

令和元年6月18日現在

機関番号：12614

研究種目：基盤研究(A) (一般)

研究期間：2015～2018

課題番号：15H01726

研究課題名(和文)南極底層水の昇温・低塩化に伴う深層大循環の変貌予測に関する基礎研究

研究課題名(英文)Basic research on the prediction of changing for the Deep Global Circulation related with warming and freshening of Antarctic Bottom Water

研究代表者

北出 裕二郎(KITADE, YUJIRO)

東京海洋大学・学術研究院・教授

研究者番号：50281001

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 35,780,000円

研究成果の概要(和文)：近年、地球温暖化に伴い南極底層水が昇温・低塩化している。本研究では南極底層水が変質する機構を解明し、今後、深層大循環がどのように変化するかを明らかにすることを目指した基礎研究が実施された。4年間にわたり毎年1月の約1ヶ月間、南大洋東経110度に沿った海洋観測、および長期係留系の設置・回収を継続して実施した。その結果、南極底層水の形成における貫入深度の季節的変動特性や子午面方向の物質輸送の主要な機構を明らかにした。さらに、南極氷床溶融水が南極底層水の変質に及ぼす影響を評価した。また、子午面循環の鍵を握る中規模渦の監視技術として、海水域における衛星海面高度データの補正アルゴリズムの開発が行われた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究では、南極底層水の変質機構の解明と深層大循環を捉えるため、無数のセンサーを配備した巨大係留系が構築され、南大洋に設置された。南大洋でのこのような観測は類を見ない。結果、冬季海水下での深層水や底層水の生成と変動が明らかにされ、子午面循環の構造とそれを維持する機構について、実測から立証するためのデータが得られた点は、学術的な意義がある。また、季節海氷域での海面変位の補正アルゴリズムの開発は、衛星データによる流速推定の精度を向上させ、水位上昇の波及など極域海洋の監視能力を強化させる。その他、4年間の観測を通して得られた基礎データは、大循環モデル・気候変動モデルの精度向上に貢献する。

研究成果の概要(英文)：As a result of Global warming, warming and freshening of the Antarctic Bottom Water (AABW) has been observed around Antarctica in recent years. In this study, we conducted basic research aiming to elucidate the mechanism by which the AABW is altered, and to clarify how the deep general circulation changes in the future. Ocean observation in the Southern Ocean along 110E and deployment and recovery of long-term moorings were continuously carried out for about one month in January every year for four years. As a result, we clarified the seasonal variation characteristics of intrusion depth in the formation of AABW and the main mechanism of material transport in the meridional direction. Furthermore, the influence of Antarctic ice sheet molten water on the alteration of AABW was evaluated. In addition, as a monitoring technique of medium-scale eddy that contribute as a key to meridional circulation, a correction algorithm was developed for satellite sea level data in the sea ice area.

研究分野：極域海洋物理学

キーワード：極域環境監視 温暖化評価 南極底層水 南大洋 子午面循環 深層大循環 海洋科学

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

1. 研究開始当初の背景

深層大循環は全球を巡る大規模な熱塩循環であり、低緯度から高緯度への熱輸送を通して安定した気候の維持に重要な役割を果たしている。極域で形成される深層水・底層水は熱塩循環の原動力となっているが、近年、南極海縁辺で形成される南極底層水が低塩化している(例えば、Aoki et al., 2013)。この低塩化は温暖化の影響による表層への淡水供給に起因すると考えられているが、南極底層水(AABW)が低塩化するプロセスは定量的に解明されていない。低塩化は深・底層水の沈み込む力を弱めるものであり、深層大循環に大きな影響をもたらす。東京海洋大学の海鷹丸で平成23年から毎年1月に実施しているオーストラリア南極海盆(東経110°)における観測では、平成26年1月には海底直上の南極底層水が昇温し、それまでの低塩化に加えてさらに密度低下を加速させる可能性を示した。東経110°の南端に位置するピンセネス湾は、近年、ケーブダンレーに続いて南極底層水の生成域であることが明らかとなった(Ohshima et al., 2013; Kitade et al., 2014) 海域であるが、南極底層水の低塩・昇温と同時に1500~3000m深には幾層かの低塩分高酸素の貫入層が捉えられている。このような底層まで沈み込めない深層貫入水の存在は、底層水の変質と大きく係わっている可能性がある。進みつつある南極底層水の変質は、深刻な問題を引き起こす可能性を秘めていることから、注意深くモニタリングしつつ、南極大陸縁辺での詳細な循環構造を明らかにし、底層水の変質機構を解明していく必要がある。

2. 研究の目的

本研究では、オーストラリア南極海盆を対象海域として、陸棚縁辺海域の表層から底層における水塊形成過程を解明することにより、南極底層水の昇温・低塩化の機構を定量的に解明し、さらに、南大洋子午面循環における湧昇流量、深層・底層水の再循環量の評価を目指した。()表層・亜表層のプロセスでは、海面に供給された淡水が、どのような混合過程を経てどのくらいの速さで塩分を獲得するのかを調べる。海洋観測衛星による海面の熱・塩のフラックスと海洋観測による広域での水温・塩分データを合わせて解析し、熱塩循環の収支を明らかにする。()陸棚近傍では、高密度陸棚水が陸棚斜面域で周極深層水と混合して南極底層水となる過程について明らかにするため、乱流観測、係留観測、CTD(電気伝導度・水温・深度計)観測を組み合わせた観測を実施する。ダウンスロープにおける乱流混合、二重拡散対流、キャベリング、サーモバリシティ効果が南極底層水の形成にどのように関与するか、また、低塩分インパクトがどの深度に、どの様に波及するのかを評価する。()深層水の湧昇と再循環プロセス、および南極底層水の昇温・低塩化については、本申請で提案した巨大CTDチェーンを用いた係留観測により、高密度陸棚水と周極深層水の混合水がどの深度帯へ沈み込んでいるかを追跡し、貫入層の水塊特性と流量を把握することにより、昇温・低塩化の機構を定量的に明らかにすることを試みた。

3. 研究の方法

本研究では、南極底層水が形成されており、南極底層水の変質が確認されている東経110度のピンセネス湾沖を研究対象海域とした。この海域は、海鷹丸が毎年実施しているモニタリング観測(日本南極地域観測事業(JARE)基本観測(海洋物理化学))の南端に位置する海域であるため、通常では継続した観測を実施することが困難な南極大陸縁辺において、継続した観測が可能な海域である。そこで、本研究では海鷹丸の南極海航海を活用して、2016年から2019年の毎年1月に、広域での水温・塩分・栄養塩類の観測、陸棚上・氷縁海域における乱流観測、係留観測を実施した。各航海では、東経110度の基本観測線におけるCTDおよび乱流計による水路観測を実施しながら南下し、南緯60度以南の集中観測海域で詳細なグリッド状の観測や係留系の設置および回収を行った。

底層水の昇温・低塩化機構の解明に加え、深層底層水が南大洋子午面循環にどのように取り込まれるのかを定量的に評価するには、通常の数メートルの係留システムでは不可能であることから、亜表層から深海底にわたる全深度帯をカバーする巨大な係留系による長期連続観測が必要である。そこで、本研究では巨大CTDチェーンを構築して南極底層水生成域の沖に設置し、南極底層水だけでなく海底まで沈み込めずに1500~2500mの深層に貫入する水塊を捉えることを試みた。2年目以降では複数の係留系を用いて、南極底層水および貫入深層水が南大洋子午面循環へ取り込まれる過程を捉えることとした。また、南極底層水の低塩化の機構解明に関連して、全地点で海水サンプルを取得し、酸素同位体比を調べた。

一方、衛星データの解析については、海水生成の評価と海面高度の精度向上に関する研究、さらには海面の熱・塩フラックスと混合層の形成に関して係留観測データと組み合わせた解析が並行して行われた。

4. 研究成果

(1) 係留観測

係留観測が本研究で最も重要な観測であったが、経費の都合上全てをメモリー式水温・塩分計(CTD)にすることはできなかったため、10台のメモリー式CTDと30台のメモリー式水温計(T)を50m間隔で配置した全長2kmの巨大CTD & Tチェーンを構築した。ピンセネス湾沖において、巨大CTD & Tチェーンの1年間係留観測は、本研究期間中2度実施し、2年間にわたる貫

重なる連続記録が得られた。3120dbar の深度に設置された係留系(図 1)において、3 月から 5 月と 11 月から 12 月に 2000 ~ 2800dbar の深度帯に、貫入層が顕著に認められた。海面が氷に覆われている期間では貫入層は殆ど無く、底層水温は緩やかに上昇しているが、8 月には新たな南極底層水の沈み込みを示した。これらの変動の特徴は、海水生産に伴う塩分上昇が不十分な秋季では深層への貫入を示すが、底層水の形成への移行は連続的ではなく、経路も異なる可能性を示唆する。(学会発表、論文投稿準備中)

一方、2017 年 1 月 ~ 2018 年 1 月に得られた流速構造には、海面から約 4000m の海底上まで、年平均で 1 cm/s の南下流があることが示されており、スベルドラップ輸送による流れと定量的な一致を示した。南大洋でスベルドラップ輸送を捉えた世界でも初めてのケースである。(IUGG2019 にて発表予定、論文投稿準備中)

(2) 衛星データ解析(海面高度)

氷で覆われている海域の衛星海面高度データには多くのエラーが含まれるが、北極海海域のデータを基に、海水で海面が覆われている海域の海面高度を推定するアルゴリズムが開発された(雑誌論文)。南極海域に適用した結果(図 2)、季節海域においても海面高度の分布が連続的に得られ、フロント構造や氷床融解水の影響と考えられる凹凸も表現できるようになった。海面高度の分布から、流れ場を推定することができ、係留データおよび海鷹丸水路観測データと比較した結果と良く一致していた(論文投稿準備中)。また、海面を通しての熱塩フラックスでは、係留データを基に解析を進め、混合係数や混合層の成長速度の推定などを行い、3 件の研究発表(、)を行った。

今後、様々な深度帯での係留観測の実施と比較を増やし、さらに精度を向上させることにより、衛星データだけで表層の流れの時空間変動を精度よく示せるようになることが期待される。

(3) 水路観測および乱流観測

本研究期間中、毎年海鷹丸による南極海対象海域において水路観測を実施した。南極底層水の変質は 2016 年まで進行していたが、2018 年と 2019 年では、ほぼ停滞している傾向であることが示された。しかし、南極大陸の各地で氷床融解は依然と進んでいることから、この停滞は温暖化による影響が止まったことを示すとは考えにくく、今後は他の深度帯海域を含め、モニタリングを続けて注視していく必要がある。

乱流観測については、2016 年 1 月と 2017 年 1 月の航海において実施された。オーストラリア南極海盆の中央に位置する海嶺の海底付近に沿って 10^{-4} [m^2/s] のオーダーの乱流拡散係数となっている海域は認められたが、その他の海域では 10^{-5} [m^2/s] のオーダーの海域が占めていた。従って内部領域では、子午面循環に及ぼす鉛直拡散係数は 10^{-5} [m^2/s] のオーダーかそれ以下であると考えてよい。しかし、海水に阻まれ観測が十分できていない陸棚斜面域については、さらに詳細な観測をする必要がある。

(4) 酸素同位体による低塩化起源水の傾向

酸素安定同位体比は、とりわけ陸氷融解水の寄与に対して高い表現性を有しているため、その変化は塩分変化の起源水を推定するうえで有効である。本研究では、海鷹丸により様々な深度で得られた海水サンプルの酸素安定同位体比の分析と過去に同海域で得られた資料の分析及び整理を行った。東経 110 度線上で、南緯 62 ~ 64 度、平均水深が約 3500dbar となる海域でのデータを用いて、2005 年 ~ 2018 年までの 13 年間について、7 回の観測の分析結果から、塩分および酸素同位体比のトレンドをもとめた。表層については、塩分に -0.07 dec^{-1} (10 年で 0.07 低塩化)、酸素同位体比に $-0.04\text{‰} \text{ dec}^{-1}$ といったやや強い低下傾向がみられ、表層の低塩化に陸氷融解成分の増加が寄与している可能性が示唆される。底層については、塩分に -0.011 dec^{-1} 、酸素同位体比に統計的には有意でないものの $-0.01\text{‰} \text{ dec}^{-1}$ の低下傾向がみられた。底層での値はロス海陸棚上やアデリー海盆周辺の高密度陸棚水でみられる酸素同位体比低下の 1/3 程度に相当し、高密度陸棚水と深層水の混合比を考えるとほぼ妥当な値であることから、高い氷床融解成分が本海盆での南極底層水の低塩化に寄与していることを示唆する。

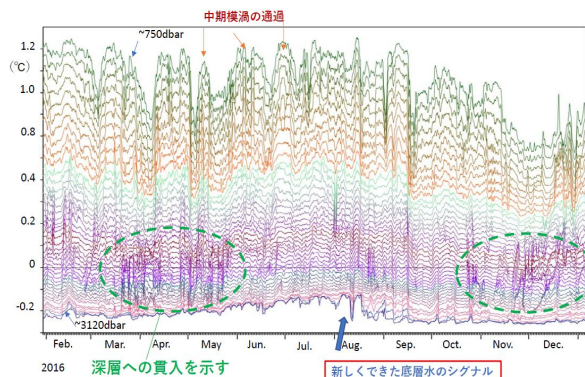


図 1 ピンセネス湾沖における深度約 750 ~ 約 3000m (約 50m 毎) の 1 年間の水温変動。(潮汐周期変動除去済み)

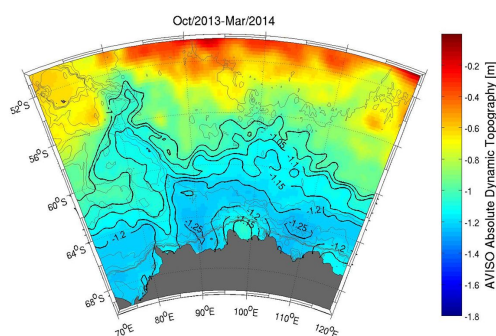


図 2 海水域対応の海面高度アルゴリズムにより、AVISO 海面高度データを補正した例。

(5) まとめと議論

本研究によって、深層水の形成と底層水の形成において季節的な変動があること、渦による輸送やスベルドラップ輸送の観測など、幾つか新たな知見を得ることができた。南北循環の指標となる周極深層水の湧昇が風応力分布と連動していることが分かり、モデルによる機構解明と定量評価を進める必要がある。また、衛星による海面高度データのアルゴリズムの開発とその有効性がある程度確認されたことにより、今後、南極海域の監視をより高精度に実施可能な糸口が見つかったと言える。最新の情報 (Qiu, 2017) によると、ピンセネス海域に隣接するトッテン氷床の融解が促進していることから、今後も継続して当該海域のモニタリング観測を実施し、南極深層底層水の変質を注視すること、風応力分布による子午面方向の輸送強化機構を解明すること、衛星海面高度データ解析アルゴリズムの検証と評価を行うことが重要である。

引用文献

- Aoki, S., Y. Kitade, K. Shimada, K.I. Ohshima, T. Tamura, C.C. Bajish, M. Moteki, and S.R. Rintoul (2013): Widespread freshening in the seasonal ice zone near 140°E off the Adélie Land Coast, Antarctica, from 1994 to 2012, *Journal of Geophysical Research*, Vol. 118, 11, 6046-6063, doi:10.1002/2013JC0090009.
- Ohshima, K.I., Y. Fukamachi, G. Williams, S. Nihashi, F. Roquet, Y. Kitade, T. Tamura, D. Hirano, L. H-Borreguero, I. Field, M. Hindell, S. Aoki and M. Wakatsuchi (2013): Antarctic Bottom Water production by intense sea-ice formation in the Cape Darnley polynya, *Nature Geoscience*, DOI: 10.1038/NGE01738
- Kitade, Y., K. Shimada, T. Tamura, G. D. Williams, S. Aoki, Y. Fukamachi, F. Roquet, M. Hindell, S. Ushio, K. I. Ohshima (2014): Antarctic Bottom Water production from the Vincennes Bay Polynya, East Antarctica, *Geophysical Research Letter*, Vol. 41, 3528-3534. doi:10.1002/2014GL059971.
- Jane Qiu (2017): The threat beneath Antarctica, *Nature* Vol.544, 152-154.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 7件)

Yujiro Kitade, Keishi Shimada, Shigeru Aoki, Kay I. Ohshima (2019): Recent research results and future project in the Antarctic Ocean by Umitaka-maru research group for physical oceanography, 123-135, In *Oceanography Challenges to Future Earth -Human and Natural Impacts on our Seas-*, 413pp., Ed. By T. Komatsu et al., Springer Nature Switzerland AG 2019. ISBN 978-3-030-00137-7.

Keiichi Yamazaki, Yujiro Kitade, Yosuke Igeta, Yutaka Kumaki and Tatsuro Watanabe (2019): Response of Near-Inertial Internal waves to Various Typhoon-Tracs Around the Tango Peninsula, Japan, 137-160, In *Oceanography Challenges to Future Earth -Human and Natural Impacts on our Seas-*, 413pp., Ed. By T. Komatsu et al., Springer Nature Switzerland AG 2019. ISBN 978-3-030-00137-7.

Masunaga, E., O. B. Fringer, Y. Kitade, H. Yamazaki and S. M. Gallagher (2017): Dynamics and Energetics of Trapped Diurnal Internal Kelvin Waves around a Midlatitude Island, *Journal of Physical Oceanography*, 47, 2479-2498.

Mizobata, K., E. Watanabe, and N. Kimura (2016), Wintertime variability of the Beaufort gyre in the Arctic Ocean derived from CryoSat-2/SIRAL observations, *J. Geophys. Res. Oceans*, 121, 1685-1699, doi:10.1002/2015JC011218.

北出裕二郎 (2016): 第54次日本南極地域観測隊 東京海洋大学研究練習船「海鷹丸」(KARE16; UM-12-08) 活動報告 南極資料, Vol. 60, 49 - 64.

Shimada, K., S. Aoki, K. I. Ohshima (2016): Creation of a gridded dataset for the Southern Ocean with a topographic constraint scheme. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 34, 511-532, doi:10.1175/JTECH-D-16-0075.

Tamura, T., K. I. Ohshima, A. D. Fraser, and G. D. Williams (2016): Sea ice production variability in Antarctic coastal polynyas. *Journal of Geophysical Research*, 121(5), 2967-2979, doi:10.1002/2015JC011537.

〔学会発表〕(計 16件)

Matheus Azevedo, Yujiro Kitade, Shigeru Aoki, Wind forced near-inertial period internal waves and their contribution to the mixed layer at the Antarctic Circumpolar Current, 気水圏シンポジウム (国立極地研究所), 2018年12月6日, 東京.

Matheus Azevedo, Yujiro Kitade, Wind forced near-inertial period internal waves at the Antarctic Circumpolar Current, 日本海洋学会 2018年度秋季大会, 2018年9月26日, 東京.

渡部和帆、北出裕二郎、嶋田啓資、南大洋グリッドデータセットを用いた循環構造の解析, 日仏海洋学会研究発表会, 2018年6月2日, 東京.

Matheus Azevedo, Yujiro Kitade, Seasonal deepening of the mixed layer at the Antarctic

Circumpolar Current and near-inertial period internal wave, 日仏海洋学会研究発表会, 2018年6月2日, 東京.

北出裕二郎, 溝端浩平, 嶋田啓資, ビンセネス湾沖大陸斜面における高密度陸棚水の混合過程について, JpGU2018, 2018年5月23日, 千葉.

Yujiro Kitade and Keishi Shimada, Formation process of Antarctic Bottom Water originating from a middle size polynya, Coast Bordeaux 2017, 2017年11月7日, ボルドー.

北出裕二郎, 嶋田啓資, 溝端浩平, 青木茂, 田村岳史, 千手智晴, 深町康, 大島慶一郎, "ビンセネス湾沖における巨大係留系による長期観測", 2017年度日本海洋学会秋季大会, 2017年10月15日, 仙台国際センター.

Shimada, K., Kitade Y., Aoki S., Ohshima K. I., Mizobata K., Tamura T., Increasing freshwater impact on Sea Level Rise in Australian-Antarctic Basin, JpGU-AGU Joint Meeting 2017, 20-25 May, 2017, Chiba.

Kitade, Y., Shimada K., Ogata Y., Aoki S., Kobayashi T., Mizobata K., Tamura T., Suga T., Ohshima K. I., Possibility of AABW source originating from meddle size of Polynya along the coast of Australian-Antarctic Basin, JpGU-AGU Joint Meeting 2017, 20-25 May, 2017, Chiba.

嶋田啓資, 北出裕二郎, 溝端浩平, 青木茂, 大島慶一郎, 田村岳史, 小達恒夫: 豪州南極海盆における南極底層水の急速かつ持続的な低塩分化. 日本地球惑星科学連合平成28年度連合大会, 2016年5月24日, 幕張メッセ, 千葉.

平野大輔, 北出裕二郎, 大島慶一郎, 深町康: ケープダンレー底層水形成に関わる乱流混合の役割. 日本地球惑星科学連合平成28年度連合大会, 2016年5月24日, 幕張メッセ, 千葉.

北出裕二郎, 嶋田啓資, 白井優, 青木茂, 田村岳史, 深町康, 大島慶一郎: オーストラリア南極海盆の南極底層水におけるビンセネス湾起源底層水的重要性. 日本地球惑星科学連合平成28年度連合大会, 2016年5月24日, 幕張メッセ, 千葉.

Yujiro Kitade, Keishi Shimada, Ogata Yuki, Shigeru Aoki, Taiyo Kobayashi, Toshio Suga and Kay I Ohshima: Possibility of AABW source originating from meddle size polynyas along the coast of Australian-Antarctic Basin, AGU Fall Meeting, 14 December 2016, San Francisco.

Haruka Nakano, Yujiro Kitade, Keishi Shimada: Validity of Thorpe scale estimation by high-resolution temperature sensor, Micro Rider, mounted on CTD system. AGU Fall Meeting, San Francisco, 14 December 2016.

引地伸太郎, 北出裕二郎: Cape Darnley 底層水形成域の混合過程に関する研究, 日仏海洋学会学術研究発表会, 2016年6月18日, 東京.

阪本美帆, 北出裕二郎: バイオロギングデータを用いた Vincennes 湾沖高密度陸棚水の特性に関する研究, 日仏海洋学会学術研究発表会, 2016年6月18日, 東京.

〔図書〕(計 0件)

〔産業財産権〕

出願状況(計 0件)

名称:

発明者:

権利者:

種類:

番号:

出願年:

国内外の別:

取得状況(計 0件)

名称:

発明者:

権利者:

種類:

番号:

取得年:

国内外の別:

〔その他〕

阪本 美帆, バイオロギングデータを用いた Vincennes 湾沖高密度陸棚水の特性に関する研究, 東京海洋大学大学院修士学位論文, 2018年3月.

引地 伸太郎 CapeDarnley 底層水の形成域における混合過程の評価, 東京海洋大学大学院修士学位論文, 2018年3月.

6. 研究組織

(1) 研究分担者

研究分担者氏名：溝端浩平
ローマ字氏名：Mizobata, Kohei
所属研究機関名：東京海洋大学
部局名：学術研究院
職名：助教
研究者番号(8桁)：80596058

研究分担者氏名：青木 茂
ローマ字氏名：AOKI, Shigeru
所属研究機関名：北海道大学
部局名：低温科学研究所
職名：准教授
研究者番号(8桁)：80281583

研究分担者氏名：田村 岳史
ローマ字氏名：TAMURA, Takeshi
所属研究機関名：国立極地研究所
部局名：研究教育系
職名：准教授
研究者番号(8桁)：40451413

(2) 研究協力者

研究協力者氏名：マテウス アゼベド
ローマ字氏名：Matheus Azevedo

研究協力者氏名：渡辺 和帆
ローマ字氏名：WATANABE, Kazuho

研究協力者氏名：嶋田 啓資
ローマ字氏名：SHIMADA, Keishi

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。