

よくある質問と回答

**FAQ 13.2 | グリーンランドと南極の氷床はこれから今世紀末まで海面水位の変化に寄与するのか？**

グリーンランド、西南極及び東南極の氷床は、地球最大の淡水貯蔵庫である。このため、これらの氷床は地質時代から近世にかけて海面水位の変化に寄与してきた。これらの氷床は涵養[かんよう](降雪)によって質量を増やし、表面消耗(大部分は氷の融解)と海洋境界での流出(浮遊棚氷になるか、氷山の分離を通じて直接海洋に流出)によって質量を失う。涵養量が増えれば世界平均海面水位は低下し、表面消耗と流出が増えれば水位は上昇する。こうした質量フラックスの変動は、氷床内と氷床外(すなわち大気と海洋)の双方における様々な過程に依存している。しかしながら、今世紀中は質量損失の原因のほうが質量増加の原因を上回る方向に向かいそうであり、世界の海面水位には引き続き正の寄与が予想されている。この「よくある質問と回答」では、この話題に関する現在の研究について要約し、詳細な評価から得た世紀末(1986~2005年の平均)に対する2081~2100年平均)の原因ごとの海面水位変動の規模を提示する。この評価は、全ての排出シナリオにわたって3分の2の確率水準として報告されている。

数千年にわたり、氷床のゆっくりとした水平の流れが、正味の涵養域(概して内陸の高地)から正味の損失域(概して、外縁の低地と沿岸周辺)に質量を運ぶ。現在、グリーンランドは堆積した氷の約半分を表面消耗によって失い、半分を氷塊分離によって失っている。一方、南極域は、涵養量のほぼ全てを氷塊分離と周縁氷床からの海中融解によって失っている。棚氷は浮いているので、その損失が海面水位に直接与える影響はほとんど無視できる程度のものであるが、その母体の氷床の質量収支を変えることで間接的に海面水位に影響を与え得る。(下記参照)。

東南極では、衛星高度計を使っただけの研究によると降雪が増えていることが示唆されているが、最近の大気モデリングと重力変化についての衛星測定によると、有意な増加は見つかっていない。この明らかな不一致は、おそらく比較的小さな長期変化傾向が、降雪の大きな年々の変動性に隠されてしまっているからだろう。予測結果では、主に温暖化した大気がより多くの水分を極域に運び込むことができるために、21世紀の南極域の降雪がかなり増加することを示唆している。また大気循環の地域的変化は、おそらく二次的な役割を果たすだろう。南極氷床全体に対しては、この過程は海面水位の低下に0~70 mm 寄与することが予測されている。

現在、南極大陸周辺の気温は低すぎて、実質的な表面消耗には至らない。それでも現場観測と衛星観測は、氷の表面の高度の低下に見られるように、いくつかの局所的な沿岸地域で流出が強まっていることを示している。これらの地域(西南極のパインアイランド氷河とスウェイツ氷河、東南極のトッテン氷河とクック氷河)は全て、南極大陸棚の縁辺に向けて深さ1キロメートルほどのくぼんだ岩盤に位置している。この流出の増加は、海流の地域的変化が引き金となり、より高温の海水が浮遊氷棚と接触したためと考えられている。

より北に位置する南極半島では、棚氷の崩壊についてしっかりした記録があり、それによれば棚氷の崩壊は、最近数十年間の大気温度の上昇によって生じた表面融解の増加に関係しているようである。これらの棚氷への流出に引き続いて起こる氷河の浅薄化は、海面水位に対して微小ではあるが正の効果を与えており、南極半島でこのような現象が今後さらに発生すれば同じ効果を与えるだろう。21世紀の気温変化に関する地域規模の予測は、それらの棚氷が将来の海洋変化によって脅かされることはあるかも知れないが、この過程は西南極及び東南極の大きな棚氷の安定性にはおそらく影響しないということを示唆している(下記参照)。

最近数十年間に南極氷床が海面水位にどのくらい寄与したかについての推定には大きなばらつきがあるが、近年は観測結果との一致に関して大きな進歩が見られている。流出の増加(主に西南極)が積雪による涵養量の増加(主に東南極)を現在のところ上回っていることを示す強い徴候があり、海面水位上昇に向かう傾向を示唆している。21世紀にわたる流出についてより高い確信度をともなった信頼できる予測を行うには、特に、浮氷と岩盤に載っている氷とを分ける接地線のいかなる変化や、棚氷と海洋との相互作用といった、氷の流れを再現するモデルを改善する必要がある。「海洋性氷床の不安定性」という概念は、接地線における氷がより厚く、したがってより速く流れている場合、海面下の岩盤に載っている氷床からの流出が増加するという考え方に基づいている。岩盤が氷床の内部に向かって下方に勾配している場合、流出の増大の悪循環が生まれ、接地線における氷は薄くなって浮き始める。すると接地線が勾配に沿って下方により厚い氷の下に後退し、今度はその厚い氷が更に流出の増大を駆動する。接地線が氷床の内部に向かって深くなるくぼみや盆地に沿って後退するにつれて、このフィードバックは氷床の一部の急速な損失を招く可能性がある。

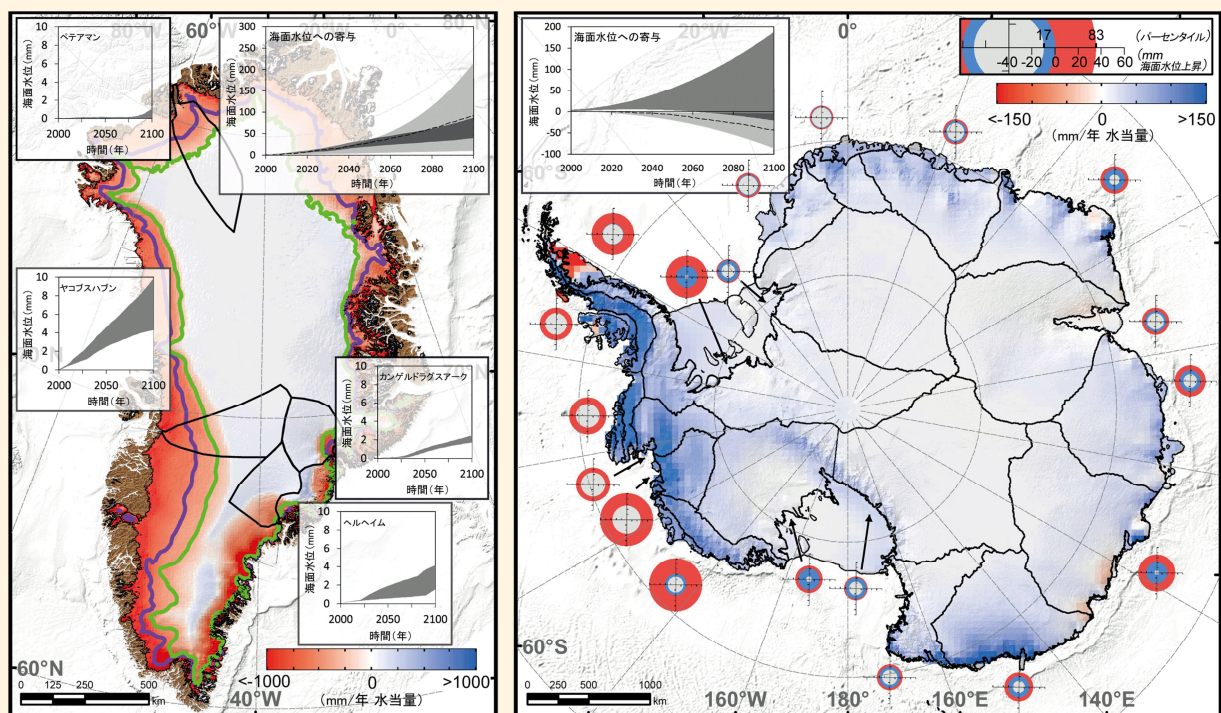
(次ページに続く)

## FAQ 13.2(続き)

将来の気候の強制力はこうした不安定な崩壊の引き金を引きかねず、その後、その崩壊は気候とは無関係に継続するかもしれない。西南極や東南極のいくつかの部分の個々のくぼんだ岩盤では、この潜在的な崩壊が何世紀にもわたって展開するかもしれない。多くの研究では、この理論上の概念がそうした氷床にどれだけ重要なのかを理解することに焦点を当てている。海洋不安定性の効果が無視できなくなれば海面水位は上昇するかもしれないが、現在のところそのような不安定な後退の前兆を明確に特定できるだけの証拠は十分に揃っていない。流出の変化は、2100年までに海面水位上昇に $-20$  (水位の低下を意味する)  $\sim 185$  mm の範囲で寄与すると予測されているが、海洋性氷床の不安定性のはっきりしない影響のために、この値が数十 cm 増える可能性もある。全体として、降雪の増加は、流出の増加によって生じた海面水位上昇を部分的に相殺するだけにとどまりそうである。

グリーンランドでは、表面消耗と流出の増加による質量損失が、近年では増加している可能性のある内陸での涵養量を卓越している。表面消耗に起因する質量損失の推定値は、1990年代初頭以降 2 倍に増えている。より長期にわたり表面消耗を生じる氷床が増えるのに伴い、この変化傾向は来世紀も継続することが予想されている。実際、21世紀についての予測では、質量損失の増大が涵養の小さな増加を卓越することを示唆している。氷床の高いところにある雪塊内での融水の再凍結は、大気温暖化と質量損失との関係に重要な(おそらく一時的ではあるが)抑制効果を与える。

観測されている流出氷河の応答は複雑で大きなばらつきがあるが、グリーンランドにある主要な流出氷河の多くからの氷山の分離はこの10年間にかなり増加し、相当な追加的質量損失をもたらしている。このことは、温かい海水がグリーンランド周辺の沿岸海域に入ってきていることと関係がありそうに見えるが、この現象が  
(次ページに続く)



**FAQ 13.2 図1** | (a)グリーンランドと(b)南極の氷床の、2100年までの表面質量収支(SMB)と流出について予測されている変化を説明する総合図。地図の色は、将来の温暖化に関する[SRES]A1B シナリオ(南極)と RCP4.5 シナリオ(グリーンランド)の下で、RACMO2<sup>【訳注】</sup>地域大気気候モデルを用いて 21 世紀の初めと終わりの間に予測される表面質量収支の変化を表す。グリーンランドの場合、この両期間中の平均した平衡線の位置は、それぞれ紫と緑で示してある。氷床の縁と接地線は、氷床の区分と同様に黒線で示している。グリーンランドについては、4 か所の主要な流出氷河についての流線モデルの結果を挿入図で、南極大陸については、観測された変化傾向の確率的外挿に基づいて予測された流出の変化を色付きの円で表している。各円の外半径と内半径は、寄与の3分の2の確率範囲の上限と下限をそれぞれ示している(尺度は右上に表示)。赤は質量損失(海面水位上昇)、青は質量増加(海面水位低下)を意味する。最後に、それぞれの氷床について海面水位への寄与が示されており(地図上側の挿入図)、薄い灰色は表面質量収支(表面質量収支図の作成に用いたモデル実験値は破線で表示)を、濃い灰色は流出を表している。全ての予測はあらゆるシナリオについて3分の2確率範囲を示している。

【訳注】 RACMO2: オランダ王立気象研究所により開発された領域気候予測モデル Regional Atmospheric Climate Model version 2 の略。

## FAQ 13.2(続き)

北大西洋振動のような数十年規模の変動や、温室効果ガスに起因する温暖化に伴うより長期変化傾向に関係しているかどうかはまだ不明である。したがって、この現象が21世紀の流出に与える影響を予測することは難しいが、見たところ流出が海洋温暖化に敏感であることは確かに明らかである。表面融水の増加が氷床基部の潤滑化に与える影響と、温度が上昇した氷が変形しやすくなることは、流出率を増加させるかもしれないが、最近の流出の増大との関連は不明である。表面消耗と涵養量との正味の差における変化は、1986～2005年平均と比較した2081～2100年平均での海面水位上昇に10～160 mmの範囲で寄与することが予測されているが、流出の増大は更に10～70 mmの寄与をすると予測されている(表 13.5)。

グリーンランド氷床は、最近数十年間における世界平均海面水位の上昇に寄与しており、この傾向は今世紀も増大すると見込まれている。南極大陸とは異なり、グリーンランドの場合21世紀中に海面水位上昇の急激な増大を生み出し得るような大規模な不安定性は知られていない。ただし、かりに百年規模の時間スケールで気候が工業化以前の状態に戻ったとしても、数百年規模の時間スケールで継続した氷床減少が不可逆となってしまうようなしきい値があるかもしれない。氷山の分離による質量損失は今後数十年間に増えるかもしれないが、この過程は最終的に、氷床の大部分が載っている海面上の岩盤まで氷縁が後退する時に終わることになる。

