



Title	全球気候変動を駆動する南大洋海洋循環：アガラスリーケージとウェッデルジャイア
Author(s)	池原, 実
Citation	低温科学, 76, 121-134
Issue Date	2018-03-31
DOI	10.14943/lowtemsci.76.121
Doc URL	http://hdl.handle.net/2115/70329
Type	bulletin (article)
File Information	14_Lowtemsci76_P121-134.pdf



[Instructions for use](#)

全球気候変動を駆動する南大洋海洋循環 — アガラスリーケージとウェッデルジャイヤ —

池原 実¹⁾

南大洋は全球気候変動にとって重要な役割をもっている。巨大な物質リザーバである南大洋における諸現象（生物ポンプ、海洋フロント、海水分布、表層成層化、湧昇等）の変化の理解が大気 CO₂ 濃度変動の原因とプロセスを解き明かすために重要である。南大洋での海洋フロントの移動は、アガラスリーケージの変化を介して大西洋子午面循環の強弱に影響する。また、ウェッデルジャイヤの拡大・縮小は、南極周極流の移動とともに海水分布域やそれらの融解スポットを変化させることから、南大洋における成層化の程度や生物ポンプの地理的多様性とそれらの変化をもたらしている。

Ocean circulation in the Southern Ocean driving global climate change — Agulhas leakage and Weddell gyre —

Minoru Ikehara¹

The Southern Ocean plays a very important role in the global climate change on the present and geologic past. To resolve the causes and processes of atmospheric CO₂ change, it is important to understand the mechanisms and processes of sub-systems in the Antarctic Cryosphere such as a change of biological productivity, surface water frontal system, sea-ice distribution, surface stratification, and wind-driven upwelling. Migration of the Southern Ocean fronts affects the intensity of the Atlantic Meridional Overturning Circulation (AMOC) through changes in the Agulhas leakage. In addition, expansion and reduction of the Weddell gyre changes the geographical variability and its changes of surface stratification and biological pump. These changes are derived from changing the sea ice distribution and their melting spots with migration of the Antarctic Circumpolar Current.

キーワード：南大洋, アガラスリーケージ, ウェッデルジャイヤ, 海水, 南極周極流

Southern Ocean, Agulhas leakage, Weddell gyre, sea ice, Antarctic Circumpolar Current

1. はじめに

南大洋 (Southern Ocean) は負の熱と CO₂等の物質の巨大なリザーバであり、全球気候変動の鍵を握る。Martin らが提唱した「鉄仮説」(Martin, 1990) 以来、南大洋は高栄養塩・低クロロフィル (high-nutrient, low-chlorophyll: HNLC) 海域の代表的な海洋として注目され

てきた。HNLC 海域は、表層混合層に栄養塩が豊富に存在しているにも関わらず、海水に溶存している鉄が不足しているために植物プランクトンの一次生産が制限されている海域のことである。鉄仮説では、南大洋の HNLC 海域において、氷期に陸域から大気経由のダストとして多量の鉄が海洋に供給されると、一次生産が増大して大気から海洋への二酸化炭素吸収が促進されていたと考えられている。このような南大洋における生物ポンプの駆動効率の変化を復元する研究が様々な古環境代理指標 (プロキシ) を用いて行われてきた (例えば, Ikehara et al., 2000)。

南大洋を特徴付ける南極周極流 (Antarctic Circumpolar Current: ACC) (図 1) は水深 3000 m 程度の厚みを持つ世界最大級の表層循環流であり、ドレーク海峡での流量は黒潮流量の 4 倍以上の最大 135 Sv (10⁶ m³/s) に達する。ACC や海水分布、表層水温、塩分など

連絡先

池原 実

高知大学 海洋コア総合研究センター

〒783-8502 高知県南国市物部乙 200

Tel. 088-864-6719

e-mail: ikehara@kochi-u.ac.jp

1) 高知大学 海洋コア総合研究センター

Center for Advanced Marine Core Research, Kochi

University, Nankoku, Japan

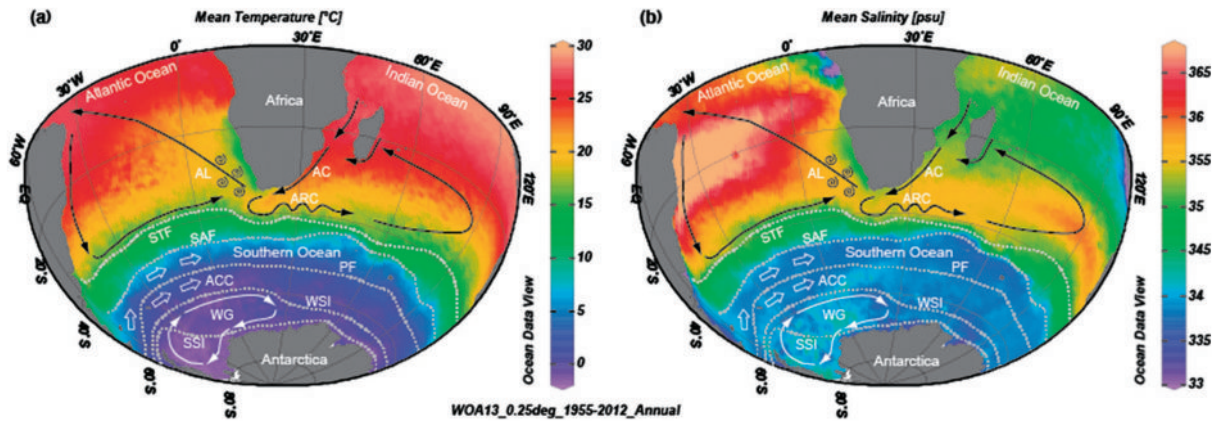


図1：南半球における海洋循環とアガラスシステムの概念図。背景のカラーは Ocean Data View (Schlitzer, 2013) と World Ocean Atlas Data 2013 (Locarnini et al., 2013; Zweng et al., 2013) を用いた海洋表層における (a) 年平均水温と (b) 年平均塩分の分布を示す。矢印 (黒と白) は主要な表層循環パターンを示す。海洋フロントの位置は Belkin and Gordon (1996) に基づいた。海水分布は Comiso (2003) に基づいており、冬季海水氷縁 (WSI) は9月の平均海水密度 (1979-1999) が >15% の位置を示しており、夏季海水氷縁 (SSI) は2月の平均海水密度 (1979-1999) が >15% の位置を示す。南大洋は風成循環である南極周極流によって複数のゾーンに分けられ、各ゾーンは異なる水温と塩分で特徴づけられる。図中の略号は次の通り。アガラス海流 (Agulhas Current: AC), アガラスリーケージ (Agulhas leakage: AL; 渦で示されている), アガラスリターン海流 (Agulhas Return Current: ARC), 亜熱帯前線 (Subtropical Front: STF), 亜南極前線 (Subantarctic Front: SAF), 極前線 (Polar Front: PF), 南極周極流 (Antarctic Circumpolar Current: ACC), 冬季海水氷縁 (winter sea ice limit: WSI), 夏季海水氷縁 (summer sea ice limit: SSI), ウェッデルジャイヤ (Weddell gyre: WG)。

の変動は、南大洋の海洋循環とそれに伴う深層から大気への CO_2 放出の強さや南極氷床に作用し、炭素循環や海水準変動を介して全球気候変動を駆動していると考えられている (例えば, Sigman et al., 2004)。実際に、南大洋における現場観測データの蓄積によって、ACC 付近の表層から亜表層において暖水化と低塩化が進行しており (Gille, 2008), ACC が極側へシフトしていることが推察されている (Aoki et al., 2003)。このような全球気候変動と南大洋変動との相互作用の実態解明のために、過去に CO_2 濃度が大きく変動した時代の実態を明らかにすることは有力なアプローチである。本稿では、南大洋における海洋循環と全球気候変動の関係の一端を、南極周極流、アガラスリーケージ、ウェッデルジャイヤに着目しながらレビューする。大気 CO_2 濃度変動機構とも密接に関連する南大洋における海洋フロントと海水氷縁の南北シフトに関しては、池原 (2012) にまとめられている。また、1990年代における南大洋の古海洋変動の復元研究例は池原 (2001) に詳述されている。本稿とあわせて2つの総説を参照されたい。

2. アガラスリーケージと大西洋子午面循環 (AMOC)

アガラス海流 (Agulhas Current) はインド洋の西岸境界流である。このような西岸境界流は熱帯の熱と塩を高緯度へ運搬する媒体であり、全球気候を和らげるとも

に、中緯度域のストーム (台風やハリケーン) の経路にエネルギーを供給している (Hu et al., 2015; Palter, 2015)。西岸境界流は、人為起源の温暖化に反応してさらに温暖化を助長し、極端気象を発現させることが予測されている。南アフリカ南端部において、アガラス海流の大部分はアガラスリターン海流 (Agulhas Return Current) としてインド洋に戻る (図1)。アガラス海流の一部分がアガラスリーケージ (Agulhas leakage) を経由してインド洋一大西洋ゲートウェイを超えてインド洋の熱と塩分を大西洋に供給している。

大西洋子午面循環 (Atlantic Meridional Overturning Circulation: AMOC) は、北半球の中緯度域における熱と炭素の輸送の大半を担う主要な子午面循環であり (図2)、その循環の強さや北向きの熱輸送の長期変化は、全球的な熱塩分配を介して気候を変化させる。アガラス海流は、インド洋から南大西洋への熱塩移流としてのアガラスリーケージを支配することで AMOC に影響し (図1)、結果として全球海洋循環に関わっている (Beal et al., 2011)。このようにそれぞれの大洋間での海水のやりとりが行われる特定の海域をゲートウェイと呼び、テクtonic な時間スケールにおける海洋循環と気候変動を支配する因子としても重要である (詳細は本巻の佐藤ほかを参照)。例えば、オーストラリア大陸と南極大陸に挟まれたタスマニアゲートウェイや南米と南極の間のドレークゲートウェイは、大陸移動に伴って、いつ開裂して南極周極流が成立したのかが新生代の気候変動と南極

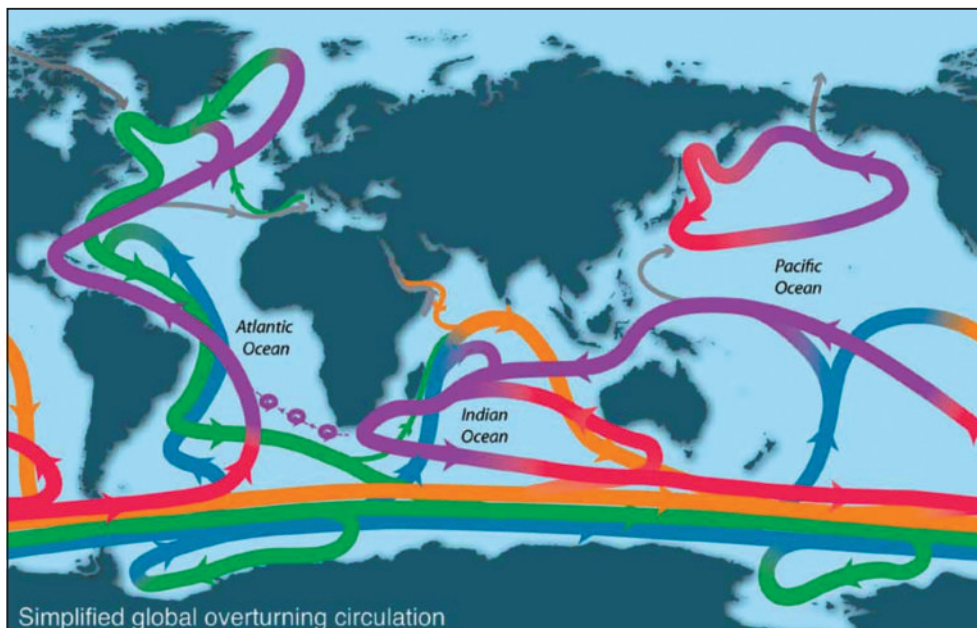


図2：全球の海洋循環の概念図 (Talley, 2013). 紫：表層および水温躍層, 赤：水温躍層下部および中層水, オレンジ：インド洋深層水 (Indian Deep Water: IDW) と太平洋深層水 (Pacific Deep Water: PDW), 緑：北大西洋深層水 (North Atlantic Deep Water: NADW), 青：南極底層水 (Antarctic Bottom Water: AABW), 灰色：ベーリング海峡通過流, 地中海と紅海への流入.

氷床発達史を検討する上で決定的に重要である。タスマニアゲートウェイの変遷史については、鈴木 (2012) に詳しくまとめられている。

アガラスリーケージと気候変動の関連に関しては、これまで多くの研究がなされてきた。例えば、アガラスリーケージは南半球偏西風帯 (Southern Hemisphere westerly winds) の位置、つまり南極周極流から亜熱帯ジャイヤを隔離する亜熱帯前線 (Subtropical Front: STF) と関係していると考えられている (de Ruijter et al., 1999; Biastoch et al., 2009; Rouault et al., 2009)。この概念に基づくと、近年の温暖化に伴って偏西風帯が南下した場合、アフリカ大陸と STF との間のゲートウェイが広がるためインド洋から大西洋への熱塩移流が増えることになる (Beal et al., 2011)。逆に、氷期で想定されているように偏西風帯が北上すれば、アガラスリーケージは縮小することになる (Bard and Rickaby, 2009)。このようなアガラスシステムの変化が AMOC を介して全球気候変動のトリガーやフィードバック機構となっている可能性が指摘され注目されている (Beal et al., 2011)。例えば、温暖期に偏西風帯の南下によって熱塩移流が強化されたとしたら、南大西洋の塩分総量が増加し、北大西洋深層水 (NADW) 形成域への塩分輸送量が増大するため、結果として AMOC が強まることとなり、さらに温暖化が加速されることが考えられる (正のフィードバック)。

しかしながら、その後アガラス海流の位置や流量などに関する現場観測研究が進展した結果、1990 年初頭以降アガラス海流が強化しているのではなく、渦活動 (eddy activity) が活発化したことによってアガラス海流の影響範囲が拡大していたことが最近報告された (Beal and Elipot, 2016)。黒潮やアガラス海流などの強い海流である西岸境界流周辺では、同時に数百 km 程度のスケールを持つ渦活動も非常に活発となる。例えば、日本近海でも渦活動と黒潮大蛇行の関連などが議論されている (鹿島ほか, 2008)。アガラス海流のような西岸境界流における渦活動の増加は、極側への熱の移動を増加させ、かつ、海洋フロントを超えて水塊相互に栄養塩を交換することに寄与する。このような渦の効果については、同様の西岸境界流である黒潮、東オーストラリア海流、メキシコ湾流でも指摘されており (Hu et al., 2015; Palter, 2015)、温暖化の進行に伴う海流系の変化予測について重要な視点を提供している。

アガラスリーケージの変動が AMOC に影響を与えることがモデル実験からも指摘されている。リーケージの強さの変化は大西洋の成層化の程度と深層水の沈み込み強度を変え、AMOC を数百年スケールで異なる安定状態に導くことが示唆された (Weijer et al., 2001, 2002)。つまり、アガラスリーケージが強まると、大西洋が相対的に高塩分化し、AMOC がより安定的に循環することとなる (図3)。

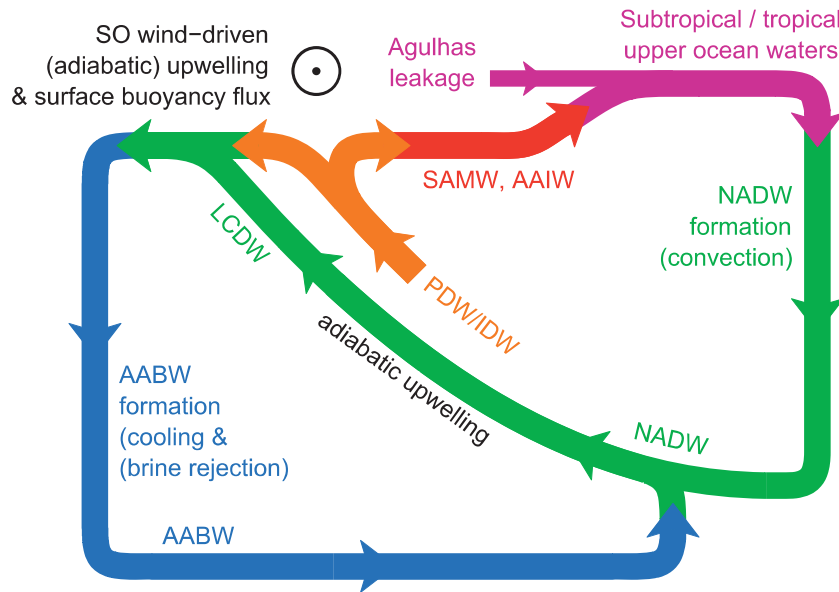


図3: 現在の大西洋子午面循環 (AMOC) の概念図 (Buizert and Schmittner, 2015). 原図は Talley (2013) による. 図中の略号は次の通り. 南極底層水 (Antarctic Bottom Water: AABW), 下部周極深層水 (Lower Circumpolar Deep Water: LCDW), 南極中層水 (Antarctic Intermediate Water: AAIW), 亜南極モード水 (Subantarctic Mode Water: SAMW), 太平洋深層水 (Pacific Deep Water: PDW), インド洋深層水 (Indian Deep Water: IDW), 北大西洋深層水 (North Atlantic Deep Water: NADW). 南大洋では, 相対的に密度が小さく溶存酸素の少ない IDW と PDW が, 密度が大きく高塩分の NADW の北側で湧昇している (Talley, 2013).

氷期・間氷期スケールでのアガラスリーケージの変動は, 南アフリカ沖の海底コアの解析から復元されている. 例えば, Martínez-Méndez et al. (2010) は, アフリカ大陸最南端の喜望峰沖で採取された2地点の海底コアから浮遊性有孔虫化石殻を抽出し, 酸素同位体比 ($\delta^{18}\text{O}$) と Mg/Ca 古水温, 浮遊性有孔虫群集組成の変動を過去 35 万年間にわたり復元するとともに, $\delta^{18}\text{O}$ と Mg/Ca 比から海水の $\delta^{18}\text{O}$ (つまり表層塩分) の変動を復元した. これらの解析結果は, 単純に氷期に表層水温が低下するという変動パターンではなく, 過去3回の氷期の最寒期と, それらに引き続く融氷期に表層水温が高くなる傾向を示し, 氷期の海洋表層の塩分が間氷期に比べて有意に高かったことを示した. このことから, 氷期のアガラス海流が温暖で高塩分化していたことが推定される (Martínez-Méndez et al., 2010) が, その具体的な要因とメカニズムはよくわかっていない. また, アガラスリーケージの影響が及ぶ海域, つまり渦として熱塩を運ぶアガラスリングが西進する南アフリカ西方沖における海底コアの解析からは, アガラスリーケージが氷期から間氷期への移行期 (融氷期) に最も強くなることが推測されている (Peeters et al., 2004; Beal et al., 2011). このことは, 融氷期のアガラスリーケージの強化が AMOC を間氷期モードに移行させる強制力として働いていたことを

示唆している (Peeters et al., 2004).

Simon et al. (2013) は, 南アフリカ東方沖の海底コア (CD154 17-17 K) を用いて過去 10 万年間の浮遊性有孔虫の $\delta^{18}\text{O}$ と Mg/Ca 古水温を復元し, アガラス海流自体の変動を明らかにした. また, 浮遊性有孔虫群集の変化も並行して求めることで, アガラスリーケージ群集と呼ばれる種群に着目した解析も行い, アガラス海流の上流側の変動パターンも示した. その結果, アガラスリターン海流における渦活動の増加が, 亜熱帯前線より南方の亜南極表層水を一部巻き込む南西インド洋ジャイヤとの混合を引き起こすことを見いだした. このことは, アガラス海流自体がアガラスリターン海流と南西インド洋ジャイヤのダイナミクスと強くリンクしており, 南大西洋におけるリーケージ下流域の変動はアガラス海流の地域的な変化を反映している可能性があることを示している (Simon et al., 2013). 2016 年には国際深海科学掘削計画 (International Ocean Discovery Program: IODP) による南アフリカ沖掘削 (IODP Exp. 361) が実施されており, 今後, 更新世~鮮新世のアガラスリーケージ変動に関する研究成果が次々に公開されることが期待される.

3. ウェッデルジャイヤの変動

南大洋を特徴づける東向きの南極周極流は世界最長の海流であり、その流量は約 135 Sv と非常に大きい。南極周極流は水温と塩分が急激に変化するいくつかの前線を伴って流れており、亜南極前線 (Subantarctic Front: SAF), 極前線 (Polar Front: PF), 南周極流前線 (Southern ACC Front) などがある。南極周極流の赤道側には亜熱帯ジャイヤが存在し、その極側には主要な海盆に対応してウェッデルジャイヤ (Weddell gyre) とロスジャイヤ (Ross gyre) と呼ばれる時計回りの亜寒帯循環が存在する (図 1)。西南極氷床から張り出す巨大な棚氷 (フィッシャーロンネ棚氷) からは絶えず氷山が流出し、南極半島東岸のラーセン棚氷からは度々巨大氷山が流出するため、温暖化の象徴として各種メディアに取り上げられる。また、ウェッデル海は南極底層水と海水の主要な生成場でもある。それゆえ、ウェッデル海は現在進行形の環境変化の実態や過去に起こっていた古海洋変動ダイナミクスを解き明かす要となる海である。

南大洋における海水分布域は冬季に拡大し、夏季に縮小するという大きな季節変動を示す。南大洋の海水分布域は一様ではなく、ウェッデルジャイヤが存在する南大西洋やロスジャイヤが存在する南太平洋では、より低緯度側へ張りだしている (図 1)。そのため、南極大陸を取り囲む南大洋では、太平洋、大西洋、インド洋の各セクターや亜寒帯循環の有無によって、海水分布域の北限や海洋フロントの位置、水温、塩分分布などに経度ごとの多様性が生まれる。特に、南大西洋においては、ウェッデルジャイヤが存在するために冬季海水縁がより低緯度側へ張り出し、ドレーク海峡を通過した南極周極流も南緯 60 度付近を中心として東進する。ウェッデルジャイヤの東端は東経 20-30 度付近にあると考えられているが、それより東方のインド洋セクターでは冬季海水縁とそれとほぼ同義である南極周極流南方境界 (southern boundary of ACC) は、より高緯度 (南極) 側へ南下する (図 1)。よって、東経 20-30 度付近のウェッデルジャイヤ東端には同じ緯度帯でも表層水温が変わる境界が生じる (図 4)。Geibert et al. (2010) は、相対的に表層水温の高い水塊と接するウェッデルジャイヤ北東端を「氷融解ホットスポット (ice melting hot spot)」という概念で表現した。ウェッデル海で生成された海水がウェッデルジャイヤによって運ばれ、ジャイヤ北東端域で相対的に水温の高い水塊と接することで、局所的に大きな海水融解が生ずることになり、海水の上に降り積もったダスト由来の鉄などの親生物元素が供給されることによって、

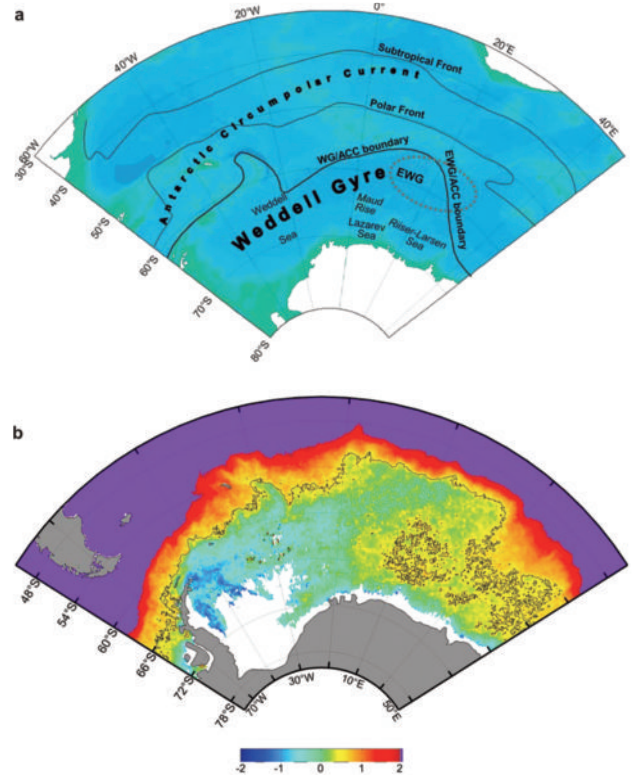


図 4: 氷融解ホットスポット (ice melting hot spot) を示す南大洋大西洋セクターの海底地形と水温分布図 (Geibert et al., 2010). (a) 海底地形図の上に海洋フロントを示してある。南極周極流 (ACC) とウェッデルジャイヤの境界 (WG/ACC) は Orsi et al. (1995) に基づく。破線で囲まれた楕円部分が氷融解ホットスポット。 (b) 表層水温分布から認められるウェッデルジャイヤ。実線は 0.5°C の等温線。東経 25 度付近に東西の表層水温境界が位置する。

鉄制限下の南大洋において生物生産が活発化するホットスポットが形成されていると主張した (Geibert et al., 2010)。このウェッデルジャイヤ北東端の生物生産ホットスポットはアフリカ大陸西岸沖の湧昇流海域に匹敵するサイズであり、今後の海水分布の変化と南大洋における CO₂ 隔離の将来予測にとって見逃すことは出来ないと指摘されている (Geibert et al., 2010)。

このような氷融解ホットスポットは、過去の気候変動においてどのように変化してきたのだろうか。南大洋において氷 (海水もしくは氷山) が存在した地質学的証拠の一つとして漂流岩屑 (ice-rafted debris: IRD) がある (池原, 2012)。池原 (2012) が、南大洋における IRD の有効性と注意点をまとめているので、その詳細については別稿に譲る。また、過去の海水分布の復元には珪藻群集解析が有効である (例えば, Gersonde et al., 2005)。残念ながら、現時点において氷融解ホットスポットやウェッデルジャイヤの変動史に関する知見はほとんど蓄積されていない。しかしながら、現在は海水の影響が皆無である南西インド洋の海底コアの解析から、氷期には

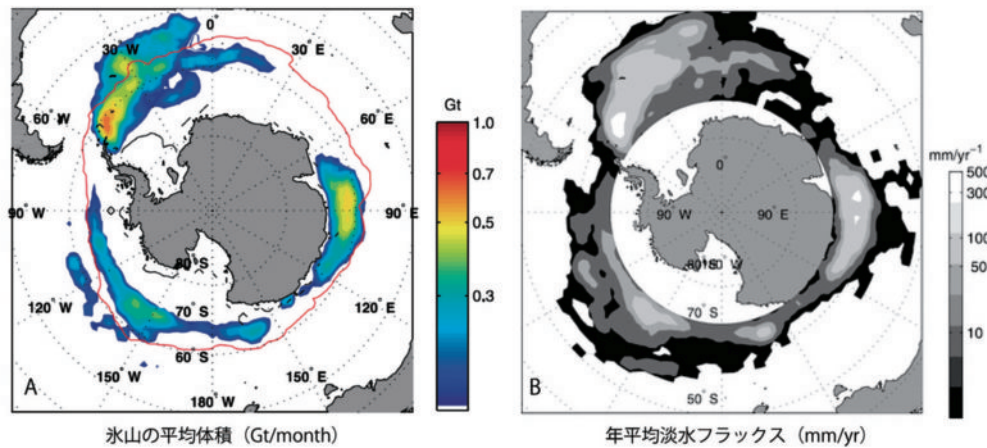


図5：南大洋における2002年から2010年の(a)氷山の体積分布と(b)年平均淡水インプットの分布. Tournadre et al. (2012) を一部改変. (a)には、AMSR-E センサーによる海水データに基づいて、夏季海水縁が黒線で、冬季海水縁が赤線で示されている。

その海域が海水に被覆され、現代（完新世末）とは明らかに異なる海洋環境であったことが報告されている (Manoj et al., 2012, 2013). さらに、この南西インド洋海域では、日本主導でデルカノライズとコンラッドライズにおいて海底コアが採取されており、これらを用いた古環境変動研究による進展が期待される。

上述の通り、ウェッデル海は西南極氷床由来の氷山が多量に流出する現場である。最近の人工衛星センサーの発達により小規模（100～2800 m）な氷山の検出技術が進み、南大洋における氷山分布をより定量的に把握することができるようになってきた。Tournadre et al. (2012) は、2002年から2010年における南大洋の氷山をデータベース化し、そのサイズや存在量等を描画することで、南極氷床からの氷山の流出と南大洋での氷山の融解に明瞭な季節サイクルがあることを明らかにした。南大洋に存在する氷山の大部分は小型の氷山であるが、それらは大型（>5 km）の氷山の分布と密接に関係していることも明らかとなった。また、特筆すべき点は氷山の定量的推定である。南大洋に存在する氷には海水と氷山があるが、そのうちの約40%が氷山であり、それら氷山全体の年平均体積はおよそ400 Gt（25-30%の誤差を含む）であることから、南極氷床からの氷山の流出と融解によって南大洋に莫大な量の淡水がインプットされることになる (Tournadre et al., 2012; 図5)。氷山の半減期は約200日と見積もられていることから (Jacka and Giles, 2007)、大部分の氷山は南極大陸から流出してから1年程度で融解すると考えてよい。ウェッデル海から流出した氷山は、ウェッデルジャイヤに乗って南極半島沿いに流れ、スコシア海付近で南極周極流によって東へ流されていく。よって、基本的にはウェッデルジャイヤに沿う

形で氷山が流下して拡散し、それらが融解することで多量の淡水が南大洋に供給されているのである (Tournadre et al., 2012; 図5)。

ウェッデルジャイヤは活発な鉛直循環のために深海と大気が直接接することができる世界最大の海であり、大気CO₂の吸収場(生物ポンプ)としての役割だけでなく、南大西洋の亜熱帯水と南極大陸を隔てる熱的緩衝材としても重要であり、その変動(拡大/縮小)は全球的な気候変動に大きなインパクトを与える。また、その北側を流れる南極周極流においても、表層から亜表層(水深1000 m位まで)が明らかに暖水化と低塩化を示していることがわかっており、南極周極流の位置が極側へ移動していることが原因だと考えられている。アガラスリーケージやアガラスリターン海流のダイナミクスもインド洋から大西洋への熱塩移流を支配していることから、ウェッデルジャイヤの拡大/縮小やアガラスリーケージの弱化/強化は、南大洋成層化や南極中層水などを介して全球気候変動に大きなインパクトを与える。しかしながら、ウェッデルジャイヤの挙動を復元するのに適した位置の海底コアが欠落しているため、それらの変動の実態は不明であり、今後の研究課題として重要である。

4. 南大洋の基礎生産変動

南大洋やベーリング海などの極域海洋では、一般的に海洋表層における基礎生産量が大きい。これは極域の海洋表層に栄養塩が豊富に存在することに起因する。豊富な栄養塩は、冬季の暴風による海水の混合や湧昇流によって中深層から表層に供給されている。しかし、海洋表層に栄養塩が高濃度で存在するにも関わらず、植物プ

ランクトンの生産量が比較的低い状態が維持されている高栄養塩・低クロロフィル (HNLC) 海域が、南大洋、北太平洋亜寒帯域、東赤道太平洋に存在する。HNLC 海域における基礎生産量変動は、大気中の CO₂ 濃度の変動機構としても重要視されており、その極域海洋における基礎生産量変遷史は、光環境や栄養塩供給、マイクロ栄養塩としての鉄の供給量の変動に支配されていると考えられている。特に、John Martin による鉄仮説 (Iron Hypothesis; Martin, 1990) の提唱以来、HNLC 海域における鉄供給と生物ポンプ (biological pump) の駆動効率の変化が CO₂ 濃度を変化させるプロセスとして注目され、現場海洋での鉄散布実験や HNLC 海域における古海洋研究が盛んに行われてきている。

南大洋は地球規模の気候システム変動において極めて重要な役割を持っている。図 6 に、南大洋における海洋循環と炭素循環を示す概念図 (Sigman and Boyle, 2000 を改変) を示す。南大洋の場合、亜南極前線や南極前線などの表層フロントと栄養塩濃度は密接な関係があり、周極深層水 (Circumpolar Deep Water: CDW) の湧昇によって南極前線より南の南極表層水に栄養塩が豊富に供給される状態が常に維持されている (図 6a)。しかし、現在では鉄律速によって南大洋は典型的な HNLC 海域となっている。氷床コアや海底コアの記録から、氷期には南米や豪州からのダスト供給量が増大していたことがわかっている (例えば、Ikehara et al., 2000; Martínez-García et al., 2009)。このような氷期のダスト供給の増加によって、南大洋の基礎生産が増大し生物ポンプが効率的に働いていたと考えられている (図 6b)。しかし、南大洋全体で氷期に基礎生産量が増加していたわけではなく、完新世に比べて氷期に有意に基礎生産量が増加していた海域は南極前線より北側に限定されている (Kohfeld et al., 2013; 図 7)。南極前線より南では、氷期に冬季海水分布域が拡大するとともに、氷山の流出と融

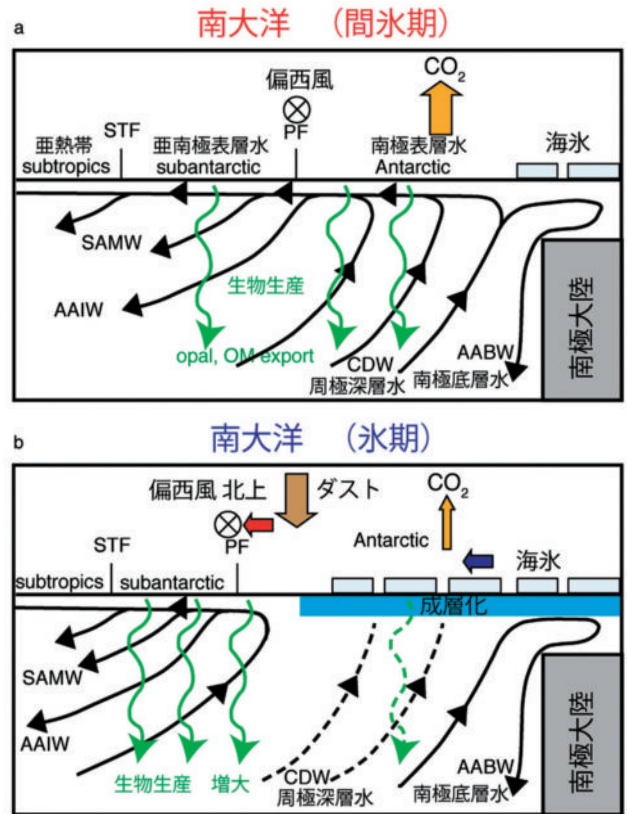


図 6: 南大洋における海洋循環と炭素循環を示す概念図。Sigman and Boyle (2000) を改変。(a) 間氷期、(b) 氷期。STF: 亜熱帯前線、PF: 極前線、SAMW: 亜南極モード水、AAIW: 南極中層水、CDW: 周極深層水、AABW: 南極底層水

解の効果も大きくなって表層の成層化が強化され、その結果、CDW の湧昇が制限されて基礎生産量が低下していた (図 6b)。このような南大洋の成層化は、南大洋の中深層水から大気への二酸化炭素の放出を制限することにも寄与していたと考えられる (Anderson et al., 2009)。

近年、南大洋の成層化の変動や偏西風帯での湧昇流の強弱が、氷期・間氷期スケール、および、より短い時間スケールでの大気-海洋間の炭素循環を支配しているプ

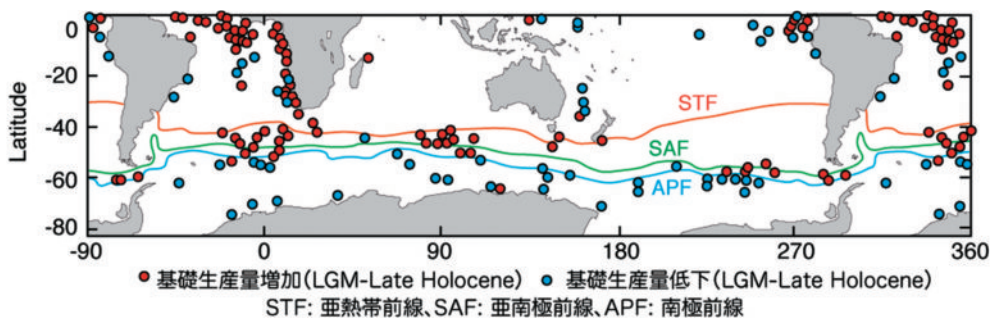


図 7: 南半球における輸出生産 (export production: 海水中の生物生産が海洋底へと輸送される量) の分布図。Kohfeld et al. (2013) を一部改変。完新世後期を基準としたときの最終氷期最寒期 (LGM) の輸出生産の差で表されている。赤は LGM に輸出生産が増加し、青は逆に LGM に輸出生産が減少したことを示す。

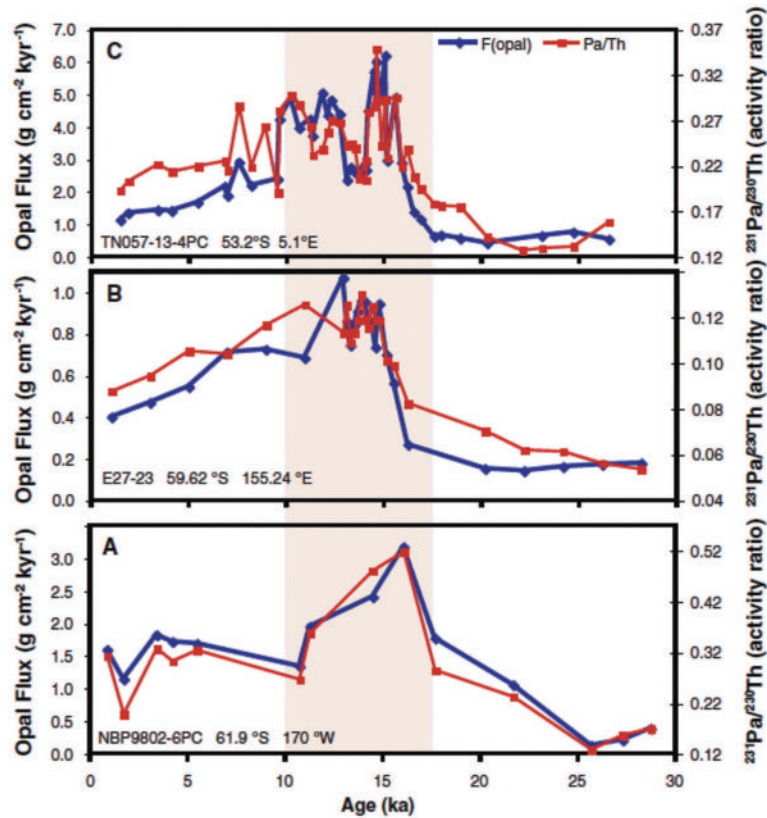


図8：南大洋の3地点における極前線の南側での湧昇の強度を示すプロキシである生物源オパールフラックス (Opal Flux) の変動 (Anderson et al., 2009). 南大洋において生物源オパールの沈降フラックスのプロキシとして有効な $^{231}\text{Pa}/^{230}\text{Th}$ の比 ($^{231}\text{Pa}/^{230}\text{Th}$) もプロットされている. 最終融氷期 [およそ 17,000 (17ka) 年前~10,000 (10ka) 年前] に湧昇流が強化していたことを示している. 南大洋の各セクター (A) 太平洋, (B) インド洋, (C) 大西洋から得られたコアの解析結果.

ロセスとして着目されている (Anderson et al., 2009). 南大洋には世界最大級の表層流である南極周極流が流れ, その上空には大陸に妨げられることなく非常に強い偏西風が吹いている. この偏西風起源のエクマン湧昇 (wind-driven upwelling) が表層の栄養塩濃度を変化させる因子の一つである. 最終融氷期には, それまで成層構造が発達していた南極前線の南側において湧昇流が強化され, 基礎生産量が増加したことが明らかになっている (Anderson et al., 2009; 図8). このとき活発化した湧昇流の影響で, 南大洋から大気へ二酸化炭素が放出され, 融氷期に大気二酸化炭素濃度を増大させた. この最終融氷期における南大洋の湧昇流強化は, 南極における一時的な寒冷化現象である Antarctic Cold Reversal (ACR) の前後に2回起こっていたことが推定されており (図8), 大気中の ^{14}C 生成率や南極氷床コアの二酸化炭素濃度が2段階で変化することと整合的である (Anderson et al., 2009).

より低緯度の熱帯・亜熱帯域における生物生産量の上

昇もまた, 南極前線より南側でのCDWの湧昇強化の間接的な証拠となりうる. Anderson et al. (2009) は, CDWの湧昇によって表層にもたらされた栄養塩が低緯度方向へ輸送され, 南極前線や亜南極前線付近において冷却されて沈み込み, 南極中層水 (Antarctic Intermediate Water: AAIW), および, 亜南極モード水 (Subantarctic Mode Water: SAMW) として, それぞれ中層 (およそ深度 100-1000 m の範囲) と亜表層 (深度約 100 m までの範囲) で, さらに低緯度方向へと輸送されることを重視した. これが赤道などの湧昇域等で表層へもたらされることで, 現場の基礎生産量が増加し, 輸出生産として海底への生物起源粒子フラックスが上昇することにつながる (Anderson et al., 2009).

より長い時間スケールにおいては, 南大洋における過去 110 万年間のダスト供給量と基礎生産量の変動史が明らかとなっている (Martínez-García et al., 2009). 南大西洋 (ODP Site 1090) では, 氷期に主に南米パタゴニアを起源とするダスト供給量 (アルカンや Fe の埋積速度)

が増大し、生物ポンプが駆動して表層生物生産量（アルケノン埋積速度）が有意に増加していた。このような氷期・間氷期スケールの周期的な変化が、過去 110 万年間継続していた。また、過去 400 万年間の南大西洋へのダスト供給量変動が復元されており、中期更新世気候変遷期（mid-Pleistocene climatic transition: MPT；80~120 万年前）を挟んで、ダスト供給量が大きく変調したことが明らかとなっている（Martínez-García et al., 2011）。その結果から、MPT 以降に南大洋へのダスト供給量が増加し、南大洋での鉄肥沃化が進んだ結果、生物ポンプの活発化によって大気二酸化炭素濃度が減少し、地球規模の寒冷化が進行したというシナリオが提案されている。

5. セジメントウェーブから探る鮮新世以降の南極周極流の変化

南極周極流は水深 3000 m 程度の厚みを持つ世界最大級の表層循環流であることはすでに述べた。その厚みのおかげで、南極周極流の主要な流路やフロントの位置は、一部で海底地形との相互作用によって支配されている（Sokolov and Rintoul, 2009）。例えば、ドレーク海峡を通過した南極周極流は、スコシア海を經由してサウスサンドイッチ諸島の北側を回り込む形で東進し、南西インド洋海嶺（Southwestern Indian Ridge: SWIR）に沿って流れている。また、南インド洋のケルゲレン海台が巨大な障壁となるために南極周極流の主要部はケルゲレン海台南部の凹地を通過している。このようにその一部が海底地形に制約を受けながら流れている南極周極流は、地質学的時間スケールにおいて、いつ頃から現在と同じような流路となり、その流路の変遷は南大洋の海洋環境や全球気候変動とどのように関係してきたのだろうか。その一端は意外なアプローチから復元されてきた。

2007 年度に実施された白鳳丸 KH-07-4 Leg 3 航海において、昭和基地のはるか北方に位置するコンラッドライズ（Conrad Rise）にて反射法地震探査とピストンコア採取が行われた。著者が中心となって進めている国際深海科学掘削計画（IODP）のプロポーザル作成のための第 1 回事前調査であった。過去にコンラッドライズにおいて深海掘削はもとより反射法地震探査も行われていなかったため、予備情報はほとんど皆無であった。コンラッドライズは暴風圏まっただ中に位置するため、強まる暴風の合間を縫って、わずか 1 側線（約 30 マイル）のみではあるが、海底地形と海底地震断面のデータを得ることが出来た。得られたデータは意外なものであっ

た。セジメントウェーブ（sediment wave）の発見である。

深海底のセジメントウェーブは、数 10 m から数 km の波長と数 m の波高を持つ大規模なベッドフォーム（堆積形態）であり、底層流や乱泥流によって形成されることが知られている（Wynn and Stow, 2002）。泥（粒径 63 μm 以下）から構成される場合、マッドウェーブ（mud-wave）とも呼ばれる。底層流に起因するセジメントウェーブは、北大西洋深層水（NADW）の通過流路であるアイスランド南方の北部北大西洋で顕著に認められる（例えば、Manley and Caress, 1994）。一方の南大洋では、ウェッデル海西部の南極底層水が流下する海域で認められている（例えば、Howe et al., 1998）。しかしながら、コンラッドライズ南西斜面で見つかったセジメントウェーブは水深 3000 m 付近に認められ、白鳳丸航走中に周辺海域から取得したサブボトムプロファイルや海底地形記録では、南極底層水が流れていると考えられる水深 5000 m 付近のエンダービー深海平原にはセジメントウェーブは観察されなかった。そこで、コンラッドライズのセジメントウェーブは南極底層水によって形成されているのではなく、南極周極流に起因しているという仮説を立て、3 年後の白鳳丸 KH-10-7 次航海において 12 本の測線を追加してセジメントウェーブの時空間分布を明らかにすることで、南極周極流との関係の解明を試みた。その結果、コンラッドライズのセジメントウェーブは、波長 1~2 km、波高 10~100 m で、1 つのウェーブ構造の長さは最大 40 km 程度に及ぶことが明らかとなった（Oiwane et al., 2014；図 9a）。このような大規模セジメントウェーブのクレストの走向（ウェーブの頂部が連なる方向）は、場所によって異なるが、等深線に平行または準平行に分布する。また、コンラッドライズの海底面においてセジメントウェーブが観察される領域は水深 2400~3400 m 程度に限定され、サブボトムプロファイルからは、コンラッドライズ北側斜面にもセジメントウェーブが観察された。Durgadoo et al. (2008) は、コンラッドライズ周辺海域の観測と数値実験に基づいて、南極周極流ジェットがコンラッドライズ付近で南北に分かれることや、水深 2000 m を超える深海においても一定の流速をもつことを示した。南極周極流ジェットの通過する海域とセジメントウェーブの分布域がほぼ一致することから、コンラッドライズのセジメントウェーブは南極周極流によって形成されたと結論した（Oiwane et al., 2014）。

さらに特筆すべきは、コンラッドライズの反射法地震探査断面にもセジメントウェーブが検出されたことであ

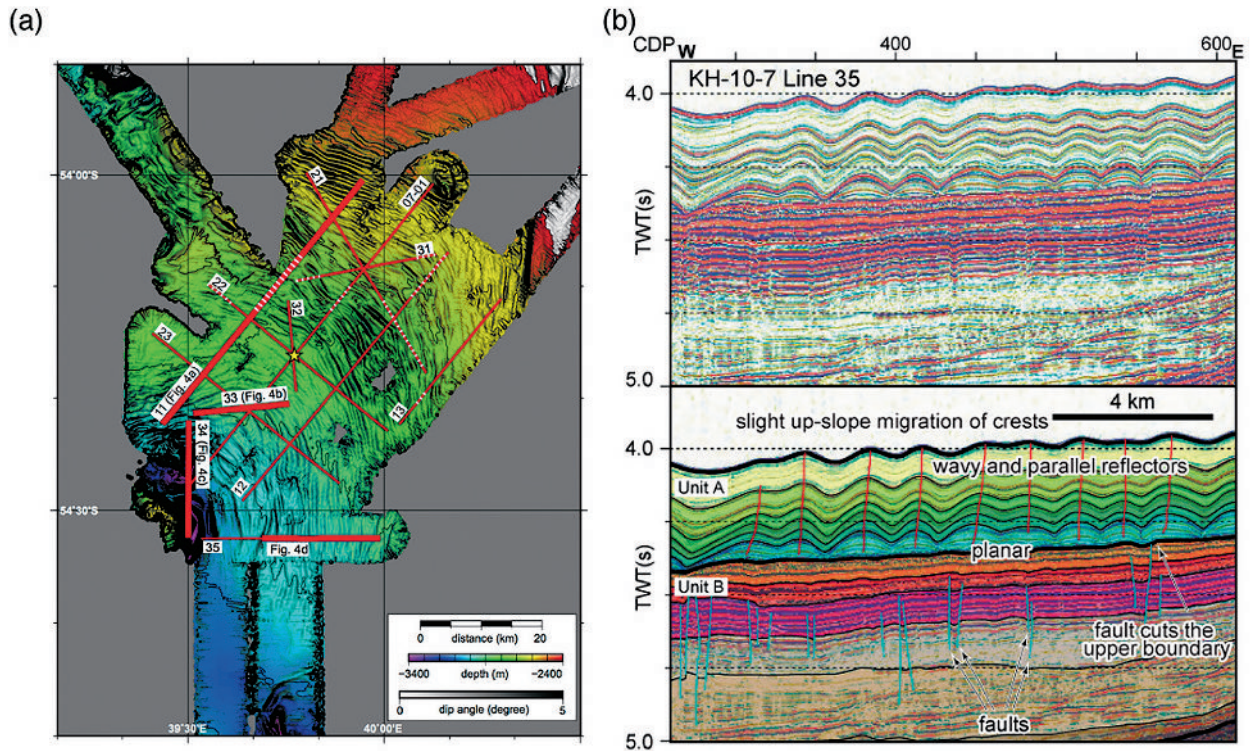


図9：南大洋インド洋セクターのコンラッドライズ南西斜面域において描画されたセジメントウェーブ。Oiwane et al. (2014) を一部改変。(a) 海底地形図と反射法地震探査の測線(赤線)、等深線は100 m 間隔。(b) 測線 KH-10-7 Line 35 における反射法地震探査プロファイル。縦軸は地震波が反射して往復する時間 (Two-way travel time: TWT) で示されており、単位は秒である。上部 Unit A には明瞭なセジメントウェーブが認められるが、下部 Unit B にはセジメントウェーブは存在しない。

る(図9b)。反射断面上での層相や堆積体の形状をもとに、コンラッドライズでの音響層序は2つのユニット(上位より Unit A, B) に区分された。Unit A は、海底面をはじめとして全体に振幅が弱く音響的に透明であり、内部の反射面は地表のセジメントウェーブに平行で波状を呈し、側方への連続性はよい。セジメントウェーブのクレストの位置は上位に向かって斜面上方へとわずかに移動する(図9b)。Unit A の下部では、下位の Unit B が最大170 m ほど浸食されていることが確認された。また、ピストンコアによって採取された表層堆積物は浮遊性有孔虫を若干含む均質な珪藻軟泥からなり、含水率が非常に高い。一方、下位の Unit B は全体に側方連続性は比較的よいが、セジメントウェーブ構造は認められない。

これらの観察結果に基づいて堆積環境を解釈すると、Unit A 全体が現在と同じような南極周極流の影響下で堆積した珪藻軟泥からなる堆積物である可能性が極めて高い。また、海底コアの堆積速度から見積もった Unit A の堆積開始年代はおおよそ170 万年前頃であった。堆積速度の誤差を勘案すれば、Unit A の堆積開始時期は前期～中期更新世であると言える。一方で、Unit B は反射強度やレンズ状堆積体を含むことなど層相が Unit A と

は全く異なる。断層による変位も Unit A にはみられないため、ユニット A/B 境界にはある程度の時間間隙(ハイエタス)と堆積環境の変化が含まれている可能性が高い。コンラッドライズは海洋プレート上に孤立した海底の高まりであるため、陸源砕屑物の供給と堆積は期待できないことから、堆積物相の変化は海洋環境の変化を表している可能性が高い。よって、Unit B の堆積は南極周極流の影響がなかった時代のものであると考えられる。したがって、前期更新世から鮮新世における温暖な時代に、南極周極流が現在よりも南側を流れていたとするとセジメントウェーブの時空間変動を合理的に説明することができる。このように、コンラッドライズのセジメントウェーブの時空間変動に基づいて、南極周極流が前期～中期更新世に北上し、それ以降現在とほぼ同じセッティングとなったとする南極周極流更新世北上仮説が提示された(Oiwane et al., 2014; 図10)。

地質時代における南極周極流の北上イベントは、南大洋の海洋環境変動および全球気候変動の中でどのように位置づけられるのであろうか。その一つの視点は、南極氷床との関連である。近年、東南極ドローニングモードランド(Dronning Maud Land)のセールロンダーネ山地

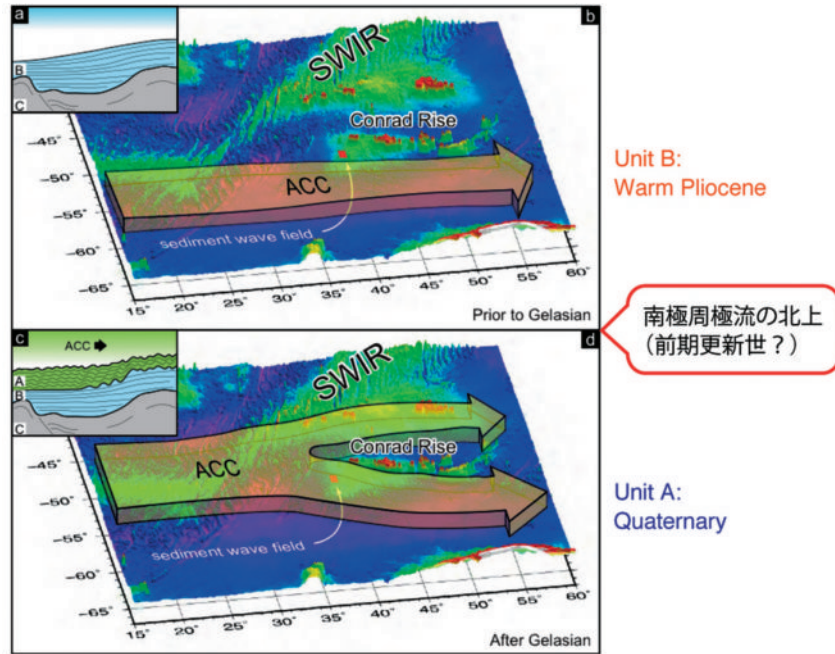


図 10：南大洋インド洋セクターのコンラッドライズ (Conrad Rise) 周辺における南極周極流 (ACC) の流路と堆積モデルの概念図. Oiwane et al. (2014) を一部改変. セジメントウェーブが観察された海域を矢印で示している. (a) Unit B 堆積時 (鮮新世温暖期) の堆積システム, (b) Unit B 堆積時には, ACC はコンラッドライズの南を流れていた, (c) Unit A 堆積時 (第四紀更新世) の堆積システム, (d) Unit A 堆積時には, ACC は現代と同じようにコンラッドライズの上を流れていた. SWIR: 南西インド洋海嶺 (Southwestern Indian Ridge).

(Sor-Rondane Mountains) における地形・地質調査と宇宙線生成核種を用いた岩石の露出年代の解析から、鮮新世以降の東南極氷床高度の変化が復元された。その結果、東南極氷床の高度が更新世において少なくとも 500 m 低下したことが明らかとなった (Suganuma et al., 2014)。これらの結果は、現在よりも温暖だった鮮新世には東南極氷床高度がもっと高かったことを示唆している。東南極氷床の他の地域でも同様の報告がなされている (例えば、Liu et al., 2010; Yamane et al., 2015)。

このような鮮新世の東南極氷床の増大を説明するためには、南大洋から南極への水蒸気供給量を考慮したからくりが必要である (Altmaier et al., 2010; Kong et al., 2010)。更新世における南極周極流の北上と東南極氷床高度の低下は、おそらく南大洋の寒冷化に伴うウェッデルジャイヤと海水分布域の拡大による亜熱帯から南極への水蒸気供給量の低下 (McKay et al., 2012) が原因の一つであろう (図 11)。McKay et al. (2012) は、西南極氷床の拡大と南大洋の寒冷化が 330 万年前から 260 万年前にかけて発生した季節海水域の拡大をもたらし、それらは南半球偏西風帯と南大洋における海洋フロントの北上と連動していたと考察している。また、このような南大洋のフロントや海水分布域の拡大 (北上) は、アガラスリー

テージを制限することになり、結果として AMOC を弱め、全球的な気候の寒冷化を加速したとするシナリオが提案されている (McKay et al., 2012)。

6. まとめと今後の課題

南大洋は過去から現代に至る様々な時間スケールにおける全球気候変動にとって重要な役割をもっている。特に、炭素などの化学物質の巨大なリザーバである南大洋における諸プロセス (生物ポンプ、海水分布、表層成層化、湧昇等) の変化が大気 CO₂ 濃度変動の一部を支配している。南大洋での海洋フロントの移動が、アガラスリーテージの変化を介して大西洋子午面循環の強弱に影響することで、全球気候変動を駆動している可能性が高い。また、ウェッデルジャイヤの拡大・縮小は、南極周極流の移動とともに海水分布域やそれらの融解スポットを変化させることから、成層化の程度や生物ポンプの地理的多様性をもたらしている。このような地質学的時間スケールでの南大洋の海洋フロントや海洋循環の変化は、極域への水蒸気供給量の変化や南極氷床高度の変化とも密接に関係している。

南大洋における古海洋学研究にさらなるブレイクス

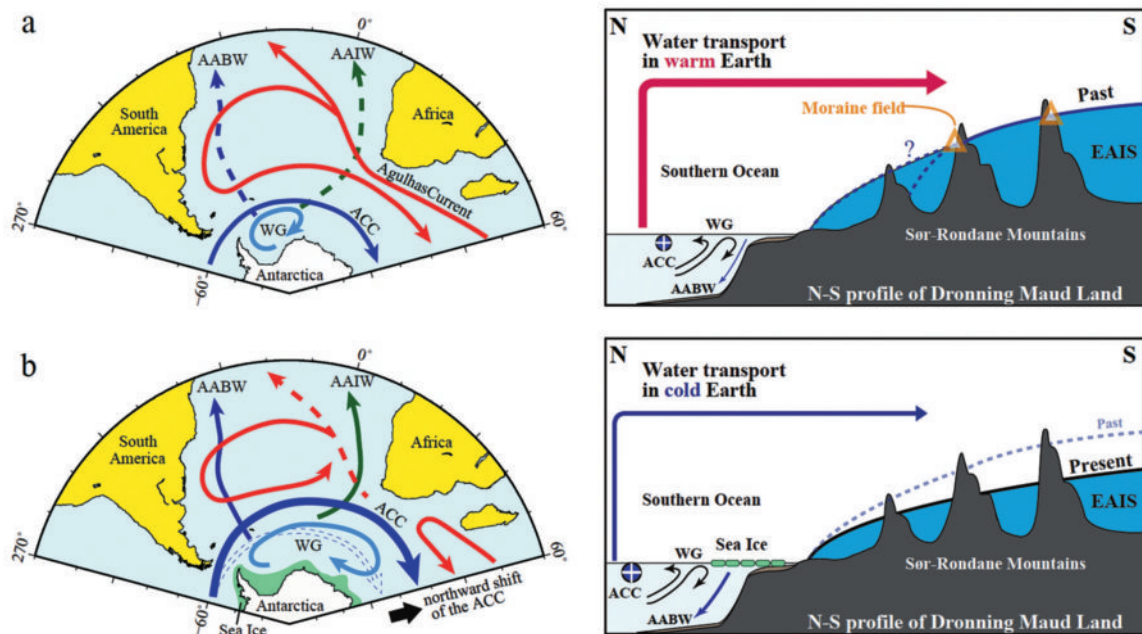


図 11：南大洋における鮮新世後期以降の海洋循環の再編 (Suganuma et al., 2014). (a) 鮮新世温暖期, (b) 更新世. ACC: Antarctic Circumpolar Current, WG: Weddell Gyre, AAIW: Antarctic Intermediate Water, AABW: Antarctic Bottom Water, EAIS: East Antarctic Ice Sheet.

ルーをもたらす方向性の一つは、既存の古環境指標（プロキシ）の高度化と新たなプロキシの開発と応用である。南大洋では、熱帯や亜熱帯域に比してまだまだプロキシ開発の余地がある。特に、炭酸塩からなる有孔虫殻は炭素・酸素同位体比や微量元素の分析を可能とするため、プロキシの素材として大いに利用されているが、南大洋の海底では有孔虫化石が保存されにくく有孔虫によるプロキシ分析はほぼ期待できない。また、古水温プロキシの代表例であるアルケノン古水温計も高緯度海洋には適用できないことがわかってきた。このような悪条件を克服するためには、セジメントトラップ沈降粒子を含む現生試料を活用して様々なプロキシ（微化石群集、化学組成、同位体比など）の緯度分布と季節変動を明らかにし、現在の南大洋における水温、塩分、海水分布などとの対応関係を検討することによって、各プロキシの有効性を再評価する必要があるだろう。また、南大洋の堆積物に豊富に産する珪質微化石（珪藻、放射虫）の酸素同位体比を比較的簡便に分析できる高周波誘導加熱法 (Ijiri et al., 2014) をさらに改良することで微量試料での分析手法を確立し、現生試料を用いたプロキシとしての有用性に関する検証を行い、新たな南大洋古海洋学研究への展開を図ることが求められる。

謝辞

大島慶一郎博士（北海道大学）、および、須藤斎博士（名古屋大学）には、原稿の改訂に際して有益なコメントをいただいた。記して謝意を表します。

参考文献

- Altmaier, M., U. Hergers, G. Delisle, S. Merchel and U. Ott (2010) Glaciation history of Queen Maud Land (Antarctica) reconstructed from in-situ produced cosmogenic ^{10}Be , ^{26}Al and ^{21}Ne . *Polar Science*, **4**, 42–61.
- Anderson, R. F., S. Ali, L. I. Bradtmiller, S. H. H. Nielsen, M. Q. Fleisher, B. E. Anderson and L. H. Burckle (2009) Wind-driven upwelling in the Southern Ocean and the deglacial rise in atmospheric CO_2 . *Science*, **323**, 1443–1448.
- Aoki, S., M. Yoritaka and A. Masuyama (2003) Multidecadal warming of subsurface temperature in the Indian sector of the Southern Ocean. *Journal of Geophysical Research*, **108** (C4), 8081, doi:10.1029/2000JC000307.
- Bard, E. and R. E. M. Rickaby (2009) Migration of the subtropical front as a modulator of glacial climate. *Nature*, **460**, 380–383.
- Beal, L. M. and S. Elipot (2016) Broadening not strengthening of the Agulhas Current since the early 1990s. *Nature*, **540**, 570–573.
- Beal, L. M., W. P. M. De Ruijter, A. Biastoch and R. Zahn (2011) On the role of the Agulhas system in ocean circulation and

- climate. *Nature*, **472**, 429–436.
- Belkin, I. M. and A. L. Gordon (1996) Southern Ocean fronts from the Greenwich meridian to Tasmania. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, **101**, 3675–3696.
- Biastoch, A., C. W. Boning, F. U. Schwarzkopf and J. R. E. Lutjeharms (2009) Increase in Agulhas leakage due to poleward shift of Southern Hemisphere westerlies. *Nature*, **462**, 495–498.
- Buizert, C. and A. Schmittner (2015) Southern Ocean control of glacial AMOC stability and Dansgaard-Oeschger interstadial duration. *Paleoceanography*, **30**, 1595–1612.
- Comiso, J. C. (2003) Large scale characteristics and variability of the global sea ice cover. In: Thomas, D. N. and G. S. Dieckmann (eds.) *Sea Ice: An Introduction to Its Physics, Biology, Chemistry, and Geology*, 112–142. Blackwell Sci., Oxford, U.K.
- de Ruijter, W. P. M., A. Biastoch, S. S. Drijfhout, J. R. E. Lutjeharms, R. P. Matano, T. Pichevin, P. J. van Leeuwen and W. Weijer (1999) Indian-Atlantic interocean exchange: dynamics, estimation and impact. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, **104**, 20885–20910.
- Durgadoo, J. V., J. R. E. Lutjeharms, A. Biastoch and I. J. Anson (2008) The Conrad Rise as an obstruction to the Antarctic Circumpolar Current. *Geophysical Research Letters*, **35**, L20606, doi:10.1029/2008gl035382.
- Geibert, W. et al. (2010) High productivity in an ice melting hot spot at the eastern boundary of the Weddell Gyre. *Global Biogeochemical Cycles*, **24**, GB3007, doi:10.1029/2009gb003657.
- Gersonde, R., X. Crosta, A. Abelmann and L. Armand (2005) Sea-surface temperature and sea ice distribution of the Southern Ocean at the EPILOG Last Glacial Maximum — a circum-Antarctic view based on siliceous microfossil records. *Quaternary Science Reviews*, **24**, 869–896.
- Gille, S. T. (2008) Decadal-scale temperature trends in the Southern Hemisphere Ocean. *Journal of Climate*, **21**, 4749–4765.
- Howe, J. A., R. A. Livermore and A. Maldonado (1998) Mudwave activity and current-controlled sedimentation in Powell Basin, northern Weddell Sea, Antarctica. *Marine Geology*, **149**, 229–241.
- Hu, D., L. Wu, W. Cai, A. S. Gupta, A. Ganachaud, B. Qiu, A. L. Gordon, X. Lin, Z. Chen, S. Hu, G. Wang, Q. Wang, J. Sprintall, T. Qu, Y. Kashino, F. Wang and W. S. Kessler (2015) Pacific western boundary currents and their roles in climate. *Nature*, **522**, 299–308.
- Ijiri, A., M. Yamane, M. Ikehara, Y. Yokoyama and Y. Okazaki (2014) Online oxygen isotope analysis of sub-milligram quantities of biogenic opal using the inductive high-temperature carbon reduction method coupled with continuous-flow isotope ratio mass spectrometry. *Journal of Quaternary Science*, **29**, 455–462.
- 池原実 (2001) 南大洋古海洋学 — 第四紀後期における表層水塊と生物生産量の時系列変動 —. 地質学雑誌, **107**, 46–63.
- 池原実 (2012) 南大洋における海洋フロントの南北シフト — 現代および第四紀後期の海水分布, 南極前線, 南極周極流の移動と気候変動のリンケージ —. 地学雑誌, **121**, 518–535.
- Ikehara, M., K. Kawamura, N. Ohkouchi, M. Murayama, T. Nakamura and A. Taira (2000) Variations of terrestrial input and marine productivity in the Southern Ocean (48° S) during the last two deglaciations. *Paleoceanography*, **15**, 170–180.
- Jacka, T. H. and A. B. Giles (2007) Antarctic iceberg distribution and dissolution from ship-based observations. *Journal of Glaciology*, **53**, 341–356.
- 鹿島基彦, 市川香, 佐竹誠 (2008) 亜熱帯前線域の中規模渦活動量の経年変動および黒潮大蛇行発生への影響. 九州大学小用力学研究所所報, **135**, 61–67.
- Kohfeld, K. E., R. M. Graham, A. M. de Boer, L. C. Sime, E. W. Wolff, C. Le Quéré and L. Bopp (2013) Southern Hemisphere westerly wind changes during the Last Glacial Maximum: paleo-data synthesis. *Quaternary Science Reviews*, **68**, 76–95.
- Kong, P., F. Huang, X. Liu, D. Fink, L. Ding and Q. Lai (2010) Late Miocene ice sheet elevation in the Grove Mountains, East Antarctica, inferred from cosmogenic ²¹Ne-¹⁰Be-²⁶Al. *Global and Planetary Change*, **72**, 50–54.
- Liu, X., F. Huang, P. Kong, A. Fang, X. Li and Y. Ju (2010) History of ice sheet elevation in East Antarctica: paleoclimatic implications. *Earth and Planetary Science Letters*, **290**, 281–288.
- Locarnini, R. A. et al. (2013) Volume 1: Temperature. In: Levitus, S. (ed.) and A. Mishonov (Technical ed.) *World Ocean Atlas 2013*, NOAA Atlas NESDIS 73, 40 pp. U.S. Gov. Printing Office, Washington, D.C.
- Manley, P. L. and D. W. Cavers (1994) Mudwaves on the Gardar Sediment Drift, NE Atlantic. *Paleoceanography*, **9**, 973–988.
- Manoj, M., M. Thamban, N. Basavaiah and R. Mohan (2012) Evidence for climatic and oceanographic controls on terrigenous sediment supply to the Indian Ocean sector of the Southern Ocean over the past 63,000 years. *Geo-Marine Letters*, **32**, 251–265.
- Manoj, M. C., M. Thamban, A. Sahana, R. Mohan and K. Mahender (2013) Provenance and temporal variability of ice rafted debris in the Indian sector of the Southern Ocean during the last 22,000 years. *Journal of Earth System Science*, **122**, 491–501.
- Martin, J. H. (1990) Glacial-interglacial CO₂ change: The iron hypothesis. *Paleoceanography*, **5**, 1–13.
- Martinez-Garcia, A., A. Rosell-Melé, W. Geibert, R. Gersonde, P. Masqué, V. Gaspari and C. Barbante (2009) Links between iron supply, marine productivity, sea surface temperature, and CO₂ over the last 1.1 Ma.

- Paleoceanography*, **24**, PA1207, doi:10.1029/2008PA001657.
- Martínez-García, A., A. Rosell-Melé, S. L. Jaccard, W. Geibert, D. M. Sigman and G. H. Haug (2011) Southern Ocean dust-climate coupling over the past four million years. *Nature*, **476**, 312–315.
- Martínez-Méndez, G., R. Zahn, I. R. Hall, F. J. C. Peeters, L. D. Pena, I. Cacho and C. Negre (2010) Contrasting multiproxy reconstructions of surface ocean hydrography in the Agulhas Corridor and implications for the Agulhas Leakage during the last 345,000 years. *Paleoceanography*, **25**, doi:10.1029/2009PA001879.
- McKay, R. et al. (2012) Antarctic and Southern Ocean influences on Late Pliocene global cooling. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, **109**, 6423–6428.
- Oiwane, H., M. Ikehara, Y. Suganuma, H. Miura, Y. Nakamura, T. Sato, Y. Nogi, M. Yamane and Y. Yokoyama (2014) Sediment waves on the Conrad Rise, Southern Indian Ocean: Implications for the migration history of the Antarctic Circumpolar Current. *Marine Geology*, **348**, 27–36.
- Orsi, A. H., T. Whitworth and W. D. Nowlin (1995) On the meridional extent and fronts of the Antarctic Circumpolar Current. *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*, **42**, 641–673.
- Palter, J. B. (2015) The role of the Gulf Stream in European climate. *Annual Review of Marine Science*, **7**, 113–137.
- Peeters, F. J. C., R. Acheson, G. -J. A. Brummer, W. P. M. de Ruijter, R. R. Schneider, G. M. Ganssen, E. Ufkes and D. Kroon (2004) Vigorous exchange between the Indian and Atlantic oceans at the end of the past five glacial periods. *Nature*, **430**, 661–665.
- Rouault, M., P. Penven and B. Pohl (2009) Warming in the Agulhas Current system since the 1980's. *Geophysical Research Letters*, **36**, L12602, doi:10.1029/2009gl037987.
- Schlitzer, R. (2013) Ocean Data View. <http://odv.awi.de>.
- Sigman, D. M. and E. A. Boyle (2000) Glacial/interglacial variations in atmospheric carbon dioxide. *Nature*, **407**, 859–869.
- Sigman, D. M., S. L. Jaccard and G. H. Haug (2004) Polar ocean stratification in a cold climate. *Nature*, **428**, 59–63.
- Simon, M. H., K. L. Arthur, I. R. Hall, F. J. C. Peeters, B. R. Loveday, S. Barker, M. Ziegler and R. Zahn (2013) Millennial-scale Agulhas Current variability and its implications for salt-leakage through the Indian-Atlantic Ocean Gateway. *Earth and Planetary Science Letters*, **383**, 101–112.
- Sokolov, S. and S. R. Rintoul (2009) Circumpolar structure and distribution of the Antarctic Circumpolar Current fronts: 1. Mean circumpolar paths. *Journal of Geophysical Research*, **114**, C11018, doi:10.1029/2008JC005108.
- Suganuma, Y., H. Miura, A. Zondervan and J. Okuno (2014) East Antarctic deglaciation and the link to global cooling during the Quaternary: evidence from glacial geomorphology and ¹⁰Be surface exposure dating of the Sor Rondane Mountains, Dronning Maud Land. *Quaternary Science Reviews*, **97**, 102–120.
- 鈴木紀毅 (2012) オーストラリア・タスマニア南方海域の古海洋 — 白亜紀末期から第四紀まで : ODP Leg189 の成果 — . 地学雑誌, **121**, 493–517.
- Talley, L. D. (2013) Closure of the global overturning circulation through the Indian, Pacific, and Southern Oceans: schematics and transports. *Oceanography*, **26**, 80–97.
- Tournadre, J., F. Girard-Ardhuin and B. Legrésy (2012) Antarctic icebergs distributions, 2002–2010. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, **117**, C05004, doi:10.1029/2011JC007441.
- Yamane, M., Y. Yokoyama, A. Abe-Ouchi, S. Obrochta, F. Saito, K. Moriwaki and H. Matsuzaki (2015) Exposure age and ice-sheet model constraints on Pliocene East Antarctic ice sheet dynamics. *Nature Communications*, **6**, doi:10.1038/ncomms8016.
- Weijer, W., W. P. M. D. Ruijter and H. A. Dijkstra (2001) Stability of the Atlantic overturning circulation: competition between Bering Strait freshwater flux and Agulhas heat and salt sources. *Journal of Physical Oceanography*, **31**, 2385–2402.
- Weijer, W., W. P. M. De Ruijter, A. Sterl and S. S. Drijfhout (2002) Response of the Atlantic overturning circulation to South Atlantic sources of buoyancy. *Global and Planetary Change*, **34**, 293–311.
- Wynn, R. B. and D. A. V. Stow (2002) Classification and characterization of deep-water sediment waves. *Marine Geology*, **192**, 7–22.
- Zweng, M. et al. (2013) Volume 2: Salinity. In: Levitus, S. (ed.) and A. Mishonov (Technical ed.) *World Ocean Atlas 2013*, NOAA Atlas NESDIS 74, 39 pp. U.S. Gov. Printing Office, Washington, D.C.