

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 5 月 11 日現在

機関番号：10101

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2013～2016

課題番号：25281001

研究課題名(和文)南極海オーバーターニングにおける淡水量変化の量的把握と原因究明

研究課題名(英文)Quantifying and investigating the causes of freshwater content change in the Southern Ocean overturning

研究代表者

青木 茂(AOKI, Shigeru)

北海道大学・低温科学研究所・准教授

研究者番号：80281583

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 14,400,000円

研究成果の概要(和文)：地球規模の海洋オーバーターンをになう底層の南極起源の海水は、近年、淡水化しつつあると指摘される。南極大陸沿岸で生まれる海水が全大洋底層の水のもとの一つとなるので、この沿岸海洋の変質の実態を把握して淡水化の原因を探るために、酸素の同位体をつかった特殊なトレーサーを含む観測研究を推進した。オーバーターンの起点となる海域の一つであるロス海沿岸部は淡水化しているが、これは西南極海洋の暖水化と同期していた。もう一つの起点であるアデリーランド沿岸では、海水生産の減少に加えて氷床融解成分の増加がみられた。これらより、大規模とローカルな氷況変化の両方が淡水含有量に大きな影響を与える可能性が明らかになった。

研究成果の概要(英文)：The Antarctic continental shelf is an important region in that it provides very dense water, which is one of the sources of Antarctic Bottom Water (AABW) that fills the global abyssal ocean. Recently freshening of AABW is reported and the causes are suspected to be on the Antarctic margin. This study aims to clarify the changes in oceanic properties in the Antarctic margin, especially based on in-situ hydrographic surveys including a noble tracer to detect continental ice melt component. For the Ross Sea shelf, the observed freshening corresponded to the basal warming in the West Antarctic shelf. For Adelie Depression off Adelie Land coast, both sea ice production and land-ice melt could change the shelf water properties, which can affect the properties of bottom water. Hence it was proposed that ice condition changes can affect the overturning circulation originated in the south.

研究分野：極域海洋学

キーワード：環境変動 環境分析 南極海 淡水循環 酸素安定同位体比

1. 研究開始当初の背景

(1) 近年、氷床流出の加速や降雪量の増加といった淡水循環の変化により、極域海洋の淡水化が進行することが予測されている。特に南極海では、表層水塊の淡水化が深層オーバーターニング循環を弱化させる可能性が指摘されており、塩分変化の実態把握とその原因の究明が急務となっている。これまで、南半球高緯度の海洋表層では大規模な淡水化が20世紀後半から起きていることが報告されている。加えて、南極底層水についても、淡水化が進行しつつある実態が徐々に明らかになりつつある。南極底層水の特性変化の把握においては、日本の我々のグループが歴史的に観測研究を実施してきた南大洋インド洋太平洋セクターでの成果も大きく貢献してきた。

(2) 南極底層水のこうした変質をもたらす原因として沿岸大陸棚上での水塊特性変化がそのひとつと考えられているが、観測の少ない大陸棚上の水塊特性変化の実態はまだ十分に掴めていない。大陸棚域ではロス海とウェッデル海の一部で淡水化が報告されているが、これ以外の海域では実態把握が遅れており、これまでの資料解析の促進と観測による変質の実態把握が求められていた。特に、日本の担当海域とも言えるインド洋太平洋セクターを中心に、海面から底層におよぶ変化の実態把握が急務であった。

(3) こうした淡水量すなわち塩分の変化は海洋変動の実態把握における基礎であるが、淡水化の原因が氷床起源の融解水の増加であるのか、降水の増加であるのか、海水生成の減少であるのかといったメカニズムを究明するうえで、塩分の情報だけでは不十分である。酸素安定同位体比は、淡水の相変化過程や輸送過程における同位体分別の相違により、淡水の履歴や起源を把握する上で極めて有益な特殊トレーサーである。水塊の経年変化の原因の究明においても酸素安定同位体比は有益であると考えられるが、これまでその分析手法の特殊性から、その観測資料は極めて限られている。そのため、観測のほとんど存在しないインド洋太平洋セクターで、現状を把握し、将来の変化を評価するためのベースライン観測を充実させることが求められる。一方で、沿岸域には冬期の冷却、海水生成と夏期の加熱、海水融解という顕著な季節変動があり、この季節変化過程で酸素安定同位体比がどのように変化するか、観測により導出された例は皆無である。季節変動の把握は、経年的・長期的なシグナルを正しく把握するためにも不可欠であり、南極海における酸素安定同位体比変化の基礎的な理解を進展させる必要があった。

2. 研究の目的

(1) 本研究では、南極底層水に代表される南

半球におけるオーバーターニングの特性変化の実態を把握するため、酸素同位体比に重点をおいた現場観測資料の取得、およびそれらに過去の観測資料も加えたデータ解析に基づき、南大洋とくに沿岸域の水塊における淡水分布様式とその時空間変化について記述することを目的とした。国際的な協力体制を推進し、海水試料の広域での取得と今後のモニタリング体制確立へ向けた準備を行うことも目指している。水塊特性変化の原因を解明するため、酸素安定同位体比の試料取得を促進し、データベースを整備することが目的である。あわせて酸素安定同位体比の季節変化を現場海洋において実際に把握するための観測手法の構築を目指した。

3. 研究の方法

(1) 本研究の基盤として、塩分および酸素同位体比の現状把握および試料取得のための現場観測を国内外の観測機関と共同で実施した。2014年から海鷹丸により、オーストラリア南極海盆 110°E 線上での観測を実施した。また、豪オーロラオーストラリスでは2015年に、アデリー海岸沖に加え、海水の障壁のためにこれまで観測されていなかったトッテン氷河近傍での観測に成功し、約900個の酸素同位体比試料を得た。さらに2016年には国際共同観測センチネルに関連して、白鳳丸でケープダンレー沿岸沖での陸棚斜面における水温・塩分データおよび酸素同位体比試料の取得に成功した。また、韓国・独と共同で、アムンゼン海およびウェッデル海大陸棚域での海水試料も取得に成功し南極大陸沿岸全周を網羅する海域において酸素同位体比分析用のサンプルを取得することに成功した。両航海において、あわせて1700個を超える酸素同位体比の試料が取得できた。期間中に取得したこれらの海水試料に加え、過去に観測船みらいにより取得したサンプルの酸素同位体比分析を進めた。こうした国際的な共同体制の構築が想定以上に発展し、試料の採取ポイントはこれまでの我々の

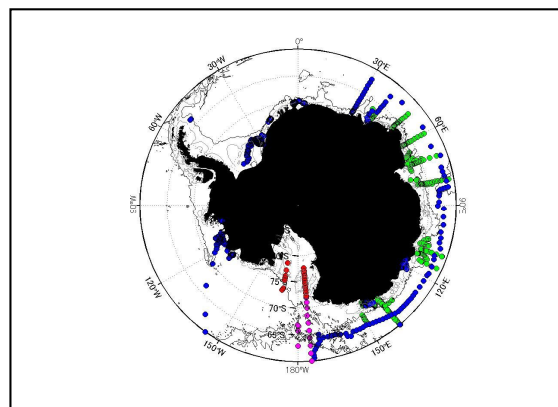


図1. 本研究で取得した酸素同位体比の観測点とこれまでの我々の観測点の分布

観測資料と合わせると南極の沿岸主要域をほぼ網羅できた(図1)。得られた海水試料が膨大で、本期間内では部分的な分析処理にとどまったが、今後これらに基づき時間変化の原因を推定するための貴重なベースラインを引くことができると期待される。

(2) 取得した試料の分析を行うとともに、得られた資料や収集した過去の観測結果に関する解析を進めた。NOAA World Ocean Database 等の世界中のデータベースから塩分の資料を集め、淡水存在量の時間変化に関する解析を実施した。また、酸素同位体比の空間分布については、NASA GISS のデータベースの資料もあわせ、大陸棚から外洋域にかけての海洋全層における分布を調べた。こうした塩分に基づく解析結果の理解のため、衛星観測に基づく海水生産量の時系列変化や、大気再解析データに基づく降水量変化の時系列データを併用した。酸素同位体比の季節変動を調べるために、時系列採水器を導入し、海水試料を通年で取得するための係留系を、機材や観測機会が整った最終年度に設置した。回収後の分析が期待される。

4. 研究成果

(1) 海鷹丸や豪オーロラオーストラリスで行った海洋観測の結果から、アデリーランド海岸沖の季節海水域において、南極底層水に加え、表層水および陸棚水が 1990 年代から 2010 年代にかけて淡水化していることが明らかになった。底層水の淡水化については 2010 年のメルツ氷河舌の切離により底層水供給量の低下が加速した可能性が示唆される。同時に実施した大気再解析データや衛星観測に基づく降水量および海水生産量の解析から、表層水の低塩化の原因として、特に対象海域低緯度側では降水量の増加が主要な役割を果たしていると考えられた。一方、高緯度側では、塩分変化を説明するのに降水変化だけでは不十分で、陸氷融解の寄与を考慮する必要があることが分かった。

(2) さらに、南極大陸を取り巻く周極的な領域において、長期的な塩分変化の解析を進めた。世界中の研究機関で利用できるデータに我々の取得した資料を加え、概ね 30 年程度以上にわたる水温・塩分の時間変化をマッピングしたところ、アムンゼン海周辺では暖水化と同時に高塩化がみられる一方、下流のロス海陸棚域では低塩化傾向がみられた。これは周極深層水起源の成分の増加と整合的である。ロス海陸棚域から外洋へ向かう低塩化のパスもみられた。また、時間変動幅が大きいものの、ウェッデルエンダービー海盆の東端の陸棚域においても、低塩化傾向が見積もられた。こうした結果と同時に、オーストラリア南極海盆の陸棚域ではデータが偏在しており、長期トレンドを求めるにはデータの十分な海域が多いことが改めて浮き彫り

になり、海域を限定して集中的にデータを取得することの必要性も明らかになった。

(3) 上記のような塩分・淡水量変化の基礎となる淡水起源ごとの流入量・存在量の基礎的バランスを考えるために、アデリーランド海岸沖を含む南極沿岸域全体において、塩分と酸素同位体比をもとに淡水成分の起源の空間的な分布を調べた。

(4) 酸素同位体比の空間分布としては、みらいのサンプルの分析から、ロス海から低緯度太平洋に伸びるパスが得られた。表層のみならず底層においても、ロス海域とオーストラリア南極海盆における淡水起源特性は全体的に相違している。一方、トッテン氷河前縁部で取得した酸素同位体比資料は、西南極と同様、周極深層水起源の高い同位体比の水の上に低い同位体比を持つ水が分布していることを見出した。ただし、その海洋上層での値は過去の西南極での値と比較して同位体比は高く、氷床融解成分の含有比率は小さいことを反映していると考えられる。沿岸における酸素同位体比の分布構造から、西南極域では表層域には陸氷融解の影響が強く底層には周極深層水の流入で陸水による変質がほとんどみられないのに対し、アデリーランド海岸沖では強い鉛直混合により陸氷融解の影響が全層にみられた。

(5) 全球オーバーターニングの基点の一つであるアデリーランド海岸沖において、さきの低塩化という解析結果を踏まえ、日本が過去に実施した観測や NASA データセットにある過去の観測に基づき、酸素同位体比を併用して淡水量の変化を解析した。淡水量の時間変化については、陸棚上の表層水および底層水が低塩化しつつあり、さらに 2010 年のメルツ氷河舌の剥離前後の資料を比較した。衛星資料に基づくデータセットによると海水生産量が減少しており、海水生産起源成分の減少が塩分の低下に繋がることを確認した。メルツ氷河舌の西側と東側とで塩分および酸素同位体比の分布が異なり、また変化傾向も異なるものの、2011 年および 2015 年に取得し分析した同位体比は過去(2001 年)の値に対して全体として減少した事実を見出した。海水形成過程では酸素同位体比はほとんど変化しないため、この同位体比の減少は陸氷融解成分の増加によるものと推定された。このことは、氷河舌の形状の変化が海水生産を通じて海洋の貯熱量分布を変化させて陸氷融解を変化させた可能性を示唆しており、深層オーバーターニングの変化を解明する上で大陸棚上における広域および局所的な氷況変化の重要性を示すものである。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 10 件)

Aoki, S., Breakup of land-fast sea ice in Lutzow-Holm Bay, East Antarctica and its teleconnection to tropical Pacific sea-surface temperatures, *Geophys. Res. Lett.*, 査読有, 44, 2017, 3219-3227, doi:10.1002/2017GL072835.

Shimada, K., S. Aoki, and K.I. Ohshima, Creation of a Gridded Dataset for the Southern Ocean with a Topographic Constraint Scheme, *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 査読有, 34, 2017, 511-532. DOI: 10.1175/JTECH-D-16-0075.1.

Kusahara, K., H. Hasumi, A.D. Fraser, S. Aoki, K. Shimada, G.D. Williams, R. Massom, and T. Tamura, Modeling ocean-cryosphere interactions off the Adelie and George V Land, East Antarctica, *J.Clim.*, 査読有, 30, 2017, 163-188, doi: 10.1175/JCLI-D-15-0808.1.

Kida, S. H. Mitsudera, S. Aoki, and 21 coauthors, Oceanic fronts and jets around Japan: a review, *J. Oceanogr.*, 査読有, 71, 2015, 469-497, doi:10.1007/s10872-015-0283-7, 2015.

Aoki, S., G. Mizuta, H. Sasaki, Y. Sasai, S.R. Rintoul, and N.L. Bindoff, Atlantic-Pacific asymmetry of subsurface temperature change and frontal response of the Antarctic Circumpolar Current for the recent three decades, *J. Oceanogr.*, 査読有, 71, 2015, 623-636, doi:10.1007/s10872-015-0284-6.

Schmidko, S., K.J. Heywood, A.F. Thompson, S. Aoki, Multi-decadal warming of Antarctic waters, *Science*, 査読有, 346 (6214), 2014, 1227-1231, doi:10.1126/science.1256117.

Kitade, Y., K. Shimada, T. Tamura, G.D. Williams, S. Aoki, Y. Fukamachi, F. Roquet, M. Hindell, S. Ushio, K.I. Ohshima, Antarctic Bottom Water production from the Vincennes Bay Polynya, East Antarctica, *Geophys. Res. Lett.*, 査読有, 41, 2014, 3528-3534, doi:10.1002/2014GL059971.

Nakamura, K., S. Aoki, K. Yoshimura, and N. Kurita, Distribution of oxygen isotope ratio of precipitation in the Atlantic-Indian sectors of the Southern Ocean, *SOLA*, 査読有, 10, 2014,

154-157, doi:20.2151/sola.2014-032.

Sugiyama, S., T. Sawagaki, T. Fukuda, and S. Aoki, Active water exchange and life near the grounding line of an Antarctic outlet glacier, *Earth and Planetary Science Letters*, 査読有, 399C, 2014, 52-60, doi:10.1016/j.epsl.2014.05.001.

Aoki, S., Y. Kitade, K. Shimada, K.I. Ohshima, T. Tamura, C.C. Bajaj, M. Moteki, and S.R. Rintoul, Widespread freshening in the seasonal ice zone near 140°E off the Adelie Land Coast, Antarctica, from 1994 to 2012, *J. Geophys. Res.*, 査読有, 118(11), 2013, 6046-6063, doi:10.1002/2013JC009009.

[学会発表](計 20件)

Aoki, S., R. Kobayashi, S. Rintoul, T. Tamura, Regime shift in basal melt of the Mertz Glacier after the 2010 calving. IGS, International Symposium on Interactions of Glaciers and Ice Sheets with the Ocean, 15 July 2016, Scripps Institution of Oceanography, La Jolla (California), USA.

Aoki, S., T. Tamura, Team ROBOTICA, Research of Ocean-ice BOUNDARY Interaction and Change around Antarctica (ROBOTICA), The Seventh Symposium on Polar Science, National Institute of Polar Research (Tokyo, Tachikawa), 1 December 2016.

山之口勤, 土井浩一郎, 中村和樹, 青木茂, 澁谷和雄, 衛星データを用いた南極リュツォホルム湾における定着氷流出の観測, 第61回日本リモートセンシング学会学術講演会, 新潟テルサ(新潟県新潟市), 2016年11月1日~2日.

平野大輔, 田村岳史, 牛尾収輝, 大島慶一郎, 青木茂, 現場観測による白瀬氷河棚氷底面融解の実態把握, 2016年度海洋学会秋季大会, 鹿児島大学(鹿児島県鹿児島市), 2016年9月14日.

山之口勤, 土井浩一郎, 澁谷和雄, 中村和樹, 青木茂, ALOS-2/PALSAR-2でみる南極棚氷・氷床 Lutzow-holm 湾の定着氷変動, 日本地球惑星科学連合 2016年大会, 幕張メッセ(千葉県千葉市), 2016年5月22日.

嶋田啓資, 北出裕二郎, 青木茂, 豪州南極海盆の中・深層に広がる低塩分化, 2016年度海洋学会春季大会, 東京大学(東

京都文京区),2016年3月15日.

Aoki, S., ROBOTICA: Research of Ocean-ice BOUNDARY Interaction and Change around Antarctica, ILTS International Symposium on Low Temperature Science, Hokkaido University (Hokkaido, Sapporo), 30 November 2015.

Aoki, S., T. Tamura, Team ROBOTICA, Research of Ocean-ice BOUNDARY Interaction and Change around Antarctica (ROBOTICA), The Sixth Symposium on Polar Science, National Institute of Polar Research (Tokyo, Tachikawa), 17 November 2015.

Shimada, K., Y. Kitade, K. Mizobata, S. Aoki, K. I. Ohshima, T. Tamura, T. Odate, Rapid and persistent freshening of Antarctic Bottom Water in the Australian-Antarctic Basin, The Sixth Symposium on Polar Science, National Institute of Polar Research (Tokyo, Tachikawa), 17 November 2015.

小林理央, 青木茂, 草原和弥, Stephen R. Rintoul, アデリー海岸沿岸域における水塊特性の経年変動に見られる海洋-氷床相互作用, 2015年度海洋学会秋季大会, 愛媛大学(愛媛県松山市), 2015年9月28日.

北出裕二郎, 嶋田啓資, 白井優, 青木茂, 田村岳史, 深町康, 牛尾収輝, 大島慶一郎, ピンセネス湾沖における南極底層水の特性, 2015年度海洋学会春季大会, 東京海洋大学(東京都港区), 2015年3月22日.

鈴木萌, 北出裕二郎, 青木茂, 馬場尚一郎, 勝又勝郎, 南大洋表層混合層の発達過程における水塊変動と熱塩フラックス, 第5回極域科学シンポジウム, 極地研(東京都立川市), 2014年12月2日.

草原和弥, 羽角博康, Fraser D. Alexander, 田村岳史, 青木茂, 東ウィルクスランド沖の雪氷-海洋相互作用に関する数値モデリング, 第5回極域科学シンポジウム, 極地研(東京都立川市), 2014年12月2日.

北出裕二郎, 嶋田啓資, 白井優, 青木茂, 田村岳史, 深町康, 牛尾収輝, 大島慶一郎, ピンセネス湾沖ピンセネス湾沖南極底層水の特性, 第5回極域科学シンポジウム, 極地研(東京都立川市), 2014年12月2日.

山之口勤, 土井浩一郎, 青木茂, 澁谷和雄, Grounding line 検出における多周波数 SAR 利用の試み, 第5回極域科学シンポジウム, 極地研(東京都立川市), 2014年12月3日.

山之口勤, 土井浩一郎, 中村和樹, 青木茂, 澁谷和雄, 多周波数マイクロ波センサを用いた氷床 棚氷域変動観測, リモセン学会第57回学術講演会, 京都大学宇治おうばくプラザ(京都府京都市), 2014年11月6-7日.

青木茂, 水田元太, 佐々木英治, 笹井義一, S.R. Rintoul, N.L. Bindoff, 南極周極流域でのここ30年程度の水温・流軸位置変化傾向にみられる海盆間非対称性, 2014年度海洋学会秋季大会, 長崎大学(長崎県長崎市), 2014年9月16日.

山之口勤, 土井浩一郎, 中村和樹, 青木茂, 多周波数 SAR による氷床-棚氷域モニタリング, Japan Geoscience Union Meeting 2014, パシフィコ横浜(神奈川県横浜市), 2014年4月29日.

白井優, 北出裕二郎, 嶋田啓資, 青木茂, 深町康, 大島慶一郎, ピンセネス湾沖南極底層水の流動特性について, 2014年度海洋学会春季大会, 東京海洋大学(東京都港区), 2014年3月27日.

北出裕二郎, 嶋田啓資, 田村岳史, 深町康, 青木茂, 牛尾収輝, 大島慶一郎, ピンセネス湾ポリニヤにおける高密度陸棚水の生成について, 2013年度海洋学会秋季大会, 北海道大学(北海道札幌市), 2013年9月19日.

〔図書〕(計 1件)

青木茂, 淡水循環と極域, 朝倉書店, 「低温環境の科学事典」河村公隆 他編, 2016, 160-161.

〔その他〕

ホームページ等

<http://climbsd.lowtem.hokudai.ac.jp/group/shigeru/sci/deltao18.html>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

青木茂 (AOKI, Shigeru)

北海道大学・低温科学研究所・准教授

研究者番号: 80281583

(2) 研究分担者

深町康 (FUKAMACHI, Yasushi)

北海道大学・低温科学研究所・准教授

研究者番号: 20250508