

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 16 日現在

機関番号：12614

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2011～2014

課題番号：23310003

研究課題名(和文)南極海表層水の低塩分が深層大循環に及ぼす影響評価に関する基礎研究

研究課題名(英文)A basic study on evaluation of effects on the global deep circulation caused by freshening of Antarctic surface water

研究代表者

北出 裕二郎(KITADE, YUJIRO)

東京海洋大学・海洋科学技術研究科・准教授

研究者番号：50281001

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 15,200,000円

研究成果の概要(和文)：南極海表層水の低塩分に伴う南極底層水の変質と深層循環に及ぼす影響を評価するため、東京海洋大学研究練習海鷹丸により2012年から2015年の毎年1月に南極海110°E及び140°E周辺海域で、水温・塩分場の観測、長期係留観測、乱流観測等を実施した。本観測では、中規模ポリニヤを起源とした南極底層水の生成を世界で初めて明らかにし、オーストラリア南極海盆の底層水上部へと沈み込んでいることを示した。底層水の顕著な低塩分は、140°Eだけでなく110°Eでも認められ、特に、昇温も認められた2014年には海盆底層水の密度が相対的に軽くなり、ピンセネス湾起源底層水が海盆底層水下部まで達していることが分かった。

研究成果の概要(英文)：Freshening of Antarctic Bottom Water (AABW) associated with freshening of sea surface water has been reported in recent years. In order to evaluate the effects of freshening of AABW to the Global deep circulation, hydrographic observations, long term mooring observations and turbulence measurements were carried out around 110°E and 140°E in January of 2012 to 2015. We found Bottom Water originating from the Vincennes Bay Polynya (VBBW) in the first time. Our observation also showed that the VBBW has spread into the upper part of AABW in Australia-Antarctica Basin. Freshening of Bottom water was also indicated off the Vincennes Bay region. Especially, the data obtained in January of 2014 showed that the VBBW has a potential to sink down to the ocean floor when the water density of surrounding AABW was reduced by freshening and warming.

研究分野：海洋物理学

キーワード：海洋科学 極域環境 環境変動 深層循環 南極底層水 海面塩分

1. 研究開始当初の背景

近年、深層大循環の原動力となる南極底層水が低塩分化していることが分かってきた。これは地球温暖化に伴う氷河の融解や降水量の増加により海表面の塩分が低くなったためと推察されているが、表層水の低塩分化がどのようなプロセスを経て南極底層水や中層水の低塩分化へと至るのか、定性的にも定量的にも明らかにされていない。

2. 研究の目的

本研究は、当該申請者所属機関の海鷹丸により南極海で繰り返し観測を実施し、底層水が形成されるプロセスを定量的に評価することにより、極域表層水の低塩分化が深層大循環に及ぼす影響を評価するための基礎研究である。本研究では、継続して観測できる海域でなおかつ、底層水が形成されている可能性がある海域として、110°Eの南端に位置するビンセネス湾を主要な観測対象海域と定め、以下の項目の観測・研究を実施した。(1)陸棚斜面海底に長期係留系を設置して南極底層水の生成過程と生成量およびその変化量を捉える、(2)広域における水温、塩分溶存酸素の観測を行い時空間的な水塊構造の変質をモニタリングする、(3)南極海の上層(海面から500m深)において乱流・微細構造の観測を実施して熱塩フラックスと主要な物理機構を解明する、(4)さらに、観測衛星で得られる極域海面塩分データの精度向上を図るための海面塩分を観測し解析する。これらを総合的に評価・考察することによって極域海表面へ供給された淡水がどのように南極底層水やその源となる陸棚水の低塩分化に作用するのかを解明するための基礎的な研究を行った。

3. 研究の方法

南極海での観測は、海鷹丸の南極海観測航海時(2012年~2015年の毎年1月)に実施し、そのほかの期間(2~12月)には観測機器の調整やデータ解析、訓練観測航海などを実施した。南極海で実施した観測は、以下の4つに分けられる。それぞれの観測結果は、南極底層水の生成、水塊特性変動、乱流混合評価等の解析に使用された。

(1)係留観測

中規模ポリニヤが形成されるビンセネス湾(ビンセネス湾ポリニヤ)沖大陸斜面海底に長期係留系を設置して南極底層水の生成過程と生成量およびその変化を捉える。係留系は全長130m~200mで、メモリ式CTD(SBE37)及びメモリ式流速計(RCM-8、RCM-11)により実施した。最初の係留観測(2011-2012年)では、ビンセネス湾ポリニヤを起源とした底層水が形成されているか、どのような経路で沈み込むのかなど、全く解明されていなかったため、係留系はビンセネス湾沖にある海脚の東側(図1A)と西側(図1B)の同じ深度帯(3000m)

に設置した。2回目のビンセネス湾沖長期係留観測(2013-2014年)では、1回目の係留の結果を基に、ビンセネス湾沖海脚の東側に2系を斜面に直交する様に水深約3200mと約3450mの地点に設置した。いずれの係留系も、1年間の係留を経て無事回収することができた。

(2)水温塩分場の観測(広域CTD観測)

海鷹丸によるCTD観測は、2012~2015年の毎年1月頃に実施した。観測点は、110°Eおよび140°Eに沿った点は毎年同じ緯度経度(ただし、140°Eでは2012と2013年のみ実施)で、ビンセネス湾沖の海域(107°E~115°E)では海水縁の状況により毎年同じ観測点ではないが、陸棚斜面域と海脚斜面域、係留観測地点において、水温・塩分・溶存酸素の詳細な構造を捉えた。両海域とも南極底層水の顕著な塩分低下が示された。

(3)乱流微細構造の観測

南極海の上層における熱塩フラックスと主要な物理機構を解明するため、TurboMAPを用いた乱流・微細構造の観測(海面から500m深)を実施した。観測点は、110°Eおよび140°Eに沿って南極発散域の59°Sより南で氷縁にかけての海域で、CTD観測後に実施した。

(4)海面塩分の観測

海鷹丸の航海中に船舶の船底から取水して連続的に計測しているサーモサリノグラフ(取水サンプルを船内に設置したCTDで計測する機器)による観測、各観測点で停船して実施するCTD(SBE9Plus)観測に加えて、ごく海表面における水温塩分を計測するため、浮環にメモリ式CTD(SBE37)を取り付け、停船観測時間中に海面の塩分値を計測する機器を作成して観測を行った。また、本観測と関連して、表層の塩分取り込み過程を明らかにするための観測として、2012-2013年には、140°E、60°Sの地点に設置されたJAMSTECの南大洋トライトンプイの海面ブイの下部にCTセンサーを取り付けた。約1年間にわたる海面塩分の変化を捉えることができた。

4. 研究成果

(1)新しい南極底層水生成域の発見

南極底層水(AABW)は、冬季の海面冷却と海氷生産による低温高塩分水が南極周極深層水と混合して形成され、陸棚斜面に沿って沈み込んでいるもので、深層大循環の重要な駆動源の一つとなっている。AABWの主な生成域は、従来、ウェッデル海、ロス海、アデリーランド沖だけと考えられていたが、近年、巨大ポリニヤが形成されるケープダンレー沖を起源とする底層水が発見された(Ohshima et al., 2013)。その後、当該研究課題で実施したビンセネス湾(図1)沖での係留観測により、中規模ポリニヤにおいても、3000m深程度まで沈み込む南極底層水が生成されていることを世界で初めて明らかにした(図2)。ビンセネス湾起源の底層水を以後VBBWと呼ぶ。

係留点で冬季に認められた水塊を構成する水系とその特性を明らかにするため、110~140°E のCTD データに加え、バイオロギングにより得られた陸棚上の高密度陸棚水(DSW)を調べた。陸棚上の窪地の600~800m深には、塩分34.5水温約-1.9°Cのほぼ様なDSWが存在することが分かった。このDSWとCDWの混合により、係留で得られた水塊が形成されることが分かった。また、沖合でARGOフロートにより得られた表層塩分および海水生産量から求めた塩分フラックスより、塩分34.5のDSWが生成される量を求めた。計算の結果、DSW排出流量は7月に最大で約 $0.68(\times 10^6 \text{ m}^3/\text{s})$ 、11月~4月の排出量はゼロであるが、年平均排出量としては約 $0.16 \pm 0.07(\times 10^6 \text{ m}^3/\text{s})$ であると見積もられた。

さらに、CDWとDSWが1:1の割合で混合し、係留点Aで観測された水塊が形成されたと考え、VBBWの生成量は $0.32 \pm 0.14(\times 10^6 \text{ m}^3/\text{s})$ と算出された。生成される水塊特性としては、オーストラリア南極海盆のAABWの最も重い水塊よりは若干軽い、AABWの層内に十分潜り込める水塊である。

この海盆に面する中規模ポリニヤは、アデリーランド沖を除いても、5か所存在するが、これらのポリニヤ起源のAABWは海盆底層水に大きなインパクトを与えているものと考えられた。

以上の研究成果はGeophysical Research Letter誌(Kitade et al.,2014)に記載された。

(2)昇温低塩化の影響と今後のモニタリングの重要性

ビンセネス湾起源の南極底層水の発見後、継続して観測を行い、水塊変化をモニタリングした結果、低塩化に加え、昇温が見られ低密度化していることが示された。それに伴い、ビンセネス湾ポリニヤ起源の底層水の影響力が相対的に上昇している様子を捉えた。

2013-2014年の係留観測点(図1C, D)はそれぞれ約14km離れ水深は200m程度異なる。この係留系CとDでの水温・塩分・密度変化から、両点ともに明確な季節変動をしており、7月中旬以降全層(3132~3462dbar)でほぼ様となり、底層水の厚みは300mを超えることがわかった。

海鷹丸のSBE911PLUSで得た水温・塩分から、2014年のビンセネス湾沖の底層水の特徴がその前と比べて、低塩化している特徴が明瞭に認められた。特に興味深い変化としては、図3に見られるように2011~2013年では、低塩分のVBBWと高塩分のRSBW・ADLBW起源の水塊との2つに分かれていたが、2014年(灰色線)では110°ラインでも底層水が低塩分側に位置している点である。低塩分化したAABWが当海域に移流されてきたものかは、さらに精査する必要がある。いずれにしても、AABWの低塩分化に伴い、密度的に軽くなった場合には、VBBWが3400mより深くまで沈み込むことを示す結果と言える。

係留(SBE37)で得られた水温・塩分をFig.3の θS ダイアグラム上にプロットすると、2013-2014年の係留(十字星印)で得られた水温・塩分は、2011-2012年(星印とダイヤ印; Kitade et al.2014)の係留のものとはほぼ同様に変化しているが、若干低塩分側

に位置する。

この研究成果は、2015年度日本海洋学会春季大会にて発表しており、現在論文作成中である。

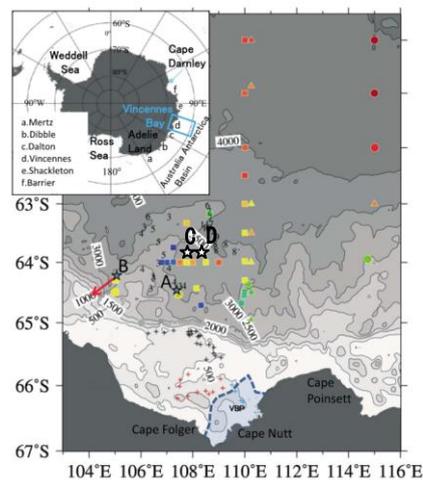


図1 観測海域地形図。星印は係留観測点。色付きの点は各観測点における中立密度28.32(kg/m³)面上の塩分を示す。

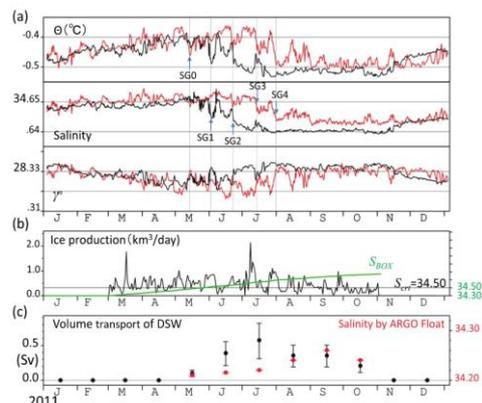


図2 (a)係留観測で得られた水温塩分、中立密度。SG1-SG4に新しくできたAABWの沈み込みを確認できる。(b)ビンセネス湾ポリニヤにおける海水生産量。(c)ビンセネス湾沖の表層塩分と高密度陸棚水の

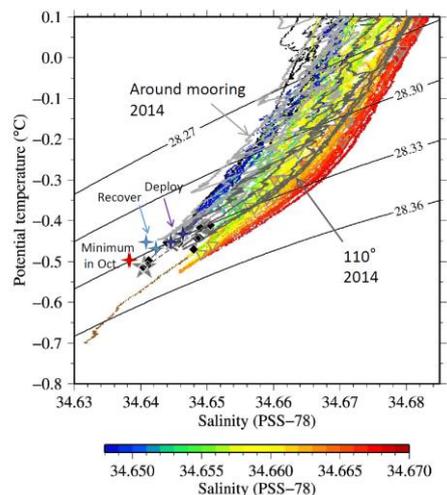


図3 2011~2014年に実施されたCTD観測より作成した θS ダイアグラム。中立密度28.32面上の塩分で色分けされており、灰色の θS 曲線は2014年の観測結果を示す。薄い灰色は係留点近く、濃い灰色は110°Eで計測されたものである。灰色の★と●は2011-2012年の係留で得られた水塊、十字星印は2013-2014年の係留で得られた水塊を示す。

(3)広域CTD観測から見た海洋微細構造の分布
南大洋の各フロント域、および表層・亜表層における主要な混合プロセスを解明するため、110°E-140°EでのCTD観測データを解析した。解析には、東京海洋大学の練習船海鷹丸によって2003年~2011年の間に5度にわたって得られた南大洋インド洋セクター110°E, 115°E, 130°E, 140°E測線のCTD(SBE911plus CTD)観測データを用いた。キャベリングおよびサーモバリシティの効果は、McDougall(1987)に倣って評価した。その際、水平拡散係数の算出にはIkawa et al.(1998), Okubo(1971)の水平拡散係数と拡散スケールとの関係式を用いた。

観測線毎に調べた結果、南極スロープフロント(ASF)近傍とASFの北側と亜南極フロント(SAF)域の亜表層で強いキャベリングの効果、大陸斜面深層部では強いサーモバリシティの効果が見られ、鉛直流速として評価すると最大で $O(10^{-5})(m/s)$ であった。

次に、キャベリングおよびサーモバリシティによる鉛直流速を浮力フラックスに換算し、乱流や二重拡散対流の効果と比較した(例えば、図4)。その結果、ASF域と大陸斜面深層部では乱流による浮力フラックスが、他の効果より2桁以上大きく、AABWの形成過程において乱流混合の影響が大きいことが分かった。

一方、ASFの北側、SAF域の亜表層では、キャベリングと二重拡散対流による浮力フラックスは共に同じオーダー $O(10^{-10})$ であった。そのためASFの北側では周極深層水からModified周極深層水への変質過程に、またSAF域亜表層では亜南極モード水と南極表層水北部の水塊の形成に関与している可能性が考えられた。

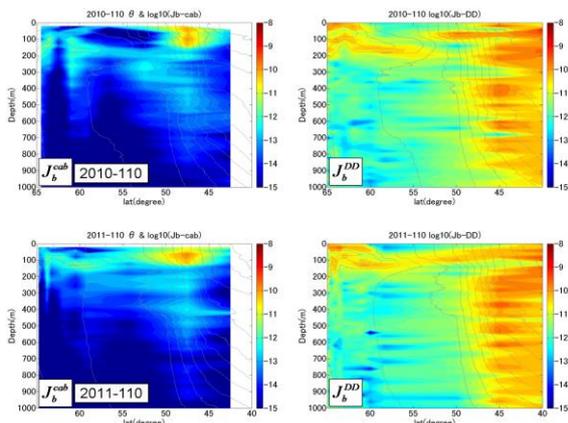


図4 110°Eにおける2010年(上段)と2011年(下段)の観測から、キャベリング(左)及び二重拡散対流(右)の浮力フラックス(W/kg)の分布の一例。

以上の研究成果の一部は、研究協力者である芦田将成氏の修士学位論文としてまとめられた。

(4)乱流観測ケープダンレー沖と発散帯における乱流の構造

①ケープダンレー沖乱流とその効果

南極底層水の新しい生成域として発見されたケープダンレー沖において、初めて実施

した乱流観測結果(図5)を解析した。大陸斜面域での乱流観測記録を解析した。斜面上における高密度陸棚水の分布構造が、スロープカレントにより形成される海底エクマン輸送で良く説明できることを明らかにした。このプロセスは、夏季のケープダンレー沖でのAABW形成における重要なプロセスであると考えられた。

以上の研究成果は、Journal of Geophysical Research誌(Hirano et al. 2015)に記載された。

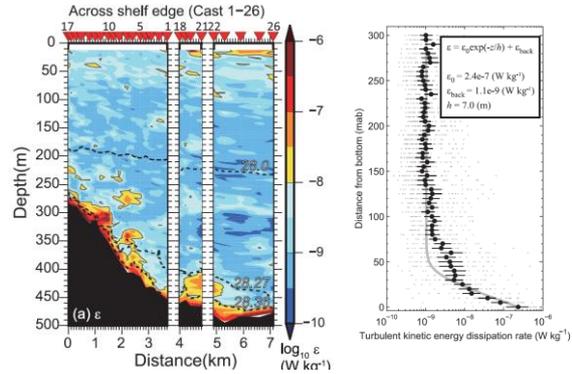


図5 ケープダンレー沖で観測した乱流エネルギー散逸率の分布(左)と鉛直構造(右)。

②南極発散帯での乱流観測

深層大循環の流量を精度良く評価するには、南極海発散帯における湧昇流量を正確に評価する必要がある。110°E及び140°E線の南極発散帯で乱流観測を実施し、発散帯における湧昇の強さを評価した。

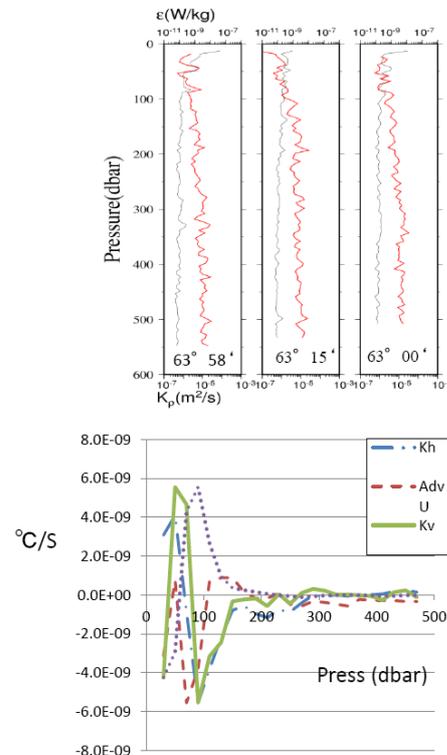


図6 上段：乱流エネルギー散逸率 ϵ (赤)と拡散係数のプロファイル(灰)の一例。下段：熱の保存式における各項の大きさの深度変化。

発散帯で観測された乱流エネルギー散逸率 ε から求めた鉛直拡散係数を基に熱保存式における各項のバランスを調べた(図 6)。鉛直拡散項と水平拡散の項が同深度で同符号である事から、本観測で定量的に評価できた鉛直拡散項とバランスする鉛直流速を試算した。見積もられた鉛直流速は $10^{-7}m/s$ と非常に小さいが、周極的な湧昇流量に換算した場合、6.6Sv 程度と見積もられ、AABW の生成量に匹敵することが示された。本解析の概略は、月刊海洋(北出他,2013)に記載されている。現在、最新の観測結果と合わせて、さらに詳細な解析を行っている。

(5)まとめと今後の課題

以上の結果は、いずれも当該研究海域では世界で初めて実施された係留観測および乱流観測の結果を基に、同時に実施したCTD観測、アルゴフロート及びバイオロギングデータを組み合わせて解析して得られたものである。本研究課題の実施により、表層低塩分水が深層へと輸送され、底層水が低塩分化するプロセスには図7に示したように、4つのプロセスに大きく分けられると考えられた。本課題では、定量的に評価できた部分もあるが、多くは定性的な理解にとどまっている。

また、観測年によっては、海盆の海底まで沈み込めない深層水(図7中のVBDW)の生成が顕著に認められたこと等から、さらなる研究課題が浮き彫りになったと言える。今後、さらに各プロセスの定量的な評価を進めるとともに、底層水の変質の動向を監視し続けていくことが重要である。

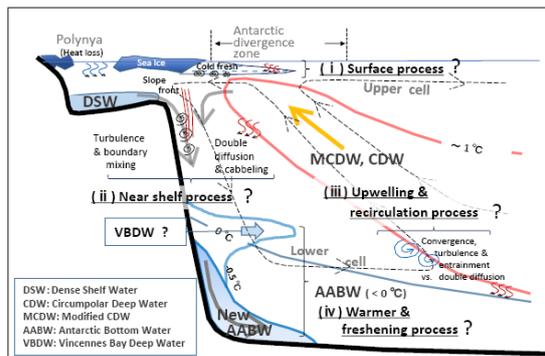


図7 当該海域における物理プロセスの模式図。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 15 件)

① Hirano, D., Y. Kitade, Y. Fukamachi and K. I. Ohshima (2015): The role of turbulent mixing in the modified Shelf Water overflows that produce Cape Darnley Bottom Water, *Journal of Geophysical Research*, 120, 910-922, doi: 10.1002/2014JC010059. (査読有)

② 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. (査読有)

③ L. Cheng and Y. Kitade (2014): Quantitative evaluation of turbulent mixing in the central equatorial Pacific, *Journal of Oceanography*, doi:10.1007/s10872-013-0213-5. (査読有)

④ Shadwick, E. H., S. R. Rintoul, B. Tilbrook, G. D. Williams, N. Young, H. Marchant, J. Smith, A. D. Fraser, and T. Tamura (2013): Glacier tongue calving reduced dense water formation and enhanced carbon uptake. *Geophysical Research Letters*, 40(5), 904-909, doi:10.1002/grl.50178. (査読有)

⑤ 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. (査読有)

⑥ 北出裕二郎・嶋田啓資・平野大輔・程靈巧 (2013): 南大洋での乱流観測, 月刊海洋, 45, 23-29. (査読無)

⑦ 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/NGeo1738. (査読有)

⑧ Tamura, T., G. D. Williams, A. D. Fraser, and K. I. Ohshima(2012): Potential regime shift in decreased sea ice production after the Mertz calving, *Nature Communications*, 3, doi:10.1038/ncomms1820. (査読有)

⑨ Ishizu, M., Y. Kitade and Y. Michida (2012): Mixing process on the northeast coast of Hokkaido in summer, *Journal of Oceanography*, doi:10.1007/s10872-012-0152-6. (査読有)

⑩ Naulita, Y., and Y. Kitade (2011) : Observed Turbulence Properties over the Continental Shelf and Slope off Jogashima, Sagami Bay, La mer, 49, 1-15. (査読有)

他 論文(査読有) 5 件 (うち 2 件は東京海洋大学博士前期課程(修士)学位論文)

[学会発表] (計 16 件)

① 北出裕二郎・嶋田啓資・白井優・青木茂・深町康・田村岳史・牛尾収輝・大島慶一郎, ビンセンス湾沖における南極底層水の特異性, 日本海洋学会春季大会, 2015.3.23, 東京海洋大学(東京).

② 小林大洋・伊藤進一・勝又勝郎・本田牧生・北出裕二郎・笈茂穂, 深海用フロート「Deep NINJA」にみられた圧力依存性のある塩分偏

差,日本海洋学会春季大会,2015.3.23,東京海洋大学(東京).

③ 白井優・北出裕二郎・嶋田啓資, オーストラリア南極海盆における AABW 水塊の変質過程について,日本海洋学会春季大会,2015.3.23,東京海洋大学(東京).

④ 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,ビ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,2014.12.2,国立極地研究所(立川).

⑤ 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,2014.12.2,国立極地研究所(立川).

⑥ 白井優・北出裕二郎・嶋田啓資,オーストラリア南極海盆における南極底層の水塊特性の変化,第5回極域科学シンポジウム,2014.12.2,国立極地研究所(立川).

⑦ Ohshima, K. I., Y. Fukamachi, G. D. Williams, S. Nishihashi, T. Tamura, Y. Kitade, D. Hirano, S. Aoki, and M. Wakatsuchi, Antarctic Bottom Water production from intense sea-ice formation in the Cape Darnley Polynya. 11th Annual Meeting, Asia Oceania Geosciences Society, August 1 2014, (札幌).

⑧ 白井優・北出裕二郎・嶋田啓資・青木茂・深町康・大島慶一郎,ビンセネス湾沖南極底層水の流動特性について,日本海洋学会春季大会,2014.3.27,東京海洋大学(東京).

⑨ 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,ビ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,日本海洋学会秋季大会,2013.9.19,北海道大学(札幌).

⑩ Kitade, Y., K. Shimada, T. Tamura, L. Cheng, Y. Fukamachi, S. Aoki, S. Ushio, K. I. Ohshima: Properties of Antarctic Bottom water observed off Vincennes Bay, American Geophysical Union 2012 Fall meeting, 2012.12.7, (サンフランシスコ).

⑪ 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,ビンセネス湾沖での係留観測により捉えられた南極底層水の特性,第3回極域科学シンポジウム,2012.11.29,国立極地研究所,(立川).

⑫ 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,ビンセネス湾沖で観測された南極底層水の特性,日本海洋学会秋季大会,2012.9.15,東海大学(清水).

⑬ 北出裕二郎: 南極海における深・底層水の形成と水塊変質の謎,「極域における環境と生態系の変動に関する研究」キックオフシンポジウム,2012.3.21,東京海洋大学(東京).

⑭ 平野大輔・北出裕二郎,南極大陸ケープダンレー沖陸棚端における海底境界混合の特徴,第34回極域気水圏シンポジウム,2011.10.15,国立極地研究所(立川).

⑮ 北出裕二郎・後藤晴香・平野大輔,リュット・ホルム湾沖における AASW の水温の長期トレンドと海況特性,第34回極域気水圏シンポジウム,2011.10.15,国立極地研究所(立川).

他1件

6. 研究組織

(1)研究代表者

北出裕二郎 (KITADE, Yujiro)

東京海洋大学大学院・海洋科学技術研究科・准教授

研究者番号: 50281001

(2)研究分担者

田村岳史 (TAMURA, Takeshi)

国立極地研究所・助教

研究者番号: 40451413

溝端浩平 (MIZOBATA, Kohei)

東京海洋大学大学院・海洋科学技術研究科・助教

研究者番号: 80586058

(3)連携研究者

嶋田啓資 (SHIMADA, Keishi)

東京海洋大学・観測支援センター・博士研究員

研究者番号:

(4)研究協力者

青木茂: 北海道大学低温科学研究所・准教授

平野大輔: 国立極地研究所・博士研究員

芦田将成: 東京海洋大学大学院海洋科学技術研究科博士前期課程(2011-2012年度)

鈴木 萌: 東京海洋大学大学院海洋科学技術研究科博士前期課程(2013-2014年度)

白井 優: 東京海洋大学大学院海洋科学技術研究科博士前期課程(2014-2015年度)