周 期 (sec)				
		実 驗 値	理 論 値 (カテナリー)	T <sub>θ</sub>	T <sub>φ</sub>	T <sub>ψ</sub>	T <sub>x</sub>	T <sub>z</sub>
M 3 A (L/B = 1.2)	チエーン	2.67	2.55	1.86	—	2.288	2.13	2.16
	シンカー付チエーン	3.15	3.03	—	—	1.904	1.76	1.88
M 3 B (L/B = 2.0)	チエーン	2.78	2.55	1.87	1.78	1.704	1.648	1.852
	シンカー付チエーン	3.35	3.03	1.81	1.78	1.472	1.470	1.569

表 1.4 試験状態

No.	L/B	B/d	H/d	$\chi$ (deg.)	係 留	波	
						規則波	不規則波
1	1.2	1.0	4.8	0	無	○	
2					無	○	
3					チエーン	○	
4				45	シンカー付チエーン	○	
5					無	○	
6					チエーン	○	
7					シンカー付チエーン	○	
8	2.0	1.0	6.2	0	無	○	
9					チエーン	○	○
10					シンカー付チエーン	○	○
11				45	無	○	
12					チエーン	○	○
13					シンカー付チエーン	○	○
14				90	無	○	

表 1.5

M3B L/B = 2.0, B/d = 1.0, H/d = 6.2,  $\chi = 0^\circ$ 

係留状態	係留器	統計量	波		動揺			係留点の張力					
			レイレイ分布 $\epsilon = 0$	P.M型 $\epsilon = 0.59$ (cm)	Pitch (deg.)	Heave (cm)	Surge (cm)	Weather Side	Lee Side	艏右 (kg)	艏左 (kg)	艉左 (kg)	艉右 (kg)
シンカーチューン係留	0.9	$\sqrt{m_0}$	2.967		1.101	1.455	4.865	0.6365	0.6365	0.4242	0.4014		
		$\tilde{H}$	7.438	6.005	2.760	3.648	12.20	1.596	1.596	1.064	1.006		
		$\tilde{H}_{\frac{1}{2}}$	11.88	11.20	4.408	5.827	19.48	2.549	2.549	1.699	1.607		
		$\tilde{H}_{max(100)}$	19.13	18.74	7.100	9.385	31.37	4.105	4.105	2.736	2.589		
		$H_{max}$ (実測)		16.91	4.88	8.04	25.3	3.74	4.23	2.28	2.16		
シンカーチューン係留	0.7	$\sqrt{m_0}$	2.303		0.8598	1.105	3.174	0.3022	0.2826	0.2725	0.2614		
		$\tilde{H}$	5.774	4.661	2.156	2.771	7.956	7.577	7.086	.6832	.6554		
		$\tilde{H}_{\frac{1}{2}}$	9.221	8.692	3.443	4.425	12.71	1.210	1.132	1.091	1.047		
		$\tilde{H}_{max(100)}$	14.85	14.55	5.545	7.128	20.47	1.949	1.823	1.758	1.686		
		$H_{max}$ (実測)		12.95	3.93	6.08	16.17	1.53	1.55	1.46	1.47		
シンカーチューン係留	0.5	$\sqrt{m_0}$	2.003		0.7849	0.9659	2.140	0.1585	0.1464	0.1520	0.1471		
		$\tilde{H}$	5.022	4.055	1.968	2.422	5.364	.3973	.3670	.3811	.3687		
		$\tilde{H}_{\frac{1}{2}}$	8.021	7.560	3.143	3.867	8.567	.6345	.5861	.6087	.5889		
		$\tilde{H}_{max(100)}$	12.92	12.65	5.062	6.229	13.80	1.022	.9439	.9804	.9485		
		$H_{max}$ (実測)		8.66	2.63	4.31	9.41	0.777	.782	.798	.888		
チューイン係留	0.9	$\sqrt{m_0}$	3.002		1.105	1.484	7.157	0.6248	0.9424	0.3748	0.6345		
		$\tilde{H}$	7.527	6.077	2.771	3.721	17.94	1.566	2.363	.9397	1.591		
		$\tilde{H}_{\frac{1}{2}}$	12.02	11.33	4.425	5.943	28.66	2.502	3.774	1.501	2.541		
		$\tilde{H}_{max(100)}$	19.36	18.96	7.128	9.572	46.15	4.029	6.078	2.417	4.092		
		$H_{max}$ (実測)		17.09	5.03	8.27	31.9	2.94	4.78	1.81	3.29		
チューイン係留	0.7	$\sqrt{m_0}$	2.187		0.8535	1.105	5.045	0.3408	0.5650	0.2962	0.4263		
		$\tilde{H}$	5.483	4.427	2.140	2.769	12.65	.8543	1.417	.7426	1.069		
		$\tilde{H}_{\frac{1}{2}}$	8.757	8.254	3.417	4.422	20.20	1.364	2.263	1.186	1.707		
		$\tilde{H}_{max(100)}$	14.10	13.81	5.504	7.123	32.53	2.198	3.644	1.910	2.749		
		$H_{max}$ (実測)		12.42	3.93	5.90	23.90	1.82	2.76	1.44	1.80		
チューイン係留	0.5	$\sqrt{m_0}$	1.590		0.6164	0.7736	3.579	0.2092	0.3598	0.2267	0.2749		
		$\tilde{H}$	3.985	3.217	1.545	1.939	8.971	.5245	.9020	.5683	.6892		
		$\tilde{H}_{\frac{1}{2}}$	6.365	5.999	2.468	3.097	14.33	.8378	1.441	.9077	1.101		
		$\tilde{H}_{max(100)}$	10.25	10.04	3.975	4.989	23.08	1.349	2.320	1.462	1.773		
		$H_{max}$ (実測)		8.05	2.63	4.36	16.75	0.974	1.67	1.02	1.24		

表 1.6

M 3 B L/B = 2.0, B/d = 6.2,  $\chi = 45^\circ$ 

係 留 状 態	係 数	統計量	波		動 揺					係留点の張力				
			レイレイ分布	P.M型 $\epsilon = 0$	Surge (cm)	Sway (cm)	Heave (cm)	Roll (deg.)	Pitch (deg.)	Yaw (deg.)	船右	船左	艉左	艉右
											横 (kg)	波上 (kg)	横 (kg)	波下 (kg)
シン カ ー 付 チ エ ー ン 係 留	0.9	$\sqrt{m_0}$	3.26		3.49	5.57	1.858	1.005	0.902	0.836	0.266	1.700	0.540	0.856
		$\tilde{H}$	8.17	6.60	8.75	13.96	4.66	2.52	2.26	2.10	.667	4.26	1.354	2.15
	0.7	$\tilde{H}_{\frac{1}{3}}$	13.05	12.30	13.97	22.3	7.44	4.02	3.61	3.35	1.065	6.81	2.16	3.43
		$\tilde{H}_{max}(100)$	21.03	20.6	22.5	35.9	11.98	6.48	5.82	5.39	1.716	10.97	3.48	5.52
		Hmax(実測)	15.66	41.7	16.94	22.29	8.24	5.23	3.63	4.70	1.034	10.88	2.49	3.58
チ ー ン 係 留	0.5	$\sqrt{m_0}$	2.43		2.78	5.21	1.406	0.825	0.693	0.686	0.238	0.843	0.388	0.712
		$\tilde{H}$	6.09	4.92	6.97	13.06	3.52	2.07	1.737	1.720	.597	2.11	.973	1.785
	0.7	$\tilde{H}_{\frac{1}{3}}$	9.73	9.17	11.13	20.9	5.63	3.30	2.775	2.75	.953	3.38	1.554	2.85
		$\tilde{H}_{max}(100)$	15.67	15.35	17.93	33.6	9.07	5.32	4.47	4.42	1.535	5.44	2.50	4.59
		Hmax(実測)	11.30		12.17	20.42	6.20	4.28	2.85	4.02	.992	3.79	1.727	2.65
チ ー ン 係 留	0.5	$\sqrt{m_0}$	1.705		1.946	3.40	0.988	0.647	0.497	0.450	0.1576	0.487	0.210	0.500
		$\tilde{H}$	4.27	3.45	4.88	8.52	2.48	1.622	1.246	1.128	.395	1.221	.526	1.253
	0.7	$\tilde{H}_{\frac{1}{3}}$	6.83	6.43	7.79	13.61	3.96	2.59	1.990	1.802	.631	1.950	.841	2.002
		$\tilde{H}_{max}(100)$	11.00	10.77	12.55	21.93	6.37	4.17	3.21	2.90	1.017	3.14	1.355	3.225
		Hmax(実測)	8.14		8.03	13.25	4.19	3.18	2.14	1.99	.636	1.877	.787	1.665
チ ー ン 係 留	0.9	$\sqrt{m_0}$	3.24		3.97	8.24	1.897	1.015	0.920	1.578	0.366	1.202	0.815	0.775
		$\tilde{H}$	8.12	6.56	9.95	20.65	4.76	2.54	2.31	3.96	.917	3.01	2.04	1.943
	0.7	$\tilde{H}_{\frac{1}{3}}$	12.97	12.23	15.90	33.0	7.60	4.06	3.68	6.32	1.465	4.81	3.26	3.10
		$\tilde{H}_{max}(100)$	20.90	20.5	25.6	53.1	12.24	6.55	5.93	10.18	2.36	7.75	5.26	5.00
		Hmax(実測)	15.10		18.99	28.01	8.60	5.11	3.90	6.39	1.406	5.70	2.94	3.06
チ ー ン 係 留	0.5	$\sqrt{m_0}$	2.43		3.30	5.49	1.413	0.822	0.722	0.993	0.276	0.578	0.521	0.526
		$\tilde{H}$	6.09	4.92	8.27	13.76	3.54	2.06	1.810	2.49	.692	1.449	1.306	1.318
	0.7	$\tilde{H}_{\frac{1}{3}}$	9.73	9.17	13.21	22.0	5.66	3.29	2.89	3.98	1.105	2.31	2.09	2.11
		$\tilde{H}_{max}(100)$	15.67	15.35	21.29	35.4	9.11	5.30	4.66	6.40	1.780	3.73	3.36	3.39
		Hmax(実測)	11.18		14.51	19.32	6.49	4.11	2.96	3.66	.975	2.45	1.606	1.890
チ ー ン 係 留	0.5	$\sqrt{m_0}$	1.668		2.11	3.00	1.009	0.638	0.526	0.368	0.200	0.266	0.269	0.293
		$\tilde{H}$	4.18	3.38	5.29	7.52	2.53	1.599	1.318	.922	.501	.667	.674	.734
	0.7	$\tilde{H}_{\frac{1}{3}}$	6.68	6.30	8.45	12.01	4.04	2.55	2.11	1.473	.801	1.065	1.077	1.173
		$\tilde{H}_{max}(100)$	10.76	10.54	13.61	19.35	6.51	4.12	3.39	2.37	1.290	1.716	1.735	1.890
		Hmax(実測)	8.11		9.35	11.18	4.71	3.23	2.17	1.71	.678	1.089	.924	1.090

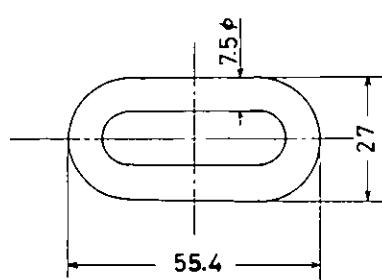


図 1.1 チェーン 1 リンクの形状

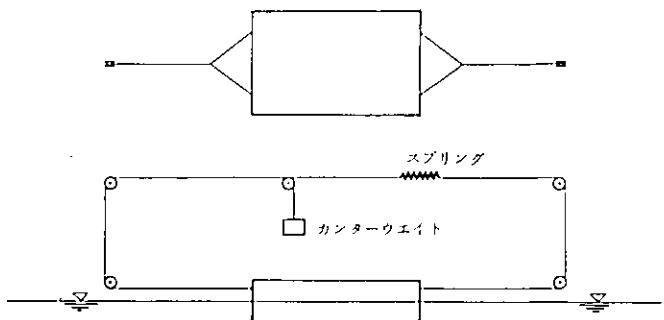


図 1.3 無係留時の試験状態

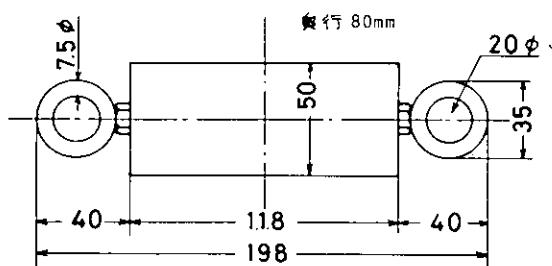


図 1.2 中間シンカーの形状

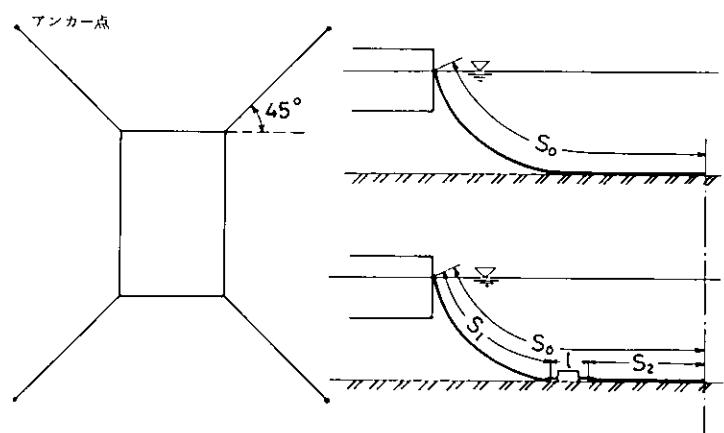


図 1.4 係留の状態

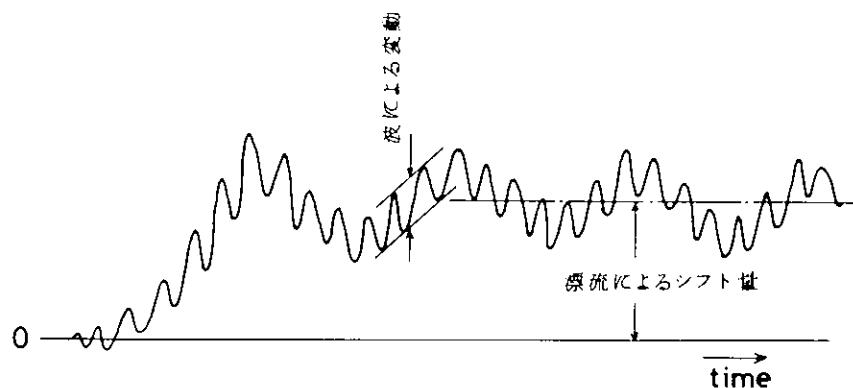


図 1.5 漂流によるシフトの定義

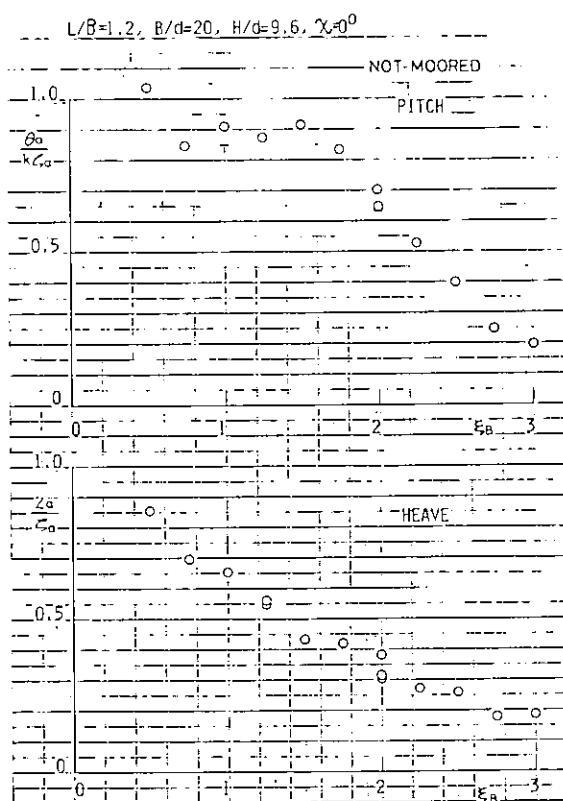


図 1.6 縦揺れ及び上下揺れの応答特性

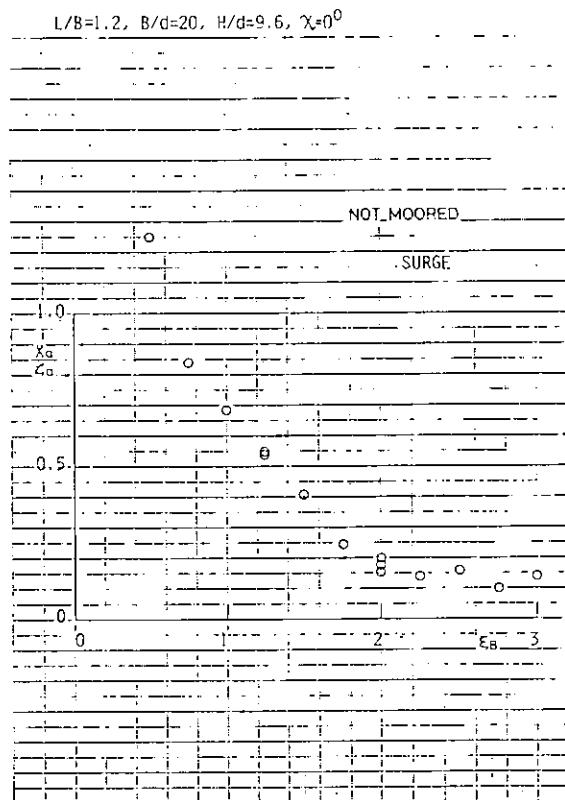


図 1.7 前後揺れの応答特性

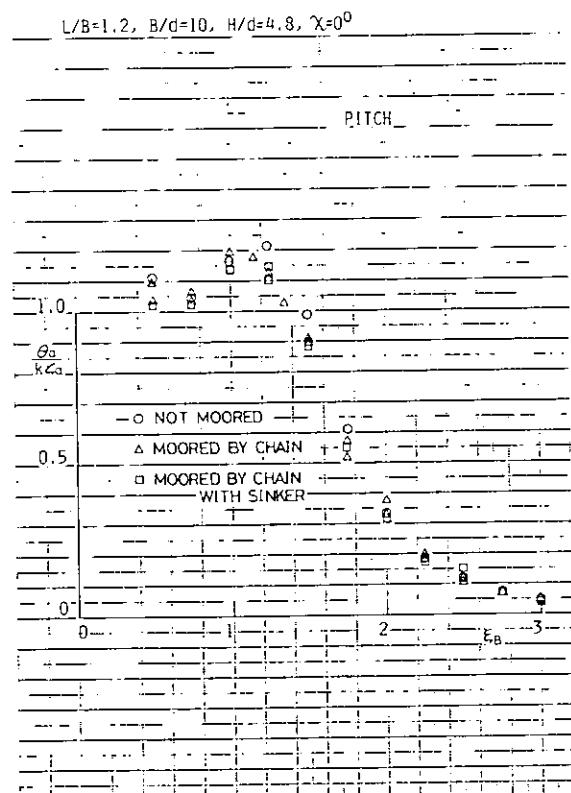


図 1.8 縦揺れの応答特性

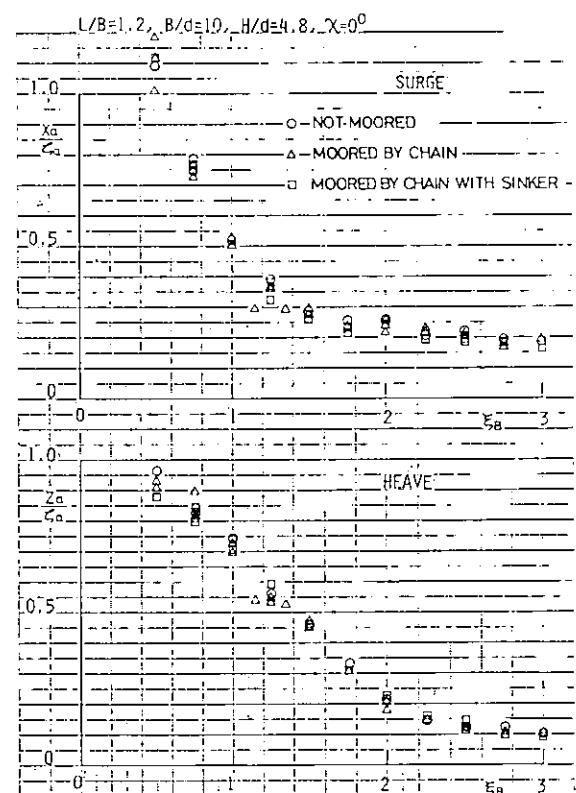


図 1.9 前後揺れ及び上下揺れの応答特性

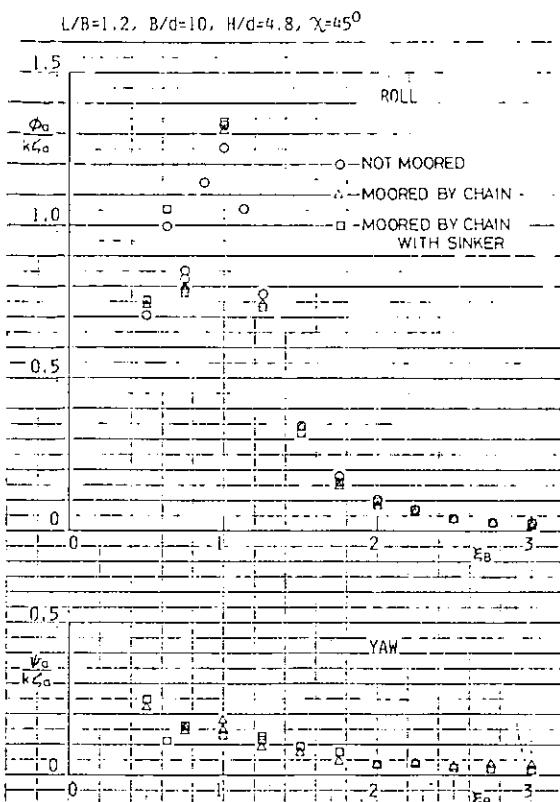


図 1.10 横揺れ及び船首揺れの応答特性

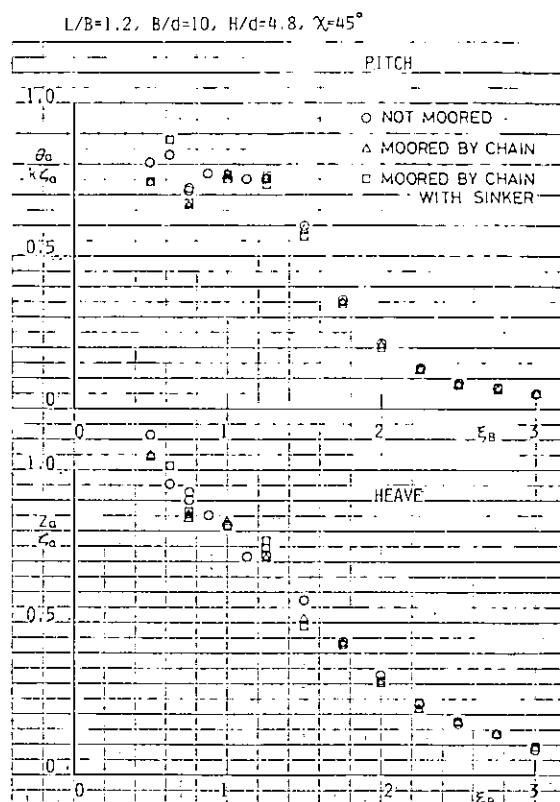


図 1.11 縦揺れ及び上下揺れの応答特性

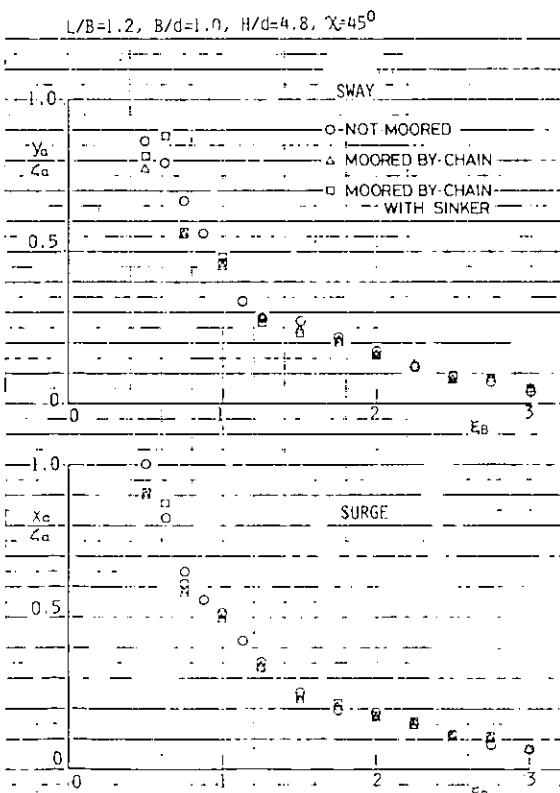


図 1.12 左右揺れ及び前後揺れの応答特性



図 1.13 縦揺れの応答特性

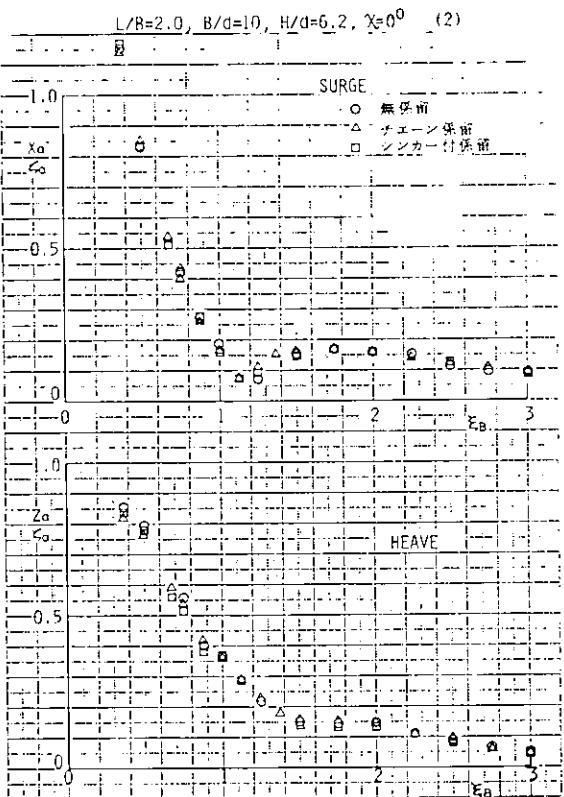


図 1.14 前後揺れ及び上下揺れの応答特性

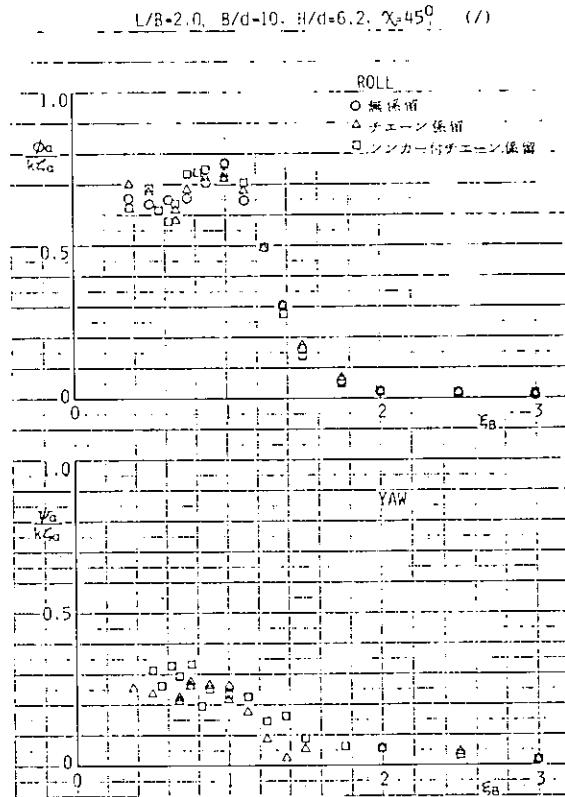


図 1.15 横揺れ及び船首揺れの応答特性

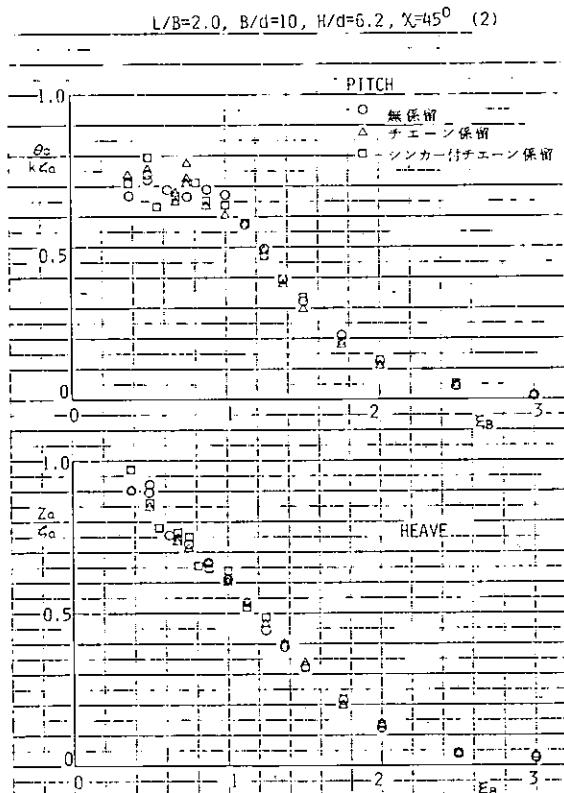


図 1.16 縦揺れ及び上下揺れの応答特性

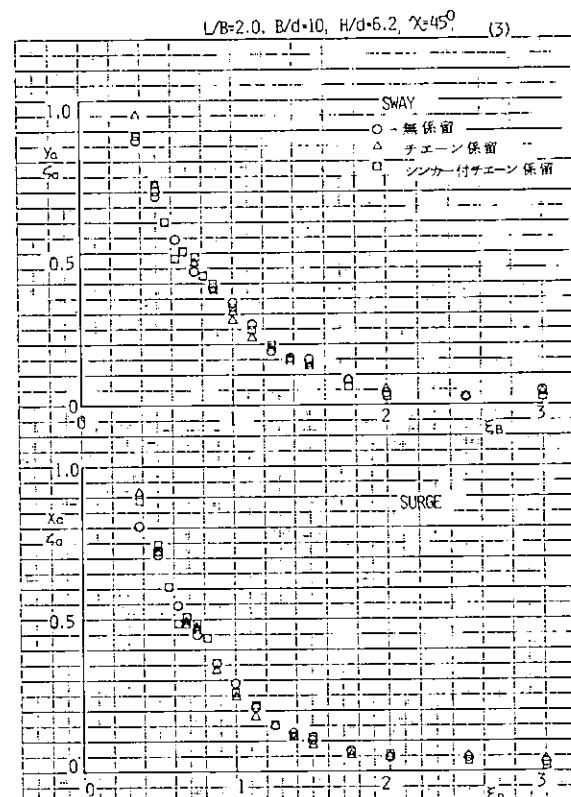


図 1.17 左右揺れ及び前後揺れの応答特性

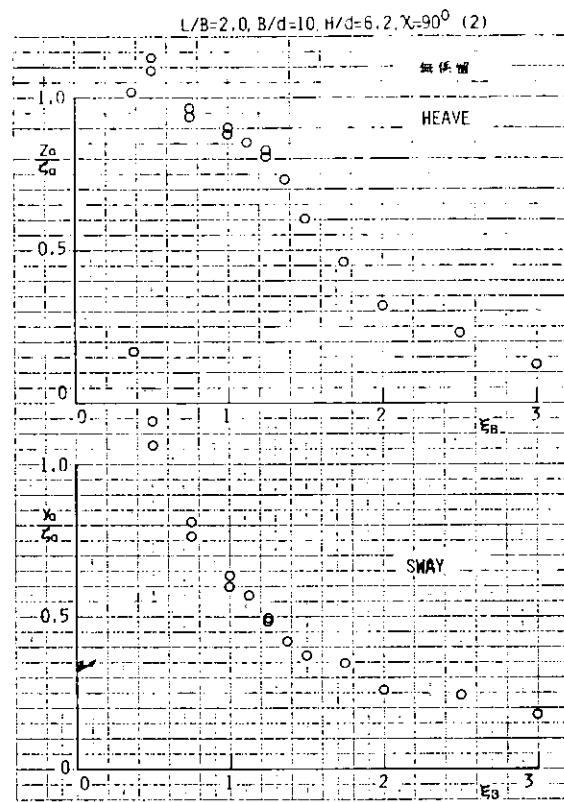
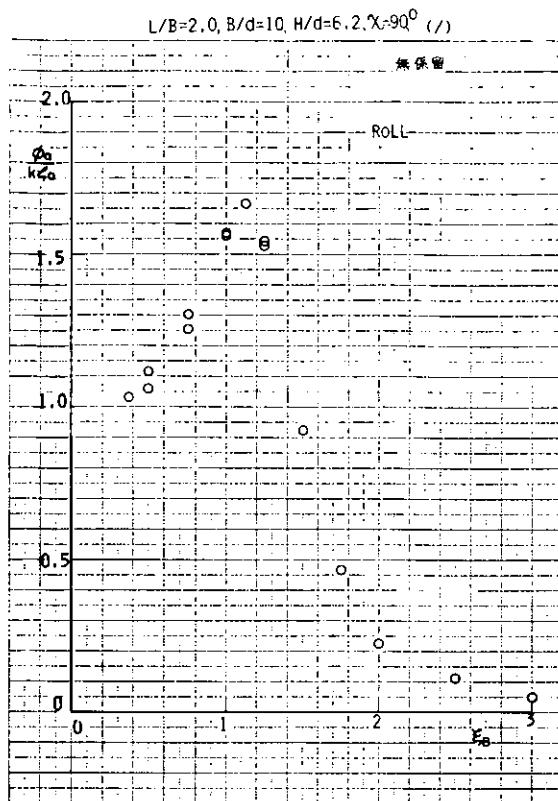


図 1.18 横揺れの応答特性

図 1.19 上下揺れ及び左右揺れの応答特性

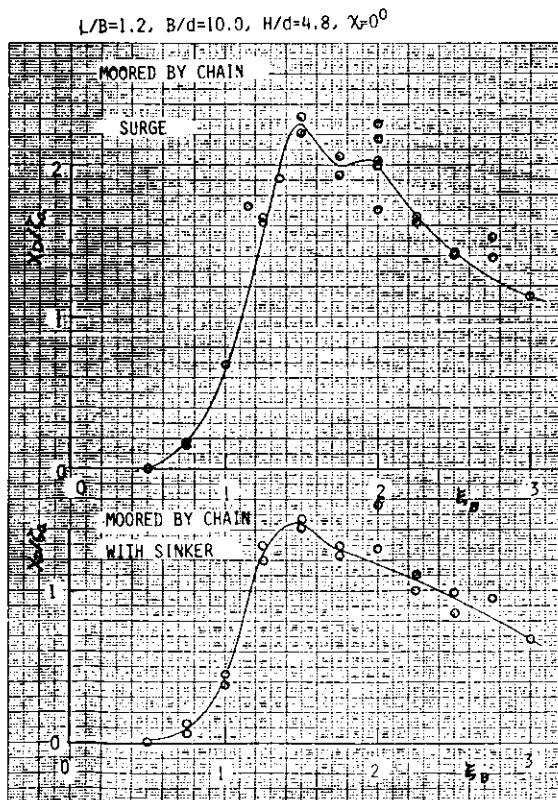


図 1.20 前後揺れのシフト量の応答特性

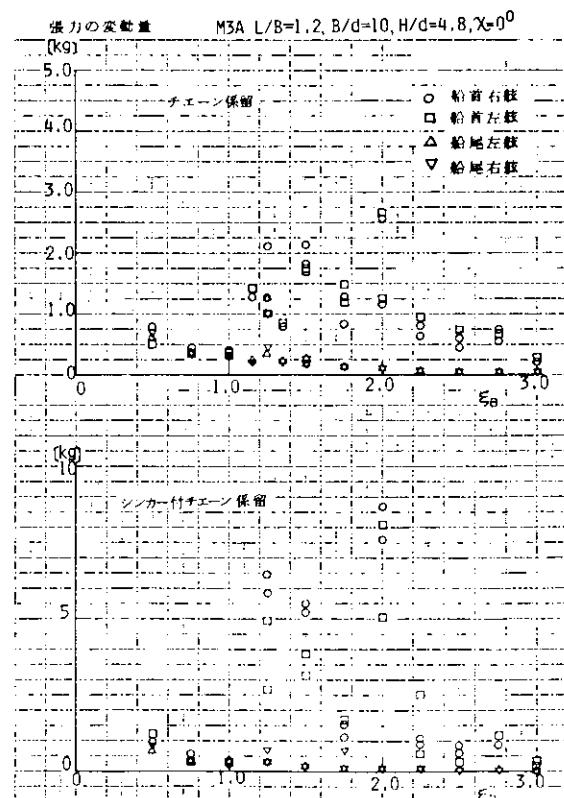


図 1.21 張力の変動量の応答特性

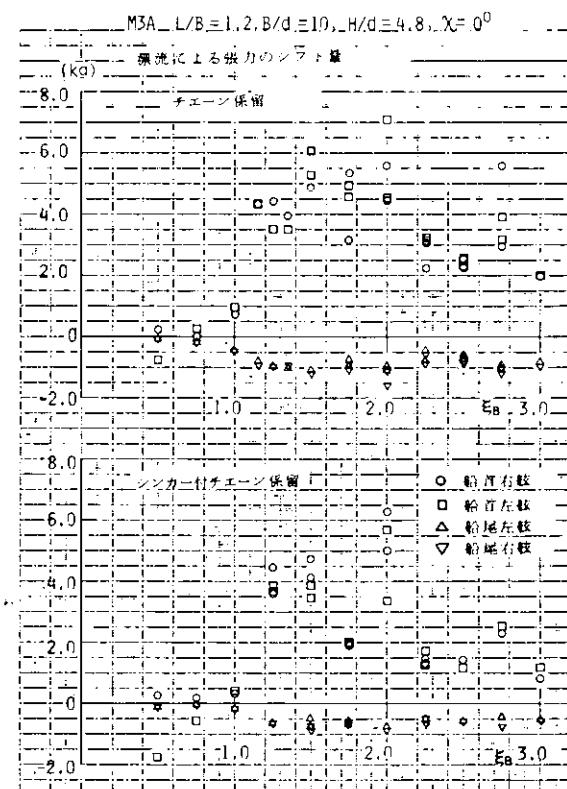


図 1.22 漂流による張力のシフト量の応答特性

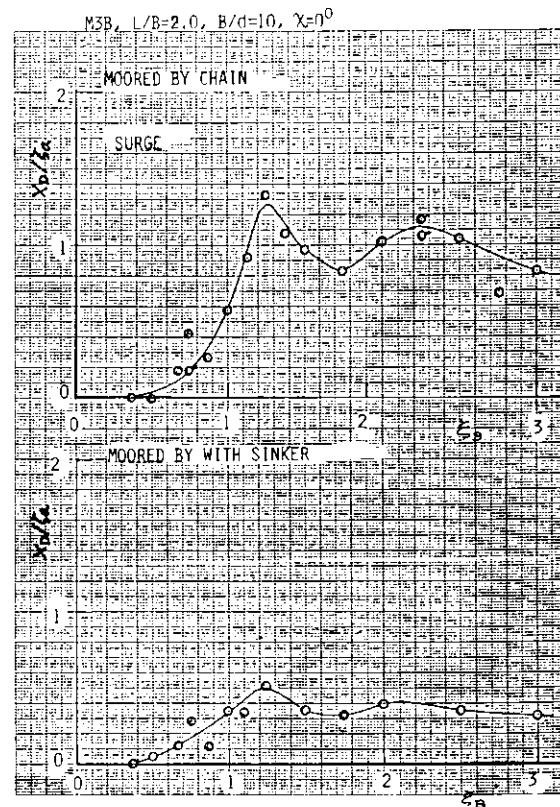


図 1.23 左右揺れのシフト量の応答特性

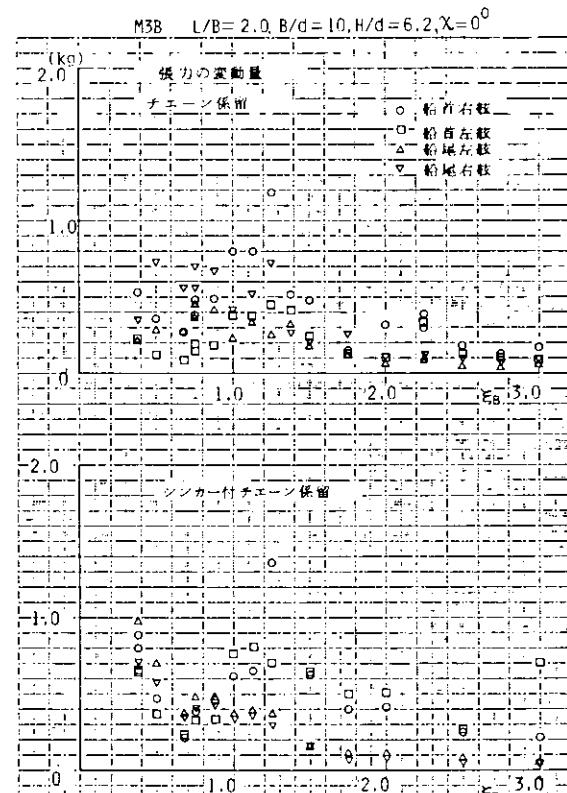


図 1.24 張力の変動量の応答特性

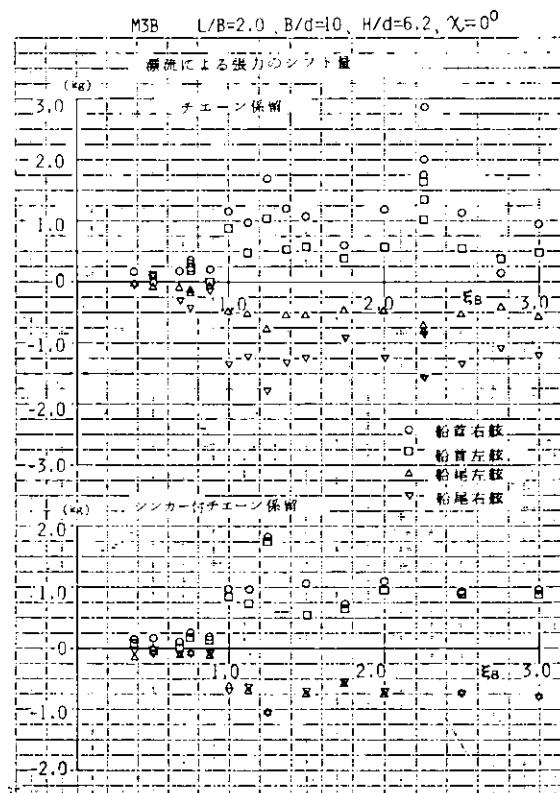


図 1.25 漂流による張力のシフト量の応答特性

不規則波中の動揺 M3B チエーン係留  $\chi = 0^\circ$

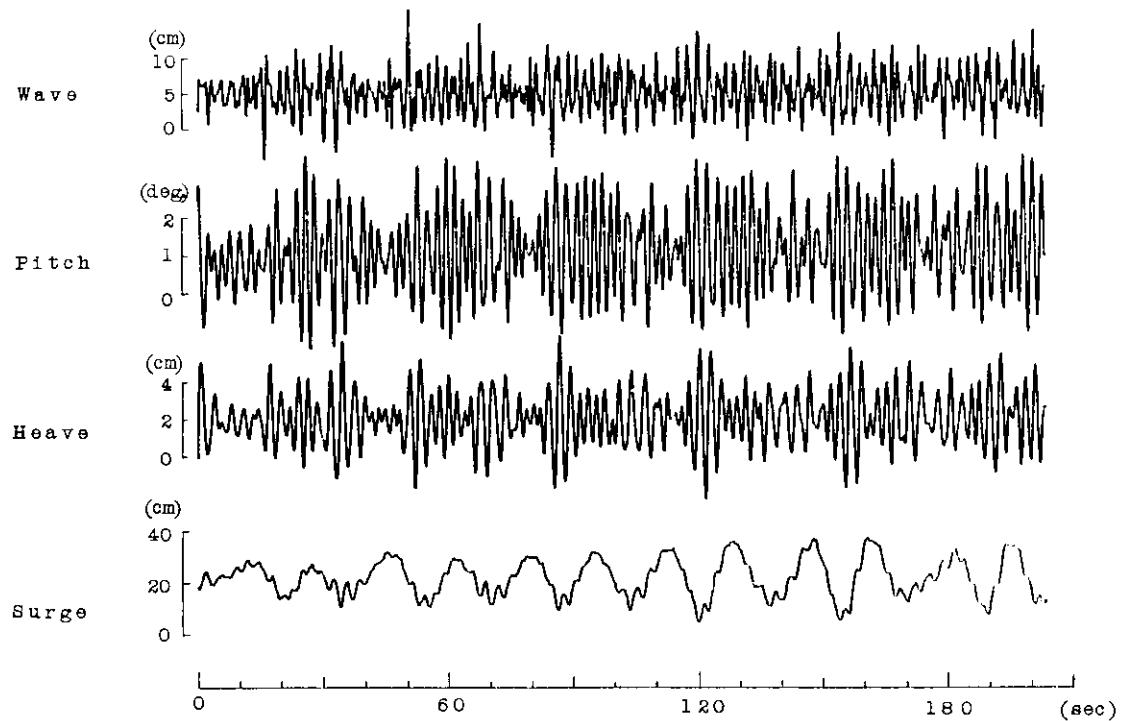


図 1.26 記録例

不規則波中の係留力 M3B チエーン係留  $\chi = 0^\circ$

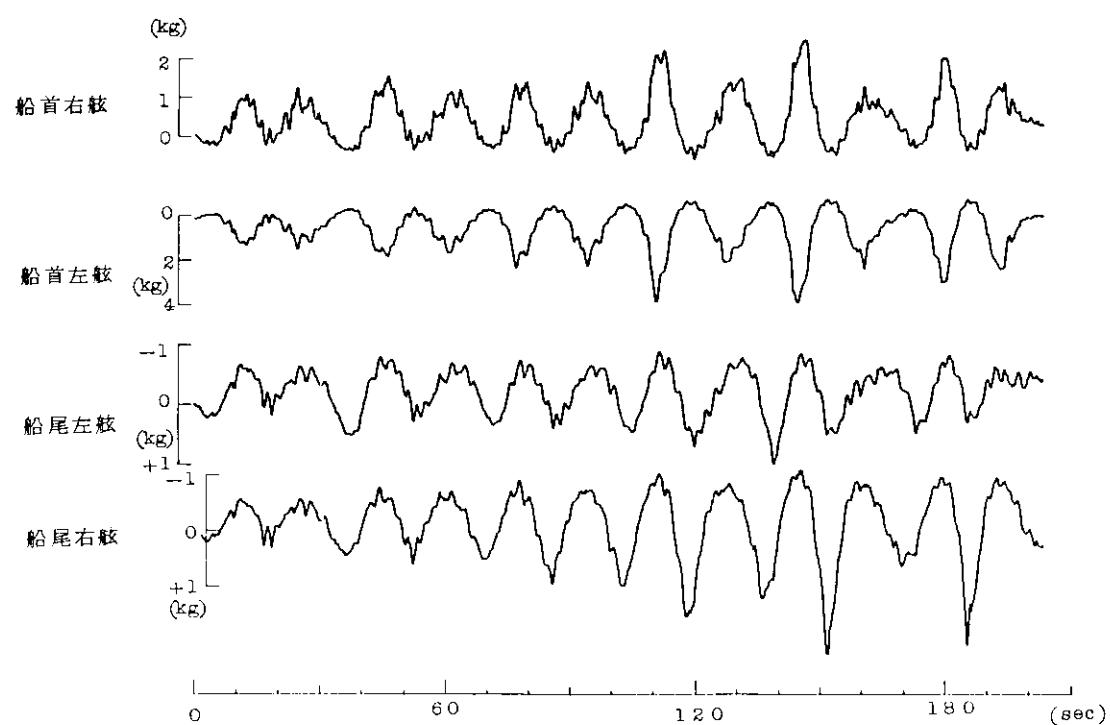


図 1.27 記録例

不規則波中の動揺 M3B 中間シンカー付チェーン係留  $\lambda = 0^\circ$

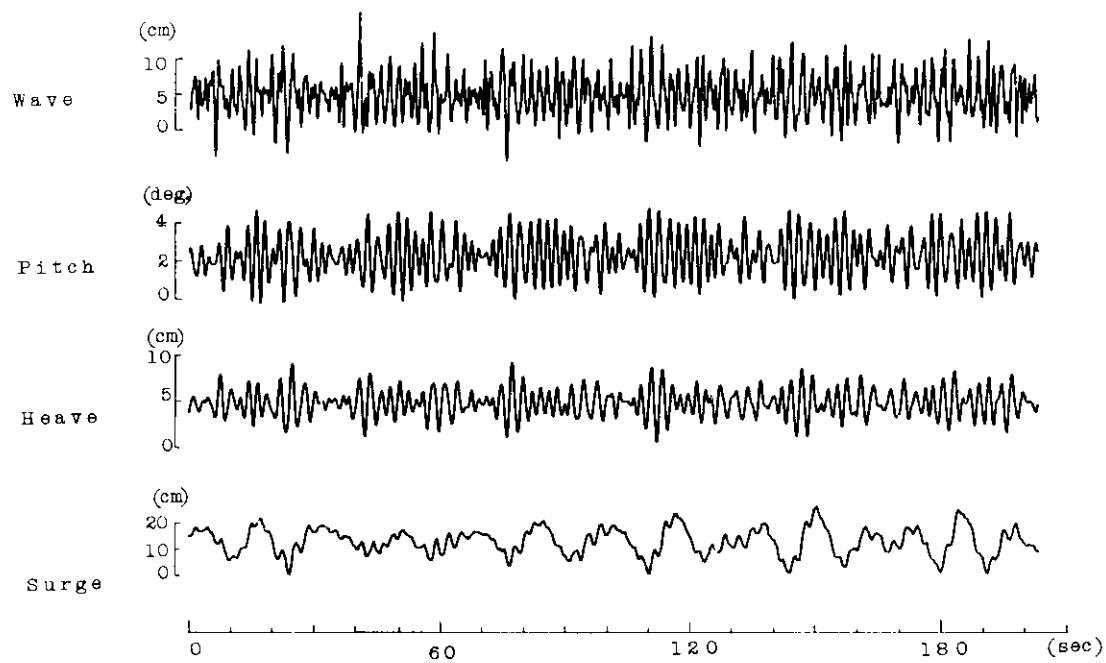


図 1.28 記録例

不規則波中の係留力 M3B 中間シンカー付チェーン係留  $\lambda = 0^\circ$

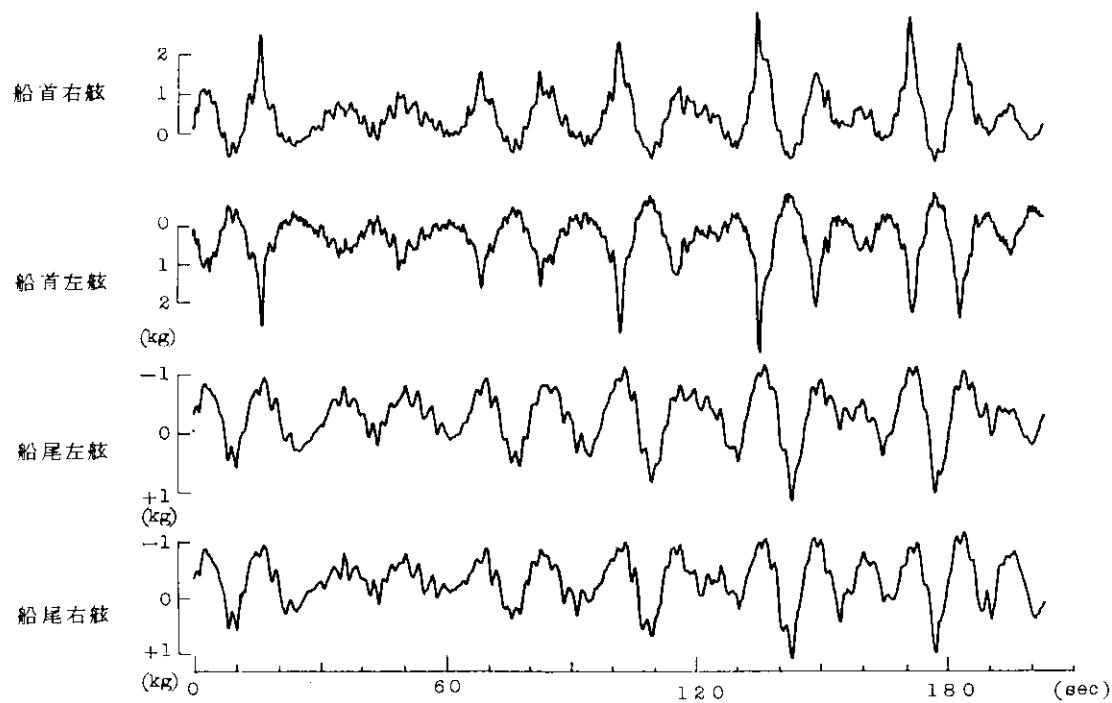


図 1.29 記録例

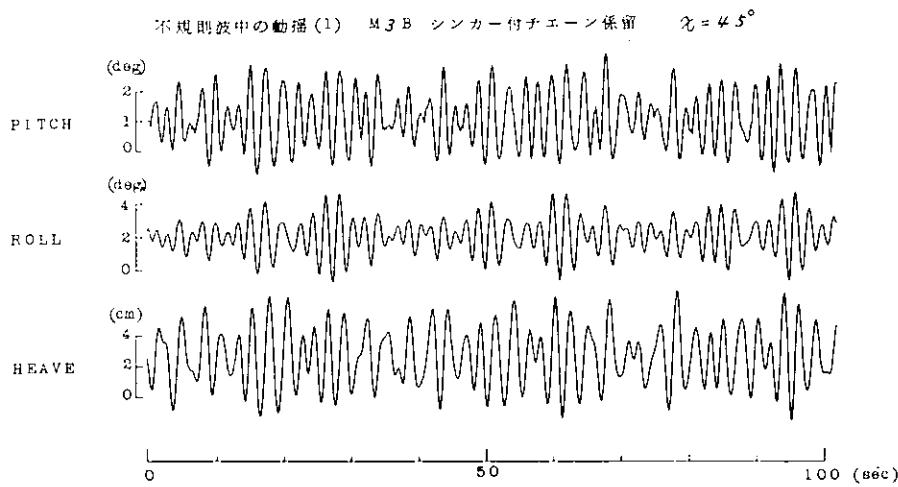


図 1.30 記録例

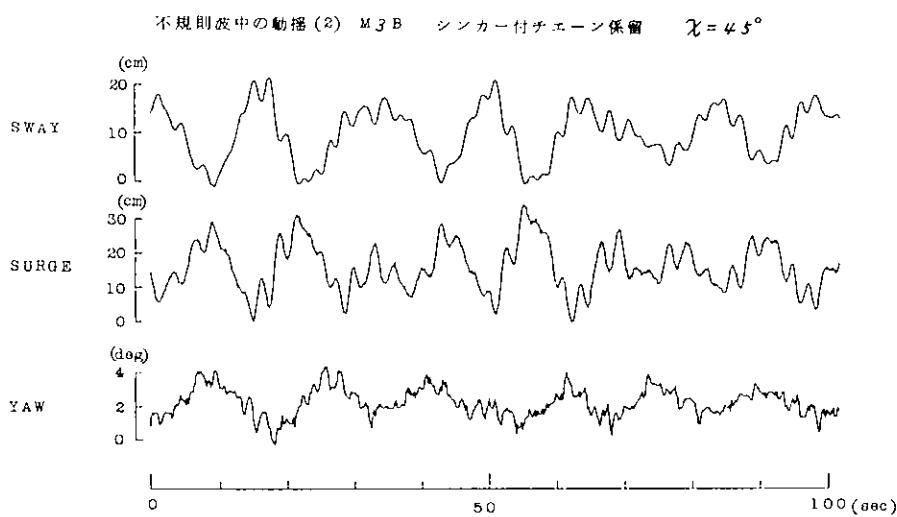


図 1.31 記録例

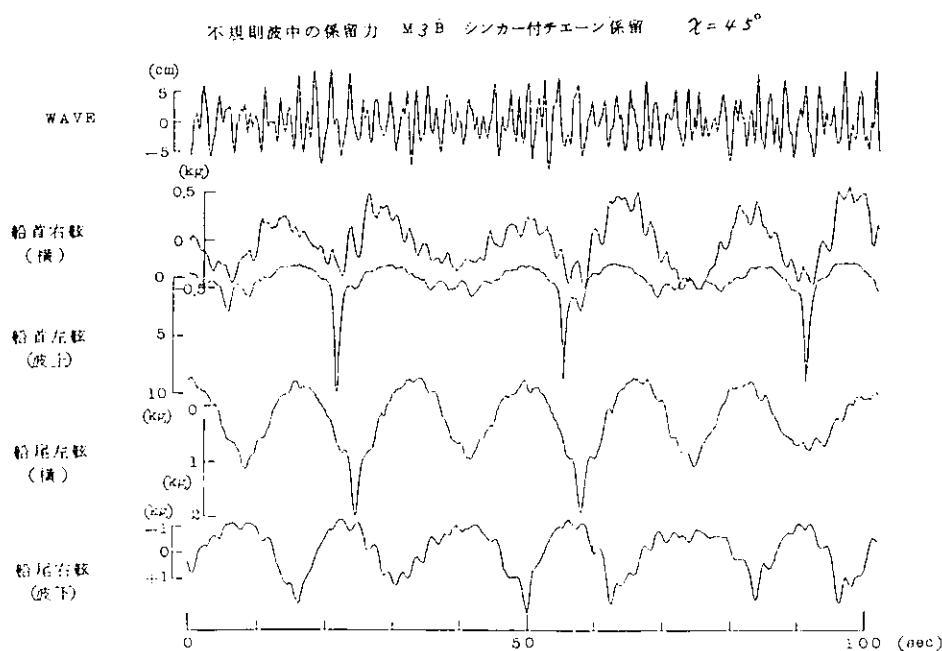


図 1.32 記録例

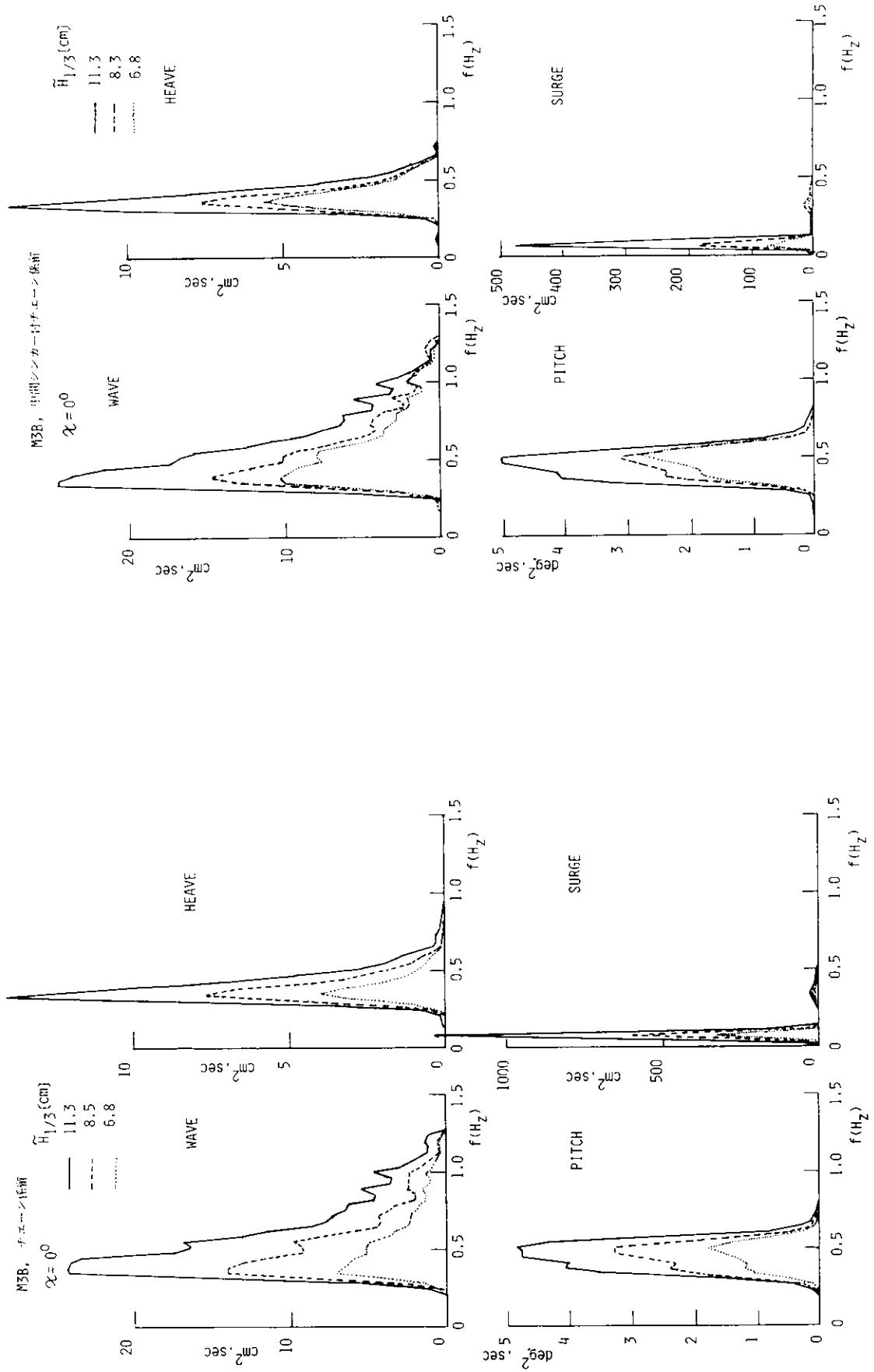


図1.34 波と運動のスペクトラム

図1.33 波と運動のスペクトラム

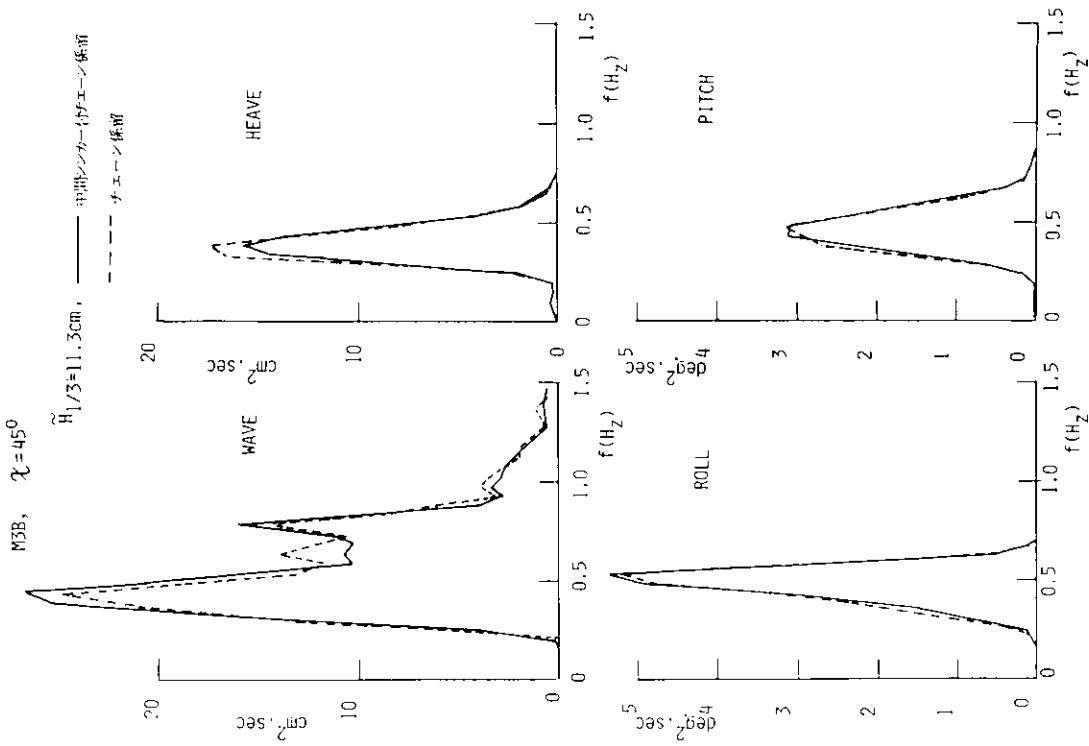


図 1.35 波と運動のスペクトラム

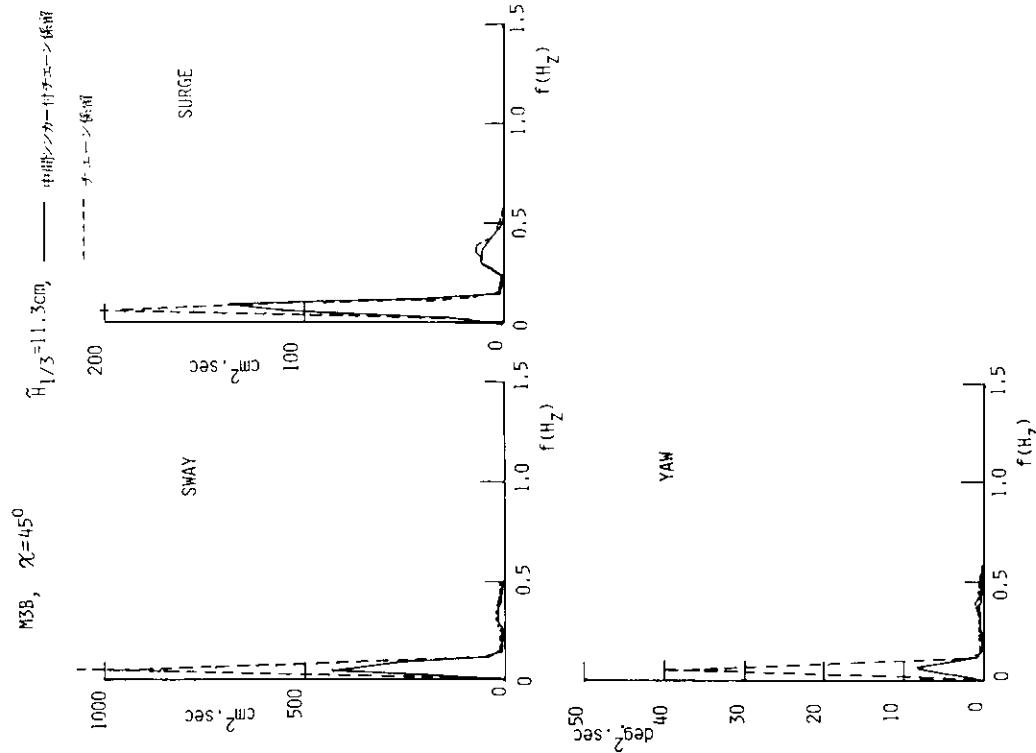


図 1.36 波と運動のスペクトラム

## 付録2. 大型模型による一点係留方式の水槽模型試験

### 1. 目的及び概要

近年、海上空間利用及び洋上備蓄基地として箱型の海洋構造物を浅海域に設置しようとする計画が増加する傾向を示してきている。それらの箱型海洋構造物は、位置保持するために各種の係留方式で係止している場合が多い。

そこで、各種係留方式に関する係留システムの設計基準を作成するためと、各種係留方式の数値シミュレーション計算法を完成するための基礎資料を得ることを目的とした一連の研究の一環として一点係留方式の水槽試験を実施した。

一点係留方式の水槽試験は、実験精度の向上を計るために可能な限り大型模型を使用し、数値シミュレーションを検証するための基礎資料を得ることを目的とし、自然環境条件の中で特に重要な外力条件として不規則波中、潮流中及びそれらの組み合せ中とで行った。

一点係留方式としては、中間ブイ方式と接触ブイ方式との2種類について水槽試験を行った。

### 2. 供試模型

今回の水槽試験に用いた3次元の大型箱型海洋構造物模型は、本研究部会の一連の水槽試験において使用したM3Bであり、模型の長さは3.872m、幅が1.936m、高さが0.600m、長さ・幅比が20.0である。

中間ブイは、既存の大型ブイを参考にして直径0.330m、高さ0.110mのものである。接触ブイは、長さ0.200m、幅0.500m、高さ0.300mのものである。

### 3. 試験の種類及び方法

ここで実施した試験の種類及び試験の方法は、以下の通りである。

#### 3.1 不規則波中における水槽試験

ブイを鎖の係留ライン4条で係留し、中間ブイ方式ではホーサーを介してブイと箱型海洋構造物を係止し、接触ブイ方式ではブイを直接箱型海洋構造物に取り付けた。そして不規則波の有義波高、供試模型の喫水、初期偏角等を系統的に変化させて船体の振れ廻りを調べた。

#### 3.2 潮流中における水槽試験

不規則波中における水槽試験と同様な試験を行って船体の振れ廻りを調べた。

#### 3.3 不規則波と潮流との組み合せ中における水槽試験

不規則波及び潮流中における水槽試験と同様な試験を行って船体の振れ廻りを調べた。

### 4. 試験状態

3次元箱型海洋構造物模型の水槽試験時の状態を表2.1に示す。

表 2.1 水槽試験時の供試模型の状態

長さ (L)m	3.872	3.872
幅 (B)m	1.936	1.936
高さ (D)m	0.600	0.600
L/B	2.000	2.000
B/d	10	20
喫水 (d)m	0.194	0.097
排水量 △kg	1,451	725.6
KG/d	2.36	2.63
GMe/d	31.34	130.93
GMt/d	6.41	31.13
kxx/B	0.348	0.298
kyy/L	0.289	0.318
kzz/L	0.364	0.350

中間ブイ及び接触ブイの概要と係留ラインの取付けの概要とを図 2.1 及び図 2.2 に示す。

係留ライン模型は、市販品のチェーン（空気中 0.49kg/m、水中 0.42kg/m）を用い、3 条の係留ラインで中間ブイ及び接触ブイを係留した。その時の係留ラインの状態の概要を図 2.3 に示す。

係留ラインの長さは、アンカーの中心からブイの取り付け部までが前方の 2 条の係留ラインで 6.285m、後方の 1 条の係留ラインで 6.235m である。

中間ブイ方式の場合のホーサーは、2 条であり、そのホーサー模型は直径 5mm、長さ 1.25m の合成纖維ロープを使用した。

なお、係留ラインの初期張力を表 2.2 に示す。

表 2.2 係留ラインの初期張力

ブイ型式	中間ブイ		接触ブイ		
	B/d	10	20	10	20
係留ラインの初期張力(kg)					
No. 1 (前方右舷)	0.835	0.835	0.92	1.05	
No. 2 (前方左舷)	0.605	0.605	0.72	0.82	
No. 3 (後方)	1.50	1.50	0.85	1.03	

また、B/d=10 の場合における供試模型の固有周波数は、縦揺れが 1.87 秒、横揺れが 1.78 秒である（平水中における自由動揺から求めた）。

## 5. 計測項目

今回の水槽試験において計測した項目は次の通りである。

イ) 不規則波 模型からの反射波を防ぐため水槽側壁付近でサーボ式波高計にて波を計測した。

- ロ) 流速 ブイの前方約3mにおける場所で流速を超音波流速計で計測した。
- ハ) ブイの係留力 ブイを係留している鎖の係留ラインがブイに取り付いている箇所にてリングゲージの歪計で図2.1及び図2.2に示すように3条の係留ライン(波上側右舷, 波上側左舷及び波下側)に働く張力で計測した。
- ニ) ブイ上のホーサー力 中間ブイによる1点係留方式にあっては、図2.1に示すようにブイ上に取り付けた回転するリングゲージにて2本のホーサーに働く力の合力を計測した。
- ホ) ホーサー力 中間ブイによる1点係留方式にあっては、図2.3のa)に示すようにホーサーが船体に取り付く箇所にてリングゲージで各々のホーサー(船首右舷, 船首左舷)に働く張力を計測した。
- ヘ) 船体動揺 船体動揺としては、縦揺れ、横揺れ及び船首揺れはジャイロにて計測した。
- ト) 船体の振れ廻り 船体の中央線上で船首より0.7~6mの箇所に豆電球を取り付けセルスポットカメラにて船体のX及びY方向の挙動をそれぞれ計測したと同時に、XYレコーダにて船体のXとYとの挙動を合成して計測した。
- チ) ブイの挙動 中間ブイによる1点係留方式にあっては、図2.1に示すブイ上に豆電球を取り付けてセルスポットカメラにてブイのX及びY方向の挙動を計測した。
- ヌ) 船体及びブイの挙動 船体及びブイの挙動を把握するためにテレビカメラにて水槽の天井から船体及びブイの挙動を撮影した。

## 6. 試験結果

まず、今回実施した水槽試験にて計測した結果の代表例を図2.4及び図2.5に示す。

図2.4は、中間ブイ型の不規則波と潮流との組み合せ中における記録例である。図2.4a)には、船体挙動のX方向及びY方向の変位、ブイ挙動のX方向及びY方向の変位、船首揺れ、ブイ上のホーサー力を示し、図2.4c)には、船首部左舷と右舷のホーサー力、横揺れ及び縦揺れを示し、図2.4e)には、ブイを係留している3条の係留ラインに働く張力及び入力波を示す。

図2.5は、接触ブイ型の不規則波と潮流との組み合せ中における記録例である。図2.5a)には、船体挙動のX方向及びY方向の変位、縦揺れ、横揺れ、船首揺れ及びブイを係留する波上側右舷の係留ラインに働く張力を示し、図2.5b)には、ブイを係留する波上側左舷及び波下側の係留ラインに働く張力、入力波及び入力波の水粒子速度(水面下約10cm)を示す。

つぎに、船体のX方向とY方向の変位を合成させた船体の振れ廻りの記録のすべてを図2.6~図2.12に示す。これらの図は、同時条件下における中間ブイ型と接触ブイ型とを比較して示している。

また、今回実施した水槽試験のブイ型式、B/d、不規則波の有義波高、潮流の流速、船体中心における初期姿勢を一括して表2.3及び表2.4に示す。

最後に、計測結果を解析して中間ブイ型と接触ブイ型との状態について比較したものを表2.5~表2.11に示す。

波浪の極大値は静水面より峰の極大を示し、波浪の極小値は静水面より谷の極小を示す。

ブイの係留力は、係留ラインに働く張力(初期張力が掛った状態が張力を零としている)の波による張力変動の平均、有義、極大及び極小を求めている。

ホーサー力は、ホーサーに働く張力の変動の有義値及び極大値を求めている。

船体動揺は、縦揺れと横揺れとの有義振幅を求めている。

その他、各計測項目は、概ね同じ周期で変動しているので、振れ廻りに近い長周期と係留した場合の前後揺れや左右揺れに近い短周期で変動しているのでそれらに区別して変動周期の大略を求めた。

なお、表2.5～表2.11に示す以外の結果は省略したが、考察において簡単に述べることとする。

## 7. 試験結果に対する考察

まず、図2.4及び図2.5の記録例からは、大略次の事項がいえる。

- 1) 船体変位は、船体変位のX方向及びY方向ともに波浪の変化の数十倍（短周期）及び数百倍（長周期）の周期で大きく変位するが、一般船舶に見受けられる振れ廻りとしては非常に小さいといえる。また、波浪の変化に対しては、X方向が多少変位していることが認められる。
- 2) ブイの変位は、船体と同様に短周期と長周期とで変位を起している。また、波浪の変化に対しては、X方向が相当変位を起していることが認められる。
- 3) 船首揺れは、模型に強制的な偏角を与えた場合に、長周期の破壊曲線を画く外に、普通時においても短周期及び長周期の船首揺れを起していることが認められる。
- 4) ホーサーに働く力は、図2.4のa)及びb)からも判るようにブイの波浪に対する応答によって衝撃的な力が作用していることが認められる。特に、船体が後方に漂流した状態においてホーサーに衝撃的な大きな力が作用する。
- 5) 縦揺れ及び横揺れとともに無係留状態と特に相違している現象は認められない。
- 6) ブイの係留ラインに働く力としては、海上側係留ラインが船体変位及びブイの短周期及び長周期変位に対して張力が変化し、波下側係留ラインが短周期及び長周期変位による張力変動の外に、波浪による変化によって比較的大きな張力変動が認められる。
- 7) ブイ型式の相違は、図2.4と図2.5とを比較すると中間ブイ型と接触ブイ型とも船体変位、船体動搖及び係留力においてほとんど差異が認められず、中間ブイ型のホーサーに働く力だけが問題になるといえる。

つぎに、中間ブイ型と接触ブイ型との船体変位の比較を図2.6～図2.12から求めると大略次の事項がいえる。

- 1) X方向の変位をブイからの漂流量とその後の変動量とに大別して比較すると、漂流量は、当然の結果といえるように中間ブイ型が接触ブイ型よりも大きいといえる。変動量は、大略中間ブイ型と接触ブイ型とも大差ないといった方がよいが、図2.8、図2.9、図2.10、及び図2.11によると僅かではあるが接触ブイ型の方が変動量が小さいといえる。
- 2) Y方向の変位は、X方向と同様に漂流量とその後の変動とに大別して比較すると、漂流量は、X方向と同様中間ブイ型が接触ブイ型よりも大きい。変動量は、大略中間ブイ型と接触ブイ型とも大差ないといった方がよいが、図2.8のa)、図2.9のa)及びb)、図2.10のa)及び図2.11のa)では僅かながら接触ブイ型の方が変動量が小さくなっている。

最後に、記録データを解析した結果を総括した表に基づいて中間ブイ型と接触ブイ型とを比較すると大略次の事項がいえる。

- 1)  $L/B = 2.0$ ,  $B/d = 1.0.0$  の状態

### イ) 漂流中(表2.5)

一様中にあっては、今回実施した範囲の試験結果によると、海上側係留ラインに働く張力は、中間ブイ型の方が接触ブイ型よりも2～3倍程度張力の平均値、極大値及び極小値が大きい。その要因としては、図2.8の船体の変位軌跡からも判るように船体の変位量が接触ブイ型よりも中間ブイ型の方が大きいためであるといえる。

### ロ) 不規則波中(表2.6及び表2.7)

今回実施した不規則波中における水槽試験は、波周期が一種類であるため、断定的な結果を導くことができ

ない。しかしながら、水槽試験結果によると、不規則波中における係留力及び船体動揺並びに変動周期ともに中間ブイ型と接触ブイ型とでは差異が認められないといえる。しいて比較すれば係留力が中間ブイ型よりも接触ブイ型の方が若干有利性が認められるし、ホーサーがないだけ有利であるともいえる。この要因も船体変位に起因しているといえる。

また、この状態で有義波高を変化させた結果によると、中間ブイ型は、波高が高くなつても急激に係留力が増加せずに単調に増加する傾向を示すが、接触ブイ型は、波高が高くなるに伴ない中間ブイ型よりも係留力の増加が激しいといえる。したがって、接触ブイ型の欠点は大波高に対する場合であるかもしれない。

#### ハ) 不規則波と潮流との組み合せ中(表2.8)

今回実施した水槽試験の範囲からは、中間ブイ型と接触ブイ型とでは係留力、船体動揺及び短周期変動に関しては差異がないといえるが、しいて比較すると、中間ブイ型の方が係留力が若干有利であり、長周期変動は接触ブイ型が中間ブイ型の約1/2以下になっている。

#### 2) $L/B = 2.0$ , $B/d = 2.00$ の状態

##### イ) 潮流中(表2.9)

今回の範囲からは、中間ブイ型と接触ブイ型とでは差異がないといえる。ただし、長周期変動は、ホーサーの有無によって相違が認められる。

##### ロ) 不規則波中(表2.10)

今回の範囲からは、中間ブイ型と接触ブイ型とでは差異がないといえる。ただし、変動周期は、中間ブイ型よりも接触ブイ型の方が短くなっていることが判る。

##### ハ) 不規則波と潮流との組み合せ中(表2.11)

この場合も潮流中及び不規則波中における結論と同様、中間ブイ型と接触ブイ型との差異は変動周期だけである。

以上述べてきた結果及び省略した実験結果から大局的に中間ブイ型と接触ブイ型とを比較した場合、今回実施した範囲からでは中間ブイ型と接触ブイ型とも係留力及び船体動揺は差異がないといえるが、それらの変動周期は、中間ブイ型よりも接触ブイ型の方が短かいといえる。

なお、本水槽試験の主目的ともいえる一点係留方式状態における船体の振れ廻り現象は、図2.6～図2.12からも判るように船体の初期姿勢を表2.3及び表2.4に示すように変化させても比較的短時間で減衰し、船体の振れ廻りといえる現象が認められない。かつ、船体のX方向及びY方向の変位量は、最大でも船幅の2.0%程度に過ぎない。

この様に船体の振れ廻りが起らない主要因は、一般船舶の場合抗力と揚力との比が船長と幅との比以上であるために僅かの偏角に対して抗力よりも揚力が大きくなるのに対し、箱型海洋構造物では船長と幅との比が一般船舶よりも小さく、抗力と揚力とが大略同じであるためである。したがって、箱型船型といえども一般船舶に近づけ $L/B$ を5.0以上にすれば振れ廻り現象が起る可能性があるといえる。

想定実機を長さ100m、幅5.0mの箱型海洋構造物として今回の水槽試験から得られた係留力及びホーサー力から実機の場合を想定すると、

	模 型	想定実機
有 義 波 高	6.5 cm	1.6 9 m
極 大 値	8.0 cm	2.0 8 m
極 小 値	~ 7.5 cm	~ 1.9 5 m
流 速	1 6.0 cm/sec	0.8 2 m/sec
波 上 側 係 留 力		
平 均 値	0.4 kg	7.0 tons
有 義 値	0.5 kg	8.8 tons
極 大 値	1.5 kg	2 6.4 tons
極 小 値	0.1 kg	1.8 tons
ホ ー サ ー 力		
有 義 値	2.2 kg	3 8.7 tons
極 大 値	4.0 kg	7 0.3 tons

となる。

そこで、係留ラインの安全率を4として係留力の極大値から鎖径を求めるとき、2種で $4.2 \text{ mm} \phi$ 、3種で $3.6 \text{ mm} \phi$ 、そして4種で $3.2 \text{ mm} \phi$ になるので妥当な値であるといえる。一方、ホーサーの安全率を3として極大値から鋼索径を求めるとき $4.0 \text{ mm} \phi$ が2本となり、合成繊維ロープでは、直徑約 $10.0 \text{ mm} \phi$ のロープになると予想される。

## 8. む す び

以上、中間ブイ型及び接触ブイ型の2種類の一点係留方式について箱型海洋構造物の大型模型を用いて水槽試験を行った結果、今回実施した範囲では船体の振れ廻りが両方式とも起らないといえる。また、中間ブイ型と接触ブイ型とについて係留力及び船体動揺等を比較すると両方式による差異がないといえる。したがって、使用目的に応じてホーサーの省略を考えることが可能であるといえる。

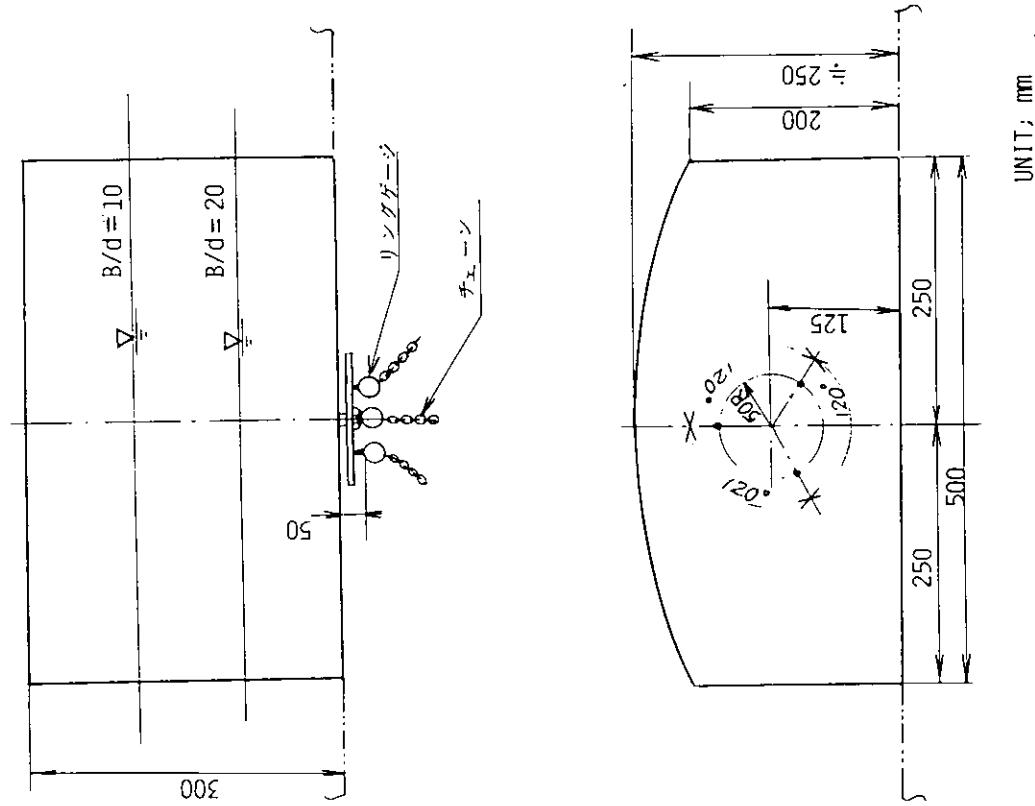


図 2.2 接触プレート模型の概要図

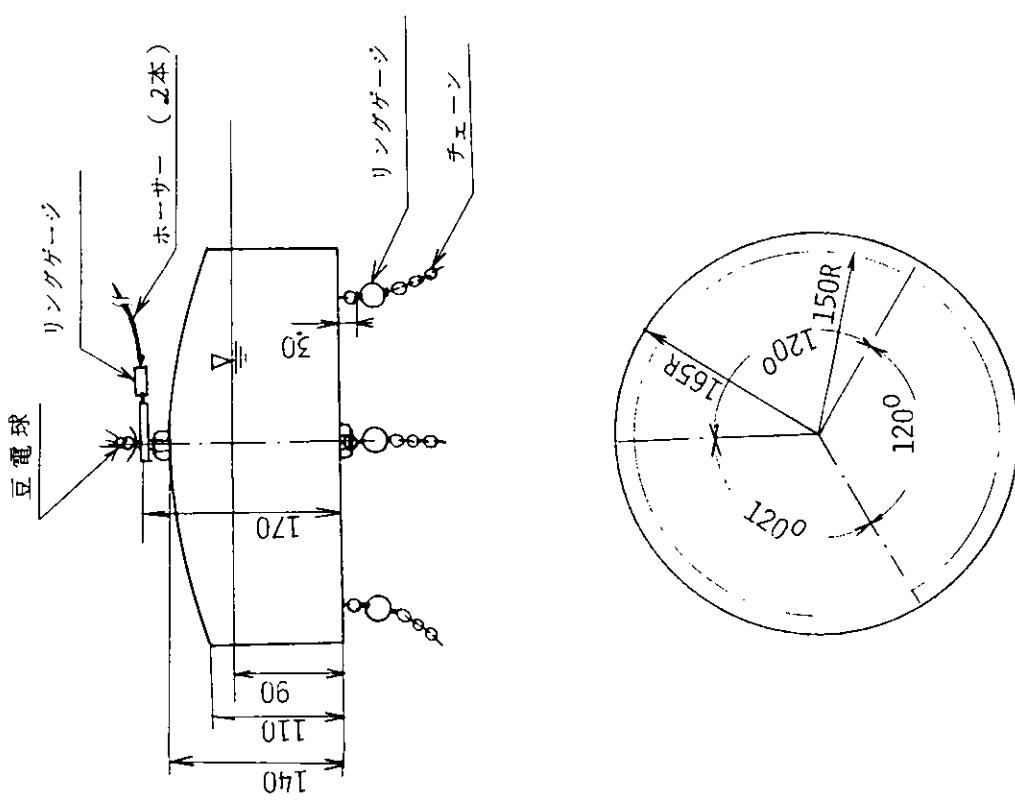
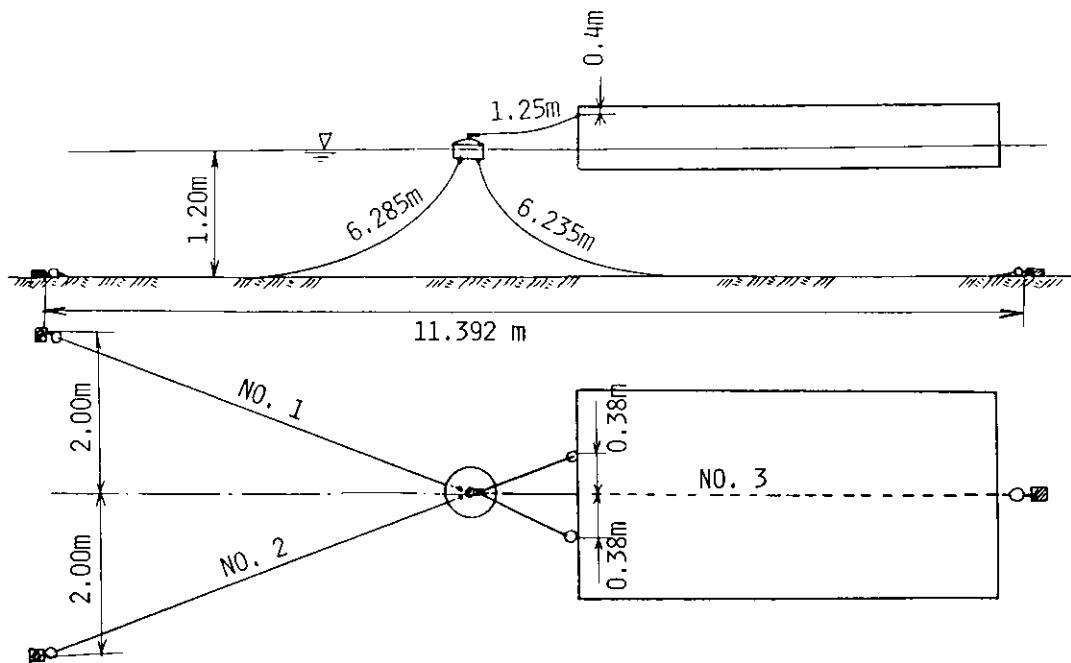
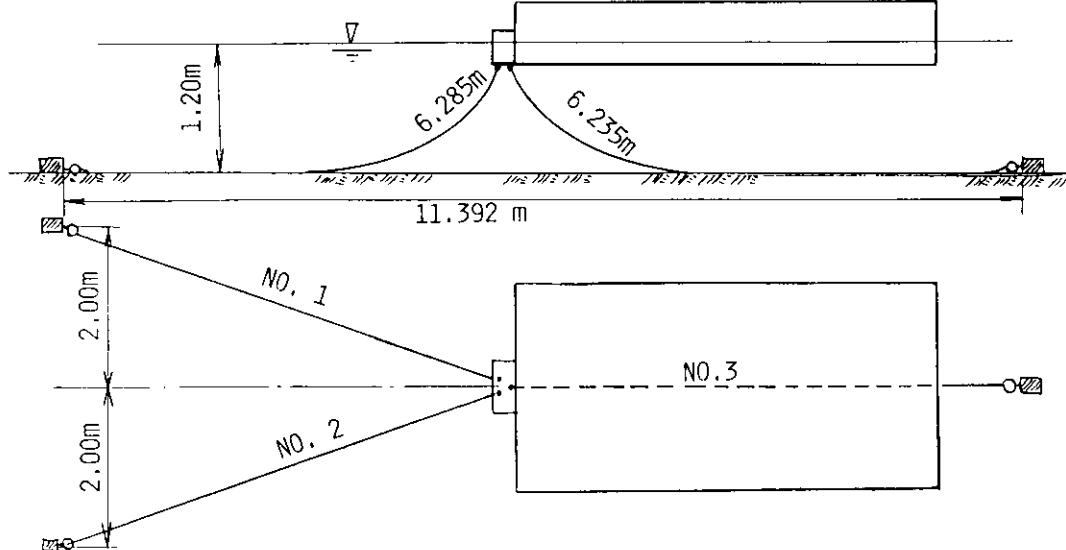


図 2.1 中間プレート模型の概要図



a) 中間ブイによる1点係留状態の概要図



b) 接触ブイによる1点係留状態の概要図

図2.3 1点係留方式の係留システムの概要図

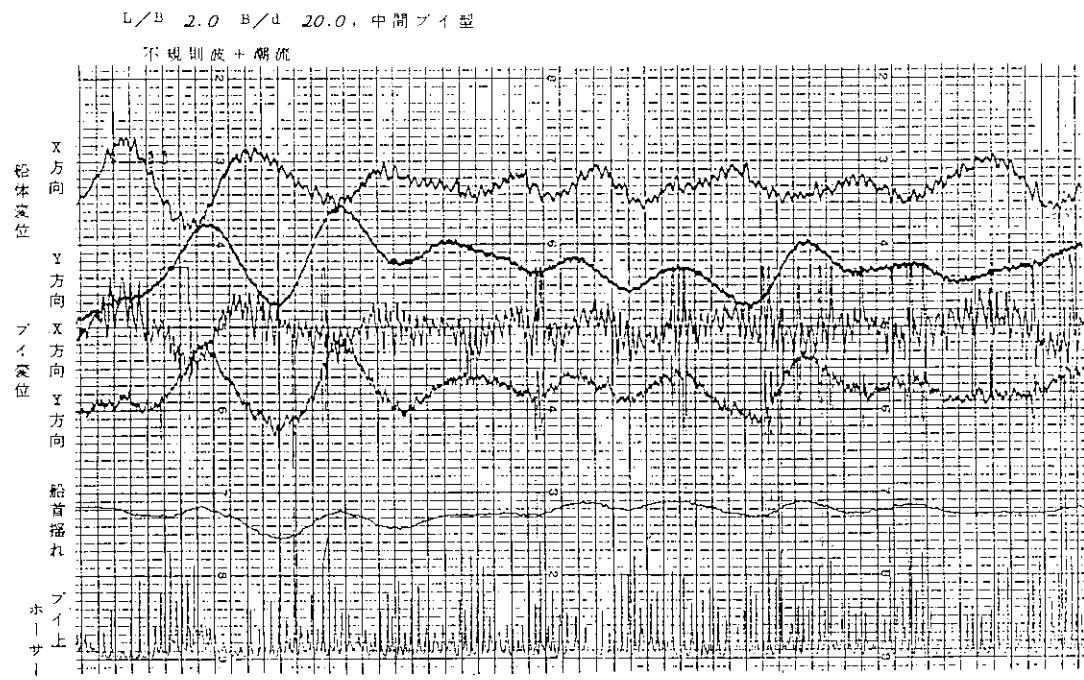


図 2.4 a) 中間ブイ型の記録例

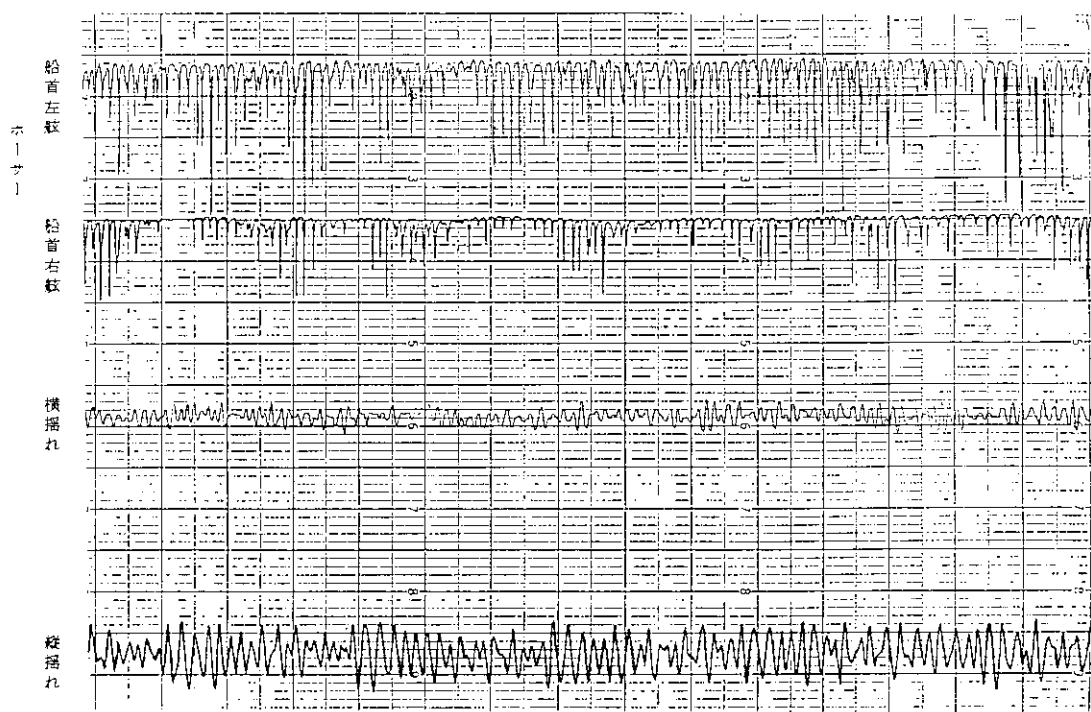


図 2.4 b) 中間ブイ型の記録例

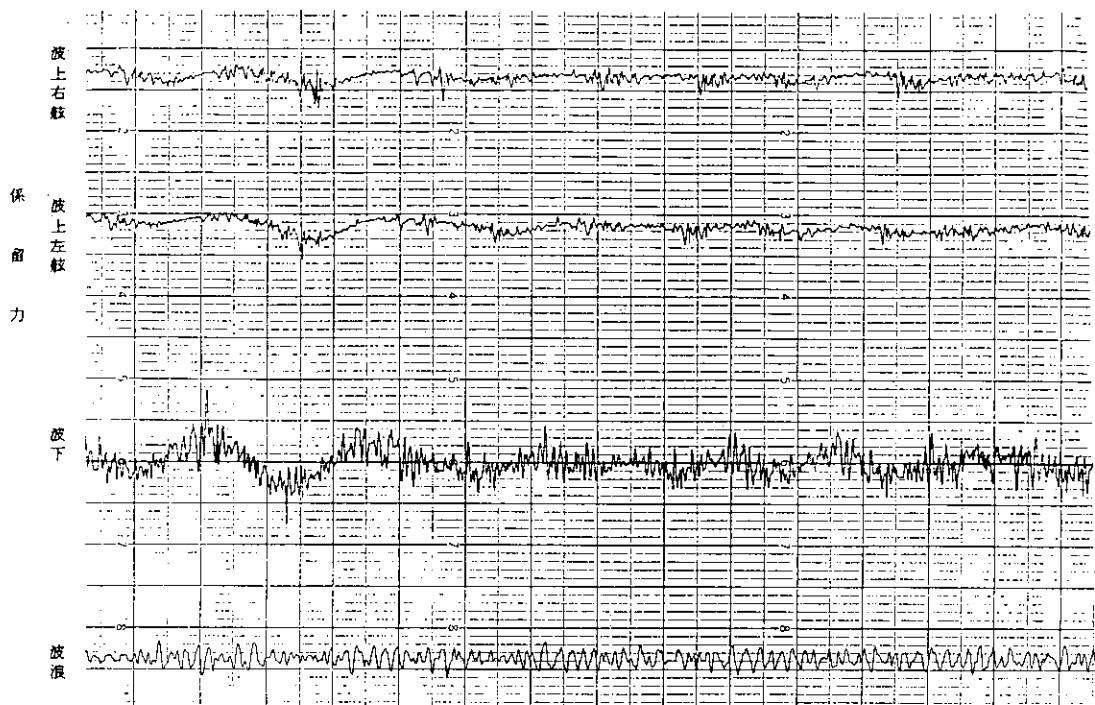


図2.4 c) 中間ブイ型の記録例

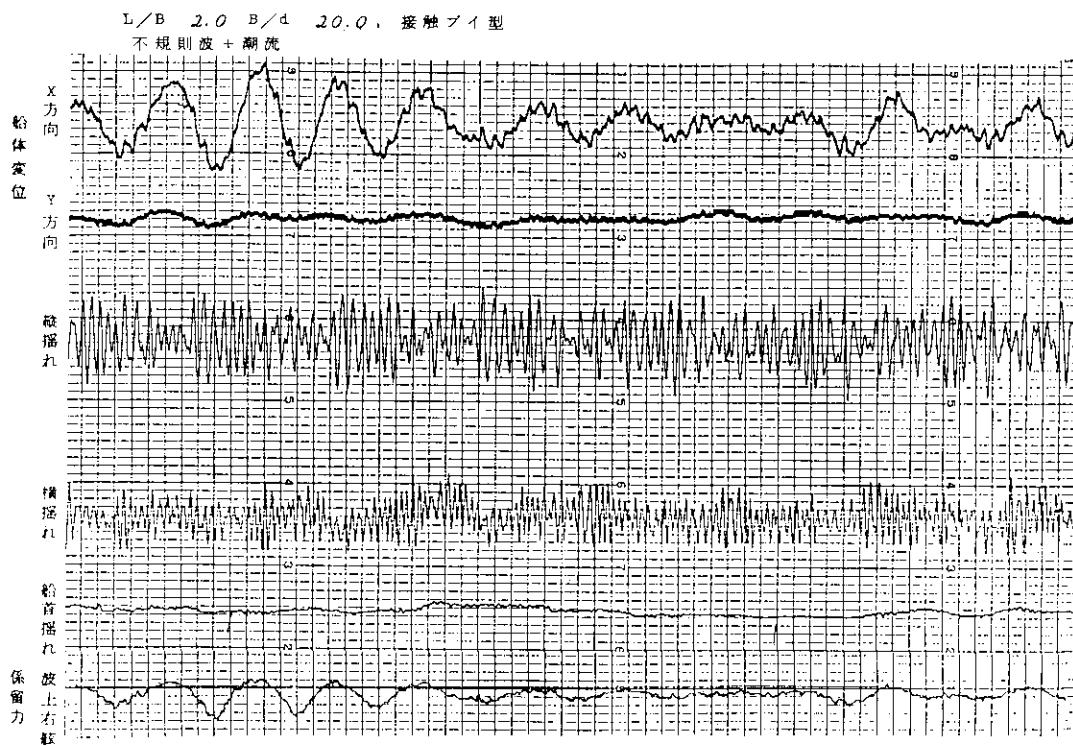


図2.5 a) 接触ブイ型の記録例

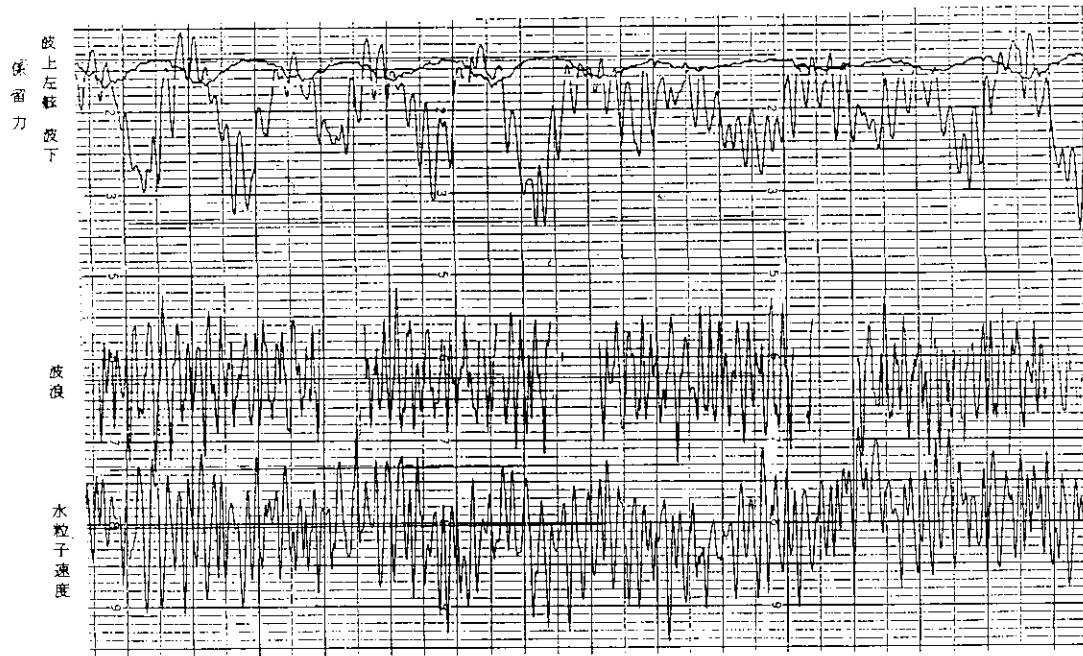


図 2.5 b) 接触ブイ型の記録例

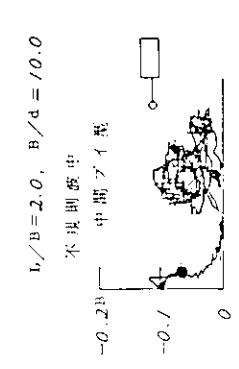


図 2.6 不規則波中ににおける船体の振れ通りの比較

$L/B = 2.0, B/d = 10.0$

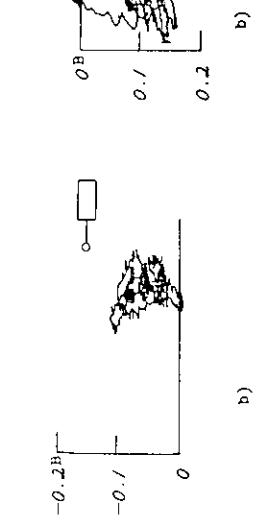
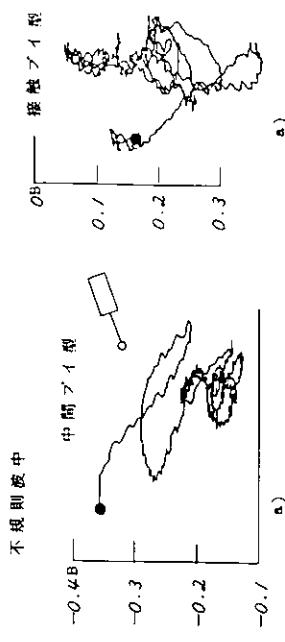


図 2.7 不規則波中ににおける船体の振れ通りの比較

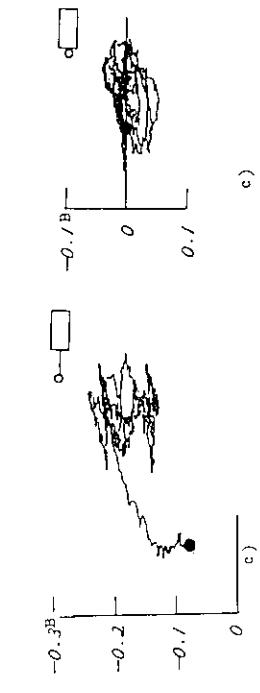
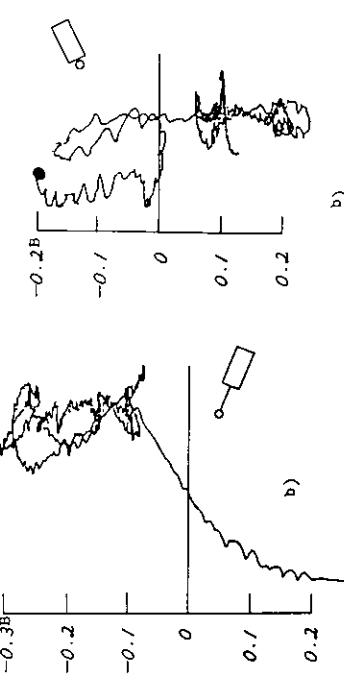
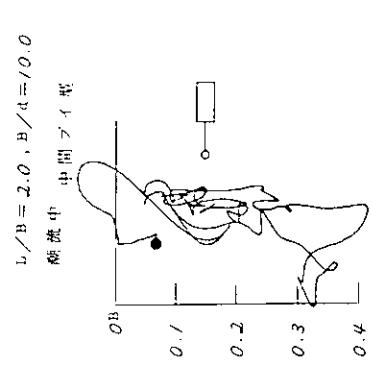


図 2.7 不規則波中ににおける船体の振れ通りの比較



$L/B = 2.0$ ,  $B/d = 10.0$   
 不規則波 + 駆除中

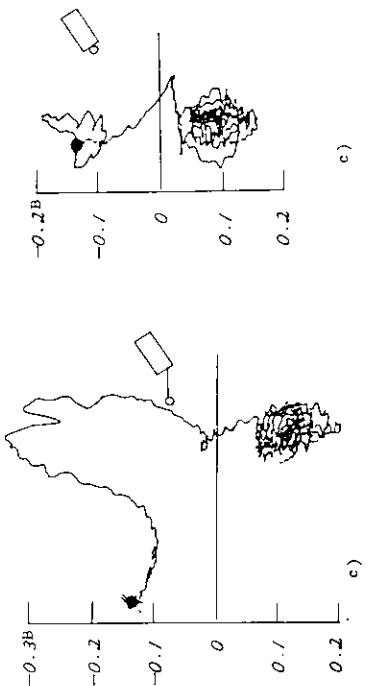
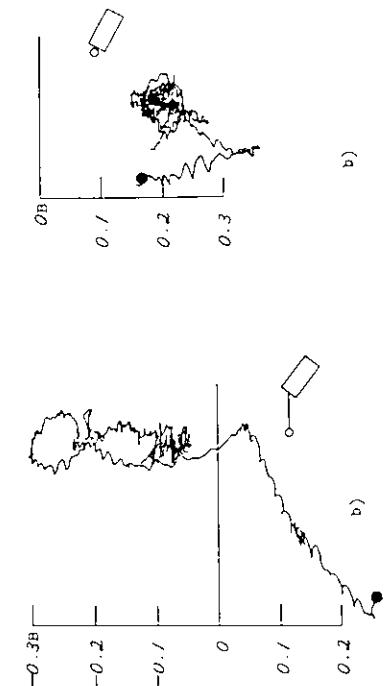
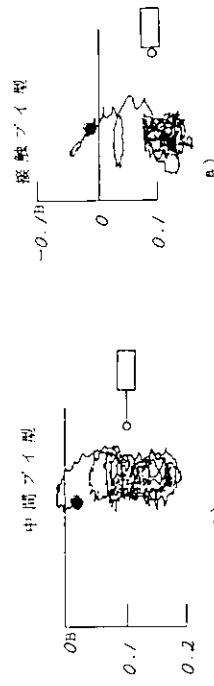
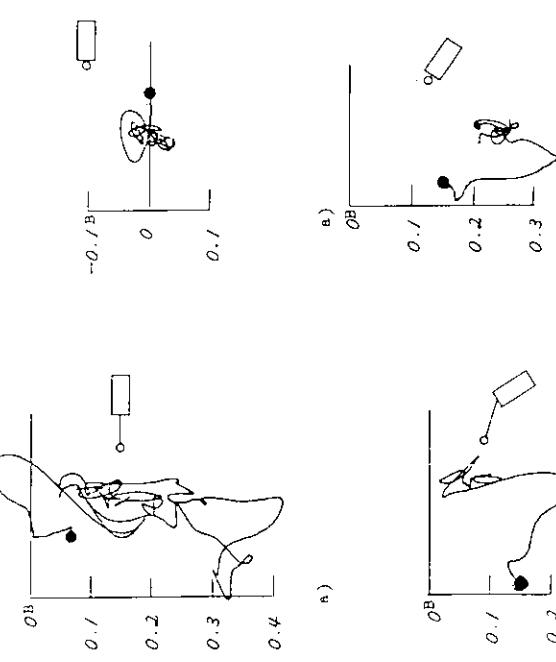


図 2.8 潮流中における粒体の振れ廻りの比較

図 2.9 不規則波と潮流との組み合せ中における粒体の振れ廻りの比較

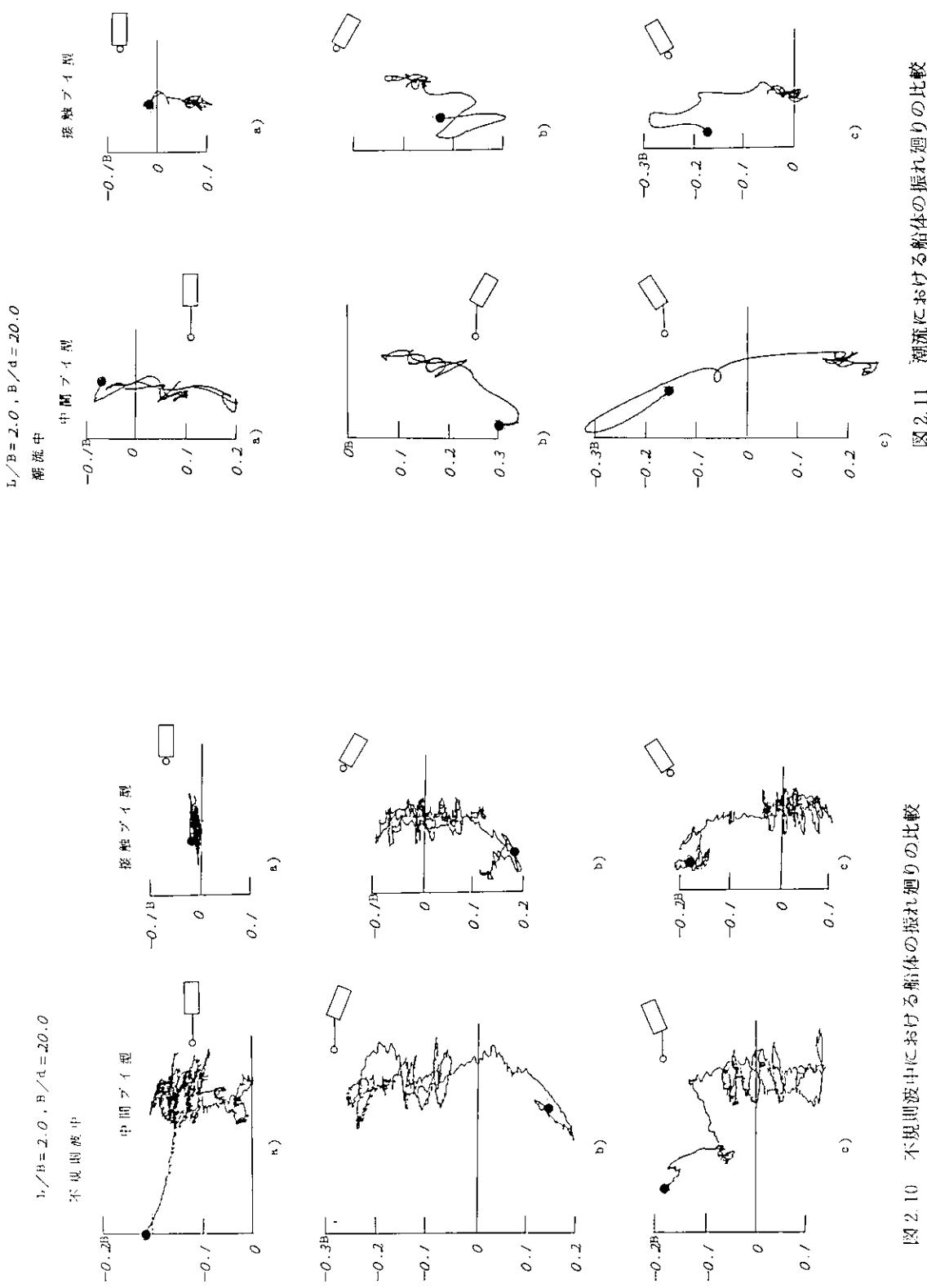


図2.10 不規則波中ににおける船体の振れ廻りの比較

$L_1/B = 2.0$ ,  $B/d = 20.0$

不規則波 + 潮流中  
中間ブイ型

接触ブイ型

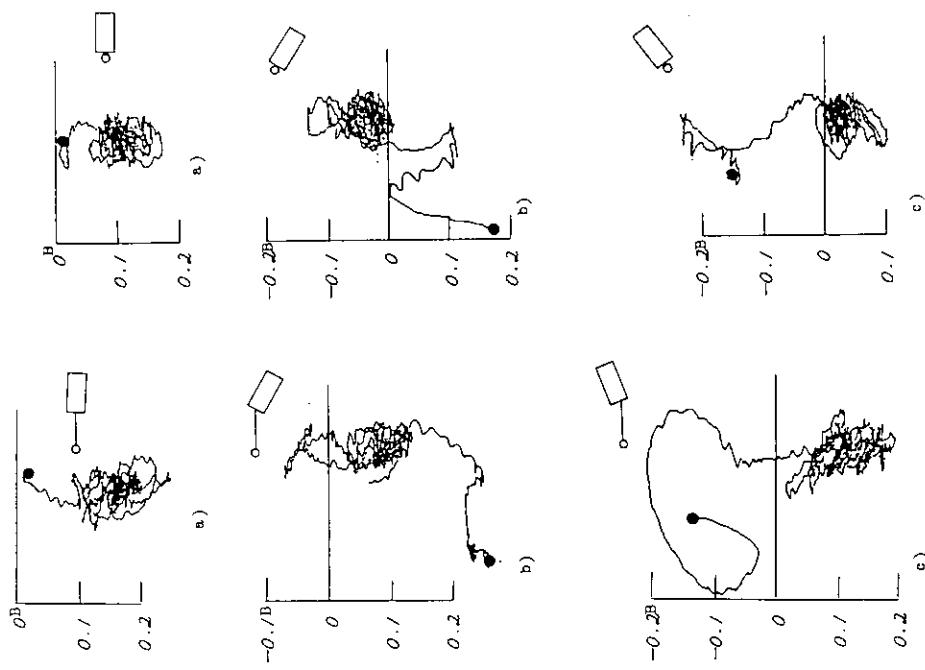


図 2.12 不規則波と潮流との組合せ中における船体の振れ廻りの比較

表 2.3 中間ブイ型の外力及び船体の初期姿勢

略記号	ブイ型式	B/d	不規則波 有義波高 (cm)	流速 (cm/sec)	初期姿勢(船体中心)			初期姿勢(計測点)			外力 →
					X (m)	Y (m)	Z (deg.)	X (m)	Y (m)	Z (m)	
W1	中間ブイ型	1.0.0	4.5 9	0.0	3.3 9.3	-0.2 0.2	- 2.5	1.8 3.3	- 0.1 3.4	-	□
W2		1.0.0	6.4 5	0.0	3.1 3.7	-0.1 8.0	0.0	1.5 7.6	- 0.1 8.0	-	□
W3		1.0.0	8.8 3	0.0	3.4 0.3	-0.2 2.9	- 1.6	1.8 4.2	- 0.1 8.5	-	□
W4		1.0.0	6.7 3	0.0	2.9 4.5	-0.6 2.4	3.3	1.3 8.7	- 0.7 1.4	-	□
W5		1.0.0	7.0 9	0.0	2.9 0.4	0.7 0.8	5.1	1.3 4.9	0.5 6.9	-	□
W6		1.0.0	6.9 7	0.0	2.1 4.4	1.9 9.0	5.8 9	1.6 2.7	0.6 5.3	-	□
W7		1.0.0	6.8 1	0.0	2.7 0.1	-0.1 1.1	- 1.9 0	1.2 2.5	0.6 1.9	-	□
W8		1.0.0	6.7 7	0.0	2.0 1.0	2.2 0.8	6.2 7	1.2 9.4	0.8 2.1	-	□
C1	中間ブイ型	1.0.0	0.0	1.6.5	3.3 6.9	0.0 0.2	- 4.4	1.8 1.3	0.1 2.2	-	□
C2		1.0.0	0.0	1.6.2	2.7 3.6	1.3 6.6	4.3 0	1.5 9.4	0.3 0.1	-	□
C3		1.0.0	0.0	1.5.8	2.9 5.2	-1.3 8.4	- 3.3.3	1.6 4.7	- 0.5 2.7	-	□
C4		1.0.0	0.0	21.3	3.3 7.5	0.6 0.6	1.3 0	1.8 5.4	0.2 5.5	-	□
C5		1.0.0	0.0	20.9	2.1 0.0	1.9 6.3	6.3.7	1.4 0.8	0.5 6.4	-	□
C6		1.0.0	0.0	21.0	2.4 8.1	-0.7 9.8	- 4.3 0	1.3 3.9	0.2 6.7	-	□
WC1	中間ブイ型	1.0.0	5.7 4	1.6.3	3.3 6.6	0.1 0.7	3.0	1.8 0.7	0.0 2.5	-	□
WC2		1.0.0	5.9 3	1.5.8	2.5 3.8	1.8 5.7	4.2.5	1.3 8.7	0.8 0.2	-	□
WC3		1.0.0	5.5 7	1.5.9	2.6 3.5	-1.3 7.3	- 4.3.0	1.4 9.3	- 0.3 0.8	-	□
W1.1	中間ブイ型	2.0.0	6.3 9	0.0	2.9 1.4	-0.6 7.3	- 9.0	1.3 7.2	- 0.4 2.9	-	□
W1.2		2.0.0	6.2 6	0.0	2.8 5.3	1.0 0.8	2.7 0	1.4 6.2	0.2 9.9	-	□
W1.3		2.0.0	6.4 8	0.0	2.6 7.6	-1.2 0.9	- 3.2.0	1.3 5.2	- 0.3 8.2	-	□
C1.1	中間ブイ型	2.0.0	0.0	1.6.3	3.3 5.1	-0.0 3.2	3.0	1.7 9.2	- 0.1 1.4	-	□
C1.2		2.0.0	0.0	1.5.7	2.5 8.2	1.8 0.1	4.9.7	1.5 7.2	0.6 1.0	-	□
C1.3		2.0.0	0.0	1.6.0	3.2 0.2	-0.7 2.6	- 1.5.0	1.6 9.4	- 0.3 2.2	-	□
WC1.1	中間ブイ型	2.0.0	5.8 3	1.5.7	3.2 7.5	0.1 4.0	3.9	1.7 1.8	0.0 3.4	-	□
WC1.2		2.0.0	5.7 2	1.6.1	2.6 2.1	1.6 6.4	4.7.0	1.5 5.6	0.5 2.2	-	□
WC1.3		2.0.0	5.9 4	1.5.9	2.9 0.4	-0.7 2.0	- 1.6.0	1.4 0.3	- 0.2 9.0	-	□

表 2.4 接触ブイ型の外力及び船体の初期姿勢

略記号	ブイ型式	B/d	不規則波 有義波高 (cm)	流速 (cm/sec)	初期姿勢(船体中心)			初期姿勢(計測点)			外力 →↓
					X (m)	Y (m)	(deg.)	X (m)	Y (m)	(m)	
W21	接触ブイ型	2.0.0	6.4 1	0.0	2.0 57	- 0.1 29	- 3.6	0.4 99	- 0.0 32	—	—
W22		2.0.0	6.6 0	0.0	1.3 84	1.5 27	4.7.8	0.3 36	0.3 70	—	—
W23		2.0.0	6.6 0	0.0	1.3 39	- 1.5 67	- 4.9.5	0.3 25	- 0.3 80	—	—
C21	接触ブイ型	2.0.0	0.0	1 1.3	2.0 58	- 0.1 11	- 3.1	0.4 99	- 0.0 27	—	—
C22		2.0.0	0.0	1 0.4	—	—	- 4.6.0	0.3 47	- 0.3 60	—	—
C23		2.0.0	0.0	1 3.0	1.4 83	- 1.4 32	—	—	—	—	—
WC21	接触ブイ型	2.0.0	5.8 3	1 1.1	2.0 61	0.0 43	1.2	0.5 00	0.0 10	—	—
WC22		2.0.0	5.9 0	1 0.3	1.4 00	1.5 12	4.7.2	0.3 40	0.3 67	—	—
WC23		2.0.0	5.9 6	1 1.6	1.2 63	- 1.6 29	- 3.7.8	0.3 95	- 0.3 06	—	—
W31	接触ブイ型	1 0.0	4.7 1	0.0	2.0 56	- 0.1 44	- 4.0	0.4 99	- 0.0 35	—	—
W32		1 0.0	6.5 1	0.0	2.0 61	- 0.0 36	- 1.0	0.5 00	- 0.0 09	—	—
W33		1 0.0	8.8 6	0.0	2.0 61	0.0	0.0	0.5 00	0.0	—	—
W34		1 0.0	6.3 6	0.0	1.5 46	1.3 63	4 1.4	0.3 75	0.3 31	—	—
W35		1 0.0	6.5 9	0.0	1.1 52	- 1.7 09	- 5.6.0	0.2 80	- 0.4 15	—	—
C31	接触ブイ型	1 0.0	0.0	1 6.8	2.0 61	0.0	0.0	0.5 00	0.0	—	—
C32		1 0.0	0.0	1 6.9	1.5 55	1.3 52	4 1.0	0.3 77	0.3 28	—	—
C33		1 0.0	0.0	1 6.4	—	—	—	—	—	—	—
WC31	接触ブイ型	1 0.0	5.6 7	1 7.4	2.0 53	- 0.1 80	- 5.0	0.4 98	- 0.0 44	—	—
WC32		1 0.0	5.8 3	1 5.1	1.5 07	1.4 06	4 3.0	0.3 66	0.3 40	—	—
WC33		1 0.0	5.6 7	1 5.6	1.6 63	- 1.2 17	- 3.6.2	0.4 03	- 0.2 95	—	—

表 2.6

 $L/B = 2.0, B/d = 1.00$ 

計測項目		中間ブイ型				接触ブイ型			
		W2	W4	W5	平均	W32	W34	W35	平均
波浪	有義波高 (cm)	6.45	6.73	7.09	6.76	6.51	6.36	6.59	6.49
	極大値 (cm)	8.70	8.66	9.05	8.80	8.10	7.58	7.45	7.71
	極小値 (cm)	-7.41	-7.15	-7.84	-7.47	-7.07	-7.14	-6.86	-7.02
潮流	流速 (cm/sec)	0	0	0		0	0	0	0
係留	波平均値 ( $Kg$ )	0.35	0.25	0.30	0.30	0.13	0.16	0.24	0.18
	上有義値 ( $Kg$ )	0.32	0.18	0.32	0.27	0.35	0.30	0.36	0.34
	右極大値 ( $Kg$ )	0.93	0.90	0.97	0.93	0.92	0.75	0.72	0.80
	舷極小値 ( $Kg$ )	-0.11	-0.25	-0.20	-0.19	-0.06	0.03	-0.04	-0.02
留	波平均値 ( $Kg$ )	0.78	0.41	0.94	0.71	0.18	0.32	0.09	0.20
	上有義値 ( $Kg$ )	0.54	0.37	0.46	0.46	0.56	0.45	0.27	0.43
	左極大値 ( $Kg$ )	1.32	1.20	1.70	1.41	1.03	1.08	0.67	0.93
	舷極小値 ( $Kg$ )	1.034	-0.06	0.53	0.27	-0.18	-0.10	-0.30	-0.19
力	波平均値 ( $Kg$ )	-0.18	-0.18	-0.15	-0.17	-0.21	-0.11	-0.16	-0.16
	有義値 ( $Kg$ )	0.19	0.19	0.16	0.18	0.21	0.19	0.13	0.18
	極大値 ( $Kg$ )	0.15	0.17	0.17	0.16	0.55	0.55	0.47	0.52
	極小値 ( $Kg$ )	-0.40	-0.44	-0.41	-0.42	-0.38	-0.34	-0.31	-0.34
ホルサ	船首右舷	有義値 ( $Kg$ )	1.44	1.61	1.42	1.49	—	—	—
	船首左舷	極大値 ( $Kg$ )	2.26	2.40	2.56	2.41	—	—	—
	右舷	有義値 ( $Kg$ )	2.71	2.54	2.73	2.66	—	—	—
	左舷	極大値 ( $Kg$ )	3.90	3.69	4.46	4.02	—	—	—
	上	有義値 ( $Kg$ )	3.70	3.24	3.51	3.48			
動揺の有義値	縦揺れ	有義振幅 (deg)	1.45	1.53	1.47	1.48	1.26	1.21	1.25
	横揺れ	有義振幅 (deg)	0.53	0.24	0.20	0.33	0.44	0.57	0.64
変動周期	短周期 (sec)	4.1	3.4	3.7	3.7	3.3	3.3	3.2	3.3
	長周期 (sec)	2.80	2.30	2.43	2.51	2.08	2.56	2.08	2.24

表 2.5

 $L/B = 2.0, B/d = 1.00$ 

計測項目		中間ブイ型				接觸ブイ型			
		C1	C2	C3	平均	C31	C32	C33	平均
波浪	有義波高 (cm)	0	0	0	0	0	0	0	0
	極大値 (cm)	0	0	0	0	0	0	0	0
	極小値 (cm)	0	0	0	0	0	0	0	0
潮流	流速 (cm/sec)	16.5	16.2	15.8	16.2	16.8	16.9	16.4	16.7
保留力	波上右舷平均値 (kg)	1.10	0.61	0.27	0.66	0.28	0.22	0.19	0.23
	波上右舷有義値 (kg)	—	—	—	—	—	—	—	—
	波上右舷極大値 (kg)	1.26	0.72	0.52	0.83	0.42	0.38	0.31	0.37
	波上右舷極小値 (kg)	0.99	0.59	0.17	0.58	0.10	0.09	0.12	0.10
	波上左舷平均値 (kg)	1.62	1.99	1.98	1.86	0.23	0.36	0.34	0.31
	波上左舷有義値 (kg)	—	—	—	—	—	—	—	—
	波上左舷極大値 (kg)	1.90	2.16	2.14	2.07	0.75	0.63	0.58	0.65
	波上左舷極小値 (kg)	1.51	1.74	1.74	1.66	0.08	0.27	0.17	0.17
	波下平均値 (kg)	-0.19	-0.14	-0.17	-0.17	-0.19	-0.18	-0.19	-0.19
	波下有義値 (kg)	—	—	—	—	—	—	—	—
	波下極大値 (kg)	-0.22	-0.24	-0.22	-0.23	0	-0.11	-0.10	-0.07
	波下極小値 (kg)	-0.14	-0.15	-0.14	-0.14	-0.28	-0.22	-0.23	-0.24
ホルサート力	船首右舷有義値 (kg)	—	—	—	—	—	—	—	—
	船首右舷極大値 (kg)	—	—	—	—	—	—	—	—
	船首左舷有義値 (kg)	—	—	—	—	—	—	—	—
	船首左舷極大値 (kg)	—	—	—	—	—	—	—	—
	ブイ上極大値 (kg)	—	—	—	—	—	—	—	—
動揺の有義値	縦揺れ 有義振幅 (deg)	—	—	—	—	—	—	—	—
	横揺れ 有義振幅 (deg)	—	—	—	—	—	—	—	—
	短周期 (sec)	—	—	3.0	3.0	3.2	3.0	4.1	3.4
	長周期 (sec)	—	—	—	—	13.6	13.8	13.0	13.5

表2.7

 $L/B = 2.0, B/d = 1.00$ 

一点係留方式		中間ブイ型				接触ブイ型			
計測項目		W 1	W 2	W 3	平均	W 3 1	W 3 2	W 3 3	平均
波浪	有義波高 (cm)	4.59	6.45	8.83		4.71	6.51	8.86	
	極大値 (cm)	5.52	8.70	10.56		4.80	8.10	12.15	
	極小値 (cm)	-4.74	-7.41	-10.77		-4.42	-7.07	8.00	
潮流	流速 (cm/sec)	0	0	0		0	0	0	
係留上右舷	波平均値 ( $Kg$ )	0.09	0.35	0.62		0.10	0.13	0.48	
	有義値 ( $Kg$ )	0.23	0.32	1.62		0.17	0.35	0.64	
	極大値 ( $Kg$ )	0.35	0.93	1.84		0.33	0.92	2.16	
	極小値 ( $Kg$ )	-0.17	-0.11	-0.29		0	-0.06	-0.06	
係留上左舷	波平均値 ( $Kg$ )	0.36	0.78	0.89		0.17	0.18	0.45	
	有義値 ( $Kg$ )	0.36	0.54	0.81		0.19	0.56	1.10	
	極大値 ( $Kg$ )	0.78	1.32	1.99		0.33	1.03	2.79	
	極小値 ( $Kg$ )	-0.12	-0.34	-0.18		0	-0.18	-0.14	
力波下	平均値 ( $Kg$ )	-0.09	-0.18	-0.26		-0.09	-0.21	-0.26	
	有義値 ( $Kg$ )	0.17	0.19	0.25		0.19	0.21	0.27	
	極大値 ( $Kg$ )	0.22	0.15	0.20		0.23	0.53	0.35	
	極小値 ( $Kg$ )	-0.25	-0.40	-0.47		-0.26	-0.38	-0.39	
ホルサム力	船首右舷 有義値 ( $Kg$ )	0.69	1.44	1.65		-	-	-	
	極大値 ( $Kg$ )	1.09	2.26	3.22		-	-	-	
	船首左舷 有義値 ( $Kg$ )	1.59	2.71	3.24		-	-	-	
	極大値 ( $Kg$ )	2.17	3.90	5.71		-	-	-	
	ブイ上 有義値 ( $Kg$ )	1.89	3.70	4.74		-	-	-	
	極大値 ( $Kg$ )	2.91	5.57	10.56		-	-	-	
動揺の有義値	縦揺れ 有義振幅 (deg)	1.08	1.44	1.97		0.97	1.26	1.66	
	横揺れ 有義振幅 (deg)	0.17	0.53	0.44		0.36	0.44	0.43	
	短周期 (sec)	5.5	4.1	3.3		3.4	3.3	3.1	
	長周期 (sec)	29.0	28.0	25.6		28.8	20.8	37.6	

表2.8

 $L/B = 2.0, B/d = 1.00$ 

一点係留方式		中間ブイ型				接触ブイ型				
計測項目		WC1	WC2	WC3	平均	WC31	WC32	WC33	平均	
波浪	有義波高 (cm)	5.74	5.93	5.57	5.75	5.67	5.83	5.67	5.72	
	極大値 (cm)	5.95	5.45	6.74	6.05	6.67	6.48	5.89	6.35	
	極小値 (cm)	-6.34	-7.14	-6.44	-6.64	-5.24	-5.56	-5.90	-5.57	
潮流	流速 (cm/sec)	16.3	15.8	15.9	16.0	17.4	15.1	15.6	16.0	
係留力	波上右舷	平均値 (kg)	0.36	0.35	0.40	0.37	0.52	0.54	0.59	0.55
	有義値 (kg)	0.40	0.44	0.46	0.43	0.49	0.47	0.70	0.55	
	極大値 (kg)	1.06	1.30	1.43	1.26	1.51	1.48	1.69	1.56	
	極小値 (kg)	-0.05	-0.13	0	-0.06	0.18	0.18	0	0.12	
	波上左舷	平均値 (kg)	0.32	0.40	0.34	0.35	0.49	0.46	0.41	0.45
	有義値 (kg)	0.37	0.34	0.40	0.37	0.69	0.41	0.46	0.52	
	極大値 (kg)	0.76	0.91	0.88	0.85	2.23	1.26	1.80	1.76	
	極小値 (kg)	0	-0.03	0	-0.01	0	0.09	0.03	0.04	
水力	波下	平均値 (kg)	-0.35	-0.35	-0.34	-0.35	-0.28	-0.27	-0.28	-0.28
	有義値 (kg)	0.10	0.08	0.09	0.09	0.10	0.06	0.09	0.08	
	極大値 (kg)	0.20	0.20	0.12	0.17	-0.06	-0.06	0.02	-0.03	
	極小値 (kg)	-0.64	-0.60	-0.51	-0.58	-0.37	-0.36	-0.39	-0.37	
サボイ	船首右舷	有義値 (kg)	1.07	1.22	1.22	1.17	-	-	-	-
	極大値 (kg)	2.22	2.27	3.06	2.52	-	-	-	-	
	船首左舷	有義値 (kg)	2.70	2.74	2.85	2.76	-	-	-	-
	ブイ上	極大値 (kg)	5.40	4.43	5.63	5.15	-	-	-	-
	ブイ上	有義値 (kg)	3.24	2.93	2.95	3.04	-	-	-	-
	極大値 (kg)	6.05	6.60	6.11	6.25	-	-	-	-	
動揺の有義値	縦揺れ	有義振幅 (deg)	1.28	1.38	1.37	1.34	1.11	1.13	1.13	1.12
	横揺れ	有義振幅 (deg)	0.37	0.40	0.41	0.39	0.53	0.56	0.56	0.55
	短周期 (sec)	3.3	3.4	3.5	3.4	3.0	3.2	3.1	3.1	
	長周期 (sec)	3.36	2.56	3.68	3.20	1.32	1.13	1.52	1.32	

表 2.9

 $L/B = 2.0, B/d = 2.0.0$ 

一点係留方式		中間ブイ型				接觸ブイ型			
計測項目		C 1 1	C 1 2	C 1 3	平均	C 2 1	C 2 2	C 2 3	平均
波浪	有義波高 (cm)	0	0	0	0	0	0	0	0
	極大値 (cm)	0	0	0	0	0	0	0	0
	極小値 (cm)	0	0	0	0	0	0	0	0
潮流	流速 (cm/sec)	1 6.3	1 5.7	1 6.0	1 6.0	1 1.3	1 0.4	1 3.0	1 1.6
係船	波平均値 (kg)	0.42	0.64	1.13	0.73	0.18	0.13	0.15	0.15
	有義値 (kg)	—	—	—	—	—	—	—	—
	極大値 (kg)	0.47	0.66	1.22	0.78	0.27	0.15	0.20	0.21
	極小値 (kg)	0.36	0.62	1.03	0.67	0.12	0	0.05	0.06
留置	波平均値 (kg)	0.11	0.11	0	0.07	0.14	0.32	0.20	0.22
	有義値 (kg)	—	—	—	—	—	—	—	—
	極大値 (kg)	0.13	0.13	0.04	0.10	0.16	0.44	0.32	0.31
	極小値 (kg)	-0.10	0.08	-0.01	-0.01	0	0.21	0.18	0.13
力	波平均値 (kg)	-0.12	-0.12	-0.12	-0.12	-0.15	-0.10	-0.14	-0.13
	有義値 (kg)	—	—	—	—	—	—	—	—
	極大値 (kg)	-0.10	-0.10	-0.08	0.09	-0.10	-0.03	-0.08	-0.07
	極小値 (kg)	-0.16	-0.13	-0.13	-0.14	-0.21	-0.18	-0.18	-0.19
ホルサ	船首右舷	有義値 (kg)	—	—	—	—	—	—	—
		極大値 (kg)	—	—	—	—	—	—	—
	船首左舷	有義値 (kg)	—	—	—	—	—	—	—
		極大値 (kg)	—	—	—	—	—	—	—
力	ブイ上	有義値 (kg)	—	—	—	—	—	—	—
		極大値 (kg)	—	—	—	—	—	—	—
動揺の有義値	縦揺れ	—	—	—	—	—	—	—	—
	有義振幅 (deg)	—	—	—	—	—	—	—	—
	横揺れ	—	—	—	—	—	—	—	—
	有義振幅 (deg)	—	—	—	—	—	—	—	—
変動周期	短周期 (sec)	2.2	2.6	2.8	2.5	2.3	2.2	2.4	2.3
	長周期 (sec)	2.29	2.37	2.53	2.40	1.68	1.92	1.86	1.82

表 2.1.0

 $L/B = 2.0, B/d = 2.0.0$ 

計測項目		中間ブイ型				接觸ブイ型			
		W1 1	W1 2	W1 3	平均	W2 1	W2 2	W2 3	平均
波浪	有義波高 (cm)	6.39	6.26	6.48	6.38	6.41	6.60	6.60	6.54
	極大値 (cm)	7.84	8.52	7.83	8.06	7.47	8.00	6.78	7.42
	極小値 (cm)	-6.94	-7.24	-6.94	-7.04	-6.32	-6.48	-6.21	-6.34
潮流	流速 (cm/sec)	0	0	0	0	0	0	0	0
留力	波上右舷平均値 (kg)	0	0.26	0.28	0.18	0.15	0.14	0.12	0.14
	波上右舷有義値 (kg)	0.29	0.42	0.26	0.32	0.29	0.22	0.21	0.24
	波上右舷極大値 (kg)	0.63	0.91	0.95	0.83	0.59	0.33	0.33	0.42
	波上右舷極小値 (kg)	-0.44	-0.39	-0.14	-0.32	-0.13	-0.05	-0.06	-0.08
	波上左舷平均値 (kg)	0.06	0.12	0.14	0.11	0.29	0.17	0.14	0.20
	波上左舷有義値 (kg)	0.13	0.19	0.14	0.15	0.35	0.43	0.38	0.39
	波上左舷極大値 (kg)	0.40	0.34	0.42	0.39	0.85	0.49	0.49	0.61
	波上左舷極小値 (kg)	-0.17	-0.22	-0.10	-0.16	0	-0.18	-0.09	-0.09
	波下平均値 (kg)	-0.12	-0.11	-0.10	-0.11	-0.21	0	-0.14	-0.12
	波下有義値 (kg)	0.19	0.20	0.17	0.19	0.28	0.26	0.24	0.26
	波下極大値 (kg)	0.34	0.39	0.30	0.34	0.67	0.53	0.38	0.53
	波下極小値 (kg)	-0.37	-0.45	-0.25	-0.36	-0.39	-0.20	-0.36	-0.32
示力	船首右舷有義値 (kg)	2.01	1.79	2.21	2.00	-	-	-	-
	船首右舷極大値 (kg)	3.53	3.34	3.29	3.39	-	-	-	-
	船首左舷有義値 (kg)	1.79	2.21	1.85	1.95	-	-	-	-
	船首左舷極大値 (kg)	2.71	4.27	3.12	3.37	-	-	-	-
	ブイ上極大値 (kg)	2.68	3.3	3.33	3.12	-	-	-	-
	ブイ上極大値 (kg)	4.76	5.93	5.32	5.34	-	-	-	-
動揺の有義値	縦揺れ 有義振幅 (deg)	1.32	1.31	1.30	1.31	1.11	1.18	1.11	1.13
	横揺れ 有義振幅 (deg)	0.34	0.35	0.31	0.33	0.32	0.29	0.43	0.35
	短周期 (sec)	3.5	3.3	3.3	3.4	2.0	1.8	1.9	1.9
	長周期 (sec)	20.5	27.6	26.8	25.0	13.2	21.0	18.4	17.5

表2.1.1

 $L/B = 2.0, B/d = 2.00$ 

一点係留方式 計測項目		中間ブイ型				接触ブイ型			
		WC11	WC12	WC13	平均	WC21	WC22	WC23	平均
波浪	有義波高 (cm)	5.83	5.72	5.94	5.83	5.83	5.90	5.96	5.90
	極大値 (cm)	5.55	5.65	7.83	6.34	6.08	7.05	6.46	6.53
	極小値 (cm)	-6.94	-6.54	-6.05	6.51	-5.35	-5.81	-6.06	5.74
潮流	流速 (cm/sec)	15.7	16.1	15.9	15.9	11.1	10.3	11.6	11.0
係留力	波上右舷平均値 ( $Kg$ )	0.99	0.91	0.87	0.92	0.32	0.33	0.28	0.31
	波上右舷有義値 ( $Kg$ )	0.27	0.28	0.26	0.27	0.33	0.32	0.30	0.32
	波上左舷極大値 ( $Kg$ )	1.77	1.58	1.47	1.61	0.72	0.74	0.69	0.72
	波上左舷極小値 ( $Kg$ )	0.54	0.61	0.55	0.57	0.08	0.11	0	0.06
	波上左舷平均値 ( $Kg$ )	0.29	0.34	0.36	0.33	0.37	0.28	0.30	0.32
	波上左舷有義値 ( $Kg$ )	0.21	0.24	0.22	0.22	0.53	0.62	0.56	0.57
	波上左舷極大値 ( $Kg$ )	0.79	0.78	0.67	0.75	0.85	0.67	0.99	0.84
	波上左舷極小値 ( $Kg$ )	-0.03	0.14	0.11	0.06	0	-0.20	-0.07	-0.09
	波下右舷平均値 ( $Kg$ )	-0.21	-0.20	-0.20	-0.20	-0.26	-0.24	-0.27	0.26
	波下右舷有義値 ( $Kg$ )	0.13	0.13	0.11	0.12	0.21	0.24	0.24	0.23
	波下右舷極大値 ( $Kg$ )	0.06	-0.04	-0.02	0.0	0.02	0.06	0.02	0.03
	波下右舷極小値 ( $Kg$ )	-0.43	-0.47	-0.41	-0.44	-0.44	-0.43	-0.44	-0.44
ホルサート力	船首右舷有義値 ( $Kg$ )	2.39	2.54	2.40	2.44	-	-	-	-
	船首右舷極大値 ( $Kg$ )	3.66	3.88	3.73	3.76	-	-	-	-
	船首左舷有義値 ( $Kg$ )	1.62	1.97	1.97	1.85	-	-	-	-
	船首左舷極大値 ( $Kg$ )	2.98	2.98	3.24	3.07	-	-	-	-
	ブイ上極大値 ( $Kg$ )	6.11	5.75	5.20	5.69	-	-	-	-
動揺の有義値	縦揺れ								
	有義振幅 (deg)	1.11	1.12	1.09	1.11	1.03	1.02	1.02	1.02
	横揺れ								
	有義振幅 (deg)	0.37	0.37	0.37	0.37	0.32	0.40	0.38	0.37
変動周期	短周期 (sec)	3.2	3.4	3.5	3.4	1.8	1.8	1.9	1.8
	長周期 (sec)	21.9	17.8	21.3	20.3	20.5	19.0	12.8	17.4