

最適運航システムの開発

松沢 孝俊*, 粉原 直人*, 久米 健一*, 金子 杏実*, 辻本 勝*

Developments of Ship-Route Optimization Systems

by

MATSUZAWA Takatoshi*, SOGIHARA Naoto*, KUME Kenichi*, KANEKO Azumi*

and TSUJIMOTO Masaru*

Abstract

NMRI has developed ship-route optimization systems to clarify the route selection and operation methods that minimize degradation in the ship's performance on the route due to wind, wave, and ice. We used technology based on VESTA, an actual operation performance simulator developed by NMRI, to evaluate ship performance. Shipping trends were analyzed using datasets such as EU-MRV and Satellite AIS as a preliminary study. We developed the GLOBUS cloud, a statistical database of waves and wind in oceans, and verified the usefulness of the database for ship routing evaluations. VESTA's purpose is to estimate ship performance in open water (no ice). As an extension, we have developed VESTA-ICE, which can estimate ice resistance in polar waters, and combined it with an optimal route search routine. This system can propose three routes optimized for distance, time, and fuel consumption for a single calculation condition. A trial simulation for navigation of a bulk carrier in the Northern Sea Route indicated that the system proposed a reasonable route that minimized fuel consumption and is similar to the actual track record. For forecasting future shipping prospects, we tested weather routing based on the RCP scenarios in the IPCC Fifth Assessment Report and examined its effect on the optimal route. Finally, the energy savings of a rotor ship, which is a wind-propelled vessels, was evaluated by weather routing. It was found that the rotors may reduce the overall fuel consumption in certain wind conditions.

* 流体設計系

原稿受付 令和 5年 7月 29日

審査日 令和 5年 9月 8日

目 次

1. はじめに	16
2. 船舶の運航実態と外乱の分析	17
2.1 船舶の運航実態	17
2.2 気象・海象データベース	18
3. 氷中航行を考慮に入れた最適運航システム	19
3.1 システムの構成	19
3.2 性能計算	20
3.3 氷況データ	20
3.4 探索アルゴリズム	21
3.5 インターフェース	21
3.6 VESTA-ICE	21
3.7 ルーティング例	22
4. 気候変動影響の調査	23
5. ウェザールーティングに基づくローター船の省エネ効果の評価	24
6. まとめ	25
謝 辞	26
References	26

1. はじめに

船舶がある2地点間を移動する際、船舶が受ける外乱によって引き起こされる性能の低下は航路によって異なるため、適切な航路や運航方法を選択すれば性能低下を抑えることができる。これらを最適航路及び最適運航と呼ぶ。外乱として特に影響が大きいものは、風、波浪、そして後述する海水である。これらの外乱による性能低下を加味した船舶性能は、実海域性能と呼ばれる。ある航路上の外乱を既知として実海域性能を推定することができれば、最適航路を導出することができる。当所では、実海域性能推定のためのソフトウェアとして VESTA（実運航性能シミュレータ）を開発してきた。本研究では併せて気象及び海象の外乱データとして気象庁の客観解析値を用いることで、最適航路や最適運航を提示するシステムを開発した。以降ではこれを最適運航システムと呼ぶ。

氷中航行が行われている北極海に目を向けると、ここ30年で海氷面積は減少傾向にあり、北極海を通航する船舶の数は段階的に増加しつつ一定以上の水準を保っている。一方で、EU-MRV（燃費消費実績報告制度に関する欧州規制）の公表データによれば、CO₂排出量の特に大きな船舶は氷中を航行するアイスクラス船であることが分かる。すなわち、海運全体としての航路の最適化を図るためには海水の影響も考慮することが不可欠である。そこで、氷海船舶試験水槽や氷中実船性能データ計測等を通じて船舶の氷中抵抗モデルを構築し、これらを基に VESTA を拡張した VESTA-ICE を開発した。VESTA-ICE と組み合わせた最適運航システムは、極海を含む全球での最適航路を導出することができる。

本稿では、まず近年の運航実態を明らかにするため、船舶の動静と遭遇する外乱について傾向分析を行う。ここで用いるのは、燃料消費量として EU-MRV データ、船舶動静として衛星 AIS データ、外乱については気象庁客観解析値及び宇宙航空研究開発機構（JAXA）衛星の海水氷密度等である。気象・海象については、各成分の複合統計分析機能を有する GLOBUS（全球の波と風データベース）を当所で開発しており、その概要と分析例について述べる。次に、海水に対応した VESTA-ICE 及びそれを含む最適運航システムについて解説する。このシステムは PC 上で動作するプログラムとして構築しており、最適運航を実現するための機能やインターフェースを実装している。ここではこのプログラムの実行例を示し、結果について考察を加える。

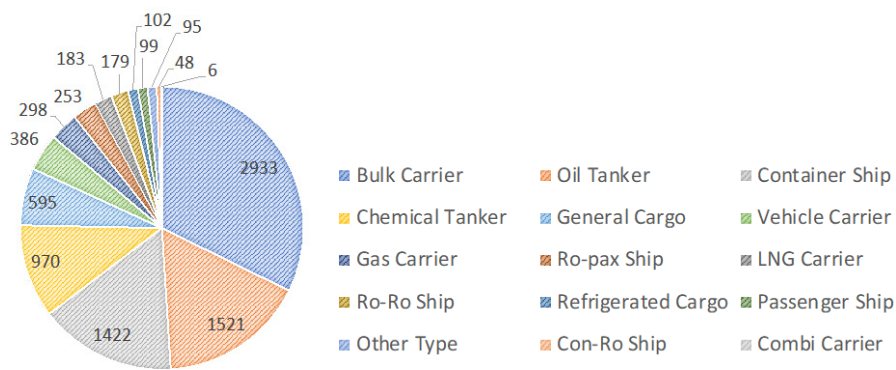
最後に、この先の気候変動により航路に変化が生じる可能性を踏まえ、IPCC（気候変動に関する政府間パネル）第5次評価報告書における RCP シナリオ（代表濃度経路シナリオ）に基づくウェザールーティングを試行し、最適航路への影響を検討する。また、ゼロエミッション実現に向けた風力推進の適用例としてローター船のウェザールーティング効果について評価を行う。

2. 船舶の運航実態と外乱の分析

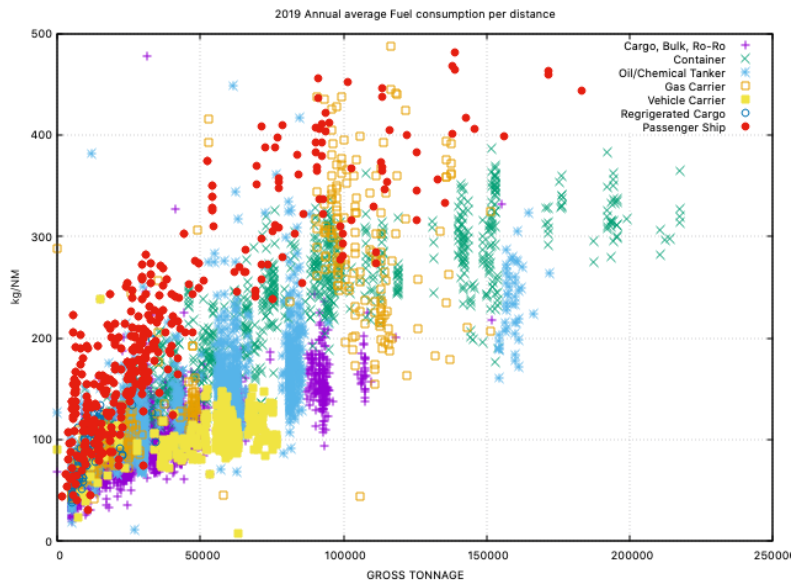
2.1 船舶の運航実態

EU-MRV は GHG 規制の一環で 5,000GT 以上の船舶において記録が義務付けられた CO₂ 排出量あるいは燃料消費量のレポートであり、2018 年以降年間を通しての実績データが公表されている。図 2-1 に、2019 年 EU-MRV データにおける船種別の隻数及びマイルあたり燃料消費量を示す。EU-MRV には、毎年おおよそ 12,000 隻の 5,000GT 以上の船舶におけるデータが含まれている。船種の内訳は図 2-1 (a) に示す通りで、船種による偏りは少ない。

図 2-1 (b) に示す船種別に見た燃料消費量の特徴としては、旅客船で大きくバラ積み船や自動車運搬船で小さいこと、また他の船種ではまとまりがなく個船による違いが大きいことが分かる。これらは積荷の性質や備船形態の違いを反映しており、速度を求められかつ不定期的な航路を運航するものについては燃料消費が大きくなることが考えられる。



(a) 船種別隻数



(b) 1 マイルあたり燃料消費量

図 2-1 2019 年 EU-MRV データにおける船種別の隻数及び 1 マイルあたり燃料消費量

EU-MRV では、各船について年間を通した CO₂ 排出量あるいは燃料消費量しか判別できない。このデータにおける海氷の影響を見るためには、各船の航跡を分析する必要がある。そこで、約 1 時間ごとの船舶動静が記録された 2018 年の船舶 AIS データにより開水中及び氷中の運航距離を算出した。海氷の有無の判別に

は JAXA による GCOM-W AMSR2 海氷密度プロダクトデータを使用した。この分析はアイスクラスを有する船舶のうち 28 隻を抽出して行った。

各船の年間航行距離及び年間燃料消費量について、海氷の有無を加味して図 2-2 に示す。これを見ると、アイスクラスを有していても氷中を航行するケースは全体の一部であることが分かる。具体的には、氷中の割合が最も多いもので 12% であり、10% を超えるものは 28 隻中 2 隻であった。一方、燃料消費量について同様に分析すると、氷中で消費する割合は最も多い船舶で 19%、10% を超えるものは全 28 隻中 5 隻であった。これは、氷中での航行距離が短くても燃料消費における割合は高く、氷中での燃料消費量の増加は顕著であることを示している。

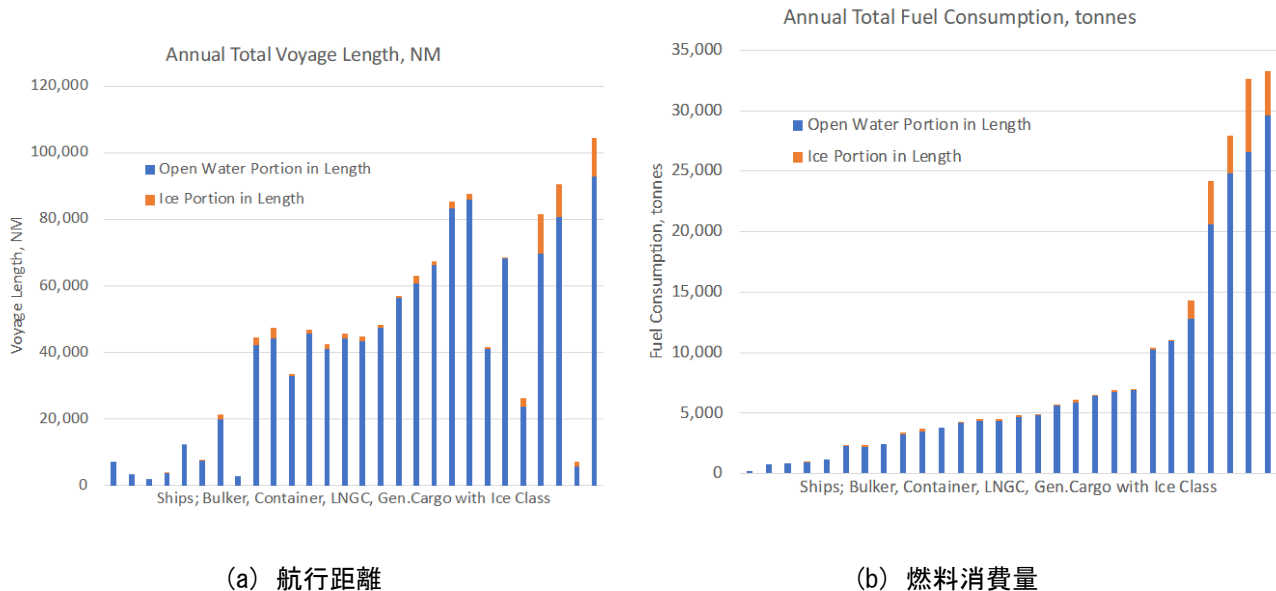


図 2-2 2018 年のアイスクラス船 28 隻における年間航行距離及び燃料消費量

2.2 気象・海象データベース

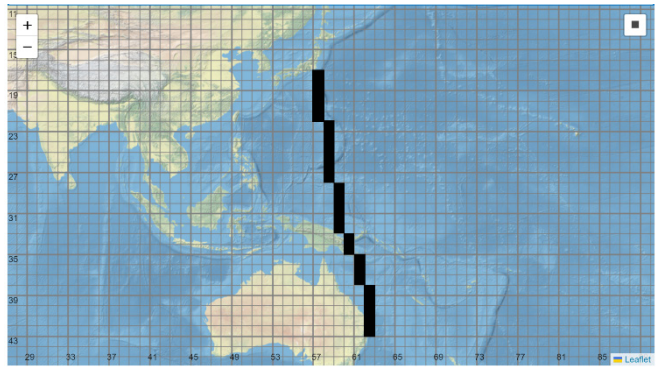
波や風が船舶の運航、特にルーティングに及ぼす影響を評価するためには、全球規模の気象・海象データを時間的・空間的に統計分析することが不可欠である。最近では様々な気象・海象データが広く利用可能となっているが、当所では波と風の統計データベース GLOBUS を開発し、気象海象評価の利用の他、一般に提供している²⁾³⁾。GLOBUS は、気象庁の 2006 年～2016 年における全球の風と波の推算値を基に、当所で統計解析を行った緯度経度 2.5 度の海域区分 (10,368 海域) における気象・海象データベースであり、GLOBUS cloud は本研究を通じて GLOBUS を Web アプリケーション化したものである。

GLOBUS cloud は、有義波高、ピーク波周期、卓越波向、平均風向、平均風速の 5 要素に加え、それらを複合した有義波高-ピーク波周期等の 2 相関や有義波高-ピーク波周期-卓越波向及び有義波高-ピーク波周期-平均風速の 3 相関について、12 種類の発現頻度表を出力する。対象とする海域はマップ上で任意に選択でき、船舶の航路に沿った分析も可能である。また、四季別や月別の出力も可能となっており、気象・海象の時間的变化による影響も考慮することができる。インターフェースを図 2-3 に示す。

GLOBUS cloud を使用した運航分析例として、東京ーブリスベン間の航路を想定した波浪の統計解析を行った⁴⁾。図 2-3 (b)はその対象海域を選択したものであり、この海域における発現頻度表を出力したものが図 2-3 (c) である。後者では平均風速を横軸に、有義波高を縦軸にとっている。別途分析によると、この航路で全体的に現れる顕著な波浪は、ピーク波周期が 7 秒及び 15 秒のものであった。そこで、それぞれのピーク波周期での条件付き確率密度関数として表すと、ピーク波周期 7 秒については図 2-4 (a)、15 秒については図 2-4 (b) のようになる。これにより、航路上で遭遇する波浪の主たる成分や全体的な分布域が明らかとなり、例えば船舶設計上の想定海象として有用な情報を提供できる。



(a) 操作画面

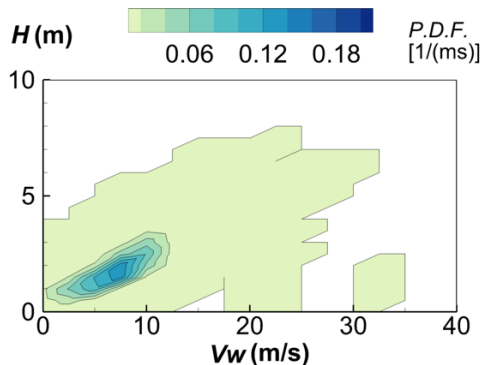


(b) 対象海域選択画面

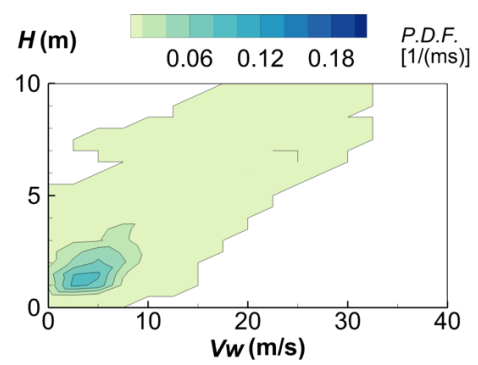
The table shows the occurrence frequency table (有義波高-平均風速). The columns represent wind speed (Vw) and wave height (H). The rows represent wind speed (Vw) and wave height (H). The table contains numerical data representing the frequency of occurrence for each combination of Vw and H.

(c) 発現頻度表 (有義波高-平均風速)

図 2-3 GLOBUS のインターフェース



(a) 波周期 7 秒



(b) 波周期 15 秒

図 2-4 遭遇する気象海象の条件付き確率密度関数 (東京—ブリスベン航路)

3. 氷中航行を考慮に入れた最適運航システム

3.1 システムの構成

氷中航行を考慮に入れた最適運航システムでは、船舶の性能及び氷況（海水分布）に応じて「航行距離」「航行日数」「燃料消費量」がそれぞれ最適、すなわち最小となる航路を探索することが必要である。そのため、本研究で開発したシステムは図 3-1 に示す構成になっており、中でも性能計算・氷況データ・探索アルゴリズムの3つの要素が重要である。性能計算では氷中抵抗を考慮する必要があるため、VESTA-ICE を適用する。同時に氷況データが必要となり、現場での運航支援を目的とすると数値予測のような予報データが必要となるが、本研究では航路評価を目的とするため、衛星で取得される過去データを利用する。また、航路探索の部分ではA*アルゴリズムを採用した。これらの詳細については、後節で述べる。

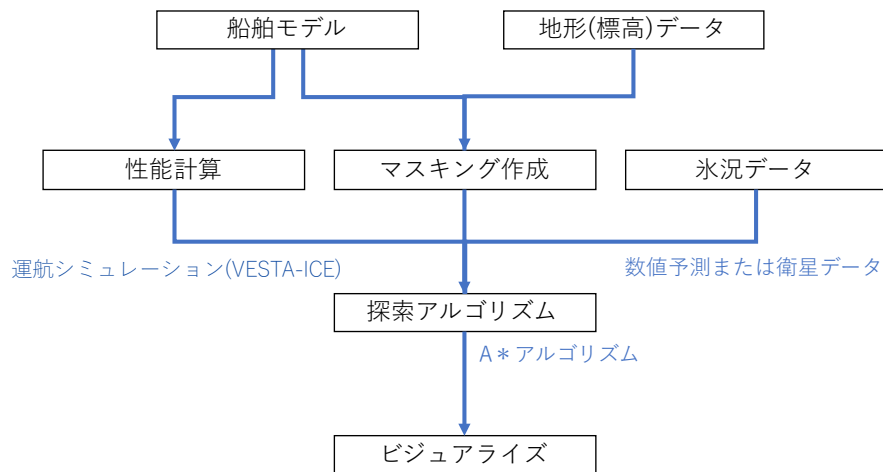


図 3-1 北極海ルーティングシステムの構成要素

本システムが航路探索対象に想定している海域は、北極点を中心としたおおよそ北緯 60 度以北の範囲である。これを約 10km 四方の格子に分割し、各格子について評価関数による評価値を算出し、アルゴリズムによって最適な航路を探索する。航路探索時には、まず船舶が通航不可能な格子範囲を除外する必要があるが、これをマスキングと呼んでいる。本システムでは、陸地や喫水制限のほか水中可航性指標も計算し、その結果も反映している。

3.2 性能計算

海氷のない開水域における運航性能評価の分野では、実海域で遭遇する波や風による影響を考慮して性能を推定する手法が従来検討されてきた。当所が開発した VESTA は、波や風等による抵抗増加及び主機作動特性を考慮できる実運航性能シミュレータである。現在、氷による抵抗増加モデルを組み込んだ VESTA-ICE として、氷中性能評価が可能なバージョンが開発されており、本システムの性能計算はこれによっている。VESTA-ICE で考慮している氷中抵抗等については後述する。

3.3 氷況データ

海氷分布は、海氷密接度という値で表現される。海氷密接度とは、ある範囲の海域に着目したとき、その海面のうち海氷が覆っている面積の比率であって、各格子にそれぞれ設定される。データ源としては、衛星データのひとつである JAXA の水循環変動観測衛星「しずく」(GCOM-W) に搭載された AMSR2 センサのレベル 3 プロダクトを使用している。このデータの取得間隔は 24 時間で、通常は取得後数日内にダウンロード可能となる。

ただし、衛星データは過去の氷況についてのデータであって、本稿で行う航路評価ではなく現場でのルーティングでは、氷況予測データが必要である。そのためには氷況予測プログラムとの連携が必要であるが、この種の氷況予測計算は比較的計算コストが高く、実用的な用途に供するためにはコストと精度のバランスの工夫が必要になる。

氷況データは、氷中抵抗の算出に用いられるほか、POLARIS 可航性指標の計算にも利用される。POLARIS とは、Polar Operational Limit Assessment Risk Indexing System の略語で、Polar Code に関連して IMO から提案されている可航性指標である。この中では、氷中航行に関するリスク指標として Risk Index Outcome (RIO) が計算される。これは各種の氷の種類ごとの密接度の重み付き和として、次式で計算される。

$$RIO = (C_1 \cdot RIV_1) + (C_2 \cdot RIV_2) + \dots + (C_n \cdot RIV_n) \quad (2.1)$$

ここで、 C はある氷種の部分密接度（0～10）であり、添字が氷種に対応する。また、 RIV は Risk Index Values の意味であり、リスクに応じた重みである。本システムでは、 RIO が負となる海域はマスキングされる。なお、POLARIS についての詳細は、参考文献^{5) 6)}を参照されたい。

3.4 探索アルゴリズム

本システムで最適航路を探索するアルゴリズムは、A*アルゴリズム⁷⁾である。これは地図の経路探索にしばしば利用される手法で、解が存在すれば必ず見つけ、かつ最小コスト解が優先的に探索されるという特徴がある⁸⁾。

本システムでは、最適航路に関するパラメータとして、燃料消費量、航海日数、経路長を考慮している。本システムのA*ルーチンでは、評価関数にこれらのパラメータで各々重み付けを行うことができ、重視する対象を選択することができる。

3.5 インターフェース

前述したように、計算結果をビジュアル化してユーザに示すインターフェースも、システム全体の有用性に影響を与える。海氷分布や航路を直感的に把握するには、それらをマップ上に描画することは必須の機能である。本システムが採用している画面構成は、図 3-2 に示すように、航路探索コマンドとマップと結果の3要素によるものである。また、氷況は日によって変化するため、その推移が動的に把握できるよう、タイムライン表示機能を付加している。

このインターフェースを通じて、ユーザは日付や船舶に関するデータをフォーム形式で入力し、計算実行をコマンドすることで、その結果である船舶の航路（位置の時系列）とその時の氷況等を重畳し連続的に表示できるようになっている。

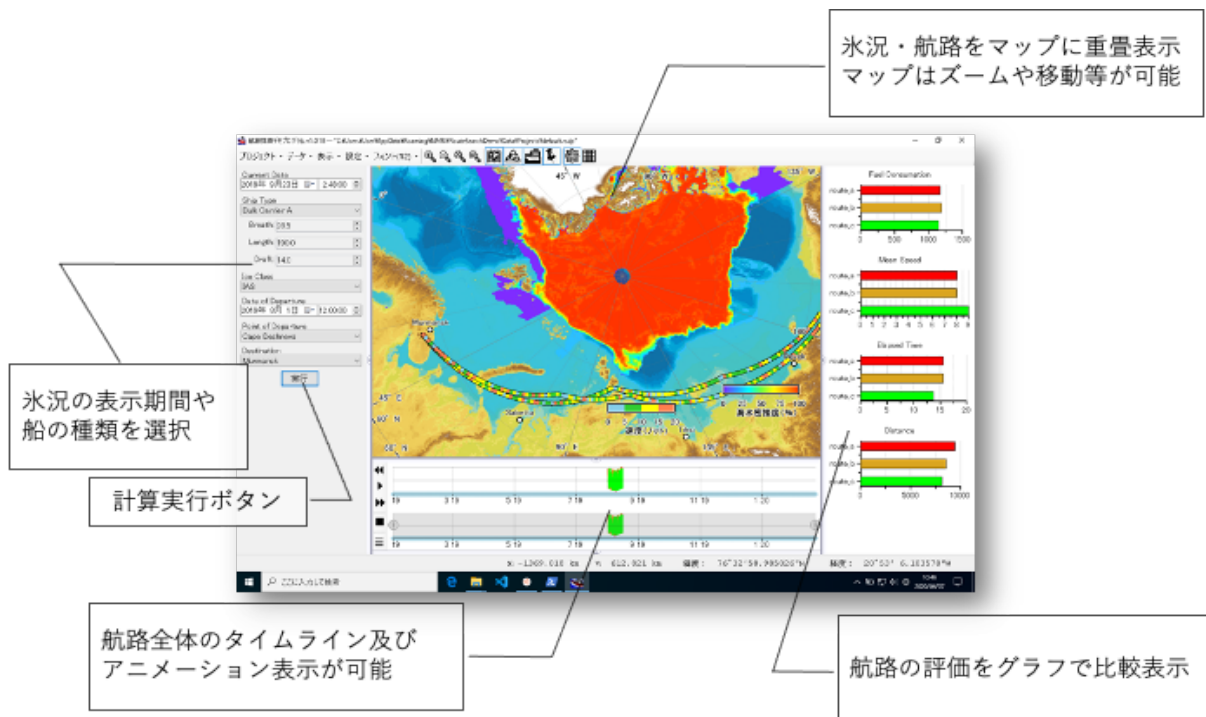


図 3-2 最適航路システムのインターフェース

3.6 VESTA-ICE

VESTA は、前述の通り波や風等による抵抗増加および主機作動特性を考慮できる実運航性能シミュレータであるが、原理としては平水中での抵抗をベースとし、実海域の波浪等の外力による抵抗増加を加味して性能推定する。VESTA を氷海対応させ VESTA-ICE とするためには、基本的には外力として水中抵抗を加味すればよい。この考えに基づく VESTA-ICE の動作フローを図 3-3 に示す。

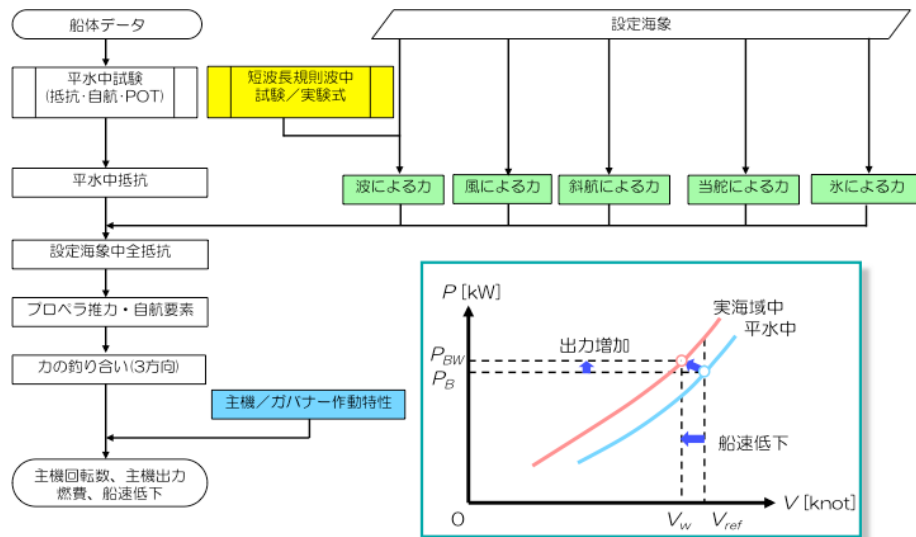


図 3-3 VESTA-ICE の動作フロー

VESTA-ICE には、水中抵抗を推定するモデルが必要である。従来様々な抵抗モデルが考案されているが、本システムでは KPR モデル Lindqvist モデルのハイブリッドモデルを採用している。各モデルの詳細は参考文献⁹⁾に記載があるが、KPR モデルは海氷密接度が高くなると推定過大になり、Lindqvist モデルは元来低い海氷密接度を想定していない。また、こうしたモデルは主に砕氷型船型で検証されており、特に本システムがターゲットとする商船船型では推定過大となることが知られている。

これらの欠点を解消するため、まず KPR と Lindqvist のハイブリッド化により、海氷密接度の範囲によらず推定過大となることを抑え、実船データにより検証した^{10) 11)}。次に、KPR モデルの船型に関するパラメータを商船船型に対応させる改良を行ない、当所の氷海水槽における模型試験により検証した¹²⁾。本システムには、以上を考慮した水中抵抗モデルを用いている。

3.7 ルーティング例

ある Bulk Carrier (アイスクラス IA) の 2019 年の Transit 航海について仮想的なルーティングを行った。本船は 2019 年 10 月 21 日に Novaya Zemlya の北から東経 70 度線を越えて北極海航路に入り、東航して、10 月 29 日に Cape Dezhnev を通過した。実航海と仮想ルーティングによる航跡を図 3-4 に、また各数値を表 3-1 に示す。ただし、この仮想ルーティングでは、海氷パラメータは衛星データのものを使用している。

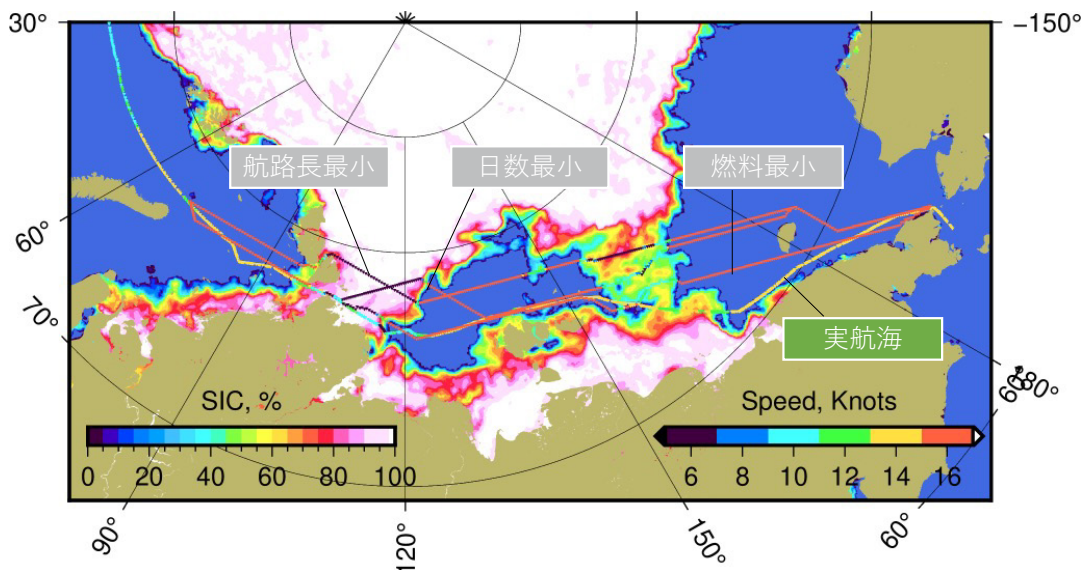


図 3-4 Bulk Carrier の仮想ルーティングと実航海の航跡比較

表 3-1 Bulk Carrier の仮想ルーティングと実航海の数値的比較

			最適化項目			実際
			航路長	日数	燃料	
氷中 水中 及び	航路長	NM	2060.5	2140.6	2136.4	2244.9
	日数	Days	8.05	7.54	6.65	6.9
	平均速度	Knots	10.66	11.84	13.38	13.5
	燃料消費量	t	1325.2	1100.8	309.6	-
氷中 のみ	航路長	NM	617.2	550.5	416.4	589.2
	日数	Days	4.21	3.31	2.08	1.9
	平均速度	Knots	6.1	6.93	8.36	12.8
	燃料消費量	t	3	1.7	0.6	-

図中、実航海の航路は最も陸地側のもので、仮想ルーティングは北から距離優先、日数優先、燃費優先である。この期間は海氷の拡大期（結氷期）で、Laptev 海は既に海氷で塞がり、東シベリア海は南北から開放水面が狭まりつつあった。実運航は燃費優先の航路とほぼ一致している。この選択は東シベリア海では北からの海氷を避けるべく南側航路を選択したものであるが、ロシア沿岸からの海氷成長に追いつかれ、船速の低下を引き起こしている。対して燃費優先の航路では、距離の短さを優先して北からの海氷を横断する選択をし、かつ短時間の速力低下に留めることで、結果的に早い到着となっている。

一方、距離優先の航路は海氷中での性能低下が影響し、評価値として不利な結果となった。これは、海氷を避けるほうが経済的であるという一般的な知見と合致する。ここで、日数優先の航路が最短日数にならなかったが、これは氷況の変化が大きく、出発時に設定したマスキングと実状が乖離したためと思われる。

4. 気候変動影響の調査

将来の気候変動への海運分野への影響を調査するため、当所で開発したウェザールーティングシステムである海象適応航法 (WAN) ¹³⁾ を用いて、最適航路への影響を評価した。WAN により、燃料消費量の最小化を目的とした航路最適化を行う。評価に使用する波浪及び風のデータは、IPCC 第 5 次評価報告書における代表濃度経路シナリオ (RCP シナリオ) 2.6¹⁴⁾ に基づき設定した予測データを用いた。

外航コンテナ船 (船長 300m) を対象に、減速運航を考慮して、北太平洋航路 (東京-ロサンゼルス間) で評価を行い、現在気候 (1997 年) 及び将来気候 (2085 年) における最適航路を調査した。調査結果を図 4-1 及び図 4-2 に示す。ここで、GCR は大圏航路、他は最適航路の出港日を表す。これらから、東航においては、現在気候も将来気候いずれも最適航路は大圏航路の北寄りとなるが、西航においては将来気候では最適航路が現在気候より南に寄る場合があることを示した。本ツールを用い、実海域性能推定技術をウェザールーティングに適用することで、風力推進の効果、気候変動による影響等、実海域性能を考慮した実運航性能の事前評価が可能となる。

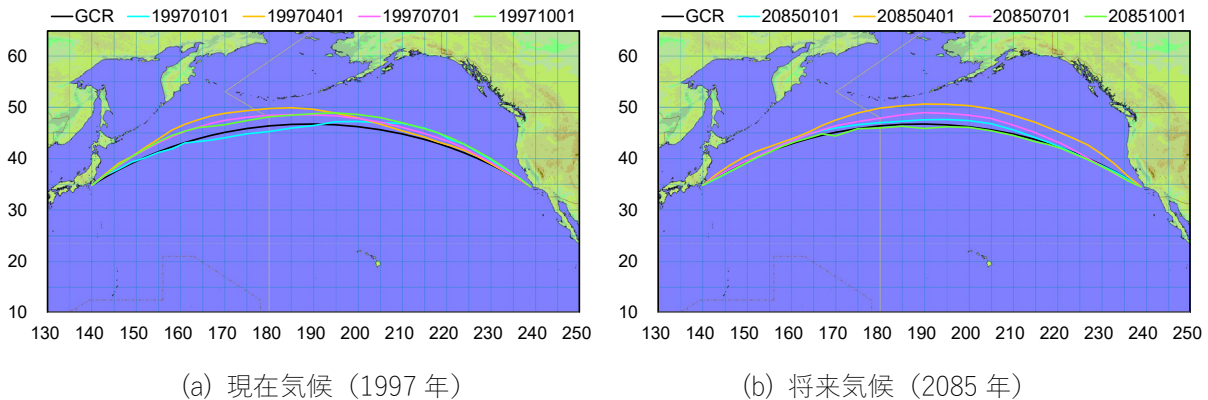


図 4-1 コンテナ船を対象としたウェザールーティング (東航)

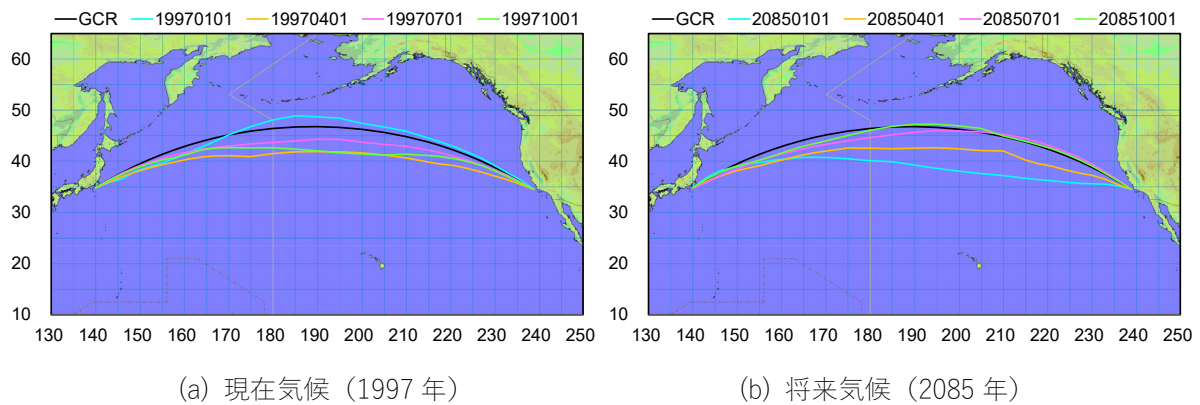


図 4-2 コンテナ船を対象としたウェザールーティング（西航）

5. ウェザールーティングに基づくローター船の省エネ効果の評価

風力推進船は、自然エネルギーの一つとして知られる風を利用して推進力を得て進む船を指す。推進力の一部を風力で補うため燃料消費量を削減することが可能であり、船舶からの二酸化炭素排出量削減を実現する方策として期待されている。

風力推進船は風を利用して運航するため、従来の通常船舶の様に単純に穏やかな海域を航行すればよいという訳ではなく、風力推進に適した航路を選定することが望ましく、このことが有意な水準で省エネ効果を得る上で重要である。ここではパナマックス型撒積船にローターを搭載したローター船を対象とし、ウェザールーティングにより省エネ効果の評価を行った結果を以下に示す。

ここで使用したウェザールーティングシステムは前節で利用した WAN である。北太平洋航路の春季、東航を対象とする。具体的には、2019年3月1日12時(UTC)に東京を出港し、サンフランシスコに向かう航海である。省エネ効果の評価のため、大圏航路(Great Circle Route)での燃費評価、ローターのない状態でのウェザールーティング(without Rotor)、ローターを付けた状態でのウェザールーティング(with Rotor)を実施した。

ウェザールーティングの結果を図 5-1 に示す。ウェザールーティングを行うことによりローターの有無に依らず大圏航路よりも南側の航路をとることが分かる。また、ローター船の航路は途中からローターが無い場合より南側の航路となっている。

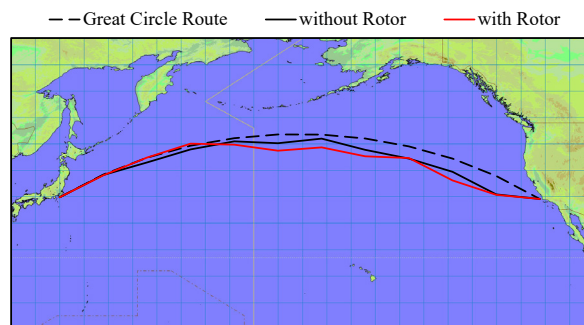


図 5-1 ウェザールーティングの結果
 (点線：大圏航路，黒実線：最適航路（ローター無し），赤実線：最適航路（ローター有り）)

最適航路上で遭遇した風況を図 5-2 に、最適航路上の運航状況を図 5-3 にそれぞれ示す。横軸は出港後経過日数である。出港して 7~9 日後、ローター船が遭遇する風の真風速は大きいですが風向が横風から斜追風とな

りローター船にとって有利な風況となっている。これにより、ローター船は出港して3日後以降はほぼ一定の船速となっている。ローターが無い場合は出港後に一旦増速しその後回転数を落とした運航となっており、ローター船よりも燃料消費量は大きくなる。

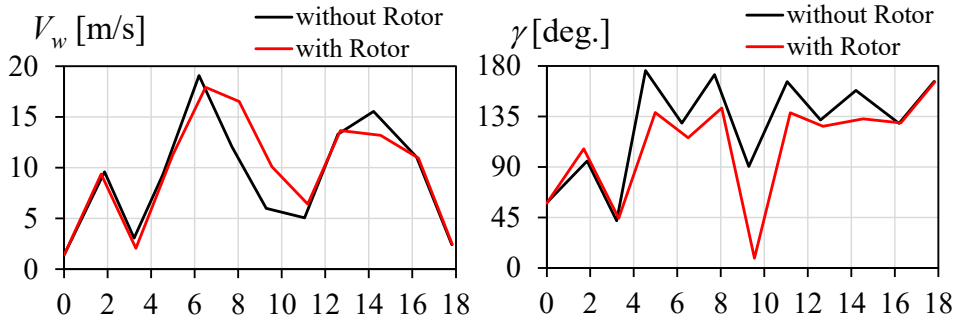


図 5-2 最適航路上の風況 (左：真風速, 右：真風向 (向風を0とする))

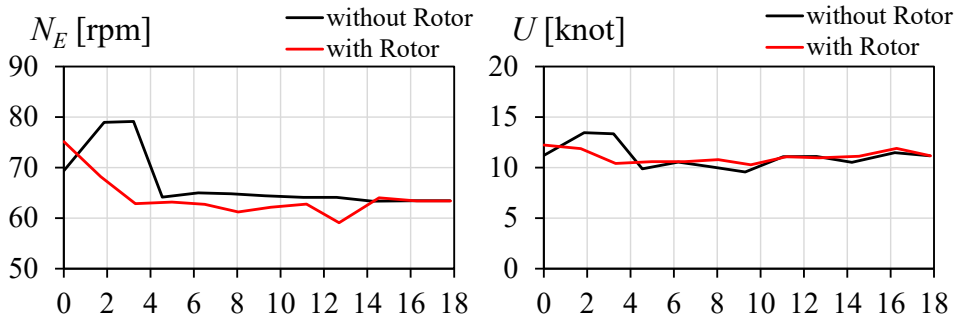


図 5-3 最適航路上の運航状況 (左：主機回転数, 右：船速)

燃料消費量の評価結果を表 5-1 に示す。表 5-1 より、ローター船の場合、ウェザールーティングと組み合わせた運用とすることにより省エネ効果が向上することが分かる。

表 5-1 省エネ効果 (燃料消費量の比較)

	大圏航路	最適航路
ローター無し	319.2ton	295.9ton
ローター船	299.4ton	251.9ton
省エネ効果	6.2%	14.9%

6. まとめ

船舶の運航に際し、航路上での性能の低下を抑える航路選択や運航方法を明らかにする目的で、最適航路及び最適運航の手法を開発した。船舶性能の評価には、当所で開発した実運航性能シミュレータである VESTA を基礎とする技術を用いた。関連して、欧州の燃料消費量実績データである EU-MRV データや衛星船舶 AIS データ等により運航実態を分析するとともに、波と風の統計データベース GLOBUS cloud を開発した。また、ウェザールーティングによる評価の適用例として、将来の気候変動による航路への影響、省エネ船として期待されているローター船による省エネ効果について検討を加えた。以下、項目別に列記する。

- EU-MRV データの分析によると、高速でかつ不定期航路を運航する船舶の燃料消費量が多いことが明らかになり、中でもアイスクラス船の燃料消費は大きいことが分かった。また、GLOBUS cloud により航路に沿った気象・海象の統計分析を行い、運航分析に有用であることを示した。
- VESTA を氷海に対応させた VESTA-ICE を用い、航路探索機能等を付加して、氷海域を含む全球の最適航路探索システムを開発した。本システムによって北極海航路における仮想ルーティングを試みたところ

ろ、実績の航路は燃費優先の探索結果と合理的な一致をみた。

- IPCC 第5次評価報告書における RCP シナリオに基づくウェザールーティングを試行し、最適航路への影響を検討した。その結果、東航においては、現在気候も将来気候いずれも最適航路は大圏航路の北寄りとなるが、西航においては将来気候では最適航路が現在気候より南による影響が示された。
- 風力推進船のひとつであるローター船について、ウェザールーティングにより省エネ効果を評価した。ローターの有無で最適航路はやや異なり、特定の風況下でローターが負荷の増加を防いで有利となる場合が見られ、総合的に燃料消費量が抑えられる可能性があることが分かった。

謝 辞

本研究の一部は、国土交通省総合政策局海洋政策課「平成29年度北極海航路における船舶運航性能推定手法に関する研究開発」「平成30年度北極海航路における運航支援システムの開発に向けた検討に関する研究開発」「令和元年度北極海航路における運航支援システム実装に向けた調査検討業務」により実施された。関係各位に深く感謝申し上げます。

References

- 1) Tsujimoto, M. et al., 2016, Ship Performance Simulator in Actual Seas -VESTA-. Papers of National Maritime Research Institute, Vol. 15, No. 4, 55-65.
- 2) Tsujimoto, M. et al., 2018, Statistical Characteristics of Global Winds and Waves. The 28th International Ocean and Polar Engineering Conference, Sapporo, Japan, June 2018.
- 3) Kaneko, A. and M. Tsujimoto, 2021, Evaluation of Occurrence Probability of Winds for Use of Wind Propulsion System in Calculating Attained Energy Efficiency Design Index. Transaction of Navigation, 6, 2. 77-84.
- 4) Kaneko, A. et al., 2023, Development of Statistical Database of Global Winds and Waves "GLOBUS cloud" and Its Application to Ship Operation. Papers of National Maritime Research Institute, Vol. 23, Supplement, 173-174.
- 5) IMO, 2015, International Code for Ships Operating in Polar Waters (Polar Code), Resolution MEPC.264(68).
- 6) IMO, 2016, Guidance on Methodologies for Assessing Operational Capabilities and Limitations in Ice, MSC.1/Circ.1519.
- 7) Hart, P.E. et al., 1968, IEEE Transaction, System Science and Cybernetics, SSC-4(2), 100-107.
- 8) Fu, L. et al., 2006, Heuristic shortest path algorithm for transportation applications: State of the art, Computers & Operations Research, 33(11), 3324-3343.
- 9) Nozawa, K., 2006, Hyokai Kogaku (氷海工学). Seizando-Shoten Publishing Co.,Ltd. (in Japanese)
- 10) Matsuzawa, T. et al., 2015, NSR transit simulations by the vessel performance simulator "VESTA" Part 1 Speed reduction and fuel oil consumption in the summer transit along NSR. Proc. 23rd Conf. Port and Ocean Eng. under Arctic Conditions.
- 11) Uto, S. et al., 2015, NSR transit simulations by the vessel performance simulator "VESTA" Part 2 Simple resistance formulae of ships in floe ice. Proc. 23rd Conf. Port and Ocean Eng. under Arctic Conditions.
- 12) Matsuzawa, T. et al., 2018, Optimization of Ice Resistance Model for Merchant Ship -Parameter Analysis in Applying Limit-Momentum Model-, Proc. JASNAOE Annual Spring Meeting 2018. (in Japanese)
- 13) Tsujimoto, M. et al., 2004, Development and Evaluation of Weather Routing System for a Novel Sail Assisted Ship. J. of the Kansai Soc. of Naval Architects Japan, 242, 25-36. (in Japanese)
- 14) Interconnect Performance page. <https://www.jccca.org/ipcc/ar5/rcp.html>