

本研究は、モーターボート競走公益資金による  
日本財団の補助金を受けて実施したものである。

研究資料 №407号

# 実船計測による横部材の荷重・応力 計算法の検証

## 成 果 報 告 書

(第 217 研究部会)

平成 8 年 3 月

社 团 法 人  
日 本 造 船 研 究 協 会

# はしがき

本報告書は、日本財団の補助事業として、日本造船研究協会第217研究部会において、平成4年度から平成7年度の4カ年で実施した「実船計測による横部材の荷重・応力計算法の検証」の研究成果を取りまとめたものである。

## 第217研究部会委員名簿

(敬称略、順不同)

部会長	藤野正陸(東京大学)(H.4~7)	
代表幹事	関濱昌弘(日立造船)(H.4~7)	
委員	船木俊彦(大阪大学)(H.4~7)	永元隆一(東海大学)(H.4~7)
	浦環(東京大学)(H.4~7)	内藤林(大阪大学)(H.4~7)
	貴島勝郎(九州大学)(H.4~7)	井上義行(横浜国立大学)(H.4~7)
	渡邊巖(船舶技術研究所)(H.4~7)	湯浅通史(日本海事協会)(H.4~7)
	前田恂(石川島播磨重工業)(H.4)	笛島洋(石川島播磨重工業)(H.4~7)
	熊倉靖(石川島播磨重工業)(H.5~7)	加藤泰彦(三井造船)(H.4~7)
	谷口友一(川崎重工業)(H.4~5)	高坂明(川崎重工業)(H.6~7)
	豊福正継(日本鋼管)(H.6~7)	後藤隆昭(日本鋼管)(H.4)
	林和男(日本鋼管)(H.5)	飯島正明(住友重機械工業)(H.4)
	二見吉雄(住友重機械工業)(H.5~7)	伏見彬(東京大学)(H.7)*
	戸沢秀(三菱重工業)(H.4~7)	末岡英利(三菱重工業)(H.7)
	亀井前人(日立造船)(H.6~7)	近藤公雄(日立造船)(H.4~5)
	宮内淳(新来島どっく)(H.4~7)	安田征夫(川崎汽船)(H.4~7)
	小川晃(第一中央汽船)(H.5~7)	* (H.4~6)三菱重工業

## 幹事会委員名簿

(敬称略、順不同)

主査	関濱昌弘(日立造船)(H.4~7)	
委員	湯浅通史(日本海事協会)(H.4~7)	前田恂(石川島播磨重工業)(H.4)
	笛島洋(石川島播磨重工業)(H.4~7)	加藤泰彦(三井造船)(H.4~7)
	谷口友一(川崎重工業)(H.4~5)	高坂明(川崎重工業)(H.6~7)
	後藤隆昭(日本鋼管)(H.4)	豊福正継(日本鋼管)(H.6~7)
	林和男(日本鋼管)(H.5)	二見吉雄(住友重機械工業)(H.5~7)
	飯島正明(住友重機械工業)(H.4)	近藤公雄(日立造船)(H.4~5)
	亀井前人(日立造船)(H.6~7)	伏見彬(東京大学)(H.7)*
	戸沢秀(三菱重工業)(H.4~7)	末岡英利(三菱重工業)(H.7)

\* (H.4~6)三菱重工業

ワーキンググループ1 委員名簿

(敬称略、順不同)

主　　査	船　木　俊　彦(大阪大学)(H.4～7)	
幹　事	近　藤　公　雄(日立造船)(H.4～5)	亀　井　前　人(日立造船)(H.6～7)
委　員	斎　藤　公　男(広島大学)(H.4～7)	豊　貞　雅　宏(九州大学)(H.4～7)
	河　辺　寛(防衛大学校)(H.4～7)	影　本　浩(東京大学)(H.4～7)
	熊　野　厚(日本海事協会)(H.4～7)	笹　島　洋(石川島播磨重工業)(H.4～7)
	伊　東　章　雄(石川島播磨重工業)(H.4～7)	賀　田　和　夫(川崎重工業)(H.4～5)
	直　井　秀　明(川崎重工業)(H.6)	清　水　穂　高(川崎重工業)(H.7)
	永　田　修　一(日立造船)(H.4～7)	伊　藤　正　明(三井造船)(H.4～7)
	萩　原　俊　秀(日本鋼管)(H.4)	麿　谷　茂(日本鋼管)(H.5～7)
	井　上　俊　司(三菱重工業)(H.4～5)	佐　藤　宏　一(三菱重工業)(H.6～7)
	河　地　三　郎(住友重機械工業)(H.4～7)	見　上　孝　一(住友重機械工業)(H.5～7)

ワーキンググループ2 委員名簿

(敬称略、順不同)

主　　査	浦　　環(東京大学)(H.4～7)	
幹　事	戸　沢　秀(三菱重工業)(H.4～7)	
委　員	鈴　木　英　之(東京大学)(H.4～7)	荒　井　誠(横浜国立大学)(H.4～7)
	能　勢　義　昭(東京大学)(H.4～7)	渡　邊　巖(船舶技術研究所)(H.4～7)
	有　馬　俊　朗(日本海事協会)(H.4～7)	磯　崎　一　郎(日本気象協会)(H.4～7)
	笹　島　洋(石川島播磨重工業)(H.4～7)	野　崎　修　一(三井造船)(H.4～7)
	浅　尾　元　秀(川崎重工業)(H.4～5)	本　井　達　哉(川崎重工業)(H.6～7)
	片　岡　福　彦(日本鋼管)(H.4～7)	河　地　三　郎(住友重機械工業)(H.4～7)
	岩　井　潮(住友重機械工業)(H.5～7)	近　藤　公　雄(日立造船)(H.4～5)
	亀　井　前　人(日立造船)(H.6～7)	岩　田　節　雄(日立造船)(H.4～7)

ワーキンググループ3 A 委員名簿

(敬称略、順不同)

主　　査	内　藤　林(大阪大学)(H.4～7)	
幹　事	谷　口　友　一(川崎重工業)(H.4～5)	高　坂　明(川崎重工業)(H.6～7)
委　員	竹　本　博　安(船舶技術研究所)(H.4～7)	熊　野　厚(日本海事協会)(H.4～7)
	笹　島　洋(石川島播磨重工業)(H.4～7)	木　曾　孝(川崎重工業)(H.4～7)
	賀　田　和　夫(川崎重工業)(H.4～5)	直　井　秀　明(川崎重工業)(H.6)
	清　水　穂　高(川崎重工業)(H.7)	浅　尾　元　秀(川崎重工業)(H.4～5)
	本　井　達　哉(川崎重工業)(H.6～7)	近　藤　公　雄(日立造船)(H.4～5)
	亀　井　前　人(日立造船)(H.6～7)	戸　沢　秀(三菱重工業)(H.4～7)
	中　島　光　明(三菱重工業)(H.4～7)	堤　　則　夫(川崎汽船)(H.4～7)

ワーキンググループ 3 B 委員名簿

(敬称略、順不同)

主 査 内 藤 林(大阪大学)(H.5~7)  
幹 事 二 見 吉 雄(住友重機械工業)(H.5~7)  
委 員 竹 本 博 安(船舶技術研究所)(H.5~7) 熊 野 厚(日本海事協会)(H.5~7)  
 笹 島 洋(石川島播磨重工業)(H.5~7) 中 村 真 一(川崎重工業)(H.5~7)  
 岩 井 潮(住友重機械工業)(H.5~7) 近 藤 公 雄(日立造船)(H.5)  
 亀 井 前 人(日立造船)(H.6~7) 中 島 光 明(三菱重工業)(H.5~7)  
 宮 田 仁(第一中央汽船)(H.5~7)

# 目 次

1. 緒 言 .....	1
2. 実船試験の指針 .....	2
2.1 自動計測・解析システム .....	2
2.2 実船試験実施計画 (Ship A) .....	2
2.3 実船試験実施計画 (Ship B) .....	3
2.4 波浪計測法 .....	4
3. 実船計測 .....	9
3.1 実船計測の概要 (Ship A) .....	9
3.2 実船計測の概要 (Ship B) .....	11
3.3 陸上データ解析システム .....	13
4. 計測データの解析 .....	14
4.1 波浪について .....	14
4.2 計測データ解析結果 .....	16
4.3 解析データの考察 .....	18
5. 荷重・応力計算法の検証 .....	22
5.1 SHIP - A .....	22
5.2 SHIP - B .....	28
5.3 相関係数 .....	35
5.4 その他の検証法の考察 .....	39
5.5 バラスト水を考慮した船側波浪変動圧 .....	39
6. 研究成果の総括 .....	41
6.1 研究成果のまとめ .....	41
6.2 今後の課題 .....	43
7. 結 言 .....	44

## 1. 緒 言

不規則な気象・海象中を航行する船舶の船体構造には様々な波浪荷重が作用するが、この複雑な荷重に対する構造応答予測の向上が、船体構造設計の信頼性を高める上で重要なファクターとなる。

近年のコンピュータの発達にともない理論解析に基づいて、想定された海象状態において波浪中航行する船舶の船体運動、荷重、構造応答を直接計算で求めることができとなってきたが、これらを検証、補完すべき実船計測のデータは非常に少ない。

強度評価の信頼性向上を図るためにには系統立てた各種船舶の継続的実船計測により船体構造に作用する荷重およびこれに対する構造応答の実体を把握することが極めて重要な課題である。

当研究部会では運動特性、構造様式の異なる船舶について主に横、局部強度に対応する実働荷重、応力等について長期実船同時計測を実施し、データの収集、解析を行うとともに、現在設計で用いられている荷重、応力計算法との比較検証を行い、船体構造設計の信頼性向上を図ることを目的に平成4年度から7年度の4年間にわたり次の研究を実施した。

研究の第1の柱である実船計測は2隻を対象に実施し、第1船の川崎汽船株式会社所属、川崎重工業株式会社建造のコンテナ船“せとぶりっじ”(SHIP A)については、平成5～7年度にわたって北米航路16航海分のデータを収集、第2船の第一中央汽船株式会社所属、住友重機械工業株式会社建造のパナマックスバルクキャリア“PACIFIC NOVA”(SHIP B)については、平成6、7年度にわたって7航海分のデータを収集した。計測は、波高をはじめとする海象条件、加速度、動搖角度等の船体運動、船底、船側に働く波浪変動圧およびスラミング圧、船体構造の応答応力等を対象に長期にわたって実施し貴重なデータを収集した。

計測データは本部会で開発された自動計測システムで収集し、データ解析も同様に当部会で開発された解析システムで実施した。また、解析データは別途検証を行いその妥当性を確認した。計算法の検証で重要なファクターとなる波浪に関しては、従来の目視による観測に加え、波高計によるデータを収集し、新たに開発した方法により解析を行うとともに気象データに基づく波浪推算結果との比較も実施した。

本研究の第2の柱である荷重・応力計算法の検証については、SHIP A,Bの両船について現状設計で用いられているストリップ法による船体運動、波浪変動圧の長短期予測、および縦強度と横強度部材に分離した離散化法による応力応答計算を行ない、計測結果との比較検証からその差異について検討した。また、離散化手法に基づく荷重、応力の計算法とは別に相関係数法を提案し、理論計算値と実船計測値との比較検証により、その適用の可能性について検討した。さらに、ストリップ法に基づく荷重・応力計算法の改善法として、船側タンク内のバラスト水が船側波浪変動圧に及ぼす影響について検討した。

最後に実船計測と計算結果の比較検討から、現在設計で用いられているストリップ法に基づく荷重・応力計算法について今後の課題を抽出した。

## 2. 実船試験の指針

### 2.1 自動計測・解析システム

最近の計測機器の進歩を活用し、船体運動、波浪（波高）、荷重、応力等の長期多点同時計測を自動で行い、応答、統計値等の解析を船上で行う計測・解析システムを開発した。

以下、実船計測の第1船である Ship A に対する仕様に基づき概要を述べる。

- (1) 本装置は船体に取付けられた各種信号をヒストグラムレコーダに収録する長期計測と、正規化後 AD 変換器を介しメモリに取り込む短期計測との 2 系統に分けデータを収録する。
- (2) 計測開始は設定したプランに従いインターバル24時間で動作する全自動計測モードと、キーボードより収録開始等の動作をする手動計測モードの 2 種類を設定する。
- (3) 長期計測ではヒストグラムレコーダ(24ch)のレインフロー法(一次元)でカウントした値を収録コンピュータに RS-232C のインターフェースを介し転送するとともに、カウント値をクリア後再度計測を開始する。計測インターバルは 24 時間で、計測時間 22 時間とし、残り 1 時間で転送等の処理を行う。収録したカウント値はそれまでの合計カウント値とともに REXAS ギャー(ファイル共有ネットワークシステム)を介し、シリコンディスクに一旦収納する。
- (4) 短期計測では AD 変換器で各チャンネルの信号を 20 ms サンプリングで収録しながらデータをコンピュータに転送する。転送したデータの高速データ(20 ms)5 ch はそのまま、低速データ(54 ch + 船速 1 ch + 方位 1 ch + 風向・風速 2 ch)は 1/10 に間引きし収録コンピュータの RAM 上に各々収納する。計測インターバルは 4 時間で、30 分間のデータを収録する。これらのデータは収録開始前に取得した船舶計器情報(計測値、計測日時(JST)、本船位置)とともに、REXAS ギャーを介しシリコンディスクに収納、この時併せて縦応力データは各成分応力(縦/横/捩り)へ変換しシリコンディスクに収納する。
- (5) シリコンディスクに収納したデータは REXAS ギャーを介し解析用コンピュータに取り込み、各種解析処理(一次元レインフロー、ゼロアップクロス法)を行う。解析処理結果は再び REXAS ギャーを介しシリコンディスクに収納する。
- (6) 1 日の短期計測データ(4 時間毎 6 回分の収録データ、解析データ)と長期計測データは、コンピュータを介し 8 mmMT に一括で保存する。
- (7) 8 mmMT に格納したデータは 1 日単位で解析用コンピュータを介しシリコンディスクに呼び出し、解析用コンピュータによるデータの確認が可能とする。
- (8) World-wide 航路船である Ship Bへの対応を考え、ハード的には最長 120 日までの無人計測を可能とする。

船上に配置される計測・解析システムの構成を図 2.1.1 に示す。

### 2.2 実船試験実施計画(Ship A)

計測点は合計 64ch であり、全体の計測点配置を図 2.2.1 に示す。以下に各計測項目に対する留意点を述べる。

#### (1) 船体加速度計測

加速度計は人の交通による損傷及び風雨の影響を避けるため、いずれも上甲板裏又は船首樓甲板裏に設けることとした。

#### (2) 船体ロール・ピッチ計測

船体ロール・ピッチ計は、居住区内上甲板左舷の計測室に設けることとし、計測室床面にボルトにて固定した。

### (3) 波高・相対水位計測

波高計は、波高計測計位置近傍のコンテナポストに設けた振り出し式の波高計取付台の先端に取り付けることとした。この取付台は荷役時等に邪魔にならぬよう、ボルト操作により船側部に収納できる構造とした。波高計取付台の設計に当たっては、波浪荷重に対する骨組強度解析を行い、予想される最大波浪荷重に対し充分な強度を有することを確認した。

### (4) 船体縦曲げ、ワーピング応力計測

インナーハル下部の歪ゲージは、水圧による歪の影響を除くため、ロンジに沿った線上で水圧による歪がゼロとなる（ロンジの水圧による曲げモーメントがゼロ）位置を求め、その位置に設けた。なお、本質安全回路が要求される区画については、計測機器との間に防爆のためのバリアを設けた。

### (5) 外板付ロンジ変動水圧計測

いずれのロンジにもフェースプレート上の4点に歪ゲージを設け、プリッジにより縦曲げ応力成分を除き、水圧変動により生ずるロンジの曲げ歪成分のみを検出することとした。

### (6) 内殻横強度応力計測

フロアまたはガーダーの表裏に歪ゲージを対にして設け、プリッジにより両者の平均を検出することとし、フロアまたはガーダープレートの面外曲げ応力の影響を取り除くこととした。なお、せん断応力については、さらにプリッジにて直交する2方向の絶対値の平均値を検出こととした。

### (7) Bow Flare 部水圧計測

サイドロンジ変動水圧計測と同様にフェースプレート上4点に歪ゲージを設け、プリッジにより縦曲げ応力成分の影響を除いた。

### (8) 船尾スラミング水圧計測

該部には水圧計測に適当なステイフナが設けられていないことより、計測は船底及び後端壁部パネルの中央に設けた歪ゲージにより行うこととした。

本船居住区内上甲板上に設けられた計測室から各センサーまでの計測用の電線は、アンダーデッキパッセージ内は計測用以外の電線とまとめて固定し、タンク内等他の電線がない場所については電線取付台を設け、インシュロックにて固定した。

## 2.3 実船試験実施計画 (Ship B)

全体計測点配置を図2.3.1に示す。各計測項目に対しては、Ship Aと同様の注意を払った。ここでは、Ship Bとして特に留意した事項について述べる。

Ship Bはバルクキャリアであり、船体各所のセンサーから計測室までのケーブルは上甲板上を通るため計測用電路の配管を必要とした。大規模な計測工事となるため、工事計画には建造工程を考慮する必要があった。計測工事計画に際し検討した主要な点を下記する。

- (1) 計測用の機器、パイプ、ケーブル等の計画は本船の電装関係の基本図作成と同時期に検討し、出来るだけ通常の建造ラインに乗せた。
- (2) 本質安全回路以外のケーブルは、本船の主電路のパイプ内に配線し、計測用の配管を減らした。また、主電路から分岐した計測用パイプはハッチサイド等できる限り通行の邪魔にならない位置に配管した。波高計への電路パイプについては舷側部の交通路を横切るためスロープウェイを設置した。
- (3) 二重底内からのケーブルはロワースツール内で内底板を貫通させた。この時、同じタンク内のケーブルは一箇所に

まとめ、グランドピースの付いた蓋を貫通させた。これにより内底板に直接多くのグランドピースが付くのを防ぎ、撤去時にはグランドピースの付いていない蓋と交換するだけとなった。

(4) ホールド内の波浪変動圧計測点ではサイドフレーム間にカーリング部材を設け、歪を計測したが、次の点を考慮しカーリングをボックススチフナにして裏面にゲージを取り付けた。

- ・ 積み荷の衝撃や摩擦からゲージを保護する。
- ・ ホールドの水洗い時の衝撃からゲージを保護する。
- ・ 積み荷がカーリングの周囲にたまらないようにする。

ホールドフレームの応力計測点も同じ理由からフレームのフェースの裏面にゲージを取り付けて、保護カバーを取り付けた。

(5) 縦曲げ計測点には電路パイプのサポート等にボルトナットで取付けるタイプの保護カバーを製作し取付けた。さらに、保護カバーの内面に端子箱を取り付け、デッキ上に取付けたゲージの上にかぶせるように設置した。船体中央部の加速度計測点には保護カバー付きの加速度計取付け台を設置した。

## 2.4 波浪計測法

実際の海域で船舶が遭遇する海洋波の方向波スペクトルを推定するには、船を方向波の観測に用いる観測ブイ（例えば、Heave/Pitch/Roll buoyなど）と見立てれば良い。しかしながら、船体が前進速度を有する場合については、未だに標準的な手法は確立されているとは言い難い。ここでは、橋本ら<sup>1)</sup>によって開発されたEMEP(Extended Maximum Entropy Principal Method)をもとに、追波状態までを扱える方向波スペクトルの推定法を新たに提案し、数値シミュレーション並びに水槽実験により、提案手法が追波状態も含めて高い推定精度を有することを示す。なお、本手法による実船試験データの解析結果については4章で示す。

### (1) 数値シミュレーション例

シミュレーションの対象としては、図2.4.1に示すスターアレイが一定速度Uで進行している場合を想定する。スターアレイは、波高計アレイによる方向波スペクトルの観測で、4台の波高計を使用する場合の最適配置の一つ<sup>2)</sup>とされているものである。本推定法の分解能の例を図2.4.2に示す。図は絶対周波数fと出会い角χについて方向波スペクトルの形で示しており、“Input”と表記されているものが入力した方向スペクトル、“Estimated”と表記されているものが本推定法によって推定された結果である。図にはEMLM<sup>3)</sup>(Extended Maximum Likelihood Method)で推定した結果を併記している。図から判るように、本推定法による推定結果は、わずか4成分の情報から、追波状態を含めて、一方向波、二方向波とも明瞭にピークをとらえ、エネルギー分布も入力値をほぼ再現できている。

### (2) 水槽実験データによる検証

使用する水槽実験データは、谷澤ら<sup>4)</sup>によって報告がなされているVLCCの実験データである。供試模型を図2.4.3に示す。図中に示す4箇所の点(RW-1、RW-2、RW-3、RW-4)で計測した相対水位変動を用いて、本推定法により方向波スペクトルを推定してみる。フルード数Fn=0.131、波長船長比λ/L=0.75の結果を図2.4.4に示す。推定された方向波スペクトルを絶対周波数fと出会い角χについて示したものである。図より、いずれも明瞭に入射波が検出されていることが判る。図2.4.5は、相対水位変動から推定された入射波の波向χ₀' と実験の際に設定された波向χ₀の比較を示したものである。両者はよく対応しており、本推定法が高い方向分解能を有していることが、この結果からも裏付けられている。図2.4.6は、入射波のスペクトルから推定されたモーメント√m₀と相対水位変動から推定されたモーメント√m₀' の比を示したものである。図から向波状態では、√m₀と√m₀' とはほぼ一致しているものの、追波状態では定量的な差が見受けられる。推定に用いた応答関数の計算値推定精度が不十分なために生

じていると考えられる。

以上より、本手法は追波状態も含めて高い分解能を有することが判った。しかし、限界もあり、船体応答関数の推定精度が悪い場合や追波状態で重なり合う成分波の絶対周波数が非常に近い場合には分解能は低下する。

## 参 考 文 献

- 1) 橋本典明他：海洋波の方向スペクトルの推定における最大エントロピー原理法（MEP）の拡張、港湾技術研究所報告、第32卷第1号、pp.3-25、1993
- 2) 合田良美：波高計群による方向スペクトルを用いた反射波推定法の検討、港湾技術研究所報告、第19卷、第3号、pp.37-69、1980
- 3) 磯部雅彦他：方向スペクトルの推定におけるMLMの拡張、第31回海岸工学講演会論文集、pp.173-177、1984
- 4) 谷澤克治、渡辺巖他：短波領域を航走するVLCCの船側に働く波圧に関する模型実験、日本造船学会論文集、174号、pp.233-242、1993

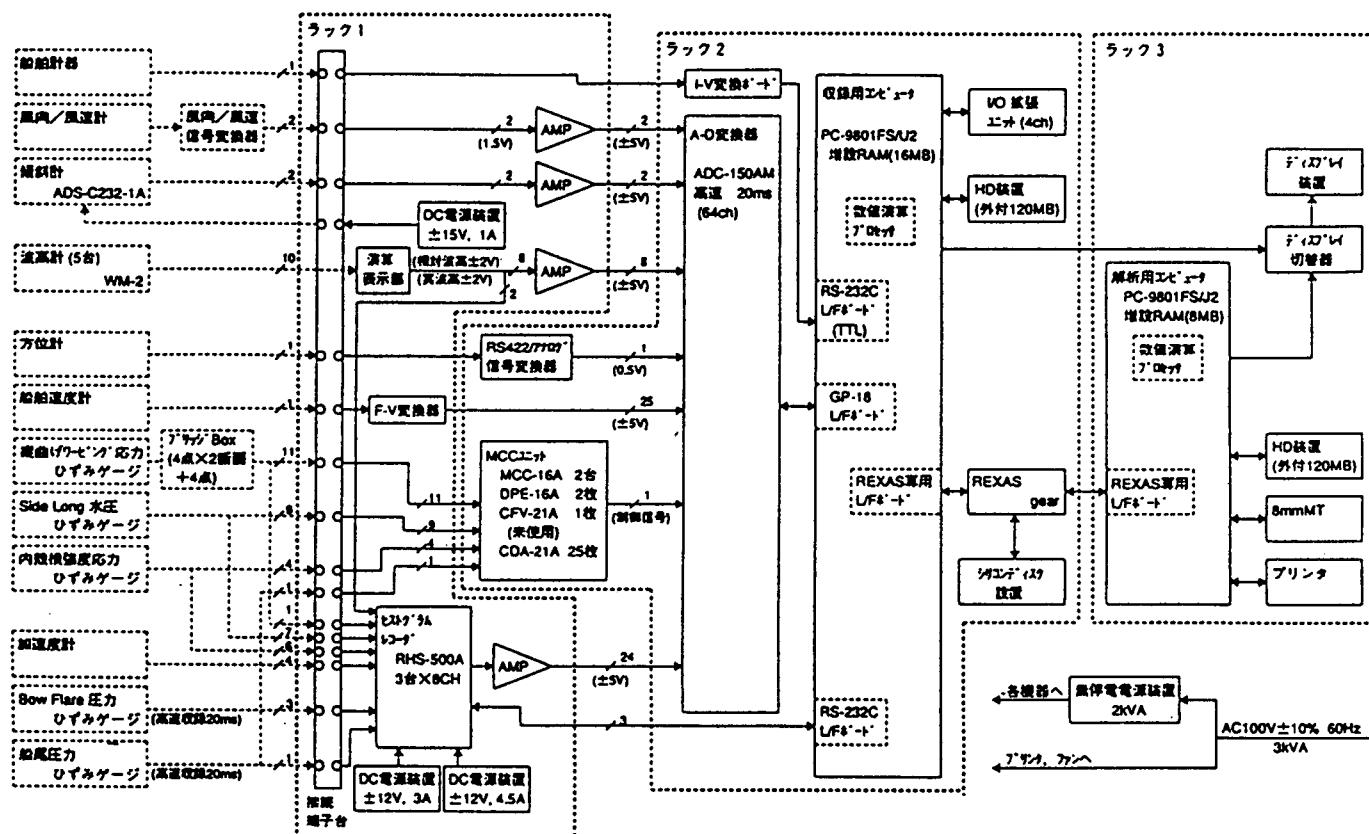
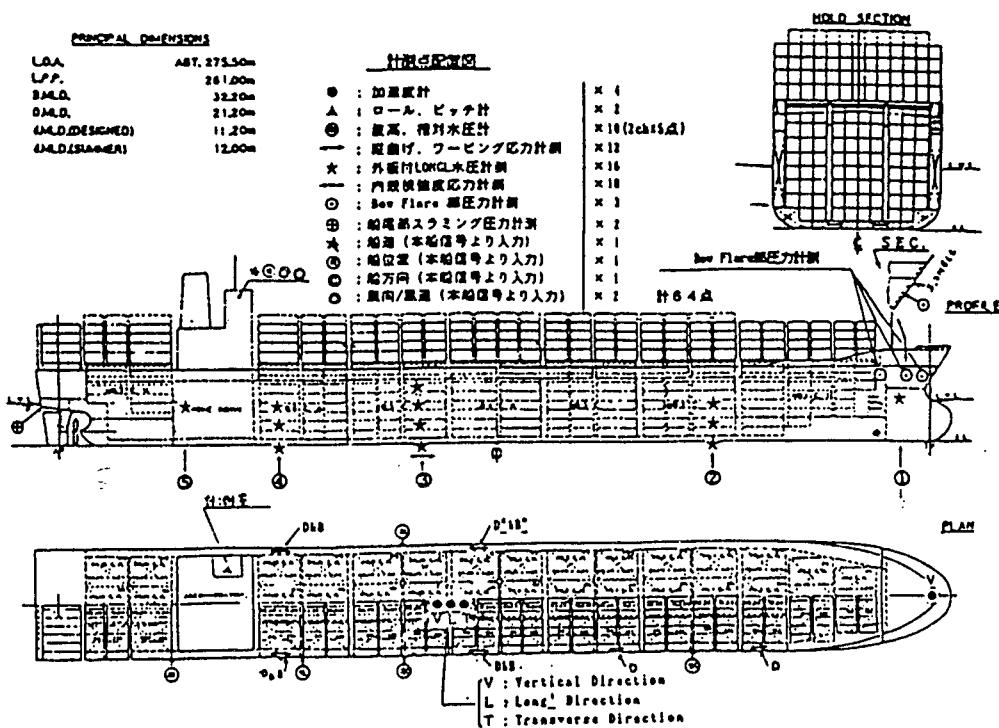


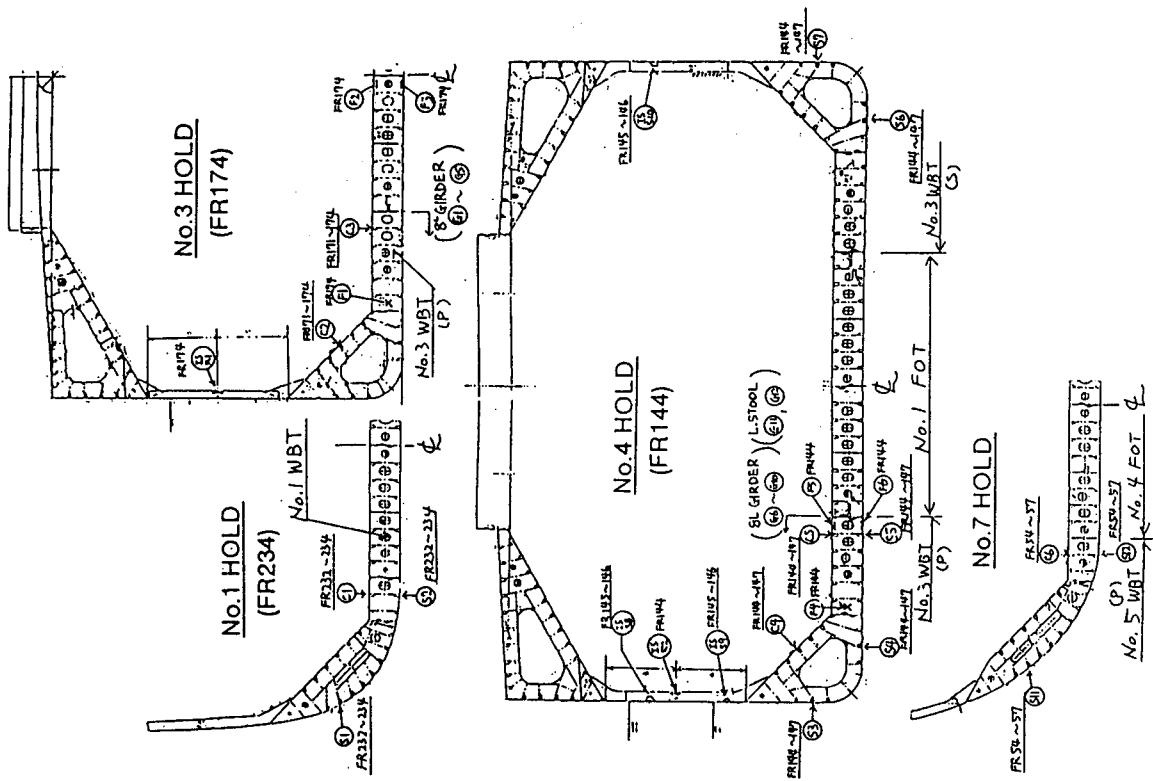
図 2.1.1 計測・解析システムブロック図 (Ship A)



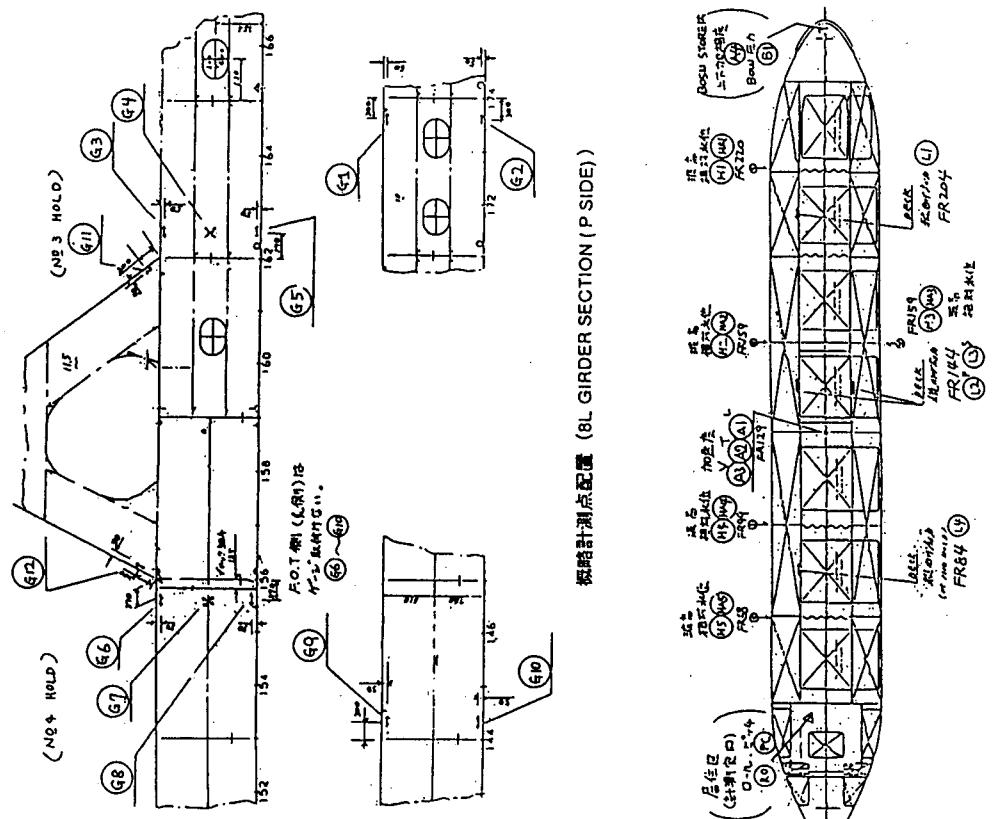
計測項目	計測点 NO.	点位	計測場所	使用ゲージ	備考
1 船体加速度	(A1)-(A6)	4	UPPER DECK下	加速度計	
2 船体ロール・ピッチ	(A1), (P) (A1)-(A6)	2	計測室内 (居住区内)	ロール・ピッチ計	センサーは計測室内に設置する。
3 高さ・相対水位 + 加速度	(A1)-(A6)	5	UPPER DECK上(最高)	鉛直計	
	(A1)-(A6)	5	UPPER DECK下 (UND. DEK. P. PASS.)内	加速度計	
4 船体現曲げ・ ワーピング応力	(A1)-(A6)	1, 2	UPP. DECK, R.S. GIB. & LONG. SHOT下方部 (U. D. P. PASS. & HOLD)	屈ゲージ	
5 外部横強度応力	(A1)-(A6)	1, 6	S. S. TE 内	垂ゲージ	4ゲージ/1計測点
6 内部横強度応力	(A1)-(A6)	1, 6	S. S. TE 内	垂ゲージ	2ゲージ/1計測点 (板の裏面に貼る)
7 BOW FLARE部負荷水圧	(A1)-(A6)	3	船首柱内 & UND. DEK. P. PASS. 内	垂ゲージ	4ゲージ/1計測点
8 船尾部スラミング圧	(A1), (A6)	2	STERN VELL 内 & S.G. FLAT 内	垂ゲージ	
9 船速	(A7)	1	—	本船信号を 入力する。	
10 位姿	(A8)	1	—	GPS信号を 入力する。	
11 航方向	(A9)	1	—	本船信号を 入力する。	
12 風向・風速	(A10)-(A14)	2	—	•	

計64点

図 2.2.1 コンテナ船実船計測計測点配置図 (Ship A)

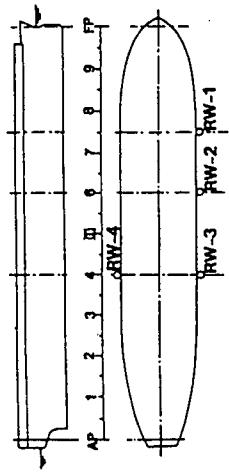


概略計測点配置 (HOLD内及び二重底バーストタンク内)



概略計測点配置 (上甲板上)

図 2.3.1 B/C 実船計測点配置図 (Ship B)



$L = 4.5\text{m}$

図 2.4.3 VLCC 模型

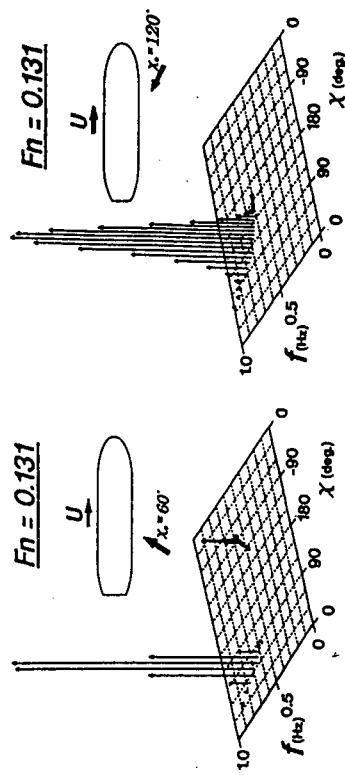


図 2.4.3 水槽実験データの解析例

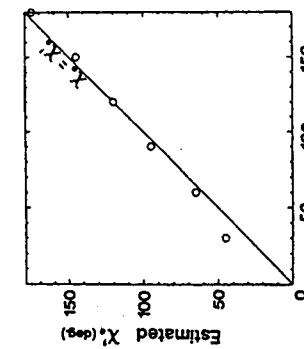


図 2.4.5 波向の比較

図 2.4.6 モーメントの比較

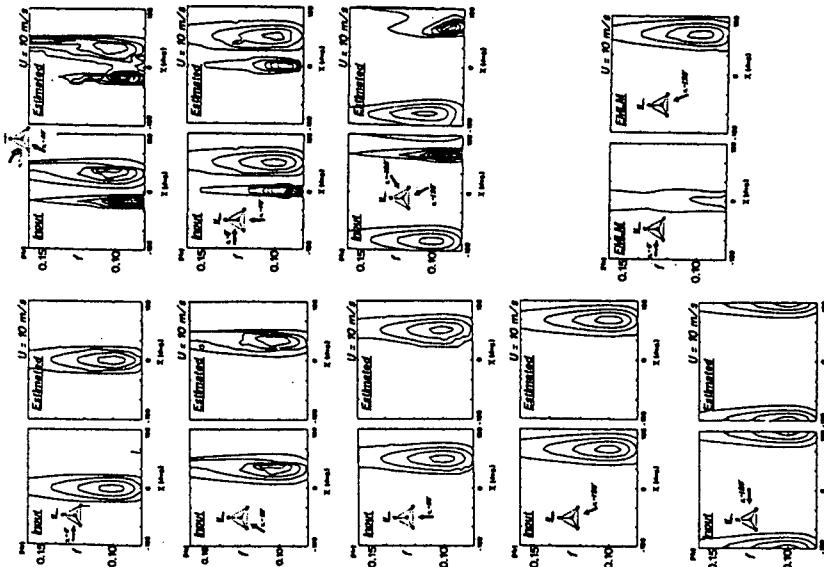


図 2.4.2 本推定法の分解能 ( $U = 10\text{m/sec}$ )

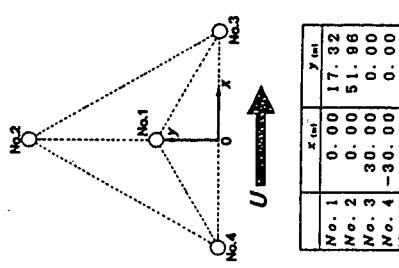


図 2.4.1 計算対象のスターアレイ

### 3. 実船計測

#### 3.1 実船計測の概要 (Ship A)

##### 3.1.1 計測概要

主計測は、平成5年から平成6年にかけて、第1次航～第8次航にて実施した。その後、計測点数を減らし、第10次航～第17次航にて継続計測を行った。計測点数は、主計測が64点、継続計測が24点とした。主計測点の内、24点はヒストグラムレコーダーにもデータを取り込んだ。継続計測は、ヒストグラムレコーダーだけで実施した。

##### 3.1.2 計測項目と計測点配置

主計測時の計測点の配置を図3.1.2-1に、計測項目を以下に示す。

###### (1) 出合海象等

風向、風速、波高、相対波高、本船の位置

ログブロックデータ、気象庁への海象報告データも本船側から入手した。

###### (2) 船体運動

加速度、ロール角、ピッチ角、船速

###### (3) 波浪変動圧

外板付きロンジの歪計測より求めた。

###### (4) 波浪衝撃圧

Bow Flare部圧力、船尾スラミング圧力

###### (5) 構造の応力応答

内殻横強度応力（カーゴホールド前部二重底のフロア及びガーダー）

縦曲げ、ワーピング応力（中央部及び機関室前部横断面）

###### (6) ヒストグラムレコーダーによる計測

主計測時の64点の計測点のうち24点に対しては定時計測の他に1日当り23時間を対象にヒストグラムレコーダーによるデータ採取を行い頻度分布として記録した。

##### 3.1.3 計測実績

第7次航の内、海象がもっとも悪いと思われる2月16日の短期計測結果を図3.1.3-1に示す。

## SKETCH

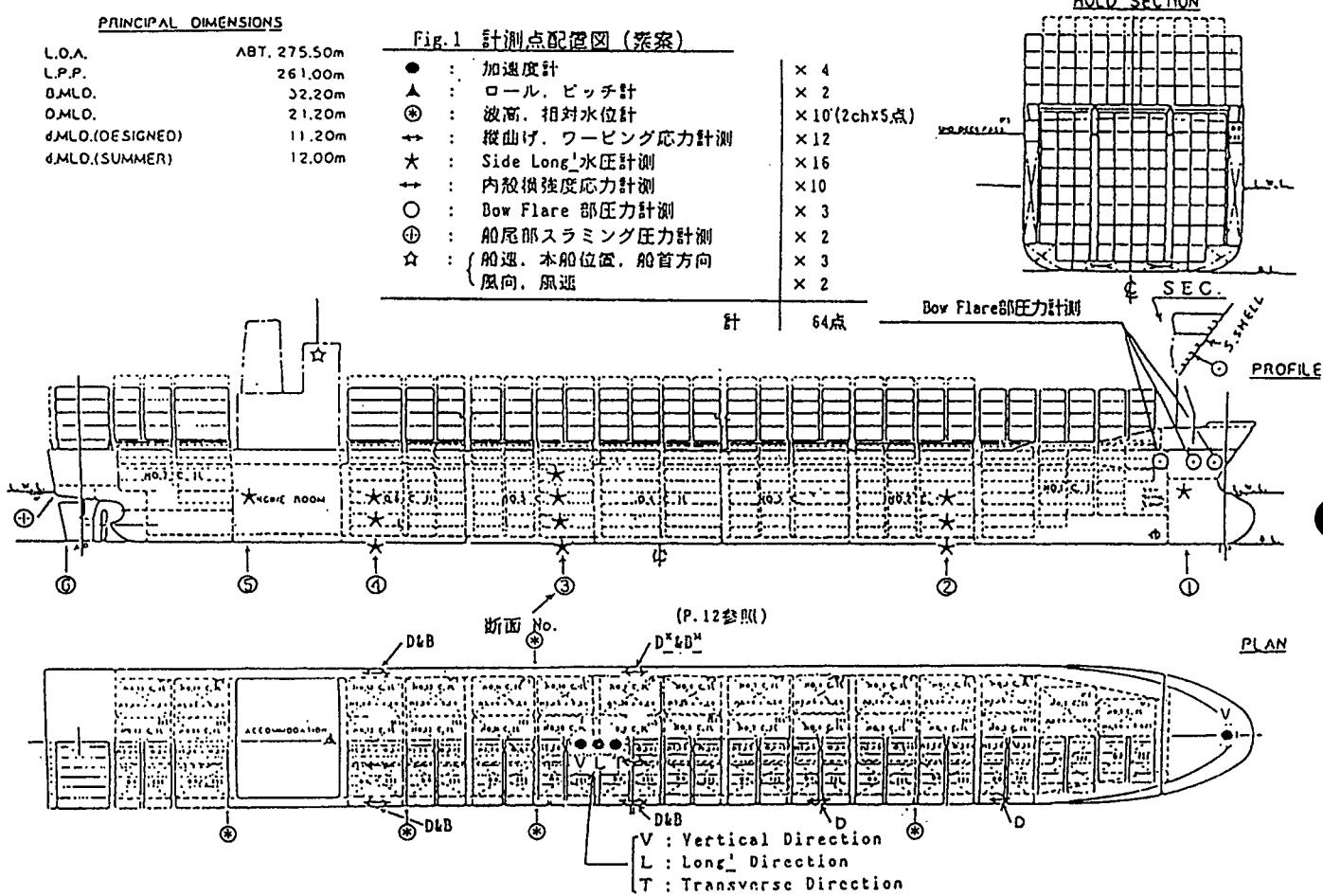


図 3.1.2-1 コンテナ船実船計測点全体配置図

【コメント】 : SR217 "Seto-Bridge" 7th voy. 94-01-18 >> JPN-China-JPN-USA-JPN

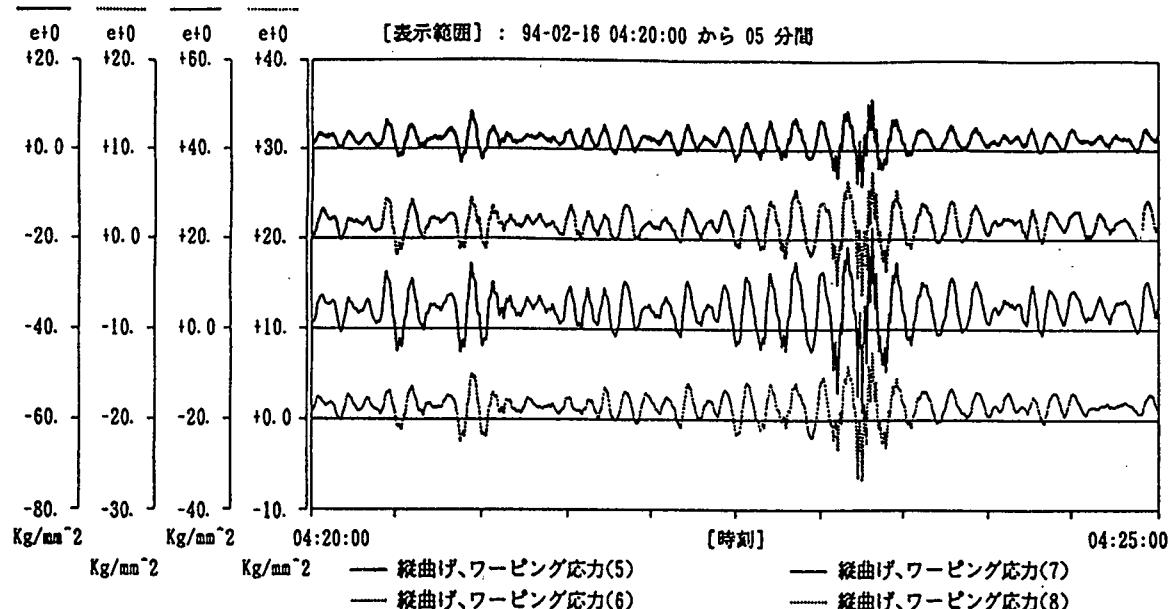


図 3.1.3-1 時系列グラフ

### 3.2 実船計測の概要 (Ship B)

#### 3.2.1 計測概要

計測は、平成6年から平成7年にかけて実施された第1次航から第7次航までを対象した。計測点数は64点とし、そのうち24点は、ヒストグラムレコーダーにもデータを取り込んだ。

#### 3.2.2 計測項目と計測点配置

計測点の配置を図3.2.2-1に、計測項目を以下に示す。

##### (1) 出合海象等

風向、風速、波高、相対波高、本船の位置、ログブックデータ、気象庁からのデータも本船側から入手した。

##### (2) 船体運動

加速度、ロール角、ピッチ角、船速

##### (3) 波浪変動圧

BOTTOM & SIDE LONG. の歪計測により求めた。

##### (4) 波浪衝撃圧

船首カント部外板の波浪衝撃圧をフレームの歪計測により計測した。

##### (5) 構造の応力応答

内殻横強度応力（2重底内フロア及びガーダー、スツール内ウェッププレート、サイドフレーム）、縦曲げ応力

##### (6) ヒストグラムレコーダーによる計測

64点の計測点のうち24点に対しては定時計測の他に1日当たり22時間を対象にヒストグラムレコーダーによるデータ採取を行い頻度分布として記録した。

#### 3.2.3 計測実績

第1次航の内、海象がもっとも悪いと思われる8月2日の短期計測結果を図3.2.3-1に示す。

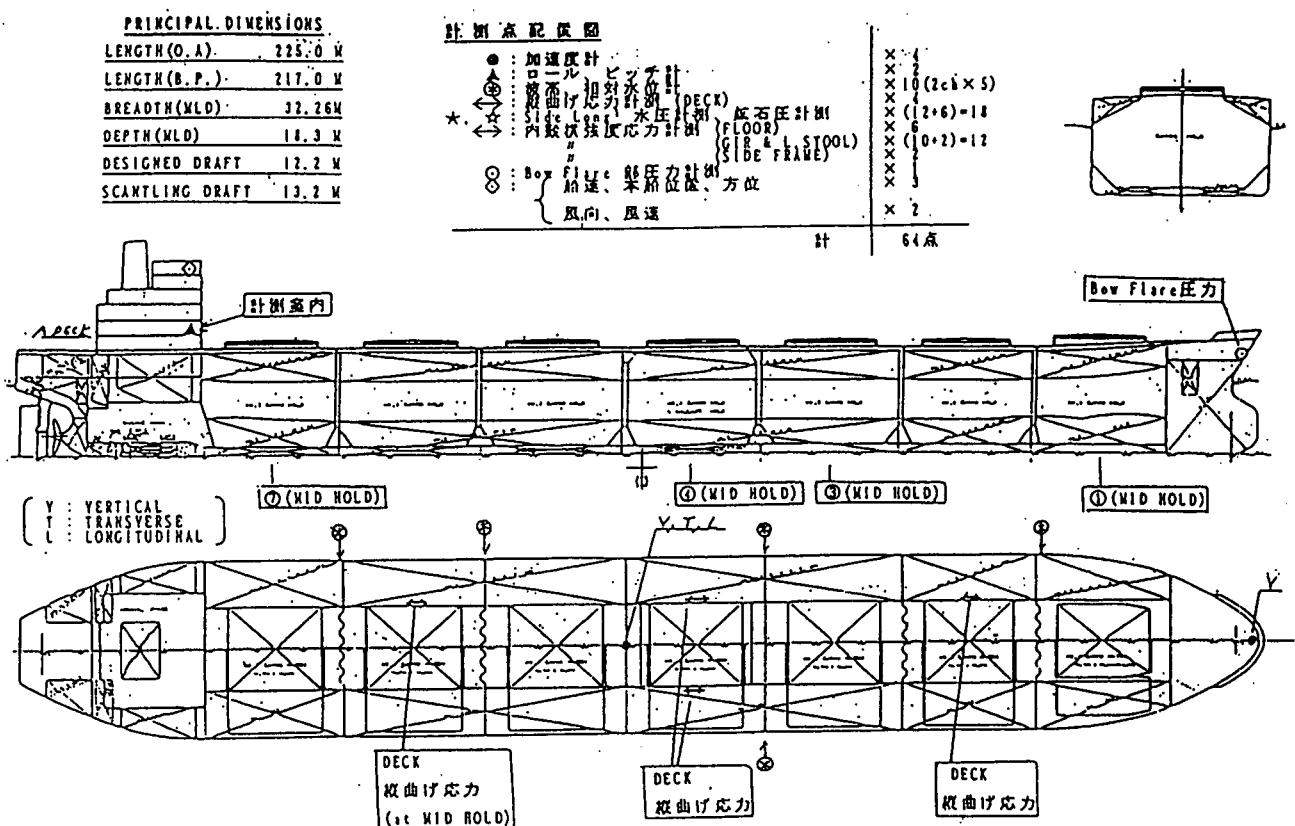


図 3.2.2-1 パルクキャリアー実船計測点配置

[コメント] : PACIFIC NOVA 1ST VOYAGE (1994.7.14 OPPAMA DEP.)

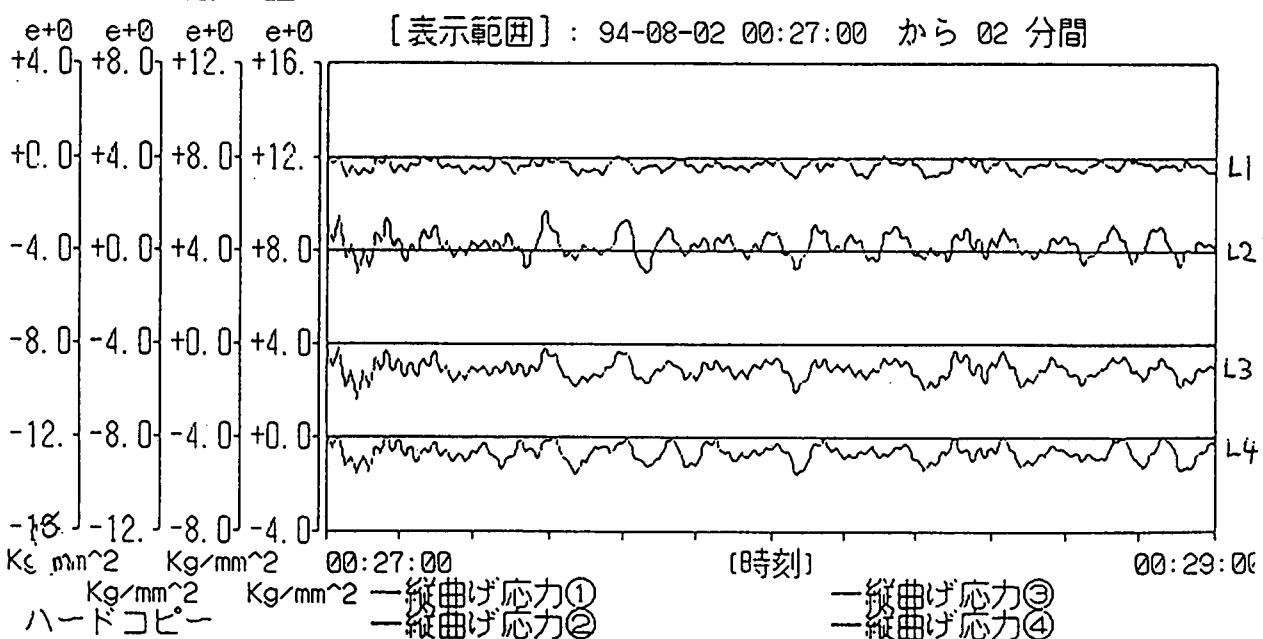


図 3.2.3-1 時系列グラフ

### 3.3 陸上データ解析システム

陸上データ解析システムは、船上の自動計測・解析システムで計測されたデータを、計算法検証システムで各種の検証ができるように処理するシステムである。そこで、本システムは、船上の自動計測・解析システムで計測された時系列データ、解析結果の出力、計測データのスペクトル解析、気象庁に連絡される船舶気象観測表からの気象データベースの作成、および波の方向を考慮した波浪解析（2.4 参照）を行なうため、以下の機能を有する。また、その解析例を示す。

- 船上の自動計測・解析システムで収録されるデータの表示
- 短期計測データの1航海中の解析結果のグラフ出力（図 3.3.1）
- 長期計測データの積算値と頻度分布のグラフ出力
- 短期計測データの解析結果（スペクトル、頻度分布、統計値）の出力（図 3.3.2）
- 本船から気象庁に連絡される船舶気象観測表の結果を集計
- 波浪解析の解析結果（方向波スペクトル、方向分布関数、統計値）の出力（図 3.3.3）

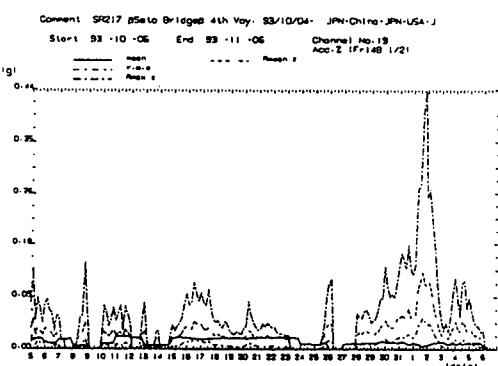


図 3.3.1 短期計測結果の航海中の変化

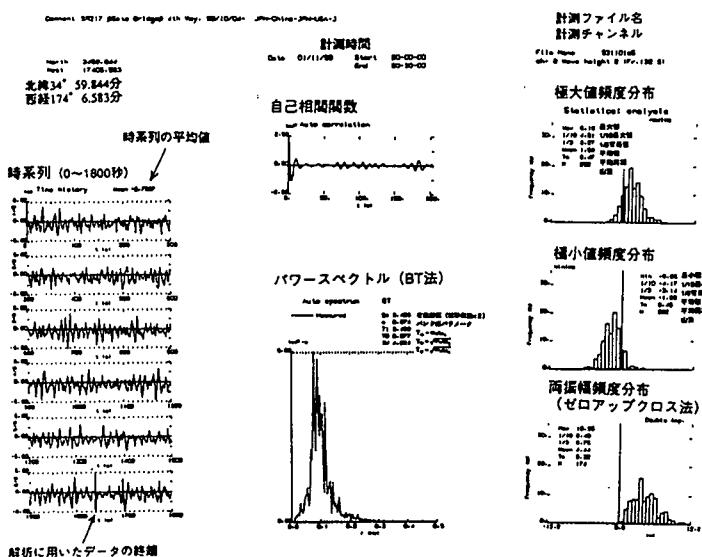
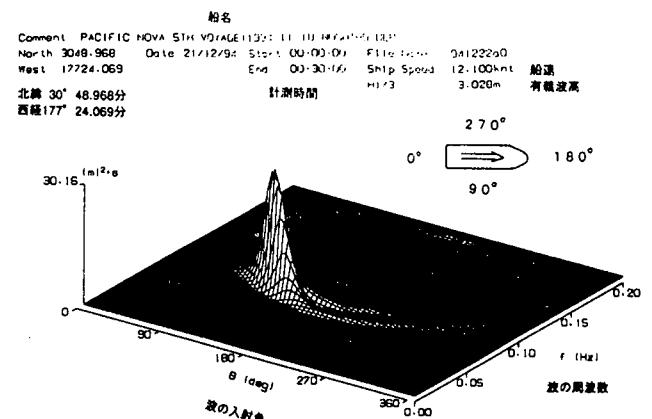


図 3.3.2 時系列、スペクトル解析、統計解析の出力例

図 3.3.3 波浪解析による方向波スペクトルと方向分布関数の出力例

## 4. 計測データの解析

### 4.1 波浪について

本研究では航行する船舶が遭遇する海象を把握するため、船側に取付けた5本の波高計の計測結果から拡張最大エントロピー法を用いて波の方向波スペクトルを求める波浪解析方法（2.4章参照）、目視計測による方法、局所的な波浪の変化は得られないが気象情報から波浪推算を行なう方法について、詳細な解析と比較を行なった。以下に、解析方法の概要を示す。

#### (1) 波高計による波浪解析

拡張最大エントロピー法では異なる3点以上の場所の波高情報を必要とする。本研究では、自船の動搖による波、および船体による反射波の影響を数値計算により取り除くことを検討したが、十分な解析精度が得られなかつたので、船側に取り付けた各波高計で計測された実波高を直接用いて波浪解析を行なつた。

#### (2) 目視計測による方法

北太平洋を航行する船舶の気象観測結果は、3時間毎に船の位置、風浪の波高と周期、うねりの波高と周期などの観測と気温、気圧、風向、風速などの計測が行なわれ、日本の気象庁と米国NOAAに通報される。本研究ではSHIP-Aについて、この結果を集計した。

#### (3) 波浪推算による方法

波浪推算では、日時と船舶の位置から船舶気象観測データ、海面気圧解析図などを用いて、有義波の特性と風（風速、吹送距離、吹送時間）との関係を表すSMB法（Sverdrup-Munk-Bretschneider Method）でうねりと風浪の各成分を推定した。

次にこれらの解析結果について示す。

目視観測結果はSHIP-Aの北米航路に対する北太平洋の波浪頻度表<sup>1)</sup>と比較した結果、目視観測結果は波浪頻度表と比較してデータが長周期側に偏っていること、母集団の総数が相対的に少ないので、大波高側で確率が高くなることが明かとなつた。

また、波の主方向、平均波周期、有義波高について、拡張最大エントロピー法を用いた波浪解析、目視観測、および波浪推算の結果について比較した結果、以下のことが明かとなつた。

- SHIP-Aは図4.1.1に示すように比較的追い波が多い往路では、波高、波周期、波向きとともに3方法の結果が比較的よく一致するが、復路では波浪解析の結果は他の方法と波高で最大2mの差があり、波向きも異なる傾向がある。
- SHIP-Bは往路と復路ともに比較的よく一致するが、図4.1.2に示すように復路で最大2mの差が生じる部分もある。

以下に波浪解析の結果をまとめる。

- 本研究で開発した波高データから拡張最大エントロピー法を用いた波浪解析法は、波高については他の計測法と比べて±1m程度の相違がある。波周期については、波浪推算の結果と比較的よく一致する。波向きについては追い波中では比較的よく一致するが、向い波中では波の主方向が異なる部分がある。
- 波浪解析法の解析精度を向上させるためには、実船に搭載するセンサーの種類、配置についての検討が必要と思われる。また、波高計を用いる場合、本研究で最終的に採用しなかつた自船の発散波、反射波の影響の実船での削除の方法、大振幅動搖する場合の波高計の計測精度についても検討する必要がある。

## 参考文献

- 1) (財) シップ・アンド・オーシャン財団: 船舶設計用標準海象データベースの構築と利用技術の調査研究報告書「北太平洋の波と風(1974~1988)」、1992年3月

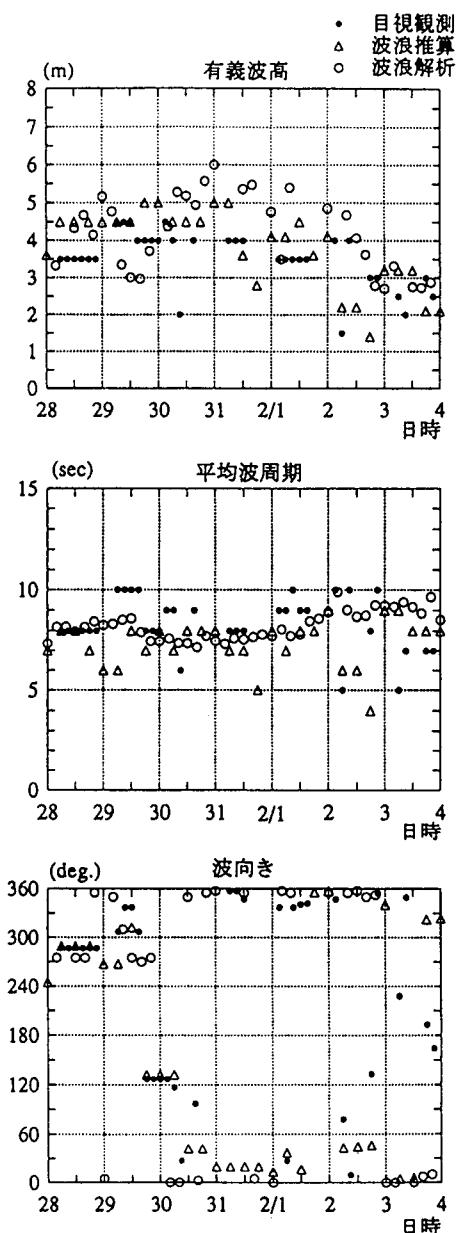


図 4.1.1 SHIP-A 波浪解析法の比較（往路）

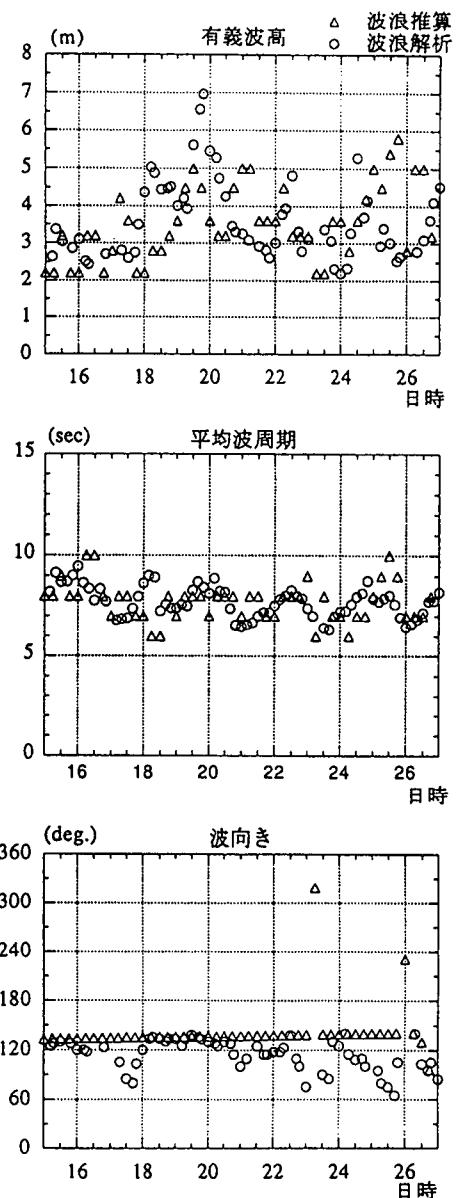


図 4.1.2 SHIP-B 波浪解析法の比較（復路）

## 4.2 計測データ解析結果

SHIP-A は北米航路について計測が行なわれた。7 次航の計測例を図 4.2.1、4.2.2 に示す。また、1~16 次航の航海を通して以下の計測結果を得た。

計測データの全体の山数は  $1 \times 10^6 \sim 10^7$  となり、波高は 2 の波高計で最大波高 18.6 m、横揺れの最大両振幅は、両振幅で 49.6 度、船体中央での左右加速度、上下加速度、船首の上下加速度の最大値はそれぞれ両振幅で 0.75G、0.52G、1.80G を計測した。また、船体表面上の圧力は、水線面よりやや下の船側部が水線面上より大きく、船底部が最も小さいことがわかった。縦揺れ、上下加速度が大きい場合、スラミングにより生じたと思われる振動を、上下加速度、および各位置での応力で計測することができた。

SHIP-B はオーストラリア航路、北米航路、南周りの日本～オーストラリア～フランス～北米の航路について計測が行なわれた。5 次航の北米航路の計測例を図 4.2.3、4.2.4 に示す。また、1~6 次航の航海を通して以下の計測結果を得た。

計測データの山数は  $1 \times 10^5 \sim 10^6$  となり、波高は 2 の波高計で最大波高 20.0 m 以上の波高を計測した。本船の型深さが 18.3 m、喫水が 12.2 m であることを考慮すると、上甲板に波が打ち込んでいると考えられる。縦揺れ、横揺れの角度、船首部の上下速度の最大値はそれぞれ両振幅で 13.7 度、0.75G である。船体表面上の圧力は、水線面よりやや下の船側部が水線面上より大きく、船底部が最も小さいことがわかった。また、船首部の BOW FLARE の圧力は最大で 46.8 ton/m<sup>2</sup> を計測した。

これらの計測結果から、SHIP-A(コンテナ船)と SHIP-B(バルクキャリア)の相違点は、コンテナ船では横揺れが斜め追い波中で大きくなり、上下加速度が船首で両振幅で 1.8 G 以上になるのに対して、バルクキャリアでは横揺れが斜め向波中で 40deg 以上発生し、横揺れの影響を受ける横加速度の最大値は両振幅で 0.6G となり、船首の上下加速度とほぼ同じである。横揺れの相違については、SHIP-A のコンテナ船では GM が小さく、横揺れの固有周期が 20 秒から 25 秒程度となるので、出会い周期が長くなる追い波中で波と同調するが、バルクキャリアでは固有周期が 10 秒程度なので斜め向波で波と同調することから説明できる。

また、船体表面上の圧力は、コンテナ船とバルクキャリアとともに水線面よりやや下の船側部が水線面上より大きく、船底部が最も小さいことが確認できた。

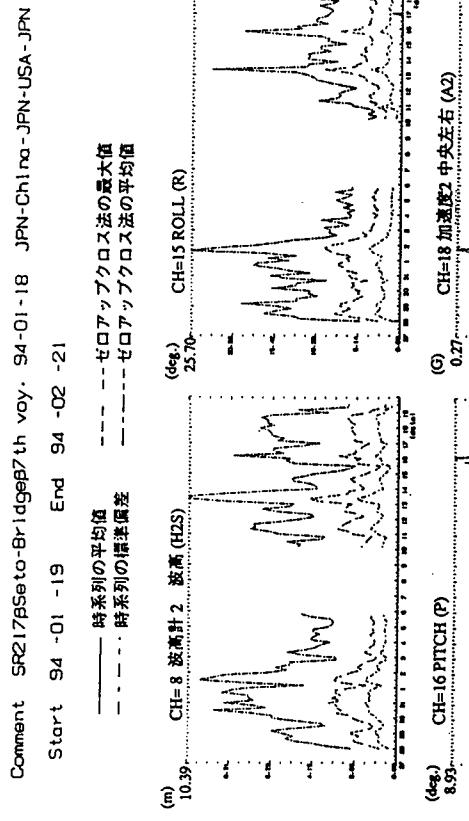


図 4.2.1 SHIP-A 7 次航 船体運動、波浪荷重、応力の航海中の変化

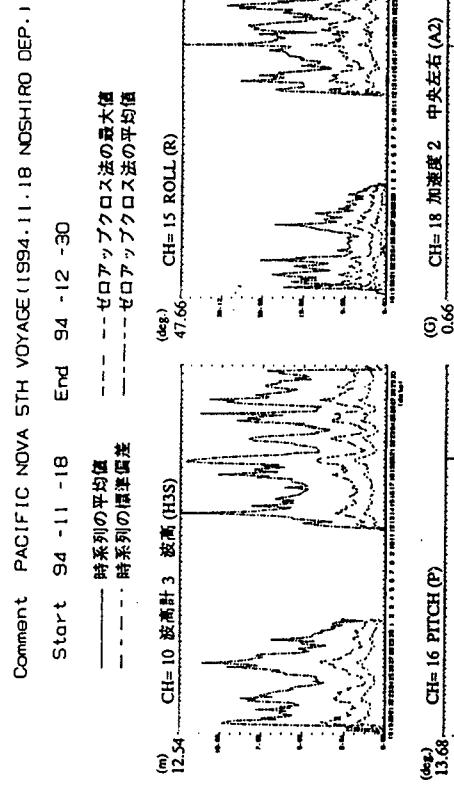


図 4.2.2 SHIP-A 7 次航 計測結果の時系列 (1994.2/16, 4:00~4:30)

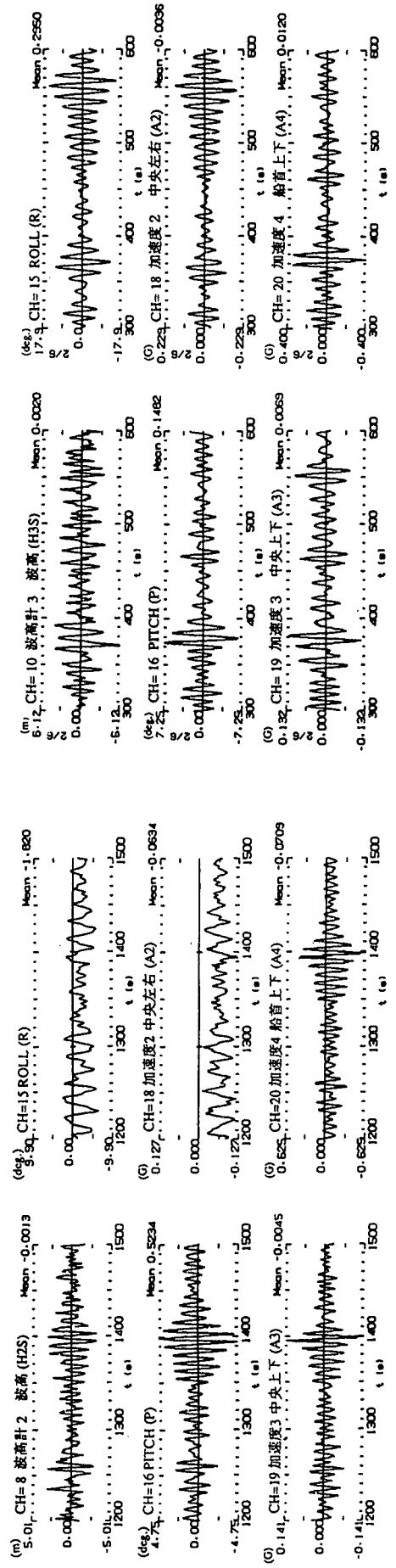


図 4.2.3 SHIP-B 5 次航 船体運動、波浪荷重、応力の航海中の変化

図 4.2.4 SHIP-B 5 次航 計測結果の時系列 (1994.12/20, 4:00~4:30)

## 4.3 解析データの考察

### 4.3.1 解析データの検証

#### (1) 短期計測データの検証

数値計算による運動、波浪荷重などの長期予測では、実海域の短期海象における運動、波浪荷重などの振幅の頻度分布がレーレー分布で表されると仮定し、波スペクトルと運動の周波数応答関数から計算される運動の標準偏差を用いて、様々な計算を行なっている。そこで、短期計測データの統計的な性質を明らかにするため、極値解析（ゼロアップクロス法）から得られる両振幅の最大値、 $1/10$ 最大平均値、 $1/3$ 最大平均値、平均値とスペクトル解析から得られる標準偏差 $\sigma$ をSHIP-Aの7次航、SHIP-Bの5次航の短期計測データについての比較を行なった。以下にその概要を示す。

- 波高計で計測された波高は、極値解析の結果は相対波高と実波高とともにレーレー分布を仮定したものより低くなっている。これは、自船の動搖による波、および船体による反射波の影響、波高計位置での上下変位の影響を精度よく取り除けていないためと考えられる。
- 運動・加速度、応力の極値解析の結果はスペクトル解析の推定結果とよく一致している。横揺れ、左右加速度については横揺れ振幅の二乗で減衰力が大きくなる非線形影響、およびSHIP-Aではさらに横揺れ固有周期が波の周期と異なることからスペクトルが広帯域になるために、極値解析の $1/10$ 最大値、最大値はスペクトル解析の推定結果より低くなっている。
- 水面付近の水圧は、動搖振幅が小さい場合、スペクトル解析からの推定結果とよく一致しているが、動搖振幅が大きい場合、圧力の計測部分が水面から露出するため波形が半波となり、スペクトル解析の結果より極値解析の結果は全体的に小さくなる。他の部分については、スペクトル解析と極値解析の結果はよく一致している。

この結果、各計測項目の極値解析の結果は、最大値を除いてレーレー分布を仮定した代表値とよく一致することが明かとなった。したがって、数値計算で運動、波浪荷重などの長期予測する場合、レーレー分布を仮定しても実用上問題ないと考えられる。

#### (2) 長期計測データの検証

SHIP-A（コンテナ船）の長期計測結果から、その全体の山数は $1 \times 10^6 \sim 10^7$ となり、累積確率の傾向は各計測項目ともに妥当な結果である。また、運動、加速度の物理量は、常識的な結果となっている。波浪変動圧は水面よりやや下の船側が最も高く、船底部分が小さい。水面の水圧は北米航路の復路では波が右舷から船体に入射してくるため、右舷の方が左舷のより大きくなっている。

SHIP-B（バルクキャリア）の長期計測結果から、その全体の山数は $1 \times 10^5 \sim 10^6$ となり、累積確率の傾向は各計測項目ともに妥当な結果である。また、運動、加速度については常識的な結果となっている。波浪変動圧は水面よりやや下の船側が最も高く、船底部分が小さい結果となっている。SHIP-Bでは、水面の水圧は左右舷共にほぼ同じ値となっている。

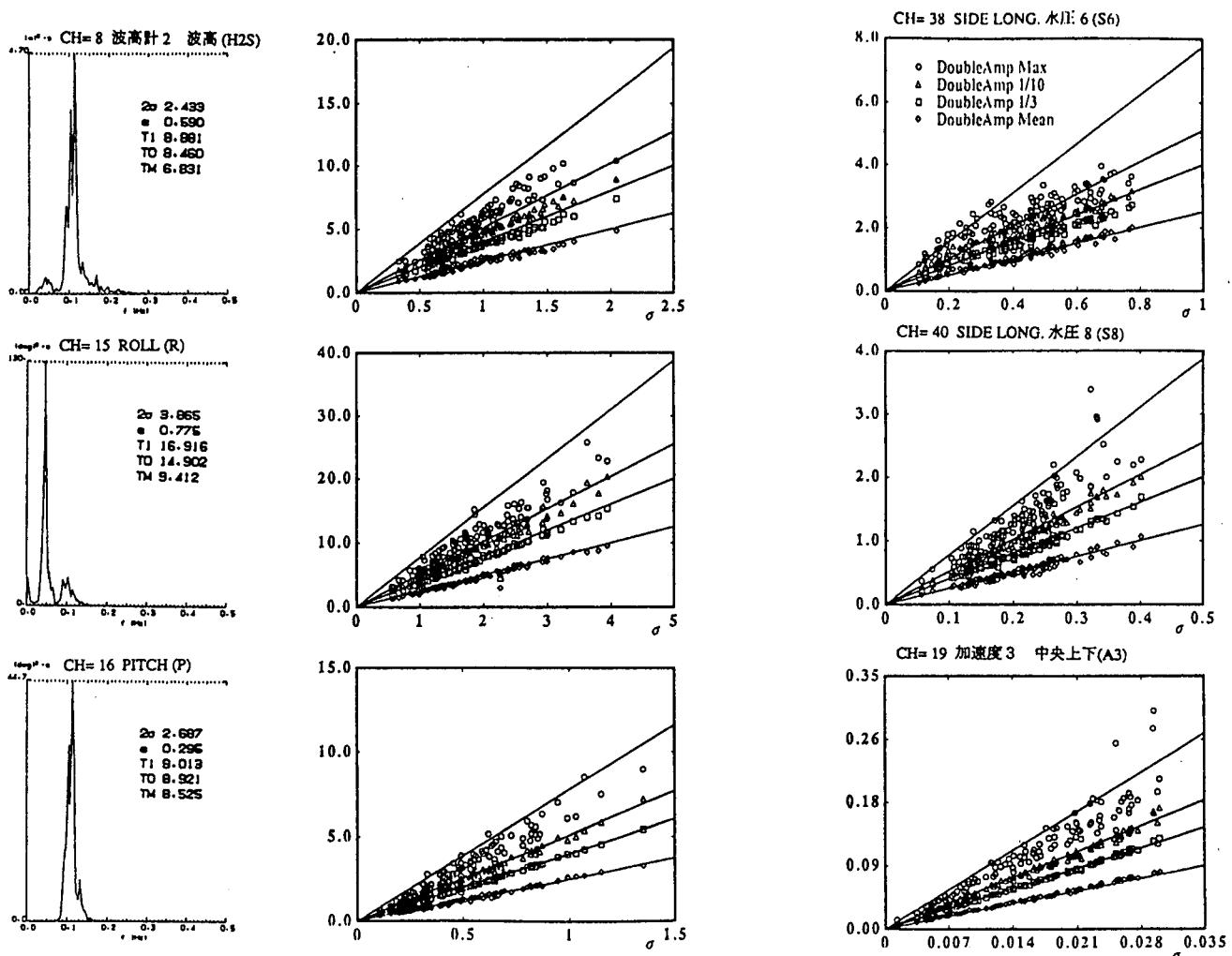


図 4.3.1 SHIP-A 7次航 スペクトル解析結果と極値解析結果の比較

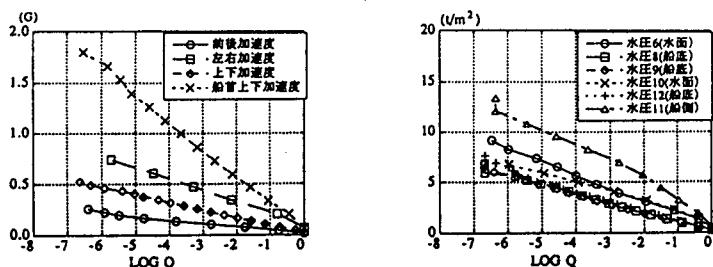


図 4.3.2 SHIP-A 長期計測結果の累積頻度

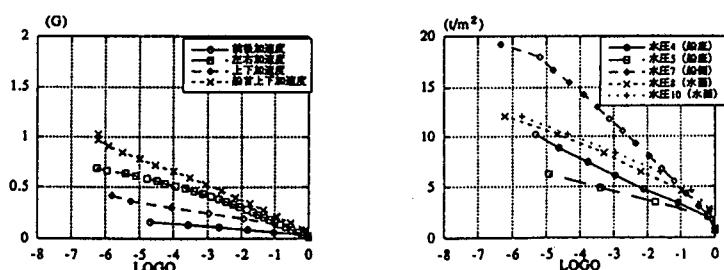


図 4.3.3 SHIP-B 長期計測結果の累積頻度

#### 4.3.2 船首波浪衝撃

波浪衝撃が発生すると予想される3章に示す様な箇所について計測を行い、設計荷重値との比較を行った。計測方法としては微少時間における圧力ピーク値を直接圧力計にて計測するのではなく、FEM結果を基に船体構造歪値を荷重値に変換する方法にて計測を行った。

##### (1) 船首部衝撃圧設計値との比較

計測結果と衝撃圧設計値とを比較したものを表4.3.2-1に示す。本計測値は長期計測データ計測結果（ヒストグラムレコーダー計測値の工学的中央値）であり、衝撃圧設計値は2つの設計基準に則り、算出した。

同表より設計値と比べて計測値はコンテナ船で2~4割、バルクキャリアで6~7割程度となる。これらの設計基準で算出された衝撃圧設計値は塑性強度評価を対象として算出されたもので、その様な多大な荷重が通常の航海中に頻繁に発生し、計測点における構造部材が塑性状態に陥るとは考えにくい。したがって、計測した荷重値は妥当なものと考えられる。

##### (2) 計測箇所の構造応答

計測結果の構造応答例として、船首部の加速度が比較的大きな時期での時系列計測結果を図4.3.2-1に示す。衝撃圧計測値10 T/m<sup>2</sup>、持続時間は1sec.程度であり、他の計測事例と比較すると、持続時間が10倍程度大きい。船首部防撓材の過渡応答を把握するために該部を防撓材の曲げ剛性を考慮した簡単な一次元ばね質点系にモデル化して計算を行った。その結果、本計測結果は共振等、動的応答の無い、作用荷重そのものによる準静的な応答を計測したものと予測される。

表4.3.2-1 波浪衝撃圧計測結果

1) Ship-A 計測点 (B1~B3)

	計測点		
	B1	B2	B3
計測結果	32.7	13.0	19.6
西 部	150 (22%)	130 (10%)	110 (18%)
DNV	84 (39%)	81 (16%)	80 (25%)

2) Ship-B 計測点 (B1)

	計測点	
	B1	
計測結果	46.8	
西 部	72 (65%)	
DNV		(70%)

註；1) 表中の括弧内数値は計測値と各設計値との比を示す。

船首上下加速度 (A4)

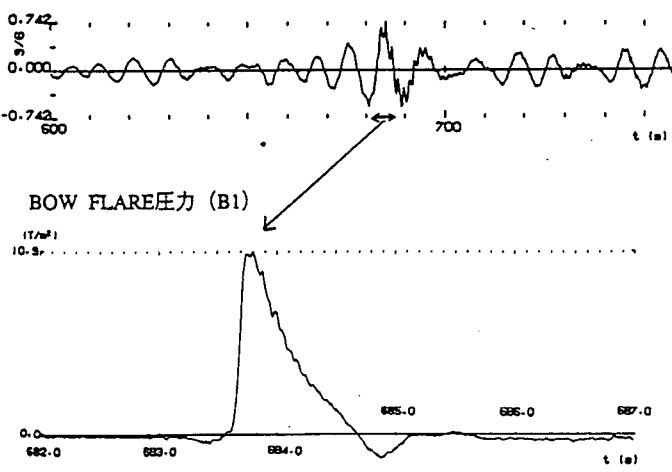


図4.3.2-1 波浪衝撃圧の時系列データ  
(Ship-A, '95.11.1, 20:00~20:30)

#### 4.3.3 波浪変動圧の計測値とルール計算値との比較

今回の実船計測では、波浪変動圧の船体断面沿いの分布を調査する為に、船体中央部の船側吃水線付近、ビルジ部、船底において、水圧計測を行った。本項では、変動圧の計測値と各船級協会が、ルールの中で示している波浪変動圧との比較を行った。

比較を行ったルールは、

- ① NKルール：横強度の直接計算を行う際の波浪変動圧
- ② NKルール：タンカーのサイドロンジの疲労強度を評価する際の波浪変動圧
- ③ NVルール：サイドロンジの疲労強度を評価する際の波浪変動圧

である。

図4.3.3-1及び図4.3.3-2にSHIP A、SHIP Bそれぞれの長期計測によって得られた値と、上記規則との比較を示した。図中、①、②のNKルールによる算式では算出される変動圧の発現確率が明らかにされていないが、計測値は $Q = 1 \times 10^{-4}$ に相当する値をプロットした。また、SHIP Aはコンテナ船であり、計測期間中の吃水の変化は、少ないと考え、 $d = 11.2$  m (DESIGN DRAFT)のみでルール計算を行った。SHIP Bについては、載荷、バラスト、両方のコンディションについて計算を行った。

SHIP A、SHIP B共に、船側の吃水線付近で大きい変動圧が計測されている点、船底では変動圧が小さくなる点などは、ルールが示す分布形状と同じ傾向となる事が判った。

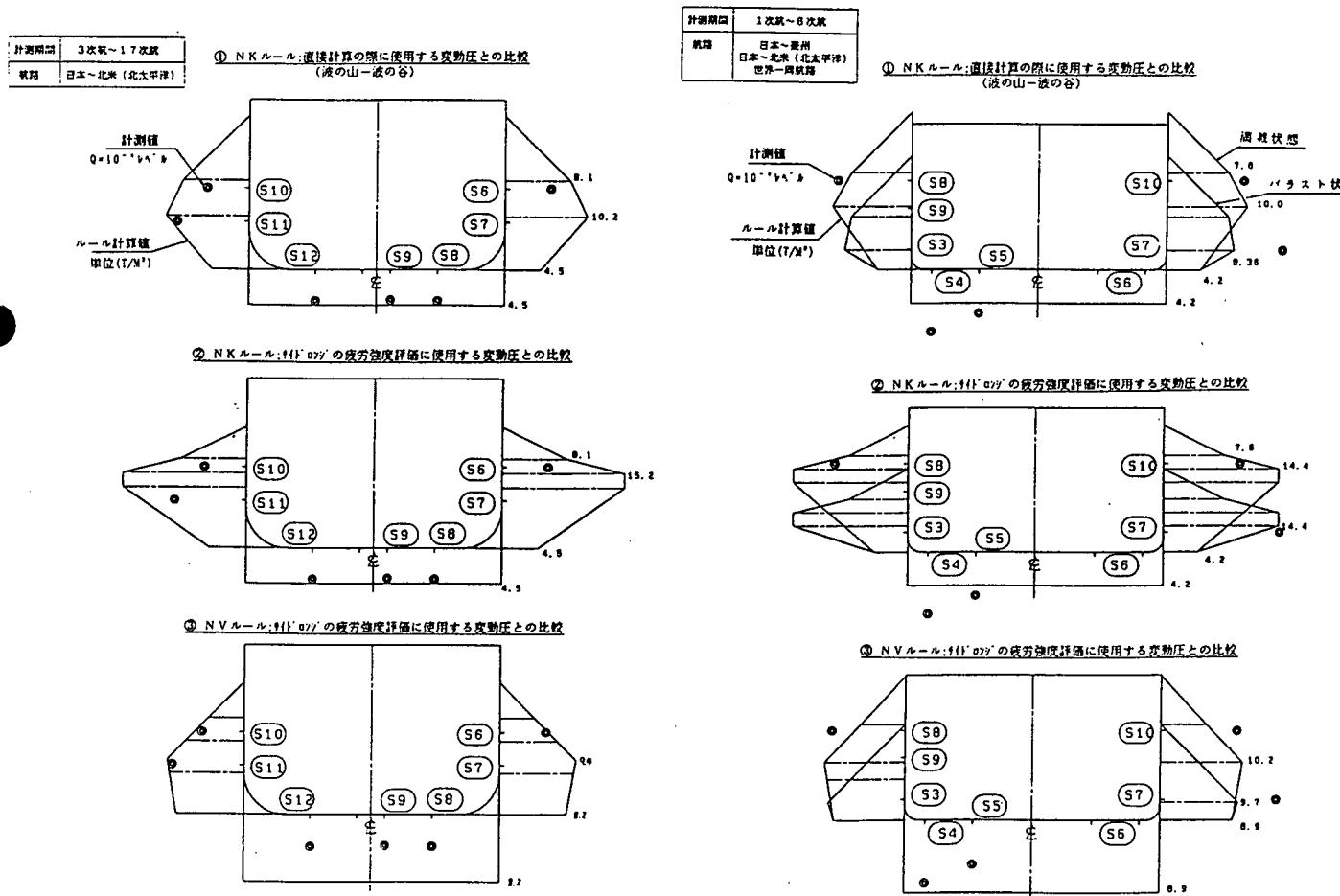


図4.3.3-1 SHIP A 波浪変動圧計測値  
とルール計算値との比較

図4.3.3-2 SHIP B 波浪変動圧計測値  
とルール計算値との比較

## 5. 荷重・応力計算法の検証

### 5.1 SHIP A

#### 5.1.1 船体運動・波浪荷重

ここでは、Ship A の船体運動、波浪荷重に関する計算結果と実船計測結果との比較を行う。比較は、短期および長期ベースで行う。Ship Aは、8 次航までの計測が行われているが、7次航（東京  $\longleftrightarrow$  北米 Oakland）が比較的荒天時のデータが取得できているので、7次航に関する計算値と計測値の比較を行う。この船の船速は 24kn、状態は Full Load Condition である。

船体運動・波浪荷重の周波数応答関数計算は、ストリップ法(OSM)を用いて行った。流体力計算は、Ursell-田才法、横揺れ減衰係数は、M係数を用いた。短期、長期予測計算は、福田法を用いて行った。波スペクトルには、ISSCスペクトル、方向分布は  $\cos^2$  分布を用いている。

##### (1) 短期予測

短期ベースでの計測値の整理には、海域の波の波高と周期が必要となる。これを得るために方法としては、I) 目視による方法、II) 船側の相対水位データから、船舶技術研究所で開発された手法により得る方法(波高計による方法)、III) 波浪推算をベースとした海象調査による方法、の3方法がある。船体加速度、Roll、Pitch および波浪変動圧の標準偏差に関して、これら3方法による波浪で整理した計測値と計算値とを出会い角 30度 ピッチで比較した。それらを整理すると以下のようである。

###### (a) 船体加速度

目視による波浪で整理した計測値と計算値は比較的一致している。波浪推算による波浪で整理した計測値は計算値よりやや小さい。波高計による波浪で整理した計測値は計算値とよく一致している。(図 5.1.1-1)

###### (b) Roll、Pitch

3種の波浪の内では、波高計による波浪で整理した計測値が、他の2つの方法に比べ、計算値との一致度はよい。(図 5.1.1-2、図 5.1.1-3)

###### (c) 波浪変動圧

計算値と計測値を比較すると、計算値が計測値よりも大きい。計測値は3種の波浪を用いた場合を検討したが、どの場合に対しても計算値が大きい。水面近くの計測点では、圧力波形が半波となるため、計算値と計測値の差が特に大きい。(図 5.1.1-4)

##### (2) 長期予測

長期予測計算に用いる波浪発現頻度は、シップ・アンド・オーシャン財団のものと、計測結果の2つを用いた。船体加速度と波浪変動圧に関する計算結果と計測結果を比較を整理すると以下のようである。

- 波浪発現頻度としては計測値を用いる方が、計算値と計測値の一致度はよい。シップ・アンド・オーシャン財団の波浪発現頻度を用いると、計算値が計測値よりも大きい。
- 計測された波浪発現頻度を用いた船体加速度に関する計算値(All Heading)と計測値は A2 点(船体中央、左右方向加速度)を除き、よく一致している。(図 5.1.1-5)
- 計測された波浪発現頻度を用いた波浪変動圧に関する計算値(All Heading)と計測値は比較的一致している。水面近傍の計測点では、圧力波形が半波波形となるため、このことを考慮していない計算値は、計測値より大きい。(図 5.1.1-6)

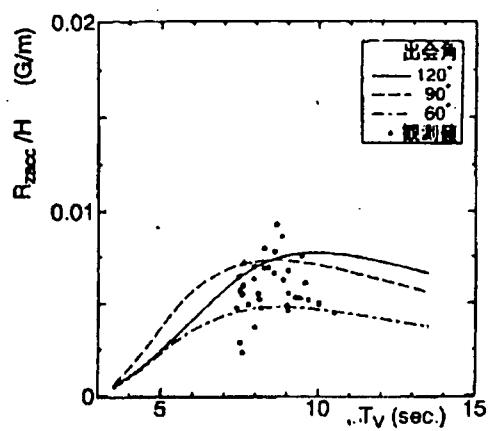


図 5.1.1-1 船体中央 Z 方向加速度の標準偏差  
(波高計による波浪)

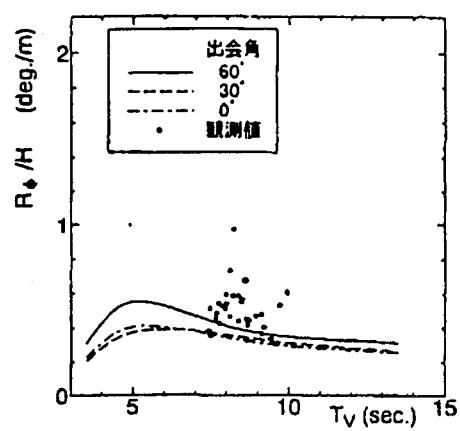


図 5.1.1-2 Roll の標準偏差(波高計による波浪)

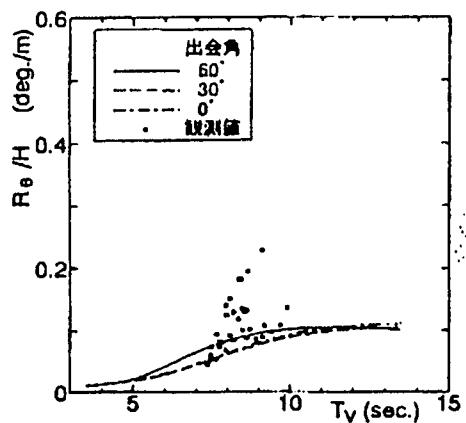


図 5.1.1-3 Pitch の標準偏差(波高計による波浪)

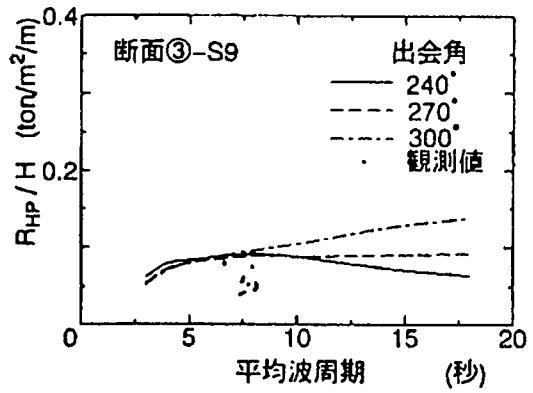


図 5.1.1-4 波浪変動圧の標準偏差(波高計による波浪)

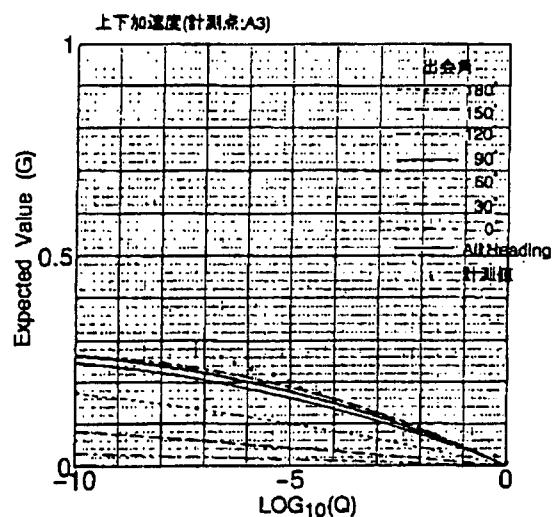


図 5.1.1-5 船体中央、上下方向加速度の長期予測

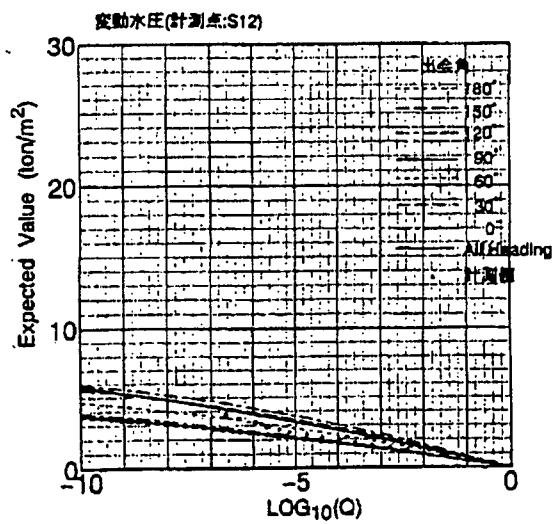


図 5.1.1-6 波浪変動圧の長期予測(計測点; S12)

### 5.1.2 構造応答

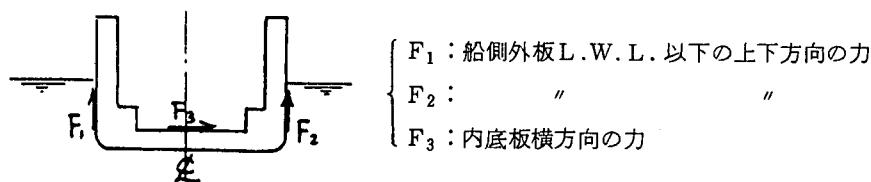
#### 5.1.2-1 応力応答関数の計算

ストリップ法により求めた規則波中の変動圧、断面力等の時刻歴応答値を用い、離散化解析により応力応答関数を計算した。計算は、縦強度と横強度に分けて実施した。

##### (a) 縦強度解析

図 5.1.2-1 に示す全船片舷モデルを使用した。

フロア（ウェブフレーム）断面に、 $F_1$ 、 $F_2$ 、 $F_3$  の単位荷重を与える、 $F_n$ に対する応力応答マトリックス $\{R_L\}$ を作成した。これとストリップ法により求めた各断面の重心周りの断面力（上下、水平、振り）を用いて応力応答関数を求めた。応答関数例を図 5.1.2-3 に示す。



##### (b) 横強度解析

図 5.1.2-2 に示す 2 ホールド片舷モデルを使用した。

モデルの外板上の各点に単位圧力（1 ton/m<sup>2</sup>）を作用させて応力応答マトリックスを作成し、ストリップ法により求めた圧力値、及び、各ペイ每の上下方向加速度を用いて応力応答関数を計算した。

応答関数例を図 5.1.2-4 に示す。

#### 5.1.2-2 応力解析

本研究では、縦強度及び横強度解析の各々に影響を与える因子として、下記の項目を検討し、より実船状態に近い条件で計算するよう留意した。

##### 縦強度解析モデル

- 端部支持条件の妥当性
- 縦曲げ応力分布の妥当性
- 水平曲げ応力分布の取扱方
- ワーピング応力分布及び縦応力分離マトリックスの修正

##### 横強度解析モデル

- 船長方向の圧力変化の影響
- 水線面近傍の船側荷重の二重底応力に及ぼす影響
- 上下支持条件の影響
- 2重底内のバラスト水の重量の影響
- Floor の応力変動の傾向
- mesh size の影響

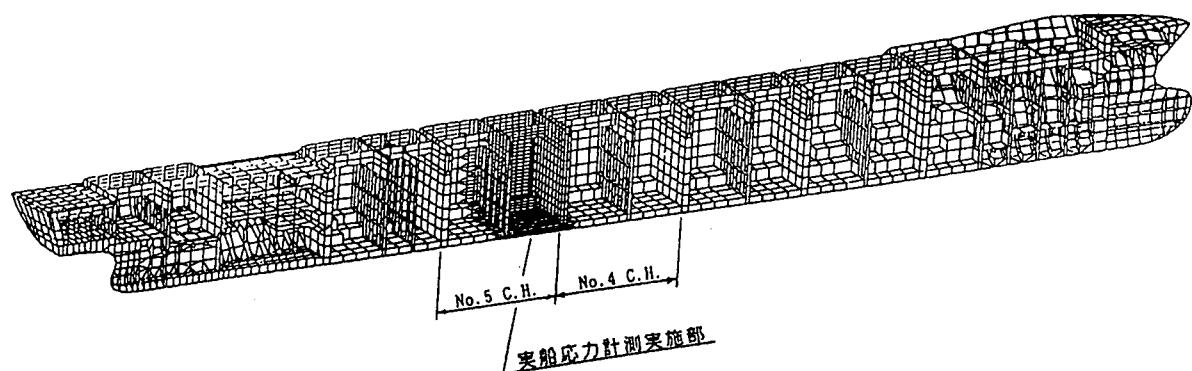


図 5.1.2-1 SHIP-A 全船FEM 解析モデル

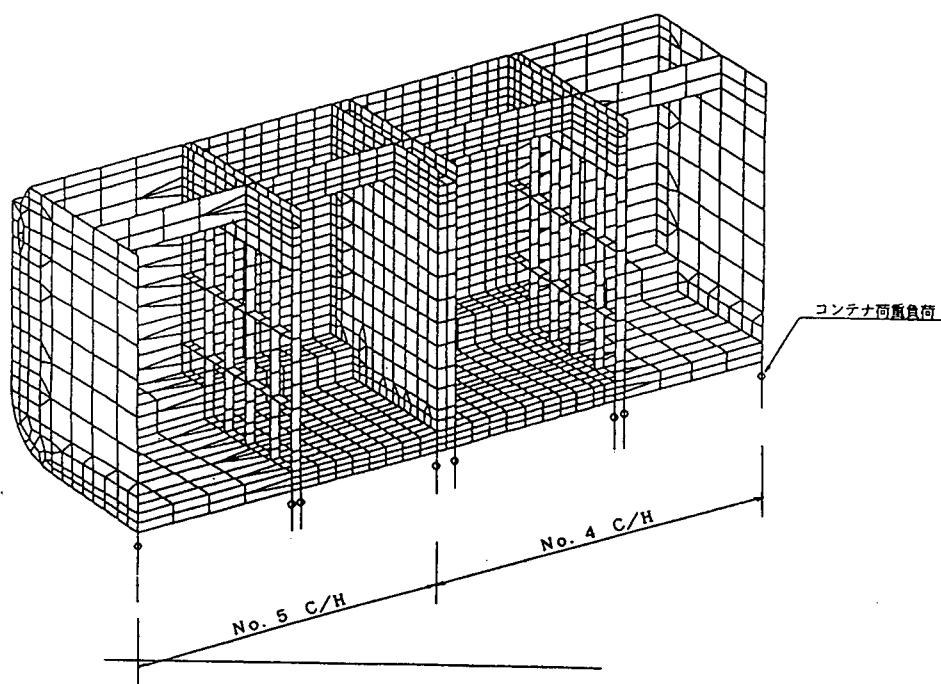


図 5.1.2-2 横強度解析用モデル

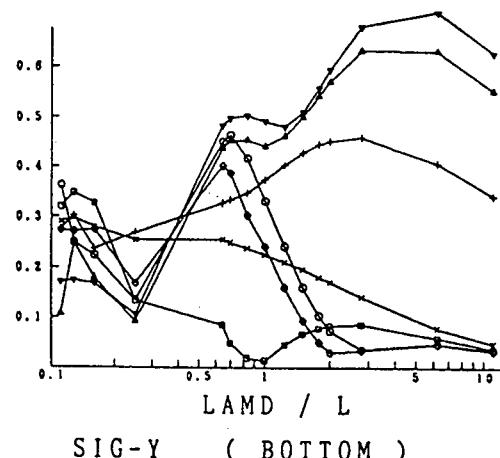


図 5.1.2-3 応力応答関数 C.L. GIR.

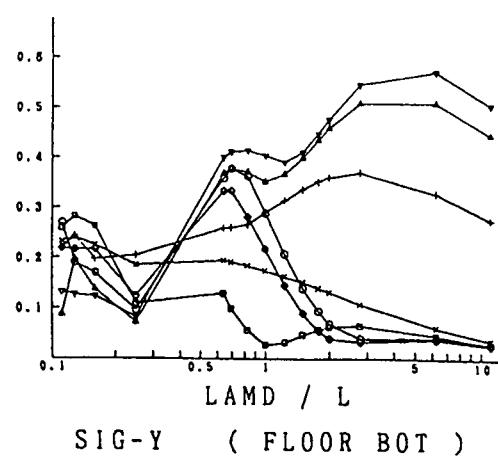


図 5.1.2-4 応力応答関数 FR. 140

### 5.1.2-3 短期予測、長期予測

5.1.2-1で求められた応力応答関数を基に、福田法を用いて短期、長期予測計算を行い、実船計測結果と比較した。

#### (a) 短期予測

計測値の整理は波高計による波浪で行っている。縦曲げワーピング応力の標準偏差に関する計算値と計測値は比較的一致している。図5.1.2-5は、その一例である。

横強度応力の標準偏差に関する計算値と計測値に関しては、計測点により、計算値が計測値より大きい場合もある。また逆に、計測値が計算値より多少大きな場合もある。図5.1.2-6は、計算値と計測値が比較的一致している場合を示している。

#### (b) 長期予測

波浪発現頻度として計測値を用いた場合、縦曲げ応力の計算値(All Heading)と計測値はよく一致している。図5.1.2-7に一例を示す。

横強度に関しては、波浪発現頻度として計測値を用いた場合、計測値が計算値よりも非常に大きくなっている場合がある。図5.1.2-8は、計算値と計測値が比較的よく一致している場合を示している。

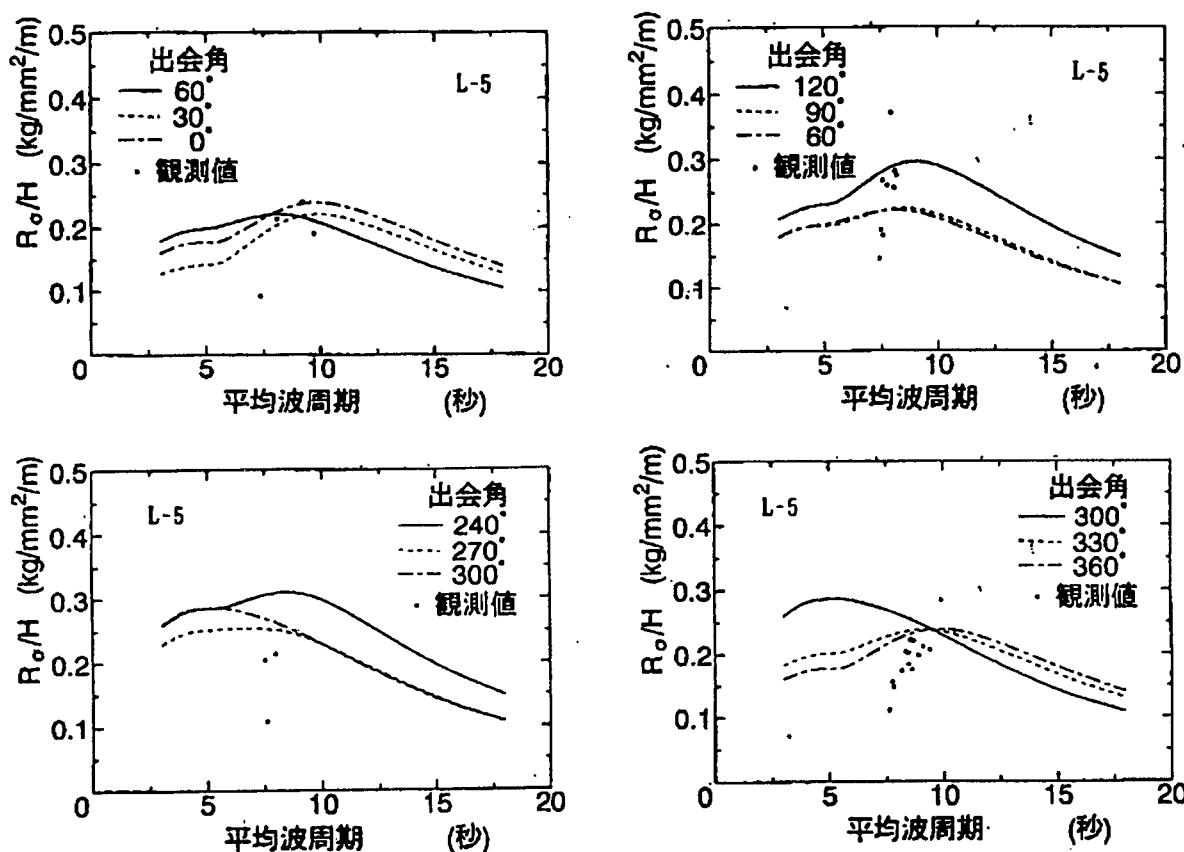


図5.1.2-5 縦曲げ応力の標準偏差 (L-5, P side. (Fr. 157))

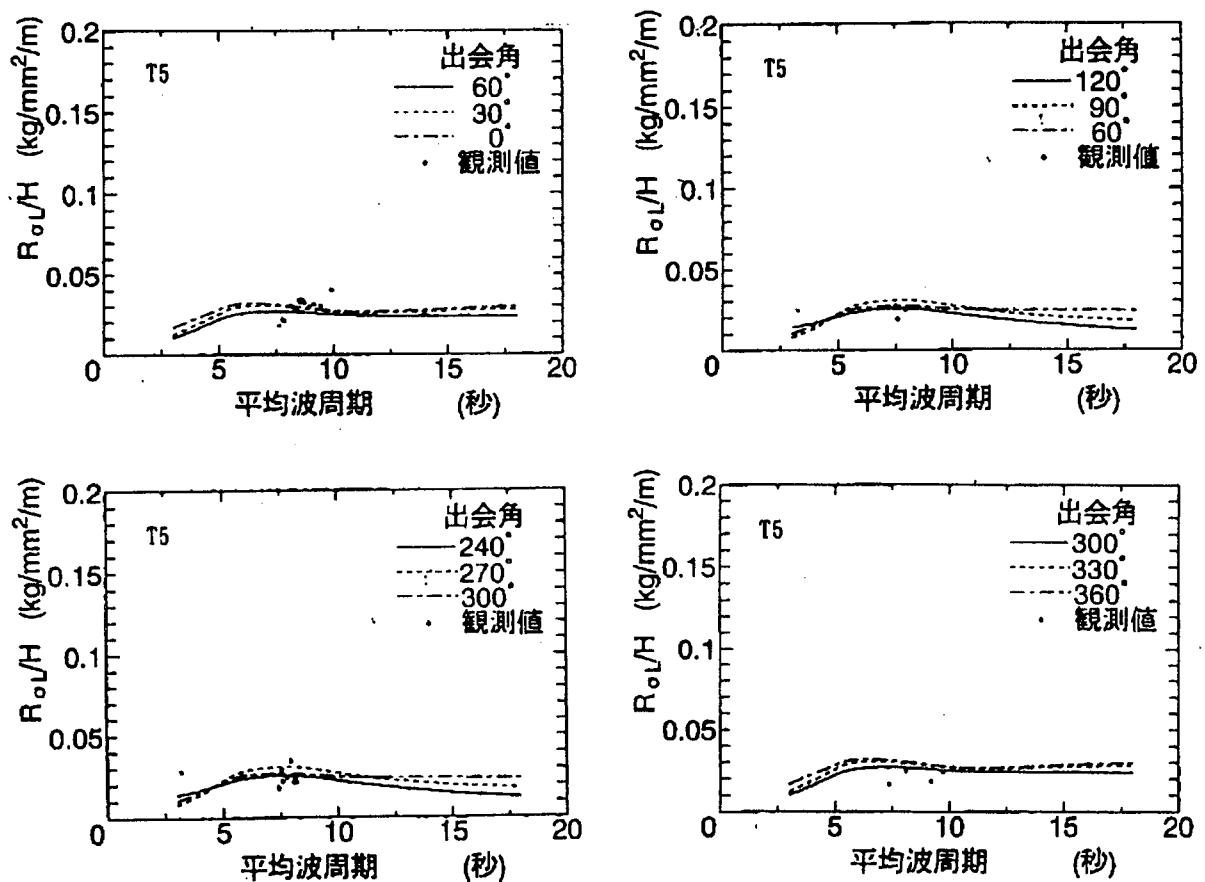


図 5.1.2-6 横強度応力の標準偏差 (T5, S side, (Fr. 140))

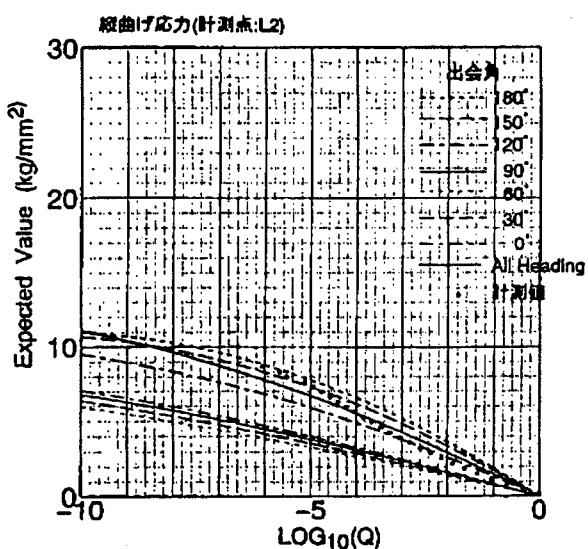


図 5.1.2-7 縦曲げ応力の長期予測 (L2)  
(実船計測から得られた波浪発現頻度表を用いる)

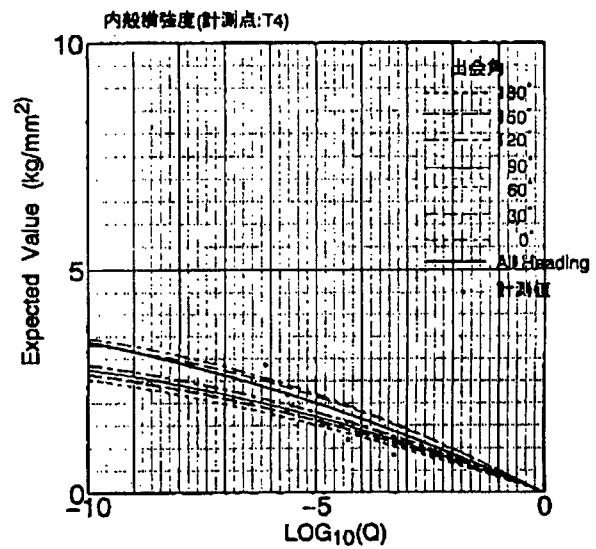


図 5.1.2-8 横強度応力の長期予測 (T4)  
(実船計測から得られた波浪発現頻度表を用いる)

## 5.2 SHIP B

### 5.2.1 船体運動・波浪荷重

ここでは、SHIP Bの船体運動、波浪荷重に関する計算結果と実船計測結果との比較を行った。この比較は、短期及び長期ベースで行う。船体運動、波浪荷重の周波数応答関数はストリップ法を用いて計算した。SHIP Bは、7次航までの計測が行われているが、5次航（日本→北米ロングビーチ）が比較的荒天時のデータが取得できているので、5次航に関する計算値と計測値の比較を行った。

#### (1) 計算法及び計算条件

積付け条件は、HEAVY BALLST CONDITION（往路：日本→北米）及びFULL LOAD CONDITION（復路：北米→日本）の2条件で行った。

船体運動・波浪荷重計算の周波数応答計算は、ストリップ法（NSM）を用いて行った。流体力計算は、close-fit法を用いて船体の横断面形状をうまく近似させる方法をとっている。横揺れ減衰係数は、N係数を用いた。短期海象の波スペクトルは、ISSC 1964 波スペクトルを用い、結果は短波頂不規則波中の標準偏差を示した。その際の波の方向分布は  $\cos^2 \chi$  分布である。また、長期海象の波浪発現頻度は、シップ・アンド・オーシャン財団のものを用いた。

#### (2) 計算結果例

周波数応答関数の例として、ROLLに対するものを図 5.2.1-1 に示す。

短期予測では、以下の2方法で海域の波の波高で割った計測値と周期で整理した。

- 船側の相対水位計データから、船舶技術研究所で開発された手法による波高と波周期（図中では、波高計による波浪と表示）
- 波浪推算による波高と波周期（図中では、波浪推算による波浪と表示）

短期予測結果例として、ROLLに対する標準偏差を図 5.2.1-2 (BALLAST) 及び図 5.2.1-3 (FULL) に、船体中央部船底圧力の標準偏差を図 5.2.1-4 (BALLAST) 及び図 5.2.1-5 (FULL) に示す。また、長期予測結果例として、船体中央部船底圧力に対するものを図 5.2.1-6 (BALLAST) 及び図 5.2.1-7 (FULL) に示す。

#### (3) まとめ

- 計測値の2種類の整理方法では、計測値と計算値の比較において、どちらかといふと波高計による波浪の方が一致度は良い。
  - BALLASTとFULL状態では運動及び加速度の計算値に大きな差異は見られない。
  - 水圧は、計測値と計算値は比較的良好一致するが、船側から、水面付近にかけてはあまり一致度が良くない。
- 長期予測では、計測値が計算値(ALL HEADINGS)よりも小さくなる。これは、計測値がWORLD WIDE (1~6次航)の累積結果であるのに対し、計算値は5次航の北太平洋の頻度表を使っていることに起因していると考えられる。

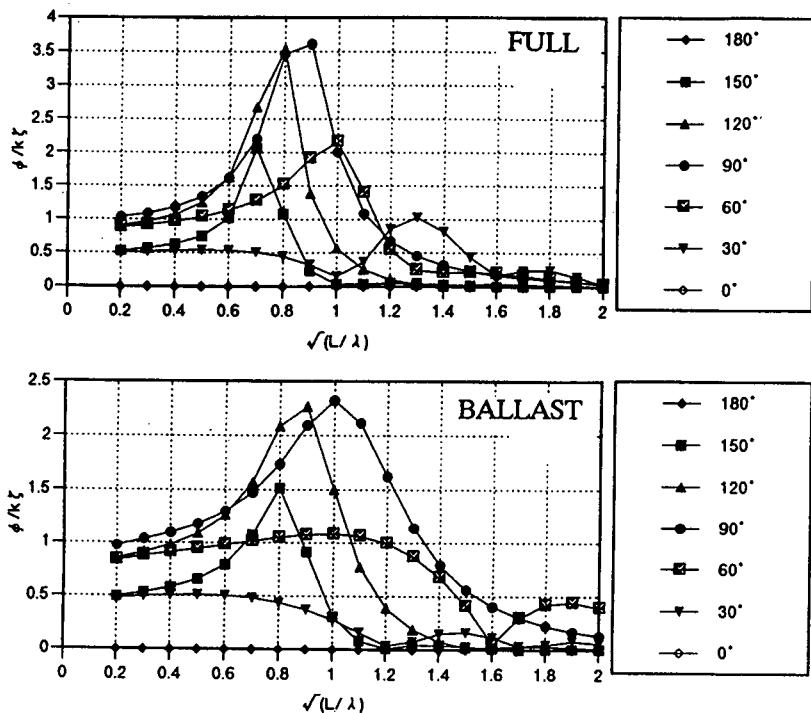


図 5.2.1-1 ROLL の周波数応答関数

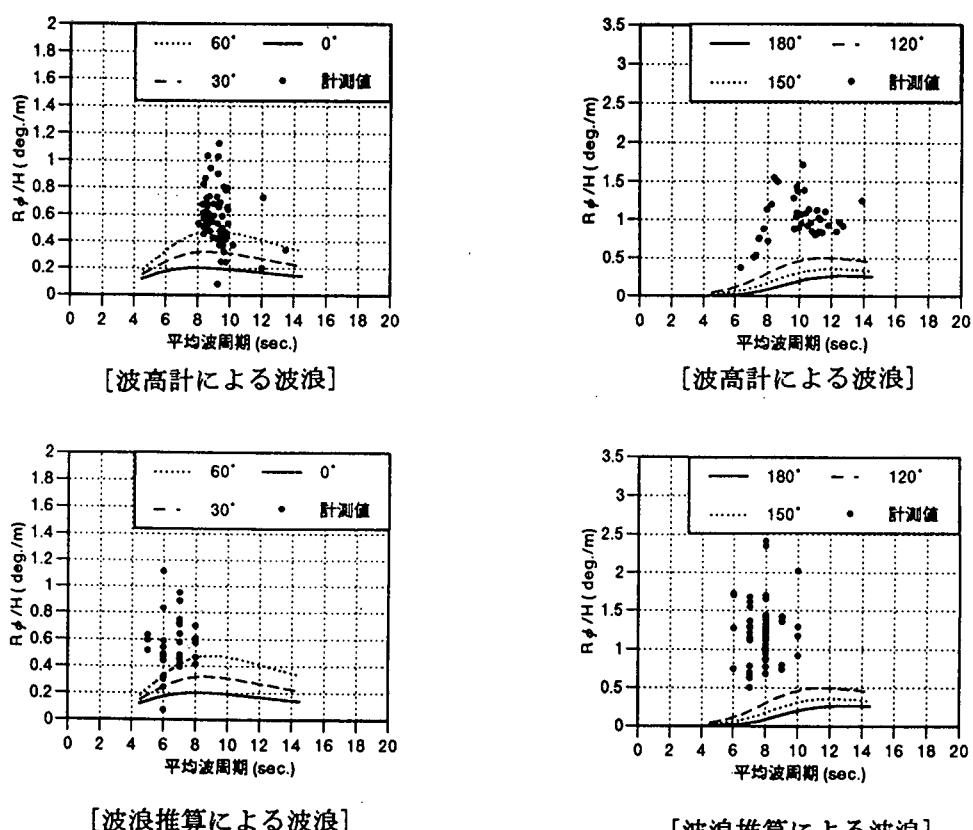
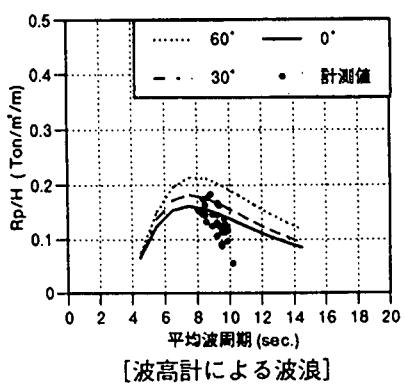
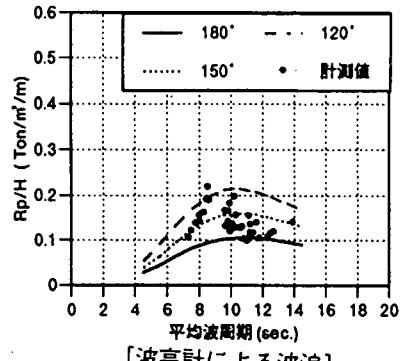


図 5.2.1-2 ROLL の短期予測  
(BALLAST 状態)

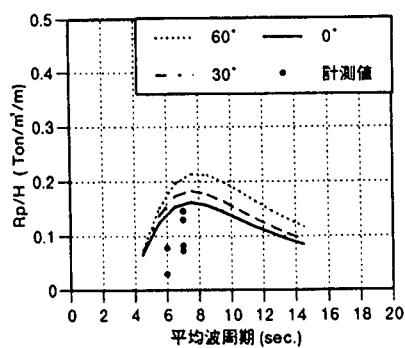
図 5.2.1-3 ROLL の短期予測  
(FULL 状態)



[波高計による波浪]

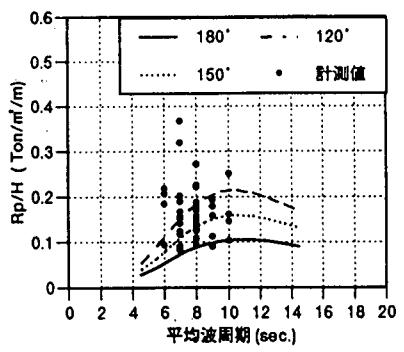


[波高計による波浪]



[波浪推算による波浪]

図 5.2.1-4 船体中央部船底圧力 (S4) の短期予測  
(BALLAST 状態)



[波浪推算による波浪]

図 5.2.1-5 船体中央部船底圧力 (S4) の短期予測  
(FULL 状態)

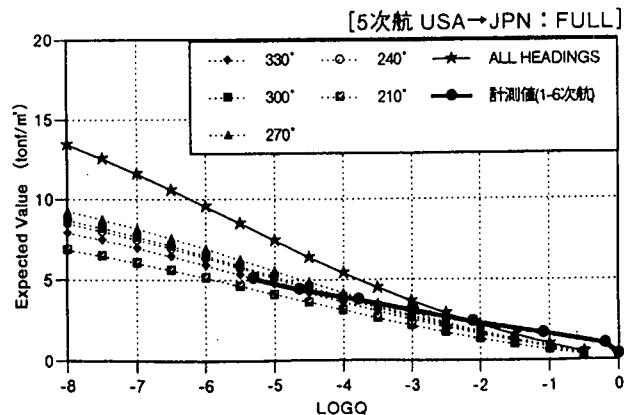
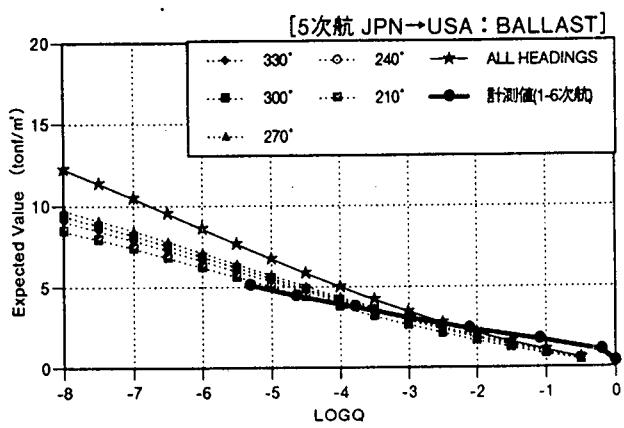
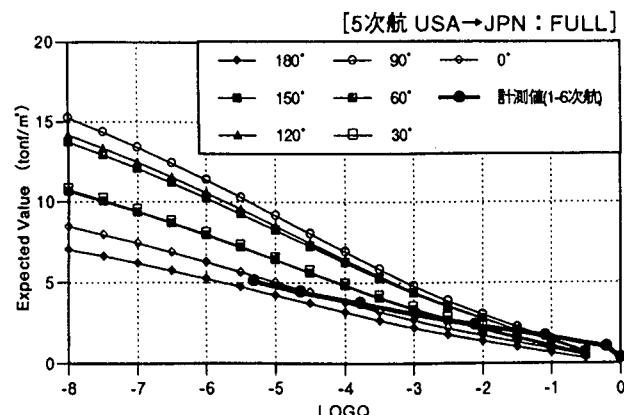
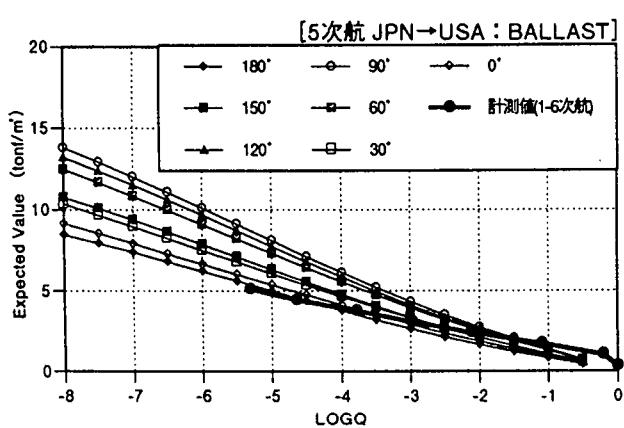


図 5.2.1-6 船体中央部船底圧力 (S4) の長期予測

### 5.2.2 構造応答

#### (1) 応力応答関数及び短期／長期予測の計算法

ストリップ法により求めた、規則波中の変動圧、縦曲げモーメント、上下・水平加速度を用い、離散化解析により応力応答関数を算出した。縦強度と横強度は分離して実施し、縦部材に対しては位相差を考慮して縦横の応力を足し合わせ応力応答関数とした。

##### (a) 縦強度解析

船体を一本の変断面梁とし、ストリップ法から求めた縦曲げモーメントMと、断面係数Zにより縦曲げ応力を算出した。

##### (b) 横強度解析

###### (i) 構造モデル

有限要素解析のための構造モデルを図5.2.2-1に示す。現状設計で用いられている1/2HOLD+1/2HOLD(片舷)では、HOLD中央の応力を検出するには不十分と思われる所以、3つの横隔壁を含む1/2+2+1/2HOLD(No.3～No.5 Hold片舷)とした。

作用荷重は一般に左右非対称であり、構造モデルは片舷(左舷)モデルである。したがって、作用荷重を対称荷重と逆対称荷重に分離し、対称荷重の場合は構造モデルの中心線上で対称条件を用い、逆対称荷重の場合は逆対称条件を用いた。

縦強度は別途考慮する所以、上甲板と船側外板の交線位置の全節点で上下方向を支持し、縦強度が分離できるものと仮定した。

###### (ii) 外水圧のモデル化

船底の外水圧は船体中心線上と船側位置を直線で結んだ台形分布に近似する。船側部も同様に三角あるいは台形分布に近似する。ただし、奥水線より上は波浪変動圧に相当する水頭を付加し、奥水線から下は負圧が生じないものとする。更に、構造モデルは片舷なので、作用荷重を対称荷重と逆対称荷重に分けて考えた。

###### (iii) 貨物圧あるいはバラスト内圧のモデル化

貨物あるいはバラスト水に生じる慣性力は、上下・水平加速度から求めた。また、対称・逆対称への分離方法は外圧に準じて行った。

##### (c) 応力の算出

図5.2.2-1に示す離散化範囲に単位荷重を作用させ応力応答関数マトリクスを算出し、上で述べた荷重マトリクスを波の一周期分について負荷した計算を行って、応答の最大・最小値の差から振幅を求め、応力応答関数とした。

また、短期、長期予測計算は、5.2.1項で述べた方法を用いて行った。

#### (2) 計算結果例

周波数応答関数の例を図5.2.2-2(GIRDER応力)、図5.2.2-3(FLOOR応力)に示す。短期予測では、以下の2方法で海域の波の波高で割った計測値と周期で整理した。

(a) 船側の相対水位計データから、船舶技術研究所で開発された手法による波高と波周期(図中では、波高計による波浪と表示)

(b) 波浪推算による波高と波周期(図中では、波浪推算による波浪と表示)

短期予測結果例を図5.2.1-2及び図5.2.1-3(GIRDER、FLOOR応力)に示す。また、長期予測結果例を図5.2.1-6及び図5.2.1-7(GIRDER、FLOOR応力)に示す。

### (3) まとめ

#### 〔短期予測結果から〕

- ・ 計測値の2種類の整理方法では、計測値と計算値の比較において、どちらかというと波高計による波浪の方が一致度は良い。
- ・ 縦曲げ応力の計算値はBALLAST・FULLでは大きな差異は見られない。計算値と計測値は比較的すると、BALLAST状態では高めの計算値となり、FULL状態では、比較的良く一致している。
- ・ ガーダ応力に関しては、縦曲げの影響が入るガーダ船長方向応力は、BALLAST状態では、縦曲げ応力と同様の傾向を示し計算値は計測値より高めとなっている。縦曲げの影響が入らないガーダのせん断応力(G2、G7)は比較的良く一致している。また、FULL状態では、G1、G4、G5を除けば比較的良く一致している。
- ・ フロア応力に関しては、BALLAST・FULL状態とも計算値と計測値の一致度はあまり良くない。特に、フロア上部の幅方向応力F2、F5の計算応力は計測値と大きくかけ離れている。この原因の一つとしては、内圧の推定精度の問題が考えられる。

#### 〔長期予測結果から〕

- ・ 全体的に計算値(ALL HEADINGS)は、計測値より大きくなる。これは、長期海象の波浪発現頻度は、シップ・アンド・オーシャン財団のものを用いており、計測値(片振幅)は、第1次航～6次航(WORLD WIDE)までの累積をとて整理しているため、計算は厳しめの計算をしていることが原因の一つとして挙げられる。
- 今後の課題としては、構造のモデル化、荷重の離散化、外荷重計算(ストリップ法)、内圧計算(液体及び粒状貨物)、短期予測(スペクトル)、長期予測などの個々の解析要素の計算精度に与える影響及び計測値の整理方法など十分に吟味する必要がある。

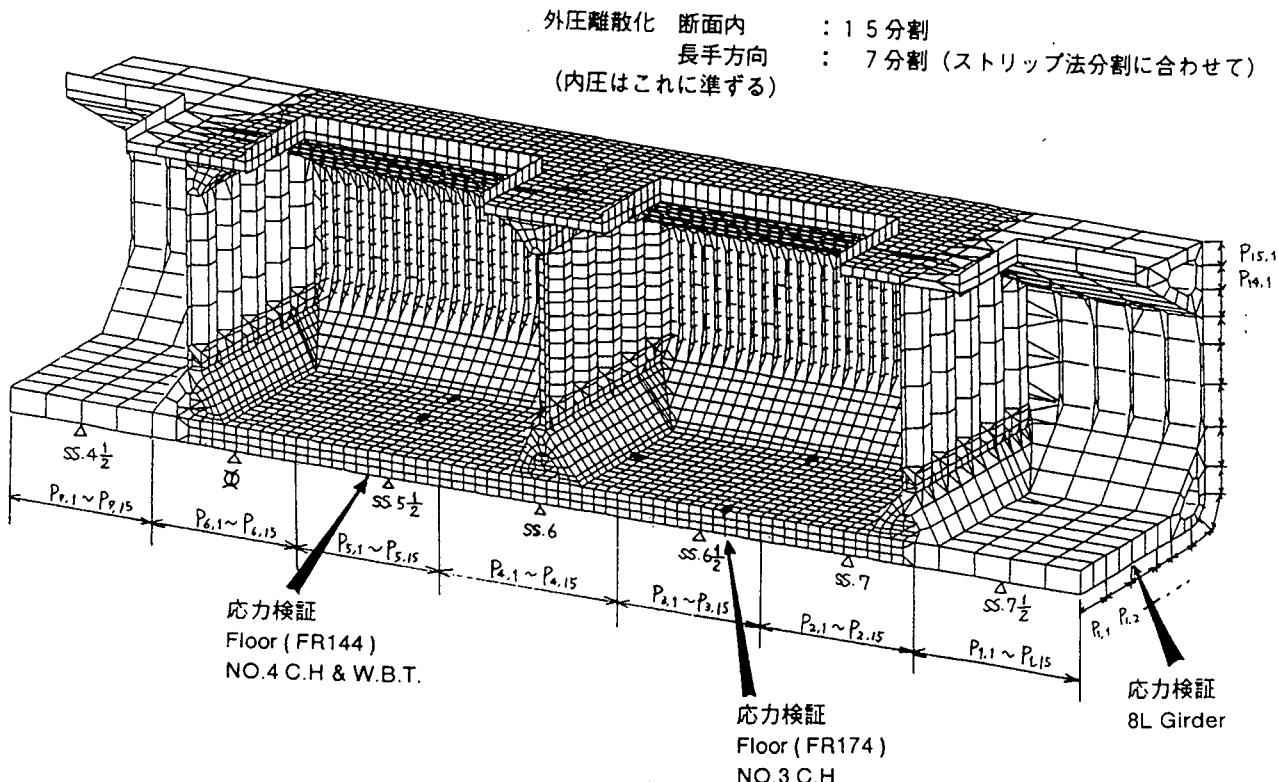


図 5.2.2-1 横強度計算モデル及び外圧の離散化位置

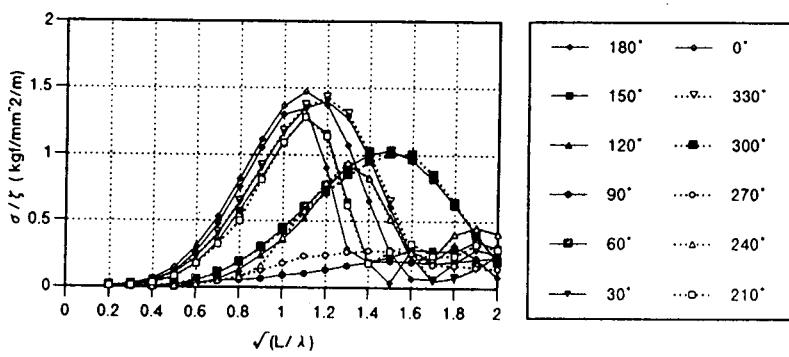


図 5.2.2-2 GIRDER 船長方向応力応答関数 (BALLAST 状態)  
(NO.4 BALLAST HOLD 中央 8L.GIR. 上部、ロワースツール側、FR144)

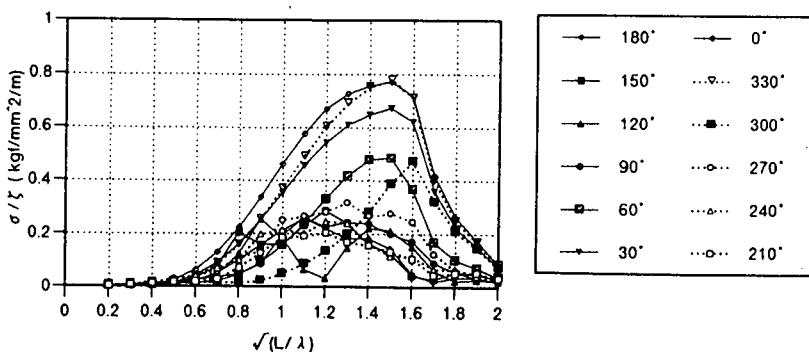


図 5.2.2-3 FLOOR せん断応力応答関数 (BALLAST 状態)  
(NO.3 HOLD ピルジホッパ側、FR174)

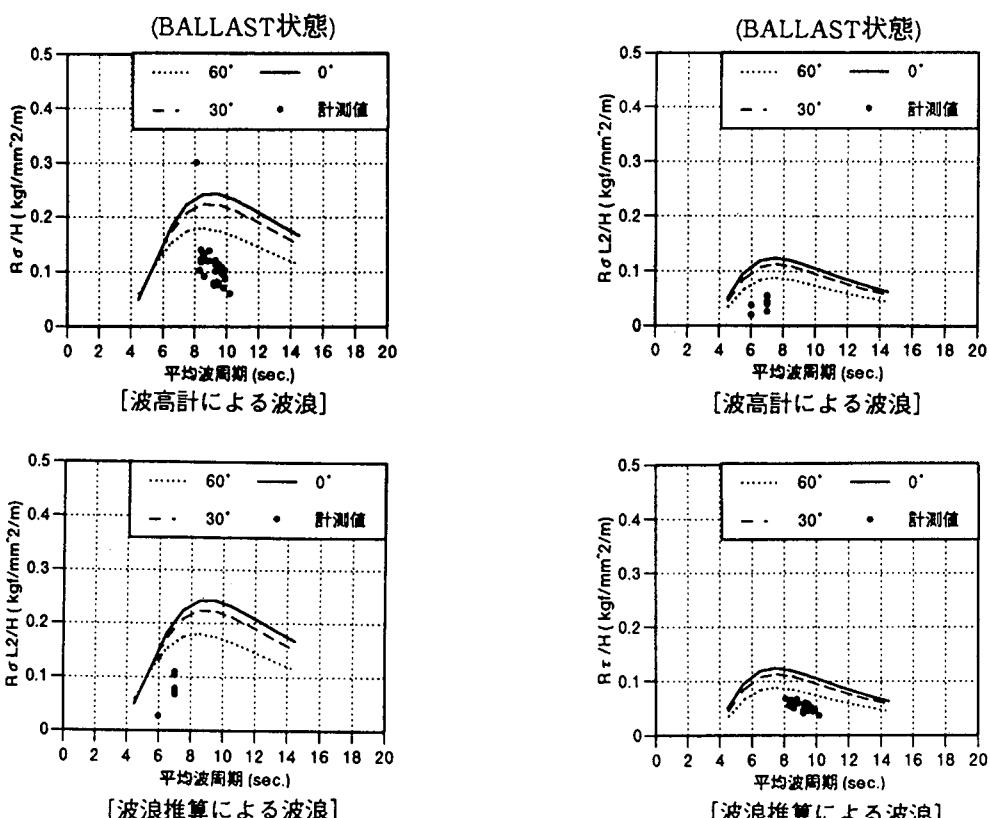


図 5.2.2-4 GIRDER 船長方向応力の短期予測  
(NO.4 BALLAST HOLD 中央 8L.GIR. 上部、  
ロワースツール側、FR144)

図 5.2.2-5 FLOOR せん断応力の短期予測  
(NO.3 HOLD ピルジホッパ側、FR174)

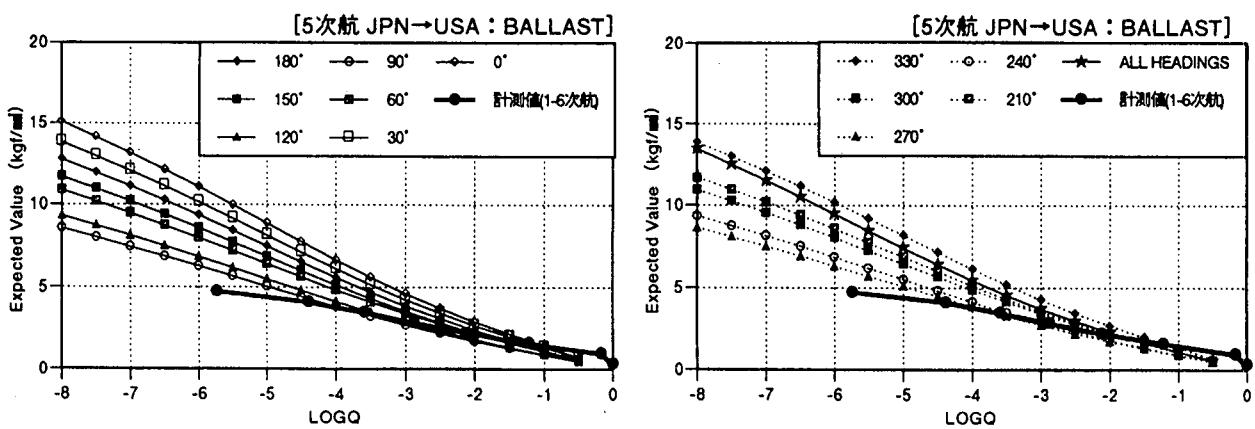


図 5.2.2-6 GIRDER 船長方向応力の長期予測  
(NO.4 BALLAST HOLD 中央 8L.GIR.上部、ロワーステール側、FR144)

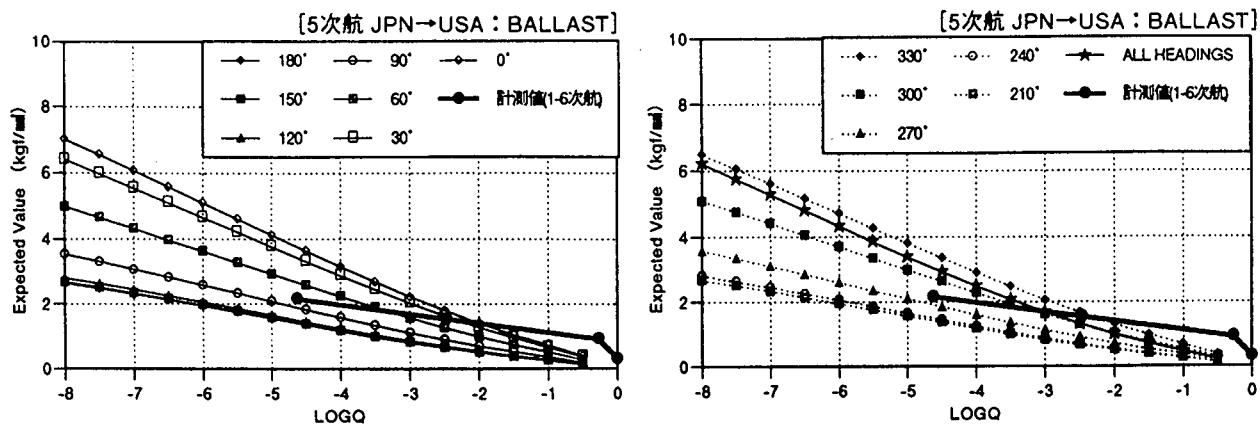


図 5.2.2-7 FLOOR せん断応力の長期予測  
(NO.3 HOLD ビルジホッパ側、FR174)

### 5.3 相関係数

#### 5.3.1 まえがき

波浪中を航行する船舶の構造部材には、船体運動および波浪による波浪変動応力が生じる。（以下、波浪変動応力を単に応力と言う。）船体構造の強度設計には、船の生涯において部材に生じる応力の頻度分布と最大値が必要となる。この応力の頻度分布の推定法としては、船体運動をストリップ法により計算し、ハルガーダの断面力、横断面の水圧分布および内部貨物の慣性力を外力として有限要素モデル化された船体構造に負荷して解析対象部材の応力応答関数を求め、それをさらに統計解析し応力の長期分布を計算する方法が現在最も精度良いとされている。この種の応力計算法として、縦、横強度トータルシステムあるいは離散化解析法（DISAM）などが挙げられる。本SRでも離散化解析法に準ずる応力解析法を採用し、前章で示された様な手順で各構造部材に生じる応力の応答関数が計算されている。この方法は、種々の積み付け状態、航行条件のもとにおいて、位相の異なる複数の荷重が作用する構造部材の応力応答が計算できることに最大の利点があるが、反面、計算量が膨大な量にふくれ上がるため実行には多大な労力を注ぎ込まなければならないのが欠点である。

複数荷重が作用する部材の応力の長期分布を計算する別の方法として、福田等により提案された相関係数法がある。福田等は、垂直曲げ、水平曲げなどによる单一成分応力の長期予測値からそれらの合成全応力の長期予測値を荷重相関係数を用いて近似的に求める方法を示している。この方法は荷重成分ごとの応力応答を計算する手間は上記の離散化解析法と同等であり、長期分布の段階で応力を合成する面倒さもある。しかし、各種波浪中の航行条件、積付け状態に対し、各部材ごとに荷重成分の相関係数がデータベース化されていれば、設計の初期段階でまだ構造配置が未定のときの応力の予測方法として有効な方法であると考えられる。

本報告では各種荷重の相関係数の理論計算値と実船計測値を比較検討し、相関係数法による応力合成法の基礎データを得る。

#### 5.3.2 荷重間の相関係数

異なる2種類の荷重がある部材に作用しその結果それらの荷重により部材に生じる応力を考える場合、大略次のように分類できる。

- (1) 垂直曲げと水平曲げなどの断面力によりある部材に生じる応力のように、部材にたいして縦荷重（軸荷重）成分というべき同じ性質の荷重が異なる振幅、位相で作用するときの合成応力に関するもの。
- (2) 船底あるいは船側の部材のように、作用する荷重が断面力による軸荷重成分と水圧による横荷重成分とが同時に働く。軸荷重成分により横荷重応力が影響され非線形構造応答をし、その結果両者の荷重による合成応力が複雑なものとなる。

異なる荷重が作用するときに両者を相関係数で関係づけて合成応力応答を求める場合、(1)、(2)の荷重形態では荷重間の相関係数の成り立ちが異なることがわかる。すなわち、(1)では単純に荷重間の位相差によって合成応力が影響を受けるが、(2)では荷重間の位相差に加え両者の相互影響成分が合成応力に関係する。したがって、この変動する複数の荷重が作用するとき、部材に生じる合応力を各荷重間の相関係数を用いて合成する場合、相関係数は一つは荷重間の位相差による成分、もう一つは荷重の相互作用による成分とがあることが予測される。船体構造は複雑で非常に高次の不静定構造であるので、相関係数は荷重間の位相差と相互作用影響が複雑に入り交じったものとなる。本報告では、荷重間の位相差による相関係数に着目し、A船の縦、水平、ワーピングおよび軸応力の相関係数について理論計算と実船計測の解析を行う。

### 5.3.3 実船計測と理論計算結果

図 5.3.1 に 4 次航の船体中央部、7 次航の機関部の応力計測値の復航について時系列 ( $\rho_{LH0}$ ) および標準偏差 ( $\rho_{LH}$ ) から求めた相関係数を比較した 1 例を示す。荷重間の相関係数は(A)の各荷重間の時系列データから求めるのが直接的で正確な値が求められるが、同時に多くの時系列データを記憶させるには大量の記憶領域が必要となる。これに対して(B)の標準偏差から相関係数を求める方法では、あらかじめ船上のオンライン計測時に統計解析を行い各荷重の変動量の標準偏差だけをデータとして記録しておけばよいか記憶領域はわずかでよい。また、この方法は荷重の長期データ間の相関係数を求めるときにも応用できる。

図 5.3.2 に 7 次航の機関部の各荷重の相関係数の短期分布における理論計算値と実船計測値との比較の 1 例を示す。図の●印は時系列データからの計測値である。また、計測値の波周期は波高計の解析による周期である。7 次航はほぼ向い波状態であるので、相関係数の理論計算値は 180、150、120 度の値を記入した。波高計による波向きは目視値と必ずしも一致していないが、ほぼ向い波と考えると、計測値は 240～180～120 度の理論計算値の範囲と比較するのが適当と言える。

長期分布の超過確率が  $10^{-4}$  に対応する荷重間の相関係数の結果を図 5.3.3 に示す。計測データは向い波状態のものであるので 180 度を中心に左右舷の 30 度の範囲にプロットをした。

### 5.3.4 長期分布の相関係数の近似推定

長期予測と短期予測の相関係数の関係を調べ、以下のようなことが明らかとなった。

- 長期予測において、2 種類の応力の合成応力の極値は、その主成分の応力の極値の海象の性質が支配的である。
- 長期予測の応力の極値は、短期予測の最大値  $R_{max}$  の値より計算できる。
- 短期予測の最大値  $R_{max}$  は、波スペクトルと応力応答関数の極大値どうしが重なり合う広義の同調現象に対応する。このときの波スペクトルの平均波周期が  $T_{max}$  である。

これらの結果から、長期予測における合成応力の極値は主成分応力の応答関数が広義の同調現象になるときの応力応答が支配的であると言える。

$$\rho_{ij} = \cos \{ \epsilon_i ((\sqrt{L/\lambda})_{i max}) - \epsilon_j ((\sqrt{L/\lambda})_{j max}) \}$$

長期分布の相関係数は、主成分の応力の応答関数が最大となる時の他成分の応力との位相差で近似できる。結果を図 5.3.4 に示す。定量的にはまだ若干の差はあるが、定性的な相関係数の針路に対する変化は十分説明できている。

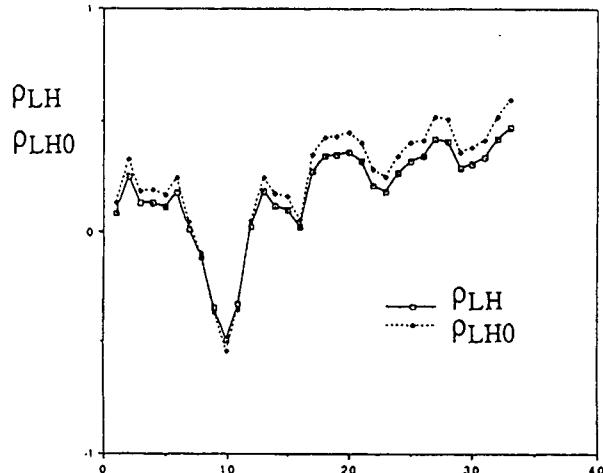
### 5.3.5 あとがき

A 船の垂直曲げ、水平曲げ、ワーピング、軸応力のそれぞれの応力の相関係数を短期不規則波浪中および長期分布について検討し、以下の結果を得た。

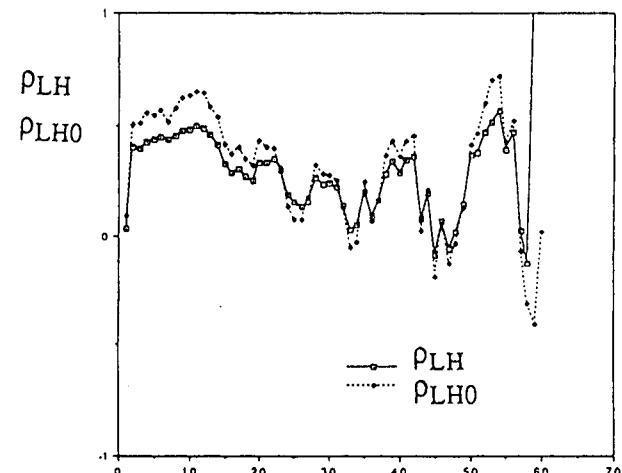
- 各応力の規則波中の応答関数から ISSC 波スペクトルを用いて短期不規則波浪中の応力の相関係数を理論的に計算した。
- A 船の各応力の短期計測データから相関係数を(A)時系列データから計算する方法と(B)標準偏差から計算する方法により解析した。(B)の標準偏差から計算する方法は時系列データとほぼ一致し、計測結果の記憶領域を少なくすることができ有利な方法である。
- 短期波浪中の相関係数の理論値と計測値を比較したところ、おむね両者は一致した。
- 各応力の長期分布を遭遇波浪データから計算し、各応力の同一超過確率レベルの極値間の相関係数を計算した。

同様に計測データの長期分布から応力の相関係数を求め、計算値と比較した。

- (5) 短期分布と長期分布の相関係数の関係を調べ、長期予測における荷重間の相関係数は主成分の応力の応答関数が最大となる時の他成分の応力との位相差で近似できることを明らかにした。また、このことは、長期分布の相関係数は遭遇海象の統計的性質にも影響されないことを意味している。

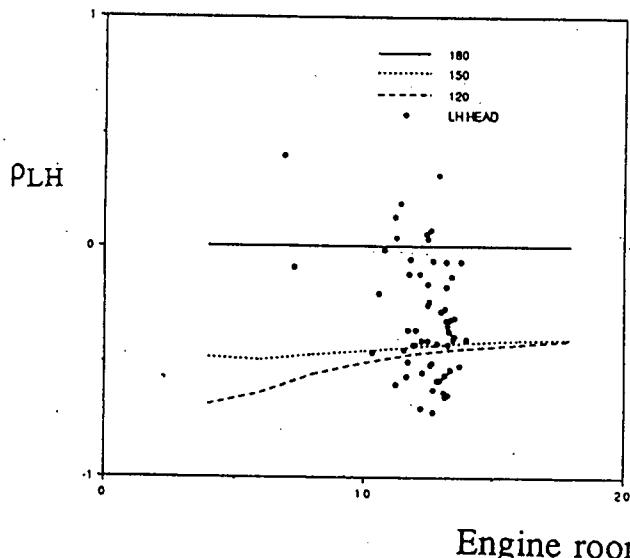


Mid-ship    Voy. 4



Engine room    Voy. 7

図 5.3.1 荷重間の相関係数の時間変化(時系列より  $\rho_{LHO}$ 、標準偏差より  $\rho_{LH}$  )



Engine room    Voy. 7

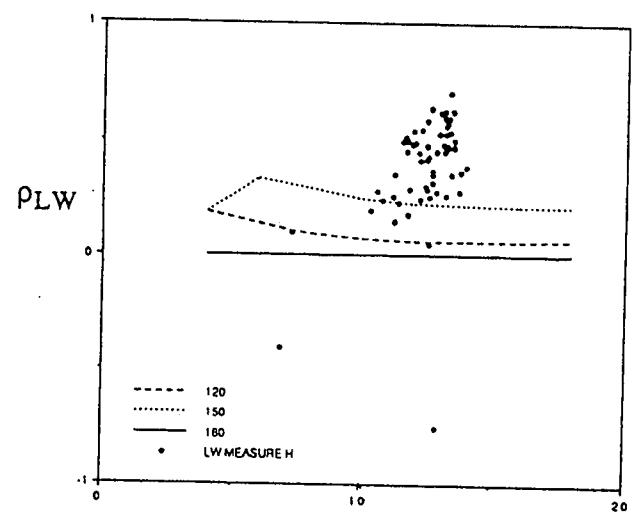


図 5.3.2 相関係数の理論計算値との比較(7次航)

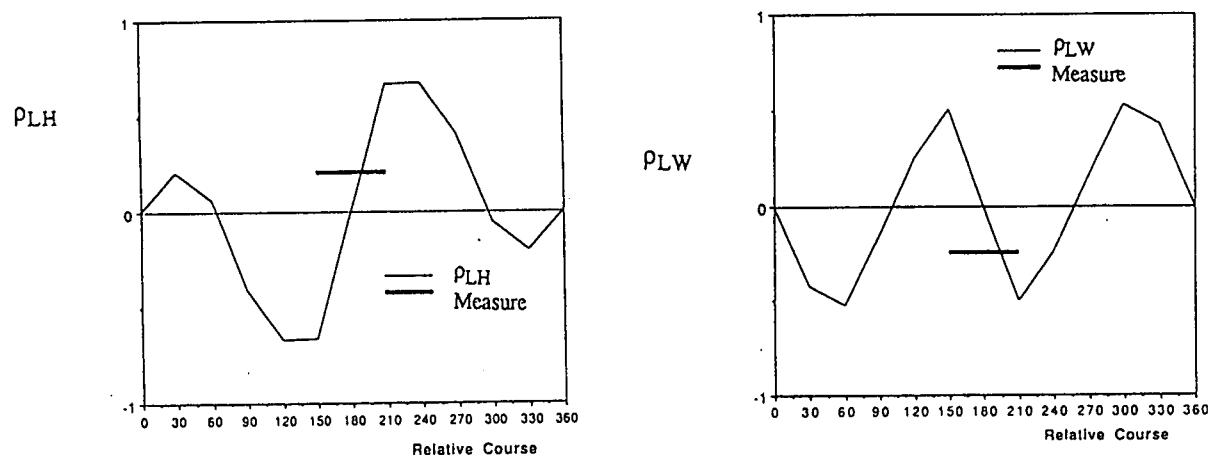


図 5.3.3 長期分布の相関係数(超過確率が  $10^{-4}$  に対応する、7次航)

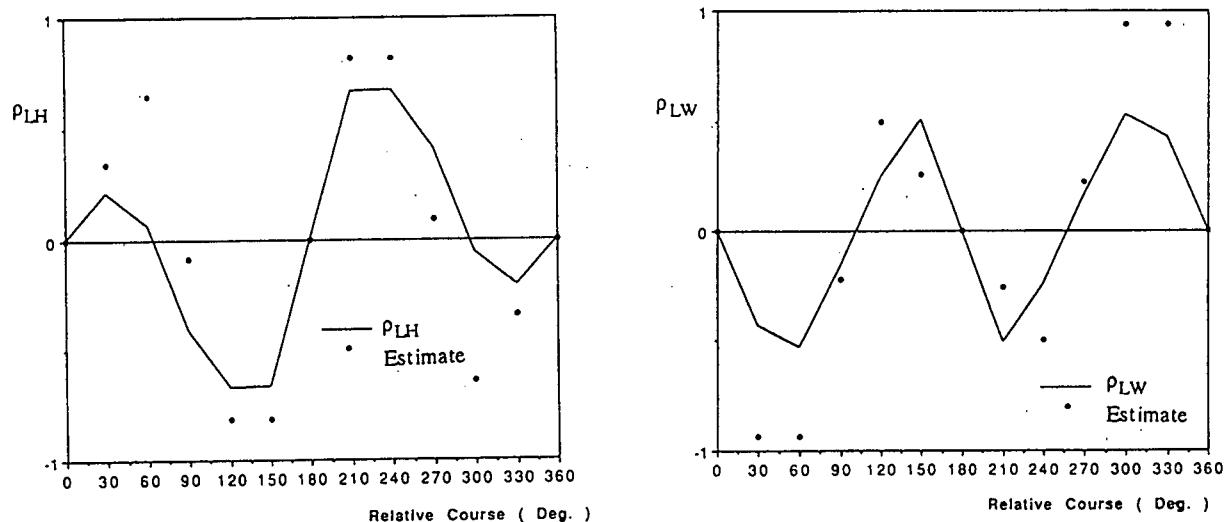


図 5.3.4 長期予測の相関係数の近似推定値

## 5.4 その他の検証法の考察

本節においては、「SHIP A」の実船計測データの中、7次航のものを中心として選び、いくつかの側面から実船計測データとストリップ法による計算値との比較検証を行った。最近、大型船の横荷重に関連して、従来のストリップ法から得られる短波長域における波浪変動圧の推定精度向上が、主として模型試験結果との比較より指摘され、これらの改善策も提案されている。また、波浪変動圧の非線形影響や、応答間の位相差などの的確な把握も船体構造に作用する荷重及びそれに対する構造応答評価の信頼性を高める上で重要である。そこで、上記の点をより詳細に検討するために、実船計測データの時系列解析など、5.1、5.2とは異なる方法を用いて、波浪変動圧計算法の検証を行った。

すなわち、

- 1) 遭遇した海洋波のスペクトルを推定し、波浪変動圧の周波数応答関数を検証する方法で、まず、計測された船体運動から波スペクトルを近似的に推定し、線形重ね合わせ法を用いて波浪変動圧のスペクトルを計算によって求め、これを計測された波浪変動圧のスペクトル並びに標準偏差値と比較した。これに対し、5.1、5.2では、波スペクトルをいわゆるISSC型と仮定し、単位波高当たりの波浪変動圧の標準偏差値を比較しているが、本方法では、実際に遭遇した海洋波のスペクトルを推定して用いている点が異なる。
- 2) 波スペクトルを介さずに波浪変動圧の周波数応答関数を検証する方法で、ここでは、運動加速度と波浪変動圧の時系列を用いて、これら時系列間の関連性をクロススペクトルを求めて、計算結果と比較した。本方法では、実測されていない不確かな波スペクトルを介さずに、運動加速度に対する波浪変動圧の周波数応答関数が検証できる。
- 3) 波浪変動圧の断面分布を検証する方法で、実船計測された運動、相対水位、波浪変動圧などの時系列データから波浪変動圧の断面分布を作画し、これを計算値と比較した。ただし、計算値は、厳密には非線形計算法によって求めるべきであるが、ここでは近似的に通常用いられる線形計算結果と比較した。  
以上のように、5.1、5.2とは異なる方法を用いて、波浪変動圧計算法の検証を行ったが、今回解析した範囲内においては、実船計測データとストリップ法による計算値とは、波下側水面付近の値を除いて比較的良い対応が見られた。この場合、遭遇した波スペクトルを用いた推定値の方がISSC型のものに比べ実船計測値により近い値を与えた。従って、実船計測値と推定値の検証においては、遭遇した波スペクトルや非線形計算法による結果も考慮しながら今後さらに詳細に検討する必要があると考える。

## 5.5 バラスト水を考慮した船側波浪変動圧

荷重・応力計算法についての今後の課題の一つとして、バラスト水や原油などの液荷の影響がある。即ち、内部の液荷が自由表面を有する場合には、船体の動搖に伴って液荷も動搖するため、船側の外部のみならず、内部にも変動圧力が働く。このような内部圧力は、たとえばデッキと船側外板との接合部に働く曲げモーメントなどに対して、場合によっては無視できない寄与を及ぼす可能性があり、内部圧力を外部圧力との位相差をも含めて推定する必要がある。本研究部会では、平成5年度よりバラスト水を考慮した船側波浪変動圧の解析法の開発を行ってきた。

まず、内部自由水を有する浮体の波浪中の運動・浮体内外部の波浪変動圧力の計算法を開発した。本計算法は、特異点分布法を用いて、内部・外部における流体運動の支配方程式（連続の式、自由表面条件、物体表面条件）と、浮体の運動方程式を連立させて解くもので、自由表面条件としては、浮体内外部共に微小水面変位を仮定した線形自由表面条件を用いている。本計算法の有効性を検証するために、浮体両舷に設けた2つのバラストタンクに半分まで水をいれた状態で、水槽試験を行った。浮体動搖・浮体内外部の変動圧力の計測結果と計算結果との比較例を図5.5.1に示す。

次に、本計算法を既存のストリップ法プログラムに組み込む方法を示し、試みに、全長175mのカーゴシップ(SR-175船型)を例にとり、船体の仮想区画にバラスト水が搭載されていると仮定して、フルード数0.275・向い波状態に

ついて計算を行った。バラスト水による流体力の影響を考慮した上下揺れ、及びバラストタンク内部における変動圧力の振幅の計算例を図 5.5.2 示す。この例では内部圧力は波振幅に相当する水頭圧の 1 割以下である。

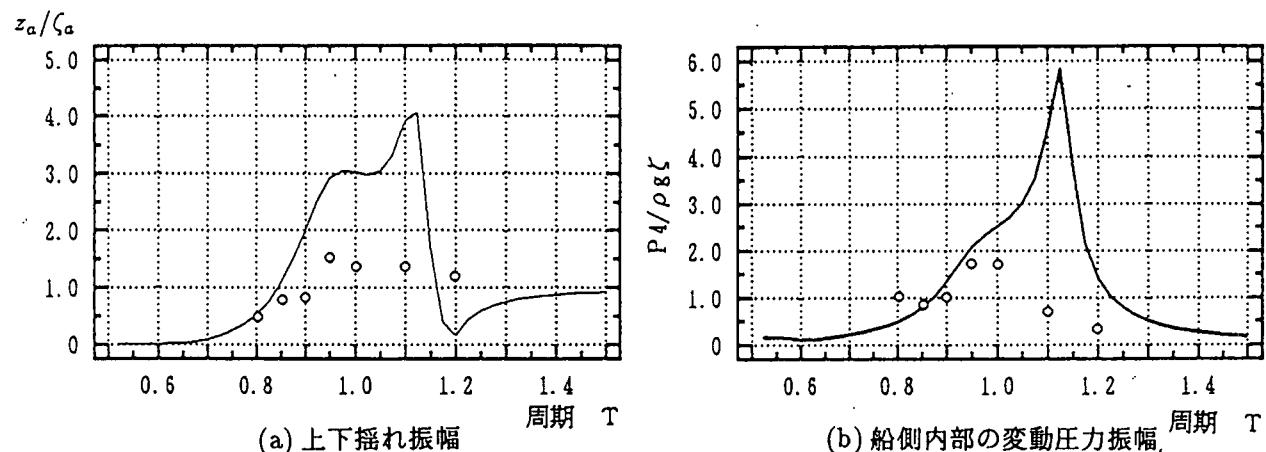


図 5.5.1 内部に自由水を有する浮体の動揺及びバラストタンク内の変動圧力

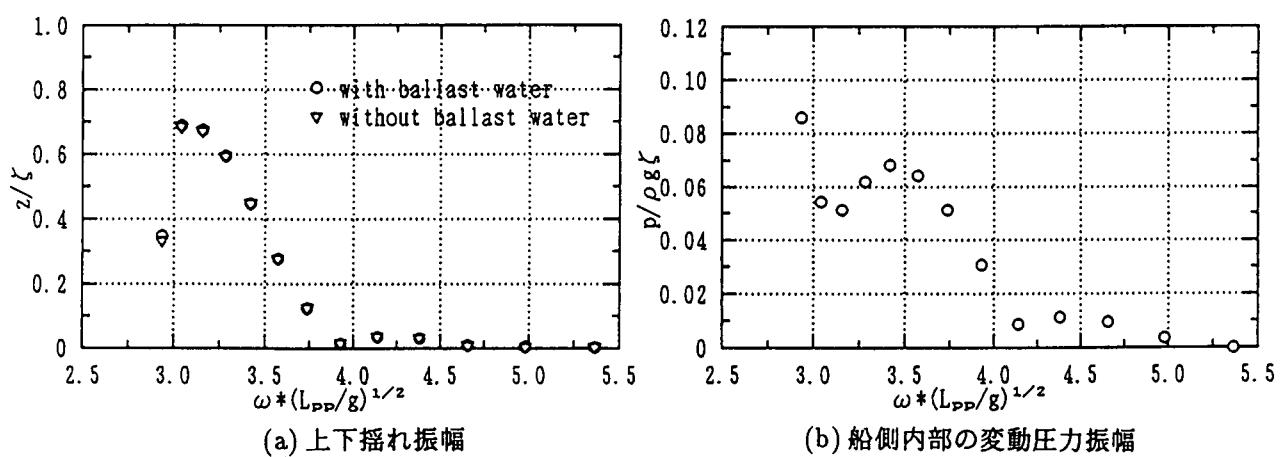


図 5.5.2 向い波中を航走中の船舶の動揺及びバラストタンク内変動圧力の計算例

## 6. 研究成果の総括

### 6.1 研究成果のまとめ

本研究部会の4年間の研究で得られた主な成果は次のとおりである。

#### (1) 実船実験自動計測、解析システム

- a) 計測機器、技術の進歩を大幅に活用し、船体運動、波浪（波高）、荷重、応力などについて長期の多点同時計測を自動的に行い、応答、統計値などのデータ解析を船上で実施できる計測・解析システムを開発した。
- b) 波高データからの波浪解析に関して、拡張最大エントロピー法をもとに、従来の方法では問題のあった追波状態までを扱える方向波スペクトルの推定法を新たに開発し、数値シミュレーションならびに水槽実験により、本波浪解析法が追波状態も含めて高い精度を有することを確認した。
- c) 本研究部会で開発した計測、解析システムは、今後の実船計測計画に大いに役立つことが期待できる。

#### (2) 実船計測

- a) 実船計測されたデータを短期間にスペクトル解析、統計解析および波浪解析を実施することが可能な陸上データ解析システムを開発した。
- b) コンテナ船について、北米航路16航海分の長期間にわたり海象条件、船体運動、加速度、船体表面圧力、船体構造応答のデータを収集した。
- c) バルクキャリアについて豪州航路をはじめ北米航路、世界一周航路といった広範囲な航路の海象条件、船体運動、加速度、船体表面圧力、船体構造応答のデータを収集した。

#### (3) 計測データの解析

- a) 波浪解析として、本研究部会で開発した波高の計測データから拡張最大エントロピー法を用いた波浪解析法、目視観測による方法、供試船の航行時刻、位置をもとに気象情報から波浪推算を行う3方法について比較検討した。この結果、新たに開発した波浪解析法は、波高に関しては他の方法と比較して±1.0m程度の範囲でまとまっており、また定性的にもよく一致していることが明らかとなった。波周期に関しては波浪推算の結果とよく一致している。また、波向きに関しては、実船実験では向波中で主方向が異なる部分はあるが、追波中は比較的よく一致することが明らかとなった。以上から、本波高計が波浪解析に有用であることが確認できた。
- b) 解析データについて、次の方法でその妥当性を確認した。
  - 数値計算による運動、波浪荷重などの長期予測では、実海域の短期海象における運動、波浪荷重などの振幅の頻度分布がレーレー分布で表されると仮定し、波スペクトル（ISSC）と運動の周波数応答関数から計算される運動の標準偏差を用いて、様々な計算を行っている。そこで、短期計測データの統計的な性質を明らかにするため、極値解析で得られる運動、加速度、圧力、応力などの代表値とスペクトル解析から得られる標準偏差を比較し、最大値を除いて、レーレー分布と仮定しても良いことを確認した。
  - コンテナ船の長期計測結果から、その全体の山数は $1\times 10^6 \sim 10^7$ で、2年間の計測データとして妥当な結果である。また、加速度についても船首部での両振幅の最大値が2.0G以下となっており妥当な結果となっている。波浪変動圧は喫水線下の船側部で最も高く、船底部で小さい。
  - バルクキャリアの長期計測結果からその全体の山数は $1\times 10^5 \sim 10^6$ で、1.5年間の計測データとして妥当な結果である。また、加速度についても船首部での両振幅の最大値が1.0G以下で、船速の遅いバルクキャリアとして妥当な結果である。
- c) 船首波浪衝撃圧については、バルクキャリアについては比較的厳しい海象状態に遭遇していることから妥当な値

が計測されている。

- d) 波浪変動圧に関して船級協会のルール規定値との比較を行い、計測値の分布が比較的良い一致を示していることを確認した。

#### (4) 荷重・応力計算法の検証

- a) ストリップ法による船体運動、波浪変動圧、縦強度および横強度部材の構造応答の長短期予測計算値と計測結果との比較から次のことが分かった。

- 船体運動、加速度の短期予測計算値は、計測値と比較的良い一致を示す。
- 波高について、波高計、目視観測および波浪推算による値を用いて比較したが、波高計による計測結果を用いて整理した結果が最も良い一致を示していることから、本研究部会で採用した波高計による計測および波浪解析法が妥当であったことが確認できた。
- 波浪変動圧の計算値については、非線形影響の大きい喫水線付近で計測値と差異が見られる。
- 縦通部材の応力の計算値は、計測値と比較的良い一致を示している。
- 横部材の応力については、一部の部材に計算値と計測値との間に差異が見られる。波浪変動圧の計算値が計測値と比較的良い一致を示している船底部でもいくらか差異が見られる。
- 一部の部材で応力の計算値の分布傾向に差異がみられる。この原因として、横部材の構造応答は、自船の発散波、反射波の影響を受けやすい船体近くの波浪が関与していることが考えられる。また、FEM解析モデルやコンテナ、グレン荷重などの作用方法についても検討の余地がある。
- 長期予測計算は、波浪発現頻度分布としてS & O財団発行のものおよび実船計測で得られたものを用いて実施したが、実船計測に基づく計算結果が計測値と良い一致を示している。
- 船体運動、応力の長期予測の計測値は計測値を上回っており、現状の設計が妥当であることが確認できた。
- 離散化手法に基づく計算手法が設計で採用可能な精度を有していることが確認できることから船体構造設計の信頼性向上が図れる。

- b) 離散化手法に基づく荷重・応力の計算法とは別に相関係数による方法を提案し、次に示すようにその提案の有用性を確認した。

- 相関係数について、各応力の短期計測データの時系列データから計算する方法、標準偏差から計算する方法を比較し両者が良い一致を示すことから、標準偏差を用いる方法が計測結果の記憶領域を少なくするという優位性を持つ。
- 短期波浪中の相関係数の理論値は計測値と良く一致した。
- 短期分布と長期分布の相関係数の関係についての検討から、長期予測における荷重間の相関係数は主成分の応力の応答関数が最大になる時の他成分の位相差で近似できることを明らかにした。これは、長期分布の相関係数が遭遇海象の統計的性質にも影響されないことを意味している。

- c) 波浪変動圧の計算法について、a)とは異なる手法を用いて検証を行い、実船計測データとストリップ法による計算値との間に大きな差異が認められないことを確認した。

- 計測された船体運動から波スペクトルを近似的に推定し、波浪変動圧のスペクトルを線形重ね合わせから求め、これを計測された波浪変動圧のスペクトルならびに標準偏差と比較する方法。
- 運動加速度と波浪変動圧の時系列計測結果を用いて、これら時系列間のクロススペクトルを求め、計算結果と比較する方法。
- 実船計測された運動や波浪変動圧の時系列データから波浪変動圧の断面分布を求め、これを計算値と比較する

方法。

- d) 現在設計で用いられているストリップ法の改善として、船側タンクのバラスト水を考慮した船側波浪変動圧の解析法の開発を行った。この解析法の検証に用いた例では、バラスト水の存在によって船体運動は殆ど影響を受けないこと。また船側波浪変動圧には大きな影響を及ぼさないという結果を得た。

## 6.2 今後の課題

荷重・応力計算法の検証は、計算船2船が遭遇した比較的厳しい航海についての計測結果との比較にとどまったが、船体運動、加速度、縦強度部材の応力は比較的良好一致を示しており、現行の計算法が設計レベルでは有効であることが確認できた。

しかし、波浪変動圧や横部材の応力に関しては、一部計測結果との差異があることから、さらに検討の余地があることが明確となった。

本研究部会で解決できなかった検討項目を今後の研究課題として以下に抽出する。

- (1) 大型船の波浪解析について、さらに精度を向上させるためには実船に搭載するセンサーの種類、配置についての検討も必要と思われる。また、波高計を用いる場合、本研究部会で検討はしたが、最終的には採用できなかつた実船における自船の発散波、反射波の影響を削除する方法についての検討が必要である。
- (2) 奥水線付近の波浪変動圧に計算値が計測値に比較してやや小さい値を示していることから、非線形性を考慮したストリップ法による波浪変動圧計算値と計測値の比較検討を行い、非線形性の影響把握が必要である。
- (3) 二重底横部材の応力について計算値と計測値の間に差異があることから、波浪の検討に加え、FEM解析モデルやコンテナ、グレン荷重などの作用方法に検討の余地が残されている。
- (4) 実際の設計では、航行海域の波浪データをもとに構造応答の計算が行われ、船体の安全性評価を確認することになる。本研究部会では、実験船の航行中の波高計データに基づく波浪解析結果と気象情報に基づく波浪推算の比較検証を行った。この実際の航路の気象情報に基づく波浪推算の実船設計への利用法も将来の課題である。

## 7. 結 言

船体構造に作用する荷重およびその荷重に対する構造応答の実態を把握し、船体構造の強度評価の信頼性を高めることを目的とする本研究は、2隻の実船計測を行うことを研究の柱としてきた。

本研究は平成4年度から4年間にわたりて実施したが、大規模な実船計測に対応するため、初年度は計測の準備期間とした。計測対象船は、運動特性、構造様式の異なる船型としてコンテナ船およびバルクキャリアを選択し、それぞれ2～3年間にわたる長期の計測データを収集した。厳しい海象条件に遭遇し、計測不能となった計測点も一部あったが多くの貴重な計測データを得ることができた。これら実船計測および計測データの解析は、本部会で開発した自動計測、解析システムで実行され多大の実績を上げた。

また、荷重・応力計算法の検証については、2船の実船計測結果との比較検討を行ない、その精度、問題点および今後の改善点を抽出した。さらに、簡易計算法として相関係数法を開発し、その有用性についても検討した。荷重、応力の短長期予測計算に多大な影響を及ぼす波浪に関しては、波高計による計測データを新たに開発した方法による解析を実施し、目視観測および波浪推算結果との比較も実施した。

本研究部会の4年間の研究で得られた主な成果は次のとおりである。

- (1) 開発した船上自動計測システムおよび陸上データ解析システムは、2船の長期実船計測で十分な実績をあげ、その有用性を確認した。今後の実船計測計画に大いに役立つことが期待できる。
- (2) コンテナ船の北米航路16航海分、バルクキャリアの豪州航路をはじめインド洋、大西洋航路など7航海分の海象条件、船体運動、構造応答の長期データを収集した。また、これらの解析データについてその妥当性を確認した。
- (3) 波浪について、目視観測、波高計による計測、波浪推算のデータを比較検討し、本部会で開発した波浪解析法の妥当性を確認した。
- (4) 現状設計で採用されているストリップ法に基づく荷重・応力計算法と計測結果の比較では、加速度等の船体運動、船体縦曲げ等の断面力は、短長期予測ともに比較的良い一致が見られ、計算法が有効であることが確認できた。波浪変動圧については船底、喫水線下の船側部では良い一致が見られるが、喫水線付近では差異がみられ、喫水線上の波の影響など非線形性を考慮しさらに改善の必要がある。
- (5) 応力については、縦通部材は本部会で採用した離散化手法に基づく計算結果と計測結果は比較的良い一致が見られる。横部材については差異の見られる計測点があるが、この原因が荷重に関与するものか構造解析モデルなど計算法に関与するものかさらに検討の余地がある。
- (6) 船体運動、応力の長期予測の計算値は計測値を上回っており、現状の設計が妥当であることが確認できた。
- (7) 以上のように実際の航行状態における船体運動、構造応答のデータが収集できしたこと、波浪解析の精度向上が図れたこと、および離散化手法に基づく計算手法が設計で採用可能な精度を有していることが確認できたことから船体構造設計の信頼性向上が図れる。

本研究では、多くの貴重なデータを収集することができたが、その反面データ解析に総力を注ぐことになったこと、荷重・応力計算法については現状方法の検証という目的から、代表的な航海の計測結果との比較を実施するにとどまった。しかし、実船計測では、当初の計画を大幅に上回る豊富なデータが収集されており、厳しい海象に遭遇したデータも得られていることから、これらのデータが他方面の研究に大いに役立つことが期待できる。

最後に、計測船を提供下さり計測のため種々の便宜をはかつて載きました川崎汽船株式会社殿ならびに第一中央汽船株式会社殿に感謝の意を表します。また、長期間の継続計測をお願いいたしました“せとぶりっじ”および“PACIFIC NOVA”的船長はじめ乗組員の方々には、計測機器の設置、計測作業等について便宜をおはかり下さいましたことに対し厚くお礼申し上げます。