

12 VESTA-ICEによる北極海航路の ルーティングシステムの開発

松沢 孝俊*

Development of an Arctic Ship-routing System Coupled with VESTA-ICE

by

MATSUZAWA Takatoshi

Abstract

NMRI has developed a ship routing aid system for Arctic navigation. The system is able to propose three possible routes optimized for distance, time, and fuel consumption for a single calculation condition. The state-of-the-art VESTA-ICE, which is an extension of NMRI's original VESTA for open sea (no ice), is coupled to evaluate the physical ship performance in ice-infested water. As a part of VESTA-ICE, we have developed a hybrid ice resistance model consisting of the Kashitelijan-Poznjok-Ryblin model and the Lindqvist model to adapt to the bow shape of typical cargo ships. The A* algorithm program was coded as a route optimizing routine. The ice condition data is given by an ice prediction model such as IcePOM, while the AMSR2 satellite observation data can be used for the hindcast. The system features a user-friendly interface in which the user sets the conditions, runs the simulation, and observe the results displayed in the map and graphs. For validation, the path of a bulk carrier navigating the Northern Sea Route in October 2019 was reproduced using the system and the proposed routes were qualitatively and quantitatively reasonable compared with the actual path.

* 流体設計系

原稿受付 令和3年5月17日

審査日 令和3年5月28日

1. はじめに

船舶が北極海を航路として利用する際には、たとえ耐氷構造を有するアイスクラス船であっても、海氷域への進入は極力避けるのがセオリーであった。しかし、近年夏季における海水面積や氷厚は減少傾向にあり、比較的ゆるい氷況であれば、商船でも水中航行が可能である。

ただし、船舶の水中航行には、海氷との干渉による危険性に加え、推進性能の低下及び環境負荷の増加に関するリスクも存在する。現場で水中航行の可否を判断することは、海氷に関する知見も含めた様々な情報が不可欠であるため、熟練した乗員でなければ難しい。この理由により、意思決定を支援するためのいわゆる氷海航行支援システムの必要性は、NSR が国際的に開放された 1980 年代から認識されていた。

当所では、実海域性能シミュレータ VESTA を氷海仕様に拡張しつつ、航路探索機能を付加し、航行日数や燃料消費量等に関する最適航路を探索するルーティングシステム（以下、本システム）を開発している。この種のシステムで特に重要な検討項目は、船舶の性能計算、氷況データ、航路探索法の 3 点である。また、情報をユーザに効率的に伝達するインターフェースの設計も、結果として有用性に大きく影響する。

本稿では、現在の本システムの内容を述べるとともに、その実用例を紹介する。

2. 北極海ルーティングシステムの構成

2.1 全体

本システムは、船舶の性能及び氷況（海氷分布）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機能を有する。そのためには、システムに図-1 に示す構成要素が必要である。

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、後述する POLARIS 可航性指標の計算結果も反映している。

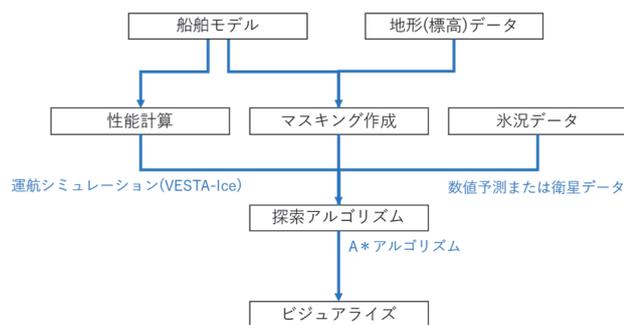


図-1 北極海ルーティングシステムの構成要素

2.2 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（参考文献 1）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行われる。VESTA-ICE で考慮している氷中抵抗等については、第 3 節でやや詳しく説明する。

2.3 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 L3 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、通常は取得後数日以内にダウンロード可能となる。

しかし、衛星データは、過去の氷況についてのデータであって、現場でのルーティングでは未来の氷況データが必要である。これを可能にするには氷況予測プログラムとの連携が必要であって、本システムでは東京大学が開発した IcePOM（参考文献 2）を利用することができる。ただし、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であると認識している。

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 3) 4) を参照されたい。

2.4 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（参考文献 5）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（参考文献 6）。A*アルゴリズムの探索木を図-2 に示す。

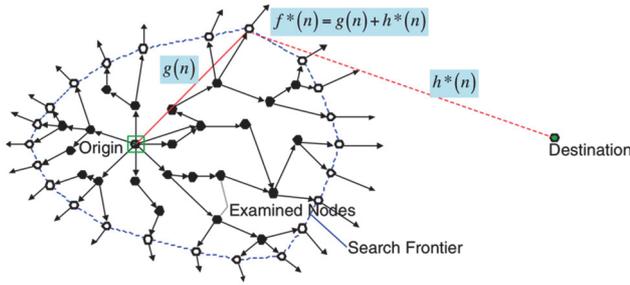


図-2 A*アルゴリズムの探索木(参考文献6)

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。

2.5 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。海水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。

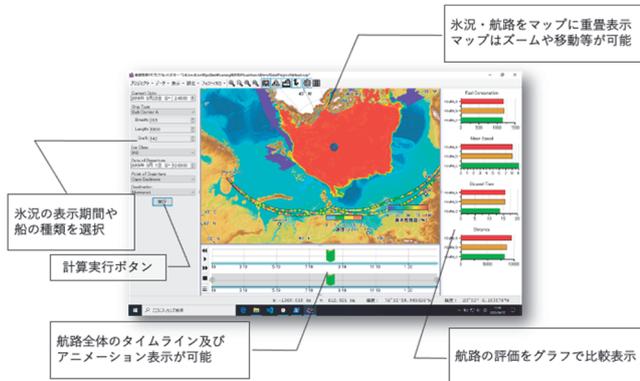


図-3 北極海ルーティングシステムのインターフェース

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。

3. VESTA-ICE について

3.1 VESTA との違い

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仕組みである。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-4 に示す。

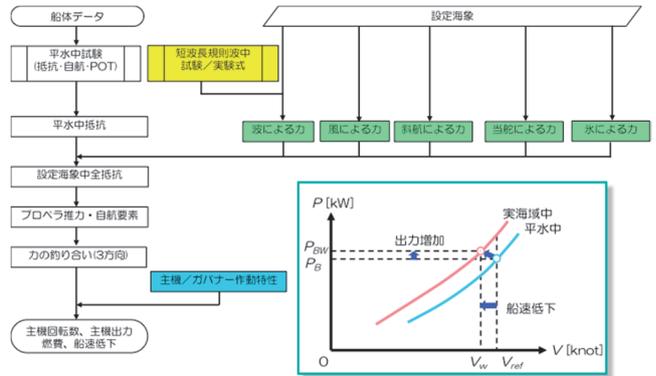


図-4 VESTA-ICE の動作フロー

3.2 水中抵抗モデル

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+Lindqvist 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7に譲るが、KPR モデルは海水氷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水氷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 KPR モデルは本システムがターゲットとする商船船型で推定過大となることが示されている。

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、海水氷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(参考文献8)。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(図-5)により検証した(参考文献9)。本システムには、以上を考慮した水中抵抗モデルが用いられている。

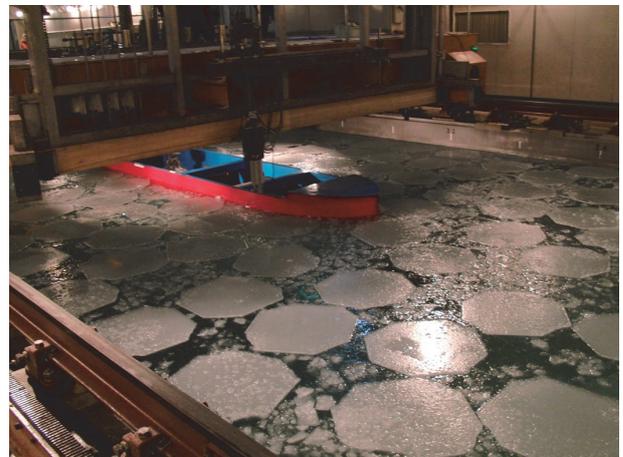


図-5 当所の氷海水槽における KPR モデルの検証試験

4. 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 の北から統計 70 度線を越えて NSR 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-6 に、また各数値を表-1 に示す。ただし、この仮想ルーティングでは、海水パラメータは衛星データのものを使用している。

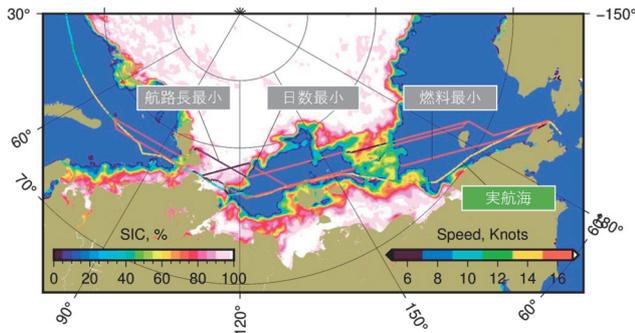


図-6 Bulk Carrier の仮想ルーティングと実航海の航跡比較

表-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		
開水中+氷中	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。この期間は海水の拡大期(結氷期)で、Laptev 海は既に海水で塞がり、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水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水成長に追いつかれ、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水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水中での性能低下が影響し、評価値上不利な結果となった。これは、海水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。

5. まとめ

氷海対応実運航性能シミュレータ VESTA-ICE を用い、航路探索機能等を付加して、氷海航行を支援するシステムを開発した。本システムは、船舶の性能計算、氷況データ、航路探索法の 3 要素が統合され、氷況とそれに対する性能低下に応じて「航行距離」「航行日数」「燃料消費量」の其々が最小となる航路を計算して表示できる。船舶性能計算に用いられている氷中抵抗モデルは、実船データや当所の氷海水槽における模型試験により改良・検証されたものである。本システムによって 2019 年 10 月の Bulk Carrier による NSR の Transit 航海例について仮想ルーティングを試みたところ、燃費優先の探索結果と合理的な一致をみた。

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., 2013, Development of a Calculation Method for Fuel Consumption of Ships in Actual Seas with Performance Evaluation. Proc. 32nd Int. Conf. Ocean, Offshore and Arctic Eng., OMAE2013-11297.
- 2) De Silva, L.W.A. et al., 2015, Ice-ocean coupled computations for sea-ice prediction to support ice navigation in Arctic sea route, Polar Research, 34, 25008, <http://dx.doi.org/10.3402/polar.v34.25008>. pp.1-18.
- 3) IMO, 2015, International Code for Ships Operating in Polar Waters (Polar Code), Resolution MEPC.264(68).
- 4) IMO, 2016, Guidance on Methodologies for Assessing Operational Capabilities and Limitations in Ice, MSC.1/Circ.1519.
- 5) Hart, P.E. et al., 1968, IEEE Transaction, System Science and Cybernetics, SSC-4(2), 100-107.
- 6) Fu, L. et al., 2006, Heuristic shortest path algorithm for transportation applications: State of the art, Computers & Operations Research, 33(11), 3324-3343.
- 7) Nozawa, K., 2006, Hyokai-Kogaku (氷海工学), Seizando-Shoten Publishing Co.,Ltd. (in Japanese)
- 8) 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.
- 9) 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)