

## 北極海航路における最適航路探索に関する研究

今井 克哉<sup>1</sup>、山口 一<sup>1</sup>、中野 佑哉<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 東京大学大学院 新領域創成科学研究科 海洋技術環境学専攻

<sup>2</sup> 科学技術振興機構 (研究当時、東京大学大学院新領域創成科学研究科海洋技術環境学専攻)

### Study of route optimization for the Northern Sea Route

#### 1. 序論

北極海は冬季に海水ではほぼ全域を覆われるが、地球温暖化に伴い、夏季は沿岸部を船舶が航行できるほど海水域が減退する。それゆえ近年、スエズ運河経由の既存航路の他に北極海を経由した北極海航路(NSR, Northern Sea Route)に注目が集まっている。NSR は既存航路と比べて欧州、東アジア間の距離を 30-40%短縮する。それにより燃料消費をおさえて温室効果ガスの削減につながり、地球温暖化防止にも貢献できる。既存航路と大きく異なる点は海水の存在であり、Figure 1[1]に示す様な航行支援システムの構築が北極海航路の利用にあたり重要な課題となる。

Choi et al.(2015)[2]では海水数値モデルによるアンサンブル計算結果から予報の不確かさを考慮した最適航路探索を行った。ここでは船速を密接度と氷厚に比例する単純な低減式で計算した。中野(2015)[3]では、[2]をベースに氷況と船のアイスクラスをひとつの数値で表す Ice Index[3]という指標を用いてより複雑な氷況に対応した船速低減式を導出し、夏季の NSR における最適航路探索を行った。また、実航行データとの比較を行ってその有効性を確認するとともに、海水長期予測データを用いて航路利用の将来性について考察した。

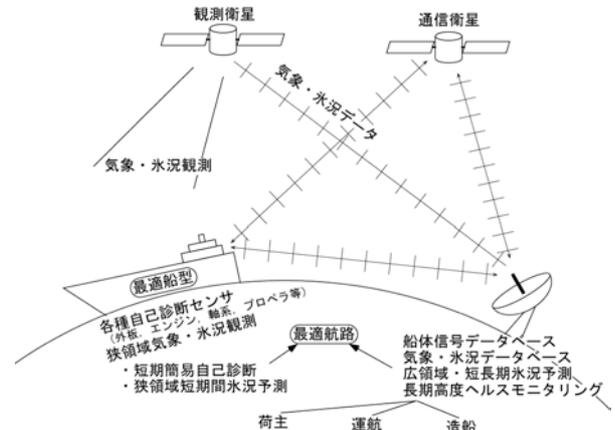


Figure 1. Schema of navigation support system[1].

#### 2. 使用データ、探索手法

使用データは海水・海洋数値モデル Ice-POM(Princeton Ocean Model)による計算値、人工衛星による海水観測データ、NSR 実航行データ、海水長期予測データの 4 つである。Ice-POM は De Silva et al.[4]による海水・海洋連結モデルであり、本研究ではその北極海全域モデル (水平解像度 25km、233×274 格子) による、2011 年 9 月から 10 月の 2 ヶ月間について海水密接度の初期値を ±10% で変化させて 31 回のアンサンブル予測計算を行った結果を用いた。人工衛星データは、実航行航路と比較する最適航路探索を行うためのマイクロ波放射計 Advanced Microwave Scanning Radiometer 2(AMSR2)による水平解像度 10km の海水分布データを用いた[5]。NSR 実航行データは船速と氷況について解析するため、共同研究者である北日本港湾コンサルタント株式会社[6]の大塚氏の提供による自動船舶識別装置 Automatic Identification System (AIS)のデータを用いた。Ice Index < 15 の範囲での Ice Index と船速低下率の関係を Figure 2 に示す。実航行データなので非常にバラついているが、それでも 0.718 の相関係数が得られている。長期予測データは全球気候モデルのひとつである MIROC5 (Model for Interdisciplinary Research On Climate, ver. 5) (Watanabe et al. (2010)[7]) による計算結果を用いた。また最適航路探索に際し、A\*アルゴリズムを用い航路探索を行う。氷況からの船速推定には Ice Index 法を用いる。

#### 3. 結果

まず、Ice-POM によるアンサンブル予測計算結果を用いて最適航路探索を行った。氷厚 0.6 m まで砕氷可能とし、2011 年 10 月 15 日にチュクチ海を出発してスカンジナビア半島の北を目指す航路とし、Ice Index ≤ 18 の時は砕氷船のエスコートを受けるものとした。アンサンブル計算結果から切断正規分布を仮定した海水厚が砕氷能力を超えて厚くなる確率を失敗率 (failure rate) としてそれを考慮して安全性の高い航路を探索した。探索の際の評価関数は式(1)にした。  $w_1 = 1, w_2 = 100, w_3 = 1,000,000$  として得られた結果を Figure 3 に示す。

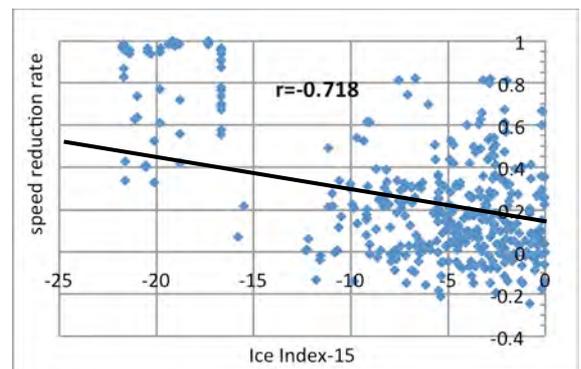


Figure 2 Relationship between ship-speed reduction rate and Ice Index.

$$\begin{aligned} \text{cost function} = & w_1 \times (\text{distance [nm]}) \\ & + w_2 \times (\text{time [hours]}) \\ & + w_3 \times (\text{failure rate}) \end{aligned} \quad (1)$$

#### 4. 結論、まとめ

本研究では船速データと海氷状況に関連づけ、それを基に夏季の北極海航路航行における最適航路探索手法を開発した。また、実航行データとの比較および長期予測データによる将来性の検討を行った。以下に結果をまとめる。

Ice Index 法を用いて実航行の船速データを整理し、船速の推定を行った。

船速を開水面速度に対する減少率に変換することで船型によらない解析を行った。Ice Index が 15-20 の範囲においては実航行データのバラつきが大きい国際北極海航路計画 (INSROP, International Northern Sea Route Programme) で行われた研究結果[8]を参照した。Ice Index が 15 以下においては比較的高い相関関係を示した AIS データを参照することで、船速推定式を得た。

A\*アルゴリズムを用いた最適航路探索手法を確立し、アンサンブル予報による予報計算結果のバラつきを考慮した航路探索を行った。

A\*アルゴリズムを用いて安全性と最適性を持つ航路探索を行う手法を開発した。海氷厚が船の砕氷能力を超えてしまう確率である失敗率を考慮することで、島の近く等の計算結果のバラつきの大きい海域を避けたより安全な航路を探索できた。

衛星観測データを用いて実航行と同じ期間に航路探索を行い、比較を行った。

AIS による 3 隻の船舶の実航行データと計算による最適航路の比較を行った。沿岸で海氷が厚く、沖合でさほどでもない場合に極点に近い航路を通ることもあったが、おおむね実航行と近い航路を探索することができ、航行距離は約 5-15%、航行時間は約 10-30%と実航行より短縮される結果を得た。また、特定の海峡を通ることを強制することも可能で、島の北を通るか南の海峡を通るか等、複数の航路を提示する形が航行支援システムとしてはよいものと考えられる。

全球気候モデルによる長期予測データを用いて将来の航行時間の変化を検討した。

航行時間の長期的変化を示すことで、航路としての将来の経済性評価に貢献するデータを得た。

今後海氷域が縮小を続けるのに伴って、NSR 通航にかかる時間は 10-20%減少するとともに航行可能期間が拡大する見込みがあり、スエズ運河経由等の南回り航路に対する優位性は増していくものと考えられる。北極海の海氷は気候モデルの予測を大幅に超えて減少を続けており、今後数十年で夏季には海氷の影響を受けない航路選定 (いわゆる Trans-polar route) が出来るようになる可能性もある。

#### 5. 今後

本研究では今後、 $w_1 \sim w_3$  の各評価関数の値の変更とそれに伴う航跡の変化、新たに  $w_4$  (money[USD]) を導入し、燃料消費との関係性について着目していく。また、船速推定式の船型によらない ice index 法と船型に依存した抵抗推定式を両立させることで新たな船速推定を行う。

#### References

- [1] Yamaguchi, H., Proc. of INSROP Symposium Tokyo '95, (Ship & Ocean Foundation, Tokyo, 1995), 39-90.
- [2] Choi, M., H. Chung, H. Yamaguchi and K. Nagakawa, Cold Regions Science and Technology, 109, 61-69, 2015.
- [3] 中野佑哉, 北極海航路における最適航路探索に関する研究, 東京大学大学院 新領域創成科学研究科, 修士論文, 2015
- [4] De Silva, L. W. A., H. Yamaguchi, and J. Ono, Polar Research 2015, 34, 25008, <http://dx.doi.org/10.3402/polar.v34.25008>
- [5] <https://ads.nipr.ac.jp>
- [6] <http://white-sapporo.sakura.ne.jp>
- [7] Watanabe, M., T. Suzuki, R. O'ishi et al., Journal of Climate, 23, 6312-6335, 2010.
- [8] 北川弘光, 小野延雄, 山口一, 泉山耕, 亀崎一彦, 北極海航路・シップ・アンド・オーシャン財団, ISBN 4-916148-94-0, 2000

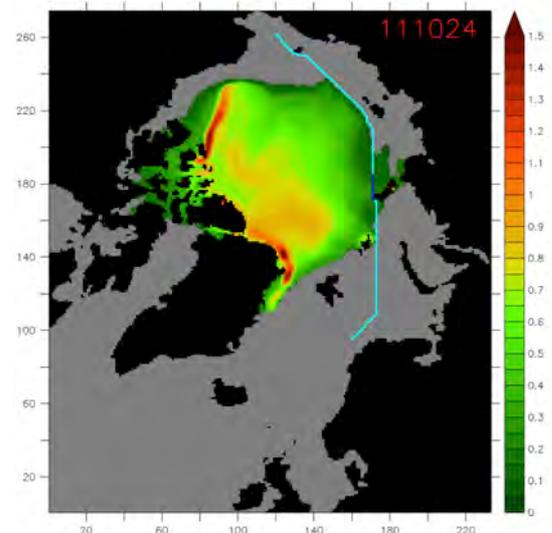


Figure 3 Optimized route (light blue: independent, blue: escorted by icebreaker) Color indicates mean ice thickness [m] on Oct. 24, 2011.