内航船の運航支援
—最適配船計画と気象・海象情報による最適航海—

加納　敏幸

本稿では，気象・海象の予測情報，船舶性能推定手法および数理的手法を活用することで，配船業務や航海の効率化を促進し，経済性，環境性，定時性を図る環境対応型運航支援システムの研究開発と社会実装された成果について紹介する．本システムでは，運航データをモニタリング，デジタルデータとして蓄積し，気象・海象の予測情報などと組み合わせて解析することで最適航海計画を立案，提供する．蓄積された運航データは，最適化手法などにより運航のカイゼンや効率化を図るための種々の知識を得るための基盤である．

キーワード：配船支援，航海支援システム，運航効率化，ウェザー・ルーティング，環境負荷低減，運航モニタリング，最適化手法

1.　はじめに

世界的な経済変動，CO_2 排出量の規制など，海運業界を取り巻く環境は大きく変化しており，このような中，船舶の安全性に加えて経済性，環境負荷低減，定時性などの多様な視点での船社の支配する船舶（船隊）全体の効率的な運航管理の重要性が高まっている．

これまで，（国研）海上技術安全研究所（以下「海技研」）は，荷主，船社，NPO マリン・テクノロジスト (MTL) などと共同で，ウェザー・ルーティング技術 [1] に基づき気象・海象予測情報，船舶性能推定手法および数理的手法を活用することで，運航効率化を促進し経済性，環境性，定時性を図る環境対応型運航支援システムの研究開発を行ってきた．2013 年度から 3 年間，環境省の「CO_2 排出削減対策強化誘導型技術開発・実証事業（航海・配船計画支援システム導入による船舶からの CO_2 排出削減実証事業）委託業務」[2] を実施した．本支援システムを利用することにより，実運航状況を基にしたシミュレーションでは，14%程度の省エネ効果が期待でき，実船を用いた実証実験では，4%程度の燃費削減効果を得た．

この成果を受け，2016 年度より，MTL が提供する運航支援サービス (eE-NaviPlan) [3, 4] として内航セメント船隊が実利用し，1 年間で 800 KL を超える燃費を節約することができた．さらに，気象・海象の予測情報により航海における定時性と安全性が向上した．ここでは，気象・海象情報の一つの利用例として，環境対応型運航支援システムについて紹介する．

第 4 次産業革命に呼応し ICT などの技術革新が始まっているが，これらの技術は，気象・海象予測情報の活用にとって極めて有効なツールとなる．今や，海運分野でもこれら技術を用いた運航効率化による活性化を図るチャンスでもある．

2.　環境対応型運航支援システム

2.1　概要

環境対応型運航支援システムは，減速運航を考慮した配船支援システム，気象・海象など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およびその省エネ効果の評価手法などを開発，統合することで，必要最小限の速度での環境に優しい運航を実現するものである．

このシステムは，まず，荷主からの輸送要請に基づいて船舶を割り当てる配船計画，および本計画に対しウェザー・ルーティング技術に基づいた最適航海計画を提供する (PLAN)．船長は，提供された計画を参考に運航する (DO)，さらに，燃費削減効果の評価，船舶の運航情報をモニタリングデータにより提供することで，運航効率化に対する気づきを与え (CHECK & ACTION)，船舶オペレータなどが行う運航管理の PDCA を効率的に行うことを支援する．これにより，燃費削減と CO_2 排出削減を図る，いわば環境対応型のフリート・マネージメントシステムである（図 1）．

2.2　最適配船計画支援

最適配船計画 (Plan)

配船とは，「荷主による輸送要請に対し，船舶を割り

かのう　としゆき
国立研究開発法人海上技術安全研究所　海洋リスク評価系
〒 181–0004 東京都三鷹市新川 6–38–1
kano@nmri.go.jp

 Copyright ⓒ by ORSJ. Unauthorized reproduction of this article is prohibited.

図 1　環境対応型運航支援システムのイメージ図

当てる」ことで，これまで専門家の経験と勘に依存してきた業務である．この配船がうまく計画できれば船隊全体での総航行距離の低減による燃費削減と傭船数削減などの経済的な効果を得る．

ここでは，配船の問題を，「組み合わせ最適化問題」として取り扱い，数理計画の手法を用いて，人の作成した配船案を PC で改善し，最適化を図る．

しかしながら，輸送要請を満足する船舶の割り当ての組み合わせの数が一般には多い．また，船舶運航のプラクティスが専門的である．船舶は 1 品生産で建造されることが多く，それぞれの性能特性が異なる．港湾により接岸可能な船舶が制約され，荷役能力も異なっている．さらに，複数の貨物を輸送する場合には貨物艙配置の考慮や貨物によっては次の貨物を搭載の際に貨物艙の洗浄を必要とし洗浄水の処理施設などを考慮しなければならない．このような複雑な制約と組み合わせの多さが相まって，配船最適化システムの開発を困難にしてきた．

実証事業では，このような制約条件をできるだけ取り込み，人の作成した配船計画案を改善し，船隊全体の総航海距離，総燃料消費量の低減を図る配船支援システムを開発した．配船最適化アルゴリズムの開発には，（公財）鉄道総合技術研究所（鉄道総研）と共同で取り組み，海技研は，線形計画法を基に以下のような手法を開発した [5]．

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 2）．

また鉄道総研は，制約プログラミングを用いて，この問題に取り組み実用的なアルゴリズムを開発した [6]．

図 2　最適配船案算出フロー

本システムは，近々実用化の予定であるが，今後対象船種を拡大し，この配船支援システムを普及していくには，輸送要請から直接最適配船計画を立案することが求められており，そのため輸送要請を船舶の単位にまとめるペアリングのアルゴリズムなどの手法との連携が必要である．このような開発を効率的に進めるため，船舶，港湾，貨物の制約条件の標準化も求められる．

2.3　最適航海計画支援

ジャストインタイムの運航計画 (Plan)

最適配船により空荷航海が削減され，輸送効率が向上する．この配船計画に従い航海要請を行い，船舶が気象・海象などの予測情報に基づき最適航海を実施すれば理想的な船隊運航管理が実現する．

ここでは，高精度な気象・海象の予測情報，精度よく推定された実海域での船舶性能および数理計画の手法を用いて，目的港にジャストインタイムに到着する必要最小限の航路上の最適出力計画を船舶に提供する環境対応型運航支援システムについて紹介する．

実海域での運航性能評価

本船のスケジュールや積載状態などのもとで，燃料最小となる最適航海計画を策定するためには，運航条件，気象・海象情報などの外乱条件に加えて，本船の固有性能を考慮して航海時間と燃料コストを精度よく推定することが必要である．

Copyright © by ORSJ. Unauthorized reproduction of this article is prohibited.

モデルによる評価

実運航中の船舶においては，主機関が発生する動力が推進器に伝達され推進動力となるが，この推進動力 P と推進効率 η および船体に働く抵抗力 R ×船速 V で計算される仕事量がバランスするように船速が定まる．

$$P = R \cdot V/\eta \tag{1}$$

実海域における本船固有の性能は，船体に働く全抵抗 (Rall) を，静穏な状況下での基準状態における本船の抵抗 (Rbase)，風抵抗 (Rwind) および波浪抵抗 (Rwave) による抵抗増加量に分離する成分分離型モデルを用いて表現している．

$$\mathrm{Rall} = \mathrm{Rbase} + \mathrm{Rwind} + \mathrm{Rwave} \tag{2}$$

個船ごとに風および波浪が及ぼす抵抗増加量を海技研の実運航シミュレーション (VESTA) [7] などを用いて高精度に船舶性能の推定を行う．ジャストインタイムの最適船速計画立案には，大きな船速低下を引き起こす波浪の影響の評価は重要で，波向きを 30° ごとに区切って詳細に評価している．

モニタリングデータによる回帰

船速の予測精度向上を図るため，モデルの決定係数を 10 分ごとに収集される運航モニタリングデータと気象・海象情報などの現況データを用いて回帰し，風波などの外力による減速量を推定する．

船舶の基本性能となる Rbase について解析を行うには，静穏な状態をたとえば，波高 1 m 以下，風速 5 m/s 以下と定義し，その状態の運航データを抽出する．風については，船舶の航海のために設置されている風向・風速計の観測データが利用できるが，波浪は，一般に計測されておらず，気象予測機関の提供する波浪の予測情報を用いる．

このほか，船速に影響を及ぼす航海ごとの排水量についてのデータや入渠時の情報を得て，排水量の影響，船体汚損や経年劣化の影響などを評価しモデルに取り込む．

船内で利用する電力需要を賄うため，プロペラ軸からギヤを介して発電機を駆動する軸発電機を利用する船舶も多い．性能評価を精度よく行うために軸発電機の利用状況を把握することが求められるが，軸発電機の状況をモニタリングしていない場合が多い．この場合でも論文 [8] は，静穏状態の時間当たりの燃料消費量と主機間の回転数から，この影響を分別するクラスタリングの手法を開発し 90%程度の精度で軸発利用時と非利用時の状態を分別できることを確認した（図 3）．

図 3　軸発使用 (×)・不使用 (○) 分別データ群

これにより，軸発電機非利用時の船舶性能推定が実施できる．

運航モニタリングで得られたデータを継続的に解析し，現状のパフォーマンスを把握することで，実海域での推進性能推定の精度が向上し，シー・マージン（気象・海象，経年劣化などによる速力低下を見込んだ機関出力の余裕度）の解析，省エネ付加物，塗装効果の確認，経年劣化や船体汚損状態など運航管理に有益な情報が把握可能となる．

気象・海象の予測情報

気象・海象は，船舶の経済運航の航路や航海計画に与える影響が大きく，最適な航海計画を立案するには高精度かつ，時間的にも稠密な予測情報が求められる．本システムは，日本沿岸域を対象とした 3 日先までの気象・海象の予測情報を利用している．風向・風速，波高・波周期・波向きについては，3 km メッシュ，3 時間ごとに更新される入手可能で最も高精度かつ時間的に稠密な情報である．これらの情報は，本船にも提供される．

海流情報

わが国沿岸域では，「黒潮」という非常に強い海流が流れており，内航船の最適な航海計画立案にとり重要な情報である．海洋研究開発機構 (JAMSTEC) は，わが国沿岸域の海流予測に関する日本沿海予測可能性実験 (JCOPE) [9] を実施し，その成果は，毎日更新される詳細な 3 km メッシュの海流予測情報として提供されている．図 4 には，大島近辺の海流予測情報が示されている．稠密で航海に役立つ情報である．本システムでは，この情報を利用している．

 Copyright © by ORSJ. Unauthorized reproduction of this article is prohibited.

図 4　毎日更新される詳細な海流予測情報
3 km メッシュ（2017 年 9 月 1 日）

運航計画 (PLAN) の提供

このような高精度な気象・海象の予測情報，船舶性能同定により，数理計画の手法を用いて，ジャストインタイムの航海計画を演算し提供する．

本船固有の性能モデル（推進性能，耐航性能，主機燃費性能など）を基礎に最新の気象・海象と海・潮流の予測情報に基づき，設定された航路とスケジュールに対し，航海時間と燃料消費量をより正確に評価し航海計画を策定する．最適化の対象は，与えられた機関出力での最短時間航路，与えられた航路上を最小燃料で与えられた時間内に目的港に到着するための機関回転数配分などであり，航海計画の最適化手法として，ここではダイクストラ法 [10, 11] と確率的な手法 [12] を用いているが，このほか，動的計画法，A* といった手法が一般に利用されている．

このように計算された結果は，本船の船載機 (GUI) の電子的な海図上に，最適な主機回転数・プロペラ翼角（可変ピッチプロペラ船）が，航路上のウェイポイント (WP) ごとに表示される．あわせて，航海の参考のため，気象・海象情報や日本沿岸域の詳細な海・潮流予測情報を提供する（図 5）．これらの情報を参考に航海することにより，本船のもつ省エネ性能を最大限に引き出し省エネ運航を支援する．

動静・航海状況把握 (CHECK & ACTION)

本船が航海している間，AIS，データロガーなどから航海および機関関連の計測データを取り込み，船陸間通信により陸上のサーバーに送信・蓄積する．

サーバーに集められたデータを処理することで，情報基盤システムによりウェブ・ブラウザで現在の船位とウェイポイントでの通過予定時刻，計画船速が示され予実などの動静情報がビジュアルに把握できる．さらに動静情報や航路の軌跡，航海ごとの機関出力の時間的推移，気象・海象の予測情報などを含む航海状況など運航情報および本システムを採用したことによる燃費削減効果や航海エネルギー効率などを確認することができる（図 6）．

図 5　船載機に表示される最適航海計画

図 6　Web 提供情報の例（動静・航海情報）

このように航海時の運航状態を「見える化」し，オペレータなどと共有することにより経済性（燃料消費）や安全性に対する気づきが深まり，継続的な運航の改善活動に貢献できる．

省エネ効果の評価 (VERIFICATION)

省エネ効果は，運航支援システムを利用しない状態 (BAU: Business as Usual) と，利用した状態 (Project) を比較することで評価される．本船のスケジュールや積載状態などの運航条件，気象・海象情報などの外乱条件に加えて，本船の固有性能を考慮して燃料消費量を精度よく評価し，その効果が演算される．その手法は，海技研が開発 [13] し，第三者審査機関が妥当性を確認した手法 [14] を用いる．図 7 は，航海ごとの燃料削減量についての月次レポートを示している．

図 8 は，運航支援サービス (eE-NaviPlan) サービス

Copyright © by ORSJ. Unauthorized reproduction of this article is prohibited.

図 7　燃費削減効果（月次レポート）

図 8　燃費削減量 (KL) の月次推移
2016 年度（左）・2017 年度（右）

による 2016・2017 年度の月次の船隊全体での燃費削減量の推移が示されている．

月次の削減量は，40 KL から 100 KL とばらつきが見られるが，セメント輸送の繁忙期には高速での航海の機会が多くなり，減速運航ができず削減量が小さくなることなどが要因である．2016・2017 年度，各 1 年間の実利用では，17 隻のセメント船隊において 800 KL 強の燃費節約が図られ，2,400 トン程度の CO_2 排出が抑制された．

運航管理指標

運航状況を示す指標として，eE-NaviPlan では，航海状態について，燃料消費量，排水量，航海距離という三つの容易に入手できるデータを用いて航海エネルギー効率（排水量（トン），輸送距離（マイル）当たりの燃料油換算 CO_2 排出量 (g)），航走エネルギー効率（同じ船速での航海エネルギー効率）などの指標を採用している．これらの指標は，物理的な意味をもちデータの考察が容易で，航海性能をうまく把握でき，排水量，入渠，省エネ付加物の効果なども評価できる．これを船社などにレポートし，航海ごとに運航状況を確認する．このレポートは，本船の運航状態や固有性能を正確に把握することと相まって，運航関係者の燃料

図 9　内航船の観測データによるデータ同化

消費への対応策構築をサポートし燃費削減活動を進めるうえで有効である．また，一定の期間の平均値を算出し比較することで船舶相互の運航性能評価もできる．

3.　最適化・モニタリングデータの解析

モニタリングデータによるデータ同化

モニタリングデータにより，新展開が考えられる．船舶で観測した現況データを気象予測機関などにフィードバックすることで，海流（流速・流向）予測精度の向上を図ることができる [15]．図 9 は，オオミズナギドリの位置情報と内航貨物船の運航モニタリングデータの同化によって海流の表現が特に改善された領域を丸で示す．これにより海流予測精度が向上することを示した [16]．

海潮流情報利用と省エネ効果の評価

小型内航船を対象に，海潮流情報をビジュアルにタブレットで配信し，この情報を参考に航海することにより省エネ航海を促進するプロジェクト（図 10）を，資源エネルギー庁の支援を得て，MTL が，荷主，船社，フォーキャスト・オーシャン・プラス (FOP)，海技研などの協力を得て進めている．

このプロジェクトでは，海流情報をモニタリングデータから把握する必要があり，本研究の一環で論文 [17] は，船舶をセンサーとして捉え，船舶の主要航路沿いの流れを把握する取り組みを行い，JCOPE-T（日本沿岸域約 3 km 格子，潮汐考慮の海潮流予測）の予測値と比較しよい一致を見ている（図 11）．今後の展開に期待したい．

4.　おわりに

海技研は，荷主，船社，MTL などの協力を得て実施した環境省の委託事業を通じて，内航船の運航燃費削減活動に貢献するため，運航モニタリングによる本船の省エネ効果の評価手法と本船固有の性能を考慮した

 Copyright © by ORSJ. Unauthorized reproduction of this article is prohibited.

図 10　海潮流情報提供タブレット

図 11　紀伊半島沖の航路沿いの流速分布
上図：観測値，下図：予測値 (JCOPE-T)

環境対応型運航支援システムを開発してきた．

2013～2015 年度の間，海技研が実施した実証事業により船速計画に軸足を置いたシステムの有効性が確認され 2016 年 4 月から，セメント船隊の 17 隻の商業運航において eE-NaviPlan サービスとして実運用されている．このサービスでは，削減効果が年間 800 KL を超えるなど一定の成果を得ている．

環境対応型運航支援システムでは，船舶の運航データをモニタリングし，デジタルデータとして蓄積，このデータと気象・海象データとを組み合わせ解析することで最適な航海計画を立案し，船舶の船載機（電子的海図）上にこれらの情報を重畳表示するものであった．

蓄積されたモニタリングデータは，船舶の推進性能の評価，運航効率の評価のほか，船をセンサーとして捉え海象の状況を把握することができ，今後，データ同化手法により予測情報の精度向上にも有益な情報となる．さらに，これらのデータは，建造造船所では船舶設計のカイゼンに，運航会社では効率的な運航管理に，荷主では無駄のない配船計画，製造・販売計画にとり有益な情報に転換でき，環境負荷低減にも，経済的なメリットに繋がっていく．モニタリングデータは，最適化，数理的手法などの取り組みによる運航のカイゼンや効率性を図るための基盤であり，この取り組みを種々の知識に転換していくことを目指す．

このようなサービスを通じて，海運業界に若い力を取り戻し，わが国海事産業の基盤が頑健なものになり，ひいては子供たちのために地球環境負荷低減とわが国産業の競争力を確保し持続的発展につながっていけばと思う．

海上輸送にかかる OR 技術を活かす場所はこのほかいくつもある．海の世界にも目を向けてもらいたい．

参考文献

[1] 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—』，成山堂書店，1992.

[2] 加納敏幸，“航海・配船計画支援システム導入による船舶からの CO_2 排出削減実証事業，CO_2 排出削減対策強化誘導型技術開発・実証事業，”環境省，2013～2015 年度，https://www.env.go.jp/earth/ondanka/cpttv_funds/pdf/prod2015/p20150102.pdf（2018 年 9 月 13 日閲覧）

[3] 加納敏幸，“内航船の最適運航支援システム eE-NaviPlan，”NKCS セミナー，2017.

[4] マリン・テクノロジスト，“内航海運のための環境に優しく経済的な船隊運航支援サービス，”eE-NaviPlan セミナー，2017.

[5] 瀬田剛広，坂口隆，小林充，加納敏幸，“数理計画を用いたセメント船段の船舶スケジューリング，”日本船舶海洋工学会講演会論文集，**8**, pp. 139–142, 2009.

[6] 坂口隆，小林充，加納敏幸，“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講演会論文集，**8**, pp. 135–138, 2009.

[7] 枌原直人，“実運航性能シミュレータ VESTA の開発，”海技研ニュース　船と海のサイエンス, 2013-winter, pp. 10–12, 2013.

[8] A. Murata and T. Kano, “Applies the clustering method using navigational monitoring data into ship’s fundamental propulsion performance,” In *Proceedings of Asia Navigation Conference 2017*.

[9] JACOPE, http://www.jamstec.go.jp/jcope/（2018 年 9 月 13 日閲覧）

[10] 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，**118**, pp. 99–106, 2008.

[11] 高嶋恭子，庄司るり，“Dijkstra 法による最少燃料消費航路計算アルゴリズムと感度解析，”日本船舶海洋工学会講演会論文集，**12**, pp. 79–80, 2011.

[12] 萩原秀樹，庄司るり，“確率的なウェザー・ルーティングに関する研究—航海時間と燃料消費量の標準偏差の推定精度—，”日本航海学会論文集，**104**, pp. 1–11, 2001.

[13] T. Kano and S. Namie, “A study on estimation of GHG emission for speed planning operation using energy efficiency index and time-series monitoring data,”

Copyright © by ORSJ. Unauthorized reproduction of this article is prohibited.

In *Proceedings of 13th Conference on Computer and IT Applications in the Maritime Industry 2014*, pp. 167–180, 2014.
[14] 加納敏幸，波江貞弘，志村幸美，“航海支援システムの適用による CO_2 排出削減量評価手法について，” 日本船舶海洋工学会講演会論文集，**21**, pp. 77–82, 2015.
[15] 堀内一敏，加納敏幸，宮澤泰正，佐藤圭二，村田暁紀，“内航船で観測した偏流データを用いた海流予測の高精度化，” 日本船舶海洋工学会講演会論文集，**21**, pp. 67–69, 2015.
[16] Y. Miyazawa, X. Guo, S. M. Varlamov, T. Miyama, K. Yoda, K. Sato, T. Kano and K. Sato, “Assimilation of the seabird and ship drift data in the north-eastern sea of Japan into an operational ocean nowcast/forecast system,” Scientific Reports 5, article number: 17672, 2015.
[17] R. Takano and T. Kano, “Estimation of ship’s drift along the main route caused by current using AIS data analysis,” In *Proceedings of Asia Navigation Conference 2017*.

 Copyright © by ORSJ. Unauthorized reproduction of this article is prohibited.