

成層圏へのエアロゾル噴射による氷床の変化を予測

～グリーンランド氷床の体積減少を大幅に抑制できることが判明～

ポイント

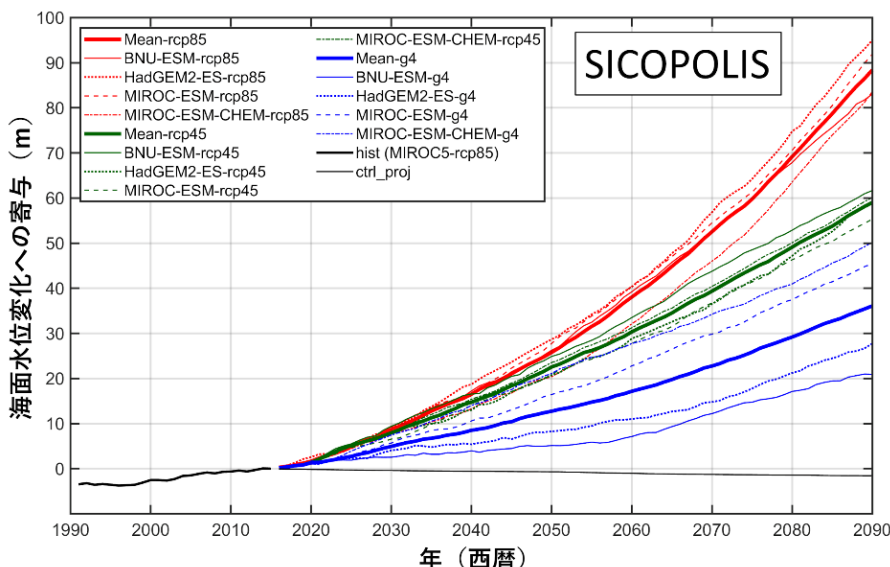
- ・エアロゾル成層圏噴射でグリーンランド氷床の体積減少を大幅に抑制できることが判明。
- ・氷床の表面融解や海への流出がエアロゾルの噴射により抑制され、氷床の安定化に寄与。
- ・人為的な手段を用いる気候工学には異論も多く、副作用などのリスクが存在。

概要

北海道大学低温科学研究所のグレーベ・ラルフ教授、ラップランド大学のジョン・ムーア教授らの研究グループは、「成層圏への人為的なエアロゾル噴射」という手法を用いた場合、2090年までにグリーンランド氷床がどのような影響を受けるかをシミュレーションで予測しました。

表面融解や氷河の周辺海域への流失（動的損失）で起こる海面上昇は、「太陽放射改変」と呼ばれる手法によって、氷床や海を冷却することで緩和できる可能性があります。この点の解明に向けて、研究チームは二つの氷床モデルを使用し、グリーンランド氷床の体積減少に起因する海面上昇を予測しました。予測に際しては、気候変動に関する政府間パネル（IPCC）の温暖化ガス排出の二つのシナリオ（「中位安定」「高位参照」）と、中位安定シナリオに「年間5メガトンの硫酸塩エアロゾルを成層圏噴射（1994年のピナツボ火山の噴火で噴出した量の4分の1相当）」の要素を加えるシナリオ（G4）を活用しています。G4では、2090年までにグリーンランド氷床の減少がIPCCの中位安定シナリオに比べ約31%～38%抑えられる一方、中位安定シナリオでは高位参照シナリオに比べ36%～48%抑制されることが確認されました。これは表面融解と動的損失が減少した影響と考えられ、本研究は温室効果ガスの削減と併せて気候工学を活用することで、気候変動の影響を抑えられる可能性を示唆しています。

この研究の結果は、2023年11月27日（月）公開の Journal of Geophysical Research: Earth Surface 誌に掲載されました。



西暦1990年から2090年までのグリーンランド氷床の体積減少を、海面上昇への影響から捉えたシミュレーション予測。

【背景】

地球温暖化は環境に様々な影響を与えますが、その一つが、氷床や氷河等の融解、後退を起因とする海面上昇です。海面上昇に伴い、人口が密集する沿岸部の多くでは、将来的に大規模な海岸整備工事なしでは住めなくなる事態が起こるかもしれません。将来の気候変動については種々の経路シナリオが策定されていますが、それぞれの経路シナリオ下で氷床や氷河がどのような影響を受け、海面上昇を引き起こすかを理解することが重要になります。

気候工学の技術は、氷床の崩壊など、地球温暖化がもたらす深刻な影響を部分的に緩和するために提唱されました。これらの技術は、「太陽放射改変」「二酸化炭素除去」「意図的気候工学」の三つに分類できます。エアロゾル成層圏噴射（SAI）は、「太陽放射改変」に属する手法です。この手法では、航空機や高高度気球を用いてエアロゾルを成層圏に届け、地球薄暮化と、アルベド（惑星や衛星に入射する太陽光のエネルギーと反射光のエネルギーの割合）の増加により、冷却効果をもたらします（アルベドの上昇は、大規模な火山噴火によって自然にも発生）。IPCC は、2018 年に発表した特別報告書「1.5°Cの地球温暖化」で、SAI は太陽放射改変の中で最も研究されてきた手法で、温暖化を 1.5°C未満に抑える有用性が高いと指摘しました。しかし、SAI は他の気候工学手法と同様に、複雑で未だ理解も不十分な地球の気候メカニズムへの介入を伴うため、狙った効果は得られても、有害な副作用が伴うリスクが存在します。

【研究手法】

研究グループは、1990 年から 2090 年までのグリーンランド氷床の経年変化を、次の三つのシナリオのもとでそれぞれ予測しました。(1) RCP*¹8.5（最悪の高位参照シナリオ）、(2) RCP4.5（現在の社会の状況下で達成可能な中位安定化シナリオ）、(3) GeoMIP*²の G4（RCP4.5 の状況に加え、2020 年から 2070 年まで、年間 5 メガトンの硫酸塩のエアロゾルを赤道上の成層圏下部に噴射）の三つです。さらに、表面質量収支（降水量と融解の収支）や表面・海洋温度の変化を勘案した四つの地球システムモデル（ESMs）の結果をすべてのシナリオに用い、グリーンランド氷床が受ける気候強制力（地球の気候に影響を与える因子）を導きました。

これらの気候強制力を用い、氷床モデルである SICOPOLIS*³ と Elmer/Ice*⁴をベースに、グリーンランド氷床の経年変化のシミュレーションを行いました。それぞれのシナリオで、氷床の全体積の変化のほか、氷の表面体積収支や周辺海域への氷の流失など流失体積変化に寄与した因子を分析しました。なお、四つの ESMs と二つの氷床モデルを使ったことにより、モデルに関する不確実要素を定量化しました。

【研究成果】

1 ページ目の図は、1990 年から 2090 年までのグリーンランド氷床の体積減少を、SICOPOLIS モデルを使って海面上昇で表したシミュレーション結果です。三つのシナリオと四つの ESMs の組み合わせで、2015 年から 2090 年までをカバーした 12 の実験が行われました。さらに、1990 年から 2015 年までは歴史的データ（hist）を利用して分析しました。あわせて、1995 年から 2014 年までの気候は、「氷床はほぼ安定している」とした対照実験（ctrl_proj）を行いました。

結果には、明確な差異がありました。対照実験と比べ、RCP8.5 のシナリオでは、海面上昇に換算（SLE）すると、90.0（84.6～96.6）mm の氷の損失が起き（p1 図：赤い曲線）、RCP4.5 のシナリオでは、SLE で 60.6（56.9～63.2）mm の損失（p1 図：青い曲線）が起きました。しかし、G4 のシナリオでは、損

失が SLE で 37.6 (22.5~51.8) mm に抑えられたのです (p1 図：緑の曲線)。もう一つの氷床モデル、Elmer/Ice でも同様の結果が得られました。本シミュレーション結果は、RCP8.5 シナリオに比べ、RCP4.5 シナリオの方がより氷床を保護できることを表しています。また、SAI による追加の保護対策 (G4) は、RCP4.5 と比べ、2090 年までにグリーンランド氷床削減を 31%~38%抑制できることが分かりました。

図 1 は、SAI がグリーンランド氷床を保護する効果について表しています。SICOPOLIS モデルをベースにした 2090 年の RCP4.5 のシナリオと比較し、G4 では氷の厚さや流れの違いが明確になっています。氷の厚さ (図 1a) については、その差が最大なのは、氷縁の周辺です (赤・オレンジで表されている部分)。これは驚きでも何でもなく、氷縁は、温暖化による表面融解増加の影響を最も受けやすい場所だということです。一方、氷流については、主に速い速度で流れる氷流と溢流氷河で RCP4.5 と G4 の違いが大きくなります。溢流氷河は海に向かう氷流にチャンネル (通路) を提供し、流失を促進させます。また、温暖化は一般的に氷縁の斜面の傾きを大きくし、氷の流れを推進する力が大きくなります。つまり、氷流と溢流氷河が、氷の周辺海域への流失を加速させるということです。さらに、図 1b の青色の部分を見ると、この流失の加速が緩和されていることが分かります。Elmer/Ice で得られた結果も、氷の流失でわずかな違いがあったものの、同様でした。したがって、表面融解と氷の流失による氷体積減少は、RCP4.5 と比べて、G4 シナリオ (RCP4.5 プラス SAI) では明確に緩和されるという結果が得られました。

【今後への期待】

気候工学は、自然に対して人為的な手段を用いるため、異論が多いテーマです。本研究は、RCP4.5 と比べ、G4 のシナリオではグリーンランド氷床の損失が減速されることを示し、議論の展開に寄与するものです。一般的に述べると、気候工学技術 (SAI など) は、温暖化がもたらす深刻な影響を部分的に緩和できるツールかもしれません。しかし、考えられる負の影響についての検討も必須です。気候工学は、今起きている現象に対応するもので、気候変動への根本的な対策に取り組むものではありません。温室効果ガスの削減に必要な根本的な社会変革を避ける、または遅らせる言い訳に利用される可能性があります。さらに、このような介入の影響が全体的に見るとポジティブであっても、地球のような複雑なシステムでは有害な副作用をもたらす可能性はあります。気候工学をさまざまな面から更に研究していくことが望ましいものの、その社会実装はリスクを伴うものになるでしょう。

【謝辞】

本研究は、日本学術振興会 (JSPS) 科研費 (JP16H02224、JP17H06104)、文部科学省「北極域研究加速プロジェクト (ArCSII、JPMXD1420318865)、外国人招へい教員向け北海道大学研究助成 (筆頭著者ラップランド大学ジョン・ムーア博士)、国家重点研究開発計画 (2021YFB3900105)、北京師範大学・地表課程及び資源生態国家重点実験室 (2022-ZD-05)、及びフィンランド・アカデミーの COLD コンソーシアム助成金 (322430、322978) の助成により行われました。

論文情報

論文名 Reduced ice loss from Greenland under stratospheric aerosol injection
(成層圏への人為的なエアロゾル噴射によるグリーンランド氷床質量損失の低減)
著者名 John C. Moore¹, Ralf Greve², Chao Yue³, Thomas Zwinger⁴, Fabien Gillet-Chaulet⁵,
Liyun Zhao³ (¹ラップランド大学、²北海道大学低温科学研究所、³北京師範大学、⁴CSC –
IT Center for Science、⁵グルノーブル・アルプ大学)
雑誌名 Journal of Geophysical Research: Earth Surface (雪氷学等の専門誌)
DOI 10.1029/2023JF007112
公表日 2023年11月27日(月)(オンライン公開)

お問い合わせ先

北海道大学低温科学研究所 教授 グレーベ・ラルフ

T E L 011-706-6891 F A X 011-706-7142 メール greve@lowtem.hokudai.ac.jp

U R L <https://ragger65.github.io>

配信元

北海道大学社会共創部広報課 (〒060-0808 札幌市北区北8条西5丁目)

T E L 011-706-2610 F A X 011-706-2092 メール jp-press@general.hokudai.ac.jp

【参考図】

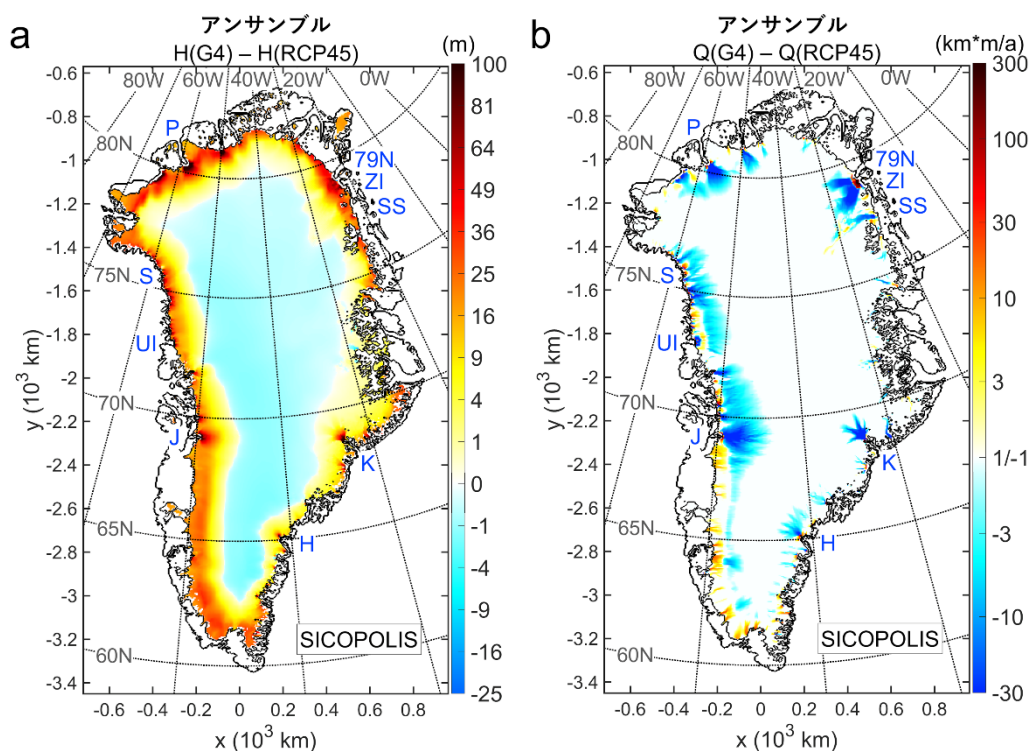


図 1. シミュレーション最終年である 2090 年の結果。

RCP4.5 と比較した G4 の結果：氷の厚さ H (a 図) と流れ Q (深度を勘案した水平速度、b 図)。氷床モデル SICOPOLIS における、四つの ESMs シナリオのアンサンブル平均。

大規模な氷流と溢流氷河は次のように表記：Nioghalvfjærdsfjorden (79N)、Zachariae (ZI)、Storstrømmen (SS)、Kangerlugssuaq (K)、Helheim (H)、Jakobshavn (J)、Upernavik (UI)、Steenstrup (S)、and Petermann (P)。

【用語解説】

- * 1 RCP … 代表的濃度経路シナリオ (Representative Concentration Pathway) の略称。IPCC 報告書世代で用いた温室効果ガス排出シナリオのこと。
- * 2 GeoMIP … 気候工学モデル相互比較実験 (Geoengineering Model Intercomparison Project) のこと。
- * 3 SICOPOLIS … Simulation COde for POLythermal Ice Sheets の略称。ポリサーマル氷床のモデル。グリーンランド大陸の気温・降雪量など、時間変化する気候の条件を境界値として、グリーンランド氷床の氷の厚さ分布とその時間発展を数値的に計算するモデル。
- * 4 Elmer/Ice … 氷床や氷河、氷流モデリング用の有限要素法ソフト。本研究で使われた二つ目の氷床モデル。