



PRESS RELEASE (2025/04/29)

雲を構成する水と氷の比率が北極温暖化に影響するメカニズムを解明

～温暖化予測・異常気象予測の高精度化に期待～

ポイント

- ① 北極域は、世界で最も温暖化が速く進行している地域です。数値気候モデルは北極の温暖化を観測よりも過小評価する系統誤差が知られていますが、その原因は未解明でした。
- ② 世界各国で開発されている 30 の気候モデルの解析により、雲粒と氷晶の割合が放射特性に影響することで北極温暖化の度合いを左右する、新しいフィードバック機構を解明しました。
- ③ 中緯度の気象現象にも密接に関わる北極気候を雲の素過程から紐解いたことで、温暖化予測の高精度化に加え、異常気象の将来変化の理解にも貢献することが期待されます。

概要

全球平均の温暖化のペースと比較して、北極域は 3～4 倍の速さで温暖化が進行しています。北極気候は中緯度の異常気象の発生にも密接に関わっているため正確な温暖化予測が必要となりますが、数値気候モデル^{*1}によるシミュレーションでは北極温暖化のペースを過小評価する系統誤差が存在します。その原因として複数の要因が挙げられていますが、正確な理解には至っていませんでした。

九州大学大学院総合理工学府修士課程 1 年の中西萌々花氏ならびに九州大学応用力学研究所の道端拓朗准教授は、北極温暖化の過小評価バイアスの原因の一つに、雲の内部構造の再現性が大きく関連している可能性を指摘しました。世界の 30 の気候モデルを解析した結果、21 モデルが衛星観測よりも雲中の氷晶割合を過大評価しており、そのようなモデルでは雲が地表面を温める温室効果を系統的に弱く再現することを理論的に説明することに成功しました。

これまでの研究でも、雲粒と氷晶が共存して構成される混合相雲の相状態が温暖化によって変化することで、放射特性が変化する“雲相フィードバック^{*2}”の重要性は指摘されてきましたが、太陽放射（短波放射）に対する影響に議論が限定されていました。本研究では、太陽放射がない極夜期のみを解析することで地球放射（長波放射）に対する雲の影響を調査した結果、雲粒と氷晶の比率によく対応する雲の長波放射射出率^{*3}によって特徴付けられる温室効果の度合いに、本質的な観測との誤差が存在することを発見しました。これは、将来温暖化した際に氷晶が融解して液体の雲粒に相変化する際にも、極めて重要なモデル誤差の要因となります。短波放射に着目した従来の研究とは異なり、長波放射に対する影響に着目した雲相フィードバックを、雲の長波放射射出率に起因して駆動されるメカニズムを強調し“雲の射出率フィードバック^{*3}”と新たに名付けました。

本研究による発見により、北極温暖化の予測結果が気候モデル間で大きくばらつく原因の解明につながるほか、北極気候の再現性と結びつく中緯度の異常気象予測の精度向上にも寄与することが期待されます。

本研究成果は、Science Partner Journals の国際学術誌「*Ocean-Land-Atmosphere Research*」に 2025 年 4 月 29 日（火）午後 7 時（日本時間）に掲載されました。

中西大学院生からひとこと：

雲相の変化によって射出率が上限値 1 に達することにより、どのタイミングで雲の射出率フィードバックが働かなくなるのかは現在気候における雲中の水と氷の比率に依存します。現在、雲中の氷晶割合を過大評価している多くのモデルは将来の雲の射出率フィードバックを過大評価する可能性があります。今後は、将来気候の予測信頼性向上のため、観測結果と統合的な雲を表現できるようなモデルの精緻化に取り組みたいと思います。

【研究の背景と経緯】

北極域は世界で最も温暖化が速く進行している地域として知られており、全球平均の温暖化のペースと比較して 3~4 倍にも達します。しかしながら、数値気候モデルによるシミュレーションでは、観測される北極温暖化のペースよりも過小評価する系統誤差が存在し、海氷の融解速度の再現性にも大きな不確実性を抱えています。その原因として、海洋による極向きの熱輸送が弱いことが有力な要因の一つとして挙げられていましたが、正確な理解には至っていませんでした。

地表気温に影響する要素として、海洋だけでなく大気も重要な役割を担っており、特に雲の存在は地表面放射収支に直接影響を及ぼします。雲は気温によって雲粒（液体）や氷晶（固体）として相状態が変化しますが、それにより放射特性も大きく異なります。そこで雲の物理素過程を専門とする本研究グループは、気候モデルにおける最大の不確実要素である雲が北極気候の再現性に大きな影響を及ぼしていると仮説を立て、雲量をはじめとする巨視的特性および雲の粒子スケールの微視的特性の双方の観点から北極温暖化との関連性を調査しました。

北極気候は、偏西風に代表される大気力学場・循環場への影響を介して中緯度の気象現象にも密接に関わっているため、北極域の正確な温暖化予測は喫緊の課題となっています。

【研究の内容と成果】

本研究では、過去・現在・将来の気候を予測する国際モデル相互比較プロジェクト「CMIP6^{※4}」に参画するモデルのうち、解析に必要な条件を満たす 30 モデルを解析しました。数値モデルの性能を評価するために、雲・放射特性を人工衛星から推定している CALIPSO-GOCCP、CERES-EBAF プロダクト、および気象場に関するデータとして ERA5 再解析プロダクトを用いました。

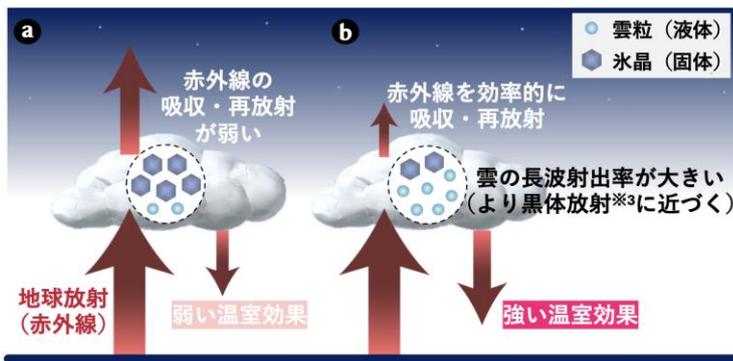
雲は、太陽放射を遮ることで地表面を冷やす「日傘効果」と、地表から宇宙への地球放射（長波放射）を吸収し地表へと再放射する「温室効果」の双方の役割があります。北極域の地表面において、白夜にあたる夏季は前者が勝り、極夜にあたる冬季は後者のみが働きます。人工衛星による推定とモデルシミュレーションの結果を比較したところ、夏季は雲による放射効果をよく再現できている一方、冬季における雲の温室効果を系統的に過小評価するモデル誤差の存在が明らかになりました。

雲による温室効果を過小評価する原因として、1)雲量の過小評価もしくは 2)雲が長波放射を吸収・射出する性質の過小評価、が可能性として考えられます。そこで 1)の雲量の誤差を検証したところ、数値モデルはむしろ北極域冬季の雲量を 20%近くも過大評価していることがわかりました。雲量を過大評価すると温室効果も過大となることが想定されますが、28 モデルが雲による温室効果を過小評価しており、このことから 2)の長波放射吸収・射出の過小評価が顕著であることが示唆されます。

その本質的な原因を明らかにするために、雲の放射特性を特徴付ける雲粒と氷晶の比率に着目しました。粒径が小さく光学的に厚い水雲は、太陽放射を効率的に反射・散乱するだけでなく長波放射に対しても吸収・射出効率が高く不透明になりますが、光学的に薄い氷晶雲の場合は長波放射に対して半透明

となる性質があるためです。この雲相依存の基本的特性を雲の長波放射射出率という指標によって数値化したところ、雲中の氷晶割合を観測よりも過大評価するモデルが 21 モデルあり、そのようなモデルでは長波放射射出率が小さく地表面に向かう下向き放射を過小評価することで低温バイアス傾向が生じていることが明らかになりました (図)。

こうした雲の相状態は、CO₂ 排出量増加による温暖化進行に伴い変化します。温暖化によって氷晶が融解して雲粒が多く形成されるようになることが予想されますが、それにより長波放射射出率が増大し温室効果が強まることも明らかになりました。本研究で新たに発見した「雲の射出率フィードバック」は、モデル間の予測のばらつきを説明する指標の一つとして観測証拠を用いた制約に活用されることが期待されます。



図：雲の射出率フィードバックの概念図

雲中に(a)氷晶が多く雲の長波放射射出率が小さい場合は長波放射の吸収・再放射が弱いため温室効果も弱い一方、(b)雲粒が多く雲の長波放射射出率が高い場合は温室効果が強くなる。地球温暖化に伴い(a)から(b)の状態に相変化が生じると、温暖化を加速させる正のフィードバックとして働くと考えられる。

【今後の展開】

本研究では、北極域に存在する混合相雲の雲粒と氷晶の比率によって特徴付けられる雲の長波放射射出率に、モデル間の大きなばらつきが存在することが明らかになりました。着実に進行している地球温暖化によって、雲相および長波放射射出率が変化し正のフィードバックをもたらすことが定性的に示唆された一方で、その大きさを定量化することは今後の課題として残されています。雲の射出率フィードバックを定量化するには、雲や大気の状態に制約を加えた複数の実験が必要となるため、本研究で実施したマルチモデル解析に加え単一の数値気候モデルを用いた感度実験を今後行う必要があります。

また、雲水量がある程度以上大きくなると、雲の長波放射射出率は上限値 1 (すなわち黒体放射^{*3}) に達することから (図)、この射出率フィードバックは時間依存性があることも大きな特徴です。気候に影響を及ぼす複雑なフィードバックプロセスを雲の素過程から紐解くことで、誤差の大きい北極温暖化の予測精度向上に貢献することが期待されます。北極気候の再現性が中緯度の気象現象にも密接に影響しているという事実を踏まえると、本研究成果は異常気象予測の精度向上や将来の温暖化時の極端現象の適切な予測の実現にも貢献することが見込まれます。

【用語解説】

(※1) 数値気候モデル

気温や風、降水などの世界の気候をシミュレートするための数値プログラム。全球をシミュレートする気候モデルは水平約 1°程度の空間解像度で、数十年～数百年以上の長期スケールを計算します。

(※2) 雲相フィードバック

温暖化によって、雲を構成する粒子が固体 (氷晶) から液体 (雲粒) に変化することで生じるフィードバック機構。氷晶が融解し、より粒径が小さく光学的に厚い雲粒に相変化すると、太陽放射をより効率的に反射することで温暖化を相殺しようとする負のフィードバックとして働くことが知られています。

(※3) 雲の長波放射射出率、雲の射出率フィードバック、黒体放射

雲が地球放射（長波放射）をどれくらい吸収・射出できるかを表す、0～1 の範囲で定義される指標。電磁波をよく吸収できる物体ほど射出もできる特性があり（放射エネルギーにおけるキルヒホッフの法則）、全ての波長の放射を完全に吸収・射出できるような理想的物体を黒体といいます。長波波長において、雲はある程度の雲水量を持つと黒体に近い「不透明」な放射特性を持ちますが、極域に形成される薄い混合相雲では「半透明」な放射特性を持ちます。雲の射出率フィードバックは雲相に依存するという意味で、(※2) の雲相フィードバックと共通しますが、雲相フィードバック（負のフィードバック）は太陽放射に対する影響で特徴付けられるのに対して、射出率フィードバック（正のフィードバック）は地球放射に対する影響を指す点で全く異なるフィードバックメカニズムです。

(※4) CMIP6 (Coupled Model Intercomparison Project Phase 6)

第6期結合モデル相互比較プロジェクトの略称。太陽活動や温室効果ガス濃度、エアロゾル濃度など共通の外部強制・シナリオに基づいて過去・現在・将来の気候を予測する国際プロジェクトです。

【謝辞】

本研究は、JST 創発的研究支援事業（JPMJFR206Y）、JSPS 科研費（JP23K13171, JP19H05669）、環境省・（独）環境再生保全機構環境研究総合推進費（JPMEERF21S12004）、文部科学省「気候変動予測先端研究プログラム」（JPMXD0722680395）の助成を受けたものです。

【論文情報】

掲載誌：Ocean-Land-Atmosphere Research (Science Partner Journals)

タイトル：How does cloud emissivity feedback affect present and future Arctic warming?

著者名：Momoka Nakanishi and Takuro Michibata

D O I : 10.34133/olar.0089

【お問合せ先】

<研究に関すること>

九州大学応用力学研究所 准教授 道端 拓朗（ミチバタ タクロウ）

TEL : 092-583-7680 FAX : 092-583-7909

Mail : michibata@riam.kyushu-u.ac.jp

<報道に関すること>

九州大学 広報課

TEL : 092-802-2130 FAX : 092-802-2139

Mail : koho@jimu.kyushu-u.ac.jp

科学技術振興機構 広報課

TEL : 03-5214-8404 FAX : 03-5214-8432

Mail : jstkoho@jst.go.jp

<JST 事業に関すること>

科学技術振興機構 創発的研究推進部 東出 学信（ヒガシデ タカノブ）

TEL：03-5214-7276 FAX：03-6268-9413

Mail：souhatsu-inquiry@jst.go.jp

Kyushu
University **VISION 2030**
総合知で社会変革を牽引する大学へ