

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 30 年 6 月 1 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(A) (一般)

研究期間：2014～2017

課題番号：26249133

研究課題名(和文) 観測・数値モデル・データ同化を基盤とする、北極海氷況予報システムの開発

研究課題名(英文) Development of sea ice forecast system based on observation, numerical model and data assimilation

研究代表者

山口 一 (Yamaguchi, Hajime)

東京大学・大学院新領域創成科学研究科・教授

研究者番号：20166622

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 29,200,000円

研究成果の概要(和文)：屋外実験やサロマ湖、北極海・南極海での現地観測を行い、可搬型マイクロ波放射計を用いたマイクロ波帯の放射・散乱・反射特性を測定した。それにより、衛星リモートセンシングの海氷厚アルゴリズムを改良した。加えて、人工衛星搭載のマイクロ波放射計データを用いて毎日の正味海氷増加・減少面積のデータセットを作成し数値モデルの検証に用いるとともに、北極海における海氷変動メカニズムの解析を行った。数値モデルに観測データを取り込むこと(データ同化)により、北極海航路域の海氷短期予測と北極海全域の海氷季節予測の精度が改善され、風、海氷、亜表層水が予測精度に重要な役割を果たしていることが示唆された。

研究成果の概要(英文)：We conducted outdoor experiments and field observations at Lake Saroma, Arctic Ocean and Antarctic Ocean, and measured the radiation, scattering and reflection characteristics of the microwave band using a portable microwave radiometer. It improved the satellite remote sensing sea ice thickness algorithm. In addition, using the satellite microwave radiometer data, we created a data set of daily net increase / decrease area of the sea ice to verify the numerical model as well as we analyzed the sea ice change mechanism in the Arctic Ocean. Short-term prediction of sea ice in the Northern Sea Route and seasonal forecast of sea ice in the whole Arctic are improved by assimilating observational data into the numerical models, suggesting that wind, sea ice, and subsurface water play a crucial role in accurate prediction of sea ice.

研究分野：船舶海洋工学

キーワード：北極海 海氷予測 現場観測 衛星リモートセンシング 数値モデル マイクロ波放射計 海氷漂流速度 データ同化

1. 研究開始当初の背景

地球温暖化に代表される地球規模の環境変動は人類にとって重要な関心事である。特に高緯度域は温暖化の兆候が最も現れやすい場所とされており、実際、北極海では夏季の海氷面積が急速に減少してきている。これに伴い、夏に限りロシア側の北東航路とカナダ側の北西航路を船舶が航行することが可能になり、社会的にも関心を集めている。その安全で効率的な利用のためには海氷分布の予測が不可欠であり、特に一週間程度先の海氷分布を正確に予測することが重要である。そのためには、高解像度の数値モデルを用いるのが、ほぼ唯一の方法である。

これまでに研究代表者および分担者は、北極海の海洋海氷結合モデル（水平格子サイズ 25 km）を構築してきた。さらに我々は、このモデルを北極航路に特化した超高解像度（水平格子サイズ 2.5 km）領域モデルに進化させ、現実的な海氷分布をある程度は再現している。しかしながら、現モデルの精度でも実際の船舶のナビゲーションに用いるには十分ではない。海氷状況の予測精度を高め、「使える」予報の実現に必要なのは、できるだけ正確な初期条件と適切な境界条件を与えた数値シミュレーションである。

そこで本研究では、現業の天気予報に使用され、海洋科学分野においてもこの 20 年間で研究が盛んに行われているデータ同化を導入する。データ同化は、観測データと数値モデルの各々の長所を補完できる手法であるため、海氷状況の再現性や予測可能性に期待がもてる。ベースとなる数値モデルには、研究代表者のグループが開発した北極海の海氷海洋結合モデル（25km と 2.5km）を使用する。同化する観測データには、これまでに各国の砕氷船・研究船および衛星リモートセンシングによって取得・公開されている利用可能な全てのデータに加えて、本研究で新たに取得する観測データを使用する。

海氷の変動を衛星リモートセンシングで捉え、数値モデルで再現するためには、現場観測において単純に海氷の面積を実測するだけでなく、厚さや積雪深、塩分、密度、内部温度、アルベドといった海氷の物理学的諸特性の変容に加えて、結氷→冠雪→融解といった季節変化のプロセスも考慮しなくてはならない。北極海上を含む極域の観測は砕氷船等の特殊なプラットフォームを必要とするため、低中緯度に比べるとデータ数は圧倒的に少ない。そのため、結氷期から融解期までの比較的長い期間にわたりデータ空白域での海氷海洋集中観測を実施し、国際的枠組みで継続的に実施できる観測網を構築することが重要である。本研究では共同研究機関の砕氷船等による洋上観測から、本研究の衛星リモートセンシングデータや氷況予測の精度評価を行い、精度向上に寄与する。

2. 研究の目的

本研究では、地球温暖化の影響により急激に変わりゆく北極海を対象海域として、現場／衛星リモートセンシング観測・数値モデル・データ同化を基盤とした、日本初の北極海氷況予報システムを構築する。ベースとなる数値モデルの検証・改良およびデータ同化に必要な観測データは、ノルウェー・ロシア・アメリカとの国際協力によって実施する現場観測と、広域かつ準リアルタイム観測が可能な衛星リモートセンシング観測に基づいて行う。本研究で構築する北極海氷況予報システムは、データ空白域である海域のデータを取得・同化し、細かい空間スケールの海氷過程を取り入れるため、これまで海氷物理過程の詳細が欠落していた海氷モデルのパフォーマンスが飛躍的に向上し、関連分野の研究にも大きなブレークスルーとなることが期待される。

3. 研究の方法

2014 年から 2017 年にかけて、北見工業大学内の屋上実験やサラマ湖の氷上、砕氷船による北極海や南極海での現地観測を行い、可搬型マイクロ波放射計を用いたマイクロ波帯の放射・散乱・反射特性の測定を実施した。

衛星搭載マイクロ波放射計の観測データと再解析気象データのデータ同化を行い、融解や積雪などの海氷表面状態の季節変化に起因する誤差を補正し、海氷厚の推定精度の向上を目指した。

人工衛星搭載の国産マイクロ波放射計 AMSR-E および AMSR2 のデータから、独自に 60 キロメートル分解能の毎日の海氷の動きを導出した。それに加え、同センサーデータから計算された海氷密接度を用いて、毎日の海氷面積の正味増加量・減少量を 60 キロメートルの分解能で算出し、2003 年以降毎日のデータセットを作成した。さらに、衛星搭載の光学センサー MODIS の可視画像をもとに、数時間の時間間隔での 5 キロメートル分解能での海氷漂流速度を計算し、細かい空間スケールでの海氷現象の解析を行った。

北極海の海氷海洋結合モデル (De Silva et al., 2015) をベースとして、北極海航路域に特化した水平解像度 2.5 km の高解像度モデルを構築した。北極海航路域における海氷分布の予測精度に与える観測データのインパクトを調べるために、モデルに観測データを取り込むデータ同化の手法を適用し、一週間程度の海氷短期予測を実施した。同化した観測データは高層気象データである。また、大気と海洋の観測データを同化した気候モデルを用いて北極海全域の海氷面積の予測可能性を調べ、鍵となる物理過程を明らかにした。また、別のアプローチとして、衛星リモートセンシングより得られる海氷データ（海氷密接度、海氷漂流速度、海氷厚）を同化する研究も行った。

4. 研究成果

衛星搭載マイクロ波放射計 AMSR-E および AMSR2 の観測データから海氷厚を推定するアルゴリズムを開発し、現地観測から得られた実測海氷厚や気象データと比較することで、融解や積雪の影響を受けて推定海氷厚に誤差が生じることがわかった(図1)。マイクロ波放射計の観測データから海氷の融解度を定量化する手法を開発し、融解の度合いが小さい海水域・期間に限定して海氷厚を推定した。

衛星データと海氷表面温度の客観解析データを同化することで海氷厚の推定誤差の低減に成功した(図2, Tateyama et al., 2018)。積雪深の補正に関しては他の衛星データや客観解析データを用いたデータ同化手法を開発中である。

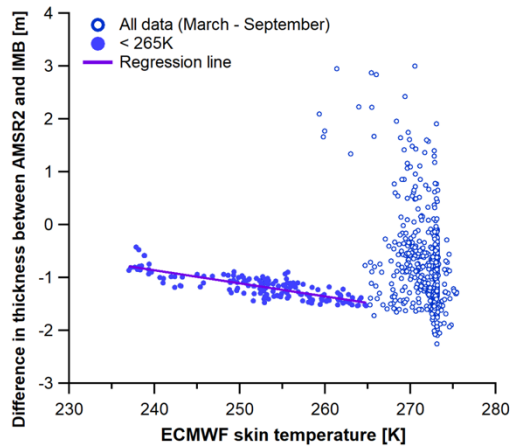


図1 海氷表面温度と氷厚差(衛星データから推定した氷厚と現地氷厚の差)の関係

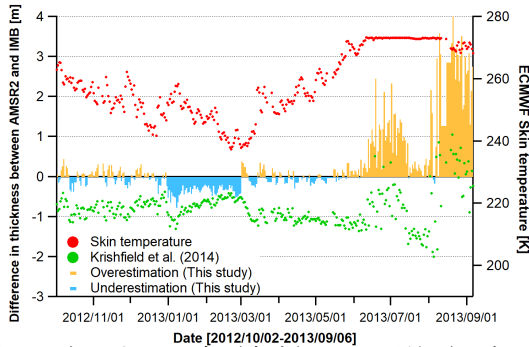


図2 海氷表面温度(赤点)と氷厚差(緑点:補正前, 青・橙棒:補正後)の季節変化の例(2012年10月から2013年9月)

現場での観測データと比較しても毎日の海氷漂流速度データの精度は高く、それは数値モデルの結果の検証と改良のために非常に有用であった。日々の海氷増加・減少を解析した結果、海水域内部での海氷の変形が北極海での海氷の厚さ変化に大きな役割を果たしていることがわかった。可視画像から計算した高解像度の海氷漂流速度には細かいスケールの渦や不均質な海氷の動きが見られた。また、それらの細かいスケールの現象が氷縁での海氷融解や海水域内部での海氷

の厚さ変化に影響を及ぼしうるということがわかった。(図3)

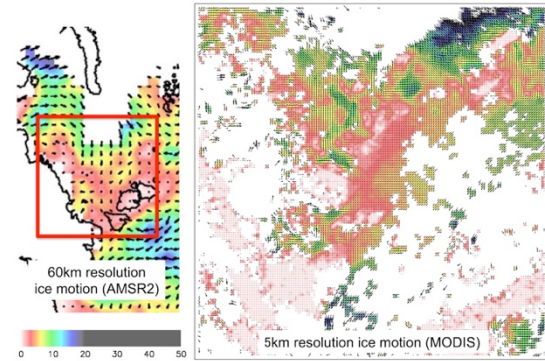
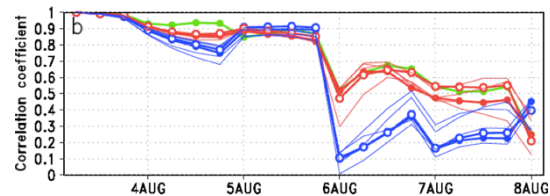


図3 AMSR2 と MODIS によるカラ海の水氷漂流速度(2016年6月15日の例)

2012年8月6日に急速に発達した巨大低気圧が北極海航路上の海氷分布に与える影響と海氷予測に対する観測データの効果を調べるために、ドイツ砕氷船から打ち上げられ



たラジオゾンデにより観測された高層気象データを考慮した場合と考慮しない場合の大気強制データで北極航路域を対象とした高解像度の海氷海洋結合モデルを駆動し、海氷短期予測を行なった。モデルと観測で得られた海氷分布の相関係数の時間発展から、ラジオゾンデを考慮した場合の方が海氷分布の予測精度は高く、特に低気圧が強まる8月6日から7日にかけてその差は大きくなることが示された(図4, Ono et al., 2016)。この結果から、ラジオゾンデ観測によるデータ(特に風)を数値モデルに取り入れることは北極海航路上の海氷分布を精度良く予測するために効果的であることが示唆された。また、気候モデルを用いた北極海の海氷面積の予測可能性を調べた。夏季は海水状態の持続性が、冬季は北大西洋からバレンツ海に流入する亜表層水が海氷面積の予測精度に重要な役割を果たしていることが示唆された(Ono et al., 2018)。海氷観測データを同化する研究では、例えば海氷密接度のみを同化しても、海氷の分布特性が現実のものに近づくので同化していないパラメータである海氷漂流速度も海氷厚も観測データに近づくという新たな知見が得られた。また、同化により境界条件と初期値が改善されるので、高解像度領域モデルを用いた数値予測も大きく改善された。図5は5日予報による氷縁位置の予測誤差の季節依存性と格子サイズ依存性を表したものである。2.5km格子であれば氷縁誤差は10km程度に止まり、氷海船乗組員が待ち望んでいた精度が遂に達成されたと言える。

図 4 高解像度の海水海洋結合モデルと観測で得られた海水分布の相関係数（予測精度）の時間発展（Ono et al. (2016)の Figure 4b に加筆）。赤：高層気象観測ありの予測。青：高層気象観測なしの予測。緑：ヨーロッパ中期予報センターが提供している再解析データ。

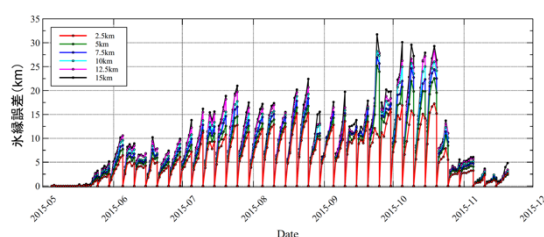


図 5 領域モデルを用いた 5 日海氷予報の氷縁誤差の季節依存性と格子サイズ依存性

引用文献

- (1) De Silva L. W. A., H. Yamaguchi, and J. Ono (2015), Ice-ocean coupled computation for sea ice prediction to support ice navigation in the Arctic Sea Routes, *Polar Research*, 34, 25008.
- (2) Ono, J., J. Inoue, A. Yamazaki, K. Dethloff, H. Yamaguchi (2016), The impact of radiosonde data on forecasting sea-ice distribution along the Northern Sea Route during an extremely developed cyclone. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, 8, 292-303, doi:10.1002/2015MS000552.
- (3) Ono, J., H. Tatebe, Y. Komuro, M. I. Nodzu, and M. Ishii (2018), Mechanisms influencing seasonal-to-interannual prediction skill of sea ice extent in the Arctic Ocean in MIROC. *The Cryosphere*, 12, 675-683, doi:10.5194/tc-12-675-2018.

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 17 件)

- (1) Nihashi, S., N. T. Kurtz, T. Markus, K. I. Ohshima, K. Tateyama, T. Toyota, Estimation of sea-ice thickness and volume in the Sea of Okhotsk based on ICESat data, *Annals of Glaciology*, 査読有、2018、1~11
<https://doi.org/10.1017/aog.2018.8>
- (2) Tanaka, Y., K. Tateyama, S. Hoshino, An algorithm for estimating sea-ice

type from AMSR-E data in the Beaufort Sea, Okhotsk Sea and Polar Oceans Research, 2 巻、査読有、2018、1~6

- (3) Tateyama, K., J. Inoue, S. Hoshino, S. Sasaki, Y. Tanaka, Development of a new algorithm to estimate Arctic sea-ice thickness based on Advanced Microwave Scanning Radiometer 2 data, *Okhotsk Sea and Polar Oceans Research*, 2 巻、査読有、2018、13~18
- (4) Ono, J., Tatebe, H., Komuro, Y., Nodzu, I., Ishii, M., Mechanisms influencing seasonal-to-interannual prediction skill of sea ice extent in the Arctic Ocean in MIROC, *The Cryosphere*, 査読有、12 巻、2018、675-683
doi:10.5194/tc-12-675-2018
- (5) De Silva, L.W.A., Yamaguchi, H., The impact of data assimilation and atmospheric forcing data on predicting short-term sea ice distribution along the Northern sea route, *Okhotsk Sea and Polar Ocean Research*, 査読有、1 巻、2017、1~6
- (6) Mudunkotuwa, D.Y., De Silva, L.W.A., Yamaguchi, H., Improving numerical sea ice predictions in the Arctic Ocean by data assimilation using satellite observations, *Okhotsk Sea and Polar Ocean Research*, 査読有、1 巻、2017
- (7) Ono, J., Inoue, J., Yamazaki, A., Dethloff, K., Yamaguchi, H., The impact of radiosonde data on forecasting sea-ice distribution along the Northern Sea Route during an extremely developed cyclone, *J. Advances in Modelling Earth Systems*, 査読有、8 巻、2016、292~303
10.1002/2015MS000552

- (8) Mizobata, K., Watanabe, E., Kimura, N., Wintertime variability of the Beaufort gyre in the Arctic Ocean derived from CryoSat-2/SIRAL observations, *J. Geophys. Res. Oceans*, 査読有、121 巻、2016、1~15
10.1002/2015JC011218
- (9) Yamaguchi, H., Nakano, Y., Research on navigation support system and optimum route search for the Northern Sea Route、*Proc. 23rd IAHR International Symposium on Ice*, 査読有、2016、1~8
- (10) Tanaka, Y., K. Tateyama, T. Kameda, and J. K. Hutchings, Estimation of melt pond fraction over high-concentration Arctic sea ice using AMSR-E passive microwave data, *J. Geophys. Res. Oceans*, 査読有、121 巻、2016、7056-7072
doi:10.1002/2016JC011876
- (11) De Silva, L.W.A., Yamaguchi, H., Ono, J., Ice-ocean coupled computations for the sea ice prediction to support ice navigation in the Arctic Ocean, *Polar Research*, 査読有、34 巻、2015、1~18
10.3402/polar.v34.25008
- (12) H. Yamaguchi, Development and use of the Arctic Sea Route for shipping, *The Mariners' Digest*, 査読無、37 巻、2015、18~20
- (13) Sugimoto, F., Tamura, T., Shimoda, H., Uto, S., Simizu, D., Tateyama, K., Hoshino, S., Ozeki, T., Fukamachi, Y., Ushio, S., Ohshima, K.I., Interannual variability in sea-ice thickness in the pack-ice zone off Lützow-Holm Bay, East Antarctica, *Polar Science*, 査読有、10 巻、2015、43~51
10.1016/j.polar.2015.10.003
- (14) 田中康弘、舘山一孝、高橋修平、亀田貴雄、榎本浩之、北極海における氷況把握のための画像解析法の開発、一自動化した表面状態判別とその測定結果一、*日本雪氷学会誌・雪氷*、査読有、77 巻 2 号、2015、173~190
- (15) H. Sumata, T. Lavergne, F. Girard-Ardhuin, N. Kimura, M. A. Tschudi, F. Kauker, M. Karcher and R. Gerges, An intercomparison of Arctic ice drift products to deduce uncertainty estimates、*Journal of Geophysical Research*, 査読有、119 巻、2014、4887~4921
DOI:10.1002/2013JC009724
- (16) P. Uotila, P. R. Holland, T. Vihma, S. J. Marsland and N. Kimura, Is realistic Antarctic sea ice extent in climate models the result of excessive ice drift?, *Ocean Modelling*, 査読有、79 巻、2014、33~42
- (17) M. Choi, J. Chung, H. Yamaguchi and K. Nagakawa, Arctic sea route path planning based on an uncertain ice prediction model, *Cold Regions Science and Technology*, 査読有、109 巻、2014、61~69
10.1016/j.coldregions.2014.10.001
- [学会発表] (計 10 件)
- (1) De Silva, L.W.A., Yamaguchi, H., Short-term sea ice forecasting during extreme Arctic cyclone in August 2016 (Young Scientists Poster Award of Excellence)、5th Intern. Symp. on Arctic Research (ISAR-5)、2018 年 1 月 17 日、一橋講堂 (東京都千代田区)
- (2) 山口一、北極の急激な温暖化と北極海航路の可能性、HAS 研第 40 回研究会 (Hitachi アカデミックシステム研究会) 「北極・南極~その現在と未来」(招待講演)、2017 年 10 月 10 日、TKP 東京駅大手町カンファレンスセンター (東京都千代田区)
- (3) 山口一、北極海の商業航路利用に向けて、「南極&北極の魅力」講演会(招待講演)、

- 2017年5月20日、日本印刷会館（東京都中央区）
- (4) 山口一、北極海にどう向き合うか、日本科学ジャーナリスト会議（JAST-J）2016年11月定例会（招待講演）、2016年11月2日、日本プレスセンタービル（東京都千代田区）
- (5) Yamaguchi, H., Nakano, Y., Research on navigation support system and optimum route search for the Northern Sea Route, 23rd IAHR International Symposium on Ice, 2016年5月31日～6月3日、Ann Arbor, Michigan, USA
- (6) Yamaguchi, H.、Sea ice prediction targeting the safe and efficient use of the Northern Sea Route, Special session for Arctic Research Status, Spring Conference of SNAK, Society of Naval Architects of Korea（招待講演）、2016年5月19日、Bexco Conference Center, Busan, Korea
- (7) 木村詞明、衛星リモートセンシングと海水観測 ～北極海航路の航行支援～、電子情報通信学会東北支部学術講演会（招待講演）、2015年12月3日、八戸工業大学（八戸市）
- (8) N. Kimura, H. Yamaguchi、Medium-range forecast of the Arctic sea-ice cover using the satellite observation data, ShipArc2015: Safe and Sustainable Shipping in a Changing Arctic Environment, 2015年8月26日、World Maritime University（マルメ、スウェーデン）
- (9) Hajime Yamaguchi、Research on navigation support system for the Arctic sea routes, “Navigation and Fisheries in the Arctic: Prospects, Problems and International Policies”, Science Symposium ISAR-4/ICARP-III, Arctic Science Summit Week 2015 (Invited Lecture), 29 April 2015, Toyama International Conference Center, Toyama, Japan
- (10) H. Yamaguchi、Recent researches in Japan to support safe and efficient navigation along the Northern Sea Route、22nd IAHR International Symposium on Ice（招待講演）、2014年8月11日～2014年8月15日、Nanyang Technological University (Singapore)

〔図書〕（計8件）

- (1) 山口一 他、（公社）日本海難防止協会、北極海航路ハンドブック 実務編（下巻）、2017年、258
- (2) 山口一 他、（公社）日本海難防止協会、Northern Sea Route Handbook (Practical Edition) Volume II、2017、99
- (3) 山口一 他、（公社）日本海難防止協会、

- 北極海航路ハンドブック 実務編（上巻）、2016年、254
- (4) 館山一孝、古今書院、PartII-6 海洋観測船の生活と調査研究の日々：海を見て、データを集める。『フィールドの見方 FENICS 100万人のフィールドワーカーシリーズ2』、2016、254
- (5) 山口一 他、（公社）日本海難防止協会、Northern Sea Route Handbook (Practical Edition) Volume I、2016、286
- (6) 館山一孝 他、成山堂書店、みんなが知りたいシリーズ2 雪と氷の疑問60 (No. 17, No. 48 執筆担当)、2016、254
- (7) 山口一、（一社）日本船長協会、北極海の航路利用と氷海航行支援システムについて、2015、86
- (8) 山口一 他、（公社）日本海難防止協会、Northern Sea Route Handbook、2015、223

〔産業財産権〕

○出願状況（計0件）

○取得状況（計0件）

6. 研究組織

(1) 研究代表者

山口 一 (YAMAGUCHI, Hajime)

東京大学・大学院新領域創成科学研究科・教授

研究者番号：20166622

(2) 研究分担者

館山 一孝 (TATEYAMA, Kazutaka)

北見工業大学・工学部・准教授

研究者番号：30374789

木村 詞明 (KIMURA, Noriaki) (2015年度まで)

国立極地研究所・北極観測センター・特任研究員

研究者番号：20384647

小野 純 (ONO, Jun)

国立極地研究所・北極観測センター・研究員 (2014年度まで)

国立研究開発法人海洋研究開発機構・気候変動リスク情報創成プロジェクトチーム・特任研究員 (2015年度より)

研究者番号：20451411

羽角 博康 (HASUMI, Hiroyasu) (2016年度より)

東京大学・大気海洋研究所・教授

研究者番号：40311641