内航船向け最適航海支援システムによる 燃料消費量削減効果について*

高 橋 淑 子 松 浦 邦 明 前 田 正 裕**

Energy-Saving Effect of Eco-Navigation Planning System for Domestic Vessels.

By Yoshiko Takahashi, Kuniaki Matsuura, Masahiro Maeda

Energy-saving navigation (Eco-Navigation) for domestic vessels is an important subject these days. The Eco-Navigation planning system minimizes fuel consumption by optimal route and speed planning using highly precise weather prediction and ship performance estimation. This system has been demonstrated to reduce FOC statistically by about 4%. Furthermore, a route-only plan achieved similar reductions in the case of the ship I-Marui

1. はじめに

これまで内航海運では、常用航路を航海し、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、省エネルギー航海は行われてこなかった。

しかし、松浦ら¹⁾が実用化した最適航海計画支援システムにより、気象海象予測情報を考慮した航海計画を用いることで、経済運航（環境調和型の運航）が可能となった。本システムで算出された推奨航路における航路選定により、常用航路と比較して平均で約 4% の FOC 削減効果が得られることが実証されている²⁾。

この効果を得るためには、システムによる推奨航路上を航海することが理想的だが、他船との見合い関係、避航海域等との兼ね合いから、推奨通りに航行することは困難な場合もある。そこで今回、本システムによる推奨航路を採用した航海、採用しない航海における FOC 削減効果の比較を行い、省エネ航海に対する本システムの有効性を検証した。

また、前述の検証に用いる実航路の FOC 削減効果は、航路選定および減速航行を総合した効果であるため、航路選定のみにより得られる効果の検証も行った。

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、日本気象協会のサーバー（以下 JWA サーバー）に要求が送信される。②JWA サーバーは要求を受付けると、気象海象予測、実海域船舶推進性能に基づき、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、常用航路と推

図1 システム概要

*原稿受付 平成 26 年 6 月 20 日。

**一般財団法人 日本気象協会

奨航路, 更に最新の気象海象予測情報を重量表示できる. 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, 船載機からは, 10 分毎に運航モニタリングデータの送信も行っている.

船陸間通信には, 通信コストが安価であることから, 主に携帯通信を利用している.

2.2 気象海象予測について

内航船における航海時間は, 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. そのため, 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.

本システムで航海計画立案に利用する気象海象予測情報を表 1 に示す¹⁾. 96 時間先までの気象海象予測情報であり, 海上風, 波浪, 流況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. 高知沖の事例を図 2 に示す. 左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を示しており, 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.

海霧情報は閲覧のみとなるが, 石田ら³⁾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更新頻度約 30 分で提供可能とした.

2.3 船舶推進性能の推定

実海域中における船舶の推進性能は, 小林ら²⁾の推定手法を用いている. 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.

次に, 一定期間の運航モニタリングデータを使用し回帰分析を行い, 求められた回帰係数を乗じた抵抗損失と推進出力が釣り合うようにフィッティングを行った. (図 3)

2.4 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) を用いている. 常用航路を中心に動的メッシュを生成し, 気象海象予測, 船舶推進性能を入力として各メッシュ間の FOC を算定し, FOC が最小

表 1 気象海象予測の概要

予測モデル / 概要	
沿岸海上風 SYNFOS (日本気象協会)	局地気象モデル WRF により, 解像度 5km で予測. GPS 過降水量を同化して, 高精度化を図っている.
沿岸波浪 JWave (日本気象協会)	SYNFOS 海上風データに対応した第 3 世代波浪モデル (改良 WAM). 解像度 2 分. 沿岸波浪観測データを同化し高精度化.
沿岸流況 JCOPE2 (JAMSTEC)	海流に加え, 潮流・吹送流を解像度 1/36 度で予測. 衛星, プイ観測値を同化し, 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.

高知港	1 日先	2 日先	3 日先
相関係数	0.815	0.754	0.683
回帰係数	0.994	1.052	1.134
平均誤差率	15.5	17.3	28.6
RSMSE	38.1	45.4	56.3

左: 数値モデルによる推算値

高知港	1 日先	2 日先	3 日先
相関係数	0.906	0.841	0.779
回帰係数	1.004	0.997	1.025
平均誤差率	5.7	7.9	14.9
RSMSE	22.0	32.3	38.3

右: データ同化による解析値

図 2 データ同化による精度向上事例

図 3 船舶推進性能推定手順

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, 航行不可区域は通航しない航路を選定する.

3. 航海における FOC 削減効果

3.1 各航路の定義

各航路における FOC および削減効果の定義は表 2 に示す通りである.

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。

3.2 推奨航路の FOC 削減効果

実証実験において、本システムにより演算された推奨航路の FOC 削減効果⁹⁾を表 3 に示す。船型、航路、航行区域などにより効果は異なるが、航路の選択の幅を持つ船舶では、平均 4%程度の効果が得られた。

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、これらの効果は、航路選定のみによる効果である。

3.3 実航路の FOC と FOC 実測値の比較

3.2 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、実航路における効果

は推奨に比較してどの程度となるか、また、推奨航路を採用しない航海（従来の船長による航海）と比較した効果はどうなるか、H 丸にてトライアルを行った。H 丸は京浜 - 関西 - 沖縄航路の RORO 船であり、トライアル期間は 3 か月とした。

推奨航路の FOC 削減効果（シミュレーション値）と実航路の FOC 削減効果（実測値）の比較を行うにあたり、まずは本システムのシミュレーションにおける FOC 推定精度の検証を行う。

実航路においては、シミュレーション値である実航路の FOC と本船モニタリングから求めた FOC 実測値があるため、この二つを用い回帰分析を行った。

結果は図 4 に示すとおり、実航路の FOC（シミュレーション値）と FOC 実測値（実測値）はほぼ一致しており、推定誤差は 2.8%と小さい。回帰係数は 0.97、決定係数は 0.99 を示しており、統計的に正しい推定ができていると言える。

また、回帰係数により補正を行うことで、推定誤差の補正が行える。H 丸については、求められたシミュレーション値について、上記の回帰係数 0.97 を用い、すべて補正を行っている。

3.4 推奨航路の採用・不採用による効果の差

H 丸は京浜 - 関西 - 沖縄航路の RORO 船であり、

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」モニタリングの出发・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。 $\text{Effect} = 100 \cdot (\text{FOC}_{\text{RCMND}} / \text{FOC}_{\text{USUAL}}) \cdot 100$
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。 $\text{Effect}_a = 100 \cdot (\text{FOC}_{\text{ACTUAL}} / \text{FOC}_{\text{USUAL}}) \cdot 100$

表 3 実証実験における推奨航路の FOC 削減効果

船舶	船種	屯数	航路	航行区域	FOC 削減効果	
					平均	最大
A 丸	セメント	14 千	西	沿海	3.4%	9.9%
B 丸	セメント	15 千	西	沿海	4.3%	13.7%
C 丸	貨物	15 千	西	沿海	4.0%	10.5%
D 丸	貨物	499	全国	沿海	3.0%	8.3%
E 丸	RORO	7 千	北	限近	4.3%	8.3%
F 丸	フェリー	11 千	北	近海	2.0%	4.8%
G 丸	RORO	16 千	日中	遠洋	1.1%	4.1%

図 4 実航路における FOC 推定誤差

毎航海出航時に推奨航路の演算を行うが、推奨航路を採用した航海、しない航海を交互に行う。実施期間は3か月とした。

3.4.1 推奨航路を採用した航海事例

推奨航路を採用した航海事例として、関西 - 京浜の順調航路の例を図5に示す。

黒潮の流軸を捉えた航路が推奨され、推奨航路のFOC削減効果は1.5%であった。実際に黒潮の流れにより低出力でも速力が出る航海であり、実航路のFOC削減効果は、減速による効果もあり16.5%であった。

3.4.2 推奨航路を採用しない航海事例

3.4.1と同じ大阪 - 京浜の、推奨航路を採用しない航海事例を図6に示す。この事例でも黒潮の流軸近くを選定しており、さらに航程ショートカットによる効果も期待できる。推奨航路のFOC削減効果は5.0%であったが、常用航路を航海したことで、実航路のFOC削減効果は3.5%となり、推奨値には届かなかった。

図5 H丸における推奨航路を採用した航海例

図6 H丸における推奨航路を採用しない航海例

3.3.3 推奨航路の採用による効果

推奨航路を採用した場合、しない場合における実航路のFOC削減効果の比較結果を表4に示す。結果は、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、推奨航路を採用した方が、しない場合に比べて2.1%高いFOC削減効果が得られた。

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. 航路選定におけるFOC削減効果

前項で行った検証で、H丸は推奨航路上を航海したが、船速計画については推奨値から外れるケースもあり、実航路のFOC削減効果は航路選定の効果だけではなく、船速による効果が含まれる結果となった。そこでI丸を対象として航路選定により得られる効果の抽出を行う。I丸は、京浜 - 北海道のRORO船であり、検証期間は8ヵ月(102航海)である。

4.1 検証方法

I丸における航海では、全航海とも推奨航路を参考とした航海を行った。船速計画については、推奨回転数 $\pm 1.0\text{rpm}$ の範囲内のものを“推奨船速を採用した航海”，推奨回転数 $\pm 1.0\text{rpm}$ の範囲外のものを“推奨船速を採用しない航海”と定義し、分類した。

推奨船速を採用した航海は、推奨航路および実航路における航路に加え、回転数もほぼ同一となる。つまり、推奨航路のFOCと実航路のFOCとがほぼ同じ値となるはずである。

推奨航路のFOCと常用航路のFOCは、同一の船速から求められたものであるため、推奨航路のFOC削減効果は、その航海における航路選定の効果を示す。

表4 推奨航路採用による効果

船舶	航海	実航路のFOC削減効果(平均)	
		推奨航路を採用	推奨航路を不採用
H丸	41	5.7%	3.6%

表5 推奨航路および実航路のFOC削減効果

	航海	推奨航路のFOC削減効果	実航路のFOC削減効果
合計	20	5.9%	6.2%
北航	12	7.7%	7.5%
南航	8	4.6%	5.4%

4.2 航路選定における実航路の FOC 削減効果

結果を表 5 に示す。検証期間 8 ヶ月間の 102 航海中、推奨船速を採用した航海は 20 航海（北航 12 航海、南航 8 航海）であった。

北航では、推奨航路の FOC 削減効果は 7.7%、実航路の FOC 削減効果は 7.5%とほぼ同じ値を示した。一方で、南航については、推奨航路の FOC 削減効果は 4.6%、実航路の FOC 削減効果は 5.4%であり、若干差の出る結果となった。

しかしながら、全航海対象では、推奨航路の FOC 削減効果は 5.9%、実航路の FOC 削減効果は 6.2%であり、概ね同じ値を示していることから、推奨航路の FOC 削減効果と実航路の FOC はほぼ同一の値であり、I 丸の京浜 - 北海道航路における航路選定により得られる燃費削減効果は、6%程度（北航で 7%、南航で 5%）であると考えられる。

5. 結論

本システムにより演算される推奨航路において、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。また、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により、高い効果が期待できる。

H 丸の実航路の FOC および FOC 実測値を用いた検証から、本システムにおいて 2.8%の誤差範囲で FOC の推定が行えた。航海毎には誤差があるが、統計的に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、統計的に正しい FOC 推定が行える。

H 丸のトライアルにおいて、本システムの推奨航路を採用することで、採用しない場合に比較して、2.1%高い実航路の FOC 削減効果が得られた。

I 丸における検証から、京浜 - 北海道航路における航路選定のみによる実航路の FOC 削減効果は、6%程度であった。

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、琉球海運株式会社、日本海運株式会社に、データ解析には特定非営利活動法人マリン・テクノロジー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・庄司りり・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) 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.
- 3) 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.
- 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.
- 5) 佐藤淑子・松浦邦明・三嶋宣明・小林充・加納敏幸・大津皓平・石田春磨・庄司りり・高嶋恭子、最適航海計画支援システム「ECORO」による省エネルギー運航効果の検証と東日本大震災による航海計画精度への影響、日本船舶海洋工学会講演論文集、第 15 号、2012

著者紹介

姓 名 高橋 淑子
・ 1978 年生 .
・ (一財)日本気象協会.

姓 名 松浦 邦明
・ 1968 年生.
・ (一財)日本気象協会.

姓 名 前田 正裕
・ 1980 年生.
・ (一財)日本気象協会.