

博士論文

ノンバラスト船及びバラスト水低減船の
初期船型計画

Preliminary Hull Form Planning for Non-Ballast Water Ship
and Minimal Ballast Water Ship

横浜国立大学大学院
工学府

新郷 将司
Shoji Shingo

2015年9月

ノンバラスト船及びバラスト水低減船の初期船型計画

目次

1. 序論	
1. 1 研究の背景	1
1. 2 研究の目的	4
1. 3 研究の構成	4
参考文献	5
2. NOBS/MIBS の概要	
2. 1 NOBS/MIBS のコンセプト	6
2. 2 過去提案された NOBS/MIBS	6
2. 3 NOBS/MIBS の主要寸法	22
2. 4 NOBS/MIBS の馬力の傾向 (在来船型との比較)	23
参考文献	26
3. 初期船型計画における船型パラメータ	
3. 1 船型パラメータ	27
3. 2 NOBS/MIBS の軽荷重量の推定	28
3. 3 NOBS/MIBS の空荷状態喫水の推定	28
3. 4 NOBS/MIBS の主要目等の検討例	31
参考文献	33
4. 平水中推進性能の簡易推定法	
4. 1 満載状態における推進性能の簡易推定	
4. 1. 1 使用ツール (Tips Sp)	34
4. 1. 2 NOBS/MIBS の主要目	35
4. 1. 3 従来の手法による推定	36
4. 1. 4 C_M の影響を補正する推定	36
4. 2 空荷状態における推進性能の簡易推定	41
4. 3 NOBS/MIBS の推進性能の推定計算例	43
参考文献	47

5. VLCC 船型の検討	
5. 1 対象とする船種とベース船	48
5. 2 検討内容と条件	48
5. 3 拡幅するケース	
5. 3. 1 在来船型の拡幅	49
5. 3. 2 MIBS の拡幅	51
5. 3. 3 NOBS の拡幅	53
5. 4 NOBS/MIBS の建造及び修繕に関する調査	58
参考文献	63
6. NOBS/MIBS の初期船型生成と CFD 計算	
6. 1 NOBS/MIBS の初期船型生成法	
6. 1. 1 タイプシップの選定	64
6. 1. 2 ミドシップ形状の修正法	64
6. 1. 3 所定の C_p カーブに対応する船型生成法	65
6. 2 CFD 計算法	
6. 2. 1 使用ソフトウェア	66
6. 2. 2 計算条件	69
6. 3 満載状態における推定精度	70
6. 4 対象船型	70
6. 5 計算結果	79
参考文献	99
7. 結論	100
謝辞	101

1. 序論

1. 1 研究の背景

近年、国際海事機関（IMO）において、地球環境保護を目的とする取り組みがいくつか行われており、国際条約の形で結実している。その一つとして、バラスト水管理条約¹⁻¹⁾がある。図 1.1.1 に示すように、バラスト水は、空荷状態の船舶の安全を確保するために、出発（荷揚）港で漲水し、到着（荷積）港で排水される¹⁻²⁾。これにより荷揚港から荷積港まで海洋生物を含む海水が移送された結果、荷積港の周辺海域における海洋生態系の破壊という形で世界各地において問題となっている。

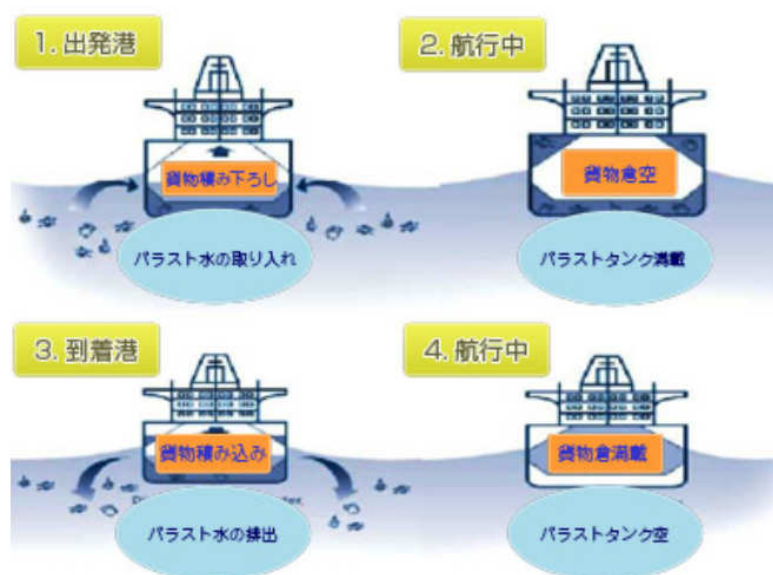


図 1.1.1 バラスト水の漲排水（文献 1-2）より引用

バラスト水管理条約は、IMO の海洋環境保護委員会（MEPC）において検討が行われ、「船舶のバラスト水及び沈殿物の規制及び管理のための国際条約」として 1994 年に採択された。本条約が発効すれば、最終的には、400GT 以上の船舶に対して、バラスト水中の微生物を滅殺する処理装置の搭載が義務付けられるため、海洋生態系破壊の防止に繋がる事が期待されている。なお、本条約は 30 カ国の批准およびその合計船腹量が 35%を越えた日から 12 ヶ月後に発効する事になっている。現在、44 カ国がバラスト水管理条約を批准し、その合計船腹量は全世界の商船全体の 32.57%であり（2015 年 2 月時点）、その発効は間近となっている¹⁻³⁾。なお、条約自体は未発効であるが、米国や豪州などの一部海域においてはポートステートコントロール（PSC）により、バラスト水管理が要求されている場合もあり、すでにバラスト水処理装置を搭載した船舶が建造されている。

IMO における地球環境保護に向けたもう一つの取り組みとして、EEDI 規制¹⁻⁴⁾ (MARPOL

条約の付属書 VI の改正) がある。この規制が行われた経緯を以下に述べる。

図 1.1.2 に示すように、前世紀を通じ、地球全体の平均気温は上昇の一途を辿っている¹⁻⁵⁾。この事は、生態系破壊や海面上昇の要因と考えられおり、地球温暖化の進行を抑制するべきという機運が先進国を中心に高まった。

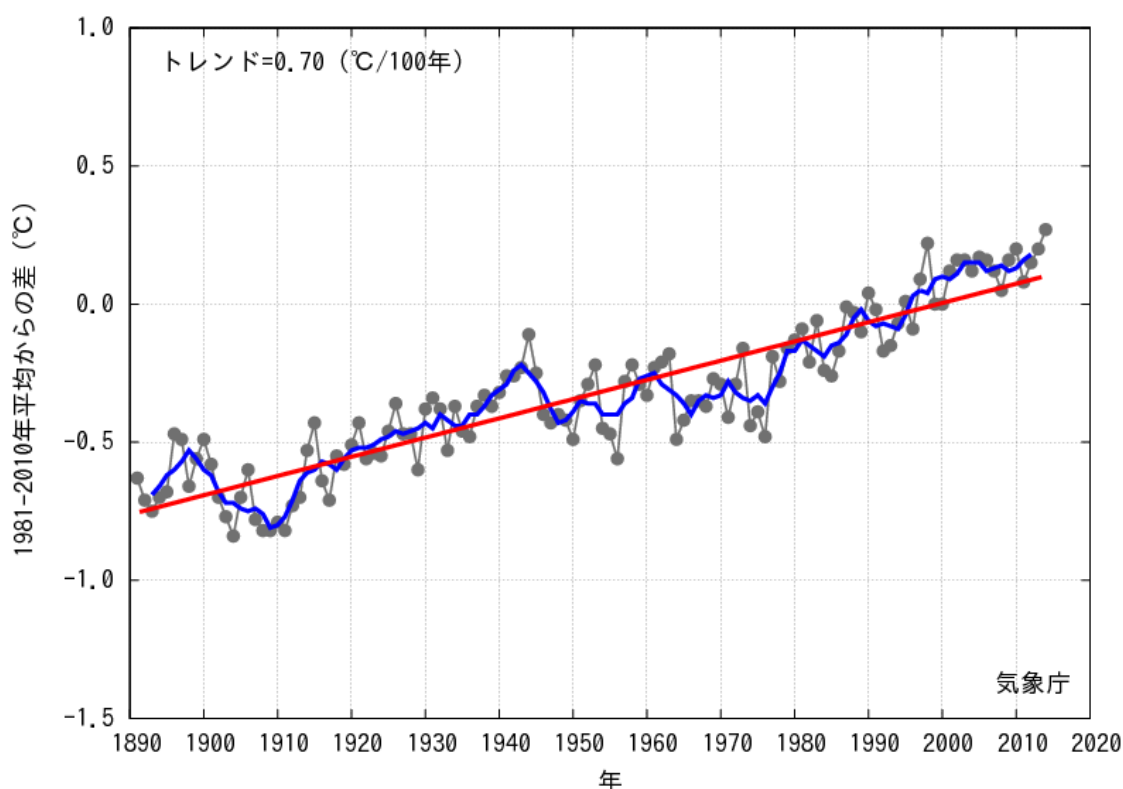


図 1.1.2 世界の年平均気温変化 (文献 1-5) より引用)

地球温暖化の主要な原因として、産業社会がその活動に伴い大量に排出する CO₂ 等の地球温暖化ガス (GHG) が挙げられており、その排出を削減する事が地球温暖化に対する有効な抑制策であると考えられている。GHG の排出量を削減するための具体的な取り組みとして、「国連気候変動枠組条約 (UNFCCC)」が 1992 年の地球サミットにおいて採択され、1994 年に発効した。UNFCCC は枠組条約であり、議定書により国別に排出 GHG の削減量が設定されるが、1997 年の京都議定書により具体的な削減目標が設定され、一定の成果を挙げた事は記憶に新しい。京都議定書は最初の約束期間として 2008 年から 2012 年にかけての削減目標を設定したもので、2013 年以降については、所謂、ポスト京都議定書により規定されるが、2015 年 9 月時点においては 2020 年以降の枠組みの議論が行われている状況である。

UNFCCC では、国毎に GHG 排出削減の目標が設定されるが、京都議定書においては、国際海運と国際航空はその対象外となった。国際海運が UNFCCC で対象外とされた理由とし

ては、その活動（貨物輸送）が公海上で行われる事、また複数国家間にまたがって行われる事から、UNFCCC の枠組みでは合理的な規制を行う事が困難であったためである（なお国内海運は、UNFCCC の枠組みにより GHG 排出削減義務が課せられる）。そのため、国際海運については、IMO において GHG 排出量削減に向けた取り組みを行う事とされた。

IMO の MEPC において、船舶が排出する GHG を削減するための方策の検討を進めた結果、「エネルギー効率設計指標（EEDI）」及び「船舶エネルギー効率管理計画書（SEEMP）」を強制化するための MARPOL 条約附属書 VI の改正案を 2011 年に採択した。改正された附属書 VI は 2013 年 1 月 1 日に発効しており、400GT 以上の外航船舶については、個船毎に、建造・竣工時におけるエネルギー効率設計指標（Energy Efficiency Design Index : EEDI）の取得と、運航時に船舶エネルギー効率管理計画書（Ship Energy Efficiency Management Plan : SEEMP）を備える事が義務付けられる事となった。

EEDI は当該船舶が一定の条件下で 1 トンの貨物を 1 海里輸送する際に排出する CO₂ の排出量であり、この値が少ないほど、物を運ぶ際のエネルギー効率が優れた船舶であることを意味する。一方、船舶は常に貨物を満載した一定速力で運航されている訳ではなく、空荷で回航されている時もあるれば、減速して省エネ運航している時もあるため、実際の運航時における船舶の CO₂ 排出量を把握するための指標が必要となる。それがエネルギー効率運航指標（Energy Efficiency Operational Indicator : EEOI）である。EEOI は当該船舶が実際に運航されている際に、1 トンの貨物を 1 海里輸送するために排出した CO₂ の排出量であり、この値が少ないほど、エネルギー効率に優れた運航がなされた事を意味する。SEEMP は EEOI のモニタリングを通じて、実際の運航時における CO₂ 排出量の削減を促進する取り組みである。

これらバラスト水管理条約や MARPOL 条約附属書 VI の改正に対応するため、前者に対してはバラスト水処理装置が開発され、後者に対しては船型改良、省エネ装置の開発、主機の効率改善等の技術的な取り組みが行われているところである。

これら技術的な取り組み一つとして、船体形状を工夫する事で、バラスト水の搭載量を減らす船、ノンバラスト船（Non-Ballast Water Ship ; NOBS）とバラスト水低減船（Minimal Ballast Water Ship ; MIBS）の設計コンセプトが国内外においていくつか提案されている。NOBS/MIBS について簡単に説明すると、船体形状を工夫する事で、在来船型と比べて、空荷状態におけるバラスト水の搭載量が削減できる船型であり、ある程度のバラスト水の搭載を許容するのが MIBS、完全にゼロにするのが NOBS である。バラスト水処理装置は海洋生物をある程度は滅殺するが、完全に滅殺する事はできないため、たとえ処理済みであるとしてもバラスト水自体を減らす、あるいはゼロとする事が、海洋環境にとっては理想的である。また、バラスト水を減らす事で、空荷状態での船足が非常に軽くなるので、省エネ航海が可能となり、それにより CO₂ 排出量を削減する事もできる。

以上に述べたとおり、NOBS/MIBS はバラスト水移送による海洋環境の負荷をさらに減らせる点と運航時の CO₂ 排出量を削減できる点の両方において、優れた性能を有する次世代

型の船舶であり、今後さらに、NOBS/MIBS の研究開発ニーズが高まる事を予測している。

1. 2 研究の目的

環境性能に優れた NOBS/MIBS の実用化を促進するため、(一財) 日本造船技術センターは(以下、SRC)は、2000 年代の中ごろから、国、民間造船所、関係機関と共同で、NOBS/MIBS の研究開発を行ってきた。SRC が共同開発した NOBS/MIBS は全部で 6 船種あり、一部の成果は公表されている(第 2 章にて述べる)。それらの研究開発において、筆者は NOBS/MIBS の初期船型計画、線図設計、水槽試験計画の立案及び実施を担当したが、その船体形状が在来船型のそれと大きく異なるため、在来船型を対象とする既存の初期船型計画に関するツールが使用できず、手探り状態で初期船型計画を行わざるを得ない事が、大きな問題であった。

本研究では NOBS/MIBS の開発において、筆者が担当した作業を通じて得た知見を纏めた上で、NOBS/MIBS の初期船型計画を効率化するための手法を構築した。

本研究の目的は、**NOBS/MIBS の効率的な初期船型計画法を構築する事**にあり、それによって数多くの NOBS/MIBS の検討を効率良く行う事を可能とし、実用化に繋げる事を意図している。

1. 3 研究の構成

前述の目的を達成するために、本研究を以下の項目で構成する。

- | | |
|----------------------------------|---------|
| 1) NOBS/MIBS のコンセプトと過去の開発事例の紹介 | < 2 章 > |
| 2) 初期船型計画で扱う船型パラメータの設定 | < 3 章 > |
| 3) 平水中推進性能の簡易推定法の構築 | < 4 章 > |
| 4) 2)、3)に基づく VLCC 船型の MIBS の検討 | < 5 章 > |
| 5) 4)で検討した MIBS を対象とした CFD 計算の実施 | < 6 章 > |

まず、2 章において、NOBS/MIBS のコンセプト(バラスト水の搭載量を削減できる仕組み)について述べる。次に、過去に提案された、NOBS/MIBS の設計コンセプトを紹介する。3 章では、NOBS/MIBS の初期船型計画で扱う船型パラメータを設定する。4 章では NOBS/MIBS に対応した満載状態と空荷状態における平水中推進性能を主要目ベースで簡易推定する手法を構築する。5 章では、2 章で設定した船型パラメータと 3 章で構築した平水中推進性能の簡易推定法を用いて、在来船型、MIBS、NOBS のそれぞれについて、主要目と推進性能の検討を行う。6 章では、5 章で検討した MIBS を対象に CFD 計算を行い、満載状態の推進性能を確認し、併せて、実績豊富な在来船型をタイプシップとして、NOBS/MIBS の初期船体形状を生成する簡便な手法を示す。CFD 計算の精度は、大型模型船による水槽試験結果と比較して確認する。7 章はまとめである。

参考文献

- 1-1) 小島隆志：バラスト水管理条約に関する最新動向，咸臨，第 39 号，pp.8-13，2011.
- 1-2) 日本海難防止協会ウェブサイト：http://www.nikkaibo.or.jp/business_pollution.html，2015 年 6 月 19 日参照.
- 1-3) 一般財団法人日本海事協会テクニカルサービス部：バラスト水管理における地域規制の動向，Class NK PEERLESS ワークショップ資料，2015.
- 1-4) 一般財団法人日本海事協会 EEDI 室：EEDI の概要および認証について，咸臨，第 53 号，pp.12-20，2014.
- 1-5) 気象庁ウェブサイト：http://www.data.jma.go.jp/cpdinfo/temp/an_wld.html，2015 年 6 月 19 日参照.

2. NOBS/MIBS の概要

2. 1 NOBS/MIBS のコンセプト

NOBS/MIBS の船型は、中央横断面形状に特徴がある。その概略形状を在来船のそれと比較して図 2.1.1 に示す。空荷状態における排水量は、在来船型が一番多く、次に MIBS、一番少ないのが NOBS である事が分かる。この独特な形状が、バラスト水を減らしても、プロペラ没水深度を確保できる理由である。一方、満載状態では、下に凸の船体形状により船底付近で排水量が減少するが、主要寸法等（全長、幅、喫水、 C_p ）を増やせば、減少する排水量を補い在来船型と同じ載貨重量を保持する事ができる。図.2.1.1 に示したのは拡幅により NOBS/MIBS の載貨重量を確保する例である。

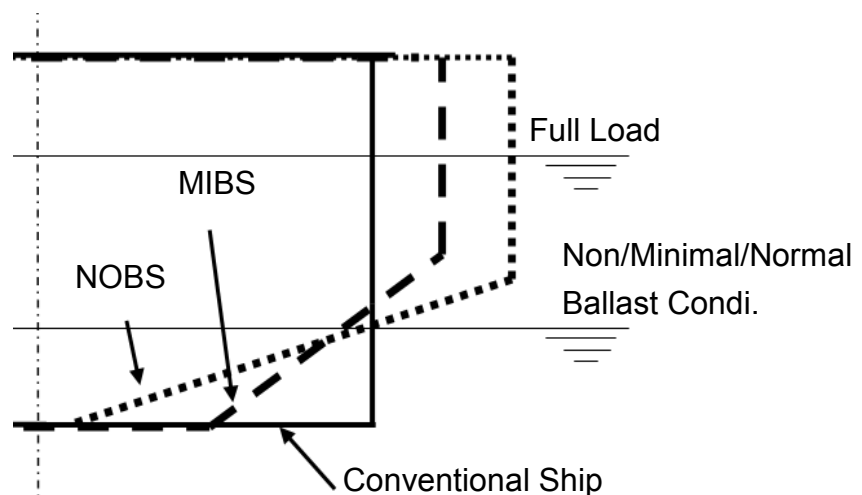


図 2.1.1 中央断面形状のコンセプト

2. 2 過去提案された NOBS/MIBS

序論でも簡単に触れたが、これまでに国内外で NOBS/MIBS の設計コンセプトがいくつか提案され、いずれも優れた環境性能を有しているとの報告がなされている。本節では、過去提案された NOBS/MIBS の設計コンセプト等について解説を行う。

(1) 三井造船；欧州特許（1968 年）

本特許は三井造船（当時）が欧州特許庁に対して出願し、認められたもので²⁻¹⁾、船体形状を工夫する事で、バラストタンクを不要とするというのが特許クレームである。本特許は、当時、シングルハルの原油タンカーが貨物タンクをバラストタンクとして兼用しており、そこから排出されるバラスト水に混じった油分による海洋汚染が問題視され、その防止策として出願されたものである。図 2.2.1 に示すように、下に凸の船底形状により、バラスト水を搭載しなくても、十分な喫水を確保できるというのが発明の概要である。なお、

カーゴタンク兼用のバラストタンクから排出される油濁バラスト水による海洋汚染については、ダブルハル化に伴い分離バラストタンクを設置するという対策が採用されたため、本特許に基づく実船建造はなされなかったようである。文献 2-1)には具体的な船種、主要目等の記載はなく、特許取得のためのアイデア提案のみ行われている。

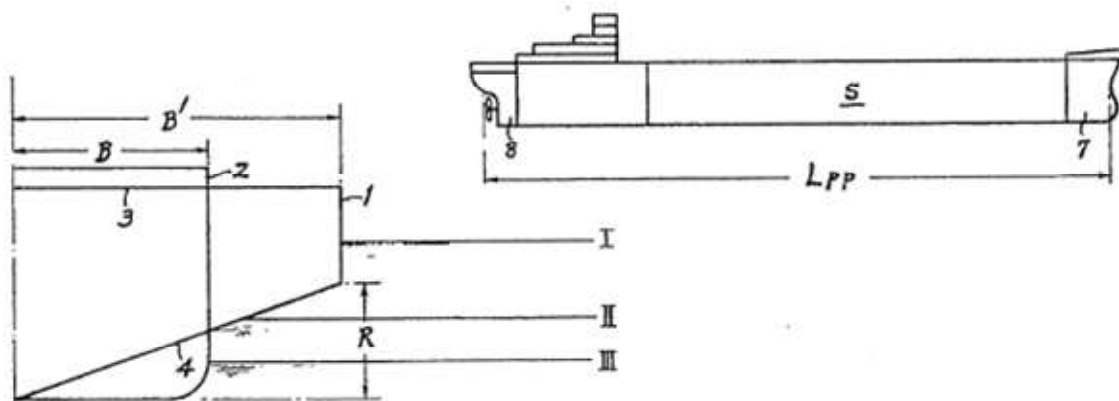


図 2.2.1 ホールドバラストレスタンカーのコンセプト (文献 2-1) FIG.1、FIG.2 より引用)

(2) 日本造船技術センター；米国特許、欧州特許、中国特許 (2002 年)

本特許は、SRC が米国、欧州 (指定国；ドイツ、イタリア、スウェーデン)、中国の特許庁に対し出願し、認められたもので^{2-2)、2-3)、2-4)}、船体形状を工夫する事と上下昇降式ポッド推進器、浮力発生装置を組み合わせる事で、バラスト水の排出をゼロとするというのが特許クレームである。本特許は、バラスト水管理条約が 2004 年に採択される事を受けて、バラスト水中の海洋生物による海洋生態系の破壊を防止するために出願されたものである。バラスト水を不要にする仕組みは、文献 2-1)と同様で、図 2.2.2 に示す下に凸な船底形状がベースである。この船体形状の工夫に加えて、図 2.2.3 に示す上下昇降式ポッド推進器、図 2.2.4 に示す浮力発生装置を必要に応じて組み合わせる事で、バラスト水ゼロを達成する。

上下昇降式ポッド推進器は、喫水自体が浅くてもプロペラ没水深度を確保する事を可能とするものである。浮力発生装置は、満載状態では、気体を充填して浮力を生じさせる一方で、空荷状態では、海水を充填して浮力を消失させるものである。形状は船体に縦通するパイプ状のものであり、空荷状態では海水が同装置内を淀みなく流れるように同装置の前後に開口部を設ける事で、海洋生物の海域間移送を防止する。なお、文献 2-2)、2-3)、2-4)には具体的な船種、主要目等の記載はなく、特許取得のためのアイデア提案のみ行われている。

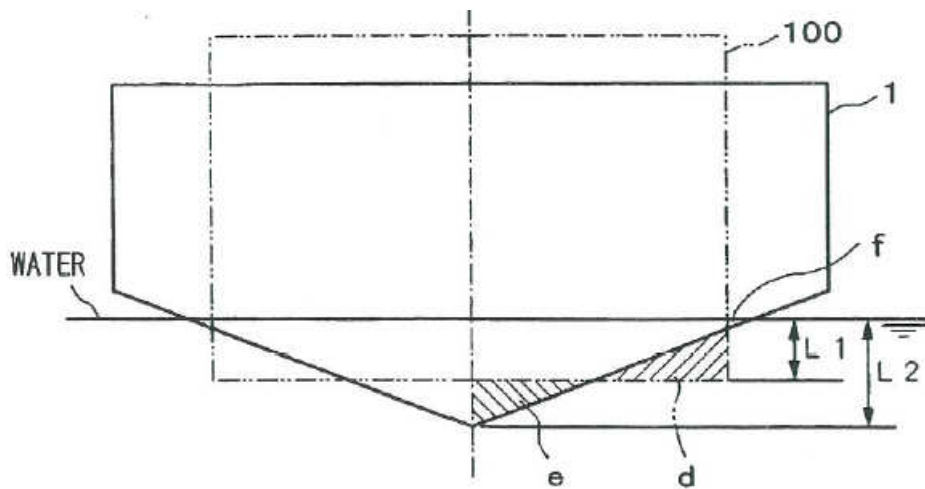


図 2.2.2 船体中央断面形状 (文献 2-3) FIG.4 より引用)

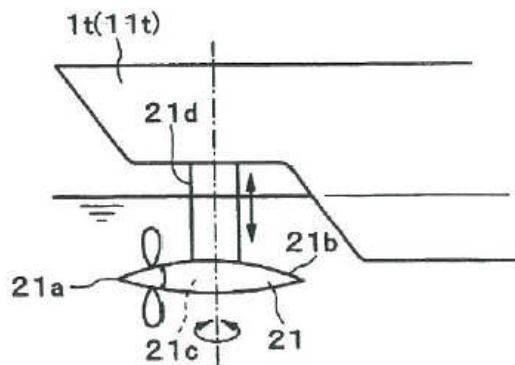


図 2.2.3 上下昇降ポッド推進器
(文献 2-3) FIG.8B より引用)

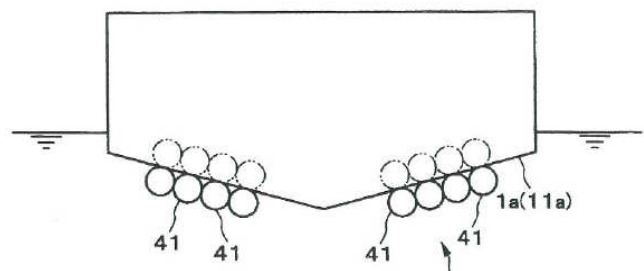


図 2.2.4 浮力発生装置
(文献 2-3) FIG.10 より引用)

(3) 日本造船技術センター、他；ノンバラスト船 (2006 年)

ノンバラスト船 (NOBS) は SRC の発案により、国の主導の下、(独) 鉄道建設・運輸施設整備支援機構ならびに (財) 日本財団の助成事業として、(財) 日本船舶技術研究協会の協力の下に (財) 日本海事協会、三菱重工業 (株)、(株) IHI マリンユナイテッド、SRC が共同開発したものである (組織名称は当時のもの)²⁻⁵⁾。NOBS は、SRC が取得した前記の特許に示したコンセプトに基づき、図 2.2.5 と 2.2.6 に示すような、下に凸な船底形状によりバラスト水をゼロにする船舶である。なお、上下昇降式ポッド推進器と浮力発生装置については、コストを勘案して、開発対象から外された。開発した船種は、図 2.2.7 と 2.2.8

に示すスエズマックスタンカーと VLCC で、船型設計、一般配置、縦強度、横強度について検討を行った。推進性能、安全性に関する諸性能は、大型模型船を製作し、様々な水槽試験（抵抗・自航試験、PMM 試験、波浪中試験（正面及び斜め向波中）、自由横揺れ試験）を行い確認した。この NOBS の研究開発には筆者は SRC の一員として参加し、そこで担当した作業を通じて得た知見が本研究に反映されている。以下、文献 2-5)に示されている NOBS の諸性能について一部紹介する。

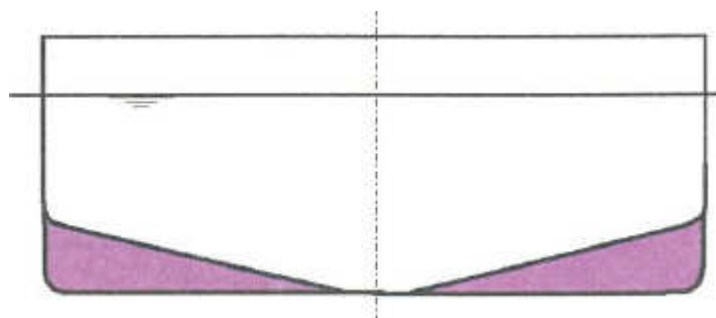


図 2.2.5 ノンバラスト船のコンセプト（文献 2-5）図 4 より引用）

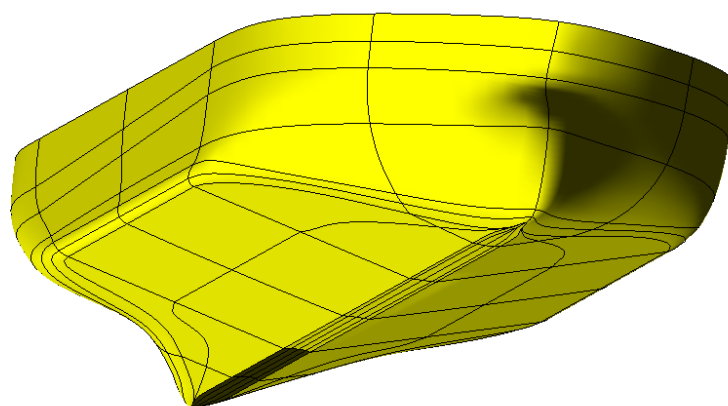


図 2.2.6 ノンバラスト船の 3D 画像

OUTLINE ARRANGEMENT

Lpp x B x D - d(des.)
267.0 m x 56.0 m x 22.5 m - 16.0 m

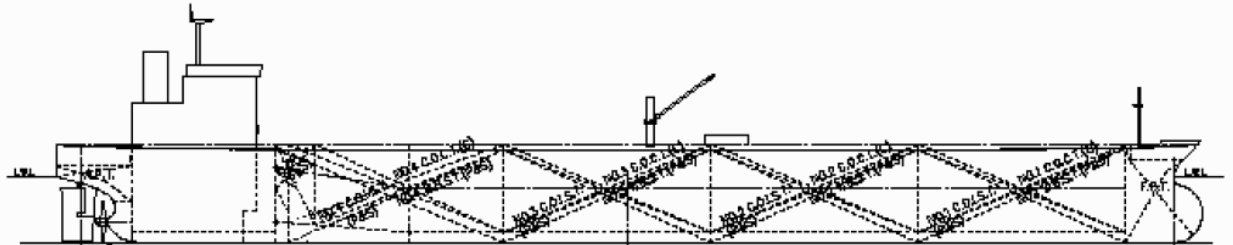
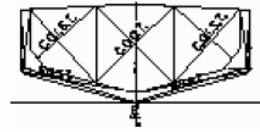


図 2.2.7 スエズマックスタンカー一般配置 (文献 2-5) 図 30 より引用)

ROUGH ARRANGEMENT

LENGTH (O.A.) APPROX 330. M
LENGTH (S.P.) 317.50 M
BREADTH (MLD) 70.00 M
DEPTH (MLD) 27.30 M
DRAUGHT (MLD) DESIGN 19.10 M

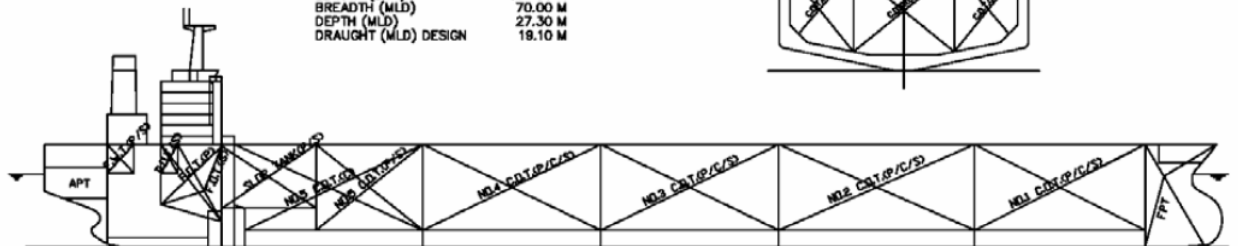
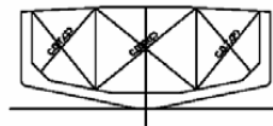


図 2.2.8 VLCC 一般配置 (文献 2-5) 図 31 より引用)

先に述べたとおり、NOBS は大型模型船による抵抗・自航試験が行われており、それにより推定された BHP カーブを図 2.2.9 に示す。自航試験の様子を図 2.2.10 に示す。図 2.2.9 を見ると、NOBS の BHP は、在来船型のそれと比べて、満載状態では少し悪化するが、空荷状態では大幅に改善している事が分かる。これはバラスト水を搭載しない事で、排水量を大幅に削減できたためである。

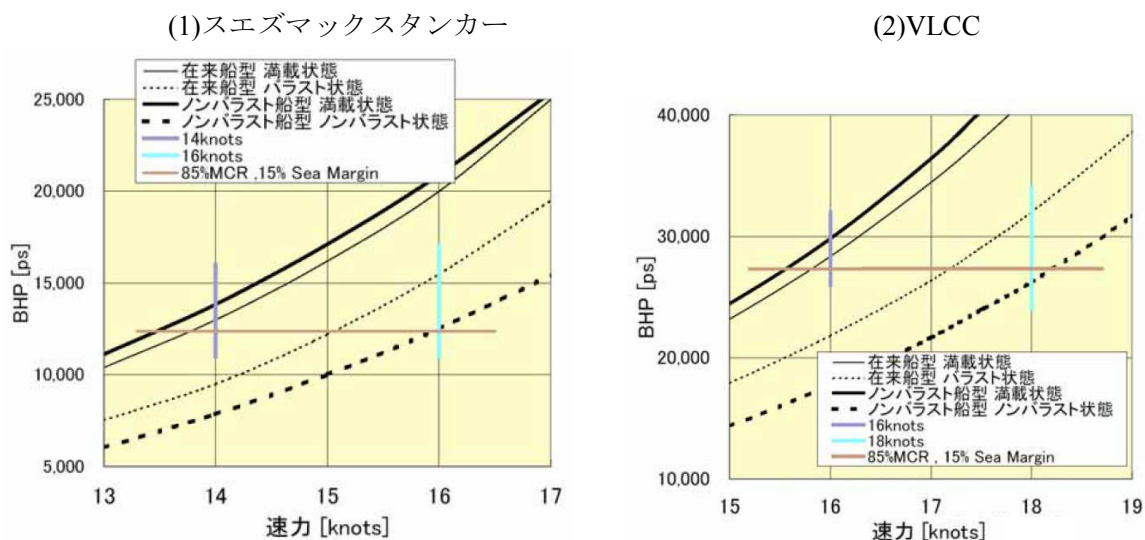


図 2.2.9 BHP カーブ (文献 2-5) 図 6、7 より引用)

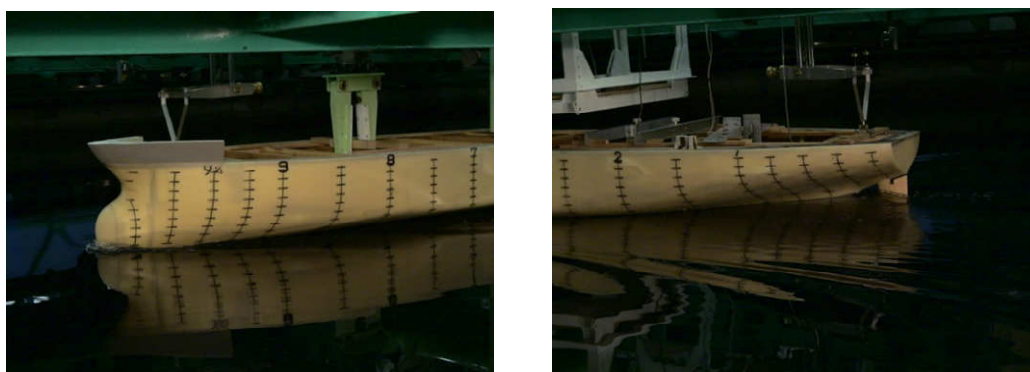


図 2.2.10 自航試験の様子 (スエズマックスタンカー、ノンバラスト状態)

次に、NOBS のプロペラ面伴流分布の計測を行い、伴流分布とキャビテーションを考慮したプロペラ設計を、スエズマックスタンカーを対象に行い、NOBS の船尾流場がプロペラ設計に際して問題を生じない事を確認した。図 2.2.11 に NOBS のプロペラ面伴流分布を、図 2.2.12 に設計したプロペラに生じたキャビテーションを示す。

(1)スエズマックスタンカー

(2)VLCC

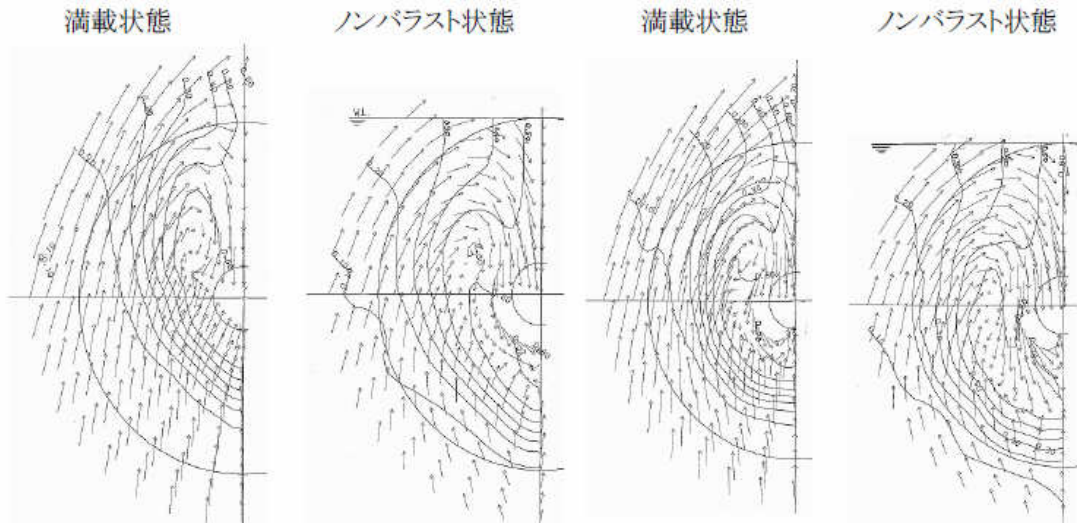


図 2.2.11 NOBS のプロペラ面伴流分布 (文献 2-5) 図 8、9 より引用)

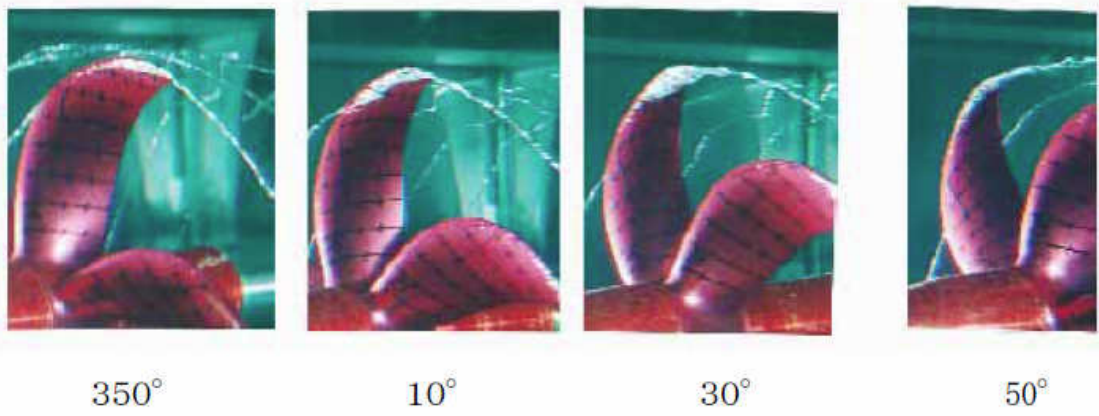


図 2.2.12 NOBS (スエズマックスタンカー) のプロペラ模型の
キャビテーション (文献 2-5) 図 26 より引用)

また、波浪中抵抗増加も波浪中試験により確認した。図 2.2.13 に長波頂不規則正面向波中での波浪中抵抗増加量を示す。これを見ると NOBS の波浪中抵抗増加は満載状態では在来船型より多いが、空荷状態では少なく、平均的には同程度となっている事が分かる。

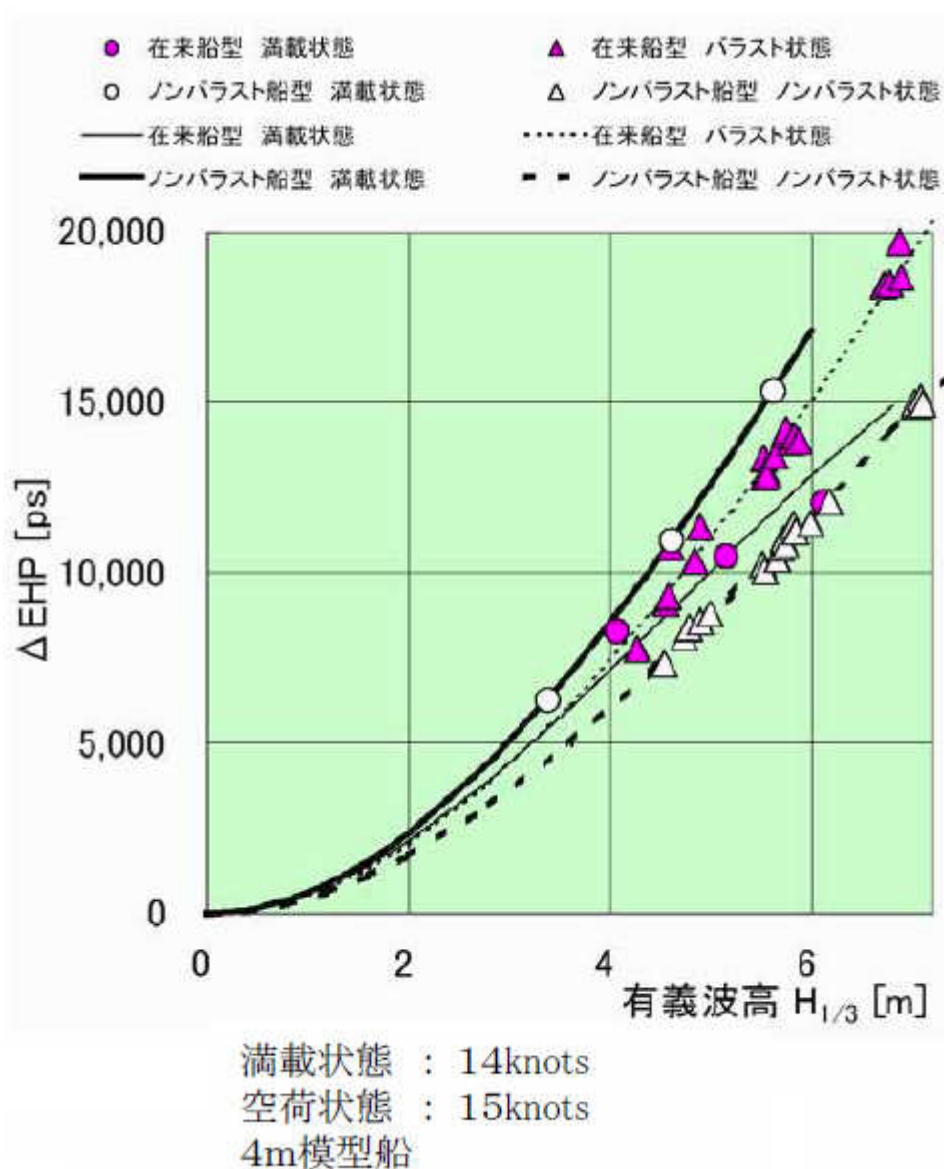


図 2.2.13 NOBS (スエズマックスタンカー) の波浪中抵抗増加量
(文献 2-5) 図 23 より引用)

続いて、安全性能について紹介する。図 2.2.10 の船尾側を見ると、ノンバラスト状態でもプロペラが水面上に露出せず、十分な没水深度を保っている事が確認できる。一方、図 2.2.10 の船首側を見ると、船首喫水が浅い事が分かる。NOBS の研究開発では、バラスト水の搭載量をゼロとするために、可能な限り喫水を小さく設計しており、スエズマックスタ

ンカーでは、在来船型のノルマルバラストにおける船首喫水が 5.8m であるのに対し、NOBS の船首喫水は 3m としている。船首喫水が浅くなると、船首船底スラミングが発生し、船底に損傷を生じる可能性が高くなるが、V 字船底形状はスラミングによる衝撃圧力が緩和されるため、波浪中試験によりスラミング衝撃圧力を実際に計測する事で、安全性を確認した。

この船首船底スラミングに対する安全性を確認するための波浪中衝撃圧計測試験は、在来船型と NOBS（スエズマックスタンカー）について行われた。船首船底に約 10 個の圧力変換器を設置して、長波頂の正面向波（規則波、不規則波）、斜め波（規則波）における圧力波形を計測し、安全性を検討した。その結果、NOBS のノンバラスト状態と在来船型のノルマルバラスト状態ではスラミング衝撃圧力に対する安全性は同程度である事が確認された。いくつか行われた検討から代表的なものとして図 2.2.14 に不規則波中での試験結果を示す。これは衝撃圧力の時系列に対する船底外板の応答を求め、相当静水圧に換算したグラフであるが、1000 波最大の値は在来船型と NOBS とで同程度である事が分かる。

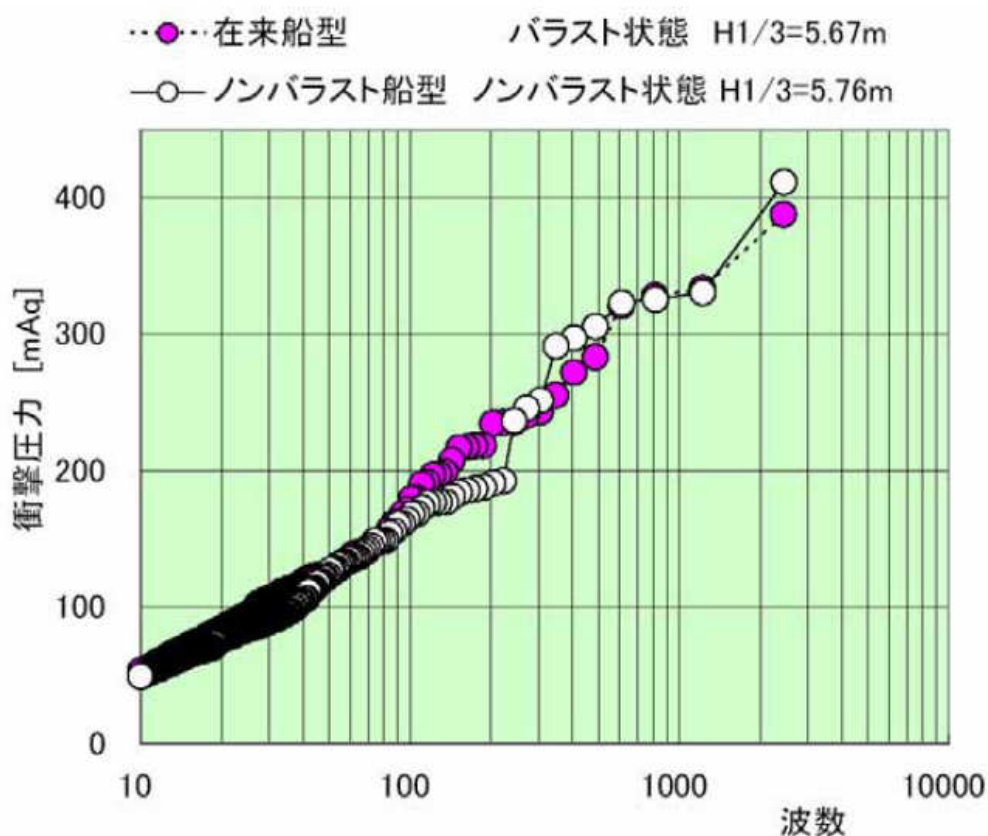


図 2.2.14 船首船底衝撃圧力の不規則波中試験結果の比較（文献 2-5）図 16 より引用

他に波浪中試験として、スエズマックスタンカーの在来船型と NOBS について、分割模型船による船体中央部における縦曲げモーメントの計測も行った。図 2.2.15 に水槽試験結果とストリップ法による計算結果を示す。これらを踏まえて、NOBS の試設計における M_w

は、在来船型の M_w の IACS 算式を図 2.2.16 に示すように修正して用いる事とした。

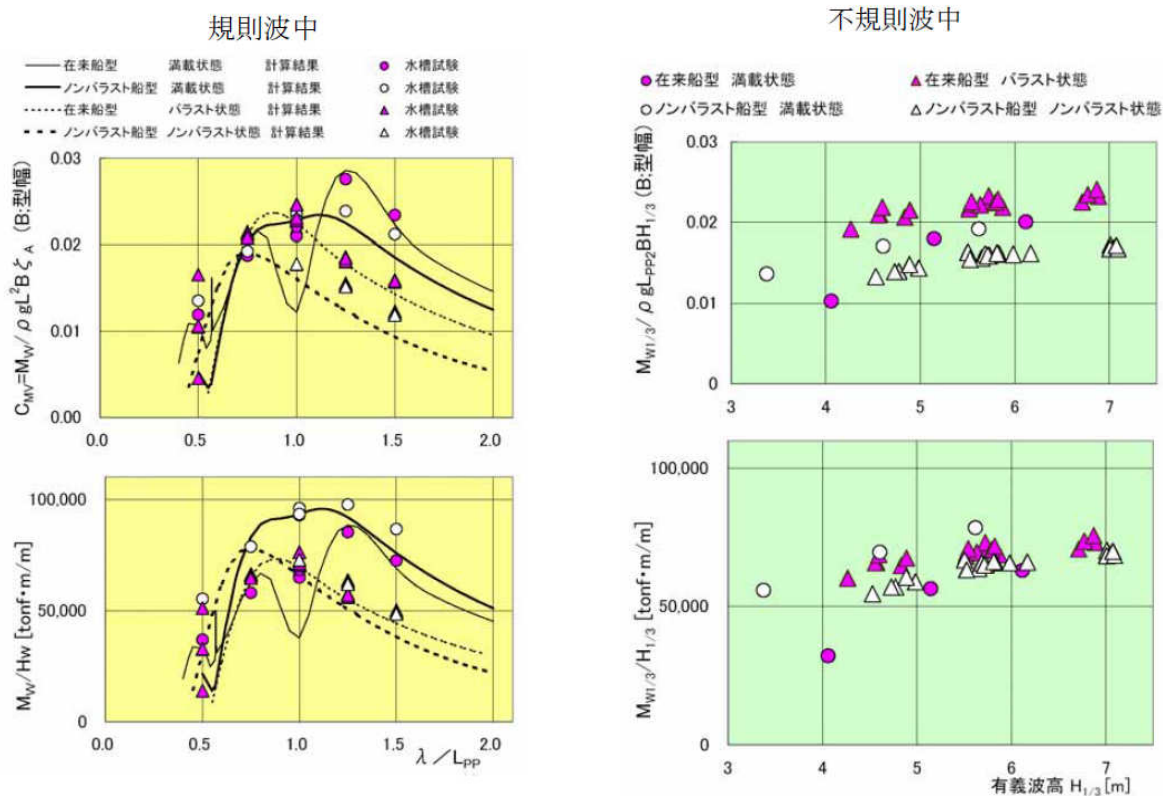


図 2.2.15 船体中央の縦曲げモーメント（スエズマックスタンカー、文献 2-5）図 13 より引用）

(1)スエズマックスタンカー

(2)VLCC

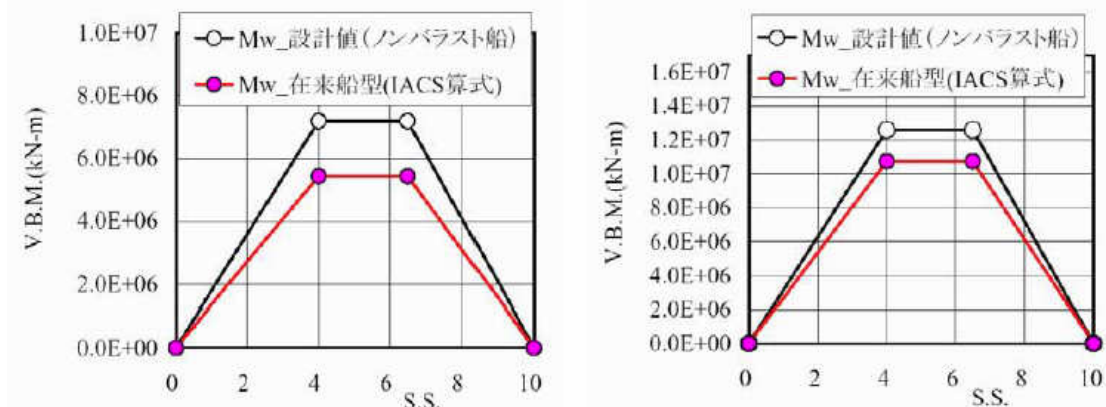


図 2.2.16 NOBS の試設計に使用した縦曲げモーメント（文献 2-5）図 16 より引用）

安全性能としては、操縦性能も重要であるので、満載状態において大型模型船によるPMM試験を行い、そこで得た諸係数を用いて、操縦運動シミュレーションを行った。表2.2.1に操縦運動シミュレーションによる各種性能指標とIMO基準を示す。図2.2.17にスパイラル特性を示す。この表と図から、NOBSはIMO基準をクリアすると同時に、不安定ループ幅の小さい、操縦性能に優れた船型である事が分かる。

表 2.2.1 NOBS（スエズマックスタンカー、満載状態、文献 2-5）表 2 より引用）

旋回性能	$\delta = +35^\circ$	-35°	IMO基準
アドバンス/ L_{pp}	3.69	3.65	4.5以下
タクティカルダイアメーター/ L_{pp}	4.34	4.30	5.0以下
初期旋回性能	$\delta = +10^\circ$	-10°	IMO基準
トラックリーチ/ L_{pp}	1.86	1.81	2.5以下
保針性能	$\delta = +10^\circ$ -10°	-10° $+10^\circ$	IMO基準
第一オーバーシュート角	4.3°	5.6°	20° 以下
第二オーバーシュート角	10.0°	8.0°	40° 以下
	$\delta = +20^\circ$ -20°	-20° $+20^\circ$	IMO基準
第一オーバーシュート角	8.4°	9.2°	25° 以下

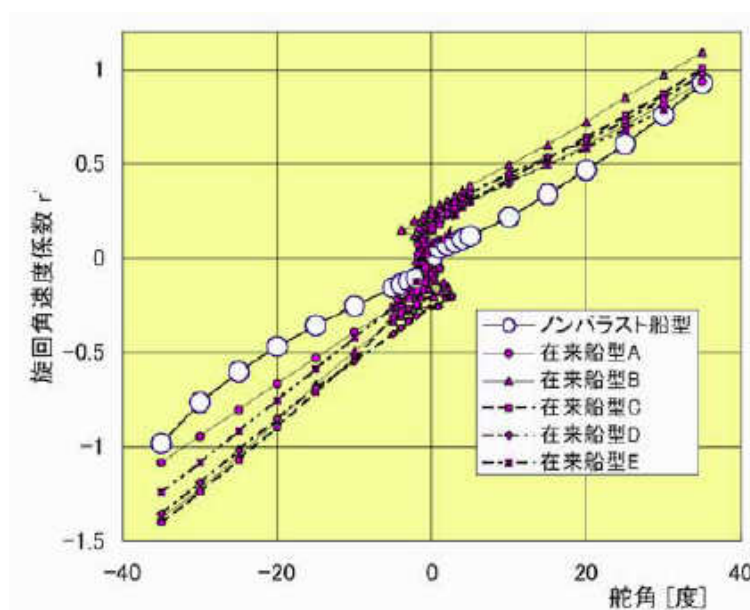


図 2.2.17 NOBS のスパイラル特性（文献 2-5）図 24 より引用）

NOBS の研究開発にて得られた結論は以下のようなものであり、必要な安全性能を満たしつつ、環境性能に優れた船舶である事が確認された。一方、船底幅が非常に狭い V 字船底形状は、建造、修繕時において特別な盤木や支持構造が必要となるため、インフラ面については解決すべき課題がある事が分かった。

a) 耐航性能

バラスト水を搭載しない空荷状態でも在来船型の空荷状態と同等の耐航性能を有する。

b) 推進性能

推進性能が在来船型に比べて 6%以上向上した。

c) 操縦性能

IMO 操縦性基準を満たしている。

e) 船殻重量

船殻重量増加により建造費が増加するが、推進性能向上により 15 年程度で回収できる。

(4) チャルマース工科大学；バラストフリータンカー（2004 年）

The Ballast-free Tanker（以下、バラストフリータンカー）は、スウェーデンのチャルマース工科大学の Anders Germundsson らによる修士論文として、2004 年に発表された²⁻⁶⁾設計コンセプトである。バラストフリータンカーも SRC の NOBS と同様に、図 2.2.18 に示すような下に凸な船底形状により、バラスト水の搭載量をゼロにする船型である。検討が行われたバラストフリータンカーのサイズは VLCC で、想定航路は中東～北米（Louisiana Offshore Oil Port）と中東～東アジアの 2 種類であった。前者の航路に対しては図 2.2.19(1)に示す”B-MIN Optimal”船型が、後者の航路に対しては図 2.2.19(2)に示す”B-MIN Malacka-max”船型が設計された。

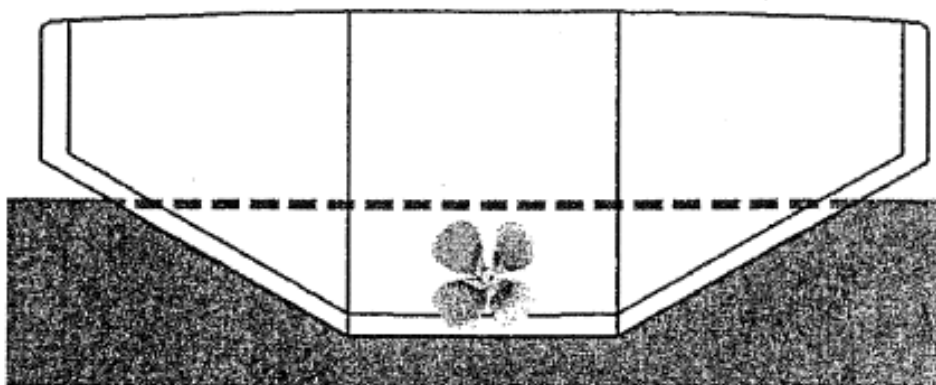
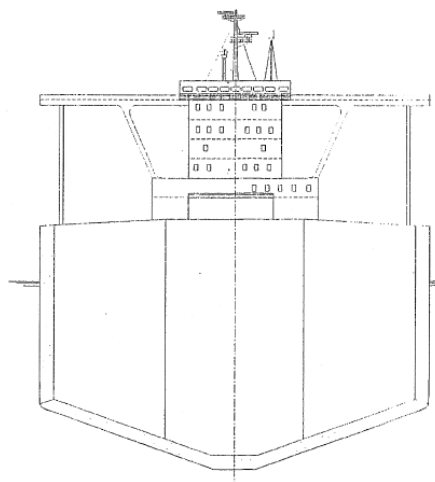


図 2.2.18 バラストフリータンカーのコンセプト（文献 2-6) Fig.5 より引用）

(1) B-MIN Optimal



(2) B-MIN Malacka-max

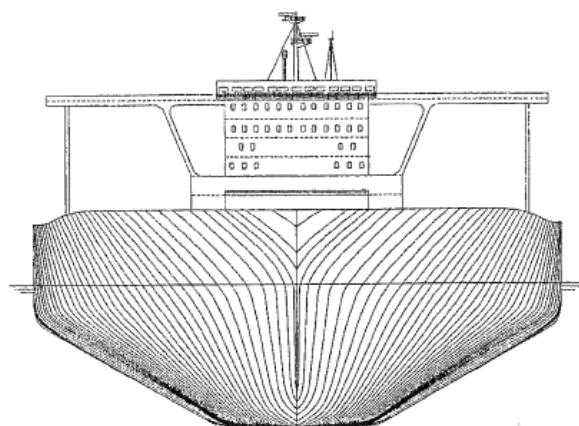


図 2.2.19 “B-MIN Optimal”船型及び“B-MIN Malacka-max”船型
(文献 2-6) Fig.17 より引用)

(5) DNV ; TRIALITY (2010 年)

TRIALITY は、原油タンカーの革新的なコンセプトとして、ノルウェー船級協会 (DNV) から提案され²⁻⁷⁾、バラスト水規制のみならず、今後想定される様々な環境規制の強化に対処するため、以下に示す4つのアイデアが導入されている。

- 一船体と貨物タンクの配置により、バラスト水不要の船舶を実現する。
- 一船舶の主燃料として LNG を使用する。
- 一低温 LNG を使用して、航海中に排出される揮発性有機化合物 (VOC) による汚染をなくす。
- 一低温 LNG を使用して、排気を冷却する事で主機の効率を改善する。

バラスト水を不要とする仕組みは、図 2.2.20 に示すように、下に凸な船底形状が用いられており、SRC の NOBS と同じである。

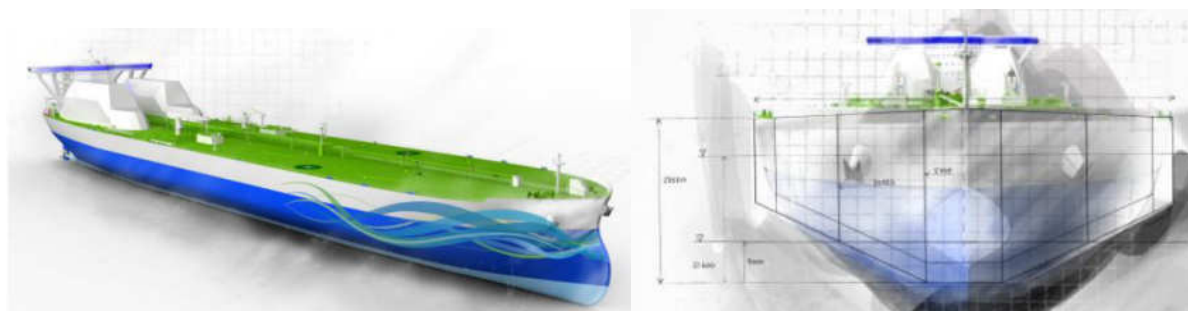


図 2.2.20 “Triality”のイメージスケッチ (文献 2-7) 表紙及び p.9 より引用)

(6) Guangzhou XED Ship Design Co.,Ltd. ; Non Ballast Seawater

Guangzhou XED Ship Design 社はその Web サイト²⁻⁸⁾上で、NOBS Oil Tanker の設計コンセプトを提案している。バラスト水を不要とする仕組みは、図 2.2.21 に示すように、下に凸な船底形状が用いられており、SRC の NOBS と同じである。

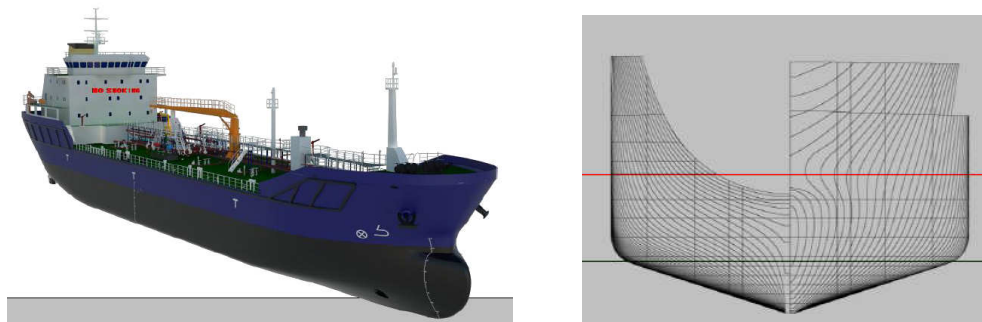


図 2.2.21 NOBS Oil Tanker のイメージスケッチ及びフレームライン
(文献 2-8) より引用)

(7) 大阪府立大学 ; ノンバラスト&K0タンカー (2012年)

ノンバラスト&K0タンカー・バルカーは大阪府立大学 池田教授の発案により、大阪府立大学と日本海事協会を中心として、民間8社が参画した共同研究プロジェクトにて開発され、以下に示す4つのアイデアが導入されている²⁻⁹⁾。

- ー上下昇降式ポッド推進器により、少ない喫水でもプロペラ没水深度を確保する。
- ー船首機関室によりトリムを解消する。
- ー丸型断面形状により浸水表面積を最小にして摩擦抵抗を最小化する。
- ー船尾をバトックフロー船型として流線形化する事で粘性圧力抵抗を最小化する。

バラスト水を不要とする仕組みは、図 2.2.22 に示すように、丸型の船底形状と上下昇降式ポッド推進器を組み合わせるものである。

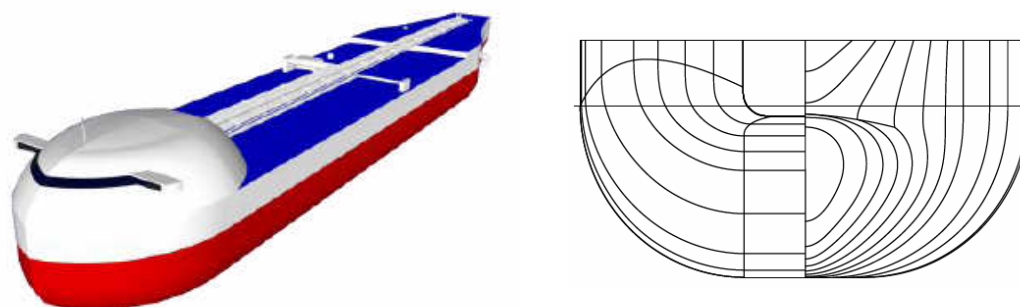


図 2.2.22 ノンバラスト&K0タンカー・のイメージスケッチ及びフレームライン
(文献 2-9) Fig. 1、Fig. 5 より引用)

(8) 日本造船技術センター、他；バラスト水低減船 (2013 年)

SRC の NOBS ((2) にて既述) は、バラスト水の搭載量をゼロとする事が主な開発目的であったため、推進性能の改善の優先度は低く、特に満載状態における推進性能の観点からは、理想的ではない船型となっている。一方、バラスト水を減らす事は、空荷状態における推進性能向上に繋がる事が確認できた。ここで、空荷状態だけでなく、満載状態についても推進性能を向上させる事を目指す、バラスト水低減船 (MIBS) のコンセプトが SRC によって発案され、国の主導の下、大島造船所、名村造船所、SRC の共同研究により、MIBS は開発された^{2-10) 2-11)}。

MIBS がバラスト水搭載を減らす仕組みは、NOBS と同様に、下に凸な船底形状による。NOBS と異なる点は、図 2.2.23 に示すような、建造、修繕時に特別な盤木や支持構造を必要としない、十分な大きさのフラットボトムを確保している点と、そのためにバラスト水のある程度搭載する必要がある点である。MIBS は満載状態及び空荷状態のそれぞれにおいての推進性能を改善し、バラスト水搭載量は在来船型のそれより 60%以上削減する事を開発目標とした。MIBS は図 2.2.24 に示すバルカーと図 2.2.25 に示す VLCC について開発を行い、大型模型船を用いた水槽試験により、満載状態と空荷状態について在来船型よりも優れた推進性能を持つ事を確認した。また、バラスト水搭載量は在来船型のそれより 60%以上削減できており、開発目標は達成された。VLCC の MIBS については名村造船所が日本海事協会からコンセプト承認を取得している²⁻¹²⁾。

なお、MIBS の研究開発には筆者は SRC の一員として参加し、そこで担当した作業を通じて得た知見が、本研究に反映されている。

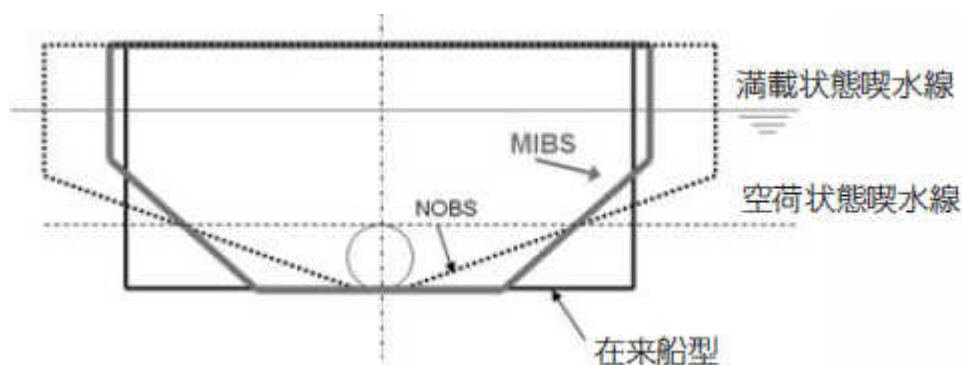


図 2.2.23 バラスト水低減船のコンセプト (文献 2-10) 図 2-1 より引用)

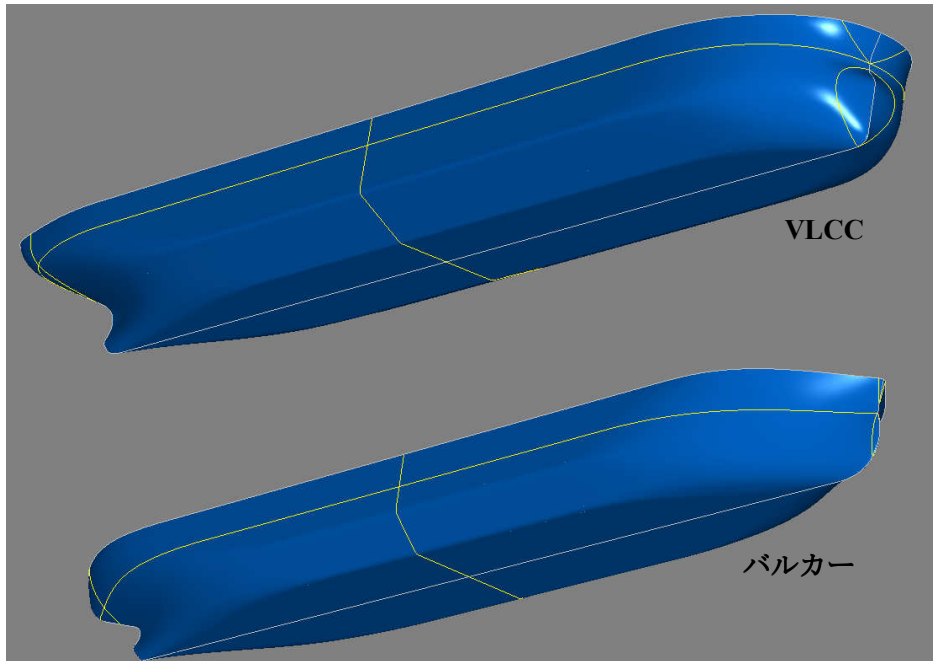


図 2.2.23 バラスト水低減船の 3D 画像 (文献 2-11) 図-2 より引用)

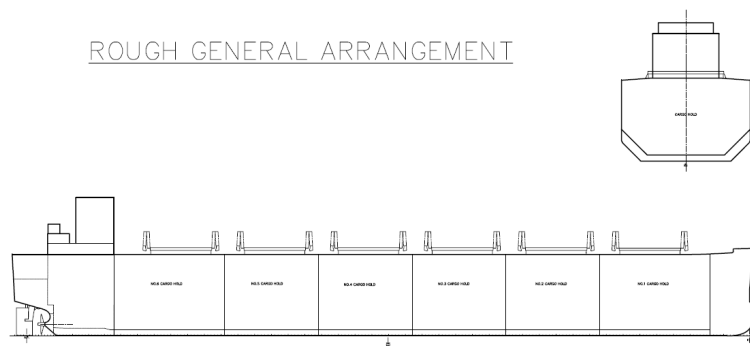


図 2.2.24 バルカー概略一般配置 (文献 2-10) 図 2-3 より引用)

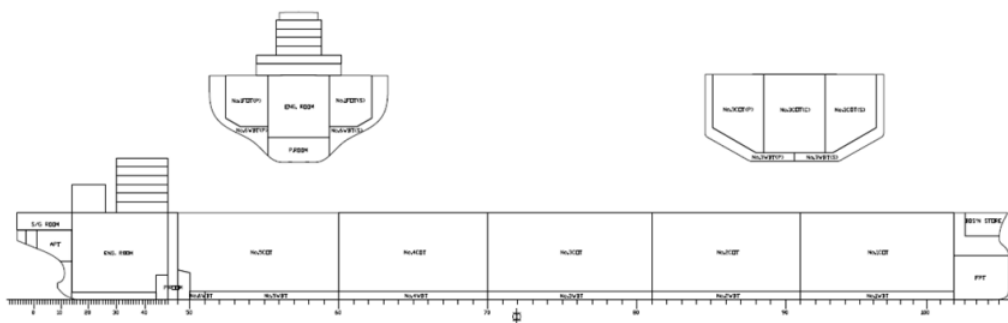


図 2.2.25 VLCC 概略一般配置 (文献 2-10) 図 2-2 より引用)

(9) サノヤス造船；レスバラストチップ船（2015年）

レスバラストチップ船は、サノヤス造船が提案する、在来船型と比べてバラスト水搭載量を40%削減できるチップ船の設計コンセプトである²⁻¹³⁾。レスバラストチップ船がバラスト水を減らす仕組みは、図 2.2.26 に示す楕円型の船底形状により、少ない排水量でも十分な喫水を確保するというものである。また、バラスト水を削減する事により、空荷状態での推進性能の改善のみならず、従来のチップ船では必須なバラスト兼用艙が不要となり、バラストタンクのみで対応可能となるので、チップの海水濡れ防止や兼用艙の錆対策が不要となるといったメリットが得られる船型である。

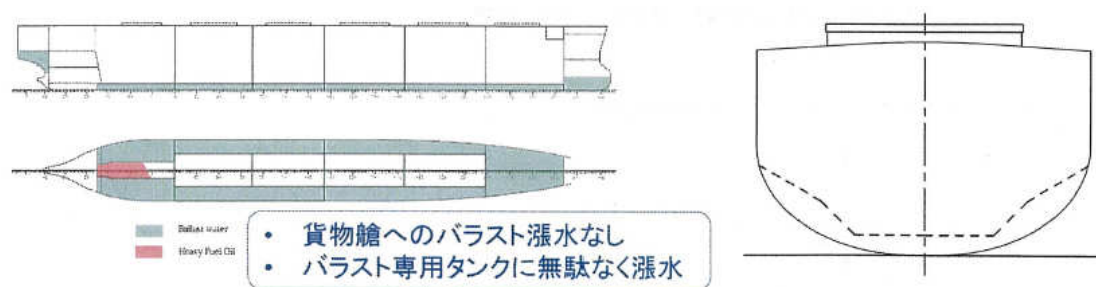


図 2.2.26 レスバラストチップ船概略一般配置（文献 2-12） p.130 より引用）

2. 3 NOBS/MIBS の主要寸法

前節にて、過去提案された NOBS/MIBS の設計コンセプトを紹介したが、具体的な主要寸法が判明している (3) ~ (9) の NOBS/MIBS に共通の要素として、主要寸法の拡大がある。ここで、表 2.3.1 に各文献で示された在来船型と NOBS/MIBS の主要寸法をまとめて示す。また、主要寸法の拡大量を一元的に把握するため、NOBS/MIBS の全長×幅×喫水の値 (LBd) と在来船型 (Conventional Ship ; C.S.) のそれとの比 ($LBd_{NOBS/MIBS} / LBd_{C.S.}$) を示す。MIBS については、そのバラスト水の搭載量と在来船型のそれとの比も示す。

表を見ると、 $LBd_{NOBS/MIBS} / LBd_{C.S.}$ はすべて 1 を越えており、これまでに提案された NOBS/MIBS の主要寸法はすべて在来船型より拡大されている事が分かる。LBd は NOBS では概ね 1.2~1.4、MIBS では 1.05~1.18 となっており、NOBS の LBd は MIBS のそれより大きい傾向がある事が分かる。

以上のように、NOBS/MIBS を設計する際には、主要寸法の拡大とそれに伴う C_p 、 C_M の見直しが必須であり、適切な主要寸法の設定が、開発自体の成否に直結すると言っても過言ではない。次章では、NOBS/MIBS を対象として主要寸法等の検討を効率良く行う手法を示す。

表 2.3.1 NOBS/MIBS の主要寸法等

名称	(3)ノンバラスト船				(4)バラストフリータンカー			
	SRC,他				チャルマース工科大学			
船種	スエズマックス tanker		マラッカマックス VLCC		Optimal VLCC		マラッカマックス VLCC	
タイプ	在来船型	NOBS	在来船型	NOBS	在来船型	NOBS	在来船型	NOBS
L [m]	265.0	267.0	316.0	317.5	333.0	325.0	333.0	322.0
B [m]	43.0	56.0	60.0	70.0	60.0	56.0	60.0	79.0
d [m]	16.0	16.0	19.1	19.1	19.0	27.0	19.0	21.0
LBd _{NOBS/MIBS} /LBd _{C.S.}	1.312		1.172		1.294		1.407	
バラスト水搭載量[ton]	43,050	0.0	75,370	0.0	80,000	0.0	80,000	0.0

名称	(5) TRIALITY		(6) NOBS Oil Tanker		(7) ノンバラスト&K0 tanker	
	DNV		Guangzhou XED Ship Design		大阪府立大学,他	
船種	VLCC		65,00DWT Tanker		80,00DWT Tanker	
タイプ	在来船型	NOBS	在来船型	NOBS	在来船型	NOBS
L [m]	320.0	351.0	99.7	106.0	232.0	236.4
B [m]	60.0	70.0	18.0	20.0	42.0	40.7
d [m]	21.0	21.6	6.8	6.9	12.2	14.9
LBd _{NOBS/MIBS} /LBd _{C.S.}	1.316		1.199		1.200	
バラスト水搭載量[ton]	80,000	0.0	2,700	0.0	32,000	0.0

名称	(8)バラスト水低減船				(9)レスバラストシップ船	
	SRC,他				サノヤス造船	
船種	バルカー		VLCC		チップ船	
タイプ	在来船型	MIBS	在来船型	MIBS	在来船型	MIBS
L [m]	210.0	210.0	333.0	333.0	210.0	220.0
B [m]	36.5	37.5	60.0	60.0	37.0	37.0
d [m]	23.0	24.0	20.5	21.5	10.7	12.0
LBd _{NOBS/MIBS} /LBd _{C.S.}	1.072		1.049		1.175	
バラスト水搭載量[ton]	25,000	9,600	85,000	28,000	—	—
B.W. _{MIBS} /B.W. _{C.S.}	0.384		0.329		0.590	

2. 4 NOBS/MIBS の馬力の傾向 (在来船型との比較)

SRC が共同開発した NOBS/MIBS の推進性能について、在来船型のそれと比較する事で特性を把握する。SRC の NOBS/MIBS は 6 船種あるが、それぞれ 2~4 隻、全体では 18 隻の大型模型船 (約 6m) を製作し、曳航水槽において抵抗・自航試験を行い、建造される船と同じ精度で推進性能を確認している。

これら 18 隻の NOBS/MIBS の所要馬力について、開発時に比較対象とした在来船型 (ベース船) の所要馬力からの増加率の形で図 2.4.1 に示す。開発における各船種の第 1 船には矢印を付し、その後の開発順に実績値を細い実線で繋げている。横軸が満載状態における BHP の増加率、縦軸が空荷状態における BHP の増加率であり、プラスが BHP 増加、マイナスが BHP 削減を意味している。なお、満載状態は計画速力における増加率、空荷状態は計画速力より大きい速力 (ケースにより異なるが、概ね+1kt) における増加率を示している。

図中の斜めの太線は満載状態とバラスト状態における BHP の増加率を足し合わせた値がゼロになる線である。たとえば、ある船が満載状態では 5%馬力増である一方、空荷状態では 5%馬力減である場合、両方の削減率を足すとゼロとなり、この線上に位置する事となる。BHP 増加率を足した値には、物理的な意味はないが、その船の満載状態と空荷状態における平均的な推進性能の目安になると考えている。太線より左下側がこの値がマイナスとな

り、満載状態と空荷状態における平均的な推進性能が向上すると想定される領域である。

SRC の NOBS/MIBS の推進性能の特徴について、以下に述べる。

- NOBS/MIBS とともに開発を進めるにつれて、推進性能が良くなっている事が分かる。これは船型改良の効果もあるが、手探り状態で第 1 船の主要目等を設定したために、推進性能が非常に悪い結果となり、第 2 船以降で主要目等を見直した結果、大幅に性能改善したケースもある。
- 主要目等を適切に設定しなかった場合、排水量が少ない空荷状態においても、在来船型より NOBS/MIBS の方が BHP 増となる場合がある。
- NOBS の開発では、バラスト水をゼロとする事を主目的としたため、満載状態において在来船型より BHP 削減する事はできなかった。空荷状態では 10%以上の BHP 削減を達成した。
- MIBS の開発では、満載状態と空荷状態の両方で在来船型より BHP 削減が可能である事が分かった。特に、満載状態において BHP 削減できているケース（図中の破線内）では、空荷状態において 15%以上の BHP 削減が達成できている。
- EEDI 規制が発効し、満載状態におけるさらなる推進性能の改善が要求されている現状では、満載状態での推進性能改善が期待できる MIBS の方が、現状規制に適した船型である事が分かる。
- バラスト水がゼロの NOBS は海洋生態系に対しての負荷がゼロという原理的なメリットがありつつ、空荷状態での性能改善は見込めるため、MIBS のさらに次の世代の船型であると考えている。

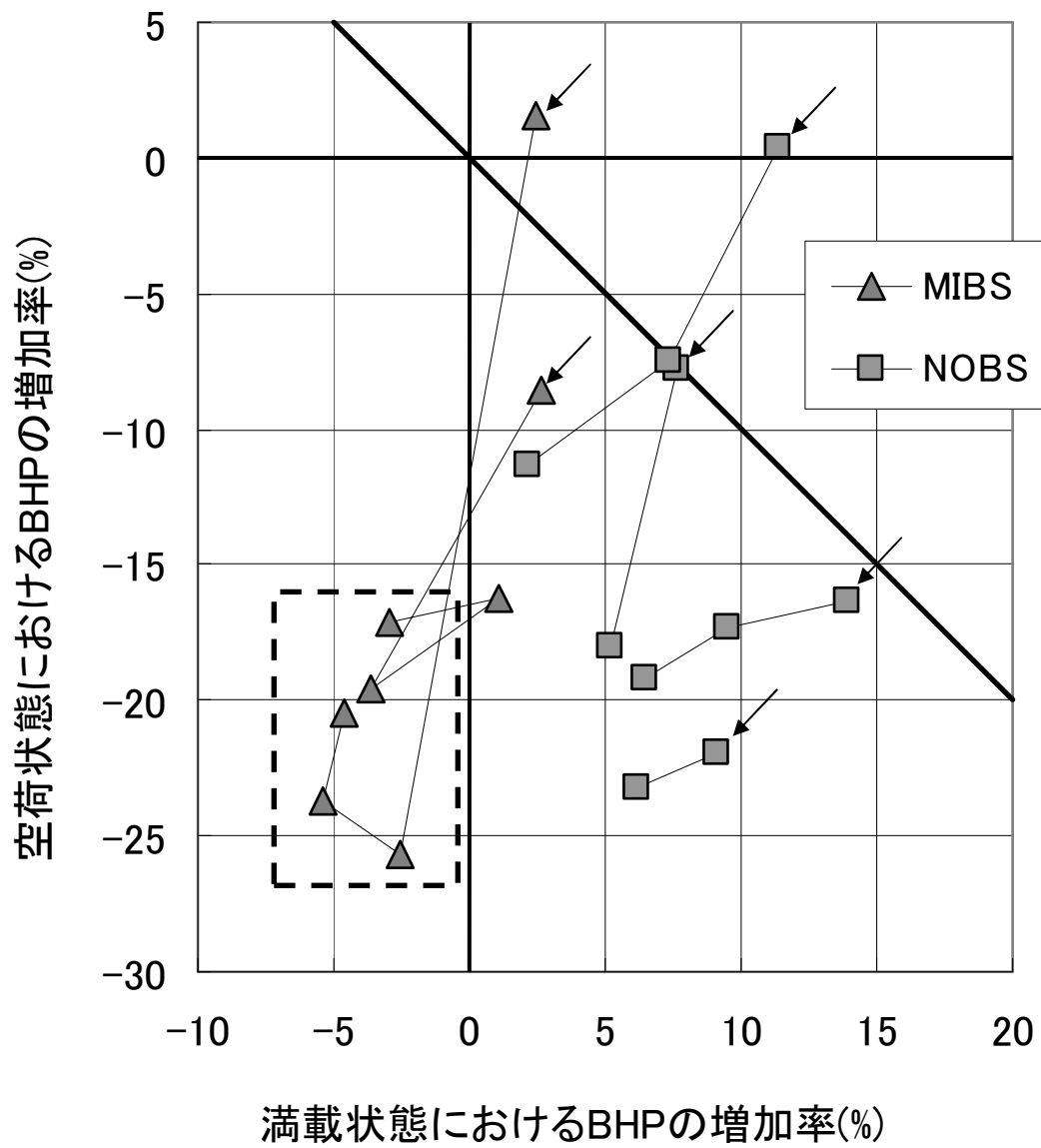


図 2.4.1 SRC が共同開発した NOBS/MIBS の BHP の増加率

参考文献

- 2-1) 三井造船：欧州特許 No.60683/68, 1968.
- 2-2) 日本造船技術センター：中国特許 No.01143897.5, 2001.
- 2-3) 日本造船技術センター：米国特許 No.10/232,465, 2002.
- 2-4) 日本造船技術センター：欧州特許 No.02019601.0, 2002.
- 2-5) 日本船舶技術研究協会：ノンバラスト船の研究開発 研究成果概要報告書、2006.
- 2-6) Germundsson, A. & Holmgren, M. : The Ballast-free Tanker、Chalmers university of technology Master thesis, Report No.X-04/146, 2004.
- 2-7) Det Norske Veritas AS : THE BALLAST-FREE SHIP, tanker update, Vol.2, 2010.
- 2-8) Guangzhou XED Ship Design Co.,Ltd. : Introduction to NOBS Oil Tanker, <http://en.xed.com.cn/res/xed/teres/201207/20120731115339533.pdf>, 2016年6月19日参照.
- 2-9) 池田良穂, 富田愛華：産学連携による次世代ノンバラスト&低粘性抵抗型タンカー・バルクキャリアの開発, 日本船舶海洋工学会講演会論文集, 第15号, pp.69-72, 2012.
- 2-10) 日本造船技術センター：造船技術センターで実施している CO2 削減技術に関する共同研究の結果について (その1), SRC NEWS, No.92, 2013.
- 2-11) 日本造船技術センター：バラスト水低減船型 (MIBS) の開発状況, SRC NEWS, No.92, 2013.
- 2-12) 名村造船所：バラスト水低減船-VLCC のコンセプト承認を日本海事協会から取得, 2013年3月6日付け名村造船所広報資料.
- 2-13) 水谷圭介：レスバラストチップ船, 日本船舶海洋工学会 関西支部シンポジウム「次世代船舶シンポジウムー省エネへの試みー」, pp.126-132, 2015.

3. 初期船型計画における船型パラメータ

3. 1 船型パラメータ

初期船型計画を行う際には、要求仕様と制約条件を考慮しながら、ある評価基準に対して最適となる船型パラメータを決定する。従って、そこで対象とする船型パラメータは、排水量や全長等、船型の概要を把握できる、過不足ないものを選ぶ必要がある。本研究では、過去に行った NOBS/MIBS の研究開発において、筆者が主要目の検討に用いていた、以下の船型パラメータを選定する。ここで、中央断面形状パラメータを図 3.1.1 に示す。軽荷重量、空荷状態平均喫水および船底傾斜は後述の推定式により得る。

・船型パラメータ（与件）

垂線間長; L_{pp} [m], 全幅; B [m], 満載喫水; d [m], 型深さ; D [m],
浮心位置（満載状態）; $l_{CB}(\%L_{pp})$, 載貨重量（満載状態）; $D.W.$ [t],
バラスト水搭載量; $B.W.$ [t], 空荷状態における燃料等; α [t],
中央横断面係数; C_M , 船底幅; K [m]

・排水量

満載状態排水量 ; $\Delta_{full} = L.W. + D.W.$
空荷状態排水量 ; $\Delta_{ballast} = L.W. + B.W. + \alpha$

・推定式により得られる値

軽荷重量; $L.W.$ [t], 船底傾斜の大きさ; H [m],
空荷状態平均喫水; $d_{ballast}$ [m]

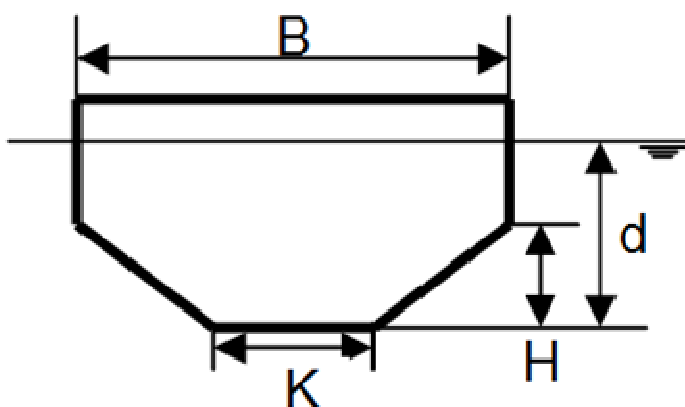


図 3.1.1 中央断面形状パラメータ

3. 2 NOBS/MIBS の軽荷重量の推定

NOBS の軽荷重量 (L.W.) については、過去に行ったノンバラスト船の研究開発³⁻¹⁾において、構造強度等を詳細に検討した際に得た知見から、初期船型計画の段階においては、以下の 1)~5) に示す手順で推定する。MIBS については、NOBS と在来船型の中間の船型であるが、NOBS に近いと仮定して、NOBS と同じ方法で推定する。

- 1) NOBS/MIBS と同じ船種で主要寸法と D.W. が近い在来船型を「ベース船」とする。
- 2) NOBS/MIBS の型深さ D は満載状態における乾舷高さがベース船と同じになるように設定する。
- 3) 関西造船協会便覧³⁻²⁾に記載されている、船殻重量を推定する、式 3.2.1 を L.W. の推定に応用する。

$$C_h = L_{pp}(B + D)/L.W. \quad (3.2.1)$$

- 4) ベース船の主要寸法と L.W. から、ベース船の C_h を 3.2.1 式より計算する。
- 5) NOBS/MIBS の C_h は、ベース船のそれと同じと仮定して、NOBS/MIBS の L_{pp}, B, D から、3.2.1 式より逆算して L.W. を得る。

なお、3.2.1 式は L_{pp} を含むが、NOBS/MIBS の L_{pp} をベース船のそれより大幅に変えた場合、 C_h がベース船と同じという仮定は適用できないと考えられるため、注意が必要である。過去に行ったノンバラスト船の研究開発では、 L_{pp} はベース船から大幅に変えた検討を行っておらず、その場合、 C_h がどのように変化するのは不明である。在来船型の L_{pp} と C_h の傾向は、関西造船協会便覧³⁻²⁾に示されているので、参考として図 3.2.1 に示す。

3. 3 NOBS/MIBS の空荷状態喫水の推定

NOBS/MIBS ではバラスト水搭載量を減らした時に、十分な喫水が確保できるかどうかを、検討の初期段階で把握しておく必要がある。また、船底傾斜の大きさについても事前に把握しておく事が望ましい。以下にその推定法を述べる。

簡単のため、ミドシップ形状を折線で近似すると、幾何計算により、船底傾斜の大きさ $H[m]$ の推定式として 3.3.1 式が導出できる。K と H の定義は図 3.1.1 に示した。

$$H = 2Bd(1 - C_M)/(B - K) \quad (3.3.1)$$

満載状態喫水に対する空荷状態喫水の比 ($d_{ballast}/d$) について、在来船型は、 C_M が 1 に近く、中央横断面形状はほぼ矩形なので、排水量と喫水は概ね比例している。図 3.3.1 に NOBS/MIBS の排水量比と喫水比の関係を示す。

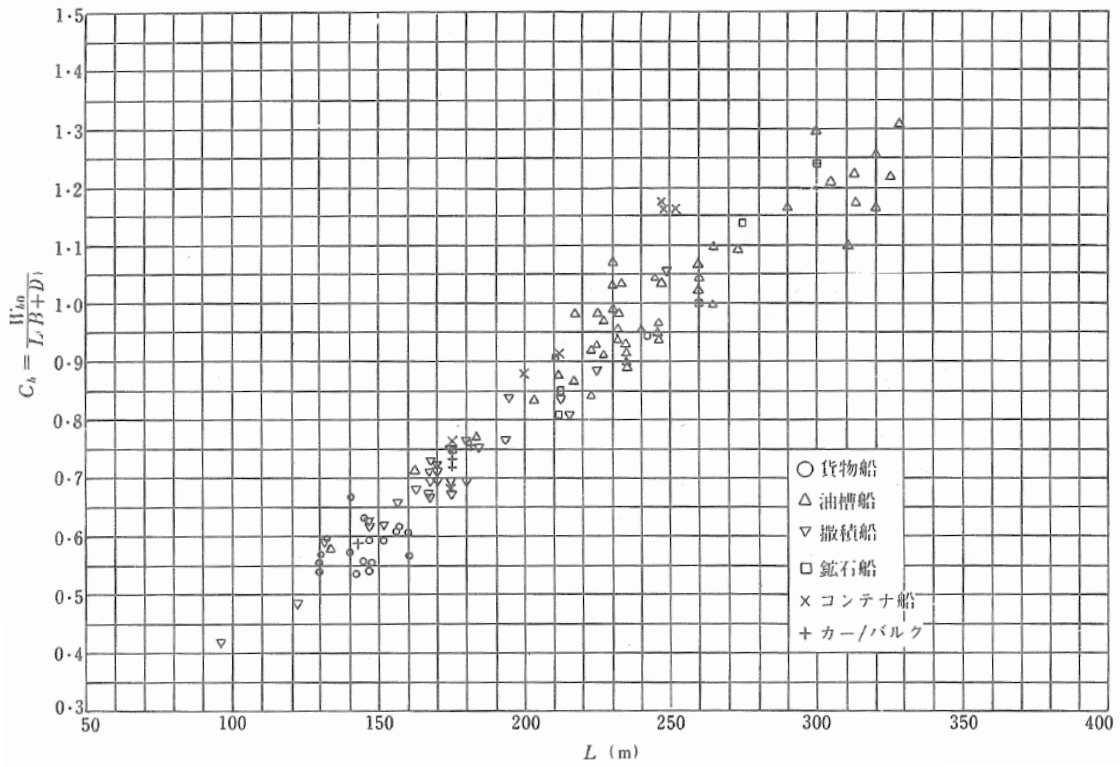


図 3.2.1 在来船型の船殻重量（上部構造物を除く）（資料 3-2）図 204）

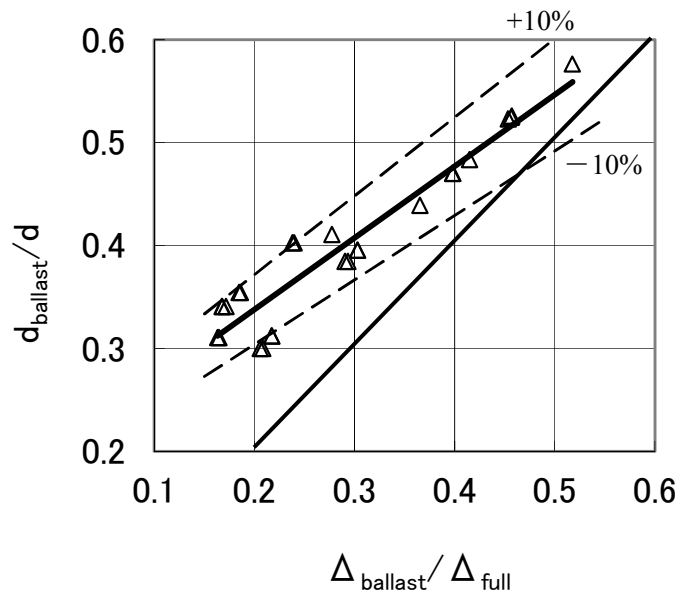


図 3.3.1 NOBS/MIBS の排水量比と喫水比の関係

図 3.3.1 では、特に軽い載貨状態において、排水量比と喫水比は比例関係から外れているが、その原因は下に凸な船体形状にある。ここで、下に凸な船体形状が空荷状態喫水に与える影響の大きさは、 C_M により代表されると仮定し、空荷状態での喫水について、3.3.2式に示す推定式を考案する。

$$\frac{d_{ballast}}{d} = \beta \left(1 + C_M^\gamma \left(\frac{\Delta_{ballast}}{\Delta_{full}} - 1 \right) \right) \quad (3.3.2)$$

3.3.2式における γ は C_M が空荷状態喫水に与える影響の補正係数、 β は全体に対する補正係数である。これらの値は、実際のトリム・排水量の計算結果（18隻、全26載貨状態）にフィットするように、最小二乗法により決定した。得られた数値を以下に示す。

$$\beta = 1.057691, \gamma = 0.891274$$

$d_{ballast}/d$ について、3.3.2式による推定値と実際の排水量計算値との相関を図 3.3.2 に示す。推定結果はすべて計算値に対し、 $\pm 3\%$ 以内で得られた。これにより、3.3.2式により、排水量比と喫水比の関係から推定するより精度良く $d_{ballast}$ を推定できる事が確認できた。

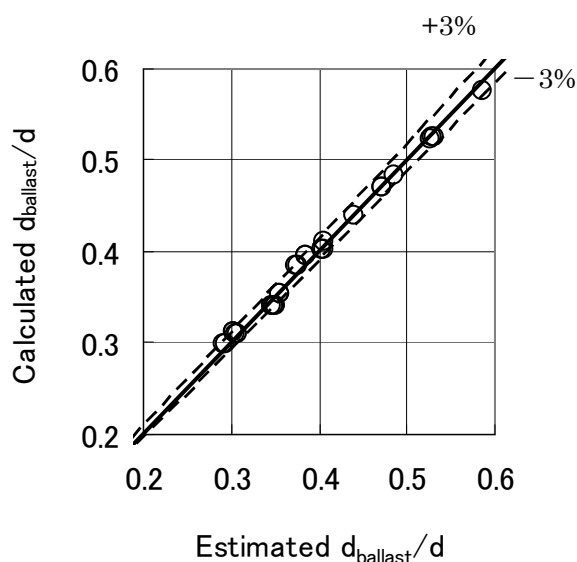


図 3.3.2 排水量計算結果と推定値との相関

一般に、トリムの大きさが排水量と平均喫水の関係に与える影響は小さいので、3.3.2 式で推定した平均喫水がトリムの大小により変化しないと仮定すれば、任意のトリムにおける船首、船尾の喫水を得る事ができる。ここで、喫水に過不足がある場合には、所定の喫水となるように、 C_M やバラスト水の搭載量を変更する等、試行錯誤的に船型パラメータを調整する必要がある。

3. 4 NOBS/MIBS の主要目等の検討例

本研究で主要目等の検討を行う際に使用するスパイラルを図 3.4.1 に示す。このスパイラルの各ステップに沿って検討を行う事で、主要寸法、推進性能等について、要求仕様や制約条件を満たすような NOBS/MIBS の主要目を計画する事ができる。なお、このスパイラルの中で、「船底形状と船底傾斜の大きさの関係」、「空荷状態喫水の推定」、「推進性能の推定」については、在来船型の知見のみでは推定が難しく、NOBS/MIBS の特徴を考慮した推定を行う必要があるステップである。

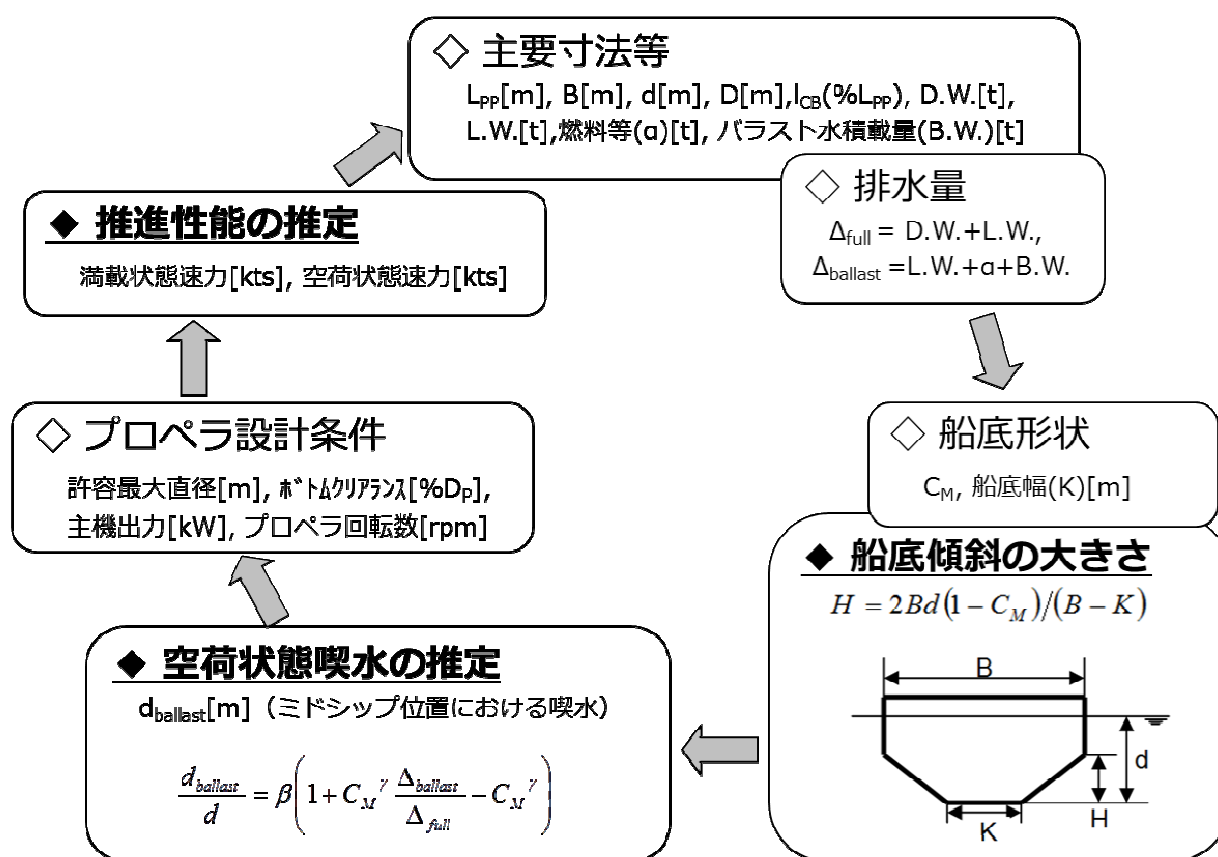


図 3.4.1 主要寸法等の検討スパイラル

(1) MIBS の検討例

検討スパイラルの内、主要目等の設定から空荷状態喫水の推定までについて、MIBS の検討例を示す。対象として、第 5 章で行う VLCC 船型の検討から、表 5.3.2、表 5.3.5 に示す MIBS;+B=7.5m のケースを用いる。ここで用いる VLCC 船型の詳細は、第 5 章で述べる。プロペラ設計条件と推進性能については、第 4 章で述べる。

◇主要寸法等の設定

①MIBS の主要寸法と D.W.を設定する。

$$L_{pp}=319.5\text{m}, B=67.5\text{m}, d=20.5\text{m}, D=29.1\text{m}, D.W.=283,000\text{ton}$$

②ベース船の $L.W./ (L_{pp}*(B+D)) = 1.50874$ から、L.W.は次の値となる。

$$L.W. = 1.50874 \times 319.5 \times (67.5+29.1) = 46565\text{ton}$$

③バラスト水搭載量 B.W.を 30,346ton とすると、排水量は次の値となる。一番軽い状態を想定するため、燃料等 α は 0 とする。

$$\Delta_{full} = 46565+283000 = 329,565\text{ton}$$

$$\Delta_{ballast} = 46565 + 0 + 30346 = 76,911\text{ton}$$

④ C_M を 0.9 に設定し、船底幅 K を全幅の半分 $67.5/2=33.75\text{m}$ とすると、船底傾斜の大きさ H は次の値となる。

$$H = 2 \times 67.5 \times 20.5 \times (1-0.9) / (67.5-33.75) = 8.20\text{m}$$

⑤D.W., L.W., B.W., C_M , d から 3.3.2 式により、ミドシップの喫水 $d_{ballast}$ として次の値を得る。

$$d_{ballast} = 1.057691 \times \{1+0.9^{0.891274} \times (30346+46565) / (283000+46565) - 0.9^{0.891274}\} \times 20.5 \\ = 6.55\text{m}$$

⑥ここで、船首喫水を 3.0m とすると、ミドシップの喫水が 6.55m であるので、船尾喫水として 10.1m を得る。本船型の D_p は 10.0m でシャフトセンター高さは 5.1m であるので、 $I/D_p=0.5$ となり喫水条件を満たしている。喫水条件を満たさない場合、手順③に戻り、バラスト水搭載量を再調整する。手順③～⑥は、実際にはエクセルのソルバー機能を用いた反復計算を行う事で、 $I/D_p=0.5$ となるようにバラスト水搭載量を決定している。

⑦プロペラ設計条件と C_w, l_{CB} を設定すれば、第 4 章で述べる方法で平水中の推進性能を推定する事が可能となる。

(2) NOBS の検討例

MIBS と同様に、主要目等の設定から空荷状態喫水の推定まで NOBS の検討例を示す。対象として、第 5 章で行う VLCC の検討から、表 5.3.3、表 5.3.6 に示す $B=15.0\text{m}$ 、 $D_p=9.0\text{m}$ のケースを用いる。ここで用いる VLCC 船型の詳細は、第 5 章で述べる。プロペラ設計条件と推進性能については、第 4 章で述べる。

◇主要寸法等の設定

①NOBS の主要寸法と D.W.を設定する。

$$L_{pp}=319.5\text{m}, B=75.0\text{m}, d=20.5\text{m}, D=29.1\text{m}, D.W.=283,000\text{ton}$$

②ベース船の $L.W./\{L_{pp}*(B+D)\} = 1.50874$ から、L.W.は次の値となる。

$$L.W. = 1.50874 \times 319.5 \times (75.0+29.1) = 50,181\text{ton}$$

③NOBS であり、バラスト水は搭載しないので排水量は次の値となる。一番軽い状態を想定するため、燃料等 α は 0 とする。

$$\Delta_{full} = 5,0181+283,000 = 333,181\text{ton}$$

$$\Delta_{ballast} = 50,181 + 0 + 0 = 50,181\text{ton}$$

④ C_M を 0.8320 に設定し、船底幅 K を 3m とすると、船底傾斜の大きさ H は次の値となる。

$$H = 2 \times 75.0 \times 20.5 \times (1 - 0.8320) / (75.0 - 3) = 7.17\text{m}$$

⑤D.W., L.W., B.W., C_M , d から 3.3.2 式により、ミドシップの喫水 $d_{ballast}$ として次の値を得る。

$$d_{ballast} = 1.057691 \times \{1 + 0.832^{0.891274} \times 50,181 / (283,000 + 50,181) - 0.832^{0.891274}\} \times 20.5 \\ = 6.05\text{m}$$

⑥ここで、船首喫水を 3.0m とすると、ミドシップの喫水が 6.05m であるので、船尾喫水として 9.1m を得る。本船型の D_p は 9.0m でシャフトセンター高さは 4.6m であるので、 $I/D_p=0.5$ となり喫水条件を満たしている。喫水条件を満たさない場合、手順④に戻り、 C_M の値を再調整する。実作業では、手順④～⑥はエクセルのソルバー機能を用いた反復計算を行う事で、 $I/D_p=0.5$ となるように C_M を決定している。

⑦プロペラ設計条件と C_w , l_{CB} を設定すれば、第 4 章で述べる方法で平水中の推進性能を推定する事が可能となる。

参考文献

- 3-1) 日本船舶技術研究協会：ノンバラスト船の研究開発 研究成果概要報告書，2006。
- 3-2) 関西造船協会編：関西造船協会便覧第 4 版,第 3 編 基本計画，pp.476-477，1983。

4. 平水中推進性能の簡易推定

4. 1 満載状態における推進性能の簡易推定

4. 1. 1 使用ツール (Tips Sp)

船型設計において最も重要な作業は、主要目の選定、あるいはそのためのデータの整備である⁴⁻¹⁾。初期船型計画においては、運航側の要求仕様を考慮した上で、推進性能に優れた主要目を速やかに選定する必要がある。そのため、船型データベース等を整備し、速やかに主要目の選定を行えるツールを整備している造船所も多い。在来船型については、SRC 船型設計システム (SRC Tips)⁴⁻²⁾、海技研 HOPE⁴⁻³⁾、各種チャート等、主要目の選定を支援するツールが一般に供用されており、主要目の初期検討を効率的に行う事が可能である。

本研究では、まず、SRC Tips をそのまま用いて推進性能推定を行う事を検討する。

SRC Tips は初期要目設定、推進性能推定 (満載状態のみ)、船型パラメータ最適化、線図創生、区画配置を行えるアプリケーション群で構成されており、推進性能の推定には Tips Sp (Ver.1.1.2.5) を使用する。

Tips Sp による推進性能推定の流れについて述べる。最初に、ニューラルネットワーク法 (NN) により、抵抗性能 (K, r_w) と自航要素を推定する⁴⁻⁴⁾。NN の結合荷重行列は、SRC が過去に実施した水槽試験結果と船型パラメータを学習させて構築したものである。次に、その結果を用いてプロペラ設計条件から MAU プロペラを設計し、パワーカーブを得る。尺度影響については、 ΔC_F としては SRC の標準式を、有効伴流係数の修正としては矢崎チャートを適用する事で考慮する。

必要な入力パラメータと、得られる結果を以下に示す。主要目は前章で示した船型パラメータ等から得る事ができる。

・入力パラメータ (Tips Sp コード 1)

主要目 ; $L_{pp}, B, d, C_B, C_M, C_W, l_{CB}$

プロペラ設計条件 ; 設計主機出力、設計回転数、許容最大直径、
ベースラインとプロペラチップとのクリアランス

・抵抗性能、自航要素推定結果

抵抗性能 ; K, r_w

自航要素 ; $1-t, 1-w_T, \eta_R$

・MAU プロペラ設計結果、馬力計算結果

実船プロペラ要目 ; D_p , ピッチ比, 展開面積比

実船プロペラ特性 ; K_T, K_Q, η_0

パワーカーブ ; $V_S, EHP, DHP, BHP^*, C_{adm}$

※ $1/\eta_T=1.03$ とする。

本章における、推進性能の指標としては、4.1.1 式に示す DHP を使ったアドミラルティ係数を用いる事とする。

$$C_{adm} = V_s^3 \Delta^{2/3} / DHP \quad (4.1.1)$$

4. 1. 2 NOBS/MIBS の主要目

NOBS/MIBS の主要目上の特徴である、在来船型と比べて小さい C_M を確認するため、Tips Sp の NN 構築に使用されたデータベース船型と 18 隻の NOBS/MIBS を対象に、 C_B に対する C_M をプロットして、図 4.1.1 に示す。なお、NOBS/MIBS のうち 3 隻は、データベースに使用されており、重複してプロットしている。

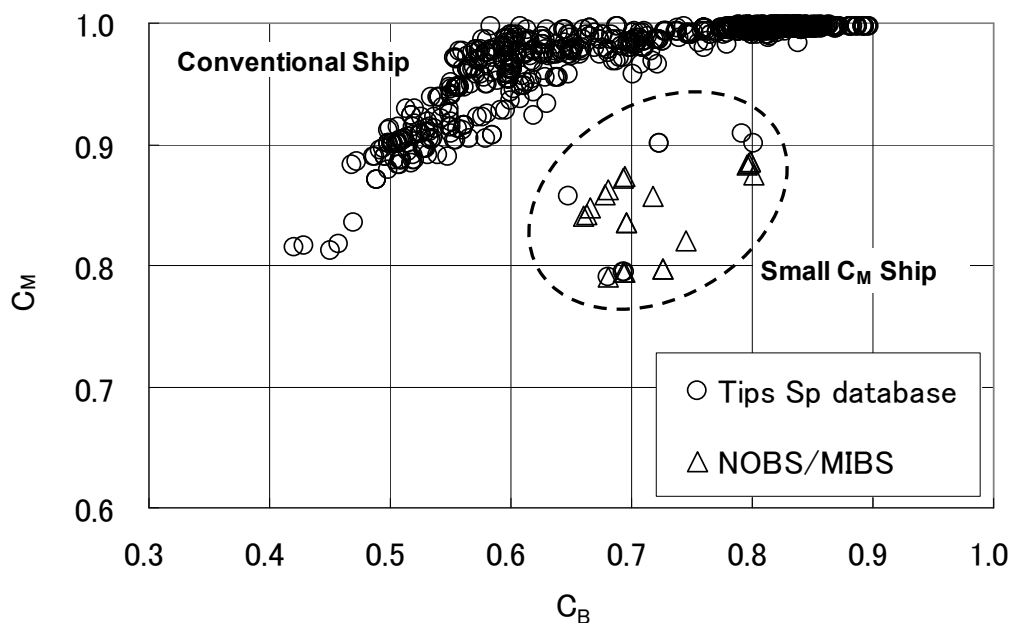


図 4.1.1 データベース船型と NOBS/MIBS の C_B と C_M の関係

データベースに含まれる載貨状態数は、計画満載状態や構造喫水状態等、全体で約 1200 状態あるが、図 4.1.1 を見ると、 C_B と C_M の関係において、大半の船型はまとまっている事が分かる。大半の船型からなる一群が、在来船型である。その群から離れて、ある C_B において在来船型と比べて小さい C_M を持つ船型群があり、本研究では、これらを小 C_M 船型と呼ぶ。データベース船型のうち、小 C_M 船型は 7 隻 (NOBS/MIBS が 3 隻、非 NOBS/MIBS が 4 隻) で、在来船型のそれと比べて数が非常に少ない。また、NOBS/MIBS は全て小 C_M 船型であり、在来船型と異なる C_M の傾向を持つ事が確認できる。

4. 1. 3 従来の手法による推定

Tips Sp をそのまま使用して NOBS/MIBS の推進性能を推定する場合について検討する。大型模型船による抵抗自航試験を実施した NOBS/MIBS のうち、NN に学習データとして採用された 3 隻を除く、NN が未学習の 15 隻を対象に、Tips Sp による C_{adm} の推定結果と水槽試験結果との相関を図 4.1.2(1)に示す。

推定精度を比較するため、NN で未学習の 18 隻の在来船型を対象に、Tips Sp による C_{adm} の推定結果と水槽試験結果との相関を図 4.1.2(2)に示す。相関係数 r は、在来船型では 0.91 であるのに対し、NOBS/MIBS では 0.81 であり、NOBS/MIBS における推定精度は在来船型のそれと比べて低い事が分かる。その理由は、前述のように、Tips Sp のデータベース船型は大半が在来船型で構成されており、NOBS/MIBS のような小 C_M 船型のデータは殆ど含まれていないためである。

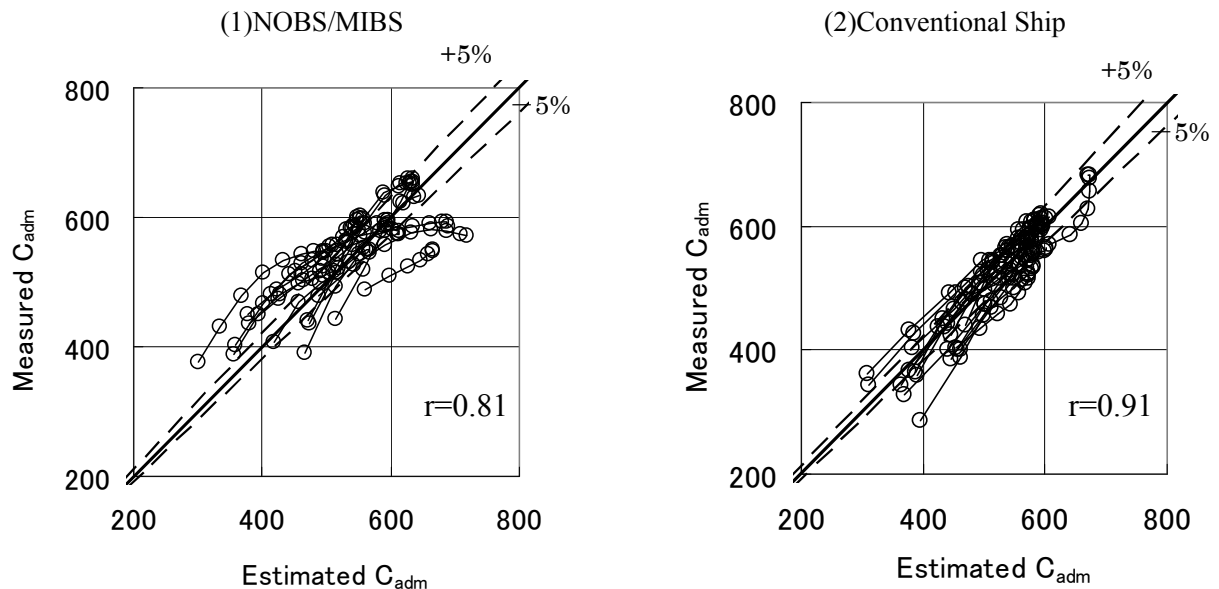


図 4.1.2 Tips Sp による C_{adm} の推定値と水槽試験結果との相関

4. 1. 4 C_M の影響を補正する推定

NOBS/MIBS の推進性能推定に、在来船型の推定手法をそのまま使用すると、推定精度が低くなる事が分かった。ここで、推定精度を向上させるため、従来の推定手法を援用して NOBS/MIBS の推進性能を推定する、以下に示す手法を考案する。

最初に NOBS/MIBS の主要目のうち、 C_M のみ 在来船型の群に含まれるように、大きな値を仮に与えた仮想在来船型 (Artificial Conventional Ship ; ACS) を設定する。主要寸法や C_p 等、 C_M 以外は変更しないので、仮想在来船型の排水量と C_B は NOBS/MIBS のそれらより大きくなる。

次に仮想在来船型の C_{adm} を Tips Sp により推定する。この場合、仮想在来船型の C_M を含む主要目は、在来船型群に含まれるので、推進性能の推定精度は、在来船型を対象とする場合と同じと考える事ができる。最後に仮想在来船型の C_{adm} に対し、NOBS/MIBS と C_M (排水量) が相違している影響を補正する。このイメージを図 4.1.3 に示す。以下、具体的な手順を述べる。

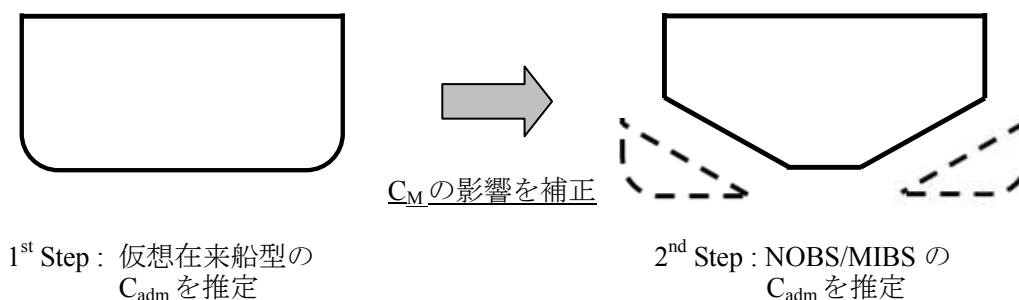


図 4.1.3 C_M の影響を補正する C_{adm} の推定法の概要

水槽試験を実施した 18 船型の NOBS/MIBS について、それぞれ仮想在来船型を設定して、Tips Sp により C_{adm} を推定する (図 4.1.3 の 1st Step)。ここで、仮想在来船型のみドシップ形状については、図 4.1.1 に示した在来船型の C_B と C_M の関係から、図 4.1.4 に示す多項式により、NOBS/MIBS の C_B に対応する仮想在来船型の C_{M_ACS} を与えている (4.1.2 式)。

$$C_{M_ACS} = 5.14738 \times C_B^3 - 12.66912 \times C_B^2 + 10.372751 \times C_B - 1.83076 \quad (4.1.2)$$

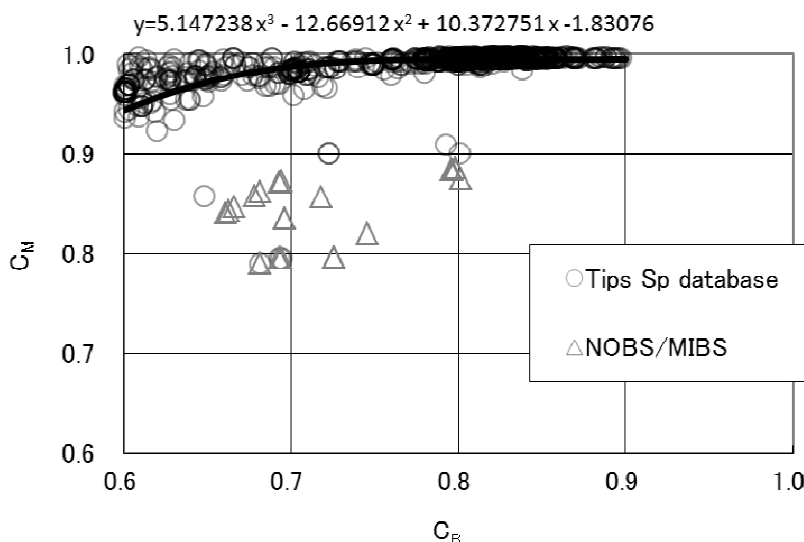


図 4.1.4 仮想在来船型の C_M を与える多項式

Tips Sp で推定した仮想在来船型のアドミラルティ係数に対する水槽試験で得られた NOBS/MIBS のアドミラルティ係数の比 (C_{adm}/C_{adm_ACS}) を縦軸に、計画速力で無次元化した速力比 (V_s/V_{s_design}) を横軸として、水槽試験と Tips Sp による実績を図 4.1.5 に示す。

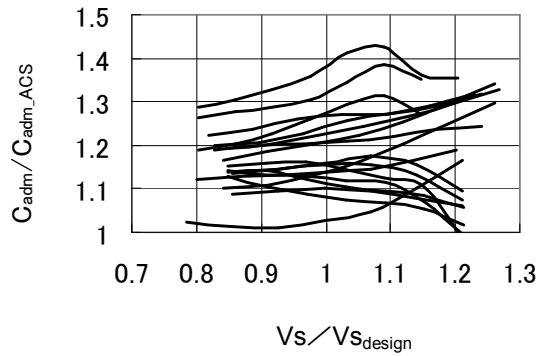


図 4.1.5 C_{adm}/C_{adm_ACS} の実績

これを見ると、 C_{adm} 比は、概ね 1.0~1.4 の範囲にある事が分かる。仮想在来船型の排水量は NOBS/MIBS のそれより大きい、主要寸法は同じなので、 C_B は増加する。そのため、仮想在来船型の所要馬力は NOBS/MIBS より増加 (C_{adm} は減少) する。ここで参考として、仮想在来船型の C_{adm} の推定値と水槽試験結果との相関を図 4.1.6 に示す。結果を見ると、仮想在来船型の C_{adm} の方が小さめに推定されており、図 4.1.5 と同じ傾向である事が確認できる。

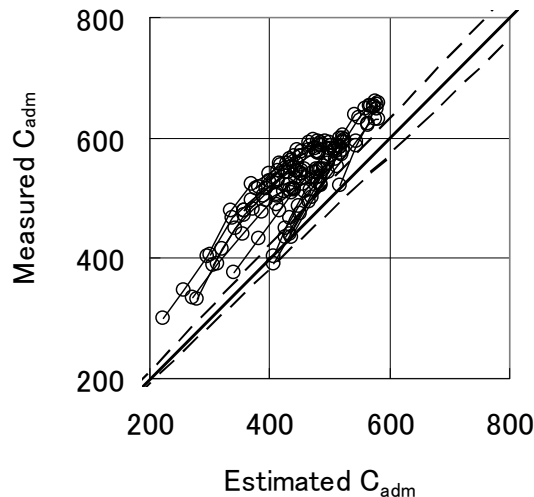


図 4.1.6 Tips Sp による仮想在来船型の C_{adm} の推定値と水槽試験結果との相関

図 4.1.5 と 4.1.6 に示したように、仮想在来船型は C_M が大きい分、偏りが生じるので、以下に示すように C_M の違いによる影響（偏り）を補正する。

C_{adm} 比について、仮想在来船型の C_M に対する、NOBS/MIBS の C_M の比 (C_M/C_{M_ACS}) と速力比の 2 次式である、4.1.3 式による曲面フィッティングを行う。

$$\frac{C_{adm}}{C_{adm_ACS}} = a_1 \left(\frac{Vs}{Vs_{design}} \right)^2 + a_2 \left(\frac{C_M}{C_{M_ACS}} \right)^2 + a_3 \left(\frac{Vs}{Vs_{design}} \right) \left(\frac{C_M}{C_{M_ACS}} \right) + a_4 \left(\frac{Vs}{Vs_{design}} \right) + a_5 \left(\frac{C_M}{C_{M_ACS}} \right) + a_6 \quad (4.1.3)$$

係数 $a_1 \sim a_6$ は、最小二乗法により、次の値を得た。

$$a_1 = -0.478881, a_2 = 0.694839, a_3 = -3.877112, a_4 = 4.330274, a_5 = 1.476745, a_6 = -1.109696$$

4.1.3 式により推定される C_{adm} 比を、 C_M 比毎に速力比ベースで図 4.1.7 に示す。ここで、フィッティングの妥当性を確認するため、速力比が 0.9, 1.0, 1.1, 1.2 の場合について、 C_{adm} 比の実績値と 4.1.3 式から得られる推定曲線との比較を図 4.1.8 に示す。これにより適切なフィッティングがなされている事が分かる。

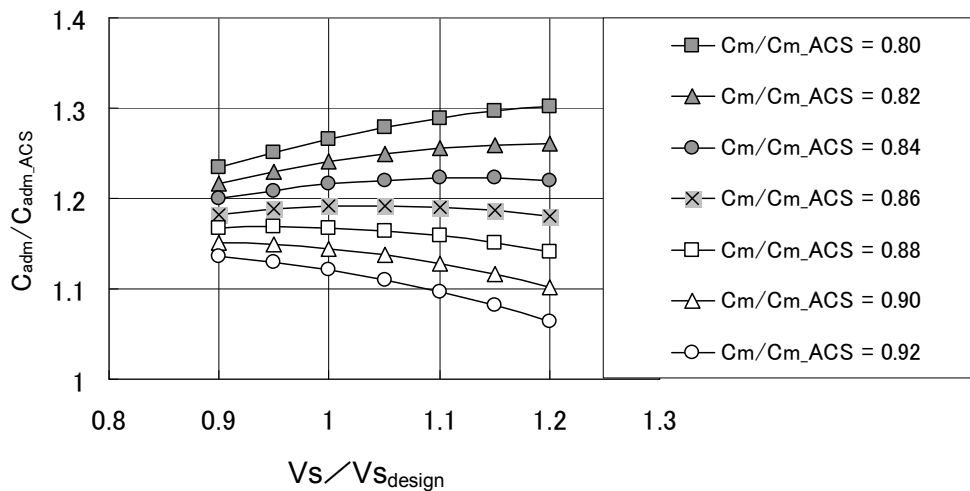


図 4.1.7 推定された C_{adm} 比

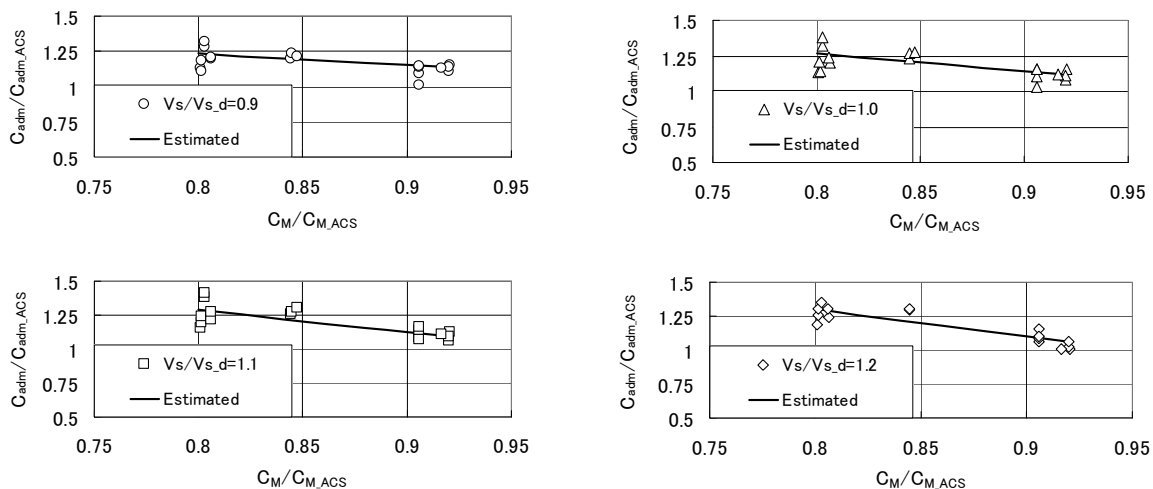


図 4.1.8 C_{adm} 比の推定曲線と水槽試験結果

4.1.3 式において C_{adm_ACS} 、 C_M と任意の速力比を与えれば、NOBS/MIBS の C_{adm} が推定できる。得られる推定値の妥当性を確認するため、水槽試験結果との相関を図 4.1.9 に示す。図 4.1.2(1)と図 4.1.9 を比較すると、在来船型の推定手法をそのまま用いるより、本手法を用いる方が NOBS/MIBS についての推定精度に優れ、在来船型と同程度の精度となる事が分かる。なお、NOBS/MIBS の実績値の範囲 (C_p 値 ; 0.8~0.92、 C_M 比 ; 0.8~0.92、速力比 ; 0.9~1.2、計画 Fn 数 ; 0.14~0.16) を外れた範囲で本手法を用いる場合、フィッティングの外挿となるので、注意が必要である。

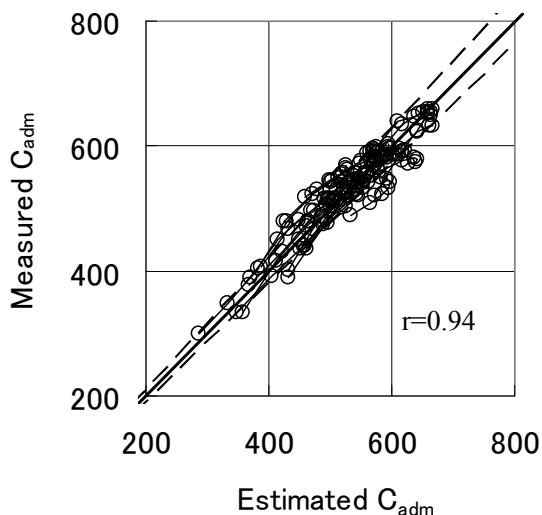


図 4.1.9 簡易推定法による C_{adm} の推定値と水槽試験結果との相関

4. 2 空荷状態における推進性能の簡易推定

NN 自体は空荷状態にも対応しているが⁴⁻⁵⁾、本研究では、満載状態の推進性能を援用して、空荷状態における推進性能を推定する手法を考案する。これは重い排水量の仮想在来船型の結果から、 C_M (排水量) の影響を補正して軽い排水量の NOBS/MIBS の推進性能を推定した、4.1.4 項で示した手法と類似の手法である。以下、具体的な手順を示す。

水槽試験を実施した 18 隻の NOBS/MIBS の全 26 載貨状態について、満載状態のアドミラルティ係数に対する空荷状態のアドミラルティ係数の比 ($C_{adm_ballast}/C_{adm_full}$) を縦軸に、空荷状態における速力を満載状態の計画速力で無次元化した速力比 ($V_{Sballast}/V_{Sdesign}$) を横軸として、図 4.2.1 に示す。

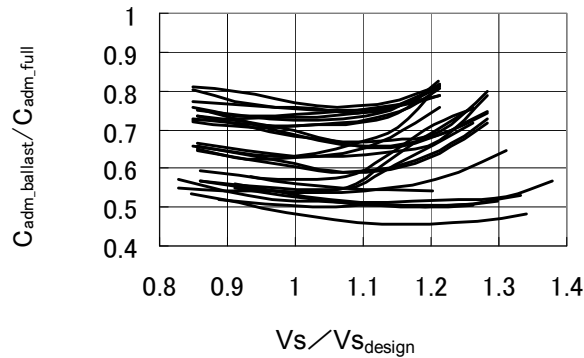


図 4.2.1 水槽試験結果による $C_{adm_ballast}/C_{adm_full}$

これを見ると、 $C_{adm_ballast}/C_{adm_full}$ は、概ね 0.5~0.8 の範囲にあり、一般に、満載状態より空荷状態の C_{adm} の方が低くなるので、妥当な結果である事が分かる。ここで、 $C_{adm_ballast}/C_{adm_full}$ を、満載状態の排水量に対する空荷状態のそれとの比と、計画フルード数に対する、推定を行うバラスト状態フルード数の比の 2 次式である、4.2.1 式による曲面フィッティングを行う。

$$\begin{aligned} \frac{C_{adm_ballast}}{C_{adm_full}} = & b_1 \left(\frac{V_{S_{ballast}}}{V_{S_{design}}} \right)^2 + b_2 \left(\frac{\Delta_{ballast}}{\Delta_{full}} \right)^2 + b_3 \left(\frac{V_{S_{ballast}}}{V_{S_{design}}} \right) \left(\frac{\Delta_{ballast}}{\Delta_{full}} \right) \\ & + b_4 \left(\frac{V_{S_{ballast}}}{V_{S_{design}}} \right) + b_5 \left(\frac{\Delta_{ballast}}{\Delta_{full}} \right) + b_6 \end{aligned} \quad (4.2.1)$$

係数 $b_1 \sim b_6$ は、最小二乗法により、次の値を得た。

$$b_1 = 1.021574, b_2 = -3.614474, b_3 = 0.684770, b_4 = -2.317056, b_5 = 2.352580, b_6 = 1.400837$$

4.2.1式により推定される $C_{adm_ballast}/C_{adm_full}$ を、 C_M 比毎に速力比ベースで図4.2.2に示す。ここで、フィッティングの妥当性を確認するため、速力比が 0.9, 1.0, 1.1, 1.2 の場合について、 $C_{adm_ballast}/C_{adm_full}$ の実績値と 4.2.1 式から得られる推定曲線との比較を図 4.2.3 に示す。これにより、適切なフィッティングである事が分かる。4.2.1 式において C_{adm_full} 、排水量比と任意の速力比を与えれば、NOBS/MIBS の空荷状態における C_{adm} が推定できる。得られる推定値の妥当性を確認するため、実績値との相関を図 4.2.4 に示す。

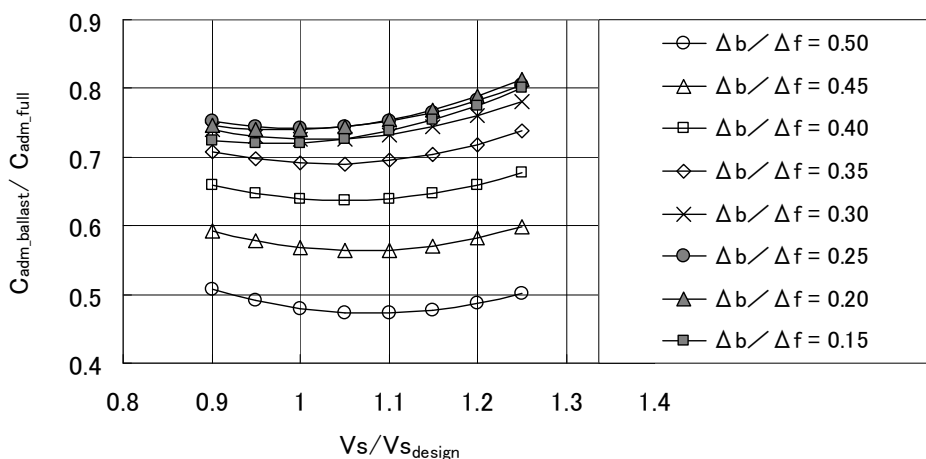


図 4.2.2 推定式による $C_{adm_ballast}/C_{adm_full}$

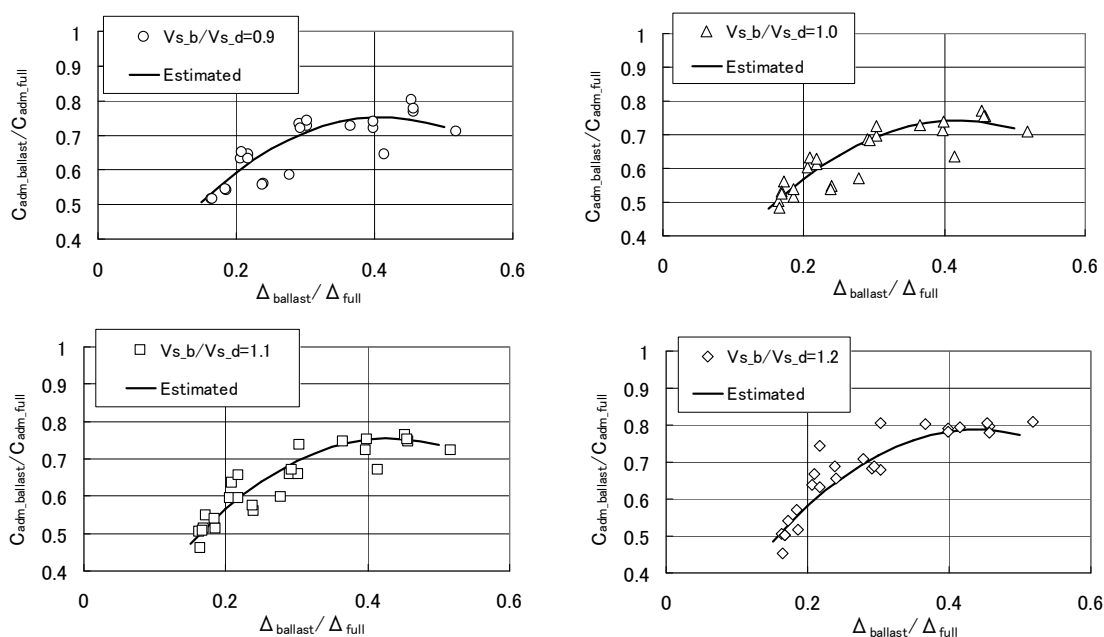


図 4.2.3 推定式による $C_{adm_ballast}/C_{adm_full}$ と水槽試験結果との比較

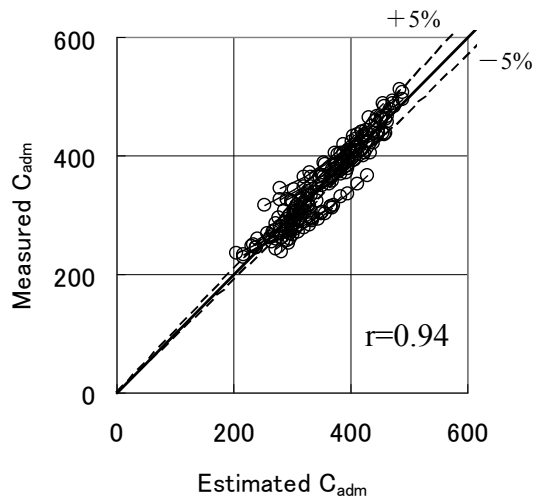


図 4.2.4 $C_{adm_ballast}$ の推定値と水槽試験結果との相関

以上の結果から、本手法による NOBS/MIBS の空荷状態における推進性能の推定精度は、満載状態におけるそれと同程度となる事が分かった。なお、NOBS/MIBS の実績値の範囲（排水量比；0.15～0.50、速力比；0.9～1.25、計画 Fn 数；0.14～0.16）を外れた範囲で本手法を用いる場合、フィッティングの外挿となるので、注意が必要である。

4. 3 NOBS/MIBS の推進性能の推定計算例

前節で示した、NOBS/MIBS の満載状態と空荷状態における推進性能の簡易推定法について、MIBS を対象に計算例を示す。

(1) 満載状態の例

計算例として、第 5 章で行う VLCC 船型の検討から、表 5.3.2、表 5.3.5 に示す MIBS;+B=7.5m のケースを用いる。本ケースは第 3 章における、主要目等の検討例でも対象としている。

C_M の影響を補正する推定を行うために、仮想在来船型の推進性能を推定する。3.4 節の MIBS の検討例において既に示した、MIBS;+B=7.5m のケースの主要寸法等を以下に示す。

- $L_{pp}=319.5\text{m}$, $B=67.5\text{m}$, $d=20.5\text{m}$, $D=29.1\text{m}$, $D.W.=283,000\text{ton}$,
- $\Delta_{full}=329,565\text{ton}$, $\Delta_{ballast}=76,911\text{ton}$
- $C_B=329,565/1.025/(319.5 \times 67.5 \times 20.5)=0.7273$, $C_M=0.9$, $C_P=0.8081$

ここで仮想在来船型の C_M を 4.1.2 式から以下の値に設定する。

$$C_M = 5.14738 \times 0.7273^3 - 12.66912 \times 0.7273^2 + 10.372751 \times 0.7273 - 1.83076 = 0.9920$$

C_M から得られる仮想在来船型の C_B と Δ_{full} を以下に示す。

$$C_B = 0.8081 \times 0.9920 = 0.8016, \quad \Delta_{full} = 0.8016 \times 319.5 \times 67.5 \times 20.5 \times 1.025 = 352,151 \text{ton}$$

C_W と l_{CB} はベース船と同じとして、Tips Sp (レベル 1) の推定に必要な船型パラメータをプロペラ設計条件と併せて以下に示す。

- $L_{pp}=319.5\text{m}$, $B=67.5\text{m}$, $d=20.5\text{m}$, $C_B=0.7771$, $C_M=0.9770$, $C_W=0.9016$, $l_{CB}(\%L_{pp})=-3.5024$
- 主機出力×回転数 (マージン含む) ; $27,000\text{kW} \times 75.0\text{rpm}$
- プロペラ直径 ; 10.0m (シャフトセンター高さ 5.1m)
- プロペラ翼数 ; 4
- 計画速力 ; 15kts

以上の船型パラメータとプロペラ設計条件から Tips Sp により推定した仮想在来船型の推進性能の諸数値を表 4.3.1(1)と(2)に示す。なお、表 4.3.1(2)の C_{adm} は Tips Sp の仕様により BHP ベースの値が表示されており、本研究における C_{adm} の定義と異なるので注意が必要である (本研究の定義である DHP ベースの値より 3%小さい値となっている)。

表 4.3.1(1) Tips Sp による MIBS; $+B=7.5\text{m}$ に対応する仮想在来船型の推進性能の諸数値

1. INPUT DATA

Name: 2

Lpp: 319.50 [m] Bmid: 67.50 [m] dmid: 20.50 [m]

Cb: 0.8016 Cm: 0.9920 Cp: 0.8081 Cw: 0.9016 lcb: -3.50 [%Lpp]

MCR: 27000 [kW] × 75.0 [rpm] Vs: 17.00 [kn]

Dp max: 10.00 [m] Z: 4 Bottom Clearance: 1.00 [%Dp]

2. ESTIMATION RESULTS

K: 0.331 $S/\nabla^{0.5}$: 5.936 $(1-w_s)(1-w_m)$: 1.185 BHP/DHP: 1.030 Disp: 363254 [t]

F_n	$rw \times 10^3$	$rr \times 10^3$	$\Delta cf \times 10^3$	1-t	1- w_m	η_R
0.110	0.030	3.250	0.070	0.804	0.535	1.005
0.120	0.060	3.230	0.070	0.804	0.539	1.007
0.130	0.110	3.240	0.080	0.804	0.543	1.010
0.140	0.170	3.260	0.080	0.804	0.548	1.013
0.150	0.260	3.310	0.090	0.804	0.552	1.016
0.160	0.380	3.400	0.090	0.805	0.557	1.018
0.170	0.570	3.560	0.100	0.805	0.562	1.021
0.180	0.870	3.830	0.100	0.805	0.567	1.023
0.190	1.360	4.300	0.100	0.805	0.572	1.025

表 4.3.1(2) Tips Sp による MIBS;+B=7.5m に対応する仮想在来船型の推進性能の諸数値

3. POWER CALCULATION RESULTS

(A) Propeller

Dp: 10.00 [m] P/D:0.724 Ae/Ad: 0.467 t/l(0.7R): 0.063

Open Characteristics

s	J	K_T	K_Q	η_D	K_T/J^2	δ
0.650	0.254	0.238	0.0274	0.350	3.700	121.8
0.500	0.362	0.200	0.0242	0.476	1.525	85.3
0.350	0.471	0.160	0.0205	0.585	0.722	65.6
0.200	0.579	0.117	0.0163	0.659	0.347	53.3
0.050	0.688	0.070	0.0115	0.665	0.147	44.9
-0.100	0.797	0.021	0.0047	0.559	0.033	38.7

(B) Power Calculation Components

Vs[kn]	Fn	Rn $\times 10^{10}$	rw $\times 10^3$	rr $\times 10^3$	cw $\times 10^3$	cfs $\times 10^3$	$\Delta cf \times 10^3$
12.07	0.110	0.167	0.030	3.250	0.010	1.440	0.070
13.16	0.120	0.182	0.060	3.230	0.020	1.420	0.070
14.26	0.130	0.197	0.110	3.240	0.037	1.410	0.080
15.36	0.140	0.213	0.170	3.260	0.057	1.400	0.080
16.46	0.150	0.228	0.260	3.310	0.088	1.380	0.090
17.55	0.160	0.243	0.380	3.400	0.128	1.370	0.090
18.65	0.170	0.258	0.570	3.560	0.192	1.360	0.100
19.75	0.180	0.273	0.870	3.830	0.293	1.350	0.100
20.84	0.190	0.289	1.360	4.300	0.458	1.350	0.100

Vs[kn]	1-t	1-ws	η_R	η_H			
12.07	0.804	0.635	1.005	1.267			
13.16	0.804	0.639	1.007	1.258			
14.26	0.804	0.644	1.010	1.248			
15.36	0.804	0.649	1.013	1.239			
16.46	0.804	0.655	1.016	1.228			
17.55	0.805	0.660	1.018	1.218			
18.65	0.805	0.666	1.021	1.208			
19.75	0.805	0.672	1.023	1.198			
20.84	0.805	0.678	1.025	1.187			

Vs[kn]	K_T/J^2	s	J	η_D	δ	N[rpm]	T[kN]
12.07	0.914	0.386	0.445	0.559	69.4	53.1	1452
13.16	0.898	0.383	0.447	0.561	69.1	58.1	1724
14.26	0.886	0.381	0.449	0.563	68.8	63.2	2026
15.36	0.875	0.379	0.450	0.564	68.6	68.4	2360
16.46	0.869	0.377	0.451	0.565	68.5	73.8	2735
17.55	0.867	0.377	0.451	0.565	68.4	79.3	3159
18.65	0.875	0.379	0.450	0.564	68.6	85.2	3662
19.75	0.897	0.383	0.447	0.561	69.1	91.6	4286
20.84	0.945	0.391	0.441	0.555	70.0	99.0	5117

Vs[kn]	EHP[kW]	EHPv[kW]	EHPw[kW]	DHP[kW]	BHP[kW]	Cadm	EHP/BHP
12.07	7253	7216	37	10193	10498	627	0.691
13.16	9393	9297	96	13211	13607	628	0.690
14.26	11964	11741	223	16859	17365	625	0.689
15.36	15005	14575	430	21200	21836	621	0.687
16.46	18638	17829	809	26437	27230	613	0.684
17.55	22965	21530	1435	32748	33730	600	0.681
18.65	28291	25706	2584	40662	41882	580	0.675
19.75	35071	30391	4680	51003	52533	549	0.668
20.84	44213	35611	8602	65468	67433	503	0.656

表 4.3.1(2)に示した仮想在来船型の C_{adm_ACS} と $C_M/C_{M_ACS} = 0.9000/0.9920 = 0.9072$ から、4.1.2 式により MIBS; $+B=7.5m$ の C_{adm} は表 4.3.2 に示すように推定できる。

表 4.3.2 MIBS; $+B=7.5m$ の満載状態における C_{adm} の推定結果

V_s [kn]	C_{adm_ACS}	V_s/V_{s_design}	C_M/C_{M_ACS}	C_{adm}
14.26	643.8	0.9200	0.9072	736.7
15.36	639.6	0.9910	0.9072	727.4
16.46	631.4	1.0619	0.9072	710.4
17.55	618.0	1.1323	0.9072	685.0
18.65	597.4	1.2032	0.9072	649.2

表 4.3.2 に示した $V_s=16.46kts$ のケース ($V_s/V_{s_design}=1.0619$) を例に、計算の流れを示す。まず、当該速力における 4.1.3 式の右辺の値を次のとおり計算する。

$$\begin{aligned} \text{右辺(4.1.3 式)} &= -0.478881 \times 1.0619^2 + 0.694839 \times 0.9072^2 - 3.877112 \times 1.0619 \times 0.9072 \\ &\quad + 4.330274 \times 1.0619 + 1.476745 \times 0.9072 - 1.109696 = 1.1251 \end{aligned}$$

$V_s=16.46kts$ における C_{adm_ACS} は 631.4 なので、以下のとおり $V_s=16.46kts$ における MIBS の C_{adm} が得られる。

$$\begin{aligned} C_{adm}/C_{adm_ACS} &= C_{adm}/631.4 = 1.1251 \\ C_{adm} &= 631.4 \times 1.1251 = 710.4 \end{aligned}$$

他の速力における C_{adm} についても、上記と同様の計算方法により得る事ができる。

(2) 空荷状態の例

満載状態の例と同じ、MIBS; $+B=7.5m$ のケースを用いた計算例を示す。3. 4 節の (1) で述べたとおり、本ケースの満載状態と空荷状態の排水量比は次の値となる。

$$\Delta_{ballast}/\Delta_{full} = 76911/329565 = 0.2334$$

表 4.3.2 に示した満載状態の C_{adm} と上記 $\Delta_{ballast}/\Delta_{full}$ から 4.2.1 式により空荷状態の C_{adm} は表 4.3.3 に示すとおり推定できる。

表 4.3.3 MIBS の空荷状態における C_{adm} の推定結果

V_s [kn]	C_{adm_full}	V_s/V_{s_design}	$\Delta_{ballast}/\Delta_{full}$	$C_{adm_ballast}$
14.26	736.7	0.9200	0.2334	466.4
15.36	727.4	0.9910	0.2334	449.9
16.46	710.4	1.0619	0.2334	436.3
17.55	685.0	1.1323	0.2334	424.8
18.65	649.2	1.2032	0.2334	413.1

表 4.3.2 に示した $V_s=16.46$ kts のケース ($V_s/V_{s_design}=1.0619$) を例に、計算の流れを示す。
まず、当該速力における 4.2.1 式の右辺の値を次のとおり計算する。

$$\begin{aligned} \text{右辺(4.2.1 式)} &= 1.021574 \times 1.0619^2 - 3.614474 \times 0.2334^2 + 0.684770 \times 1.0619 \times 0.2334 \\ &\quad - 2.317056 \times 1.0619 + 2.352580 \times 0.2334 + 1.400837 = 0.6142 \end{aligned}$$

$V_s=16.46$ kts における C_{adm_full} は 710.4 なので、以下のとおり空荷状態における C_{adm} が得られる。

$$C_{adm_ballast}/C_{adm_full} = C_{adm_ballast}/710.4 = 0.6142$$

$$C_{adm_ballast} = 710.4 \times 0.6142 = 436.3$$

他の速力における C_{adm} も、上記と同様の計算方法により得る事ができる。

参考文献

- 4-1) 森正彦：船型設計，船舶技術研究協会，p.1，1997.
- 4-2) 日本造船技術センター：SRC 船型設計システム (SRC Tips) について (その 1 SRC Tips とは)，SRC NEWS，No.78，2009.
- 4-3) 佐々木紀幸他：NMRI 船型要目最適化システム，平成 18 年度海上技術安全研究所講演会講演集，pp.141-144，2006.
- 4-4) 金井健：ニューラルネットワークによる船舶の推進性能推定とその船型最適化への応用，西部造船会会報，第 99 号，pp.1-11，2000.
- 4-5) 金井健：ニューラルネットワークを用いた推進性能の推定ーバラスト状態への適用ー，日本船舶海洋工学会論文集，第 11 号，pp.17-27，2010.

5. VLCC 船型の検討

5. 1 対象とする船種とベース船

肥大船の用途としては、原油タンカーとバルカーがその大半を占めている。本研究では、初期船型計画の対象として、中東－東アジアで運航されるマラッカマックス型 VLCC を設定する。

NOBS/MIBS は建造実績がないため、その初期計画を行う際には在来船型をベース船として設定し、比較しながら検討を進める必要がある。今回、船体形状が公表されている KVLCC2⁵⁻¹⁾の主要寸法等を修正した船型をベース船とする。ベース船の L.W.は、SRC Tips の初期要目設定ツール (Tips Id)⁵⁻²⁾による推定値を参考に設定する。主要目等を以下に示す。

- $L_{OA}=abt.333m$, $L_{PP}=319.5m$, $B=60.0m$, $d=20.5m$, $D=29.1m$
- $L.W.=42,950t$, $D.W.=283,000t$, $B.W.=83,000t$
- $L.W. / (L_{PP} * (B + D)) = 1.5087$
- $C_B=0.8092$, $C_P=0.8108$, $C_M=0.9980$, $lcb(\%L_{PP})=-3.50$
- $\Delta_{ballast} / \Delta_{full}=0.40$, バラスト状態トリム量=1.0% L_{PP}
- 計画速力 ; 15.5kts
- 主機 MCR ; 27,000kW×72rpm
- プロペラ直径 ; 10.0m (シャフトセンター高さ 5.1m)
- プロペラ翼数 ; 4

全長、幅、喫水、深さは、実際に建造されている 300 型マラッカマックス船型⁵⁻³⁾と同じとしたが、それ以外の船体形状は KVLCC2 をベースとしたので、結果として、載貨重量は 260 型 VLCC と 300 型 VLCC の中間程度となっている。NOBS/MIBS はベース船から主要寸法を拡大する必要があるが、喫水についてはマラッカ海峡の通航制限が、全長については港湾への入港制限があるため、実用面も考慮して、本研究では比較的制約の少ない拡幅する場合についての検討を行う事とする。

5. 2 検討内容と条件

NOBS/MIBS は空荷状態において、少ない排水量で十分な喫水を確保するため、在来船型と比べて C_M を小さくする必要がある。この時、 C_M のみ小さくすると、満載状態の排水量が減少するので、 $D.W.$ を保持するためには C_P や主要寸法を増やす必要がある。本研究では運航上の制約が少ない、型幅を拡大する場合について検討を行う。

NOBS/MIBS の満載状態と空荷状態における平水中推進性能の推定と空荷状態における喫水の推定には、第 3 章で示した簡易推定法を用いる。在来船型の満載状態における平水中推進性能の推定には、第 4 章で述べた Tips Sp(Ver.1.1.2.5)を用いる。在来船型の空荷状態

における平水中推進性能は、満載状態と空荷状態の C_{adm} の比（類似船の実績）から計算する。本研究では、ノンバラスト船の研究開発研究成果概要報告書⁵⁻⁴に記載されている、類似の在来船型（VLCC）の満載状態と空荷状態の BHP の関係から、5.2.1 式に示す比を用いる。なお、この類似船の排水量比 $\Delta_{ballast} / \Delta_{full}$ は約 0.4 であり、ベース船はこれらの値を用いる事とする。

$$\frac{C_{adm_ballast}}{C_{adm_full}} = 0.74 \quad (5.2.1)$$

以降の検討において共通の条件を次のとおり設定する。

- D.W., L_{pp} , d はベース船と同じとする。
- D はベース船と同じとする（タンク容積に違いが生じる場合があるが、後に配置を検討する際に調整する）。
- NOBS/MIBS の空荷状態喫水は、燃料等をすべて消費した状態で、F.P.の喫水を 3m に、船尾喫水は $I/D_p=0.5$ となるように設定する。
- 主機はベース船のそれと同じとする。
- 実船プロペラは直径制限して設計した 4 翼 MAU プロペラとし、MCR における回転数マージンを +3rpm として設計する。

5. 3 拡幅するケース

5. 3. 1 在来船型の拡幅

在来船型を対象として、ベース船から拡幅する場合の主要目等と BHP を検討する。型幅を 2.5m 刻みで 67.5m まで拡幅させる場合の主要目等の概要を表 5.3.1 に示す（詳細は表 5.3.4 に示す）。ここで、表 5.3.1 と 5.3.4 に記載されているパラメータのうち、4 章で定義していないものについて、以下に述べる。

- $\delta \Delta_{full}$ はベース船の満載状態排水量との差で、主要寸法拡大に伴う L.W.増加量である
- BHPratio はベース船の BHP に対する当該ケースの BHP の比で、1.0 より小さいと BHP 低減である。本検討では、満載状態では計画速力 15.5kts における比を、空荷状態では 17.0kts における比を求める事とする。

拡幅量と BHPratio の関係を、他の結果と併せて、満載状態について図 5.3.1 に、空荷状態について図 5.3.2 に示す。

結果を見ると、満載状態については拡幅量が 5.0m までの BHP は減少傾向で、ベース船のそれと比べて 6.4%の低減が見込めるが、さらに拡幅すると BHP は増加に転じる事が分かる。空荷状態の BHP については、満載状態のそれと同じ傾向で、拡幅量が 5m の時に 7.8%の低減である。

表 5.3.1 在来船型の拡幅シリーズ

+B [m]	-	2.5	5.0	7.5
$C_B/C_{B\text{Base}}$	1	0.964	0.930	0.899
B [m]	60.000	62.500	65.000	67.500
L.W. [ton]	42,950	44,155	45,360	46,565
Δ_{full} [ton]	325,950	327,155	328,360	329,565
$\delta \Delta_{\text{full}}$ [ton]	-	1,205	2,410	3,615
Δ_{ballast} [ton]	130,450	130,905	131,360	131,815
C_B	0.8092	0.7797	0.7525	0.7273
C_P	0.8108	0.7813	0.7540	0.7287
C_W	0.9016	0.9016	0.9016	0.8900
lcb [% L_{PP}]	-3.5024	-3.5024	-3.0000	-2.2000
B.W.[ton]	87,500	86,750	86,000	85,250
BHP _{full} [kW]	19,981	19,016	18,709	19,053
BHP _{ballast} [kW]	19,673	18,483	18,141	18,529
BHP ratio _{full}	1.0000	0.9517	0.9363	0.9536
BHP ratio _{ballast}	1.0000	0.9395	0.9221	0.9418

【共通のパラメータ】

$L_{PP}=319.5\text{m}$, $d=20.5\text{m}$, $D=29.1\text{m}$, $C_M=0.998$

$D.W.=283,000\text{ton}$, $L.W./ (L_{PP}*(B+D)) = 1.5087$

$\Delta_{\text{ballast}} / \Delta_{\text{full}} = 0.40$, $D_p=10.0\text{m}$ (シャフトセンター高さ 5.1m)

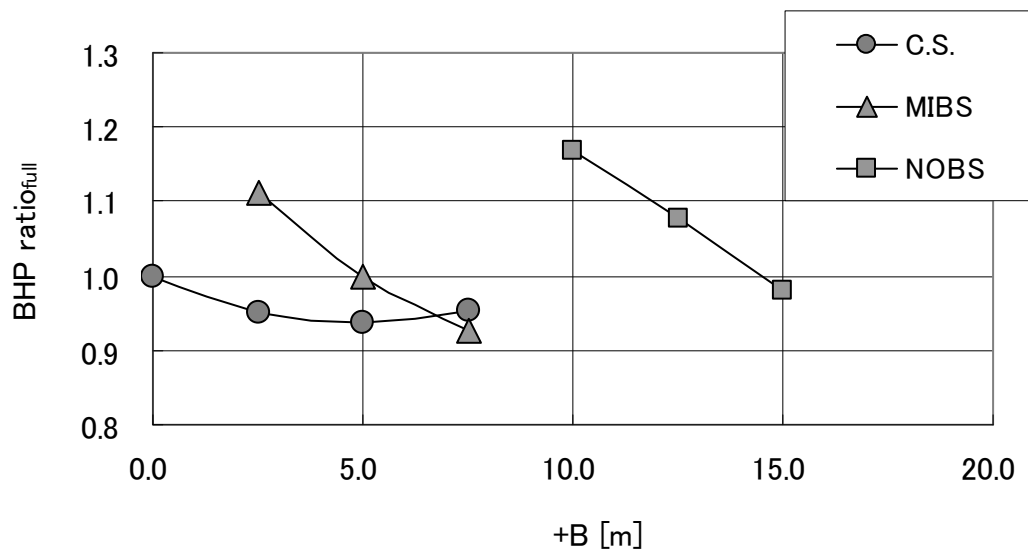


図 5.3.1 拡幅量と BHP ratio_{full} の関係

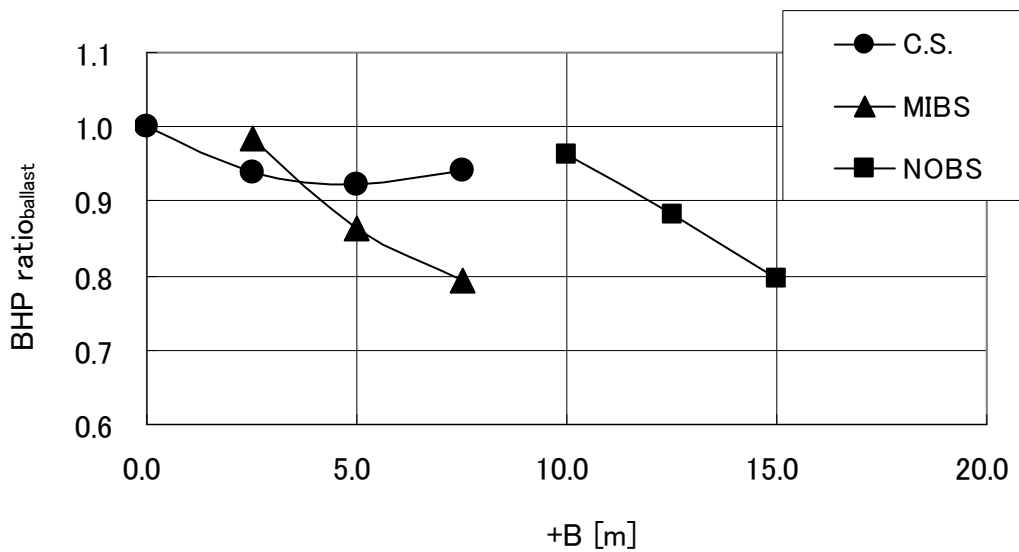


図 5.3.2 拡幅量と BHPratio_{ballast} の関係

ここで、 C_W と l_{CB} については、なるべくベース船と同じとするが、Tips Sp のデータベース船型を調べたところ、 C_P を減少させると、 C_P に対して C_W と l_{CB} の実績が少ない領域に入ってしまうケースがある事が判明した。そのため、在来船型については、図 5.3.3 に示すように、 C_W と l_{CB} の値を C_P に対しそれらの実績範囲内（図中破線の内側）に入るように修正して Tips Sp による馬力推定を行っている。

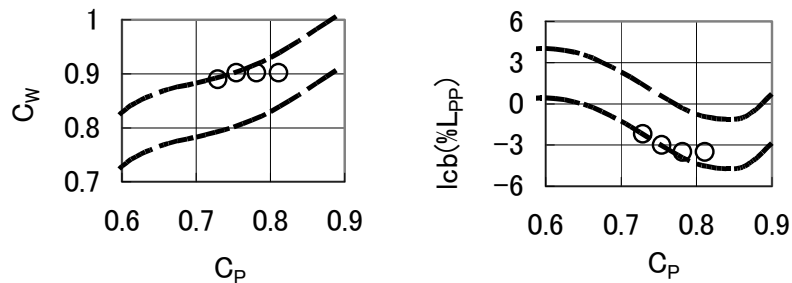


図 5.3.3 在来船型の C_P と C_W , $l_{CB}(\%L_{PP})$ の関係

5. 3. 2 MIBS の拡幅

MIBS はバラスト水がある程度搭載するため、 C_M を任意に設定する事が可能である。 C_M を小さくするとバラスト水搭載量を減らす事ができる一方で、D.W.を確保するためには主要寸法と C_P の調整が必要となる。ここでは、バラスト水の搭載量がベース船のそれと比べて60%以上の削減となるように、筆者が過去に得た知見から、 C_M を0.9として検討を行う。型幅を62.5m, 65.0m, 67.5mに拡大させる場合の主要目等の概要を表 5.3.2 に示す（詳細は表 5.3.5 に示す）。満載状態、空荷状態における拡幅量と BHPratio の関係を図 5.3.1 と 5.3.2 に

示す。ここで、NOBS/MIBS の推進性能の簡易推定法はそれらの水槽試験による実績値に基づくが、 C_p が 0.8 以下となる NOBS/MIBS の実績がなく、信頼性に欠けると判断したため、本研究では拡幅量は C_p が 0.8 を下回らない範囲で検討している。

結果を見ると、MIBS では船底の水平部の幅 K を型幅の半分にすると、船底傾斜の大きさ H は 8.2m となる。この値は過去に開発した VLCC の MIBS⁵⁻⁵⁾ のそれよりも若干小さい値であり、接岸条件等、運航上の大きな問題はないと考えている。バラスト水搭載量は想定通りに 60%以上削減できている事が分かる。推進性能については、2.5m 拡幅する場合は、 C_p が約 0.87 と非常に大きい数値となるため、満載状態における BHP はベース船のそれに対して 11.1%増加している。5.0m の拡幅では、満載状態における BHP は同程度である。7.5m に拡幅すると、満載状態では 7.3%の BHP 低減である。この時、バラスト状態では 20.7%の BHP 低減である。

表 5.3.2 MIBS の拡幅シリーズ

+B [m]	2.5	5.0	7.5
C_B/C_{B_Base}	0.964	0.930	0.899
B [m]	62.500	65.000	67.500
L.W. [ton]	44,155	45,360	46,565
Δ_{full} [ton]	327,155	328,360	329,565
$\delta \Delta_{full}$ [ton]	1,205	2,410	3,615
$\Delta_{ballast}$ [ton]	76,349	76,630	76,911
C_B	0.7797	0.7525	0.7273
C_p	0.8663	0.8361	0.8081
K [m]	31.25	32.50	33.75
B.W. [ton]	32,193	31,270	30,346
B.W._base/B.W.	0.368	0.357	0.347
BHP _{full} [kW]	22,192	19,967	18,517
BHP _{ballast} [kW]	19,359	16,996	15,605
BHP ratio _{full}	1.1106	0.9993	0.9267
BHP ratio _{ballast}	0.9840	0.8640	0.7932

【共通のパラメータ】

$L_{pp}=319.5m$, $d=20.5m$, $D=29.1m$, $H=8.2m$,

$C_M=0.900$, $C_W=0.9016$, $lcb(\%L_{pp})=-3.50$

$D.W.=283,000ton$, $L.W./ (L_{pp}*(B+D)) = 1.5087$

$d_{f_ballast}=3.0m$, $d_{a_ballast}=10.1m$

$D_p=10.0m$ (シャフトセンター高さ 5.1m)

5. 3. 3 NOBS の拡幅

NOBS の C_M は、空荷状態喫水の簡易推定式を用いる事で、空荷状態における排水量と喫水条件から一意に定まるが、拡幅量により異なる値となる。プロペラ直径は、空荷状態における所要喫水をなるべく減らすため、ベース船のそれより 10%減らして 9.0m とする。これよりさらに直径を小さくする場合については、荷重度が過大となり展開面積比が 4 翼の MAU チャートの上限を越えてしまうため、検討していない。

この時、型幅を 70.0m、72.5m、75.0m に拡大させる場合の主要目等の概要を表 5.3.3 に示す（詳細は表 5.3.6 に示す）。満載状態、空荷状態における拡幅量と BHPratio の関係を図 5.3.1 と 5.3.2 に示す。

結果を見ると、 C_M は 0.80~0.83 の範囲となり、建造上の制約を考慮して、船底の水平部の幅を 3m とした場合、船底傾斜の大きさは 8m 未満となる。これは MIBS のそれより小さい値となり、問題はないと考えている。推進性能については、10.0m と 12.5m 拡幅する場合、満載状態における BHP は、ベース船のそれより大幅に増加している。15.0m 拡幅する場合、満載状態ではベース船より 2.1%の BHP 低減となり、空荷状態では 20.2%の BHP 低減が見込まれる。なお、これ以上の拡幅については、 C_p が 0.8 を下回るため、前述の理由により、検討していない。

表 5.3.3 NOBS の拡幅シリーズとプロペラ直径変更

+B [m]	10.00	12.50	15.00	15.00
$C_B/C_{B\text{Base}}$	0.870	0.843	0.818	0.818
B [m]	70.000	72.500	75.000	75.000
L.W. [ton]	47,770	48,976	50,181	50,181
Δ_{full} [ton]	330,770	331,976	333,181	333,181
$\delta \Delta_{\text{full}}$ [ton]	4,820	6,026	7,231	7,231
Δ_{ballast} [ton]	47,770	48,976	50,181	50,181
C_B	0.7038	0.6821	0.6617	0.6617
C_M	0.8253	0.8286	0.8320	0.8022
C_p	0.8529	0.8231	0.7953	0.8249
H [m]	7.49	7.33	7.17	8.45
$\Delta_{\text{ballast}}/\Delta_F$	0.144	0.148	0.151	0.151
$d_{m\text{ballast}}/d$	0.295	0.295	0.295	0.320
$d_{a\text{ballast}}$ [m]	9.100	9.100	9.100	10.100
$D_{P\text{max}}$ [m]	9.000	9.000	9.000	10.000
シャフトセンター高さ[m]	4.600	4.600	4.600	5.600
BHP _{full} [kW]	23,321	21,528	19,572	19,602
BHP _{ballast} [kW]	18,957	17,374	15,684	15,693
BHP ratio _{full}	1.1671	1.0774	0.9795	0.9810
BHP ratio _{ballast}	0.9636	0.8832	0.7972	0.7977

【共通のパラメータ】

$L_{pp}=319.5\text{m}$, $d=20.5\text{m}$, $D=29.1\text{m}$, $K=3.0\text{m}$

$C_W=0.9016$, $lcb(\%L_{pp})=-3.50$

$D.W.=283,000\text{ton}$, $L.W./ (L_{pp}*(B+D)) = 1.5087$

$B.W.=0\text{ton}$, $d_{f_ballast}=3.0\text{m}$

先にプロペラ直径を減らした検討を行ったが、ここでは、15.0m 拡幅する場合について、プロペラ直径をベース船と同じ 10.0m にする検討を行い、その結果を表 5.3.3 の右列に示す。これを見ると、プロペラ直径が 9.0m の場合と 10.0m の場合とで推進性能は同程度である事が分かる。プロペラ直径が異なるにも関わらず、推進性能が変わらない理由を以下に考察する。プロペラ直径を縮小すると、空荷状態における所要喫水が減少するので、プロペラ直径を変えない場合と比べて C_M は大きく、 C_p は小さくなる。プロペラ直径の縮小 (BHP 増加) と C_p の縮小 (BHP 低減) は推進性能の観点から見るとトレードオフ関係にあり、結果として、推進性能が同程度になったと考えられる。プロペラ直径が大きい場合と小さい場合とでは、直径が小さい方が、プロペラ重量が軽く、材料コストや軸受け強度の面で有利である。また、船首尾トリムがより小さく、船橋視界の確保の面でも有利であるので、本検討により、NOBS に小直径プロペラを採用する事は合理的である事が確認できた。

表 5.3.4 在来船型（拡幅シリーズ）の主要目検討表

主要寸法の拡大量	+Lpp [m]	-	0.00	0.00	0.00
	+B [m]	-	2.5	5.0	7.5
	+d [m]	-	0.00	0.00	0.00
	$C_B/C_{B\text{Base}}$	1	0.964	0.930	0.899
主要寸法	L _{pp} [m]	319.500	319.500	319.500	319.500
	L _{wl} [m]	325.000	325.000	325.000	325.000
	B [m]	60.000	62.500	65.000	67.500
	D [m]	29.100	29.100	29.100	29.100
	d [m]	20.500	20.500	20.500	20.500
各種重量、排水量等	L.W. [ton]	42,950	44,155	45,360	46,565
	D.W. [ton]	283,000	283,000	283,000	283,000
	Fuel,etc. [ton]	0	0	0	0
	Δ_{full} [ton]	325,950	327,155	328,360	329,565
	$\delta \Delta_{\text{full}}$ [ton]	-	1,205	2,410	3,615
	LW/L(B+D)	1.5087	1.5087	1.5087	1.5087
	Δ_{ballast} [ton]	130,450	130,905	131,360	131,815
寸法比、各種係数等	L _{pp} /B	5.3250	5.1120	4.9154	4.7333
	B/d	2.9268	3.0488	3.1707	3.2927
	C _B	0.8092	0.7797	0.7525	0.7273
	C _M	0.9980	0.9980	0.9980	0.9980
	C _P	0.8108	0.7813	0.7540	0.7287
	C _M * (ACS)	-	-	-	-
	C _B * (ACS)	-	-	-	-
	L _{pp} /B(1-C _P)	1.0074	1.1182	1.2093	1.2841
	C _w	0.9016	0.9016	0.9016	0.8900
	lcb [%L _{pp}]	-3.5024	-3.5024	-3.0000	-2.2000
中央断面形状	K [m]	0.00	0.00	0.00	0.00
	H [m]	0.00	0.00	0.00	0.00
	H/d	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
	θ [deg.]	0.00	0.00	0.00	0.00
空荷状態	$\Delta_{\text{ballast}}/\Delta_F$	0.400	0.400	0.400	0.400
	d _{m,ballast} /d	-	-	-	-
	d _{f,ballast} [m]	-	-	-	-
	d _{a,ballast} [m]	-	-	-	-
	B.W.[ton]	87,500	86,750	86,000	85,250
	バラスト水搭載量比	-	-	-	-
プロペラ設計条件	D _{P,max} [m]	10.000	10.000	10.000	10.000
	MCR[kW]	27,000	27,000	27,000	27,000
	Np[rpm]	75.00	75.00	75.00	75.00
	翼数	4	4	4	4
	Bottom Clearance(%Dp)	1.00	1.00	1.00	1.00
馬力推定結果	Vs _{design} [kts]	15.50	15.50	15.50	15.50
	C _{adm,full}	669	704	718	706
	BHP _{full} [kW]	19,981	19,016	18,709	19,053
	Vs _{ballast} [kts]	17.00	17.00	17.00	17.00
	C _{adm,ball.}	487	519	530	520
	BHP _{ballast} [kW]	19,673	18,483	18,141	18,529
	BHP ratio _{full}	1.0000	0.9517	0.9363	0.9536
	BHP ratio _{ballast}	1.0000	0.9395	0.9221	0.9418
	BHP ratioの平均値	1.0000	0.9456	0.9292	0.9477

表 5.3.5 MIBS (拡幅シリーズ) の主要目検討表

主要寸法の拡大量	+L _{pp} [m]	0.00	0.00	0.00
	+B [m]	2.5	5.0	7.5
	+d [m]	0.00	0.00	0.00
	C _B /C _{B Base}	0.964	0.930	0.899
主要寸法	L _{pp} [m]	319.500	319.500	319.500
	L _{wl} [m]	325.000	325.000	325.000
	B [m]	62.500	65.000	67.500
	D [m]	29.100	29.100	29.100
	d [m]	20.500	20.500	20.500
各種重量、 排水量等	L.W. [ton]	44,155	45,360	46,565
	D.W. [ton]	283,000	283,000	283,000
	Fuel,etc. [ton]	0	0	0
	Δ _{full} [ton]	327,155	328,360	329,565
	δ Δ _{full} [ton]	1,205	2,410	3,615
	LW/L(B+D)	1.5087	1.5087	1.5087
	Δ _{ballast} [ton]	76,349	76,630	76,911
寸法比、 各種係数等	L _{pp} /B	5.1120	4.9154	4.7333
	B/d	3.0488	3.1707	3.2927
	C _B	0.7797	0.7525	0.7273
	C _M	0.9000	0.9000	0.9000
	C _P	0.8663	0.8361	0.8081
	C _M * (ACS)	0.9947	0.9940	0.9920
	C _B * (ACS)	0.8618	0.8311	0.8016
	L _{pp} /B(1-C _P)	0.6833	0.8057	0.9085
	C _W	0.9016	0.9016	0.9016
	lcb [%L _{pp}]	-3.5024	-3.5024	-3.5024
	中央断面形状	K [m]	31.25	32.50
H [m]		8.20	8.20	8.20
H/d		0.4000	0.4000	0.4000
θ [deg.]		27.69	26.78	25.92
空荷状態	Δ _{ballast} /Δ _F	0.233	0.233	0.233
	d _{m ballast} /d	0.320	0.320	0.320
	d _{f ballast} [m]	3.000	3.000	3.000
	d _{a ballast} [m]	10.100	10.100	10.100
	B.W. [ton]	32,193	31,270	30,346
	B.W. _{base} /B.W.	0.368	0.357	0.347
プロペラ 設計条件	D _{P max} [m]	10.000	10.000	10.000
	MCR[kW]	27,000	27,000	27,000
	N _p [rpm]	75.00	75.00	75.00
	翼数	4	4	4
	Bottom Clearance(%D _p)	1.00	1.00	1.00
馬力推定結果	V _{s design} [kts]	15.50	15.50	15.50
	C _{adm full}	604	672	727
	BHP _{full} [kW]	22,192	19,967	18,517
	V _{s ballast} [kts]	17.00	17.00	17.00
	C _{adm ball.}	346	395	431
	BHP _{ballast} [kW]	19,359	16,996	15,605
	BHP ratio _{full}	1.1106	0.9993	0.9267
	BHP ratio _{ballast}	0.9840	0.8640	0.7932
	BHP ratioの平均値	1.0473	0.9316	0.8600

表 5.3.6 NOBS (拡幅シリーズ) の主要目検討表

主要寸法の拡大量	+L _{pp} [m]	0.00	0.00	0.00	0.00
	+B [m]	10.00	12.50	15.00	15.00
	+d [m]	0.00	0.00	0.00	0.00
	C _B /C _{B Base}	0.870	0.843	0.818	0.818
主要寸法	L _{pp} [m]	319.500	319.500	319.500	319.500
	L _{wL} [m]	325.000	325.000	325.000	325.000
	B [m]	70.000	72.500	75.000	75.000
	D [m]	29.100	29.100	29.100	29.100
	d [m]	20.500	20.500	20.500	20.500
	各種重量、 排水量等	L.W. [ton]	47,770	48,976	50,181
D.W. [ton]		283,000	283,000	283,000	283,000
Fuel,etc. [ton]		0	0	0	0
Δ _{full} [ton]		330,770	331,976	333,181	333,181
δ Δ _{full} [ton]		4,820	6,026	7,231	7,231
LW/L(B+D)		1.5087	1.5087	1.5087	1.5087
Δ _{ballast} [ton]		47,770	48,976	50,181	50,181
寸法比、 各種係数等		L _{pp} /B	4.5643	4.4069	4.2600
	B/d	3.4146	3.5366	3.6585	3.6585
	C _B	0.7038	0.6821	0.6617	0.6617
	C _M	0.8253	0.8286	0.8320	0.8022
	C _P	0.8529	0.8231	0.7953	0.8249
	C _M * (ACS)	0.9886	0.9835	0.9770	0.9770
	C _B * (ACS)	0.8431	0.8096	0.7771	0.8059
	L _{pp} /B(1-C _P)	0.6715	0.7796	0.8720	0.7461
	C _W	0.9016	0.9016	0.9016	0.9016
	lcb [%L _{pp}]	-3.5024	-3.5024	-3.5024	-3.5024
	中央断面形状	K [m]	3.00	3.00	3.00
H [m]		7.49	7.33	7.17	8.45
H/d		0.3651	0.3575	0.3500	0.4121
θ [deg.]		12.59	11.91	11.27	13.21
空荷状態	Δ _{ballast} /Δ _F	0.144	0.148	0.151	0.151
	d _{m,ballast} /d	0.295	0.295	0.295	0.320
	d _{f,ballast} [m]	3.000	3.000	3.000	3.000
	d _{a,ballast} [m]	9.100	9.100	9.100	10.100
	B.W. [ton]	0	0	0	0
	バラスト水搭載量比	0.000	0.000	0.000	0.000
プロペラ 設計条件	D _{P,max} [m]	9.000	9.000	9.000	10.000
	MCR[kW]	27,000	27,000	27,000	27,000
	Np[rpm]	75.00	75.00	75.00	75.00
	翼数	4	4	4	4
	Bottom Clearance(%D _p)	1.11	1.11	1.11	1.00
	Vs _{design} [kts]	15.50	15.50	15.50	15.50
馬力推定結果	C _{adm,full}	579	628	693	692
	BHP _{full} [kW]	23,321	21,528	19,572	19,602
	Vs _{ballast} [kts]	17.00	17.00	17.00	17.00
	C _{adm.ball.}	258	287	323	323
	BHP _{ballast} [kW]	18,957	17,374	15,684	15,693
	BHP ratio _{full}	1.1671	1.0774	0.9795	0.9810
	BHP ratio _{ballast}	0.9636	0.8832	0.7972	0.7977
	BHP ratioの平均値	1.0654	0.9803	0.8884	0.8893

5. 4 NOBS/MIBS の建造び修繕に関する調査

以上の検討の結果、ベース船の型幅 60.0m に対して、MIBS は 67.5m、NOBS は 75.0m まで拡張する船型を得た。ここでは NOBS/MIBS の建造、修繕において考慮すべき点として建造、修繕時の支持方法とドック幅があるので、それらについて検討する。

まず、前者については、MIBS の場合、フラットボトム幅として、型幅の半分を確保しているため、既存の盤木をそのまま用いても、建造、修繕における船体支持は問題なく可能である。以前 MIBS を開発した際の検討では、盤木の強度についても問題ないという結果も得られている。NOBS の場合は船底の水平部はごく僅かであり、また船底の大半は大きな傾斜をもっている。そのため、既存の盤木では支持できず、支持方法は実船建造にあたり解決すべき課題として残されている。

次に建造ドックについては、2003 年時点でも日本国内に幅 79m 以上のドックが 5 カ所存在しており⁵⁻⁶⁾、これらのドックを文献 5-6) から抜粋して以下に示す。

- ・ 今治造船株式会社

西条 ; 420m × 89.0m

- ・ ジャパンマリンユナイテッド

呉 ; 508.2m × 80.0m

有明 ; 595.2m × 82.0m

- ・ 住友重機械工業

横須賀 ; 560.0m × 80.0m

- ・ 三菱重工業株式会社

香焼 ; 950.0m × 96.0m

修繕ドックについては、中東及びアジア地域において多数存在しているが、そこから幅 60m 以上、全長 350m 以上、対応キャパシティ 30 万 DWT 以上の能力を持つ修繕ドックの本数とドック幅との関係を図 5.4.1 に示す。修繕ドックの情報は、日本海事協会が作成している修繕ドックリスト (2015 年 4 月時点)⁵⁻⁷⁾ から得た。なお、対応キャパシティの記載がないドックについては、幅のみを条件としてドック本数のカウントに含めている。船の幅よりプラス 5m ほどドック幅が必要と仮定すると、ベース船 (在来船型) に対応できる幅 65m 以上の修繕ドックは 35 以上ある事が分かる。MIBS に対応できる幅 72.5m 以上の修繕ドックは 19 あり、NOBS に対応できる幅 80m 以上の修繕ドックも 14 存在している。

以上により、本研究で検討した MIBS については、建造、修繕において大きな問題はないと考える事ができる。NOBS については、支持方法についての課題はあるが、ドックの大き

さには問題がない事が分かる。ただし、NOBS に関してはこれ以上拡幅すると、対応可能な建造ドック数と修繕ドックが大きく減るので、注意が必要である。

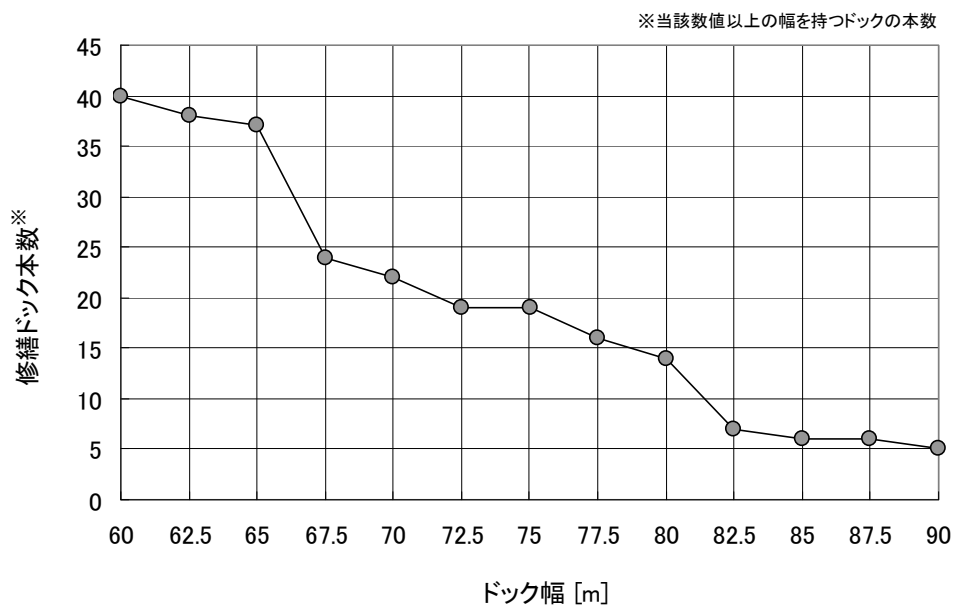


図 5.4.1 修繕ドック本数と幅との関係

以下に幅 60m 以上、全長 350m 以上、対応キャパシティ 30 万 DWT 以上の能力を持つ修繕ヤードとそこが保有しているドックのリストを修繕ドックリストから抜粋して示す。

【中東】

・ バーレーン

Repair Yard	No.	Type	Length(m)	Width(m)	Capacity(DWT)
Arab Shipbuilding and Repair Yard Co. Web Site: http://www.asry.net/	1	Graving	375	75	500000
	2	Floating	252	44	120000
	3	Floating	227	40	80000

・ オマーン

Repair Yard	No.	Type	Length(m)	Width(m)	Capacity(DWT)
Oman Drydock Company Web Site: http://www.omandrydock.com/index.html	1	Graving	410	95	600000
	2	Graving	410	80	500000
	3	Floating			80000

・カタール

Repair Yard	No.	Type	Length(m)	Width(m)	Capacity(DWT)
Nakilat - Keppel Offshore and Marine Ltd. Web Site: http://www.nkom.com.qa/index	1	Graving	360	66	350000
	2	Graving	400	80	450000
	3	Floating	375		

・UAE

Repair Yard	No.	Type	Length(m)	Width(m)	Capacity(DWT)
Dubai Drydocks Web Site: http://www.drydocks.gov.ae/	1	Graving	366	66	
	2	Graving	521	100	
	3	Graving	411	80	
	4	Floating	205	32	

【北アジア】

・中国

Repair Yard	No.	Type	Length(m)	Width(m)	Capacity(DWT)
Daishan Haizhou Shipyard Co., Ltd. Web Site: http://www.haizhoushipyard.com/en/	1	Graving	260	40	80000
	2	Graving	300	40	80000
	3	Graving	360	68	300000

Repair Yard	No.	Type	Length(m)	Width(m)	Capacity(DWT)
COSCO (Dalian) Shipyard Web Site: http://www.bogdanos-marine.gr/portfolio/cosco-dalian-shipyard-china/	1	Graving	240	40	80000
	2	Floating	260	48.5	180000
	3	Floating	350	66	300000

Repair Yard	No.	Type	Length(m)	Width(m)	Capacity(DWT)
Daeyang Shipyard Co., Ltd. Web Site: www.dyshipyard.com	1	Graving	250	41	100000
	2	Graving	360	78	300000

Repair Yard	No.	Type	Length(m)	Width(m)	Capacity(DWT)
Fujian Huadong Shipyard Co.Ltd. Web Site: http://www.fjhdshipyard.com	1	Drydock	375	72	400000
	2	Drydock	295	50	170000
	3	Drydock	245	41.8	100000

Repair Yard	No.	Type	Length(m)	Width(m)	Capacity(DWT)
CSSC Guangzhou Huangpu Shipbuilding Company Web Site: http://csschps.com	2	Graving	360	96	300000

Repair Yard	No.	Type	Length(m)	Width(m)	Capacity(DWT)
Chengxi Shipyard(Guangzhou) Co.Ltd. Web Site: http://chengxi.cssc.net.cn/	2	Graving	360	65	300000
	3	Graving	300	74	200000

Repair Yard	No.	Type	Length(m)	Width(m)	Capacity(DWT)
Guangzhou CSSC-Oceanline-GWS Marine Engineering Co.Ltd Web Site: http://www.gzdock.com/	1	Graving	300	62	150000
	2	Graving	360	65	300000
	3	Graving	300	74	200000

Repair Yard	No.	Type	Length(m)	Width(m)	Capacity(DWT)
Qingdao Beihai Shipbuilding Heavy Industry Co., Ltd. Web Site: http://www.bhshipyard.cn/en	1	Graving	360	78	300000
	2	Graving	325	58	150000
	3	Floating	250	45	100000

Repair Yard	No.	Type	Length(m)	Width(m)	Capacity(DWT)
Zhejiang Eastern Shipyard Co., Ltd. Web Site: http://www.zescoshipyard.com/	1	Graving	360	76	300000
	2	Graving	310	54	150000

Repair Yard	No.	Type	Length(m)	Width(m)	Capacity(DWT)
China Shipping Industry Co., Ltd (Changxing) Web Site: http://www.csgcic.com/en	1	Floating	247	37	75000
	2	Floating	308	50	Cape Size
	3	Floating	410	72	300000
	4	Floating	330	66	200000

Repair Yard	No.	Type	Length(m)	Width(m)	Capacity(DWT)
Yiu Lian Dockyard (Shekou) Limited Web Site: http://www.cmhicom.com	1	Graving	400	83	Over 300,000
	2	Graving	360	67	300000
	3	Floating	190	28	30000
	4	Floating	240.5	36	80000

Repair Yard	No.	Type	Length(m)	Width(m)	Capacity(DWT)
COSCO (Zhoushan) Shipyard Web Site: http://en.cosco-shipyard.com/	1	Graving	280	40	100000
	2	Graving	410	68	300000
	3	Graving	539	49.2	150000
	4	Graving	410	108	500000

Repair Yard	No.	Type	Length(m)	Width(m)	Capacity(DWT)
PaxOcean Engineering Zhoushan Co., Ltd Web Site: http://paxoceanzhoushan.com/	1	Graving	400	106	
	2	Graving	380	80	

Repair Yard	No.	Type	Length(m)	Width(m)	Capacity(DWT)
Zhoushan Asia Pacific Dockyard Co., Ltd. Web Site: http://www.apdock.com/	1	Graving	300	46	180000
	2	Graving	360	76	300000

Repair Yard	No.	Type	Length(m)	Width(m)	Capacity(DWT)
Zhoushan IMC-Yongyue Shipyard & Engineering Co., Ltd. Web Site: http://www.imc-yy.com/en/	1	Graving	350	65	300000
	2	Graving	251	39	100000

・日本

Repair Yard	No.	Type	Length(m)	Width(m)	Capacity(DWT)
Sasebo Heavy Industries Co., Ltd. Web Site: http://www.ssk-sasebo.co.jp/ssk/us/home/index.html	1	Graving	154	27	20000
	3	Graving	370	70	400000
	5	Graving	174	30	24000
	6	Graving	180	29	27000

Repair Yard	No.	Type	Length(m)	Width(m)	Capacity(DWT)
MES Yura Web Site: http://www.mes.co.jp/yura/cgi-bin/index.cgi	1	Graving	350	65	330000

【東南アジア】

・マレーシア

Repair Yard	No.	Type	Length(m)	Width(m)	Capacity(DWT)
Malaysia Marine and Heavy Engineering Sdn Bhd (MMHE). Web Site: http://www.mhb.com.my/	1	Graving	385	80	450000
	2	Graving	270	46	140000
	3	Shiplift	188	34	50000

・フィリピン

Repair Yard	No.	Type	Length(m)	Width(m)	Capacity(DWT)
Keppel Subic Shipyard Web Site: http://www.keppelphilippinesmarineinc.com/subic.htm	1	Graving	350	65	340000

・シンガポール

Repair Yard	No.	Type	Length(m)	Width(m)	Capacity(DWT)
Jurong Shipyard Web Site: http://www.jspl.com.sg/	1	Graving	270	40	100000
	2	Graving	350	56	300000
	3	Graving	380	80	500000
	4	Graving	335	56	200000

Repair Yard	No.	Type	Length(m)	Width(m)	Capacity(DWT)
Keppel FELS Limited Web Site: http://www.keppelfels.com.sg/	1	Graving	380	80	400000

Repair Yard	No.	Type	Length(m)	Width(m)	Capacity(DWT)
Keppel Shipyard (Benoi) Web Site: http://www.keppelom.com/en/home.aspx	1	Graving	350	60	300000
	2	Graving	300	60	170000

Repair Yard	No.	Type	Length(m)	Width(m)	Capacity(DWT)
Keppel Shipyard (Tuas) Web Site: http://www.keppelom.com/en/home.aspx	1	Graving	350	66	360000
	2	Graving	355	60	330000
	3	Graving	301	52	150000

Repair Yard	No.	Type	Length(m)	Width(m)	Capacity(DWT)
Sembawang Shipyard Web Site: http://www.sembship.com/	1	Graving	384	64	400000
	2	Floating	290	48	150000
	3	Graving	303	39	100000
	4	Floating	202	42	60000
	5	Floating	230	35	65000

Repair Yard	No.	Type	Length(m)	Width(m)	Capacity(DWT)
Sembmarine Integrated Yard Web Site: http://www.sembcorpmarine.com.sg	1	Graving	350	66	350000
	2	Graving	360	89	500000
	3	Graving	412	66	350000
	4	Graving	350	66	350000

参考文献

- 5-1) Kim, W.J., Van, S.H., Kim, D.H. : Measurement of flows around modern commercial ship models, *Experimental in Fluids*, Vol.31, pp.567-578, 2001.
- 5-2) 日本造船技術センター：SRC 船型設計システム (SRC Tips) のバージョンアップー初期要目設定 (Tips Id), SRC NEWS, No.94, 2014.
- 5-3) 深井 孝, 久間 康充, 田平 誠：マラッカマックス VLCC の開発, 三菱重工技報告 No.47, Vol.3, 2010.
- 5-4) 日本船舶技術研究協会：ノンバラスト船の研究開発 研究成果概要報告書, 2006.
- 5-5) 日本造船技術センター：造船技術センターで実施している CO2 削減技術に関する共同研究の結果について (その1), SRC NEWS, No.92, 2013.
- 5-6) Germundsson, A. & Holmgren, M : The Ballast-free Tanker, Chalmers university of technology Master thesis, Report No.X-04/146, Appendix E. Dry-dock list, 2004.
- 5-7) 日本海事協会：修繕ドックリスト, <http://www.classnk.or.jp/hp/ja/directory/DockData/>, 2015年6月19日参照.

6. NOBS/MIBS の初期船型生成と CFD 計算

6. 1 NOBS/MIBS の初期船型生成法

6. 1. 1 タイプシップの選定

船型計画の最初期段階においては、主要目等の代表的な船型パラメータを用いて推進性能を推定し、検討対象とする船型を絞り込む。そこから先の段階では、配置等の検討や CFD 計算による、より高精度な推進性能の推定を行うため、船型設計を行い、船体形状を生成する必要がある。

船型設計を行う際には、作業の効率化を図るため、類似な主要目を持つ船型をタイプシップとして選定し、主要寸法、ミドシップ形状、船首尾プロファイル、 C_p カーブを修正して、初期船型を得る事が一般的である。現状では、NOBS/MIBS の実績は少なく、類似な主要目を持つ NOBS/MIBS をタイプシップとして選定できるケースは稀である。ここでは、実績が豊富な在来船型をタイプシップとして選定して、NOBS/MIBS 船型を生成する手法を示す。

6. 1. 2 ミドシップ形状の修正法

図 6.1.1 に示すように、タイプシップ（在来船型）のフレームラインのうち、NOBS/MIBS のミドシップ形状より外側に位置している部分をすべて NOBS/MIBS のミドシップ形状に投影する。ここで、投影した部分（図中の Projection）としなかった部分の境界にキンクが生じるので、そこを滑らかにする局所的な修正（図中の Modification）を施す。これにより、所定の C_M を持つ船型を得る事ができる。なお、図 6.1.1 に示したのは MIBS であるが、船底傾斜の範囲が異なるだけで、NOBS に対してもこの方法は適用可能である。

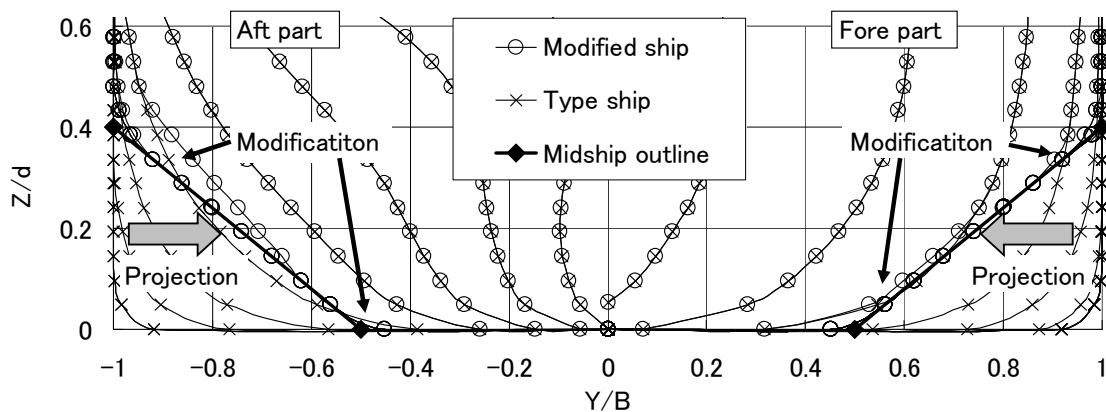


図 6.1.1 ミドシップ形状の修正方法

6. 1. 3 所定の C_p カーブに対応する船型生成法

前述のミッドシップ形状の修正法により、所定の C_M を持つ NOBS/MIBS のフレームラインは得られるが、この時点では、 C_p カーブは計画通りのものとはなっていないため、さらなる船体形状の修正を行う必要がある。本研究では、ステーション移動法をベースとする方法により、所定の C_p カーブに対応するように船体形状を修正できるプログラムを作成し、NOBS/MIBS の初期船型を生成する。その流れを図 6.1.2 に示す。

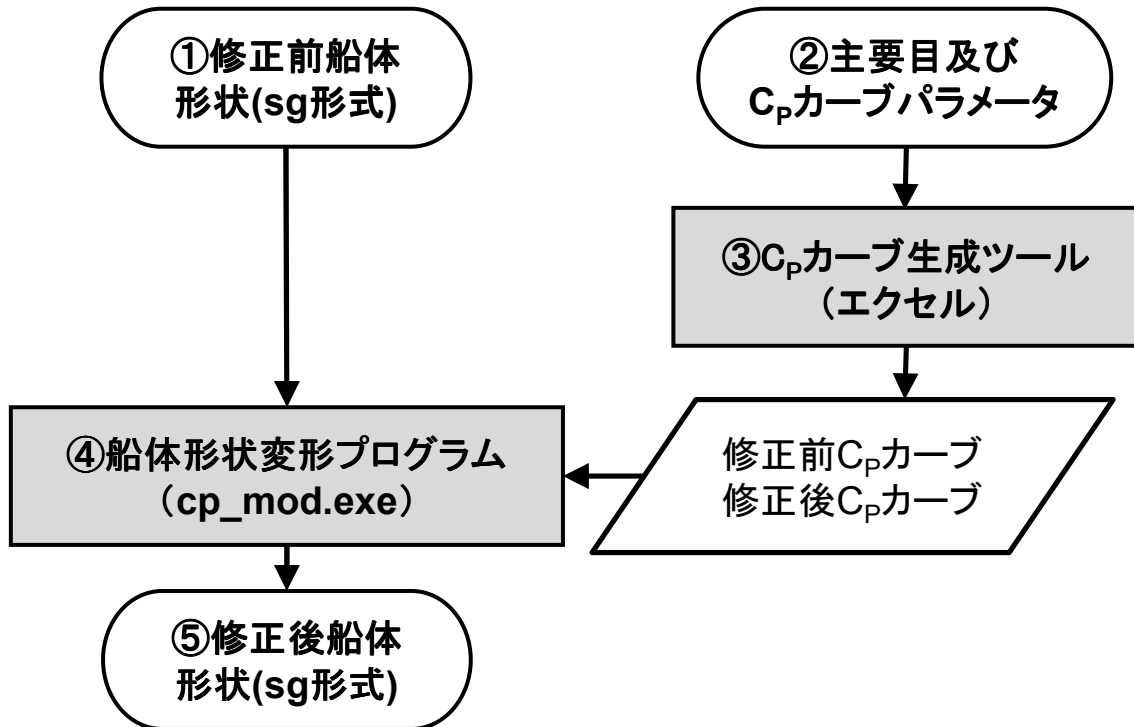


図 6.1.2 NOBS/MIBS の初期船型生成の流れ

所定の C_p カーブに対応した船体形状を得るための手順を図 6.1.2 に従って以下に述べる。なお、船体形状のデータ形式としては、次節で述べる、CFD 計算で使用しているソフトウェアにおいて、船体表面形状の定義に用いられている sg 形式を使用している。

- ①修正前の船体形状を、図 6.1.1 に示した方法で作成する。
- ② C_p カーブ生成ツールに入力する、主要目と C_p カーブパラメータを用意する。
- ③ C_p カーブ生成ツールを用いて、修正前と修正後の C_p カーブを出力する。
- ④修正前の船体形状、修正前と修正後の C_p カーブを船体形状変更プログラムに入力して、修正後の C_p カーブに対応した船体形状を出力する。
- ⑤所定の C_M と C_p カーブを持つ船体形状データを得る。

ここで、 C_p カーブパラメータとしては、SRC Tips の NN で使用されている、5 次の多項式⁶⁻¹⁾によるものを使用している。

以上で述べた、2段階の修正（ミッドシップ形状を修正した船体形状を、さらに所定の C_p カーブに対応するように修正）を在来船型のタイプシップに対し行う事で、全体的なフェアリング作業を行う事なく、効率的に NOBS/MIBS の初期船型を得る事が可能となる。

6. 2 CFD 計算法

6. 2. 1 使用ソフトウェア

CFD 計算には海上技術安全研究所が開発し、一般に利用可能な CFD 計算システムである NMRI CFD 2008（格子生成機能）と NMRI CFD 2013R1（RaNS ソルバー機能）を用いる。船体表面格子の生成には SURFG Ver.6.01⁶⁻²⁾を、空間格子生成には O-O タイプ格子生成プログラム BFC Ver.1.0⁶⁻³⁾を使用する。RaNS ソルバーとしては Neptune Ver.6.41⁶⁻⁴⁾を使用する。各ソフトウェアの概要を以下に示す。

(1) 船体表面格子の生成（SURFG Ver.6.01）

SURFG では、オフセット点列の形で与えられた船体形状データに対して、図 6.2.1 に示すようなスプラインネットを生成する事で、船体曲面形状を定義する。次に、生成したスプラインネット上に、一定のアルゴリズムに基づいて、船体表面格子を配置する。船体表面格子を配置する際には、直行性・平滑化をバランスさせる事が重要であり、SURFG では Implicit Geometrical Method (IGM)⁶⁻⁵⁾というアルゴリズムが用いられている。格子トポロジーとしては、本研究で対象とする肥大船は、バルブやオーバーハングの突出量が少ないため、シングルブロックによる船体表面格子生成を行う。生成した格子の例を図 6.2.2 に示す。

(1)トポロジー

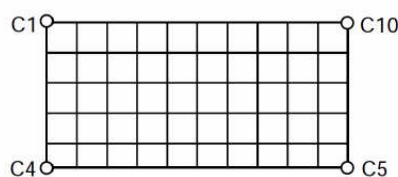


Fig.5 Topology and corner points of single -block

(2)船体表面格子

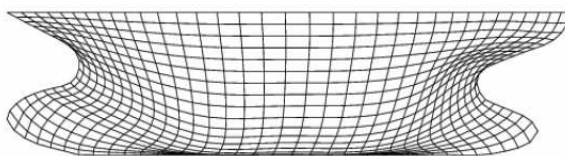
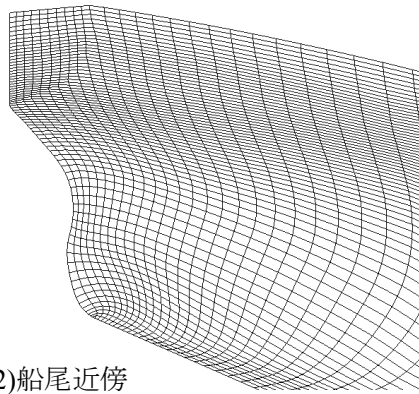


Fig.6 Hull surface spline net of single block

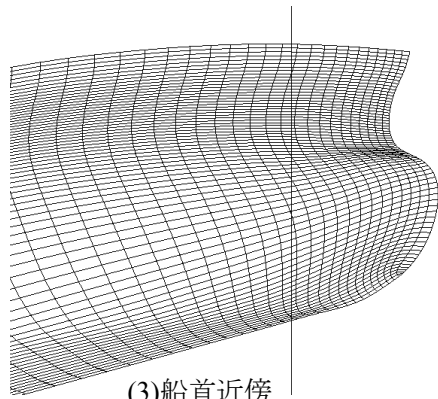
図 6.2.1 船体表面格子のトポロジーとスプラインネット
(文献 6-2) Fig.5、6 より引用)



(1)全体 (側面)



(2)船尾近傍



(3)船首近傍

図 6.2.2 船体表面格子の例

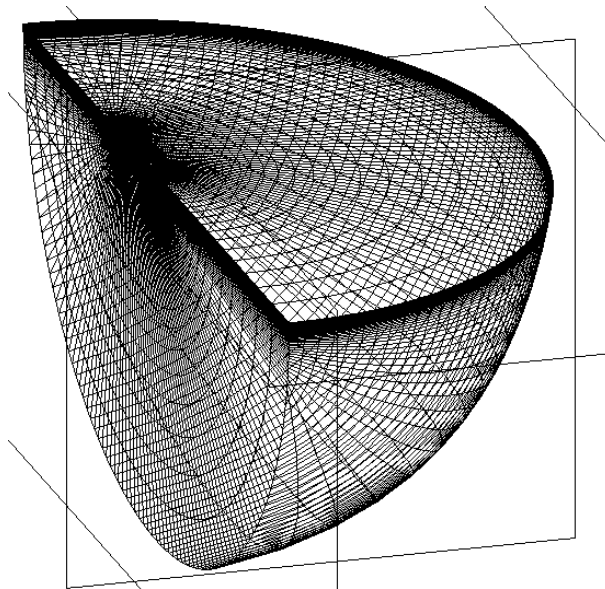


図 6.2.3 O-O タイプ空間格子の例

(2) 空間格子の生成 (BFC Ver.1.0)

BFC は、(有) エイ・シー・ティールと大阪府立大学との共同研究により開発された O-O タイプの格子生成プログラムを、HullDes に組み込むためのインターフェース、Surfg との連携、自由表面へのクラスタリングなどの機能を加えた格子生成ソフトウェアである。具体的な機能として、BFC Ver.1.0 では、先に SURFG により生成した船体表面格子から、3次元ポワソン方程式を解く事で、O-O タイプの空間格子を生成する⁶⁻⁶⁾。空間格子の生成例を図 6.2.3 に示す。

(3) RaNS ソルバー (NEPTUNE Ver.6.41)

NEPTUNE (NEwton-Relaxation Scheme for Pseudo-Compressibility Based TURbulent Navier-Stokes Equations) は、海上技術安全研究所が開発した船体まわりシミュレーションのための 3次元非圧縮ナビエ・ストークスソルバー⁶⁻⁷⁾である。流体现象の物理モデルであるナビエ・ストークス方程式を、ある境界条件の下に数値的に解く事で、船体まわり流れをシミュレートし、船舶の推進性能を推定できるソフトウェアである。次のような特徴を持つ。

- ・ 3次元非圧縮性レイノルズ平均ナビエ・ストークス方程式を用い、擬似圧縮性を導入して定常解を求める。
- ・ 空間離散化には構造格子ベースの有限体積法を用い、変数配置は Cell-centered である。
- ・ 対流項には Roe 法に基づく 3次精度風上差分 (MUSCL type) を、拡散項には 2次精度中心差分を用いる。
- ・ 時間微分は、1次精度後退差分で近似している (陰的解放)。
- ・ 局所時間刻み、マルチグリッドを用いた収束加速を行う。
- ・ ナビエ・ストークス方程式は準 Newton 法によって解き、行列反転には対称ガウス・ザイデル法を用いる。
- ・ 二重模型流れおよび非線形自由表面条件による自由表面流れを計算できる。
- ・ 自由表面条件の解法として、格子点と自由表面と一致させる界面追跡法、格子セル内部で自由表面を捕える界面捕獲法の 2種類から選択可能である。
- ・ 乱流モデルは、Baldwin-Lomax (BL) モデル、SR222 修正 BL (MBL) モデル、Spalart-Allmaras (SA) モデル、修正 SA (MSA) モデルの 4種類から選択可能である。
- ・ マルチブロック法による船体と舵干渉の計算を行う事が可能である。
- ・ 無限翼数プロペラ理論に基づいた簡易プロペラモデルによる自航計算が可能である。
- ・ 縦方向の姿勢変化 (trim、sinkage) を考慮した計算が可能である。

6. 2. 2 計算条件

計算条件は次のとおりである。

- ・形状影響係数は二重模型流れ計算から得る。レイノルズ数は模型試験のフルード数が $Fn=0.1$ における値とする。
- ・造波抵抗係数は上記の二重模型流れ計算と $Fn=0.14, 0.15, 0.16, 0.17, 0.18$ を対象とした自由表面追跡法による計算結果から得る。
- ・自航要素は二重模型流れ計算から得る。レイノルズ数は模型試験における計画速力に対応するフルード数における値とする。
- ・簡単のため舵無しとする（抵抗計算、自航計算共通）。
- ・乱流モデルは SA モデルを使用する（抵抗計算、自航計算共通）。
- ・計算格子数（セル数）は長手方向×ガース方向（片舷）×法線方向について、 $80 \times 56 \times 80$ である。自航計算は両舷格子で行い、ガース方向のセル数は2倍になる。格子トポロジーは O-O タイプである。
- ・最小格子間隔は、 Rn に係わらず、 $0.01 / (1.0 \times 10^7)^{1/2}$ で一定値とする（抵抗計算、自航計算共通）。
- ・計算領域はセンターライン、ミドシップ、喫水が交差する点から船体前方に $2.5L_{pp}$ 、横方向に $2.5L_{pp}$ 、船体下方に $2.5L_{pp}$ 、船体後方に $3.5L_{pp}$ の大きさを持つ回転楕円体である（図 6.2.4）。

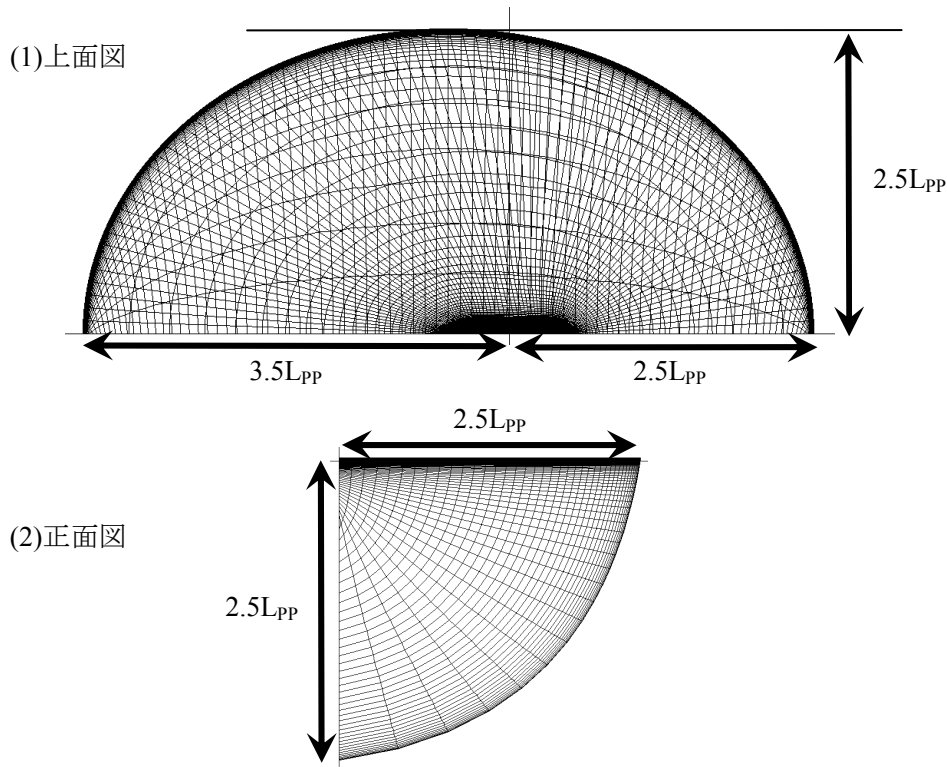


図 6.2.4 計算領域

6. 3 満載状態における推定精度

前節に示した計算法を用いて、在来船型及び NOBS/MIBS のそれぞれ 18 隻を対象とした CFD 計算結果と、大型模型船による水槽試験結果の相関を図 6.3.1 に示す。

結果を見ると、形状影響係数、 r_w , $1-t$, $1-w_T$ については、水槽試験結果に対して、CFD 計算結果はばらつきと偏りを持つが、大小関係の傾向は評価できる事が分かった。 η_R については、大小関係を評価する事は難しいが、他の要素と比べると、船型差が小さいため、馬力推定精度の観点からは、他の要素と同程度の推定精度と見なす事ができる。ばらつきと偏りの原因としては、乱流モデル、格子分割数、舵の省略、水槽試験結果のばらつき等が考えられるが、偏りについては、性能要素毎に回帰直線を求めて補正する事とする。ばらつきの大きさは、バージョンは異なるが、NEPTUNE を用いて CFD の精度検証が行われた結果が報告されており⁶⁻⁸⁾、それと同程度であるので、概ね妥当な結果が得られていると考えている。

形状影響係数、 r_w , $1-w_T$ では最小二乗法によるフィッティングを、 $1-t$ と η_R では直観によるフィッティングを行い、得た回帰直線等を図 6.3.1 に示した。馬力計算は、回帰直線等の偏りを補正した性能要素を用いて行う。その際には自航要素は速力に対し一定値として扱い、実船プロペラの設計条件等は前章に示したものと同様とする。

補正した CFD 計算結果を用いて推定した C_{adm} と水槽試験結果から推定したそれとの相関を図 6.3.2 に示す。相関係数 r は在来船型では 0.94、NOBS/MIBS では 0.95 である。第 4 章に示した Tips Sp (在来船型対象) と推進性能の簡易推定法 (NOBS/MIBS 対象) における相関係数はそれぞれ 0.91 と 0.94 であったので、より高精度な結果を得られている事が分かる。また、補正を行う事で、 C_{adm} について偏りの少ない相関が得られる事が分かる。

6. 4 対象船型

MIBS 拡幅シリーズ (+B=2.5m, 5.0m, 7.5m) とベース船を対象に CFD 計算を行い、生成した初期船型の推進性能を確認する。ベース船の船型としては KVLCC2 の長さ、幅、深さを伸縮させたものを使用する。ここで、ベース船と MIBS 拡幅シリーズの C_p カーブを図 6.4.1 に示す。MIBS の C_p カーブはベース船のその傾向をなるべく変えずに、平行部長さを伸縮させる事で所定の C_p 値となるよう調整しており、図 6.4.2~6.4.5 に C_p カーブとその 1 次、2 次の微分値の分布を示す。これを見ると、ベース船と MIBS 拡幅シリーズの 1 次、2 次の微分値の分布は概ね相似となっており、 C_p カーブの傾向としては同じものとなっている事が分かる。

ベース船とこれらの C_p カーブに対応する MIBS のフレームラインを図 6.4.6(1)-(4) に示す。ベース船と MIBS 拡幅シリーズの船首、船尾プロファイルは共通であり、それらを図 6.4.7 に示す。

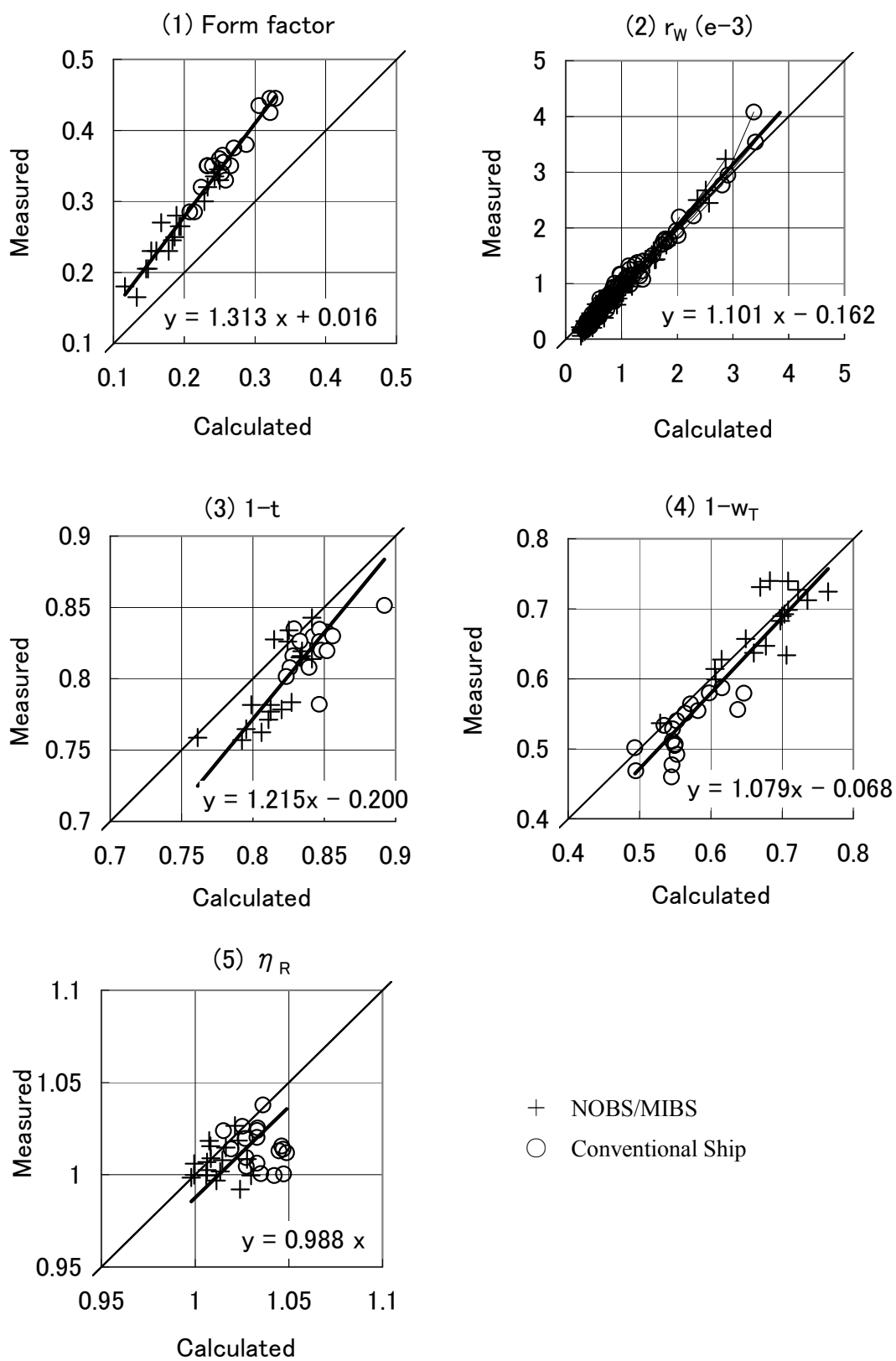


図 6.3.1 抵抗性能、自航要素について CFD 計算結果と水槽試験結果との相関

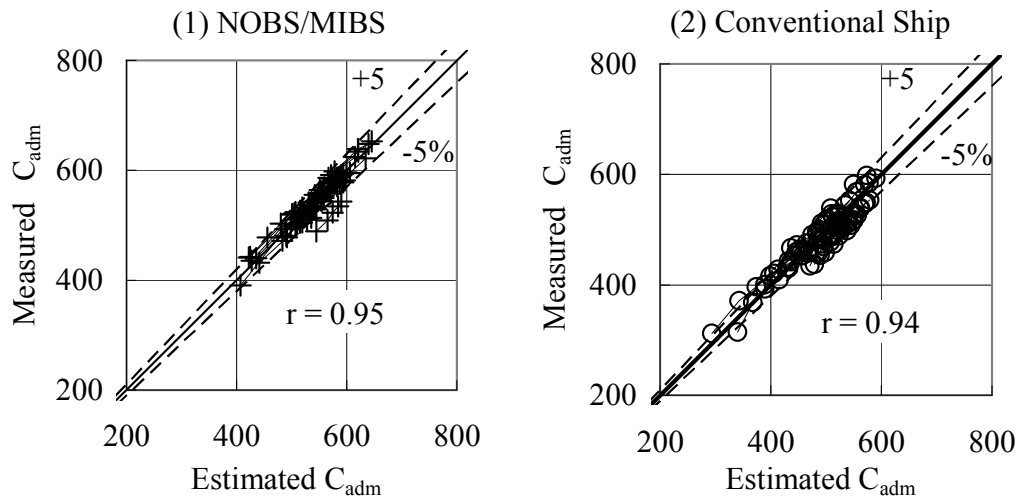


図 6.3.2 C_{adm} について CFD 計算結果と水槽試験結果との相関

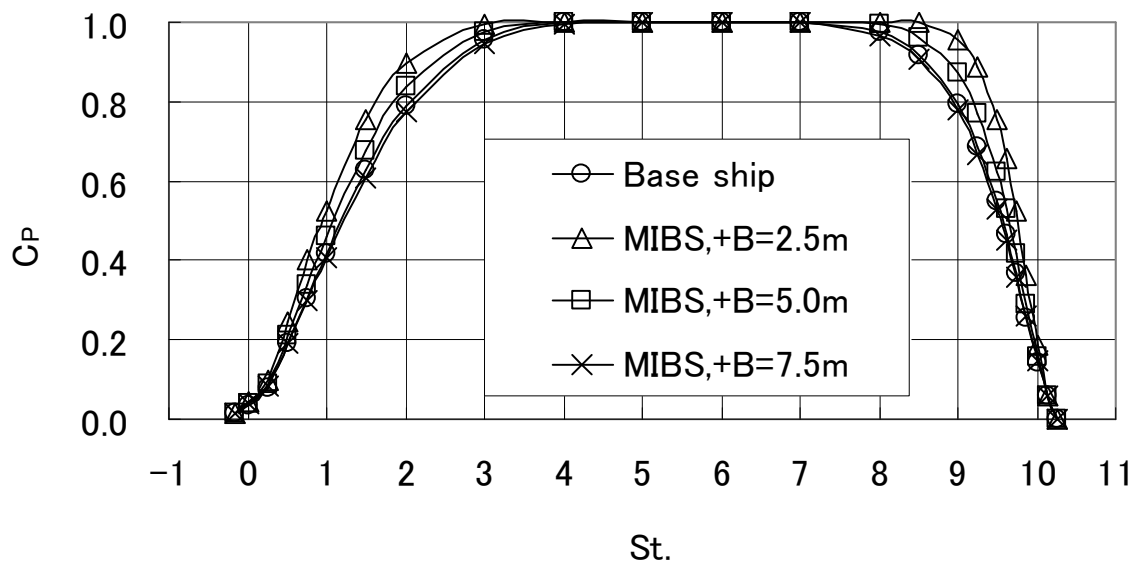


図 6.4.1 ベース船と MIBS 拡幅シリーズの C_p カーブ

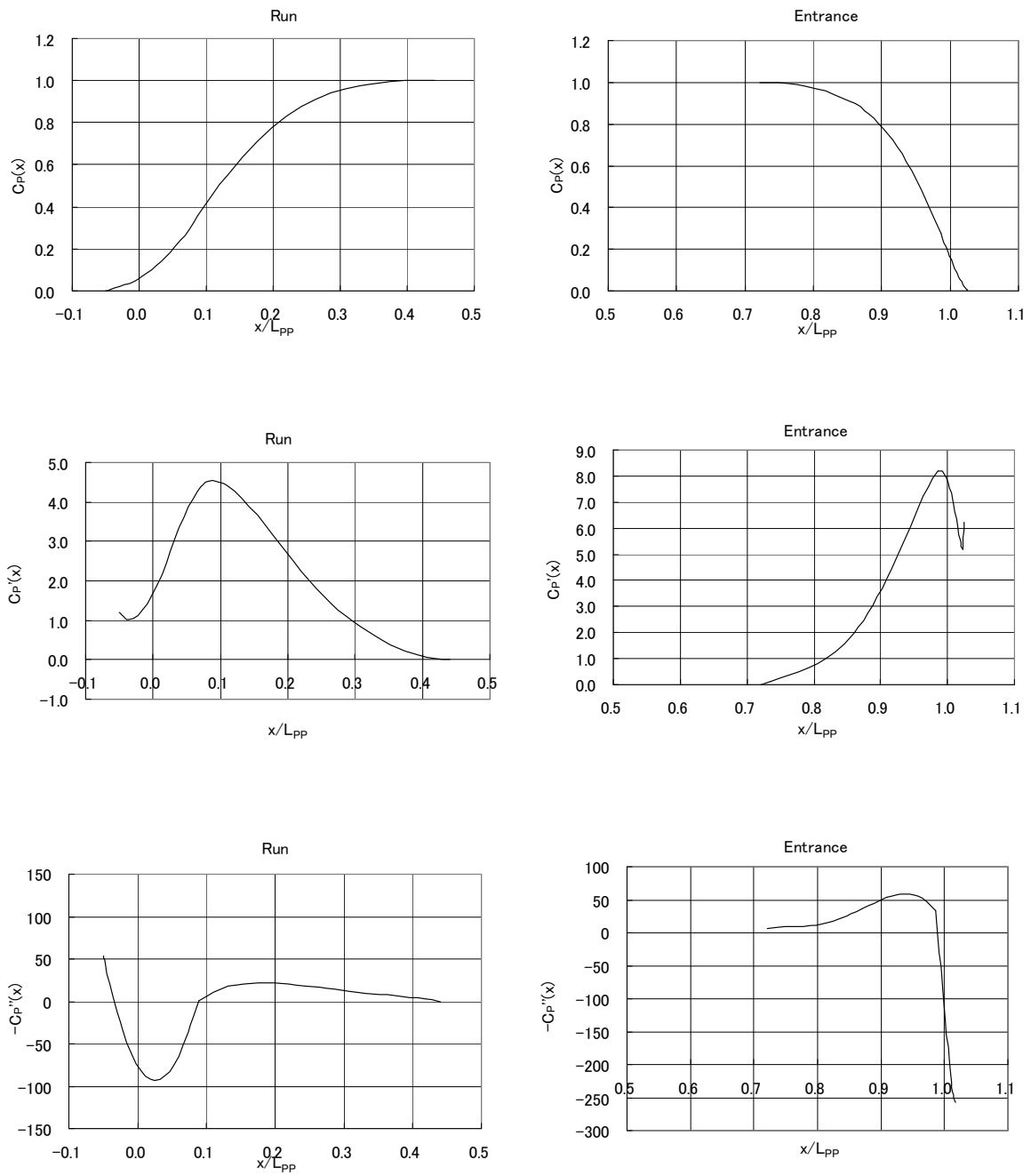


図 6.4.2 ベース船の C_p とその 1 次、2 次の微分値の分布

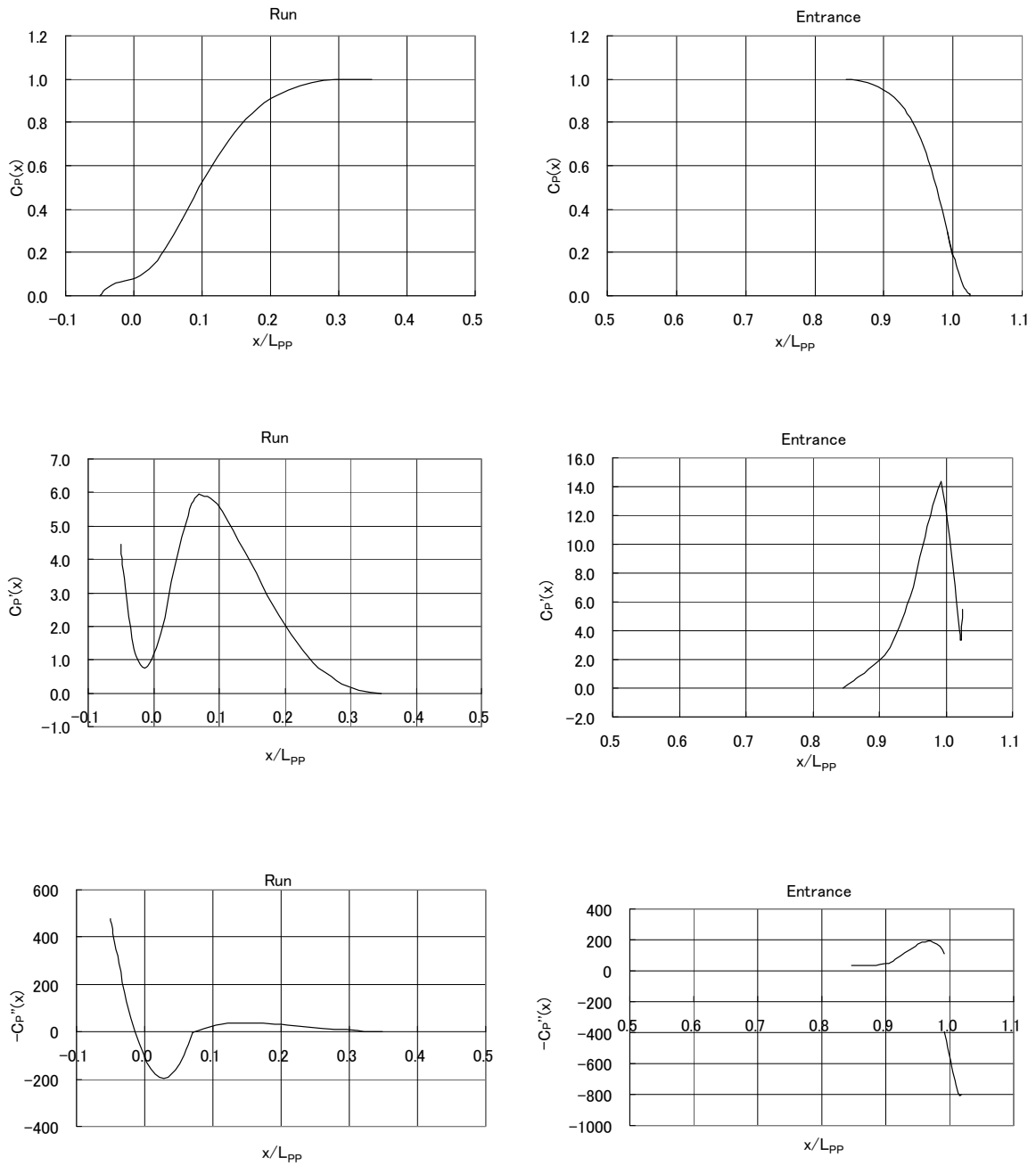


図 6.4.3 MIBS ; +B=2.5m の C_p とその 1 次、2 次の微分値の分布

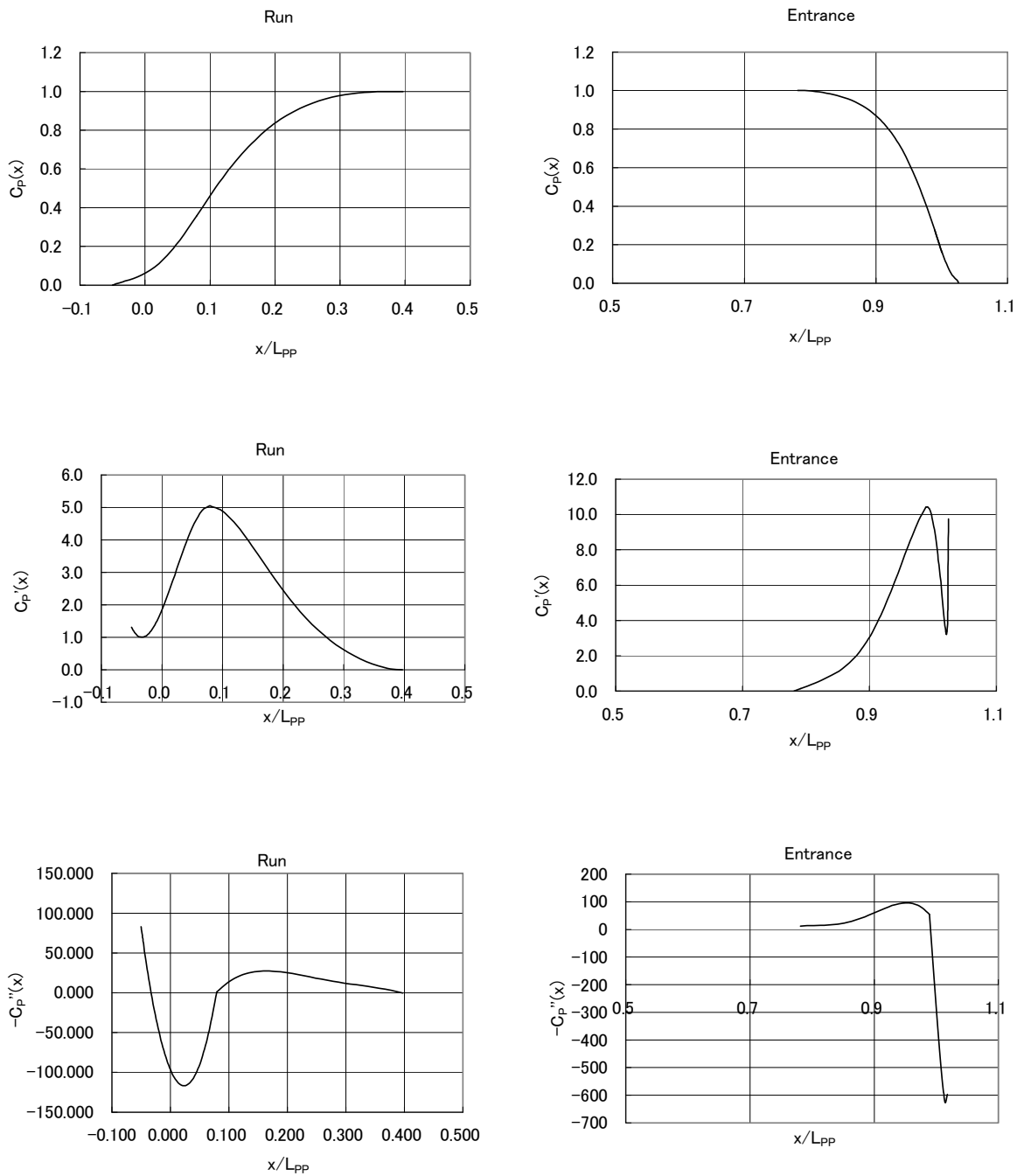


図 6.4.4 MIBS ; +B=5.0m の C_p とその 1 次、2 次の微分値の分布

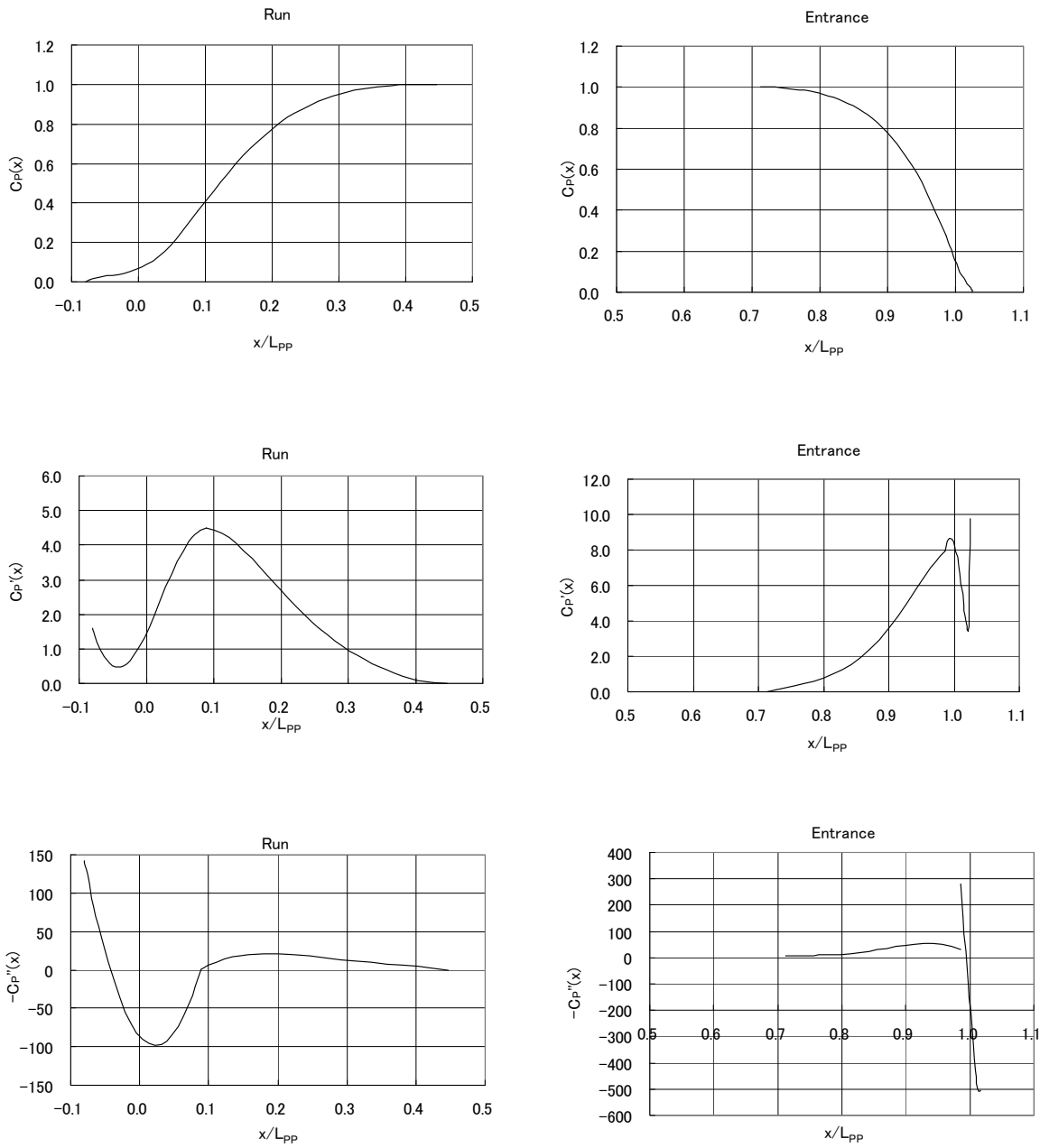


図 6.4.5 MIBS ; +B=7.5m の C_p とその 1 次、2 次の微分値の分布

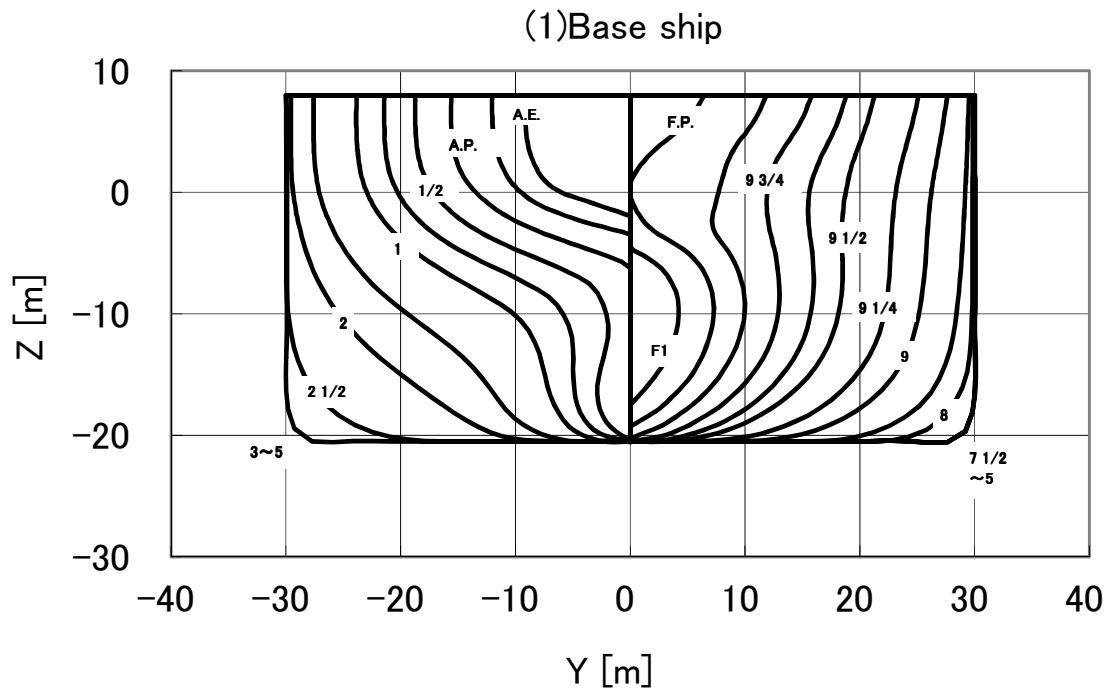


図 6.4.6(1) ベース船のフレームライン

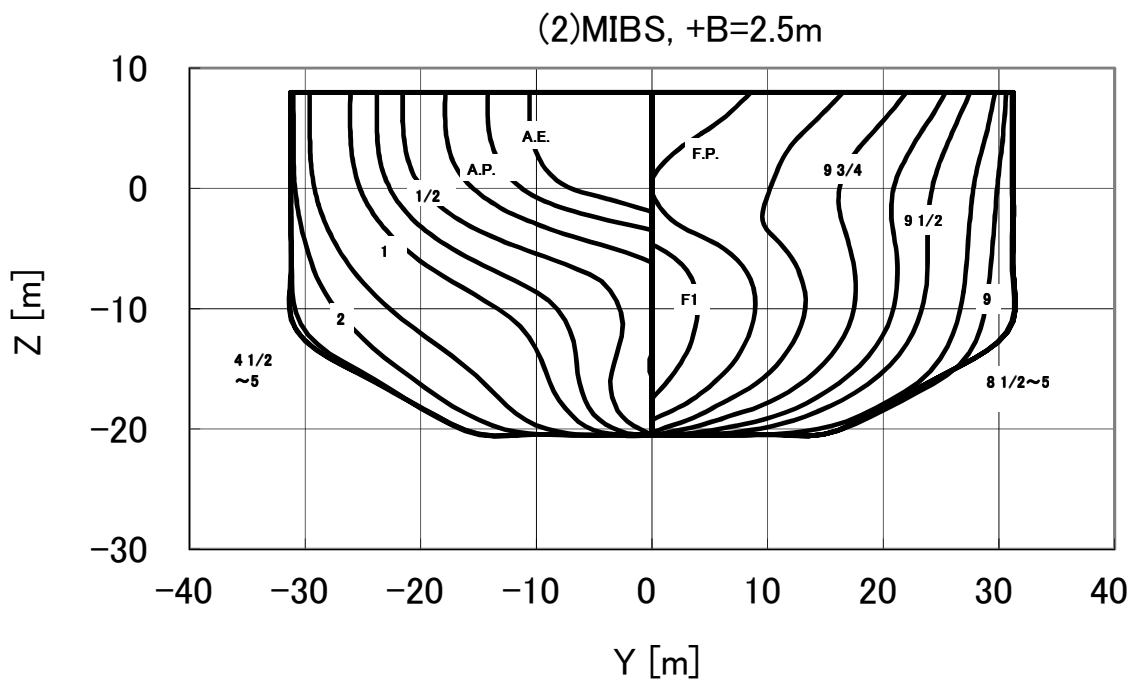


図 6.4.6(2) MIBS ; +B=2.5m のフレームライン

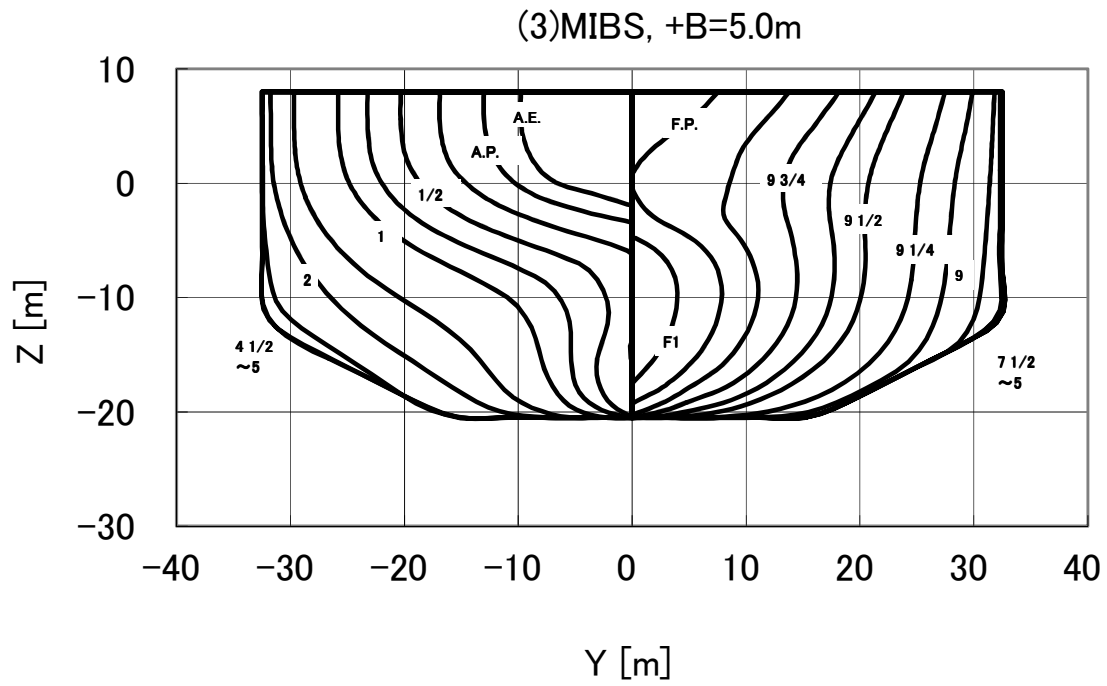


図 6.4.6(3) MIBS ; +B=5.0m のフレームライン

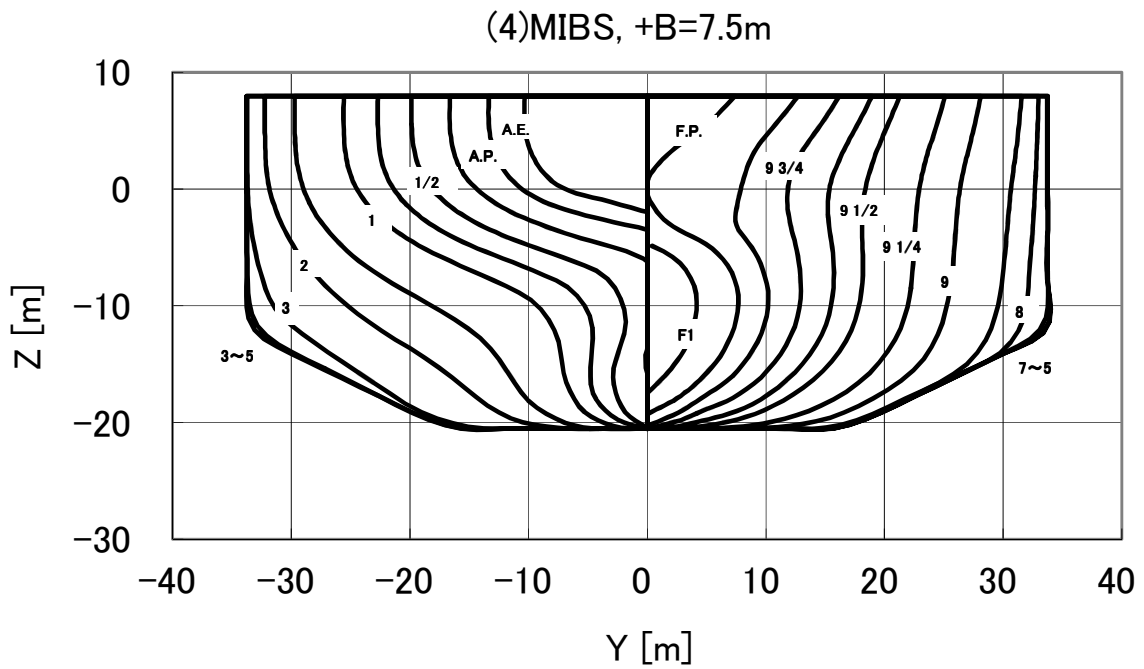


図 6.4.6(4) MIBS ; +B=7.5m のフレームライン

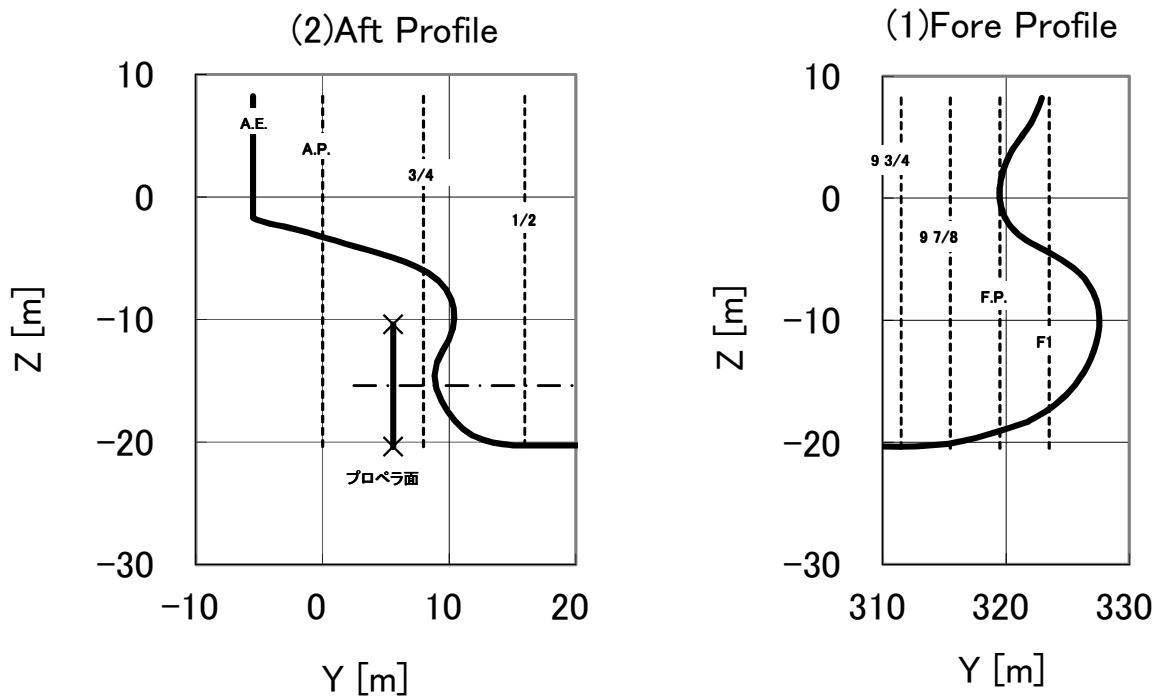


図 6.4.7 ベース船と MIBS の船首尾プロファイル

6. 5 計算結果

(1) ベース船

CFD 計算と Tips Sp により得たベース船の推進性能の各要素を図 6.5.1(1)-(5)に、それらの要素を用いて推定した BHP カーブを図 6.5.1(6)に示す。

結果を見ると、各要素は CFD 計算結果と Tips Sp で近い結果が得られた。Vs=15.5kts における BHP は、CFD では 19,570kW、Tips Sp では 19,981kW であり、こちらも近い結果 (2.1% の違い) が得られた。水槽試験結果のデータベースに基づく Tips Sp の結果は、当該主要目における平均的な船体形状による結果と考える事ができる。今回、CFD 計算と Tips Sp とで近い結果が得られているので、ベース船の船体形状は、平均的な形状をしていると考えている。

ベース船について CFD 計算による流場の可視化も行っているが、MIBS の結果と併せて後述する。

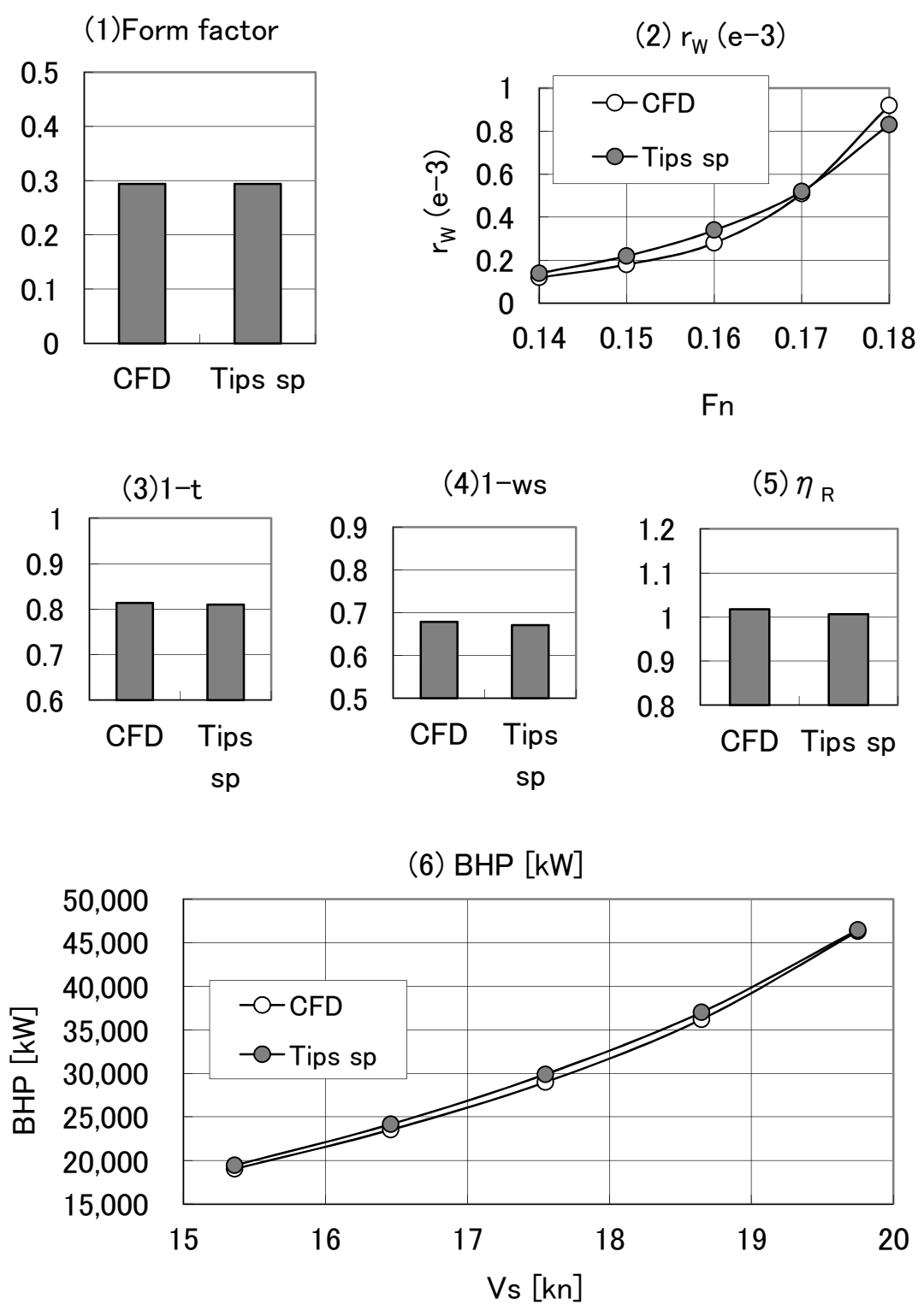


図 6.5.1 CFD、Tips Sp によるベース船の推進性能

(2) MIBS

ベース船と MIBS の CFD 計算結果を図 6.5.2(1)-(5)に、CFD 計算結果から推定した $BHP_{ratio_{full}}$ を第 3 章で示した簡易推定法によるそれと併せて図 6.5.2(6)に示す。これら CFD 計算結果と馬力推定結果の数値を表 6.5.1～6.5.5 に示す。

各性能要素については、拡幅するにつれて形状影響係数は単調減少、1-t と 1-ws は単調増加する傾向である。造波抵抗係数は 2.5m 拡幅する場合は、他の場合と比べて特に大きい値となっており、 C_p が実用上の限界を越えてしまっていると考えている。造波抵抗係数と波形の関係を確認するため、図 6.5.3～6.5.7 にフルード数毎の船体周囲波形等高線を示す。これを見ると、2.5m 拡幅する場合の波高が、他の場合と比べて顕著に大きい事が分かる。また、拡幅が大きくなるにつれて波高が低くなり、7.5m 拡幅した MIBS についてはベース船より波高が低く、図 6.5.2(2)に示した造波抵抗係数の傾向を、波形等高線によっても確認できている事が分かる。

次に、 $Fn=0.14$ における船体表面圧力の可視化結果について、正面／背面図を図 6.5.8(1)-(4)に、側面下方からの俯瞰図を図 6.5.9 に示す。これを見ると、MIBS は拡幅が大きくなるにつれて圧力等高線の数少なく、圧力変化が穏やかになっている。これは、特に形状影響係数が減少する事を意味しており、図 6.5.2(1)に示した形状影響係数の傾向を、圧力等高線によっても確認できている事が分かる。

また、図 6.5.10～6.5.13 にプロペラ面における流場の可視化結果を示す。曳航状態の結果を見ると、ベース船と MIBS の拡幅シリーズの縦渦形状は類似している。自航状態の結果を見ると、プロペラ回転方向に流れが巻き込まれながら加速されており、プロペラの影響が正しく考慮されている事が確認できる。

推進性能については、2.5m 拡幅する場合の BHP はベース船のそれに対して 11.9%増加である。5.0m の拡幅では、BHP は 2.3%増加、7.5m まで拡幅すると 1.1%の低減である。簡易推定法による結果との比較では、拡幅が少ない時に差が小さいが、拡幅が大きくなるにつれて差は大きくなっている。しかしながら、簡易推定法の精度と、船型改良による性能改善の余地がある事とを勘案すると、CFD 計算と簡易推定法とで概ね同じ傾向の結果が得られていると言える。

なお、CFD 計算では、簡易推定法とは異なり C_p 等の適用制限はなく、さらなる拡幅を行った検討も可能であるが、タイプシップである KVLCC2 と幅が大きく異なってしまうため、本研究における検討では 7.5m の拡幅に留めている。

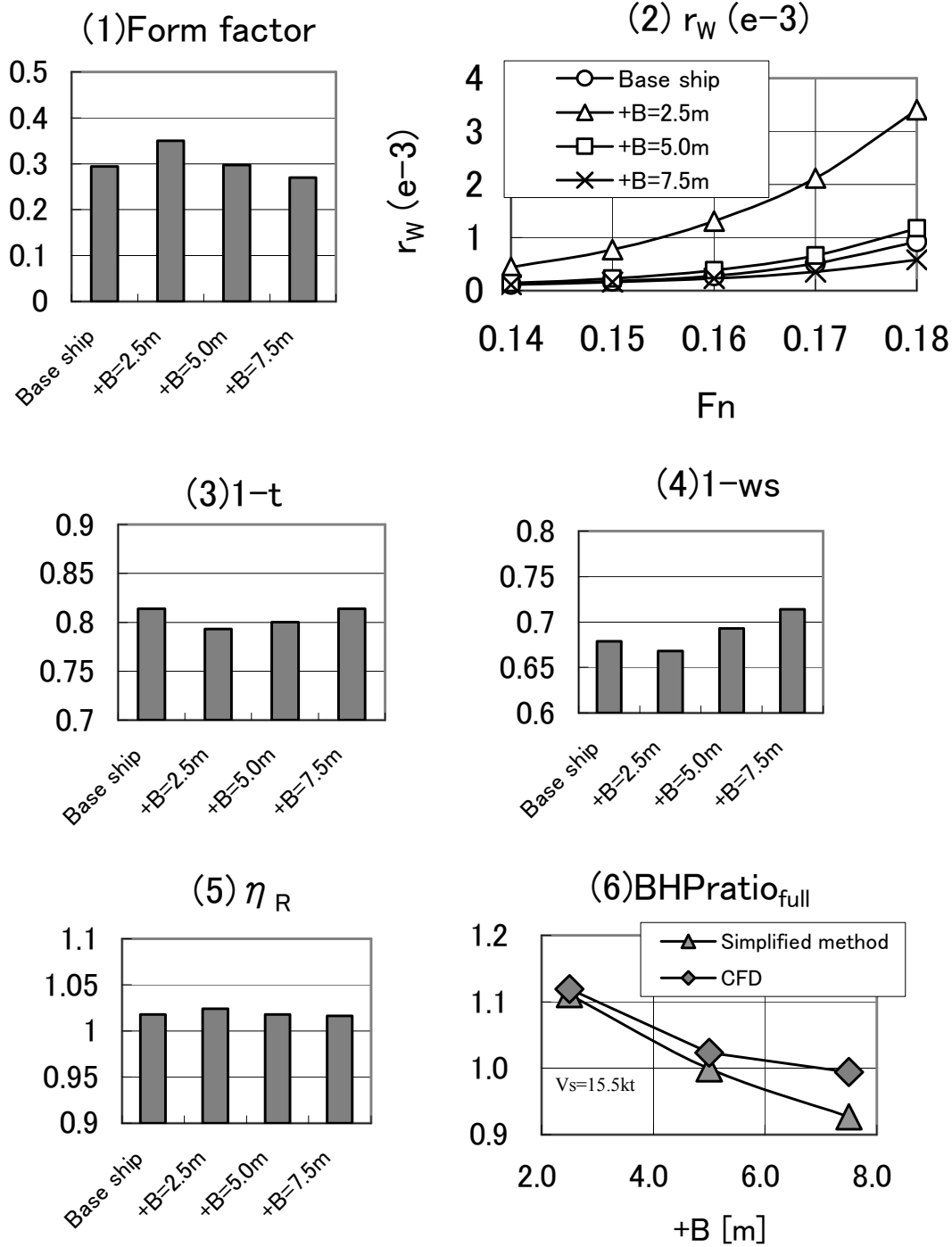


図 6.5.2 CFD 計算によるベース船と MIBS の推進性能の推定値

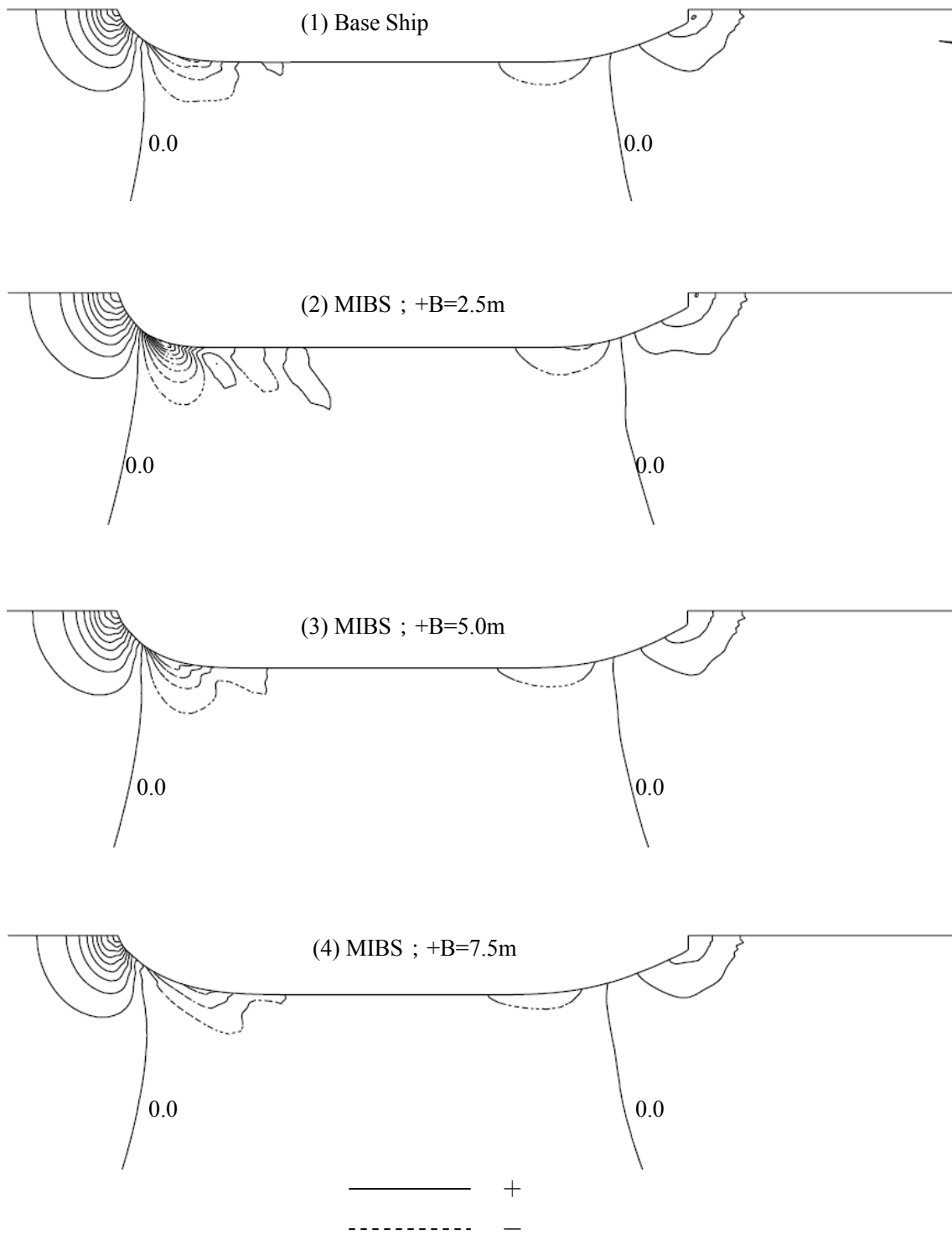


図 6.5.3 CFD 計算による船体周囲波形等高線 ; $F_n=0.14$
 ($\Delta h_w=0.1\%L_{pp}$)

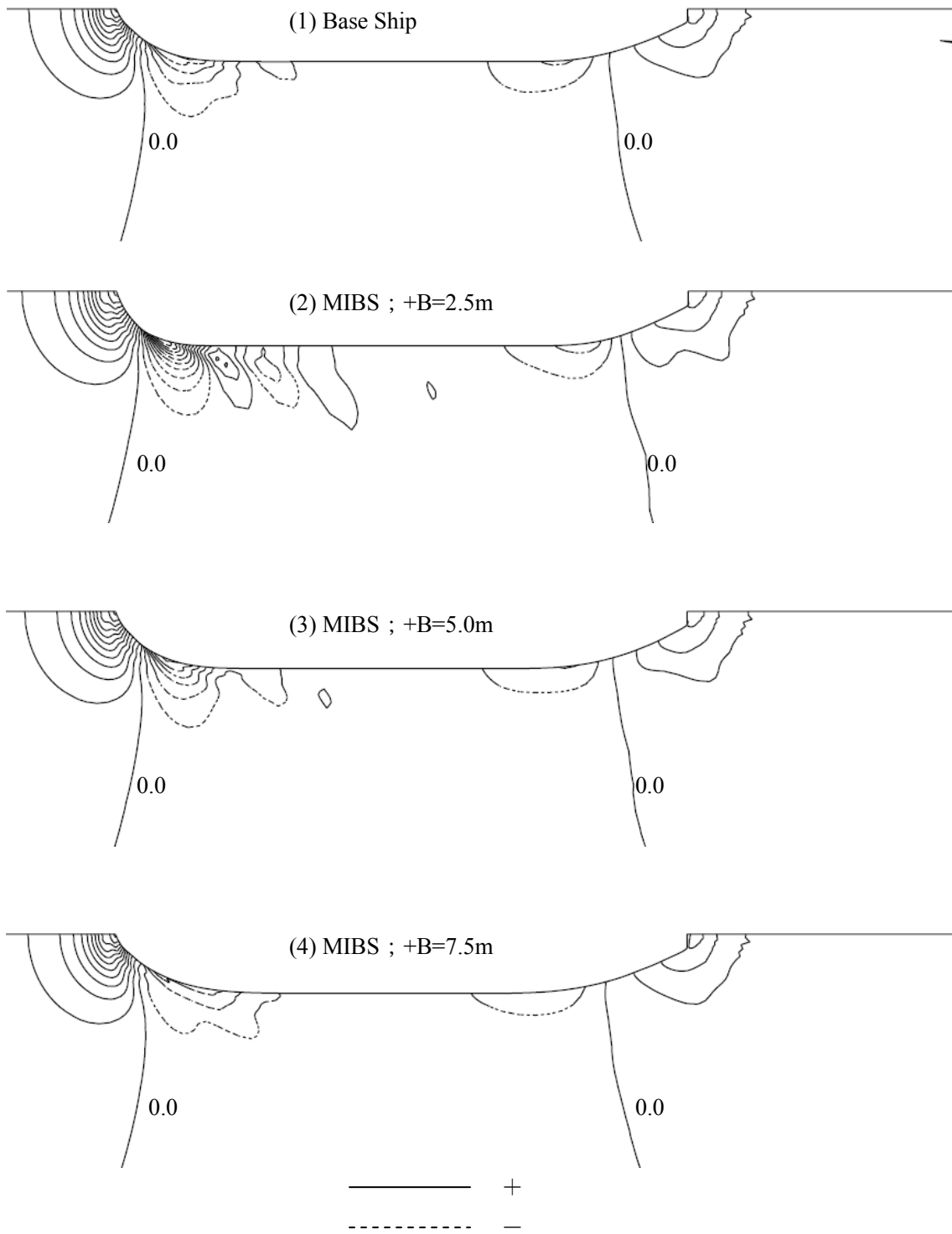


図 6.5.4 CFD 計算による船体周囲波形等高線 ; $F_n=0.15$
 ($\Delta h_w=0.1\%L_{pp}$)

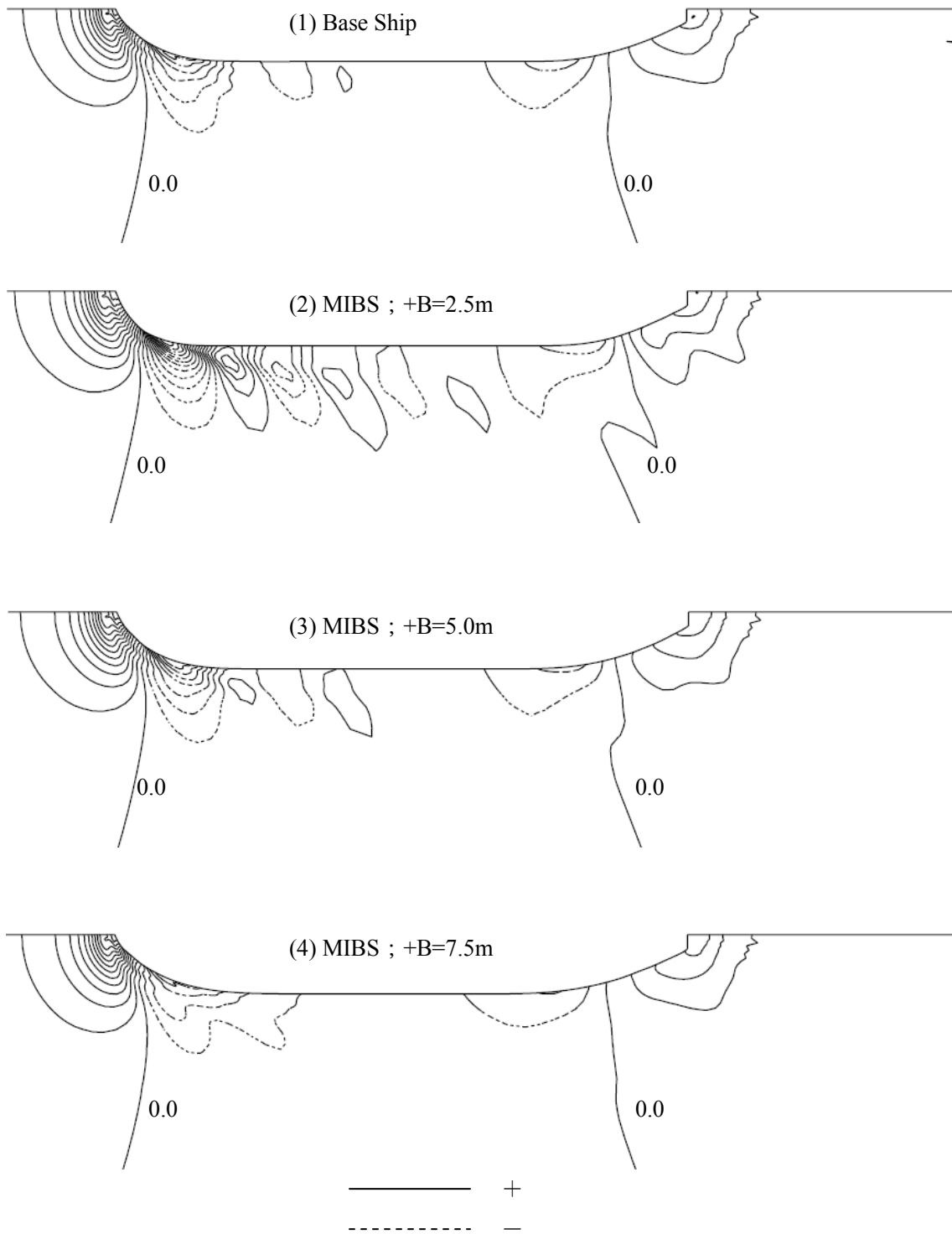


図 6.5.5 CFD 計算による船体周囲波形等高線 ; $F_n=0.16$
 ($\Delta h_w=0.1\%L_{pp}$)

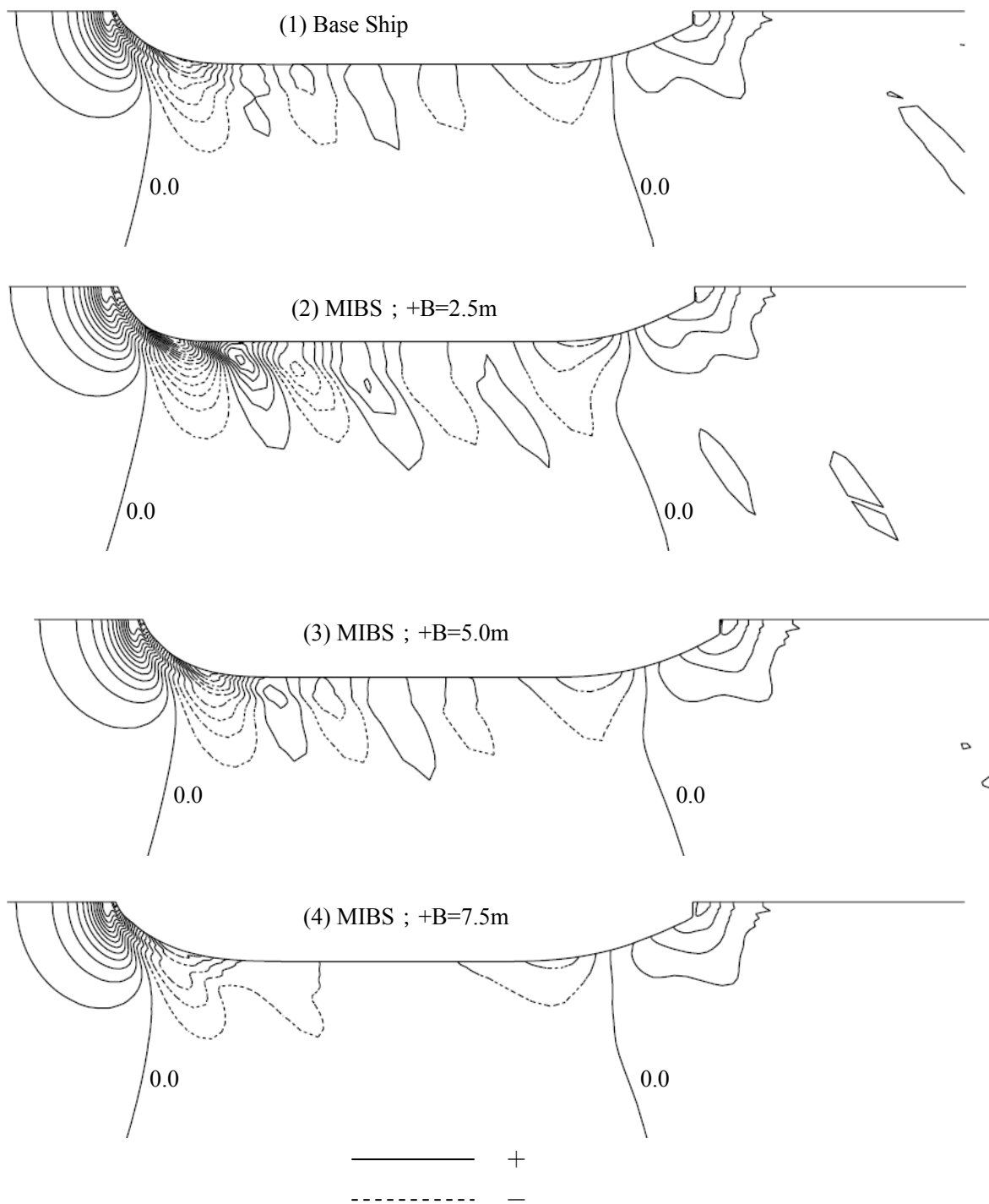


図 6.5.6 CFD 計算による船体周囲波形等高線 ; $F_n=0.17$
 ($\Delta h_w=0.1\%L_{pp}$)

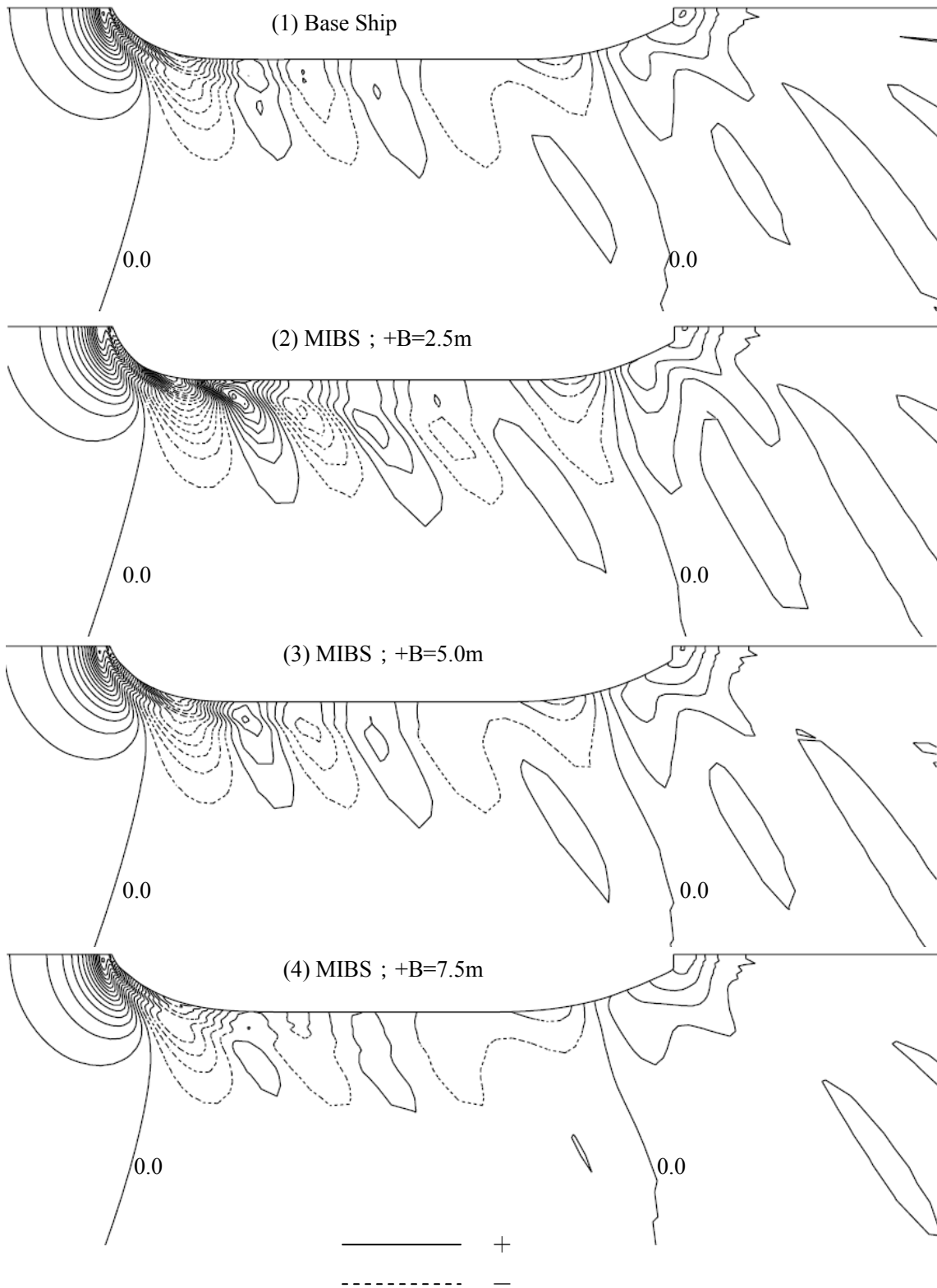


図 6.5.7 CFD 計算による船体周囲波形等高線 ; $F_n=0.18$
 ($\Delta h_w=0.1\%L_{pp}$)

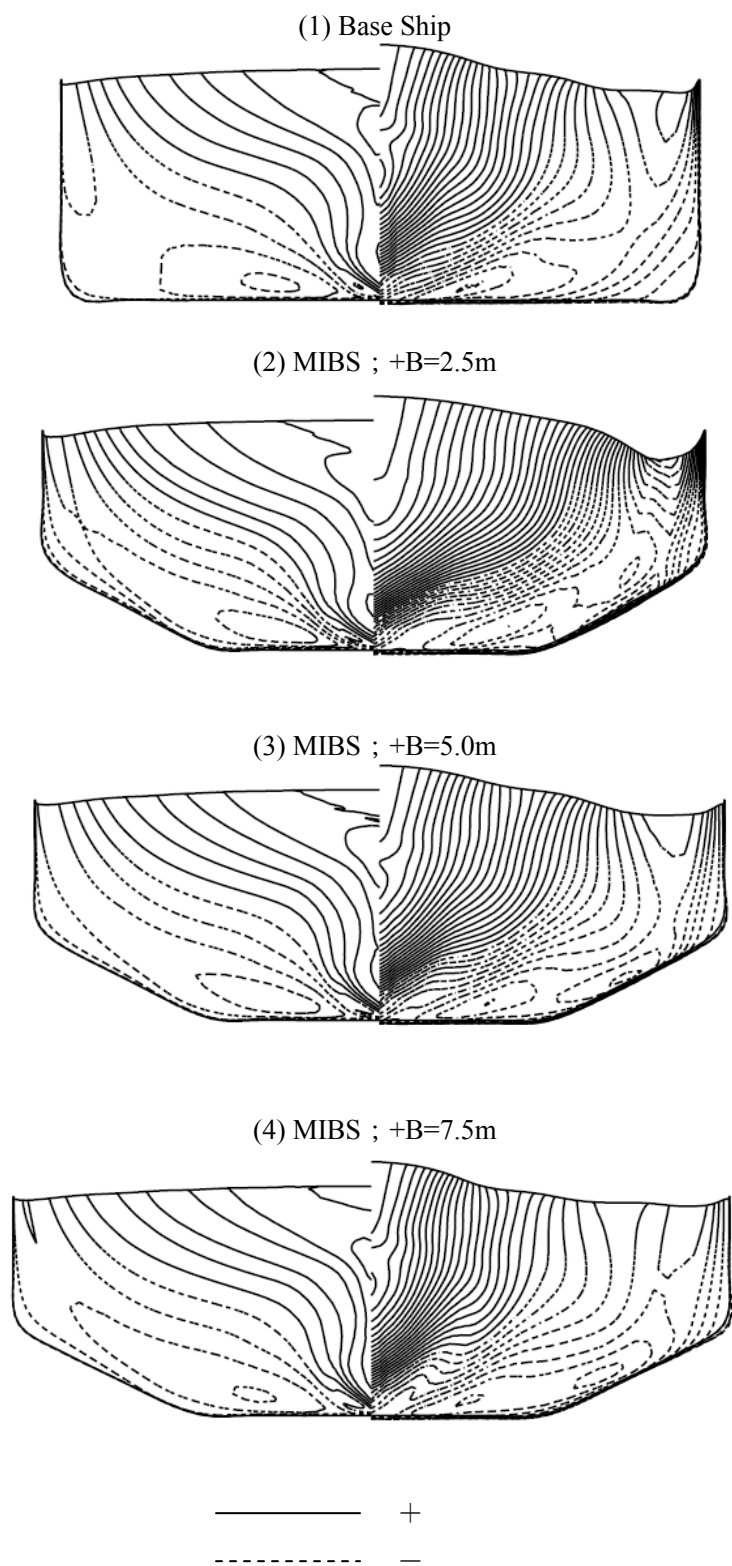
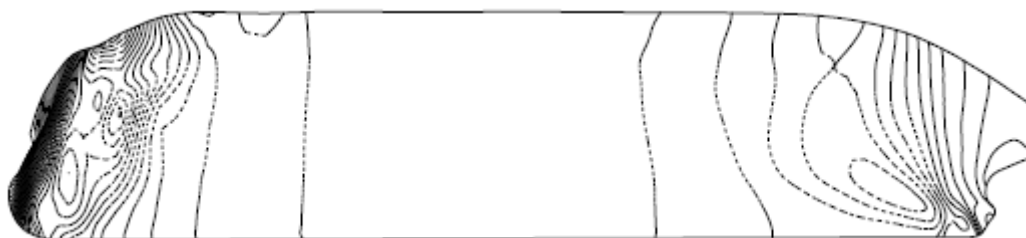


図 6.5.8 CFD 計算による船体表面圧力分布 (正面/背面図) ; $Fn=0.14$
($\Delta C_p=0.5$)

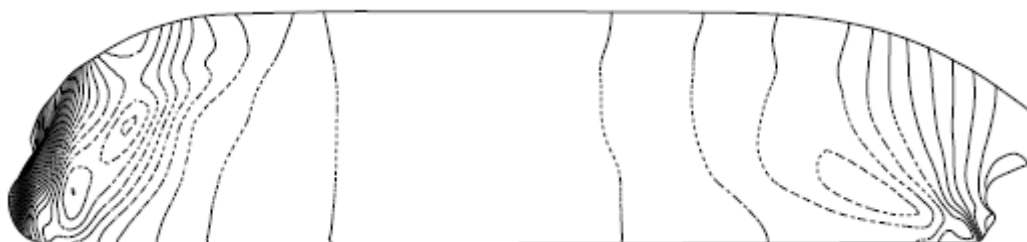
(1) Base Ship



(2) MIBS ; +B=2.5m



(3) MIBS ; +B=5.0m



(4) MIBS ; +B=7.5m



— +
- - - - -

図 6.5.9 CFD 計算による船体表面圧力分布 (俯瞰図) ; $Fn=0.14$
($\Delta C_p=0.5$)

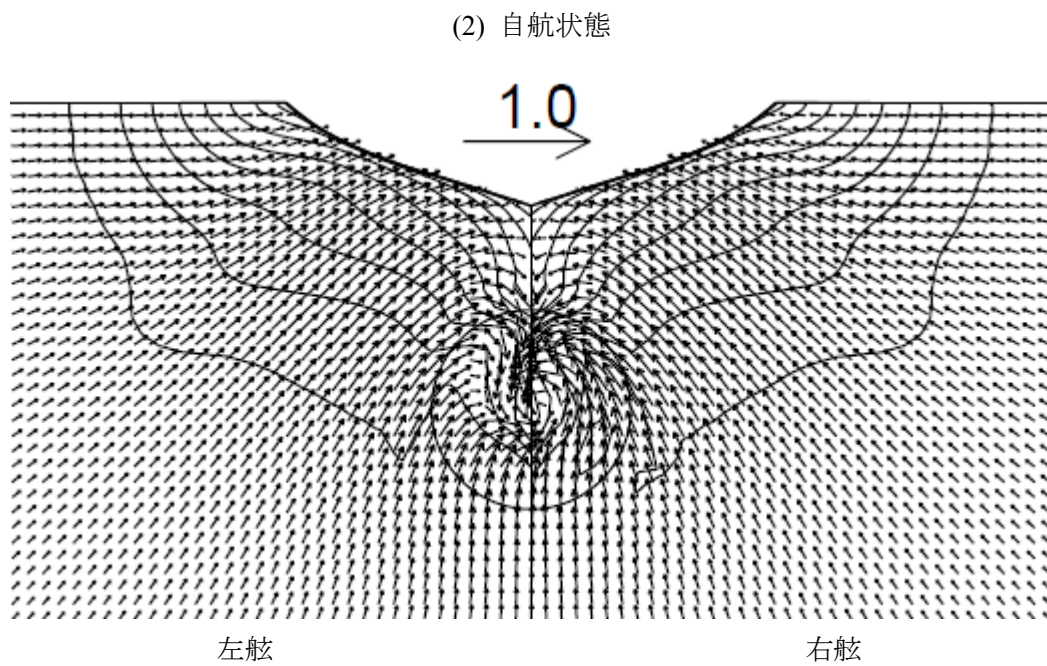
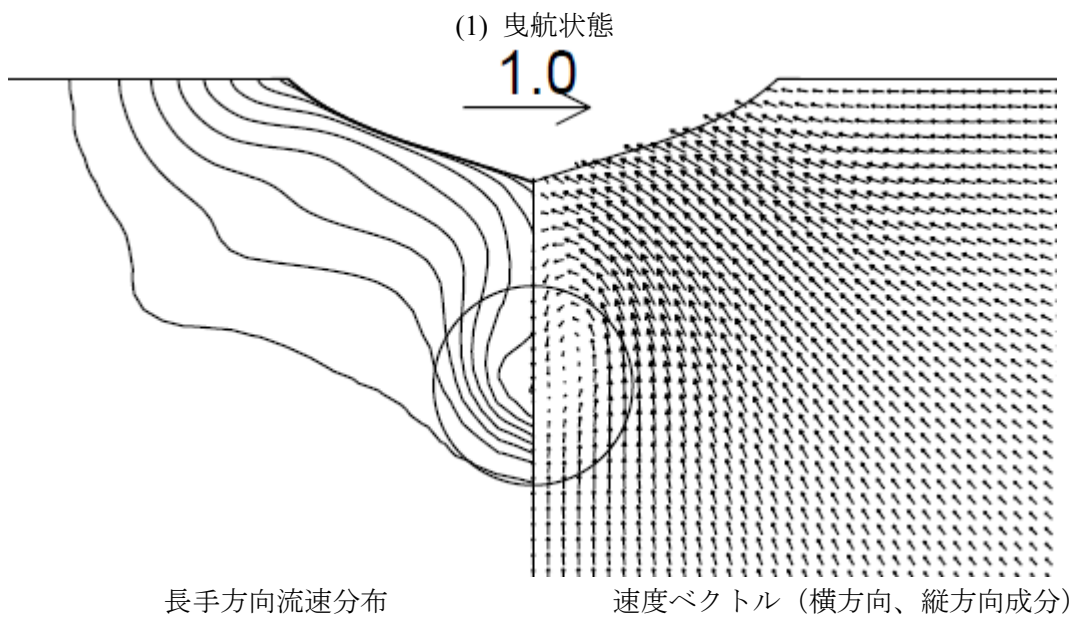


図 6.5.10 CFD 計算によるプロペラ面伴流分布 (ベース船、二重模型流れ)
($\Delta w=0.1$)

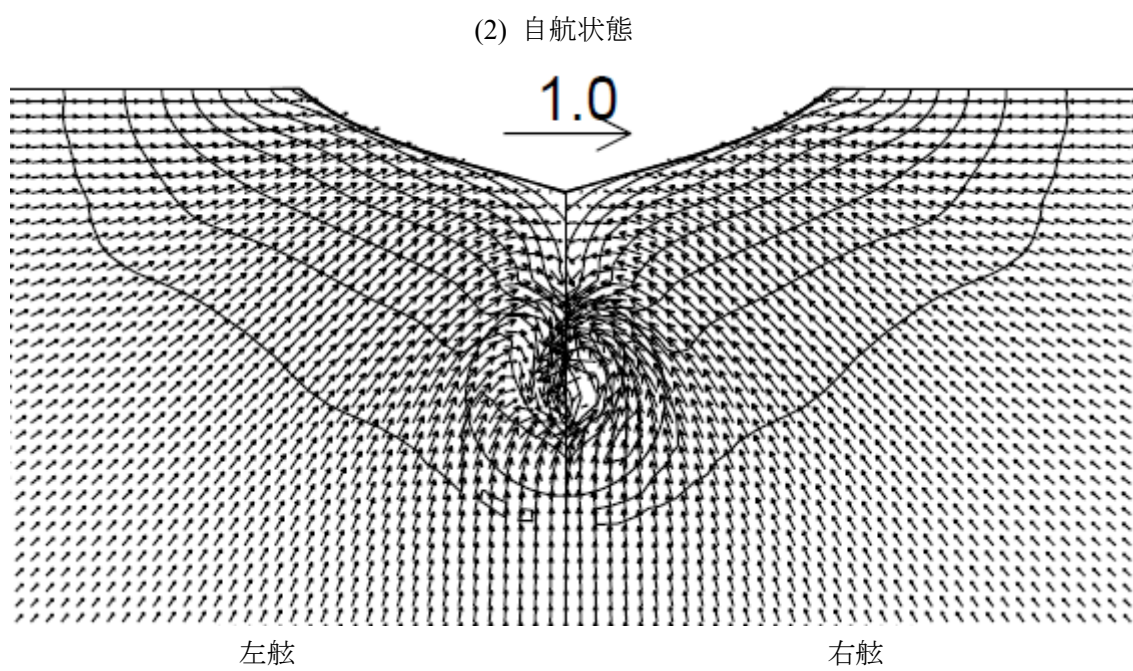
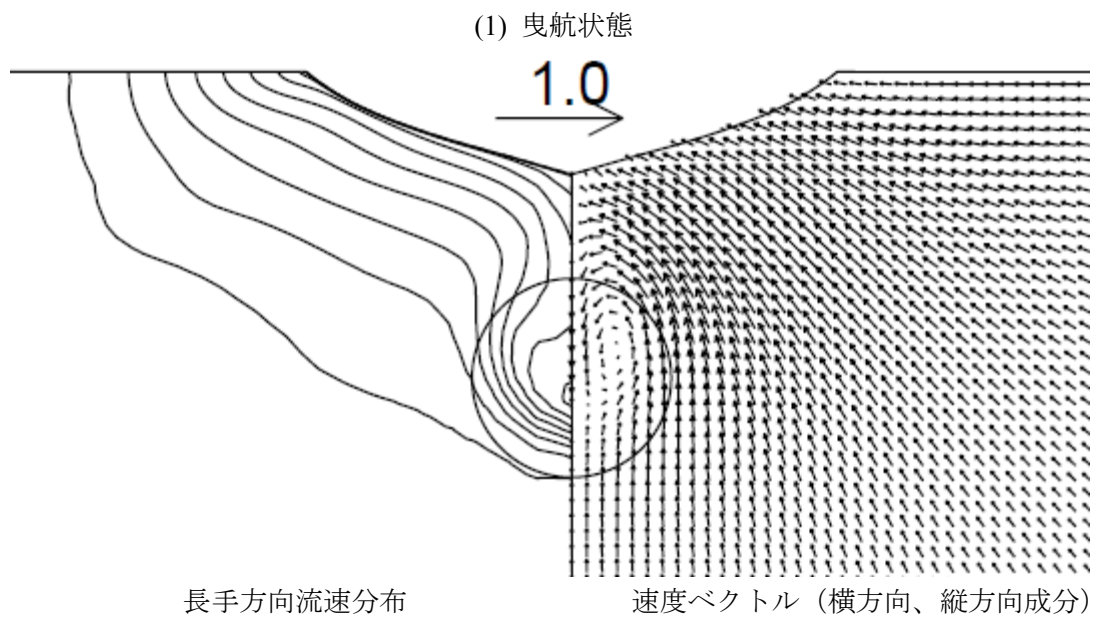


図 6.5.11 CFD 計算によるプロペラ面伴流分布 (MIBS ; +B=2.5m、二重模型流れ)
($\Delta w=0.1$)

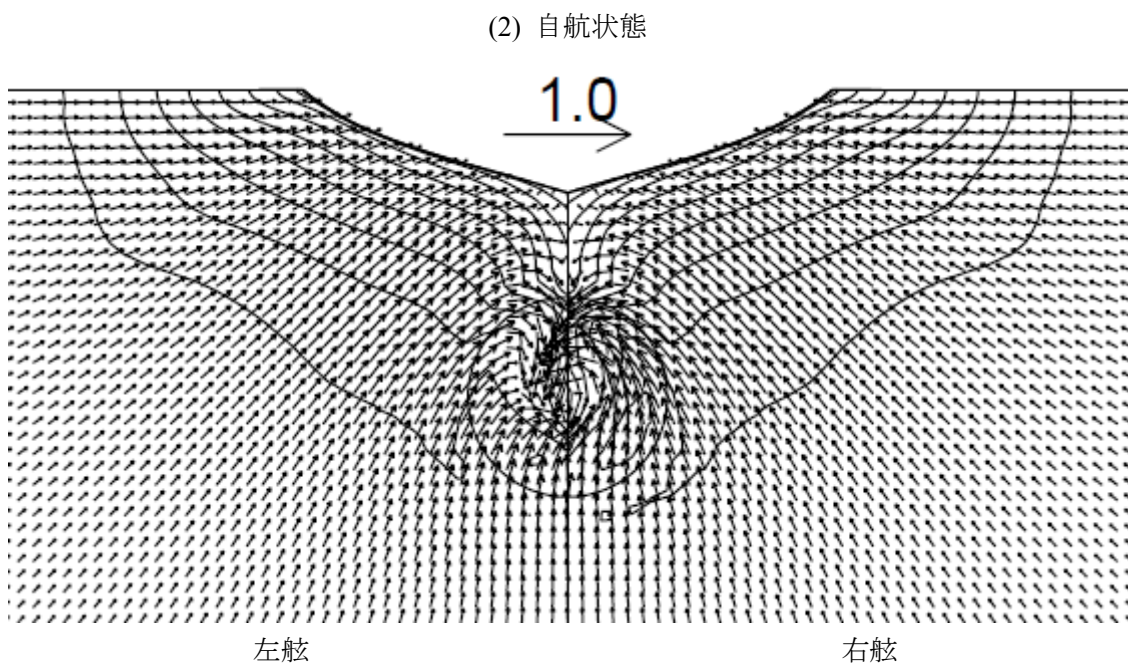
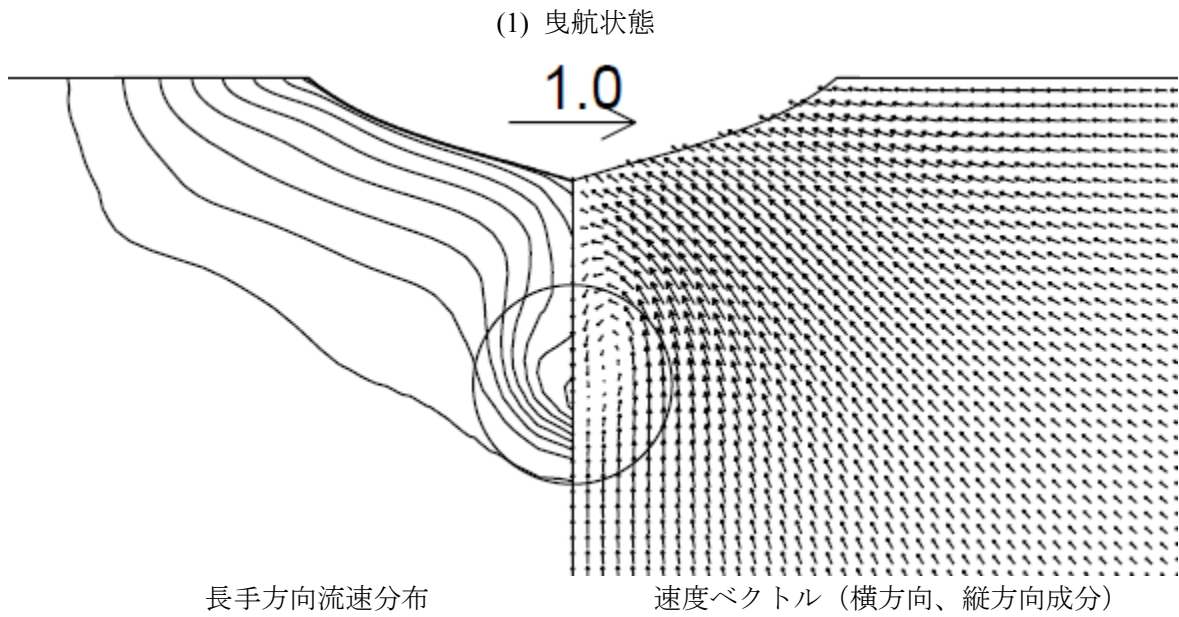


図 6.5.12 CFD 計算によるプロペラ面伴流分布 (MIBS ; +B=5.0m、二重模型流れ)
($\Delta w=0.1$)

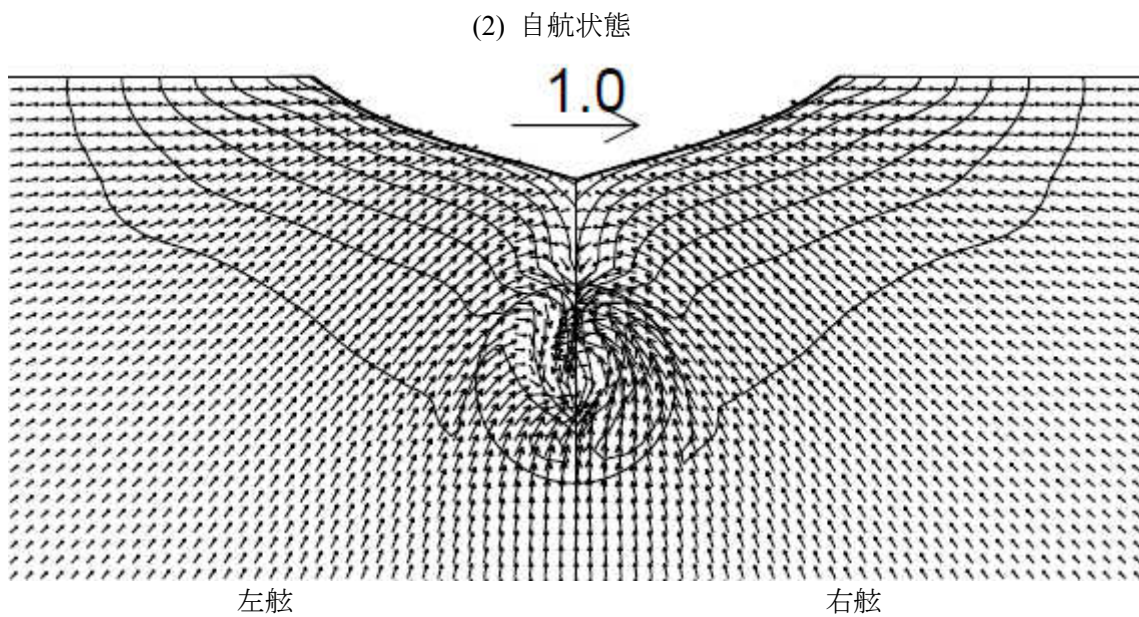
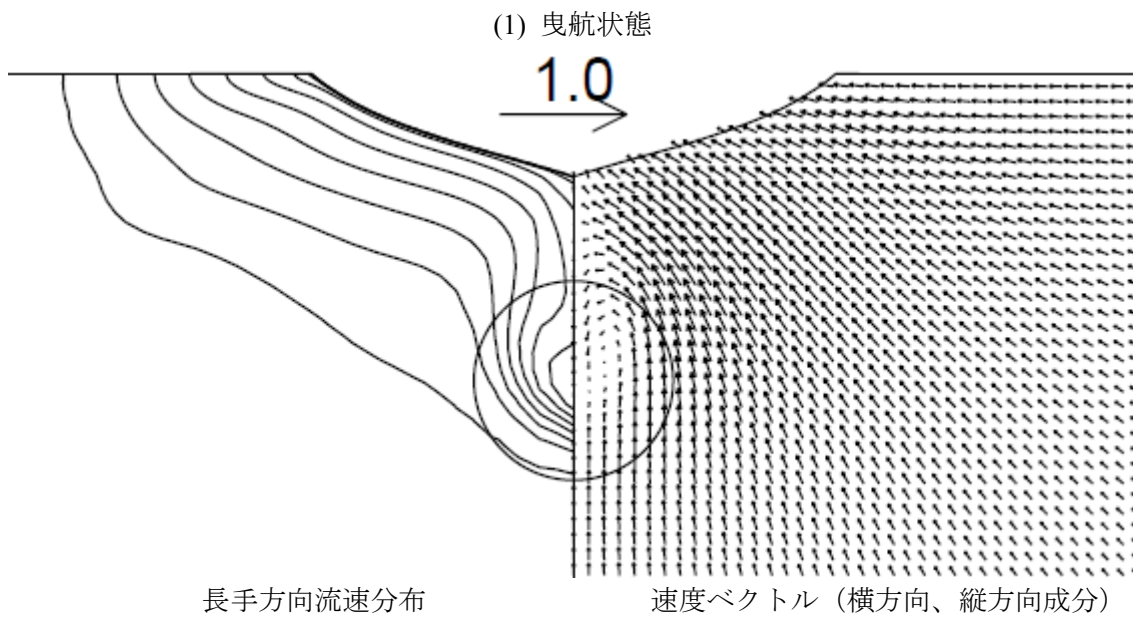


図 6.5.13 CFD 計算によるプロペラ面伴流分布 (MIBS ; +B=5.0m、二重模型流れ)
($\Delta w=0.1$)

表 6.5.1 Tips Sp によるベース船の推進性能の諸数値

1. INPUT DATA

Name: Base
 Lpp: 319.50 [m] Bmid: 60.00 [m] dmid: 20.50 [m]
 Cb: 0.8092 Cm: 0.9980 Cp: 0.8108 Cw: 0.9016 lcb: -3.50 [%Lpp]
 MCR: 27000 [kW] × 75.0 [rpm] Vs: 17.00 [kn]
 Dp max: 10.00 [m] Z: 4 Bottom Clearance: 1.00 [%Dp]

2. ESTIMATION RESULTS

K: 0.291 S/√³: 5.961 (1-ws)(1-wu): 1.151 BHP/DHP: 1.030 Disp: 325954 [t]

Fn	rw×10 ³	rr×10 ³	Δcf×10 ³	1-t	1-wu	η _R
0.110	0.020	2.860	0.060	0.809	0.572	0.998
0.120	0.050	2.850	0.060	0.810	0.575	1.001
0.130	0.090	2.850	0.070	0.810	0.579	1.004
0.140	0.140	2.870	0.070	0.810	0.583	1.006
0.150	0.220	2.920	0.080	0.811	0.587	1.010
0.160	0.340	3.010	0.080	0.811	0.591	1.013
0.170	0.520	3.160	0.080	0.812	0.595	1.015
0.180	0.830	3.450	0.090	0.812	0.599	1.018
0.190	1.350	3.940	0.090	0.813	0.604	1.021

3. POWER CALCULATION RESULTS

(A) Propeller

Dp: 10.00 [m] P/D: 0.739 Ae/Ad: 0.452 t/(0.7R): 0.066
 Open Characteristics

s	J	K _r	K _Q	η _o	K _r /J ²	δ
0.650	0.259	0.242	0.0282	0.353	3.620	119.3
0.500	0.370	0.204	0.0250	0.481	1.493	83.5
0.350	0.481	0.164	0.0212	0.591	0.710	64.2
0.200	0.592	0.120	0.0169	0.664	0.342	52.2
0.050	0.702	0.072	0.0119	0.675	0.146	43.9
-0.100	0.813	0.022	0.0051	0.552	0.033	38.0

(B) Power Calculation Components

Vs[kn]	Fn	Rn×10 ¹⁰	rw×10 ³	rr×10 ³	cw×10 ³	cfs×10 ³	Δcf×10 ³
12.07	0.110	0.167	0.020	2.860	0.007	1.440	0.060
13.16	0.120	0.182	0.050	2.850	0.017	1.420	0.060
14.26	0.130	0.197	0.090	2.850	0.030	1.410	0.070
15.36	0.140	0.213	0.140	2.870	0.047	1.400	0.070
16.46	0.150	0.228	0.220	2.920	0.074	1.380	0.080
17.55	0.160	0.243	0.340	3.010	0.114	1.370	0.080
18.65	0.170	0.258	0.520	3.160	0.174	1.360	0.080
19.75	0.180	0.273	0.830	3.450	0.278	1.350	0.090
20.84	0.190	0.289	1.350	3.940	0.453	1.350	0.090

Vs[kn]	1-t	1-wu	η _R	η _H			
12.07	0.809	0.658	0.998	1.230			
13.16	0.810	0.662	1.001	1.223			
14.26	0.810	0.666	1.004	1.216			
15.36	0.810	0.671	1.006	1.208			
16.46	0.811	0.675	1.010	1.201			
17.55	0.811	0.680	1.013	1.193			
18.65	0.812	0.685	1.015	1.185			
19.75	0.812	0.690	1.018	1.178			
20.84	0.813	0.695	1.021	1.170			

Vs[kn]	K _r /J ²	s	J	η _o	δ	N[rpm]	T[kN]
12.07	0.760	0.360	0.473	0.583	65.2	51.8	1299
13.16	0.749	0.357	0.475	0.585	65.0	56.6	1542
14.26	0.739	0.356	0.476	0.586	64.8	61.6	1809
15.36	0.731	0.354	0.477	0.588	64.7	66.6	2103
16.46	0.727	0.353	0.478	0.588	64.6	71.7	2434
17.55	0.728	0.354	0.478	0.588	64.6	77.1	2813
18.65	0.737	0.355	0.477	0.587	64.8	82.7	3258
19.75	0.761	0.360	0.473	0.583	65.2	88.8	3824
20.84	0.809	0.369	0.466	0.577	66.2	95.8	4596

Vs[kn]	EHP[kW]	EHPv[kW]	EHPw[kW]	DHP[kW]	BHP[kW]	Cadm	EHP/BHP
12.07	6532	6509	23	9118	9392	652	0.695
13.16	8460	8386	74	11815	12170	653	0.695
14.26	10760	10591	170	15040	15491	652	0.695
15.36	13477	13147	330	18862	19427	650	0.694
16.46	16720	16083	638	23455	24159	642	0.692
17.55	20618	19422	1196	29030	29901	630	0.690
18.65	25386	23193	2193	35943	37022	610	0.686
19.75	31574	27421	4153	45134	46488	577	0.679
20.84	40076	32131	7945	58191	59937	526	0.669

表 6.5.2 CFD 計算によるベース船の推進性能の諸数値

1. INPUT DATA

Name: Base

Lpp: 319.50 [m] Bmld: 60.00 [m] dmid: 20.50 [m]

Cb: 0.8087 Cm: 0.9980 Cp: 0.8103 Cw: 0.9016 lcb: -3.50 [%Lpp]

MCR: 27020 [kW] × 75.0 [rpm] Vs: 15.50 [kn]

Dp max: 10.00 [m] Z: 4 Bottom Clearance: 1.00 [%Dp]

2. ESTIMATION RESULTS

K: 0.294 $S/\nabla^{2/3}$: 5.904 $(1-w_s)(1-w_M)$: 1.152 BHP/DHP: 1.030 Disp: 325752 [t]

Fn	$rw \times 10^3$	$rr \times 10^3$	$\Delta cf \times 10^3$	1-t	1- w_M	η_R
0.140	0.120	2.860	0.070	0.814	0.589	1.018
0.150	0.180	2.880	0.080	0.814	0.589	1.018
0.160	0.280	2.960	0.080	0.814	0.589	1.018
0.170	0.510	3.160	0.080	0.814	0.589	1.018
0.180	0.920	3.540	0.090	0.814	0.589	1.018

3. POWER CALCULATION RESULTS

(A) Propeller

Dp: 10.00 [m] P/D: 0.743 Ae/Ad: 0.454 $t/l(0.7R)$: 0.065

Open Characteristics

s	J	K_T	K_Q	η_O	K_T/J^2	δ
0.650	0.260	0.244	0.0285	0.354	3.600	118.7
0.500	0.372	0.205	0.0252	0.482	1.485	83.1
0.350	0.483	0.164	0.0214	0.592	0.705	63.9
0.200	0.594	0.120	0.0170	0.666	0.339	51.9
0.050	0.706	0.072	0.0120	0.676	0.144	43.7
-0.100	0.817	0.022	0.0051	0.552	0.032	37.8

(B) Power Calculation Components

Vs[kn]	Fn	$Rn \times 10^{10}$	$rw \times 10^3$	$rr \times 10^3$	$cw \times 10^3$	$cfs \times 10^3$	$\Delta cf \times 10^3$
15.36	0.140	0.213	0.120	2.860	0.041	1.400	0.070
16.46	0.150	0.228	0.180	2.880	0.061	1.380	0.080
17.55	0.160	0.243	0.280	2.960	0.095	1.370	0.080
18.65	0.170	0.258	0.510	3.160	0.173	1.360	0.080
19.75	0.180	0.273	0.920	3.540	0.312	1.350	0.090

Vs[kn]	1-t	1- w_s	η_R	η_H			
15.36	0.814	0.679	1.018	1.199			
16.46	0.814	0.679	1.018	1.199			
17.55	0.814	0.679	1.018	1.199			
18.65	0.814	0.679	1.018	1.199			
19.75	0.814	0.679	1.018	1.199			

Vs[kn]	K_T/J^2	s	J	η_O	δ	N[rpm]	T[kN]
15.36	0.704	0.350	0.483	0.592	63.9	66.6	2073
16.46	0.708	0.351	0.483	0.591	64.0	71.4	2392
17.55	0.717	0.352	0.481	0.590	64.1	76.4	2757
18.65	0.742	0.357	0.478	0.586	64.6	81.8	3222
19.75	0.790	0.366	0.471	0.580	65.6	87.8	3845

Vs[kn]	EHP[kW]	EHPv[kW]	EHPw[kW]	DHP[kW]	BHP[kW]	Cadm	EHP/BHP
15.36	13339	13056	282	18464	19018	663	0.701
16.46	16486	15964	522	22841	23526	660	0.701
17.55	20273	19289	984	28150	28995	649	0.699
18.65	25171	23021	2150	35164	36219	624	0.695
19.75	31808	27207	4601	44955	46304	579	0.687

表 6.5.3 CFD 計算による MIBS ; +B=2.5m の推進性能の諸数値

1. INPUT DATA

Name: mibs_cm090_case0a_cfd
 Lpp: 319.50 [m] Bmld: 62.50 [m] dmlid: 20.50 [m]
 Cb: 0.7759 Cm: 0.9980 Cp: 0.7775 Cw: 0.9016 lcb: -3.50 [%Lpp]
 MCR: 27000 [kW] × 75.0 [rpm] Vs: 15.50 [kn]
 Dp max: 10.00 [m] Z: 4 Bottom Clearance: 1.00 [%Dp]

2. ESTIMATION RESULTS

K: 0.350 $S/\nabla^{2/3}$: 5.766 (1-w_s)(1-w_M): 1.167 BHP/DHP: 1.030 Disp: 325562 [t]

Fn	rw × 10 ³	rr × 10 ³	Δcf × 10 ³	1-t	1-w _M	η _R
0.140	0.440	3.620	0.080	0.793	0.573	1.024
0.150	0.770	3.910	0.080	0.793	0.573	1.024
0.160	1.310	4.420	0.080	0.793	0.573	1.024
0.170	2.120	5.190	0.090	0.793	0.573	1.024
0.180	3.410	6.460	0.090	0.793	0.573	1.024

3. POWER CALCULATION RESULTS

(A) Propeller

Dp: 10.00 [m] P/D: 0.730 Ae/Ad: 0.466 t/l(0.7R): 0.063
 Open Characteristics

s	J	K _r	K _O	η _O	K _i /J ²	δ
0.650	0.256	0.240	0.0278	0.351	3.667	120.7
0.500	0.365	0.202	0.0245	0.478	1.511	84.5
0.350	0.475	0.161	0.0208	0.587	0.716	65.0
0.200	0.584	0.117	0.0165	0.661	0.344	52.8
0.050	0.694	0.070	0.0116	0.668	0.146	44.5
-0.100	0.804	0.021	0.0047	0.559	0.032	38.4

(B) Power Calculation Components

Vs[kn]	Fn	Rn × 10 ¹⁰	rw × 10 ³	rr × 10 ³	cw × 10 ³	cfs × 10 ³	Δcf × 10 ³
15.36	0.140	0.213	0.440	3.620	0.153	1.400	0.080
16.46	0.150	0.228	0.770	3.910	0.267	1.380	0.080
17.55	0.160	0.243	1.310	4.420	0.454	1.370	0.080
18.65	0.170	0.258	2.120	5.190	0.735	1.360	0.090
19.75	0.180	0.273	3.410	6.460	1.183	1.350	0.090

Vs[kn]	1-t	1-w _s	η _R	η _H			
15.36	0.793	0.668	1.024	1.187			
16.46	0.793	0.668	1.024	1.187			
17.55	0.793	0.668	1.024	1.187			
18.65	0.793	0.668	1.024	1.187			
19.75	0.793	0.668	1.024	1.187			

Vs[kn]	K _i /J ²	s	J	η _O	δ	N[rpm]	T[kN]
15.36	0.800	0.366	0.463	0.575	66.7	68.4	2286
16.46	0.839	0.373	0.458	0.570	67.4	74.2	2752
17.55	0.907	0.386	0.448	0.561	68.8	80.8	3383
18.65	1.009	0.405	0.434	0.547	71.1	88.6	4249
19.75	1.176	0.437	0.411	0.524	75.0	99.0	5552

Vs[kn]	EHP[kW]	EHPv[kW]	EHPw[kW]	DHP[kW]	BHP[kW]	Cadm	EHP/BHP
15.36	14337	13301	1036	20514	21129	597	0.679
16.46	18491	16263	2228	26705	27506	564	0.672
17.55	24250	19646	4604	35604	36672	513	0.661
18.65	32359	23427	8932	48725	50187	450	0.645
19.75	44771	27713	17058	70366	72477	370	0.618

表 6.5.4 CFD 計算による MIBS ; +B=5.0m の推進性能の諸数値

1. INPUT DATA

Name: mibsCm090_case1_cfd
 Lpp: 319.50 [m] Bmld: 65.00 [m] dmid: 20.50 [m]
 Cb: 0.7503 Cm: 0.9000 Cp: 0.8337 Cw: 0.9016 lcb: -3.50 [%Lpp]
 MCR: 27000 [kW] × 75.0 [rpm] Vs: 15.50 [kn]
 Dp max: 10.00 [m] Z: 4 Bottom Clearance: 1.00 [%Dp]

2. ESTIMATION RESULTS

K: 0.297 $S/\nabla^{2/3}$: 5.777 $(1-w_s)(1-w_m)$: 1.146 BHP/DHP: 1.030 Disp: 327414 [t]

Fn	$rw \times 10^3$	$rr \times 10^3$	$\Delta cf \times 10^3$	1-t	1- w_m	η_R
0.140	0.140	2.840	0.080	0.800	0.604	1.018
0.150	0.230	2.900	0.080	0.800	0.604	1.018
0.160	0.380	3.020	0.090	0.800	0.604	1.018
0.170	0.660	3.280	0.090	0.800	0.604	1.018
0.180	1.170	3.760	0.100	0.800	0.604	1.018

3. POWER CALCULATION RESULTS

(A) Propeller

Dp: 10.00 [m] P/D: 0.746 Ae/Ad: 0.451 t/l(0.7R): 0.066
 Open Characteristics

s	J	K_r	K_G	η_o	K_r/J^2	δ
0.650	0.261	0.244	0.0286	0.355	3.586	118.3
0.500	0.373	0.206	0.0253	0.482	1.479	82.8
0.350	0.485	0.165	0.0215	0.593	0.703	63.7
0.200	0.597	0.120	0.0171	0.667	0.338	51.7
0.050	0.708	0.072	0.0120	0.678	0.144	43.6
-0.100	0.820	0.022	0.0052	0.551	0.032	37.6

(B) Power Calculation Components

Vs[kn]	Fn	$Rn \times 10^{10}$	$rw \times 10^3$	$rr \times 10^3$	$cw \times 10^3$	$cfs \times 10^3$	$\Delta cf \times 10^3$
15.36	0.140	0.213	0.140	2.840	0.048	1.400	0.080
16.46	0.150	0.228	0.230	2.900	0.080	1.380	0.080
17.55	0.160	0.243	0.380	3.020	0.132	1.370	0.090
18.65	0.170	0.258	0.660	3.280	0.228	1.360	0.090
19.75	0.180	0.273	1.170	3.760	0.405	1.350	0.100

Vs[kn]	1-t	1- w_s	η_R	η_H			
15.36	0.800	0.693	1.018	1.155			
16.46	0.800	0.693	1.018	1.155			
17.55	0.800	0.693	1.018	1.155			
18.65	0.800	0.693	1.018	1.155			
19.75	0.800	0.693	1.018	1.155			

Vs[kn]	K_r/J^2	s	J	η_o	δ	N[rpm]	T[kN]
15.36	0.682	0.341	0.491	0.597	62.8	66.8	2090
16.46	0.689	0.345	0.489	0.595	63.1	72.0	2427
17.55	0.704	0.350	0.485	0.593	63.7	77.4	2821
18.65	0.735	0.356	0.480	0.588	64.3	83.0	3324
19.75	0.794	0.368	0.472	0.580	65.5	89.5	4026

Vs[kn]	EHP[kW]	EHPv[kW]	EHPw[kW]	DHP[kW]	BHP[kW]	Cadm	EHP/BHP
15.36	13225	12894	331	18837	19402	652	0.682
16.46	16448	15780	668	23489	24194	643	0.680
17.55	20395	19054	1341	29268	30146	627	0.677
18.65	25534	22744	2790	36916	38024	596	0.672
19.75	32750	26873	5877	48035	49476	544	0.662

表 6.5.5 CFD 計算による MIBS ; +B=7.5m の推進性能の諸数値

1. INPUT DATA

Name: mibs_cm090_case2

Lpp: 319.50 [m] Bmld: 67.50 [m] dmlld: 20.50 [m]

Cb: 0.7239 Cm: 0.9000 Cp: 0.8043 Cw: 0.9016 lcb: -3.50 [%Lpp]

MCR: 27000 [kW] × 75.0 [rpm] Vs: 15.50 [kn]

Dp max: 10.00 [m] Z: 4 Bottom Clearance: 1.00 [%Dp]

2. ESTIMATION RESULTS

K: 0.270 $S/\nabla^{2/3}$: 5.794 $(1-w_s)(1-w_M)$: 1.129 BHP/DHP: 1.030 Disp: 328043 [t]

Fn	$rw \times 10^3$	$rr \times 10^3$	$\Delta cf \times 10^3$	1-t	1- w_M	η_R
0.140	0.110	2.570	0.080	0.814	0.633	1.016
0.150	0.160	2.590	0.090	0.814	0.633	1.016
0.160	0.230	2.630	0.090	0.814	0.633	1.016
0.170	0.350	2.730	0.100	0.814	0.633	1.016
0.180	0.580	2.940	0.100	0.814	0.633	1.016

3. POWER CALCULATION RESULTS

(A) Propeller

Dp: 10.00 [m] P/D: 0.756 Ae/Ad: 0.442 t/l(0.7R): 0.067

Open Characteristics

s	J	K_T	K_Q	η_O	K_T/J^2	δ
0.650	0.265	0.247	0.0292	0.357	3.531	116.6
0.500	0.378	0.208	0.0258	0.486	1.457	81.6
0.350	0.492	0.168	0.0220	0.597	0.694	62.8
0.200	0.605	0.122	0.0175	0.670	0.334	51.0
0.050	0.718	0.074	0.0123	0.684	0.143	43.0
-0.100	0.832	0.022	0.0054	0.546	0.032	37.1

(B) Power Calculation Components

Vs[kn]	Fn	$Rn \times 10^{10}$	$rw \times 10^3$	$rr \times 10^3$	$cw \times 10^3$	$cfs \times 10^3$	$\Delta cf \times 10^3$
15.36	0.140	0.213	0.110	2.570	0.038	1.400	0.080
16.46	0.150	0.228	0.160	2.590	0.055	1.380	0.090
17.55	0.160	0.243	0.230	2.630	0.079	1.370	0.090
18.65	0.170	0.258	0.350	2.730	0.121	1.360	0.100
19.75	0.180	0.273	0.580	2.940	0.200	1.350	0.100

Vs[kn]	1-t	1- w_s	η_R	η_H			
15.36	0.814	0.714	1.016	1.140			
16.46	0.814	0.714	1.016	1.140			
17.55	0.814	0.714	1.016	1.140			
18.65	0.814	0.714	1.016	1.140			
19.75	0.814	0.714	1.016	1.140			

Vs[kn]	K_T/J^2	s	J	η_O	δ	N[rpm]	T[kN]
15.36	0.617	0.318	0.516	0.612	59.9	65.7	2015
16.46	0.620	0.319	0.515	0.612	60.0	70.5	2322
17.55	0.624	0.321	0.514	0.611	60.1	75.4	2660
18.65	0.635	0.326	0.510	0.609	60.5	80.6	3056
19.75	0.659	0.336	0.502	0.604	61.4	86.7	3557

Vs[kn]	EHP[kW]	EHPv[kW]	EHPw[kW]	DHP[kW]	BHP[kW]	Cadm	EHP/BHP
15.36	12971	12711	260	18301	18850	672	0.688
16.46	16016	15551	465	22616	23295	669	0.688
17.55	19574	18761	813	27680	28510	664	0.687
18.65	23889	22406	1482	33907	34924	650	0.684
19.75	29440	26527	2914	42131	43395	621	0.678

参考文献

- 6-1) 金井健：ニューラルネットワークを利用した船舶の推進性能推定，横浜国立大学大学院工学研究科博士論文，pp.46-49，2010.
- 6-2) (独) 海上技術安全研究所，(有) エイ・シー・ティール：HullDes 版 GMESH マニュアル (1) 船体表面格子生成コード SUREFG Ver.6.01，2007.
- 6-3) (独) 海上技術安全研究所，(有) エイ・シー・ティール：BFC マニュアル O-O タイプ 船体表面格子生成コード BFC Ver.1.0，2008.
- 6-4) (独) 海上技術安全研究所 流体性能評価系 CFD 研究グループ：NEPTUNE Ver6.41—ユーザーズマニュアル—，2013.
- 6-5) 児玉良明：Implicit Geometrical Method による実用船型まわりの格子生成，日本造船学会論文集，第 169 号，pp.27-38，1991.
- 6-6) 数値流体力学編集委員会 編：格子形成法とコンピュータグラフィックス，pp.26-31，1995.
- 6-7) Hirata,N and Hino,T.：An Efficient Algorithm for Simulating Free-Surface Turbulent Flows around an Advancing Shp, J. of the Soc. Naval Archit. Japan, Vol.185, pp.1-8, 2000.
- 6-8) 菅井信夫，平田信行：内航タンカーのシリーズテストに対する CFD の検証，関西造船協会論文集，第 241 号，pp.19-24，2004.

7. 結論

NOBS/MIBS の初期船型計画を在来船型と同程度に効率良く行うため、日本造船技術センターが NOBS/MIBS を共同開発した際に、筆者が担当した作業を通じて得た知見を纏めた上で、NOBS/MIBS の初期船型計画法の構築を行った。本研究により、以下の成果を得た。

- SRC 及び他機関が過去提案した NOBS/MIBS の事例から、NOBS/MIBS はベース船より主要寸法が拡大されている事を確認した。
- SRC が共同開発した NOBS/MIBS の水槽試験結果から、NOBS と MIBS を比べると、推進性能は MIBS の方が優れている事が分かった。
- NOBS/MIBS の初期船型計画で使用するパラメータを選定した。
- NOBS/MIBS の空荷状態における喫水の推定式を考案し、実際の排水量計算結果との相関を調べる事で、実用上問題のない推定精度を持つ事を確認した。
- 満載状態の推進性能推定システム (SRC Tips) を援用して、NOBS/MIBS の推進性能を推定する方法を考案し、水槽試験結果との相関を調べる事で、同手法は在来船型に対する推定精度と同程度の精度がある事を確認した。
- 満載状態における C_{adm} カーブと排水量比から、空荷状態における NOBS/MIBS の推進性能を簡単に推定できる手法を考案し、水槽試験結果との相関を調べる事で、満載状態に対する推定精度と同程度の精度がある事を確認した。

NOBS/MIBS の推進性能の簡易推定法の有用性を確認するため、VLCC 船型について、NOBS/MIBS の推進性能を推定し、以下の結果を得た。

- ベース船と比べて推進性能に優れる NOBS、MIBS の主要目 (拡幅量) を得た。
- NOBS に小直径プロペラを採用しても推進性能は殆ど変わらない事を確認した。

ベース船と NOBS/MIBS の満載状態を対象に CFD 計算を行い、以下の結果を得た。

- SRC が共同開発した、18 隻の NOBS/MIBS の満載状態を対象に CFD 計算を行い、水槽試験結果との相関を調べる事で、簡易推定法と比べて推進性能の推定精度が高い事を確認した。
- 実績豊富な在来船型をタイプシップとして、NOBS/MIBS の初期船型を作成する手法を考案し、MIBS 拡幅シリーズの船型を生成した。
- MIBS の拡幅シリーズについて、満載状態を対象とする CFD 計算を行い、簡易推定法による傾向と概ね同じ結果が得られる事を確認し、同手法の妥当性を示した。また、CFD 計算により得た流場の可視化を通じて、MIBS シリーズの流力特性を把握した。

本研究により、NOBS/MIBS の初期船型計画を効率的に行う方法を構築し、その有用性を示す事ができた。今後は様々な船種、航路を対象に NOBS/MIBS の検討を行い、実用化に繋がりたいと考えている。

謝辞

本研究の取り纏めは、横浜国立大学工学府社会人ドクターコースにおいて行いました。社会人ドクターコースへの入学を快くご許可いただき、2年半にわたって懇切なご指導をいただいた、鈴木和夫教授に心より感謝いたします。先生には、学部の卒業論文のご指導をいただき、また、社会人になってからも機会がある毎にご鞭撻をいただきました。博士論文執筆を決心したのも、先生から勧めていただいた事によります。このような励ましをいただきながら、本論文を完成させる事ができたと考えています。

本研究は、佐藤和範流体技術部長（当時）の発案によりノンバラスト船（NOBS）の開発が行われた事から始まりました。バラスト水低減船（MIBS）はノンバラスト船から派生して開発されたもので、同氏の発案がなければ本研究はありませんでした。ここに畏敬の念とともに、その業績を記します。

本研究はまた、NOBS/MIBS の共同開発において筆者が担当した研究作業を通じて得た知見がその根幹をなしています。研究作業にあたっては、武隈克義技監（当時）及び金井健技術部長より、水槽試験の方法、船型計画の考え方、研究の進め方、報告書・論文の書き方に至るまで様々なご指導を多くいただき、こうしたご指導が本研究の基礎となっています。お二方の長年のご指導に対しここに感謝致します。

NOBS/MIBS はいくつかのプロジェクトを通じ、国、日本財団からの支援を受け、（一財）日本船舶技術研究協会、（独）鉄道建設・運輸施設整備支援機構の協力の下、（一財）日本海事協会、（株）アイ・エイチ・アイマリユニテッド（当時）、（株）大島造船所、（株）名村造船所、三菱重工業（株）と共同開発したものです。共同開発においては、関係各位から、様々な示唆、助言をいただきました。これらも本研究に欠かせない要素となっており、ここに感謝いたします。

社会人ドクターコースへの入学、学位取得にあたり、業務遂行上ご尽力いただいた、鷺尾祐秀常務理事、またそれらを快くご承認いただいた徳留健二会長のお二方のご助力、ご支援に感謝いたします。

最後に、本研究は、長年 SRC に蓄積された水槽試験結果と船型開発のノウハウがなければ成り立ちませんでした。特に、船型開発のノウハウは、中手造船所の方々との共同研究の場としての造工中手技術連絡会（HRC）を通じて磨かれてきたものであり、優れた船型を世に出してきた SRC の諸先輩方の努力の結晶であると感じています。諸先輩方に、ここに感謝の意をささげます。