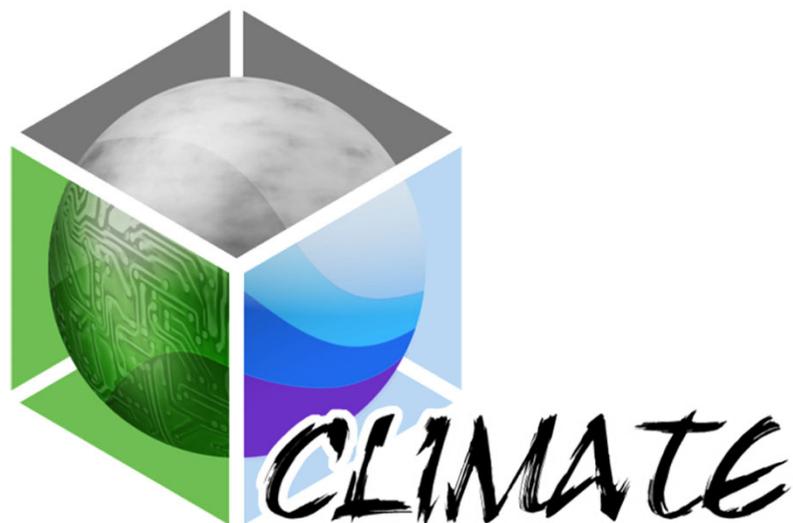


令和4年度気候変動適応の研究会シンポジウム・分科会

# 将来の気候モデリングの在り方について



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

富田浩文



# 自己紹介

京都市出身：1969年10月21日 (満53歳)

- 1999.3： 東京大学大学院工学系研究科航空宇宙工学専攻  
博士（工学）取得
- 1999.4: 地球フロンティア研究システム ポスドク研究員
- 2004.4: (独) 海洋研究開発機構 研究員
- 2007.4: 同機構 主任研究員
- 2011.1~ (国) 理化学研究所・計算科学研究機構  
(現計算科学研究センター) 複合系気候科学研究チーム チームリーダー
- 2014.4-2021.3: 本務変更  
同研究所・フラグシップ2020開発プロジェクト副プロジェクトリーダー  
アプリケーション開発チーム チームリーダー
- 2018.4~ 同研究所・開拓研究本部・富田数理気候研究室 研究主宰者 兼務
- 2021.4~ 同研究所・現計算科学研究センター・複合系気候科学研究チーム 本務復帰





# 本日のお話

- 現在の気候モデリング
  - 様々な妥協の上に成り立っている
  - モデルに起因する不確実性
- これからの気候モデリング
  - やらないといけないこと
    - 妥協してきたところを今一度見直し、チャレンジ。
    - 妥協してきたモデルの改良はどうすべき？
    - データサイエンスの血をどう取り入れる？
- はてしなく高解像度化???
- サロゲートモデルについて
- 簡単なまとめ



# 高解像度化は正義か？！

Miyamoto et al.(2022,GRL)

NICAM 870 m - 96 levels  
Real Case Simulation: 25 - 26, Aug., 2012

SPIRE field-3: Study of extended-range predictability using GCSRAM  
RIKEN / AICS: Computational Climate Science Research Team



「京」時代にやった全球高解像度モデルの結果



# 高解像度化しても(だからこそ)様々な妥協

## 現状の問題点いくつか

- 力学過程：山岳の問題
  - 現状のほとんどの気象・気候モデルは、山岳に沿った座標系
  - 圧力項のエラーが不思議な循環を生む。
  - そもそも、steepだと落ちる。
- 物理過程：各種パラメタリゼーションの問題
  - 雲関連のパラメタリゼーションの不確実性
    - そもそも、**パラメータの最適化がめっちゃめっちゃしんどい。**
  - 乱流のグレーゾーン問題
    - **将来は、一足飛びにLES?** 実は問題、、、
  - 地表面、土壌モデル
    - 植生・土地利用・廃熱などのデータ、あるいはモデル化



# 大気モデルでキーとなるモデル改良要素は？

- 積雲パラメタリゼーション
  - これは、領域高解像度シミュレーションでは、将来使われなくなる。
- 雲微物理過程
  - 現在、多くは、1/2モーメントバルク法
  - ビン法、未だ重い。
  - Particle-baseの超水滴法などは、有望？！
- 乱流過程
  - メッシュサイズ 数100m オーダー～1km オーダーでは、RANSとLESの境目
  - **将来は、LES？ ほんとか？**
- 放射過程
  - 現在はほとんどが、プレーンパラレル。
  - 3D放射がメインとなりうるか？
  - そのインパクトはどの解像度からか？
- 都市などの地表面
  - 気象・気候モデル（ほとんどがキャノピー）と工学的モデルは別物？？？
  - **将来的には、融合が必要？**
- **他、いっぱいいっぱい**
- **基本的には、どんどん第一原理化していく方向**

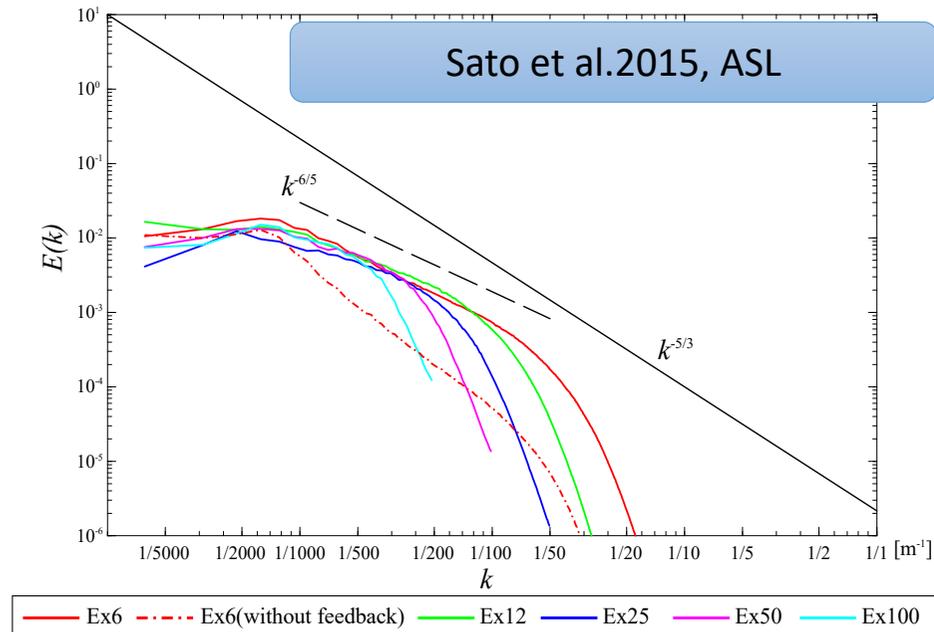


# 高解像度気候計算の質的ジャンプは LES + 詳細微物理？

- LESって本当にワークするの？
  - 現在のLESは以下に基づく
    - 等方性乱流、成層効果は入っているけど、
    - 一様乱流
    - ドライな時の理論
  - じゃあ、湿潤過程のLESに適用していいのか？
    - 凝結に伴う、グリッドスケールでの熱の注入
    - ドライで見られる、きれいなエネルギーカスケードにはならない。

## 湿潤LESの構築（原理に基づく雲と乱流の一体化スキーム）、どうやってやっていくべきか？

- 凝結を伴う現象をDNSでデータベース化
- そこから、（データ科学による）原理の推論モデル化

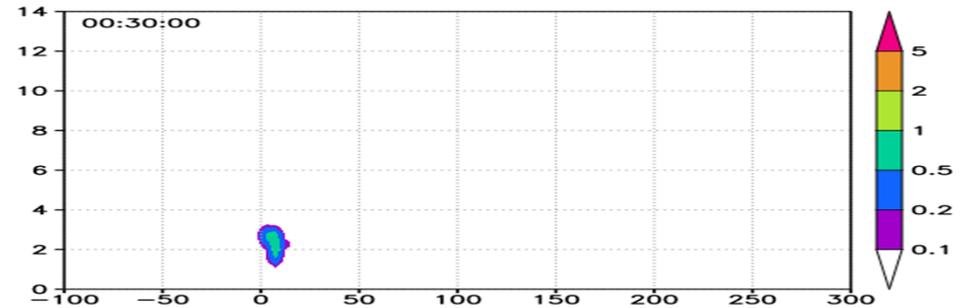


- 例:
  - 超高解像度で超水滴法での層積雲シミュレーション
  - $-5/3$  乗即に乗らない、、、、
- 本当？

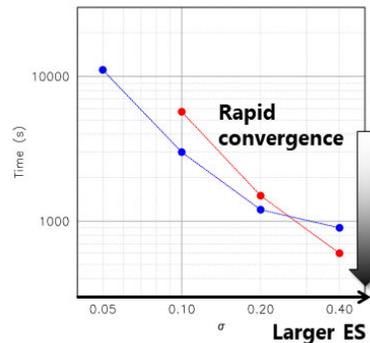
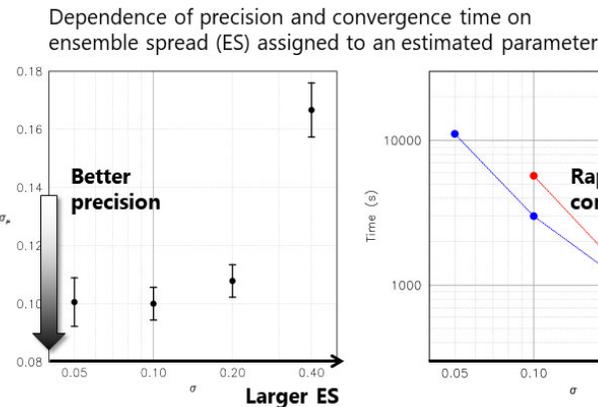
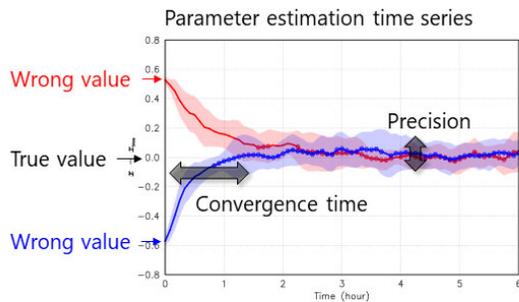


# どう精緻化しても、パラメタリゼーションからは逃れられない問題

- **Unknown parameter**は不可避、、、
  - どう決めるの？
    - ちまちまと人海戦術でやりますか？
    - もはや、無理。
- **データ科学での最適化**
  - 例：データ同化によるパラメータ推定など、



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



2Dスコールライン実験を  
OSSE（観測システムシミュレーション実験）  
データ同化で、雨の落下速度を推定した例

間違った値から始めるが、データ同化により  
雨の落下速度が修正されていく。

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;

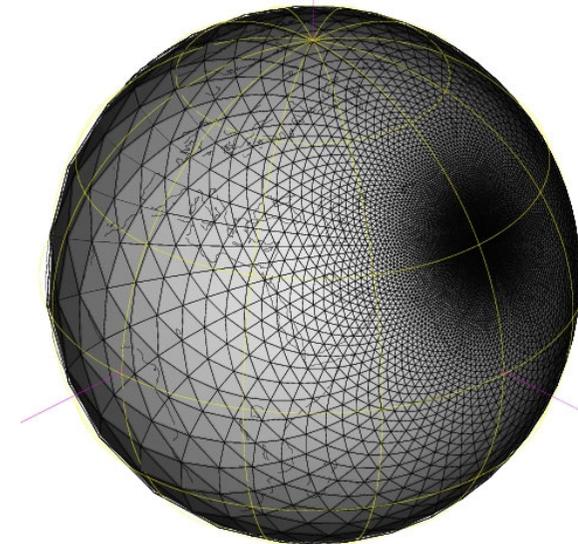
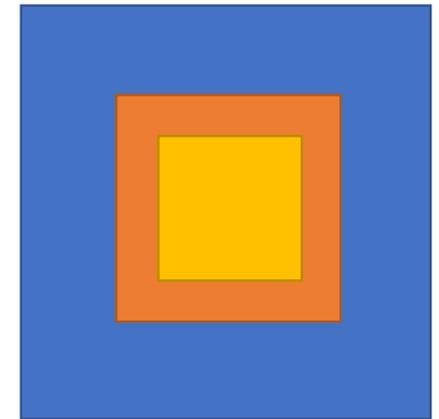
$\sigma_{\varepsilon}$  increases with increasing ES ( $\sigma_{\varepsilon}^2 \equiv E[\varepsilon^2]$ ).

Sueki et al.(2022,PEPS)



# 領域気候モデルの大きな問題

- ① **ネスト、ネスト、ネスト！**
  - 親モデルと子モデルの境界領域で何が起きているか？  
(実は、昔からの問題)
    - へんてこな雨が降る、
    - 擾乱がうまく入っていない、
    - バッファ領域の設定、スペクトルナッジングでごまかす。
      - かなりの労力を割いてチューニング
  - 1wayの場合：親から子への一方的リクエスト
    - 親からの締め付けに子供が大反発
    - 反抗期は特に家庭内崩壊すら起こす。
  - 2wayの場合：親から子へのリクエスト・子から親へのフィードバック
    - 親子喧嘩はマイルドになる？、
    - が、完全に解決するわけではない。
  - そもそも、どう考えても数学的におかしい。
  - 一つの提案、**全球モデルのストレッチ**
- ② **領域モデルへのインプットの大元はGCM**  
(Adachi & Tomita 2020, JGR, review paper)
  - GCMモデルバイアスはカスケードする
  - RCMモデルバイアスと同時に考えなければいけない。





# サロゲートモデルの是非

- (そこそこ満足できる) 精緻化した超高解像度モデルでアセスメントができるか？
  - ムーアの法則の終焉によるコンピュータリソースの絶対的な枯渇
    - 現状のテクノロジーの限界
  - たくさんの計算はできそうにないかもしれない。
- **現在、機械学習によるサロゲートモデルが有望視**
  - 多くの計算を行わなければならない気候アセスメントの救世主になりうるか？
    - 私には分からない。うまくいくかもしれない。
- 現状いくつかの問題：
  - サロゲートモデルでの外層は正しいのかどうか分からない？
  - そもそも、機械学習にかませる物理モデル結果がしっかりしていないとサロゲートモデル自身の信頼性がない？
  - 物理的なメカニズムを引き出す(説明する)のは難しい？



# まとめ

- 
- 現状の気候モデルの不確実性の多くはパラメタリゼーションにある。パラメタリゼーションは、どんなコンポーネントでも使わざるを得ない。
  - 最適化は、もはや人海戦術では困難。
  - AI・機械学習・データ同化などで自動的にやるしかないのでは？

- 
- ある程度モデルが成熟している中で、  
これまで妥協してきたところをきちんとやっていくべき。
    - 意外と有望と思われる方法にも落とし穴がある、、LES問題など

- 
- サロゲートモデルは有望。だが、その意味と限界を知らないといけない。
  - サロゲートモデルの信頼性は、インプットとなる物理モデルの精緻化にかかっている？！

- 
- 課題：モデルを作る人がどんどんいなくなっている気がする？！
    - これが、実は、一番の問題かもしれない！

# SCALE: a highly sophisticated common library for meteorology/climate simulations



Scalable Computing for **A**dvanced **L**ibrary and **E**nvironment.

Many components, including CFD & computer science techniques

Free software under BSD2-license

[https://www.r-ccs.riken.jp/software\\_center/software/scale/overview/](https://www.r-ccs.riken.jp/software_center/software/scale/overview/)

- **SCALE is a library, but it has also own models**

- SCALE-RM : regional model:

*Nishizawa et al.(2015, Geophys. Model Dev. )*

*Sato et al.(2015, Progress in Earth and Planetary Science)*

- SCALE-GM: global model(NICAM-DC clone)

- Porting from NICAM(Tomita & Satoh(2004,Fluid Dyn.Res.)



- **Data assimilation has been already equipped in cooperation with Data Assimilation Research Team**

- SCALE-LETKF

