

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 3 日現在

機関番号：17102

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2015～2016

課題番号：15K12190

研究課題名(和文) 気候モデルに適用する新しい雲・降水成長スキームの開発

研究課題名(英文) Development of new cloud and precipitation growth scheme to be applied to the climate model

研究代表者

竹村 俊彦 (Takemura, Toshihiko)

九州大学・応用力学研究所・教授

研究者番号：90343326

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,000,000円

研究成果の概要(和文)：気候変動を再現・予測する数値シミュレーションにおいて、雲が雨へ成長する過程の表現の不確か性は高い。そこで、これまでに提案されている複数の表現方法を同一環境下でテストし、人工衛星観測データと詳細に比較しながら、その挙動を検証した。その後、多くの気候モデルでまだ導入されていない、雨滴とドリズル(雲粒と雨滴の中間のサイズを持つ水滴)の時空間分布を陽に計算する手法を新たに開発した。研究成果は、査読論文として国際学術誌に投稿し、受理・公開された。

研究成果の概要(英文)：In the numerical simulation to reproduce and predict climate change, there is a high uncertainty in an expression of the growing process from cloud to rain. We tested several parameterizations for the process under the common circumstances, and understood each behavior comparing it with the satellite data in detail. After that, we newly developed a method to explicitly calculate the spatiotemporal distribution of raindrops and drizzle (water droplets having sizes between cloud droplets and raindrops) that have not yet been introduced in most climate models. The research results were submitted as peer-reviewed articles in international journals, accepted and published.

研究分野：気象学・大気環境学

キーワード：気候変動 気象学 モデル化 雲 エアロゾル

1. 研究開始当初の背景

2013年9月に、国連環境計画(UNEP)および国際気象機関(WMO)の下にある気候変動に関する政府間パネル(IPCC)第1作業部会(WG1)の最新報告書である第5次評価報告書(AR5)が公表された(本研究課題の研究代表者は、IPCC WG1 AR5のLead Authorに選出され、報告書を執筆した)。IPCCによる気候変動の評価、特に将来予測において主に用いられるのが気候モデルである。IPCC WG1 AR5では、気候モデルの平衡気候感度(二酸化炭素濃度が倍増した際の地上気温の昇温)が1.5~4.5°Cと評価され、依然として世界各研究機関の気候モデル間のばらつきが大きい。気候感度は、気候変動の評価にとって重要な指標であり、温暖化時の雲の変動に大きく依存する。その主要因として、気候モデルにおける雲粒・氷晶・雨滴・雪片の微物理特性の再現が不十分であり、大気放射収支の不確か性を大きくしていることが挙げられる。例えば、一般的な気候モデルと人工衛星による観測データとを比較すると、気候モデルでは雲粒や氷晶から降水や降雪への成長が速すぎる傾向にあり(Suzuki et al., 2011)、雲微物理特性にバイアスをもたらしていると考えられる。また、雲粒や氷晶は、大気浮遊粒子状物質(エアロゾル)が核となっていることから、雲の生成・成長プロセスでは、エアロゾルと雲の相互作用を考慮することが本質的である。

2. 研究の目的

本研究課題では、エアロゾル・雲相互作用を考慮し、雲粒・氷晶から降水・降雪への成長タイムスケールを適切に表現できる新しいスキームを開発する。さらに、新しい雲・降水スキームを適用した気候モデルによるシミュレーションを行い、人為的要因による、エアロゾル・雲相互作用放射強制力および温暖化に伴う雲変化による気候へのフィードバックを定量的に評価する。

3. 研究の方法

本研究課題で使用するエアロゾル気候モデルMIROC-SPRINTARSは、研究代表者を中心に開発されてきた。SPRINTARSは、対流圏主要エアロゾルである黒色炭素・有機物・硫酸塩・土壌粒子・海塩粒子の分布や気候に対する影響を地球規模でシミュレートする。エアロゾル粒子の輸送プロセス(発生・移流・拡散・化学反応・湿性沈着・乾性沈着・重力落下)を計算するだけでなく、大気大循環モデルの放射過程や雲・降水過程と結合させて、エアロゾル・放射相互作用(エアロゾル粒子が太陽放射や赤外放射を散乱・吸収する作用)およびエアロゾル・雲相互作用(エアロゾル粒子が水雲の凝結核および氷雲の氷晶核となる機能を通して雲の反射率や寿命を変調させる作用)を計算することが可能である。

MIROC-SPRINTARSをはじめとする国内外の気候モデルでは、水雲から降水への変化(autoconversion)の時間変化にパラメタリゼーションを用いている。これらのパラメタリゼーションは、雲水混合比・雲粒数濃度に対する非線形度が各々で異なるため、これらを気候モデルに組み込んだ際、モデルで表現される降雨生成過程は、エアロゾル変化に対する応答が系統的に異なる。現在の一般的な気候モデルでは、雲粒から雨滴への成長タイムスケールが観測と比較して短くなる傾向にあるが、その主要因の1つは、この非線形度の不確か性に由来する。そこで、本研究課題では、これらのパラメタリゼーションの改良型あるいは新規のスキームを開発し、現実に近い雲から降水への成長タイムスケールを表現することを目指す。同時に、時空間が高解像度化している近年の気候モデルに適合させるため、2タイムステップ以上にまたがり降水が地表面へ到達する過程(雨滴の予報変数化)を導入し、観測事実を適切に表現できるようにする。また、実際の大気には、ドリズル(霧雨)のような雲粒と雨滴の中間のサイズの状態のものも存在しているが、一般的な全球気候モデルではこれを陽には取り扱っていないため、本研究課題で導入する。

これらの開発を行っていく上で、現実大気での雲から降水への成長過程に関して、十分に把握しておく必要がある。そこで、CFODDを用いた人工衛星データ解析を行う。CFODDは、雲のレーダー反射因子と光学的厚さの関係の頻度を雲粒径ごとにプロットするものであり、高頻度の位置により、雲粒→ドリズル→雨滴という成長過程が明確に示される。本研究課題では、人工衛星CloudSatの95GHz雲レーダーのデータ解析を、全球を細分化した領域ごとに行い、各領域のCFODDの特性を定量的に把握する。

4. 研究成果

まず、世界各国の気候モデルで用いられているいくつかのautoconversionのパラメタリゼーションを、本研究課題の代表者が開発してきたMIROC-SPRINTARSへ導入し、同一環境下でのautoconversionの感度を把握する実験を行った。その感度実験の結果は、衛星観測データと比較・検証した。MIROC-SPRINTARSでは、autoconversionの時間変化にBerry(1967)のパラメタリゼーションを用いているが、衛星観測データと比較すると、レーダー反射率が高い値を示しており、全般的に降水を強く予報していることがわかった。一方、Khairoutdinov and Kogan(2000)のパラメタリゼーションが多く気候モデルにおいて採用されている。これを適用した場合、Berryのパラメタリゼーションの場合と比較して、衛星観測との整合性があることがわかった。この2つのパラメタリゼーションでは、雲粒数濃度に対する非線形度が異なっており、そのことが

autoconversion の表現にとって重要であることを示唆している。ただし、Khairoutdinov and Kogan でも衛星観測を完全に説明できているわけではなく、かつ、これを用いてエアロゾル・雲相互作用を定量的に評価すると過大となる。つまり、autoconversion のパラメタリゼーションの変更だけでは、雲から雨への成長過程の表現について明確な改善をもたらすことは難しいと考えられる。この研究成果は、研究協力者（大学院生）が主著者で、研究代表者が共著者の査読論文として国際誌へ投稿して、受理・掲載された (Michibata and Takemura, 2015)。

次に、雲粒数濃度の変化に対する雲水総量の変化の感度を、気候モデルと人工衛星観測データとで詳細な比較を行った。その結果、衛星観測では見られる負の応答（雲粒数濃度増加に伴う雲水総量減少）が、現在の一般的な気候モデルではほとんど見られないことを明確に示した。このことは、気候モデルではエアロゾル・雲相互作用を過大評価している可能性を示唆している。この研究成果は、研究協力者（大学院生）が主著者で、研究代表者が共著者である査読付き論文として国際誌へ投稿して、受理・掲載された (Michibata et al., 2016)。

以上の結果を踏まえて、雲・降水変換プロセスの改良・再構築に取り組んだ。具体的には、より現実的な降水プロセスを実現するために、雨水量および雨粒数濃度を予報変数として扱うように変更し、複数タイムステップにまたがって大気中を雨水が落下するスキームの開発に取り組んだ。最初に鉛直 1 次元モデルにて構築・挙動確認をした後、気候モデル MIROC-SPRINTARS へ導入した。その結果、衛星観測で見られる負の応答を気候モデルでも表現することができるようになった。これは、プロセス途中での雨の蒸発が評価できるようになったことが主な要因と考えられる。また、大陸西岸のドリズル（雲粒と雨滴の中間サイズの液滴）を表現できるようになったため、本研究課題の成果は、気候モデルによる大気放射収支の定量的改善にも貢献できる可能性がある。

<引用文献>

- ① Suzuki, K., G. L. Stephens, S. C. van den Heever, and T. Y. Nakajima, Diagnosis of the warm rain process in cloud-resolving models using joint CloudSat and MODIS observations, *Journal of the Atmospheric Sciences*, 68, 2011, 2655-2670, doi:10.1175/JAS-D-10-05026.1
- ② Berry, E. X., Cloud droplet growth by collection, *Journal of the Atmospheric Sciences*, 24, 1967, 688-701.
- ③ Khairoutdinov, M., and Y. Kogan, A new cloud physics parameterization in a large-eddy simulation model of marine

stratocumulus, *Monthly Weather Review*, 128, 2000, 229-243.

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 7 件)

- ① Myhre, G., T. Takemura, et al. (21 名中 20 番目), Multi-model simulations of aerosol and ozone radiative forcing for the period 1990-2015, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 17, 査読有, 2017, 2709-2720, doi:10.5194/acp-17-2709-2017.
- ② Michibata, T., K. Suzuki, Y. Sato, and T. Takemura, The source of discrepancies in aerosol-cloud-precipitation interactions between GCM and A-Train retrievals, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 査読有, 16, 2016, 15413-15424, doi:10.5194/acp-16-15413-2016.
- ③ Stjern, C. W., T. Takemura, et al. (18 名中 17 番目), Global and regional radiative forcing from 20 % reductions in BC, OC and SO₄ – an HTAP2 multi-model study, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 16, 査読有, 2016, 13579-13599, doi:10.5194/acp-16-13579-2016.
- ④ Ghan, S., T. Takemura, et al. (15 名中 13 番目), Challenges in constraining anthropogenic aerosol effects on cloud radiative forcing using present-day spatiotemporal variability, *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 113, 査読有, 2016, 5804-5811, doi:10.1073/pnas.1514036113.
- ⑤ Samset, B. H., T. Takemura, et al. (17 名中 16 番目), Fast and slow precipitation responses to individual climate forcings: A PDRMIP multi-model study, *Geophysical Research Letters*, 43, 査読有, 2016, 2782-2791, doi:10.1002/2016GL068064.
- ⑥ Kipling, Z., T. Takemura, et al. (24 名中 22 番目), What controls the vertical distribution of aerosol? Relationships between process sensitivity in HadGEM3-UKCA and inter-model variation from AeroCom Phase II, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 16, 査読有, 2016, 2221-2241, doi:10.5194/acp-16-2221-2016.
- ⑦ Michibata, T., and T. Takemura, Evaluation of autoconversion schemes in a single model framework with satellite observations, *Journal of Geophysical Research*, 査読有, 120, 2015, 9570-9590, doi:10.1002/2015JD023818.

[学会発表] (計 16 件)

- ① Takemura, T., and K. Suzuki, Climate responses of black carbon and sulfate aerosols assessed with coupled-ocean general circulation model, AGU Fall Meeting, December 16, 2016, San Francisco, CA (USA).
- ② Michibata, T., K. Suzuki, Y. Sato, and T. Takemura, The source of discrepancies in cloud and precipitation susceptibilities between GCMs and A-Train retrievals, AGU Fall Meeting, December 16, 2016, San Francisco, CA (USA).
- ③ 竹村俊彦, 鈴木健太郎, 大気海洋結合モデルを用いたエアロゾルによる放射収支変化と気温変化との関係性の検証, 日本気象学会 2016 年秋季大会, 2016 年 10 月 28 日, 名古屋大学 (愛知県名古屋市).
- ④ Takemura, T., K. Sudo, K. Ueda, Y. Masutomi, K. Suzuki, and D. Goto, Climate change and impacts due to aerosol effects in Asian region based on modeling studies, 15th AeroCom Workshop, September 20, 2016, Beijing (China).
- ⑤ Michibata, T., and T. Takemura, Evaluation and development of cloud microphysical conversion processes in the MIROC-SPRINTARS with A-Train observations, 17th International Conference on Cloud and Precipitation, July 26, 2016, Manchester (UK).
- ⑥ Takemura, T., Mineral dust aerosols under the glacial period and anthropogenic global warming simulated by global models, Goldschmidt 2016, June 27, 2016, Yokohama (Japan).
- ⑦ Takemura, T., Integrated assessment of aerosol effects on atmospheric temperature and precipitation with global climate models, Yoram Kaufman Memorial Symposium, June 21, 2016, Greenbelt, MD (USA).
- ⑧ 竹村俊彦, エアロゾルによる気候変動 — 数値モデルの開発と影響評価, 日本地球惑星科学連合 2016 年大会, 2016 年 5 月 24 日, 幕張メッセ (千葉県千葉市).
- ⑨ Takemura, T., K. Sudo, K. Ueda, Y. Masutomi, S. Watanabe, M. Nakata, H. Takahashi, and D. Goto, Environmental assessment on aerosol effects in Asian region based on modeling studies, International Radiation Symposium 2016, April 20, 2016, Auckland (New Zealand).
- ⑩ Takemura, T., H. Irie, T. Nishizawa, K. Aoki, R. Kudo, A. Higurashi, A. Shimizu, S. S. Park, and K. Yumimoto, Resent

application of SKYNET and AD-Net to aerosol climate models. International SKYNET Workshop, March 3, 2016, Rome (Italy).

- ⑪ Takemura, T., Assessment on climate response to aerosol effects based on a coupled atmosphere-ocean general circulation model, 2nd International Workshop on SLCPs in Asia, February 18, 2016, Incheon (Korea).
- ⑫ Takemura, T., K. Sudo, K. Ueda, Y. Masutomi, S. Watanabe, M. Nakata, H. G. Takahashi, D. Goto, and T. Nakajima, Integrated assessment on effects of short-lived climate pollutants (SLCPs) in Asia based on numerical models, AGU Fall Meeting, December 17, 2015, San Francisco, CA (USA).
- ⑬ Takemura, T., Simulations under recent projects on aerosol model intercomparisons, Asian Conference on Meteorology, October 26, 2015, Kyoto (Japan).
- ⑭ Michibata, T., and T. Takemura, A study of cloud-to-rain conversion processes for warm cloud over East Asia and the North Pacific from A-Train observations, Asian Conference on Meteorology, October 26, 2015, Kyoto (Japan).
- ⑮ Takemura, T., K. Sudo, K. Ueda, Y. Masutomi, S. Watanabe, M. Nakata, H. G. Takahashi, D. Goto, and T. Nakajima, Integrated assessment on effects of short-lived climate pollutants (SLCPs) in Asia, 14th AeroCom Workshop, October 6, 2015, Frascati (Italy).
- ⑯ 道端拓朗, 竹村俊彦, MIROC-SPRINTARS における暖かい雨の雲微物理スキームの評価, 日本気象学会 2015 年春季大会, 2015 年 5 月 22 日, つくば国際会議場 (茨城県つくば市).

[その他]

ホームページ等
<http://sprintars.net>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

竹村 俊彦 (TAKEMURA, Toshihiko)
九州大学・応用力学研究所・教授
研究者番号: 90343326

(2) 研究協力者

鈴木 健太郎 (SUZUKI, Kentaroh)
道端 拓朗 (MICHIBATA, Takuro)