

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和元年6月18日現在

機関番号：12601

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2016～2018

課題番号：16K21700

研究課題名(和文)北極海の海洋乱流エネルギー時空間変動の復元—海水減少と大循環流強化の影響評価—

研究課題名(英文)Presumption of turbulent kinetic energy in the Arctic Ocean: Evaluation of ice retreat and growing large-scale ocean circulation

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) 3,100,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、北極海における海水変動と海洋内部の乱流混合エネルギーについて実態を解明すべく、船舶や係留系を用いた観測を執り行った。海水が著しく後退する西部北極海に設置した係留系のデータを解析した結果、元来、海洋の乱流エネルギーが小さいと考えられている海域であるにもかかわらず、顕著な内部波や混合エネルギーの存在が確認された。これは、海水後退の結果、大気と海洋間で熱や運動量の交換が拡大していることに起因する。この変化は、海水が比較的少ない初夏や結氷初期に、海水が風に対して敏感に応答することで、海洋上層に同じ周期の波動が発生し、下方伝搬した結果と考えられる。

研究成果の学術的意義や社会的意義

上述のように、地球温暖化の影響で海水が著しく減少し続ける北極海において、海洋が大気に接する時間が増加することは自明である。変化が著しい北極海において、海洋がこの変化にどのように応答しているのか？という問いに対して、係留系を用いた直接的な海水や海洋流速の現場観測を執り行い、通年におよぶ貴重な実測データを取得した。その詳細なデータ解析から、北極海の海洋では、地球温暖化に端を発した海水減少の影響がすでに中・深層にまでおよび始めていることを提示できた点は、学術コミュニティのみならず社会全体に与える影響力は決して小さくないと考える。

研究成果の概要(英文)：In this study, we performed mooring and shipboard observations to elucidate the variation of sea ice volume and ocean mixing in the Arctic Ocean. We closely analyzed the data records from the mooring system, that was situated in the Pacific section of the Arctic, where ice retreat has been observed in the most prominent way. The data demonstrated the remarkable elevation in internal wave and turbulent kinetic energy in the upper water. We interpret that the high energy level is due to the expansion in the momentum exchange between ice and air. The increased turbulent energy was observed particularly during early summer and early freezing period, when sea ice was rarely present. In the time, ice drift is relatively faster as response to the surface wind. Consequently, we concluded that the faster ice drift produced highly energetic internal waves in the upper part of ocean column, at the similar frequency.

研究分野：極域海洋物理学

キーワード：北極海 慣性振動 内部重力波 海水 乱流混合 エネルギー散逸 ウェーブレット

## 1. 研究開始当初の背景

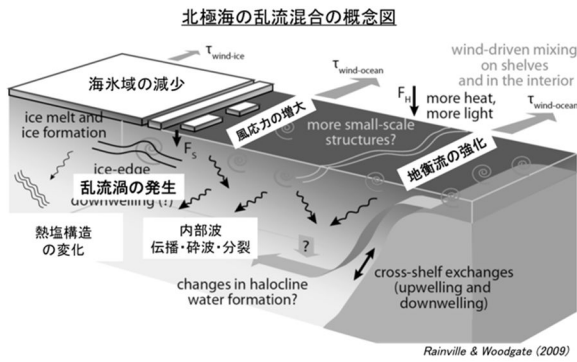
北極海の海洋混合エネルギーは他海域に比べて微弱であると言われてきた。そこには、海水の存在が主要因としてあげられる。特に、多年氷の海域では、氷盤間の摩擦(内部応力)によって海水の運動が鈍くなるため、海洋表面に注入される運動量も大幅に減退させる(e.g., D'Asaro & Morison 1992)。また、潮流などによる海洋内部での運動量も海水-海洋間の粘性境界層にて減衰を受けるため、結果的に乱流混合の発生が難しいと言われてきた。一方、1990年代以降、地球温暖化が進行し、北極海の海水面積の後退は加速の一途にある。この海水域面積の減少は、様々な形で北極海の海洋環境に二次的影響を生み出している。その一つが北極海の海洋循環場の強化つまり流れのもつ力学的エネルギーの増加である。流速の強化が著しい海域としては、太平洋側北極海のポーフォート循環がある。この海流強化は、海水が後退しポーフォート高気圧による大気強制が支配的になる事が、表層のエクマン収束を促進させると言われている。その結果として高気圧性(時計回り)の流速成分が強められる(Proshutinsky et al. 2009)。同時に、温暖化に関係した海盆域への淡水流入量の増加(融氷水・河川水など)も海盆循環流を局地的に変異させる一因になっている(McPhee 2013)。

申請者は、2009年以降、西部北極海において高分解能な流速シアと水温センサーによる乱流観測を継続的に行ってきた。以下に、観測実績の一例を述べる。2013年9月には、海水の後退したチャクチ陸棚域において乱流観測を行い、夏の海洋混合層が風力によって浸食されながら急速に冷却されていく過程を捉えた(Kawaguchi et al. 2015; Nishino et al. 2015)。2014年にはカナダ海盆において3週間の集中観測を行い、高気圧性の中規模渦の内部に内部慣性重力波が捕捉され、渦内部に強い擾乱を引き起こしながら散逸する様子を捉えた。ここで申請者が注目するのは、増大傾向にある海盆スケールの運動エネルギーがより小さな空間規模の流れや乱れの場合へと引き継がれていく点である。つまり、海盆規模の流れ場が不安定化することで、傾圧渦やフロント蛇行といった中規模擾乱にエネルギーの高まりがもたらされる。次に、中規模擾乱のエネルギーは、内部重力波として海洋中を伝搬し、最終的には数センチ規模の乱流場に変換されて消散する。この最小空間スケールのエネルギー散逸とそれに伴うミキシングは、北極海の水温・塩分(したがって密度)構造を変質させるだけの十分な素力がある。例えば、北極海は融氷水・太平洋水・大西洋水が空間的に複雑的に折り重なることで大規模循環場(ロスビー変形半径以上)を形成している。そのため、それぞれの等密度面を横切る乱流混合が強まることによって、密度成層やフロント構造を大幅に修正し、結果的に大規模な地衡流パターンに還元的影響を及ぼす可能性がある。

## 2. 研究の目的

本申請研究では、北極海が近年の乱流化に至るまでの変動過程を明らかにすることを目的とする。かつて永年海水域であった時代には、北極海の内部混合は海水間の摩擦により中・低緯度の数十分の一と考えられてきた。しかし近年の乱流場の直接観測から微細規模の運動エネルギーに飛躍的な増加傾向が見られるようになった。問題は観測技術の遅れによりその変遷プロセスが直接的な記録として残されていない点である。そこで本研究は、過去のCTD・ADCPデータから乱流現象の痕跡を検出し、90年代後半から現在までの乱流エネルギーの時空間変動を復元する。これによって北極海の乱流場が海水減少の進行とともにどう変化し、熱輸送や水塊混合によって大循環場にどのような還元的影響を与えたかを明らかにする。

## 3. 研究の方法

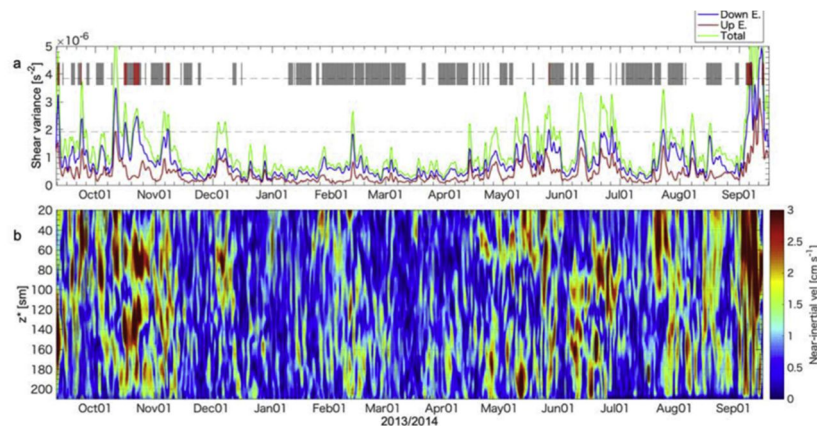


1998-2016年のCTD・ADCP観測の資料を解析し、2009-2016年の乱流場の直接観測と比較する事で乱流エネルギーの時空間変動と混合の物理プロセスを明らかにする。CTDデータは24 Hzの生記録から密度逆転層を検出し、混合距離 $L_T$ を見積もり、乱流観測と比較する。ADCPの手法では、流速データから鉛直シア流を算出し、Garrett & Munk (1975)の内部波の理論

論解と比較した上で $\epsilon$ の見積もり( $\epsilon_{ADCP}$ )を得る。両者の結果を直接的な乱流観測と比較し、北極海における乱流エネルギーの長期変動を再現する。

#### 4. 研究成果

本申請課題で取り組んできた課題(「西部北極海の混合過程の復元」)を2編の主著論文にまとめ、一定の査読プロセスを経て主著論文として出版することができた(Kawaguchi et al. 2016; 2019)。これらの論文では、内部波と乱流混合エネルギーの具現化を主テーマとして、おおよそ計画通りに研究を進めることができた。Kawaguchi et al. (2016)では、西部北極海の海盆域で遭遇した高気圧渦の観測から得られた結果を発表した。この観測では、高気圧渦が特定の周波数の波動を内側に閉じ込めるという“内部波捕捉”、および、捕捉に伴う臨界深度での波の増幅現象を捉えることに成功した。この現象は、乱流エネルギーの乏しいと言われる北極海において、海洋混合のホットスポットとなり得る可能性を秘めており、今後の観測においてもその動向を注視する必要がある。またKawaguchi et al. (2019)の論文では、ノースウィンド海嶺と呼ばれる海域の係留系データを解析し、海氷と海洋の運動量輸送に関する力学特性、および、それぞれの媒体間の相互作用に関して重点的な解釈を行った(下図)。この研究では、海氷の運動量と海洋上層の内部重力波の間に顕著な相互作用が検出され、現象の定量化と物理機構の解釈を中心に解析を進めた。具体的には、海洋の流速場から乱流混合のエネルギー量を推定し、当該海域における1年間の変動サイクルを明らかにした。これらの変動は、海氷の厚さや水平密度が少ない季節(初夏や結氷初期)においては、海洋側の内部波振幅の増大が海氷の慣性振動に起因する、という事実が明らかとなった。



図：西部北極海における海洋上層の内部波エネルギーの時空間変動。Kawaguchi et al. (2019)より。

また関係論文として、4編の共著論文を出版することができた。Nishino et al. (2018)では、2015年のみらい北極海航海(MR15-03)におけるチャクチ海台周辺の低気圧性(反時計回り)海洋渦の集中観測を行い、詳細な解析結果を国際誌から出版した。この研究では、GPS装置を装備した漂流ブイを用いて、当低気圧性の渦を約2週間近くにわたり追跡し、繰り返し周辺のハイドロ観測を実施することで、渦の立体的な構造の把握、渦内部における混合エネルギーの空間的分布の特定、そして渦内部に含まれる化学成分の詳しい分析に成功した。Viviér et al. (2016)では、北極点付近に設置した複数種類の自動観測装置の結果をまとめた。ここでは、多年海氷下の混合層内の貯熱量の時間変動の可視化、そして鉛直熱輸送の定量化に成功した。Uchimiya et al. (2016)と Fujiwara et al. (2017)では、過去のみらい北極航海の中で得られた海水サンプルを分析し、その結果を論文として出版した。ここでは、暴風に対する海洋微生物や植物プランクトンのブルームイベントを焦点の一つとし、イベント発生の物理要因に関して、申請者が海洋物理的または気象擾乱の物理機構の面において貢献することができた。

#### 参考文献(略記)

Sirevaag et al., 2011, Mixing, heat fluxes and heat content of the Arctic, *Ocean Science*, 7, 335-349.  
Proshutinsky et al. 2009, Beaufort Gyre fresh reservoir: State and variability ..., *JGR*, 114, C00A10.  
Rainville & Woodgate, 2009, Observations of internal wave generation in Arctic ..., *GRL*, 36, L23604.  
D'Asaro & Morison, 1992, Internal waves and mixing in the Arctic Ocean, *Deep-Sea Res.*, 39, S459.  
McPhee, 2013, Intensification of geostrophic currents in Canada Basin, *J. Climate*, 26, 3130-3138.

#### 5. 主な発表論文等

(雑誌論文)(計 6 件)(いずれも査読あり)

- (1) Kawaguchi, Y., M. Itoh, Y. Fukamachi, E. Moriya, J. Onodera, T. Kikuchi, N. Harada, 2019, Year-round observations of sea-ice drift and near-inertial internal waves in the Northwind Abyssal Plain, Arctic Ocean, *Polar Science*, in press, <https://doi.org/10.1016/j.polar.2019.01.004>
- (2) Nishino, S., Kawaguchi, Y., Fujiwara, A., Shiozaki, T., Aoyama, M., Harada, N., & Kikuchi, T., 2018, Biogeochemical anatomy of a cyclonic warm-core eddy in the Arctic Ocean. *Geophysical Research Letters*, 45. <https://doi.org/10.1029/2018GL079659>.
- (3) Fujiwara A., S. Nishino, K. Matsuno, J. Onodera, Y. Kawaguchi, T. Hiratake, K. Suzuki, J. Inoue, T. Kikuchi, 2017, Changes in phytoplankton community structure during wind induced fall bloom on the central Chukchi shelf, *Polar Biology*, <https://doi.org/10.1007/s00300-018-2284-7>.
- (4) Kawaguchi, Y., S. Nishino, J. Inoue, K. Maeno, H. Takeda, and K. Oshima, 2016, Enhanced diapycnal mixing due to near-inertial internal waves propagating through an Antarctic eddy in the ice-free Chukchi Plateau, *J. Phys. Oceanogr.*, 46, 2457-2481, doi:10.1175/JPO-D-15-0150.1.
- (5) Uchimiya, M., C. Motegi, S. Nishino, Y. Kawaguchi, J. Inoue, H. Ogawa, and T. Nagata, 2016, Coupled response of bacterial production to wind-induced autumnal phytoplankton bloom and sediment resuspension in the Chukchi Shelf, Western Arctic Ocean", *Frontiers in Marine Science*, doi: 10.3389/fmars.2016.00231.
- (6) Viviér, F., J. K. Hutchings, Y. Kawaguchi, T. Kikuchi, J. H. Morison, A. Lourenco, and T. Noguchi, 2016, Sea ice melt onset associated with lead opening during the spring/summer transition near the North Pole, *J. Geophys. Res. Oceans*, 121, doi:10.1002/2015JC011588.

#### 6. 研究組織

研究分担者

なし

研究協力者氏名: 西野 茂人

ローマ字氏名: (NISHINO, Shigeto Nishino)

研究協力者氏名: 藤原 周

ローマ字氏名: (FUJIWARA, Amane)

研究協力者氏名: 伊東 素代

ローマ字氏名: (ITOH, Motoyo)

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、研究者個人に帰属されます。