

日本船舶振興会昭和57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.366

第192研究部会
海洋構造物の設計外力
及び復原性に関する研究

報 告 書

昭 和 58 年 3 月

社 団 法 人
日 本 造 船 研 究 協 会

海洋構造物の建造量は近年増加しているが、石油掘削リグなどの設計上現行規則には復原性に関して明確でない部分がある。また、最近これらのリグの事故が続発しているため、本研究ではこれらの問題を究明するため今年度から4か年計画でスタートした。

今年度はまず関連する技術の現状調査、問題点の抽出とこれらを解明するための研究計画を立案した。

はしがき

本報告書は、日本船舶振興会昭和57年度補助事業として日本造船研究協会第192研究部会において実施した「海洋構造物の設計外力及び復原性に関する研究」の成果をとりまとめたものである。

第192研究部会委員名簿

(敬称略、順不同)

部 会 長	中 村 彰 一 (大 阪 大 学)	
委 員	竹 沢 誠 二 (横 浜 国 立 大 学)	大 楠 丹 (九 州 大 学)
	姫 野 洋 司 (大 阪 府 立 大 学)	前 田 久 明 (東 京 大 学)
	高 木 幹 雄 (広 島 大 学)	高 石 敬 史 (船 舶 技 術 研 究 所)
	影 本 浩 (船 舶 技 術 研 究 所)	日 笠 則 明 (日 本 海 事 協 会)
	宝 田 直 之 助 (住 友 重 機 械 工 業)	永 松 秀 一 (住 友 重 機 械 工 業)
	中 川 賢 一 郎 (住 友 重 機 械 工 業)	高 木 又 男 (日 立 造 船)
	塙 中 勝 (日 立 造 船)	坂 尾 稔 (川 崎 重 工 業)
	堺 由 輝 (川 崎 重 工 業)	田 中 陽 (川 崎 重 工 業)
	藤 本 亮 典 (日 本 鋼 管)	森 山 厚 夫 (日 本 鋼 管)
	西 村 弘 道 (三 菱 重 工 業)	池 上 国 広 (三 菱 重 工 業)
	池 之 内 昌 弘 (三 井 造 船)	吉 野 信 治 (三 井 造 船)
	小 林 正 典 (三 井 造 船)	金 縄 正 夫 (三 井 造 船，途中退任)
	佐 々 木 恒 登 (石 川 島 播 磨 重 工 業)	田 中 久 仁 雄 (石 川 島 播 磨 重 工 業)

討議参加者名簿

(敬称略、順不同)

山 本 崇 也 (三 菱 重 工 業)	丸 川 宗 平 (石 川 島 播 磨 重 工 業)
服 部 陽 一 (日 立 造 船)	田 島 栄 吉 (川 崎 重 工 業)
秦 数 実 (日 本 鋼 管)	一 色 洋 (住 友 重 機 械 工 業)
加 藤 俊 司 (船 舶 技 術 研 究 所)	杉 浦 正 憲 (日 立 造 船)
角 野 忠 夫 (三 井 造 船)	池 田 良 穂 (大 阪 府 立 大 学)
江 口 純 弘 (東 京 大 学)	岸 田 千 秋 (日 立 造 船)
森 庸 寛 (日 本 鋼 管)	鷹 尾 伏 昭 (三 菱 重 工 業)
乾 泰 司 (三 井 造 船)	米 家 卓 也 (日 本 海 事 協 会)

目 次

はじめに	1
1. 海洋構造物に対する現行復原性規則	2
1.1 現行規則の総括とその基本的な考え方	2
1.2 現行規則の海象・気象条件の設定	3
1.3 その他の設計条件	3
1.4 設計条件例	3
2. 海洋構造物の事故例	20
2.1 Alexander L. Kielland 号	20
2.2 Ocean Ranger 号	22
2.3 その他	22
2.4 事故の統計	24
3. 現行規則で再考を要すると考えられる要因	30
3.1 転覆メカニズムに対する考慮	30
3.1.1 予備浮力に対する考慮	30
3.1.2 転覆モーメントに対する考慮	30
3.1.3 複合外力に対する考慮	31
3.2 海象・気象条件に対する考慮	31
3.2.1 風	31
3.2.2 波	33
3.2.3 潮流	34
3.3 海象・気象に対する外力の考慮	38
3.3.1 風による力	38
3.3.2 波力	42
3.3.3 潮流力	44
4. 海洋構造物の転覆機構解明及び設計外力推定精密化のための研究計画	53
4.1 研究の方向	53
4.2 実験計画及び供試船型の選定	53
4.2.1 実験計画の概要	53
4.2.2 実験に用いる標準模型の設計	56
4.3 風洞実験計画の詳細	71
4.3.1 セミサブ構造物に働く揚力の発生機構解明に関する実験計画	71
4.3.2 変動風による風圧力に関する実験計画	71
4.3.3 動搖している構造物に作用する非定常空気力に関する実験計画	74
4.3.4 Juck Up型に対する実験計画	77
付録 腐食・防食に関するOTC論文の概要	81

はじめに

海底石油開発が、世界のエネルギー事情の逼迫によりますます活発化しているが、それに伴い開発海域も沿海の浅水域から沖合の深海域に進展しており、稼働中に直面する自然条件も厳しくなる傾向である。

また、海洋のスペース利用や海洋エネルギー利用のための新しい海洋構造物の開発が種々試みられているが、これらの構造物も沖合の大水深域に設置されることを目標としている。

石油掘削リグなどの設計に際しては、設置・稼働海域の海象・気象条件の短期及び長期にわたる性質をできる限り正確に把握し、それから受ける外力を推定し、十分な強度、安定性を保持するようにしなければならない。

海洋構造物の設計基準としては、移動型石油掘削リグを対象としたIMOのMoDu-Codeをはじめとして、各国政府或は船級協会の規定が存在し、外力、復原性、強度等がかなり詳細に決められている。そして造船所はこれに則して石油掘削リグの設計及び建造を行うことがほとんどである。しかしながら、復原性に関しては風圧力の設定法や外力と復原力のバランスのとり方等の考え方が船舶の規定を単純に変形したものであったり、波浪や潮流の影響、係留ラインの影響、風速の変動の影響など、重要な因子がどの程度考慮されているのか明確でないという問題点も内蔵している。

最近、大型の石油掘削リグの荒天による転覆海難が北大西洋において連続して発生し、多くの人命が失われた事故を契機とし、海洋構造物の設計、外力、復原性、さらに構造強度に関して重大な関心が注がれることとなった。このことは、昭和57年10月、東京で開催された、第2回、船舶と海洋構造物の復原性に関する国際会議において、海洋構造物の復原性や転覆事故に関する論文が多数発表されたことにも現れている。

このような情況のなかで我が国においても海洋構造物の設計外力推定の精密化や風浪中の安全性確保のため、海洋構造物の実物に則して、現象を正確に把握することの必要性と緊急性が認識されるに至った。

そこで、本研究部会（SR192）が設置され、海洋構造物の部材や全体構造に働く風圧力、波力などの推定精度向上と、これら外力中における海洋構造物の復原性評価に関する研究を実施することとなった。

昭和57年度は、その初年度として、本研究を効果的に実施するため、関連する技術の現状の調査を行い、問題点を抽出し、これを解明するための研究計画を立案することとした。即ち、下記の項目の調査検討を実施した。

(1) 海象条件推定法の調査研究

ここでは、海洋構造物に対する現行の復原性規則の基本的な考え方を各國、各船級協会の規則について明らかにし、その中に規定されている、海象・気象条件、並びに実機の設計条件例を比較検討し、現行規則で再考を要すると考えられる各種要因を考察した。海象・気象に基く海洋構造物の事故例もできるだけ調査した。

(2) 転覆機構解明及び設計外力推定精密化のための水槽及び風洞実験計画の策定

上記調査研究によって明らかになった問題点を解明するため、水槽実験及び風洞実験計画を検討し立案した。即ち、風荷重に関しては甲板の揚力、カラムや上部構造部材の相互干渉、変動風や動搖物体の風圧力等を解明するための風洞実験計画と、係留ラインの影響、大傾斜時の動搖、波、風、潮流などの組み合わせ外力の影響などを解明するための水槽実験計画とを立案した。さらにこれらの実験の対象とするセミサブ型リグ並びにジャッキアップ型リグの船型を設計した。

本報告書はこれらの調査研究の結果をとりまとめたものであり、次年度以降の研究の指針となるべきものである。

1. 海洋構造物に対する現行復原性規則

1.1 現行規則の総括とその基本的な考え方

石油掘削リグを中心とした海洋構造物に対しては各船級協会や各國政府がそれぞれ一般船舶用と別個に規則や基準を有しており、復原性に関してもほとんどの船級／政府規則によって、むしろ一般船舶以上に細かく規定されている。

表 1.1.1 「半潜水型及び甲板昇降型海洋構造物の復原性能に関する規則の比較」に主要規則の復原性に関する部分の大要を示す。〔海洋構造物として最も特徴的かつ主要なタイプである半潜水型（セミサブ型）と甲板昇降型（ジャッキアップ型）について示す。〕

同表に示す如く、これらの規則は浮上時復原性に関し以下のような考え方を立脚している。

(1) 非損傷時復原性 (Intact Stability)

各規則とも基本的には同一の思想に基づいている。それは図 1.1.1 に示すように、一言でいえば、「外力による傾斜エネルギーよりも大きさは復原力エネルギーを有する事」であり、この時傾斜モーメントとしては定常風による転倒モーメントを使用し、復原モーメント算出に際しては浮体の平水時における復原性能カーブを使用する事になっており、波浪による影響や突風 (Gust) 等の不確定要素に対しては一定の割合で転倒モーメントに対し復原モーメントの余裕を取ることによって安全性が確保されているとみなすものである。この基本思想は ABS が最初に石油掘削船の規則を作る際 (1968 年規則作成時), US Coast Guard が一般船に対して適用すべく作成していた Criteria を基にした所からきているもの (参考文献 1) と思われる。

一般にこのやり方に従えば浮体の復原性能は幾何学的に決るので風力を如何に評価するかが、各規則に合致しているか否かの判定に大きく影響することになる。

この風力の評価法に関しては 3 章で述べられる様にその要求される精度 (風をうける物体間の相互影響を含む) が明確でなく、又実際の物理現象との相関が必ずしもとれたものになっていないという問題点はあるが、多くの規則は一応下記のような思想の元に計算 (又は風洞試験) で求める事を要求している。

即ち「各傾斜状態において水面上の構造物に作用する風圧力を傾斜力として求め、この水面上風圧力の中心点と (同一傾斜状態における)、水面下の構造物に作用する流体反力 (抗力) の圧力中心点との距離を傾斜レバーとして求め、これらの傾斜力と傾斜レバーの積として傾斜モーメントを求める。」というものである。

これは、「定常風によって構造物が風下側へ一定速度で漂流する場合の現象」に相当しているが、これを便宜的に「海上における海洋構造物の転倒のメカニズムを単純化した取扱方法」として使用しているわけである。

また一方では、波や潮による影響は、これらがいわば安全係数の形で処理されているため表面には全く出てこないようになっている。

付隨的にいえば上記に述べた基本的な考え方を加えて Static なメタセンタ高さ (GM) を所定値以上とする要求や NM D にみられる 1st intercept 角を所定値以下に、2nd intercept を所定値以上に制限する要求が追加されている場合がある

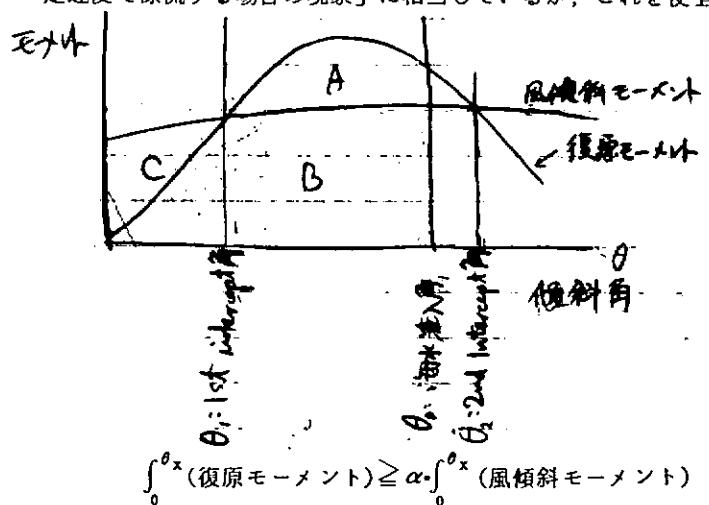


図 1.1.1

(図 1.1.1)。

(2) 損傷時復原性

表 1.1.1 に比較して示すように規則によって色々と差がある。特にセミサブ型においては損傷設定範囲を構造物の外周まわりでかつ喫水付近に限定したもの (IMO, NK, ABS), 任意の一区画浸水を要求するもの (UK, DEn), これらの両方を要求するもの (DnV, NMD) に大きくわけられる。更に A. L. Kielland の事故を契機に改正された DnV, NMD では一本のコラムの浮力が失なわれた場合でも所定の浮上状態が保てる事 (DnV は Accommodation unit に対してのみ) という要求が追加されている。

1.2 現行規則の海象・気象条件の設定 (表 1.1.1 参照)

海洋構造物の海象・気象条件は実際に使用される海域の海象・気象条件を考慮して決められるものと規定されているが構造を中心とした設計基準として DnV, NK 等は稼働海域での 100 年再現又は 50 年再現の海象条件を使用する事を要求している。(参考文献 2)

しかし、少くとも復原性規則においては、(それが具体的な数値が決らない場合の最低標準という趣旨としてとらえるべきであるにせよ) 特に稼働海域に制限をうけない海洋構造物に対しては概ね風速については

作業時	70 ノット (36 m/s 又は 35 m/s)
暴風時	100 ノット (51.5 m/s 又は 50 m/s)
損傷時	50 ノット (25.8 m/s 又は 25 m/s)

を要求している。

又復原性規則には波や潮流については特別な規定を設けていない。

1.3 その他の設計条件

1.2 で述べた復原性能の外に、寒冷地で稼働する半潜水式海洋構造物に対しては、氷や雪の付着量を構造物の海面上の位置や傾斜度を考慮して算定することにより氷や雪の付着によって重心が上昇しても、充分な復原性を有する事、又半潜水式海洋構造物が波浪中で動搖している際、大きな定常傾斜を引き越さないためある値以上の GM を有する事を要求する規則がある (UK, DEn の場合)。

1.4 設計条件例

多くの海洋構造物の場合、暴風時の海象・気象条件が、強度上、あるいは復原性能上の最も重要な設計条件の 1 つとなっていることが多い。

そこで、これまでに述べた各船級協会や各国政府の現行復原性規則に対する参考として、実際の海洋構造物の設計条件がどのようにになっているかを調査した。

我が国で既に建造されたか、あるいは現在建造中の海洋構造物の暴風時海象条件について表 1.1.4 (1/2) に半潜水型海洋構造物の例を、表 1.1.4 (2/2) に甲板昇降型海洋構造物の例を示す。

参 考 文 献

- (1) Assessment of Stability Requirements for Semisubmersible Units: Edward Numata, W. H. Michel, Alan C. McClure SNAME 1976
- (2) ルール上の海象および設計外力
井上義行, 日笠則明; 日本造船学会誌 609 号 1980 年 3 月

表 1.1.1 に対する注釈

1. 原則として該当する規則の本文に記されている事のみ記した。即ち内規等は含んでいない。
(しかし、例外的に注記を加えたりした所もある)
2. 一部に比較表としてのバランスをとるため又は簡単化のため、表現を変えたり、省略を行なったりした所がある。
又特に注記せず單なる Guidance の部分を記した所もある。
3. 上記の問題の他、訳語や比較表の作り方に問題がありうるので、正確には本文を参照のこと。

表 1.1.1 半潜水型及び甲板昇降型海洋

項目	規則・規約	I M O	N K	A B S
政府機関、船級協会名		International Maritime Organization	Nippon Kaiji Kyokai	American Bureau of Shipping
I 半潜水型海洋構造物				
A 非損傷時復原性 (INTACT STABILITY)				
1. Static stability			(19. 1. 1)	(3. 15. 1)
1) Operating condition 注(9)	記述なし	$G_o M > 0$	$G_o M > 0$	$G_o M > 0$
2) Transit condition	"	$G_o M > 0$	$G_o M > 0$	$G_o M > 0$
3) Severe storm condition	"	$G_o M > 0$	$G_o M > 0$	$G_o M > 0$
4) Temporary condition 注(10)	"	$G_o M > 0$	$G_o M > 0$	$G_o M > 0$
2. Dynamic stability				
1) 計算条件として考慮すべき最低の風速	(3. 2. 2. 2)	(19. 1. 2)		(3. 15. 2 a)
a) Operating condition	36 m/s	36 m/s		36 m/s
b) 閉鎖された場所におけるOperating condition	25.8 m/s	25 m/s		25.8 m/s
c) Transit condition	36 m/s	36 m/s		36 m/s
d) Severe storm condition	51.5 m/s	50 m/s		51.5 m/s
e) Temporary condition (喫水変更時の一時的状態)	規定なし	規定なし		規定なし
2) 判定条件				
a) 復原モーメントと風圧による傾斜モーメントとの関係	(3. 3. 1)	(19. 2. 1)		(3. 17. 2)
(注) θ_1 : 1 st intercept (static heel angle)				
θ_D : Down flooding angle (海水流入角)				
θ_2 : 2 nd intercept	$(A+B) \geq 1.3 (B+C)$	$(A+B) \geq 1.3 (B+C)$		$(A+B) \geq 1.3 (B+C)$
b) 復原モーメント曲線の値に対する要求	(3. 3. 1) 2 nd intercept 角度迄正であること	(19. 2. 1) 2 nd intercept 角度迄正であること		(3. 17. 2) 2 nd intercept 角度迄正であること
c) 1 st intercept 角度の条件	規定なし	規定なし		規定なし
d) 2 nd intercept 角度の条件	規定なし	規定なし		規定なし

構造物の復原性能に関する規則の比較

(注) 調査に使用した規則の名称は比較表末尾の注に示す。
又下記比較表に示された()内の数字は各規則の対応項目の数字を示す。

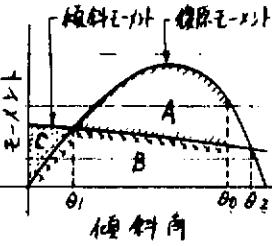
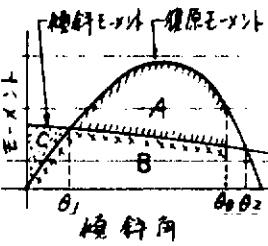
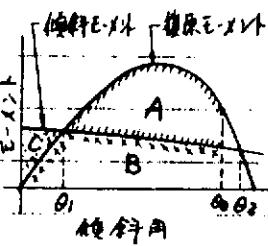
U S C G	D _n V	N M D	U K D E _n
United States Coast Guards	Det Norske Veritas	The Norwegian Maritime Directorate	U.K. Department of Energy
(§ 108.303)	(CH. IV SEC. 1 C 301)	(§ 6 8.1.3)	(4.3.3)
$G_oM \geq 0.05\text{ m}$	$G_oM \geq 1.0\text{ m}$	$G_oM \geq 1.0\text{ m}$	波浪中定常傾斜を防止する為適当な G_oM を確保する
$G_oM \geq 0.05\text{ m}$	$G_oM \geq 1.0\text{ m}$	$G_oM \geq 1.0\text{ m}$	"
$G_oM \geq 0.05\text{ m}$	$G_oM \geq 1.0\text{ m}$	$G_oM \geq 1.0\text{ m}$	"
$G_oM \geq 0.05\text{ m}$	$G_oM \geq 0.3\text{ m}$	$G_oM \geq 0.3\text{ m}$	記述なし
(§ 108.311)	(CH. IV SEC. 1 C 205)	(§ 6 7.2)	(PART II 4.3.1(a))
36 m/s	36 m/s	36 m/s	35 m/s
規定なし	25.8 m/s	25.8 m/s	規定なし
36 m/s	36 m/s	36 m/s	35 m/s
51.5 m/s	51.5 m/s	51.5 m/s	50 m/s
規定なし	36 m/s	36 m/s	規定なし
(§ 108.305 (a))	(CH. IV SEC. 1 C 301)	(§ 6 8.1.3)	(PART II 4.3.1(d)(ii))
傾斜角 θ_1 又は θ_2 に対して $(A + B) \geq 1.3 (B + C)$	傾斜角 θ_2 に対して $(A + B) \geq 1.3 (B + C)$	傾斜角 θ_2 に対して $(A + B) \geq 1.3 (B + C)$	傾斜角 θ_1 又は θ_2 に対して $(A + B) \geq 1.3 (B + C)$
(注) 上図に示す様に、ある傾斜角を越えて海水の流入が起ってもその区画を除いて計算した復原モーメントが傾斜モーメントより大きければ、そのベースに修正して 2nd intercept まで計算を続ける。			
(§ 108.305 (b)) 2nd intercept 角度迄正であること 規定なし 規定なし	記述なし	記述なし	規定なし 規定なし 規定なし
	(CH. IV SEC. 1 C 301) 約 15°以下 (CH. IV SEC. 1 C 301) 30°以上	(§ 6 8.1.1) 15°以下 (§ 6 8.1.1) 30°以上	

項目	規則・規約	I M O	N K	A B S
B 損傷時復原性 (DAMAGE STABILITY)				
1. 通常の損傷時の復原性				
1) 喫水線の位置に関係のない一区 画浸水	規定なし	規定なし	規定なし	
a) 計算条件として考慮すべき風 速				
i) Operating condition				
ii) Transit condition				
iii) Severe storm condition				
b) 損傷範囲				
2) 喫水線周辺の損傷				
a) 計算条件として考慮すべき風 速	(3. 4. 2)	(19. 1. 3)	(3. 15. 2 b)	
i) Operating condition	25.8 m/s	25 m/s	25.8 m/s	
ii) Transit condition	25.8 m/s	25 m/s	25.8 m/s	
iii) Severe storm condition	(オペレーションマニュアル に本喫水を記入する場合の み 25.8 m/s)	(オペレーションマニュアル に本喫水を記入する場合の み 25 m/s)	25.8 m/s	
b) 損傷範囲	(3. 5. 3)	(19. 3. 2)	(5. 9)	
i) 仮定しなければならない範 囲				
UNIT の外周の暴露部分 に限定する	規定あり	規定あり	規定あり	
ii) 仮定する損傷の大きさ、深 さ				
垂直方向の範囲	喫水上 5 m } にある任意 の 喫水下 3 m } 3 m の範囲 但し、政府の裁断で draft 上、下各 1.5 m の範囲に 緩和出来る。	喫水上 1.5 m 喫水下 1.5 m	喫水上 1.5 m 喫水下 1.5 m	喫水上 1.5 m 喫水下 1.5 m
水平方向の範囲（長さ）		なし（2つの縦隔壁で囲まれた区画の浸水のみ考える。但し、縦隔壁の間隔が 1 / 8 周より小さい時は一方をないものとみなす。）		
水平方向の深さ	外板から 1.5 m	外板から 1.5 m	外板から 1.5 m	

U S C G	D n V	N M D	U K D E n
規定なし	(CH.IV SEC. 1 A 402) 25.8 m/s 25.8 m/s 規定なし (CH.IV SEC. 1 D 201) 海水に接している部分 損傷の大きさ；規定なし	(§ 6 4.2) 25.8 m/s 25.8 m/s 規定なし (§ 6 10.1) 海水に接している部分 損傷の大きさ；規定なし	(PART II 4.3.2) 25 m/s 25 m/s 25 m/s 外周の外板から 1.5 m の深さ 損傷の大きさ；規定なし 規定なし (上記 1. の規定にて cover される)
(§ 108.315) 25.8 m/s 25.8 m/s 25.8 m/s	(CH.IV SEC. 1 A 402) 25.8 m/s 25.8 m/s 規定なし	(§ 6 4.2) 25.8 m/s 25.8 m/s 規定なし	
(§ 108.323)	(CH.IV SEC. 1 D 204)	(§ 6 10.4)	
規定あり	規定あり	規定あり	
喫水上 1.5 m 喫水下 1.5 m	喫水上 5 m 喫水下 3 m にある任意の 3 m の範囲	喫水上 5 m 喫水下 3 m にある任意の 3 m の範囲	
なし (2つの縦隔壁で囲まれた区 画の浸水のみ考える；但し 1/8 周以下しか離れていない縦隔壁は 無視する) 外板から 1.5 m	外周上 3 m	外周上 3 m	
		外板から 1.5 m	

項目	規則・規約	I M O	N K	A B S
3) 判定条件		(3. 4. 2)	(6. 2. 3)	(3. 15. 2 b)
a) 浸水後、規定の風を受けた状態での最終水線		浸水が進行する開口の下縁より下方にあること	浸水が進行する開口の下縁より下方にあること	浸水が進行する開口の下縁より下方にあること
b) 復原モーメントと風力による傾斜モーメントとの関係		規定なし	規定なし	規定なし
注 θ_0 : static heel angle without wind				
θ_1 : 1st intercept (static heel angle) with wind				
θ_D : Down flooding angle (海水流入角)				
θ_2 : 2nd intercept				
c) 1st intercept 角度の条件	規定なし	規定なし	規定なし	規定なし
2. 1 - コラム浮力消失	規定なし	規定なし	規定なし	規定なし
1) 適用する海洋構造物				
2) 適用 draft				
3) 損傷範囲				
4) 判定条件				
a) 浸水後の最終水線				
b) 復原モーメント曲線の値に対する要求				
C 补足事項				
1. 外力及びそれに伴う傾斜方向は	(3. 2. 1. 1)	(19. 2. 1)	(3. 17. 3)	最も厳しい角度とすること
2. 係船装置からの影響	(3. 2. 3)	(19. 1. 2. 5 & 19. 1. 3. 5)	(3. 15. 2 a & b)	無視する 但し、復原性に悪影響を及ぼす場合は考慮する
3. 復原モーメントの計算	記述なし	記述なし	記述なし	

U S C G	D n V	N M D	U K D E _n
(§ 108.315) 浸水が進行する開口の下縁より下方にあること 規定なし	(CH.IV SEC.1 D101) 浸水が進行する開口の下縁より下方にあること (CH.IV SEC.1 D101)	(§ 6 9.1) 浸水が進行する開口の下縁より下方にあること (§ 6 9.3)	(4.3.2) 浸水が進行する開口の下縁より下方にあること 規定なし
	$(A + B) \geq (B + C)$	$(A + B) \geq (B + C)$	
規定なし 規定なし	(CH.IV SEC.1 D101) 15°以下 (CH.IV SEC.1 D300) Accommodation unit のみ適用 operating draft コラム全体あるいは主要部分 浸水が進行する開口の下縁より 0.6 m以上下方にあること	(§ 6 9.2) 15°以下 (§ 6 11) 半潜水型掘削機全般 operating draft コラム全体あるいは主要部分 浸水が進行する開口の下縁より 0.6 m以上下方にあること	規定なし 規定なし
記述なし	(CH.IV SEC. 1 C 201) 最も厳しい角度とすること	(§ 6 4.3) 最も厳しい角度とすること	記述なし
(§ 108.317 a) 無視する	(CH.IV SEC.1 C104 & 201) 無視する 但し、displacement及びKGの計算には船体ラインの垂直成分を 含めること	(§ 6 5.1 & 6.2) 無視する 但し、復原性に悪影響を 及ぼす場合は考慮すること	(PART II 4.3.1(c)) 無視する 但し、復原性に悪影響を 及ぼす場合は考慮すること
記述なし	(CH.IV SEC. 1 A 404) trim freeにて行う	(§ 6 6.2) trim freeにて行う	記述なし

項目	規則・規約	I M O	N K	A B S
II 甲板昇降型海洋構造物(浮上時)				
A 非損傷時復原性 (INTACT STABILITY)				
1. Static stability	記述なし	$G_oM > 0$	$G_oM > 0$	$G_oM > 0$
2. Dynamic stability				
1) 計算条件として考慮すべき最低風速	(3. 2. 2. 2)	(19. 1. 2)	(4. 5. 1)	
a) Non-storm condition	36 m/s	36 m/s	36 m/s	
b) Storm condition	51.5 m/s	50 m/s	51.5 m/s	
2) 判定条件				
a) 復原モーメントと風圧による傾斜モーメントとの関係	(3. 3. 1)	(19. 2. 1)	(3. 17. 2)	
④ a) θ_1 : 1st intercept (static heel angle)				
θ_D : Down flooding angle (海水流入角)				
θ_2 : 2 nd intercept	θ_D 又は θ_2 に対して $(A+B) \geq 1.4 (B+C)$	θ_D 又は θ_2 に対して $(A+B) \geq 1.4 (B+C)$	θ_D 又は θ_2 に対して $(A+B) \geq 1.4 (B+C)$	
b) 復原モーメント曲線の値に対する要求	(3. 3. 1) 2 nd intercept 角度迄正であること	(19. 2. 1) 2 nd intercept 角度迄正であること	(3. 17. 2) 2 nd intercept 角度迄正であること	
c) 1 st intercept 角度の条件	規定なし	規定なし	規定なし	
d) 2 nd intercept 角度の条件	規定なし	規定なし	規定なし	
B 損傷時復原性 (DAMAGE STABILITY)	(3. 4. 2)	(19. 1. 3)	(3. 15. 2 b)	
1. 計算条件として考慮すべき風速	25.8 m/s	25 m/s	25.8 m/s	

U S C G	D _n V	N M D	U K D E _n
(§ 108.303) $G_o M \geq 0.05 \text{ m}$	(CH.IV SEC. 1 301) $G_o M \geq 0.5 \text{ m}$	(§ 6 8.1.2) $G_o M \geq 0.5 \text{ m}$	記述なし (2.b) 参照)
(§ 108.311) 36 m/s 51.5 m/s	(CH.IV SEC. 1 C 205) 36 m/s 51.5 m/s	(§ 6 7.2) 36 m/s 51.5 m/s	(PART II 4.3.1(a)) 35 m/s 50 m/s
(§ 108.305 (a)) 	(CH.IV SEC. 1 C 301) 	(§ 6 8.1.2) 	(PART II 4.3.1(d)(i))
傾斜角 θ_1 又は θ_2 に対して $(A + B) \geq 1.4 (B + C)$	傾斜角 θ_2 に対して $(A + B) \geq 1.4 (B + C)$	傾斜角 θ_2 に対して $(A + B) \geq 1.4 (B + C)$	傾斜角 θ_1 又は θ_2 に対して $(A + B) \geq 1.4 (B + C)$
(注) 上図に示す様に、ある傾斜角を越えて海水の流入が起っても、その区画を除いて計算した復原モーメントが傾斜モーメントより大きければ、そのベースに修正して 2 nd intercept 迄計算を続ける			
(§ 108.305 (b)) 2 nd intercept 角度迄正であること	記述なし	記述なし	(PART II 4.3.1(i)) field transit 時は $0^\circ - 20^\circ$ 遠正であること long transit 時は $0^\circ - 35^\circ$ 遠正であること
規定なし	(CH.IV SEC. 1 C 301) 約 15° 以下	(§ 6 8.1.1) 15° 以下	規定なし
規定なし	(CH.IV SEC. 1 C 301) 30°以上	(§ 6 8.1.1) 30°以上	規定なし
(§ 108.315) 25.8 m/s	(CH.IV SEC. 1 A 402) 25.8 m/s	(§ 6 4.2) 25.8 m/s	(PART II 4.3.2) 25 m/s

項目	規則・規約	I M O	N K	A B S
2. 損傷仮定				
1) 横からの損傷				
a) 垂直方向の範囲	(3. 5. 2) 基線上, 上方全域	(19. 3. 1) 船底より上方全域	(4. 7) 船底より上方全域	
b) 水平(外板平行)方向の範囲	なし(有効水密隔壁間の 小区画) 但し, 3 m以上間隔が離 れていない隔壁は有効水 密隔壁と扱われない	なし(有効水密隔壁間の 区画のみ浸水)	なし(有効水密隔壁間の 区画のみ浸水)	
c) 水平方向の深さ	1.5 m	1.5 m	1.5 m	
2) 底からの損傷 (マットがない時)	規定なし	一区画浸水	一区画浸水	
3) マット付の場合のマットの損傷	近接しすぎてないと認め られる限り, 主船体と独 立に損傷を仮定する。		最大軽喫水線より下方 1.5 m以内にマットが有り, 主船体とマットの長さ又は幅の差から 1.5 m以内で あるときのみ主船体と同時浸水, 他は独立に一区画 浸水	
3. 判定条件				
1) 浸水後, 規定の風を受けた状態 での最終水線	(3. 4. 2) 浸水が進行する開口の下 縁より下方にあること	(6. 2. 3) 浸水が進行する開口の下 縁より下方にあること	(3. 15. 2 b) 浸水が進行する開口の下 縁より下方にあること	
2) 復原モーメントと風圧による傾 斜モーメントとの関係	記述なし	記述なし	記述なし	
注 θ_0 : Static heel angle without wind				
θ_1 : 1 st intercept (static heel angle with wind)				
θ_D : Down flooding angle (海水流入角)				
θ_2 : 2 nd intercept				
3) 1 st intercept 角度の条件	規定なし	規定なし	規定なし	

U S C G	D n V	N M D	U K D E n
(§ 108.321) 船底より最上層の連続甲板 (もしあれば第1層目の船接 甲板)迄の全域 なし(主水密隔壁間の区画の み浸水)	基線より上方全域 3 m	基線より上方全域 3 m	(PART II 4.3.2) 1区画浸水 (損傷深さ 1.5 m)
1.5 m 記述なし	1.5 m 一区画浸水	1.5 m 一区画浸水	一区画浸水
マット円の各一区画浸水を考 慮(主船体とは独立に一区画 浸水)	近接しすぎていないと認められる限り主船体と 独立に損傷を仮定する		
(§ 108.315) 浸水が進行する開口の下縁よ り下方にあること	(CH. IV SEC. 1 D 101) 浸水が進行する開口の下縁よ り下方にあること	(§ 6 9.1) 浸水が進行する開口の下縁よ り下方にあること	(4.3.2) 浸水が進行する開口の下縁よ り下方にあること
記述なし	(CH. IV SEC. 1 D 101)	(§ 6 9.3)	記述なし
$(A + B) \geq (B + C)$			
$(CH. IV SEC. 1 D 101)$			
規定なし	15°以下	15°以下	規定なし

項目	規則・規約	I M O	N K	A B S
C 補足条件		(3. 2. 1) 最も厳しい角度とすること (3. 2. 3)	(19. 2. 1) 最も厳しい角度とすること (19. 1. 2. 5 & 19. 1. 3. 5)	(3. 17. 3) 最も厳しい角度とすること (3. 15. 2 a & b)
1. 外力及びそれに伴う傾斜方向		無視する	無視する 但し、復原性に悪影響を及ぼす場合は考慮すること	無視する 但し、復原性に悪影響を及ぼす場合は考慮すること
2. 係船装置からの影響				
3. 復原モーメント計算		記述なし	記述なし	記述なし
III 風圧による傾斜モーメント計算法		(3. 2. 2. 1) $H = F \cdot h$	(4. 1. 2) $H = F \cdot h$	(3. 5. 2) $H = F \cdot h$
A 傾斜モーメント H		$F = 0.0623 \cdot C_s \cdot C_H \cdot V^2 \cdot A$	$F = 0.0625 \cdot C_s \cdot C_H \cdot V^2 \cdot A$	$F = 0.0623 \cdot C_s \cdot C_H \cdot V^2 \cdot A$
F : 風圧力 (kg)				
C_s : 形状係数				
C_H : 高度係数				
V : 風速 (m/s)				
A : 構造物の投影面積 (m^2)				
h : 浸水部の lateral 抵抗中心から風圧受圧中心までの距離		(3. 2. 5)	(19. 2. 3)	(3. 17. 4)
B 風洞試験による傾斜モーメントの決定		計算の代りとして差支えない (抗力及び揚力効果を考慮すること)	計算の代りとして差支えない (抗力及び揚力効果を考慮すること)	計算の代りとして差支えない (抗力及び揚力効果を考慮すること)
注: 調査した規則の名称		RESOLUTION A. 4. 14 (XI) adopted on Nov. 15, 1979 "CODE FOR THE CONSTRUCTION AND EQUIPMENT OF MOBILE OFFSHORE DRILLING UNITS"	RULES FOR THE SU- RVEY AND CONSTR- UCTION OF STEEL SHIPS 1978 "PART P. MOBILE OFFSHO- RE UNITS"	RULES FOR BUILDI- NG AND CLASSING MOBILE OFFSHORE DRILLING UNITS 1980

U S C G	D n V	N M D	U K D E _n
記述なし (§ 108.317 a)	(CH.IV SEC. 1 C 201) 最も厳しい角度とすること (CH.IV SEC. 1 C 104&C 201)	(§ 6 4.3) 最も厳しい角度とすること (§ 6 5.1 & 6.2)	記述なし (PART II 4.3.1(c))
無視する	無視する 但し, displacement及びKGの計算には係船ラインの垂直成分を含めること (CH.IV SEC. 1 A 404) trim free にて行う	無視する 但し, displacement及びKGの計算には係船ラインの垂直成分を含めること (§ 6 6.2) trim free にて行う	無視する 但し, 復原性に悪影響を及ぼす場合は考慮すること
記述なし (§ 108.311) $H = F \cdot h$ $F = 0.0623 \cdot C_s \cdot C_h \cdot V^2 \cdot A$	(Appendix 1 B 100) $H = F \cdot h$ $F = 0.0625 \cdot C_s \cdot C_h \cdot V^2 \cdot A$	規定なし (B参照)	BS-CP 3 "Code of Basic Data for the Design of Buildings" で recommendされた方法による
(§ 108.105 (a)) 計算の代りとして差支えない	(CH.IV SEC. 1C207 & 208) 計算の代りとして差支えない (抗力及び揚力効果を考慮すること)	(§ 6 7.1) 風洞試験にもとづく事	(4. 1. 4. 1) 計算の代りとして差支えない
FEDERAL REGISTER " REQUIREMENTS FOR MOBILE OFFSHORE DRILLING UNITS 1978 "	RULES FOR CLASSIFICATION OF MOBILE OFFSHORE UNITS 1981	MOBILE DRILLING PLATFORM Regulations laid down by the Norwegian Maritime Directorate 1982	STATUTORY INSTRUMENTS 1974 No. 289 THE OFFSHORE INSTALLATIONS (CONSTRUCTION AND SURVEY) REGULATIONS OFFSHORE INSTALLATIONS :GUIDANCE ON DESIGN AND CONSTRUCTION 1977

表 1.1.4(4) 半潜水型海洋構造物の設計条件（暴風時）例

機種	建造造船所	適用規則	稼動海域	設計条件				
				水深(m)	波高(m)	波周期(s)	風速(kt)	潮流(kt)
デリックバージ	IHI	BV	北海	—	15(H _{1/3})	16	100	—
クレーンバージ	MES	LR	制限なし	—	30	—	117	—
掘削リグ	MES	ABS	制限なし	366	30	—	100	3.0
フローティング・ホテル	MES	DnV	制限なし	—	30	15	100	2.0
掘削リグ	MES	DnV	制限なし	61~457	33.5	15	110	2.0
掘削リグ	NKK	ABS, USCG, NMD, DEn	北海	450	15(H _{1/3})	14	100	2.5
掘削リグ	SHI	—	—	457	33.5	15	100	3.0
掘削リグ	SHI	—	北海、 アラスカ湾	305	30.5	12.5	100	1.5
掘削リグ	HZ	—	制限なし	—	30.5	12.5	99.9	1.5
掘削リグ	HZ	—	制限なし	—	30.5	12.5	99.9	1.5
掘削リグ	MHI	ABS	日本近海、 東南アジア	20~200	22.9	13~20	117	3.0
掘削リグ	MHI	ABS	制限なし	300	36.6	20~25	117	3.0
アクアポリス	MHI	—	沖縄	45	15	8~20	117	1.5
掘削リグ	MHI	ABS	北海、 アラスカ湾	450	30	20	100	2.0
掘削リグ	MHI	ABS	制限なし	500	36.6	20~25	117	3.0
掘削リグ	KHI	ABS, USCG	制限なし	610	36.3	18	100	3.0

表 1.1.4 (2/2) 甲板昇降型海洋構造物の設計条件（暴風時）例

機種	建造造船所	適用規則	稼動海域	設計条件				
				水深(m)	波高(m)	波周期(s)	風速(kt)	潮流(kt)
S E P	IHI	ABS	アラビア湾	61	10.7	7	70	3.3
S E P	IHI	JG	沿岸	25	3.5	6	117	2
掘削リグ	MES	ABS	メキシコ湾, アフリカ沿岸	61	10.7	—	100	—
掘削リグ	MES	ABS	日本近海, 東南アジア	91.4	12.2	—	100	0
掘削リグ	MES	ABS	—	91.4	12.2	—	100	0
掘削リグ	NKK	ABS	メキシコ湾	61	15.2	—	100	0
				76.2	9.1	—	70	0
掘削リグ	NKK	ABS	メキシコ湾	76.2	18.3	15	100	0
				91.4	13.7	15	70	0
掘削リグ	NKK	ABS, USCG	アラビア湾	33.5	8.5	10	58	0
掘削リグ	NKK	ABS	制限なし	27.4	10.7	8	100	0
				39.6	12.2	14	100	0
掘削リグ	NKK	ABS	西オーストラリア	95.4	20.0	14	88	2.9
			クック海	97.5	14.5	12.4	90.4	3.9
掘削リグ	SHI	—	北海, アメリカ西岸	91.4	16.1	14	100	1.2
掘削リグ	SHI	—	アメリカ東岸	121.9	23.8	18	100	0
				91.4	25.3	18	100	0
				61	27.1	18	100	0
掘削リグ	SHI	—	メキシコ湾	38.1	14.3	14	100	1.0
S E P	SHI	—	ボンベイ湾	85.3	18.3	14.5	104	3.1
掘削リグ	HZ	—	制限なし	—	15.2	—	108.8	—
掘削リグ	HZ	—	アラブ海	—	8.5	9	99.9	2.9
掘削リグ	HZ	—	インド沿岸	—	18.6	13.5	85.9	1.0
掘削リグ	HZ	—	制限なし	—	12.0	9	99.9	1.5
掘削リグ	HZ	—	北海	—	23.1	15.6	82.6	2.5
掘削リグ	HZ	—	北海	—	23.0	15.0	105	1.5
掘削リグ	HZ	—	西アフリカ	—	11.0	12.0	100.1	2.5
掘削リグ	MHI	ABS, NK	東南アジア, 中近東	57	9.0	6.8~15	100	0

2. 海洋構造物の事故例

この数年間に大型の海洋構造物の転覆、沈没事故が続発し、多くの人命が失なわれた事から、海洋構造物の安全性の問題がクローズアップされるに至った。各國政府、船級協会等の海洋構造物規則では、非損傷時および損傷時の復原性について規定を設けており、これらの事故を起こした海洋構造物も建造時には各規定に適合していた事は言うまでもない。しかし、これらの規則では、1章において見たように、非損傷時では閉鎖装置を備えた開口からは海水が浸入しないという条件で風および波に曝されている場合を、損傷時では底触または他船との衝突による破口からの一区画または隣接する区画への浸水を想定しているが、以下に示す事故例では構造物の強度的要因によりこれよりも苛酷な状態に陥って転覆している。なお、Alexander L. Kielland 号の事故に鑑み、NMD規則ではコラムの1本分に相当する浮力が消失した状態においても充分な予備浮力をもたねばならぬ旨の規定が追加された。

本章では最近の海洋構造物の全事故の例を、公にされた報告書や報道をもとに紹介する。

2.1 Alexander L. Kielland 号¹⁾

(1) 事故の概要

1980年3月27日 北海のエコフィスク油田において、生産プラットフォーム Edda 2／7 C 附近に係留されていた半潜水式海洋構造物 Alexander L. Kielland 号（以下A号と略す）が転覆し、123人が死亡した。この事故は5本のコラムのうち1本が落失して復原力を失なった事によるものである。

(2) 本船の概要

A号は図 2.1.1 に示すような五角形の半潜水式海洋構造物であり、下部に円形の浮力体をもった5本のコラムは

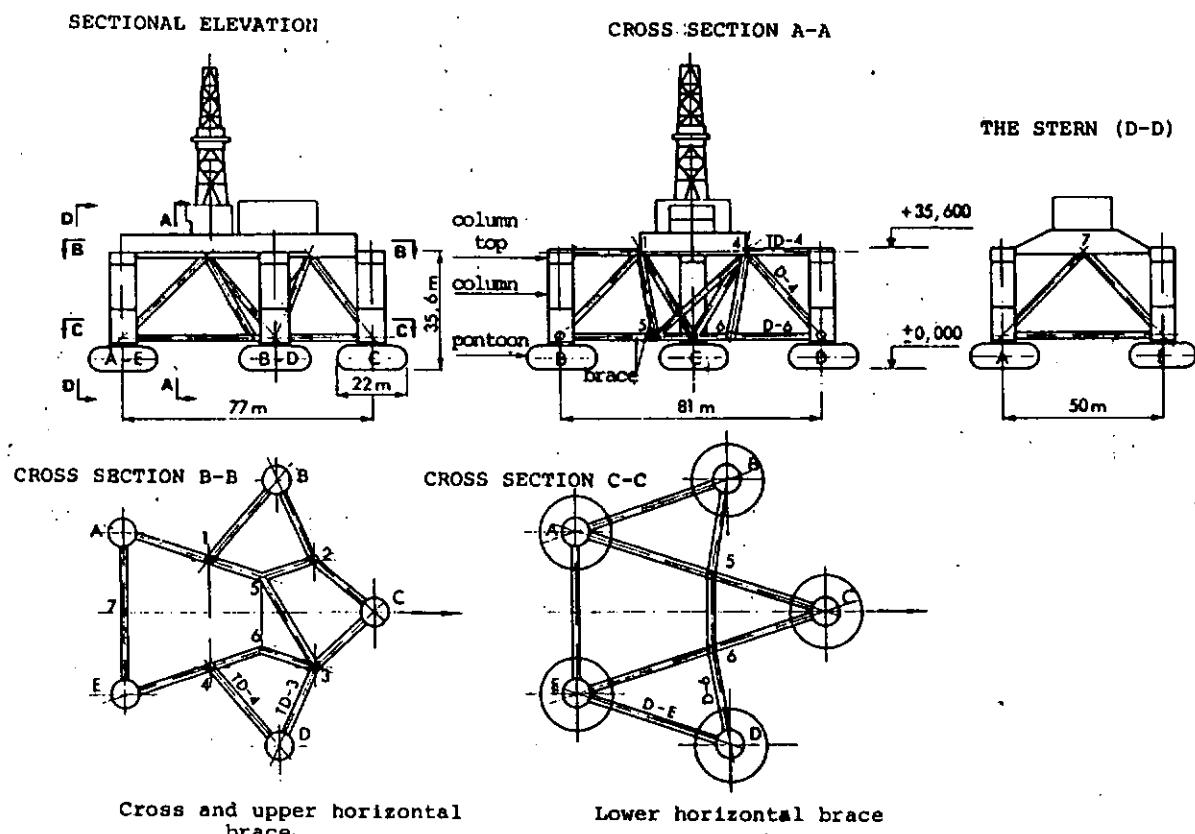


図 2.1.1

複雑な配置のプレースによって結合されている。

(3) 事故に至るまでの経過

A号は掘削用リグとして設計、建造されたものであるがこれまで専ら居住用のプラットフォームとして使用されていた。事故当日までの9ヶ月間は生産プラットフォーム Edda 2/7C に近接して係留されていたが、事故当日の1980年3月27日午後になって風速 16~20 m/s、波浪 6~8 m と天候が悪化したので、Edda 2/7C との接触を避けるために位置を移動した。因みに A号はコラム C, D を Edda 2/7C に面しており、A, B, D および E のコラムにはそれぞれ 2 本ずつのアンカー索が取り付けられ、コラム C は無係留状態であった。A号は推進装置を持っていないので、上述の移動はコラム B, D のアンカー索を緩めながら、同時にコラム A, E のアンカー索をウインチで巻き込む事により行なった。

位置を移動してから半時間後に乗員は強い衝撃を感じたが、これは悪天候下で時折発生する波浪衝撃と同じようなものであったので特に気にする者はいなかった。引き続き第二の衝撃があり、金属が破壊される音を聞いた者もあった。A号はこの直後 30°~35°まで一気に傾き、一旦静止したように見えたがその後徐々に傾きながら沈みはじめ、最初の衝撃があってから約20分後に完全に転覆して倒立した。

この事故により212名の乗員中89名が救助され、123名が死亡した。

(4) プレースの破断原因の調査

調査の結果この事故は、図 2.1.2 のようにコラム D に取り付けられた 6 本のプレースのうち、D-6 がまず破断した事により他のプレースに過大な力が加わり、他のプレースが次々に破断して遂にはコラム D 自身が落失したものである。以下にはこの事故の引き金となったプレース D-6 の破断の原因について述べる。

プレース D-6 には船位検知用のハイドロフォンが埋め込まれており、このハイドロフォンを保持するホルダーがプレースの内側と外側とで隅肉溶接されているが、この溶接ビートの形状およびホルダーへの溶け込みが良好で

はなかった。プレースの板厚方向の強度および延性の不足と溶接不良とが重なって、溶接部およびホルダーの破壊を引き起こした。しかも破面にペンキが付着している事から、亀裂の幾つかは建造中に既に発生していた事が判った。これらの亀裂によるプレース内の応力の再配分の結果、ホルダー取付部とその反対側との応力レベルが高くなる。これらの点から発生した疲労亀裂が円周方向に拡がり、最終的には全周の 2/3 に亘って亀裂が延びている。また事故の少なくとも 12 ヶ月前には板厚方向に亀裂が貫通している事も判った。

(5) 結論

A号のような海洋構造物で構造的に最も重視されているのは一般にコラムやプレースの格点であり、該部は過大な応力集中を生じないように充分に検討された構造とするほか、工作についても細心の注意が払われている。上に見たように A号の事故はプレースに取り付けたハイドロフォンホルダーの溶接不良に端を発するものであった。損傷がこのように、従来さほど重要視されていない部所から発生した事も、大事故を未然に防ぎ得なかった原因とな

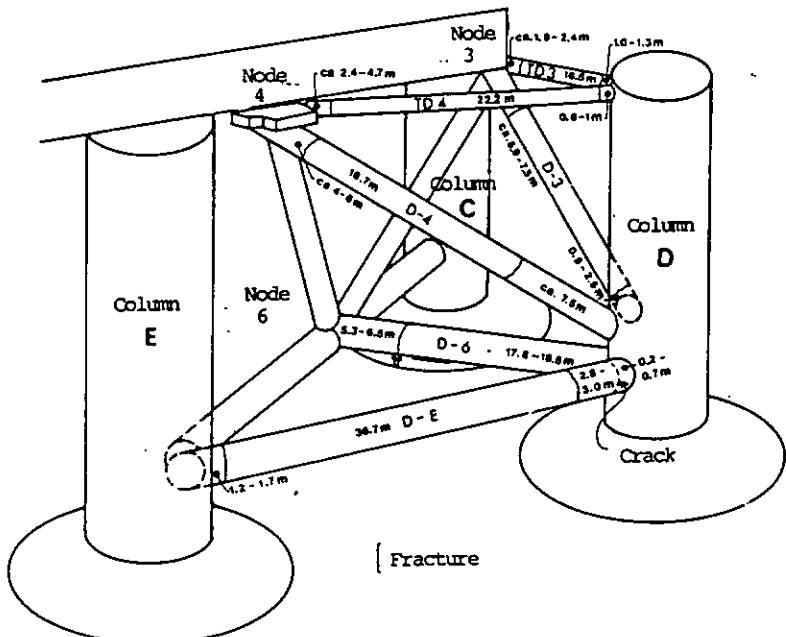


図 2.1.2

っている。

一方復原性能の立場から見れば、従来の損傷時残存復原力の計算が、今回のようにその主要な浮力メンバーであるコラムのうちの1本を完全に失なうというような苛酷な状態を想定していなかった事が今回の事故の原因である。また、事故の発生直後における主要な閉鎖装置の操作が適切であれば、転覆、沈没に至るまでの時間を長引かせる事ができ、救助活動を更に有効に行ない得たであろう。

2.2 Ocean Ranger 号

事故の原因については現在調査中のため詳しいことは明らかにされていないが、事故当事の新聞報道やその後の関係者の発言を記載した雑誌、聴聞会のメモを取り纏めた。

(1) 事故の概要

本船が1982年2月15日カナダ・ニューファンドランド沖の大西洋上で操業中大しきのため転覆・沈没し作業員(84人)全員が行方不明になった。当時の気象状況は、吹雪まじりの暴風雨で15mを超える高波と風速25m以上の風が吹いていた。

陸上基地への最後の連絡は、

リグは70~80ノットの西風をうけて船首方向に8~10フィート沈み左舷に12°~15°傾斜して危険なため全員が救命ボートに乗り込み中である

という内容であった。

Rangerは救命ボートを14隻(内、4隻はSurvival Capsule)所持していたが2月末までに8隻が依然として発見されていない。尚、84名のうち22名は死体で発見、62名は行方不明のことである。

(2) 本船の概要

本船は図2.2.1に示すように2ロワーハル、8コラム型式の大型半潜水式石油掘削リグで、主要目は次のとおりである。

長さ×幅×高さ 約120m×80m×40m

係留索 12本(チェーンとワイヤの組合せ)

また本船の設計(外力)条件は次のとおりである。

波高 110フィート(波周期15秒)

風速 100ノット

潮流 3ノット

(3) 推定事故原因

事故後無人の潜水機でRangerの沈没の様子をTV撮影したところ、2つのロワーハルの船首部が壊れ、バラストコントロール室が破損して約260フィートの

海底にさかさまに沈没していた。コラムやブレース類は崩壊していないことから、この事故がリグの構造上の崩壊に係わる問題ではなく何らかの原因で「転覆」した模様である。

いずれにせよ詳細な調査結果が待たれる。

2.3 その他²⁾

以上の二例は半潜水式海洋構造物の、稼働海域における事故の例であるが、ジャッキアップ式海洋構造物の曳航中の事故例を一件紹介する。

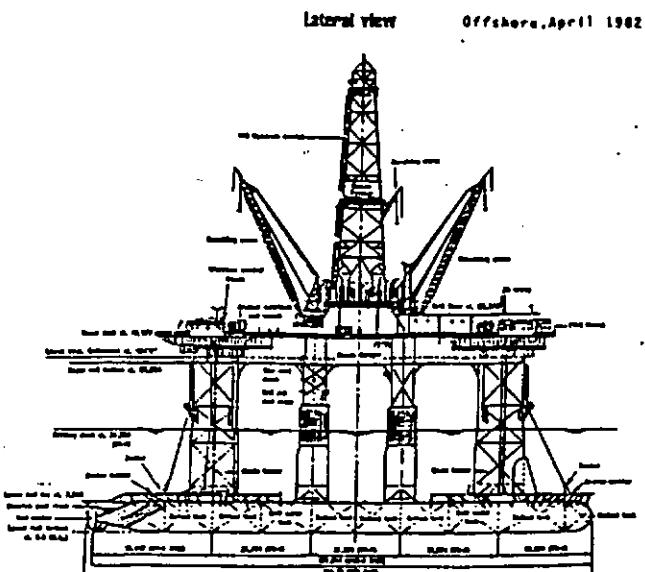


図2.2.1

(1) 事故の概要

1980年10月22日、アラスカ南方200浬の地点でDan Prince号(以下D号と略す)が転覆して沈没した。D号はダッチハーバーからアビジャンに向けて曳航中に悪天候に遭遇し、船内に浸水して復原力を失ないこの事故に至ったものと思われる。

(2) 本船の概要

D号は図2.3.1に示すようなジャッキアップ式の非自航式掘削リグである。3本のレグは四面ランス構造で全長418フィートである。

(3) 事故に至るまでの経過

1980年10月7日ダッチハーバーにおいてD号は、長期間に亘る外洋の曳航に備えて整備を行なった。曳航中にD号が50%の確率で遭遇する海象は、風速28ノット、波高14フィートと予測されている。出航予定当日の天気予報が不確かであったので、曳船の船長は出航を一日見合わせ、整備の完了を見届けたうえで、10月10日アビジャンに向けて曳航を開始した。

翌日から約1週間に亘りD号は風速50ノット、波高45フィート程の悪天候に遭遇し、船体の各部に多大な損傷を受けた。これらの損傷は高応力によるものだけではなく、激しい船体運動により甲板上に仮留めしてあった掘削パイプや重い艤装品が動き出し、諸管装置等が破壊されたものも数多い。これらの損傷部から船体内部に浸水しているのが発見された。

20日夜半には風速75ノット、波高60フィートに達するとの予報が出たため、乗員は近くに待機していたUSCGのカッターに移った。翌21日D号は右舷に傾きながら船尾から沈みはじめ、22日早朝には転覆して沈没した。

(4) 復原性能の検討

転覆の原因を調査するために、非損傷時および損傷時の復原性の検討を行なった。まず、転覆に先立つ数日間の悪天候に耐えている事から、非損傷時復原性能は充分であったと考えてよいであろう。(3)で述べたように転覆直前にはかなりの浸水量があった事が推察されるが、損傷時復原力計算によるとドリルウォータータンク、機関室、バルクセメント室に同時に浸水しても大丈夫であるが、更にバルクマッド室にも浸水した場合には(3)の最後に述べたように右舷に傾きながら船尾にトリムして転覆する事が判った。但しこの浸水区画はあくまで仮定であり、実際にその区画に浸水があったか否かは確認されていない。

(5) 結論

D号の事故は予測を遥かに上回る悪天候に遭遇して損傷を受け、そこから浸水して復原力を失い転覆して沈没したものと考えられるが、損傷の規模や件数から見て、鋼材や溶接の品質について疑問がある。また多くの損傷が甲板上に仮留めした重量物の移動によって生じている事も見過ごせない。

この事故を参考に、外洋を曳航する際の注意点を挙げると、まず遭遇する海象を精度よく予測すること、甲板上に一時的に置かれた重量物は、充分な固縛ができない限り取り除くこと等である。

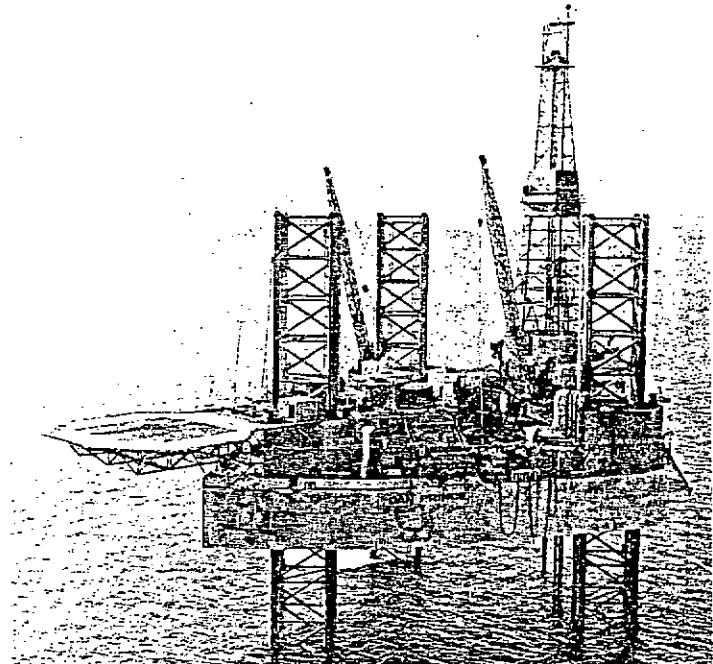


図2.3.1

2.4 事故の統計³⁾

1955年から1981年1月までに発生した海洋構造物の事故は総計140件ある。これらを発生年毎にまとめたものが表2.4.1である。但し1980年1月に発生した3件はこの表には含まれていない。これによると、この数年になって件数、規模とも急に増加している事が判る。1979年には渤海2号が、1980年には先に紹介したAlexander L. Kielland号およびDan Prince号が転覆している。

これらの事故を原因別および形式別に分類したのが表2.4.2、2.4.3である。まず原因別に見ると、暴噴が最も多く、暴風雨、曳航中、稼働中の事故がこれに次いでいる。構造物の型式別ではジャッキアップ式が圧倒的に多いが、これはこれまで建造された海洋構造物の大多数がジャッキアップ式である事とも関係している。

参考のため、これら140件の事故の概要を表2.4.4に示す。

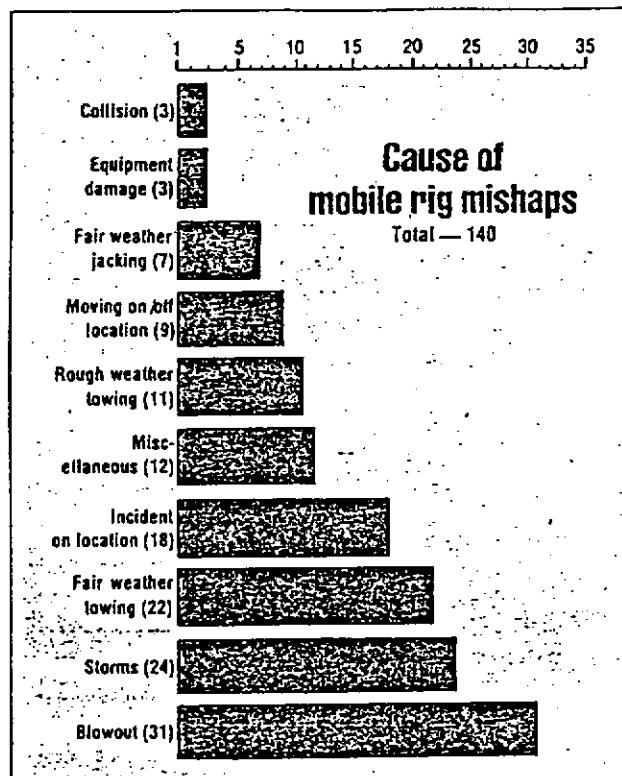
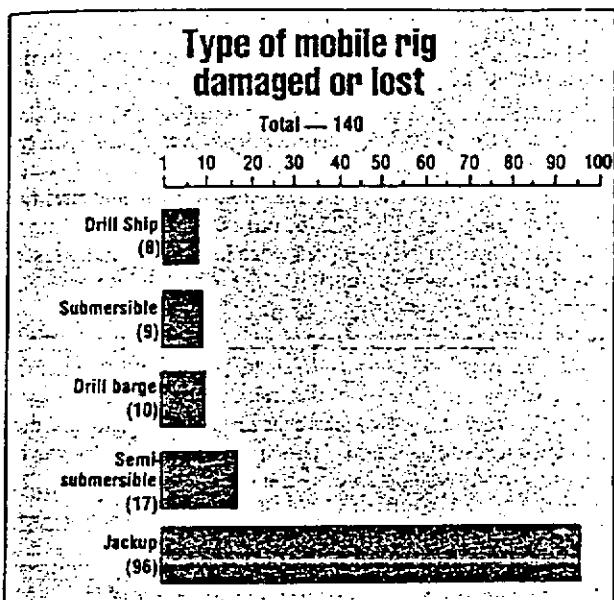
表2.4.1 事故の件数と被害額³⁾

Fleet loss over 26-year period			
Year	No. of mishaps	Rigs lost to fleet	Value of loss (\$ million)
1955	3	0	3.7
1956	1	0	1.4
1957	4	2	7.9
1958	2	1	2.7
1959	2	1	4.2
1960	1	1	1.3
1961	3	0	3.7
1962	1	1	3.0
1963	0	—	—
1964	2	2	9.8
1965	7	5	26.4
1966	4	3	14.3
1967	0	—	—
1968	8	3	17.6
1969	12	2	15.7
1970	14	2	15.0
1971	4	1	13.3
1972	6	3	31.4
1973	5	0	19.1
1974	8	4	46.2
1975	3	1	21.3
1976	9	4	83.9
1977	5	2	43.3
1978	3	0	2.9
1979	8	3	139.0
1980	22	5	217.4
	137	46	744.5*

*Value of loss on 10 units unknown

参 考 文 献

- (1) The "Alexander L. Kielland" accident, Norwegian Public Reports (English), Nov. 1981
- (2) Decision of the Commissioner of Maritime Affairs, R. L. and Report of the Preliminary Investigation in the Matter of the Loss of the Jack-Up Drilling Rig Dan Prince (O. N. 6178) Which Sank in Alaska Waters, on 22 October, 1980, Bureau of Maritime Affairs (Liberia), May, 1981
- (3) Tracing the Causes of Rig Mishaps, Leonard LeBlanc, Offshore, March, 1981

表 2.4.2 原因別発生件数³⁾表 2.4.3 型式別発生件数³⁾表 2.4.4 事故の概要³⁾

YEAR	RIG NAME	TYPE*	OWNER	DAMAGE	DAMAGE LOSS (\$ MILLIONS)	UNIT RETURNED TO SERVICE
1955	S-44	Sub	Chevron	Blowout and fire in Gulf of Mexico	1.8	Yes
	Rig No. 101	Sub	American Tidelands	Capsized while moving off location in Gulf of Mexico	1.6	Yes
	Rig No. 52	JU	Offshore Co.	Damaged while jacking in Gulf of Mexico	0.3	Yes
1956	Rig 22	Sub	Sedco	Capsized at Gulf of Mexico shipyard	1.4	Yes
1957	Qatar Rig No. 1	JU	Shell	Broken up by storm in Persian Gulf	1.7	No
	Mr. Gus 1	JU	Glasscock Drilling	Capsized during relocation in Gulf of Mexico	2.5	Partially salvaged
	Deepwater No. 2	JU	Deepwater Drilling	Collapsed while drilling in Gulf of Mexico	1.6	No
	Ed Malloy	Sub	John W. Mecom	Destroyed in hurricane	2.1	Partially salvaged
1958	Translak No. 3	JU	Underwater Gas Developers	Capsized while under tow in Lake Erie	2.0	No
	Rig No. 55	JU	Offshore Co.	Damaged during tow by storm in Gulf of Mexico	0.7	Yes
1959	Rig No. 10	JU	Trans-Gulf	Capsized while preparing to move in Gulf of Mexico	3.1	No
	C.E. Thornton	JU	Reading & Bates	Damaged by blowout in Persian Gulf	1.0	Yes
1960	Nola 2	Drill barge	Zapata Offshore	Beached in Bay of Campeche during storm	1.3	No
1961	No. 55	JU	Offshore Co.	Beached off British Honduras in hurricane	1.7	Yes
	Delta	Sub	Offshore Co.	Damaged by hurricane in Gulf of Mexico	1.5	Yes
	Mr. Louie	JU	Reading & Bates	Damaged by storm while under tow in Gulf of Mexico	0.5	Yes

YEAR	RIG NAME	TYPE	OWNER	DAMAGE	DAMAGE LOSS (\$ MILLIONS)	UNIT RETURNED TO SERVICE
1962	SM-1	Drill barge	Global Marine	Sank in storm off California	3.0	No
1964	C.P. Baker	Drill barge	Reading & Bates	Capsized during blowout In Gulf of Mexico — 22 killed	2.3	No
	Rig No. 1	Semi	Sante Fe Drilling	Sank in hurricane in Gulf of Mexico	7.5	No
1965	Penrod 52	JU	Penrod Drilling	Capsized by hurricane in Gulf of Mexico	2.5	No
	Marlin No. 3	JU	Marlin Drilling	Partially sunk while under tow In Gulf of Mexico	1.7	Yes
	Santa Fe Explorer	JU	Sante Fe Drilling	Damaged while under tow In Mediterranean Sea	1.5	Yes
	Triton	JU	Shell	Blowout and fire off Nigeria	1.5	No
	Bruyard	Semi	Shell	Sank while under tow In South China Sea — 13 killed	7.5	No
	Paguro	JU	Saipem	Blowout and fire in Adriatic Sea — 3 killed	6.0	No
	Maverick I	JU	Zapata Offshore	Sank in hurricane in Gulf of Mexico	5.7	No
1966	Sea Gem	JU	Compagnie Gen. D'Equipments	Collapsed while preparing to move in North Sea — 13 killed	5.0	No
	Roger Butin	JU	CEP	Capsized off Cameroon	7.0	No
	Mercury	YF Barge	Golden Land Drilling	Sank during storm off Tuxpan, Mexico	1.5	No
	Rig No. 52	JU	Offshore Co.	Leg damaged off Nigeria	0.2	Yes
1968	Julie Ann	JU	Dixilyn Drilling	Sank while under tow in Gulf of Mexico	4.0	No
	Dresser II	JU	Dresser Offshore	Capsized in Gulf of Mexico	2.0	Yes
	Little Bob	JU	Fluor Drilling	Blowout and fire in Gulf of Mexico — 7 killed	2.0	No
	Ocean Prince	Semi	Odeco	Hull broken up by storm in the North Sea	7.0	No
	Ocean Traveller	Semi	Odeco	Structural damage by storm in North Sea	0.2	Yes
	Nola II	Drill Barge	Zapata Offshore	Fire in engine room in location in the Persian Gulf	0.2	Yes
	Ocean Viking	Semi	Odeco	Structural damage in North Sea	0.2	Yes
	Chaparral	JU	Zapata Offshore	Lost legs in storm while under tow In Mediterranean Sea	2.0	Yes
1969	Wodeco II	Drill Barge	Fluor Drilling	Hull, mast damage while under tow through Hudson Straits	0.4	Yes
	Wodeco III	Drill Barge	Fluor Drilling	Blowout in the Red Sea	0.5	Yes
	St. Louis	Sub	Odeco	Engine room damaged by hurricane in Gulf of Mexico	0.1	Yes
	Estrellita	JU	Offshore Co.	Capsized while under tow in Gulf of Mexico	2.5	Yes
	Constellation	JU	Offshore Co.	Sank in storm in North Sea	5.8	No
	North Star	JU	Offshore Co.	Leg damaged by storm during tow in North Sea	0.1	Yes
	John C. Marthens	JU	Offshore Co.	Leg damaged during storm in Gulf of Alaska	0.1	Yes
	Rimtide	Sub	Odeco	Blowout in Gulf of Mexico	0.1	Yes
	Mariner I	Semi	Sante Fe	Hull damage off Argentina	0.2	Yes
	Sedco 135G	Semi	Sedco	Blowout and fire off Australia	3.5	Yes
	Mercury	JU	Offshore Co.	Damaged in Lisbon harbor	0.1	Yes
	Scorpion	JU	Zapata Offshore	Sank in storm while under tow off Canary Islands	2.3	No
1970	Wodeco V	Drill Barge	Fluor Drilling	Damaged while in drilling mode off Libya	0.7	Yes
	Kenting I	JU	Kenting Ltd.	Damaged by storm in tow across Atlantic	0.2	Yes
	Kenting I	JU	Kenting Ltd.	Hull damaged by saboteurs off Ivory Coast	0.3	Yes
	Rig 59	JU	Offshore Co.	Leg damaged off Nigeria	0.2	Yes
	Rig 59	JU	Offshore Co.	Capsized on site off Nigeria	4.0	No

YEAR	RIG NAME	TYPE*	OWNER	DAMAGE	DAMAGE LOSS (\$ MILLIONS)	UNIT RETURNED TO SERVICE
	Discoverer III	Ship	Offshore Co.	Blowout in South China Sea	0.6	Yes
	Discoverer II	Ship	Offshore Co.	Blowout off Malaysia	0.1	Yes
	Sonda I	Ship	Offshore Co.	Hull damaged in collision with freighter in Gulf of Lyons	0.1	Yes
	J. W. Nickle	JU	Reading & Bates	Damaged by storm in Arabian Gulf	2.5	No
	Stormdrill III	JU	Storm Drilling	Blowout and fire in Gulf of Mexico	3.5	Yes
	Transworld 61	Semi	Transworld Drilling	Legs damaged while relocating off South Africa	0.8	Yes
	Glomar North Sea	Ship	Global Marine	Equipment damaged by storm in North Sea	0.2	Yes
	Mercury	JU	Offshore Co.	Damaged by storm off Argentina	0.3	Yes
	Westdrill I	JU	Westburne International	Damaged in storm while under tow off Ivory Coast	0.5	Yes
1971	Big John	Drill Barge	Atwood Oceanics	Hull sank after blowout and fire off Brunei — 9 killed	4.3	Yes
	Endeavor	JU	Zapata Offshore	Leg damage while under tow off West Africa	1.7	Yes
	Wodeco II	Drill Barge	Fluor Drilling	Blowout and fire off Peru — 7 killed	4.5	No
	Panintoll II	JU	Amoco-Iran	Damaged by storm in Persian Gulf	2.8	Yes
1972	M.G. Huime	JU	Reading & Bates	Capsized after blowout in Java Sea	7.5	No
	Rig 60	JU	Transworld Drilling	Capsized after blowout off Burma	10.0	No
	J. Storm II	JU	Marine Drilling	Blowout in Gulf of Mexico	8.0	No
	Intrepid	JU	Zapata Offshore	Leg failure in Gulf of Mexico	1.5	Yes
	Ocean Tide	JU	Odeco	Damaged by high winds in North Sea	2.0	Yes
	Mr. Arthur	Sub	Fluor Drilling	Damaged in Gulf of Mexico	0.4	Yes
1973	Mariner I	Semi	Sante Fe Drilling	Blowout off Trinidad — 3 killed	0.1	Yes
	Topper III	JU	Zapata Offshore	Legs damaged while jacking up in Gulf of Mexico	6.0	Yes
	C.E. Thornton	JU	Reading & Bates	Damaged while under tow in Arabian Sea	4.0	Eventually salvaged
	Rowan Anchorage	JU	Rowan Drilling	Leg collapsed while jacking up off East Kalimantan	3.0	Yes
	Intrepid	JU	Zapata Offshore	Leg lost while under tow in Gulf of Mexico	6.0	Yes
1974	Transocean III	Semi	Transocean Drilling	Capsized and sank prior to drilling in the North Sea	16.0	No
	Gemini	JU	Offshore Co.	Leg damaged after punching through seafloor in Gulf of Suez — 18 killed	2.0	Yes
	Dresser VII	JU	Dresser Offshore	Capsized and sank while under tow in the Gulf of Mexico	1.4	No
	Meteorite	JU	Offshore Co.	Blowout off Nigeria	3.0	No
	Mr. Gus	JU	Fluor Drilling	Damaged while under tow in the Gulf of Mexico	3.0	Yes
	Gatto Salvatico	JU	Saipem	Leg penetrated seafloor off Madagascar	4.0	Eventually salvaged
	Penrod 60	JU	Penrod Drilling	Damaged by hurricane in the Gulf of Mexico	9.8	Yes
	Ranger II	JU	YPF-Argentina	Capsized while under tow in Caribbean Sea	7.0	No
1975	Topper III	JU	Zapata	Capsized following gas blowout in the Gulf of Mexico	15.0	No
	Mariner II	Semi	Sante Fe Drilling	Lost BOP stack during blowout in the Gulf of Mexico	0.3	Yes
	PMI II	JU	Progress Marine	Capsized while under tow in Gulf of Mexico — 1 killed	6.0	Yes
1976	Western Offshore III	JU	Western Offshore	Broke loose in Persian Gulf storm and struck W. D. Kent	0.1	Yes
	W. D. Kent	JU	Reading & Bates	Rammed Western Offshore III during Persian Gulf storm and sank — 1 killed	5.9	No

YEAR	RIG NAME	TYPE	OWNER	DAMAGE	DAMAGE LOSS (\$ MILLIONS)	UNIT RETURNED TO SERVICE
	Deep Sea Driller	Semi	Deep Sea Drilling	Damaged while under tow in the North Sea	35.0	Partially salvaged
	Deep Sea Sags	Semi	Deep Sea Drilling	Flash fire in the North Sea	0.2	*Yes
	Ocean Express	JU	Odeco	Sank in Gulf of Mexico storm while under tow — 13 killed	15.0	No
	Penrod 53	JU	Penrod Drilling	Broke up by storm in the Gulf of Mexico	9.4	Yes
	George F. Ferris	JU	Raymond International	Damaged during jacking operations in the Lower Cook Inlet	10.0	No
	Kaspill	JU	USSR	Capsized and sank on location in the Caspian Sea	8.0	No
	Canmar Explorer	Ship	Canadian Marine Drilling	Explosion in the Beaufort Sea	0.3	Yes
1977	Scan Sea	JU	Scan Drilling	Sank in storm off Taiwan while under tow	14.0	No
	Glomar IV	JU	Global Marine Drilling	Fire in engine room while under tow through Malacca Straits	0.8	Yes
	Interocean I	JU	Interocean S.A.	Hit rocks and sank while under tow off Japan	16.0	No
	Ball Dolphin	JU	Dolphin International	Capsized and sank off Indonesia while under tow — 1 killed	6.0	Yes
	Maersk Explorer	JU	Maersk Drilling	Blowout and fire in the North Sea	6.5	Yes
1978	Texas Star	JU	Chiles Offshore	Struck fixed platform while under tow in the Gulf of Mexico	0.2	Yes
	Orion	JU	Offshore Co.	Damaged while being dry-towed through the English Channel	0.2	Yes
	Scan Bay	JU	Scan Drilling	Blowout and fire in the Persian Gulf	2.5	Yes
1979	Sedco 135	Semi	Sedco Drilling	Blowout and fire in the Bay of Campeche	22.0	No
	Ranger I	JU	Atlantic-Pacific Marine	Leg failure in the Gulf of Mexico	4.8	Yes
	Salenergy II	JU	Salen Offshore	Blowout in the Gulf of Mexico	28.0	No
	Glomar Jackup I	JU	Global Marine	Damaged while under tow off California	1.0	Yes
	Milton G. Hulme	JU	Reading & Bates	Confiscated by Iran	60.0	Yes
	Bohai II	JU	People's Republic of China	Capsized by typhoon while under tow in Po Hai — 70 killed	20.0	No
	Mr. Neal	JU	Underwater Gas Developers	Fire in Lake Erie	2.0	Yes
	Pool Rig 142	JU	Pool Offshore	Leg damage in Arabian Gulf	1.2	Yes
1980	Sedco 135 C	Semi	Sedco Drilling	Blowout and fire off Nigeria	18.0	No
	Topper I	JU	Zapata	Capsized and sank while under tow in Gulf of Mexico	1.4	No
	Western Triton I	JU	Western Oceanic	Caught fire while under tow in Red Sea	5.5	Yes
	Western Triton III	JU	Western Oceanic	Lost leg support during rig positioning in Gulf of Mexico	1.2	Yes
	Western Triton II	JU	Western Oceanic	Lost leg support during rig positioning in Gulf of Mexico	4.8	Yes
	Alexander Kielland	Semi Accom.	Stavanger Drilling	One column buckled on location in North Sea — 123 killed	62.4	Delayed
	Discoverer 534	Ship	Offshore Co.	Escaping gas caught fire off Australia	Claims pending	Yes
	Sabine I	JU	Houston Offshore	Damaged in hurricane in Gulf of Mexico	6.0	Yes
	D-F Rig 81	JU	Dixilyn-Field Drilling	Damaged in hurricane in Gulf of Mexico	15.0	No
	Harvey H. Ward	JU	Reading & Bates	Damaged in hurricane in Gulf of Mexico	15.0	No
	Fjelldrill	JU	Olsen & Ugelstad	Damaged in hurricane in Gulf of Mexico	10.0	Yes
	Ocean King	JU	Odeco	Blowout and fire in Gulf of Mexico — 5 killed	25.0	Salvage underway
	Marlin 14	JU	Marlin Drilling	Blowout in the Gulf of Mexico	—	Yes

YEAR	RIG NAME	TYPE	OWNER	DAMAGE	DAMAGE LOSS (\$ MILLIONS)	UNIT RETURNED TO SERVICE
	Ron Tappmeyer	JU	Reading & Bates	Blowout in the Persian Gulf — 5 killed	1.1	Yes
	Marlin IV	JU	Marlin Drilling	Leg collapsed during rig positioning off Brazil	—	Salvage pending
	Bohai I	JU	People's Republic of China	Damaged in Gulf of Bohai	—	Yes
	Nanhai II	JU	People's Republic of China	Blowout off Hainan Island	—	Yes
	Okha	JU	USSR	Damaged by typhoon while under tow in Sea of Okhotsk	—	Will be salvaged
	Ocean Champion	JU	Odeco	Sank while under tow in Mediterranean Sea	—	Will be salvaged
	Dan Prince	JU	J.L. Offshore	Sank while under tow near Aleutian Islands	40.0	No
	Maersk Endurer	JU	Maersk Drilling	Blowout and fire in the Red Sea — 2 killed	10.0	Will be salvaged
	Ocean Traveller	Semi	Odeco	Fire in engine room in Gulf of Mexico	—	Will be salvaged
1981	Penrod 50	Sub	Penrod Drilling	Blowout and fire in Gulf of Mexico	—	No
	Fredericksburg	Ship	Atwood Oceanics	Lost BOP stack in Bay of Bengal	—	Yes
	Pelerin	Ship	Helmer Stabo and Co.	Lost BOP stack in Bay of Bengal	—	Yes

*Abbreviations -- JU - Jackup; Sub - Submersible; Semi - Semisubmersible; Ship - Drillship

3. 現行規則で再考を要すると考えられる要因

現行復原性規則は1章において述べられた通り、浮遊構造物としての復原性の基本、気象海象条件及び気象海象条件に伴う外力の設定を行っているが、なお2章に述べられたような復原性上の重大な事故が発生している。本章ではこの大きな乖離の原因になる可能性を包含していると考えられる要因について考慮してみることにする。考察は転覆のメカニズム、気象海象条件の設定、気象海象に伴う外力推定の精密化の各視点について行うが、転覆メカニズムについては、自己昇降式構造物の移動時の浮遊状態は基本的には一般船舶に対する考慮と変わらないのでこれを省略し、半潜水式構造物を対象とする。気象海象条件及び外力推定の精密化については、半潜水式、自己昇降式を通じて考察することとする。

3.1 転覆メカニズムに対する考慮

復原性の確保は、基本的には外力に対抗して沈没しない予備浮力の確保と、外力によって惹起される転覆モーメントに対抗できる復原モーメントの確保である。この2点について考察してみる。

3.1.1 予備浮力に対する考慮

一般に浮遊物体の復原性確保の基本は予備浮力の確保である。外力により浮遊の姿勢が変化した場合直ちに復原し得る予備浮力を保持しているか否かが問題になる。この場合姿勢の変化度合（小変化、大変化）によって挙動の様相が異なる。水線面積が比較的小さいことを特徴とする半潜水式プラットフォームにおいては他の浮遊構造物に比較して

- (1) 上下方向の外力に対して復原力が小さく、姿勢変化が大きい。したがって同一予備浮力を得るために沈下量が大きい。
- (2) その反面波浪に対する上下応答が小さいことが最大の特徴であり、予備浮力を必ずしも同等にとる必要はない。ただしことは波浪に対してである。
- (3) 他の荷重、特に静的荷重に関しては(1)の特徴は顕著にあらわれると考えられるので、これらを考慮した Air gap について検討する必要がある。
- (4) 大変化時の予備浮力については、上部構造物が考えられるが、構造上予備浮力として取扱うことが、またこの部分を予備浮力として取扱うことが設計上有利であるかの検討が必要である。

3.1.2 転覆モーメントに対する考慮

転覆モーメントに関連する要因を考察すると

- (1) 外力：転覆モーメントを惹起する外力は、
 - a) 波：波強制力、波漂流力
 - b) 潮流
 - c) 風

であるが、更に

- (2) 自由浮体と係留浮体の差；
両状態によって同一外力であっても転覆モーメントの発生が異なる。すなわち、自由浮体においてはa) 波のうち波漂流力及びb) 潮流については構造物が漂流するだけで、転覆モーメントは発生しないが、係留浮体では無視することができない。

(3) 関連要因

- (2)に関連して係留浮体の場合は係留点の位置が転覆モーメントの大きさに影響を及ぼす。

現行復原性規則は船舶などの自由浮体に対する考え方に基盤を置いたものであり、係留浮体の特徴を十分考慮され

ているとはいひ難い。

3.1.3 複合外力に対する考慮

係留浮体に対する復原性を考えた場合、自由浮体に対する場合より考慮しなければならない要因が多くなるとともに、周波数特性も大幅に異なるものがある。また姿勢の変化による応答も異なるし、係留系の非線型影響も強くあらわれる。したがって個々の要因についての解析結果を単純に重ね合せをしたのでは実態から離れた結果しか得られないだけでなく、各要因の解明も困難になることが予想される。したがって転覆過程を刻々再現するシミュレーション手法を開発して転覆機構を解明する必要があると考える。

参考文献

- (1) The Stability on Semi - Submersible Platform in Waves (On the Capsizing of Moored Semi - Submersible Platform)
TAKARADA N, OBOKATA J, INOUE R, NAKAJIMA T, KOBAYASHI K, Stability ' 82
- (2) Experimental Study of Stability Limits for Semi - Submersible Drilling Platforms.
NUMATA E, MICHEL W. H. OTC Paper 2032
- (3) Experimental Study of Stability Limits for Semi - Submersible Drilling Platforms, NUMATA E, McCLURE, A, C, OTC Paper 2285
- (4) Assessment of Stability Requirements for Semi - Submersible Units ; NUMATA E, MICHEL W. H. Trans, SNAME, Nov. 1976
- (5) Semi - Submersible Intact Stability - Static and Dynamic Assessment and Steady Tilt in Waves ; KUOS, LEE, C, WELYAY, MARTIN J, OTC Paper 2976

3.2 海象・気象条件設定に対する考慮

3.2.1 風

海洋構造物に対する設計風速を設定することは、その構造物の安全設計、構造設計を検討する上で重要なことである。風は鉛直方向に風速分布をもち、この風速分布を表わす方法として、対数法則と指数法則が用いられるが、実用面で広く使用されている指数法則を示すと

$$U_z = U_{10} \left(\frac{Z}{10} \right)^{\alpha}$$

(1)

ここで U_z : 高度 Z における風速

U_{10} : 基準高度 10 m における風速 (基準風速)

$\alpha = 1/10 \sim 1/7$

と書くことができる。ABS, NKなどの基準では階段状に変化した形で表わし、DNVでは

$$U_z = U_{10} \sqrt{0.93 + 0.07 Z}, \quad Z \leq 150 \text{m} \quad (2)$$

で与えられている。

各国船級協会規則で与えている鉛直方向風速分布と(1)式の指數法則で計算した結果との比較を図 3.2.1 に示す。この結果から各国船級協会規則では $\alpha = 1/14$ 程度となっていることがわかる。

設計風速を設定する場合、設計風速 U_D は

$$U_D = \nu_1 \cdot \nu_2 U_{10} \quad (3)$$

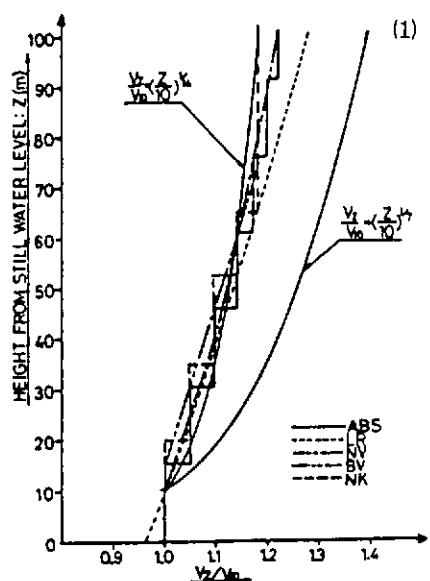


図 3.2.1 風速の鉛直分布²⁾

によって定められる。基本風速 U_{10} は最大風速の再現期待値とその分散を考慮して決定される。再現期間 T は

$$T = \frac{1}{1 - Q^{1/N}} \quad (4)$$

で与えられる。ここに Q は非超過確率で年最大風速があるとえられた最大風速 U_N を越えない確率であり、 N は構造物の耐用年数である。再現期間が決まると確率紙を用いる方法などによって風速期待値を求める。再現期間は、地域特性と耐用年数の重要度によって決まってくる。

また、 ν_1 、 ν_2 は高度と鉛直長による補正係数で次のように与えられている。

$$\nu_1 = \left(\frac{Z}{10} \right)^{1/7} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} \nu_2 &= 1.50, H \leq 30 \text{ m} \\ \nu_2 &= 1.68 - 0.006H, 30 \text{ m} < H \leq 60 \text{ m} \end{aligned} \quad \} \quad (6)$$

H : 構造物の海面上の鉛直長 (m)

以上のように設計風速は定められるが、実際には稼働区域が氷海を除いた全世界指向型の構造物が多くなってきており、風に対するデータも少ないとことなどから、各国船級協会で設定している復原性計算の基準となる稼働時、非常時のそれぞれの設計風速の最小値を使っているのが現状である。特殊な条件下で稼働するものに対しては、最小値よりさらに高い風速が設定される場合もある。

これらの設計風速に対して、構造物を構成する各要素の形状によって決定される抗力係数に設計風速の2乗と風の方向の投影面積を乗じ、各要素に働く風圧力を求め、風圧の中心が各要素の投影面積の面積中心にあるという考え方に基づいて、水面下の抵抗中心からの鉛直レバーを乗じることによって風圧モーメントが計算されている。しかし、この計算方法は実情に合わないという考え方が一般的であり、風洞実験、さらに合理的な風圧モーメントの推定法が強く望まれており、種々検討が行なわれている。設計風速の最小値についても、1970年代は非常時に對して風速 60 m/s (120ノット) を採用して、セミサブの復原性の強化が意図されたが、現在は 51.5 m/s (100ノット) まで下げられており、風圧モーメントの推定法の検討と同様風のデータ観測を重ねることにより、さらに実際的な設計風速の設定が望まれる。

風は常に変動しており、風の息や乱れがある。風の息による構造物の動揺への影響は、デッキ下面に Air gap をもつセミサブの上部構造物にあたる風の作用によって生ずる揚力による影響と同様無視出来ない。風速の時間的変動については、平均風速に対する瞬間風速の比がガストファクターとして用いられているのが一般的である（通常、ガストファクターは $1.2 \sim 1.5$ ）が風速は定常過程の時系列であるため、ガストファクターだけでの表現は不十分である。

変動風のスペクトルとしては風の観測から求めた Davenport によるものと日野が修正した式とがある。

$$f \cdot S_u(f) = 2K U_{10}^2 \frac{X^2}{(1+X^2)^{4/3}}, \quad X = 1,200 f / U_{10} \quad (7)$$

(Davenport の式)

$$\begin{aligned} S_u(f) &= 1.428 \frac{K U_{10}^2}{\beta} \left[1 + \left(\frac{f}{\beta} \right)^2 \right]^{-5/6}, \\ \beta &= 1.169 \times 10^{-3} \frac{U_{10} \alpha}{\sqrt{K}} \left(\frac{Z}{10} \right)^{2m\alpha-1} \end{aligned} \quad (8)$$

(日野の式)

ここに、 K は摩擦係数で、水上では $K = 0.003$ とされている。 Z は水面上高さ、 f は周波数、 m は大気安定度に関する修正係数で強風に対しては $m = 2$ である。(7), (8)式で示した変動風のパワースペクトルを図 3.2.2 に示す。

これらの変動風のパワースペクトルを用いれば風速変動の最大期待値を求めることができる。

構造物の動揺に対する変動風の影響は変動風の周期50秒前後の風の息が強いエネルギーをもっており、その周期が横揺の固有周期、あるいは係留されたときの左右揺固有周期に近いため、同調現象の起る可能性があるため問題となっている。図3.2.3は変動風中の実機の横揺れの計測例である。

これらの変動風による構造物の動揺への影響を検討するためには、変動風中の風洞試験を実施し、風荷重に対する風速変動の影響を調査する必要がある。また、構造物は波浪によって常に動揺しており、変動風速による風荷重と同様構造物の動揺による風荷重への影響も復原性を検討する上で重要となると考えられる。

以上の検討の結果に基づいて変動風の取扱いを含めた設計風の設定の考え方を明らかにする必要がある。

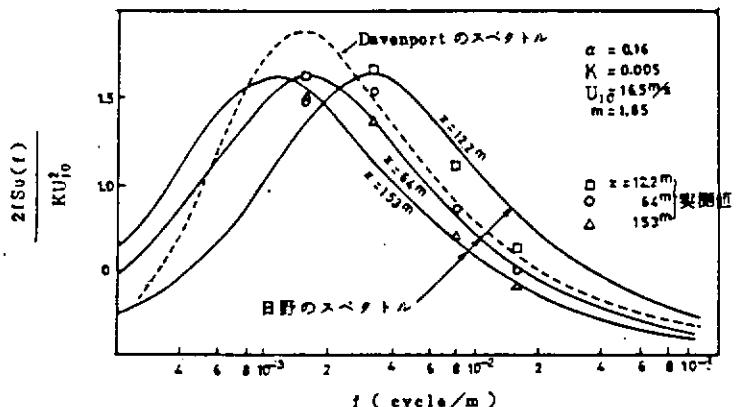


図3.2.2 変動風のスペクトル¹⁾

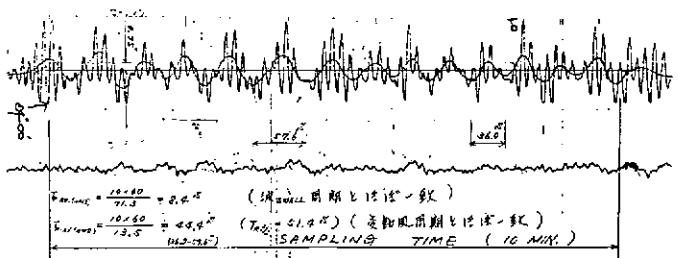


図3.2.3

参考文献

- (1) 高橋他；海洋構造物の設計と海象，海洋工学特集，日本造船学会誌No 609 1980
- (2) 日笠他；ルール上の海象および設計外力 “ ” ” ” ”
- (3) 海洋開発技術ハンドブック，朝倉書店
- (4) 海洋土木事典 産業調査会 近刊予定
- (5) 為廣；“半潜水式海洋掘削装置の建造及び操業実績から見た計画設計上の問題”
- (6) 海洋構造物設計指針（案）解説，土木学会 昭和48年8月
- (7) J. R. Paulling； A Comparison of Stability Characteristics of Ships and Offshore Structures, Stability '82, 1982

3.2.2 波

各国船級協会をはじめとする諸機関で、規定されている浮遊式構造物の現行の復原性規準は、1章に述べられている通り、構造物の復原エネルギーが定常風による転倒エネルギーに対してある一定の余裕があれば良いということになっている。

波および潮流に対する特別の検討を要求する規定はなく、これらの復原性へ及ぼす影響は、他の要因による影響とともに、上記の余裕の中に含まれていると考えられている。^[11]

風圧力下の復原性検討規準以外に、「同等の安全性が確保できれば、他の規準、例えば風洞試験および水槽試験に基づいて設定された規準を考慮する。」と記述されているが、具体的なその設定法に関する記述はない。

動揺性能・エアギャップを検討することを規定しているが、これは構造強度上の安全性に重点を置いたものであ

る。

一方、浮体（特に係留浮体）の復原性の検討に際しては、波・潮流による影響を無視できないことが、既に発表^{(2), (4)}されている。

以下に今後波条件について研究を要すると思われる項目について考察する。

(1) 波・潮流を考慮した浮体（特に係留浮体）の復原性の検討・評価方法およびこれに対応した波条件の設定法

現行の規則には係留の影響について無視する（D_nV），原則として考慮しないが、復原性に悪影響を与える場合には考慮する（NK, ABS, UKDEn）等の記述がある。

宝田等は文献(4)で浮体が係留されていることに起因する係留力、潮流力および波漂流力を考慮した復原性の検討の必要性を述べている。更に打ち込み海水が復原性に及ぼす影響について述べており、復原性の観点からエアギャップに関する再考が必要と思われる。また同文献には、必ずしもサーバイバル時の波条件が復原性にとって厳しいとは限らないことが述べられている。

一方、現行規則の波条件に関する規定は、構造強度に重点を置いたサーバイバル状態に対応するものであり、設計に際しては検討項目（復原性、エアギャップ、係留、強度等）および操船モード（稼働時、サーバイバル時、移動時）に応じた適切な波条件を設定することが必要である。

また文献(5)に、波条件に対する考え方方が解説されているが、復原性検討時の適切な波の取り扱い法、即ち設計波による手法、またはスペクトラム手法等について、再現期間、最盛期波浪の継続時間、波浪統計、波スペクトル等を考慮して検討する必要がある。

(2) 十分な長期波浪統計を利用できないときの設計波条件の設定法

海洋構造物は稼働海域が局地であることが多い、従って稼働海域の十分な長期波浪統計が得られないことが多い。一般には、波条件は他の条件とともに、所有者から指定されるケースが多いが、設計者としても条件が設定された背景を認識しておく必要がある。

現行規則ではD_nVに、N年の波高の推定法および北海・ノルウェー海域の100年波高が示されている。UKDEnには北海・イギリス周辺海域の50年波高・周期が示されている。

また稼働海域の十分な長期波浪統計を得られない状態で設計波条件を検討した例に浮体工法による海上空港建設に対する技術検討がある。⁽⁷⁾

(3) 風・潮流との組合せの考え方

波、風、潮流を同時に考えて復原性を検討するときの方向／大きさを考慮に入れた組合せについて検討を要する。

(4) 波の特性に関する考察

構造物の転覆現象のように、波の繰り返し作用が関係する現象は、不規則な波群の中でも波高の大きな波の継続波数に影響される。この累積効果が重要な問題の検討には、設計波として大波高を選ぶだけではなく、波高あるいは周期の連なりに関する統計的性質をあわせて考慮しておく必要がある。^{(8), (9)}

設計波高が波の観測データに基づき、確率論的方法によって推定されているのに対し、周期はその分布の特性が明らかにされていないため、推定手法として確定したものはまだない。

現行の周期の取り扱いには、不確定性・任意性が残っていて、波高の推定手法との間の整合性、一貫性にあいまいさがあることが従来から指摘されている。^{(10), (11)}

周期の定量的な取り扱い手法の確立が必要と考える。

3.2.3 潮 流

諸機関の復原性に関する現行規則は3.2.2で述べた通り、潮流に対する特別の検討を要求していない。

しかし潮流についても3.2.2(1), (2), (3)で述べたことと同様の観点からの検討が必要と考えられる。

現行規則の強度検討時の外力としての規定は、所有者の指定した値または構造物の設置点における実測によるという一般的な記述になっている。

D_nV は潮流に関し、Wind generated current および Tidal current を考慮することを規定し、十分な統計を使用できないときの Wind generated current の推定式を示している。また Tidal current については Unrestricted service に対しては最小 0.5 m/s を規定し、更に北海域のデータを示している（表 3.2.1）。

UKDEn は北海・イギリス周辺海域の Surface tidal current のデータを示している（図 3.2.4）。

参 考 文 献

- (1) E. Numata 他 Assesments for Stability Requirements for Semisubmersible Units, SNAME Vol. 84, 1976
- (2) C. Kuo 他 Semisubmersible Intact Stability-Static and Dynamic Assessment and Steady Tilt in Waves, OTC 2976, 1977
- (3) U. K. Department of Energy Offshore Installations : Guidance on Design and Construction
- (4) N. Takarada 他 The Stability on Semi-submersible Platform in Waves, The Second International Conference on Stability of Ships and Ocean Vehicles, 1982
- (5) 高橋 雄他 海洋構造物の設計と海象, 日本造船学会誌 № 609, 1980
- (6) Det Norske Veritas Rules for Classification of Mobile Offshore Units, 1981
- (7) 宝田直之助 超大型海洋構造物のテクノロジアセメントの一例（その 2）, 日本造船学会誌 № 639, 1981
- (8) Y. Goda ON WAVE GROUPS, Proceedings Conf. on Behaviour of Offshore Structures (BOSS), Trondheim, 1976, Vol. I
- (9) H. Rye 他 Wave grouping studies by means of correlation techniques, Norwegian Maritime Research, № 4, 1981
- (10) M. K. Ochi Wave Statistics for the Design of Ships and Ocean structures, SNAME Vol. 86, 1978
- (11) 合田良実 環境条件 — 波浪統計と波スペクトル — 第 5 回夏期講座「新しい造船学」テキスト, 1979

表 3.2.1 DnV Current

303 In open areas, the wind-generated current at the still water surface may, if statistical data are not available, be taken as follows:

$$(V_h)_{wind} = 0.01 V_{10}$$

where ;

V_{10} = sustained wind speed at 10 m above
still water level

304 The tidal current velocity to be used in conjunction with a 100-year wave height of 30 metres (unrestricted service), is not to be taken less than 0.5 m/sec. Some particular data for tidal current are given in Appendix I A 200, Table A.3.

Table A.3
100 year Tidal Current Velocity.
North Sea and Norwegian Shelf.

Latitude	Longitude	$V_{h tide}$ m/sec
North of 60° N	(Norwegian Shelf)	0.5
55° N - 60° N	East of 0°	0.5
	West of 0°	1.0
54° N - 55° N	East of 2° E	1.0
	West of 2° E	1.5
52° N - 54° N	Coast to coast	1.5

Figure 2.7

Part II Section 2

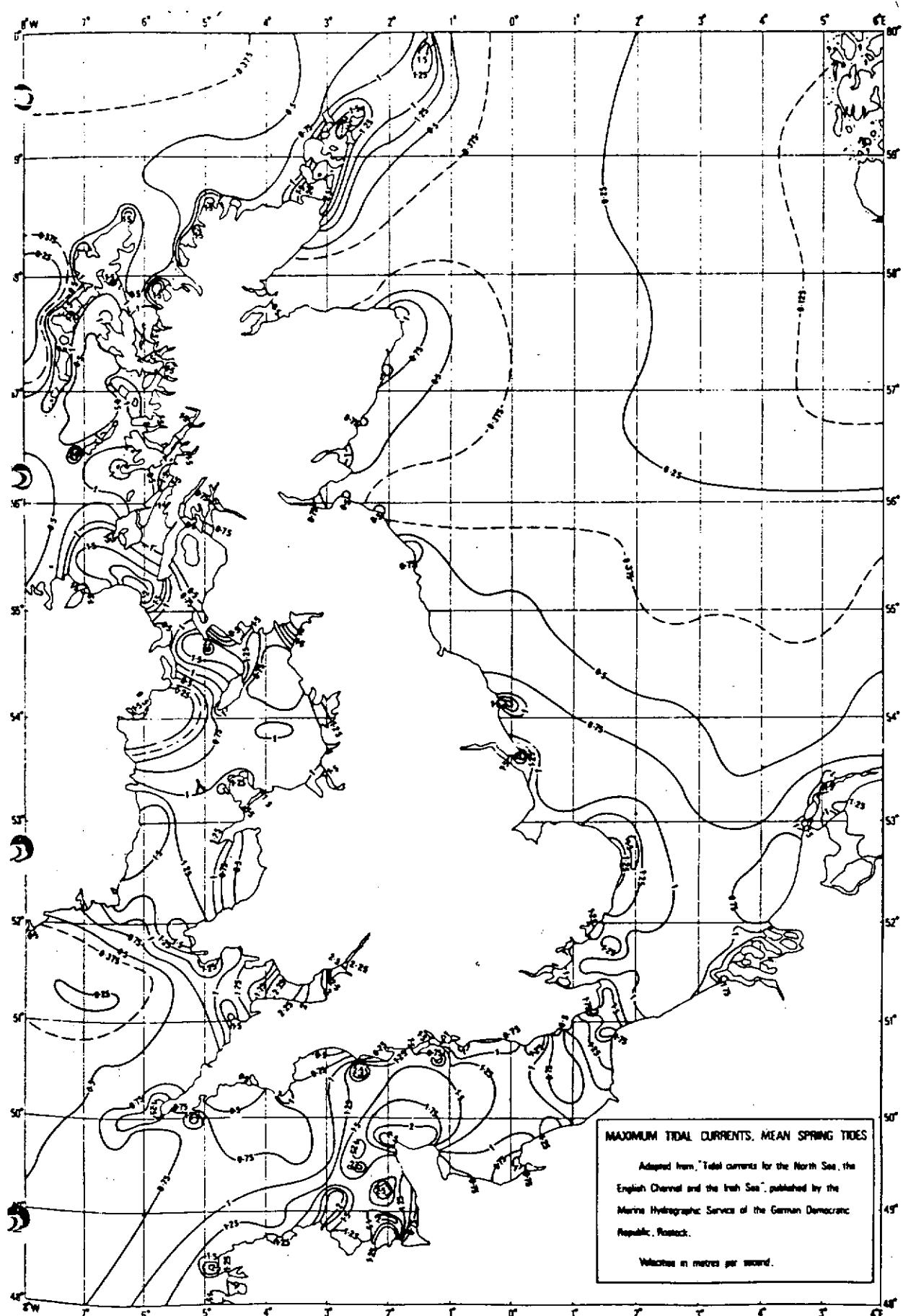


図 3.2.4 UKDEN Current

3.3 海象・気象に対する外力の考慮

3.3.1 風による力

(1) 風荷重

構造物に作用する風荷重は次式で与えられている。¹⁾

$$F = \frac{1}{2} \rho U^2 C_D A \quad (\text{kg}) \quad (1)$$

ここで、 ρ : 空気の密度 ($\text{kg} \cdot \text{s}^2 / \text{m}^4$)

U : 風速 (m/s)

C_D : 抗力係数

A : 投影面積 (m^2)

ρ は標準値として $0.125 \text{ kg} \cdot \text{s}^2 / \text{m}^4$ が用いられている。実際の海洋構造物では、複雑な構造物で構成されることが多く、これらの基本断面や骨組構造の空気力を空力干渉効果や遮蔽効果を含めて合成しなければならない。また、NK, ABSなどでは風速の鉛直分布の補正を考慮して式(1)の代わりに風荷重を、

$$F = \frac{1}{2} \rho U^2 C_s C_h A \quad (\text{kg}) \quad (2)$$

のように表示しており、抗力係数に相当する C_s を形状係数、高さ補正数 C_h を高度係数と呼び、表 3.3.1, 3.3.2 のように与えている。^{2), 3), 4), 5)}

表 3.3.1 形状係数 (NK)

構造部分	C_s
球殻構造	0.4
円筒形構造	0.5
主船殻	1.0
甲板室	1.0
独立した構造部材(クレーン、彩鋼、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

各船級協会の風荷重推定法は構造物を構成する各要素に作用する風荷重を式(2)を使って求めて加算する考え方にもとづいている。しかし、これらには各種部材の縮尺影響、また部材および構造物の相互干渉や遮蔽効果に対する検討が十分ではない。一部、 $D_n V$ ⁵⁾ では遮蔽効果が考慮されている(注記に詳細を記す)。Numata, Norton^{7), 13)} などはABSの計算値は実験値よりも50%以上も大きい値をあたえると指摘しており、実験研究による風荷重推定法の精度向上が必要と考えられる。

表 3.3.2 高度係数 (NK)

垂直高さ (m)	C_h
15.3未満	1.00
15.3以上 30.5未満	1.10
30.5以上 46.0未満	1.20
46.0以上 61.0未満	1.30
61.0以上 76.0未満	1.37
76.0以上 91.5未満	1.43
91.5以上 106.5未満	1.48
106.5以上 122.0未満	1.52
122.0以上 137.0未満	1.56
137.0以上 152.5未満	1.60
152.5以上 167.5未満	1.63
167.5以上 183.0未満	1.67
183.0以上 198.0未満	1.70
198.0以上 213.5未満	1.72
213.5以上 228.5未満	1.75
228.5以上 244.0未満	1.77
244.0以上 259.0未満	1.79
259.0以上	1.80

(2) 抗力係数

単一部材の抗力係数 C_D を表 3.3.3 に示す。⁸⁾ 抗力係数 C_D は大なり、小なりレイノルズ数 Re (= $U \cdot D / \nu$, D : 代表長さ, ν : 空気の動粘性係数) の影響を受け。円柱では図 3.3.1 に示すように、レイノルズ数によって変化している。一方、はく離点が固定している角ばった部材では Re 数の影響は小さい。図 3.3.1 には後述するストローハル数 S_N の変化もあわせて示してある。なお、物体の表面に突起のあるような場合は抗力係数の値が増加する(粗度影響)。

長さが有限で端部が自由な柱状体に対しては、流れがそこからまわり込んで 3 次元緩和効果があるので、3 次元抗力係数は 2 次元値に対して、表 3.3.4 に示すような修正係数を乗じて求められる。修正係数は柱状体のアスペクト比 λ (L/D , L : 柱状体の長さ) によって変わる。もし両端自由の場合は柱状体の長さを、一端自由の場合は柱状態の長さの 2 倍をとる。しかし、長さが有限でも部材の両端が構造物に連結している場合は修正しなくてよい。

複数の部材が近接して配置されている場合は、部材間に空力干渉や遮蔽効果があり、抗力係数の値が変わる。2 本円柱の相互干渉による抗力変化は図 3.3.2⁹⁾ に示すとおりで、流れ方向に並んで

表 3.3.3 単一部材の抗力係数の標準値

風 向	断面形	C_D	風 向	断面形	C_D
→	平板	2.0	→	ウェブが風向に直角なT形断面	1.8
→ └	一辺を地に接した平板	1.2	→ —	フランジを風下にしたT形断面	1.5
→	ウェブが風向に直角なI形断面	2.0	→ ▨	風向に平行にかけられた正方形断面	2.0 (1.2)
→ ↗	風向に45°に傾斜したI形断面	1.6	→ ◆	風向に45°傾斜した正方形断面	1.5 (1.5)
→ —	フランジが風向に直角なI形断面	1.8	→ ▨	長刃が風向に平行な長方形断面	1.4 (1.6)
→ √	風向に45°傾斜した山形断面	1.1	→ ▨	短刃が風向に平行な長方形断面	2.2 (1.6)
→ └	一辺を風下に立てた山形断面	1.8	→ ▲	頂点を風上にした正三角形断面	1.2 (1.1)
→ >	頂点を風下に立てた山形断面	1.7	→ ▲	頂点を風下にした正三角形断面	2.0 (1.3)
→ <	頂点を風上にした山形断面	1.5	→ ●	円形断面	1.2 (0.7)
→ —	下フランジを風上にしたT形断面	2.0	→ ○	12角形断面	1.5 (1.0)

(注) [] は1辺の1/4の径をもって切取った場合, () は限界レイノルズ数以上, における数値

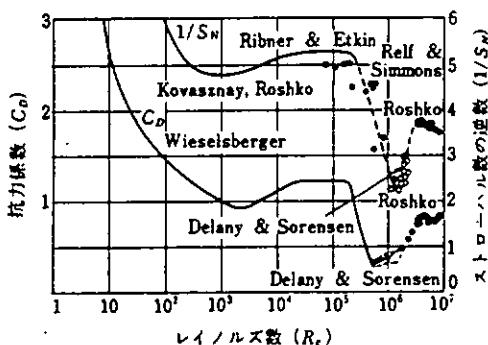


図 3.3.1 円柱の C_D と S_N

いる場合には (純間隔/直徑) > 4 , 流れに直角方向に並んでいる場合には (純間隔/直徑) > 3 程度になると両者の相互影響を無視してさしつかえないと思われる。多数の円柱が並ぶ場合や他の断面の部材については, 今後さらに研究が必要である。

多数の部材が組合せられた骨組構造の場合, 空力的干渉効果はさらに複雑となり, 部材に作用する空気力の単純な組合せではない。

図 3.3.3 に平面トラスの抗力係数を充実率 ϕ (トラスの投影面積と外郭面積との比) に対して示している。⁸⁾

立体トラスになると, 遮蔽効果すなわち, 風向方向幅に影響されるパラメータ μ (風向方向幅と風向直角方向トラス幅との比) が加わり, 問題はさらに複雑となる。図 3.3.4 に角ばった立体トラスの抗力係数を示した。

表 3.3.4 三次元緩和係数

アスペクト比	修正係数
4 以下	0.6
4~8	0.7
8~40	0.8
40 以上	1.0

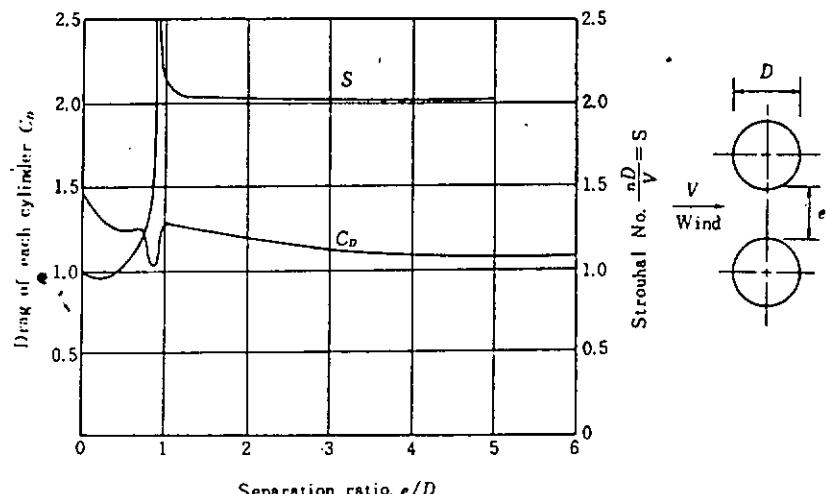


図 3.3.2 2本円柱の相互干渉(a)

(3) 転倒モーメント

海洋構造物では風荷重による転倒モーメントも後述の動的安定性に関連して重要である。転倒モーメント M は次のように表わされる。

$$M = F \cdot \ell \quad (\text{kg} \cdot \text{m}) \quad (3)$$

ここで、 F : 風荷重 (kg)

ℓ : モーメントのレバー(m)

ℓ は水面上の風圧中心から水面下の抵抗中心までの鉛直距離である。海洋

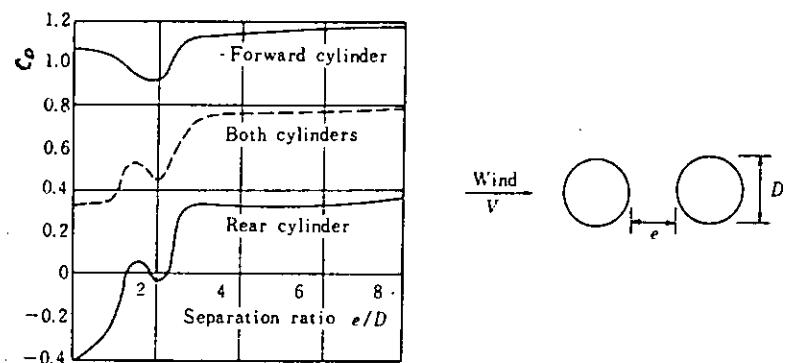


図 3.3.2 2 本円柱の相互干渉 (b)

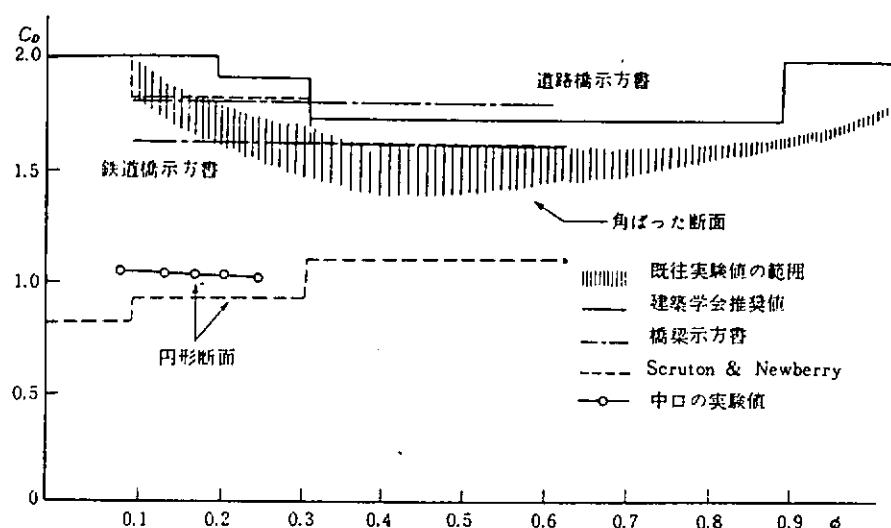


図 3.3.3 平面トラスの抗力係数

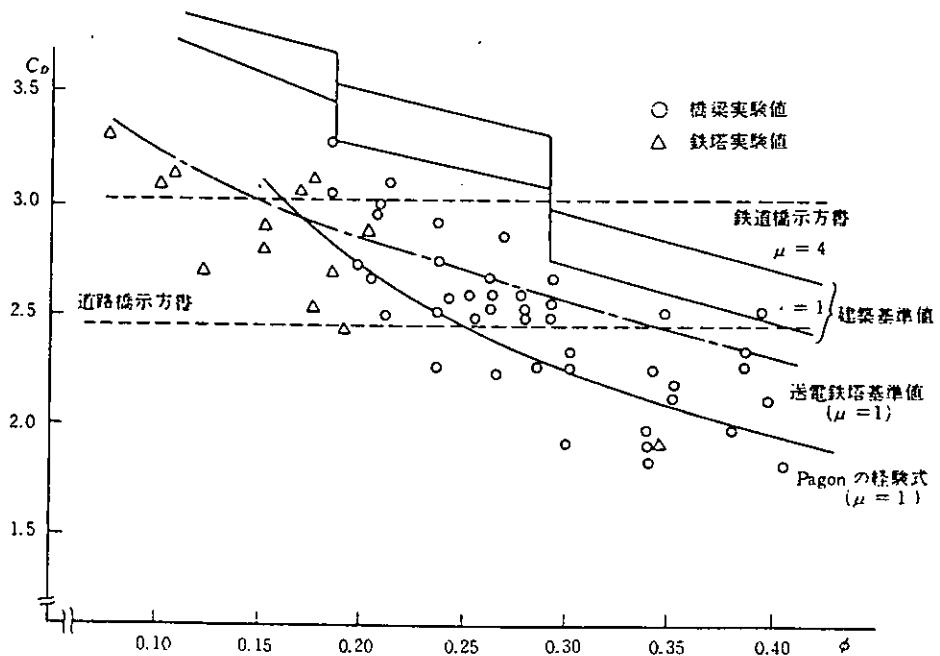


図 3.3.4 四面立体トラス構造の抗力係数

構造物の場合一般船舶に比べて、水面上の高さが比較的大きく、かつ形状が複雑なこともある、風圧中心は投影面積の中心で近似するのではなく、それぞれの部材のモーメントレバーの計算が必要である。

現行規則の風圧転倒モーメントの推定法は風荷重のみより求める方法であり、揚力により発生するモーメント

(10), (11)
が考慮されていない。例えば、Bjerregaard 等は風圧転倒モーメントにおよぼす揚力の効果が非常に大きく重要であると言及している。海洋構造物にはたらく揚力の発生機構の解明、すなわち Air gap, 海面粗度およびプラットフォーム上面の形状の影響などを風洞実験で調べることが強く望まれる。

(4) 風による振動

流れが物体に当ると物体の後流は乱されて渦が発生する。後流渦の発生振動数 f (Hz) を表わすパラメータであるストローハル数 S_N ($= f \cdot D / U$) は抗力係数と同様に、断面形状によって定まつてくる。この渦振動数と部材の固有振動数が一致したときに振動現象が発生する。これが渦励振であり、同調しないように考慮する必要がある。渦による起振力は流れに直角な方向に作用するのが大きいが、それを定量的に規定することは困難であり、風洞実験による確認が必要である。

円柱に対するストローハル数は図 3.3.1 に示したように、レイノルズ数に依存するが、通常、対象となる部材寸法や風速の範囲では $0.2 \sim 0.3$ 程度である。円形以外の断面では $0.11 \sim 0.17$ 程度の値をとる。部材断面のストローハル数 S_N を表 3.3.

5 に示す。

比較的細長い、剛性が低く、構造減衰が小さい構造物などでは、いったん構造物が振動すると振動によって生ずる空気力がさらに振動を増幅する、いわゆる自励振動が問題となることもある。海洋構造物ではその恐れは少ないと考えられるがこれを確認するためには風洞試験などによらなければならない。

(5) 変動風に対する応答

変動風に対する動的な構造解析のプロセスは図 3.3.5 で示される。⁸⁾

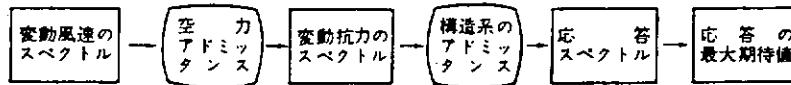


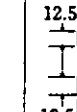
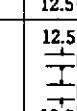
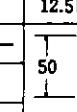
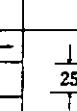
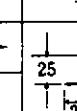
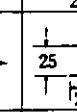
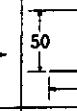
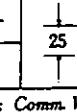
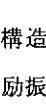
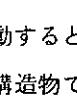
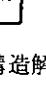
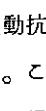
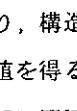
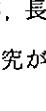
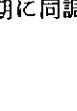
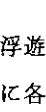
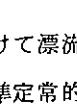
図 3.3.5 変動風に対する動的構造解析プロセス

ここで、空力アドミッタは変動風速を変動抗力に変換するための伝達関数であり、構造系のアドミッタは不規則振動論でいう周波数応答関数である。このような動的解析から設計上の数値を得るには、まだ種々の問題があり、実際には簡単ではないと考えるが、長周期変動風が海洋構造物の動揺周期に同調した場合の安全性を考えると非常に重要な問題であり、実験的研究が必要であると思われる。

(6) 動的安定性

風の作用を受ける構造物の挙動にはこの他に、浮遊状態にある海洋構造物が風波を受けて漂流や動揺する問題がある。構造物の波浪中応答の推定は風荷重の中に各傾斜角における転倒モーメントを準定的に取り入れて検

表 3.3.5 各部材断面のストローハル数 S_N

風向	断面寸法 (mm)	S_N	風向	断面寸法 (mm)	S_N
→		0.120	↓		0.147
		0.137			
→		0.120	↓		0.150
					0.145
↓		0.144	↑		0.142
		0.145			0.147
↓		0.140	→		0.131
		0.153			0.134
↑		0.145	↓		0.137
		0.168			0.121
↓		0.145	→		0.143
		0.156			0.135
↓		0.145	→		0.160
					0.114
↓		0.200	↑		0.145
					

出典: Trans. Am. Soc. Civil Engrs. Task Comm. Wind Forces, 1961.

討する方法も考えられる。しかし、動搖時の海洋構造物に定常風が作用したときの変動空気力（風工学の分野ではこれを非定常空気力と称する）は変動風による動的空気力と同様、構造物の動搖に影響を与える原因となることが考えられる。したがって、この非定常空気力に対する研究も風洞実験によって実施する必要がある。

注記 部材間の遮蔽効果 ($D_n V^5$)⁵⁾

風向にそって2部材が配置されており、その部材間心距 ℓ が風上側の部材の幅 d_1 の7倍より小さいとき、風下側の部材の暴露面積 A_2 を次式で求めることにより、遮蔽効果を考慮することができる。

$$(A_2)_{\text{exposed}} = u \cdot A_2$$

$$u = 1 - \frac{d_1}{d_2} \left(1 - \frac{\ell}{7 d_1} \right) \quad \text{for } d_1 < d_2$$

$$u = \frac{\ell}{7 d_1} \quad \text{for } d_1 \geq d_2$$

$$u = 1 \quad \text{for } \ell \geq 7 d_1$$

ここで、 d_2 は風下側部材の幅である。

参 考 文 献

- (1) 通商産業省、運輸省：海洋開発技術ハンドブック、朝倉書店、pp.301～310 (1975)
- (2) 日本海事協会 (N K) : 鋼鉄規則第45編 — 海底資源掘削船 (案) (1982)
- (3) American Bureau of Shipping : Rules for Building and Classing Offshore Mobile Units (1980)
- (4) Lloyd's Register of Shipping : Rules for the construction and classification of mobile offshore units (1972)
- (5) Det Norske Veritas : Rules For The Construction And Classification Of Mobile Offshore Units (1981)
- (6) Numata, E. Michel, W. H. : Assessment of Stability Requirements for Semisubmersible Units, SNAME (1976)
- (7) Norton, S. F. Wolf, C. V. : Mobile Offshore Platform Wind Loads, OTC 4123 (1971)
- (8) 土木学会：海洋鋼構造物設計指針 (案) 解説 pp. 9～28 (1973)
- (9) Hoerner, S. F. : Fluid-dynamic Drag (1958)
- (10) Bjerregaard, T. D. : Wind Overturning Effect on Semi-Submersible, OTC 3063 (1978)
- (11) Bjerregaard, T. D., Sorensen, E. G. : Wind Overturning Effects Obtained from Wind Tunnel Tests with various Semisubmersible Models, OTC 4124 (1981)
- (12) 土木学会：土木技術者のための振動便覧 pp. 183～216 (1971)
- (13) Boonstra, H., Leynse, C. : Wind-Tunnel Tests on a Model of a Semisubmersible Platform and Comparison of the Results with Full-Scale Data OTC 4245 (1982)

3.3.2 波 力

海洋構造物の波浪中の流体力および挙動については、比較的多くの研究がなされており、藤井他^{1), 2)} および小寺山³⁾ は技術の現状を取りまとめている。これ等の文献を参考にして下記の調査を行なった。まず、セミサブリグに関しては復原性能の検討に重要である“波漂流力”と“大波高時の波力と流体力”について、次にジャッキアップに関しては“脚に働く波力と流体力”について着目した。

調査した文献リストを表 3.3.6 に示し、各調査項目別に概要を次に述べる。

(1) 波漂流力

水平面内の波漂流力については係留系を設計する立場から多くの研究が行われており、S R 187 の報告書はこれ等を詳しく紹介している。⁴⁾

特に、セミサブリグについて行われた波漂流力の実験例を朝長他、Pinkster、などが示している。^{5) 6)}

一方、波漂流力は流体力の2次のオーダーの力であり、これには水平方向成分の他に上下方向の成分も存在する。この揚力がセミサブリグの復原性にとり重要な外力となることを指摘したのは Numata 他である。Numata は傾斜したセミサブリグには規則波中において定常な Tilt が生ずることを観察し、この現象がロワーハルに働く上下方向の2次の力による Tilt モーメントによって説明できることを示した。さらに、Ogilvie⁷⁾ の理論計算（2 次元没水円柱）および Goodman⁸⁾（細長回転体）の理論計算を応用して一般のロワーハルの形状に適用できる定常 Tilt モーメントの計算式を示した。

Numata の式はロワーハル単体が波浪中で固定された状態の計算式であるが、動搖を許した状態の理論式は Lee 他、Martin^{10) 11)} によって与えられた。

また、Pinkster⁶⁾ は没水円柱に働く上下方向の2次の流体力を斜波中の場合も含めて計算し、実験値と良く一致することを示している。

以上は規則波中の漂流力に関する研究例である。不規則波中においては、波漂流力は長周期の変動成分を有し、係留浮体の固有周期と同調して、大きな長周期運動を誘起することは良く知られている。長周期変動漂流力の重要性を始めて指摘したのは Hsu 他であるが、彼はまた、この力は不規則波を一波一波の規則波のつながりとみなして、規則波中の波漂流力が波高の変化に対応して変わるとすればよいとした。Pinkster^{12) 13)} はこの考え方により変動漂流力のスペクトル表示式を与えた。新井は Pinkster のスペクトルを使用しあつ浮体運動の減衰力を正しく導入すれば、係留浮体の運動応答スペクトルを推定できることを示した。

セミサブリグの長周期運動、特に長周期の Tilt モーメントによる Roll の長周期運動に着目したものとして宝田他、日根野他の研究がある。日根野他は Pinkster の式により Roll の変動 Tilt モーメントのスペクトルを計算すれば、Roll の長周期運動を説明できることを示した。但し、この場合に必要な規則波中の定常 Tilt モーメントは Numata の式による計算値と実験値とが一致しなかったので実験値の方を用いている。¹⁵⁾

セミサブリグに働く定常 Tilt モーメントには Martin 他¹¹⁾ および宝田他¹⁵⁾ が指摘するように上下方向の揚力の寄与だけでなく、水平方向の波漂流力の寄与も考えられる。今後は、定常 Tilt モーメントの計算法とその定量的な精度について十分に調査する必要があろう。

(2) 大波高時の波力と流体力

Survival condition のような大波高下では水粒子の運動および構造物の運動が小さいという仮定が成立しなくなり、運動方程式が非線形となる。

片山他はこのような非線形性を考慮したセミサブリグの規則波中における定常応答計算手法を述べている。¹⁷⁾

一方、不規則波中では通常の線形重ね合せ理論によるスペクトル解析法が適用できなくなり、非線形な運動方程式を時系列的に解く必要が生ずる。構造物の運動を時間領域で取り扱う場合、付加質量、減衰係数などの流体力は時間の関数として取扱うべきであるが、通常は流体力係数を固定する方法で取扱われている。しかし、セミサブリグの長周期運動は同調現象であるため、系の減衰力を正確に知る必要がある。時間領域での流体力については高木他、池淵等により研究がなされており、今後はこの両方法の差異を調べる必要があろう。^{18) 19)}

現在、セミサブリグの流体力の計算には、通常 Hoof²⁰⁾ が用いたように、セミサブリグを構成する各構造要素の流体力を個々に求め、総和して全体流体力を求める手法が使われている。しかし大変位動搖している場合、相互干渉を無視したこの方法には問題がある。

また、セミサブリグの復原性の検討には、風あるいは損傷を受けて定傾斜した状態での波力流体力を知る必要があるが、この分野に関する研究は少く、わずかに Huang 他²¹⁾ の研究があるのみである。

セミサブリグの大波高下あるいは定傾斜状態の挙動については文献も少く、現象の非線形性が強いため未知な点が多い。今後は、セミサブリグの大振幅強制動搖試験等により、流体力を把握し、波浪中における大変位動搖時並びに定傾斜時の動搖推定法の検討を行なう必要があろう。

(3) 脚に働く波力と流体力

ジャッキアップリグの脚はラック付円柱か、あるいは円柱部材で構成されたトラス構造物である場合が多い。トラス構造物の脚はそれぞれの部材が相互干渉し合う配置にある。これ等の脚を構成する部材の径は波高に比べて小さいため、波力における粘性影響が極めて大きく、脚の波力を理論計算で求めることは現状では困難である。従って、通常は Morison の公式による質量力および抗力によりレグに働く波力を計算している。

さて、円柱に働く波力については多くの研究がなされている。それ等は波浪中の水平没水円柱、鉛直円柱、傾斜円柱及び複数本の円柱の干渉問題等である。波浪中の水平没水円柱に関するものとしては文献^{22)~26)}があり、鉛直円柱に関するものとしては文献^{27), 28)}がある。^{29)~32)}また、傾斜円柱に関しては文献³³⁾がある。

一方、円柱間の波力の相互干渉の問題については脚の波力のように K_c 数が大きな領域での波力の干渉効果に着目したものに文献^{33)~35)}の研究がある。永井他は二本の鉛直円柱を波に対して縦横に配置し円柱間の距離を変えて各円柱に働く抗力、質量力を求めた。これより、円柱間の相互干渉はその芯間距離が円柱の直径の 4 倍以上になれば無視できるという結論を得ている。以上は規則波中の波力に関する研究例である。不規則波中におかれた円柱に加わる波力の研究については岩坦他および植木他によって行なわれている。この他、円柱の波力における表面粗度の影響についても最近、加藤他、元良他により研究が実施されている。^{36), 37), 38), 39)}

以上示したように円柱に加わる波力については多くの研究が行われているが、ラック付円柱の波力については公開された資料は殆どなく、トラス構造のレグについてもわずかに小寺山他の研究があるだけである。⁴⁰⁾レグに働く波力の計算において、従来は、船級協会が規定する質量力係数および抗力係数を用いて Morison 公式で計算しているが、その値は部材単独について与えられたものであり、かつ船級協会によって異っている。(例えば、円柱の抗力係数について DnV では $C_D = 0.7$ を与え、ABS では $C_D = 0.5$ と規定している) また、ラック付円柱の場合、ラック位置に対する流れの向きによって剥離点の位置が変わり抗力係数が異なることが考えられるが、これについても明確にはされていない。従って、今後はラックの影響および相互干渉影響を中心に研究を進める必要がある。

また、尺度影響、表面粗度影響についても調査する必要があろう。

3.3.3 潮流力

潮流力に関する文献の一覧表を表 3.3.7 に示す。調査結果を“セミサブリグに働く潮流力”“脚に働く潮流力”および“流れと波浪が共存する場での流体力”に分けてその概要を以下に述べる。

(1) セミサブリグに働く潮流力

船級協会のルールでは潮流力を定常外力とみなし、セミサブリグの構造要素に働く抗力を総和して構造物全体の潮流力を計算するよう規定している。この場合、実際には上流側の構造要素の作る伴流中に下流側の構造要素が入ることによる遮蔽効果あるいはロワーハルに働く揚力等を考慮する必要がある。DnV は 3.3.1(1) に述べたようにセミサブの各構造要素に適当な遮蔽効果係数を与えるが、揚力に対する規定はない。この問題について、松本他は潮流力の横力成分にはロワーハルに働く揚力を考慮しなければならないこと、またロワーハル間の遮蔽効果も流入角によって変わることを示した。さらに、揚力および流入角による遮蔽効果の違いを考慮したセミサブリグに働く潮流力の予測法を示している。¹⁾

コラム間の遮蔽効果に関する研究としては有田他および永井他^{2), 3), 4), 5)}の一連の研究がある。有田他は端部を有する 2 行 3 列合計 6 本の円柱群の模型を水槽内で縦横斜めに曳航し、各円柱の抗力係数を臨界レイノルズ数以上の範囲まで求めたものであり、セミサブリグのコラムの抗力係数の推定にとって参考になろう。また宝田は⁶⁾

多列円柱群の抗力係数に関する詳細な検討結果を報告している。

一方、係留されたセミサブリグの復原性の検討に関連して潮流力による転倒モーメントも重要であるがこれについて⁷⁾宝田他⁸⁾、Egon他の研究がある。宝田他の研究は係留されたセミサブ模型の潮流力によるモーメントを実際に計測したものであるが、Egon他の研究は風によりDriftするセミサブリグの水面下の流体反力と着力点を風洞試験により求めたものである。セミサブリグが傾斜した場合についても実験しており参考になると思われる。

円柱相互間の遮蔽効果に関する研究は比較的多く行なわれているが、セミサブリグの潮流力に関する研究は少く、今後はロワーハル間およびコラム間の遮蔽効果並びにロワーハルに働く揚力を明らかにする研究を行なう必要がある。

(2) 脚に働く潮流力

円柱の潮流力に関する研究は多いが、レグについて行われたものは殆どない。円柱の潮流力についてはレグに働く波力の節で紹介した文献の多くに定常流中の抗力係数が示されているのでそちらを参照されたい。

(3) 流れと波浪が共存する場での流体力

実際の海洋構造物は潮流による外力を単独で受けるよりも流れと波浪による力を同時に受けることが多い。この場合、流体力を抗力と質量力の和と考えると、抗力項に波と流れと水粒子速度の相乗効果の項が現われ、単純に波の力と流れの力を加えたものよりも大きな力を生じると考えられる。船級協会のルールでも部材に働く抗力の計算に用いる水粒子速度には波の水粒子速度と潮流による速度をベクトル和したものを用いることを規定している。この場合、抗力係数および質量力係数としていかなる値を用いるべきかが問題となる。

堀川他^{9), 10)}は進行波中を一定速度で曳航される直立円柱に働く流体力の計算法をMorisonの公式に準じた方法で誘導し、実験と比較した。これより、流れと波が在る場合の流体力を見積るために考え方としてMorisonの公式に水粒子速度のベクトル和を採用し、抗力係数としては流れのみによる値、質量力係数としては波のみによる値をとれば十分であるとの結論を得た。小寺山他¹¹⁾は堀川他の実験よりもK_c数が大きな範囲で同様な実験を行っている。

一方、規則波中において抗力は水粒子速度の2乗に比例する力であるため、1周期当たりの時間平均を取ると定常成分があらわれ、この力は構造物に漂流力として作用することになる。Pijfers他¹²⁾は波と流れの速度を考慮したMorison式でセミサブの構造要素に加わる波力を表わし、このうちの抗力の寄与による定常外力から潮流力を差し引いて流れの影響を含んだ漂流力の計算を行った。

さらに、この抗力による漂流力は流れの速度および方向の影響を大きく受け相互干渉の影響が強いことを示した。

この他、不規則波中で流れが在る場合のMorison式にもとづく波力について検討したものにBurrows他¹³⁾及びVinge¹⁴⁾他の研究がある。

以上の研究は、流れと波が共存する場合では、単に個々の外力を総和するだけでは不十分であることを示している。今後は、流れと波がある場合の部材間の相互干渉等の問題も含めて研究する必要がある。

表 3.3.6 波力に関する文献

内容分類

- (1) 一般
- (2) 波漂流力
- (3) 大波高時の波力と流体力
- (4) レグに働く波力と流体力

番号	文 獻	著 者	出 典	内 容				備 考
				(1)	(2)	(3)	(4)	
1	海洋構造物の運動推定法(1)	藤井 齊他	日本造船学会誌, 第622号 1981	○				
2	我が国における海洋工学性能分野研究の現状(II)	藤井 齊他	日本造船学会誌, 第623号 1981	○				
3	我が国における海洋工学性能分野研究の現状(III) 4. 柱状体に働く流体力と波力について	小寺山 優	日本造船学会誌, 第625号 1981	○				
4	SR 187 海洋構造物の深海係留に関する調査研究報告書 第5章		SR 187 海洋構造物の深海係留に関する調査研究報告書, 1982	○				
5	浮遊式海洋構造物に作用する波漂流力の計測	朝長 義英他	西部造船会々報, 第59号 1981	○				
6	Mean and Low Frequency Wave Forces on Semi-Submersible	J. A. Pinkster	OTC 3951, 1981	○				模型; 2-ロワーハル, 8-コラム型セミサブ
7	Assessment of Stability Requirements for Semi-Submersible Units	Numata, E et al.	SNAME, 1976	○				模型; 2-ロワーハル, 6-コラム型セミサブ
8	First - and Second - Order Forces on a Cylinder Submerged Under a Free - Surface	Ogilvie, T. F.	Journal of Fluid Mechanics, Vol 16, 1963	○				模型; 2-ロワーハル, 4-フーティング型セミサブ

番号	文 獻	著 者	出 典	内 容			備 考
				(1)	(2)	(3)	
9	Forces on a Hovering Slender Body of Revolution Submerged Under Waves of Moderate Wavelength	Goodman, T. R.	Development in Mechanics Rergamon Press, 1965	○			
10	Vertical Mean Force and Moment of Submerged Bodies Under Waves	Lec, C.M. and Newman, J. N.	JSR, Vol. 15, No. 3 1971	○			
11	Calculations for the Steady Tilt of Semisubmersibles in Regular Waves	Martin, J. and Kuo, C.	RINA, 1978	○			
12	Analysis of Peak Mooring Force Caused by Slow Vessel Drift Oscillation in Random Seas	Hsu, F. H. and Blenkarn, K. A.	OTC 1159 1970	○			
13	Low Frequency Phenomena Associated with Vessels Moored at Sea	Pinkster, J. A.	Soc. of Petroleum Engineers of AZSE, 1974	○			
14	不規則波中の係留浮体の運動に関する研究	新井 信一他	日本造船学会論文集第140号 1976	○			
15	The Stability on Semi - submersible Platform in Waves (On the Capsizing of Moored Semi - submersible)	N. Takarada et al.	The Second Int. Conf. on Stability of Ships and Ocean Vehicles, 1982	○			模型；2 - ロワーハル, 8 - コラム型セミサブ
16	The Effect of Low Frequency Roll Motion on Under - deck Clearance of a Semi - Submersible Platform	M. Hineno et al.	同 上	○			模型；2 - ロワーハル, 8 - コラム型セミサブ

番号	文 獻	著 者	出 典	内 容				備 考
				(1)	(2)	(3)	(4)	
17	半潜水式海洋構造物の波浪中構造応答解析	片山 正敏他	三笠重工技報 Vol. 15, No. 1, 1978		○			
18	非周期的造波問題の周波数領域での取り扱い(第1報) －二次的物体に対するメモリー影響関数－	高木 又男他	関西造船協会誌第182号, 1981		○			
19	Hydrodynamic Forces on a Body Moving Arbitrary in Time on a Free Surface	Ikebuchi, T.	J. Kansai Soc. N. A. Japan, No. 181, 1981		○			
20	A Mathematical Method of Determining Hydrodyna- mically Induced Forces on a Semi-submersible	Hooft, J. P.	SNAME, 1971		○			
21	Loads and Motions Measured on a Semi - submer- sible having a Large Permanent List Angle	X. Huang et al.	Norwegian Maritime Research No. 2, 1982		○			模型; 2一口ワーハル, 8コラム型 セミサブ
22	Force on Cylinders and Plates in an Oscillating Fluid	Keulegan, G. H. Carpenter, L. H.	Journal of the National Bur- eaу of Standards, No. 2857 1958		○			
23	Force on Cylinder and Spheres in a Sinusoidally Oscillating Fluid	Sarpkaya, T.	ASME, Vol. 42, No. 1 1975		○			
24	水平浸水円柱に加わる波力について	小寺山 売他	日本造船学会論文集第143号 1978		○			
25	斜波中の水平浸水円柱及び深水波中の鉛直円柱に加わる 波力について	小寺山 売他	応用力学研究所所報第50号, 1979		○			

番号	文 献	著 者	出 典	内 容				備 考
				(1)	(2)	(3)	(4)	
26	水平円柱に作用する全波力について	土屋 義人他	第21回海岸工学講演会論文集 1974				○	
27	Wave forces on a Vertical Circuler Cylinder (Experiments and Proposed of Waves Force Computation)	Goda, Y	Report of Port and Harbour Technical Research Institute No. 8, 1964				○	
28	直円柱に作用する全波力について	土屋 義人他	土木工学論文報告集第227号 1974				○	
29	Wave Forces on a Randomly Oriented Tube	S. K. Chakrabarti et al.	OTC 2190 1975				○	
30	Total Forces on A Submerged Randomly Oriented Tube due to Waves	S. K. Chakrabarti et al.	OTC 2495 1976				○	
31	Wave Forces on Inclined Smooth and Rough Circular Cylinder	Sarpkaya, T.	OTC 4227 1982				○	
32	傾斜円柱に作用する波力について	重村 利幸他	第25回海岸工学講演会論文集 1978				○	
33	波浪中における円柱の相互干渉	永井莊七郎他	第24回海岸工学講演会論文集 1977				○	
34	複数円柱構造物の波力の干涉効果について	榎木 亨他	第25回海岸工学講演会論文集 1978				○	

番号	文 献	著 者	出 典	内 容				備 考
				(1)	(2)	(3)	(4)	
35	パイオニアに作用する波力の特性	吉田 常松他	第6回海洋工学シンポジウム テキスト, 1982			○		
36	円柱に作用する不規則波力について	岩垣 雄一他	第20回海岸工学講演会論文集 1973			○		
37	円柱に作用する不規則波力の特性 - 債性項の支配的となる場合について -	榎木 亨他	同 上			○		
38	付着生物の基礎調査と直立円柱に加わる波力への影響について	加藤 直三 テキスト, 1982	第6回海洋工学シンポジウム テキスト, 1982			○		
39	円柱部材の流体力に及ぼす生物付着影響	元良 誠三他	同 上			○		
40	甲板昇降式海洋掘削台の脚に加わる流体力について	小寺山 宣他	西部造船会々報, 第62号, 1981			○		

表3.3.7 潮流力に関する文献 内容分類

(1) セミサブに働く潮流力
(2) レグに働く潮流力
(3) 流れと波浪が共存する場での流体力

番号	文 献	著 者	出 典	内 容				備 考
				(1)	(2)	(3)		
1	セミサブ型石油掘削リグ "BINGO 4000M" の運動性能	松木 繁洋他	日本鋼管技報 No.95, 1982	○				

番号	文 獻	著 者	出 典	内 容			備 考
				(1)	(2)	(3)	
2	Study on the Force of Tidal Current Acting on Multi - Turbular - Column Structure	Yukio Arita et al.	OTC 1815 1973	○ ○			
3	円柱構造物に働く潮流力に関する基礎的研究(第2報)	永井莊七郎他	第22回海岸工学講演会論文集, 1975	○ ○			
4	同 上 (第3報)	永井莊七郎他	第23回海岸工学講演会論文集, 1976	○ ○			
5	同 上 (第4報)	永井莊七郎他	第24回海岸工学講演会論文集, 1977	○ ○			
6	超大型海洋構造物のテクノロジ・アセスメントの一例(その3)	室田直之助	日本造船学会誌, 第640号, 1982	○ ○			
7	The Stability on Semi - submersible Platform in Waves (On the Capsizing of Moored Semi - submersible)	N . Takarada et al.	The Second Int. Conf. on Stability of Ships and Ocean Vehicles 1982				模型; 2 - ロワーハル, 8 - コラム型セミサブ
8	Forces and Moments on Under Water Bodies Obtained from Wind Tunnel Test	Egon T. D. et al.	OTC 4438 1982	○			
9	波と流れが共存する場における流体力について(1)	堀川 清司他	第23回海岸工学講演会論文集, 1976	○			
10	波と流れが共存する場における流体力について(2)	堀川 清司他	第24回海岸工学講演会論文集, 1977	○			

番号	文 獻	著 者	出 典	内 容			備 考
				(1)	(2)	(3)	
11	波浪中を前進する鉛直円柱に加わる流体力についての実験的研究	小寺山 亘他	日本造船学会論文集第151号, 1982		○		
12	Calculation Drift Forces of Two Semi-Submersible Platform Types in Regular and Irregular Waves	J. G. L. Pijfers et al.	OTC 2977 1977		○		
13	The Influence of Wave - Current Interaction on Induced Fluid Loading	R. Burrows et al.	Int. Symposium on Hydrodynamic in Ocean Eng. 1981		○		
14	Statistical Distribution of Hydrodynamic Forces on Objects in Current and Waves	T. Vinge et al.	Norwegian Maritime Research, No. 2, 1980		○		

4. 海洋構造物の転覆機構解明及び設計外力推定精密化のための研究計画

4.1 研究の方向

海洋構造物の転覆機構の解明と設計外力推定の精密化とは密接に関連する研究課題を提供しており、表4.1のようにまとめることができる。

すなわち、研究課題は、対象とする海洋構造物の形式即ちセミサブリグとジャッキアップリグによって共通の部分と独自の部分とがあるが、一般的に次の5つのカテゴリーに分けることができる。

(1) 現象及び技術の現状の調査

これには、海洋構造物の事故例の調査・分析、現行の規準の問題点の抽出などがあり既に前節までに検討が行われている。

(2) 海洋構造物に働く外力や動搖の基礎的研究

これは、海洋工学における研究課題と共通のものであるが、特に転覆機構解明に関して、大傾斜した構造物に作用する外力と動搖特性、変動風荷重、波漂流力及び傾斜モーメント、水圧の着力点等がある。また、設計外力推定の精密化に関しては、構造物の構成部材の形状と波力、潮流力、風圧力の関連、外力の粘性影響や部材間の相互干渉、大変動時の流体力等が考えられる。

(3) 転覆現象のシミュレーション

これは、海洋工学における現有の理論的知識によりセミサブリグの動搖を、各種条件のもとでシミュレーションするもので、転覆に及ぼす主要な因子を探求したり、次項の模型実験と比較したりするために行われる。

(4) 総合的な水槽実験

これは、波、潮流、風等の外力を与え、各種の係留条件や船体条件についてセミサブリグの動搖を水槽実験で観測するもので、転覆をもたらす外力や船体の条件を明らかにして、転覆機構に対する認識を明確にすると共に、新しい要因があれば、それを見出し、次の研究への足がかりとするために行われる。

(5) 特殊な条件下における実験

これは、船体が損傷を受けた場合、甲板上に海水が打ち上げ浸水した場合、係留ラインが一部切断した場合等の異常事故発生時の現象を観察するために行われる。

これら(1)～(5)の研究を計画的に遂行することにより、新しい問題である海洋構造物の転覆現象を解明することができ、転覆海難の防止や、セミサブリグに対する復原性基準の改善に役立つことが期待できる。また、設計外力の推定精度を向上させることにより海洋構造物の合理的設計の基礎が固まる。これらの研究成果は海洋構造物の構造強度に関する基準にも役立つ。

さらにこれらの研究結果の実機への適用性を確認するため、模型と実機との間の流体力に関する縮尺影響や実海域の環境条件設定の精度を調査するため、実海域でのプロトタイプ又は実機による外力及び挙動の計測実験が必要である。

上記の研究課題を網羅して本研究部会における研究計画を次節に示すように立案した。

4.2 実験計画及び供試船型の選定

4.2.1 実験計画の概要

海洋構造物の設計の適正化、安全性の向上に資するため、セミサブ型リグの風浪中の転覆機構の解明及び、同型及びジャッキアップ型リグの部材及び全体構造に働く外力の推定精密化のための研究を実施する。

表 4.1 海洋構造物の転覆機構解明及び設計外力推定精密化のための研究課題

			1	2	3	4	5
			現象及び技術の現状調査	外力や動搖の基礎的研究	転覆現象のシミュレーション	総合的な水槽実験	特殊な条件下での水槽実験
セミサブリグ	転覆機構の解明に関するもの	研究 内 容		事故例の調査、規準値の検討など	傾斜時の動搖特性、外力の干渉効果など	転覆の要因の影響調査	転覆現象の観測
		運航状態	オペレーションサーバイバル	○ ○	○ ○	○ ○	○ ○
		外 波	波 強 制 力 波 漂 流 力		規則波 不規則波 T. W. W.	規則波 不規則波 T. W. W.	大波高規則波、 不規則波、 T. W. W.
		潮 流			漂 流 力	○	(模擬外力)
		力 風	定 常 風 変 動 風 波との干渉		傾斜船体風圧力 変動風圧力 波との干渉効果		(模擬外力)
		船体条件		傾 斜 重 心 (G M) 海 水 打 込 係 留 点	大傾斜時 重心の変化 エアギャップ 傾留ライン特性	重心の変化 係留ライン特性	船体損傷時 海水打上時 係留ライン切断時
		設 計 外 力 の 推 定 精 度 向 上 に 関 す る も の	波 力	部 材 形 状 粘 性 效 果 干 渉 效 果	要素及び全体の波力 振動流中		
			潮 流 力	部 材 形 状 粘 性 效 果 干 渉 效 果	○ ○ ○		
			風 力	部 材 形 状 粘 性 效 果 干 渉 效 果 上部構造抗力 “ 揚 力 ”	○ ○ ○ ○ ○		
			組合せ外力		大変位時流体力		

(1) 転覆機構の解明に関する研究

セミサブ型リグ模型により、複合外力下の転覆実験、大傾斜時の動搖実験並びに転覆に関する総合実験を実施し、波浪、風、潮流を受けた場合の係留及び無係留状態における転覆現象を観測すると共に、理論的に転覆過程をシミュレーションする方法を研究し、転覆機構を明らかにすると同時に各種の因子の影響を調べ、転覆防止の方法を考究する。

(a) 複合外力下の転覆模型実験

係留されたセミサブ型リグに波、風、潮流の各外力が複合して作用した状態の擬似水槽試験を実施し、模型

を転覆あるいは沈没させ、その時の模型の状態および外力状況が実際にあり得るかどうかを逆に検討し、転覆等の可能性を調査し、さらに係留されたセミサブの海難防止策を考究する。

(b) 大傾斜時の動搖実験

風圧により大傾斜したセミサブ型リグについて波浪中動搖実験を実施し、大波浪中の動的復原性に関する基礎資料を得る。またDeckと波面の相対運動特性も調べ、必要なAir gapの量を明かにする。

(c) 転覆現象のシミュレーションの研究

波強制力、風抗力、潮流力及び係留力に関する現有の理論的知識によって、セミサブ型リグの運動方程式を作り、コンピューターによるシミュレーション計算を行い、転覆に影響する条件（海象、気象、損傷、海水打込み）を種々に設定して、転覆の過程をグラフィック・ディスプレイにより示し、転覆の要因を広範に調べる。

(d) 転覆現象の総合評価水槽実験

風、波、潮流の組合せ外力下における総合水槽実験を行い、転覆のシミュレーション結果と対照して、転覆要因を明確にする。

(2) 風圧転覆モーメントに関する研究

セミサブ型リグの復原性に最も影響する外力である風圧による転覆モーメントの発生機構を詳細に解明するため、リグの水面上構造物模型を用いて、船体傾斜時の風圧力、船体動搖時の風圧力変動、変動風による風圧力変動及び構造物上の風圧力分布を風洞試験により測定する。

(a) 傾斜時の風圧力に関する風洞試験

風圧力に関する基礎的データを得るために、定常風下において、風向、風速、船の姿勢（傾斜及び吃水）の変化に対する静的風荷重を計測する。

(b) 動搖時の風圧変動に関する風洞試験

波浪中で動搖している海洋構造物の単純化模型に作用する非定常空気力の測定風洞試験を実施する。

(c) 変動風による風圧力変動に関する風洞試験

変動風（長周期変動風）を風洞に発生させ、海洋構造物模型に作用する風圧力変動を計測する。

(d) 風圧力分布に関する風洞試験

セミサブ型リグの分割模型の風洞試験を行い、海洋構造物を構成する各部分ごと、これらを組み合わせた状態での揚力、抗力、転倒モーメントを測定する。（コラム、デッキ、上載構造物に分割する）。

(3) 設計外力の推定精密化に関する研究

ジャッキアップ型リグの部材、レグに働く風圧力、潮流力、波力並びにセミサブ型リグの部材・甲板に働く風圧力の推定精度を向上させるため、部材模型の水槽実験を実施する。

(a) ジャッキアップ型リグのレグに働く風圧力及び潮流力

ラック付メインコード単独、レグとプレースの組合せたもの及びレグとデリックを配列したものについて風洞実験を行い、定常流（風及び潮流）中の流体力及び相互干渉影響を調べる。水槽実験によっても同様の実験を行う。

(b) セミサブ型リグに働く流体力の水槽実験

セミサブ型リグ模型の大変位強制動搖水槽実験を行い、流体力に対する形状影響、干渉効果等を調べ、理論計算結果と比較し、大変位動搖時における流体力の推定法を検討する。

(c) セミサブ型リグに働く外力の推定精密化の研究

セミサブ型リグの単純化した全体模型を使用した水面上構造物に加わる風荷重の測定実験並びにコラムやフレーティング、ロワーハルなどの要素模型による一様流（風及び潮流中）中における遮蔽効果実験を行う。次いで、波力に対する遮蔽効果を調べるため振動流中の要素模型実験を行う。

(d) 大波高時及び組合せ外力中の要素部材に働く外力の研究

セミサブ型リグの要素部材に働く外力を、大波高時の水槽実験により調べる。また、風潮流、波の併存時に
おける要素部材に働く外力を、水槽実験により調べる。

(4) 実機試験の計画立案と調査

実機（プロトタイプ構造物）の実海域における外力及び挙動の計測実験を実施するために必要な調査研究を下記のように行う。

- (i) 実機試験用構造物の検討及び試設計
- (ii) 実機試験方案の立案
- (iii) 実機試験適地の調査
- (iv) 実機試験海域の自然条件の調査及び海象条件・外力の推定

以上の(1)～(4)の研究は、57年度の調査研究を基礎として、58年度より3ヶ年計画として実施する。

4.2.2 実験に用いる標準模型の設計

(1) Two Lower Hull, 8 Column型

極力現実的なリグとなるよう下記に注意して形状を決めた。

- (i) 大きさは現存の各種デザインの中間的なものとしてサーバイバル時の排水量30,000トンクラスをねらった。
- (ii) 幅高さ比等のプロポーションは実際のリグの平均的な値となるように設定した。
- (iii) 又、現行規則（A B S）適用時の復原性も、サーバイバル状態としてインタクト、ダメージそれぞれ一般に Critical と思われるケースにつき概略検討した。その際、外力条件は、A B Sのインタクト、ダメージそれぞれに対する要求最低値である風速100及び50ノットを使った。

以下に主要目を示す。

全 長	115 m
全 幅	75 m
高 さ (Main deckまで)	38 m
ローワーハル	115 m (長) × 15 m (幅) × 8 m (高さ)
コ ラ ム	4～10 m Ø, 4～8 m Ø
コラム間距	72 m (長) × 60 m (幅)
排 水 量 (サーバイバル状態)	33,120 MT
吃 水 (")	20 m
エヤーギャップ (")	16.5 m
波 高 (")	100 フィート

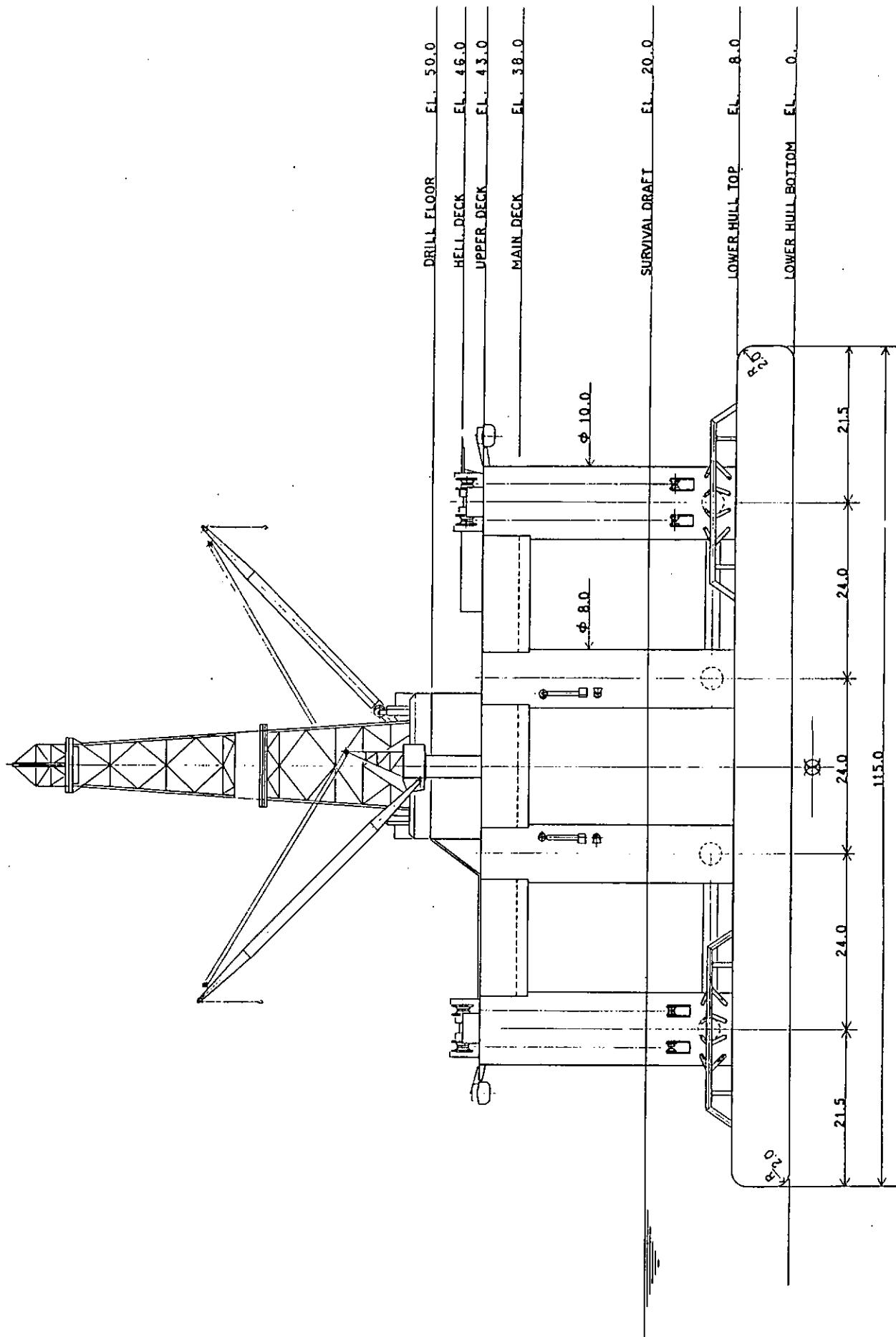


図 4.2.1 側面図 (Starboard Elevation)

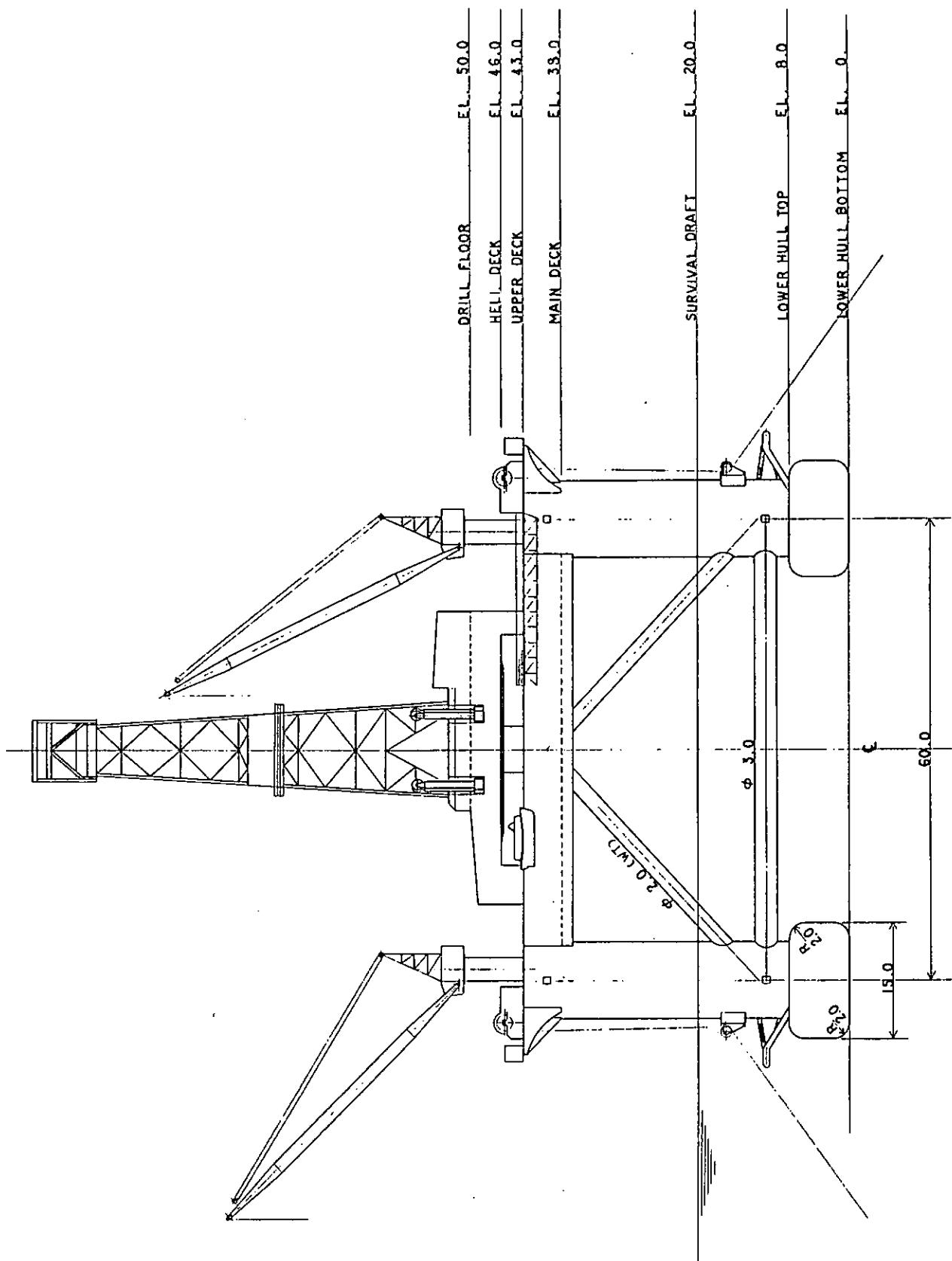


图 4.2.2 正面图 (Forward Elevation)

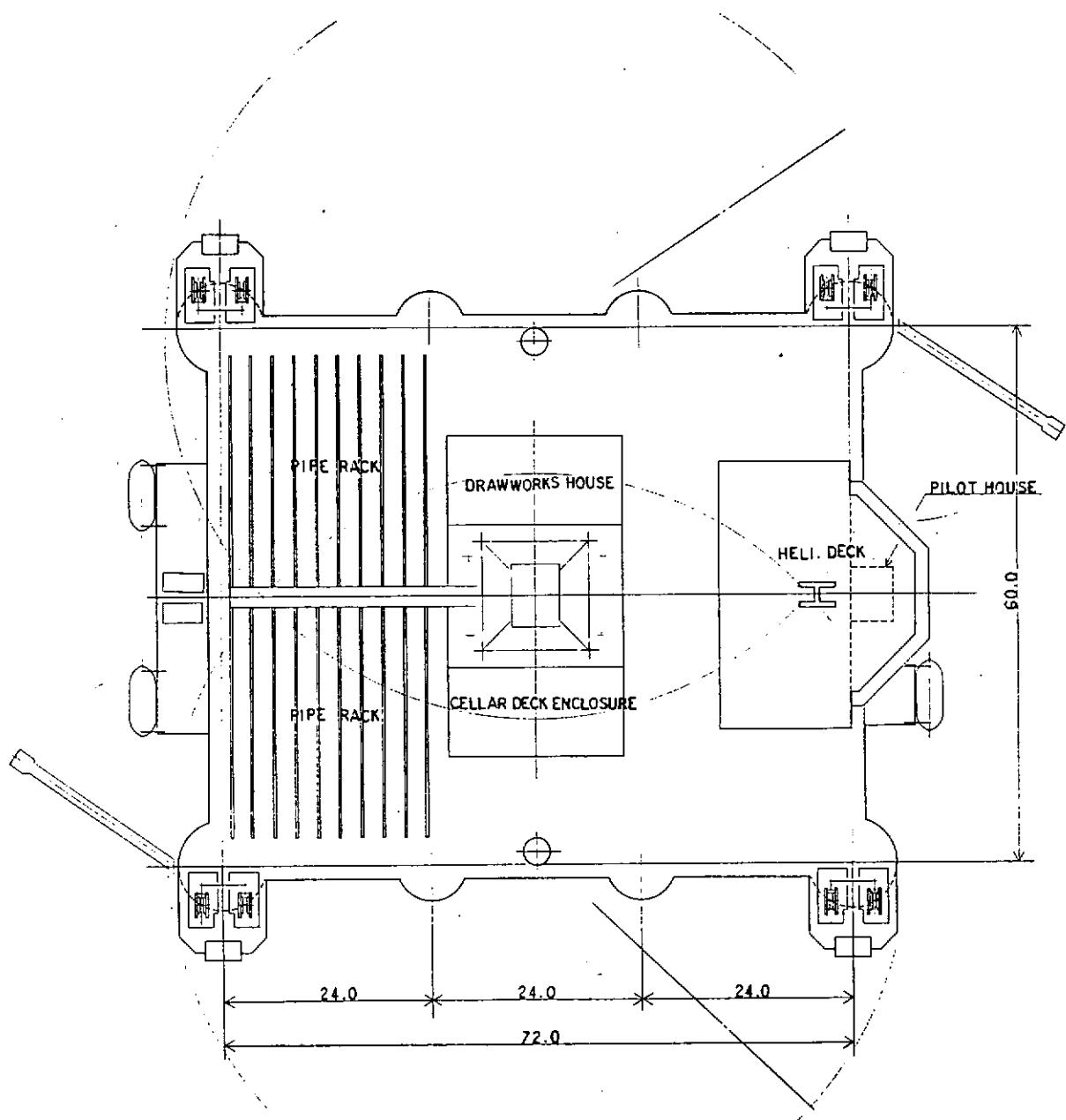


図 4.2.3 平面図 (Top View)

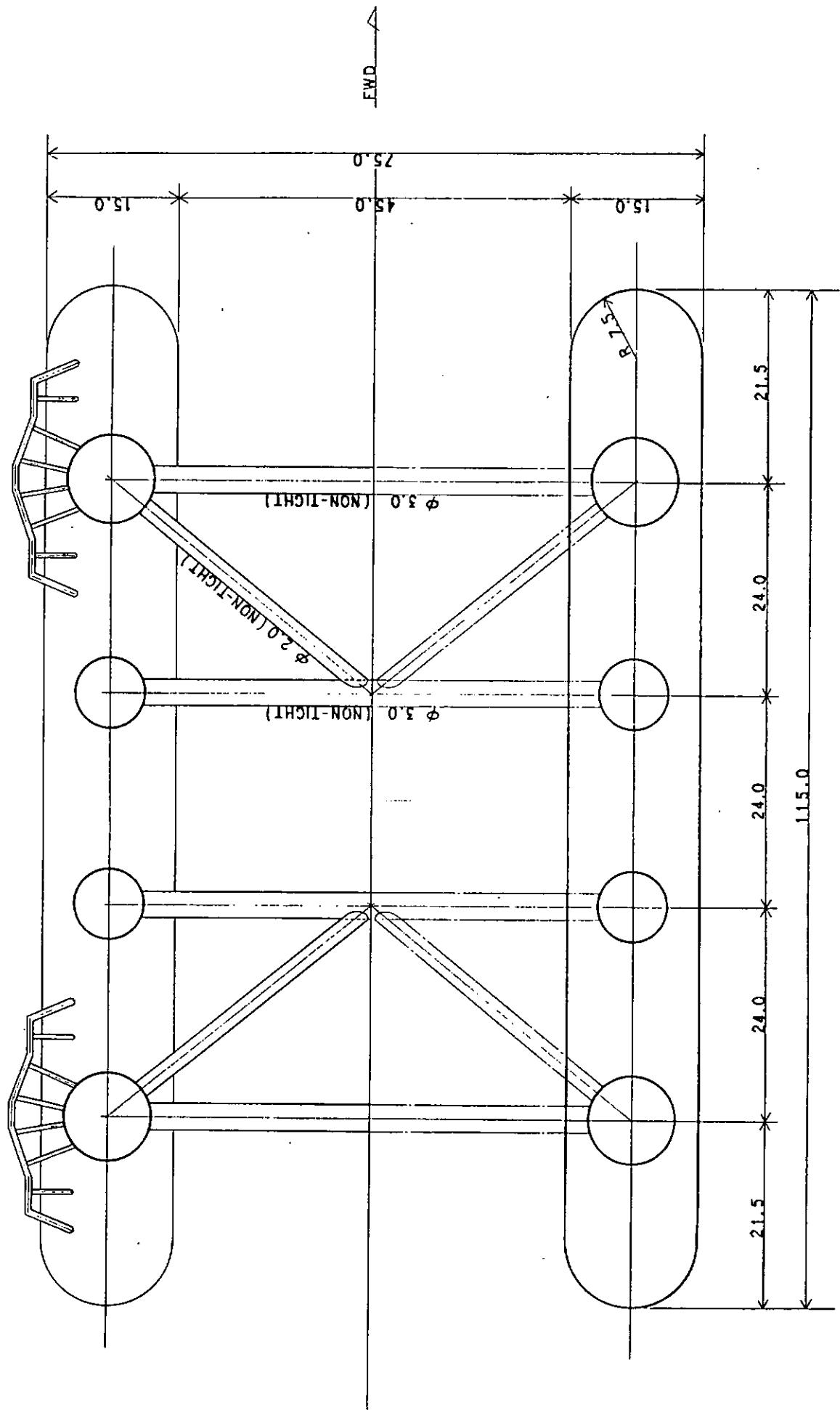


図 4.2.4 ロウルーハル (Lower Hull)

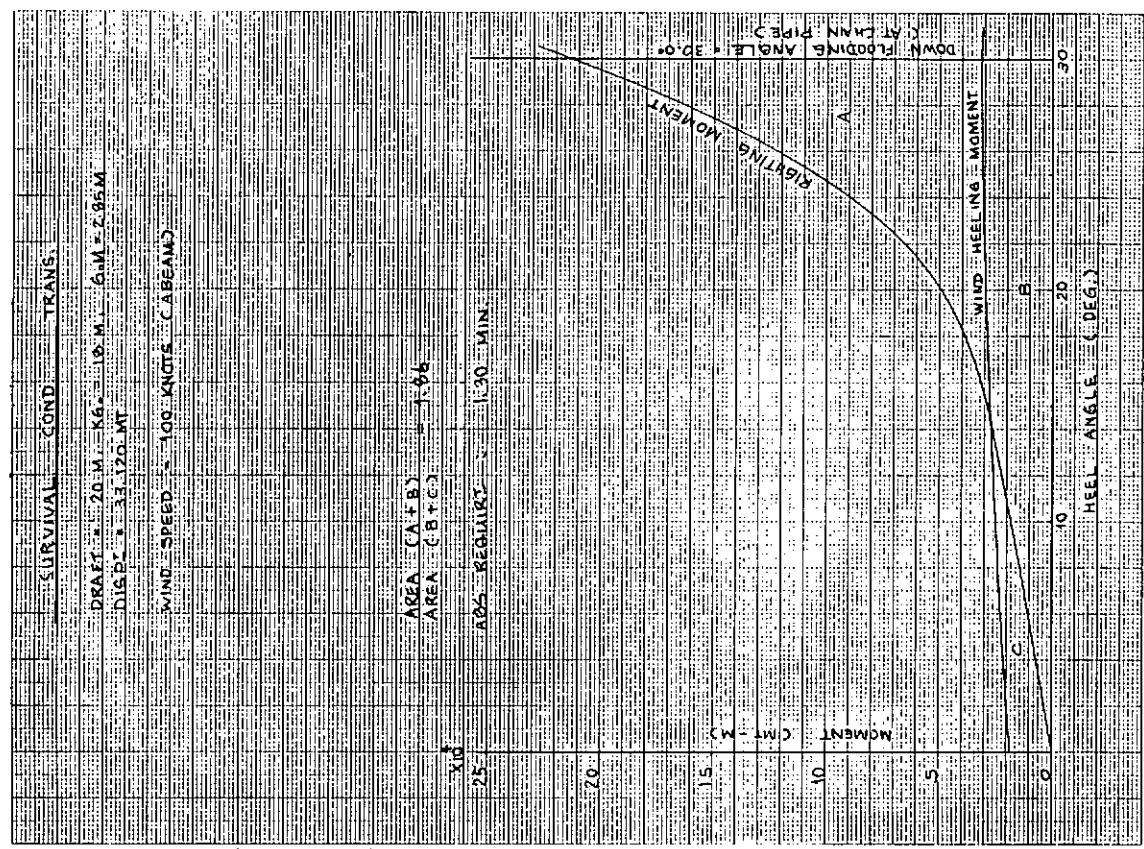


図 4.2.6 復原性能(イソタクト)

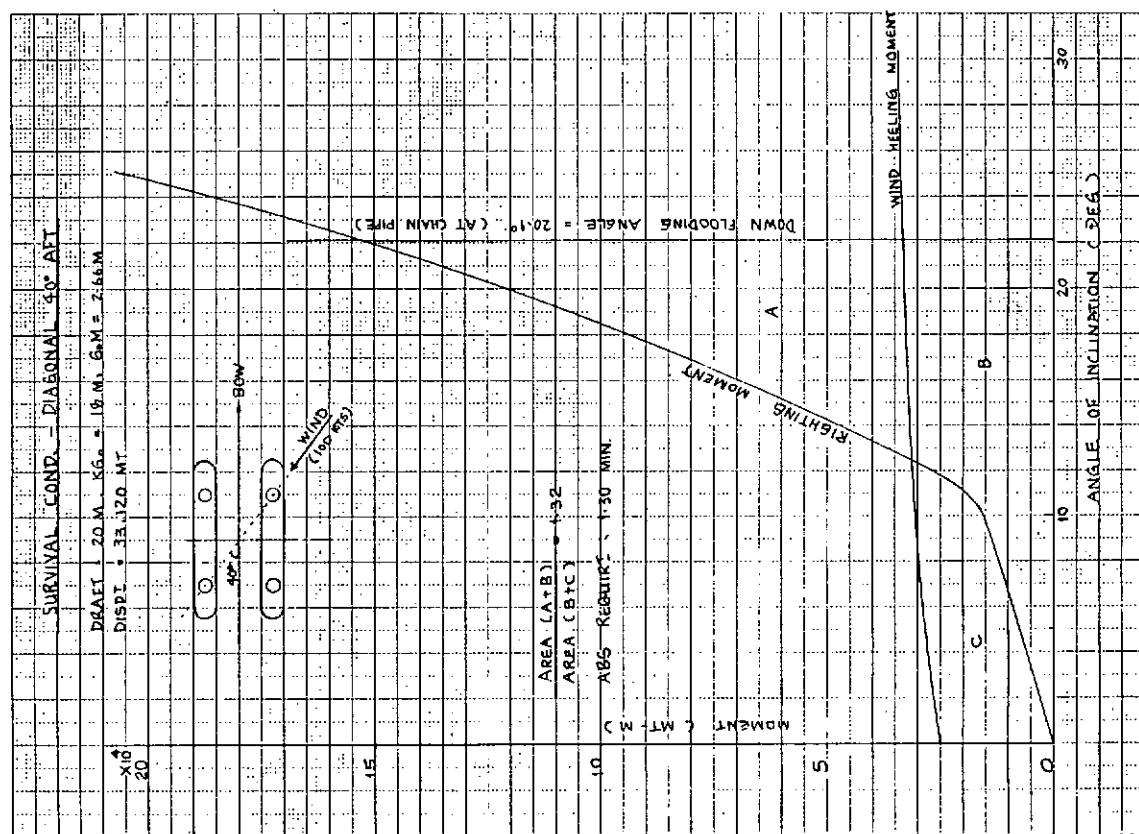


図4.2.5 復原性能(イシタクト)

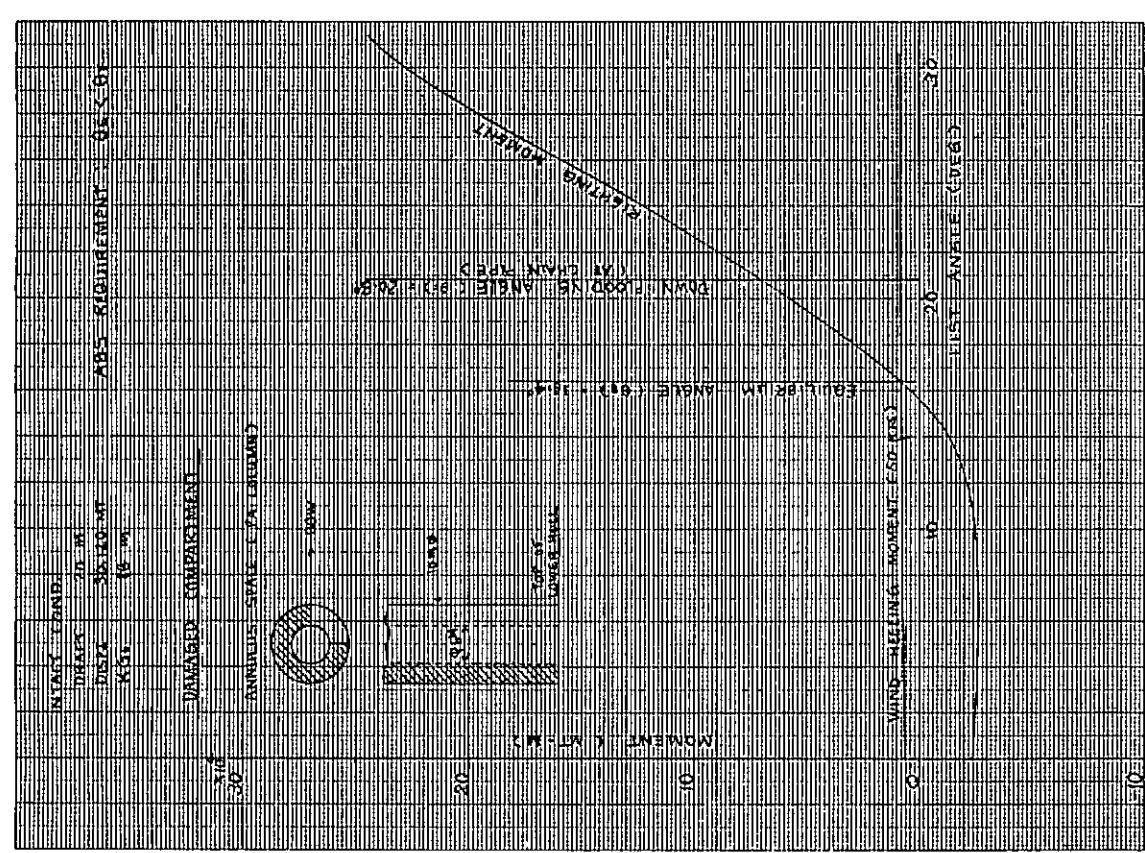


図 4.2.7 復原性能(1シタクト)

図 4.2.8 復原性能(ダメージ)

(2) Two-lower Hull, 4 column型

水槽実験に用いる模型に対する実機案の要目は次の通りとする。

(a) 主要寸法

メインデッキ長さ×幅	約66 m × 約59 m
メインデッキ高さ（ベースライン上）	43 m
ローワーハル長さ×幅×深さ	100 m × 16 m × 8 m
ローワーハル中心間距離	56 m
コラム本数×コラム直径	4 本 × 13 m
コラム中心間距離	59 m × 59 m

(b) 設計条件（暴風時状態）

船級	A B S
暴風時吃水	20 m
暴風時吃水における排水量	約 33,000 トン
波高／周期	30 m / 15秒
風速	100 ノット
潮流	3 ノット

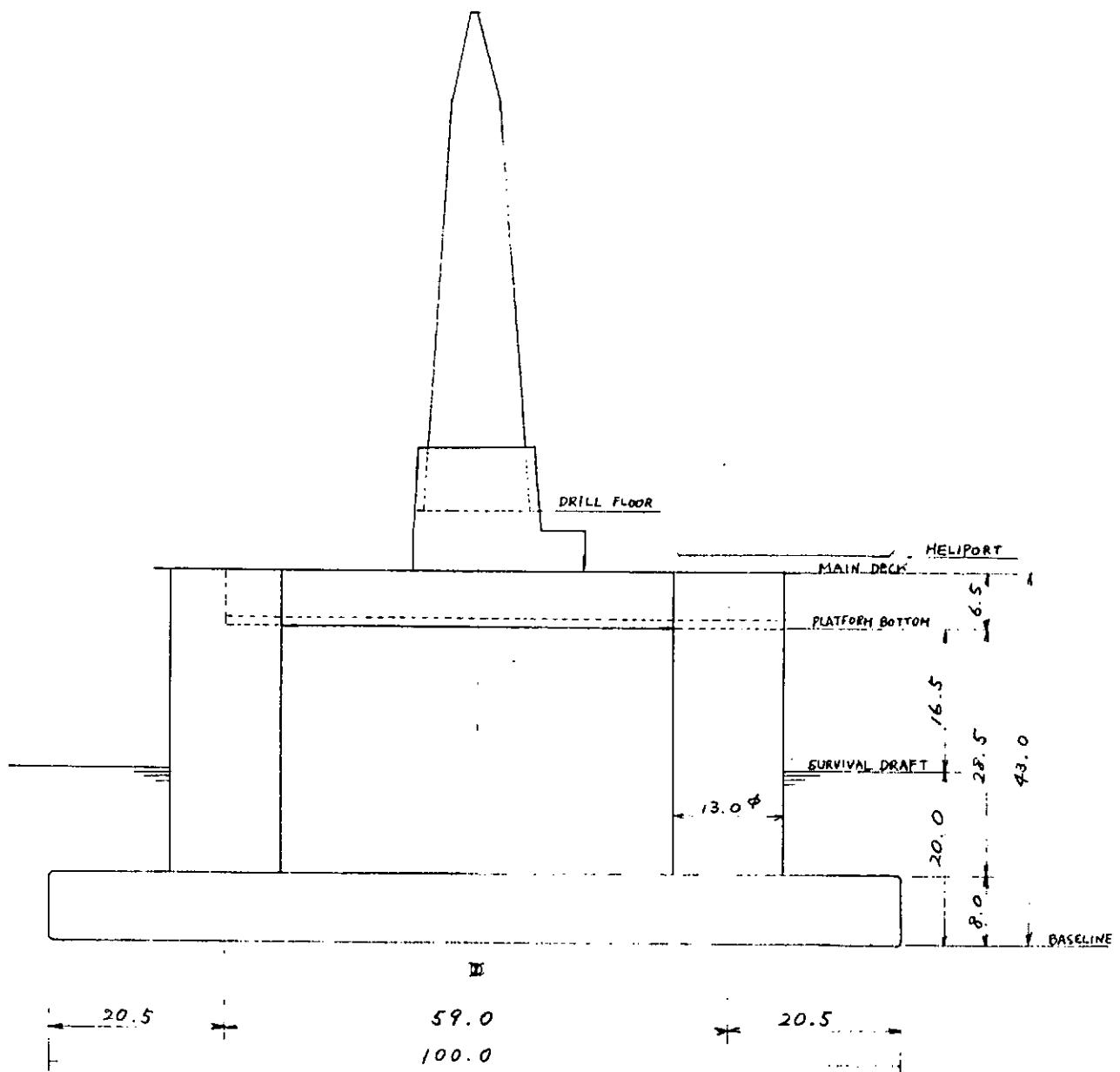


图 4.2.9 Profile

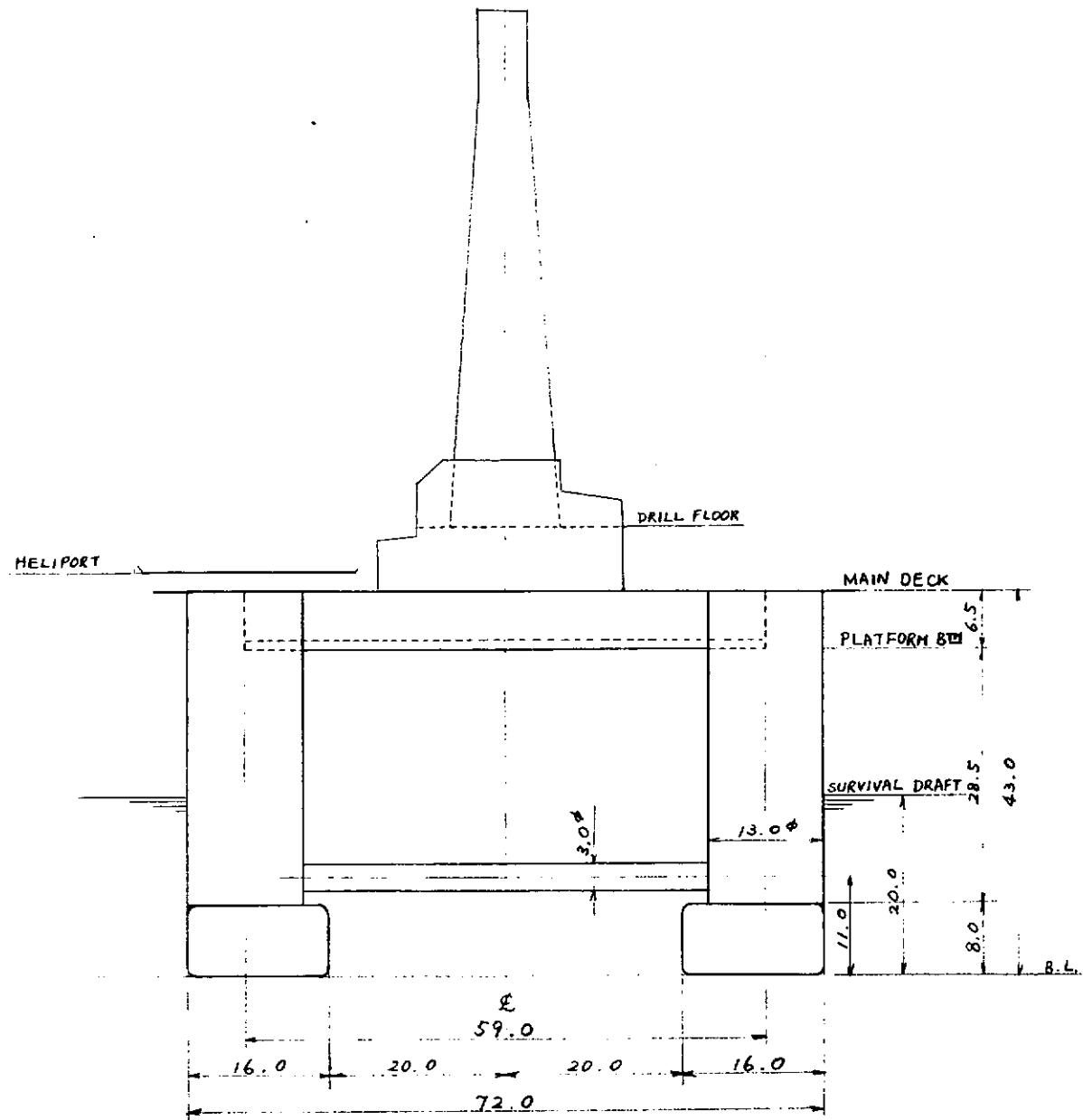


图 4.2.10 Front View

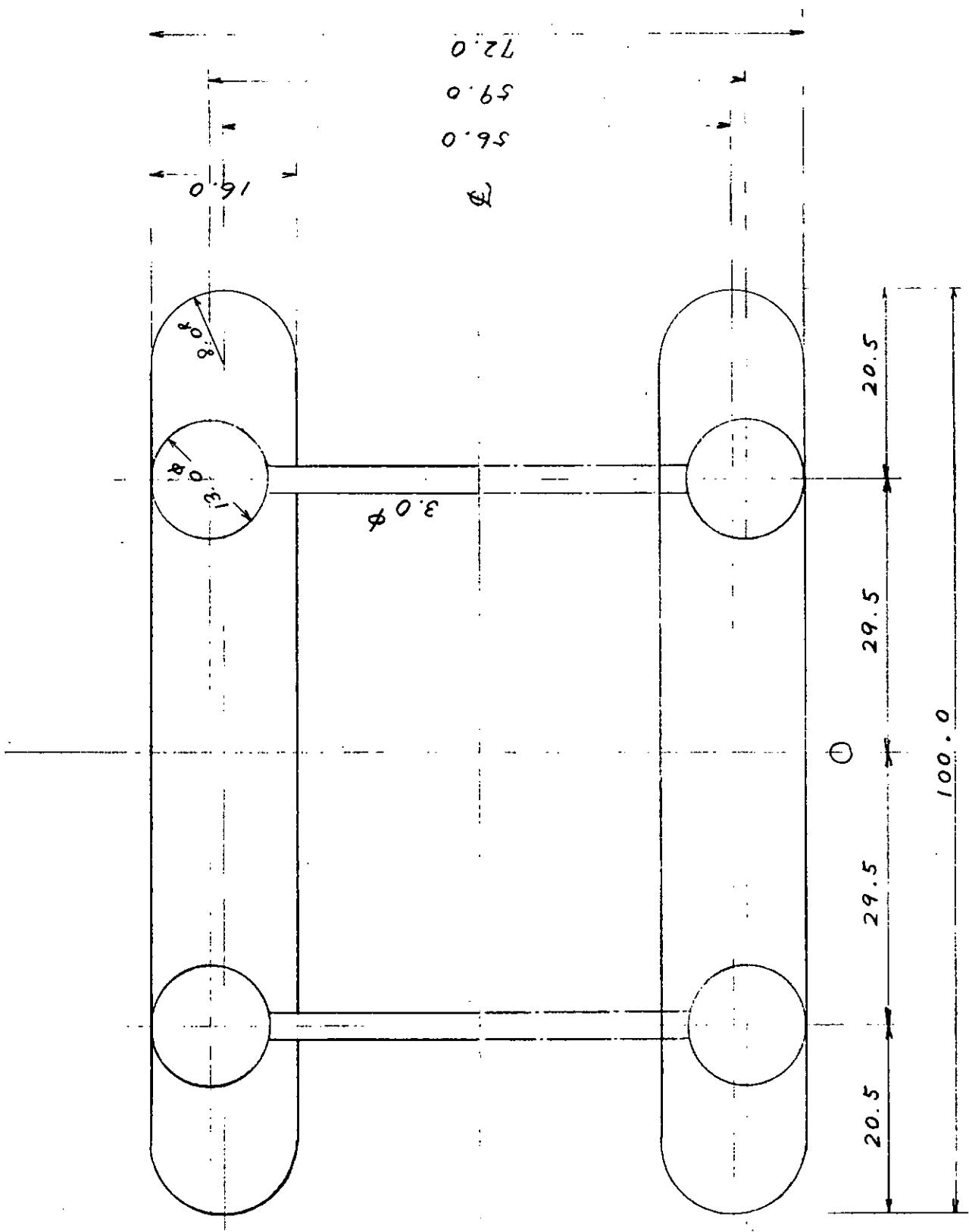


図 4.2.11 Lower Hull & Brace

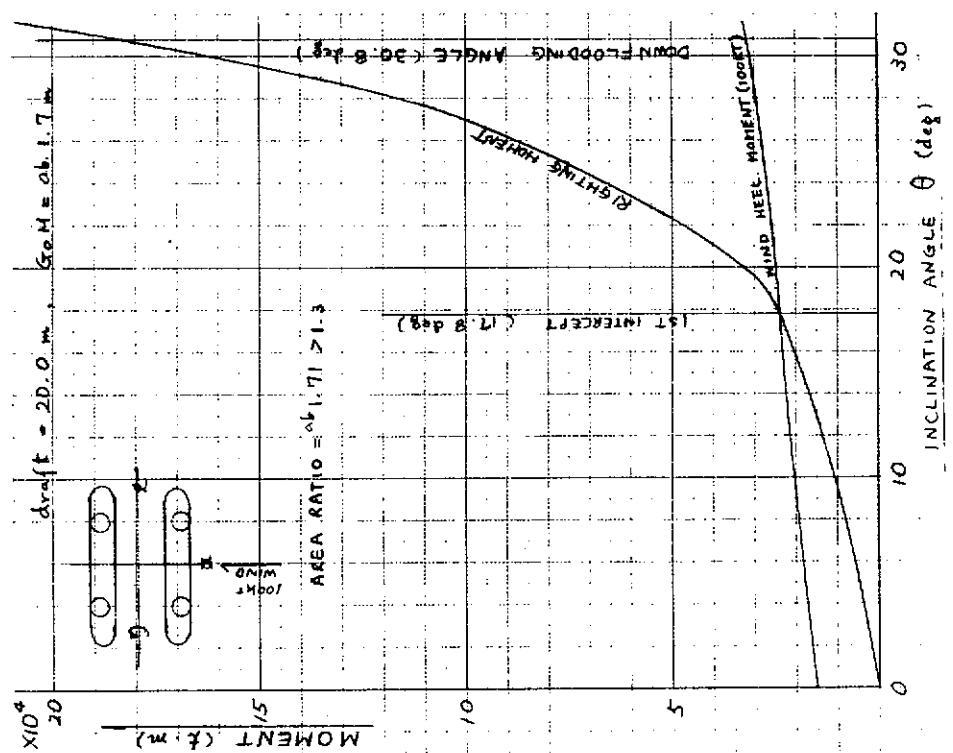


图 4.2.13 生存条件(横倾)

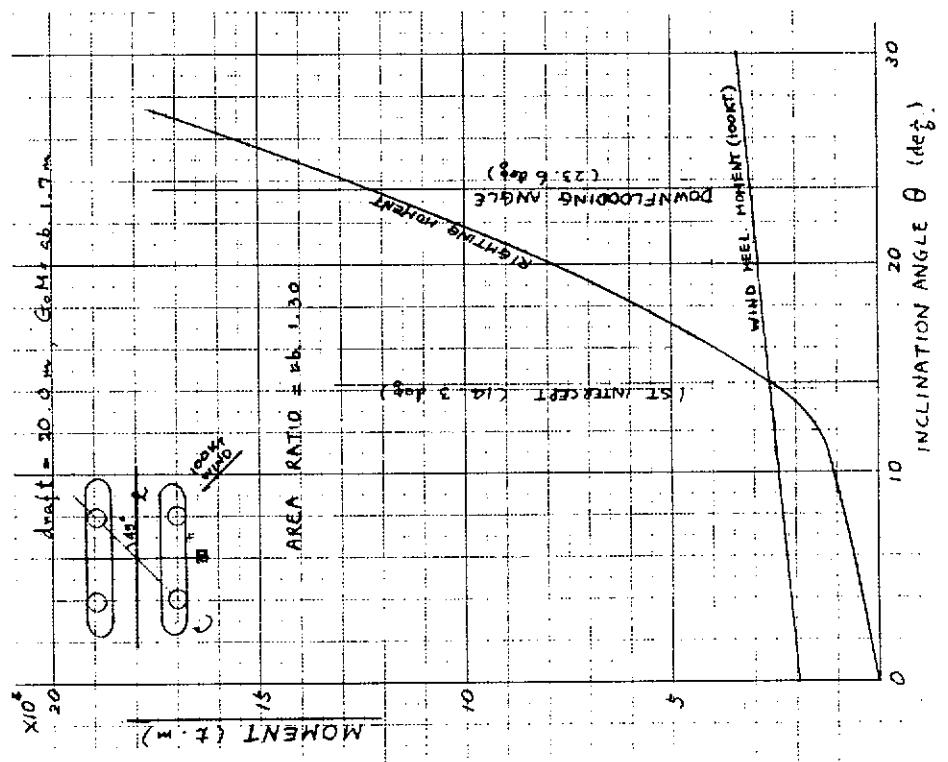


图 4.2.12 生存条件(斜倾)

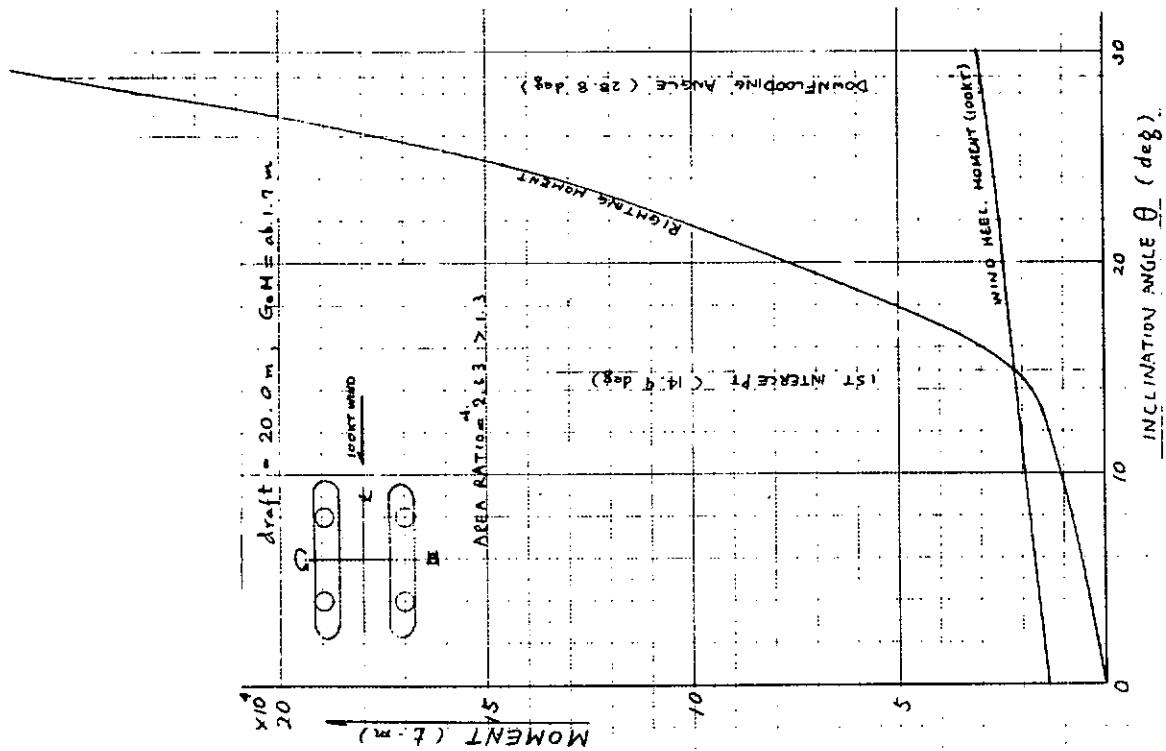


図 4.2.14 Survival Condition (Longitudinal)

(3) Footing 型

58年度水槽試験は、2-ロワーハル型について実施しフーティング型は翌年以降に実施する予定なので、57年度は形状を決めるベースについて次の通り調査した。

(a) 稼働性能

2-ロワーハル型に合わせる。

即ち、デッキロード、掘削装置、居住設備、環境条件等を合わせる。

(b) 主要目等

要 目	型 式	2-ロワーハル型	フーティング型
船 級		A B S	同 左
コ ラ ム 数 (本)		4 or 8	4
掘削時排水量 (A_{OP}) (トン)		30,000 クラス (サーバイバル時)	20,000~25,000
掘削時吃水 (d_{OP}) (m)		20 "	20~25
排水量/水線面積比 (A_{OP}/A_w) (t/m ²)		約 60 "	55~75
掘削時エアギャップ (m)		16.5 "	15~20

上記に示す排水量等の目安の数値は図 4.2.15~図 4.2.16に示すフーティング型セミサブの実績の調査結果(範囲を図中に斜線で示す)を参考にして決めた。

(c) 形 状

概略図 4.2.17に示す通りとする。形状は E. Numata 等が取り扱っているモデル (*) を参考にした。

(*) Assessment of Stability Requirements for Semisubmersible Units, SNAME vol. 84, 1976

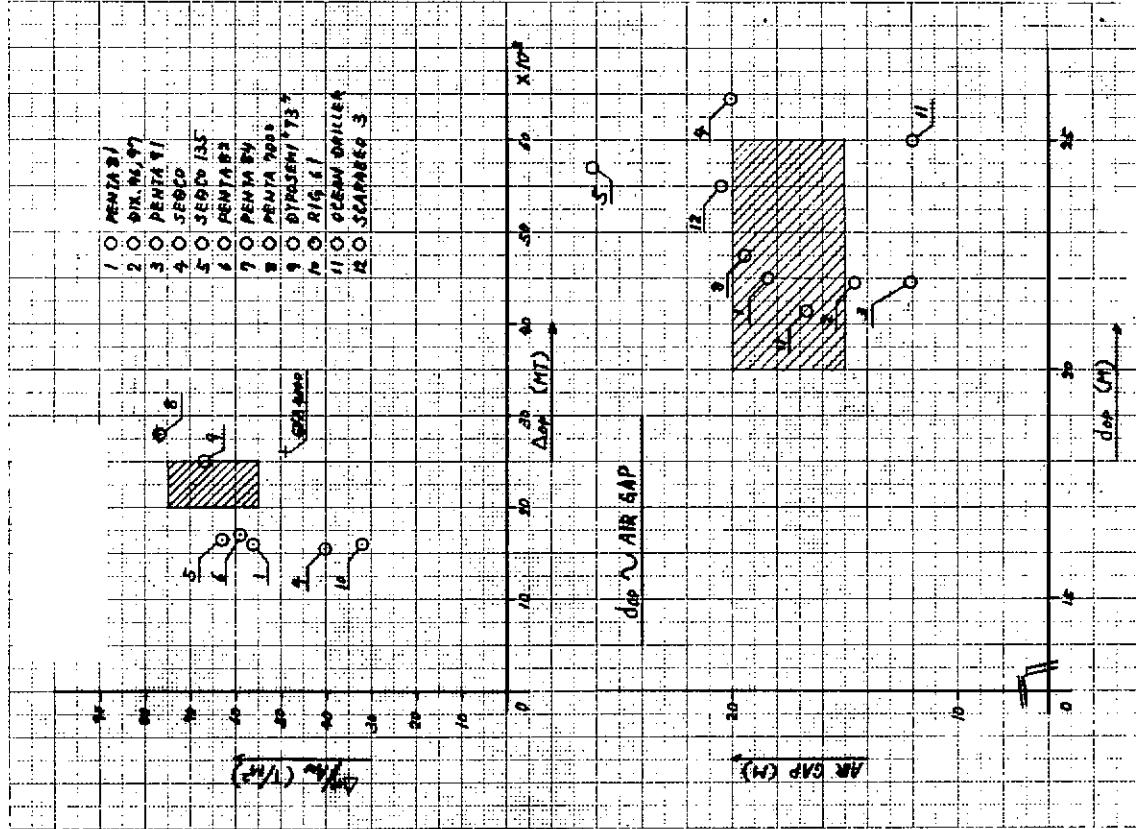


図 4.2.16

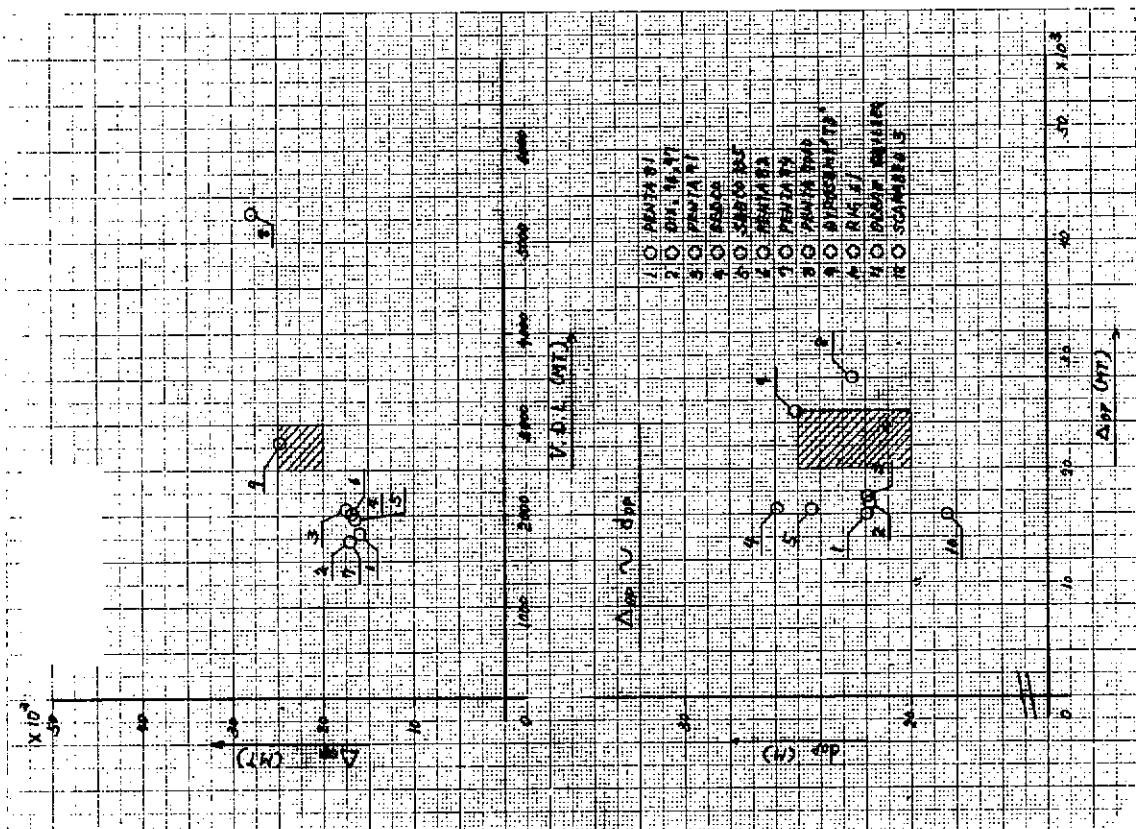
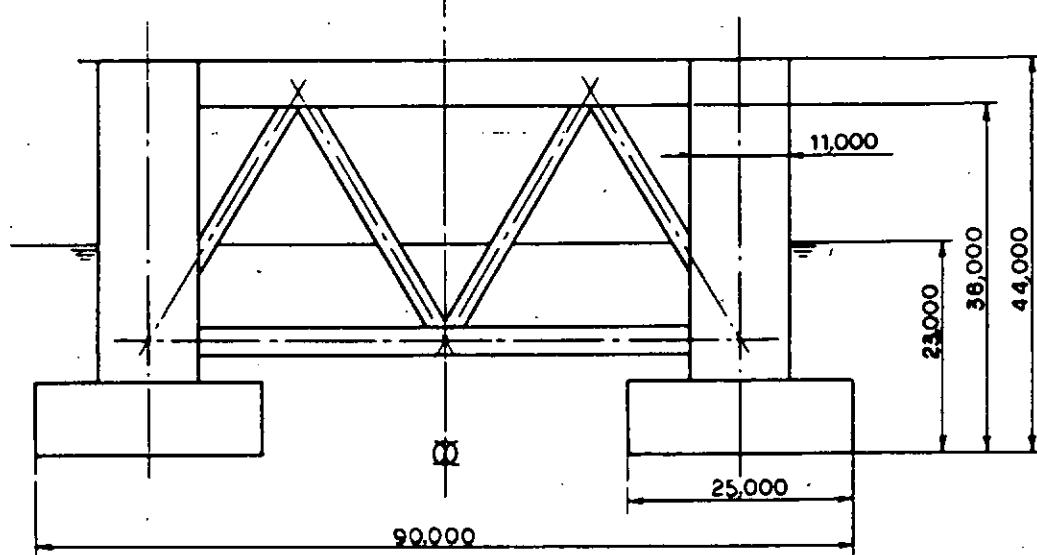
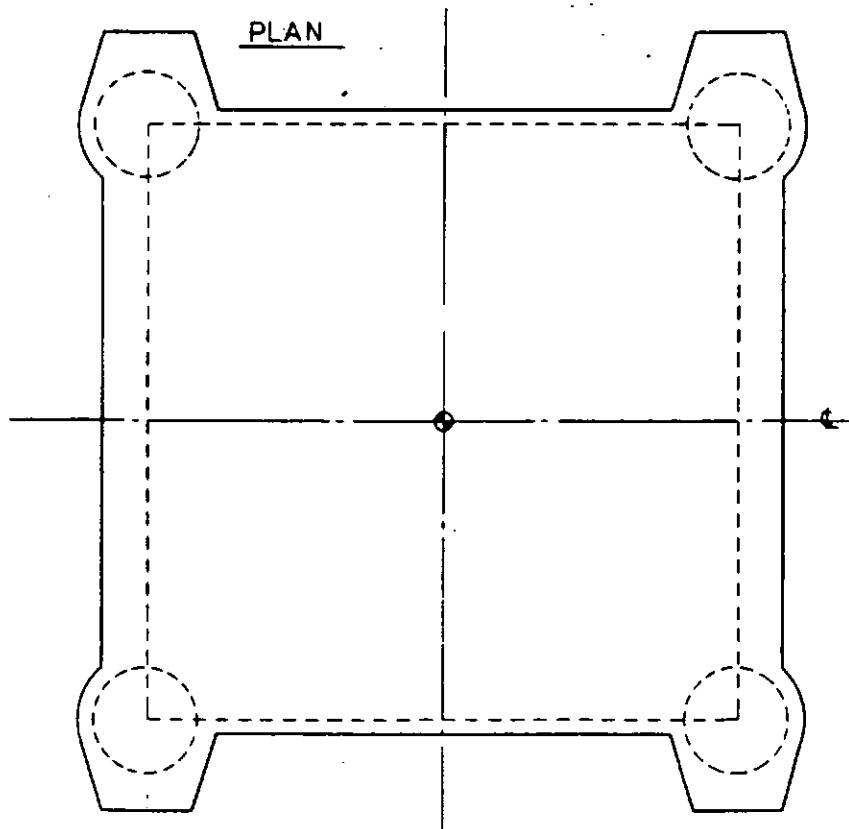


図 4.2.15

PROFILE



PLAN



主要寸法

全長	(M)	90,000
全幅	(M)	90,000
高さ (フローパーハル下面まで)	(M)	38,000
フーティング幅 (M)		25,000
高さ (M)		8,000
フランジ (M)		11,000
アーチドーム (t)		2,500
△op	(l)	22,000
dop	(M)	23,000
エフランジ (M)		15,000

図 4.2.17

4.3 風洞実験計画の詳細

4.3.1 セミサブ構造物に働く揚力の発生機構解明に関する実験計画

(1) 目的

セミサブ型構造物に作用する揚力の発生機構を明らかにし、揚力による寄与を含めた転倒モーメントの推定精度の向上を計る。

(2) 調査項目

- (a) 揚力発生に対する船体各部の寄与
- (b) 甲板上下面の圧力
- (c) 揚力発生の機構
- (d) 揚力の転倒モーメントに対する寄与
- (e) 揚力推定法

(3) 供試船型

供試船型は Two-Lower Hull, 8 Column タイプのセミサブ型構造物（S R - 192 標準モデル）とする。

(4) 風洞試験法

供試船型を単純化した縮尺 1 / 100 程度の分割模型を使用し、船体を構成する各部分毎、およびこれらを組合せた状態での揚力、抗力、転倒モーメントを計測する。船体は次の各部分に分割する。

- (a) コラム（8 本）
- (b) デッキ
- (c) 上載構造物

試験は、先ず、全体模型を用いて、任意風向の力およびモーメントを計測し、揚力または転倒モーメントが特徴的な風向 2 種類についてのみ、分割模型による実験を行なう。

分割模型の組合せは次の 4 通りを考える。

- (a) デッキ単体
- (b) デッキ + コラム
- (c) デッキ + 上載構造物
- (d) コラム + デッキ + 上載構造物

また、分割模型の試験と同じ風向について、デッキ上下面の圧力を計測する。

揚力の特性に関しては、垂直方向の流速分布の影響が無視できないので、実海面の流速分布を模擬する。

4.3.2 変動風による風圧力に関する実験計画

(1) 目的

変動風下において海洋構造物に作用する風荷重を計測し、海洋構造物の風荷重に対する風速変動の影響を調査して、風浪下における海洋構造物の転覆機構解明および設計外力精密化のための基礎資料とする。

(2) 試験法

(a) 変動風発生法

実用中のダンパー方式による変動風発生装置を図 4.3.1 に示す。¹⁾

この風洞の風路断面寸法は 10 m × 3 m であり、これを 3 分割し、その中央部を測定断面とし、両側部をバイパス部としている。上下のバイパス部にそれぞれ平板列（コード 100 mm × 又は 150 mm, ピッチ 250 mm, 枚数 12 枚）を設け、モータにて全平板を同時に回転させる。平板はとなり合ったものが逆方向に回転するようになっており、これによってバイパス部の流量を変動させ、その結果測定部に流量（流速）変動を与えるようになっている。

図 4.3.2 に示す計測位置（変動風発生装置の後流 2.5 m の位置の測定部断面中心を原点①とし、原点を含む上下・左右・前後の計 7 点）における正弦変動風の計測波形の一例を図 4.3.3 に示す。振幅はほぼ一定であり、原点①と同一断面にある計測点④～⑦の波形は同位相で、①に対して前流側の②及び後流側の⑧の波形はそれぞれ位相差を有している。この位相差を無次元振動数 ($f \xi / V$) で整理すると、図 4.3.4 のように Taylor の仮説 * に基づく位相差とほぼ一致しており、自然風の成分波としての条件を満足していることが確認される。ここに ξ は、2 点間の距離である。

(b) 供試模型

供試模型は、Two-Lower Hull, 8 Column タイプの半潜水式プラットフォーム (SR 192 標準模型) とする。

縮尺比は $1/S = 1/50$ とし、水面上の部分模型とする。

(c) 試験の種類

定常風による風荷重データを求めるとともに、変動風と変動風荷重の間の伝達関数を求めるため、次の 2 種類の試験を行う。

(i) 静的風荷重試験

定常風下において風速変化、浮体の姿勢変化に対する静的風荷重を計測する。

(ii) 動的風荷重試験

正弦波状および不規則変動風下における動的風荷重を計測する。

(d) 試験条件

(i) 静的風荷重試験

風速、風向、模型の傾斜角を変更した試験となる。

(ii) 動的風荷重試験

規則変動風中試験は、主に変動周波数、不規則変動風中試験は、主にスペクトルを変動した試験とする。

参考文献

- (1) 渡部洋八郎：“変動風発生法に関する研究（正弦波状変動風発生法）”，土木学会，第37回年次学術講演会，昭和57年10月

* Taylor の仮説：風下方向に距離 ξ 隔った点の風速変動は、風上の風速変動がそのまま平均流 (V) で運搬されるとの仮定。従って 2 点間の変動風速の Time lag は ξ/V で、これを位相差で表すと $2\pi f \xi / V$ となる。

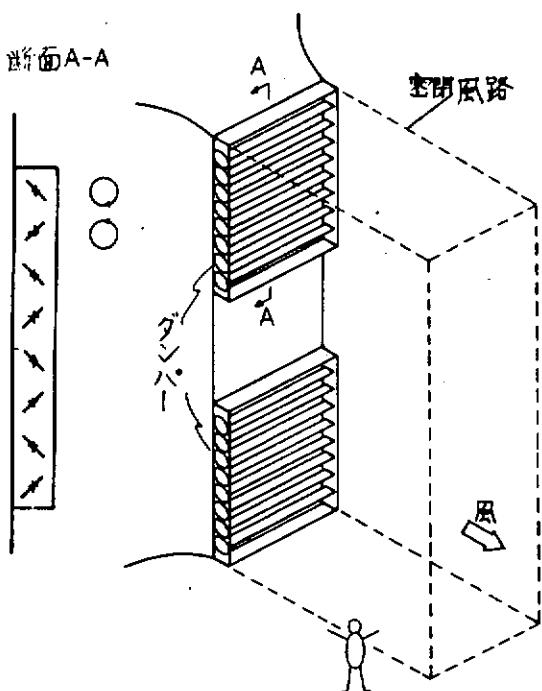


図 4.3.1 変動風発生装置

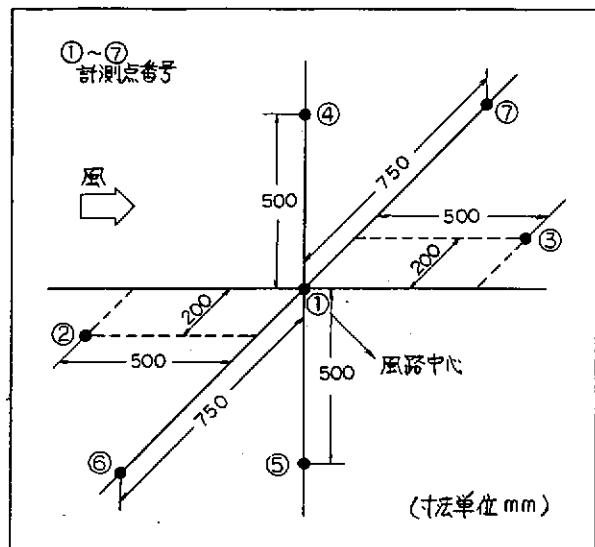


図 4.3.2 変動風計測位置

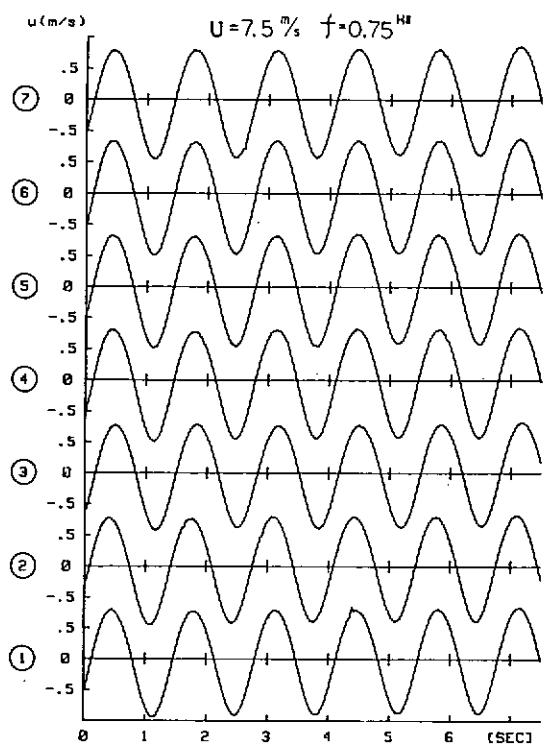


図 4.3.3 変動風波形

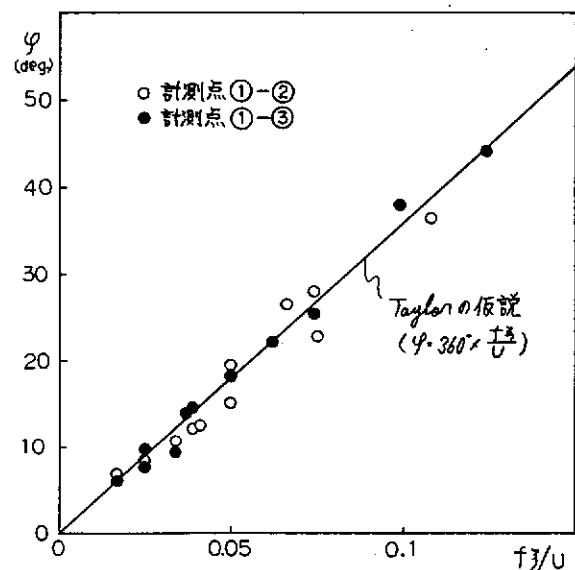


図 4.3.4 位相差 (U 方向)

4.3.3 動揺している構造物に作用する非定常空気力に関する実験計画

(1) 目的

海洋構造物の単純化模型に作用する非定常空気力の測定試験を考える。海洋構造物が風波を受けて動揺している時に働いている空気力を調べるもので、転覆機構解明のための基礎資料となる。

ここで、非定常空気力は「振動する物体（模型）に作用する変動空気力」と定義される。

気流は風速分布を有さない一様流中での試験とする。

(2) 供試模型

供試模型はセミサブ型プラットフォームを出来るだけ単純化、標準化した模型とし、1種類とする。最小限、プラットフォームとカラムを考える。

(3) 試験方法

(a) 非定常空気力測定試験

気流中にある模型を調和振動させ、その模型に作用する動的風圧力を測定する。非定常空気力測定装置の概念図は図4.3.5のとおりである。

加振モードはピッティング1自由度のみとする。計測する空気力はピッティングモーメントを主体に計測し、揚力、抗力については参考データとする。

計測したデータの解析は動的空気力のうち調和振動に比例する成分を抽出して、その大きさ、位相などを求める。海洋構造物の動的応答との対応（相似則）については次式を基本とする。

$$\frac{V_p}{N_p D_p} = \frac{V_m}{N_m D_m} = \text{一定} \quad (1)$$

ここで、
V : 風速

N : 振動数

D : 代表寸法

p : 実機

m : 模型

例えば、モデルケースを1/200とし、実機の動揺周期 $\tau = 20\text{秒}$ ($: N_p = 0.05\text{ Hz}$) を対象として、模型加振振動数 $N_m = 2\text{ Hz}$ で試験すると、風洞風速 $V_m = 1 \sim 20\text{ m/s}$ の範囲の試験に対して、実機換算風速 $V_p = 5 \sim 100\text{ m/s}$ に相当する。

なお、計測した動的空気力の平均値も求める。

(b) 静的風圧力測定試験

前項の試験と同一の模型を使用して、静止した模型に作用する空気力を測定して、その平均値を求める。振動状態での模型に作用する平均空気力との差異を比較するためのデータとする。

(4) 試験条件

各試験における条件はつぎのとおりとする。

(a) 非定常空気力測定試験

風向	$0^\circ \sim 180^\circ$	2状態
傾斜角	$0^\circ \sim \pm 10^\circ$	3～4状態
風速	$1 \sim 20\text{ m/s}$	
加振振動数	2 Hz 程度	2種類
加振振幅	$1^\circ \sim 15^\circ$	

(b) 静的風圧力測定試験

風 向	$0^\circ \sim 180^\circ$	2 狀態
傾斜角	$0^\circ \sim \pm 20^\circ$	
風 速	16 m/s (標準)	

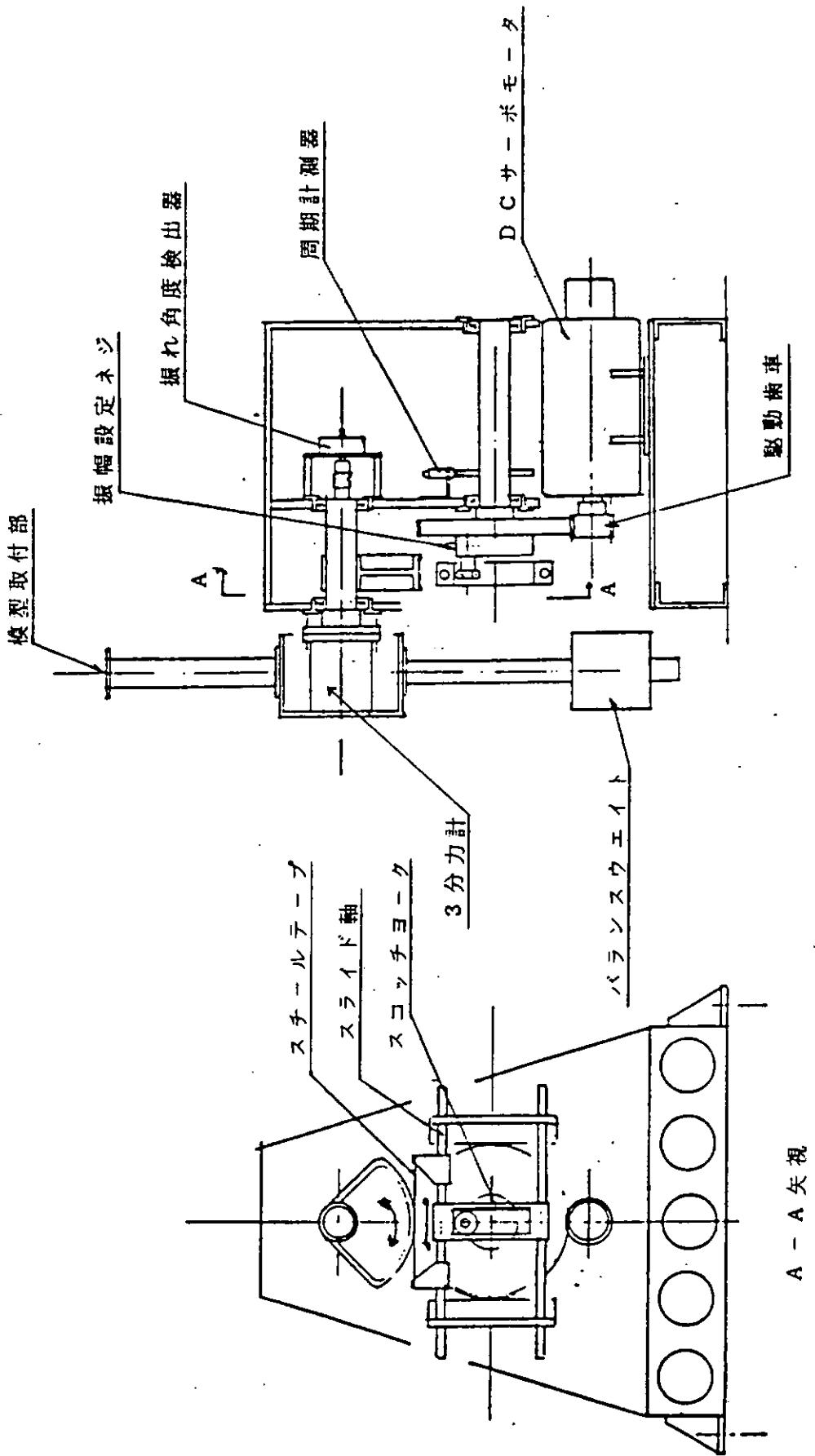


図 4.3.5 非定常空気力測定装置（概略設計）

4.3.4 Jack up型に対する実験計画

Jack up 型のプラットフォームに働く波、風、潮流による外力推定の精度向上のために種々の実験的研究を行ない、安全でかつ合理的な設計を行なうための資料を得ることを目的とする。

(1) 設計外力推定上の問題点

Jack up 型のプラットフォームの設計にはその状態に応じて次のような外力の推定が必要である。

(a) Leg up 状態

風による転倒モーメントに対して Stability が充分であるかどうかチェックする必要がある。

この場合、風向によっては Leg と Leg または Leg と Derrick 等の干渉を考慮した外力推定が必要となる。

(b) Leg down 時

Leg が海底近くまで下げられた時、波によるプラットフォームの動搖でスパッドタンクが海底と衝突する。

波高が何 m まで Leg down 作業が行なえるかが問題となる。この際に推定しなければならない外力はプラットフォームの動搖推定に必要な波力および海底地盤からの反力である。

(c) Jack up 状態

プラットフォームの強度設計にとって基本的な状態であり、外乱は Survival condition のものが考慮される (Leg の静的強度)。また稼動水深が深くなるにしたがって Leg の固有周期と波周期が近づきつつあり、大きな振動 (動搖) が起きる可能性がある。

Jack up 型のプラットフォームの Leg は円柱に Rack が付いた Main chord およびそれらをつなぐ Brace で構成されており、それぞれの部材が相互干渉し合う構造配置にある。このような構造物に働く流体力 (抗力係数 : C_d 、付加質量係数 : C_a 、揚力係数 : C_L 等) は従来各船級協会で指定された値を使用しているが、これらの値は部材単独についてのものであり、Rack 付部材の流れの方向による値の指定を含めその値はまちまちである。

さらに、以下に示すような点も明確でない。

- (i) 部材の寸法影響 (Re & K_c 数による C_d , C_a 等の変化)
- (ii) 部材の相互干渉影響 (Shielding effect)
- (iii) 流れの定常、非定常の差による抵抗係数の差異
- (iv) 定常流 (潮流) + 非定常流 (波動) の場合の流体力の評価

(2) Jack up 型プラットフォームの供試模型

実験は要素部材にて行なうため、その対象となる実機の主要目を以下に、概略一般配置を図 4.3.6 に示す。

プラットフォーム長さ 64.0 m

" 幅 59.0 m

" 深さ 7.0 m

Leg 長 124.8 m

要素部材の部材の寸法影響及び相互干渉影響の実験に用いる供試模型は

- (i) Rack の付いた Main chord
- (ii) Leg の一体構造
- (iii) 上部構造 (Derrick)

とする。

風洞実験に用いる模型の寸法を図 4.3.7 ~ 図 4.3.9 に示す。(i)については Center rack 式と Side rack 式の 2 種とし、両者の Rack 形状は同一とする。

(iii)については、高さ方向で断面形状が異なるため代表的な形状としては中間の位置での形状とした。

(3) Jack up 型プラットフォームのLeg 等に働く流体力に関する実験計画

(a) 定常流中における流体力（風および潮流による力）

(i) 部材の寸法影響（図4.3.7）

Side rack 付およびCenter rack 付 Main chord について次の要領で実験する。

- 計測項目 C_D, C_L

- 実験ケース

風向 $0^\circ \sim 90^\circ$ (Center rack 付)

$0^\circ \sim 180^\circ$ (Side rack 付)

(角度は約 10° 毎に変えて計測)

風速 $10 \text{ m/s} \sim 30 \text{ m/s}$

(Re 数 $10^5 \sim 3 \times 10^5$)

※ Re 数 $10^6 \sim 10^7$ については大水槽等で実施する必要がある。

(ii) 部材の相互干渉影響

(i) Leg の要素部材の相互干渉影響（図4.3.8）

Leg の一体構造を Brace と結合された部分と Brace とは切り離した Main chord の部分に分けて配置し、流体力は Brace 付、Brace 無の Main chord および全体構造について同時に計測する。

- 計測項目 C_D, C_L

- 実験ケース

ℓ/d は 3 通り程度変える。

[但し、 $\ell = (588.8 \pm \alpha) \text{ mm}, d = 50\phi \text{ mm}$]

風向 $0^\circ \sim 180^\circ, 15^\circ$ 毎に計測

風速 $10 \text{ m/s} \sim 30 \text{ m/s}$

(Re 数 $10 \leq 10^5$)

(ii) Leg と他の上部構造物 (Derrick) の相互干渉影響（図4.3.8, 図4.3.9）

- 計測項目 C_D, C_L

- 実験ケース

Derrick の充実率を 2～3 通りに変える。

[Derrick の Brace 部を変えることによる。]

Leg と Derrick の距離 3 通り程度変える。

” の相対角度 ”

風向 $0^\circ \sim 360^\circ, 15 \sim 30^\circ$ 毎に計測

風速 $10 \text{ m/s} \sim 30 \text{ m/s}$

(Re 数 $\leq 10^5$)

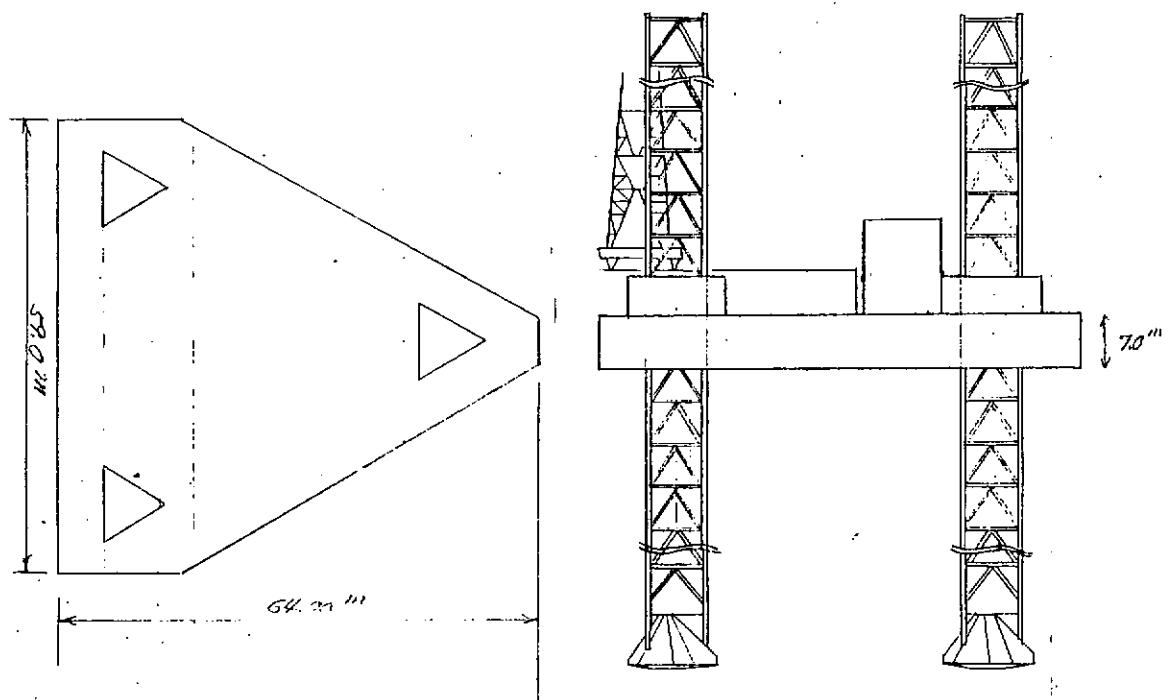


図 4.3.6 対象実機概略配置図

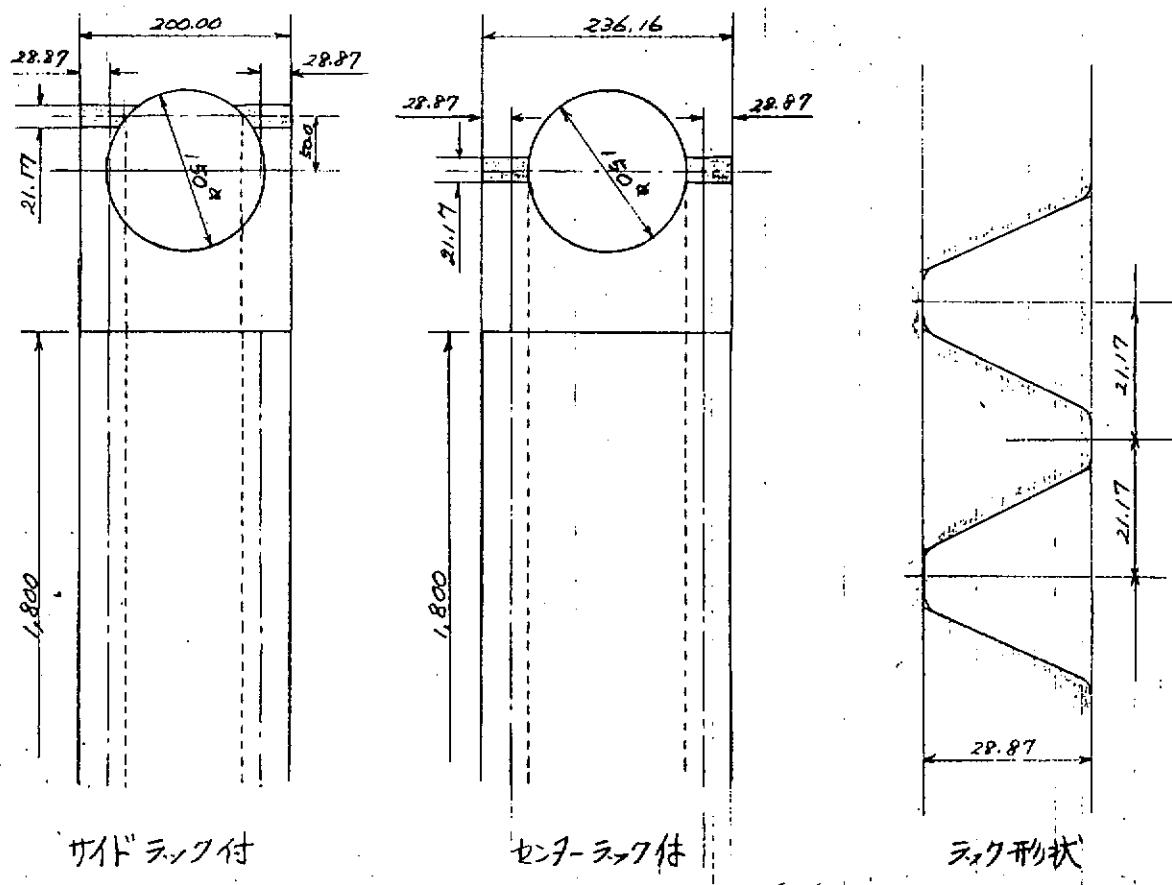


図 4.3.7 コード模型及びラック形状

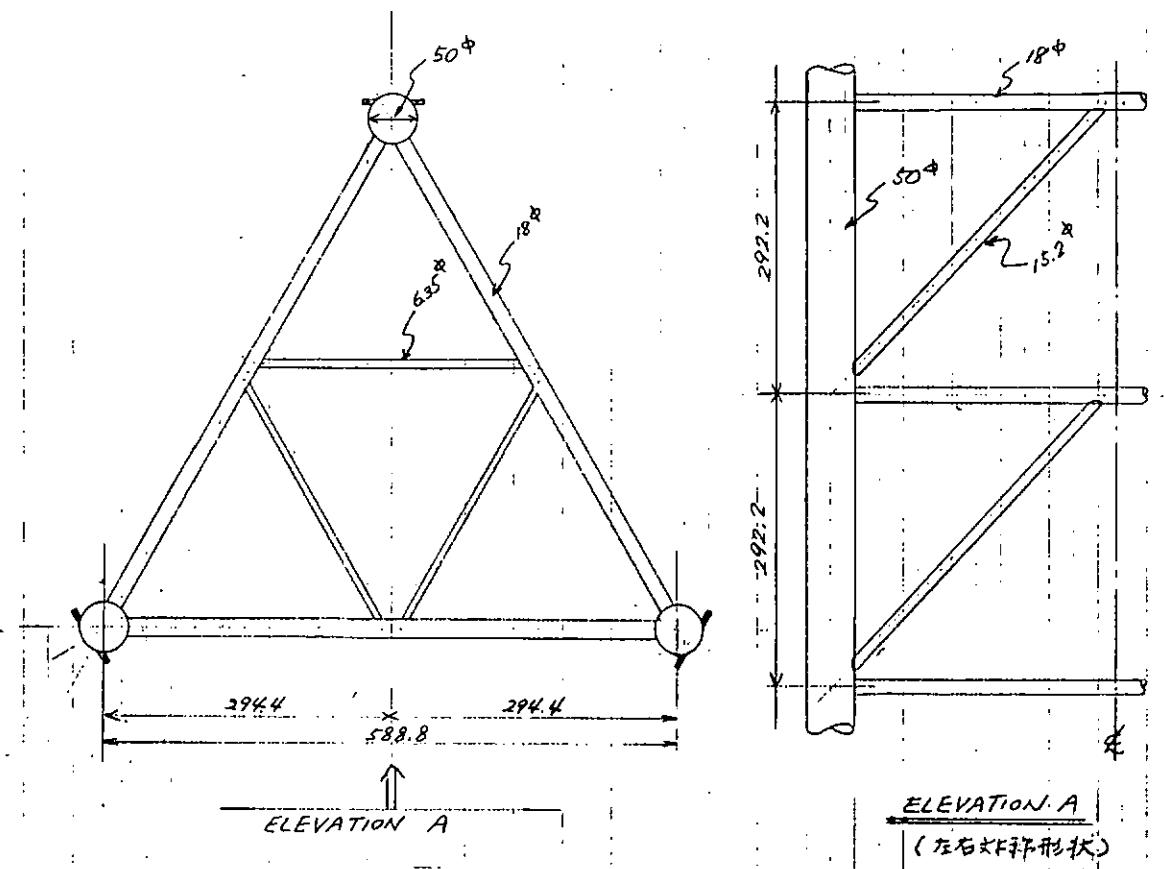


図 4.3.8 レグ一体模型

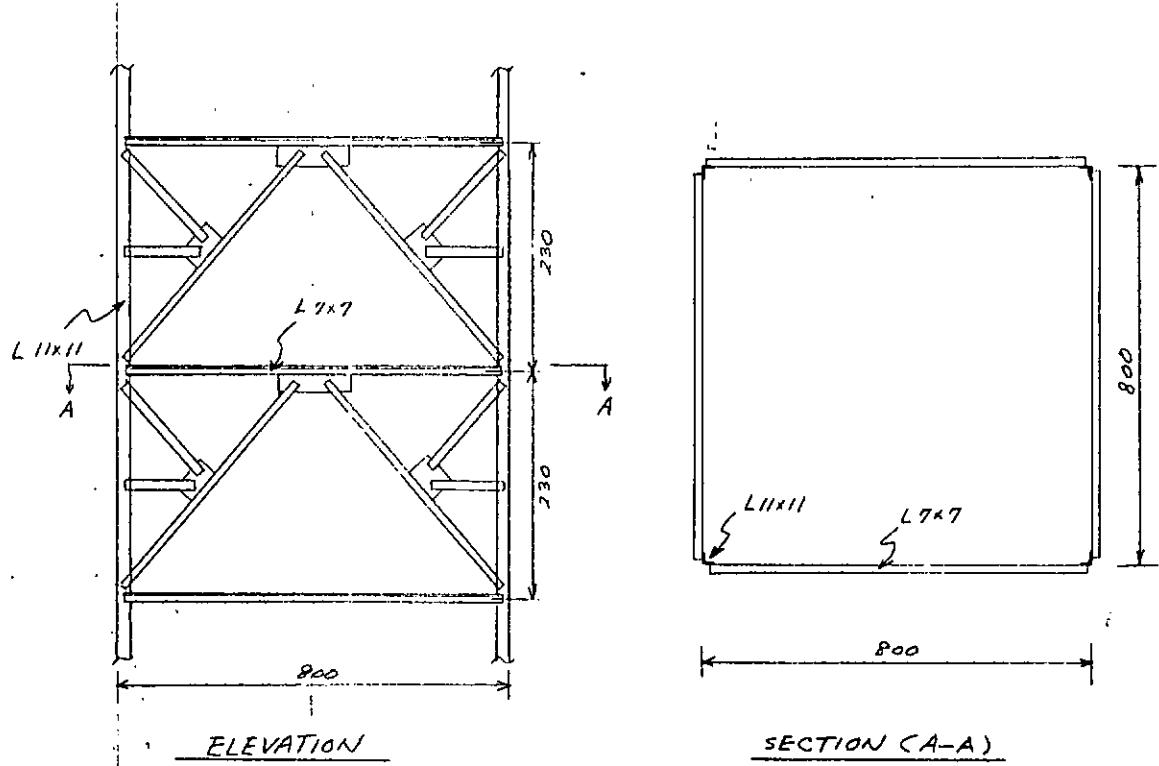


図 4.3.9 デリック一体模型

付 錄

腐食、防食に関するOTC論文の概要（1979, 1980, 1981年分）

取り上げた文献

1979年 OTC 3389, 3420, 3421, 3511, 3600, 3601, 3602, 3603

1980年 OTC 3856, 3857, 3858, 3859, 3860, 3889, 3890, 3891, 3893, 3894

1981年 OTC 4150, 4151, 4152, 4153, 4154, 4155

分 類

A 海洋構造物の腐食に関するもの

(1) 海水の腐食率の調査

OTC 3602, 海水の腐食率測定装置の開発

OTC 3603, 北極の氷板下の海中における腐食性の調査

OTC 3889, 海と海底の環境データに基づいた海水の腐食率の測定と腐食制御条件の推定

(2) 構造物の腐食状態の計測法

OTC 3894, 超音波探傷器を用いた海洋構造物パイプの内外面の腐食状態の計測

(3) 海洋構造物の腐食例および腐食の制御

OTC 3856, ステンレス鋼のすきま腐食と腐食防止のための陰極防食

OTC 3890, ガス掘削用パイプのCO₂腐食と腐食防止のための材料

OTC 3891, パイプラインの応力腐食割れ

OTC 4150, ステンレス鋼の腐食による硫化応力割れと防止のための材料

(4) 構造物に付着する生物および金属沈着物

OTC 3511, 疲労き裂面へのカルシウム沈殿物の付着

OTC 3860, 北海のガス, オイルプラットフォームに付着する生物とそれによる構造物の腐食

OTC 4154, 海洋構造物の陰極防食下の金属沈着物（マグネシウム, カルシウム）の成長

(5) 耐食材料および耐食パイプ

OTC 3891, パイプライン用耐食パイプの開発

OTC 4151, すぐれた耐食性能を有するステンレス鋼

OTC 4153, 掘削用耐食性パイプの開発

(6) 腐食環境下の強度

OTC 3420, 溶接継手の腐食疲労強度
3421,

OTC 3511, 陰極防食下の管継手部の疲労強度

OTC 3893, Self-shield型のFluxワイヤを用いた溶接物の腐食疲労強度

B 海洋構造物の防食に関するもの

(1) 陰極防食

OTC 3420, 繰返し荷重を受ける溶接継手部への陰極防食の効果

OTC 3511, 陰極防食による構造物管継手部の疲労耐久限の増加

OTC 3856, 陰極防食を用いたステンレス鋼のすきま腐食の防止法

OTC 3858, 海洋構造物の犠牲陰極防食システム設計のための数学モデルの提案

(2) コーティング

OTC 3857, 陰極防食とコーティングを併用した海洋構造物の防食法

(3) 構造物の防食状態の測定

OTC 3600, 海水探査機を用いたパイプラインの陰極防食状態の測定

OTC 3601, 海洋構造物およびパイプラインの陰極防食システムのモニタリング

(4) 構造物に付着した生物汚染物の除去

OTC 3859, 海洋環境にさらされる物体表面からの生物汚染物の除去技術

OTC 4155, 銅イオンを用いた構造物の生物付着防止法

OTC	表題および概要
3389 (1979年)	<ul style="list-style-type: none"> 北海構造物の建設、維持および緊急時態用の多目的支援船 概要、表題の多目的支援船の設備および性能について述べている主要なものとして、プラットフォーム建設やメインテンナンスを支援する幅広い性能を有すること、十分な消火設備、プラットフォームの放棄設備あるいはそのような災害のあとでの残がいの除去設備などがあげられる。
3420 (1979年)	<ul style="list-style-type: none"> 溶接継手の定荷重疲労強度における北海の環境の影響 概要、北海で使用される海洋プラットフォームがさらされる環境下および応力条件下で溶接継手の疲労試験を行っている。その結果の要約は(1)腐食環境および乾湿を繰返した環境での疲労強度は大気中の疲労強度とあまり変わらない。(2)陰極防食の効果は高応力レベルでは無く、低応力レベルでは有る。(3)継手止端部をグラインダ仕上しても、腐食環境の場合には疲労強度向上の効果は小さい。
3421 (1979年)	<ul style="list-style-type: none"> 大気中および海水中における溶接継手の疲労挙動 概要、T型溶接継手の曲げ荷重疲労試験を大気中および海水中で行っている。そして板厚への影響、溶接止端部の仕上げ(グラインダ、TIGドレス、プラズマドレス)の効果、残留応力および応力比の影響を調べた。その結果、(1)海水中の疲労寿命は、同一応力レベルにおける大気中の寿命の1/2～1/3となる。(2)大気中、海水中との板厚が疲労強度に及ぼす影響はほとんど無い。(3)グラインダ、プラズマドレスは大気中、海水中の両方で疲労強度を向上させるが、TIGドレスは効果がほとんど無い。(4)大気中、海水中とも応力比の影響は小さいが、残留応力の影響はある。
3511 (1979年)	<ul style="list-style-type: none"> 海水中で使用される構造用鋼の陰極防食による耐久限の増加 概要、海洋構造物の管継手部に陰極防食を行い、耐久限が増加することを示した。その結果の要約は(1)陰極防食による耐久限の増加は海水中の切欠材に対しては見られるが、3%食塩水中的平滑材には見られない。(2)陰極防食の効果はポテンシャル、試験片寸法および繰返し速度に依存する。(3)き裂面に生じるカルシウム沈殿物により耐久限は向上する。水素脆化はき裂の伝播が生じるような状態下で支配的と考えられる。(4)水素脆化とき裂面のカルシウム沈殿物の形成の相対的大さは、局所の電流密度および電解質のまざっている広さに依存する。(5)海水下の構造物のHot spot箇所(このような場所は耐久限の増加に最適なポテンシャルに分極している)に対して陰極防食をシステム化した設計を行うことができる。
3600 (1979年)	<ul style="list-style-type: none"> 海水探査機によるパイプラインの陰極防食の測定と腐食制御 概要、表題のことがらについて一般的な説明を行っている。プロトタイプの電流密度測定システムは1978年の初めから実用化されており、現在6つのメジャー石油会社で300km以上のパイプラインを北海で検査している。そしてパイプライン技術者に有益な情報を提供しており、とくにパイプラインの陰極防食の状態についてすぐれた情報を提供している。このシステムは種々のタイプのパ

	<p>イプラインについて、またパイプラインの深さや状態が変化するような場合でも検査をすることができる。このシステムはINTERSUBと呼ばれるもので次の情報を知ることができる。(1)アノードの位置を捜し出しその寿命を検査する。(2)損傷したり紛失したアノードを発見する。(3)パイプラインの絶縁体が破損している箇所を発見する。(4)隣接する陰極防食システムとの干渉の様子を調べる。(5)陰極防食の時間変化を観察する。</p>
3601 (1979年)	<ul style="list-style-type: none"> ◦ 海洋構造物およびパイプラインの陰極防食システムのモニタリング ◦ 概要、海洋構造物の陰極防食システムのモニタリングの原理と詳細が述べられている。海水中でのポテンシャル測定は鋼の腐食挙動について価値ある情報を提供してくれる。測定の重要なポイントは照合電極(Reference anode)を検査領域にどれだけ近づけて置くかということである。測定装置はメインテナンスとキャリブレーションに関連したいくつかの問題点がある。
3602 (1979年)	<ul style="list-style-type: none"> ◦ 海水中の腐食率測定装置 ◦ 概要、海水データと腐食データを同時に記録するパイ装置が作られた。その装置を用いれば、即座に腐食率と腐食防食の条件を潮流スピードと時間の関数として表示することができる。この装置はすでにグリーンランド近くの北極海30m～300mの深さの海水中でテストされた。その結果、十分間隔ごとに連続してデータを記録することにより、腐食率と潮流の動きの間に密接な関係があることが明らかになった。
3603 (1979年)	<ul style="list-style-type: none"> ◦ 北極の氷板下の海中における腐食性の調査 ◦ 概要、海洋構造物を建設する前には、その建設位置の環境の腐食性を調査する必要がある。そのためには、電気化学的原理に基づいて腐食率をすばやく測定する技術が必要である。この論文では1978年春に北極の氷板の下で腐食性を調査した際の実験方法および結果について述べている。
3856 (1980年)	<ul style="list-style-type: none"> ◦ ステンレス鋼のすきま(Crevis)腐食防止のための陰極防食 ◦ 概要、ステンレス鋼を用いた装置のすきま腐食は、長年の間海洋構造物の設計者や使用者の問題となっている。本研究ではType 316と17-4 PHステンレス鋼のすきま腐食を防止するための陰極防食法が海水中で試験されている。アルミニウムと低炭素鋼のアノードを使用し、すきま腐食位置の比率、すきま腐食のピット深さおよびポテンシャル測定の結果などを明らかにした。Type 316と17-4 PHステンレス鋼はすきま腐食と水素脆化とともに受けやすい。本論文では水素脆化の危険をおかすことなく、有効にすきま腐食を防止する方法を明らかにしている。主な結果としては、(1)両ステンレス鋼に対して陰極防食によりすきま腐食をさけることができる。(2)アルミニウムと低炭素鋼のアノードはすべての位置ですきま腐食を防止できる。(3)17-4 PH鋼では過防食による強度低下の可能性があるために、低炭素鋼のアノードを用いることが望ましい。(アルミアノードは過防食と水素脆化の危険性がある。)
3857 (1980年)	<ul style="list-style-type: none"> ◦ 陰極防食とある種のコーティングシステムを併用した防食法に関する実験的研究 ◦ 概要、コーティングと陰極防食は、海洋構造物の腐食防止法として用いられているが、深水中で使用される背の高い海洋構造物が発達したことにより、構造物全体にわたり長期間防食を行うことが困難になってきた。とくにコーティングは陰極防食と併用して防食を行うことに対して信頼性がないため、海水下の部分には適用されなかった。一方はだか鋼の構造物の陰極防食の試みは、大電流が必要なこと、シールドの問題およびアノード重量などの問題から完全には成功していない。1975年以来Ameron研究所により、コーティング材料に陰極防食を行った場合と行わない場合について

	の実験プログラムが施工されてきた。その結果ある種のコーティングは陰極防食と両立できることが明らかとなった。そのコーティング法とはポリアミドCured タールエポキシの下にエポキシInhibitive なプライマーを行うことである。
3858 (1980年)	・犠牲陰極防食システムの設計のための新しい数学モデル ・概要、本論文では固定海洋構造物の防食の現状について述べ、新しい防食設計法を明らかにしている。新しい防食法とは構造物の分極状態が明らかなとき、アノード電流と寿命に関する従来のデータに合うような数学モデル（著者が提案したもの）に基づく方法である。結果として次のことがあげられる。(1)分極ポテンシャルが明らかな場合には、提案した数学モデルを種々の実機のデータに適用すれば、犠牲陰極防食デザインのコストとアノード重量を軽減できる。この軽減の効果は（電流／重量）比の大きなアノードを用いることにより可能である。(2)さらに海水中での使用時間と海底土に埋まっている領域が明らかであれば、より小さくコスト的にも安価なアノードで防食が可能であることが明らかとなった。
3859 (1980年)	・海洋環境にさらされる物体表面からの生物汚染物（Biofouling）の除去技術 ・概要、海洋環境にさらされる表面の電気的な次亜塩化処理（Hypochlorination）は生物汚染物の除去にとって有効な方法である。除去方法はまず、保護あるいは浄化されるべき表面をプラチナの薄まくでおおい、海水を電解液とした中で電気化学的のサーキットを作つて行う。試験は電流密度が0.022 mA/cm ² という低い値で、7ヶ月間海水中にさらされた面に電流を流して生物汚染物を除去した。最初のテスト結果から、8ないし24時間といった短時間間隔毎に電流を間欠的に流すことが除去に有効であることが明らかとなった。
3860 (1980年)	・北海のオイルあるいはガスプラットフォームにおける海洋生物の成長 ・概要、海洋構造物に付着し成長する生物の詳細、成長の状態などを北海の場合について述べている。また、それらの生物による構造物の腐食についても述べている。
3889 (1980年)	・北緯62°のノルウェー大陸棚の環境状態と腐食制御 ・概要、ノルウェー大陸棚北部での腐食設計条件を明らかにする方法を明らかにしている。その方法は海と海底の両環境データに基づくもので、現在すでに明らかにされている海洋学的、地理学的数据の解析を通じて腐食制御条件を推定することが非常に有益な方法であることを示した。ノルウェーの大陵棚の海水は酸素含有量と平均的海流スピードが北海に比べて高く、腐食率は北海よりもいくぶん大きい。
3890 (1980年)	・海洋で使用される特殊生産物用チューブ（プロダクションチューブ）のCO ₂ 腐食制御 ・概要、北海でガス帯が発見され、生産が開始されて以来Grade N-80材で作られたプロダクションパイプの上部にCO ₂ による腐食ケ所が見つかった。この生産ガスには1.8%のCO ₂ が含まれその溶解液により腐食が生じてくることがわかった。この問題に対処するため13Cr高合金鋼が使用されはじめた。13Cr鋼はCO ₂ 腐食に対してすぐれた抵抗力を有するとともに、プロダクションチューブとして十分な機械的性質を有するもので、ガス生産用のみならず石油生産用としても有用である。
3891 (1980年)	・パイプラインの腐食の問題とその一解決方法 ・概要、パイプラインの腐食の問題とその一解決方法が検討されている。経済的な方法としてステンレスパイプ内面への埋め込み法が提案されている。理論的および実験的考察に基づいて、新しく熱と水圧を用いた密着法を提案し、この方法が応力腐食割れ、内破など従来のステンレスパ

	イプに生じていた問題を起すことなく、非常に有効な方法でコストの面でも他のパイプより有利でありまた強度的にも十分であることを示した。
3 8 9 3 (1980年)	<ul style="list-style-type: none"> ◦ Self-shield 型のFlux-cored ワイヤを用いた溶接物の腐食疲労挙動 ◦ 概要、Self-shield 型のFlux-cored 溶接ワイヤは海洋構造物の建造に益々多用されてきている。そのワイヤを用いることにより得られる高い溶接スピードが建造の経済性を与えるというのが主な理由である。しかしFlux-cored ワイヤを用いた溶接物の腐食疲労データの不足がいまだにその溶接法の汎用性をさまたげている。この論文は2種類のFlux-cored ワイヤと A W S E 7016 を用いて作られた溶接物の腐食疲労試験結果を報告したものである。それぞれの溶接部に対して模擬海水中のS-N線図を求めるとともに、海水中および陰極防食下での疲労き裂伝播試験を行った。得られた主な結果はFlux-cored ワイヤを用いた溶接部の腐食疲労特性はA W S E 7016 の溶接部の疲労特性と同じであったことである。
3 8 9 4 (1980年)	<ul style="list-style-type: none"> ◦ 超音波探傷技術を用いたダイバーによる海洋構造物パイプの内部腐食の推定 ◦ 概要、本論文では3次元超音波像を用いた海洋構造物パイプ内面の探傷方法について述べる。その方法は潜水調査船からダイバーが海中に出で、超音波探傷器をパイプにあて、その出力を潜水調査船の中のオペレーターが解析するという方法である。探傷できる損傷としては、パイプの幾何学的変形、外部腐食、局部的な内部腐食および疲労き裂などがある。
4 1 5 0 (1981年)	<ul style="list-style-type: none"> ◦ 窒素強化ステンレス鋼の硫化応力割れ抵抗 ◦ 概要、近年種々の窒素強化オーステナイト系ステンレス鋼が用いられるようになってきた。その材料はステンレス鋼の300シリーズよりも高い強度を有するだけでなく、他の付加すべき性質を有している。本研究では種々の合金鋼に対する硫化応力割れ試験結果を報告している。大部分の合金鋼は応力レベルによっていくぶん割れを生じ易く、これは高いマンガン含有率によるものである。ただ1つ窒素強化ステンレス鋼XM-19がマンガン含有率5%であるにもかかわらず高い硫化応力割れ抵抗を有していた。この差異はXM-19のすぐれた腐食特性によるものである。
4 1 5 1 (1981年)	<ul style="list-style-type: none"> ◦ 海洋のガス、オイル生産用の高性能ステンレス鋼 ◦ 概要、SANDVIK Sanicro 28 およびSAF 2205の両ステンレス鋼は経済性の面および腐食抵抗（海水中、H₂S中、CO₂中、Cl中）の面ですぐれた性能を有している。Sanicro 28はSAF2205よりさらにすぐれた幅広い適用性のある材料である。本論文では種々の環境下における両ステンレス鋼の腐食試験の結果を示している。
4 1 5 2 (1981年)	<ul style="list-style-type: none"> ◦ クラッドおよび非クラッド材の厚壁構造物の疲労解析 ◦ 概要、経済性のためにステンレス材料のクラッド鋼を用いることはよく行われているが、クラッド鋼を応力集中部に用いた場合の疲労特性についてはあまり明らかではない。そこでこの研究ではクラッド鋼を応力集中部に用いたときの疲労特性について明らかにしている。試験はSide notch試験片を用い切欠部にクラッド材を用いて軸荷重下で行った。母材にはAISI4130をクラッド材にはInconel 625あるいはAISI316Lを用いた。試験結果の要約は、(1) ASMEのBoiler Code, Section 8, Division 2, Appendix 5の疲労解析法は低サイクル領域で安全側すぎる傾向にある。(2)クラッド材と母材の間からの疲労き裂発生は、母材に比べクラッド材が低い降伏応力で高い冷間加工特性をもつ場合に生ずる。(3)ラック材の試験片に引張りの予荷重を加えておけば、クラッド表面に大きな圧縮残留応力を生じさせることができる。そこで疲労寿命も明らかに長くなると考えら

	れるが実際は非クラット材とあまり差はない。
4153 (1981年)	<ul style="list-style-type: none"> ・耐腐食性パイプの開発 ・概要、掘削用パイプの腐食の問題を解決するために、熱-水圧法により耐食材のうす肉パイプを鋼管にうめこむ方法を提案した。またパイプの継手部の設計例および工作例が示されている。主な結果としては(1)著者らが提案した熱-水圧法で耐食性ライナーをタイトフィットさせる方法はパイプの製作に非常に有効な方法であり、(2)ライナーの圧縮応力は応力腐食割れに対してすぐれた抵抗力を有する。(3)製作法が簡単であるので経済的である。(4)ライナーは冶金学的にパイプに接着されるわけではないので、ライナーと外側のパイプの材料の組合せが任意である。
4154 (1981年)	<ul style="list-style-type: none"> ・海水中における鋼の陰極防食に対する水深の影響 ・概要、炭素鋼の陰極防食下の金属沈着物の生成に対する静水圧の影響に関する実験結果を明らかにしている。実験結果によれば、金属沈着物は主にマグネシウム金属であり、もしあるとすればカルシウム沈着物が2番目である。静水圧下での沈着物は従来示されているとおり、海水表面に比べてやわらかく性質が異ったものである。
4155 (1981年)	<ul style="list-style-type: none"> ・銅イオンのControll release ・概要、海洋で使用される構造物に付着する生物の付着防止のため銅板を構造物に取り付け、銅イオンの溶ける率を制御することによってそれを行う方法について述べている。また海洋構造物、ブイおよび船舶にこの方法を適用してよい成果をあげたことを述べている。