

富田数理気候学研究室

主任研究員 富田 浩文 (D.Eng.)



(0) 研究分野

分科会：物理、工学

キーワード：雲の自己組織化と階層構造／気候多平衡解／地域気候アセスメント法の開発

(1) 研究背景と研究目標

当研究室では、気候変動にとって重要な雲・乱流・放射プロセスの理解の元、数理科学的視点から、雲の自己組織化と階層構造の存在理由などの本質を明らかにすることを目標とする。それらの理解に基づいて、将来気候予測の不確実性を解釈し、将来気候アセスメントにおける数理的手法の研究開発を行う。これにより、社会への直接貢献を目指す。前者では、雲・乱流スキームの解の収束性評価を行い、水の相変化を含む湿潤大渦シミュレーション(Large Eddy Simulation: LES)の理論構築を目指す。更に、物理プロセスの高度化とそれらのスキームの高速アルゴリズムの開発し、低解像度モデルへの適切なパラメータ化の提案を行う。後者では、これまで当研究チームで開発してきた新しい気候アセスメント手法を、様々な形で応用していく。実際には、各国のモデルで算出された全球気候予測結果を力学的ダウンスケールし、不確実性の理解とともに、各地域での将来気候をより客観性を持たせた評価を行っていく。

(2)2020年度成果と今後の研究計画(中長期計画2025年度まで)

① 新しい切り口による様々な力学的ダウンスケール手法の解釈

地域スケールの気候の予測や気候変化のメカニズム理解のための数値実験手法の1つに、力学的ダウンスケールリング(DDS)手法がある。最も一般的なDDS手法では、親モデル(多くの場合、全球気候モデル:GCM)で計算された気候データを、子モデル(領域気候モデル:RCM)の境界条件として与え、ある領域内の気候を計算する。計算領域を限ることで、同じ計算リソースで高解像度な計算や、複雑な実際の現象をより精度良く模したスキームを使用することが可能となる。一方で、GCMもRCMも実際の気候状態を完全に再現することができないため、DDS手法で計算される気候状態はモデルバイアスを含む。過去の気候を対象とする場合には、実測の観測値が利用可能であるため、それを計算時に同化することによりモデルバイアスを軽減することが可能である。しかしながら、将来の気候予測を行う場合には、実際の気候状態がわからないため、モデルバイアスの影響が避けられない。特に、RCMは、境界値として与えられるGCMの気候の制約の中で計算を行うため、GCM由来のモデルバイアスは将来気候予測において大きな問題となっていた。上記の背景を受けて、将来気候予測におけるモデルバイアスの軽減や、将来気候変化の要因の理解を目的として、改良版DDS手法がこれまでに複数提案されている。

昨年度は、これら改良版DDS手法について網羅的なレビュー論文を出版した(Adachi & Tomita 2020)。本年度は、Adachi et al. (2017)の手法における非線形効果の特徴について解析を行った。改良DDS手法で、複数の気候変化要因の寄与を見積もる場合、それぞれの要因の直接的な影響に加えて、複数の要因が同時に影響することによって発生する非線形効果が存在する(Stein and Alpert, 1993)。Adachi et al. (2017)では、FSCC methodを用いて西日本における将来の降水変化の要因分析を行い、温暖化に伴う「平均的な気候状態の変化」による強い降水の頻度の増加と比べて、非線形効果が無視できない事例があることを示した。しかしながら、見積もった感度に対する非線形効果の重要性については、未だ十分に理解されていない。そこで、本年度は、同じ事例を対象に、非線形効果の特性について解析を行った。

まず、非線形効果特性を解析するために、 $\Delta C-\Delta P-\Delta cp$ scatter diagram を提案した(図1)。本ダイアグラムでは、横軸に大規模スケールの気候状態の平均的な気候状態の変化(ΔC)を、縦軸に大規模スケールの気候状態の擾乱成分の変化(ΔP)をとり、それらを軸に持つ位相空間上に、非線形効果(Δcp)の働き(符号)を色で示す。非線形効果は、 $\Delta cp = \Delta - \Delta C - \Delta P$ で求める。ここで、 Δ は、大規模スケールの気候状態の変化に応じた領域気候変化である。

次に、図2に、最大日降水量(R1D)と平均降水量(Rave)の $\Delta C-\Delta P-\Delta cp$ scatter diagramの結果を示す。最大日降水量の場合、線形応答のみで見積もられるExpected climate change ($\Delta C + \Delta P$)

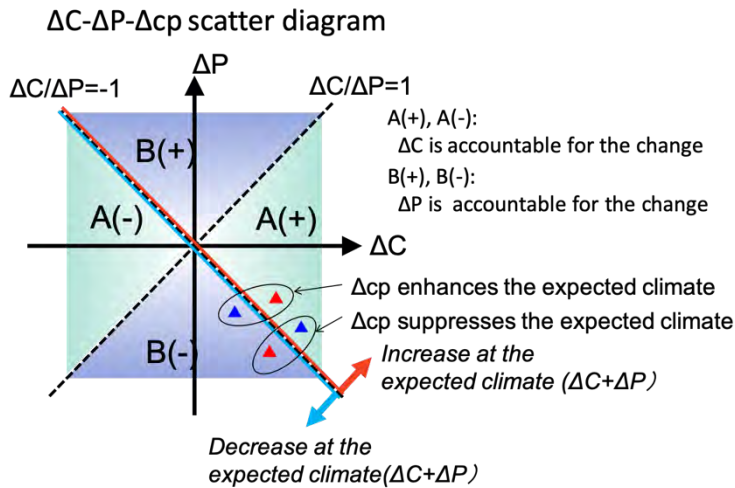


図1： ΔC - ΔP - Δcp scatter ダイアグラム。

きそのもの（絶対値）が小さな地点も多い。

最大日降水量と平均降水量の結果が異なる理由は、異なる降水強度間の非線形効果の大きさの違いによって説明できると推測される。Adachi et al. (2017)は、非線形効果による抑制が300 mm/dayを超える強い降水で顕著になることを示している。平均降水量にはさまざまな種類の降水イベントが含まれるため、平均降水量で見ると非線形効果の特性が平均化されてしまっていると考えられる。本解析結果は、現在投稿準備中である。

が正の場合、非線形効果 (Δcp) は負の値をとる (図2a-d)。また、その逆の関係 (Expected climate changeが負のときは、 Δcp は正) も同様である。つまり、非線形効果は、大規模スケールの気候変化に対する地域気候の線形的な応答を抑制する方向に働く。この特性は、異なる大規模スケールの気候変化を用いた4つの将来気候実験結果に共通する結果であった (図2a-d)。一方、平均降水量では、Expected climate changeに対する非線形効果の寄与ははっきりしない (図2e-h)。抑制する効果と促進する効果が、混在して分布しており、そもそも Δcp の働

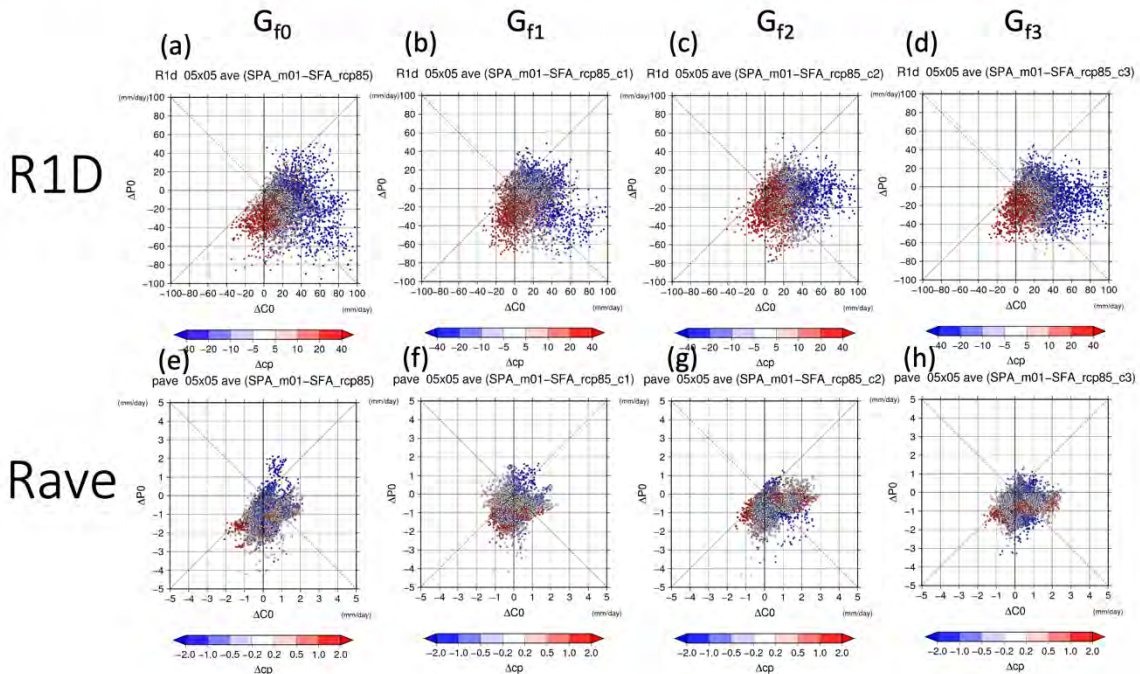


図2：(a-d)日最大降水量と(e-h)平均降水量の ΔC - ΔP - Δcp scatter diagram。色は、非線形効果(Δcp)の符号を表す。

② 乱流スキームLESの必要数値精度の導出

近年、ラージエディシミュレーション (LES) は、サブグリッドスケール乱流のパラメタリゼーションの有望な方法として、気象・気候シミュレーションで採用され始めている。しかしながら、力学コアに必要な数値精度は未だ完全に理解されているとは言い難い。本年度は、移流項の必要精度について2つの理論的基準を導出した。大気境界層の典型的な状況を設定した数値実

験によってそれらの妥当性の検証を行った。以下、格子スケールが $O(10m)$ の場合の結果を示す。数値拡散誤差の理論基準に基づくと、風上スキームは少なくとも7次の精度を持っている必要がある。また、通常4次中央スキームは4次の陽的な拡散を用いるが、その係数は3次風上スキームの陰的な拡散係数よりも1桁または2桁小さくしなければ、理論的基準を満たさない。数値分散誤差の理論的基準に基づくと、少なくとも7次または8次が必要となる。実際は、分散誤差はエネルギースペクトルに対して間接的な影響しか認められなかったが、局所的な乱流メカニズムに影響を与える可能性があることが考慮する必要があると考察する。また、圧縮性モデルの時間離散化の影響も調査し、音波の制限のために時間ステップが十分に小さい場合、格子スケールが $O(10m)$ まで比較的低次の時間スキームが利用可能であることが分かった。導出された理論的基準が意味することは、格子間隔が減少するにつれて、必要な精度の次数が増加することである。これは、将来の高解像度LESの数値誤差問題に関してかなりの注意を払う必要があることを示唆している(Kawai & Tomita,2021)。今後、上記に配慮しながら、高効率で高次精度の力学コアを目指す。現在は、Discontinuous Galerkin法が精度と計算性能の面で優れていると判断し、開発に着手し始めた。

③ データ同化を使用した気候モデルのパラメータ推定

気候モデルを構成する物理過程コンポーネントには様々なパラメータが含まれているが、これらのパラメータには不確実性があり、気候予測の不確実性の要因となる。気候予測の信頼性向上のため、観測データをモデルシミュレーションに同化することにより最適なパラメータ値を推定する手法の確立を目指している。本年度は、湿潤対流システムの数値シミュレーション (nature run) の結果を観測とみなし、アンサンブル・カルマンフィルタ (EnKF) を用いた同化により、nature run で用いたパラメータの真値を推定する理想実験を実施した。EnKFによるパラメータ推定では、アンサンブルの各メンバーに異なるパラメータ値を与えた予報結果と観測とを比較し、観測により近い結果を与えるパラメータ値に向かって推定値が更新される。ここで、アンサンブルに与えるパラメータ値のバラつき (σ) を大きくすると真値への収束時間が短縮される一方、推定精度は悪化してしまう。本研究では σ を変化させる感度実験を行い、推定精度を最大化する最適な σ の存在を示した。さらに、推定値の時系列を1次の自己回帰モデルで近似することで σ と推定精度・収束時間との関係を定量化し、最適な σ に関する指針を提案した。一連の結果については現在、米国気象学会が発行する学術雑誌への投稿を準備中である。

(3) 研究室メンバー

(2020年度)

富田浩文 主任研究員
足立幸穂 研究員
末木健太 特別研究員
村木啓子 アシスタント

(4) 発表論文等

1. “Numerical Accuracy of Advection Scheme Necessary for Large-Eddy Simulation of Planetary Boundary Layer Turbulence”, Kawai, Y. and H. Tomita, *Monthly Weather Review*, accepted (2021).
2. “Methodology of the constraint condition in dynamical downscaling for regional climate evaluation: A review”, Adachi, S.A., and H. Tomita, *J. Geophys. Res.-Atmos.*, 125, e2019JD032166 (2020).
3. “Impacts of Number of Cloud Condensation Nuclei on Two-Dimensional Moist Rayleigh Convection”, Miyamoto, Y., S. Nishizawa, and H. Tomita, *J. Meteorol. Soc. Japan*, 98(2), 437–453, (2020).
4. “Environment of tornado occurrences. Understanding Tornadoes”, Sueki, K., and E. Tochimoto, *Meteorological Research Note*, No. 243, the Meteorological Society of Japan, 47–70. (2020) (Japanese)
5. “Structure and environment of tornado-spawning typhoons”, Sueki, K., Tornado Symposium – Commemorating the 100th Anniversary of the Birth of Dr. Tetsuya Fujita – , Mar. 11-12, 2021. (Oral)
6. “The Essence of Dynamical Downscaling Method for the Assessment of Regional Climate Change”, Adachi, S. A. and H. Tomita, 61st Annual Meeting of Japan Society for Atmospheric Environment, Sep. 14 - Oct. 4, 2020. (Oral)
7. “Parameter estimation for cloud microphysics scheme using an ensemble Kalman filter”, Sueki, K., T.

Yamaura, S. Nishizawa, and H. Tomita, The Meteorological Society of Japan Spring Meeting 2020, May 19-22, 2020. (Oral)

Laboratory Homepage

https://www.riken.jp/research/labs/chief/math_clim/index.html

http://mathclim.riken.jp/index_j.html