

研究課題名：雲・降水プロセスに着目した気候変動予測の不確実性に関する研究

課題代表者：国立環境研究所地球システム領域 廣田渚郎
共同研究者：国立環境研究所地球システム領域 塩竈秀夫・小倉知夫・林未知也
国立環境研究所気候変動適応センター 石崎紀子
東京大学大気海洋研究所 渡部雅浩
岡山大学大学院自然科学研究科 野沢 徹
東京大学生産技術研究所 金 炯俊・日比野研志・新田友子
株式会社三菱総合研究所 井上 剛・大山剛弘・田中良明
気象庁気象研究所 川瀬宏明
株式会社パスコ 姫木祐太郎
エム・アール・アイリサーチアソシエイツ株式会社 櫻木俊輔
茨城大学理工学研究科 若月泰孝
東京海洋大学学術研究院 関口美保

実施年度：令和2年度～令和4年度

1. 研究目的

2021年8月に、IPCC第6次報告書が発表され、世界の研究機関で開発されている気候モデル(CMIP6)による気候変動予測シミュレーションの結果が利用された。しかし、CMIP6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、CMIP6モデルにおける、二酸化炭素倍増時の全球地表気温の上昇量で定義される“気候感度”には1.8～5.6°Cの幅がある。予測不確実性の最大の要因は、温暖化に伴って雲の温室効果/日傘効果が、温暖化を加速/減速させる働き(雲フィードバック)がモデルごとに異なることにある(Zelinka et al., 2020)。

本課題の研究目的は、気候モデルによる気候変動予測シミュレーションを行い、気候変動とその不確実性について、雲・降水プロセスに着目して調べることである。モデルは、主にMIROCを用いる。MIROCは、1990年代からCMIPに参加して、IPCCに貢献してきた気候モデルで、国立環境研究所を含む日本の研究グループで開発されている。近年は、次期CMIP7に向けて、特に雲・降水プロセスを中心に改良が進められている。例えば、これまで診断的に扱っていた雨と雪の降水粒子を予報変数として扱い、それらの雲との相互作用、放射プロセスへの影響をより精密に表現できる様になった(予報型降水スキーム)。これらの改良が、モデルによる気候の表現性能や気候変動予測にどの様に影響するのかを調べる。

2. 研究計画

MIROCの大気モデルAGCMで、従来の診断型降水スキーム(DIAG)と新しく開発された予報型降水スキ

ーム(PROG)を用いた場合を比較する。DIAGとPROGの現在気候実験と温暖化実験を行い、それらの雲フィードバックを比較する。特に雲の日傘効果や温室効果に関わる、雲の量、高さ、厚さの温暖化への応答の違いを調べることで、フィードバックプロセスの理解を深めることができる。さらに、世界のCMIPモデルとの比較を行い、MIROCに見られたプロセスの違いが、CMIPモデルの気候感度の不確実性をどの程度説明できるのかを調べる。

また、既存の気候実験データを用いた影響評価研究も行う。特に生活との関りが大きい降水の変化に着目する。その成果は一般の方にもわかりやすい形で発表する。

3. 進捗状況

課題計画時の目標はおおむね達成されている(昨年の報告会と年報)。MIROCで精緻化された予報型降水スキームの雲フィードバックと気候感度への影響と、そのCMIPモデルとの比較についての論文を発表した(Hirota et al., 2022)。その他にも気候モデルによる気候変動予測の不確実性に関する研究や、温暖化の降水への影響についての論文を多数発表した。

昨年の報告会から、PROGとDIAGの雲フィードバックの信頼性についての調査を更に進めた。World Climate Research Programme (WCRP)は、これまでの研究の知見を統合・発展させることで、雲フィードバックの“確からしい推定値”を見積もった(Sherwood et al., 2020)。DIAGとPROGの雲フィードバックをこの確からしい推定値と比較した。DIAGでは、雲の高さフィードバック(図1の上から1段目)と熱帯海上の

下層雲量フィードバック（図1の2段目）がWCRPの推定値に比べて弱かったが、PROGではそれらが強くなり、WCRPの推定値と整合的になった。

予報型降水スキームの導入によるMIROCの雲・降水プロセスの精緻化は、雲フィードバックの働きをより適切なものに改善した。一方、予報型降水スキームでは、上層雲量が多くなり（Michibata et al., 2019）、その温室効果によって、モデル大気のエネルギーバランスが崩れるなどの問題が発生した。様々な検討を行った結果、これはMIROCの放射スキームのバイアスに起因する可能性があることが分かってきた。

MIROCの放射スキームMstrnX（Sekiguchi & Nakajima 2008）を改良したMstrn11の開発を開始した。MstrnXでは、SW放射が地表に+3.5W/m²過剰に入射するバイアスがあった。MstrnXから放射パラメータを更新することで、このバイアスを+0.5W/m²まで軽減することができた。

今年度は計算機資源の大部分は予報型降水の大気海洋結合モデルMIROCの開発のために利用した。気候感度・雲フィードバックと温暖化の影響評価について

の研究で用いられた実験データは、以前に国立環境研究所のスーパーコンピュータなどをを利用して計算したものである。

4. 今後の計画

ここまでMIROC開発では、モデルの雲・降水プロセスや、気候変動に重要な雲フィードバックの表現が改善された。一方で、大気のエネルギーバランスが崩れるなどの問題が発生してしまった。今後は、新しい放射スキームの改良を完了させ、それをMIROCに実装する。その上で、雲・降水・対流・乱流・放射プロセスを再度調整し、大気海洋結合モデルMIROCの気候変動表現と予測信頼性の向上を目指す。

5. 計算機資源の利用状況（2021年11月1日～2022年10月31日）

実行ユーチューブ数: 18

VE時間積 v_debug: 53.18 hours, v_normal: 209,995.71 hours, 計: 210,048.89 hours (全体のVE時間積に対する占有率: 16.6 %)

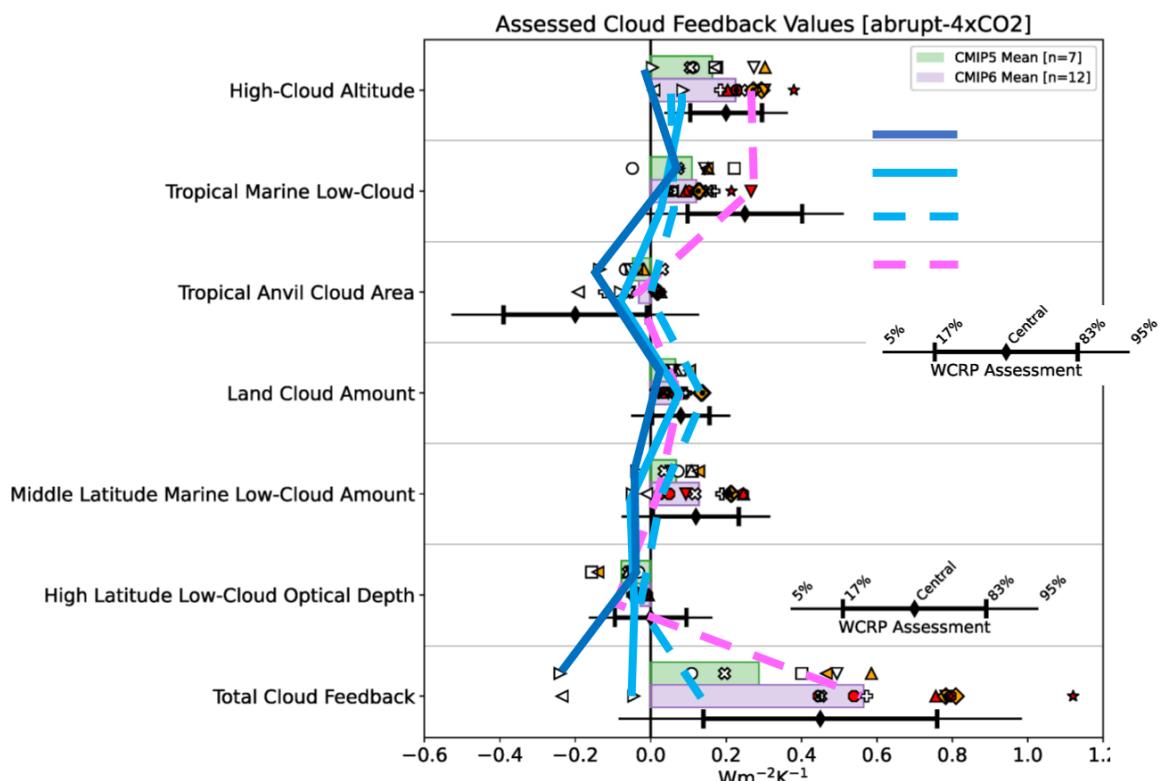


図1. 気候モデルの雲フィードバックのWCRPによる推定値（Sherwood et al. 2020）との比較。黒線がWCRP推定値とその不確実性の幅。MIROC5(青実線)とMIROC6(水色実線)、DIAG(水色破線)、PROG(ピンク破線)は折れ線です。DIAGとPROGは大気のみのAGCM実験に基づくもので、他は大気海洋結合モデルCGCM実験に基づく。上段から下段に、雲の高さフィードバック、熱帯海上の下層雲フィードバック、熱帯の上層雲量フィードバック、陸上の雲量フィードバック、中緯度海上の下層雲量フィードバック、高緯度の下層雲の光学的厚さのフィードバック、合計の雲フィードバック。