

船舶の横揺れ減衰力及び波浪中船速低下  
に関する研究

Researches on Roll Damping and  
Speed Loss of Ships in Waves

第161研究部会

昭和54年3月

社団法人

日本造船研究協会

## 第 1 6 1 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)         | 藤 野 正 隆 (東 京 大 学)         |
| 委 員       | 元 良 誠 三 (東 京 大 学)         | 竹 沢 誠 二 (横 浜 国 立 大 学)     |
|           | 伊 田 力 (東 京 大 学)           | 内 藤 林 (大 阪 大 学)           |
|           | 平 山 次 清 (横 浜 国 立 大 学)     | 姫 野 洋 司 (大 阪 府 立 大 学)     |
|           | 田 中 紀 男 (大 阪 府 立 大 学)     | 福 田 淳 一 (九 州 大 学)         |
|           | 池 田 良 穂 (大 阪 府 立 大 学)     | 高 木 幹 雄 (九 州 大 学)         |
|           | 田 才 福 造 (九 州 大 学)         | 大 松 重 雄 (船 舶 技 術 研 究 所)   |
|           | 高 石 敬 史 (船 舶 技 術 研 究 所)   | 相 原 和 樹 (三 菱 重 工 業)       |
|           | 渡 辺 巍 (船 舶 技 術 研 究 所)     | 小 林 正 典 (三 井 造 船)         |
|           | 藤 井 斎 (三 菱 重 工 業)         | 岩 井 清 (日 立 造 船)           |
|           | 田 崎 亮 (石 川 島 播 磨 重 工 業)   | 山 上 順 雄 (川 崎 重 工 業)       |
|           | 高 木 又 男 (日 立 造 船)         | 永 松 秀 一 (住 友 重 機 械 工 業)   |
|           | 富 山 穀 (日 本 鋼 管)           | 花 園 史 郎 (函 館 ド ッ ク)       |
|           | 山 崎 芳 嗣 (佐 世 保 重 工 業)     | 日 下 幹 生 (大 阪 造 船)         |
|           | 篠 原 喜 代 美 (函 館 ド ッ ク)     | 松 田 耕 (臼 杵 鉄 工 所)         |
|           | 池 田 洋 (榎 崎 造 船)           | 日 笠 則 明 (日 本 海 事 協 会)     |
|           | 伊 藤 讓 (造船 技 術 セン タ ー)     | 岡 本 忠 穀 (かもめ エンジニアリング)    |
|           | 川 崎 豊 彦 (大 阪 商 船 三 井 船 舶) | 沼 田 敏 晴 (東 京 大 学)         |
| 討 議 参 加 者 | 湯 浅 和 昭 (東 京 大 学)         | 川 口 升 (三 菱 重 工 業)         |
|           | 牛 島 憲 夫 (三 菱 重 工 業)       | 高 橋 雄 (三 菱 重 工 業)         |
|           | 柳 田 晃 (三 菱 重 工 業)         | 日 根 野 元 裕 (三 井 造 船)       |
|           | 池 上 国 広 (三 菱 重 工 業)       | 松 原 直 哉 (三 井 造 船)         |
|           | 島 田 潔 (三 井 造 船)           | 宮 本 雅 史 (日 立 造 船)         |
|           | 梶 田 悅 司 (石 川 島 播 磨 重 工 業) | 黒 井 昌 明 (日 立 造 船)         |
|           | 山 本 茂 (日 立 造 船)           | 政 井 和 博 (川 崎 重 工 業)       |
|           | 三 住 悅 己 (川 崎 重 工 業)       | 高 梨 伊 三 夫 (川 崎 重 工 業)     |
|           | 池 渕 哲 朗 (川 崎 重 工 業)       | 佐 々 木 紀 幸 (住 友 重 機 械 工 業) |
|           | 山 本 翁 (日 本 鋼 管)           | 小 林 顯 太 郎 (住 友 重 機 械 工 業) |
|           | 竹 川 正 夫 (住 友 重 機 械 工 業)   | 松 井 志 郎 (佐 世 保 重 工 業)     |
|           | 城 野 清 治 (佐 世 保 重 工 業)     | 赤 川 英 一 (かもめ エンジニアリング)    |
|           | 川 隅 一 道 (佐 世 保 重 工 業)     |                           |
|           | 松 村 純 一 (船 舶 局)           |                           |

## 横 摆 丸 減 衰 小 委 員 会 委 員 名 簿

(敬称略、順不同)

|       |                         |                         |
|-------|-------------------------|-------------------------|
| 委 員   | 中 村 彰 一 (部会長、大阪大学)      | 竹 沢 誠 二 (横浜国立大学)        |
|       | 藤 野 正 隆 (東 京 大 学)       | 姫 野 洋 司 (大 阪 府 立 大 学)   |
|       | 平 山 次 清 (横 浜 国 立 大 学)   | 田 才 福 造 (九 州 大 学)       |
|       | 池 田 良 穂 (大 阪 府 立 大 学)   | 高 石 敬 史 (船 舶 技 術 研 究 所) |
|       | 高 木 幹 雄 (九 州 大 学)       | 山 本 茂 (日 立 造 船)         |
|       | 高 木 又 男 (日 立 造 船)       | 高 橋 雄 (三 菱 重 工 業)       |
| 討議参加者 | 藤 井 斎 (三 菱 重 工 業)       | 福 田 淳 一 (九 州 大 学)       |
|       | 内 藤 林 (大 阪 大 学)         |                         |
|       | 田 崎 亮 (石 川 島 播 磨 重 工 業) |                         |

# 目 次

|   |     |
|---|-----|
| まえがき .....                                | 1   |
| 1 船体の横揺れ減衰力及び横揺れ運動 .....                  | 2   |
| 1. 実用船型の横揺れ減衰力計測結果 .....                  | 2   |
| 1.1 自由横揺れ試験による横揺れ減衰係数 .....               | 2   |
| 1.1.1 供試模型船及び試験法 .....                    | 2   |
| 1.1.2 試験結果及び考察 .....                      | 4   |
| 1.2 規則強制横揺れ試験による横揺れ減衰係数 .....             | 21  |
| 1.2.1 供試模型船及び試験状態 .....                   | 21  |
| 1.2.2 強制横揺れ試験法および解析法 .....                | 21  |
| 1.2.3 横揺れ減衰係数の実験表示式 .....                 | 22  |
| 1.2.4 考 察 .....                           | 23  |
| 1.3 大角度過渡並びに大角度不規則強制横揺れ試験による横揺れ減衰係数 ..... | 37  |
| 1.3.1 解析方法 .....                          | 37  |
| 1.3.2 実験結果 .....                          | 39  |
| 2. 横揺れ減衰力の推定法 .....                       | 54  |
| 2.1 横揺れ減衰力の成分分離 .....                     | 54  |
| 2.1.1 減衰力の表示法 .....                       | 54  |
| 2.1.2 成分減衰力の定義 .....                      | 54  |
| 2.1.3 各成分減衰力の研究状況 .....                   | 55  |
| 2.2 成分減衰力の推定法 .....                       | 70  |
| 2.2.1 摩擦成分 $B_F$ .....                    | 70  |
| 2.2.2 造渦成分 $B_E$ .....                    | 70  |
| 2.2.3 揚力成分 $B_L$ .....                    | 71  |
| 2.2.4 造波成分 $B_W$ .....                    | 72  |
| 2.2.5 ビルジキール成分 $B_{BK}$ .....             | 72  |
| 2.2.6 横揺れ減衰力推定 フォートラン計算プログラム .....        | 73  |
| 2.3 実験値との比較 .....                         | 86  |
| 2.3.1 成分減衰力の推定値と実験値との比較 .....             | 86  |
| 2.3.2 全減衰力の比較 .....                       | 86  |
| 2.4 推定法による応用計算例 .....                     | 92  |
| 2.4.1 横揺れ軽減のための設計方針 .....                 | 92  |
| 2.4.2 船体主要目と横揺れ減衰力 .....                  | 93  |
| 2.4.3 造波成分の一削減法 .....                     | 94  |
| 2.4.4 ビルジキール効果 .....                      | 94  |
| 2.5 推定法の適用範囲と今後の問題点 .....                 | 99  |
| 2.6 減衰力に関する基礎資料 .....                     | 101 |
| 2.6.1 横揺れ減衰力の船長方向分布の計測 .....              | 101 |

|   |     |     |
|---|-----|-----|
| 2.6.2 横揺れする船体周りの速度分布の計測                   | 101 |     |
| 2.6.3 ビルジキールの直圧力の計測                       | 101 |     |
| 2.6.4 ビルジキールにより生ずる船体表面圧力の計測               | 102 |     |
| 2.6.5 大角度横揺れ時の横揺れ減衰力                      | 102 |     |
| 2.6.6 数式船型の横揺れ減衰力                         | 103 |     |
| 3. 非線形横揺れ減衰力を含む横揺れの統計的取扱い                 | 114 |     |
| 3.1 計算方法について                              | 114 |     |
| 3.2 一定波高法と最小偏差法の比較                        | 115 |     |
| 3.2.1 計算状態                                | 115 |     |
| 3.2.2 計算結果と考察                             | 116 |     |
| 3.3 非線形項と最小偏差等価線形項による横揺れ運動の比較             | 116 |     |
| 3.3.1 計算状態                                | 116 |     |
| 3.3.2 計算結果と考察                             | 117 |     |
| 3.4 長期予測の計算例                              | 118 |     |
| 3.4.1 長期予測計算方法                            | 118 |     |
| 3.4.2 計算状態                                | 119 |     |
| 3.4.3 計算結果と考察                             | 119 |     |
| 3.5 考 察                                   | 120 |     |
| 4. 大角度不規則強制横揺れ試験による等価線型減衰係数を用いた不規則波中横揺れ推定 | 127 |     |
| 4.1 予測の方法                                 | 127 |     |
| 4.2 予 测 例                                 | 128 |     |
| II 波浪中における船速低下及び推進性能                      |     | 136 |
| 1. 波浪中推進性能に関する総合的考察                       | 136 |     |
| 2. 波浪中における抵抗増加                            | 139 |     |
| 2.1 波浪中抵抗増加の計算法                           | 139 |     |
| 2.2 波浪中抵抗増加の実験                            | 140 |     |
| 3. 波浪中におけるプロペラ推力, トルク, 回転数増加と自航要素         | 141 |     |
| 3.1 波浪中におけるプロペラ推力, トルク, 回転数増加の実験          | 141 |     |
| 3.2 波浪中自航要素の検討                            | 141 |     |
| 4. 波浪中における船速低下                            | 141 |     |
| 4.1 波浪中船速低下の推定計算法                         | 141 |     |
| 4.2 波浪中における自然減速の計算及び実験                    | 144 |     |
| 4.3 波浪中における意識的減速, 変針の計算及び実験               | 144 |     |
| 4.4 燃料消費量について                             | 145 |     |
| 5. プロペラ負荷変動                               | 145 |     |
| 5.1 プロペラ負荷変動の推定計算法                        | 145 |     |
| 5.2 プロペラ負荷変動の実験                           | 146 |     |
| 6. プロペラレーシング                              | 147 |     |
| 6.1 レーシング時の負荷変動とプロペラ没水深度の相互関係             | 147 |     |

|                        |     |
|------------------------|-----|
| 6.2 規則波中におけるプロペラレーシング  | 147 |
| 6.3 不規則波中におけるプロペラレーシング | 148 |
| 7. 今後の課題               | 149 |

## まえがき

波浪中において船体に働く外力や荷重を正確に推定し、これに耐える安全な構造を合理的に設計することや、荒れた海面において海水の打ち込み、プロペラレーリング、激しい船体動揺や加速度、波浪衝撃など、船舶の運航にとって危険な状況を避けながら最適の操船を行うなど、船舶の設計と運航の両面から船の安全と合理的な運航を図るため、波浪中における船体の各種応答を、船型、海象条件、運航状態に対して精度よく推定する必要がある。

このため日本造船研究協会は、日本船舶振興会の研究補助金の交付を得て、「船舶の波浪中性能推定の精度向上とその実証に関する研究」の研究課題で第161研究部会を組織し、昭和50年度から4か年計画で研究を実施してきた。波浪中性能のうち、船体動揺及び船速低下の推定は、各種耐航性要素の決定に極めて重要な因子であり、また波浪外力の推定に対しても直接大きな影響を及ぼすものである。船体動揺のうちで、縦揺れ、上下揺れ等の運動は船体運動理論の発展により推定法がほぼ実用の域に達しているが、横揺れに関しては減衰力に粘性や前進速度の影響が大きく、合理的な推定法が確立していないのが現状である。

従って本研究では、1) 横揺れ減衰力の正確な推定法の確立及びその非線形性の横揺れ運動推定に及ぼす影響の検討、2) 波浪中における抵抗増加及び船速低下の推定精度向上に関する研究に重点をおき、これらの問題の究明を図ると共に、波浪中の諸性能を実船に適用する手段を確立するため、3) 波浪中で危険回避の限界設定に必要な耐航性基準の検討と、4) 実船の運航状況の調査と実船への適用方法の試みを行うことを目的とした。

各年度の研究内容については、すでに各年度末の報告として、それぞれ

日本造船研究協会、研究資料、No.257、昭和51年3月

〃 No.275、昭和52年3月

〃 No.291、昭和53年3月

〃 No.310、昭和54年3月

に発表した。本報告は上記研究項目のうち1), 2)の項目について、本研究部会における研究成果と共に、本研究部会の前身である、船舶の耐航性能に関する研究として実施された第108及び第125研究部会での成果、更に学会誌等に発表された研究成果も一部取り入れて総合取りまとめを行ったものである。

横揺れ減衰力及び横揺れ運動の推定法に関する研究は、東京大学、横浜国立大学、大阪府立大学、九州大学応用力学研究所、船舶技術研究所、三菱重工業長崎研究所等で実施され、取りまとめはこれら各研究機関からの委員により構成された「横揺れ減衰小委員会」によって行われた。

波浪中における抵抗増加及び船速低下の推定法に関する研究は、大阪大学及び三菱重工業長崎研究所で実施され、取りまとめは主として大阪大学が三菱長崎研究所の協力を得て行ったものである。

# I 船体の横揺れ減衰力及び横揺れ運動

## 1. 実用船型の横揺れ減衰力計測結果

船の波浪中性能を推定する場合、船体運動計算に用いる横揺れ減衰力をいかに精度よく推定するかということが大きい問題点である。横揺れ減衰力の理論的推定法の研究は本研究の主要な部分を占め、その成果は後章で詳述されるが、実用船型の横揺れ減衰力に関する実験データは、推定法の検証のためにも、またその船型、あるいは類似の船型の船体運動計算のためにも利用価値は大きい。

そこで本章では最近10年間に行われた横揺れ減衰力の模型試験結果をとりまとめて示すこととした。模型試験の方法には、自由横揺れ試験と強制横揺れ試験の2つの方法が用いられている。またこのうち、強制横揺れ試験には、規則強制横揺れ法と、過渡強制及び不規則強制法がある。

### 1.1 自由横揺れ試験による横揺れ減衰係数

自由横揺れ試験法は、船の固有周期での減衰率を、船体の自由減衰動揺の記録から求める方法であり、W. Frödöde の頃より用いられている伝統的方法である。従って、この方法で求められた減衰率あるいはいわゆるN係数の実験データは多く、実験式にもまとめられるなどして利用されている。<sup>1) 2) 3) 4)</sup> 等

最近になり、新しい船型の出現、耐航性能推定の手法の進展等により、さらに多くの船型の横揺れ減衰力を求める必要が生じた。その場合、減衰力を線形項と非線形項に分離して表すことや、停船時のみならず前進速度影響を明らかにすることが望まれる。

模型船を種々の速度で自航させたり曳航しながら自由横揺れを行う方法は、実験装置が簡単なものでよくまた試験法、解析法も比較的単純なうえ、その結果は上記の要求も一応満足するので、かなり多数の模型船に適用されている。本節ではこれらの試験結果を中心にして述べるが、試験法、解析法、強制横揺れ試験法との比較、等にも触れる。

#### 1.1.1. 供試模型船及び試験法

##### (1) 模 型 船

自由横揺れ試験を行った船型は合計18隻で、その主要目及び実験状態はTable 1.1.1(a)~(c)に示すとおりである。

すなわち、高速貨物船、高速コンテナ船、カーフェリー、ロールオン・ロールオフ船、漁船、数式船型、タンカー、Series 60船型等である。このうち1軸高速コンテナ船SR108船型については、供試模型船の大きさを変化させた試験や載貨状態を変えた試験を行っている。また、この船型はいくつかの研究機関でも試験されているので、試験法の比較も行われた。模型船の長さは、4~5mの中型模型と、2m前後の小型模型の両方が混っている。

##### (2) 試 験 法

自由横揺れ試験の方法は、模型船を重心点を通る前後軸でつかまえ、横揺れ、縦揺れ、上下揺れを自由にし、左右揺れ、船首揺れ及び前後揺れを拘束するシンバル装置で曳航台車により直進曳航させ、船に初期傾斜角を与える、これを解放した後の自由減衰運動を測定する方法である。Fig. 1.1.1に試験装置の概略図を、Fig. 1.1.2に試験中の写真を示す。

模型船は実験に先立ち、排水量、重心位置、横揺れ周期が調整される。従って実験中の横揺れ周期は固有周期である。ただし、前進速度によって船の復原力に寄与する流体力が変化するので、固有周期も変化する。しかし通常の船型で、船速があまり高くない範囲では、その変化の量はあまり大きくない。

実験は普通船型については前進速度がフルード数( $F_n$ )で0から0.35程度の範囲で行われる。船速がゼ

の場合には、船の方向を試験水槽の長さ方向に対し直角に向けて実験を行う場合が多い。これは側壁からの波の反射の影響を避けるためである。

曳航中の自由横揺れ試験のほかに、2～3の船型については、角水槽の平水中で自航させて自由横揺れ試験を行った。この場合、模型船は無線操縦で直進するよう操船され、船の横揺れ固有周期に合わせた舵やフィンの周期的操舵、あるいは船内での重量物の移動等により横揺れモーメントが与えられ、船体が大傾斜したあと、自由減衰動揺を行いながら前進する。

Table 1.1.1 で Roll axis の欄に「free」と書いたものはこの方法によるものである。

### (3) 解析法

自由横揺れ試験で得られる横揺れ角の記録は Fig. 1.1.3 に示すようなものである。

この記録から横揺れ減衰力を求める方法には2つの方法がある。

#### i) 自由横揺れの運動方程式を

$$\ddot{\phi} + 2\alpha \dot{\phi} + \omega_{\phi}^2 \phi = 0 \quad (1.1.1)$$

と表す。自由減衰する動揺の山と谷の値を最初の1揺れを除いて大きい順に読みとり、 $\phi_0, \phi_1, \phi_2, \dots, \phi_{n-1}, \phi_n, \phi_{n+1}, \dots$ とする。

$$|\phi_{n+1}| = |\phi_n| e^{-\frac{\pi\alpha}{\omega_{\phi}}} \quad (1.1.2)$$

の関係があるから、 $|\phi_{n-1}| + |\phi_n|$ に対して、 $|\phi_n| + |\phi_{n+1}|$ をプロットした点を直線で結ぶと Fig. 1.1.4 のようになり、その横軸に対する勾配  $\tan \delta$  は、

$$\tan \delta = (|\phi_{n+1}| + |\phi_n|) / (|\phi_n| + |\phi_{n-1}|) = e^{-\frac{\pi\alpha}{\omega_{\phi}}} \quad (1.1.3)$$

である。このようにして求められた  $\alpha$  は、横揺れの同調周波数における同調振幅の外力に対する倍率  $\mu_m = 1/\kappa$  と次式の関係にある。

$$\kappa = 2\alpha / \omega_{\phi} \quad (1.1.4)$$

この方法で求めた減衰係数を Fig. 1.1.6 以下の実験結果の図では  $\kappa^*$  と表している。

#### ii) a, b 係数又は $\kappa_{\alpha}, \beta$

前述の  $\kappa^*$  については、横揺れ運動方程式を線形とみなしたため、減衰力の項の非線形成分を分離していない。船が大角度で横揺れする場合には、非線形項も考慮に入れて応答を求める必要がある。

運動方程式を、非線形減衰係数  $\beta$  を用いて

$$\ddot{\phi} + 2\alpha \dot{\phi} \pm \beta \dot{\phi}^2 + \omega_{\phi}^2 \phi = 0 \quad (1.1.5)$$

と表す。

自由横揺れ試験で得られた  $\phi_n$  から、

$$\Delta\phi = \phi_n - \phi_{n+1}, \quad \phi_m = (\phi_n + \phi_{n+1})/2 \quad (1.1.6)$$

を求め、 $\Delta\phi$  を  $\phi_m$  に対してプロットしたいわゆる減滅曲線 (extinction curve) を Fig. 1.1.5 のようになる。これを、

$$\Delta\phi = a \phi_m + b \phi_m^2, \quad (\phi_m \text{ は degree }) \quad (1.1.7)$$

で近似し、係数  $a$  及び  $b$  は実験点を用い、最小自乗法で求められる。そうすると、この  $a, b$  係数と運動方程式の係数の間には次の関係がある。

$$\alpha = \frac{a}{\pi} \omega_\phi, \quad \beta = \frac{3}{4} \cdot \frac{180}{\pi} \cdot b \quad (1.1.8)$$

$\kappa = 2\alpha/\omega_\phi$  であるから、振幅  $\phi_m$  における有効線形減衰率  $\kappa_{e\phi_m}$  は

$$\kappa_{e\phi_m} = \kappa_\alpha + \frac{8\beta}{3\pi} \phi_m, \quad (\phi_m \text{ は radian}) \quad (1.1.9)$$

$$\text{となる。ここで } \kappa_\alpha = \frac{2}{\pi} a \quad (1.1.10)$$

である。また  $\Delta\phi = N\phi_m^2$  (deg) (1.1.11) で表される N 係数は

$$N = \frac{a}{\phi_m} + b \quad (1.1.12)$$

である。

自由横揺れ試験の解析には主として ii) の方法が用いられ、その場合、解析結果は  $\phi_m = 10^\circ$  に対する値  $\kappa_{e10^\circ}$  並びに、可能な限りこれを線形減衰率  $\kappa_\alpha$  と非線形項  $\beta$  とに分けたものを示した。

### 1.1.2 試験結果及び考察

自由横揺れ試験で求めた減衰率  $\kappa$  の値を船速 (フルード数) をベースに示したのが Fig. 1.1.6～Fig. 1.1.41 である。

(1) Fig. 1.1.6～Fig. 1.1.8 は、SR 108 の 1 軸コンテナ船の 1.75 m 模型を用いて、横揺れ減衰力に対するビルジキールの幅、船体重心の高さあるいは横揺れ周期、横揺れ中心軸を G 点にとるか O 点にとるかの違い等の影響を調べたものである。この結果は解析法 i) によって解析されたデータであり、横揺れの初期複振幅  $\phi_0 + \phi_1$  の値が約  $40^\circ$  までとられているので、これらの図は  $\phi_m \approx 15^\circ \sim 20^\circ$  程度の振幅に対する線形減衰率と考えられる。

従って、後に出てくる Fig. 1.1.9 の同じコンテナ船 1.75 m 模型を船研で実験した  $\kappa_{e10^\circ}$  の値に対して大きい。しかし、Fig. 1.1.10 に示す同じ模型船の  $\kappa_\alpha$  及び  $\beta$  を用いて  $\phi_m = 20^\circ$  に対する値  $\kappa_{e20^\circ}$  を求めてみると、Fig. 1.1.6 の値に近いものとなることがわかっている。

(2) Fig. 1.1.9～Fig. 1.1.16 は、同じく SR 108 の 1 軸コンテナ船々型について、模型船の寸法を、長さ 1.75 m から 5 m まで変えた相似模型を試験した結果である。

減衰率の船速に対する傾向はほぼ似た傾向を示すが、その大きさに若干の差が認められる。模型船の大きさに対する一定の傾向は見られない。

Fig. 1.1.15 は、横揺れ周期あるいは重心高さの影響を 4.5 m 模型で調べた結果であるが、Fig. 1.1.7 に示す 1.75 m 模型の傾向とほぼ同じである。

(3) Fig. 1.1.17 は、SR 108 の 1 軸コンテナ船 ( $L/B = 6.89$ ) を、 $L/B = 8.0$  に引き伸した船型の実験結果を示す。これを  $L/B = 6.89$  に対する Fig. 1.1.12 と比較してみると、 $F_n$  の高い所で  $L/B = 8.0$  の方がわずかに高い  $\kappa$  の値を与えるが、その差は小さい。

(4) Fig. 1.1.19～Fig. 1.1.21 は、SR 108 の 2 軸コンテナ船の 1.80 m 模型を用いて、(1)で述べたと同様に、ビルジキールの幅、重心の高さ等の影響を調べたものである。この実験も  $\phi_m \approx 15^\circ \sim 20^\circ$  付近の線形減衰率を与えていていると見ることができる。従って Fig. 1.1.18 に示す 5 m 模型船に対する  $\kappa_{e5^\circ \sim 10^\circ}$  の値よりかなり大きい値となっている。なお 5 m 模型船に対しては角水槽における自由航走中の試験結果を示す。

1.75 m 模型船の実験結果から見ると、2 軸船の方が 1 軸船より横揺れ減衰率は大きいようである。

(5) Fig. 1.1.22～Fig. 1.1.24 は、Series 60 船型の  $C_B = 0.6, 0.7$  及び  $0.8$  の 3 隻に対する実験結果を示す。ビルジキールなしの場合、 $C_B = 0.7$  と  $0.8$  の間にはあまり差がない。ビルジキールありの場合も、 $C_B = 0.8$  が、低速と高速時にやや高い  $\kappa_e$  の値を示すが、全般的にはそう大きな違いはない。船速に対する変化の様子

は、あまり急激でなく船速と共にゆるやかに増加する。

- (6) Fig. 1.1.25～Fig. 1.1.27は、高速貨物船と超高速貨物船に対する減衰率を示す。両船型とも、 $\kappa_e$ のFnに対する傾向及びその大きさは、前述の Series 60の傾向と値によく似ている。超高速貨物船は高速貨物船よりかなりやせ形であり、減衰力の大きさも小さい。超高速貨物船は Series 60,  $C_B = 0.7$ とよく似た傾向である。Fig. 1.1.26は、同じ超高速貨物船の2 m模型に対する結果を示すが、Fig. 1.1.25の4 m模型に比べてやや高い値である。Fig. 1.1.40とFig. 1.1.41に上記の船型と似た高速貨物船、超高速貨物船の結果を追加する。
- (7) Fig. 1.1.28とFig. 1.1.29にカーフェリー、Fig. 1.1.30にロールオン／ロールオフ船の実験結果を示す。両船とも浅喫水、幅広であり、船首尾のフレアーが大きい特徴がある。後者は自由航走中の試験結果である。高速時( $F_n > 0.2$ )ではロールオン／ロールオフ船の横揺れ減衰力はかなり大きい。またフィンを付けると、減衰力はさらに大幅に増加することがわかる。
- (8) Fig. 1.1.31とFig. 1.1.33は原子力船「むつ」の4 m模型に対する減衰率を示す。計画満載状態と、当初予定された実験航海状態の両方の値が併記されている。
- コンテナ船や高速貨物船に比べて低速時で減衰力がかなり大きい。
- (9) Fig. 1.1.33とFig. 1.1.34は数式船型に対する実験値を示す。この船型は、船幅の影響を調べるために強制動揺試験に供されたL/Bシリーズの系統的模型船群の1隻である。<sup>12)</sup> Fig. 1.1.34にこの船型を浅水中で水深hを変えて実験した結果を示す。船速ゼロの場合の値を示すが、水深が浅くなるに従って減衰力が増加する様子がわかる。 $h/d - 1 < 2.0$ の範囲では、 $\kappa_{e10}$ と $h/d - 1$ とは逆比例の関係にあるようである。
- (10) Fig. 1.1.35～Fig. 1.1.37は漁船々型に対する実験結果である。Fig. 1.1.35とFig. 1.1.36とは、ハドチャインを持つ角型の横断面形状の小型漁船々型で、<sup>11)</sup>これらの横揺れ減衰力は、他の普通船型に比べてかなり大きい値である。特に低速での減衰力が大きい。船速に対する変化はゆるやかである。
- (11) Fig. 1.1.38とFig. 1.1.39に、SR 108の1軸コンテナ船及びタンカーのバラスト状態における実験値を示す。コンテナ船の場合は、normal loadに対する値と大きい差はない。タンカー船型では、船速ゼロの場合の $\kappa_e$ の値がかなり大きいが、 $F_n = 0.15$ あたりまでは船速によってほとんど変化しない。
- (12) 自由横揺れ試験で求めた減衰係数と、強制横揺れ試験で求めた減衰係数とを比較した例をFig. 1.1.42～Fig. 1.1.44に示す。SR 108コンテナ船の1.75 m模型船を用いて大阪府大が行った結果をFig. 1.1.42に示す。また同じ船型の3 m模型船に対する自由横揺れ試験結果(船研)を強制横揺れ試験結果(九大応力研)と比較したのがFig. 1.1.43とFig. 1.1.44である。

Table 1.1.2には、(11)で述べたタンカーとコンテナ船のバラスト状態における自由横揺れと強制横揺れによる減衰係数の比較を示した。

これらによると、両試験法による減衰係数の値はどの場合もよく一致していると見なすことができる。

なお  $\hat{\kappa}_e$  と  $\hat{B}_{44e}$  との関係は次式で与えられる。

$$\kappa_e = \left( \frac{2B}{GM} \right) \hat{\omega}_0 \hat{B}_{44e} \quad (1.1.13)$$

$$\text{ここに, } \hat{\omega}_0 = \omega_0 \sqrt{\frac{B}{2g}}, \quad \hat{B}_{44e} = \frac{B_{44e}}{\rho \nabla B^2} \sqrt{\frac{B}{2g}}, \quad (1.1.14)$$

ただし、横揺れの運動方程式を次式のように表すとする。

$$I \ddot{\phi} + B_{44e} \dot{\phi} + C_\phi \phi = 0 \quad (1.1.15)$$

$$\text{ここに, } C_\phi = \rho g \nabla GM$$

本節では、各所で行った多数の船型に対する自由横揺れ試験結果を列挙した。これによって、それぞれの船型の使用状態に近い載貨状態や横揺れ周期での横揺れ減衰力の大きさ、船速影響やビルジキール効果等を大略知ることができよう。また、全体を比較して見れば各船型の特徴もうかがえる。

これらの実験値を用いて、ストリップ法による斜め波中の応答計算を行い、角水槽の斜め波中の実験結果と比較した例もいくつかある。それによれば、非線形項まで考慮した横揺れ減衰力の実験値を使って計算すれば実験値とよく合うことがわかっている。

また、自由横揺れ試験と強制横揺れ試験の比較が行われたが、広い周波数にわたって減衰力を求めるのには強制動揺法が適している。横揺れ減衰力の性質を詳細に調べたり、理論推定法との比較などを行うためには強制動揺法がよい。よって、次節では強制動揺試験結果が述べられる。

一方、船の横揺れ減衰力を理論的に推定しようとする、いわゆる成分組み立て法の研究が行われ、通常型の船型に対しては、この推定法が有用であることが次章で述べられるであろう。しかし、浅喫水船、幅広船あるいは特殊な船型に対してはなお推定法の改良が必要とされている。そこで、更に多くの船型について横揺れ減衰力のデータを集積し、推定法の改良に役立てると共に、実船の設計や運航にも直接利用できるようにするこ<sup>ト</sup>が今後とも必要であろう。

#### 参考文献

- 1) 渡辺恵弘、井上正祐；船の横揺れ抵抗所謂Nの計算方法について、西部造船会々報、第14号、昭和32年10月
- 2) 渡辺恵弘、井上正祐、村橋；N係数計算法の肥大型への拡張、西部造船会々報、第27号、昭和39年3月
- 3) 谷口 中、柴田 実；自航時の動揺試験、西部造船会々報、第14号、昭和32年10月
- 4) 岩田秀一；巡視船の横揺減滅係数について、造船協会論文集、第107号、昭和35年7月
- 5) 田中紀男ほか；航走中の横揺れ性能に関する実験、関西造船協会誌、第146号、昭和47年12月
- 6) 日本造船研究協会第108研究部会；高速貨物船の波浪中における諸性能に関する研究報告書、研究資料、No.110、昭和45年3月
- 7) 同 上、No.125、昭和46年3月
- 8) 日本造船研究協会第125研究部会；超高速コンテナ船の耐航性能に関する研究報告書、研究資料、No.211、昭和50年3月
- 9) 日本造船研究協会第161研究部会；船舶の波浪中性能推定の精度向上とその実証に関する研究報告書、研究資料、No.257、昭和51年3月
- 10) 日本造船研究協会第6基準研究部会；外洋フェリーの性能に関する調査研究報告書、研究資料、No.21R、昭和48年3月
- 11) 藤井 巍；小型FRP漁船船型の横揺れ特性に関する研究、日本造船技術センター技報、第4号、昭和51年
- 12) 渡辺 巍；数式船型に働く横揺れ減衰力の速度依存性について、日本造船学会論文集、第144号、昭和53年12月

Table 1.1.1(a) Model dimensions and test conditions of free rolling experiments.

| Ship No.                                     | (1)-a                          | (1)-b                                  | (1)-c               | (1)-d                         | (2)                            | (3)-a                         | (3)-b                         | (4)                            | (5)                           | (6)                           | (7)-a                         |
|--|--------------------------------|--|---------------------|-------------------------------|--------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|--------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|
| Ship Model                                   | Container                      | Container                              | Container           | Container                     | Container                      | Container                     | Container                     | Container                      | Container                     | Container                     | Container                     |
| Experiment Tank                              | University of Osaka Pre.       | do.                                    | do.                 | do.                           | do.                            | do.                           | do.                           | do.                            | do.                           | do.                           | University of Osaka Pre.      |
| Ipp (m)                                      | 1.750                          |  |                     | 1.750                         | 3.000                          | 4.500                         | 4.500                         | 5.000                          | 5.225                         | 5.000                         | 1.800                         |
| B (m)  | 0.254                          |  |                     | 0.254                         | 0.435                          | 0.653                         | 0.653                         | 0.726                          | 0.653                         | 0.625                         | 0.225                         |
| D (m)  | 0.154                          | do.                                    | do.                 | 0.154                         | 0.264                          | 0.396                         | 0.396                         | 0.440                          | 0.396                         | 0.500                         | 0.180                         |
| d <sub>m</sub> (m)                           | 0.085                          |  |                     | 0.095                         | 0.163                          | 0.219                         | 0.244                         | 0.271                          | 0.219                         | 0.208                         | 0.075                         |
| t (m)  | 0.010                          |  |                     | 0                             | 0                              | 0.026                         | 0                             | 0                              | 0.026                         | 0                             | 0                             |
| V (m <sup>3</sup> )                          | 0.0212                         |  |                     | 0.242                         | 0.122                          | 0.361                         | 0.410                         | 0.562                          | 0.419                         | 0.365                         | 0.0170                        |
| C <sub>B</sub>                               | 0.562                          |  |                     | 0.572                         | 0.572                          | 0.562                         | 0.572                         | 0.572                          | 0.562                         | 0.561                         | 0.561                         |
| C <sub>H</sub>                               | 0.960                          | do.                                    | do.                 | 0.969                         | 0.969                          | 0.966                         | 0.969                         | 0.966                          | 0.966                         | 0.980                         | 0.980                         |
| C <sub>W</sub>                               | 0.686                          |  |                     | 0.712                         | 0.712                          | 0.686                         | 0.712                         | 0.712                          | 0.686                         | 0.772                         | 0.772                         |
| GM (m)                                       | 0.010                          |  |                     | 0.010                         | 0.017                          | 0.026                         | 0.030                         | 0.033                          | 0.025                         | 0.031                         | 0.011                         |
| OG (m)                                       | -0.009                         | do.                                    | do.                 | -0.001                        | -0.001                         | -0.022                        | 0.002                         | 0.002                          | -0.023                        | -0.018                        | -0.007                        |
| l <sub>cb</sub> (m)                          | -0.032                         |  |                     | -0.025                        | -0.043                         | -0.081                        | -0.064                        | -0.071                         | -0.094                        | -0.125                        | -0.045                        |
| T <sub>P</sub> (sec)                         | 1.85                           | 1.85                                   | 1.82                | 1.80                          | 2.36                           | 2.89                          | 2.65                          | 2.77                           | 2.87                          | 2.72                          | 1.58                          |
| l <sub>BK</sub> (m)                          | 0.438                          | 0.438                                  | 0.438               | 0.438                         | 0.75                           | 1.125                         | 1.125                         | 1.250                          | 1.306                         | 1.50                          | 0.54                          |
| b <sub>BK</sub> (cm)                         | 0~0.75                         | 0.45                                   | 0.45                | 0.45                          | 0.77                           | 1.16                          | 1.16                          | 1.29                           | 1.16                          | 0.91                          | 0~0.66                        |
| Rolling Axis                                 |                                |  |                     |                               |                                |                               |                               |                                |                               |                               |                               |
| G  | G                              | G                                      | G                   | G                             | G                              | G                             | G                             | Free                           | G                             | Free                          | G                             |
| Appendages A <sub>R</sub> (cm <sup>2</sup> ) | Rudder 27                      | Rudder 27                              | Rudder 27           | Rudder 78                     | Rudder 78                      | Rudder 176                    | Rudder 176                    | Rudder 217                     | Rudder 249                    | Rudder 237                    | Rudder 31 Bossing             |
| Test Condition                               | B.K. area varied               | KG = 1.136<br>KG = 1.101<br>KG = 1.034 | Rolling Axis varied |                               |                                | 0.017<br>GM = 0.026<br>0.039  |                               |                                |                               |                               | B.K. area varied              |
| Ship Form                                    | SR 108 - Single sc. Normal cn. | do.                                    | do.                 | SR 108 - Single sc. Full Load | SR 108 - Single sc. Normal cn. | SR 108 - Single sc. Full Load | SR 108 - Single sc. Full Load | SR 108 - Single sc. Normal cn. | SR 108 - Twin Scrw. Full Load | SR 108 - Twin Scrw. Full Load | SR 108 - Twin Scrw. Full Load |
| Test Condition References                    | 5)                             |  |                     | 9)                            | 9)                             | 9)                            | 9)                            | 9)                             | 7)                            | 7)                            | 5)                            |
| Figure No.                                   | 1.1.6                          | 1.1.7                                  | 1.1.8               | 1.1.9<br>1.1.10               | 1.1.11                         | 1.1.12<br>1.1.13              | 1.1.14<br>1.1.15              | 1.1.16                         | 1.1.17                        | 1.1.18                        | 1.1.19                        |

Note : OG is downward positive, l<sub>cb</sub> is forward positive.

Table 1.1.1(b) Model dimensions and test conditions of free rolling experiments.

| Ship No.  | (7)-b   | (7)-c                     | (8)                               | (9)                               | (10)                              | (11)                          | (12)           | (13)      | (14)                 | (15)                             | (16) -a          |
|---|---|---------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|-------------------------------|----------------|-----------|----------------------|----------------------------------|------------------|
| Ship Model                                      | Container   | Container                 | Series 60<br>C <sub>B</sub> = 0.6 | Series 60<br>C <sub>B</sub> = 0.7 | Series 60<br>C <sub>B</sub> = 0.8 | Cargo<br>Liner                | Super<br>Liner | Car Ferry | Roll-on/<br>Roll-off | Nuclear<br>Ship                  |                  |
| Experiment                                      | University<br>of<br>Osaka<br>Prefecture                 | do.                       | do.                               | do.                               | do.                               | Ship<br>Research<br>Institute | do.            | do.       | do.                  | do.                              |                  |
| L <sub>pp</sub> (m)                             | 1.800   | 1.800                     | 1.800                             | 1.800                             | 1.800                             | 4.000                         | 4.000          | 5.000     | 5.000                | 4.000                            |                  |
| B (m)   | 0.225   | 0.237                     | 0.257                             | 0.277                             | 0.535                             | 0.600                         | 0.300          | 0.803     | 0.734                | 0.655                            |                  |
| D (m)   | 0.180   | do.                       | 0.096                             | 0.103                             | 0.111                             | 0.240                         | 0.253          | 0.177     | 0.211                | 0.160                            | 0.466            |
| d <sub>m</sub> (m)                              | 0.075   | 0                         | 0                                 | 0                                 | 0                                 | 0                             | 0              | 0         | 0                    | 0                                | 0.238            |
| v (m <sup>3</sup> )                             | 0   | 0.0246                    | 0.0331                            | 0.0443                            | 0.328                             | 0.353                         | 0.0441         | 0.450     | 0.409                | 0.413                            |                  |
| V (m <sup>3</sup> )                             | 0.0170  | 0.600                     | 0.700                             | 0.800                             | 0.660                             | 0.595                         | 0.595          | 0.531     | 0.696                | 0.663                            |                  |
| C <sub>B</sub>                                  | 0.561   | 0.600                     | 0.986                             | 0.990                             | 0.951                             | 0.947                         | 0.947          | 0.982     | 0.988                | 0.863                            |                  |
| C <sub>M</sub>                                  | 0.980   | do.                       | 0.772                             | 0.013                             | 0.012                             | 0.017                         | 0.024          | 0.035     | 0.052                | 0.057                            | 0.031            |
| C <sub>W</sub>                                  | 0.772   | 0.011                     | -0.007                            | 0.019                             | 0.019                             | 0.025                         | 0.044          | 0.082     | -0.152               | -0.178                           | -0.023           |
| l <sub>cb</sub> (m)                             | -0.045  | do.                       | 2.25                              | 1.93                              | 1.55                              | 1.40                          | 2.55           | 2.28      | 1.61                 | 2.61                             | 0.202            |
| T <sub>φ</sub> (sec)                            | 1.58  | 2.25                      | 1.93                              | 1.55                              | 1.50                              | 1.40                          | 2.55           | 2.28      | 1.61                 | 2.60                             | -0.079           |
| bBK (cm)  | 0.54  | 0.63                      | 0.63                              | 0.63                              | 0.63                              | 1.192                         | 0.669          | 0.435     | 1.50                 |                                  |                  |
| bBK (cm)  | 0.36  | do.                       | 0.54                              | 0.54                              | 0.54                              | 1.24                          | 2.29           | 1.15      | 1.20                 |                                  |                  |
| Rolling Axis                                    | G   | G                         | G                                 | G                                 | Rudder<br>25.6                    | Rudder<br>26.7                | Rudder         | Rudder    | Rudder<br>2 x 182    | Rudder<br>2 x 100                | Rudder<br>209    |
| Appendages<br>A <sub>2</sub> (cm <sup>2</sup> ) | Rudder<br>31<br>Bossing                                 | do.                       | Rudder                            | Rudder                            | G                                 | G                             | G              | G         | Free                 | G                                |                  |
| Test Condition                                  | KG = 1.226<br>KG = 1.189<br>1.132<br>varied             | Rolling<br>Axis<br>varied |                                   |                                   |                                   |                               |                |           | without<br>Fin stab. | with and<br>without<br>Fin stab. |                  |
| Ship Form                                       | SR 108 -<br>Twin scrw.<br>Full Load<br>References<br>5) | do.                       | 5)                                | 5)                                |                                   |                               |                |           | 10)                  |                                  |                  |
| Test Condition<br>References                    | 1.1.20  | 1.1.21                    | 1.1.22                            | 1.1.23                            | 1.1.24                            | 1.1.25                        | 1.1.26         | 1.1.27    | 1.1.28<br>1.1.29     | 1.1.30                           | 1.1.31<br>1.1.32 |
| Figure No.                                      |   |                           |                                   |                                   |                                   |                               |                |           |                      |                                  |                  |

Note : Og is downward positive, lcb is forward positive.

Table 1.1.1(c) Model dimensions and test conditions of free rolling experiments.

| Ship No.                                     | (16)-b                  | (17)                             | (18)                                | (19)                            | (20)              | (21)                | (22)        | (23)   |
|--|-------------------------|----------------------------------|-------------------------------------|---------------------------------|-------------------|---------------------|-------------|--------|
| Ship Model                                   | Nuclear Ship            | Mathematical Model               | Fishing Boat                        | Container                       | Tanker            | Cargo Liner         | Sugar Liner |        |
| Experiment                                   | Ship Research Institute | Ship Research Institute of Japan | Shipbuild. Research Center of Japan | Mitsubishi Nagasaki             | Co.               | University of Tokyo | do.         |        |
| Lpp (m)                                      | 4.000                   | 3.000                            | 1.800                               | 1.771                           | 3.500             | 3.000               | 2.000       |        |
| B (m)  | 0.655                   | 0.420                            | 0.339                               | 0.514                           | 0.508             | 0.472               | 0.268       |        |
| D (m)  | 0.466                   | 0.300                            | 0.145                               | 0.200                           |                   |                     | 0.168       |        |
| d <sub>m</sub> (m)                           | 0.223                   | 0.160                            | 0.113                               | 0.154                           | 0.125             | 0.093               | 0.117       |        |
| t (m)  | 0.037                   | 0                                | 0                                   | 0.086                           |                   |                     | 0.115       |        |
| V (m <sup>3</sup> )                          | 0.365                   | 0.120                            | 0.0473                              | 0.114                           | 0.1776            | 0.1089              |             |        |
| C <sub>B</sub>                               |                         | 0.593                            | 0.554                               |                                 | 0.528             | 0.524               | 0.672       | 0.564  |
| C <sub>M</sub>                               |                         | 0.889                            | 0.874                               |                                 | 0.955             | 0.988               |             | 0.975  |
| C <sub>W</sub>                               |                         | 0.667                            |                                     |                                 |                   |                     |             |        |
| G <sub>N</sub> (m)                           | 0.057                   |                                  |                                     | 0.064                           | 0.056             | 0.069               | 0.014       | 0.033  |
| OG (m)                                       | -0.012                  | 0                                | X <sub>H</sub> =0.219               | -0.028                          | -0.035            | -0.053              | 0.021       | 0.030  |
| I <sub>c<sub>o</sub></sub> (m)               | -0.124                  | 0                                | 0.003                               | -0.136                          |                   |                     |             | -0.032 |
| T <sub>P</sub> (sec)                         |                         |                                  |                                     |                                 |                   |                     |             |        |
| I <sub>BK</sub> (m)                          | 2.01                    | 1.91                             | 1.56                                | 1.60                            |                   |                     |             |        |
| b <sub>BK</sub> (cm)                         |                         |                                  | 1.22                                | 1.04                            |                   |                     |             |        |
| Rolling Axis                                 | G                       | 0                                | G                                   | G                               | G                 | G                   |             |        |
| Appendages A <sub>R</sub> (cm <sup>2</sup> ) | Rudder 209              | Rudder with Skeg 83              | Rudder with Skeg 75.9               | Rudder                          | Rudder            | Rudder              | Rudder 56   |        |
| Test Condition                               |                         |                                  | 0.127 without<br>KG=0.157<br>0.180  | Without<br>KG and with<br>Bulge |                   |                     |             |        |
| Ship Form Test Condition References          |                         | PRE Hard Chine<br>12)            | 11)                                 | SR 108-Single sc.<br>Ballast    | Ballast Condition | Full Load           | Full Load   |        |
| Figure No.                                   | 1.1.31<br>1.1.32        | 1.1.32<br>1.1.34                 | 1.1.35<br>1.1.36                    | 1.1.37                          | 1.1.38            | 1.1.39              | 1.1.40      | 1.1.41 |

Note : OG is downward positive, I<sub>c<sub>o</sub></sub> is foreward positive.

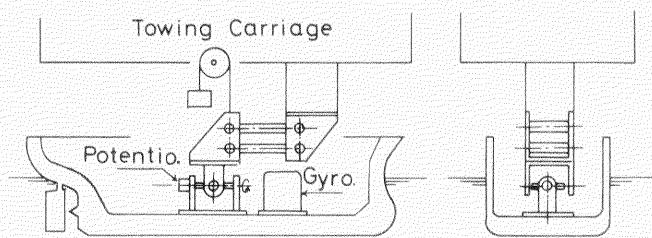


Fig. 1.1.1 Schematic figure of free rolling experiment.

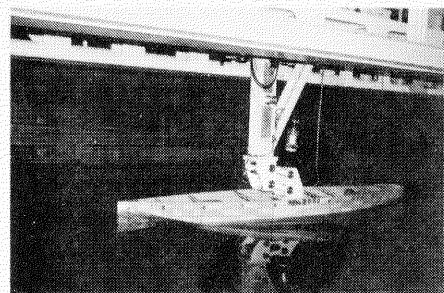


Fig. 1.1.2 Photograph of free rolling experiment.

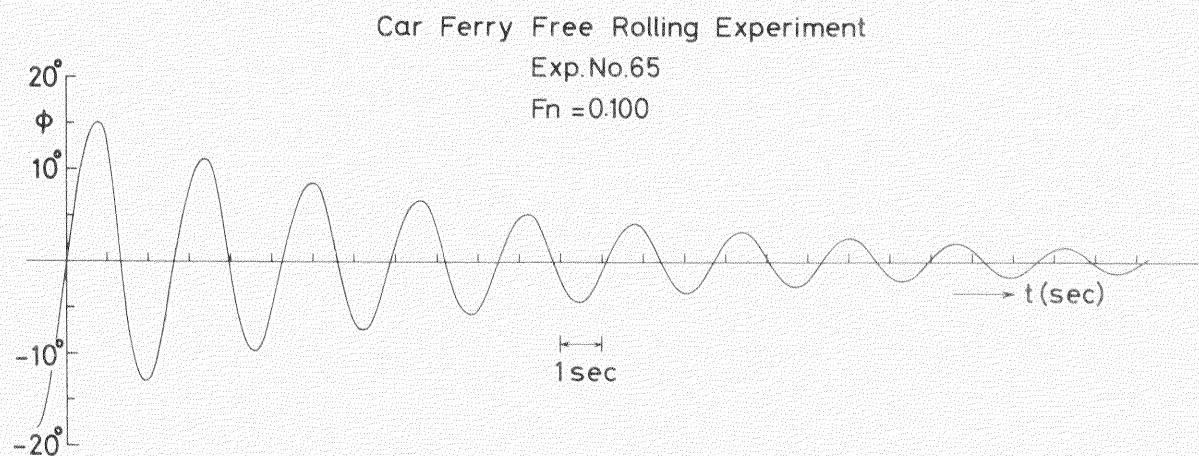


Fig. 1.1.3 Record of free rolling experiment.

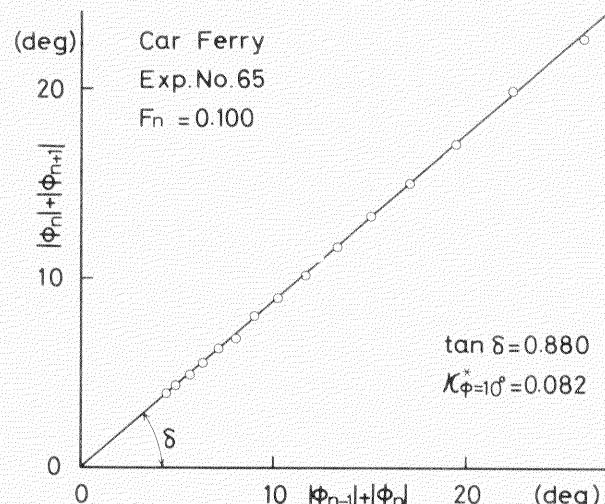


Fig. 1.1.4

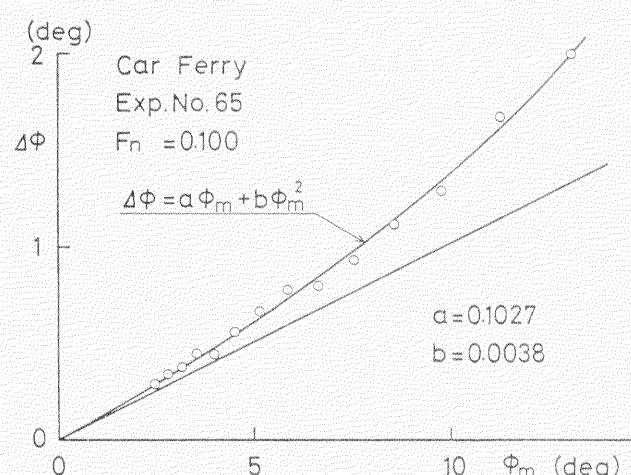


Fig. 1.1.5

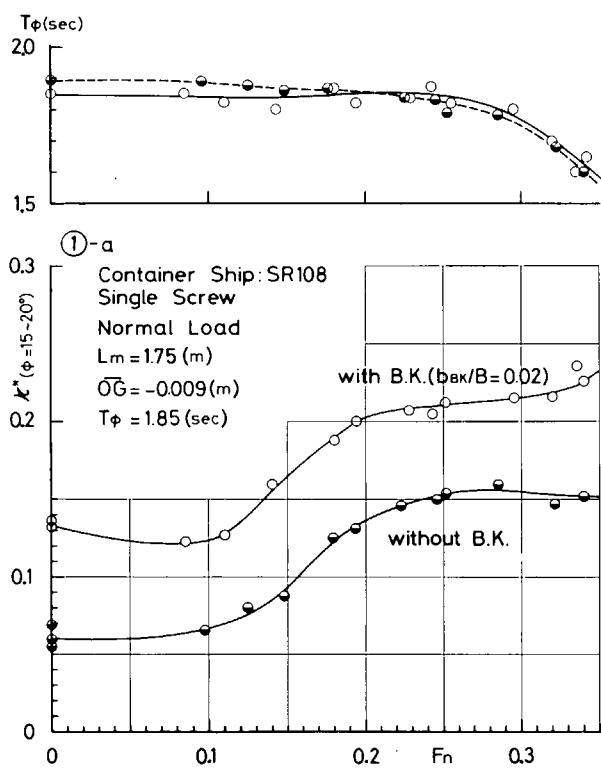


Fig. 1.1.6

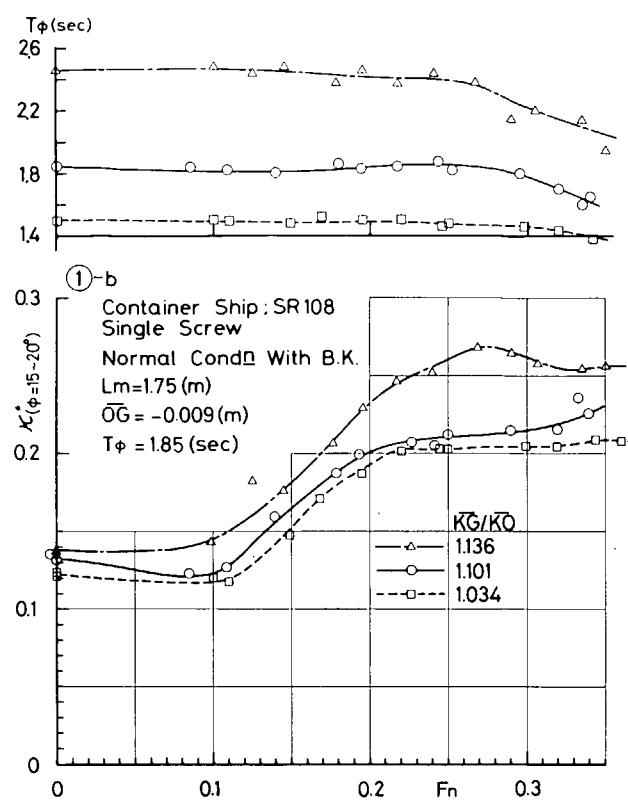


Fig. 1.1.7

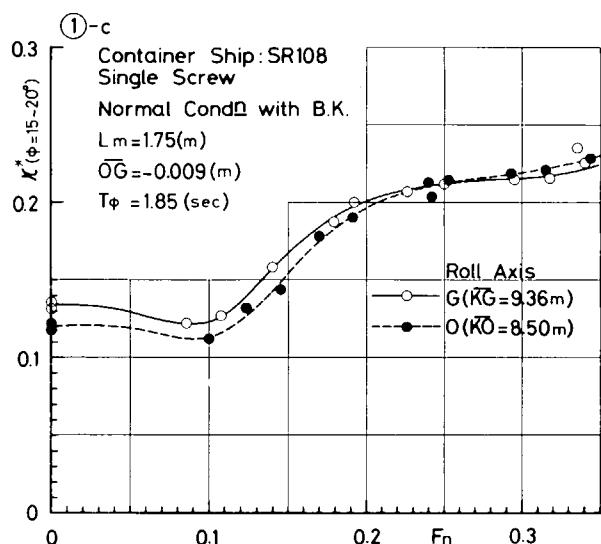


Fig. 1.1.8

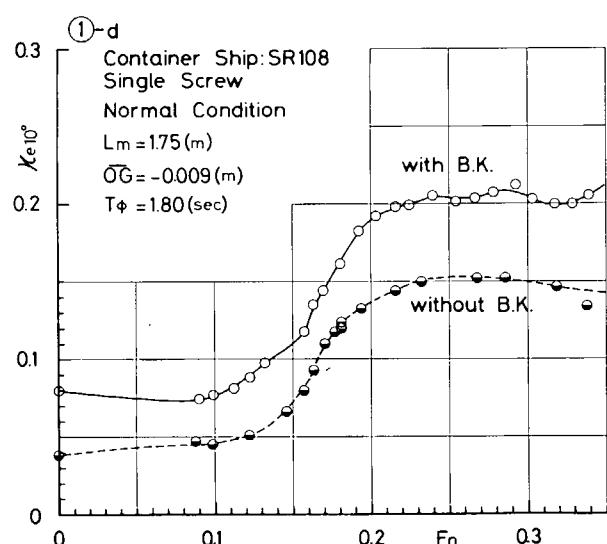


Fig. 1.1.9

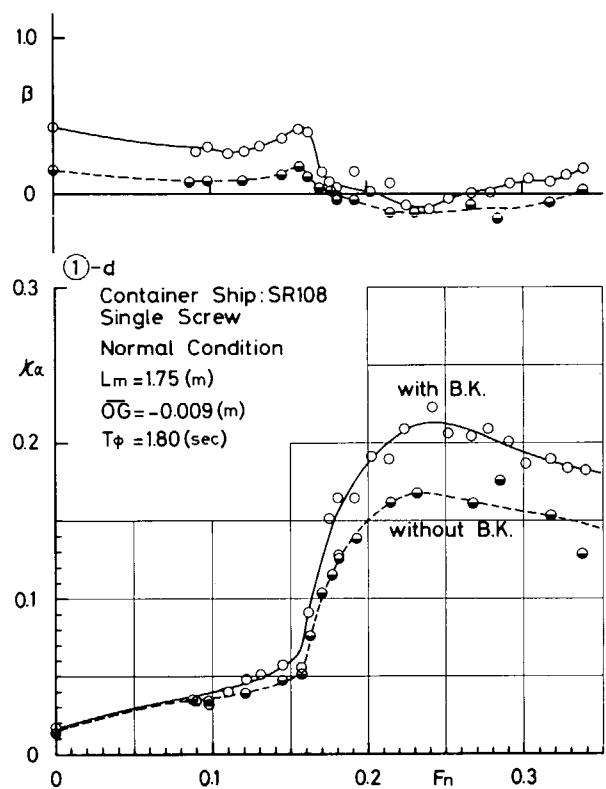


Fig. 1.1.10

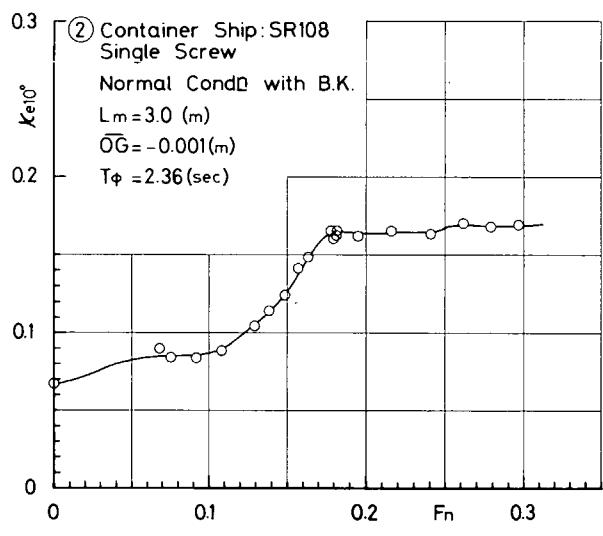


Fig. 1.1.11

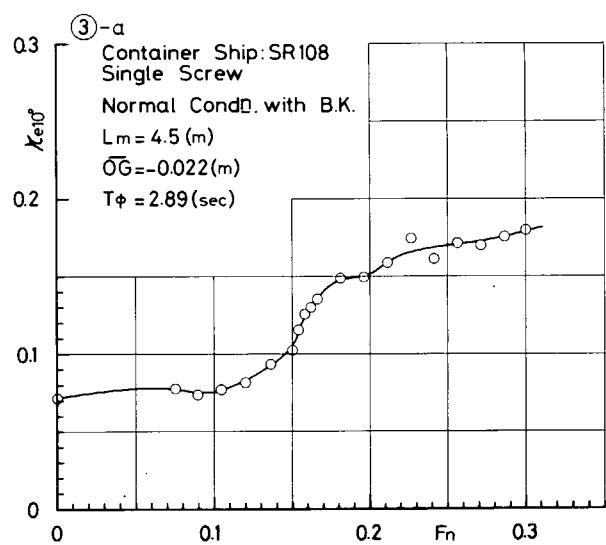


Fig. 1.1.12

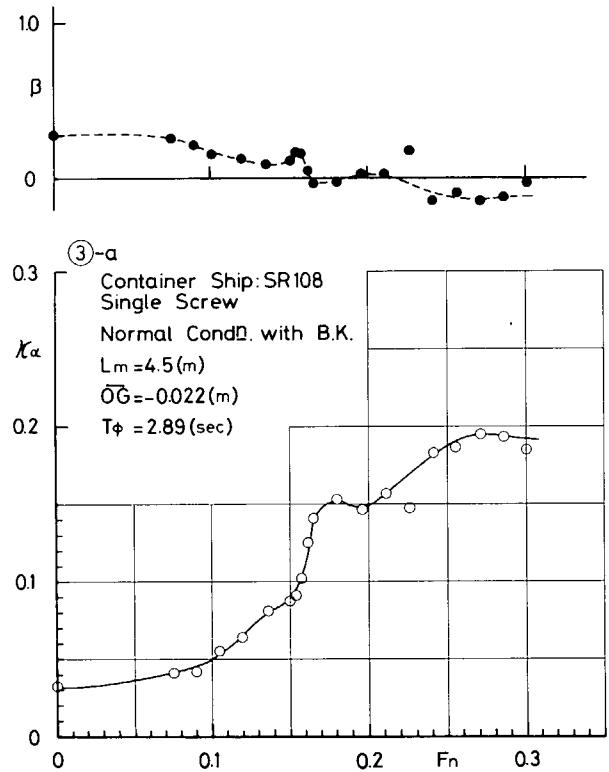


Fig. 1.1.13

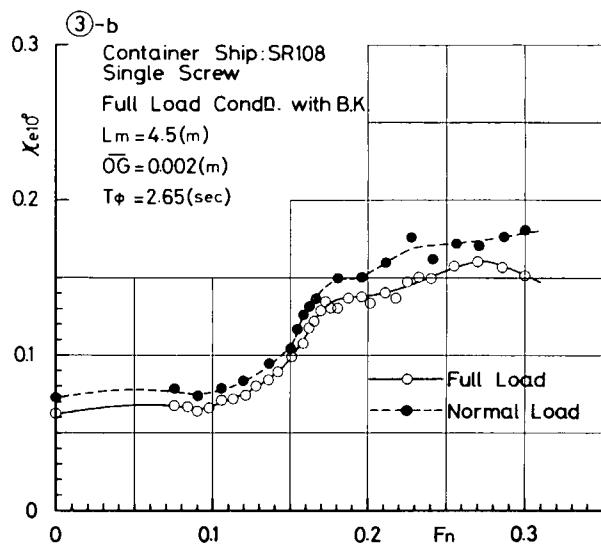


Fig. 1.1.14

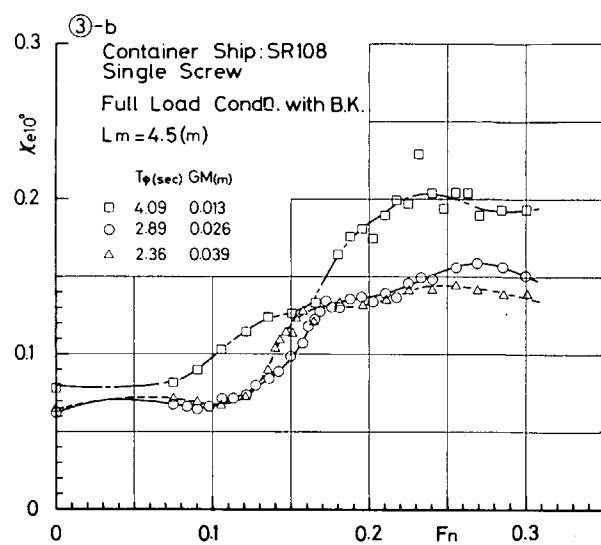


Fig. 1.1.15

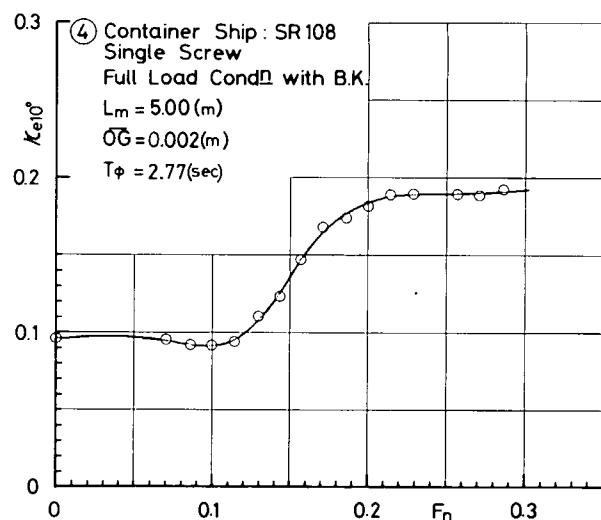


Fig. 1.1.16

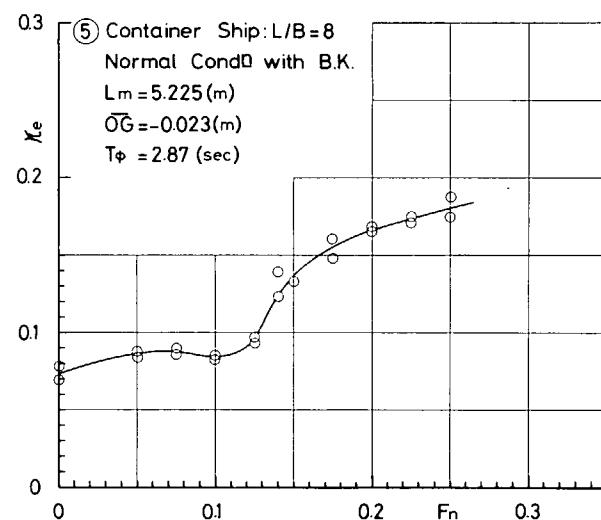


Fig. 1.1.17

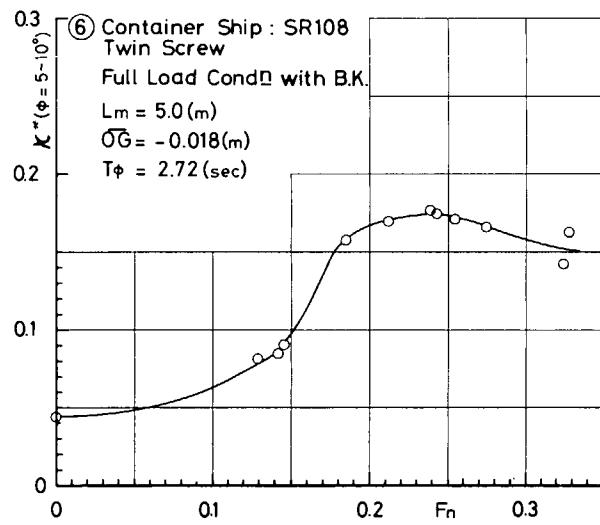


Fig. 1.1.18

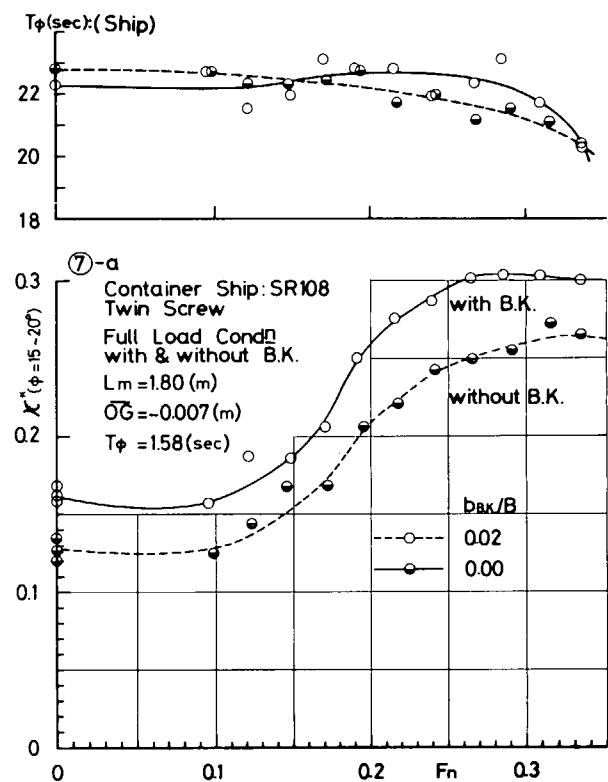


Fig. 1.1.19

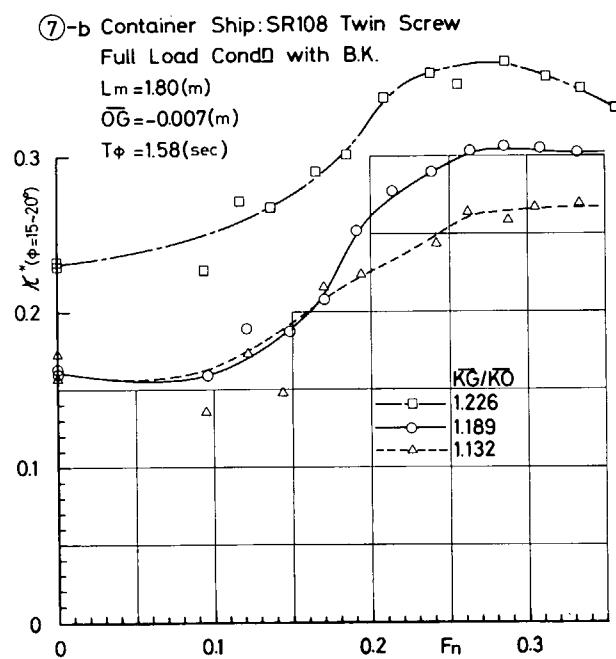


Fig. 1.1.20

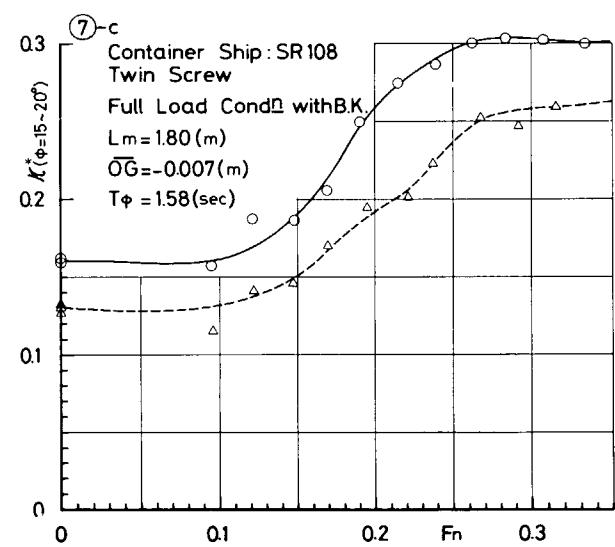


Fig. 1.1.21

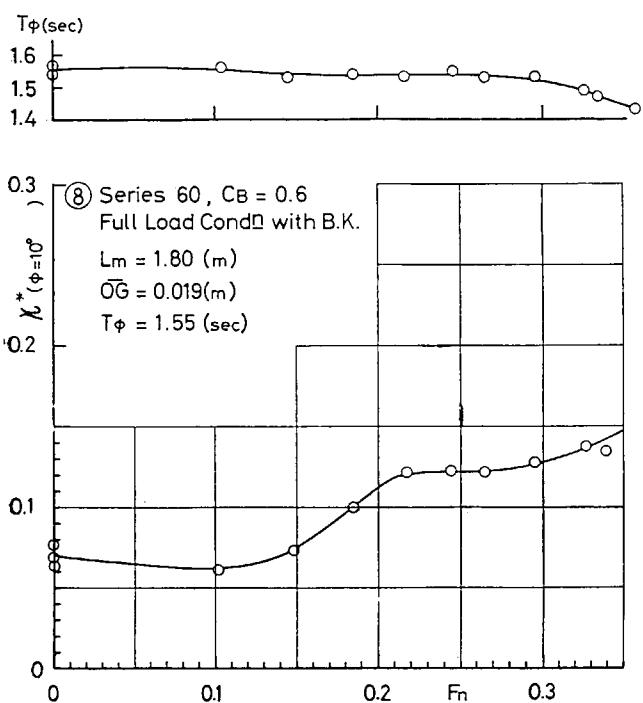


Fig. 1.1.22

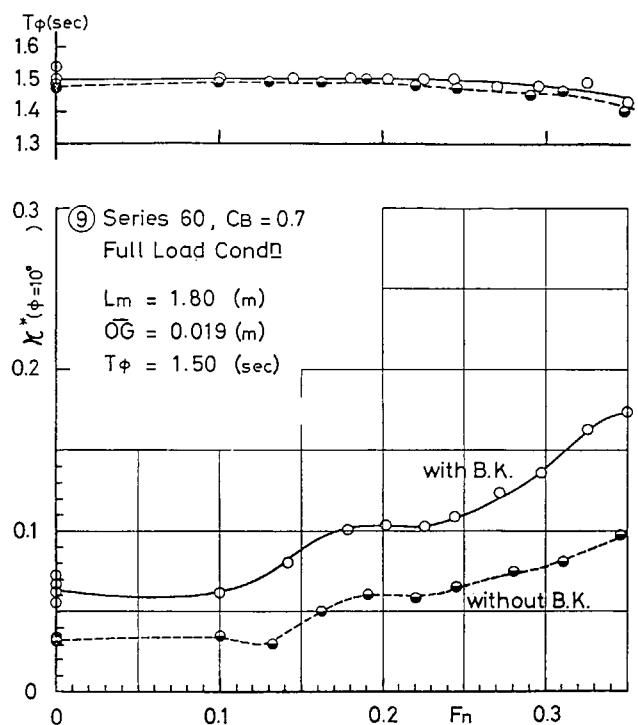


Fig. 1.1.23

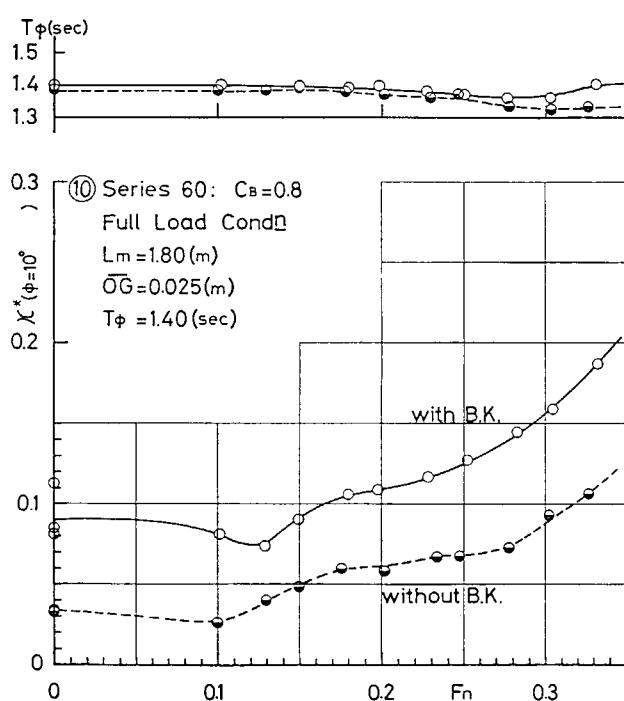


Fig. 1.1.24

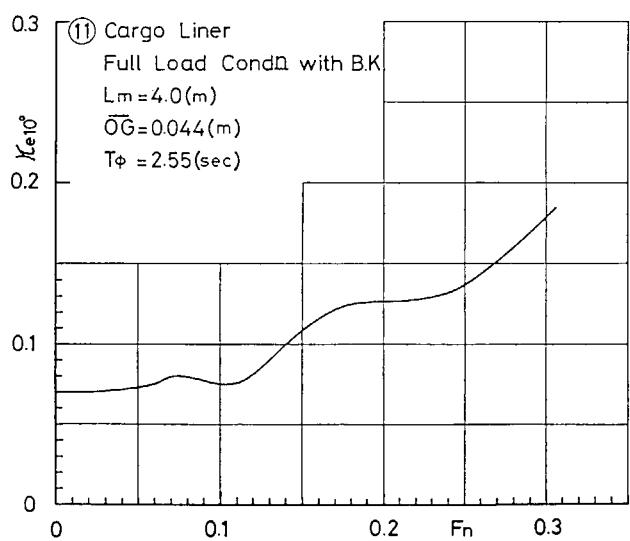


Fig. 1.1.25

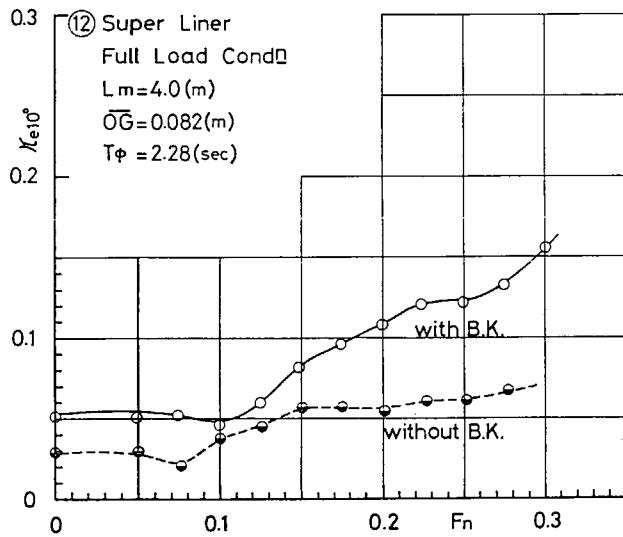


Fig. 1.1.26

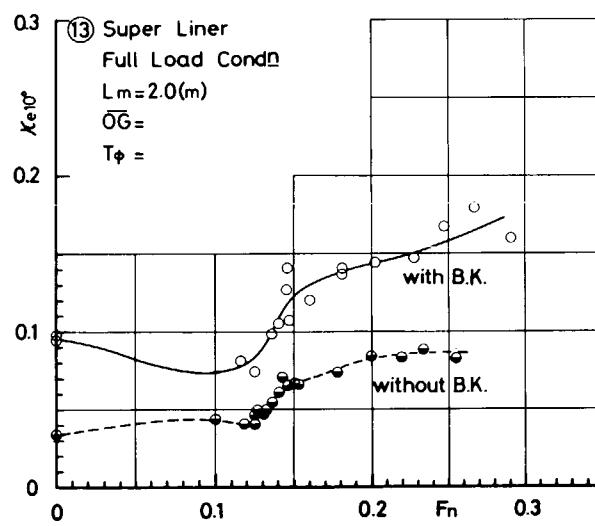


Fig. 1.1.27

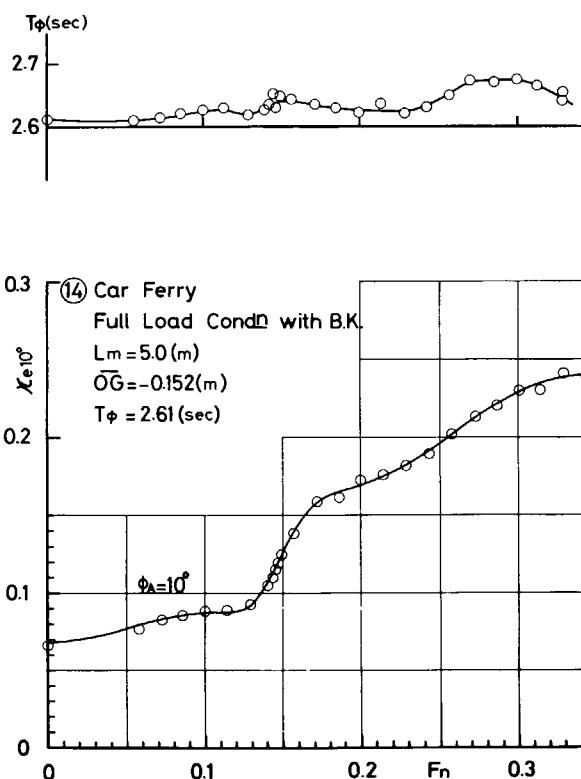


Fig. 1.1.28

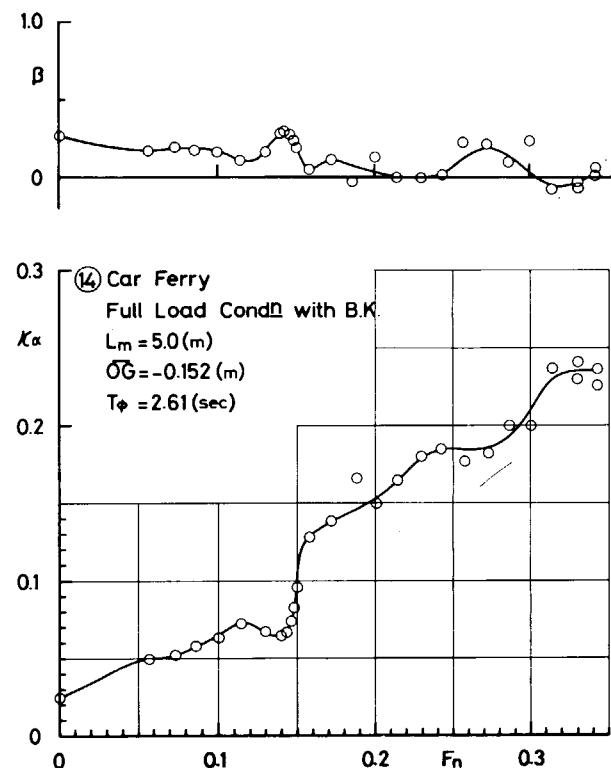


Fig. 1.1.29

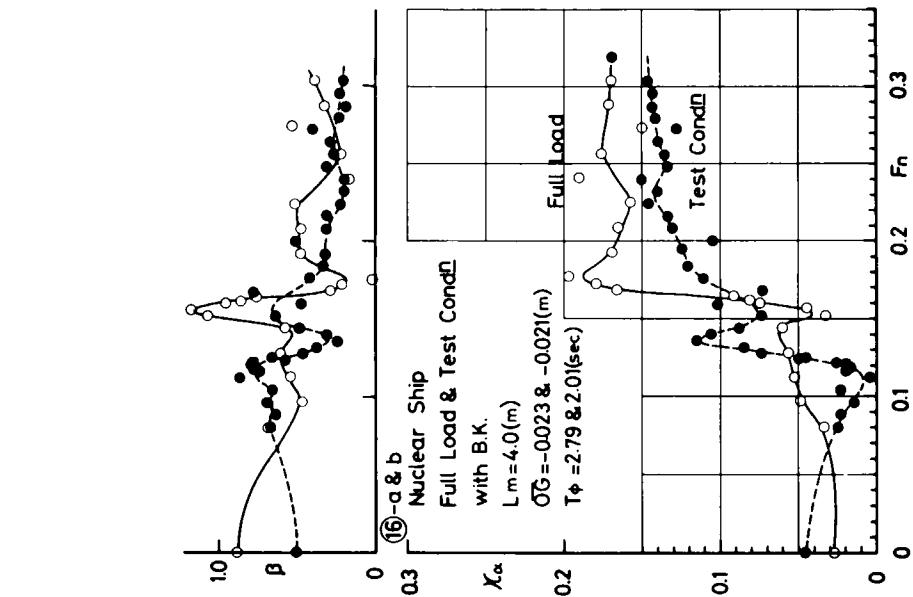


Fig. 1.1.32

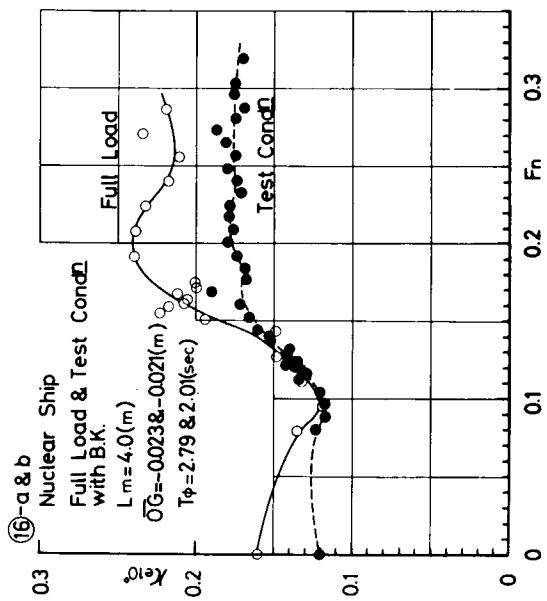


Fig. 1.1.31

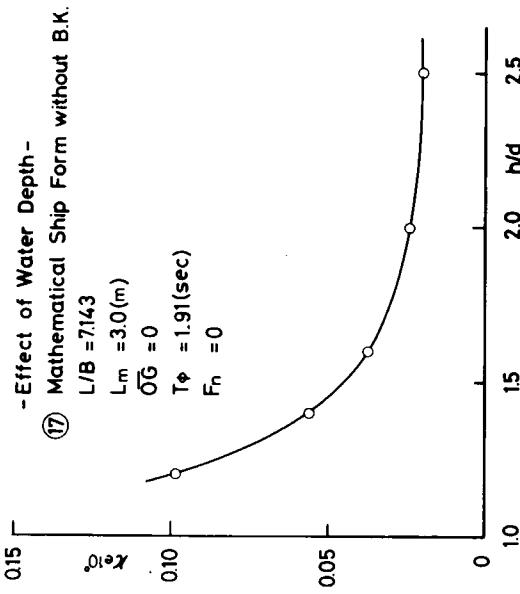


Fig. 1.1.34

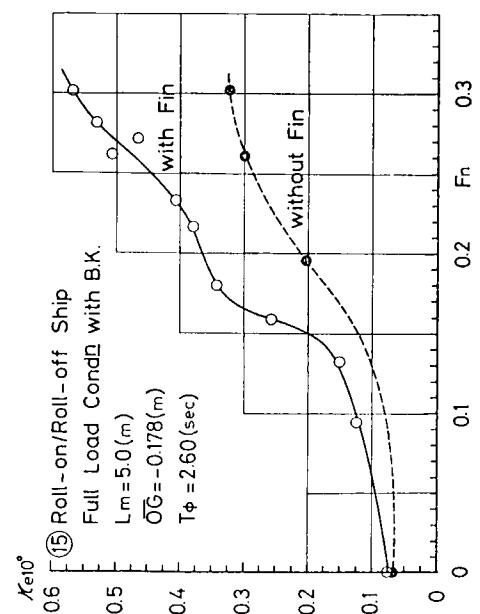


Fig. 1.1.30

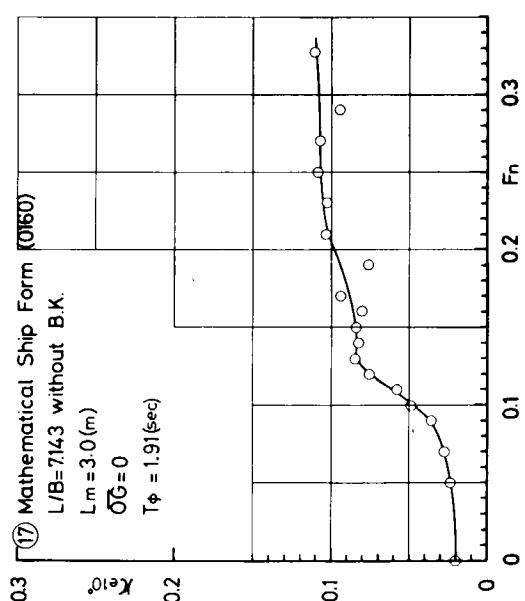


Fig. 1.1.33

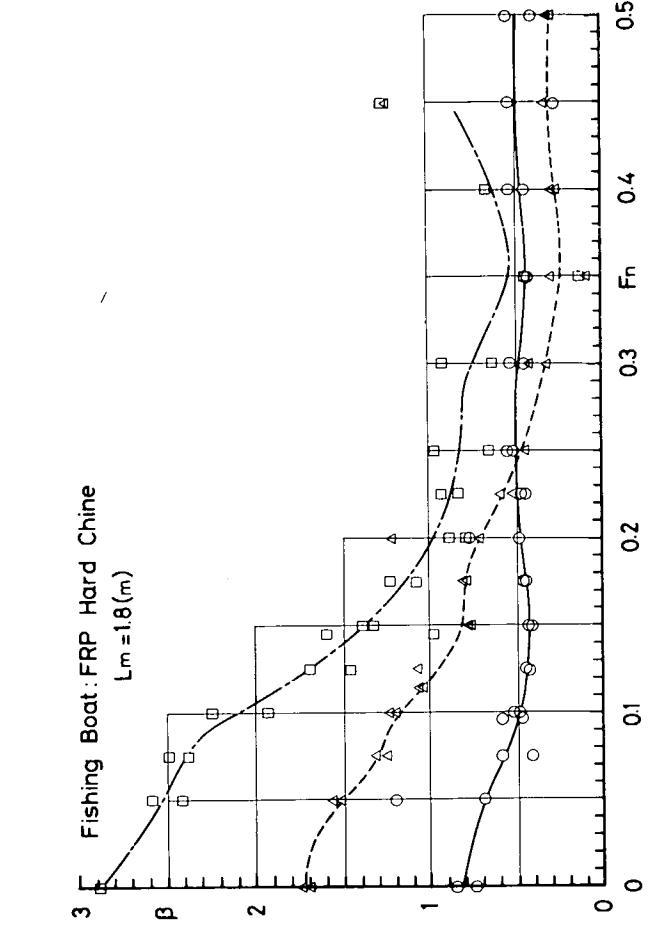
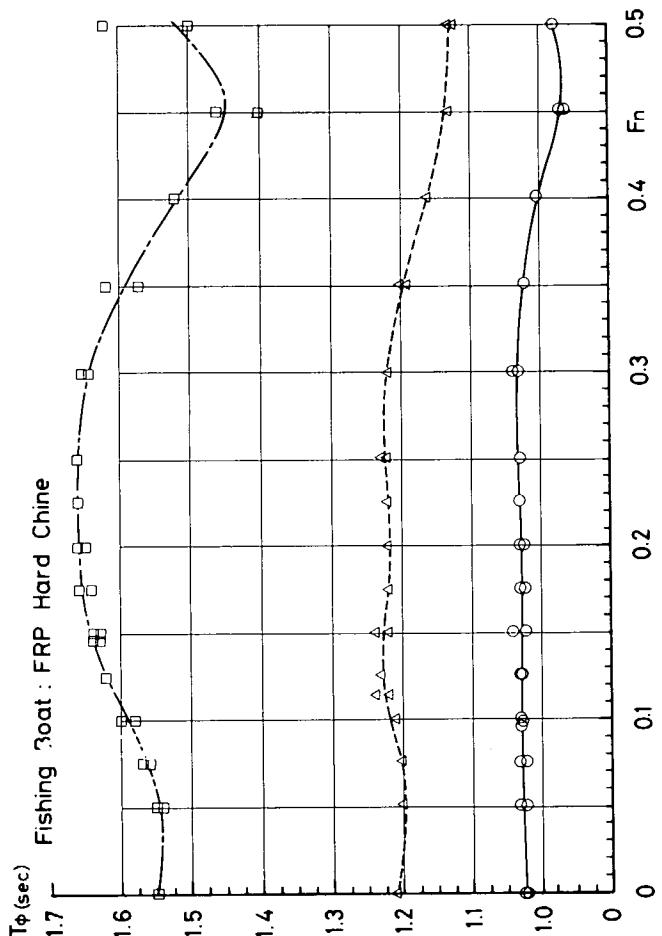
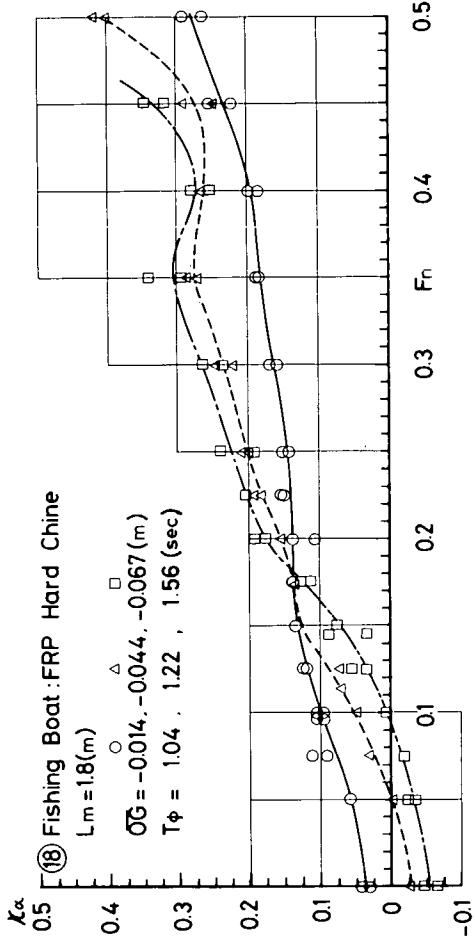
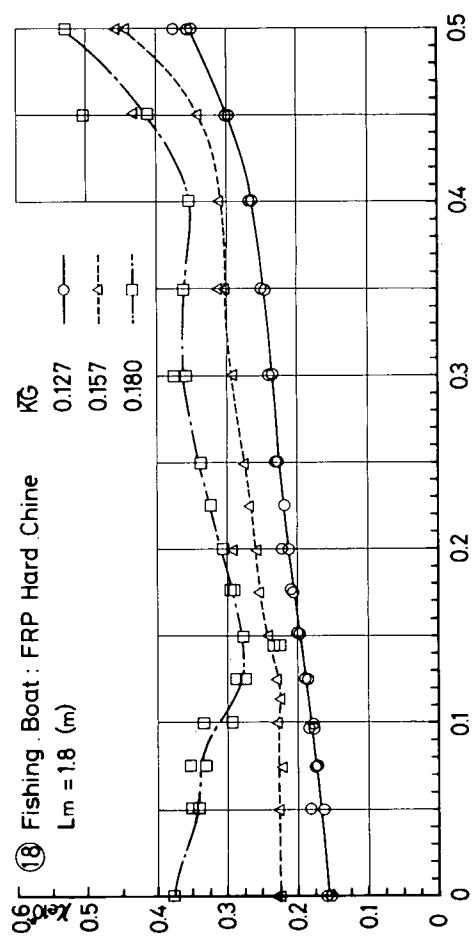


Fig. 1.1.35

Fig. 1.1.36

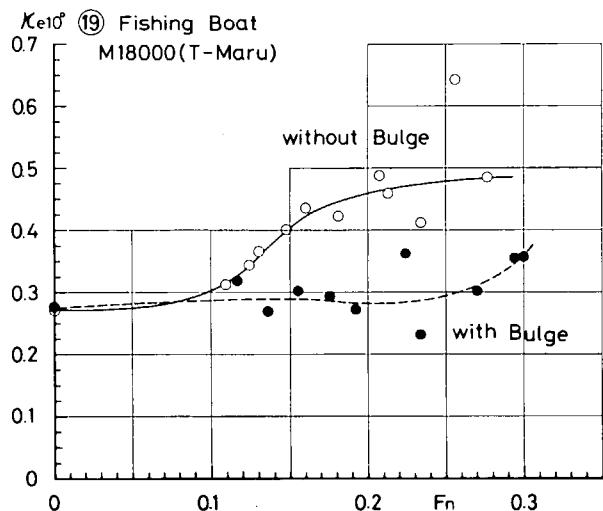


Fig. 1.1.37

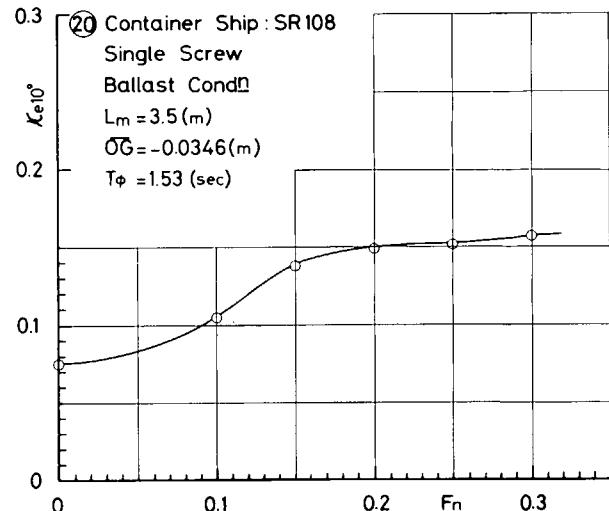


Fig. 1.1.38

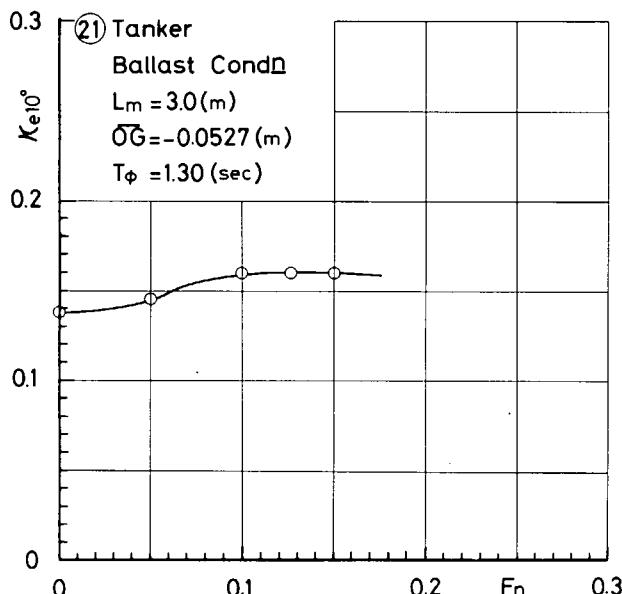


Fig. 1.1.39

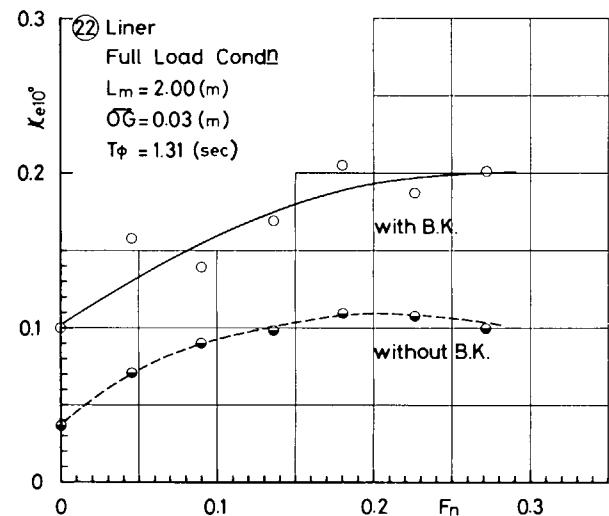


Fig. 1.1.40

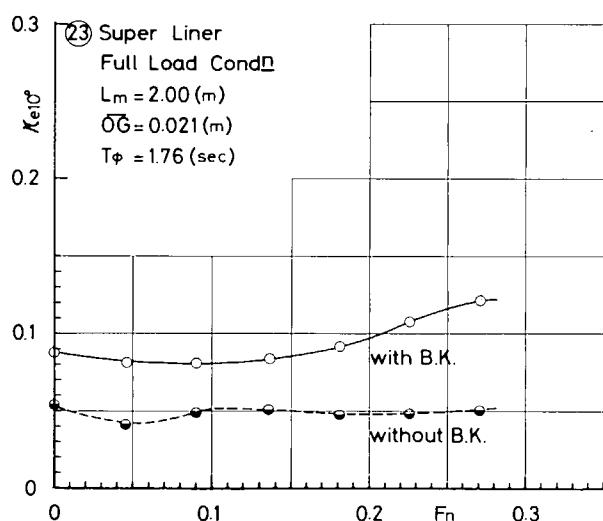


Fig. 1.1.41

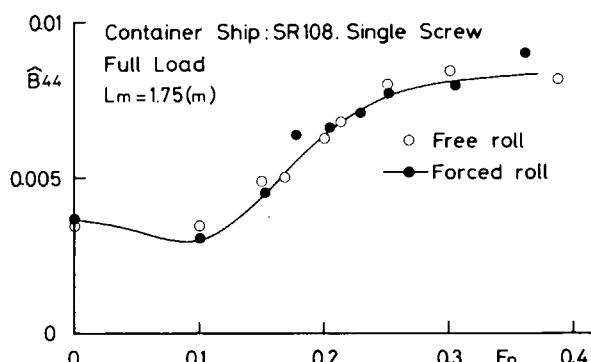


Fig. 1.1.42

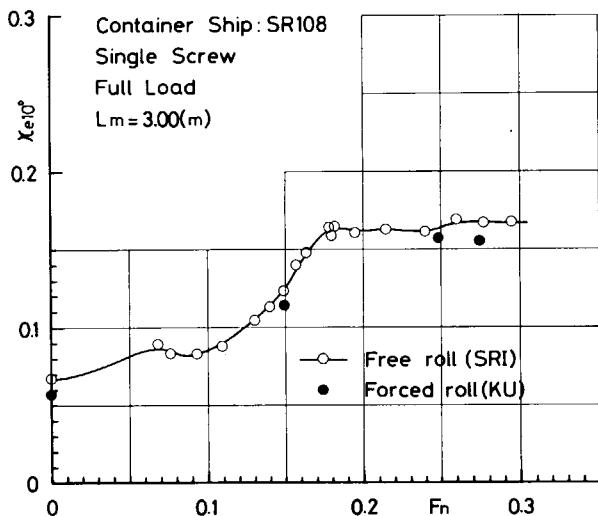
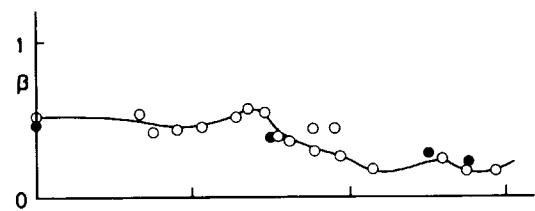


Fig. 1.1.43

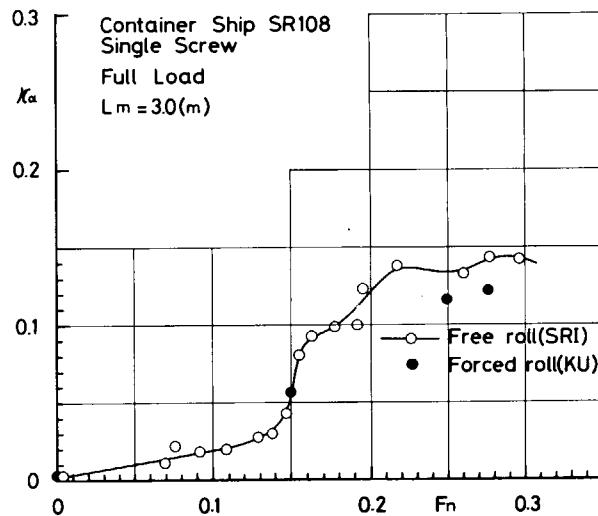


Fig. 1.1.44

Table 1.1.2 Comparison between free rolling and forced rolling experiments.

| Ship   | Speed<br>Fn | Free Rolling Test Results   |                         |                                       | Forced Rolling<br>Test Results |
|--|-------------|-----------------------------|-------------------------|---------------------------------------|--------------------------------|
|  |             | Natural<br>Frequency        | N<br>Coefft<br>(1/deg)  | Corres-<br>ponding<br>$\hat{B}_{44e}$ | $\hat{B}_{44e}$                |
| Tanker<br>Ballast Cond'n<br>2 % Trim by<br>the Stern                       | 0           | $\hat{\omega}_\phi = 0.751$ | $N_{10^\circ} = 0.0213$ | 0.0171                                | 0.0137                         |
|  | 0.10        |                             | $N_{10^\circ} = 0.0248$ | 0.0199                                | 0.0177                         |
|  | 0.15        |                             | $N_5^\circ = 0.0300$    | 0.0121                                | 0.0110                         |
|  |             |                             | $N_{10^\circ} = 0.0248$ | 0.0199                                | 0.0186                         |
| SR 108<br>Container Ship<br>Ballast Cond'n<br>0.985 % Trim by<br>the Stern | 0           | $\hat{\omega}_\phi = 0.661$ | $N_{10^\circ} = 0.013$  | 0.0068                                | 0.0050                         |
|  | 0.15        |                             | $N_{10^\circ} = 0.0217$ | 0.0114                                | 0.0110                         |
|  | 0.25        |                             | $N_5^\circ = 0.044$     | 0.0116                                | 0.0130                         |
|  |             |                             | $N_{10^\circ} = 0.0237$ | 0.0125                                | 0.0133                         |

## 1.2 規則強制横揺れ試験による横揺れ減衰係数

波浪中の船体応答の諸性能を正確に推定するために、最近、船体運動方程式の流体力係数の精度向上を図る研究が行われている。強制動揺試験は任意の動揺周波数ごとに船体に働く radiation force を求めることが容易であり、船体運動方程式の流体力係数を調べるために大変有効な方法で、現在、各機関で盛んに行われている。

本節では、これまでに各機関で行われてきた、実用船型の規則強制横揺れ試験結果ならびに試験状態を整理し、その結果について報告する。

### 1.2.1 供試模型船および試験状態

供試模型船は、コンテナ船々型、Series-60船型、貨物船々型、タンカー船型、鉱石運搬船々型およびフェリー船型の6種類の実用船型である。これらの船型の試験状態は、それぞれの満載状態あるいは軽荷状態について、横揺れ振幅ならびに前進速度をそれぞれ変化させている。

Table 1.2.1 にこれらの模型船の主要目、実験状態、ビルジキール寸法等をまとめて示している。<sup>1~9)</sup> ただし、水面から重心までの距離OGは水面より下方を正にとり、船体中央から浮心までの距離ℓ<sub>CB</sub>は船首方向を正としている。

### 1.2.2 強制横揺れ試験法および解析法

船体重心Gの回りの1自由度の運動方程式を次のようにおく。

$$(J_{44} + A_{44})\ddot{\phi} + B_{44}\dot{\phi} + C_{44}\phi = M_{\phi e} \quad (1.2.1)$$

ただし、

$J_{44}$  : 横揺れの質量慣性モーメント

$A_{44}$  : 横揺れの付加慣性モーメント

$B_{44}$  : 横揺れ減衰係数

$C_{44}$  : 横揺れ復原モーメント係数

$M_{\phi e}$  : 横揺れ強制モーメント

今、船体をその重心Gの回りに、強制的に横揺れ振幅 $\phi_A$ の周期的正弦運動 ( $\phi = \phi_A \sin \omega t$ ) をさせた時、船体に働く横揺れモーメントを次式のようにおく。

$$M_{\phi e} = L_A \sin(\omega t + \epsilon_L) \quad (1.2.2)$$

ただし、

$L_A$  : 横揺れモーメント振幅

$\epsilon_L$  : 船体運動と横揺れモーメントの位相差

この式より、(1.2.1)式の各係数は次のように求まる。<sup>10)</sup>

$$\left\{ \begin{array}{l} J_{44} + A_{44} = -\frac{L_A \cos \epsilon_L}{\omega^2 \phi_A} + \frac{C_{44}}{\omega^2} \\ B_{44} = \frac{L_A \sin \epsilon_L}{\omega \phi_A} \end{array} \right. \quad (1.2.3)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} J_{44} + A_{44} = -\frac{L_A \cos \epsilon_L}{\omega^2 \phi_A} + \frac{C_{44}}{\omega^2} \\ B_{44} = \frac{L_A \sin \epsilon_L}{\omega \phi_A} \end{array} \right. \quad (1.2.4)$$

ここで、船体に働く横揺れ減衰モーメント ( $L_A \sin \epsilon_L$ ) の求め方に、2種類の方法がとられていることに注意しなければならない。一つは船体に働く横揺れモーメント  $M_{\phi e}$  についてフーリエ解析を行い、船体運動と同一周波数 $\omega$ の横揺れモーメント振幅  $L_A$  ならびに運動との位相差  $\epsilon_L$  を求めることによって、(1.2.4)式より横揺れ減衰係数 ( $B_{44}$ ) を求める方法である(九大応力研、三菱のデータ)。他の一つは、横揺れ角  $\phi = 0$ 、すなわち横揺れ角速度が最大となる瞬間のモーメント ( $M_{\phi e}$ ) を実験結果より読みとり、これを減衰モーメントとする方法<sup>5,11)</sup> である(大阪府大のデータ)。前者は運動周波数 $\omega$ だけの流体力であるのに対し、後者は運動周波数 $\omega$

だけでなく、高次の周波数の流体力が含まれている。前者の方法で求めた横揺れ減衰係数を  $\hat{B}_{44}$ 、後者の方法で求めたものを  $\hat{B}_{44}^*$  で表示する。これらの係数の無次元化の方法は次のとおりである。

$$\hat{B}_{44}, \hat{B}_{44}^* = \frac{\hat{B}_{44}, B_{44}}{\rho \nabla B^2} \sqrt{B/2g} \quad (1.2.5)$$

ただし、

$\nabla$  : 排水容積 ( $m^3$ )       $\rho$  : 流体密度 ( $Kg \cdot sec^2/m^4$ )

$B$  : 船 幅 ( $m$ )       $g$  : 重力加速度 ( $m/sec^2$ )

この二つの解析法による  $\hat{B}_{44}$  と  $\hat{B}_{44}^*$  は、全減衰モーメントが横揺れ角速度  $\dot{\phi}$  に比例する場合、両者は一致するが、全減衰モーメントが  $\dot{\phi} |\dot{\phi}|$  に比例する場合には

$$\hat{B}_{44}^* = \frac{3\pi}{8} \hat{B}_{44} \quad (1.2.6)$$

の関係があり、 $\hat{B}_{44}^*$  が  $\hat{B}_{44}$  より 2割弱大きくなる。<sup>5)</sup> 大阪府大の解析によると、Fig. 1.2.1 に示すとく、SR-108 コンテナ船々型のように、造波等の線型成分の大きい船では  $\hat{B}_{44}$  と  $\hat{B}_{44}^*$  の差はほとんどなく、むしろ  $\hat{B}_{44}$  が少し大きくなっている。また、Fig. 1.2.30, 1.2.32 の貨物船の場合、非線型影響が大きく、 $\hat{B}_{44}^*$  が (1.2.6) 式の  $\frac{3\pi}{8} \hat{B}_{44}$  より大きくなっている。

各機関で得られた実用船型の横揺れ減衰係数 ( $\hat{B}_{44}, \hat{B}_{44}^*$ ) は、横軸に無次元周波数  $\hat{\omega}$  ( $= \omega \sqrt{B/2g}$ ) をとり、横揺れ振幅  $\phi_A$  をパラメーターとして、Fig. 1.2.2 ~ Fig. 1.2.43 に示されている。

### 1.2.3 横揺れ減衰係数の実験表示式

横揺れ減衰係数は、前進速度影響および粘性による非線型影響が強いため、波の中の横揺れ振幅を求める時、繰り返し計算が必要となる。このため、これらの実験値をうまく表示する簡単な実験式を作つておくと大変便利である。

ここでは、実験結果の一部(九大応力研のデータ)を文献[10]に従つて、横揺れ角速度  $\dot{\phi}$  に関する三次式および二次式による近似を試みた。

横揺れ減衰係数  $B_{44}$  を次式のごとく仮定する。

$$\begin{aligned} B_{44} \dot{\phi} &= B_1 \dot{\phi} + B_2 \dot{\phi} |\dot{\phi}| + B_3 \dot{\phi}^3 \\ &= \left( B_1 + \frac{8}{3\pi} \omega \phi_A B_2 + \frac{3}{4} \omega^2 \phi_A^2 B_3 \right) \dot{\phi} \end{aligned} \quad (1.2.7)$$

無次元表示を行うと

$$\hat{B}_{44} = \hat{B}_1 + \frac{8}{3\pi} \hat{\omega} \phi_A \hat{B}_2 + \frac{3}{4} \hat{\omega}^2 \phi_A^2 \hat{B}_3 \quad (1.2.8)$$

$$\left. \begin{aligned} \text{ただし, } \hat{B}_1 &= \frac{B_1}{\rho \nabla B^2} \sqrt{B/2g}, \\ \hat{B}_2 &= \frac{B_2}{\rho \nabla B^2}, \\ \hat{B}_3 &= \frac{B_3}{\rho \nabla B^2 \sqrt{B/2g}} \end{aligned} \right\} \quad (1.2.9)$$

となる。

また、二次式近似の場合、

$$\hat{B}_{44} = \hat{B}_1 + \frac{8}{3\pi} \hat{\omega} \phi_A \hat{B}_2 \quad (1.2.10)$$

となる。

(1.2.8) および (1.2.10) 式に、強制横揺れ試験結果を代入し、最小自乗近似によって、 $\hat{B}_1$ ,  $\hat{B}_2$  および  $\hat{B}_3$  の各係数を決定すればよい。九大応力研で得られた実験結果をこの方法により解析し、その結果を Table 1.2.2, 1.2.3 および図中 (Figs. 1.2.2~1.2.6, Figs. 1.2.26~1.2.29, Figs. 1.2.35~37, Figs. 1.2.40~1.2.41) に実線および点線で示す。

この方法は、一つの船型でかつ特定のフルード数  $F_n$  に対して係数  $\hat{B}_1$ ,  $\hat{B}_2$ ,  $\hat{B}_3$  が一定であると仮定されているので、造波の影響などにより係数  $B_1$  の値が  $\omega$  によって変化することの効果が高次の項でうまくカバーされた形となっている。<sup>11)</sup> これらの図からわかるように、振幅の比較的大きい所まで実験値をうまく表示している。

#### 1.2.4 考 察

##### (i) コンテナ船型 (Figs. 1.2.2~1.2.16)

1 軸コンテナ船々型の満載あるいは常用状態（船型番号①, ③, ⑤）における横揺れ減衰係数 ( $\hat{B}_{44}$ ,  $\hat{B}_{44}^*$ ) は、横揺れ振幅  $\phi_A$  に関して非線型となって現われ、横揺れ振幅  $\phi_A$  ならびに動揺周波数  $\hat{\omega}$  の増加と共に大きくなっている。また、速度の増加と共に  $\hat{B}_{44}$  および  $\hat{B}_{44}^*$  は低周波数領域で増加し、高周波数領域ではわずかに減少している (Fig. 1.2.6)。

2 軸コンテナ船々型②の満載状態の  $\hat{B}_{44}$  は前進速度影響のため低周波数領域において非常に大きくなり、1 軸コンテナ船々型の 1.5~1.8 倍程度である。<sup>2)</sup> また、高周波数領域において、 $\hat{B}_{44}$  に hollow が現われている。

SR-108 船型のバラスト状態④の  $\hat{B}_{44}$  は常用状態と異なり、横揺れ振幅  $\phi_A$  に対するはっきりした傾向が現われていない (Fig. 1.2.12)。これと同じ SR-108 船型のバラスト状態⑥の前進時の  $\hat{B}_{44}^*$  はビルジキールの有無にかかわらず、動揺周波数  $\hat{\omega}$  の増加と共に減少する傾向が見られる (Fig. 1.2.15)。

##### (ii) Series-60 船型 (Figs. 1.2.17~1.2.21)

Series-60,  $C_b = 0.7$  の満載状態⑦の  $\hat{B}_{44}^*$  は、前進速度があると全実験周波数にわたって、前進速度が零の場合より大きくなっているが、ビルジキールの付いた場合と付かない場合の差は、前進速度影響をほとんど受けていない (Figs. 1.2.17, 1.2.18)。

Series-60,  $C_b = 0.8$  のバラスト状態⑧の  $\hat{B}_{44}^*$  は、ビルジキールの有無にかかわらず前進速度影響のため、低周波数領域で増加している。ビルジキールの付いた場合は動揺周波数  $\hat{\omega}$  の影響は小さい。また裸殻の状態の  $\hat{B}_{44}^*$  は動揺周波数  $\hat{\omega}$  の増加と共に減少している (Fig. 1.2.19, 1.2.20)。

##### (iii) 貨物船々型 (Figs. 1.2.22~1.2.34)

2 隻の貨物船々型は長さ 3 m と 2 m の相似模型船である。Figs. 1.2.22~1.2.29 は 3 m 模型船⑨の満載状態の実験結果である。裸殻状態の場合、 $\hat{B}_{44}$  は実験値にばらつきが見られるけれど、全般的に横揺れ振幅に関してほぼ線型である。また、前進速度がある場合、 $\hat{B}_{44}$  は低周波数領域において増加する傾向にあるが、高周波数領域におけるそれは、前進速度の影響をほとんど受けていない。

ビルジキールの付いた場合、先の裸殻の状態と異なり、コンテナ船々型の満載状態と同様、横揺れ振幅に対して  $\hat{B}_{44}$  は非線型となって現われる。また、前進速度影響は、高周波数領域で弱く、低周波数領域で強く現われるが、前進速度の増加と共に  $\hat{B}_{44}$  は増加している。

Figs. 1.2.30~1.2.34 に 2 m 模型船⑩の  $\hat{B}_{44}^*$  を示す。 $\hat{B}_{44}^*$  に対する周波数ならびに前進速度影響は 3 m 模型⑨の  $\hat{B}_{44}$  の傾向と全く同じであるが、1.2.2 節で述べたように、フーリエ解析による  $\hat{B}_{44}$  よりも全周波数にわたって  $\hat{B}_{44}^*$  は大きくなっている。

##### (iv) タンカー船型 (Figs. 1.2.35~1.2.39)

満載状態⑪の  $\hat{B}_{44}$  は先のコンテナ船および貨物船の満載状態の傾向と全く同じで、横揺れ振幅  $\phi_A$  に対して非線型となって現われている。また、前進速度影響により、低周波数領域において、前進速度の増加と共に大きくなっている。

バラスト状態<sup>⑫</sup>の  $\hat{B}_{44}$  は先のコンテナ船々型のバラスト状態と異なり、横揺れ振幅  $\phi_A$  に対する非線型性がはっきりと現われると共に、動揺周波数の増加と共に大きくなっている。これらの傾向は満載状態の傾向とはほとんど変らず、満載状態の  $\hat{B}_{44}$  よりも全般に大きくなっている (Fig. 1.2.39)。

(v) 鉱石運搬船々型 (Figs. 1.2.40~42)

満載状態<sup>⑬</sup>, <sup>⑭</sup>の  $\hat{B}_{44}$  は横揺れ振幅  $\phi_A$  に対して非線型となっている。しかし、前進速度影響はタンカーホーク型よりも小さく、顕著に現われていない (Fig. 1.2.42)。

(vi) フェリー船型 (Fig. 1.2.43)

横揺れ振幅  $\phi_A = 10^\circ$ , 前進速度  $F_n = 0, 0.318$  と実験データが非常に少ないが、前進速度影響はコンテナ船々型と同様、低周波数領域において大きく現われており、高周波数領域では小さくなっている。

以上、実用船型の規則強制横揺れ試験による実験結果を示した。これらの結果は実用的な船型についての実験結果であるので、初期設計の段階で横揺れ減衰モーメントを推定するのに有効であろう。また、船型、船速等が異なる場合は、これらのデータをもとに補間して求めることができるであろう。

#### 参考文献

- 1) 日本造船研究協会第131研究部会, 波浪外力に関する水槽試験報告書, 研究資料No.213, 昭和50年3月
- 2) 藤井斉, 高橋雄; 斜め波中における船体運動, 変動水圧の計算法に対する実験的検証, 西部造船会々報, 第49号, 昭和50年2月
- 3) 日本造船研究協会第108研究部会, 高速貨物船の波浪中における諸性能に関する研究報告書, 研究資料No.125, 昭和46年3月
- 4) 日本造船研究協会第161研究部会, 船舶の波浪中性能推定の精度向上とその実証に関する研究報告書, 研究資料No.275, 昭和52年3月
- 5) 日本造船研究協会第161研究部会, 船舶の波浪中性能推定の精度向上とその実証に関する研究報告書, 研究資料No.291, 昭和53年3月
- 6) 日本造船研究協会第131研究部会, 波浪外力に関する水槽試験報告書, 研究資料No.192, 昭和49年3月
- 7) 日本造船研究協会第131研究部会, 波浪外力に関する水槽試験報告書, 研究資料No.176, 昭和48年3月
- 8) 日本造船研究協会第131研究部会, 波浪外力に関する水槽試験報告書, 研究資料No.163, 昭和47年3月
- 9) Fujii, H. and Takahashi, T.; Experimental Study on Lateral Motion of Ships in Waves, International Conference on Stability of Ships and Ocean Vehicles, Glasgow, 1975
- 10) 高木幹雄, 田才福造; 横運動方程式の流体力について, 西部造船会々報, 第46号, 昭和48年8月
- 11) 姫野洋司; 横揺れ減衰力, 日本造船学会第2回耐航性に関するシンポジウム, 昭和52年12月

Table 1.2.1 Principal dimensions of ship models and experimental conditions

| Ship No.                               | (1)                                      | (2)                      | (3)                                   | (4)                           | (5)            | (6)                           | (7)                          | (8)                      | (9)                                    | (10)                              | (11)                                   | (12)                          | (13)                    | (14)                       | (15)                             |                 |
|--|--|--------------------------|---------------------------------------|-------------------------------|----------------|-------------------------------|------------------------------|--------------------------|--|-----------------------------------|--|-------------------------------|-------------------------|----------------------------|----------------------------------|-----------------|
| Ship model                             | Container                                | Container                | Container                             | Container                     | Container      | Container                     | Series 60<br>$C_b = 0.7$     | Series 60<br>$C_b = 0.8$ | Cargo ship                             | Cargo ship                        | Tanker                                 | Tanker                        | Ore-carrier             | Ore-carrier                | Ferry                            |                 |
| Experimental place                     | Kyushu*                                  | Mitsubishi**             | Mitsubishi**                          | Mitsubishi**                  | Osaka***       | Osaka***                      | Osaka***                     | Osaka***                 | Kyushu*                                | Osaka***                          | Kyushu*                                | Mitsubishi**                  | Kyushu*                 | Mitsubishi**               | Mitsubishi**                     |                 |
| Length between perpendiculars          | $L_{pp}$ (m)                             | 3.000                    | 3.500                                 | 3.000                         | 3.500          | 1.75                          | 1.750                        | 1.800                    | 3.00                                   | 2.00                              | 3.00                                   | 3.00                          | 3.00                    | 3.000                      | 3.600                            |                 |
| Breadth of ship                        | $B$ (m)                                  | 0.4354                   | 0.4606                                | 0.4354                        | 0.5080         | 0.254                         | 0.254                        | 0.257                    | 0.2769                                 | 0.47826                           | 0.319                                  | 0.4719                        | 0.4931                  | 0.4931                     | 0.520                            |                 |
| Depth of ship                          | $D$ (m)                                  | 0.2640                   | —                                     | —                             | —              | —                             | —                            | —                        | 0.26847                                | —                                 | —                                      | 0.2793                        | 0.2793                  | 0.2793                     | —                                |                 |
| Draft                                  | $d$ (m)                                  | 0.1628                   | 0.1575                                | 0.1453                        | 0.1254         | 0.095                         | 0.0627                       | 0.1028                   | 0.0684                                 | 0.19565                           | 0.130                                  | 0.1828                        | 0.0933                  | 0.1943                     | 0.1943                           |                 |
| Displacement                           | $V$ ( $m^3$ )                            | 0.12161                  | 0.1471                                | 0.1064                        | 0.1176         | 0.0241                        | 0.01452                      | 0.0331                   | 0.02642                                | 0.19984                           | 0.0591                                 | 0.22057                       | 0.1089                  | 0.237                      | 0.1337                           |                 |
| Block coefficient                      | $C_b$                                    | 0.5719                   | 0.5731                                | 0.5582                        | 0.5275         | 0.572                         | 0.521                        | 0.7                      | 0.7748                                 | 0.7119                            | 0.7119                                 | 0.8519                        | 0.8236                  | 0.8243                     | 0.8242                           |                 |
| Midship section coefficient            | $C_A$                                    | 0.9700                   | —                                     | 0.9665                        | 0.9546         | 0.970                         | 0.9546                       | 0.986                    | 0.9902                                 | 0.9905                            | 0.9905                                 | 0.9946                        | 0.9875                  | 0.9953                     | 0.9953                           |                 |
| Waterline coeff.                       | $C_w$                                    | 0.7108                   | —                                     | —                             | —              | —                             | —                            | —                        | —                                      | 0.8109                            | 0.8109                                 | 0.931                         | —                       | 0.8836                     | 0.8836                           |                 |
| Metacentric height                     | $\bar{GM}$ (m)                           | 0.017                    | 0.0559                                | 0.0326                        | 0.0555         | —                             | 0.0                          | -0.0173                  | 0.0                                    | -0.01887                          | 0.0217                                 | —                             | 0.0608                  | 0.0893                     | 0.0453                           |                 |
|  | $\bar{OG}$ (m)                           | -0.0004                  | 0.0                                   | 0.0                           | -0.0346        | —                             | —                            | —                        | —                                      | 0.0211                            | 0.014                                  | 0.053                         | -0.0527                 | 0.04                       | 0.0452                           |                 |
|  | $\ell_{CB}$ (m)                          | -0.0425                  | —                                     | —                             | -0.0342        | —                             | —                            | —                        | —                                      | -0.025                            | -0.0167                                | 0.0993                        | 0.1326                  | 0.089                      | -0.0104                          |                 |
| Bilge-keel                             | $\ell_{BK}$ (m)                          | 0.25 $L_{pp}$            | 0.25 $L_{pp}$                         | 0.25 $L_{pp}$                 | 0.25 $L_{pp}$  | 0.25 $L_{pp}$                 | 0.25 $L_{pp}$                | 0.35 $L_{pp}$            | 0.35 $L_{pp}$                          | 0.25 $L_{pp}$                     | 0.0025 $L_{pp}$                        | 0.37 $L_{pp}$                 | 0.37 $L_{pp}$           | 0.25 $L_{pp}$              | 0.25 $L_{pp}$                    |                 |
|  | $b_{BK}$ (m)                             | 0.00643                  | 0.0114                                | 0.0077                        | 0.00900        | 0.0045                        | 0.0045                       | 0.0054                   | 0.0054                                 | 0.0076                            | 0.005                                  | 0.0041                        | 0.0041                  | 0.0052                     | 0.0090                           |                 |
| Radius of transverse gyration for roll | $K_t$ (m)                                | 0.382 $B$                | 0.355 $B$                             | 0.330 $B$                     | —              | —                             | —                            | —                        | —                                      | 0.3240 $B$                        | —                                      | 0.2513 $B$                    | —                       | 0.2602 $B$                 | 0.223 $B$                        |                 |
| Natural period for roll                | $T_\phi$ (sec)                           | 2.43                     | 1.51                                  | 1.68                          | 1.53           | —                             | —                            | —                        | —                                      | 2.242                             | —                                      | 1.414                         | 1.30                    | 1.405                      | 1.07                             |                 |
| Rolling axis                           |  | G                        | O                                     | O                             | G              | O                             | G & O                        | O                        | G                                      | G                                 | G                                      | G                             | G                       | G                          | G                                |                 |
| Appendage (Rudder area ( $cm^2$ ))     | Rudder (75.85)                           | Rudder Bossing           | Rudder (75.85)                        | Rudder (75.85)                | Rudder (32.46) | Rudder (32.46)                | Rudder (25.56)               | Rudder (26.67)           | Rudder (87.5)                          | Rudder (38.9)                     | Rudder (86.635)<br>63.3 L.T            | Rudder (86.635)               | Rudder (91.59)          | Rudder (91.59)             | Rudder (153.19)<br>Shaft bracket |                 |
| Trim                                   | 0  | 0                        | 0.57 % A                              | 0.985 % A                     | 0              | 0                             | 0                            | 0                        | 0                                      | 0                                 | 0                                      | 2 % A                         | 0                       | 0                          | 0                                |                 |
| Rolling amplitude (degree)             | 5°, 10°, 15°                             | 10°                      | 10°, 20°                              | 5°, 10°, 15°                  | —              | 10°<br>0, 0.25                | 10°<br>0, 0.20               | 10°<br>0, 0.20           | 5°, 10°, 15°<br>0, 0.15,<br>0.20, 0.25 | 9°, 10°<br>0, 0.15,<br>0.20, 0.25 | 5°, 10°, 15°<br>0, 0.15,<br>0.20, 0.25 | 5°, 10°, 15°<br>0, 0.10, 0.15 | 5°, 10°, 15°<br>0, 0.15 | 5°, 10°, 15°<br>0, 0.10    | 15°<br>0, 0.15                   | 10°<br>0, 0.318 |
| Forward speed $F_n$                    | 0, 0.15, 0.25                            | 0, 0.275                 | 0.1, 0.2, 0.                          | 0, 0.25                       | 0              | —                             | —                            | —                        | —                                      | —                                 | —                                      | —                             | —                       | —                          | —                                |                 |
| Remarks                                | SR-108 ship Full load condition Ref. [1] | Twin screw type Ref. [2] | SR-108 ship Normal condition Ref. [3] | SR-108 ship Ballast condition | SR-108 ship    | SR-108 ship Ballast condition | Full load condition Ref. [4] | Ballast condition        | Geosim                                 | Ref. [6]                          | Ballast condition                      | Kasagisan-maru Ref. [7]       | Kasagisan-maru Ref. [8] | Triple screw type Ref. [9] | —                                |                 |
| Fig. No.                               | Figs. 1.2.2 ~ 1.2.6                      | Fig. 1.2.7               | Figs. 1.2.8 ~ 1.2.10                  | Figs. 1.2.11 ~ 1.2.12         | Fig. 1.2.13    | Figs. 1.2.14 ~ 1.2.16         | Figs. 1.2.17 ~ 1.2.18        | Figs. 1.2.19 ~ 1.2.21    | Figs. 1.2.22 ~ 1.2.29                  | Figs. 1.2.30 ~ 1.2.29             | Figs. 1.2.35 ~ 1.2.37                  | Figs. 1.2.38 ~ 1.2.39         | Figs. 1.2.40 ~ 1.2.41   | Fig. 1.2.42                | Fig. 1.2.43                      |                 |

\* Research Institute for Applied Mechanics, Kyushu University

\*\* Nagasaki Technical Institute, Mitsubishi Heavy Industry, Ltd.

\*\*\* University of Osaka Prefecture

Table 1.2.2 Damping coefficients of 3rd order approximation

| Fn    | coeff.      | (1)       | (9)        | (11)    | (13)        |
|-------|-------------|-----------|------------|---------|-------------|
|       |             | Container | Cargo ship | Tanker  | Ore-carrier |
| 0     | $\hat{B}_1$ | 0.00082   | 0.00061    | 0.00209 | 0.00308     |
|       | $\hat{B}_2$ | 0.03690   | 0.04908    | 0.04168 | 0.03262     |
|       | $\hat{B}_3$ | 0.08474   | 0.08994    | 0.03877 | 0.12170     |
| 0.10  | $\hat{B}_1$ |           |            | 0.00316 | 0.00359     |
|       | $\hat{B}_2$ |           |            | 0.04453 | 0.04110     |
|       | $\hat{B}_3$ |           |            | 0.03581 | 0.07783     |
| 0.15  | $\hat{B}_1$ | 0.00374   | 0.00242    | 0.00344 |             |
|       | $\hat{B}_2$ | 0.02531   | 0.03755    | 0.04254 |             |
|       | $\hat{B}_3$ | 0.09835   | 0.08755    | 0.05524 |             |
| 0.20  | $\hat{B}_1$ |           | 0.00332    |         |             |
|       | $\hat{B}_2$ |           | 0.03551    |         |             |
|       | $\hat{B}_3$ |           | 0.05226    |         |             |
| 0.25  | $\hat{B}_1$ | 0.00628   | 0.00389    |         |             |
|       | $\hat{B}_2$ | 0.02125   | 0.04033    |         |             |
|       | $\hat{B}_3$ | 0.03567   | 0.02206    |         |             |
| 0.275 | $\hat{B}_1$ | 0.00671   |            |         |             |
|       | $\hat{B}_2$ | 0.01402   |            |         |             |
|       | $\hat{B}_3$ | 0.05097   |            |         |             |

Table 1.2.3 Damping coefficients of 2nd order approximation

| Fn    | coeff.      | (1)       | (9)        | (11)    | (13)        |
|-------|-------------|-----------|------------|---------|-------------|
|       |             | Container | Cargo ship | Tanker  | Ore-carrier |
| 0     | $\hat{B}_1$ | 0.00006   | 0          | 0.00161 | 0.00193     |
|       | $\hat{B}_2$ | 0.05563   | 0.06999    | 0.05180 | 0.05667     |
| 0.10  | $\hat{B}_1$ |           |            | 0.00272 | 0.00281     |
|       | $\hat{B}_2$ |           |            | 0.05387 | 0.05975     |
| 0.15  | $\hat{B}_1$ | 0.00286   | 0.00156    | 0.00276 |             |
|       | $\hat{B}_2$ | 0.04702   | 0.05785    | 0.05696 |             |
| 0.20  | $\hat{B}_1$ |           | 0.00282    |         |             |
|       | $\hat{B}_2$ |           | 0.04752    |         |             |
| 0.25  | $\hat{B}_1$ | 0.00571   | 0.00368    |         |             |
|       | $\hat{B}_2$ | 0.0321    | 0.04548    |         |             |
| 0.275 | $\hat{B}_1$ | 0.00596   |            |         |             |
|       | $\hat{B}_2$ | 0.02851   |            |         |             |

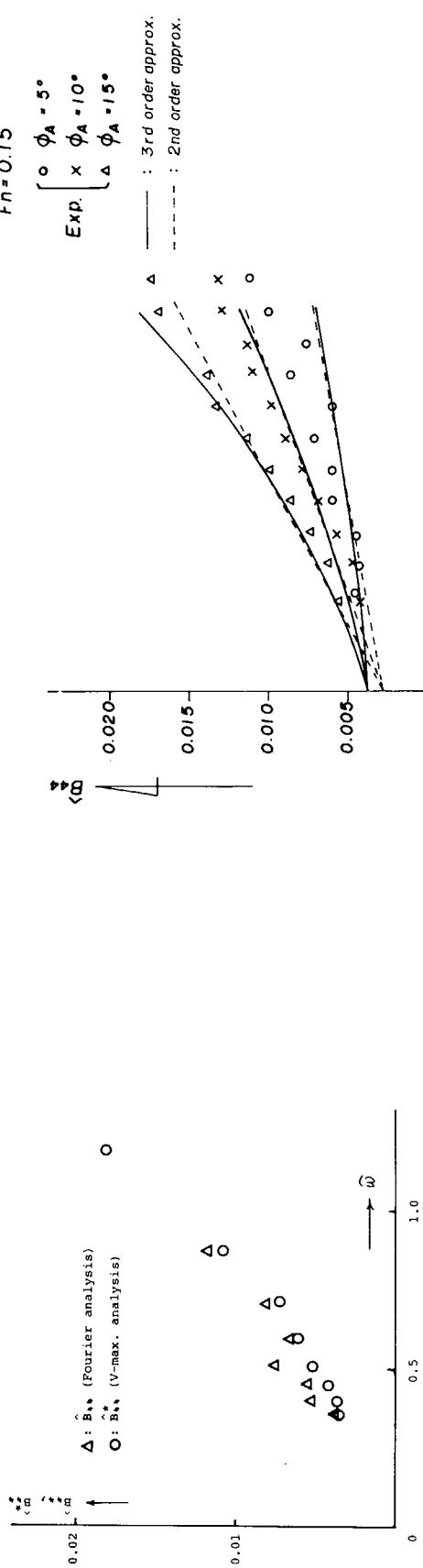


Fig. 1.2.1 Comparison between roll damping coefficients  $\hat{B}_{\alpha}^*$  and  $\hat{B}_{\beta}^*$ .

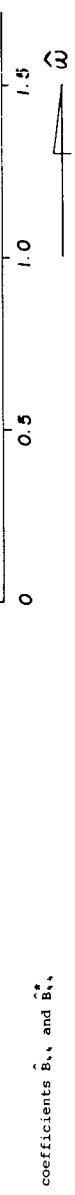


Fig. 1.2.3 (1) : Container ship with full load cond. at  $Fn=0.15$

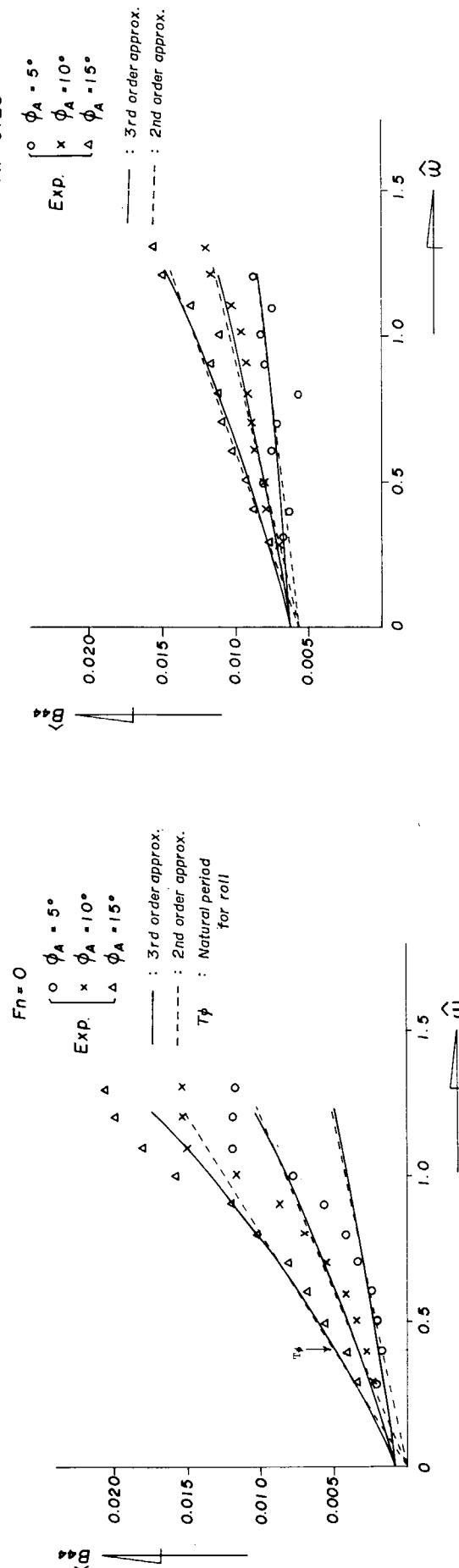


Fig. 1.2.2 (1) : Container ship with full load cond. at  $Fn=0$

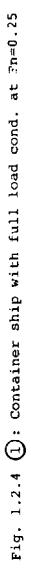


Fig. 1.2.4 (1) : Container ship with full load cond. at  $Fn=0.25$

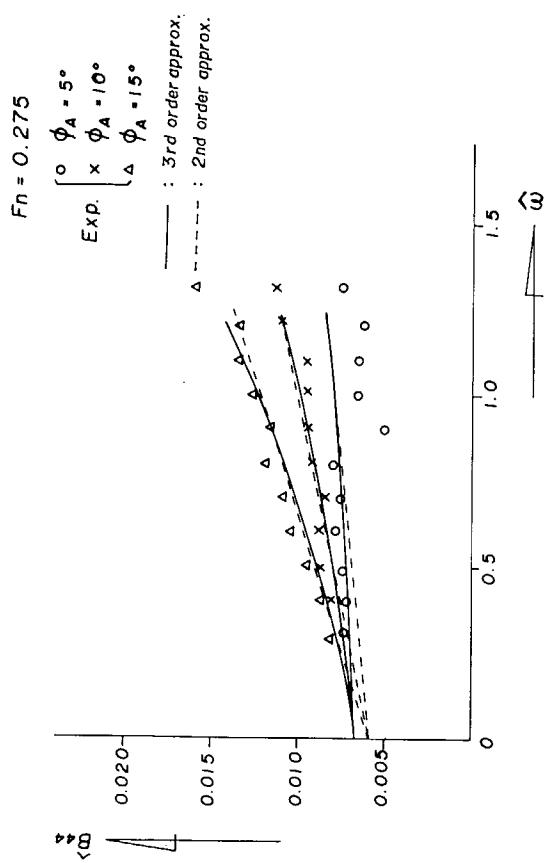


Fig. 1.2.5 (1) : Container ship with full load cond. at  $Fn=0.275$

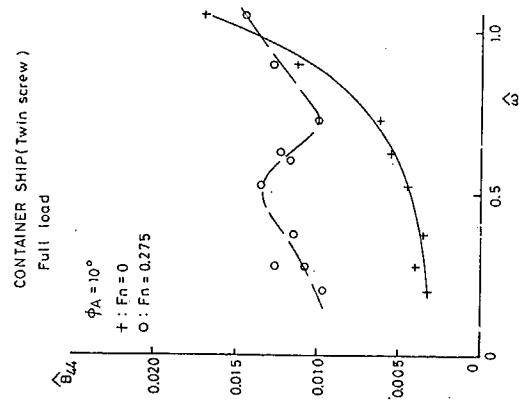


Fig. 1.2.7 (2) : Container ship with full load cond. at  $Fn=0$

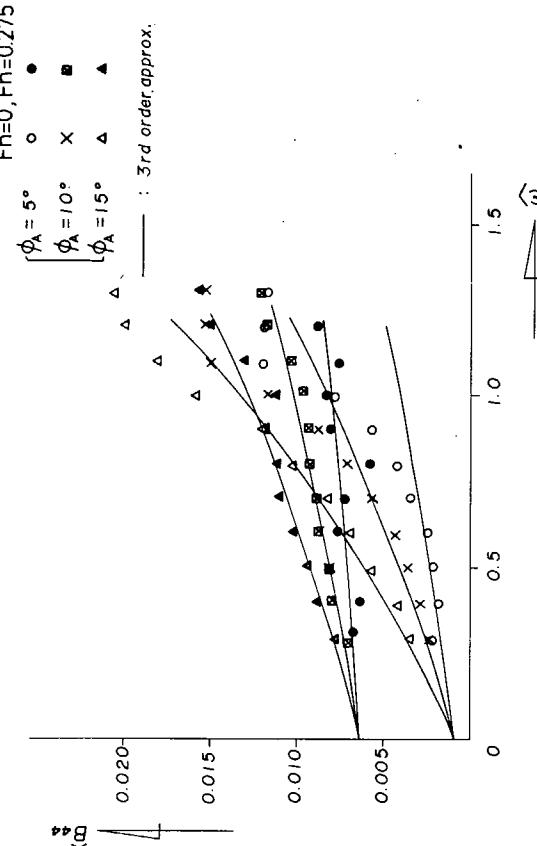


Fig. 1.2.6 (1) : Effect of forward speed on roll damping coefficient for container ship

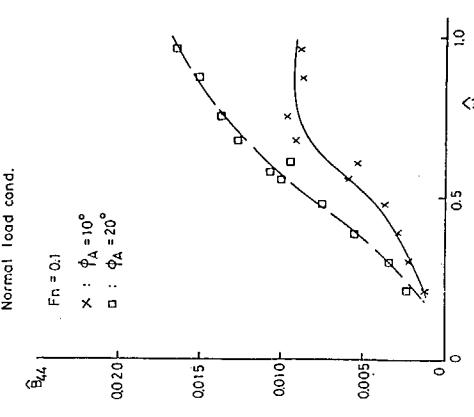


Fig. 1.2.8 (1) : Container ship with normal load cond. at  $Fn=0.1$

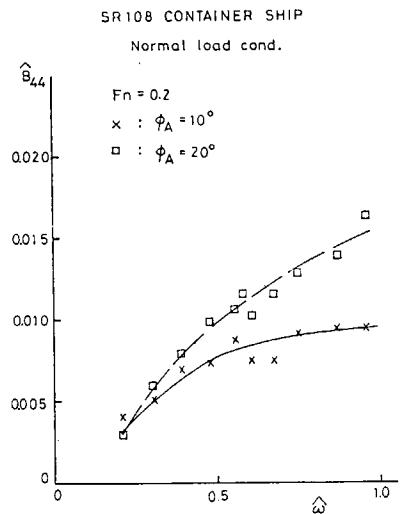


Fig. 1.2.9 ③: Container ship with normal load cond. at  $F_n = 0.2$

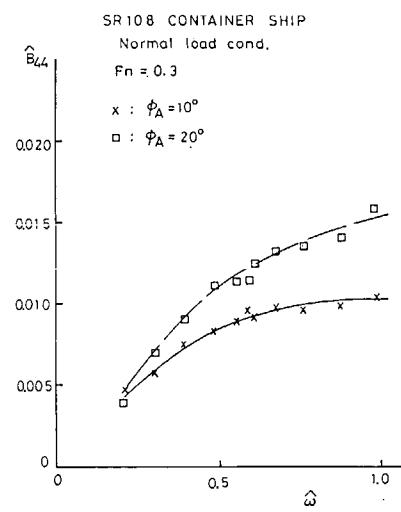


Fig. 1.2.10 ③: Container ship with normal load cond. at  $F_n = 0.3$

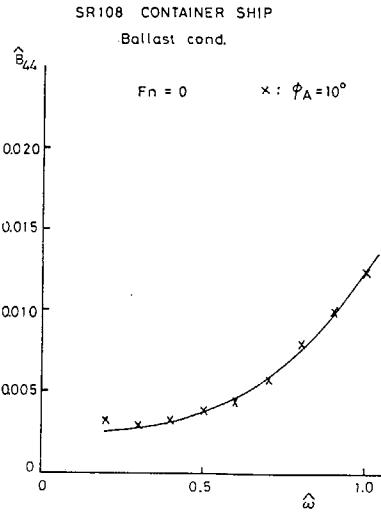


Fig. 1.2.11 ④: Container ship with ballast cond. at  $F_n = 0$

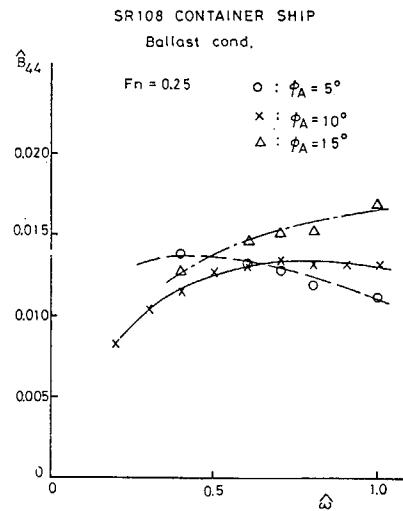


Fig. 1.2.12 ④: Container ship with ballast cond. at  $F_n = 0.25$

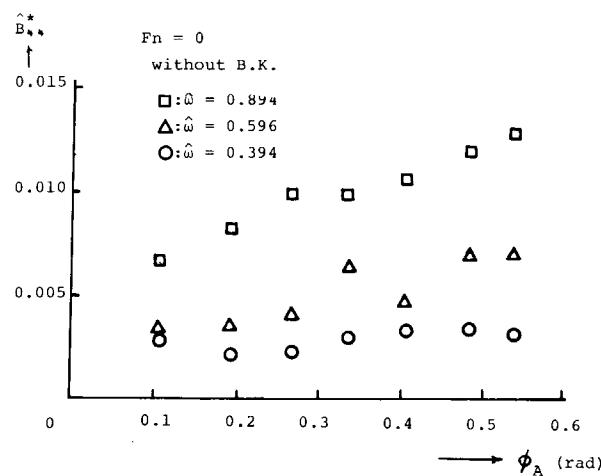


Fig. 1.2.13 ⑤: Container ship (SR-108) at  $F_n = 0$

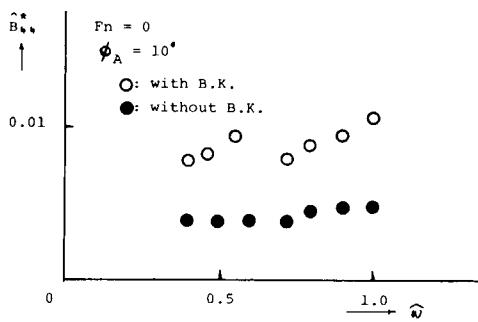


Fig. 1.2.14 (6): Container ship with ballast cond. at  $F_n=0$  (about G)

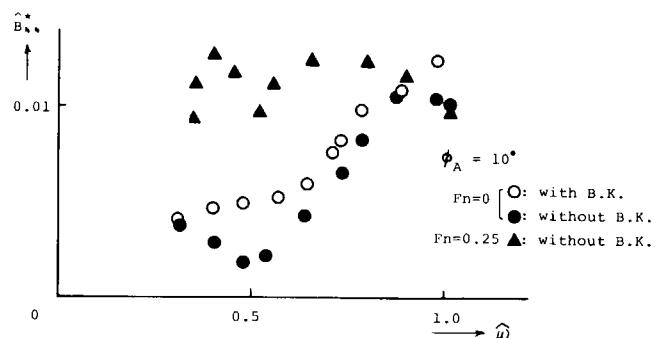


Fig. 1.2.16 (6): Container ship with ballast cond. at  $F_n=0, 0.25$  (about O)

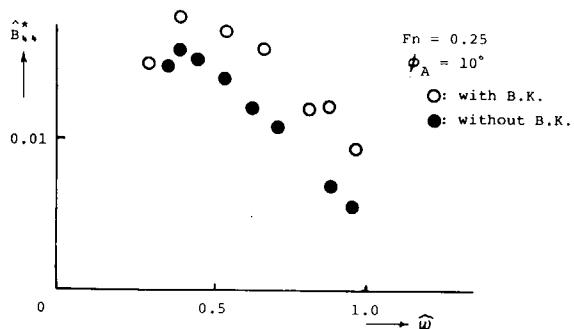


Fig. 1.2.15 (6): Container ship with ballast cond. at  $F_n=0.25$  (about G)

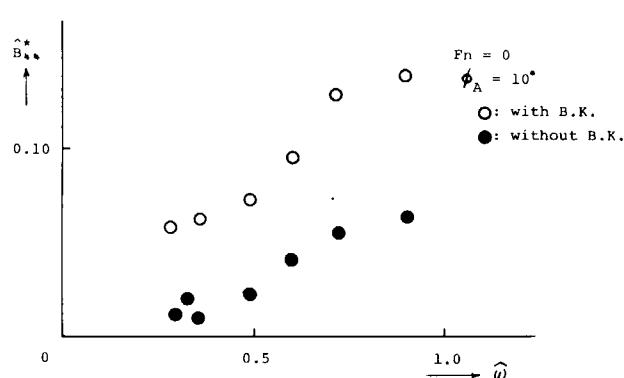


Fig. 1.2.17 (7): Series-60( $C_b=0.7$ ) with full load cond. at  $F_n=0$

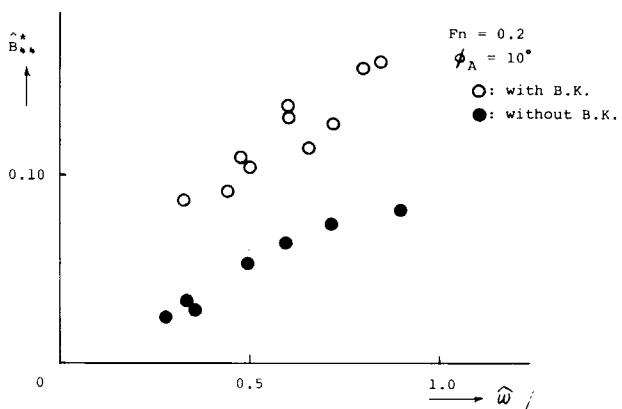


Fig. 1.2.18 (7): Series-60( $C_b=0.7$ ) with full load cond. at  $F_n=0.2$

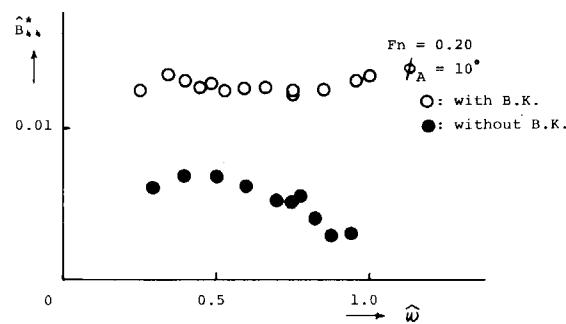


Fig. 1.2.20 (8): Series-60( $C_b=0.8$ ) with ballast cond. at  $F_n=0.2$  (about G)

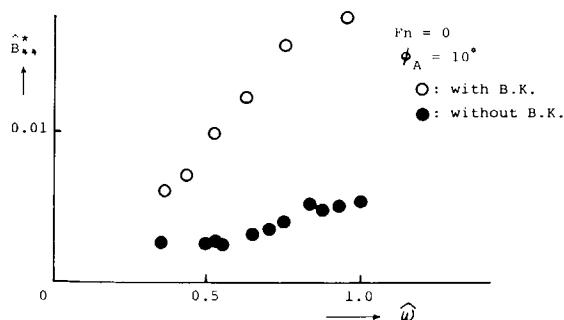


Fig. 1.2.19 (8): Series-60( $C_b=0.8$ ) with ballast cond. at  $F_n=0$  (about G)

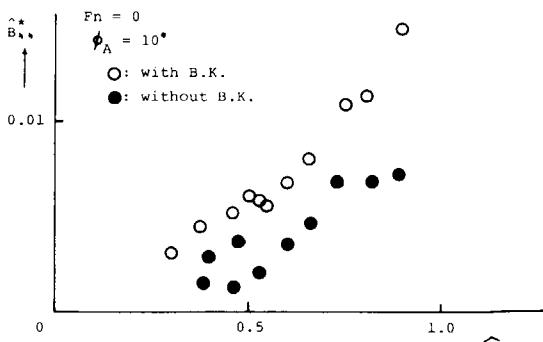


Fig. 1.2.21 (8): Series-60( $C_b=0.8$ ) with ballast cond. at  $F_n=0$  (about O)

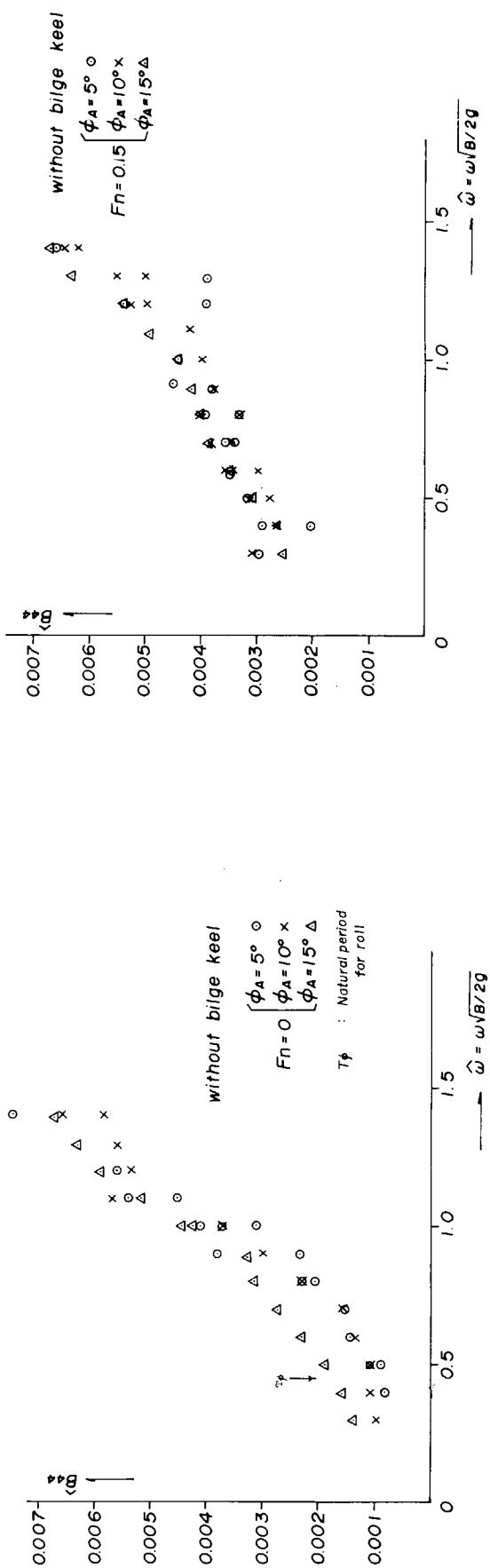


Fig. 1.2.22 (9) : Cargo ship with full load cond. at  $Fn=0$  (without B.K.)

Fig. 1.2.23 (9) : Cargo ship with full load cond. at  $Fn=0.15$  (without B.K.)

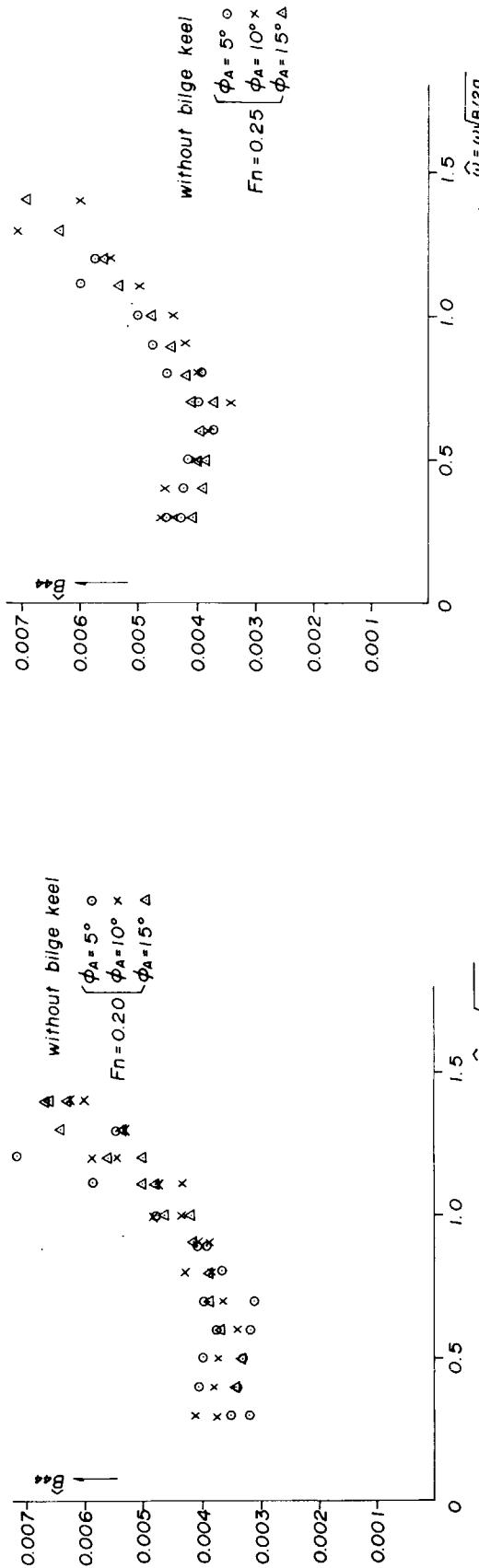


Fig. 1.2.24 (9) : Cargo ship with full load cond. at  $Fn=0.2$  (without B.K.)

Fig. 1.2.25 (9) : Cargo ship with full load cond. at  $Fn=0.25$  (without B.K.)

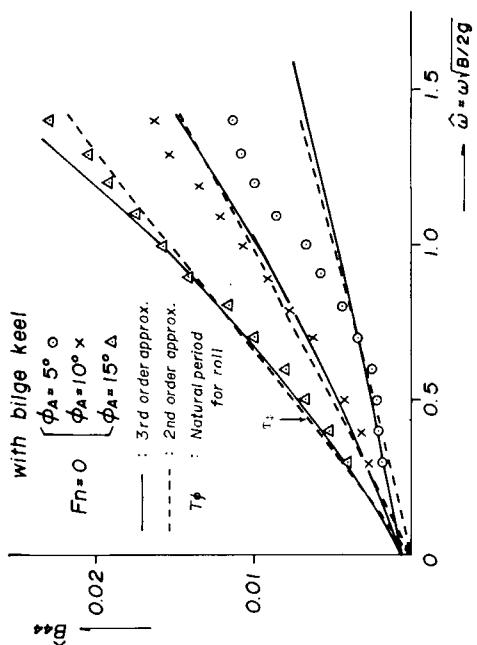


Fig. 1.2.26 ⑨ : Cargo ship with full load cond. at  $F_n=0$

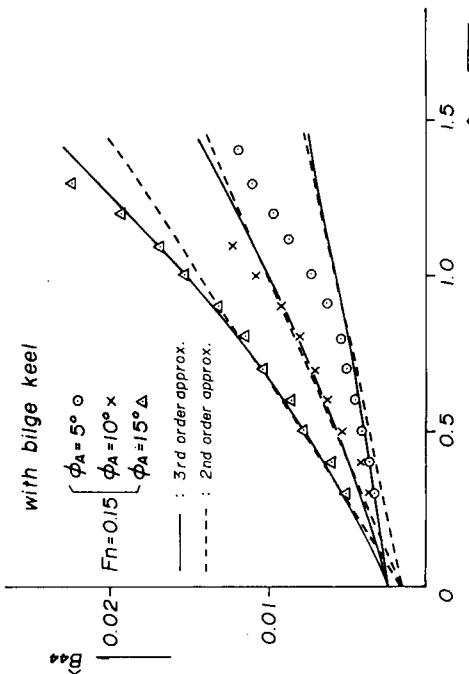


Fig. 1.2.27 ⑨ : Cargo ship with full load cond. at  $F_n=0.15$

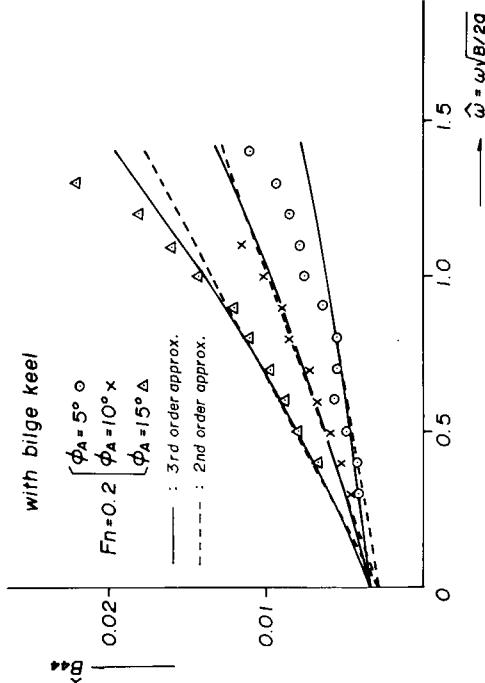


Fig. 1.2.28 ⑨ : Cargo ship with full load cond. at  $F_n=0.2$

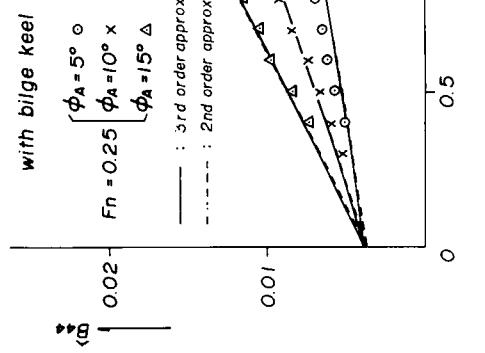
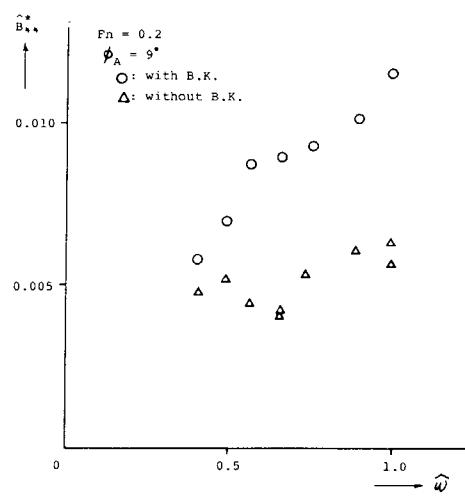
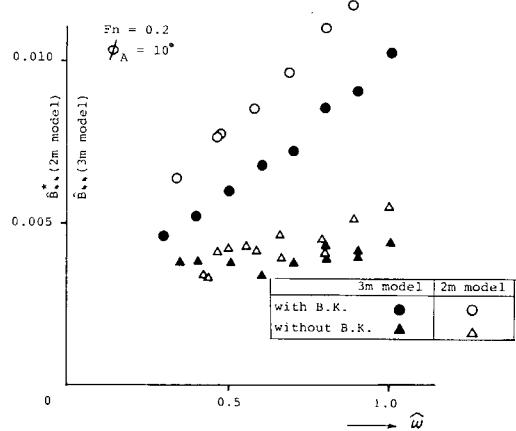
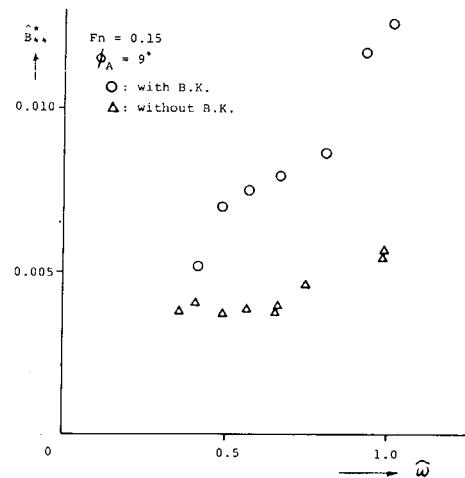
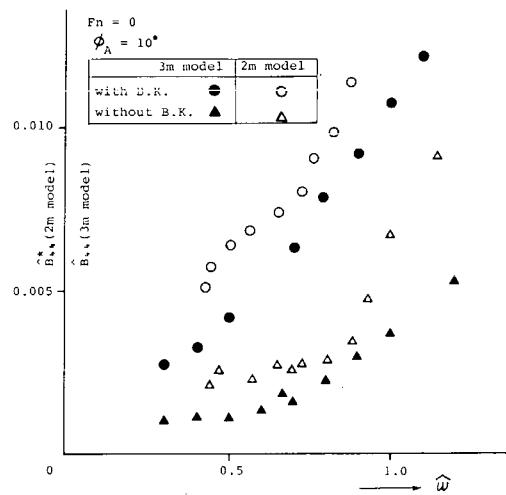


Fig. 1.2.29 ⑨ : Cargo ship with full load cond. at  $F_n=0.25$



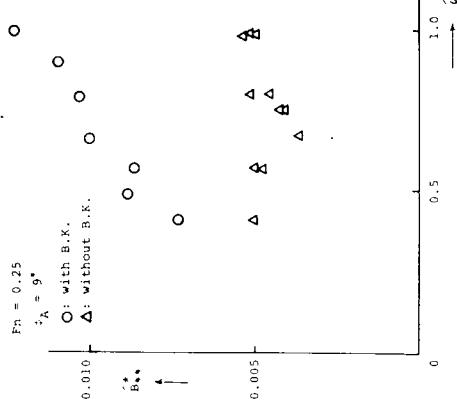


Fig. 1.2.34 (10) : Cargo ship with full load cond. at  $\text{Fn}=0.25$

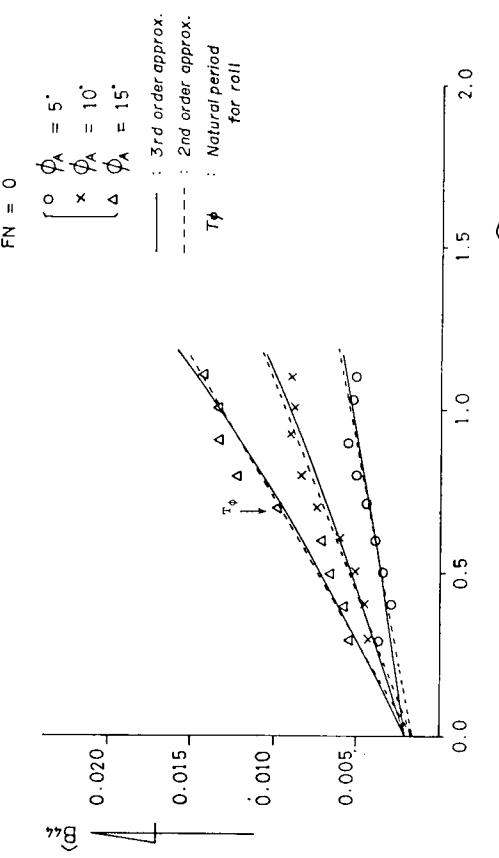


Fig. 1.2.35 (11) : Tanker with full load cond. at  $\text{Fn}=0$

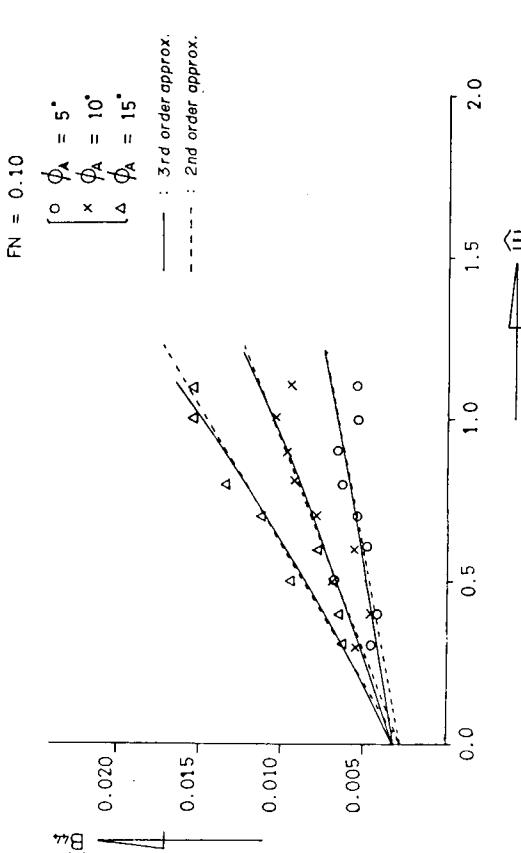


Fig. 1.2.36 (11) : Tanker with full load cond. at  $\text{Fn}=0.1$

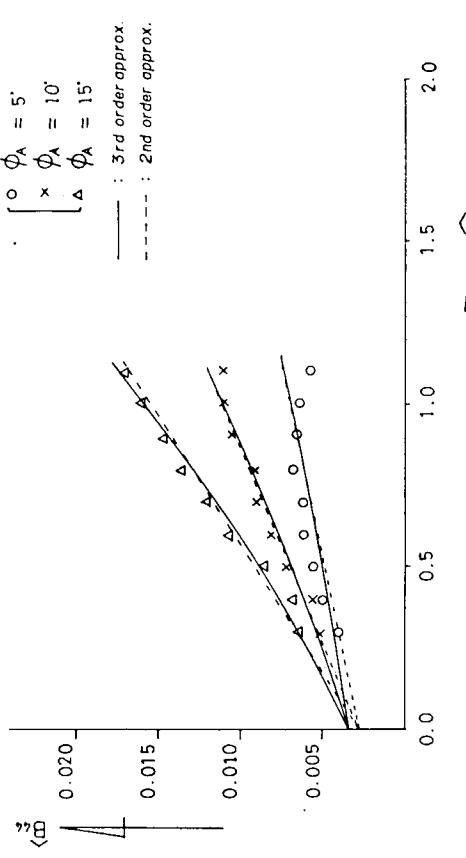


Fig. 1.2.37 (11) : Tanker with full load cond. at  $\text{Fn}=0.15$

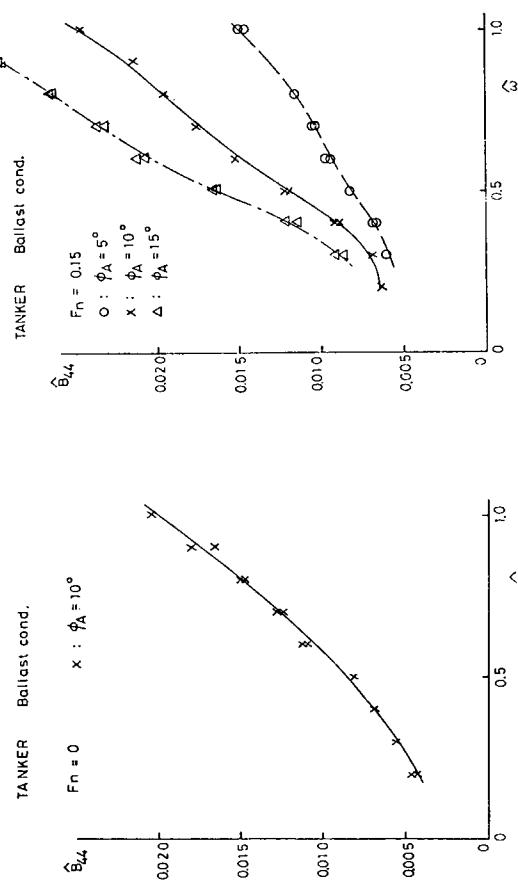


Fig. 1.2.39 (12) : Tanker with ballast cond. at  $F_n=0.15$

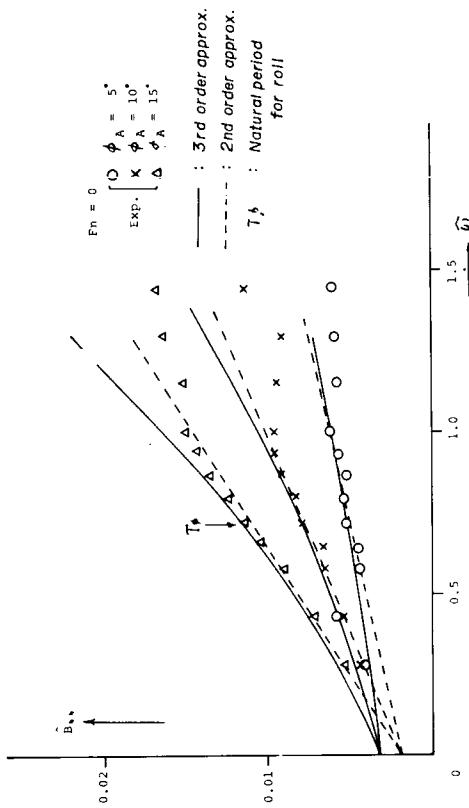


Fig. 1.2.41 (13) : Ore-carrier with full load cond. at  $F_n=0$

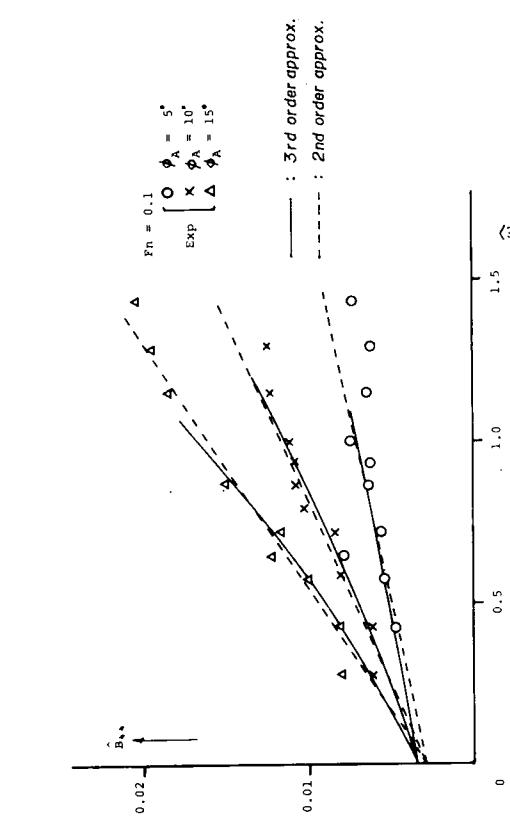


Fig. 1.2.43 (15) : Ferry at  $F_n=0$ ,  $0.318$

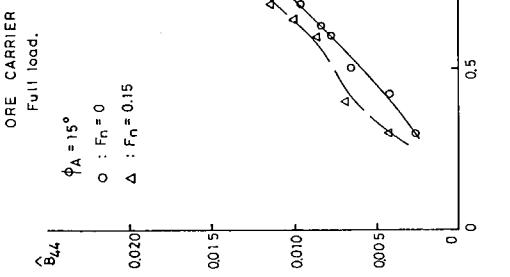


Fig. 1.2.45 (15) : Ore-carrier with full load cond. at  $F_n=0.15$

### 1.3 大角度過渡並びに大角度不規則強制横揺れ試験による横揺れ減衰係数

横揺れは減衰力が小さいため大振幅運動となりやすく、減衰係数は非線型性を有することは周知の事実である。

非線型性を有する系では、規則現象、過渡現象、不規則現象が伝達関数上で等価にならないことは明らかであるが、横揺れスペクトルは狭帯域となるため、大角度規則横揺れ運動における減衰係数の非線型性の評価が意味をもつることが推察され、規則強制横揺れ実験がなされている。

しかしながら、実海面で問題となる大角度不規則横揺れに対応するような不規則強制横揺れによって得られる減衰係数と、規則強制横揺れ、さらには過渡強制横揺れによるそれとが、どの程度一致するのかを検証した例はない。

ここでは、その点を模型実験により検証した例について解析方法をも交えて説明することにする。

#### 1.3.1 解析方法

実験は pure roll とし、次の横揺れ運動方程式を仮定する。

$$A_{44} \ddot{\phi} + B_1 \dot{\phi} + B_2 \dot{\phi} |\dot{\phi}| + C_1 \phi + C_3 \phi^3 = m(t) \quad (1.3.1)$$

ただし、 $C_1, C_3$ は復原力曲線より求められる。

(1.3.1)式の減衰係数及び復原力係数が適当な手法で等価線型化した係数  $B_{44E}, C_{44E}$  で次式

$$A_{44} \ddot{\phi} + B_{44E} \dot{\phi} + C_{44E} \phi = m(t) \quad (1.3.2)$$

のごとく書けるものとすれば  $A_{44}, B_{44E}$  は、

$$A_{44}(\omega) = [C_{44} - (M_0/\Phi_0) \cos \alpha] / \omega^2 \quad (1.3.3)$$

$$B_{44E}(\omega) = (M_0/\Phi_0) \sin \alpha / \omega \quad (1.3.4)$$

より求まる。ここで  $M_0, \Phi_0$  はモーメント及び横揺れの振幅、あるいはフーリエスペクトル振幅であり、 $\alpha$  は、それらの位相差である。非線型現象であっても、過渡あるいは不規則強制横揺れのタイムヒストリーから、揺れ角  $\phi(t)$  と反力  $m(t)$  の伝達関数の振幅比に相当する  $M_0(\omega)/\Phi_0(\omega)$ 、位相差に相当する  $\alpha(t)$  は、計算できるから、(1.3.4)式を形式的に適用することにより、なんらかの意味で等価線型化された減衰係数が求まることになる。

一方、(1.3.1)式が成立する系では、regularな場合は、エネルギー的な考察から次の関係(文献2)

$$B_{44E} = B_1 + \frac{8}{3\pi} (\omega \phi_0) B_2 \quad (1.3.5)$$

$$C_{44E} = C_1 + \frac{1}{2} C_3 \phi_0^2 \quad (1.3.6)$$

があることが、また不規則な場合もエネルギー誤差を最小にする、いわゆる最小偏差法により

$$B_{44E} = B_1 + \sqrt{\frac{8}{\pi} \sigma_{\dot{\phi}}^2 B_2} \quad (1.3.7)$$

$$C_{44E} = C_1 + 3 \sigma_{\dot{\phi}}^2 C_3 \quad (1.3.8)$$

なる関係があることが知られている(文献3)。ここで  $\sigma_{\dot{\phi}}^2, \sigma_{\phi}^2$  は各々横揺れ角の分散、横揺れ角速度の分散であり、中心周波数  $\omega_0$  の狭帯域スペクトルでは  $\sigma_{\dot{\phi}} \approx \omega \sigma_{\phi}$  なるゆえ(1.3.5)式との対応が理解されよう。

以上の関係を用いた減衰係数  $B_1, B_2$  及び見掛けの慣性モーメント  $A_{44}$  の解析方法を(1.3.1)式が完全に成立する系で数値実験により示そう。Fig. 1.3.1はフローダイヤグラムである。横揺れ角速度及び角加速度のタイムヒストリーは、数値微分でなくフーリエ逆変換を用いている。結果を(Fig. 1.3.2~5)に示すが、以降の図の中で用いている係数の無次元表示の定義は次のとおりである。

$$\hat{A}_{44} = A_{44} / \rho \Delta B^2 \quad (1.3.9)$$

$$\hat{B}_{44E} = (B_{44E}/\rho \Delta B^2) \cdot \sqrt{B/2g} \quad (1.3.10)$$

$$\hat{B}_1 = (B_1/\rho \Delta B^2) \cdot \sqrt{B/2g} \quad (1.3.11)$$

$$\hat{B}_2 = B_2/\rho \Delta B^2 \quad (1.3.12)$$

$$\hat{C}_{44E} = (C_{44}/\rho \Delta B^2) \cdot (\sqrt{B/2g})^2 \quad (1.3.13)$$

$$\hat{\omega} = \omega \cdot \sqrt{B/2g} \quad (1.3.14)$$

Fig. 1.3.2, 3 は各々、振幅一定、角速度振幅一定の過渡強制横揺れの例で、図中上段のタイムヒストリー  $\phi(t)$  を与えて、最初与えた  $B_1, B_2$  に基づいて反力の  $m(t)$  を計算し、(1.3.4) 式により、 $\hat{B}_{44E}$  を求めたものが折れ線である。図中の直線は、最初与えた  $B_1, B_2$  による (1.3.5) 式の、 $\phi_0$  をパラメータとする  $B_{44E}$  であり、振幅 ( $\phi_0$ ) 一定の過渡強制の場合は  $\hat{\omega}$  に関して右上りの、また、角速度振幅 ( $\omega\phi_0$ ) 一定の場合は  $\hat{\omega}$  に関して、水平の直線となる。両図とも、折れ線の平均特性と一致していることがわかる。したがって振幅一定の過渡強制の場合には  $\hat{B}_{44E}$  の平均線を最小 2 乗法により求めれば、 $\omega=0$  との交点が  $\hat{B}_1$  を、また、直線の傾斜  $\theta_1$  より  $B_2$  が

$$B_2 = \frac{3\pi}{8\phi_0} \tan \theta_1 \quad (1.3.15)$$

として求まる。同様にして、角速度振幅一定の場合は  $B_{44E}$  を  $\omega\phi_0$  ベースに整理した Fig. 1.3.4 より、 $\omega\phi_0=0$  での値が  $B_1$  を、直線の傾き  $\theta_2$  より  $B_2$  が

$$B_2 = \frac{3\pi}{8} \tan \theta_2 \quad (1.3.16)$$

として求まるわけである。

また、Fig. 1.3.5 は不規則強制横揺れの場合である。手法は Fig. 1.3.1 と同じであるが、ここでは横揺れのパワースペクトルを与え、位相をランダムにして、正弦波の合成により横揺れのタイムヒストリーを計算している。角速度及び角加速度は、合成前の正弦波の解析的な 1 回微分、2 回微分をしたものを使っているから数値微分は必要ないわけである。また、 $M/\rho$  はクロススペクトルより計算している。得られた折れ線の  $B_{44E}$  の  $\hat{\omega}$  ベースの平均をとった値を  $\sigma_\phi$  ベースにプロットしたのが Fig. 1.3.6 である。最初に与えた  $B_1, B_2$  による (1.3.7) 式の直線が再現できることがわかる。したがってこの場合も、 $\sigma_\phi=0$  での値より  $B_1$  が、直線の傾き  $\theta_2$  より

$$B_2 = \sqrt{\frac{\pi}{8}} \tan \theta_3 \quad (1.3.17)$$

として  $B_2$  が求まる。

以上により、過渡強制横揺れ並びに不規則強制横揺れにより得られた  $B_{44E}$  を、横揺れ角振幅  $\phi_0$ 、横揺れ角速度振幅  $\omega\phi_0$ 、または、横揺れ角速度分散のルート  $\sigma_\phi$  ベースに整理して直線近似し、(1.3.5) 式または、(1.3.7) 式を適用すれば直線の切片及び傾きより  $B_1, B_2$  が求まることがわかった。ただし、ここではこの解析方法が (1.3.1) 式で、表現され得る系で成立することを確かめたに過ぎないことに注意する必要があろう。また、 $B_1, B_2$  は一般的にはともに  $\omega, \phi_0$  の関数と考えられるが、 $B_{44E}$  の実用的な近似値を求めようという観点から、 $B_1$  は定数であるとし、また、 $B_2$  は前述の  $\omega$  ベースの整理方法の時は、 $\phi_0$  のみの関数として扱うことにする。したがって本来  $B_1$  に含まれる造波減衰力の周波数変化の効果は  $B_2$  の方に入ってくることになる。再解析された  $A_{44}$  に関しては、低周波数でかなり小さな値となり、運動方程式には入っていない負の付加質量がある形となっている。ここで (1.3.3) 式中の  $C_{44}$  の代わりに復原項の非線型を考慮した (1.3.6) 式あるいは (1.3.8) 式の  $C_{44E}$  を使えば Fig. 1.3.5 中の点線で示すごとく、修正され、与えた  $A_{44}$  の値に近づくことより、実験でも復原項の非線型性を考慮する必要があるわけである。

また、以上述べた数値実験では過渡横揺れのスペクトル、不規則横揺れのスペクトル等は、後述の実験とほぼ同じ

ものを使っていることを付記する。ただし、状態は、常用状態である。

### 1.3.2 実験結果

実験に使用したものは、SR108の57-175m型2m模型で実験条件をTable 1.3.1に示す。ここでは満載と常用の2状態がある。実験装置の概略はFig. 1.3.7である。強制横揺れさせるサーボモータは回転軸直結としている。また、没水角最大可能揺れ角をFig. 1.3.8に示す。振幅一定及び角速度振幅一定の過渡強制フーリエスペクトルの例を、Fig. 1.3.9, 10に、また、不規則強制横揺れのパワースペクトルの例をFig. 1.3.11に示す。おのおのの実験による $B_{44E}$ はFig. 1.3.12~14に例を示すように周波数ベースに、数値実験でも見られたようなハンプ・ホールが見られるが、さきに述べた平均線を用いる解析によればほぼ一定の傾向をもつ $B_1$ ,  $B_2$ が得られる。結果は横揺れ角ベース、フルード数 $F_n$ ベースで、Fig. 1.3.15~18ならびにTable 1.3.2にまとめて示す。

$B_1$ については、フルード数が同じであればほぼ同一の値となったので、過渡及び不規則強制の結果をまとめて、 $F_n$ ベースに直線的に変化する一本の線で整理した。一方、そのような $B_1$ をもとにした $F_n$ ベースの $B_2$ には、規則強制横揺れからもいわれている、 $B_2$ の値が $F_n$ の増大とともに減少する傾向がはっきりと出ている。

横揺れ角 $\phi_0$ ベースにまとめたFig. 1.3.17, 18の中には本来 $\phi_0$ ベースでは表現できない $\omega - \phi_0 = \text{const.}$ の過渡強制横揺れ及びirregularの結果も参考として水平線で記入してある。 $\phi_0 = \text{const.}$ であるような過渡強制による $B_2$ は細かくみると満載状態の場合と常用状態の場合とで若干傾向が違うが、 $F_n$ の増大とともに右下りの傾向が弱まる点では一致している。

いずれにしてもこの図程度の傾向の違いは全体の $B_{44E}$ にはあまり効いてこず、 $\phi_0$ ベースで見ると、 $B_2$ は大略一定であると見て差しつかえないようである。その点を立体的に示したのがFig. 1.3.19~25の( $\hat{\omega} - \phi_0 - B_{44E}$ )図である。奥行きが揺れ角となっている。1点鎖線は不規則強制によって得られた $B_1$ ,  $B_2$ を(1.3.5)式にあてはめて表現したもので、過渡強制と不規則強制の結果が全体の $B_{44E}$ という点ではかなり一致するという結果を示しているといえよう。

また、規則強制による結果も、対応できる満載状態の場合についてFig. 1.3.22に示してあるが、これもかなりよく一致しているといえよう。ただしこの場合規則強制横揺れは片振幅15°位であり、それ以上の大角度での程度一致するかは明らかでない。

Fig. 1.3.26は、 $F_n = 0.275$ の不規則強制横揺れについて、 $B_{44E}$ を得た実験での最大揺れ角、有義揺れ角、平均揺れ角を横軸にとって $B_{44E}$ を置点したものである。2点鎖線と規則強制横揺れの実験とが比較的近いことからさきに示した実験では、横揺れの統計量のうち最大揺れ角( $\phi_{\max}$ )を規則横揺れの場合の $\phi_0$ とみなせば不規則横揺れの減衰係数をある程度推定できることが推察される。

以上本節の冒頭で述べたように、従来規則強制横揺れではなされていない大角度の過渡強制、ならびに大角度の不規則強制横揺れにおける減衰係数が等価線型減衰係数により対応づけられることを示した。またこの点からみると、線型な現象の場合に偉力を發揮する過渡強制実験が非線型の場合も使用可能といえよう。ただし、これはあくまで数例であって通常の船型について一般的にいえるかどうかはさらに実験による検証の積み重ねが必要であろう。

### 参考文献

- 1) 日本造船研究協会 161 研究部会；船舶の波浪中性能推定の精度向上とその実証に関する研究報告書、研究資料、No. 275, 昭和 52 年 3 月
- 2) 高木幹雄、田才福造；横運動方程式の流体力について、西部造船会会報 第 46 号、昭和 48 年 8 月
- 3) Kaplan, R; Lecture Notes on Non-Linear Theory of Ship Roll Motion in a Random Seaway, Proc. 11th I.T.T.C. Tokyo 1966

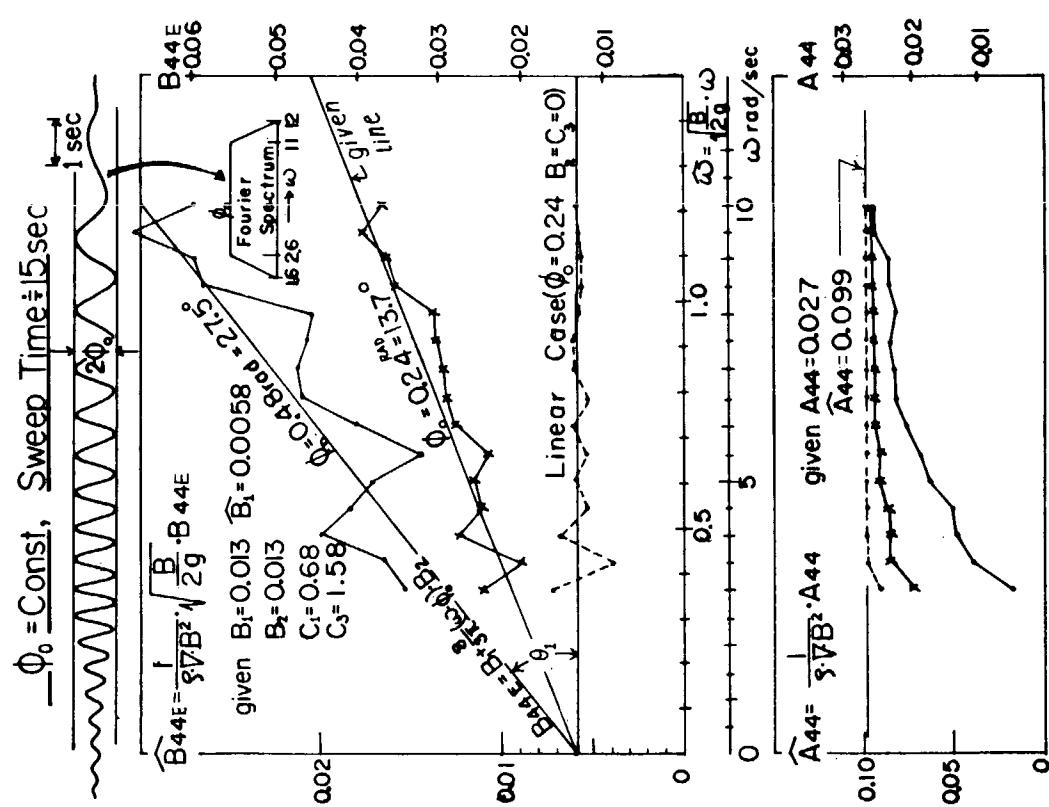


Fig. 1.3.2 An example of so-called equivalently linearized damping coefficient  $B_{44}$  and  $A_{44}$  obtained from simulation of forced transient roll.  
(Amplitude const.)

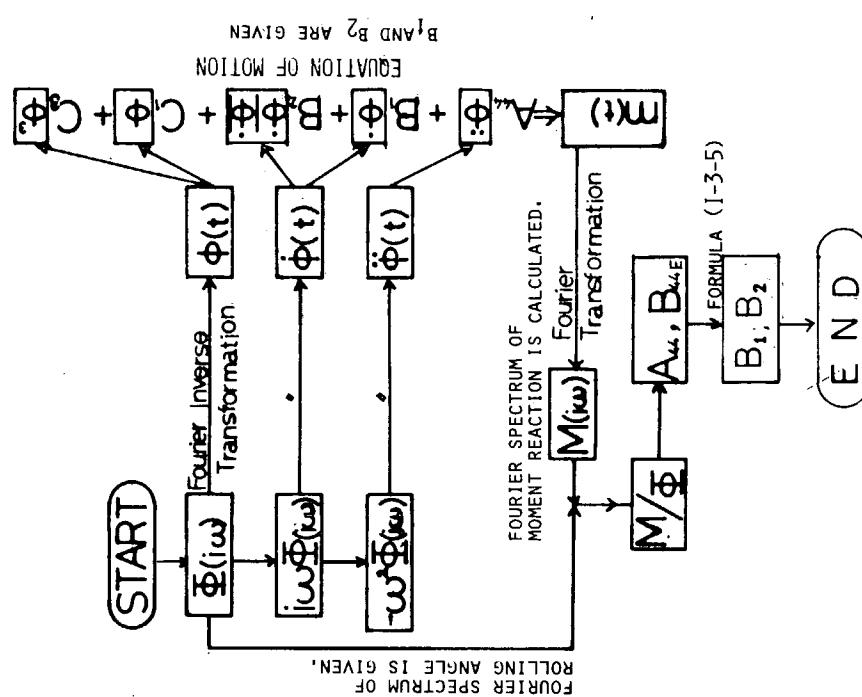


Fig. 1.3.1 Flow diagram of forced roll simulation for confirming the analyzing process of  $B_1$  and  $B_2$

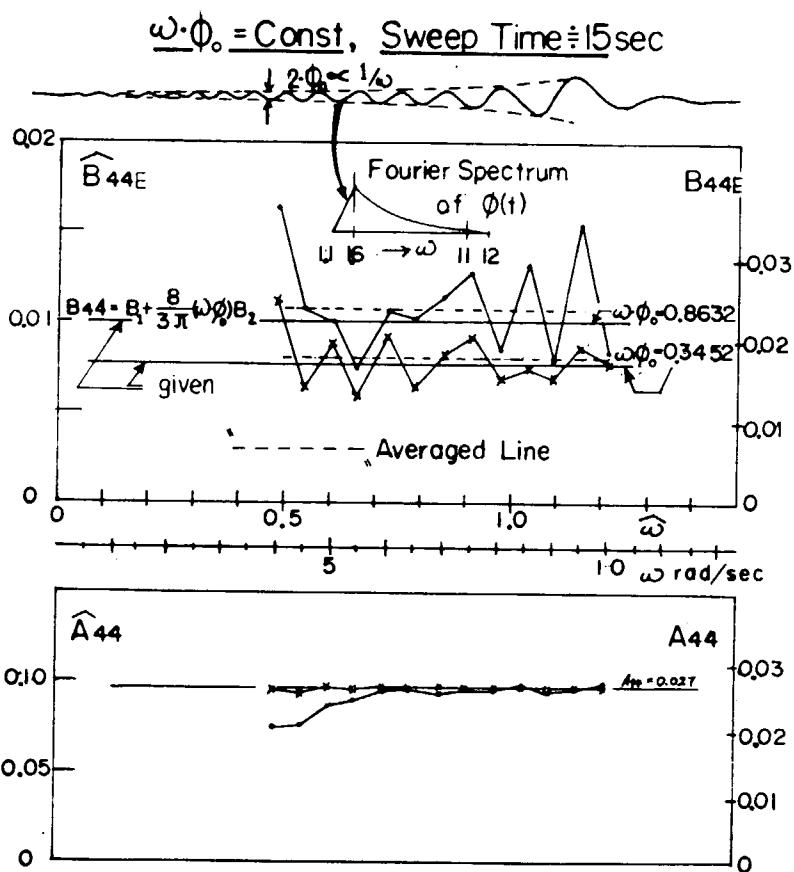


Fig. 1.3.3 An example of  $B_{44}$  and  $A_{44}$  obtained from simulation of forced transient roll.  
 (Amplitude of angular velocity is const.)

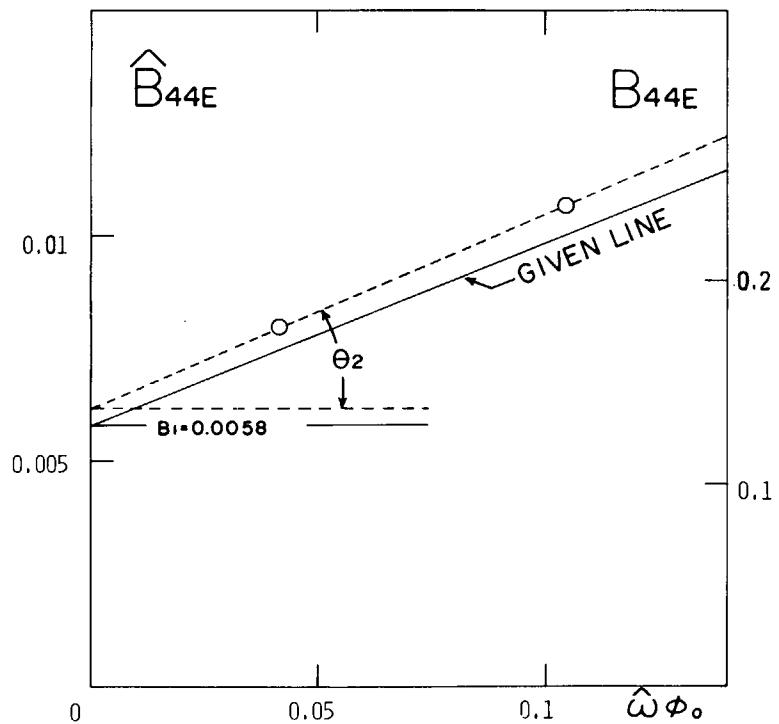


Fig. 1.3.4 Comparison of given  $B_{44E}$  and the obtained  $B_{44E}$  from Fig. 1.3.3

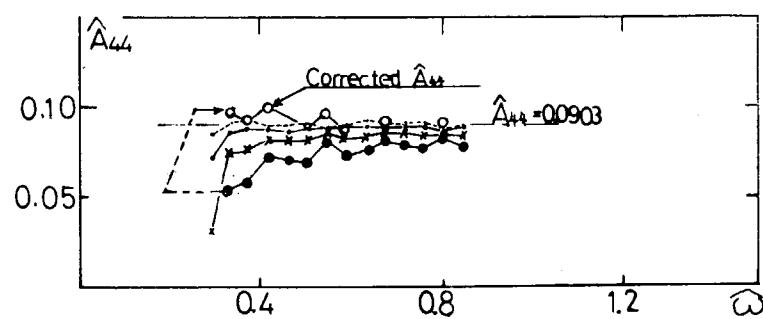
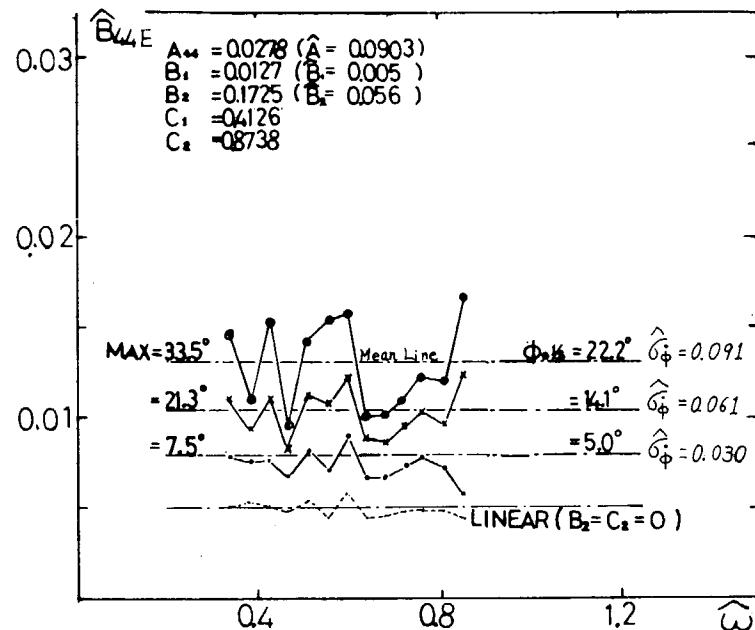


Fig. 1.3.5 An example of  $\hat{B}_{44}$  and  $\hat{A}_{44}$  obtained from simulation of forced irregular roll.

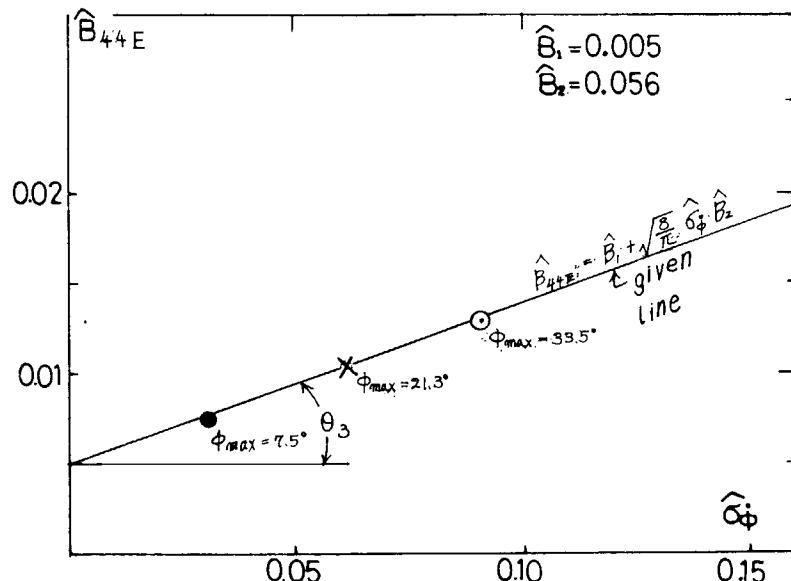


Fig. 1.3.6 Comparison of given  $\hat{B}_{44}$  and the obtained  $\hat{B}_{44}$  from Fig. 1.3.5

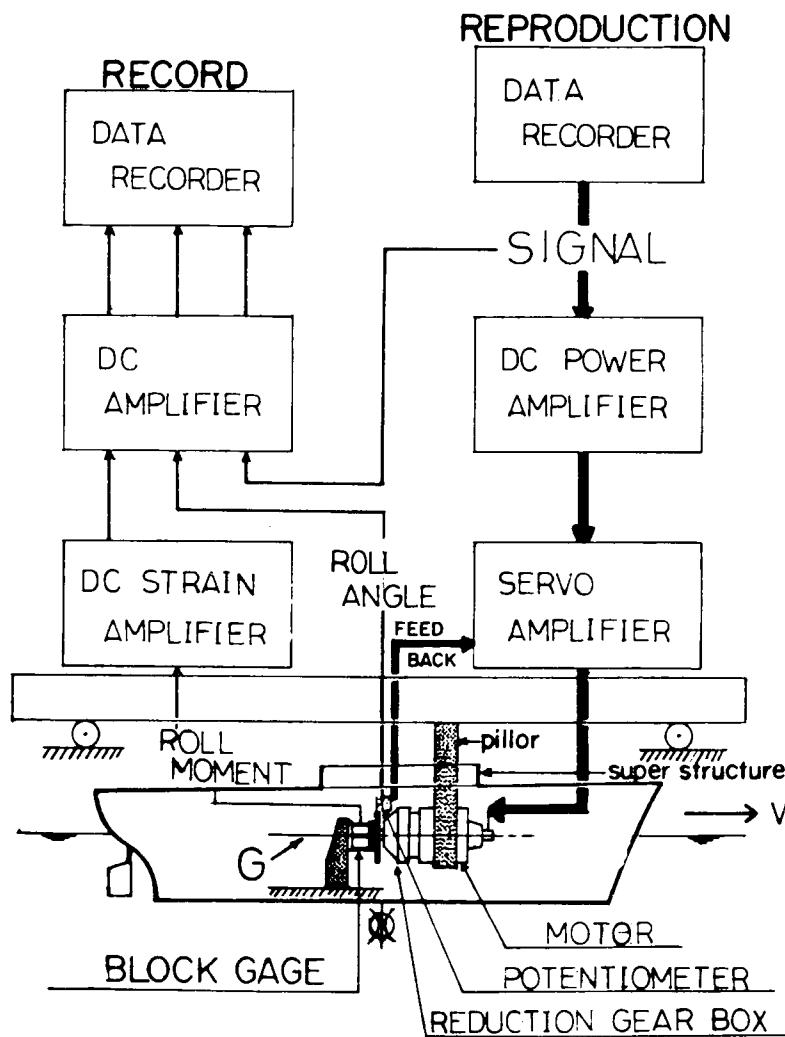


Fig. 1.3.7 Flow diagram of the controlling signal and recorded data of forced roll experiment.

Table 1.3.1 Principal dimensions and experimental conditions of model ship.

| SR-108-S7 ; Scale=2/175<br>Ship Form          | Full Load Condition  | Normal Condition     |
|---|----------------------|----------------------|
| L   | 2.000 (m)            | 2.000 (m)            |
| B   | 0.290 (m)            | 0.290 (m)            |
| D   | 0.176 (m)            | 0.176 (m)            |
| d   | 0.1086(m)            | 0.0971(m)            |
| Trim  | 0.0 (m)              | 0.0 (m)              |
| $C_b$   | 0.570                | 0.559                |
| $\nabla$                                      | 0.0359( $m^3$ )      | 0.0315( $m^3$ )      |
| Rolling Period T (in Water)                   | 1.630(sec)           | 1.245(sec)           |
| Rolling Frequency                             | $\omega_\phi$        | 5.047( $rad/s$ )     |
| Nondimensional Roll.Freq. $\hat{\omega}_\phi$ | 0.4688               | 0.6139               |
| KM  | 0.1202(m)            | 0.1187(m)            |
| GM  | 0.0116(m)            | 0.0216(m)            |
| $KG=d$  | 0.1086(m)            | 0.0971(m)            |
| $K_{xx}/B$ in Water at $F_n=0$                | 0.302                | 0.315                |
| $K_{xx}/B$ in Air                             | 0.273                | 0.289                |
| Bilge Keel : Length= $L_{pp}/4$<br>Breadth    | 0.5 (m)<br>0.0051(m) | 0.5 (m)<br>0.0051(m) |
| Rudder  | with                 | with                 |

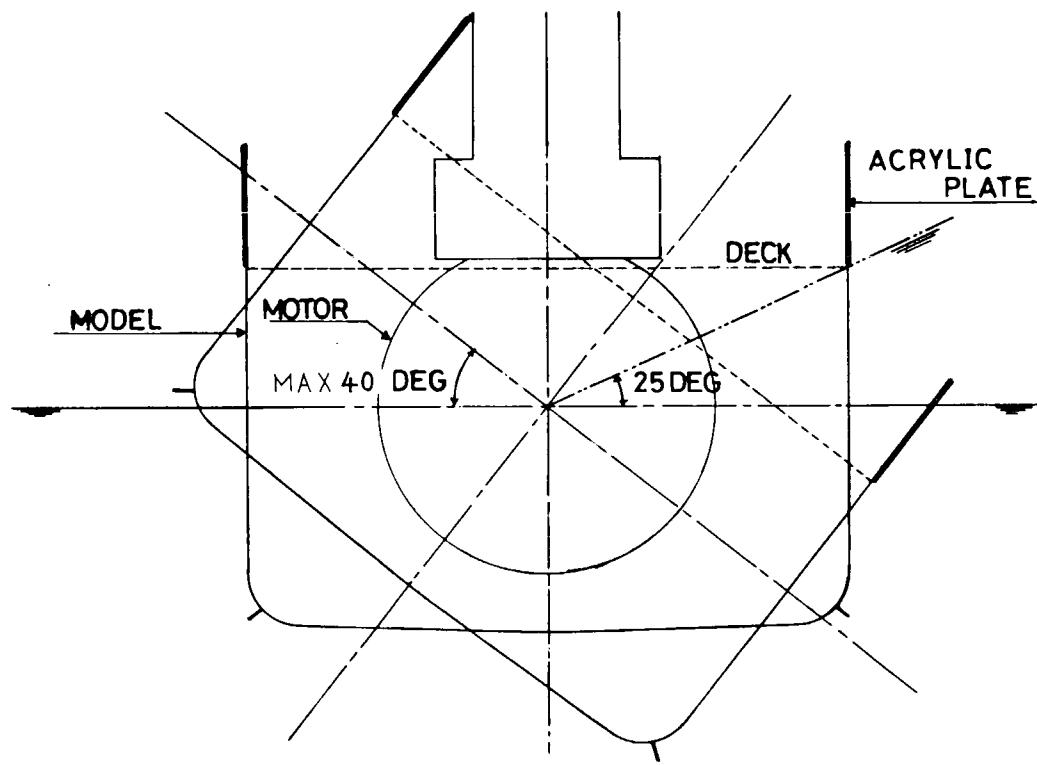


Fig. 1.3.8 Limitation of rolling angle.

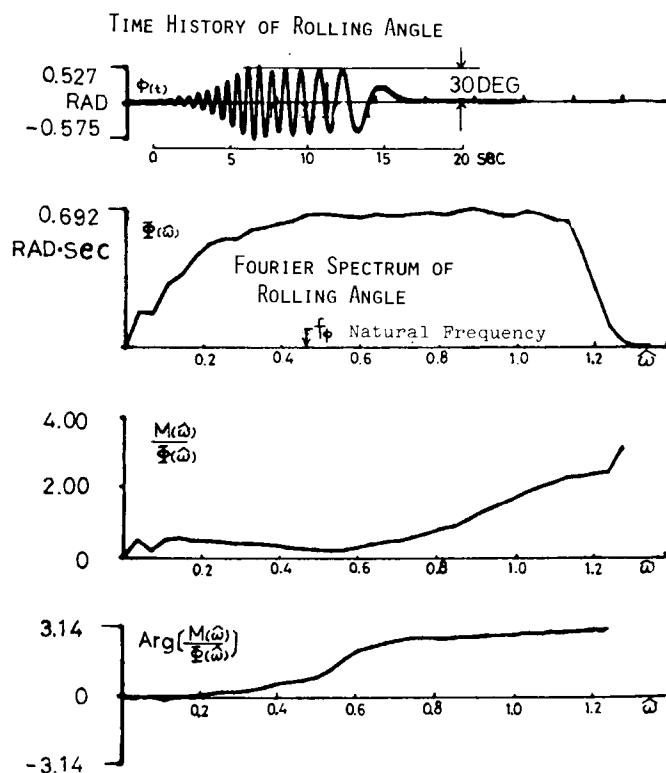


Fig. 1.3.9 An example of experiment of forced transient roll. ( $\phi_0 = \text{constant case}$ )

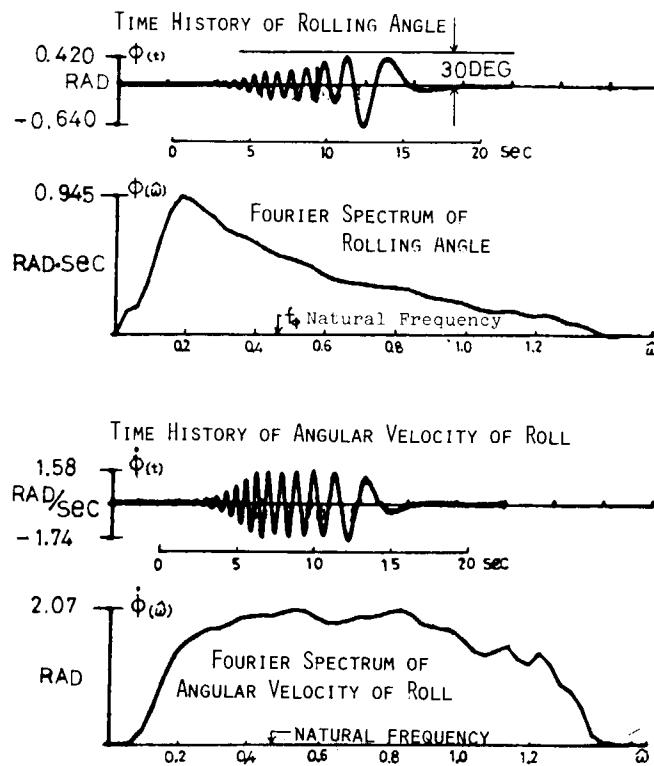


Fig. 1.3.10 An example of experiment of forced transient roll. ( $\omega\phi_0 = \text{constant case}$ )

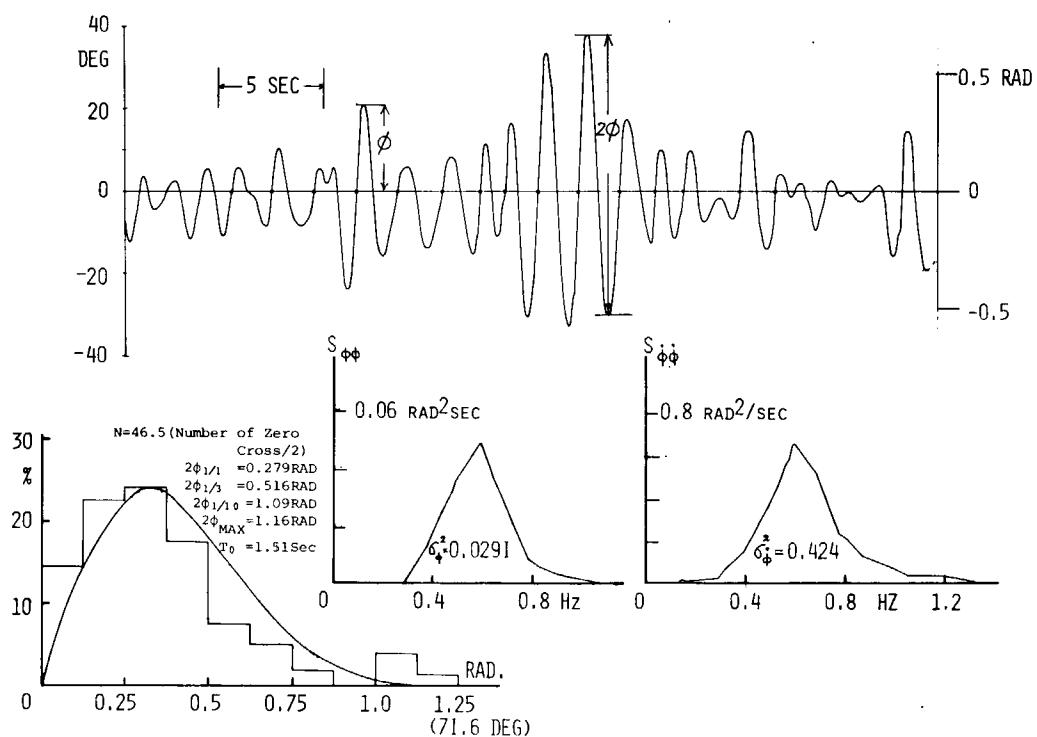


Fig. 1.3.11 An example of experiment of large amplitude forced irregular roll.

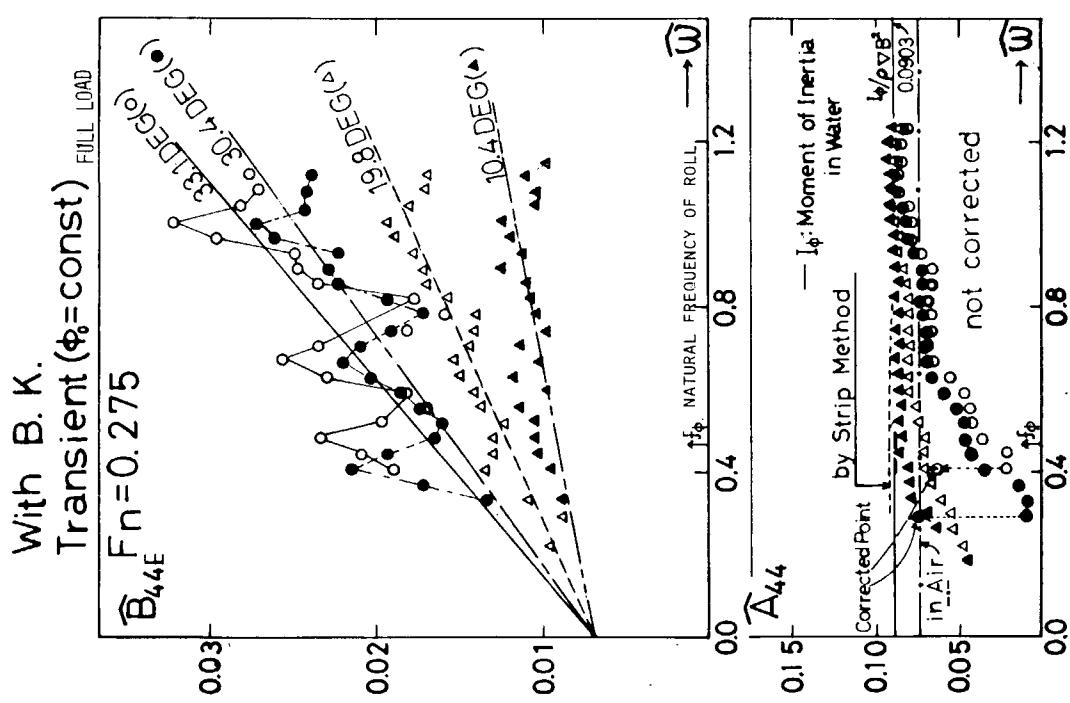


Fig. 1.3.12 An example of so-called equivalent linearized damping coefficient  $\hat{B}_{44}$  and  $\hat{A}_{44}$  obtained from forced roll.

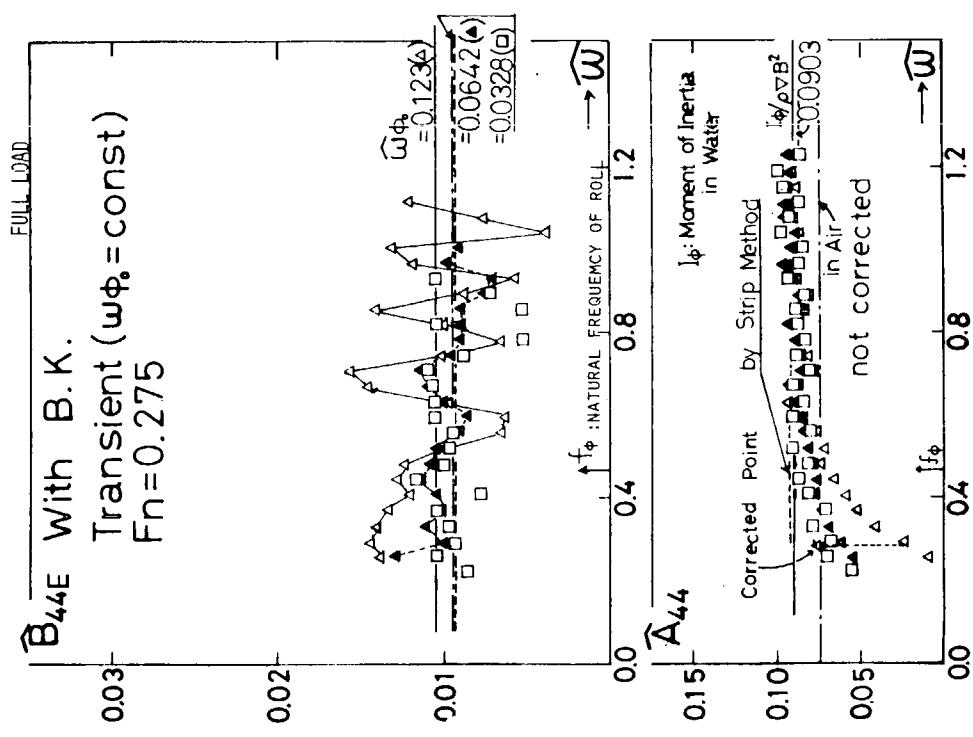
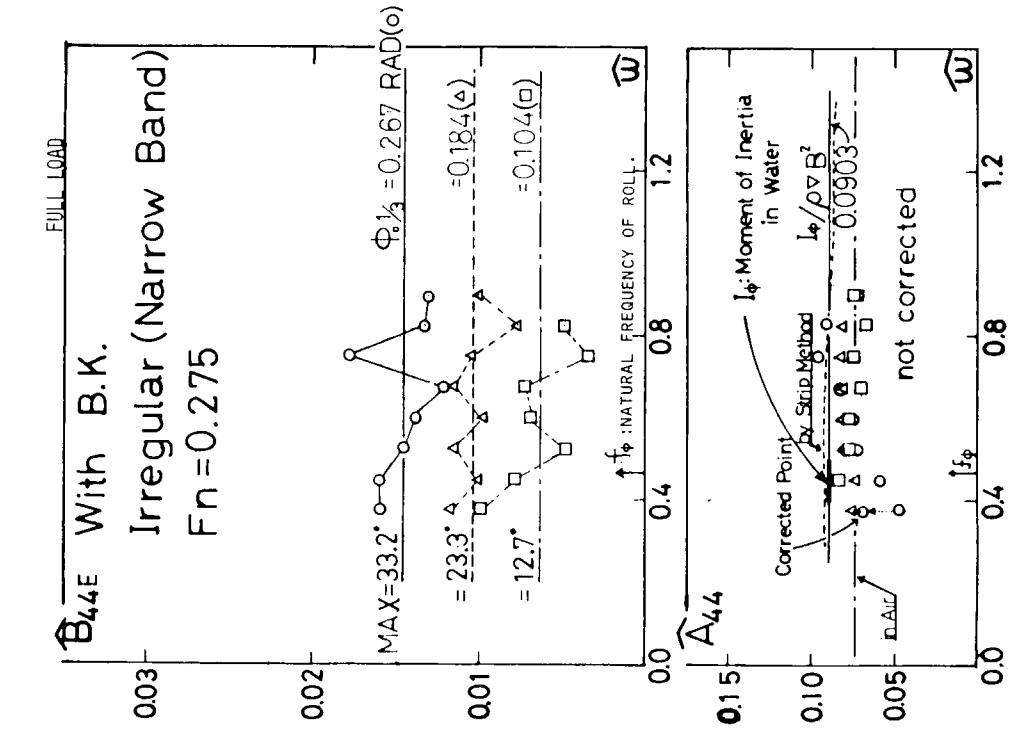
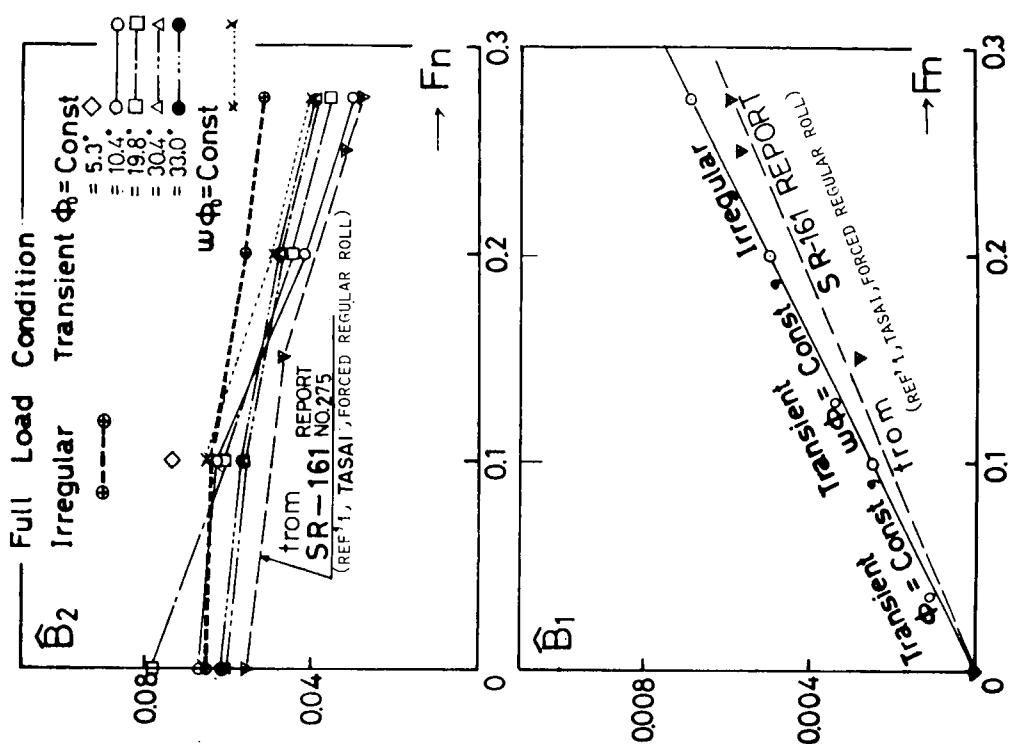
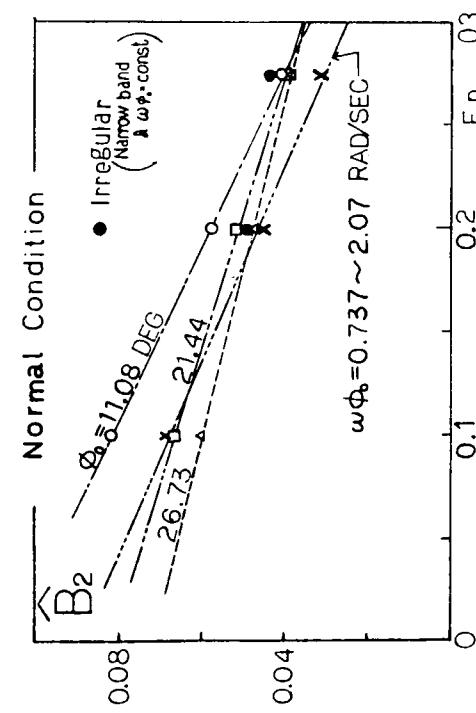


Fig. 1.3.13 An example of  $\hat{B}_{44}$  and  $\hat{A}_{44}$  obtained from experiment of forced transient roll. ( $\omega\phi_0 = \text{constant case}$ )



- 47 -





- 48 -

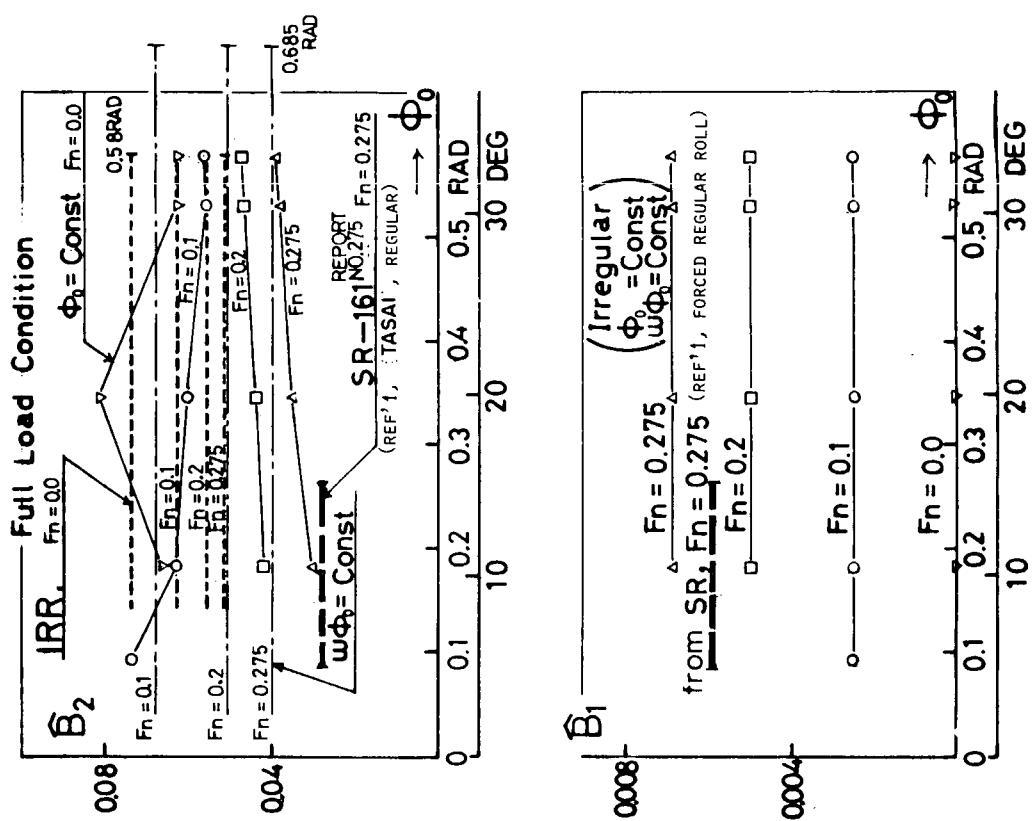


Fig. 1.3.16 Final result of obtained  $\hat{B}_1$  and  $\hat{B}_2$  vs. Froude number for the normal load condition.

Fig. 1.3.17 Final result of obtained  $\hat{B}_1$  and  $\hat{B}_2$  vs. rolling angle. (full load condition)

Table 1.3.2 Table of final results of damping coefficient  $\hat{B}_1, \hat{B}_2$  obtained from the forced transient and the forced irregular roll experiments.

|       |                  | (Transient) |             |             |                |             |             | Container Ship, Full Load Condition (Irregular) |             |             |                  |             |             |                  |             |             |                  |        |  |
|-------|------------------|-------------|-------------|-------------|----------------|-------------|-------------|---|-------------|-------------|------------------|-------------|-------------|------------------|-------------|-------------|------------------|--------|--|
|       |                  | $\phi_0$    |             |             | 5.3°<br>(≈ 5°) |             |             | 10.4°<br>(≈ 10°)                                |             |             | 19.8°<br>(≈ 20°) |             |             | 30.4°<br>(≈ 30°) |             |             | 33.1°<br>(≈ 35°) |        |  |
| Fn    | COEFF            | $\hat{B}_1$ | $\hat{B}_2$ | $\hat{B}_1$ | $\hat{B}_2$    | $\hat{B}_1$ | $\hat{B}_2$ | $\hat{B}_1$                                     | $\hat{B}_2$ | $\hat{B}_1$ | $\hat{B}_2$      | $\hat{B}_1$ | $\hat{B}_2$ | $\hat{B}_1$      | $\hat{B}_2$ | $\hat{B}_1$ | $\hat{B}_2$      |        |  |
| 0.0   | Fig.<br>(1-3-19) | 0.0         | $\hat{B}_1$ | 0.0000      | 0.0000         | 0.0000      | 0.0000      | 0.0000  | 0.0000      | 0.0000      | 0.0000           | 0.0000      | 0.0000      | 0.0000           | 0.0000      | 0.0000      | 0.0000           | 0.0000 |  |
| 0.1   | Fig.<br>(1-3-20) | 0.025       | $\hat{B}_1$ | 0.0025      | 0.0025         | 0.0025      | 0.0025      | 0.0025  | 0.0025      | 0.0025      | 0.0025           | 0.0025      | 0.0025      | 0.0025           | 0.0025      | 0.0025      | 0.0025           | 0.0025 |  |
| 0.2   | Fig.<br>(1-3-21) | 0.19        | $\hat{B}_1$ | 0.0050      | 0.0050         | 0.0050      | 0.0050      | 0.0050  | 0.0050      | 0.0050      | 0.0050           | 0.0050      | 0.0050      | 0.0050           | 0.0050      | 0.0050      | 0.0050           | 0.0050 |  |
| 0.275 | Fig.<br>(1-3-22) | 0.275       | $\hat{B}_1$ | 0.0419      | 0.0444         | 0.0444      | 0.0444      | 0.0444  | 0.0444      | 0.0444      | 0.0444           | 0.0444      | 0.0444      | 0.0444           | 0.0444      | 0.0444      | 0.0444           | 0.0444 |  |

|       |                  | (Transient) |             |             |                |             |             | Container Ship, Normal Condition (Irregular) |             |             |                  |             |             |                  |             |             |             |        |
|-------|------------------|-------------|-------------|-------------|----------------|-------------|-------------|--|-------------|-------------|------------------|-------------|-------------|------------------|-------------|-------------|-------------|--------|
|       |                  | $\phi_0$    |             |             | 5.3°<br>(≈ 5°) |             |             | 11.1°<br>(≈ 10°)                             |             |             | 21.4°<br>(≈ 20°) |             |             | 26.7°<br>(≈ 30°) |             |             |             |        |
| Fn    | COEFF            | $\hat{B}_1$ | $\hat{B}_2$ | $\hat{B}_1$ | $\hat{B}_2$    | $\hat{B}_1$ | $\hat{B}_2$ | $\hat{B}_1$                                  | $\hat{B}_2$ | $\hat{B}_1$ | $\hat{B}_2$      | $\hat{B}_1$ | $\hat{B}_2$ | $\hat{B}_1$      | $\hat{B}_2$ | $\hat{B}_1$ | $\hat{B}_2$ |        |
| 0.1   | Fig.<br>(1-3-23) | 0.1         | $\hat{B}_1$ | 0.0025      | 0.0025         | 0.0025      | 0.0025      | 0.0025                                       | 0.0025      | 0.0025      | 0.0025           | 0.0025      | 0.0025      | 0.0025           | 0.0025      | 0.0025      | 0.0025      | 0.0025 |
| 0.2   | Fig.<br>(1-3-24) | 0.2         | $\hat{B}_1$ | 0.055       | 0.055          | 0.055       | 0.055       | 0.055  | 0.055       | 0.055       | 0.055            | 0.055       | 0.055       | 0.055            | 0.055       | 0.055       | 0.055       | 0.055  |
| 0.275 | Fig.<br>(1-3-25) | 0.275       | $\hat{B}_1$ | 0.076       | 0.076          | 0.076       | 0.076       | 0.076  | 0.076       | 0.076       | 0.076            | 0.076       | 0.076       | 0.076            | 0.076       | 0.076       | 0.076       | 0.076  |

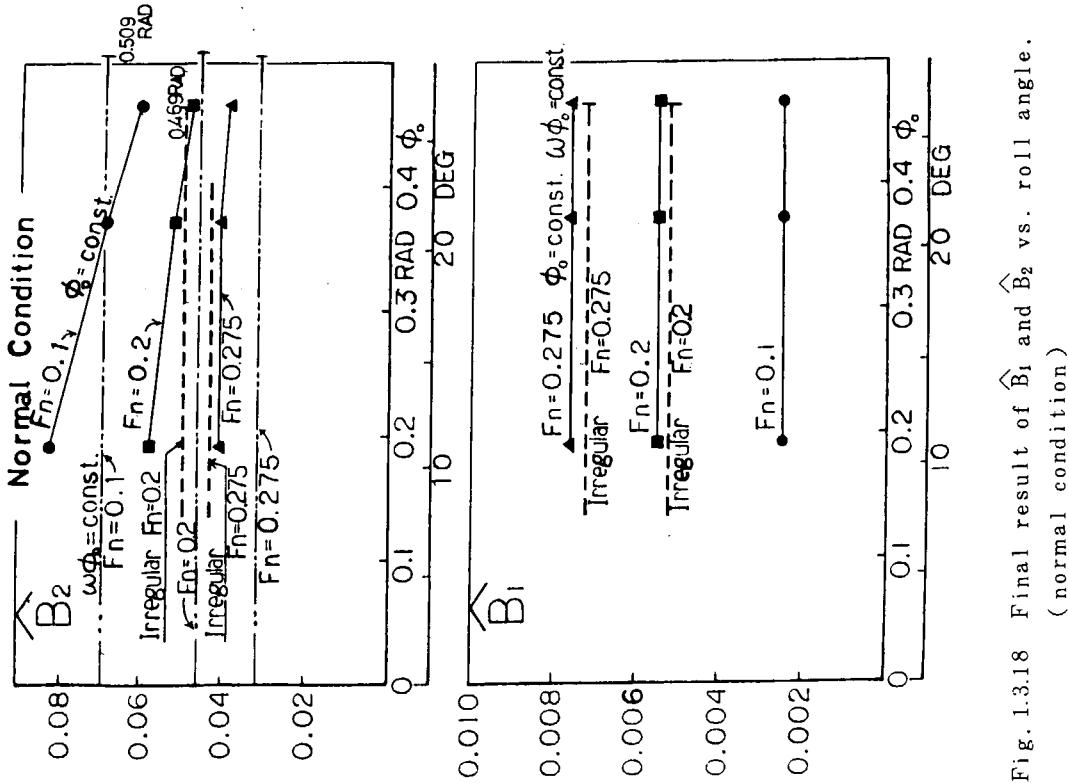


Fig. 1.3.18 Final result of  $\hat{B}_1$  and  $\hat{B}_2$  vs. roll angle.  
(normal condition)

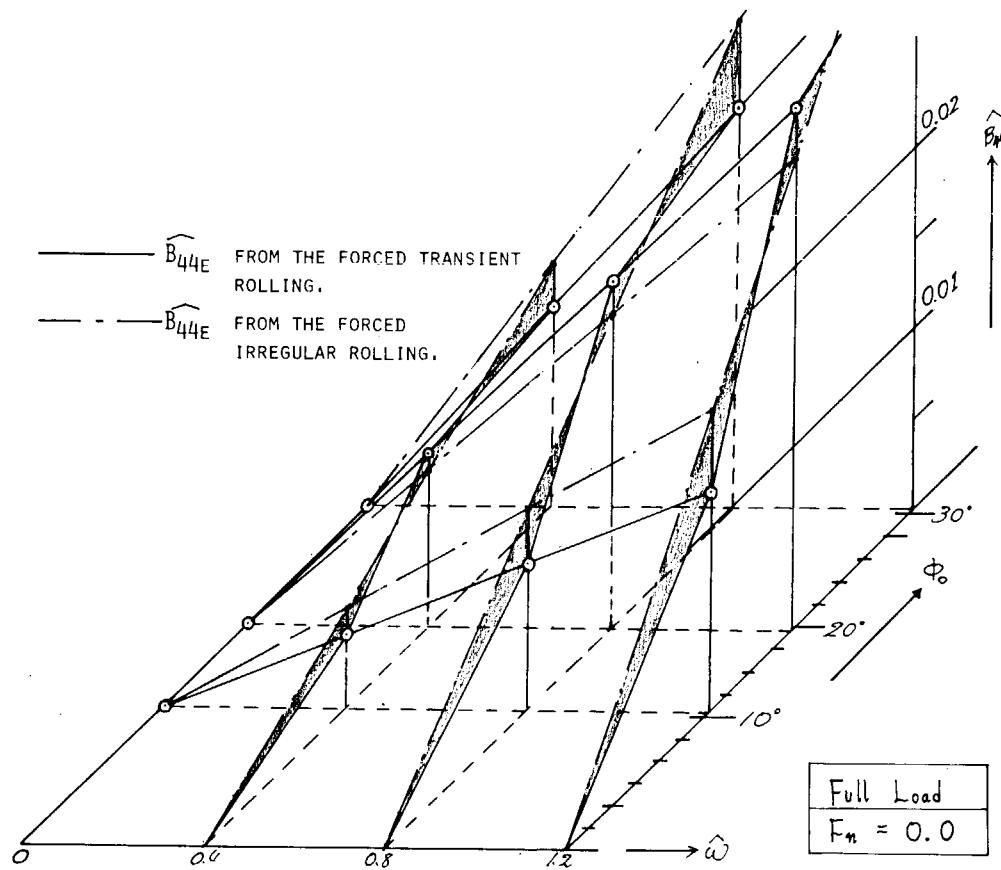


Fig. 1.3.19 Three dimensional expression of  $\hat{B}_{44E}$  by the formula (1.3.5) using the Table 1.3.2 .

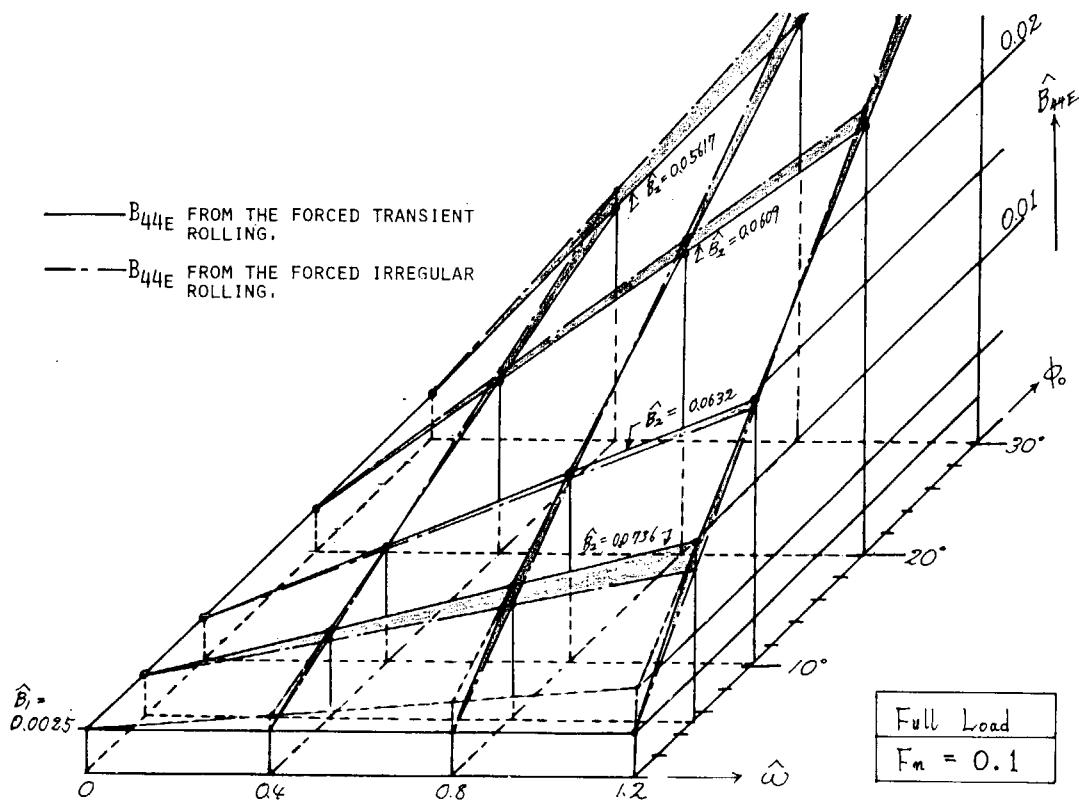


Fig. 1.3.20 Three dimensional expression of  $\hat{B}_{44E}$ .

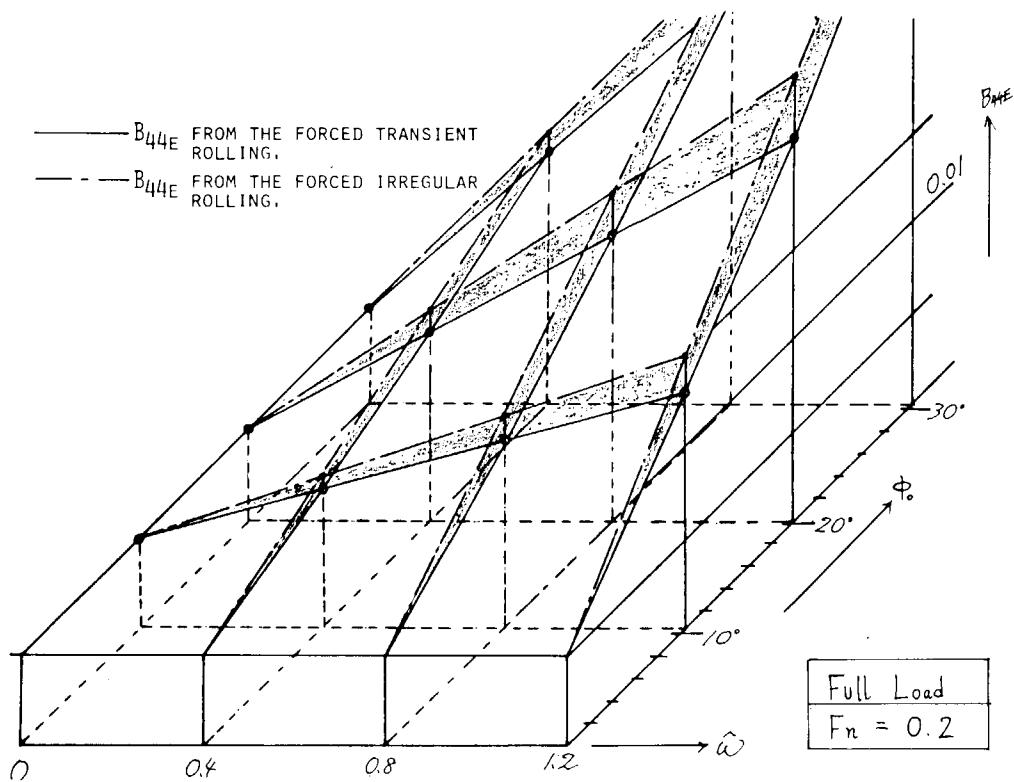


Fig. 1.3.21 Three dimensional expression of  $\hat{B}_{44E}$ .

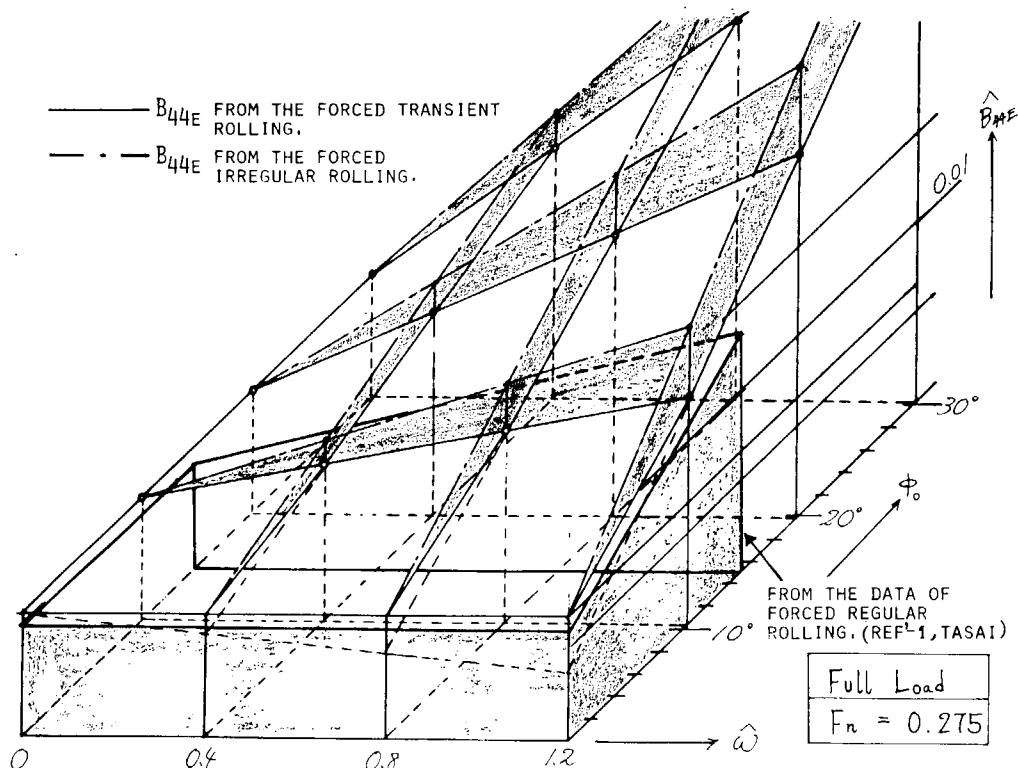


Fig. 1.3.22 Three dimensional expression of  $\hat{B}_{44E}$  by the formula (1.3.5) using the Table 1.3.2.

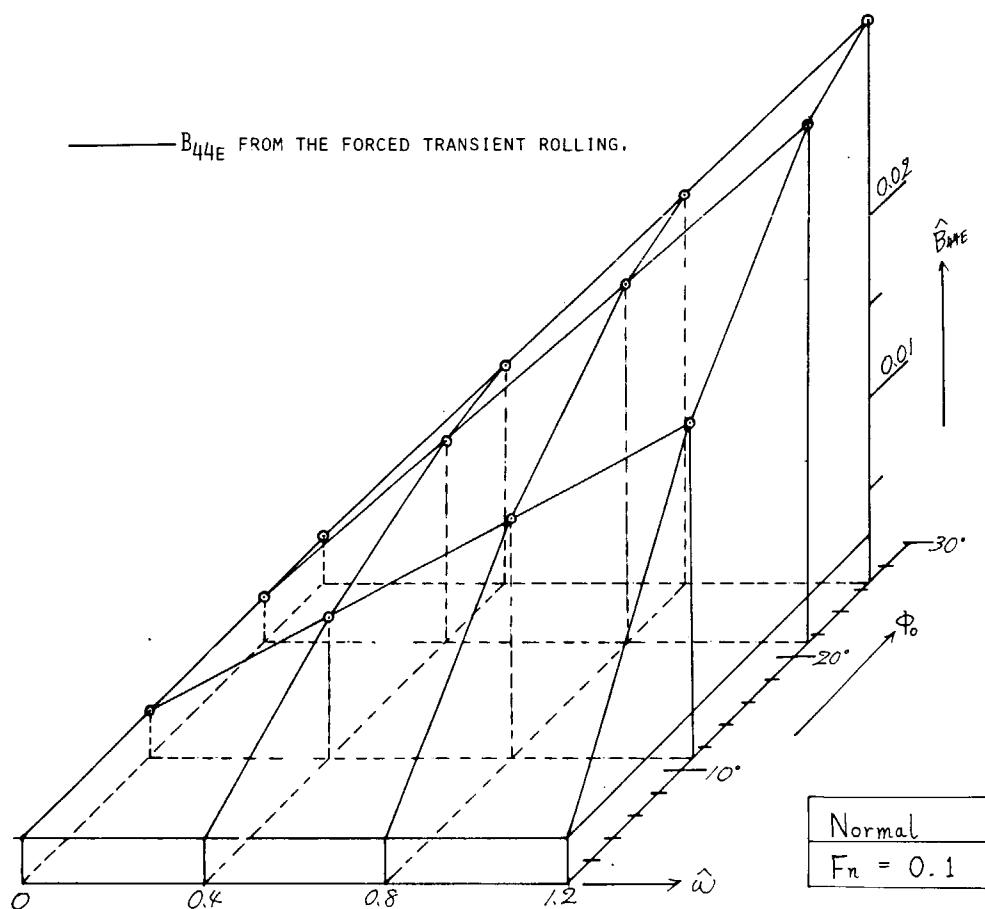


Fig. 1.3.23 Three dimensional expression of  $\hat{B}_{44E}$ .

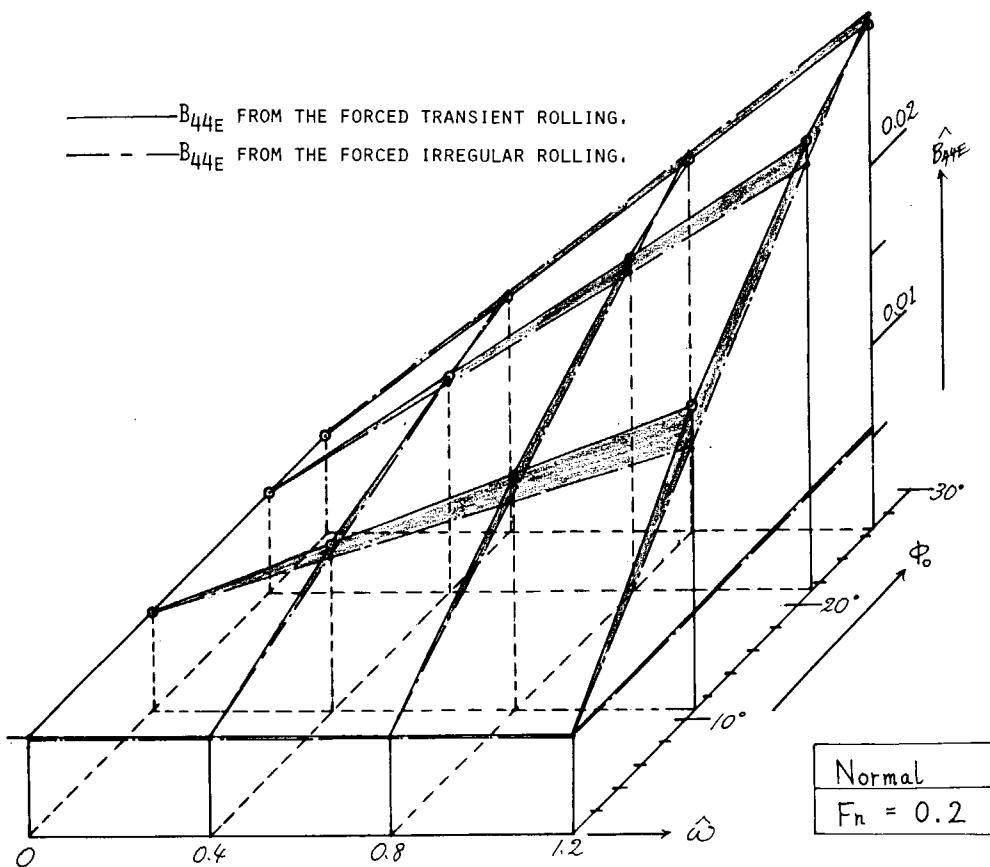


Fig. 1.3.24 Three dimensional expression of  $\hat{B}_{44E}$ .

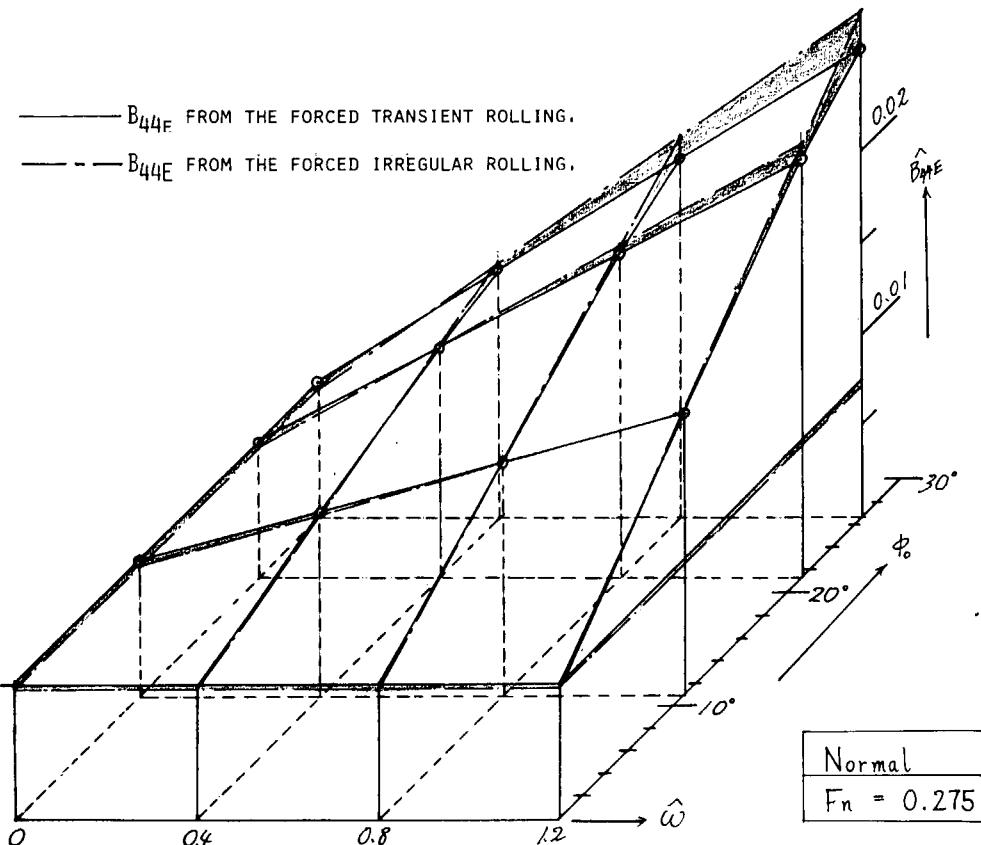


Fig. 1.3.25 Three dimensional expression of  $\hat{B}_{44E}$ .

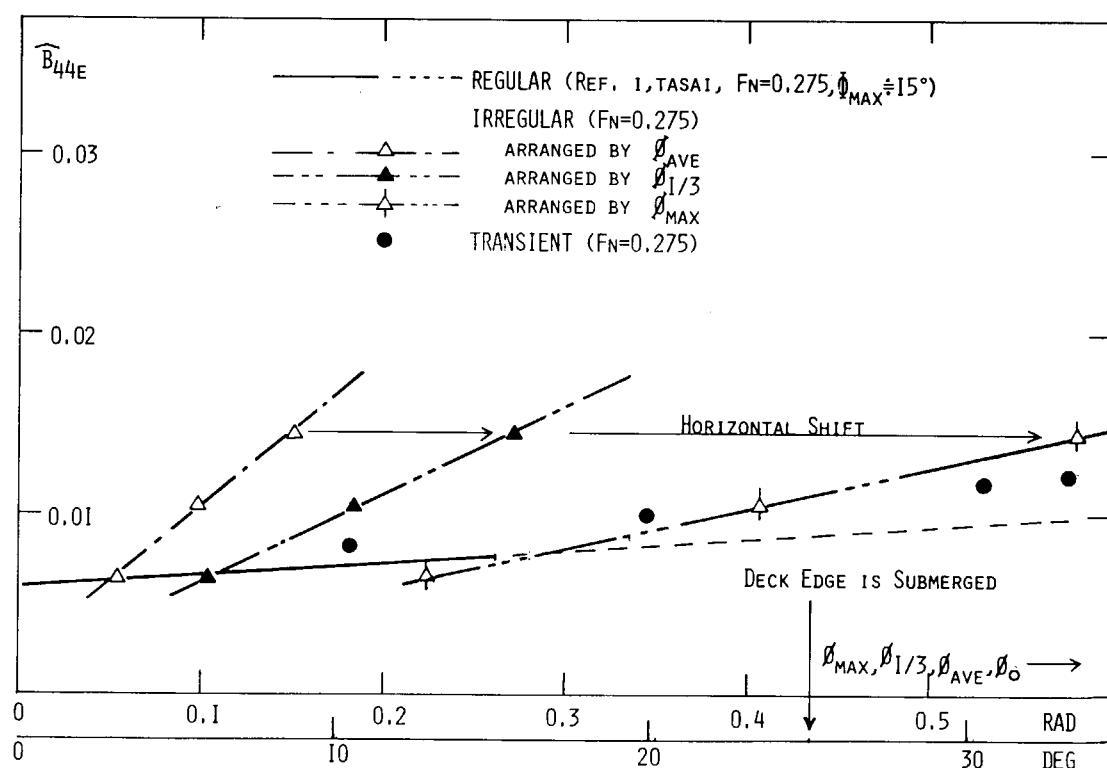


Fig. 1.3.26 Expression of  $\hat{B}_{44E}$  of the forced irregular rolling on base of  $\phi_{AVE}$ ,  $\phi_{1/3}$ ,  $\phi_{MAX}$  of forced irregular rolling

## 2. 横揺れ減衰力の推定法

### 2.1 横揺れ減衰力の成分分離

以下では、横揺れ減衰力を数成分に分離し、それぞれの成分の推定値を加え合わせて船の横揺れ減衰力を求めるいわゆる組立て推定法について述べるが、それに先立ち減衰力の表示法および成分減衰力の定義について述べておく。

#### 2.1.1 減衰力の表示法

船舶の横揺れ運動は、その減衰力が粘性の影響を強く受けるため、非線型性が強く、その運動方程式の取り扱いが一般に難しい。そのため便宜的な方法として、この減衰力の非線型項の効果がある種の“等価な”線型減衰力で表すことがよく行われる。この等価法については姫野の論説<sup>1)</sup>に詳しく述べられているので、ここでは簡単にその概要を述べるにとどめる。

横揺れ減衰モーメント  $M_R$  を非線型表示すると次式となる。

$$M_R = B_1 \dot{\theta} + B_2 \dot{\theta} |\dot{\theta}| + \dots \quad (2.1.1)$$

ここで  $\theta$  は横揺れ角を表す。上式を等価な線型減衰力に等値する方法として最も一般的に使われているのは、一揺れ間の損失エネルギーを等しくする方法であり、等価線型減衰力  $B_e$  は次式で与えられる。

$$B_e = B_1 + \frac{8}{3\pi} \omega \theta_0 B_2 + \dots \quad (2.1.2)$$

ここで  $\omega$  は横揺れ円周波数、 $\theta_0$  は横揺れ振幅を表す。従来の研究から、上式中の係数  $B_1$  は造波成分の影響で横揺れ周波数により変化し、また係数  $B_2$  はビルジキールの影響で横揺れ振幅により変化することがわかっているので、実験的にこれらの係数を求める場合、従来の自由横揺れの解析法および強制横揺れの解析法（横揺れ周波数を一定とし、横揺れ振幅を変化させて求めた減衰係数の傾きと切片から求める方法）では求まらないこととなる。後述するように、ビルジキールの効果を考慮すると  $B_2$  は近似的に横揺れ振幅に依存しない係数  $B_2'$  および  $B_2''$  を用いて次式のように表わしても大きな誤差はない。

$$B_2 = \frac{B_2'}{\theta_0} + B_2'' \quad (2.1.3)$$

(2.1.3) 式を (2.1.1) 式に代入すると

$$B_e = (B_1 + \frac{8}{3\pi} \omega B_2') + \frac{8}{3\pi} \omega \theta_0 B_2'' + \dots = B_1^* + \frac{8}{3\pi} \omega \theta_0 B_2^* \quad (2.1.4)$$

$$( \text{ただし}, B_1^* = B_1 + \frac{8}{3\pi} \omega B_2', B_2^* = B_2'' )$$

となり、 $B_1^*$  および  $B_2^*$  は横揺れ振幅にかかわらずほぼ一定とみなせる。前述の自由横揺れおよび強制横揺れの解析で求まる値は、この  $B_1^*$ ,  $B_2^*$  であり、 $B_1^*$  には  $\dot{\theta} |\dot{\theta}|$  に比例するいわゆる非線型項も含まれていることに注意せねばならない。

他に、不規則横揺れの場合には、最小偏差法による等価法もあるが、これについては第3章で述べる。

#### 2.1.2 成分減衰力の定義

横揺れ減衰力の成分分離にあたっては、種々の観点からの分離が可能と思われるが、ここでは全減衰力  $B_{44}$  を摩擦  $B_F$ 、造渦  $B_E$ 、揚力  $B_L$ 、造波  $B_W$ 、ビルジキール  $B_{BK}$  の5成分に分離することとし、それぞれ次のように定義する。

##### (1) 摩擦成分 $B_F$

船体表面に働く摩擦応力による減衰力。粘性理論によりある程度理論的に扱いうる成分である。自由表面お

およびビルジキール等による影響も考えられる。

(2) 造渦成分  $B_E$

裸殻船体に働く粘性に基づく圧力による減衰力。非線型成分であり、主に流れの剥離に伴う2次元的剥離渦による。また、前進速度のある時に働く揚力による成分の非線型項も含めて考える。

(3) 揚力成分  $B_L$

裸殻船体に働く線型揚力に基づく減衰力。造渦成分と同じく粘性に基づくが、主に3次元剥離渦による成分で、適当な条件を付すと場合によってはポテンシャル流れの理論で取り扱うことが可能な成分である。ここでは、揚力に基づく減衰力のうち非線型の項は造渦成分に含めて考える。

(4) 造波成分  $B_W$

自由表面に波を造ることにより裸殻船体に働く圧力に基づく減衰力。ポテンシャル理論で取り扱うことが可能な成分である。

(5) ビルジキール成分  $B_{BK}$

ビルジキール付加時の圧力成分の増分、すなわちビルジキール取り付け時の減衰力と裸殻の減衰力との差として定義する。ビルジキールが付くと船体周りの流場全体が変化し、厳密には裸殻の減衰力に単にビルジキールの効果を加えた形で減衰力を表わすのには流体力学的に見ていくつかの問題点を含んでいると考えられるが、工学的な立場からすると、ビルジキールが付いたことによる減衰力の増加量が大きな関心事であることから、このような定義が採用されることが多い。このビルジキール成分は、さらに次の3つの成分に分離して扱われる。

(i) ビルジキールの直圧力成分  $B_N$

ビルジキール自体に働く圧力による減衰力。

(ii) ビルジキールの船体表面圧力成分  $B_S$

ビルジキールにより生ずる船体表面の変動圧力による減衰力。

(iii) ビルジキールによる造波成分  $B_{BKW}$

自由表面の存在による  $B_N, B_S$  の変化分。

減衰係数および周波数の無次元表示については次式を用いる。

$$\hat{B}_{44} = \frac{B_{44}}{\rho \nabla B^2} \sqrt{\frac{B}{2g}}, \quad \hat{\omega} = \omega \sqrt{\frac{B}{2g}} \quad \text{又は} \quad \xi_d = \omega^2 \frac{d}{g}$$

ここで、 $\rho$  は流体の密度、 $\nabla$  は船体の排水容積、 $g$  は重力加速度、 $B$  は船幅を表わす。各成分減衰力係数の無次元表示も同様である。

### 2.1.3 各成分減衰力の研究状況

前節で述べた各成分減衰力について多くの研究が行われている。以下に、それぞれの成分の研究の現状について簡単に紹介する。

(1) 摩擦成分  $B_F$

前進速度がない場合（以下  $F_n = 0$  時と表す）の同成分については、全没円柱を中心軸周りに振動させた実験結果に基づく加藤の推定式<sup>2)</sup>が一般に用いられている。加藤は実験結果から、横揺れ摩擦減衰力は Blasius の層流平板の定常摩擦公式と関数形が同じになることを見だし、等価 Reynolds 数を実験的に決め、層流および乱流の場合の船の横揺れ摩擦減衰力の推定公式を提案した。池田らは、 $F_n = 0$  時の摩擦減衰力を Stokes の振動平板解を利用して理論的に計算する方法を示し、その結果が Fig. 2.1.1 に示すように計測値とよく合うことを示し、また、加藤の推定式による値が、実際の船型の摩擦減衰力についても十分満足できる精度を

持つことを理論的、実験的に示した<sup>3)</sup> (Fig. 2.1.2)。

同成分の前進速度影響に関しては、横揺れしながら前進する回転橋円体についての3次元境界層理論および実験に基づく田宮の公式<sup>4)</sup>があり、池田らの行った若干詳しい理論計算によりその有効性が確かめられている<sup>5)</sup> (Fig. 2.1.3)。こうした研究の結果、現在のところ摩擦成分については、 $F_n = 0$ 時の加藤の式と前進時の田宮の式とを組み合わせた加藤-田宮の公式を用いて十分であろうとされている。

ビルジキールが付いた場合の同成分については、加藤が Hughes の乱流の平板公式に先に述べた等価 Reynolds 数を代入して求めた乱流の場合の公式を用いることを提案しているが、ビルジキール背後の死水域等では逆に摩擦力が減少することも考えられ、今後の研究が必要と思われる。

## (2) 造渦成分 $B_E$

同成分は、船体が横揺れする際、船首尾部の船底や中央部のビルジ付近に生ずる流れの剝離による圧力抵抗であり、 $\dot{\theta} |\dot{\theta}|$ に比例する非線型減衰力である。ビルジキール成分も同じく剝離渦による圧力抵抗であるが、先にも述べたようにここでは分離して扱う。一般に振動する bluff body の抗力は period parameter ( $K - C$  number =  $V_{max} T / D$ ,  $V_{max}$  : 最大流速,  $T$  : 周期,  $D$  : 代表的長さ) に依存するが、池田らの行った各種2次元模型の実験<sup>6)</sup>によれば、横揺れする裸殻船体の造渦成分の  $B_E$  係数は、period parameter すなわち横揺れ振幅によらずほぼ一定で、その値は断面形状だけによって決まるとして考えてよい (Fig. 2.1.4, 2.1.5)。池田らは、剝離渦により2次元船体表面に働く圧力分布形状を簡単な関数で近似し、一方圧力値は断面の表面上のポテンシャル流速の最大値と平均値の比 (一種の增速率を表す) によって決まるとして実験値に基づく公式を導き、その圧力分布を表面上で積分して造渦成分の推定法を導いた。<sup>6)</sup>

前進速度が加わると、上述の2次元的剝離渦は後方に流出し、非線型の造渦成分が減少し、代って揚力効果による減衰力が生じてくる。造渦成分の減少のメカニズムについては今の所明らかでないが、実験によるとこの減少は物体の縦横比や形状によるようであり、reduced frequency  $K$  に対して示すと Fig. 2.1.6 のようになる。池田らは、前進時の揚力成分の非線型成分もすべて造渦成分に含めて考え、裸殻船体の横揺れ試験の結果から非線型成分だけを取り出して、それが前進速度の増加と共に急激に減少し、前進速度が十分大きくなるとほとんど 0 となることを示し、その実験式を導いている<sup>7)</sup> (Fig. 2.1.6)。

## (3) 揚力成分 $B_L$

横揺れ減衰力に及ぼす揚力の効果の具体的な推定法を最初に示したのは湯室ら<sup>8)</sup>である。湯室らは斜航する船体に対する揚力係数を援用し、代表迎角および揚力中心までのモーメントレバーを仮定して次式の推定式を導き、その推定結果と模型実験結果とを比較し、この揚力成分が前進時の横揺れ減衰力のうちに重要な役割を演じることを指摘した。

$$B_L = \frac{\rho}{2} U L d k_N (0.3 d - OG) (0.5 d - OG) \quad (2.1.5)$$

ここで

$$k_N = \frac{2\pi d}{L} + \kappa \left( 4.1 \frac{B}{L} - 0.045 \right) \quad (2.1.6)$$

$$\kappa = \begin{cases} 0 & C_M \leq 0.92 \\ 0.1 & 0.92 < C_M \leq 0.97 \\ 0.3 & 0.97 < C_M \leq 0.99 \end{cases} \quad (2.1.7)$$

ただし、 $\rho$  は流体の密度、 $U$  は前進速度、 $L$  は船の長さ、 $B$  は幅、 $d$  は喫水、 $OG$  は横揺れ回転軸から静止水面までの距離 (回転軸が水面より下にある時を正とする)、 $k_N$  は揚力勾配係数、 $C_M$  は船体中央横断面係数を表す。池田らは、この湯室の式を実験的に検証するために次のような実験を行い、揚力成分を計測した。<sup>7)</sup> まず、造波成分を除くために水面を板で被うか、あるいは波の影響を無視できるような低周波数領域での裸殻船

体の横揺れ試験を行い、その結果から摩擦成分の推定式を差し引けば、残りは造渦成分と揚力成分の2成分となる。高速域では先にも述べたように造渦成分は無視できるので、この領域の実験値は揚力成分だけと考えられる。この実験の結果、湯室の推定式は、普通の船型に対し横揺れ回転軸が0点（静止水面における船体中心線位置）の場合には非常によい値を与える（Fig. 2.1.7）が、回転軸が0点以外のときは実験値とかなり異なる値を示すことがわかった（Fig. 2.1.8）。池田らは、線型理論を用いて代表迎角を取る位置および揚力中心までのモーメントレバーを求め、回転軸の影響についても湯室の推定式を若干改良した同成分の推定式を導いている。<sup>7)</sup>

今後、非線型性も考慮した揚力理論が実際の船型の横揺れ減衰力に応用できるようになれば、この揚力成分の定義自身も、線型成分だけでなく非線型成分も含めたものにした方がよいようにも思われる。

#### (4) 造波成分 $B_W$

前進速度のない場合の造波成分については、OSM等の理論計算結果が横揺れるする2次元船型模型からの発散波の計測結果とよく合うことが報告され（Fig. 2.1.9）<sup>25)</sup>、3次元船体での実験的検証はないものの、現在では、これらの理論計算である程度満足できる値が得られるものと考えられている。

一方、同成分の前進速度影響については、古くは菱田の理論計算<sup>9)</sup>や花岡の理論計算<sup>10)</sup>があるが、前進する実用船型の同成分を推定できるには至っていない。

最近、渡辺はこの花岡の理論を数値計算し<sup>11)</sup>、興味深い数値計算例を示している。この理論は小縦横比の平板翼が中心軸周りに微小横揺れする時の造波問題を定式化したもので、造波成分および揚力成分が含まれている。このうち造波成分のみの計算例をFig. 2.1.10に示す。計算は、 $\Omega (= \omega U / g) = 1/4$  の点で発散するがこれは source 分布を用いているためである。<sup>12)</sup> この理論計算は平板を対象としているため  $F_n = 0$  での造波成分が実際の船に対する値に比べて過大になり、また前進時の減衰力に現れる船幅の影響を考慮できない等の問題点もあった。渡辺は、さらに、薄い船としての上述の垂直平板解と、船の幅を表わすために船底位置に置いた水平平板解を組み合わせた理論を提案した<sup>13)</sup>が、未だ十分な結果は得られておらず、今後の研究が期待されている。

一方、前述のようにある程度実験的検証も行われている  $F_n = 0$  時の同成分の理論解に前進速度影響の修正を行い、前進時の造波成分を推定する試みもなされている。池田らは船体の横揺れ効果を水平方向に軸を持つ非定常二重吹き出しで表現し、同成分の前進速度影響を菱田の方法<sup>9)</sup>にならって数値計算した。<sup>7)</sup> その結果は上述の渡辺の計算結果とよく似た傾向を示す（Fig. 2.1.11）が、二重吹き出しを用いているため  $\Omega = 1/4$  で有限値となっている。造波成分は、前進速度の増加と共に増加し、 $\Omega = 1/4$  付近で最大値となり、その後減少する。また  $\Omega = 1/4$  付近のハンプは、横揺れ周波数が大きい程陥しい形状となる。船首尾の二重吹き出しの干渉項も現われるが、それ程大きなオーダーにはならない。理論計算で得られた造波成分のこれらの傾向は、平板による強制横揺れ試験で検証されている（Fig. 2.1.12）。<sup>7)</sup> さらに、池田らはこれらの諸性質を持つ関数形を仮定し、その係数を実験的に決めるにより普通の船型に対する造波成分の推定公式を得ている。<sup>7)</sup> この推定式は、普通の貨物船型、タンカー船型の同成分の推定にはほぼ妥当な値を与えると思われるが、ごく限られた船型に対する実験結果を基礎にしているため、幅広い船型および周波数の変化には対応できないものと考えられ、今後さらに研究が必要と思われる。

#### (5) ビルジキール成分 $B_{BK}$

同成分については、田中の研究<sup>14)</sup>や加藤の研究<sup>15)</sup>等があるが、いずれも定常に運動する垂直平板の抗力の立場からビルジキールによる減衰力を推定しようと試みたものである。しかし、近年海洋構造物に働く外力あるいはその運動の研究に関連して、振動流中の bluff body に働く研究が進んだ結果、非定常の場合の抗力係数は、定常の場合とは異なり period parameter により変化することがわかつてきた。ビルジキールによ

る減衰力についても、この立場からの研究が進んできている。

#### (5.1) ビルジキールの直圧力成分 $B_N$

非定常運動する垂直平板の抗力係数  $C_D$  を次式で定義する。

$$C_D = \frac{2F}{\rho A |v| v} \quad (2.1.8)$$

ここで、 $F$  は抗力、 $A$  は平板の面積、 $v$  は運動速度である。この抗力係数  $C_D$  は前述のとおり period parameter  $VT/D$  (ただし、 $V$  は  $|v|_{max}$ 、 $T$  は周期、 $D$  は平板の幅) により変化する。池田らは、ビルジキールの場合  $D$  を  $2b_{BK}$  ( $b_{BK}$  はビルジキールの幅) として period parameter を定義して、振動平板の抗力係数  $C_D$  をビルジキールの抗力係数に応用することを試み (Fig. 2.1.13)，両者がよい一致を示すことを明らかにし、次式のビルジキールの抗力係数  $C_D$  の実験式を導いた。<sup>5)</sup>

$$C_D = 22.5 \frac{b_{BK}}{\pi r \theta_0} + 2.4 \quad (2.1.9)$$

ここで、 $b_{BK}$  はビルジキールの幅、 $r$  は横揺れ中心軸からビルジキール取付け部までの距離を表す。

上式の有効性については九大応力研の実験<sup>16)</sup>や、湯浅らの単独振動平板の実験<sup>17)</sup>で確かめられている。さらに、池田らは肥えた船の場合にはビルジキールにあたる流速  $v$  を修正する必要があることを指摘し、修正係数  $f$  を乗じて  $fv$  とし、抗力係数  $C_D$  の抗力も

$$C_D = 22.5 \frac{b_{BK}}{\pi f r \theta_0} + 2.4 \quad (2.1.10)$$

と修正することを提案し、 $f$  として理論値を用いると過大評価となるため、 $f$  をビルジキール成分全体の実験値から決めている。<sup>18)</sup>

一方藤野らは、ビルジキールの場合の period parameter を決める場合、池田らのように平面に対する鏡像をとるのではなく、次式のようにビルジ部での円鏡像をとり、

$$b_I = b_{BK} \left( 1 + \frac{R}{R + b_{BK}} \right) \quad (2.1.11)$$

ただし、 $R$  はビルジ半径を表す。

また、ビルジキールにあたる流速としては、ビルジキールが付かない場合のビルジキール位置でのポテンシャル流速をビルジキール幅にわたり平均した値を用いることを提案した。<sup>19)</sup> さらに、模型船に付けたビルジキールに働く抗力を計測し、その結果が上述の方法による推定値とよく合うことを示している (Fig. 2.1.14)。<sup>19)</sup> この藤野らの方法は、池田らの方法ではやや理論的裏付けの薄かった点をより合理的に扱ったものとして評価できるが、九大応力研の直圧力の計測値<sup>16)</sup>と一致が悪く (Fig. 2.1.15)，また、藤野らの方法で直圧力を求め、さらに同様の考え方を次に述べる船体表面圧力効果の推定法に導入してビルジキール全体の減衰力を推定してみると、従来のビルジキール成分の計測値に比べ過大評価となるなど、今後さらに詳しい検討が必要な面もある。

同成分の前進速度影響の研究としては、池田ら<sup>5)</sup>、九大応力研<sup>22)</sup>、湯浅ら<sup>17)</sup>、藤野ら<sup>19)</sup>のものがある。池田らは、回転橈円体にビルジキールを付け、中心軸まわりに横揺れさせ、計測値からビルジキールを付けない場合の同じ状態の計測値を差し引くことにより直圧力成分を分離し、その前進速度影響を調べた結果、同成分は前進速度の増加と共に漸増することを示した (Fig. 2.1.16)<sup>5)</sup>。九大応力研では貨物船模型に 5 分割したビルジキールを付け、ビルジキールの各部分に働く直圧力を計測した結果、ビルジキールの前端部分の直圧力は前進速度の増加と共に大きくなるが、中央および後端部分のそれはそれ程大きな前進速度影響を受けないことを見明らかにし (Fig. 2.1.17)<sup>20)</sup>。湯浅らは、ビルジキールを小縦横比平板翼でおき

かえて実験的、理論的研究を行い、死水と揚力面を重ね合わせたモデル等を提案している。<sup>17)</sup> 藤野らは、定常の非線型翼理論をビルジキールに応用して計算し、前進速度がある程度以上大きくなるとその結果が実験値とよく合うことを示している(Fig. 2.1.18)。<sup>19)</sup> 剥離渦が2次元的な渦から3次元的な渦へ移り変わっていく前進速度の低い領域で、直圧力の抗力係数が減少するが、これについては今のところ理論的説明はなく今後の研究が待たれる。

#### (5.2) ビルジキールの船体表面圧力成分 $B_S$

この成分は、ビルジキールにより生ずる船体表面変動圧力に基づく減衰力で、ビルジキールと船体との干渉による造渦成分の変化分とみなせ、先にも述べたように裸殻の造渦成分とは分けて扱われる。

ビルジキールにより生ずる船体表面変動圧力の計測例としては、郷田らの研究<sup>21)</sup>および池田らの研究<sup>18)</sup>がある。池田らの研究によれば、ビルジキール後方の船体表面には台形形状の負の圧力が働き、前方の船体表面に働く正の圧力はビルジキールから離れるに従いながら減少する(Fig. 2.1.19)。また、圧力係数  $C_p (= \frac{P}{\frac{1}{2} \rho v^2})$  で表わすと、ビルジキール前方の正圧の  $C_p$  は船体形状および period parameter に依存しないのに対し、後方の負圧の  $C_p$  の値および分布長さは直圧力の場合と同じような period parameter 依存性を示す。池田らは、3隻の2次元模型についてこの変動圧力の計測を行い、この結果に基づき圧力分布を仮定し、それを船体表面上で積分して同成分の推定式を導いている。<sup>18)</sup>

同成分の前進速度影響については大阪府大において実験的研究が行われている。<sup>22)</sup> 実験は、他の成分減衰力の寄与を除くため回転橈円体(半没状態)を中心軸まわりに横揺れさせて、船体表面圧力の計測が行われた。その結果(Fig. 2.1.20)によると、ビルジキールの負圧が減少し、同成分は前進速度の増加と共に減少する。しかし、この減少のメカニズムおよび減少量については明らかでなく、今後の研究が必要とされている。

ビルジキール効果全体の前進速度影響は、田中らの実験<sup>23)</sup>等によるとほとんど無視できる。これは、直圧力成分の増加量と船体表面圧力の減少量とが、たかいにほぼ打ち消し合うためと考えられているが、九大応力研の研究<sup>20)</sup>によれば若干の前進速度影響が見られるとされ、今後両成分の前進速度影響を詳しく検討する必要があろう。

#### (5.3) ビルジキールによる造波成分 $B_{BKW}$

この成分に関する理論計算としては古くは菱田の研究<sup>26)</sup>がある。菱田の研究によれば、ビルジキールによる発散波高は、裸殻船体の発散波高と同程度にもなり得るが、位相が異なるので必ずしも減衰力の増加になるとは限らない。また、最近の研究例としては高木が行った実験および理論計算がある(Fig. 2.1.21)。<sup>24) 27)</sup> 実験によれば、横揺れ振幅が大きい場合には裸殻船体の造波成分に比して無視できないとされている。また理論計算は特異点法で行われ、流速分布および発散波振幅が求められている。<sup>27)</sup> ビルジキールが付いた時の発散波振幅の計算値は、裸殻の場合のそれより若干高い程度で、横揺れ振幅  $\theta_0 = 5^\circ$  の時の実験値とよく合っている。横揺れ振幅の大きい場合に実験値と合わないのは、微小振幅のポテンシャル理論を適用することに無理があるとされている。<sup>27)</sup>

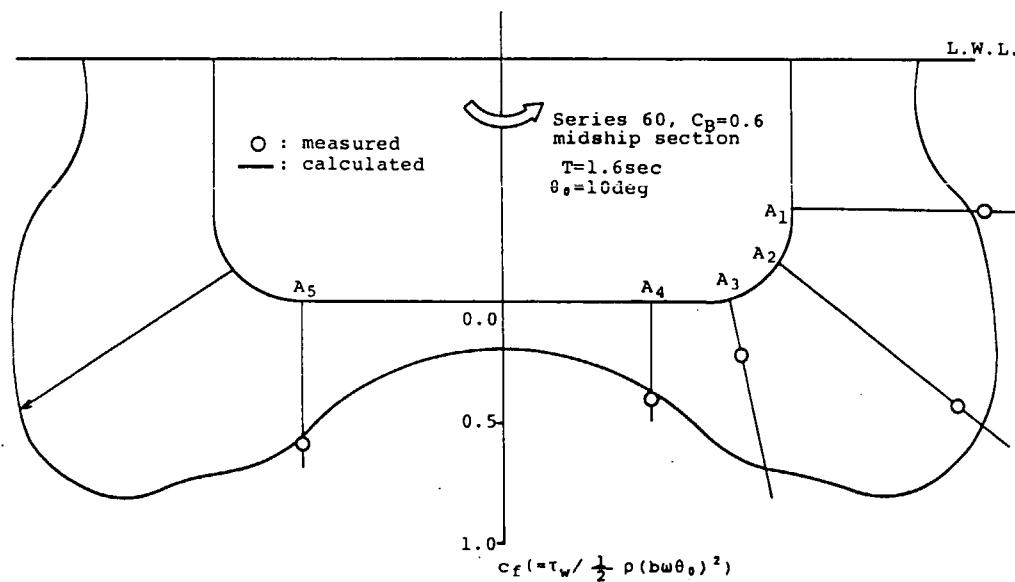


Fig. 2.1.1 Shear stress distribution on ship hull surface in rolling motion.

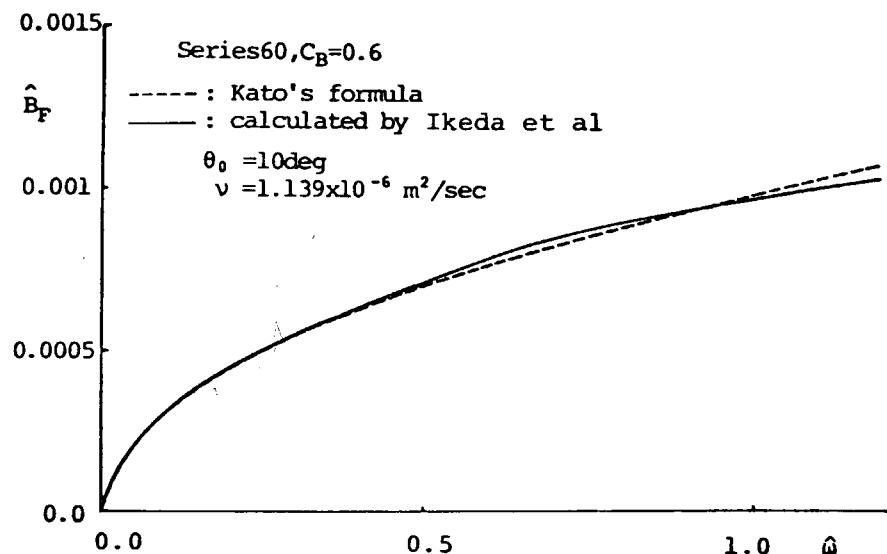


Fig. 2.1.2 Frictional damping coefficient  $\hat{B}_F$  for Series 60,  $C_B = 0.6$  model at zero advance speed.

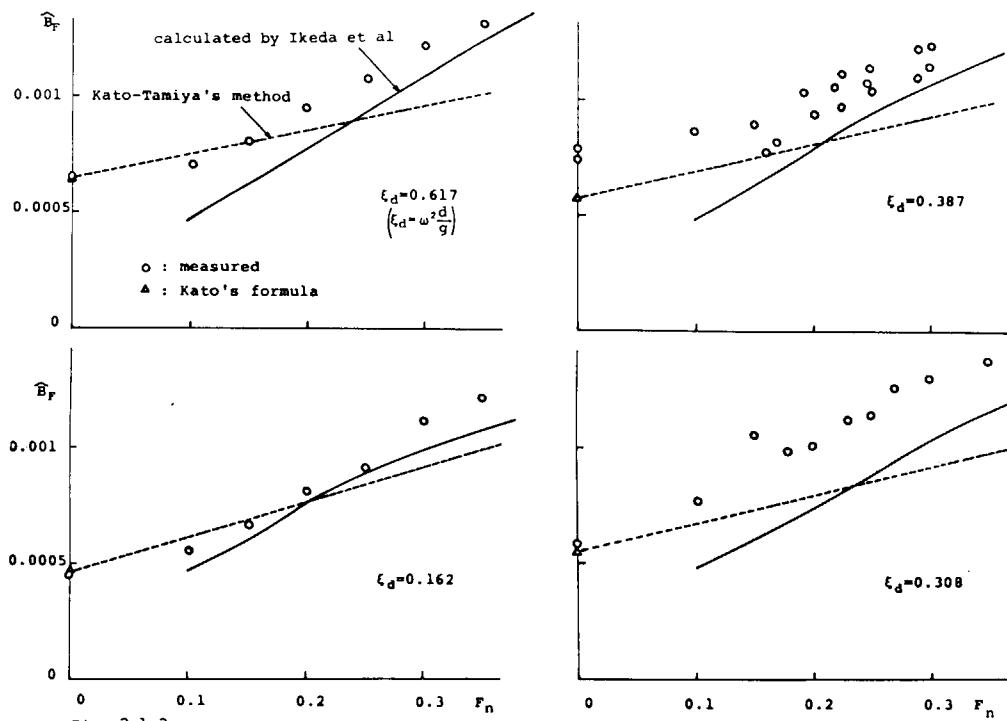


Fig. 2.1.3 Frictional roll damping coefficient of ellipsoid model.

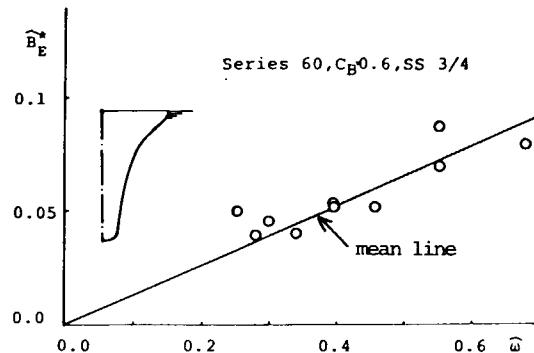


Fig. 2.1.4 Eddy making component of roll damping coefficient.

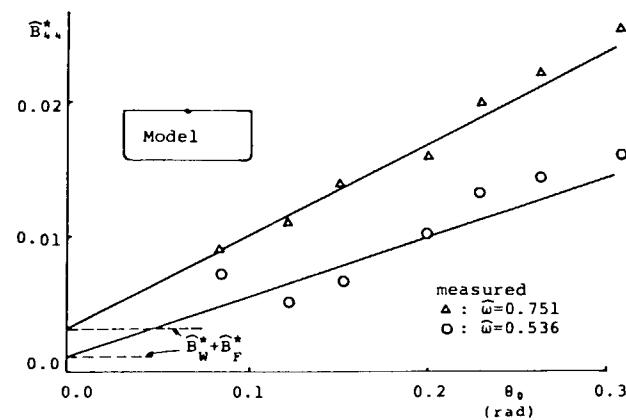


Fig. 2.1.5 Roll damping coefficient \$\hat{B}\_{44}^\*\$.

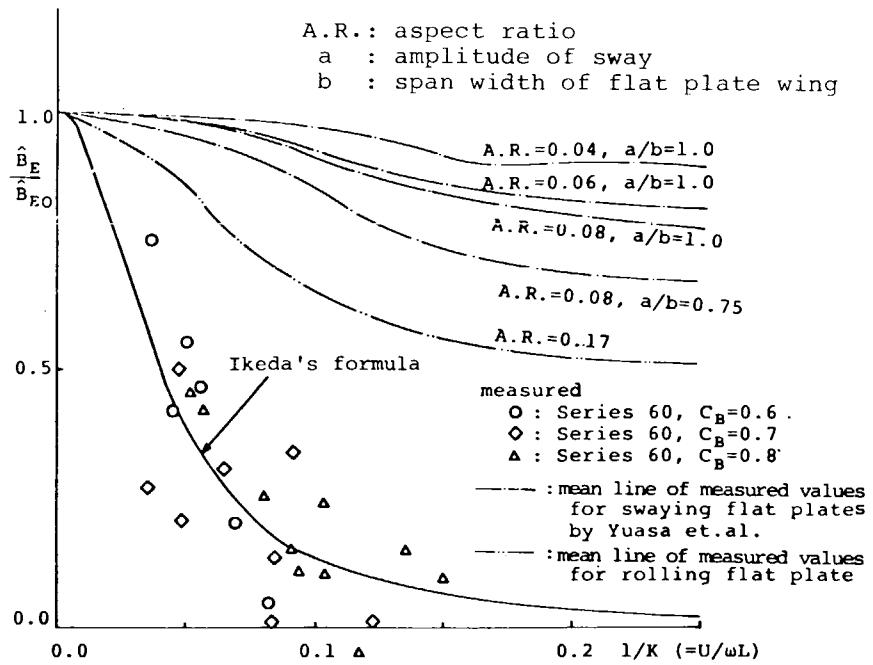


Fig. 2.1.6 Decrease of eddy making damping at forward speed.

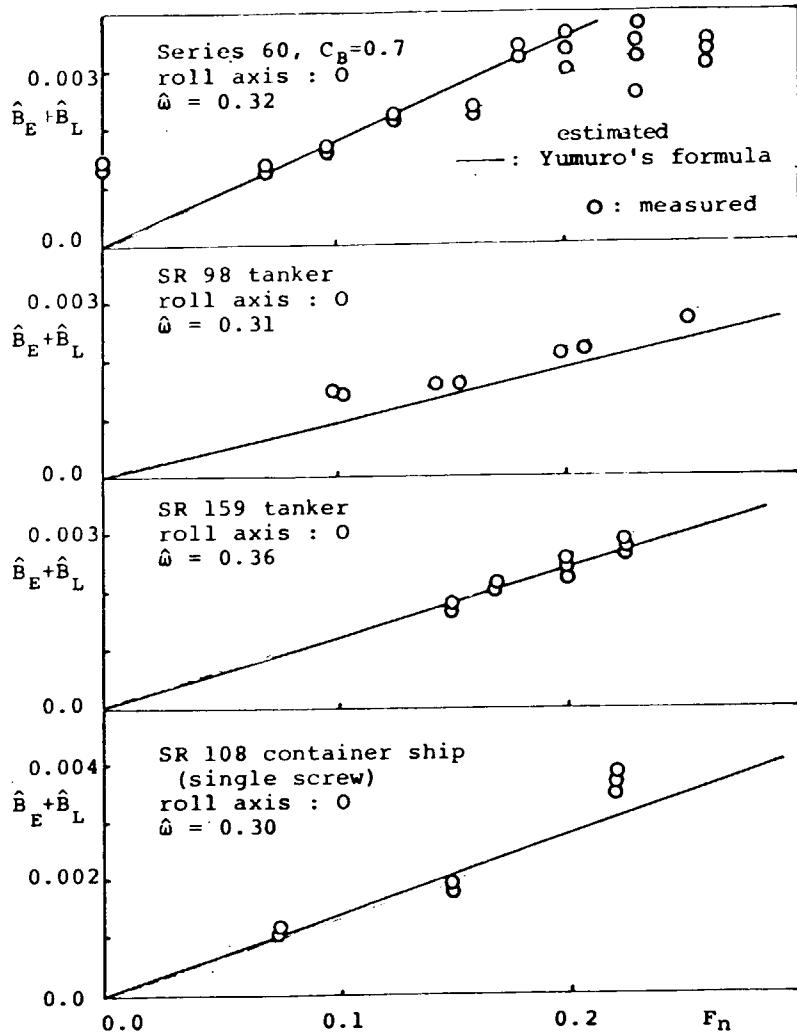


Fig. 2.1.7 Roll damping coefficient of eddy making and lift components.

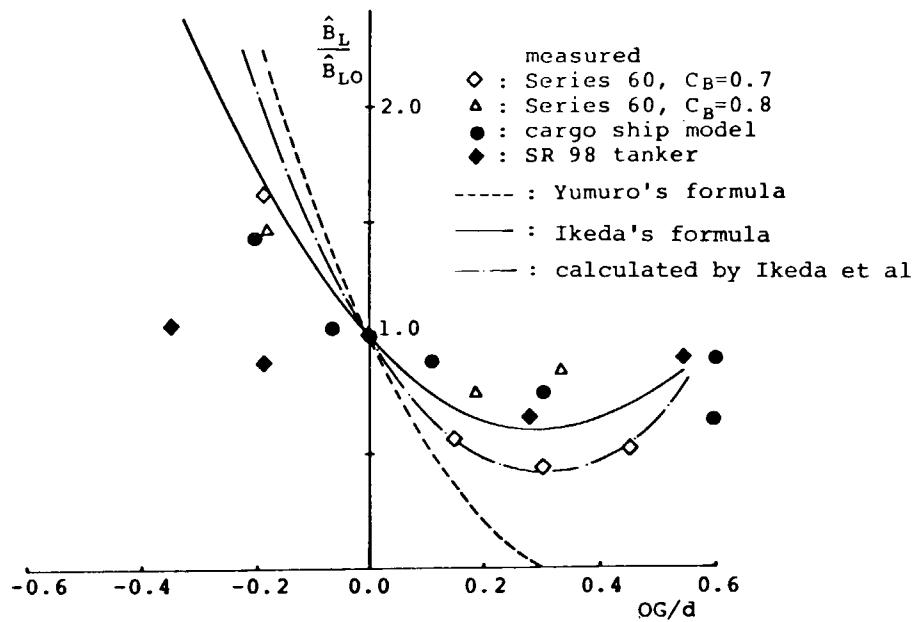


Fig. 2.1.8 Effect of position of roll axis on lift component.

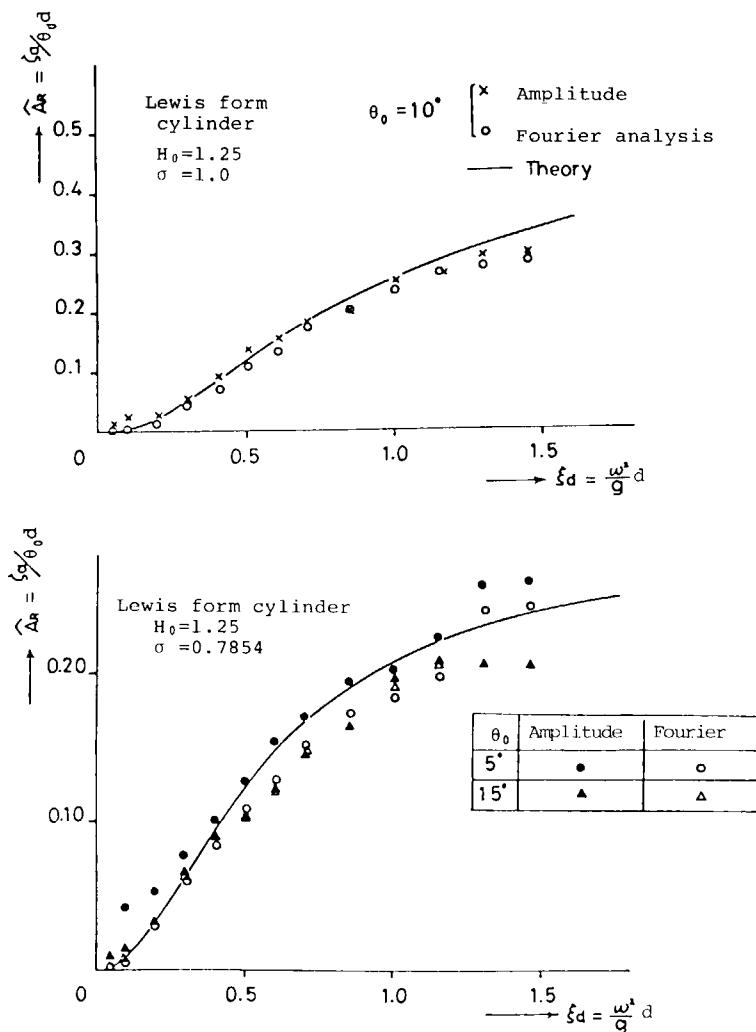


Fig. 2.1.9 Radiation wave amplitude for two-dimensional cylinders.

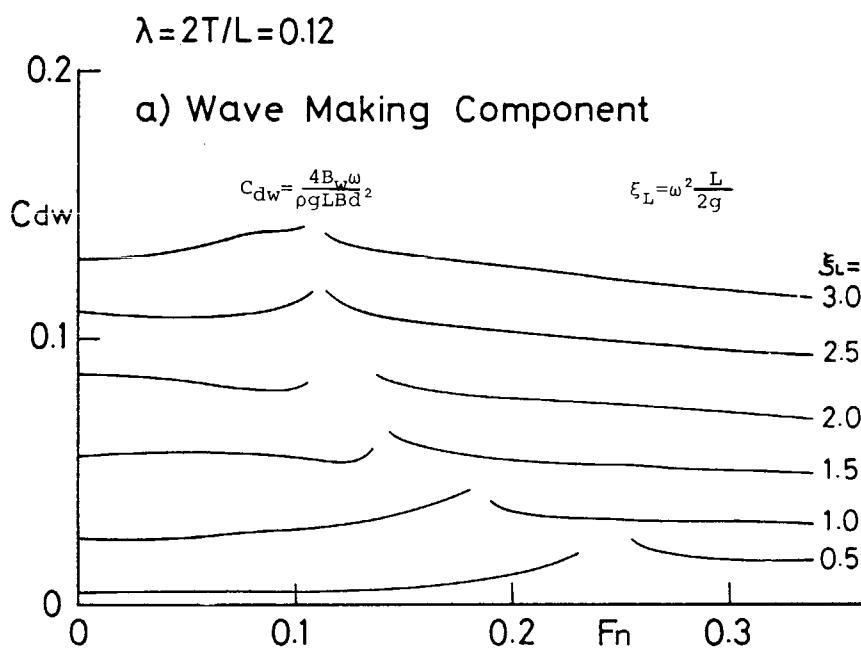


Fig.2.1.10 Examples of calculated results of wavemaking component.

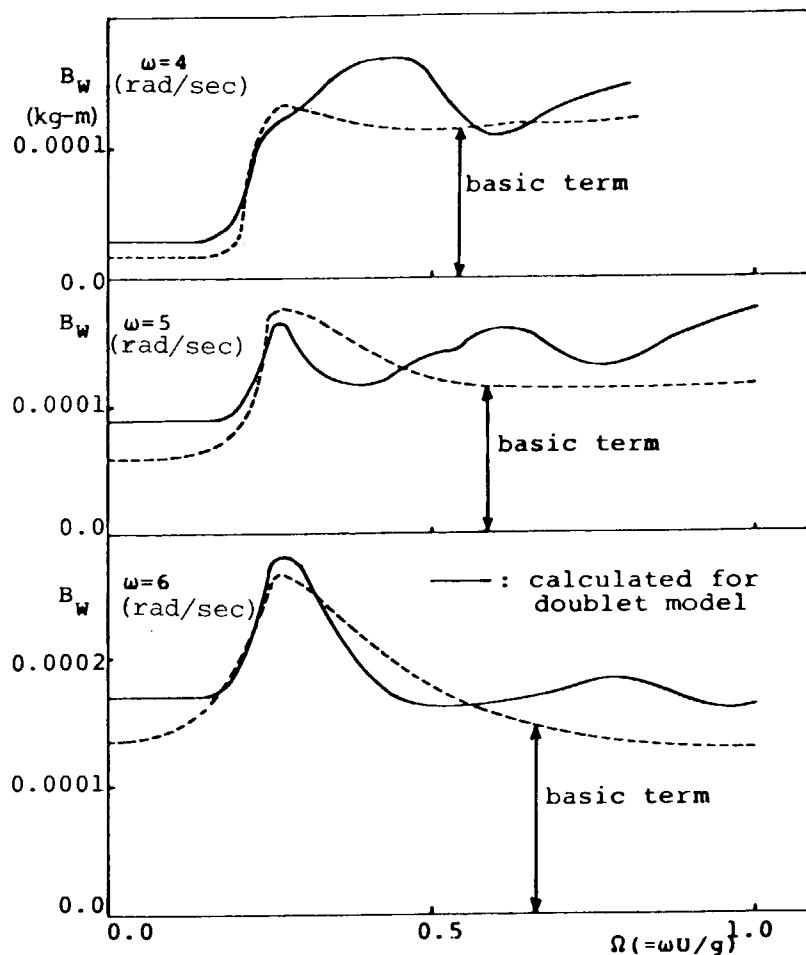


Fig. 2.1.11 Examples of calculated results for doublet model.

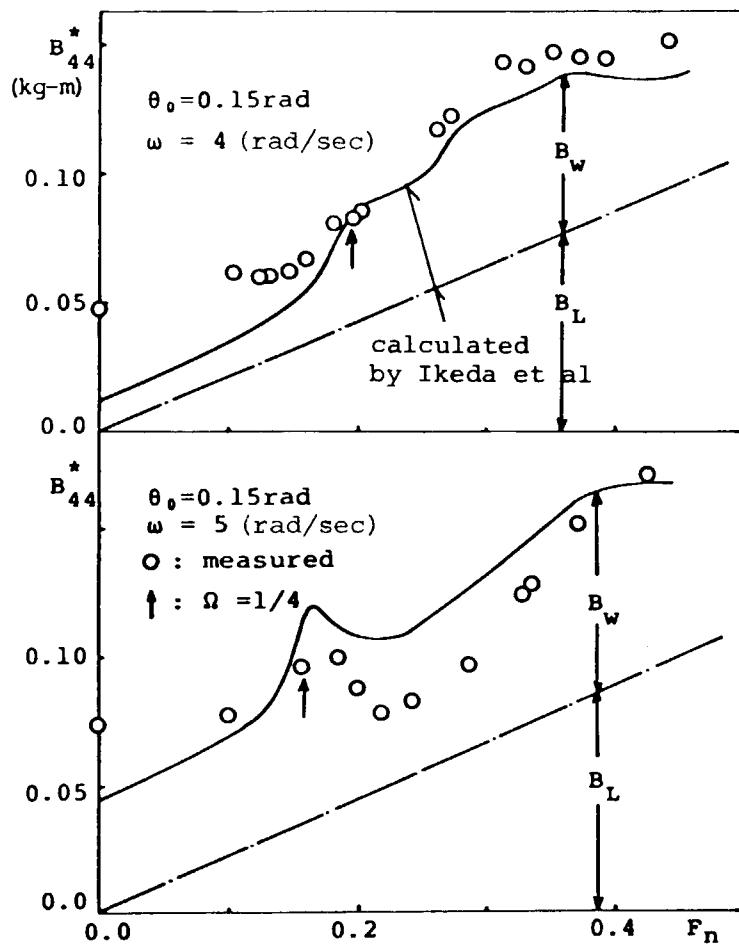


Fig. 2.1.12 Roll damping coefficient  $B_{44}^*$  of flat plate model.

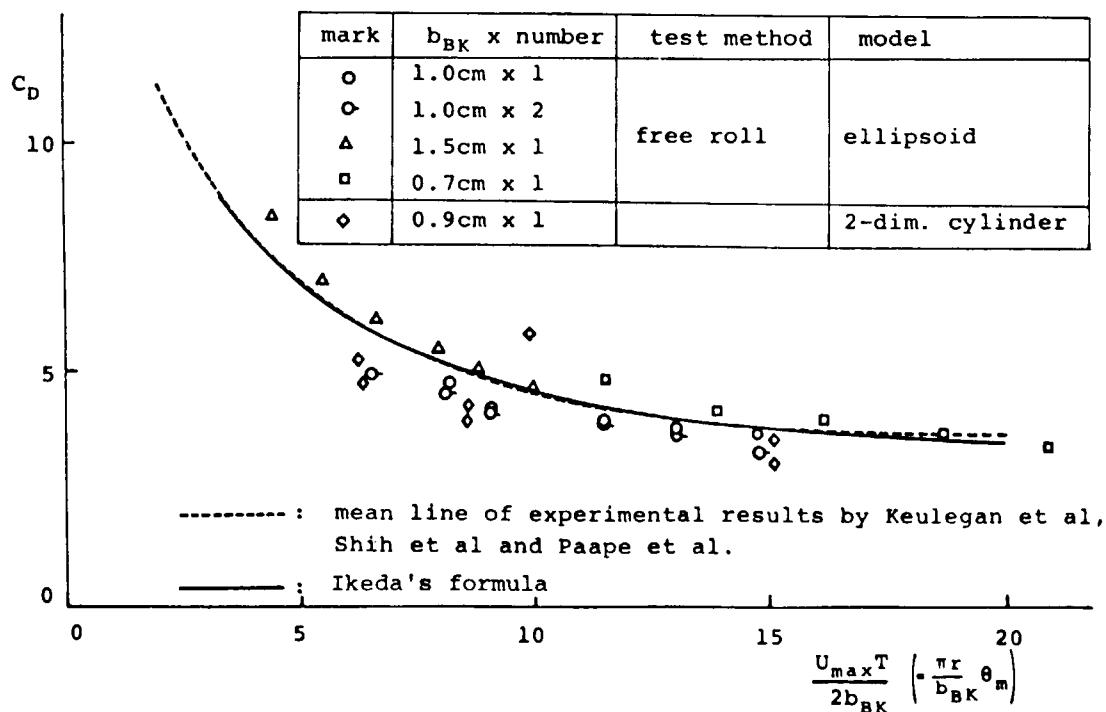


Fig. 2.1.13 Drag coefficient of bilge keels.

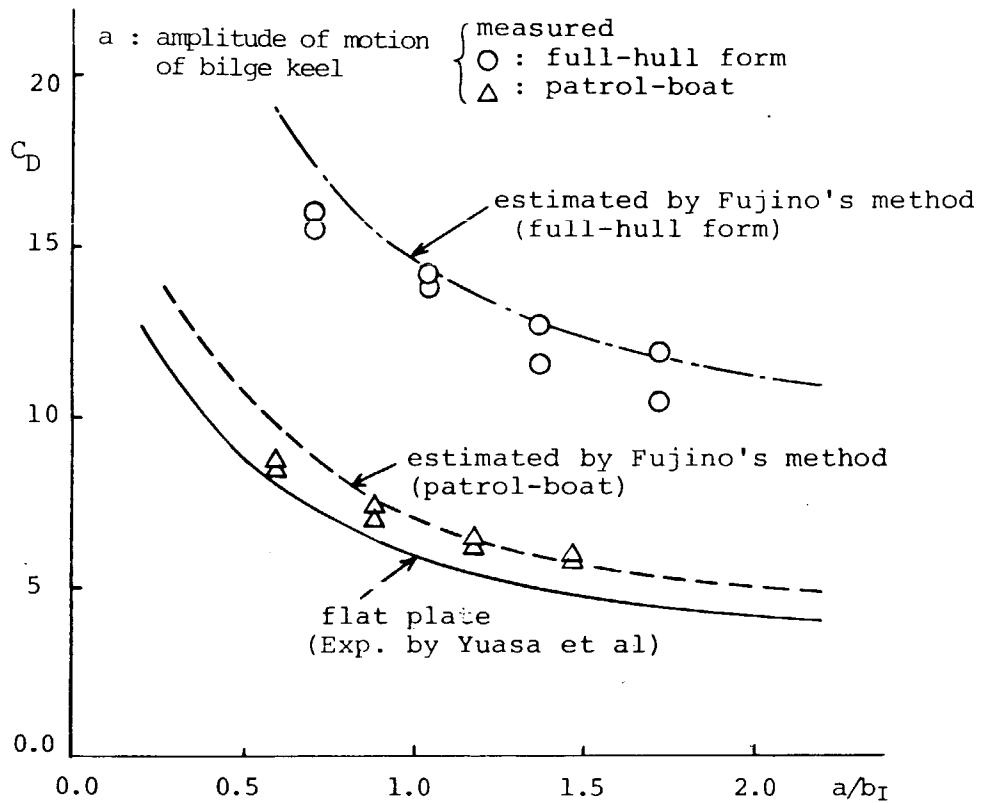


Fig.2.1.14 Drag coefficient of bilge keel.

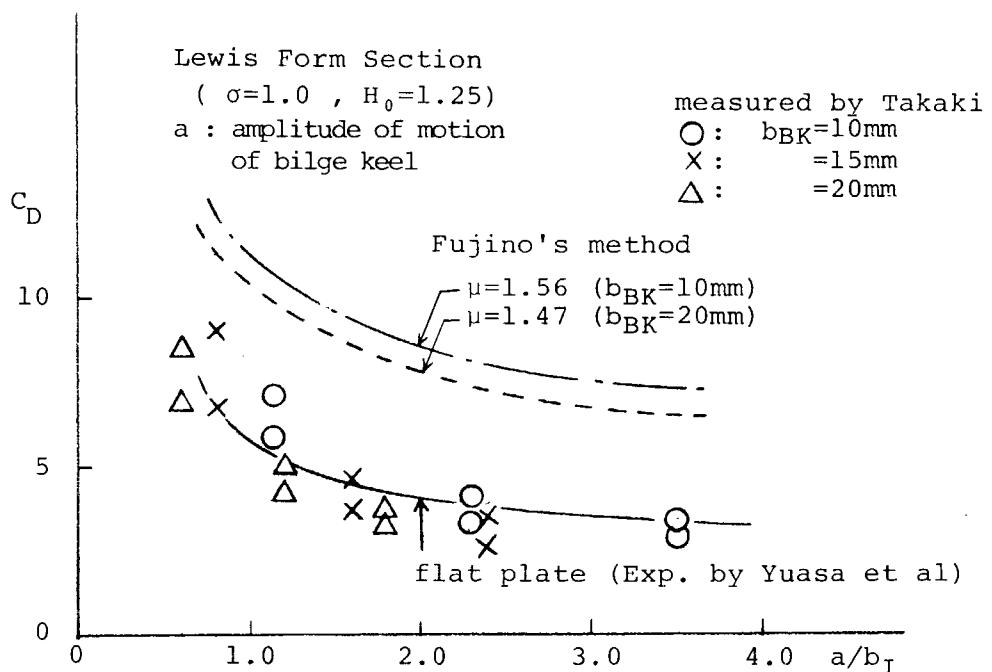


Fig.2.1.15 Drag coefficient of bilge keel.

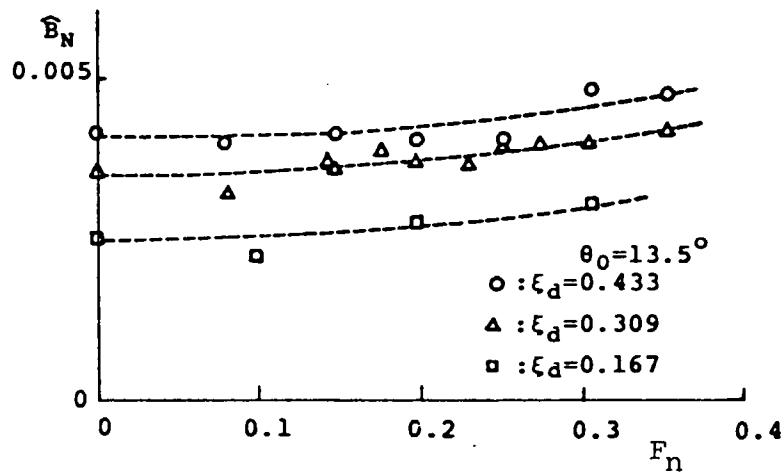


Fig.2.1.16 Effect of advance speed on normal force of bilge keels.

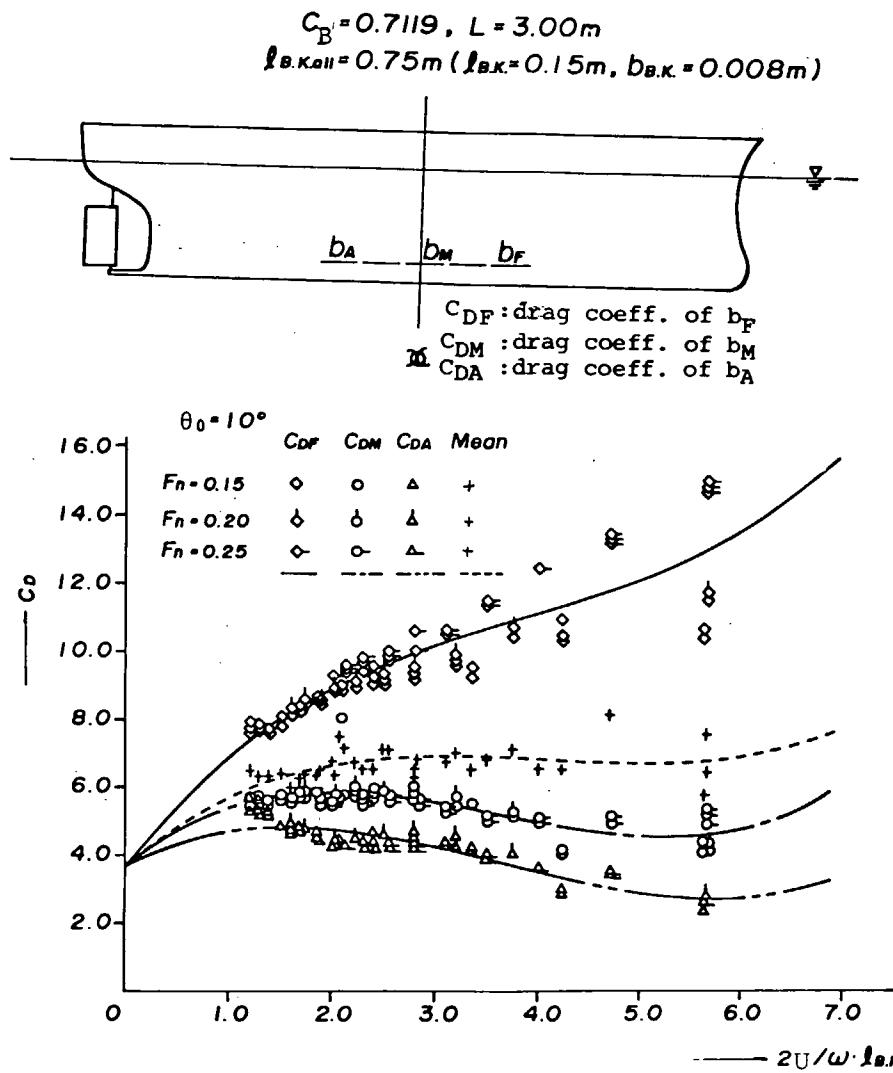


Fig.2.1.17 Drag coefficient of bilge keel at forward speed.

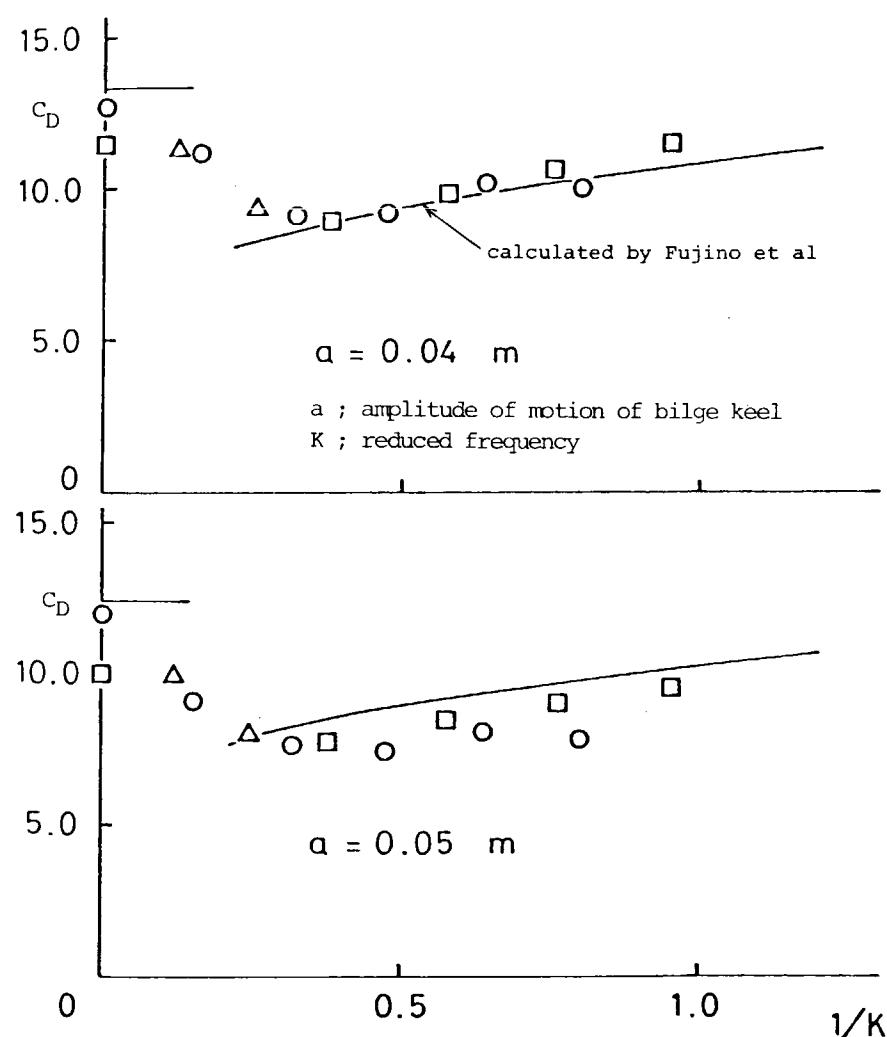


Fig.2.1.18 Drag coefficient of bilge keel at forward speed.

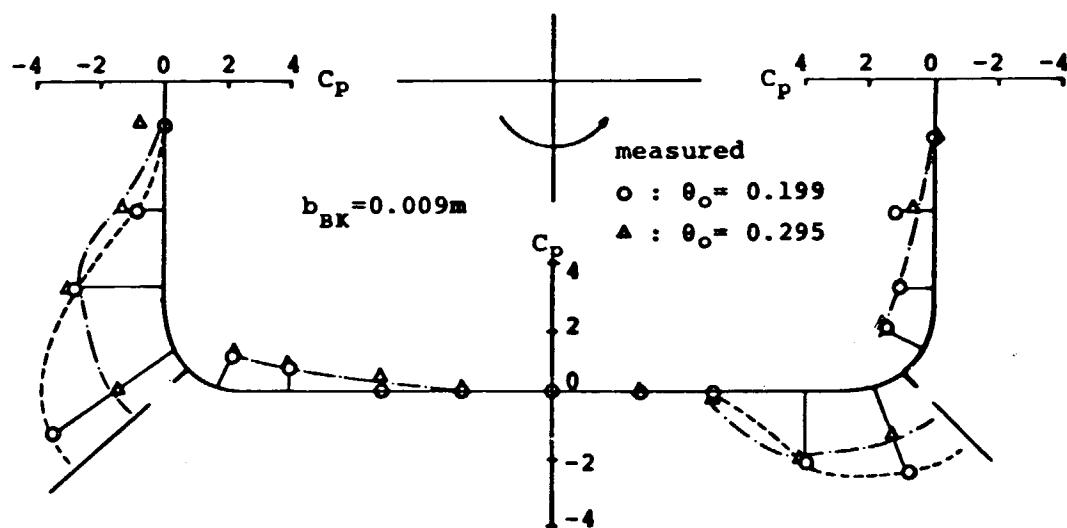


Fig. 2.1.19 Pressure distribution on hull.

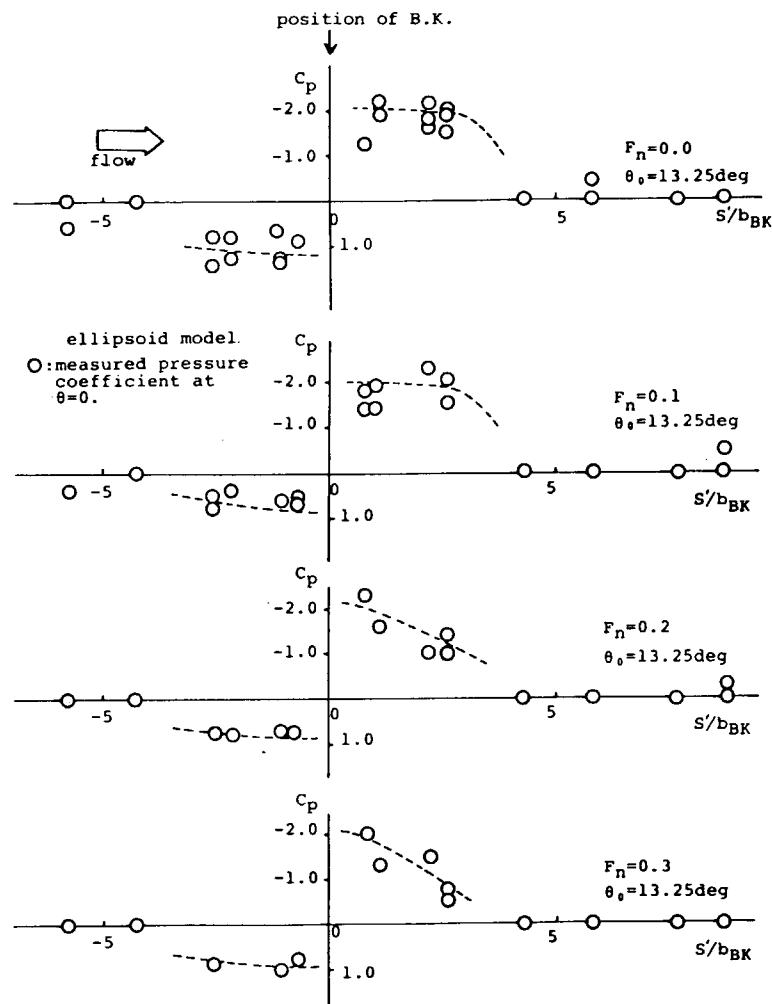


Fig. 2.1.20 Effect of advance speed on pressure created by bilge keels.

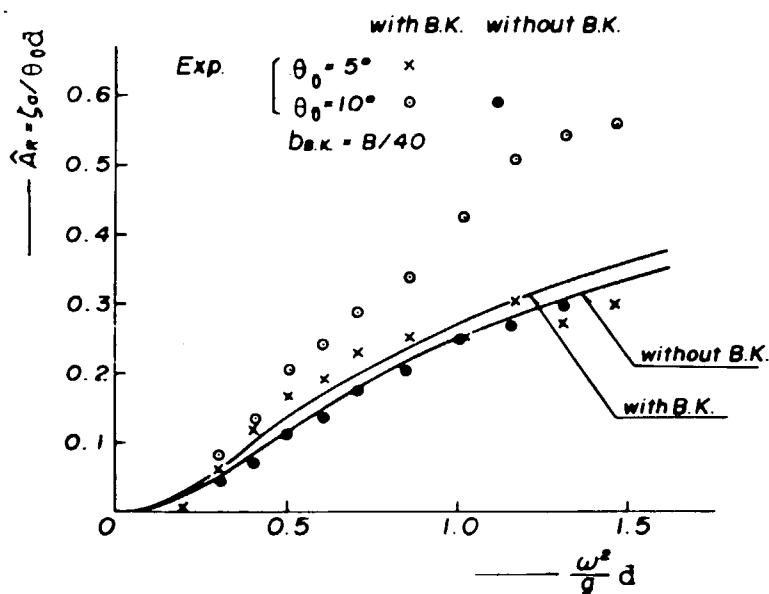


Fig. 2.1.21 Radiation wave amplitude of rolling two-dimensional cylinder with and without bilge keel.

## 2.2 成分減衰力の推定法

本節では横揺れ減衰力の推定法の1例として、池田らの提案した推定法<sup>6)7)</sup>について概説し、そのフォートラン・プログラムを示す。

池田らの推定法では、全横揺れ減衰力  $B_{\text{ff}}$  が摩擦成分、造波成分、造渦成分、揚力成分およびビルジキール成分の5成分の和として次式のように表わされる。

$$B_{\text{ff}} = B_F + B_W + B_E + B_L + B_{BK} \quad (2.2.1)$$

以下に各成分の推定法を簡単に述べる。

### 2.2.1 摩擦成分 $B_F$

この成分については、 $F_n=0$ 時の加藤の推定式<sup>2)</sup>に田宮の提案した前進速度影響修正<sup>4)</sup>を施した次式で表わされる加藤一田宮の式を用いる。

$$B_F = \frac{4}{3\pi} \rho S_f r_f^3 \theta_0 \omega C_f \left( 1 + 4.1 \frac{U}{\omega L} \right) \quad (2.2.2)$$

ただし、摩擦係数  $C_f$ 、等価半径  $r_f$ 、表面積  $S_f$  は近似的にそれぞれ次のように与えられる。

$$C_f = 1.328 \left( \frac{3.22 r_f^2 \theta_0^2}{T \nu} \right)^{-1/2} \quad (2.2.3)$$

$$r_f = \frac{1}{\pi} \left\{ (0.887 + 0.145 C_B) (1.7 d + C_B \cdot B) - 2OG \right\} \quad (2.2.4)$$

$$S_f = L (1.75 d + C_B \cdot B) \quad (2.2.5)$$

ここで、 $\rho$ は流体密度、 $\theta_0$ は横揺れ振幅、 $\omega$ は円周波数、 $U$ は前進速度、 $L$ は船の長さ、 $B$ は船幅、 $T$ は周期、 $\nu$ は動粘性係数、 $C_B$ は方形係数、 $OG$ は横揺れ軸から静止水面までの距離（吃水下が正）を表わす。

加藤はビルジキール付きの場合には乱流の公式を使うべきであるとしている<sup>2)</sup>が、これには第2.1.3節でも述べたように疑問がないわけではなく、また乱流による付加項はそれ程大きないので、ビルジキール付きの場合についても（2.2.3）式の層流の推定式を用いる。

### 2.2.2 造渦成分 $B_E$

$F_n=0$ 時の裸殻船体の造渦成分の係数  $B_2$  は前述のように断面形状だけによって決まるとしてよい。船体中央断面のように2点で剥離する場合と船首尾部のように1点で剥離する場合とに分けて、圧力分布をFig. 2.2.1に示すように1次式で仮定すると、造渦成分による減衰モーメント  $M_{RE}$  は

2点剥離断面では

$$M_{RE} = L d^2 \left\{ \left( 1 - \frac{R}{d} \right) \left( 1 - \frac{OG}{d} - \frac{R}{d} \right) + \left( H_0 - \frac{R}{d} \right)^2 \right\} \frac{P_m}{3} \quad (2.2.6)$$

1点剥離断面では

$$M_{RE} = L d^2 \left( 1 - \frac{OG}{d} + f_2 H_0^2 \right) \frac{P_m}{3} \quad (2.2.7)$$

となる。ここで、 $L$ は2次元柱体の長さ、 $d$ は喫水、 $R$ はビルジ半径、 $H_0$ は半幅喫水比（＝ $\frac{B}{2d}$ ）、 $P_m$ は剥離位置における左右舷対称位置での圧力差を表わし、 $f_2$ は船尾断面形状を表わす修正係数である。（2.2.6）式と（2.2.7）式は、2点剥離断面で1となり1点剥離断面で0となる適当な階段関数  $f_1$  を用いて次式のような1つの式にまとめることができる。

$$M_{RE} = L d^2 \left\{ \left( 1 - f_1 \frac{R}{d} \right) \left( 1 - \frac{OG}{d} - f_1 \frac{R}{d} \right) + f_2 \left( H_0 - f_1 \frac{R}{d} \right)^2 \right\} \frac{P_m}{3} \quad (2.2.8)$$

ここで、階段関数  $f_1$  は断面積係数  $\sigma$  の関数と考えて次式とする。

$$f_1 = \frac{1}{2} [ 1 + \tanh \{ 20 (\sigma - 0.7) \} ] \quad (2.2.9)$$

圧力差  $P_m$  は、各種2次元断面の強制横揺れ試験で(2.2.8)式左辺の  $M_{RE}$  を与えると実験的に求まる。 $P_m$  の圧力係数  $C_p$  ( $= \frac{2 P_m}{3 \rho Y_{max}^2 \theta |\theta|}$ ,  $Y_{max}$  は横揺れ中心軸から船体表面までの最大距離)を定義し、これが船体表面上の最大流速  $V_{max}$  と平均流速  $V_{mean}$ との比  $\gamma$  ( $= \frac{V_{max}}{V_{mean}}$ )に関係するとして整理したのがFig. 2.2.2である。この図から  $C_p$  の実験式として次式が導かれている。

$$C_p = \frac{1}{2} (0.87 e^{-\gamma} - 4 e^{-0.187\gamma} + 3) \quad (2.2.10)$$

また船尾断面の修正係数  $f_2$  の実験式としては次式が与えられている。

$$f_2 = \frac{1}{2} (1 - \cos \pi \sigma) - 1.5 (1 - e^{-5(1-\sigma)}) \sin^2 \pi \sigma \quad (2.2.11)$$

(2.2.10)式中のパラメタ  $\gamma$  の近似算出法は以下のとおりである。

$$\gamma = \frac{\sqrt{\pi} f_3}{2 d \left(1 - \frac{OG}{d}\right) \sqrt{H_0' \sigma'}} \left( r_{max} + \frac{2M}{H} \sqrt{A^2 + B^2} \right) \quad (2.2.12)$$

ただし、

$$M = \frac{B}{2(1 + a_1 + a_3)} \quad (2.2.13)$$

$$H = 1 + a_1^2 + 9a_3^2 + 2a_1(1 - 3a_3) \cos 2\psi - 6a_3 \cos 4\psi \quad (2.2.14)$$

$$A = -2a_3 \cos 5\psi + a_1(1 - a_3) \cos 3\psi \\ + \{(6 - 3a_1)a_3^2 + (a_1^2 - 3a_1)a_3 + a_1^2\} \cos \psi \quad (2.2.15)$$

$$B = -2a_3 \sin 5\psi + a_1(1 - a_3) \sin 3\psi \\ + \{(6 + 3a_1)a_3^2 + (3a_1 + a_1^2)a_3 + a_1^2\} \sin \psi \quad (2.2.16)$$

$$r_{max} = M \sqrt{\{(1 + a_1) \sin \psi - a_3 \sin 3\psi\}^2 + \{(1 - a_1) \cos \psi + a_3 \cos 3\psi\}^2} \quad (2.2.17)$$

$$\sigma' = \frac{\sigma - OG/d}{1 - OG/d}, \quad H_0' = \frac{H_0}{1 - OG/d} \quad (2.2.18)$$

$$\psi = \begin{cases} 0 = \psi_1 & \{ r_{max}(\psi_1) \geq r_{max}(\psi_2) \} \\ \frac{1}{2} \cos^{-1} \frac{a_1(1 + a_3)}{4a_3} = \psi_2 & \{ r_{max}(\psi_1) < r_{max}(\psi_2) \} \end{cases} \quad (2.2.19)$$

$$f_3 = 1 + 4 \exp \{-1.65 \times 10^5 (1 - \sigma)^2\} \quad (2.2.20)$$

ここで、 $a_1, a_3$  は半幅喫水比が  $H_0'$ 、横断面積係数が  $\sigma'$  の断面のルイスのパラメタである。

## 2.2.3 揚力成分 $B_L$

揚力成分  $B_L$  は次式で与えられる。

$$B_L = \frac{1}{2} \rho S_L U k_N \ell_o \ell_R \quad (2.2.21)$$

ここで、 $S_L$  は側面積 ( $= L \cdot d$ )、 $k_N$  は揚力勾配係数、 $\ell_o$  は横揺れ中心軸から代表迎角をとる位置までの距離、 $\ell_R$  は横揺れ中心軸から横揺れ時の揚力作用中心までの距離を表わす。池田らは、線型理論を用いて代表迎角を斜航時の揚力作用中心位置でとるべきことを示し、<sup>7)</sup> 実験結果も考慮して  $\ell_o, \ell_R$  を次式とした。

$$\ell_o = 0.3 d \quad (2.2.22)$$

$$\ell_R = 0.5 d \quad (2.2.23)$$

また、横揺れ軸の位置による影響についても、左右揺れと横揺れの線型重ね合せから得られた式を実験値を用い

て修正し、任意軸まわりに横揺れる船体に働く横揺れ減衰力の揚力成分  $B_L$  の推定公式として湯室の公式<sup>8)</sup>を修正した次式を導いた。<sup>7)</sup>

$$B_L = \frac{\rho}{2} U L d k_N \ell_0 \ell_R \left( 1 - 1.4 \frac{OG}{\ell_R} + 0.7 \frac{OG^2}{\ell_0 \ell_R} \right) \quad (2.2.24)$$

また、揚力勾配係数  $k_N$  は湯室と同じく次式の簡易公式を用いる。

$$k_N = \frac{2\pi d}{L} + \kappa \left( 4.1 \frac{B}{L} - 0.045 \right) \quad (2.2.25)$$

$$\kappa = \begin{cases} 0 & , C_M < 0.92 \\ 0.1 & , 0.92 < C_M \leq 0.97 \\ 0.3 & , 0.97 < C_M \leq 0.99 \end{cases} \quad (2.2.26)$$

#### 2.2.4 造波成分 $B_W$

$F_n = 0$  時の造波成分は OSM<sup>28)</sup> で推定し、この  $F_n = 0$  の時の値に前進速度の修正を行うこととする。この修正は、二重吹き出しを 2 個おいたモデルについての理論計算結果および平板、船体の実験結果を参考にして、Fig. 2.2.3 に示すような  $\Omega (= \omega U / g) = 1/4$  付近に最大値  $A_1$  を持ち、 $\Omega$  が大きい所で一定値  $A_2$  となる関数形を適当に定め、多くの模型実験結果から  $A_1$  および  $A_2$  の実験式を導いた。<sup>7)</sup>  $A_1, A_2$  を求めるにあたっては、減衰力の実験値より、摩擦、造渦および揚力成分の推定値を差し引き、残りを造波成分と考えた。 $A_1$  および  $A_2$  の実験値を Fig. 2.2.4, Fig. 2.2.5 に示す。以上の結果をまとめると造波成分は次式で推定することができる。

$$\hat{B}_W = \frac{1}{2} \hat{B}_{w0} \left[ \{ (A_2 + 1) + (A_2 - 1) \tanh 20(\Omega - 0.3) \} \right. \\ \left. + (2A_1 - A_2 - 1) \exp \{ -150(\Omega - 0.25)^2 \} \right] \quad (2.2.27)$$

$$A_1 = 1 + \xi_d^{-1.2} \exp(-2\xi_d) \quad (2.2.28)$$

$$A_2 = 0.5 + \xi_d^{-1.0} \exp(-2\xi_d) \quad (2.2.29)$$

$$\text{ただし, } \xi_d = \omega^2 \frac{d}{g}$$

ここで  $\hat{B}_{w0}$  は  $F_n = 0$  での造波成分の理論計算値を表わす。

#### 2.2.5 ビルジキール成分 $B_{BK}$

##### (1) ビルジキールの直圧力成分 $B_N$

ビルジキールの直圧力成分については (2.1.10) 式の抗力係数<sup>5)</sup> を用いて推定する。相当線型減衰係数  $B_N$  で表わすと、1 対のビルジキールに対し次式となる。

$$B_N = \frac{8}{3\pi} \rho r \ell_{BK} \omega f^2 \left( 22.5 \frac{b_{BK}^2 r}{\pi f} + 2.40 b_{BK} r^2 \theta_0 \right) \quad (2.2.30)$$

ここで、 $r$  は横揺れ回転軸からビルジキール取付け部までの距離、 $\ell_{BK}$  はビルジキールの長さ、 $b_{BK}$  はビルジキールの幅を表わす。また修正係数  $f$  については後述する。

##### (2) ビルジキールの船体表面圧力成分 $B_S$

池田ら<sup>18)</sup> は、ビルジキールの付いた 3 種類の 2 次元断面模型を横揺れさせ、船体表面圧力を計測した結果、ビルジキール前方の正圧分布はビルジキールから離れるに従いながら減少し、period parameter の影響もあまり受けないこと、およびビルジキール背後の負圧分布は直圧力と同じように period parameter の影響を受けることを明らかにした。負圧分布長さ  $S$  の計測結果を Fig. 2.2.6 に示す。これらの実験結果に基づき、Fig. 2.2.7 に示すような圧力分布を仮定し、負圧分布長さ  $S_0$  およびビルジキール直前の圧力係数  $C_p^+$  を実験結果から次のように仮定し、

$$S_0 / b_{BK} = 0.3 \left( \frac{\pi f r \theta_0}{b_{BK}} \right) + 1.95 \quad (2.2.31)$$

$$C_p^+ = 1.2 \quad (2.2.32)$$

また、ビルジキール背後の圧力係数  $C_p^-$  は、直圧力係数  $C_D$  と  $C_D = C_p^+ - C_p^-$  の関係があることを利用して

$$C_p^- = -22.5 \frac{b_{BK}}{\pi r f \theta_0} - 1.2 \quad (2.2.33)$$

とした。この圧力を積分すると2次元船体に対するビルジキールの船体表面圧力成分  $B_s$  は次式で与えられる。

$$B_s = \frac{4}{3\pi} \rho r^2 f^2 \omega \theta_0 \int_G C_p \cdot \ell \cdot dG \quad (2.2.34)$$

$$= \frac{4}{3\pi} \rho r^2 f^2 \omega \theta_0 d^2 (-A C_p^- + B C_p^+) \quad (2.2.35)$$

ここで  $A$ ,  $B$  は次のように与えられる。

$$A = (m_3 + m_4) m_8 - m_7^2 \quad (2.2.36)$$

$$B = \frac{m_4^3}{3(H_0^2 - 0.215m_1)} + \frac{(1-m_1)^2(2m_3-m_2)}{6(1-0.215m_1)} \\ + m_1(m_3m_5 + m_4m_6) \quad (2.2.37)$$

$$m_1 = R/d, \quad m_2 = OG/d$$

$$m_3 = 1 - m_1 - m_2, \quad m_4 = H_0 - m_1$$

$$m_5 = \frac{0.414H_0 + 0.0651m_1^2 - (0.382H_0 + 0.0106)m_1}{(H_0 - 0.215m_1)(1 - 0.215m_1)}$$

$$m_6 = \frac{0.414H_0 + 0.0651m_1^2 - (0.382 + 0.0106H_0)m_1}{(H_0 - 0.215m_1)(1 - 0.215m_1)} \quad (2.2.38)$$

$$m_7 = \begin{cases} S_0/d - 0.25\pi m_1 & (S_0 > 0.25\pi R) \\ 0 & (S_0 \leq 0.25\pi R) \end{cases}$$

$$m_8 = \begin{cases} m_7 + 0.414m_1 & (S_0 > 0.25\pi R) \\ m_7 + \sqrt{2}\{1 - \cos(S_0/R)\}m_1 & (S_0 \leq 0.25\pi R) \end{cases}$$

またビルジ半径  $R$  および横揺れ中心軸からビルジキールまでの距離  $r$  はそれぞれ次式で与えられる。

$$R = \begin{cases} 2d \sqrt{\frac{H_0(\sigma-1)}{\pi-4}} & (R < d, \quad R < B/2) \\ d & (H_0 \geq 1, \quad R/d > 1) \\ B/2 & (H_0 \leq 1, \quad R/d > H_0) \end{cases} \quad (2.2.39)$$

$$r = d \sqrt{\left\{H_0 - \left(1 - \frac{\sqrt{2}}{2}\right) \frac{R}{d}\right\}^2 + \left\{1 - \frac{OG}{d} - \left(1 - \frac{\sqrt{2}}{2}\right) \frac{R}{d}\right\}^2} \quad (2.2.40)$$

修正係数  $f$  については直圧力成分 ((2.2.30)式)と船体表面圧力成分 ((2.2.35)式)の推定値の和が、ビルジ半径の非常に小さい断面での実験結果と合うように決めた。

$$f = 1 + 0.3 e^{-160(1-\sigma)} \quad (2.2.41)$$

前進速度影響については両成分共考慮していない。

## 2.2.6 横揺れ減衰力推定フォートラン計算プログラム

以上の手法により、各成分減衰力を推定し（ただし、 $F_n = 0$  時の造渦成分、造波成分、ビルジキール成分は2次元断面に対する値を船長方向に積分して船全体の値を求める）、それらを加え合わせると全横揺れ減衰力が求まる。尺度影響に関する研究はあまり進んでいないが、造渦およびビルジキール成分の Reynolds 数 影

響は少ないと考えられ、無次元係数  $\hat{B}_{44}$  で表わすと  $\hat{B}_F$  だけが尺度影響を受けて減少すると考えてよいと思われる。

フォートラン計算プログラムを以下に示す。

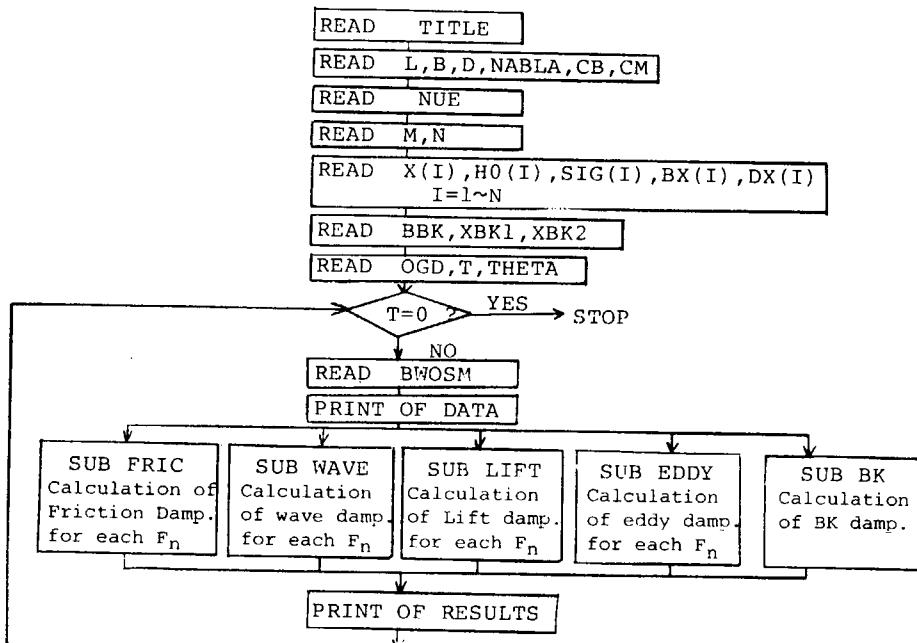
### 横揺れ減衰力推定 フォートラン計算プログラム

| (1) データの読み込み   |   | Input type |
|--|---|------------|
| (1)  | Title (70字)   | 70 A 1     |
| (2)  | L, B, D, NABLA, CB, CM<br>L ; 船長 (m), B ; 船幅 (m), D ; 喫水 (m), NABLA ; 排水容積 ( $m^3$ )<br>CB ; 方形係数, CM ; 船体中央横断面積係数  | 6 F 10.0   |
| (3)  | NUE<br>NUE ; 動粘性係数 ( $m^2/s$ )  | F 10.0     |
| (4)  | M, N<br>M ; フルード数の計算点数 (Fn=0 より 0.02 間隔)<br>N ; データ入力 SS 数 (=5 のデータカード数)  | 2 I 5      |
| (5)  | X(1), HO(1), S1G(1), BX(1), DX(1)<br>X(1) ; SS number (ただし AP を 0, FP を 10 とする)<br>HO(1) ; 半幅喫水比 $H_0$ ( $=BX(1)/2DX(1)$ )<br>SIG(1) ; 断面積係数 $\sigma$ ( $=\text{断面積}/BX(1) \cdot DX(1)$ )<br>BX(1) ; 船幅 (m), DX(1) ; 喫水 (m) | 5 F 10.0   |
| (6)  | BBK, XBK1, XBK2<br>BBK ; ビルジキールの幅 $b_{BK}$ (m)<br>XBK1 ; ビルジキール端の X(1) (SS number) (船尾側)<br>XBK2 ; " (船首側)  | 3 F 10.0   |
| (7)  | OGD, T, THETA<br>OGD ; $=OG/d$<br>OG は静止水面から重心 (回転中心) までの距離。重心が静止水面より下の時が正<br>T ; 横揺れ周期 (sec)<br>THETA ; 横揺れ振幅 (rad)  | 3 F 10.0   |
| (8)  | BWOSM<br>BWOSM ; $Fn=0$ 時の造波成分 ( $=\hat{B}_W$ )   | F 10.0     |
| (1)～(8)のデータによる横揺れ減衰力の各成分を計算する。同一船型で OGD, T, THETA, BWOSM を変えて計算するときは、(7)(8)のカードのみ加える。計算は T=0 となればストップする。 |   |            |
| ○データの順番 ; (1) (2) (3) (4) (5) (6) (7) (8) (7)(8) (7) (8) (白紙)  |   | ↓<br>Stop  |
| (2)  | 出 力   |            |
| (1)  | 入力データのプリント  |            |
| (2)  | 造渦減衰係数 $C_R$ の船長方向分布  |            |
| (3)  | ビルジキール成分 $\hat{B}_{BK}$ と $\hat{B}_N/\hat{B}_{BK}$ の船長方向分布<br>$\hat{B}_{BK}$ ; 各断面の単位長さ当りの $\hat{B}_{BK}$<br>$\hat{B}_N$ ; 各断面の単位長さ当りの直圧力成分 $\hat{B}_N$   |            |
| (4)  | 各フルード数に対する<br>各成分値 $\hat{B}_F, \hat{B}_W, \hat{B}_E, \hat{B}_L, \hat{B}_{BK}$   |            |

構成比  $\hat{B}_F/\hat{B}_{44}, \hat{B}_W/\hat{B}_{44}, \hat{B}_E/\hat{B}_{44}, \hat{B}_L/\hat{B}_{44}, \hat{B}_{BK}/\hat{B}_{44}$   
 全横揺れ減衰力  $\hat{B}_{44}$

のプリント

(3) フローチャート



```

***** ESTIMATION OF ROLL DAMPING *****
CODED BY Y.IKEDA. ....
C
C      REAL L,NUE,NABLA
C      DIMENSION X(25),HD(25),SIG(25),BX(25),DX(25),B44HAT(100),
C           BWHAT(100),BEHAT(100),BLHAT(100)
C
C      *FN(100),TITLE(70),BPHAT(100)
C
C      READ (5,100) (TITLE(i),i=1,70)
C      FORMAT (70A1)
C
C      *** PRINCIPAL DIMENSIONS ***
C      L=LENGTH, B=BREADTH, D=DRAFT, NABLA=VO
C      CB=BLOCK COEFF., CM=MIDSHIP COEFF. ..
C
C      READ (5,01) L,B,D,NABLA,CB,CM
C      FORMAT (6F10.0)
C      READ (5,03) NUE
C      FORMAT (F10.0)
C
C      *** NUMBERS OF FN AND DATAS ***
C
C      READ (5,104) N
C      FORMAT (2I5)
C
C      *** PARAMETERS OF EACH SECTION ***
C      H0=B/2D, SIG=S/BD, BX=BREADTH
C      DX=DRAFT
C
C      DO 1 I=1,N
C      READ (5,P104) X(I),H0(I),SIG(I),BX(I),DX(I)
C
C      105 FORMAT (5F10.0)
C
C      *** BILGE KEELS DATA ***
C      BBK=BREADTH OF B.K., XBK1=X OF B.K. END (APT)
C      XBK2=X OF B.K. END (FOR)
C
C      READ (5,106) BBK,XBK1,XBK2
C
C      FORMAT (3F10.0)
C
C      106 CONTINUE
C
C      *** CONDITION ***
C      OGD=OG/D, TPERIOD=THETAM=AMP. OF ROLL
C      READ (5,102) OGD,T,THETA
C
C      FORMAT (3F10.0)
C
C      102 IF (T.LT.0.000001) STOP
C
C      *** WAVE MAKING COMPONENT AT FN=0.0 ***
C      READ (5,103) BWOSH
C
C      WRITE (6,200) (TITLE(i),I=1,70)
C
C      200 FORMAT ((H1,i,/,7X,5H****,2X,70A1,5H****))
C
C      WRITE (6,300) L,B,D,NABLA,CB,CM
C
C      300 FORMAT ((H ,/,5X,8H****DATA****,2X,2H ,/,
C           F8.5,2X,6HNABLA****,F8.5,2X,3HCMB****,F8.5)
C
C      WRITE (6,311) OGD,T,THETA,NUE,BWOSH
C
C      301 FORMAT ((H ,/5X,5HOG/D=,F8.3,2X,2H ,/,
C           F8.3,2X,6HTHETA**,F8.3,3HRAD
C
C           ,2X,4HNUE**,F12.3,2X,6HBWOSH**,F15.10)
C
C      302 FORMAT ((H ,5X,4HBHKK=,F8.5,2X,5HXBK1**,F8.3,2X,5HBK2**,
C           F8.3)
C
C      WRITE (6,304)
C
C      304 FORMAT ((1H ,/,4X,25H+DATA OF EACH SECTION+))
C
C      DO 15 I=1,N
C
C      15 WRITE (6,305) X(I),H0(I),SIG(I),BX(I),DX(I)
C
C      303 FORMAT ((1H ,4X,3HSSM=,F8.5,3X,3HMO=,F8.5,3X,3HBS=,
C           F8.5,3X,2HBS=,F8.5)
C
C      *****+
C
C      UMEGA6,28318/7
C      DO 2 I=1,M
C      2 PN(I)=0.0+0.02*FLOAT(I-1)
C
C      CALL FRIC (L,B,D,CB,NABLA,OGD,NUE,OMEGA,PN,BPHAT,M)
C
C      CALL WAVE (L,B,D,MESAB,WOSH,PN,BWOSH)
C
C      CALL LIFT (L,B,D,MESAB,LIFT,PN,BWOSH)

```

```

57      CALL EDDY
      (X,HO,SIG,BX,DY,B,D,NABLA,OGD,OMEGA,THETA,PN,
58      BEHAT,M,N,L)
59      IF (BBK.LT.0.00000001) GO TO 20
60      CALL_BK
      (X,HO,SIG,BX,DY,B,D,NABLA,OGD,OMEGA,THETA,BBK,
61      XBK1,XBK2,BBKHAT,M,N,L)
62      IF(BBK.LT.0.00000001) BBKHAT=0.0
63      DO 3   I=1,M
64      3   B44HAT(I)=BFHAT(I)*BWHT(I)+BLHAT(I)*BEHAT(I)*BBKHAT
65      ****
66      ****
67      201   ****
68      ****
69      ****
70      ****
71      00 4   I=1,M
72      BFF=BFHAT(I)/B44HAT(I)
73      BWB=BWHAT(I)/B44HAT(I)
74      BEE=BEHAT(I)/B44HAT(I)
75      BLL=BLHAT(I)/B44HAT(I)
76      BBK=BBKHAT
77      WRITE(6,202)FN(I),BFHAT(I),BWHT(I),BEHAT(I),BLHAT(I),BBKHAT,
78      ****
79      202   FORMAT (1H ,2X,F6.3,2X,F8.5,2X,F8.5,2X,F8.5,
80      ****
81      ****
82      00 TO 5
83      END
*****
```

```

1      ****
2      ****
3      ****
4      ****
5      ****
6      ****
7      ****
8      ****
9      ****
10     ****
11     ****
12     ****
13     ****
14     ****
15     ****
16     ****
17     ****
18     ****
*****
```

```

1      ****
2      ****
3      ****
4      ****
5      ****
6      ****
7      ****
8      ****
*****
```

```

9      A2=0.5*GUZAID**(-1.0)*EXP(-2.0*GUZAID)
10     DO 1 I=1,M
11       LOMEGA=OMEGA*FN(I)*SQR(L/9.80665)
12       RWHAT(I)=B0SM*0.5*((A2+1.0)*(A2-1.0)*TANH(20.0*(LOMEGA=0.3)))+
13          (2.0*A1-A2+1.0)*EXP(-150.0*(LOMEGA=0.25)**2)
14     RETURN
15   END

1      C ****
2      C   SUBROUTINE FRICIT (L,B,D,CB,NABLA,OGD,NUE,OMEGA,FN,BFHAT,M)
3      C   FRICTIONAL COMPONENT
4      C     REF. H.KATO (JZK,NO.102) AND S.TAMIYA ET AL (JZK,NO.132)
5      C     REAL NABLA,NUE,L
6      C     DIMENSION FN(100),BFHAT(100)
7      C     SF=L*(C1**D+CB*B)
8      C     RF=((0.887+0.145*CB)*(1.7*D+CB*B)-2.0*0GD*0)/3.1415
9      C     DO 1 I=1,M
10     C     1 BFHAT(I)=0.787*SF*RF*2*SQRT(OMEGA*NUE*B/19.6133)/(NABLA*B**2)
11     C     * *(1.0+4.1*FN(I))/OMEGA*SQRT(9.80665/L)
12     C     RETURN
13   END

1      C ****
2      C   SUBROUTINE EDDY (X,H0,SIG,BX,DX,B,D,NABLA,OGD,OMEGA,THETA,FN,
3      C     BEHAT,M,N,L)
4      C     EDDY MAKING...COMPONENT
5      C     REF. YAKEDA ET AL (JZK,NO.142,JZK,NO.143)
6      C     REAL NARLA,LTHETA,L
7      C     DIMENSION X(25),H0(25),SIG(25),BX(25),DX(25),FN(100),BEHAT(100),
8      C     RMAX1(25),V(2),CR(25),X1(25),X1(30)
9      C     DO 1 J=1,N
10     C     AH0=H0(J)/(1.0-0GD)
11     C     SIGMA=(SIG(J)-0GD)/(1.0-0GD)
12     C     E=(AH0-1.0)/(AH0+1.0)
13     C     E2=E**2
14     C     A=4.0*SIGMA*(1.0-E2)/3.1415+E2
15     C     O=-A/(A+3.0)
16     C     O2=SQR(O**2-(A-1.0)/(A+3.0))
17     C     A3=O+O2
18     C     A1=E*(1.0+A3)
19     C     AM=BX(J)/(1.0+A1+A3)*0.5
20     C     AA1=A1*(1.0+A3)/A3+0.25
21     C     IF(AA1.GT.-1.0) AA1=1.0
22     C     IF(AA1.LT.-1.0) AA1=-1.0
23     C     DO 2 I=1,2
24     C       LTHETA=0.5*ARCOS(AA1)
25     C       IF (I.EQ.1) LTHFTA=0.0
26     C       AH=1.0+A1**2+9.0*A3**2+2.0*A1*(1.0-3.0*A3)*COS(2.0*LTHETA)-6.0*A3
27     C       * COS(6.0*LTHFTA)
28     C       AA=2.0+A3*COS(5.0*LTHETA)+A1*(1.0-A3)*COS(3.0*LTHETA)+(6.0-3.0*
29     C       * A1)*A3**2+(A1**2-3.0*A1)*A3+A1**2*COS(CLTHETA)
30     C       BB=-2.0*A3*SIN(5.0*LTHETA)+A1*(1.0-A3)*SIN(3.0*LTHETA)+(6.0+3.0*
31     C       * A1)*A3**2+(3.0*A1+A1**2)*A3+A1**2*SIN(CLTHETA)
32     C       V(I)=2.0*AM+SQT((AA**2+BB**2)/AH
33     C       2 RMAX1(I)=A1*SQT((1.0+A1)*SIN(CLTHETA)-A3*SIN(3.0*LTHETA))***2
34     C       * +((1.0-A1)*COS(CLTHETA)+A3*COS(3.0*LTHETA))***2

```

```

35      RMAX=RMAX1(1)
36      VMAX=V(1)
37      IF (RMAX1(1).LE.RMAX1(2)) GO TO 8
38      GO TO 9
39      8   RMAX=RMAX1(2)
40      VMA=V(2)
41      9   CONTINUE
42      RMEAN=2.0*DX(J)*(1.0+OGD)*SQRT(AHO*SIGMA3,1415)
43      P1=VMAX/RMEAN
44      P2=RMAX/RMEAN
45      PP3=P1+P2
46      GAMMA=(1.0+4.0*EXP(-165000.0*(1.0-SIGMA)**2))*PP3
47      CP=0.87*EXP(GAMMA)-4.0*EXP(-0.187*GAMMA)+3.0
48      F1=0.5*(1.0+TANH(20.0*(SIG(J)**0.7)))
49      F2=0.5*(1.0+COS(3.1415*SIG(J)))-1.5*(1.0*EXP(-5.0*(1.0*SIG(J))))*
50      *   SIN(3.1415*SIG(J))**2
51      R=2.0*Dx(J)*SQRTHO(J)*(SIG(J)-1.0)/(=-0.5584)
52      RD=RDX(J)
53      IF (HO(J).LE.1.0.AND.RD.GE.AHO) R=0.5*BX(J)
54      IF (HO(J).GT.1.0.AND.RD.GE.1.0) R=DX(J)
55      RD=RDX(J)
56      1   CR1(J)=RMAX**2/DX(J)**2+CP*((1.0*F1*RD)+(1.0*OGD-F1*RD)*F2*
57      *   (HO(J)-F1*RD)**2)
58      WRITE(6,452)
59      452  FORMAT(1H//,4H*****31H LONGITUDINAL DISTRIBUTION OF CR,
60      *   4H*****)
61      DO 10 J=1,N
62      10  WRITE(6,453) X(J),CR1(J)
63      453  FORMAT(1H'4X,3HSS,F8.5,4X,3HCR,FR.5)
64      DO 3 K=1,21
65      X1(K)=0.0+0.5*FLOAT(K-1)
66      MAX=N
67      3   CALL HOKAN1(X(CR1),25,MAX,X(K),CR(K),DAM,1,0)
68      CR(1)=1.5*(1.0-OGD)
69      CR(2)=1.5*(1.0-OGD)
70      SAM=0.0
71      DO 4 K=1,10
72      K2=2*K
73      K1=K2-1
74      K3=K2+1
75      SAM1=CR(K1)+6.0+CR(K2)+CR(K3)
76      SAM=SAM+SAM1
77      CRT=SAM/60.0
78      BEHAT(1)=4.0**4.0**4.0**4.0*SQRT(B/19.6)/NARLA/B**2*CRT
79      *   *THETA
80      DO 5 I=2,M
81      AK=OMEGA/FN(I)*SQRT(L/9.8)
82      BEHAT(I)=BEHAT(1)*(0.04*AK)**2/((0.04*AK)**2+1.0)
83      RETURN
84
1      C ****
2      *   SUBROUTINE BK(X,H0,SIG,BX,D,NABLA,OGD,OMEGA,THETA,BBK,
3      *   XBK1,XBK2,BKHAT,M,N,L)
4      *   DAMPING DUE TO BILGE KEELS.
5      *   REF. Y.IKEDA ET AL. (KZK NO.161, KZK NO.165)
6      *   REAL NABLA, M1=M2,M3=M4,M5=M6,M7=M8,L
*****
```

```

7 DIMENSION X(25),W0(25),S10(25),SN(25),49X(25),BBKHAT(25),BXK(25)
8 ,RAT10(25),
9 XBK(1)=XBK1
10 BBK(1)=BBK2
11 DO 9 I=2,10
12 XBK(I)=XBK(I-1)+(XBK2-XBK1)*0.1
13 MAXBN
14 IM1=11
15 CALL HOKAN1 (X/H0, 25/MAX,XBK(I)),H01,DAM,1,0)
16 CALL HOKAN1 (X/816, 25/MAX,XBK(I)),SIG1,DAM,1,0)
17 CALL HOKAN1 (X/DX, 25/MAX,XBK(I)),DX,DAM,1,0)
18 CALL HOKAN1 (X/BX, 25/MAX,XBK(I)),BX,DAM,1,0)
19 R=2,*DX1*SQRT(H01*(SIG1=1.0)/(-0.8955))
20 RD=RD*X1
21 IF (H01.LE.0.0.AND.RB.GE.H01) R=0.5*BX1
22 IF (H01.GT.1.0.AND.RD.GE.1.0) RD=DX1
23 RD=RD*X1
24 F=1.0+0.3*EXP((=160.0*(1.0*SIG1)))
25 RBK=DX1*SQRT ((H01=0.2929*RD)**2+(1.0*GD=0.2929*RD)**2)
26 M1=RD
27 M2=GD
28 M3=0.*M1=M2
29 M4=H01*M1
30 M5=H0.414*H01**0.0651*M1**2*(0.382*H01**0.0106)*M1)/(H01=0.215
31 *(M1)*1.0=0.215*M1)
32 M6=(0.414*H0**0.0651*M1**2*(0.382*0.0106*H01)*M1)/(H01=0.215
33 *(M1)*(1.0=0.215*M1))
34 S0=0.3*((3.145*#RBK*THETA)+1.95*BBK
35 M7=SD0DX1=0.25*3.145*M1
36 R1=0.25*3.145*R
37 IF (50.LT.R1) M7=0.0
38 M8=M7*0.414*M1
39 IF (50.LT.R1) M8=M7+1.614*(1.0=COS(S0/R))+M1
40 A=(M2,M4),M8=M7+2,
41 BB=4**3/3*(H01=0.215*M1)+(1.0=M1)**2*(2.0*M3*M2)/6.0/(1.0=0.215
42 *(M1)*M1*(M3+M5+M4+M6))
43 CPPLAS=1.2
44 CPMINS=22.5*BBK/(3.1415*RBK+F*THETA)=1.2
45 CD=CPPLAS*CPMINS
46 C *** BBKHAT FOR UNIT LENGTH ***
47 RATIO(I)=RBK*CD*(RBK*CD+2*OMEGA*GRT(B/19.6)*THEA*F**2/3*0**3*1615
48 BBKHAT(I)=8.0*RBK**2*OMEGA*GRT(B/19.6)*THEA*F**2/3*0**3*1615
49 *NABLA*B**2)*(RBK*BBK*CD+0.5*DX1**2*(A*CPMINS+BB*CPPLAS
50 ))
51 WRITE (6,100)
52 FORMAT ($1H / / 4H*****35H LONGITUDINAL DISTRIBUTION OF BBKHAT,
53 6H*****)
54 DO 7 IM1=11
55 7 WRITE (6,101) XBK(I),BBKHAT(I),RATIO(I)
56 101 FORMAT (1H / 4X,3HSS=,F8.5,3X,7HBBKHAT=,F13.8,3X,22HNORMAL FORCE/T
57 *TOTAL BK=F13.8)
58 *** BBKHAT FOR THREE-DIMENSIONAL SHIP FORM...***+
59 SAM=0.0
60 DO 3 IM1=1,5
61 3 1=2,1
62 SAM=BBKHAT(I2=1)+6.0*BBKHAT(I2)+BBKHAT(I2+1)
63 3 SAM=SAM+SAM
64 BBKHAT=SAM*(IER2=XBK1)*0.1/1.0**0.1
65 RETURN
66 END

```

```

1   C ****
2   C      SUBROUTINE HOKAN1 (X1,Y1,MAX,N,X,Y,M1,M2)
3   C      LAGRANGE 3 POINTS INTERPOLATION
4   C      DIMENSION X1(MAX),Y1(MAX),WX(3),WY(3)
5   C      WIEN=1
6   DO 10 I=2,MAX
7   10   IF (X .LE. X1(I)) GO TO 1
8   CONTINUE
9   I1=I+1
10  I1=I+1
11  I2=I1+2
12  DO 20 I=I1,I2-
13  I1=I+1
14  WX(I1)=X1(I1)
15  WY(I1)=Y1(I1)
16  IF(M1.NE.1) GO TO 2
17  CALL LAG3(WX,WY,X,Y)
18  CONTINUE
19  IF(M2.NE.1) RETURN
20  YX=0.0
21  RETURN
22  END
23
24
25
26
27
28
29
30
31
32
33
34
35
36
37
38
39
40
41
42
43
44
45
46
47
48
49
50
51
52
53
54
55
56
57
58
59
60
61
62
63
64
65
66
67
68
69
70
71
72
73
74
75
76
77
78
79
80
81
82
83
84
85
86
87
88
89
90
91
92
93
94
95
96
97
98
99
100
```

## \*\*\*\*\* SRI10B CONTAINER

\*\*DATA\*\* L= 1.75000 B= 0.25400 D= 0.09500 NABLA= 0.02400 CB= 0.57100 CN= 0.97000  
 OG/D= 0. T= 1.200 THETA= 0.175RAD NU= 0.00000114 BWSM= 0.00095620  
 BK1= 0.00450 XBK1= 3.750 XBK2= 6.250

## \*\*\*DATA OF EACH SECTION\*\*\*

|            |             |                |            |            |
|------------|-------------|----------------|------------|------------|
| SS= 0.     | H0= 2.10600 | SIGMA= 0.72700 | B= 0.03000 | D= 0.00700 |
| SS= 0.500  | H0= 0.47300 | SIGMA= 0.27700 | B= 0.09000 | D= 0.09000 |
| SS= 1.000  | H0= 0.74100 | SIGMA= 0.66000 | B= 0.14100 | D= 0.09300 |
| SS= 1.500  | H0= 0.95600 | SIGMA= 0.56200 | B= 0.18200 | D= 0.09000 |
| SS= 2.000  | H0= 1.12000 | SIGMA= 0.65800 | B= 0.21300 | D= 0.09500 |
| SS= 2.500  | H0= 1.23000 | SIGMA= 0.74600 | B= 0.23400 | D= 0.09000 |
| SS= 3.000  | H0= 1.29500 | SIGMA= 0.82700 | B= 0.24600 | D= 0.09500 |
| SS= 3.500  | H0= 1.32800 | SIGMA= 0.89000 | B= 0.25300 | D= 0.09500 |
| SS= 4.000  | H0= 1.33500 | SIGMA= 0.94000 | B= 0.25000 | D= 0.09500 |
| SS= 4.500  | H0= 1.33500 | SIGMA= 0.96600 | B= 0.25400 | D= 0.09500 |
| SS= 5.000  | H0= 1.33500 | SIGMA= 0.97000 | B= 0.25000 | D= 0.09500 |
| SS= 5.500  | H0= 1.33400 | SIGMA= 0.95200 | B= 0.25400 | D= 0.09500 |
| SS= 6.000  | H0= 1.30600 | SIGMA= 0.91400 | B= 0.24000 | D= 0.09500 |
| SS= 6.500  | H0= 1.22800 | SIGMA= 0.86800 | B= 0.23500 | D= 0.09500 |
| SS= 7.000  | H0= 1.10500 | SIGMA= 0.81000 | B= 0.20000 | D= 0.09500 |
| SS= 7.500  | H0= 0.93700 | SIGMA= 0.77200 | B= 0.17800 | D= 0.09500 |
| SS= 8.000  | H0= 0.73800 | SIGMA= 0.73200 | B= 0.14000 | D= 0.09500 |
| SS= 8.500  | H0= 0.52700 | SIGMA= 0.72000 | B= 0.10000 | D= 0.09500 |
| SS= 9.000  | H0= 0.33100 | SIGMA= 0.75100 | B= 0.07000 | D= 0.09500 |
| SS= 9.500  | H0= 0.16400 | SIGMA= 0.92300 | B= 0.03100 | D= 0.09500 |
| SS= 10.000 | H0= 0.07700 | SIGMA= 1.00000 | B= 0.00700 | D= 0.09500 |

## \*\*\*LONGITUDINAL DISTRIBUTION OF CR\*\*\*

|              |             |
|--------------|-------------|
| SS= 0.       | CR= 0.01930 |
| SS= 0.50000  | CR= 1.08838 |
| SS= 1.00000  | CR= 0.53705 |
| SS= 1.50000  | CR= 0.10031 |
| SS= 2.00000  | CR= 0.02335 |
| SS= 2.50000  | CR= 0.00043 |
| SS= 3.00000  | CR= 0.00151 |
| SS= 3.50000  | CR= 0.03689 |
| SS= 4.00000  | CR= 0.17439 |
| SS= 4.50000  | CR= 0.37376 |
| SS= 5.00000  | CR= 0.42150 |
| SS= 5.50000  | CR= 0.26781 |
| SS= 6.00000  | CR= 0.07310 |
| SS= 6.50000  | CR= 0.01108 |
| SS= 7.00000  | CR= 0.00040 |
| SS= 7.50000  | CR= 0.00034 |
| SS= 8.00000  | CR= 0.02475 |
| SS= 8.50000  | CR= 0.15268 |
| SS= 9.00000  | CR= 0.42203 |
| SS= 9.50000  | CR= 0.37702 |
| SS= 10.00000 | CR= 0.36397 |

\*\*\*\*\*LONGITUDINAL DISTRIBUTION OF BBKHAT\*\*\*\*\*

|             |                    |                                   |
|-------------|--------------------|-----------------------------------|
| SS= 3.75000 | BBKHAT= 0.00453689 | NORMAL FORCE/TOTAL BK= 0.47981367 |
| SS= 4.00000 | BBKHAT= 0.00580597 | NORMAL FORCE/TOTAL BK= 0.40740543 |
| SS= 4.25000 | BBKHAT= 0.00714898 | NORMAL FORCE/TOTAL BK= 0.35315630 |
| SS= 4.50000 | BBKHAT= 0.0081900  | NORMAL FORCE/TOTAL BK= 0.31508720 |
| SS= 4.75000 | BBKHAT= 0.00920128 | NORMAL FORCE/TOTAL BK= 0.29615364 |
| SS= 5.00000 | BBKHAT= 0.00906588 | NORMAL FORCE/TOTAL BK= 0.29918894 |
| SS= 5.25000 | BBKHAT= 0.00810482 | NORMAL FORCE/TOTAL BK= 0.32434918 |
| SS= 5.50000 | BBKHAT= 0.00676648 | NORMAL FORCE/TOTAL BK= 0.36655595 |
| SS= 5.75000 | BBKHAT= 0.00533023 | NORMAL FORCE/TOTAL BK= 0.42870754 |
| SS= 6.00000 | BBKHAT= 0.00616363 | NORMAL FORCE/TOTAL BK= 0.49768392 |
| SS= 6.25000 | BBKHAT= 0.00318729 | NORMAL FORCE/TOTAL BK= 0.57803215 |

|       |         |         |         |       |        |         |         |         |          |
|-------|---------|---------|---------|-------|--------|---------|---------|---------|----------|
| FN    | BFHAT   | BWHAT   | BRHAT   | BLHAT | BE/B44 | BW/B44  | BL/B44  | BBK/B44 | BL44/HAT |
| 0.    | 0.00068 | 0.00096 | 0.00113 | 0.    | 0.0298 | 0.11846 | 0.19703 | 0.51833 | 0.00374  |
| 0.020 | 0.00070 | 0.00096 | 0.00108 | 0.    | 0.0298 | 0.11756 | 0.1979  | 0.49714 | 0.0099   |
| 0.040 | 0.00073 | 0.00100 | 0.00104 | 0.    | 0.0298 | 0.11789 | 0.15197 | 0.48777 | 0.00318  |
| 0.060 | 0.00075 | 0.00120 | 0.00078 | 0.    | 0.0298 | 0.11558 | 0.18458 | 0.45625 | 0.00633  |
| 0.080 | 0.00078 | 0.00184 | 0.00062 | 0.    | 0.0298 | 0.10670 | 0.25180 | 0.40761 | 0.00371  |
| 0.100 | 0.00080 | 0.00274 | 0.00050 | 0.    | 0.0298 | 0.09610 | 0.32681 | 0.35563 | 0.00837  |
| 0.120 | 0.00083 | 0.00316 | 0.00040 | 0.    | 0.0298 | 0.09229 | 0.35110 | 0.48112 | 0.33115  |
| 0.140 | 0.00085 | 0.00307 | 0.00032 | 0.    | 0.0298 | 0.09369 | 0.33542 | 0.20811 | 0.35631  |
| 0.160 | 0.00088 | 0.00281 | 0.00027 | 0.    | 0.0298 | 0.09668 | 0.30857 | 0.23552 | 0.32709  |
| 0.180 | 0.00091 | 0.00264 | 0.00024 | 0.    | 0.0298 | 0.09860 | 0.28703 | 0.26666 | 0.2431   |
| 0.200 | 0.00093 | 0.00260 | 0.00019 | 0.    | 0.0298 | 0.09894 | 0.27613 | 0.28881 | 0.31661  |
| 0.220 | 0.00096 | 0.00259 | 0.00016 | 0.    | 0.0298 | 0.09882 | 0.26826 | 0.30812 | 0.3789   |
| 0.240 | 0.00098 | 0.00259 | 0.00014 | 0.    | 0.0298 | 0.09862 | 0.26089 | 0.31362 | 0.32749  |
| 0.260 | 0.00101 | 0.00259 | 0.00012 | 0.    | 0.0298 | 0.09839 | 0.25379 | 0.34510 | 0.39123  |
| 0.280 | 0.00103 | 0.00259 | 0.00010 | 0.    | 0.0298 | 0.09814 | 0.24698 | 0.30979 | 0.28341  |
| 0.300 | 0.00106 | 0.00259 | 0.00009 | 0.    | 0.0298 | 0.09789 | 0.24047 | 0.37730 | 0.37594  |
| 0.320 | 0.00108 | 0.00259 | 0.00008 | 0.    | 0.0298 | 0.09763 | 0.23425 | 0.39205 | 0.26881  |
| 0.340 | 0.00111 | 0.00259 | 0.00007 | 0.    | 0.0298 | 0.09737 | 0.22832 | 0.40539 | 0.2600   |
| 0.360 | 0.00113 | 0.00259 | 0.00006 | 0.    | 0.0298 | 0.09711 | 0.22265 | 0.40554 | 0.4921   |
| 0.380 | 0.00116 | 0.00259 | 0.00006 | 0.    | 0.0298 | 0.09686 | 0.21724 | 0.43174 | 0.2928   |
| 0.400 | 0.00118 | 0.00259 | 0.00005 | 0.    | 0.0298 | 0.09661 | 0.21207 | 0.44632 | 0.24335  |

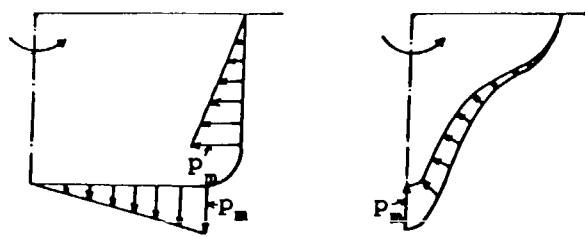


Fig. 2.2.1 Assumed profile of pressure distribution .

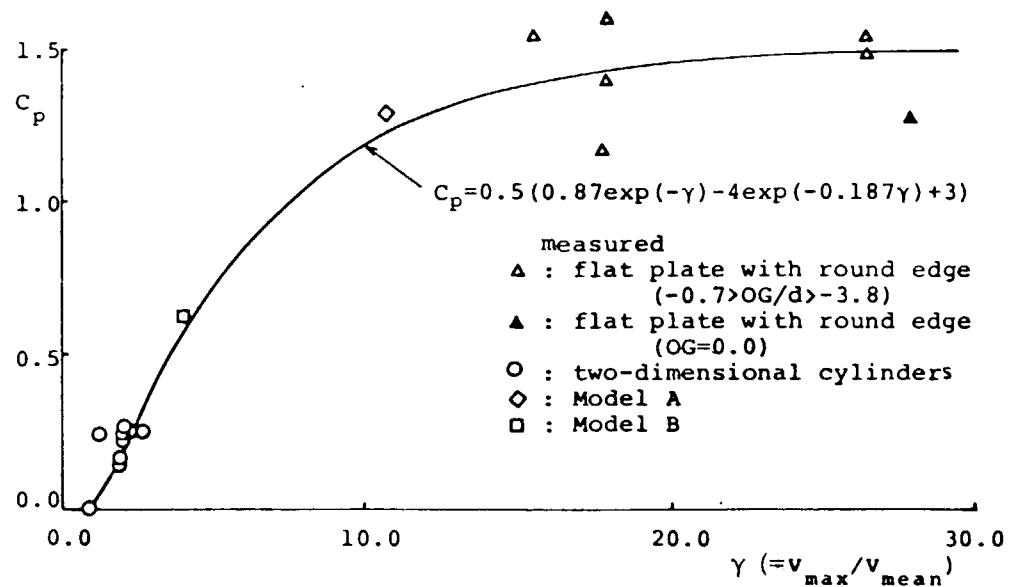


Fig. 2.2.2 Pressure coefficient  $C_p$ .

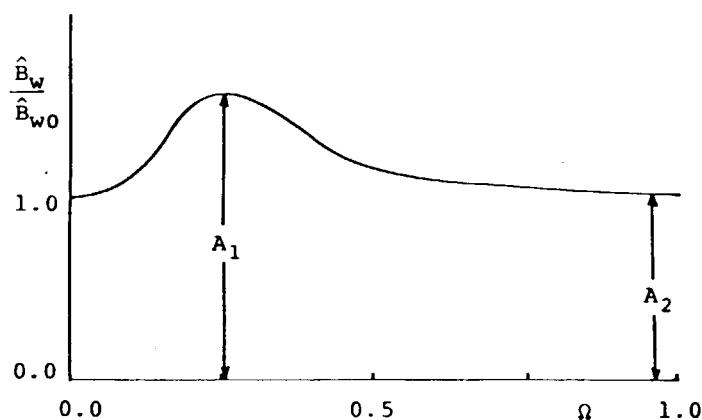


Fig. 2.2.3 Effect of advance speed on wave making damping.

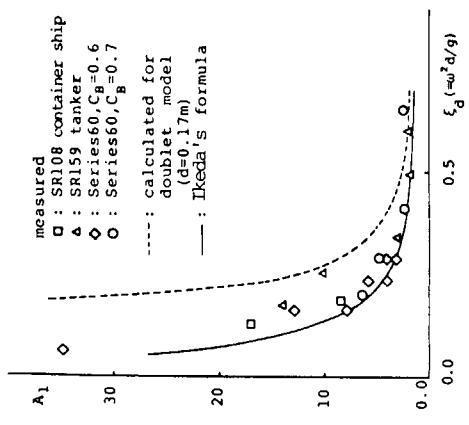


Fig. 2.2.4  $A_1$  value for ship forms .

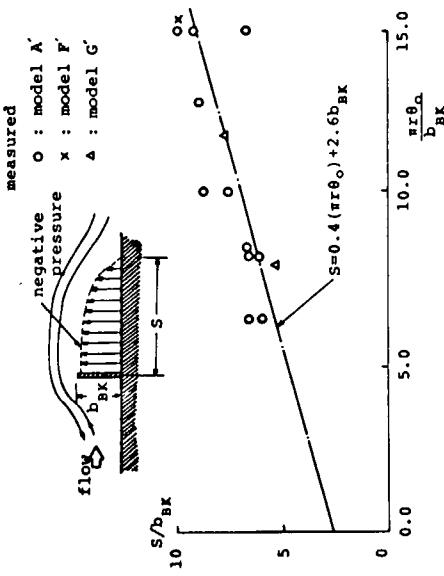


Fig. 2.2.6 Distribution length of negative pressure.

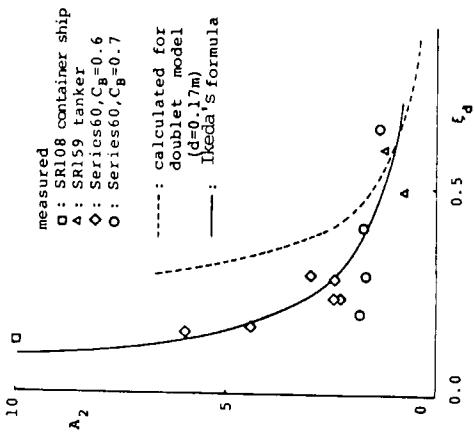


Fig. 2.2.5  $A_2$  value for ship forms .

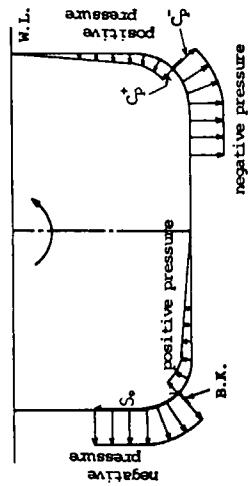


Fig. 2.2.7 Assumed pressure distribution.

## 2.3 実験値との比較

### 2.3.1 成分減衰力の推定値と実験値との比較

摩擦成分については、3次元の実用船型に対する実験はまだ行われていないが、2次元模型船の実験による局部摩擦係数がストークスの振動平板解を用いた理論解とよく合う(Fig. 2.1.1)ことが報告<sup>3)</sup>され、さらにこの理論解と加藤の公式による値もよく合う(Fig. 2.2.2 参照)ことから、加藤の公式は実用船型に対しても実用上十分な精度を有するものと見られている。前進時の摩擦成分の計測も、回転楕円体だけしか行われていない。

造渦成分の推定値と計測値との比較をFig. 2.3.1, 2.3.2<sup>6)</sup>に示す。実験的に造渦成分を求めるにあたっては、裸殻船体の強制横揺れ試験で計測された横揺れ減衰力から、加藤の式を用いて摩擦成分の推定値を差し引き、さらにOSMによる造波成分の推定値を差し引いて残りを造渦成分と考えた。

揚力成分の推定値と計測値の比較をFig. 2.3.3に示す。揚力成分の分離にあたっては、十分低周期での横揺れ試験を行うことにより造波成分を除き、計測値から摩擦成分の推定値を差し引いて求めた。Fig. 2.3.3には九大応力研で行われた3m模型の計測値と大阪府大で行われた2m模型の計測値を同時に示しているが、両者はよく一致しており、推定値との一致もよい。

前進時の造波成分の推定値と計測値との比較をFig. 2.3.4に示す。造波成分の分離にあたっては、横揺れ減衰力の計測値から摩擦、造渦、揚力の各成分の推定値を差し引いている。 $\Omega = 1/4$ 付近で最大値となり、 $\Omega > 1/4$ では徐々に減衰力が減少し、 $\Omega$ がある値以上になると実用的にはほぼ一定値と考えてもよさそうである。

ビルジキールの直圧力の推定値と計測値との比較をFig. 2.3.5に示す。計測値は、2次元円筒に付けられたビルジキールの直圧力の結果で、九大応力研で実施されたもの<sup>25)</sup>である。推定値と計測値とは比較的良く合っている。

ビルジキール効果全体の比較をFig. 2.3.6, 2.3.7<sup>18)</sup>に示す。いずれの船型でも推定値と計測値の一致は比較的良い。

### 2.3.2 全減衰力の比較

まず、 $F_n = 0$ のときの裸殻の場合の横揺れ減衰力の推定値と計測値との比較をFig. 2.3.8～2.3.11に示す。Fig. 2.3.8からわかるとおり、 $F_n = 0$ の場合 比較的大振幅の横揺れ減衰力まで両者の一致は良い。また、周波数についても全域にわたり比較的良い一致を示している(Fig. 2.3.9～2.3.11)。Fig. 2.3.12, 2.3.14には前進時の比較を示す。推定値と実験値との一致は比較的良く、前節で述べた推定法が、一般的な船型についてある程度有効であることがわかる。Fig. 2.3.12および2.3.14には、従来の渡辺-井上-高橋の推定法<sup>1)</sup>による結果も示している。この結果を見ると、同推定法による値は肥えた船では実験値より大きい値を与えるようである。この原因は、前進速度影響に船型の影響を考慮していないためと思われる。

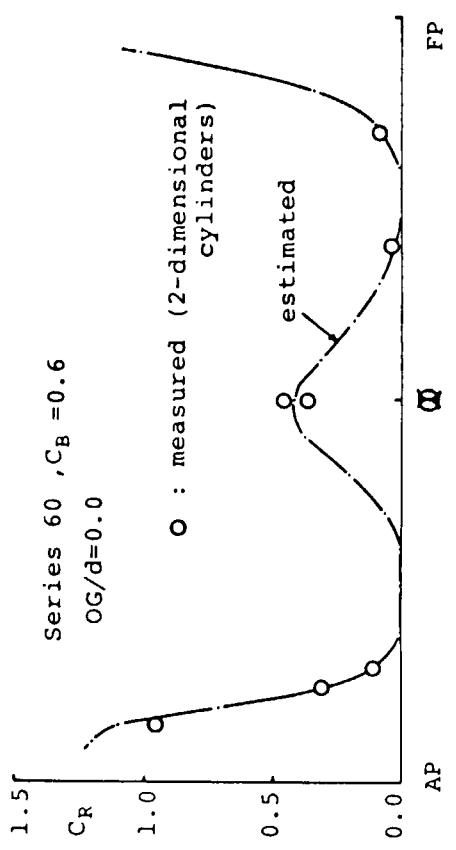


Fig.2.3.1 Damping coefficient  $C_R$  for eddy making component.

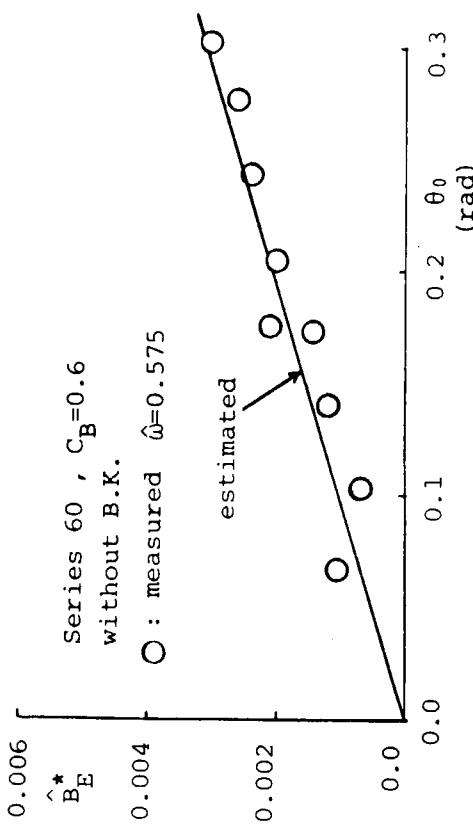


Fig. 2.3.2 Comparison between measured and estimated values of eddy making component.

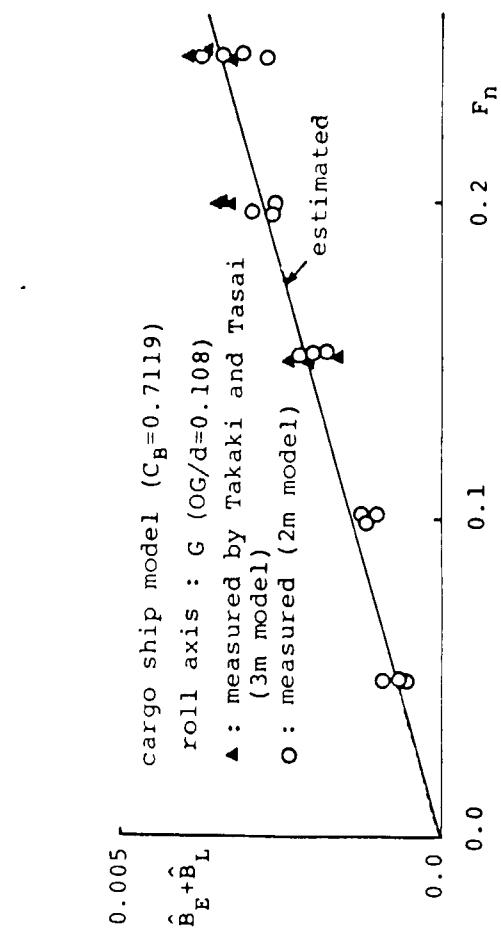


Fig.2.3.3 Roll damping coefficient of eddy making and lift components.

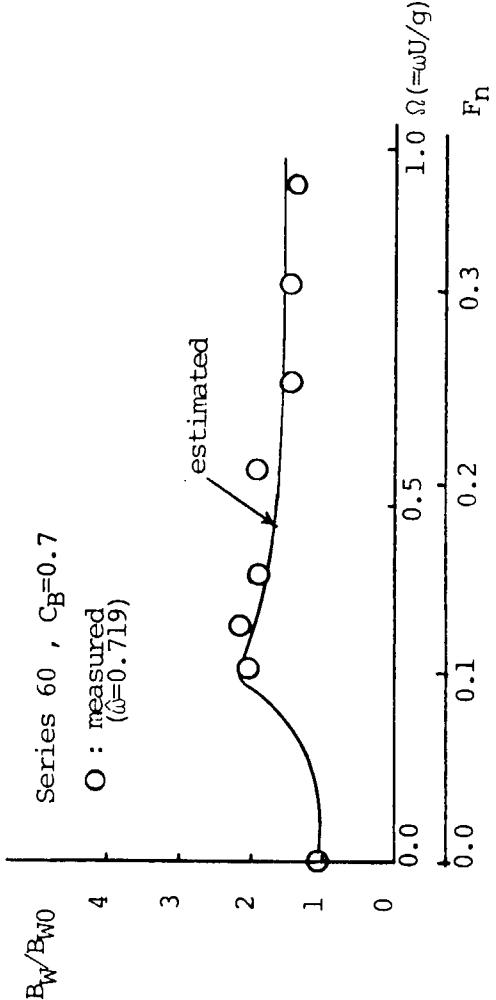


Fig.2.3.4 Comparison between measured and estimated values of wave making component.

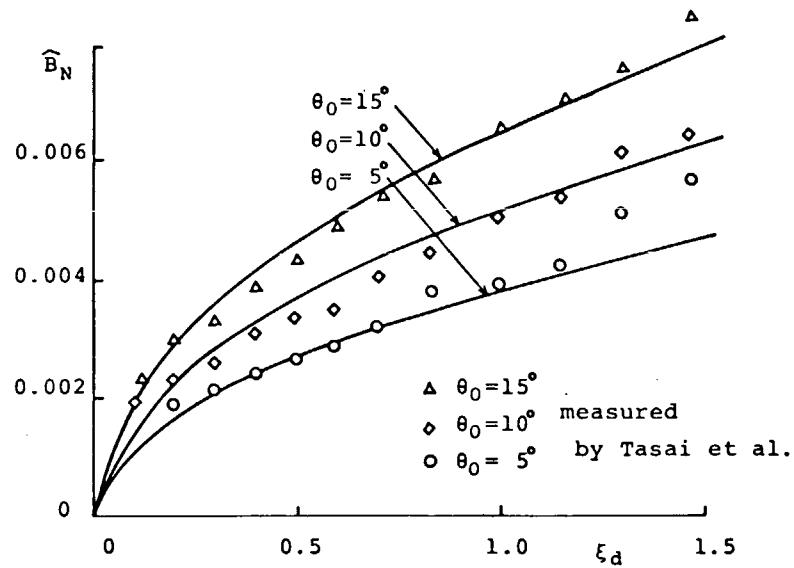


Fig.2.3.5 Damping coefficient due to normal force of bilge keels.

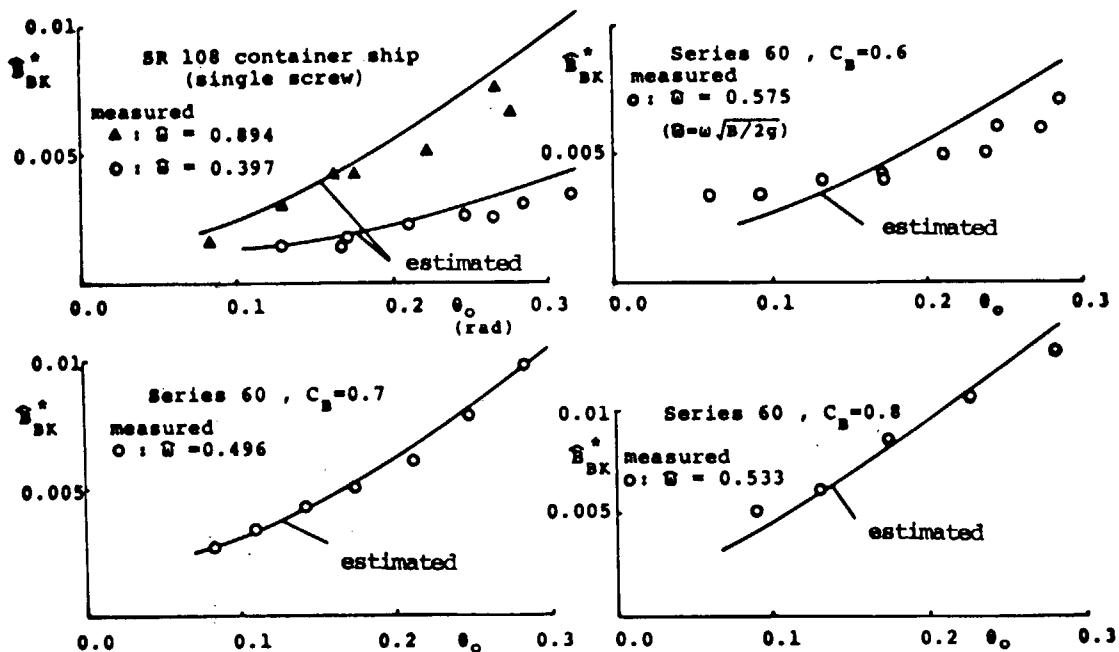


Fig.2.3.6 Bilge keel component of roll damping of three-dimensional ship forms.

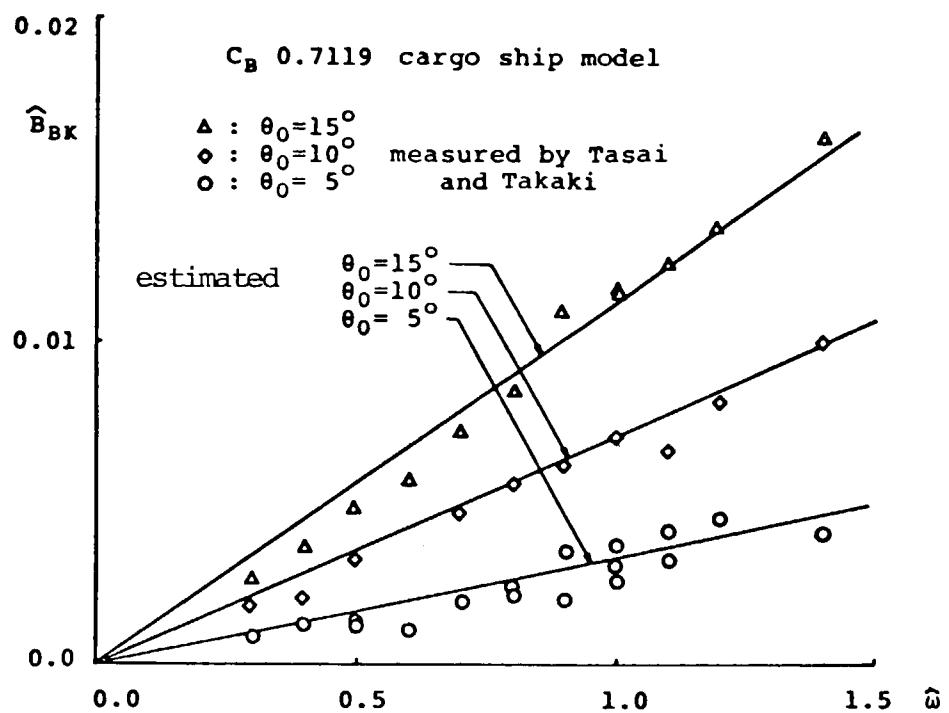


Fig. 2.3.7 Roll damping coefficient  $\hat{B}_{BK}$  due to bilge keels.

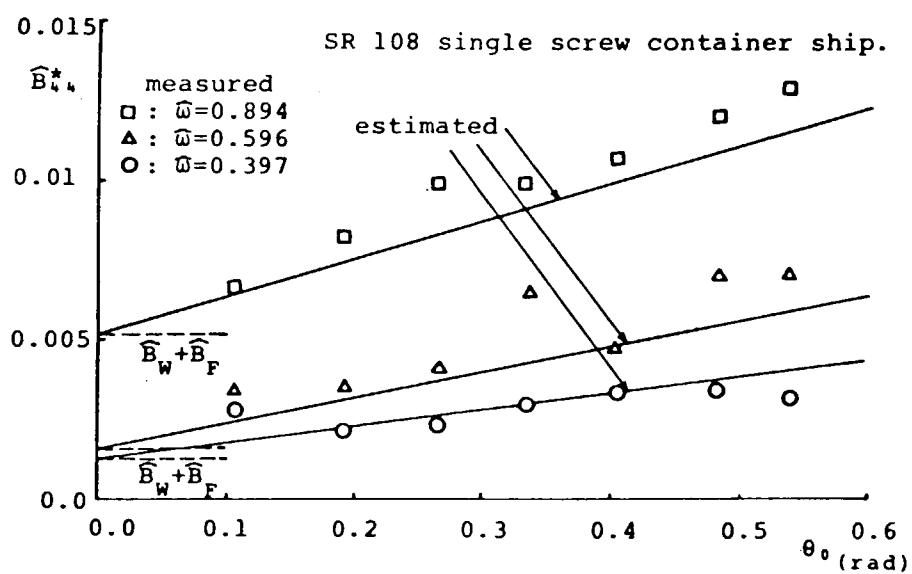


Fig. 2.3.8 Roll damping coefficient  $\hat{B}_{44}^*$  of container ship model.

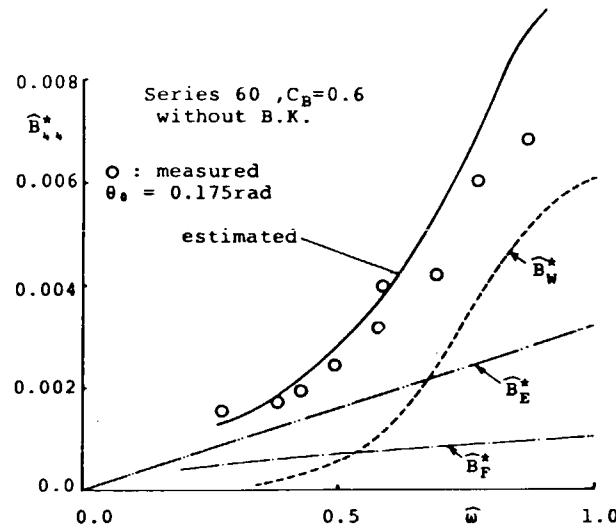


Fig.2.3.9 Components of roll damping coefficient  $\hat{B}_{44}^*$  of ship hull (Series 60  $C_B=0.6$ ).

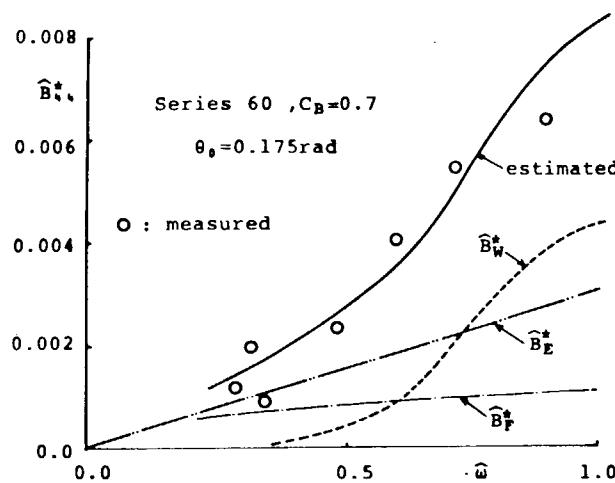


Fig.2.3.10 Components of roll damping coefficient  $\hat{B}_{44}^*$  of ship hull (Series 60  $C_B=0.7$ )

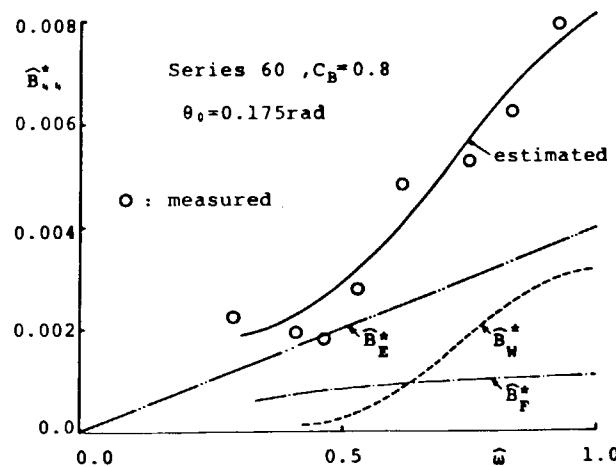


Fig.2.3.11 Components of roll damping coefficient  $\hat{B}_{44}^*$  of ship hull (Series 60  $C_B=0.8$ ).

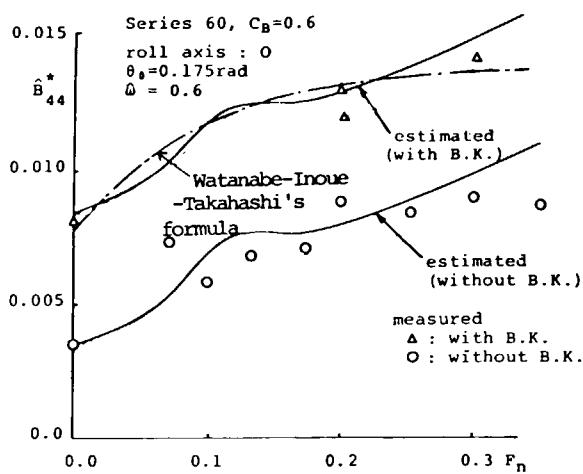


Fig.2.3.12 Roll damping coefficient  $B^*_{44}$  of ship model at forward speed

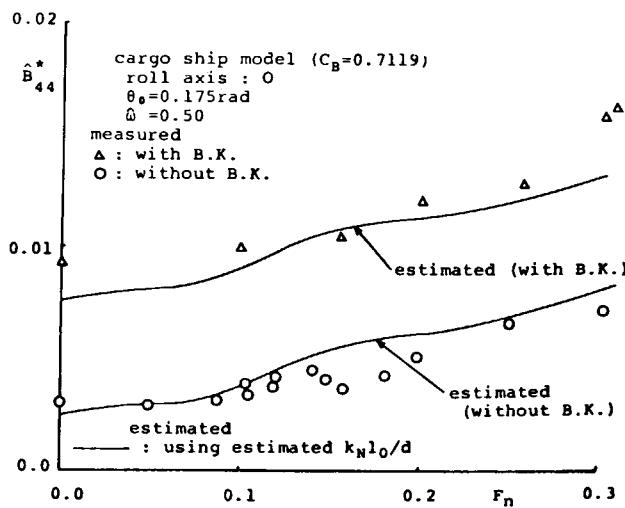


Fig.2.3.13 Roll damping coefficient  $B^*_{44}$  of cargo ship model at forward speed

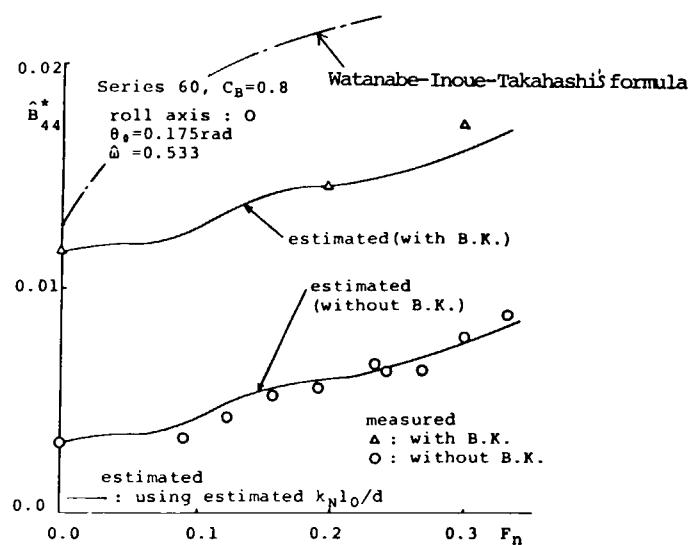


Fig. 2.3.14 Roll damping coefficient  $B^*_{44}$  of ship model at forward speed.

## 2.4 推定法による応用計算例

本節では第2.2節で述べた横揺れ減衰力の推定法による応用計算例を数例紹介する。計算結果の検討にあたっては、単に横揺れ減衰力の値の大小を論ずるのではなく、同調時の横揺れ振幅を減少させるという立場から検討を加えた。

### 2.4.1 横揺れ軽減のための設計方針

船舶の横揺れを減少させるためには、船体に働く波浪強制力を減少させると共に横揺れ減衰力を増加させねばよいわけであるが、波浪強制力と横揺れ造波減衰力との間には密接な関係があるので、横揺れ減衰力を増やしても必ずしも横揺れ振幅が減少することは限らない。ここでは、応用計算例を示すのに先立ち、横揺れ振幅を減少させるための横揺れ減衰力各成分の選び方について若干の考察を行った。

#### (1) 規則波中の横揺れ振幅の計算

連成を無視して横揺れのみを考えると線型の横揺れ運動方程式は次式で与えられる。

$$(J_{44} + A_{44})\ddot{\theta} + B_{44}\dot{\theta} + C_{44}\theta = M_{\theta e} \quad (2.4.1)$$

ただし、 $J_{44}$ ；船体の慣性モーメント

$A_{44}$ ；付加慣性モーメント

$B_{44}$ ；横揺れ減衰係数

$C_{44}$ ；復原力係数 ( $=W\bar{GM}$ )

$M_{\theta e}$ ；波浪強制モーメント ( $=W\bar{GM}\gamma\Theta\omega\sin(\omega t + \epsilon)$ )

上式より、同調時の横揺れ振幅  $\theta_{os}$  は

$$\theta_{os} = \frac{\gamma\Theta\omega\omega(J_{44} + A_{44})}{B_{44}} \quad (2.4.2)$$

となる。ここで、 $\gamma$ 、 $\Theta\omega$ 、 $\omega$ はそれぞれ有効波傾斜係数、最大波傾斜角および円周波数を表わす。

Newmann は2次元の場合の波浪強制力の振幅  $|M_{\theta e}|$  と造波減衰力係数  $B_w$  の間に次の関係のあることを示した。<sup>28)</sup>

$$|M_{\theta e}| = \zeta_A \left( \frac{\rho g^2}{\omega} B_w \right)^{1/2} \quad (2.4.3)$$

ここで、 $\zeta_A$ 、 $\rho$ 、 $g$  はそれぞれ波振幅、流体の密度および重力加速度を表わす。(2.4.3)式から

$$W\bar{GM}\Theta\omega\gamma = \zeta_A \left( \frac{\rho g^2}{\omega} B_w \right)^{1/2} \quad (2.4.4)$$

上式を(2.4.2)式に代入すると

$$\theta_{os} = \frac{\zeta_A \left( \frac{\rho g^2}{\omega} B_w \right)^{1/2}}{B_{44}} \quad (2.4.5)$$

横揺れ減衰係数  $B_{44}$  を造波成分  $B_w$  とそれ以外の成分  $B_c$  とに分けて

$$B_{44} = B_w + B_c \quad (2.4.6)$$

と表わすことにして、(2.4.5)式は

$$\theta_{os} = \frac{\zeta_A}{\omega} \left( \frac{\rho g^2}{\omega} \right)^{1/2} \frac{\sqrt{B_w}}{B_w + B_c} \quad (2.4.7)$$

となる。上式からわかるように、同調横揺れ角  $\theta_{os}$  は造波成分以外の成分  $B_c$  が大きくなると単調に減少するが、造波成分  $B_w$  について見ると  $B_w = B_c$  で最大値を持ち、 $B_w \rightarrow 0$  や  $B_w \rightarrow \infty$  では零となる。 $B_w \gg B_c$  の場合には

$$\theta_{os} = \frac{\zeta_A}{\omega} \left( \frac{\rho g^2}{\omega} \right)^{1/2} \frac{1}{\sqrt{B_w}} \quad (2.4.8)$$

となり、造波減衰力を増加させれば運動振幅は小さくなる。一方  $B_w \ll B_c$  のときには、造波減衰力を減少させ、造波以外の減衰力を増加させると同調時の横揺れ振幅は減少する。

以上の考察は、減衰力が線型の場合であったが、減衰力が非線型の場合を渡辺の方法<sup>29)</sup>にならって考えてみる。横揺れ減衰モーメントを(2.1.1)式のような非線型表示で表わし、さらに  $B_2$  を(2.1.3)式のようにおくと

$$B_{44} = B_1 + \frac{8}{3\pi} B_2' \omega + \frac{8}{3\pi} B_2'' \omega \theta_0 \quad (2.4.9)$$

となり、 $B_1, B_2', B_2''$  は横揺れ振幅に無関係として表示できる。停止時( $F_n = 0$ )の実船では、摩擦成分が小さいので  $B_1 = B_w$  としてもよい。渡辺の方法にならい(2.4.9)式を(2.4.5)式に代入すると、同調時の横揺れ振幅  $\theta_{os}$  は次式となる。

$$\theta_{os} = \frac{3\pi}{16\omega B_2''} \left\{ -\left( B_w + \frac{8\omega}{3\pi} B_2' \right) + \sqrt{\left( B_w + \frac{8\omega}{3\pi} B_2' \right)^2 + \frac{32}{3\pi} \zeta_A \left( \frac{\rho g^2}{\omega} \right)^{1/2} B_2'' \sqrt{B_w}} \right\} \quad (2.4.10)$$

上式も(2.4.7)式と同様に、 $B_2', B_2''$  を一定にして  $B_w$  を変化させると、ある  $B_w$  の値で最大値を持つ。以上は、いずれも2次元の場合であったが、定性的には3次元船についても同じことが言えると考えられる。一般的の船型の横揺れ同調周期付近では、 $B_w$  がこの最大値をもつ値より小さい場合がほとんどであるので、 $B_w$  は小さい程また造波以外の成分が大きい程同調横揺れ角は小さくなる。

各成分について考えてみると、まず摩擦成分を増やすためには表面積を増やせばよいが、前進抵抗の増大を招くため必ずしも得策ではなく、かつ実船の同成分は他の成分減衰力に比べ非常に小さいので、横揺れ性能を考える上では同成分の増大をはかる必要はない。造渦成分の増大のためには、船首尾をやせさせ、船体中央部は半幅喫水比  $H_0$  を1近くにすると共に面積係数  $\sigma$  を大きくすればよいが、特に  $H_0$  の変化は造波成分にも影響を及ぼすので慎重に船型を選ぶ必要がある。揚力成分の増大のためには、船体のアスペクト比( $2d/L$ )を大きくするとよいが、これも造波成分の増大を招く恐れがある。ビルジキール成分の増大および造波成分の削減法については後述する。

## 2.4.2 船体主要目と横揺れ減衰力

船体の主要目の変更による横揺れ減衰力の変化を調べるために SR 108 1 軸コンテナ船(1.75mモデル)および Series 60  $C_B = 0.8$  船(1.8mモデル)を母型とし、幅喫水比を系統的に変化させた船型について横揺れ減衰力を第2.2節の方法で推定してみた。船型は、排水量を一定とし、前進抵抗に大きな影響を及ぼす  $C_p$  カーブには変化が生じないように各断面の面積および面積係数  $\sigma$  を母型と同じとし、半幅喫水比  $H_0$  を1割増加させた船型(W1), 2割増加させた船型(W2), 1割減少させた船型(N1), 2割減少させた船型(N2)の4種類である。推定結果をFig. 2.4.1~2.4.3に示す。Fig. 2.4.1には、SR 108 1 軸コンテナ船を母型とした4種類の船型の停止時における横揺れ減衰力の推定結果および各成分減衰力の構成比を示す。同図より横揺れ減衰係数  $B_{44}$  は母型付近で最小となり、幅が増加しても減少してもその値は増加している。しかし、この増加は構成比の図からわかるとおり造波成分の増加によるところが大きく、前述のように同調横揺れ角の減少の立場からすると必ずしも得策とは言えない。このコンテナ船の場合 Fig. 2.4.1 から判断すると造波成分の比率が小さく粘性成分の割合の大きい  $H_0$  (船体中央部の値) = 1.2~1.3程度が最適に近いと思われる。Fig. 2.4.2には、同じ船型の前進時の推定結果を示す。揚力成分は幅が狭いほど大きくなっている。また幅の大きい W1, W2 では造波成分が大きいためハンプ・ホールが顕著に現れている。Fig. 2.4.3には Series 60,  $C_B = 0.8$  船を母型とした各船型の  $F_n = 0$  時の値を示す。造波成分の割合は  $H_0 = 1.3$  付近で最小になっている。さらに詳しい検討のために

は実際に運動の計算をしてみる必要があると思われ、また左右揺れ等の連成による効果についても調べる必要があると思われる。

#### 2. 4. 3 造波成分の一削減法

前述のように同調時の横揺れ振幅を小さくするためには横揺れ造波減衰力が小さいほどよい。以下では、この造波成分をできるだけ小さくすることを考えてみる。

Ursell-田才法により各種2次元断面の造波減衰力を計算してみると、例えばFig. 2.4.4 のようになる。同図からわかるように、面積係数 $\sigma$ を一定にして半幅喫水比 $H_0$ を変化させると、造波減衰係数 $\hat{B}_W' (= \frac{B_W}{\rho_d^5} \sqrt{\frac{d}{2g}})$ はある $H_0$ で最小値を持つ。したがって、船体の各断面の形状を極力この最小値に近くなるように選ぶと船体全体の造波減衰力を非常に小さくすることができる。例として船体中央断面を考えると、肥えた場合には $H_0 = 1.4$ 程度が良く、やせるに従って $H_0$ を若干小さく選んだ方がよいこととなる。ただし、以上はすべて Ursell-田才法の結果に基づいたものであり、Lewis form の近似の悪い場合等には問題がある。

実際の船舶の設計にあたっては抵抗推進性能が優先する場合が多いので、上述の方法も適用するのには困難が伴う。そこで、次に既存の船型を若干手直しすることにより横揺れ造波減衰力を小さくすることを考える。対象船を SR 108 1 軸コンテナ船とすると同船の造波減衰力の船長方向分布は Fig. 2.4.5(b) に示すように SS. 2  $\frac{1}{2}$  付近に大きなピークを持つ分布形となっている。この船型を各断面の面積は変えず ( $H_0 \times \sigma = \text{const}$ ) に若干船型を変化させて Fig. 2.4.5(a) の破線のように  $H_0$  や  $\sigma$  を修正すると、SS. 2  $\frac{1}{2}$  付近のピークも減少し、計算上では造波成分の削減が可能となる。ただし、この結論は Ursell-田才法の結果に基づくものであり、同法の各種断面での精度のチェックも含め未だ多くの検討が必要と思われる。

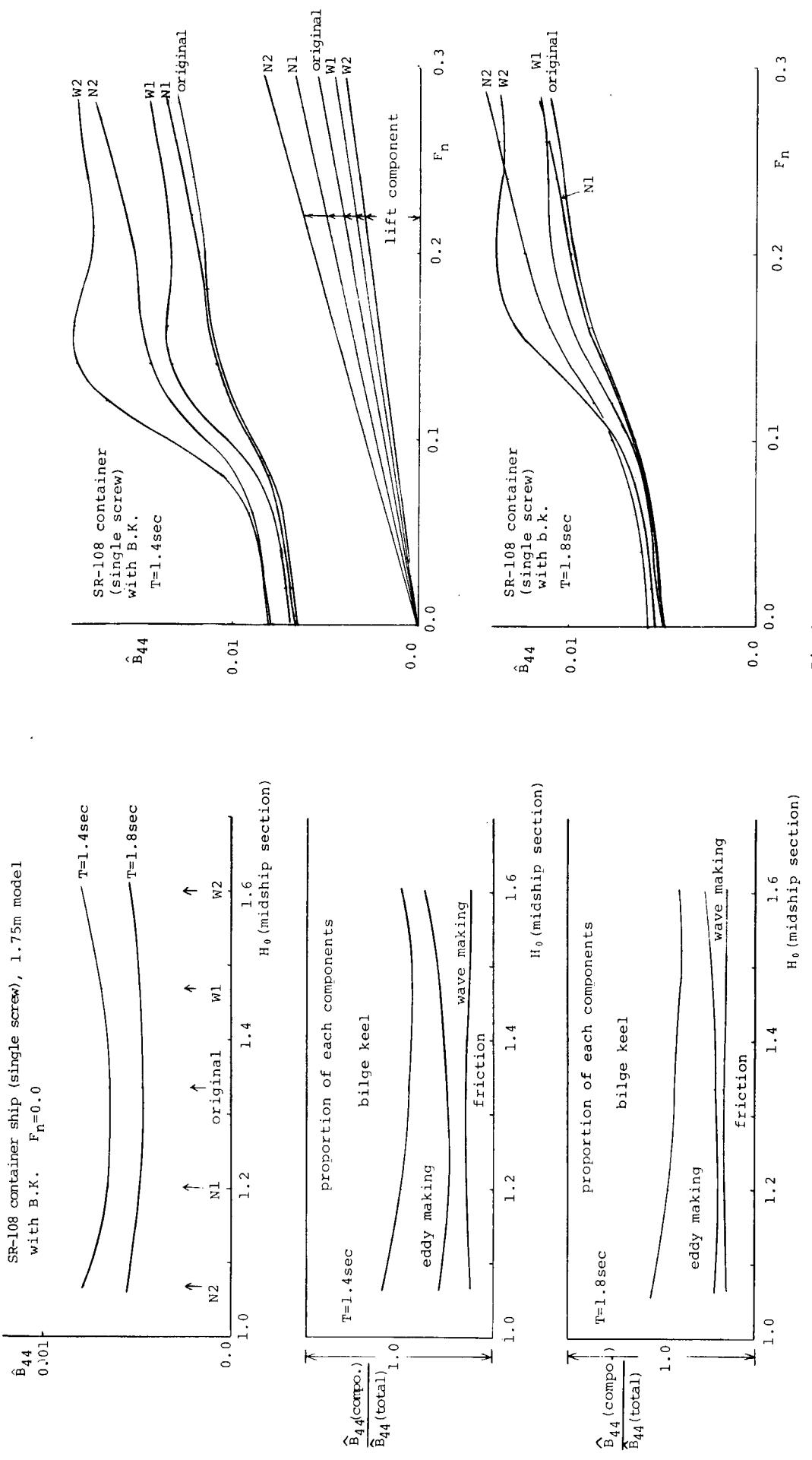
#### 2. 4. 4 ビルジキール効果

ビルジキールの効果は非常に大きく横揺れ減衰力の 40~80%を占めるため、ビルジキールの形状および取付け位置を最も効果的に選ぶことは、横揺れ性能改善のために重要なことと思われる。

まず、ビルジキールの面積および取付け断面の形状がその効果に及ぼす影響を Fig. 2.4.6 に示す。この推定結果から、ビルジキールの効果は、その面積が大きい程また取付け断面が肥えている程大きくなる。

ビルジキールの取付け位置による影響を Fig. 2.4.7 に示す。Series 60,  $C_B = 0.8$  船では SS. 4  $\frac{1}{2}$  付近を中心に、SR 108 1 軸コンテナ船では SS. 5 付近を中心になると大きな効果が得られる。この結果はビルジキールの長さによっても若干変わるとも考えられるが、普通の船型では船体中央平行部の中央をビルジキールの中央とすればよいと思われる。

最後にビルジキールの形状の変化がその効果に及ぼす影響を推定した結果を Fig. 2.4.8 に示す。肥えた船 (Series 60,  $C_B = 0.8$ ) ではビルジキールの幅を狭くして長くした方が効果が大きく、やせた船 (SR 108 1 軸コンテナ船) では幅を大きくして長さを短かくした方が効果が大きいことがわかる。



Series 60 ,  $C_B=0.8$  , 1.8m model  
with B.K.

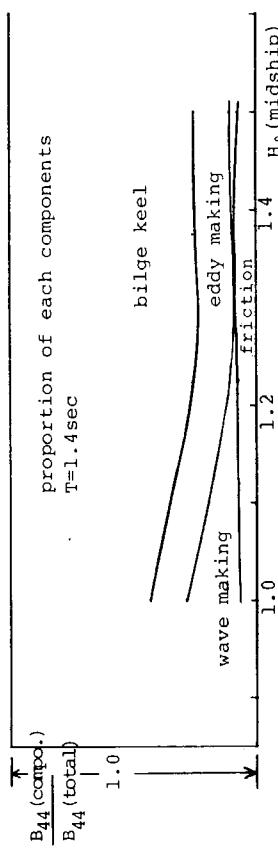
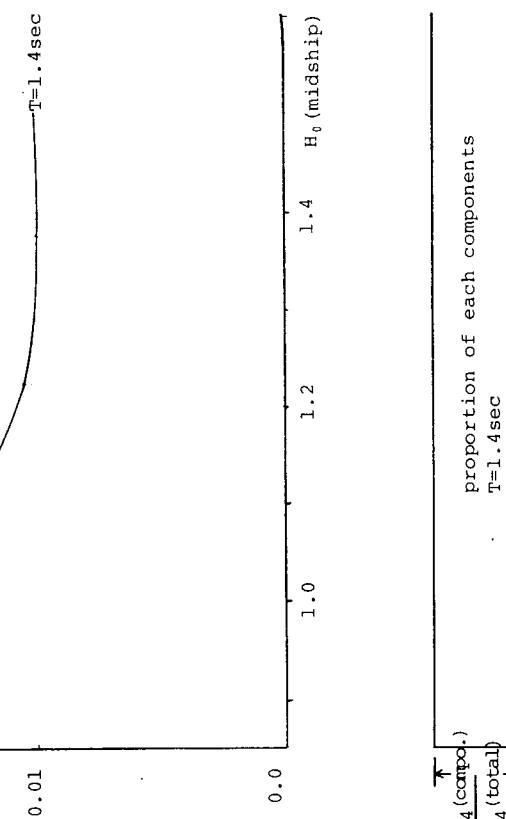


Fig.2.4.3 Effect of breadth of hull on roll damping moment.

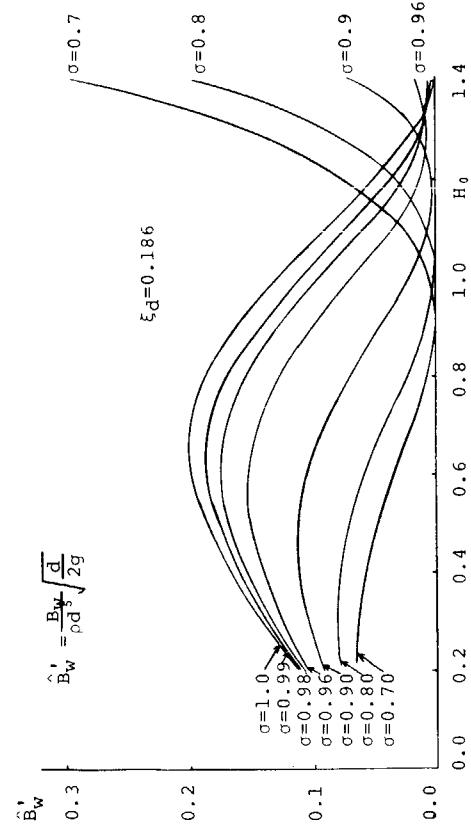


Fig.2.4.4 Roll damping coefficient due to wave making for two-dimensional cylinders.

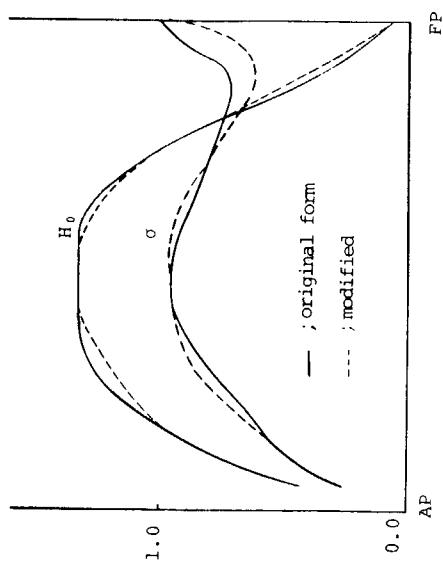


Fig.2.4.5(a)

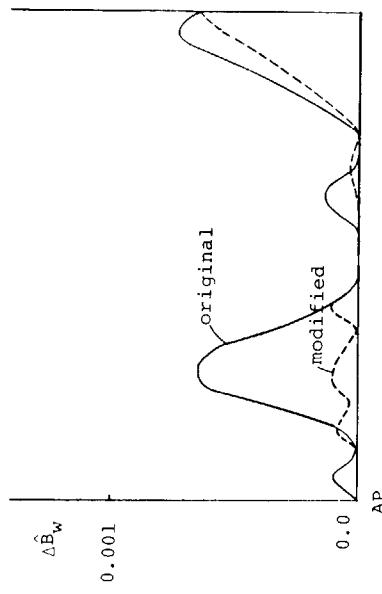


Fig.2.4.5(b)

Fig.2.4.5 Modification of hull form in order to reduce wave making component of roll damping.

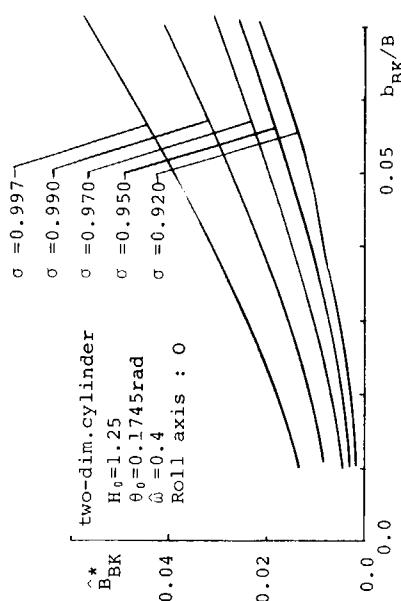


Fig.2.4.6 Effect of breadth of bilge keel and area coefficient on bilge keel component.

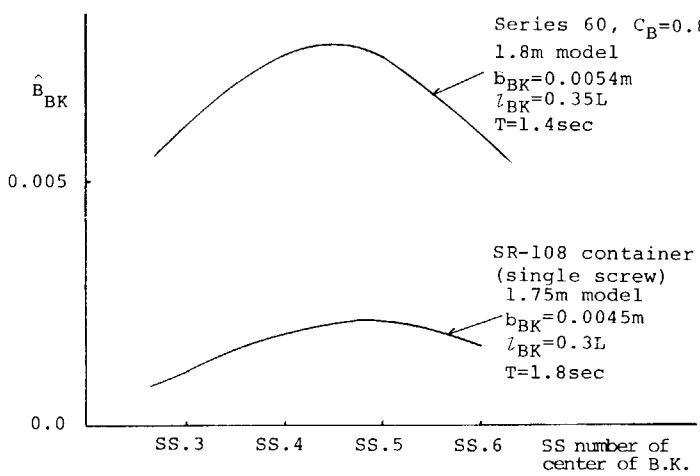


Fig.2.4.7 Effect of location of bilge keel on bilge keel component.

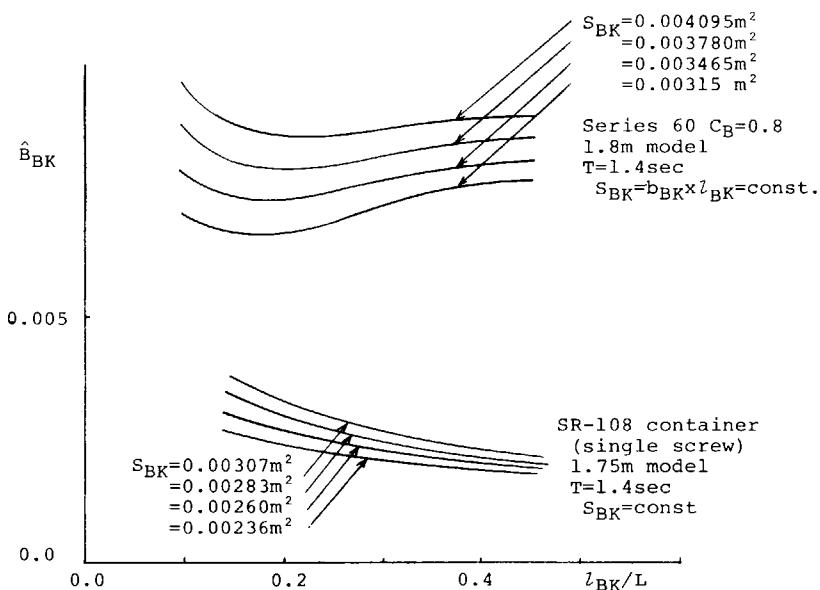


Fig.2.4.8 Effect of ratio of  $b_{BK}$  and  $l_{BK}$  on bilge keel component of roll damping.

## 2.5 推定法の適用範囲と今後の問題点

第2.2節で述べた横揺れ減衰力の推定法は、第2.3節で示したように標準的な貨物船船型（1軸、満載）の横揺れ減衰力を実用上満足し得る精度で推定し得るが、各成分の推定式の中には経験式の域を脱しないものもあり、船型や横揺れ周期、振幅の大幅な変化に十分には対応しきれないのが現状であろう。今後、同推定法の適用範囲を明らかにするとともに、広い変化に対応できるような修正を行う必要があろう。

まず、同推定法が十分でない例として軽荷状態の船と非常に肥えた船の横揺れ減衰力の計測結果と推定値の比較を示す。Fig. 2.5.1およびFig. 2.5.2に軽荷状態の Series 60,  $C_B = 0.8$  船の横揺れ減衰力の計測値<sup>30)</sup>と推定値との比較を示す。前進速度の有無にかかわらず推定値の方が高目であり、特に前進時の両者の一致はよくない。この傾向はやせた船でも同様であり、今後軽荷状態の各成分について検討する必要があろう。Fig. 2.5.3には非常に肥えた船の例として笠木山丸の横揺れ減衰力の計測値<sup>31)</sup>と推定値との比較を示す。図からわかるとおり特に周波数の高い所では推定値の方が計測値に比べ過大となっている。このように船体中央部が非常に肥えた船型では、ビルジキール成分と造渦成分が横揺れ減衰力の中に大きな割合を占めるが、これらがいずれも渦に起因するため、相互干渉が無視できないことも考えられる。試みに、ビルジキール取付け部の造渦成分を0として計算してみると Fig. 2.5.3 中の一点破線のようになるがやはり若干推定値の方が過大となる。今後、ビルジキールの効果を考えるために考慮したビルジ部の流速増加の修正係数  $f$  ((2.2.41)式)についても、さらに多くの模型実験結果を基にして検討していく必要があろう。

今後の問題点としては、上述の軽荷状態の場合および非常に肥えた船についても十分実用的に満足できる値を与えるように同推定法を修正していくと共に、スケグ、プロペラボッシング等の付加物の影響や、チャイン等のある特殊船型の場合の取り扱いについても検討していく必要がある。また、前進時の造波成分、渦に起因する造渦および揚力成分についても、本格的な取り組みが必要と思われる。

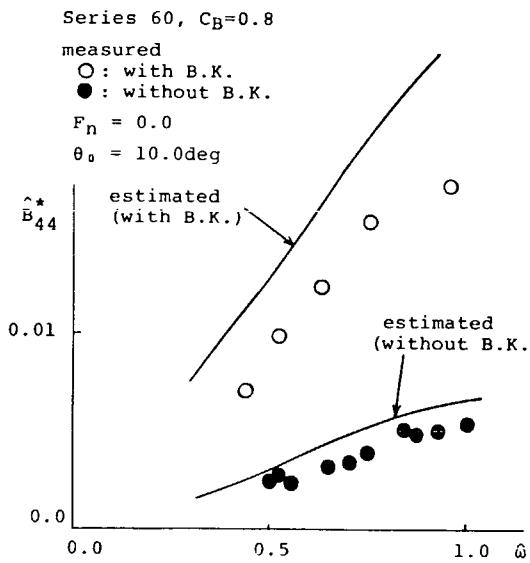


Fig. 2.5.1 Roll damping coefficient  $B^*_{44}$  for Series 60,  $C_B=0.8$  (ballast cond.) at zero forward speed.

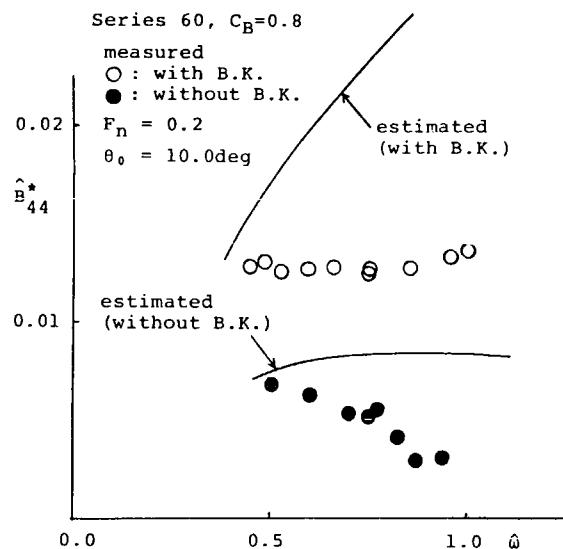


Fig. 2.5.2 Roll damping coefficient  $B^*_{44}$  for Series 60,  $C_B=0.8$  (ballast cond.) at forward speed.

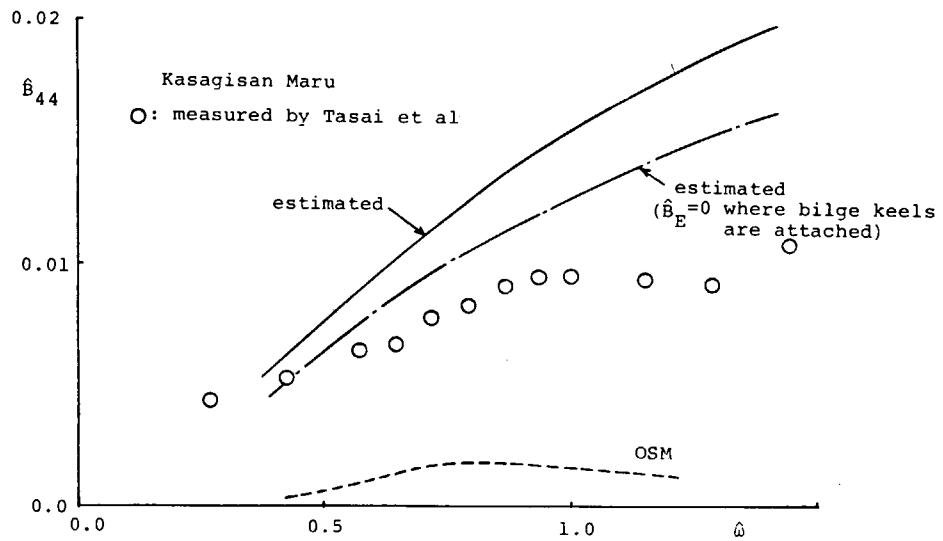


Fig. 2.5.3 Roll damping coefficient  $B^*_{44}$  for full ship form.

## 2.6 減衰力に関する基礎資料

横揺れ減衰力に関する種々の情報を得る目的で、本研究部会発足以来各研究機関で減衰力に関する基礎的な実験が多数実施され、既に報告されている。詳細については、各年度の報告書を参照していただくこととして、以下にその概略を述べておく。

### 2.6.1 横揺れ減衰力の船長方向分布の計測

昭和51年度に船研では、コンテナ船型と数式船型の分割模型を用いた横揺れ減衰力の船長方向分布の計測が行<sup>32)</sup>われた。

コンテナ船型はSR-108型（1軸）で、船体を3分割し、船首部、中央部、船尾部に働く減衰力が計測され、前進速度影響およびビルジキール、舵等の付加物の効果について研究が行われた。数式船型は、前後、左右について各々対称で、水線面が船体中央を頂点とする放物線、断面が標準喫水線を頂点とする8次式で与えられる形状を持つ。結果の一例をFig. 2.6.1, 2.6.2に示す。これらの実験の結果得られた結論は次のとおりである。

- (i) 船体全体の横揺れ減衰力は、低周波数の場合には速度の増加と共に増加するが、高周波数においては一定かもしくは減少の傾向を示す。
- (ii) コンテナ船型と数式船型の横揺れ減衰力の分布形状は、船尾部を除き、前進速度に対し同じ傾向を示す。
- (iii) コンテナ船型の場合、ビルジキールと舵を付けると減衰力は約2倍になる。また、舵による効果はビルジキールの効果に比べると小さい。
- (iv) 嘴水を深くすると減衰力は急増する。

### 2.6.2 横揺れする船体周りの速度分布の計測

横揺れ減衰力の諸性質を正確に知るために、横揺れする船体周りの流場を調べておく必要がある。本部会では、横揺れる2次元船体周りの速度分布の理論計算および計測が実施され、多くの成果が得られた。理論計算については、東大で有限要素法を用いたポテンシャル計算<sup>30)</sup>、九大応力研では特異点法によるポテンシャル計算<sup>27)</sup>、大阪府大ではUrseil-田才法および無限流体中で一様回転するLewis form cylinderについてのポテンシャル計算、並びにそれとストークスの振動平板解を応用した粘性解を合成した計算が行われた。<sup>31)</sup> 九大応力研で行われた計算結果をFig. 2.6.3, 2.6.4に示す。計算は、断面係数 $\sigma = 1.0$ 、半幅喫水比 $H_0 = 1.25$ のLewis form cylinderについて行われ、ビルジキール( $b_{BK}/B = 0.025$ )が付いた場合についても同様に行われた。図は、横揺れ角 $\theta = 0$ の瞬間における流速分布で、各点での船体表面の接線方向の流速を法線方向の距離で表示している。

大阪府大では実験も行われ、Series 60,  $C_B = 0.6$ 船の船体中央断面形状の2次元模型を空気中で横揺れさせ、船体周りの流速分布が熱線流速計で計測された。熱線流速計は、船体表面から表面と直角方向にトラバースされ、各点で流速の絶対値が求められた。結果の一例をFig. 2.6.5に示す。実線は上述の粘性理論解であり実験値との一致は非常に良好である。また、東大で行われた有限要素法によるポテンシャル計算値も×印で示しているが、船体のごく近傍を除いて実験値とよく一致している。

以上の計算および実験から得られた結論は次のとおりである。

- (i) ビルジキールを付けた場合の流速分布のポテンシャル計算結果では、ビルジキール近傍の接線方向の流速は船体表面で零となるが、船体表面から離れるほどビルジキール先端近傍で大きく増速される。しかし、船体表面からビルジキールの幅の4～5倍程度離れるほど裸殻の状態とほぼ同じ流速分布となっている。
- (ii) 横揺れする船体近傍の粘性流場は、負の圧力勾配の大きい所を除いてストークス近似でよく表現でき、境界層の外部はポテンシャル計算値と比較的よく合う。

### 2.6.3 ビルジキールの直圧力の計測

ビルジキールに働く直圧力の計測が九大応力研<sup>33) 20)</sup> および東大<sup>34) 35) 20) 30)</sup>で行われた。九大応力研では、

51年度に2次元模型に付けられたビルジキールの直圧力の直接計測が実施され、その抗力係数が Shih & Buchanan の近似式<sup>36)</sup> および池田らの推定式<sup>5)</sup>による値とよく合うことを示した。さらに、52年度には貨物船模型のビルジキールを5分割し、ビルジキールの前部、中央および後部に働く直圧力を計測し、その前進速度影響について研究した。計測結果の一例を Fig. 2.1.17 に示す。この実験から得られた結論を要約すると以下のようになる。

- (i) 前進時には、ビルジキールの前部に働く直圧力が他の部分に比べ大きくなる。
- (ii) 前進速度の増加に伴いビルジキールの直圧力成分は増加し、船体表面圧力は減少する。また、ビルジキールの効果全体にも前進速度の影響が多少存在する。

また、これらの実験結果を次式で近似し、その係数を Table 2.6.1 に示すように求めている。

$$C_D = a + b \left( \frac{2U}{\omega \ell_{BK}} \right) + c \left( \frac{2U}{\omega \ell_{BK}} \right)^2 + d \left( \frac{2U}{\omega \ell_{BK}} \right)^3 \quad (2.6.1)$$

東大では、ビルジキールを模した低縦横比平板翼の左右揺れ試験およびビルジキール付きの紡錘体と船体の強制横揺れ試験を行ってビルジキールの直圧力およびビルジキール表面上に働く変動圧力の計測を行い、主にその前進速度影響について詳しく研究した。左右揺れる低縦横比平板翼の抗力係数の計測例を Fig. 2.6.6、付加質量係数を Fig. 2.6.7 に示す。また翼面上の圧力分布の計測結果の一例を Fig. 2.6.8（運動速度と同位相成分）および Fig. 2.6.9（加速度と同位相成分）に示す。図からわかるとおり、圧力分布は前進速度の影響を受け変化している。この低縦横比平板翼についての実験結果をビルジキールの場合に適用するために、紡錘体および船体についてのビルジキールの直圧力および圧力分布の計測が行われた。紡錘体に付けられたビルジキールの直圧力の計測例を Fig. 2.6.10、圧力分布の計測例を Fig. 2.6.11 に示す。Fig. 2.6.10 と Fig. 2.6.6 を比較すると船体のある場合と単独平板翼の場合には、直圧力への前進速度影響が若干異なるのがわかる。以上の結果、九大応力研での結論とも多少重複するが次の結論が得られた。

- (i) 等価全抗力係数  $C_D$  には、若干ではあるが前進速度の影響が現われ、 $1/K$  ( $K$  は reduced frequency) の増加とともに一旦減少したのち、 $1/K$  の増大とともに大きくなる傾向があり、その増加の割合はビルジキールを小アスペクト比平板翼とみなしたときの揚力の増加とほぼ等しい。
- (ii) 付加質量係数  $C_m$  には  $C_D$  よりも前進速度影響が強く現われ、 $1/K$  の増加とともに  $C_m$  は減少する。

#### 2.6.4 ビルジキールにより生ずる船体表面圧力の計測

昭和51年度に大阪府大で、二次元模型を用いてビルジキールにより生ずる船体表面圧力の計測が行われた。<sup>37)</sup> 供試模型は船体中央断面模型 ( $H_0 = 1.25$ ,  $\sigma = 0.985$ ) および Series 60,  $C_B = 0.6$  船の SS. 7 断面模型で、前者の結果の一例を Fig. 2.1.19 に、後者の結果の一例を Fig. 2.6.12 に示す。またビルジキール背後に生ずる負圧領域の長さを period parameter で整理した結果を Fig. 2.2.6 に示す。これらの実験で得られた結果をまとめると

- (i) ビルジキールにより船体表面に生ずる変動圧力は周波数の2乗に比例する。
- (ii) ビルジキール前方の変動圧力の圧力係数は period parameter に依存するが、ビルジキール後方の負の変動圧力は、その圧力係数値および分布長さが period parameter に依存する。
- (iii) ビルジキール前方の正の圧力分布形状は、ビルジキール直前を最大値としてビルジキールから離れるにつれて一次的に減少する三角形形状であり、後方の負圧の分布形状は、ビルジキールからある程度離れる所まで一定値の続く台形形状となっている。

#### 2.6.5 大角度横揺れ時の横揺れ減衰力

昭和52年度に大阪府大において、2次元模型の大振幅強制横揺れ試験<sup>38)</sup>が行われ、発散波高ならびに減衰モーメントの計測が行われた。発散波高の計測は平板および Series 60,  $C_B = 0.6$  船 SS. 5 断面模型について行

われ、後者の計測例を Fig. 2.6.13 に示す。同図から特に大振幅横揺れ時の発散波形が非常に複雑な形状であることがわかるが、フーリエ解析して第14項までとり等価波高にして表わす（C法）と、線型のボテンシャル理論値とよく合う（Fig. 2.6.14）。

減衰モーメントについては、主に甲板縁没水時の減衰力の変化を調べるために、水面下の円柱である2次元模型を用いた（Fig. 2.6.15）。結果の一例を Fig. 2.6.16 に示す。また一揺れ間の減衰モーメントの変化は Fig. 2.6.17 に示すようになり、甲板縁没水時には揺れ始めに大きな減衰モーメントが働くことがわかった。さらに、甲板上の流動水の効果をモデル化した計算も行われた（Fig. 2.6.16, 2.6.17 中の破線）。これらの実験の結果得られた結論は次の通りである。

- (i) 大角度横揺れ時の発散波の波形には高次成分の影響が見られるが、等価波高にするとボテンシャル理論による計算値とよく合う。
- (ii) 甲板縁が没水するような大振幅横揺れの減衰力は大きくなるが、これは甲板上の遊動水の効果によるもののが大きい可能性がある。

## 2.6.6 数式船型の横揺れ減衰力

昭和52年度および53年度に船研では、幅船長比（B/L）を系統的に変えた数式船型について強制横揺れ試験を行い、横揺れ減衰力に及ぼす船幅の影響について調査を行った。<sup>13)</sup> 結果の一例を Fig. 2.6.18～Fig. 2.6.21 に示す。ここで減衰力は係数  $C_D$ （単位横揺れ振幅当たりの減衰力を  $\frac{\rho g}{2} L d^3$  で無次化したもの）で表示してある。この実験の結果得られた結論は次の通りである。

- (i) 横揺れ減衰力は、船幅および喫水によって大きく変化する。これらによる変化は  $B/2d$  をパラメタに選ぶと一つの曲線にまとめられる。
- (ii) 減衰力は、 $B/2d$  の値が実用船型のそれに近い付近で最小となる。
- (iii) 横揺れ減衰力の前進速度影響は船幅により異なった傾向を示す。また喫水が深い場合は、前進速度影響は小さい。
- (iv) 数式船型のように単純化された船型であっても、同一の主要寸法の実用船型の裸殻の横揺れ減衰力をよく表わしている。

Table 2.6.1 Drag coefficient of bilge keel of 3rd order approximation.

|                       | a    | b     | c      | d     |
|-----------------------|------|-------|--------|-------|
| $\theta_0 = 5^\circ$  | 4.83 | 6.484 | -1.665 | 0.181 |
|                       | 4.83 | 4.009 | -1.448 | 0.133 |
|                       | 4.83 | 2.636 | -1.124 | 0.102 |
|                       | 4.83 | 4.626 | -1.511 | 0.150 |
| $\theta_0 = 10^\circ$ | 3.62 | 3.885 | -0.772 | 0.066 |
|                       | 3.62 | 2.468 | -0.839 | 0.076 |
|                       | 3.62 | 1.585 | -0.633 | 0.057 |
|                       | 3.62 | 2.640 | -0.683 | 0.055 |
| $\theta_0 = 15^\circ$ | 3.25 | 3.548 | -0.676 | 0.050 |
|                       | 3.25 | 1.415 | -0.482 | 0.045 |
|                       | 3.25 | 0.898 | -0.331 | 0.027 |
|                       | 3.25 | 2.242 | -0.632 | 0.059 |

$$C_D = a + b \frac{L}{B} + c \left(\frac{L}{B}\right)^2 + d \left(\frac{L}{B}\right)^3$$

$$\frac{L}{B_K} = 2V/\omega \cdot L_{BK} \quad -103-$$

$$L_{BK} = 15 \text{ cm}$$

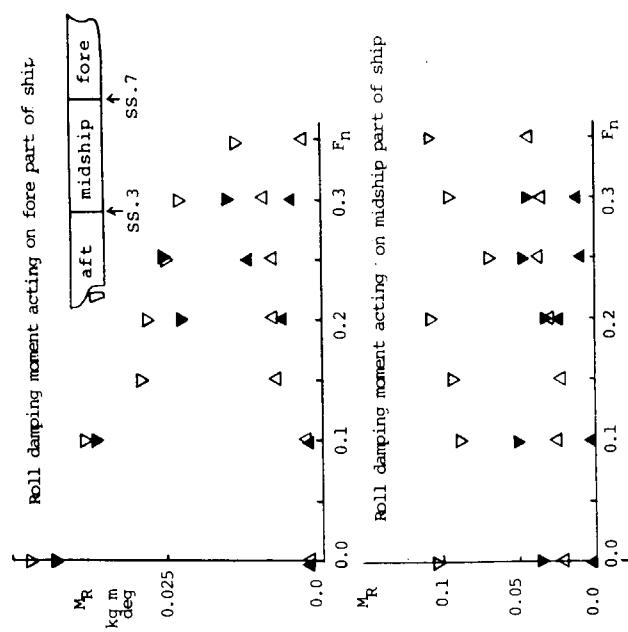


Fig. 2.6.1 Longitudinal distribution of roll damping of SR-108

container ship hull (single screw).

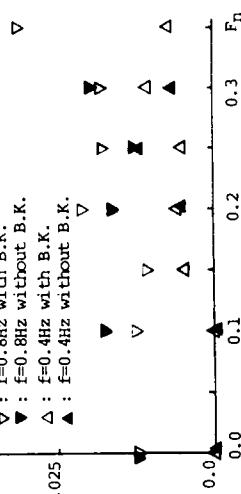


Fig. 2.6.1 Longitudinal distribution of roll damping of SR-108 container ship hull (single screw).

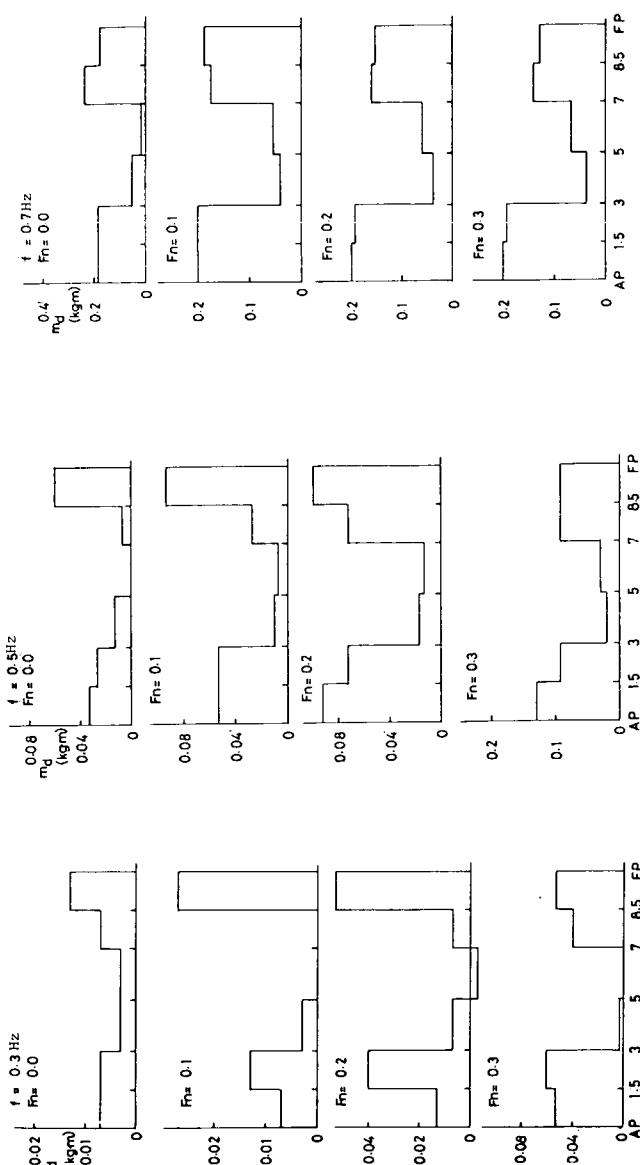


Fig. 2.6.2 Longitudinal distribution of roll damping of mathematical ship models.

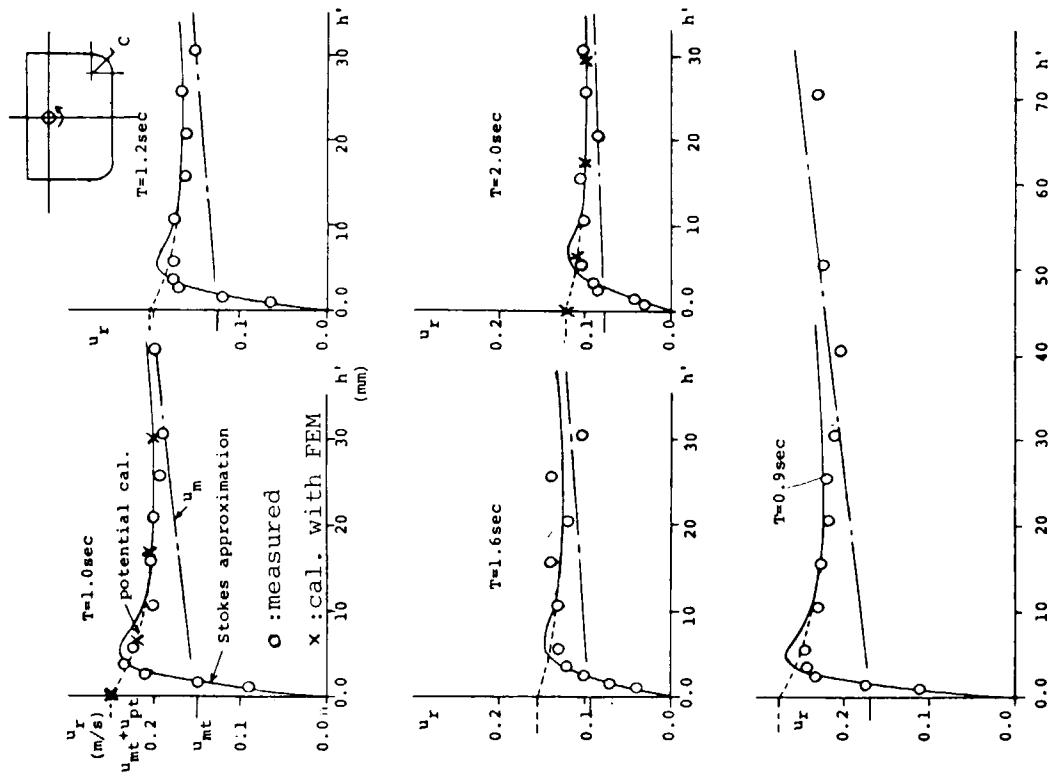


Fig. 2.6.5 Velocity profile around rolling hull.

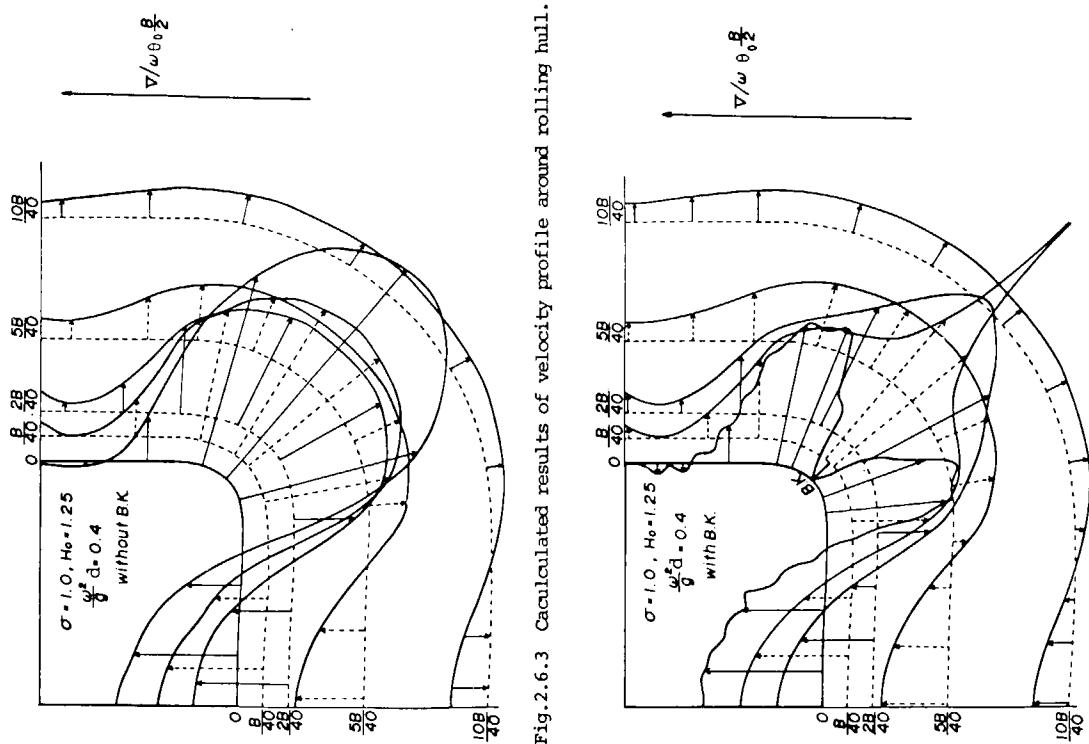


Fig. 2.6.3 Calculated results of velocity profile around rolling hull.

Fig. 2.6.4 Calculated results of velocity profile around rolling hull.

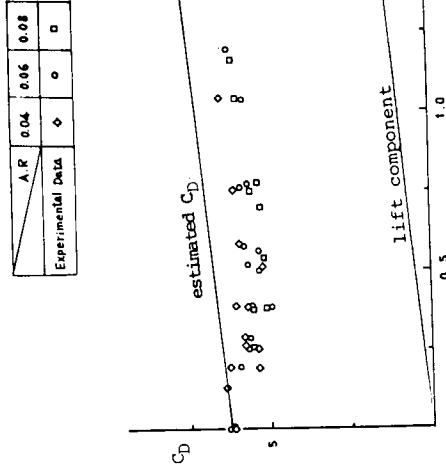


Fig.2.6.6 Drag coefficient of swaying flat plate.

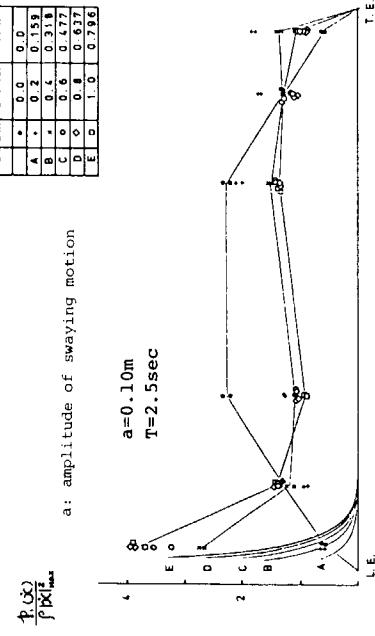


Fig.2.6.8 Pressure distribution on swaying flat plate ('velocity phase component').

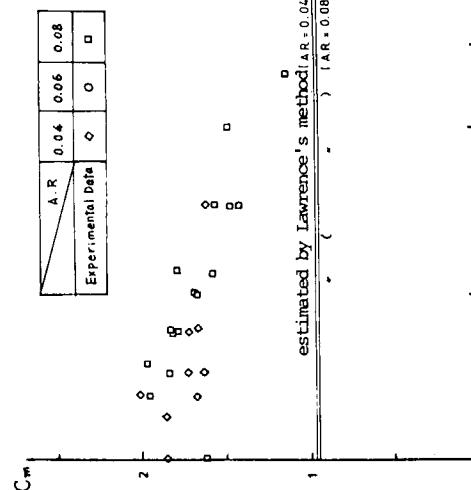


Fig.2.6.7. Inertia coefficient of swaying flat plate.

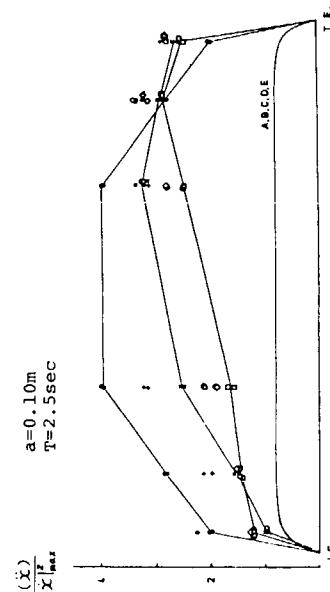
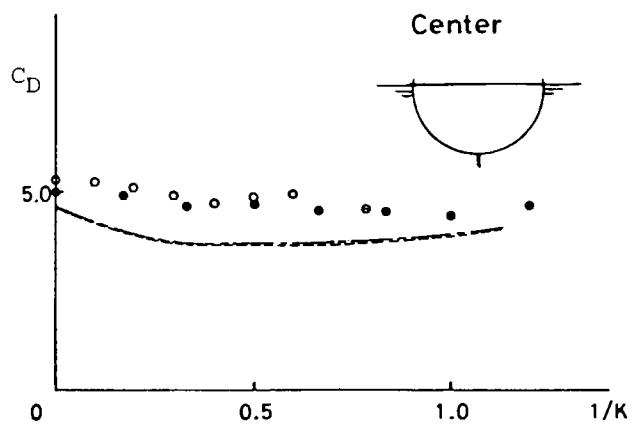


Fig.2.6.9 Pressure distribution onswaying flat plate (acceleration phase component).



$$AR = 0.02 \quad a/b = 3.675$$

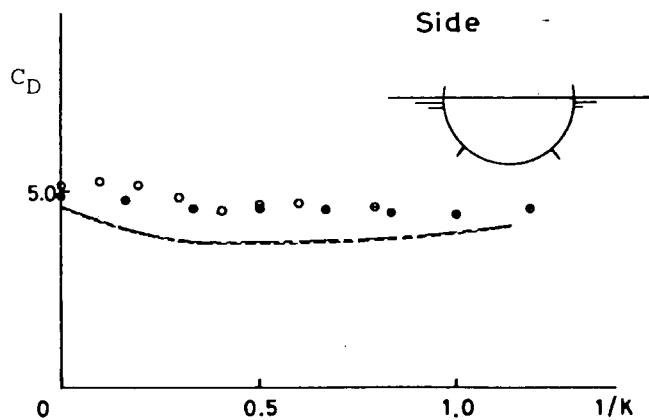


Fig.2.6.10 Drag coefficient of bilge keel attached on spindle-shaped body.

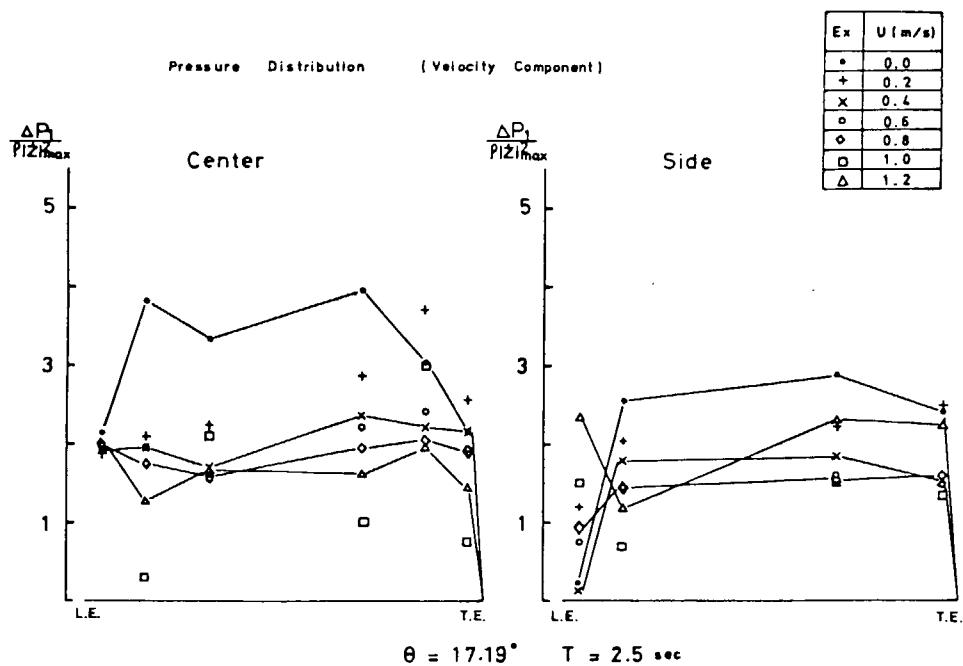


Fig. 2.6.11 Pressure distribution on bilge keel attached on spindle-shaped body.

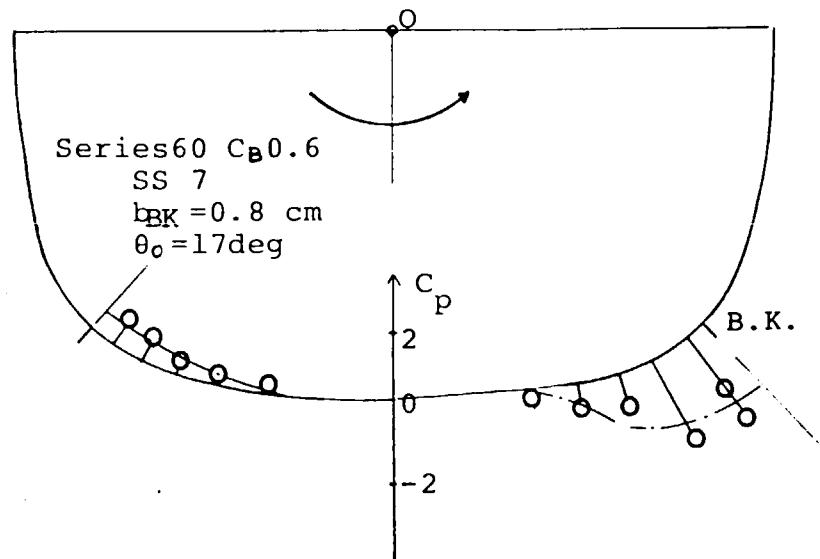


Fig.2.6.12 Pressure distribution due to B.K. ,  
(series60  $C_B$  0.6 SS 7 ,  $b_{BK}$  = 0.8 cm)

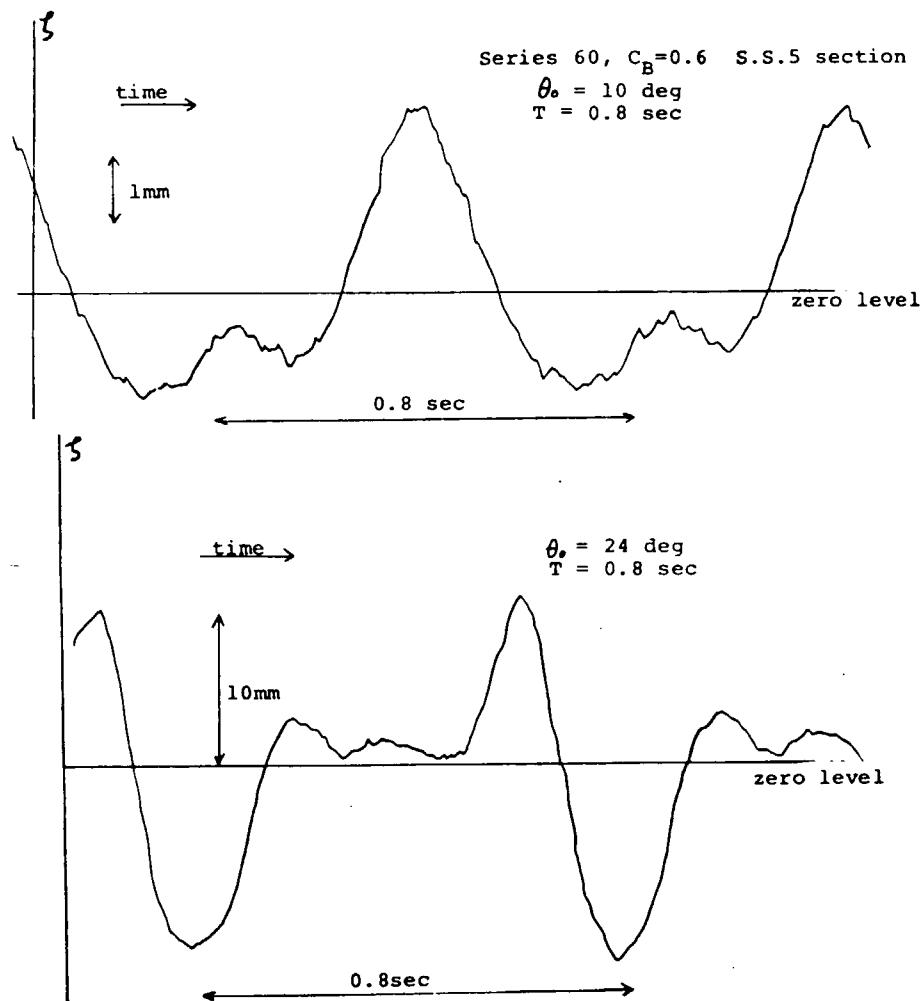


Fig.2.6.13 Wave profile in large amplitude rolling.

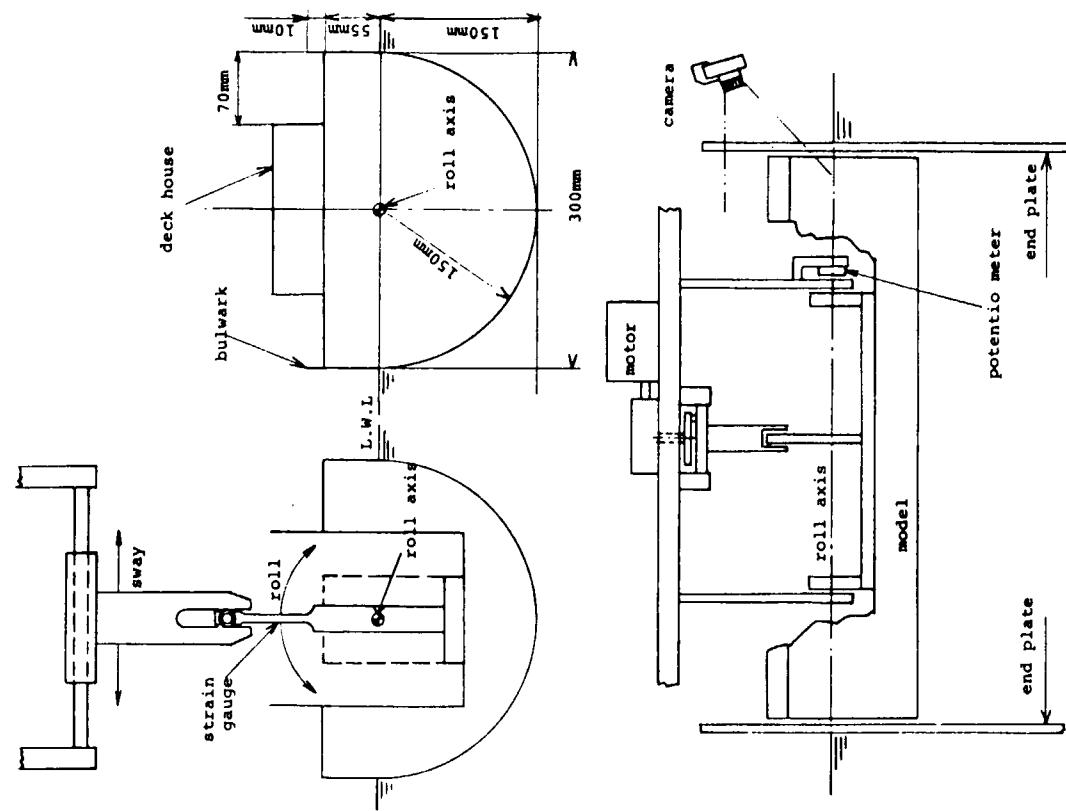
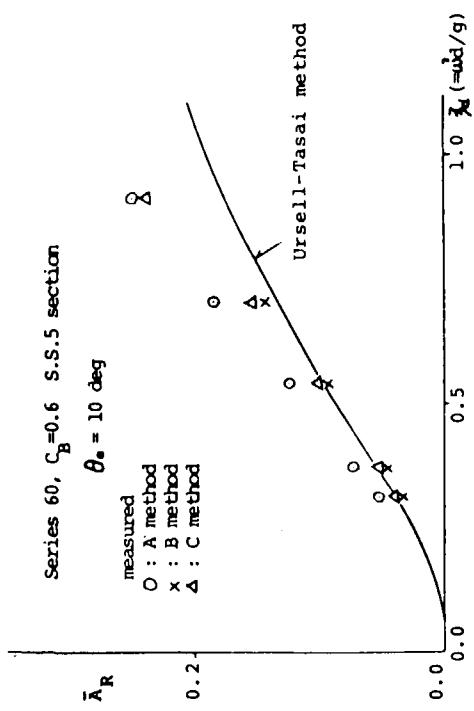


Fig. 2.6.14 Wave amplitude for rolling two-dimensional cylinder.

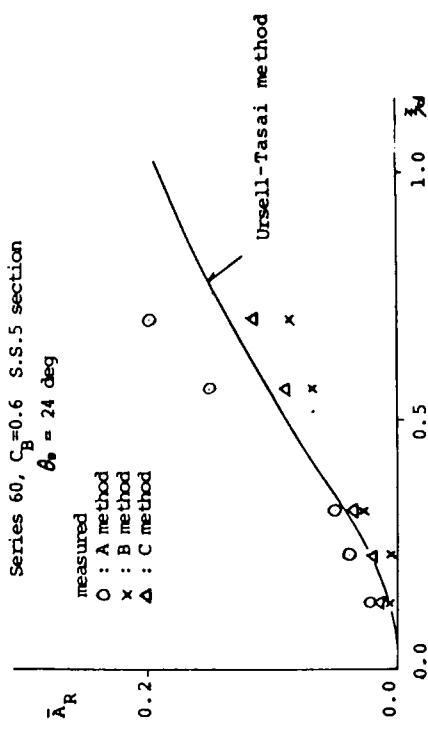


Fig. 2.6.15 Schematic view of test condition.

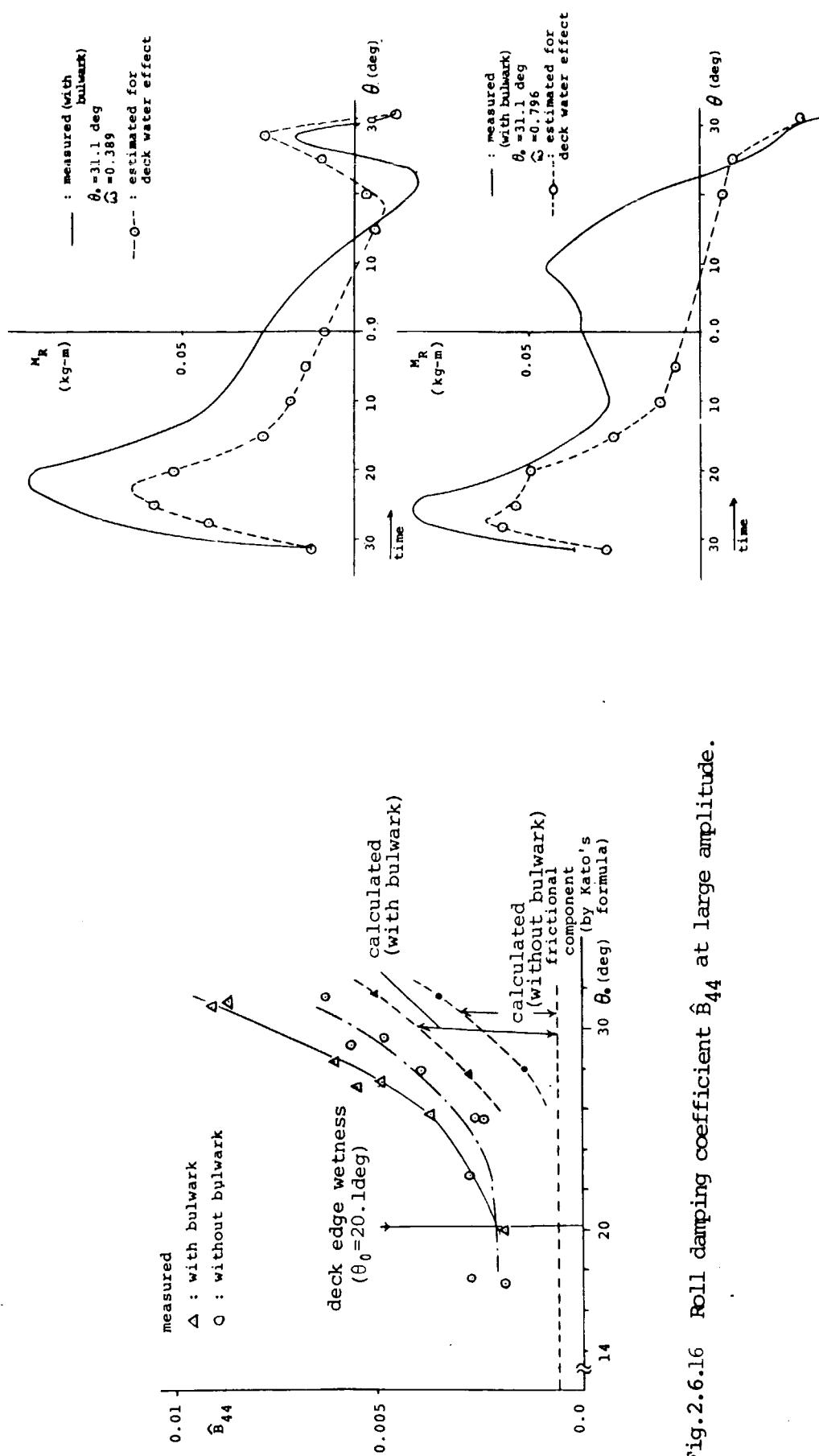


Fig.2.6.16 Roll damping coefficient  $\hat{B}_{44}$  at large amplitude.

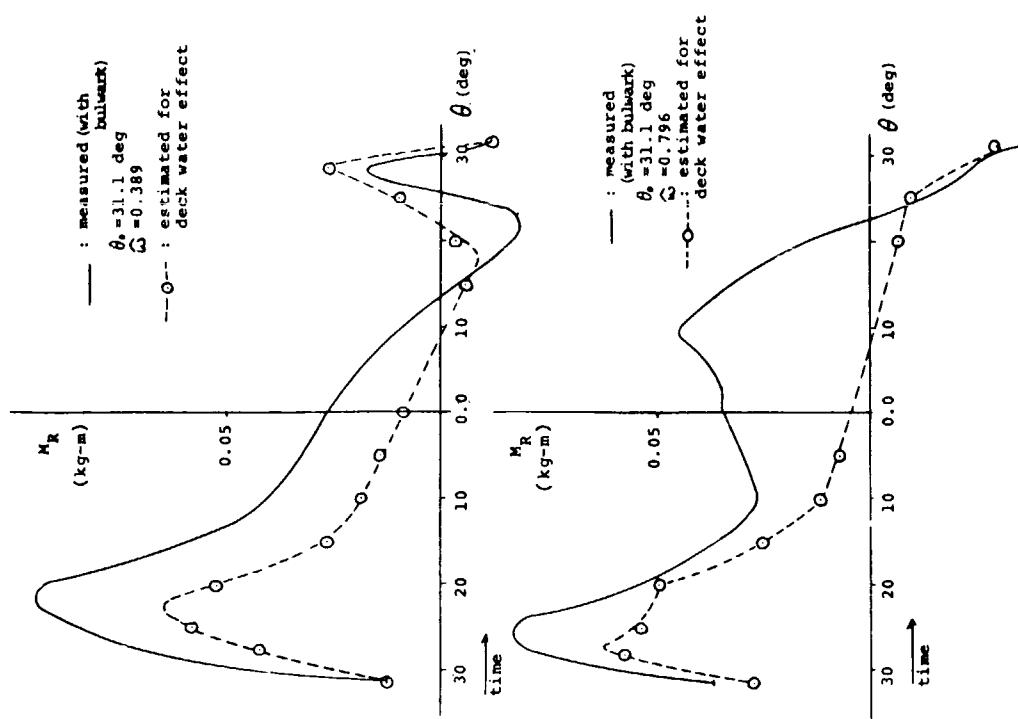


Fig.2.6.17 Roll damping moment at large amplitude.

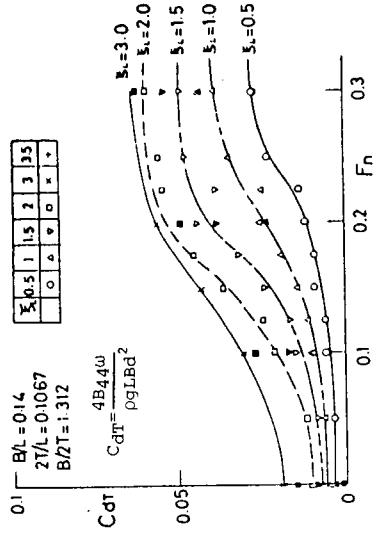


Fig. 2.6.18 Roll damping coefficient  $C_{dT}$  of mathematical model.

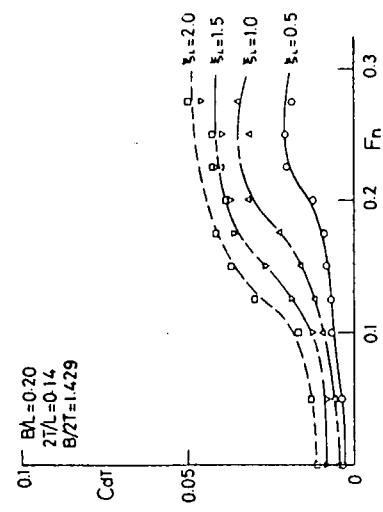


Fig. 2.6.20 Roll damping coefficient  $C_{dT}$  of mathematical model.

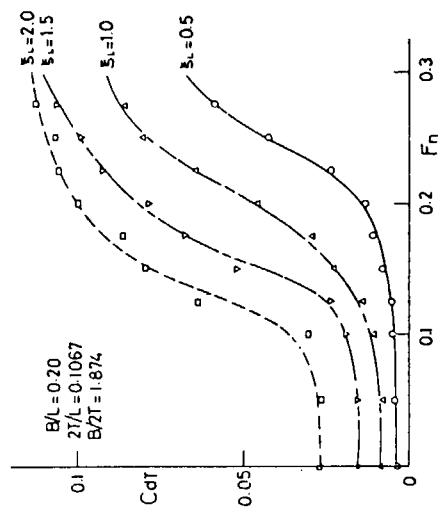


Fig. 2.6.19 Roll damping coefficient  $C_{dT}$  of mathematical model.

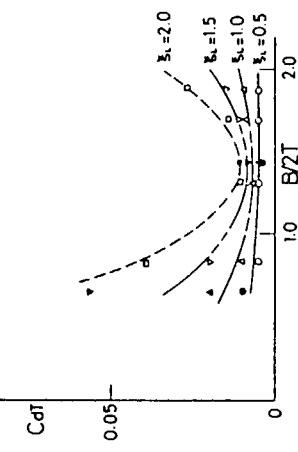


Fig. 2.6.21 Effect of breadth of models on roll damping.

## 参 考 文 献

- 1) 姫野洋司；横揺れ減衰力，第2回耐航性に関するシンポジウム，日本造船学会（昭52.12），p.199
- 2) 加藤 弘；船の横揺れに対する摩擦抵抗について，造船協会論文集，第102号，（昭33.2），p.115
- 3) 池田良穂，藤原利弘，姫野洋司，田中紀男；横揺れ時の船体近傍の流場について，関西造船協会誌，第171号（昭53.12），p.33
- 4) 田宮 真，小村隆士；高速航走時の横揺特性，日本造船学会論文集，第132号，（昭47.12），p.159
- 5) 池田良穂，姫野洋司，田中紀男；横揺れ減衰力について—摩擦成分とビルジキールの直圧力成分—，関西造船協会誌，第161号，（昭51.6），p.41
- 6) 池田良穂，姫野洋司，田中紀男；裸殻の横揺れ造渦減衰力について，日本造船学会論文集，第142号，（昭52.12）p.59
- 7) 池田良穂，姫野洋司，田中紀男；前進時の横揺れ減衰力成分について，日本造船学会論文集，第143号，（昭53.6），p.121
- 8) 湯室彰規，水谷郁夫；Anti-Rolling Fin に関する研究(2)，石川島播磨技報，第10巻第2号，（昭45.3），p.107
- 9) 菊田敏男；船舶の動揺造波抵抗に関する研究その6，前進速度影響についての一考察，造船協会論文集，第87号，（昭30.3），p.67
- 10) 花岡達郎；On Michell's Method of Solving the Non-Uniform Wave-Making Phenomena of a Ship, 応用力学連合講演会論文集，第5回（1955）
- 11) I. Watanabe ; On the effect of the forward velocity on the roll damping moment, Papers of Ship Research Inst. №51 (1977)
- 12) 高木又男，大楠 丹；規則波中を航走する船体の動揺理論概説，第2回耐航性に関するシンポジウム，日本造船学会（昭52.12），p.1
- 13) 渡辺 敏；数式船型に働く横揺れ減衰力の速度依存性について，日本造船学会論文集，第144号，（昭53.12），p.106
- 14) N. Tanaka ; A study on the bilge keel, Part 1 ~ Part 4, 造船協会論文集，第102, 103, 105, 109号（昭32.8, 33.7, 34.7, 36.6）
- 15) 加藤 弘；船の横揺れに対するビルジキールの効果について，造船協会論文集，第117号，（昭40.6），p.93
- 16) 日本造船研究協会第161研究部会，船舶の波浪中性能推定の精度向上とその実証に関する研究，昭和51年度報告，研究資料№275，（昭52.3），第2.1.4節 p.15
- 17) 湯浅和昭，藤野正隆，元良誠三；前進速度を有する小アスペクト比振動平板翼に作用する流体力について，日本造船学会論文集，第142号，（昭52.12），p.65
- 18) 池田良穂，小松 清，姫野洋司，田中紀男；横揺れ減衰力について—ビルジキールによる船体表面圧力効果，関西造船協会誌，第165号，（昭52.6），p.31
- 19) 藤野正隆，伊田 力，前当孝夫，沼田敏晴；ビルジキールの直圧力に関する一考察，日本造船学会論文集，第144号，（昭53.12），p.127
- 20) 日本造船研究協会第161研究部会，船舶の波浪中性能推定の精度向上とその実証に関する研究，昭52年度報告，研究資料№291，（昭53.3），第2.1.5節，p.40
- 21) 郷田国夫，宮本 武；二次元模型の大振幅強制動揺試験による変動水圧および甲板水圧の計測，西部造船会会報，第49号，（昭50.2），p.12
- 22) 日本造船研究協会第161研究部会，船舶の波浪中性能推定の精度向上とその実証に関する研究，昭50年度報告，

研究資料№257, (昭51.3), 第2.2.4節, p.27

- 23) 田中紀男, 姫野洋司, 小倉雅人, 増山和雄; 航走中の横揺れ性能に関する実験, 関西造船協会誌, 第146号, (昭47.12), p.63
- 24) 高木幹雄; 浅海域における船体運動について(その2)一左右揺れおよび横揺れの二次元流体力一, 西部造船会報, 第52号, (昭51.8), p.59
- 25) 日本造船研究協会第161研究部会, 船舶の波浪中性能推定の精度向上とその実証に関する研究, 昭和50年度報告, 研究資料№257, (昭51.3), 第2.2.6節, p.32
- 26) 菊田敏男; 船舶の動揺造波抵抗に関する研究, その2 (Bilge Keel の造波抵抗), 造船協会論文集, 第85号, (昭27.12), p.54
- 27) 日本造船研究協会第161研究部会, 船舶の波浪中性能推定の精度向上とその実証に関する研究, 昭和52年度報告, 研究資料№291, (昭53.3), 第2.1.6節, p.47
- 28) 田才福造, 高木又男; 規則波中の応答理論および計算法, 耐航性に関するシンポジウム, 日本造船学会, (昭44.7), p.1
- 29) 田才福造; Beam Sea における船体運動, 西部造船会報, 第30号, (1965)
- 30) 日本造船研究協会第161研究部会, 船舶の波浪中性能推定の精度向上とその実証に関する研究, 昭和53年度報告書, (昭54.3)
- 31) 高木幹雄, 田才福造; 橫運動方程式の流体力について, 西部造船会報第46号, (昭48.), p.71
- 32) 日本造船研究協会第161研究部会, 船舶の波浪中性能推定の精度向上とその実証に関する研究, 昭和51年度報告書, 研究資料№275, (昭52.3), 第2.2.2節, p.75
- 33) 日本造船研究協会第161研究部会, 船舶の波浪中性能推定の精度向上とその実証に関する研究, 昭和51年度報告書, 研究資料№275, (昭52.3), 第2.1.4節, p.15
- 34) 日本造船研究協会第161研究部会, 船舶の波浪中性能推定の精度向上とその実証に関する研究, 昭和50年度報告書, 研究資料№257, (昭51.3), 第2.2.5節, p.28
- 35) 日本造船研究協会第161研究部会, 船舶の波浪中性能推定の精度向上とその実証に関する研究, 昭和51年度報告書, 研究資料№275, (昭52.3), 第2.1.3節, p.8
- 36) C. C. Shih & H. J. Buchanan ; The drag on oscillating flat plates in liquids at low Reynolds numbers, Journal of Fluid Mechanics, Vol. 48, Part 2 (1971), p.229
- 37) 日本造船研究協会第161研究部会, 船舶の波浪中性能推定の精度向上とその実証に関する研究, 昭和51年度報告書, 研究資料№275, (昭52.3), 第2.1.2節, p.6
- 38) 日本造船研究協会第161研究部会, 船舶の波浪中性能推定の精度向上とその実証に関する研究, 昭和52年度報告書, 研究資料№291, (昭53.3), 第2.1.3節, p.13

### 3. 非線形横揺れ減衰力を含む横揺れの統計的取扱い

現在、船舶の耐航性能の計算に用いられている O. S. M. (Ordinary Strip Method)などは、ほぼ実用に供し得るものであることが、種々の研究により明らかにされてきているが、その精度向上に大きな問題となっているものの一つに、横揺れ減衰力の非線形性の取扱い方法の問題がある。

ここでは、横揺れの角速度の2乗に比例する減衰項を含む運動方程式で、横揺れの不規則波中における応答の統計的な性質を調べるために、2とおりの等価線形減衰項による計算方法や、Runge-Kutta-Gill法によって、非線形減衰項のまま横揺れの時系列を数値計算する方法など、いくつかの計算方法に従って計算を行い、横揺れ応答の統計的な取扱いについて比較検討したので、それについて述べる。

#### 3.1 計算方法について

一般に、規則波中の船体運動の左右揺れ( $\eta$ )、横揺れ( $\phi$ )、船首揺れ( $\psi$ )に関する連成運動方程式は、横揺れの非線形の減衰項を含めて(3.1.1)～(3.1.3)式のように与えられる。

$$A_{22} \ddot{\eta} + B_{22} \dot{\eta} + A_{24} \dot{\phi} + B_{24} \ddot{\phi} + A_{26} \ddot{\psi} + B_{26} \dot{\psi} + C_{26} \phi = F_\eta \quad (3.1.1)$$

$$A_{42} \ddot{\eta} + B_{42} \dot{\eta} + A_{44} \dot{\phi} + B_1 \dot{\phi} + B_2 |\dot{\phi}| + C_{44} \phi + A_{46} \ddot{\psi} + B_{46} \dot{\psi} + C_{46} \psi = M_\phi \quad (3.1.2)$$

$$A_{62} \ddot{\eta} + B_{62} \dot{\eta} + A_{64} \dot{\phi} + B_{64} \ddot{\phi} + A_{66} \ddot{\psi} + B_{66} \dot{\psi} + C_{66} \psi = M_\psi \quad (3.1.3)$$

これらの運動方程式の横揺れ減衰項の取扱いについて、次に述べるような計算方法を用いた。なお、計算方法の名称、略号は、ここで便宜的に用いているだけで、仮称である。

##### (a) 一定波高法(L-1)

規則波に対して、横揺れ減衰項を(3.1.4)式のように近似して、一揺れ間のエネルギーが等しくなるように等価線形化する<sup>1)</sup>と(3.1.5)式となる。

$$B_{44E}^{(1)} \dot{\phi} \doteq B_1 \dot{\phi} + B_2 |\dot{\phi}| \quad (3.1.4)$$

$$B_{44E}^{(1)} = B_1 + \frac{8}{3\pi} \omega \phi_A B_2 \quad (3.1.5)$$

ここで、 $\omega$ は波の円周波数であり、 $\phi_A$ は横揺れの応答振幅である。一定波高の規則波に対して、この等価線形減衰係数は $\phi_A$ の関数になるが、繰返し計算により応答関数を定めることができる。このように、各周波数ごとの規則波に対し、波高を一定として応答関数を求め、この応答関数と波スペクトルとから不規則波中の応答の統計諸量を求める方法である。この場合、 $B_{44E}^{(1)}$ は $\omega$ によって変化する。

##### (b) 最小偏差法(L-2)

横揺れ減衰項を(3.1.6)式のように近似し、これを用いた運動方程式とともに運動方程式との差をとり、その偏差 $\delta$ ((3.1.7)式)の2乗の期待値 $E[\delta^2]$ を最小にする $B_{44E}^{(2)}$ (円周波数によらず一定とする)は(3.1.8)式より求めることができて(3.1.9)式となる。<sup>2)3)</sup>

$$B_{44E}^{(2)} \dot{\phi} \doteq B_1 \dot{\phi} + B_2 |\dot{\phi}| \quad (3.1.6)$$

$$\delta = B_1 \dot{\phi} + B_2 |\dot{\phi}| - B_{44E}^{(2)} \dot{\phi} \quad (3.1.7)$$

$$\frac{\partial E[\delta^2]}{\partial B_{44E}^{(2)}} = -2(B_1 - B_{44E}^{(2)}) E[\dot{\phi}^2] - 2B_2 E[|\dot{\phi}|^2] = 0 \quad (3.1.8)$$

$$B_{44E}^{(2)} = B_1 + B_2 \frac{E[|\dot{\phi}|^2]}{E[\dot{\phi}^2]} = B_1 + \sqrt{\frac{8}{\pi}} \sigma_\phi B_2 \quad (3.1.9)$$

ここで、 $\sigma_{\dot{\phi}}$  は考えている不規則波に対して応答する横揺れの角速度の標準偏差である。一つの不規則波に対して、 $B_{44E}^{(2)}$ 、応答関数、応答スペクトル、 $\sigma_{\dot{\phi}}$ 、新しい $B_{44E}^{(2)}$ 、………という繰返し計算により、 $B_{44E}^{(2)}$ を定めることができる。この $B_{44E}^{(2)}$ をこの不規則波に対する全周波数領域での等価線形減衰係数として、応答関数を求め、その応答関数と波スペクトルとから不規則波中の応答の統計諸量を求める方法である。この場合、 $B_{44E}^{(2)}$ は $\omega$ によって変化しないで、波スペクトルと船の航海条件に対して、一つ定まる。

#### (c) 非線形時系列法 (N. L-T)

(3.1.1)～(3.1.3)式の運動方程式において、 $F_{\eta}$ ,  $M_{\phi}$ ,  $M_{\dot{\phi}}$ に、考えている不規則波の波スペクトルを持つ入射波の時系列に対応した不規則の波浪強制力・波浪強制モーメントの時系列を与え、Runge-Kutta-Gill法により、運動方程式を数値的に解いて、運動の応答の時系列を求める。この時系列を統計解析して、応答の統計諸量を求める方法である。この場合、(3.1.1)～(3.1.3)式中の係数は $\omega$ によって変化するが、不規則な応答では、この係数変化を正しく考慮した数値計算は困難であるので、近似的に、応答の計算中に係数を変化させて計算している。<sup>4)</sup>

#### (d) 最小偏差時系列法 (L-2-T)

「(c)非線形時系列法」において、非線形減衰項( $B_1 \dot{\phi} + B_2 \dot{\phi} |\dot{\phi}|$ )の代わりに「(b)最小偏差法」の最小偏差等価線形減衰項( $B_{44E}^{(2)} \dot{\phi}$ )を用いて、運動の応答の時系列を数値計算し、この時系列を統計解析して統計諸量を求める方法である。

以上の4つの計算方法について特色を述べると「(a)一定波高法」では、一定波高をある一定の値に固定すれば、応答関数も $\omega$ ごとに決まり、線形応答と仮定したことになり、種々の不規則波に対しても同じ応答関数が使え、短波頂不規則波中の応答や長期予測の計算が容易となる。一方、一定波高の値によって応答が変化するので、この一定波高として、どのような値を選ぶかが大きな問題となる。

「(b)最小偏差法」では、不規則波の波スペクトルに対応して、応答関数が定まるので、「(a)一定波高法」のように、波高を仮定する必要はないが、波スペクトルによって応答関数が変化するために、短波頂不規則波中の応答や長期予測の計算が線形でなくなる。

「(c)非線形時系列法」と「(d)最小偏差時系列法」は、係数の変化の近似による誤差や、入力としての不規則波の時系列の不完全さによる誤差や、計算結果の統計的誤差が含まれる。しかし、非線形減衰項や最小偏差等価線形項をそのまま用いられるので、それらによる差を検討できるとともに、数値シミュレーション計算であるので、応答スペクトルなどの他に、極値分布などについての情報も得ることができる。

次に具体的な計算であるが、対象船としては、Table 3.1.1に示す主要目のSR 108の1軸高速コンテナ船(S 7-175-1.0)の満載状態を採用し、不規則波の波スペクトルには、I.S.S.C.波スペクトルを用いた。また(c), (d)の時系列法の計算では、Runge-Kutta-Gill法のステップを0.1秒とし、係数の変化は1秒ごととしている。時系列のスペクトル解析はサンプリングタイム1秒で、Qウィンドウを用いラグ数53としている。また、極値の数列については、Rayleigh分布と比較しやすいように、各Zero Cross間での最大振幅のみを取り、負の極大値、正の極小値などを無視し、さらに同じZero Cross間に2つ以上の極大値、極小値があるときは、振幅の最大のもの以外は除外して、時系列を狭帯域のスペクトルを有するごとに修正するような統計解析<sup>5)</sup>により求めている。

## 3.2 一定波高法と最小偏差法の比較

### 3.2.1 計算状態

「(a)一定波高法」と「(b)最小偏差法」とによる横揺れ運動を比較するために、フルード数 $F_n$ が0.275(実船22.2 knot)で、出会い角 $\chi$ が $30^\circ$ ,  $60^\circ$ ,  $90^\circ$ ,  $120^\circ$ ,  $150^\circ$ ( $0^\circ$ を追波,  $180^\circ$ を向波とする)の5状態について、

(平均周期 $T_w$ , 有義波高 $H_w$ 表示で, (8 s, 10 m), (10 s, 10 m), (12 s, 10 m), (6 s, 5 m), (8 s, 5 m), (10 s, 5 m)の6つの不規則波に対して, 計算を行い比較検討した。

また, 非線形性の強弱の度合を(非線形項の係数 $B_2$ )と(線形項の係数 $B_1$ )との比で表わすことにし, 非線形度 $\alpha = B_2 / B_1$  ( $s/\text{rad}$ )を定義して, フルード数との関連を強制動揺法による実験結果<sup>6)</sup>でみてみると, ( $F_n$ ,  $\alpha$ )表示で, (0.00, 1055.), (0.15, 18.7), (0.25, 6.4), (0.275, 5.4)となっている。そこで, 非線形性の強弱による影響を見るために, 正規の $\alpha = 5.4$ 以外に,  $\alpha = 20.0, 100.0, \infty$ (無限大)の場合についても計算を行った。ただし, この場合には, フルード数の変化に伴う影響を除くために, フルード数を0.275に固定し, 横揺れ減衰項の $B_1, B_2$ の値だけをTable 3.2.1のように適当に変化させて計算している。

なお, ここでは, 「(a)一定波高法」の一定波高には, 有義波高 $H_w$ を用いている。

### 3.2.2 計算結果と考察

計算結果によると「(a)一定波高法」と「(b)最小偏差法」との差は, 左右揺れ, 船首揺れではほとんどないので, 横揺れについてだけ考えることにする。

#### (1) 減衰係数, 応答振幅, 応答スペクトル

Fig. 3.2.1～Fig. 3.2.3に, 例として非線形度 $\alpha = 5.4$  ( $s/\text{rad}$ )で( $T_w, H_w$ )=(10 s, 10 m)の場合の横揺れ減衰係数, 応答振幅, 応答スペクトルにおける「(a)一定波高法」と「(b)最小偏差法」の値を示す。横揺れの等価線形減衰係数のFig. 3.2.1をみると両計算の係数の様子がよくわかる。横揺れの応答振幅の差はFig. 3.2.2に示すように, 同調に近い応答振幅の大きいところ以外では両者の差は小さく,  $\alpha = 5.4$ の場合で,  $H_w = 10 m$ では,  $T_w = 12 s$ の時が, また $H_w = 5 m$ では,  $T_w = 6 s$ の時が差が最も大きい。横揺れ応答スペクトルについては,  $\alpha = 5.4$ の場合では, 両者の差は $T_w$ が小さいと小さく,  $T_w$ が大きいと大きくなる傾向が見られた。

#### (2) 有義両振幅 $H_R$ ( $= 4 \times (\text{片振幅標準偏差 } \sigma_R)$ )

Fig. 3.2.4に横揺れの有義両振幅 $H_R$  ( $= 4 \sigma_R$ )に関する計算結果を $H_w = 10 m$ の場合について, 非線形度 $\alpha$ および出会い角 $\chi$ 別に, 平均周期 $T_w$ をベースに示した。これをみると両計算方法の差は,  $\chi = 60^\circ, 90^\circ$ の時に大きく,  $\alpha = B_2 / B_1$ が増して非線形性が強くなるほど, また $T_w$ が大きくなるほど, 絶対量の差は大きくなる傾向がある。

#### (3) 「(a)一定波高法」と「(b)最小偏差法」との比 $C_{K0}$

Fig. 3.2.5に出会い角 $\chi$ および波( $T_w, H_w$ )別に $1/\alpha = B_1/B_2$ ベースで $H_R$  ( $= 4 \sigma_R$ )の $C_{K0} = \{(a)\text{一定波高法} / (b)\text{最小偏差法}\}$ の値を示す。この図で非線形度( $\alpha$ )の影響をみると,  $\chi$ によっても,  $T_w$ によっても変化しており, 少し複雑になっているが,  $H_R$  ( $= 4 \sigma_R$ )の絶対量の大きい $\chi = 60^\circ$ では, ほぼ直線に近く, ( $T_w, H_w$ )による影響も小さく, 両計算方法による差の推定がしやすい様相を示している。ただ, 全般的にみると $\alpha$ が増して非線形性が強くなるほど両計算方法による差が大きく, 「(a)一定波高法」の値から「(b)最小偏差法」の値を推定したり, 逆の推定をするのは難しいようである。

なお, 「(b)最小偏差法」の繰返し計算の収束は早く数回の計算で収束している。

### 3.3 非線形項と最小偏差等価線形項による横揺れ運動の比較

#### 3.3.1 計算状態

非線形項と最小偏差等価線形項による横揺れ運動の比較のために, 「(c)非線形時系列法」と「(d)最小偏差時系列法」とにより計算を行った。また, 同時に「(a)一定波高法」と「(b)最小偏差法」とで計算を行い比較の資料とした。

計算状態は非線形性がやや強い, フルード数 $F_n$ が0.15で, 非線形度( $\alpha = B_2 / B_1$ )が18.7 ( $s/\text{rad}$ )の状

態とし、出会い角 $\chi$ は横揺れの大きい斜め追波の $60^\circ$ としている。不規則波は、次のような3種類を選び、時系列法の時系列としては1時系列が20分間で全部10時系列の計算を「(c)非線形時系列法」と「(d)最小偏差時系列法」で行った。ここでの同じ種類の波の時系列間の差は、波の時系列の発生時の成分、波のランダムな位相差の組の違いによる。

- |   |   |      |      |
|---|---|------|------|
| ① | $(T_w, H_w) = (10.3\text{ s}, 7.1\text{ m})$  | 3時系列 | 60分間 |
| ② | $(T_w, H_w) = (11.7\text{ s}, 9.2\text{ m})$  | 3時系列 | 60分間 |
| ③ | $(T_w, H_w) = (13.1\text{ s}, 11.5\text{ m})$ | 4時系列 | 80分間 |

### 3.3.2 計算結果と考察

各時系列法による計算結果の統計諸量は各時系列ごとに求めているが、同一の波においては、各時系列間の差が小さいので、以下特に断わらない限り、波の種類ごとに各時系列の値を平均したもので論ずることにする。また、「(a)一定波高法」、「(b)最小偏差法」と「(c)非線形時系列法」、「(d)最小偏差時系列法」との間には、入力の不規則波の誤差や時系列法自体の近似（係数変化の近似）の影響や統計的誤差も含まれていることに注意する必要がある。ここでは、主として、(c), (d)間での非線形減衰項と最小偏差等価線形項による横揺れの差について考える。

#### (1) 出会波スペクトル

Fig. 3.3.1に時系列法計算に用いた出会い波の時系列の統計解析から求めた出会い波スペクトルとI. S. S. C. 波スペクトルから求めた正規の出会い波スペクトルを示す。図によると、前者は後者をほぼよく近似しているが、多少の差があり、正規の出会い波スペクトルに対する(a), (b)の計算結果と(c), (d)の計算結果との差に多少の影響を及ぼしていると考えられる。

#### (2) 横揺れスペクトル

Fig. 3.3.2に(c), (d)による横揺れスペクトルを示すが、両者の差は波の種類によらずほとんど同じ傾向で、(c)の方が(d)よりも大きい。

#### (3) $\sigma_R, H_R^{1/3}, H_R^{1/10}$

Fig. 3.3.3に、横揺れの $\sigma_R$ （片振幅標準偏差）と $H_R^{1/3}$ （ $1/3$  highest mean）と $H_R^{1/10}$ （ $1/10$  highest mean）について、各計算方法間の比較値、 $C_{K0} = (a)/(b)$ ,  $C_{K1} = (c)/(a)$ ,  $C_{K2} = (c)/(b)$ ,  $C_{K3} = (c)/(d)$ ,  $C_{K4} = (d)/(b)$ を示す。 $C_{K0}$ および $C_{K1}$ は、波によって大きく変化しており、(a), (b)間および(c), (a)間のそれぞれの関連付けが難しいことを示している。それに対して、 $C_{K2}$ ,  $C_{K3}$ ,  $C_{K4}$ は各波の間では差が小さく(c), (b), (d)間に強い関連があることを示している。 $C_{K2}$ は(b)で(c)を推定するときの値であり、入力波の誤差、係数近似の誤差、統計的誤差も含まれている。 $C_{K3}$ は、同じ時系列法間で減衰項が異なるだけであるので、減衰項の差による横揺れの差をよく表わしていると考えられる。 $C_{K3}$ は図によると波による差も小さく、値自体も1.0に近く(d)は(c)をよく近似していることがわかる。 $C_{K4}$ は同じ減衰項を使用しているので、時系列法計算の近似や統計的誤差などの差をみるのに役立つ。これも波による差は小さくよく近似していることがわかるが、 $H_R^{1/3}$ ,  $H_R^{1/10}$ で $C_{K4}$ の値自体が小さくなっている。これには、前述の誤差の他に(b)の $H_R^{1/3}$ ,  $H_R^{1/10}$ で極値のRayleigh分布を仮定しているので、それも含まれている。また $C_{K2}$ ,  $C_{K3}$ ,  $C_{K4}$ とも全体的な性質を表わす $\sigma_R$ では値が1.0に近く近似がよいが、 $H_R^{1/10}$ では近似が悪い。

#### (4) 極値分布とRayleigh分布

③( $T_w, H_w) = (13.1\text{ s}, 11.5\text{ m}$ )の波に関して、Fig. 3.3.4に出会い波と横揺れの極値の発生頻度とそれに対応したRayleigh分布曲線を示し、さらに、Fig. 3.3.5に累積発生頻度の図を示した。この図中のNは計算した時系列の極値の総数を示す。ここでは③の波について示したが①, ②の波についても同じ傾向が見られる。

Fig. 3.3.4 の極値の発生頻度によると、全般的に、(c)の場合は、(d)に比べて、小さな横揺れは多少多くなるが、非常に大きな横揺れは少なくなる傾向があり、両者の極値分布の形状は少し異なっている。(c)と(d)の極値分布について、5%の有意水準で $\chi^2$ 検定を行ったところ、②の波の1時系列と3時系列の和と③の波の1時系列とが棄却されただけで、他の各時系列と①、③の波の時系列の和は許容されており、(d)は(c)をよく近似しているように思われる。

また、Rayleigh 分布と(c), (d)の極値分布について、5%の有意水準で $\chi^2$ 検定を行ったところ、出会波はすべて許容されたが、横揺れでは各波の各時系列の約2/3と、各波の時系列の和はすべて棄却された。ただし、図からもわかるように(c), (d)の時系列法の極値分布はRayleigh 分布の山より少し大きいところで、Rayleigh 分布よりも発生頻度が多いという傾向にあり、Rayleigh 分布との関連が強い。

Fig. 3.3.5 は、累積発生頻度分布の図であるが、これは短期予測に相当しており、これによると、大きな極値の発生は、出会波の入力時系列の Rayleigh 分布との差を考慮に入れてても、(c)では、Rayleigh 分布より低い値となっている。このことは、次節 3.4 の Fig. 3.4.4, Fig. 3.4.5においても同じことが言えるので、非線形項をもつ横揺れの短期予測では、Rayleigh 分布よりも小さくなることが考えられる。

#### (5) まとめ

以上のことから、次のようなことがわかった。

- (i) 種々の有義波高を持つ不規則波中の非線形動揺においては、一律に固定された一定波高の等価線形項を用いるよりも、それぞれの波の有義波高に対応した等価線形項を用いる方が、非線形項の横揺れをよく近似できる。
- (ii) (c)の非線形減衰項と(d)の最小偏差等価線形減衰項による横揺れの差は、スペクトル、 $\sigma_R$ ,  $H_R^{1/3}$ ,  $H_R^{1/6}$  および極値分布においても小さく、両者の差の傾向も波の種類による影響が少ないので、最小偏差等価線形項を用いる方法は、非線形減衰項を用いる場合の横揺れをよく近似している。
- (iii)  $C_{K3} = (c)$  非線形時系列法 / (d) 最小偏差時系列法の横揺れの比較の値について、今回の計算では、 $\sigma_R$  で約 1.04,  $H_R^{1/3}$  で約 1.03,  $H_R^{1/6}$  で約 0.99 の値が得られた。

### 3.4 長期予測の計算例

#### 3.4.1 長期予測計算方法

非線形減衰項を含む横揺れの応答は、非線形の応答となるために、一定波高として一律に 10 m を採用して、応答関数を定めてしまい、あとは線形応答とするような普通の線形応答の長期予測の手法は採用できない。また「(b)最小偏差法」においても、応答は波によって異なり長期予測計算上では線形応答と同じ扱いはできない。ここでは、真能他<sup>7)</sup>の「超過確率が  $10^{-8}$ 、または、それに近い最大値（異常値）は長期分布を構成する短期分布の内で、その分散が最大のものの発現確率とその分散の値が与えられれば近似的に求められ、これから長期分布の全容を推定できる」という近似推定法に従って長期予測の計算を行った。以下、真能他<sup>7)</sup>に従って近似推定法の概略を述べる。

長期分布における任意の応答値 X の超過確率  $Q(X)$  は、任意の海面状態  $i, j$  (波高  $H_i$ , 波周期  $T_j$ ) において、任意の航海条件  $k$  で航海しているときの短期分布における X の超過確率  $q_{ijk}(X)$  の和 (3.4.1) 式で与えられる。ここで、X の値が大きくなると  $q_{ijk}(X)$  が急激に小さくなるような分布の場合には、X がある値以上になると (3.4.1) 式の右辺の計算では、最悪短期分布における超過確率以外は無視できるようになる。

$$Q(X) = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^{\ell} p_{ij} \cdot p_o(ijk) \cdot q_{ijk}(X) \quad (3.4.1)$$

$p_{ij}$  : 海面状態  $i$   $j$  の発現確率

$p_o(ijk)$  : 海面状態  $i$   $j$  における航海条件  $k$  の発現確率

船体応答の長期分布における最大値に対する  $Q(X)$  の値は  $10^{-8}$  程度であり、上述の取扱いが可能となる。さらに、短期分布が Rayleigh 分布に従うとして、最悪海面状態の時の  $p_{ij}$  を  $p_{mj}$ 、 $p_o(ijk)$  を  $p_{mo}$  とし、その時の応答の標準偏差  $R_{ijk}$  を  $R_m$  とすると、 $Q(X)$  が  $10^{-N}$  である最大値  $X_m$  は近似的に (3.4.2) 式の第1近似式で求められることになる。また、 $p_m = p_{mj} \times p_{mo}$  が小さいときにも適用できるように、第1近似式の  $X_m - Q$  曲線に接し原点を通る直線で近似する (3.4.3) 式の第2近似式も真能他<sup>7)</sup> は導いている。

$$X_m = 2.146 \{ N + \log(p_{mj} \cdot p_{mo}) \}^{1/2} R_m \quad (3.4.2)$$

$$X_m = 1.073 N \{ -\log(p_{mj} \cdot p_{mo}) \}^{-1/2} R_m \quad (3.4.3)$$

ここでの計算は、「(a)一定波高法」と「(b)最小偏差法」とで行い、一部につき「(c)非線形時系列法」と「(d)最小偏差時系列法」によっても行い比較検討した。

### 3.4.2 計算状態

今回の計算では、航海中に遭遇すると考えられる厳しい海面状態としては、真能の文献<sup>8)</sup>の表2の北大西洋の標準等価最高波高  $H_{me}$  の想定遭遇海象を採用してみた。これは、各波周期別表示で、海面状態の発現確率  $p_{mjs}$  が  $10^{-5}$  (船令を20年として、航海を1年に200日とした場合に、船の生涯で遭遇する時間は約1時間となる) になるような等価最高波高曲線  $H_{me}$  を示しているもので、Fig. 3.4.1中に採用した値と、その値に基づく I. S. S. C. 波スペクトルを示し、Fig. 3.4.2中に、等価最高波高曲線  $H_{me}$  を示している。

また、想定遭遇海象の各海面状態に対する航海条件については、荒天時の避航や速力低下や操船の変化などを考えないで、フルード数  $F_n = 0.150$  ( $\hat{B}_1 = 0.00286$ ,  $\hat{B}_2 = 0.0470$  で、非線形度  $\alpha = 18.7$  (s/rad)) とし、相対針路(出会い角  $\chi$ )は  $30^\circ$ ,  $60^\circ$ ,  $90^\circ$ ,  $120^\circ$ ,  $150^\circ$  の5状態とした。また、ここでは、長波頂不規則波中のみを考えている。

### 3.4.3 計算結果と考察

Fig. 3.4.2に「(a)一定波高法(一定波高を一律に10mとしている)」と「(b)最小偏差法」によって計算した、それぞれの想定遭遇海象に対する横揺れの値を標準偏差  $\sigma_R$  (片振幅)で示し、さらに  $C_{K0} = (a)$ 一定波高法」／「(b)最小偏差法」の値も示してみた。これによると両計算方法の差は長期予測に関係するような横揺れの大きいところでは数%位になっていて、両計算方法による差は比較的小さいことがわかった。ただ、横揺れの大きさによって、大小関係が逆転したりしている。これらのこととは、長期予測においても、(3.4.2), (3.4.3)式をみればわかるように、 $X_m$  は  $R_m (= 2\sigma_R)$  に比例しているので、同様のことが言える。

また、非線形減衰項の影響についてさらに検討するために、 $\chi = 60^\circ$ について、最悪海面の( $T_w, H_w$ ) = (12.0 s, 17.75 m)と(14.0 s, 16.25 m)とについて、「(c)非線形時系列法」と「(d)最小偏差時系列法」とで計算を行い、標準偏差  $\sigma_R$  の比  $C_{K3} = (c)/(d)$  の値を求め、「(b)最小偏差法」の  $\sigma_R$  にこの値を乗じて(e)非線形修正としての  $\sigma_R$  を求めてみた。 $C_{K3}$  は、20分間の時系列計算で 1.029 ( $= 11.78^\circ / 11.45^\circ$ ) と 1.031 ( $= 11.79^\circ / 11.44^\circ$ ) となっていて、(a), (b), (e)による長期予測の結果は Fig. 3.4.3 に示すように、3者ともほぼ同じ値で数%の差になった。

次に、長期予測と関連して、短期分布における非線形減衰項の影響を調べるために、時系列法の時系列から求めた狭帯域的に修正した Zero Cross の値  $X$  の短期分布を Fig. 3.4.5, Fig. 3.4.6 の図に、縦軸は  $X$  (両振幅)／ $\sigma$  (片振幅) とし、横軸は累積頻度  $p(X/\sigma)$  (%表示)、または  $q(X/\sigma) = 1 - p(X/\sigma)$  の値として、片対数グラフで示した。これによると、「(c)非線形時系列法」の短期分布の曲線は  $q(X/\sigma)$  の値が小さくなるにつれ、Rayleigh 分布および時系列計算の入力としての出会い波の短期分布の曲線よりも下方に離れ

ていく傾向を示し、短期予測の値は、出会い波の短期分布の理論分布である Rayleigh 分布よりも小さくなっている。

このことを長期予測に関連させて考えると想定遭遇海象の発現確率  $P_{mjs}$  は  $10^{-5}$  なので短期分布における  $q_{ijk}(X) = 10^{-8}$  の値を考えれば、長期予測の  $10^{-8}$  に対応することになる。Fig. 3.4.5, Fig. 3.4.6 では、 $q(X/\sigma) = 0.001$  の  $X/\sigma$  の値を推定するのは困難なので、代わりに  $q(X/\sigma) = 0.0025$  の値で考えると出会い波の  $X/\sigma$  より約 1 割ほど「(c)非線形時系列法」の  $X/\sigma$  の値が小さくなっているので、Rayleigh 分布近似の場合よりも約 1 割がた小さめとみてよいようである。これを長期予測上で考えると  $\log_{10} Q(X) = -7.5$  位で Fig. 3.4.3 の(e)非線形修正の値よりも約 1 割がた小さめの長期予測の値と考えてもよいと思われる。

これらのことを考え合わせると、非線形減衰項を含む場合の長期予測においては、短期予測の標準偏差の値も大事であるが、短期分布形状が Rayleigh 分布と異なってきて、短期予測や長期予測の値が Rayleigh 分布の場合よりも小さくなると考えられるので、短期分布の形状も重要と思われる。

### 3.5 考 察

横揺れの角速度の 2 乗に比例する非線形減衰項を含む横揺れに関して、2 種の等価線形減衰係数および非線形係数を用いて、4 方法により計算を行い、比較検討して、次のようなことがわかった。

- (1) 「(a)一定波高法」と「(b)最小偏差法」との差は、左右揺れ、船首揺れにはほとんど現われず、横揺れにだけ現われる。
  - (2) 「(a)一定波高法」と「(b)最小偏差法」とによる横揺れの等価線形減衰係数、応答振幅、応答スペクトルの差に関する資料が得られた。
  - (3) 「(a)一定波高法」と「(b)最小偏差法」とによる横揺れの運動の差に対する、波の平均周期や有義波高や非線形性の度合などの影響に関する資料が得られた。
  - (4) 「(c)非線形時系列法」の計算結果と比較した場合では、「(a)一定波高法」で一律に波高を固定する方法よりも、「(b)最小偏差法」の方が、「(c)非線形時系列法」による横揺れと、波に関しては同じ傾向にあるなど、よい近似を示している。このことから、等価線形減衰係数としては、それぞれの波、または有義波高に対応した値を用いた方がよいと思われる。
  - (5) 「(c)非線形時系列法」と「(d)最小偏差時系列法」との比較によると、両計算方法による横揺れの差は、多少あるものの、スペクトル、 $\sigma_R$ ,  $H_R^{1/3}$ ,  $H_R^{1/6}$  および極値分布においては小さく、波に対する傾向も似ており、最小偏差等価線形減衰項を用いる方法は、非線形減衰項を用いる場合の運動をよく近似している。また、「(c)非線形時系列法」と「(d)最小偏差時系列法」とによる横揺れの比較から、 $\sigma_R$  や  $H_R^{1/3}$ ,  $H_R^{1/6}$  について、 $C_{K3} = (c)/(d)$  の修正係数的な値の資料が得られた。
  - (6) 北大西洋の想定遭遇海象に対する長期予測計算例によると「(a)一定波高法」、「(b)最小偏差法」、「(e)非線形修正」の短期予測の標準偏差は 3 方法ともよく似た値となっており、短期分布を Rayleigh 分布と仮定した場合は、長期予測上でも、短期予測の標準偏差による違いと同じで、数%の差となっている。
  - (7) 「(c)非線形時系列法」による短期分布の計算結果をみると、Rayleigh 分布と少し異なり、短期予測の値は、Rayleigh 分布近似した場合よりも小さい値となっている。このことから、非線形な横揺れの短期予測、長期予測においては、標準偏差だけでなく、短期分布の分布形状が大きく影響をおよぼすことがわかった。
- 以上のことを考えにいれて実用計算のことを考えると、時系列法計算(c), (d)は計算時間がかかるので、実用計算にはむかないとと思われ、実際には、(a), (b)の方法で計算し、その結果に対して、非線形性を考慮して、(a), (b)の計算結果を修正するのはよいと思われる。この場合(a)の一定波高の場合は、対象としている波に合うものを選ぶ必要がある。今回の各計算方法間の比較で、修正用の資料も得られているが、計算データの少ないとによる影響や、

非線形度の影響や、船型による影響などは未検討であり、今後も検討が必要と思われる。さらに、大角度横揺れになると、運動方程式の係数や波浪強制力なども、微小運動の仮定の場合と変化していくと考えられるので、その方面的研究も重要と思われる。

#### 参考文献

- 1) 高木幹雄, 田才福造:「横運動方程式の流体力について」 西部造船会々報 第46号 昭和48年8月
- 2) Lyssimachos Vassilopoulos :「Ship Rolling at Zero Speed in Random Beam Seas with Non-linear Damping and Restoration」 Journal of Ship Research, Vol.15, №4, Dec. 1971
- 3) 日本造船研究協会第161研究部会:「船舶の波浪中性能推定の精度向上とその実証に関する研究報告書」 研究資料 №257, 昭和51年3月, 4.2節
- 4) 日本造船研究協会第161研究部会:「船舶の波浪中性能推定の精度向上とその実証に関する研究報告書」 研究資料 №275, 昭和52年3月, 4.1節
- 5) 日本造船研究協会第125研究部会:「超高速コンテナ船の耐航性に関する研究報告書」 研究資料 №157, 昭和47年3月, 3.2節
- 6) 日本造船研究協会第125研究部会:「超高速コンテナ船の耐航性に関する研究報告書」 研究資料 №211, 昭和50年3月, 3.3節
- 7) 真能創, 上野洋純:「波浪に対する各種船体応答の長期分布の近似推定法とその応用」 日本造船学会論文集, 第132号, 昭和47年12月
- 8) 真能創:「海洋波に対する応答の長期分布の理論的推定における想定海象について」 日本造船学会論文集, 第135号, 昭和49年6月
- 9) 真能創:「海洋波に対する応答の長期分布の理論的推定における想定海象について(続)」 日本造船学会論文集, 第139号, 昭和51年6月
- 10) 真能創, 河辺寛:「海洋波に対する応答の長期分布の理論的推定における想定海象について(第3報)」 日本造船学会論文集, 第142号, 昭和52年12月
- 11) D. E. Cartwright & M. S. Longuet-Higgins :「The Statistical Distribution of the Maxima of a Random Function」 Proceedings of the Royal Society of London, Series A, vol. 237, 1956
- 12) N. H. Jasper :「Statistical Distribution Patterns of Ocean Waves and of Wave-induced Ship Stress and Motions, with Engineering Applications」 Transactions of the Society of Naval Architects & Marine Engineers, vol. 64, 1956
- 13) M. K. Ochi & W. E. Bolton :「Statistics for Prediction of Ship Performance in a Seaway」 International Shipbuilding Progress, vol. 20, №222, №224, №229 1973
- 14) 岩井清, 宮本雅史:「不規則波中における最大横揺角について」 関西造船協会誌, 第131号, 昭和44年3月
- 15) 真鍋大覚:「不規則動搖の最大値に対する一考察」 造船協会論文集, 第110号, 昭和36年12月
- 16) 高木又男他:「波浪による船内タンクの不規則応力推定法」 関西造船協会誌, 第156号, 昭和50年3月
- 17) 渡辺恵弘:「再び船体の最大曲応力の統計的推定について」 造船協会誌, 第429号, 昭和40年4月
- 18) 篠田仁吉:「船舶の横揺れの長期間における統計分布」 造船協会論文集, 第110号, 昭和36年12月
- 19) 山内保文:「波浪中船の応答特性の統計的解析に関する二, 三の考察—イムパルス応答の推定と非線形要素

Table 3.1.1 Principal particular of ship

| Type                  | S 7 - 1 7 5 | Type     | S 7 - 1 7 5 |
|-----------------------|-------------|----------|-------------|
| L pp                  | 1 7 5 . 0 m | △        | 2 4 7 4 2 t |
| B                     | 2 5 . 4 m   | C b      | 0 . 5 7 1 6 |
| D                     | 1 5 . 4 m   | C $\phi$ | 0 . 9 7     |
| d                     | 9 . 5 m     | K M      | 1 0 . 5 2 m |
| L / B                 | 6 . 8 9     | G M      | 1 . 0 0 m   |
| B / d                 | 2 . 6 7     | T R      | 1 8 . 0 s   |
| $\ell_{cb}$ (% L pp ) | - 1 . 4 1 7 | K $\ell$ | 0 . 2 4     |

Table 3.2.1 Roll damping coefficient

| $\alpha = B_2 / B_1$    | 5.4 (s/rad) | 20 (s/rad) | 100 (s/rad) | $\infty$ (s/rad) |
|-------------------------|-------------|------------|-------------|------------------|
| $\hat{B}_1$             | 0.000596    | 0.00163    | 0.000326    | 0.0              |
| $\hat{B}_2$             | 0.02851     | 0.02874    | 0.02879     | 0.02884          |
| $\hat{B}_2 / \hat{B}_1$ | 4.8         | 17.6       | 88.3        | $\infty$         |

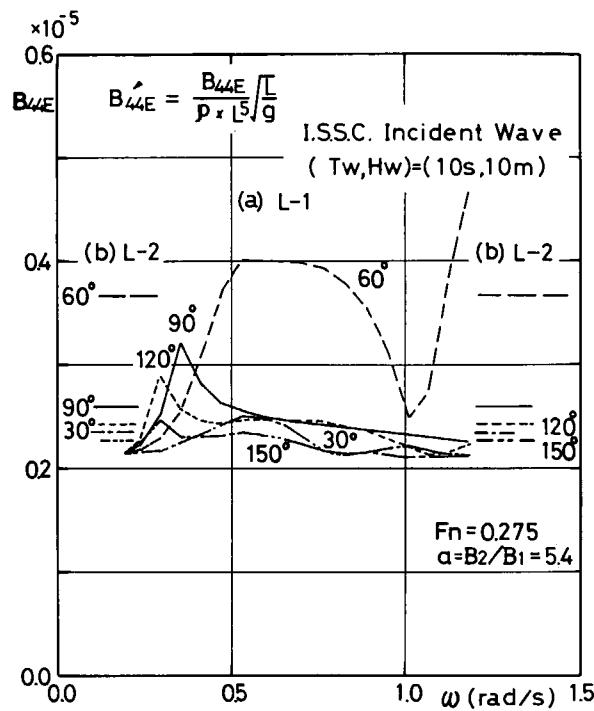


Fig. 3.2.1 Roll damping coefficient.

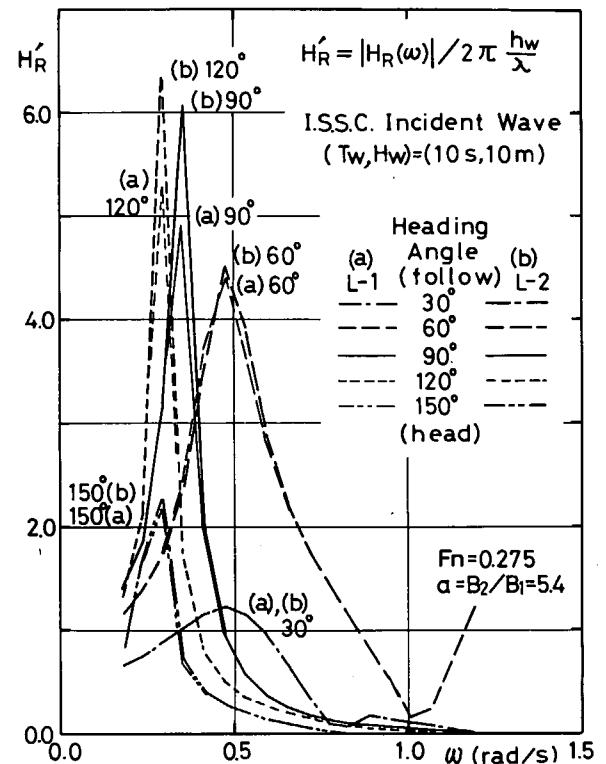


Fig. 3.2.2 Roll response amplitudes.

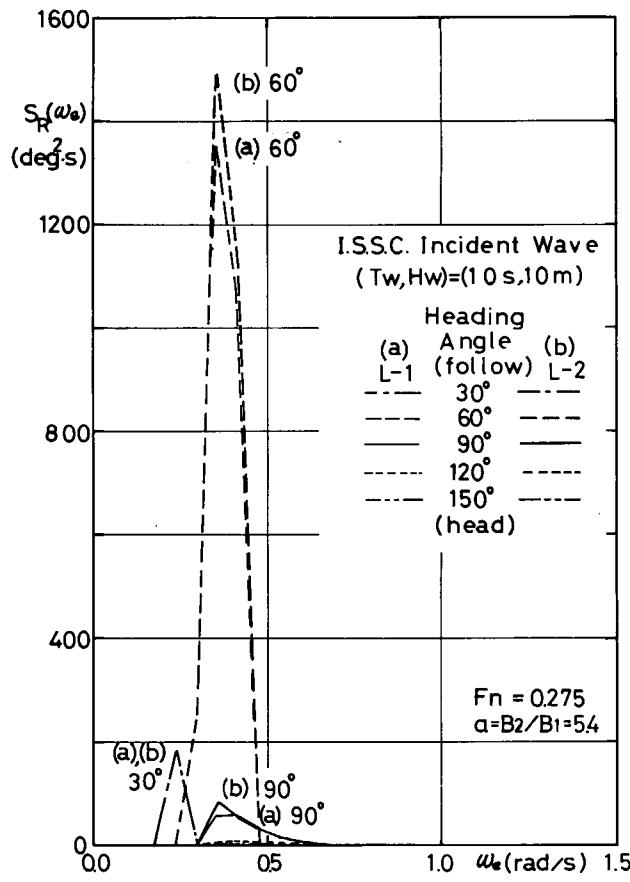


Fig. 3.2.3 Roll spectra

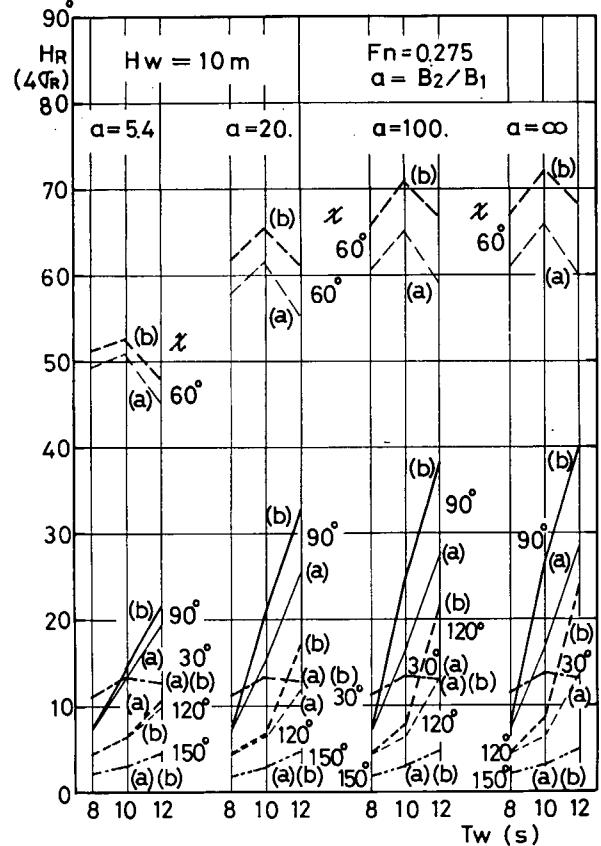


Fig. 3.2.4 Significant roll amplitude

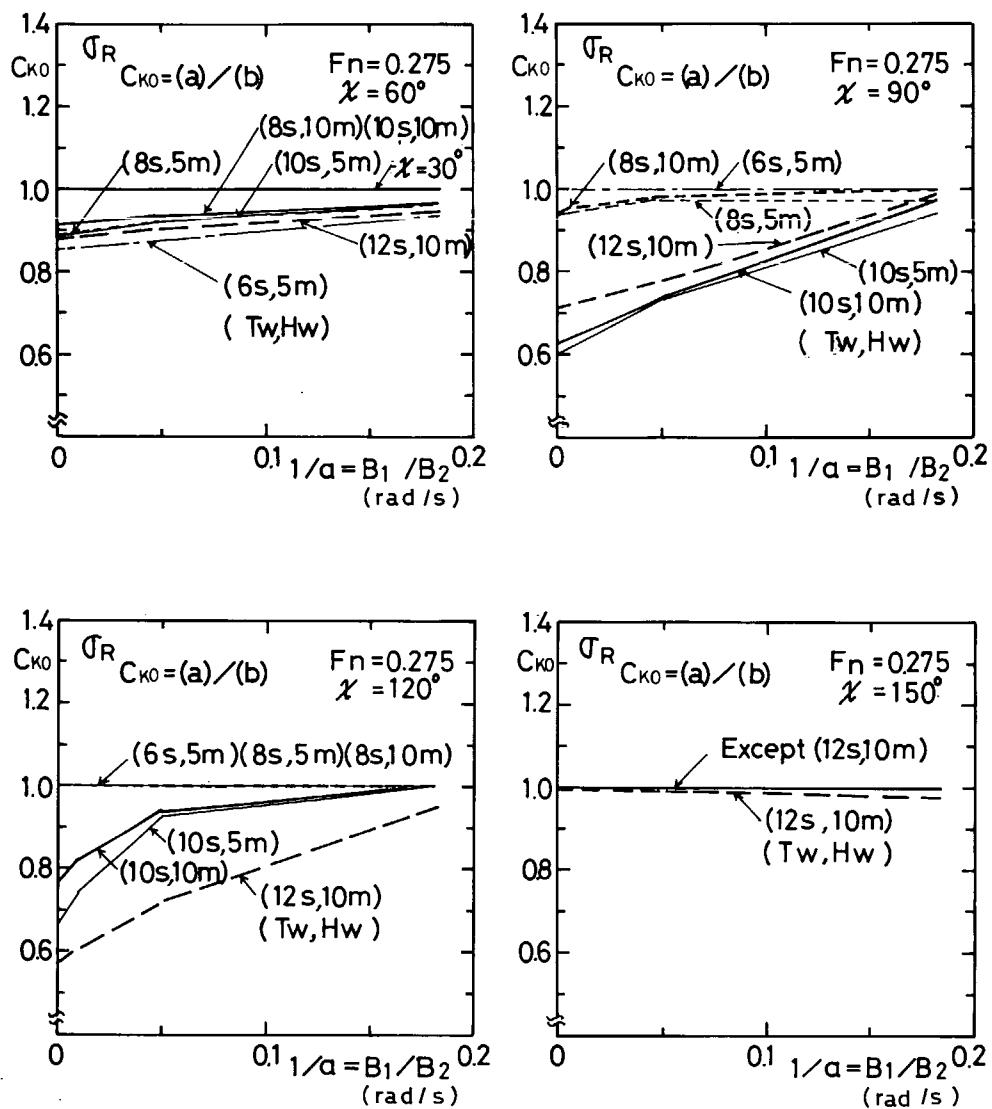


Fig. 3.2.5  $C_{K0} = \{ (a)L - 1 \vee (b)L - 2 \}$

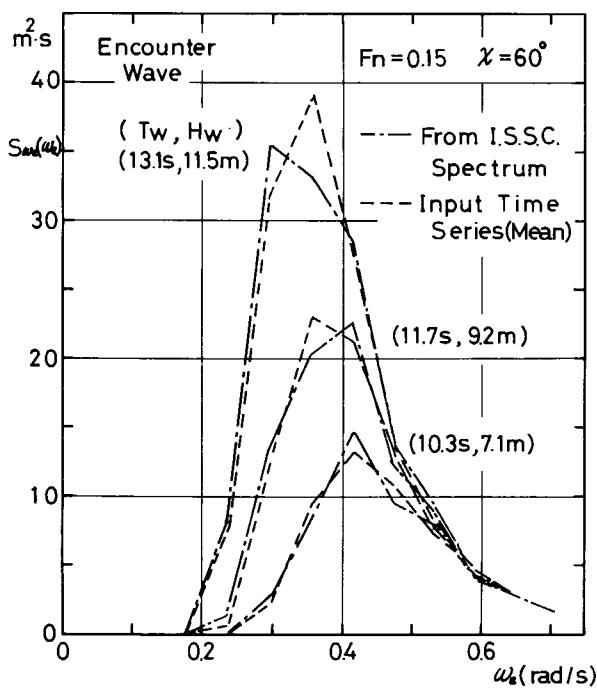


Fig. 3.3.1 Encounter wave spectra

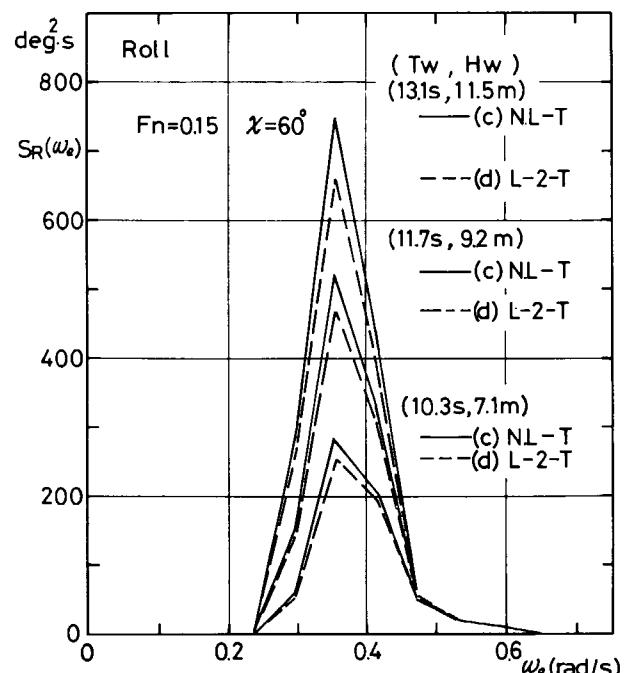


Fig. 3.3.2 Roll spectra

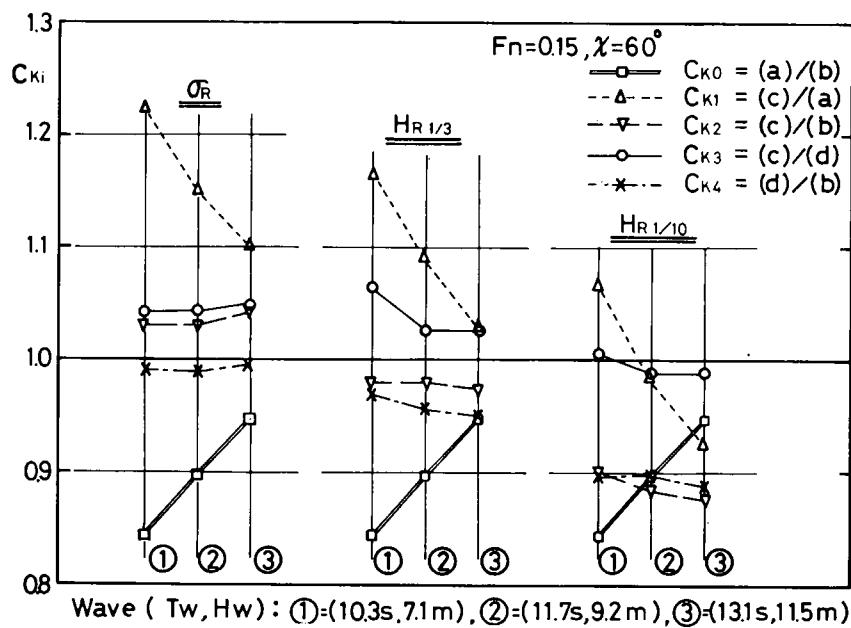


Fig. 3.3.3  $\sigma_R$ ,  $H_R^{1/3}$ ,  $H_R^{1/10}$

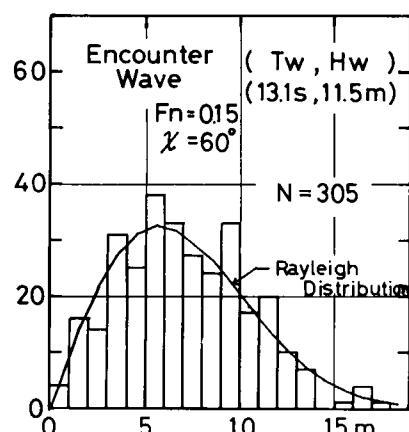


Fig. 3.3.4 Histogram of encounter wave and roll

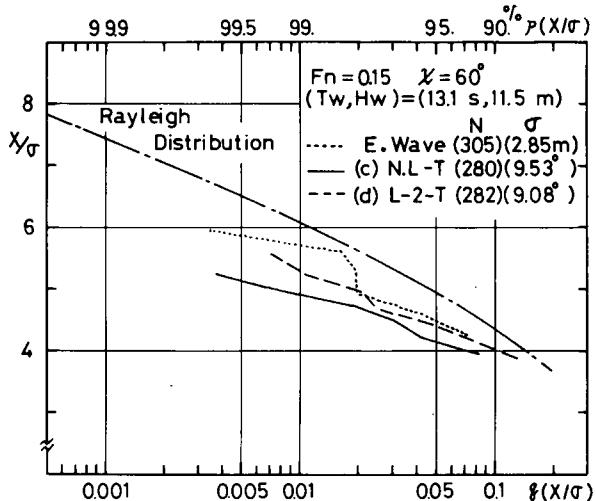


Fig. 3.3.5 Short-term distribution

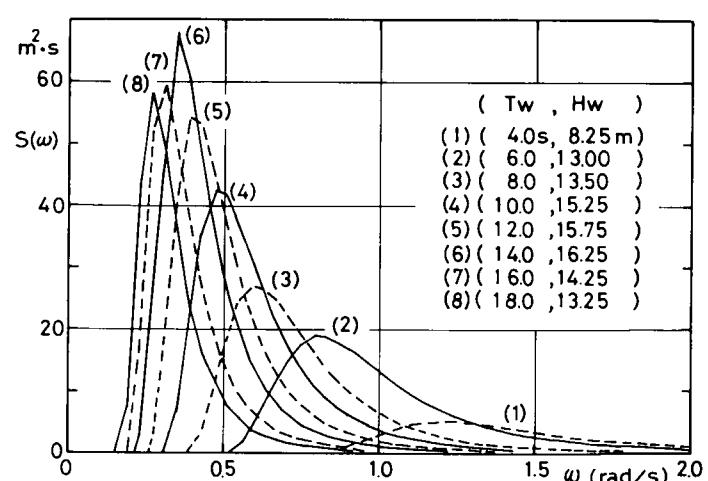
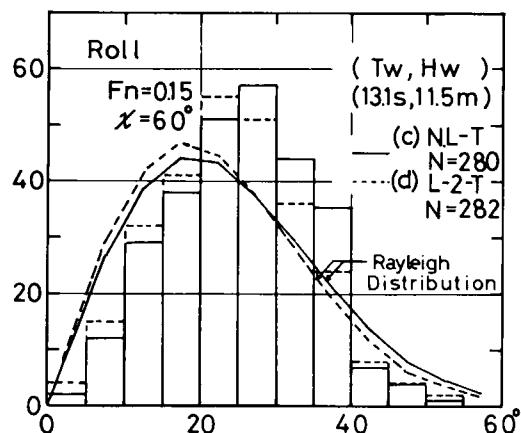


Fig. 3.4.1 Wave spectra of extreme wave condition

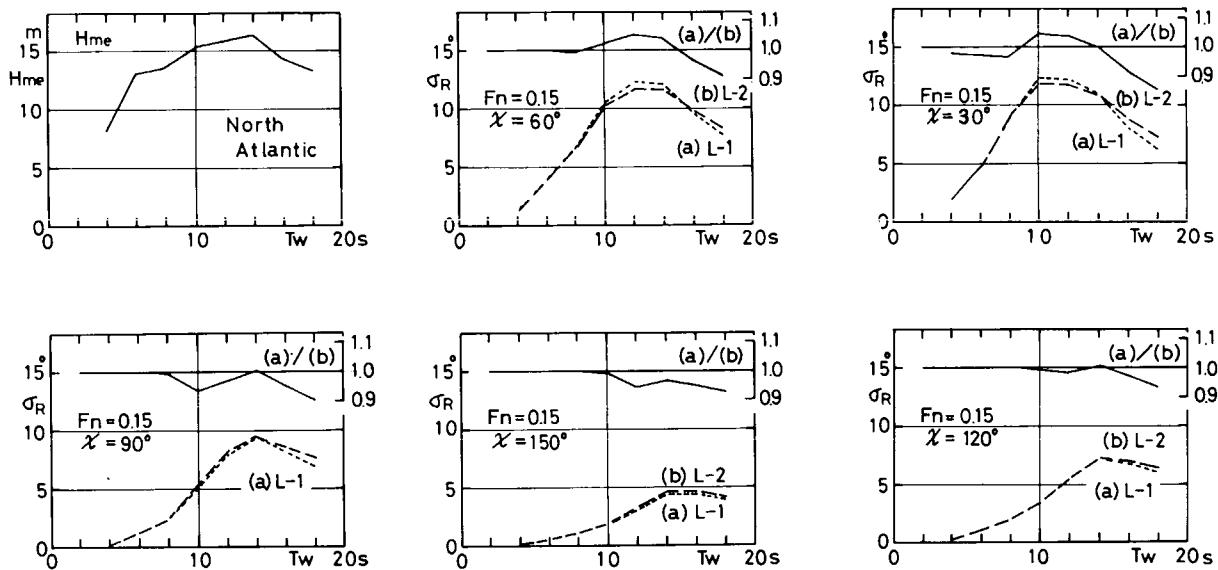


Fig. 3.4.2  $H_{me}$  curve and  $\sigma_R$

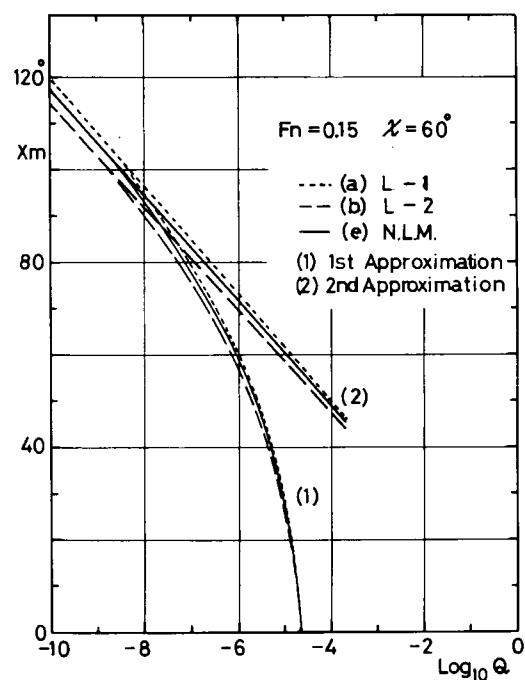


Fig. 3.4.3 Long-term distribution

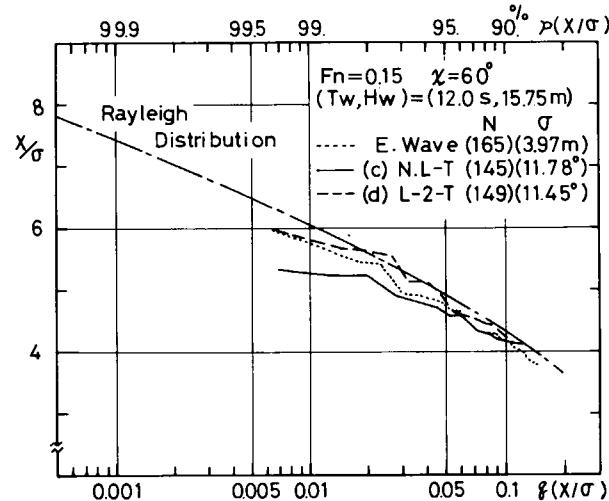


Fig. 3.4.4 Short-term distribution

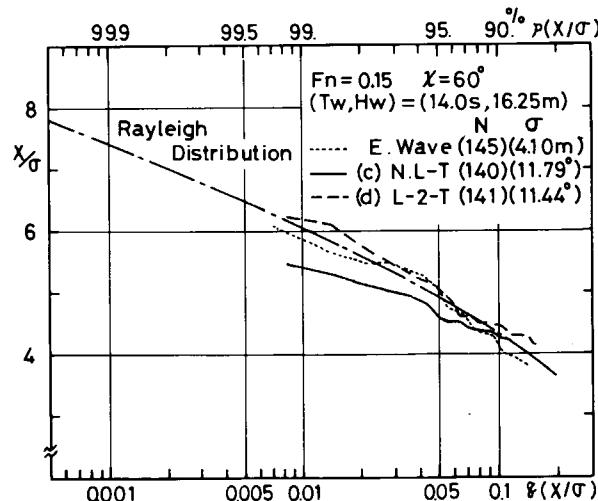


Fig. 3.4.5 Short-term distribution

## 4. 大角度不規則強制横揺れ試験による等価線型減衰係数を用いた不規則波中横揺れ推定

1.3節では、今まで強制横揺れではなされていなかったような大角度の横揺れを生ずる、不規則波中での横揺れ運動予測が可能な減衰係数が実用的に使用しやすい形でいかにして求められるかという点を述べた。

ここでは1.3節で求められた等価線型減衰係数を用いて、不規則横波中の横揺れを予測した例について述べる。ただし運動方程式は(1.3.1)式と同一の次式を考えている。

$$A_{44} \ddot{\phi} + B_1 \dot{\phi} + B_2 \dot{\phi} |\dot{\phi}| + C_1 \phi + C_3 \phi^3 = m(t)$$

### 4.1 予測の方法

予測の方法としては、Fig.4.1のフローチャートに示すように次の3つが考えられる。

#### Method A Spectrum direct prediction method.

入力として波のパワースペクトル  $S_{hh}$  が与えられた場合、等価線型減衰係数ならびに等価線型復原力係数で構成された横揺れの応答関数  $G_{\phi h}(\omega)$  の絶対値を用いて次式により横揺れ角のスペクトル  $S_{\phi\phi}(\omega)$  を求め、

$$S_{\phi\phi}(\omega) = S_{hh}(\omega) |G_{\phi h}(\omega)|^2 = S_{hh}(\omega) |G_{\phi m}(\omega)|^2 \cdot |G_{mh}(\omega)|^2 \quad (4.1)$$

その分散から揺れ角に関する統計量を予測する方法(文献1,2)。上式で  $G_{mh}$  は波による波浪強制モーメントの、また  $G_{\phi m}$  は強制モーメントによる揺れ角の応答関数である。ここで  $|G_{\phi m}|^2$  は

$$|G_{\phi m}(\omega)|^2 = 1 / [(C_{44E} - A_{44}\omega^2)^2 + (B_{44E}\omega)^2] \quad (4.2)$$

$$\text{ただし } B_{44E} = B_1 + \sqrt{\frac{8}{\pi}} \sigma_{\phi} B_2 \quad (4.3)$$

$$C_{44E} = C_1 + 3\sigma_{\phi}^2 C_3 \quad (4.4)$$

で与えられるが、応答関数の中に未知パラメータとして横揺れ角速度標準偏差  $\sigma_{\phi}$ 、横揺れ角度の分散  $\sigma_{\phi}^2$  を含むため適当な初期値を与えて、得られた横揺れスペクトルから求まる  $\sigma_{\phi}$ 、 $\sigma_{\phi}^2$  が一定の値に十分収束するまでくり返し計算をする必要がある(Fig.4.2のフローチャート参照)。

#### Method B Time history generation method.

同じく、入力として波のスペクトルが与えられた場合。Method Aにより得られた横揺れ角スペクトルを用いて、不規則造波信号を作る要領で横揺れ角タイムヒストリーを計算し時間軸上で統計量を求める予測する方法が考えられるが、内容的にはAとあまり変わらないと考えられる。あるいは同様に波を合成して、その時系列を入力としてつぎに述べるインパルス応答を用いて横揺れ角タイムヒストリーを求めるという方法もある。

#### Method C Deterministic time history prediction method.

3番目として、入力としての波のタイムヒストリーが与えられた場合。波と波浪強制モーメントとの応答関数  $G_{mh}$  の逆フーリエ変換によるインパルス応答  $i(\tau)$  を用いて、コンボリューションにより波浪強制モーメントのタイムヒストリー  $m(t)$

$$m(t) = \int_{-\infty}^{\infty} i(\tau) h(t-\tau) d\tau$$

を求め、冒頭に示した非線型微分方程式(1.3.1)を直接解き、得られた揺れ角タイムヒストリー上の最大値等の決定論的な値を予測する方法である。インパルス応答の具体的手法については(文献3)に詳しい。ただし

(1.3.1)式の減衰係数  $B_1, B_2$  は等価線型減衰係数評価により求められた値を使用する。

ここで横揺れ角のタイムヒストリーの計算に際し、等価線型減衰係数を使って  $\sigma_{\dot{\phi}}, \sigma_{\phi}$  が収束するまでコンボリューションによるタイムヒストリー計算を繰り返すという方法も考えられよう。

#### Method D

また、Method C で得られたタイムヒストリーのスペクトルを求め、そのスペクトルから予測される揺れ角の統計量をタイムヒストリーから直接得られた統計量と比較することも意味のあることである。

以上、いずれも実験結果と比較することによって予測の程度を検討することが可能である。

## 4.2 予測例

### (1) 実験ケース

使用したモデルは1.3節のものと同一であるが、慣性モーメントは若干異なるのでTable 4.1を参照されたい。(\*)印をつけた部分が異っている値である。heave は free としているが、sway fix と sway free の場合がある。この節では sway fix の場合を示す。

実験装置の都合上、sway free の場合は roll の回転軸に対して水平方向に carriage の集中慣性抵抗がかかる形になっている (Fig. 4.3)。また、heave 用のガイドロッドは回転軸に集中荷重としてかかるが、ロールの慣性モーメントには影響を与えない。空中での環動半径測定には重心位置に heave 用ロッドに相当する weight を置いているので環動半径算定には排水量をそのまま用いている。

### (2) Sway fix の場合の例

Fig. 4.7 の下図予測に使用した模型船への入力波のスペクトルであり、参考までにゼロクロス平均周期と有義波高より定まる I. S. S. C. スペクトルを描いてある。ただしスペクトルは  $(-\infty, \infty)$  で定義されているものの  $(0, \infty)$  の部分の表示である。有義波高は実船スケールで  $9.7 m$  となっている。Fig. 4.4 は波と波浪モーメントとの応答関数  $|G_{mh}(\omega)|$  である。小波高ではストリップ法により求まる外力でよいと考えられるが、回転軸の上下位置の微妙な違いの影響も大きく、大波高の場合はかなり振幅による違いもあるので、ここでは Fig. 4.4 の中に点線で示した heave free かつ sway fix の状態で計測した、不規則波による強制モーメントを使用した。位相差も実験による値を用いている。また、波スペクトルは運動計測に使用したものと同程度としている。

参考のために all free の状態で、一定波高の規則波による横揺れ応答(ストリップ法による)の例を Fig. 4.5 に示す。ただし一定波高は  $17.5 m$  としたため高周波数で碎波限界に近い波傾斜となっている。線の違いは OG の違いであり Fig. 4.4 の OG に対応している。

また減衰係数は非線型の  $B_1, B_2$  を用い、各々の周波数で繰り返し計算により応答を求めている。

Fig. 4.6 には、Method A, C による応答関数  $|G_{\phi h}(\omega)|$  と実験及び自由横揺れにより得られた減衰力係数を用いた通常の strip 法によるものとの比較を示す。これで見ると I. T. T. C. の船体運動比較計算で指定された減衰係数  $\zeta$  ならびに強制横揺れ試験により得られた  $\hat{B}_1, \hat{B}_2$  (ただし  $\hat{B}_1$  には運動計測時の軸摩擦を加えてある)を使用した通常のストリップ法では実験との差が大きく、横波中での停止時横揺れをうまく予測できないことがわかる。これには、 $\hat{B}_1, \hat{B}_2$  を使用した場合には一定波高の選び方、さらに両者とも復原項の非線型性、波浪モーメントの非線型性が評価されていない点に原因があると考えられる。

Fig. 4.7 の上図には、Method A と C による横揺れ角スペクトルの推定と実験値との比較を示してある。これで見るとタイムヒストリー予測を介さないで求めた、Method A の結果もかなりよい推定となっているようである。

さらに、Method C においてタイムヒストリー予測の具体例の一部を Fig. 4.8, Fig. 4.9 に示す。Fig.

4.9は約180秒のタイムヒストリーのうち比較的あっていない部分で、Fig. 4.10に示す振幅のヒストグラムが、計測されたものに比べて Rayleigh 分布からずれる原因となっている。Rayleigh 分布とならない点については文献4)のシミュレーション計算も参考となろう。以上の場合について得られた最大値、有義値などの統計量を table の形にまとめて比較したのが Table 4.2 である。いずれの場合もタイムヒストリーから求められた最大値に対してスペクトルから推定した最大値が、ほぼ同程度に大きめの値を示しているが(ただしバンド幅パラメータ  $\epsilon = 0$  とした定数を使用)、不規則横揺れは若干広帯域になるという傾向を考慮すれば  $2^\circ \sim 3^\circ$  の違いで推定できることになる。また、平均揺れ角、有義揺れ角はほぼ推定できており、例は少ないが等価線型減衰係数を使用する、Method A による横揺れ角の統計量予測が可能であろうということが示されているといえよう。

### 参考文献

- 1) Kaplan.R; Lecture Notes on Nonlinear Theory of Ship Roll Motion in a Random Seaway ; Proc. 11th I.T.T.C., Tokyo 1966
- 2) Vassilopoulos.L; Ship Rolling at Zero Speed in Random Beam Seas with Non-linear Damping and Restoration: Journal of Ship Research, Vol 15, No 4, Dec. 1971
- 3) 山内保文; 波浪中船の応答特性の統計的解析に関する二、三の考察；造船協会論文集117号、昭和40年6月
- 4) Dalzell.J.F.; A Note on the Distribution of Maxima of Ship Rolling; Journal of Ship Research, Vol 17, No 4 1973

Table 4.1 Experimental condition for the ship rolling motion in a beam seas.

| SR-108-S7 ; Scale=2/175<br>Ship Form          | Full Load Condition  |
|---|----------------------|
| L   | 2.000 (m)            |
| B   | 0.290 (m)            |
| D   | 0.176 (m)            |
| d   | 0.1086(m)            |
| Trim  | 0.0 (m)              |
| $C_b$   | 0.570                |
| $V$   | 0.0359( $m^3$ )      |
| Rolling Period T (in Water)                   | * 1.625(sec)         |
| Rolling Frequency                             | * 3.867(rad/s)       |
| Nondimensional Roll.Freq. $\hat{\omega}_\phi$ | * 0.4704             |
| KM  | 0.1202(m)            |
| GM  | 0.0116(m)            |
| $KG=d$  | 0.1086(m)            |
| $K_{xx}/B$ in Water at $F_n=0$                | * 0.301              |
| $K_{xx}/B$ in Air                             | * 0.2784             |
| Bilge Keel : Length= $L_{pp}/4$<br>Breadth    | 0.5 (m)<br>0.0051(m) |
| Rudder  | with                 |

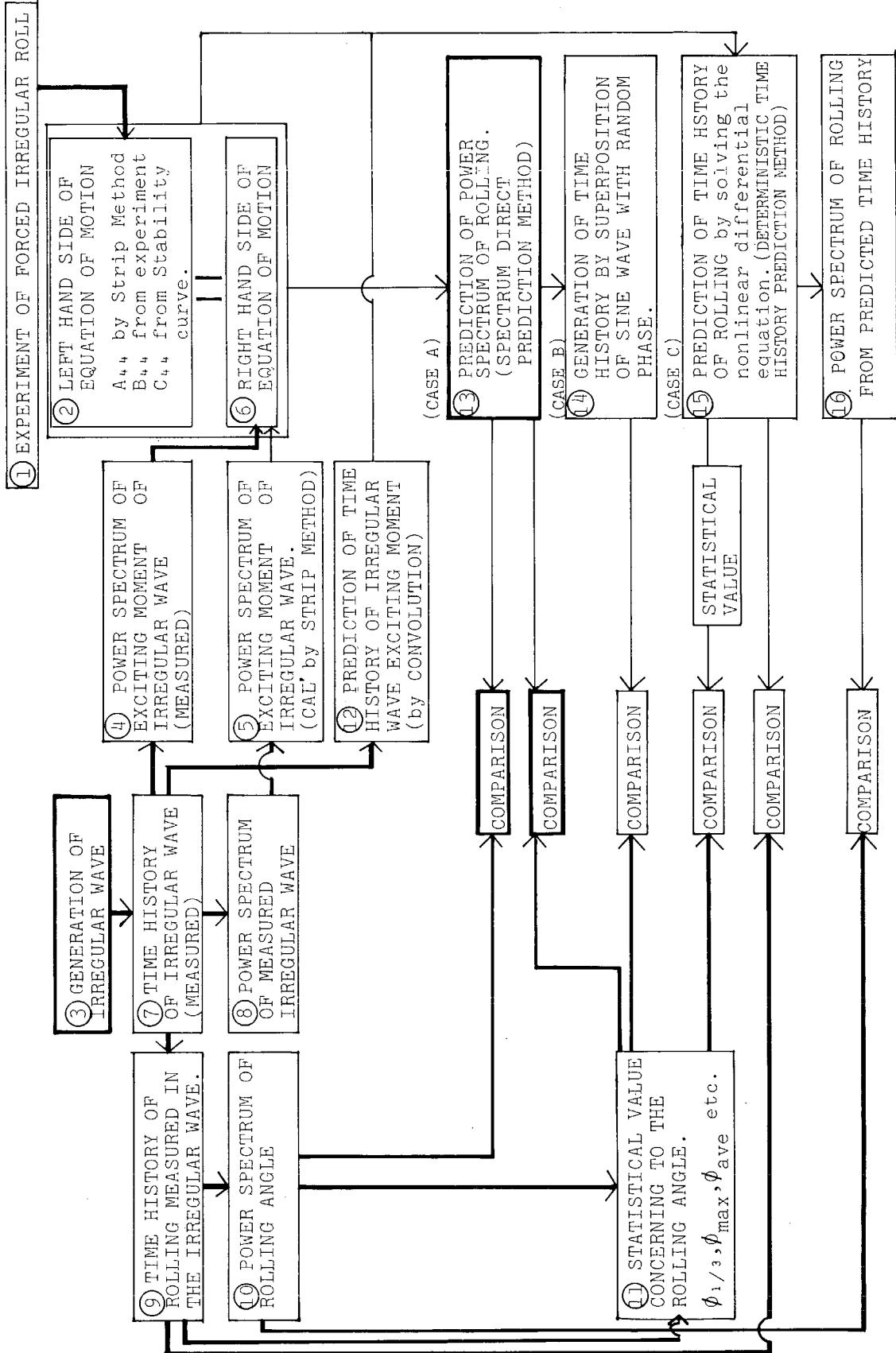
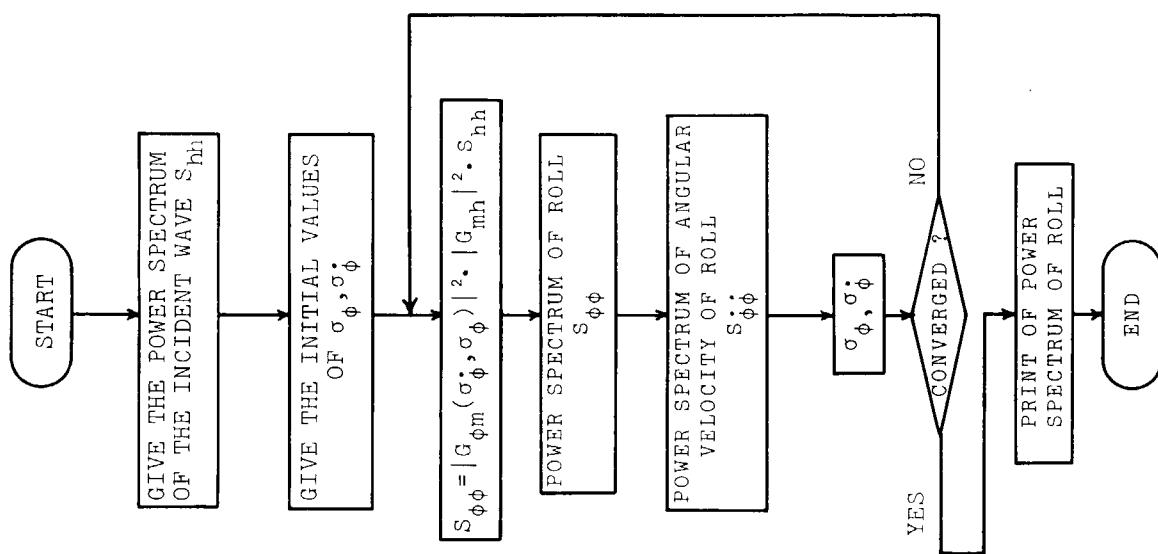


Fig. 4.1 Flow diagram of prediction of roll angle spectrum or time history.



- 131 -

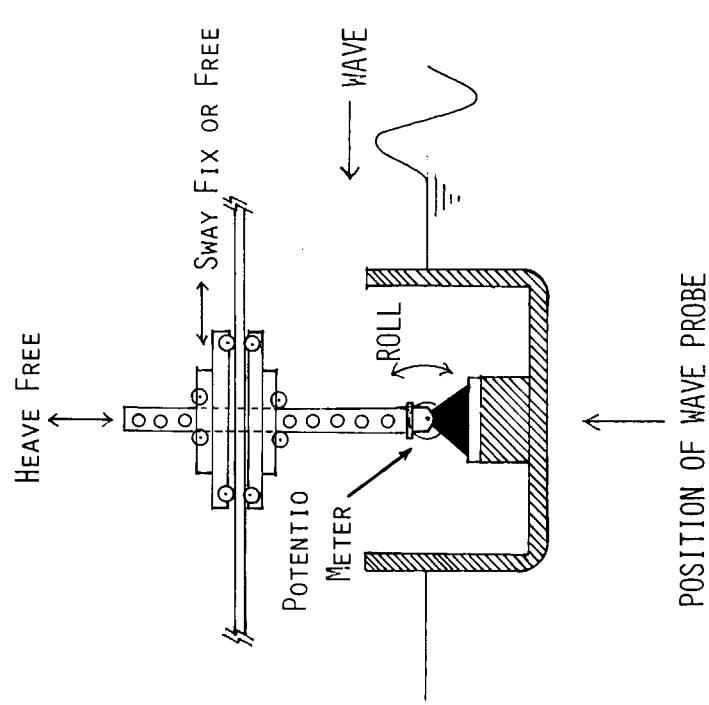


Fig. 4.3 Measurement of roll motion in a beam sea.

Fig. 4.2 Flow diagram of the spectrum direct prediction method.

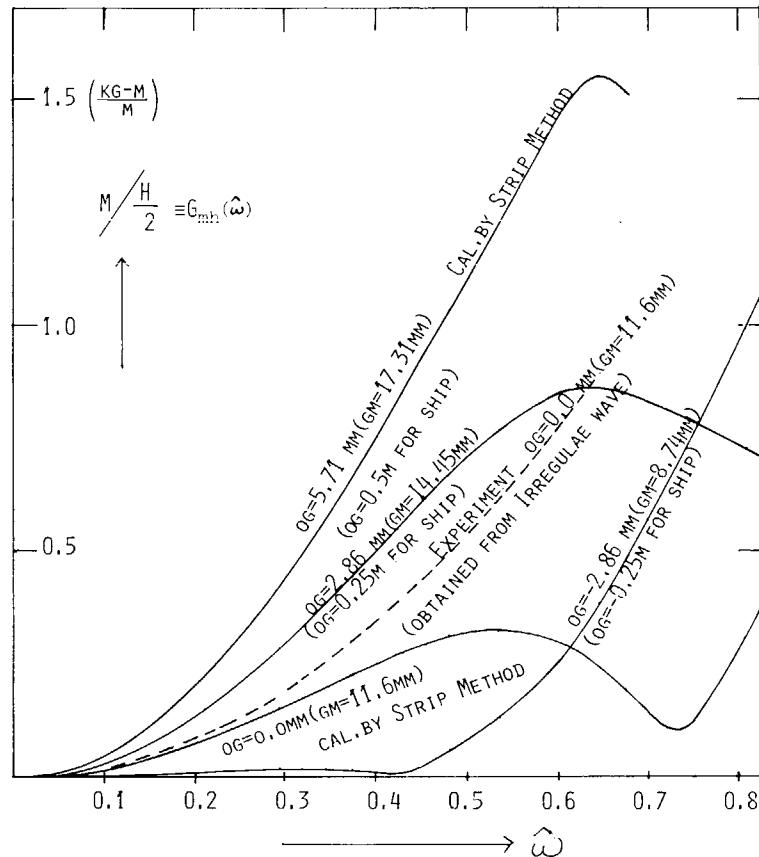


Fig. 4.4 Wave induced roll moment by strip method and experiment.

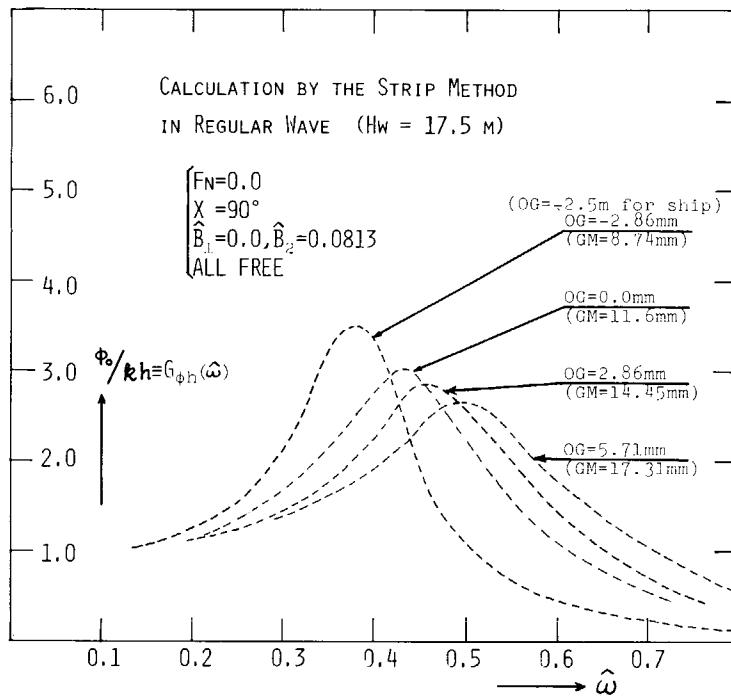


Fig. 4.5 Roll response function calculated by the strip method with nonlinear damping coefficient.

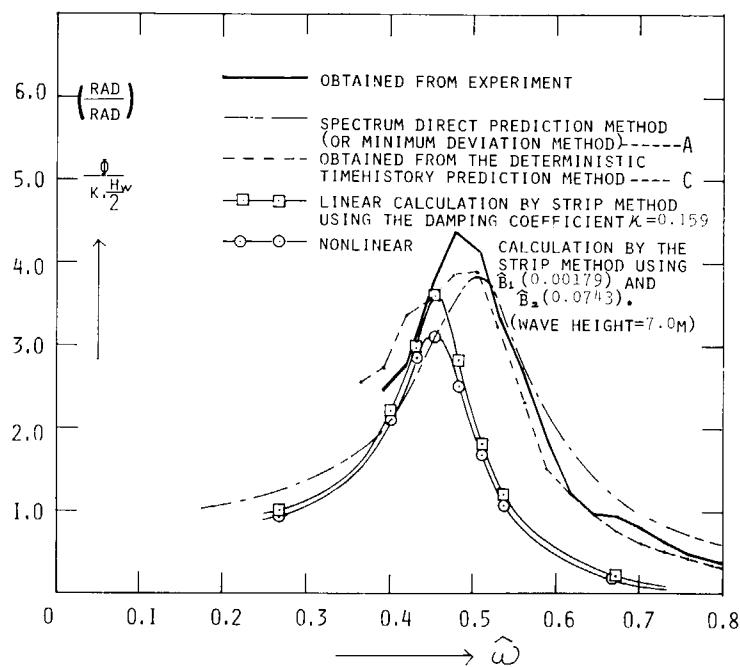


Fig. 4.6 Prediction of roll response function.

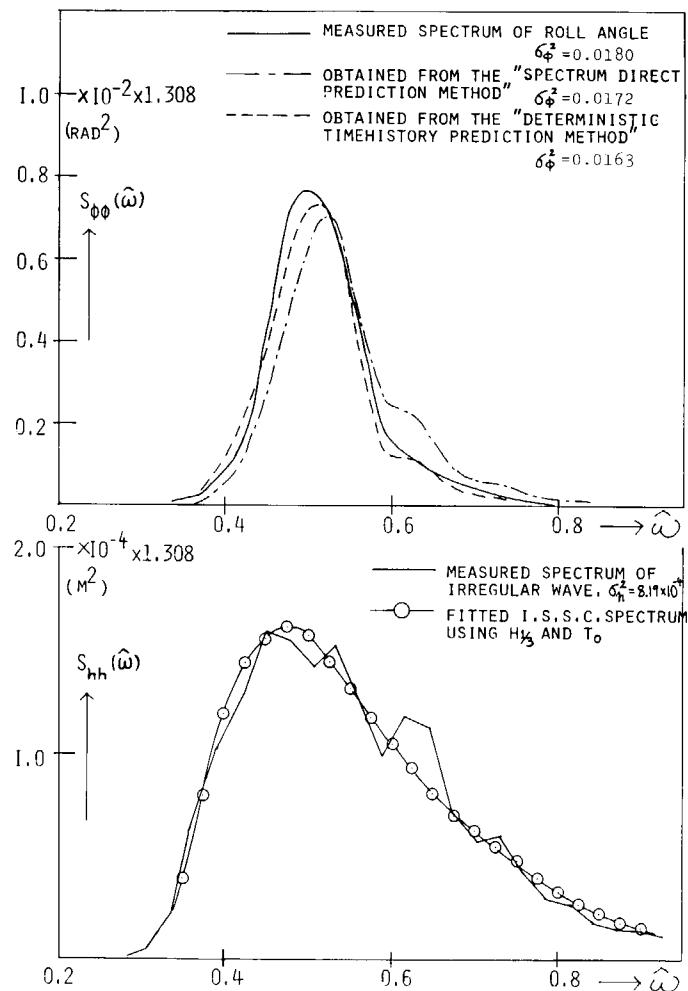


Fig. 4.7 Incident wave spectrum and prediction of the spectrum of roll angle.

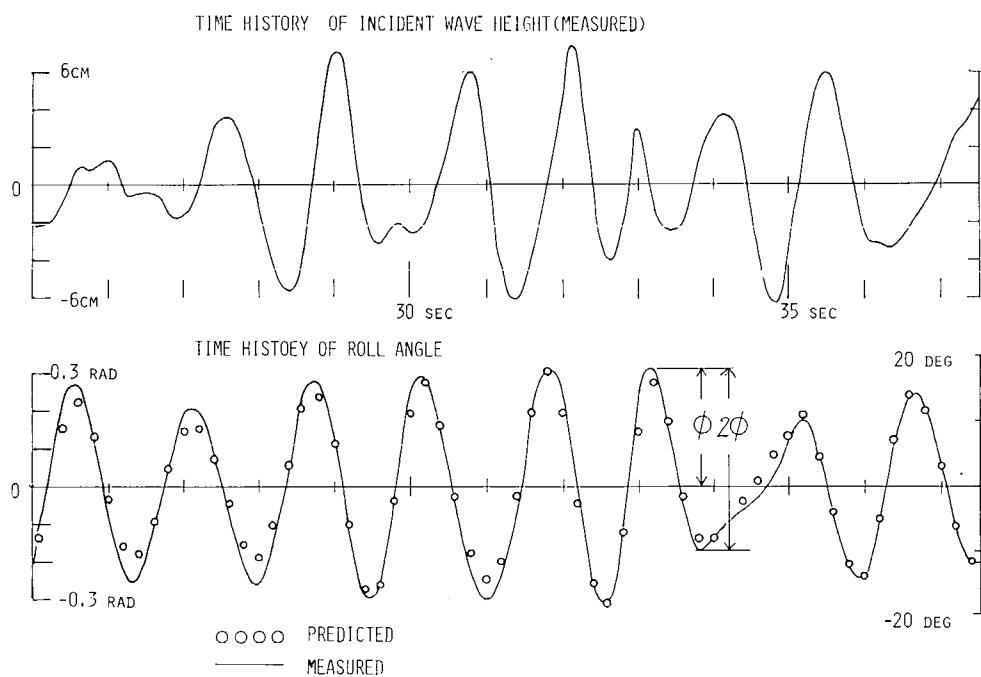


Fig. 4.8 Prediction of time history with nonlinear damping.

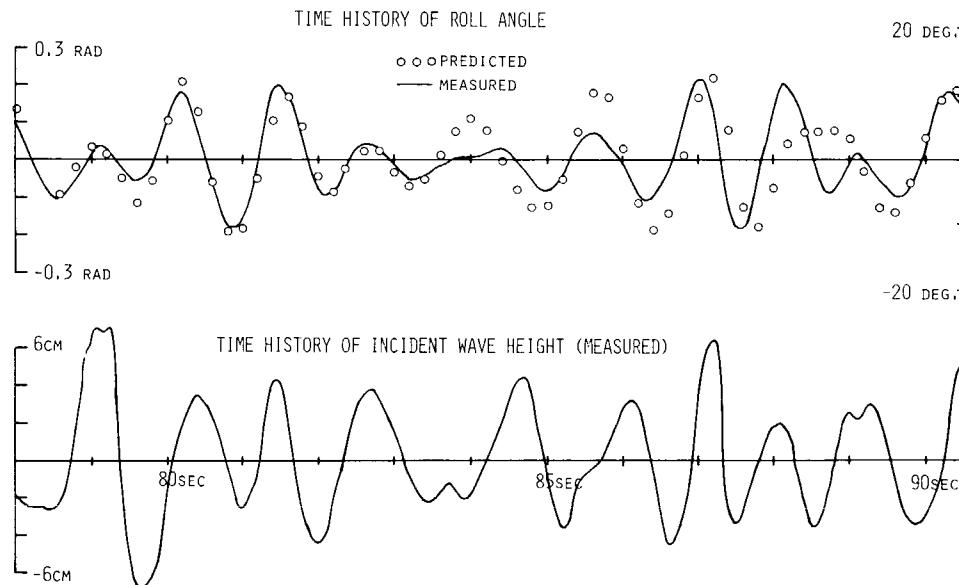


Fig. 4.9 Prediction of time history with nonlinear damping.

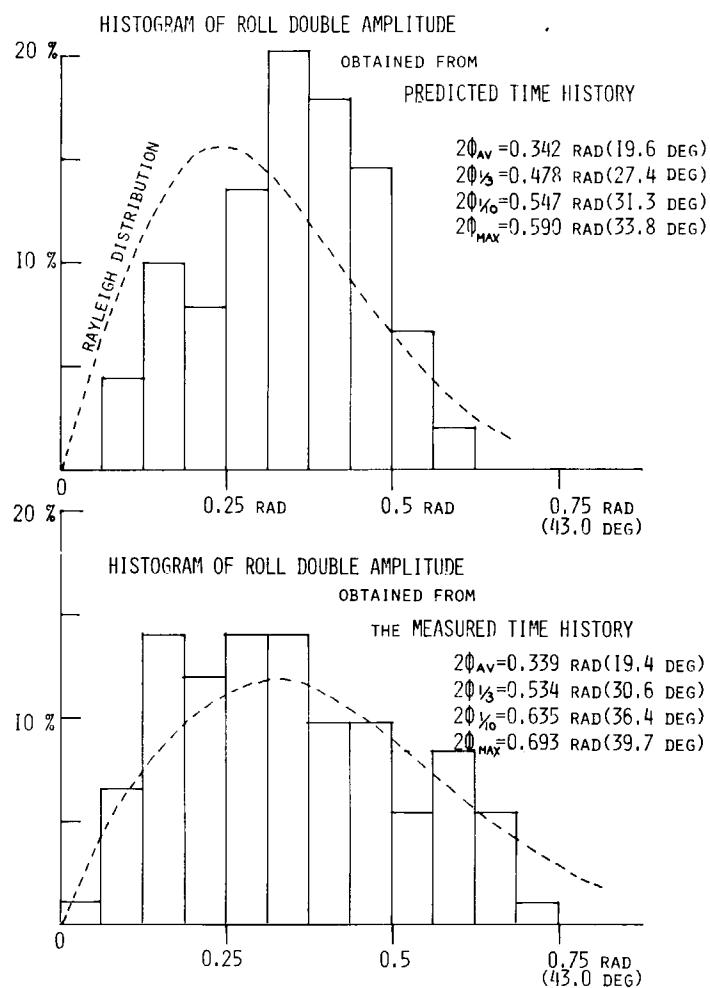


Fig. 4.10 Histogram of roll double amplitude.

Table 4.2 Comparison of statical values of roll angle obtained various method.

| phenomena                           | used methods<br>history or spectrum | EXPERIMENT IN THE IRREGULAR WAVE.<br>(BEAM SEA) |                             | SPECTRUM DIRECT PREDICTION METHOD | DETERMINISTIC TIMEHISTORY PREDICTION METHOD  |
|-------------------------------------|-------------------------------------|---|-----------------------------|-----------------------------------|--|
|                                     |                                     | FROM THE TIME HISTORY                           | ESTIMATED FROM THE SPECTRUM | ESTIMATED FROM THE SPECTRUM       | FROM THE TIME HISTORY FROM OBTAINED SPECTRUM |
| INCIDENT WAVE<br>(DOUBLE AMPLITUDE) | $\sigma_h^2(m^2)$                   | $8.48 \times 10^{-4}$                           | $8.19 \times 10^{-4}$       | $8.29 \times 10^{-4}$             | $8.48 \times 10^{-4}$                        |
|                                     | $H_{max}(m)$                        | 0.153(n=103)                                    | 0.174(n=103)                | 0.175(n=103)                      | 0.153(n=103)                                 |
|                                     | $H_{3/1}(m)$                        | 0.111   | 0.115                       | 0.115                             | 0.111  |
|                                     | $H_{ave}(m)$                        | 0.0742  | 0.0717                      | 0.0722                            | 0.0742                                       |
| ROLLING ANGLE<br>(DOUBLE AMPLITUDE) | $\sigma_\theta^2(\text{deg}^2)$     | 59.41   | 59.10                       | 56.33                             | 53.62  |
|                                     | $2\Phi_{max}(\text{deg})$           | 39.7(n=92)                                      | 46.3(n=92)                  | 45.2(n=92)                        | 33.8(n=89)                                   |
|                                     | $2\Phi_{3/1}(\text{deg})$           | 30.6  | 30.8                        | 30.1                              | 27.4   |
|                                     | $2\Phi_{ave}(\text{deg})$           | 19.4  | 19.3                        | 18.8                              | 19.6   |

variance is obtained from  $R(\theta)$ :  $R$ =correlogram  
variance is obtained from the area of Spectrum  $S(\omega)$

## II 波浪中における船速低下及び推進性能

### 1. 波浪中推進性能に関する総合的考察

波浪中において船舶が受ける波浪圧力や波浪荷重を運航状況に即して正しく推定することは、船体の設計上重要なが、そのためには波浪中における船速を正しく知る必要がある。また、荒れた海面において船の運航上危険な状態を避けながら最適な航海を行うことも重要である。

波浪中における船舶の推進性能関係の挙動全体として、その各現象の相互関係を示したのが Fig. 1.1 のブロック図である。この図の上側のブロックは船体部分を、真中の部分は推進器を、下側の部分は主機を示し、この 3 つのブロックが相互に影響し合いながら船舶は波浪中を航行している。右側の部分は船長指令で、この部分も入れると 4 つのブロックということになる。船長指令は、人間の判断が入るので、それを除いた形で論議し、後に船長指令の部分を論ずることにする。この 3 つのブロックの相互関係より、船体抵抗とプロペラ推力の釣り合いと、プロペラトルクと主機トルクの釣り合いが同時に満たされるという条件を与えれば、船の時間平均的な定常状態を決定することができる。そして、その定常作動点まわりにプロペラ負荷などが時間的に変動するのであるが、それは主機トルクとプロペラトルクの不釣り合いから生じるものである。

この船の挙動をベクトル的に表現するために  $x_1$  軸に船体抵抗 ( $R$ )、 $x_2$  軸にプロペラ推力 ( $T_p$ )、 $x_3$  軸にプロペラトルク ( $Q_p$ )、 $x_4$  軸に主機トルク ( $Q_e$ ) をとり、それらの  $x_i$  軸で作られる空間で船が作動している点を Fig. 1.2 のようにベクトルで表現する。船が平水中を航行している場合の釣り合い点 C (ベクトル  $\mathbf{E}_c$ ) から船が波浪中に入り  $\delta \mathbf{E}_n$  だけそのベクトルが変化し、点 A (ベクトル  $\mathbf{E}_n$ ) で平均的には釣り合いながら、点 A のまわりに変動する (ベクトル  $\mathbf{e}_n(t)$ )。

この  $\delta \mathbf{E}_n$  を求めて新しい釣り合い点 A を求めるのが nominal speed loss の問題であるとする。この A 点において船長は、船が安全であるか危険であるかを判断し、危険である場合、意識的に船速を落としたり変針したりする。これによって変化したベクトルを  $\delta \mathbf{E}_d$  とする。船長判断によって点 B (ベクトル  $\bar{\mathbf{E}}$ ) に新たな平衡点が移動し、その点のまわりに変動する (ベクトル  $\mathbf{e}(t)$ )。この  $\delta \mathbf{E}_d$  を求め、点 B を求めるのが deliberate speed loss の問題であるとする。

この 2 つの問題は、内容は同じ性質を持っており、同様な方法で論ずることができるが、C 点 → A 点の場合は、A 点 → B 点のように両点とも波浪中にある場合と違って、C 点は平水中の状態であるため若干の工夫が必要となる。さて、 $R$ 、 $T_p$ 、 $Q_p$ 、 $Q_e$  を定常部分と変動部分に分け、かつ変数を明示して次のように表わす。

$$\left. \begin{aligned} R(V, \chi) &= \bar{R}(\bar{V}, \bar{\chi}) + r_s(v, \chi) = R_0 + \delta \bar{R} + r_s(v, \chi) \\ T_p(U, N_p) &= \bar{T}_p(\bar{U}, \bar{N}_p) + t_p(u, n_p) = T_{p0} + \delta \bar{T}_p + t_p(u, n_p) \\ Q_p(U, N_p) &= \bar{Q}_p(\bar{U}, \bar{N}_p) + q_p(u, n_p) = Q_{p0} + \delta \bar{Q}_p + q_p(u, n_p) \\ Q_e(rN_p, A) &= \bar{Q}_e(r\bar{N}_p, \bar{A}) + q_e(rn_p, \lambda) = Q_{eo} + \delta \bar{Q}_e + q_e(rn_p, \lambda) \end{aligned} \right\} \quad (1.1)$$

ここで V は船速、U はプロペラへの流入速度、 $\chi$  は船と波の出会い角、A は 1 回転当たりの燃料投入量、N は回転数を表わし、変数も同様に

$$\left. \begin{aligned} V &= V_0 + \delta V = V_0 + \bar{\delta}V + v(t) \\ U &= U_0 + \delta U = U_0 + \bar{\delta}U + u(t) \\ N_p &= N_{p0} + \delta N = N_{p0} + \bar{\delta}N + n_p(t) \\ A &= A_0 + \delta A = A_0 + \bar{\delta}A + \lambda(t) \\ \chi &= \chi_0 + \delta \chi = \chi_0 + \bar{\delta}\chi + \chi(t) \end{aligned} \right\} \quad (1.2)$$

と表現する。記号の上のバーは平均値を示す。また、 $r$  は主機軸からプロペラ軸への減速比を示している（主機が  $r$  回転した時プロペラが 1 回転する）。これらを用いると、船の挙動を表わすベクトル  $\bar{\mathbf{E}}$  は一般的に

$$\mathbf{E} = R(V, \chi) \mathbf{x}_1 + T_p(U, N_p) \mathbf{x}_2 + Q_p(U, N_p) \mathbf{x}_3 + Q_e(r N_p, A) \mathbf{x}_4 = \bar{\mathbf{E}} + \mathbf{e}(t) \quad \dots \dots \dots (1.3)$$

と表現されることになる。右辺第 2 式の第 1 項が時間平均一定常量であり第 2 項が変動項である。そこで、Fig. 1.2 の A 点から B 点に変化する場合を考えてみると

$$\mathbf{E} = \bar{\mathbf{E}}_n + \delta \mathbf{E}_d = \bar{\mathbf{E}}_n + \delta \bar{\mathbf{E}}_d + \mathbf{e}(t) \quad \dots \dots \dots (1.4)$$

となる。

この  $\delta \bar{\mathbf{E}}_d$  や  $\mathbf{e}(t)$  を求めるために、ある時間平均的な作動点のまわりの微少変化を考えることによって式を線型化し、わかり易いように表現してみる。

ここで、 $\delta \bar{\mathbf{E}}_d$  は A 点のまわりの微少変化とし、 $\mathbf{e}(t)$  は、変化後の B 点のまわりに微少変動をするものとする。微少変化を考えるから、各変数に対する微係数を求めると、

$$\begin{bmatrix} y_N \\ y_V \\ y_U \\ y_A \\ y_\chi \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & \frac{\partial T_p}{\partial N_p} & \frac{\partial Q_p}{\partial N_p} & \frac{\partial Q_e}{\partial N_e} \\ \frac{\partial R}{\partial V} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{\partial T_p}{\partial U} & \frac{\partial Q_p}{\partial U} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{\partial Q_e}{\partial A} \\ \frac{\partial R}{\partial \chi} & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{x}_1 \\ \mathbf{x}_2 \\ \mathbf{x}_3 \\ \mathbf{x}_4 \end{bmatrix} \quad \dots \dots \dots (1.5)$$

<I>      <II>      <III>

となる。 $<I>$  が船体部分、 $<II>$  が推進器部分、 $<III>$  が主機部分を表わし、前述した船の 3 つのブロックが 1 つのマトリックス内に表現されたことになる。

釣り合い点 A より、 $\delta V, \delta U, \delta N_p, \delta \chi, \delta A$  だけ微少変化した時のベクトルの変化分  $\delta \bar{\mathbf{E}}_d$  は、(1.5) 式を使うと

$$\delta \mathbf{E}_d = y_N \cdot \delta N_p + y_V \cdot \delta V + y_U \cdot \delta U + y_\chi \cdot \delta \chi + y_A \cdot \delta A = \delta \bar{\mathbf{E}}_d + \mathbf{e}(t) \quad \dots \dots \dots (1.6)$$

となる。

(1.5) 式を (1.6) 式に代入し、増分ベクトル  $\delta \mathbf{E}_d$  を具体的に書くと次のようになる。

$$\begin{aligned} \delta \mathbf{E}_d = & \left( \frac{\partial R}{\partial V} \delta V + \frac{\partial R}{\partial \chi} \delta \chi \right) \mathbf{x}_1 + \left( \frac{\partial T_p}{\partial N_p} \delta N_p + \frac{\partial T_p}{\partial U} \delta U \right) \mathbf{x}_2 \\ & + \left( \frac{\partial Q_p}{\partial N_p} \delta N_p + \frac{\partial Q_p}{\partial U} \delta U \right) \mathbf{x}_3 + \left( r \frac{\partial Q_e}{\partial N_e} \delta N_p + \frac{\partial Q_e}{\partial A} \delta A \right) \mathbf{x}_4 \end{aligned}$$

ここで、 $\frac{\partial R}{\partial V} = R_V, \frac{\partial R}{\partial \chi} = R_\chi, \frac{\partial T_p}{\partial N_p} = P_{TN}, \frac{\partial T_p}{\partial U} = P_{TU}, \frac{\partial Q_p}{\partial N_p} = P_{QN}, \frac{\partial Q_p}{\partial U} = P_{QU}, \frac{\partial Q_e}{\partial N_e} = E_{QN},$

$$\frac{\partial Q_e}{\partial A} = E_{QA}$$

と略記号を用いると

$$\begin{aligned} \delta \mathbf{E}_d = & (R_V \delta V + R_\chi \delta \chi) \mathbf{x}_1 + (P_{TN} \delta N_p + P_{TU} \delta U) \mathbf{x}_2 + (P_{QN} \delta N_p + P_{QU} \delta U) \mathbf{x}_3 \\ & + (E_{QN} \cdot r \delta N_p + E_{QA} \delta A) \mathbf{x}_4 \end{aligned} \quad \dots \dots \dots (1.7)$$

となる。

これから時間平均的定常部分と変動部分に分ける。この場合、各微係数は定常成分については大文字で、変動成分については小文字で示すことになると

$$\begin{aligned}\delta \bar{\mathbf{E}}_d = & (R_V \cdot \delta \bar{V} + R_\chi \cdot \delta \bar{\chi}) \mathbf{x}_1 + (P_{TN} \delta \bar{N}_p + P_{TU} \delta \bar{U}) \mathbf{x}_2 \\ & + (P_{QN} \delta \bar{N}_p + P_{QU} \delta \bar{U}) \mathbf{x}_3 + (r E_{QN} \delta \bar{N}_p + E_{QA} \delta \bar{A}) \mathbf{x}_4\end{aligned}\quad \dots \quad (1.8)$$

$$\begin{aligned}\mathbf{e}(t) = & (r_v \cdot v(t) + r_\chi \cdot \chi(t)) \mathbf{x}_1 + (p_{tn} n_p(t) + p_{tu} u(t)) \mathbf{x}_2 \\ & + (p_{qn} n_p(t) + p_{qu} u(t)) \mathbf{x}_3 + (r e_{qn} n_p(t) + e_{q\lambda} \lambda(t)) \mathbf{x}_4\end{aligned}\quad \dots \quad (1.9)$$

となる。前述したように、 $\delta \bar{\mathbf{E}}_d$ を求める微係数は、変化前のA点でのものをとり、 $\mathbf{e}(t)$ を求める微係数は、変化後のB点の値をとることにする。

船の変化後の定常点Bは、 $\mathbf{x}_1$ 軸と $\mathbf{x}_2$ 軸の釣り合いと、 $\mathbf{x}_3$ 軸と $\mathbf{x}_4$ 軸の釣り合いが同時に満たされる時に決まる。定常点を求める時には、船速とペロペラへの流入速度との間には伴流係数 $w_0$ として、 $(1 - w_0) = w$ とすると

$$w \bar{V} = \bar{U} \quad \dots \quad (1.10)$$

の関係があり、微少変化量 $\delta \bar{V}$ 、 $\delta \bar{U}$ にも

$$w \delta \bar{V} = \delta \bar{U} \quad \dots \quad (1.11)$$

が成り立つとする。

推力減少係数を $t_0$ とし、 $(1 - t_0) = t$ とおくと、この釣り合い式は、

$$\left. \begin{array}{l} \mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2 \text{ 軸の釣り合い } \square \quad \frac{1}{t} (R_V \delta \bar{V} + R_\chi \delta \bar{\chi}) = P_{TN} \delta \bar{N}_p + w P_{TU} \delta \bar{V} \\ \mathbf{x}_3, \mathbf{x}_4 \text{ 軸の釣り合い } \square \quad P_{QN} \delta \bar{N}_p + w P_{QU} \delta \bar{V} = r (E_{QN} \cdot r \delta \bar{N}_p + E_{QA} \delta \bar{A}) \eta_t \end{array} \right\} \quad (1.12)$$

$\eta_t$ は、伝達効率である。ここで $\mathbf{x}_1$ 軸の抵抗には波浪中における抵抗増加の成分を一般的に含んでおり、平水中抵抗 $R_c(\bar{V})$ と抵抗増加 $R_{AW}(\bar{V}, \bar{\chi})$ 、(ある1つの海象状態について。)の和として、

$$R(\bar{V}, \bar{\chi}) = R_c(\bar{V}) + R_{AW}(\bar{V}, \bar{\chi}) \quad \dots \quad (1.13)$$

として表わすことができる。この(1.12)式で $R_V \cdot \delta \bar{V}$ の項については次のように考えることが必要である。それは、C点では抵抗増加の成分が入っていないなくA点では抵抗増加の成分が入っているからである。そこで次のようにする。

C点の時の船速を $\bar{V}_c$ で表わし、(1.13)式より

$$\begin{aligned}R_V \cdot \delta \bar{V} &= R(\bar{V}, \bar{\chi}) - R_c(\bar{V}_c) = R_c(\bar{V}) + R_{AW}(\bar{V}, \bar{\chi}) - R_c(\bar{V}_c) \\ &\simeq \left[ \frac{\partial R_c}{\partial V} \right]_c \delta \bar{V} + R_{AW}(\bar{V}, \bar{\chi})\end{aligned}\quad \dots \quad (1.14)$$

この(1.14)式のままでは、 $R_{AW}$ を知るのに $\bar{V}$ 、すなわち $\delta \bar{V}$ が必要であり、 $\delta \bar{V}$ を求めるのに $R_{AW}$ が必要となり、そのために繰り返し計算が必要である。そこで $R_{AW}(\bar{V}, \bar{\chi})$ を次のように表わす。

$$R_{AW}(\bar{V}, \bar{\chi}) \simeq \left[ \frac{\partial R_{AW}}{\partial V} \right]_c \cdot \delta \bar{V} + R_{AW}(\bar{V}_c, \bar{\chi}) \quad \dots \quad (1.15)$$

(1.14)式、(1.15)式より

$$R_V \cdot \delta \bar{V} = \left\{ \left[ \frac{\partial R_c}{\partial V} \right]_c + \left[ \frac{\partial R_{AW}}{\partial V} \right]_c \right\} \delta \bar{V} + R_{AW}(\bar{V}_c, \bar{\chi}) \quad \dots \quad (1.16)$$

となる。 $R_{AW}(\bar{V}_c, \bar{\chi})$ は今問題にしている海象中において平水中の速度を維持したとした時の抵抗増加量である。

(1.16)式を(1.12)式に代入すると

$$\left. \begin{aligned} \frac{1}{t} \left[ \left\{ \left[ \frac{\partial R_c}{\partial V} \right]_c + \left[ \frac{\partial R_{AW}}{\partial V} \right]_c \right\} \delta \bar{V} + R_{AW}(\bar{V}_c, \bar{\chi}) + R_\chi \delta \bar{\chi} \right] = P_{TN} \delta \bar{N}_p + w P_{TU} \delta \bar{V} \\ P_{QN} \delta \bar{N}_p + w P_{QU} \delta \bar{V} = r \{ r E_{QN} \delta \bar{N}_p + E_{QA} \delta \bar{A} \} \eta_t \end{aligned} \right\} \cdots (1.17)$$

となる。(1.17)式は4つの未知数に対して2つの方程式であるからこのままでは4つの未知数を決定することができない。更に諸係数を実際に求めるためには、平水中の抵抗、波浪中の抵抗増加、プロペラ特性、自航要素、主機特性などを正しく知る必要がある。

## 2. 波浪中における抵抗増加

### 2.1 波浪中抵抗増加の計算法

波浪中を船舶が航行した場合、波浪や風、あるいは操舵などによって抵抗が増加する<sup>(1)</sup>。風や操舵などによる抵抗増加については、ここでは触れないことにする。

正面規則波中における抵抗増加の計算法はいくつか提案されているが、それらのうち主要なものを以下に示す。

#### (1) 丸尾の理論

丸尾による線型理論は次のように与えられている。

$$R_{AW} = 4\pi\rho \left[ -\int_{-\infty}^{m_1} + \int_{m_2}^{\infty} \right] \frac{(m+K_0\Omega)^2 (m-k \cos \chi)}{\sqrt{(m+K_0\Omega)^4 - K_0^2 m^2}} |H_1(m)|^2 dm \quad \cdots \cdots \cdots (2.1)$$

ただし、  
 $k = \frac{2\pi}{\lambda}$  ,  $K_0 = \frac{g}{V^2}$  ,  $\Omega = \frac{V\omega_e}{g}$  ,

$\lambda$  : 波長

$$\left. \begin{aligned} m_1 \\ m_2 \end{aligned} \right\} = -\frac{K_0}{2} (1 + 2\Omega \pm \sqrt{1 + 4\Omega})$$

$g$  : 重力加速度

また

$$\left. \begin{aligned} m_3 \\ m_4 \end{aligned} \right\} = \frac{K_0}{2} (1 - 2\Omega \pm \sqrt{1 + 4\Omega})$$

$V$  : 前進速度

$\omega_e$  : 出会い円周波数

$\chi$  : 船と波との出会い角

が実数のときは、 $m_3 \sim m_4$  を積分範囲から除く。

$H_1(m)$  は船体を表わす特異点分布によって決まる関数であるが、丸尾によればある一定の深さの位置に吹出し又は、2重吹出しが船長方向に分布しているものとして近似することにしている。すなわち

$$H_1(m) = \int (\sigma_c - \sigma_s) \exp \left\{ \frac{(m+K_0\Omega)^2}{k} Z_0 + imx \right\} dx \quad \cdots \cdots \cdots (2.2)$$

ここで  $\sigma$  は特異点を表現するものである。

この計算は実際の数値計算を実施しようとするとかなり面倒である。

#### (2) Gerritsma-Beukelman の方法

Gerritsma, Beukelman の抵抗増加の近似式は、

$$R_{AW} = \frac{k}{2\omega_e} \int \left( N - \rho V \frac{\partial s}{\partial x} \right) V_{ra}^2 dx \quad \cdots \cdots \cdots (2.3)$$

ここで

$$N : \left( = \frac{\rho g^2}{\omega_e^3} \bar{A}^2 \right) \text{減衰力} \quad \bar{A} : \text{発散波振幅比} \quad V_{ra} : \text{相対流速振幅}$$

$$S : \text{断面の付加質量} / \rho$$

である。実用的には付加質量の項 ( $\rho V \frac{\partial s}{\partial x}$ ) を無視する方がよい。この方法は、肥えた船型の場合は低目の推定値を、やせた船型の場合は高目の推定値を与える。

### (3) 丸尾の簡易化公式

前述の丸尾の線型理論から出発し、幅長さ比を微少量として高次の項を省略し、出会い周波数がある程度大きいとして簡易化し、ストリップ法的に計算できる式として

$$R_{AW} = \frac{k}{2m_c} \int_{-\infty}^{\infty} N |\tilde{V}|^2 dx - \frac{1}{2m_c} \int_{-\infty}^{\infty} N |\tilde{V}|^2 \left( \frac{A_0 B'_0 - A'_0 B_0}{A_0^2 + B_0^2} + \frac{d\beta}{dx} \right) dx \quad \dots \quad (2.4)$$

が丸尾により示されている。

この式の第1項は吹出し密度に関する項で Gerritsma の式において付加質量の項を無視したものに形式上等しく、第2項は吹出し密度の位相角に関するもので、たとえばルイス断面を用いるとすれば、Ursell-田才法の計算中に出てくる  $A_0, B_0$  などの値と  $\tilde{V}$  の位相角  $\beta$  によって定まるものである。この計算式は一見簡単に見えるが、実用的にはルイス断面についての Ursell-田才法の計算プログラムを持っているか、あるいは  $A_0, B_0$  などの表を作り持っているかしなければならぬので、結構面倒である。実用的には、第2項を省略し、第1項のみで計算して良いと思われる。

他に、種々の近似計算法があるが、それらについては文献(2)を参照されたい。理論計算と実験との比較によると、肥大船の短波長域で実験値が計算値に比べて極めて大きな値を与えるが、それは船首部からの反射波による抵抗増加であるとして、Havelock の結果を利用し、その成分を近似的に計算する方法が藤井、高橋により示されている。<sup>(3)</sup> その成分を  $\Delta R_{AW}$  とすると

$$\Delta R_{AW} = \alpha_1 (1 + \alpha_2) \frac{1}{2} \rho g h_A^2 B \cdot \overline{\sin^2 \beta} \quad \dots \quad (2.5)$$

ただし  $\overline{\sin^2 \beta} = \frac{1}{B} \int_{-B/2}^{B/2} \sin^2 \beta dy$  ; (bluntness係数, Fig. 2.1を参照)

$$\alpha_1 = \pi^2 I_1^2(kd) / \{ \pi^2 I_1^2(kd) + K_1^2(kd) \}$$

$$\alpha_2 = 5\sqrt{F_n} \quad \dots \quad (\text{実験式})$$

$I_1, K_1$  は変形ベッセル関数である。 $\alpha_1$  は有限喫水影響を、 $\alpha_2$  は前進速度影響を表わす。式の形から明らかのように、やせた船では小さい値を与えるし、肥大船でも波長の長い範囲では小さい値となる。ここに求められた成分は、原理的には (2.1) 式で計算できる量である。すなわち  $H_1(m)$  を定める際に、船首部での波の反射を表わすような境界条件を定めて特異点分布を決定すればよい。しかし現在のところ、そのような研究結果が得られていない。

### (4) 不規則波の抵抗増加

不規則波中の抵抗増加は、抵抗増加が波高の2乗に比例するとし、統計的な意味で規則波中抵抗増加の値を重ね合わせることができるとされている。すなわち波浪中の平均抵抗増加は、

$$\overline{R_{AW}(\chi)} = 2 \int_0^{2\pi} \int_0^\infty \frac{R_{AW}(\alpha)}{\zeta a^2} \zeta(\omega, \alpha - \chi) d\omega d\alpha \quad \dots \quad (2.6)$$

となる。

## 2.2 波浪中抵抗増加の実験

Table 2.1 に示すコンテナ船型の模型船(A)による実験結果を Fig. 2.2, Fig. 2.3 に示す。Fig. 2.2 は常用状態の結果で Fig. 2.3 は軽荷状態の結果である。常用状態の場合、Gerritsma の計算結果と実験値の一致はよいが、軽荷状態の場合は、実験値の方が高めの値を与えることがわかる。Fig. 2.4 に同じ模型の正面不規則波中の実験結果と (2.6) 式による推定値を示すが、おおむね実験値に近い推定値を与えていている。Table 2.2 に示す大型肥大船の 7 m 模型(B)を使い正面不規則波中における抵抗試験を行い (2.5) 式の成分を入れて (2.6) 式によ

ってその推定値を出した結果をFig. 2.5に示す。以上に示すように、波浪中の抵抗増加は実用的には、ほぼ満足できる推定値を与えることがわかる。

### 3. 波浪中におけるプロペラ推力、トルク、回転数増加と自航要素

#### 3.1 波浪中におけるプロペラ推力、トルク、回転数増加の実験

Fig. 3.1に模型船Ⓐの軽荷状態での正面規則波中におけるプロペラ推力、トルク、回転数増加を示す。更にFig. 3.2に同じ模型船Ⓐでプロペラ直径を変えた場合（Table 2.1のプロペラA,B. 通常はプロペラAを使用）のプロペラ推力、トルク、回転数増加を示す。無次元係数はプロペラ直径の相違による影響を見るため、従来の形と異なりプロペラ直径を含まない形で無次元化を行っている。すなわち、推力増加係数= $T_{AW}/\rho g \zeta_w^2 (B^2/L)$ 、トルク増加係数= $Q_{AW}/\rho g \zeta_w^2 B^2$ 、回転数増加係数= $N_{AW} VL^3 / g \zeta_w^2 (B^2/L)$ である。推力増加係数は従来と同じ形であるがトルク増加係数、回転数増加係数の従来の形は、プロペラ直径Dを用い、それぞれ $Q_{AW}/\rho g \zeta_w^2 D (B^2/L)$ 、 $N_{AW} VD^3 / g \zeta_w^2 (B^2/L)$ である。推力増加係数にはプロペラ直径の影響はほとんどない。回転数増加係数はプロペラ直径の小さい方が大きく、トルク増加係数はその逆である。Fig. 3.3に波高を変化させた場合の結果を示すが、この場合も同様である。Fig. 3.4には、追波中における自航試験の結果から各増加量を求めた結果を示す。これらの値はいずれも向波中の場合に比べて非常に小さく、また波長による変化の程度も小さいことがわかる。なお不規則波中における各増加量の実験値と、線型重ね合わせ法による推定値との比較については文献(4)を参照されたい。

#### 3.2 波浪中自航要素の検討

波浪中における自航要素についての包括的な内容は文献(4)に詳しいが、以下、自航試験の結果より平水中のプロペラ単獨特性を用いて解析した結果を示す。

Fig. 3.5に模型船Ⓐによるプロペラ直径を変化させた場合の結果を示す。図中には、比較のため平水中の自航要素や、文献(4)によって示されている方法で、計測された平均的な伴流分布から自航要素を試算した結果も示してある。

Fig. 3.6にTable 3.1に示す模型船Ⓒの満載状態における $F_n = 0.25$ の速度における自航要素を示す。これは、 $180^\circ$ （向波）、 $150^\circ$ 、 $120^\circ$ 、 $90^\circ$ 、 $0^\circ$ の5状態を並べて示す。

Fig. 3.7に同船における軽荷状態、トルク一定制御時の船速低下実験時の自航要素を示す。いずれの結果も従来から指摘されているように、<sup>(4)</sup>  $(1 - we)$ が波浪中では平水中に比べて増加し、 $\eta_r$ （あるいは $e_r$ ）はあまり変わらない、という結果になっている。

### 4. 波浪中における船速低下

#### 4.1 波浪中船速低下の推定計算法

波浪中における船速低下の計算は、(1.17)式をもとにして行う。

まず、自然減速（いわゆる nominal speed loss）の場合は、Fig. 1.2のC点からA点への移動を意味する。この場合は、燃料投入量一定 ( $\delta \bar{A} = 0$ )、波との出会い角一定 ( $\delta \bar{\chi} = 0$ )より (1.17)式は

$$\left. \begin{aligned} \frac{1}{t} \left[ \left\{ \left[ \frac{\partial R_c}{\partial V} \right]_c + \left[ \frac{\partial R_{AW}}{\partial V} \right]_c \right\} \delta \bar{V} + R_{AW}(\bar{V}_c, \bar{\chi}) \right] &= P_{TN} \delta \bar{N}_p + w P_{TU} \delta \bar{V} \\ P_{QN} \delta \bar{N}_p + w P_{QU} \delta \bar{V} &= r^2 \eta_t E_{QN} \delta \bar{N}_p \end{aligned} \right\} \quad \dots \dots \dots \quad (4.1)$$

となる。

これから  $\delta \bar{V}$ ,  $\delta \bar{N}_p$  を求めると

$$\delta \bar{V} = \frac{R_{AW}(\bar{V}_c, \bar{\chi})}{w t \left\{ P_{TU} + \frac{P_{TN} \cdot P_{QU}}{r^2 \eta_t E_{QN} - P_{QN}} \right\} - \left[ \frac{\partial R_c}{\partial V} \right]_c - \left[ \frac{\partial R_{AW}}{\partial V} \right]_c} \quad (4.2)$$

$$\delta \bar{N}_p = \frac{w P_{QU} \cdot R_{AW}(\bar{V}_c, \bar{\chi})}{w t (P_{TN} P_{QU} - P_{TU} P_{QN} + P_{TU} \eta_t r^2 E_{QN}) - (r^2 \eta_t E_{QN} - P_{QN}) \left\{ \left[ \frac{\partial R_c}{\partial V} \right]_c + \left[ \frac{\partial R_{AW}}{\partial V} \right]_c \right\}} \quad (4.3)$$

となる。

ここで  $E_{QN} = -0$  の場合は主機トルク一定の機関性能を示し,  $E_{QN} = -\infty$  の時は回転数一定の機関性能を,  $E_{QN} = -Q_p (\omega \bar{V}_c, \bar{N}_c) / r^2 \bar{N}_c$ ; ( $\bar{N}_c$  は, C 点の時の回転数) の場合, 馬力一定の機関性能を表現する。この (4.2), (4.3) 式により,  $\delta \bar{V}$ ,  $\delta \bar{N}_p$  が求められれば,  $\delta \bar{E}_n$  ベクトルが求められ, 自然減速した場合の, 各種の時間平均的諸量が求められる。さて, ここでディーゼル機関に all speed governor が装備されることが多いっているが, この場合は次のように取り扱う。All speed governor は主機に対して人為的に回転数を一定にする制御を施すものであるが, この場合は (4.1) ではなく (1.17) 式にもどって考える。

ディーゼル主機の性能として主機トルク一定より  $E_{QN} = -0$ , かつ回転数を一定に保つよう制御するから  $\delta \bar{N}_p = 0$  とすると (1.17) 式は, 次のようになる。

$$\left. \begin{aligned} \frac{1}{t} \left[ \left\{ \left[ \frac{\partial R_c}{\partial V} \right]_c + \left[ \frac{\partial R_{AW}}{\partial V} \right]_c \right\} \delta \bar{V} + R_{AW}(\bar{V}_c, \bar{\chi}) \right] &= \tilde{w} P_{TU} \delta \bar{V} \\ w P_{QU} \delta \bar{V} &= r \eta_t E_{QA} \delta \bar{A} \end{aligned} \right\} \quad (4.4)$$

これより

$$\delta \bar{V} = \frac{R_{AW}(\bar{V}_c, \bar{\chi})}{w t P_{TU} - \left[ \frac{\partial R_c}{\partial V} \right]_c - \left[ \frac{\partial R_{AW}}{\partial V} \right]_c} \quad (4.5)$$

$$\delta \bar{A} = \frac{w P_{QU}}{r \eta_t E_{QN}} \cdot \frac{R_{AW}(\bar{V}_c, \bar{\chi})}{w t P_{TU} - \left[ \frac{\partial R_c}{\partial V} \right]_c - \left[ \frac{\partial R_{AW}}{\partial V} \right]_c} \quad (4.6)$$

として, 船速低下と, その時に governor が必要とする燃料投入量がわかる。当然のことながら, (4.5) 式の船速低下量は, (4.2) 式において  $E_{QN} = -\infty$ , すなわち回転数一定性能の主機として計算された場合の結果と一致する。

自然減速を求める他の方法として Fig. 4.1 に示すような手順で行う方法がある。この方法は馬力推定計算の途中にチェックポイントを設け, 回転数, トルク, あるいは馬力一定の条件を満たさせるようにくり返し計算をする方法である。

さて, 自然減速した平衡点 (A 点) において航行している時, 船長は船が安全か, あるいは危険かの判断を下し, 危険な場合に操船し, 安全な平衡点 (B 点) に移るようにする。この船長の判断を数量化する場合, 船首加速度, プロペラレーシングなどいくつかの現象が考慮されるわけであるが, それらを以下のように扱うこととする。ある  $i$  なる現象の分散値  $\sigma_i^2$  は, ある海象  $\bar{S}$ , 船速  $\bar{V}$ , 出会い角  $\bar{\chi}$  の関数として次のように表現されるとする。

$$\sigma_i^2 = F(\bar{S}, \bar{V}, \bar{\chi}) \quad (4.7)$$

ある平衡状態からの微少変化  $\delta \bar{S}$ ,  $\delta \bar{V}$ ,  $\delta \bar{\chi}$  が生じた場合の分散値  $\sigma_i^2$  の増分  $\delta \sigma_i^2$  は, 高次の項を無視すると

$$\delta \sigma_i^2 = \frac{\partial F}{\partial S} \delta \bar{S} + \frac{\partial F}{\partial V} \delta \bar{V} + \frac{\partial F}{\partial \chi} \delta \bar{\chi} \quad (4.8)$$

と表わすことができる。通常は一定海象 ( $\delta \bar{S} = 0$ ) のもとで議論されるから (4.8) 式は

$$\delta \sigma_i^2 = \frac{\partial F}{\partial V} \delta \bar{V} + \frac{\partial F}{\partial \chi} \delta \bar{\chi} \quad \dots \dots \dots \quad (4.9)$$

となる。

$i$ なる現象については限界値  $C_{io}$  とそれを超す確率(限界確率)  $A_{io}$  が与えられ、これらの量がこの現象に対する船の安全性の評価基準になっている。限界確率が  $A_{io}$  になるような値  $C_i$  は、現象の極値分布が Rayleigh 分布に従うとすると

$$A_{i0} = \exp\left(-\frac{C_i^2}{2\sigma_i^2}\right) \quad \dots \dots \dots \quad (4.10)$$

となり、この式より

$$C_i = (-2\sigma_i^2 \log A_{i0})^{1/2} \quad \dots \dots \dots (4.11)$$

となる。この  $C_i$  と限界値  $C_{i_0}$  を比較することにより

$$C_{io} - C_i < 0 \quad \dots \dots \dots \quad (4.12)$$

なら、その現象について船は危険であり

$$C_{i0} - C_i \geq 0 \quad \dots \dots \dots \quad (4.13)$$

の時、その現象について船は安全であると考えられる。

ゆえに、船が危険な場合、(4.12)式より

とおくと、この $\delta C_i$ 分だけ補正するように船速を落としたり変針したりすれば、船は安全域に入ることになる。

(4.11) 式を分散  $\sigma_i^2$  で微分すると

$$\frac{dC_i}{d\sigma_i^2} = \sqrt{-\log A_{io}/2\sigma_i^2} \quad \dots \dots \dots \quad (4.15)$$

となる。ゆえに

$$\delta C_i = \delta \sigma_i^2 (-\log A_{i0} / 2 \sigma_i^2)^{1/2}$$

となり(4.9)式を代入すると

$$\delta C_i = \left( \frac{\partial F}{\partial V} \delta \bar{V} + \frac{\partial F}{\partial \chi} \delta \bar{\chi} \right) \sqrt{\frac{-\log A_{i0}}{2\sigma_i^2}} \quad \dots \dots \dots \quad (4.16)$$

となる。

これから危険回避のために必要な船速低下と変針角の関係は、

$$\delta \bar{V} = \frac{\delta C_i}{\left[ \frac{\partial F}{\partial V} \right]_A \sqrt{\frac{-\log A_{io}}{2 \sigma_i^2}}} - \frac{\left[ \frac{\partial F}{\partial \chi} \right]_A}{\left[ \frac{\partial F}{\partial V} \right]_A} \delta \bar{\chi} \quad ..... (4.17)$$

となる。

サフィックス A は、Fig. 1.2 の A 点における微係数をとることを意味する。右辺第 1 項は、変針しない場合に必要な意識的船速低下量であり、第 2 項は、変針の影響項である。(1.17) 式に新たな条件式(4.17)式が付加されることになるが、未知数が 4 つであるから他に、もう 1 つの条件が必要である。その条件としては、例えば「ある A 点から B 点まで航行するのに最少時間で到達せよ。」などの条件が考えられる。これは最適航法の問題ということになる。この最適航法の定義として定まったものはまだないと言われているが、ここでは文献(5)によるところの局所的最適航法(主に大洋航海中の荒天避航に代表される。)といわれるものを意味している。なお、意識減速の場合、(1.17)式における微係数をとる点を指定したサフィックス C (Fig. 1.2 の C 点) は、A (Fig. 1.2 の A 点) に

する。

#### 4.2 波浪中における自然減速の計算及び実験

Fig. 4.2 に模型船Ⓐの常用状態における実験で、回転数一定制御及び主機トルク一定制御の場合の正面規則波中における実験値と計算値との比較を示す。回転数一定制御の場合、トルク増加及び馬力増加は実験値の方が若干大きいが、船速低下、推力増加は実験値と計算値とがよく合っていると言える。主機トルク一定制御の場合も実験値と計算値はよく合っており、船速低下は回転数一定制御の場合より大きいことがわかる。なお、図中横軸の右端に書いてある数値は、それぞれ平水中を  $F_n = 0.25$  の速度で航走している時の値であり、平水中の場合に比較して、どれ位増減しているかがわかる。馬力一定制御の場合は、実験を行っていないので計算値のみを図中に示してある。Fig. 4.3 に不規則波中における実験結果及び計算値を有義波高を横軸にとり図示してある。正面規則波中の実験結果と同様に、トルク一定制御の場合の方が大きな船速低下をきたすことがわかる。Fig. 4.4 には、Fig. 4.1 で示した方法によって船速低下を計算した場合の実験値との比較を示す（模型船Ⓒの満載状態）。両者の方法とも、実験値との一致はよい。Fig. 4.5 には、大型タンカー模型船Ⓑの不規則波中における船速低下の実験値のみを示す。Fig. 4.6 に模型船Ⓐの軽荷状態における正面規則波中の実験結果と推定結果の比較を示す。常用状態と比較すると実験値と推定値の一致度はよくない。Fig. 2.3 に示されているように、軽荷状態における抵抗増加の実験と計算値の一一致度がよくないので抵抗増加の実験値を用いて計算した結果も示してあるが、あまり改善されない。常用状態で主機トルク一定と回転数一定の場合には、明確に船速低下に差が出たが、軽荷状態ではその差が顕著には出ない。また、軽荷状態の場合、プロペラが水面より露出したりするためにプロペラ性能も劣化しているが、その影響も考慮する必要があろう。Fig. 4.7 には軽荷状態の不規則波中における結果を示す。主機トルク一定と回転数一定の制御方式による差が出ていないのは規則波中の場合と同じである。

#### 4.3 波浪中における意識的減速、変針の計算及び実験

計算は、日本造船研究協会第108, 125部会の研究で使用されてきた高速コンテナ船 ( $L_{pp} = 175\text{m}$ ) を対象にして行った。各現象の限界値や限界確率は、文献(6)と同じであり、分散値は「SR125 高速コンテナ船の耐航性諸要素計算とりまとめ 担当、日立技研、大阪府立大、昭和50年3月」の結果を利用した。

計算では、伝達効率  $\eta_t = 1.0$ 、減速比  $r = 1$ 、ディーゼル船を考え  $E_{QN} = -0$  とし、自航要素は平水中の値を使用した。Fig. 4.8 に、 $\bar{\chi} = 180^\circ$  (向波),  $150^\circ$ ,  $120^\circ$  に対する計算結果を示す。図中、点線は nominal speed loss を示す。船が危険になり針路を保持したまま必要な減速をした結果が実線であり、この速度まで落とせば船は安全ということである。横軸に有義波高をとり平均波周期をパラメータとして示してある。次にあるX点とY点を考えてY点の方からX点の方に波が来る状況を考え、XからYまで最も短時間で行くようにせよ、という条件で解いた結果の1例が Fig. 4.9 である。図中太い実線で示したのが最少時間で航行することができる航法である。すなわち、 $H_{1/3} = 7\text{m}$ ,  $\tilde{T}_0 = 10.3$  秒位の荒れた不規則海面では、波に対して  $60^\circ$  変針して進行し、X, Yの中間点で、反対側に  $60^\circ$  変針して進むのが一番早く、かつ安全に目的地に到着できるということである。

この意識的減速、変針についての推定計算法の検証のために、長水槽における模型実験を実施し計算と比較してみた。長水槽における実験であるために波との出会い角は  $180^\circ$  であり変針はしないものとする。 $(\delta\bar{\chi} = 0)$ 、また1つの波長 ( $\lambda/L = 1.2$ ) における規則波中の実験とする。そこで、船の安全、危険の目安として船首加速度を選び、この船首加速度にある限界値  $\alpha_c$  を適当に与えて、この限界値に対して船長判断が下される考えることにする。単位波振幅に対する船首加速度は、船速、海象、波との出会い角の関数と考えられるが、本実験の場合、海象のうちで波周期を一定とし、更に波との出会い角は  $180^\circ$  と決まっているので速度の関数となり、それを

$$\alpha = \zeta_a G(V) \quad \dots \dots \dots \quad (4.18)$$

とおく。ここで  $\zeta_a$  は波振幅である。

前述した方法と同様にして

$$\delta \bar{V} = \frac{\alpha_c - \alpha}{\zeta_a \cdot \frac{dG(V)}{dV}} \quad \dots \dots \dots \quad (4.19)$$

だけ船速を落とせば、限界値  $\alpha_c$  以下の加速度で航行できることになる。

実験は燃料投入量としてボテンショメーターのダイヤルを考え、それを  $\delta A = -1, -2, -3, -4$  と減少させて、波高変化に対応して船速、船首加速度、プロペラ推力、回転数などを計測した。駆動モーターは主機トルク一定を模擬した。 $(E_{QN} = -0)$  Fig. 4.10 に波高に対する船首加速度、船速低下、ダイヤル（燃料投入量）を示し、Fig. 4.11 にその時のプロペラ推力、回転数の増減量を示す。

計算で(4.18)式に対応するものとしてO.S.M.で求められる船首加速度の結果から燃料投入量(本実験の場合は、ボテンショーメータのノッチの変化量)などを求めた場合と、実験で得られた船首加速度の結果を使って計算した結果の両者を示してあるが、船首加速度として実験結果を使って求めた推定結果は、実験結果とよく合っており、船首加速度の計算が実験結果と合致するならば計算によって危険回避に必要な燃料投入量減少の推定計算は、良い推定値を与えるであろうと期待される。なお、 $F_n = 0.25$ で平水中を航行している状態を最初の基準状態(Fig. 1.2のC点)を選んである。

#### 4.4 燃料消費量について

危険回避のため新たな平衡点B点に移動させるためにどれ位の燃料投入量を減らしたらよいだろうか。これを見るためには、(1.17)式などにおける $E_{Q,A}$ の値を知る必要がある。海上公試の結果より一般には、回転数に対する馬力、あるいは単位時間当りの燃料消費量などが得られるから、その結果より燃料に対する主機トルクの関係を知ることができる。主機トルクの微少変化量は $x_4$ 軸の変化分であり、 $\delta\bar{Q}_e = E_{QN} \cdot \delta\bar{N}_e + E_{Q,A} \delta\bar{A}$ で与えられる。しかるに、主機トルク一定の性能をもった機関の場合、 $E_{QN} = -0$ より $\delta\bar{Q}_e = E_{Q,A} \delta\bar{A}$ となる。ゆえに $E_{Q,A} = \delta\bar{Q}_e / \delta\bar{A}$ であるから、燃料に対する主機トルクの関係より、その微係数として $E_{Q,A}$ が求められる。主機の性能に応じて $E_{QN}$ を与えてやれば、同様に $E_{Q,A}$ をその機関性能に対して知ることができる。主機の陸上運転の結果などからも $E_{Q,A}$ を求めることができよう。

Fig. 4.12 にある 175 m 級の高速コンテナ船の公試運転結果を示し、Fig. 4.13 にそれを使って求めた燃料-主機トルク曲線 ( $A$ - $Q_e$  曲線) を示す。これを使い  $E_{QA}$  を求め、Fig. 4.9 に対応して、船が安全に航行できる変針角と燃料投入量の限界線を求めたのが Fig. 4.14 である。Fig. 4.9 との対応でみると、この海象では、60° 変針し、燃料を 2 kg/hour · rpm 減少させて走ると安全であり、その時の船速はほぼ 21 kt 位ということになる。

Fig. 4.15 には、自然減速の場合、主機トルク一定の場合と、回転数一定の場合では、どの位の燃料差があるかを試算したものである。回転数一定は、結果として all speed governor を取り付けたことになるから、両者の差の分を governor が補充すると回転数が一定で航行できるということである。

## 5. プロペラ負荷変動

## 5.1 プロペラ負荷変動の推定計算法

プロペラ負荷変動は、主機の駆動トルクとプロペラ負荷トルクの不釣り合いから生じる。すなわち  $x_3$  軸と  $x_4$  軸の不平衡から生じる。

回転系の回転慣性モーメントを  $I$  とすると、回転運動方程式は、

$$2\pi \frac{1}{g} \dot{n}_e = q_e - [q_p]_e \quad \dots \dots \dots \quad (5.1)$$

となる。

ただし  $[q_p]_e$  は、プロペラトルク変動の主機側への換算値を示す。

である。(1.9)式より(5.1)式の右辺は

$$q_e - [q_p]_e = (e_{qn} \cdot \eta_t - \frac{P_{qn}}{r^2}) n_e + e_{q\lambda} \cdot \eta_t \cdot \lambda - \frac{P_{qu}}{r} \quad \dots \dots \dots \quad (5.3)$$

となり、これから(5.1)式は

$$2\pi \frac{I}{g} \dot{n}_e + \left( \frac{P_{qn}}{r^2} - \eta_t \cdot e_{qn} \right) n_e = \eta_t \cdot e_{q\lambda} \cdot \lambda(t) - \frac{P_{qu}}{r} \cdot u(t) \quad \dots \dots \dots (5.4)$$

なる回転運動を表わす1次系の微分方程式が得られる。ここで

$$T = \frac{2\pi I r^2}{g(P_{qn} - r^2 \eta_t e_{qn})}, \quad K_1 = \frac{r P_{qu}}{P_{qn} - r^2 \eta_t e_{qn}}, \quad K_2 = \frac{r^2 \eta_t e_{qn}}{P_{qn} - r^2 \eta_t e_{qn}} \quad \dots \dots \dots (5.5)$$

とおくと(5.4)式は

となる。これを解くと

$$n_e = \frac{-K_1 u + K_2 \lambda}{\sqrt{1 + (\omega T)^2}} \quad \dots \dots \dots \quad (5.7)$$

となる。この第1項はプロペラへの流入速度変動を示し、その計算方法は文献(7)に示されている。第2項は燃料投入量変動であり、いわゆるガバナーのようなものを意味している。しかるにガバナー機構についてはまだ十分検討されていないのでここでは触れないことにする。(5.7)式の結果より各種の変動量は次のように与えられることになる。

$$\left. \begin{aligned} t_p &= P_{tn} n_p + P_{tu} u \\ q_p &= P_{qn} n_p + P_{qu} u \\ q_e &= e_{qn} \cdot n_e \\ n_p &= n_e / r \end{aligned} \right\} \dots \dots \dots \quad (5.8)$$

船速低下の計算と同様に、 $e_{qn}$  の値に応じて任意の主機性能における変動量が計算できることになる。

## 5.2 プロペラ負荷変動の実験

Fig. 5.1 に回転数一定制御及び主機トルク一定制御時の正面規則波中におけるプロペラ推力及び主機トルクの変動量の実験値と計算値との比較を示す。縦軸に変動両振幅のなまの値と、平水中における各値に対する比との両者を示す。回転数一定制御時には、短波長領域での実験値と計算値の一致はよくないが、それ以外ではよく合っていると言える。主機トルク一定制御時は回転数一定制御時よりも実験値と計算値との一致はよい。また主機トルク一定制御であってもプロペラトルク変動があるが、これは実験値がないので計算値だけを示してある。馬力一定制御時の各変動量については計算値のみを図中に示してある。

Fig. 5.2 に不規則波中における各変動量の有義値を、有義波高に対して示す。各変動量の有義値は、有義波高とほぼ直線的比例の関係にあるが、有義波高が大きくなると、直線比例関係より大きい方にずれてくることがわかる。<sup>(8)</sup> なお、プロペラへの流入速度変動  $u(t)$  の計算には、入射波の船体による擾乱の影響を考慮した結果<sup>(8)</sup> を用い

ており、不規則波中の計算は、線型重ね合わせ法により規則波中の応答関数より求めた。駆動モーターの回転慣性モーメント  $I$  は、カタログ数値  $I = 25 \text{ Kg-cm}^2$  を用いた。

## 6. プロペラレーシング

プロペラ負荷変動の特別な場合としてプロペラが水面より露出し、極めて激しい負荷変動を起こす場合——いわゆるプロペラレーシング——には、5章で述べたような方法だけでは取り扱うことができなく、プロペラ没水深度に対する考慮が必要となる。Fig. 6.1に日本造船研究協会第125部会で実施された実船実験（氷川丸第2次航）で計測されたレーシング時の波形を示す。実船実験では、トルク、回転数ともに非常に大きな変動を示していることがわかる。模型船①を使って軽荷状態の波浪中自航試験時に得られたプロペラレーシングのアナログ波形をFig. 6.2に示す。

### 6.1 レーシング時の負荷変動とプロペラ没水深度の相互関係

プロペラ没水深度がどのようにレーシングに影響しているかを知るために、プロペラ没水深度を変えたプロペラ単独試験を行い、Fig. 6.3に没水深度の浅い場合と深い場合の推力、トルク比を  $I_0/R$  の変化に対して示す。図中にプロペラを回転円盤と考えた場合、その没水面積とプロペラ円盤面積との比の没水深度による変化を示してある。推力、トルクの減少具合は、このように回転円盤と考えた場合の面積比と同様な傾向を示すことがわかる。

同様に不規則波中のプロペラ単独試験を行い推力比の瞬時値と没水深度との関係を示したのがFig. 6.4であり、平均的にFig. 6.3と同様な傾向にあることがわかる。更に不規則波中における模型船①の軽荷状態での自航試験時に得られたアナログ記録の瞬時値を同様な方法でFig. 6.5に示す。以上の結果は、プロペラレーシング時の波形は複雑のようであるが、プロペラ没水深度と極めて強い関係があり、瞬時瞬時のプロペラ没水深度がわかればその時の推力、トルクなどの瞬時値は予測できることを示すものと言えよう。

### 6.2 規則波中におけるプロペラレーシング

規則波中におけるプロペラレーシング時の変動波形は、2種類の性質の異なったものから成り立っていると考えられる。1つは波の粒子速度によるプロペラへの流入速度変動によるもの、他の1つはプロペラの没水深度の変化によるもので、この両者が合成された波形と考えられる。プロペラへの流入速度変動によって生ずる変動分は波と没水深度が与えられれば簡単に求められる。没水深度の変化によって生ずる変動分はFig. 6.3に示されているように  $I_0/R \leq 1.2 \sim 1.4$  の範囲では、 $T/T_\infty, Q/Q_\infty$  が直線的に変化すると考えると簡単になり以下のように取り扱えるものとする。(Fig. 6.6)

$$\text{波を } \zeta = \zeta_a \cos \omega_e t \quad \dots \quad (6.1)$$

とおく。この時の波粒子速度の水平成分  $U_p$  は、

$$U_p = -\zeta_a \omega \cdot \exp(kZ) \cos \omega_e t \quad \dots \quad (6.2)$$

この  $U_p$  に対応する推力変動  $t_{p1}$  は

$$t_{p1} = -P_{tu} \cdot U_p \quad \dots \quad (6.3)$$

の形で表現される。

ただし、 $P_{tu}$  はプロペラの要目及び作動状態で決まる定数でプロペラ単独特性から求められる。次に  $I/R$  は、次のように表わせる。

$$\frac{I}{R} = \frac{I_0 + \zeta}{R} = \frac{I_0}{R} + \frac{\zeta_a}{R} \cos \omega_e t \quad \dots \quad (6.4)$$

また、Fig. 6.3の結果をモデル化して

$$\left. \begin{aligned} T/T_{\infty} &= a(1/R) + b & ; & (1/R \leq A) \\ &= 1 & ; & (1/R > A) \end{aligned} \right\} \quad \dots \dots \dots \quad (6.5)$$

と表現することにする。これより没水深度変化によって生ずる推力変動  $t_{p_2}$  は

$$\left. \begin{aligned} t_{p_2} &= a(\frac{\zeta a}{R}) \cos \omega_e t \cdot T_{\infty} & ; & (1/R \leq A) \\ &= 0 & ; & (1/R > A) \end{aligned} \right\} \quad \dots \dots \dots \quad (6.6)$$

となる。よって推力変動  $t_p$  は

$$\left. \begin{aligned} t_p &= -P_{tu} U_p + a(\frac{\zeta a}{R}) \cos \omega_e t \cdot T_{\infty} & ; & (1/R \leq A) \\ &= -P_{tu} U_p & ; & (1/R > A) \end{aligned} \right\} \quad \dots \dots \dots \quad (6.7)$$

で与えられる。この方法で推力変動のタイムヒストリーを計算し、実験時のタイムヒストリーと比較した結果を Fig. 6.7 に示す。計算は  $A = 1.2$  とした。前進常数  $J$  が 0.5, 0.6 などの場合、波形それ自体も対称であって計算によってよく推定できることがわかる。一方、 $J$  が小さい 0.3 の場合、計算値との相違が大きいうえに、波形が非対称であるのが特徴的である。これは、 $J$  が小さい場合、 $A$  は 1.2 よりも大きな値となっていることと、プロペラが水中に入る場合と出る場合に空気の吸い込みなどの影響で特性が違うことに原因していると考えられよう。<sup>(10)</sup>  
 $J$  が小さい場合には、上記に示した方法では完全に合わないことを示している。

上述のように単独状態では比較的よい推定値を与えるので実際の場合の検討として船後状態を考えてみる。この場合、船が航走することによりプロペラの没水深度は、まわりの水面の盛り上がりなどで変化するが、その変化を模型④で調査した結果を Fig. 6.8 に示す。高速になるとかなりの没水深度の変化があり、この量を計算に考慮しないと正しい推定値は得られない。

船後状態で強制縦揺れさせながらプロペラの推力、トルク、回転数の変動を計測した結果と、前述の方法を使って推定した結果を比較し Fig. 6.9 に示す。更に、模型船④の軽荷状態での正面規則波中の自航試験時の変動振幅と、推定した結果を比較したものが Fig. 6.10 である。Fig. 6.9, Fig. 6.10 とともに、Fig. 6.8 の水面盛り上り量を考慮してある。比較的良い推定値を与えることがわかり、プロペラの没水深度の推定がよければ、レーシング時の負荷変動の推定は、実用的には満足できるであろう。

### 6.3 不規則波中におけるプロペラレーシング

規則波中におけるプロペラレーシングについては、プロペラの没水深度の推定が正確にできるならば、比較的容易に変動幅の推定をすることができるが、不規則波中の場合には、波自体が線型重ね合わせができるてもレーシング現象が非線型な現象であるために取り扱いは複雑にならざるを得ない。

模型船④の軽荷状態での、不規則波中自航試験結果を Fig. 6.11 に示す。一般的に、波浪中におけるプロペラレーシングをどのように定義したらよいか種々議論があるが、それらについては十分に明確にされていない。

この実験状態では、ビューフォート 7 ( $H_{1/3} = 8 \text{ cm}$ ,  $\tilde{T}_0 = 1.24 \text{ sec}$ , 模型スケール) 相当の海象になると、プロペラは  $\frac{1}{3}$  露出 ( $1/D = 0.17$ ,  $1/R = 0.34$ ) するようになり、この時の回転数変動は 10% 程度、トルク変動は 20% 程度、船速低下は 10% 程度になっている。更にビューフォート 8 ( $H_{1/3} = 11 \text{ cm}$ ,  $\tilde{T}_0 = 1.51 \text{ sec}$ ) 位になると最高回転数が定格回転数の 110% 位に達する。これは主機関の立場から考えてみると 1 つの限界と考えられる。不規則波中におけるレーシングのシミュレーション計算の方法が高橋により提案<sup>(11)</sup>されているが 1 つの参考になろう。

レーシングは主機関に悪影響を及ぼすものであるか、レーシング時の主機の作動状況を主機特性平面上で考えることは大切なことである。Fig. 6.12 に、模型船④、あるいは実船のレーシング時の解析結果を主機特性平面上に

示す。この平面上においてみるとプロペラレーシングが主機関にどのような影響を与えるかを知ることができる。このように不規則波中のレーシング現象を主機の特性平面上で考え、いろいろ提案されているレーシングの定義についての相互関係をつかむことが今後の課題といえよう。

## 7. 今後の課題

以上、4カ年の研究結果から、今後、研究調査される必要があるのは、次のような事項であろう。

- 1) 抵抗増加の計算値が、いろいろの種類の船型について良い推定値を与えるような実用計算法の開発
- 2) 波浪中の自航要素を船速低下の推定計算に組み込むことができるようすること。
- 3) 船速低下の推定計算法（自然減速、意識的減速）を、他の船型などによって確認し、その改良をすること。
- 4) 燃料の問題も含めて、「波浪中における船舶の挙動の最適化とは何か」という点を明らかにすること。
- 5) 主機関の種々の性質を推定性能の分野から整理し、正しく、船速低下や負荷変動などの計算に組み入れること。
- 6) プロペラレーシングの判定条件については更に多方面から検討すること。
- 7) 実船運航の資料を、今、研究の成果の上にたって収集すること。

### 参考文献

- 1) 中村彰一；耐航性の諸要素、第1回耐航性に関するシンポジウム、日本造船学会、昭和44年7月、p.121
- 2) 新谷 厚；波浪中抵抗増加の近似計算法に関する諸問題、関西造船協会誌、150号、昭和48年9月、p.27
- 3) 藤井 斎、高橋 雄；肥大船の波浪中抵抗増加推定法に関する実験的研究、日本造船学会論文集、137号、昭和50年6月、p.132
- 4) 中村彰一他；コンテナ船の波浪中推定性能に関する研究（第4報）、関西造船協会誌、159号、昭和50年12月、p.29
- 5) 細田龍介、黒井昌明；最適航法、第2回耐航性に関するシンポジウム、日本造船学会、昭和52年12月、p.211
- 6) 北沢孝宗他；コンテナ船の波浪中での限界速度、日本造船学会論文集、138号、昭和50年12月、p.269
- 7) 中村彰一他；コンテナ船の波浪中推進性能に関する研究（第3報）、関西造船協会誌、158号、昭和50年9月、p.37
- 8) 中村彰一他；波浪中におけるプロペラ単獨特性と負荷変動について、関西造船協会誌、159号、昭和50年12月、p.41
- 9) 日本造船研究協会第125研究部会；超高速コンテナ船の耐航性に関する研究報告書、研究資料No.211、昭和50年3月
- 10) 田崎 亮；浅没水深度の波浪中プロペラオーブンテスト結果、資料SR125-19-13、昭和49年9月
- 11) 高橋 雄；プロペラレーシングに関する水槽試験、JTTTC第2部会資料SK52-3、昭和52年11月

Table 2.1 Principal particulars of ship model and propeller  
(Container ship)

Model (A)

|                                  | Normal cond. | Light cond. |
|----------------------------------|--------------|-------------|
| L <sub>pp</sub> (m)              | 4.000        | 4.000       |
| B (m)                            | 0.5874       | 0.5874      |
| d <sub>F</sub> (m)               | 0.1953       | 0.1079      |
| d <sub>A</sub> (m)               | 0.2199       | 0.1698      |
| d <sub>M</sub> (m)               | 0.2076       | 0.1389      |
| ▽ (m <sup>3</sup> )              | 0.2769       | 0.1709      |
| C <sub>B</sub>                   | 0.568        | 0.524       |
| L <sub>pp</sub> /B               | 6.81         | 6.81        |
| B/d <sub>M</sub>                 | 2.83         | 4.23        |
| k <sub>yy</sub> /L <sub>pp</sub> | 0.24         | 0.255       |

| Propeller                 | A      | B     |
|---------------------------|--------|-------|
| Diameter D (m)            | 0.15   | 0.112 |
| Pitch ratio               | 1.007  | 1.009 |
| Expanded blade area ratio | 0.6935 | 0.670 |
| Blade thickness ratio     | 0.0530 | 0.05  |
| Boss ratio                | 0.1848 | 0.180 |
| Number of blades          | 5      | 5     |

Table 2.2 Principal particulars of ship model (Tanker)

Model (B)

| Correspond ship      | 210 KDW/Tanker      |
|----------------------|---------------------|
| Load cond.           | Full load even keel |
| L <sub>pp</sub> (m)  | 7.000               |
| B (m)                | 1.101               |
| d (m)                | 0.4266              |
| ▽ (m <sup>3</sup> )  | 2.802               |
| C <sub>B</sub>       | 0.8521              |
| GM (m)               | 0.135               |
| T <sub>φ</sub> (sec) | 2.153               |

Table 3.1 Principal particulars of ship model and propeller  
(SR108 Container ship)

Model C

|                    |                   | Full cond. | Light cond. |
|--------------------|-------------------|------------|-------------|
| L <sub>pp</sub>    | (m)               | 3.500      | 3.500       |
| B                  | (m)               | 0.508      | 0.508       |
| d                  | (m)               | 0.190      | 0.1254      |
| t/L <sub>pp</sub>  | (%)               | 0          | 0.985       |
| A                  | (m <sup>2</sup> ) | 0.1936     | 0.1168      |
| C <sub>B</sub>     |                   | 0.5725     | 0.5275      |
| C <sub>m</sub>     |                   | 0.9700     | 0.9546      |
| C <sub>w</sub>     |                   | 0.7107     | 0.6303      |
| F <sub>B</sub> /L  | (%)               | 51.454     | 51.954      |
| KG                 | (m)               | 0.1903     | 0.1600      |
| GM                 | (m)               | 0.196      | 0.555       |
| k <sub>yy</sub> /L |                   | 0.2396     | 0.256       |
| T <sub>φ</sub>     | (sec)             | 2.62       | 1.51        |

Propeller

|                       |     |       |
|-----------------------|-----|-------|
| Diameter D            | (m) | 0.130 |
| Pitch                 | (m) | 0.130 |
| Expanded area ratio   |     | 0.652 |
| Blade thickness ratio | (%) | 5.073 |
| Number of blades      |     | 5     |
| Direction of turning  |     | Right |

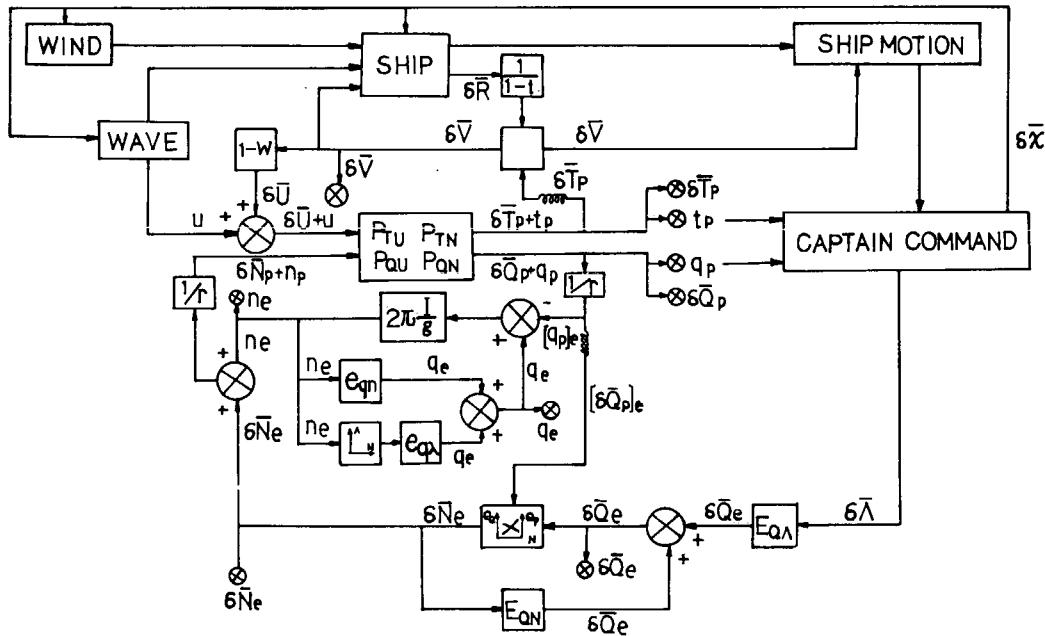


Fig. 1.1 Block diagram of propulsive performance of ship in waves.

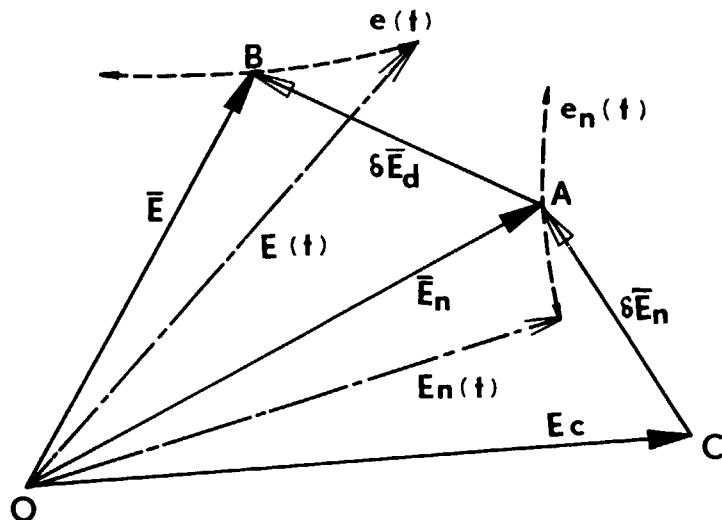


Fig. 1.2 Vector representation of propulsive performance of ship in waves.

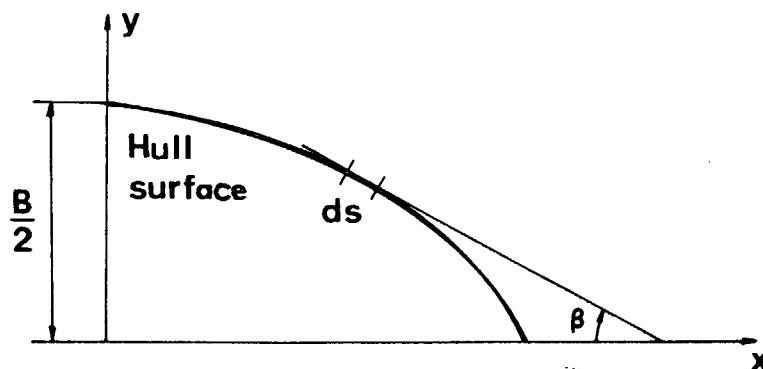


Fig. 2.1 Bluntness coefficient

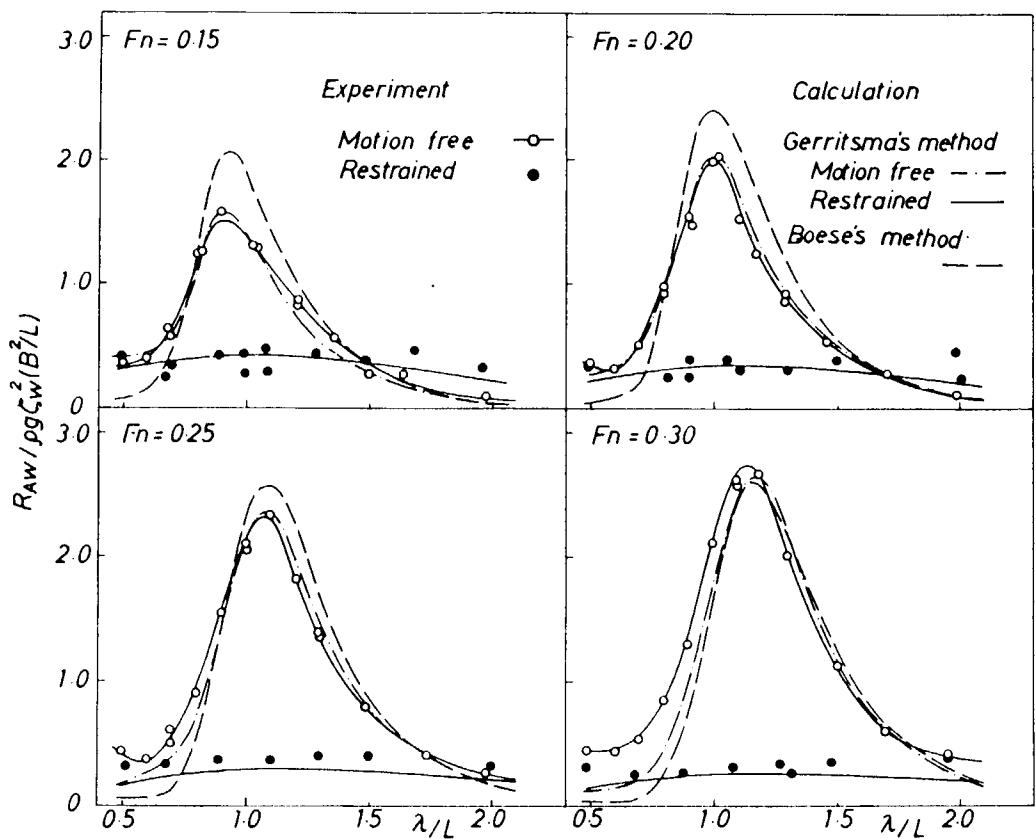


Fig. 2.2 Comparison of resistance increase coefficients in regular head waves between experiments and calculations. (Model A, Normal condition)

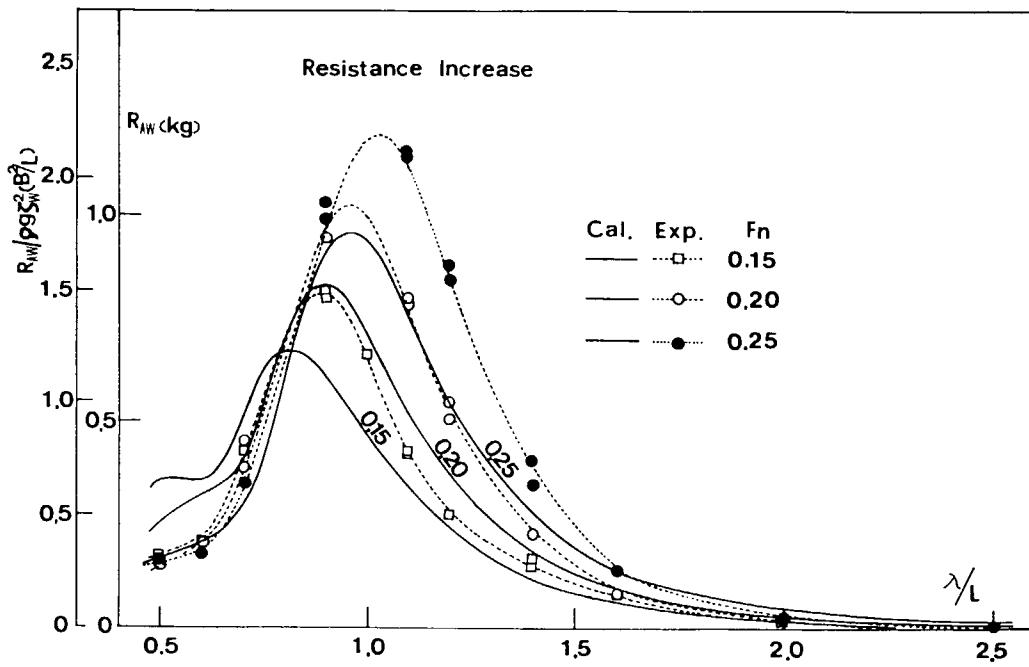


Fig. 2.3 Resistance increase in regular head waves. (Model A, Light condition)

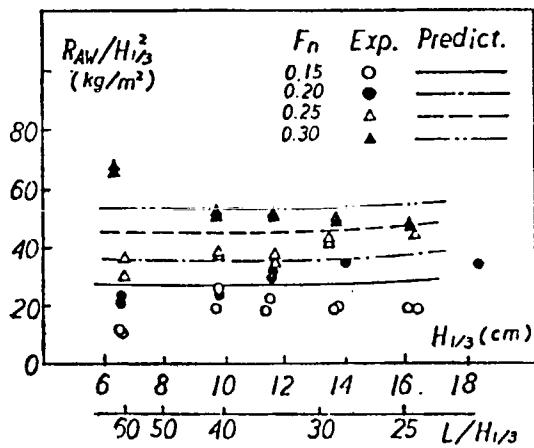


Fig. 2.4 Resistance increase in irregular head waves.  
(Model ①, Normal condition)

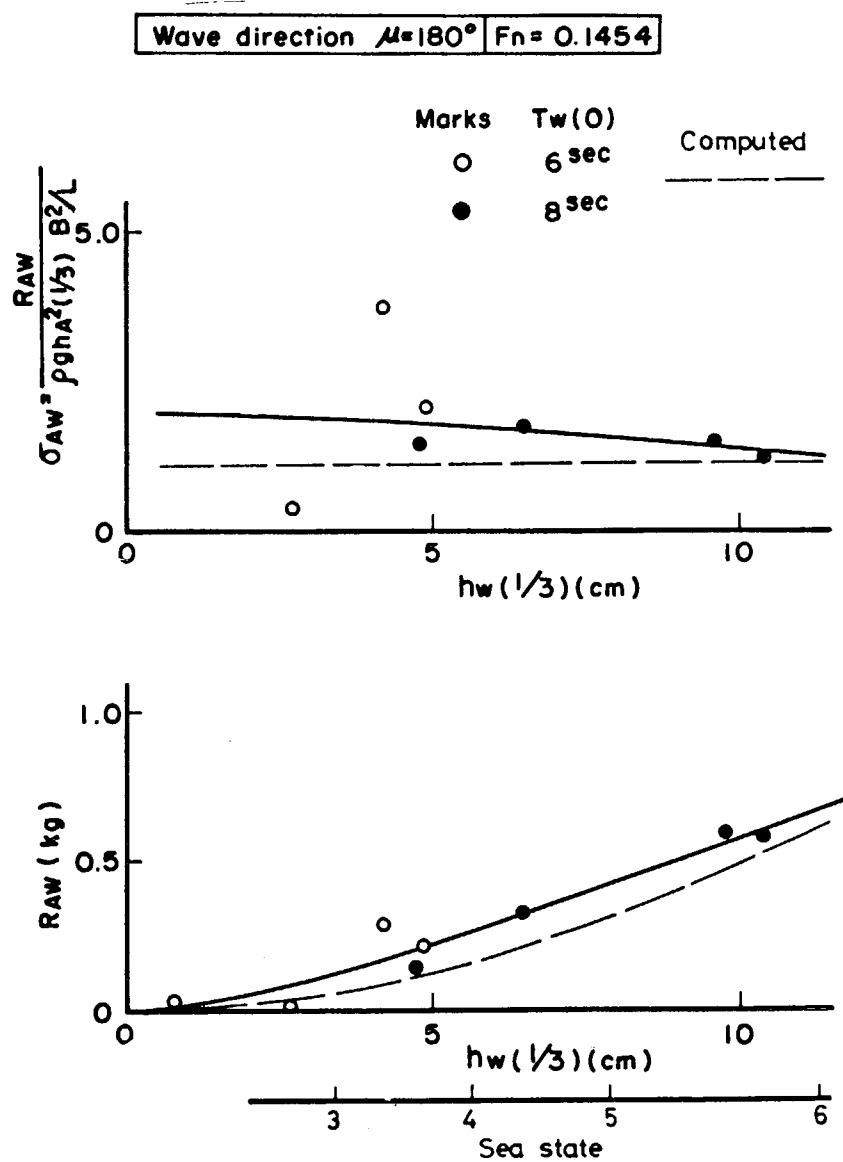


Fig. 2.5 Resistance increase in irregular head waves.  
(Model ②, Normal condition)

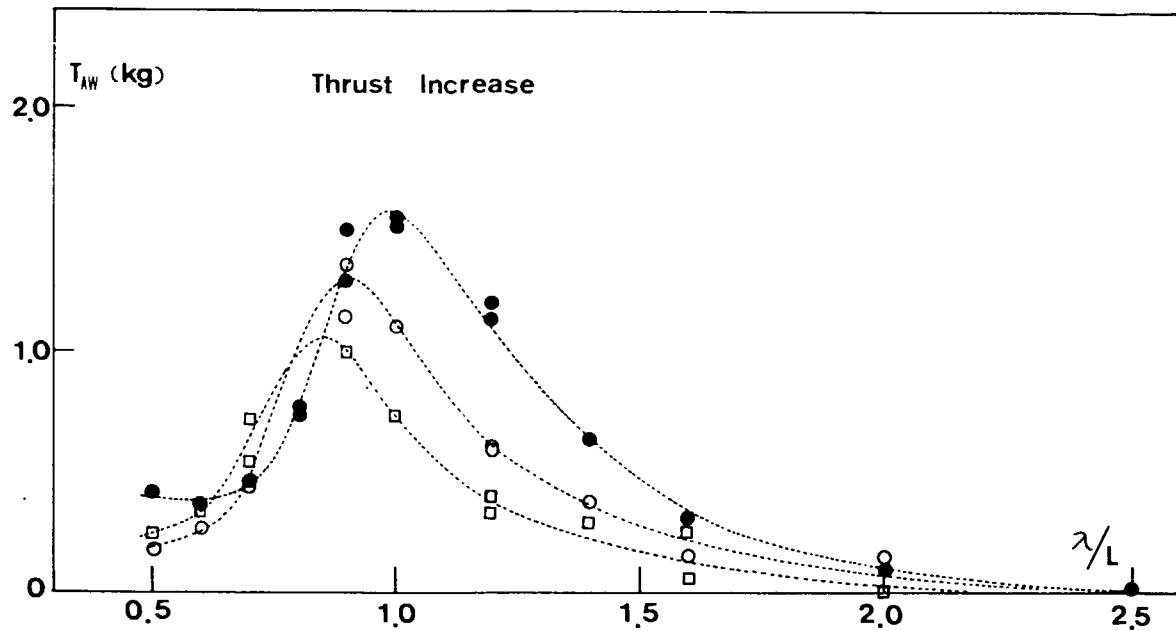


Fig. 3.1-1 Mean increase of propeller thrust, torque and revolutions in regular head waves.  
(Model A, Normal condition)

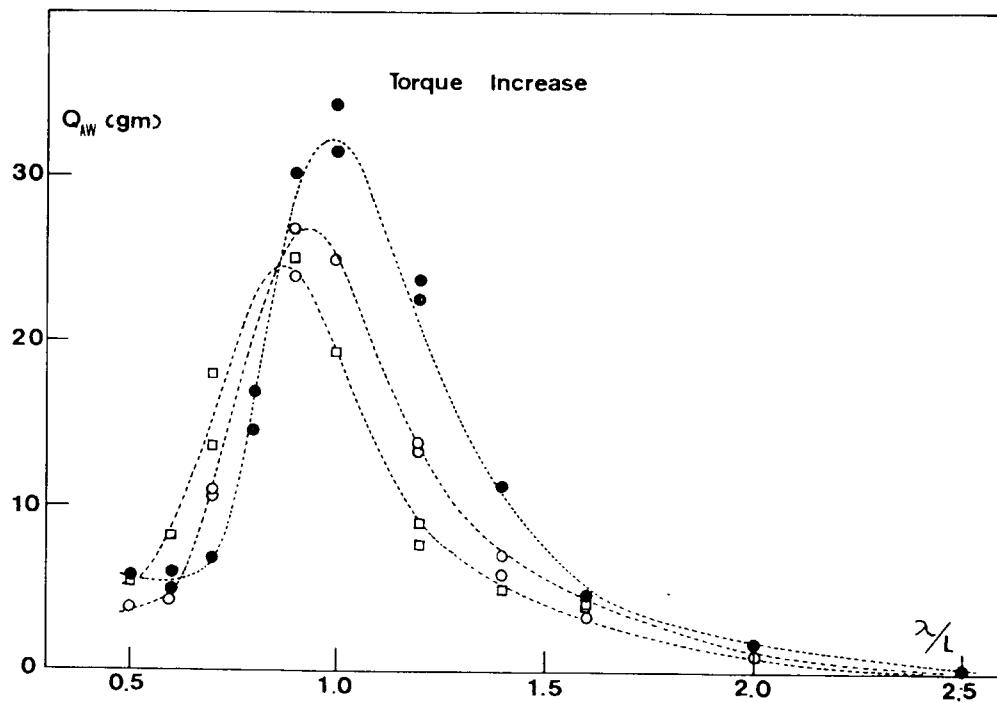


Fig. 3.1-2 Mean increase of propeller thrust, torque and revolutions in regular head waves.  
(Model A, Normal condition)

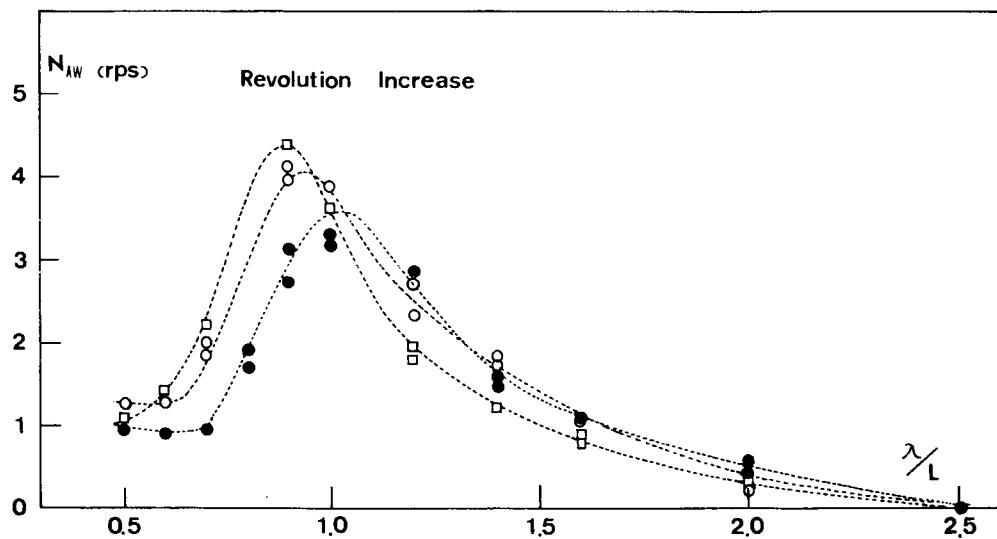


Fig. 3.1-3 Mean increase of propeller thrust, torque and revolutions in regular head waves.  
(Model A, Normal condition)

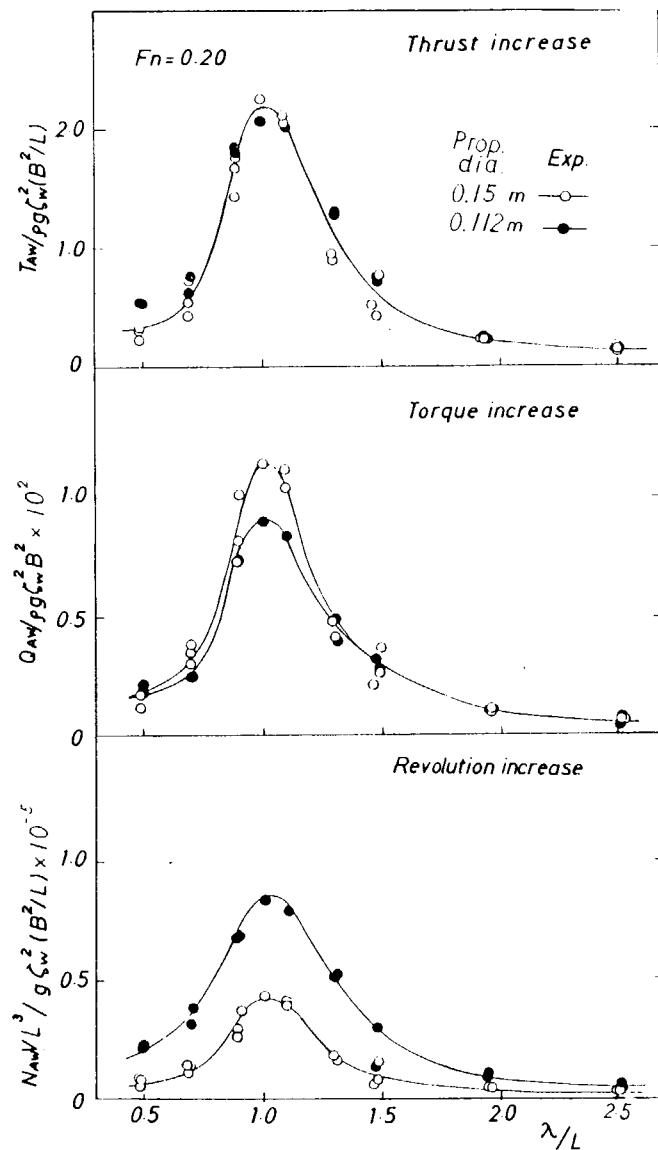


Fig. 3.2 Effect of propeller diameter on mean increases of propeller thrust, torque and revolutions in regular head waves.  
(Model A, Normal condition)

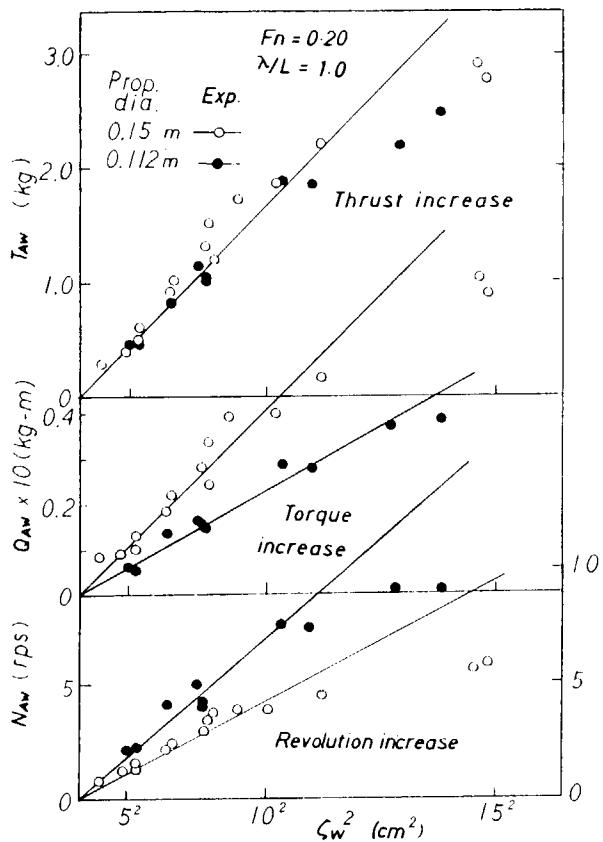


Fig. 3.3 Effect of wave height on mean increase of propeller thrust, torque and revolutions in regular head waves. (effect of propeller diameter) (Model A, Normal condition)

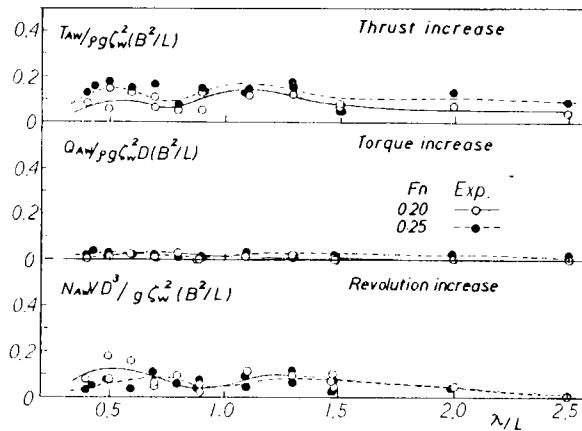
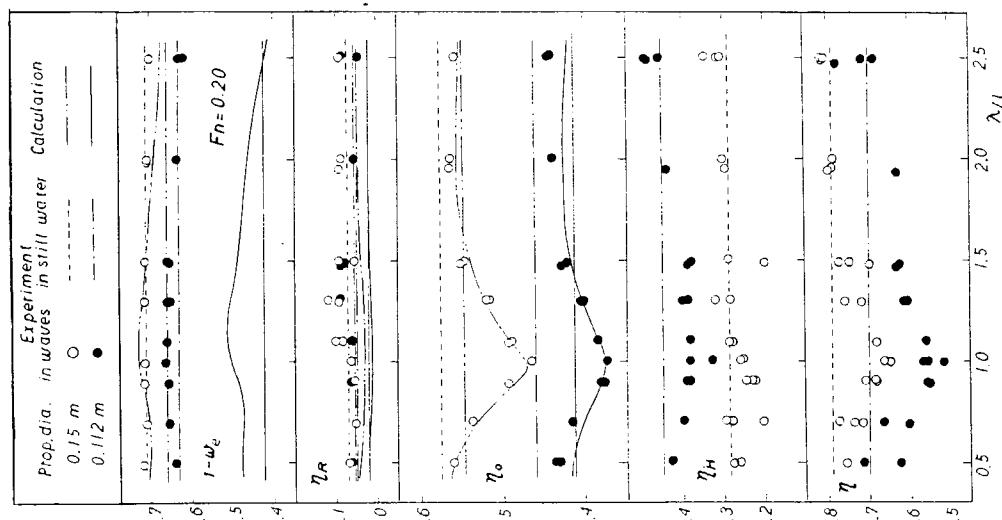


Fig. 3.4 Coefficients of mean increase of propeller thrust, torque and revolutions in regular following waves. (Model A, Normal condition)



- 158 -

Fig. 3.5 Self-propulsion factors in regular head waves.  
(effect of propeller diameter)  
(Model A, Normal condition)

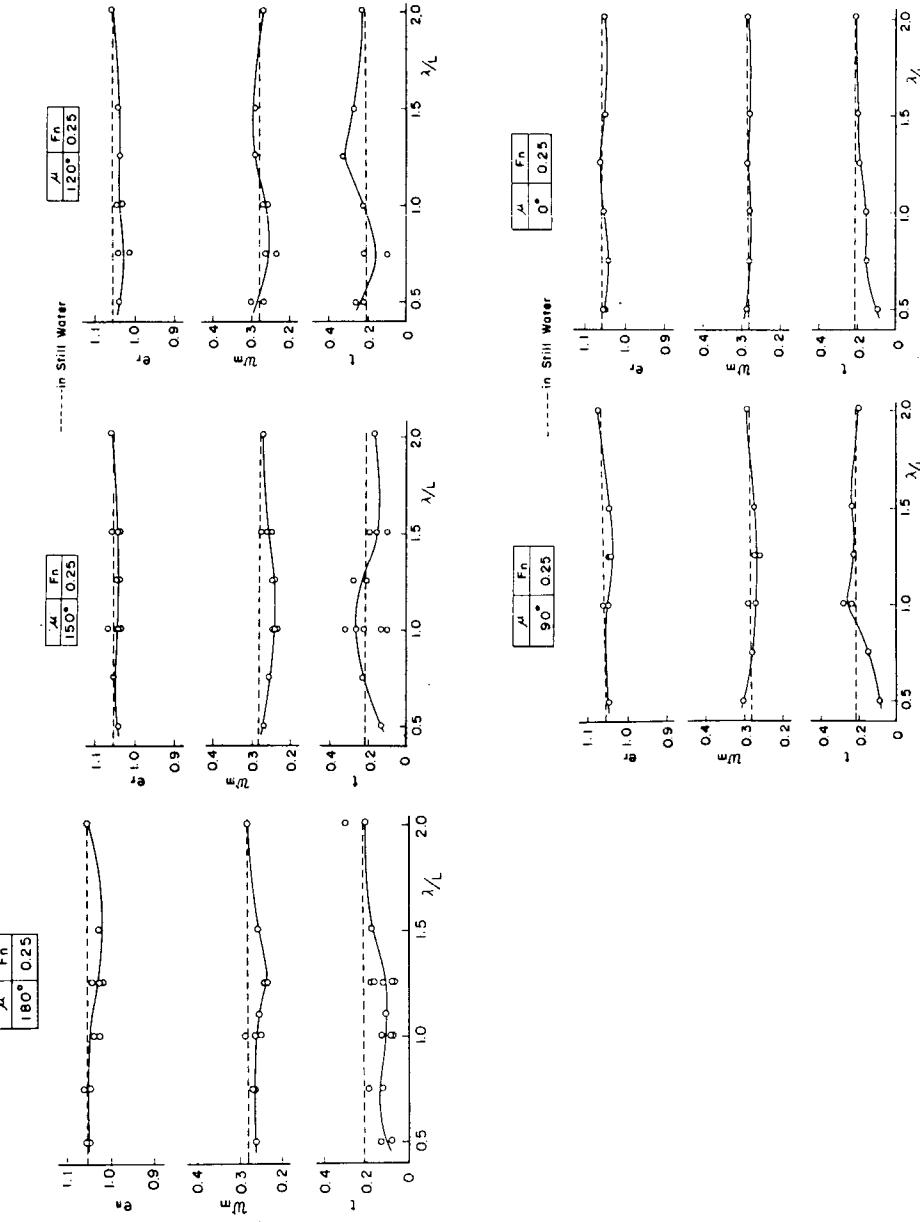


Fig. 3.6 Self-propulsion factors in regular oblique waves.  
(Model C, Full load condition)

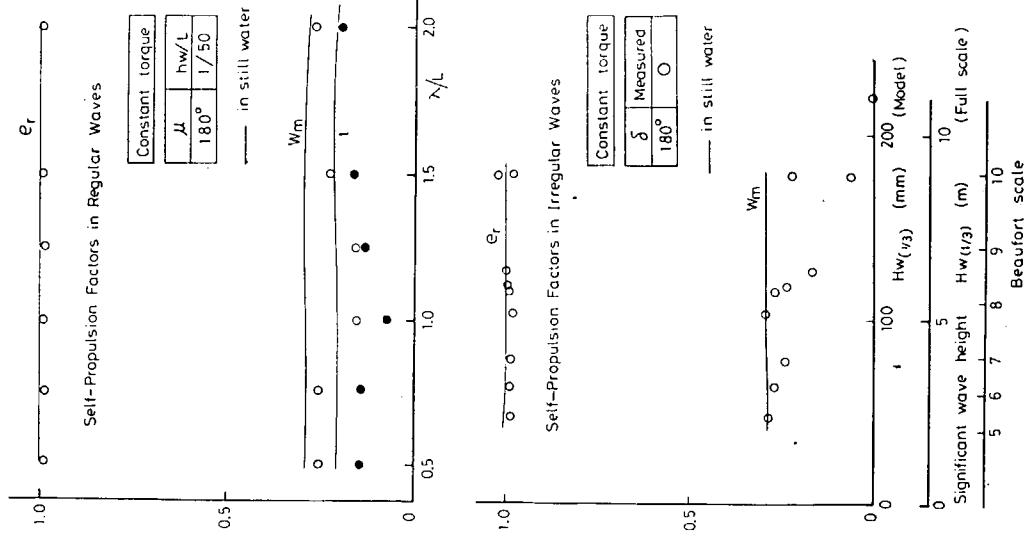


Fig. 3.7 Self-propulsion factors in waves.  
(Model ©, Light condition)

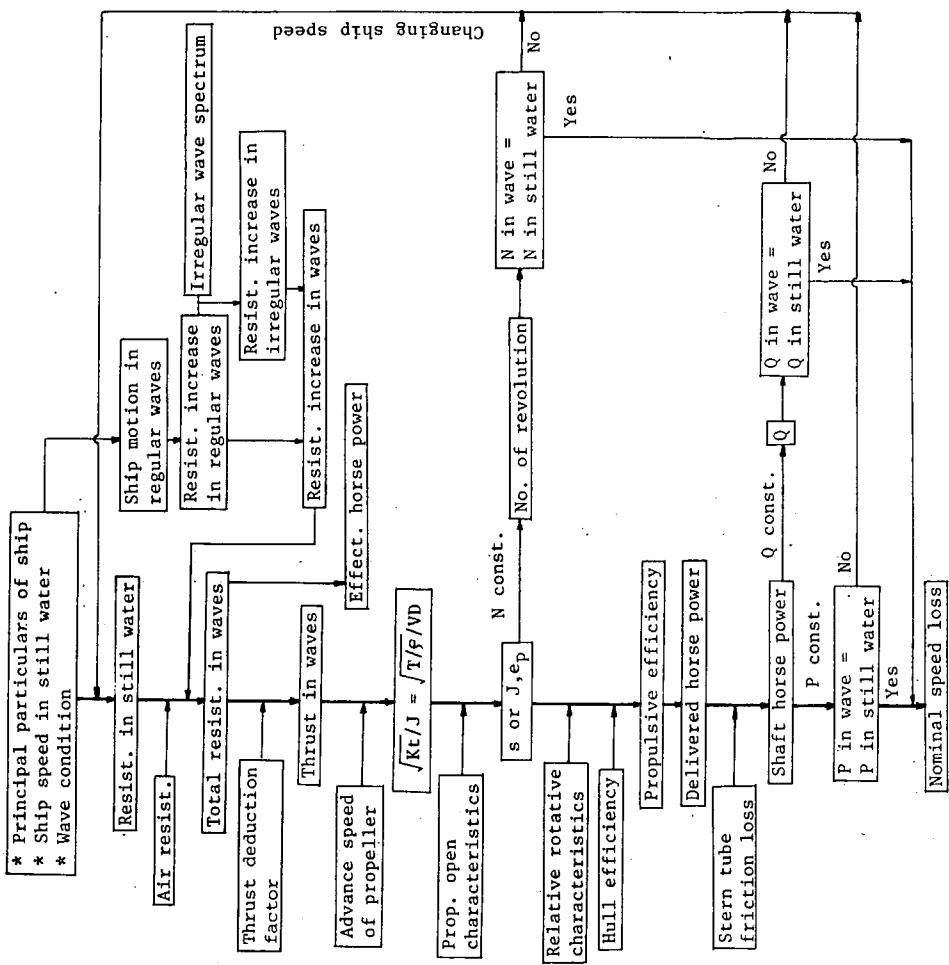


Fig. 4.1 Flow chart of calculation of nominal speed loss in waves.

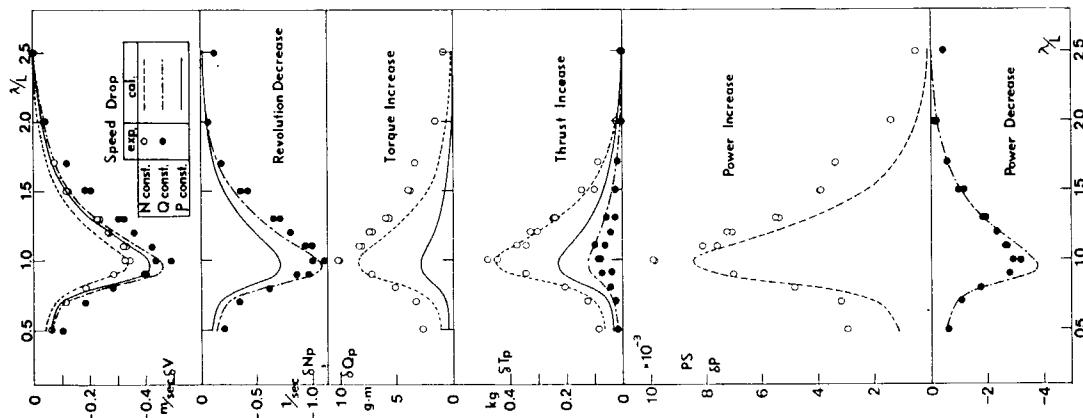


Fig. 4.2 Comparison of measured and computed speed drop in regular head waves.  
(Model A, Normal condition)

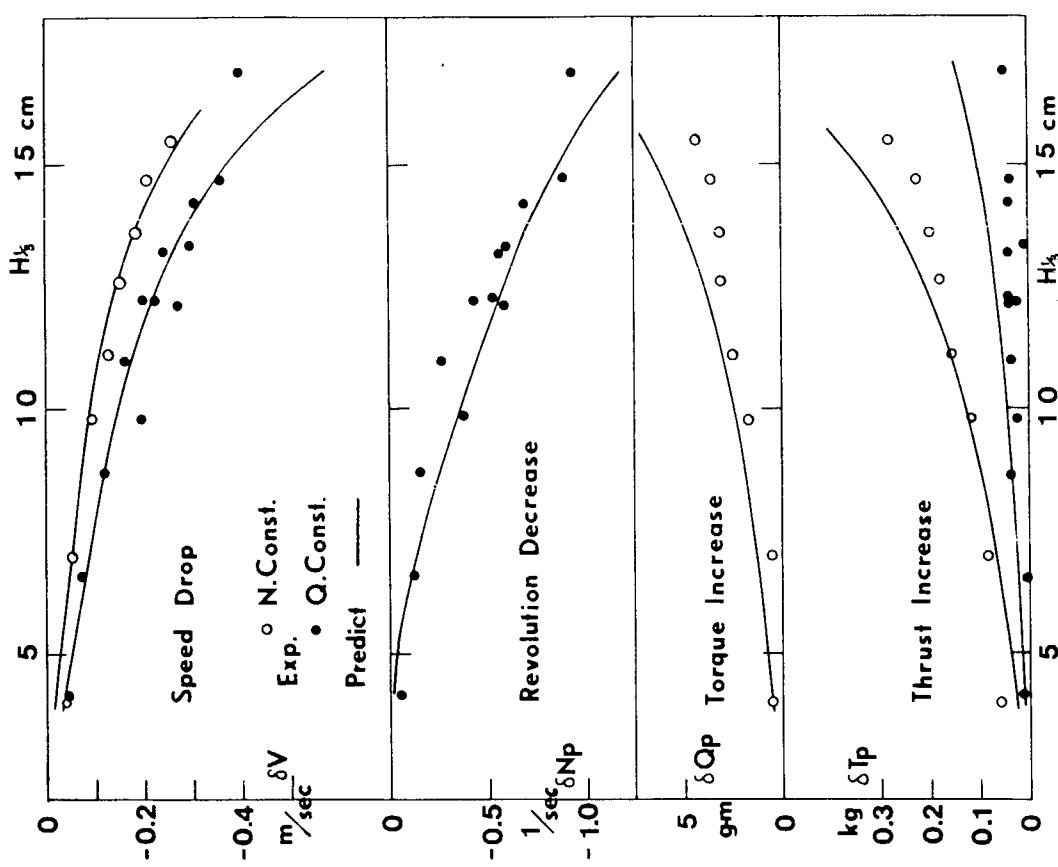


Fig. 4.3 Comparison of measured and computed speed drop in irregular head waves.  
(Model A, Normal condition)

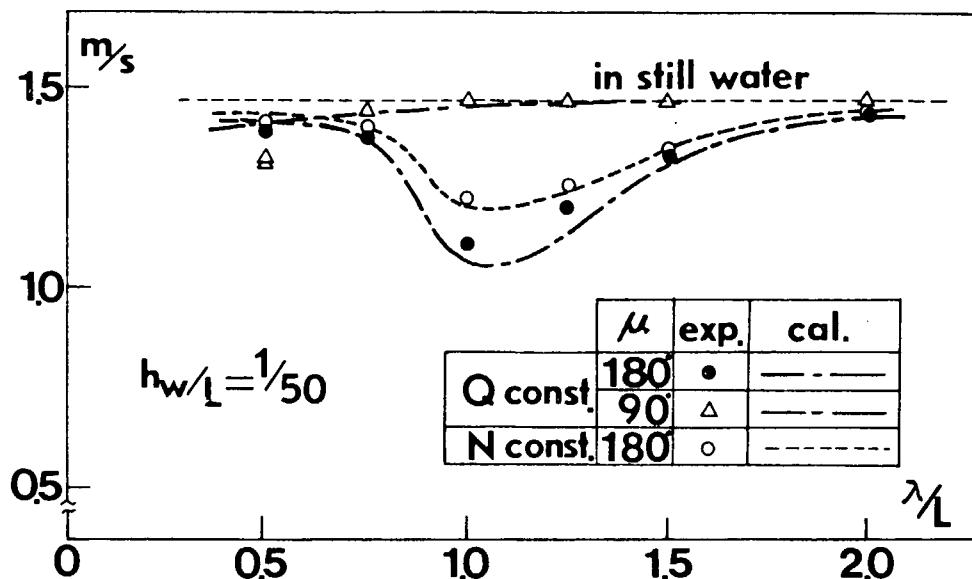


Fig. 4.4 Comparison of measured and computed speed drop in regular head waves.  
(Model C, Full load condition)

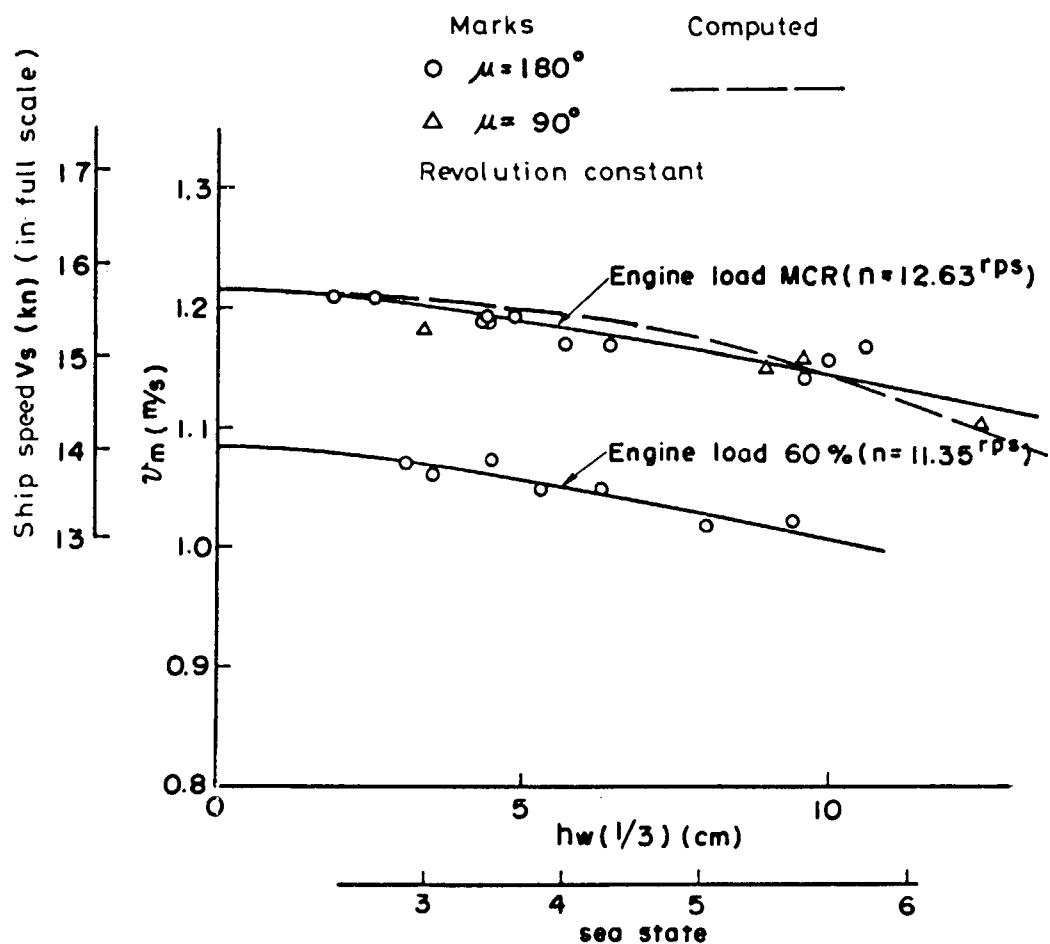


Fig. 4.5 Comparison of measured and computed speed drop in irregular head waves.  
(Model B)

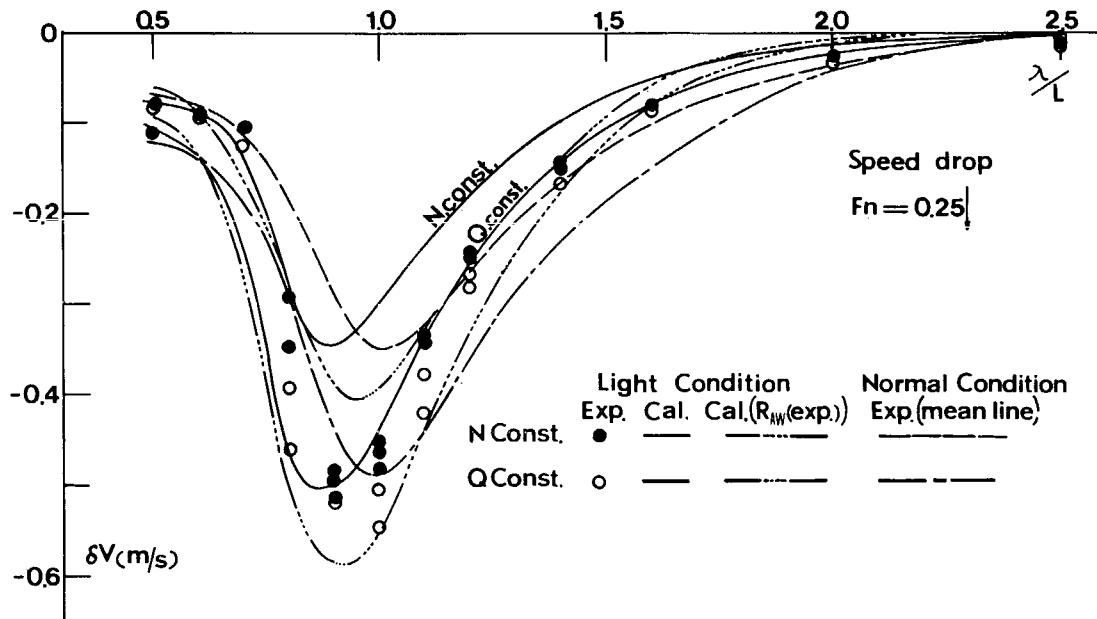


Fig. 4.6 Comparison of measured and computed speed drop  
in regular head waves.  
(Model A, Light condition)

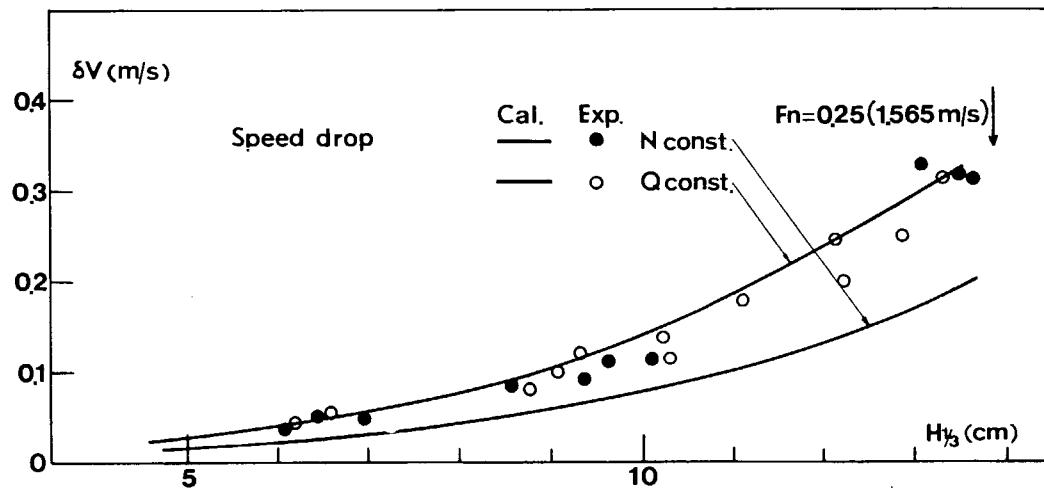


Fig. 4.7 Comparison of measured and computed speed drop  
in irregular head waves.  
(Model A, Light condition)

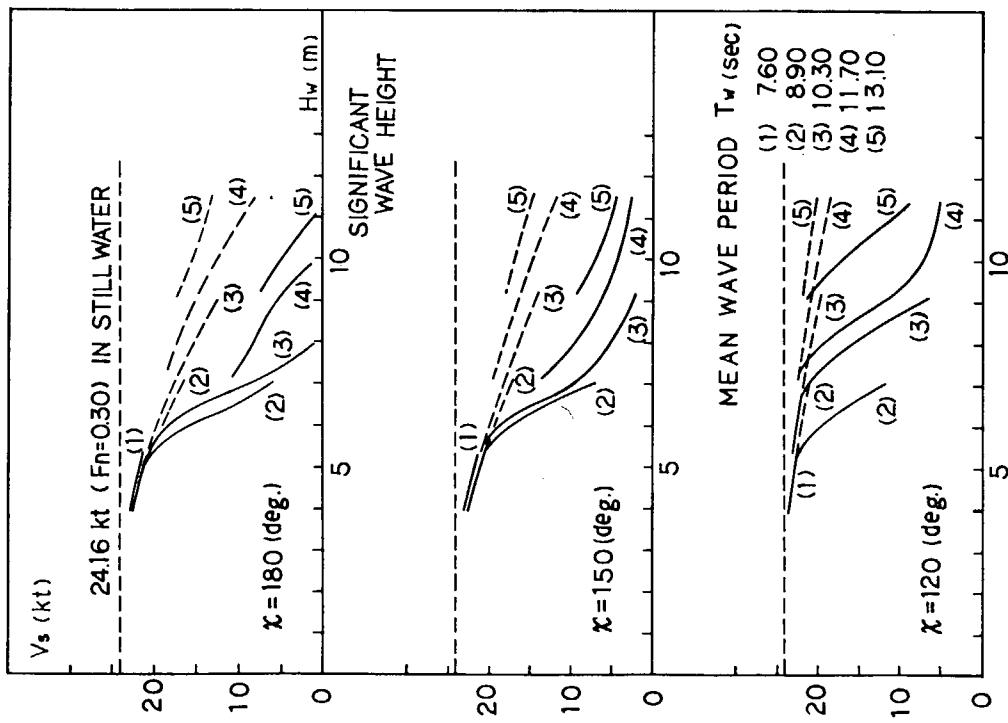


Fig. 4.8 Calculation of speed drop in irregular oblique waves. (SR108 container ship)

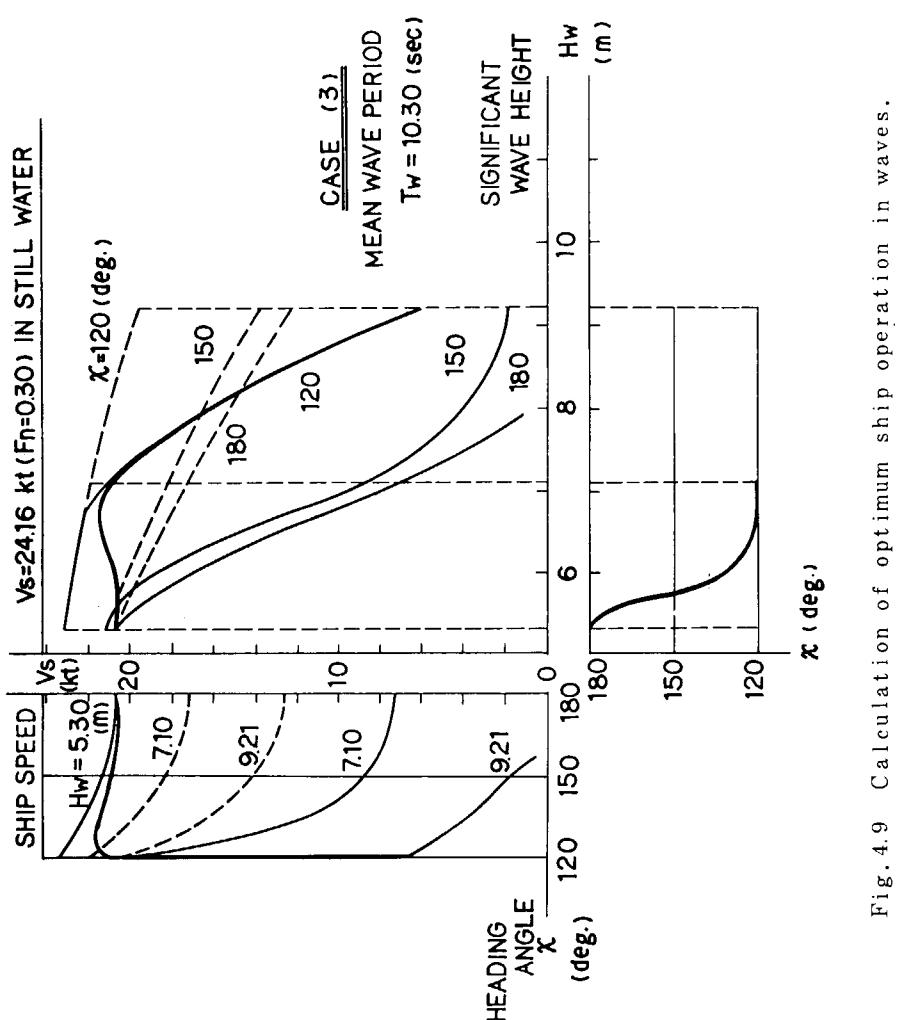


Fig. 4.9 Calculation of optimum ship operation in waves.  
(SR108 container ship)

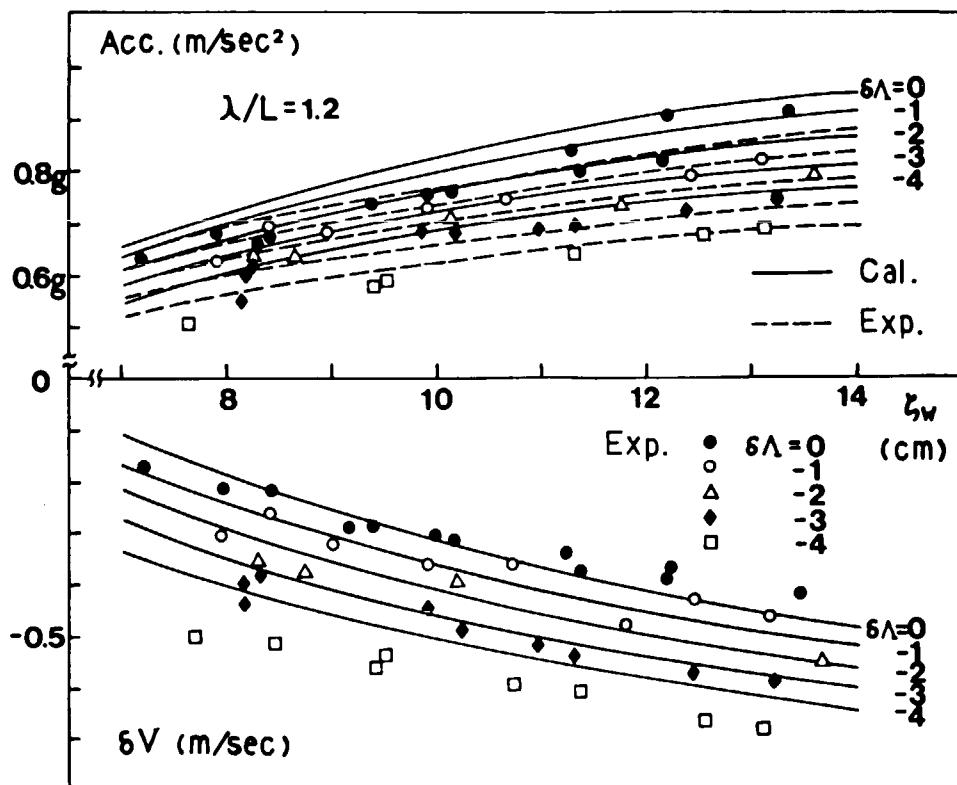


Fig. 4.10-1 Comparison of measured and computed deliberate speed loss in regular head waves. ( $\lambda/L=1.2$ )  
(Model A, Normal condition)

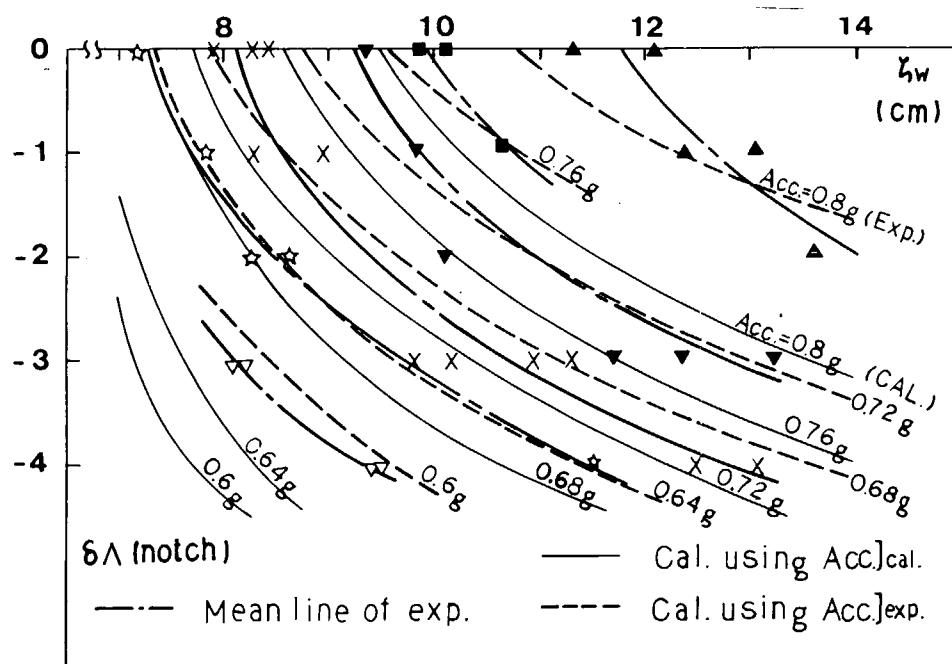


Fig. 4.10-2 Comparison of measured and computed deliberate speed loss in regular head waves. ( $\lambda/L=1.2$ )  
(Model A, Normal condition)

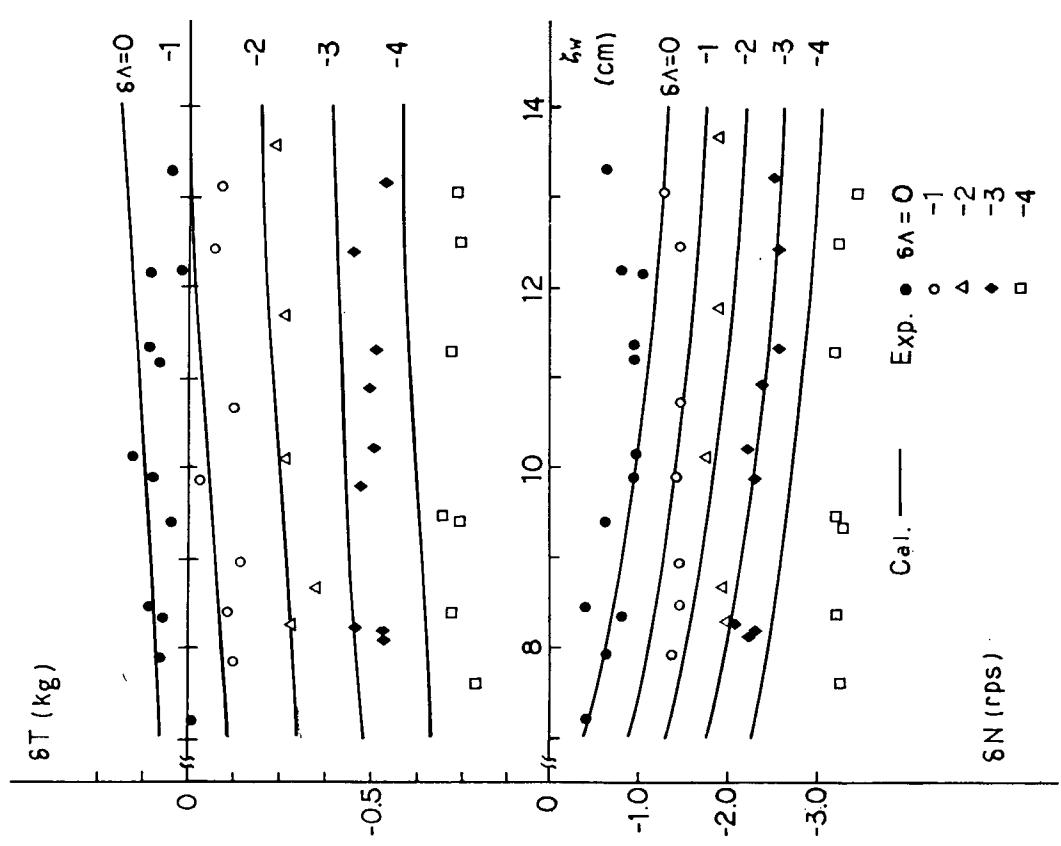


Fig. 4.11

Comparison of measured and computed mean increases of propeller thrust and revolutions. ( $\lambda/L = 1.2$ )  
(Model A, Normal condition)

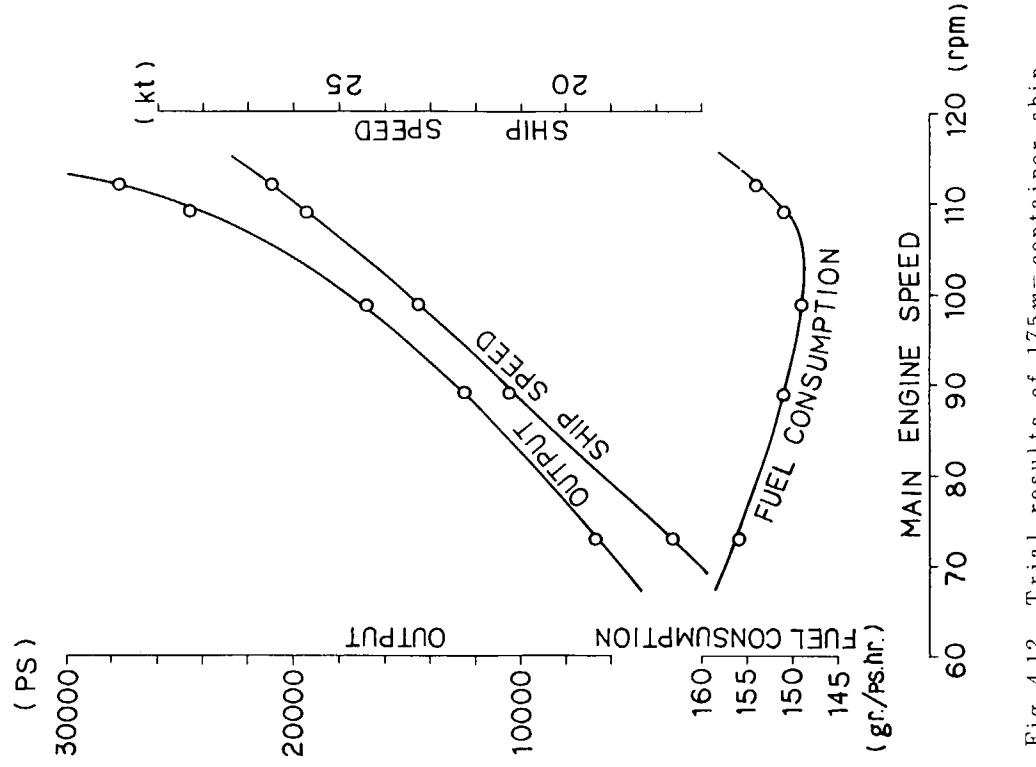


Fig. 4.12 Trial results of 175m container ship.

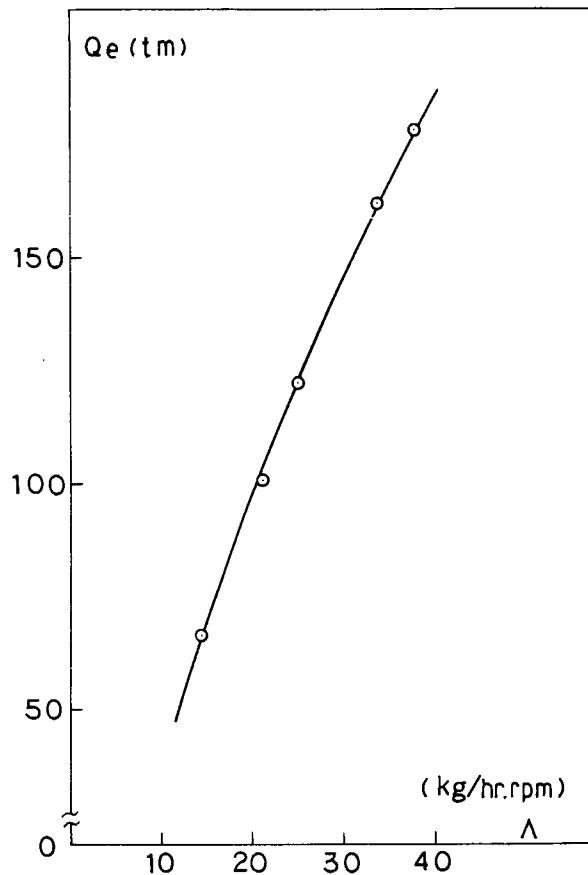


Fig. 4.13 Relation between engine torque and fuel consumption.

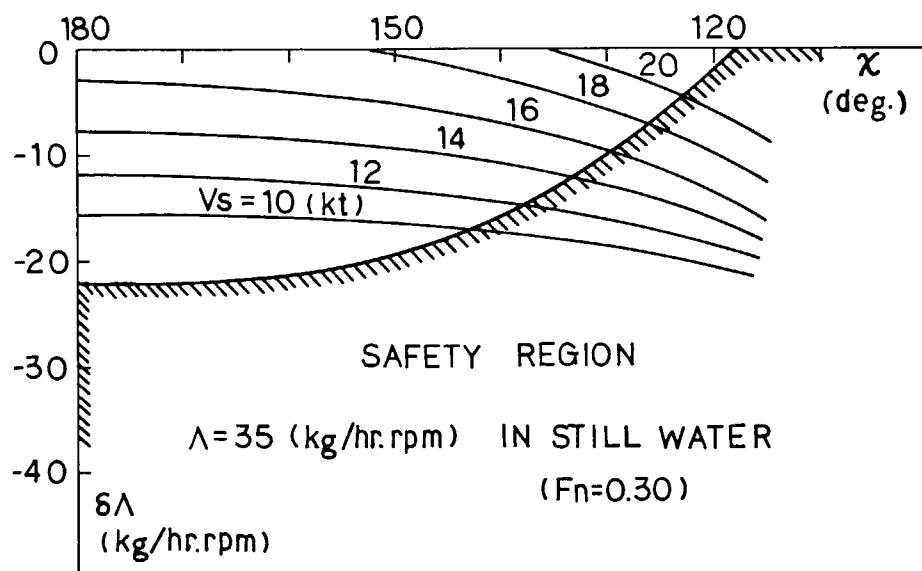


Fig. 4.14 Relation between heading angle and fuel consumption at critical speed.

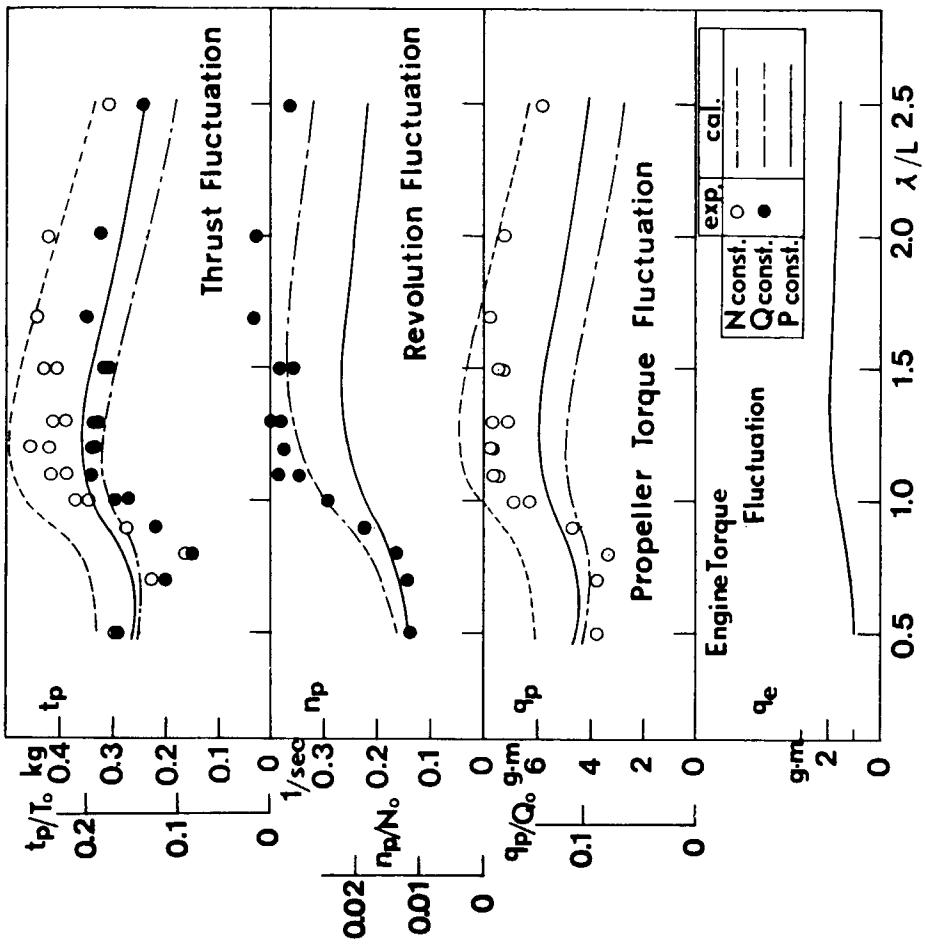


Fig. 5.1 Comparison of amplitudes of propeller load fluctuations in regular head waves between experiments and calculations.  
(Model A, Normal condition)

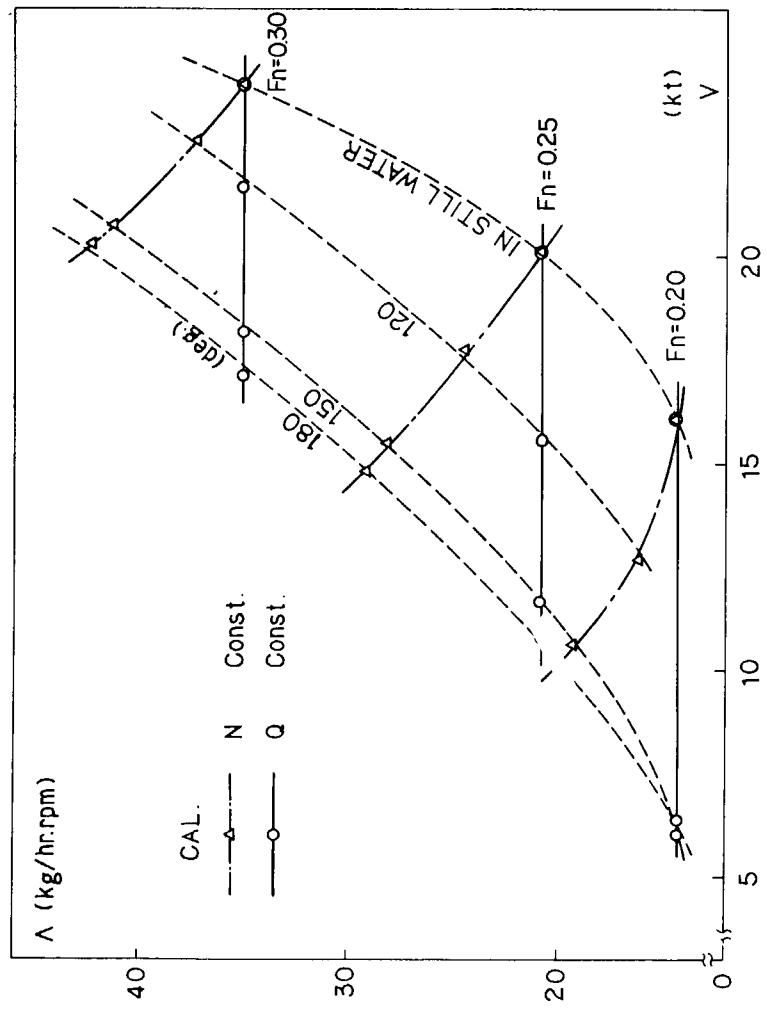


Fig. 4.15 Relation between ship speed and fuel consumption.

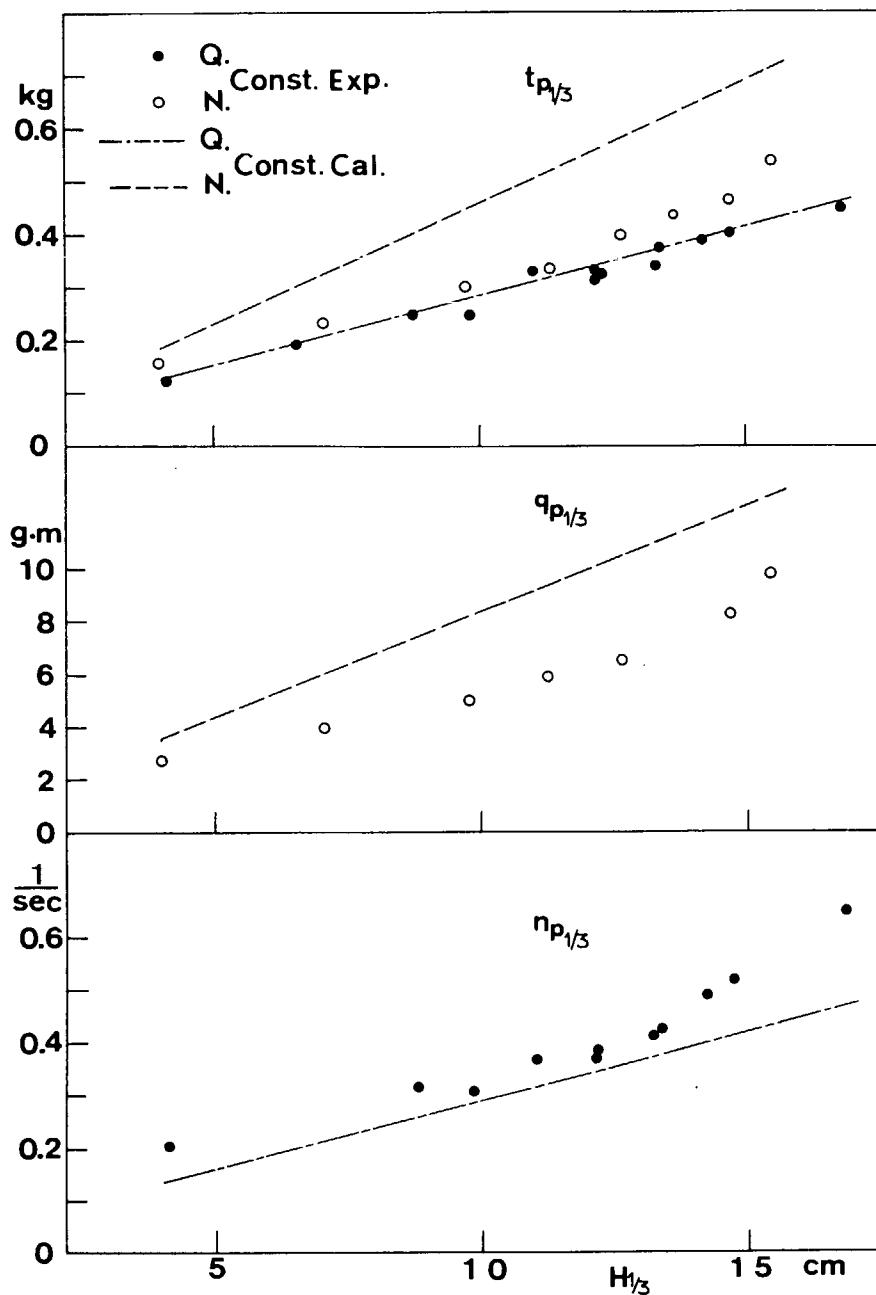


Fig. 5.2 Comparison of significant values of propeller load fluctuations in irregular head waves between experiments and calculations.

(Model A, Normal condition)

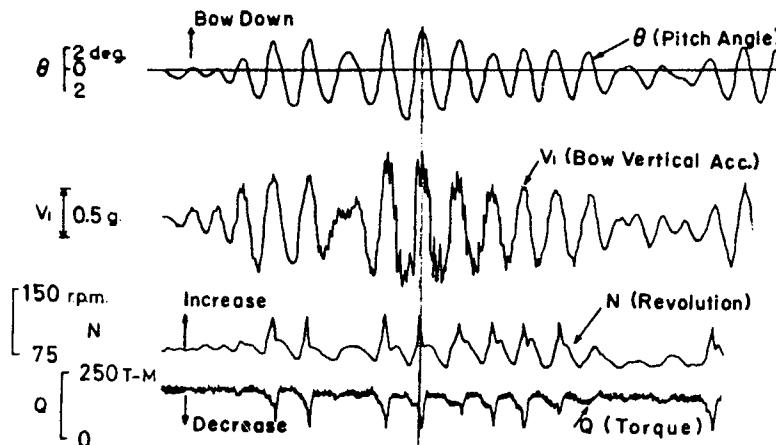


Fig. 6.1 Example of records of propeller load fluctuations at racing condition.  
(HIKAWA-MARU, 2nd voyage)

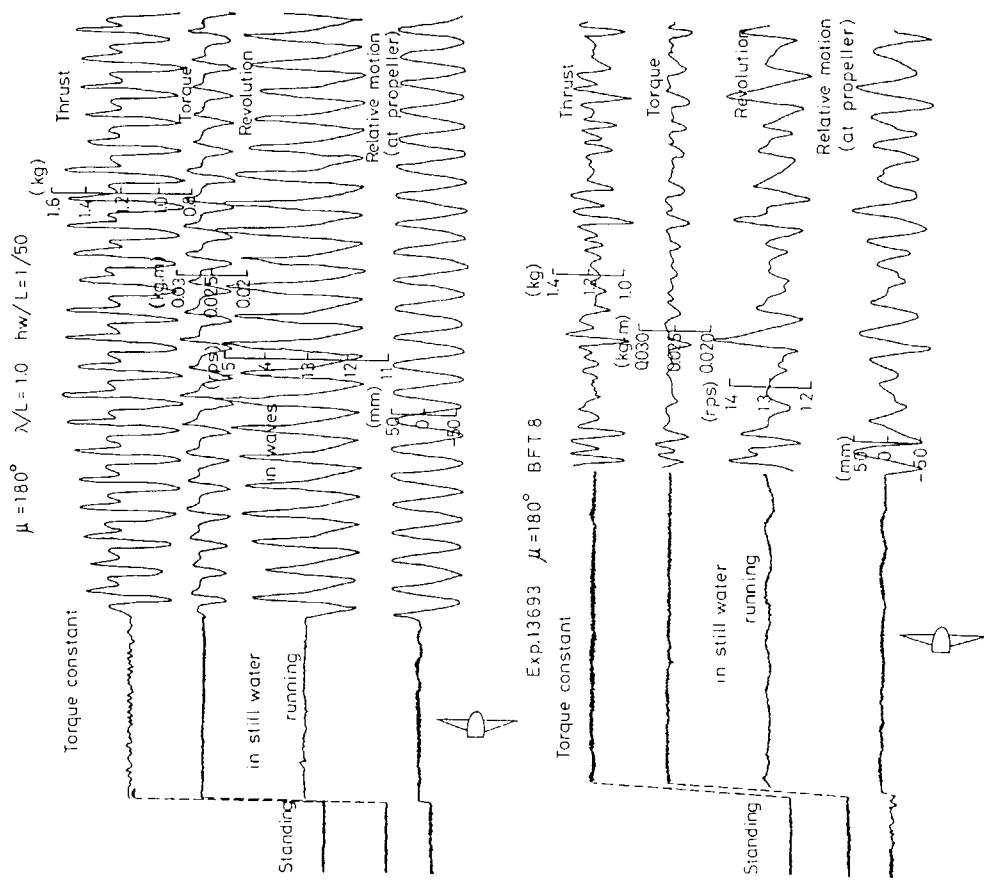


Fig. 6.2 Example of records of propeller load fluctuations at racing condition.  
(Model C, Light condition)

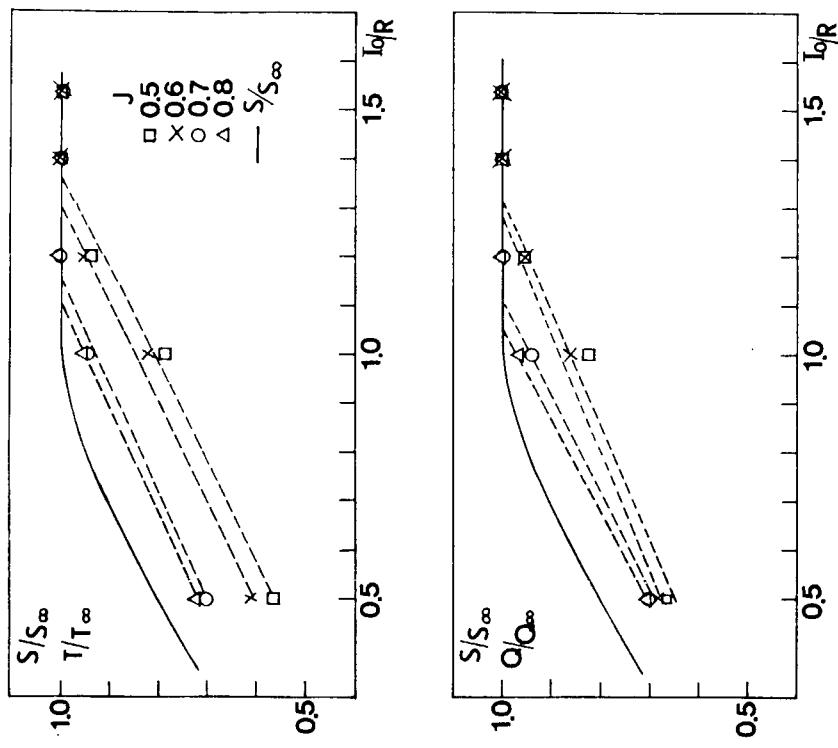


Fig. 6.3 Relation between propeller immersion and ratio of propeller load at shallow immersion to that at deep one.

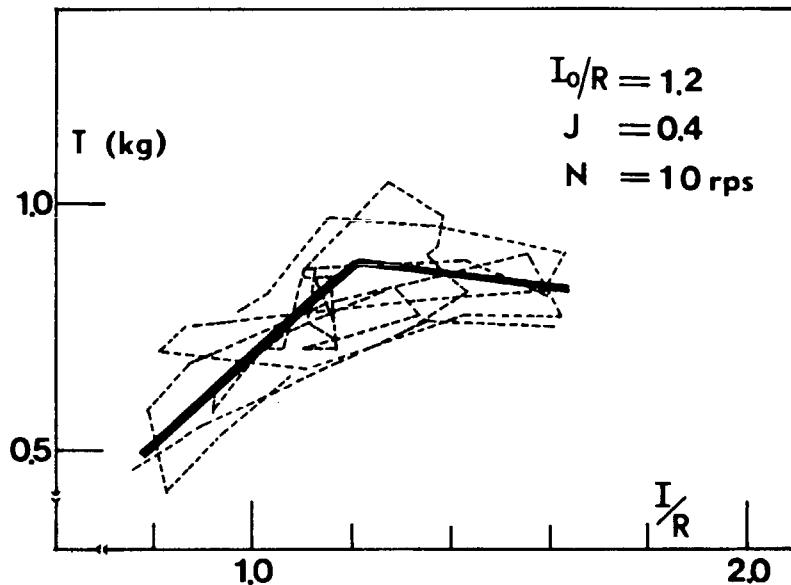


Fig. 6.4 Relation between propeller thrust and immersion at open water tests in irregular waves.

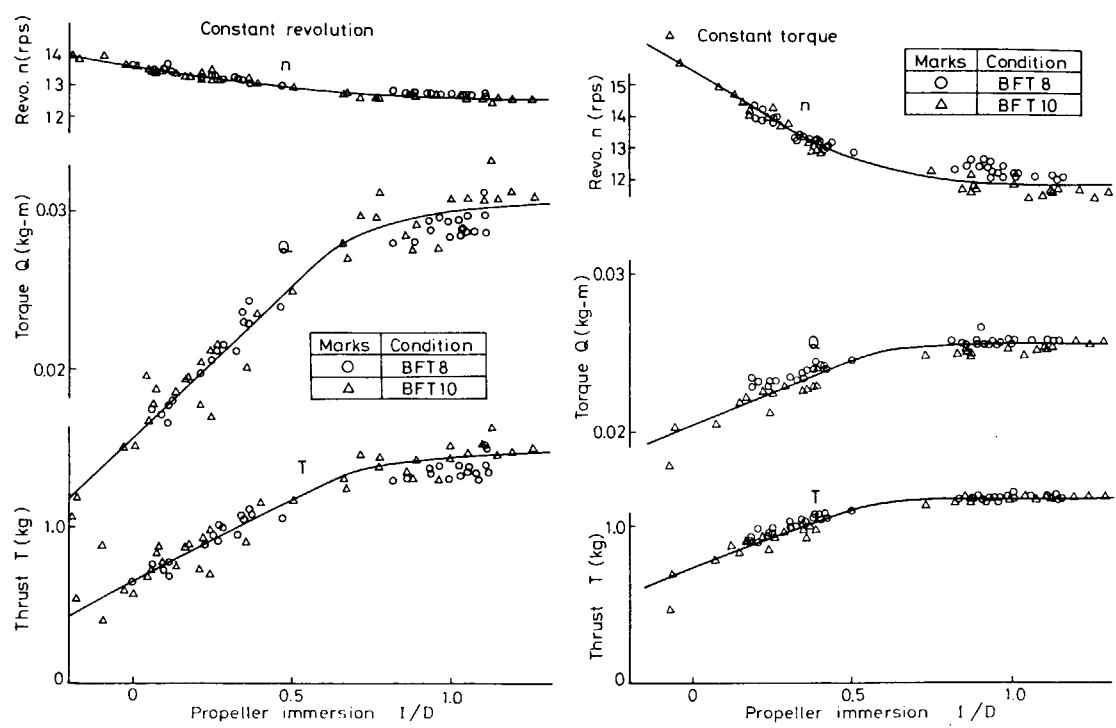


Fig. 6.5 Instantaneous values of propeller thrust, torque and revolutions versus propeller immersion.  
(Model C, Light condition)

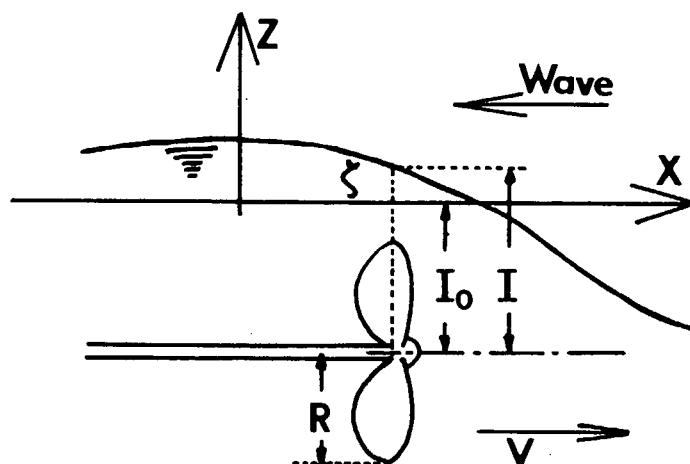


Fig. 6.6 Co-ordinate system and definition.

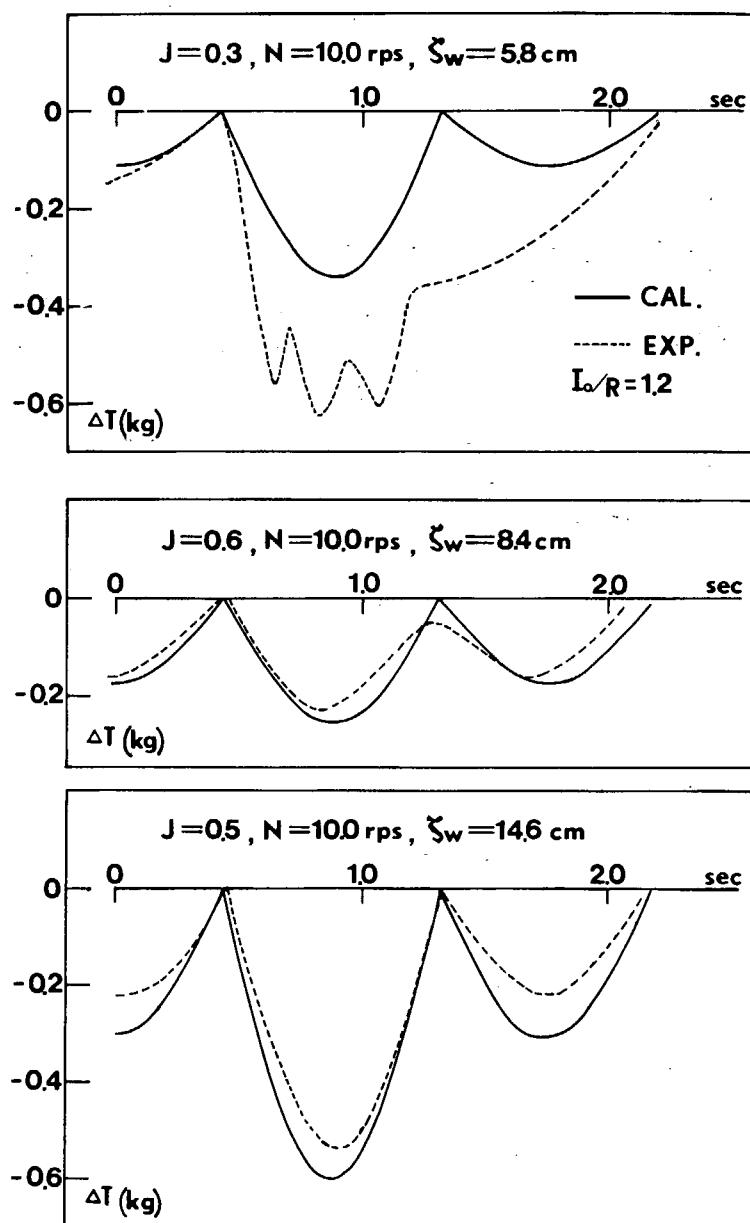


Fig. 6.7 Comparison of time histories of propeller thrust fluctuation at racing condition between experiment and calculation. (open water condition)

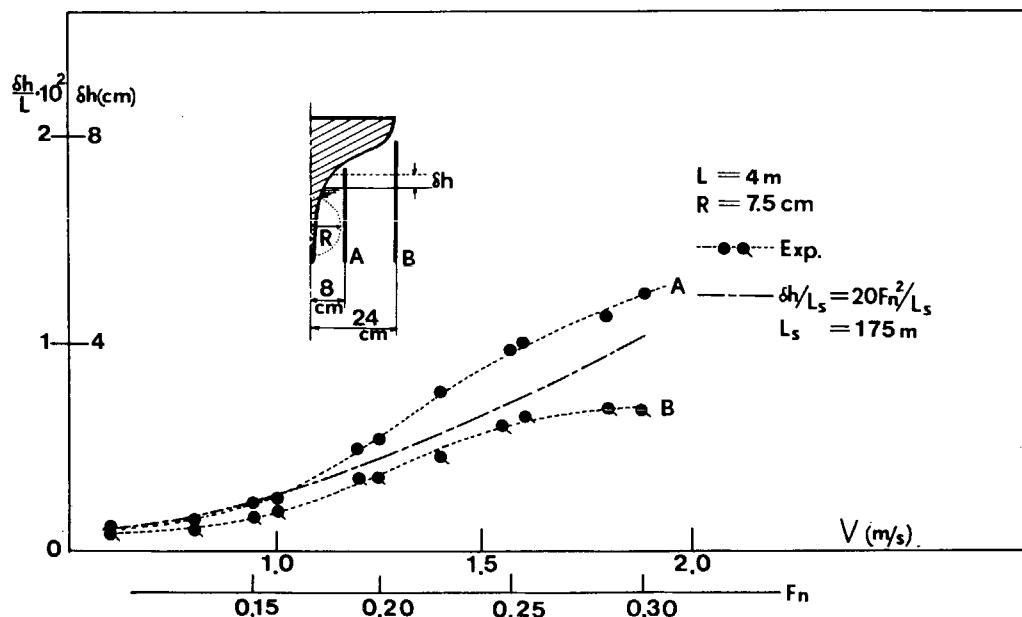


Fig. 6.8 Swell up of water level at propeller position.

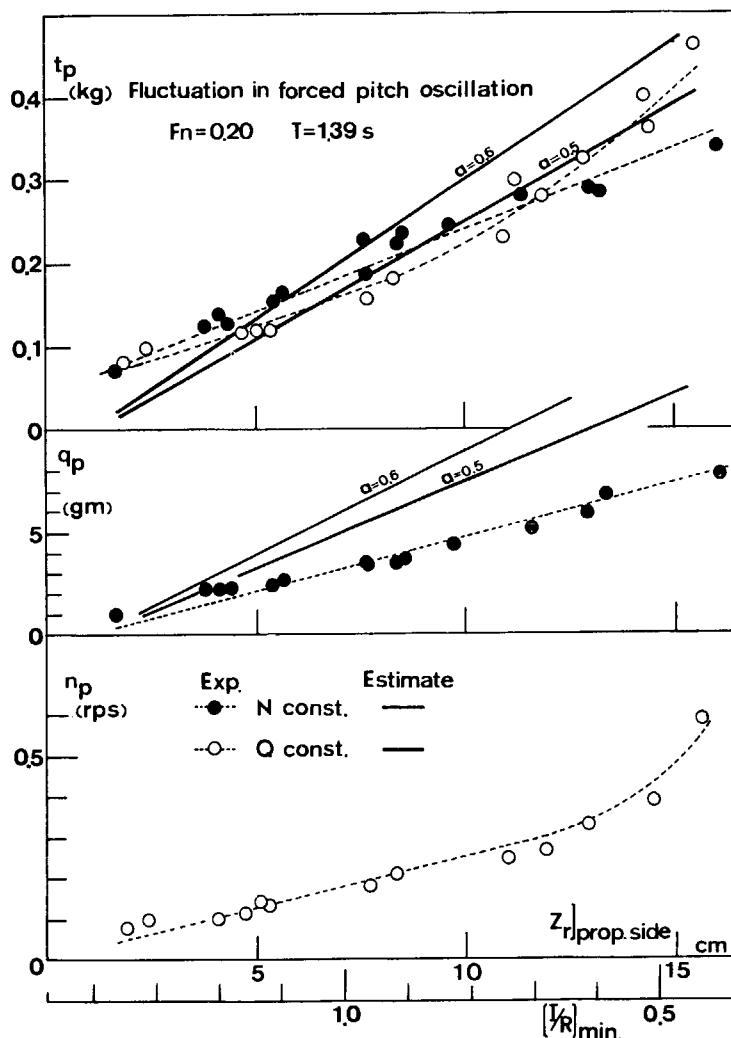


Fig. 6.9 Propeller load fluctuations in forced pitch oscillation.  
(Model A, Light condition)

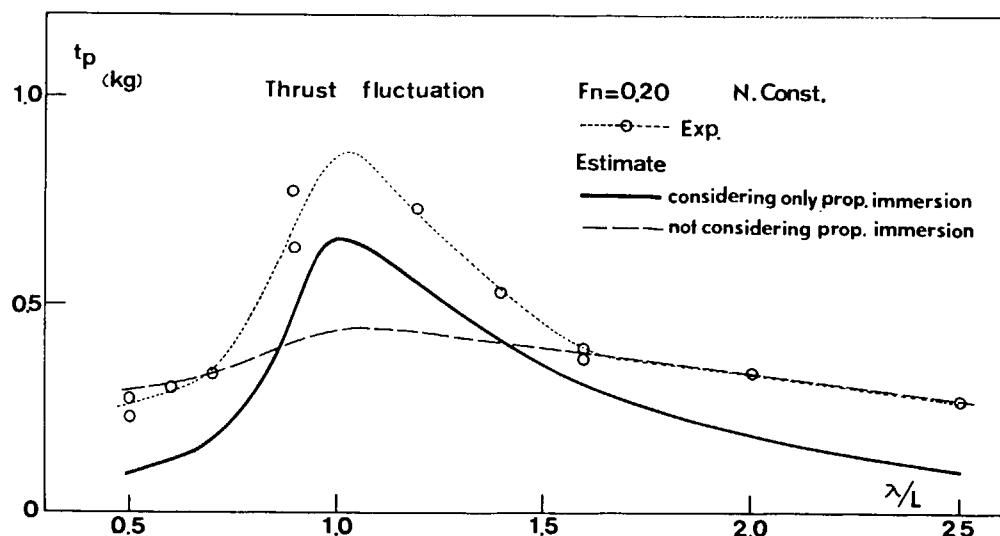


Fig. 6.10-1 Comparison of measured and computed propeller thrust fluctuations in regular head waves.  
(Model A, Light condition)

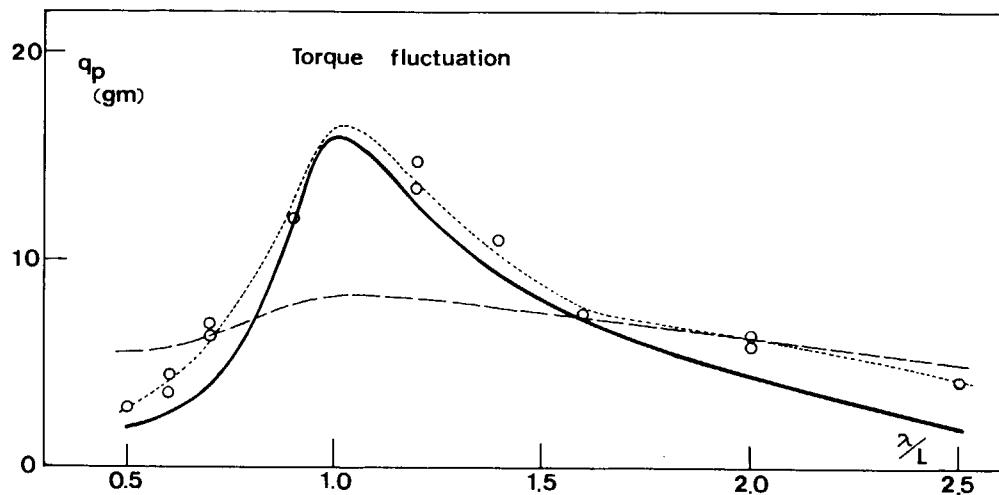


Fig. 6.10-2 Comparison of measured and computed propeller torque fluctuations in regular head waves.  
(Model A, Light condition)

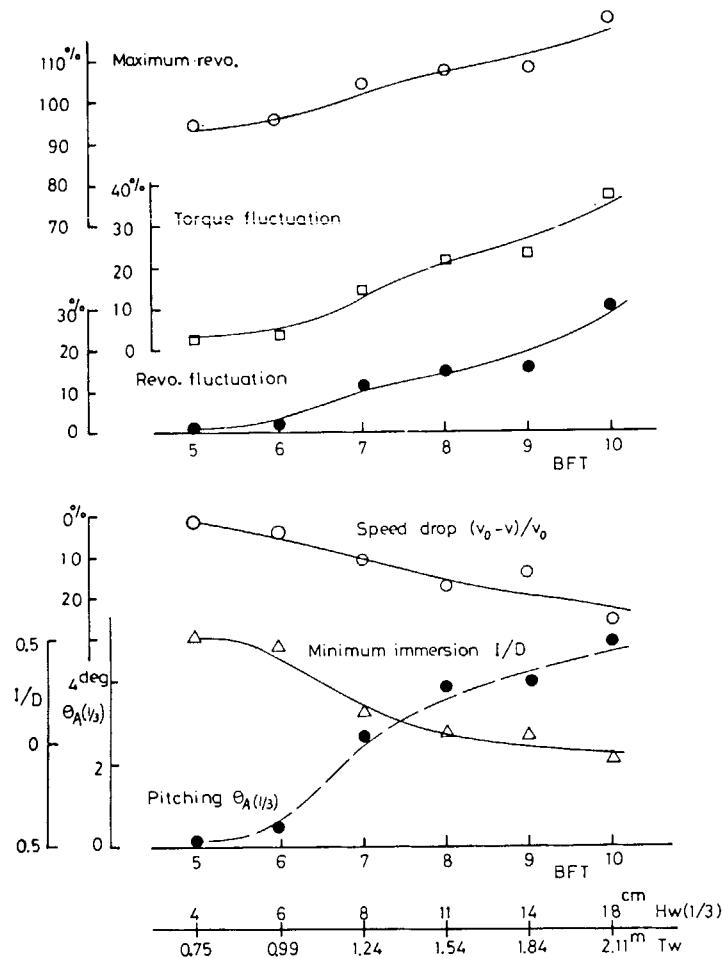


Fig. 6.11 Result of experiments in irregular head waves.  
(Model C, Light condition)

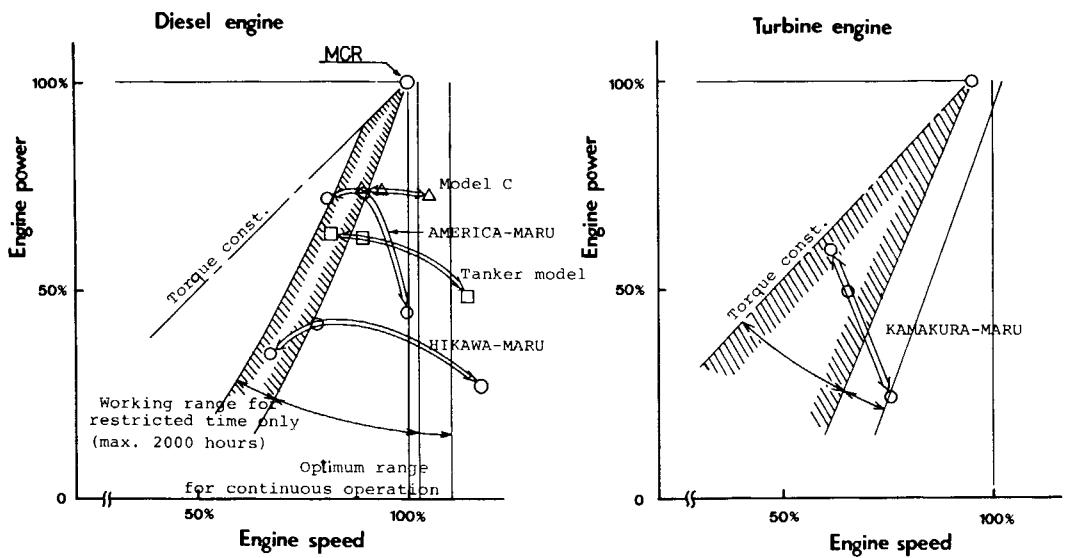


Fig. 6.12 Engine performance plane.