海難事故に対する初動対応と
事故再現・解析技術の高度化に関する研究

上野　道雄*，田口　晴邦*，福戸　淳司**，星野　邦弘***，宮崎　英樹*
北川　泰士*，今里　元信****，黒田　貴子*，塚田　吉昭*，牧野　雅彦***
三宅　里奈**，疋田賢次郎**，池本　義範***，宝谷　英貴*，鈴木　良介*，原口　富博*
沢田　博史*

Researches on Advanced Technology for Initial Responses, Reproduction, and Analysis of Marine Accidents using the Actual Sea Model Basin and the Bridge Simulator for Navigation Risk

by

Michio UENO, Harukuni TAGUCHI, Junji FUKUTO, Kunihiro HOSHINO, Hideki MIYAZAKI, Yasushi KITAGAWA, Motonobu IMASATO, Takako KURODA,Yoshiaki TSUKADA, Masahiko MAKINO, Rina MIYAKE, Kenjiro HIKIDA, Yoshinori IKEMOTO, Hidetaka HOUTANI, Ryosuke SUZUKI, Tomihiro HARAGUCHI and Hiroshi SAWADA

Abstract

Marine accidents such as collisions and capsizing of ships still occur at high rates in the world though their reductions have ever been required. Prevention of recurrence of accidents at sea needs advanced technologies for responding initially to accidents at sea, reproducing phenomena, assessing scenarios, and revealing crucial causes of accidents based on analysis of remaining clues. These technologies could provide indispensable information for investigating and analyzing causes of marine accidents, and contribute to prevention of their recurrences. This report is of a research project for development of advanced technologies for initial responses at sites or on ships of accidents at sea and for the use of the Actual Sea Model Basin and the Bridge Simulator for Navigation Risk to reproduce and analyze marine accidents.

＊　流体性能評価系，＊＊ 運航・物流系，＊＊＊ 流体設計系，＊＊＊＊ 海洋利用水中技術系
原稿受付　平成 29 年 5 月 19 日
審 査 日　平成 29 年 7 月 11 日

目　次

1. 緒言 3
2. 初動分析のための流体力特性統合推定システムの構築 4
2.1 流体力特性統合推定システムの設計思想および概要 5
2.2 船型主要目の自動推定機能 5
2.3 抵抗・推進性能特性の推定 6
2.4 操縦流体力特性及び舵特性の推定 7
2.5 船舶水面上構造物への風圧力特性と波漂流力特性の推定 8
2.6 まとめ 9
3. 事故船現場計測手法の体系化 10
3.1 船体形状の現場計測 10
3.1.1 ３次元レーザースキャナ装置と３次元形状計測 10
3.1.2 船体形状計測 11
3.2 復原性能の現場計測 12
3.2.1 実施事例と検討事項 12
3.2.2 現場計測要領に基づく計測例 13
3.3 まとめ 14
4. 実海域再現水槽での海難事故再現手法の構築 14
4.1 はじめに 14
4.2 実海域再現水槽 15
4.3 対象事例 15
4.4 再現実験 15
4.5 まとめ 17
5. 波浪場の面計測技術の研究 18
5.1 はじめに 18
5.2 研究の方法 19
5.3 研究成果 19
5.4 まとめ 23
6. 事故船の波浪中船体運動推定ツールの機能拡張 24
6.1 波浪中船体運動推定ツールの機能拡張の概要 24
6.2 定傾斜状態の有効波傾斜係数に関する模型実験 25
6.2.1 はじめに 25
6.2.2 実験概要 25
6.2.3 実験結果 26
6.2.4 おわりに 27
6.3 定傾斜した漁船の波浪中運動に関する模型実験 28
6.3.1 はじめに 28
6.3.2 実験概要 28
6.3.3 実験結果 29
6.3.4 おわりに 29
6.4 定傾斜が船の安全性に及ぼす影響の検討 30
6.4.1 はじめに 30
6.4.2 計算概要 30
6.4.3 計算結果 31
6.4.4 おわりに 32

6.5 まとめ……………………………………………………………………33
7. 緊急停止時・浅水域等における流体力特性推定手法の開発………………… 34
7.1 プロペラ逆転時の不平衡流体力の簡易推定法の開発……………………34
7.2 プロペラ逆転時の舵力数学モデルの開発……………………………36
7.3 緊急停止操船シミュレーションによる提案手法の検証…………………37
7.4 浅水域における操縦流体力推定手法の実用的推定手法の開発……………38
7.5 まとめ……………………………………………………………………40
8. 操船リスクシミュレータにおける表現技術の向上と評価…………………… 40
8.1 概要………………………………………………………………………40
8.2 インテリジェントシミュレータの構築……………………………………41
8.2.1 自動避航操船機能の操船リスクシミュレータへの組み込み……………… 41
8.3 自動避航操船機能のシミュレータへの導入………………………………42
8.3.1 自動避航操船アルゴリズム………………………………………… 42
8.3.2 3 船問題を用いた避航操船シミュレーション………………………… 43
8.3.3 シミュレーションの実時間性の確認………………………………… 45
8.4 まとめ……………………………………………………………………45
9. 船体運動推定ツールの高度化とシミュレータによる再現…………………… 45
9.1 船体運動推定ツールの高度化………………………………………………45
9.1.1 操縦運動における傾斜影響について………………………………… 46
9.1.2 操縦運動における風浪の影響について……………………………… 48
9.2 シミュレータによる再現……………………………………………………49
9.3 まとめ……………………………………………………………………51
10. 結言…………………………………………………………………………… 52

1.　緒　言

重大な海難事故が発生した際，現状（本研究実施前）では，事故発生直後の初動対応としては，事故発生状況に関する情報収集を行うとともに，気象庁等が公表している気象・海象データを確認し，海難事故データベースから類似事故を抽出整理するなどした分析結果を国土交通省等に提供するに止まっており，その後，運輸安全委員会等からの請負調査として事故船の船型データ等を基に復原性計算や船体運動計算を行うなどの詳細解析を行っている．しかしながら，平成 21 年に発生したフェリー大傾斜事故 [1)]では，類似船が多数就航しており，再発防止の観点から従来に比べより早急な詳細分析が求められた他，キンメダイ漁船転覆事故 [2)]では廃船前の短期間に事故船の船体形状及び復原性能の計測を行うことを求められるなど，初動対応内容の高度化が必要となっている．また，大型船舶の衝突，異常波浪による小型船舶の沈没等の海難事故が依然として高い水準で発生しており，海難事故の大幅削減が求められている．海難事故の再発防止を図るためには，残された数少ない事実から事故を再現し，欠落した事故の経緯を迅速に推定し，真の海難事故原因を解明する手法について，更なる高度化を図ることが必要と考えられる．

そこで，本研究では，所内の既存ツール [3)]を統合して，事故発生直後に得られる船種，主要目などの情報から，事故船の概略の船体運動推定に必要な流体力特性推定システムを構築し，荷崩れなどにより傾斜した船体について流体力特性の推定手法を確立し，前述の流体力特性推定システムに組み込むことで，初動分析として事故発生時の概略の船体運動推定を行うための入力データを整備した．また，既存の船体運動推定ツールの機能を拡張，高度化して，定常傾斜時や曳航時等広範な事故状況に対応した事故船の概略の運動推定を可能とした．更に，事故船の船体形状計測及び復原性能計測ノウハウの暗黙知を形式知化した事故船現場計測要領を検討し，転覆事故に対する初動対応を体系化した．関係当局へのより正確で信頼性の高い情報提供を可能とする海難事故の再現・

解析技術としては，複雑な多方向不規則波中の事故など多種多様な海難事故を実海域再現水槽において再現する技術の構築と波浪場の面計測技術の基礎的研究，傾斜船の流体力特性推定法の研究，停止および浅水域における運動表現手法の研究，さらに，これらを活用した操船リスクシミュレータの高度化と海難事故の再現に関する研究に取り組んだ．以上の全体構成を図 1.1 に示す．これらの研究開発によって，従来できなかった事故再現・原因分析を可能とし海難事故防止対策立案へ貢献できると考えられる．

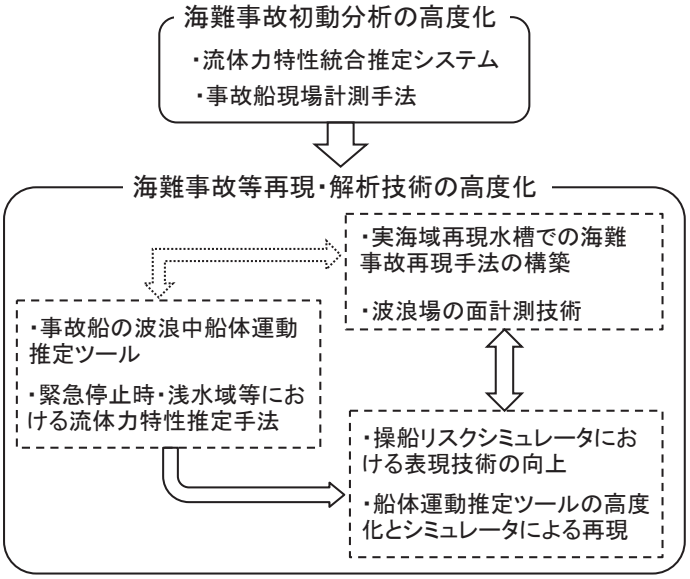


図 1.1 本研究の構成

1 章の参考文献

1) 運輸安全委員会：2　フェリーありあけ船体傾斜，船舶事故調査報告書　MA2011-2 (2011).
2) 運輸安全委員会：2　漁船第一幸福丸転覆，船舶事故調査報告　MA2011-3 (2011).
3) 一ノ瀬康雄：設計工数の削減を目指して—Hope, HOPE Light の開発, 海上技術安全研究所研究発表会講演集, 第 10 号 (2010)，pp.97-104.

2.　初動分析のための流体力特性統合推定システムの構築

衝突や転覆を伴うような海難事故が発生した場合，原因の早急な分析のためには事故時の海象条件における船体運動推定や操舵を考慮した航跡推定を行えることが重要である．ただし，通例ではこれらの推定計算を行うためには船舶の船型詳細や抵抗特性，横方向・回頭方向運動による流体力特性，プロペラ・舵の単独特性および船体との相互干渉特性，等の多様な情報が必要となる．そして，このような流体力特性を用意するためには水槽模型試験や多くの CFD 計算が必要であるが，これらは一般的に多くの労力とコストを伴う．更に，初動分析時には入手できる事故船の情報も限定的であることがほとんどであり，流体力特性を用意するための準備作業でさえ一定の時間を要することが多い．

そこで本研究では，海難事故初動分析対応を迅速に行うためのツールとして，事故船の航跡計算を行うための流体力特性等を必要最小限の情報から整備することが可能な流体力特性統合推定システム（以下, 統推システム）を構築した．本システムは対象船の船種と垂線間長を最低限の入力情報として，航跡計算に必要な各種流体力特

性の推定とそれら特性推定に必要な船型情報の自動補完を行うことが可能である．本章では本システムが有するそれぞれの機能について説明する．

2.1 流体力特性統合推定システムの設計思想および概要

船舶航跡計算を行うためには，(2.1)式に示される船体前後(X)方向・横(Y)方向・回頭(N)方向の物体固定座標系における 3 自由度の平面運動方程式を解いて運動の時系列を求め，運動時系列を空間固定座標系に変換して航跡を求めるのが一般的である．そして，運動方程式の外力項は(2.2)式に示されるように船体に作用する各々の流体力を線形和として表現される．ここで，R_Tは船体抵抗，X_Pはプロペラ有効推力であり，添え字の H は各運動方向への操縦流体力，R は舵によって船体に作用する流体力，A は船体の水面上構造物への風圧力，W は波による外力，を示す．つまり，航跡推定のためには事故船における各種船型主要目および流体力特性や，運動方程式上の付加質量・モーメント等の諸係数を用意する必要がある．

$$\begin{cases} (m+m_x)\dot{u} - m\left(vr + x_G r^2\right) = X^* \\ (m+m_y)\dot{v} + \left(mx_G + m_y x_t\right)\dot{r} + mur = Y^* \\ \left(I_{ZZ} + mx_G{}^2 + J_{ZZ} + m_y x_t{}^2\right)\dot{r} + \left(mx_G + m_y x_t\right)\dot{v} + mx_G ur = N^* \end{cases} \tag{2.1}$$

$$\begin{cases} X^* = -R_T + X_H + X_P + X_R + X_A + X_W \\ Y^* = Y_H + Y_R + Y_A + Y_W \\ N^* = N_H + N_R + N_A + N_W \end{cases} \tag{2.2}$$

本研究で開発する本システムは必要最小限の船型情報から(2.1)，(2.2)式上の流体力を計算するための各種流体力特性や係数等を推定することを目的に設計されている．流体力特性の推定については過去の研究で提案されている回帰式や水槽試験データベース，および海上技術安全研究所で開発された各種推定ツールを 1 つのシステム内で統合して利用することとした．そして，これら回帰式や推定ツールを利用するために必要な船型主要目情報を整備する機能として，船種と垂線間長を最低限入力するのみでこれらを補完計算できる船型主要目の自動推定機能を有している．以降の各節で詳細を説明する．

2.2 船型主要目の自動推定機能

本システムで用いられている流体力特性推定ツールおよび回帰式を使用するための入力情報はツールや回帰式ごとに異なるが，最も多い場合で表 2.1 に示される船型主要目情報が必要である．よって，これらの主要目の内で事故発生時に入手できない情報は別途推定する必要がある．そこで，本研究では海上技術安全研究所で開発された HOPE Light[1)]に着目した．HOPE Light は船舶設計支援ツールであるが，船種と垂線間長（全長でも可能），船幅，喫水および排水量と計画速力を指定することで表 2.1 に記載の本システムに必要な各種船型主要目や船型詳細および後節で説明する推進性能特性を求めることが可能である．よって，HOPE Light をシステムに組み込むことで，表 2.1 に記載の通り，この使用に必要な船型主要目を事故時の情報から整備できるようにした．

表 2.1 流体力特性統合推定システム中のツール使用（および HOPE Light 使用）に必要な船型主要目等

流体力特性統合推定システム	垂線間長L_{pp}，船幅 B，喫水 d_m，排水量 m（あるいは方形係数C_b），トリム，船体後半部の注形係数C_{pa}，船体後半部の水線面積係数C_{wa}
(HOPE Light)	垂線間長L_{pp}，船幅 B，喫水 d_m，排水量 m，計画速力

通例の船舶基本設計では垂線間長，船幅，喫水，排水量および計画速力は最初期に決定されており，設計支援ツールである HOPE Light もこれらの値が整備された状況を前提としている．本研究では，事故時においても船種および垂線間長は入手可能であると見なし，この 2 つの情報から HOPE Light 使用に必要な情報を補間推定す

るための手法として，垂線間長の関数である回帰式の構築を船種ごとに試みた．そのため，一般的に入手可能な船舶明細書[2)]や学会誌[3),4)]から船種ごとの主要目情報を収集しデータベース化した．そして，作成した主要目データベースより船種ごとに垂線間長と他の要目の関係性を整理した所，凡そそれぞれの船種で強い相関性を確認することができた．例として，図 2.1 にばら積み船を例に垂線間長と船幅，喫水，計画速力のフルード数，方形係数との関係性を記す．図中の”DB”はデータベース値，”Reg.”はデータベース値から近似した回帰式である．他の船種も含め回帰式はこれらの要目等を凡そ良好に推定できていた．

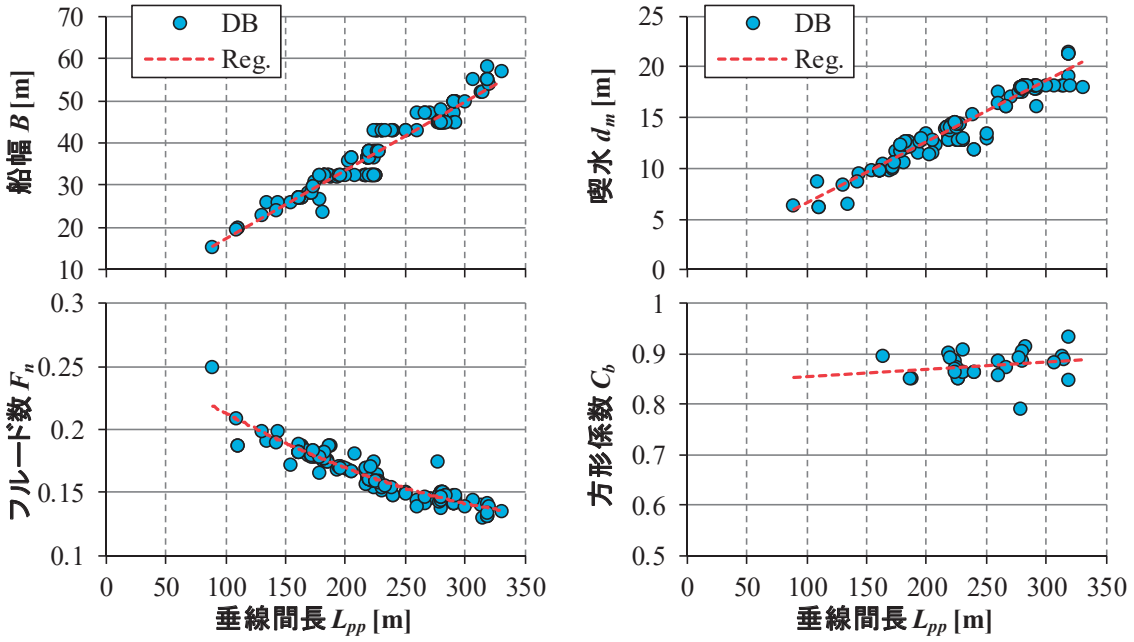


図 2.1 主要目データベースによる垂線間長と他要目等の相関性（ばら積み専用船）

以上より，船種ごとに作成したこれらの近似回帰式を用いることで垂線間長から HOPE Light を使用するための入力情報が整備できるようになり，HOPE Light を通じて本システムで流体力特性等を推定するために必要な主要目情報を整備することが可能となった．

2.3 抵抗・推進性能特性の推定

船舶の航跡推定を行うために必要な抵抗・推進性能特性は表 2.2 の通りに代表できる．船体抵抗は三次元外挿法に則った表現であり，プロペラ有効推力はプロペラ単独特性および船体とプロペラの相互干渉特性である推力減少率，プロペラ有効伴流係数を用いて求められる．

表 2.2 船体抵抗・推進性能特性を推定するために必要な代表要素

主要目	浸水表面積 S_w，プロペラ直径 D
流体力特性	形状影響係数 k，造波抵抗特性 C_W，プロペラ推力単独特性 K_T，推力減少率 t_P，プロペラ有効伴流係数 w_P

これらを用意するには対象船の模型船を製作した上で抵抗試験や自航試験を実施して得ることが一般的であり，近年では CFD 計算によって求めることも可能であるが，いずれの方法でも船型ライン図等の詳細情報が必要であるため事故時の初動分析対応には不適当である．一方，前節で説明した通り HOPE Light[1)]は少ない入力情報から推進性能特性を求めることが可能であり，表 2.2 に記載する必要要素は基本的にフォローされている．HOPE Light では水槽試験結果によるデータベースや船型学による考察に基づいた推定によりこれらを求めており，精度良い推定が期待できる．よって，前節と同様に本システムに HOPE Light を組み込むことで抵抗特性および推進性能特性を推定することとする．

ただし，HOPE Light は漁船を対象外にしているため，漁船のこれら特性の推定ルーチンは別途整備する必要がある．そこで，文献調査により漁船に関する抵抗・推進性能特性のデータ収集を図ったが，一般商船と比較すると極少数しか入手することが叶わず[5),6)]，これらも巻き網漁船を対象とした研究報告であった．図 2.2 に文献に記載されていた船体全抵抗係数（図中の点）とこれらから三次元外挿法に則って解析した粘性抵抗係数および造波抵抗係数（図中の線）を示す．粘性抵抗係数中の形状影響係数 k は両船とも 0.85 であり，一般商船に対して曲面部の割合が相当高いことが表されている．また，全抵抗係数も両船でほぼ同じである．なお，漁船等の小型舟艇の抵抗特性は二次元外挿法によって推定することが多いが，本システムの船種の多くは三次元外挿法を前提としているため，システムからの出力結果を統一するため便宜的に三次元外挿法を適用している．以上より，漁船については現状では入手できた巻き網漁船の主要目と流体力特性のみで代表させることとするが，データ拡充は今後も継続して実用性の向上を図りたい．

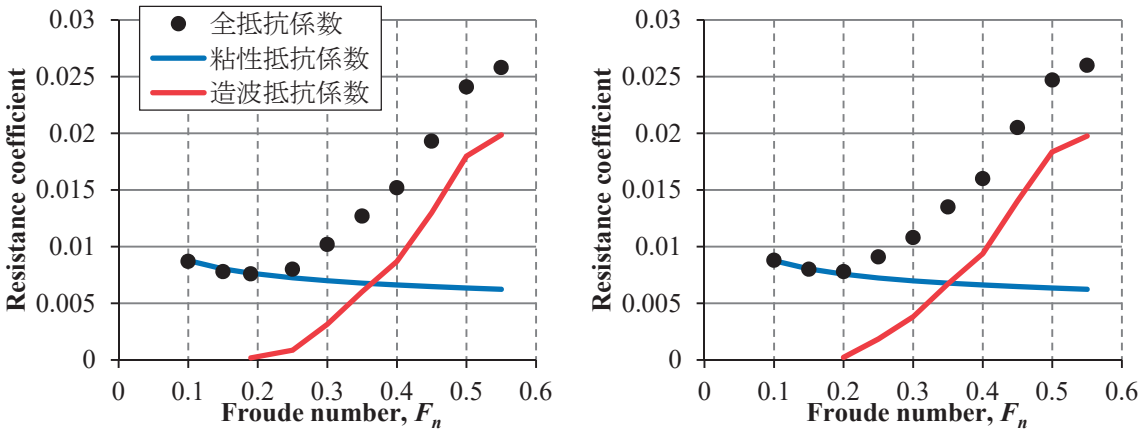


図 2.2 巻き網漁船模型による抵抗試験結果（文献[5), 6)]より，左：135GT，右：39GT）

2.4 操縦流体力特性及び舵特性の推定

操縦運動時の船体に作用する操縦流体力および舵による流体力の推定に必要な要素は表 2.3 のように表せる．なお，(2.1)式の運動方程式の慣性項を計算するためには回頭方向の慣性モーメント I_{zz} や各運動方向の付加質量・慣性モーメント(m_x, m_y, J_{zz})が必要であり，これらについては便宜上本節で取り扱う．

表 2.3 の内，主要目およびプロペラ有効伴流係数は 2.2 節の回帰式や HOPE Light によって推定可能である．一方，操縦流体力特性や舵に関係する流体力特性は水槽模型試験によって求めることが一般的であるが，過去の研究で提案された船型主要目を用いた回帰式により推定することが可能である．また，回頭方向の慣性モーメントは回頭方向の無次元慣動半径を 0.25 として求めても大きな誤差はなく，各運動方向の付加質量・モーメントは元良チャート[7)]を使えば表 2.1 中の主要目により推定可能である．次に，舵直圧力特性は藤井らのプロペラ後流中を対象にした検討に基づき舵の縦横比によって計算される回帰式を用いて推定可能である[8)]．

表 2.3 船体への操縦流体力特性・舵による流体力特性を推定するために必要な代表要素

主要目	垂線間長 L_{pp}，喫水 d，舵の側面投影面積 A_R，舵高さ H_R，プロペラ直径 D
流体力特性	各運動方向への操縦流体力特性(X'_H, Y'_H, N'_H)，船体と舵の相互干渉特性(t_R, a_H, x'_H)，舵直圧力特性 C_N，プロペラ有効伴流係数 w_P，舵有効伴流係数 w_R，舵への横方向流入特性 γ_R, l_R

ここで，操縦流体力特性を表現するために提案された数学モデルは想定する操縦運動に応じてその形式が多様である．計画速力付近で航走する運動状態においては井上の線形モデル[9)]や貴島の非線形モデル[10)]が代表的であり，烏野は低速および大斜航状態の操縦流体力を表現できる成分分離型モデル[11)]を提案し，Kang は肥大船を対象に貴島モデルと烏野モデルを組み合わせて通常航走時と低速時の両状態に対応できるモデル[12)]を提案している．また，芳村は漁船も対象に含めて作成した操縦流体力データベースに基づいて非線形モデルを提案している．そして，これらの操縦流体力モデルはその関数形と共に関数内係数を船型主要目から推定できる回帰式が提案され

ており，その主な目的は船舶初期設計段階における船舶操縦性能推定に供することである．本システムでは 2.2 節の通り船型主要目を整備できるためこれら回帰式を利用可能である．そこで，事故時に想定される運動状況や事故船の船種に応じて操縦流体力モデルを使い分けられるよう，これら回帰式をシステムに組み込んで想定モデルに応じて使用を選択できるよう整備した．また，海上技術安全研究所で収集した模型試験結果に基づく操縦流体力モデル微係数データベースもシステムに組み込んで使用できるようにした．図 2.3 に本システムによって計算した無次元操縦流体力の出力画面を例として示す．これらは Kang のモデルの計算例であり，モデル中係数は 2.2 節で提案した主要目推定回帰式を用いて Kang の回帰式により計算している．

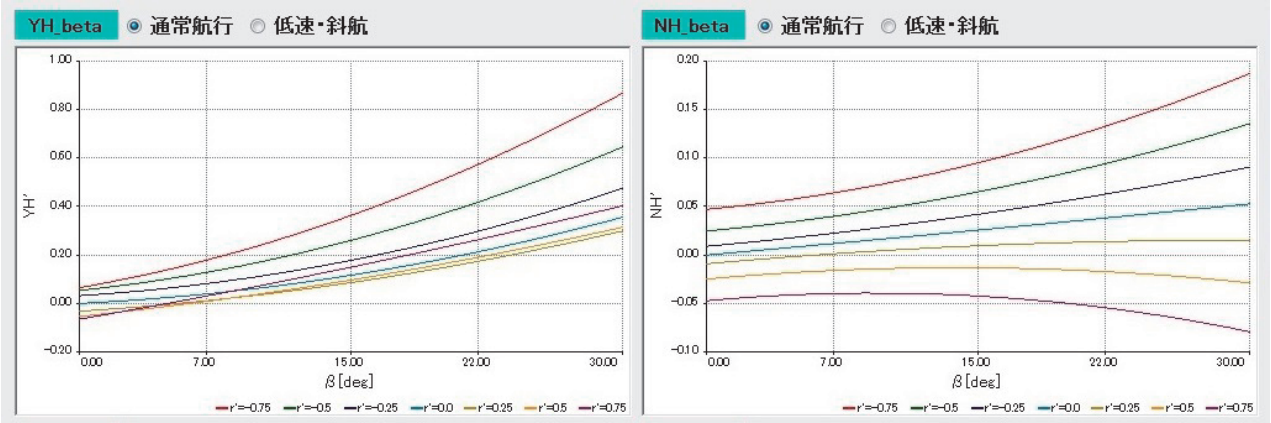


図 2.3 流体力特性統合推定システムによる無次元操縦流体力$Y_H^{'}$,$N_H^{'}$ 計算例（Kang のモデル）

一方，船体と舵の相互干渉係数や舵の有効伴流係数，そして整流係数に代表される舵への船体横方向からの有効流入特性については，基本的に舵と船体の干渉によって誘起される流体力をモデル化したものであるが，船体に作用する操縦流体力特性と比較すると理論推定のための研究例は少なく，基本的には模型試験によって求めることが一般的である．ただし，これら干渉特性についても，水槽試験結果に基づく検討により船型主要目を入力とした推定回帰式がいくつか提案されている．青木は提案した回帰式を用いた数値シミュレーションとばら積み船の実船操縦性試験結果を比較して良好な一致を得ており [14]，芳村は構築した干渉係数データベースを基に漁船に適応可能な回帰式を提案している [13]．それぞれが提案する舵特性モデルは物理的意味が同じである一方で関数形は少々異なることもあるが，操縦流体力モデルの場合と同様に船種に応じ使い分けられれば事故時の初動分析対応においても実用性は高い．よって，これらの舵特性に関する回帰式も本システムに組み込み，対象船に応じて式を選択できるよう整備した．

2.5 船舶水面上構造物への風圧力特性と波漂流力特性の推定

前節までは平水中航走時に船体に作用する流体力特性を取り扱ったが，実海域では風や波による外乱が常に存在するため事故時の航跡推定においてもこれらの外乱影響は考慮されるべきである．そこで，本研究では風や波によって船体に作用する時間定常的な特性を簡易に推定できる手法を本システムに組みこむこととした．

まず，風による定常力は船体への相対風速および相対風向に加え，水面上の船体上部構造物の形状に基づく風圧力特性がわかれば推定できる．そこで，本研究では海上技術安全研究所で開発された風圧力特性簡易推定プログラム”LB-WindLoad”[15]を本システムに組み込んだ．LB-WindLoad は船種と船の全長と船幅を入力として，風圧力推定計算に必要な上部構造物の正面投影面積および側面投影面積と相対風向を変数とした各運動方向の風圧力係数を出力する．推定法の詳細については参考文献 [16]を参照願う．なお，船の全長は別途用意する必要があるが，本システムでは 2.2 節で提案した船種ごとの主要目推定回帰式を船全長についても作成することで対応した．

次に，波による定常力は波漂流力と呼ばれるが，これらは基本的にはポテンシャル理論を前提とした比較的簡易な理論で求めることが可能であり波振幅の二乗に比例する成分として表される，そして，細長体であることを前提に二次元断面の流体力を推定する二次元理論ではなく，船体表面の三次元的な曲面情報を必要とする三次元

理論を用いてより理論的に厳密で精度の良い計算を行うこともあるが，この計算には一般的に多くの準備を要するため事故時の初動分析への対応は容易ではない．そこで，本研究では海上技術安全研究所で開発した波漂流力データベース補間プログラム”DForce”[17]を本ステムに組み込んだ．DForce は船種および垂線間長船幅比L_{pp}/Bと船幅喫水比B/dを入力することにより，3 次元パネル法によって計算された多数の船舶の波漂流力特性のデータベースを参照し，各運動方向の規則波中無次元波漂流力を補完計算するプログラムである．

図 2.4 にそれぞれのプログラムによる計算例を示す．これらは無次元値であるため有次元化するには事故当時の風波状況を把握しておく必要があるが，船種と垂線間長・船幅・喫水のみの情報から斯様な特性を推定できることは初動分析時には貴重であると言えよう．

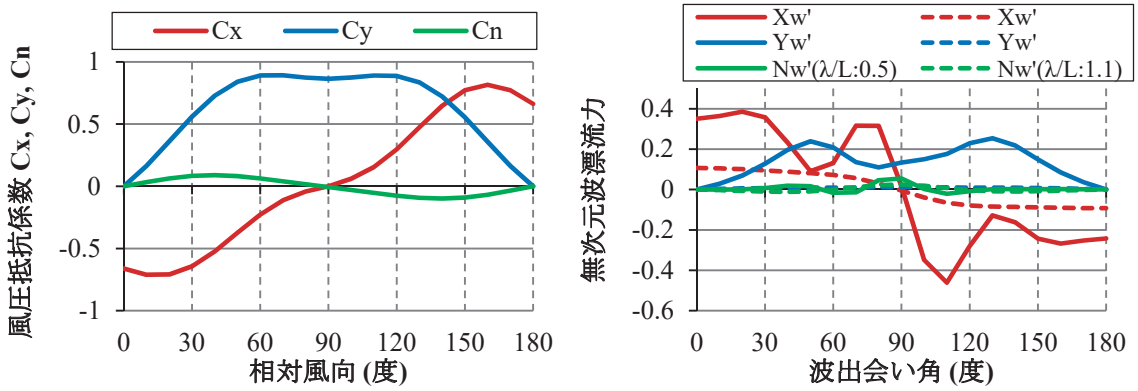


図 2.4 LBWindLoad による風圧抵抗係数（左）と DForce による規則波中無次元波漂流力（右）の計算例
（相対風向は 0 度：向い風 180 度：追い風，波出会い角は 0 度：追い波 180 度：向波）

2.6 まとめ

海難事故発生時の初動分析のための迅速な環境整備を可能にする流体力特性統合推定システムを構築した．本システムを用いれば事故発生時のように船舶情報が限定的である状況下においても船の航跡計算を行うための多様な流体力特性を整備することが可能である．本システムにより，初動分析の高度化および事故原因究明の更なる早急化が期待される．

一方，本システム中の流体力特性推定はほとんどが水槽試験結果に基づいた回帰式かデータベース補完に基づくため，水槽模型試験や CFD 計算のように詳細な船型情報を必要とする手法と比較するとその推定精度が劣る可能性があることは否めない．そのため，コストパフォーマンスの良い代替手法があれば適宜利用していく等，初動分析時により良い推定精度を担保するための臨機応変な対応は今後も継続して検討すべきである．

2 章の参考文献

1) 一ノ瀬康雄，久米健一：船型要目最適化プログラム HOPE Light，海上技術安全研究所報告，第 15 巻 第 4 号，(2016)，pp.13-25.
2) 社団法人日本海運集会所 編：日本船舶明細書シリーズ，(本研究では 2012 年版を使用).
3) 公益社団法人日本船舶海洋工学会 編：KANRIN（主に毎年 7 月号の“年鑑 – 主な完成船舶”を参照）.
4) 一般社団法人海洋水産システム協会 編：海洋水産エンジニアリング.
5) 社団法人漁船協会（現 海洋水産システム協会） 編：平成 9 年度 漁船等国際機関等対策事業報告書 第 2 章，(1998)，pp.131-163.
6) 社団法人漁船協会（現 海洋水産システム協会） 編：平成 11 年度 漁船等国際機関等対策事業報告書 第 5 章，(2000)，pp.94-115.
7) 元良誠三：船体運動に対する付加質量および付加慣性モーメントについて（その 1-5），造船協会論文集，第 105-107 号，(1959, 1960).

8) 藤井斉，津田達雄：自航模型船による舵特性の研究(2)，造船協会論文集，第 110 号，(1961)，pp.31-42.
9) 井上正祐，平野雅祥，平川雄二，向井一浩：等吃水船体の操縦微係数について，西武造船会々報，第 57 号，(1979)，pp.13-19.
10) 貴島勝郎，名切恭昭：船舶操縦性能推定の実用的計算法に関する研究，西武造船会々報，第 105 号，(2003)，pp.21-31.
11) 烏野慶一，前川和義，他：簡易渦モデルを用いた操縦運動中の主船体流体力の成分分離型数学モデル（その 4-5），日本造船学会論文集，第 187, 190 号，(2000, 2001).
12) D. Kang and K. Hasegawa：Prediction method of hydrodynamic forces acting on the hull of a blunt-body ship in the even keel condition, Journal of Marine Science and Technology, Vol.12 Issue.1, (2007), pp.1-14.
13) 芳村康男，増本友美子：中速商船・漁船船型の操縦流体力データベースと操縦運動の一推定法，日本船舶海洋工学会論文集，第 14 号，(2011)，pp.63-73.
14) 青木伊知郎，貴島勝郎，古川芳孝，名切恭昭：実船の操縦性能推定法に関する研究，日本船舶海洋工学会論文集，第 3 号，(2006)，pp.157-165.
15) 北村文俊，上野道雄，藤原敏文：船舶風圧力簡易推定プログラムについて，海上技術安全研究所報告，第 9 巻 第 3 号，(2009)，pp.61-67.
16) F. Kitamura, M. Ueno, T. Fujiwara and N. Sogihara：Estimation of above water structural parameters and wind loads on ships, Ships and Offshore Structures, in online article (Later assigned to new Vol.), (2017).
17) M. Ueno, S. Ohmatsu and S. Chiaki : Estimation Program for Steady Wave Loads on Ships at Zero Forward Speed Using Database, Report of National Maritime Research Institute, Vol.16 Issue.3, (2017), pp.43-52.

3. 事故船現場計測手法の体系化

転覆事故について初動分析や詳細解析を行うためには，事故船の船体形状を示す線図等及び基本的な復原性能に関連する重量重心計算書や復原性資料等の設計図書が必要となる．しかしながら，事故船が比較的小型の船の場合や船齢が高い船の場合は，前述した設計図書が入手できないこともある．そのような場合，初動対応として，解析に必要なデータを取得するために，事故船あるいは類似船の船体形状や復原性能を直接独自に計測することになる．事故船あるいは類似船の計測は，実施時期等の関係で十分な設備がない，事故現場に近い岸壁等の場所で，短期間に確実に実施することが求められるため，現場計測を適切に実施するためには計測手法の体系化・標準化を目指した検討が必要となる．

3.1 船体形状の現場計測

3.1.1 ３次元レーザースキャナ装置と３次元形状計測

図面等がない船体形状を知るためには，直接的に対象船舶の船体形状を計測することが必要となる．そこで，３次元形状計測の手段として，スキャナ機能付きの３次元レーザー計測装置の活用を提案し[1),2)]，このような状況で船体形状を明らかにすることを求められた事例での技術的なアプローチ手法[3)]を示す．

図 3.1 に本研究で使用した３次元レーザースキャナ装置を示し，表 3.1 にその機能仕様を示す[4)]．本機はレーザー距離測定器と２軸のビームスキャニング機構によって構成される３次元レーザースキャナ装置である．計測原理は表 3.1 に示すように，機器内部に組み込まれたレーザーダイオードから発射された近赤外線波長（0.9μm）のレーザー光が対象物に当たり，後方散乱光がフォトダイオードに受光されるまでの時間，この飛行時間を精密測定し，本機と観測対象物との距離を得るものである．このようにして得られた測距データは，基本的には１次元的な情報であるが，本機の場合，回転するポリゴンミラーによってレーザービームの上下縦方向のスキャニングを実行し，同時にポリゴンミラーが格納された機器ヘッド部自体を回転させることによって，左右横方向のスキャニン

グを実行している．この結果，観測された対象点の位置情報は計測器を原点とした３次元空間における位置座標として出力される．なお本機におけるスキャニング範囲は，上下角±40°，回転角 0°～333°である．

表 3.1 に示したように本研究で使用した３次元レーザースキャナ装置は旧型でもあることから，その測定精度は±25 mm となっている．形状計測において，これは充分に利用可能な精度とは言えないが，その対策として同一点の多数回測定による平均化処理に基づく補正技術や測定面上での１次元あるいは２次元位置補正による処理技術が開発[1),2),3)]されており，見かけ上の精度を±5 mm 程度，言い換えれば 4～5 倍程度の精度向上を可能にした．

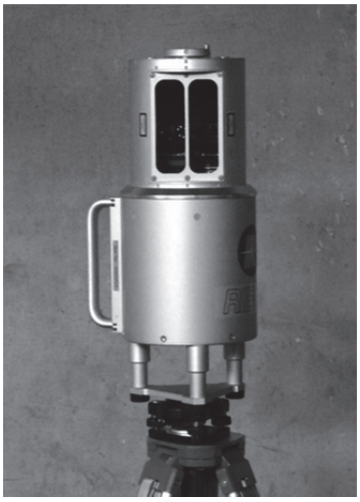


図 3.1　３次元レーザースキャナ装置の外観

表 3.1　３次元レーザースキャナ装置の仕様[4)]

測定原理	単発レーザー光飛行時間測定
測定距離 ①プリズム使用 ②自然物のターゲット　反射率 ＞ 80% ③自然物のターゲット　反射率 ＞ 10%	 25 mm 分解能で 350 m 25 mm 分解能で 350 m 150 m まで
最短距離	標準　2 m
測定精度（1 σ 標準偏差）	±25 mm
レーザー波長	0.9 μm
レーザー光の広がり角度	Approx. 3 mrad （1 mrad : 100 m の距離で 10 cm のビーム幅に相当）

3.1.2 船体形状計測

事故船など対象船舶の船型形状を明らかにすることを目的に，３次元レーザースキャナ装置を用いて指定位置での船殻外形形状を計測した[3)]．例として図 3.2 に示すように S.S.（Square Section）の計測位置を定めて計測作業計画を立案した．図 3.2 に示したような多数の計測位置であっても，対象船舶に正対して充分な距離（350m以内程度）を取ることができれば，３次元レーザースキャナ装置の性能上は１回のスキャンで網羅することが可能であり，全データの取得ができる．しかし，ドライドックのように計測場所によっては，見通しでの計測が限定される場合がある．その場合は，図 3.3 に示すようにキールラインに対して平行に３次元レーザースキャナ装置の移動ラインを設定し，数カ所の計測位置ごとに移動して計測することを実施した．

このようにして得られた船体表面形状３次元位置情報は，各 S.S.位置での縦方向のラインプロファイルを含んだものとなっていることから，それらのラインプロファイルを抽出して，オフセットデータおよび正面線図を作成した．この手法により，３次元レーザースキャナ装置を活用した船殻外形形状が明らかにされた．なお，ここ

では対象船舶の計測結果等の掲載を割愛する．また本手法により作成した事故船の正面線図は，運輸安全委員会より公表された船舶事故調査報告書[5)~10)]を参照されたい．

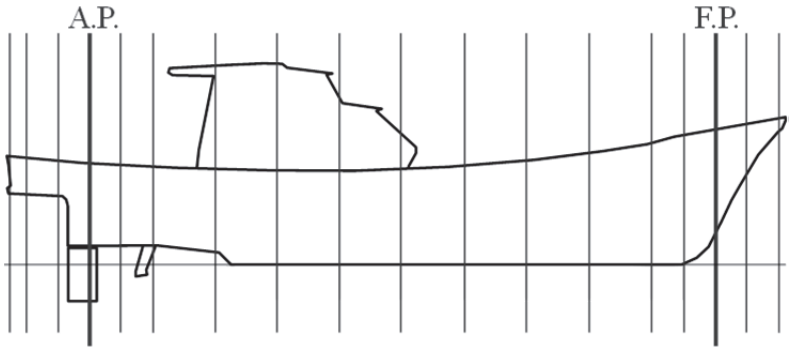


図 3.2　計測位置の決定例

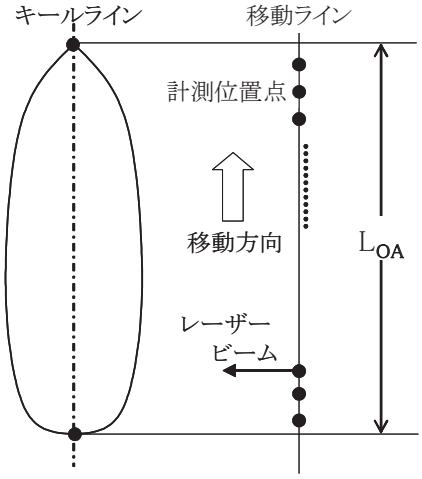


図 3.3　計測手順の概要

3.2 復原性能の現場計測

転覆事故の解析に必要な事故船の復原性に関連するデータとしては,船体重心高さ及び横揺れ固有周期がある．復原性能の現場計測では，これらのデータを得るために，重心査定試験及び動揺試験を実施する．重心査定試験では，①喫水計測及び②重量物の移動に伴う横傾斜角の計測を行う．また，動揺試験では甲板上の人員の移動等の方法で横揺れを発生させて横揺れ周期を計測する．計測する項目については建造時に実施される試験と同一であるが，事故発生直後の現場計測では事故船や類似船の状態（排水量や甲板上の搭載物の状況等）や試験実施現場の状況について詳細が不明であることが多く，周到な事前準備と実際の現場状況に応じた適切な計測の実施が求められる．そこで，本研究では，これまで実施した実船の復原性能試験について，準備，実施，解析の各段階における検討事項や手順等を整理するなどして，事故船の復原性能に関する標準的な現場計測要領を検討した．

3.2.1 実施事例と検討事項

今回整理・検討した実船の復原性能試験事例をまとめて表 3.2 に示す．No.1，No.2 は事故船でないが，実施内容は事故船と同一であったので検討対象に含めた．表 3.2 において喫水計測として“水上”としたのは，別途用意した伝馬船から喫水標を読み取った事例で，“船上”としたのは，乗船者が上甲板端から水面までの距離（乾舷）を計測した事例，“船外”としたのは乗船者以外が桟橋から乾舷を計測した事例である．また，重心査定試験用の移動重量物としては，水を充填したポリタンク（灯油タンク等）を使用した事例，漁獲物用水槽に水を充填して

移動重量物とした事例の他，船内スペースの関係で水を充填したポリタンクに加え，模型試験用の錘を併用（ポリタンク等と記載）した事例もある．

表 3.2　実船復原性試験実施事例

No.	船種	総トン数／全長	実施場所	喫水計測	移動重量物
1	漁船	45GT	漁港岸壁	水上	ポリタンク
2	漁船	30GT	漁港岸壁	水上	漁獲物用水槽
3	遊漁船	16GT	漁港岸壁	船上	ポリタンク
4	漁船	19GT	通常岸壁	船上	ポリタンク等
5	カッターボート	7.00m	湖桟橋	船外	ポリタンク等

表 3.2 に示した実船復原性試験実施事例における主な事前検討事項は，①船上及び船外からの乾舷計測位置及び方法，②移動用重量物の重量及び設置場所である．

乾舷（喫水）の計測は，試験時の排水量や基線上メタセンタ高さに直接関係するため，信頼性のある計測が求められる．そのため，事前に入手した一般配置図及び現状の写真を基に船長方向の計測位置を決めるとともに，計測原点となる上甲板端等の位置を検討した．その際，計測位置における喫水は，一般配置図等から読み取った計測原点の基線上高さから水面までの距離の計測値を差し引いて求めることから，入手した一般配置図と現状の写真から建造後の改造等がないと想定される適切な計測原点となる位置を設定した．

重心査定試験では，重量物を船幅方向に移動させて横傾斜角を計測する．その際，現場計測では波や風の影響を完全に排除できないことを考慮して十分な計測精度を確保できる程度の横傾斜角となるように，移動用重量物の合計重量や十分な移動距離を確保できる設置場所を検討した．準備する移動用重量物の合計重量に関しては，比較的船型が近い船の排水量やメタセンタ高さのデータ等を基に計測対象船の排水量とメタセンタ高さを概算するとともに，一般配置図や写真から仮決めした重量物の設置場所と凡その移動距離から十分な計測精度を確保できる程度の横傾斜角となる移動重量を逆算して準備した．

また，この他，各計測事例における計測機材，現場での計測手順や確認事項，解析の際の留意事項等を整理して，船種，船型，計測場所による違い等も考慮した上で，事故船の復原性能に関する標準的な現場計測要領を検討した．

3.2.2 現場計測要領に基づく計測例

標準的な現場計測要領の検討結果に基づいて事故船や類似船 3 隻の復原性能の計測を行い[9), 10), 11)]，事故解析に必要なデータを取得した．ここでは，転覆した押船の同型船（総トン数 19 トン）が寄港した造船所の岸壁で実施した現場計測[11)]について紹介する．

(1) 試験時の喫水（乾舷）の計測

重心査定試験の解析に必要な試験時の排水量を算定するために，船長方向の 6 つの位置で船体中心線上あるいは両舷端（合計 11 か所）から水面まで下げ振りをおろし，各位置におけるブルワーク上端から水面までの鉛直距離を計測した．そして，計測した各位置の一般配置図等に示されたブルワーク上端の基線上高さからブルワーク上端から水面までの鉛直距離の計測値を計測した各位置のブルワーク上端の基線上高さから差し引いて，各計測位置での喫水を求めた．

喫水の計測結果については，運輸安全委員会より公表された船舶事故調査報告書[11)]を参照されたい．

(2) 重心査定試験の実施

船上に搭載した水入りポリタンク 33 個（合計重量 626kgf）及び人員 5 名（合計体重 434kgf）を舷側方向に移動させて重心査定試験を実施した．傾斜用重量物（水入りポリタンク及び人員）の移動による傾斜モーメントは，個々の重量及び移動距離を合算して算出した．

試験時に計測された片舷の傾斜角は約 1.7 度であり，計測結果に基づいて計算した試験時の状態の復原力曲線と比較して十分な精度で計測を行えたことを確認した．

メタセンタ高さ GM の算定結果と関連するデータ（試験時の排水量 W，傾斜用重量物の重量 w，平均移動距離 ℓ，傾斜角 φ）については，運輸安全委員会より公表された船舶事故調査報告書[11)]を参照されたい．

3.3 まとめ

転覆事故等の初動分析や詳細解析を行うために必要な，事故船あるいは類似船の船体形状や復原性能の計測は，実施時期等の関係で，十分な設備がない事故現場に近い岸壁等の場所で，短期間に確実に実施することが求められる．ここでは，現場計測を適切に実施するために行った検討内容と計測事例について紹介した．

現場計測はケースごとに計測環境が大きく異なることから，今後とも適切な計測が行えるよう，蓄積した計測事例を踏まえつつ，検討を継続する必要があると考える．

謝　辞

3.1.2節及び3.2.2節に紹介した現場計測については，運輸安全委員会からの請負研究として実施した．計測実施に協力いただいた関係各位に謝意を表します．

3 章の参考文献

1) 桐谷伸夫，山之内博，今里元信，篠野雅彦，蔭山智子：造船工程における形状計測作業の実態調査と大型構造物の非接触３次元形状計測技術，海上技術安全研究所報告，第 11 巻第 1 号（2011），pp.29-10.
2) 桐谷伸夫, 今里元信, 山之内博: ３次元船体形状の計測技術, 日本船舶海洋工学会誌, 第 40 号(2012), pp.12-16.
3) 桐谷伸夫，山之内博，今里元信：狭隘環境条件における３次元船型形状の計測技術，日本マリンエンジニアリング学会学会誌，第 46 巻 1 号（2011），pp.76-81.
4) リーグルジャパン株式会社，3D Imaging Sensor，LMS-Z210，http://www.riegl-japan.co.jp/.
5) 運輸安全委員会：３ 引船第八きさ丸台船 N.503 沈没，船舶事故調査報告書　MA2010-3（2010）.
6) 運輸安全委員会：２ 漁船第一幸福丸転覆，船舶事故調査報告書　MA2011-3（2011）.
7) 運輸安全委員会：４ 遊漁船はなぶさ釣り客負傷，船舶事故調査報告書　MA2011-9（2011）.
8) 運輸安全委員会：８ カッター（船名なし），船舶事故調査報告書　MA2012-1（2012）.
9) 運輸安全委員会：３ 旅客船第十一天竜丸転覆，船舶事故調査報告書　MA2012-12（2012）.
10) 運輸安全委員会：漁船第三裕丸転覆，船舶事故調査報告書　MA2016-2-36（2016）.
11) 運輸安全委員会：押船３８三協丸転覆，船舶事故調査報告書　MA2014-3-4　（2014）.

4.　実海域再現水槽での海難事故再現手法の構築

実海域再現水槽[1)]の特長は 382 台のフラップ式造波機で構成される全周造波機と拘束模型試験および自由航走模型試験に対応した高精度運転可能な曳引台車である．本研究ではこの 2 つの特長を最大限に活かした実験手法を高度化することで様々な海難事故に対応できる技術の確立を目指した．ここでは高速フェリーの大傾斜事故の再現について述べる．

4.1 はじめに

高速フェリーが斜め追い波中で遭遇した大きな横傾斜と荷崩れ，そしてそれに続く急旋回という現象の模型実験での再現をおこなった. 使用した実験施設は全周造波機と 3 自由度の曳引台車を備えた実海域再現水槽である. 当時の海域の方向スペクトル推定結果に基づき水槽内に多方向不規則波浪場を再現し，そこで模型船を自由航走させた．最初の横揺れを誘起するごく小さな集中波を重ね合わせることで実際の現象に近い状況を再現した.

4.2 実海域再現水槽

実海域再現水槽 [1)]は 1958 年以来活用されてきた 1 辺 80m の正方形の屋外の角水槽を改修して 2010 年に建造された屋内の水槽で，長さ 80m，幅 40m，深さ 4.5m と水面広さは角水槽の半分であるが，角水槽には無かった曳引台車を備えており，造波機もこの規模の水槽としては他に類を見ない全周造波機を採用している．幅 55cm のフラップ式造波機(ヒンジ部は水面下 1.6m)が 382 台でトリミングタンク入口部分を除く水槽全周を取り囲み，造波と消波を同時におこなって任意の波浪場を再現することが可能である．曳引台車の最大速度は長さ方向に 3.5m/s，幅方向に 3.0m/s である．副台車は回転盤を備えており，前後・左右の並進運動と水平面内回転運動のいわゆる XYΨ3 自由度運動をおこなうことができる.

図 4.1 に実海域再現水槽の平面図を座標系と共に示す.

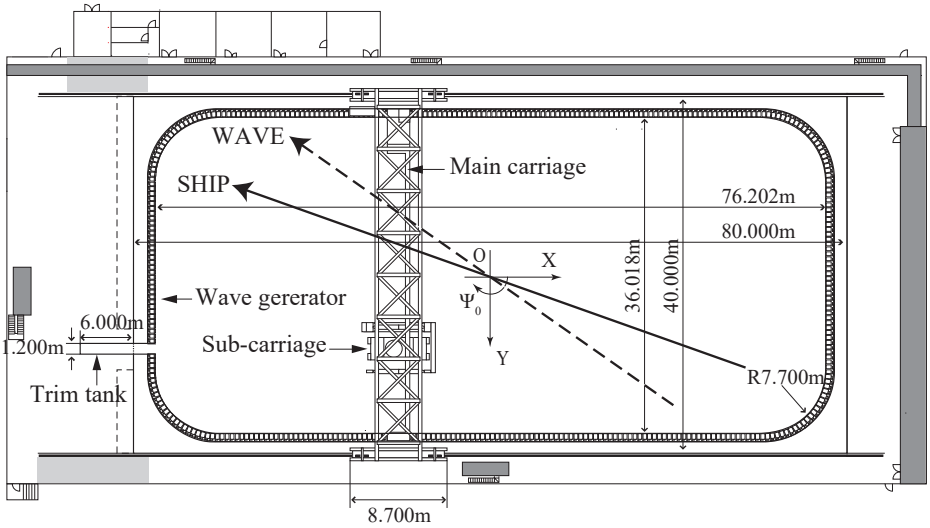


図 4.1　実海域再現水槽

4.3 対象事例

2009 年 11 月 13 日 5:00 過ぎ，垂線間長さ 150m の高速フェリーが熊野灘を針路 235 度，船速約 20kt で航行中に突然大傾斜を起こして荷崩れが発生した．急激な減速と急旋回がこれに続き，船は大傾斜したままとなった．幸い船は自力航行して紀伊半島沿岸にたどり着き人命が失われることはなかった．当時この海域の気海象は，東北東の風 15.4m/s，有義波高 4.59m，平均波周期 10.0s の東からの波という状況であった [2)]. 乗員の証言によれば，突然 20～30 度の右傾斜を生じ，続いて 40 度を超える傾斜になったとのことである．この間，荷崩れによると思われる音がしていたことが乗員によって確認されている.

4.4 再現実験

前記の気海象は文献 2)記載の推算値であるが，これだけでは実際の海象を水槽に再現するには不十分である．そこで，当時の海象の方向スペクトルの推定を気象協会に依頼し，WAM(Wave prediction Model) cycle-4[3)]による方向波スペクトルの推定結果を得た.

WAM によって推定された方向スペクトルから全周造波機への入力データを作成し，Single summation 法 [4)]によって実海域再現水槽で当時の波浪場を模型尺度(1/42.86)で再現した．EMLM 法 [5)]によって求めた方向スペクトルを入力データと比較して図 2.2 に示す．周波数スペクトルの形状のみを対象として調整をおこなったため，Cosine6 乗分布に近い目標分布よりもやや広い分布となった. 波の主方向は図 4.1 中の矢印で示した方向とした.

模型船の主要目および状態を表 4.1 に示す．重心高さや船速，荷崩れ量も含めて文献 2)の情報に従った．模型船の針路の値は図 4.1 の水槽座標系による．

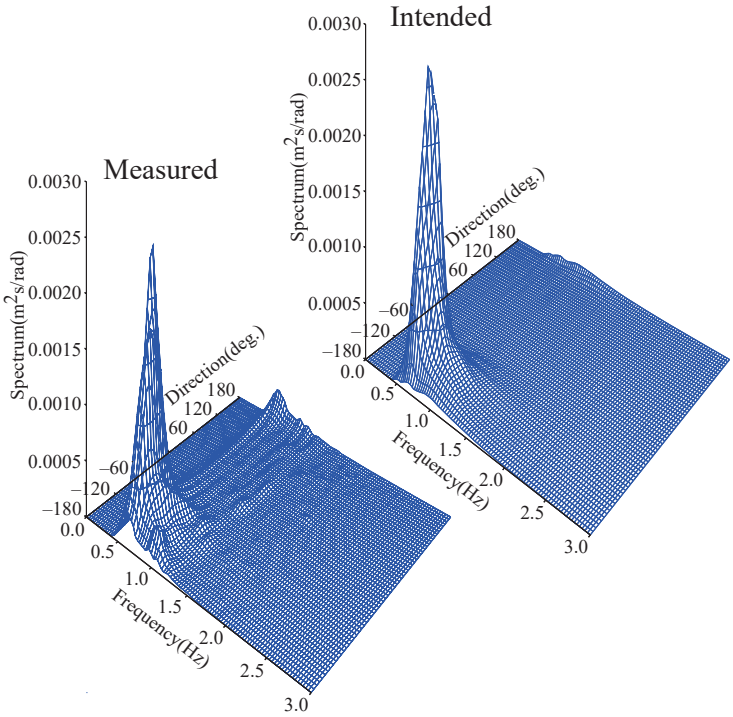


図 4.2　方向スペクトル [6)]

表 4.1　模型船の主要寸法と実験状態

Item	Ship	Model
Length between P. P. (m)	150.00	3.500
Breadth (m)	22.80	0.532
Draft (m)	6.26	0.146
Trim (m)	1.68	0.039
G_0M (m)	1.80	0.042
Displacement (kN)	1.1257E+05	1.3952
Cargo shift moment (N-m)	4.318E+07	1.345E+01
Ship speed (m/s)	10.5	1.61
Course (deg.)	235.0	200.0

荷崩れを再現するために，一定の重りを水平横方向に滑らせることで荷崩れに相当する横傾斜モーメントを発生する装置(図 4.3)を製作して模型船に搭載した．設置高さは実船で荷崩れが発生した高さに合わせた．重りは任意の信号によって拘束を解かれて自由に横方向に滑り始める．いったん滑り始めて再度左右舷どちらかの端に到達すればそこで固定される．

曳引台車が模型船を自動追尾する方法 [7)]で模型船を自由航走させた．加減速はワイヤークランプ装置を使い，電源と信号のやりとりは有線でおこなった．計測中はケーブル等は十分緩く模型船の運動に影響を与えることはない．

造波開始から模型船が出発するまでの時間を変化させて何度も計測をおこなったが，比較的高い波に遭遇する状況においても実船に発生したような大傾斜現象は認められなかった．そこで，周波数スペクトル形状が相似でパワーが再現波浪場の 5%, 方向分布が cosine6 乗であるような集中波 [8)]を模型船の航路上に設定して重ね合わせ，模型船がこれに遭遇するようにした．荷崩れ再現装置は横傾斜角 25 度で作動するようにした．

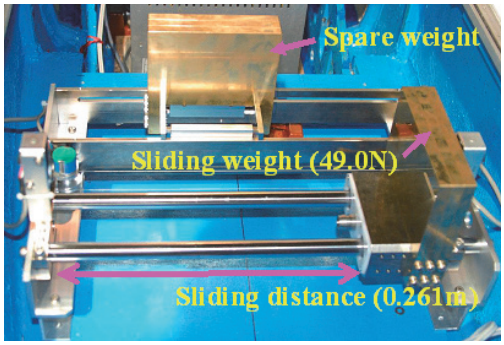


図 4.3　荷崩れ再現装置 [6)]

船体運動を図 4.4 に示す．一番上のデータは模型船を走らせる前に波高計だけを平均船速で曳航して出会波を計測した結果である．有義波高(10.5cm)より低い波に 2～3 回出会った後，有義波高の約 1.3 倍の波に遭遇している．最初は 30 度近い横揺れ角を生じ，その間に荷崩れ再現装置が作動して重りが左舷側から右舷側に移動している．その後の横揺れ角は 0 度までは戻らず次に 40 度を超える値を示す．船首揺れのデータは振動しながらの左旋回を示している．

4.5 まとめ

多方向不規則波浪場を再現して斜め追波中の船の大傾斜現象の再現をおこなった．この模型実験が実際の現象をどの程度説明しているかは別途詳細な検証が必要であるが，全周造波機を備えた実海域再現水槽において海難事故を再現するための基本的な技術を確立することができた．

謝　　辞

本研究の遂行にあたり国土交通省海事局から情報提供を頂きました．本研究は科研費(23246152)の助成を受けたものです．関係機関の皆様に感謝致します．

4 章の参考文献

1) 谷澤克治ほか，実海域再現水槽について，　海上技術安全研究所報告，　第 10 巻，第 4 号 (2011), pp.1-40.
2) 運輸安全委員会，船舶事故調査報告書 MA2011-2, (2011).
3) H. Gunther, S. et al., The Wamodel Cycle 4, Deutsches Klimarechenzentrum, Technical Report No. 4 (1991)..
4) 竹沢誠二ほか，長水槽内で発生させた方向スペクトル波について，日本造船学会論文集，第 163 号(1988), pp. 222-232.
5) 磯部雅彦ほか，方向スペクトルの推定における MLM の拡張，海岸工学講演会論文集，第 31 回 (1984), pp. 173-177.
6) Ueno M. et al., Model Experiment Reproducing an Incident of Fast Ferry, Journal of Marine Science and Technology, 18-2, pp. 192-202.
7) 宮崎英樹ほか，実海域再現水槽における自由航走実験について，海上技術安全研究所研究発表会講演集，第 11 回 (2011), pp. 7-8.
8) 竹沢誠二ほか，任意過渡水波の発生について，日本造船学会論文集，第 129 号 (1981), pp. 41-53.

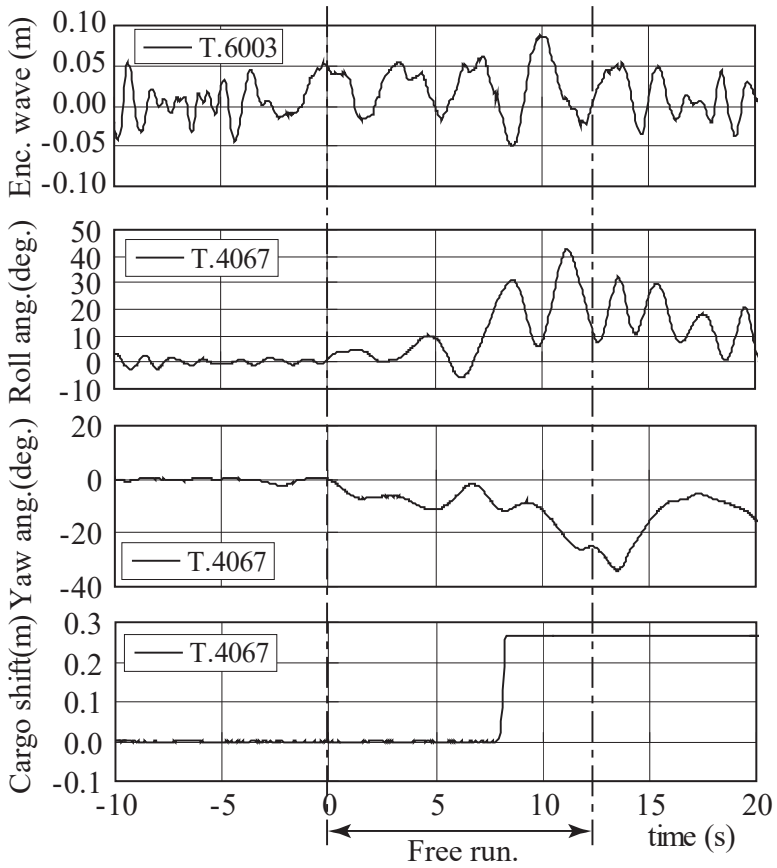


図 4.4　出会波と船体運動，荷崩れ再現装置の時系列

5.　波浪場の面計測技術の研究

5.1 はじめに

海の波は様々な方向からの不規則的な波が重なりあった複雑な現象である．一方，試験水槽においてもこのような自然界の不規則多方向波をコンピュータ制御で制御・運転することにより再現することが可能である．また，波浪中を動揺しながら航行する模型船の周りの波を面的に計測することは，造波抵抗低減等の船型学分野で重要である．船体運動と船の周りの波高分布を同時に計測できれば，荒天時の船の耐航性能を検討する際にも貴重な情報を得ることが出来る．

試験水槽に起こした波の面的波浪場計測法として現状では以下の手法が用いられている．

1) 複数のシングルポイント波高計による計測[1)]と方向波解析

2) 自由表面の可視化と画像処理による計測[2)]

複数のシングルポイント波高計による計測法は，容量線式や抵抗線式などの波高計を多数設置（波高計アレイ）して方向波スペクトルを推定する方法と多数のシングルポイント波高計群による水位計測結果を補間して直接波面形状を求める方法等が考えられている．波浪中を航行する船の造波抵抗の検討を行う場合などの場合のように必要なデータが方向波スペクトルの推定に留まらない場合も多い．多数のシングルポイント波高計による計測は，波高計を水槽に常設することが通常試験の妨げになるとともに，波高計の設置により波面を乱してしまうため通常は行わない．従って，効率的な面的波浪場の計測法として自由表面の可視化と画像解析による解析法が近年，盛んに検討されている．その中で水面上方の参照画像（ランダムまたはグリッド）を光源として，波面の反射像の位置から波面勾配を計測する水面反射法が提案されている．この計測法は，従来の画像処理的な波浪計測法で必要であった水面の散乱性の調整や懸濁物質を水中に溶かし込み空気と水との透過率の差を大きくするなどの工

夫が必要でないため，船舶海洋工学の試験水槽での波浪計測法として有望である．しかしながら，画像処理による計測法は，計測領域と撮像センサーの持つ画像分解能の関係から平面水槽のような広い領域を精度良く計測することは困難である．

本研究では，以上の水槽試験における面的波浪場計測の現状を鑑みて，水中超音波を用いた広域計測法を提案する．超音波を用いた計測法としては，水中発射式や空中発射式波高計が cm 以下の精度で実海計測用として既に実用化されているが，シングルポイントの計測装置である．ここでは新たに水面を 3 次元気・液界面として捉え超音波を用いた面的な波浪計測法を考え，水槽内に起こした方向波の計測とその変形および波浪中の模型船の運動とその周りの波浪場の計測をリアルタイムに効率的に行う計測法技術を開発する．その手法としては，水槽において広範囲に空間分解能の高い計測が可能となる水中超音波を用いる．

5.2 研究の方法

図 5.1 に示すように水槽の底から無指向性の球面音波を発射し，同じく水槽底に設置した受波素子のトランスデューサアレイで一度に受波して面的波浪場を計測しようとするものである．

具体的な研究の進め方は以下の通りである．

① 超音波を使った気・液界面の計測システムの機器構成の検討
② 計測アルゴリズムの検討と予備実験
③ 計測システムの詳細設計と試作
④ 水槽試験での検証

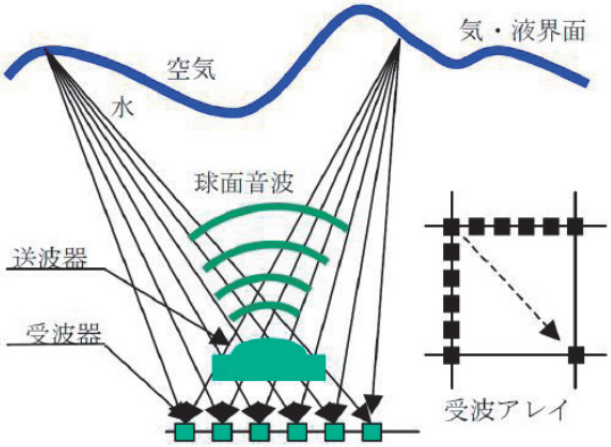


図 5.1 超音波トランスデューサアレイによる波浪場の計測

5.3 研究成果

(1) 2 次元計測実験

無指向性の超音波トランスデューサ 1 個を使って反射物体の反射点位置の同定実験 [3]を行なった．解析アルゴリズムは逆誤差伝搬法を用いた．簡単のために 2 次元空間で反射体が一つの場合を考える．図 5.2 に示すようにある一つの反射体が存在する空間に対して扇型に広がる超音波で計測すると仮定すると，トランスデューサ X1-X7 で計測された反射信号は図に示すように反射体と計測点の距離の変化にしたがって異なった時間に観測される．そこで，受信時間の違いからこの点反射体の位置を特定することが可能となる [4]．

逆誤差伝搬法は，トランスデューサと計測対象間の距離と超音波の TOF（Time Of Flight）の関係から計測対象の位置を推定する手法である．(x2, y2) に存在する点反射体と(x1, y1) におかれた超音波トランスデューサの距離 s は次式で表される．

$$s = \sqrt{(x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2} \tag{5.1}$$

図 5.3 に示すように振動子を中心にこの伝播時間に相当する距離の空間上に反射体が存在するとし，振動子を中心とした球面上のすべての点に輝度値を与え，複数の超音波トランスデューサによって受信された信号を加算していく．この時，最も輝度値が上昇した点を反射点とする．2 次元計測実験で得在られた反射波の計測例として第 1 反射の計測例を図 5.4 に示す．真の反射データに対してエネルギーレベルの低いゴーストが発生している．図 5.5 に第 1 反射と第 2 反射の位置を逆誤差伝搬法で解析して求めた例を示す．第 1 反射から第 10 反射までの反射点位置の同定が出来た．

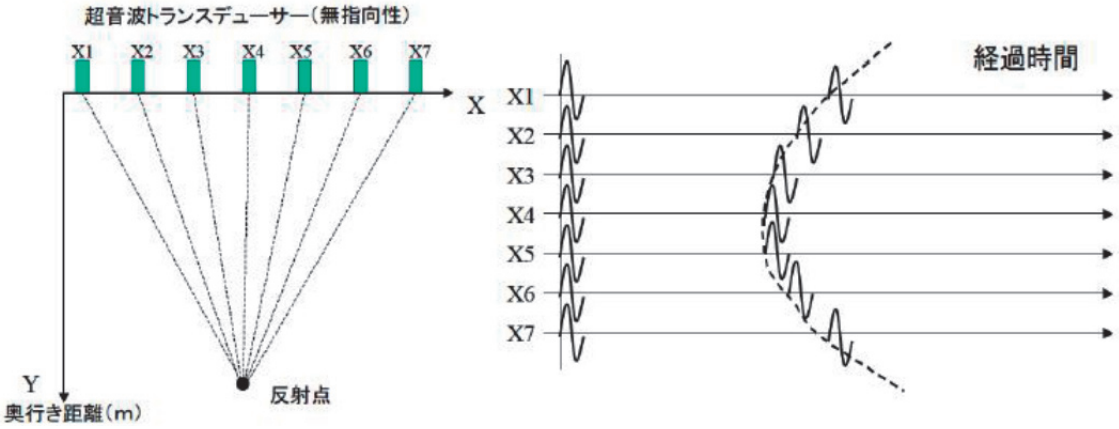


図 5.2 複数の超音波トランスデューサで受信した単一反射点からの反射信号

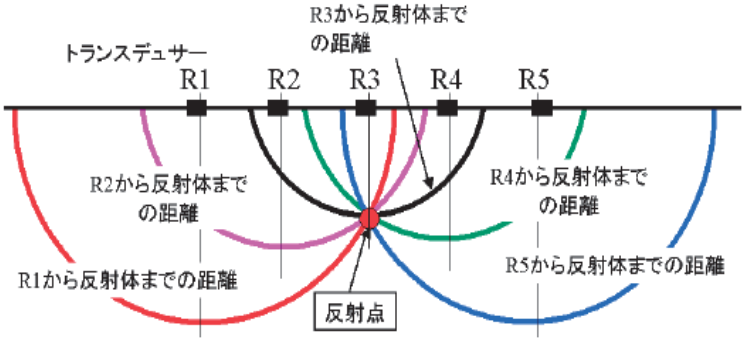


図 5.3 逆誤差伝播法

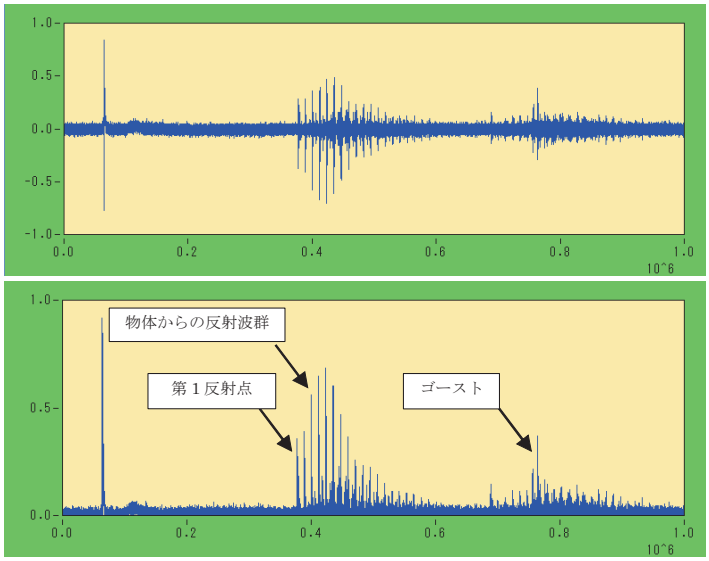


図 5.4 反射波の計測例

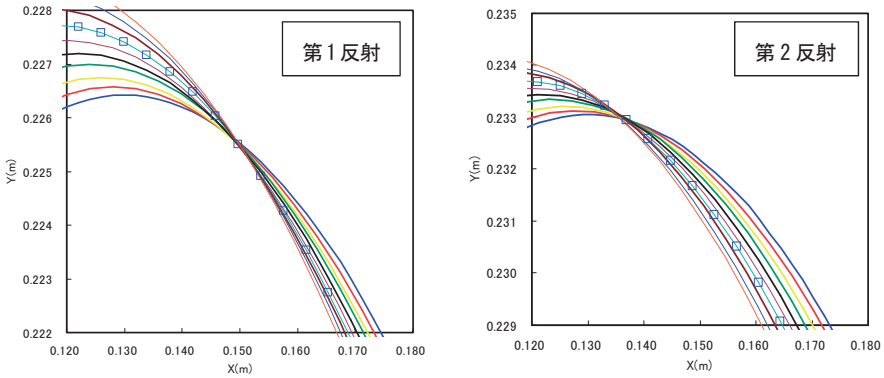


図 5.5 第 1 反射および第 2 反射の同定

(2) 球面音波生成装置の試作とその性能

球面音波発生装置の試作を行なった．まず，試作した防水送受一体型の球面音波生成装置の外観および寸法図を図 5.6 に示す．図 5.7 に防水送受一体型のトランスデューサアレイの内部回路構成を示す．図 5.8 および図 5.9 に試作した送波部の垂直方向と水平方向のビーム角特性を示す．構成する素子数の問題から完全な球面音波は生成できなかったが，素子数を増やすことで対応可能である．図 5.10 に受波素子の水平方向のビーム角特性を示す．受波部は送波部の確認用であり，ほぼ無指向性の特性が確認された．

球面音波生成装置として，より球面状の音波に近い生成装置の製作を行なった．製作した球面音波生成装置の外観を図 5.11 に示す．ドーム状に 20 個の 1MHz の送波用のトランスデューサを配置した．無指向性の送波部を組み合わせて位置と数の組合せで簡便に球面音波を生成することが出来る．

(3) 受波素子アレイの試作

図 5.12 に試作した受波素子アレイの外観を示す．1MHz の送波用のトランスデューサを 4× 4 の正方格子状に配置した．トランスデューサの配置間隔は任意に変更可能である．

(4) 全体計測システムの構築

超音波データ収録用の高速完全同時サンプリング 25MHz×16ch で A/D 変換できるデータ収録装置を完成させ，暗騒音等に対するノイズ対策を行ない球面音波生成から計測までの一連のシステムを完成させた．図 5.13 に完成したシステムの構成を示す．

関数発生装置は，送波器へ与える任意の信号を与える装置でありパルスアンプはこの信号を増幅し，送波器の各ピエゾ素子をドライブするために必要な数 10～数 100V に増幅するための高速高圧絶縁アンプである．受波素

子が受ける信号には常に外来の騒音や暗騒音等が重畳して信号 S/N 比がかなり悪いことが判明した．S/N 比改善のためにフィルターアンプとプリアンプを導入した．チャンネル間は電磁的に完全にシールドを行なった．

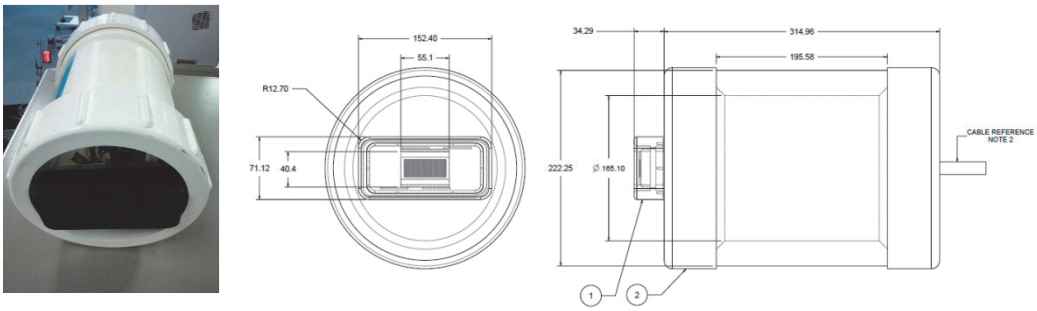


図 5.6 防水送受一体型のトランスデューサアレイ

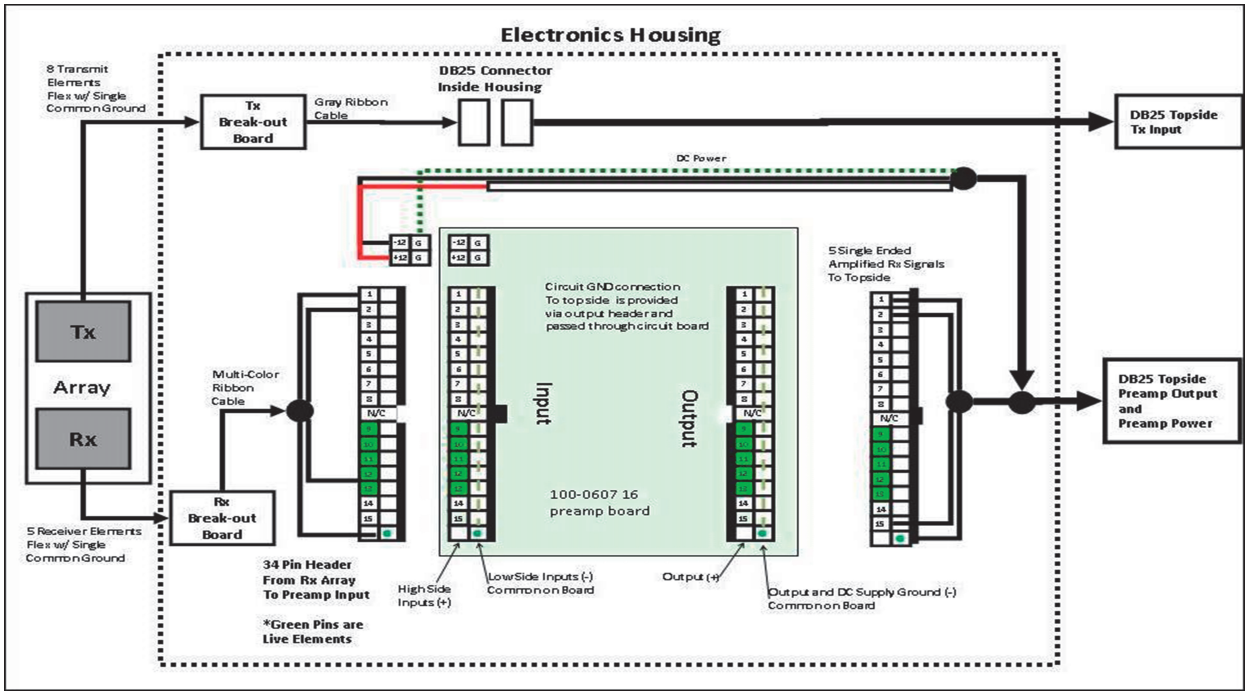


図 5.7 防水送受一体型のトランスデューサアレイの内部回路構成

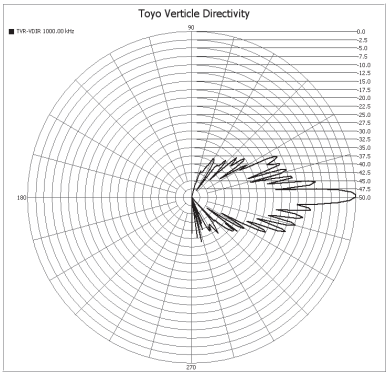


図 5.8 送波部垂直ビーム角特性

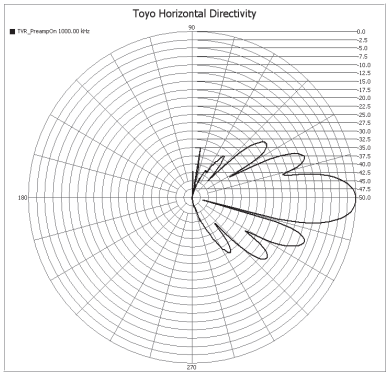


図 5.9 送波部水平ビーム角特性

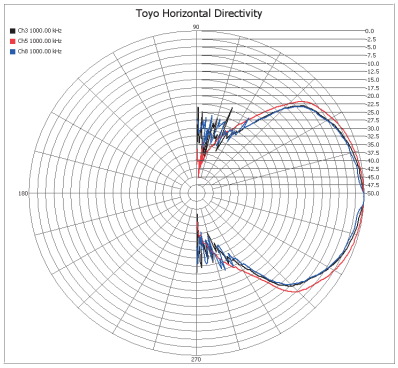


図 5.10 受波部水平ビーム角特性

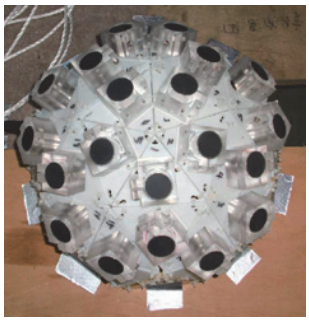


図 5.11 球面音波生成装置

図 5.12 受波素子アレイ

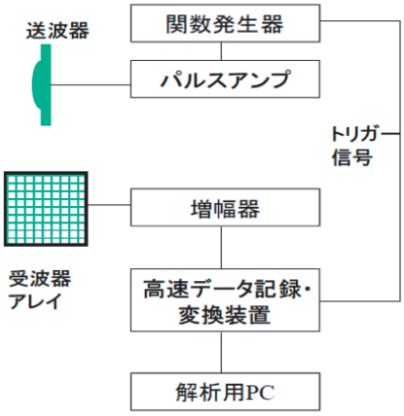


図 5.13 全体計測システムの構成

(5) 水槽試験での検証

完成したシステムを用いて水槽での検証実験を行なった．水槽試験における送波器と受波素子アレイの配置を図 5.14 に示す．水槽試験の様子を図 5.15 示す．実際に計測された波浪中の計測データの一例を図 5.16 に示す．多数の場所からの反射波が重畳された形で計測され，これを分離し，それぞれの反射点位置を同定し 3 次元波面を再構成する必要がある．この数値処理として逆伝搬法を検討し，各受波信号と送波信号の相関演算と相関値の遅延から求める方法を検討したが，研究期間中に解析結果を示すにいたらなかった．今後，数値シミュレーションによる解析アルゴリズムの確認と取得しているデータを用いたデータ解析処理の検証を行う予定である．

5.4 まとめ

計測データにノイズが多く，その対策に時間を要したが，基本的なシステムを完成させ，幾つかの波浪中の反射波データを取得した．本研究で得られた成果は水槽での 3 次元波浪場計測における気・液界面の 3 元リアルタイム計測法の基礎になるものである．

5 章の参考文献

1) 星野邦弘，大松重雄, VLFS の波浪場変形について，船舶技術研究所研究発表会講演論文集 (1998), pp.143-148.
2) 星野邦弘ほか，水槽試験による画像処理の応用（その 1　格子傾斜トモグラフィによる波高分布の計測），西部造船会会報第 98 号 (1999),pp.59-66.
3) 後藤英信，池本義範，星野邦弘，超音波による面的波浪場計測法の予備的検討，第 11 回海上技術安全研究所研究発表会講演集 (2011), pp.3-4.
4) 中塚盛雄，超音波リングアレイプローブを用いた実時間 3 次元画像計測システム，奈良先端科学技術大学院大学修士論文 (2000).

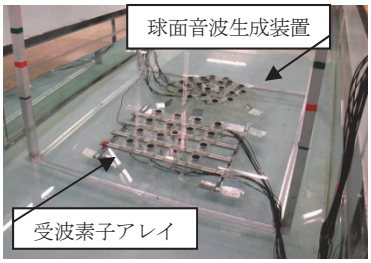


図 5.14 水槽試験における送波器と受波素子アレイの配置

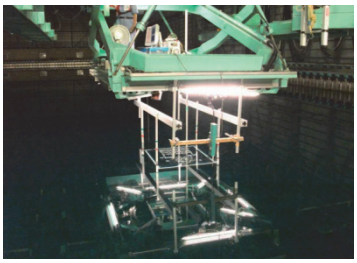


図 5.15 水槽試験

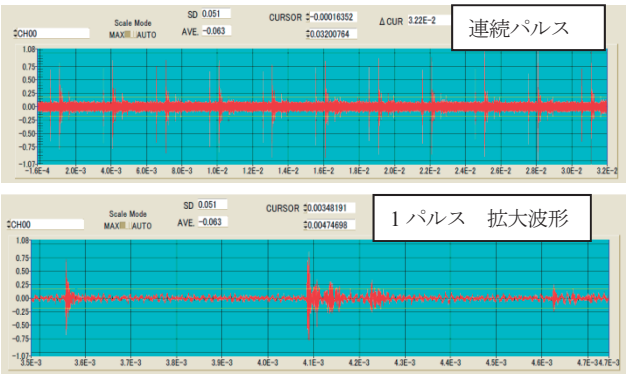


図 5.16 波浪中計測データの 1 例

6.　事故船の波浪中船体運動推定ツールの機能拡張

甲板上に比較的大きな漁網や漁獲物を搭載する漁船では，甲板上の搭載物が荷崩れを起こして定常横傾斜（以下，単に「定傾斜」という.）が付いた状態となったことが切っ掛けで，転覆，沈没等の海難事故に至る場合がある.

搭載物の荷崩れが発生すると，①船体全体の重心位置が船幅方向に移動するので，実質的な復原力が減少する[1)]ことや，②定傾斜した状態では水面下の船体形状が左右非対称となるので，直立時とは波浪中船体運動特性が変化する[2),3),4)]とともに，海水打ち込みの発生状況が変化する[5),6)]ことが，事故の関連要因となると考えられる.

従来転覆事故等の初動分析や詳細解析における波浪中船体運動推定ツールとしては，直立状態を対象とした「STF 法[7)]に基づく特異点分布法による船体運動計算プログラム」を使用していたが，比較的大きな定傾斜角が付いた状態での波浪中船体運動ツールとしては十分ではないと考えられた．そこで，より広範な事故状況に対応した解析ツールの整備を図ることを目的に，荷崩れなどにより定傾斜した船体の流体力特性を考慮した船体運動の推定が可能となるよう，既存の波浪中船体運動推定ツールの機能拡張を行った.

ここでは，事故船の波浪中船体運動推定ツールの機能拡張の概要及びその妥当性検証等のために行った模型実験，並びに，機能拡張した波浪中船体運動推定ツールを用いて定傾斜が船舶の安全性に及ぼす影響について検討した結果について報告する.

6.1 波浪中船体運動推定ツールの機能拡張の概要

水面下の船体形状が左右非対称となった場合の前後揺を除く線形の船体運動方程式は，各運動モードの変位を η_k（k=2：左右揺，k=3：上下揺，k=4：横揺，k=5：縦揺，k=6：船首揺），出会波周波数を ω，時間を t とすると一般に(6.1)式で表せる[4)].

$$\sum_{k=2}^{6}\left\{\left(M_{jk}+A_{jk}\right)\ddot{\eta}_k+B_{jk}\dot{\eta}_k+C_{jk}\eta_k\right\}=F_j\,e^{i\omega t},\quad \mathrm{j}=2,6 \tag{6.1}$$

ここで，M_{jk} は慣性力係数，A_{jk} は付加質量係数，B_{jk} は造波減衰係数，C_{jk} は復原力係数を表し，添え字は k モードの運動による j モード方向に作用する流体力係数などを意味する．また，F_j は j モードの波浪強制力の複素振幅であり，(6.1)式右辺の強制力項は実部をとる．

水面下の船体形状が左右対称の場合，船体運動方程式は縦運動（上下揺，縦揺の連成運動）の組みと横運動（左右揺，横揺，船首揺の連成運動）の組みに分離でき，従来の「STF 法に基づく特異点分布法による船体運動計算プログラム」では，縦運動と横運動を別々に取り扱っていた．一方，水面下の船体形状が左右非対称の場合は流体力特性が変化し，縦運動と横運動の連成流体力が生じることから，船体運動計算において例えば(6.2)式に示すような上下揺と左右揺の連成付加質量等も考慮する必要がある [2), 3), 4)].

$$A_{23}=\int a_{23}(x)dx \tag{6.2}$$

そこで，今回「STF 法に基づく特異点分布法による船体運動計算プログラム」について，定傾斜角を入力として，(6.2)式のような縦運動と横運動の連成流体力を考慮した船体運動計算が行えるように機能を拡張した．その際，定傾斜の原因として，荷崩れ等により重心位置が船体中心から船幅方向に変位する以外に定常風による場合もあることを考慮し，重心の左右位置も入力するようにした．なお，例示した(6.2)式右辺の被積分関数のような 2 次元流体力は，左右非対称の水面下の船体形状に対して Close-fit 法で求めた値を用いた．

6.2 定傾斜状態の有効波傾斜係数に関する模型実験 [8)]

6.2.1 はじめに

船舶復原性規則で用いられている有効波傾斜係数は，左右揺を考慮した 1 自由度横揺運動方程式の強制力項に対応するものであり，これまで直立状態について理論的，実験的に検討が行われてきた [9)].

一方，定傾斜状態の波浪強制力に関しては公表された調査研究例 [10)]が少なく，定傾斜が波浪強制力に及ぼす影響や理論計算法の妥当性等について十分明確になっていないのが現状である．

そこで，漁船模型を用いて水槽実験を行って，定傾斜が波浪強制力，特に有効波傾斜係数に及ぼす影響を調べるとともに，連成を考慮した 1 自由度横揺運動方程式の強制力項について，6.1 節で述べた機能拡張した波浪中船体運動推定ツールによる計算を実施して実験結果と比較することで，推定ツールの妥当性の検証を行った．

6.2.2 実験概要

実験は，当所の動揺水槽（長さ 50m，幅 8m，水深 4.5m）において，規則波中でガイド装置（上下揺，左右揺：自由，横揺等：固定）に検力計を介して取り付けた模型船を横波状態となるように設置して行った（図 6.1）．

(1) 供試模型

使用した模型船は，95GT 型沖合底びき網漁船の 1/19.53 縮尺模型である．表 6.1 に供試船の主要目を示す．計測状態は，漁場発状態 [11)]とした．

(2) 計測項目

計測項目は，上下揺，左右揺，左右揺加速度，横揺方向のモーメント，左右揺及び上下揺方向の力，並びに入射波高である．

(3) 計測条件

今回の実験では，入射波の波岨度（H/λ）を一定（1/50）として波周期（T_w）を変化させて（0.93～2.19s）計測を行った（波長船幅比 λ/B=4.24～23.38）．復原性資料で示された漁場発状態の横揺固有周期は，模型スケールで 1.48 秒である．また，定傾斜角（φs）の設定は，－20 度（波下側傾斜）から+20 度（波上側傾斜）まで 5 度刻みとし，比較のため直立状態でも計測を行った．

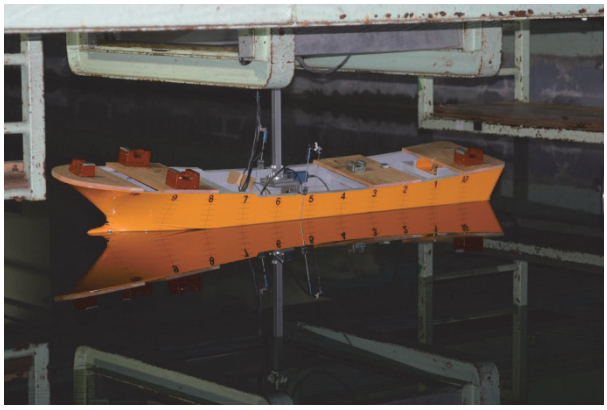


図 6.1 模型船設置状態

表 6.1 主要目

	Loa(m)	Lpp (m)	B (m)	D (m)
Ship	37.80	29.30	6.25	2.60
Model	1.935	1.500	0.320	0.133

6.2.3 実験結果

有効波傾斜係数 γ は，計測された横揺方向のモーメントを計測した入射波の周期に横揺固有周期が一致する重心位置周りの横揺強制モーメントに変換[11]した M_{xG} を用いて，(6.3)式により算定した．

$$\gamma = \frac{M_{xG}}{khW\overline{GM}} \tag{6.3}$$

ここで，k は入射波の波数，h は波振幅，W は排水量，GM は波周期に横揺固有周期が一致する重心位置でのメタセンタ高さである．

(1) 定傾斜角の影響

図 6.2 及び図 6.3 に波下側に定傾斜させた状態で計測したデータから(6.3)式で求めた有効波傾斜係数を示す. 図 6.3 は，設計値の横揺固有周期に対応する波長（λ/B=10.24）での計測結果である．図中には比較のため，参考文献 12）に基づき，左右揺及び上下揺の影響を考慮した 1 自由度横揺運動方程式の強制力項を 6.1 節で述べた機能拡張した波浪中船体運動推定ツールにより計算し，その結果から有効波傾斜係数を算定した値を示した（図 6.2：点線，図 6.3：×印）．また，図 6.2 には船舶復原性規則で規定されている算定式による有効波傾斜係数の値を実線で示した．

図 6.2 及び図 6.3 から，①機能拡張した波浪中船体運動推定ツールによる計算値は，λ/B＞15 に対応する横揺固有周期が比較的長い（重心が高い）状態を除いて，計測データから求めた有効波傾斜係数に近い値となっていること，②直立状態では，規則算定式による値（実線）も計測データから求めた有効波傾斜係数に近い値となっていることが分かる．また，③定傾斜角 φs の絶対値が大きくなるに伴い，計測したデータから求めた有効波傾斜係数は大きくなること，④重心が高くなり横揺固有周期が長くなるほど（同調する波長が長くなるほど）定傾斜角が有効波傾斜係数に及ぼす影響も大きくなることも分かる．

(2) 定傾斜方向の影響

図 6.4 に定傾斜角を 10 度として波上側に傾斜させた状態（φs=+10 度.：□印）と波下側に傾斜させた状態（φs=－10 度.：×印）で計測したデータから求めた有効波傾斜係数を示す．計測したすべての波長で，波上側に傾斜させた状態と波下側へ傾斜させた状態の有効波傾斜係数に有意な差異がみられた二次元模型[13]の場合と異なり，今回計測した漁船の場合は，定傾斜の影響は横揺固有周期が比較的短い重心が低い状態に限定されている．また，機能拡張した波浪中船体運動推定ツールによる計算値（点線）も，計測データから求めた有効波傾斜係数と同様の傾向を示している．

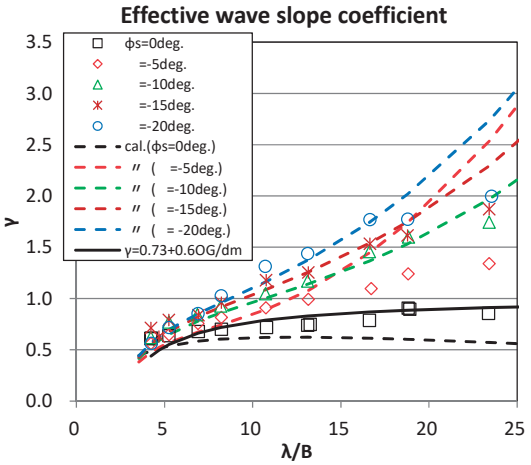


図 6. 2　定傾斜角（波下側）が有効波傾斜係数に及ぼす影響

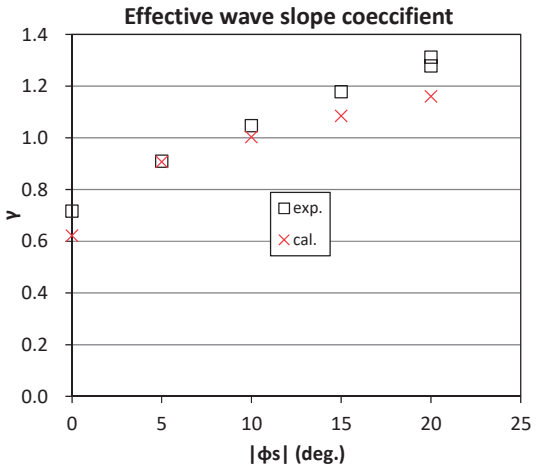


図 6. 3　定傾斜角（波下側）が有効波傾斜係数に及ぼす影響(λ/B=10.24)

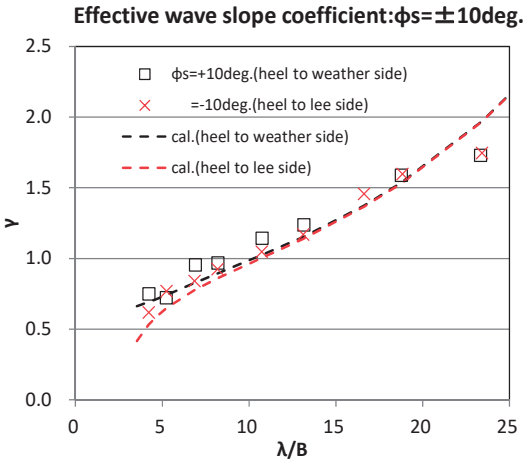


図 6. 4　定傾斜方向が有効波傾斜係数に及ぼす影響(φ s=±10 度.)

6. 2. 4 おわりに

定傾斜を付けた漁船模型を用い横波状態で波浪強制力等を計測し，計測値から有効波傾斜係数を算定し，機能拡張した波浪中船体運動推定ツールによる計算値と比較した．その結果，機能拡張した波浪中船体運動推定ツー

ルによる計算値は，横揺固有周期が比較的長い（重心が高い）状態を除いて，計測データから求めた有効波傾斜係数に近い値となっていることを確認した．また，機能拡張した波浪中船体運動推定ツールを用いることで，計測データからの算定値で示された，①有効波傾斜係数は定傾斜角の増大に伴い大きくなること，②重心が高くなり横揺固有周期が長くなるほど定傾斜が有効波傾斜係数に及ぼす影響も大きくなること，③同じ定傾斜角であっても傾斜する方向によって有効波傾斜係数が異なる状態があることなど，定傾斜が有効波傾斜係数に及ぼす影響について推定できることを確認した．

6.3 定傾斜した漁船の波浪中運動に関する模型実験 [14)]

6.3.1　はじめに

定傾斜状態の波浪中船体運動に関しては，これまでに，Lewis form 断面をもつ 2 次元柱状体の横波中での運動や相対水位変動について理論計算や模型実験で検討 [2), 3), 5)]が行われた他，実用船型の前後揺を除く波浪中船体運動について船速がある場合も含めた理論計算 [4)]も実施されている．しかしながら，特に船速がある場合については，公表された調査研究事例が少なく，定傾斜が波浪中の船体運動に及ぼす影響や理論計算法の妥当性等について十分明確になっていないのが現状である．

そこで，漁船模型を用いて定傾斜を付けた状態で波浪中自由航走実験を行い，定傾斜が波浪中の船体運動に及ぼす影響を調べるとともに, 6.1 節で述べた機能拡張した波浪中船体運動推定ツールによる計算を実施して実験結果と比較することで，推定ツールの妥当性の検証を行った．

6.3.2 実験概要

実験は，当所の実海域再現水槽において，規則波中でオートパイロット装置を用いて模型船を波との出会角が一定となるように自由航走させて行った．

(1) 供試模型

使用した模型船は, 80GT 型まき網漁船の 1/11.3 縮尺模型である. 表 6.2 に供試船の主要目を示す. 計測状態は，満載出港状態（表 6.3）とした．また，定傾斜角（φs）は－10 度.（左舷傾斜）とし，比較のため直立状態でも計測を行った．図 6.5 に定傾斜を付けた状態の模型船の写真を示す.

(2) 計測項目

計測項目は，船体運動（横揺，縦揺，船首揺），重心位置の加速度（前後，左右，上下）及び相対水位変動 4 か所（Stem，S.S.5 左右舷，S.S.2 左舷），並びに，船速及び航跡である．

(3) 計測条件

今回の実験では，波岨度（H/λ）を一定（1/50）として波長（λ）と出会角（χ）を変化させて計測を行った．船速は，別途実施した操縦流体力の計測を行った船速（フルード数 Fn=0.218）とした．計測を行った規則波の波長は，波長船長比（λ/L）で 0.75～2.0 を基本とし，出会角によっては更に長い波長の波でも計測を行った．また，出会角の設定は，真追波（0 度）から右舷側横波（270 度）まで 45 度間隔とした．

表 6.2　主要目

	Loa(m)	Lpp (m)	B (m)	D (m)
Ship	37.77	29.50	7.10	2.80
Model	3.342	2.611	0.628	0.248

表 6.3　計測状態

	W(t)	GM (m)	dm (m)
Ship	285.70	1.87	2.36
Model	0.1981	0.166	0.209

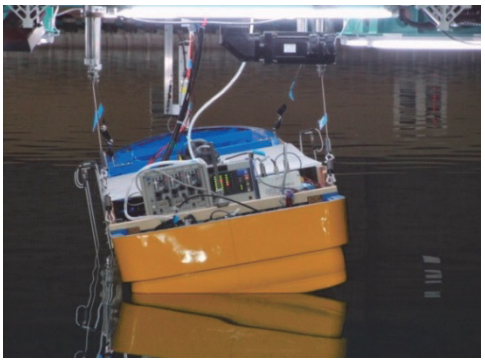


図 6.5　供試模型（定傾斜状態）

6.3.3 実験結果

計測データは，通常の波浪中動揺試験と同様に，波長船長比をベースに応答の振幅，位相遅れとしてまとめ，機能拡張した波浪中船体運動推定ツールによる計算値と比較した．ここでは，計測値と計算値の比較例として，波浪中の安全性に関連する横波中の横揺及び斜め追波中の相対水位変動について示す．

(1)横波中の横揺

波浪中で定傾斜した状態では，水面下の船体形状が左右非対称となったことに伴い，縦運動との連成が生じることや横揺強制力自体が変化するため，定傾斜角の大きさによって横揺応答が変化する．

図 6.6 に今回の実験における横波中の横揺振幅の計測結果を最大波傾斜で無次元（φ_a/kh）して示す．□印が直立状態，△印が波上側に 10 度定傾斜した状態の横揺振幅の計測値であり，実線で直立状態（黒色），波上側に 5 度（赤色），10 度（緑色），15 度（茶色）定傾斜した状態について機能拡張した波浪中船体運動推定ツールを用いた計算値を示している．

図 6.6 から，①波上側に 10 度定傾斜した状態で計測された横揺振幅が同調点付近の波長（λ/L=1.25，1.50）で直立状態に比べて小さくなっており，機能拡張した波浪中船体運動推定ツールによる計算値もほぼ同様の傾向を示すこと，②波浪中船体運動推定ツールを用いた計算によると定傾斜角が 5 度までの横揺応答は直立状態とほぼ同じであることなどが分かる．

(2) 斜め追波中の相対水位変動

図 6.7 に斜め追波中（χ=45 度.）の S.S.5 における weather side の相対水位変動の計測結果を波振幅で無次元化（ζ_r / h）して示す．□印が直立状態，△印が波上側に 10 度定傾斜した状態の相対数変動の振幅の計測値であり，実線で直立状態（黒色），波上側に 5 度（赤色），10 度（緑色），15 度（茶色）定傾斜した状態について機能拡張した波浪中船体運動推定ツールを用いた計算値を示している．

図 6.7 から，①波上側に 10 度定傾斜した状態で計測された相対水位変動が直立状態に比べて小さくなっていること，②機能拡張した波浪中船体運動推定ツールを用いた計算値と計測値との対応は良好なこと，③波浪中船体運動推定ツールを用いた計算によると定傾斜角が 5 度までの相対水位変動の大きさは直立状態とほぼ同じであることなどが分かる．

6.3.4 おわりに

定傾斜を付けた漁船模型を用いた波浪中自由航走実験を実施し，計測結果を 6.1 節で述べた機能拡張した波浪中船体運動推定ツールによる計算結果と比較した．その結果，ここで比較例を示した横波中の横揺及び斜め追波中の相対水位変動のように，機能拡張した波浪中船体運動推定ツールによる計算値と計測値との対応は概ね良好であることを確認した．また，今回実験を行った漁船模型では．定傾斜角が 5 度までは横波中の横揺及び斜め追波中の相対水位変動の大きさとも直立状態とほぼ同じであるが，定傾斜角が 10 度以上になると船体応答が大きく変化することが計算で示された．しかしながら，定傾斜が波浪中の船体運動に及ぼす影響に関しては，船型による違いが大きいと想定されることから，他の船型についても定傾斜が流体力係数に及ぼす影響も含めてさらに検証を深める必要があると考える．

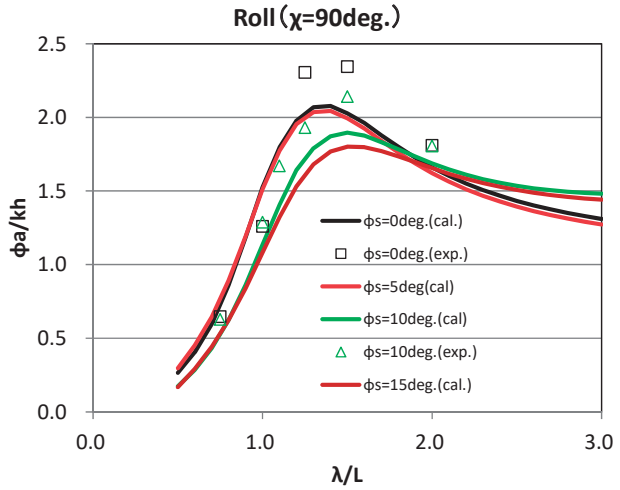


図 6.6　定傾斜角が横揺振幅に及ぼす影響（χ=90 度.）

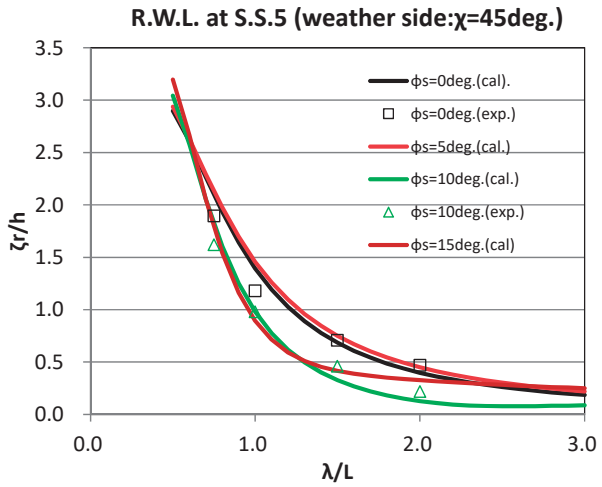


図 6.7　定傾斜角が相対水位変動に及ぼす影響（船体中央波上側：χ=45 度.）

6.4 定傾斜が船の安全性に及ぼす影響の検討 [15)]

6.4.1 はじめに

6.1 節で説明した機能拡張した波浪中船体運動推定ツールを用いることで, 定傾斜が船の安全性に及ぼす影響について検討できる．ここでは，漁船の運用上の安全策について検討を行なう基礎資料とするために，漁網の荷崩れ等を想定して，直立状態も含めて 4 ケースの定傾斜角に対して船体中央部の海水打ち込み確率を計算し，打ち込み確率に及ぼす定傾斜角の影響を調べた結果を報告する．

6.4.2 計算概要

今回は，実際の状況で問題となると考えられる，定傾斜側に横波を受けた状態で航行している場合の船体中央部における海水打ち込み確率を検討した．計算は，代表的な 80GT 型まき網漁船を対象に，主要な操業海域の波浪データを基に設定した短期海象について実施した．

(1) 計算対象船

計算を行った船は 6.3 節で模型実験結果を報告した 80GT 型まき網漁船（表 6.2）であり，具体的な検討は，模型実験を行った満載出港状態（表 6.3）について行った．

また，表 6.4 に今回の検討で変化させた定傾斜角（φs）の設定値と打ち込み限界（有効乾舷）とした船体中央部の定傾斜側のブルワーク上端の喫水線上高さ（H_m）及び各定傾斜角に対応する船幅方向の船体重心の船体中心

線からの距離（C.L.-G）を示している．定傾斜角が 15 度の場合（φs=15 度.）は，直立状態（φs=0 度.）に比べて有効乾舷が約 6 割減少する．

表 6.4　計算条件

ϕ s (deg.)	H_m (m)	C.L.-G (m)	$H_m(\phi)/H_m(0)$
0	1.69	0.00	1.00
5	1.37	0.15	0.81
10	1.04	0.30	0.62
15	0.71	0.44	0.42

(2) 短期予測計算

海水打ち込み確率の計算は，通常の短期予測計算の手順に従って行った．その際必要となる相対水位変動の応答関数は, 水面下の船体形状の左右非対称性を考慮できる機能拡張した波浪中船体運動推定ツールにより求めた．波スペクトラムは，ISSC スペクトラムを用いた．波スペクトラムの方向分布は $\cos^2\chi$ を仮定し，波の主方向に対する船の向き（出会角）は横波状態（χ=90 度.）で一定とした．

海水打ち込み確率 P は，船体中央部の相対水位変動の標準偏差（R_{zr}）の計算結果と表 6.4 に示したブルワーク上端の喫水線上高さ（有効乾舷）H_m から(6.4)式を用いて求めた．

$$P = \exp(-\frac{H_m^2}{2R_{zr}^2}) \tag{6.4}$$

検討する短期海象としては，九州周辺のまき網漁船の主要な操業海域の一つである五島列島周辺海域について当所が所有している波浪データベース [16]を用いて求めた有義波高（$H_{1/3}$）及び有義波周期（$T_{1/3}$）の平均値（$H_{1/3}$=1.64m, $T_{1/3}$=6.16s）を基本として，有義波高が変化した場合についても計算を行った．

6.4.3 計算結果

(1) 相対水位変動の標準偏差

表 6.5 に船体中央部（S.S.5）の相対水位変動の標準偏差 R_{zr} の計算結果を有義波高 $H_{1/3}$ で無次元化して示す．今回の計算状態では定傾斜角 φs が増加するに従い相対水位変動の標準偏差 R_{zr} も大きくなり，定傾斜角が 15 度の場合（φs=15 度.）は，直立状態（φs=0 度.）に比べて約 1.14 倍大きくなっている．これは，海水打ち込み確率（(6.4)式）を考えると，有効乾舷 H_m が直立状態に比べ約 1 割小さくなることに相当する．

表 6.5　相対水位変動の標準偏差の計算結果（船体中央波上側：χ=90 度.）

ϕ s (deg.)	$R_{zr}/H_{1/3}$	$R_{zr}(\phi s)/R_{zr}(0)$
0	0.173	1.00
5	0.182	1.05
10	0.191	1.10
15	0.197	1.14

(2) 海水打ち込み確率

相対水位変動の標準偏差（R_{zr}：表 6.5）と有効乾舷（H_m：表 6.4）から船体中央部（S.S.5）における海水打ち込み確率 P を求めた結果を図 6.8 に示す．横軸は定傾斜角 φs，縦軸は打ち込み確率 P の常用対数値（$Log_{10}P$）をとっている．また，図中には，①有効乾舷は直立時の値（H_m=1.69m）で一定とし相対水位変動の標準偏差（R_{zr}）のみ定傾斜角により変化するとして求めた打ち込み確率 P0_(R_{zr})と，②相対水位変動の標準偏差は直立時の値

（$R_{zr}/H_{1/3}$=0.173）で一定とし，有効乾舷（H_m）のみ定傾斜角により変化するとして求めた打ち込み確率 P0_(H_m)も示している．また，図 6.9 に有義波高が変化した場合（$H_{1/3}$=2.32m, 3.28m）の海水打ち込み確率 P の計算結果を示す．

図 6.8 及び図 6.9 から，

①船体が直立している状態（φs=0 度.）では，有義波高が 1.64m の場合の打ち込み確率は 10 の-7 乗未満であり，現状のブルワーク上端高さで船体中央における海水打ち込みを十分制限していると考えられること，

②定傾斜角（φs）が 10 度を超える状態では，海水打ち込み確率は 10 の-2 乗を超過するようになり，直立状態（φs=0 度.）で有義波高が 2 倍（$H_{1/3}$=3.28m）となった場合と同程度の海水打ち込みの発生が予測されること，

③定傾斜角が増加するに従い，海水打ち込み確率が急激に増加する主因は，定傾斜に伴う有効乾舷（ブルワーク上端の喫水線上高さ）の減少によるものであること

などが分かる．そのため，定傾斜が発生しないように搭載物等を確実に固縛することが，海水打ち込みを制限するために重要であると考えられる．

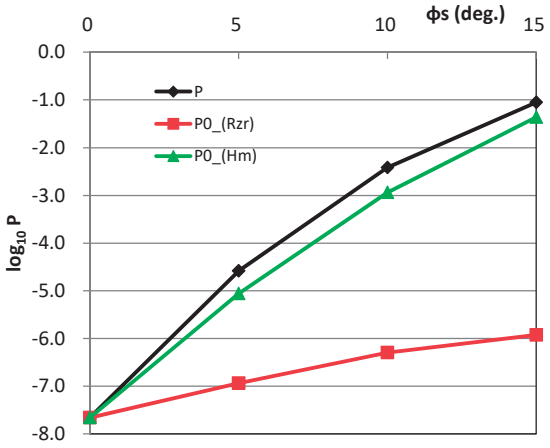


図 6.8　定傾斜角が海水打ち込み確率に及ぼす影響（船体中央波上側：$H_{1/3}$=1.64m，$T_{1/3}$=6.16s）

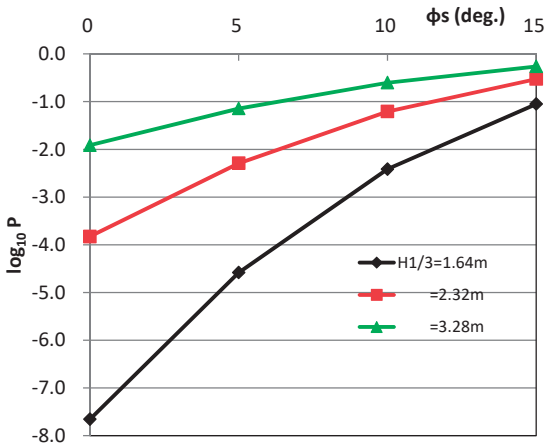


図 6.9　定傾斜角が海水打ち込み確率に及ぼす影響（有義波高パラメータ）
（船体中央波上側：$T_{1/3}$=6.16s）

6.4.4 おわりに

6.1 節で説明した機能拡張した波浪中船体運動推定ツールを使用して，代表的な 80GT 型まき網漁船を対象に，主要な操業海域の波浪データを基に設定した短期海象について，定傾斜角をパラメータに船体中央部の海水打ち

込み確率の計算を行い，海水打ち込みを制限して安全性を確保するためには搭載物等を確実に固縛するなどして定傾斜の発生を抑制することの重要性を示した.

6.5 まとめ

より広範な事故状況に対応した解析ツールの整備を図ることを目的に，荷崩れなどにより定傾斜した船体の流体力特性を考慮した波浪中船体運動の推定が可能となるように既存の船体運動推定ツールの機能拡張を行い，定傾斜した漁船の有効波傾斜係数や波浪中船体運動に関する模型実験結果と比較し妥当性を検証した．更に，機能拡張した波浪中船体運動推定ツールを用いて，代表的な 80GT 型まき網漁船を対象に定傾斜が打ち込み確率に及ぼす影響について調査し，海水打ち込みを制限して安全性を確保するためには定傾斜の発生を抑制することの重要性を示した.

なお，本研究では，波浪中における船体の過渡応答を評価しうる，たたみ込み積分型船体運動計算 [17]についても検討しており，別の機会に報告する予定である.

謝　辞

6.2 節の模型実験及び 6.4 節の検討の一部は，科研費（課題番号 26289341）により実施しました．関係各位に謝意を表します.

6 章の参考文献

1) 森田知治：船舶復原論—基礎と応用—，海文堂（1985），pp.82-84.
2) 小林正典：船体傾斜時の波浪中の運動について（第 1 報），西部造船会会報，第 51 号（1976），pp.171-178.
3) 慎燦益：傾斜船の横波中の運動について，西部造船会会報，第 63 号（1981），pp.79-95.
4) Lee, C.M. and Kim, K. : Prediction of Motion of Ships in Damaged Condition in Waves, Proceedings of the 2nd International Conference on Stability of Ships and Ocean Vehicles（1982），pp.287-301.
5) 慎燦益:傾斜した二次元柱状体甲板上への海水打ち込み限界波高について, 西部造船会会報, 第 60 号(1980)，pp.129-143.
6) 慎燦益, 柿見紀一郎, 東濱清 : 横波中にある傾斜船の甲板上への海水打ち込み限界波高について，西部造船会会報，第 64 号（1982），pp.135-143.
7) Nils Salvesen, E. O. Tuck and Odd Faltinsen : Ship Motions and Sea Loads, Transactions of the Society of Naval Architects and Marine Engineers, Vol.78（1970），pp.250-287.
8) 田口晴邦，沢田博史，原口富博：漁船の有効波傾斜係数に及ぼす定傾斜の影響，日本船舶海洋工学会講演会論文集, 第 23 号（2016），pp.479-480.
9) 水野俊明：船体の横揺れ運動における有効波傾斜係数について，日本造船学会論文集, 第 134 号（1973），pp.85-102.
10) 藤野正隆, 桜井和之：ストリップ法による横揺れ波浪強制力の推定について，日本造船学会論文集, 第 152 号（1982），pp.125-137.
11) 田口晴邦, 上野道雄, 塚田吉昭, 沢田博史, 佐藤陽平：漁船の有効波傾斜係数に関する模型実験，日本船舶海洋工学会講演会論文集, 第 6 号（2008），pp.245-248.
12) 田才福造, 高木幹雄, 稲田勝：船の横運動波浪強制力及び横波中の横揺の計算法について，西部造船会会報, 第 62 号（1981），pp.137-149.
13) 田口晴邦, 沢田博史, 原口富博, 黒田貴子：定傾斜した二次元模型の有効波傾斜係数に関する水槽実験，日本船舶海洋工学会講演会論文集, 第 21 号（2015），pp.493-494.

14) 田口晴邦，宝谷英貴，黒田貴子，塚田吉昭，宮崎英樹，沢田博史，原口富博：定傾斜した漁船の波浪中運動に関する模型実験，平成 25 年度（第 13 回）海上技術安全研究所研究発表会講演集，PS-12（2013），pp.19-20.
15) 田口晴邦, 原口富博：まき網漁船の海水打ち込みに及ぼす定傾斜の影響, 日本船舶海洋工学会講演会論文集, 第 19 号（2014），pp.493-494.
16) 辻本勝, 石田茂資：日本近海の波と風の統計的性質, 日本船舶海洋工学会論文集, 第 2 号（2005），pp.19-27.
17) 前田久明, 林昌奎 , 奥山淳一郎, 武田 信玄 : 多方向不規則波中を航行する船舶の応答の実用的時間領域解析法ー（第 1 報）線形応答解析法についてー，日本造船学会論文集，第 180 号（1996），pp.141-150.

7. 緊急停止時・浅水域等における流体力特性推定手法の開発

船舶の操縦運動シミュレーションのための数学モデルおよびモデル中係数は計画速力付近の航走状況を対象に決定されることが多い．一方，緊急停止操船の際はプロペラを逆転させて後進力を得るが，その際に船体に作用する流体力は複雑であることが知られているものの，これらを推定するための研究例は十分では無い．また，港内や河川のような浅水域を航行する場合，水深が十分深い場合と比較して船体に作用する流体力が異なることが知られている．このような通常航走時と異なる流体力特性の推定は船舶の安全運航のために重要である．

しかしながら，プロペラ逆転時や浅水域航走時の流体力特性は通例では水槽模型試験を行って特定するため，本研究の目的の 1 つである海難事故初動分析のためにはなるべく少ない情報量と時間でこれらを推定できることが望まれる．そこで本章では，船舶設計時に入手できる情報からこれら流体力特性を推定できる手法の開発を目的として, プロペラ逆転時に船体に作用する流体力の簡易推定手法と操舵影響等を考慮できる数学モデルの開発, および浅水域航走時の操縦流体力の実用的推定手法の開発を行った.

7.1 プロペラ逆転時の不平衡流体力の簡易推定法の開発

プロペラを逆転させると舵中央状態であっても有意な横力および回頭モーメントが船体に作用することが知られている．これらは不平衡流体力と呼ばれ，藤野らによる研究 [1)]が代表的である．不平衡流体力はプロペラ推力やトルクと同様にプロペラ回転数の二乗に比例することが知られており，(7.1)式のようにモデル化されている．ここで，Y_P, N_P：船体横方向および回頭方向への不平衡流体力(N)（およびモーメント(Nm)），ρ：流体密度，n：プロペラ回転数(rps)，D：プロペラ直径(m)，L：船長(m)，Y_P^*, N_P^*：無次元化された不平衡流体力，であり，横力の正方向は船体右方，モーメントの正方向は鉛直上より見て時計回り方向である．

$$\begin{cases} Y_P = \rho n^2 D^4 \cdot Y_P^* \\ N_P = \rho n^2 D^4 L \cdot N_P^* \end{cases} \tag{7.1}$$

操縦運動時の船体に作用する操縦流体力の数学モデルは多様に提案されており，モデル中の操縦流体力微係数は船体主要目等の船舶設計時においても入手できる情報から推定できる回帰式 [2)]が提案されている．そこで本研究でも，プロペラ逆転時の不平衡流体力の実用的な推定方法として，無次元不平衡流体力のモデル化およびモデル中係数値を推定する船型主要目等を入力とした回帰式を提案する．

まず，回帰分析および船種ごとの不平衡流体力の傾向分析のため，水槽模型試験による不平衡流体力解析結果を収集してデータベース作成を行った．データ収集は過去の文献調査および海上技術安全研究所における水槽試験実施により行った．なお，対象とする不平衡流体力は前進航走状態に計測された結果としている．文献調査によって収集したのは藤野ら [1)]，芳村ら [3)]の試験結果であり，目視で実験点を読み取った．なお藤野らは，同じ船型に対して 2 種のプロペラを用いた場合，不平衡流体力の挙動は定性的には同様だが一部で定量的に異なることを実験的に示している．そのため，船型が同じでも使用プロペラが異なる場合は別個の結果として取り扱い，回帰分析時にはプロペラ要目も考慮することとした. 表 7.1 に収集した供試船の船型およびプロペラの要目を示す.

表 7.1 不平衡流体力データベース 供試船の船型・プロペラ主要目

No	Ship Type	Hull				Propeller			
		L_{pp} (m)	B (m)	d (m)	C_b	Wing Num.	D (m)	P(0.7R) (m)	EAR*
1	Tanker	2.500	0.500	0.183	0.823	5	0.0603	0.0366	0.720
2	Tanker	2.500	0.500	0.183	0.823	4	0.0886	0.0585	0.720
3	Tanker	2.500	0.411	0.174	0.738	4	0.0886	0.0585	0.720
4	Tanker	2.500	0.411	0.174	0.738	5	0.0603	0.0366	0.720
5	Container	3.000	0.428	0.163	0.581	6	0.1089	0.1215	0.790
6	Tanker	4.000	0.800	0.293	0.82	5	0.0966	0.0586	0.720
7	Tanker	4.400	0.793	0.283	0.831	5	0.1206	0.0804	0.651
8	Container	4.000	0.587	0.208	0.568	5	0.1500	0.1500	0.700
9	Tanker	2.909	0.527	0.189	0.809	4	0.0896	0.0646	0.431

＊：プロペラ展開面積比

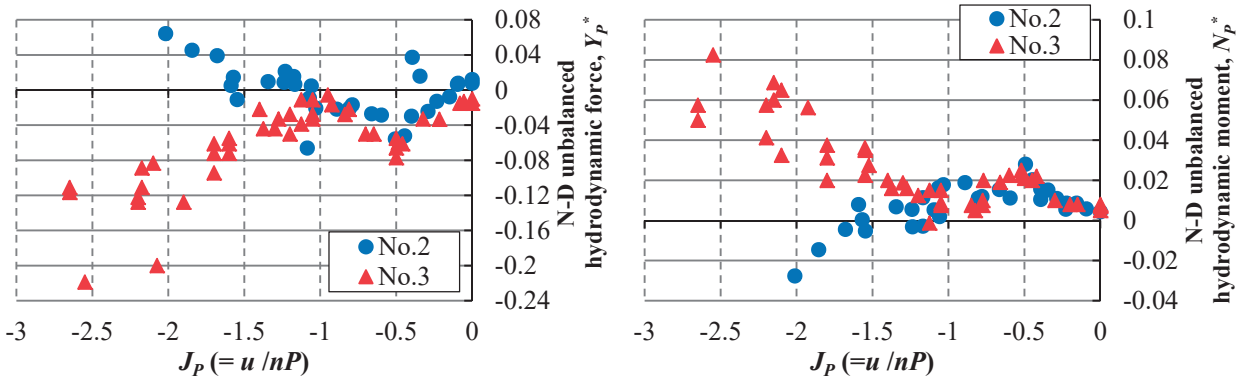


図 7.1 プロペラ逆転時不平衡流体力の例（Ship No.： 3 & 9）

収集したデータベース中の無次元不平衡流体力およびモーメントの一例として，表 7.1 中の No.2, 3 の結果を図 7.1 に示す．これらの横軸は前後方向船速 u (m/s)とプロペラピッチ P (m)を用いた見掛けのプロペラ前進定数 J_P $(= u/nP)$であり，藤野ら [1]に従った傾向整理である．傾向を観察すると，単なる線形的挙動では無く，極値が複数個存在する複雑な挙動であり，データベース中の他船の結果も概ね同様であった．これら流体力傾向を良好に捉える一意な関数形の検討や関数中係数等の精度良い推定は基本的に困難を伴うことが予想される．一方，不平衡流体力の傾向を観察すると，J_Pが 0 から-1 に減少するにつれ，両船とも横力は減少した後に値が 0 に近づき，モーメントは増加した後に 0 に近づく．この傾向はほぼ全ての供試船で同様であった．そして，J_Pが-1 から負側では供試船ごとに傾向は異なっているが，凡そ正負のどちらかに大きくなる傾向である．ここで，J_Pの定義に沿って $J_P = -1$ の船尾流場状況を考察すると，J_Pの分母はプロペラによって押し出される逆転流の流速と解釈できるため，$J_P = -1$ とは船尾付近では前方から来る船速成分の流速とプロペラ逆転流の流速が凡そ拮抗している状態と見なせよう．よって，$-1 < J_P < 0$ では逆転流成分が支配的で $J_P < -1$ では船速成分が支配的であると見なせる．つまり，不平衡流体力のモデリングも $J_P = -1$ を境に分けて考慮できる．そこで，少々大胆ではあるが，本研究では無次元不平衡流体力Y_P^*を(7.2)式のように J_Pの範囲ごとの線形モデルとし，モーメントN_P^*を(7.3)式のように船体重心からのプロペラ位置x_P'とプロペラ位置を基準としたY_P^*の作用位置x_{Pub}'の線形和で表現した着力点位置とY_P^*の積で表すこととした．

$$Y_P^* = \begin{cases} a_{ub1} \cdot J_P + b_{ub}, \text{ where } \mathrm{c}_{ub} \le J_P \le 0.0 \\ a_{ub2} \cdot (J_P + 1), \text{ where } -1.0 \le J_P < \mathrm{c}_{ub} \\ a_{ub3} \cdot (J_P + 1), \text{ where } J_P < -1.0 \\ \mathrm{c}_{ub} = (a_{ub2} - b_{ub}) / (a_{ub2} - a_{ub1}) \end{cases} \tag{7.2}$$

$$N_P^* = (x'_P + x'_{Pub}) Y_P^* \tag{7.3}$$

次に(7.2)，(7.3)式中の係数および定数を推定する回帰式を作成するため，データベース中の供試船ごとに式中の係数等を同定し，それらと船型およびプロペラの主要目を種々に組み合わせた変数について相関性解析を行い，(7.4)式の通り回帰式を作成した．

$$\begin{cases} a_{ub1} = -4.298 \cdot \dfrac{\pi D_P{}^2 \cdot P \cdot EAR}{LBd(1-C_b)} + 0.2029 \\ a_{ub2} = 0.3953 \cdot \dfrac{EAR \cdot \pi D_P{}^2}{Bd} - 0.2006 \\ a_{ub3} = 0.3583 \cdot C_b (L/B) - 1.454 \\ b_{ub1} = -0.01475 \cdot L/B + 0.073 \\ x_{Pub}{}' = 385.2 \cdot \left(\dfrac{\pi D_P{}^2 \cdot P \cdot EAR}{LBd(1-C_b)} \right)^2 - 18.66 \cdot \dfrac{\pi D_P{}^2 \cdot P \cdot EAR}{LBd(1-C_b)} + 0.312 \end{cases} \tag{7.4}$$

(7.4)式の回帰式によって推定した係数・定数を用いて(7.2)，(7.3)式の不平衡流体力数学モデルを計算した結果と実験値の比較を図 7.2 に示す．図 7.2 の実験値は図 7.1 と同じである．$-1 < J_P < 0$ の領域では両船とも計算値と実験値が良好に一致している．一方，$J_P < -1$ では，No.3 では凡その一致を確認できるが，No.2 では勾配の正負が異なるため良好な推定とは言えない．なお，表 7.1 中の供試船全てについて同様の比較を行ったが，一部は満足な推定精度では無かったことを補足しておく．ただし，大凡の精度であっても，本研究の提案によって少ない船型情報でプロペラ不平衡流体力を簡易に推定できることは貴重であると言えよう．今後も不平衡流体力データベースの拡充を継続し，提案手法の推定精度向上を図りたい．

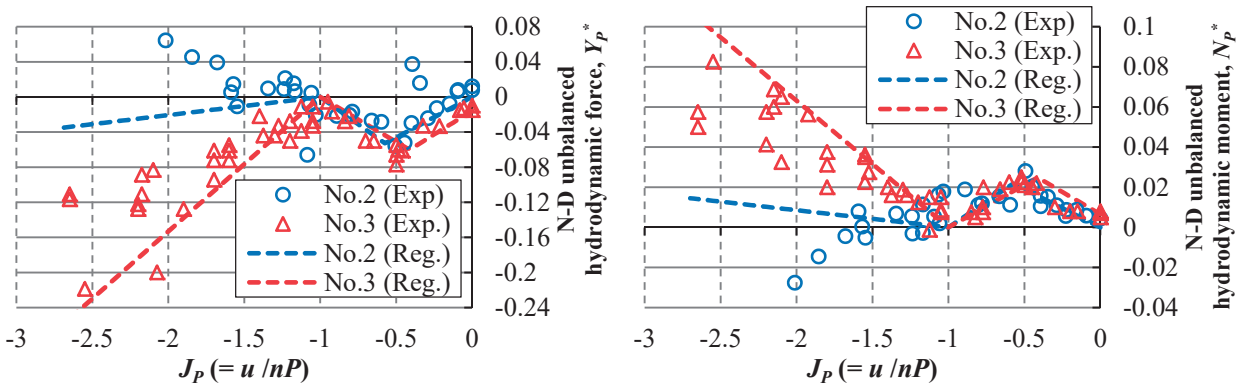


図 7.2 不平衡流体力 推定モデルによる計算値と実験値の比較（”Exp.”：実験値，”Reg.”：計算値）

7.2 プロペラ逆転時の舵力数学モデルの開発

プロペラ逆転時は正転時よりも舵効きが低下することが知られており [4]，プロペラ逆転を伴う操縦運動推定を行う場合も計算上舵力を無視することが通例である．しかし，港内における離着桟操船やその場旋回など，低速

状態でプロペラ逆転を伴う場合は船体に作用する他の流体力も弱いため舵力は相対的に大きくなることが考えられるため，プロペラ逆転時の舵力を推定できることは有意義である．そこで，本研究では操縦運動数学モデルで用いられる一般的な舵直圧力数学モデルを基に，プロペラ逆転時に適用できる舵直圧力モデルの開発を行った[5]．

まず，舵直圧力F_Nの数学モデルは(7.5)式の通り表せる．ここで，A_R：舵面積(m^2)，U_R：舵有効流入速度(m/s)，C_N：舵直圧力係数，α_R：舵有効流入角，u_R：船体前後方向舵有効流入速度(m/s)，v_R：船体横方向舵有効流入速度(m/s)，である．

$$\begin{cases} F_N = \dfrac{1}{2}\rho A_R U_R{}^2 \cdot C_N\left[\alpha_R\right] \\ U_R = \sqrt{u_R{}^2 + v_R{}^2} \end{cases} \tag{7.5}$$

前進航走状態でプロペラを逆転させた場合，舵位置の流場では船体前方からの流速成分とプロペラ逆転流成分により混成されるため，舵の前後方向有効流入速度u_Rはこの両成分を考慮してモデル化されるべきである．そこで本研究では，従来のu_Rモデルの理論的前提であるプロペラ運動量理論をベースにして，(7.6)式のようにu_Rモデルを提案した．u_{RPR1}はプロペラディスク面内の有効流速，u_{RPR2}は面外の有効流速，η はプロペラ直径と舵高さの比，K_Tはプロペラ推力係数である．u_{RPR2}およびu_{RPR1}の第 1 項は前後方向船速 u と舵位置での有効伴流率$(1-w_R)$の積による船速成分である．u_{RPR1}の第 2 項はプロペラ運動量理論から導いた船体停止時のプロペラ逆転流による流速成分である．k_{xPR}は無限遠方上の逆転流有効流速を基準とした舵位置での比率を示す係数であり，停止状態での実験結果から値は 0.144 と定められた．また，u_{Rsq}の第 3 項は逆転流による流速成分が船体停止状態を前提としていることを実用的に補正する項であり，補正係数は実験結果から-0.176 と定められた．これら定式化の詳細については著者らの参考文献[5]を参照願う．

$$\begin{cases} u_R = \mathrm{sgn}\left(u_{Rsq}\right)\cdot\sqrt{\left|u_{Rsq}\right|} \\ u_{Rsq} = \eta\cdot\mathrm{sgn}\left(u_{RPR1}\right)\cdot u_{RPR1}{}^2 + \left(1-\eta\right)\cdot u_{RPR2}{}^2 + C_{PR}\cdot u^2 \\ u_{RPR1} = u\left(1-w_R\right) + nDk_{xPR}\sqrt{-8K_T/\pi} \\ u_{RPR2} = u\left(1-w_R\right) \end{cases} \tag{7.6}$$

7.3 緊急停止操船シミュレーションによる提案手法の検証

前節までに提案したプロペラ逆転時の不平衡流体力モデルとモデル中係数推定手法および舵直圧力モデルの検証として，緊急停止操船の数値シミュレーションを行ってその挙動を検証する．対象船は表 7.1 中の No. 9 であり，KVLCC として呼称されるベンチマーク船である．計算条件は実操船に倣い，設計速力相当で直進中にプロペラ回転数を落として逆転させ，最後には初期回転数の 50%値の一定速で逆転させるものとする．操縦運動数学モデルの定式化や他の詳細は参考文献[5]と同じであり，対象尺度は模型船である．

まず 7.1 節で提案した不平衡流体力モデルとモデル中係数の推定回帰式の検証のため，不平衡流体力に水槽試験による実験値を直接用いる条件と提案手法を用いる条件の比較を行う．図 7.3 に航跡および前後方向・横方向船速と回頭角の時系列を示す．これらは前後方向船速が 0 になるまでの結果である．提案手法による不平衡流体力を用いた条件では，停止距離に 1 船長程度の差が確認できるが，実験値を直接用いた条件とほぼ同様の船体運動が得られている．よって，提案手法による不平衡流体力の推定精度は一定の水準を満たしていると言えよう．

次に，7.2 節で提案したプロペラ逆転時舵直圧力モデルの検証のため，舵角を 0 度に保った条件と左右それぞれに 35 度にした条件の比較を行う．図 7.4 に航跡および前後方向船速・回頭角・舵直圧力の時系列を示す．操舵はプロペラ回転数が停止して逆転を始めた直後に開始している．なお，計算に用いた不平衡流体力は本研究の提案手法による．結果の通り，操舵の方向に船体が動いていることが確認できる．また，舵直圧力は船速の低下に伴

い徐々に落ちているため，緊急停止操船時に操舵による回避も加える場合は船速が十分に高くないと効果が発揮されないことが考察できる．以上により，提案した舵直圧力モデルにより操舵影響が検討できることが示された．

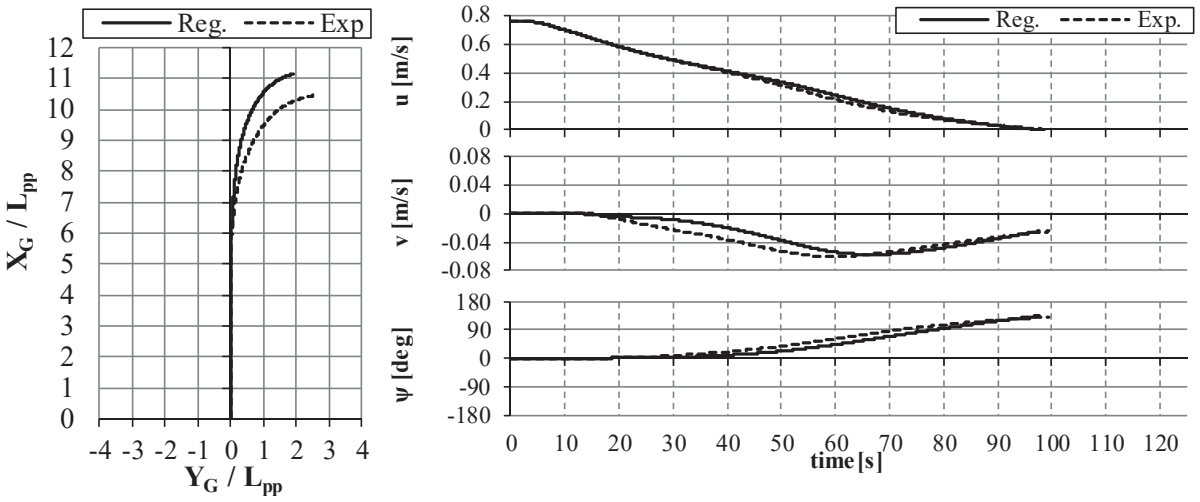


図 7.3 緊急停止操船のシミュレーション結果（不平衡流体力 ”Reg.” ：提案法，”Exp.” ：実験値）

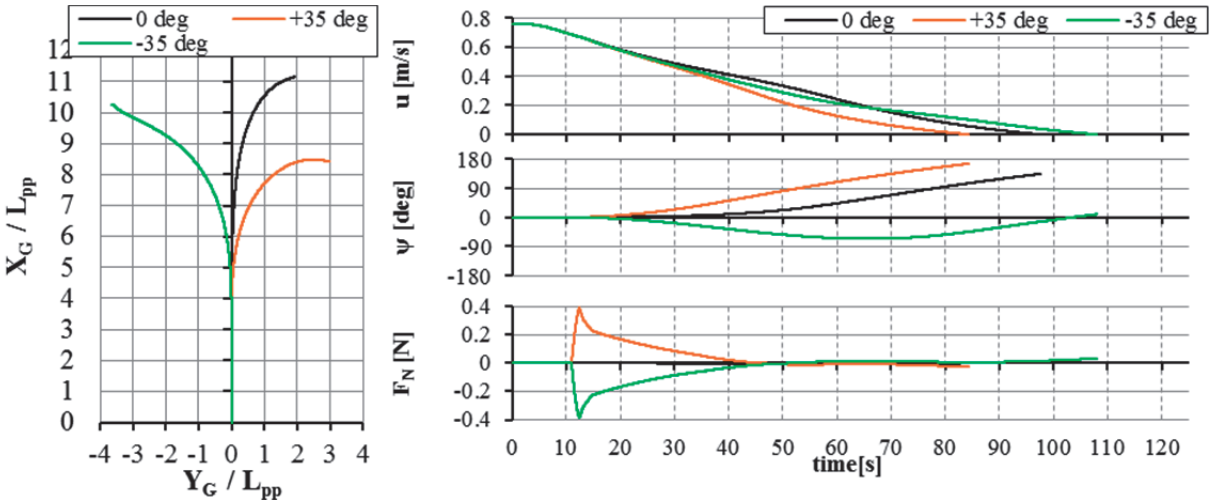


図 7.4 操舵を伴う緊急停止操船のシミュレーション

7.4 浅水域における操縦流体力推定手法の実用的推定手法の開発

浅水域では船体に作用する操縦流体力が深水域中と異なり，水深が浅くなる程大きくなることが知られている[6]．浅水域の操縦流体力特性を得るには水槽模型試験によるデータ取得が最も堅実であるが，浅水域の環境を再現できる水槽設備の絶対数は決して多くない．数値計算による推定では野中[7]が細長体理論による定式化の例があり，近年では CFD による推定例も増えつつある．そして，船型主要目を入力とした回帰式によって操縦流体力微係数の水深影響を推定する手法も提案されている．本研究では，事故初動分析にも対応できる浅水域操縦流体力の実用的手法として，貴島が提案した回帰式に基づく手法[6]を基にした浅水影響推定手法を提案する．

まず，貴島は浅水域の操縦流体力モデルを(7.7)式とし，それぞれの微係数に(7.8)式に示す関数$f(h)$を掛けることで浅水影響を考慮する手法を提案した．ここで，$\beta(=tan^{-1}(-v/u))$：斜航角，r'：無次元回頭角速度，$h(=d/H)$：喫水と水深の比，である．(7.8)中の n，a_1，a_2，a_3 は表 7.1 中の船型主要目を入力とした水槽実験結果に基づく回帰式によって計算される．

$$\begin{cases} Y'_H = Y'_\beta \beta + Y'_r r' + Y'_{\beta\beta}\beta|\beta| + Y'_{rr} r'|r'| + \left(Y'_{\beta\beta r}\beta + Y'_{\beta rr} r'\right)\beta r' \\ N'_H = N'_\beta \beta + N'_r r' + N'_{\beta\beta}\beta|\beta| + N'_{rr} r'|r'| + \left(N'_{\beta\beta r}\beta + N'_{\beta rr} r'\right)\beta r' \end{cases} \tag{7.7}$$

$$f(h) = \begin{cases} \dfrac{1}{(1-h)^n} - h, \text{ for } Y'_\beta, Y'_{\beta\beta}, Y'_{\beta rr}, N'_\beta, N'_r \\ 1 + a_1 h + a_2 h^2 + a_3 h^3, \text{ for } Y'_r, Y'_{rr}, Y'_{\beta\beta r}, N'_{\beta\beta}, N'_{rr}, N'_{\beta\beta r}, N'_{\beta rr} \end{cases} \tag{7.8}$$

これら貴島法は水槽試験実施を必要とせず少ない主要目情報で浅水影響を考慮できるため実用性は高いが，(7.7)式の関数形のみにしか適用することができない．ここで，貴島法による浅水影響は(7.9)式のように浅水域の操縦流体力の総和と深水域の操縦流体力の総和との比関数で表すことで代表させることが可能である．つまり，これらの比関数を時々刻々計算し，深水域を前提とした操縦流体力モデルに掛ければ合理的に浅水影響を考慮することが可能である．この操作により任意の操縦流体力モデルで浅水影響を含めた操縦運動計算が可能になるため，実用性の更なる向上が期待される．

$$\begin{cases} g_Y(h,\beta,r') = Y'_{H(shallow)} / Y'_{H(deep)} \\ g_N(h,\beta,r') = N'_{H(shallow)} / N'_{H(deep)} \end{cases} \tag{7.9}$$

提案手法による浅水影響を検証するため，3 通りの水深条件による旋回試験シミュレーションにて航跡等の確認を行う．対象船は 7.3 節と同じ KVLCC で，操縦運動計算のための定式化も同じである [5]．操縦流体力モデルは Kang[8]によって提案された低速状態・大斜航状態に対応可能なモデルを選定し，時々刻々の操縦流体力計算値と(7.9)式の貴島法に基づく比関数の積により浅水影響を与えている．なお，比関数の値は，元文献の水槽試験結果の上限値と下限値を参照し，その値を超えないように数値上の処理を施している．水深条件は無限水深に加え，喫水水深比が 0.33, 0.5 相当になる水深を与えた. なお, プロペラ推力と舵直圧力には浅水影響を考慮していない. 図 7.4 に舵角 10 度の旋回試験シミュレーションによる航跡および船速合速度，斜航角，回頭角速度の時系列を示す．まず，喫水水深比が大きくなる程，つまり水深が低くなる程に旋回径が大きくなっている．これは過去の研究による知見と同様である．また，回頭角速度は過渡応答を除いて有意な差は無かったが，斜航角は水深が低い程に値が小さい．これは浅水影響により横方向の操縦流体力が相対的に増加したことを示すものであり，本研究の提案手法で浅水影響が定性的に表現できていることを示していると言える．

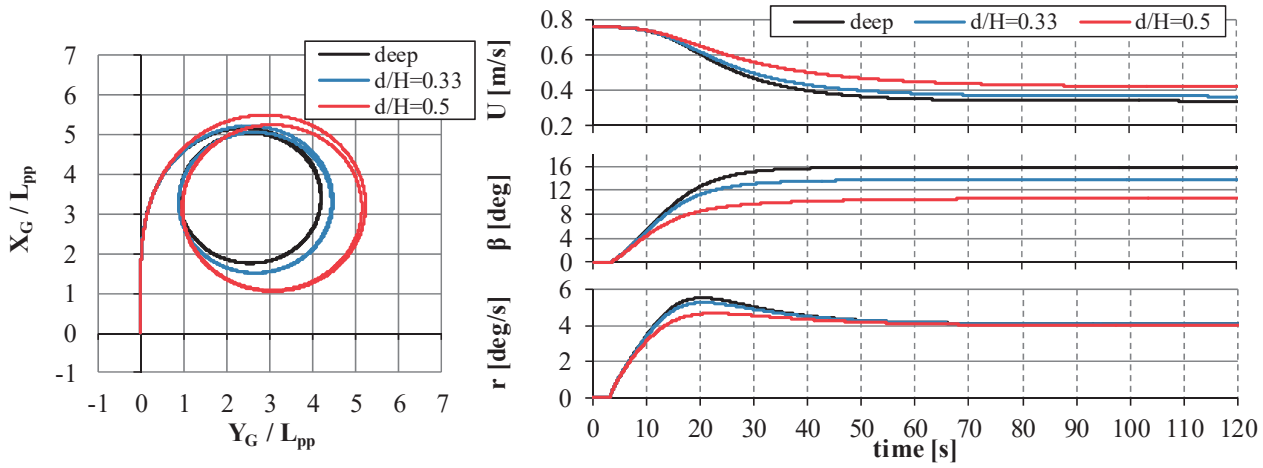


図 7.5 旋回試験シミュレーションによる提案手法の浅水影響（"deep" ：d/H=0 で計算）

7.5 まとめ

本章ではプロペラ逆転時に作用する不平衡流体力および浅水域航走中の操縦流体力について，海難事故初動分析時のように入手できる船舶情報に制限がある中でも対応可能な実用的推定手法を提案した．また，プロペラ逆転時においても操舵の影響を考慮できる数学モデルを開発した．そして，これら提案手法および数学モデルの検証のため，操縦運動計算を行ってその妥当性を示した．

7 章の参考文献

1) 藤野正隆，切田篤：プロペラ逆転による制動時の船の操縦性について（第一報），関西造船協会誌，第 169 号 (1978)，pp.57-70.
2) 例えば 貴島勝郎，名切恭昭：船舶操縦性能推定の実用的計算法に関する研究，西武造船会々報，第 105 号 (2002)，pp.21-31.
3) 芳村康男，野本謙作：増減速を伴う操縦運動の取り扱いについて，日本造船学会論文集，第 144 号 (1978)，pp.57-69.
4) L. Wagner Smitt and M.S. Chislett：Course stability while stopping, J. Mechanical Engineering Science, Vol. 14 No. 7 (1972) , pp.181-185.
5) 北川泰士，塚田吉昭，宮崎英樹：プロペラ逆転時のプロペラ・舵の数学モデルに関する検討，日本船舶海洋工学会講演会論文集，第 20 号 (2015)，pp.117-120.
6) 例えば 日本造船学会 運動性能研究委員会：操縦性研究の設計への応用（運動性能研究委員会 第 12 回シンポジウムテキスト），(1995)，pp.35-39.
7) 野中晃二：対称運動への細長体理論の適応について（第 2 報 浅水域の場合），日本造船学会論文集，第 162 号 (1987)，pp.118-124
8) D. Kang and K. Hasegawa：Prediction method of hydrodynamic forces acting on the hull of a blunt-body ship in the even keel condition, Journal of Marine Science and Technology, Vol.12 Issue.1 (2007), pp.1-14.

8. 操船リスクシミュレータにおける表現技術の向上と評価

操船リスクシミュレータは，海難事故の解析や，高速船の運航や自動避航操船機能などの知的なシステム等新しい概念のシステムが導入された際の安全性・有効性の評価に使用される．こうした評価において，操船リスクシミュレータ上での気象海象や他船の動き等環境条件の表現は，評価に影響を与えるため，評価対象に応じて必要なレベルの臨場感を与える必要がある．こうした考えから，以下に示す交通流を構成する自船以外の船舶の知能化を行うフレームワークの製作の他，波の表現の高度化や，特殊な船舶の操船システムの構築等を行った．

今回の報告ではこの内，インテリジェントシミュレータの構築の内容について報告する．

8.1 概要

新しい概念のシステムの評価においては，被験者が操船体験する船舶（以下，「自船」と呼ぶ.）で，新しい概念の機能に基づく操船を操船リスクシミュレータで体験する必要があるほか，相手船が新しい概念の機能により操船されている状況も，自船から体験して評価する必要がある．従来，操船シミュレーション上の交通流を構成する船舶（以下，「他船」と呼ぶ.）は，シナリオで設定されたウェイポイント（変針点）で構成される計画航路に沿って操船される．しかし，この他船の表現では，例えば自動避航操船機能により自船が変針した場合，他船との見合い関係が変わる他，他船は自船の変針による見合い関係の変化に関係なく計画航路通り動くため，矛盾のある不自然な動きとなり，評価者を惑わせ評価に影響を与える可能性がある．このため，本研究では全他船が交通環境条件を考慮して，例えば避航操船等知的な操船機能を持たせ，知的な機能による操船を自船及び他船か

ら当該システムの評価者が経験できるようにすることができ，矛盾の少ない他船の操船を実現するインテリジェントシミュレータの構築を行った．

8.2 インテリジェントシミュレータの構築 [1)]

新しい概念のシステムの船舶への導入時には，当該システムの導入コストに対するシステムの効用を評価する費用対効果分析が求められるが，同システムの効用（例えば，同システムを支援システムとして適用した場合のヒューマンエラーの低減率）は，そのシステムの運用経験がなく統計量としての評価は難しい．このため，システムの効用は，シミュレータにより当該システムを模擬利用した経験に基づく熟練者の専門家判断として効用の評価者により主観確率や期待効用等として定量化される．この主観確率や期待効用等の取得時には，当該システムの使用経験は必要不可欠であり，操船リスクシミュレータは当該システムの模擬使用経験を与える有効な手段の１つである．

さらに，新しい概念のシステムによる船船間の相互作用を操船リスクシミュレータ上で表現するには，交通流を構成する船舶をシミュレーション実施中に当該システムの機能に則って制御する必要があるが，従来の操船リスクシミュレータでは，あらかじめ設定された計画航路に基づく航行が基本であり，周りの船舶の動きに対応した操船はできなかった．このため，長時間のシミュレーションの場合，自船の動きに影響されて望む見合い関係を設定できなかったり，航法に反して他船が自船に向かってくる等，不自然な動きとなった．また，当該システムの機能を実現するには，その機能を表現するインテリジェンスを他船に持たせる必要もある．

そこで，本研究では，全他船に船船間の相互作用等知的な動きを組み込むため，自動避航操船機能を例に操船リスクシミュレータに全他船を制御する枠組みを導入し，その機能の確認を行う．

8.2.1　自動避航操船機能の操船リスクシミュレータへの組み込み

操船リスクシミュレータでは，交通流を構成する他船はあらかじめ設定された計画航路に沿って航行する（この航行状態を，以下「航路航行モード」という）．また，必要に応じて対象船を指定して，その船舶を航路航行モードから手動操船モードに切り替え，指令針路および指令速度を手動で設定することにより航行させることができる．

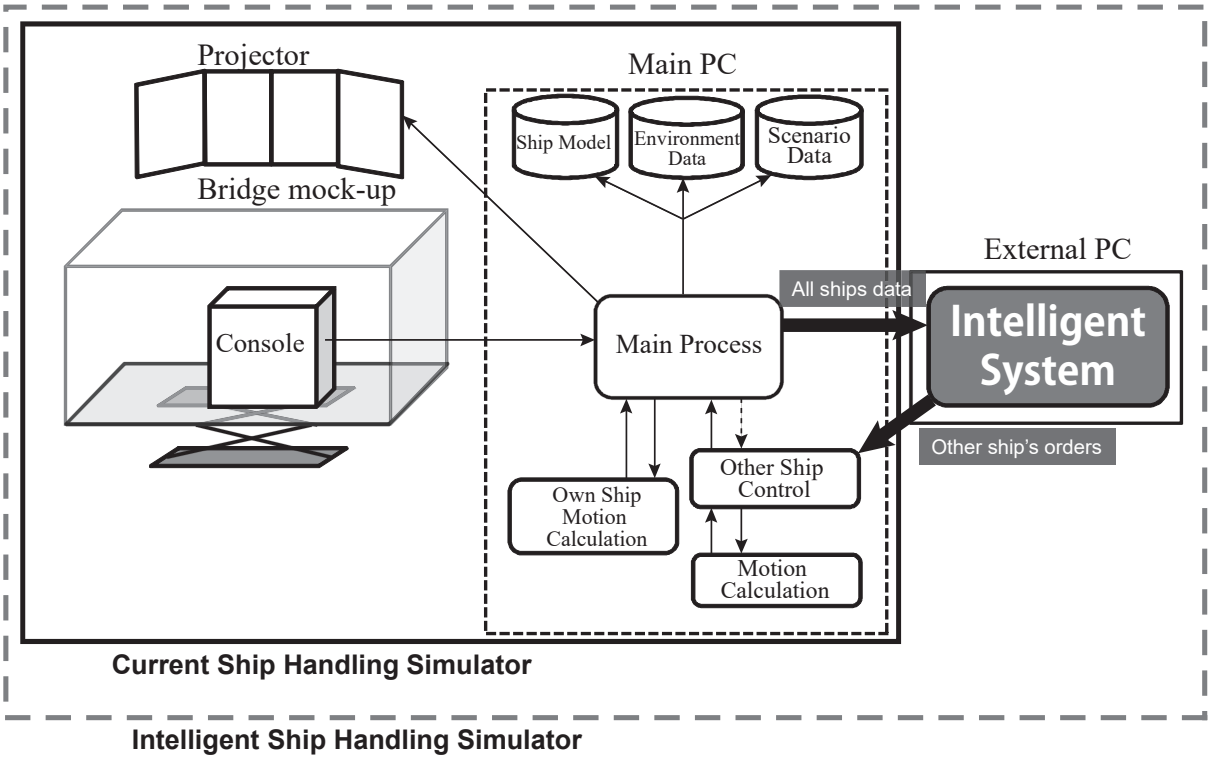


図 8. 1　操船リスクシミュレータのシステム構成図

自動避航操船機能の組み込みでは，この航路航行モードと手動操船モードの切り替えおよび手動操船モードでの指令針路および指令速度の設定機能を利用して，シミュレータ操作室のシミュレータ外部からの他船を制御するフレームワークを作成した．

図 8.1 に操船リスクシミュレータの船舶運動部分の概略図を示す．実線で囲まれた部分が従来の操船リスクシミュレータであり，自船の運動は，船橋で設定された舵角やエンジンテレグラフ値に基づいて，運動計算プロセスで 1 ステップ分計算される．他船の運動は，他船制御プロセスで他船毎に航路航行モードあるいは手動モードが設定され，それぞれのモードに基づいて指令針路および指令速度が出力される．次に，他船運動計算プロセスで，指令針路および指令速度から指令舵角と指令エンジンテレグラフ値が求められ，他船の運動を計算する．

図8.1の破線部分が,自動避航操船機能に代表される知的なシステムを組み込んだ操船リスクシミュレータで,知的なシステムは外部計算機に導入されており，主計算機の負担を増やさないようになっている．

避航操船を実施するためには,各時刻における位置や速度,アクチュエータ等の船舶の状態を表す状態量の他,計画航路や船舶の属性が必要になる．また，主計算機のシミュレーション実行中の負荷を最小限にするため，通信量を極力低減する必要がある．

このため，通信は以下の手順で実施した．

(1) 操船リスクシミュレータ初期化時：　計画航路や船舶属性等をシナリオファイルから取得

(2) シミュレータ試験実行時：　1 秒毎に全船の状態量のみを取得し，各船舶の手動操船への切り替えの有無と指令針路・船速のみを出力

これにより，実時間での自動避航機能を実現した．

8.3　自動避航操船機能のシミュレータへの導入

8.3.1　自動避航操船アルゴリズム

自動避航操船アルゴリズムとしては大阪大学で開発された Fuzzy 推論による自動避航システム [2)]の一部を改良して用いた．このシステムは，1987 年に最初に開発されたものであるが，今回は避航指令部分を C++言語によりプログラム化し，シミュレータ用に再構成して，操船リスクシミュレータに組み込んだ．具体的には，上述の自動避航システムのうち，各船が入手した他船情報から周りの状況を認識して避航操船判断を行い，操船指令を出すまでのアルゴリズムを用いた．

各船の避航操船判断は，基本的には，(1) 遭遇船との衝突の危険の評価，(2) 避航の要否の判断，(3) 避航が必要な場合，避航手段の決定，(4) 避航手段に基づいた避航操船手順の実行，(5) 避航操船手順実現のための指令針路および指令船速を出力，の順に実施される．

(1)　衝突の危険と避航の可否の評価基準

遭遇船舶との衝突の危険の評価および避航の要否の判断は，衝突危険度(CR)により判断される．CR は，自船と遭遇船との相対的な位置および進路，速度から求まる TCPA（Time to Closest Point of Approach:最接近時間）および DCPA（Distance to Closest Point Approach: 最接近距離）を船舶の大きさおよびその操縦性能の影響を考慮して修正された修正 TCPA および修正 DCPA を基に，Fuzzy 推論により求める．

修正 TCPA と修正 DCPA は，熟練者の専門家判断により，それぞれ 8 つの Fuzzy 言語変数と 5 つの Fuzzy 言語変数で規定された Fuzzy メンバーシップ関数として表現されている．また，衝突危険は 8 つの Fuzzy 言語変数で規定された Fuzzy メンバーシップ関数として表現されており，この修正 TCPA および修正 DCPA の Fuzzy 言語変数と衝突危険の Fuzzy 言語変数を Fuzzy 制御則としてまとめられ, CR はこの Fuzzy 制御則に基づく Fuzzy 推論から-1 から 1 の値として求められる．なお，CR 値が正の場合は最接近点通過前，負の場合は最接近点通過後を示し，CR の絶対値が大きいほど衝突の危険が大きいことを示している．

(2)　避航操船判断

避航操船の要否の判断や避航方法は衝突危険度と見合い関係に依存する．本アルゴリズムでは，遭遇船との見合い関係を 6 つのパターンに分類し，パターン毎に避航開始の CR の閾値と避航手段を設定した．このため，避航操船判断の要否は，現状の CR が見合い関係で設定される CR の閾値を超過するかどうかで判断され，避航する場合は，各見合い関係に設定された避航法に基づいて避航操船が実行される．

また，交通流を構成する他船群に避航操船アルゴリズムを適用する場合，通常 1 対 1 のみではなく 1 対多での遭遇を考慮する必要がある．このため，避航の要否の判断においては，設定した距離以内にいる全ての船舶に対して CR を計算し，最も CR の絶対値の大きな船舶に対して避航操船の要否の判断を行い，避航が必要な場合にはその船を対象に避航させる．

(3)　避航操船の手順の実現

本アルゴリズムでは，航行状態を航路航行モード(WP mode: Way Point mode)，避航モード（Avoiding mode），平行操船モード(Parallel manoeuvring mode)，復帰モード(Returning mode)の 4 つのモードで表現する．避航時の操船モードと操船モードの遷移条件を，図 8.2 に示す．

船舶は通常，計画航路の基づいた航路航行モードで航行する．この際，常に周囲の船舶との衝突危険度と見合い関係を計算し，モード遷移の可能性を確認する．一度 CR が避航モードへの移行の閾値 C_{CR} を超え，設定された変針後の衝突危険度 ACR が設定値 C_{ACR} より小さい場合, 避航モードに移行し初期変針角である 30 度右への変針を行うための変針指令が操船リスクシミュレータに送られ，避航操船が行われる．ACR が C_{ACR} より大きい場合は所定の変針角である 30 度では危険が回避されないので，初期変針角である 30 度に 5 度ずつ加え，45 度を上限に，ACR が C_{ACR} より小さくなるまで変針角を増やしその変針角度で避航する．避航モードに移行後は，そのコースが保持されるとともに，そのコースを保持した場合の衝突危険度 CR と計画航路と同じ進路に変針し平行して航行する平行操船モードに移行した場合の衝突危険度 VCR が計算され，新たな避航操船の必要性と平行操船への移行の可能性が判断される. ここで, 平行操船モードへの移行の閾値 $C1_{VCR}$ に基づいて安全に平行操船モードに移行できると判断された場合，平行操船モードに移行する．復帰モードへの移行も同様に閾値 $C2_{VCR}$，復帰航路に変針した場合の衝突危険度 C_{OCR} により判断される．最後，復帰モードの状態で計画航路からの距離が設定範囲内になった場合，航路航行モードに復帰する．

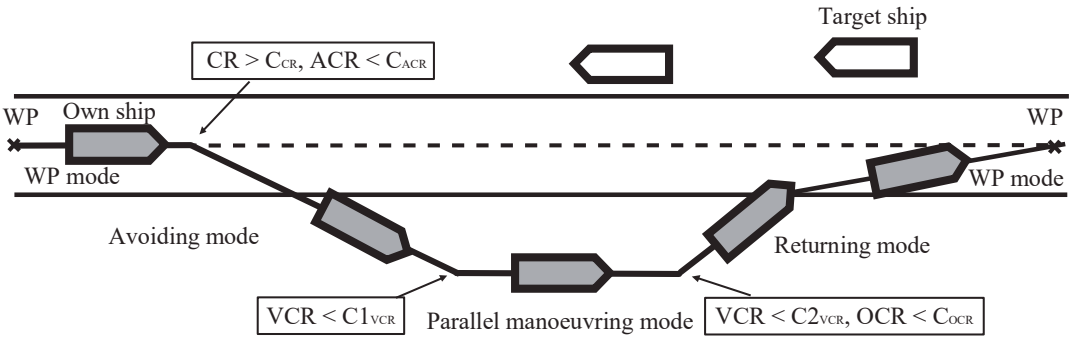


図 8.2　避航時の操船モード

8.3.2　3 船問題を用いた避航操船シミュレーション

(1)　シナリオ

避航操船機能の有効性を確認するため, 平成 20 年 3 月に発生した明石海峡における二重衝突事故をシナリオ化して，被験者による自船の操船と他船の自動避航操船を実施し，インテリジェントシミュレータの有効性の確認を行った．

事故は明石海峡航路東口付近において，同航路に沿う針路で西航中の Ship O と同針路と交差する針路の Ship E とがともに同航路に沿う針路で西航中の Ship G を追い越す態勢で接近し，各船がほぼ同時に航路に入航した直後, 最初に Ship O の右舷船尾と Ship E の左舷側ほぼ中央とが衝突し，次いで，Ship O の船首が Ship G の右舷側ほぼ中央に衝突した．衝突の結果，Ship O と Ship E は外板に凹損を生じ，Ship G は外板に破口を生じて沈没した．

そこで，この状況を基に図 8.3 に示すシナリオを設定し，事故が起こった状況に対して自動避航操船機能がどのように対応できるかについて検討を行った．

なお，シミュレータによる試行時には，基本的な避航機能を確認するという立場から，航路の存在は考慮しないこととし，開水面を仮定してシナリオを設定した．表 8.1 に各船舶の要目を示す．

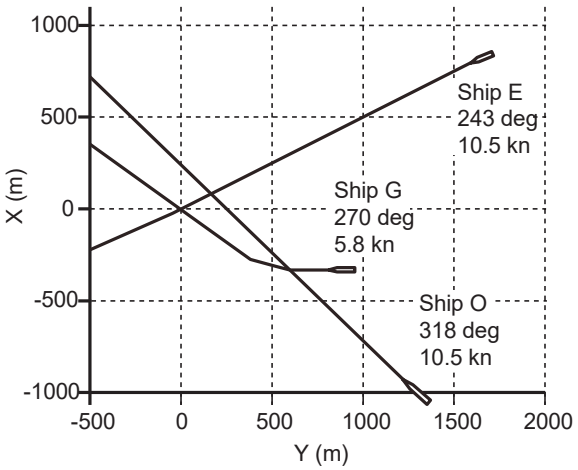


図 8.3　シミュレーションでの船舶の初期配置

表 8. 1 船舶の主要目

Name	Ship Type	Gross Tonnage	Length
Ship E	Cargo Ship	496 ton	65.65 m
Ship O	Tanker	2948 ton	96.00 m
Ship G	Cargo Ship	1466 ton	72.10 m

(2)　自動避航操船結果

図 8.4 と図 8.5 に，Ship O を操船者が操船し，他の船舶を自動避航操船機能が操船した場合の航跡と，針路・速度・衝突の危険度の時系列を示す．図 8.4 において，船舶の形（以下，「船型」という）を太線に白抜きで示す航跡は操船者が操船したものであり，その他の航跡は自動避航操船機能による操船結果である．また，船型は，30 秒毎に表示しており，2 分毎に大きな船型を表示している．

図 8.5 において上から，3 船の針路，船速，Ship O から見た Ship E，Ship G の衝突危険度:CR_O，Ship E から見た他の船舶の衝突危険度:CR_E，Ship G から見た他の船舶の衝突危険度:CR_G を示している．

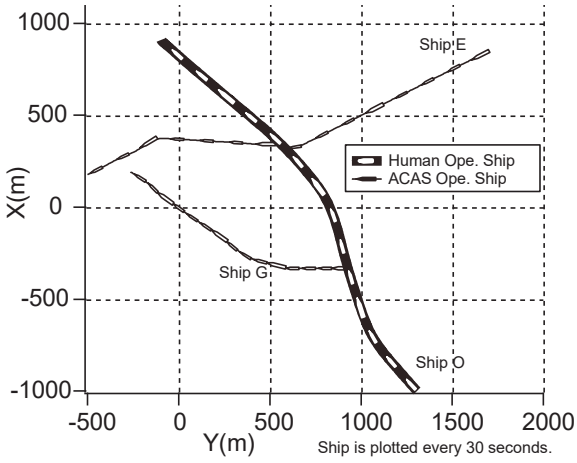


図 8.4　避航操船結果　航跡

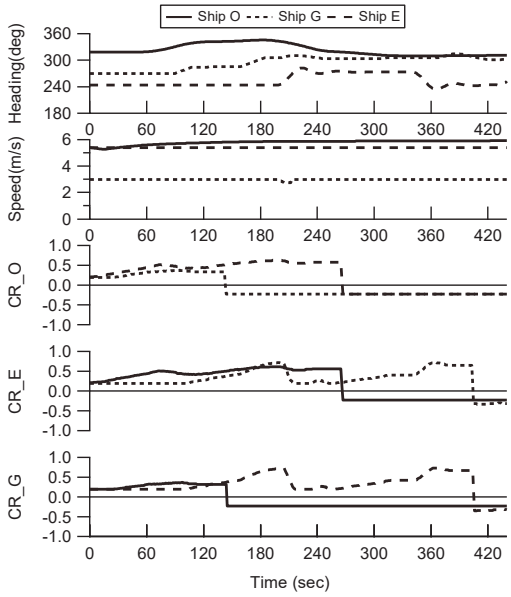


図 8.5　避航操船結果　状態量の時系列

実験開始から 60 秒後，Ship O は Ship E に対する CR が 0.43 になった時に右への避航を開始し，その後，Ship E の船尾を追尾しながら徐々に航路復帰し，避航開始から 170 秒後，避航開始前の針路に復帰した．その間，Ship E は Ship G に対して，実験開始後，200 秒から 370 秒まで Ship G を追い越し船と判断し避航操船が行われた．この際，Ship O の各船への最小離隔距離は，Ship E には，348m，Ship G には，499m でありそれぞれ妥当な避航操船を行っていることが確認できた．

8.3.3　シミュレーションの実時間性の確認

操船リスクシミュレータによる主な計算処理は主計算機により行われが，今回の避航操船機能は外部計算機上で実行されるため，主計算機の負担としては，1 秒毎の全船舶の状態量の出力と全他船の手動操船モードへの切り替えの有無を示すフラグと，指令針路および指令速度の入力となる．この通信は，LAN 経由で UDP プロトコルを用いて実施している．さらに，全船舶の状態量の出力については，従来から他のプロセスに対して行われていた放送形式の出力を受信したため，実質，主計算機への負担の増加となるのは，手動モードの切り替えフラグおよび指令針路および指令速度の受信処理のみであった．3 船の避航操船シミュレーションの他，30 隻での避航操船シミュレーションも実施したが，問題なく実行できた．

自動避航操船機能も，シミュレーション実行時の処理としては，全船舶の状態量データの受信処理，各船の避航操船判断処理，判断結果の主計算機への送信が挙げられるが，外部計算機により遅滞なく 1 秒の計算間隔で処理できた．

8.4　まとめ

自動避航操船や船船間通信による操船支援等の知的なシステムの働きを考慮した他船の動きを実現するため，操船リスクシミュレータ上に他船を制御するフレームワークを構築し，その一例として，自動避航操船機能の組み込みについて検討した．組み込みに際しては，操船リスクシミュレータの主計算機の負担軽減を図るため，外部計算機を LAN 経由で接続し，UDP プロトコルによるプロセス間通信で必要なデータをやり取りすることにより，目的の機能を実現した．

また，被験者の自船による操船と他船の自動避航操船の状況を実現し，避航操船が良好に実現可能なことを確認した．

謝　　辞

本研究の一部は，日本学術振興会科学研究費基盤研究 (B) (No. 22360375 代表者：福戸淳司)　の支援を受けて実施した．

8 章の参考文献

1) 福戸淳司, 長谷川和彦,酒井史彦,操船シミュレータへの自動避航操船機能の導入,日本航海学会論文集, No. 125 (2011), pp. 63-71.
2) 長谷川和彦, 上月明彦：Fuzzy 制御による自動避航システムに関する研究, 関西造船協会会誌, No.205, (1987), pp.1-10, 1987.6

9.　船体運動推定ツールの高度化とシミュレータによる再現

9.1 船体運動推定ツールの高度化

本研究では既存の MMG モデルを用いた操縦運動推定ツールの推定精度の向上や機能拡張を行うために，水槽実験や運動モデルの検討を行った．

9.1.1 操縦運動における傾斜影響について

操縦運動中に船体が傾斜すると直立時とは異なることは従来から知られているが，これまでの研究では高速コンテナ船など重心位置が高く，GM の小さい船型が旋回時に大きく外方傾斜することで旋回性能が向上するという知見が得られている．これらについては再確認のためにコンテナ船模型の GM を変更した操縦性能試験を行い，GM の違いが操縦性能に与える影響を確認した [1)2)]．

しかし，この影響を操縦運動推定計算に反映するためには，傾斜が操縦流体力に与える影響を定量的に評価して操縦運動パラメータの関数として操縦運動推定計算に導入する必要がある．

初めに定傾斜を与えた状態での自由航走実験を行い，定傾斜が旋回性能に与える影響を確認した．水槽試験の様子を図 9.1 に，定傾斜の有無による航跡の比較を図 9.2 に，定傾斜の有無による旋回性能の比較を図 9.3～9.4 に示す．

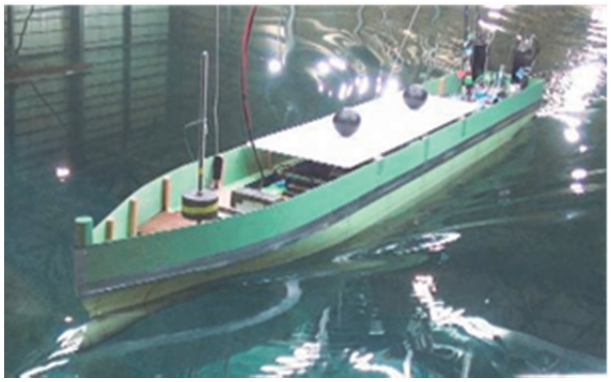


図 9.1 水槽試験の様子

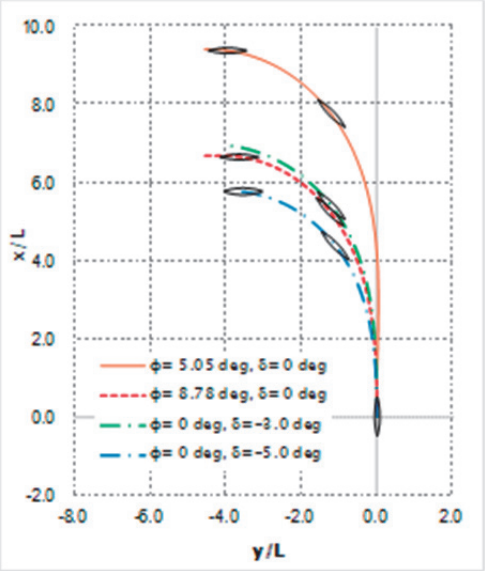


図 9.2 定傾斜の有無による航跡の比較

水槽試験の状態は船速（U）は 1.09 m/s で，実船の 18.4 kt に相当する．定傾斜は 2 種類とし，それぞれ右舷側に 5.05 度と 8.78 度とした．図 9.2 から右舷側に 8.78 度の定傾斜を与えると，操舵しなくても直立状態で δ= -3.0 度で旋回した場合と同程度の航跡となっている．これから定傾斜した船体に働く操縦流体力が直立状態とは異なるためと考えられる．図 9.3 ～ 9.5 から定傾斜が旋回性能に影響を与えることが確認された．右舷に定傾斜を与えた場合，旋回角速度は左旋回時の無次元旋回角速度（r’ = rL/U）に顕著な違いが，偏角については直立時から全体的に舵角がプラス側にシフトすることが確認された．これらの結果から定傾斜が旋回運動に与える影響は右旋回と左旋回では異なると考えられる．定傾斜が直立時の外方傾斜と同一方向の場合は，より外方傾斜をすることで旋回性能が向上する．一方，その反対の場合には，与えた定傾斜に依るが定常旋回中に内方傾斜して旋回することとなり通常の定常旋回とは異なった性能を示すことが確認された．

定傾斜の有無で定常旋回する船舶の主船体に働く操縦流体力がどのように変化するか確認するため，CFD 計算を用いて検討を行った．図 9.5 ～ 9.7 に直進時及び定常旋回中の定傾斜の有無による主船体の表面圧力分布を示す．

図 9.5 ～ 9.7 から定傾斜の有無で主船体表面の圧力分布に相違が生じることが確認された．船体に働く圧力を積分すると操縦流体力が得られるが，斜航状態では直立状態とほぼ同様の値となったが，定常旋回中の値が異なることが確認された．これは船体が傾斜した場合に斜航ではなく，船体が旋回する原因と考えられる．

操縦流体力と傾斜角の相関を取るために傾斜角付きでの CMT 試験を行った．供試模型は高速 RO/RO フェリーとし，傾斜角の計測範囲は外方傾斜から内方傾斜に至るまでとした．計測された操縦流体力を旋回角速度，偏角，

傾斜角をパラメータとした解析を行ったところ，GM が小さく操舵や旋回による横傾斜が無視できない船型を取り扱う場合は左右運動と回頭運動の外力項には傾斜角の影響を考慮する必要があることが確認された．この知見から操縦運動推定計算には傾斜による影響も考慮する項を追加した．

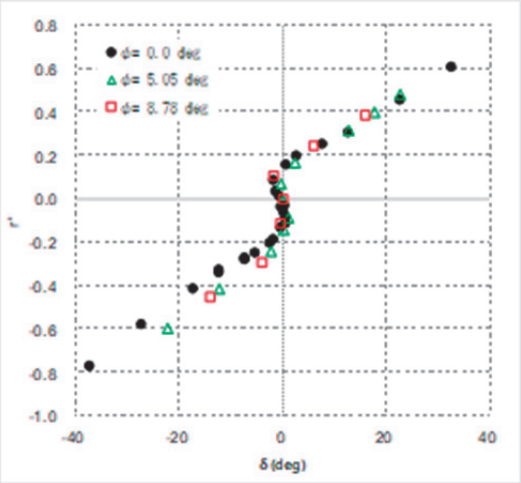


図 9.3 定傾斜の有無による旋回角速度の比較

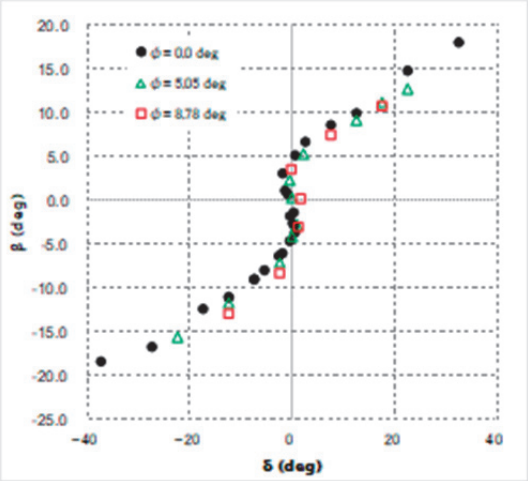


図 9.4 定傾斜の有無による偏角の比較

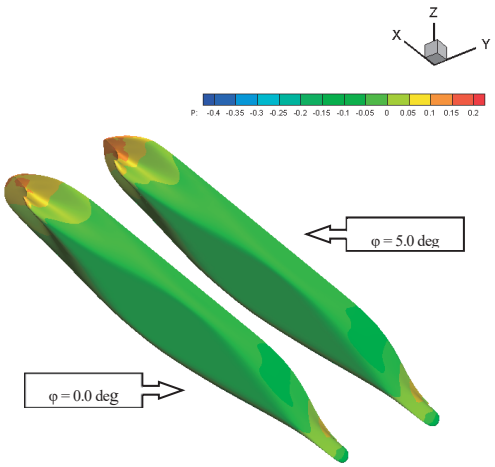


図 9.5　定傾斜の有無による表面圧力分布の比較
（r’ =0.0,　β=0.0 度）

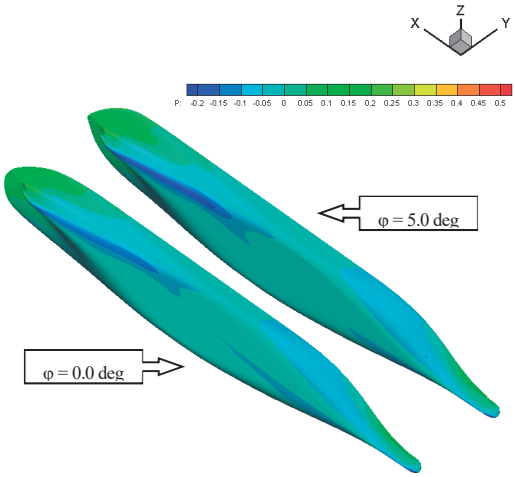


図 9.6　定傾斜の有無による表面圧力分布の比較
（r’ =0.4,　β=0.0 度）

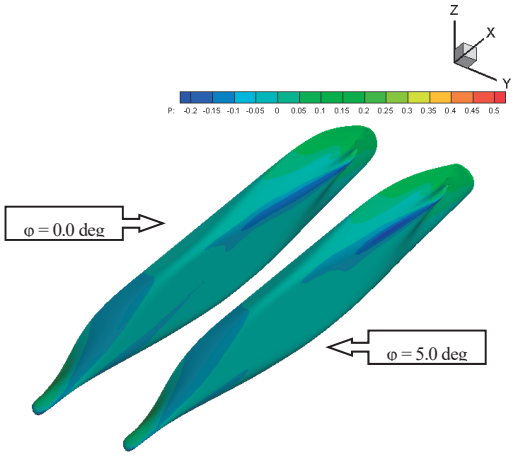
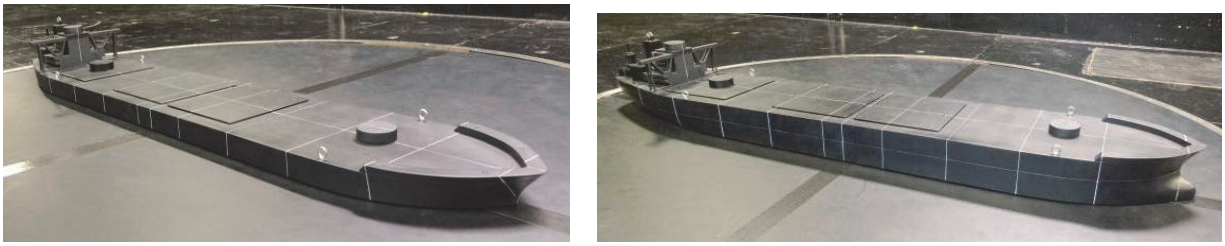


図 9.7　定傾斜の有無による表面圧力分布の比較
（r’ =−0.4,　β=0.0 度）

9.1.2 操縦運動における風浪の影響について

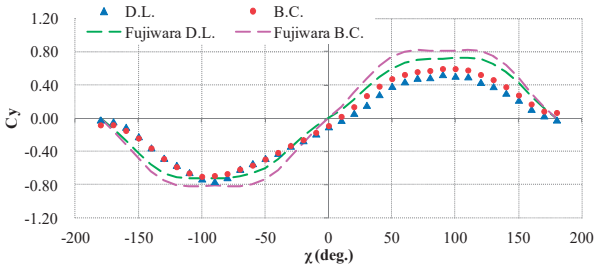
平水中での操縦運動に及ぼす外乱としては，風浪と潮流が考えられる．潮流については対水船速が変化したと考えれば良いので，改めて検討は行わない．そこで風浪による影響について検討を行う．海面よりも上の上部構造物に働く風圧力は藤原 [3]らや Kitamura ら [4]により簡易推定法が提案されている．本研究では上部構造物を含むタンカー模型船を用いて，載荷状態の違いによる風浪の影響を風洞試験及び水槽試験で検討を行った [5]．

風洞試験は変動風水洞で行った．風洞試験での供試模型を図 9.8 に，風洞試験で得られた横力と回頭モーメントの載荷状態による比較を図 9.9 に示す．

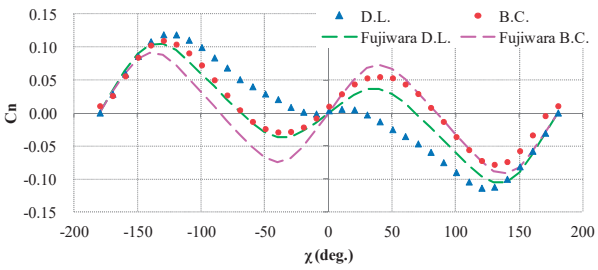


（満載状態）　　（軽貨状態）

図 9.8 供試模型



（横力）



（回頭モーメント）

図 9.9 横力・回頭モーメントの載荷状態に比較

図 9.9 は水槽試験で使用する風速に対応した風速を使用した．点が計測値で，破線が藤原らの推定式から求めた値である．横力に関しては概ね良好な一致を示しているが，回頭モーメントについては載荷状態により多少の相違が確認された．上部構造物が少ない満載状態の方がその差異は多少大きくなることが確認された．

次に実海域再現水槽において送風機を用いた風浪影響を考慮した自由航走試験を行った．水槽試験の様子を図 9.10 に，載荷状態及び風浪の有無による 10 度の Z 操舵試験の航跡の比較を図 9.11 に示す．

実海域再現水槽では送風機を用いた実験を行うことが可能で，副台車の脇に作業用台車を設置して送風機を取り付ける（図 9.10）．図 9.11 は載荷状態及び風浪の有無で実線の色が異なり，風浪なしの軽貨状態が青線で風浪ありの軽貨状態が赤線，風浪ありの満載状態が緑線である．本実験で使用した風速は実船で操縦性能試験を行う目安となる上限に相当するものとしたが，風浪の有無による航跡の差異は僅かでオーバーシュート角にも優位な影響が出ていない．それよりは載荷状態での差異の方が大きく，満載状態で海上公試の行えない船舶の載荷状態の修正法が重要であることが確認された．

上記の知見から操縦運動推定計算への風浪影響の考慮について検討し，これまで提案されている通りに外力の項に風圧力の項を追加することとした．

上記以外にも MMG モデルで使用されている干渉係数の妥当性などの検討も行い，平水中操縦運動推定ツールの高度化を行った．

図 9.10 水槽試験の様子

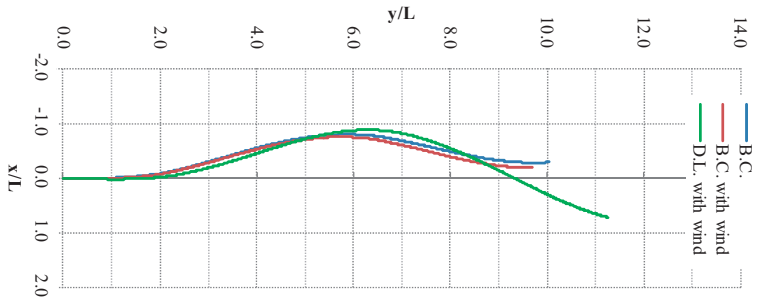


図 9.11 載荷状態及び風浪の有無による航跡の比較

9.2 シミュレータによる再現

操船リスクシミュレータは①操船シミュレータの画面表示，②操船者の操作量の検出，③操作量に対応した船体運動計算の 3 つ要素と，これらの 3 つの要素間のデータ通信を担う通信プログラムから構成されている．本研究では③に対応する船体運動計算ライブラリーの更新を行う．本研究では波浪中船体運動に対応した操船シミュレータとするために波浪中船体運動推定プログラムを作成し，操船リスクシミュレータへ実装した．

平水中での船体運動は上記のように改良をした 4 自由度の MMG モデルを適用し，波浪中での船体運動にも対応させるために NSM（ストリップ法）から算出される付加質量や造波減衰係数，復原力係数を付加した．復原力の一部にはフルード・クリロフ力も取り入れて時々刻々の水面下の船体形状を考慮し，抵抗増加や波漂流力についても考慮した．操船リスクシミュレータ内部を図 9.12 に，操船リスクシミュレータの構成を図 9.13 に示す．操船リスクシミュレータが管理する自船の位置情報や外乱の情報・波との相対位置からスクリーンに表示する画像を構成し，通信プログラムを介して操船コンソールや船体運動計算 DLL に状態量を送信する．それを受けて操船

者がコンソールに設置された操舵機やスロットルなどを操作する．船体運動計算 DLL では操船リスクシミュレータと操船コンソールから送信された情報と 1 ステップ前に算出した船体運動から，計算時間を 1 ステップのみ進めた新たな船体運動の計算を行う．このサイクルを 0.1 秒ごとに繰り返して，操船リスクシミュレータは動作している．

船体運動計算 DLL の計算結果の一例を図 9.14-15 に示す．これは左斜め追い波と横波状態で 10 度 Z 操舵試験を行った計算結果である．追い波や横波で Z 操舵試験を行うと操舵開始から船首方位が時々刻々と変化する．それに伴い波との出会い角も変更するために，ロール角も時々刻々と変化している様子が確認できる．特に横揺れ固有周期に近い出会い波周期の場合はロール角が大きくなっていることが確認された．また，波との出会い角はロール角だけではなく，航跡やオーバーシュートにも影響を与えることが推定出来ており本推定計算の有効性が確認された．

図 9.12 操船リスクシミュレータ内部

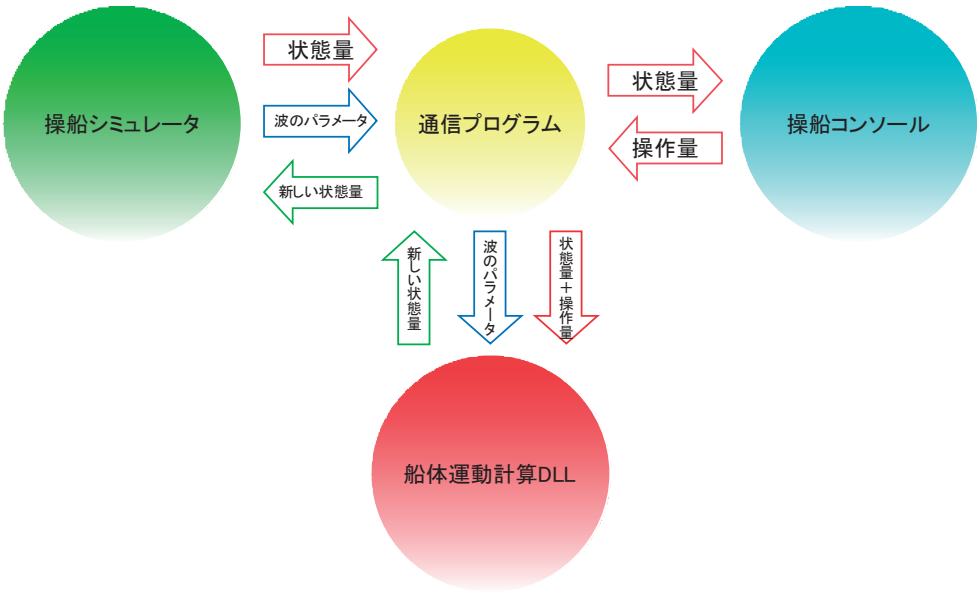


図 9.13 操船リスクシミュレータの構成

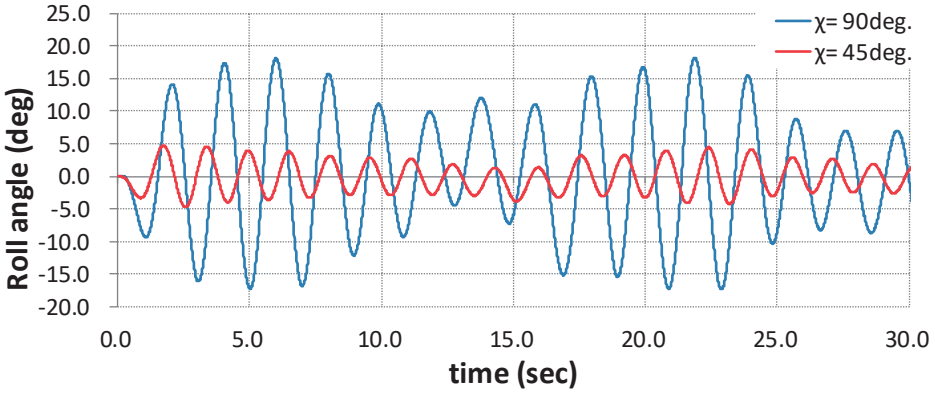


図 9. 14 波浪中での Z 操舵試験のロール角の比較

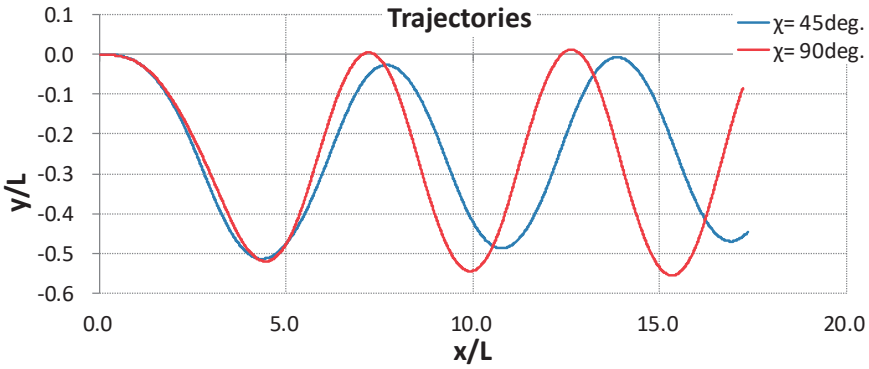


図 9. 15 波浪中での Z 操舵試験の航跡の比較

9. 3 まとめ

操船リスクシミュレータの波浪中船体運動に対応させるため，船体運動計算ライブラリーの更新を行った．平水中の操縦運動推定にはこれまでの MMG モデルの推定精度を向上させるために横傾斜や風による影響を水槽実験や数値計算で検証を行い船体運動推定ツールの高度化に取り組んだ．また，波浪中船体運動についてはこれまでの研究成果を取り入れ, 波浪中での操船運動が推定可能なことを確認した. このプログラムを操船リスクシミュレータに組み込むための波浪中船体運動計算 DLL へと変換し，これらを操船リスクシミュレータに実装した.

9 章の参考文献

1) Miyazaki H. et al, Experimental and Numerical Study About the Static Heel Effect on the Turning Ability, Proceedings of The Twenty-third International Offshore and Polar Engineering Conference (2013), Vol.4, pp.840-845.
2) 宮崎英樹ほか，コンテナ船の重心高さが操縦性能に及ぼす影響の実験的検討について，日本船舶海洋工学会講演会論文集，第 16 号（2013），pp21-24.
3) 藤原敏文ほか，成分分離型モデルを利用した新しい風圧推定法，日本船舶海洋工学会論文集，Vol.2（2005），pp243-255.
4) Kitamura F. et al., Estimation of above water structural parameters and wind loads on ships, Ships and Offshore Structures, 12, (2017), (in press).
5) Miyazaki H. et al, Experimental and Numerical Study about the Effect of Wind on the Zig-Zag Manoeuver of Very Large Crude Oil Carrier, Proceedings of Proceedings of The Twenty-third International Offshore and Polar Engineering Conference (2015), Vol.4, pp.1188-1193.

10. 結　　言

本研究では,海難事故発生直後の初動分析の高度化を図るため,事故船の流体力特性統合推定システムの構築,船体運動推定ツールの機能拡張・高度化等に関する研究を実施した．これらにより，事故発生直後の現場計測の適切な実施，推測される事故原因の絞り込みが可能となり，同時に，その後の海難事故詳細解析についても迅速かつ的確な実施が可能になると考えられる．また，実海域再現水槽において実際に発生した事故を対象として模型実験をおこない，事故当時の海象を再現した中で荷崩れ再現装置を搭載した模型船を航走させて斜め追い波中の大傾斜とこれに続く急旋回を再現することに成功した．実海域の海象を水槽内に再現するために必要な技術として，水中からの超音波を使った波浪場の面計測技術の基礎的研究をおこない有益な技術的知見を得た．海難事故に遭遇する船の状況は様々で，通常の航行状況とは異なる場合が多い．このような様々な状況に対応した船体応答を推定するための技術として，傾斜船の流体力特性を推定する手法を構築するとともに，衝突・座礁等の事故の解析に必要となる緊急停止時や浅水域等における運動の表現手法を構築した.さらに,操船リスクシミュレータを高度化するためのインテリジェントシミュレータの構築に取り組み，上述の新たな機能を新しい船体運動推定手法ツールとして構築して高度化された操船リスクシミュレータを用いて海難事故の再現をおこなった．本研究によって海難事故の再現および解析技術の高度化が図られ，今後のより信頼性の高い情報提供や再発防止策への貢献が期待される.