

実運航性能シミュレータの開発に関する研究

辻本 勝*, 黒田麻利子*, 粉原 直人**, 櫻田 顕子*
松沢 孝俊*, 宇都正太郎***, 大場 弘樹*, 一ノ瀬 康雄*
坂本 信晶*, 星野 邦弘*, 下田 春人*, 藤沢 純一*
後藤 英信*, 池本 義範*, 若生 大輔*, 深澤 良平*
金子 杏実*, 平田 宏一****, 仁木 洋一****, 福田 哲吾****
村岡 英一****

Development on Ship Performance Simulator in Actual Seas

by

Masaru TSUJIMOTO, Mariko KURODA, Naoto SOGIHARA, Akiko SAKURADA
Takatoshi MATSUZAWA, Shotaro UTO, Hiroki OHBA, Yasuo ICHINOSE,
Nobuaki SAKAMOTO, Kunihiro HOSHINO, Haruhito SHIMODA, Junichi FUJISAWA,
Hidenobu GOTO, Yoshinori IKEMOTO, Daisuke WAKO, Ryohei FUKASAWA,
Azumi KANEKO, Koichi HIRATA, Yoichi NIKI, Tetsugo FUKUDA
and Eiichi MURAOKA

Abstract

Prediction of performance of ships in actual seas is a key to reduction of fuel consumption in ship operation. To support efforts for the reduction of fuel consumption and emission of greenhouse gas by ship yards and ship operators, research on a ship performance simulator in actual seas was conducted for five years. Structure of the research was as follows; 1) system development for evaluation of performance of ships in actual seas, 2) prediction of added resistance in following waves and self-propulsion factors in waves, 3) hull form development for reduction of added resistance in waves, 4) improvement of ship operation and 5) prediction of resistance in brash ice for the operation of Northern Sea Route. Here, the results of the research are explained.

* 流体設計系, ** 国土交通省海事局安全政策課 (研究当時流体設計系), *** 海洋開発系, **** 環境・動力系
原稿受付 平成28年10月31日
審査日 平成28年12月26日

目 次

1. まえがき	18
2. 実運航評価システムの開発と高度化	19
2.1 VESTA/UNITAS の開発	19
2.2 波浪中水槽試験の不確かさ解析と評価	21
3. 追波評価技術・波浪中自航要素評価技術の開発	22
3.1 追波評価技術の開発	22
3.1.1 波浪中抵抗増加計算法	22
3.1.2 実船計測データによる検証	24
3.2 波浪中自航要素評価法の開発	24
4. 実海域性能最適化に関する研究	27
4.1 マイクロバブルを用いた PIV 計測システムの開発	27
4.2 省エネ船首形状 COVE	28
5. SEEMP 改善手法の研究	29
5.1 実船データ解析手法	29
5.2 実運航の評価法	31
6. 北極海航路航行性能推定法の研究	32
6.1 氷中抵抗増加モデルの拡張	32
6.1.1 Channel 中抵抗増加推定モデル	32
6.1.2 氷海水槽試験データによる検証	32
6.2 北極海航路における運航シミュレーション	33
6.2.1 対象船及び航路設定	33
6.2.2 氷中推進性能の推定	35
6.2.3 シミュレーションによる航路の評価	35
6.3 衛星 AIS データによる北極海航路実運航の分析	36
6.3.1 対象データ	36
6.3.2 分析及びシミュレーションとの比較	37
6.4 北極海航路運航支援システムの開発に向けて	38
7. まとめ	39
参考文献	40

1. まえがき

国際海運からの温室効果ガス（GHG: Greenhouse Gas）排出削減のため、国際海事機関（IMO: International Maritime Organization）において、国際ルール策定の検討が行われ、2013 年 1 月 1 日より、新造船に対するエネルギー効率設計指標（EEDI: Energy Efficiency Design Index）による規定値以上の EEDI 値の達成及び現存船を含む外航船舶に対する船舶エネルギー効率管理計画書（SEEMP: Ship Energy Efficiency Management Plan）の保持を義務とする MARPOL 条約（1978 年の議定書によって修正された 1973 年の船舶による汚染の防止のための国際条約）附属書 VI の改正が発効した。これにより外航船舶からの GHG 排出削減を進める国際ルールの第一段階が開始された。

この国際動向に合わせ当所では 2011 年より 5 年計画で、実海域における運航性能評価手法の確立を行うため、重点研究にて実運航性能シミュレータの開発に関する研究を実施した。

実運航性能シミュレータは新造船、現存船に対し、本船の遭遇する気象海象条件を考慮し、流体力学性能と機関特性を組み合わせ、高精度に燃料消費量、船速低下量を推定するものである。流体力学性能としてはこれまで開発してきた波浪中抵抗増加の高精度推定法を迫波系に拡張し、遭遇海象中の評価を可能とする。機関特性としては主機特性の他、主機ガバナー（調速機）による主機回転数一定制御、主機出力一定制御の他、省エネルギー運航のため実施されているフューエルインデックス制御の実装を行った。これをパッケージ化し実燃料消費、速力低下等の性能を算定できる実運航性能シミュレータ VESTA として一般向けに提供している。また、VESTA を船舶の設計図面がない船社等でも利用可能とするため、入力支援プログラムとして船体形状・船体性能推定プログラム UNITAS も一般向けに提供している。なお、VESTA/UNITAS についてはその内容を別途解説¹⁾しているため、追加機能について記載する。

また、アジアー欧州間の外航輸送での GHG・燃料消費量・輸送日数の大幅な削減が可能な北極海航路（NSR: Northern Sea Route）の利用検討を行うため、北極海で見られる砕け氷中での抵抗を推定する手法を開発し、これを基に北極海航路の航行性能推定法を開発した。

以下に本研究の内容について紹介する。

2. 実運航評価システムの開発と高度化

2.1 VESTA/UNITAS の開発

VESTA では波、風による外力の算定が可能である。外力の計算方法等は別途解説¹⁾に記載しているので、ここではその後、機能を追加した波浪定常横力・波浪定常回頭モーメントについて示す。

(1) 波浪定常横力・波浪定常回頭モーメント

VESTA に波浪定常横力、波浪定常回頭モーメントの計算機能の追加を行う。VESTA では波浪定常横力 (Y_W)、波浪定常回頭モーメント (N_W) は、前進速度 0 の 3 次元パネル法^{2),3)}により波漂流力をシリーズ計算し、これを主要目でデータベース化した結果を用いて波漂流力を補間推定するものである⁴⁾。

入力が必要となる要目は、船種（タンカー、コンテナ船、自動車運搬船、多目的貨物船、漁船）、船長、幅、喫水である。

バルクキャリア（垂線間長 178m、幅 32.26m、喫水 11.57m）に対する VESTA の計算結果を水槽試験結果とあわせて図 2-1⁵⁾に示す。

ここで、波浪定常横力、波浪定常回頭モーメントの無次元係数は(2-1)、(2-2)式とする。

$$C_{YW} = \frac{Y_W}{4\rho g \zeta_a^2 B_M^2 / L} \quad (2-1)$$

$$C_{NW} = \frac{N_W}{4\rho g \zeta_a^2 L B_M} \quad (2-2)$$

このとき、波浪定常回頭モーメントは重心周りで定義し、 ρ は流体密度、 g は重力加速度、 ζ_a は波振幅、 B_M は最大船幅、 L は船長であり、波向 (α) は向波を 0deg.と定義する。

図 2-1 より、波浪定常横力、波浪定常回頭モーメントの速度影響は小さいことが分かる。また、水槽試験結果のばらつきを考慮すると、全般的に計算が試験結果を十分推定していることが分かる。

なお、実運航シミュレーションに対する波浪定常横力、波浪定常回頭モーメントの考慮の有無の影響は、舵角、斜航角の推定に現れ、船速低下、燃料消費量にはほとんど影響はない。

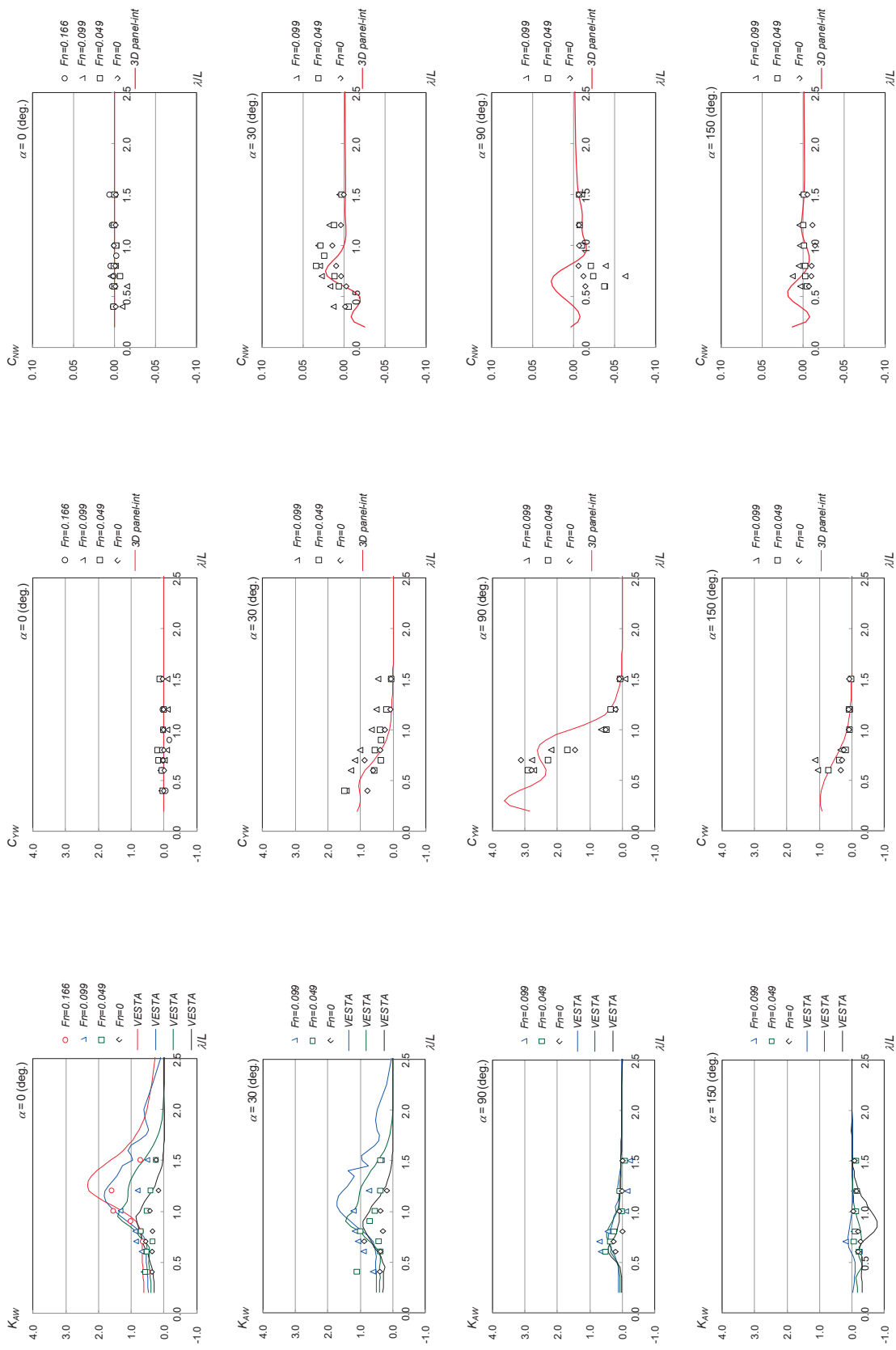


図 2-1 規則波中定常力の周波数応答⁵⁾

2.2 波浪中水槽試験の不確かさ解析と評価

実海域性能評価の検証のため波浪中試験を実施するが、水槽試験の精度管理、改善点の把握のためには不確かさ解析が必要である。

そこで当所で保有する実海域再現水槽、三鷹第二船舶試験水槽(400m 水槽)、三鷹第三船舶試験水槽(中水槽)で同一模型(表 2-1 に示す模型船長約 4.5m の自動車運搬船)を使用して、平水中抵抗及び波浪中抵抗の繰り返し試験を実施し、不確かさ解析を実施する^{6), 7), 8)}。繰り返し試験の実施状況を表 2-2 に示す。また、評価に使用する平水中抵抗係数(C_t)を(2-3)式に、波浪中抵抗増加係数(K_{AW})を(2-4)式に示す。

$$C_t = \frac{R_t}{0.5\rho S V^2} \quad (2-3)$$

$$K_{AW} = \frac{R - R_0}{4\rho g \zeta_a^2 B_M^2 / L} \quad (2-4)$$

ここで、 R_t は平水中抵抗、 ρ は水槽水の密度、 S は浸水表面積、 V は対水船速、 R は波浪中抵抗、 R_0 は水温修正後の平水中抵抗、 g は重力加速度、 ζ_a は波振幅、 B_M は最大船幅、 L は船長である。

表 2-1 対象船主要目 (自動車運搬船)

Item	Full-scale	Model
Length between perpendiculars (L_{PP}) [m]	190.00	4.675
Maximum breadth (B_M) [m]	32.26	0.794
draught at midship (d_m) [m]	9.00	0.221

表 2-2 繰り返し試験の実施状況

	400m Towing Tank	150m Towing Tank	Actual Sea Model Basin
Length×Breadth×Depth	400[m]×18[m]×8.0[m]	150[m]×7.5[m]×3.5[m]	80[m]×40[m]×4.5[m]
Capacity of Load Cell	50[N]	50[N]	100[N]
Water Temperature	16.60[deg.C.]	14.50[deg.C.]	13.15[deg.C.]
Number of Tests	15	15	10
Synchronous Measurement System	Used	Not Used	Used

事象 r に対する不確かさ (U_r) は、ステューデント値を t として、絶対正確度 (B_r)、絶対精密度 (S_r) により表される。平水中抵抗係数(事象 CT)については、水槽水の密度、浸水表面積、対水船速、計測した抵抗値を考慮し、波浪中抵抗増加係数(事象 KAW)については、水槽水の密度、垂線間長、船幅、波浪中抵抗、水温修正後の平水中抵抗、出会い波高を考慮する。なお、波浪中抵抗増加については船速を系統的に変化させた試験を実施していないため、対水船速の誤差影響については考慮していない。また、水槽毎に造波波高が異なるため、波浪中抵抗増加は波高の 2 乗に比例するとして換算する。

平水中抵抗に対する不確かさ解析の結果を図 2-2 に、波浪中抵抗増加の不確かさ解析の結果を図 2-3 に示す。 Fr はフルード数、 λ は波長である。

平水中抵抗の不確かさについては、400m 水槽、中水槽、実海域再現水槽の順に不確かさが大きくなっている。これは実海域再現水槽では同期システムを使用しているが、容量の大きい検力計を用いたこと、また水槽長が短く残留流れが停滞しやすいことから、計測間のばらつきが大きくなっていることが分かる。

波浪中抵抗増加の不確かさについては、400m 水槽、実海域再現水槽、中水槽の順に不確かさが大きくなっている。その理由として、出会い波高の精密度は実海域再現水槽が最も小さく、400m 水槽、150m 水槽の順に大きくなっている。これは、実海域再現水槽は全周造波機を備えているため消波能力が高く、加えて同期システムを使用

しているため精度が小さくなっているためである。ただし、計測回数が少ないため不確かさは高めに評価されている。また、波浪中抵抗増加の不確かさが出会い波高の精度に応じて大きくなっていることから、波浪中抵抗増加の計測には出会い波高の計測精度が大きく影響すると考えられる。従って、精度良い波浪中抵抗増加の計測を行うには造波機の精度向上や、波高計の精度向上が重要である。さらに、水槽内に残る反射波影響を緩和させるために試験間隔を調整することも重要となる。

	400m Towing Tank	150m Towing Tank	Actual Sea Model Basin
C_T	3.912E-03	3.932E-03	3.945E-03
U_{CT}	4.105E-05	8.173E-05	1.119E-04
U_{CT}/C_T	1.1%	2.1%	2.8%
B_{CT}^2/U_{CT}^2	7.6%	1.9%	1.8%
$(t \cdot S_{CT})^2/U_{CT}^2$	92.4%	98.1%	98.2%

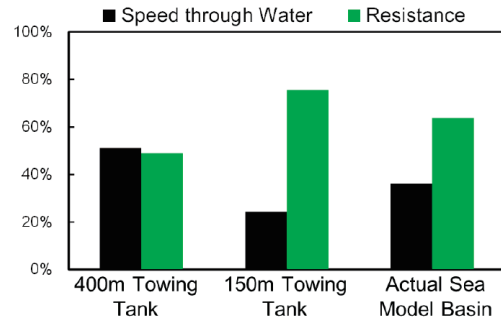


図 2-2 中型模型による平水中抵抗の不確かさ解析 ($Fr = 0.238$)

	400m Towing Tank	150m Towing Tank	Actual Sea Model Basin
K_{AW}	0.686	0.648	0.633
U_{KAW}	3.420E-02	4.424E-02	3.992E-02
U_{KAW}/K_{AW}	5.0%	6.8%	6.3%
B_{KAW}^2/U_{KAW}^2	0.3%	0.2%	0.4%
$(t \cdot S_{KAW})^2/U_{KAW}^2$	99.7%	99.8%	99.6%

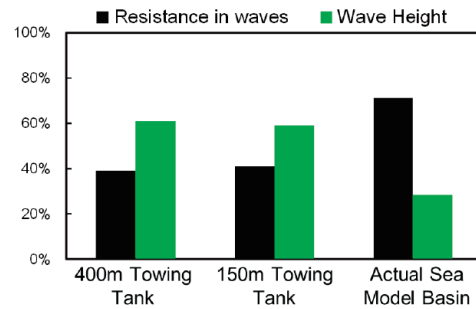


図 2-3 中型模型による波浪中抵抗増加の不確かさ解析 ($Fr = 0.238$, $\lambda/L = 0.4$, $2\xi_a = 0.0738m$)

3. 追波評価技術・波浪中自航要素評価技術の開発

3.1 追波評価技術の開発

波浪中抵抗増加の推定法として、短波長域での推定精度が重要となる。このため、短波長域の速度変更試験により得られるパラメータを取り入れる方法を開発し⁹⁾、試験値によく一致することを確認している。この計算法は、向波・斜向波中の抵抗増加を対象とした計算法であったが、斜追波・追波中の水槽試験データから、本手法を斜追波中・追波中に拡張し、実船計測データにより計算法の検証を行う¹⁰⁾。

3.1.1 波浪中抵抗増加計算法

丸尾の理論¹¹⁾により計算される規則波中抵抗増加 R_{AW} は、短波長域で試験結果と一致が悪いため、短波長域で支配的なディフラクション成分に修正を行う修正項 R_{AWR} を付加して計算し、推定精度を向上させる。この R_{AWR} は、ブラントネス係数 ($B\rho$)、新たに出会い周波数で表現し水槽試験で精度を確認した¹²⁾ 喫水・周波数影響項 (α_d)、速度影響項 (α_u) から構成される。ここで、 ρ は流体密度、 g は重力加速度、 ζ_a は入射波振幅、 B_M は最大幅、 d_d は最深喫水、 dl は水線面に沿った線素、 Fr はフルード数、 I_1 は 1 次の第 1 種変形ベッセル関数、 K_1 は 1 次の第 2 種変形ベッセル関数、 β_w は水線面に沿った線素の傾斜、 α は入射波と船首方向とのなす角 (向波を 0deg とする)、 ω は入射波の角周波数であり、積分範囲 (I 及び II) を図 3-1 に示す。

$$R_{AWR} = \frac{1}{2} \rho g \zeta_d^2 B_M B_f \alpha_d (1 + \alpha_U) \quad (3-1)$$

$$B_f = \frac{1}{B_M} \left\{ \int_I \sin^2(\alpha + \beta_w) \sin \beta_w dl + \int_{II} \sin^2(\alpha - \beta_w) \sin \beta_w dl \right\} \quad (3-2)$$

$$\alpha_d = \frac{\pi^2 I_1^2 (K_e d_d)}{\pi^2 I_1^2 (K_e d_d) + K_1^2 (K_e d_d)} \quad (3-3)$$

$$\alpha_U = C_U(\alpha) Fr \quad (3-4)$$

$$K_e = K(1 + \Omega \cos \alpha)^2 \quad (3-5)$$

$$\Omega = \frac{\omega V}{g} \quad (3-6)$$

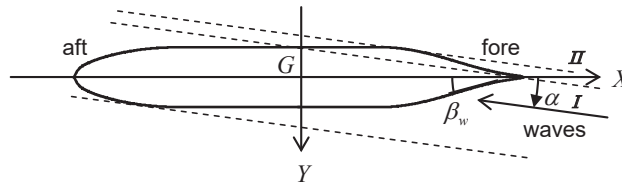


図 3-1 R_{AWR} に対する座標系

速度影響係数 $C_U(\alpha)$ は、速度影響 α_U を Fr の 1 次式で表した時の係数である。速度影響係数 $C_U(\alpha)$ とブラントネス係数 $B_f(\alpha)$ の関係については、通常船首の短波長での多数の水槽試験結果から、図 3-2 の通り経験式が得られる¹⁰⁾。追波及び斜追波中の試験結果から、速度影響係数を抽出しプロットした結果を、図中に "quartering waves" として示している。ここから、ブラントネス係数と速度影響係数の関係が、追波及び斜追波中についても、向波 "head waves", 斜向波中 "bow waves" と同じ関係で表されることが分かる。なお、喫水・周波数影響項 (α_d) についても追波及び斜追波中水槽試験で精度を確認している¹³⁾。

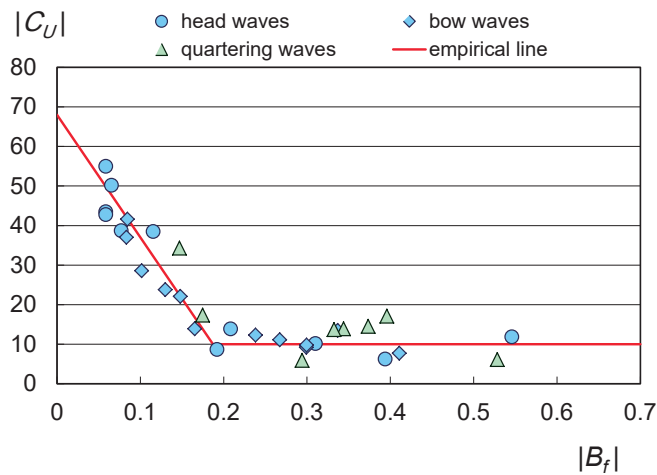


図 3-2 R_{AWR} の速度影響係数とブラントネス係数の関係 (通常船首形状の水槽試験データ)

3.1.2 実船計測データによる検証

波浪中抵抗増加計算法の検証のため、主機出力を一定とした船速低下量を算定し、実船計測データとの比較を行う¹⁰⁾。

対象船は、軸馬力計やXバンドレーダーによる波浪計測システムを搭載した自動車運搬船（船長 192.0 m、船幅 32.26 m、喫水 9.0 m、連続最大主機出力 13,260 kW）である。解析対象条件を、計画満載状態、主機出力を 75%MCR とし、対象条件に近いデータ（排水量差 15%以内）を抽出する。なお、対水船速計の測定精度を考慮して、対水船速と対地速力の差が 0.5 knot 以上あるものについては解析対象から除外する。対水船速について、(3-7)式により解析対象条件との排水量（ ∇ ）、主機出力（BHP）の差を補正する。ここで、 $f(\nabla)$ は排水量の変化による船速への影響を表し、下付き文字 M は計測データであることを示す。

$$V = V_M \left(\frac{0.75MCR}{BHP_M} \right)^{\frac{1}{3}} \times f(\nabla) \quad (3-7)$$

実船データと計算結果との比較を図3-3に示す。ここで、BFはビューフォート風力階級に対応することを示し、SPICAは斜追波中・追波中抵抗増加を0として計算した結果、VESTAは3.1.1節に示した方法により波浪中抵抗増加を計算した結果である。ここから、VESTA計算法により斜追波・追波中でも実海域性能の推定が可能であることが分かる。

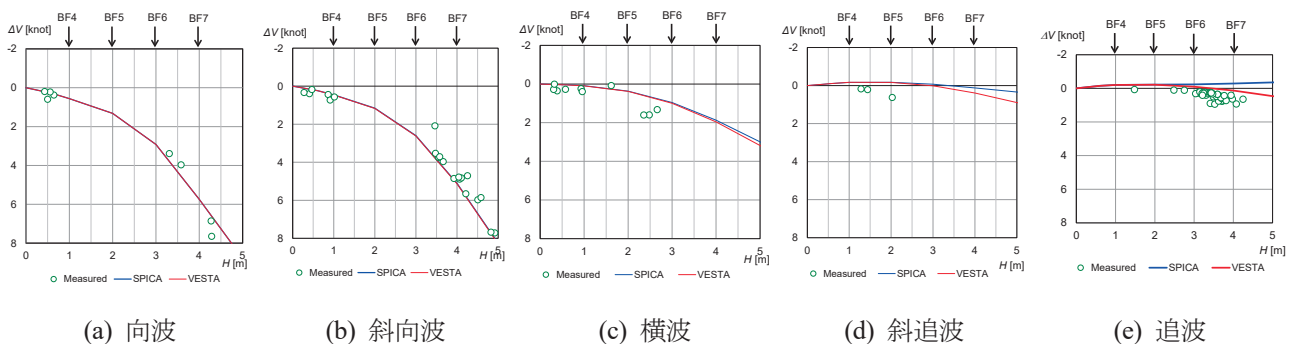


図3-3 船速低下の実船計測データと計算値との比較（自動車運搬船）

3.2 波浪中自航要素評価法の開発

船尾に取り付けられる省エネ付加物は、平水中において船体周りの流れを制御し、推進性能を向上させることを想定して設計される。しかし、実際の船舶は波や風の存在する実海域中を航行するため、実海域中における効果を把握することが重要である。実海域においては、波や風の外力によりプロペラ荷重度が変化する他、波浪中で船体運動することにより船尾流場が変化する影響がある。これを評価するためにはまず波浪中自航要素を評価する技術が必要となる。

自航要素のうち、有効伴流係数について、プロペラ荷重度による影響と船体運動による影響に分離し、荷重度変更試験を実施した結果から、推定式を構築する。

足達¹⁴⁾により開発された荷重度変更法では、理論的考察により、有効伴流係数($1-w_M$)を、プロペラ荷重度(C_T)の平方根型の関数で(3-8)式の通り表現する。ここで、 ρ は流体密度、 U_{a0} はプロペラ推力が0の時の有効伴流係数、 C_0 は伴流に対するプロペラの干渉を表す係数である。プロペラ荷重度は(3-9)式で表される推力 T の無次元値であり、 V は対水船速、 A_p はプロペラ全円面積であり、プロペラ直径 (D_p) と (3-10)式の関係がある。

推力減少係数($1-t$)は、(3-12)式に示す船体抵抗増加係数 (C_G) を用いてプロペラ荷重度 (C_T) の平方根型の関数で(3-11)式の通り表現する。ここで、 B_0 は船体とプロペラの干渉を表す係数である。 G は船体の抵抗増加量であり、($1-t$)との間に(3-13)式の関係がある。なお、プロペラ効率比 (η_R) については平水中と波浪中とで同一とする。

$$1 - w_M = U_{a0} + C_0 \left(-U_{a0} + \sqrt{C_T + U_{a0}^2} \right) \quad (3-8)$$

$$C_T = \frac{T}{0.5 \rho A_P V^2} \quad (3-9)$$

$$A_P = \frac{\pi D_P^2}{4} \quad (3-10)$$

$$C_G = B_0 \left(-U_{a0} + \sqrt{C_T + U_{a0}^2} \right) \quad (3-11)$$

$$C_G = \frac{G}{0.5 \rho A_P V^2} \quad (3-12)$$

$$1 - t = 1 - \frac{C_G}{C_T} \quad (3-13)$$

平水中の荷重度変更試験により, (3-8)式及び(3-11)式からフィッティングにより U_{a0} , B_0 , C_0 を求めることができる. 波浪中については, B_0 , C_0 は平水中と同じ値を適用することができ, C_T の平方根型の関数で変化することが水槽試験結果からも示されている¹⁵⁾. このため, 波により船体運動する影響は U_{a0} の変化として扱えば良い. U_{a0} について, 波浪中の値の平水中 (U_{a0s}) の値からの変化量を, 入射波の波高 ($2\zeta_a$) と船尾喫水 (d_a) の比で割り, $\Delta U_{a0}'$ として(3-14)式で表す.

$$\Delta U_{a0}' = \frac{U_{a0} - U_{a0s}}{2\zeta_a / d_a} \quad (3-14)$$

船体運動によりプロペラ推力が0の時の有効伴流係数 (U_{a0}) が変化するため, この周波数応答を表現する必要がある. これを波浪中で船尾流場が相対運動する影響と考え, プロペラ断面での船体底部の変動水圧振幅 (P_a) を用いて周波数応答を表す¹⁶⁾. また, 斜波に拡張するためプロペラ軸高さの波粒子速度振幅 (v_a) を加え周波数応答を(3-15)式の通り表す. 波向 (α) に関する係数 $A(\alpha)$, $B(\alpha)$ はそれぞれ P_a , v_a に対する重み関数で船型による回帰式で表現する. なお, 波向は向波を 0deg. とする.

$$\Delta U_{a0}' = A(\alpha) \frac{P_a(\alpha, \omega)}{\rho g \zeta_a} + B(\alpha) \frac{v_a(\alpha, \omega)}{\zeta_a \sqrt{g / L_{ps}}} \quad (3-15)$$

$$A(\alpha) = A(0) - \left(C_1 \sin \alpha + C_2 \sin \frac{\alpha}{2} \right) \quad (3-16)$$

$$B(\alpha) = B(\pi/2) \sin \alpha \quad (3-17)$$

$$A(0) = -2.931 - 1.529 C_B + 1.672 C_{wa} + 2.845 C_{VP} + 0.757 \frac{H_S}{d_a} \quad (3-18)$$

$$B(\pi/2) = 2.722 - 0.172 \frac{B}{d_m} - 2.187 C_{VP} - 5.022 (1 - C_B) \frac{d_m}{B} + 0.110 \sigma_a \frac{B}{d_m} \quad (3-19)$$

$$C_1 = 9.543 - 5.823 C_B - 1.589 e_a' - 8.754 K_m + 5.407 C_B \sigma_a - 1.007 \frac{d_a - d_f}{d_m} \quad (3-20)$$

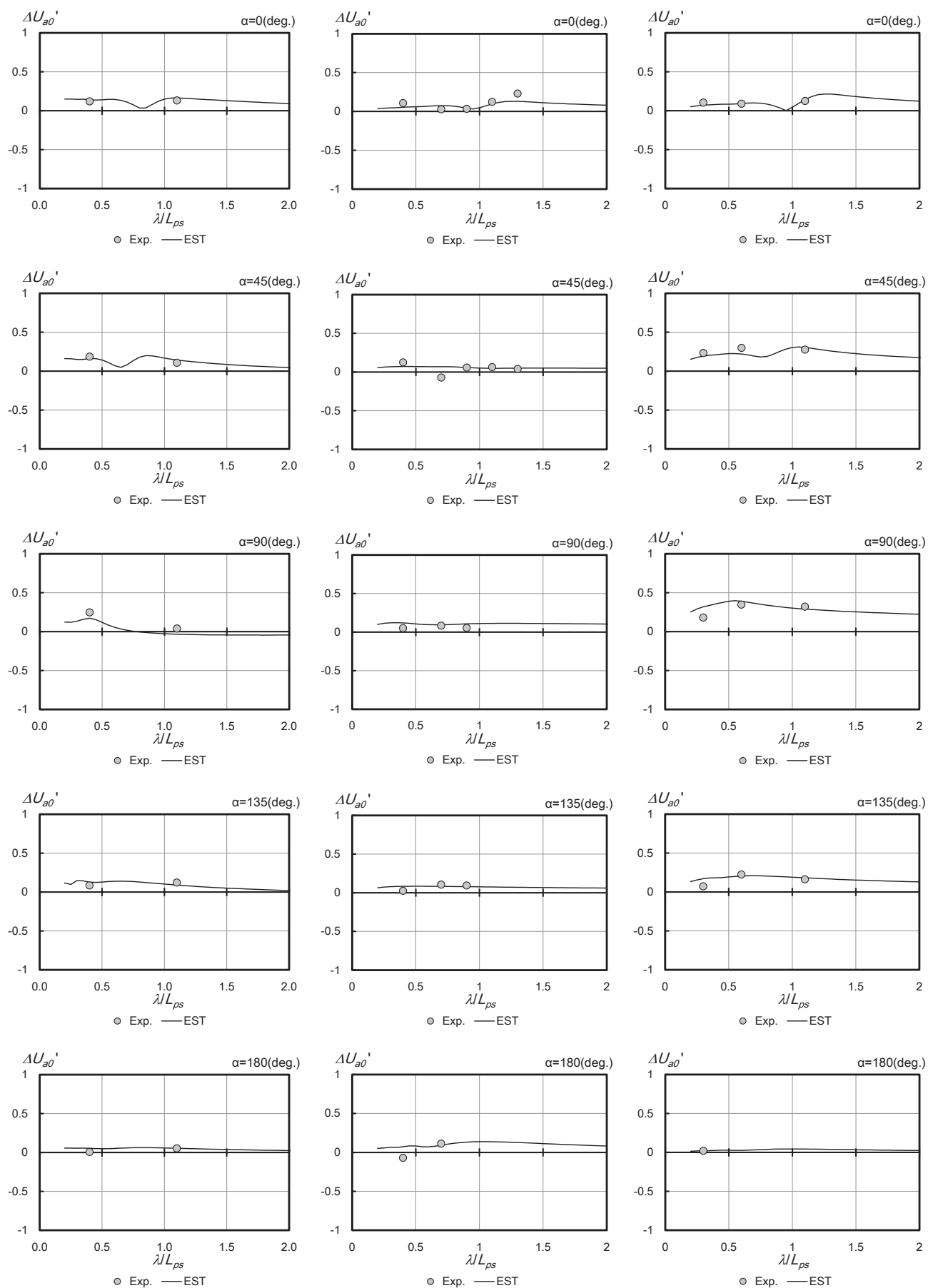


図 3-4 波浪中自航要素推定法と検証結果（左：コンテナ船、中央：大型タンカー、右：199GT 内航貨物船）

$$C_2 = 5.002 + 2.869\gamma_a - 17.069C_B \frac{B}{L_{ps}} - 26.261 \frac{2d_m}{L_{ps}} - 1.621 \frac{d_a - d_f}{d_m} - 6.012 \frac{H_s}{d_a} \quad (3-21)$$

$$\sigma_a = \frac{1 - C_{wa}}{1 - C_{pa}} \quad (3-22)$$

$$e_a' = \frac{L_{ps}/B}{\sqrt{0.25 + (d_m/B)^2}} (1 - C_{pa}) \quad (3-23)$$

$$K_m = \left(\frac{1}{e_a'} + \frac{1.5}{L_{ps}/B} - 0.33 \right) (0.95\sigma_a + 0.40) \quad (3-24)$$

$$\gamma_a = \frac{L_{ps}}{B} \frac{1}{1 - C_{pa}} \quad (3-25)$$

ここで、 ρ は流体密度、 g は重力加速度、 C_B は方形係数、 C_{wa} は船体後半部の水線面積係数、 C_{pa} は船体後半部の柱形係数、 C_{vp} は豎柱形係数、 L_{ps} は線首水切位置からA.Pまでの長さ、 B は船幅、 d_m 、 d_f 、 d_a はそれぞれ中央部喫水、船首喫水、船尾喫水、 H_s はベースラインからのプロペラ軸心高さである。

波浪中で波長船長比 (λ/L_{ps}) を変化させて荷重度変更試験を行い、 U_{a0} の周波数応答を求め、これを(3-15)式と比較する。コンテナ船 ($L_{ps}=300.00\text{m}$, $B=40.00\text{m}$, $d_m=14.00\text{m}$)、大型タンカー ($L_{ps}=324.00\text{m}$, $B=60.00\text{m}$, $d_m=20.50\text{m}$)、199GT内航貨物船 ($L_{ps}=51.30\text{m}$, $B=9.60\text{m}$, $d_m=3.28\text{m}$) について図3-4に示す。ここで、Exp. は水槽試験値、ESTは(3-15)式による推定である。いずれの場合も本モデルにより、 ΔU_{a0} の周波数応答が表現できることが分かる。

4. 実海域性能最適化に関する研究

4.1 マイクロバブルを用いたPIV計測システムの開発

実海域中の船舶の推進性能を正確に評価し、船型改良を行うためには、船尾流場の変化を把握する必要がある。そのために、PIV (粒子画像流速測定法) による流場計測が盛んに行われており、国内外の水槽で導入が進んでいる。一般的に、PIVで可視化計測を行う場合、流体中に目印となる固体粒子のトレーサが用いられるが、一度散布したトレーサは回収が事実上不可能で、水槽保守や精度管理の観点から問題があるため、当所では水槽中に残留することのないマイクロバブルをトレーサとして利用したPIVシステムの開発を行い¹⁷⁾、模型船船尾の流場計測を行う^{18), 19), 20)}。本計測システムの概観図を図4-1に示す。マイクロバブルは気泡径のサイズが約30 μm 程度であり、気泡上昇速度が小さく気泡の結合が発生しない特徴を有するため、トレーサとして有用である。レーザ光源には4Wのグリーンレーザを使用し、ミラーにより光軸を変えて水中に設けたシリンドリカルレンズを通して鉛直上向きにレーザシートを照射する仕様としている。

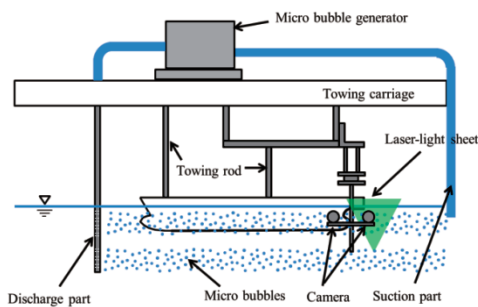


図4-1 システム概観図 (側面図)

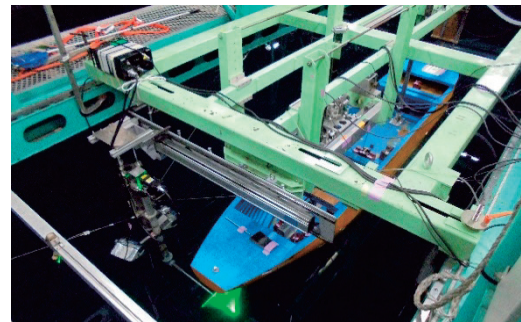


図4-2 PIV計測システム設置状況 (400m水槽)

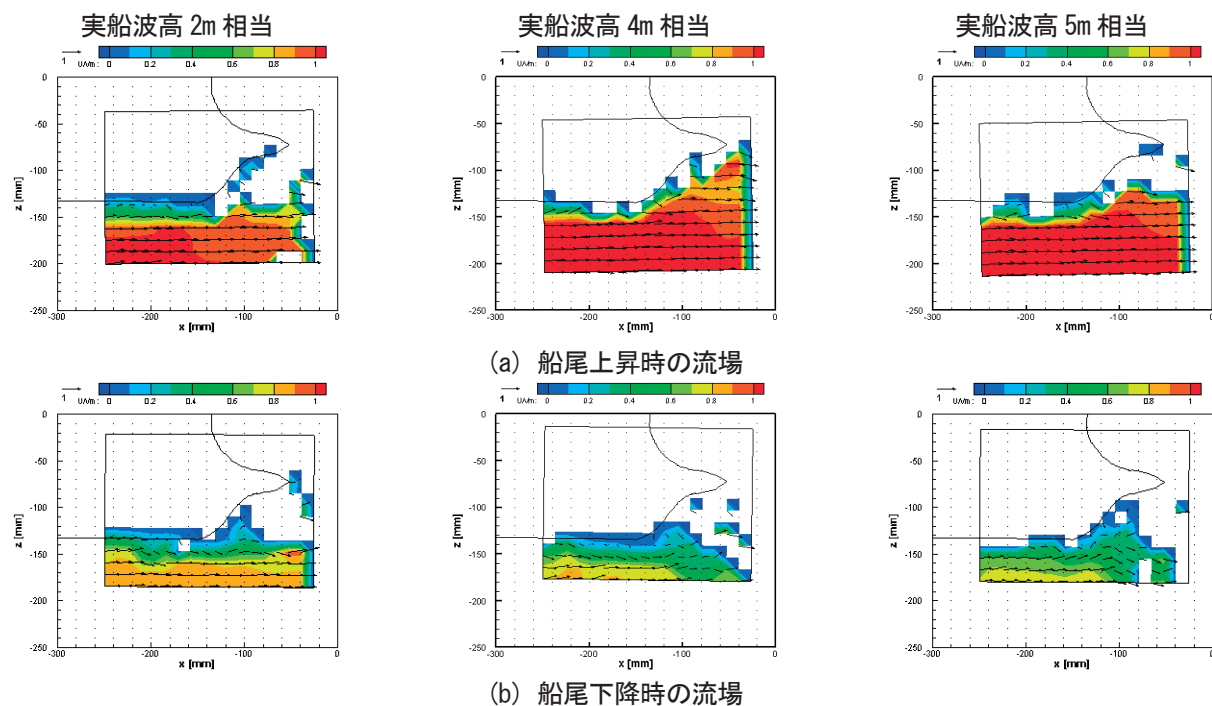


図 4-3 速度ベクトルと主流方向速度の等高線図

バラスト状態の VLCC 模型船周りの流れ計測を三鷹第二船舶試験水槽（400m 水槽）にて行った例を図 4-2 に示す。計測は、実船相当船速 10.3knot の自航状態でいい、センターラインに沿った断面での解析結果を図 4-3 に示す。波高による主流方向速度の変化を捉えることができ、船尾流場が相対運動している様子が観測できる。

なお、本 PIV 計測システムは当所の各水槽（実海域再現水槽、三鷹第二船舶試験水槽、三鷹第三船舶試験水槽、動揺試験水槽、氷海船舶試験水槽）にて使用可能である。

4.2 省エネ船首形状 COVE

実海域性能向上の取り組みの一つとして波浪中抵抗増加の低減を目指した船首形状 COVE（Concave bow shape Optimized in waVEs）の開発を行う^{21), 22), 23)}。COVE 船首は、平水中航走波形（静的水位上昇）より上方のフレームラインを内方に傾斜させた形状であり、平水中性能は変わらずに波浪中抵抗増加の低減を図るものである。COVE 船首の概念図を設計条件とともに図 4-4 に示す。

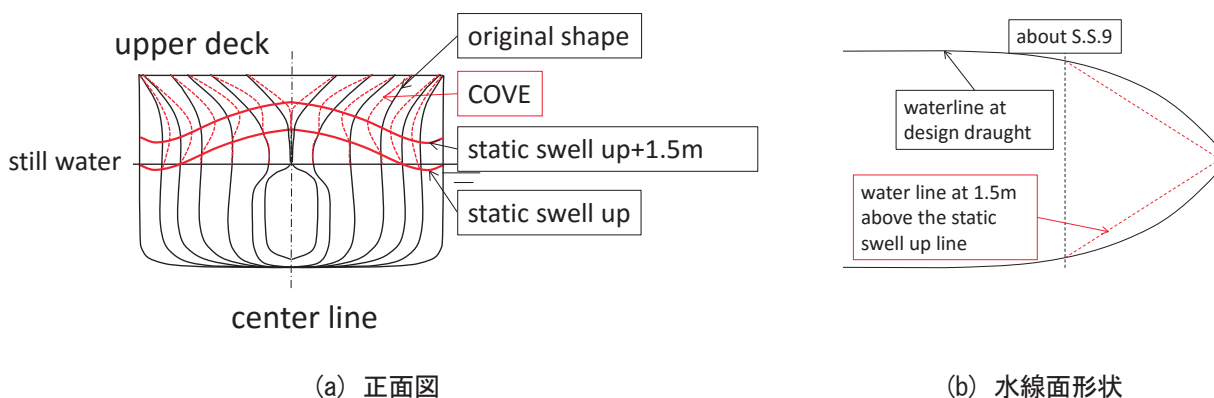


図 4-4 COVE 船首概念図（設計条件：SS.9 より前方を变形，設計波高 3m）

VLCC（船長 324.0m, 船幅 60.0 m, 喫水 20.5 m）模型船を対象に、原型及び COVE 形状で水槽試験を実施し波浪中抵抗増加の低減効果を検証した。対象船の原型及び COVE 船首形状を図 4-5 に示す。

水槽試験は、当所の実海域再現水槽（長さ 80m, 幅 40m, 水深 4.5m, 全周分割式フラップ型吸収式造波機）で行った。向波、斜向波、横波の規則波中抵抗増加の試験結果を図 4-6 に示す。図中の実線は VESTA による計算結果である。水面上形状により、短波長域での速度影響係数が異なるためこれを水槽試験で取得し、それを VESTA 計算に使用し規則波中抵抗増加を推定している。

これから COVE 船首による波浪中抵抗増加の低減は、向波短波長域で最も高く約 40%であることが分かる。

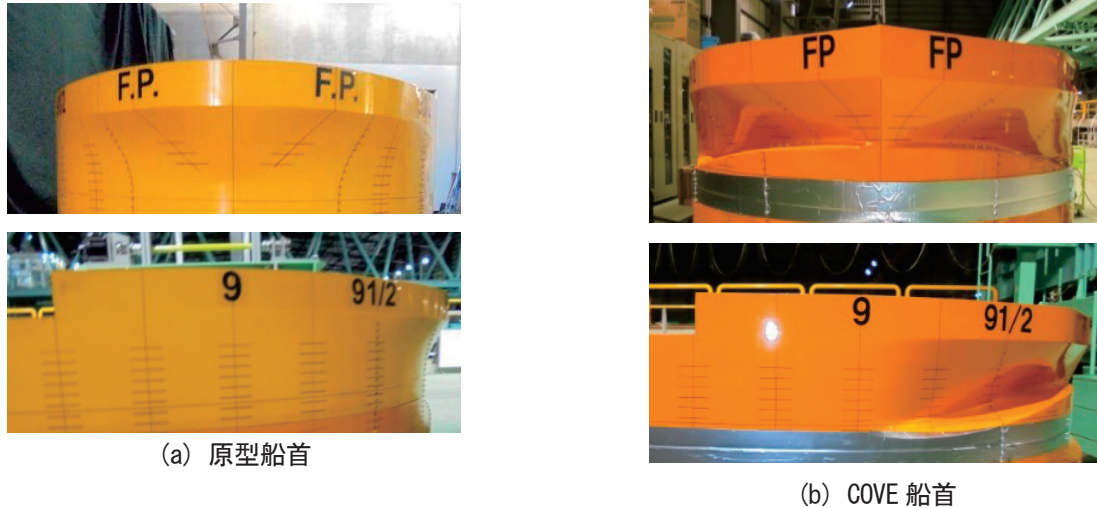


図 4-5 対象船の船首形状

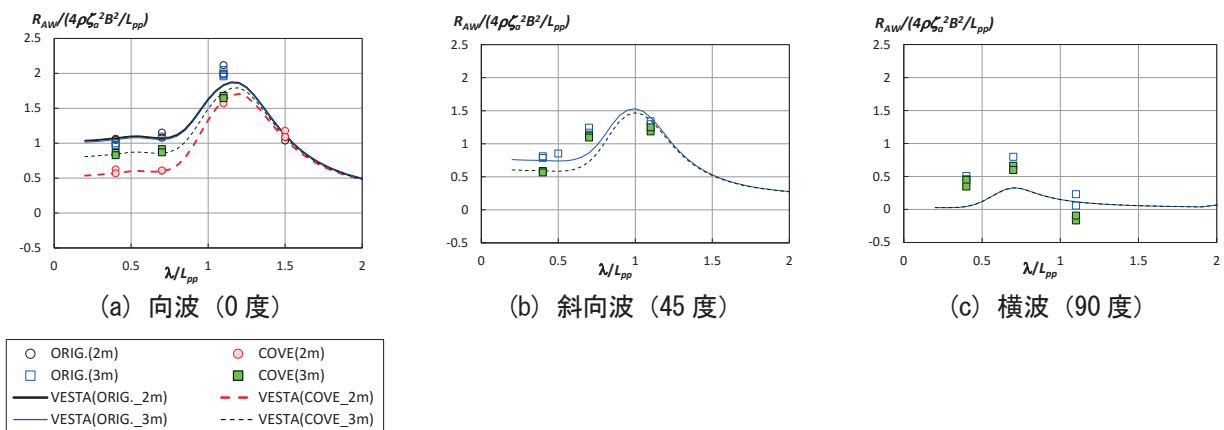


図 4-6 波浪中抵抗増加の周波数応答 ($F_r=0.139$)

5. SEEMP 改善手法の研究

船舶運航からの GHG 排出量及び燃料消費量の削減を図るため、VESTA を用いた実船モニタリングデータの解析により、燃料消費量増加の要因分析が可能である。また、シミュレーションにより、実際に遭遇しなかった状況での運航評価も可能である。

5.1 実船データ解析手法

実運航シミュレーションは物理モデルベースの実海域性能推定法 VESTA により実施する。評価に必要となる平水中のパワーカーブは実船モニタリングデータより平水中に相当する対水船速、主機回転数と主機出力を抽出し、それらのデータからカーブフィッティングする。主機出力は対水船速及び主機回転数のおよそ 3 乗に比例す

ることから(5-1), (5-2)式に示す累乗近似を行う. この累乗近似により高速域から低速域まで滑らかに表現することが可能である. ここで, BHP は主機出力, V は対水船速, N_E は主機回転数であり, $a_v, a_n, b_v, b_n, c_v, c_n$ はそれぞれ定数である.

$$BHP = a_v V^{b_v} + c_v \quad (5-1)$$

$$BHP = a_n N_E^{b_n} + c_n \quad (5-2)$$

実海域中では波や風による外力を VESTA で推定し, 抵抗・推力一致法で実海域中のパワーカーブを求める. 遭遇気象海象及び主機回転数（主機出力一定制御の場合は主機出力が入力）を入力に, 主機作動特性を用いて速力や燃費等を推定する²⁴⁾. この方法によるシミュレーションの精度検証がコンテナ船, 自動車運搬船, バルクキャリアでの実船モニタリングデータにより実施されており^{25), 26), 27)}, 約 1% の精度で燃料消費量を推定することが可能である.

実運航では喫水状態が航海毎に異なるため, 航海毎の比較を行う場合, アドミラルティ係数の関係を用いて同一船速での各航海の主機出力を基準航海の値に換算する方法が通常行われる. 主機出力の換算式を(5-3)式に示す.

$$P_R(V) = \left(\frac{disp_R}{disp_i} \right)^{\frac{2}{3}} P_i(V) \quad (5-3)$$

ここで, P は主機出力, $disp$ は排水量, 下付添字の R は基準航海, i は各航海を表す.

この換算方法の精度を検討するため, バルクキャリア（船長約 330m）に対して VESTA を用いた場合の排水量修正の影響を調べ, 満載に近い状態とバラストに近い状態とで比較を行った²⁸⁾. その結果を図 5-1 に示す. ここで, $\delta disp\%$ は(5-4)式に示す基準航海の排水量と各航海の排水量との差の割合のパーセント表示, $\delta FPD\%$ は(5-5)式に示す 1 航海の合計燃料消費量のシミュレーションと実船データとの差の割合のパーセント表示を示す. FPD は燃料消費量であり, 下付添字の sim は実運航シミュレーションの推定, OB は実船モニタリング値を表す.

$$\delta disp\% = \frac{disp_R - disp_i}{disp_R} \cdot 100 \quad (5-4)$$

$$\delta FPD\% = \frac{(FPD_{sim} - FPD_{OB})}{FPD_{OB}} \cdot 100 \quad (5-5)$$

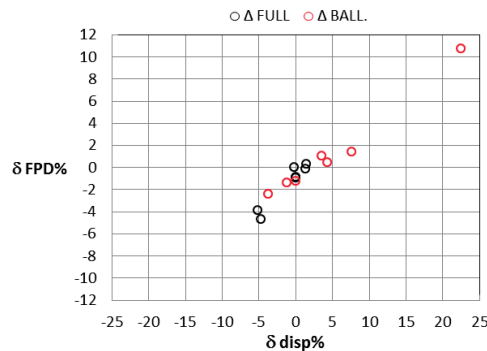


図 5-1 排水量と燃料消費量推定差の関係²⁸⁾

図5-1 から、1 航海の燃料消費量の推定精度を約 1%とするためには、アドミラルティ係数を用いた排水量修正は、約 2%の排水量の違いとする必要があることが分かる。

5.2 実運航の評価法

1 航海の燃料消費量は運航方法によって左右される。運航方法は船長判断に依存するため、その運航技量評価方法が必要とされる。そこで、実際の運航で回転数の低下と増加を繰り返している区間を取り上げ、航海時間を同じとして回転数を変化させない、すなわち平均的な回転数で運航するシナリオについて、燃料消費量の影響を調べる²⁷⁾。

図5-2 は自動車運搬船の航海データで、出港 11 日目に回転数を上げたものの、早着となるため、入港直前に回転数を下げた運航の例（赤丸で示す）で、図5-3 はコンテナ船の航海データで、出港 2 日目から 6 日目まで回転数が高く、その後は回転数を落としてしている例である。

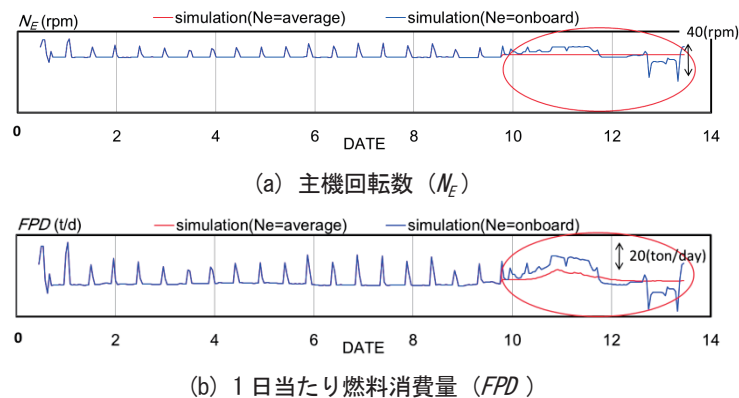


図5-2 回転数変化と燃料消費量の関係（自動車運搬船）²⁷⁾

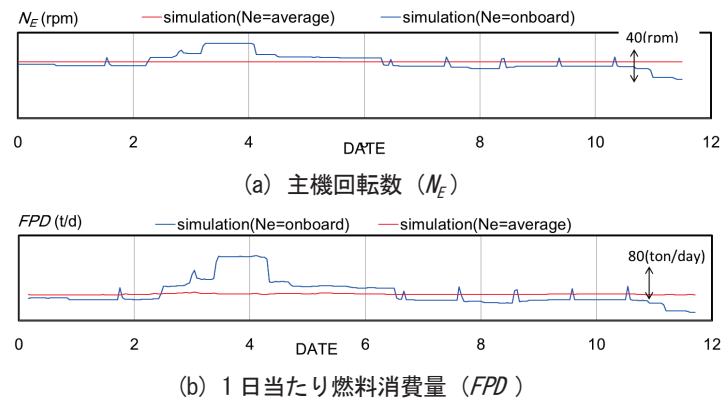


図5-3 回転数変化と燃料消費量の関係（コンテナ船）²⁷⁾

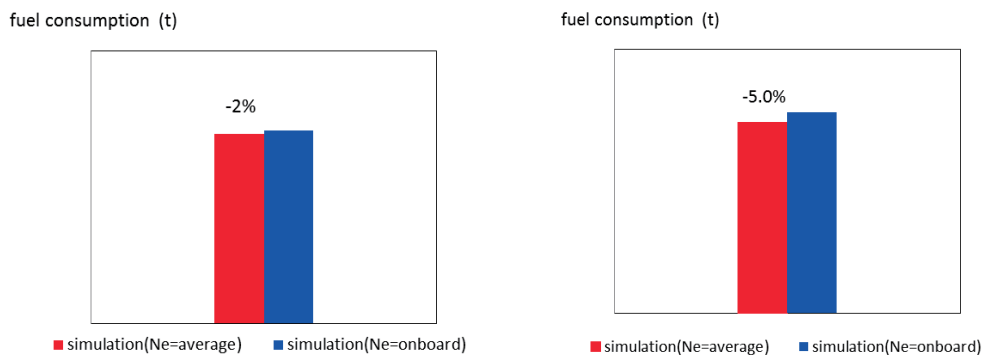


図5-4 シナリオによる燃料消費量削減効果（左：自動車運搬船，右：コンテナ船）

なお、図 5-2, 5-3 では主機回転数が 1 日に 1~2 回、短時間増加している状況が見られるが、これは対象船が低速運航を行っているため、熱交換器系の煤取りのためスートブローを行い、主機の回転数を計画的に増加させているものである。

平均的な回転数で運航するシナリオによる燃料消費量削減効果を比較し、図 5-4 に示す。これから、自動車運搬船の場合約 2% の削減、コンテナ船の場合約 5% の削減となることが分かる。

6. 北極海航路航行性能推定法の研究

近年、北極海では海水面積の減少とともに航路としての利用が増加している。本研究では、VESTA と氷中抵抗増加モデルを組み合わせることにより、北極海航路を念頭に置いた実運航性能を評価する手法の開発を進めてきた。具体的な内容は、様々な氷況に対応する氷中抵抗増加モデルの開発、実氷況データを用いた運航シミュレーション、及び衛星 AIS データを用いた北極海航路の実運航の分析である。また、章末には今後の展開として、北極海航路運航支援システムの開発について言及する。

6.1 氷中抵抗増加モデルの拡張

6.1.1 Channel 中抵抗増加推定モデル

従来、氷海域を航行する船舶の抵抗推進性能は、厚さが一定で十分大きな氷盤（平坦氷）を砕氷航行する場合を想定した指標値で通常表していた。しかし、当該航路を航行するタンカー、バルクキャリア等の一般商船の多くは、耐氷補強を施した通常船型である。これらの船舶が平坦氷を砕氷航行することは殆どなく、むしろ先導する砕氷船によって啓開された水路（Channel）中を航行することが多いため、比較的小さな氷盤によって構成された砕け氷（氷盤群、以下 Floe ice）中における性能の評価が重要である。

そこで、Floe ice 中における船舶の抵抗増加を推定するため、氷中抵抗の Limit Momentum モデルと Limit Stress モデルの 2 種類を氷況に応じて用いることとする。また、Floe ice の寸法と密接度（Ice Concentration：平面内を氷が占める割合）の 2 つのパラメータに注目し、上記 2 種類のモデルを結合することにより、小氷盤から平坦氷中までの抵抗増加を表現可能なハイブリッド・モデルとする²⁹⁾。このモデルでは、ある寸法（径）と厚さの Floe ice が一定の氷密接度で一様に分布する領域を想定する。この領域を航行する船舶に作用する全抵抗の平均値 R_F は、要するエネルギーが低い方のプロセスが選択的に生じると考えられることから、(6-1)式で与えられる。

$$R_F = \text{Min}[R_{LM}, R_{LS}] \quad (6-1)$$

ここで、添え字 LM (Limit Momentum) は、船体に作用する抵抗が氷盤の運動量によって規定されることを示す。本研究では Limit Momentum モデルとして、船体に比べて十分小さい氷盤群中における抵抗を表現する Kashitelijan-Poznjok-Ryblin モデル³⁰⁾（以下、KPR モデル）を用いる。一方、添え字 LS (Limit Stress) は、船体に作用する抵抗が氷盤の破壊によって規定されることを示す。本研究では、船体に比べて十分大きい氷盤中における抵抗を表現する Lindqvist³¹⁾によるモデルを用いる。

6.1.2 氷海水槽試験データによる検証

耐氷型商船の北極海運航では、航路上の氷況は比較的穏やかで低氷密接度であり、氷中抵抗増加推定モデルとしては KPR モデルが適当であるケースが多いことが予想される。そこで、巡視船「そうや」模型の流氷中抵抗試験結果³²⁾を用いて、KPR モデルによる channel 中抵抗増加推定精度を検証した³³⁾。実船及び模型船の諸元を表 6-1 に示す。模型船の縮尺比は 1/20 である。この模型試験は当所の氷海船舶試験水槽において行ったもので、氷密接度 (C) 及び氷厚 (h) を変えて、船速 (V_m) に対応する抵抗を計測している。ここでは、同じ条件を KPR モデルに与えて計算し、模型試験結果と KPR モデルによる推定結果の比較を図 6-1 に示す。図の横軸は模型船速、縦

軸は全抵抗であり、開水中の抵抗を含む。図 6-1 より、KPR モデルによる推定結果は氷厚が小さく、かつ密接度が低い場合は水槽試験結果と概ね良く一致する。一方、氷厚が大きく、密接度が高い場合はモデルの値がやや過大となる。この一因として、模型試験ではモデル化されていない少エネルギーかつ局所的な氷板破壊が先に起き、モデル化された抵抗まで高まらないためと考えられる²⁹⁾。

表 6-1 巡視船「そうや」主要目

Item		Unit	Full [m]	Model [m]
Length B.P.	L_{PP}	M	90.2	4.5
Breadth	B	M	15.6	0.78
Draft	D	M	5.26	0.263

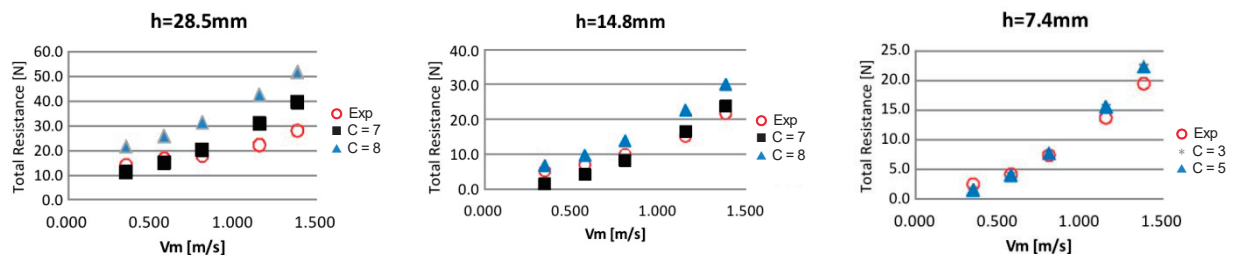
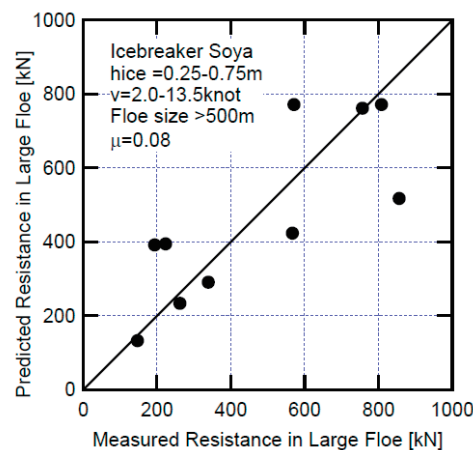


図 6-1 模型試験結果と KPR モデルによる推定結果の比較

なお、Lindqvist モデルについて、直径 500m 以上の船体に比べて十分大きい氷盤中での抵抗を実船試験と比較した結果³⁵⁾を図 6-2 に示す。ここで、 h_{ice} は氷盤上の積雪を含む氷厚、 v は船速、 μ は船体と氷との間の摩擦係数である。

図 6-2 実船試験結果と Lindqvist モデルによる推定結果の比較³⁵⁾

6.2 北極海航路における運航シミュレーション

6.2.1 対象船及び航路設定

最近 30 年近くに亘る衛星観測によると、北極海の海水面積は年々減少している。2013 年には夏季における海水面積は、衛星観測史上最低となった。これに伴い、当年北極海航路（NSR: Northern Sea Route）を通して極東アジアとヨーロッパの間を航行する船舶は 70 隻を超えた。ただし、氷中航行では船速及び燃料消費量は氷況の厳しさによって大きく変化するため、NSR の経済性は氷況によって損益が分岐すると言える。

本研究では、NSR の経済性評価精度を向上させることを目標として、当所で開発した実運航シミュレータ VESTA と氷中抵抗増加推定モデルを組み合わせて、北極海航路の運航シミュレーションを行う。対象船は図 6-3

に示す船長約 217m のパナマックスバルクキャリアである。本船の主要目は表 6-2 の通りである。他の諸元はこの船種に多く見られる標準的なものとし、プロペラは固定ピッチプロペラである 1 軸船を想定している。ただし、船殻は耐氷型とし、夏季の緩やかな氷況であれば砕氷船のエスコートを受けることなく単独氷中航行が可能と仮定する。

対象期間は、2013 年の 9 月である。海氷分布は、JAXA の「しずく」に搭載されたマイクロ波放射計 AMSR2 による、当該期間の氷密接度データ月平均値から与えた。この氷密接度分布は、図 6-4 にカラーで示す通りである。また、氷厚は 1.0m、氷盤サイズは 20m と仮定する。これらのパラメータは、INSROP プロジェクトの試験航海における氷況観測結果³⁴⁾を参考に設定したものである。

航路は氷況に応じて 3 種類を設定した。設定方針は (a) Shortest：高密接度でない範囲で最短、(b) Fair：低密接度の範囲で最短、(c) Coastal：トラディショナルかつ氷を極力避航とした。図 6-4 に折れ線で示す各航路との対応をまとめると表 6-3 の通りになる。また、航路全体の出発地は東京、目的地はロッテルダムとし、風・波等は考慮していない。



図 6-3 対象船（バルクキャリア）

表 6-2 対象船の主要目（バルクキャリア）

Length B.P.	217.34	m
Breadth moulded	32.26	m
Draft	14.0	m
Dead weight	73,000	MT
Engine Output (MCR)	9,070	kW

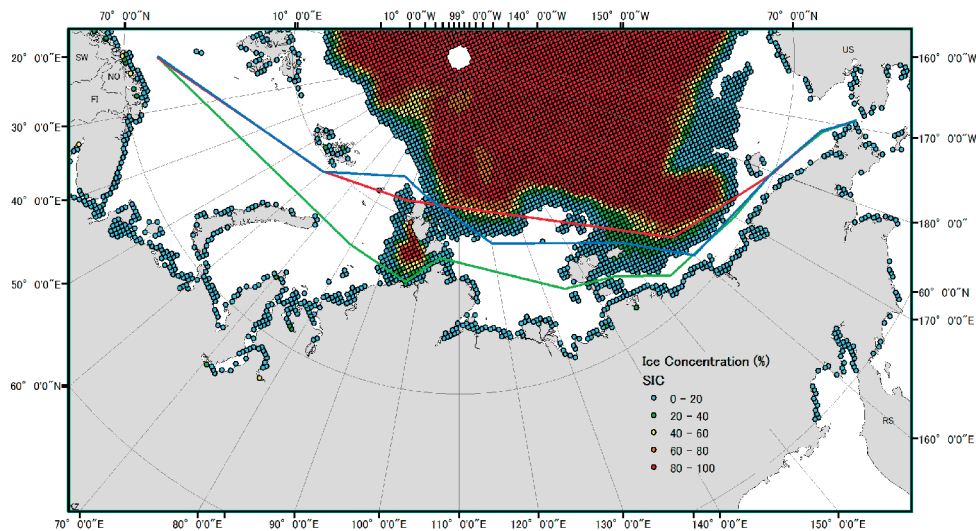


図 6-4 NSR での氷況分布と選定航路（2013 年 9 月）

表 6-3 選定航路概要

Route	Color	Note
(a) Shortest	Red	Ice concentration < 6/10
(b) Fair	Blue	Ice concentration < 3/10
(c) Coastal	Green	High intention to find open lead

6.2.2 水中推進性能の推定

VESTA に 6.1 節で述べた Channel 中氷抵抗増加推定モデルを組み合わせ、本船の氷中推進性能を推定する³⁶⁾。氷密接度を変化させた場合の抵抗増加量を考慮したパワーカーブを図 6-5 に示す。図中 C は氷密接度（10 分率）、Calm は無氷かつ静水を示す。また、O.P. は主機のオペレーティングポイントである。

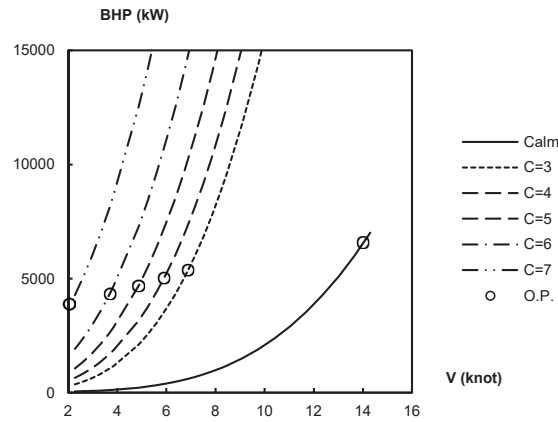


図 6-5 氷密接度とパワーカーブの関係

パワーカーブでは、氷密接度が高くなると船速を維持するためにはより大きな主機出力（BHP）を要するが、主機 O.P. における BHP は低下する。これは、VESTA の機能により主機のトルクリミットが考慮されたためである。すなわち、氷抵抗によって過負荷になり、主機回転数が制限されて出力が低下することを意味している。

また、本船の巡航速度は 14knot を想定しているが、氷密接度が 5 を超える辺りでは、速度は 50% 以上低下することが分かる。船速低下は航海日数に大きく影響する。また、燃料消費量（FOC）もトータルでは日数の影響が大きい。氷の存在は推進性能に大きく影響を及ぼすことが分かる。

6.2.3 シミュレーションによる航路の評価

出発地を東京、目的地をロッテルダムとし、6.2.1 節に述べた条件のもとで NSR における運航シミュレーションを行う³⁷⁾。シミュレーションにおける航路長は図 6-6 の (a), (b), (c) の通りである。なお、SCR（スエズ回り航路）を参考として付記する。

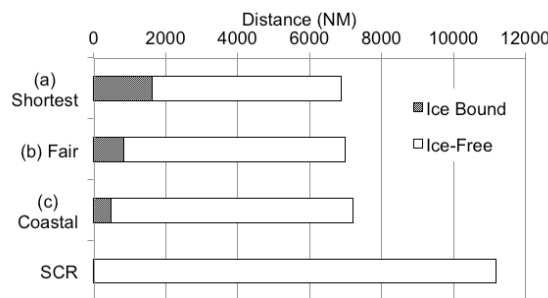


図 6-6 航路長の比較

当該期間では、NSR でも氷に覆われている範囲は全体の高々 24% であった。従って、NSR の評価においては、氷のない区間の運航性能評価も重要であることが分かる。

図 6-7 に、航路 (a), (b), (c) における運航要素間の比較を示す。ただし、これらは各航路の NSR 部分についてのみ抽出した比較である。

これを見ると、(a) は最短であるにもかかわらず航海日数が他と比べて多い。(a) は密接度 3 以上の海域を含むが、そこでの氷抵抗による船速低下が日数に大きく影響していると考えられる。また、(a) では FOC も他より大きい。これは、(a) の氷況では、短い航路長や船速の低下による FOC 削減より、日数の増加による FOC 増加が顕著であったことを意味している。

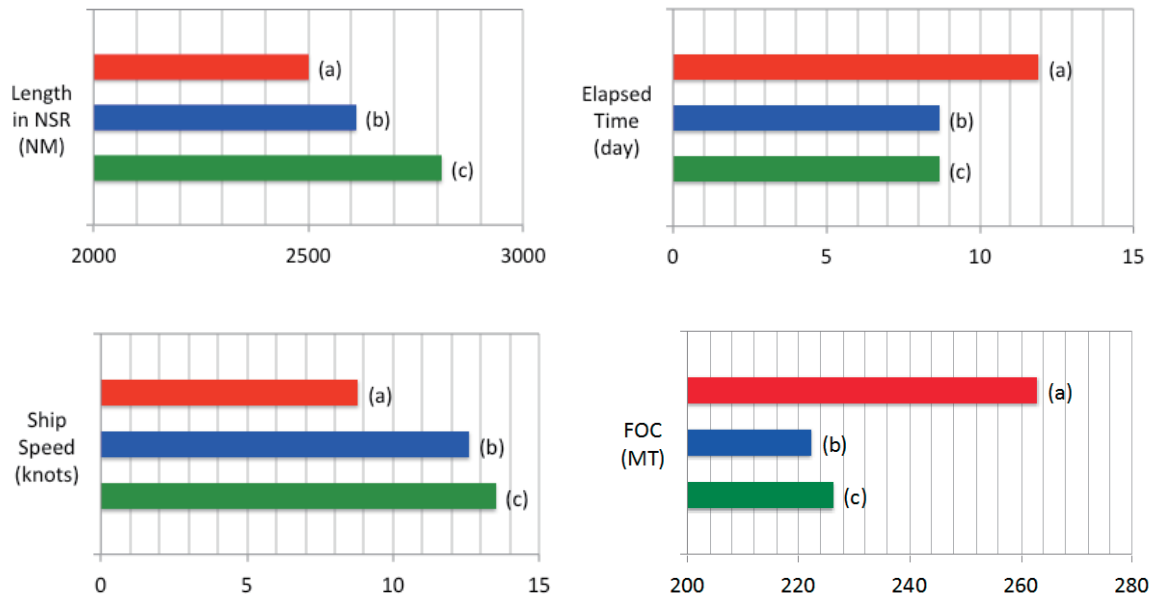


図 6-7 NSR での運航要素間の比較

表 6-4 各運航要素について SCR（スエズ回り航路）に対する NSR の削減率

	Length	Elapsed Time	FOC
(a) Shortest	38%	25%	31%
(b) Fair	37%	35%	35%
(c) Coastal	36%	35%	35%

また、東京からロッテルダムまでの全航路において、各運航要素について、SCR に対する NSR の削減率を表 6-4 に示す。

航路(b), (c)のシミュレーション結果は、概ね 35%の日数（船速）及び FOC の削減が可能というものであり、氷況がマイルドな範囲であれば、航路による差は比較的少ない。しかし、(a)については、SCR に対して優位であることは変わらないものの、(b), (c)と比較して若干成績が悪いことが分かる。すなわち、氷況が厳しい航路を選択すると、前述のように、航路長が短くても航海日数や FOC に対しては逆効果になり得る。

NSR を通航するコストには他にも多くの要素がある³⁸⁾が、トータルで見ると氷況によって損益が分岐すると言える。また、上述の計算例を参照すると、氷況に応じた航路の選択は NSR のコスト評価に大きく影響している。なお、ここで行った計算は多くの仮定を含んでいることを注記する。

6.3 衛星 AIS データによる北極海航路実運航の分析

6.3.1 対象データ

氷中抵抗増加モデル及び運航シミュレーションを検証するためには、実運航データが必要不可欠である。しかし、氷中航行船舶の絶対数は少なく、データの入手は容易ではない。衛星 AIS は、船舶の位置動静通報制度である AIS (Automatic Identification System) のデータを衛星でキャッチするもので、NSR の実運航について一定の情報源となる。今回は、exactEarth 社をデータソースとした AIS データ（供給元：IHI 社）を使用した。分析対象期間は 2013 年の 9 月及び 10 月とし、NSR（北東航路）沿いの通航船舶から通報された CLASS A AIS POSITION REPORT (MESSAGES 1, 2, AND 3)と CLASS A SHIP STATIC AND VOYAGE RELATED DATA (MESSAGE 5)から実運航に関するパラメータを抽出している。

表 6-5 NSR 通航船舶の分類（2013 年 9 月から 10 月）

区 分	隻数
NSR を通航した船舶	30
上記のうち、NSR を完全に横断した船舶	22
上記のうち、出発地と目的地が、Murmansk 以西と、ベーリング海峡以東または以南であった船舶	17
上記のうち、商船	12
上記のうち、アイスクラス IA あるいは Arc 4 以上を持つ船舶	8

※NSR Information Office データを分析

表 6-6 NSR 通航船（Ice-1A）の主要目（2013 年 9 月から 10 月）

Ship ID	Ice Class	Type	L	B	D/W	Remarks
A	Ice-1A	Tanker	250	44	74,559	
B	Ice-1A	Tanker	229	32	74,997	
C	Ice-1A	Tanker	183	40	64,917	
D	Ice 1A	Bulker	225	32	75,603	Target

※NSR Information Office 及び Vessel Tracker 公表データより抽出

2013 年 9 月から 10 月に北極海航路を通航したアイスクラス 1A あるいは Arc 4 以上を持つ商船の数を表 6-5 に示す。これは、NSR Information Office が公表している Transit Statistics in 2013³⁹⁾を分析して求めたものである。この間、北極海を横断した商船としては、約 7 割が 1A 以上という高いアイスクラスを保有していたことが分かる。また、これらの船舶のうち衛星 AIS によって航跡が追跡でき、かつ要目が明らかな 4 隻を表 6-6 に示す。要目は、上述の NSR Information Office の資料の他、Vessel Tracker がインターネットで公開している情報を参照して収集したものである。なお、便宜上各船に A から D までの ID を付与する。

6.3.2 分析及びシミュレーションとの比較

ここでは、表 6-6 に挙げた各船のうち、6.2 節で述べたバルクキャリア（モデル船と呼ぶ）と類似した要目を持つ D 船の船速と、モデル船のシミュレーションによる船速を比較する。D 船は 2013 年 10 月に当該海域を西行しており、日時・位置及び船速は AIS データから、氷密接度は衛星データ（AMSR2）から抽出している。D 船の航跡と氷密接度を図 6-8 に示す。また、モデル船に与えた氷況等の条件は 6.2 節と同様とする。

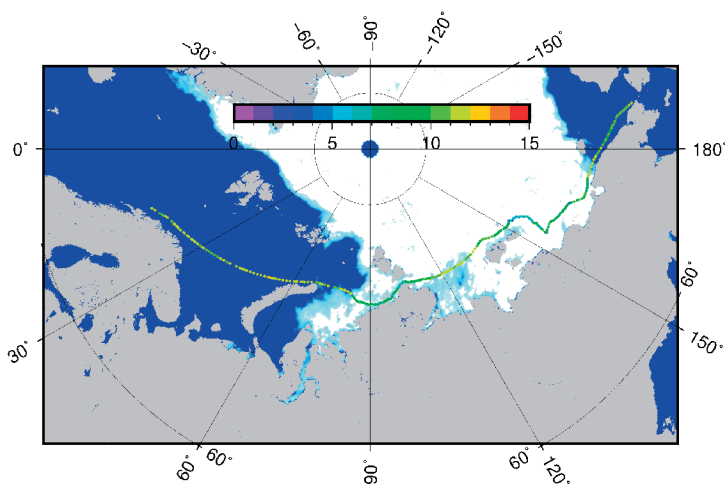


図 6-8 Ship D の航路と氷況（2013 年 10 月の氷密接度月平均値）
航路上の着色は Ship D の船速を knot で示したもの

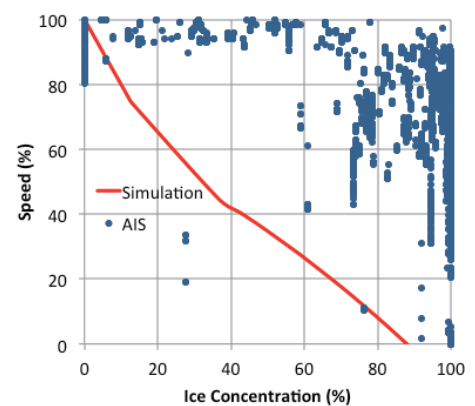


図 6-9 氷密接度に対する船速低下（Ship D）

D 船とモデル船の氷密接度に対する船速低下を比較したものを図 6-9 に示す。図 6-9 での船速は、平水での巡航速度の最大値を 100%とした割合で表している。モデル船も D 船も、氷密接度に概ね比例して船速が低下していることが分かる。この比較で現れる船速の違いの理由は、主に以下の 2 通りが考えられる。

第一に、実運航では衛星データで捉えられない開水域を選択的に通ることである。これはモデル船に与えた AMSR2 の分解能 (10km) に起因しており、特に氷密接度が低い海域ではほとんど無氷と変わらない航走が可能となるため、モデル船の船速低下が過大になる。第二に、砕氷船のエスコートの影響である。特に氷密接度が高い海域ではその可能性は高い。その場合、船は砕氷船の作るチャンネル内を航行することになり、船速は砕氷船の指示によるため不定となりやすく、モデル船との単純な比較は不可能である。

これらのことから、氷中航行性能シミュレーションの高精度化のためには、より詳細な氷況を考慮することと、エスコートの影響を適切に評価・分離することが望まれる。

6.4 北極海航路運航支援システムの開発に向けて

北極海航路では海水面積が減少しており、今後船舶の通航は増加すると考えられる。氷海航行には寒冷環境対応や危険察知の面で経験が必要である一方、実運航は全体数の中では少なく、知識の獲得が難しい。従って、北極海航路を経済的かつ安全に活用するためには、意思決定支援システムが必要不可欠である。そのシステムでは、様々なデータを集約して正確に分析し、氷況の変化に伴う推進性能や安全性の変化を適切に報告することが求められる。すなわち、氷海航行船または氷海航路運用は高度に情報化されなくてはならない。

当所では、前出の氷中抵抗増加推定モデルを組み込んだ VESTA や、衛星センサ及びレーダ解析等による氷況モニタリング、構造応答計測等を統合した北極海航路運航支援システムの開発を目指している。開発中のシステムのイメージとして、北極海の海水分布とその中に設定された航路を表示した例を図 6-10 に示す。現在は既存データの参照による計画支援としての機能が実装されているが、今後短期的な氷況の変化を予測する技術を導入することで、経済性や安全性を考慮した最適航路の探索が船上で可能となる。

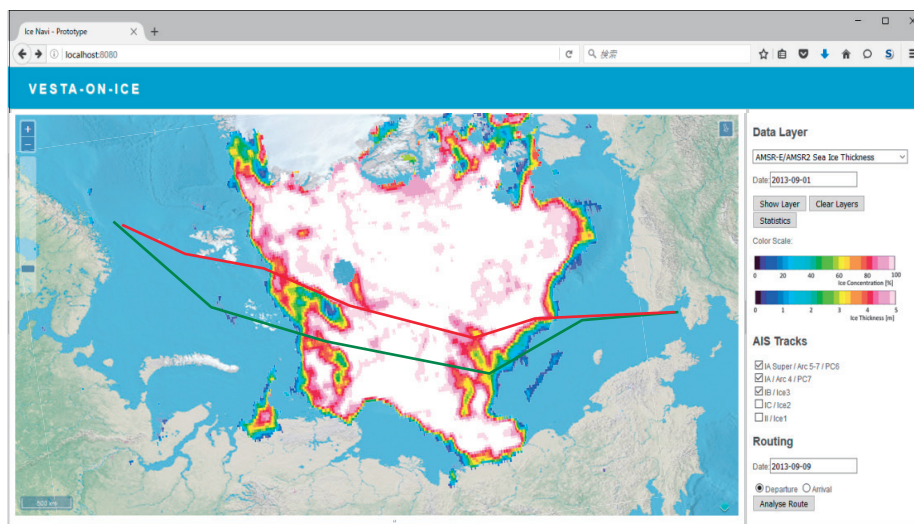


図 6-10 NSR 航海支援システム (NMRI)

このシステムに必要な技術的課題はまだ残されているが、氷中性能推定の基礎となる氷中抵抗増加推定モデルの改良もそのひとつである。6.3.2 節で述べたように、現在のモデルは運航支援システムで使う場合、より改善できる余地がある。また、モデルの定式化は最近の大型商船を対象に構築されたものではなく、その意味でもさらなる研究が必要である。新しい船型に対する新しいモデルを構築するためには、氷海水槽試験の活用が重要な役割を果たす。当所の氷海水槽では、図 6-11 に示す通り、パナマックスバルクキャリアのバルト海用規則に基づく出力推定試験⁴⁰⁾の認証経験がある。この施設と試験技術を活用してモデルを改善し、システムの実現に結びつける予定である。



図6-11 バルト海用規則に基づく出力推定試験(NMRI)
(左：流水中試験の様子，右：Trafí（フィンランド運輸省）より取得した証書）

7. まとめ

実運航からのGHG排出削減、燃費削減の取り組みを進めることができるよう、実運航性能シミュレータの開発に関する研究を行った。その成果をまとめると以下である。

- (1) 実運航性能シミュレータ VESTA を開発し、船体形状・船体性能推定プログラム UNITAS とともに一般向けに提供している。
- (2) 波浪中抵抗増加の不確かさ解析を行い、当所の波浪中水槽試験の品質管理を可能とし、信頼性の高い水槽試験の実施を可能とした。
- (3) 追波中抵抗増加、波浪中自航要素の推定法の開発を行い、高度な実運航性能評価を可能とした。
- (4) 実海域性能を向上させるため、COVE 船首形状の開発を行い、短波長域の波浪中抵抗増加の40%減少を示した。また波浪中船尾流場の可視化評価のため、マイクロバブルをトレーサに用いた PIV システムを開発し、自航状態での波浪中船尾流場の解析を可能とした。
- (5) 実運航での運航技量評価を可能とするため、実船モニタリングデータを基に VESTA で評価し、燃料消費量1%の精度で推定することを可能とした。運航中の指令回転数の変更を抑えることで燃料消費量削減になる事を示した。
- (6) アジア-欧州間の外航輸送でのGHG・燃料消費量・輸送日数の大幅な削減が可能な北極海航路の利用検討を行い、砕け氷(氷盤群)中抵抗推定法を開発し、これを基に北極海航路の航行性能推定法を開発した。

今後、外航船舶からのGHG排出削減規制は第二段階に向かって進む。第二段階で実施するとしていた経済的手法の導入には、枠組み策定をはじめとする関係国間の合意形成に時間がかかるため、まずはSEEMP改正により燃料消費実績報告制度(DCS: Data Collection System)を開始することとなった。高効率輸送への取り組みは一層加速するが、まじめな取り組みが評価される仕組みを構築できるよう、今後とも研究開発を通じ、技術面から支援していきたいと考えている。

参考文献

- 1) 辻本勝, 粉原直人, 黒田麻利子, 櫻田顕子: 実運航性能シミュレータ VESTA, 海上技術安全研究所報告, 第 15 巻, 第 4 号 (2016), pp.55-65.
- 2) 原口富博, 二村正: 曳船およびバージの波漂流力計測, 船舶技術研究所報告, 第 31 巻, 第 3 号 (1994), pp.19-38.
- 3) 原正一, 谷澤克治, 山川賢次, 星野邦弘, 湯川和浩, 長谷川純, 上野道雄, 南真紀子, 桐谷伸夫, 大松重雄, 猿田俊彦, 岡本三千朗: 荒天下における航行不能船舶の漂流防止等に関する研究, 海上技術安全研究所報告, 第 4 巻, 第 2 号 (2004), pp.1-157.
- 4) Tsujimoto, M., Sogihara, N., Kuroda, M. and Sakurada, A.: Development of a Ship Performance Simulator in Actual Seas, Proceedings of the ASME 2015 34th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering, OMAE2015- 41708 (2015).
- 5) MEPC 70/INF.35, Report of JASNAOE research project for determining minimum propulsion power (2016), pp.1-57.
- 6) 粉原直人, 辻本勝, 笠原良和, 深澤良平: 波浪中抵抗増加の計測における不確かさ解析の適用, 日本船舶海洋工学会講演会論文集, 第 19 号 (2014), pp.187-190.
- 7) 粉原直人, 辻本勝, 笠原良和, 深澤良平, 濱田達也: 水槽間における不確かさ解析—平水中抵抗と波浪中抵抗増加—, 日本船舶海洋工学会講演会論文集, 第 20 号 (2015), pp.263-266.
- 8) Sogihara, N., Tsujimoto, M., Kasahara, Y., Fukasawa, R. and Hamada, T. : Application of Uncertainty Analysis for Measurement of Added Resistance in Regular Short Waves, 18th International Conference on Ships and Shipping Research (2015), pp.92-102.
- 9) Tsujimoto, M., Shibata, K., Kuroda, M. and Takagi, K.: A Practical Correction Method for Added Resistance in Waves, Journal of the Japan Society of Naval Architects and Ocean Engineers, Vol.8, (2008), pp.147-154.
- 10) Tsujimoto, M., Kuroda, M. and Sogihara, N. : Development of a Calculation Method for Fuel Consumption of Ships in Actual Seas with Performance Evaluation, Proceedings of the ASME 2013 32nd International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering, OMAE2013-11297 (2013).
- 11) Maruo, H. : Resistance in Waves, Research on Seakeeping Qualities of Ships in Japan, The Society of Naval Architects of Japan, Vol.8, pp.67-102.
- 12) Kuroda, M., Tsujimoto, M., Fujiwara, T., Ohmatsu, S. and Takagi, K.: Investigation on Components of Added Resistance in Short Waves, Journal of the Japan Society of Naval Architects and Ocean Engineers, Vol.8, (2008), pp.141-146.
- 13) 黒田麻利子, 辻本勝, 塚田吉昭, 若生大輔: ディフラクション状態における船舶に対する波長・波向・喫水の影響についての研究, 日本船舶海洋工学会講演会論文集, 第 14 号 (2012), pp.187-190.
- 14) 足達宏之: 荷重度変更法の基礎とその応用について, 日本造船学会論文集, 第 154 号 (1983), pp.109-117.
- 15) 一ノ瀬康雄, 粉原直人, 辻本勝: 向波中を航行する船の自航要素に関する研究, 日本船舶海洋工学会講演会論文集, 第 14 号 (2012), pp.373-374.
- 16) 粉原直人, 辻本勝: 向波中の伴流係数の周波数影響について, 日本船舶海洋工学会講演会論文集, 第 15 号, (2012), pp.257-260.
- 17) 大場弘樹, 星野邦弘, 辻本勝: 船舶試験水槽におけるマイクロバブルをトレーサに用いた PIV 計測法の開発—一様流及び規則波の計測—, 日本船舶海洋工学会講演会論文集, 第 18 号 (2014), pp.153-156.
- 18) 大場弘樹, 星野邦弘, 黒田麻利子, 辻本勝: 船舶試験水槽におけるマイクロバブルをトレーサに用いた PIV 計測法の開発—模型船周りの流場計測—, 日本船舶海洋工学会講演会論文集, 第 20 号 (2015), pp. 275-278.
- 19) Ohba, H., Hoshino, K., Tsujimoto, M. and Kuroda, M. : Flow Visualization and analysis by PIV Measurement System using Micro-bubbles as Tracer in Ship Model Basin - Measurement in Still Water and Regular Waves-, 10th Pacific Symposium on Flow Visualization and Image Processing (2015), pp.1-10.
- 20) 大場弘樹, 星野邦弘, 黒田麻利子, 辻本勝, 澤田祐希: 船舶試験水槽におけるマイクロバブルをトレーサに用いた PIV 計測法の開発—船尾流場と波高との関係—, 日本船舶海洋工学会講演会論文集, 第 22 号 (2016), pp.319-322.

- 21) 辻本勝：実海域推進性能評価－実海域船型学のすゝめ－，実海域推進性能研究会，第71回，シンポジウム実海域推進性能の向上技術（2015），pp.1-34.
- 22) 櫻田顕子，辻本勝，黒田麻利子，池本義範：COVE 船首による波浪中抵抗増加の低減，日本船舶海洋工学会講演会論文集，第22号（2016），pp.147-150.
- 23) Sakurada, A., Tsujimoto, M. and Kuroda, M.: Development of COVE Bow - Energy Saving Bow Shape in Actual Seas-, Proceeding of PRADS2016 (2016).
- 24) 辻本勝，粉原直人：実海域での燃費評価法，日本船舶海洋工学会論文集，第16号（2012），pp.69-75.
- 25) 粉原直人，辻本勝，安藤英幸，角田領，上野周作：大型コンテナ船乗船計測による実海域での主機燃費推定について，日本船舶海洋工学会講演会論文集，第14号（2012），pp.203-206.
- 26) 粉原直人，辻本勝，安藤英幸，角田領：実船計測データによる実海域燃費評価法の検証－瘦型船の載貨状態の評価－，日本船舶海洋工学会講演会論文集，第18号（2014），pp.429-432.
- 27) 櫻田顕子，粉原直人，黒田麻利子，辻本勝，杉本義彦，長井洋，長谷川健：実運航シミュレーションによる気象・海象影響とオペレーション影響の評価，日本船舶海洋工学会講演会論文集，第20号（2015），pp.363-366.
- 28) 櫻田顕子，粉原直人，黒田麻利子，辻本勝，杉本義彦，長谷川健：実運航シミュレーションによる実船データへの波風修正の適用と気象・海象影響評価，日本船舶海洋工学会講演会論文集，第21号（2015），pp.537-541.
- 29) Uto, S., Takimoto, T., Shimoda, H., Wako, D. and Matsuzawa, T.: Verification of the Simple Calculation Method of Added Resistance in Pack Ice by the Field Measurement in the Sea of Okhotsk, Proc. 29th Int. Symp. on Okhotsk Sea and Sea Ice (2014), pp.22-34.
- 30) 野澤和男：氷海工学，成山堂書店（2006）.
- 31) Lindqvist, G.: A Straightforward Method for Calculation of Ice Resistance of Ships, Proc. 10th Conf. Port and Ocean Eng. Under Arctic Conditions (1989), pp.722-735.
- 32) 若生大輔，泉山耕，山口眞裕：船舶の流氷中抵抗に関する模型実験，第16回寒地技術シンポジウム講演集（2000），pp.86-91.
- 33) 宇都正太郎，瀧本忠教，松沢孝俊：北極海航路運航シミュレータの開発－船舶のチャネル中抵抗増加推定モデルの検証－，日本船舶海洋工学会講演会論文集（2013），pp.303-306.
- 34) Yamaguchi, H.: Experimental Voyage through Northern Sea Route, Proc. INSROP Symp. Tokyo'95 (1995), pp.39-90.
- 35) Uto, S., Shimoda, H., Wako, D. and Matsuzawa, T. NSR Transit Simulations by the Vessel Performance Simulator "VESTA" Part 2 Simple Resistance Formulae of Ships in Floe Ice, Proc. 23rd Conf. Port and Ocean Eng. Under Arctic Conditions (2015), POAC15-106.
- 36) Sogihara, N., Matsuzawa, T. and Uto, S.: Development of "VESTA" - Navigation Performance Simulator in Ice-free Waters - and its Application to Arctic Navigation, Proc. 29th Int. Symp. on Okhotsk Sea and Sea Ice (2014), pp.208-211.
- 37) Matsuzawa, T., Sogihara, N., Tsujimoto, M. and Uto, S.: NSR transit simulations by the vessel performance simulator "VESTA". Part 1. Speed reduction and fuel oil consumption in the summer transit along NSR, Proc. 23rd Conf. Port and Ocean Eng. Under Arctic Conditions (2015), POAC15-110.
- 38) Furuichi, M. and Otsuka, N.: Economic feasibility of finished vehicle and container transport by NSR/SCR-combined shipping between East Asia and Northwest Europe, IAME 2014 Conf. (2014), Paper ID 34.
- 39) NSR Information Office: Transit Statistics in 2013, http://www.arctic-lia.com/docs/nsr/transits/Transits_2013_final.pdf, copied on 28 Oct. 2016.
- 40) Matsuzawa, T., Shimoda, H., Wako, D., Uto, S., He, Q. and Watanabe, S.: Ice Tank Measurement of Power Required for Ice Class Vessel, Proc. 31st Int. Symp. on Okhotsk Sea and Sea Ice (2016), pp.80-83.