

令和 5 年 5 月 23 日現在

機関番号：82101

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2020～2022

課題番号：20K04067

研究課題名（和文）気候モデルにおける対流表現と雲フィードバック・気候感度の関係

研究課題名（英文）Representation of convection and its relationship with cloud feedback and climate sensitivity

研究代表者

廣田 渚郎（HIROTA, Nagio）

国立研究開発法人国立環境研究所・地球システム領域・主任研究員

研究者番号：30750616

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,400,000円

研究成果の概要（和文）：本研究課題では、世界の多数の気候モデル(CMIP3, 5, 6)の実験出力の解析と、日本の気候モデルMIROCの数値実験を行った。地球温暖化の進行に伴い、大気下層(高度~2000m程度)の雲の量は減少し、雲の日傘効果が弱くなることで温暖化が加速すると考えられている。また、大気上層(~10000m程度)の雲は、温暖化に伴って高さが高くなることで、雲の温室効果が強くなり、温暖化が加速する。しかし、多くの気候モデルは下層雲と上層雲の量を過小評価しており、これらの雲の正のフィードバックが不十分であることが示された。これらの成果は、2本の論文として国際学術誌で発表された。

研究成果の学術的意義や社会的意義

気候モデルによる気候変動予測には大きな不確実性がある。例えば、IPCC AR6で参照されている気候モデルによって予測されるCO2倍増時の気温上昇量には1.8-5.6 の幅がある。本研究課題では、気候変動予測の不確実性の最大の要因である、雲・降水プロセスを調べ、それらが温暖化を加速するメカニズムを示した。更にその理解に基づいて、気候変動における雲の働き(雲フィードバック)の不確実性を低減することに成功した。これらの成果は、気候モデルによるより精緻な気候変動予測に繋がるものである。

研究成果の概要（英文）：In this research project, we analyzed the experimental outputs of many climate models (CMIP3, 5, 6) around the world and performed numerical experiments using the Japanese climate model MIROC. In warmer climate, cloud amount in the lower atmosphere (~2000 m) decrease weakening the sun-shade effect of clouds and accelerating global warming. In addition, clouds in the upper atmosphere (~10000 m) increase in height with global warming, which strengthens the greenhouse effect of clouds and accelerates global warming. However, many climate models underestimate the amounts of low and high clouds, indicating insufficient positive feedback of these clouds. These results were published as two papers in international academic journals.

研究分野：気候学

キーワード：気候感度 雲降水 気候モデル

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

気候モデル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る。将来の気温変化予測の不確かさの最大の要因は気候モデルの雲・降水プロセスにあると考えられている。例えば、亜熱帯海洋上の背の低い雲(下層雲)の振る舞いは、モデルごとに大きく異なることが知られている(Ceppi et al. 2017)。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る。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る。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る。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、温暖化は加速する(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る(Shiogama et al. 2012)。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ている。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ない。

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、雲・降水プロセスが温暖化の加速/減速効果(雲フィードバック)に影響する仕組みを調べる。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ある。

3. 研究の方法

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(CMIP3, 5, 6)、及び観測データの解析を行う。また、日本の気候モデル MIROC を用いた数値実験を行う。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する。

- ・ 雲フィードバック: 温暖化に伴う雲の増減によって、雲による地球の加熱/冷却効果がどの程度変化するか($W m^{-2} K^{-1}$)。この値が正に大きいほど雲は温暖化を加速する。
- ・ 安定層強度: 安定層の上層と下層の温度差()。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る。
- ・ 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る。

特に安定層強度が 3 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する。

4. 研究成果

まず、亜熱帯海上で安定層強度が 3 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 にプロットする。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る。横軸の対流活動度を衛星観測から見積もると2.2%程度になる。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)があることがわかる。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 $0.5 \sim 3.4 \text{ W m}^{-2} \text{ } ^{-1}$ だと推定することができる(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 $-2.0 \sim 4.9 \text{ W m}^{-2} \text{ } ^{-1}$ 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る。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る。

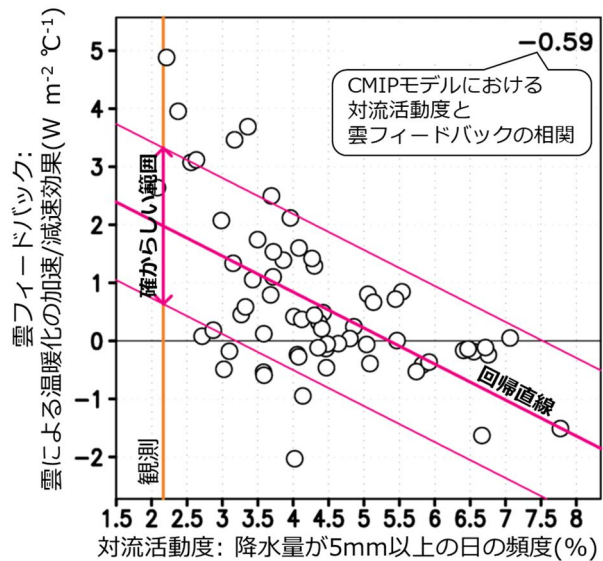


図 1: 対流活動度(%; 横軸)と雲フィードバック($\text{W m}^{-2} \text{ } ^{-1}$; 縦軸)の関係。各点が65個のCMIP気候モデルを表し、オレンジ線は衛星観測に基づく対流活動度を表します。ピンク線は回帰直線と雲フィードバックの ± 1 標準偏差の幅。

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だろうか。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

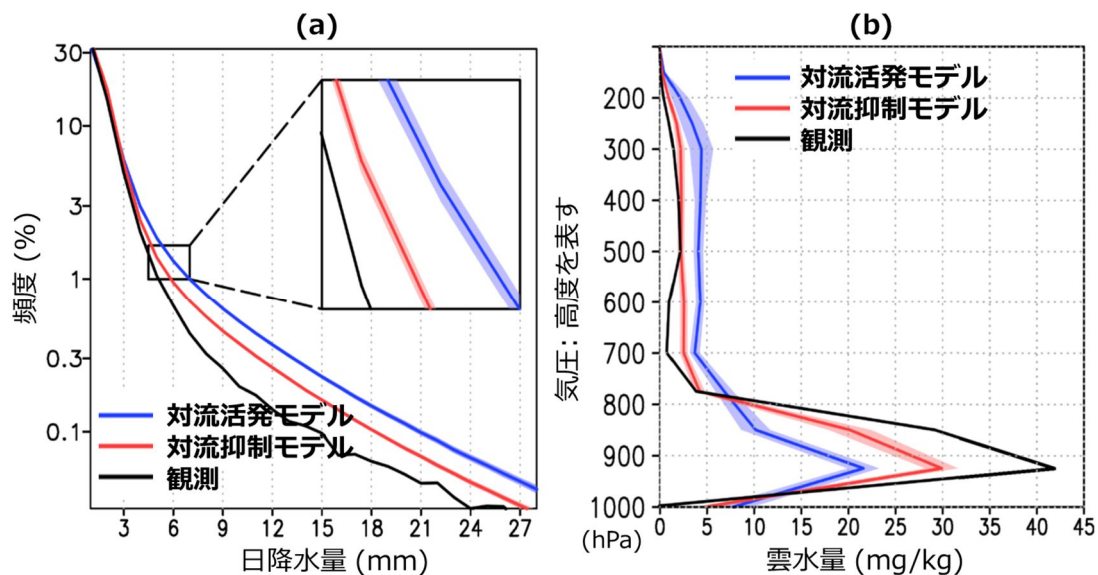


図 2: 亜熱帯海上における対流と雲の比較。(a)対流の活動度と関係する日平均降水量(横軸 mm day^{-1})の頻度(縦軸%)、(b)雲の量を示す雲水混合比(mg kg^{-1})の鉛直分布。対流活発モデルは青、対流抑制モデルは赤、観測は黒で表す。

ル(「対流抑制モデル」という)の比較を行う。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った。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する。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る。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が、それでも対流が過剰に活発で、下層雲が過少である。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する。この研究成果は、国際学術誌 *Environmental Research Letters* で発表された(Hirota et al. 2021)。

また、下層雲の役割の他に、上層雲(高度 10000m 程度)の地球温暖化予測にたいする役割も調べた。上層雲は温暖化の進行とともにその高度が高くなる。そうすると雲の温室効果がより効果的に働き、温暖化を加速する。しかし、多くの気候モデルでは、上層雲の表現も不十分であり、この正のフィードバックの働きが不十分であることがわかった。この研究成果は、国際学術誌 *Geophysical Research Letters* で発表された(Hirota et al. 2022)。

本研究課題から、CMIP 気候モデルによる地球温暖化予測において、大気の下層雲や上層雲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る。このことには、モデルの雲・降水プロセスのバイアスが関わっていることがわかった。雲・降水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る。その理解を深め、より適切にモデル化することが、より正確な温暖化予測に繋がると考えられる。

<引用文献>

Ceppi, P., F. Briant, M. D. Zelinka, and D. L. Hartmann, 2017: Cloud feedback mechanisms and their representation in global climate models. *Wiley Interdiscip. Rev. Clim. Change*, 8 (4), e465.

Shiogama, H. et al. 2012: Perturbed physics ensemble using the MIROC5 coupled atmosphere-ocean GCM without flux corrections: experimental design and results. *Climate Dyn*, 39 (12), 3041-3056.

Hirota, N., Ogura, T., Shiogama, H., Caldwell, P., Watanabe, M., Kamae, Y., and Suzuki, K. (2021). Underestimated marine stratocumulus cloud feedback associated with overly active deep convection in models. *Environmental Research Letters*, 16(7), 074015, <https://doi.org/10.1088/1748-9326/abfb9e>.

Hirota, N., T. Michibata, H. Shiogama, T. Ogura, and K. Suzuki (2022) Impacts of precipitation modeling on cloud feedback in MIROC6. *Geophysical Research Letters*, 49, <https://doi.org/10.1029/2021GL096523>.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 3件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 2件）

| | |
|--|-----------------|
| 1. 著者名 Hirota, N., T. Michibata, H. Shiogama, T. Ogura, and K. Suzuki | 4. 巻 49 |
| 2. 論文標題 Impacts of precipitation modeling on cloud feedback in MIROC6 | 5. 発行年 2022年 |
| 3. 雑誌名 Geophysical Research Letters | 6. 最初と最後の頁 - |
| 掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1029/2021GL096523 | 査読の有無 有 |
| オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である） | 国際共著 - |

| | |
|---|-----------------------|
| 1. 著者名 Shiogama H., Watanabe M., Kim H., and Hirota N | 4. 巻 602 |
| 2. 論文標題 Emergent constraints on future precipitation changes | 5. 発行年 2022年 |
| 3. 雑誌名 Nature | 6. 最初と最後の頁 612-616 |
| 掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1038/s41586-021-04310-8 | 査読の有無 有 |
| オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難 | 国際共著 - |

| | |
|---|-----------------|
| 1. 著者名 Hirota, N., Ogura, T., Shiogama, H., Caldwell, P., Watanabe, M., Kamae, Y., and Suzuki, K. | 4. 巻 16(7) |
| 2. 論文標題 Underestimated marine stratocumulus cloud feedback associated with overly active deep convection in models | 5. 発行年 2021年 |
| 3. 雑誌名 Environmental Research Letters | 6. 最初と最後の頁 - |
| 掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1088/1748-9326/abfb9e | 査読の有無 有 |
| オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である） | 国際共著 - |

〔学会発表〕 計6件（うち招待講演 0件/うち国際学会 2件）

| |
|--|
| 1. 発表者名 廣田 渚郎, 小倉 知夫, 塩竈 秀夫, Peter Caldwell, 渡部 雅浩, 釜江陽一, 鈴木健太郎 |
| 2. 発表標題 CMIP5/6における対流活動に着目した下層雲フィードバックの不確実性の制約 |
| 3. 学会等名 日本気象学会 |
| 4. 発表年 2021年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 Nagio Hirota, T. Ogura, H. Shiogama, P. M. Caldwell, M. Watanabe, Y. Kamae, and K. Suzuki |
| 2. 発表標題 Underestimated marine stratocumulus cloud feedback associated with overly active deep convection in models |
| 3. 学会等名 CFMIP 2021 (国際学会) |
| 4. 発表年 2021年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 廣田 渚郎, 小倉 知夫, 塩竈 秀夫, 渡部 雅浩, 釜江陽一, 鈴木健太郎 |
| 2. 発表標題 CMIP5/6モデルにおける過剰な深い対流と気候感度の過小評価 |
| 3. 学会等名 日本気象学会 |
| 4. 発表年 2020年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 Hirota, N., T. Michibata, H. Shiogama, T. Ogura, and K. Suzuki |
| 2. 発表標題 Impacts of Precipitation Modeling on cloud response to global warming in MIROC6 |
| 3. 学会等名 CFMIP 2022 (国際学会) |
| 4. 発表年 2022年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 廣田 渚郎, 道端 拓朗, 塩竈 秀夫, 小倉 知夫, 鈴木健太郎 |
| 2. 発表標題 MIROC6における降水過程精緻化による雲の温暖化応答への影響 |
| 3. 学会等名 JpGU 2022 |
| 4. 発表年 2022年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 廣田 渚郎, 道端 拓朗, 塩竈 秀夫, 小倉 知夫, 鈴木健太郎 |
| 2. 発表標題 MIROCにおける雲・降水プロセス高度化の雲フィードバックへの影響 |
| 3. 学会等名 日本気象学会 |
| 4. 発表年 2022年 |

〔図書〕 計1件

| | |
|---|-----------------|
| 1. 著者名 国際環境NGO FoE Japan 気候変動・エネルギーチーム | 4. 発行年 2021年 |
| 2. 出版社 合同出版 | 5. 総ページ数 176 |
| 3. 書名 気候変動から世界をまもる30の方法 | |

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

| 氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号) | 所属研究機関・部局・職 (機関番号) | 備考 |
|---------------------------|-----------------------|----|
|---------------------------|-----------------------|----|

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

| 共同研究相手国 | 相手方研究機関 |
|---------|---------|
|---------|---------|