



Title	南大洋における観測からみた海洋長期変動
Author(s)	青木, 茂
Citation	低温科学, 76, 25-31
Issue Date	2018-03-31
DOI	https://doi.org/10.14943/lowtemsci.76.25
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/70323
Type	departmental bulletin paper
File Information	8_Lowtemsci76_P25-31.pdf



南大洋における観測からみた海洋長期変動

青木 茂¹⁾

南大洋ではいたるところで海水特性の長期的な変化が生じている。ここ数十年間にわたる観測の蓄積から、南極底層水についてはその密度と体積の減少が明瞭になってきた。相対的に、ウェッデル-エンダービー海盆では暖水化傾向が強く、アムンゼン-ベリングスハウゼン海盆とオーストラリア-南極海盆では淡水化傾向が強い。沿岸大陸棚上では、ロス海やウェッデル海南西部の陸棚水に淡水化傾向が観測されている。沿岸高密度水の淡水化と底層水特性変化との関連性、暖水化・淡水化の定量的評価とメカニズムの理解が求められており、沿岸水海域での持続的な観測の確立が望まれる。

Long-term oceanic variabilities observed in the Southern Ocean

Shigeru Aoki¹

Long-term changes in sea water properties are ubiquitous in the Southern Ocean. From in situ hydrographic observations for the recent decades, decreases in density and volume in Antarctic Bottom Water are detected. Freshening of shelf waters are observed in some sectors. Hence it is of high priority to understand the oceanic property changes quantitatively to uncover their relationship and mechanism, with an effort in establishing the sustained observation network on the continental shelf region.

キーワード：南極底層水、高密度陸棚水、暖水化、淡水化

Antarctic Bottom Water, Dense Shelf Water, Warming, Freshening

1. はじめに

南大洋は、世界の海をつなぐ扇の要のようなユニークな大洋である。その子午面循環の特性から表層と深・底層とがつながり、さらにその周極性から三大洋とつながっている。一方、南極大陸の大陸棚沿岸域は、局所的には沿岸ポリニヤでの海水生産にともなう高密度水の生成が底層水の形成の基礎となると同時に、別の海域では高温である深層水からの熱供給が棚氷や氷床の融解に寄

与する（本巻の杉山、草原を参照）（図1）。こうした全体的な特性から、南大洋は、大気や雪氷圏との関わりで生じた特性変化が表層や深底層にもおよびやすく、全球規模の変化の起点となりうる場所である（本巻の勝又を参照）。

南大洋は、人間生活域からの隔絶や氷をともなう過酷な自然環境といった地理的な特性から、歴史的にも最も観測の少ない大洋である。これに加え、その広大さが南大洋の全体的な理解を困難にしている。19世紀末のチャレンジャー号や20世紀初頭のメテオール号といった歴史的な観測航海を皮切りに、深層水の湧昇、南極底層水の供給をはじめとする南大洋の子午面循環像が確立されていくが、初期の観測の空間的な分布は極めて限られている。それでも、1960年代にはじまるエルタニン号を中心とする一連の観測（Gordon, 2012）は、南大洋広域を現代的な観測精度で観測しており、現代の観測と直接比較可能なベースラインとしての重要性をもっている。さらに1990年代からのWOCE (World Ocean Circulation Experiment, 世界海洋循環実験) 計画とその

連絡先

青木 茂

北海道大学 低温科学研究所

〒060-0819 北海道札幌市北区北19条西8丁目

Tel. 011-706-7430

e-mail: shigeru@lowtem.hokudai.ac.jp

1) 北海道大学 低温科学研究所

Institute of Low Temperature Science, Hokkaido University, Sapporo, Japan

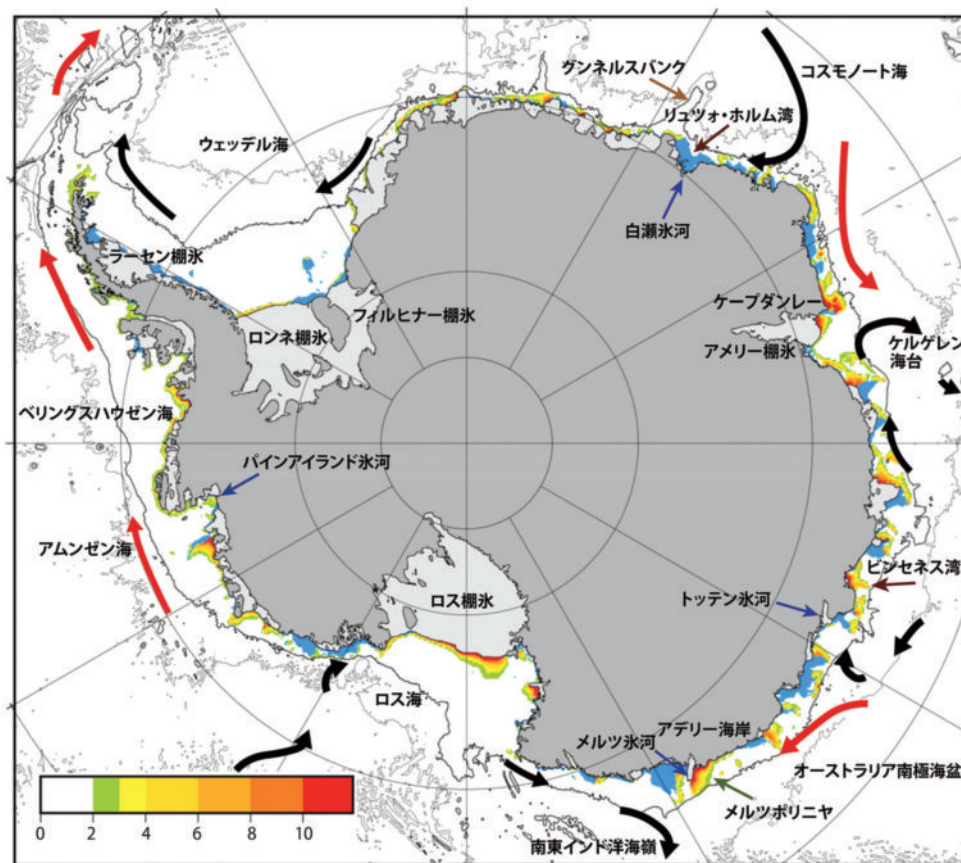


図1：南極大陸沿岸部の氷況。棚氷（灰色）・定着氷（青色）・海水生産量（暖色系カラー）の分布を示す。黒矢印は亜寒帯循環の概略，赤矢印は南極周極流の概略を示す。Nihashi and Ohshima (2015) の原図に加筆。

後継計画，2000年代からのArgo計画の進展により，時間的な変動の実態を捉えることのできる観測点の数が空間的にも増えてきた。その成果は気候変動に関する政府間パネル（IPCC）の最新の報告書（Rhein et al., 2013）にも結実している。

南大洋の中でも，一年のほとんどを海水に閉ざされ，氷山が頻繁に漂流する大陸沿岸域では，海洋観測の展開はさらに遅れている。アメリカの基地に面するロス海では1957-58年の国際地球観測年以来の観測が断続的に実施されてきているものの，それ以外の海域での観測は不十分であった。それでも1980年代くらいから，幾つかの海域で観測の蓄積が増えてきた。

こうした現場海洋観測の進展や資料の蓄積により，南大洋の底層や沿岸域が急激に変化している現状が徐々に明らかになってきた。沿岸域でも，その地域的な特性が明らかになるとともに，長期的な変化特性が分かりつつある。本稿では，南極大陸の周辺を中心として，近年の現場観測から明らかになりつつある海洋の中・長期的な変化を概観していきたい。

2. 海盆域の変化・沿岸域の変化

近年，南大洋ではいたるところで海水特性の変化が生じていることが明らかになってきた。特に，IPCCの第5次評価報告書では，底層水温の暖水化がクローズアップされた。WOCE/CLIVAR/GO-SHIPのここ20-30年の繰り返し観測の結果から，南極大陸をとりまく海盆域では，おしなべて，暖水化し淡水化しつつある傾向がみられている（Purkey and Johnson, 2010, 2013）。暖水化傾向はウェッデル-エンダービー海盆で強く，淡水化傾向はアムンセン-ベリングスハウゼン海盆とオーストラリア-南極海盆で強い（図2）。より長期間のさまざまな観測資料を統合した解析結果からも，底層では暖水化にともなって密度が低下し，一定の密度で定義したときの層の厚さが薄くなり，体積が減少したとされている（Azaneu et al., 2013）。

表層でも変化がみられる。歴史的なデータに近年のArgoデータを加えてトレンドを求めたDurack and Wiffels (2010)は，南緯65度以北の南大洋で，南極表層

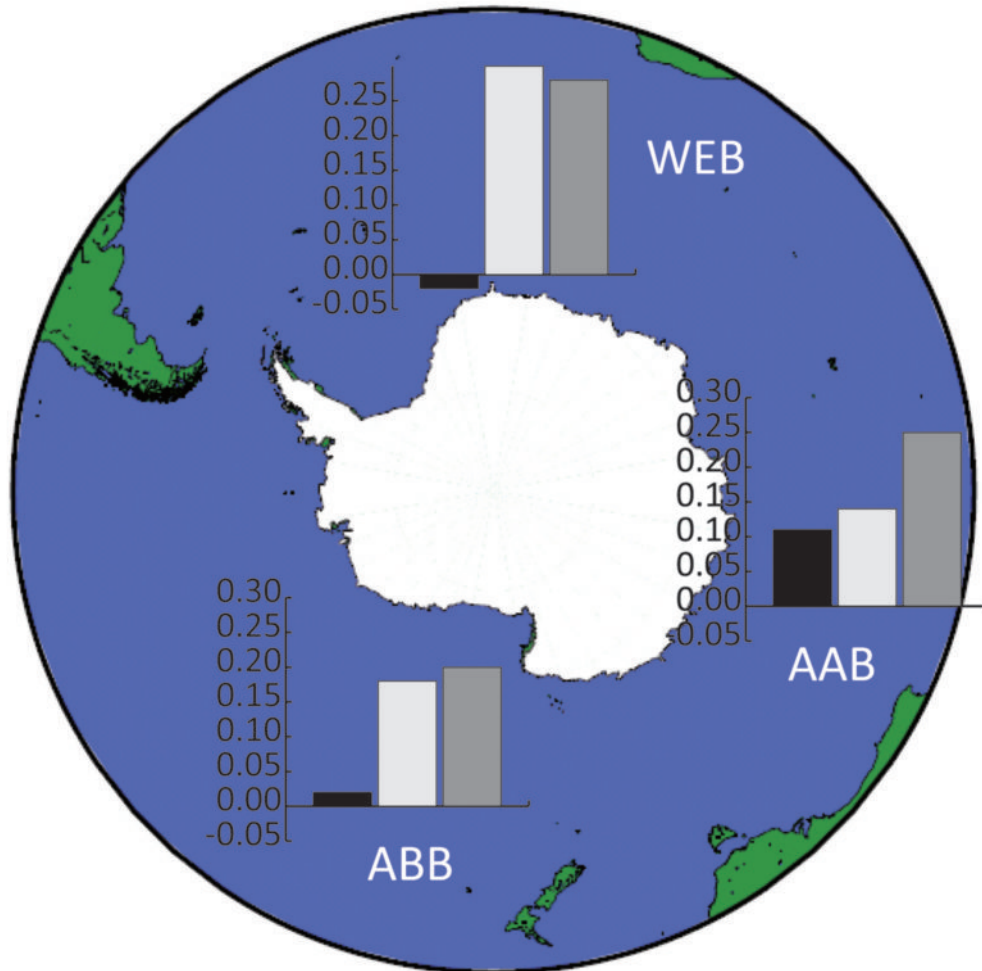


図2：塩分と水温の変化による密度変化が海水位に与える影響 (mm/yr)。挿入パネルの棒グラフで、左から順に塩分、水温、両者の総和を示す。Purkey and Johnson (2013) に基づき、海盆ごとにみた 4000 m 以深について作図。WEB はウェッデル-エンダービー海盆、AAB はオーストラリア-南極海盆、ABB はアムンセン-ベリングスハウゼン海盆をそれぞれ示す。

水付近から南極中層水にかけての低塩化と周極深層水に対応する亜表層の高塩化がどこでもほぼ一様にみられることを示した。

大陸沿岸域では、観測点の分布はさらに不十分なうえに偏りがあるものの、平均としてみると淡水化し、低密度化している (Azaneu et al., 2013)。塩分の変化率は $-0.012 (\pm 0.007) / 10$ 年、密度の変化率は $-0.014 (\pm 0.007) \text{ kg m}^{-3} / 10$ 年とされている。こうした変化傾向はそれぞれ地域性をともなっており、地域的な海水の挙動特性とともに変化の地域性を考えることは、変化の原因を考える上での基礎となる。

2.1 ウェッデル-エンダービー海盆

西を南極半島、東をケルゲレン海台に区切られたこの海盆には、南極の低気圧性循環の中で最も強いウェッデ

ルジャイヤがあり、その北縁を南極周極流が東南進する。南極半島の東岸はラーセン棚水などがある大陸棚域が、南西部沿岸域にはフィルヒナー-ロンネ棚水を背後に擁する広大な大陸棚が広がる。これらの大陸棚において形成された高密度陸棚水が、南極底層水の重要な母海水となっている。これより東側の沿岸は、グネルスバンクまで棚水が発達している。さらに東側、グネルスバンクからケープダンレーの西側まではほぼその場で結氷した定着水が発達しており、海水生産量としてはおしなべて少ない (図1)。一方で、ケープダンレー沖のポリニヤでは薄水の連続的な形成と移送によって海水生産量は大きくなり、底層水の形成につながっている (本巻の大島を参照)。

ウェッデル海・ウェッデルジャイヤのグリニッジ子午線上の観測線では、これまで観測が精力的になされてき

ている。1977年から2001年まで、温暖深層水（WDW, Warm Deep Water）は $0.032^{\circ}\text{C}/10$ 年で上昇している（Smerdsrud, 2005）。その長期的な昇温傾向に加えて、1980年代後半と90年代後半には低温化する期間があるといった十年規模の変化もみられる。90年代後半の低温化には、モードライズ・ポリニヤの形成との同時性が指摘されている。底層では、1984年から2008年までのデータの解析から、ウェッデル海深層水（WSDW, Weddell Sea Deep Water）とウェッデル海底層水（WSBW, Weddell Sea Bottom Water）が全般的な暖水傾向を示していることが報告されている（Fahrbach et al., 2011）¹。

大陸棚斜面では、沿岸流が南西陸棚域へ流入する東側と流出する西側で、1960年代から2005年にかけての時系列からWDWのコアにあたる深さの水温の上昇（ $0.07 (\pm 0.04)^{\circ}\text{C}/10$ 年）とその深度の上昇が観測されている（Robertson et al., 2002; Robertson, 2010）。ただし、この水温時系列には1970年代中盤と1990年代中・終盤に低温化した時期があり、この2つの低温化イベントには含まれた70年代から90年代だけで考えると、昇温傾向はより強まる（ $0.12^{\circ}\text{C}/10$ 年）ことになる。前者の低温化イベントのタイミングはウェッデル・ポリニヤの発生した時期に対応している。WSDWも推定誤差の範囲内程度での暖水化傾向を示す。暖水化傾向は、1980年代後半以降に限ると、より明瞭である。

大陸棚上西部では、1970年代からのデータにより、陸棚水は低塩化（ $-0.01 (\pm 0.07)/10$ 年）および多少の低温化（ $-0.05 (\pm 0.04)^{\circ}\text{C}/10$ 年）がみられる（Schmidtke et al., 2014）。北西部では1989年から2006年の17年間にかけて $-0.05/10$ 年程度の低塩化がみられる（Hellmer et al., 2011）。低塩化の原因は定かではなく、トレンドも考慮期間によって変化するが、Hellmer et al. (2011)はその原因として海水生産の減少と降水の増加の可能性を挙げている。

ウェッデルジャイアの東側に位置する海域でも、変化が観測されている。東経30度では、1990年代中盤から2000年代後半にかけて、大陸棚斜面の下部にあたるところで、底層水の水温が約 0.1°C 上昇し、密度は $0.025-$

0.03 kg m^{-3} 軽くなった（Couldrey et al., 2013）。この位置はケープダンレー沖周辺で新しく形成された底層水の通り道にあたり、ケープダンレー底層水（Ohshima et al., 2013）の変質の可能性も指摘されている。

コスモノート海近辺の陸棚上では、変化は激しいものの、傾向としては低塩化している（Schmidtke et al., 2014）。リュツォホルム湾のオングル海峡では、表層の塩分に十年規模の変動があり1982年から1991年にかけて $0.2-0.3$ 低下している（Ohshima et al., 1996）。また、1982年から1991年までに比べて1998年の亜表層水温は高い傾向にあった（Aoki and Hashida, 2000）。東から西へ、南極周極流域からウェッデルジャイアへの影響を橋渡しする場所として、ウェッデル-エンダービー海盆の東部にも注目が集まり始めている。

2.2 オーストラリア-南極海盆

ケルゲレン海台-ガウスベルク海嶺と南東インド洋海嶺に挟まれたオーストラリア-南極海盆では、大陸沿岸氷床が最も低緯度側に張り出している。ロス海から移流してきた底層水に、アデリー海岸沖を筆頭とする幾つかの沿岸海域において産み出された高密度陸棚水の沈み込みが加わることによって、その底層水の特徴が形成される。沿岸域には海水生産量の高い沿岸ポリニヤが多く分布している（図1；Tamura et al., 2008）。

オーストラリア-南極海盆全体では、1960-71年から2008-2012年にかけて南極底層水は低塩分化している（Aoki et al., 2005, 2013; Rintoul, 2007; Shimada et al., 2012; van Wijk and Rintoul, 2014）。低塩分化の傾向は、ロス海からの流入経路に沿って、上流側でもっとも強く、下流へ向けて徐々に弱まっている。水温は全般に上昇傾向を示しているが、こちらは流入経路にそって下流ほど強いという結果が得られている。

沿岸域については、海水生産の大きいメルツポリニヤ近傍のアデリー海凹で、1969年から2008年までと比べて、2010年以降陸棚水の塩分が急激に低下したことが分かっている（Shadwick et al., 2013; Lacarra et al., 2014）。この塩分の低下は、主な海水生産域であったメルツ氷河の氷河舌の西側にできるポリニヤの面積が、2010年の氷河舌崩壊にともなって、15-40%減少したことが原因と考えられる（Tamura et al., 2012; Nihashi and Ohshima, 2015）。こうした陸棚水の変化は、底層水に影響を与えることが考えられる（Aoki et al., 2013）。やや下流側のデュルビル・トラフでは、1994年から2008年にかけて、陸棚水が低塩化している。上流側の酸素同位体比の観測では、2001年に比べ2015年では、塩分が高いものの酸

¹ ウェッデル海では地理的な特性や歴史的な経緯もあり、水塊に独自の名称が頻用されている。Circumpolar Deep WaterはWarm Deep Waterに対応し、Antarctic Bottom WaterはWeddell Sea Deep Water（南極底層水の密度帯にある）とWeddell Sea Bottom Water（概ねウェッデル海盆に限定されるより重い海水）とに分けられる。

素同位体比²の増加をとまなっていない (Aoki et al., 2017). こうした底層水の形成スポットでは, 地域的・広域的な陸氷・海水の状況の両方が, 全球規模の海洋循環に影響を及ぼし得ることを示している.

2.3 ロス海・アムンゼン-ベリングスハウゼン海盆

太平洋-南極海嶺の東に広がるこの海洋セクターでは, ロス海南西部にあたる陸棚域からの高密度水の沈み込みが底層水を形成する. ロス海の東側にあるアムンゼン海・ベリングスハウゼン海では, 南極周極流が沿岸陸棚域と近接しており, この熱による西南極氷床の融解が大きな課題となっている (本巻の杉山, 草原を参照).

ロス海の南極底層水は, 観測されている期間の中でも, 非常に大きな変化を示している. 1974年から2004年にかけて, 太平洋-南極海嶺に近いある場所では, 底層では水温が+0.074℃上昇し, 塩分は-0.020の減少, 溶存酸素も-5 μmol/kgの減少を示した (Ozaki et al., 2009). オーストラリア-南極海盆へ向かう大陸棚斜面上の底層水も, 1950年代から2000年代にかけて塩分が低下している (Jacobs et al., 2002; Jacobs and Giulivi, 2010; Budillon et al., 2011). この変化は, 下流側のオーストラリア-南極海盆で観測されている塩分変化の主要な部分を占めていると考えられる (Shimada et al., 2012). また, 1992年と2011年に同じセクションで観測した結果, 底層に加えて, 表層での低塩化・低密度化や周極深層水の暖水化が報告されている (Swift and Orsi, 2012).

ロス海の大陸棚域は, 南極の沿岸としては最も充実した観測がなされてきた場所であるが, ここではさらに顕著な低塩分化傾向が観測されている. 1958年から2008年までで, 陸棚水には全体として-0.03/10年の塩分低下がみられ (Jacobs and Giulivi, 2010), 酸素同位体比も概ね低下しており, 陸氷起源成分の増加を強く示唆している (Jacobs et al., 2002).

² 酸素の安定同位体には¹⁶Oと¹⁷O, ¹⁸Oの3つが存在する. 水の中の酸素の安定同位体比として¹⁶Oに対する¹⁸Oの存在比を考えることが多いが, 観測や実験で用いられる酸素安定同位体比の変数 $\delta^{18}\text{O}$ は, サンプルの同位体比と基準となる国際標準試料 (ウィーン標準平均海水) の同位体比との比の偏差の千分率として定義される. 酸素 (安定) 同位体比といった場合には, 一般にこの $\delta^{18}\text{O}$ のことを指すことが多い. 水は蒸発や降水といった相変化に際してその中の酸素同位体比に偏りが起こるため (同位体分別), 地球上の水はその履歴を反映した特徴的な同位体比を有することになる. 周極深層水の $\delta^{18}\text{O}$ はほぼ0‰である. 一方, 南極氷河・氷床を構成する水の $\delta^{18}\text{O}$ は-35~-40‰といった値を示すのに対し, 海洋上の降雪の水は-17‰前後の値を示す. これらと比較すると, 海水形成過程では $\delta^{18}\text{O}$ は低下し融解過程で増加するが, その変化の程度は小さい. 海水に対する淡水の起源のこのような顕著な違いにもとづき, 混合した淡水の起源を推定することに用いる.

こうした塩分低下の主要な原因として想定されているのは, 隣接する西南極域での陸氷流出・融解である. 主として人工衛星観測などを基礎として, 近年の氷質量の流出の加速が指摘され (Rignot et al., 2008), 棚氷の融解の加速も指摘されている (Paolo et al., 2015). しかしながら, 西南極氷床付近の海域では歴史的にほとんど観測が行われてきておらず, 本格的に海洋観測が始まったのは1990年代に入ってからである. パインランド氷河の近傍では, 底面付近で1994年から2009年にかけて水温の上昇が観測されている (Jacobs et al., 2011). 周辺の陸棚斜面域においても周極深層水のコアでの水温が上昇し, コアのある深度も上昇している (Schmidtke et al., 2014). アムンゼン海では, 現在韓国を中心として西南極海域の観測が精力的に展開されている.

3. おわりに

南極底層水については, ここ数十年間にわたる観測の蓄積から, その体積の減少が明瞭になってきた. 南極底層水の「生産量減少」仮説はこれまでも提唱され論争があったが (Worthington, 1977; Broecker et al., 1999; Orsi et al., 2001), またここへ来てその時間軸や妥当性・定量性, 海盆ごとの違いについて, さらに議論が続く状況になってきている (Johnson, 2008; Purkey and Johnson, 2013; van Wijk and Rintoul, 2014).

南大洋における淡水含有量の増加は, 主として南極氷床・棚氷の流出・融解増加と関連付けて議論されている. ただし現状では超過淡水ソースの見積もりも, Rignot et al. (2008) の $140 \pm 90 \text{ Gt/yr}$ (Purkey and Johnson, 2013) を採用したり, 幾つかのリファレンスを組み合わせた $350 \pm 100 \text{ Gt/yr}$ (Rye et al., 2014) を採用したりと, 誤差範囲まで考えると研究によって一桁近く異なっており, 表層から底層まで含めて, 淡水流入超過量の見積もりと海洋で増加した淡水貯蓄量の見積もりが収束している状況にはない. 今後は, 酸素同位体比など海水中の淡水分の起源特定のためのトレーサーの情報などもあわせて, 淡水増加量・流入量の見積もりとともに, その時間的な推移も含めて, あらゆる角度から検討されるべきであろう.

南極沿岸域における陸氷の融解に及ぼす海洋の影響を正確に把握することがグローバルな観点からも重要になってきており, 陸棚-外洋間, 海洋-氷床間の熱塩交換過程の実態把握に注目が集まっている. 氷海域での観測において, 船舶による船上観測に頼るのみでは今後も大きな理解の加速は見込めないであろう. しかしながら,

近年、人工衛星を経由して観測データを伝送する通信技術の発展や海中での観測プラットフォームの挙動を制御する技術の発達、氷海域における観測に革命的な変化を起こしつつある。アザラシなどの動物に取り付けたセンサーで動物の行動を知るとともに環境情報を取得する手法—バイオリギング—の発展は、人間のアクセスの難しい場所や行動の難しい冬期の観測を可能にした。自律型無人潜水機、水中グライダーなどによる観測成果もあがりつつある。このような技術を観測域の海況・氷況に即して開発、活用することで、南極沿岸域の観測が充実できるものと期待している。

参考文献

- Aoki, S. and G. Hashida (2000) Observations of water temperature and salinity in Ongul Strait, Antarctica, in 1998 and investigations of their intraseasonal, seasonal, and interannual variations. *Polar Meteorol. Glaciol.*, **14**, 68–77.
- Aoki, S., S. R. Rintoul, S. Ushio, S. Watanabe and N. L. Bindoff (2005) Freshening of the Adélie Land Bottom Water near 140° E. *Geophys. Res. Lett.*, **32**, L23601, doi:10.1029/2005GL024246.
- 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. *J. Geophys. Res.*, **118**, 6046–6063.
- Aoki, S., R. Kobayashi, S. R. Rintoul, T. Tamura and K. Kusahara (2017) Changes in water properties and flow regime on the continental shelf off the Adélie/George V Land coast, East Antarctica, after glacier tongue calving. *J. Geophys. Res.*, **122**, 6277–6294.
- Azaneu et al. (2013) Trends in the deep Southern Ocean (1958–2010): Implications for Antarctic Bottom Water properties and volume export. *J. Geophys. Res.*, **118**, 4213–4227.
- Broecker, W. S., S. Sutherland and T. -H. Peng (1999) A possible 20th-century slowdown of Southern Ocean Deep Water formation. *Science*, **286**, 1132–1135.
- Budillon, G., P. Castagno, S. Aliani, G. Spezie and L. Padman (2011) Thermohaline variability and Antarctic bottom water formation at the Ross Sea shelf break. *Deep Sea Res. I*, **58**, 1002–1018.
- Couldrey, M. P., L. Jullion, A. C. Naveira Garabato, C. Rye, L. Herráiz-Borreguero, P. J. Brown, M. P. Meredith and K. L. Speer (2013) Remotely induced warming of Antarctic Bottom Water in the eastern Weddell gyre. *Geophys. Res. Lett.*, **40**, 2755–2760.
- Durack, P. J. and S. E. Wijffels (2010) Fifty-year trends in global ocean salinities and their relationship to broad-scale warming. *J. Clim.*, **23**, 4342–4362.
- Fahrbach, E., M. Hoppema, G. Rohardt, O. Boebel, O. Klatt and A. Wisotzki (2011) Warming of deep and abyssal water-masses along the Greenwich meridian on decadal time scales: The Weddell gyre as a heat buffer. *Deep-Sea Res. II*, **58**, 2509–2523.
- Gordon, A. L. (2012) Circumpolar view of the Southern Ocean from 1962 to 1992. *Oceanography*, **25**, 18–23.
- Hellmer, H. H., O. Huhn, D. Gomis and R. Timmermann (2011) On the freshening of the northwestern Weddell Sea continental shelf. *Ocean Sci.*, **7**, 305–316.
- Jacobs, S. S., C. F. Giulivi and P. A. Mele (2002) Freshening of the Ross Sea during the late 20th century. *Science*, **297**, 386–389.
- Jacobs, S. S. and C. F. Giulivi (2010) Large multidecadal salinity trends near the Pacific-Antarctic continental margin. *J. Clim.*, **23**, 4508–4523.
- Jacobs, S. S., A. Jenkins, C. F. Giulivi and P. Dutrieux (2011) Stronger ocean circulation and increased melting under Pine Island Glacier ice shelf. *Nat. Geosci.*, **4**, 519–523.
- Johnson, G. C. (2008) Quantifying Antarctic Bottom Water and North Atlantic Deep Water volumes. *J. Geophys. Res.*, **113**, C05027, doi:10.1029/2007JC004477.
- Lacarra, M., M. -N. Houssais, C. Herbaut, E. Sultan and M. Beauverger (2014) Dense shelf water production in the Adélie Depression, East Antarctica, 2004–2012: Impact of the Mertz Glacier calving. *J. Geophys. Res.*, **119**, 5203–5220.
- Nihashi, S. and K. I. Ohshima (2015) Circumpolar mapping of Antarctic coastal polynyas and landfast sea ice: Relationship and variability. *J. Clim.*, **28**, 3650–3670.
- Ohshima, K. I., T. Takizawa, S. Ushio and T. Kawamura (1996) Seasonal variations of the Antarctic coastal ocean in the vicinity of Lützow-Holm Bay. *J. Geophys. Res.*, **101**, 20617–20628.
- Ohshima, K. I., Y. Fukamachi, G. D. Williams, S. Nihashi, F. Roquet, Y. Kitade, T. Tamura, D. Hirano, L. Herráiz-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. *Nat. Geosci.*, **6**, 235–240.
- Orsi, A. H., S. S. Jacobs, A. L. Gordon and M. Visbeck (2001) Cooling and ventilating the abyssal ocean. *Geophys. Res. Lett.*, **28**, 2923–2926.
- Ozaki, H., H. Obata, M. Naganobu and T. Gamo (2009) Long-term bottom water warming in the North Ross Sea. *J. Oceanogr.*, **65**, 235–244.
- Paolo, F. S., H. A. Fricker and L. Padman (2015) Volume loss from Antarctic ice shelves is accelerating. *Science*, **348**, 327–331.
- Purkey, S. G. and G. C. Johnson (2010) Warming of global abyssal and deep Southern Ocean waters between the 1990s and 2000s: Contributions to global heat and sea level rise budgets. *J. Clim.*, **23**, 6336–6351.

- Purkey, S. G. and G. C. Johnson (2013) Global contraction of Antarctic Bottom Water between the 1980s and 2000s. *J. Clim.*, **26**, 6105–6122.
- Rhein, M., S. R. Rintoul, S. Aoki, E. Campos, D. Chambers, R. A. Feely, S. Gulev, G. C. Johnson, S. A. Josey, A. Kostianoy, C. Mauritzen, D. Roemmich, L. D. Talley and F. Wang (2013) Observations: Ocean. In: Stocker, T. F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S. K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P. M. Midgley (eds.) *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, 255–316. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- Rignot, E., J. L. Bamber, M. R. van den Broeke, C. Davis, Y. Li, W. J. van de Berg and E. van Meijgaard (2008) Recent Antarctic ice mass loss from radar interferometry and regional climate modelling. *Nat. Geosci.*, **1**, 106–110.
- Rintoul, S. R. (2007) Rapid freshening of Antarctic Bottom Water formed in the Indian and Pacific oceans. *Geophys. Res. Lett.*, **34**, L06606. doi:10.1029/2006GL028550.
- Robertson, R. (2010) Are the deep waters of the Weddell Sea still warming? In: You, Y. and A. Henderson-Sellers (eds.) *Climate Alert Climate Change Monitoring and Strategy*, 111–141. Sydney University Press, Sydney.
- Robertson, R., M. Visbeck, A. L. Gordon and E. Farbach (2002) Long-term temperature trends in the deep waters of the Weddell Sea. *Deep-Sea Res. II*, **49**, 4791–4806.
- Rye, C. D., A. C. N. Garabato, P. R. Holland, M. P. Meredith, A. J. Nurser, J. George, C. W. Hughes, A. C. Coward and D. J. Webb (2014) Rapid sea-level rise along the Antarctic margins in response to increased glacial discharge. *Nat. Geosci.*, **7**, 732–735.
- Schmidtko, S., K. J. Heywood, A. F. Thompson and S. Aoki (2014) Multi-decadal warming of Antarctic waters. *Science*, **346**, 1227–1231.
- Shadwick, E. et al. (2013) Glacier tongue calving reduced dense water formation and enhanced carbon uptake. *Geophys. Res. Lett.*, **40**, 904–909.
- Shimada, K., S. Aoki, K. I. Ohshima and S. R. Rintoul (2012) Influence of Ross Sea Bottom Water changes on the warming and freshening of the Antarctic Bottom Water in the Australian-Antarctic Basin. *Ocean Sci.*, **8**, 419–432.
- Smerdsrud, L. H. (2005) Warming of the deep water in the Weddell Sea along the Greenwich meridian: 1977–2001. *Deep-Sea Res. I*, **52**, 241–258.
- Swift, J. and A. H. Orsi, (2012) Sixty-four days of hydrography and storms: RVIB *Nathaniel B. Palmer's* 2011 S04P Cruise. *Oceanography*, **25**, 54–55.
- Tamura, T., K. I. Ohshima and S. Nishihashi (2008) Mapping of sea ice production for Antarctic coastal polynyas. *Geophys. Res. Lett.*, **35**, L07606, doi:10.1029/2007GL032903.
- Tamura, T., G. D. Williams, A. D. Fraser and K. I. Ohshima (2012) Potential regime shift in decreased sea ice production after the Mertz Glacier calving. *Nat. Comm.*, **3**, 826, doi:10.1038/ncomms1820.
- van Wijk, E. M. and S. R. Rintoul (2014) Freshening drives contraction of Antarctic Bottom Water in the Australian Antarctic Basin. *Geophys. Res. Lett.*, **41**, 1657–1664.
- Worthington, L. V. (1977) The case for near-zero production of Antarctic Bottom Water. *Geochim. Cosmochim. Ac.*, **41**, 1001–1006.