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

一2019年度山本賞受賞記念講演一

道端拓朗*

1. はじめに

この度は、日本気象学会山本賞を賜り、誠に有難う ございます.これまで推進してきた、人工衛星観測 データを用いた数値気候モデルのエアロゾル・雲・降 水プロセスにおける不確実性の理解と、予測精度を改 善するためのモデル開発の取り組みに対して、大変光 栄な賞を賜りましたことはこの上ない喜びであり、こ れまで支えて下さった多くの方々に心より感謝申し上 げます.今回の受賞を励みに、今後なお一層、学術的 貢献に尽力してまいりたいと思います.

受賞対象となった2編の論文(Michibata et al. 2016, 2019a)は、九州大学大学院総合理工学府博士後期課程 在学時から、博士学位取得後に九州大学応用力学研究 所および東京大学大気海洋研究所にポスドク研究員と して在籍していた期間を中心に着手した研究成果で す.学部生の頃に手に取った論文がきっかけで、「人工 衛星観測データと数値モデルを組み合わせた研究がし たい」と希望を膨らませた研究像が少しずつ形になり、 こうして評価して頂いたことを大変に感慨深く思って おります.

本研究で中心的に取り扱う雲・降水過程は、気候変 動予測における最大の不確実要素の1つであり、大気 エアロゾルと非線形に相互作用し合う複雑なプロセス です. 国際的にも関心度の高い分野であると同時に、 課題も山積しているため、研究の進展の早い分野の1

*	九州大学応用力学研究所	(現:岡山大学学術研究院自
	然科学学域).	

tmichibata@okayama-u.ac.jp

-2020年11月12日受領--2021年1月12日受理-

© 2021 日本気象学会

つでもあると思います.そこで本解説では,当該研究 領域における様々な問題意識と本研究に至った背景を 2節で整理し,数値モデルにおける雲・降水過程の不 確実性の根源を解明した研究成果,およびそれを克服 するためのモデル開発に関する研究成果をそれぞれ3 節,4節で解説します.5節では,これまでの研究を 踏まえ,今後さらに研究が必要な課題について整理し ます.

エアロゾル・雲・降水相互作用にまつわる諸問 顕

本研究では、産業革命以降の人間活動によって増加 してきたエアロゾル(固体・液体の微粒子が大気中に 浮遊している系)が、気候システムにどのような影響 を及ぼすかについて定量的に理解することを大きな目 標としています。その理解の鍵となる、エアロゾル・ 雲・降水といった粒子系の「微物理(microphysics)」 から話を出発したいと思います。私たちの普段の経験 からも感覚的に想像できると思いますが、代表的な雨 滴の大きさは半径約1mm 程度です。一方、雨粒の素 となる雲粒は、シャープペンシルの芯や髪の毛よりも 小さい、半径10μm 程度のオーダーです(荒木 2014). 雲粒の凝結核(タネ)となるエアロゾルはそれよりも さらに小さく、文字通りの「ミクロ」な世界での出来 事を研究しています。

では、こうしたマイクロスケールのエアロゾル・ 雲・降水過程が、地球規模の水循環・エネルギー収支 とどのようにつながりを持っているのでしょうか? それを説明する主要な役割である2つの概念を紹介し ます、その1つ目は、「エアロゾル・放射相互作用」で す、これは、大気中に存在するエアロゾルによって太 陽・赤外放射の散乱や吸収の度合いが変わることで、 地球の放射収支に影響を及ぼす効果のことを言いま す.例えば,黒色炭素は太陽放射をより吸収する特性 があり大気を温める効果がある一方で,硫酸塩や有機 物,海塩などの光学的に明るいエアロゾルは地球を冷 やす効果を持ちます.後者の効果の方が大きい為に, 正味では負の放射強制力を持つものと評価されていま す (Myhre *et al.* 2013).

そして2つ目は、「エアロゾル・雲相互作用」です. 例えば、人間活動などによってエアロゾルが増加する と、 雲の凝結核が増加し雲粒一つ一つの粒径が小さく なることで、雲アルベドの増加につながります (Twomev 1977). また. 雲粒が小さくなると. 雲粒同 士の衝突・併合によって降水粒子に成長する時間ス ケールが長くなり. 雲寿命が延びる (雲量が増加する) といったプロセスが働くことも古くから知られていま す (Albrecht 1989). これらは太陽放射の散乱をより 強める方向に働くため、先述のエアロゾル・放射相互 作用と同様、やはり負の放射強制力を持つものと評価 されています。ただし、これは大気下層に形成される 背の低い層状性の水雲(雲頂温度が273K 以上のいわゆ る暖かい雨を降らせる雲)についてです.背が高く氷 晶を伴う積乱雲や、氷晶と過冷却水滴が混在する混合 相雲などによる冷たい雨は物理過程がさらに複雑であ り、その気候影響も水雲の場合とは大きく異なります (Lohmann 2017). 例えばエアロゾルが多い環境で形 成される対流雲は、エアロゾルが少ない環境と比較し て降水生成のタイミングにラグが生じ、より上層まで 多くの雲水が運ばれて蒸発が生じることで不安定を加 速させます.結果として,エアロゾルが対流雲の活性 化に寄与することで雲はより深くなり、地表降水も増 加することが報告されています (Rosenfeld et al. 2014). 背の高い対流性の雲は. 地球を冷やす 日傘効 果|よりも宇宙への長波放射を逃がさない「温室効果| が正味で勝り、結果として正の放射強制力として寄与 する可能性が指摘されています.対流雲だけでなく, 混合相雲の微物理の振る舞いも非常に複雑で、現在で も議論の的となっています.本解説では、特に断りが ない限り低層の水雲について議論の対象にします.

上述のプロセスを介して, エアロゾルをトリガーと したマイクロスケールの現象がグローバルな気候シス テムと密接に関わっています (Myhre *et al.* 2013). ち なみに, これらの相互作用はそれぞれ, エアロゾルに よる直接効果や間接効果, といった用語がよく用いら れてきましたが, 気候変動に関する政府間パネル (IPCC)第5次評価報告書(AR5)以降は「エアロゾル・放射相互作用」・「エアロゾル・雲相互作用」という用語が統一的に用いられるようになってきています(Boucher *et al.* 2013). この分野全体に関する日本語の解説としては、IPCC AR5に Lead Author(主執筆者)として貢献された九州大学の竹村俊彦主幹教授による解説(竹村 2014)があります.

さて、エアロゾル・放射相互作用とエアロゾル・雲 相互作用はそれぞれ地球を冷却する負の放射強制力を 持つ、という話をしましたが、その効果はどの程度な のでしょうか? 先述の IPCC AR5では、これら2 つの相互作用の正味の放射強制力は、-0.9Wm⁻²(そ れぞれ-0.45Wm⁻²) であると評価されています. 二 酸化炭素やメタンといった温室効果ガスによる正の放 射強制力が約3.0Wm⁻²のオーダーであることを考え ると (Myhre et al. 2013), エアロゾルは無視できない 程度に温暖化成分の相殺に寄与していることがおわか り頂けるかと思います。しかし、エアロゾル放射強制 力の-0.9Wm⁻²という見積もりには、-0.1~ -1.9Wm⁻²という大きな不確実性の幅がつけられて おり、AR5以前のIPCC評価報告書から長きにわたり 定量的な評価の信頼性向上が課題となっています (Bellouin et al. 2020).

特に不確実性が大きいのは、エアロゾル・雲相互作 用です (Boucher et al. 2013). その原因である雲の応 答の複雑性を模式的に表したのが第1図です(Stevens and Feingold 2009). エアロゾルに対する雲の応答は、 放射収支を変化させると同時に水循環にも影響しま す. 雨の降り方の変化を適切にモデル化できなけれ ば、それによってエアロゾルが大気中から除去される 度合いも変わり、それによってさらに雲場の応答に不 確実性が波及します (Jing et al. 2019). また, 気象場 そのものがモデル内で適切に表現されていないと、エ アロゾル場・雲場の再現性にも影響すると同時に, 雲 微物理における凝結・蒸発といった潜熱のやり取りが 環境場・気象場を変化させるフィードバック機構にも 影響します (McCoy et al. 2020). さらには, 雲内部で 生じる乱流も降水形成や雲の蒸発 (Lebo and Feingold 2014) に影響しています.

このように,エアロゾル・雲相互作用は非線形性の 強い現象であり,時空間解像度の粗い気候モデルが特 に苦手としている領域です.気候モデルの典型的な水 平解像度は約100km 格子スケール,積分時間ステップ は10~30分程度ですので,雲は直接解像することがで

"天気"68.6.

きず,パラメタリゼーションによって半物理的・半経 験的に表現しています.しかし,どんなに精緻な数値 モデルであろうと完全な現実世界を再現するのは不可 能であり,観測や理論研究,モデリング研究でも未だ 解明されていないプロセスも残っているはずです.し たがって,気候変動予測の精度を向上するためには,

- ・モデル内における不確実性の根源がどこに起因するのか?
- ・どのようなプロセスを見逃していて、それがどれく らい気候変動予測における不確実性を生じうるの か?
- そうした問題を克服するためには、現実的な計算コストの範囲内でモデルのどのプロセスをどのように 改良すれば良いか?

といった問題を見極めることが非常に重要になります. エアロゾル・雲相互作用に端を発したこれらの学術 的問いに答えるため、全球大気海洋モデル MIROC (Tatebe *et al.* 2019)および複数の人工衛星データの解 析を組み合わせることで、素過程レベルでの理解深化 に尽力してきました.次節以降で、具体的な研究成果 について解説を進めていきます.ちなみに、共同研究 者であり、この度の山本賞の受賞と同一のタイミング で正野賞を受賞された北海道大学の佐藤陽祐さんは、 エアロゾル・雲・降水をより素過程レベルで表現可能 な全球雲システム解像モデル NICAM (Satoh *et al.* 2014) および LES モデル SCALE (Nishizawa *et al.* 2015) を階層的に用いることで、この分野の諸問題の 解決に多大なご貢献をされてきました.佐藤さんによ る受賞記念講演の解説記事(佐藤 2020)がすでに出版 されていますので、高解像度のモデリング研究と本解 説における気候研究との繋がりを意識しながら読み進 めて頂けると、この分野の研究をより広い視野で見渡 すことができるのではないかと思います.

3. 雲・降水素過程の不確実性の理解

以上の背景を踏まえ,数値気候モデルと観測の矛盾



第1図 エアロゾルの摂動に対するバッファ機構の模式図(Stevens and Feingold (2009)第3図を改変).地球 システムの要素である大気エアロゾル場・放射場・気象場と雲システムの応答の関係性を示す.矢印の太 さは関連性の強さ,矢印の色の濃さは信頼性の度合いを表す.

の根源はどこにあるのだろうか? ということについ て調査した論文が,受賞対象論文の1つ目 (Michibata et al. 2016) になります.前節で,エアロゾルは水雲の 寿命を延ばす働きがある,と説明しましたが,実は 2000年代後半あたりを皮切りに,こうした雲寿命効果 と整合しない (エアロゾルの増加に対して雲水が減少 する)結果がしばしば報告されるようになりました (Small et al. 2009).ただしそうした研究の多くが, LES を用いた高解像度のプロセスモデリングや航空 機観測による事例解析がベースとなっていましたの で,研究領域が絞られていて全球規模でどうなるの か,正味で気候に対してどういうインパクトを持つの か,については長らく論争が続いていました (Stevens and Feingold 2009).

280

3.1 数値モデルと衛星観測の矛盾の根源

そこで、エアロゾルに対する雲の応答の地理分布を モデルと観測で比較できれば、不確実性を明らかにで きるのではないかと考えました。第2図は、d (ln LWP)/d (ln N_c) という指標を全球解析した図で、 LWPは鉛直積算雲水量、 N_c は雲粒数濃度です。この指 標は、エアロゾルのプロキシを N_c として、その微小変



 第2図 全球大気海洋モデル MIROC および CloudSat・MODIS衛星観測から推定され たエアロゾルに対する雲水の応答 d ln LWP/d ln N_cの水平分布図. エアロゾル の増加に対して雲水が減少することを意 味する負の領域をハッチで示す. Michibata et al.(2016) 第2図をもとに作成.

化 (perturbation) があった時の雲水の質量変化を意 味しますが, 簡単に言うと, エアロゾルによって雲寿 命がどれくらい影響を受けやすいか, というシグナル を取り出したような解析になります.

まず上段の MIROC モデルの結果を見ると,全球ほ ぼ一様に正の応答が出ていることがわかりますが,こ れはエアロゾルが増えて N_cが増加すると,降雨生成効 率を減少させて雲寿命を延ばすパラメタリゼーション がモデル内に組み込まれているからです(3.2節で詳 述).一方で下段の衛星観測の結果を見ると,雲水が増 大する効果そのものが小さいことに加え,ポコポコし た積雲が立つような環境では雲寿命効果とは逆向きの 負の応答を併せ持つことがわかってきました.これ は,人間も生まれ育った環境によって個性が異なるよ うに,雲も成長した環境によってエアロゾルの感じ 方・影響の受けやすさが異なる,ということ意味する 結果です.つまり,数値気候モデルではそういった「雲 の個性」を表現することができていない,ということ になります.

こうした不確実性が正味で気候にどう影響するか, については、雲寿命の変化に加えて雲の粒径(半径, 以下同じ)の変化にも着目する必要があります. 雲の 光学的厚さ (τ_c)は鉛直積算雲水量 LWP に比例し, 雲粒有効粒径 r_c に反比例する ($\tau_c \propto LWP/r_c$)ことを考 えると、雲粒数濃度 N_c を用いて

$$\frac{d \ln \tau_{\rm c}}{d \ln N_{\rm c}} = -\frac{d \ln r_{\rm c}}{d \ln N_{\rm c}} + \frac{d \ln \text{LWP}}{d \ln N_{\rm c}} \tag{1}$$



第3図 エアロゾルに対する雲の応答の全球平均 値. 白抜きは MIROC モデル、グレーは 衛星観測. 左から, 雲光学的厚さ, 雲ア ルベド効果, 雲寿命効果の応答を示す. Michibata *et al.*(2016)第3図をもとに作成.

という関係が成り立つことがわかります. すなわち,

エアロゾルに対する正味の雲の明るさの変化(左辺) は、雲アルベド効果(右辺第1項)と雲寿命効果(右 辺第2項)に依ります(Ghan *et al.* 2016). それぞれ のインパクトについて、モデルと観測で比較したのが 第3図ですが、やはり雲寿命効果に抱えるモデルの不 確実性が正味の雲の明るさのバイアスに本質的に関係 しており、その符号をも見誤っている可能性があるこ とを示唆しています.

エアロゾルの増加に対して雲水が増加する正の応答 は. エアロゾルが雲の凝結核として効率的に機能し, 雲量を増加させるためですが、負の応答は一体どのよ うなメカニズムによるのでしょうか? 第2図の衛星 観測で見られた地理依存性が、中緯度で正、低緯度で は負、と非常に明瞭に現れていたので、これは環境場 や雲のタイプが影響しているのではないだろうか、と 仮説を立てました、それを考察するために、エアロゾ ルに対する雲の応答を,降水量と大気安定度の観点か らレジームに分解した解析を考えました。すると、 自 の応答は大気が不安定なときほど現れやすいことが明 らかになったほか、降水を生じていないにも関わらず 雲水を失う場合もあることがわかりました. これは具 体的には、非降水性の浅い積雲レジームが該当すると 考えられますが、大気がより不安定な環境では強いエ ントレインメントによる乱流混合が雲頂付近の雲縁で 発生し、エアロゾルの増加によって小粒径化した雲粒 がより蒸発することで雲水を失うプロセスを捉えてい るものではないかと考えています。今回の研究で用い た CloudSat および MODIS 衛星観測からは,同一の雲 を時系列で追いかける解析ができないため、このメカ ニズムはあくまで推測の域を脱しないものの, LES を 用いた先行研究からの示唆とも矛盾しない結果です (Lebo and Feingold 2014). それまで LES がベースと なって議論されていたエアロゾルに対する雲のレジー ム依存性を,全球規模の観測的側面から明らかにした 成果として位置付けられるようになりました.

また,その後同様の解析を佐藤陽祐さんが NICAM を用いた実験を実施したところ,衛星観測と極めてよ く似た地理分布が再現されました.Michibata et al.(2016)で解析した人工衛星観測と MIROC の結果 に,新たに NICAM の解析結果を追加した佐藤さんの 研究は Nature Communications 誌に掲載されるなど, たちまち大きな成果に発展しました(Sato et al. 2018).その詳しい内容については,先述の佐藤(2020) に解説があります.これらの研究で指摘した微物理と

2021年6月

カ学場の相互作用による雲の蒸発メカニズムの他に も、湿性沈着を介したプロセスによって負の応答が説 明できることなどがその後の研究で指摘されているほ か(Rosenfeld *et al.* 2019)、東京大学の堀田陽香さん による追試験でも湿性沈着の重要性が確認されるな ど、まだまだ議論が活発な領域です.

いずれにしても、エアロゾルに対する雲の応答こそ が、気候モデルと観測における矛盾の根源となってい ることが明らかになってきました.こうした系統バイ アスを除去するために、数値モデルのパラメタリゼー ションのどの部分をどのように改良していけば良い か、についてさらに考えていきました.

3.2 数値モデルにおける系統誤差のメカニズム

数値モデルの中で起こっている素過程の振る舞いを 理解するために、雲・降水過程の表現手法について少 し掘り下げて見ていこうと思います.数値気候モデル では一般に、雲水から雨水への変換を計算する autoconversion というパラメタリゼーションで雲寿命の変 化を表現しています.具体的には、式(2)に示す通 り、ある高度における降水生成効率(P_{aut})をエアロゾ ル数(正確には雲粒数濃度 N_c)に関連づけることで表 現しています(Berry 1967; Khairoutdinov and Kogan 2000).

$$P_{\rm aut} \sim q_c^{\alpha} N_c^{-\beta} \tag{2}$$

ここで q_c は雲水混合比、 α および β はスキームに特有 の正の定数です.したがって、エアロゾル数の増加に 伴い N_c が増加すると、降雨効率を減少させることで雲 寿命を延ばす効果を再現しています.モデルによって 採用している autoconversion スキームは様々で、ス キームごとに α や β が異なるため、 q_c および N_c への感 度の持ち方はモデル依存です(Suzuki *et al.* 2015).ま た、雲粒同士の相互作用で新しく降水を生成する autoconversion プロセスは N_c への依存性を持ちます が、雲内に共存する降水粒子が衝突・併合によって雲 粒を捕捉し、さらに大きな雨滴へと成長する accretion というプロセスは、一般に雲水および雨水の質量(q_c , q_r)に比例する関数で定式化されるため(Seifert and Beheng 2001)、エアロゾルには依存しないという違い があります.

さて、第2図および第3図で、エアロゾルの摂動に 対して雲水を過度に増やそうとする系統誤差が MIROCに見られることを指摘しましたが、上述の微 物理過程の定式化とどうリンクしているのでしょう か? その理解の鍵となるのが、モデル内での降水の 取り扱い方です.現状のほとんど全ての気候モデルで は、隆水を診断的に取り扱っています。これは、モデ ルのある時間ステップにおいて診断された雨水は、そ の時間ステップ内に全て地表降水として落下させる (大気中に留めない)扱い方です. このように降水を診 断変数として取り扱うことで、気候モデルは本来必要 な隆水の鉛直落下や水平移流に関わる計算コストを節 約しています. こうした降水診断型のモデリング手法 は、開発の歴史的な経緯もあって多くの気候モデルで 採用されている一方、降水を陽に表現しないため雲内 部に本来共存する雨滴が雲粒を捕捉してどんどん成長 する accretion プロセスを. 原理上強く表現できない ことになります. そのため. エアロゾルの影響を直接 受ける autoconversion プロセスに偏って降水生成を 表現することになり、エアロゾル・雲相互作用を過大 に表現することにつながってしまう、というのが有力 な解釈です (Gettelman et al. 2015).

282

この問題は、MIROC に限らず同様のパラメタリ ゼーションを採用しているほとんど全ての気候モデル でも生じうるはずで、Michibata *et al.*(2016)の中でも 警鐘を鳴らしていましたが、実際に米英の複数の気候 モデルで同様の追試験を実施した論文が、翌年 Nature から発表されました(Malavelle *et al.* 2017). 彼らの結果でも、雲の粒径の変化は観測と整合的であ る一方、雲水の応答をモデルが過大評価する傾向を示 しており、雲・降水スキームが系統誤差の主要因とな りうるとする Michibata *et al.*(2016)の主張を支持す る結果を得たことになります.

4. 降水予報型スキームの開発

エアロゾル・雲相互作用に抱える数値気候モデルの 系統誤差の主因のひとつが、降水粒子の簡便な(診断 的な)取り扱いに求められることについて解説してき ました.この問題を本質的に改善するために、降水を 陽に予報して、水蒸気・雲水・雲氷・降雨・降雪の相 互作用を精緻に表現する「降水予報型スキーム」を開 発し、MIROC-SPRINTARS に適用することにしまし た.ここからは、当時のモデル開発の様子を振り返り、 開発したスキームの詳細について解説します.

4.1 新しい雲・降水スキームの枠組みと妥当性の 検証

降水を診断変数として取り扱う従来の「降水診断型 スキーム」と、今回開発した降水を予報変数として取 り扱う「降水予報型スキーム」の構造的な違いを模式 的に表したのが第4図です.

まず前者の診断型スキームでは、3節でも少し触れ ましたが、降水の情報を大気中にメモリしない仕様で すので、降水は時間ステップ内に即時に地表へと落下



第4図 (左)従来の降水診断型スキームと、(右)新たに開発した降水予報型スキームの構造の違いを模式的に示 した図.

します. これは乱暴な仮定に思えますが. 計算機資源 が乏しく積分時間ステップが30分以上だったような時 代には、5m/s程度で落下する雨滴は時間ステップ内 に全て地表に落下するものと見なし, 鉛直沈降や水平 移流を無視することで計算コストを節約していました (Ghan and Easter 1992). しかし、上空からゆっくり と時間をかけて落下する雪や、層積雲に伴うドリズル (霧雨)を適切に表現できないことになります。結果と して降水の頻度や強度のバイアスの要因の1つとなる ほか. 雲内部に降水粒子を共存させることができない ことで微物理過程にもバイアスが生じます (Gettelman et al. 2015). また. 降雨・降雪の放射効果も仕様 の制約上見逃されるため、短波放射は降水粒子を感じ ることなく地表に入射することになります。地球から 宇宙へと逃げる長波放射についても、本来降雪によっ てトラップされる温室効果を無視することになります (Li et al. 2014).

これらの本質的な改善を目指し,式 (3) に示すよう に,従来型モデルで診断的に扱っていた降雨・降雪の 質量 (q_x) および数濃度 (N_x)を陽に予報する,2モー メントのフレームワークを構築しました.

$$\frac{\partial q_{x}}{\partial t} = -\frac{1}{\rho_{a}} \nabla \cdot (\rho_{a} u q_{x}) - \frac{1}{\rho_{a}} \frac{\partial (\rho_{a} q_{x} v_{qx})}{\partial z} + S_{qx}$$
$$\frac{\partial N_{x}}{\partial t} = -\frac{1}{\rho_{a}} \nabla \cdot (\rho_{a} u N_{x}) - \frac{1}{\rho_{a}} \frac{\partial (\rho_{a} N_{x} v_{Nx})}{\partial z} + S_{Nx}$$
(3)

ここで ρ_a は大気密度, u は風ベクトル, v_q , v_N はそれぞ れ質量・数濃度重み付け落下速度, 添字の x は降雨お よび降雪をそれぞれ r と s で表しています. 右辺第3 項の S_{rx} , S_{Nx} は, 蒸発や凝結といった雲微物理過程にお ける生成・消滅項です.したがって, q_r , q_s , N_r , N_s の4 つの予報変数が加わったことになります.雨滴および 雪片による放射効果も併せて導入しました.粒子形状 に関しては, 雲氷は六角柱, 雪片は樹枝状結晶として 異なる取り扱いで放射計算を行っています (Yang et al. 2013). 雲・降水過程は強い非線形性があるため, 標準の積分時間ステップ未満のサブタイムステップ (60秒)を用いて微物理過程を解いていますが,降水の 落下過程では鉛直方向の CFL 条件(数値不安定を回避 するために要求される時間ステップになる場合もあります.

このように、降雨・降雪の質量および数濃度それぞ れを予報変数として取り扱い. 降水粒子の放射効果も 含めて陽に計算するパラメタリゼーションは、開発当 時の気候モデルコミュニティの中では最高水準の仕様 でした.現在でも、まだ数モデルほどしか存在しませ ん、開発した新しいモデリング手法が、より論文の読 者の印象に残り、今後ますます成果が広まるようにと 期待を込めて、CHIMERRA (Cloud/Hydrometeors Interactive Module with Explicit Rain and Radiation) と名付けることにしました (Michibata et al. 2019a). キメラ (キマイラ) とは, 頭がライオン, 胴 体は山羊,尻尾に毒蛇を持つギリシャ神話に登場する 怪獣で, 生物学ではいわゆる「異質同体」を意味する そうです. すなわち, 大気中の様々な凝結生成物 (雲 水・雲氷・雨滴・雪片)を陽に取り扱い. 雲内部で複 雑に相互作用する微物理過程を異質同体に表現する, というコンセプトになぞらえたことに由来しています.

少し話題が逸れてしまいましたが,設計上は大変に 素晴らしいモデルが構築できたように見えます. で は,本当に性能面でも素晴らしい進展があったので





しょうか? 「天気」の読者の皆様であればお察しの通 りだと思いますが、そうは問屋が卸さないのが現実 で、実装したての開発初期バージョンの性能は決して 良いとは言えないものでした.気候場に抱える課題も まだまだ山積みだったほか、特に気候モデルに共通す る癖である、雲量が少ない割に光学的に厚すぎる雲バ イアス (Nam *et al.* 2012) や、過冷却水滴の割合の過 小評価バイアス (McCoy *et al.* 2016) などをバランス よく改善することができずに四苦八苦していました.

モデル開発と併行して衛星観測データの解析も進め ていましたが、雲・降水の鉛直構造の調査には欠かせ ない CloudSat と CALIPSO を解析した結果から、従来 型モデルは大気中の雲氷・降雪の質量(TIWC; total ice water content) が大幅に少ないことが事前調査で わかっていました. そこで, TIWC を増やす方向性で 調整を続けました(第5図).従来の診断型では、雲氷 のみで調整するしか方法はないのですが、そうすると 宇宙空間へ逃げる長波放射が過少になるほか、地球に 入射する短波放射を過剰にはじいてしまいますので. TIWC を増加させるには限界があります.一方で降水 予報型スキームは、 雲氷に加えて降雪が大気中に保存 される分で TIWC を増加させることができます。雪片 は雲氷よりも粒径が大きく短波放射への感度もはるか に小さいので、TIWC が観測と整合するように増加さ せても (第5図), 放射収支を大きく壊すほどでもあり ません. 短波の雲放射強制力の改善には、氷粒子どう しが凝集することで質量が増加する aggregation プロ セスの調整が有効でした.長波放射に関しては,雲氷 と降雪の比率に注視して調整し、先行研究による推定 (Li et al. 2012) とも整合する状態で現実的な放射収支 を両立させることができました.

この他,開発の中心である大規模凝結過程(水蒸気の格子平均値から凝結量や雲量を表現する過程)に加 え,浅い積雲と深い対流の共存のさせ方であったり, モデル全体のバランスに注視する必要がありました. 大規模計算機でモデルを実行するためのベクトル化に も取り組んだりと紆余曲折がありましたが,多くの 方々のご助言とサポートに支えられ,一つ一つ抑える べき物理過程に制約をかけながらモデルの開発と調整 を進めることができました.

このように、モデル内で仮定されているパラメータ を不確実性の範囲で調整する「チューニング」は、一 見すると「辻褄合わせ」のように受け取られるかもし れません.しかし、信頼性の高い気候変動予測を行う 前提条件として、気候場が実際に観測される場と大き くずれていては、そもそものスタートラインに立てな いことになります.いくら構造が立派に見える家で も、一つ一つの柱や部品に欠陥があっては、信用して 利用できる住まいとは言えないわけです.モデル開発 に特に注力していた2年間は論文が全く書けていな かったので焦りもありましたが、早く成果を出したい 気持ちを抑えて細かい微物理プロセスの改良やパラ メータの最適化作業に専念しました.ただし、チュー ニングに「頼る」モデルの見せ方は物理的なモデルの 振る舞いを阻害する原因になります.調整作業を進め る過程で、従来型モデルに残存していた人為的な閾値 を撤廃する工夫にも鋭意取り組んでいたことを申し添 えておきます.

4.2 根強い"共通バイアス"改善への挑戦

降水予報型スキームを開発する上での最も大きな目 標としては、気候モデルに共通する癖を取り除くこと でしたので、そういった根強い共通バイアスが従来型 モデルと比較してどのように変わるかについて調査を 進めていきました.具体的には、雲量の過小評価バイ アス (Nam *et al.* 2012),降水生成を早く表現してしま うバイアス (Suzuki *et al.* 2015),エアロゾル・雲相互 作用の過大評価バイアス (Quaas *et al.* 2009)などが挙 げられます.

モデルの雲・降水過程をより綿密に、かつ衛星観測 と整合的な評価を行うためには、「衛星シミュレータ」 の利用が有効になります。衛星シミュレータとは、モ デルが表現する仮想地球で衛星観測が行われた場合に どのようなリトリーバル値を返すか. を再現するソフ トウェアで、数値モデルと衛星観測をより整合的に比 較することを目的としたツールです(詳細は、増永 (2011) を参照). 多数の医療機材を使って総合診断を 行う人間ドックのように,様々な特徴を持つ衛星セン サーとの系統的な比較を実施できるという意味で、モ デルの全体から素過程に至るまでの「精密検査」を行 うという位置付けでイメージして頂いてよいかと思い ます. 衛星シミュレータを用いてモデルの調査を行う ことで、衛星センサー独自の検出感度に起因する誤差 を考慮に入れた診断が原理上可能になるという利点が あります (Bodas-Salcedo et al. 2011; Michibata et al. 2019b).

第6図に、CALIPSO/GOCCP衛星プロダクトおよ びそれに対応するシミュレータをかけた MIROC 診断 型・予報型スキームによる雲量の空間分布を示しま

"天気"68.6.



第6図 (左) CALIPSO/GOCCP 衛星観測, (中央) 診断型 MIROC, (右) 予報型 MIROC による雲量の分布.上 から順に,全雲量,上層雲量,中層雲量,および下層雲量を示す.

す.特に上層雲で顕著な改善が見られたほか,全球平 均としても雲量の過小評価バイアスが大幅に改善され たことがおわかり頂けるかと思います.これは,先述 の雲氷・降雪の質量と放射収支の調整の際に,雲氷か ら降雪への成長を表現する微物理プロセスに設けられ ていた質量の下限値や気温の閾値を取り除いたことに 加え,過冷却雲中に存在する雲氷の成長プロセス(BF プロセスと呼ばれる)を調整したのが有効でした.前 者は熱帯上空の雲量に,後者は中高緯度,特に南大洋 の雲量に強い感度を持ちます.

南大洋の雲量バイアスも,重要な共通バイアスの1 つです.第7図は,過冷却水滴の割合の気温依存性を 描いた図ですが,改良前の MIROC は陰影の観測の統 計値よりも下側を通っています.これは,BF プロセ スで表現される,水蒸気の昇華凝結による氷粒子の成 長が早すぎることを示唆する結果であり,多くの CMIP モデルに共通するバイアスです (McCoy *et al.*



第7図 (破縁) 改良前と(美緑) 改良後の至雲水 量に占める過冷却水滴の割合SLF (super-cooled liquid fraction)の気温依 存性. 陰影はCALIPSO 衛星観測による 推定範囲.

285

2016). このようなバイアスを持つモデルの場合, 地球 が温暖化した際に雲氷から液水に相変化するポテン シャル(雲フェーズフィードバック)を過大に持つた め,気候感度の過小評価に繋がることが指摘されてい ます(Tan et al. 2016). したがって,第7図のような 雲の微視的な特徴を,衛星観測から得られる情報を元 にうまく制約をかけてモデルを高度化することが,雲 量や雲放射強制力,さらには気候感度といった気候変 動に対する巨視的な特徴と連動して改善につながる可 能性があるわけです.

286

また,3節で指摘した autoconversion と accretion のバランスについても,降水予報型スキームで陽に表 現が可能になった雨水によって accretion がより支配 的に働くようになりました.エアロゾルに感度を持つ autoconversion の役割が相対的に弱まることで,従来 型モデルにおける問題点であったエアロゾルに対する 雲水の過大な増加が約20%緩和されるようになりまし た.結果として,降水の頻度・強度のバイアスが改善 されると同時に,エアロゾル・雲相互作用の過大評価 バイアスも改善されることが確認できました.以上よ り,雲・降水過程の抜本的な高度化によって気候モデ ルに共通して根強く残っているバイアスの多くを軽減 できる可能性を示しました.

本研究で推進してきた物理ベースなモデルの高度化 が、気候モデルの共通バイアスを取り除く一助とな り、信頼性の高い気候変動予測に貢献することが期待 されます.こうしたモデルのあちこちに存在する問題 を俯瞰的に捉え、解決につなげる挑戦を続けることが 重要だと考えています.

5. まとめと今後の課題

本研究では、異なる特徴を持つ複数の衛星観測デー タを組み合わせることで、数値気候モデルが抱える不 確実性の根源を調査してきました。そうして明らかと なった、エアロゾルに対する雲の応答をより精緻に表 現するために、降水を陽に取り扱う降水予報型スキー ムの開発を進めてきました。モデル内で仮定されてい る"チューニングパラメータ"の調整に頼ることでモ デルを現実「らしく」操るのではなく、モデルを構成 する部品自体を見直し、基盤の再構築に挑戦した点が 大きな特徴です。

受賞対象論文から派生した成果なので本解説では詳 しくご紹介しませんでしたが,降水予報型スキームを 用いることで,気候モデルにおける共通バイアスで あった降水頻度・強度に抱えるバイアスを緩和できる とともに、エアロゾル有効放射強制力の過大評価バイ アスも大幅に改善することができ(Michibata and Suzuki 2020),降雪の取り扱いが本質的に重要である ことをメカニズムレベルで明らかにすることができま した(Michibata *et al.* 2020).これらは、先端的なモ デルを構えなければ着手すること自体ができなかった 研究という言い方もできます.モデリング手法を精緻 化することが、単にモデルの性能向上につながるだけ でなく、未解明の新しいプロセスの発見につながる可 能性も秘めているというのは、モデル開発を進める上 での大きな醍醐味でもあります.

衛星観測から得られた知見をベースとして.よりエ アロゾル・雲・降水相互作用を精緻に取り扱う数値モ デルを開発してきましたが、まだまだ課題も残ってい るのも事実です. サブグリッドスケールの雲水の不均 一性を考慮すること(Hotta et al. 2020)に加え, 降水 の格子内不均一性も表現を高度化することが必要で す.また、雲の成長レジームや環境場への依存性を適 切に考慮に入れた、レジーム依存の autoconversion ス キームを検討することも重要な課題です. それに加 え, 雲のライフサイクルに全球規模で寄与する要素の 1つに、巨大海塩の存在があります。巨大海塩がドリ ズルの芽となり降水を促進する効果は古くから指摘さ れていますが (Feingold et al. 1999), 従来型モデルは 降水を予報していなかった仕様上の制約もあり、モデ ル内では考慮されていません. この効果は. 強風帯で ある南大洋の降水システムでは特に無視できないプロ セスであると予想されます.

こうした新しい物理プロセスの導入もさることなが ら、モデル内で仮定されている恣意的なパラメータに 可能な限り依存しない仕様にしていくことも重要で す.今回開発した降水予報型スキームでは、雲氷から 降雪を生成させる際の質量の下限値や気温の閾値など を撤廃しましたが、それでもまだまだ多くの人為的な 閾値が(もちろん雲微物理以外にも)存在します.衛 星観測データや、LES などの高解像度のプロセスモデ リングを横断的に活用することで、より物理ベースな モデル開発をこれからも継続していきたいと思いま す.それによって、研究コミュニティにも微力ながら も貢献ができればと考えております.

謝 辞

本研究を進めるにあたり,本当に多くの方々の支え

があって今日まで研究を継続することができました. この場をお借りして心より御礼申し上げます.九州大 学応用力学研究所の竹村俊彦主幹教授には、大学院修 士課程から博士課程にかけて辛抱強くご指導頂き,不 自由のない研究環境を提供し続けて頂きました. 学部 時代にお世話になった河本和明教授(長崎大学)から は、衛星リモートセンシングの基礎からご指導頂き、 研究者を志すきっかけを与えて頂きました。鈴木健太 郎准教授(東京大学)には、学振 PD 研究員として受 け入れて頂く前からたくさんのアドバイスや励ましを 頂いたほか,衛星観測と数値モデルを融合させた問題 解決の重要性を教えて頂きました.本当に師と環境に 恵まれたおかげで、今日まで研究を継続してこられた のだと実感しています. また. 竹村先生の恩師にあた る中島映至東京大学名誉教授からも励ましのお言葉を 頂いたほか、中島研究室出身の多くの先輩方にも大変 お世話になりました.特に、関口美保准教授(東京海 洋大学). 五藤大輔博士(国立環境研究所). 佐藤陽祐 特任准教授(北海道大学)からは、共同研究を通して 様々なご助言を頂きました.

また,所属研究室の江口菜穂助教をはじめ,九州大 学応用力学研究所の鵜野伊津志主幹教授, 岡本 創主 幹教授,時長宏樹教授,山本 勝准教授,弓本桂也准 教授,早渕百合子准教授,端野典平准教授(現:高知 工科大学), 佐藤可織助教, 原 由香里助教, 森 正人 助教,及川栄治博士,朴 祥緒博士(現:蔚山科学技 術大学校),板橋秀一博士(現:電力中央研究所), Ying-Wen Chen 博士(現:海洋研究開発機構),萩原 雄一朗博士 (現:情報通信研究機構), 栗林正俊博士 (現:長野県環境保全研究所),ほか九州大学の関係者 の皆様には、学生時代から現在にかけて大変お世話に なっております.特に、同研究室出身の山口慶人先輩 からは、モデル開発を進める上で様々な技術的なご助 言を頂きました.また,博士課程在学時の同期である 平川知明さんとは、常に前向きに議論に付き合って頂 いたことで、行き詰まった時も頑張ることができまし た.本当に感謝しています.研究員時代にお世話に なった東京大学大気海洋研究所鈴木研究室の皆様に も,心より感謝申し上げます.励まし合ってきた同期 をはじめ、仲良くして頂いた先輩方・後輩方からも、 常日頃より多くのご支援を賜りました.

また,本稿では主に数値モデリング研究をベースと して解説をさせて頂きましたが,私がこうした研究 テーマに着手できたのは,これまでの諸先輩方の大変

2021年6月

なご苦労があったからに他なりません. 全球大気海洋 モデル MIROC の開発にご尽力されてきた故・沼口 敦先生,住 明正先生,木本昌秀教授(東京大学),野 沢 徹教授(岡山大学),江守正多博士(国立環境研究 所),渡部雅浩教授(東京大学)をはじめ,数多くのモ デル関係者の皆様に心より感謝申し上げます.特に, 統合的気候モデル高度化研究プログラムの共同研究者 の皆様からは,幅広い視点からアドバイスを頂き研究 を支えて頂きました.数値モデルの検証に用いた衛星 プロダクトの提供元である,CloudSat data processing center (コロラド州立大学)をはじめ,数多くの 関連研究機関の方々にも謝意を表します.

最後に,いつも応援してくれている家族,研究に関 わって頂いた全ての方々に重ねて感謝申し上げます. 今回の栄誉を励みとし,尚一層の研鑽を重ねて参りま す.今後とも,変わらぬご指導とご鞭撻のほど,よろ しくお願い申し上げます.

略語一覧

BF: Bergeron Findeisen

- CALIPSO : Cloud-Aerosol Lidar and Infrared Pathfinder Satellite Observations
- CFL : Courant-Friedrichs-Lewy criterion
- CMIP : Coupled Model Intercomparison Project
- GOCCP : GCM-Oriented CALIPSO Cloud Product

IPCC: Intergovernmental Panel for Climate Change

- LES: Large-Eddy Simulation
- MIROC : Model for Interdisciplinary Research on Climate
- MODIS : Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer
- NICAM : Nonhydrostatic Icosahedral Atmospheric Model
- SCALE : Scalable Computing for Advanced Library and Environment
- SPRINTARS : Spectral Radiation-Transport Model for Aerosol Species

参考文献

- Albrecht, B. A., 1989: Aerosols, cloud microphysics, and fractional cloudiness. Science, 245, 1227-1230.
- 荒木健太郎, 2014: 雲の中では何が起こっているのか. ベ レ出版, 344pp.
- Bellouin, N., J. Quaas, E. Gryspeerdt, S. Kinne, P. Stier, D. Watson-Parris, O. Boucher, K. S. Carslaw, M. Christensen, A.-L. Daniau, J.-L. Dufresne, G. Feingold, S. Fiedler, P. Forster, A. Gettelman, J. M. Haywood, U. Lohmann, F. Malavelle, T. Mauritsen, D. T. McCoy, G.

Myhre, J. Mülmenstädt, D. Neubauer, A. Possner, M. Rugenstein, Y. Sato, M. Schulz, S. E. Schwartz, O. Sourdeval, T. Storelvmo, V. Toll, D. Winker and B. Stevens, 2020: Bounding global aerosol radiative forcing of climate change. Rev. Geophys., 58, e2019RG000660, doi:10.1029/2019RG000660.

288

- Berry, E. X., 1967: Cloud droplet growth by collection. J. Atmos. Sci., 24, 688–701.
- Bodas-Salcedo, A., M. J. Webb, S. Bony, H. Chepfer, J. L. Dufresne, S. A. Klein, Y. Zhang, R. Marchand, J. M. Haynes, R. Pincus and V. O. John, 2011: COSP: Satellite simulation software for model assessment. Bull. Amer. Meteor. Soc., 92, 1023–1043.
- Boucher, O., D. Randall, P. Artaxo, C. Bretherton, G. Feingold, P. Forster, V.-M. Kerminen, Y. Kondo, H. Liao, U. Lohmann, P. Rasch, S. K. Satheesh, S. Sherwood, B. Stevens and X. Y. Zhang, 2013: Clouds and aerosols. Climate Change 2013: The Physical Science Basis (T. F. Stocker *et al.* eds.), Cambridge University Press, Cambridge UK, 571-657.
- Feingold, G., W. R. Cotton, S. M. Kreidenweis and J. T. Davis, 1999: The impact of giant cloud condensation nuclei on drizzle formation in stratocumulus: Implications for cloud radiative properties. J. Atmos. Sci., 56, 4100-4117.
- Gettelman, A., H. Morrison, S. Santos, P. Bogenschutz and P. M. Caldwell, 2015: Advanced two-moment bulk microphysics for global models. Part II: Global model solutions and aerosol-cloud interactions. J. Climate, 28, 1288–1307.
- Ghan, S. J. and R. C. Easter, 1992: Computationally efficient approximations to stratiform cloud microphysics parameterization. Mon. Wea. Rev., 120, 1572–1582.
- Ghan, S., M. Wang, S. Zhang, S. Ferrachat, A. Gettelman, J. Griesfeller, Z. Kipling, U. Lohmann, H. Morrison, D. Neubauer, D. G. Partridge, P. Stier, T. Takemura, H. Wang and K. Zhang, 2016: Challenges in constraining anthropogenic aerosol effects on cloud radiative forcing using present-day spatiotemporal variability. Proc. N a tl. A c a d. S c i., 113, 5804-5811, d o i:10.1073/ pnas.1514036113.
- 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.
- Jing, X., K. Suzuki and T. Michibata, 2019: The key role of warm rain parameterization in determining the aerosol indirect effect in a global climate model. J. Climate, 32, 4409–4430.

- Khairoutdinov, M. and Y. Kogan, 2000: A new cloud physics parameterization in a large-eddy simulation model of marine stratocumulus. Mon. Wea. Rev., **128**, 229-243.
- Lebo, Z. J. and G. Feingold, 2014: On the relationship between responses in cloud water and precipitation to changes in aerosol. Atmos. Chem. Phys., 14, 11817-11831, doi:10.5194/acp-14-11817-2014.
- Li, J. L. F., D. E. Waliser, W. T. Chen, B. Guan, T. Kubar, G. Stephens, H.-Y. Ma, M. Deng, L. Donner, C. Seman and L. Horowitz, 2012: An observationally based evaluation of cloud ice water in CMIP3 and CMIP5 GCMs and contemporary reanalyses using contemporary satellite d at a. J. G e o p h y s. R e s. A t m o s., 117, D 16105, doi:10.1029/2012JD017640.
- Li, J. L. F., W.-L. Lee, D. E. Waliser, J. D. Neelin, J. P. Stachnik and T. Lee, 2014: Cloud-precipitation-radiation-dynamics interaction in global climate models: A snow and radiation interaction sensitivity experiment. J. Geophys. Res. Atmos., 119, 3809–3824.
- Lohmann, U., 2017: Anthropogenic aerosol influences on mixed-phase clouds. Curr. Clim. Change Rep., 3, 32-44.
- Malavelle, F. F., J. M. Haywood, A. Jones, A. Gettelman, L. Clarisse, S. Bauduin, R. P. Allan, I. H. H. Karset, J. E. Krisjánsson, L. Oreopoulos, N. Cho, D. Lee, N. Bellouin, O. Boucher, D. P. Grosvenor, K. S. Carslaw, S. Dhomse, G. W. Mann, A. Schmidt, H. Coe, M. E. Hartley, M. Dalvi, A. A. Hill, B. T. Johnson, C. E. Johnson, J. R. Knight, F. M. O'Connor, D. G. Partridge, P. Stier, G. Myhre, S. Platnick, G. L. Stephens, H. Takahashi and T. Thordarson, 2017: Strong constraints on aerosol-cloud interactions from volcanic eruptions. Nature, 546, 485-491.
- 増永浩彦, 2011:衛星データ・シミュレータ. 天気, 58, 559-561.
- McCoy, D. T., I. Tan, D. L. Hartmann, M. D. Zelinka and T. Storelvmo, 2016: On the relationships among cloud cover, mixed-phase partitioning, and planetary albedo in GCMs. J. Adv. Model. Earth Syst., 8, 650–668.
- McCoy, D., P. Field, H. Gordon, G. Elsaesser and D. Grosvenor, 2020: Untangling causality in midlatitude aerosol-cloud adjustments. Atmos. Chem. Phys., 20, 4085-4103.
- Michibata, T. and K. Suzuki, 2020: Reconciling compensating errors between precipitation constraints and the energy budget in a climate model. Geophys. Res. Lett., 47, e2020GL088340, doi:10.1029/2020GL088340.
- Michibata, T., K. Suzuki, Y. Sato and T. Takemura, 2016: The source of discrepancies in aerosol-cloud-precipitation interactions between GCM and A-Train retrievals.

Atmos. Chem. Phys., 16, 15413-15424.

- Michibata, T., K. Suzuki, M. Sekiguchi and T. Takemura, 2019a: Prognostic precipitation in the MIROC6-SPRIN-TARS GCM: Description and evaluation against satellite observations. J. Adv. Model. Earth Syst., 11, 839– 860.
- Michibata, T., K. Suzuki, T. Ogura and X. Jing, 2019b: Incorporation of inline warm rain diagnostics into the COSP2 satellite simulator for process-oriented model evaluation. Geosci. Model Dev., 12, 4297-4307.
- Michibata, T., K. Suzuki and T. Takemura, 2020: Snowinduced buffering in aerosol-cloud interactions. Atmos. Chem. Phys., 20, 13771-13780.
- Myhre, G., D. Shindell, F.-M. Bron, W. Collins, J. Fuglestvedt, J. Huang, D. Koch, J. F. Lamarque, D. Lee, B. Mendoza, T. Nakajima, A. Robock, G. Stephens, T. Takemura and H. Zhang, 2013: Anthropogenic and natural radiative forcing. Climate Change 2013: The Physical Science Basis (T. F. Stocker *et al.* eds.), Cambridge University Press, Cambridge UK, 659–740.
- Nam, C., S. Bony, J.-L. Dufresne and H. Chepfer, 2012: The 'too few, too bright' tropical low-cloud problem in CMIP5 models. Geophys. Res. Lett., 39, L21801, doi:10.1029/2012GL053421.
- Nishizawa, S., H. Yashiro, Y. Sato, Y. Miyamoto and H. Tomita, 2015: Influence of grid aspect ratio on planetary boundary layer turbulence in large-eddy simulations. Geosci. Model Dev., 8, 3393-3419.
- Quaas, J., Y. Ming, S. Menon, T. Takemura, M. Wang, J. E. Penner, A. Gettelman, U. Lohmann, N. Bellouin, O. Boucher, A. M. Sayer, G. E. Thomas, A. McComiskey, G. Feingold, C. Hoose, J. E. Kristjánsson, X. Liu, Y. Balkanski, L. J. Donner, P. A. Ginoux, P. Stier, J. Feichter, I. Sednev, S. E. Bauer, D. Koch, R.G. Grainger, A. Kirkevåg, T. Iversen, Ø. Seland, R. Easter, S. J. Ghan, P. J. Rasch, H. Morrison, J.-F. Lamarque, M. J. Iacono, S. Kinne and M. Schulz, 2009: Aerosol indirect effects general circulation model intercomparison and evaluation with satellite data. Atmos. Chem. Phys., 9, 8697–8717.
- Rosenfeld, D., S. Sherwood, R. Wood and L. Donner, 2014: Climate effects of aerosol-cloud interactions. Science, 343, 379–380.
- Rosenfeld, D., Y. Zhu, M. Wang, Y. Zheng, T. Goren and S. Yu, 2019: Aerosol-driven droplet concentrations dominate coverage and water of oceanic low-level clouds. Science, 363, 599, doi:10.1126/science.aav0566.
- 佐藤陽祐,2020:全球雲解像モデルを用いたエアロゾル・ 雲相互作用に関する研究とラージ・エディ・シミュレー

ションモデルを用いた低層雲の研究-2019年度正野賞受 賞記念講演-. 天気, 67, 5-15.

- Sato, Y., D. Goto, T. Michibata, K. Suzuki, T. Takemura, H. Tomita and T. Nakajima, 2018: Aerosol effects on cloud water amounts were successfully simulated by a global cloud-system resolving model. Nat. Commun., 9, 985, doi:10.1038/s41467-018-03379-6.
- Satoh, M., H. Tomita, H. Yashiro, H. Miura, C. Kodama, T. Seiki, A. T. Noda, Y. Yamada, D. Goto, M. Sawada, T. Miyoshi, Y. Niwa, M. Hara, T. Ohno, S. Iga, T. Arakawa, T. Inoue and H. Kubokawa, 2014: The non-hydrostatic icosahedral atmospheric model: description and development. Prog. Earth Planet. Sci., 1, 18, doi:10.1186/s40645-014-0018-1.
- Seifert, A. and K. D. Beheng, 2001: A double-moment parameterization for simulating autoconversion, accretion and selfcollection. Atmos. Res., 59-60, 265-281.
- Small, J. D., P. Y. Chuang, G. Feingold and H. Jiang, 2009: Can aerosol decrease cloud lifetime? Geophys. Res. Lett., 36, L16806, doi:10.1029/2009GL038888.
- Stevens, B. and G. Feingold, 2009: Untangling aerosol effects on clouds and precipitation in a buffered system. Nature, 461, 607-613.
- Suzuki, K., G. Stephens, A. Bodas–Salcedo, M. Wang, J.-C. Golaz, T. Yokohata and T. Koshiro, 2015: Evaluation of the warm rain formation process in global models with satellite observations. J. Atmos. Sci., 72, 3996–4014.
- 竹村俊彦, 2014:エアロゾルの気候影響に関するモデル研 究-2013年度日本気象学会賞受賞記念講演-. 天気, 61, 3-19.
- Tan, I., T. Strelvmo and M. D. Zelinka, 2016: Observational constraints on mixed-phase clouds imply higher climate sensitivity. Science, 352, 224-227.
- 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, 2019: Description and basic evaluation of simulated mean state, internal variability, and climate sensitivity in MIROC6. Geosci. Model Dev., 12, 2727–2765.
- Twomey, S. 1977: The influence of pollution on the shortwave albedo of clouds. J. Atmos. Sci., 34, 1149–1152.
- Yang, P., L. Bi, B. A. Baum, K.-N. Liou, G. W. Kattawar, M. I. Mishchenko and B. Cole, 2013: Spectrally consistent scattering, absorption, and polarization properties of atmospheric ice crystals at wavelengths from 0.2 to 100 µm. J. Atmos. Sci., 70, 330–347.

Aerosol-Cloud-Precipitation Interactions: Climate Modeling and Satellite Observations

Takuro MICHIBATA*

* Research Institute for Applied Mechanics, Kyushu University, Fukuoka 816–8580, Japan (Present affiliation: Graduate School of Natural Science and Technology, Okayama University, Okayama 700–8530, Japan)

E-mail: tmichibata@okayama-u.ac.jp

(Received 12 November 2020; Accepted 12 January 2021)