

令和 2 年 6 月 17 日現在

機関番号：82101

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2017～2019

課題番号：17K05657

研究課題名(和文) 雲の対流圏調節の不確実性と瞬時放射強制力

研究課題名(英文) Uncertainty in tropospheric cloud adjustment and instantaneous radiative forcing

研究代表者

小倉 知夫 (Ogura, Tomoo)

国立研究開発法人国立環境研究所・地球環境研究センター・主任研究員

研究者番号：10370264

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,300,000円

研究成果の概要(和文)：大気中のCO₂濃度増加に伴う気候変化を全球気候モデル(GCM)を用いた数値シミュレーションで予測する際、シミュレートされた雲の対流圏調節が複数のGCM間でばらつく問題が知られている。雲の対流圏調節とは、CO₂増加がもたらす大気中の放射加熱により、地表気温が上昇する前に対流圏の雲が変化する現象を指す。雲の対流圏調節がGCM間でばらつく原因について、近年、提唱された仮説によると、CO₂の増加による放射加熱を各GCMで診断した値がばらつくことが一因とされている。この仮説を検証するため、5つのGCMを用いた数値実験の出力を解析した。得られた結果は仮説と整合的であり、仮説に対する信頼性は高まった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

気候変化への対策(緩和策や適応策)を立案するには、大気中のCO₂濃度が変化した場合に気候がどう変わるのか、気候モデルを用いた数値シミュレーションで予測する必要がある。しかし、このような予測は、複数のモデル間で結果が大きくばらつくという問題が知られている。本研究は、予測にばらつきを生じさせる要因の一つとして、気候モデルで診断される放射加熱のばらつきが重要であることを明らかにした。この成果は、予測のばらつきを低減させるための手がかりを与える点に、社会的意義がある。また、大気中のCO₂濃度増加に対して雲がどのように応答するか、という問題に対して回答の手がかりを与える点に、学術的意義がある。

研究成果の概要(英文)：Projection of climate change by multiple Global Climate Models (GCMs) exhibits a considerable spread among the GCMs, partly because of the spread in the simulated cloud adjustment induced by the atmospheric CO₂ increase. The cloud adjustment is a variation in cloud caused by the radiative heating of the atmosphere from the CO₂ increase, that occurs before an increase in surface air temperature. A study recently hypothesized that the spread in the cloud adjustment originates from the spread in the radiative heating of the atmosphere from the CO₂ increase, diagnosed with the multiple GCMs. To examine the hypothesis, we analyzed output of numerical experiments with 5 GCMs. The obtained results corroborated the hypothesis.

研究分野：気象学、気候学

キーワード：気候変化 放射強制力 対流圏調節 気候感度 雲 降水

様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

温室効果気体の増加に伴う気候変化を全球気候モデル(Global Climate Model, GCM)で予測する際、問題となるのは、CO₂増加に対する地表面気温の平衡応答または過渡的応答の推定値が複数のGCM間で大きく異なることである。このことが、地球温暖化の社会・経済的影響を評価する上で大きな不確実性をもたらしている。GCM間で気温の応答に違いが生ずる主な要因は雲フィードバックの違いであるが、雲の対流圏調節の違いも無視できないほどの寄与を示す。雲の対流圏調節とは、CO₂増加がもたらす放射加熱(瞬時放射強制力)により、地表面気温が応答する前に対流圏の雲が変化する現象である。こうした雲の変化が大気上端の放射を通して地表面気温に影響することがGCMのシミュレーション結果から知られている。

なぜ、雲の対流圏調節がGCM間でばらつくのか。対流圏調節の直接的な原因であるCO₂増加による放射加熱(瞬時放射強制力)に注目すると、GCM内部で計算される放射加熱の鉛直分布がモデル間で大きく違うことが既往研究により指摘されている。そして、この違いが雲の対流圏調節の違いと良く対応することが、3つのGCMの相互比較研究から示されている。つまり、雲の対流圏調節のばらつきの要因として、放射加熱のばらつきが浮上したことになる。しかし、ここまでの理解では、雲の変化と放射加熱の対応関係が良いと言うだけであるため、わずか3つのGCMで見られた対応関係は偶然によるものかも知れず、また、放射加熱のばらつきが雲の変化のばらつきをどの程度定量的に説明できるかも明らかでない。以上の研究動向を踏まえ、研究開始当初は、より多くのモデルで瞬時放射強制力を相互比較すること、および瞬時放射強制力の違いが雲の変化にどの程度の違いをもたらすか定量的に見積もることが必要とされていた。

2. 研究の目的

本研究の目的は、IPCC第3.5次報告に参加した5つのGCMについて、大気中CO₂増加による瞬時放射強制力が雲の対流圏調節にどの程度の不確実性(モデル間のばらつき)をもたらすか、明らかにすることである。具体的には、まず、1)5つのGCMにおいて診断された雲の対流圏調節を相互比較してモデル間のばらつきを定量化する。次に、2)5つのGCMから出力された瞬時放射強制力を1つのGCMに境界条件の熱源として与え、雲の応答を計算し、雲の応答が瞬時放射強制力の違いによってどの程度ばらつくかを定量化する。最後に、1)で定量化したばらつきのうちの程度を2)のばらつきで説明できるかを検討する。以上の検討に基づき、瞬時放射強制力が雲の対流圏調節のばらつきに寄与する、という仮説を検証する。

3. 研究の方法

本研究は下記に述べる(1)(2)(3)の手順を踏んで実施する。

(1) 5つのGCMで診断された雲の対流圏調節の相互比較

本研究では5つの大気GCM(CanAM4, HadGEM2-A, IPSL-CM5A-LR, MIROC3, MIROC5)に注目する。また、シミュレーション設定としては、観測データに基づく海面水温と海水被覆率を境界条件として与えるAMIP設定、および、それに加えて大気中CO₂濃度を4倍増するAMIP4xCO₂設定に注目し、各設定における年平均気候値を解析する。

まず、各GCMを用いて実施されたAMIP、AMIP4xCO₂シミュレーションの出力をEarth System Grid Federation(ESGF)のデータサーバより収集し、対流圏調節の値をAMIP4xCO₂ minus AMIPとして診断する。そして、各GCMの出力を標本と見なして、標本間のばらつきを定量化する。

(2) 5つの瞬時放射強制力に対する雲の応答の相互比較

5つの大気GCMを用いて診断されたCO₂濃度4倍増の瞬時放射強制力をESGFのデータサーバより収集する。そして、得られた瞬時放射強制力を1つの大気GCM(MIROC3)に境界条件の熱源として与え、雲の応答をシミュレートする。5つの熱源に対してそれぞれ得られた応答を標本と見なして、標本間のばらつきを定量化する。

(3) 上記(1)(2)で定量化した標本間のばらつきの比較解析

標本間のばらつきを(1)と(2)で比較し、両者の間に相関関係が認められるか確認する。もし相関関係が認められた場合、既往研究で提唱された仮説(瞬時放射強制力が雲の対流圏調節のばらつきに寄与する)が支持されたことになり、そうでない場合は、上記仮説が普遍的に成り立つものではないことが分かる。

4. 研究成果

標本間のばらつきを前項の(1)と(2)で比較した結果、(1)のばらつきと(2)のばらつきの間には相関が認められ、前者を後者である程度説明できることが分かった。例として大気上端の雲放射効果に注目すると、相関係数は正味で0.96、短波成分で0.72、長波成分で0.60であった(図1)。従って、正味の雲放射効果においては(1)の分散の91%を(2)で説明可能である。(1)と(2)の間に相関が生じる仕組みを調べたところ、瞬時放射強制力による加熱が対流圏下層に強く加わるGCM(MIROC3)では下層雲の減少が顕著であり、雲放射効果が正に大きくなることが分かった。逆に、対流圏上層に加熱が強く加わるGCM(IPSL-CM5A-LR)では上層雲の減少が顕著となり、雲放射効果が負に大きくなる様子が見られた。以上の結果は、既往研究で提唱された仮説(瞬時放射強制力が雲の対流圏調節のばらつきに寄与する)と整合的である。従って、仮説に対する信頼性は高まった。

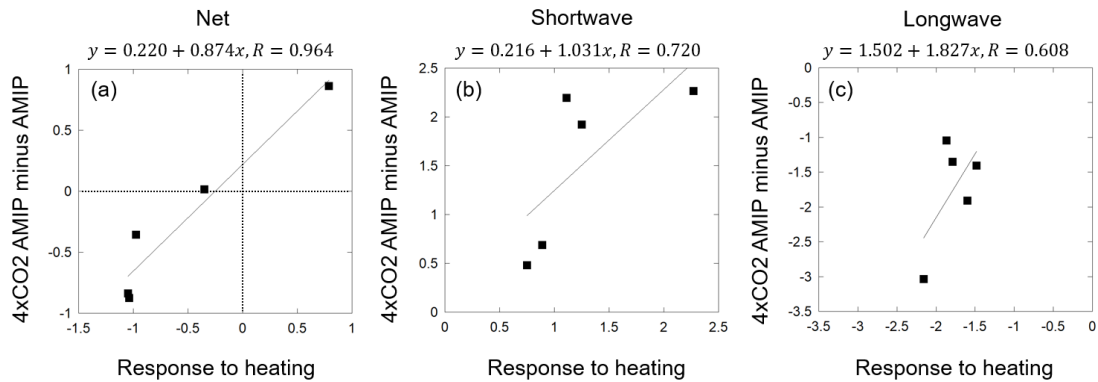


図1 大気上端における雲放射効果の全球年平均値。縦軸は AMIP4xCO₂ minus AMIP として診断された対流圏調節の値。四角印は5つの GCM の出力を示す。横軸は瞬時放射強制力に対する応答を MIROC3 でシミュレートした値。四角印は5つの GCM で診断された瞬時放射強制力に対する応答を示す。(a)正味、(b)短波成分、(c)長波成分。各パネルに回帰直線、回帰方程式、相関係数を示す。

(1) のばらつきと (2) のばらつきの間類似性が見られるという特徴は、雲放射効果だけに留まらず、気温、水蒸気量、相対湿度、雲量にも認められた。例えば、気温の緯度-高さ分布に注目した場合、(1) の標本においては、MIROC3 の対流圏中層に気温の低下が見られ、IPSL-CM5A-LR では対流圏上層に気温上昇の強い極大が見られた。しかし、他の GCM ではそのような特徴は見られなかった。このような標本間のばらつきはすべて、(2) の標本でも共通して見られた。加えて、(1) のばらつきと (2) のばらつきは定量的に同じ程度であった。以上の結果も、既往研究で提唱された仮説と整合的である。

一方、降水量の地理分布に注目した場合、(1) のばらつきと (2) のばらつきの間類似性は、気温や水蒸気量の場合と比べて不明瞭であった。そのことは (1) と (2) の間の相関係数に表れており、緯度-経度の各格子で計算された値のうち 10% 有意水準で 0 と異なる領域は地球全体の中で小さな割合しか占めなかった。しかし、相関係数が 0 と異なる領域は面積が小さいながらも存在しており、こうした領域では、瞬時放射強制力が降水の応答のばらつきに寄与している様子が見られた。例えば、熱帯中央太平洋の一部領域において (1) と (2) の相関係数は 0.91 に達した。この領域では、(2) のシミュレーションで MIROC3 を 5 種類の異なる熱源で駆動した結果、大気循環の応答にばらつきが生じ、そのことが大気境界層における水蒸気の水平輸送の収束に影響して降水の応答にばらつきが生じていた。

瞬時放射強制力が複数のモデル間でばらつくことは地表気温の予測に不確実性が生じる要因の一つであるが、それに加えて、温暖化に伴う降水量変化の予測においても不確実性に寄与している可能性が示唆された。従って、各 GCM において瞬時放射強制力の診断精度を向上できれば、地表気温と降水量の両方の予測で信頼性が高まり、共便益が生じる可能性がある。ただし、本研究で調査した GCM の数は 5 つであり、標本数が依然として少ないことに注意が必要である。今後はより多くの GCM を調査対象に加えることで標本数を増やし、本稿で報告した内容の頑健性を検討することが重要である。

本研究では、当初の計画に含まれていないものの内容的に関係が深いテーマについて、追加的な調査を実施した。そこから得られた成果を 2 つ、以下に報告する。

第一に、雲の対流圏調節が地域、季節によって異なる理由について理解を深めた。大気 GCM でシミュレートされた雲の対流圏調節の特徴として、相対湿度の低下に伴い海上で全雲量が減少する傾向が知られている。しかし、異なる地域や高度、季節について詳しく調べると、全ての場合において一様に雲量が減少している訳ではないことが分かる。とりわけ、夏季の亜熱帯海洋上(特に北半球)では下層雲が顕著に増加しており、対流圏調節に関する従来の知見では説明しきれない部分が残っていた。そこで、対流圏調節を引き起こす原動力、すなわち大気中 CO₂ 濃度 4 倍増による瞬時放射強制力に注目し、異なる地域や高度、季節について値を調べた。その結果、CO₂ 濃度増加の地理分布が一様であっても、瞬時放射強制力の地理分布は一様でないことが分かった。すなわち、気温の低い中高緯度よりも気温の高い熱帯で強い傾向が見られた。また、深い対流が活発で対流圏が比較的湿潤な領域よりも、下層雲が広がり対流圏が比較的乾燥している亜熱帯域の方が強い傾向が見られた。瞬時放射強制力の値は季節によっても異なっており、亜熱帯域に注目した場合、夏季の加熱率が冬季を上回っていた。このような、瞬時放射強制力の季節変化が一因となり、対流圏下部の静力学的安定度の強化や、それに伴う下層雲の増加にも明瞭な季節性(冬季よりも夏季で顕著となる)が現れることが分かった。

第二に、対流圏調節により降水が北アフリカ西部で増加する仕組みについて理解を深めた。大気中の CO₂ 濃度増加により引き起こされる対流圏調節においては、降水量が海上で減少し、熱帯陸上で増加する傾向が知られている。とりわけ、西部アフリカモンスーンに伴う降水は増加が

顕著であることから、どのような仕組みによるものかが既往研究で議論されてきた。この降水量の増加は、北アフリカ～西アジア上空における対流圏中～上層の気温上昇に伴って生じており、気温上昇域では地表気圧が低下すると共に、対流圏下層を南から北へ向かう夏季の季節風が強化される。本研究では、CO₂濃度の増加が地理的に一様であるのに、なぜ、気温上昇が北アフリカ～西アジア上空で特に目立つのかを検討した。その結果、CO₂増加による放射加熱（瞬時放射強制力）は上に述べた領域で特に大きい訳ではなく、気温上昇の地理分布を説明できないことが分かった。従って、気温上昇が北アフリカ～西アジア上空で特に大きいのは、放射加熱そのものではなく加熱に対する大気の応答が地理的に一様でないことが原因である、と示唆された。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 4件/うち国際共著 3件/うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 Chadwick, R., D. Ackerley, D. Dommenget, and T. Ogura	4. 巻 124
2. 論文標題 Separating the influences of land warming, the direct CO2 effect, the plant physiological effect and SST warming on regional precipitation changes	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Journal of Geophysical Research: Atmospheres	6. 最初と最後の頁 624-640
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） https://doi.org/10.1029/2018JD029423	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 該当する
1. 著者名 Kamae, Y., R. Chadwick, D. Ackerley, M. Ringer, and T. Ogura	4. 巻 52
2. 論文標題 Seasonally variant low cloud adjustment over cool oceans	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Climate Dynamics	6. 最初と最後の頁 5801-5817
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） doi:10.1007/s00382-018-4478-7	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 該当する
1. 著者名 Ogura, T., H. Shiogama, M. Watanabe, M. Yoshimori, T. Yokohata, J. D. Annan, J. C. Hargreaves, N. Ushigami, K. Hirota, Y. Someya, Y. Kamae, H. Tatebe, and M. Kimoto	4. 巻 10
2. 論文標題 Effectiveness and limitations of parameter tuning in reducing biases of top-of-atmosphere radiation and clouds in MIROC version 5	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Geoscientific Model Development	6. 最初と最後の頁 4647-4664
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） https://doi.org/10.5194/gmd-10-4647-2017	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 該当する
1. 著者名 Tatebe, H., T. Ogura, T. Nitta, Y. Komuro, K. Ogochi, T. Takemura, K. Sudo, M. Sekiguchi, M. Abe, F. Saito, M. Chikira, S. Watanabe, M. Mori, N. Hirota, Y. Kawatani, T. Mochizuki, K. Yoshimura, K. Takata, R. O'ishi, D. Yamazaki, T. Suzuki, M. Kurogi, T. Kataoka, M. Watanabe, and M. Kimoto	4. 巻 12
2. 論文標題 Description and basic evaluation of simulated mean state, internal variability, and climate sensitivity in MIROC6	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Geoscientific Model Development	6. 最初と最後の頁 2727 ~ 2765
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） https://doi.org/10.5194/gmd-12-2727-2019	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4件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 3件）

1. 発表者名 小倉知夫, M. J. Webb, 渡部雅浩, F. H. Lambert, and 對馬洋子
2. 発表標題 瞬時放射強制力に起因する降水予測の不確実性
3. 学会等名 日本気象学会秋季大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Kamae, Y., R. Chadwick, D. Ackerley, M. Ringer, and T. Ogura
2. 発表標題 Seasonally variant low cloud adjustment over cool oceans
3. 学会等名 CFMIP Meeting 2018 (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Ogura, T., M. J. Webb, M. Watanabe, F. H. Lambert, and Y. Tsushima
2. 発表標題 Instantaneous radiative forcing as a contributing factor to the inter-model difference in precipitation adjustment
3. 学会等名 2017 Cloud Feedback Model Intercomparison Project meeting (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Ogura, T., and M. J. Webb
2. 発表標題 A new method for understanding inter-model difference in low cloud feedback
3. 学会等名 CFMIP Meeting 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

研究者紹介

<https://www.nies.go.jp/researchers/100120.html>

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
--	---------------------------	-----------------------	----