

内航船の環境調和型運航支援システムに関する 研究開発について

加納 敏幸*、小林 充*、瀬田 剛広*

On the Environmentally Friendly Shipping Support Systems for Coastal Vessels

by

Toshiyuki KANO, Mitsuru KOBAYASHI and Takahiro SETA

1. はじめに

船舶の省エネに関し、これまで船型開発、機関の効率向上などハードウェアの研究が主に行われてきたが、船舶の運航の改善によっても省エネが図れる。海上技術安全研究所（以下海技研）では、平成18年度から平成20年度まで(独)新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)の先導研究として「内航船の環境調和型運航計画支援システムに関する研究開発」を(財)鉄道総合技術研究所、東京海洋大学、(財)日本気象協会等と協力して実施し、内航船の配船の問題と気象・海象の予測データに基づく定時運航支援システムに関する研究開発を行った。これにより、内航船の運航計画（配船計画と航海計画）の効率化を図り燃料消費量の20%削減を図る。

配船計画支援は、荷主からの輸送要請に対し、船舶を割り当てる、経験を積んだ専門家が行う業務である。これを最新の数理計画の手法を用いてコンピュータに

より支援する。また、航海計画支援は、船長が行う航路の設定や船速設定の計画を、精度の高い気象・海象予測と数理的な最適化手法により作成支援するものである。内航船の航海は、気象・海象の不確実性から、不必要に速い速度で航行し、目的港外に着いて待っている（沖待ち）実態がある。しかしながら、船舶の燃料消費量は一般に、同じ距離を航行する場合、船速の2乗に比例して増加するためこの航海法は非効率である。これに対し、気象・海象の予測データに基づいて不確実性の影響も考慮し定時性を維持する最適な航海計画を提供することで、この沖待ち時間を削減し、このムダな時間を航海時間に割り当てることで減速運航を行い大幅な燃料削減を実現する。

本報告では、この研究で人の行った配船及び定時運航支援システムに関する技術要素と効果等の特徴を明らかにし、将来の課題を述べる等、本研究を総括する。

* 物流研究センター

原稿受付 平成21年12月 3日

審査済 平成21年12月11日

2. 内航船の運航実態

2.1 背景

船舶の燃費削減に関し、これまで主に船型開発、機関の効率改善といったハード面での研究開発が行われてきたが、配船計画、運航計画の改善といったソフト面での取り組みによっても燃費の大幅な削減と環境負荷の低減効果が期待される。また、このような改善は、船舶の改造等を伴わないため即応性が極めて高く、既存船についても適用でき、即時性も高いシステムとなる。本研究は、コンピュータによる配船計画作成支援と気象・海象の予測データに基づく最適航路選択を行い、さらに定時運航を確実にする運航計画作成支援システムという既存船にも容易に適用できるソフト面での研究開発を行うことにより、内航船の環境負荷低減と定時運航とデマンド型物流システム形成を支援するものである。

2.2 内航船の運航実態

内航船について、輸送計画時の課題である配船と、運用時の課題である航海計画に関する運航実態について述べる。

1) 配船業務の実態

現状、配船業務は船隊のオペレータにおいて専門家の経験と勘により行われているが、船舶と港湾荷役に係る複雑な制約条件を精緻に考慮し、省エネを図ることのできる配船案を算出するには至っていない。

2) 内航船のリードタイム

内航船の典型的な運航状態について、航海、シフト、荷役、沖待ちに要するリードタイムでみると、航海に要する時間は約 50%、荷役、シフトの時間が 20%弱であり、残りの停泊、沖待ちに要する約 30%の時間が輸送から見ると無駄な時間となっている（図-1 参照）。停泊は、貨物需要量の変化への対応、過剰船腹、船隊構成の問題といった事情があり必ずしも無駄とは言いつけられない点もあるが、効率的な運航の視点では、沖待ち時間を削減したい。

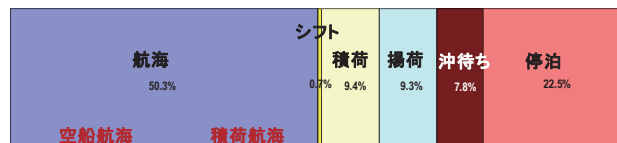


図-1 内航船のリードタイム

3) 航海の実態

風、波、海流などは時々刻々変化するが、常にほぼ一定の航路を採用するなど慣習的な航海がなされており、気象・海象の変化に適応した航路計画が立案されていない。また、採用される機関回転数もほぼ一定で、離散的な値が採用されている。これは、テレグラフの時代の船員の慣習に基づくものと考えられる。

4) 沖待ちの実態

図-2 は、白油タンカーの沖待ちの実態を調査した結果が示されている。横軸が荷役開始時刻であり、縦軸が沖待ち時間を示す。白油タンカーの場合には、取り扱い貨物が危険物であり夜間の荷役が禁止され、1日の8時から16時の間に荷役が開始される。このように荷役可能時間が決まっていり到着時間の制約があるにも拘わらず定常的に沖待ちが存在し、到着時間を考慮した航海がなされていない。

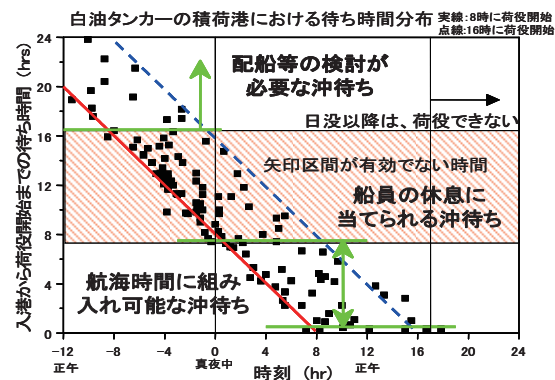


図-2 白油タンカーの積荷港における待ち時間分布

これは、気象・海象の不確実性を避けるため、とにかく全速で航海し、荷役まで余裕時間を持って待っているという運航がなされており、このことが沖待ちの一因となっている。この他の要因としては、製造、需要側の計画、配船計画、船員の休養を取るといったこともあったと考えられる。

2.3 課題

内航船の運航実態を考慮すると、以下の課題がある。

- 1) 配船は、専門家が経験と勘で行い必ずしも最適化が行われていない。コンピュータにより効率的な配船計画の立案を行うことで最適化を図れないか。
- 2) 常にほぼ一定の航路を採用するなど気象・海象の変化に適応した航路計画が立案されていない。これを改善するため、気象・海象の予測情報に基づいた最適航路を立案することができないか。

3) 気象・海象の不確実性を避けるため、とにかく全速で航海し、荷役まで余裕時間として待っている。これを改善するため、航海に関し、気象・海象の変化に適応した航路計画を立案し、さらに気象・海象の不確実性を考慮した予定到着時間を維持する航海計画を立案することができないか。

3. 研究概要

そこで、内航船の上記の課題解決のため以下のような配船と航海の効率化に関する研究開発を実施した。

3.1 配船計画支援

配船計画支援は、現在、専門家の経験と勘により行われている、荷主からの輸送要求に船舶を割り当てる配船作業を、最新の数理計画の手法を用いたソフトウェアにより最適化するものである。これは、荷主の輸送要請（オーダー）に対して船社の支配する船の割り当て問題で、数理的なアルゴリズムを用いて人よりも上手く効率的な船舶への割り当てを行い船隊全体の総航行距離の削減等により省エネを図る。この問題は、鉄道のダイヤ作成支援、運転整理との類似性があり、(財)鉄道総合技術研究所の協力を得て研究を実施した。

配船計画問題を扱う際、解決すべき課題としては、①問題の規模が小さい内は解けても、少し大きな問題になると、急激に難しくなり計算に膨大な時間がかかる、②船舶の運航においては様々かつ複雑な考慮すべき制約条件があり、それを支援ソフトウェアに組込む必要がある、といった点が挙げられる。①の問題を解決するために、ソフトウェアの開発にあたっては、(財)鉄道総合技術研究所と海技研がそれぞれ制約プログラミング(CP)及び整数計画法(IP)と呼ばれる技術を用いた。CPを用いた手法では、「ネットワークによる問題表現」を行うとともに、「First-Failの原理」や「部分解近傍探索」、「Successive Shortest Path法を利用したネットワークの簡約」といった技術を合わせて用い¹⁾²⁾(図-3参照)、IPを用いた手法では、「集合分割法による定式化」(図-4参照)を行うとともに、「列生成法」「時空間ネットワーク」「トポロジカルソート」といった技術を組み合わせることで、高品質な計画を高速に立案する手法を開発した³⁾⁴⁾。②の問題を解決し、現実の様々な事例に対応するために、船主・荷主の協

力を得て配船の問題について詳細にヒアリングを行うことで港湾、船舶、荷物の積み下ろし等における様々な制約条件のモデル化を行った。さらに、対象の問題も、小規模船社に対する問題から中規模船社に対する問題へと段階を経て実施し、さらには内航船について最大規模の配船問題に取り組むこととした。

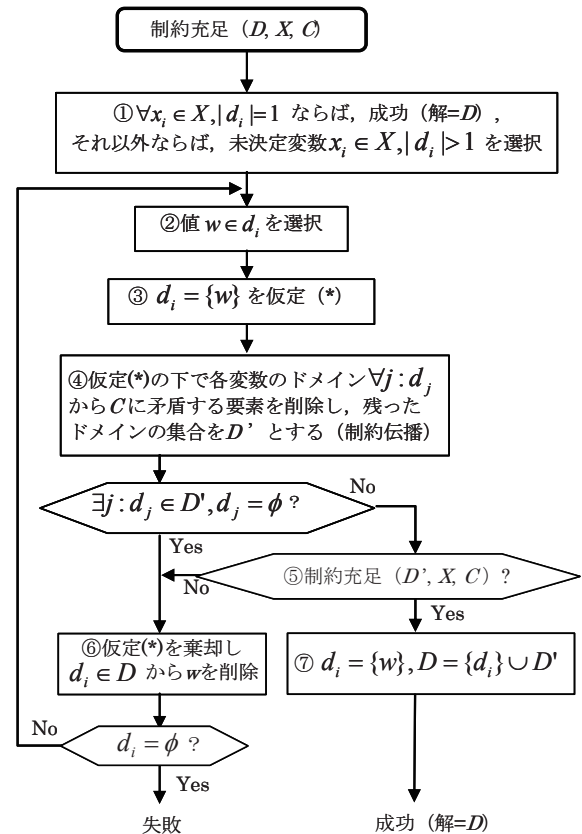


図-3 制約プログラミングの流れ

	船A			船B			船C			
	ルート1	ルート2	ルート3	ルート1	ルート2	ルート3	ルート1	ルート2	ルート3	
オーダー1	$X_{A1} + X_{A2}$				$+ X_{B2}$					$+Y_1 \geq 1$
オーダー2	X_{A1}		$+ X_{A3}$			$+ X_{B3}$				$+Y_2 \geq 1$
オーダー3				X_{B1}			$+ X_{C1} + X_{C2}$			$+Y_3 \geq 1$
オーダー4		X_{A2}			$+ X_{B2}$				$+ X_{C3}$	$+Y_4 \geq 1$
オーダー5				X_{B1}		$+ X_{B3} + X_{C1}$				$+Y_5 \geq 1$
オーダー6			X_{A3}					$+ X_{C2} + X_{C3}$		$+Y_6 \geq 1$
オーダー7	$X_{A1} + X_{A2}$				$+ X_{B2}$					$+Y_7 \geq 1$
コスト	8	7	5	4	8	4	5	4	5	

$\min. X_{A1} + X_{A2} + X_{A3} + X_{B1} + X_{B2} + X_{B3} + X_{C1} + X_{C2} + X_{C3} + \sum F_0 Y_0$

$X_{A1} + X_{A2} + X_{A3} \leq 1$ $X_{B1} + X_{B2} + X_{B3} \leq 1$ $X_{C1} + X_{C2} + X_{C3} \leq 1$

船ごとに選べるルートは1つ

図-4 集合分割法(IPによる解法)の構成イメージ

作成したソフトウェアの実行画面プロトタイプを図-5に、計算結果をまとめたものを表-1に示す。それぞれの問題について人の行った配船を改善し、全体で6%以上の燃料消費量削減効果が期待できることが確認できた。開発したアルゴリズムでは、30隻、2週間から1ヶ月規模の問題を取り扱うことができ⁵⁾⁶⁾、これではほぼ全ての現行内航船の配船問題を取扱うことができる。

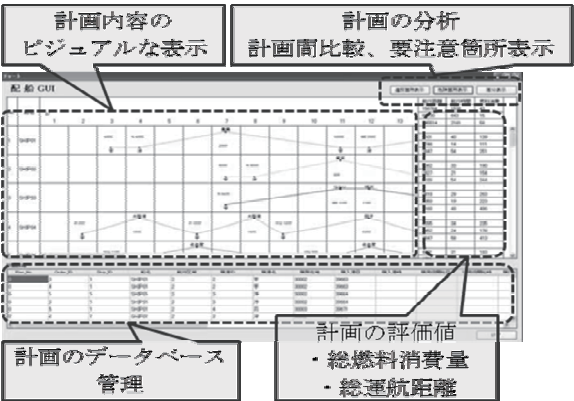


図-5 配船計画ソフトウェア

表-1 配船結果

問題規模		手法	結果
小	7 隻、1 ヶ月	CP	備船数 7 => 6 隻
	10 隻、1 ヶ月	IP	運航距離 6～8%削減
中	15 隻、2 週間	CP	燃料消費量 8～14%削減
	15 隻、3 週間	IP	運航距離 4～6%削減
大	29 隻、2 週間	CP	燃料消費量 7%削減
	29 隻、1 ヶ月	IP	燃料消費量 6%削減

3.2 航海支援

航海計画支援は、航海時に船長が行う航路設定や船速設定の計画を、高精度の気象・海象予測と数理的な最適化により作成するものである。最適航路上を最適船速計画で航海することにより定時性を維持し、且つ省エネを図れる航海計画立案が目的である。そのため、気象・海象の予測と与えられた気象・海象下での船舶推進性能評価を実施し、推進性能と気象・海象予測値から最適航路を算出する。さらに、この最適航路航行時の遅延確率を計算し、遅延確率が一定の許容範囲内(例えば 2σ)で収まるような船速計画を立案するといった流れに沿い以下のような研究を行った。

1) 気象・海象の予測

(財)日本気象協会が気象・海象の予測データの推定精度の向上を図る。内航船は、日本近海を対象としたメソ数値予測モデル (MSM) が適用でき、より精度の高い風の予測が期待できる。本研究では、気象数値モデル MM5 を(財)日本気象協会が改良した総合数値予測システム (SYNFOS) を用いた⁷⁾。

波浪については第三世代波浪推算モデルの一つである WAM によった。海流は地球環境フロンティアセンターの「日本沿海予測可能性実験 (JCOPE)」の予測データを活用した。

2) 船舶の実海域推進性能の推定

最適航路計算を行うためには、実海域(風、波)中での機関馬力と船速との関係(実海域推進性能)を推定する必要がある。このため、海技研が実海域での船舶推進性能の推定を行った。

主機関が生成する機関馬力がプロペラを経て平水中抵抗、風圧前後力による抵抗、風圧回転モーメントに対抗する当て舵による抵抗及び波浪抵抗増加として消費されると仮定し、各要素に関する推定を行った。

平水中抵抗に関してはログデータブックから燃料消費量と平均船速を抽出してグラフ上にプロットし、下方包絡線を取り推定を行った。これを海上公試データから積荷による排水量の増加、船体の経年劣化を考慮したものと比較をしたところ常用域についてよく一致した。

風圧前後力、風圧回頭モーメントに関しては船舶の水線上の投影面積に基づく推定手法である成分分離モデル⁸⁾により推定を行った。確認のため模型船を製作し風洞試験を行ったところ推定値と実験値は非常によく一致した。

波浪抵抗増加に関しては丸尾法⁹⁾、藤井・高橋法¹⁰⁾に従い、ストリップ法により波浪中の船体動揺や抵抗増加係数を海技研で開発した実海域性能評価ツール (ESSPAS)により推定した。さらに、模型船を製作し、水槽試験にて正面からの規則波による船体動揺、抵抗増加について検証を行った(図-6 参照)。船体動揺に関しては推定値と実験値がよく一致した。抵抗増加係数に関しては周波数領域におけるピーク値および関数形状はよくあっているものの、短波長および長波長の部分について2倍程度の誤差があった。

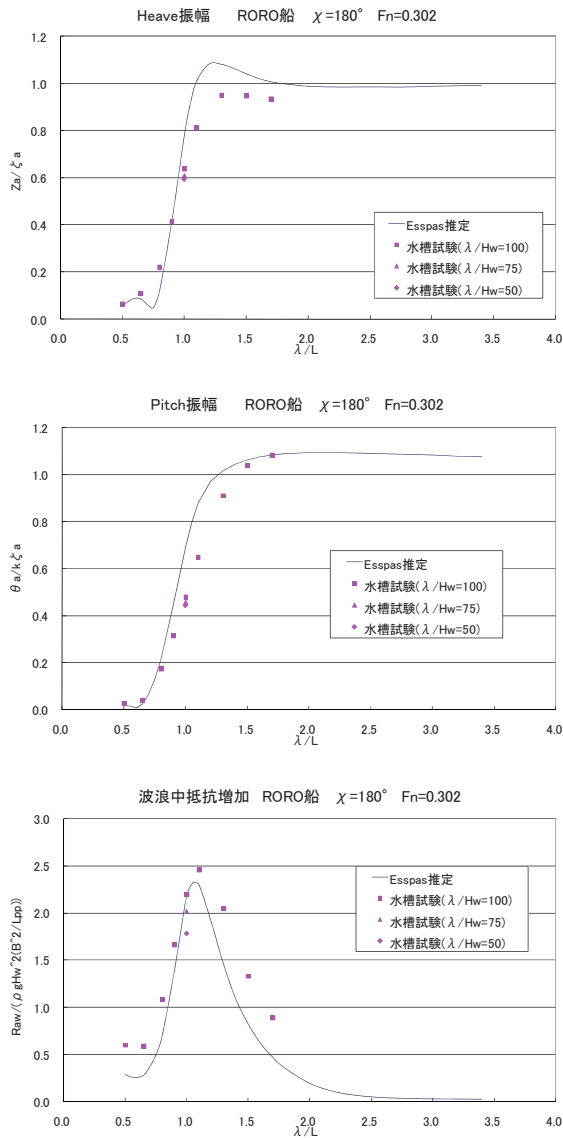


図-6 水槽試験結果と推定値との比較 (RORO 船)

また、これらの各要素の誤差を取り除くため、対象船舶に軸馬力計を設置し、下式のように船舶の軸馬力を目的変数に、各要素を説明変数にして回帰分析を行った。

$$\begin{aligned}
 SHP = & a_1 V_s^3 \\
 & + a_2 C_X (V_A, \theta_A) q_A A_F V_s \\
 & + a_3 C_Y (V_A, \theta_A) q_A A_L V_s \\
 & + a_4 K_{AW} (\theta_w, \lambda) \rho g H_w^2 (B^2 / L_{PP}) V_s
 \end{aligned}$$

この式で、 SHP は軸馬力、 V_s は船舶の対水船速、 V_A, θ_A は船舶に対する相対風速・風向、 H_w, θ_w, λ は波高、船首方位に対する波向、波長である。関数 C_X, C_Y, K_{AW} はそれぞれ、風圧力前後力係数、風圧力回頭モーメント係数、波浪抵抗増加無次元値である。定数 $q_A = (\rho_A V_A^2 / 2)$ 、 $\rho_A, A_F, A_L, \rho, g, B, L_{PP}$ はそれぞれ空気

密度、水面上船舶投影面積(前面)、同(側面)、海水密度、重力加速度、船幅、垂線間長を表す。係数 $a_1 \sim a_4$ は回帰分析パラメータである。

例として、RORO 船の平成 19 年 7 月の一ヶ月間の計測値を用いてパラメータの値を決定し、平成 18 年 8 月の一ヶ月間の燃料消費量を推定したところ、一航海あたりの燃料消費量の推定誤差が 3% 程度に収まっていることが確認できた¹¹⁾ (図-7 参照)。

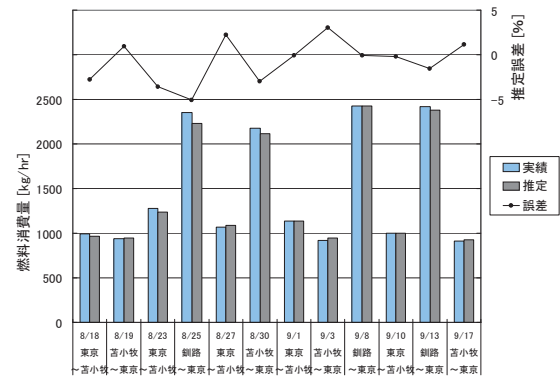


図-7 RORO 船に関する燃料消費量推定と実績との比較

最後に、主機関回転数と CPP 翼角、対水船速による軸馬力量の定式化を行い、対水船速による軸馬力の生成と消費の釣り合いの式を解くことで、回転数・風向・風速・波高・波向・波周期を指数とした船速と軸馬力のデータテーブルを作成し、最適航路計算に利用できるようにした。

他に、実験値との検証の観点から、レーダーによる波浪計測装置 (WAVEX) で計測した方向波スペクトルから直接波浪中の抵抗計算を行う等の検討を行った¹²⁾。

3) 最適航路計算

これらの情報に基づき東京海洋大学が最適な航海計画 (航路計画と定時性維持航海計画) を立案するシステムを開発した。従来のウェザールーティングと同様に、動的計画法を用いて最小燃料消費量航路を計算した。さらに、船速計画に関し、到着時間の予測に確率を取り入れたモデルを開発し、定時性を維持する航海計画を立案した¹³⁾。

この手法を用いて対象船舶であるセメント船と RORO 船について、2008 年 5 月 14 日から 2009 年 1 月 21 日までの間のシミュレーション計算を行った。その結果 (図-8、図-9 参照) によると航路計画の最適

化を図ることにより、セメント船の場合に 7~10%、RORO 船の場合には 4~6%程度の省エネが期待できた。また、図-10 によると季節変動が大きいことが分かる。さらに、セメント船について、気象・海象の不確実性を考慮した定時運航をシミュレーションにより模擬し、沖待ち時間を 30 分程度にできれば、20%以上の省エネが図れるという結果を得た。

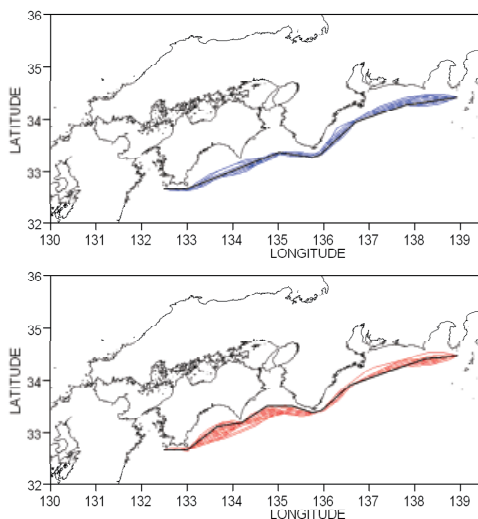


図-8 省エネ航路シミュレーション結果(セメント船)

上図：宇部-東京（データ数 194）

下図：東京-宇部（データ数 187）

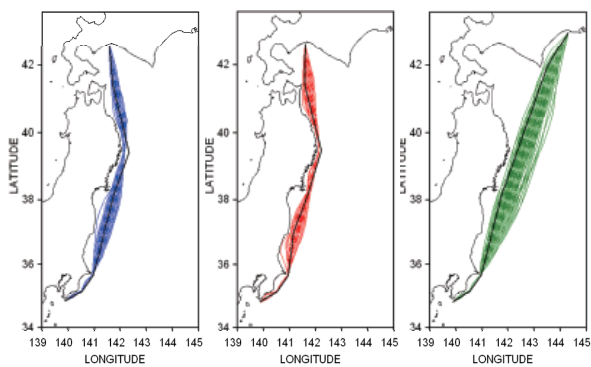


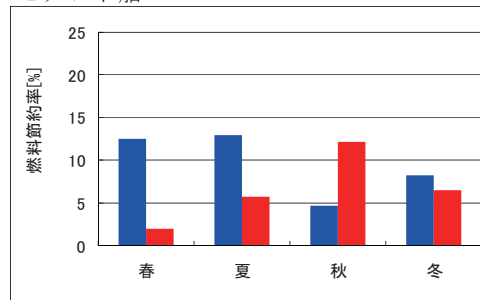
図-9 省エネ航路シミュレーション結果（RORO 船）

左図：東京-苦小牧（データ数 193）

中央図：苦小牧-東京（データ数 190）

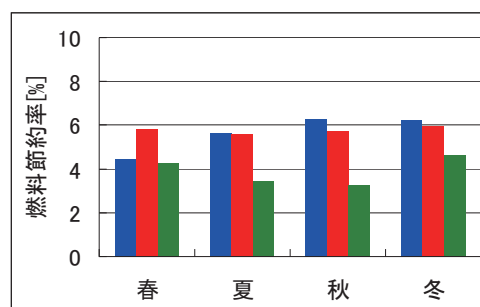
右図：釧路-東京（データ数 187）

セメント船



左：宇部-東京、右：東京-宇部

RORO 船



左：東京-苦小牧、中央：苦小牧-東京、右：釧路-東京

図-10 燃料節約率の季節変化

4) 実証試験

本研究で開発した手法により立案した航海計画の有効性を確認するため、実証システムを構築し船主の協力を得て、海技研が中心となって、(財)日本気象協会、東京海洋大学と協力し、セメント船と RORO 船の 2 隻の実船（写真-1）を対象に、立案した航海計画に従い航走する実証実験を実施した。



写真-1 実証試験対象船舶

（上：セメント船、下：RORO 船）

航路計算は、気象・海象の予測データが1日8回大凡3時間に1回毎に更新され、更新されたデータを基に再計算を行い、その結果が対象船舶上の航海計画実証システム（図-11 参照）に送信され、ウェイポイントと所要の機関回転数が電子海図上に表示される。

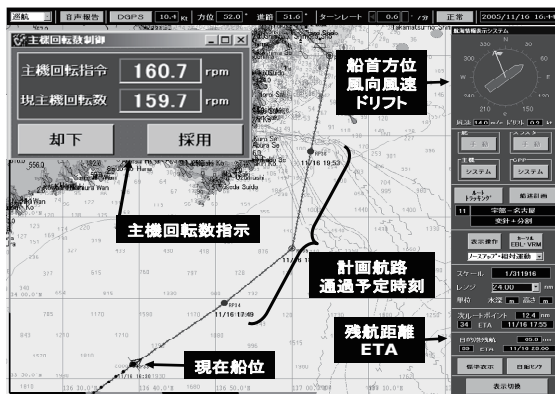
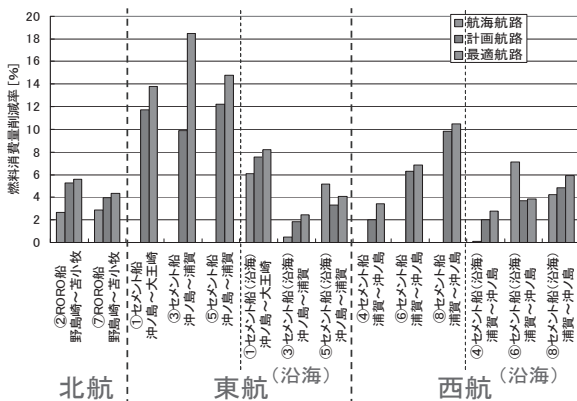


図-11 航海計画実証システム

実証実験を予備試験を含め延べ11回実施し、その結果を図-12に示す。その結果、最適航路では、RORO船(近海区域)北航で5%、セメント船(沿海区域)で4%程度の燃料削減効果を得た。セメント船を限定近海航行可能とすると11%の省エネ効果が期待できる。また、定時性を維持するための航海計画に関する実験を行い、5分以下の精度で到着時間を確保することができた（図-13参照）。この航海計画に従い沖待ち時間を航海時間に組み入れれば20%を超える省エネ効果が期待されることがわかった¹⁴⁾（図-14参照）。

さらに、今後の課題となる、船陸間通信についても海技研がNTTコミュニケーションズの協力を得て試験を実施し、その可能性を確認した。



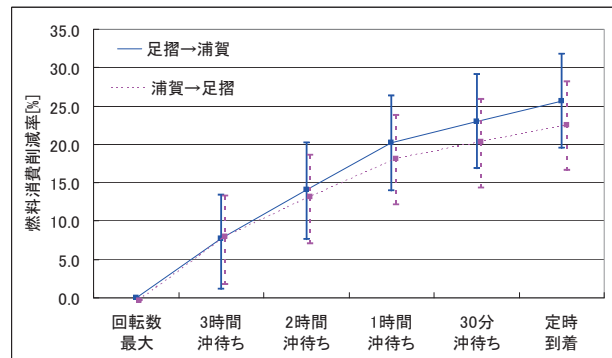
燃料削減効果の実証実験による検証

（三本の棒グラフは左より、実際に航海した航路、実験当時の気象予測値により作成される最適航路、後日得られる気象解析値により作成される最適航路のそれぞれにおける、常用航海に対する燃料削減率。）

図-12 実験結果（航路計画）



図-13 定時運航実験



沖待ち時間を航海に還元した場合の燃料削減シミュレーション（中央70%値）

図-14 定時運航の効果

4. おわりに

本研究開発は、平成18年度から20年度まで、船主、荷主、アドバイザーグループのご指導・ご協力を得てNEDOの先導研究として実施し、以下の結果を得た。

4.1 配船支援システム

配船支援システムについては、現行の全ての内航船の配船について適用でき、10日程度先までの配船計画について演算時間も10分程度で人の行った配船に比較して燃料消費量を6%程度削減することのできる配船アルゴリズムを開発した。今後の主な課題は、ユーザーインターフェースの開発である。

4.2 航海支援システム

1) 内航不定期船について、定時運航計画により沖待ち時間を航海時間に組み入れれば20%程度の省エネ効果が期待されることを示した。また、国内海上物流は、西から東への物流が多く、日本沿岸を西から東に流

れる黒潮を利用できれば航路計画でセメント船では10%程度の省エネが期待された。

2) 内航定期船に適用すれば、風・波・海流等自然環境に適応した航路計画により5%程度の省エネが期待される。さらに、定時運航をより確実に行うことができる。

3) 実船2隻を用いて、定時運航計画及び航路計画の有効性について確認した。

4.3 今後の展開

本研究開発では、海上物流に関する短期の計画と運用の問題を効率化の観点から取り扱った。また、実証試験等を通じて実社会活動（業務）を学ぶことができた。副産物も大きなものを得ることができた。

本先導研究において省エネに係る効果が検証されたことから、今後は、特に実船試験により実用化を図る上で明らかとなった課題解決を図る予定である。

視点を変えれば、本研究では、海上輸送の計画、運用の問題を扱ったことになる。他方、陸上輸送については、トラックの配車システム、動態管理システムは既に開発され一部利用されており、物流の視点で見ると、海陸一環輸送を取り扱うことのできるシステム統合の研究開発が重要である。そのため、平成21年度から22年度までNEDOの実用化研究「内航船の環境調和型運航計画支援システムと陸上交通情報連携に関する実用化研究」の研究開発を開始し研究フェーズを移す。本研究では、実用化を意識し民間企業との連携を前提として研究に取り組む。これによりドアー・ツー・ドアーの物流の効率化を図り更なる環境負荷の低減、省エネ、物流活動の効率化、高度化に貢献する。関係各位のご支援、ご鞭撻をお願いしたい。本研究についても結果が出た段階でご紹介したい。

謝 辞

本研究は、経済産業省からの交付金を原資とし「エネルギー使用合理化技術戦略的開発」事業の一つとして実施するNEDO技術開発機構の先導研究「内航船の環境調和型運航計画支援システムの研究開発」により実施された。NEDOのエンジン・船舶系技術検討会飯田委員長他委員各位、NEDO岩井統括調査員、日本内航海運組合総連合会及川審議役、日本海運宮澤常務取締役、宇部興産海運今澄取締役船舶部長、日本造船技術センターの武隈技術顧問等多くの関係者にご助言、

ご協力いただいた。ここに記して感謝の意を表したい。

参 考 文 献

- 1) 坂口隆他：「配船計画への制約プログラミングの適用」日本船舶海洋工学会平成21年春季講演会
- 2) 坂口隆他：「ホールド割当を含む不定期船配船計画の最適化」スケジューリング学会 スケジューリング・シンポジウム2008
- 3) 小林和博他：「船舶スケジューリング」日本OR学会 RAMP2008
- 4) K. Kobayashi 他：「A Two-Phase Algorithm for Tramp Ship Routing Problems by a Column Generation Approach」Learning and Intelligent Optimization
- 5) 瀬田剛広他：「数理計画を用いたセメント船団の船舶スケジューリング」日本船舶海洋工学会平成21年春季講演会
- 6) 瀬田剛広：「数理計画法を用いた内航最大規模の配船計画の最適化」日本船舶海洋工学会論文誌（投稿中）
- 7) 窪田和彦他：「内航船のための気象・海象予測」日本船舶海洋工学会平成21年春季講演会
- 8) 藤原敏文他：「成分分離型モデルを利用した新しい風圧力推定法」日本船舶海洋工学会論文集第2号
- 9) 丸尾孟：波浪中の船体抵抗増加に関する研究（第1報），造船協会論文集第101号，1957，pp.33-39
- 10) 藤井斉他：「肥大船の波浪中抵抗増加推定法に関する実験的研究」日本造船学会論文集第137号
- 11) 小林充他：「船舶運航時の燃料消費量簡易推定法について」日本船舶海洋工学会平成20年春季講演会
- 12) 加納敏幸他：「方向波スペクトルを用いた波浪中抵抗増加の推定について」日本船舶海洋工学会平成21年春季講演会
- 13) 高嶋恭子：「内航商船に対する最適運航計画について」日本船舶海洋工学会平成21年春季講演会
- 14) 小林充他：「航海計画支援システムの実船試験と評価」日本船舶海洋工学会平成21年春季講演会