



Title	最終間氷期の南極氷床崩壊と海水準上昇
Author(s)	関, 宰; Seki, Osamu
Citation	低温科学, 76, 135-144
Issue Date	2018-03-31
DOI	https://doi.org/10.14943/lowtemsci.76.135
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/70330
Type	departmental bulletin paper
File Information	15_Lowtemsci76_P135-144.pdf



最終間氷期の南極氷床崩壊と海水準上昇

関 宰¹⁾

近年、極域氷床の融解が急速なペースで進行中であることが明らかになり、温暖化によって海水準が大きく上昇する懸念が高まっている。産業革命前よりも僅かに温暖な最終間氷期（13万～11.5万年前）には、6～9 mもの急激な海水準上昇があったとされる。これが事実なら、現在と似た気候状態で、南極氷床の大規模な崩壊を誘発する臨界点が存在することになる。現在の平均的な気候状態はすでに最終間氷期のレベルに達しており、南極氷床の大規模な崩壊が将来に起こり得る可能性の検証は喫緊の課題と言える。本稿では最終間氷期の気候状態や海水準変動、南極氷床の安定性についての最新の知見を解説し、将来、南極氷床の大規模融解が引き起こされる可能性について考察する。

Collapse of Antarctic ice sheet and sea level rise in the Last Interglacial

Osamu Seki¹

Recent observations have revealed that the fastest melting rate of polar ice sheets ever observed is ongoing and there is growing concern of significant rise of sea level in the future. Geological records have suggested that abrupt rises in sea level (6-9 m rise) happened during the Last Interglacial when global mean sea surface temperature was slightly higher than the preindustrial level. If this were really happening, there is a critical ice sheet stability threshold resulting in the catastrophic collapse of polar ice sheets and substantial rapid sea-level rise in the interglacial climate regime. Given that the current global mean SST has already reached the Last Interglacial level, it is urgent issue to evaluate whether massive collapse of the Antarctic ice sheets could occur in the future. In this article, we review climate state, sea level fluctuation and stability of Antarctic ice sheet in the Last Interglacial.

キーワード：最終間氷期、海水準、南極氷床崩壊

Last Interglacial, relative sea level, Antarctic ice sheet collapse

1. はじめに

近年の地球温暖化により、産業革命以前と比べて全球平均表層気温にして約1℃も上昇しており、すでに水害・異常気象の頻度増加など、全世界規模で生活を困難にさせる多くの問題が生じている。気候変動(温暖化)は我々の生活のあらゆる局面において様々な影響をもたらす

が、気候変動がもたらす脅威リストのトップに挙げられるのが「種の絶滅」と「海水準の上昇」と考えられている。この2つの共通点は、一度引き起こされたら元に戻せないことにある。確かに、絶滅してしまった生物種はもう二度と地上に現れることはなく、「種の絶滅」は完全に不可逆的な出来事であり、自然の多様性を良しとする生物学の価値観においては、多様性の維持がいかに重要であるかは直感的に理解できるだろう。一方、「海水準の上昇」の場合、厳密には元に戻せないわけではない。しかし、それは一旦引き起こされてしまったら、元の状態に戻すには人間の一生をはるかに超えた時間を必要とするため、基本的には元に戻せないものと捉えてよいだろう。海面の安定性は人間の社会や文明の発達に恩恵をもたらしたと考えられており、現在に至る複雑な人間社会が発達できたのはここ数千年にわたり海水準が安定していたことが土台となっているとする見方がある。海水

連絡先

関 宰

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. 011-706-5504

e-mail : seki@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

準上昇が引き起こす低地の水没は、我々の生活圏を狭め、それに伴う食料不足や大量の難民の発生などの計り知れない社会的・経済的ダメージをもたらす可能性が高い。経済や文明の基盤となる大都市の多くが海面近くの低地に築かれていることを考えれば、海水準上昇がいかに深刻な問題か容易に理解することができるだろう。

海水準上昇の原因は、海水温の上昇による海水の膨張と氷河や氷床の融解・流出による海水量の増加がある。2013年に出版された気候変動に関する政府間パネル(IPCC)の第5次報告書によれば、このまま温暖化が進行したときの21世紀末の海水準上昇は最大で1m近くに達すると予測されている(Church et al., 2013)。この予測における海面上昇に対する各要素の寄与は、海水の熱膨張の効果が最も大きく、次いで山岳氷河、グリーンランド氷床となり、南極氷床の寄与はごくわずかと推定されている。海水準を60m程度上昇させるほどの淡水量を有する南極氷床であるが、温暖化に対しては比較的安定であると考えられていた。

ところが、近年の研究の進展により、この見通しがまちがっていることがわかってきた。氷床の安定性に関しては、大気の1000倍の熱量を持つ海洋との相互作用が特に重要であり、氷床の基底が海面下にある地域において(図1)、棚氷下の海洋に亜表層の暖水が貫入して氷床の底面から融解が進み、さらに棚氷が流出するというプロセスが、これまで考えられていた以上に棚氷の分離に重要であることが分かってきた(図2; Pritchard et al., 2012; Favier et al., 2014)。また、棚氷の分離を加速させるもう一つのプロセスとして、夏季における降水や棚氷表層の融解によって引き起こされる棚氷の破碎やクレバスの生成の効果も見落とされてきた。これらの氷床崩壊プロセスの理解を基にした最新の氷床モデル研究によれば、今後の海水準上昇の速度はそのプロセスを考慮していないIPCC第5次報告書の予測より大きくなるとされる(DeConto and Pollard, 2016)。そして、それを裏付けるように、予想を超える急速なペースでの南極氷床の底面融解が進行中であることが最新の観測から明らかになってきている(Khazendar et al., 2016)。

近年の研究によると、温暖化が産業革命前より2℃進行すれば、最終的に不可逆的な氷床の崩壊が起こる可能性が示唆されている(Golledge et al., 2015; Hansen et al., 2016)。全球平均表層気温がこの100年ですでに1℃上昇してしまったことを考えると、南極氷床の大規模な崩壊が将来起こり得る可能性を検証することは喫緊の問題といえる。果たして現在進行中の地球温暖化によって、最新の気候氷床結合モデルで示されるような南極氷床の

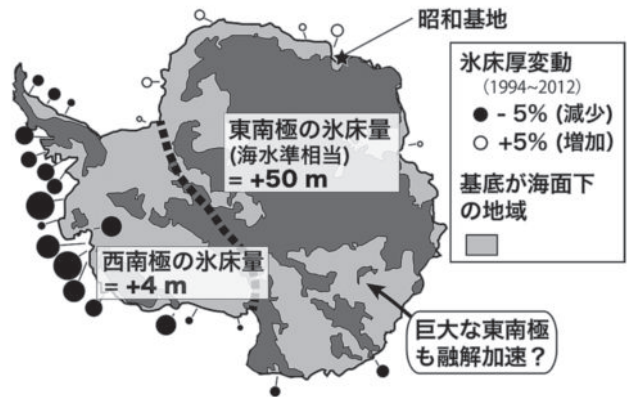


図1: 南極大陸の地理的特徴と氷床量(海水準相当)および近年の氷床厚の変化(Paolo et al., 2015を改変)。

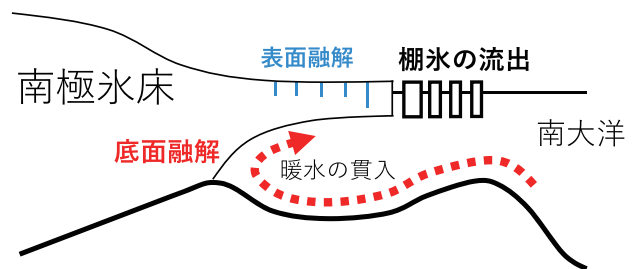


図2: 南極棚氷の底面融解のメカニズム。

崩壊は引き起こされるのだろうか? もし起こるとしたら、どの氷床がどのくらい融解し、どの程度の海水準上昇が起きうるのだろうか? また、海水準上昇はどのくらいの速度で起こりうるのか? そして、不可逆的な氷床崩壊へと至る臨界点(ティッピング・ポイント)はいつ訪れるのだろうか?

気候氷床結合モデルによる将来予測以外の方法で、上記の問いの答えに迫ることができるもう一つの方法は、過去の温暖期の気候の状態や変動を詳細に調べることである。古気候研究の強みは、気候が変化した時に何が起こり得るか? という問いに対し、過去に“実際に起こった事例”を示すことで、説得力のある知見を提供できる点にある。過去に実際に起こったということは、また同様の気候状態になれば、気候システムは再び同じ現象を引き起こしうることを意味するからである。

そして、幸いなことに現在よりも暖かい時代が過去に存在していたことがわかっている。こうした過去の温暖期の研究から将来の氷床融解の可能性とそれに伴う海水準の上昇を推定する試みが、現在、盛んに行われている。将来の温暖化地球のアナロジーという観点では、過去350万年間の間に複数存在する温暖期(例えば300万年前の鮮新世温暖期など)が特に注目を集めている(Dutton et al., 2015a)。また、この期間の大半を占める更新世(258万~1万年前)は温暖な間氷期と寒冷な氷期

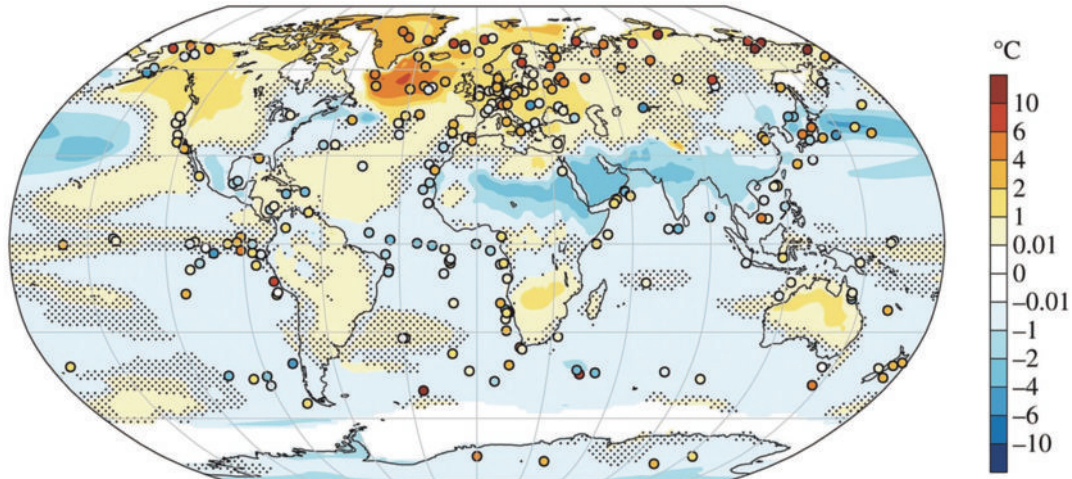


図3：代理指標および古気候モデルにより復元された最終間氷期と産業革命前の表層温度偏差の分布 (Otto-Bliesner et al., 2013). 図中のシンボル (○) は温度代理指標による推定地点を示す。

が周期的に繰り返されている時代であるが、その中にはスーパー間氷期と呼ばれる現在よりも温暖であった時代も存在する。本稿では、過去のスーパー間氷期の中でも古気候復元データが最も充実しており、当時の気候が最もよく理解されている一つ前の間氷期（最終間氷期）に焦点を当て、当時の気候状態や海水準の変動、南極氷床の安定性について解説し、南極氷床の大規模な融解が将来引き起こされるのかどうかについて考察してみたい。

2. 最終間氷期の気候状態

最終間氷期は約13万年前に始まりおよそ11.5万年前頃に終了した一つ前の間氷期である。様々な温度代理指標に基づく最新の推定では、この時代の全球平均表層気温は産業革命前に比べて約1°C程度高かったとされている (図3; Otto-Bliesner et al., 2013)。前述したように、現在は既に産業革命前から全球平均表層温度が1°C上昇しており、さらに、現在と最終間氷期の全球平均表層海水温度も同様に、産業革命前より0.5°C高いと推定されている (Hoffman et al., 2017)。従って、全球平均温度という観点からも、現在は最終間氷期と同等のレベルに達していると言える。このように、地表温度の平均状態が現在とほぼ同じである最終間氷期であるが、古気候記録によれば北極圏と南極の気温はそれぞれ5~8°C、3~5°Cほど産業革命前より温暖だったと推定されており (CAPE Last Interglacial Project Members, 2006; Jouzel et al., 2007; NEEM community members, 2013)、極域は現在よりもかなり温暖化が進んだ状態にあったとされる。一方で、最終間氷期の赤道域は現在よりも僅かに寒冷であったと見積もられている (Hoffman et al., 2017)。

しかし、当時の北極圏の気温は主に花粉分析から推定されているが、高緯度域の陸上植物の生産季節は夏季に偏っているため、それらの推定は夏季にバイアスがかかっている可能性があることに留意する必要がある。また、表層海水温の復元データに目を向けると、最終間氷期では北半球に比べ南半球の方で著しく表層が温暖化している傾向がある (Hoffman et al., 2017)。このように、現在と最終間氷期では全球平均表層温度は同じでありながら、その空間的分布に違いが見られることは重要な点である。この違いの原因としては、温暖化を引き起こした要因が異なっていたことが考えられる。現在進行中の温暖化は主に二酸化炭素などの温室効果ガス濃度の増大に起因しているのに対し、最終間氷期の温暖化はミランコビッチサイクルと呼ばれる地球の公転軌道の離心率や自転軸の傾き、自転軸の歳差運動の周期的変化によって引き起こされる地球に入力される太陽放射量の季節的、緯度的な変動に地球システムが応答した結果もたらされたものである。また、現在は温室効果ガスの強制力に対する地球システム応答の過渡期にあり、まだ十分に地球システムが平衡に達していないことにも留意する必要がある。

3. 最終間氷期の海水準の推定

最終間氷期の海水準は、過去の海水準の指標とされる海岸線の地形学的な特徴や浅海性の化石サンゴ記録などによって、現在よりも6~9m高かったと推定されている (Kopp et al., 2009; Dutton and Lambeck, 2012; O'Leary et al., 2013; Dutton et al., 2015b)。最終間氷期の海水準上昇に対する海水の熱膨張や規模の小さい山岳氷

河の融解の寄与は ~ 1 m程度と推定されている (McKay et al., 2011; Vaughan et al., 2013). 従って, 上記の海水準の推定が正しいなら, この数 m 以上の海水準上昇を説明するには, 最終間氷期においてグリーンランドや南極の水床が融解していなければならないことになる.

そうだとすると, 当時どちらの水床のどの部分がどのくらい溶けたのか? を明らかにできれば, 温暖化に対して水床のどの部分が脆弱なのかを知ることができる. 現在, 表面融解が著しく進行しているグリーンランド氷床であるが, その氷床が全て融解すると海水準が7 m上昇するので, グリーンランド氷床の融解だけで, 当時の海水準上昇の大部分を説明可能である. しかしながら, 最終間氷期においてはグリーンランド氷床の南部セクターは縮小していたと考えられているが (Colville et al., 2011), グリーンランドのアイスコアの研究によれば, 当時のグリーンランド氷床融解の寄与は海水準を2 mほど上昇させる程度であったと推測されている (NEEM community members, 2013). もしこの推測が正しいとするなら, 最終間氷期に南極氷床の一部が大幅に縮小することで, 海水準上昇に大きく寄与していたことになる. そして, このことは, 南極氷床は僅かな温暖化に対しても敏感に応答し, 海水準を数 m 上昇させるくらい融解する可能性があることを示唆する. また, 産業革命前よりも $2\sim 3^{\circ}\text{C}$ 全球平均表層温度が高かったとされる他のスーパー間氷期 (約40万年前の海洋酸素同位体ステージ11) (Masson-Delmotte et al., 2010) や中期鮮新世温暖期 (300万-330万年前) (Haywood et al., 2013) においても, 海水準は現在よりも ~ 13 m 上昇していたと推定されているため (Raymo and Mitrovica, 2012; Roberts et al., 2012; Chen et al., 2014; Winnick and Caves, 2015), 産業革命前より $1\sim 3^{\circ}\text{C}$ 温暖な気候下では例外なく南極氷床は融解していたことを強調しておきたい. このことから, 今後温暖化が進行すれば, 最終的に海水準が数 m 以上上昇するのは避けられないように思える.

4. 最終間氷期における海水準の安定性

次に最終間氷期における海水準の安定性について考えてみたい. 現在の間氷期 (完新世: 過去約1万年間) においては, 融氷期における海水準の上昇が止まった後は数千年にわたり極めて安定していたことが知られており, 一般に間氷期は氷期に比べ, 海水準が安定していると考えられている. しかし, 海岸線の古気候記録によれば, 最終間氷期は安定な完新世とは異なり数 m の海水準変動が繰り返されていた可能性が示唆されている

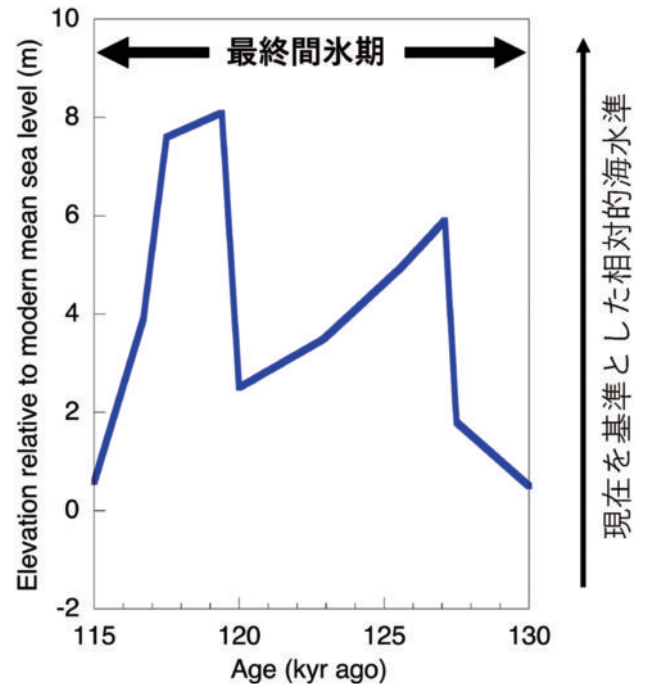


図4: オーストラリア西海岸の造礁サンゴ化石から復元された最終間氷期の海水準変動 (O'Leary et al., 2013 を改変).

(Kopp et al., 2009; Dutton and Lambeck, 2012; O'Leary et al., 2013; Dutton et al., 2015b). こうした数 m の海水準の変動は別の海水準の代理指標である底生有孔虫の酸素同位体記録からも示唆されている (Grant et al., 2012). これらの結果は, 現在の間氷期よりも僅かに暖かい気候状態では, 海水準は比較的安定なモードから少し不安定なモードに移行する可能性があることを示唆している.

また, 多くの地質学的記録で, 最終間氷期における海水準上昇のピークが最終間氷期の後期に認められており (Chen et al., 1991; Hearty et al., 2007; Blanchon et al., 2009; Lambeck et al., 2011; Thompson et al., 2011), このことは, 継続的に温暖期が続いた果てに突然数 m もの急激な海水準上昇が起こる可能性を示している.

一方, 最終間氷期における海水準変動の頻度に関しては古気候記録で異なった結果が示されており, 未だコンセンサスは得られていないが, 少なくとも1回, 場合によっては複数回の変動があった可能性も考えられている. 近年の研究によれば, 最終間氷期初期の温暖化ピーク時 (約127万年前) と最終間氷期の終盤 (11.8万年前) に急激な海水準の上昇があったとされ (Kopp et al., 2013; O'Leary et al., 2013), 特に終盤の海水準上昇イベントが顕著である (図4; O'Leary et al., 2013). こうした海水準上昇のダブルピークは最終間氷期の南極氷床の変動を再現した氷床モデル実験においても現れており, 南極の海底地形の特徴によるものかもしれない (Sutter et al., 2016).

また、過去の海水準の推定で留意すべき点として、氷河性地殻均衡（GIA; Glacial Isostatic Adjustment）の効果の補正をする必要があることを述べておきたい。GIAとは氷床の発達や消失によって引き起こされる地殻（やマントル）の隆起と沈降作用のことであり、この効果は場所によって大きく異なる（詳しくは本巻の奥野を参照）。過去の海水準を推定する際には、この効果を補正しているため、その推定にはある程度の不確かさが含まれる。さらに、近年、マントルの対流活動に起因する動的地形変化も最終間氷期の海水準の推定に影響を及ぼすことが指摘されており、GIAの補正に加え、今後は動的地形変化の効果も検証していく必要性が示唆されている（Austermann et al., 2017）。

5. 最終間氷期の海水準上昇速度

将来予測に関して、海水準の上昇度合（どのくらい上昇するか）の予測と同様に、上昇速度の把握も極めて重要な課題といえる。上昇速度が十分遅ければ、我々はその変化に十分対応していけるかもしれないが、上昇速度が予想以上に急速な場合には対応が追いつかない可能性がある。過去に実際に起こった海水準の上昇速度を知ることが、今後の温暖化で氷床崩壊が進行した場合に、一体どのくらいの速度で海水準の上昇が起こりうるのかを推測する上で重要な知見となる。最終間氷期に形成された浅海に住む造礁サンゴの化石の年代測定などに基づく、当時の海水準の上昇速度は1000年で1~7mであったと推測されている（Rohling et al., 2008; Thompson et al., 2011; Kopp et al., 2013; O'Leary et al., 2013）。ちなみに、過去に起こった氷床崩壊による海水準上昇速度の最大の見積もりは、最終融氷期に起こったMeltwater Pulse event 1a（約14,600年前）の100年で数mというものであり（Deschamps et al., 2012）、最終間氷期における海水準の上昇速度はこれよりも1桁小さいことになる。しかしながら最終間氷期の海水準の推定や年代制約の不確かさが大きいいため、実際のところは上昇速度がどの程度であったのかはよくわかっていないのが現状であり、復元精度の向上が求められている。また、現在の大気中への二酸化炭素の排出速度は、少なくとも過去3億年間の地球史において例がないほど急速であり、地球システムへの温室効果ガス強制力の急激な入力に対し氷床がどのように応答するのかは未知の部分がある。

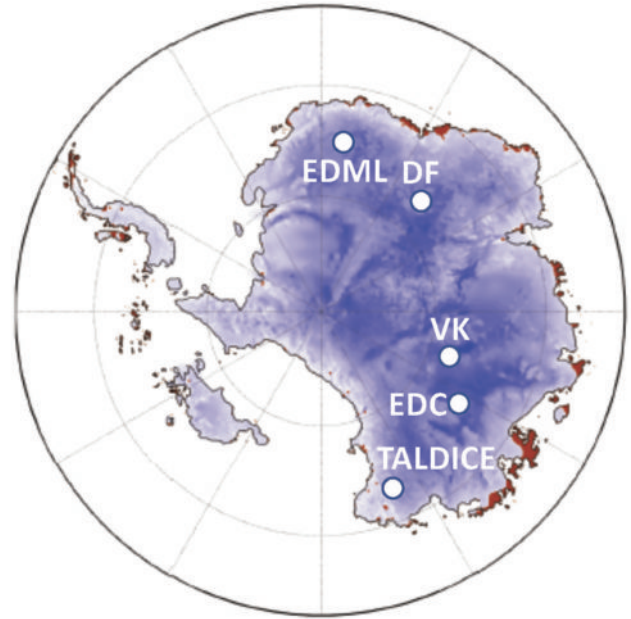


図5：気候氷床モデルにより再現した最終間氷期の南極氷床分布（DeConto and Pollard, 2016）と氷床コアの位置。EDML=EPICA Dronning Maud Land 氷床コア。DF=Dome Fuji 氷床コア。VK=Vostok 氷床コア。EDC=EPICA Dome C 氷床コア。TALDICE=Talos Dome 氷床コア。

6. 南極氷床のどこが溶けたのか？

次に最終間氷期に南極氷床のどの部分が溶けていたのかについて解説したい。最終間氷期において南極氷床が融解した直接的な地質学的証拠は、ほとんど蓄積されておらず、実はよくわかっていないのが現状である。しかしながら、最終間氷期の境界条件を用いた気候氷床結合モデルは、西南極氷床の大部分が融解する結果を示している（図5；Goelzer et al., 2016; DeConto and Pollard, 2016）。西南極氷床の基底部分は海面下数百m以深の所にあり（図1）、棚氷の底面が暖かい亜表層水と接しているため、より不安定な状況下にある。西南極氷床は全て融解すると海水準が4mほど上昇すると見積もられており、最終間氷期の海水準上昇度合いとおおよそ一致するため、西南極氷床は最終間氷期の融解セクターの最も有力な候補といえる。実際、現在最も融解が進行している地域は西南極氷床である（Paolo et al., 2015）。Sutter et al. (2016) は、最終間氷期における南極氷床融解の再現実験を行い、西南極氷床の大部分を融解させるには、南大洋高緯度域の温暖化が決定的に重要で、2~3℃の水温上昇が必要との結果を示しており、これは南大洋高緯度における表層水温復元データともほぼ整合的である（Capron et al., 2014）。また、東南極氷床に関しては、その基底部分は大部分が海面より上に位置しているが、ウィルクスバイズンやオーロラバイズン周辺は西南極と同様

に基底が海面下にある (図 1). 気候氷床結合モデルによると, 最終間氷期においてこれらの地域の沿岸部で著しい融解を示しており (DeConto and Pollard, 2016), それらの地域の氷床も今後の温暖化に対して敏感に応答する可能性がある.

7. 最終間氷期における南極氷床崩壊のメカニズム

もし, 地質学的記録が示すような数 m もの急激な海水準上昇が最終間氷期において本当に起こっていたとしたら, それはどのようなメカニズムで引き起こされたのであろうか? そのメカニズムの理解は, 将来, 大規模な南極氷床崩壊が引き起こされる可能性があるかどうかを検証する上で極めて重要である. そこで, この章では現在報告されている世界各地の古気候データの解析から示されている, 温暖な気候状態における南極氷床の崩壊が引き起こされるメカニズムについて考察し, 将来同様のことが起きうるかどうかについても考えてみたい.

前述したように, 最新の知見によれば, 南極氷床融解の鍵を握るのは海洋と氷床の相互作用であり, 暖水の貫入による棚氷の底面融解が重要な役割を果たすと考えられているが, 最終間氷期においてもこの作用が重要であったとする主張がある (Duplessy et al., 2007; Holden et al., 2010). 最終間氷期における北大西洋深層水は現在よりも 0.4°C ほど高かったと推定されており (Duplessy et al., 2007), この北半球由来の熱が海洋循環を通して南極海に伝わり, 南極海の水温を上昇させたことが, 南極氷床の融解に寄与したと議論している. 一方で, Holden et al. (2010) は, 北半球と南半球間の熱輸送に重要な役割を担っている大西洋子午面循環 (AMOC, Atlantic meridional overturning circulation; 本巻の勝又を参照) の変動が重要な役割を果たしたと主張している. AMOC は大西洋を北向きに流れる海流であり, AMOC が強い時は低緯度の熱が北半球により多く輸送されるが, 弱まると反対に南半球に熱が輸送され, 南半球が温暖化する. また, AMOC は熱塩循環つまり海水の密度差が駆動力となっている循環であり, 北大西洋に大量の淡水が供給されるなどして表層水の密度が低下すると減衰してしまう. 最終間氷期においてはグリーンランドの氷床が融解し, 淡水が北大西洋に供給されたことで, AMOC の急激な減衰が起こり, 熱が南半球に輸送され, 棚氷の融解が引き起こされたというシナリオが提案されている (Holden et al., 2010). 実際に, 最終間氷期において, グリーンランド氷床の融解や AMOC に大きな変動

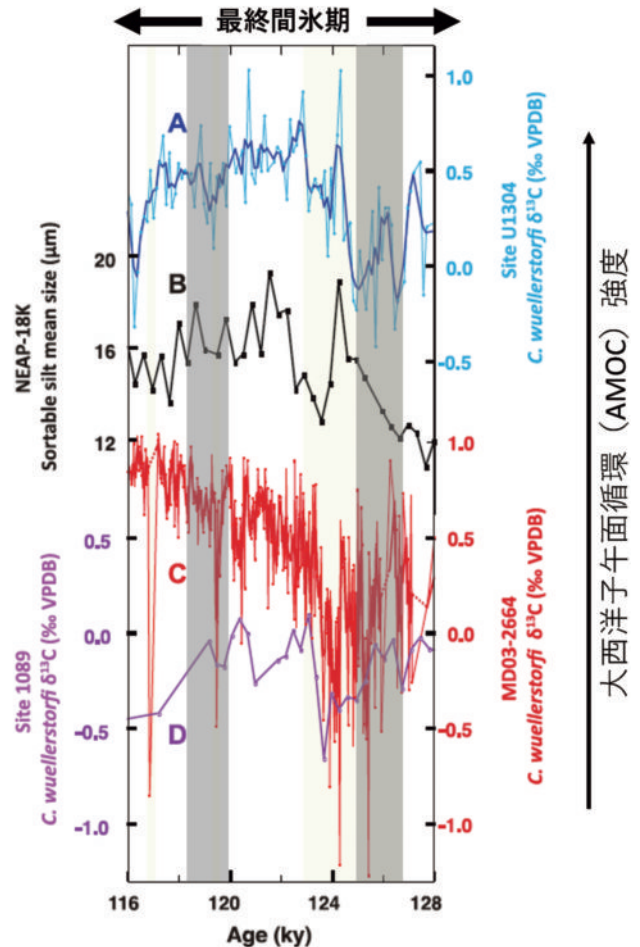


図 6: 北大西洋および南大西洋の海底堆積物コア中の底生有孔虫 (*C. wuellerstorfi*) の安定炭素同位体比 ($\delta^{13}\text{C}$) とシルト平均サイズにより復元した最終間氷期における大西洋子午面循環 (AMOC) の変動. 折線 A, C, D はそれぞれ, Site U1304 (位置 $53^{\circ} 03' \text{N}$, $33^{\circ} 32' \text{W}$; 水深 $3,082 \text{ m}$), MD03-2664 (位置 $57^{\circ} 26' \text{N}$, $48^{\circ} 36' \text{W}$; 水深 $3,342 \text{ m}$) および Site 1089 (位置 $40^{\circ} 56' \text{S}$, $9^{\circ} 54' \text{E}$; 水深 $4,624 \text{ m}$) における底生有孔虫の $\delta^{13}\text{C}$ 変動を示す (Hall et al., 1998; Hodell et al., 2009; Galaasen et al., 2014). 底生有孔虫の $\delta^{13}\text{C}$ 値が高いほど, AMOC が強いことを示す. 折線 B は NEAP-18K (位置 $52^{\circ} 46' \text{N}$, $30^{\circ} 21' \text{W}$; 水深 $3,275 \text{ m}$) のシルト平均サイズの変動を示し, サイズが大きいくほど AMOC が強いことを示す. 図中の灰色で示した期間は急激な海水準上昇が起こった時期 (O'Leary et al., 2013) を示す.

があったことが大西洋の海底堆積物記録に示されており (Irvali et al., 2016), 最終間氷期は完新世とは異なり, 比較的不安定な気候モードであったと考えられる. 興味深いことに, AMOC の急激な減衰イベントは O'Leary et al. (2013) らが主張している海水準の急激な上昇時期とよく対応しているように見え (図 6; Hodell et al., 2009; Galaasen et al., 2014; Hayes et al., 2014), 両者の関連が示唆される. AMOC の変動は南極周辺の海洋循環や大気循環にも大きな影響を与えるため, AMOC の急激な減衰が南極海の海洋循環に大きく作用し, 棚氷下へ貫入する亜表層の暖水流入を加速させたかもしれない. 同様に

Hansen et al. (2016) は、大気海洋結合モデルの結果から、温暖化の果てにグリーンランド氷床の部分的融解などによる北大西洋への淡水流入量が増加した結果、AMOCの減衰が起こり、海洋循環が変化することで棚水下への暖水の貫入が引き起こされて氷床底面融解が加速、大規模崩壊につながったと最終間氷期の大規模な南極氷床崩壊のメカニズムを議論しており、AMOCの減衰が南極氷床の不可逆的な崩壊を導くトリガーではないかと提案している。

一方で、南極氷床コアの古気候記録も興味深い変動を示している。特に、沿岸付近の氷床コア（TALDICEやEDML：図5を参照）において、気温の指標である酸素同位体比（ $\delta^{18}\text{O}$ ）がO'Leary et al. (2013) によって示された海水準上昇イベントで顕著な上昇を示しており（図7；Masson-Delmotte et al., 2011）、この時期は海洋循環が変化しただけでなく、南極沿岸の気温も上昇していたことが示唆され、AMOC減衰仮説と調和的である。さらに、大気温暖化は、棚氷表層の融解やクレバス形成を促進させるため、大気と海洋の相互作用も氷床崩壊に寄与していた可能性が考えられる。

もし、間氷期という気候状態においてAMOCの減衰が南極氷床崩壊を加速させるトリガーだとしたら、二酸化炭素濃度の増大による現在の温暖化においても、同様にAMOCの急激な減衰が引き起こされる可能性があるのかどうかを検証しておくことが、将来予測という観点においても大事である。実は、これまでの将来予測モデルではAMOCは二酸化炭素の増大に対して比較的安定であり、温暖化が進行してもそれほど大きく減衰しないだろうと考えられていた（Schmittner et al., 2005）。ところが、最新の研究によれば、これまでのモデルでは設定にバイアスがかかっていたために、温室効果ガス強制力に対するAMOCの応答が鈍かったことがわかってきた（Liu et al., 2017）。このバイアスを取り除いた気候モデルでは、AMOCは温室効果ガス強制力に対して敏感であり、温暖化が進行するとやがて急激に減衰するという結果が示されている（Liu et al., 2017）。バイアスを補正したモデルが正しいとするなら、将来AMOCが急激に減衰して南極氷床の融解が加速するというシナリオも十分ありうることになる。これまで、AMOCはその変動がヨーロッパなどを中心とした北半球中高緯度の気候に大きく作用するという観点から注目を集めてきた。しかし、もしかしたらAMOCの役割はそれだけに留まらない可能性がある。AMOC減衰による南極氷床崩壊というシナリオは現時点では作業仮説に過ぎないが、今後、温室効果ガス強制力に対するAMOCの安定性について

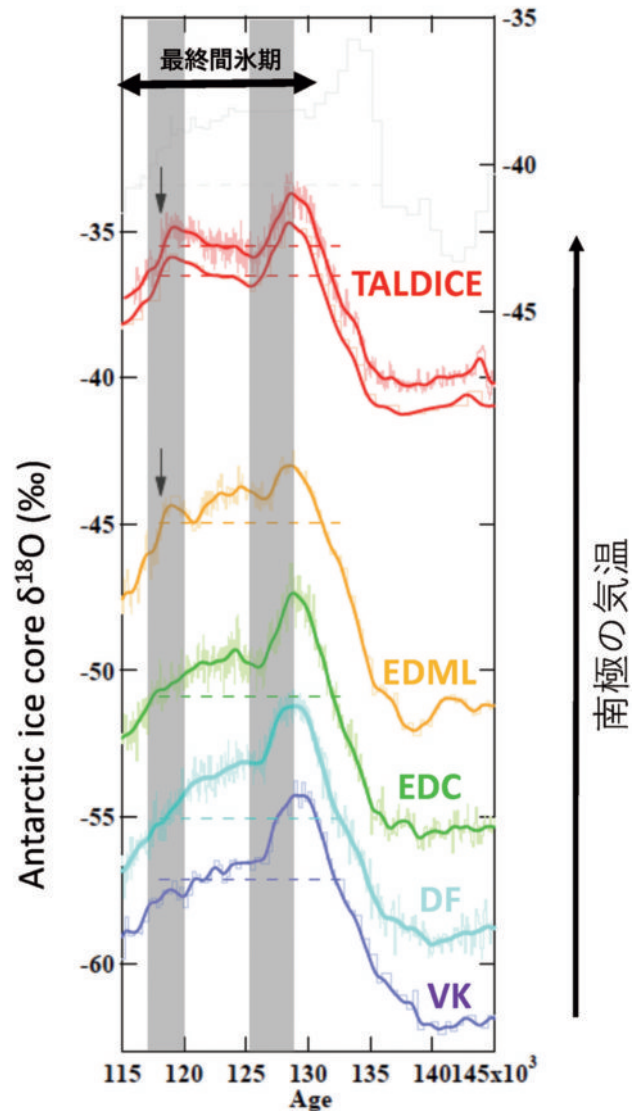


図7：最終間氷期における南極氷床コアの酸素同位体比（ $\delta^{18}\text{O}$ ）変動（Masson-Delmotte et al., 2011）。図中の灰色で示した期間は急激な海水準上昇が起こった時期を示す（O'Leary et al., 2013）。各氷床コアの位置は図5に示す。EDML = EPICA Dronning Maud Land 氷床コア。DF = Dome Fuji 氷床コア。VK = Vostok 氷床コア。EDC = EPICA Dome C 氷床コア。TALDICE = Talos Dome 氷床コア。

さらに検証していくことがますます重要になってくるに違いない。

8. 最終間氷期の南極氷床崩壊の検証とメカニズムの解明に向けて

前述したように、温暖化で将来不可逆的な南極氷床の崩壊が起こる可能性が気候氷床結合モデルから示唆されており（Golledge et al., 2015; Hansen et al., 2016）、本当に温暖化が進行した果てに南極氷床の大規模な崩壊が引き起こされるのかどうかをさらに検証することは喫緊の課題であり、早急な解明が必要である。この問題に取り

組むためには、過去の温暖期に実際に急激な南極氷床の大規模崩壊があったかをしっかりと精査する必要がある。そして、氷床の崩壊があった場合、氷床が崩壊した地域の特定と崩壊の臨界点となった気候・海洋条件（特に棚氷の下に貫入する海水の温度）を解明することが重要である。世界各地の古気候データの充実さと、古環境復元の精度という観点では、最終間氷期が最良の研究対象となるだろう。しかしながら、最終間氷期における南極付近の気候情報は、氷床コアを除けばほとんど蓄積されておらず、最終間氷期の事象から、将来温暖化が進行した果てに南極氷床が急激に崩壊する可能性を評価できていないのが現状である。

南極周辺海域に適用できる古環境代理指標が限られており、海底堆積物の年代制約や環境復元が極めて難しいため、南極近辺の海域における最終間氷期の古海洋研究はあまり進展していない。従って、この海域に適用できる年代制約手法や新規の代理指標の開発が必要であり、特に棚氷から分離した氷山の融解やその起源域を推定できる代理指標の開発が南極海の古海洋環境復元の鍵を握ると考えられる。また、氷床の崩壊へと至るメカニズムとして、グリーンランド氷床を含めた南北両半球スケールの大気-氷床-海洋の相互作用が重要である可能性が示唆されており（Hansen et al., 2016）、こうした一連のプロセスの全体像を把握するためには世界各地の古気候データの統合的な解析が求められるだろう。そして、各サブシステムで発生する変化の因果関係をしっかりと検証するためには、氷床コアや海底堆積物コアなど様々なアーカイブから得られる古気候データにおいて共通の年代軸を確立することが決定的に重要であり、また、どのプロセスが特に重要なのかを見極める上で古気候モデル研究者との連携が必要不可欠となる。

謝辞

適切な校正とコメントを頂いた大島慶一郎編集長および須藤斎編集委員に感謝の意を表します。

参考文献

Austermann, J., J. X. Mitrovica, P. Huybers and A. Rovere (2017) Detection of a dynamic topography signal in last interglacial sea-level records. *Sci. Adv.*, **3**, e1700457.
 Blanchon, P., A. Eisenhauer, J. Fietzke and V. Liebetrau (2009) Rapid sea-level rise and reef back-stepping at the close of the last interglacial highstand. *Nature*, **458**, 881-884, doi: 10.1038/nature07933.

CAPE Last Interglacial Project Members (2006) Last Interglacial Arctic warmth confirms polar amplification of climate change. *Quat. Sci. Rev.* **25**, 1383-1400, doi: 10.1016/j.quascirev.2006.01.033.
 Capron, E., A. Govin, E. J. Stone, V. Masson-Delmotte, S. Mulitza, B. Otto-Bliesner, T. L. Rasmussen, L. C. Sime, C. Waelbroeck and E. W. Wolff (2014) Temporal and spatial structure of multi-millennial temperature changes at high latitudes during the Last Interglacial. *Quat. Sci. Rev.*, **103**, 116-133.
 Chen, J. H., H. A. Curran, B. White and G. J. Wasserburg (1991) Precise chronology of the last interglacial period: ^{234}U - ^{230}Th data from fossil coral reefs in the Bahamas. *Geol. Soc. Am. Bull.*, **103**, 82-97.
 Chen, F. et al. (2014) Refining estimates of polar ice volumes during the MIS11 Interglacial using sea level records from South Africa. *J. Clim.*, **27**, 8740-8746, doi: 10.1175/JCLI-D-14-00282.1.
 Church, J. A. et al. (2013) Sea Level Change. In: Stocker, T. F. et al. (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*, 1137-1216. Cambridge University Press, Cambridge.
 Colville, E. J. et al. (2011) Sr-Nd-Pb isotope evidence for ice-sheet presence on southern Greenland during the Last Interglacial. *Science*, **333**, 620-623, doi: 10.1126/science.1204673;pmid:21798947.
 DeConto, R. and D. Pollard (2016) Contribution of Antarctica to past and future sea-level rise. *Nature*, **531**, 591-597, doi: 10.1038/nature17145.
 Deschamps, P. et al. (2012) Ice-sheet collapse and sea-level rise at the Bolling warming 14,600 years ago. *Nature*, **483**, 559-564, doi: 10.1038/nature10902.
 Duplessy, J. C., D. M. Roche and M. Kageyama (2007) The deep ocean during the last interglacial period. *Science*, **316**, 89-91.
 Dutton, A. and K. Lambeck (2012) Ice volume and sea level during the last interglacial. *Science*, **337**, 216-219, doi: 10.1126/science.1205749.
 Dutton, A., A. E. Carlson, A. J. Long, G. A. Milne, P. U. Clark, R. DeConto, B. P. Horton, S. Rahmstorf and M. E. Raymo (2015a) Sea-level rise due to polar ice-sheet mass loss during past warm periods. *Science*, **349**, doi: 10.1126/science.aaa4019.
 Dutton, A., J. M. Webster, D. Zwart, K. Lambeck and B. Wohlfarth (2015b) Tropical tales of polar ice: Evidence of last interglacial polar ice sheet retreat recorded by fossil reefs of the granitic Seychelles islands. *Quat. Sci. Rev.*, **107**, 182-196, doi: 10.1016/j.quascirev.2014.10.025.
 Favier, G. D. et al. (2014) Retreat of Pine Island Glacier controlled by marine ice-sheet instability. *Nat. Clim. Change*, **4**, 117-121.

- Galaasen, E. V. et al. (2014) Rapid reductions in North Atlantic Deep Water during the peak of the last interglacial period. *Science*, **343**, 1129–1132.
- Goelzer, H., P. Huybrechts, M.-F. Loutre and T. Fichefet (2016) Last Interglacial climate and sea-level evolution from a coupled ice sheet-climate model. *Clim. Past*, **12**, 2195–2213, doi: 10.5194/cp-12-2195-2016.
- Golledge, N. R. et al. (2015) The multi-millennial Antarctic commitment to future sea-level rise. *Nature*, **526**, doi: 10.1038/nature15706.
- Grant, K. M. et al. (2012) Rapid coupling between ice volume and polar temperature over the past 150,000 years. *Nature*, **491**, 744–747.
- Hall, I. R., I. N. McCave, M. R. Chapman and N. J. Shackleton (1998) Coherent deep flow variation in the Iceland and American basins during the last interglacial. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **164**, 15–21.
- Hansen, J. et al. (2016) Ice melt, sea level rise and superstorms: evidence from paleoclimate data, climate modeling, and modern observations that 2°C global warming could be dangerous. *Atmos. Chem. Phys.*, **16**, 3761–3812, doi: 10.5194/acp-16-3761-2016.
- Hayes, C. T. et al. (2014) A stagnation event in the deep South Atlantic during the last interglacial period. *Science*, **346**, 1514–1516.
- Haywood, A. M. et al. (2013) Large-scale features of Pliocene climate: Results from the Pliocene Model Intercomparison Project. *Clim. Past*, **9**, 191–209, doi: 10.5194/cp-9-191-2013.
- Hearty, P. J., J. T. Hollin, A. C. Neumann, M. J. O’Leary and M. T. McCulloch (2007) Global sea-level fluctuations during the Last Interglaciation (MIS 5e). *Quat. Sci. Rev.*, **26**, 2090–2112, doi: 10.1016/j.quascirev.2007.06.019.
- Hodell, D. A. et al. (2009) Surface and deep-water hydrography on Gardar Drift (Iceland Basin) during the last interglacial period. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **288**, 10–19.
- Hoffman, J. S., P. U. Clark, A. C. Parnell and F. He (2017) Regional and global sea-surface temperatures during the last interglaciation. *Science*, **355**, 276–279, doi: 10.1126/science.aai8464.
- Holden, P. B. et al. (2010) Interhemispheric coupling, the West Antarctic Ice Sheet and warm Antarctic interglacials. *Clim. Past*, **6**, 431–443, doi: 10.5194/cp-6-431-2010.
- Irvali, N. et al. (2016) Evidence for regional cooling, frontal advances, and East Greenland Ice Sheet changes during the demise of the last interglacial. *Quat. Sci. Rev.*, **150**, 184–199.
- Jouzel, J. et al. (2007) Orbital and millennial Antarctic climate variability over the past 800,000 years. *Science*, **317**, 793–796, doi: 10.1126/science.1141038.
- Khazendar, A., E. Rignot, D. M. Schroeder, H. Seroussi, M. P. Schodlok, B. Scheuchl, J. Mouginot, T. C. Sutterley and I. Velicogna (2016) Rapid submarine ice melting in the grounding zones of ice shelves in West Antarctica. *Nat. Commun.*, **7**, doi: 10.1038/ncomms13243.
- Kopp, R. E., F. J. Simons, J. X. Mitrovica, A. C. Maloof and M. Oppenheimer (2009) Probabilistic assessment of sea level during the last interglacial stage. *Nature*, **462**, 863–867, doi: 10.1038/nature08686.
- Kopp, R. E., F. J. Simons, J. X. Mitrovica, A. C. Maloof, M. Oppenheimer (2013) A probabilistic assessment of sea level variations within the last interglacial stage. *Geophys. J. Int.*, **193**, 711–716, doi: 10.1093/gji/ggt029.
- Lambeck, K. et al. (2011) Sea level and shoreline reconstructions for the Red Sea: Isostatic and tectonic considerations and implications for hominin migration out of Africa. *Quat. Sci. Rev.*, **30**, 3542–3574, doi: 10.1016/j.quascirev.2011.08.008.
- Liu, W., S. Xie, Z. Liu and J. Zhu (2017) Overlooked possibility of a collapsed Atlantic Meridional Overturning Circulation in warming climate. *Sci. Adv.*, **3**, e1601666.
- Masson-Delmotte, V. et al. (2010) EPICA Dome C record of glacial and interglacial intensities. *Quat. Sci. Rev.*, **29**, 113–128, doi: 10.1016/j.quascirev.2009.09.030.
- Masson-Delmotte, V. et al. (2011) A comparison of the present and last interglacial periods in six Antarctic ice cores. *Clim. Past*, **7**, 397–423, doi: 10.5194/cp-7-397-2011.
- McKay, N. P., J. T. Overpeck and B. L. Otto-Bliesner (2011) The role of ocean thermal expansion in Last Interglacial sea level rise. *Geophys. Res. Lett.* **38**, L14605, doi: 10.1029/2011GL048280.
- NEEM community members (2013) Eemian interglacial reconstructed from a Greenland folded ice core. *Nature*, **493**, 489–494, doi: 10.1038/nature11789.
- O’Leary, M. J. et al. (2013) Ice sheet collapse following a prolonged period of stable sea level during the last interglacial. *Nat. Geosci.*, **6**, 796–800, doi: 10.1038/ngeo1890.
- Otto-Bliesner, B. L. et al. (2013) How warm was the last interglacial? New model-data comparisons. *Philos. Trans. R. Soc. London Ser. A*, **371**, 20130097, doi: 10.1098/rsta.2013.0097.
- Paolo, F., H. A. Fricker and L. Padman (2015) Volume loss from Antarctic ice shelves is accelerating. Volume loss from Antarctic ice shelves in accelerating. *Science*, **348**, 327–331, doi: 10.1126/science.aaa0940.
- Pritchard, H. D. et al. (2012) Antarctic ice-sheet loss driven by basal melting of ice shelves. *Nature*, **484**, 502–505.
- Raymo, M. E. and J. X. Mitrovica (2012) Collapse of polar ice sheets during the stage 11 interglacial. *Nature*, **483**, 453–456, doi: 10.1038/nature10891.
- Roberts, D. L., P. Karkanias, Z. Jacobs, C. W. Marean and R. G. Roberts (2012) Melting ice sheets 400,000 yr ago raised sea level by 13 m: Past analogue for future trends. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **357–358**, 226–237, doi: 10.1016/j.epsl.2012.09.006.
- Rohling, E. J. et al. (2008) High rates of sea-level rise during

- the last interglacial period. *Nat. Geosci.*, **1**, 38–42, doi: 10.1038/ngeo.2007.28.
- Schmittner, A., M. Latif and B. Schneider (2005) Model projections of the North Atlantic thermohaline circulation for the 21st century assessed by observations. *Geophys. Res. Lett.*, **32**, L23710.
- Sutter, J., P. Gierz, K. Grosfeld, M. Thoma and G. Lohmann (2016) Ocean temperature thresholds for Last Interglacial West Antarctic Ice Sheet collapse. *Geophys. Res. Lett.*, **43**, 2675–2682, doi: 10.1002/2016GL067818.
- Thompson, W. G., H. A. Curran, M. A. Wilson and B. White (2011) Sea-level and ice-sheet instability during the Last Interglacial: New Bahamas evidence. *Nat. Geosci.*, **4**, 684, doi: 10.1038/ngeo1253.
- Vaughan, D. G. et al. (2013) Observations: Cryosphere. In: Stocker, T. F. et al. (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*, 317–382. Cambridge Univ. Press, Cambridge.
- Winnick, M. J. and J. K. Caves (2015) Oxygen isotope mass-balance constraints on Pliocene sea level and East Antarctic Ice Sheet stability. *Geology*, **45**, 879–882, doi: 10.1130/G36999.1.