

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—

佐藤 陽 祐*

1. はじめに

この度は荣誉ある日本気象学会正野賞をいただき光栄に存じます。私が研究を続けられているのは、数多くの方のご支援あつてのものです。これまでの私の研究に関わっていただきました全ての方々にこの場を借りて感謝申し上げます。

今回受賞対象となった研究論文はその多くが、2019年8月に運用を終了したスーパーコンピュータ、京を用いて行った数値実験の結果を成果としてまとめたものです。京が稼働している期間にこのような研究をできたことを光栄に思うとともに、私に数値実験を用いた研究と、京を使わせていただく機会を提供してくださった方々に重ねて感謝申し上げます。

現在、次世代のスーパーコンピュータ富岳が2021年の運用開始に向けて準備を進めております。スーパーコンピュータを用いた数値実験による研究は室内実験、観測的研究、理論的研究に並ぶ気象学の大きな柱です。私の研究にとどまらず、今後も大型計算機を用いて気象学の発展に寄与する研究が生まれてくることを切に願います。同時にそれを担う私より若い世代の研究者の活躍に大いに期待いたします。

受賞対象となった論文は大きく分けると、以下の二つの研究テーマに分かれます。一つは全球雲解像モデル Nonhydrostatic Icosahedral Atmospheric Model (NICAM : Satoh *et al.* 2008, 2014 ; Tomita *et al.* 2005)

を用いたエアロゾル雲相互作用に関する研究、もう一つは Scalable Computing for Advanced Library and Environment (SCALE : Nishizawa *et al.* 2015 ; Sato *et al.* 2015) を用いた超高解像モデルによる低層雲の研究です。本稿ではこれらの研究に取り組むことになった背景を2章で、一つ目の研究テーマに関しては3章で、二つ目のテーマに関しては4章で紹介いたします。本稿で研究の詳細を記述するのは紙面の問題で難しいため、これらの研究の位置付けをご理解いただくことに主眼を置きます。本稿から上記の二つの研究がどのように関連づけられているかをご理解いただければ幸いです。

2. 研究の背景

大気中に存在する小さな塵（エアロゾル）は太陽放射を反射・吸収して地球の放射収支に大きな影響を与えるだけでなく（Aerosol Radiative Interaction）、それ自身が雲粒の核となって働くことで、雲の微物理特性や雲のアルベド (Twomey 1977)、雲の寿命 (Albrecht 1989)、降水効率などに影響を与える。雲もそれ自身が太陽放射・赤外放射を反射・吸収するなどして、地球の放射収支の中で大きな役割を担っているため、エアロゾルの増減によって雲の微物理特性や、アルベド、寿命などが変化すると、地球の放射収支にも大きな影響を及ぼす。このエアロゾルが雲を介して地球の放射収支にもたらす様々な効果をエアロゾル雲相互作用 (Aerosol Cloud Interaction) と呼ぶ。エアロゾル雲相互作用による地球の放射収支への影響は、有効放射強制力という物理量によって見積もられる (放射強制力については中島・竹村 (2009) を参照)。気候変動に関する政府間パネル (Intergovernmental Panel for Climate Change : IPCC) の第5次報告書

* 北海道大学大学院理学研究院, 理化学研究所計算科学研究センター。

yousuke.sato@sci.hokudai.ac.jp

—2019年12月26日受領—

—2020年3月20日受理—

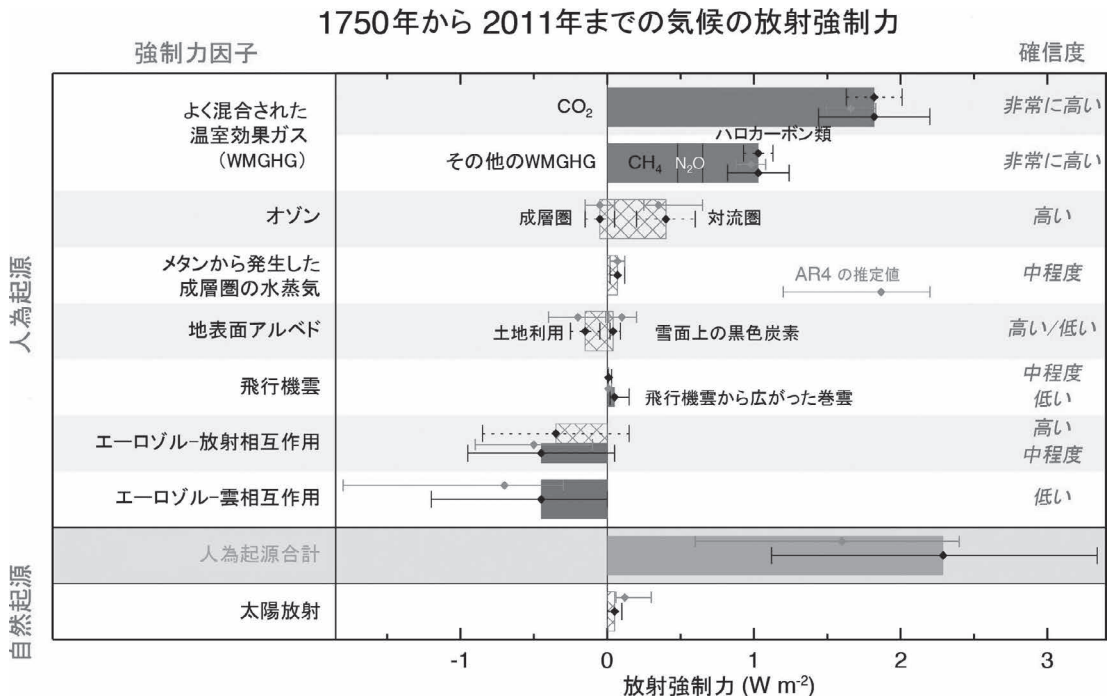
(AR5:IPCC 2013) では、エアロゾル雲相互作用による放射強制力は -0.45 W m^{-2} と見積もられ、エアロゾル雲相互作用によって地球は冷やされているとされている。しかしながら、その見積もりには $-1.2 \sim -0.0 \text{ W m}^{-2}$ と大きな幅があり、科学的な信頼度は「低い」とされている(第1図)。そのため、エアロゾル雲相互作用は気候予測の最大の不確定要素であるとされ、過去に数多くの研究が行われてきた。

エアロゾル雲相互作用は、エアロゾル数密度の変化によって雲粒のサイズが変化することで生じるため、数値計算でその影響を表現するには、雲内部での雲粒サイズ分布の変化や雲粒の凝結、蒸発などといった雲の微物理プロセスを直接計算する必要がある。一方、雲一つ一つの空間スケールは数百 m~数 km のオーダーであるのに対して、気候予測を行う気候モデルの格子幅は数十~数百 km とはるかに大きい。一般に数値モデルは格子幅より小さい現象は直接表現できない(サブグリッドスケールの現象という)が、気候モデルにとって雲は典型的なサブグリッドスケールの現象であり、雲を直接表現することはできないため、雲微物理プロセスが計算できない。しかしながら雲は地球の

放射収支に大きな影響を及ぼすため、雲が放射収支や、地球の水循環に及ぼす効果を気候モデルで取り入れなければならない。そこで、雲を直接表現できない従来の気候モデルでは、雲微物理プロセスのいくつかの要素について、経験則や概念に基づく多くの仮定を基に「大規模凝結」や「積雲対流パラメタリゼーション」と呼ばれる方法で雲の効果が取り込まれる。

この経験則に基づくパラメタリゼーションなどの手法では、我々が観測したことのない、または、経験したことのない現象を表現することが難しいため、計算結果に不確実性が生み出される。本稿で対象としているエアロゾル雲相互作用による地球の放射収支への影響に関しても、その全てを観測できているわけではないため、これまでの経験則に基づいて(謂わば間接的に)その影響を推定している。そのため、世界の複数の気候モデルでエアロゾル雲相互作用による放射強制力の値がバラバラになるといった不確実性が生まれる。

このようなエアロゾル雲相互作用のモデリングに起因する気候予測の不確実性の問題を解決するには、雲の微物理プロセスや放射への影響をより精緻に表現しなければならない。これには大きく分けて二つのアプ



第1図 IPCC AR5による放射強制力の見積り (IPCC AR5 政策決定者向け要約, 気象庁訳から抜粋, <https://www.data.jma.go.jp/cpdinfo/ipcc/ar5/index.html>, 2020. 3. 17閲覧)。

ローチがあり得る。「1, 経験的なパラメタリゼーションを使わなくても良い程度に格子幅を小さくした実験を行う」, 「2, パラメタリゼーションや雲の表現方法をより精緻なものに改良する」である。2の方法は, 山本賞を同時に受賞した道端拓朗氏の論文 (Michibata *et al.* 2019) が例としてあげられる。道端氏は雲の表現方法の改良のヒントを衛星観測から導き出した (Michibata *et al.* 2016)。一方, 同じ2を限定的な領域ではあるが, 雲を十分に解像できる程度の格子幅 (数 m~数十 m) で計算を実施するラージ・エディ・シミュレーション (LES) モデルを用いて行う方法もある。例えば Bretherton and Park (2009) は, LES モデルを用いて低層雲を計算し, その結果に基づいて, 気候モデルの浅い雲の表現を改良している。この度, 正野賞の受賞対象となった LES モデルによる研究 (4章で記述) は, このような LES モデルを用いたさまざまなモデルの改良を目指して開発した, SCALE ライブラリに含まれる LES モデルを用いた研究である (Sato *et al.* 2015, 2017, 2018b)。解像度数 $m \sim 10$ m で計算を行うためにスーパーコンピュータが必要となる。

一方, 1の方法は全球モデルの格子幅を小さくして数値実験を行う方法である。この方法であれば, 経験的なパラメタリゼーションが必要なくなり, 雲内部での雲粒サイズ分布の変化や雲粒の凝結, 蒸発などの雲の微物理プロセスを直接計算できる。このようなモデルを雲解像モデルと呼ぶ。雲解像モデルを用いることで雲の微物理プロセスが直接計算できるため, エアロゾルの変化に伴って雲粒のサイズ分布や雲粒の凝結, 蒸発の速度が変化するといったエアロゾル雲相互作用を直接表現できる (ただし, ここでいう「直接計算」とは雲内部での微物理プロセスや雲粒全体の質量・相変化を計算するものであり, 雲粒一つ一つを直接表現するものではないことに注意されたい。雲粒一つ一つを直接計算するには, 雲解像モデルよりも格子幅をさらに小さくし, 雲粒一つ一つのサイズ数 $\mu\text{m} \sim \text{mm}$ と同等の格子幅にしなければならない)。この度正野賞の受賞対象となった論文のうち Sato *et al.* (2016, 2018a) は, 1の方法で, 全球雲解像モデル NICAM とエアロゾル輸送モデル Spectral Radiation-Transport Model for Aerosol Species (SPRINTARS: Takemura *et al.* 2005) を結合した NICAM-SPRINTARS (Goto *et al.* 2018; Suzuki *et al.* 2008) を用いて行った研究である。雲を直接表現できる程度の格子幅で全球を覆った計算をするため, 計算コストが高く, こちらもスー

パーコンピュータが必要になる。

一見すると NICAM を用いた研究と SCALE を用いた研究は独立した研究テーマに見えるが, どちらも気候モデルの雲, およびエアロゾル雲相互作用の表現を改良するための取り組みであると位置づけることができる。どちらの研究も高解像度という言葉がキーワードになり膨大な計算資源を必要とする研究である。そこで, これらの研究は京を用いて行った。以下, NICAM を用いた研究について 3章で, SCALE を用いた研究について 4章でそれぞれ説明する。

3. 全球雲解像モデルを用いた数値実験

NICAM-SPRINTARS を用いた二つの論文 (Sato *et al.* 2016, 2018a) のうち, ここでは Sato *et al.* (2018a) についての解説を行う。エアロゾルによる放射強制力の見積もりは様々な方法で求められるが, 多くは気候モデルを用いてエアロゾルの影響を評価する。しかしながら気候モデルの出力は様々な現象が複雑に相互作用した結果であり, 例えば, アルベドの効果と雲の寿命効果を切り分けて議論することは難しい。近年 Ghan *et al.* (2016) はこれらの切り分けを行うために, エアロゾルと前駆物質 (E) の変動による雲の放射強制力の変化 (R) を, 以下のように分解することを試みた。

$$\frac{d \ln \bar{R}}{d \ln E} = \frac{d \ln \bar{R}}{d \ln N_d} \frac{d \ln \bar{N}_d}{d \ln CCN} \frac{d \ln \overline{CCN}}{d \ln E}, \quad (1)$$

ここで N_d , CCN はそれぞれ雲粒数密度, CCN の変動を表し, オーバーバーはエアロゾルが変動した時に雲が応答する程度に長い時間の平均を意味する。この式 (1) をさらに変形して式 (2) を得る (式変形の詳細は Ghan *et al.* (2016) を参照)。

$$\frac{d \ln \bar{R}}{d \ln E} = \left[\frac{d \ln \bar{C}}{d \ln N_d} + \frac{d \ln \bar{R}_c}{d \ln \tau} \left(\frac{d \ln \bar{L}}{d \ln N_d} - \frac{d \ln r_e}{d \ln N_d} \right) \right] \frac{d \ln \bar{N}_d}{d \ln CCN} \frac{d \ln \overline{CCN}}{d \ln E}, \quad (2)$$

ここで C は雲量, R_c は雲放射強制力, L は雲水量 (Liquid Water Path), r_e は雲粒有効半径, τ は雲の光学的厚さである。この式 (2) の中の大括弧内の第 3 項目は雲のアルベドへの影響 (Twomey 1977), 第 1, 2 項目が雲の寿命効果 (Albrecht 1989) と解釈される。勘

の良い読者の方の中には L がliquid water pathと書かれたことに違和感を持つ方がいるかもしれない。本来雲水は液水 (liquid) だけでなく氷 (ice) も含まれるはずである。しかしながら、氷雲へのエアロゾルの影響は未解明な部分が多く現在精力的に研究が取り組まれている分野である。そのため、Ghan *et al.* (2016) ではエアロゾルの「暖かい雲 (Liquid のみで構成される雲)」の影響のみを議論しており、Sato *et al.* (2018a) でも雲頂温度が273K以上の「暖かい雲」へのエアロゾルの影響のみを解析している。

Sato *et al.* (2018a) では、式 (2) の $(d \ln \bar{L}) / (d \ln \bar{N}_a)$ (Cloud Susceptibility, 以下 λ と記載) について議論した。 λ はエアロゾルまたは雲凝結核の増加に伴う雲の増減を表す量である。 λ が正であれば、エアロゾルの増加に伴って雲 (雲水量) は増加することを意味し、負であればエアロゾルの増加に伴って雲は減少することを意味する。エアロゾル雲相互作用による雲の寿命効果が、Albrecht (1989) によって提唱されてから、2010年代前半までは、エアロゾルの増加に伴って「暖かい雲」の衝突・併合による成長と降水の形成が抑制される結果、雲の寿命が延びて雲水量は増えると考えられてきた。そのため λ は正であると考えられ、このような知見に基づいて作り込まれてきた気候モデルから見積もられた λ は正であった。例として、世界に複数ある気候モデルでモデル間比較を行った AeroCOM (Huneus *et al.* 2011; Myhre *et al.* 2013) プロジェクトの結果から見積もった λ は全てのモデルで正の値であった (Ghan *et al.* 2016; Quaas *et al.* 2009) ことが挙げられる。 λ と λ と同様な物理量 (λ の分母が雲粒数濃度の変動ではなく、エアロゾル数濃度や Aerosol index (AI), エアロゾルの光学的厚さといったエアロゾルの量を示す物理量の変動となったもの) は、衛星観測でも見積もられてきたが (Nakajima and Schulz 2009), 2010年代の前半までは λ は正というコンセンサスが得られていたと考えて良いであろう。

ところが2006年に打ち上げられたCloudSATなどのアクティブセンサーを用いた解析から、この正の λ に対して疑問が投げかけられる。Chen *et al.* (2014) はCloudSATを用いた解析から λ と同様な物理量である $(d \ln \bar{L}) / (d \ln \bar{AI})$ を見積もり、 $(d \ln \bar{L}) / (d \ln \bar{AI})$ は必ずしも正ではないという報告をした。山本賞を同時に受賞した道端氏の論文 (Michibata *et al.* 2016) でも λ は常に正ではなく、領域によって負の値も取り得ることが報告された。具体的に記述すると、道端氏は λ

を Lower Tropospheric Stability (LTS: 地上と700hPa 温位の差で定義される) と呼ばれる不安定度の指標ごとに求め、安定度の低い (積雲が卓越する) 領域は λ が負に、安定度が高い (層積雲が卓越する) 領域では λ が正となることを報告した (Michibata *et al.* 2016 の Fig. 1)。道端氏はまた既存の気候モデルでは λ は全球一様で正になっていることを示した。これらの結果は、エアロゾル雲相互作用が地球の放射収支に与える影響のうち、雲の増減を通じた放射収支への影響について、多くの気候モデルによる見積もりの妥当性に再考の余地があることを示すものであり、道端氏の論文は非常にインパクトのある論文であった。ところが、道端氏の論文が出た時点では世界中のどのモデルも λ が正と見積もっていた。

筆者らは、気候モデルでは雲が解像されていないために、雲の応答が表現されていないことが全球一様に λ が正となる原因だと考えた。Sato *et al.* (2018a) では、雲を直接解像したモデル (より正確には積雲パラメタリゼーションを使わず雲モデルのみで雲の表現を行うモデル) を用いることで、 λ の領域分布の再現を試みた。

具体的にはNICAM-SPRINTARSを用いた全球14kmの格子で覆った計算で1年間の積分を行い、その結果から λ を見積もった。全球を14km格子で覆った計算は膨大な計算資源が必要となるため、計算は京を用いて行った。実験設定の詳細はSato *et al.* (2018a) を参考にされたい。

NICAM-SPRINTARSの計算から導かれた λ の全球分布がSato *et al.* (2018a) の Fig. 1である。これを見ると λ は領域分布を持っており、Michibata *et al.* (2016) がCloudSATを用いて求めた λ の全球分布と見事に一致している。この λ の全球分布を世界で初めて再現したという点がSato *et al.* (2018a) の最も重要な成果である。

さらにSato *et al.* (2018a) は、 λ が負になる原因について、計算結果の解析から、エアロゾルが増える結果、雲粒のサイズが小さくなることで降水は抑制されるが、同時に雲粒が小さくなることで蒸発が促進されて雲水量が減るためであると結論づけた。これはすなわち、エアロゾルの量が増えた時の雲微物理プロセス (ここでは主に蒸発プロセス) の応答を雲を直接解像したNICAM-SPRINTARSモデルを用いることで再現できるようになったと解釈できる。気候モデルの大規模凝結と積雲パラメタリゼーションでは雲物理プロセ

スを直接取り扱うことができないため、蒸発プロセスの応答が再現されなかったと解釈することもできる。

この論文が受理された直後にドイツのマックスプランク研究所が所有する古城 (Schloss Ringberg) に世界中のエアロゾル雲相互作用を専門とする研究者が集まって1週間に渡り議論するワークショップで、この結果を提示する機会があった(第2図)。結果を提示した時は初めは誰も信じていないようであった。しかしながら、その場の議論を行う中で全球一様で入が正しいことはいないだろうという意見で一致し、その後、他の気候モデルでも負の入の可能性が議論されるようになった (Christensen *et al.* 2017; Neubauer *et al.* 2017)。そのような正の入が当たり前ではないということを示したという点で、Michibata *et al.* (2016) と Sato *et al.* (2018a) は大きなインパクトがある論文であった。なお、ドイツの古城で議論した内容は最近になって、Bellouin *et al.* (2020) としてまとめられ出版されたので、興味のある方は参照されたい (なお、Bellouin *et al.* (2020) はエアロゾル雲相互作用のみならず、エアロゾルの影響を一般的に議論している)。

4. SCALE を用いた数値実験

3章で記載した論文のアプローチとは異なり、限定的な領域ではあるが、雲を十分に解像できる程度まで解像度を上げたLESモデルを用いて計算を行い、その結果を用いてエアロゾル雲相互作用の再現性を向上させる取り組みについてこの章で述べる。

本研究が主に対象としている「暖かい雲」を十分に再現するためには、その生成に大きな寄与を及ぼす、空間スケールが数m~数十mの乱流を再現する必要がある。そのため、この取り組みのためには格子幅が数m~数十mオーダーのLESモデルが必要となる。



第2図 Schloss Ringbergで行われたエアロゾル雲相互作用に関するワークショップの参加者の集合写真。

ところが、筆者がLESの必要性を感じた2012年時点で、エアロゾル雲相互作用の影響を(間接的にも)扱える雲微物理を備え、自由に使える(著作権やライセンスに捉われずに利用できる)LESモデルが日本にはなかった。そんなことはないと言われる方も読者の中にはいらっしやると思われるが、少なくとも筆者が博士課程期間中に探した範囲では見つけることができなかった。諸外国の研究者に頼ってLESモデルを借りてくることもできたが、東京大学大気海洋研究所の本木昌秀教授の「数値気候モデルは、自分たちの研究に絶対に必要なものだ。そして、それを作る力がなければやりたい研究を推進してゆくことはできないのだ」という言葉(本木 2016)を真に受けたのか、自分で中身のある程度は理解してLESモデルを使いたいと考えた。

そこで、当時、理化学研究所で開発を始めていたSCALEの開発に加わることを決意し、理化学研究所の富田浩文チームリーダー率いる複合系気候科学研究チームに加わった。今回の受賞対象論文である、Sato *et al.* (2015) は Nishizawa *et al.* (2015) とともに、SCALEのdescription paperという位置付けである。この章ではこのSCALEを用いて行った研究のうち受賞対象となった論文の位置付けについて紹介を行う。

Sato *et al.* (2015) は、全く同じLESモデルを用いても、雲物理モデルの選択一つで計算結果が大きく変わってしまうことを示した。雲物理モデルのみならず、LESモデルといえども、計算結果はモデルの格子幅に依存する。そこで、研究の対象としている洋上の積雲に対して格子幅依存性を調べたのが、今回の受賞対象論文であるSato *et al.* (2017, 2018b)である。これらの論文では、Barbados Oceanographic and Meteorological Experiment (BOMEX) とよばれる洋上の積雲を対象としたモデル間比較 (Siebesma *et al.* 2003) の実験設定で、水平格子幅をSiebesma *et al.* (2003) が用いていた100m (鉛直格子幅は水平格子幅の0.8倍に設定した) から6.25mまで変えて実験を行い、計算結果(具体的には雲量)が格子幅によらず変わらなくなる格子幅が12.5mであることを示した(計算される雲量が12.5mの格子幅で数値的に収束することを示した)。水平格子幅6.25m~12.5mの計算にはやはり膨大な計算資源が必要になるため、京を用いて計算を行った。BOMEXのケースで数値的に収束する格子幅を示したのはこれらの研究が初めてであったと認識している。BOMEX以外にも様々な低層雲でのモデル間

比較が行われており、近年の研究によって数値的収束が議論されている。例えば、The Second Dynamics and Chemistry of Marine Stratocumulus field study (DYCOMS-II RF02: Ackerman *et al.* 2009) のケースでは Matheou and Teixeira (2019) が数値的収束には 2.5m の格子幅が必要だと報告している。このように、利用している LES モデル自身の特性を知ること、気候モデルの改良を行う際に、モデルの誤った利用や計算結果の誤った解釈を防ぐことができる。

Sato *et al.* (2017, 2018b) では同時に、粒子法雲モデルである超水滴法 (Super Droplet Method: SDM, Shima *et al.* 2009) を利用したということも新しい点であった。現存する気象モデルは、雲粒などの水物質について、単位空気あたりの質量や数密度を各格子で定義し、その時間変化を算出する。水物質を格子点で定義するため各格子の境界 (側面・上面・下面) での水物質の移動は境界を横切るフラックスなどから計算される。このような扱いは水物質を Euler 的に扱っていると見ることができるので、Euler 型雲モデル (Eulerian Cloud Model: ECM) と呼ばれる。一方、SDM では属性の似た雲粒をまとめて表現する超水滴とよばれる粒子によって水物質を表現し、超水滴一つ一つの動きと微物理プロセスを計算する。このような雲の扱いは、Lagrange 的に粒子を扱うので Lagrange 型雲モデル (Lagrangian Cloud Model: LCM) と呼ばれる。LCM は 2000 年代後半～2010 年代前半に気象モデルでの利用を見据えた開発が始まり (Riechelmann *et al.* 2012)、2010 年代後半になって気象モデルで徐々に用いられるようになってきた (Hoffmann 2016)。この LCM を用いる利点は Grabowski *et al.* (2019) にまとめられているが、Sato *et al.* (2017, 2018b) はこの LCM の一つである SDM を SCALE に取り込んで、LCM を用いた気象モデルでの数値実験を世界に先駆けて行ったという点に新規性があった。

なお、SDM は長らく「暖かい雲」しか扱えないモデルであったが、LCM の氷過程への拡張が現在進められており (Shima *et al.* 2019)、近い将来気象モデルで一般的に使われるようになるだろう。

最後に、SCALE を用いた応用的な研究として、受賞対象論文 Sato *et al.* (2018c) について説明する。2011 年 3 月に起こった福島第 1 原子力発電所の事故の際に大気中に放出された放射性物質を対象とした国際モデル間比較プロジェクトが行われ、SCALE をはじめとした世界中で 12 のモデルが参加した。このモデル間比

較プロジェクトでは、気象場と放射性物質の放出源情報を統一した実験を行い、モデルの不確実性を評価した。この研究に限らず SCALE を用いて現実事例を対象とした研究 (Adachi *et al.* 2017, 2019; Nishizawa *et al.* 2018) や現実事例を効率よく行うためのネスティング手法の開発 (Yoshida *et al.* 2017)、さらには応用研究 (Tanji and Inatsu 2019) に至るまで、SCALE を用いた研究が徐々に増えてきているところを見るのは開発者冥利につきる。

5. モデル開発の今後

ここまで述べてきたように、著者は SCALE の LES モデルを用いた様々な実験を行っているが、今でもモデルの開発を重ねている段階であり、現状としてはエアロゾル雲相互作用による放射収支の見積もりまでは至っていない。今後は SCALE を用いたエアロゾル雲相互作用に関する研究を進めていければと考えている。

同時に、モデルの精緻化は進めなければならない。雲モデルの精緻化は日本では 2010 年前半からはほとんど進んでいないことに加え、領域モデルで自由に利用できるエアロゾルモデルが日本で全く開発されていない。これはモデル開発できる人材の不足に起因するところが大きいと考えられる。モデルの開発は測器の開発やアルゴリズムの開発と同様に時間のかかる作業であり、開発している間は論文を書けないというジレンマがつきまとう。

もちろん人的リソースが限られる中で、閾雲に精緻な雲モデルやエアロゾルモデルを作ればいいというものではないが、雲やエアロゾルに関する精緻化を行なっていくことは今後も必要であるし、筆者はそのために努力を惜しむつもりはない。

また、精緻化という観点では、現在筆者は雷を直接取り扱う数値モデルの開発を行い (Sato *et al.* 2019)、SCALE で扱える物理プロセスを増やす取り組みをしている。雷に限らず、必要なモデルの開発・改良に今後も取り組んでいきたい。なお、この雷モデルの開発は筆者が修士 2 年の時にやりたいと思ったことであり、本稿で紹介してきた研究の空き時間を使って徐々に進めてきたものである。若手研究者の方々の中には、もし何かやりたい研究があっても、立場上その研究はすぐにはできない場合や、ワークライフバランスといった点からその研究ができないということもあると想像する。しかしながら、ぜひ諦めず僅かな時間でも、(体調を崩さない程度また立場を失わない程度に)

取り組み続けていただけることを切に願っている。

謝 辞

本稿の最初でも記載した通り、上記の研究は決して私一人で成し得たものではなく、数え切れないほど多くの方の支えの上に成り立っております。紙面の関係で全ての方を紹介することは難しいですが、ここでは可能な限り私の研究を支えていただいた方を紹介させていただきます。

まず、エアロゾル雲相互作用という私の研究の基幹となる研究テーマに私を導いてくださった中島映至東京大学名誉教授に感謝申し上げます。ご自身の専門は大気放射であり、雲モデルを用いた研究を行う私の指導にご苦労された部分があると思いますが、常に国際的な目線でコメントをいただき、私に研究者としてのあり方を教えていただきました。

理化学研究所計算科学研究センターの富田浩文チームリーダーにも大変お世話になりました。学位を取得後、初めて研究員となった私のような新米に、京を使う機会を与えていただくだけでなく、SCALEを開発する機会や、雲解像モデルNICAMを用いた研究を行う機会を与えていただきました。研究の方向性に関して乱暴な意見を申し上げたこともあり、大変な失礼をしたにも関わらず、常に私の研究をエンカレッジしていただきました。今回の受賞対象となった多くの研究は、私が理化学研究所に研究員として在籍していた頃に行った研究です。富田チームリーダーなしにはこの研究は成立しませんでした。

東京大学理学系研究科の三浦裕亮准教授には、数値モデルを使った研究の進め方についてアドバイスをいただきました。今回受賞対象となった論文のうちの(Sato *et al.* 2016, 2018a)は、私の未熟さから結果をどう解釈したらいいかわからず論文化することを諦めていた研究です。三浦准教授は富田チームリーダーと並び、日本では数値モデルのことを最もよく知る研究者の一人であり、学位を取ったばかりの私にモデルの結果の解釈の仕方、モデル開発を行う上で最も重要な価値観や心構えを教えてくださいました。この時に身についた価値観や心持が今でも私の研究の基盤になっています。

京を使ってNICAM-SPRINTARSの計算やSCALEの開発、実験を行うにあたり、国立環境研究所の八代尚主任研究員と五藤大輔主任研究員には多大なるサポートをいただきました。また、理化学研究所の

SCALE開発チームのメンバー(梶川義幸上級研究員、西澤誠也研究員、足立幸穂研究員、山浦 剛研究員、末木健太研究員、松嶋俊樹研究員、河合佑太研究員、大谷英之研究員)、高度情報科学技術研究機構の伊賀晋一研究員、慶應義塾大学の宮本佳明講師、米国大気科学研究所の吉田龍二研究員にはモデルの開発、数値実験、解析にあたり大変お世話になりました。理化学研究所で過ごした5年間は私の研究者としてのあり方に大きな影響を与えたことは言うまでもありません。日頃から研究に限らず気軽に話せる環境があり、その環境を土台にしていつも活発に研究の議論が理化学研究所でできました。また、同じ理化学研究所のデータ同化チームの方々(三好建正チームリーダーを始め、大塚成徳研究員、寺崎康児研究員、小槻峻司研究員(現千葉大学准教授)、近藤圭一研究員(現気象研究所研究員)、本田 匠研究員、前島康光研究員)にもSCALEやNICAMを用いた研究を通して、大変お世話になりました。同時に、理化学研究所で私が研究を心置きなくできるように支援いただきました皆様にも感謝申し上げます。

東京大学の鈴木健太郎准教授、九州大学応用力学研究所の竹村俊彦教授、道端拓朗助教にはNICAM-SPRINTARSを用いた数値実験の設定や結果の解釈の際に一緒に議論をしていただきました。兵庫県立大学の島 伸一郎准教授にはSCALE-SDMを用いた数値実験を行うにあたり、SDMのSCALEへの実装から計算資源の獲得、実験、結果の解釈に至るまで詳細に議論いただきました。

名古屋大学工学部の山澤弘実教授には、私が名古屋大学に在籍した期間、研究科が専門とする研究とは必ずしも一致しない私の研究を自由にやらせていただきました。このようなサポートがなければ今回受賞対象となった論文は書けなかったと思います。また福島第1原子力発電所起源の放射性物質に関わるモデル間比較や大気環境物質のためのシームレス同化システムの構築とその応用プロジェクト(SALSAプロジェクト)では、海洋研究開発機構の滝川雅之主任研究員、気象研究所の関山 剛主任研究員、梶野瑞王主任研究員、国立環境研究所の森野 悠主任研究員、国立環境研究所地域環境研究センターの高見昭憲センター長、東京大学の打田純也研究員、リモート・センシング技術センターの鶴田治雄研究員、千葉大学の樋口篤志准教授、茨城大学の増富祐司准教授に大変お世話になりました。

そのほか研究を遂行するために日本学術振興会から科学研究費補助金、理化学研究所から基礎科学特別研究員研究費を、HPCIから京と九州大学のFX10、東京大学情報基盤センターの若手・女性利用制度からOakforest-PACSの計算資源を提供いただきました。

また、ここには書ききれないほど多くの方から研究のサポートをいただきました、この場を借りて御礼を申し上げます。皆様との縁を大切に、現在の上司である稲津 将教授とともに、これからも気象学の発展のために、尽くしていきます。

最後に、いつも私を支えてくれる家族に一番の感謝の言葉をこの場を借りて申し上げます。

略語一覧

BOMEX+: Barbados Oceanographic and Meteorological Experiment
 DYCOMS-II: Second Dynamics and Chemistry of Marine Stratocumulus field study
 ECM: Eularian Cloud Model
 IPCC: Intergovernmental Panel for Climate Change
 LCM: Lagrangean Cloud Model
 LES: Large Eddy Simulation
 NICAM: Nonhydrostatic ICosahedral Atmospheric Model
 SCALE: Scalable Computing for Advanced Library and Environment
 SDM: Super-Droplet Method
 SPRINTARS: Spectral Radiation-Transport Model for Aerosol Species

参 考 文 献

- Ackerman, A. S., M. C. VanZanten, B. Stevens, V. Savijovcic, C. S. Bretherton, A. Chlond, J.-C. Golaz, H. Jiang, M. Khairoutdinov, S. K. Krueger, D. C. Lewellen, A. Lock, C.-H. Moeng, K. Nakamura, M. D. Petters, J. R. Snider, S. Weinbrecht and M. Zulauf, 2009: Large-eddy simulations of a drizzling, stratocumulus-topped marine boundary layer. *Mon. Wea. Rev.*, **137**, 1083-1110.
- Adachi, S. A., S. Nishizawa, R. Yoshida, T. Yamaura, K. Ando, H. Yashiro, Y. Kajikawa and H. Tomita, 2017: Contributions of changes in climatology and perturbation and the resulting nonlinearity to regional climate change. *Nat. Commun.*, **8**, 2224, doi:10.1038/s41467-017-02360-z.
- Adachi, S. A., S. Nishizawa, K. Ando, T. Yamaura, R. Yoshida, H. Yashiro, Y. Kajikawa and H. Tomita, 2019: An evaluation method for uncertainties in regional climate projections. *Atmos. Sci. Lett.*, **20**, e877, doi:10.1002/asl877.
- Albrecht, B. A., 1989: Aerosols, cloud microphysics, and fractional cloudiness. *Science*, **245**, 1227-1230.
- 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. Rügenstein, 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.
- Bretherton, C. S. and S. Park, 2009: A new moist turbulence parameterization in the community atmosphere model. *J. Climate*, **22**, 3422-3448.
- Chen, Y.-C., M. W. Christensen, G. L. Stephens and J. H. Seinfeld, 2014: Satellite-based estimate of global aerosol-cloud radiative forcing by marine warm clouds. *Nat. Geosci.*, **7**, 643-646.
- Christensen, M. W., D. Neubauer, C. A. Poulsen, G. E. Thomas, G. R. McGarragh, A. C. Povey, S. R. Proud and R. G. Grainger, 2017: Unveiling aerosol-cloud interactions - Part I: Cloud contamination in satellite products enhances the aerosol indirect forcing estimate. *Atmos. Chem. Phys.*, **17**, 13151-13164.
- 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. Natl. Acad. Sci.*, **113** (21), doi:10.1073/pnas.1514036113.
- Goto, D., T. Nakajima, D. Tie, H. Yashiro, Y. Sato, K. Suzuki, J. Uchida, S. Misawa, R. Yonemoto, T. T. N. Trieu, H. Tomita and M. Satoh, 2018: Multi-scale simulations of atmospheric pollutants using a non-hydrostatic icosahedral atmospheric model. *Land-Atmospheric Research Applications in South and Southeast Asia* (K. Vadrevu, T. Ohara and C. Justice, ed.), Springer, Cham, 277-302.
- Grabowski, W. W., H. Morrison, S.-I. Shima, G. C. Abade, P. Dziekan and H. Pawlowska, 2019: Modeling of cloud microphysics: can we do better? *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **100**, 655-672.
- Hoffmann, F., 2016: The effect of spurious cloud edge supersaturations in lagrangian cloud models: An ana-

- lytical and numerical Study. *Mon. Wea. Rev.*, **144**, 107–118.
- Huneus, N., M. Schulz, Y. Balkanski, J. Griesfeller, J. Prospero, S. Kinne, S. Bauer, O. Boucher, M. Chin, F. Dentener, T. Diehl, R. Easter, D. Fillmore, S. Ghan, P. Ginoux, A. Grini, L. Horowitz, D. Koch, M. C. Krol, W. Landing, X. Liu, N. Mahowald, R. Miller, J. J. Morcrette, G. Myhre, J. Penner, J. Perlwitz, P. Stier, T. Takemura and C. S. Zender, 2011: Global dust model intercomparison in AeroCom phase I. *Atmos. Chem. Phys.*, **11**, 7781–7816.
- IPCC, 2013: Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (T. F. Stocker, D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S. K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex, P. M. Midgley, eds.), Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 1535pp.
- 木本昌秀, 2016: 気候モデルの開発を通じた我が国の地球温暖化研究の推進と気候変動にかかわる社会への情報発信—2015年度藤原賞受賞記念講演—. *天気*, **63**, 793–801.
- Matheou, G. and J. Teixeira, 2019: Sensitivity to physical and numerical aspects of large-eddy simulation of stratocumulus. *Mon. Wea. Rev.*, **147**, 2621–2639.
- 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, 2019: Prognostic precipitation in the MIROC6-SPRINTARS GCM: Description and evaluation against satellite observations. *J. Adv. Model. Earth Syst.*, **11**, 839–860.
- Myhre, G., B. H. Samset, M. Schulz, Y. Balkanski, S. Bauer, T. K. Berntsen, H. Bian, N. Bellouin, M. Chin, T. Diehl, R. C. Easter, J. Feichter, S. J. Ghan, D. Hauglustaine, T. Iversen, S. Kinne, A. Kirkevåg, J.-F. Lamarque, G. Lin, X. Liu, M. T. Lund, G. Luo, X. Ma, T. van Noije, J. E. Penner, P. J. Rasch, A. Ruiz, Ø. Seland, R. B. Skeie, P. Stier, T. Takemura, K. Tsigaridis, P. Wang, Z. Wang, L. Xu, H. Yu, F. Yu, J.-H. Yoon, K. Zhang, H. Zhang and C. Zhou, 2013: Radiative forcing of the direct aerosol effect from AeroCom Phase II simulations. *Atmos. Chem. Phys.*, **13**, 1853–1877.
- Nakajima, T. and M. Schulz, 2009: What do we know about large-scale changes of aerosols, clouds, and the radiation budget? Struöngmann Forum Report: Clouds in the Perturbed Climate System. Their Relationship to Energy Balance, Atmospheric Dynamics, and Precipitation (J. H. Charlson, J. Robert, ed.), MIT Press, Cambridge, 597pp.
- 中島映至, 竹村俊彦, 2009: 放射強制力. *天気*, **56**, 29–31.
- Neubauer, D., M. W. Christensen, C. A. Poulsen and U. Lohmann, 2017: Unveiling aerosol-cloud interactions – Part 2: Minimising the effects of aerosol swelling and wet scavenging in ECHAM6-HAM2 for comparison to satellite data. *Atmos. Chem. Phys.*, **17**, 13165–13185.
- 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.
- Nishizawa, S., S. A. Adachi, Y. Kajikawa, T. Yamaura, K. Ando, R. Yoshida, H. Yashiro and H. Tomita, 2018: Decomposition of the large-scale atmospheric state driving downscaling: a perspective on dynamical downscaling for regional climate study. *Prog. Earth Planet. Sci.*, **5**, 2, doi:10.1186/s40645-017-0159-0.
- 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.
- Riechelmann, T., Y. Noh and S. Raasch, 2012: A new method for large-eddy simulations of clouds with Lagrangian droplets including the effects of turbulent collision. *New J. Phys.*, **14**, 065008, doi:10.1088/1367-2630/14/6/065008.
- Sato, Y., S. Nishizawa, H. Yashiro, Y. Miyamoto, Y. Kajikawa and H. Tomita, 2015: Impacts of cloud microphysics on trade wind cumulus: which cloud microphysics processes contribute to the diversity in a large eddy simulation? *Prog. Earth Planet. Sci.*, **2**, 23, doi:10.1186/s40645-015-0053-6.
- Sato, Y., H. Miura, H. Yashiro, D. Goto, T. Takemura, H. Tomita and T. Nakajima, 2016: Unrealistically pristine air in the Arctic produced by current global scale models. *Sci. Rep.*, **6**, 26561, doi:10.1038/srep26561.
- Sato, Y., S. Shima and H. Tomita, 2017: A grid refinement

- study of trade wind cumuli simulated by a Lagrangian cloud microphysical model: the super-droplet method. *Atmos. Sci. Lett.*, **18**, 359–365.
- Sato, Y., D. Goto, T. Michibata, K. Suzuki, T. Takemura, H. Tomita and T. Nakajima, 2018a: 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.
- Sato, Y., S. Shima and H. Tomita, 2018b: Numerical convergence of shallow convection cloud field simulations: Comparison between double-moment eulerian and particle-based lagrangian microphysics coupled to the same dynamical core. *J. Adv. Model. Earth Syst.*, **10**, 1495–1512.
- Sato, Y., M. Takigawa, T. T. Sekiyama, M. Kajino, H. Terada, H. Nagai, H. Kondo, J. Uchida, D. Goto, D. Quélo, A. Mathieu, A. Quérel, S. Fang, Y. Morino, P. von Schoenberg, H. Grahn, N. Brännström, S. Hirao, H. Tsuruta, H. Yamazawa and T. Nakajima, 2018c: Model intercomparison of atmospheric ^{137}Cs from the Fukushima daiichi nuclear power plant accident: simulations based on identical input data. *J. Geophys. Res. Atmos.*, **123**, 1–18.
- Sato, Y., Y. Miyamoto and H. Tomita, 2019: Large dependency of charge distribution in a tropical cyclone inner core upon aerosol number concentration. *Prog. Earth Planet. Sci.*, **6**, 62, doi:10.1186/s40645-019-0309-7.
- Satoh, M., T. Matsuno, H. Tomita, H. Miura, T. Nasuno and S. Iga, 2008: Nonhydrostatic icosahedral atmospheric model (NICAM) for global cloud resolving simulations. *J. Comput. Phys.*, **227**, 3486–3514.
- 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.
- Shima, S., K. Kusano, A. Kawano, T. Sugiyama and S. Kawahara, 2009: The super-droplet method for the numerical simulation of clouds and precipitation: a particle-based and probabilistic microphysics model coupled with a non-hydrostatic model. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **135**, 1307–1320.
- Shima, S., Y. Sato, A. Hashimoto and R. Misumi, 2019: Predicting the morphology of ice particles in deep convection using the super-droplet method: development and evaluation of SCALE-SDM 0.2.5-2.2.0/2.2.1. *Geosci. Model Dev. Discuss.*, doi:10.5194/gmd-2019-294.
- Siebesma, A. P., C. S. Bretherton, A. Brown, A. Chlond, J. Cuxart, P. G. Duynkerke, H. Jiang, M. Khairoutdinov, D. Lewellen, C.-H. Moeng, E. Sanchez, B. Stevens and D. E. Stevens, 2003: A large eddy simulation intercomparison study of shallow cumulus convection. *J. Atmos. Sci.*, **60**, 1201–1219.
- Suzuki, K., T. Nakajima, M. Satoh, H. Tomita, T. Takemura, T. Y. Nakajima and G. L. Stephens, 2008: Global cloud-system-resolving simulation of aerosol effect on warm clouds. *Geophys. Res. Lett.*, **35**, L19817, doi:10.1029/2008GL035449.
- Takemura, T., T. Nozawa, S. Emori, T. Y. Nakajima and T. Nakajima, 2005: Simulation of climate response to aerosol direct and indirect effects with aerosol transport-radiation model. *J. Geophys. Res.*, **110**, D02202, doi:10.1029/2004JD005029.
- Tanji, S. and M. Inatsu, 2019: Case study of blowing snow potential diagnosis with dynamical downscaling. *SOLA*, **15**, 32–36.
- Tomita, H., H. Miura, S. Iga, T. Nasuno and M. Satoh 2005: A global cloud-resolving simulation: Preliminary results from an aqua planet experiment. *Geophys. Res. Lett.*, **32**, 1–4.
- Twomey, S. 1977: The influence of pollution on the short-wave albedo of clouds. *J. Atmos. Sci.*, **34**, 1149–1152.
- Yoshida, R., S. Nishizawa, H. Yashiro, S. A. Adachi, Y. Sato, T. Yamaura and H. Tomita, 2017: CONeP: A cost-effective online nesting procedure for regional atmospheric models. *Parallel Comput.*, **65**, 21–31.

Numerical studies of aerosol cloud interaction using global scale cloud resolving model
and numerical studies of shallow clouds using Large Eddy Simulation model.

Yousuke SATO*

* *Faculty of Science, Hokkaido University, RIKEN Center for Computational Research.*
E-mail: yousuke.sato@sci.hokudai.ac.jp

(Received 26 December 2019; Accepted 20 March 2020)
