

氷床の安定性と海水準

東京大学 大気海洋研究所 横山 祐典

2010年6月、クアラルンプール、100人超の多分野の研究者が集結し、“極域氷床の安定性と海水準上昇”という会議が開かれた。IPCCの第一作業部会が主催、氷床と海水準の関係について最近の知見を議論しようと開催された。筆者は5名のScientific Steering Committee (SSC)メンバーのひとりとして、事前に綿密なメール会議を経て臨んだ。4日間の会議中、SSCメンバーを議長に行われた分科会での熱い議論と全体集会を通して、何がどこまでわかっているのかが明らかになった。近年の氷床変動および海水準についての研究は進展が速く、世界的な関心の高さを物語っている。以下ではこのホットな研究トピックの近年の知見について概説する。

海 水準をコントロールする要因

水をいれたコップをテーブルにおいて氷を入れる。氷の体積の分だけ水位が上昇する。氷が融けても水の密度はほとんど変わらないが、実際の地球はどうだろうか(図1)? 融け水が海洋にもたらされると海水の塩分が下がる。融けた氷床が存在していた陸域は荷重の解放に伴い隆起する。海洋底は、全海洋にもたらされた荷重により沈降する。つまり器の形が変形するとともに、その内容物の性質も変わる。さらには、それまで巨大な質量をもつ氷床により、近傍の海面が引き寄せられていた効果が、氷床の縮小とともに小さくなることや、地球回転の変化に伴う極の移動による海水準変化等、総合的な理解が必要となる(図2)。

上述の“器の変化”は、氷河性—海水荷重地殻均衡(GIA; glacio-hydro isostatic adjustment)とよばれている。GIAのモデルは、現在では詳細な氷床量変化復元に使われ始めた。長期的な海水準変化を議論するときのみならず、衛星のデータを用いた氷床質量収支を議論する上でも無視できない量であるため、定量的な見積もりが必要である(後述)。

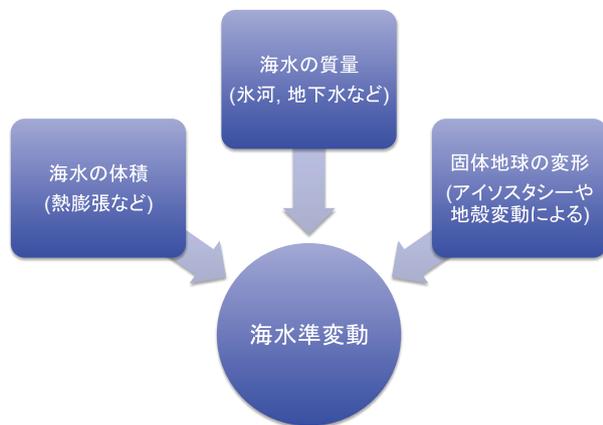


図1 海水準を変化させる要因。

氷 床が融けていた証拠

現在の地球はあたたかい。氷期に比べれば陸上に存在する氷の量は圧倒的に少ないが、果たしてこれ以上、氷が融けていたことがかつてあるのか。カナダのケベック大学のグループによるユニークな研究成果がNature誌に発表されたのは2008年のこと。彼らは国際深海掘削計画(ODP; Ocean Drilling Program)によって掘られたグリーンランド沖の2本のコアの花粉分析を行った。それによると高木性花粉量は、40万年前の間氷期(MIS11; Marine Isotope Stage, 過去の海水の酸素同位体比 $\delta^{18}O$ によって定義される温暖期・寒冷期の時代区分で奇数番号は温暖期)では現在の20倍、12万5000年前の最終間氷期(MIS5)相当層にも5倍の量を検出した。このことはとりもなおさず、グリーンランド氷床(GIS; Greenland Ice Sheet)の南部が現在よりも融解しており、カナダのマニトバなどと同様、樹木が生息できるような環境にあったことを示す。MIS11における地球の公転軌道要素の条件は、現在ととても近い。一方、南極氷床(AIS; Antarctic Ice Sheet)もANDRILL(国際南極掘削計画; Antarctic geological drilling)などの研究が進

み、過去の大規模融解の証拠が報告されてきている。どうやら両極氷床は過去において今よりも小さくなったことが度々あったらしいことが分かってきた。

MIS5

過去の間氷期の海水準を復元することにより、気候変化に対する氷床の自然状態での応答についての理解が進むことが期待される。

MIS5における気温は全球的に現在より約2~3℃高く、予想される2100年時の温暖化の規模と同等だったと推定される。過去の海水準復元法は複数存在するが、鍵となるのは当時の海水準とプロキシ(間接指標)との関係、それに年代が正確に決まっていることである。過去5万年間については、 ^{14}C 法を用いて高精度に決定できる。しかしMIS5は年代が古すぎてこの方法が使えない。

そこで注目されるのは、低緯度域に生息するサンゴだ。造礁サンゴは、共生藻を持つため海面近くに生息するので海水準の指標となるとともに、ウラン系列核種を用いた正確な年代決定を行うことができる(Yokoyama and Esat, 2011)。西オーストラリアの化石サンゴのウラン年代は12万9000年~11万6000年前。生息深度を考慮すると、当時の海水準は現在よりも+4~6mであったと推定される。極域から遠く離れた地域(FE; Far Field)(図2)であるオーストラリアの海水準には、氷床の融解による地球の粘性応答の影響が小さく、氷床の融解史の影響を反映しているとみなすことができる。すなわち、当時はGISとAISのどちらも、またはどちらかが現在より大幅に融けていたことになる。大気海洋結合大循環モデルと氷床コアの $\delta^{18}O$ を使ったアメリカ大気海洋局(NOAA)などの研究によると、GISは2~4m海水準相当量融けていたようだ。Science誌に発表されたニューハンプシャー大学の最近の研究によれば、この値は1.6~2.2mであったとされ、より大規模な南極氷床の融解が示唆されている。

海 水準の変化率

地球の近過去でもっとも海水準がさがっていたのは(つまり陸上に存在する氷床量が最も大きかったのは)2万年前のことである。カナダや北欧が、厚さ3kmの氷に覆われ、直下の地殻を1kmほど押し下げていた。海水準はグローバルに130mほど低下し、インドネシア周辺には、海に消えた大陸とも言える“スンダランド”が広がっていた。当時から現在にかけての海水準変化は、気温の変化などとともによくわかっていなかったが、過去10年の目覚ましい古気候・古海洋学の発展により、気候の変化との詳細なリンクが明らかになってきた(Yokoyama and Esat, 2011)。それらのデータは、過去の気候変動と海水準との関係が1,000年スケールもしくはもっと短い時間スケールでもかな

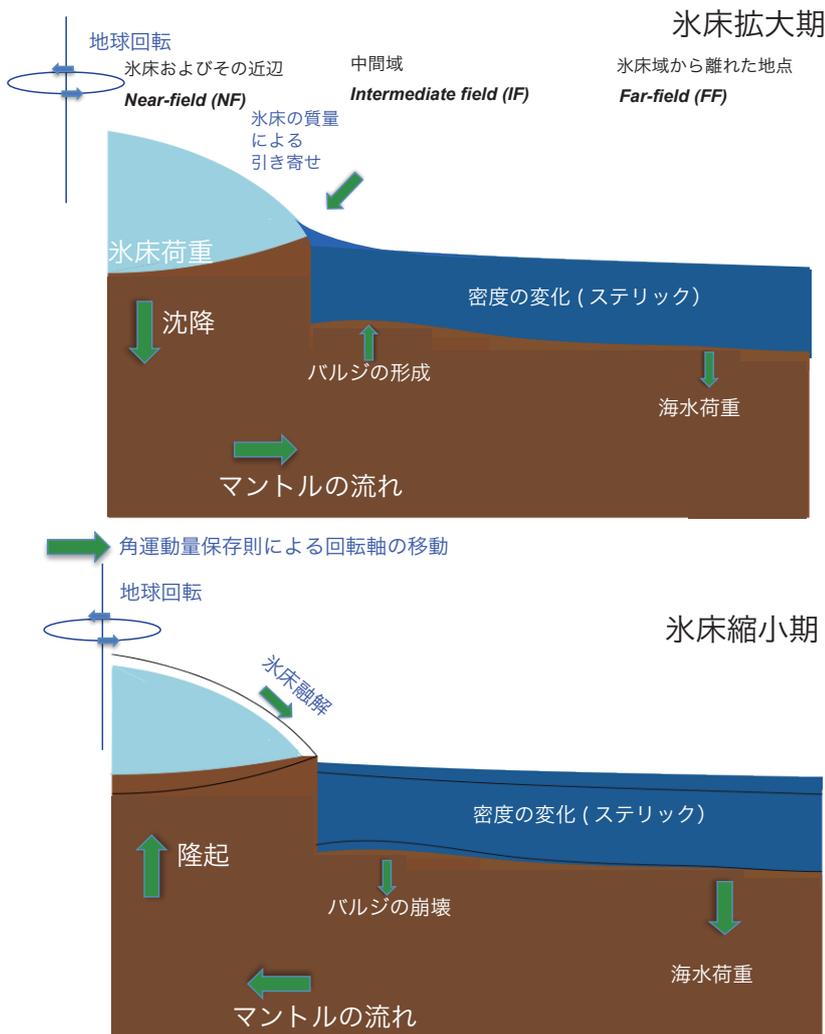


図2 氷床の拡大・縮小に伴う海洋と固体地球の変化。

り密接であったことを強く示唆している。

気候研究で重要なのは「変化率」である。今後の変化率を予想するためにも、たとえばかつての海面上昇率はどうか、といった問題が氷床の安定性を議論する上で重要な要素となる。過去2万年間のそれは一定ではなく、時折急激な上昇が起こった。最大の海面上昇イベントはメルトウォーターパルス1a (Mwpl1a)と呼ばれており、筆者らにより、近年のIODP (統合国際深海掘削計画)のタヒチ沖掘削コアからも確認された (Yokoyama and Esat, 2011; Thomas *et al.*, 2009)。およそ14,000年前に起こったこの大規模氷床崩壊イベントは、GIS氷床コアに記録されている14℃の急激な温度上昇と同期し、海面上昇率は年間40mmを超えた。15~20mm/yrにおよぶ海水準変化はそのほかの時期にも確認され、氷床の融解速度はある時期には急激に上昇する可能性が示唆されている。筆者が首席研究者をつとめた

IODP325航海 (グレートバリアリーフ掘削)のサンゴ試料からさらに詳細な全体像が近い将来明らかになることが期待されている (Yokoyama *et al.*, 2011)。

宇宙からの観測

人工衛星を使った観測には、(1)レーダーおよびレーザーを使った氷の標高の変化を求める方法 (ERS-1,-2, Envisat, IceSatなどの人工衛星)、(2)海洋に流出する氷の量を検出する方法 (干渉開口レーダー InSAR)、それに(3)重力の変化を捉える方法 (GRACE)の3種類がある。ここで(2)は氷床の厚さを正確に知る必要があり、また(3)はGIAの評価が重要となってくる。

アメリカのNASAジェット推進研究所のRignotらの人工衛星を用いた氷床収支の研究成果によると、AISおよびGISの融解スピードは近年増加しており、海水準の全変化量に対する氷床融解の割合が近い将来最も

大きくなるだろう、と発表されたのは2011年の夏のことであった。GRACEとInSARなどによる氷床量収支の見積りの両者がともに同様な解を導いており、今後の海面上昇変化率の増加が危惧されている。

一方同じくNASAのZwallyのグループは、これらの見積りは過大評価されているとし、GIAを正確に求めるためにGPSや氷河地質学・地球化学的方法を用いた研究を推進すべきだとしており、いまだに決着はついていない。そんな中、九大の中田正夫らとハーバード大のMitroviaのグループは、それぞれ潮位計 (FFにおいては全球的な海水準変化)と地球回転軸の位置変化 (表層荷重の再分配が起こると、角運動量保存則から回転軸が移動する; 図2)を用いて、西南極氷床 (WAIS; West Antarctic Ice Sheet)およびGISが、ここ100年間、およそ0.5~1.0mm/yrの海水準上昇相当分だけ、それぞれ減少しているとした。やはり現在の両極氷床は融解しているようだ。

密度変化と海水準

過去20年弱の期間の海水準上昇量のうち、1/3が海水の熱膨張 (サーモステリック)によるもので、残りの2/3が陸上の氷床の融解によるものである。複数のグループがフロート (Argo float)による表層の約700mについての観測バイアス補正を報告しているが、World Ocean Database 2009のものとはIshii and Kimoto (2009)の結果は極めてよい一致を見ている。それらは過去50~60年間に約 16×10^{22} J (およそ大気の15倍)にもおよぶ熱量が海洋に蓄積されており、それによって海洋熱膨張による海水準上昇が起きているとしている。さらに熱と塩分の変化にともなうステリックな変化 (密度が変化するためおこる海水準変化)は地域性が強く、大気海洋の相互作用の結果もたらされるものが多いため、注意深い観測の解釈が必要となってくる。難しい観測項目であるが、海水準を正しく評価するためには重要な要素である。

将来予測

MIS5と将来の状況は同じではない。以前多く行われた比較研究に対して、そのような意見が出されている。確かにそうである。公転軌道要素は異なるし、温室効果ガスの大気中への供給速度も大きく異なる。しかし氷床変化への寄与について感度実験を行った結果、1/3が夏の日射量変化に伴うもので残りは温暖化ガスと非線形な相互作用によるものという結果が出た。つまり同じ温度であればMIS5よりも速い速度でGISが融解する。



図3 氷床変動を探索の鍵のひとつは、海洋との相互作用の理解である。とくに現在-近未来の南極氷床については表面融解よりも海洋との相互作用の方が大きく影響する。

2011年12月のサンフランシスコでのAGUにおいて、マサチューセッツ大学のDeContoは氷床モデルの計算結果を示した。簡単にするために定常状態ではないとしながらも、AISの融解予測について、 $\text{CO}_2 \times 2$ 倍の場合は表面融解の効果は大きくないが、4倍にした場合はその影響が強くなり、WAISは全融解となった。今後、氷床底と氷床融解の関係を観測とモデルを使って詳細に明らかにしていき、氷床モデルの精度を上げる必要がある。すなわち、氷棚やGIAな

ど観測から得られるデータを多面的に解析してシステム全体を理解していく必要がある(図3)。



著者紹介 横山 祐典 Yusuke Yokoyama

東京大学 大気海洋研究所・(兼)理学系研究科地球惑星科学専攻 准教授

専門分野：古気候・古海洋学、地球化学、地球表層環境変遷の高精度復元とそのメカニズム解明について、地球化学的/地球物理学的手法を使った研究を行なっている。

略歴：オーストラリア国立大学博士課程修了。カリフォルニア大学バークレー校、ローレンスリバモア国立研究所研究員等を経て、現職。著書に「縄文時代の考古学3—大地と森の中で」(同成社、分担執筆)などがある。

—参考文献—

Ishii, M. and Kimoto, M. (2009) *J Oceanogr.*, **65**, 287-299.

Thomas, A.L. *et al.* (2009) *Science*, **324**, 1186-1189.

Yokoyama, Y. and Esat, T.M. (2011) *Oceanography*, **24**, 54-69.

Yokoyama, Y. *et al.* (2011) *Scientific Drilling*, **12**, 32-45, doi:10.2204/iiodp.sd.12.04.2011.

■一般向けの関連書籍

日本第四紀学会編(2007) *地球史が語る近未来の環境*, 東京大学出版会。