

地球温暖化予測において

雲減少による温暖化の加速効果が過小評価

－ 対流活動に着目して予測の不確かさを減らす －

2021年 6月 29日 (火)

国立研究開発法人国立環境研究所

国立大学法人東京大学

国立大学法人筑波大学

(環境省記者クラブ、環境記者会、
筑波研究学園都市記者会、
大学記者会(東京大学)、文部科学記者会、
科学記者会同時配付)

1. 研究の背景

国立環境研究所、東京大学、筑波大学の研究チームは、気候モデルによる地球温暖化予測において、亜熱帯海上の雲量減少に伴う温暖化の加速効果が十分に働いていないことを示しました。

亜熱帯海洋上には、大気が上下に混ざりにくい安定層があり、下層に背の低い雲(下層雲)が生成されています。下層雲は、太陽光を反射して地球を冷却しています。また、下層雲は温暖化の進行に伴い減少すると考えられています。そうすると、雲による冷却効果は弱くなり、温暖化は加速します(正の雲フィードバック)。しかし、多くの気候モデルには、現在の下層雲量が観測に比べて少なくなる誤差(現在の下層雲量の過少バイアス)があり、将来予測においてこの正の雲フィードバックが働きにくいことがわかりました。この「現在の下層雲量の過少バイアス」は、地表付近で温められた空気が上昇して大気を混合する対流プロセスが、モデルでは活発過ぎて、下層雲の形成に必要な安定層の発達が妨げられていることが原因として考えられます。雲フィードバックと対流活動度との関係から、雲フィードバックの確からしい値を $0.5 \sim 3.4 \text{ W m}^{-2} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ と推定しました。これは、温暖化予測に関わる雲フィードバックの不確かさを、日々の対流の活動度との関係から、世界で初めて低減した成果になります。地球温暖化予測を精確に行うためには、雲・対流プロセスの理解を深め、モデルを高度化していく必要があります。

本研究の成果は、2021年6月29日付で自然科学分野の学術誌「Environmental Research Letters」に掲載されました。

気候モデル^{※1}による地球温暖化予測には不確かさがあり、温暖化対策に関わる判断を困難にしています。将来の気温変化予測の不確かさの最大の要因は、亜熱帯海洋上の背の低い雲（下層雲）の振る舞いがモデルごとに異なることにあることが知られています^[1]。亜熱帯海上では、高度 2km 付近に上層が暖かく下層が冷たい、大気が上下に混ざりにくい安定な層が形成されます。この安定層付近には、水蒸気が凝結して下層雲が形成されています。この下層雲は広く広がり、太陽光を効果的に反射して地球を冷却しています。この下層雲が温暖化の進行に伴い減少すると、その冷却効果が弱くなるため、温暖化は加速します(正の雲フィードバック)。また、温暖化予測の不確かさは、地表付近で温められた空気が上昇して大気を混合する対流プロセスの計算方法に強く依存することが知られています^[2]。日々の対流活動による大気の混合は、安定層の形成を妨げて、下層雲の振る舞いにも影響すると考えられます。しかし、対流が雲フィードバックに影響する仕組みは、まだ十分に理解されていません。

2. 研究の目的

本研究は、気候モデルによる地球温暖化予測において、対流が、雲減少による温暖化の加速効果(雲フィードバック)に影響する仕組みを調べます。その理解に基づいて、雲フィードバックの不確かさを理解し、低減することを目指します。日々の対流活動と雲フィードバックの関係性の物理的な理解に基づいて、雲フィードバックの不確かさを低減することは、世界的にも新しい試みです。

3. 研究手法

世界各国の研究機関で開発されている 65 個の気候モデルによる実験データ (CMIP)、及び観測データの解析を行います。モデルの雲フィードバック、下層雲に関わる安定層、および対流活動について調べるために下記の指標を利用します。

- 雲フィードバック: 温暖化に伴う雲の増減によって、雲による地球の冷却効果がどの程度変化するか($W\ m^{-2}\ ^{\circ}C^{-1}$)。この値が正に大きいほど雲は温暖化を加速します。
- 安定層強度: 安定層の上層と下層の温度差($^{\circ}C$)。安定層強度の大きさが、下層雲量の多寡を決めていることが知られています。
- 対流活動度: 日降水量が 5mm より大きい日の頻度(%)。対流は降水を伴うので、降水日の頻度が高いほど、対流活動が活発だと考えられます。

特に安定層強度が 3°C より大きく、下層雲が卓越する亜熱帯海上における雲フィードバックに着目します。

4. 研究結果と考察

まず、亜熱帯海上で安定層強度が 3°C 以上の地域における、CMIP 気候モデルの対流活動度と雲フィードバックの関係を図 1 にプロットします。相関係数は -0.59 で、対流活動度が小さいモデルほど、雲フィードバックが大きく、地球温暖化が加速される傾向があることが分かります。横軸の対流活動度を衛星観測から見積もると 2.2% 程度になります。つまり、ほとんどの気候モデルには、この地域の日々の対流が観測に比べて活発すぎる誤差(バイアス)があることがわかります。図 1 のモデル間の対流と雲フィードバックの関係性及び観測の対流活動度を利用すると、雲フィードバックの確からしい値は $0.5\sim 3.4\text{W m}^{-2} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$ だと推定することができます(図 1 ピンク線)。この幅は、全 CMIP モデルの雲フィードバックの幅 $-2.0\sim 4.9\text{W m}^{-2} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$ より小さいので、この結果は雲フィードバックの不確かさを低減することに繋がります。雲フィードバックが小さいモデルは、対流活動度が観測と整合的でないモデルであり、雲による温暖化の加速効果の働き方の信頼性も低いと考えられます。

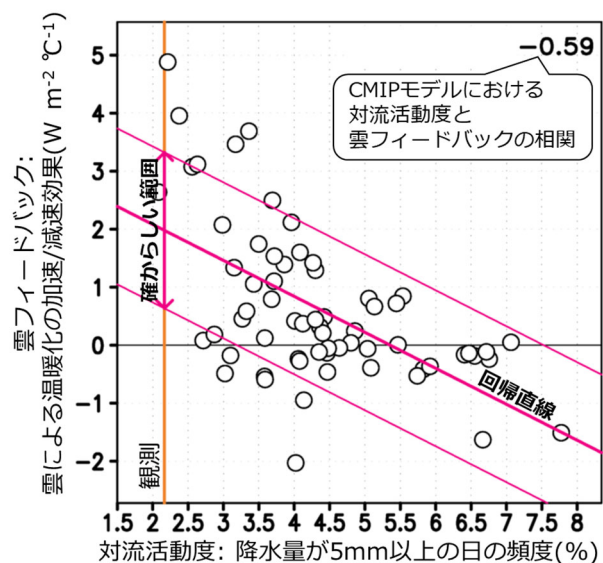


図 1: 対流活動度(%; 横軸)と雲フィードバック($\text{W m}^{-2} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$; 縦軸)の関係。

各点が 65 個の CMIP 気候モデルを表し、オレンジ線は衛星観測に基づく対流活動度を表します。ピンク線は回帰直線と雲フィードバックの ± 1 標準偏差の幅。

では、なぜ対流活動が活発なモデルほど雲フィードバックが小さくなるのでしょうか。CMIP モデルの中で、対流活動度が大きい 30 モデルの平均(「対流活発モデル」という)と小さい 30 モデル(「対流抑制モデル」という)の比較を行います。図 2 に現在における降水の頻度分布(対流の活動度を表す)、及び雲水混合比

(雲の量を表す)を示します。対流活発モデルは対流抑制モデルより強い降水の頻度が多く、また、対流活発モデルは対流抑制モデルに比べて、大気下層の安定層が弱く、下層雲が少ないことがわかりました。これらの結果は、対流活発モデルでは、対流が過剰に活発なことで、大気下層の安定層の発達と下層雲の形成を妨げていることを示唆します。そして、対流活発モデルでは現在の下層雲量が少ないので、将来の下層雲量の減少に伴う温暖化の加速効果が働きにくくなっていると考えられます。また、興味深いのは、対流抑制モデルは対流活発モデルよりは観測に近いのですが、それでも対流が過剰に活発で、下層雲が過少です。これは図 1 で示したほとんどの CMIP モデルに、対流が過剰に活発なバイアスがあったことを示唆します。

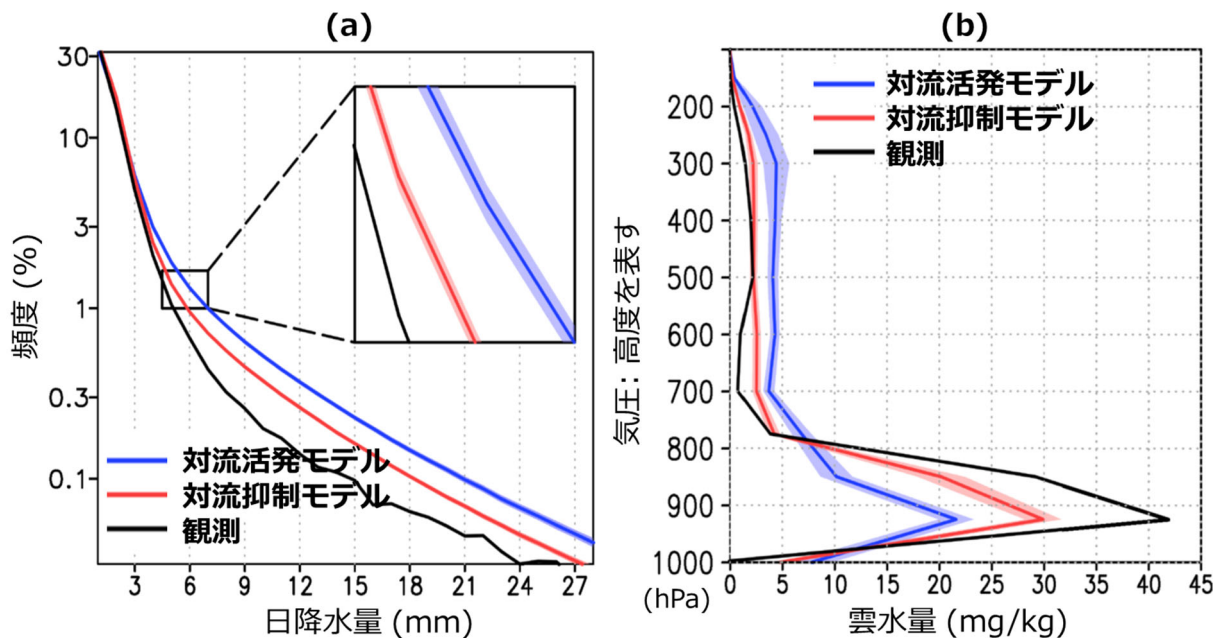


図 2: 亜熱帯海上における対流と雲の比較。(a)対流の活動度と関係する日平均降水量(横軸 mm day^{-1})の頻度(縦軸 %)、(b)雲の量を示す雲水混合比 (mg kg^{-1})の鉛直分布。対流活発モデルは青、対流抑制モデルは赤、観測は黒で表す。

5. 今後の展望

本研究の結果から、CMIP 気候モデルによる地球温暖化予測において、亜熱帯海洋上の雲減少による温暖化の加速効果が働きにくくなっていると考えられます。このことには、モデルの対流活動のバイアスが関わっていることがわかりました。雲・対流プロセスはモデルによる表現が難しいことが知られています。その

理解を深め、より適切にモデル化することが、より精確な温暖化予測に繋がると考えられます。

6. 注釈

※1：気候モデルとは、大気海洋などの気候を物理法則に従ってコンピューターでシミュレーションするための仮想的な地球のことです。

7. 研究助成

本研究は、文部科学省「統合的気候モデル高度化研究プログラム」(JPMXD0717935457)、日本学術振興会科研費(20K04067)、環境再生保全機構環境研究総合推進費(JPMEERF20192004)の支援を受けて実施されました。

8. 発表論文

【タイトル】 Underestimated marine stratocumulus cloud feedback associated with overly active deep convection in models

【著者】 Nagio Hirota¹, Tomoo Ogura¹, Hideo Shiogama¹, Peter Caldwell⁴, Masahiro Watanabe², Youichi Kamae³ (釜江陽一), and Kentaroh Suzuki²

【所属】 ¹ 国立環境研究所地球システム領域

² 東京大学大気海洋研究所気候システム研究系

³ 筑波大学生命環境系

⁴ ローレンス・リバモア国立研究所

【雑誌】 Environmental Research Letters

【DOI】 <https://doi.org/10.1088/1748-9326/abfb9e>

9. 参考文献

[1] 小倉知夫 2020: 地球温暖化における雲の役割. 日本気象学会 2020 年度夏季大会, https://www.metsoc.jp/default/wp-content/uploads/2020/08/SS2020_05.pdf.

- [2] 釜江陽一, 塩竈秀夫 2016: 【最近の研究成果】観測データとの比較による気候感度不確実性の低減. CGER ニュース, Vol.27, No.7, <https://www.cger.nies.go.jp/cgernews/201610/310006.html>.

10. 問い合わせ先

【研究に関する問い合わせ】

国立研究開発法人国立環境研究所 地球システム領域
地球システムリスク解析研究室 主任研究員 廣田渚郎
hirota.nagio (末尾に@nies.go.jp をつけてください)
029-850-2106

【報道に関する問い合わせ】

国立研究開発法人国立環境研究所 企画部広報室
kouhou0 (末尾に@nies.go.jp をつけてください)
TEL:029-850-2308

国立大学法人東京大学大気海洋研究所 広報室
kouhou (末尾に@aori.u-tokyo.ac.jp をつけてください)

国立大学法人筑波大学広報室
kohositu (末尾に@un.tsukuba.ac.jp をつけてください)
TEL:029-853-2040