

2010年以降に観測された地球のエネルギー吸収の増加は エアロゾルの減少などによる可能性 ～衛星等の観測と気候モデルとの比較から～

- ・ 近年の衛星観測の結果から2010年以降に地球が太陽の光を吸収する量が急増していることが確認されています。この原因について、エアロゾル^{*1}の減少によって雲ができにくくなった結果、地球全体として太陽の光を吸収しやすくなったことが主要な要因となっている可能性を観測データと気候モデルの結果から明らかにしました。
- ・ この結果は、気候変化に関するエアロゾル等の役割が重要であることを示しており、この役割の理解促進を通じて将来の気候変化予測の信頼性が向上し、温暖化緩和策・適応策に貢献することが期待されます。

○研究の概要

現在進行中の地球温暖化により、地球のエネルギー収支は均衡を失い、大気上端で地球に入射するエネルギーが地球から放出されるエネルギーを上回っており、この不均衡は2010年以降、特に顕著に拡大していることが衛星観測で確認されています(Loeb et al., 2021)。

本研究では、衛星による放射観測データと地表温度の観測記録を組み合わせ、放射収支の変化を

- 地球温暖化に対する気候システムの応答としての変化(フィードバック)
- エアロゾルや温室効果ガス^{*2}などの外的要因による変化(有効放射強制力、ERF^{*3})

に分離して定量化しました。

その結果、2010年以降のエネルギー不均衡の急増は、フィードバックだけでは説明できず、エアロゾル排出量の減少(Quaas et al., 2022)によって雲ができにくくなった結果、地球全体として太陽光(短波放射)を吸収しやすくなった(ERFの顕著な増大)ことが主要な寄与をしている可能性が示されました。

正確な原因は依然として不確実性を伴いますが、モデルが十分に捉えきれていないエアロゾル排出量の変化などが影響している可能性が考えられます。

また、現在進行している気候変化の要因を理解する上で、長期にわたる衛星観測の継続が極めて重要であることも示しています。

○研究の背景

近年の衛星観測により、地球全体で太陽放射の反射率が低下し、地球が吸収するエネルギー量が2010年以降急速に増加していることが明らかになっています。このエネルギー吸収の増大は、2023～2024年に観測された記録的高温の一因である可能性も指摘されています (Goessling et al., 2024)。

また、観測される放射収支の変化には、「フィードバック」の成分と「ERF」の成分の両方が含まれます。これまでERFの推定は主に気候モデルに依存してきましたが、特にエアロゾルによるERFには大きな不確実性があり、CMIP6^{*4}モデルが近年の太陽放射反射率の低下を十分に再現できていない要因の一つである可能性も指摘されています。

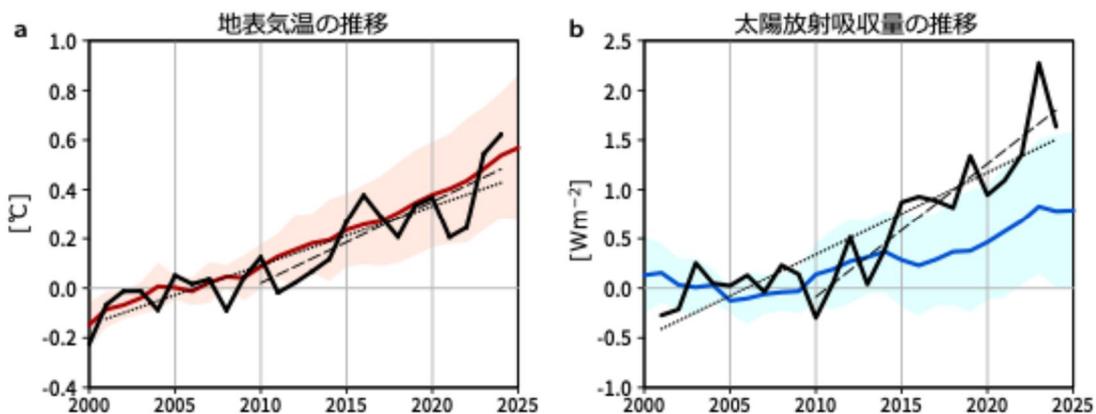
そこで本研究では、観測データに基づいてERFの最近のトレンドを推定し、気候モデルの結果と比較しました。

○研究内容と成果

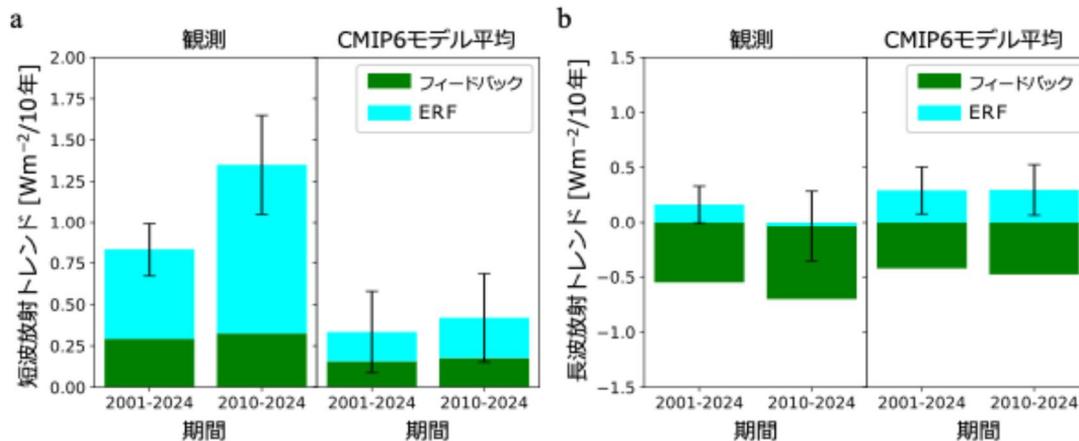
第1図は、地球全体で平均した地表温度と大気上端における太陽放射の収支 (すなわち地球に入る太陽放射から宇宙へ反射する量を差し引いた地球が吸収する量) の2000年以降の推移を示しています。観測された地表温度は、2010～2024年の期間で10年あたり $0.33 \pm 0.11^\circ\text{C}$ と上昇しています。CMIP6モデルの平均はこの上昇傾向を概ね再現しています。一方、衛星観測から求めた太陽放射の吸収量は、2010～2024年の期間で、10年あたり $1.35 \pm 0.30 \text{ W/m}^2$ の急激な増加を示しました。これは2001～2024年の期間よりも顕著ですが、CMIP6モデルはこの増加傾向を明確に過小評価しています。

次に、放射収支のトレンドを、短波放射 (太陽からの放射) と長波放射 (地球からの赤外放射) に分け、それぞれを「フィードバック」成分と「ERF」成分に分解しました。この分解のために、観測における温度の年々変動と放射の年々変動との関係、およびCMIP6モデルにおける年々変動と二酸化炭素を増加させた実験から得られる温度変化と放射変化との関係を使用しました。これはこれまでにない新しい解析手法です。

第2図は、2001～2024年の期間と2010～2024年の期間について、短波放射および長波放射のトレンドとその内訳を示しています。観測された太陽放射吸収量の2010年以降の急激な増加は、主にERF成分 (約 $1.0 \text{ W/m}^2/10\text{年}$) によることが示されました。結果として、2010年以降の地球全体の (短波と長波を合わせた) エネルギー吸収増大は、短波放射におけるERFの増加が支配的であることが示唆されました。CMIP6モデルによる結果は、観測された短波放射のトレンドをはるかに過小評価しており、その要因はERFの大きな変化を捉えられていないことにあると考えられます。



第1図：地球全体で平均した(a)地表温度（単位：°C）および(b)大気上端における太陽放射吸収量（単位：W/m²）の推移。2001~2010年平均を基準とした偏差で示す。黒線は観測、色のついた線はCMIP6モデルによるシミュレーションの平均、薄い色はモデルの5%~95%のばらつき範囲。点線および波線の直線は2001~2024年および2010~2024年の各期間における観測の線形トレンドを示す。



第2図：地球全体で平均した(a)短波放射および(b)長波放射の2001~2024年と2010~2024年の各期間におけるトレンド（単位：W/m²/10年、正の値は地球を加熱し、負の値は地球を冷却する方向）とその内訳（緑：フィードバック成分、水色：ERF成分）。観測とCMIP6モデルの比較。エラーバーは5%~95%の誤差範囲。

○今後の展開

衛星で観測されている短波放射の変化は、北半球中緯度海洋上での下層雲による反射減少と関係している可能性があります。

本研究の結果は、これらの変化が単なる地表温度上昇への応答だけでなく、エアロゾルの変化が雲に与える影響を含む可能性を示唆しています。

今後は、

- 放射強制力増大の物理的要因の解明
- エアロゾル-雲相互作用の理解
- 気候モデルの再現性向上

を進めることで、将来の気候変化予測の信頼性向上につながることを期待されます。

○掲載論文

題名 : Emerging Effective Radiative Forcing in the Radiative Imbalance since 2010

著者 : 行本誠史、川合秀明、大島 長、出牛 真(気象庁気象研究所)

掲載誌 : Geophysical Research Letters

<https://doi.org/10.1029/2025GL119913>

ニュースレター (AGU)

Title “Earth’s energy budget deeper in the red than forecast, even considering warming” URL

<https://news.agu.org/2-26-2026-human-actions-intensify-flood-risk-around-the-globe/>

問合せ先 : 気象研究所企画室 広報担当

メール : ngmn11ts@mri-jma.go.jp

電話 : 029-853-8536 (内線 291)

<用語解説>

*1. エーロゾル（「エアロゾル」とも言う。）

大気中に浮遊している固体あるいは液体の微粒子。地表や海面から舞い上がるものや、工業活動によって排出されるばい煙や気体（硫黄酸化物等）から生成される二次生成粒子などがある。太陽光を吸収・散乱したり、雲が凝結する核として雲の生成などに影響する。

*2. 温室効果ガス

地球から宇宙へ出ていく赤外線を吸収し、地表に向けて再び放出することによって、地表を温める性質を持つ気体の総称。代表的なものに二酸化炭素と水蒸気がある。

*3. 放射強制力、有効放射強制力（ERF）

地球に出入りする放射のバランスを変化させようとする気候システム外部からの変化要因の強さの指標を「放射強制力」という。変化要因としては、温室効果ガスやエーロゾルの変化がある。瞬時に効果が現れる本来の放射強制力に対し、気温や湿度、雲などが短期間のうちに変化して放射を変化させる分も含めたものを「有効放射強制力（Effective Radiative Forcing、略してERF）」と呼ぶ。

*4. CMIP6、CMIP6モデル

世界気候研究計画（WCRP）による結合モデル相互比較（CMIP: Coupled Model Intercomparison Project）の第6期プロジェクト。世界各国の研究機関等がそれぞれの持つ最新の気候モデルを用いて、統一した実験設定のもと、気候変動要因の解明や将来の気候変動予測のための様々なシミュレーションを行ない、結果のデータを公開している。この結果は、IPCCの第6次評価報告書に重要な情報を与えている。参加する数多くのモデルを総合してCMIP6モデルと呼び、各モデルによるシミュレーション結果を平均した「CMIP6モデル平均」がよく参照される。本発表の調査では15のモデルの結果を用いた。詳細については、「日本の気候変動2025」（文部科学省・気象庁）詳細編付録 A.1.4 項を参照。

< 参考文献 >

Loeb, N. G., Johnson, G. C., Thorsen, T. J., Lyman, J. M., Rose, F. G., & Kato, S. (2021). Satellite and ocean data reveal marked increase in Earth's heating rate. *Geophysical Research Letters*, 48(13), e2021GL093047. <https://doi.org/10.1029/2021gl093047>

Quaas, J., Jia, H., Smith, C., Albright, A. L., Aas, W., Bellouin, N., et al. (2022). Robust evidence for reversal of the trend in aerosol effective climate forcing. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 22(18), 12221–12239. <https://doi.org/10.5194/acp-22-12221-2022>

Goessling, H. F., Rackow, T., & Jung, T. (2024). Recent global temperature surge intensified by record-low planetary albedo. *Science*, 387(6729), 68–73. <https://doi.org/10.1126/science.adq7280>