

第 211 研究部会

中型ばら積貨物船の高性能化に 関する研究

成 果 報 告 書

平成 5 年 3 月

社団法人 日本造船研究協会

は　し　が　き

本報告書は、日本船舶振興会補助事業として、日本造船研究協会第211研究部会において平成2年度から3カ年計画で実施した「中型ばら積貨物船の高性能化に関する研究」の成果をとりまとめたものである。

第211研究部会委員会名簿

(敬称略、順不同)

部会長	高橋 肇(元東京商船大学)(H.2~4)
代表幹事	田添 英士(大島造船所)(H.2~4)
委員	大楠 丹(九州大学)(H.2~4) 高木 幹雄(広島大学)(H.2~4) 内藤 林(大阪大学)(H.2~4) 北川 弘光(船舶技術研究所)(H.2~4) 渡辺 巖(船舶技術研究所)(H.2~4) 田中 拓(日本造船技術センター)(H.2~4) 青木伊知郎(大島造船所)(H.2~4) 萩野 繁之(サノヤス・ヒシノ明昌)(H.2~4) 久田 靖二(常石造船)(H.2~4) 田井 祥史(今治造船)(H.2~4) 岡田 利治(尾道造船)(H.2~4) 荘田 雅信(カナサシ)(H.2~4) 原嶋 啓剛(幸陽船渠)(H.2~4) 浜田 克明(佐世保重工業)(H.2~4) 高津 浩治(新来島どっく)(H.2~3) 河野 一(名村造船所)(H.2~4) 藤原 一志(新来島どっく)(H.4) 福味 誠(三保造船所)(H.2~4) 成田 征(函館どっく)(H.2~4)
オブザーバ	宮村 弘明(海上技術安全局)(H.2~4) 池淵 義昭(日本造船技術センター)(H.2~3) 大野 勝利(日本造船技術センター)(H.4)

第211研究部会幹事会名簿

(敬称略、順不同)

主査	田添 英士(大島造船所)(H.2~4)
	高橋 肇(元東京商船大学)(H.2~4)
	高木 幹雄(広島大学)(H.2~4)
	田中 拓(日本造船技術センター)(H.2~4)
	萩野 繁之(サノヤス・ヒシノ明昌)(H.2~4)
協力者	橋本 美貴(サノヤス・ヒシノ明昌)(H.2~4)
オブザーバ	宮村 弘明(海上技術安全局)(H.2~4) 池淵 義昭(日本造船技術センター)(H.2~3) 大野 勝利(日本造船技術センター)(H.4)

()内数字は就任年度を示す

討議参加者

(敬称略、順不同)

塩田 昭男(日本造船技術センター)	大出 明(尾道造船)
西村 宗一(サノヤス・ヒシノ明昌)	佐野 晴彦(新来島どっく)

目 次

1. 緒 言	1
2. 主要目等分布の調査	2
3. 航海性能の調査	3
3.1 平穏な海象の出現頻度の調査	3
3.2 Sea margin の調査	3
4. 短波長中の抵抗および馬力の調査	5
4.1 シリーズ船型の構成	5
4.2 模型船型の概要	5
4.3 抵抗増加計測結果	6
4.4 馬力増加計測結果	7
4.5 理 論 計 算	7
4.5.1 解析法の概要	8
4.5.2 解 析 結 果	8
5. 運航性能の改善	9
6. 結 言	10

1. 緒 言

ばら積貨物船は、油送船に次いで船腹量の多い主力船種であり、平成3年度では世界の船腹量436百万G Tの内、26.3%を占めている（油送船は31.9%）。

一般に、船の推進性能の研究は、平水中性能の改善が主テーマで、ここでは主機馬力の削減が主要な目的となっている。このため航海中の性能を軽視すると馬力余裕が少なく、海洋波の影響を受け易い船型になってくる。ばら積貨物船にも同様な傾向があつて、平水中の推進性能の改善が、航海中で速力維持が困難な船型を生む可能性があつて、両者はバランスよく研究されねばならない。

海洋波の影響は、大型船より中・小型船に著しいので、ばら積貨物船についても、中型船の航海中の性能改善の研究が緊急な課題と考えられた。

ここで中型ばら積貨物船とは、2万D Wから6万D Wのパナマックス型を一応の対象と考えているが、このような中型ばら積貨物船は、中手の造船所において1970年代から多数建造されており、平成2年から4年までの統計では、国内建造ばら積貨物船の73.6%（歴年、建造許可隻数ベース）が主に中手造船所で造られている。

このようなことから、中型ばら積貨物船について、航海中の推進性能の改善を研究するに当たり、造工・中手造船所を中心として研究をすすめることとなり、平成2年度を初年度とする3年計画で実施され、所期の成果をあげることができた。

3年間に実施された研究の構成をフローに示すと、図1の通りである。

委員会で実施された主な調査・研究の内容は、最初に近年の中型ばら積貨物船船型の傾向を調べ、母船型を選択した。次に、日常の航海中の性能を知るために、短波長（規則波向い波）中の抵抗増加および馬力増加を計測するための試験法の調査およびシリーズ模型船型12隻の計画を行い、長さ4.5mの模型船による波浪中試験を実施して、船型要素の変化、喫水等が抵抗増加、自航要素に及ぼす影響を調べた。さらに、船体運動、抵抗および馬力増加を計算する方法を調査し、水槽模型船型を含む合計25隻の計算を行い試験結果等と比較することによって、計算法を改善した。

また、航海中の性能の実態を把握するために、中型ばら積貨物船10隻の航海日誌を収集し、解析した。最後に、上記の資料を取りまとめると共に、Bales-高木の統計的計算法を用いて、波浪中抵抗増加の少ない中型ばら積貨物船型を求め、模型試験によってその成果を確かめた。本報告では、この全体を説明する余裕がないので、主に図1に見られる流れに沿って、要点を述べる。

なお、本研究において日常の航海で遭遇する海象とは、最長の波長が船長程度 ($\lambda / L_{pp} < 1.0$) で、波高も波長の1/50以下の場合を考えており、いわゆる短波長中の問題を重視している。波長が船長の半分程度の短波長で、波高も小さい穏やかな海象では、船体運動はほとんど発生しないが、本研究の結果からも判るように、波浪による抵抗増加係数は、荒海中だけではなく、日常の海象の中ですでに相当な値に達しており、船型研究には平水中だけでなく、日常運航中の性能も重視されなければならないことが注目される。

本研究は、SR211研究部会（部会長 高橋 肇 元東京商船大学教授）で実施された。同研究部会は、造工・中手造船所12社が中心となり、大阪大学、広島大学、九州大学、船舶技術研究所の各委員のご指導を頂き、(財)日本造船技術センターの協力によって行われた。

2. 主要目等分布の調査

本研究の期間中に調査、研究できる船型の数および主要目の範囲は限られているので、効率よく模型試験等のデータを収集して、汎用性のある研究成果を得るには、この研究が対象とする船型群の構成を十分に検討する必要がある。

このため、中型ばら積貨物船について近年の主要目上の特徴、分布等を調べる目的で、本研究委員会参加造船所各社の協力を得て、50隻余の中型ばら積貨物船の主要目、10隻の航海日誌の資料を収集して調べた。

この傾向を見ると L_{pp}/B は 5.5～6.0 の間に、 B/d は 2.25～2.75 の間に、 C_B は 0.78～0.82 の間に、また ℓ_{CB} は -1.5 ～ -2.5 の間に多く分布していることが判る。航海速力は、約 13.5～15 knot に広く分布しているが、フルード数 (F_n) は 0.17～0.19 に集中しており、肥大船型としてはやや高速の部類であることが判った。

また調査対象とした船の長さ、載貨重量の分布は図 2 の中に示されているが、これらの相関を取ると図 3 に示すように、船の大きさ (DW) に対し一定の傾向があることが、よく示されている。しかし、図 4 に示すように、主要目比等と船の大きさの関係は明確と言えない。

また、図 2 には、竣工年代の分布も示されており、1982 年から 1986 年が多く、特に 1984 年頃のいわゆる造船ミニブーム時代に建造された船型が、資料には多数含まれていることが判る。載貨重量を (35,000～50,000) Ton および (15,000～35,000) Ton に分けて、 L/B および C_B の 1970 年以降の変遷を図 5 に示した。 C_B には特別の傾向は見られないが、 L/B については、幅広化の傾向が示されており、小型船の方が著しい。なお、図表は省略しているが、フルード数および主機出力も、年とともに低下しており、近年のばら積貨物船の船型開発は、低速化並びに省エネ化の傾向を背景としていることがうかがえる。

主要目相互の相関を調べることも重要であり、特に ($L/B \sim B/d$) および ($C_B \sim L/B$) には、重要な傾向が見られるが、これらは、後にシリーズ船型試験および航海日誌調査の対象船の分布を示す場合に重複して用いられるので、ここでは省略する(図 6、図 16 および図 17 参照)。

以上は、中型ばら積貨物船の船型を具体的に理解し、資料作成の目的を明確に示す目的で実施した調査結果であるが、今後の性能調査の中心となる本研究の母船型もこの資料を用いて定めた。即ち、本調査のなかでは、主要目を支配している要素が載貨重量であることに着目し、まず全データの平均載貨重量を約 38,600 DWT とした。次にこれに近い大きさの船 12隻を抽出して、12隻の平均に最も近い船を選んで母船型とした。

12隻の主要目比の平均と母船型の主要目比を比較して、表 1 に示した。また母船型に選択した船舶は、先の図表中で、“黒三角”で示されている。母船型は、やや C_B が大きい方に属するが、波浪中の運航性能は肥大船型に問題が多く、適当な選択と考えている。

3. 航海性能の調査

先に述べたように、本研究は、中型ばら積貨物船が遭遇する、最も日常的な海象における性能の改善を目的としている。研究の企画としては、平水中でなく荒海中でもない、比較的平穏な波浪中性能を想定しており、いわゆる短波長中の推進性能の改善に着目している。肥大船型についての短波長中の抵抗増加、馬力増加等の推定に役立つ既存の資料は、極めて少ないのでなく、この海象中の船の運航について調査した報告も乏しい。このために、本研究では、波浪中における模型試験、計算等と並行して、航海日誌を解析し、中型ばら積貨物船の運航の実態を知ることに努めた。

航海日誌(logbook)を調査した中型ばら積貨物船は10隻で、A丸、B丸……K丸(E丸欠番)と名付けているが、その主要目等の分布を図6に示した。なお、航海日誌の収集については、海運関係者のご協力によって可能となったもので、図7にA丸、F丸の例を示すように航路が不特定であり、調査に係わる条件は統一されていない。

以下に、本調査で得られた中型ばら積貨物船の運航状況について説明する。

3.1 平穏な海象の出現頻度の調査

最初に、本研究が検討の対象としている、短波長を主とした平穏な海象に船舶が遭遇する頻度について調査した結果を述べる。beaufort scale(BS)3以下を仮に平穏な海象と考えると、各船の全航海日数に対する平穏な航海日数の割合は、下表の通りであった。

A丸	B丸	C丸	D丸	F丸	G丸	H丸	I丸	J丸	K丸
43%	2%	32%	14%	25%	9%	26%	21%	18%	17%

(BS 3は、風速3.4~5.4 m/s)

航路、季節が一定しないので、平穏日の率は一定しないが、これを頻度分布で見ると図8の通りである。先に述べたように、本研究では、波長が船長以下、波高が波長の1/50を調査の主要な対象(短波長域)としているので、これをBS 5~6以下と考えると、A丸、B丸、G丸およびH丸の例では、半分以上の航海日が、短波長域にあると考えられる。

3.2 Sea margin の調査

Sea margin(S.M.)の定義は、調査目的によって異なる場合もあるが、ここでは新造時平水中推進性能の所要馬力(P_o)からの運航中の所要馬力(P)の増加率のパーセントと定義した。

$$S.M. = \frac{P - P_o}{P_o} \times 100$$

Sea marginの主な要因は、一般に

- (1) 船体、主機、プロペラの経年影響
- (2) 船体、プロペラの汚損影響
- (3) 波浪を主として、海流、風等の海象影響

に分類できて、これをモデル化すると図9のように示すことができる。

本研究で用いた波浪Sea margin算出の要領を簡単に述べると、航海記録から、海流修正後の対地船速を求め、1日または港間の平均燃料消費量から平均の主機馬力を算出すると、(1)~(3)の要因を含んだ1日または港間の平均Sea marginを求めることができる。

このSea marginに含まれる(1)および(2)の影響は、BS 3以下の平穏な海象下のSea marginで推定することができる。図10は、A丸の場合で、A丸の船底塗装には、在来型の防汚塗料が用いられている。他の船のSPC塗料の場合も調査

したが、全船が就航後比較的短期間のデータであるため、SPCの効果は明確にならなかった。このため解析には全船とも年率20%の割合で船底汚損マージンが進行すると仮定して作業をした。

解析結果の例を示すと、図11がA丸の航海平均の全マージンおよび波浪マージンである。この図には、入渠船底清掃の効果も示されている。また、図12は、A丸におけるbeaufort scaleとSea marginの関係を示している。この図には、A丸の1日平均のSea marginをプロットし、A丸の平均線に加えてB丸、G丸およびH丸の同種のデータの平均線も比較のために記入してある。各船の特色を示すと、A丸に比較してB丸は C_B が小さく、G丸は風圧面積が大きく、またH丸はA丸と主要目が似ている。

また航海日誌データからbeaufort scaleベースの船速特性を算出したが、A丸の例を図13に示した。この図には、向波中の近東から満載復航中のデータを用いており、船底汚損影響の修正を行っている。図中、置点は一日平均値を示し、点線はその平均線、実線は理論計算値であるが、これについては4章で説明する。

以上によって、A丸を中心としてSea marginに関して調査した事項を述べた。しかし、Sea marginに関する要因は、極めて複雑であって簡単に整理のつくものではない。それ故、主機の余裕出力を15~20%とするガイドラインが慣用として使われるが、一般に認められているように、実績平均値としてのSea marginと比較すると、明らかに過少である。

Sea marginに関する船舶の運航の実態と考え方の間のギャップについては、委員会においても論議された。現在用いられている、設計者の立場から考えたPower margin（主機の余裕出力計画）と並行して、船舶の運航者の立場に立つ、運航スケジュールの確保のための速度マージンの検討も重要であると考えた。

後者については、細田等⁽¹⁾によって信頼性工学の立場から研究されており、統計理論を導入した新しい手法が用いられている。本研究で得られた資料に基づき若干の検討が行われたが、精度のよい結論を得るには、更に船速低下の推定、航路海象、気象情報の蓄積に関する高度化の必要性が感じられる。

次章に入る前に、これまで波浪中推進性能、特に抵抗増加の研究のほとんどが、満載状態について行われている事実に注目しておきたい。これは、波浪中推進性能の研究は、理論的研究が中心で、設計の問題として扱われることが少なかった事情を反映しているものと思われる。しかし、ばら積貨物船の運航状態には、軽荷状態も多く、喫水変化と波浪中抵抗増加の間には無視できない関係があることを次章に示すことができる。

参考として、A丸の運航に関し、載貨状態の変化を図14に示した。今後、Sea margin等運航諸性能の取扱には、喫水変化を重要な要因として考慮に加えてゆく必要があると思われる。

4. 短波長中の抵抗および馬力の増加

前章の調査によって、中型ばら積貨物船に関し、短波長 ($\lambda/L_{pp} < 1.0$, $\zeta_w < \lambda/50$) 中の抵抗および馬力増加に係わる情報の収集が重要であることを示した。しかし既存の公表資料の中には、直接役立つものが極めて少ないため、本研究によって模型試験および計算を実施し、データベースを作成する計画を立てた。

4.1 シリーズ船型の構成

基礎となる船型群の構成は、5シリーズ10隻で、この他各シリーズの要となる母船型1隻と本研究の最後に実施した母船型の改良船型1隻を加えて、計12隻である。この内、母船型については、2章に主要目と船型を決定した経緯を述べた。母船型は、3年の間、使用に耐えるよう木製としたが、他はすべてパラウッド製である。母船型模型の写真を図15に示した。模型船の長さは、 $L_{pp} = 4.5\text{m}$ である。なお試験は、主として $F_n = 0.17$ の満載状態およびバラスト状態について行われたが、バラスト状態の排水量は52.35% FULL、トリム 0.56%である。

シリーズ船型の船体主要目は、短波長中の推進性能の影響を調べるために、母船型の船体主要目を系統的に変化させて構成した。選択した主要目は、短波長中での推進性能に明確な影響を与える可能性があるものとしたために、幾分現実的でない船型も含まれている。

(a) L/B シリーズ船型

平水中の性能において、著しい不安定現象が生じない範囲として、 $L/B = 5.50, 5.82$ (母船型), 7.00 および 8.00 の4点を選びシリーズを構成した。このとき、喫水は、母船型と同じとした。

(b) B/d シリーズ船型

調査結果を参考として、 $B/d = 3.45, 2.78$ (母船型) および 2.20 の3点を選びシリーズを構成した。このとき、船幅は、母船型と同じとした。

なお、本シリーズでは、喫水変化のため、プロペラおよび舵は母船型と異なっている。

(c) C_B シリーズ船型

調査結果を参考として、 $C_B = 0.82$ (母船型), 0.78 および 0.75 の3点を選びシリーズを構成した。このとき、船幅と喫水は、母船型と同じとした。

(d) C_{WF} シリーズ船型

母船型をベースに、母船型より C_{WF} を均一に増減させた3隻の模型船でシリーズを構成した。 C_{WF} は、0.89 (母船型), 0.876 および 0.906 である。このとき、 C_p カーブは、母船型と同じとした。

(e) バルブシリーズ船型

母船型と母船型のバルブを削った2船型でシリーズを構成した。

以上の5シリーズ船型群の内、 L/B , B/d および C_B シリーズの各船型の相互関係および調査船型群との関係を示す目的で、図16および図17に、($L/B - B/d$) および ($L/B - C_B$) の相関図を示した。

4.2 模型試験の概要

模型試験は、各模型船共通の標準試験および母船型を用いて行った短波長中試験法の調査の2種に大別できるが、この他若干の平水中の試験も行った。

模型試験の内容は、主に短波長中の抵抗増加試験および馬力増加試験である。これらは、平水中を航走したときの抵抗および伝達馬力からの増加分の計測を主目的としているが、船体運動、自航要素の解析も合わせて行った。

また、短波長中における肥大船型の抵抗増加成分が、実験的には十分な検証が行われていないところから、抵抗増加の総量の計測に加えて、増加の主成分である非定常造波抵抗（波形抵抗増加）の分離計測を行った。非定常造波抵抗の計測には、大楠⁽²⁾の方法を用いた。

この波形抵抗増加試験は、図18に示すように、8本の波高計を用いた波浪中後続波の縦切り計測波形（Longitudinal cut wave）をデータとして、平水中波形造波抵抗からの増加分を計測する試験である。

模型船は、浮心位置で曳航し、模型試験は(財)日本造船技術センターの第1試験水槽（長さ207m、幅10m、水深6m）で実施された。

4.3 抵抗増加計測結果

本研究では、波浪中における抵抗増加の係数、

$$\sigma_{AWL} = R_{AW} / \rho g \zeta_A^2 L_{pp}$$

（但し R_{AW} は、抵抗増加量、 ζ_A は、入射波の振幅を示す）

と船型要素 (L/B , B/d , C_B , C_{WF}) および船首バルブの有無、の関係を調べることを主な目的として、試験計画を立てた。

即ち、波長 λ 、波高 ζ_A の波浪中の母船型の抵抗増加係数を、

$$\sigma_{AWLO} (\lambda/L_{pp}, \zeta_A/\lambda, F_n; \alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_5)$$

（但し、 $\alpha_1 = L/B$, $\alpha_2 = B/d$, $\alpha_3 = C_B$, $\alpha_4 = C_{WF}$, $\alpha_5 = \text{Bulb}$ の有・無） で示すとき、

同じ λ/L_{pp} 、 ζ_A/λ の波浪中で、船型が $\alpha_1 + \Delta \alpha_1$, $\alpha_2 + \Delta \alpha_2$, ..., に変化したとき、 $\Delta \alpha_1/\alpha_1$, $\Delta \alpha_2/\alpha_2$, ... が小さければ、抵抗増加係数は船型要素間の相関を考えないと、次のような補間式で書くことができる。

$$\sigma_{AWL} (\lambda/L_{pp}, \zeta_A/\lambda, F_n; \alpha_1 + \Delta \alpha_1, \alpha_2 + \Delta \alpha_2, \dots)$$

$$= \sigma_{AWLO} + K_1 \Delta \alpha_1 + K_2 \Delta \alpha_2 + \dots + K_4 \Delta \alpha_4 \quad (1)$$

$$+ K'_1 (\Delta \alpha_1)^2 + K'_2 (\Delta \alpha_2)^2 + \dots + K'_4 (\Delta \alpha_4)^2$$

従って、このシリーズ試験の一つの目的は、 K_1 , K_2 , ... を求めるに相当する。実際に、 L/B シリーズ試験によって補間係数を算出した例を、図19に示した。

図19には、 $F_n = 0.17$, $\zeta_W/\lambda = 1/50$ の場合に、波長別に、満載およびバラストの2状態について、 K_1 （直線補間）および $K_1' = 0$ として K_1' （2次補間）を求めた結果が示してある。この図によると、満載状態、バラスト状態共に、 $\lambda/L_{pp} = 0.4 \sim 0.76$ の範囲では、抵抗増加は船幅の2乗に比例して増加する傾向を示し、 $\lambda/L_{pp} = 0.76 \sim 1.00$ では、船幅に比例して増加する傾向を示している。

他の例について述べると、抵抗増加は、 C_B の増加に比例し（図20参照）、喫水の増加に比例して減少し、 C_{WF} の増加に対して満載状態では比例して増加する傾向を示している。

これを波長ベースに見た例を L/B シリーズについて図21に示す。また、図21と同じ試験の波形抵抗増加係数 ($\sigma_{AWPL} = R_{AWP}/\rho g \zeta_A^2 L_{pp}$) の計測結果も、図22に示した。

波形抵抗増加の計測については、九州大学（大楠委員）、大阪大学（内藤委員）を中心にして綿密な研究が行われている。しかし今回のように多数の実用船型の計測が行われたことはなく、波形抵抗増加係数の意味も一般に知られていないので、図21、22の説明に加え、補足して述べる。

波浪中の抵抗増加の大部分は、造波抵抗と考えられ、船体が入射波を反射し、また動搖で生ずる波動によっている。このことは、船体表面の圧力増加分布の計測によっても判るかもしれないが、計測法の困難を考えると、後続波形の解析から抵抗増加を算出する方が実際的であると言える。この意義は、平水中試験の波形解析（造波抵抗直接計測）と同

等である。

しかし、波浪中の抵抗増加の原因は、上記の波動だけでなく、粘性、造渦の他に、平水中の航走で生じる波の変形も含めなければならない。

図21と22を比較してみると、 L/B が大きくなるに従って抵抗増加係数 (σ_{AWL}) が大きくなる状況は、図19のクロスカーブで示してあるが、波形抵抗増加係数 (σ_{AWPL}) には σ_{AWL} 程の差が見られない。

満載状態では、 L/B が大きくなるにつれて σ_{AWL} と σ_{AWPL} の差は小さくなっている。さらに波長が短い波の方が σ_{AWL} と σ_{AWPL} の差が大きく、 $\lambda/L_{pp} = 1$ 付近の最も長い波では、両者ほぼ一致している。

バラスト状態では、 σ_{AWL} と σ_{AWPL} の差が満載以上に広がっているが、 σ_{AWPL} には、船幅の影響がほとんど見られない。

以上のことから、波浪中抵抗増加に及ぼす船型 (L/B) の影響は、 σ_{AWL} と σ_{AWPL} との差の成分によると考えられ、特に短波長の抵抗増加成分にはこの傾向が著しく現われている。

波形抵抗増加係数の解析（非定常波形解析）のメリットの一つに、振幅関数（Kochin関数）が得られることがある。 Kochin関数は、船の進行方向を $\theta = 0^\circ$ として、 θ 方向に放射される素成波のエネルギーを表示しており、これによってどの方向の波が抵抗増加に寄与しているかを知ることができる。

図23に L/B シリーズ船型の Kochin 関数の例を示す。これらの図形によっても、船幅の変化によって、短波長中ではほとんど船のおこす波に変化がないことが判る。

以上に示したように、抵抗増加係数は、喫水の違いによっても大幅に異なることが判った。この原因を検討する資料として、母船型を用いて中間喫水の試験が行われたが、中間喫水の σ_{AWL} は、波長が短い ($\lambda/L_{pp} < 0.75$) とバラスト状態に等しく、波長がそれより長い場合には、満載状態に等しい結果を得た。 σ_{AWPL} は、3状態ともほとんど同一であった。

以上は、 L/B シリーズ船型を例として、短波長中の抵抗増加の性質について、従来からの知見では十分でない部分があることを示した。しかし一方において、新しい設計資料を多量に得ているので、これの活用のためにも、短波長中の抵抗増加成分に係わる理論的な研究の必要性が痛感される。

4.4 馬力増加計測結果

各船型について、波浪中自航試験を実施し、主として自航要素の平水中と短波長波浪中の比較を行った。図24に $C_B = 0.78$ (C_B シリーズ船型) の自航要素と波長の関係を例示する。

一般に満載状態では、短波長中の自航要素は平水中とほとんど変わらないが、バラスト状態では、波長が長くなると、 λ/L_{pp} が 0.6 付近からプロペラがレーンシングを起こし、 $1 - W_T$ が著しく大きくなる。この状況は主に喫水深さと波の Steepness が関与しており、船型差は、余り見られない。

参考として、平水中に対する馬力増加比を、同じ船型について、模型レベルで計算したものを図25に示した。図25には、馬力計算に使う自航要素を、平水中計測値と波浪中計測値をそれぞれ用いた場合の比較も示されている。この図からも、バラスト状態の波浪中性能研究の重要性が判る。

4.5 理論計算

理論計算によって、試験および調査をシミュレートして、結果の理解を広げ、斜め波等の試験を行っていない問題にも汎用性を広げるため、理論計算を行った。

4.5.1 解析法の概要

解析法研究の目的は、波浪中抵抗増加の理論計算プログラムを作成し、模型試験における試験内容と同等な条件の理論計算を行って、試験結果と比較し、またこの経験によって計測結果とより良く適合するように計算プログラムの改良を行うことである。改良の方法は、高橋⁽³⁾に習い、特異点の深さを調整した。またこの改良プログラムによって、ログ・ブック解析船の波浪中抵抗増加および船速低下の計算ならびに sea margin の推定計算等も実施した。更に本プログラムは、改良船型の基礎データの作成にも利用された。

計算プログラムの内容

高橋⁽³⁾の研究に従って、丸尾の厳密公式をベースとするプログラムの作成をした。

$$R_{AW} = R_{AW}(1) + R_{AW}(2) + R_{AW}(3) \quad (2)$$

$R_{AW}(1)$; heaving, pitchingに基づく抵抗増加

$R_{AW}(2)$; sway, yaw, rollに基づく抵抗増加

$R_{AW}(3)$; 船首部船側からの反射波に基づく抵抗増加

$R_{AW}(1)$ および $R_{AW}(2)$ については、丸尾の式を用いる。 $R_{AW}(3)$ については、藤井・高橋⁽⁵⁾の方法を基礎式とした。また、特異点分布の強さは、ストリップ法による船体運動で求まる発散波に比例するものとし、丸尾・石井⁽⁴⁾、丸尾・岩瀬⁽⁶⁾の基礎式によった。

4.5.2 解析結果

抵抗増加の計算について、若干の例を示すと、図26に母船型について、短波長から一部長波長領域にわたる計測結果と計算結果の比較を示した。図26は、満載状態を示し、 $F_n = 0.17$ （標準）、0.15および0.13の速度変化の影響を示している。

この図で判るように、抵抗増加の計算は、満載状態では試験結果と比較的よい一致を見せるが、バラスト状態については、現状では、未だ計算法の研究が必要と思われる。バラスト状態を含んだ計算結果の例として、図27にL/Bシリーズ船型3隻の抵抗増加係数を計測値と対比して示す。この計測値は、先に示した、図21に対応するものである。

このように、現状では、計算結果だけにすべてを任せられる状況になっていないが、計算結果には、Kochin関数、船体運動成分と抵抗増加の関係、任意方向の入射波に対する抵抗増加等試験では得ることが難しい情報を含んでいるため、なお一層の計算法の実用化の研究が望まれる。

なお、現在開発したプログラムは、船体運動および満載状態の抵抗増加等については、有用な結果が得られるので、各種の応用を試みた。この一例が、ログ・ブック解析船A丸のbeaufort scaleと船速特性の関係で、これについてはすでに結果を図13中に実線で示した。この図に示されているように、海象が短波長の領域（BS 5以下）を超えると、航海日誌の解析結果と計測推定値は悪くなり、この傾向は他の計算結果の全てに共通している。この原因も現状では不明確であるが、計算法の改良に加えて、船上における海象の目測精度にも検討すべき問題があるのかもしれない。

5. 運航性能の改善

船型と短波長中の抵抗増加を推定するために不可欠なデータ・ベースと計算手法を当初企画に従って完成させた後、この応用として母船型の船型改良を試みた。

Bales-高木の方法

波浪中抵抗増加に関する船体運動に着目して、船型要素の影響を与えた研究に、Bales⁽⁷⁾と高木⁽⁸⁾の方法がある。

Bales-高木の方法では、本来は上下揺れ、縦揺れ、船首尾の上下加速度等、8個の応答関数を用いて各船型の耐航性能を相対評価し、ランク付けを行い、ランク値と船型要素に関する回帰式を求めて、これを船型改良等に応用して成功している。

ここでは、本研究で用いた模型船、航海日誌調査船その他の関連船型25隻の抵抗増加係数（満載状態）の計算値を用いて、直接に船型要素を変数とした抵抗増加係数の回帰式を次式のように求めた。

$$\sigma_{AWL} = C_1 C_{WF} + C_2 C_{WA} + C_3 C_{VPF} + C_4 C_{VPA} + C_5 B/L + C_6 d/L + C_7 \quad (3)$$

ここで C_W は水線面積係数、 C_V は堅柱形係数、添字 F は fore、 A は aft を示す。

抵抗増加係数に計算値を用いたのは、常時計測値のみに頼るのは、現実的でないため、汎用性をもたせたためである。本研究では、計測値とのクロス・チェックが可能であり、この例として、 B/L の変化に伴う σ_{WAL} の計測と計算値の比較を図28に示した（計測値は、図19参照）。

回帰式(3)の係数値の大きな項が、抵抗増加に大きな寄与をもつことになるので、これらを評価して、母船型改良の方針をたてた。このような見方では、抵抗増加に影響が著しいのは、 B/L および C_{WF} で、 C_{VPF} が続いている。

船型改良の方針として、船体の長さ、幅および排水量は母船型から変更しないこととし、船体前半部の変更に止ることとした。この結果、

改良(1) 船首水線面積係数 (C_{WF}) を減じ、方形係数 (C_B) を小さくした船型（排水量は、喫水で調整）。

改良(2) 船首水線面積係数 (C_{WF}) を減じ、堅柱形係数 (C_{VPF}) を増加させた船型。

を計画した。

この改良により、Bales-高木の方法による回帰式では、抵抗増加係数は母船型にくらべて改良(1)は約12%、改良(2)は約13%減少することにより、試験結果を基にした抵抗増加の推定式では、 $\lambda/L_{pp} = 0.52$ で改良(1)約32%、改良(2)は約14%の減少となる。

試験結果は、図29に示すように、 $\lambda/L_{pp} = 0.40 \sim 0.76$ の範囲の平均で、満載状態で改良(1)および改良(2)共に約9%、バラスト状態で改良(1)は約16%、改良(2)は母型と同様であった。一方、波形造波抵抗係数およびKochin関数には、船型の違いは、ほとんど見られなかった。

以上の経験により、Bales-高木の回帰式による方法が、肥大船の船型改良の検討方法として有効であることが確かめられたが、改善の指針としては、船幅を減じることおよび船首水線面積を減じることが最も効果的であることが示された。

6. 結 言

平成2年度より3カ年にわたる、SR 211研究部会の成果をまとめると、次の通りである。

- (1) 中型ばら積貨物船に関して、船体主要目が短波長中の推進性能に及ぼす影響を調べ、シリーズ模型試験によるデータベースおよび推定図表を作成した。また計算法を確立した。
しかしながら、短波長中の抵抗増加には、抵抗の成分等に関し説明の困難な問題があり、理論的研究の必要性があることが判った。また計算法については、バラスト状態の抵抗増加の計算法の改良が望まれる。
- (2) 中型ばら積貨物船の就航状態について、多くの知見を得た。今後 sea margin の合理的な推定法について、理論的研究を進めるとともに、統計的なデータの蓄積も望まれる。
- (3) 短波長中の抵抗増加を改善する船型改良法として、Bales-高木の方法が有効であることを示し、本研究部会の母船型の改良を行った。

以上により、中型ばら積貨物船の日常航海中の推進性能に関し、改善の必要性を明らかにし、その改良方策を示すことができた。

本研究の実施に際し、(財)日本船舶振興会からのご援助を賜りましたことに感謝致します。

参 考 文 献 リ スト

- (1) 細田龍介、高橋 雄；シーマージンと航海実績、“波浪中推進性能と波浪荷重”
運動性能研究委員会第1回シンポジウム 日本造船学会(1984)
- (2) 大楠 丹；一定速度で前進し動搖する船の波形解析、日本造船学会論文集第142号(1977)
- (3) 高橋 雄；波浪中抵抗増加の実用的推定法に関する研究、九州大学学位論文(1986)
- (4) 丸尾 孟、石井昭良；簡易公式による向い波中抵抗増加の計算、
日本造船学会論文集第140号(1976)
- (5) 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第137号(1975)
- (6) 丸尾 孟、岩瀬和夫；斜波における抵抗増加の計算、日本造船学会論文集第147号(1980)
- (7) Bales, N.K. ; Optimizing the Seakeeping Performance of Destroyer Type Hulls, 13 th ONR (1980)
- (8) 高木幹雄；船体運動に対する船型要素の影響と船型改良、日本造船学会論文集第166号(1989)

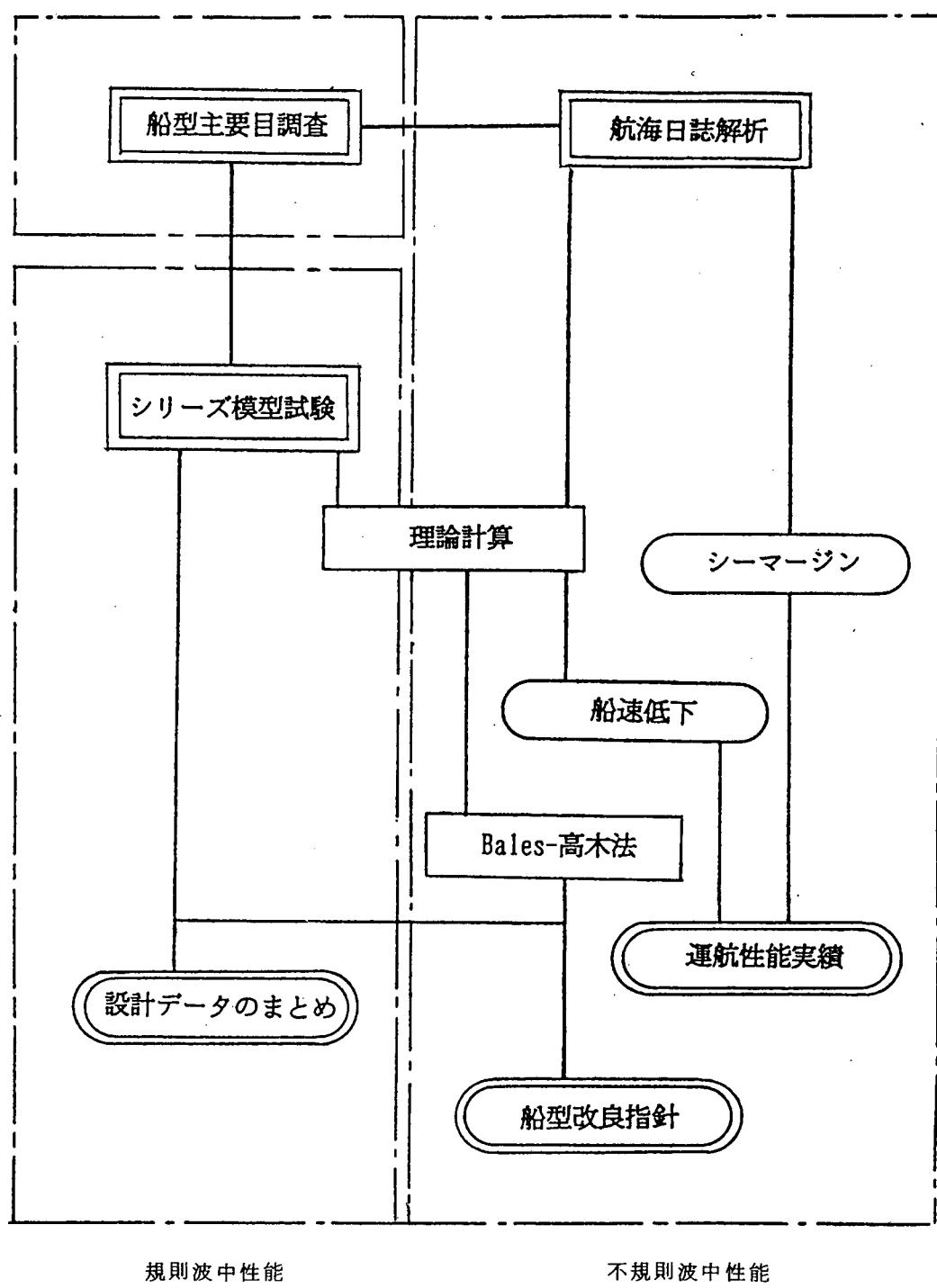


図1 研究の構成

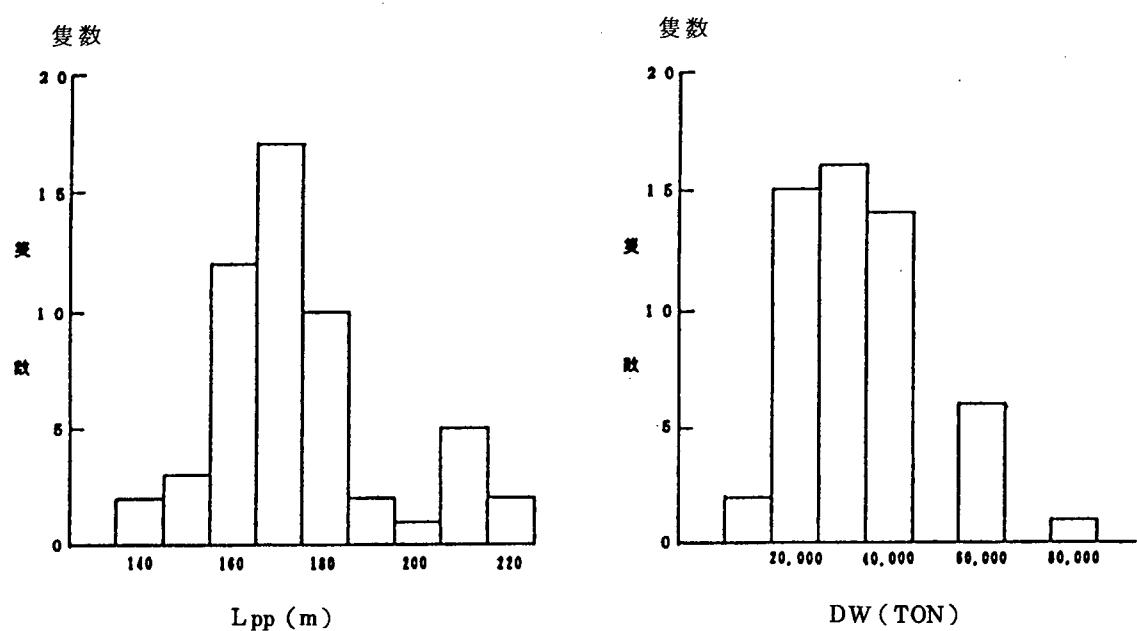
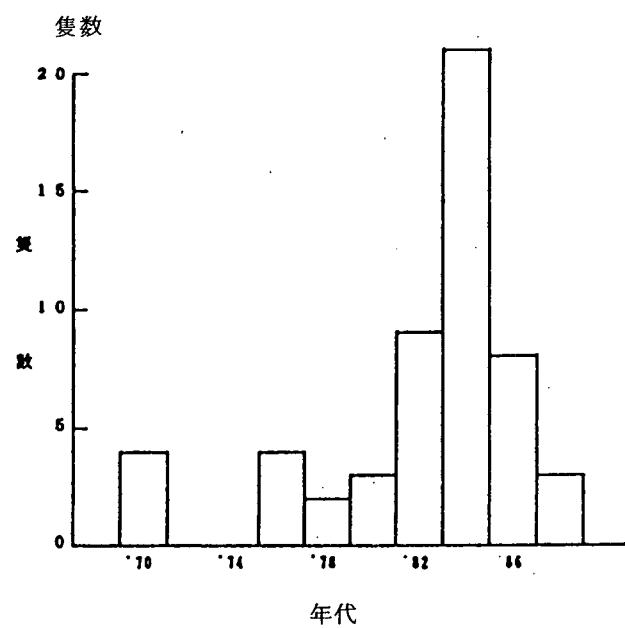


図 2 主要目等の分布

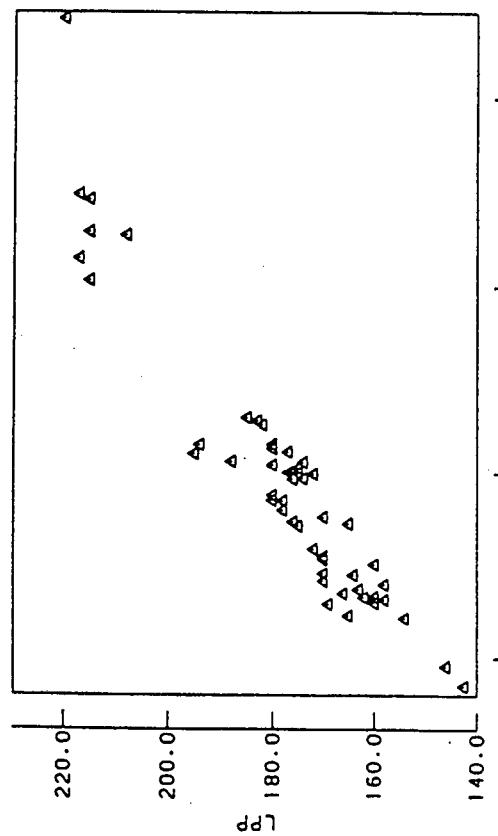


図 3.1 D.W. (載貨重量) と L_{pp} (船長) の関係

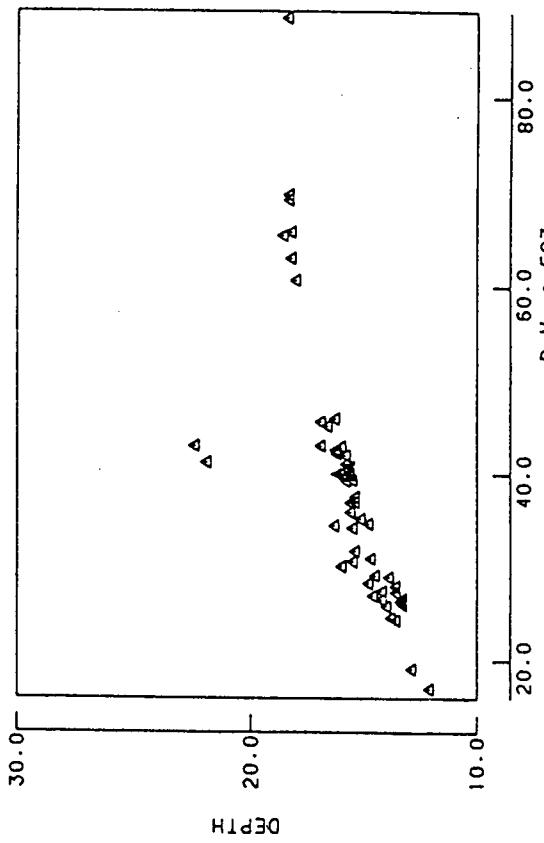


図 3.3 D.W. (載貨重量) と DEPTH の関係

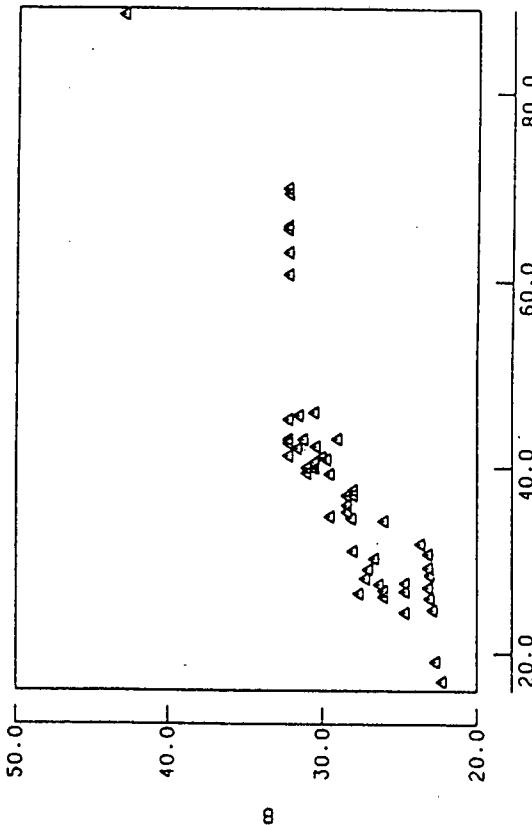


図 3.2 D.W. (載貨重量) と B (船幅) の関係

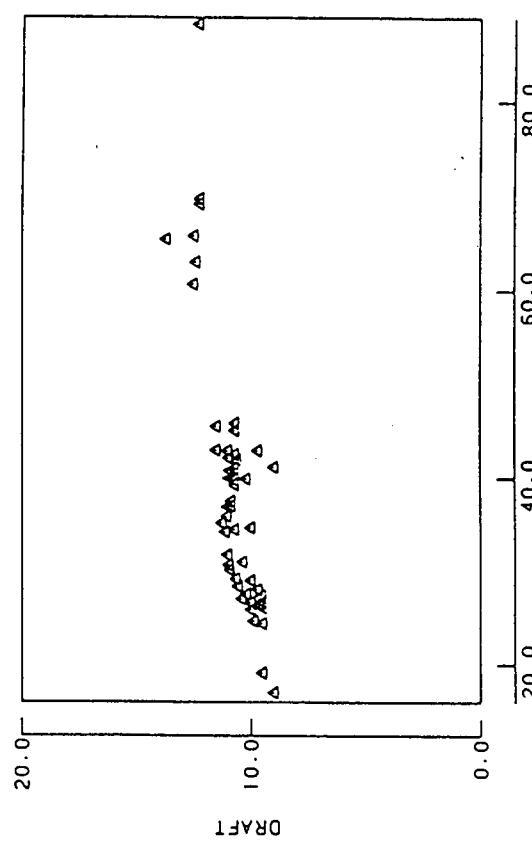


図 3.4 D.W. (載貨重量) と DRAFT の関係

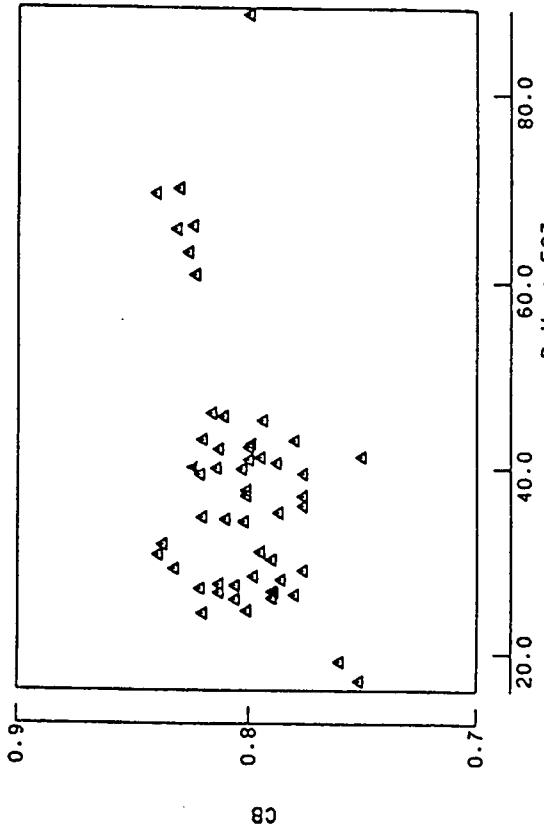


図 4.1 D.W. (載貨重量) と C_B の関係

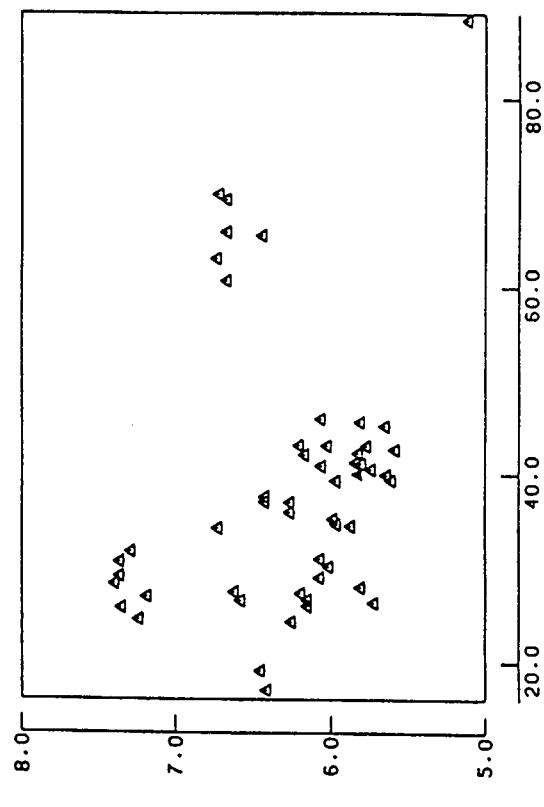


図 4.3 D.W. (載貨重量) と L_{pp}/B の関係

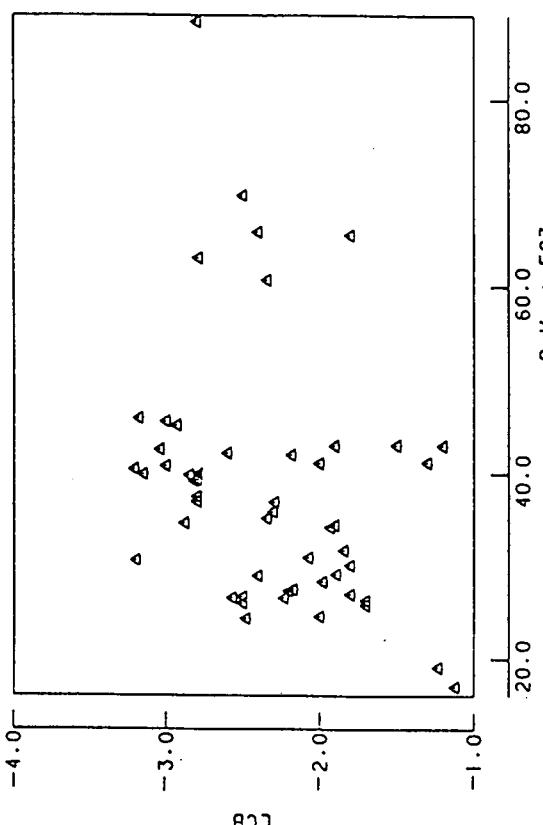


図 4.2 D.W. (載貨重量) と ℓ_{CB} の関係

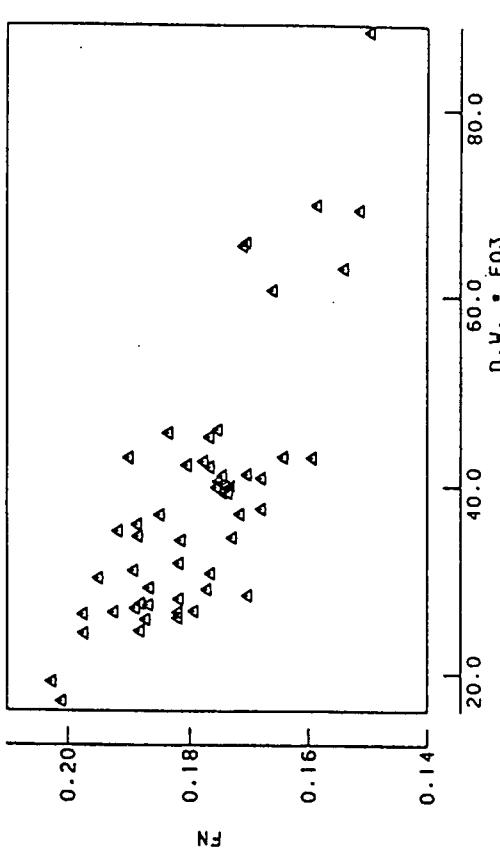


図 4.4 D.W. (載貨重量) と F_n の関係

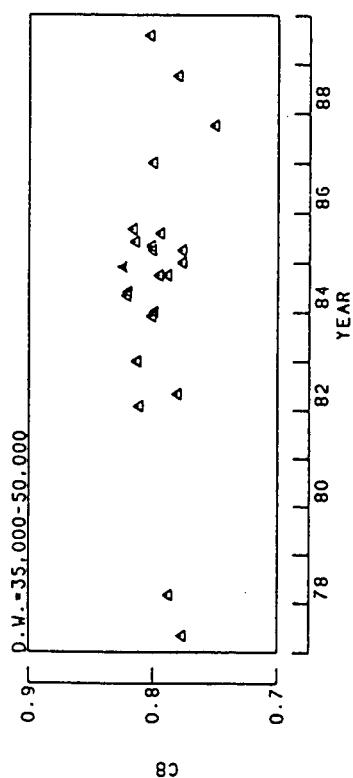


図 5.1 CB の竣工年代による変化

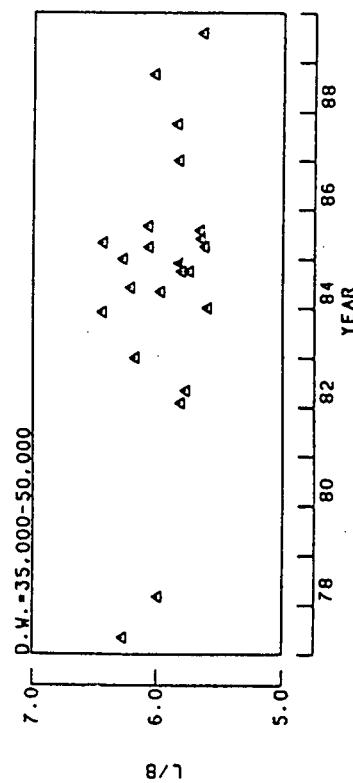


図 5.3 Lpp/B の竣工年代による変化

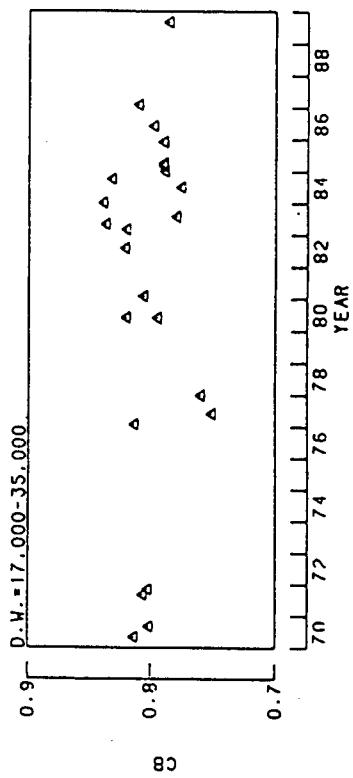


図 5.2 CB の竣工年代による変化

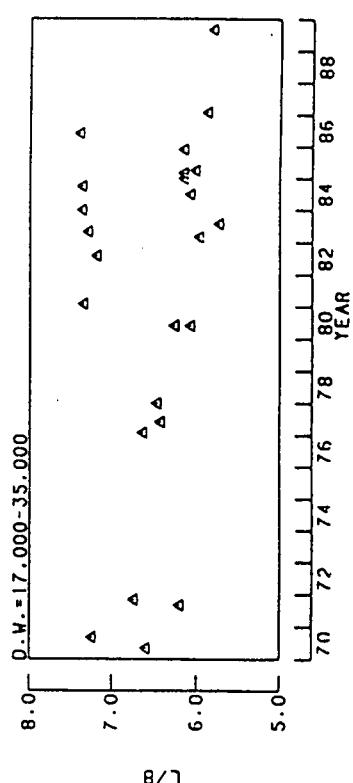


図 5.4 Lpp/B の竣工年代による変化

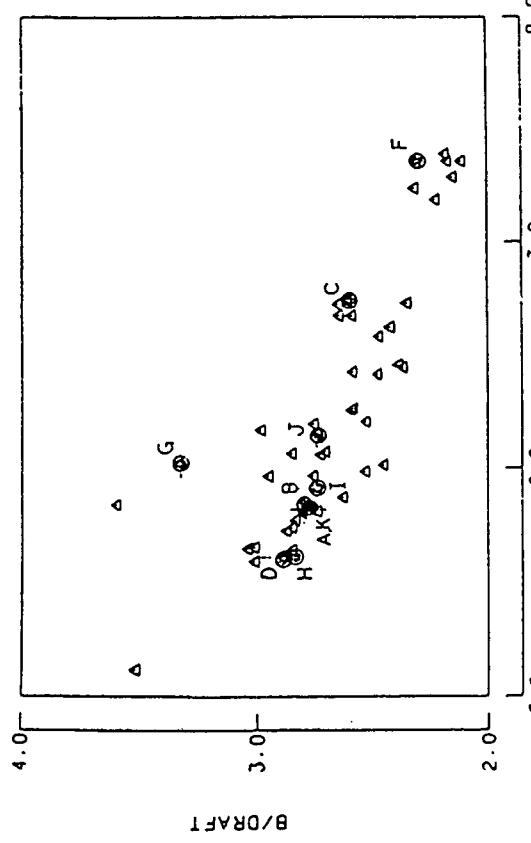


図 6.1 ログ・ブック解析対象船の主要目 ($L/B \sim B/DRAFT$)

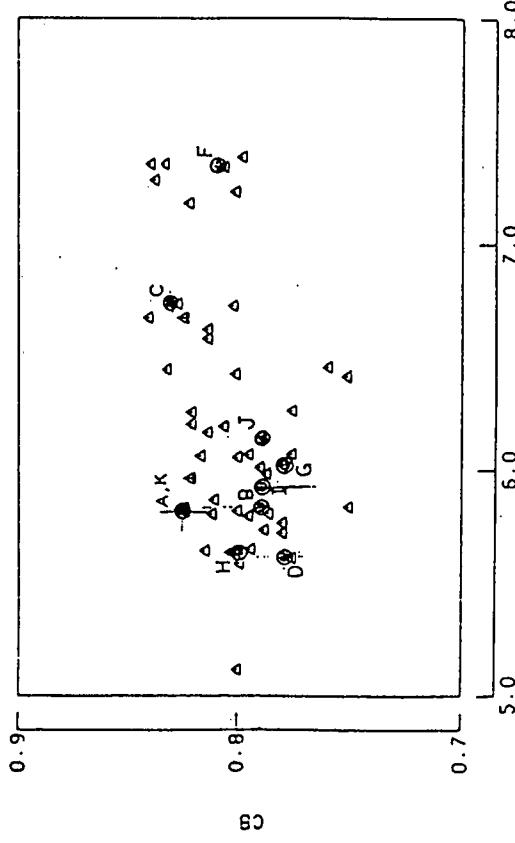
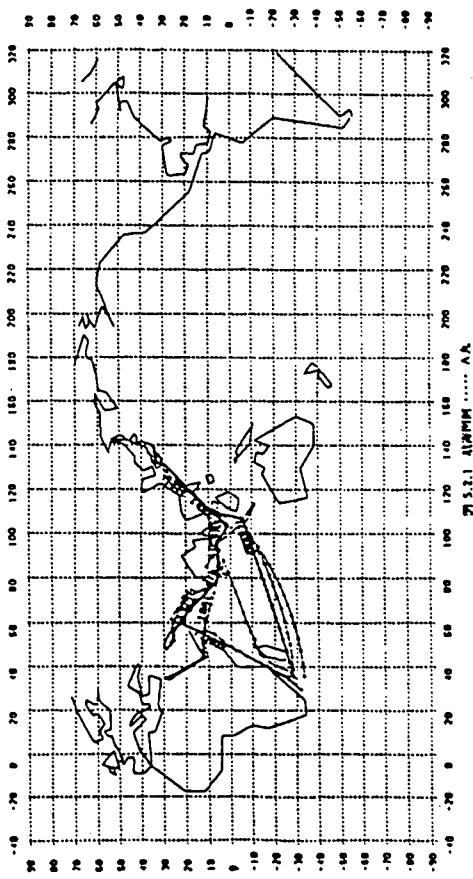
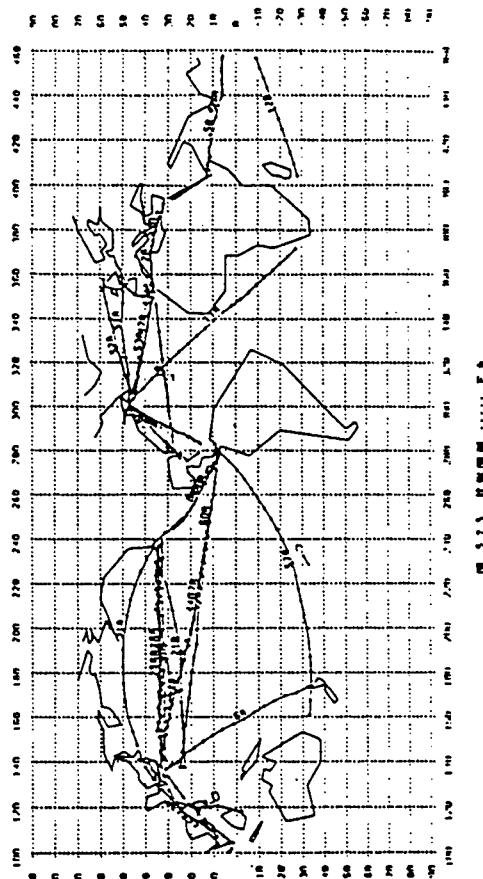


図 6.2 ログ・ブック解析対象船の主要目 ($L/B \sim C_B$)



KOKAI NO KISEKI
15.2.1 15.2.2 15.2.3

- 16 -



KOKAI NO KISEKI
15.2.1 15.2.2 15.2.3

図 7.2 F 丸の航海軌跡

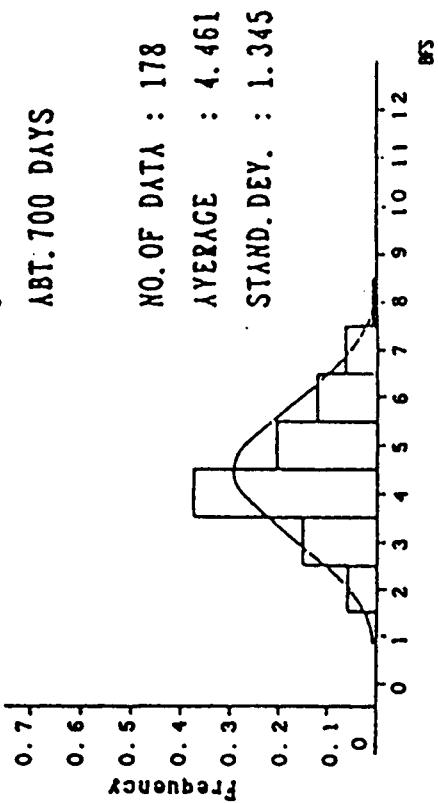
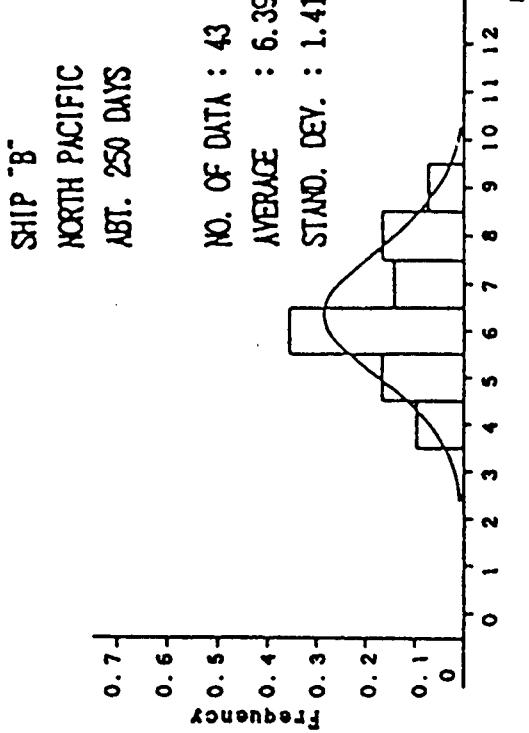
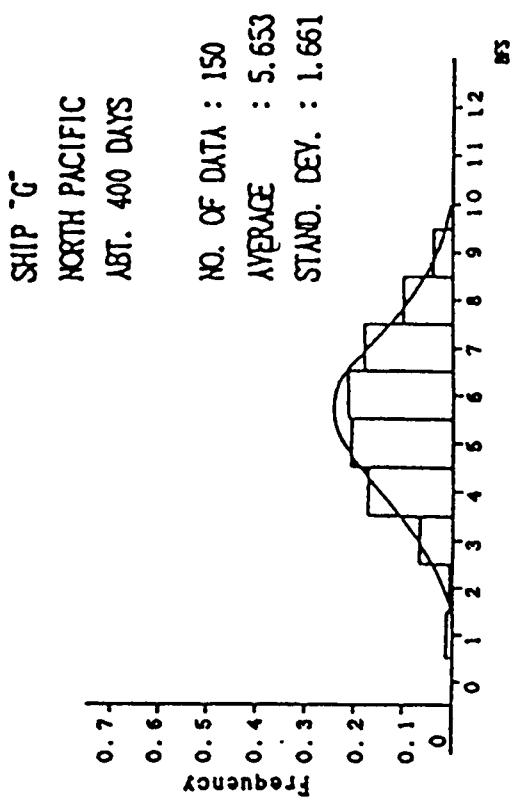
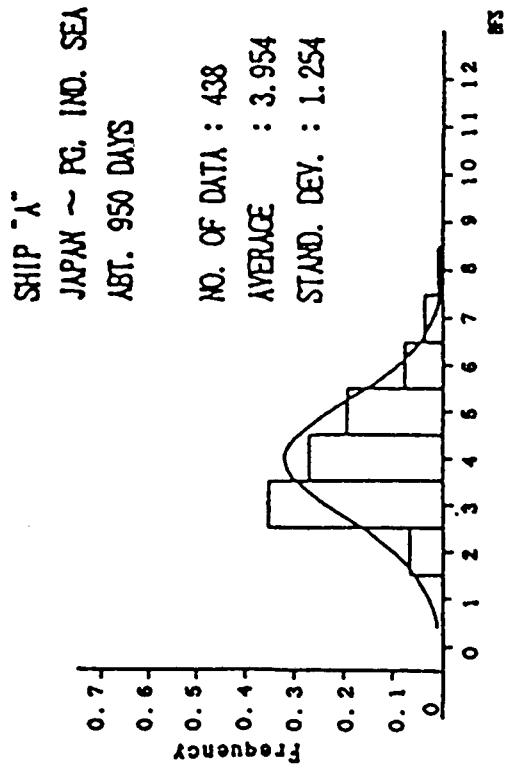


図 8 ビューフォートスケールの分布

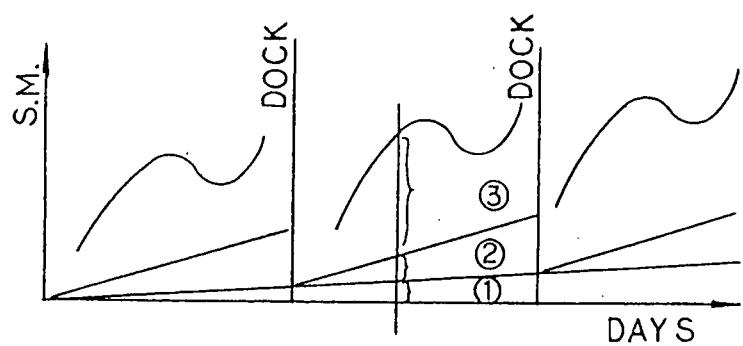


図 9 シーマージンのモデル化

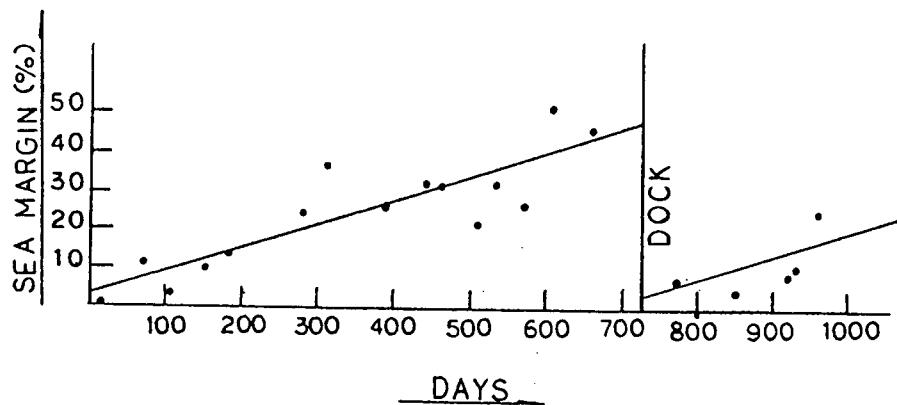


図 10 A 丸の汚損マージン

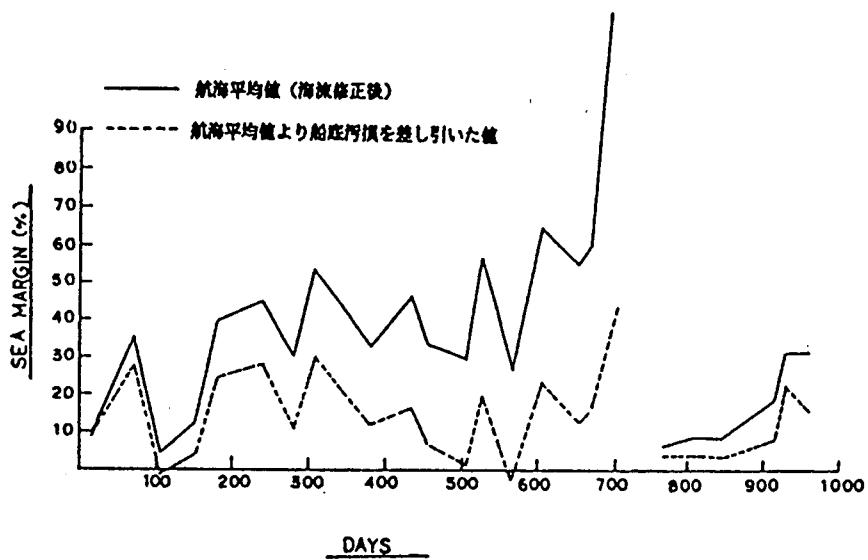


図 11 A 丸の航海中平均シーマージン

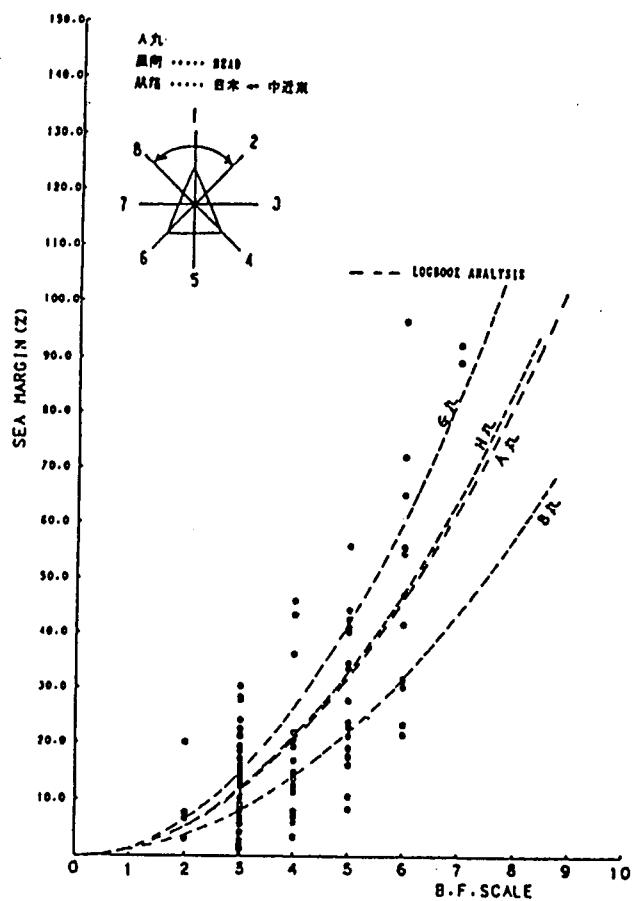


図 12 シーマージンとビューフォートスケールの関係

CORRECT. CURVE OF BEAUFORT SCALE

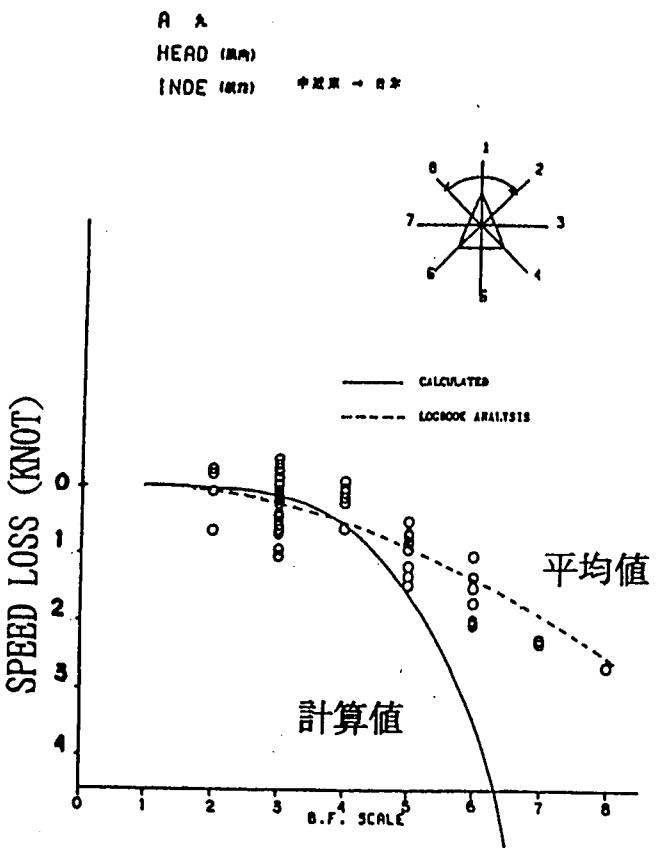


図 13 A 丸の船速低下

▲ 日本→中近東（横載航海）
□ 中近東→日本（横載航海）
× ガルフ湾→南ア又はインド（バラスト航海）

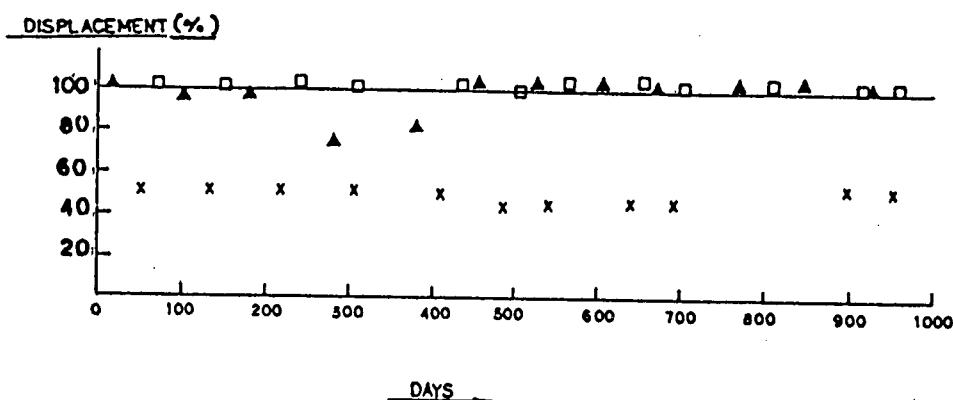


図 14 A 丸の排水量変化

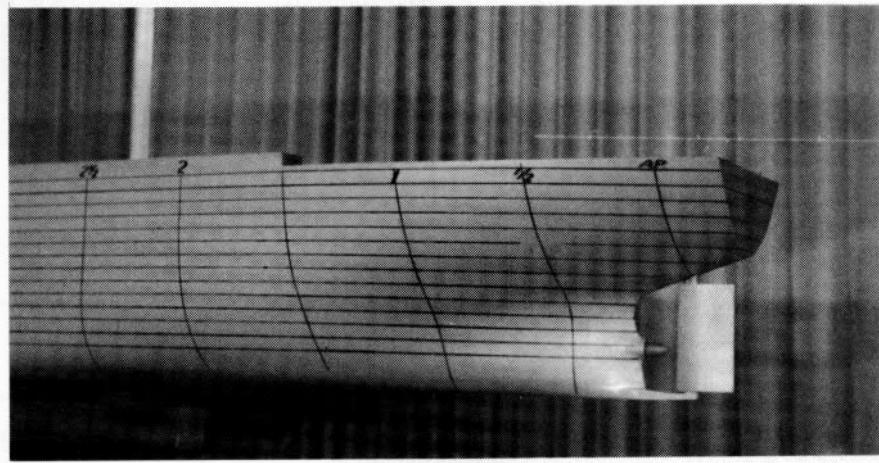
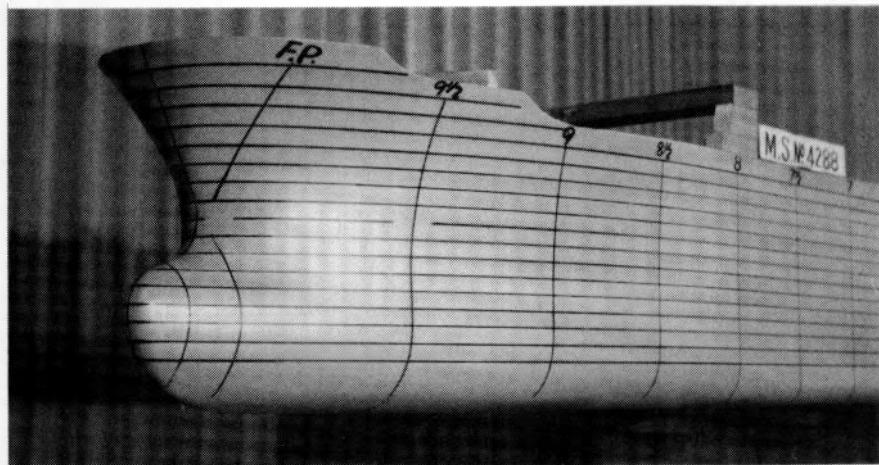
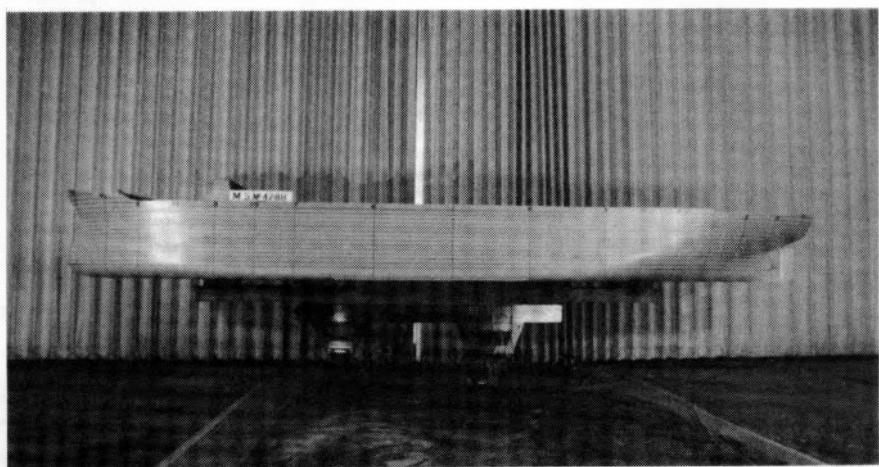


図 15 母船型 (M. S. No. 4288) 模型船写真

表 1 平均的な主要目と母船型の主要目

	平均 値	母 船 型
L/B	5.98	5.82
B/d	2.75	2.78
C _b	0.80	0.82
$\ell_{CB} (\% L_{PP})$	-2.7	-2.8

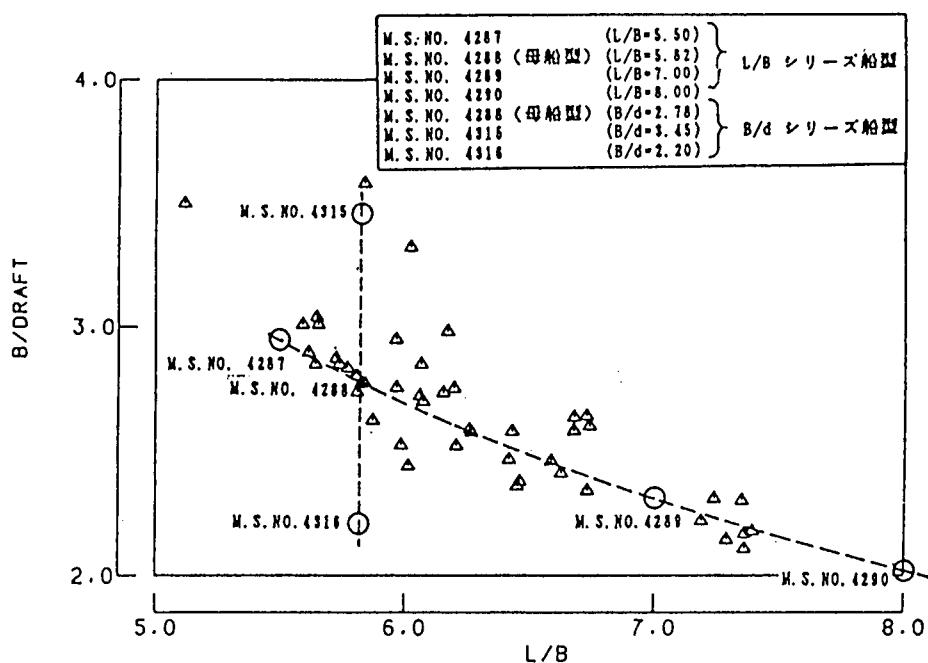


図 16 各シリーズ船型要目 (B/d ~ L/B)

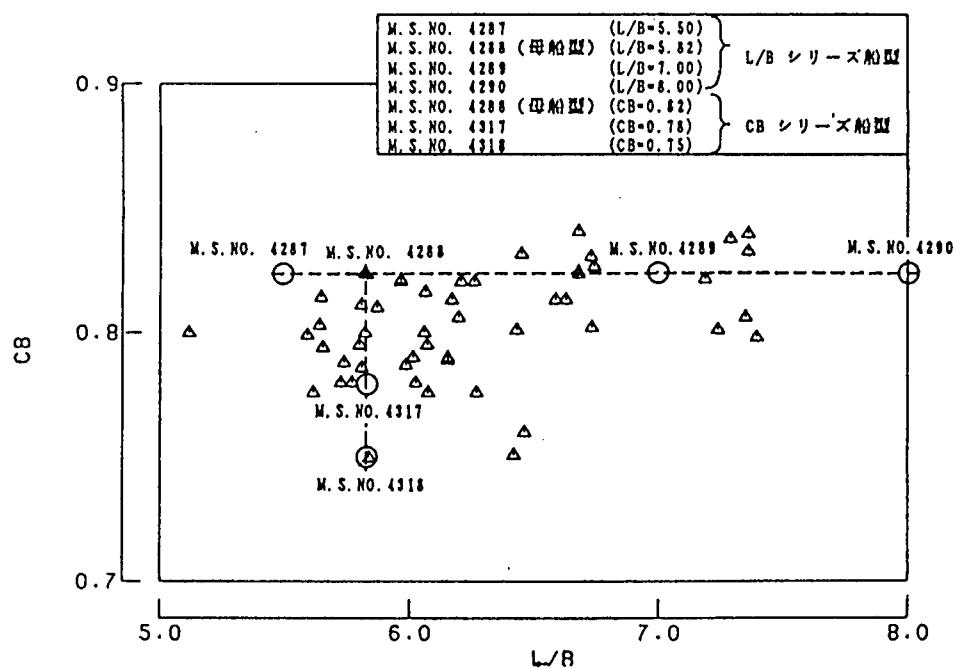


図 17 各シリーズ船型要目 ($C_B \sim L/B$)

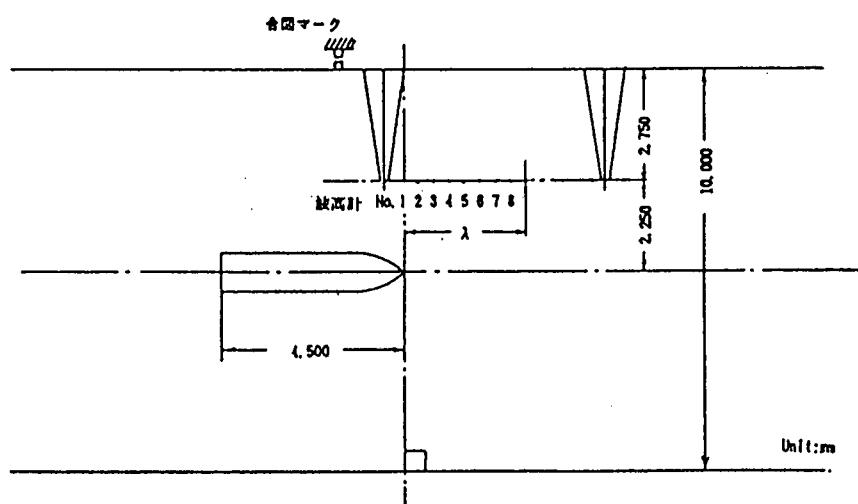


図 18 波高計と模型船の位置関係

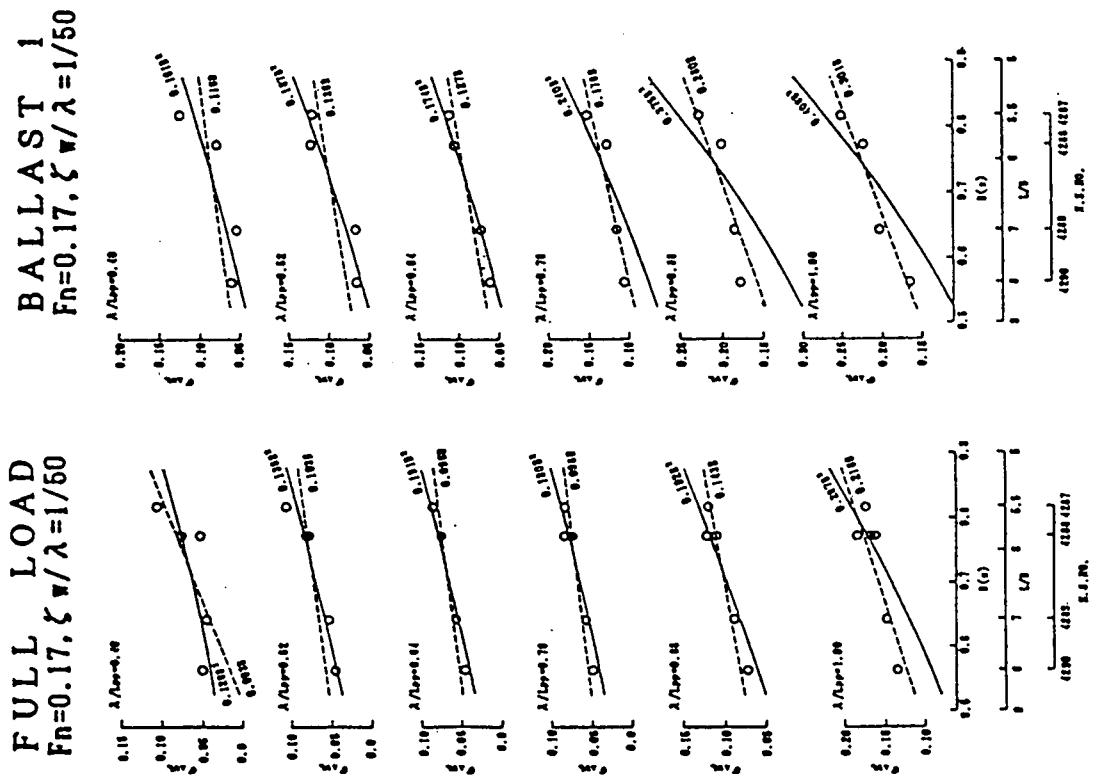


図 20 C_B と抵抗増加の関係

図 19 船幅と抵抗増加の関係

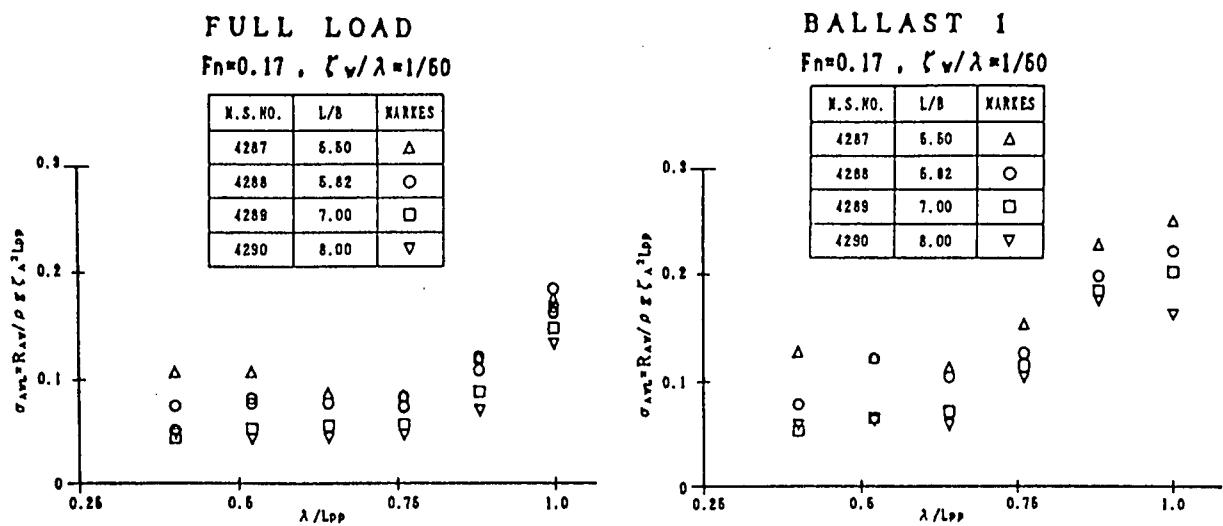


図 21 L/B シリーズ，抵抗増加の比較

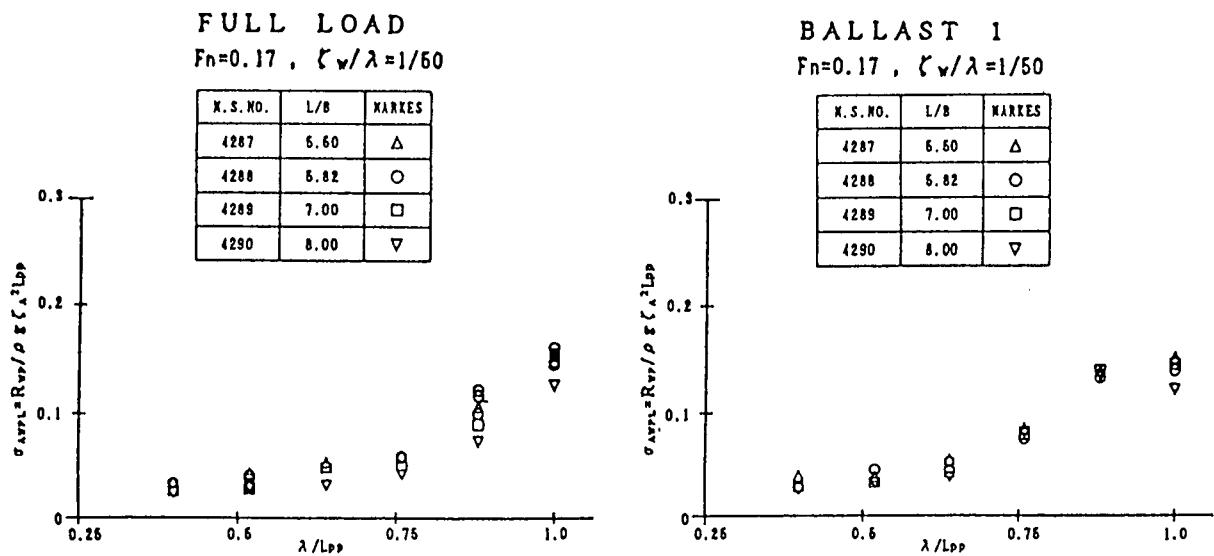
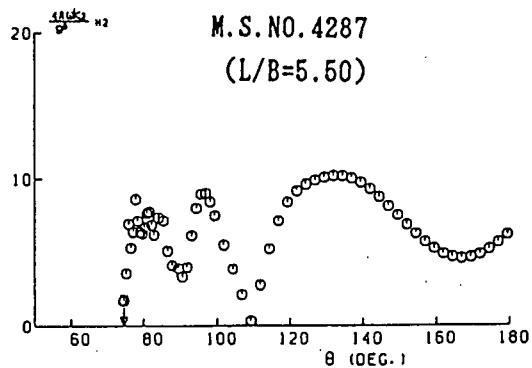


図 22 L/B シリーズ，波形抵抗増加の比較

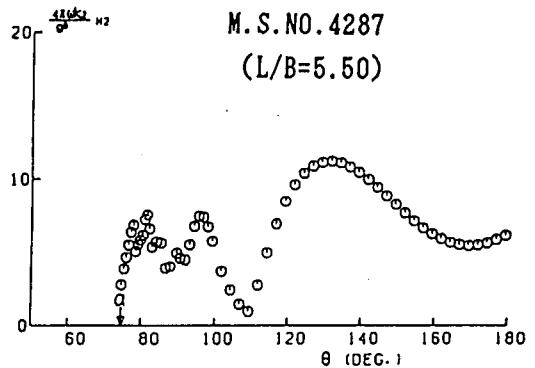
FULL LOAD

$F_n = 0.17$, $\zeta_w / \lambda = 1/50$
 $\lambda / L_{pp} = 0.52$

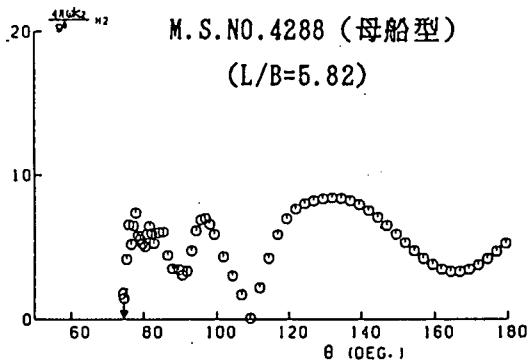


BALLAST 1

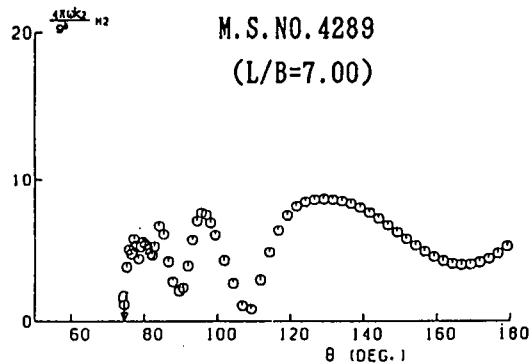
$F_n = 0.17$, $\zeta_w / \lambda = 1/50$
 $\lambda / L_{pp} = 0.52$



M.S. NO. 4288 (母船型)
(L/B=5.82)



M.S. NO. 4288 (母船型)
(L/B=5.82)



M.S. NO. 4289
(L/B=7.00)

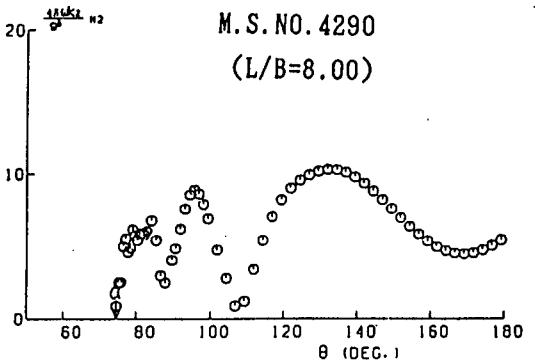
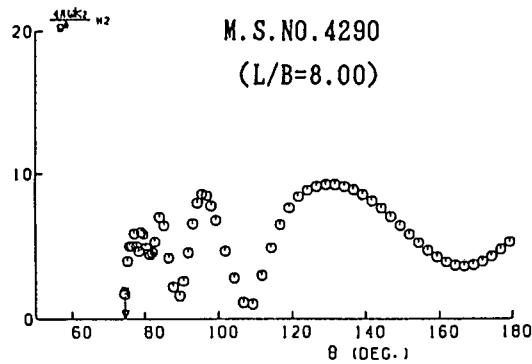


図 23 kochin 関数 (L/B シリーズ船型)

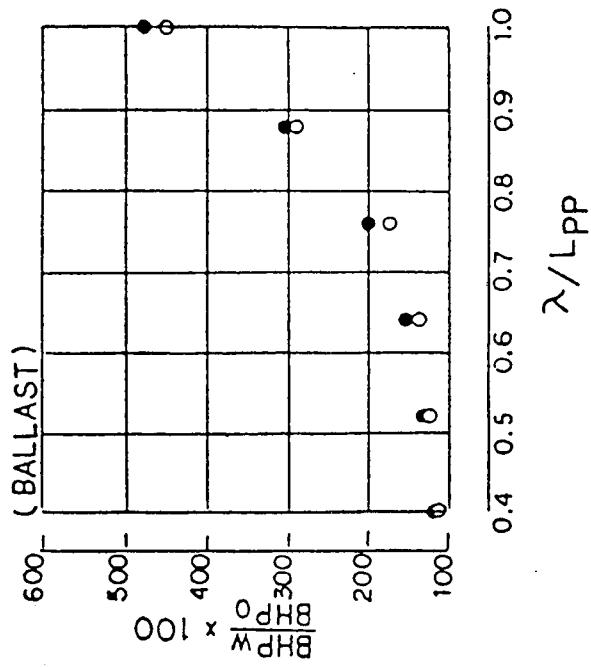
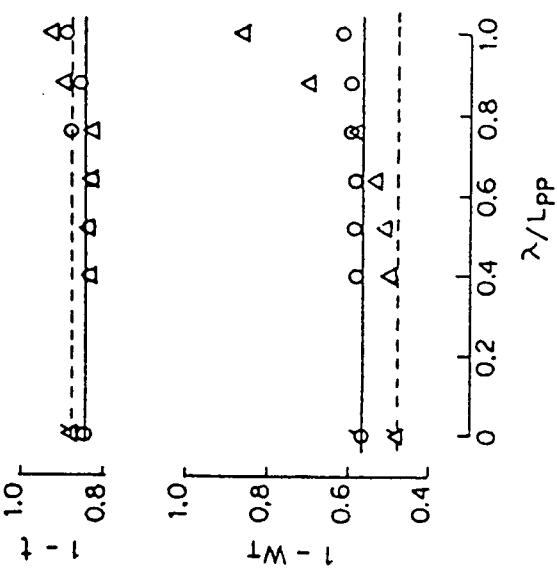
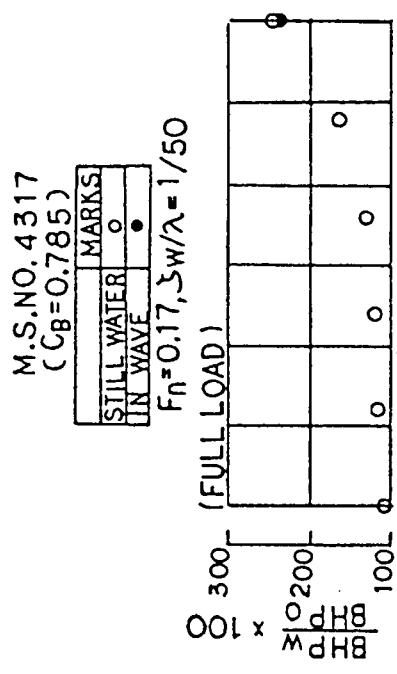
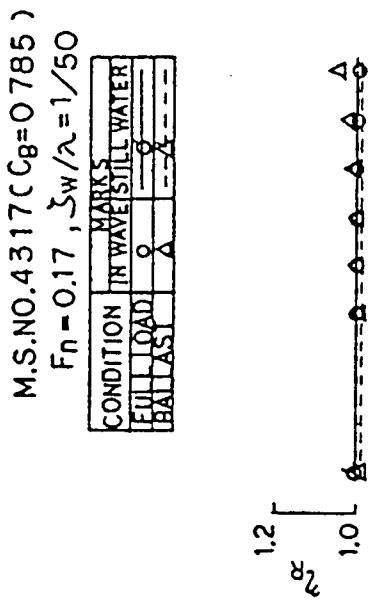


図 24 自航要素

図 25 馬力増加

M.S.NO. 4288

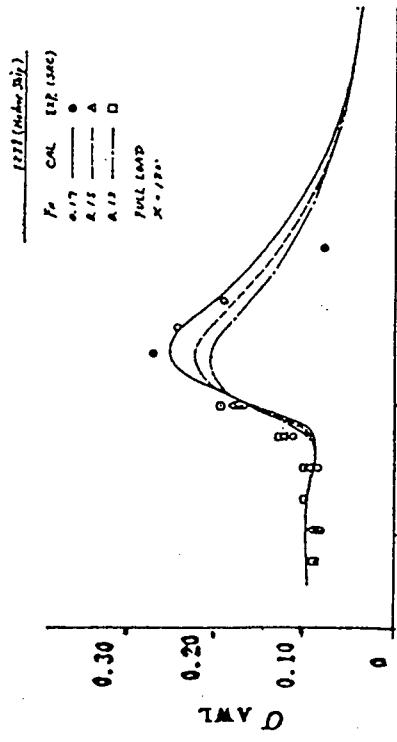


図 26 抵抗増加計算結果（波長及ひずみ速度変化）

M.S.NO. 4289

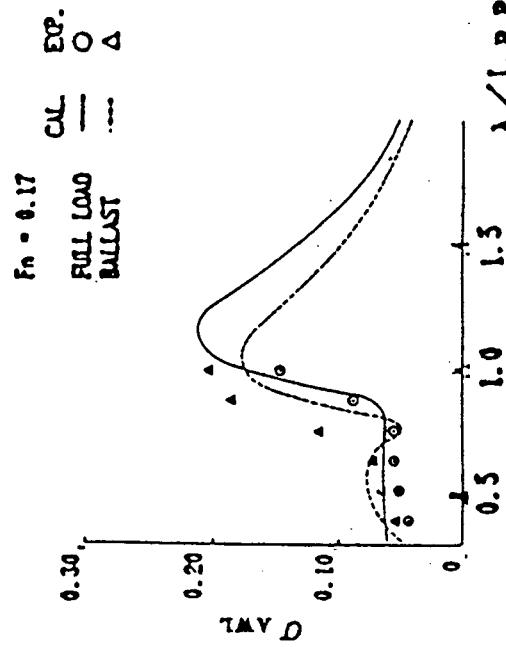


図 27 抵抗増加計算結果（1）

M.S.NO. 4290

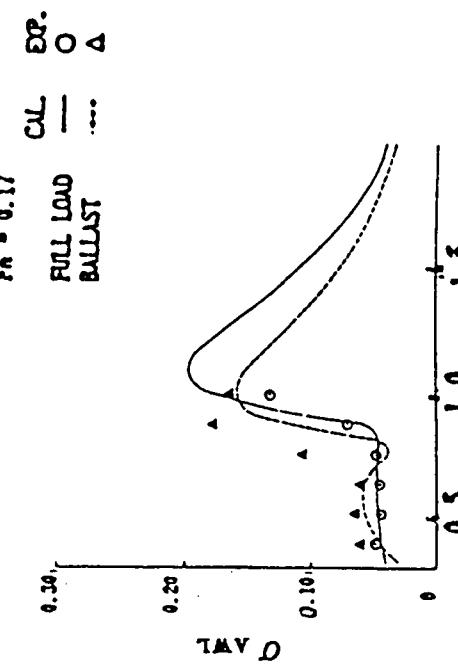


図 27 抵抗増加計算結果（2）

$f_n = 0.17$ CAL. ... EXP.
FULL LOAD —○—
BALLAST —△—

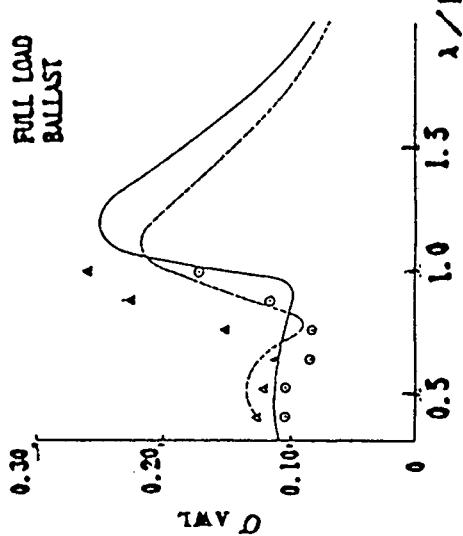


図 27 抵抗増加計算結果（3）

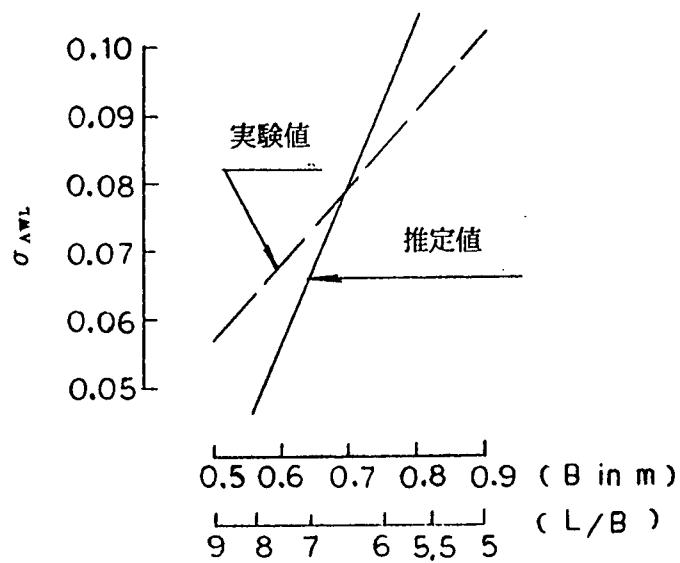


図 28 抵抗増加係数 (σ_{AWL}) と船幅の関係(載貨重量)

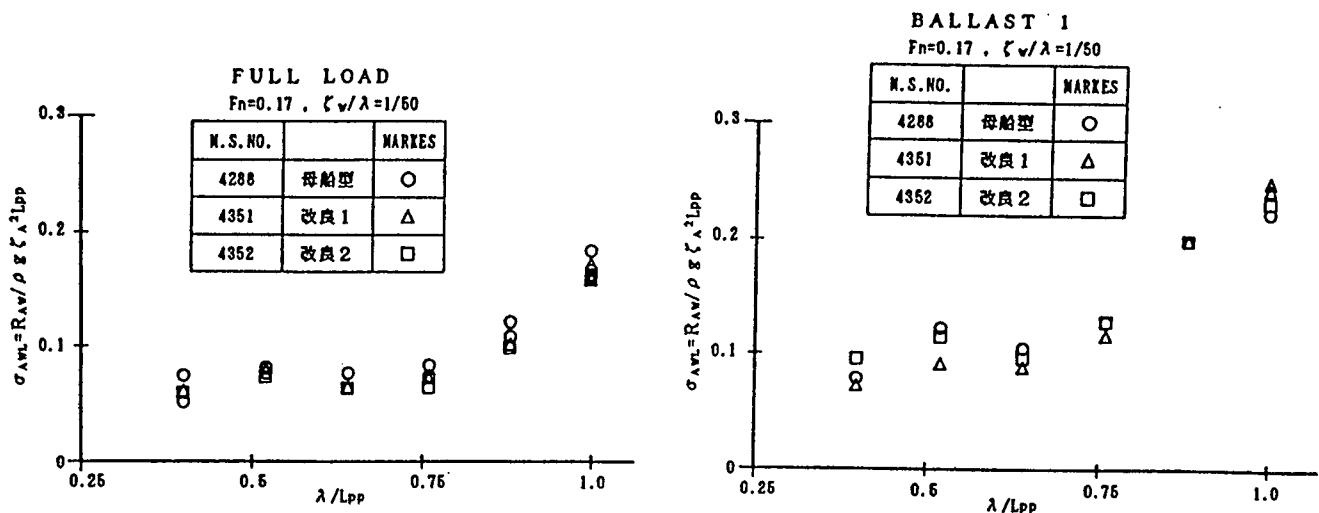


図 29 改良船型、抵抗増加の比較