



## (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) 2021年度成果と今後の研究計画

### ① 放射対流平衡下における湿潤対流の自己集合化の発生メカニズム

放射対流平衡(RCE)は大気のエネルギーバランスを理想化した描像であり、気候系の本質的性質を探究するための枠組みとして長年に亘り研究されてきた。近年、対流雲とそれに伴う大気鉛直運動を陽に扱うことのできる雲解像モデルを用いたRCEの研究が世界的にも活発に進められている。しかし、RCE実験は様々な理想化数値気候実験の中でも単純な枠組みとして位置づけられているにも関わらず、湿潤対流の自己組織化により創発する豊かな時空間構造について、未だにその全容は明らかではない。特に湿潤対流の大規模な組織化については、RCE実験に用いる領域サイズや解像度に強く依存することが明らかになってきた(Muller and Held 2012; Patrizio and Randall 2019)。我々はこれまで、理化学研究所 計算科学研究センター 複合系気候科学研究チームが中心となって開発を進めている数値気象ライブラリSCALE(Nishizawa et al. 2015; Sato et al. 2015)を用いることで、系統的なRCE実験を行い、領域サイズ・解像度に対する湿潤対流の自己集合化の発生条件を明らかにし、当該研究分野における先駆的な成果を創出してきた(Yanase et al. 2020)。

今年度は昨年度までの研究をさらに発展させ、RCE実験の領域幅依存性の詳細な解析に基づく雲の自己集合化の発生メカニズムの研究に取り組んだ。本研究では、RCEにおける雲の自己集合化の特徴である大気水蒸気量の水平コントラストの自発的な増幅について、大気下層における循環と大気上層における放射・対流・水蒸気の水平変動性の役割に焦点を当てた解析を行なった。まず領域幅が十分大きく集合化が起きる場合においては、領域幅が小さく集合化が起きない場合と異なり、逆勾配的な水平水蒸気輸送を担う特徴的な下層循環が発達することを発見した。この下層循環の駆動力は、乾燥域における強い放射冷却が生み出す浮力勾配である。この放射冷却による循環の駆動メカニズムは数10日程度の比較的長い時間スケールでの自己集合化の発達を説明する。一方、下層循環の発達に先立つ、より短い時間スケールにおける自己集合化のトリガメカニズムには大気上層における水平変動性が重要になる。大気水蒸気量が増加するほど大気対流加熱量が増加するという関係がこれまで多くの観測的研究や数値的研究によって示されてきた。本研究の一連の実験においてもこのような関係が再現されており、特に領域幅が増加するにつれて、両者の変動幅が増加する傾向にあった。この変動幅の増加が、乾燥域における正味の下層循環の強化につながり、大気上層から下層への鉛直貫入を通して自己集合化のトリガーとなることが示唆された。水蒸気量や対流の水平変動性はその空間スケールと密接な関係にあり、領域幅が増加するにつれて大きな空間スケールの変動性が表現されることが、自己集合化の発生の領域幅依存性を理解するための鍵である。最後に、これらの結果に基

づき、大気上層と下層におけるプロセスを統合した自己集合化発生メカニズムの新しい描像を提示した(図1)。本研究成果は国際誌Journal of the Atmospheric Sciencesに投稿中である。

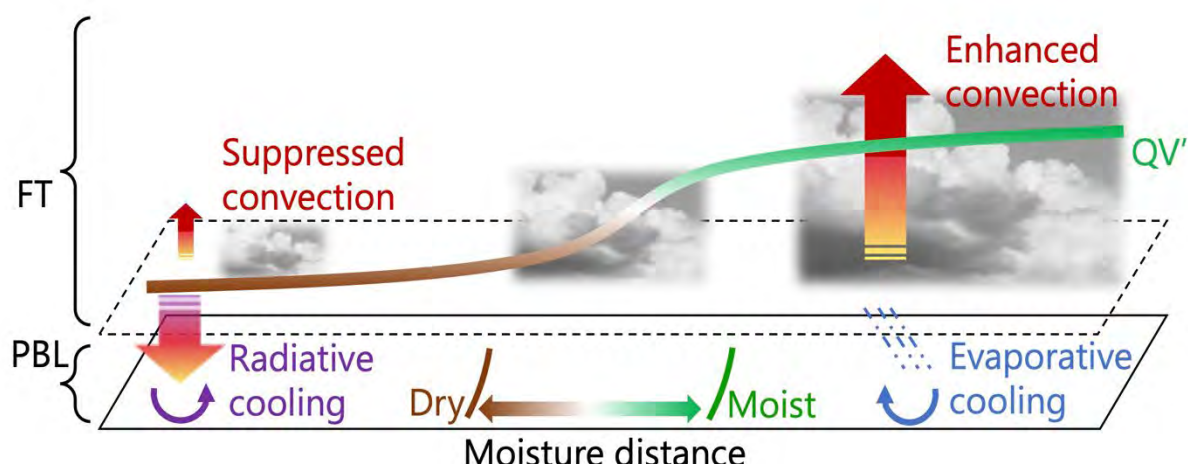


図1: 湿潤対流の自己集合化の発生に重要なプロセスの概念図。Yanase et al. (2022, *J. Atmos. Sci.*, under review) Figure 18 より。

なおこれまでは自己集合化の発生メカニズムを数100–1,000 km程度の空間スケールにおいて考察を進めてきたが、今後は自己集合化した雲が数1,000–10,000 kmといったより大きな空間スケールにおいてどのような上位階層構造を形成するのかを明らかにするために、世界的にも類を見ない超広領域のRCE実験をスーパーコンピュータ「富岳」を用いて行い、雲の自己組織化・階層構造のさらなる探究を進める予定である。

## ② 乱流スキームLESの必要数値精度の導出

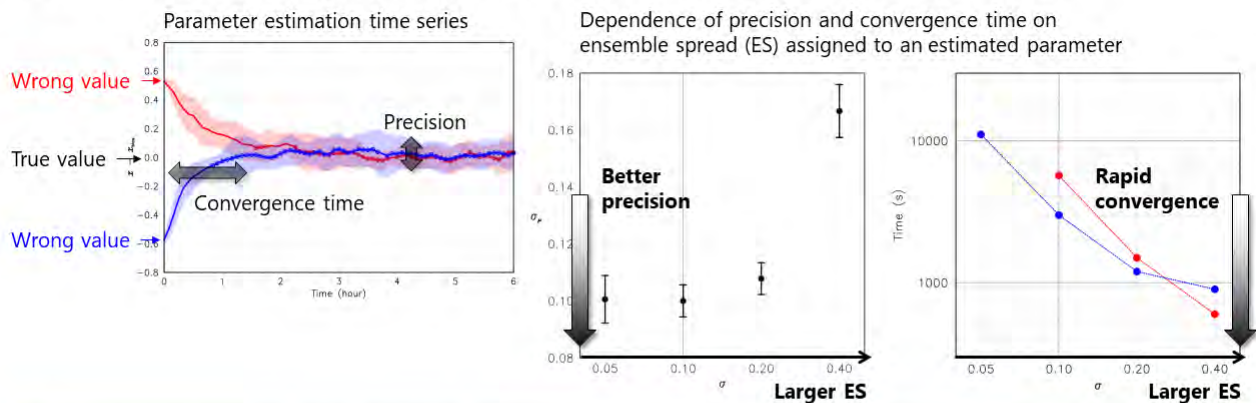
近年、ラージエディシミュレーション(LES)は、サブグリッドスケール乱流のパラメタリゼーションの有望な方法として、気象・気候シミュレーションで採用され始めている。しかしながら、力学コアに必要な数値精度は未だ完全に理解されているとは言い難い。昨年度は、移流項の必要精度について2つの理論的基準を導出し、大気境界層の典型的な状況を設定した数値実験によってそれらの妥当性の検証を行った。これらの数値基準に基づくと、格子スケールが $O(10\text{m})$ の場合、少なくとも7次または8次が必要となることが分かった(Kawai & Tomita, 2021)。しかし、格子点法で高い次数を実現するには、並列計算機間の大量の通信が必要となり、計算効率が低下する。不連続ガラキン法(DGM)は、これらの制限を克服するための有望なアプローチである。このため、今年度は、LESでのDGMの理論的数値基準を導き、要素内の多項式( $p$ )の必要な次数を明らかにした。格子間隔 $O(10\text{m})$ での数値基準に基づくと、十分なスケール選択的なモーダルフィルターとともに、 $p=4$ が必要であることが分かった。時間精度については、完全に明示的な時間スキームが使用される場合、4次で十分であることが示唆された。また、ルサノフ流が低マッハ数の流れで使用される場合に、通常見られるハイパーアップワンディングの影響も調査した。その結果、高次DGMが使用される場合では、数値フラックスの選択がシミュレーション結果にほとんど影響を与えないことが分かった。これらの一連の理論的帰結を実際の境界層乱流シミュレーションを用いて、その妥当性の検証を行った。現在、2編の論文として投稿準備中である。本課題の続きとして、DGMを用いた全球モデルの構築を行っていく。

## 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ベースの手法では、推定対象のパラメータが発散することを防ぐため、パラメータ値のアンサンブル・スプレッド(ES)に何らかのインフレーションを適用し、パラメータの不確実性の幅を維持する必要がある。ここで、推定の期間を通じてパラメータ値のESの大きさが一定に保たれ

るようなインフレーションを適用する場合、推定の精度や収束速度はESの大きさに依存する。しかしながら、ESをどの程度の大きさに設定すれば推定の精度や収束速度が最適化されるかについて、統一した見解は得られていない。上記の実験の結果から分かったことは、ESが小さくなるほど推定精度は向上するものの、それ以上の精度が見込めないESの下限値が存在し、精度の観点から最適なESが決定可能であることが示されたことである。一方、収束速度はESが大きくなるほど速くなる。我々は、パラメータ推定の時系列を一次の自己回帰(AR(1))モデルにより近似し、推定の精度と収束速度をAR(1)モデルの2つのパラメータ(自己回帰パラメータとランダム擾乱の振幅)により定式化した。ESが大きくなると、自己回帰パラメータが減少し、ランダム擾乱の振幅は増加する。推定精度は両者のバランスによって決定される。AR(1)モデルによる近似は、パラメータ推定の精度と収束速度を最適化するESを決定する際の定量的なガイドラインとなると考えられる。今年度は、これらの結果をPEPSへ投稿し、2022年9月現在受理されている。本課題は、今後、現実大気での実験を行い、その有用性を示す予定である。

### Precision and Convergence Speed of EnKF-Based Parameter Estimation



AR(1) approximation for estimation time series

$$\mu'(t) = \phi\mu'(t-1) + \varepsilon(t)$$

$t$ : Time step  
 $\mu'$ : Deviation of an estimated parameter value from the true value  
 $\phi$ : Autoregressive parameter  
 $\varepsilon$ : Random perturbation

➡

**Precision:**  
 $\sigma_{\mu} = \sigma_{\varepsilon} / (1 - \phi^2)^{1/2}$

**Convergence time:**  
 $t = -1 / \ln(\phi)$

$\phi$  decreases with increasing ES;  
 $\sigma_{\varepsilon}$  increases with increasing ES ( $\sigma_{\varepsilon}^2 \equiv E[\varepsilon^2]$ ).

図2: 左図: 初期のパラメータ値が真値よりも大きな値である場合のパラメータ推定の時系列(赤線)と、真値よりも小さな値から始まる場合の時系列(青線)。各線に重なる陰影は各13回の試行の標準偏差であり、標準偏差が小さいほど推定の精度は高い。また、推定の時系列が真値付近に収束するまでの時間が短いほど収束速度は速い。中央図: 推定を行う際のパラメータ値のアンサンブル・スプレッド(ES)の大きさに対する推定精度の依存性。右図: 収束時間のES依存性。下部枠内: 推定の時系列をAR(1)モデルで近似した場合の、自己回帰パラメータ $\phi$ とランダム擾乱の振幅 $\varepsilon$ を用いた推定精度・収束時間の定式化 (Sueki et al.2022より)

### (3) 研究室メンバー

(2021年度)

- (主任研究員)
- 富田浩文
- (研究員)
- 足立幸穂
- (特別研究員)
- 末木健太

### (4) 発表論文等

1. Kawai, Y. and H. Tomita (2021): “Numerical Accuracy of Advection Scheme Necessary for Large-Eddy Simulation of Planetary Boundary Layer Turbulence”, *Mon. Wea. Rev.*, 149(9), <https://doi.org/10.1175/MWR-D-20-0362.1>.
2. Sato, Y., Y. Miyamoto, and H. Tomita (2021): “Lightning frequency in an idealized hurricane-like vortex from initial to steady-state using a coupled meteorological and explicit bulk lightning model”, *Mon Wea Rev*, 49(3), Doi:10.1175/MWR-D-20-0110.1.
3. Tomita, H. : “The co-design of general-purpose supercomputer "Fugaku" and future of computational climate study”, *The Fifth Convection-Permitting Modeling Workshop 2021*, Sept. 10, 2021, Online (invited)
4. Adachi, S.A.: “Review of dynamical downscaling techniques for assessing regional climate change”, *The Fifth Convection-Permitting Modeling Workshop 2021*, Sept. 10, 2021, Online.
5. Yanase, T., Nishizawa, S., Miura, H., Takemi, T., Tomita, H. “New Critical Length for the Onset of Self-Aggregation of Moist Convection”, *The Fifth Convection-Permitting Modeling Workshop 2021*, Virtual, Sep, 2021. (Poster)

## **Supplementary**

### **Laboratory Homepage**

[https://www.riken.jp/research/labs/chief/math\\_clim/index.html](https://www.riken.jp/research/labs/chief/math_clim/index.html)

[http://mathclim.riken.jp/index\\_j.html](http://mathclim.riken.jp/index_j.html)