内航船向け最適航海計画支援システムの開発について

高橋 淑子¹・庄司 るり²・松浦 邦明³・加納 敏幸⁴

Development of the Eco-Navigation Planning System for Domestic Vessel

Yoshiko TAKAHASHI, Ruri SHOJI,

Kuniaki MATSUURA and Toshiyuki KANO

Abstract

Energy-saving navigation (Eco-Navigation) for domestic vessel is an important subject in these days. The Eco-Navigation planning system minimize fuel consumption by optimal route and speed planning using highly precise weather prediction and ship performance estimation. This system has demonstrated about 4% of FOC reduction effect in a recommended route statistically. In addition, in an actual route has demonstrated more reduction effect.

Keywords : Eco-Navigation, Energy-saving, Weather routing

キーワード: 航海・地球環境、気象海象、燃費削減

1. はじめに

これまで内航海運では、常用航路により早めに到着して沖待ちをする航海計画がしばしば用いられ、省エネルギーを考慮した航海は行われてこなかった。しかし、高精度の気象海象予測情報を考慮した航路計画、予測の不確実性を考慮した船速計画（減速航行）を用いることで、経済的な運航（環境調和型の運航）が可能になる。

著者らは、内航船舶の航海中における燃料消費量の削減を目的として、船舶が遭遇する気象海象環境（海上風、波浪、海潮流）を精度よく予測するとともに、実海域での船舶推進性能を推定し、これらの情報に基づき最適な航海計画（燃料消費量が最小となる航路かつ定時性を維持した船速計画）を作成するシステムを実用化した。そして、内航船舶7隻を

対象に実証実験を実施し、その効果を評価した¹⁾。

また、対象船舶のうち2隻については、その後も継続して長期にわたる効果の検証を行った。

2. システム概要

2.1 システム概要

システムの概要を図1に示す。①ユーザーが船載機を用い、本船の常用航路、出発位置と日時、到着位置と日時、積載状態等を設定し、最適航海計画をリクエストすると、船陸間通信を介し、JWA（Japan Weather Association：日本気象協会）サーバーに要求内容が送信される。②JWAサーバーは要求を受けると、高解像度、高精度の日本周辺の気象海象予測情報、実海域船舶性能データに基づき、FOC（Fuel-Oil-Consumption：燃料消費量）が最小となる最適航路および到着予想時刻を計算する。要求に

¹ 学生会員 東京海洋大学海洋工学部 (〒135-8533 東京都江東区越中島 2-1-6) takahashi.yoshiko@jwa.or.jp

² 正会員 東京海洋大学海洋工学部

³ 非会員 一般財団法人日本気象協会 防災ソリューション事業部

⁴ 正会員 海上技術安全研究所 運航計画技術研究センター

対する最適航海計画の結果は、船陸間通信を介して船載機に送信される。③算出された航海計画は、船載機の画面上で利用でき、常用航路と最適航路、更に最新の気象海象予測情報を重畳表示できる。これにより、船長の航海計画立案を支援する。

通信プロトコルはメールであり、計画要求、計算結果を添付ファイルとして送受信する。また、船舶からは、10分毎に運航に関するモニタリングデータの送信を行っている。

船陸間通信には、携帯通信、衛星通信ともに利用が可能だが、通信コストが安価であることから、携帯通信を主に利用した。

本システムで演算する航海計画の対象範囲は、図2に示すとおりである。内航船向けであるが、韓国、中国、台湾等は対象範囲に含まれる。

図1 システム概要

図2 演算対象範囲

3. 要素技術

3.1 気象海象予測について

内航船における航海時間は、1～2日、長くても3日程度と短い。また、航行区域が沿岸であるため、高密度な予測情報が存在するとともに、データ同化に用いることのできる観測データも多い。つまり、時空間解像度の高い高精度な気象海象予測を用いることができる。

本システムで利用する気象海象予測情報を表1に示す。松浦ら¹⁾による96時間先までの気象海象予測情報であり、海上風、波浪、海潮流とも空間解像度は緯度経度2分、時間解像度は1時間の情報である。これらの予測情報は、データ同化により予測精度を向上している。

一例として、高知沖の事例を図3に示す。図3は左右それぞれ予測値と観測値との散布図を示している。予測値は、左値が数値モデルによる推算値、右はデータ同化による解析値である。観測値は、地点緯度33° 28' 57" 経度133° 35' 13"、水深-24.1mの海底設置式波浪計による20分毎データであり、比較に使用したデータ期間は3ヶ月である。比較結果から、データ同化によりばらつきが小さくなり、精度の向上が認められる。

表1 気象海象予測モデルの概要

予 測	モデル	概 要
沿岸 海上風	SYNFOS (日本気象協会)	MSM を入力として、局地気象モデル WRF により、解像度 5km で予測。GPS 過降水量を 3DVAR で同化している。さらに、毎時大気解析値を同化して、高精度化を図っている。
沿岸波浪	JWave (日本気象協会)	SYNFOS の海上風データに対応した第 3 世代波浪モデル (改良 WAM) で、解像度 2 分で予測。さらに沿岸波浪観測データを同化して、高精度化を図っている。
沿岸流況	JCOPE2 (JAMSTEC)	海流に加えて、潮流・吹送流を解像度 1/36 度で予測。衛星、ブイ観測値を同化し、高精度化を図っている。
海 霧	ひまわり 霧情報 (日本気象協会)	MTSAT の複数チャンネルの観測結果から霧を判別。実況のみ。

図3 波浪精度検証結果（高知沖の例）

図4 船舶性能推定手順

表2 各航路における FOC および削減効果の定義

用語	定義
常用航路の FOC	常用航路を航海した場合のシミュレーションによる FOC 推定値。要求到着時間内に到着する範囲で船速一定の最適な機関制御値を選択。
推奨航路の FOC	最適航路を航行した場合のシミュレーションによる FOC 推定値。要求到着時間内に到着する範囲で船速一定の最適な機関制御値を選択。選択する船速は常用航路とほぼ同一である。
実航路の FOC	「通過位置」「通過時刻」「機関制御値」のモニタリングを入力としたシミュレーションによる FOC 推定値。
FOC 実測値	「燃料流量計積算値」モニタリングの出発・到着時刻の差分とした。航海シミュレーションの推定誤差の確認に用いた。
推奨航路の FOC 削減効果	常用航路に対する推奨航路の削減効果 Effect (%) とし、以下の式により算出した。 $\text{Effect} = 100 - (\text{FOC}_{\text{RCMND}} / \text{FOC}_{\text{USUAL}}) * 100$
実航路の FOC 削減効果	常用航路に対する実航路の削減効果 Effect_a (%) とした。 $\text{Effect_a} = 100 - (\text{FOC}_{\text{ACTUAL}} / \text{FOC}_{\text{USUAL}}) * 100$

また、海霧情報については、石田ら²⁾による手法を用い、気象衛星による準リアルタイム観測による霧現況情報を、約 30 分の更新頻度で提供を可能とした。海霧は航海計画立案には考慮しておらず、船載機での閲覧のみとなる。

3.2 船舶性能の推定

実海域における船舶性能データは、小林ら³⁾の推定手法によるものを使用している。まず、船型資料等から船体パラメータを作成し、抵抗損失を推定する。風抵抗損失と風による回頭モーメントの推定には藤原法（成分分離モデル）、波浪抵抗損失の推定には丸尾法・藤井高橋法（海上技術安全研究所 SPICA モデル）、平水中抵抗の推定にはログ船速計による実運航データを用いた。燃料消費量は対象船の軸馬力と機関効率（定数）より求める。軸馬力については、図4に示すフローの通り推定している。

軸馬力は下式(1)に示すように、平水中抵抗損失、風圧力による損失、風圧力の回頭モーメントによる斜航・抵抗損失、波浪抵抗増加による損失からなる。これらの損失を構成する要素について、一定期間の運航モニタリングデータを使用して回帰分析を行い、求められた回帰係数を乗じた抵抗損失と推進出力とが釣り合うようにフィッティングを行う。

$$\text{SHP} = \text{SHP}_S + \text{SHP}_A + \text{SHP}_{AM} + \text{SHP}_W \quad (1)$$

SHP : 軸馬力

SHP_S : 平水中抵抗損失

SHP_A : 風圧力による損失

SHP_{AM} : 風圧力の回頭モーメントによる斜航・抵抗損失

SHP_W : 波浪抵抗増加による損失

3.3 航海計画演算法

燃料消費が最小となる最適航海計画の立案は、高嶋ら⁴⁾のダイナミック・プログラミング (Dynamic Programming) を用いており、常用航路を中心に動的メッシュを生成し、気象海象予測、船舶性能を入力として各メッシュ間の FOC を算定し、FOC が最小となるメッシュの組み合わせを最適化計算で求める。

また、演算の対象となる船舶の航行区域についても考慮し、航行不可区域は避険線を用い設定することでその区域を通航しない航路を選定する。

4. 最適航海計画の FOC 削減効果

4.1 航路の定義

本システムでは、各船の常用航路をベースとし、FOC が最小となる推奨航路を算出する。各航路における FOC と削減効果の定義を、表 2 に示す。

各航路上の FOC の推定に用いる気象海象情報として、常用航路および推奨航路の FOC には要求時点で最新の気象海象予測情報を、実航路の FOC には予測初期時刻と 1、2 時間先予測を予測の更新される 3 時間毎に組み合わせた解析値を、それぞれ使用した。

4.2 推奨航路における FOC 削減効果

本システム開発時における実証実験および継続実験の結果としての推奨航路の FOC 削減効果を表 3 に示す。常用航路周辺に避航海域等の制限がない、航路選択の幅のある船舶では、平均 3.7% の FOC 削減効果を得ることができた。また、この効果は海域により異なり、黒潮や津軽暖流等の海流の影響を強く受ける海域での効果は特に高く、4.0% の削減効果となる。

航行区域の範囲が広い船舶ほど、海流の利用に有利となり、特に黒潮を利用もしくは避けることによる効果は大きく、西航路で大きな効果が出る傾向にある。また、航路の選択の幅を持たない D 丸（船型が小型であるため沿岸を航海する）や G 丸（航路上に漁場がある）では、航路選択の幅を持つ船舶に比較すると、効果は小さいが平均して 1～2% の効果が得られた。なお、表 2 のとおり、常用航路と推奨航路における船速はほぼ同一である。そのため、表 3 に示す結果は航路選定のみによる効果であるといえる。

4.3 実航路の FOC と FOC 実測値の比較および航海シミュレーションにおける推定誤差

4.2 において、推奨航路で平均 4% の FOC 削減効果が得られる可能性が分かったが、実航路においても同等の効果が得られるか検証するために、H 丸（関東～関西～沖縄を航行する RORO 船）においてトライアルを実施した。

トライアル期間は 2013 年 3 月～5 月の 3 ヶ月間である。この夏、4 年ぶりに黒潮大蛇行が見られたが、実験対象月はこの期間に当てはまらず、また、台風シーズンからも外れる。そのため、例年から大きく異なる気象海象現象およびそれに伴う影響はないと考えられる。

本船は可能な範囲で推奨航路に沿った航海を行うが、完全に推奨航路と一致するわけではなく、実際に航海した航跡が実航路となる。実航路や実際の航海状況を把握するために、GPS、ログ船速計等の航海計器および機関データロガーから燃料流量、主機回転数、翼角等のデータを 10 分毎にモニタリングした。

実航路の FOC は、このモニタリングデータを入力値としてシミュレーションにより求められた値であり、FOC 実測値は、主機燃料流量計の実測値である。これらの値を用いて、H 丸に対してシミュレーション推定誤差の検証を行った。その結果を図 5 に示す。回帰係数は 0.98 とほぼ 1 に近く、実航路の FOC は FOC 実測値に比べ若干大きく推定される傾向にあり、決定係数は 0.99 と高かった。

以上から、H 丸の例において、本システムでは標準偏差 2.8% の誤差範囲で FOC の推定ができた。さらに、得られた回帰係数でモデルを補正することで、統計的に正しい燃料消費量の推定ができると言える。

また、尤度関数を用い、解析のためのサンプル数として 20 航海を超えると安定した結果を示すことを確認した。今回解析に用いた航海サンプル数は 55 航海であり、信頼できる結果といえる。

表 3 実証実験および継続実験の結果としての推奨航路の FOC 削減効果

船舶	船種	屯数	航路	航行区域	航海数	FOC 削減効果 (%)	
						平均	最大
A 丸	セメント	14 千	西航	沿海	46	3.4	9.9
B 丸	セメント	15 千	西航	沿海	67	4.3	13.7
C 丸	貨物	15 千	西航	沿海	27	4.0	10.5
D 丸	貨物	499	全国	沿海	13	3.0	8.3
E 丸	RORO	7 千	北航	限近	43	4.3	8.3
F 丸	フェリー	11 千	北航	近海	30	2.0	4.8
G 丸	RORO	16 千	日中	遠洋	71	1.1	4.1

図 5 実航路における FOC 推定誤差

4.4 推奨航路の参考状況別による評価

本システムによる推奨航路を参考とした航海、参考としない航海それぞれにおける評価を、H丸における3か月間のトライアルにより実施した。対象期間中においては、毎航海出港前に航海計画を立案し、推奨航路を参考とする航海、しない航海を交互に行った。

ここで、推奨航路を参考にする航海とは、出港前に本システムにより立案された推奨航路に安全な範囲でできる限り従った効果、推奨航路を参考としない航海とは、常用航路を基に、船長が本システムで閲覧できる気象海象情報および無料で入手できる気象海象情報を参考として判断した航路と定義した。各航海におけるFOC削減効果を比較する。参考とした航海、しない航海の各事例を以下に示す。

なお、実航路と常用航路では用いる機関出力が異なるため、実航路のFOC削減効果には、航路選定の効果に加え、船速による効果の増減分も含まれる。

4.4.1 推奨航路を参考とした航海事例

推奨航路を参考とした航海事例として、H丸における大阪－東京間の順潮航路の航海結果と、その際の高潮の状況を図6に示す。

この事例では、黒潮の流軸を捉えた航路が推奨されており、推奨航路のFOC削減効果はこの航海事例においては1.5%であった。実際に推奨航路に沿って航海した結果、実航路でも黒潮の流れにより低出力でも速力が出る航海となり、実航路のFOC削減効果は16.5%であった。

4.4.2 推奨航路を参考としない航海事例

推奨航路を参考としなかった航海事例として、同じくH丸における大阪－東京間の航海結果と、海潮流の状況を図7に示す。

この事例でも、4.4.1ほどではないが、推奨航路は黒潮の流軸近くを選択している。また、航程のショートカットによる効果も期待できる航路であり、推奨航路のFOC削減効果は、この航海事例においては5.0%であった。

実航路は、ほぼ常用航路と同じ航路を取っており、実航路のFOC削減効果は3.5%であった。ここで、推奨航路を参考としていないにもかかわらず実航路のFOC削減効果が3.5%得られているが、これは、船長判断により回転数制御等の機関出力の調整によりを行っており、出港時に本システムで常用航路の計算

図6 航海事例（推奨航路を参考とした場合）

図7 航海事例（推奨航路を参考としない場合）

表4 推奨航路参考状況別による
実航路のFOC削減効果

船舶	航海	実航路のFOC削減効果(平均)	
		推奨航路を参考とした	推奨航路を参考としなかった
H丸	41	5.7%	3.6%

表5 推奨航路のFOC削減効果と推奨航路を
参考とした実航路のFOC削減効果

船舶	船種	航路	推奨航路のFOC削減効果	推奨航路を参考とした実航路のFOC削減効果
			(平均)	(平均)
A丸	セメント	九州	2.8%	3.3%
B丸	セメント	九州	5.2%	6.4%
H丸	RORO	関西	1.3%	4.1%
H丸	RORO	沖縄	1.6%	3.7%

を行った際に用いる機関出力値とは異なるためである。

この事例では、4.4.1とは異なり、実航路のFOC削減効果は推奨航路のFOC削減効果に届かない結果となった。

4.4.3 比較結果

トライアル期間3カ月間における推奨航路の参照状況別による実航路のFOC削減効果の比較結果を表4に示す。

実航路のFOC削減効果は、期間全体の平均で推奨航路を採用した場合は5.7%、採用しない場合は3.6%となり、推奨航路を参考とした場合は、参考としない場合に比べて2.1%のFOC削減効果が得られた。

推奨航路を参照としない航路は、気象情報等を参考とした船長判断による航海となっている。そのため、推奨航路を参考としなくともFOC削減効果は得られる。しかし、システムを併用し推奨航路を参考とした航海では、より高いFOC削減効果が得られることが実証できた。

4.5 推奨航路を参考とした航海における 実航路のFOC削減効果

推奨航路を参考に航海した場合、推奨航路のFOC削減効果と同等の実航路のFOC削減効果を得ることができるのか、検証を行う。

解析に十分なデータが揃うA丸、B丸およびH丸について推奨航路のFOC削減効果と、推奨航路を参考に航海した場合の実航路のFOC削減効果の比較を行った。比較結果を表5に示す。

全ての船舶で、実航路のFOC削減効果が推奨航路のFOC削減効果に比べて高い結果となっており、推奨航路を参考に航海することで、出港時に計画した推奨航路のFOC削減効果を上回る効果を実航路で得られることが実証できた。

また、特に大きなFOC削減効果が得られる航路は、黒潮の影響が大きい関西、九州、沖縄航路であった。傾向としては、東航では黒潮を利用して低出力で船速を保持する航路を、西航では逆潮による速力の低下を最小限に抑えた航路を推奨し、低出力航海の実現により、FOC削減に繋がったと考えられる。

5. 結論

本研究では、内航船向け最適航海計画支援システムを実用化し、内航船7隻を対象に実証実験を行っ

た。その結果、航路選択の幅を持つ船舶で平均4%、航路選択の幅を持たない船舶では1~2%のFOC削減効果が得られる可能性がある。特に黒潮域を航海する船舶では、東航は黒潮を利用して低出力で船速を保持する航路を、西航は逆潮による速力の低下を最小限に抑えた航路を計画することにより、高い燃費削減効果が期待できる。

さらに、A丸、B丸およびH丸の3隻を対象に、運航モニタリングデータを用い実航路のFOC削減効果の検証を行った結果、全船において推奨航路のFOC削減効果を上回るFOC削減効果が得られることを確認した。

また、H丸のトライアルにおいては、本システムの推奨航路を参考状況別の比較を行い、推奨航路を参考とした航海は、参考にしない場合に比較して2.1%のFOC削減効果が得られた。

FOCの推定精度の検証をH丸について行った結果、2.8%の誤差範囲でFOCの推定が行えた。航海毎にFOC推定値には誤差があるが、FOC削減効果は航海毎に推定された各航路のFOC推定値から算出されるため、FOC削減効果にこのFOC推定誤差は影響しない。そのため、統計的にみて省エネ効果があることを示している。また、求められた回帰係数により補正を行うことで、より正しいFOC推定が行えることが期待できる。

今回の検証で、推奨航路を参考とした航海では、推奨値以上のFOC削減効果が得られることが実証したが、実際には他船の状況や荒天による影響で、推奨航路の参照率の低い船舶もある。今後の展望として、システム運用において推奨航路の参照率の向上に向けた問題点の抽出、改良に向けた検討を行いたい。

謝辞

本報告内容は、独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）の実用化研究開発「内航船の環境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開発」として一般財団法人日本気象協会、独立行政法人海上技術安全研究所、国立大学法人東京海洋大学が協同で実施した結果の一部、および本研究にて開発したシステムの運用結果の一部となります。

実証実験では、多くの船社、船舶乗組員の皆様に、多大なご協力をいただきました、また、運用後の運

航データ提供には、宇部興産海運株式会社、琉球海運株式会社に、データ解析には特定非営利活動法人マリン・テクノロジストにご協力をいただきました。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- (1) 松浦邦明・佐藤淑子・加納敏幸・小林充・瀬田剛広・大津皓平・庄司るり・高嶋恭子：環境調和型航海支援システムの構築と実証実験，日本船舶海洋工学会講演論文集，第 12 号，2011，ROMBUNNO. 2011S-OS3-8.
- (2) 石田春磨・中島孝・下田陽久・鈴木靖・後藤あずみ：気象衛星 MTSAT-1R による霧検出手法の開発，社団法人日本気象学会大会講演予講集，第 94 号，2008，pp. 517.
- (3) 小林充・加納敏幸・松浦邦明・佐藤淑子：環境調和型航海支援システムのための船舶性能推定と実証実験の検証，日本船舶海洋工学会講演論文集，第 12 号，2011，ROMBUNNO. 2011S-OS3-9.
- (4) 高嶋恭子，加納敏幸，小林充：高精度気象・海象予測データに基づく内航船の省エネルギー運航について，日本航海学会論文集，第 118 号，2008，pp. 99-106.