



1970年代の北半球中高緯度の雲量は エアロゾルにより増加していた

～長期間のエアロゾルと雲の関係解明による、地球温暖化メカニズム研究の進展に期待～

ポイント

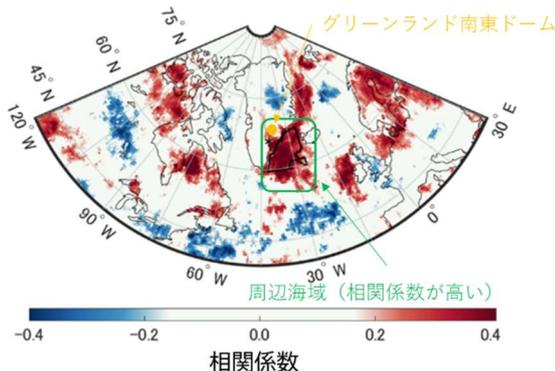
- ・グリーンランドのアイスコアから過去の硫酸エアロゾル量と周辺海域の雲量の関係解明。
- ・人為的な硫黄排出最盛期である1970年代は硫酸エアロゾル量が多く、雲量も多かったことを示唆。
- ・雲量の増加は地球表層を冷却するため、地球温暖化のメカニズムの理解向上に期待。

概要

北海道大学大学院環境科学院修士課程の渡利晃久（研究当時）、北海道大学低温科学研究所の飯塚芳徳准教授、名古屋大学大学院環境学研究科の藤田耕史教授、名古屋大学宇宙地球環境研究所の増永浩彦准教授、長崎大学大学院総合生産科学研究科（水産・環境科学総合研究科）の河本和明教授らの研究グループは、グリーンランドのアイスコア^{*1}に保存されている硫酸エアロゾル^{*2}と衛星観測による周辺海域の雲量や雲粒の数密度に関係があることを発見し、人為硫酸化物の排出最盛期である1970年代は硫酸エアロゾルが雲粒を多く作ることで雲量が増加していたことを解明しました。

硫酸エアロゾルは、地球の放射収支を考える上で重要な要素です。とくに極域では硫酸エアロゾルは凝結核^{*3}となり雲を形成し、雲が地球表層の大気を冷却する役割があります。過去の硫酸エアロゾルの量はアイスコアから、雲の量は衛星観測から調べることができます。今回、研究グループは、グリーンランドのアイスコアに保存されている硫酸エアロゾルの量と、周辺海域の雲量との間に有意な正の相関があることを明らかにしました。しかしながら、衛星観測は1980年代から本格的に始まっており、1970年代よりも古い時代の雲量を直接調べることはできません。そこで本研究では、1980年代から2010年代のエアロゾル量と雲量の関係を用いて、1970年代の雲量を復元しました。その結果、人為硫酸化物の排出最盛期である1970年代は硫酸エアロゾルが雲粒を多く作り、雲量の増加が地球表面を寒冷化させていたことが示唆されました。過去のエアロゾルと雲の関係解明は地球温暖化のメカニズムの理解向上につながり、将来予測の精度を高めることが期待されます。

なお、本研究成果は、2024年4月21日（日）公開のScientific Reports誌に掲載されました。



グリーンランド周辺海域における1982年から2014年までの夏の硫酸エアロゾル濃度と雲量の相関分布図。周辺海域に濃い赤で表示された硫酸エアロゾルと雲量の相関の高い海域がある。

【背景】

エアロゾルは 20 世紀における地球と地域の気候変動に大きな役割を果たしてきました。硫酸エアロゾルは雲凝結核として作用し、雲を増加させ、地球表面を冷却します (図 1)。人為的な SO₂排出量の増加により、北極の硫酸エアロゾルは 1975 年まで増加し、その時代に極域の温暖化増幅が観測されなかった原因と考えられています。最近のモデル計算においても、エアロゾルと雲は、放射強制力の推定と気候予測における主要な不確実性の要因となっています。不確実性を減らすには、北極の気候に対する硫酸エアロゾルの役割について、より直接的な証拠が求められています。しかしながら、過去から現在まで硫酸エアロゾルがどの程度雲凝結核として雲粒を形成し、それがどのくらい地球表面を冷却させてきたかについての証拠はほとんど得られていません。

極域のアイスコアは過去から現在までに雪とともに沈着したエアロゾルを保存しており、アイスコアから硫酸エアロゾルの沈着量を得ることができます。他方で、衛星観測は 1980 年代からデータが蓄積されており、雲量や雲粒の数密度を知ることができます。これらのデータを用いて、本研究では過去のエアロゾルと雲の関係解明を行いました。

【研究手法】

本研究では硫酸エアロゾル量を復元するために、グリーンランド南東部のドーム (北緯 67.18°、西経 36.37°、標高 3170m) のアイスコアを用いました (図 2)。このドーム域は極めて降雪量が多いため、高い時間分解能とエアロゾルの保存性の両方を備えており、南東ドームアイスコアにより、1960 年から 2014 年までの硫酸エアロゾルの堆積量を季節スケールで正確に求めることができます。

また、雲量や数密度を復元するために、Cloud_cci (CCI) データと呼ばれる新しい衛星雲データセット (1982-2016) を用いました。CCI は Advanced Very High-Resolution Radiometer (AVHRR) に基づいており、1982 年から 2016 年までの様々な雲特性を含んでいます。このデータセットは、最も古い雲衛星の一つである AVHRR から一貫して取得されたものであり、いくつかの受動的雲データセットと組み合わせることで、全球をカバーする高い空間解像度と高い時間解像度を実現しています。

エアロゾルと雲のデータが重なる 1982 年から 2014 年までの期間で季節ごと (1 年で 4 データ) の量データの相関関係を調べました。グリーンランド周辺海域を 0.5° × 0.5° のグリッドごと、アイスコアデータからは硫酸イオン濃度など 7 種イオン濃度を、衛星データからは雲量や数密度などの 15 物理量を用いて、それぞれの相関係数を計算しました。

【研究成果】

多数の相関係数の空間分布の計算結果の中から、グリーンランド周辺海域において夏の硫酸エアロゾル濃度と雲量に有意な相関があることを発見しました (図 3)。これは、実際に過去 30 年間グリーンランド周辺海域で硫酸エアロゾルが雲形成に関与していたことを示す初めての観測的結果です。

エアロゾルが雲形成に関与していたことを検証するために、まず、エアロゾルが雲を形成するのに重要となる雲粒の数密度との相関を調べたところ、グリーンランド周辺海域において夏の硫酸エアロゾル濃度と雲粒の数密度に有意な相関があることを発見しました。この発見は、エアロゾル量の増加が雲粒の数密度の増加をひきおこし、数密度の増加が雲量を増加させたという、一連の雲形成過程の因果関係を強く支持する結果です。次に、エアロゾル以外の雲を形成させる要因 (気温や湿度) に着目し、これらの要因が一定の範囲にあるときのみのデータだけで検証を行ったところ、そういった制約された条件でもグリーンランド周辺海域において夏の硫酸エアロゾル濃度と雲量に有意な相関があることを確認しました。これらの検証は、過去 30 年間グリーンランド周辺海域で硫酸エアロゾルが雲形成に関与していたことを強く支持します。

衛星データは1982年からしか存在しませんが、アイスコアデータはより古い時代も復元できます。1970年代は北米や欧州などグリーンランド周辺国の人為由来の硫黄排出の最盛期で、アイスコアに含まれる硫酸イオン濃度は高い値を示しています。1982-2014年の硫酸エアロゾル濃度と雲量の関係から、1970年代の雲量（雲被覆率）は2000年以降と比較して3%程度多かったことが復元されました（図4）。人為由来硫黄排出期の雲量を復元できたことはこれまでにない成果です。

【今後への期待】

2021年には南東ドーム地域で新しいアイスコアが掘削されており、産業革命前後の西暦1800年までさかのぼれることが分かっています。新しいアイスコアを用いて産業革命前から現在までの雲量を復元し、その結果をモデルの結果と比較することで、人為的な大気汚染が顕著になった過去200年間における数値モデルの雲物理の理解や精度向上につなげることができます。本研究の結果を踏まえると、将来に向けて人為起源硫黄排出の削減が続くと、雲量が減り地球温暖化が加速され続ける可能性があります。今後は観測事実を増やし、モデルの精度向上と地球温暖化のメカニズムの理解向上につなげることで、将来予測の精度を高めることが期待されます。

【謝辞】

本研究は、日本学術振興会科学研究費（JP18H05292, 23H00511）、北極域研究加速プロジェクト（ArCS II:JPMXD1420318865）、北海道大学低温科学研究所の共同研究プログラムの一環として行われたものです。

論文情報

論文名	Long-term relationships between summer clouds and aerosols over mid-high latitudes of the Northern Hemisphere（北半球中高緯度における夏の雲とエアロゾルの長期的関係）
著者名	渡利晃久 ^{1,2} 、飯塚芳徳 ² 、藤田耕史 ³ 、増永浩彦 ⁴ 、河本和明 ⁵ （ ¹ 北海道大学大学院環境科学院、 ² 北海道大学低温科学研究所、 ³ 名古屋大学大学院環境学研究科、 ⁴ 名古屋大学宇宙地球環境研究所、 ⁵ 長崎大学大学院水産・環境科学総合研究科）
雑誌名	Scientific Reports
DOI	10.1038/s41598-024-59817-7
公表日	2024年4月21日（日）（オンライン公開）

【参考図】

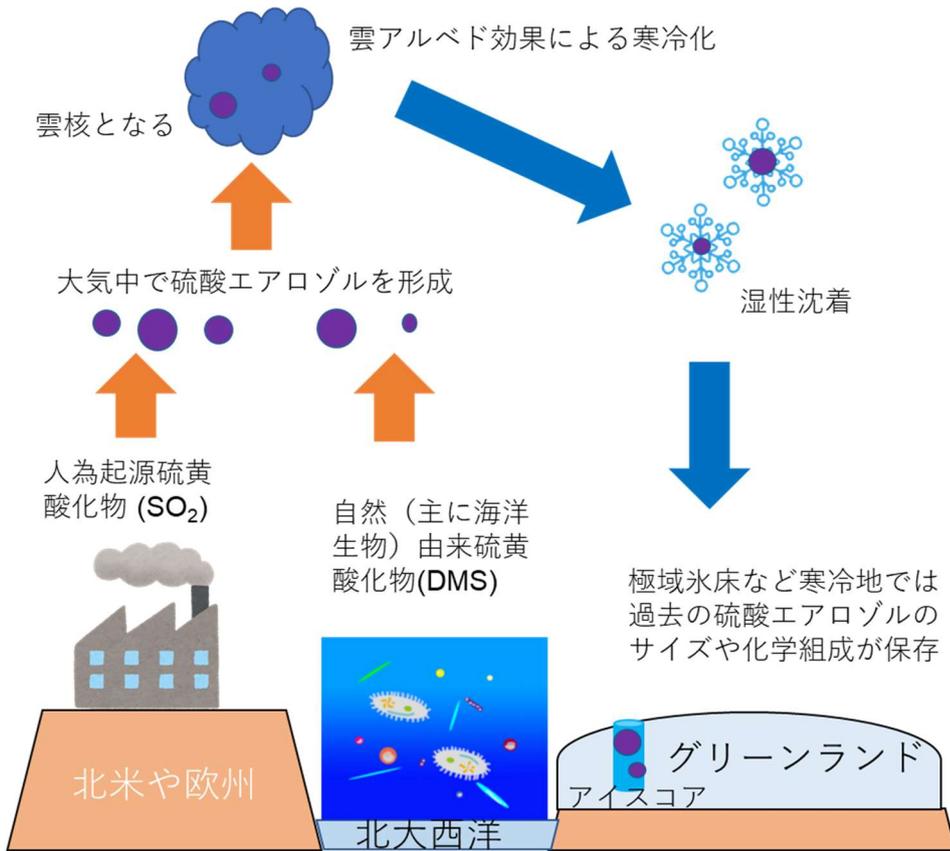


図 1. 硫酸エアロゾルと雲の相互作用

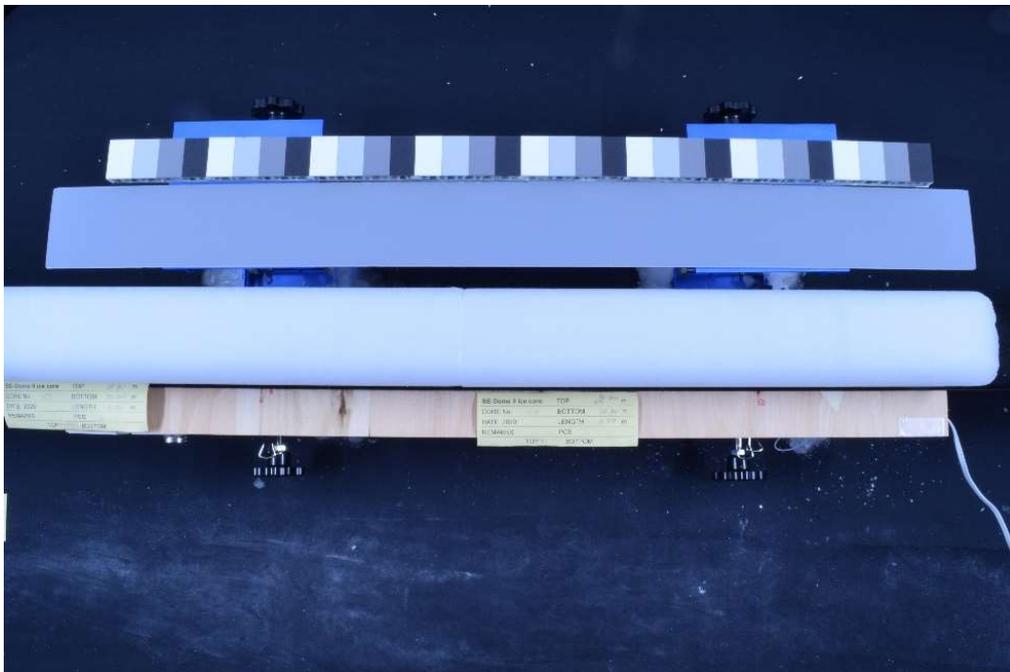


図 2. グリーンランド南東ドームアイスコア（1970年代の氷）

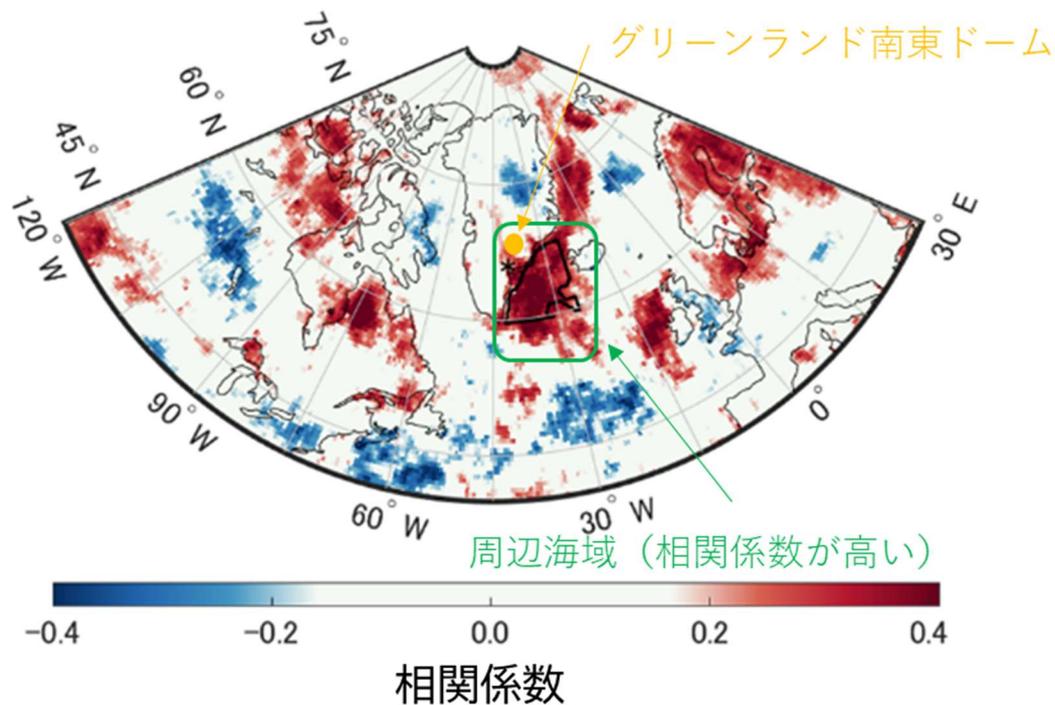


図 3. グリーンランド周辺海域における 1982 年から 2014 年までの夏の硫酸エアロゾル濃度と雲量の相関分布図

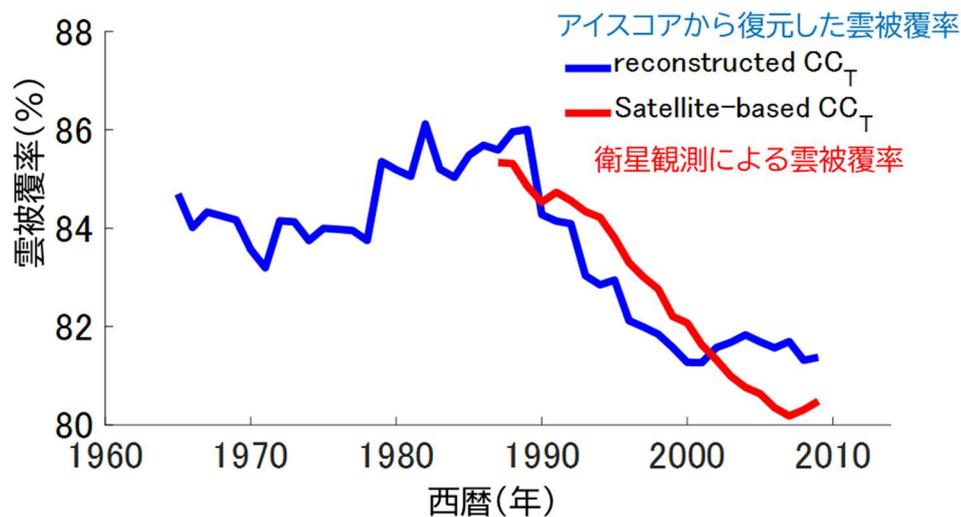


図 4. アイスコアの硫酸エアロゾル濃度に基づいた 1965 年から 2010 年までの雲被覆率（全天日に対する雲に覆われた日の割合）の復元

【用語解説】

- *1 アイスコア … 極地氷床などで鉛直方向にくり貫かれる円柱状の氷試料のこと。
- *2 エアロゾル … 気体中に浮遊する微小な液体または固体の粒子と周囲の気体の混合体。
- *3 雲凝結核 … 雲が生成されるとき、気体の水蒸気から液体の水に凝結するとき核（凝縮核）として働く微粒子のこと。