

# 南大洋における大気・海洋結合系の長期変動に関する 観測的研究

—2017年度堀内賞受賞記念講演—

青 木 茂\*

## 1. はじめに

南大洋は、大陸にさまたげられずに地球を経度方向に一周できるユニークな海洋である。南大洋は、大西洋、太平洋、インド洋という主要な大洋を結びつけ、全球海洋の中でも特有な働きをしている。南大洋の海洋構造が決まる上で、海水の生産や陸氷の流入の過程も絡んだ、大気からの運動量輸送・熱塩フラックスが本質的な役割を果たしている。

南大洋の、特にその深底層が全球規模の海洋循環にはたす役割の重要性は、早くも20世紀の初頭には認識されてはいたものの、南大洋の海洋構造の変化が本格的に認識されるようになったのは、ようやく21世紀も近づいてからのことである。国際的な観測網の整備・発展により、1990年代頃から海洋の長期的な変動の研究が積みあがりはじめ、その実態に関する理解が急速に進展した。日本南極地域観測隊 (Japanese Antarctic Research Expedition : JARE) では、当時の海上保安庁水路部 (現海洋情報部) が長年にわたり海洋観測を実施してきた。南大洋において、40年以上の長期にわたり観測を継続したケースは極めて稀で、その観測から得られた結果は気候変動に関する政府間パネル (Intergovernmental Panel on Climate Change : IPCC) の第4次評価報告書 (Bindoff *et al.* 2007) にも何編か引用されるなど、国際的にも高い評価を受けている。筆者はこのJAREに越冬隊として参加したり、またより広域で行われた国内外の船舶観測プロジェクトを計画・参加することで、刻々と

変化する南大洋の実態の把握に努めてきた。

こうした取り組みを含む国際的な研究の進展により、南極周極流域から大陸棚沿岸域にわたって顕著な海洋変動があり、それらがお互いにリンクしている様子が浮かび上がってきた。その背景には、大気場の変動があり、これらは南極氷床や海氷の変化とも関連しあった変動であることも明らかになってきた。本稿では、こうした海洋観測が明らかになってきた南大洋の変動の実態について紹介するとともに、これから向かうべき観測の方向性について考えてみたい。

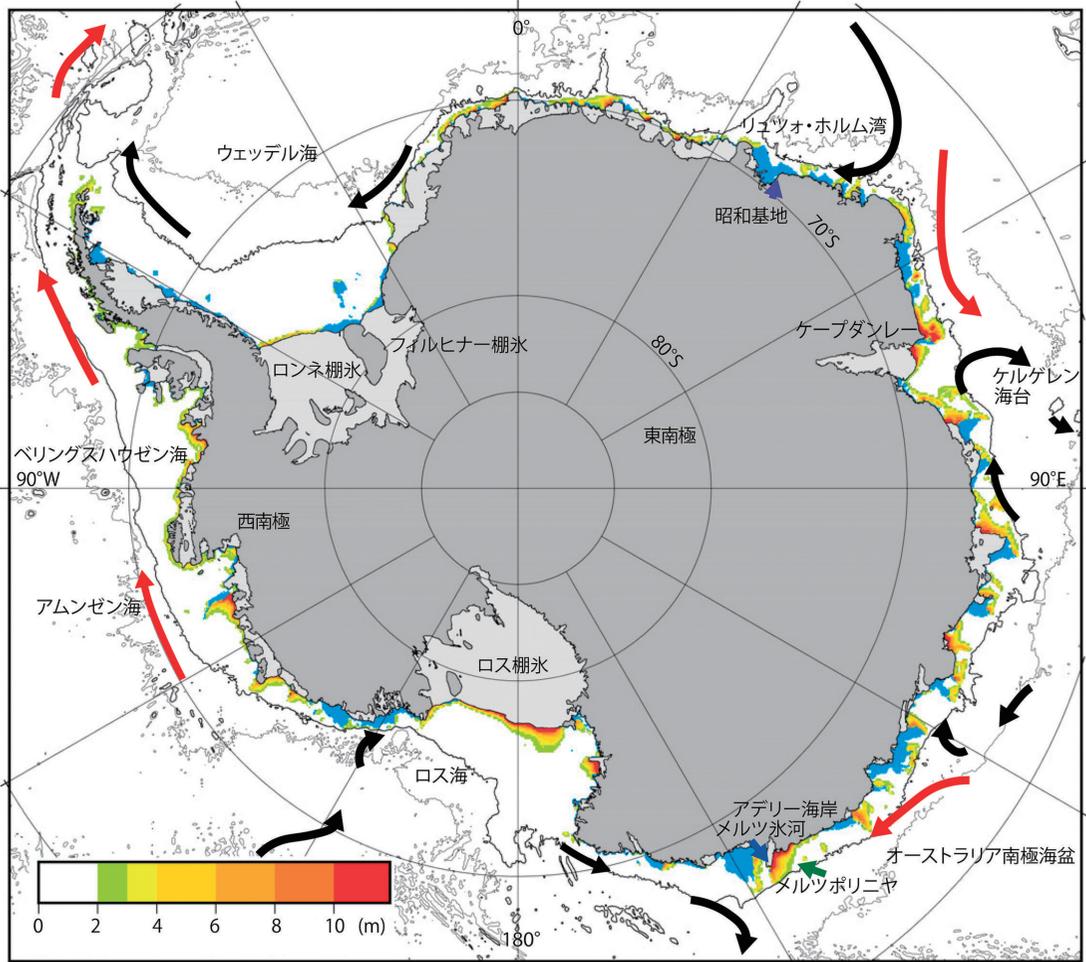
## 2. 南大洋の海洋構造と海洋観測網の展開

南大洋の海洋構造は、大気の状態に強く規定されている。南大洋上では、世界でも有数の強さの西風が吹いている。一方、南極大陸近傍の沿岸域海上では、極循環に伴う偏東風が卓越する。西風は表面の海水を赤道方向に、東風は表面の海水を極方向に引きずるため、この間の緯度帯では海洋表層が発散場となり、これをめがけて比較的暖かく塩分の高い深層水が湧き上がる。この湧き上がった水が大気と降雪・陸氷・海水によって変質をうけ、一方は高緯度大陸沿岸側から沈み込み冷たい南極底層水となり、他方は中緯度側 (南極周極流のあたり) から沈み込み塩分の低い南極中層水となることで、2つの子午面循環セルが形成される。

南大洋の高緯度域では冬期を中心に海氷が生産されるが、沿岸海洋では、生産される海水の様態は、場所によって大きく異なっている (Nihashi and Ohshima 2015)。海氷がその場からほとんど移動しない定着氷として成長する場所もあれば、大陸から吹き降ろすカタバ風が強く、また地形的にも、生産された海水が風によって沖合いに輸送されやすい場所もある (第1図)。後者は沿岸ポリニヤ (ポリニヤとは薄氷域、あ

\* 北海道大学低温科学研究所。  
shigeru@lowtem.hokudai.ac.jp

—2018年1月26日受領—  
—2018年3月22日受理—



第1図 南極大陸沿岸における氷況。棚氷（灰色）・定着氷（青色）・海水生産量（暖色系カラー・単位はm）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それぞれ示す。Nihashi and Ohshima (2015) をもとに作図。

るいは水で囲まれた海水域をさす）と呼ばれる。沿岸ポリニヤでは海水生産量が多く、海水生産時に排出される高塩分水（ブライン）の影響により、高密度の海水—高密度陸棚水—が形成される。この高密度になった水が大陸棚を越え、陸棚斜面上の深層水と混ざりながら沈み込んだものが南極底層水である。近年の気候条件下では、南極底層水はほとんどこの形式で形成されていると考えられている。このため、南極底層水は沿岸ならどこでもできるというわけではなく、限られた場所でしか形成されない。近年、今まで良く知られていた3箇所に加え、日本の研究が中心となって、インド洋海域で2つの形成域が新たに特定された（Oh-

shima *et al.* 2013 ; Kitade *et al.* 2014)。

沿岸海洋は、氷床や棚氷といった大陸上で発達した陸氷と大洋との接点でもある。特に比較的暖かい海水が陸棚上へ侵入できる海域では、棚氷を底面から融かす陸氷融解が顕著になり、海水は低温化されるが融けた氷が塩分を低下させることで密度が低下し、海水が上昇するという循環形態をとりうる。海水から供給される熱の多寡によって氷が融ける量も変わり、このような循環の強さが変わることになる。

南大洋は、人間社会からもっとも遠く離れた大洋であり、また冬期を中心に海水に覆われるため、その観測は他の大洋に比べて遅れている。広大な南大洋の全

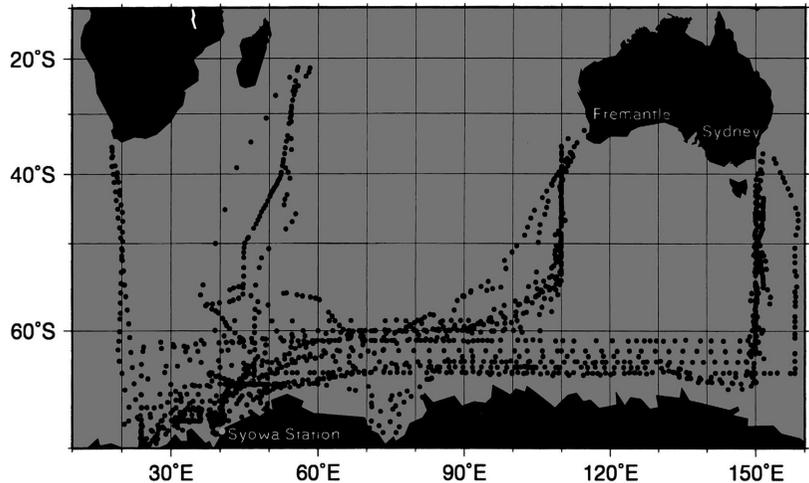
域を観測するのは難しく、また海水の状況によっては、予定した観測が必ずしも実施できるわけでもない。それでも1990年代頃から、世界海洋循環実験計画（World Ocean Circulation Experiment : WOCE）や Argo 計画といった世界規模の現場海洋観測網の充実により、定線を精密に測る手法と広域をランダムに測る手法の組み合わせで、亜表層から底層へと変動現象の把握と理解が拡大していった。また、人工衛星観測の継続と多様化も、海洋構造や変動を広域的に一樣に把握するうえで貢献した。

こうした情勢のなか、JARE では海上保安庁水路部により1960年代から2000年代まで、海洋観測が継続されてきた（第2図）。近年では、砕氷艦しらせにより昭和基地への往路・復路航路上で、数百 m から2000～3000 m 深までの塩分水温プロファイラ（Conductivity, Temperature and Depth profiler : CTD）・採水観測、投下式水温プロファイラ／投下式塩分水温プロファイラ（eXpendable Bathy Thermograph : XBT/eXpendable CTD : XCTD）観測、および表面バケツ採水観測といった項目が実施されてきた。

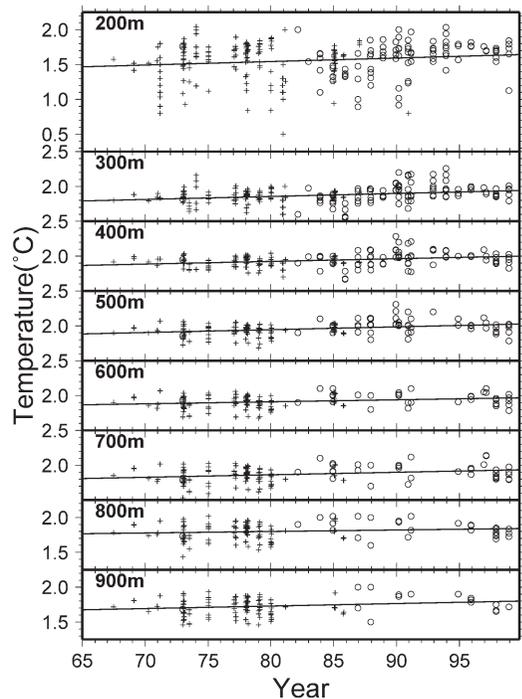
昭和基地が東経40度付近に位置し、また日本から南大洋へはオーストラリアの港を経由することが便利であることもあり、白鳳丸や海鷹丸、みらいといった研究船・練習船により日本が主導する南極海洋観測は、歴史的にインド・太平洋海域で行われることが多い。こうした経緯もあり、東経110度や140度といった国際的な定線に加え、幾つかの海域で高精度の観測を実施してきた。これらの観測と過去の観測結果との比較から、南大洋がいたるところで変化をしていることが明らかになってきた。

### 3. 南極周極流域の変動

20世紀も終わろうとする頃、南極周極流域では、数百 m の深さの亜表層で、顕著な変動が起きていることが明らかになった。JARE により蓄積された海洋観測の結果から、1960年代から90年代にかけて、



第2図 1990年代までに日本南極地域観測によって実施された海洋観測点の分布の概略。



第3図 東経50～80度、南緯60度付近における表層水温の時間変化。白丸が日本南極観測による観測、十字が NOAA のデータベースに収録された観測をそれぞれ示す。直線は最小二乗法により求めたトレンド。1960年代から90年代にかけて暖水化が顕著である。Aoki *et al.* (2003) をもとに作図。

0.04°C/10年の暖水化傾向が見出された（第3図：Aoki *et al.* 2003；Aoki 1997）。南極周極流は大陸を周回しており、より広域について周極的に1000 m前後の海洋亜表層をみると、1950～80年代で0.17°C暖水化したという結果が得られている（Gille 2002）。こうした水温上昇傾向は、南極周極流が南下したとすると整合的に説明できる。ただし、最近では、こうした南下傾向には時期により、経度によって特性の相違が見られることも指摘されている（Kim and Orsi 2014；Aoki *et al.* 2015）。この南極周極流の南下は、南半球環状モード（Southern Annular Mode：SAM）が正偏差化し西風の強化と南方シフト（Thompson and Solomon 2002）が原因であるとする見方が強い。近年のSAMの正偏差化には、成層圏オゾンの減少が関係しているという報告がなされている。

こうした循環場の変化とも関連して、JAREの採水観測の結果から、深層水コアの高温化、中層水コアの低塩化を示唆する結果も得られた（Aoki *et al.* 2005a）。低塩化の原因としては、降水量の増加に加えて、海水の融解量の増加や陸氷融解量の増加が大きな寄与をしている可能性があり（Helm *et al.* 2010）、淡水収支の見積もりには南極大陸周辺まで含めて考える必要が

ある。

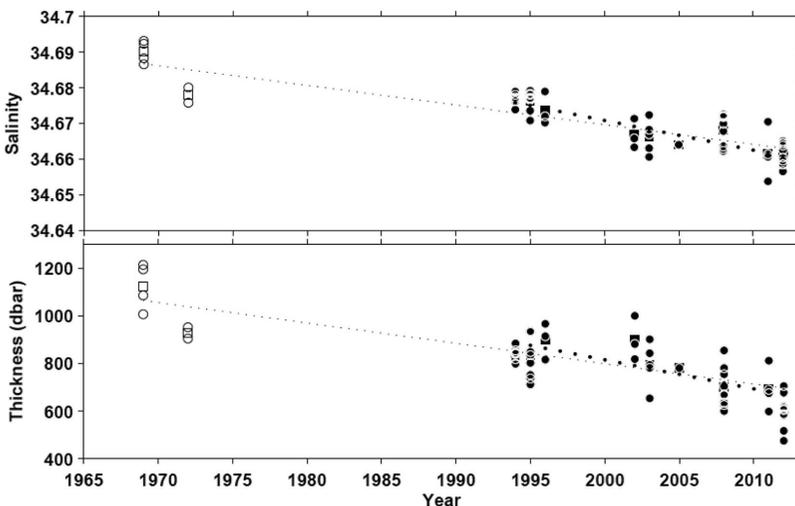
#### 4. 南極底層水の淡水化と沿岸域の変化

海洋は広く大きく、しかも深い。通常は海の浅い方で変化が起きることは考えやすく、事実、温暖化に伴う海洋の貯熱量の増加も、水深数百mまでで強く起きていることが分かっている（Bindoff *et al.* 2007）。しかし、船から海底の直上まで観測機材をおろして昔と今の観測データを比べた結果、南極大陸の近くでは、海底付近に端を発する強い変化があらわれていることが明らかになってきた。

南極沿岸域の南極底層水の形成域近傍の一つである東経140度線で観測を行い、過去からの観測と比較した結果、1970年代から南極底層水は顕著に淡水化し、また底層水の層の厚さが薄くなりつつあることが分かった（第4図：Aoki *et al.* 2005b, 2013）。同じ海盆域では、より広くみると暖水化も進行しつつあり（Shimada *et al.* 2012）、ほぼ同様の傾向は南極海全体でみられることも明らかになってきた（Purkey and Johnson 2010, 2013）。こうした南大洋底層における昇温の把握は、IPCCの第5次評価報告書（Rhein *et al.* 2013）でも大きな理解の進展の一つとして取り扱

われている。南極底層水の形成過程を考えると、南極を取り巻く海の底から変化が起こるのは自然と言えば自然であるが、観測誤差を大きく超えてこれほど変化がはっきりと見えた当時は大きな驚きであった。個人的な感触としては、2002年に実施したこの海洋観測の後では、場所によって異なるものの、観測を実施する度ごとに半ば一方的に変化するの当たり前で、いったいどこまで変化するのかという点に焦点が移ったものだった。

南極底層水は大陸棚上で冬期に形成される陸棚水の影響を強く受けるため、陸棚水が変化すれば底層水に変化が及ぶ。2000年前



第4図 東経140度南極近傍における南極底層水の塩分（上、PSS-78：概ね‰に一致する）と層厚（下）の時間変化。黒丸が日本および世界海洋循環実験計画による観測点、白丸がEltanin号による観測を示す。黒四角、白四角はそれぞれそれらの年平均値。太い点線は1990年代以降のデータ、細い点線は1970年代以降すべてのデータにもとづき最小二乗法により求めたトレンドをそれぞれ示す。1970年代から低塩化傾向と厚さの減少、および近年の加速が観測されている。Aoki *et al.* (2013) をもとに作図。

後には、東側にあるロス海の陸棚上で陸棚水が低塩化していることが明らかになっており、我々の観測した南極底層水の低塩化はこのロス海で形成された南極底層水が低塩化した影響を受けていると推測している。一方で、東経140度の形成域付近でも、大きな変化が起きている。140度の高密度陸棚水の形成域は、メルツ氷河から伸びる浮氷舌の下流にできるメルツ・ポリニヤでの海水生産を主たる起源としているが、2010年に氷山が漂流してきてこの浮氷舌に接近し、浮氷舌が崩壊してしまった。そのため、ここでの海水生産量が激減してしまい (Tamura *et al.* 2012)、陸棚水の塩分も低塩化した (Shadwick *et al.* 2013)。このローカルな変化も南極底層水の特性に影響を与える可能性が考えられ (Aoki *et al.* 2013, 2017)、海水生産の顕著な南極大陸棚上での海況が変化すると、広く深底層のレジームシフトを惹き起こす可能性を示している。

ロス海の陸棚水の低塩化の原因は、南極沿岸流の方向でみた場合に上流側にある西南極氷床 (第1図) から陸水の流出、西南極氷床の融解の加速が原因であると考えられている (Jacobs *et al.* 2002; Jacobs and Giulivi 2010)。では何故西南極氷床からの水の流出が加速しているのか? 現在、このあたりの状況の把握とメカニズムの理解が全球的な気候変動理解の数々の課題のなかでも最重要課題の一つとなっている。この西南極氷床は、氷を取り除いた場合の地盤は海面下に沈むため、かなり昔から氷床の不安定性が指摘されてきた (例えば Mercer 1978)。このような基盤地形を背景とした海洋と氷床の相互作用が注目されている。過去の観測データから南極沿岸の陸棚域全体で水塊特性の変化傾向を調査したところ、西南極沿岸は暖水化しており、これは沖側の深層水の湧き上がる水深と水温の上昇とに関係していることが明らかになった (Schmidtke *et al.* 2014)。この海洋の変動が本当に氷河変動のトリガーになったのか、この海洋変動と大気変動の関係性はどうか、現在、精力的に研究が繰り広げられている。

## 5. むすび 南極沿岸での大気-海洋-雪氷圏共変動の把握に向けて

海洋観測網の発展とともに、南極周極流域の暖水化や南極底層水の淡水化・暖水化など、南大洋長期変動の実態把握の進展がみられた。大気が海洋の底層にまで影響を及ぼすこと、南極沿岸のそれぞれの地域が固有の重要性をもつことに対する理解も進んできた。大

気の変動が、陸水や海水といった氷を巻き込んで、全球規模の海洋変動とリンクしている。

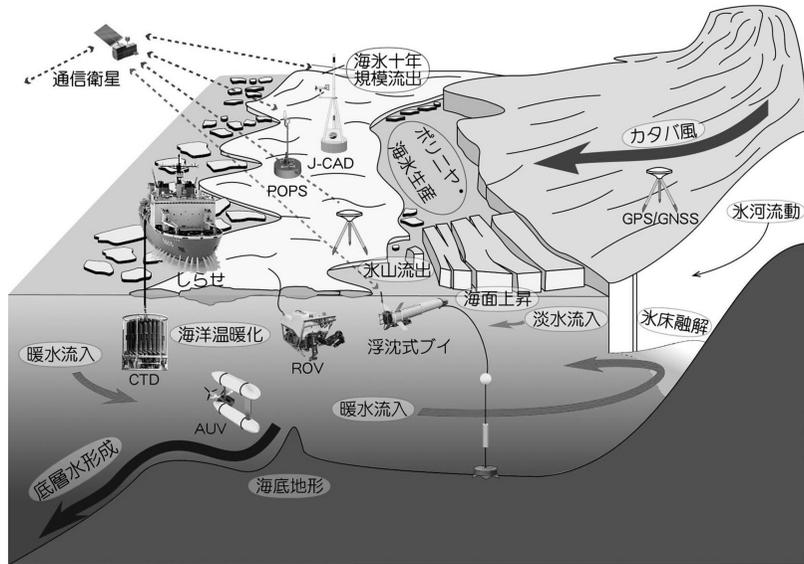
こうした大気変動と海洋変動のリンクは南極域だけに限定されるわけではない。太平洋の南西端をなす西南極・南極半島のあたりでは、海洋から氷床までエルニーニョ・南方振動のテレコネクションの影響が指摘されているが (例えば Turner 2004)、さらにもう少し進んで、インド洋区にある昭和基地周辺の定着氷縁の緯度が熱帯太平洋の海面水温と相関している可能性もある (Aoki 2017)。

このように、南極沿岸氷床の理解が全球の気候システム変動の全体像を理解する鍵となっている。こうした中で、国際的には Southern Ocean Observing System (SOOS) といった枠組みの中で国際観測協力が拡がり、国内でも新学術領域「南極の海と氷床」(川村賢二代表)のもとで多分野間での学際的な協力がはじまった。その中で、氷海域での海洋観測をさらに無人化・省力化し、より充実させることを目指している。JAREの第9期重点観測ではサブテーマ2として「氷床・海水縁辺域の総合観測から迫る大気-氷床-海洋の相互作用」(Research of Ocean-ice BOundary InTeraction and Change around Antarctica: ROBOTICA) をかかげ、ロボット観測技術や動物センサーに遠隔通信を用いて、氷海の気候システム観測・研究の発展を図っている (第5図)。同時に、酸素安定同位体比を用いて淡水起源を推定するなど、極域で有効なトレーサーの分析も有益である。道筋は平坦でも容易でもないだろうが、将来的な地球環境の変化を見通す上で必要な努力であると考えている。

このように認識が急展開する時期に南大洋観測の一端を担い、地球の大きな変化を見出す現場に立ち会えたことは、研究者として幸運であった。今回の賞は、明らかに過去からの様々な取り組みの蓄積の上にいただいたものです。このような評価をいただいたことに感謝するとともに、先人達の努力に敬意を表します。そして極域海洋・気候システムの研究と観測を、次の世代に引き継いでいけたらと切に願っています。

## 参 考 文 献

- Aoki, S., 1997: Trends and interannual variability of surface layer temperature in the Indian sector of the Southern Ocean observed by Japanese Antarctic Research Expeditions. *J. Oceanogr.*, **53**, 623-631.  
 Aoki, S., 2017: Breakup of land-fast sea ice in Lützow-



第5図 「氷床・海水縁辺域の総合観測から迫る大気-氷床-海洋の相互作用」南極沿岸海洋で構想している観測網の概念図。

- Holm Bay, East Antarctica, and its teleconnection to tropical Pacific sea-surface temperatures. *Geophys. Res. Lett.*, **44**, 3219-3227.
- Aoki, S., M. Yoritaka and A. Masuyama, 2003: Multidecadal warming of subsurface temperature in the Indian sector of the Southern Ocean. *J. Geophys. Res.*, **108**, 8081, doi:10.1029/2000JC000307.
- Aoki, S., N. L. Bindoff and J. A. Church, 2005a: Interdecadal water mass changes in the Southern Ocean between 30°E and 160°E. *Geophys. Res. Lett.*, **32**, L07607, doi:10.1029/2004GL022220.
- Aoki, S., S. R. Rintoul, S. Ushio, S. Watanabe and N. L. Bindoff, 2005b: 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., G. Mizuta, H. Sasaki, Y. Sasai, S. R. Rintoul and N. L. Bindoff, 2015: Atlantic-Pacific asymmetry of subsurface temperature change and frontal response of the Antarctic Circumpolar Current for the recent three decades. *J. Oceanogr.*, **71**, 623-636.
- 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**, doi:10.1002/2017JC012925.
- Bindoff, N. L. *et al.*, 2007: Observations: Oceanic climate change and sea level. In: *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K. B. Averyt, M. Tignor and H. L. Miller (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 996pp.
- Gille, S. T., 2002: Warming of the Southern Ocean since the 1950s. *Science*, **295**, 1275-1277.
- Helm, K. P., N. L. Bindoff and J. A. Church, 2010: Changes in the global hydrological-cycle inferred from ocean salinity. *Geophys. Res. Lett.*, **37**, L18701, doi:10.1029/2010GL044222.
- Jacobs, S. S. and C. F. Giulivi, 2010: Large multidecadal salinity trends near the Pacific-Antarctic continental margin. *J. Climate*, **23**, 4508-4524.
- Jacobs, S. S., C. F. Giuliv and P. A. Mele, 2002: Freshening of the Ross Sea during the late 20th century. *Science*, **297**, 386-389.

- Kim, Y. S. and A. H. Orsi, 2014: On the variability of Antarctic Circumpolar Current fronts inferred from 1992–2011 altimetry. *J. Phys. Oceanogr.*, **44**, 3054–3071.
- Kitade, Y., K. Shimada, T. Tamura, G. D. Williams, S. Aoki, Y. Fukamachi, F. Roquet, M. Hindell, S. Ushio and K. I. Ohshima, 2014: Antarctic Bottom Water production from the Vincennes Bay Polynya, East Antarctica. *Geophys. Res. Lett.*, **41**, 3528–3534.
- Mercer, J. H., 1978: West Antarctic ice sheet and CO<sub>2</sub> greenhouse effect: a threat of disaster. *Nature*, **271**, 321–325.
- Nihashi, S. and K. I. Ohshima, 2015: Circumpolar mapping of Antarctic coastal polynyas and landfast sea ice: Relationship and variability. *J. Climate*, **28**, 3650–3670.
- Ohshima, K. I. *et al.*, 2013: Antarctic Bottom Water production by intense sea-ice formation in the Cape Darnley polynya. *Nat. Geosci.*, **6**, doi:10.1038/ngeo1738.
- 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. Climate*, **23**, 6336–6351.
- Purkey, S. G. and G. C. Johnson, 2013: Antarctic Bottom Water warming and freshening: contributions to sea level rise, ocean freshwater budgets, and global heat gain. *J. Climate*, **26**, 6015–6122.
- Rhein, M. *et al.*, 2013: Observations: Ocean. In: *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [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.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 1535pp.
- Schmidtko, S., K. J. Heywood, A. F. Thompson and S. Aoki, 2014: Multidecadal warming of Antarctic waters. *Science*, **346**, 1227–1231.
- Shadwick, E. H., S. R. Rintoul, B. Tilbrook, G. D. Williams, N. Young, A. D. Fraser, H. Marchant, J. Smith and T. Tamura, 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.
- 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. Commun.*, **3**, doi:10.1038/ncomms1820.
- Thompson, D. W. J. and S. Solomon, 2002: Interpretation of recent Southern Hemisphere climate change. *Science*, **296**, 895–899.
- Turner, J., 2004: The El Niño–Southern Oscillation and Antarctica. *Int. J. Climatol.*, **24**, 1–31.

---

## Observational Study on Long-term Variability of Atmosphere–ocean Coupled System in the Southern Ocean

Shigeru AOKI\*

\* *Institute of Low Temperature Science, Hokkaido University,  
Kita-19, Nishi-8, Kita-ku, Sapporo, 060-0819, Japan  
E-mail: shigeru@lowtem.hokudai.ac.jp*

(Received 26 January 2018, Accepted 22 March 2018)

---