

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ヤ
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
Туре	bulletin (article)
File Information	14_Lowtemsci76_P121-134.pdf



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,海氷分布,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氷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, 海氷, 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, lowchlorophyll: HNLC)海域の代表的な海洋として注目され

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 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3000m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135Sv(10⁶ m³/s)に達する. ACC や海氷分布,表層水温,塩分など



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. 海氷分布は Comiso (2003) に基づいており,冬季海氷縁 (WSI) は 9 月の平均海氷密接度 (1979-1999) が>15%の位置を示しており,夏季海氷縁 (SSI) は 2 月の平均海氷密接度 (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),冬季海氷 縁 (winter sea ice limit: WSI),夏季海氷縁 (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 CO2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 が極側ヘ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 CO2 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 CO2 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.

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、テクト ニック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 が拡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(δ18O)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、δ¹⁸OとMg/Ca比か ら海水の δ¹⁸O (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 d¹⁸O 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135Sv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氷の主要な生成場 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.

南大洋における海氷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。南大洋の海氷分布 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、海氷分布域の北限や 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氷縁がより低緯度 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氷縁と 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氷がウェッデル 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、局所的に大きな海氷融 解が生ずることになり、海氷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℃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をしてきたのだろうか。南大洋 において氷(海氷もしくは氷山)が存在した地質学的証 拠の一つとして漂流若層(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、過去の海氷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、現在は海氷の影響が皆 無である南西インド洋の海底コアの解析から、氷期には



氷山の平均体積 (Gt/month)

年平均淡水フラックス (mm/yr)

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 センサーによる海氷データに基づ いて, 夏季海氷縁が黒線で, 冬季海氷縁が赤線で示されている.

その海域が海氷に被覆され,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(>5km)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氷と氷山がある 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400Gt(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ていること 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-Garcia 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 に冬季海氷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-プロトアクチニウムと230-トリウムの比(²³¹Pa/²³⁰Th)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無く非常に強い 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), 大気中での¹⁴C 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-Garcia 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-Garcia 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、スコシア海を経由してサウスサン 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,海底地形と海底下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10m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 (mudwave)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1~2km、波高10~100m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)UnitB堆積時(鮮 新世温暖期)の堆積システム,(b)UnitB堆積時には,ACCはコンラッドライズの 南を流れていた,(c)UnitA堆積時(第四紀更新世)の堆積システム,(d)UnitA 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).

(Sør-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 ルジャイヤと海氷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氷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 のフロントや海氷分布域の拡大(北上)は、アガラスリー ケ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,海氷分布,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氷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ークス



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、海氷分布などとの対 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、放散虫)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. Herpers, G. Delisle, S. Merchel and U. Ott (2010) Glaciation history of Queen Maud Land (Antarctica) reconstructed from in-situ produced cosmogenic ¹⁰Be, ²⁶Al and ²¹Ne. *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) Winddriven upwelling in the Southern Ocean and the deglacial rise in atmospheric CO₂. *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. Ansorge (2008) The Conrad Rise as an obstruction to the Antarctic Circumpolar Current. *Geophysical Research Letters*, **35**, L20606, doi:10.1029/2008g1035382.
- 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 hightemperature 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 一現代および第四紀後期の海氷分布,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. Caress (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.
- Martínez-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-Garcia, A., A. Rosell-Melé, S. L. Jaccard, W. Geibert, D. M. Sigman and G. H. Haug (2011) Southern Ocean dustclimate 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 Sør 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.