

令和 4 年 6 月 15 日現在

機関番号：12601

研究種目：国際共同研究加速基金（国際共同研究強化）

研究期間：2018～2021

課題番号：17KK0083

研究課題名（和文）大西洋側北極海における近慣性内部重力波と乱流熱輸送：地球温暖化増幅の実態評価

研究課題名（英文）Observational study of turbulent heat and near-inertial internal waves under perennial sea ice in the Arctic Ocean: Assessment of the global warming

研究代表者

川口 悠介（Kawaguchi, Yusuke）

東京大学・大気海洋研究所・助教

研究者番号：00554114

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 11,200,000円

渡航期間： 6ヶ月

研究成果の概要（和文）：地球温暖化の北極海への影響を調査するべく、ドイツの砕氷船を用いた国際観測プロジェクト「MOSAIC」に参加し、計画通りの海氷・海洋の物理プロセスに関する現場調査を実施した。本プロジェクトでは、海水と熱の動きを高頻度に観測するシステムを用いて、海氷直下の熱輸送に関する正確な調査を行った。この調査から海氷が融解してできた低塩分な表層水が、海水が再び結氷するための重要な要素であることが実証された。低塩な解け水があることによって、海水の結氷点が通常の海水よりも高く（0 に近い）なるため、わずかな冷却でも結氷可能となる。

研究成果の学術的意義や社会的意義

北極海で進行している海氷量の変動（主に減少）は、地球温暖化のグローバルな影響を示す上でもっとも象徴的な事象と言えます。今後の北極海の家氷変動を予測する上で、現場調査から得られる知見はもっとも重要な鍵となります。本研究では、ドイツの砕氷船（Polarstern号）を用いた国際的な観測プロジェクト「MOSAIC」に参加することで、海氷と海洋の間で起きる熱や運動量のやりとりに注目し、海氷変動の実態を明らかにするための現地調査を行いました。

研究成果の概要（英文）：For the aim of the assessment of global warming and its implication in the Arctic environment, we participated in the international joint project, MOSAIC, that is led by a German institution. In the project, we took samples of physical oceanographic parameters base on the drifting-ice platform using an ice breaking vessel, R/V Polarstern. In the field survey of ice ocean boundary layer of the Arctic Ocean, movement of water and heat were measured at high-frequency sampling rate. The observation revealed that in the surface water the low salinity melt-water plays important roles in regaining ice formation during winter season. That is, the freshened water is lowered in freezing temperature, and consequently it allows the water to freeze up in relatively mild cooling event in the atmosphere.

研究分野：海洋物理

キーワード：北極海 海氷変動 地球温暖化 熱収支 乱流混合 内部重力波

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

## 1. 研究開始当初の背景

1990年代後半以降、北極海の夏の海水面積は地球温暖化の影響を受けて、急速な減少傾向を示している。北極海は、複数の水道を通して中緯度の海とつながっており、海水減少の主な原因とされる熱の出入りについては各領域で状況が異なっている。北極海の中央から大西洋側（東部セクター）は、ぶ厚い多年氷が比較的多く残る領域とされているが、海水の正確な変動量やそのメカニズムの実態はわかっていない。また、海水面積の縮小が長期化する中で、北極海の海洋環境が今後どのように変化していくのかを長期的に予測することは極めて難しい。

## 2. 研究の目的

本研究では、現場観測を行うことによって、北極海の中央海盆・東部セクターで起きている海水量変動の実態と今後の変動予測について明らかにすることを目的とする。具体的には、以下の2つの問いを明らかにするための現場調査とデータ解析を実施する。

- 1) 海水の融解・結氷の速度や時期を決定する要因とは何か？
- 2) 海水後退の北極海における新しい海洋循環像とは？

## 3. 研究の方法

2019年10月から2020年10月にかけて実施された北極海の国際観測プロジェクト「MOSAic」[Shupe et al. 2020]に参加し、漂流する海水をプラットフォームとした現場観測を行った。MOSAicでは、ドイツのAlfred Wegener Instituteの砕氷船『Polarstern号』を用いて、当該海盆域を海水とともに移動しながら、海水-海洋間の境界層における熱・塩分・運動量の収支に関する収支について通年にわたり直接観測を実施した。観測には、高頻度に海水の流速や水温場を測定する渦相関計や乱流プロファイラー、海水内部の温度変化を詳細に記録するサーミスターストリングなど、複数種類の機器を用いた観測を組み合わせることで、より正確な諸物理量の動きを定量化するための総合的な調査を実施することができた。

## 4. 研究成果

MOSAicでは、2019年10月にノルウェーのトロムソ港を出航し、ロシア沿岸に位置するラプテフ海の沖合い（北緯約80度）から観測をスタートさせ、海水と同時に自由漂流する旅路に着いた（図1）。当初、観測は2ヶ月ごとに乗船研究者やクルーを入れ替える計画であったが、新型コロナウイルスの世界的な広まりの影響を受けて、当初の計画からの変更を余儀なくされ、イレギュラーな体制でプロジェクトは進められた。研究代表者（川口）が所属した研究グループ（Team Ocean）[Rabe et al. 2022]では、主に海水下の海洋物理特性についての現場データの取得が行われた。ここでは、研究の成果として、特に海水直下の熱・運動量の輸送に関する2つの成果について報告を行う。

### (1) 乱流を介した海水直下の熱流動

北極海における海水減少の主要因は、海水の融解過多にあると考えられる。この調査では、乱流プロファイラーを用いて、海水直下5mから水深400mまで、海水中の乱流エネルギー散逸率と熱フラックスについての詳しい調査を行った。特に、ここでは海水直下の境界層と呼ばれる領域に着目し、境界層内の波や乱れによる熱輸送と、海水の動きとの関係性について追求するための解析を行った。

夏季データの解析の結果、海水消長に関わる熱輸送において重要な発見が得られた。それは、低塩分な海水の融け水（融氷水）が表層に蓄積し、初冬の海水の生成を補助しているという観測事実である。海水の塩分は約33-35の範囲にあるが、純粋な融氷水の塩分は0-5である。下層の海水と混合した後でも、その塩分値は30を下回るが、海水の結氷温度は塩分による凝固点降下の結果として0度を大きく下回る（例えば、塩分が33ならば $-1.81$ ）。言い換えると、融氷水があることで海水の結氷温度は0に近づく。つまり、より小さな大気冷却でも結氷が起きることを意味している。我々は、この融氷水の蓄積が海水減少を最後の部分で食い止めることで、北極海の海水量がいまだにゼロにならずにいられる一つの要因と考えている。この融け水の効果を詳しく評価するためにはより広い範囲での表層塩分の厳密な調査が今後は必要となる。

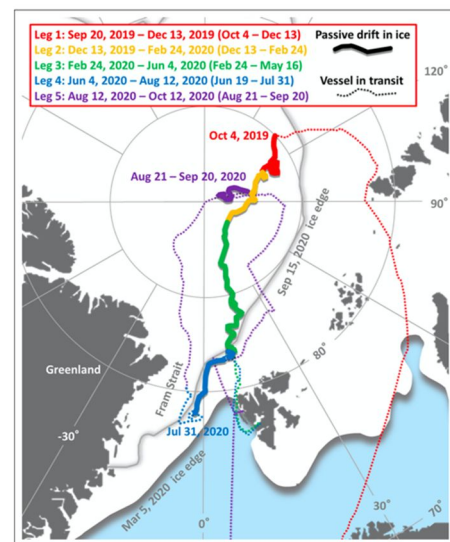


図1: MOSAic キャンペーン期間中にPolarstern号が辿った漂流の軌跡。

(2) 北極海の乱流化について

北極海は海水の存在によって、海と大気とが分離した状態と考えることができる。この条件においては、北極海の深層には大気からの強制力(風や放射)の影響は届きにくいと考えられてきた。ただ、近年の観測から、海水が部分的に減少する夏の間は、海水の風に対するレスポンスが加速することで、波動(内部重力波)を介して運動エネルギーが中・深層にまで到達するという事例 [Kawaguchi et al. 2019] が報告されている。ここでは、夏季の北極海で内部重力波がどのような形で励起され、下層に向けて伝搬していくのか、その実態を調査した。ここでは、海水直下の水の動きを計測するドップラー流速計と既出の乱流計を組み合わせた観測を実施した。また、高精度の GPS 装置を海水上に三角形に配置し、海水の移動速度、回転、変形を同時に計測した。

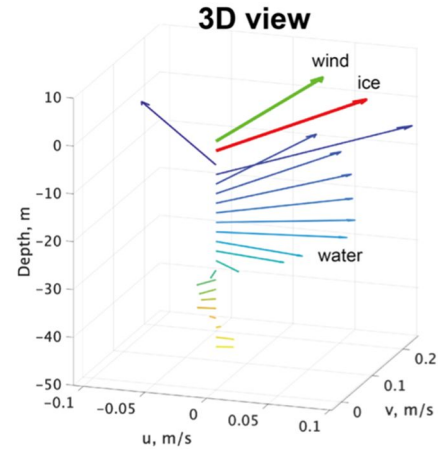


図 2 : ドップラー流速計がとらえた海水下のエクマン螺旋。

観測の結果、夏季に海水の移動速度が最大となり(摩擦の減退により) 慣性振動とよばれる時計回りの回転運動を激しく行う様子が確認された。このような海水の動きに対して、境界層内の海水の動きは、深さとともに海水の進行方向に対して右向きに回転する螺旋構造を示した(エクマン螺旋; 図 2)。境界層におけるエクマン螺旋を直接観測することは珍しく貴重な成果と言える。この螺旋の構造をつぶさに見ることで、境界層内部の混合の度合い(乱流拡散)を推測することができる。エクマン理論から間接的に得られる拡散率と、乱流計で直接得られた拡散率とを比較することで、GPS による海水の動きなどから海水の混合状態を便宜的に予測可能となる。

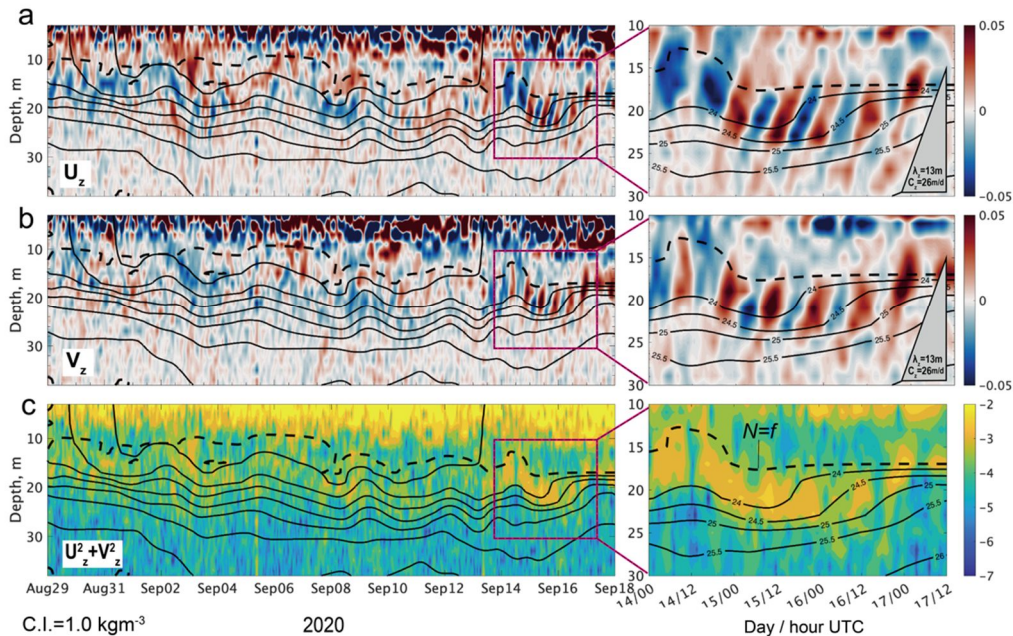


図 3: 海水直下で観測された内部重力波(色)、混合層の下部に内部波が捕捉されている(等値線が混み合う領域で密度成層が大きい)。

また、本研究では、海水の慣性振動が境界層内部に波を形成する様子を捉えることにも成功した。一般に乱流が卓越する境界層(混合層)内には密度成層が弱く、密度成層の中を伝播する内部重力波は存在できないと考えられてきた。しかしながら、境界層周辺の融氷水の鉛直的な分布を詳しく解析することで、低塩水が波の伝搬を許す程度の微小な密度成層を形成していることがわかった(図 3)。そして、実際にそこで慣性振動のエネルギーを波の形態に変化させる様子がドップラー流速計の観測によって示された。今後、1)と同様、海水下の融氷水の分布を詳しく調べることで、内部重力波の空間分布について明らかにすることが可能となる。

< 引用文献 >

Kawaguchi, Y., M. Itoh, Y. Fukamachi, E. Moriya, J. Onodera, T. Kikuchi, N. Harada, "Year-round observations of sea-ice drift and near-inertial internal waves in the Northwind Abyssal Plain, Arctic Ocean", *Polar Science*, 21(2019), 212-223, doi: 10.1016/j.polar.2019.01.004, 2019.

Rabe, B, Kawaguchi, Y., et al. "Overview of the MOSAiC expedition: Physical oceanography", *Elem Sci Anth*, 10: 1. doi: [https://doi.org/ 10.1525/elementa.2021.00062](https://doi.org/10.1525/elementa.2021.00062), 2022.

Shupe, MD, Rex, M, Dethloff, K, Damm, E, Fong, AA, Gradinger, R, Heuze, C, Loose, B, Makarov, A, Maslowski, W, Nicolaus, M, Perovich, D, Rabe, B, Rinke, A, Sokolov, V, Sommerfeld, A., "Arctic Report Card 2020: The MOSAiC expedition: A year drifting with the Arctic sea ice", doi: 10.25923/9g3v-xh92, 2020.



5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計9件（うち査読付論文 7件/うち国際共著 2件/うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 Rabe et al.	4. 巻 10(1)
2. 論文標題 Overview of the MOSAiC expedition: Physical oceanography	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Elementa Science Anthropocene	6. 最初と最後の頁 1-62
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1525/elementa.2021.00062	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 Nomura, Ikawa, Kawaguchi, et al.	4. 巻 40
2. 論文標題 Atmosphere-sea ice-ocean interaction study in Saroma-ko Lagoon, Hokkaido, Japan 2021	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Bulletin of Glaciological Research	6. 最初と最後の頁 1-17
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.5331/bgr.21R02	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 Kawaguchi Yusuke, Nishioka Jun, Nishino Shigeto, Fujio Shinzou, Lee Keunjong, Fujiwara Amane, Yanagimoto Daigo, Mitsudera Humio, Yasuda Ichiro	4. 巻 125
2. 論文標題 Cold Water Upwelling Near the Anadyr Strait: Observations and Simulations	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Geophysical Research: Oceans	6. 最初と最後の頁 1-18
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1029/2020JC016238	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 Nomura, D., Y. Kawaguchi, and 16 coauthors	4. 巻 38
2. 論文標題 Saroma-ko Lagoon Observations for sea ice Physico- chemistry and Ecosystems 2019	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Bulletin of Glaciological Research	6. 最初と最後の頁 A01-1
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 Bui, O. T. M., S. Kameyama, Y. Kawaguchi, S. Nishino	4. 巻 22
2. 論文標題 Influence of warm-core eddy on dissolved methane distribution in the southwestern Canada Basin during late summer/early fall 2015	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Polar Science	6. 最初と最後の頁 100481
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.polar.2019.100481	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 Nishino, S., Y. Kawaguchi, J. Inoue, M. Kawai, N. Harada, T. Kikuchi	4. 巻 125
2. 論文標題 Do strong winds impact water mass and nutrient and phytoplankton distributions in the ice-free Canada Basin in the fall? A Eulerian approach to detecting their temporal changes	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 J. Geophys. Res. Oceans	6. 最初と最後の頁 e2019JC015428
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1029/2019JC015428	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 Kimura, S., J. Onodera, M. Itoh, T. Kikuchi, S. Nishino, Y. Kawaguchi, E. Watanabe, N. Harada	4. 巻 124
2. 論文標題 The warming of the Chukchi slope through the Barrow Canyon outflow in the 2016-2017 winter	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 J. Geophysical Research	6. 最初と最後の頁 1,20
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1029/2019JC015093	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 Kawaguchi, Y., M. Itoh, Y. Fukamachi, J. Onodera, E. Moriya, T. Kikuchi, N. Harada	4. 巻 未定
2. 論文標題 Year-round observations of sea-ice drift and near-inertial internal waves in the Northwind Abyssal Plain, Arctic Ocean	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Polar Science	6. 最初と最後の頁 1-9
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.polar.2019.01.004	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 Nishino, S., Kawaguchi, Y., Fujiwara, A., Shiozaki, T., Aoyama, M., Harada, N., & Kikuchi, T.	4. 巻 45
2. 論文標題 Biogeochemical anatomy of a cyclonic warm-core eddy in the Arctic Ocean	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Geophysical Research Letters	6. 最初と最後の頁 1-9
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1029/2018GL079659	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 -

[学会発表] 計7件(うち招待講演 0件/うち国際学会 3件)

1. 発表者名 Yusuke Kawaguchi, Zoe Koeing, Mario Hoppman, Daiki Nomura, Jun Inoue, Benjamin Rabe
2. 発表標題 Interfacial generation of internal waves and turbulent heat flux due to enhanced inertial motion for deformed sea-ice floe: Preliminary results from MOSAiC expedition
3. 学会等名 European Geological Union (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Yusuke Kawaguchi
2. 発表標題 Cold water upwelling and entrainment near the Anadyr Strait: Implications to the North Pacific Arctic Interaction
3. 学会等名 The tenth Symposium on Polar Science
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Yusuke Kawaguchi
2. 発表標題 Year-round observations of sea-ice drift and near-inertial internal waves in the Northwind Abyssal Plain, Arctic Ocean
3. 学会等名 The tenth Symposium on Polar Science
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Yusuke Kawaguchi
2. 発表標題 Ice-ridge internal waves and turbulent heat flux in ice-ocean boundary layer: Observations
3. 学会等名 ISAR-6, ( 国際学会 )
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Eun-yaе Son
2. 発表標題 Observational study of internal-wave-induced interior mixing in the Canada Basin Arctic Ocean
3. 学会等名 ISAR-6, ( 国際学会 )
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Yusuke Kawaguchi
2. 発表標題 Cold water upwelling and entrainment near the Anadyr Strait: Implications to the North Pacific-Arctic interaction
3. 学会等名 ISAR-6,
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 川口 悠介
2. 発表標題 Year-round observations of sea-ice drift and near-inertial internal waves in the Northwind Abyssal Plain, Arctic Ocean
3. 学会等名 EGU
4. 発表年 2019年



〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

Ocean at Risk 02「北極海の海水融解」  
<https://www.cole.p.u-tokyo.ac.jp/curriculum/1848>

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
主たる渡航先の主たる海外共同研究者	レイブ ベンジャミン  (Rabe Benjamin)	アルフレッド・ウェゲナー研究所・Physical oceanography department・Scientist	

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			
ドイツ	Alfred Wegener Institute			
ドイツ	Alfred Wegener Institute			