

Environment Research and Technology Development Fund

環境研究総合推進費 終了研究成果報告書

2RF-2003 地球温暖化予測のための時空間シームレスな降雨・降雪スキームの開発
(JPMEERF20202R03)

令和2年度～令和3年度

Development of a Spatio-Temporal Seamless Precipitation Scheme for Global Warming Prediction

〈研究代表機関〉

国立大学法人岡山大学

〈研究協力機関〉

国立大学法人東京大学大気海洋研究所

国立研究開発法人国立環境研究所

Jet Propulsion Laboratory, California Institute of Technology, California, USA

Center for Climate Systems Research, Columbia University, New York, NY, USA

NOAA/Earth System Research Laboratory, Boulder, Colorado, USA

Met Office Hadley Centre, Exeter, UK

○図表番号の付番方法について

「Ⅰ．成果の概要」の図表番号は「0．通し番号」としております。なお、「Ⅱ．成果の詳細」にて使用した図表を転用する場合には、転用元と同じ番号を付番しております。

「Ⅱ．成果の詳細」の図表番号は「サブテーマ番号．通し番号」としております。なお、異なるサブテーマから図表を転用する場合は、転用元と同じ図表番号としております。

令和4年5月

目次

I. 成果の概要	1
1. はじめに（研究背景等）	
2. 研究開発目的	
3. 研究目標	
4. 研究開発内容	
5. 研究成果	
5-1. 成果の概要	
5-2. 環境政策等への貢献	
5-3. 研究目標の達成状況	
6. 研究成果の発表状況	
6-1. 査読付き論文	
6-2. 知的財産権	
6-3. その他発表件数	
7. 国際共同研究等の状況	
8. 研究者略歴	
II. 成果の詳細	
II-1 地球温暖化予測のための時空間シームレスな降雨・降雪スキームの開発 （国立大学法人岡山大学）	14
要旨	
1. 研究開発目的	
2. 研究目標	
3. 研究開発内容	
4. 結果及び考察	
5. 研究目標の達成状況	
6. 引用文献	
III. 研究成果の発表状況の詳細	28
IV. 英文Abstract	30

I. 成果の概要

課題名 2RF-2003 地球温暖化予測のための時空間シームレスな降雨・降雪スキームの開発

課題代表者名 道端 拓朗 (国立大学法人岡山大学学術研究院自然科学学域(理)・准教授)

重点課題 主:【重点課題⑨】地球温暖化現象の解明・予測・対策評価
副:

行政要請研究テーマ(行政ニーズ) 非該当

研究実施期間 令和2年度～令和3年度

研究経費

10,647千円(合計額)

(各年度の内訳:令和2年度:5,382千円、令和3年度:5,265千円)

研究体制

(サブテーマ1)地球温暖化予測のための時空間シームレスな降雨・降雪スキームの開発(国立大学法人岡山大学)

他のサブテーマはない。

研究協力機関

国立大学法人東京大学大気海洋研究所

国立研究開発法人国立環境研究所

Jet Propulsion Laboratory, California Institute of Technology, California, USA

Center for Climate Systems Research, Columbia University, New York, NY, USA

NOAA/Earth System Research Laboratory, Boulder, Colorado, USA

Met Office Hadley Centre, Exeter, UK

本研究のキーワード 数値気候モデル、エアロゾル・雲相互作用、降水微物理、放射強制力、人工衛星観測、衛星シミュレータ、雲フィードバック、気候感度

1. はじめに（研究背景等）

科学的知見に基づいた適切な環境政策・地球温暖化対策を推進するにあたって、大気大循環モデル（GCM）は欠かせないツールとしての役割を担っている。気候変動予測を行う際、複数のGCMや排出シナリオを用いて評価することが標準的な手法になっているが、推定される平衡気候感度（CO₂濃度が倍増した際の地上気温の昇温）は1.5～5°Cと、依然としてGCM間のばらつきが大きい（Sherwood et al., 2014）。また、温室効果を相殺する役割を持つエアロゾル放射強制力（放射の散乱・吸収特性を介して正味で気候を冷却する効果）についても見積もりの不確実性が大きい（Lohmann, 2017）。パリ協定において掲げられた「産業革命以前からの世界の平均気温上昇を2°C未満に抑える」という地球環境保全に関する目標を実現するためには、数値モデルが抱える不確実性を狭める努力が必要不可欠である。

これらの不確実性をもたらす最大の要素の一つは、雲・降水・放射過程に伴う気候へのフィードバックである（Zelinka et al., 2020）。時空間解像度が粗いGCMにおいては、雲・降水素過程を半経験的な手法に頼って表現しており、その結果としてGCMに共通して見られる系統誤差が複数存在する。気候変動予測における致命的な問題点として、

- 1) 降水の頻度を過大に評価し、強度を過小評価するバイアス（Jing et al., 2017）
- 2) 雲量を過小に評価するバイアス（Nam et al., 2012）
- 3) エアロゾル変化に対して雲が過剰に応答するバイアス（Ghan et al., 2016）

が報告されている。信頼性の高い気候変動予測・環境変動予測を実施するためには、現在・過去・将来気候を正しいメカニズムで再現ができることが前提条件であり、そのためには物理素過程を部品レベルで高度化することが必須である。

こうした数値気候モデルに共通して見られる系統誤差が解消されてこなかった背景の一つに、全球規模の衛星観測データを数値モデルの開発・改良に役立てる際の評価手法の不整合がある。具体的には、衛星観測に特有のリトリバルアルゴリズムに起因する不確実性である。例えば、観測によって得られる雲量は、衛星センサー固有の検出感度に左右されるため、数値モデルが表現する雲量とは厳密に定義が異なる。こうした衛星観測と数値モデルの間の評価の不整合を取り除くためのツールとして用いられているのが、衛星シミュレータである（Masunaga et al., 2010）。衛星シミュレータは、数値モデルが表現する仮想地球内で人工衛星が観測を行なった場合に、どのようなリトリバル結果が得られるかを再現するソフトウェアであり、衛星センサー特有の検出感度に起因する誤差を考慮に入れたモデル評価が可能になる。こうしたツールの利用が国際的にも広く推奨されている一方、まだ比較的新しいツールであることもあり、衛星観測データの特性を有効に活用したモデルの改良・開発は未だに不十分である。

したがって、上記の系統誤差は単に数値モデルの物理過程を高度化することで解消されるものではなく、衛星から得られる情報を最大限に活用することが要求される。特に、雲量や放射強制力といったマクロな気候場の特性と、エアロゾル・雲・降水に至るミクロな粒子系の特性とが、どのように系統誤差とリンクしているかを解明する必要がある。ほとんど全てのGCMが抱える系統誤差を解消するためのモデル開発を国内外のモデリングセンターに先駆けて実施することで、信頼性の高い次世代の地球環境予測・気候変動予測に貢献できる可能性が非常に高い。

2. 研究開発目的

上記の背景を踏まえ、前節に記載の系統誤差1)～3)の解消が可能なモデルの開発を目指す。本研究課題では、課題代表者がこれまで開発を推進してきた先端的な雲・降水スキームを基盤として、地球温暖化予測の精度向上を目指した物理過程の更なる高度化に取り組む。GCMが特に苦手とする、サブグリッドの降水の変動性を陽に考慮した物理ベースなパラメタリゼーションを導入することにより、空間解像度へのモデル依存性の軽減を目指す。また、従来型モデルで陽に表現されていなかった降水粒子を予報変数化し、落下過程を精緻に取り扱うことで、時間解像度へのモデル依存性の軽減も併せて目指す。

このような時空間シームレスなパラメタリゼーションは、将来的なモデルの高解像度化の際に特に重要な役割を担い、集中豪雨などの極端現象や領域規模での気候影響評価への応用が大きく進展するものと期待される。それに加え、全球規模の長期的な気候変動予測においても、気候が変化した時の雲・降水・放射特性の変化をより物理的に表現することにつながることを期待される。

モデルの高度化に際しては、複数の人工衛星によって得られた素過程の情報を最大限に利用するよう、衛星シミュレータを用いる。これにより、モデルの高度化と性能評価を反復的に実施することで、短期間で効率的なモデル開発を推進する。また、多くのモデルが抱える系統誤差をメカニズムレベルで解明することで、数値モデルの不確実性を適切に考慮に入れた環境政策への貢献に寄与する。

これらの物理素過程の高度化は、Future Earthが掲げるテーマの一つである、地球が自然現象と人間活動によってどう変化しているか（Dynamic Planet）、という学術的問いに対する理解深化に貢献するものである。数値モデル開発を基軸として、複数の衛星データおよび対応する衛星シミュレータを用いたモデルの評価・改良を首尾一貫して推進することで、実用性と応用性を備えた高精度の地球環境予測・気候変動予測に資することを目的とする。

3. 研究目標

全体目標	地球温暖化予測を実施する上で重要な雲・降水のサブグリッドスケールのモデリング手法を、大規模計算にも適用可能な低い計算コストで実装し、高精度の環境変動予測・気候変動予測に資する。
サブテーマ1	地球温暖化予測のための時空間シームレスな降雨・降雪スキームの開発
サブテーマリーダー/所属機関	道端拓朗／国立大学法人岡山大学
目標	サブグリッドスケールの雲・降水分布をモデル化するため、CloudSatおよびMODISによる衛星観測データを複合的に解析し、降水強度が解像度に依存しない空間シームレスな降水スキームを開発する。その際に、計算コストに大きな割合を占める降水落下過程を時間ステップに依存しない時間シームレスなスキームに更新し、開発前のバージョンから20%低コスト化することを目指す。モデルの高度化による気候影響の評価として、降水素過程およびエアロゾル放射強制力を定量的に見積もり衛星観測との比較を実施する。特にバイアスが大きく気候変動予測の信頼性を支える重要な指標である雲量については、全雲量および高度ごと（低層・中層・高層）の雲量を、GOCCP衛星観測に対して誤差5%以内に収めることを達成目標とする。

4. 研究開発内容

図0.1に、本研究課題の全体像を示す。本課題における最終目標は、GCMの最大の不確実要素となっている雲・降水過程のモデリング手法を高度化し、信頼性の高い地球温暖化予測・気候変動予測に資することである。この目的の達成のため、以下の3つの研究軸に沿ってモデルの高度化を推進した（丸数字の番号は、図0.1の番号に一致する）。

なお、開発したスキームは、東京大学大気海洋研究所・国立環境研究所・海洋研究開発機構を主体として開発されている全球大気海洋モデルMIROCに実装を行い、国内外に向けて広く成果発信を行った。

地球温暖化予測のための時空間シームレスな降雨・降雪スキームの開発

代表者：道端拓朗（岡山大学）

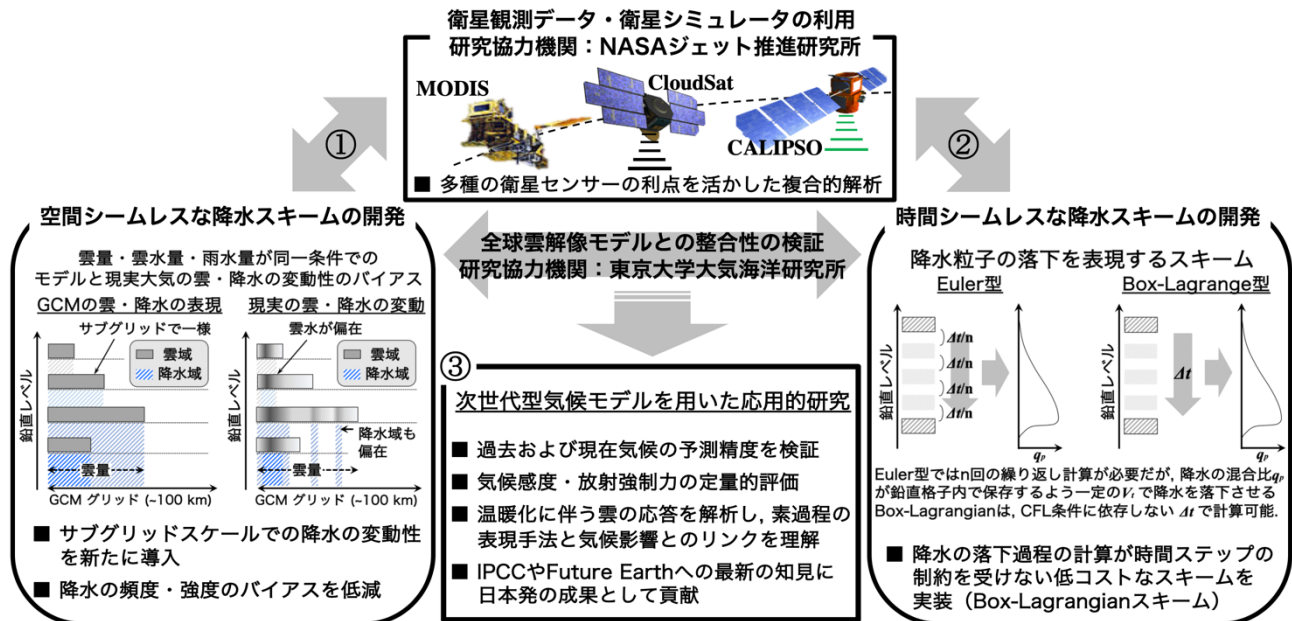


図0.1 本研究課題で実施した研究開発内容の全体像

① サブグリッドスケールの降水の変動を陽に考慮したパラメタリゼーションの開発

現状のGCMでは、雲のサブグリッドの変動性は陽に考慮している一方、降水は雲域全体から一様に生成される仕様となっている。しかし現実には、雲のタイプに依存し雲域の一部で降水が生じる場合が一般的であり、モデルの降水バイアスの度合いは水平解像度に依存する。サブグリッドの降水の変動性（空間不均一性）を考慮することで降水バイアスの解像度依存性を低減する、空間シームレスな降水スキームを構築した。

具体的には、Hotta et al. (2020)で開発された雲のサブグリッドスキームを最新版のMIROC6に搭載し、雲の不均一性を考慮して降水生成効率や雲アルベドが調整される仕様に更新した。また、従来型モデルでは雲域全体から降水が生じる仮定がベースとなっていたが、サブグリッドの降水分布も可変とする仕様に改良したことで、雲・降水の空間不均一性を考慮に入れた降水生成が原理上可能となった。

また、エアロゾル変化に対して雲が過剰に応答するという、従来のGCMで致命的な問題の改善にも取り組んだ。問題の本質は、モデル内でエアロゾル数に対して単調に雲が増加するような定式化が置かれている点である。これを改善するために、衛星データから得られたエアロゾルに対する雲の感度の空間不均一性を考慮に入れた、新しい降雨生成スキームを開発し、全球モデルMIROCに実装を完了した。

② 時間ステップに依存しない降水の落下スキームの導入

降水過程において計算コストのウェイトを比較的大きく占めるのが、降水の鉛直落下の計算である。これは、降水粒子の落下を安定に計算するために、鉛直方向のCFL条件を満たすよう時間ステップを短くとる必要が生じるためである。この問題を回避するために、降水の落下が時間ステップに制約を受けない時間implicitな降水落下の表現手法を導入し、時間シームレスな降水落下スキームを構築した。

また、従来型の数値気候モデルの大きな構造上の問題として、降雨・降雪を診断的に取り扱う手法を採用している点が挙げられる。これは、降雨・降雪がモデルの1回の時間ステップ（約20分程度）で全て地表に落下すると仮定した表現手法であるが、ゆっくりと落下する霧雨や雪片には実際には厳密に当てはまらない仮定であるほか、時間ステップを短く取った場合には大気中から降水がどんどん除去されてしまうなど、シミュレーション結果が時間解像度に大きく依存する問題を抱えていた。これを解消す

るために、降雨・降雪の予報変数化を実施したことに加え、気候モデルでは考慮されていない雹・あられについても併せて予報変数として導入した。このように、エアロゾルから雲・降水に至る粒子系をシームレスに取り扱うことができるよう、モデリング手法の枠組みを刷新した。雹・あられは、降雨・降雪と比較して落下速度が速く、大気が不安定な条件下で強い降水をもたらす局地降水の再現性向上が期待される。また、雲内で生成される雹・あられは雷の発生に重要な役割を持っているため、全球規模の長期的な雷発生頻度の定量的な評価に応用可能であり、従来型モデルでは評価できなかった新しい情報が原理上入手可能となった。

③ 開発した新しい雲・降水パラメタリゼーションを用いた気候予測精度の評価

上記により精緻化したモデルを用いて、現在気候での雲・降水の再現性が観測事実と整合的か調査した。数値モデルと衛星観測の比較には、衛星シミュレータを用いて実施した。その結果、雲量を過小評価する系統誤差が大幅に改善されただけでなく、降水頻度・強度のバイアス改善にも重要な役割を持つことがわかった。

気候予測における重要な指標である、エアロゾル・雲による有効放射強制力（エアロゾル変化が雲場を変調することで地球を冷却する度合い）への影響を見積もるために、産業革命以前のエアロゾル条件下での実験も実施した。また、平衡気候感度（CO₂濃度が倍増した際の地上気温の昇温）を推定するために、大気海洋モデルを用いた温暖化シミュレーションも併せて実施した。

開発した新モデルによって得られたシミュレーション結果の一部は、国際的なモデル間相互比較プロジェクトである AeroCom Phase III に提出した（代表：Lindsay Lee, 英国Leeds大学）。

研究計画書に記載していた上記3項目に加え、研究開始当初には計画していなかった、衛星シミュレータのアルゴリズムの検証および改良にも着手した。これは、初年度後半である2020年11月に、米国コロンビア大学のGregory Cesana博士から提案され、開始した共同研究である。本課題で降水粒子を陽に表現するモデルの開発が大幅に進んだことで、人工衛星による雲のリトリーバルに降水粒子が及ぼす影響の評価に役立てるプロジェクトである。これは、降水粒子を大気中に保持しない従来型の数値モデルでは評価自体ができなかった過程であり、気候モデルコミュニティ全体として盲点となっていた不確実性でもある。研究成果の節で詳述の通り、降水粒子が衛星による雲のリトリーバル結果を大きく変えることが明らかとなり、気候感度の推定に影響をもたらしうる可能性が示唆されたほか、Cesana博士にデータ提供を行った。

これらそれぞれの項目について、各年度の具体的な実施内容を表0.1に示す。上述の通り、モデル開発とモデル評価の双方の観点から反復的に研究を推進したことで、効率的にモデルの性能向上につなげることが可能になった。

表0.1 年度ごとの研究実施内容の概要

実施年度	スキーム開発・モデルの高度化	モデルの性能評価
2020年度	● SCM^{*1}を用いた理想実験・スキーム検証 ● パラメータ・解像度への感度の調査	● 複数の人工衛星観測データの解析
2021年度	● 全球モデルへの実装・感度実験 ● パラメータの最適化	● 衛星観測シミュレータを用いたモデルの評価・不確実性の理解
	● CO₂倍増実験による気候感度^{*2}の定量化と、微物理スキームへの依存性の確認 ● エアロゾルに対する雲量の応答の評価や、エアロゾル有効放射強制力^{*3}の定量化	

^{*1}SCM: Single-Column Model（鉛直1次元モデル）

^{*2}気候感度: CO₂濃度が倍増した際の地上気温の昇温

^{*3}エアロゾル有効放射強制力: エアロゾル変化が雲場・放射場を変調することで地球を冷却する度合い

5. 研究成果

5-1. 成果の概要

本課題では、数値気候モデルの最大の不確実要素となっている雲・降水過程のモデリング手法を高度化し、信頼性の高い地球温暖化予測・気候変動予測に資することを目的としている。国内外多くの数値モデルが抱える雲量の過小バイアスや、降水生成の頻度・強度における系統誤差を解消するには、数値モデル内で仮定されている雲・降水の取り扱いをより物理的に高度化する必要がある。また、従来型モデルにおける雲・降水素過程の簡素な表現手法のままでは、数値モデルの時空間解像度を変更した際に、連動して系統誤差が拡大する問題を抱えていた。この問題の本質的な改善には、パラメータの調整といった一時的な対応では不十分であり、モデルの物理過程を部品レベルで刷新する必要がある。

図1.1は、本研究課題で再構築をおこなった新しい雲・降水パラメタリゼーションの模式図である。国内外の多くの従来型GCMにおいて、降水は診断的に取り扱われており、1回の時間ステップで地表降水として大気中から除去される仕様が主流となっている。この問題を克服する手法の一つとして、降雨・降雪が時間ステップをまたがって落下する、降水予報型スキームの開発を推進してきた一方、雲域全てから降水が生じるものと仮定しているため、地表降水の頻度を過大評価し、まとまった強い降水が表現できない問題があった。

そこで本課題では、モデルの物理過程がより現実的に振る舞うよう、以下の改良・開発に着手した。

- 1) 雲の水平不均一性を考慮に入れた雲のサブグリッドスキームの実装
- 2) 降水が雲域から部分的に生じるよう水平不均一性を認めた設計の導入
- 3) エアロゾル変化に対する雲の感度が雲種・環境場に依存する新しい降水スキームの開発
- 4) 空間解像度が上がるほど計算コストが膨大になる降水落下スキームの改良
- 5) これまで無視されていた雹・あられを陽に表現するパラメタリゼーションの開発

後出の表0.2にまとめてある通り、4)においてモデルの挙動に一部問題が生じている以外は、すべて全球モデルへ実装済みであり、動作試験・感度実験・長期積分までを完了した。

上記1) および2) の導入により、従来は各層の雲域全体から降水が生じると仮定する手法を採用していたが、降水生成効率を反映して降水分布が決められるよう（小さくするよう）自由度を設ける設計に更新した。これにより、雲の種類や降水の不均一性を考慮に入れた表現が可能となった。

上記3) の実装により、先行研究で指摘されていた「数値モデルにおける雲は現実よりもエアロゾルの影響を受けやすい」という系統誤差を解消するように機能することが明らかになった。具体的には、従来の降水生成スキームは、エアロゾルの増加に対して雲が一様に増加する定式化を用いてきた。衛星

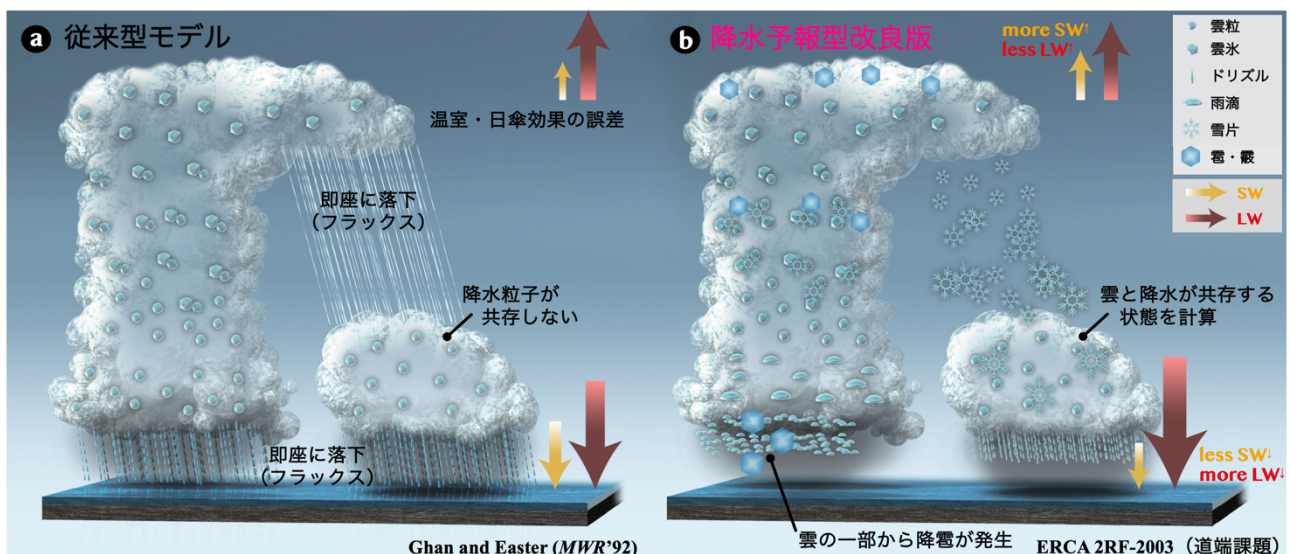


図1.1 本研究課題で構築する新しい雲・降水パラメタリゼーションの概念図。(a)は従来型、(b)は開発した枠組みを示す。

観測から得られた、低緯度ではエアロゾルへの感度が小さく、中緯度で大きくなる空間依存性をモデル内で表現するため、雲のレジームに依存してエアロゾルへの感度が可変となるような、従来とは全く異なる新しい降雨生成スキームを構築した。このスキームの導入により、従来型モデルと比較してエアロゾル有効放射強制力が15.4%～32.0%減少し、観測による推定値に近づく結果を得た（図1.7）。

上記4）および5）は、モデルのシミュレーション結果が時間ステップに依存してしまう従来型モデルの特徴を改善する目的で実施した。特筆すべき成果として、現状の気候モデルでは考慮されていない雹・あられについても併せて予報変数として導入した、世界最高水準の精緻度の枠組みが完成した点である。降水の格子内不均一性を考慮できるよう、サブグリッドの降雹割合が雲量のみによって一意に定まらない仕様を採用した（図1.1b）。このような仕様の導入は、雲の一部からまとまった強い降水を表現するために本質的に重要となるため、例えば将来の局地豪雨などの再現性向上にも期待される成果である。

構築したモデルを用いて、全球一様に海面水温を+4K上昇させる簡易的な温暖化実験を実施した。図1.10は、現在気候と温暖化時のシミュレーションとで地表に達する降雹の頻度の差を示している。温暖化時は、低緯度から中緯度までの広い範囲で雹が融解し降雹頻度は減少する一方、極域では降雹頻度が50%以上増加するという新しい知見を得た。これは、温暖化による雹の融解よりも、水蒸気・雲の極側へのシフトの結果として、降雹頻度が増加したものと考えられる。雷の発生頻度が雲内に存在する雹・あられ粒子の存在と本質的に関連していることを考慮すると、この結果は高緯度地域において将来の雷発生頻度の増加を示唆するものである。雷の発生は火災を誘発することが知られており、それにより永久凍土が融解するとメタンが大気中に放出され、さらなる温暖化の加速を引き起こす可能性も考えられる。このように、長期的な環境政策に役立てられるほか、モデル内で考慮されていない物理過程がもたらしうる気候予測への影響に関して、極めて有益な情報を提供する成果と位置付けられる。

また、気候変動予測における重要な指標である、平衡気候感度および雲フィードバックの強度についても、開発の前後でどのように変化したか定量的に調査した。改良後のモデルでは、平衡気候感度を約20%上昇させることが明らかとなり、より温暖化しやすいモデルになったことを意味する（図

1.13a）。この原因は、雲の背の高さが温暖化によって変化するフィードバックが本質的に重要であることも明らかになった。このように、本研究における雲・降水のミクロな物理過程の高度化が、気候に対するマクロな指標とどのように結びついているかを、メカニズムレベルで明らかにすることができた。これらの科学的解釈はMIROCのみに当てはまる議論ではなく、他のモデリングセンターにも有益な成果として活用されることが期待される。

本研究では、モデル開発を中心に実施し

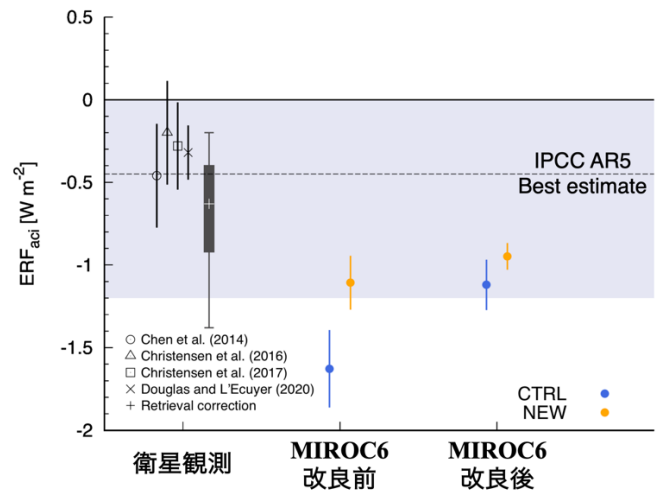


図1.7 衛星観測（左）、降水診断型MIROC（中央）、降水予報型MIROC（右）によって得られたエアロゾル有効放射強制力の全球年平均値を示す。MIROCの結果は、青がエアロゾルに対する雲の感度を定数として与えた従来型のスキームによる結果、橙がエアロゾルに対する雲の感度を可変にする新しいスキームによる結果を示す。

雹の発生頻度の差異

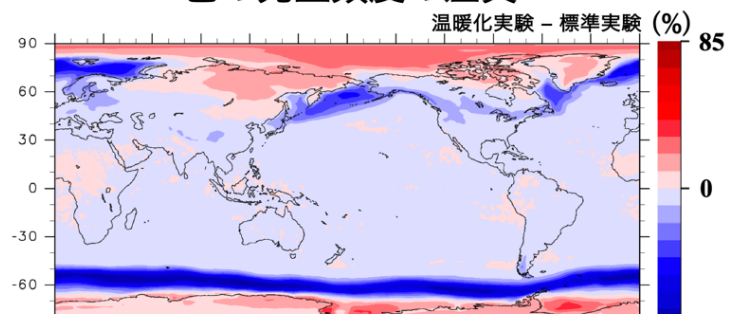


図1.10 雹・あられ予報型スキームによってシミュレートされた、温暖化時と現在気候における地表面付近で観測される降雹頻度の差異。

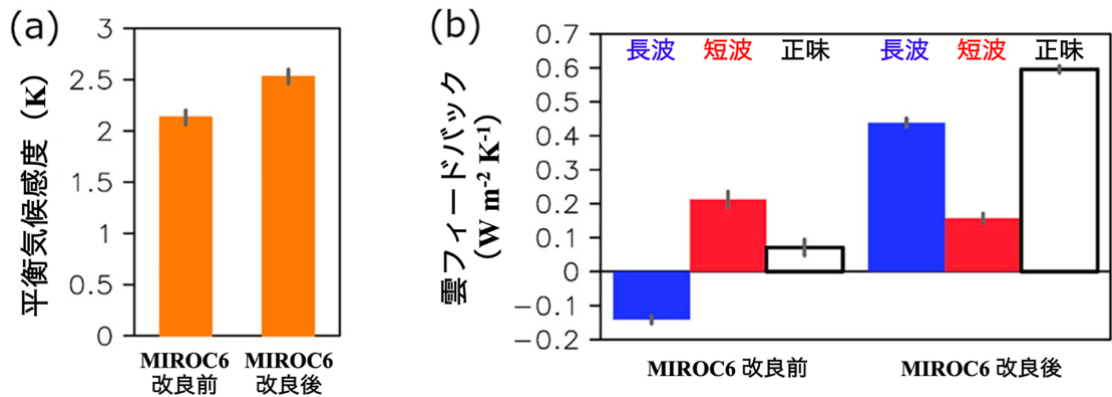


図1.13 改良前のMIROCと改良後のMIROCによって得られた平衡気候感度 (a) および、長波成分、短波成分、それらの正味の雲フィードバックの強さ (b)。

たが、モデルを評価するツールである衛星シミュレータの改良にも着手した。具体的には、現実の衛星観測においてCALIPSO搭載LiDARが雲を検出する際に、雨滴や雪片も雲の一部とみなして雲判別がなされる仕様をモデルにも導入した。これにより、観測とより整合した条件で雲量比較が可能になる一方、降水を簡素に取り扱っている国内外ほとんど全ての気候モデルでは、このような詳細な評価自体ができないことになっている。言い換えると、本課題で降水粒子を陽に表現するモデルの開発が大幅に進んだことによって可能となった研究である。

結果として、数値目標に掲げていた、CloudSat/CALIPSO衛星観測と比較したモデル雲量（全雲量に加え上層雲量・中層雲量・下層雲量）の誤差5%以内を達成することができた（図1.14）。この目標数値は、国際的にも極めて挑戦的な数値であり、データが公開されている数値気候モデルの中では世界最高クラスの性能である。現在気候における雲量が観測を忠実に再現するモデルを構築したことで、過去

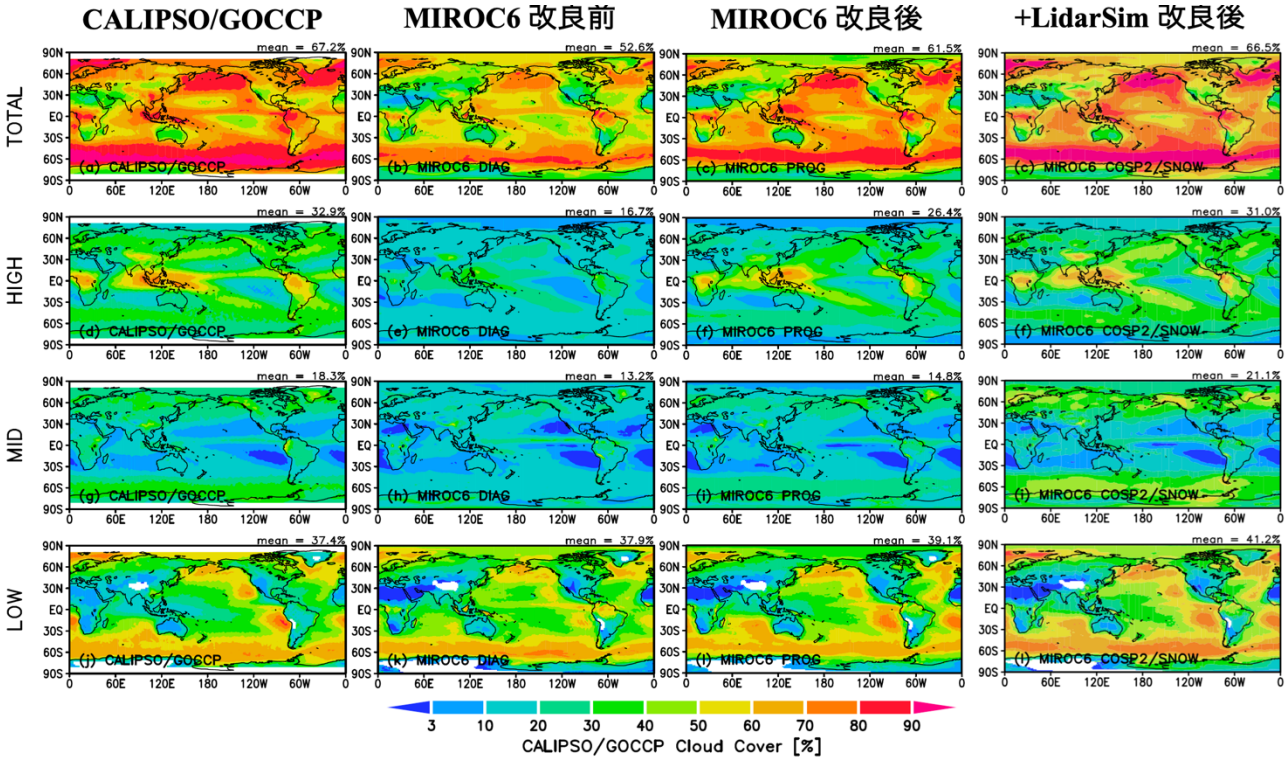


図1.14 衛星観測データ、従来型モデル、降水予報型モデル、およびLiDARアルゴリズムを改良した降水予報型モデルを用いた全雲量および上・中・下層雲量の全球分布。各図の右上の数値は、雲量の全球年平均値を示す。

および将来の気候変動予測の信頼性についても、従来型モデルより大幅に向上したものと考えられる。

本研究課題の実施中に得られた多数のシミュレーション結果は、共同研究者であるGregory Cesana博士（コロンビア大学）に提供したほか、国際的なモデル間相互比較プロジェクトである AeroCom Phase III にも提出した。また、他にも複数の国際共同研究に繋がるなど、課題終了後も国際コミュニティの中で成果の波及が期待される。

5－2．環境政策等への貢献

＜行政等が既に活用した成果＞

特に記載すべき事項はない。

＜行政等が活用することが見込まれる成果＞

地球温暖化への適応策および緩和策の両面において、不確実性の大きい雲・降水過程を高精度化することは必須である。雲・降水の将来変化が適切に予測されなければ、それによって結果的に生じる気温変化や水リスクの評価、および集中豪雨などの極端現象の発生を考慮に入れた環境政策が困難であるためである。

本研究課題では、気候状態を特徴づける上で最も基本的かつ重要な指標の一つである雲量の再現性向上に尽力し、全雲量および高度毎の雲量（上・中・下層雲量）が、衛星観測と比較して誤差5%以内という極めて挑戦的な数値目標を達成した。この数値目標の達成が持つ科学的意味として、将来の温暖化時に雲場・放射場の変化を介した局地降水の発生頻度や強度がどのように変化するか、を高精度に評価することにつながる。逆にいえば、ほとんど多くの気候モデルが約5～10%以上の雲量の誤差を抱えている現状を考えると、現在気候の条件下でそうした誤差を抱えたモデルがシミュレートする温暖化時の雲量変化や降水量変化も、信頼性が低いと判断せざるを得ない。従来型の多くのモデルが解決できなかった系統誤差を解消できたことは、これまでの数値モデル研究では狭められなかった不確実性の低減に貢献できる可能性が非常に高いことを意味し、適切な環境政策・地球温暖化対策に直結するものと期待される。

集中豪雨や熱波などの気象イベントに対して、人間起源の寄与がどの程度含まれるかを定量的に評価する研究手法はイベントアトリビューションと呼ばれるが、こうした研究は数値モデルが現在気候を物理的に正しく表現できていることが前提として議論される。雲量バイアスだけでなく、降水の頻度・強度に抱える系統誤差についても改善できたことや、現実大気をより物理的に再現するサブグリッドスケールのモデリング手法の高度化は、こうした極端現象の予測の信頼性向上にも寄与するものと期待される。さらに、これまでの数値モデルで無視されてきた雹・あられといった大粒子による降水過程を陽に表現するモデリング手法を導入したことで、「温暖化によって北極域での降雹頻度が大幅に増加する」という知見が得られたことは、非常に貴重な科学的成果の一つとなった。北極域の火災の原因の9割以上が落雷によるものであり、雷発生に雹・あられが本質的に寄与している事実を考慮すると、本課題によって得られた成果は、数値モデルの高度化という基礎研究にととまらず、それを用いた地球環境予測・気候変動予測の精度向上に直結する成果として位置付けられる。

本課題で得られた研究成果の多くは、すでに日本国内のMIROC開発チームにおいて認知されており、新スキームを次期バージョンのMIROC7への搭載することが決定している。また、大気物理・海洋物理・全体総括で構成されるMIROC7開発リーダー3名のうちの1名として、大気部分の重要な役割である雲・降水過程の調整において中心的役割を担っている。これらのモデル開発や性能評価といった調整作業は膨大な時間と労力を要するため、短期間では査読論文に直結しない面があるが、長期的には次期IPCC AR7に向けて日本発の最先端の研究成果として貢献できる可能性が非常に高い。

また、本研究で得られたシミュレーションデータの一部は、すでにAeroCom (Aerosol Model Intercomparison) という国際的なモデル間相互比較プロジェクトに提出済みである。このプロジェクトは、エアロゾル・雲・降水の物理過程におけるモデル間のばらつきの大きさやその原因を包括的に調査する国際的なプロジェクトであり、適切な気候変動予測を目指す上での不確実性の理解に直接的に活用されるものである。したがって、本研究課題におけるモデル開発の成果を迅速に発信したことで、国際的な枠組みの中での波及効果も見込まれる。

このように、新しいスキームを実装したモデルは、科学的信頼性の高い気候・環境変動予測に活用されるほか、数値モデルの不確実性を適切に考慮に入れた環境政策への貢献が期待される。

5－3．研究目標の達成状況

表0.2に、本研究課題で得られた成果と研究開始当初の目標達成状況を示す。研究目標のほぼ全てを達成した。数値モデル開発だけでなく、衛星観測データの特性を考慮に入れたモデルの性能評価ツールである衛星シミュレータの改良にも国際コミュニティの中で貢献・活用したことにより、全雲量および上層・中層・下層雲量全ての誤差が5%以内という数値目標を達成することができた。これは、世界各国で開発されている50を超える最新のCMIP6モデルの結果の中でも最高水準の性能である。

また、当初掲げていた数値目標の達成に加え、全球気候モデルでは世界最高水準の精緻度を備えた仕様である電・あられ予報型の数値モデル開発も完了することができた点は特筆すべき成果である。実装による計算コストの増加は1.1倍程度であり、大規模計算にも適用可能な低い計算コストで運用可能である。唯一、全球気候モデルに電・あられを陽に予報するスキームを搭載しているのが米国のCAMモデルであるが、用途としては領域モデルとして10kmスケールの高解像度での使用が想定されており、本課題で実施したような温暖化実験からの降電頻度の将来変化予測の評価は、他に類例がない。この点について、目標を大きく上回る成果をあげたと自己評価する。

開発した新しい雲・降水パラメタリゼーションは、日本で開発が推進されているMIROCの次期バージョンに搭載されることが決定している。また、本課題の中で特に重要な役割を担った衛星シミュレータを利用したモデル開発は国際的にも注目が集まっており、コロラド大学（米国）、コロンビア大学（米国）、Pacific Northwest National Laboratory（PNNL; 米国）、Met Office Hadley Centre（英国）、University of Leeds（英国）などとの複数の国際共同研究に既に発展している（7．国際共同研究等の状況 に記載）。これらのことは、本課題終了後も新たな科学的萌芽に繋がることが期待されるほか、次期CMIP7への参画およびIPCC AR7への科学的知見の提供に貢献する可能性が非常に高いことを裏付けるものである。

成果の発信としては、2年間の研究期間内において筆頭論文3編（うち1編は招待レビュー論文）、共著論文1編が出版された。また、リバイズ中の共著論文1編（課題代表者が責任著者）に加え、投稿準備中の論文も複数あり、研究期間終了後も継続的な成果創出を見込んでいる。また、国際学会における招待講演も2件実施し、本課題によって得られた成果を国際的なモデル開発の潮流に位置付けて発信することができた。コロナ禍で研究会等の対面実施が制約される状況であったほか、研究実施期間中に課題代表者の職位変更・所属機関変更があったものの、「国民との科学・技術対話」も1件実施し、最新の地球温暖化に関する科学的知見を高校生に発信することができた。

課題管理、研究資金の運用に関して効率的に実施した点としては、モデルの開発と性能評価の双方の研究軸を反復的に推進したことで、短期間で効率的にモデルの性能向上につなげることが可能になった。特にモデル開発の段階では、デバッグに多大な時間を要する。そのため、計算速度は高速だが計算開始まで待ち時間を要する大型計算機上で開発するのではなく、待ち時間が無く所属研究室で占有して利用可能な小規模のLinux計算機を用いて開発を行うなど、効率的な研究開発を推進できるよう工夫した。その際、初年度に本研究課題で購入したLinux計算機を中心的に用いた。

表0.2 本研究課題における設定目標と達成状況の概要

テーマ	設定目標（計画書から引用）	根拠となる図表・関連成果等	達成状況
全体目標	地球温暖化予測を実施する上で重要な雲・降水のサブグリッドスケールのモデリング手法を、大規模計算にも適用可能な低い計算コストで実装し、高精度の環境変動予測・気候変動予測に資する。	全雲量・高度毎雲量の誤差5%以内という挑戦的な目標を達成した（図1.14）。複数の査読論文が出版されるなど、成果発信にも貢献できた一方で、研究計画が完全には完了しない内容が一部あったため（下記項目2）、達成状況は95%と自己評価を付けた。また、研究期間内に国際共同研究に計3件 ^{*1-3} 発展し、課題終了後も成果の波及が見込まれる。 ^{*1} : AeroComへのデータ提供（Lindsay Lee, Leeds大学・英国） ^{*2} : 衛星シミュレータのアルゴリズムの改良（Gregory Cesana, コロンビア大学・米国） ^{*3} : 暖かい雨の診断手法の適用（Charlotte Beall, PNNL・米国 など）	95%
サブテーマ1	1. サブグリッドスケールの降水の変動を陽に考慮したパラメタリゼーションの開発	雲・降水の水平不均一性を考慮に入れたスキームの実装を完了した（図1.5）。また、衛星観測データによる解析結果から、エアロゾルに対する雲の応答の水平不均一性を考慮した、新しい降水生成スキームを開発し、全球モデルに適用した（図1.6, 1.7）。 Michibata（投稿準備中）	100%
	2. 時間ステップに依存しない降水の落下スキームの導入	降水の大気中の存在量が時間解像度に依存しない、時間implicitな降水落下スキームを実装した（図1.8）。その一方で、全球モデルに適用時に数値不安定が局所的に発生する問題を解消できず、時間implicitスキームを用いて長期計算を行うことはできなかった。 雹・あられを予報する、世界最高水準の精緻度を持つモデリング手法を搭載し、このスキームを用いた温暖化実験等を実施した（図1.9, 1.10）。 Nakao and Michibata（投稿準備中） Michibata et al.（投稿準備中）	85%
	3. 開発した新しい雲・降水パラメタリゼーションを用いた気候予測精度の評価	開発した新しい降水スキームを用いて多数の実験を実施し、エアロゾル有効放射強制力や気候感度など、気候変動予測に重要な指標の定量化を達成した（図1.11-13）。また、衛星シミュレータを用いて観測との整合的な比較も実施し、雲量や降水頻度・強度の系統誤差を大幅に解消することができた。また、新モデルによる計算結果を国際的なモデル間相互比較プロジェクトAeroComや連携研究者に提出した。 Michibata and Suzuki (2020) Michibata et al. (2020) Hirota et al. (2022) Imura and Michibata (in revision)	100%

6. 研究成果の発表状況

6-1. 査読付き論文

<件数>

4件

<主な査読付き論文>

- 1) **T. Michibata**: *Handbook of Air Quality and Climate Change*. Springer, 1-42 (2022), Aerosol-cloud interactions in the climate system, doi:10.1007/978-981-15-2527-8_35-1. **[invited]**
- 2) N. Hirota, **T. Michibata**, H. Shiogama, T. Ogura, and K. Suzuki: *Geophys. Res. Lett.*, **49**, e2021GL096523 (2022) (IF:4.72), Impacts of precipitation modeling on cloud feedback in MIROC6.
- 3) **T. Michibata**, K. Suzuki, and T. Takemura: *Atmos. Chem. Phys.*, **20**, 13771-13780 (2020) (IF:6.13), Snow-induced buffering in aerosol–cloud interactions.
- 4) **T. Michibata**, and K. Suzuki: *Geophys. Res. Lett.*, **47**, e2020GL088340 (2020) (IF:4.72), Reconciling compensating errors between precipitation constraints and the energy budget in a climate model.

6-2. 知的財産権

特に記載すべき事項はない。

6-3. その他発表件数

査読付き論文に準ずる成果発表	0件
その他誌上発表（査読なし）	2件
口頭発表（学会等）	10件
「国民との科学・技術対話」の実施	1件
マスコミ等への公表・報道等	0件
本研究に関連する受賞	1件

7. 国際共同研究等の状況

- 1) University of Leeds（英国）のLindsay Lee博士、Kenneth Carslaw博士が代表として推進している、AeroCom Multi-Model Perturbed Parameter Ensemble（MMPPE）にデータ提出を行った。エアロゾル・雲・降水の再現性を大きく左右するエアロゾルから雲凝結核への活性化効率、降水生成効率などのパラメータを39通りの組み合わせでアンサンブル実験を行うことで、モデル間の不確実性の幅とばらつきの原因を調査することを目的としたプロジェクトである。課題代表者は、改良前と改良後の2つのバージョンのモデルを用いて実験を行い、そのシミュレーション結果を提出した。これにより、モデル間のばらつきの特定に加え、モデル内での物理スキームの構造の違いがもたらす不確実性の理解に貢献できる可能性がある。
- 2) University of Colorado（米国）のDustin Swales博士、Robert Pincus博士、Met Office Hadley Centre（英国）のAlejandro Bodas-Salcedo博士らと、気候モデルで広く利用されている衛星シミュレータCOSP2（Cloud Feedback Model Intercomparison Project Observational Simulator Package）の開発を連携

して推進した。課題代表者は、暖かい雲の微物理過程を統計的に診断する手法をCOSP2に導入した実績を有し、COSP2の開発を推進する国際的な中心メンバー10人程度で構成されたチームの1人として、日本の担当窓口として貢献した (<https://github.com/CFMIP/COSPV2.0>)。本課題においても、モデルの高度化に際して開発した雲の診断ツールを利用した。また、ソースコードとともに衛星観測データの統計サマリーも公開しており (<https://github.com/takmichibata>)、本課題の推進にあたってPacific Northwest National Laboratory (米国) のCharlotte Beall博士、NCAR (米国) のDani Coleman博士にデータ提供および解析補助を行った。本課題の終了までに、連携研究者らが使用している米国・英国のモデルからのデータ提供はなかったが、今後複数のモデルからのデータが得られれば、モデルの系統誤差を理解する上で重要な知見が得られる可能性が高い。

- 3) Columbia University (米国) のGregory Cesana博士と連携し、CALIPSO衛星搭載ライダーが降雪粒子を雲と認識する効果について、アルゴリズムの高度化研究に着手しデータ提供を行なった。本課題代表者が開発した新しい雲・降水パラメタリゼーションは、降水粒子を陽に表現しているため、その一部が雲と認識され、雲量は見かけ上増加することが明らかとなった。本来このアルゴリズムが正しい観測との比較となるが、従来型モデルでは降水粒子が透明なものとして扱われることになるため、厳密には人工衛星観測のアルゴリズムと一致しておらず、気候感度の推定に重要な指標となる雲水と雲氷の比率の診断にも影響が及ぶことがわかった。国際的にも先端的なモデルを構築したことで実施可能となった研究であり、各国のモデリングセンターへの成果の波及も期待される。また、本研究課題の成果の一部である Hirota et al. (2020, *Geophys. Res. Lett.*) および Imura and Michibata (in revision in *J. Adv. Model. Earth Syst.*) においても、当該共同研究の成果を反映した議論ができたことから、本課題への貢献として非常に大きな位置付けを持った。また、すでに学術論文として取りまとめていることから、今後国際的にも大きな位置付けを占めることは明白である。

8. 研究者略歴

研究代表者

道端 拓朗

九州大学大学院総合理工学府修了、博士 (理学)、東京大学大気海洋研究所・日本学術振興会特別研究員PD、九州大学応用力学研究所・助教、現在、岡山大学学術研究院・准教授

II. 成果の詳細

II-1 地球温暖化予測のための時空間シームレスな降雨・降雪スキームの開発

国立大学法人岡山大学

学術研究院自然科学学域（理） 准教授

道端 拓朗

〔要旨〕

エアロゾル・雲・降水の相互作用は、気候変動を予測する上で最大の不確実要素の一つである。数値気候モデルにおいて特に降水過程は簡素に取り扱われており、モデル間に共通する様々な系統誤差をもたらす。本研究では、こうした系統誤差を素過程レベルで解消することを目指し、雲水・雲氷・降雨・降雪・雹・あられの質量混合比および数濃度をともに予報する、世界最高水準の仕様の雲・降水パラメタリゼーションを開発した。モデルの高度化に際し、全球規模の人工衛星観測データを利用するとともに、衛星シミュレータを用いることで観測と整合的な評価にも重点的に取り組んだ。CALIPSO/GOCCP衛星観測プロダクトおよび、CloudSat・MODISデータを複合的に解析した結果から、降雨・降雪を陽に予報するスキームを用いることで、雲量の過小評価バイアスおよび降水生成が早すぎるバイアスの除去に有効であることがメカニズムレベルで明らかになった。また、エアロゾルに対する雲の応答は、雲種や環境場に依存するという衛星観測から得られた知見を踏まえ、新しい降水生成スキームの開発を行った。これは、雲水に対して雨水が多く占めるような水循環の早い雲レジームではエアロゾルへの感度が小さくなるように設計されており、低緯度ほどエアロゾルへの雲の感度が小さくなるような空間依存性を考慮に入れたスキームとなっている。このスキームを用いて産業革命以前と現在気候でのエアロゾル条件下で実験を行ったところ、従来型スキームよりもエアロゾル有効放射強制力が15.4%～32.0%減少し、観測に近づく結果を得た。このスキームは、雲のサブグリッドの空間変動性を考慮に入れた仕様となっているため、雲から降水への変換の表現が空間解像度に依存しない仕様である。

こうしたミクロな雲物理過程の改良に加え、降水モデリング手法のマクロな構造の改善にも着手した。これまでの気候モデルで考慮されていなかった雹・あられを陽に予報する枠組みを開発し、大粒子によって局地的に降水が強まる仕組みを新たに導入した。このスキームの導入前は、降水は大気中に留まることなく即座に落下する仕様であったため、モデル内で設定される時間解像度に性能が大きく左右される問題があったが、これを本質的に回避することが可能である。こうして時空間シームレスなモデルの枠組みを構築した。

本課題で大きな進展となった、雹・あられ予報型の降水スキームを用いた気候研究は、世界的にも類例がない。本スキームを用いた温暖化実験によると、低緯度・中緯度では降雹の融解が促進される一方で、高緯度では雹の発生頻度が50%以上増加することが明らかになった。雲内部での雹の発生が雷の発生に重要であることを考えると、極域において将来の雷発生頻度が増加することを示唆する結果である。これは、極域での火災発生リスクが将来高まる可能性を示すものであり、適切な地球環境予測・気候変動予測を行うために、本課題で開発したモデルを利用することが重要であることを意味する。また、研究目標として掲げていた、全雲量及び高度毎の雲量（上・中・下層雲量）の誤差が衛星観測と比較して5%以内という数値目標を達成した。これは、最新のCMIP6のモデルの中でも世界最高クラスの性能であり、今後の気候変動研究の信頼性向上に大きく貢献する成果となった。

1. 研究開発目的

パリ協定において掲げられた $2^{\circ}\text{C} \cdot 1.5^{\circ}\text{C}$ 気候安定化目標では、数値気候モデル（GCM）による将来気候予測をベースに経済政策・シナリオが議論されている。しかし、将来気候予測の結果は、特に気候感度とエアロゾル放射強制力の両者に強く依存し、それぞれの不確実性によって数値モデル間でのばらつきが依然として大きく、温暖化対策・環境政策の障害となっている。

時空間解像度が粗いGCMにおいては、雲・降水素過程を半経験的な手法に頼って表現しており、その結果としてGCMに共通して見られる系統誤差が複数存在する。気候変動予測における致命的な問題点として、

- 1) 降水の頻度を過大に評価し、強度を過小評価するバイアス¹
- 2) 雲量を過小に評価するバイアス²
- 3) エアロゾル変化に対して雲が過剰に応答するバイアス³

が報告されている。信頼性の高い気候変動予測・環境変動予測を実施するためには、現在・過去・将来気候を正しいメカニズムで再現ができることが前提条件であり、そのためには物理素過程を部品レベルで高度化することが必須である。

本研究課題では、モデル全体のパフォーマンスを決定づける心臓部である、雲・降水のモデリング手法を素過程レベルで改良し、地球温暖化予測の高精度化を目指す。この目標の達成のため、課題代表者がこれまで開発を推進してきた先端的な雲・降水スキームを基盤として、地球温暖化予測の精度向上を目指した物理過程の更なる高度化に取り組む。GCMが特に苦手とする、サブグリッドの降水の変動性を陽に考慮した物理ベースなパラメタリゼーションを導入することにより、空間解像度へのモデル依存性の軽減を目指す。また、従来型モデルで陽に表現されていなかった降水粒子を予報変数化し、落下過程を精緻に取り扱うことで、時間解像度へのモデル依存性の軽減も併せて目指す。

このような時空間シームレスなパラメタリゼーションは、将来的なモデルの高解像度化の際に特に重要な役割を担い、集中豪雨などの極端現象や領域規模での気候影響評価への応用が大きく進展するものと期待される。それに加え、全球規模の長期的な気候変動予測においても、気候が変化した時の雲・降水・放射特性の変化をより物理的に表現することにつながることを期待される。

モデルの高度化に際しては、複数の人工衛星によって得られた素過程の情報を最大限に利用するよう、衛星シミュレータを用いる⁴。これにより、モデルの高度化と性能評価を反復的に実施することで、短期間で効率的なモデル開発を推進する。また、多くのモデルが抱える系統誤差をメカニズムレベルで解明することで、数値モデルの不確実性を適切に考慮に入れた環境政策への貢献に寄与する。

これらの物理素過程の高度化は、Future Earthが掲げるテーマの一つである、地球が自然現象と人間活動によってどう変化しているか（Dynamic Planet）、という学問的問いに対する理解深化に貢献するものである。数値モデル開発を基軸として、複数の衛星データおよび対応する衛星シミュレータを用いたモデルの評価・改良を首尾一貫して推進することで、実用性と応用性を備えた高精度の地球環境予測・気候変動予測に資することを目的とする。

2. 研究目標

サブグリッドスケールの雲・降水分布をモデル化するため、CloudSatおよびMODISによる衛星観測データを複合的に解析し、降水強度が解像度に依存しない空間シームレスな降水スキームを開発する。その際に、計算コストに大きな割合を占める降水落下過程を時間ステップに依存しない時間シームレスなスキームに更新し、開発前のバージョンから20%低コスト化することを目指す。モデルの高度化による気候影響の評価として、降水素過程およびエアロゾル放射強制力を定量的に見積もり衛星観測との比較を実施する。特にバイアスが大きく気候変動予測の信頼性を支える重要な指標である雲量については、全雲量および高度ごと（低層・中層・高層）の雲量を、GOCCP衛星観測に対して誤差5%以内に収めることを達成目標とする。

3. 研究開発内容

図1.1に、本研究課題で改良を目指す新しい雲・降水パラメタリゼーションの模式図を示す。国内外の多くの従来型GCMは、降水を診断的に取り扱っているため、降水は大気中に保持されることなく1回のモデル時間ステップで地表降水として除去される仕様である。そのため、放射に対して降水粒子は透明なものとして取り扱われることになり、地球のエネルギー収支に不確実性をもたらす。それに加え、モデルの時間解像度を短く取った場合、1回の時間ステップでは地表に達しないような霧雨や上空から時間をかけて落下する降雪までもが、過剰に降水として除去されるため、モデルの性能は時間ステップに強く依存してしまう問題があった（図1.1a）。

この問題を克服するために、課題代表者は降雨・降雪が時間ステップをまたがって地表に到達する仕様の、降水予報型スキームの開発に取り組んできた⁵。このスキームは、従来型よりも物理的な雲の内部構造を表現できる点で優れている一方、

- ・雲域全てから降水が生じるものと仮定しているため、地表降水の頻度を過大評価してしまう
 - ・雲域全体から降水が均一に生じるため、雲の一部からのまとまった強い降水が表現できない
 - ・現実では降雪よりも大きな雹やあられを無視していることで、局所的な強い降水が表現できない
- などの問題が生じていた。

そこで本課題では、図1.1bに示すように、雲および降水の空間不均一性を考慮に入れた表現手法を開発する。また、雹・あられも予報変数化することで、時間ステップに依存しない第一原理的な表現手法を開発する。開発したスキームは、東京大学大気海洋研究所・国立環境研究所・海洋研究開発機構を主体として開発されている全球大気海洋モデルMIROCに実装した。以下、開発の詳細を項目ごとに説明する。

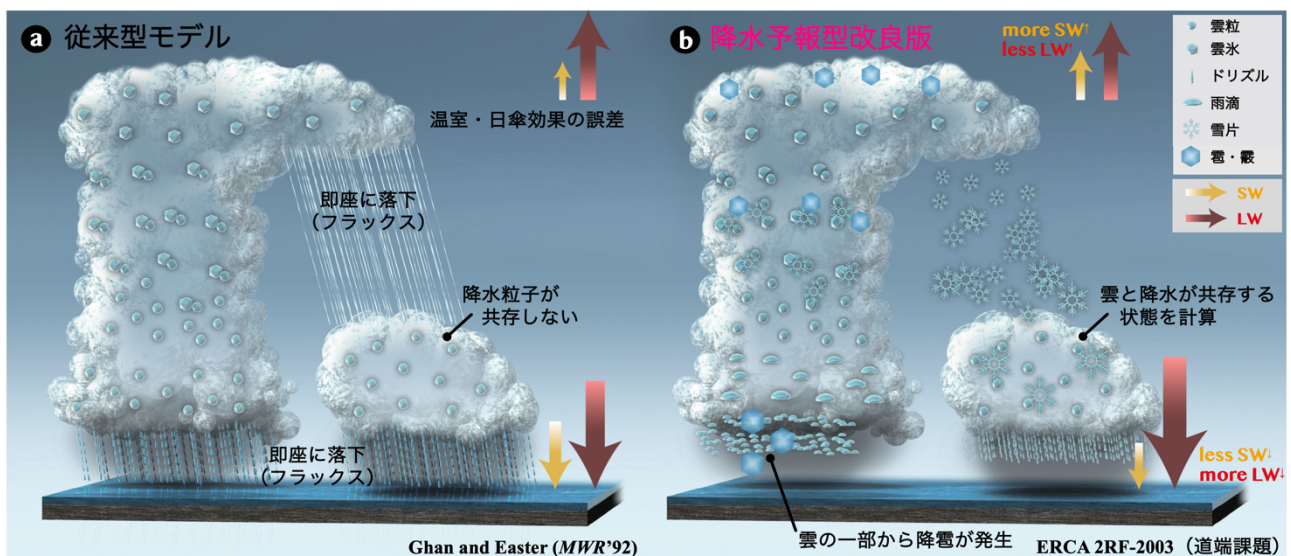


図1.1 本研究課題で構築する新しい雲・降水パラメタリゼーションの概念図。(a)は従来型、(b)は開発した枠組みを示す。

3. 1 サブグリッドスケールの降水の変動を陽に考慮したパラメタリゼーションの開発

図1.2は、開発に用いる全球気候モデルMIROC6で仮定されている、総水量の格子内不均一性を表す確率密度関数を示す（Hotta et al., 2020 より引用⁶）。この三角形関数の飽和部分を格子内平均の雲水量として取り扱い降水生成を計算しているが、格子内不均一性を考慮せずに格子平均値で降水生成効率を考えた場合、系統的に過小評価することになる。Hotta et al. (2020)⁶ では、この飽和部分を雲水の格子内不均一性を表す確率密度関数として、補正ファクターを積分計算に導入する手法を提案した。

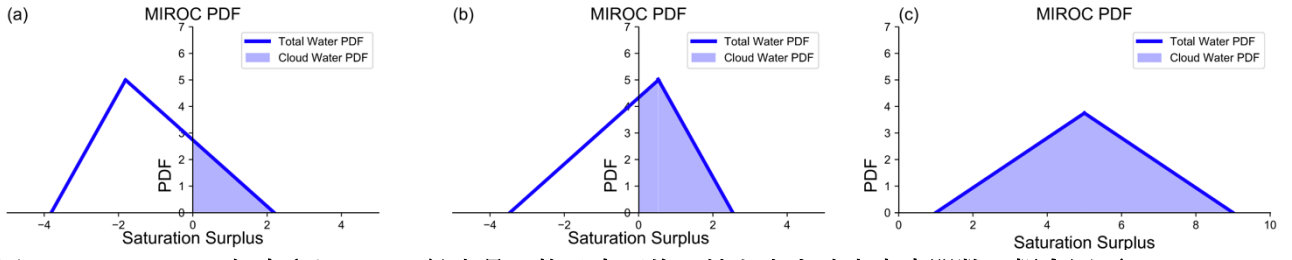


図1.2 MIROC6で仮定されている総水量の格子内不均一性を表す確率密度関数の概念図 (Hotta et al., 2020 より引用⁶⁾)。

本研究課題の取り掛かりとして、まずこのスキームを課題代表者が開発してきた降水予報型スキームに組み込んだ。これで雲の不均一性を考慮に入れた降水生成が表現できるようになった一方、降水分布の不均一性は考慮していないため、この改良にも併せて取り組んだ。具体的には、降水が格子内に占める割合を計算する際、従来は各層の雲域全体から降水が生じると仮定する手法を採用していたが、降水生成効率を反映して降水分布が決めるよう（小さくするよう）自由度を設ける設計に更新した。これにより、雲の種類や降水の不均一性を考慮に入れた表現が可能となった。

さらに別の問題として、数値モデル上で再現される雲は、エアロゾルの変化に過剰に応答しやすい傾向があることが衛星観測データを用いた解析から近年指摘されるようになってきた⁷⁾。課題代表者による過去の解析⁸⁾ (図1.3上・中段) においても、現実大気では低緯度ではエアロゾルへの感度が小さく、中緯度で大きくなる空間依存性が示された一方、モデルでは全球一様にエアロゾルに対して雲寿命が延び、かつ感度が大きすぎることを示されている。これは、モデルではエアロゾルへの感度を一定値で表現していることが原因の一つと考えられ、式で表すと、

$$R \sim L_c^\alpha \times N_c^\beta$$

でパラメタライズしていることによる。ここで R は降水量、 L_c は雲水量、 N_c は雲粒子数濃度であり、 α および β は定数である ($\alpha > 0, \beta < 0$)。

観測で示された空間不均一性を考慮する手法として、本研究では β を可変にする新しいパラメタリゼーションを提案する。すなわち、エアロゾルに対する降水の影響の受けやすさを $S_p = -d \ln R / d \ln N_c$ と定義すると、上式より

$$S_p = -\alpha \frac{d \ln LWP}{d \ln N_c} - \beta$$

である。図1.3下段のように、エアロゾルに対する雲水の影響の受けやすさ ($d \ln LWP / d \ln N_c$) は、雲全体に占める雨水の割合 (f_{rain}) と相関することを踏まえると、

$$\frac{d \ln LWP}{d \ln N_c} = a \times f_{rain} + b$$

で表される。降水の感度 S_p も同様の関係を用いて表される場合、

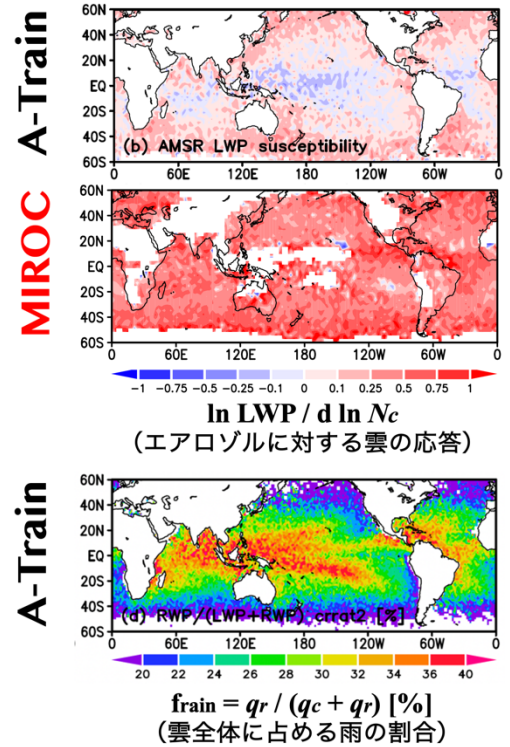


図1.3 衛星観測およびMIROCから得られたエアロゾルに対する雲寿命効果のシグナルの強さ (上段・中段) と、衛星観測から得られた雲全体に占める雨水の割合 f_{rain} の全球分布。

$$\frac{d \ln R}{d \ln N_c} = c \times f_{rain} + d$$

であるから、降水生成がエアロゾルの摂動に対する感度の大きさ (β_{param}) は、

$$\beta_{param} = A \times f_{rain} + B$$

のように、 f_{rain} を用いて表すことができる。結果として、

$$\begin{aligned} \beta_{param} &= -S_p - \alpha \frac{d \ln LWP}{d \ln N_c} \\ &= (c \times f_{rain} + d) - \alpha(a \times f_{rain} + b) \\ &= (-a\alpha + c)f_{rain} - \alpha b + d \end{aligned}$$

を得る。本研究では、衛星観測からこれらの係数をempiricalに決定し、雲のレジームに応じてエアロゾルへの感度が時空間的に変化するような、従来とは全く異なる新しい降雨生成スキームを構築した。

3. 2 時間ステップに依存しない降水の落下スキームの導入

図1.1のような降水予報型スキームの問題点として、降水粒子の落下を安定に計算するために鉛直方向のCFL条件を満たす必要がある。MIROCは緯度方向に並列計算分割を行なっているため、例えば降水粒子サイズが大きい熱帯では、落下速度が小さな中高緯度と比較し、計算に要求される時間ステップが短くなり、結果として別の並列計算ノードに余計な待ち時間が生じる可能性がある。そこで本研究では、降水の落下が時間ステップに制約を受けない時間implicitな降水落下の表現手法を導入し、時間シームレスな降水落下スキームを構築した。

また、研究開始前までに開発を推進してきた降雨・降雪予報型のモデリング手法をさらに高度化するため、現状の気候モデルでは考慮されていない雹・あられについても併せて予報変数として導入した。雹とあられは統一的に取り扱い、以下の予報方程式

$$\begin{aligned} \frac{\partial q_g}{\partial t} &= -\frac{1}{\rho_a} \nabla \cdot (\rho_a \mathbf{u} q_g) - \frac{1}{\rho_a} \frac{\partial(\rho_a q_g v_{q_g})}{\partial z} + S_{q_g} \quad \text{and} \\ \frac{\partial N_g}{\partial t} &= -\frac{1}{\rho_a} \nabla \cdot (\rho_a \mathbf{u} N_g) - \frac{1}{\rho_a} \frac{\partial(\rho_a N_g v_{N_g})}{\partial z} + S_{N_g}, \end{aligned}$$

を時間積分することで、雹の質量混合比 (q_g) および数濃度混合比 (N_g) が保存されるようモデリング手法を更新した。雹・あられ予報型のスキームの導入に伴い新たに定式化を加えた微物理過程を表1.1に示す。また、3. 1節に記載の通り、降水の格子内不均一性を考慮するようにサブグリッドの降雹割合が決定できるような仕様を採用した。

3. 3 開発した新しい雲・降水パラメタリゼーションを用いた気候予測精度の評価

気候モデルの性能を測る最も基本的な指標として、雲量がある。現在気候において雲量が観測事実を再現できていない場合、そうしたモデルがシミュレーションする過去および将来の気候も、信頼できる結果とはいえないため、地球の水収支・エネルギー収支の中心を担う雲量が観測をよく再現できるかどうかは非常に重要である。本課題では、衛星観測の比較を厳密に行うため衛星シミュレータCOSP2⁴を用いる。降水の頻度・強度の評価についても、将来の気候変化時の水循環の変化を

表1.1 降雹予報型スキームに新たに追加したプロセスの一覧表。

Process	Interaction	q_c	q_i	q_r	q_s	q_g	N_c	N_i	N_r	N_s	N_g
Prognostic Rain											
autoconversion	$c + c \rightarrow r$	↓		↑			↓		↑		
accretion	$c + r \rightarrow r$	↓		↑			↓				
self-collection	$r + r \rightarrow r$								↓		
evaporation	$r \rightarrow v$				↓				↓		
sedimentation	r			↑↓					↑↓		
break-up	$r \rightarrow r$								↑		
Prognostic Snow											
instantaneous melt	$s \rightarrow r$			↑	↓				↑	↓	
freezing of rain	$r \rightarrow s$			↓	↑				↓	↑	
aggregation	$i + i \rightarrow s$		↓		↑			↓		↑	
accretion	$c + s \rightarrow s$	↓			↑		↓				
	$i + s \rightarrow s$		↓		↑			↓			
	$r + s \rightarrow s$			↓	↑				↓		
Hallet-Mossop	$c \rightarrow i$	↓	↑					↑			
self-aggregation	$s \rightarrow s$									↓	
sublimation	$s \rightarrow v$					↓				↓	
sedimentation	s				↑↓					↑↓	
Bergeron	$c \rightarrow i$	↓	↑								
	$c \rightarrow s$	↓			↑						
break-up	$s \rightarrow s$									↑	
Prognostic Graupel											
freezing of rain	$r \rightarrow g$			↓		↑			↓		↑
aggregation of snow	$s + s \rightarrow g$				↓	↑				↓	↑
rain/snow collection	$r + s \rightarrow g$			↓	↓	↑			↓	↓	↑
riming	$g + c \rightarrow g$	↓				↑	↓				
sublimation	$v \leftrightarrow g$					↑↓					
Bergeron	$c \rightarrow g$	↓				↑	↓				
instantaneous melt	$g \rightarrow r$			↑		↓			↑		↓
break-up	$g \rightarrow s$				↑	↓				↑	↓

特徴づける上で重要な指標である。MODIS・CloudSat・CALIPSOなどの人工衛星データを複合的に利用することで、モデルが抱える系統誤差の原因をメカニズムレベルで考察した。

また、気候変動予測を行う上で重要な指標に、平衡気候感度（CO₂濃度が倍増した際の地上気温の昇温）とエアロゾル・雲による有効放射強制力（エアロゾル変化が雲場を変調することで地球を冷却する度合い）がある。前者は温暖化を促進する力を意味し、後者は温暖化を抑制する力をそれぞれ意味するが、開発したモデルを用いてこれらの指標を定量化した。開発前後でこれらの気候に対するマクロな指標がどのように変化したかを考察することで、雲・降水のミクロな物理過程とのリンクを解明することに貢献した。

開発した新モデルの振る舞いを国内外のモデル群との比較を通して考察するため、また広い成果の波及を見通して、得られたシミュレーション結果の一部を国際的なモデル間相互比較プロジェクトである AeroCom Phase III に提出した。

3. 4 降雪粒子を考慮に入れた衛星シミュレータの雲判別アルゴリズムの検証および改良

前節で衛星シミュレータを用いたモデルの評価について言及したが、シミュレータにも数値モデルと観測間でのアルゴリズムの適用手法の不整合に起因する不確実性が存在する。具体的には、実際の衛星観測では雲を判別する際に、ある程度大きな降水粒子の一部も雲と判別し、雲量などが推定される⁹。しかし数値モデルにおいては、雲と降水は完全に独立して取り扱われているため、衛星センサーが降水粒子からのリトリバルを見逃していることが判明した（図1.4）。

この不整合がモデルの評価に及ぼす影響を調査するため、米国コロンビア大学のGregory Cesana博士と連携し、不確実性の評価を実施した。これは、気候モデルコミュニティ全体として盲点となっていた不確実性でもある。MIROCによって得られたシミュレーションデータの一部は、Cesana博士に提供した。

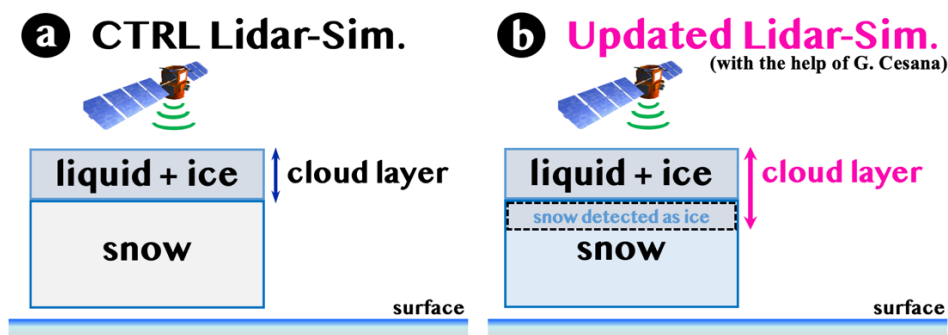


図1.4 改良前(a)と改良後(b)のLiDARシミュレータの構造上の違いを表す概念図。改良版では、観測と同様に降雪粒子の一部が雲と判別される効果が考慮される。

4. 結果及び考察

4. 1 雲・降水の空間不均一性が降水頻度・強度に及ぼす影響

図1.5に標準版MIROCおよび改良版MIROCにおける、降水生成の早さを表すダイアグラムを示す。この図はCFODD（Contoured Frequency by Optical Depth Diagram）と呼ばれるもので、横軸に降水強度の指標となるレーダー反射率dBZ、縦軸に雲頂から潜った光学的深さをとり、色でその鉛直プロファイルの頻度分布を描いたものである¹⁰。

図1.5aの衛星観測の統計と比較し、降水の空間不均一性を考慮していない標準版では降水生成が遅れていることがわかる。一方で、降水分布の不均一性を認め、雲域の50%からしか降水を生じないように制約した感度実験の結果（図1.5c）を見ると、標準版よりも観測に近い統計を示していることがわかる。これは、雲の一部分からまとまって降水を生じさせることで、降水強度が強まることと整合的であ

る。また、降水の不均一性とは別に、雲内部で生じる雲粒同士の衝突・併合過程にも感度があるか調査した結果（図1.5d）、この感度実験においても観測に近づく統計を示すことがわかった。以上のことから、降水の水平不均一性に加え、雲内部で生じる微物理過程においても、降水頻度・強度のバイアスを除去するために継続的な努力が必要であることが示唆された。

また、雲の水平不均一性を考慮に入れたHotta et al. (2020)⁶ のスキームを降水予報型に結合した。図は示さないが、この手法の導入はモデルの性能にほとんど影響を及ぼさないことが明らかとなった。このスキームは、雲の不均一性を考慮することでautoconversion（雲粒同士の相互作用により新たな雨滴を形成する過程）において重要であるものの、降水を予報しているモデルの場合、accretion（雨滴が雲粒を捕捉し成長する過程）に強い感度を持つため、実装の影響は小さかったものと考えられる。

以上のことから、雲の不均一性と併せて、降水の不均一性のモデリング手法を重点的に改善していくことが今後より重要であることが示唆された。

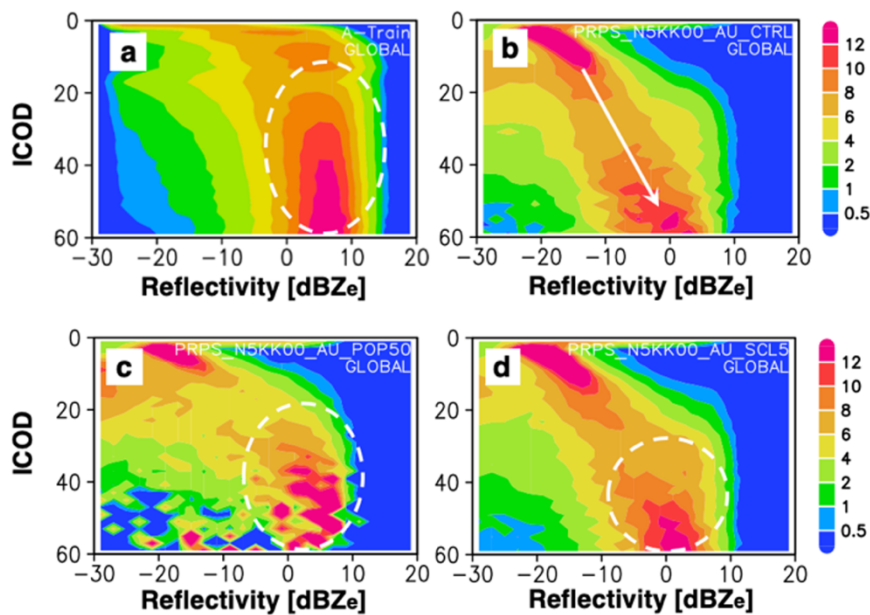


図1.5 人工衛星 (a)、改良前のMIROC (b)、降水分布の空間不均一性を認めた改良版スキーム (c)、および雲内部の粒子衝突係数を5倍にしたとき (d) のCFODD (Contoured Frequency by Optical Depth Diagram)。

4. 2 エアロゾルに対する雲の応答のレジーム依存性を考慮した降水スキームの開発

図1.6aは、前節で説明した図1.3における、雲全体に占める雨水の割合 f_{rain} と、エアロゾルに対する雲水の応答（雲寿命効果の強さ、すなわち $d \ln LWP / d \ln N_c$ ）の相関を取った図である。衛星観測データの解析から、前節で示した式変形をベースとして、 $\beta_{param} = -0.0124 f_{rain} + 2.00$ という関係式を得た。この関係式から、雲のレジームに応じて特徴づけられる $0 < f_{rain} < 100$ の変動に対して $0.76 < \beta_{param} < 2.0$ の範囲を変動することになる。これは、既存の複数のautoconversionスキームで採用されている β のレンジ¹である、 $0.33 < \beta < 3.3$ を広くカバーできるスキームとなっている。また、このスキームは他のモデルにも容易に実装可能であるという点も大きな特徴である。

図1.6bは、このスキームをMIROCに搭載してシミュレーションした際の、 β_{param} の年平均値を示した図である。この図から明らかなように、図1.3で示した衛星観測の地理依存性を非常に良く再現していることがわかる。すなわち、低緯度では β_{param} が小さく、エアロゾルに対する雲の感度が小さい一方で、中高緯度の雲は感度が大きいことを示している。これは言い換えると、従来型のモデルでは考慮できていなかった、“雲の個性”を表現できていると解釈することが可能であり、既存のスキームとは全く異なる手法である。

この新しいautoconversionスキームを用いて、現在気候と産業革命前のエアロゾル条件下でシミュレ

ーションを行い、エアロゾル有効放射強制力を見積もったのが図1.7である。MIROC従来型・改良型ともに、新しいautoconversionスキームの適用によってエアロゾル有効放射強制力が15%~32%弱化し、衛星観測による見積りや、IPCC AR5における最良推定値¹¹に近づいていることがわかる。このことから、既存のスキームのようにエアロゾルに対する雲の感度を一定として取り扱うよりも、雲のレジームに応じて特徴づける手法を用いることで、数値気候モデルの系統誤差の改善につながる可能性が高いことが示唆された。

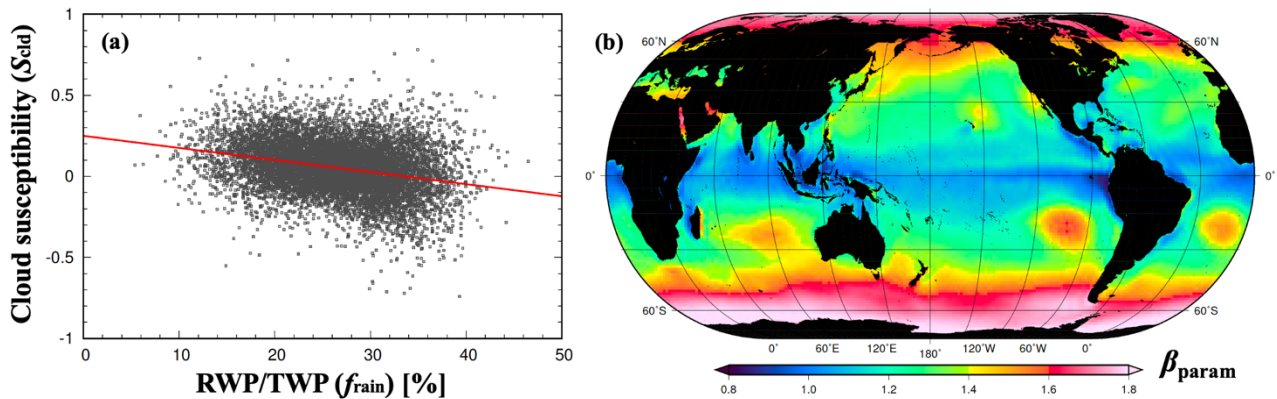


図1.6 衛星観測から得られた、 f_{rain} とエアロゾルに対する雲の感度の強さの相関図 (a) および、得られた定式化をMIROCに実装しシミュレートした際に表現されるエアロゾルへの感度の強さ β_{param} の年平均分布図 (b)。

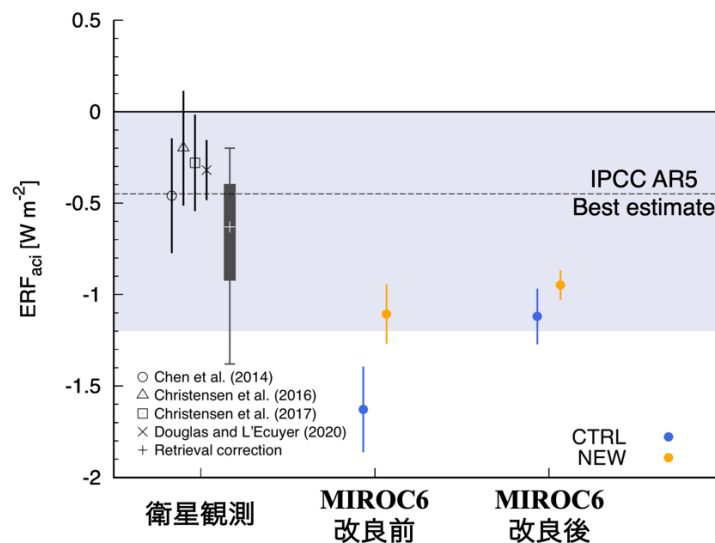


図1.7 衛星観測 (左)、降水診断型MIROC (中央)、降水予報型MIROC (右) によって得られたエアロゾル有効放射強制力の全球年平均値を示す。MIROCの結果は、青がエアロゾルに対する雲の感度を定数として与えた従来型のスキームによる結果、橙がエアロゾルに対する雲の感度を可変にする新しいスキームによる結果を示す。

4. 3 降水粒子の落下過程の改良と雹・あられ予報型スキームの開発

数値モデルの性能が時間解像度に依存しないモデルを構築するため、これまで降水予報型スキームで適用していたEulerian型から時間implicitなスキームに更新した。作業効率化のため、鉛直1次元モデルを構築して理想的な条件で降水落下を計算したのが図1.8である。それぞれのスキームで初期時刻、8分後、16分後の雨水混合比の鉛直プロファイルを描いているが、時間implicitなスキームがEulerian型よりもわずかに落下が早いことがわかる。時間積分を陽に解くEulerian型が計算誤差は小さいと期待される

が、気候シミュレーションを行う上ではほとんど影響しない程度の誤差であると考えられ、それ以上に計算コストを削減できるメリットの方が大きいと考えられる。

SCMに実装したimplicitスキームを全球モデルにも適用したが、局所的に発生する計算不安定（数値ノイズ）の問題を解消することができず、時間implicitスキームを用いた長期積分は完了できなかった。そのため、計算コストがどの程度改善されるかについては不明である。この問題は、課題終了後も継続して問題解明に取り組む。しかしながら、Eulerian型でも実用上問題ない程度の計算コストで時間積分できているため、以降のシミュレーション結果は、全てEulerian型の落下スキームを用いた結果を示す。

本研究課題を推進する上で最も大きな成果となったのが、雹・あられを予報する降水パラメタリゼーションを構築できた点である。これは、現存する数値気候モデルの中では世界最高水準の精緻度を持つ仕様であり、それを用いた気候研究はこれまでに類例がない。メソモデルや雲解像モデルには雹を予報変数として含んだモデルも多いが、その多くが質量のみを予報する1 momentと呼ばれる手法であり、本研究で開発したような数濃度も予報する2 momentスキームは、雲解像モデルでもごく一部に限られている。気候変動研究をする上で、質量・数濃度をともに予報することは、粒子サイズを物理的に再現する上で必要不可欠であるため、本課題で開発したスキームは今後のモデル開発の潮流を大幅に先取りした成果であるといえる。

新たに開発した雹予報型スキームによってシミュレートされた、雹粒子の粒径の頻度分布を図1.9に示す。黒の波線は、あられと雹のサイズの境界を示しているが、開発したモデルは比較的小さなあられから巨大な雹まで広い粒径にわたってシミュレートしており、現場観測のデータとも整合的である。また、メソモデルとして活用された先行研究¹²よりも、大きな粒子に成長する様子を再現できていることがわかる。

また、構築したモデルを用いて、全球一様に海面水温を+4K上昇させる簡易的な温暖化実験を実施した。

この実験はCFMIPなどでよく用いられる手法で、雲フィードバックや気候感度を定量化する際に利用される。現在気候と温暖化時のシミュレーションとで地表に達する降雹の頻度の差を解析したところ（図1.10）、低緯度から中緯度までの広い範囲で温暖化による雹の融解が生じることで、降雹頻度は減少する結果が得られた。一方で極域（特に北極域）では、温暖化による水蒸気・雲の極側へのシフトの結果、生成される降雹が50%以上増加するという新しい知見を得た。雷の発生頻度が雲内に存在する雹・あられ粒子の存在と本質的に関連していることを考慮す

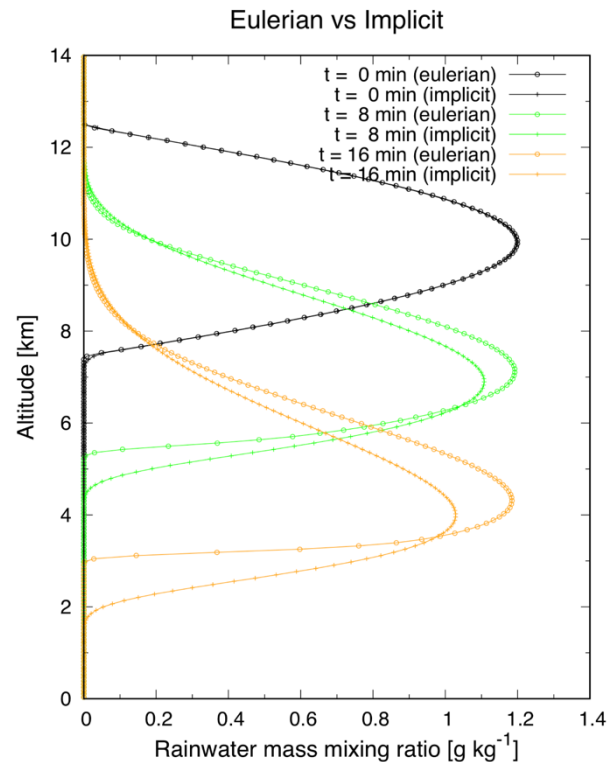


図1.8 鉛直1次元モデル上で構築した時間implicitスキームによる降水落下と時間ステップの制約を受けるEulerian型の降水落下の比較。

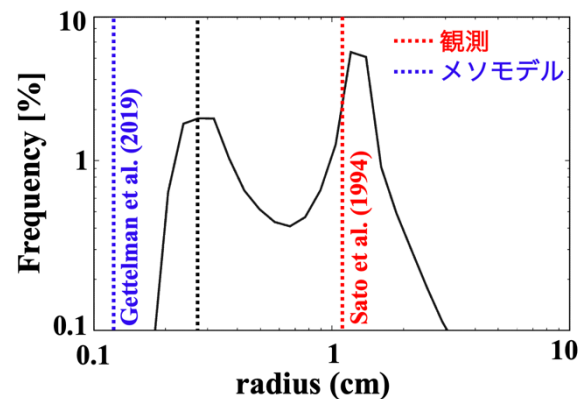


図1.9 雹・あられ予報型スキームによってシミュレートされた固体降水粒子の頻度分布図。黒破線はあられと雹のサイズの境界を示す。赤破線は日本における降雹の観測結果、青破線はメソモデルによる結果を示す。

ると、この結果は高緯度地域において将来の雷発生頻度の増加を示唆するものである。雷の発生は火災を誘発することが知られており、特に北極圏における火災の9割以上は落雷によるものである。火災が発生して永久凍土が融解すると、メタンが大気中に放出され、さらなる温暖化の加速を引き起こす可能性も考えられる¹³。

このように、長期的な環境政策に役立てられるほか、モデルに考慮されていない物理過程がもたらしうる気候予測への影響に関して、極めて有益な情報を提供する成果と位置付けられる。

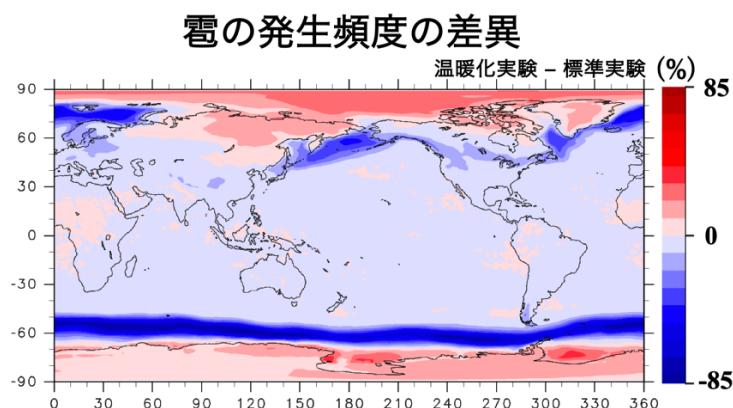


図1.10 雷・あられ予報型スキームによってシミュレートされた、温暖化時と現在気候における地表面付近で観測される降電頻度の差異。

4. 4 モデル開発前後における素過程の再現性の変化と気候予測への影響

本研究課題でのモデルの改良前後で、雲のミクロな素過程の高度化が気候に対するマクロな指標にどのような影響を与えるかについて、メカニズムレベルで理解する必要がある。図1.11は、降水を診断する手法と予報する手法の違いによって、エアロゾル有効放射強制力と、降水の頻度・強度に抱える系統誤差がどのように変化したかを描いた図である。

従来型モデルでは、降水生成をautoconversionプロセスのみに頼って表現せざるを得ず、雨滴によってもたらされるaccretionプロセスを原理上表現できていなかった。Autoconversionプロセスはエアロゾルに強く依存するため、エアロゾル有効放射強制力を観測よりも過剰な冷却作用を持つように表現されている。これは、MIROCに限らず多くのGCMに共通して見られる系統誤差の一つである⁷。一方、降水を予報するモデリング手法と用いると、エアロゾルに依存しないaccretionも陽に表現され、結果としてこの系統誤差の解消につながったことが明らかとなった。

また、降水生成についても、よく知られている“too-frequent and too-light”（降水頻度が過大な一方で強度は過小に表現する系統誤差）問題も、降水予報型モデルで顕著な改善が見られた。図1.11下段は降水生成の特徴を表すCFODDであるが、大気中での降水粒子の落下過程を陽に表現する降水予報型で、衛星観測と整合的な降水生成が可能になることがわかった。これは言い換えると、雲内部で現実大気で生じている雲粒・雲氷・雨滴・雪片の粒子間相互作用（図1.1）がより現実的にモデリングできていることを意味している。

その結果を踏まえると、エアロゾル有効放射強制力の水平分布に見られる改良前と改良後の差異を説明することができる。図1.12から明らかなように、エアロゾル有効放射強制力の弱化が見られたのは、東アジア・北米・ユーラシアといった北半球中緯度の寄与がほとんどである。感度実験として、液体降水のみ予報型にした実験と、固体降水も予報型にした実験を行った。その結果、雨滴のみの粒子間相互作用ではエアロゾル有効放射強制力の大幅な弱化は見られず、固体降水粒子（特に雪片）が本質的に重要であることが明らかとなった。エアロゾル有効放射強制力が緩和された地域は降雪量とも対応が非常に良いことを考慮すると、エアロゾルの増加によって増加した雲水が、上空から時間をかけて落下してくる雪片によって併合し雪片の成長に使われることで、雲の増大（すなわちこれがエアロゾル有効放射

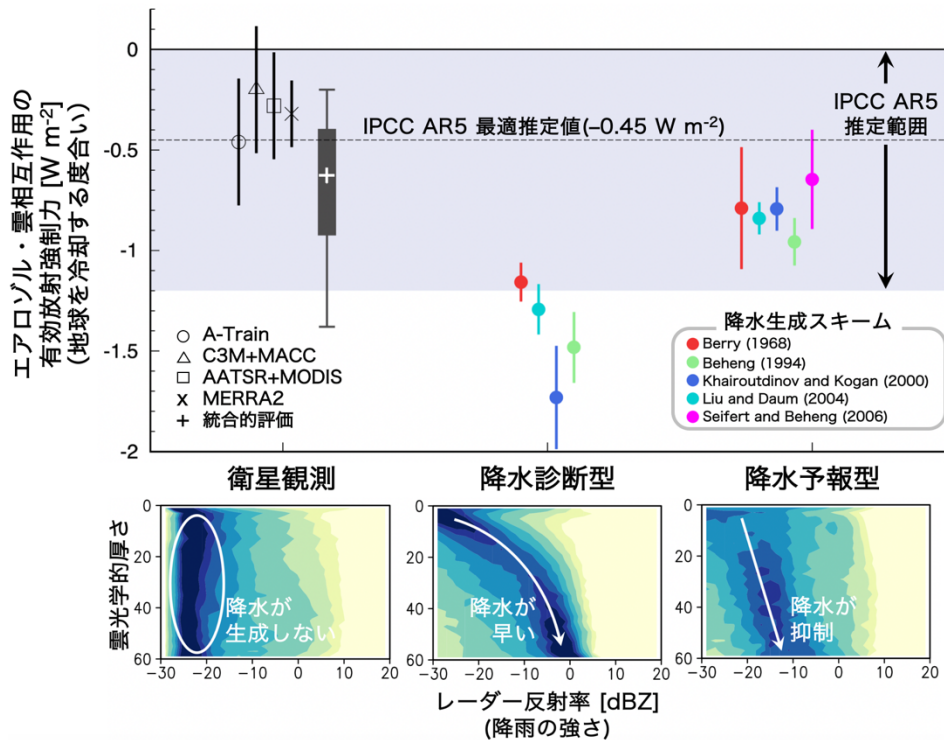


図1.11 衛星観測、降水診断型MIROC、降水予報型MIROCによって得られた、(上段)エアロゾル有効放射強制力の全球年平均値および、(下段)降水生成の早さを示すCFODD。

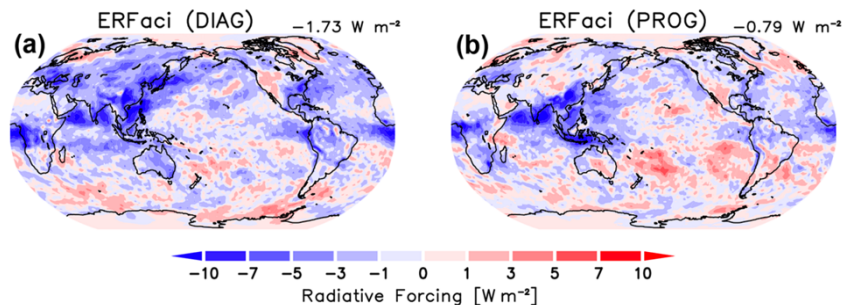


図1.12 降水診断型MIROC (a) および降水予報型MIROC (b) によって推定されたエアロゾル有効放射強制力の年平均全球分布図。青色は、エアロゾルによって気候に対して冷却の効果をもたらすことを意味する。

強制力の駆動源)を緩和させているためだと結論づけた。これら一連の結果は、“Snow-induce buffering” 仮説として成果発表を行った^{14,15}。今後、雲解像モデルやLES (Large-Eddy Simulation) など、よりプロセスの解像に根ざした数値モデルを用いた追試験が行われることで、本仮説の検証が進むと期待する。

エアロゾル有効放射強制力に加え、平衡気候感度も数値モデルの性能を示す重要な指標である。図1.13は、モデルの改良前後で平衡気候感度および雲フィードバックがどのように変化したかを示した図である (Hirota et al., 2022より引用¹⁶)。改良後のモデルでは、平衡気候感度を約20%上昇させることがわかった (図1.13a)。すなわち、温暖化がより出やすいモデルになったことを意味する。その原因としては、従来型モデルで大幅に過小だった雲量が、改良型モデルでは観測と非常に整合するように改善されたこと (次節および図1.14で詳述) が本質的に寄与していることが明らかとなった。具体的には、雲量が少ないモデルの場合、温暖化に伴って上層雲がさらに高高度化する効果 (雲の高さフィードバックと呼ばれる) も適切に表現することができず、雲量変化自体が過小にしか表現できない。雲の高さフ

フィードバックは、地球から逃げる放射を弱めることで地球を温める方向に寄与するため、特に長波の雲フィードバックにこの特徴がよく現れている（図1.13b）。

このように、本研究における雲・降水のミクロな物理過程の高度化が、気候に対するマクロな指標とどのように結びついているかを、メカニズムレベルで明らかにすることができた。したがって、これらの科学的解釈はMIROCのみに当てはまる議論ではなく、他のモデリングセンターにも有益な成果として活用されることが期待される。

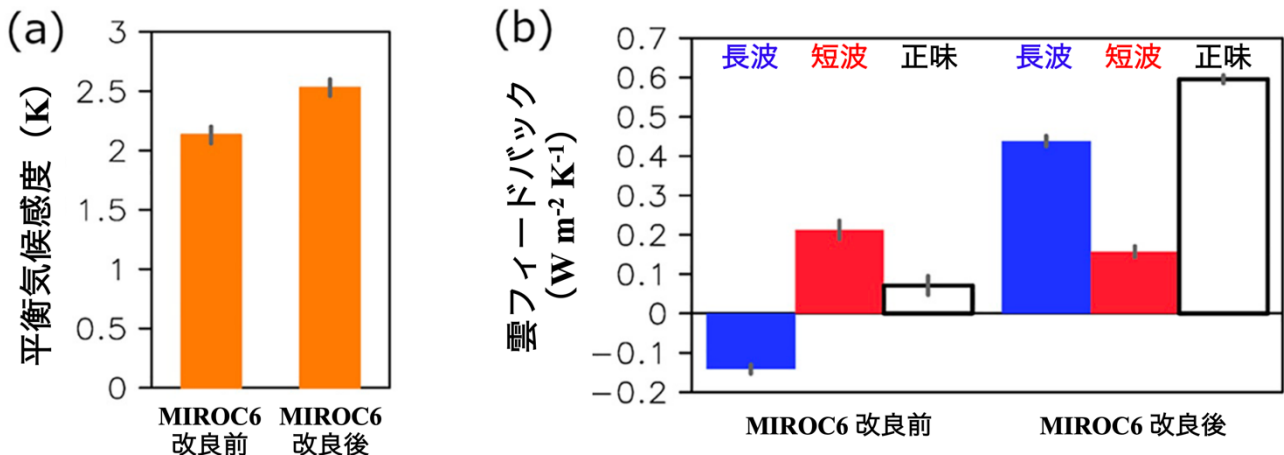


図1.13 改良前のMIROCと改良後のMIROCによって得られた平衡気候感度 (a) および、長波成分、短波成分、それらの正味の雲フィードバックの強さ (b)。

4. 5 モデルの評価手法の不確実性の理解と気候変動予測への示唆

上記のモデル開発を進める中で、モデルの評価手法自体にも不確実性が内蔵していることが明らかとなった。具体的には、実際の衛星観測（CALIPSO搭載LiDAR）における雲検出は、部分的には雨滴や雪片といった降水粒子からの後方散乱も寄与している一方、モデル内では雲と降水は別クラスとして取り扱っているため、厳密に衛星アルゴリズムを反映していない仕様となっていた。米国コロンビア大学のGregory Cesana博士から、試験的にこの効果を導入することを提案され、本課題で開発したモデルに実装を行った。これは、本課題で降水粒子を陽に表現するモデルの開発が大幅に進んだことによって可能となった研究である。

図1.14に、衛星観測データ、従来型モデル、降水予報型モデル、およびLiDARアルゴリズムを改良した降水予報型モデルを用いた全雲量および上・中・下層雲量の全球分布を示す。従来型モデルと比較し、降水予報型モデルでは雲量の再現性が大幅に向上したことがわかるが、さらにLiDARシミュレータの雲診断アルゴリズムを観測と整合するように改良したことにより、ほぼ観測との誤差がない性能を表現できることが明らかとなった。このことは、現状のシミュレータのままではモデルの評価手法自体に無視できない不確実性を含んでいることを意味する。

結果として、数値目標に掲げていた、CloudSat/CALIPSO衛星観測と比較したモデル雲量（全雲量に加え上層雲量・中層雲量・下層雲量）の誤差5%以内を達成することができた。この目標数値は、国際的にも極めて挑戦的な数値であり、データが公開されている数値気候モデルの中では世界最高クラスの性能である¹⁷。現在気候における雲量が観測を忠実に再現するモデルを構築したことで、過去および将来の気候変動予測の信頼性についても、従来型モデルより大幅に向上したものと考えられる。

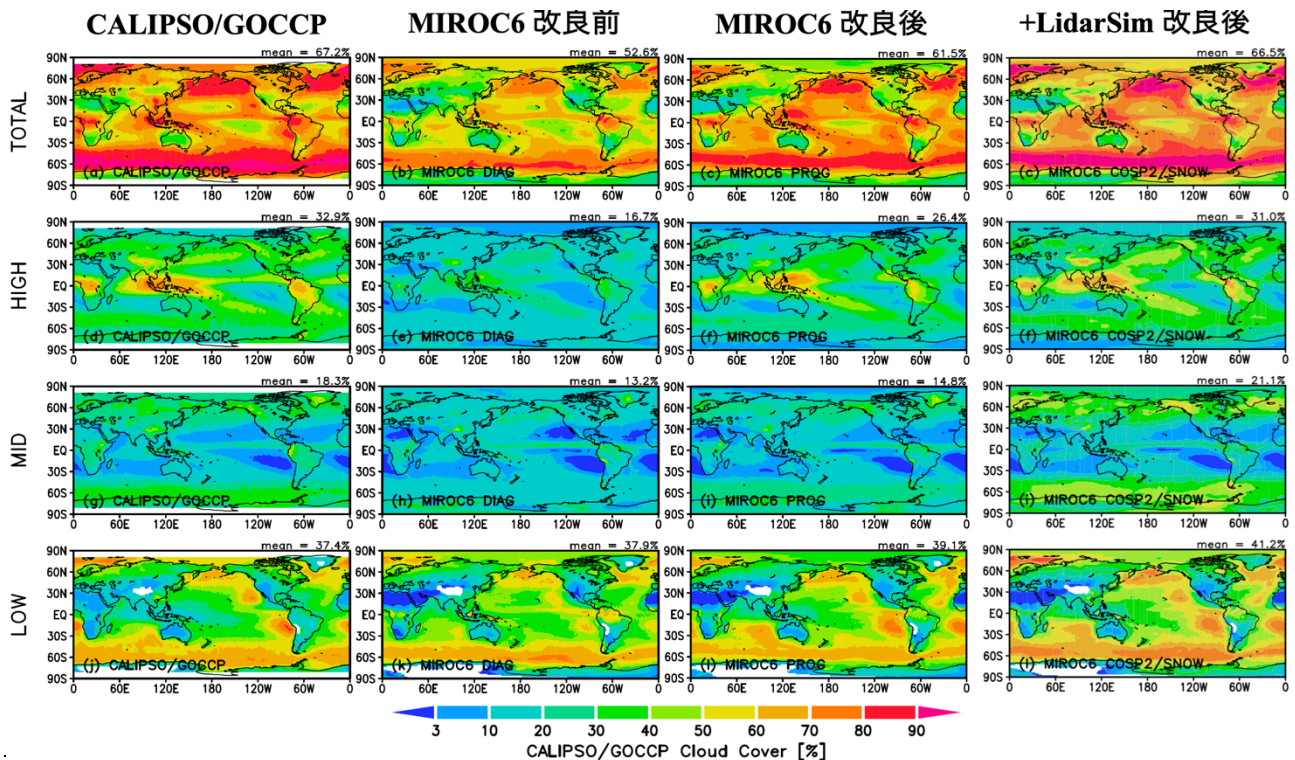


図1.14 衛星観測データ、従来型モデル、降水予報型モデル、およびLiDARアルゴリズムを改良した降水予報型モデルを用いた全雲量および上・中・下層雲量の全球分布。各図の右上の数値は、雲量の全球年平均値を示す。

5. 研究目標の達成状況

研究目標のほぼ全てを達成した。数値モデル開発だけでなく、衛星観測データの特性を考慮に入れたモデルの性能評価ツールである衛星シミュレータの改良にも国際コミュニティの中で貢献・活用したことにより、全雲量および上層・中層・下層雲量全ての誤差が5%以内という数値目標を達成することができた。これは、世界各国で開発されている50を超える最新のCMIP6モデルの結果の中でも最高水準の性能である。

また、当初掲げていた数値目標の達成に加え、全球気候モデルでは世界最高水準の精緻度を備えた仕様である電・あられ予報型の数値モデル開発も完了することができた点は特筆すべき成果である。実装による計算コストの増加は1.1倍程度であり、大規模計算にも適用可能な低い計算コストで運用可能である。唯一、全球気候モデルに電・あられを陽に予報するスキームを搭載しているのが米国のCAMモデルであるが、用途としては領域モデルとして10kmスケールの高解像度での使用が想定されており、本課題で実施したような温暖化実験からの降電頻度の将来変化予測の評価は、他に類例がない。この点について、目標を大きく上回る成果をあげたと自己評価する。

開発した新しい雲・降水パラメタリゼーションは、日本で開発が推進されているMIROCの次期バージョンに搭載されることが決定している。また、本課題の中で特に重要な役割を担った衛星シミュレータを利用したモデル開発は国際的にも注目が集まっており、コロラド大学（米国）、コロンビア大学（米国）、Pacific Northwest National Laboratory（PNNL; 米国）、Met Office Hadley Centre（英国）、University of Leeds（英国）などとの複数の国際共同研究に既に発展している。これらのことは、本課題終了後も新たな科学的萌芽に繋がることが期待されるほか、次期CMIP7への参画およびIPCC AR7への科学的知見の提供に貢献する可能性が非常に高いことを裏付けるものである。

6. 引用文献

- 1) Jing, X., Suzuki, K., Guo, H., Goto, D., Ogura, T., Koshiro, T., and Mülmenstädt, J. (2017). A multimodel study on warm precipitation biases in global models compared to satellite observations. *J. Geophys. Res. - Atmos.*, **122**, 11,806–11,824.
- 2) Nam, C., Bony, S., Dufresne, J.-L., and Chepfer, H. (2012). The ‘too few, too bright’ tropical low-cloud problem in CMIP5 models. *Geophys. Res. Lett.*, **39**, L21801.
- 3) Ghan, S., Wang, M., Zhang, S., Ferrachat, S., Gettelman, A., Griesfeller, J., et al. (2016). Challenges in constraining anthropogenic aerosol effects on cloud radiative forcing using present-day spatiotemporal variability. *P. Nat. Acad. Sci.*, **113**, 5804–5811.
- 4) Swales, D. J., Pincus, R., and Bodas-Salcedo, A. (2018). The cloud feedback model intercomparison project observational simulator package: Version 2. *Geosci. Model Dev.*, **11**, 77–81.
- 5) Michibata, T., Suzuki, K., Sekiguchi, M., and Takemura, T. (2019). Prognostic precipitation in the MIROC6-SPRINTARS GCM: Description and evaluation against satellite observations. *J. Adv. Model. Earth Syst.*, **11**, 839–860.
- 6) Hotta, H., K. Suzuki, D. Goto and M. Lebsock, 2020: Climate impact of cloud water inhomogeneity through microphysical processes in a global climate model. *J. Climate*, **33**, 5195–5212.
- 7) Malavelle, F. F., Haywood, J. M., Jones, A., Gettelman, A., Clarisse, L., Bauduin, S., et al. (2017). Strong constraints on aerosol–cloud interactions from volcanic eruptions. *Nature*, **546**, 485–491.
- 8) Michibata, T., Suzuki, K., Sato, Y., and Takemura, T. (2016). The source of discrepancies in aerosol–cloud–precipitation interactions between GCM and A-Train retrievals. *Atmos. Chem. Phys.*, **16**, 15,413–15,424.
- 9) Cesana, G. V., Ackerman, A. S., Fridlind, A. M., Silber, I., and Kelley, M. (2021). Snow reconciles observed and simulated phase partitioning and increases cloud feedback. *Geophys. Res. Lett.*, **48**, e2021GL094876.
- 10) Suzuki, K., Stephens, G., Bodas-Salcedo, A., Wang, M., Golaz, J.-C., Yokohata, T., and Koshiro, T. (2015). Evaluation of the warm rain formation process in global models with satellite observations. *J. Atmos. Sci.*, **72**, 3996–4014.
- 11) Boucher, O., Randall, D., Artaxo, P., Bretherton, C., Feingold, G., Forster, P., et al. (2013). Clouds and aerosols. Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (pp. 571–657). Cambridge, UK: Cambridge University Press.
- 12) Gettelman, A., Morrison, H., Thayer-Calder, K., and Zarzycki, C. M. (2019). The impact of rimed ice hydrometeors on global and regional climate. *J. Adv. Model. Earth Syst.*, **11**, 1543–1562.
- 13) Finney, D.L. Lightning threatens permafrost. *Nat. Clim. Chang.* **11**, 379–380 (2021).
- 14) Michibata, T., and Suzuki, K. (2020). Reconciling compensating errors between precipitation constraints and the energy budget in a climate model. *Geophys. Res. Lett.*, **47**, e2020GL088340.
- 15) Michibata, T., Suzuki, K., and Takemura, T. (2020). Snow-induced buffering in aerosol–cloud interactions. *Atmos. Chem. Phys.*, **20**, 13771–13780.
- 16) Hirota, N., Michibata, T., Shiogama, H., Ogura, T., and Suzuki, K. (2022). Impacts of precipitation modeling on cloud feedback in MIROC6. *Geophys. Res. Lett.*, **49**, e2021GL096523.
- 17) Vignesh, P. P., Jiang, J. H., Kishore, P., Su, H., Smay, T., Brighton, N., and Velicogna, I. (2020). Assessment of CMIP6 cloud fraction and comparison with satellite observations. *Earth Space Sci.*, **7**, e2019EA000975.

Ⅲ. 研究成果の発表状況の詳細

(1) 誌上発表

<査読付き論文>

- 1) **T. Michibata**: *Handbook of Air Quality and Climate Change*. Springer, 1-42 (2022), Aerosol-cloud interactions in the climate system, doi:10.1007/978-981-15-2527-8_35-1. **[invited]**
- 2) N. Hirota, **T. Michibata**, H. Shiogama, T. Ogura, and K. Suzuki: *Geophys. Res. Lett.*, **49**, e2021GL096523 (2022) (IF:4.72), Impacts of precipitation modeling on cloud feedback in MIROC6.
- 3) **T. Michibata**, K. Suzuki, and T. Takemura: *Atmos. Chem. Phys.*, **20**, 13771-13780 (2020) (IF:6.13), Snow-induced buffering in aerosol–cloud interactions.
- 4) **T. Michibata**, and K. Suzuki: *Geophys. Res. Lett.*, **47**, e2020GL088340 (2020) (IF:4.72), Reconciling compensating errors between precipitation constraints and the energy budget in a climate model.

<その他誌上発表（査読なし）>

- 1) MIROC6 AGCM document writing team (T. Ando, T. Higuchi, H. Hotta, T. Iwakiri, T. Jinno, K. Kino, Y. Takano, M. Toda, and K. Yamazaki, M. Chikira, T. Kodama, **T. Michibata**, H. Miura, T. Nitta, T. Ogura, F. Saito, M. Sekiguchi, T. Suzuki, K. Suzuki, H. Tatebe, M. Watanabe, S. Watanabe, and K. Yoshimura), *UTokyo Repository*, pp. 136 (2021), Technical Report: Description of MIROC6 AGCM, doi: <https://doi.org/10.15083/0002000180>
- 2) **道端拓朗**: 天気, **68**, 277-290 (2021) 数値気候モデルと衛星観測の複合利用によるエアロゾル・雲・降水相互作用に関する研究 –2019年度山本賞受賞記念講演–. **[招待あり]**

(2) 口頭発表（学会等）

- 1) N. Hirota, **T. Michibata**, H. Shiogama, T. Ogura, and K. Suzuki: CFMIP Workshop, 2022 “Impacts of Precipitation Modeling on cloud response to global warming in MIROC6.”
- 2) 廣田渚郎, **道端拓朗**, 塩竈秀夫, 小倉知夫, 鈴木健太郎, 日本気象学会2022年度春季大会（2022）「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) **T. Michibata**, T., Y. Imura, H. Nakao, and K. Suzuki: EarthCARE Workshop, 2022 “Evaluation of cloud micro- and macrophysical properties in the MIROC6 with A-Train observations and COSP simulator.” **[invited]**
- 4) 井村裕紀, **道端拓朗**, エアロゾル・雲・降水の相互作用に関する研究集会（2022）「衛星シミュレータを用いた北極域の雲・降水過程の解析」
- 5) **道端拓朗**, 日本気象学会関西支部2021年度中国地区第3回例会（2021）「数値気候モデルMIROCに適用する新しい雲・降水パラメタリゼーションの開発」
- 6) 井村裕紀, **道端拓朗**, 日本気象学会関西支部2021年度中国地区第3回例会（2021）「全球気候モデルMIROC6における北極域の雲・降水過程の診断」
- 7) **T. Michibata**, Y. Imura, H. Nakao, and K. Suzuki: Tri-MIPathlon-3 Workshop, 2021 “How does the treatment of precipitation in a climate model improve the representation of aerosol-cloud interactions?”
- 8) **T. Michibata**, and Y. Imura: CFMIP Meeting, 2021 “Revisiting an apples-to-apples comparison between model and observations using satellite simulator.”
- 9) **T. Michibata**, K. Suzuki, and T. Takemura: JpGU-AGU Joint Meeting, 2020 “Challenges in constraining cloud and precipitation susceptibilities to aerosols: Satellite observations and global climate models.” **[invited]**
- 10) **道端拓朗**, 鈴木健太郎: 日本気象学会2020年度秋季大会, (2020) 「降水予報型MIROCにおける降水頻度・強度の改良」

(3) 「国民との科学・技術対話」の実施

- 1) 岡山県立岡山芳泉高等学校における特別授業「地球温暖化研究の最前線 ～観測とシミュレーションで気候を理解する～」(2021年11月19日、聴講者45名)

(4) マスコミ等への公表・報道等>

特に記載すべき事項はない。

(5) 本研究費の研究成果による受賞

井村 裕紀：令和3年度岡山大学理学部長賞, 2022年3月(研究室所属学生の表彰)

IV. 英文Abstract

Development of a Spatio-Temporal Seamless Precipitation Scheme for Global Warming Prediction

Principal Investigator: Takuro MICHIBATA

Institution: Graduate School of Natural Science and Technology,
 Okayama University, 3-1-1 Tsushima-Naka, Kita-ku, Okayama
 700-8530, Japan
 Tel: +81-(0)86-251-7884
 E-mail: tmichibata@okayama-u.ac.jp

[Abstract]

Key Words: Global climate model, Aerosol-cloud interactions, Precipitation microphysics, radiative forcing, Satellite observations, Satellite simulator, Cloud feedback, Climate sensitivity

Aerosol-cloud interactions (ACI) are a major source of uncertainty in climate modeling because of their complex dependences on cloud and environmental regimes, which are poorly understood. The simplified treatment of precipitation in general circulation models (GCMs) gives rise to several commonly recognized systemic biases. To address such problems at a fundamental process-level, this study develops a comprehensive two-moment cloud and precipitation parameterization, which features prognostic precipitation for rain, snow, graupel, and hail. During the model development, this study particularly focused on the use of a satellite simulator to evaluate model performance in a manner consistent with satellite observations. Explicit treatments of rain and snow effectively reconcile the “too-few” cloud bias and “too-frequent” rain formation bias. In addition to updating the framework for modeling precipitation, this study also develops a cloud-to-rain conversion scheme based on multiple satellite observations. The proposed scheme is designed to reproduce a lower cloud susceptibility to aerosols in a more efficient precipitating regime according to the satellite-derived relationship. This allows the simulation of nonmonotonic cloud responses to aerosol perturbations from region to region, similar to that provided by a cloud-resolving model in the literature. These results are considered to be more realistic than previous autoconversion schemes that fix the magnitude of ACI and hence ignore the regime dependence. The new scheme mitigates “too strong” ACI bias commonly found in current GCMs.

The prognostic treatment of graupel and hail, which is a state-of-the-art framework in current GCMs, improves precipitation intensity by considering subgrid-scale variability in a manner that effectively provides “spatio-temporally seamless” modeling. Explicit representation of graupel and hail is fundamentally important to predict future changes in lightning occurrence, and hence forest-fire over mid- and high-latitudes. According to global warming simulations (4K increase in sea surface temperature) using the new parameterization, occurrences of graupel and hail increase more than 50% compared to the present-day simulation over the Arctic regions, which is in line with recent studies that have shown a future increase in lightning activity.

The new model simulates cloud cover (i.e., total-, high-, mid-, and low-cloud amount) with errors of <5%. This performance is at the highest level of the latest CMIP6 models. It is hoped that the new model developed in this study will contribute to a better understanding of the process-level linkage between cloud-precipitation and global warming, and result in more accurate climate simulations.