



名古屋大学  
NAGOYA UNIVERSITY



北海道大学  
HOKKAIDO UNIVERSITY

配布先: 文部科学記者会、科学記者会、名古屋教育記者会、北海道教育記者クラブ

2024年11月8日

報道機関 各位

## 温暖化に伴う北極ダストの増加が雲の氷形成を促進する効果を解明 ～気候変動の予測精度の向上に期待～

### 【本研究のポイント】

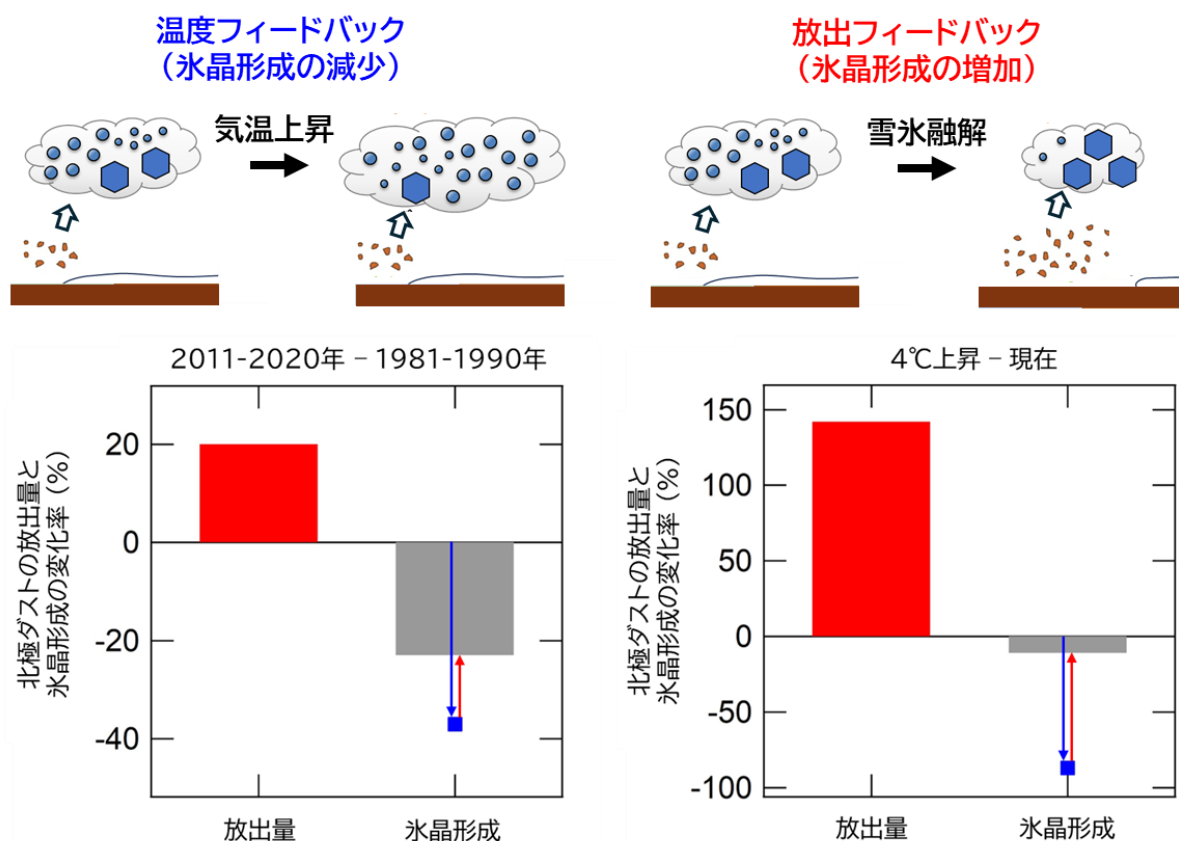
- ・北極域の温暖化によって北極ダスト(北極の陸域から大気中に放出される鉱物を主成分とする微粒子)の放出量が増加し、その増加が北極域の広い範囲で雲の中の氷晶形成を促進させることを解明した。
- ・この結果は、北極域の下層雲において、気温上昇によって氷晶の形成が起きにくくなるとされていた従来の理解を修正する新たな発見である。
- ・北極ダストとその増加は、現在ほとんどの気候モデルでは考慮されていない。これらの過程を考慮することで、北極域の下層雲の氷晶形成・放射収支などの気候変動予測の精度向上につながっていくことが期待される。

### 【研究概要】

名古屋大学大学院環境学研究科の松井 仁志 准教授と河合 慶 研究員は、北海道大学低温科学研究所と国立極地研究所との共同研究で、北極域の温暖化によって北極ダスト(北極の陸域から大気中に放出される鉱物を主成分とする微粒子)の放出量が増加し、その増加が北極域の広い範囲で雲の中の氷晶形成を促進させることを気候モデルの数値シミュレーションによって明らかにしました。これは、北極域の下層雲において、気温上昇によって氷晶の形成が起きにくくなり、水滴の割合が増加するとされてきた従来の理解を修正する新たな発見です。北極ダストとその温暖化による変化は、現在ほとんどの気候モデルでは考慮されていないため、これらの過程を考慮することで、北極下層雲における氷晶形成や放射収支の長期的な変化をより正確に予測できるようになり、北極域の気候変動予測の精度向上につながっていくことが期待されます。

本研究成果は、2024年11月1日付で気候科学分野の国際学術誌「npj Climate and Atmospheric Science」に掲載されました。

本研究は、日本学術振興会・科学研究費助成事業、環境省・環境再生保全機構の環境研究総合推進費、文部科学省・北極域研究加速プロジェクトなどの支援のもとで行われたものです。



## 【研究背景と内容】

温暖化が地球全体の平均と比べて数倍の速さで進む北極域の対流圏下層(高度数 km 以下)では、氷点下の大気環境下において水滴と氷晶の両方を含む下層雲が多く形成されることが知られています。近年の研究では、北極域の温暖化に伴って、これらの下層雲の氷晶の割合が減少(水滴の割合が増加)することが指摘されています。このような雲の水滴/氷晶の割合(雲の相状態)の変化は、雲の光学的な厚さや寿命(消失のしにくさ)、降水過程に影響を及ぼすとともに、雲に関わる気候のフィードバック過程(温暖化に伴う雲の放射収支の変化)や気候感度(CO<sub>2</sub> 倍増時の地上平均気温の上昇幅)を推定する上でも重要になると考えられています。そのため、急速な温暖化に伴って北極下層雲の相状態がどのように変化するかを理解することは、気候変動予測において重要な課題の 1 つとなっています。

大気中に浮遊する微粒子のうちごく一部の粒子は、氷点下の雲の中で氷晶の形成を助け、水滴と氷晶の両方を含む雲を形成する上で重要な役割を果たします。最近の研究では、北極域において夏から秋にかけて陸上の雪氷が融解して露出した地表面から放出される鉱物を主成分とする微粒子(「北極ダスト」)が、非常に高い氷晶を形成する効率(氷晶核能)を持つことが明らかにされてきました。そして北極ダストが、北極下層雲における氷晶の形成を促進し、雲の相状態を決める上で主要な役割を果たしていることが示されてきました。

微粒子の氷晶核能は、温度の上昇とともに低下することが知られています。そのため、北極域が温暖化すると、微粒子の濃度が変わらなくても下層雲における氷晶の形成が減少すると考えられます(図1:温度フィードバック)。氷晶形成が減少すると、雲の中の水滴

の割合が高くなることで光学的に厚い雲(太陽からの光を反射しやすい雲)が形成され、冷却効果をもたらす可能性があります<sup>注1)</sup>。一方、北極域の温暖化によって雪氷の融解が加速すると、露出した地表面からの北極ダストの放出量が増加し、北極域の対流圏下層に分布することで下層雲における氷晶の形成を増加させる可能性があります(図1:放出フィードバック)。この場合、上記の温度フィードバックとは反対の雲の変化が起こります。しかし、特にこの放出フィードバックを対象とした研究例はこれまでになく、北極下層雲の氷晶形成に対して、2つの相反するフィードバックがどの程度重要なのか(全体として氷晶の形成は増えるのか減るのかなど)は理解されてきませんでした。

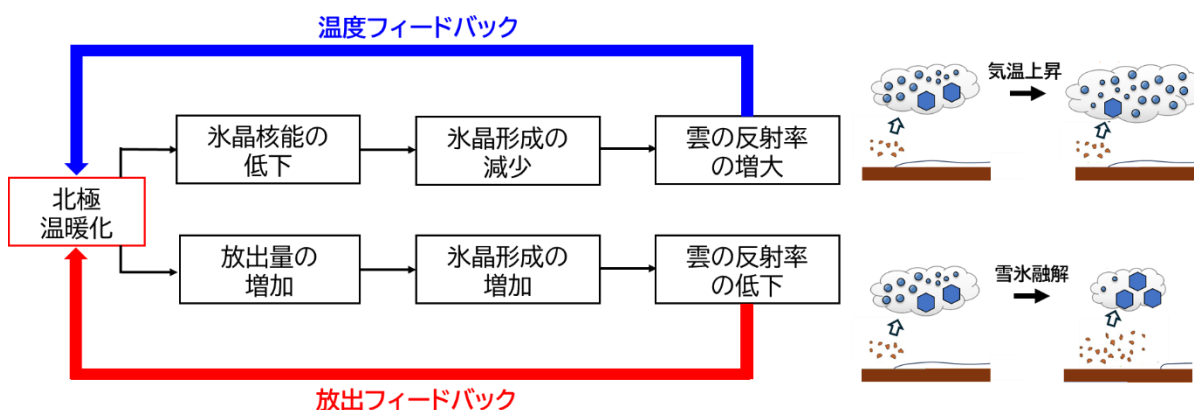


図1. 北極域の温暖化が北極下層雲とその氷晶形成に及ぼす影響の概念図。右側には、北極ダストの放出量は増加せずに気温のみが上昇した場合(温度フィードバックに対応する)と雪氷の融解によって北極ダストの放出量が増加する場合(放出フィードバック)の下層雲の変化のイメージ図を示す。

本研究では、名古屋大学が開発してきた全球気候モデル CAM-ATRAS<sup>注2)</sup>を用い、過去40年間(1981~2020年)の北極ダストの放出量の変化とその北極下層雲の氷晶形成への影響を評価しました(本研究では北緯60度以北を北極域と定義)。その結果、北極温暖化によって陸上の雪氷が減少することによって(図2)、1981~1990年から2011~2020年にかけて北極ダストの放出量が20%増加することが推定されました(図3)。この北極ダストの増加によって、過去40年間の北極下層雲における夏・秋の氷晶形成の減少率(北極域の平均)は37%(温度フィードバックのみを考慮した場合)から23%(温度と放出の両フィードバックを考慮した場合)へと変化しました(図3)。この結果は、北極ダストの放出量の増加が、その増加を考慮しない場合と比べて、温暖化に対する北極下層雲の氷晶形成の減少率(北極域の平均)を約40%弱めたことを示しています。また、北極域の3割以上の領域(年平均で約3割、6~8月の平均で約7割の領域)では、北極ダストの放出量の増加による氷晶形成の増加(放出フィードバック)が温暖化による氷晶形成の減少(温度フィードバック)を上回り、温暖化が北極下層雲における氷晶形成を加速する結果が得られました(図4)。これは、北極域の広い領域で、従来の研究で指摘されてきた温暖化による氷晶形成の減少とは反対の変化が起こっていることを示唆しています。

また、海面水温を地球全体で一様に4℃上昇させた将来の温暖化を模した理想的な感度実験を行ったところ、4℃の上昇によって北極ダストの放出量は2.4倍となり、この増加が温暖化による氷晶形成の減少の大部分を相殺する結果が得られました(図3)。この

結果は、将来的にさらに北極域の温暖化が進んだ場合に、北極ダストが大幅に増加し、それが北極下層雲の相状態の変化に大きな影響を及ぼし得ることを示しています。

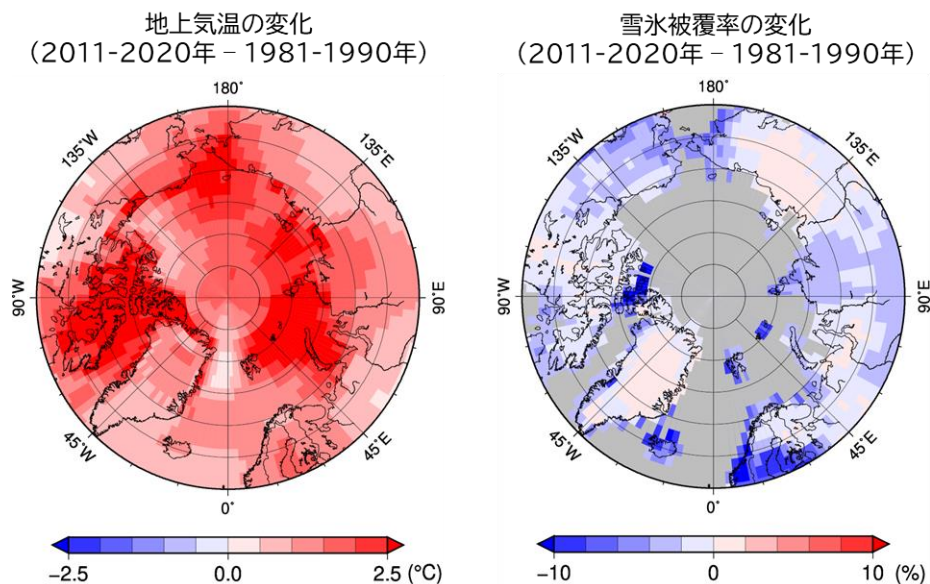


図2. 北極域における 1981-1990 年から 2011-2020 年までの地上気温と雪氷被覆率の変化。

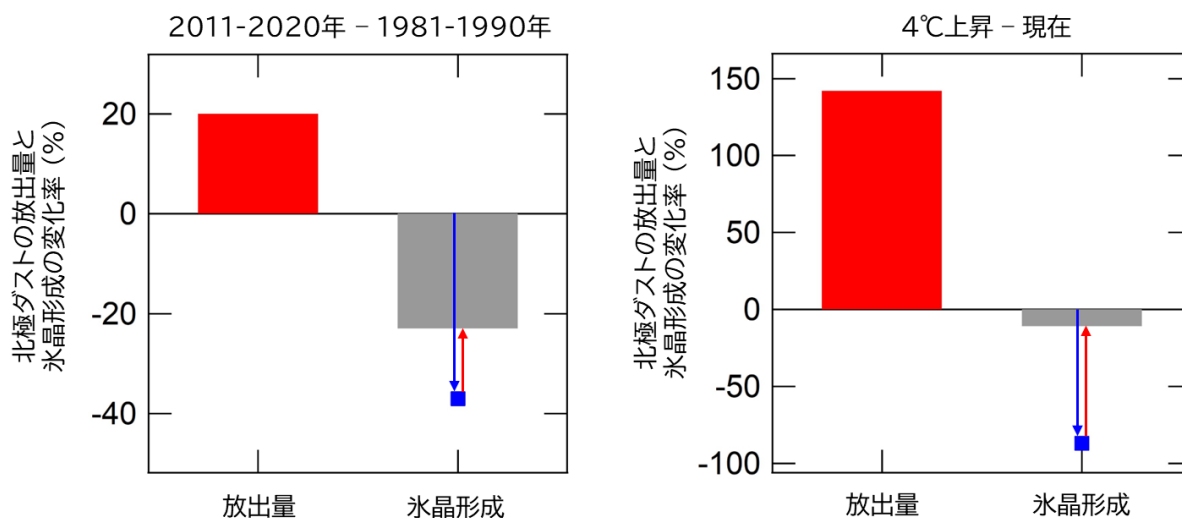


図3. 北極温暖化に伴う北極ダストの放出量(赤色)と雲の氷晶形成(灰色)の変化率(%). (左)1981-1990 年から 2011-2020 年の変化率。(右)海面温度を地球全体一様に 4°C上昇させた理想的な場合の変化率。氷晶形成の青と赤の矢印は、それぞれ温度フィードバックによる減少率と放出フィードバックによる増加率を示す。

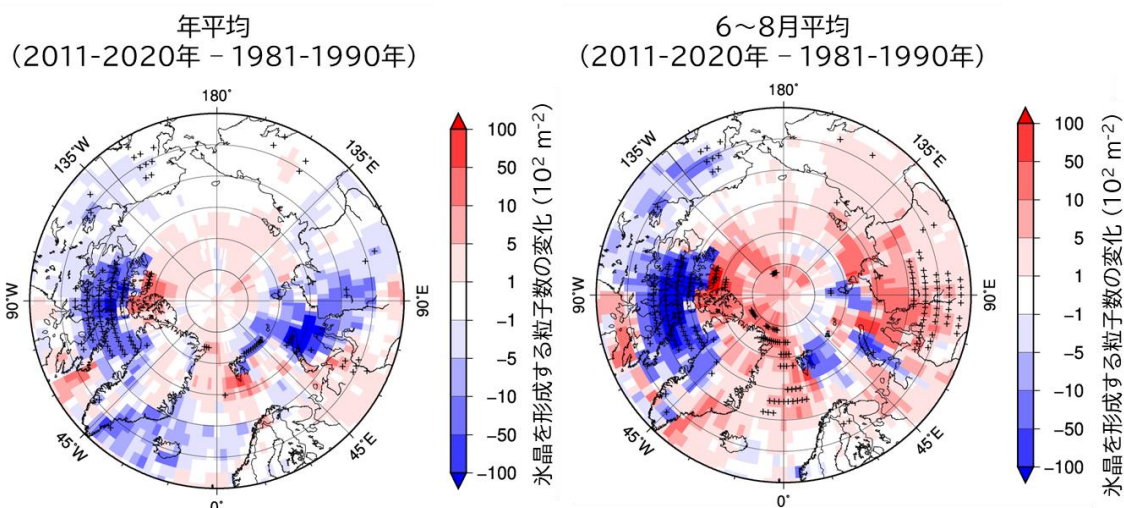


図4. 北極域における 1981-1990 年から 2011-2020 年の雲の氷晶形成の変化。年平均(左)と 6～8 月平均(右)の雲の中の氷晶を形成する粒子数濃度の変化を示す。青色は温暖化によって雲の氷晶形成が減少し、温度フィードバックが卓越する領域を示している。赤色は温暖化によって雲の氷晶形成が増加し、放出フィードバックが卓越する領域を示している。

## 【成果の意義】

本研究では、北極域の温暖化に伴って北極ダストが増加し、その増加が北極下層雲の氷晶形成を促進して、気温上昇による氷晶形成の減少を大幅に抑制する(地域によっては氷晶形成をむしろ加速させる)役割を果たすことを示しました。これは従来の研究では想定されてこなかった新たな発見です。

北極ダストとその温暖化による変化は、現在ほとんどの気候モデルでは扱われていません。本研究の成果は、これらの過程を気候モデルで考慮することが、北極下層雲における氷晶形成や相状態、さらには雲の放射収支の長期的な変化をより正確に予測するために重要であることを示唆しています。今後、微粒子の氷晶形成が雲の放射収支に与える影響の推定精度をさらに向上させていくことで、北極域の気候変動予測の精度向上につながっていくことが求められます。

また、本研究の結果は、温暖化の進行に伴い北極ダストがさらに増加することを示唆しており、北極ダストを含む自然由来の微粒子とその雲への影響を詳細に理解することが、今後の北極域の気候変動予測の研究においてより一層重要になることを示しています。

本研究は、文部科学省・日本学術振興会の科学研究費助成事業(JP19H01972、JP19H05699、JP19KK0265、JP20H00196、JP20H00638、JP22H03722、JP22F22092、JP23H00515、JP23H00523、JP23K18519、JP23K24976、JP23KK0067、JP24H00761、JP24H02225)、環境省・環境再生保全機構の環境研究総合推進費(JPMEERF20202003、JPMEERF20232001)、文部科学省の北極域研究加速プロジェクト(ArCS II:JPMXD1420318865)などの支援のもとで行われたものです。

## 【用語説明】

注1) 氷晶形成が減少すると、雲の中の水滴の割合が高くなることで光学的に厚い雲(太陽からの光を反射しやすい雲)が形成され、冷却効果をもたらす可能性があります:

実際に冷却効果をもたらす(大気上端で負の放射効果を持つ)かどうかは、太陽放射(短波放射)と地球放射(長波放射)のバランスなどによって決まる。雲が厚くなると、太陽放射の反射率が増えることで短波の冷却効果をもたらす一方、地球放射の散逸が減少することで長波の加熱効果をもたらす。北極域は太陽放射の入射量の季節変動が非常に大きいため(夏季は白夜、冬季は極夜)、太陽放射量の大きい夏季は太陽放射の冷却効果がより重要になるのに対して、冬季は地球放射の加熱効果が相対的に重要になる。また、太陽放射の反射率が低い地球の表面(雪氷に覆われていない海面や陸面など)か高い地球の表面(雪氷面)かによっても太陽放射と地球放射の相対的な重要性は異なる。本研究のモデル計算では、氷晶形成が減少して厚い雲が形成されると、太陽放射と地球放射の正味の効果として夏季は冷却効果を持ち、冬季は加熱効果を持つことが推定された(北極域(北緯 60 度以北)の平均)。

注2) 全球気候モデル CAM-ATRAS:

地球全体の大気を緯度・経度・高度の 3 次元方向に細かい格子に分割し、それぞれの格子での気象要素(気温、風速、雲、放射など)や物質の濃度(水蒸気、微量気体成分、微粒子などの濃度)の時間変化を、流体力学、熱力学、化学などの法則に従って計算する数値モデル。本研究では、海面温度と海氷について観測に基づいた年・月ごとに変化するインプットデータを与え、大気と陸域の計算を行った。CAM-ATRAS は、微粒子の大気への放出、大気中での生成・変質・輸送、降水などによる除去といったプロセスを考慮して、数ナノメートルから数十マイクロメートルの大きさを持つ微粒子の空間分布とその時間変化を計算する。北極ダストを含むダストの放出については、モデルで計算される地表付近の風速や地表面状態(植生や積雪の被覆率など)を用い、モデルの緯度・経度・タイムステップ(30 分)ごとにモデル内で計算する。また、モデルでは、氷晶を形成する微粒子(氷晶核)の濃度を計算し、その結果を用いて氷点下の雲の中の氷晶形成や雲の相状態・放射収支などを計算する。モデルで計算される北極ダストや氷晶核などの観測による検証については、近年の我々の研究で実施してきており、本研究では地上観測・アイスコア観測等を用いた北極ダストの長期変化の検証を実施した。

### 【論文情報】

雑誌名: npj Climate and Atmospheric Science

論文タイトル: Increasing Arctic dust suppresses the reduction of ice nucleation in the Arctic lower troposphere by warming

著者: 松井 仁志 (名古屋大学大学院環境学研究科・未来社会創造機構 脱炭素社会創造センター)

河合 慶 (名古屋大学大学院環境学研究科)

當房 豊 (国立極地研究所・総合研究大学院大学)

飯塚 芳徳 (北海道大学低温科学研究所)

的場 澄人 (北海道大学低温科学研究所)

DOI: 10.1038/s41612-024-00811-1

URL: <https://www.nature.com/articles/s41612-024-00811-1>