

環境対応型航海支援システム

加納 敏幸*、小林 充*、鳥海 重喜*

Energy Saving Navigation Support System for Coastal Vessels

by

Toshiyuki KANO, Mitsuru KOBAYSHI, Shigeki TORIUMI

Abstract

The global warming problem is concerned in the world. Under the Kyoto Protocol, Japan has an obligation of greenhouse gas emission reduction of 6% below 1990 levels for the first commitment period of 2008-2012. Research and development on the energy saving support system based on precise environmental forecast for coastal vessels has been conducted by the National Maritime Research Institute of Japan (NMRI) cooperated with Tokyo University of Marine Science and Technology, Japan Weather Association as a strategic development of energy conservation technology project of New Energy and Industrial Technology Development Organization. The support system could be applied immediately for the existing vessels as well as new vessels and is expected to save fuel consumption by 15%.

This support system embodies a technical breakthrough in meeting certain requirements of coastal shipping such as reducing the burden on the environment, the logistics costs and high-developed transport support system.

This report describes current status of our research and development and future perspectives.

* 物流研究センター

原稿受付 平成20年 1月15日

審査済 平成20年 2月27日

目 次

1. はじめに	36
2. 背景	36
2. 1 地球環境問題の国際的な取り組み	36
2. 2 物流の最近の動向と荷主の求める課題	37
2. 3 「エネルギー使用の合理化に関する法律」 の改正	37
3. 研究概要	37
3. 1 開発課題	37
3. 1. 1 基盤技術	37
3. 1. 2 遅延リスクの回避	37
3. 1. 3 研究内容	37
3. 1. 4 目標	38
4. 研究体制	38
4. 1 研究体制と役割	38
4. 2 アドバイザリーグループ	38
5. 研究計画	38
6. 環境対応型航海支援システム	38
6. 1 運航実態調査	38
6. 1. 1 検討対象船	38
6. 1. 2 運航実態調査	40
6. 1. 3 エネルギー消費量の配分	43
6. 1. 4 省エネの可能性	43
6. 2 気象・海象の予測	44
6. 2. 1 風及び波浪の推算	44
6. 2. 2 海流の予測	46
6. 2. 3 潮流の予測	46
6. 2. 4 気象・海象の予測例	47
6. 2. 5 最新予測モデル(SYNFOS) の採用	47
6. 3 風・波による外力測定	53
6. 3. 1 風による影響の推定	53
6. 3. 2 波浪による抵抗増加の推定	60
6. 4 省エネ効果の見通し	67
6. 4. 1 船舶性能推定手順	67
6. 4. 2 航海計画と省エネ効果	69
6. 4. 3 航海計画立案に関する考察	71
7. おわりに	71
参考文献	72

1. はじめに

地球環境問題の重要性が国際的に認識され、我が国においても環境負荷の低減、エネルギー効率の向上があらゆる分野に求められている。内航海運においても京都議定書によるCO₂削減の要請や、荷主である産業界からは物流合理化の一環として改正省エネ法への対応、燃費の削減等が求められ、環境負荷

の低減の一層の促進が急務となっている。また、燃費高騰のおり省エネに関する関心も非常に高い。

船舶の省エネルギーについては、様々な取り組みがなされている。海上技術安全研究所においても環境エンジン、排熱回収、マイクロバブルなどの研究が行われているが、このようなハード面ではなく、船舶の運航を改善するというソフト面での取り組みによっても省エネを図ることができる。物流研究センターでは、平成18年度から平成20年度の3年間で、このような課題に対応すべく、日本海運㈱、宇部興産海運㈱、東京海洋大学、(財)日本気象協会、(財)鉄道総合研究所の協力を得て新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)の先導研究「内航船の環境調和型運航計画支援システムの研究開発」を実施している。

本研究開発は、配船のコンピュータ支援、気象・海象予測データに基づく省エネ航海計画、船陸間通信を対象としているが、ここでは内航船を対象とした環境対応型航海支援システムについて、これまでの取り組み及び研究の見通し並びに今後の展開について紹介する。

2. 背景

2.1 地球環境問題の国際的な取り組み

地球環境問題の重要性が国際的に認識され、1997年にとりまとめられた京都議定書が2005年2月16日に発効し、今年から2012年までの5年間で、我が国においても6%のCO₂削減という目標達成のため環境負荷の低減、エネルギー効率の向上があらゆる分野に求められている。内航海運の分野においても目標達成を図るために環境負荷低減の一層の促進が急務となっている。船舶は、環境に優しく廉価な大量輸送モードであり、また、トラック輸送から船舶への転換(モーダルシフト)は、我が国のCO₂排出量削減に大きな効果がある。

2.2 物流の最近の動向と荷主の求める課題

荷主は、消費者のニーズの高度化、価格設定に対する厳しい要請に呼応して、物流に対し、必要な商品を必要なときに必要な分量を配送することを求めている。製造の現場においても、製品の販売状況に応じて売れ筋商品を必要な量だけ生産するという需用が高まっており、物流が、これらのサプライサイドからディマンド・サイド重視に変化した要請に応じてジャストインタイムの物流管理、輸配送の対応を行うことが求められている。

また、物流の観点からも地球環境問題に対

応が求められているが、CO₂削減に向けて、荷主を含め物流関係者が協働した取り組みが必要である。

2.3 「エネルギー使用の合理化に関する法律」の改正

「エネルギー使用の合理化に関する法律」が改正され（改正省エネ法）、平成18年4月1日に施行された。この改正省エネ法によると、一定の規模の特定輸送事業者（総トン数2万トン以上の船舶を有する事業者を含む）及び3000万トン・キロ以上の貨物輸送を委託している特定荷主事業者は、省エネ責任者の設置、省エネ計画の策定等を実施するとともに中長期的にみて1%の年間低減（エネルギー消費原単位）の目標を実現する必要がある。このような目標を効率的に実現するためには、荷主、輸送事業者等の物流関係者の協働した取り組みが求められる。

3. 研究概要

船舶の省エネに関する研究は、造船の立場から船型開発、推進器開発、各種フィン等船舶の各要素に着目した研究・開発が数多く実施され成果を出してきた。他方、気象・海象の予測データに基づいた運航計画の改善によっても大きな省エネが図れることが期待される。

3.1 開発課題

3.1.1 基盤技術

(1) 気象・海象の予測

最近の気象・海象推算モデルとコンピュータの発達により、精度の良い推算が期待できるようになっている。特に内航船では、外航船に比較し航海時間も短く予測精度も高いものが期待できる。また、海流についても地球環境フロンティア研究センターの「日本沿海予測可能性実験（JCOPE）」による海流予測データが入手できるようになっている。

(2) 気象・海象が航海に及ぼす影響

気象・海象が分かれば、航海途上の外力による船舶性能の変化を概ね船舶工学の知識により得ることができる。風や波による抵抗増加量については、正面向い波の場合には実用的な推定ができる。推定の困難な船長に比較し短波長域または追い波中の波浪中抵抗増加量については実船試験により評価すれば良い。最近、実船の性能についての計測や解析もコンピュー

タやその記憶容量の増加等に伴い大量のデータ解析ができるようになってきている。計測装置の発達により、これまで計測が困難であった波向きの計測も可能となってきた。

(3) 航路計画の策定アルゴリズム

航海途上の外力と船舶性能との関係が明らかにできれば、燃料消費量を最小にする航路計画、動揺の少ない航海計画などをDP等の数値計画の手法により立案することができる。

以上のように、あらかじめ航海中に遭遇する気象・海象が推測できれば最適な航路を立案でき、気象・海象の不確実性による余裕量を減少させ無駄を省いた運航を行うことができる。

3.1.2 遅延リスクの回避

このような航路計画が、実運航の中で採用されるためには、次の課題を解決する必要がある。

内航船の実運航では、船長が最短航路を採用している。この航路は、航海中遭遇する気象・海象による影響を考えなければ、最小エネルギーかつ最短時間航路となる。現実には、航海中遭遇する気象・海象による不確実性があるため、予定時刻に遅延しないように必要以上の船速で予定時刻より早く到着して沖待ちをしている現状がある。このような航海を行っていれば万が一遅延が生じても咎められることはない。

他方、最適航路計画は多くの場合最短航路とならない。そして、この航路を採用し遅延が生じた場合のリスクを船長は負えないという課題がある。また、気象・海象の予測、船舶性能の性能推定値についても誤差による不確実性が入っている。このような不確実性を考慮した上で、実用上のレベルで遅延リスクを評価し遅延を最小とする運航計画の立案が必要となる。

さらに、最適航路計画として提示された航路上を航海するために舵を用いるが操舵による抵抗増加も無視できないため、操舵量を最少とし航路上をトラッキングする操船法についての検討を行う。

3.1.3 研究内容

以上のような状況に鑑み、研究課題は以下のようなものになる。

(1) 気象・海象の予測精度と質の向上

(2) 気象・海象が航海に与える影響の推定と実船計測データの評価手法の検討

- (3) 気象・海象の予測に基づいた航路計画アルゴリズムの検討
- (4) 不確実性を考慮した航海計画アルゴリズムの開発
- (5) ウェイポイント間省エネ操船制御法

3.1.4 目標

既存の内航船に対し、15%の燃料消費量の低減を目標とする。その内訳は、海流等を活用した航海計画で 5%から 10%の燃料消費量の低減を図り、沖待ち時間等の航海時間への組み入れ等により 10%以上の省エネを図ることを目標とする。

4. 研究体制

表 4.1-1 研究体制

研究分野等	機関名等
全体とりまとめ	海上技術安全研究所
気象・海象予測 予測精度向上	(財)日本気象協会
気象・海象が 航海に与える影響	海上技術安全研究所
不確実性を考慮した 航海アルゴリズム	東京海洋大学
ウェイポイント間 省エネ操船制御法	東京海洋大学

表 4.2-1 アドバイザリーグループ

氏名	所属・役職
久保 幹雄	東京海洋大学 海洋工学部 流通情報工学科 准教授
渡邊 巖	高知大学 海洋コア総合研究センター長
武隈 克義	(財)日本造船技術センター 技術顧問
榎野 純	弓削商船高等専門学校 助教
駒井 啓一	(財)省エネルギーセンター 技術部 部長
井崎 宣昭	日本内航海運組合総連合会 審議役
今澄 敏夫	宇部興産海運株式会社 取締役船舶部長
宮澤 徹	日本海運株式会社 常務取締役

4.1 研究体制と役割

本研究は、全体のとりまとめを海上技術安全研究所が行い、それぞれの研究分野毎に、表

4.1-1 のような研究体制で進めている。

4.2 アドバイザリーグループ

本研究は、表 4.2-1 に示すような学識経験者から適宜ご意見を頂き、また研究オリエンティドと成らぬようユーザー側からもアドバイスを得つつ進めている。

5. 研究計画

本研究は、平成 18 年度から 20 年度までの 3 年間の研究を予定している。

6. 環境対応型航海支援システム

6.1 運航実態調査

内航海運は、油、セメント、鋼材等の物流の動脈として我が国の基幹産業を支えている。大勢を占めるのは、タンカー、セメント船、鋼材運搬船等であり、荷主の要請オーダーに応じて船舶を手配する不定期船である。他方、モーダルシフトが期待されるのが、RORO 船、コンテナ船であるがこれらは運航スケジュールが定められた定期船である。本研究に当たり宇部興産海運㈱及び日本海運㈱に協力頂き運航実態調査を実施した。

6.1.1 検討対象船

検討対象船は、船主の協力を得て不定期船のセメント船と定期船の RORO 船とした。それぞれの航路は、太平洋側の関東以北と関東以西に分かれており、対象となる海域及び海流も黒潮と親潮と異なっており幅広い検討ができ都合が良い。以下にそれぞれの基本仕様、運航の特徴を示す。

(1) 不定期船（セメント船）

1) 仕様

対象船舶は、1991 年 9 月竣工の宇部興産海運所有 2 万トン型セメント船（図 6.1.1-1 参照）で、基本仕様は、表 6.1.1-1 の通りである。大型セメント船である。



図 6.1.1-1 「セメント船」

表 6.1.1-1 対象船舶基本仕様

船種	セメント運搬船
全長	159.7 [m]
型幅	24.20[m]
総トン数	13,787 [tons]
載貨重量	21,493 [tons]
MCR	5,120 [kW] (6,960PS)
航路	宇部～千葉～東京～宇部 宇部～名古屋～豊橋～宇部

2) 運航の特徴

① 運航航路・海流

本船は、宇部港（山口県）でセメントを積載し、主に千葉・東京又は名古屋・豊橋に輸送する不定期船である。図 6.1.1-2 に約 1 ヶ月間における船舶の位置を GPS で計測したものを示す。天候や漁船回避などの理由で若干航路を変更することがあるものの、ほとんど航路を変更せずに最短航路を採用している。宇部でセメントを搭載し、平均で名古屋まで 32 時間、千葉まで 44.4 時間の航海となっている。復航も殆ど同じ時間となっている。

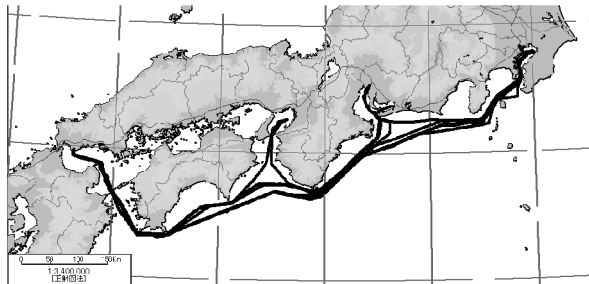


図 6.1.1-2 セメント船の航路(航跡)

② 運航（スケジュール）管理

2007 年 1 月 1 日から 2007 年 3 月 8 日までの「宇部→千葉」航路について、航海支援システムに設定されたウェイポイントを通過した時刻を各航海（対象航海数：7）で算出する。航海毎にプロットしたものを図 6.1.1-3 に示す。

本船は不定期船であるものの、出港時刻は大きく変わらない。図 6.1.1-3 から、出港時刻の差がほぼ到着時刻の差になっている（ここでは、むしろ拡大している）。機関の使用状態を見ても出力は、ほぼ一定で運航している。

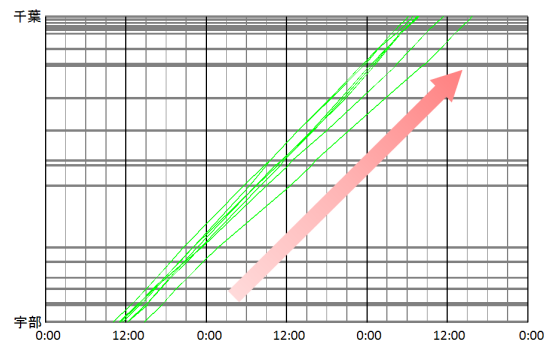


図 6.1.1-3 セメント船航海実績（宇部→千葉）

(2) 定期船（RORO 船）

1) 仕様

対象船舶は、2001 年 4 月竣工の日本海運所有 RORO 船（図 6.1.1-4 参照）で、基本仕様は、表 6.1.1-2 の通りである。



図 6.1.1-4 RORO 船

表 6.1.1-2 対象船舶基本仕様

船種	コンテナ・RORO 船
全長	161.1 [m]
型幅	24.00[m]
総トン数	7,323 [tons]
載貨重量	4,000 [tons]
MCR	16,920 [kW] (23,005PS)
航路	東京～苫小牧～釧路～東京

2) 運航の特徴

① 運航航路・海流

本船は基本的に、東京－苫小牧・釧路間の航路を平均 2 週間で 3 航海（東京～苫小牧～釧路～東京の三角航路 2 周＋東京～苫小牧の 1 往復）のスケジュールで運航している。図 6.1.1-5 に本船の就航航路を示す。新栄丸と同様、ほとんど、航路を変更せずに最短航路を採用している。このように、内航船の実運航では、最短航路を前提とした航路を採用する

ことが多いと考えられる。

本船は船体前半部にコンテナを積み付け、後半部船体内にトラックシャーシを乗り入れさせることのできる、コンテナ RORO 船である。東京→苫小牧は約 33 時間、苫小牧→東京は約 35 時間、釧路→東京は約 29 時間の航海となっている。

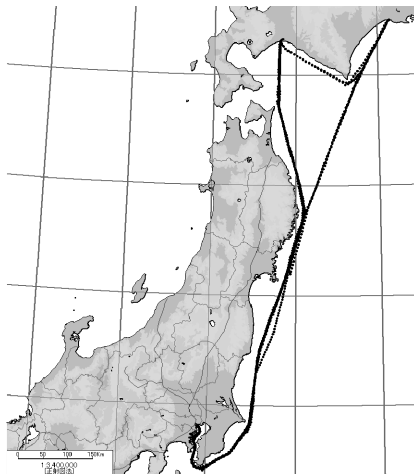


図 6.1.1-5 RORO 船の就航航路（航跡）

②運航（スケジュール）管理

2006 年 8 月 5 日から 2007 年 3 月 15 日までの「東京（若洲）→苫小牧」航路について、図 6.1.1-6 に示した行程表のウェイポイントを通じた時刻を各航海（対象航海数：35）で算出する。そして、横軸に通過時刻、縦軸にウェイポイント（間隔はウェイポイント間の距離）として、航海毎にプロットしたものを図 6.1.1-7 に示す。本船は定期船であり、着時刻が出港翌々日の午前 6 時と定められているため、出港時刻に応じて船速をコントロールしている。苫小牧に近付くにつれて、通過時刻のバラツキが小さくなっていき、出港時に 64 分であった標準偏差は、尻屋崎では 18 分、苫小牧に入港する際には 8 分となっている。

ひまわり 1 東京 苫小牧 行程表									
港名	17:00	18:00	19:00	20:00	21:00	22:00	23:00	24:00	25:00
東京港	20:00	20:30	21:00	21:30	22:00	22:30	23:00	23:30	24:00
尻屋崎	22:00	22:30	23:00	23:30	24:00	00:00	00:30	01:00	01:30
野島崎	23:30	00:25	00:55	01:30	02:00	02:30	03:00	03:30	04:00
犬吠崎	04:25	04:45	05:15	05:45	06:15	06:45	07:15	07:45	08:15
塩屋崎	08:15	08:45	09:15	09:45	10:15	10:45	11:15	11:45	12:15
金華山	13:40	13:45	14:15	14:50	15:20	15:50	16:20	16:50	17:20
新々崎	18:05	18:05	18:35	19:00	19:30	19:55	20:25	20:55	21:25
尻屋崎	01:05	01:50	02:20	02:55	03:30	04:00	04:30	05:00	05:30
苫小牧	06:10	06:50	07:20	07:50	08:20	08:50	09:20	09:50	10:20

港名	19:00	20:00	20:30	21:00	21:30	22:00	22:30	23:00	23:30
東京港	23:00	23:30	00:00	00:30	01:00	01:30	02:00	02:30	03:00
尻屋崎	01:00	01:30	02:00	02:30	03:00	03:30	04:00	04:30	05:00
野島崎	02:45	03:10	03:40	04:10	04:35	05:00	05:30	06:00	06:30
犬吠崎	06:45	07:10	07:30	08:00	08:20	08:50	09:20	09:50	10:20
塩屋崎	10:45	11:05	11:20	11:50	12:05	12:30	13:00	13:30	14:00
金華山	15:05	15:10	15:20	15:50	16:00	16:45	17:10	17:40	18:10
新々崎	19:05	19:05	19:10	19:40	19:45	20:15	20:40	21:10	21:40
尻屋崎	01:20	01:10	01:05	01:35	01:35	02:45	02:05	02:05	02:05
苫小牧	03:00	04:50	04:40	05:10	05:00	05:00	05:15	05:15	05:15

図 6.1.1-6 行程表

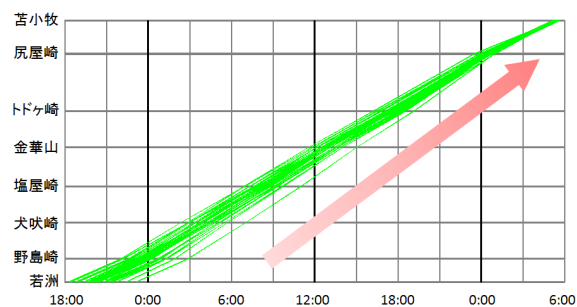


図 6.1.1-7 RORO 船航海実績（東京→苫小牧）

6.1.2 運航実態調査

船社の協力が得られた次の 2 隻の船舶について運航中の船舶に同乗し船長や乗員に対し運航実態に関するヒアリング調査を行った。調査の概要を以下に示す。

(1)「ひまわり 1」

・第 1 回

日時：2006 年 11 月 21 日～23 日

場所：ひまわり 1

出席者：生出林治 船長

海技研：小林充

・第 2 回

日時：2007 年 3 月 15 日～17 日

場所：ひまわり 1 船上

出席者：生出林治 船長

海技研：榎野純、渡部大輔、鳥海重喜

(2)「新栄丸」

日時：2007 年 3 月 8 日～10 日

場所：新栄丸

出席者：上村辰己 船長

海技研：小林充、小林和博

ヒアリング調査に基づき、各船において航海計画を立案する際に留意すべき事項を表 6.1.2-1 に整理する。現行の入手できる海流図、気象・海象情報を参照し航海計画を立案していることや気象・海象による速力低下の情報が求められていることなどが分かる。しかし、このような情報では、精度、情報提供間隔、空間的密度等が粗く最適な航海計画を立案するには課題を有しているように考えられる。

表 6.1.2-1 ヒアリング結果

		新栄丸	ひまわり 1
気象・海象	入手方法 と頻度	・衛星電話サービスの「パケット気象情報サービス」を利用	・1日2回、衛星電話サービスの「パケット気象情報サービス」を利用（図 6.1.2-1）
		・本社からの FAX	・本社からの FAX（1日2回）
		・テレビのニュース	・インターネット（随時）
		・インターネット	
	利用方法	・出港時刻を仮定したときの、1日程度の航路および時間を算出し、その時の気象情報を確認	・目的港までの各岬の通過予定時刻を算出し、その時の気象情報を確認
		・前々日から翌日程度の期間の気圧配置および気象海象情報は、航路付近に限らず、日本海側地域のものを確認して航海に活用	・実況図と翌朝の予想図の拡大図から、気象を予測（例えば、低気圧の針路と発達度合） ・予測方法は社内の安全講習会で習得
海流・潮流	問題点		・インターネットから取得した港付近のピンポイント予報は、対象領域が広いため誤差が大きい ・現在、得られる気象情報は、陸上の情報と比べて粗いので、詳細な情報を知りたい
		・（海上保安庁が提供している）航海する海域のおおまかな海流図を利用	・（海上保安庁が提供している）航海する海域のおおまかな海流図を利用（図 6.1.2-2）
		・潮汐はブリッジのホワイトボードに手書きで明記	・潮汐はブリッジのホワイトボードに手書きで明記
濃霧			・夏場の三陸沖で濃霧が発生しやすい
			・視界が悪くなったときは、安全第一で減速
			・三陸沖では、視程が 100m を切るような場合もあり、その際にはレーダー2台と見張りに対応
			・濃霧注意報は得られるが、海域全体に対するもので、結局は航行してみないとわからない
			・風と気温と海水温度が詳しくわかれば、予測できるかもしれない
			・濃霧とわかっているにもかかわらず、ピンポイントでわからないので航路は変更しない
航海計画	基本計画	・向こう一日の各点の通過予定時刻は、出発港を出港する時刻と予定船速から、予め算出された行程表を元に決定	・出発港を出港する時刻と予定船速から、予め算出された行程表を元に決定（図 6.1.1-6）
			・ウェイポイントを通過する時刻は、毎航海でほぼ同じで、目的地が近づくにつれて減速し、到着時刻をコントロール
			・沖待ちはしないように、減速運転などをして、到着時刻をコントロール
			・ある船速を出すための主機回転数は、航海速力表から求めるが、波の状態に応じて適宜修正（図 6.1.2-3）

			・三陸沖では、主に沖側と陸側の2つの航路があり、視界、風、潮流などを元にして航路を決定
気象・海象の影響		・気象・海象の状況が変化した際には、湾に避難するか、航路を変更するかなどを決め、航海計画を変更	・気象・海象の状況が変化した際には、適宜、主機回転数を増減
		・3m程度の波であれば影響が少ないが、スラミングを起こす程度の大きな波、風であれば、できるだけ回避	・波の高さと波の向き、さらに風速と風向などを考慮して、回避できるときは回避
		・甲板上で作業の必要がある場合は、陸を風除けにするために一定時間陸の近くを走ることがある	・風向によっては、陸を風除けにして航行することで風の影響を軽減
	海流・潮流の影響	・黒潮が陸に近いときは、できるだけ流れに乗る ・最大で3ノット程度の船速が得られる ・船速が出た場合は到着予測時刻を見ながら回転数を落とす ・逆流になる場合は、できるだけ回避する	・夏場であれば、黒潮の影響を考えて、少し沖合を航行するという考え、海流図を見て航路を検討 ・海流による速力調整（ある海域では速度が落ちても、先で挽回できるなどということ）も考えて、主機の回転数を調整 ・しかし、この航路では、距離をロスした分を海流で補間することは難しい ・海流、潮流などの影響により、針路がずれたときは適宜修正
	その他		・外力の影響によって、船速がどの程度しか出せないのかということが知りたい ・（これまで取得したGPS航路データでは、津軽海峡の付近で、航路がバラついていることについて）海流の影響もあるし、波の影響を考えて航路を設定している
燃料消費			・排水量や積荷の重量によって、燃費が違うことを実感する
			・例えば、速度を上げる（18ノット→23ノット）と、燃料消費が2倍になることもある（燃費は速力の3乗に比例）
			・同一船速でも気象海象で燃費が違うことを実感する
荒天時の航行			・湾内や沖合でアンカーをうつことや、逆に低気圧が発達する前にできるだけ早く通り過ぎるようにすることがある
			・前者の場合は、遅れを取り戻すために速力を上げるので、燃料消費量が多くなる
			・後者の場合は、燃費が悪くなることに加えて、沖待ちをすることもある
			・うねりが強く、波を正面に受けて真っすぐに進めない場合は、ピッチングを避けるため、波を舵でかわしながらジグザグに航行することもある

セメント船についての運航状況について、航海、シフト、荷役、沖待ち、といったモードに分けてそれぞれに要する時間について整理したのが図 6.1.4-1 の帯グラフである。減速運航するためには、海流利用などの航海計画の改善、荷役時間を短縮し短縮時間を航海時間に組入れること及び沖待ち時間や停泊時間を航海時間に組入れることが考えられる。このような方法なら現在のセメントの運送サービスを変えることなく省エネが図れることになる。また、RORO 船のような定期船の場合には、海流利用などの航海計画改善の他、集荷を早めにするなど出港時間を早くすること等のスケジュール管理を行うことが考えられる。

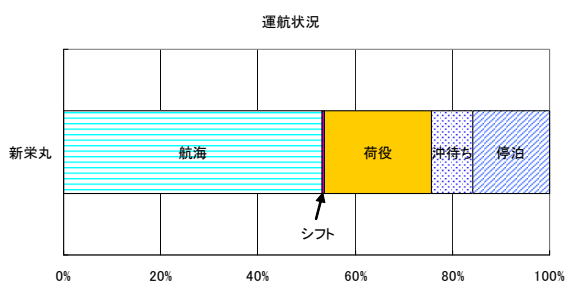


図 6.1.4-1 セメント船の運航状況

6.2 気象・海象の予測

船舶に影響を与える外力は、風（風速、風向）、波（波高、波向、波周期）、海流（流速、流向）が主要なものである。ここでの気象・海象の予測範囲は、表 6.2-1 及び図 6.2-1 に示すように検討対象船の航行する海域を包含している。

表 6.2-1 気象海象データの概要

予測項目	有義波高、有義波周期、卓越波向 平均風向、平均風速、海流、潮流
予測領域	東京北海道航路 北緯 34.0～43.5 度 東経 139.0～145.0 度 東京宇部航路 北緯 32.0～36.0 度 東経 130.0～141.0 度
水平分解能	緯度・経度 2 分（約 3.7km）
予測期間	初期時刻から 72 時間先まで 1 時間間隔 8 回/日

風及び波の予測は、(財) 日本気象協会が予測モデルの改良と推算を担当し、海流は、地球環境フロンティア研究センターの「日本沿海予測可能性実験 (JCOPE)」による海流予測デー

タを利用した。潮流は、国立天文台の潮汐予測システム (NAO.99b) で使用されている、潮流の調和定数を使用して計算した。

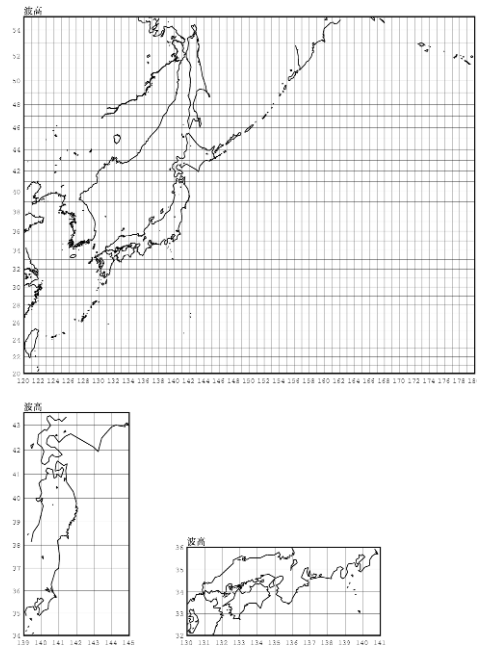


図 6.2-1 波浪データの計算領域
上図 広領域 下図 狭領域

6.2.1 風及び波浪の推算

対象船の航海する海域について、(財) 日本気象協会が、風（平均風向と平均風速）及び波浪（有義波高、有義波周期および卓越波向）の推定を数値計算モデルにより算出する。

(1) 風の予測

① メソ数値予報モデル (MSM) の予測

推定は、72 時間先までの間を予測しているが、表 6.2.1-1 に示すように、初期時刻から 15 時間後までは、波浪を発生させる海上風の予測値として、気象庁が発表するメソ数値予報モデル (MSM) の予測結果を使用する。MSM の予報時間は 15 時間後までであるため、16 時間後から 72 時間後までは気象庁が発表する沿岸波浪予報モデルの結果を利用した。

(2) 波浪の予測

波浪の数値計算は、後で説明するが第三世代波浪推算モデルの一つである WAM¹⁾²⁾ を使用して行い、水平分解能 2 分（約 0.03 度）で行うため、MSM の風向・風速のデータを単純内挿により空間内挿した。MSM の概要と、処理の内容を表 6.2.1-2 に示す。

表 6. 2. 1-1 波浪予測の計算に使用した数値計算モデル

予測項目	初期時刻から 15 時間後まで	初期時刻の 16 時間後から 72 時間後まで
気象の予測	気象庁メソ数値 予報モデル (MSM)	—
波浪の予測	WAM	気象庁沿岸波 浪予報モデル

表 6. 2. 1-2 MSM の出力から風のデータを

項 目	MSM 予報 (気象庁発 表)	作成する データ	データの 処理
初期時刻	00,03,06, 09,12,15, 18,21時 (日本時間)	00,03,06, 09,12,15, 18,21時 (日本時間)	—
予報時間	15 時間	15 時間	—
予報時間の間 隔	1 時間	1 時間	—
配信領域	22.4N～ 47.6N 120.0E～ 150.0E	①34.0N～ 43.5N 139.0E～ 145.0E ②32.0N～ 36.0N 130.0E～ 141.0E	該当領域 のデータを 切り出す
水平分解能	3 分× 3.75 分	2 分×2 分	MSM に データを 単純内挿

作成するために行った処理

第三世代波浪推算モデルの一つである WAM は、発達期の風波成分と減衰期のうねり成分を考慮できる方法であり、波の発達と減衰、非線型相互作用などを同時に考慮することができる。

波浪推算の諸条件を表 6.2.1-3 に示す。まず北西太平洋の北緯 20.0～56.0 度、東経 120.0～180.0 度の領域（広領域）を緯度経度 30 分（0.5 度）間隔で計算し、これを境界条件として、航路付近の 2 領域（狭領域）を計算した（波浪の計算領域は図 6.2-1 参照）。

表 6. 2. 1-3 波浪推算の計算条件一覧表

	広領域	狭領域
	北緯 20.0～ 56.0 度 東経 120.0～ 180.0 度	① 北緯 34.0～ 43.5 度 東経 139.0～ 145.0 度 ② 北緯 32.0～ 36.0 度 東経 130.0～ 141.0 度
格子間 隔	30'（約 50km）	2'（約 3.7km）
周波数 分割数	35 成分（0.04177248Hz～ 1.06718953Hz : $f(1) \times 1.10^{(i-1)}$ ）	
周期成 分	35 成分（約 24 秒～0.9 秒）	
方向分 割数	16 成分	

① 初期時刻の 16 時間後以降の予測

気象庁の沿岸波浪予報モデルを使用した。モデルの概要を表 6.2.1-4 に示す。このモデルも WAM と同じ第三世代波浪推算モデルの一つである。このモデルに入力する風の計算は気象庁領域数値予報モデル（RSM）で行われている。

気象庁から発表される沿岸波浪予報 GPV から、波浪データを作成する処理の概要を表 6.2.1-5 に示す。気象庁から配信される計算結果は、水平分解能が緯度 0.1 度×経度 0.1 度（6 分×6 分）であるため、細分化を行った。細分化の計算は、水平分解能 2 分で海岸線を表現し、遮蔽された領域へのうねりの伝播や、局地的な風による波の発達を考慮して行った。また、時間についてはスプライン法により 1 時間間隔に補間した。沿岸波浪予報 GPV は 1 日 2 回の更新で、初期時刻は 09 時と 21 時（日本時間）であるため、16 時間後より先のデータについては 09 時または 21 時初期値のデータのうちの新しい方のデータを接続した。すなわち、初期時刻が 09 時、12 時、15 時、18 時の場合は、09 時初期値の沿岸波浪予報 GPV に基づくデータを、それ以外の初期時刻については 21 時初期値の GPV に基づくデータを接続した。

15 時間後までの予測データとの接続にあたっては、接続部でデータの不連続が生じないように、15 時間後の 2 つの計算法による予測値の差によって、16 時間後以降のデータを補正した。補正量は初期時刻の 39 時間後に 0 になるよう、時間

とともに直線的に減じるものとし、39 時間後以降は補正を行わない。

表 6.2.1-4 気象庁発表の沿岸波浪予報 GPV の概要

項 目	内 容
モデル	気象庁沿岸波浪予報モデル(第三世代波浪推算モデル)
波の計算のために入力する風	気象庁領域数値予報GPV (RSM)
初期時刻	09, 21時 (日本時間)
予報時間	72 時間
予報時間の間隔	6 時間
配信領域	北緯 22.0～48.0 度 東経 120.0～148.0 度
水平分解能	緯度 0.1 度×経度 0.1 度

6.2.2 海流の予測

海流は、地球環境フロンティア研究センターの「日本沿海予測可能性実験 (JCOPE)」による海流予測データ (水平解像度 5'、2 日平均、表層) を、時空間内挿した。処理の要領を表 6.2.2-1 に示す。

表 6.2.1-5 気象庁から発表される沿岸波浪予報 GPV から、波浪データを作成する処理

項 目	沿岸波浪予報GPV	作成する波浪データ	データの処理
初期時刻	09,21時 (日本時間)	00,03,06,09,12,15,18,21時 (日本時間)	72時間後までのデータは09時と21時の1日2回のみ作成し、それ以外の時刻の場合は09時と21時の新しい方のデータを使用。
予報時間	72 時間	72 時間	—
予報時間の間隔	6 時間	1 時間	水平分解能の細分化を行った後、時間についてスプライン法により補間。
配信領域	北緯 22.0～48.0 度、 東経 120.0～148.0 度	①北緯 34.0～ 43.5 度 東経 139.0～145.0 度 ②北緯 32.0～ 36.0 度 東経 130.0～141.0 度	該当領域のデータを切り出す。
水平分解能	緯度経度 6 分 (0.1 度)	緯度経度 2 分	局地的な風により発達する波と、遮蔽域へのうねりの伝播を考慮して、空間内挿。

表 6.2.2-1 JCOPE による海流予測データから、海流データを作成する処理

項 目	JCOPE の 海流予測データ	作成する海流データ	データの処理
初期時刻	毎週土曜日	毎日 00,03,06,09,12,15, 18,21時 (日本時間)	—
予報時間の間隔	2 日間 (データの数値は 2 日間の平均値)	1 時間	2 日間の真ん中の時刻に 2 日間の平均値をとるものとして、前後のデータとの間で単純内挿
配信領域	東経 117.0～180.0 度 北緯 12.0 度～62.0 度	①北緯 34.0～ 43.5 度 東経 139.0～145.0 度 ②北緯 32.0～ 36.0 度 東経 130.0～141.0 度	該当領域のデータを切り出す。
水平分解能	緯度経度 5 分 (0.083 度)	緯度経度 2 分	時間内挿を行った後、海流の東西成分と南北成分を、それぞれ単純内挿。

海流予測データは、毎週土曜日が初期時刻で、予測の発表は翌週金曜日の夕方であるため、金曜日 18 時初期時刻のデータから、前週土曜日初期値の JCOPE の予測データを利用できるものとした。

6.2.3 潮流の予測

潮流は、国立天文台の潮汐予測システム (NAO.99b) で使用されている、潮流の調和定数を使用して計算した。調和定数は緯度経度 5 分の空間分解能で、潮流の東西、南北の成分別に 16 分潮まで与えられている。調和定数を利用すれば、任意の時刻の潮流を推算することができる。

次の手順で、緯度経度 2 分、1 時間間隔の、潮流の東西成分と南北成分を求めた。

- ① 緯度経度 5 分の空間分解能で、調和定数から 1 時間ごとの潮流を、東西・南北の成分ごとに求める。
- ② 潮流の東西、南北の成分別に、空間について 5 分間隔から 2 分間隔に単純内挿する。

6.2.4 気象・海象の予測例

波浪の予測には15時間先まではMSMの結果得られる地上風を外力として、第三世代波浪推算モデルのひとつであるWAMを使用して予測し、16時間以降72時間先までは気象庁の数値波浪モデル(0.1°×0.1°格子、6時間間隔)の計算結果を時空間内挿した。海流は、地球環境フロンティア研究センターの「日本沿海予測可能性実験(JCOPE)」による海流予測データ(水平解像度5'、2日平均、表層)を、時空間内挿した。潮流は、国立天文台の潮汐予測システム(NAO.99b)で使用されている、潮流の調和定数を使用して計算した。

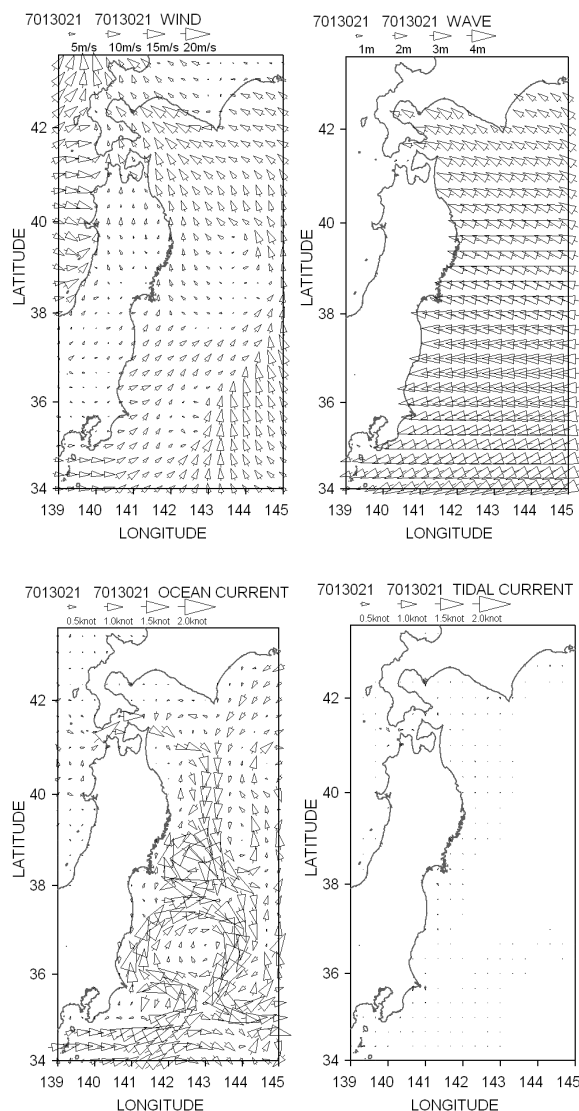


図 6.2.4-1 気象予測例(東京北海道航路)
(左上より、風向風速、波向波高、海流、潮流)

予測項目は表 6.2-1 の通りである。予測例を、東京北海道航路について図 6.2.4-1 に、東京宇

部航路について図 6.2.4-2 に示す。

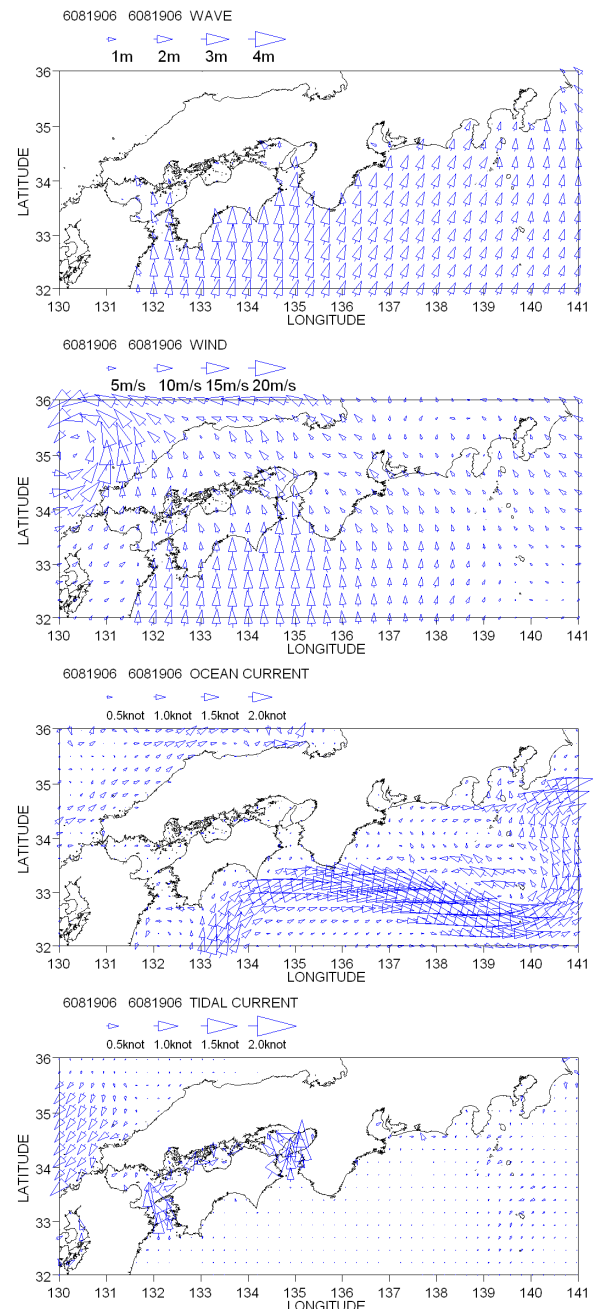


図 6.2.4-2 気象予測例(東京宇部航路)
(上より、風向風速、波向波高、海流、潮流)

6.2.5 最新予測モデル(SYNFOS)の採用

(1) 総合数値予測システム(SYNFOS)

以上の検討により気象・海象の予測ができた。波浪の予測には3時間毎の更新間隔で15時間先(現在18時間先まで予測できるように改善されている)まではMSMの結果得られる地上風を外力として、第三世代波浪推算モデルのひとつであるWAMを使用して予測し、16時間以降72時間先までは気象庁の数値波浪モデルの計算結果を時空間内挿

している。しかしながら、これらのモデルの繋ぎ目のところで予測値の連続性に課題を有している。そこで、風の予測に関し、3 時間毎の更新間隔で 27 時間先まで予測が可能な(財)日本気象協会が開発した総合数値予測システム (SYNFOS) の最新予測モデルを用いることを検討する。

SYNFOS は、メソスケールの気象現象をより正確に計算することを主な目的として、米国ペンシルバニア州立大学と NCAR (National Center for Atmospheric Research) が共同開発した気象数値モデル MM5 をベースに、(財)日本気象協会が物理過程の一部を独自に改良したものである。MM5 は高い実績を持つ非静力学気象モデルで、プログラム・ソースが一般に公開されており、世界で最も多く利用されていると推定される。

MM5 を利用した研究成果は学術誌に多数掲載されており、現業予報モデルとしての実績も豊富である（韓国、モンゴル、米国空軍、など）。

SYNFOS の概要を表 6.2.5-1 に示す。従来のモデルと比べて計算格子が小さく（高分解能）、短い間隔で更新するのが特徴である。

表 6.2.5-1 SYNFOS の概要

項目	内容	
予報モデル	非静力学予報モデル MM5 をベースに物理過程を独自改良	
初期時刻	00、03、06、09、12、15、18、21 時（1 日 8 回、3 時間毎）	
予測時間	15km 格子予測：初期時刻より 0～27 時間 5km 格子予測：初期時刻より 0～15 時間	
予測格子間隔	5km および 15km	
予測範囲	15km 格子予測	日本付近（北緯 24～46 度，東経 125～146 度） ※緯度経度の範囲はおおよその値
	5km 格子予測	1．日本西部（九州・中国・四国） 2．日本中部（近畿・北陸～関東・南東北） 3．日本北部（北東北・北海道）
予測発表時刻	15km 格子予測：初期時刻から 3 時間後（概算） 5km 格子予測：初期時刻から 4 時間 15 分後（概算）	
予測高度	地表～100hpa	
予測要素	降水量、降雪量、地上気圧、風向風速、気温、相対湿度、日射量など	

予測計算領域は、日本全域をまとめて計算す

る 15km 格子(図 6.2.5-1 左図)、および日本全域を 3 つのエリアに分けて計算する 5km 格子(高分解能予測、図 6.2.5-1 右図)の 2 種類があり、本業務ではこのうち 5km 格子で計算した風の予測を使用した。

SYNFOS の MM5 からの主な改良点は、次の 2 点である。

a) Eta Mellor-Yamada 乱流モデルの改良

MM5 で使われている乱流モデルは、「乱流の長さスケール」に関する問題が従来より指摘されている。このままでは日中の混合層高度が実際より低く表現されるため、(財)日本気象協会が独自に開発した ANEMOS と同様の乱流計算手法を用いている(図 6.2.5-2 参照)。

b) 地表面過程の改良

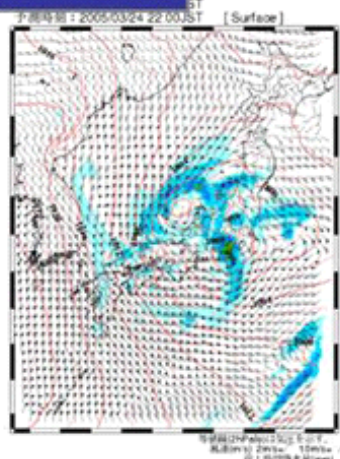
MM5 では、格子内を最大土地利用で代表させるため、格子スケール以下の土地利用分布を考慮できない。この過程も、ANEMOS と同様に、格子内の土地利用を考慮できるように改良を加えている。

国内で運用されている代表的な予測モデルは、気象庁の RSM(水平分解能；約 20km)と MSM(約 10km)で、分解能が約 5km の SYNFOS は、局地的な気象現象を細かく表現できるという特長を持っている(図 6.2.5-3 参照)。

SYNFOS 予測計算領域

- ・15km格子予測で日本全域をカバー
- ・北海道～九州は5km格子高分解能予測

全域 15km 格子



西部・中部・北部 5km 格子

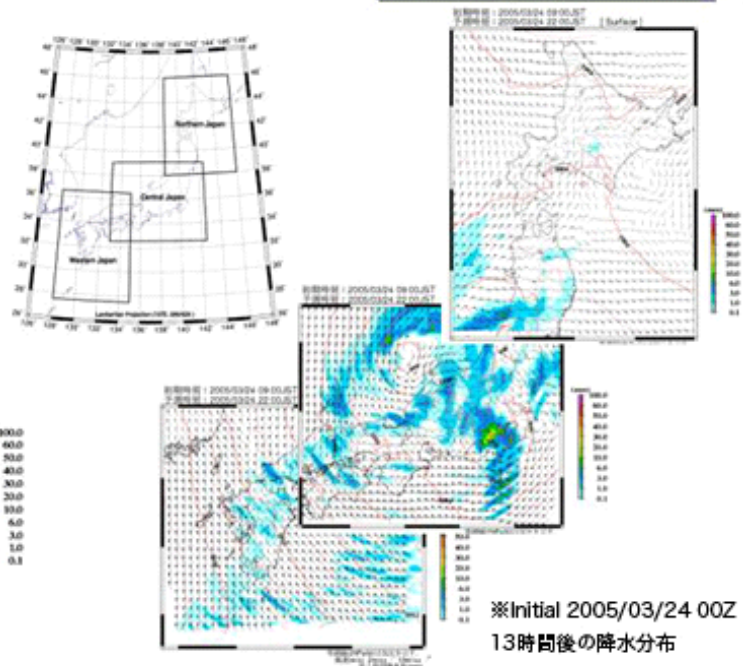


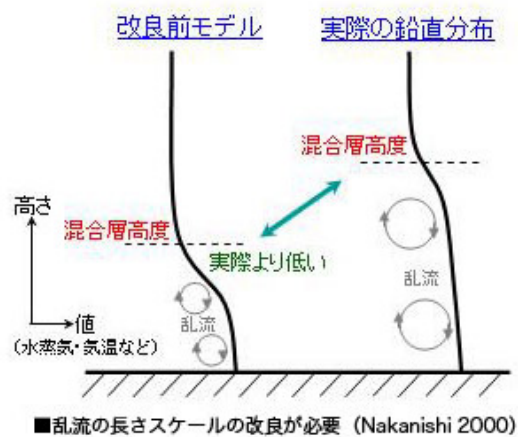
図 6.2.5-1 SYNFOS の計算領域

JWAによるMM5の改良① 乱流モデル

Eta Mellor-Yamada乱流モデルの改良

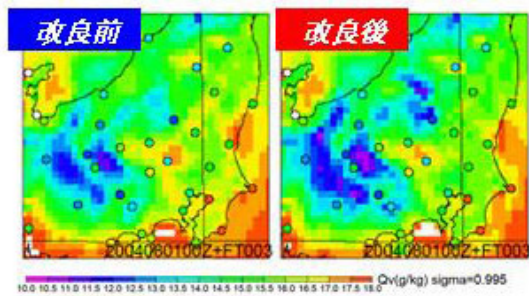
「乱流の長さスケール」に関する問題が従来より指摘されている
 日中の混合層高度が低い。

ANEMOSと同様の計算手法へ改良



改良前後の比較

水蒸気混合比



- ・背景色はモデル出力。
- ・○は気象官署での実測値
- ・色が背景と同化しているほど精度が良い

図 6.2.5-2 乱流モデルの改良の概念図

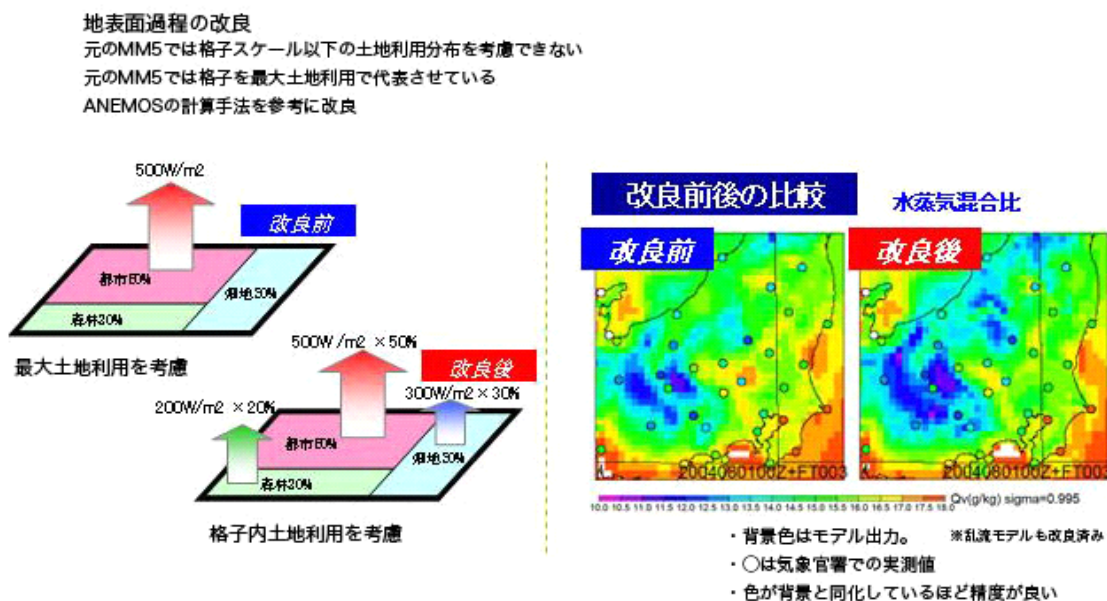


図 6.2.5-3 地表面過程の改良の概念図

(2) 予測誤差の評価

① 誤差評価の方法

SYNFOS によって計算された風の予測データと、この風を外力として WAM によって計算された波浪の予測データについて、対象船舶で観測された気象データ、および航路周辺の海岸部における実測データと比較し、誤差の統計値を算出する。これを、現行の MSM と WAM による予測の誤差と比較することにより、SYNFOS を用いた予測の評価を行う。

a) 比較対象とする実測データ

- ・対象船舶で観測された気象データ
対象船舶において、航行中に観測された風速のデータと比較した。
- ・航路周辺の海岸部において観測された気象海象データ

波浪は、有義波高と有義波周期を、国土交通省港湾局が運営するナウファスの観測データと比較した。また、風は、風速を、気象庁が運営するアメダスの観測データと比較した。比較対象地点を図 6.2.5-4 に示す。

ナウファスの観測地点は、水深 50m 程度の海岸部にある。目的は航路上の予測精度を把握することにあるため、比較対象とする観測所は、海底地形が比較的単純で水深による波浪の変形が比較的小さいと考えられる地点を主として選定した。また、風については、波浪の比較対象地点に比較的近く、海岸部に位置し、できるだけ周囲の地形の影響が少ない

と考えられる地点を選定した。

b) 誤差評価の指標

対象船舶における観測値は海域ごと（航路ごと）に、また海岸部の観測地点における観測値は対象地点ごとに、初期時刻からの経過時間（予測時間）ごとの予測値と実測値を集計し、下記のとおり予測誤差に関する統計解析を行った。

・予測値と実測値の相関解析

予測値と実測値との対応を散布図に表し、相関係数（R）、及び回帰直線の傾きを算出した。

相関係数は予測値と実測値との間に直線的な関係があるかどうかを示す指標で、-1 から 1 までの間の値をとる。1 に近ければ相関が高いことを示し、0 に近ければ相関が無いことを示す。相関係数が 0.7 以上であれば、統計的に見て予測値と実測値との相関は高いと言え、0.9 以上であれば、散布図上のプロットも一本の直線の近傍によくまとまっているように見える。

回帰直線は原点を通るものとして傾きを求めた。回帰式の傾きが 1 より小さければ、予測は実測よりも小さく、1 より大きければ予測は実測よりも大きい傾向があることを示す。従って、回帰直線の傾きは 1 に近い方が望ましい。

・平均誤差率（BIAS）

BIAS(バイアス)は、予測値と実測値の差

(ずれ)を実測値で除した平均値(平均誤差率)である。この値が正であれば、全体として実測値より大きく予測する傾向があることを示し、逆に負であれば実測値よりも小さく予測する傾向があることを示す。したがって、BIASは0に近いほど望ましいが、誤差が大きくても実測値より大きく予測されるものと小さく予測されるものが均衡していれば、誤差が相殺されてBIASは0に近い値となることに注意する必要がある。

$$BIAS = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left(\frac{F_i - A_i}{A_i} \right)$$

ここで、

n : 予測発表総数(個)

Fi : 予測値、 Ai : 実測値

・二乗平均平方根誤差率(RMSE)

予測値と実測値の差(ずれ)の二乗平均平方根を算出した。BIASが誤差の正負の傾向(実測値の対して大きめに予測される傾向があるのか、その逆の傾向があるのか)を示すのに対し、RMSEは誤差の大きさ(絶対値)を示すものである。この値は0に近いほど、予測値と実測値の差(ずれ)が小さい、すなわち精度が良いことを示す。

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left(\frac{F_i - A_i}{A_i} \right)^2}$$

② 誤差の評価

a) 観測地点のデータとの比較

・波高

波高は海岸部の観測地点のデータと比較した。

予測時間による誤差の違いを見るため、7～9時間、10～12時間、13～15時間の、2つの計算法による波高の予測値をそれぞれ実測値と比較し、誤差の指標を算出した。2つのモデルで大きな、系統的な差異は見られないが、北海道航路方面は現行のMSMの風を使用した方が、予測精度が比較的良好である。一方、宇部航路方面は、新しいSYNFOSを使用した予測が現行予測をやや上回る例も多い。

・周期

2つの計算法による周期の予測値をそれぞれ実測値と比較し、前節の波高と同様に解析した。

波高と同様、2つのモデルで大きな、系統的

差異は見られないが、十勝と苫小牧の第2期と3期は、SYNFOSの方が相関係数は大きく、RMSEは小さくなっており、予測精度が良好である。

・風速

対象船舶および航路周辺の海岸部にある観測施設において、観測されたデータと比較した。

b) 対象船舶において観測されたデータとの比較

北海道航路について、2つの計算法による風速の予測値を、船舶において観測された実測値とそれぞれ比較した。誤差の集計は予測時間(7～9時間、10～12時間、13～15時間)ごとに行い、海域は北海道航路全体をひとまとめにして行った。SYNFOSの相関係数は、概ね0.60～0.77で、MSMの0.70～0.81と比べてやや低い。誤差の大きさを示すRMSEは、SYNFOSが50～70%で、MSMの45～65%と比べて全般にやや大きい、その差は小さい。

SYNFOSの回帰直線の傾きは、0.74～0.80で、予測値が実測値に対して20%程度小さい傾向を示す。この傾向は、MSMも同様である。BIASも-5%程度で、実測値に対して小さい傾向を示す。MSMは-10%程度で、SYNFOSの方がやや良好な数字となっている。

c) 航路周辺の海岸部において観測されたデータとの比較

2つの計算法による風速の予測値をそれぞれ実測値と比較し、前々節の波高と同様に解析した。

東北地方から関東にかけては現行のMSMの風速の方がSYNFOSより精度が良好である。潮岬と清水は、MSMでは実測より大きな風速が予測される傾向があるが、SYNFOSでは実測値に比較的近い風速が予測されている。そのため、RMSEやBIASはSYNFOSの方が小さくなっているが、相関係数は小さく、予測精度が良いとは必ずしも言えない。

最後に、風と波浪の予測誤差についてMSMで予測した結果の評価値を図6.2.5-5及び図6.2.5-6とSYNFOSとMSMで初期時刻の10時間から12時間後までの予測値についての比較を図6.2.5-7及び図6.2.5-8に図示する。

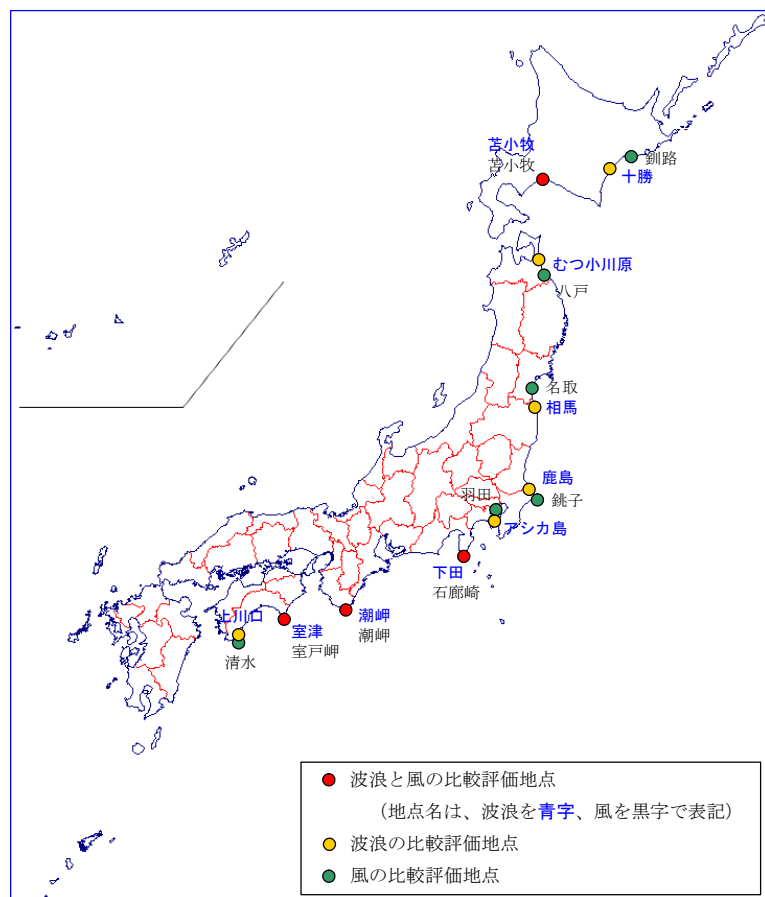


図 6.2.5-4 観測地点

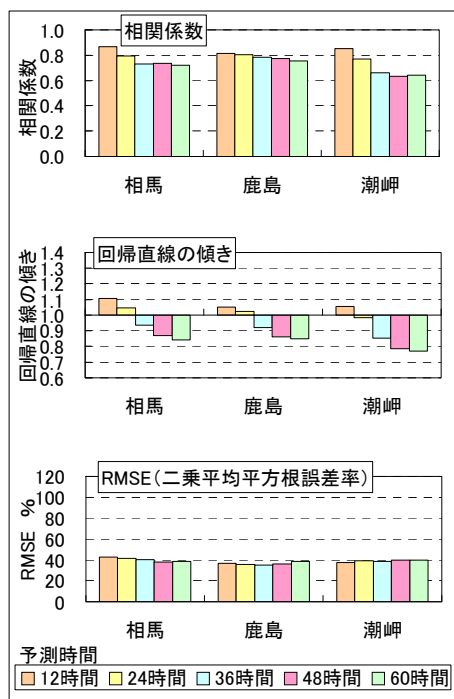


図 6.2.5-5 波高予測値

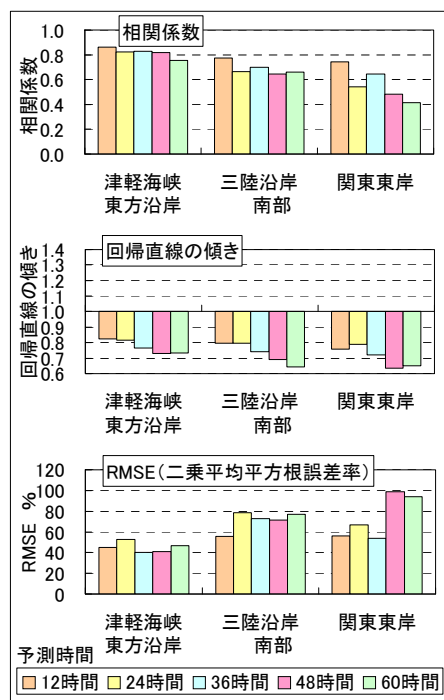


図 6.2.5-6 風速(船上)予測値

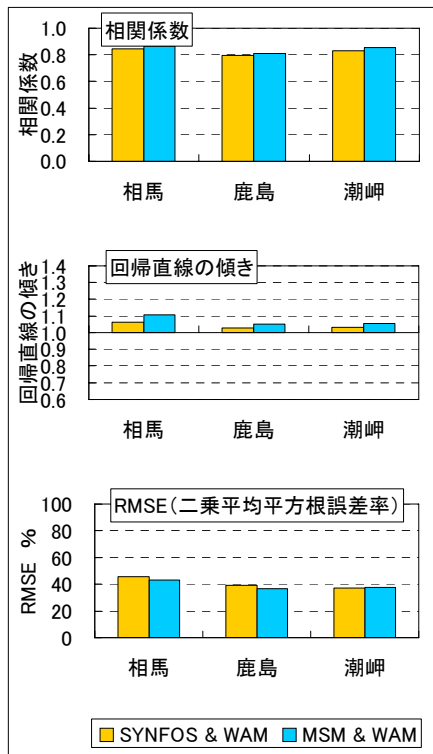


図 6.2.5-7 波高 (SYNFOS と MSM との比較)
10 時間から 12 時間後

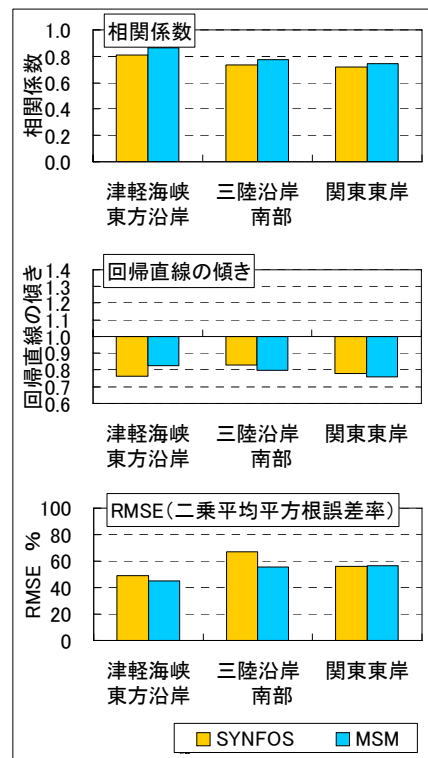


図 6.2.5-8 風 (船上)SYNFOS と MSM との比較
10 時間から 12 時間後

(3) 今後の課題

航海計画への適用を考慮した場合、気象・海象の予測モデルは、以下の要件を満足する必要があると考えられる。

- ① 予測精度が高いこと
- ② 予測モデルの適用時間が、長いこと（内航船の一般的な航海期間である 2 日程度の航海時間をカバーすること）
- ③ 予測の航海時間間隔が短いこと（内航船の航海当直の実態から言って、4 時間以内であれば 1 時間程度となることが望ましい）

SYNFOS の予測精度は、MSM と比較して、概ね同等と考えられる。しかしながら、更新間隔が 3 時間の予測モデルでは、MSM は 18 時間後、SYNFOS は初期時刻の 27 時間後までの予測が可能であることと、図 6.2.5-7 及び図 6.2.5-8 に示されるように回帰直線の傾きは SYNFOS の方が 1.0 に近い予測が実測に対して“過大”又は“過小”となる癖が少ない。これらのことから、航海計画の立案には SYNFOS を用いるのが適当と考えられる。いずれにしても、SYNFOS の精度向上を図ることと、内航船の航海時間に対応した予測期

間まで延長することなどが将来の課題と考えられる。

また、今後この予測結果等を用いて航海計画の評価を行い、更新データ間隔を含め予測情報の適用可能性と今後の開発課題について検討することとしたい。

6.3 風・波による外力測定

6.3.1 風による影響の推定

(1) 風抵抗の表現と推定手法

船舶が風から受ける力は、図 6.3.1-1 に示す座標系で、前後力 X_A 、横力 Y_A 、回頭モーメント N_A 、横傾斜モーメント K_A の 4 つの成分で表わされる。

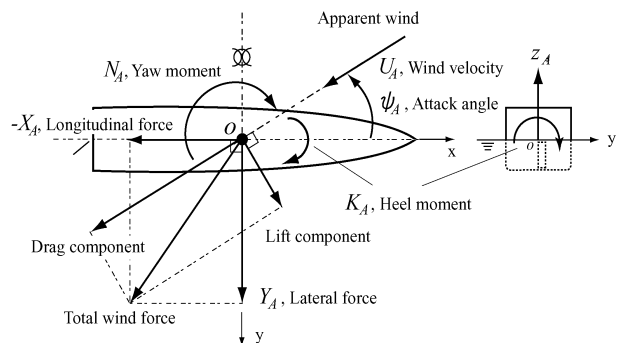


図 6.3.1-1 座標系および風抵抗等の表現

風速 U_A 、風向角 ψ_A での前後・横風圧力係数 C_X 、 C_Y 及び回頭・横傾斜モーメント係数 C_N 、 C_K は次式のように無次元化して定義される。

$$\begin{aligned} C_X &= X_A / (q_A A_F) \\ C_Y &= Y_A / (q_A A_L) \\ C_N &= N_A / (q_A A_L L_{OA}) \\ C_K &= K_A / (q_A A_L^2 / L_{OA}) \\ q_A &= \rho_A U_A^2 / 2 \end{aligned}$$

ただし、 ρ_A は空気密度、 L_{OA} は船舶の全長、 A_F は水面上の正面投影面積、 A_L は側面投影面積である。各係数 C_X 、 C_Y 、 C_N 、 C_K は風洞試験により求められるが、風洞試験を行わない場合は、藤原による 8 種類の船体外観パラメータを用いた推定式で求めることができる。船体外観パラメータの定義は図 6.3.1-2 および表 6.3.1-1 に示す。

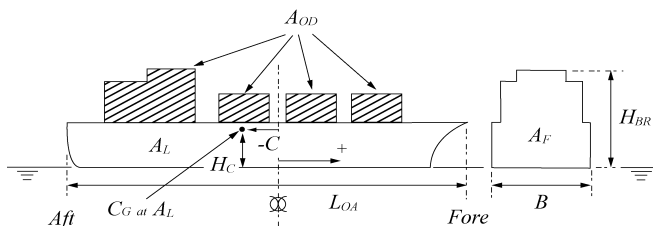


図 6.3.1-2 船舶要目諸記号の定義

表 6.3.1-1 風圧力係数推定に用いる
船体パラメータの定義

Length overall	L_{OA}
Lateral projected area (includes A_{OD})	A_L
Lateral projected area of superstructure etc. on the deck	A_{OD}
Distance from midship section to center of lateral projected area (Front side (+))	C
Height to center of lateral projected area	H_C
Breadth	B
Frontal projected area	A_F
Height of top of superstructure(bridge)	H_{BR}

航行している船舶はその水面下の部分が前記のように海水から摩擦抵抗と剩余抵抗を受けるが、船の水面上の部分は空気から抵抗を受ける。船の受ける抵抗はまわりの流体の密度に比例するが空気の密度 ρ_A は海水の密度の約 1/800 程度なので、

無風状態であれば通常は風抵抗（空気抵抗、風圧力とも言う）はほとんど無視できる。しかしながら、強風の中では風抵抗を無視することはできず、特に自動車運搬船(PCC)、大型クルーザーや大型コンテナ船、或いは空船時の貨物船などのように水面下に比べて水面上の部分が大きくなる船では風抵抗を無視できない場合が多い。操船に対する風の影響も大きくなり操舵のためのエネルギーも無視できなくなる。

また向風成分 X_A による直接の抵抗増加のほかに、横風による横方向の力 Y_A (回頭モーメント N_A を含む) と釣りあうために当て舵を取って斜航（斜めの姿勢で航行すること）することになることから船の水面下部分についても海水からの抵抗が増加することになる。後方から風を受ける状態でもこの斜航の影響のため抵抗増加となる場合があり得る。

平水中抵抗に比べて風抵抗がどの程度の量になるかについて、後述する波による抵抗増加も併せ、風力階級をパラメータにして試算した例³⁾を以下の図 6.3.1-3 に例示する。

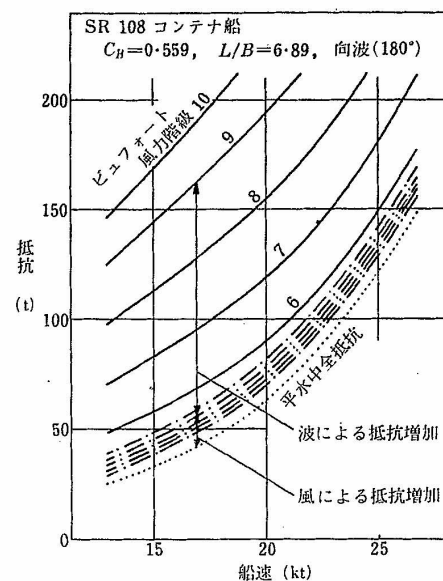


図 6.3.1-3 風と波による抵抗増加の例
(コンテナ船、 $L_{pp}=175m$)

(2) 風の影響の評価

セメント船および RORO 船に関して、風洞実験を行ったので、その実験結果について藤原⁴⁾の推定法による推定値と比較する。

実験状態は次のとおりである。図 6.3.1-4 に示すように変動風水洞の計測洞上流端から 6m の地点に船の風向角を変化させるターンテーブル（直

径 1.8m) を設置し、その中心で床面内に 6 分力計 (図中の Load cell) を設置した。さらに風洞模型の船体中心を 6 分力計に固定する。図 6.3.1-5 に模型の設置状態を示す。風洞模型と 6 分力計の設置点以外は床面と非接触であり、模型底面と床面との間で空気が流れないように床面側を凸形状、船体底面側を逆凹形状としている。

6 分力計からは歪みアンプにケーブルで接続し、歪みアンプからパーソナルコンピュータ (PC) にデータを転送する。PC 上でアナログデータからデジタルデータに変換し、所定のサンプリング周期で記録する。歪みアンプ上でフィルターにより 30Hz 以上のノイズを除去する。

風圧力係数を求める際の代表風速は、図 6.3.1-4 中右側の計測洞入り口、高さ約 1.8m、風洞幅中心の地点に設置された熱線風速計で計測する。風向角 ψ は船体全周 (-180 から $+180$ deg.) に渡って 10 度間隔で変化させる。

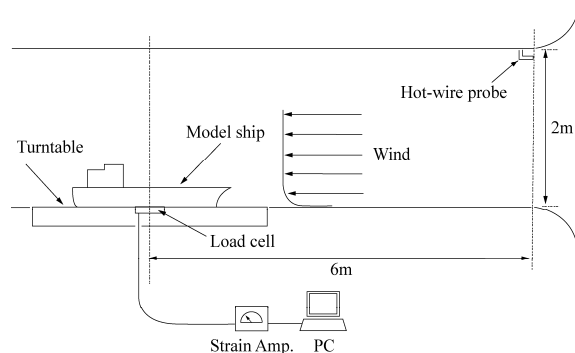


図 6.3.1-4 実験状態図

表 6.3.1-2 セメント船の船体パラメータ

状態	記号	実船	模型	単位
Full	L_{OA}	159.7	1.400	m
	L_{PP}	152.5	1.337	m
	B	24.2	0.212	m
	A_F	365.9	0.028	m ²
	A_L	1163.2	0.089	m ²
	A_{OD}	458.1	0.035	m ²
	C	-13.3	-0.116	m
	H_C	5.2	0.045	m
	H_{BR}	18.2	0.160	m
Ballast	$Trim$	0.0	0.000	m
	A_F	470.5	0.036	m ²
	A_L	1814.0	0.139	m ²
	C	-6.1	-0.053	m
	H_C	8.9	0.078	m
	H_{BR}	21.7	0.190	m

- a) セメント船の風洞実験と推定法による推定
セメント船の 1/114 縮尺模型を使用して実験を

行った。実船と模型船の主要目を表 6.3.1-2 に示す。軽荷状態での模型による最大風洞断面閉塞率 (模型側面投影面積と風洞断面の比) は 2.32% であり、風圧力係数に顕著な影響を与えない程度である (通常 5%未満)。

全ての実験は 50Hz のサンプリング周期で 10 秒間計測し、得られたデータの平均値を求める。さらに模型は左右舷対称であることから、最終的な結果では 2 計測値の平均値を示す。

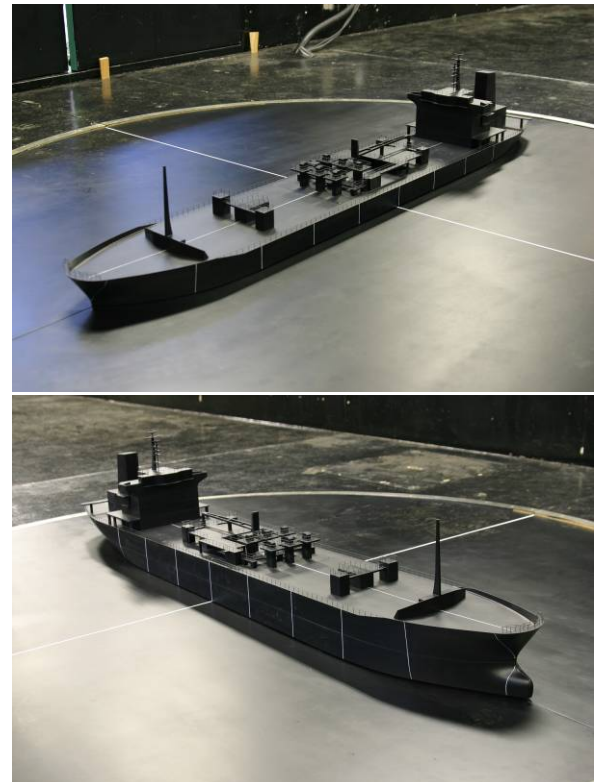


図 6.3.1-5 模型設置状態 (上; 満載、下; 軽荷)

図 6.3.1-6 に船体固定点での鉛直風速分布を示す (過去の収録データ、風速約 25[m/s])。高さ H での風速 U' を代表風速 U の比で示している。船体周辺では風洞床面から高さ約 10cm にわたって境界層が存在する。今回の実験においては粗面板等による境界層の修正は行っていない。また、実験値に対して境界層影響の補正を特段行わず実験結果を整理した。

図 6.3.1-7 に風速を変化させた場合の前後力係数 C_x を示す。風向角は正面風 ($\psi=0$ [deg]) の状態である。風速の上昇に伴い、 C_x に変化がなくなりほぼ一定になれば乱流域に入ったとみなせるが、風速 20m/s 以上で C_x がほぼ一定値となっており、乱流域になっていることがわかる (船長を基準としたレイノルズ数は 10^5 オーダ)。今回の実験では 25[m/s] を代表風速として実験を行った。

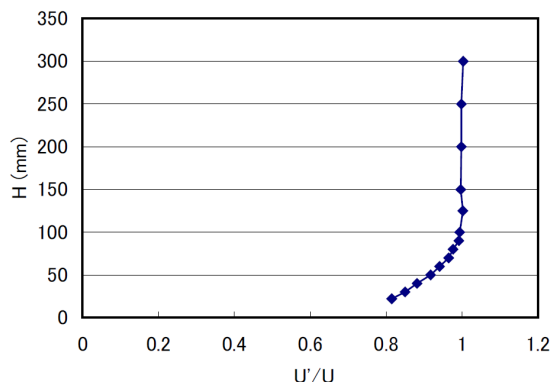


図 6.3.1-6 実験状態の鉛直風速分布

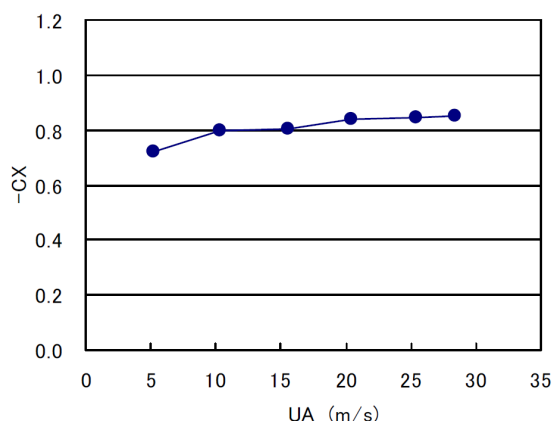


図 6.3.1-7 風速を変化させた場合の前後力係数 (軽貨状態、 $\psi=0$ [deg])

満載状態 (Full) 及び軽荷状態 (Ballast) の風圧力係数の計測結果を図 6.3.1-8 に示す。

各図の縦軸に前後力係数 C_X 、横力係数 C_Y 、回頭モーメント係数 C_N 、傾斜モーメント係数 C_K を示す。横軸は風向角 ψ である。風圧力係数を求める際の投影面積には満載時、軽荷時のそれぞれの値を使用している。

今回得られた実験結果と風圧力推定法により計算された推定値との比較を行い、推定精度の確認を行った。

図 6.3.1-9 に満載状態を、図 6.3.1-10 に軽荷状態の結果を示す。丸印は実験値、三角印は推定値である。

満載状態では、 C_N の風向角 ψ が 20deg. から 60deg. の付近と C_K に関して若干推定値と実験値との間で差が見られるが、他の状態では概ね両者は一致している。軽荷状態では精度の良い推定結果が得られている。

満載状態では主船体に対して相対的にブリッジの影響が大きくなる。 C_N の差についてはブリッジの回頭モーメントに及ぼす影響をやや過小評価していると言える。

風圧力推定法の C_K については C_Y の推定値に傾斜モーメントレバーを乗じることにより計算している。満載時 C_Y の推定精度に問題がないことから、満載状態での傾斜モーメントレバーの推定に大きな誤差が生じていることがわかる。

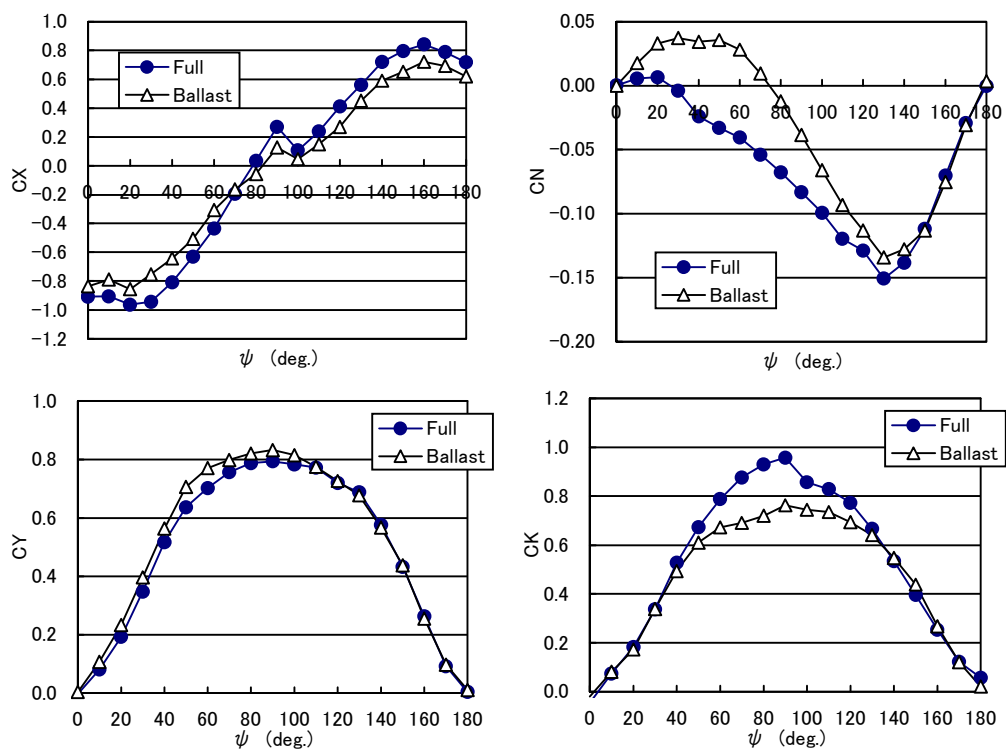


図 6.3.1-8 セメント船の風圧力係数 (満載・軽荷)

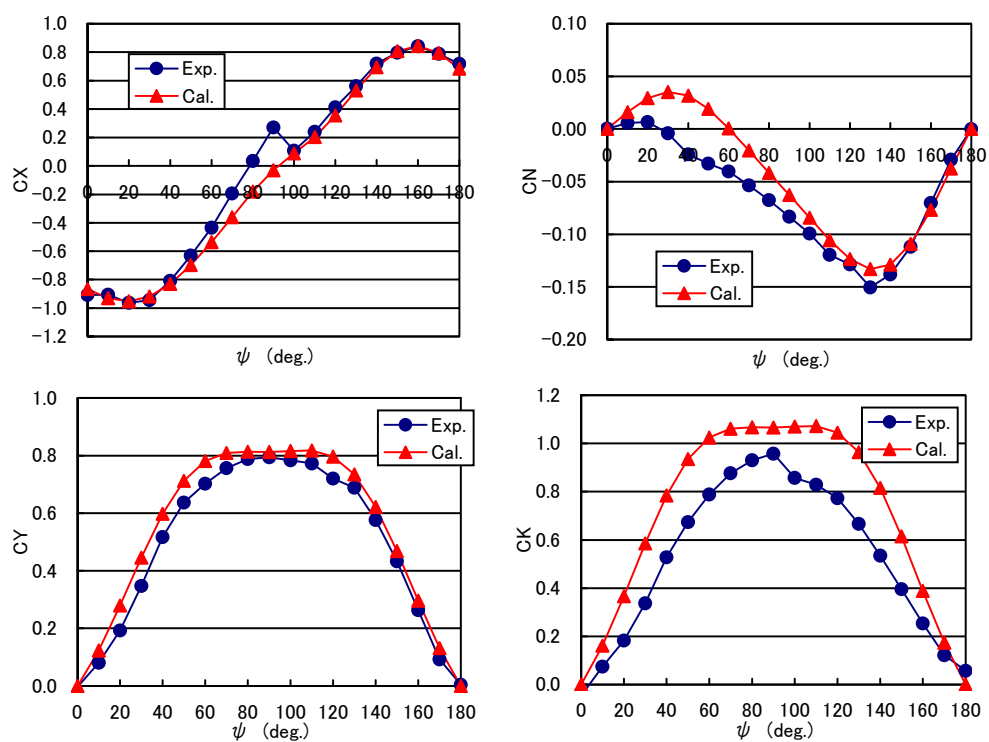


図 6.3.1-9 風圧力係数の推定結果と実験結果の比較 (セメント船、満載状態)

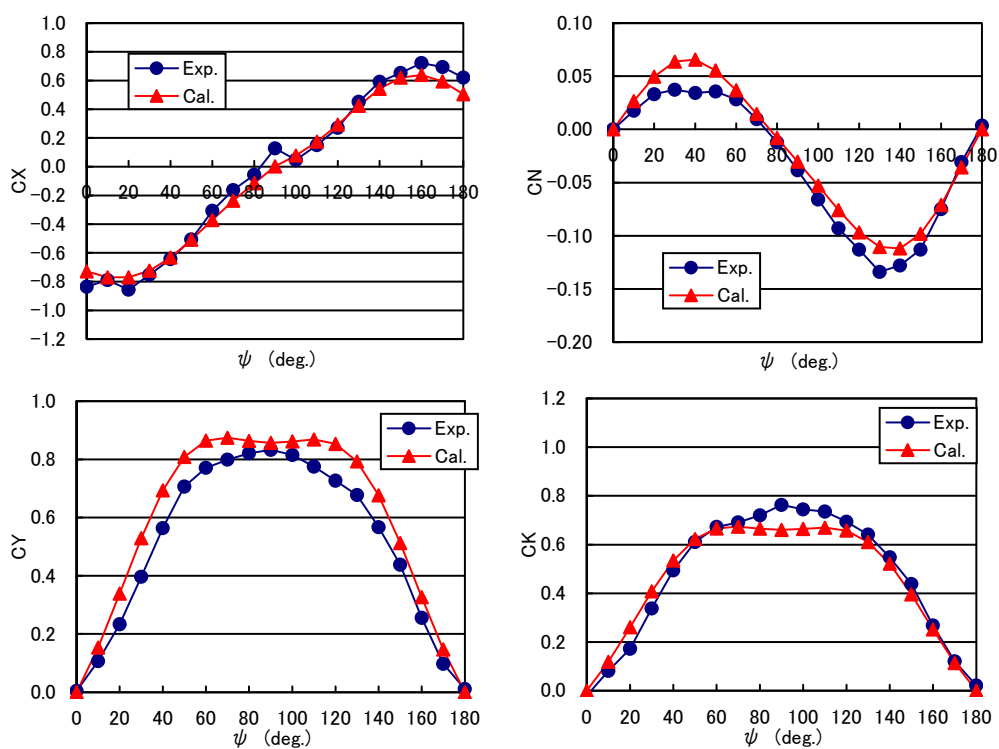


図 6.3.1-10 風圧力係数の推定結果と実験結果の比較 (セメント船、軽荷状態)

b) RORO 船風洞実験と推定法による推定

RORO 船の 1/115 縮尺模型を製作し実験を行った。風洞模型は満載喫水線から上部を製作し、コンテナは着脱可能とした。本船の上部構造物は、右舷側船尾に煙突があり左舷側船尾には車両乗り入れランプが設置されていて左右舷で非対称である。RORO 船の主要目を一般配置図より測定し、表 6.3.1-3 のように設定した。

模型による最大風洞断面閉塞率（模型側面投影面積と風洞断面の比）は約 2.8% であり、風圧力係数に顕著な影響を与えないと考えられる（通常 5% 未満）。

表 6.3.1-3 RORO 船の主要目

記号	実船	模型	単位
L_{OA}	161.15	1.40	m
B	24.0	0.209	m
A_F	509.5	0.0385	m ²
A_L	2191.4	0.1654	m ²

風洞模型の試験状態は以下の 3 状態である。模型設置状態を図 6.3.1-11 に示す。

- ①コンテナ有：コンテナ 2 段を積載した状態
- ②コンテナ無：コンテナを積載していない状態
- ③クレーン囲み：クレーン部分を板で囲み立方体の構造物とした状態

全ての実験は 50Hz のサンプリング周期で約 15 秒間計測し、得られたデータの平均値を求める。各点での計測は 2 度行い、それらの平均値を最終結果として得る。

今回の実験においては粗面板等による境界層の修正は行っていない。また、実験値に対して境界層影響の補正を特段行わず実験結果を整理した。

図 6.3.1-12 に風速を変化させた場合の前後力係数 C_X を示す。風向角は正面風 ($\psi=0[\text{deg}]$) の状態である。風速 20m/s 以上で乱流域に入り C_X がほぼ一定値となることがわかる（船長を基準としたレイノルズ数は 10^5 オーダ）。今回の実験では 25[m/s] を代表風速として実験を行った。

各状態における風圧力係数の計測結果を図 6.3.1-13 に示す。各図の縦軸に前後力係数 C_X 、横力係数 C_Y 、回頭モーメント係数 C_N 、傾斜モーメント係数 C_K を示す。横軸は風向角 ψ である。

今回得られた実験結果（コンテナ有の状態）と風圧力推定法により計算された推定値との比較を行い、推定精度の確認を行った。図 6.3.1-14 にその結果を示す。また、推定値の計算に用いた船体パラメータの値を表 6.3.1-4 に示す。

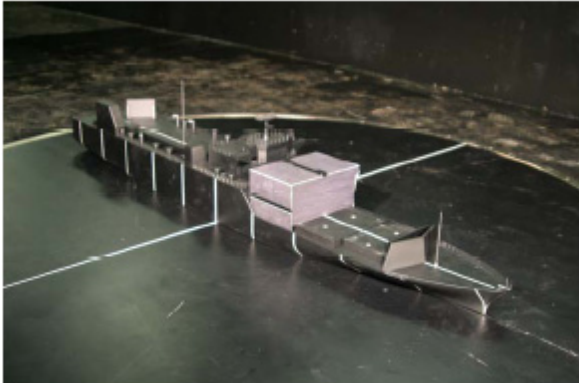
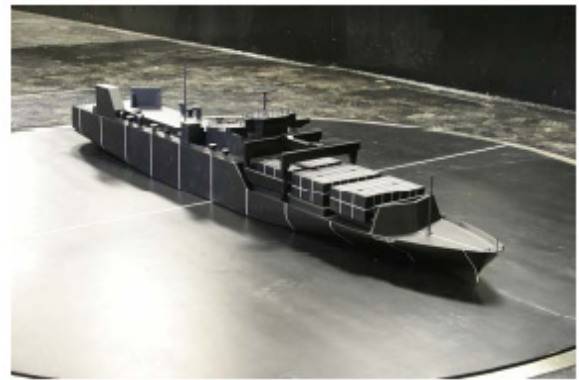


図 6.3.1-11 模型設置状態（上；コンテナ有、中；コンテナ無、下；クレーン囲み）

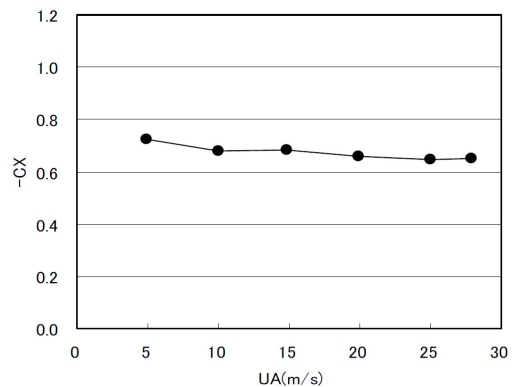


図 6.3.1-12 風速を変化させた場合の前後力係数（コンテナ有、 $\psi=0$ [deg]）

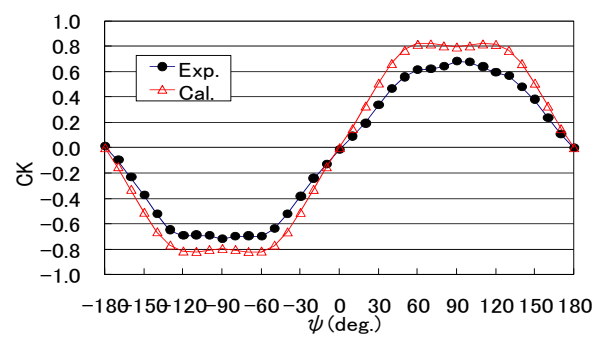
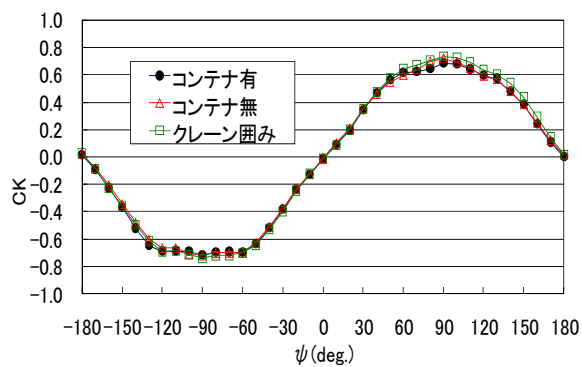
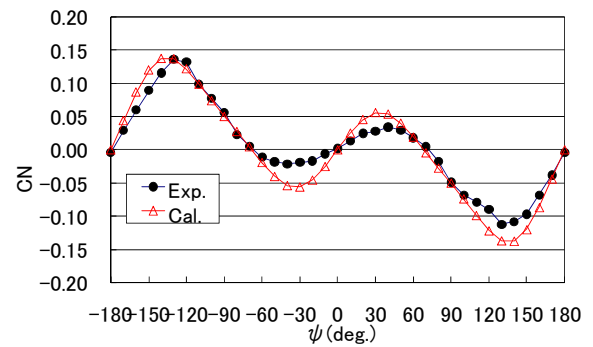
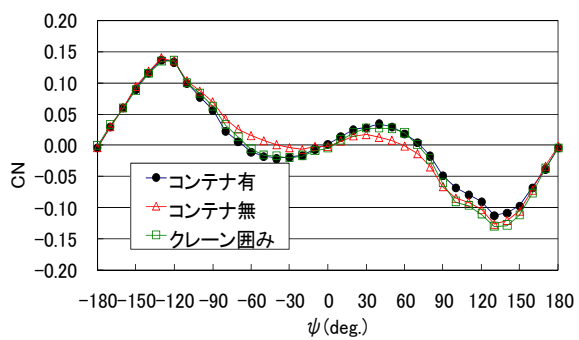
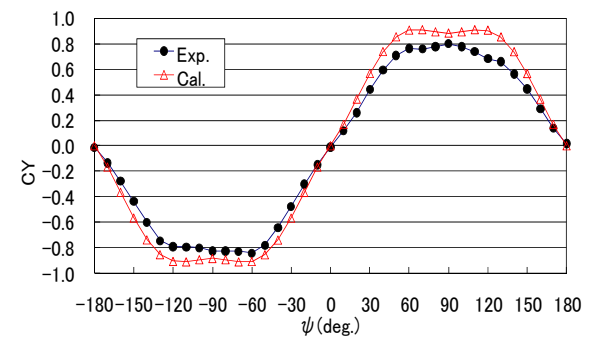
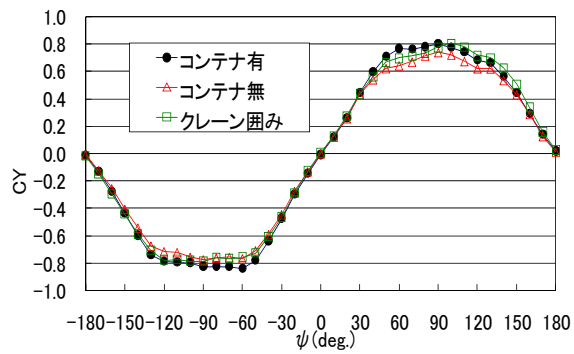
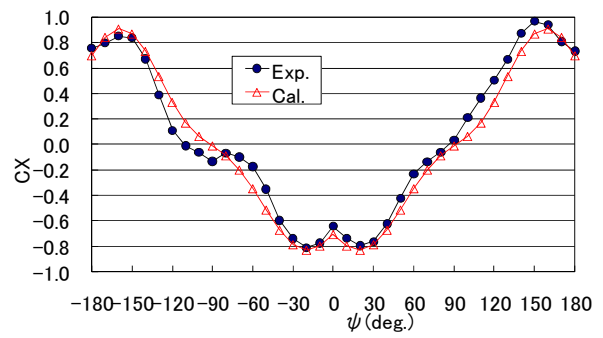
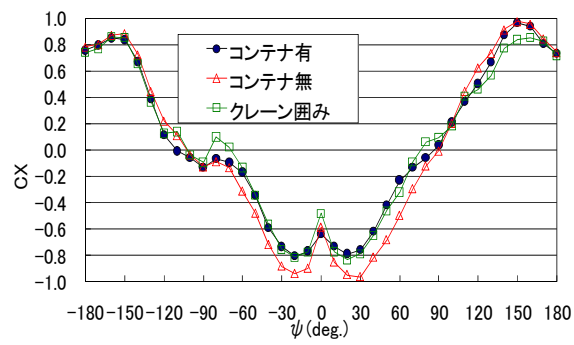


図 6.3.1-13 RORO 船の風圧力係数
(コンテナ有・無、クレーンを囲んだ状態)

図 6.3.1-14 風圧力係数の推定結果と実験結果の比較
(コンテナ有)

表 6.3.1-4 RORO 船の船体パラメータ

記号	値	単位
L_{OA}	161.15	m
B	24.0	m
A_F	509.5	m ²
A_L	2191.4	m ²
A_{OD}	1285.7	m ²
C	-9.90	m
H_C	7.68	m
H_{BR}	21.8	m
$Trim$	0.0	m

(3) まとめ

セメント船（満載・空船）および RORO 船について上のように風洞実験と推定式による推定を行い、両者を比較した。

どのケースにおいても、推定式と実験値は概ね合っており、推定式が十分な精度をもっていることが検証できた。

なお、この評価には境界層の影響は含まれておらず、実船での性能推定に適用するためにはこの影響を考慮する必要がある。地表面からの高さとの関係は、平均的には下記のような、べき法則に従うことが知られており、これを用いることにより境界層における風速を高度 10m の風速に換算することができる。

$$U_z = U_{10} \times \left(\frac{z}{10} \right)^{1/n}$$

z : 高度[m]

U_z : 高度 z での風速

n : べき法則のべき指数

べき指数 n の値は表 6.3.1-5 に示すように地表の粗度状態によって変わり、海岸地方は $n=7 \sim 10$ とされている。

表 6.3.1-5 風速の境界層分布のべき指数

地表状態	n
平坦な地形の草原	7~10
海岸地方	7~10
田園	4~6
市街地	2~4

(多くの観測地の平均)

海上のべき指数 n は海岸地方とほぼ同じか、これよりやや大きいと考えられる。 $n=10$ として計算すると、海上 10m の風速は 30m より約 10% 小さく、 $n=7$ とすると約 15% 小くなる。

図 6.3.1-15 に、風洞実験での鉛直方向風速分布と、べき法則による風速分布を比較した。なお、風洞実験における高さは実船スケールに変換してある（縮尺 1/115）。これによると、高さ 15m を超えると風速分布の乖離が激しく、船体構造物の高さがこれより高い船舶では調整の必要があることがわかる。

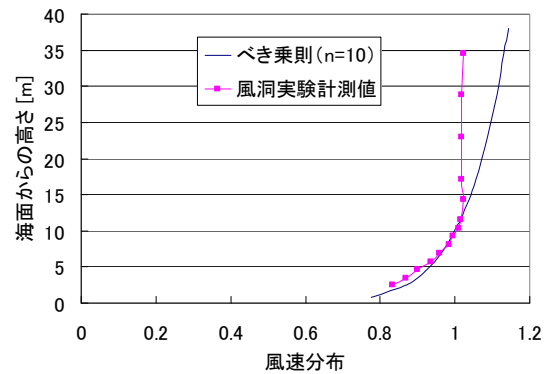


図 6.3.1-15 鉛直風速分布
(高さ 10m の風速を 1 とする)

6.3.2 波浪による抵抗増加の推定

(1) 波浪中抵抗増加の表現

船が海洋波の中を航走するときは、波のない平水中を航走するときの抵抗に上乗せする形で抵抗増加 R_{AW} が発生する。この海洋波による抵抗増加 R_{AW} は、船が縦揺れや上下動などの運動をして波を造るための造波抵抗による成分 R_{AW0} と、船体が海洋波を反射散乱することにより生ずる反射波抵抗による成分 R_{AW1} からなるものである。

$$R_{AW} = R_{AW0} + R_{AW1}$$

(2) 波浪中抵抗増加の性質

一般に船体運動による造波抵抗成分 R_{AW0} は、船の縦揺れ/上下揺れの同調点付近、換言すると船と海洋波との相対運動が激しくなる波長範囲 ($\lambda/L=1 \sim 1.2$ 程度) で大きくなり、船が波とともに穏やかに揺れるような長波長域 ($\lambda/L > 2$ 程度) では小さくなる。一方船首からの海洋波の反射による反射波抵抗成分 R_{AW1} は短波長域 ($\lambda/L < 0.5$ 程度) 範囲で顕著になる。このような短波長域では海洋波の反射は大きくなるが、船を揺らせようとする波強制力が小さいため船体運動は小さくなる。

海洋波による抵抗増加 R_{AW} はいずれの成分も波高の 2 乗に比例し、波高が 2 倍になると抵抗増加は 4 倍になるという性質のものであり、波高が高いほど大きな影響を受ける。従って無次元化は波高 h の 2 乗または波振幅 $\zeta_A (= h/2)$ の 2 乗で割って表現する。即ち抵抗増加係数 K_{AW} は

$$K_{AW} = \frac{R_{AW}}{\rho g h^2 B^2 / L}$$

のように表すのが一般的である。ただし L は船の垂線間長さで L_{PP} と表すこともある。 B は船幅である。

(3) 波浪中抵抗増加の推定手法

RORO 船、セメント船における波浪中の抵抗増加の推定は ESSPAS⁵⁾ によって行った。これは、船舶の主要目をもとに、ストリップ法を解くことによって波浪中での船体加速度や、抵抗増加係数を推定⁶⁾するものである。

面については 3 次スプライン補間によって推定した。船速は 13[knot] ($F_n=0.173$) と仮定し計算を行った。

表 6.3.2-1 波浪中抵抗増加推定に用いる

船体パラメータの定義	l_{pp}	喫水	d	幅	B	深さ	D	排水量	W	方形係数	C_b	柱形係数	C_p	縦柱形係数	C_v	船尾張出長さ	D_{st}	無次元慣動半径 x	K_{xx}/B	無次元環動半径 y	K_{yy}/l_{pp}	無次元環動半径 z	K_{zz}/l_{pp}	重心の前後位置	$C.G.$	重心高さ	$KG-d$	メタセンタ高さ	GM	横揺固有周期	$T\phi$	水線長	L_w	断面喫水	d_s	断面半幅	$B_{s/2}$	断面面積	A_s
------------	----------	----	-----	---	-----	----	-----	-----	-----	------	-------	------	-------	-------	-------	--------	----------	-------------	------------	-------------	-----------------	-------------	-----------------	---------	--------	------	--------	---------	------	--------	---------	-----	-------	------	-------	------	-----------	------	-------

21 断面
または
23 断面
とする

波浪中抵抗増加推定に用いる船体パラメータの定義を表 6.3.2-1 に示す。また、計算に用いた横揺れ減衰力は楕円形係数 0.2、非楕円形係数 0 とし、波浪中抵抗増加における反射波の計算式には藤井・高橋法⁷⁾を用いる。

不規則波中抵抗増加係数を推定する場合、波向・波周期を一定の分布に分散させ、それぞれの波の状態で計算した規則波中抵抗増加係数を加重平均して求めることとなる。

ESSPAS では、規則波中抵抗増加係数を求める波向・波長を複数指定することができ、その中の 1 ケースでも、出合い周波数 ω_e が 0 に近づくとも規則波中抵抗増加計算で計算が破綻し、ひいては不規則波中抵抗増加計算において全体的に計算不能となる。

すなわち、追い波および斜め追い波中において

$$\lambda / L = 2\pi F n^2 \cos^2 \chi$$

(χ は出合い角) の条件を満たすと $\omega_e=0$ となり、これに近い船速・波向・波長の条件下では 2 次元理論による上下揺れの付加質量が対数的に発散するため計算不能になると考えられる。そのため、波長を設定する際に、この条件を避けるよう値を選択する必要がある。

(4) セメント船の波浪中抵抗増加の推定

セメント船では、貨物・燃料満載および、貨物軽荷、燃料満載での状態を仮定し、波浪中抵抗増加の推定を行った。貨物・燃料満載のときの船体パラメータを表 6.3.2-2、表 6.3.2-3 に、波浪応答の推定値を図 6.3.2-1 に示す。軽貨かつ燃料満載のときの船体パラメータを表 6.3.2-4、表 6.3.2-5 に、波浪応答の推定値を図 6.3.2-2 に示す。セメント船の断面面積は、船社より 17 断面の資料が提供され、資料に記載のない 4 断

No.	断面喷水	断面半幅	断面面積 [m ²]
1 (AP)	1.80	3.41	6.58
2	9.00	7.17	48.80
3	9.00	9.96	101.18
4	9.00	11.39	143.92
5	9.00	11.92	177.66
6	9.00	12.10	200.92
7	9.00	12.10	211.65
8※	9.00	12.10	215.76
9	9.00	12.10	216.77
10※	9.00	12.10	216.77
11	9.00	12.10	216.77
12※	9.00	12.10	216.77
13	9.00	12.10	216.77
14※	9.00	12.10	216.77
15	9.00	12.10	216.77
16	9.00	12.10	216.51
17	9.00	12.00	212.35
18	9.00	11.56	196.63
19	9.00	10.01	160.17
20	9.00	6.74	102.37
21 (FP)	8.60	2.50	28.30

表 6.3.2-3 船体の断面バウメータ (回)

記号	値	単位
L_{pp}	152.50	m
d	9.00	m
B	24.20	m
D	13.20	m
W	27644.40	ton
Cb	0.81	-
Cp	0.82	-
Cv	0.90	-
Dst	3.50	m
$K_{xv}B$	0.33	-
$K_{yvl}l_{pp}$	0.24	-
$K_{zvl}l_{pp}$	0.24	-
G.G.	4.03	m
$KG-d$	-0.78	m
GM	1.88	m
$T\phi$	11.59	sec
Lw	156.00	m

表 6.3.2-2 船体バラスト
(セメント船、貨物・燃料満載)

※：3 次スプライン補間による推定値

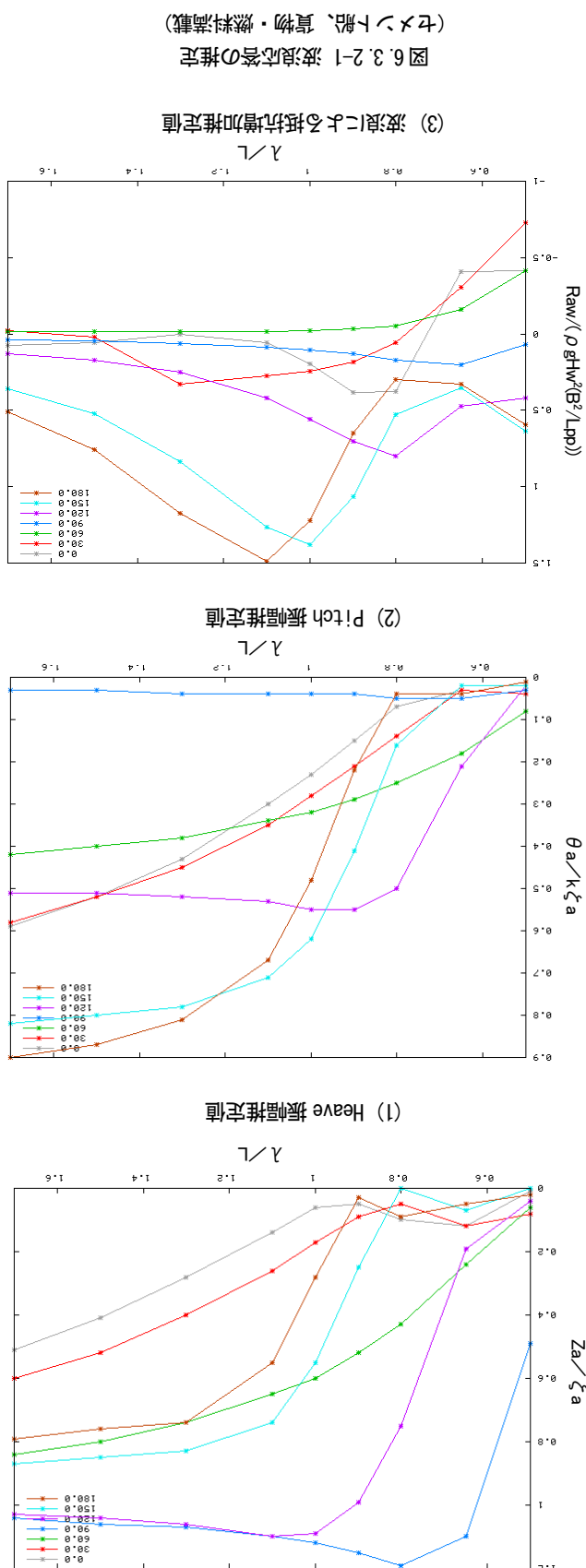


図 6.3.2-1 波浪応答の推定
(セメント船・貨物・燃料満載)

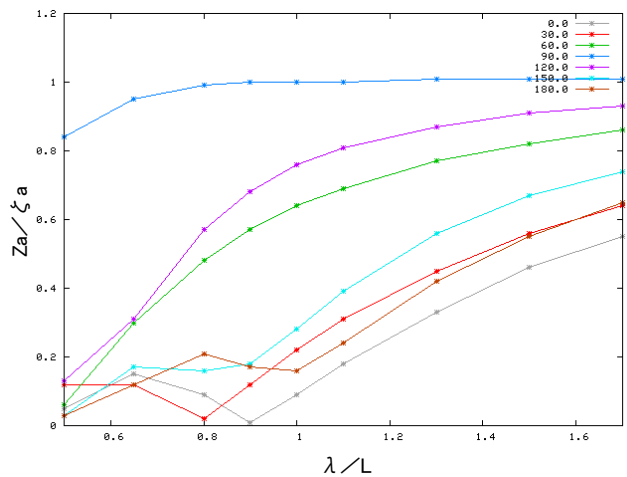
表 6.3.2-4 船体パラメータ
(セメント船、軽貨、燃料満載)

記号	値	単位
L_{pp}	152.50	m
d	4.69	m
B	24.20	m
D	13.20	m
W	13412.90	ton
C_b	0.76	-
C_p	0.76	-
C_v	0.91	-
D_{st}	3.50	m
K_{xx}/B	0.38	-
K_{yy}/L_{pp}	0.24	-
K_{zz}/L_{pp}	0.24	-
C.G.	2.43	m
$KG-d$	0.51	m
GM	6.61	m
$T\phi$	7.08	sec
L_w	156.00	m

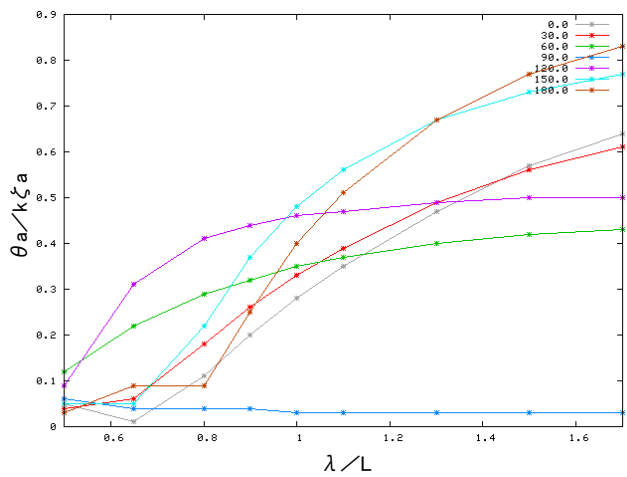
表 6.3.2-5 船体の断面パラメータ (同)

No.	断面喫水 [m]	断面半幅 [m]	断面面積 [m ²]
1 (AP)	0.00	0.00	0.00
2	4.69	2.38	15.70
3	4.69	6.16	43.02
4	4.69	8.91	69.41
5	4.69	10.80	92.47
6	4.69	11.89	108.84
7	4.69	12.10	116.88
8*	4.69	12.10	117.06
9	4.69	12.10	117.24
10*	4.69	12.10	114.91
11	4.69	12.10	112.47
12*	4.69	12.10	110.12
13	4.69	12.10	107.70
14*	4.69	12.10	105.14
15	4.69	12.10	102.94
16	4.69	12.10	100.29
17	4.69	11.96	94.86
18	4.69	11.18	82.50
19	4.69	9.12	61.75
20	4.69	5.97	35.45
21 (FP)	4.30	2.35	9.54

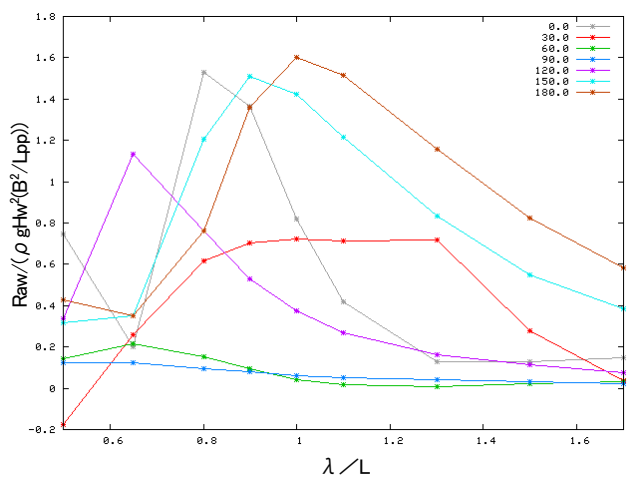
※: 3 次スプライン補間による推定値



(1) Heave 振幅推定値



(2) Pitch 振幅推定値



(3) 波浪による抵抗増加推定値

図 6.3.2-2 波浪応答の推定
(セメント船、軽貨、燃料満載)

(5) セメント船の水槽実験

海上技術安全研究所三鷹第2試験水槽において、セメント船の 1/25.4 模型を用いて水槽実験を行った。載貨状態として満載状態とバラスト状態の2通りとし、船速 13[knot]の状態を模擬し向い波の状態で波長・波高を変えて合計 11 通りの波浪条件にて、抵抗値、プロペラ回転数、スラスト、トルク、Heave、Pitch の計測を行った。船体モデルの主要目を表 6.3.2-6 に、模型船の設置状態を図 6.3.2-3 に示す。Heave 振幅、Pitch 振幅、抵抗増加の推定値と測定値の比較を、満載状態について図 6.3.2-4 に、バラスト状態について図 6.3.2-5 に示す。ただし、バラスト状態の船の姿勢について、実験時の設定は空船での実航海における姿勢をもとにしており、推定での設定とは若干異なる。同一の設定における推定、および結果の解析については、現在行われているところである。

表 6.3.2-6 セメント船の主要目

船体パラメータ		実船	模型	単位
L_{pp}		152.5	6.0000	m
L_{dwl}		156.0	6.1377	m
B		24.2	0.9521	m
D		12.0	0.4721	m
d		9.0	0.3541	m
キール半径		0.0	0.0000	m
ビルジサークル		1.5	0.0590	m
船底勾配		0.0	0.0000	m
W.L.、B.L.間隔		1.0	0.0393	m
横截面間隔		15.25	0.6000	m
プロペラ直径		4.5	0.1770	m
満載	喫水 aft	9.0	0.3541	m
	喫水 mid	9.0	0.3541	m
	喫水 fore	9.0	0.3541	m
	トリム	0.0	0.0000	m
	排水量 (裸殻)	26996.2	1.6442	m ³
空船	喫水 aft	6.1	0.2400	m
	喫水 mid	5.0	0.1967	m
	喫水 fore	3.9	0.1534	m
	トリム	2.2	0.0866	m
	排水量 (裸殻)	14044.4	0.8554	m ³

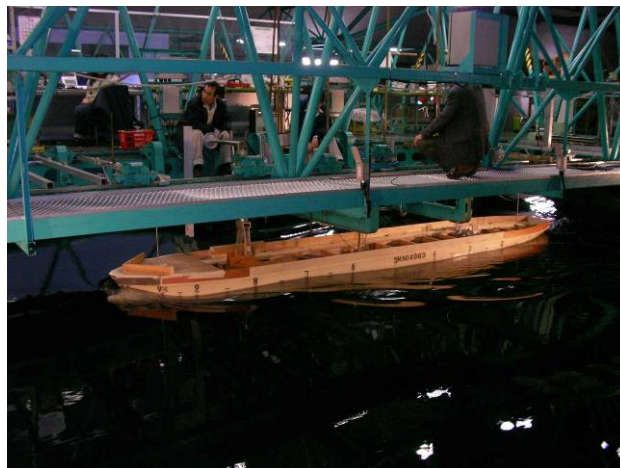
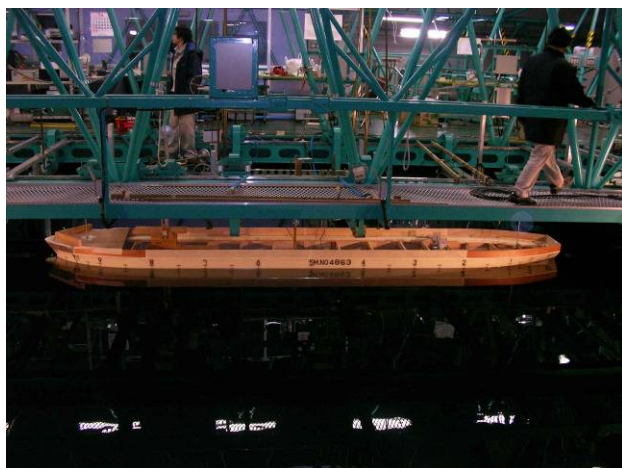


図 6.3.2-3 模型船の設置状態 (左: 静止状態 右: 実験中)

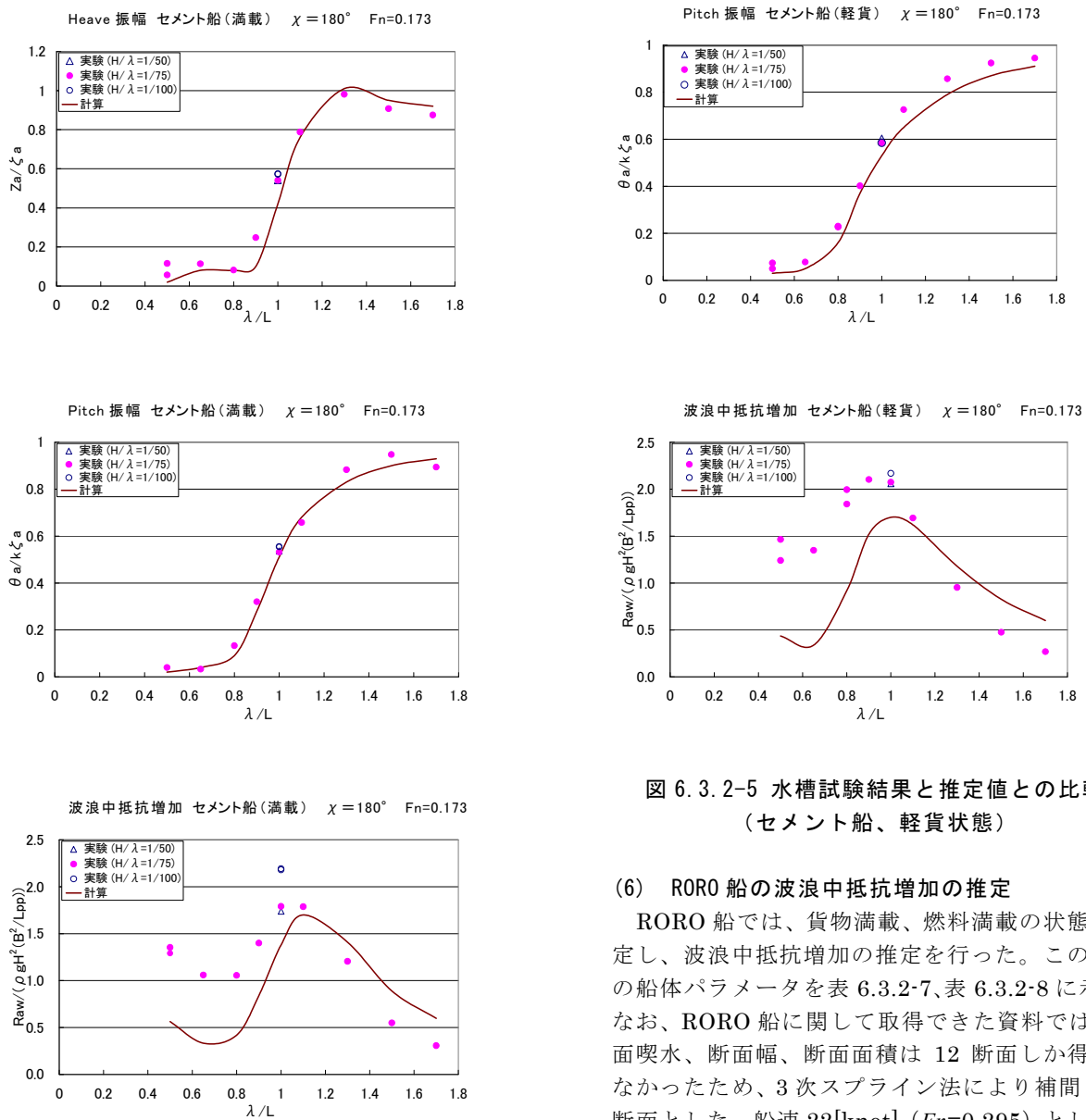


図 6.3.2-5 水槽試験結果と推定値との比較
(セメント船、軽貨状態)

(6) RORO 船の波浪中抵抗増加の推定

RORO 船では、貨物満載、燃料満載の状態を仮定し、波浪中抵抗増加の推定を行った。このときの船体パラメータを表 6.3.2-7、表 6.3.2-8 に示す。なお、RORO 船に関して取得できた資料では、断面喫水、断面幅、断面面積は 12 断面しか得られなかったため、3 次スプライン法により補間し 21 断面とした。船速 22[knot] ($Fn=0.295$) として計算された推定値を図 6.3.2-6 に示す。

なお、RORO 船の場合、喫水は載貨状態によって大きく変化しないため、満載状態の 1 ケースについてのみ推定計算および水槽実験を行っている。

図 6.3.2-4 水槽試験結果と推定値との比較
(セメント船、満載状態)

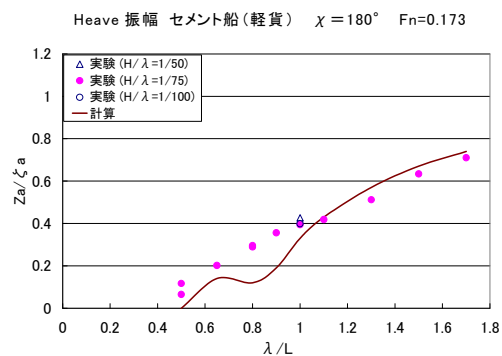


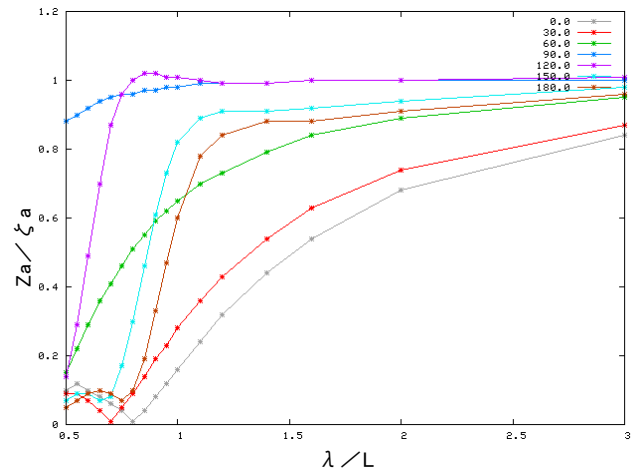
表 6.3.2-7 船体パラメータ
(RORO 船、貨物・燃料満載)

記号	値	単位
L_{pp}	150.00	m
d	6.42	m
B	24.00	m
D	12.00	m
W	11305	ton
C_b	0.48	-
C_p	0.54	-
C_v	0.69	-
D_{st}	6.56	m
K_{xx}/B	0.38	-
K_{yy}/L_{pp}	0.24	-
K_{zz}/L_{pp}	0.24	-
C.G.	-6.88	m
$KG-d$	3.25	m
GM	2.61	m
$T\phi$	11.43	sec
L_w	156.56	m

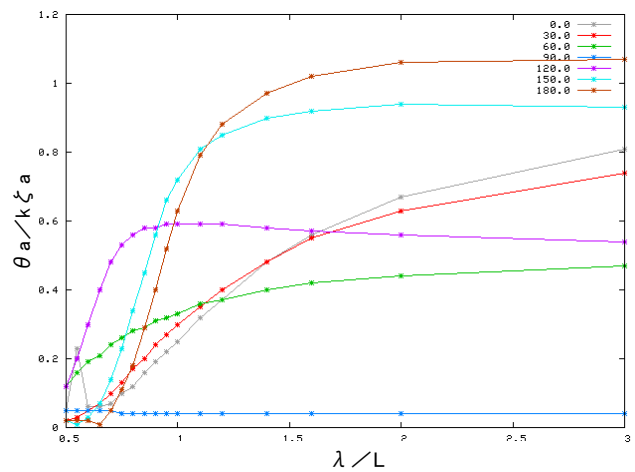
表 6.3.2-8 船体の断面パラメータ (同)

No.	断面喫水 [m]	断面半幅 [m]	断面面積 [m ²]
1 (AP)	0	0.00	0.00
2*	6.27	5.18	15.42
3	6.42	8.51	30.25
4*	6.42	10.10	50.91
5	6.42	10.76	74.50
6*	6.42	11.44	97.07
7	6.42	11.97	115.82
8*	6.42	12.00	128.65
9	6.42	12.00	135.35
10	6.42	12.00	136.58
11	6.42	12.00	133.98
12*	6.42	11.95	126.14
13	6.42	11.56	112.73
14*	6.42	10.54	94.47
15	6.42	8.95	74.30
16*	6.42	6.96	55.31
17	6.42	4.88	39.04
18*	6.42	3.04	26.37
19	6.42	1.74	17.11
20*	6.42	1.15	10.60
21 (FP)	6.07	0.97	5.56

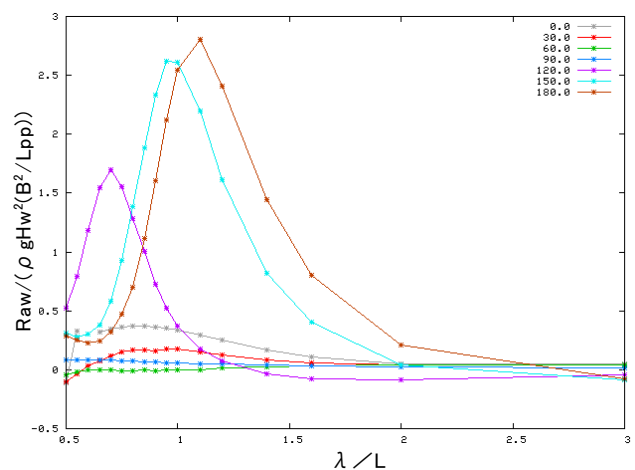
※：3 次スプライン補間による推定値



(1) Heave 振幅推定値



(2) Pitch 振幅推定値



(3) 波浪による抵抗増加推定値

図 6.3.2-6 波浪応答の推定
(RORO 船、貨物・燃料満載)

(7) RORO 船の水槽実験

海上技術安全研究所三鷹第2試験水槽において、RORO 船の 1/25.4 模型を用いて水槽実験を行った。載貨状態として満載状態とし、船速 22[knot] の状態を模擬し向い波の状態で波長・波高を変えて合計 11 通りの波浪条件にて、抵抗値、プロペラ回転数、スラスト、トルク、Heave、Pitch の計測を行った。船体モデルの主要目を表 6.3.2-9 に示す。また、Heave 振幅、Pitch 振幅、抵抗増加の推定値と測定値の比較を、図 6.3.2-7 に示す。

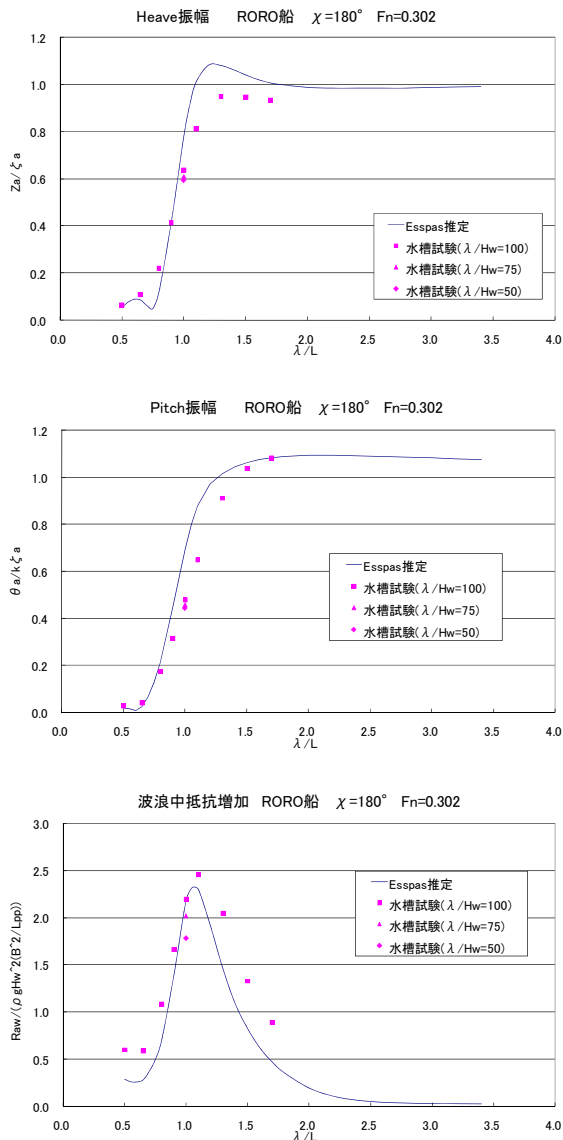


図 6.3.2-7 水槽試験結果と推定値との比較 (RORO 船)

表 6.3.2-9 セメント船の主要目

船体パラメータ	実船	模型	単位
L_{pp}	150.0	5.9000	m
L_{dwl}	143.3	5.6354	m
B	24.0	0.9440	m
D	12.0	0.4720	m
d	6.4	0.2517	m
キール半径	0.99	0.0389	m
ビルジサークル	5.5	0.2163	m
船底勾配	0.6	0.0236	m
W.L、B.L.間隔	1.0	0.0393	m
横截面間隔	15.00	0.5900	m
プロペラ直径	5.6	0.2200	m
喫水 aft	6.4	0.2517	m
喫水 mid	6.4	0.2517	m
喫水 fore	6.4	0.2517	m
トリム	0.0	0.0000	m
排水量 (裸殻)	11028.9	0.6711	m ³

(8) まとめ

セメント船 (満載・空船) および RORO 船について以上のように水槽実験と推定プログラムによる推定を行い、両者を比較した。いずれのケースにおいても、向い波中の Heave、Pitch の船体運動は精度よく推定できているといえる。一方、波浪中抵抗増加はその形状およびピークの値を表現できているものの、短波長側での推定値は実験値に比べおよそ 1/2 の評価をしていること、また長波長側での推定値はセメント船では過大、RORO 船では過小評価となるなど、推定値と実験値の間に乖離が見られる。このため、推定値を船舶運航性能の評価に適用する際には実船試験による調整を行うなど注意が必要である。

6.4 省エネ効果の見通し

ここでは、これまでの研究の結果である気象・海象の推定結果、風と波浪による外力が船速に与える影響の推定結果及び推定手法並びに実船の燃料消費量等のデータ等現在入手又は解析できているデータ等により航海計画を策定し、省エネ効果をシミュレーションすることにより、研究の方向と省エネ効果を見通しておく。なお、詳細な検討は、これから来年度にかけて実施し、20年度実施予定の実証試験により効果の確認を行うこととしている。

6.4.1 船舶性能推定手順

前節までに示した、気象・海象や斜航による外力によって船速に与える影響の推定結果から、船舶の性能を推定することができる。船舶性能推定手順の模式図を図 6.4.1-1 に示す。

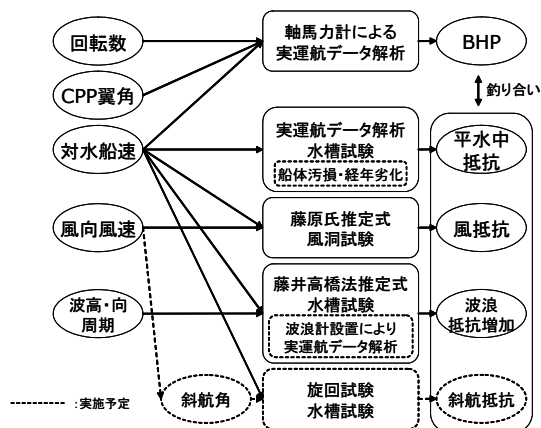


図 6.4.1-1 船舶性能の推定手順

まず、プロペラ回転数と CPP (controllable pitch propeller: 可変ピッチプロペラ) の翼角、対水船速をパラメータとして、プロペラによって船の推力に変換される機関馬力を回帰分析によって定式化する。概ね推力はプロペラ回転数の 3 乗に比例する。また、対水船速の低下は回転トルクを増加させる方向に働くため、回帰式中の対水船速にかかる係数は負となることに注意が必要である。

また、平水中抵抗と 6.3 で述べた風圧力抵抗、波浪中抵抗増加それぞれから導出される馬力損失の和を消費の側から見た機関馬力とし、両者の機関馬力が釣り合う対水船速を反復計算により導出する。なお、図中点線で示される、船体汚損・経年劣化による平水中抵抗の経時的変化、斜航による抵抗増加分は現在解析中であり本報告では考慮していない。

船長からのヒアリングでも示されているように、波と船速との関係が知りたい場合がある。この関係は計算で求めることができる。例示として、波高・波向と船速の関係を、RORO 船ではプロペラ回転数 130[rpm]において図 6.4.1-2 に、新栄丸では 157[rpm]において図 6.4.1-3 にそれぞれ示す。なお、これらの図では作図の簡略化のため、風速 [m/s] は有義波高 [m] の 4 倍、波周期 [sec] は有義波高 [m] の平方根の 4 倍、風向と波向は等しいものと仮定した。また、回転数を変化した場合の船速変化と必要な機関馬力およびその消費先を各船について図 6.4.1-4、図 6.4.1-5 にそれぞれ示す。この計算例では、風向・波向が船首より 60°、風速 9[m/s]、有義波高 2[m]、波周期 6[sec] として推定を行ったものである。

航海計画作成時には、船速推定計算を多数回行う必要があるため、実際には回転数、風向・風速、波向・波高・波周期をパラメータとしてそれぞれ十数個ずつ変化させながら船速と BHP を計算しあらかじめ数値テーブルとしておき、利用時には

内挿(interpolation)して利用している。

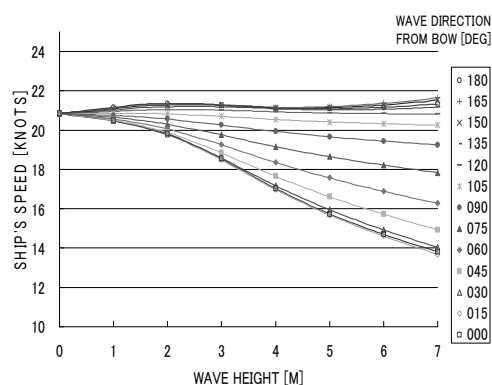


図 6.4.1-2 波浪中船速低下計算例(ひまわり 1)

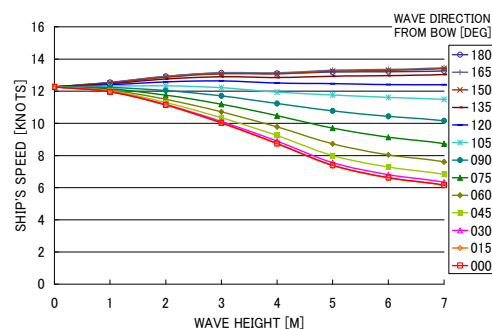


図 6.4.1-3 波浪中船速低下計算例(新栄丸満載)

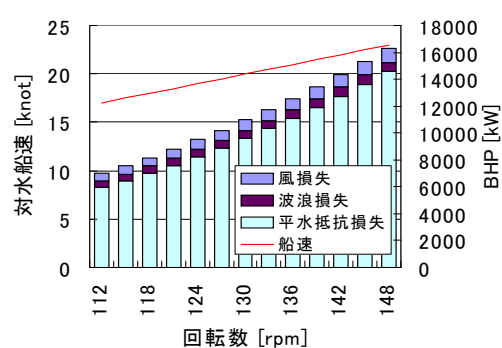


図 6.4.1-4 回転数変化による船速と推進力計算例(RORO 船)

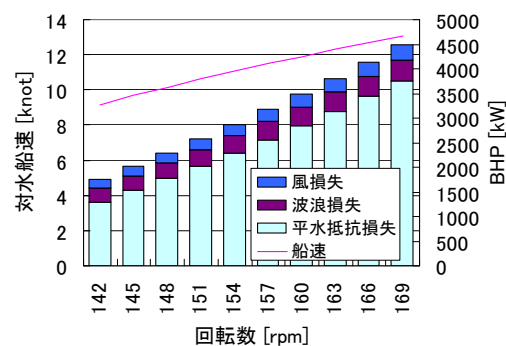


図 6.4.1-5 回転数変化による船速と推進力計算例(セメント船満載時)

6.4.2 航海計画と省エネ効果

既に 6.1 で示したように、内航船の実運航では、最短航路を採用することが多い。ここでは、固定された航路に関し、航海時間一定とした制約の中で、航海計画(船速)を変更することによる省エネ効果について検討する。次に、海流等を利用し航路を変更することによる省エネ効果について検討する。

(1) 航海計画変更による省エネ効果 (RORO 船)

1) 航路・航海時間固定での省エネ効果

ここでは、RORO 船を対象に、固定航路において船速計画を変化させた場合の省エネ効果について考察する。

ある航路について、日本気象協会の推定する風向・風速、波高・波向・波周期に航海中に遭遇すると仮定し、航海途上の対象船に働く外力を実海域性能評価システム(ESSPAS: Estimation System of Ship Performance in Actual Seas)により計算し、燃料消費量を最小にする船速計画について検討⁸⁾⁹⁾する。なお、ここでの推定は、風の推算モデルは MSM を用いている。例として、2006 年 9 月 14 日東京発 16 日苫小牧着の航海を検討対象とした。図 6.4.2-1 は、風速と波高の推算値と、船上で計測した風速値を示している。航海の前半において比較的波が高く、目的地に近づくに従い穏やかになるように変化していることがわかる。

本航海において測定される対水船速と、また気象海象推算と対水船速から推定される主機 BHP 出力(推定 BHP)を図 6.4.2-2 に示す。この航海では、主機出力が前半において抑えられ、後半で遅れを取り戻すような形になっている。なお、この 28 時間における主機関仕事量(推定 BHP の累積、以下同じ)は 161.3[MWh]であった。

同一の航路・気象海象条件下において、燃料消費が最小となるように船速最適化を行い、シミュレーションで求めた速度と推定 BHP の推移を図 6.4.2-3 に示す。BHP 出力が全体的に平均化されており、そのため波が高く風速が大きい前半航海において速度が自然と抑えられ、風波が穏やかな後半において速度が上昇し追いつけるような形になっている。最適化は、Microsoft Excel の最適化ソルバーを用いた。主機関仕事量は 158.6[MWh]であり、実測船速の場合に対する仕事量の削減率は 1.7%であった。

また、同一の航路・気象条件において、船速が一定になるように航行した場合の速度と推定 BHP の推移を図 6.4.2-4 に示す。船速が一定であるため、天候の影響により、主機関出力が比較的大きく増減した。主機関仕事量は 158.9[MWh]であり、実測船速の場合に対し 1.5%少なく、また

最小燃料航海に対し 0.2%多い。

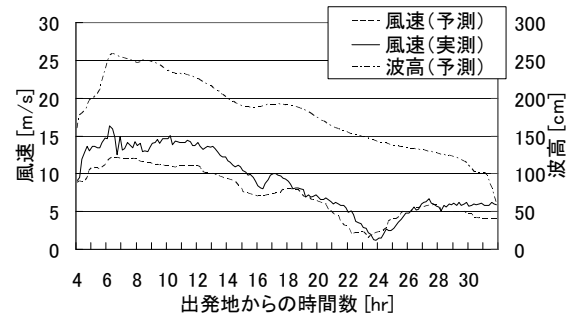


図 6.4.2-1 航海中の風速と波高

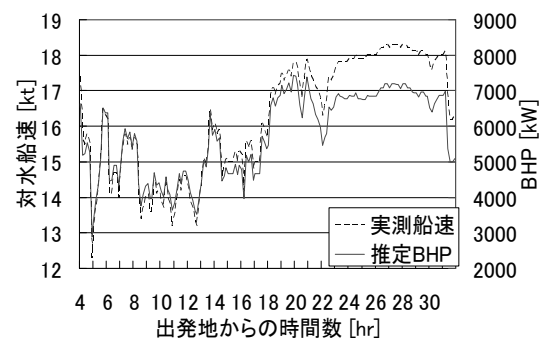


図 6.4.2-2 実測船速における船速と推定 BHP

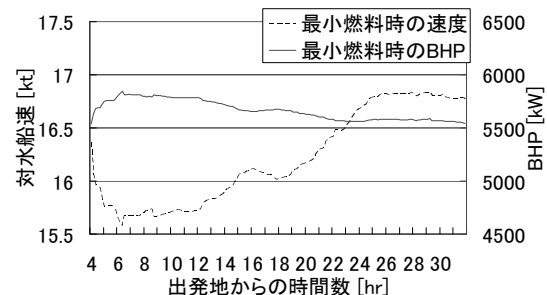


図 6.4.2-3 最小燃料消費時の船速と推定 BHP

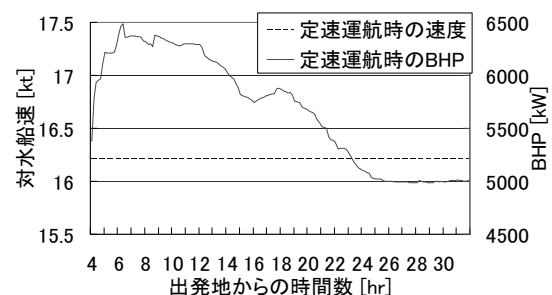


図 6.4.2-4 定速運航における船速と推定 BHP

以上のことより、航路を固定した場合、速力計画を変更し最適化を図っても、一定速度での航海

に比較して燃料削減効果は 1%以下と、あまり多くを期待できないことがわかる。

一方、航海を行う者にとって、到着地に到着予定時刻どおりに到着することは、荷主への輸送サービス確保の点から重要である。定速運航時と船速変動に伴う海上通過地点の通過時刻の遅れ時間を図 6.4.2-5 に示す。この航海では、一定船速の場合に対し、実運航船速では最大 74 分、最小燃料消費の航海計画では最大 20 分の遅れが発生することがわかった。ただし、この遅れ時間の形状は、気象条件の推移により航海ごとに大きく異なる。船舶の運航者にとって、たとえ燃料消費が最小だとしても、航海中途での遅れ時間が発生するのは航海計画として受け入れ難いものであることが想像できる。

燃料消費量と定刻運行のための時間的余裕のトレードオフの関係を的確に把握し、適切な船速計画を選択することは、遅延リスクを解消させることや、運行の遅れを恐れるあまり無駄に船速を増加させることを解消するために重要である。そのためには、精度の高い気象海象予測と、遅延確率と燃料消費量から求められる評価値を最小にする航海計画を確率的最適化の手法によって作成することが必要である。

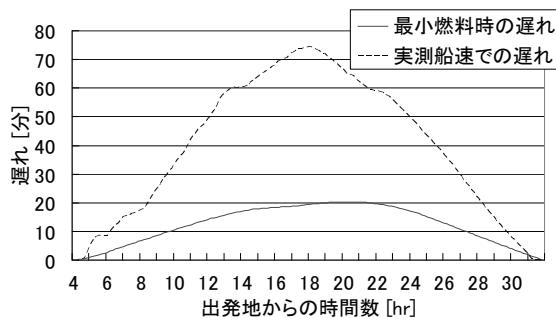


図 6.4.2-5 海上通過地点における通過時刻の遅れの比較

2) 航路を変化させた場合の省エネ効果

一方、航路を変化させる場合、主に海流を利用することにより、燃料削減の効果が大きいことがわかった。6.2.4 に気象予測例を図示したが、海流の流速・方向に大きな地域差があることがわかる。これを利用することで、対水船速を減少させることにより燃料消費の削減を図ることが可能となる。

航海計画の作成のためのアルゴリズムに関しては本紙別掲の小論文「内航船の最小燃料消費航路計算アルゴリズムについて」を参照されたい。例として、2007 年 1 月 31 日釧路発東京着を検討対象とし、航海時間固定の条件化で海洋大において航路最適化のシミュレーションを行ったところ、

実測の航路・航海速力による航海時間 22.65 時間での主機関仕事量（気象海象推算と対水船速から推定される主機 BHP 出力（推定 BHP）の累積、以下同じ）に対する最適航路の主機関仕事量は、5.5%の削減となった。現行航路と最適化による提案航路、およびその当時の海流の様子を図 6.4.2-6 に示す¹⁰⁾¹¹⁾。

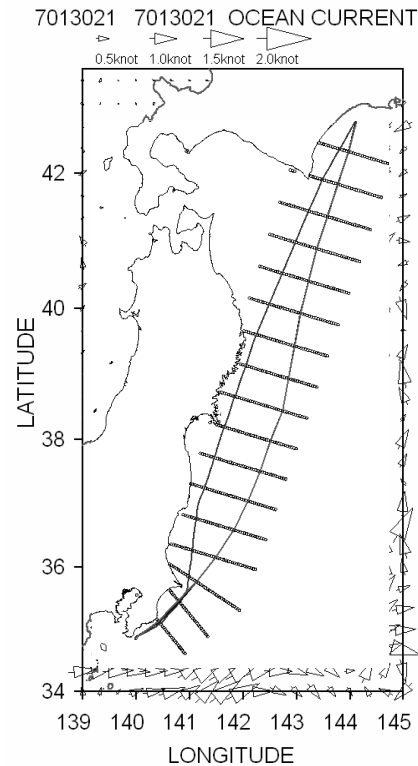


図 6.4.2-6 RORO 船における航路最適化
(釧路東京航路、左：現行航路 右：最適化航路)

(1) 航海計画変更による省エネ効果（セメント船）

1) 航路・航海時間固定での省エネ効果

セメント不定期船での航海計画による最適化について、航路・航海時間を固定とした場合の燃料削減量は、RORO 船と同様大きくなく、例として 2006 年 8 月 19 日宇部発名古屋行き航路における 24 時間での主機関仕事量の削減率は、船速一定に対し最小燃料航海では 0.06%削減されたに過ぎない。

2) 航路を変化させた場合の省エネ効果

一方、海洋大のシミュレーションによって航路を最適化させた場合は 11.1%の主機関仕事量が削減となった。また、当該航路の運航実態を解析してみると、平均約 3 時間の沖待ち時間が存在していることが判明した。この時間を航海時間に組み入れ、海流・風・波の状況に適応した最適航路を採用すると、30%以上の省エネ効果が期待できる。図 6.4.2-7 に航路最適化の計算例と、その時刻で

の海流の様子を示す。また、図 6.4.2-8 に、沖待ち時間を航海時間に組み入れた場合の時間数と、それによる減速効果と航路最適化によって期待される燃料消費削減率を示す。

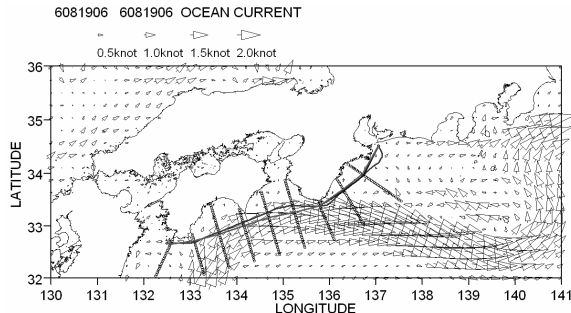


図 6.4.2-7 新栄丸における航路最適化

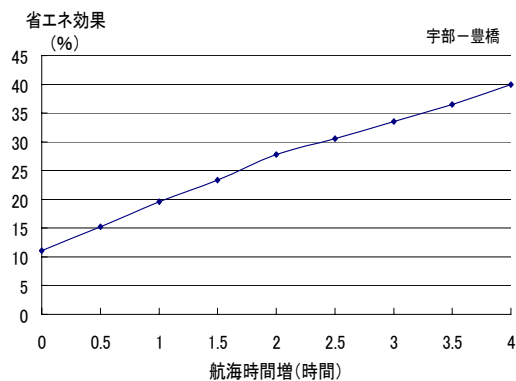


図 6.4.2-8 航海時間の増加と省エネ効果

6.4.3 航海計画立案に関する考察

以上のことから、省エネ運航には、気象・海象に適應する最適航路を選択することが肝要となる。また、運航サービス維持の観点で、遅延が許されないなら、最適航路上を気象・海象の予測値の不確実性を評価し得られる余裕時間を組み入れ遅延することのない航海計画を立案すれば良い。この場合には、出港当初は平均船速より大きな速力を選ぶことになりエネルギー消費量が増加するが目的地に近づくに従って小さくなる、また、気象・海象の推算を利用すれば不確実性はそれほど大きなものではないこと、航路及び航海時間が固定されていればその中で船速計画の増減はエネルギー増加に殆ど寄与しないこと等から、省エネの観点から問題とはならないと考えられる。

ここに不確実性を取り入れた海洋大のシミュレーション結果の一例を示す。気象・海象予測データが更新されるたびに到着時刻の予測誤差の標準偏差 σ_T を計算し、到着予定時刻より $2\sigma_T$ 早く到着できるようにプロペラ回転数を設定する。図 6.4.3-1 に最適航路を示す（宇部～東京航路）。赤

丸が再計算を行った場所である。航海が進むにつれ σ_T は小さくなり、余裕時間を少なくできる。その結果、プロペラ回転数も徐々に落すことができ、定時性を保った燃料節約航海が可能となる（図 6.4.3-2 参照）。定時性を考慮しない場合と比較すると 0.5% 程度の燃料増加をもたらすが、定時性を考慮したこのシミュレーションの 17.5% の節約が可能となった。

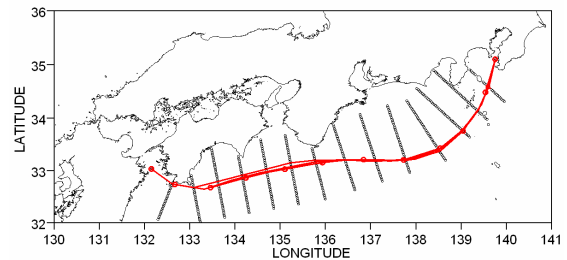


図 6.4.3-1 最適航路

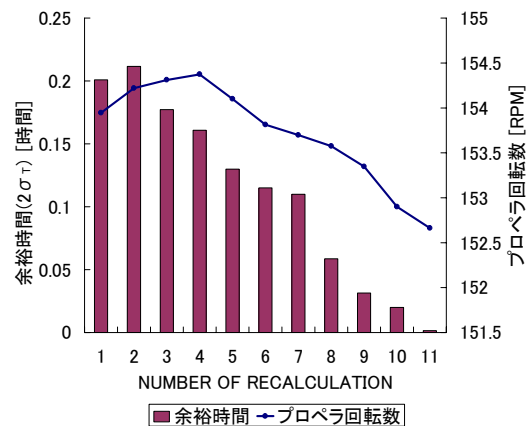


図 6.4.3-2 余裕時間の変化

航海計画の立案は、最適航路の算定と船速計画を個別に扱って良いと考えられる。

7. おわりに

平成 18 年度から研究を進めてきた環境対応型運航支援システムの研究開発について、研究の進め方、各要素技術の開発状況及び省エネの効果の見通しについて紹介した。そして、気象・海象の予測情報に基づいて最適航海を行えば大きな省エネ効果を得ることの見通しを得た。

東京海洋大学では、気象の不確実性を考慮した航海計画アルゴリズムを構築しシミュレーション計算に着手している。海技研では、検討対象船の船速、燃料消費量、軸馬力、風速等の運航データ

の他、波向きを含めた波浪情報についても計測ができるようになってきた。現在、シミュレーション結果及び波浪情報の計測値についてそれぞれ検証作業を進め、次年度の実証試験に備えているところである。

平成 20 年度には、実証試験を予定している。実証試験では、普段の航路を航海した場合と最適航路を選択した場合との燃料消費量の差異、すなわち省エネ効果を示さねばならない。しかし、試験船は、どちらか 1 の航路しか採り得ないので、他の航路を採用した場合の燃料消費量を推定し比較する必要がある。

実証すべき主要な課題は、

- (1) 我々のモデルが、燃料消費量を実用的なレベルで推定できるか
- (2) 我々が提案する航路と航海計画が、15%の燃料消費量低減という所期の環境目標を達成し得るか
- (3) そして、航海計画が、船長にとって安心して採用できるか。つまり、この航海計画を採用しても遅延することが無いかな

となる。

これらの課題を克服し、船舶の省エネに関し運航面から省エネを図ることにより、効率的な物流と物流システムの高度化に貢献することとしたい。

謝辞

本研究は、日本海運㈱、宇部興産海運㈱、東京海洋大学、(財)日本気象協会の協力を得て、新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO) の先導研究「内航船の環境調和型運航計画支援システムの研究開発」の一貫として実施された。特に、NEDO の担当者、日本海運の宮澤常務、宇部興産海運の今澄取締役船舶部長、東京海洋大学の高嶋氏、日本気象協会の窪田氏には本研究において多大な貢献を頂いております。ここに記して感謝申し上げますと共に、アドバイザーの学識経験者の皆様等関係各位に感謝申し上げます。

参考文献

- 1) WAMDI Group, “The WAM Model - A Third Generation Ocean Wave Prediction Model,” J. Phys. Oceanogr. 18, 1775-1810, 1988.

- 2) Komen, G. J., Cavaleri, L., Donelan, M., Hasselmann, K., Hasselmann, S. and P. A. E. M. Janssen, 1994, “Dynamics and Modelling of Ocean Waves”, Cambridge University Press, 532 p.
 - 3) 関西造船協会「造船設計便覧」、海文堂、第 4 版、第 4 刷、pp.429
 - 4) 藤原敏文「強風下における船舶の風圧力推定と運航性能に関する研究」、大阪府立大学博士論文
 - 5) 久米健一他「実海域性能評価と船型要目最適化システム」、海上技術安全研究所第 7 回研究発表会資料、平成 19 年 6 月
 - 6) 一例として、丸尾孟「波浪中の船体抵抗増加に関する研究 (第 1 報)」、造船協会論文集第 101 号、1957、pp.33-39
 - 7) 藤井 斉、高橋 雄「肥大船の波浪中抵抗増加推定法に関する実験的研究」、日本造船学会論文集第 137 号、昭和 50 年 6 月、pp.132
 - 8) 小林充他「気象・海象予測データに基づく省エネ航海計画に関する一考察」、日本船舶海洋工学会講演会論文集第 5W 号、平成 19 年 11 月
 - 9) 加納敏幸「環境対応型航海支援システム」、日本船長協会誌「Captain」第 381 号、平成 19 年 10・11 月号、pp.7-12
 - 10) 高嶋恭子、萩原秀樹他「高精度気象・海象予測に基づく内航船の省エネルギー運航について」、日本航海学会第 117 回講演会予稿集、平成 19 年 10 月
 - 11) 高嶋恭子他「高精度環境予測に基づく内航船の省エネルギー航法」、日本航海学会誌「Navigation」第 167 号、平成 19 年 12 月、pp.12
- その他、本研究に関し以下の参考を参考とした。
- 12) 辻本勝他、内航船用船速計画システムの実船試験とその評価、日本船舶海洋工学会論文集第 4 号、pp.47-54
 - 13) ウェザー・ルーティング研究グループ、ウェザー・ルーティング - 気象情報に基づく最適航法、成山堂書店