

階層的数値モデル群による短寿命気候強制因子の  
組成別・地域別定量的気候影響評価

Assessment on climate impacts of short-lived climate forc  
ers by composition and region with hierarchical numerical models

課題番号：19H05669

竹村 俊彦（TAKEMURA Toshihiko）

九州大学・応用力学研究所・教授



研究の概要（4行以内）

大気汚染物質でもある短寿命気候強制因子（SLCFs）の気候変動に対する影響について、自ら開発してきた SLCFs に関する空間分解能の異なる複数の気候モデルを用いて、組成ごと・地域ごとに定量的に評価する。その際に、気候モデルの主要な不確実性要因である雲・降水過程の表現について、スキームの精緻化を図る。

研究分野：地球温暖化、環境変動、水・物質循環、環境モデル、シミュレーション

キーワード：短寿命気候強制因子、気候モデル、気候変動、大気汚染、エアロゾル

1. 研究開始当初の背景

大気中の PM2.5 などの微粒子（エアロゾル）や、光化学オキシダントであるオゾンなどの微量気体は、大気汚染物質であると同時に気候変動を引き起こす物質であり、短寿命気候強制因子（Short-Lived Climate Forcers (SLCFs)）と呼ばれる。気候変化を定量的に評価する上で最も基本となる太陽光と赤外線のエネルギーの不均衡である放射強制力については、各々の SLCFs の定量的評価が、国連気候変動に関する政府間パネル (IPCC) などでもなされてきた。しかし、各 SLCFs 濃度変化による気温や降水量などの具体的な気候変化については、統合的な評価がなされていない。その一方で、SLCFs の複雑な気候影響過程を組み込んだ気候モデルが成熟期に入り始めた。

2. 研究の目的

本研究課題では、研究チーム自ら開発を進めてきた SLCFs に関する空間分解能の異なる複数の気候モデルを用いて、SLCFs による組成ごと・地域ごとの気候変化を定量的に評価する。また、近年顕在化している極端な気温や降水など、災害に直結する気象現象について、SLCFs の影響を評価する。その際、気候モデルの主要な不確実要因であり、SLCFs と相互に影響を及ぼす雲・降水の素過程について、モデル内での表現方法の精緻化を図る。

3. 研究の方法

SLCFs の大気中での輸送過程および気候影響が計算できる以下の様々な時空間スケ

ルの気候モデルを組み合わせて研究を行う。

- MIROC-SPRINTARS/CHASER：地球全体の気候状態を再現・予測する MIROC に、エアロゾルに関わる過程を計算する SPRINTARS や、詳細な化学反応過程を計算する CHASER を結合させた、水平分解能が数十 km の気候モデル。SLCFs の時空間分布や気候影響を計算できる。MIROC-SPRINTARS は、毎日一般向けに広く情報提供されている PM2.5 予測でも利用されている。
  - NICAM-Chem：水平分解能 3.5/7/14km の高分解能で雲物理を陽に表現しながら地球全体の大気の状態を計算する NICAM に、SPRINTARS/CHASER を結合させて、SLCFs の時空間分布と気候影響を計算する気候・気象モデル。
  - SCALE-SPRINTARS：個々の雲の過程を扱える水平分解能数十～数百 m の超高分解能気象モデル SCALE に、エアロゾルの時空間分布と気候影響を計算できる SPRINTARS を結合させたモデル。当初計画では SCALE を利用するのみであったが、より発展的な研究成果を求めて SPRINTARS の結合開発を進めている。
- 各 SLCFs に関係する排出量を、様々な分解能のモデルで変動させる感度実験を行い、気温や降水量などの気象場の変化量を解析する。その際、エアロゾル・雲相互作用の表現の改良や、降雨・降雪を陽に計算する方法の導入などにより、気候モデルの精緻化を図る。

#### 4. これまでの成果

前半2年間では、SLCFs 関連排出量の感度解析の予備実験、および気候モデルの雲・降水の素過程の精緻化を計画した。当初想定よりも、研究代表者および研究分担者が筆頭著者の査読論文を多く発表することができ、かつ、当初計画を超える SCALE-SPRINTARS の開発に着手した。

##### ● SLCFs 関連排出量の感度解析の予備実験

MIROC-SPRINTARS を用いて、主要 SLCFs である硫酸塩エアロゾルの前駆気体である SO<sub>2</sub> について、燃料消費起源の排出量を全球一様の比率で数段階に増減させる感度実験を行った。その際の CO<sub>2</sub> 濃度を、2000 年レベルおよびその2倍の2つのパターンに設定した。その結果、近い将来に想定される硫酸塩エアロゾル濃度の低下に伴う気温上昇は、同量の硫酸塩エアロゾル濃度の低下であっても、CO<sub>2</sub> 濃度が高い状態の方が大きくなることを定量的に示した<sup>4)</sup>。このことは、大気汚染対策を実施する場合、同時に温室効果ガス濃度の上昇を抑制しなければ、地球温暖化が加速度的に進行することを示している。この研究成果の査読論文の公表に合わせてプレスリリースを行ったところ、関心が高く、計5紙に掲載されたほか、国際的な科学ニュースサイトでも紹介した。

硫酸塩のほか、同じく代表的な SLCFs であるブラックカーボンの排出量を変化させる感度実験を MIROC-SPRINTARS を用いて行った。ブラックカーボンは、大気加熱によって降水量を大きく減少させることで、顕著な負の水循環感度を「速い応答」として生み出すのに対して、硫酸塩は、主に地上気温の変化に連動する「遅い応答」として起こる水蒸気フィードバックの結果として、正の水循環感度を生み出すことがわかった<sup>5)</sup>。

NICAM-Chem 全球 14km の雲解像モード<sup>2)</sup>においても、SO<sub>2</sub> およびブラックカーボンの排出量を全球一様に変化させる感度実験を行い、従来の気候モデルでは解像できない雲に関わる SLCFs の気候応答を直接的に計算することの重要性を示唆する結果が得られた。また、感度実験の一環として、MIROC-SPRINTARS および MIROC-CHASER を用いて、SLCFs に関わる国際モデル相互比較プロジェクトに参画することで、気候変動に関する科学的知見の提供に貢献している。

##### ● 数値モデルの精緻化

従来型の気候モデルでは診断変数として取り扱っていた降雨・降雪を陽に予報する「降水予報型スキーム」を開発し、MIROC-SPRINTARS に実装した。また、ほとんど全ての気候モデルが無視している雨滴・雪片による大気放射の散乱・吸収も計算するよう設計した<sup>3)</sup>。この結果、降水の頻度・強度や雲量の観測との整合性が高まり、エアロゾル・雲相互作用に伴う有効放射強制力

(速い応答を含む大気放射収支の変化)についても、観測による推定を満足する結果が得られたり。

当初計画以上の研究成果を求めて着手した超高解像度 SCALE-SPRINTARS の開発は、想定よりも速く進捗しており、主要エアロゾルすべての輸送過程計算の組み込みはほぼ完了した。このモデル開発は、関連分野全体の発展に大きく寄与することが見込まれる。

#### 5. 今後の計画

自ら開発してきた SLCFs に関する空間分解能の異なる複数の気候モデルを階層的に用いて、組成別・地域別・燃料起源や森林火災起源などの起源別に、それぞれ現実的な範囲内で SLCFs 関連排出量を変動させる大規模な感度実験を実施する。本研究課題の成果は、査読論文や国内外の学会での発表を通じて公表するほか、気候変動緩和へ向けた国際的な潮流が加速しつつある中で、政策や一般社会活動に資する科学的知見を提供するという観点でも活用していく。

#### 6. これまでの発表論文等 (受賞等も含む)

- 1) Michibata, T., and K. Suzuki, Reconciling compensating errors between precipitation constraints and the energy budget in a climate model. *Geophysical Research Letters*, 47, doi:10.1029/2020GL088340, 2020.
  - 2) Goto, D., Y. Sato, H. Yashiro, K. Suzuki, et al., Global aerosol simulations using NICAM.16 on a 14 km grid spacing for a climate study: improved and remaining issues relative to a lower-resolution model. *Geoscientific Model Development*, 13, 3731–3768, doi:10.5194/gmd-13-3731-2020, 2020.
  - 3) Michibata, T., K. Suzuki, and T. Takemura, Snow-induced buffering in aerosol-cloud interactions. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 20, 13771–13780, doi:10.5194/acp-20-13771-2020, 2020.
  - 4) Takemura, T., Return to different climate states by reducing sulphate aerosols under future CO<sub>2</sub> concentrations. *Scientific Reports*, 10, 21748, doi:10.1038/s41598-020-78805-1, 2020.
  - 5) Suzuki, K., and T. Takemura, Understanding hydrological sensitivities induced by various forcing agents with a climate model. *Scientific Online Letters on the Atmosphere (SOLA)*, 16, 240–245, doi:10.2151/sola.2020-040, 2020.
- 日本気象学会山本賞, 道端拓朗, 2019.  
西日本文化賞奨励賞, 竹村俊彦, 2019.  
Highly Cited Researchers, 竹村俊彦, 2019, 2020.  
Highly Cited Researchers, 須藤健悟, 2019, 2020.

#### 7. ホームページ等

[https://www.riam.kyushu-u.ac.jp/climate/KAKE\\_NHI\\_S/](https://www.riam.kyushu-u.ac.jp/climate/KAKE_NHI_S/)