

令和 4 年 5 月 12 日現在

機関番号：10101
 研究種目：基盤研究(C) (一般)
 研究期間：2019～2021
 課題番号：19K12304
 研究課題名(和文)北極海の長期包括的観測データに基づく海水変形過程のパラメタリゼーションの開発

 研究課題名(英文)Development of the parameterization of sea ice deformation processes based on the year-round comprehensive data in the Arctic Ocean

 研究代表者
 豊田 威信 (Toyota, Takenobu)

 北海道大学・低温科学研究所・助教

 研究者番号：80312411
 交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円

研究成果の概要(和文)：北極海における数値海水モデルの精度を改善することを目的として、海水変形過程に焦点を当ててオホーツク海や北極海の現場や衛星の観測データを基にパラメタリゼーションを吟味した。現時点では北極海プロジェクトの現場観測データの利用は限られたこと、衛星SAR画像を用いたオホーツク海の変形氷抽出アルゴリズムは北極海には適用が難しいことが判明したため、主としてオホーツク海における変形過程の検討に軌道修正した。観測データに基づいて解析した結果、従来用いられてきた海水氷レオロジーの妥当性や小さな氷盤分布特性から力学的特性を新たに示すことができた。季節海水域化が進む北極域での今後の適用が期待される。

研究成果の学術的意義や社会的意義

現在の気候モデルでは北極海の海水の急激な減少傾向がまだ的確には再現されておらず、モデルの改善が必要とされている。本研究は海水の変形過程に焦点を当て、北極海で実施された観測プロジェクトのデータ等を利用して変形氷域の時間発展の実態から変形過程のパラメタリゼーションの開発を志した。北極海データの利用が限られた現状に鑑み、対象海域をオホーツク海に変更して衛星や現場で取得した観測データに基づいて吟味した結果、従来のパラメタリゼーションの手法を適切に用いれば、変形氷の発達の様子を季節内および経年変動で捉えられることなどが示された。今後、季節海水域化が進む北極海への適用が期待される。

研究成果の概要(英文)：To improve the accuracy of numerical sea ice models for the Arctic Ocean, the parameterization of deformation processes was examined, based on the in-situ and satellite observations. Due to the limited availability of the Arctic project data and the difficulty in applying the algorithm of detecting deformed ice which was developed for the Okhotsk ice to the Arctic Ocean, the research design was modified to the investigation of the deformation processes for the Sea of Okhotsk as a typical seasonal ice zone. The results show that the sea ice rheology which has been adopted in many numerical sea ice models was justified to reproduce the real deformed ice to some extent, and suggest the self-similar properties of deformation in the wide range of horizontal scales, based on the measurements of size distribution of floes smaller than 10 m. These results are expected to be applied for the Arctic Ocean where the fraction of seasonal ice zone is increasing.

研究分野：海水科学

キーワード：海水力学過程 北極海 リモートセンシング レオロジー パラメタリゼーション 海水漂流速度 数値海水モデル 氷厚分布

1. 研究開始当初の背景

海氷は海洋から大気へ放出される多大な熱を遮断し、また高いアルビードの故に日射量を大幅に減らす役割を持つため、海氷域は地球の気候システムの中で重要な役割を果たしている。近年の北極海海氷面積の減少が広く中緯度に寒冷な冬をもたらすことも指摘されており、将来の気候予測を行う気候モデルの中で海氷域の振る舞いが精度良く再現されることが望ましい。しかしながら、現在気候モデルで用いられている海氷モデルは北極海における氷況の変化を十分には予測できていない。特にモデルの平均氷厚の減少率は観測の約 4 分の 1 程度であることから、海氷力学過程の取り扱いを改善する必要性が指摘されてきた。現在のモデルに組み込まれている海氷力学過程は基本的には約 40 年前の厚い (~3 m) 多年氷が卓越する北極海の季節変化を再現することを目的として開発されたものであり、季節海氷域化の進行により氷厚が約半分減少した現在の北極海においての有用性は検証する必要がある。

季節海氷域の氷厚発達過程で本質的な役割を担うのは氷の変形過程であることが研究代表者等による観測研究から明らかになった。北極海で季節海氷域の割合が増えている今、変形過程の定量化が早急に求められていると言える。変形過程は通常サブグリッドスケール (< 1 km) で生じることを考慮すると、適切なパラメタリゼーションの開発は喫緊の課題である。

変形過程のパラメタリゼーションにおいて本質的な役割を担うのは海氷レオロジーの定式化の手法である。従来の数値海氷モデルでは、海氷域は通常の大さの応力で二次元塑性体として振舞うとして定式化された Hibler (1979) のレオロジーが用いられてきた。塑性体の振る舞いを支配する降伏曲線をアスペクト比 2 の楕円として定式化した点に特徴がある。この定式化の手法が領域やモデルの分解能に依らずほぼ一律に適用されてきたが、観測からこの定式化の可否を検証した研究は非常に限られており、しかも多年氷が卓越する過去の北極海を対象としたものであった。季節海氷域化が進む現在の北極海に対する有用性は観測に基づく検証が必要である。また、Hibler による定式化の物理的な意味合いは必ずしも明瞭ではなく改善を行う際の障壁となっていた。

そこで、研究代表者は分担者と共同して季節海氷域のオホーツク海を対象として Hibler のレオロジーの検証を試みた (Toyota & Kimura, 2018)。まず、Hibler が用いた降伏曲線が塑性理論から導かれる降伏曲線と比較的良く合致することを見出して物理的な根拠を与えることに成功した。次に海氷速度データ等を用いて変形過程の理論的観点から検証を行った結果、時間や空間のスケールに依らず本質的には Hibler の定式化と整合的な結果が得られた。しかしながら一方、季節海氷域は氷盤の大きさが比較的小さいが故に海氷速度分布の空間変動が大きく、サブグリッドスケール (< 10 km) の速度収束成分をグリッドスケール (~ 数 10 km) の速度成分から見積もることの困難さが指摘され、新たなパラメタリゼーションを開発する必要性が提起された。サブグリッドスケールの速度収束場は海氷の変形過程と直結しているため氷厚分布の予測の精度を高めるために本質的な課題といえる。

2. 研究の目的

以上の学術的背景に基づき、次の通り本研究課題の学問的な問いを立てた。「季節海氷域が増大しつつある北極海において、数値海氷モデルにおけるサブグリッドスケールの海氷の変形過程をパラメタライズするにはどのような物理過程を考慮する必要があるか？」

この問いに直接関連する観測が 2019 年 10 月 ~ 2020 年 10 月にかけて北極海中央部で実施された。Multidisciplinary drifting Observatory for the Study of Arctic Climate (MOSAiC) と呼ばれる大掛かりな国際共同観測プロジェクトであり、船を特定の氷盤の上に固定して漂流させ、周囲約 40km 以内の詳細な氷厚や海氷速度の分布など力学的パラメータの観測を約一年間にわたって継続的に実施する計画であった。本研究はこの機会を利用して、得られた観測データを基に海氷変形過程のパラメタリゼーションの開発を志した。

本研究の目的は、北極海国際観測プロジェクト (MOSAiC) で得られるサブグリッドスケールの海氷速度や氷厚分布等のデータを衛星から得られる広域のデータと組み合わせることで解析することにより、季節海氷域化が進む北極海における海氷力学過程の理解を改善するとともに、数値海氷モデルにおける海氷の変形過程のパラメタリゼーションの手法を開発してモデルの精度向上に資することである。一方、北極海観測データの取得が計画通りに進まなかった場合に備えてオホーツク海でも観測を行い、変形過程の理解に寄与することとした。

3. 研究の方法

(1) 北極海およびオホーツク海における現場観測

MOSAiC プロジェクトでは研究協力者 (Christian Haas, Jennifer Hutchings) の主導で継続的に氷厚データや漂流ブイの観測データを取得した。しかしながら、先方の事情もあって利用可能な北極海現場データは氷厚データ等に限定されるという現実に直面し、オホーツク海の観測データを最大限に活用して本研究課題に役立てる方針に軌道修正した。

(2) 衛星データの検証および解析

研究分担者（木村）は AMSR2 と MODIS の衛星データを用いて異なる分解能で北半球全体の日々の海水漂流速度データを作成する。研究代表者は北極海やオホーツク海で得られた観測データを基に衛星 L-band SAR データを用いて変形氷域を抽出するアルゴリズムを作成・検証する。

(3) パラメタリゼーションの開発および数値モデルへの応用

まず MOSAiC データを用いてサブグリッドスケールでの海水速度の変形場と氷厚分布の時系列データセットを作成する。次に衛星から得られたグリッドスケールの変形場・氷厚分布と比較して両スケール間での相関性を見出しパラメタリゼーションの開発を行う。そして最終的には研究協力者（Hutchings、三寺）と協力して数値海水モデルの改善を目指す。各観測データは準リアルタイムに入手可能であるので初年度～二年度は 1) と 2)、それに変形過程の理論構築の準備を中心に、三年度は 3) を中心に進める予定とした。

本研究の成果は、モデルの中でサブグリッドスケールの変形過程が改善されることにより気候モデルにおける氷域の振る舞い、特に氷厚分布変動の予測が改善され、その結果として気候モデル全体の予測精度が向上することが期待される。

4. 研究成果

(1) 変形氷を抽出するアルゴリズムの開発

変形氷を抽出するには、水平分解能が高く、変形氷のスケールの表面粗度に敏感で、昼夜問わず観測可能な衛星 L-band SAR 画像が有効と考えられている。そこで、まずは身近で観測データが十分にあるオホーツク海の海水を対象として、季節氷域を想定して ALOS/PALSAR 画像データを用いて変形氷を薄氷や蓮葉氷と識別するアルゴリズムを現場データと照らし合わせながら入射角の関数として作成した（図 1）。得られた入射角依存性は従来他海域で推定されたものとほぼ合致しており信憑性が得られた。さらに、最近の ALOS-2/PALSAR-2 画像データ（2016～2019）を用いてこのアルゴリズムの現場検証観測を実施した。その結果、同時観測の観測点ではアルゴリズムとほぼ整合的な結果が得られることが確認された。

しかしながら、観測を実施した 4 年間のうち最も変形氷が卓越した 2018 年と最も薄い氷が卓越した 2016 年で全体的に同程度のシグナルを示すという矛盾も明らかになった。この原因を目標観測など他のデータも照合して調べた結果、氷盤の大きさ分布も SAR のシグナルに影響を与えていることが分かった。すなわち、図 2a に示すように小さい氷盤が卓越する氷域では大きな氷盤に比べて氷縁を数多く持つことになる。この氷縁は水面から屹立しているため大きな散乱をもたらす。この効果が変形氷の表面凹凸による散乱と同程度になるため 2016 年（図 2a）と 2018 年（図 2b）で同程度のシグナルを与えたと推測された。HH 偏波でみると氷盤の全周囲長が 4 倍になれば、表面粗度の 2 倍と同程度の寄与があり、後方散乱係数 (σ_{HH}^0) は 4-6 dB 増加すると見積もられた。この結果は、小さな氷盤が形成されやすい氷縁域では高いシグナルが観測されがちであり、アルゴリズムの解釈に注意を要することを示す。また、氷盤の大きさに対する感度は HV 偏波の方が高いことも分かった。これらの成果は季節氷域を対象とした観測に基づく研究としては初めてのものであり、論文として公表された（Toyota et al., 2021）。

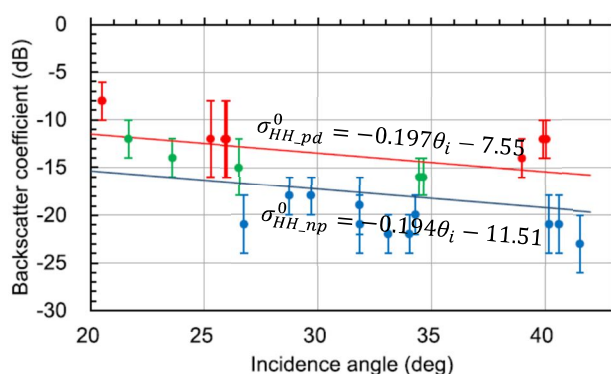


図 1. 後方散乱係数 (σ_{HH}^0) と入射角 (θ_i) を関数とした海水種類識別のアルゴリズム。図中、赤：変形氷、緑：蓮葉氷、青：薄氷（ニラス）を示す。

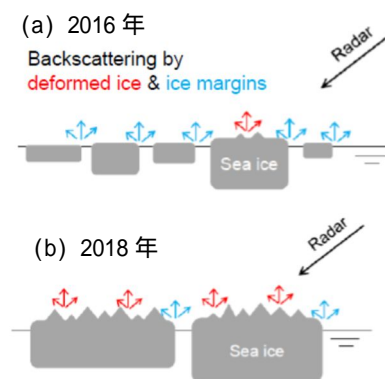


図 2. 変形氷の表面凹凸と氷盤の大きさ分布が散乱特性に与える影響の概念図

次に、上で求めたアルゴリズムが北極海で適用可能かどうかを ALOS-2/PALSAR-2 を現場観測で得られた氷厚データと比較して検証した。氷厚データは MOSAiC プロジェクト期間中に航空機に搭載された電磁誘導センサー（EM bird）を用いて取得された。変形氷はおおよそ氷厚が厚い海水で代表されると仮定して、アルゴリズムから推定される変形氷域が実際の氷厚分布とどの程度合致するかという観点から検証を行った。氷厚観測は船の周囲で合計 15～20 回程度実施され、そのうち PALSAR-2 画像の観測時間との時間差が一日以内であった 2020 年 4 月 10 日と 2020 年 6 月 19 日のデータを解析の対象とした。観測場所はどちらもフラム海峡内であった。

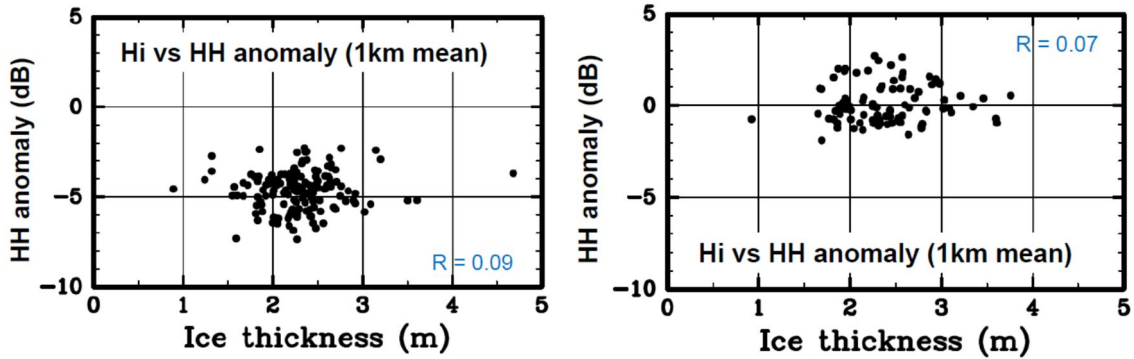


図3. 北極海で1km平均の氷厚とHH anomalyの相関図。(左)2020年4月10日(右)2020年6月19日

変形の度合い(～氷厚)に対応するシグナルは図1の閾値からの偏差($\sigma_{HH}^0 - \sigma_{HH, pd}^0$)で定義されるHH anomalyと考えられる。氷厚測定時間と衛星観測時間の半日程度の差を考慮して1km平均で氷厚とHH anomalyの相関を見たのが図3である。両日ともに両者に有意な相関は見られずオホーツク海のアルゴリズムを北極海に適用するには改良が必要なが分かる。その要因は観測時間の差による直接比較の困難さ(漂流の影響)、氷厚と表面凹凸の対応の困難さ(多年氷の影響)、季節進行によるシグナルの変化(表面融解の影響)などが考えられ、いずれも一筋縄には行かない問題である。元の σ_{HH}^0 分布図は変形氷の分布特性をある程度捉えているので改良の可能性はあるものの、 σ_{HH}^0 と氷厚(表面粗度)の直接比較に基づく手法は必ずしも得策とは言えない。そこで、本研究では季節海氷域の変形過程の解明の方向に少々軌道修正した。北極海の季節海氷域化が進んでいる現状を考えると本研究課題に即した方向づけと判断した。

(2)海水変形過程の理論の吟味

オホーツク海南部では巡視船を用いて1996～2020年の期間ほぼ同じ海域で継続して海氷観測が実施されてきた。この期間、国際標準に則った手法で目視観測を毎正時行い、変形氷の情報を含んだ海氷データを蓄積した。このデータを用いて変形氷が卓越した年と卓越しなかった年で漂流速度分布にどのような違いがあったかを吟味して、現在多くの数値海氷モデルで用いられている変形過程のパラメタリゼーションの妥当性を調べることにした。ちなみに、目視観測といえども観測から見積られた平均氷厚($0.64 \pm 0.38m$)は係留計で計測された平均喫水厚($0.60m$)とほぼ同じであり、定量的な議論に堪えうることは確認された。観測の統計からは各年の平均氷厚は変形氷の占める面積や体積と高い相関があり、この海域の氷況を予測するには変形過程は本質的な役割を果たすことも明らかになった。

直感的には海水の変形の度合いは漂流速度の収束($-div \mathbf{v}$)で表現されそうであるが、本研究で用いたグリッド間隔60kmの漂流速度で計算された収束は必ずしも変形度の良い指標とはならない。例えば、漂流速度データが存在する2003-2020年について1～2月の時系列を示したのが図4である。変形氷が卓越した年が必ずしも強い収束場になっていないことが分かる。

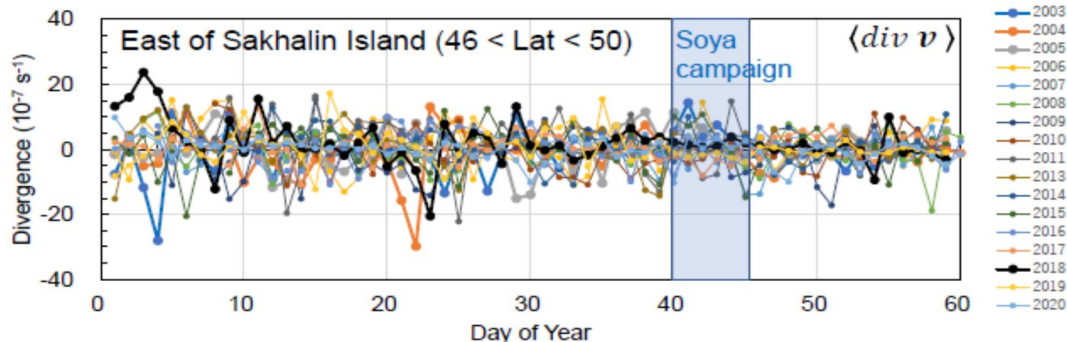


図4. 漂流速度場の発散をサハリン東方($46^\circ - 50^\circ N$)の平均の各年の時系列(2003-2020) 太い実線は変形氷が特に卓越してオホーツク海南部の海氷量が顕著に多かった年。

これは、通常変形過程は水平スケール1km以下のサブグリッドスケールで生じており、純粋なシア場(収束ゼロ)であっても局所的には収束(すなわち変形)が起こりうるからである。局所的な収束を予測するためには海氷レオロジーの理論に基づいたパラメタリゼーションが必要である。ここでは、多くの数値海氷モデルで用いられているHibler(1979)のViscous-plasticレオロジーを用いる。ここで、海氷域内で海水にかかる応力がなす仕事率はすべて変形過程に用いられるという前提に立ったRothrock(1975)の理論の次式を用いる。

$$\dot{W} = \sigma_I \dot{\epsilon}_I (\text{divergence}) + \sigma_{II} \dot{\epsilon}_{II} (\text{shear}) = |\dot{\epsilon}| \alpha_r(\theta) P, \quad |\dot{\epsilon}| = \sqrt{\dot{\epsilon}_I^2 + \dot{\epsilon}_{II}^2}, \quad \theta = \tan^{-1}(\dot{\epsilon}_{II}/\dot{\epsilon}_I)$$

ここで $\alpha_r(\theta)$ は塑性体の降伏曲線から理論的に定まる関数である。 P を一定として \dot{W} を図4と同じ領域で積分した物理量は理想的には変形の度合いを直接表現するものである。その時系列を図5に示す。図4と比較して、変形氷が顕著に卓越した年が浮き彫りになって見える。

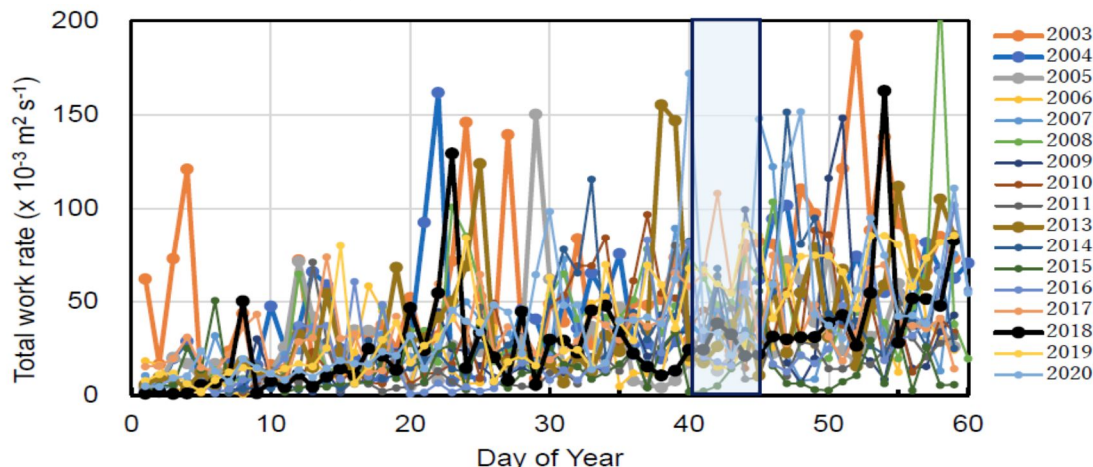


図5.漂流速度場から計算される、図4と同じ領域で積分した仕事率の各年の時系列

図5のピークが変形過程に対応することは PALSAR-2 を用いた変形氷抽出アルゴリズムからも確かめられた。各ピークは低気圧の通過と関連しており、変形過程は徐々にというよりは間歇的に生じることを示す。見方を変えれば、季節海氷域においては現在多用されている変形過程のパラメタリゼーションでも適切に用いられれば変形過程を十分表現しうることを示唆している(論文投稿準備中)。

(3)小さい氷盤の氷盤分布特性

変形過程は氷盤の大きさに応じて数 m ~ 数 km の幅広い水平スケールで生じる。従って、幅広いスケールで氷盤分布の特性を把握しておく必要がある。近年、氷盤分布の観測は精力的に進められているが、これまでのデータはほとんどが大きさ数十 m 以上の氷盤が中心であり、大きさ 10m 以下の氷盤分布特性は未知であった。小さな氷盤の分布特性は融解の影響が大きく受けるため、実態の把握は融解過程の理解にも役立つ。

そこで、オホーツク海南部において、2020年2月に巡視船「そうや」を用いて小さな氷盤を対象とした氷盤分布の観測をドローンを用いて実施した。特に直径 15m 以下の小さな氷盤に着目して約 20000m²の面積の海氷域で約 12000 個の氷盤の画像解析を行った結果、氷盤の累積個数分布は大きさ 0.8 m 以上ではほぼ指数-1.35 のべき乗側に従い、氷盤の代表的なアスペクト比は 1.73 であることなど自己相似な特徴が明らかになった(図6)。これらの特徴は大きさ数 m ~ 数 km の氷盤についてこれまで知られていた特徴と符合しており、大きさ約 1m 以上の氷盤については変形過程の力学的性質においても自己相似性があることを示唆する。このことは現在のパラメタリゼーションの手法にある程度の正当性を与えたと考えている。氷盤分布の結果を基に融解過程についての定量的な議論も試みられた(論文執筆中)。

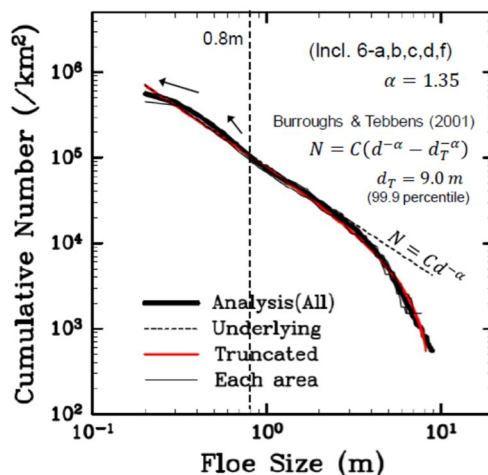


図6.氷盤の単位面積当たりの積算個数分布
黒実線：計測値、赤実線：観測面積の有限性を考慮したべき乗関数、破線：理想的なべき乗関数

以上のように、当初予定していた北極海氷そのものを対象とした変形過程のパラメタリゼーションの開発には至らなかったものの、季節海氷域における観測データに基づいて従来用いられてきた海氷レオロジーの妥当性や力学的特性を新たに示せたことは意義ある成果であり、季節海氷域化が進む北極域で今後の適用が期待される。

<引用文献>

- Hibler, W.D. III (1979): *J. Phys. Oceanogr.*, 9, 815-846.
 Rothrock, D.A. (1975): *J. Geophys. Res.*, 80(33), 4514-4519.
 Toyota, T. & Kimura, N. (2018): *J. Geophys. Res.*, 123(2), 1406-1428.
 Toyota, T., Ishiyama, J., & Kimura, N. (2021): *IEEE Trans. on Geosci. Remote Sens.*, 59(11), 9361-9381

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計16件（うち査読付論文 14件／うち国際共著 9件／うちオープンアクセス 8件）

1. 著者名 Toyota Takenobu, Ono Takashi, Tanikawa Tomonori, Wongpan Pat, Nomura Daiki	4. 巻 61
2. 論文標題 Solidification effects of snowfall on sea-ice freeze-up: results from an onsite experimental study	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Annals of Glaciology	6. 最初と最後の頁 299 ~ 308
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1017/aog.2020.49	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する
1. 著者名 Wongpan Pat, Nomura Daiki, Toyota Takenobu, Tanikawa Tomonori, Meiners Klaus M., Ishino Tomomi, Tamura Tetsuya P., Tozawa Manami, Nosaka Yuichi, Hirawake Toru, Ooki Atsushi, Aoki Shigeru	4. 巻 61
2. 論文標題 Using under-ice hyperspectral transmittance to determine land-fast sea-ice algal biomass in Saroma-ko Lagoon, Hokkaido, Japan	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Annals of Glaciology	6. 最初と最後の頁 454 ~ 463
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1017/aog.2020.69	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する
1. 著者名 Saiki Ryu, Mitsudera Humio, Fujisaki-Manome Ayumi, Kimura Noriaki, Ukita Jinro, Toyota Takenobu, Nakamura Tomohiro	4. 巻 190
2. 論文標題 Mechanism of ice-band pattern formation caused by resonant interaction between sea ice and internal waves in a continuously stratified ocean	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Progress in Oceanography	6. 最初と最後の頁 102474 ~ 102474
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.pocean.2020.102474	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する
1. 著者名 Toyota Takenobu, Ishiyama Junno, Kimura Noriaki	4. 巻 59
2. 論文標題 Measuring Deformed Sea Ice in Seasonal Ice Zones Using L-Band SAR Images	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing	6. 最初と最後の頁 9361 ~ 9381
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/TGRS.2020.3043335	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Maeda Ken, Kimura Noriaki, Yamaguchi Hajime	4. 巻 39
2. 論文標題 Temporal and spatial change in the relationship between sea-ice motion and wind in the Arctic	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Polar Research	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.33265/polar.v39.3370	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Kimura Noriaki, Tateyama Kazutaka, Sato Kazutoshi, Krishfield Richard A., Yamaguchi Hajime	4. 巻 39
2. 論文標題 Unusual drift behaviour of multi-year sea ice in the Beaufort Sea during summer 2018	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Polar Research	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.33265/polar.v39.3617	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 Zhang, W., N. Ebuchi, Y. Fukamachi, F. Cheng, K.I. Ohshima, B.M. Emery, T. Toyota, H. Abe, and K. Shirasawa	4. 巻 58
2. 論文標題 Sea ice observation with oceanographic HF Radar	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing	6. 最初と最後の頁 378-390
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/TGRS.2019.2936576	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Nomura, D., WONGPAN P., TOYOTA, T., TANIKAWA T., KAWAGUCHI Y., ONO T., ISHINO T., TOZAWA, M., TAMURA, T.P., YABE I. S., SON E. Y., VIVIER F., LOURENCO A., LEBRUN M., NOSAKA Y., HIRAWAKE T., OOKI A., AOKI S., ELSE B., FRIPIAT F., INOUE J., VANCOPPENOLLE M.	4. 巻 38
2. 論文標題 Saroma-ko Lagoon Observations for sea ice Physico-chemistry and Ecosystems 2019 (SLOPE2019)	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Bulletin of Glaciological Research	6. 最初と最後の頁 1~12
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.5331/bgr.19R02	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 Toyota, T., Y. Arihara, T. Waseda, M. Ito, and J. Nishioka	4. 巻 36
2. 論文標題 Observations of ice cakes with a drone in the southern Sea of Okhotsk	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Proceedings of the 36th International Symposium on Okhotsk Sea & Polar Oceans 2022	6. 最初と最後の頁 237 ~ 240
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Uto, S., and T. Toyota	4. 巻 36
2. 論文標題 Evaluation of ship resistance in ice regime using ice chart	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Proceedings of the 36th International Symposium on Okhotsk Sea & Polar Oceans 2022	6. 最初と最後の頁 124 ~ 127
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Toyoda Takahiro, Kimura Noriaki, Urakawa L. Shogo, Tsujino Hiroyuki, Nakano Hideyuki, Sakamoto Kei, Yamanaka Goro, Komatsu Kensuke K., Matsumura Yoshimasa, Kawaguchi Yusuke	4. 巻 57
2. 論文標題 Improved representation of Arctic sea ice velocity field in ocean?sea ice models based on satellite observations	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Climate Dynamics	6. 最初と最後の頁 2863 ~ 2887
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s00382-021-05843-4	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Veytia Devi, Bestley Sophie, Kawaguchi So, Meiners Klaus M., Murphy Eugene J., Fraser Alexander D., Kusahara Kazuya, Kimura Noriaki, Corney Stuart	4. 巻 129
2. 論文標題 Overwinter sea-ice characteristics important for Antarctic krill recruitment in the southwest Atlantic	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Ecological Indicators	6. 最初と最後の頁 107934 ~ 107934
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.ecolind.2021.107934	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

〔学会発表〕 計29件（うち招待講演 1件 / うち国際学会 22件）

1. 発表者名 豊田威信、小野貴司、谷川朋範、Pat Wongpan、野村大樹
2. 発表標題 降雪が結氷初期の海氷凍結過程に及ぼす影響について
3. 学会等名 日本海洋学会2020年度秋季大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Toyota, T., J. Ishiyama, N. Kimura
2. 発表標題 Measuring deformed sea ice area in seasonal ice zones using L-band SAR images
3. 学会等名 The 11th Symposium on Polar Science (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Toyota, T., J. Ishiyama, N. Kimura
2. 発表標題 Algorithm to detect deformed sea ice area in seasonal ice zones using L-band SAR images
3. 学会等名 American Geophysical Union 2020 Fall Meeting (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Singha, S., G. Spreen, T. Krumpen, M.W. Davidson, S. Sobue, S. Howell, R. Kwok, M. Jose, S. Zecchetto, L. Frulla, H. C. Kim, M. Battagliere, T. Toyota, E. Schwarz
2. 発表標題 Year-round Satellite Multi Frequency Synthetic Aperture Radar Observations During the MOSAiC Expedition
3. 学会等名 American Geophysical Union 2020 Fall Meeting (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Toyota, T., C. Haas, G. Spreen
2. 発表標題 Validation of the algorithm with L-band SAR data for detecting deformed sea ice area in the Arctic Ocean
3. 学会等名 The Joint PI Meeting of JAXA Earth Observation Missions FY2020 (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Toyota, T., N. Kimura, J. Nishioka, M. Ito, D. Nomura, H. Mitsudera
2. 発表標題 The interannual variability of the ice conditions in the southern Sea of Okhotsk and its likely factors
3. 学会等名 Joint Seminar on Mombetsu Sea Ice Symposium 2021 ~ focusing on the Okhotsk Sea and Polar Oceans ~ (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 豊田威信
2. 発表標題 合成開口レーダーを用いた変形氷抽出の試み
3. 学会等名 ArCS II 北極海航路課題・2020 年度報告会 (招待講演)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Kimura, N., H. Hasumi, H. Yamaguchi
2. 発表標題 Summary of the medium-range forecast of the Arctic sea ice
3. 学会等名 The 11th Symposium on Polar Science (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Toyota, T. and J. Ishiyama
2. 発表標題 Retrieval of Deformed Sea Ice Area in the Southern Sea of Okhotsk Using Satellite L-band SAR Images
3. 学会等名 2019 Living Planet Symposium (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Toyota, T. and J. Ishiyama
2. 発表標題 Retrieval of Deformed Sea Ice Area in the Seasonal Ice Zone Using Satellite L-band SAR Images
3. 学会等名 International Union of Geodesy and Geophysics General Assembly (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Toyota, T., and J. Ishiyama
2. 発表標題 Application of ALOS-2/PALSAR-2 for detecting sea-ice-surface features in the seasonal ice zone "
3. 学会等名 International Glaciological Society 2019 Sea Ice Symposium (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Nihashi, S., N. T. Kurtz, and T. Toyota
2. 発表標題 Sea-ice thickness and volume in the Sea of Okhotsk estimated on the basis of ICESat and CryoSat-2 data
3. 学会等名 International Glaciological Society 2019 Sea Ice Symposium (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Fraser, A., N. Ramm, J. Cartwright, N. Kimura, R. Massom, T. Toyota, and P. Heil
2. 発表標題 First-year-sea-ice thickness in the Weddell Sea from microwave backscatter
3. 学会等名 International Glaciological Society 2019 Sea Ice Symposium (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Hwang, B., and T. Toyota
2. 発表標題 New high-resolution sea-ice floe-size distribution results from US Geological Survey LIDP imagery
3. 学会等名 International Glaciological Society 2019 Sea Ice Symposium (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 豊田威信
2. 発表標題 巡視船「そうや」の観測を通して見えてきたオホーツク海海水の特性
3. 学会等名 環オホーツクシンポジウム
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 豊田威信、小野貴司、谷川朋範、Pat Wongpan、野村大樹
2. 発表標題 雪が結氷初期の海水成長に及ぼす影響について - サロマ湖における観測の事例解析 -
3. 学会等名 雪氷研究大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 木村詞明、羽角博康
2. 発表標題 南北両半球における海水の履歴情報マッピング
3. 学会等名 日本海洋学会秋季大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Toyota, T., C. Haas, and G. Spreen
2. 発表標題 Validation of the algorithm with L-band SAR data for detecting deformed sea ice area in the Arctic Ocean
3. 学会等名 The Joint PI meeting of JAXA Earth Observation Missions FY2019 (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Kimura, N., and H. Hasumi
2. 発表標題 Analysis of the trajectory and history of drifting sea ice in the Arctic and Antarctic
3. 学会等名 International Symposium on Okhotsk Sea and Polar Oceans (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Toyota, T., J. Ishiyama, N. Kimura
2. 発表標題 On the possibility of detecting deformed sea ice area in the seasonal ice zone with ALOS-2/PALSAR-2
3. 学会等名 Sixth International Symposium on Arctic Research (online meeting due to cancellation) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Kimura, N., and H. Hasumi
2. 発表標題 A new way to derive the sea ice thickness from satellite observation data
3. 学会等名 Sixth International Symposium on Arctic Research (online meeting due to cancellation) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Toyota, T., N. Kimura, J. Nishioka, M. Ito, D. Nomura, and H. Mitsudera
2. 発表標題 The interannual variability of the ice conditions in the southern Sea of Okhotsk and its likely factors
3. 学会等名 American Geophysical Union 2021 Fall Meeting (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Toyota, T., Y. Arihara, T. Waseda, M. Ito, J. Nishioka
2. 発表標題 Observations of ice cakes with a drone in the southern Sea of Okhotsk
3. 学会等名 The 36th International Symposium on the Okhotsk Sea & Polar Oceans (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Uto, S., T. Toyota
2. 発表標題 Evaluation of ship resistance in ice regime using ice chart
3. 学会等名 The 36th International Symposium on the Okhotsk Sea & Polar Oceans (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Toyota, T., C. Haas, G. Spreen
2. 発表標題 Validation of the algorithm with L-band SAR data for detecting deformed sea ice area in the Arctic Ocean
3. 学会等名 The 7th ALOS-2 PI Workshop (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 豊田威信、木村詞明、西岡純、伊藤優人、野村大樹、三寺史夫
2. 発表標題 オホーツク海南部の海水量の年々変動特性とその要因
3. 学会等名 日本海洋学会2021年度秋季大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Kimura, N., Hasumi, H., Oyama, M., Yamaguchi, H.
2. 発表標題 Interannual variability of sea-ice age distribution in the Arctic
3. 学会等名 The 12th Symposium on Polar Science (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 木村詞明、羽角博康、大山元夢、山口一
2. 発表標題 北極海における海水年齢分布の変化
3. 学会等名 日本気象学会2021年度秋季大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Kimura, N., Hasumi, H., Oyama, M., Yamaguchi, H.
2. 発表標題 Recent change of sea-ice age distribution in the Arctic
3. 学会等名 The 36th International Symposium on the Okhotsk Sea and Polar Oceans (国際学会)
4. 発表年 2022年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	木村 詞明 (KIMURA Noriaki) (20374647)	東京大学・大気海洋研究所・特任研究員 (12601)	

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究協力者	三寺 史夫 (MITSUDERA Humio)	北海道大学・低温科学研究所・教授 (10101)	
研究協力者	ハース クリスティアン (HAAS Christian)	アルフレッド・ウェーゲナー極地海洋研究所・海水部門・教授	
研究協力者	ハッチングス ジェニファー (HUTCHINGS Jennifer)	オレゴン州立大学・地球・海洋・大気科学部門・准教授	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------