

2026 年 9 月 17 日

大学共同利用機関法人情報・システム研究機構 国立極地研究所

国立大学法人東海国立大学機構 名古屋大学

南大洋の地表に届く長波放射を左右するのは雲の量だけではない ～南極観測船「しらせ」の観測から判明、「水雲か氷雲」と気温の正確な再現が鍵～

国立極地研究所の佐藤和敏助教、猪上淳教授、名古屋大学の松井 仁志教授らの研究グループは、南極地域観測事業（注 1）において南極観測船「しらせ」により南大洋で取得した気象観測データを基準とし、気候モデル（注 2）と広く利用されている 2 つの再解析データ（注 3）について、雲底の高度や雲相（水雲・氷雲）、気温、地表に到達する下向き短波・長波放射の再現性を評価しました。その結果、すべてのデータセットで高度 1km 以下の雲の発生頻度が観測に比べて高くなる傾向にあるのに対し、地表に到達する下向き長波放射が観測より小さくなる傾向が確認されました。この下向き長波放射の過小再現は、単純に「雲が多いか少ないか」だけでは説明できず、雲が水滴でできているか氷粒子でできているかという「雲の相状態（雲相）」と、大気気温の再現性が重要であることが明らかになりました。

本研究は、南大洋の放射収支を正確に再現するためには、雲の発生頻度や雲の形成に寄与する大気中のエアロゾル濃度の再現性向上だけでは不十分で、雲相と気温を同時に改善する必要がありますことを示しました。この成果は、2026 年 7 月 31 日付の *Geophysical Research Letters* 誌オンライン版に掲載されました。



図 1：本研究の概要図

< 研究の背景 >

雲は太陽から届く短波放射を宇宙へ反射する一方、地表や大気から放出される赤外線（長波放射）を吸収して再び地表へ放射します。そのため、雲の有無によって地表に届く放射は大きく変化します。また、雲相（水雲か氷雲か）も放射に影響します。特に、 0°C 以下でも凍結せずに液体の状態を保つ「過冷却水雲」は、南大洋で頻繁に観測され、南極圏の地表の熱収支に影響しています（文献 1）。これらの雲の形成には、大気中の水蒸気や雲粒の核となる微粒子（エアロゾル）など、さまざまな過程が関係しています。しかし、これらの過程を数値モデルで完全に表現することは難しく、特にこのような過冷却水雲を氷雲として再現する傾向があり、南大洋における放射収支の誤差の原因の一つとして指摘されてきました（文献 1）。しかし、南大洋でエアロゾル濃度の変化が雲の発生頻度に影響するのか、雲の再現性が改善された場合に地表放射の誤差も実際に改善するのか、については十分に明らかになっていませんでした。そのため、南大洋で観測データを取得し、数値モデルの結果と比較することで、実際の雲や放射をどの程度再現できているかを検証し、モデルに生じる誤差とその原因を明らかにすることが重要です。

そこで本研究では、南大洋で南極観測船「しらせ」により取得した船上気象観測データを基準として、数値モデルおよび再解析データの雲、エアロゾル質量濃度（注 4）、地表放射の再現性を比較し、エアロゾル質量濃度と雲の発生頻度の関係、下向き長波放射の誤差を生じさせる要因を調査しました。

< 研究の内容 >

研究グループは、第 64 次南極地域観測隊（2022 年 12 月～2023 年 3 月）において南極観測船「しらせ」に乗船し、南大洋上で雲と大気の連続観測を実施しました（図 2）。船上には、偏光解消計測機能付きライダーシーロメーター（Vaisala 社製 CL61）とマイクロ波放射計（Radiometer Physics GmbH 社製 HATPRO-G4）を設置し、雲底高度、雲底の相状態（雲相）、気温の鉛直分布を連続的に観測しました。これらの観測データを、全球気候モデル CAM-ATRAS（注 2）と再解析データ ERA5、MERRA-2（注 3）と比較することで、南大洋における雲の再現性を評価しました。その結果、観測では雲底高度 1 km 以下の下層雲の発生頻度が 40% 以下であったのに対し、ERA5 と MERRA-2 では下層雲を過大評価していました（図 3 左）。一方、CAM-ATRAS は下層雲をやや過大評価したものの、観測に最も近い結果となりました。

下層雲の形成にエアロゾルが関係することから、船上のエアロゾルカウンター（Sensirion 社製 SPS30）で観測したエアロゾル質量濃度と、CAM-ATRAS および MERRA-2 のエアロゾル質量濃度の頻度分布を比較しました（図 4 左、注 4）。その結果、CAM-ATRAS では観測とよく一致したのに対し、MERRA-2 では観測よりも高濃度に再現されていました。特に、水雲の形成に必要な凝結核として働く海塩粒子の質量濃度も MERRA-2 で過大評価されており、この凝結核の過剰な再現が下層雲の発生頻度を過大評価する一因である可能性が示されました（図 4 右）。

実際に、CAM-ATRAS を用いた感度実験では、南半球の海面から放出されるエアロゾル量を 100 倍に増加させると、雲底高度 1 km 以下の下層雲の発生頻度の増加が確認されました（図 3 右）。このことから、凝結核を過大評価することで下層雲の過大形成につながったと考えられます。

次に、雲の発生頻度の過大評価が下向き長波・短波放射の再現性に与える影響を調べました。その結果、雲の再現性が最も高かった CAM-ATRAS を含め、すべてのデータセットで地表に到達する下向き長波放射（DLW）と下向き短波放射（DSW）に誤差があり（図 5）、特に DLW が観測より小さく再現されていました（図 5 左）。一般に、雲が発生すると雲から放出される DLW が増加します。しかし、DLW は過小評価されており、雲の発生頻度以外の要因が DLW の過小評価に影響していることが示唆されました。実際に、CAM-ATRAS による感度実験では、下層雲の発生頻度が増加したにもかかわらず、通常のエアロゾル量の場合と比較して DLW にはほとんど差がみられませんでした。

そこで研究グループは、DLW に影響する雲底の温度と、雲相に着目しました。その結果、モデルや再解析データでは雲底付近の気温が実際より低く再現されており、この「低温バイアス」によって雲から地表へ放出される長波放射が少なくなっていることが分かりました（図 6 左）。また、気温 -25°C 程度の低温環境でも卓越する水雲が観測されていましたが（文献 1）、CAM-ATRAS でこの特徴を比較的よく再現しているのに対し、ERA5 と MERRA-2 では氷雲として再現する傾向がみられました（図 6 右）。氷雲は水雲より地表へ放出する長波放射が小さいため、この雲相の再現誤差も DLW を過小評価する原因の一つであることが示されました。

以上の結果から、南大洋の地表放射を正確に再現するためには、単に雲の量を正しく再現するだけでは不十分で、「水雲か氷雲か」という雲相の違いと、雲や大気の温度を正しく再現することが重要であることが明らかになりました。

< 今後の展望 >

南大洋は、地球上で特に雲の再現が難しい地域の一つです。南大洋における雲と放射の誤差は、海面水温や海氷の再現だけでなく、海洋による熱の吸収や全球規模の大気循環の再現にも影響する可能性があります。これまでのモデル開発では、雲量やエアロゾルなどの再現性向上が進められてきました。本研究は、それらに加えて、水雲と氷雲を正しく区別する雲相の再現と、大気の気温誤差の改善が重要であることを示しました。

今後は、南極圏の複数の観測船や観測所において、気温だけでなく雲相、エアロゾル、放射を継続的に観測し、今回明らかになった特徴が南大洋の他の海域や季節にも共通してみられるのかを検証することが重要です。さらに、衛星による雲観測と組み合わせることで、船舶や観測所で得られる詳細な観測結果を南大洋全域へ広げ、気候モデルや再解析データの改良につなげることを期待されます。

< 発表論文 >

掲載誌 : Geophysical Research Letters

タイトル : Evaluation of Low-Level Clouds, Temperature, and Surface Radiation Using a Model, Two Reanalyses, and Southern Ocean Observations

著者 : 佐藤 和敏 (国立極地研究所 国際極域・地球環境研究推進センター 助教)

猪上 淳 (国立極地研究所 北極観測センター 教授)

松井 仁志 (名古屋大学 宇宙地球環境研究所 教授)

URL : <https://doi.org/10.1029/2026GL123000>

DOI : 10.1029/2026GL123000

論文公開日 : 2026 年 7 月 31 日

< 研究サポート >

本研究は、南極地域観測第 X 期計画重点研究観測(AJ1005)、文部科学省・日本学術振興会の科学研究費助成事業 (JP18H05053、JP19K14802、JP20H04963、JP22H03722、JP22K14103、JP23H00515、JP23H00523、JP23K18519、JP23K24976、JP24H02225、JP24H02339、JP24H02341、JP25H00002、JP26K00780、JP26K03065)、文部科学省の北極域研究加速プロジェクト (ArCSII; JPMXD1420318865) と北極域研究強化プロジェクト (ArCSIII; JPMXD1720251001)、環境省・環境再生保全機構の環境研究総合推進費 (JPMEERF20232001、JPMEERF20262002)、国立極地研究所特別共同研究 (B25-02) などの助成を受けて実施されました。

< 注 >

注 1 : 南極地域観測事業

南極地域観測統合推進本部 (本部長: 文部科学大臣) の下、実施中核機関である国立極地研究所を中心に、関係省庁の連携・協力により国家事業として実施 (昭和 30 年閣議決定)。南極地域観測計画に基づき、地球温暖化などの地球環境変動の解明に向け、各分野における地球の諸現象に関する研究・観測を推進。

注 2 : CAM-ATRAS

名古屋大学で開発された全球気候 - エアロゾルモデル。気温、風、水蒸気、雲などの大気状態に加えて、エアロゾルの放出、大気中での輸送・変質・除去や、エアロゾルが雲形成に与える影響などを計算することができる。また、地表からのエアロゾル放出量を変化させることで、大気中のエアロゾル量の変化が雲や放射などの大気状態に与える影響を調べる感度実験を実施することができる。本研究では、南大洋における雲、エアロゾル、気温、放射などの再現性を観測データと比較するとともに、南半球の地表からのエアロゾル放出量を 100 倍に増加させた感度実験を実施した。

注 3：再解析データ

数値予報モデルによる計算結果に、人工衛星、地上観測、ラジオゾンデなどの観測データを「データ同化」と呼ばれる手法で取り込み、過去の大気状態を時間的・空間的に連続して再現したデータセット。本研究では、極域研究で広く使用されているヨーロッパ中期予報センター（ECMWF）の ERA5 と、米国航空宇宙局（NASA）のゴダード宇宙飛行センターにある全球モデリング・同化室（GMAO）が開発した MERRA-2 を使用した。

注 4：エアロゾル質量濃度

船上に設置したエアロゾルカウンター（SPS30）で観測された 5 つの粒径範囲（ $0.3\sim0.5\ \mu\text{m}$ 、 $0.5\sim1.0\ \mu\text{m}$ 、 $1.0\sim2.5\ \mu\text{m}$ 、 $2.5\sim4.0\ \mu\text{m}$ 、 $4.0\sim10\ \mu\text{m}$ ）のエアロゾル粒子数と、各粒径範囲に仮定した代表粒径などからエアロゾル質量濃度を算出した。CAM-ATRAS では、粒径 $1\ \text{nm}\sim10\ \mu\text{m}$ の硫酸塩、硝酸塩、アンモニウム、ブラックカーボン、有機エアロゾル、海塩、ダストを対象とし、それぞれの大気中の質量濃度を使用した。一方、MERRA-2 では、粒径 $0.01\sim20\ \mu\text{m}$ のダスト、海塩、硫酸塩、ブラックカーボン、有機炭素の質量濃度を使用した。

<文献>

文献 1：国立極地研究所プレスリリース「南大洋上は -25°C の低温環境でも水雲が多い～日射を強く反射し熱収支を左右～」（2025 年 6 月 19 日）

<図>

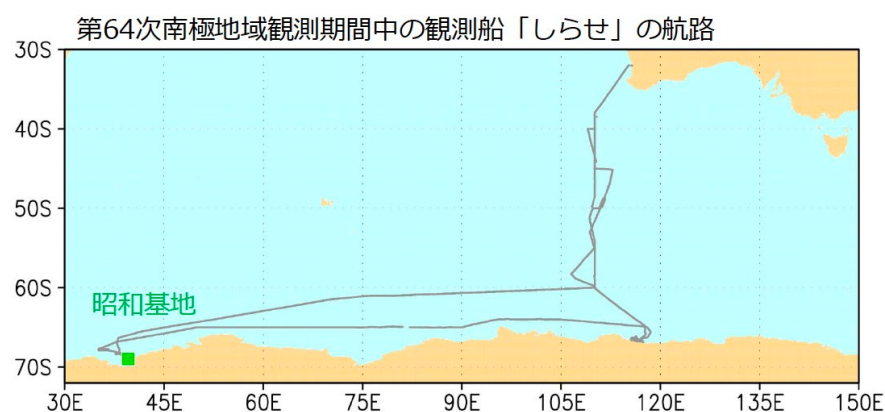


図 2：しらせの航路図

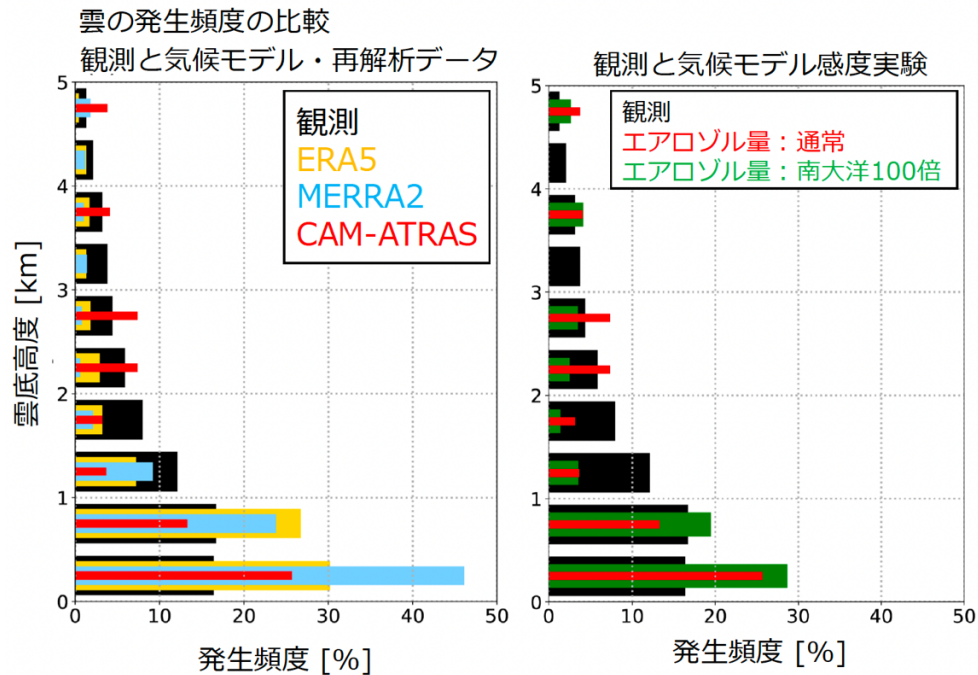


図 3：（左）「しらせ」航路上の雲底高度の発生頻度分布（黒：ライダーシーロメーターによる観測値、黄色：大気再解析データ ERA5、水色：大気再解析データ MERRA-2、赤色：全球気候モデル CAM-ATRAS）。ERA5、MERRA-2、CAM-ATRAS が 1km 以下の雲を過大評価している。（右）「しらせ」航路上の雲底高度の発生頻度分布（黒：観測値、赤色：通常のエアロゾル放出量で計算した CAM-ATRAS の結果、緑色：南半球でのエアロゾル放出量を 100 倍にした CAM-ATRAS の結果）。

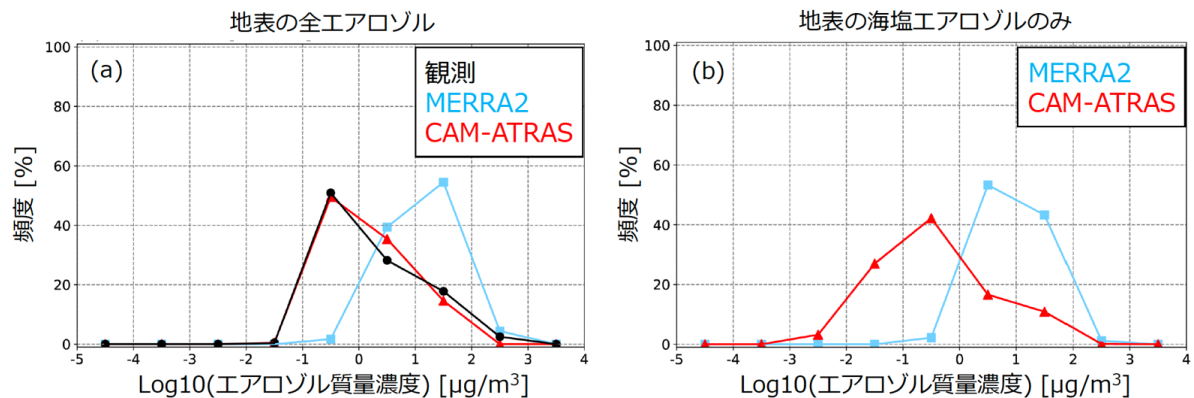


図 4：「しらせ」航海中のエアロゾル質量濃度の頻度分布（黒：観測、水色：MERRA-2、赤：CAM-ATRAS）。（a）全エアロゾルと（b）海塩粒子エアロゾル。CAM-ATRAS はエアロゾル質量濃度の頻度分布が観測とよく一致したのに対し、MERRA-2 は観測よりも高濃度に再現されている。

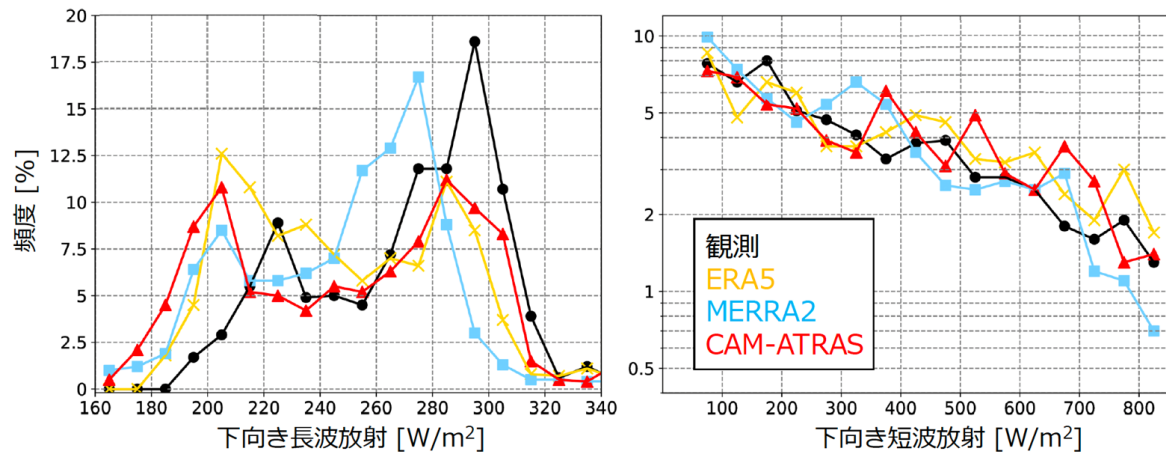


図5：「しらせ」航海中の放射観測データの頻度分布（黒：観測値、黄色：大気再解析データ ERA5、水色：大気再解析データ MERRA-2、赤色：全球気候モデル CAM-ATRAS）。（a）下向き長波放射フラックス、（b）下向き短波放射フラックス。再解析データや CAM-ATRAS は、観測された長波放射のダブルピーク構造を再現しているものの、ピーク値を全体的に過小評価している。短波放射では、 300W/m^2 以上の範囲で発生頻度を 1%程度過大評価する傾向がみられ、MERRA-2 では 700W/m^2 以上の範囲で 1%程度過小評価している。

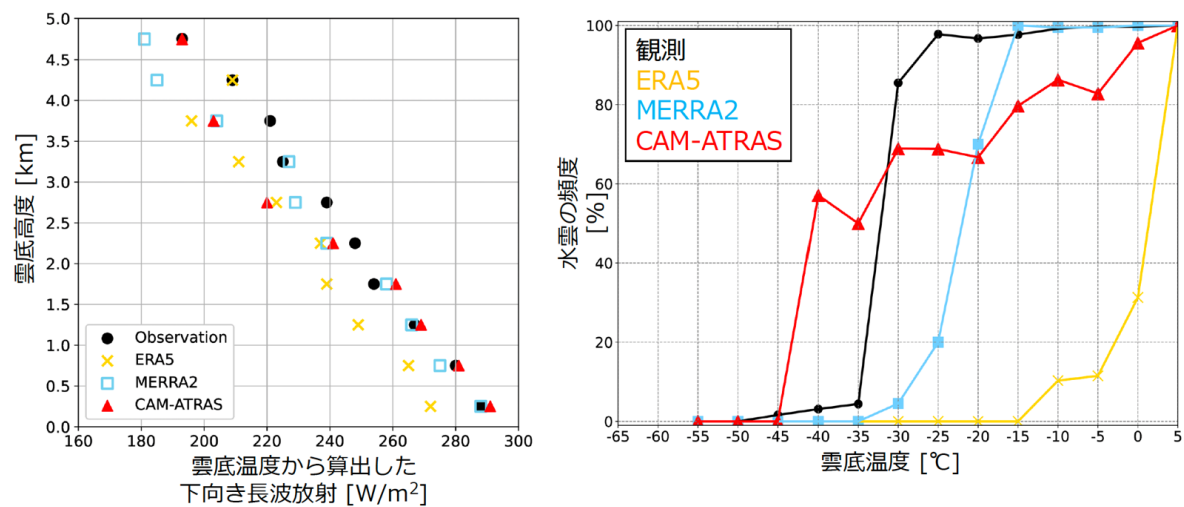


図6：（左）観測された雲底温度と各データセットの雲底温度から、ステファン・ボルツマンの法則を用いて算出した下向き長波放射（DLW）の高度分布。ERA5、MERRA-2、CAM-ATRAS では、特に高度 2 km 以上で観測より DLW が小さくなっており、雲底温度の低温誤差や雲相の再現誤差が、DLW の過小評価に影響していることを示している。（右）雲底温度ごとの水雲の出現頻度。観測では $-30\sim -25^{\circ}\text{C}$ 程度の低温環境でも水雲が高い頻度で存在するのに対し、ERA5 と MERRA-2 では水雲の出現頻度が低く、実際の水雲を氷雲として再現していることが分かります。一方、CAM-ATRAS は低温下でも水雲を再現しています。