

令和元年6月18日現在

機関番号：82706

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2016～2018

課題番号：16K05563

研究課題名(和文)北極海に起因する太平洋・ベーリング海の海洋循環変動の解明

研究課題名(英文) Ocean circulation changes in the Pacific Ocean and the Bering Sea originated from the Arctic Ocean

研究代表者

川合 義美 (KAWAI, Yoshimi)

国立研究開発法人海洋研究開発機構・地球環境観測研究開発センター・主任研究員

研究者番号：40374897

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,500,000円

研究成果の概要(和文)：北極の海洋に変化が生じたときにベーリング海や太平洋にも影響が及び得るのか、数値モデルや観測データを用いて調べた。寒候期(10月～3月)に北極海のシベリア沿岸で海面が低くなると、北極海に流入するベーリング海峡通過流が強まり、数か月遅れてベーリング海北西部の表層の塩分が高くなる。但し、この影響は北緯60度より南には広がらないことがわかった。またこれらの海域で大気が海洋にどのように応答しているか調べ、北極のチュクチ海では10月～11月に大気下層の上昇流が最も強まることや、ベーリング海では海底地形が下層雲や海洋に入射する日射にまで影響を与えることなどを見出した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

北極では温暖化が急速に進行するなど環境が大きく変わりつつあり、この変化が低緯度側の地域にまで波及し得るのかは社会的にも重要な問題である。北極海からベーリング海への影響伝播は今までほとんど考慮されておらず、学術的にも新しいテーマである。本研究ではシベリア沿岸の変動がベーリング海の海洋循環場に影響を与えることがわかった。ベーリング海は世界有数の好漁場であり、この海域の物理場の変化は水産や海洋酸性化にも波及する可能性がある。

研究成果の概要(英文)：The authors have investigated whether changes in the Arctic Ocean can affect the Bering Sea or the Pacific Ocean by analyzing datasets of numerical models and observations. When sea surface height along the Siberian coast in the Arctic Ocean is lower in the cold season (October to March), the Bering Strait throughflow to the Arctic Ocean strengthens, and sea surface salinity becomes higher in the northwestern part of the Bering Sea with a lag of a few month. This effect, however, does not extend south of 60°N. The authors have also examined responses of the atmosphere to the seas, and have found that upward motion near the surface is reinforced most in October and November in the Chukchi Sea, and that bottom topography affects low-level clouds and downward solar radiation in the Bering Sea.

研究分野：海洋物理学、気象学

キーワード：海洋物理 北極海 ベーリング海 塩分 海面高度

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

北極域の長期的な気温上昇は全球平均を上回っており、地球上において気候変動による影響が最も顕著に現れる地域の一つである。北極海では 1980 年代以降、海水面積が長期的に減少しており、特に夏～秋季の太平洋側で減少が顕著である。海水減少は、北極海内部や大西洋の海洋循環に大きな影響を与えると考えられる。一方、太平洋は、幅わずか 85 km、水深約 40m のベーリング海峡のみで北極海とつながっており、海水の流れも基本的に太平洋から北極海に向かうため、北極海の変動が上流側の太平洋に直接影響を与える可能性はほとんど考えられてこなかった。

しかし、研究代表者らが行っていた全球海洋データ同化モデルの改修中に、北極海の海洋構造の変化がベーリング海を含む北太平洋亜寒帯域の密度場に影響を与える可能性が見つかった。同化手法の変更により北極海で海面高度が上昇すると、ベーリング海峡を通して太平洋から北極海に流入する淡水量が減少し、表層塩分の変化（低塩化）が北極海からベーリング海を伝って北太平洋亜寒帯域全体に広がった。このことから、北極海で何らかの理由により北極海の海洋循環場が変化すると、低塩分水が北極海に入りにくくなってベーリング海に留まり、太平洋亜寒帯域の低塩分をを引き起こすという仮説が立てられた。北太平洋の水温・塩分場の変動には熱帯からの影響が大きいと予想されるが、それだけで全てを説明できるわけではなく、北極域の顕著な変化が中緯度海洋に与える影響を調べることも、気候変動・温暖化に伴う海洋環境の変動を明らかにする上で不可欠である。また、北太平洋の中高緯度域は世界有数の好漁場であり、この海域の物理場の変化は水産資源や海洋酸性化にも波及すると考えられる。

2. 研究の目的

本研究では上記を踏まえ、北極海の海洋循環場の変化が如何にして上流側の北太平洋寒帯・亜寒帯域の海洋循環・塩分場に影響を与えるのか、その物理過程を数値モデルと観測データを駆使して明らかにすることを主目的とする。更にその物理場の変化により熱・物質循環等にごどのような変化が生じるかを調べる。これらを通して、1980 年代以降の北極海の劇的な変化、及び今後の変化が、中低緯度海域にどのように波及し得るかについての知見を得る。

3. 研究の方法

ベーリング海峡通過流の変動を軸として、その変動の原因と影響伝播、特に、ベーリング海の表層塩分変動との関係や塩分アノマリの遠方への伝播に注目した解析を行った。北極海及びベーリング海は現場観測データが非常に限られているため、主に海洋数値モデルを使用した。数値モデルの妥当性を検証するため現場データ、海洋再解析データも利用した。具体的には、国際的プロジェクトである結合モデル相互比較プロジェクト (CMIP) に参加し長期気候場の再現に実績のある大気 - 海洋 - 海水結合全球モデル MIROC4 (Komuro et al. 2012) を中心に解析を行った。海洋再解析データとしては、4 次元変分法 (4DVAR) を用いた ESTOC (Osafune et al. 2015)、及び最適内挿法を用いた SODA (Giese and Ray 2011) という 2 種類のデータセットを利用した。更に、現場観測データのみから作成された格子化データ (https://www.nodc.noaa.gov/OC5/3M_HEAT_CONTENT/s_anomaly_data.html) や、衛星観測の海面高度データ (Armitage et al. 2016) も使用した。

4DVAR によるデータ同化システム (アジョイントモデル) ではシグナルの逆追跡を容易に行えることが強みである。表層塩分偏差を生じさせる原因を探るため、この同化システムで逆追跡実験 (感度解析) も行った。この逆追跡実験では、より高解像度で海水の入った新たに開発した同化システムを用いた。また、海洋に対する大気の応答を調べる際には、高解像度の大気再解析データセット NCEP-CFSR (Saha et al. 2010) を用いた。

4. 研究成果

(1) 全球モデルの MIROC4h による 56 年分のアンサンブル歴史再現データと上記の 2 種類の海洋再解析データ、及び現場観測データを用い、ベーリング海峡通過流 (BTF) と周辺海域の海面塩分 (SSS) との関係調べた。その結果、BTF 流量が多い年にはアナディル湾を含むベーリング海北西部の SSS が高いという関係が全てのデータセットで共通して見られた。この関係には季節性があり、寒候期に相関が高く暖候期には相関がなくなること、BTF 流量の変動が SSS の変動に 2-3 か月先行することがわかった (図 1)。

BTF 流量はベーリング海東部、及び北極海のシベリア沿岸の海面高度 (SSH) と高い相関がある。シベリア沿岸の SSH はベーリング海の SSH とは独立に変動しており、また、ベーリング海北西部の SSS と有意な相関がある

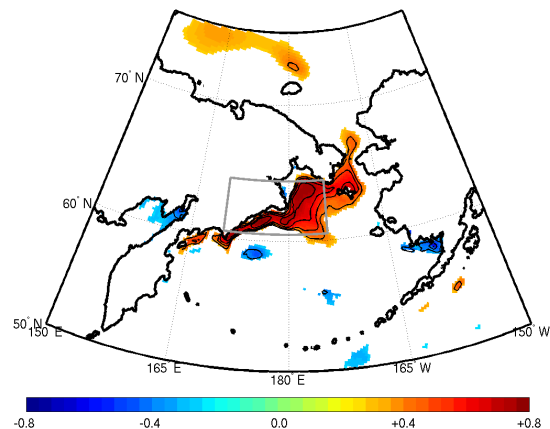


図 1. 10 月 - 3 月平均の BTF 流量と 1 月 - 6 月平均の SSS との相関係数。有意水準 0.05 で有意な部分のみ着色。等値線は ± 0.4 以上で 0.1 毎。MIROC4 の第 3 アンサンブルメンバーのみ示す。

ことが示された(図2)。即ち、北極海シベリア側の SSH 変動は流速場の変動を介してベーリング海の塩分に影響を与えていると考えられる。

数値モデルデータを用いて海洋混合層の収支解析を行ったところ、寒候期にシベリア沿岸の SSH が低く BTF 流量が多い年には、ベーリング海北西部で水平移流による塩分の収束の増加と融解水の減少が起こり、高塩化に寄与していることがわかった。ベーリング海北西部から海峡部にかけて北東向きの表層流速が強いと海水が北に押しやられるため、ナバリン岬より南で融解水が少なくなり高塩化に寄与する。また、SSS の等値線を横切る方向に流速が強まるために塩分の水平収束が起こる。

ベーリング海東部からチュクチ海にかけての海上で南東風が強い年に、BTF 流量は多くなる。これはアリューシャン低気圧の西偏と関係しており、先行研究と整合的である(Danielson et al. 2012)。この時には暖気移流が起こるため、BTF 流量が多い年には海面温度はベーリング海全体で高くなる傾向がある。即ち、ベーリング海北西部では表層が高塩・高温化することになるが、海水密度で見ると、高温化による低密度化よりも高塩化による高密度化の方が勝ることがわかった。これらの結果は国内外の学会で発表するとともに、査読付論文誌に投稿し掲載された(Kawai et al. 2018)。

ESTOC で推定されている全炭酸と BTF との関係も調べた。BTF 流量が多い年には、ベーリング海南東部のアリューシャン海盆からアリューシャン列島南方にかけての海域で表層の全炭酸濃度が低いことがわかった(図3)。有意な相関が見られる海域はベーリング海峡から離れているため、BTF 流量の変動と全炭酸濃度に直接の因果関係があるというより、BTF 流量に影響を与えるアリューシャン低気圧の位置や強度が冬季の海洋混合を通じて全炭酸濃度に影響を与えていると考えられる。海洋再解析で推定された全炭酸等の生物地球化学データは不確実性も大きいので、今後更なる調査が必要である。

(2) ベーリング海北西部の表層に生じた塩分偏差の原因を、海水の入った最新の海洋データ同化システムを利用した感度解析で調べた。ベーリング海のナバリン岬沖(北緯 63 度・西経 178 度)の表層をターゲットとし、2013 年 4 月 1 日にこの海域に人工的に塩分のコストを与えて逆追跡を行った。コストを与えた日から遡って 50 日前~80 日前の SSH の感度を図4に示す。北極海のラフテフ海から東シベリア海にかけて感度が高くなっており、沿岸ケルビン波に伴う流速変動がベーリング海北西部の塩分を変化させていることがわかる。シベリア沿岸で約 2 か月前に起こる SSH 低下のシグナルは、図2と整合的である。一方、図2と異なり、図4にはベーリング海やアラスカ湾沿岸でも強いシグナルが出ており、アラスカ湾から流入するアラスカ沿岸流の変動もベーリング海北西部の塩分変化に寄与していることが示唆される。

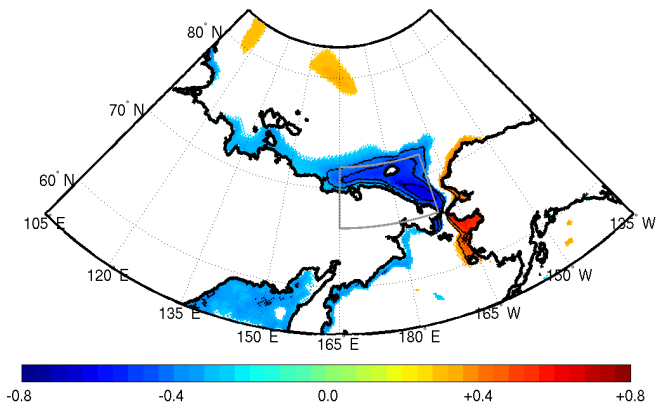


図2. 図1の灰色の四角で囲まれた海域の1月-6月平均SSSと、10月-3月平均のSSHとの相関係数。有意水準0.05で有意な部分のみ着色。等値線は±0.4以上で0.1毎。MIROC4の第3アンサンブルメンバーのみ示す。

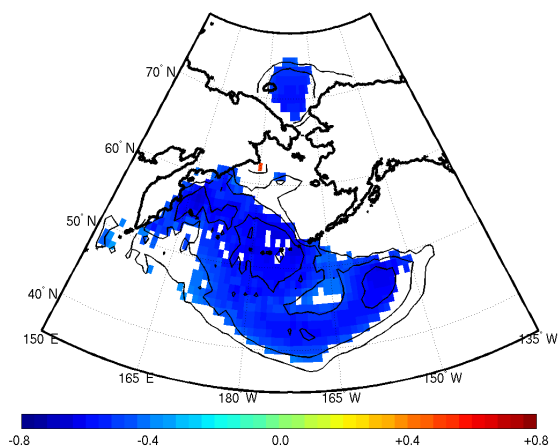


図3. 年平均のBTF流量と年平均の海洋最上層の全炭酸濃度との相関係数。有意水準0.05で有意な部分のみ着色。等値線は±0.4以上で0.1毎。ESTOCのデータを使用。

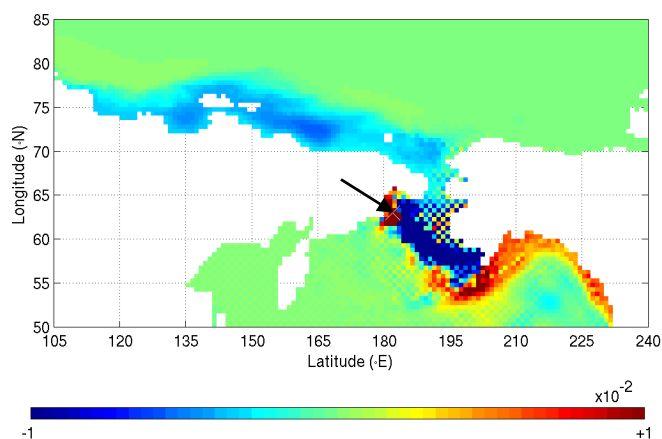


図4. ナバリン岬沖(北緯63度・西経178度、矢印の先)に塩分のコストを与えた日から遡って50日前~80日前のSSHの感度。

(3) ベーリング海北西部に生じた塩分や水温の偏差が遠方に伝播するか調べたが、偏差はほぼ当該海域に留まり、北緯 60 度以南への明瞭な伝播は確認できなかった。このため方針を変え、ベーリング海及びチュクチ海を対象を限定して、海面温度が直上の大気にどのような影響を与えるかを調べた。メキシコ湾流や黒潮・黒潮続流などの中緯度の西岸境界流沿いには海面水温前線が形成されるため、その上空の大気にも大きな水平温度勾配が引き起こされる。それにより、暖水上で気圧の負偏差や海上風の収束、上昇流が生じることや、海面温度の影響は夏季には対流圏中～上層にまで及ぶことなどが示されてきた。ベーリング海やチュクチ海のような季節海水域では、冬季は海水域と開水域の間に非常に大きな表面温度勾配が生じることから、海水縁付近で傾圧性が強まり、中緯度の海面水温前線付近で見られるのと同様な現象が期待されるが (Seo and Yang 2013)、海水域では現場観測も衛星観測も困難であることなどから研究は進んでいない。本課題では 1979～2010 年の 32 年間の月平均大気再解析データを用いて大気応答を調べた。

期間全体を通しての海上風の収束・発散を見ると (図 5)、チュクチ海南部で収束が大きく、またベーリング海は北東部の浅い大陸棚域で発散、南部で収束となっているが、特に大陸棚外縁に沿って収束が大きくなっているのがわかる。ちょうど海底地形を反映しているような分布である。季節変化を見ると、チュクチ海では海水が最も後退し海面温度が最も高くなるのは 8 月～9 月であるが、海上風の収束や上昇流が卓越するのはこの時期ではなく、海水が広がり始める 10 月～11 月であった。この頃にはチュクチ海南部は、ベーリング海から流入する温暖なアラスカ沿岸流の影響で、結氷が始まってもまだ水面や海水面の温度は高いが、チュクチ海北部では海水上の気温がかなり低くなっている。このため海面温度の水平勾配はこの時期に最大となり、中緯度の水温前線域と同様に圧力調整メカニズムが働いて、大気下層で収束・上昇流が引き起こされる。11 月頃にこのような現象が卓越するという事は、これまでに指摘されていない新しい発見である。

一方、ベーリング海では夏季以外の季節で、水深が急激に変化する大陸棚外縁に沿って海面温度の水平勾配が最大となり、2 月頃にこの海域上で大気下層の収束・上昇流が見られた。また、夏季以外の季節で、大陸棚外縁を挟んで南北で下層雲の雲水量や海面到達日射量に差異が生じていた。これは、海底地形が冬季混合層の形成を通して海洋表層の水温に影響し、その結果として下層雲や海洋に入射する日射にまで影響を与えたものと考えられる。これらの結果は国内の学会で発表した。北極海は 1980 年代以降急速に温暖化が進行しており、その中緯度地域への影響が、主に数値モデル実験により世界中で盛んに研究されている。しかしその大半は半球スケールの大気大循環に主眼が置かれており、海水域の大気や海洋の境界層のプロセスが十分に研究されているとは言えない。本研究の成果は大きく変化しつつある極域海洋に対する大気応答の解明に寄与するものである。

< 引用文献 >

Komuro, Y., et al., Sea-ice in twentieth-century simulations by new MIROC coupled models: A comparison between models with high resolution and with ice thickness distribution, *Journal of the Meteorological Society of Japan*, Vol.90A, 2012, pp.213-232.

Osafune, S., S. Masuda, N. Sugiura, and T. Doi, Evaluation of the applicability of the Estimated State of the Global Ocean for Climate Research (ESTOC) data set, *Geophysical Research Letters*, Vol.42, 2015, pp.4903-4911.

Giese, B. S., and S. Ray, El Niño variability in simple ocean data assimilation (SODA), 1871-2008, *Journal of Geophysical Research*, Vol.116, 2011, C02024.

Armitage, T. W. K., et al., Arctic sea surface height variability and change from satellite radar altimetry and GRACE, *Journal of Geophysical Research: Oceans*, Vol.121, pp.4303-4322.

Saha, S., et al., The NCEP climate forecast system reanalysis, *Bulletin of the American Meteorological Society*, Vol.91, 2010, pp.1015-1057.

Danielson, S., et al., Coupled wind-forced controls of the Bering-Chukchi shelf circulation and the Bering Strait throughflow: Ekman transport, continental shelf waves, and variations of the Pacific-Arctic sea surface height gradient, *Progress in Oceanography*, Vol.125, 2014, pp.40-61.

Seo, H., and J. Yang, Dynamical responses of the Arctic atmospheric boundary layer

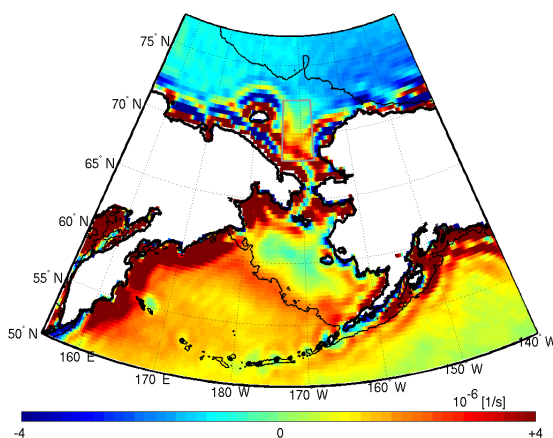


図 5. 高度 10m の海上風の収束 (1/s)。負値は発散。黒線は 200m の等深線で、水深が大きく変化する大陸棚外縁に概ね相当する。

process to uncertainties in sea-ice concentration, Journal of Geophysical Research: Atmospheres, Vol.118, pp.12383-12402.

5 . 主な発表論文等

[雑誌論文](計 3件)

Kawai Yoshimi, Osafune Satoshi, Masuda Shuhei, Komuro Yoshiki, Relations between salinity in the northwestern Bering Sea, the Bering Strait throughflow and sea surface height in the Arctic Ocean, Journal of Oceanography, Vol.74, pp.239-261, 2018, doi:10.1007/s10872-017-0453-x, 査読有

Kawai Yoshimi, Katsumata Masaki, Oshima Kazuhiro, Hori Masatake, Inoue Jun, Comparison of Vaisala radiosondes RS41 and RS92 launched over the oceans from the Arctic to the tropics, Atmospheric Measurement Techniques, Vol.10, pp.2485-2498, 2017, doi:10.5194/amt-10-2485-2017, 査読有

Kawai Yoshimi, Nishikawa Hatsumi, Oka Eitarou, In situ evidence of low-level atmospheric responses to the Oyashio front in early spring, Journal of the Meteorological Society of Japan, Vol.97, pp.423-438, 2019, doi:10.2151/jmsj.2019-024, 査読有

[学会発表](計 12件)

Kawai Yoshimi, Osafune Satoshi, Masuda Shuhei, Komuro Yoshiki, Relationship between the Bering Strait throughflow and salinity in the Bering Sea in an atmosphere-ocean-ice coupled model, 2016 American Geophysical Union (AGU) Fall Meeting, 2016

川合義美・西川はつみ・立花義裕・岡英太郎、晩冬期における亜寒帯水温前線に対する大気下層の応答、日本海洋学会 2016 年度秋季大会、2016 年

Masuda Shuhei, Osafune Satoshi, Sugiura Nozomi, and Doi Toshimasa, Ocean heat content and sea level changes from an improved ocean state estimation, Asia Oceania Geosciences Society (AOGS) 13th Annual Meeting, 2016

Kawai Yoshimi, Osafune Satoshi, Masuda Shuhei, Komuro Yoshiki, Interannual salinity variations in the northwestern Bering Sea associated with the Bering Strait throughflow, JpGU-AGU Joint Meeting 2017, 2017

Kawai Yoshimi, Moteki Qoosaku, Kuwano-Yoshida Akira, Enomoto Takashi, Manda Atsuyoshi, Nakamura Hisashi, Case study on impact propagation of radiosonde data assimilation over the Kuroshio and Kuroshio Extension, 2017 Joint IAPSO-IAMAS-IAGA Assembly, 2017

Kawai Yoshimi, Convergence of the sea surface wind over the marginal ice zone in the Chukchi Sea and the Bering Sea, 2018 Ocean Sciences Meeting, 2018

川合義美・勝俣昌己・大島和裕・堀正岳・猪上淳、海上におけるバイサララジオゾンデ R41 と R92 の比較、日本気象学会 2017 年度秋季大会、2017 年

川合義美、ベーリング海・チュクチ海における海上風収束と海表面温度との関係、日本海洋学会 2017 年度秋季大会、2017 年

増田周平・長船哲史・杉浦望実・土居知将・邊見忠、四次元変分法データ統合システムを用いた全球長期海洋環境の再現、平成 28 年度地球シミュレータ利用報告会、2017 年

川合義美、Atmospheric responses to sea surface temperature in the Bering Sea and Chukchi Sea, 日本地球惑星科学連合 2018 年大会、2018 年

Kawai Yoshimi, Nishikawa Hatsumi, Oka Eitarou, Intensive observations of imprints of the Oyashio (subarctic) front on the atmosphere in April 2013, 2018 American Geophysical Union (AGU) Fall Meeting, 2018

Masuda Shuhei, Osafune Satoshi, Hemmi Tadashi, Long-term sea level changes in an ocean state estimation of ESTOC, Asia Oceania Geosciences Society (AOGS) 15th Annual Meeting,

6 . 研究組織

(1)研究分担者

研究分担者氏名：増田 周平

ローマ字氏名：(MASUDA, Shuhei)

所属研究機関名：国立研究開発法人海洋研究開発機構

部局名：地球環境観測研究開発センター

職名：グループリーダー

研究者番号(8桁): 30358767

(2)研究協力者

研究協力者氏名：長船 哲史

ローマ字氏名：(OSAFUNE, Satoshi)

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。