フリートマネジメントにおける運航支援の研究*

加 納 敏 幸**

Study of Operational Support Technologies for Fleet Management

By Toshiyuki KANO

The author has promoted and implemented the research and development of the eco-friendly electric propulsion ship “Super Eco-Ship”, weather routing for domestic vessels “Navigation Support System”, and ship allocation problem “Ship scheduling support system” from the viewpoint of operational support of domestic shipping. In other words, the following steps were taken to improve vessel operation efficiency. First, build a highly efficient vessel by adopting the latest technology and having it operated by a great master. Then, optimally allocate vessels to meet the shipper’s requests and perform effective fleet management to achieve environmental and economic benefits. Although there are other tasks such as posting crew assignments or vessel maintenance, NMRI takes the viewpoint of operational support technology.

This paper introduces the history on Research & Development of operational support technology for fleet-management including the evaluation methodology of transportation fleets. These technologies are expected to find application not only in coastal shipping but also in ocean going shipping.

1. はじめに

筆者等は、主に内航海運を対象に、環境に優しい電気推進船「スーパー・エコシップ」、内航船向けウェザー・ルーティング「航海支援システム」、船隊の効率的スケジュール管理に資する「配船支援システム」等の研究開発を実施してきた。すなわち、最新の技術により優れた船舶を造り、これを船長がスマートに運航し、さらには、荷主からの輸送要請に対し、船舶を上手に割り当て（配船）効率的なスケジュール管理を行い、船隊全体の効率的運航を図るといったステップをたどって運航支援技術に関する研究開発を行ってきた。もちろん、配乗、保守その他の課題もあるだろうが、ここでは、運航支援技術という視点で、海上技術安全研究所（海技研）が、これまで行ってきたフリートマネジメントにおける運航支援に関する研究と、現在行っている「運航効率についての評価手法」についても紹介する。この成果は、内航海運に限らず外航海運にも適用できるものが多いと思う。

これまでの研究について順にたどってみる。

優れた船を造るといった視点で、筆者等は、船主等と協力し、POD 推進器を備えたタンデム・ハイブリッド型スーパー・エコシップ^{1), 2)}の研究開発を行い、「興山丸」として結実した（図1、2参照）。

図1 スーパー・エコシップ「興山丸」

スマートな運航という視点では、2006年から（独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）の支援を受け内航船に対するウェザー・ルーティング技術の研究開発^{3), 4)}を行い、この成果は、財気象協会が行う内航船用の航海支援情報提供サービス「ECORO」として実用化された。なお、「興山丸」には、航海支援システムが搭載され、実運航時の省エネ運航に貢献している。

*原稿受付 平成26年6月20日。

** 海上技術安全研究所（三鷹市新川6-38-1）。

図2 「興山丸」基本コンセプト

船隊の効率的運用という視点では、同様に 2006 年から NEDO の支援を受け、船舶の割り当て（配船）について取り組み、PC による配船計画支援システムを開発した。

2013 年から、配船計画と運航支援システムとを連携し、効率的なフリートマネジメントを構築するという視点で、環境省からの受託事業「航海・配船計画支援システム導入による船舶からの CO₂ 排出削減実証事業」を実施している。本事業では、航走エネルギー効率等を基に CO₂ 排出量の定量化・検証方法も併せて開発し、この方法によりフリート全体の運航効率を評価する。

以下、筆者等がこれまで進めてきているフリートマネジメントにおける運航支援の研究について紹介することとしたい。

2. フリートマネジメント支援技術

2.1 航海支援「個船管理」

気象・海象の予測情報に基づく、最適な運航計画情報を提供することで、内航船の運航効率化を図ることにより大幅な省エネ運航を実現することを目的に、2006 年から 2008 年度まで、東京海洋大学、(財)日本気象協会、(財)鉄道総合技術研究所と協力して NEDO 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」を行った。

開発した航海支援システム（図 3）は、燃費削減と環境負荷低減のため、精度の高い日本沿岸域の気象と海洋研究開発機構の JCOPE での研究成果を基にした海流の定量化された予測情報を基に、これらの外力下での推進性能を個船毎に推定・評価し、最適な航路・船速計画を数理計画法により立案し船載機上の海図データ上に重畳表示し乗組員に分かり易く情報提供を行うことで航海支援を行うもの。

このシステムでは、風・波の高精度の予測情報が、3 時間毎に 72 時間先まで JWA から提供され、海流の予測情報については毎日更新され提供される。さらに、

風・波による減速、出力増等推進性能の推定については、船舶が一品生産され船型、装備等が異なるため、個船毎に海技研の船舶流体力学解析パッケージソフト VESTA を用いて解析を行い、これを活用する性能推定モデルを開発した。

図3 航海支援システムのイメージ

さらに、本システムは、性能評価に必要なデータである、船位、針路、船速、燃料消費量、主機関回転数、推進器翼角（CPP の場合）等が原則 10 分毎に自動的に計測し、陸上に送信されている。これを基に、陸上（海洋大 NPO マリン・テクノロジスト（MTL））で随時性能推定モデルと運航性能との関係性を評価・把握し、本モデルを適宜修正し、推定精度向上を図っている。特に、モニタリングデータから、如何に精度良く平水中の船舶性能（ベースライン）を推定（図 4）できるかがコア技術となる。この結果を用いて、風、波の影響を同定する。

図4 ベースラインの設定イメージ

船上では、乗組員が船載機の GUI により、航海計画を船陸間通信を介して陸上のサーバーに要求し、ここで計算された最適の航海計画が船舶に送信され船載機（図 5）に表示される。この表示装置は、三菱マ

リンエンジニアリング㈱「スーパーブリッジXE」、日本無線㈱「ECoRO 対応簡易電子チャート表示装置」、戸高製作所㈱「航(わたる)君」が提供している。

本 NEDO の研究で行った実証実験結果では、航海支援システムは、航路計画にて 3~5% (実績)、船速計画にて 20%以上 (シミュレーション) の効果が期待できることが確認された。現在、財気象協会が内航船用の ECoRO の航海支援情報提供サービスとして実用化している。

図5 「興山丸」の航海支援システム船載機

2.2 配船支援「フリートマネジメント」

さらに、NEDO の研究開発では、船隊のスケジュール管理の要である配船支援システムの開発も併せて行った。配船とは、荷主の輸送要請に対する船舶の割り当て業務であり、この配船が効率よく実施できれば船隊全体での総航行距離の低減、備船数の削減等の効率化が図れる。現行では、配船の業務は人の経験と勘に基づき行われているが、配船を「組合せ最適化問題」として取り扱い数値計画の手法を用いて、人の作成した配船案を PC で改善し、最適化を図ろうとするもの (図 6)。

船隊のスケジュール管理

図6 配船支援システムのイメージ

本システムでは、①ルート候補生成 (時空間ネットワーク) ②ルート航路絞り込み (列生成法) ③ルート

決定 (集合被覆法) の手順にて以下のような手法を駆使して最適な配船案を算出する (図 7)。

図7 最適配船案算出フロー

配船支援システムについて人の行った配船に比較し 6%の削減効果が見込める (図 8) ことから、荷主において実用化に着手したところである。

船隊のスケジュール管理実証例

図8 配船支援システムの適用例

2.3 配船と航海支援システム連携

最適配船により空荷航海が削減され、積載効率が改善する。この配船計画に従い輸送要請を行い、船舶での気象・海象等による遅延等の航海情報も配船計画にフィードバックすれば理想的な運航が実現でき (図 9)、さらに荷主が配船を行いバース管理を容易に行えるプライベート・バースであれば沖待ちをなくす Just in Time の最適運航が実現する。

この連携であれば、関係者は、荷主、オペレータ、船社（船舶）と限定的である。難しい利害関係は存在するが解決可能と考えられる。また、要素技術は既に開発されている。

図9 航海・配船連携システム・イメージ

このような視点で、現在環境省からの受託事業「航海・配船計画支援システム導入による船舶からのCO₂排出削減実証事業」を進めている。

・概要 本事業は、減速運航を考慮した配船システムと気象・海象等の船舶への影響を考慮したジャスト・イン・タイムの航海計画を提供するシステムを開発し統合することで必要最低限の速度での環境に優しい運航を可能とするもの。内航船の大宗を占めるセメント船、タンカー、RORO船（図10）40隻を対象に実証実験を実施し、併せて開発したCO₂削減効果の評価手法を用いてその効果を検証する。

内航輸送トン・キロ構成で見ると、油送船（33%）、セメント船（12%）、RORO船（13%）の3船種で、内航船の輸送の60%を占めることから大きな効果が期待できると考えている。

図10 主な対象船

・体制 財鉄道総合技術研究所、宇部三菱セメント（株）、出光興産（株）、日本通運（株）、鶴丸海運（株）、宇部興産海運（株）、旭タンカー（株）、日本海運（株）等、荷主、オペレータ、船社等の協力を得て進めている。

・スケジュール 本事業は、2013年から2015年度までの計画で、概ね以下のようなスケジュールで実施する。

まず、対象船に対し常用の運航状態（BAU:Business

As Usual）での主機回転数、推進器翼角、燃料消費量、船速等について観測、同定を行う。現在、船舶にデータ収集装置を設置し、船陸間通信によりモニタリングデータを収集、蓄積している。

次に配船、航海支援連携システムを構築し、40隻の内航船を対象に本システムを適用し実証実験を実施する。併せて、その効果を検証するための手法を開発する。

最後に、本手法を対象船に適用し、実証実験により支援システムの導入による効果を確認する。

開発スケジュール			
年度	2013年度(H25)	2014年度(H26)	2015年度(H27)
1. 配船計画・航海計画支援システムの一体化	一体化システムの開発 機器設置 現状データ測定	システム改修	
2. 温室効果ガス削減量評価	評価手法検討	現状データ評価	実証実験評価
3. 実証実験の実施	企画調整	実証実験の実施	
4. 普及検討委員会	検討項目の設定	各項目の検討	普及方策の取り纏め

図11 開発スケジュール

3. 運航の評価

造船サイドでは一般に馬力・速力で性能を示すことが一般的であるが、船舶運航の採算計算を行う船社サイド⁶⁾では、同様の速力・馬力性能を持ちながら機関性能等の違いから燃費の異なる船舶があり、燃費・速力で表す方が分かり易い。ここでは船舶運航の効果について、運航エネルギーによる燃料ベースの評価手法について紹介する。

3.1 運航エネルギー評価指標

運航のエネルギー効率⁷⁾は、投入した燃料に対する輸送仕事との比（輸送エネルギー効率）で表わす（赤城⁷⁾）。船舶輸送により得られる仕事は、社会的な便益であって、一般には物理的な意味はなく、種々の便益を考えることができる。なお、出力と輸送貨物重量に速度を乗じたものの比が採用されることもあるが、これは、分母、分子に時間を掛ければ、燃料消費量と輸送貨物重量に輸送距離を乗じたものと同等である。

図12 輸送エネルギー効率

IMO (International Maritime Organization) では、船舶の運航エネルギーについて、実輸送距離と実輸送貨物量を用いた輸送仕事と燃料消費量から求めたCO₂排出量を用いて「運航エネルギー効率指標 (EEOI: Energy Efficiency Operational Index) ⁸⁾」としている。

なお、IMO の EEDI では、機関出力と貨物輸送量に速度を乗じたものとの比が採用されている。これは、分母・分子に時間を乗ずれば、燃料消費量と輸送貨物量に輸送距離を乗じたものとの比と同等である。

3. 2 航走エネルギー評価指標

船舶の運航エネルギーについては、IMO において EEOI が検討されている。この指標は、貨物輸送の観点では輸送するのは貨物であることから、輸送貨物に輸送距離を乗じて仕事を定義している。フリートマネージメントの視点では、輸送貨物だけでなく、船舶の運航性能に着目した管理も必要となる。ここでは「船舶自重と貨物重量を含む排水量 (重量)」と「水に対しての航走距離」を船舶の航走仕事と考え、投入された燃料に対し、船舶が航走した航走仕事との比を、航走エネルギー効率指標 (EENI: Energy Efficiency Navigational Index) ⁹⁾ として、以下のように定義する。船舶の省エネ性能の評価に関するこのような考え方は ¹⁰⁾ は、既に検討されている。

EENI は、排水量、そして航走距離によって変化する指標である。また、EEOI と同様に平均 EENI は、加重平均を採用し、場合によっては任意の期間内での移動平均を適用することも可能である。

<個々の航海の EENI>

$$EENI = \frac{\sum_j FC_j \times C_{Fj}}{W \times D} \quad (1)$$

<決められた期間または幾つかの航海に関する指標の平均値>

$$AverageEENI = \frac{\sum_i \sum_j (FC_{i,j} \times C_{Fi})}{\sum_i (W \times D_i)} \quad (2)$$

	内容
'i'	航海数
'j'	燃料のタイプ
FC_i, FC_{ij}	航海 i における燃料 j の消費量
C_{Fj}	燃料 j に関する、燃料量からの CO ₂ 量への変換係数
W	排水量 (トン)
D	仕事量に対応する航海距離 (海里)

この *AverageEENI* を使えば、ウェザー・ルーティングのサービスを受けた期間と、サービスを受けなかった期間のそれぞれの *AverageEENI* を比較することにより評価することもできる。

なお、IMO の EEOI は、輸送貨物量又は輸送量、そして輸送距離により変化する指標である。この貨物積載量は、市場の影響を受け比較的大きく変動するため、EEOI の時系列データも大きく変動する。また、物理的な意味もない指標となっている。他方、この指標 (EENI) は、貨物積載率というマーケットの影響を受けないため、比較的最ままりが良い。

3. 3 実海域推進性能指標

EENI は、船速の二乗に比例し、排水容積の 1/3 乗に反比例するといった物理的な意味を持つ ^{11), 12)}。これは、船速が小さく、船型が大きいほど EENI の値が小さく、エネルギー効率が良いことを示している。

また、船速の二乗で割れば、船速影響を除くことができる。すなわち、次の実海域推進性能 K_n 指標 ^{11), 12)} を用いる。図 12 は、異なる 4 航路を異なるスケジュール (船速) で運航する船舶での解析例を示す。10 航海程度の平均を採れば一定の値に収束し、航路の差異も示している。

<個々の航海 i の K>

$$K = \frac{EENI}{V^2} \quad (3)$$

<決められた期間または幾つかの航海 N に関する指標の平均値>

$$Average K_N = \sum_{i=1}^N \frac{EENI_i}{V_i^2} \quad (4)$$

図 13 航海数Nまでの平均 K_n

<他船との比較>

異なる 2 船 A, B 間の比較も以下のように評価できる。

$$Rd(\%) = \left(1 - \frac{\text{Average } K_N : \text{shipA}}{\text{Average } K_N : \text{shipB}} \right) \times 100 \quad (5)$$

3. 3 船隊の運航エネルギー効率評価

船隊全体では、個船 n の EENI の総和で以下のように評価できる。

$$\text{Average Fleet EENI} = \frac{\sum_n \sum_i \sum_j (FC_{i,j} \times C_{Fi})}{\sum_n \sum_i (W \times D_i)} \quad (6)$$

5. むすび

フリートマネジメントの効率化は、環境負荷を低減するだけでなく、効率的な輸送を実現し高い経済性を実現する。

荷主が最適な配船計画を策定し、荷主と船社及び船舶とが協力してこの計画に沿って気象・海象の予測情報に基づき最適運航を行う。船舶の運航データが、収集され船社、荷主等で共有すれば、船舶の動静・配船管理が円滑に実施できる。また、陸上の専門家が運航解析を行いその結果をステークホルダーに提供する。この結果、効率的な運航が加速され燃費が削減され、CO₂も削減される。このことは、企業にとっても経済的効果だけでなく環境負荷低減に貢献するという副次的な効果をもたらす。この削減された CO₂ について、J-クレジット等の枠組みで取引に繋がればなお結構なこととなる。

図 14 船舶のフリートマネジメントのイメージ

ICTを活用したフリートマネジメントのイメージは、若年層にとってかっこいいものと映る。すなわち地球にとっても、荷主、船主にとっても、また、乗組員にとっても優れたシステムであり、海上輸送の持つ社会的課題の解決に貢献し得るものである。今後、多様な運航支援技術が開発・提供され、21世紀にふさわしい若者に夢を与えるシステムとして普及、定着することが期待される。これにより、我が国の海運分野で

の環境負荷低減が図られることを念願している。皆様のご支援ご鞭撻をお願いしたい。

本研究開発は、NEDO、環境省からの委託で多くの民間の方々等パートナーの協力のもと実施されてきたものである。開発のパートナー、ならびに、ヒアリング調査等でご協力頂いた皆様に厚く感謝致します。

参考文献

- 1) 加納敏幸, 今澄敏夫, タンデム型 (ハイブリッド型) 電気推進船, 日本マリンエンジニアリング学会誌, 46-1(2011-01), 38-43.
- 2) 加納敏幸, ハイブリッド型電気推進 スーパー・エコシップ, 自動車技術, 66-10(2012-10).
- 3) 加納敏幸, 小林充, 鳥海重喜, 環境対応型運航支援システム, 海上技術安全研究所報告7-4(2008), 425-472
- 4) ウェザー・ルーティング研究グループ, ウェザー・ルーティング-気象情報に基づく最適航法-, 成山堂(1992)
- 5) Seta, T., Kano, T., Application of set partition based fleet scheduling system to Japanese coastal oil tanker fleet, 15th Int. Congr. Int. Maritime Assoc. Mediterranean (IMAM), (2013-10), 691-696.
- 6) 黒川正典, 船主経済から見た船舶の新しい価値の表現方法-主として燃料費の面から-1979.1.
- 7) 赤城新介, 新 交通機関論-社会要請とテクノロジー-, コロナ社, (1995).
- 8) IMO 2009, Guidelines for Voluntary Use of the Ship Energy Efficiency Operational Indicator (EEOI), (2009-08), MEPC.1/ Circ. 684.
- 9) 田中拓, 省エネルギー船の考え方, 第8回造船学会夏期講座, 新しい造船学, (1882.9)
- 10) Kano, T., Seta, T., A study on the Eco-Shipping support system for keeping regularity of ship's schedule, 15th Int. Congr. Int. Maritime Assoc. Mediterranean (IMAM), (2013-10), 667-674
- 11) Kano, T. & Namie, S., A study on Estimation of GHG Emission for Speed Planning Operation Using Energy Efficiency Index and Time-series Monitoring Data, 13th Conference on Computer and IT Applications in the Maritime Industry (COMPIT)(2014-05), 167-180
- 12) Kano, T. & Namie, S., A Study on Estimation Methodology of GHG Emission from Vessels by Using Energy Efficiency Index and Time Series Monitoring Data (2014-10), (投稿中)