# 全球雲解像モデルから全球渦解像モデルへ





京都市山科区出身:1969年10月21日(満52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~ 複合系気候科学研究チーム 本務復帰





- これまでやってきたこと。
  - ベナール対流のお話(学生時代)
  - 私のモデルづくりとサイエンスの原点
- NICAMのお話(地球フロンティア・JAMSTEC時代)
  - 歴史
    - 2000年当時の全球モデルの問題
    - ・ なぜ、20面体格子? 浅水波モデルで遊びまくろう!全球非静力学モデルへの道?!
    - 一つのマイルストーン:水惑星実験による熱帯の雲階層構造
  - 何の気づきがあったか?
    - モデル構築と「自分が知りたいこと」を同時にやった方が妄想できる!
- SCALEのお話(RIKEN時代)
  - なぜ、いまさら新しいモデルつくるの?
- 次のブレークスルー(LES)へ向けて
  - ・理想実験とモデル構築の両輪、その積み重ねにこそ、知りたいことが見えてくる?

#### • モデル構築

• たくさんの問題

修士課程時代にやっていたこと

- レイリー(ベナール)対流
  - Tomita, H. and K. Abe(1999) : Numerical simulation of the Rayleigh-Benard convection of air in a box of a large aspect ratio. *Phys. Fluids*, 11, 743-745
  - ・熱対流駆動のRayleigh対流:
    - 上下の温度差を上げていくと、熱拡散から熱対流へ移行
    - ・更に温度差を上げると、traveling waveが発現しだす。カオスへの第一歩。
  - 何が面白かったか?
    - もともと、六角形対流に興味があった。
    - このころは、六角形対流になるシチュエーションすら知らなかった。
    - ・温度差を与えるととりあえず対流が発現したので、なんか楽しかった。。。
  - 用いたスキーム:
    - ・スキーム:
      - スペクトル法:フーリエ級数+チェビシェフ多項式で展開(FFTも頑張って作った)
      - 有限体積法:めんどくさいのでA格子。
    - なぜか、スペクトル法は実際の計算では用いなかった。
      - なんで作ったんだっけ?
      - 作りたかったから、、、としか、、、、



- ベナール=マランゴニ対流
  - ・とにかく2次元ロール対流は絵的に面白くない。
  - 六角形対流が見てみたい!
  - •お勉強:
    - どうやら、六角形対流の本質は内部の浮力が駆動する対流ではないらしい。
    - フリースリップ上部境界の表面張力の温度依存によるって駆動されるらしい (Marangoni対流)
    - は?!え?!:どんなシチュエーション?
      - 宇宙空間で微小重力下:結晶生成に、対流が悪さする、、、
  - ・<u>ふーん、、、では、浮力と表面張力混在ではどんな対流になるの?</u>



# ・学位論文:「ベナール対流のパターンフォーメーションに関する数値的研究」

• Tomita, H. and K. Abe (2000) : Numerical simulation of pattern formation in the Benard Marangoni convection. Phys. Fluids, 12, 1389--1400.





(a)

- <sup>-</sup> - <sup>-</sup>





- ひょんなことから、松野先生に拾われた。
  - なんでも、「地球シミュレータなるどでかい計算機を作るから、
     それを使って、全球雲解像モデルなんぞ、作ってみないか?」とのこと。
  - メンターに佐藤正樹さんを付けてもらって、一緒に頑張ることになった。
- 当時の環境:
  - ・ 地球フロンティア研究システムに来てみて、びっくり。
  - 地球シミュレータは640計算ノードあるのに、並列処理プログラム開発環境がほぼゼロ。(SX4が2 ノードとか4ノードとかそんな感じ)
  - ・ 開発環境ないなら作ろう。
    - ・ 「私に100万円ください」と当時の上の人に談判して、パーツをかき集める。
    - 初号機10並列(論理的には何並列でも可能)機を格安で作る。
    - ・ MPIは、configure & compile !
- ・ 使用言語:Cにしたかったが、Fortranで作るのが主流らしい。
  - Fortranはこの時初めて本格的にいじる。
  - F77のコードを見て、びっくり!こらあかんは、、、
  - Fortran 90で構造体・モジュール化をふんだんに駆使して、インフラを作ろうとするも、「構造体とか最適化ができないのでダメ!」とか言われる。へこむ。
- ・気象・気候のお勉強
  - ・ 「気象・気候まるで分らん!」
  - とりあえず、耳学問+教科書で基本事項は抑える。
  - 生き字引的にすぐそばに栗原先生がいらっしゃった。たくさんいろんなことを教わった。





- このころ、全球モデルはスペクトル法で決まり!という感じだった。
- 一方で、スペクトル法の将来は危惧されていた。
  - コミュニケーション量の増大
  - ルジャンドル変換に高速変換がない。などなど、
- •格子点法は、極に格子点が集中しすぎて、うれしくない。
- ・ 準一様格子の採用:
  - ・6面体と20面体に基づくものが候補。
  - ・6面体は、格子が四角形なので、これまでの知見がわんさか使える。
  - ・が、あえて、20面体を選んだ。
    - ・格子は三角形だが周りに6点あって、六角形格子ともいえる。なんかよくね?
      - うつくしい!平面充填問題で、もっとも円に近い多角形。
    - 五角形格子も出てくるが、ま、なんとかなるっしょ、、こっちのほうがチャレンジングっぽいし、、



- 何事も、たたき台が肝心。 一層モデルの多層化が静力学モデル。 ・目指すは非静力学コアだが、 まずは、水平離散化何とかしとかんと、、、、
- ・20面体のインフラ整備:
  - 相当、大変だった。
    - 20枚の三角形領域を2個合わせて、10枚
    - 20個の特異点まわりは、5角形。
    - つなぎ合わせ部分は、i,jインデックスが逆になり、 更に一つずれる。
    - 領域の繋ぎトポロジーグラフの自動生成。
    - 任意の個数の領域を任意の数のプロセスで 受け持たせる。
  - あってるのかあってないのか?
     Viewerがないとやってられない!
    - ・ Icoview: OpenGL使って多面体格子用に自作
- 全然、shallow water までいかへんやん!!!(焦)
  - 汎用性をもたせるのに2、3か月ぐらいかかったかも。





- •2001年から日本流体力学会の会誌 「ながれ」の表紙がカラーになった。
- 記念すべき第一号の表紙をかざったのは、これ!

多面体用専用viewer, icoviewを用いた shallo water test case 5の結果





- •インフラが整備されていると早い。
- SWM組むだけなら、1日でできる。
   嘘です:各種オペレータ準備に1か月かかっている。
- 有名なテストケース(Williamson Test5)をやっ てみる
- •結果:悲惨!
  - ・ノイズだらけ、、そもそもA-gridがあかんのかなぁ、、
    - B、C-grid用のインフラは作りかけて、超めんどくさく なってとりあえずペンディングしていた。
  - そもそもどんな感じにエラーが乗るんだろうか?
    - ある単純な関数のdivergence operatorの解析解からのずれを見てみる。
    - ひでえな、、、こりゃ。
  - 領域境界で、ぐちゃぐちゃな感じになっている。
    - これはこれで、フラクタル的で面白い。





- う~ん、領域境界にたまるエラーは、格子点の距離がぎざぎざしてるからだろうなぁ、、、
- ・ちょっと、簡単になましてみるか、、ばね使おう、、
- ・ついでに、完全2次精度を保証するように位置補正しよう。





#### divergence operatorのエラー:ましになった気がする



Result : glevel5 SPR-GC grid without viscosity

<u>(0) t=0 day</u>







(2) t=10 day





- •お~~!
- ・既定の15日間、数値粘性なしで完走!
  ・ちなみに、90日間やっても完走した。
- ・これ、いけるんじゃね?
- まとめ:
  - Tomita, H., M. Tsugawa, M. Satoh, and K. Goto(2001) : Shallow Water Model on a Modified Icosahedral Geodesic Grid by Using Spring Dynamics. J. Comput. Phys., 174, 579-613

ついでに、ばねの最適化:

- エラーをハフ関数モードで評価
- Tomita, H., M. Satoh, and K. Goto (2002) : An Optimization of the Icosahedral Grid Modified by Spring Dynamics. J. Comput. Phys., 183, 307-331



- ・同時並行で、佐藤正樹さんがエネルギー保存型の非静力学モデルを 作っていた。
  - Satoh,M(2002): Conservative scheme for the compressible non-hydrostatic models with the horizontally explicit and vertically implicit time integration scheme. Mon. Wea. Rev., 130, 1227-1245
  - Satoh.M(2003): Conservative scheme for a compressible nonhydrostatic model with moist processes. Mon. Wea. Rev., 131, 1033-1050
- ・早速、20面体格子モデルへ実装
  - Tomita,H. and Satoh,M. (2004) A new dynamical framework of nonhydrostatic global model using the icosahedral grid. Fluid Dyn. Res., 34, 357-400.
     この論文が、NICAMダイナミカルコアのリ ファレンス論文

でも、なぜか、citationが伸びない。

・<u>NICAMのダイナミカルコア・プロトタイプ完成!</u>



#### AFESの方にコードお借りして結果を比較





ええ感じになってきたなぁ。。 気象・気候やってるっぽくなってきたなぁ、、、

でも、なんか足らんなぁ、、、???



- ・ 雲微物理を入れてみた、、、
  ・ 最も簡単なケスラータイプ。
- ・解像度が足らないので、地球の半径を数10分の1 かつストレッチ格子にしてやってみた。
  - ターゲットはGCSS Case1のスコールライン。
- ・ 最初の印象:
  - ・これ、上昇流きつすぎない?1km解像度で60m/s
  - なんか間違っていない、私?!
  - 相当悩む。
    - ウォームバブルー発実験でいろいろ検証することに、、、
    - 断熱曲線も書いてみて、上がるべきところまででストップするか、、およそストップするがオーバーシュートはするし、他のモデルと比べてきつすぎるのでは?
    - この時期、ほとんどノイローゼ、、、、
    - 竹見先生(現京大)にお願いしてARPSで同じ実験をやってもらって比較しても上昇流がきつい。 WRFはその中間か?
    - 結局、層の数の問題とか、diffusionの問題とか、雲微物理タイミングの問題とか、いろんなものが絡んで、モデル毎に異なる。
    - 一応、断熱曲線的にはそれなりに合っているので、良しとする。

### 「いままで、力学コアで議論してきた精度ってなんだったんだよう~!(泣)」



Ion: 15W



- APEのMIP的比較実験に参入。
  - ・他のGCMはすべて静力学モデル+積雲パラメタリゼーション
  - NICAMだけ、非静力学モデル+雲微物理スキーム
- 富田作成動画 ・ この時代の全球7km, 3.5km格子は、ちょっと桁違いだった、、、







#### Hovmeller diagram for precipitation on the tropics



Produced by Dr. Williamson





- 約30日で一周する、割と集中した(wave#1)スーパークラウドクラスターが東進
- その中身は、100kmスケール
   のクラウドクラスターが西進
- 前者は、後者のパケットに なっている。

Tomita, H, Miura, H., Iga, S., Nasuno, T., and Satoh, M. (2005) A global cloud-resolving simulation: preliminary results from an aqua planet experiment. Geophys. Res. Lett., vol.32, L08805, doi:10.1029/2005GL022459

で、 その後はNICAM破竹の勢い

- MJOの再現に成功
  - Miura, H., Satoh, M., Nasuno, T., Noda, A.T., Oouchi, K.(2007) A Madden-Julian Oscillation event simulated using a global cloud-resolving model. Science, 318, 1763-1765.
- ・全球で格子1kmを切る収束性
  - Miyamoto, Y., Y. Kajikawa, R. Yoshida, T. Yamaura, H. Yashiro, and H. Tomita (2013): Deep moist atmospheric convection in a subkilometer global simulation, Geophysical Research Letters, Volume 40, Issue 18, 4922-4926
- •季節内予報スキルの劇的向上:
  - Miyakawa, T., Satoh, M., Miura, H., Tomita, H., Yashiro, H., Noda, A. T., Yamada, Y., Kodama, C., Kimoto, M., Yoneyama, K. (2014) Madden-Julian Oscillation prediction skill of a new-generation global model. Nature Commun., 5, 3769. doi:10.1038/ncomms4769



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

#### • 他



### • Unwind bias 高次精度スキーム:

• Miura. H(2007): An Upwind-Biased Conservative Advection Scheme for Spherical Hexagonal–Pentagonal Grids, Mon.Wea.Rev. 135, 4038-4044



### ・単調性とCWCを保証するスキーム

 Niwa, Y, H. Tomita, M. Satoh, R. Imasu(2011): A Three-Dimensional Icosahedral Grid Advection Scheme Preserving Monotonicity and Consistency with Continuity for Atmospheric Tracer Transport, J. Meteorol. Soc. Japan, 89, 255-268



- ・2011年1月1日付で理研へ移りました。
- ・当時考えていたこと:
  - モデル作りのためのインフラは最重要
  - 既存のコンポーネントは比較のために網羅したい。
  - Model Intercomparison Project(MIP)は結局、品評会に終わるんでは?
    - いろんなものがごちゃごちゃ異なって、結果の解釈が難しい。
    - ・ 力学のように正解がない。
    - Model Intra-comparison Project をやりたいな、、、
- SCALE projectの立ち上げ:3つのポリシー
  - 完全にフリーソフトウェアであること。
    - 誰もが自由に使えるほうがよい。
  - 論文ベースでスクラッチから組むこと。
    - オレオレスキームを貰ってきても、そこに行きつくアイデア・ノウハウがわかっていないと、、
    - 独自チューニングが埋め込まれているとそれがデフォルトだと思ってしまい、不健全
  - ドキュメントはディテールまで書き込む。
    - 自分らの忘備録でもある。
    - 論文化するときに、ささっと書ける。
  - ※ 現在、これらは守られているか?
    - やや疑問、、、だが、まあまあ、守るようにしている(してもらっている)。



- ・SCALEは現在、version 5.4.3
  - Version 0は、領域のC-grid shallow water
    - 京での速度コンペのため、富田が急いで週末作った。
  - Version 1は、三浦先生に作ってもらった!

    - 三浦「いいですよ~。ちょっと時間ください」
    - ・すると、1週間待たずに出てきた。
  - ・その後、インフレするメジャーリビジョン番号!
    - 最近は、Core SCALERな人たちに、バージョンアップポリシーを決めてもらった。
- 現在は、ライブラリーSCALE、領域モデルSCALE-RM, 全球モデルSCALE-GM(NICAM-DC後継)。





- ・領域モデルから始めたが、、、、何のメリットがあるのか、よくわからなかった。
  - 全球ストレッチでええやん!
- ダウンスケールにもいろいろあることを知る。
  - ・ 擬似温暖化手法など、、、
- ・領域にあって、全球にないもの:
  - 境界条件になる気候値と擾乱 を自由に変えられる。 (Adachi et al.2017, Nishizawa et al. 2018)
  - もともと西澤さん(理研)がこれも 一つのアイデアと言い出したので、 チームプロジェクト化して、 やることにした。
- ・富田、なるほど!ようやく納得!
  - 宣伝:いままでの領域手法のレビュー論文





Adachi and Tomita(2020): Methodology of the Constraint Condition in Dynamical Downscaling for Regional Climate Evaluation: A Review, *J. Geohpys. Research-Atmos*, <u>https://doi.org/10.1029/2019JD032166</u>





**SC18のBoF:** 「スパコンまるでわからん!」 より

- ・2011年から、富田の気候研究・空白の10年間。
  - ・2011年: 文科省アプリケーション作業部会取りまとめ
  - •2012~2013年:将来のHPCIシステムのあり方の調査研究「アプリケーション分野」代表
  - •2014年:ポスト京開発プロジェクト・副プロジェクトリーダー
  - •2021年4月:ようやく解放される。
- まじ、しんどかった、、、、、



- 全球LESの話をするんじゃなかったっけ?
- •ここまでで、全球雲解像のお話は終わり。
- ・ここから、どうするか?
- 次のブレークスルーってなに?
  - 解像度競争はあきたし、このまま全球雲解像で突っ走っても何か見えてくるとも思わない。
    - E.g. 富岳では200m解像度が出来そうだけど、質的変化がないかも、、
  - ・モデルの質的変化を狙うとしたら、、、全球LESになる。
    - 乱流モデルのより原理化
    - Shallow cloudの表現力アップで、地球のエネルギー収支がそれなりに表現できるかもしれない、できないかもしれない(汗)
- あ、地球は水があるんだった、、(汗、汗、汗)
- ・そもそも、そもそも、現状のDryのLESも大丈夫なんかな?



### ・そもそも、現状使われている気象でLESって、どうなの?

•まずここから、、







Kawai & Tomita (2021, MWR)

空間フィルタを適用した 運動量方程式

- 低次精度の移流スキームに伴う数値粘性誤差や数値分 散誤差が、サブグリッドスケール(SGS)の乱流混合の効 果を卓越する可能性がある.
  - この問題は数値流体計算分野で歴史的に議論されて
     きた (e.g., Rogallo and Moin, 1984; Verman et al., 1994: Ghosal, 1996).
  - 一方,気象計算で対象とする設定を考慮した検討は まだ十分に進んでいなかった。
- では、有限差分法・有限体積法を移流項に適用した場合に、その数値誤差が Smagorinsky-Lilly モデルに伴う 渦粘性項を卓越しないための数値精度のオーダーは?





- 移流スキームに伴う数値粘性・数値分散誤差項をそれぞれ, 渦粘性項をラプラシアンと形式的分散項
   に分けてその大きさを比較する.
  - 移流スキームとしては、風上スキームと数値フィルタを付随した中心スキームを考える.
- •数値粘性は減衰の時定数,数値分散は位相速度に注目して以下の指標を導いた.
  - ・減衰の時定数比:

$$R_{\text{diff}} \equiv \frac{T_{\text{e,sgs}}}{T_{\text{e,num}}} = \frac{1}{2^2} \left(\frac{\pi}{l}\right)^{2(n-1)} \left(\frac{\gamma_{2n}}{\Delta t}\right) \left(\frac{\Delta x}{C_s \Delta_{\text{sgs}}}\right)^2 (|S| \beta_e(l,n))^{-1}$$
  
位相速度の比:

 $R_{\rm disp} \equiv \frac{|S_{p,\rm num}|}{|S_{p,\rm sgs}|} = 2^{2n} \left(\frac{\pi}{l}\right)^{2n} \frac{|U\tilde{a}_{\rm num,2n+1}|}{(C_{\rm s}\Delta_{\rm sgs})^2 |\partial|S|/\partial x|} \tilde{\beta}(l,n).$ 

$$T_{e,num}$$
、 $T_{e,sgs}$ :数値粘性項,SGS 項に伴う減衰時定数,  
S<sub>p,num</sub>,S<sub>p,sgs</sub>:数値分散項,SGS 項に伴う位相速度,  
I:波長(格子幅で規格化), |S|: 典型的な歪み速度テン  
ソルの大きさ,U:典型的な風速,Y<sub>2n</sub>:数値粘性に伴う  
係数,  $a_{num,2n+1}$ :数値分散に伴う係数,  
C<sub>s</sub>: Smagorinsky 定数,  $\Delta_{sgs}$ :空間フィルタ長

数値誤差項が SGS 項を卓越しないためには, これらの指標が 1 より十分小さいことが要請される. そのためには, 何次精度必要か?

- <u>大気境界層 LES で必要とされる</u> <u>移流スキームの精度の検討</u>  $R_{diff}, R_{disp}$ の格子幅( $\Delta x$ ), 波長(/)に対する 依存性を調べ(右図),  $\Delta x$ =O(10 m) におい て, />8 $\Delta x$  に対して指標が 10<sup>-1</sup>以下とな るような数値精度のオーダーを検討した.
- 中立成層に近い境界層内部において, O(10
   m)の格子幅では 7-8 次精度必要であることが示唆された.
  - 理想化した大気境界層 LES で得たエネル ギースペクトルとも整合する.

課題: 従来的な格子点法(有限差分,有限体積) によって,8次精度といった高精度力学 コアを実現するのは適切か? 定式化の複雑化,ハロの拡大





### <u>有望な離散化法の一つ:不連続ガラーキン法 (DGM)</u>

- ・ 従来的な格子点法と比較した DGM の長所
  - 高精度化が単純である.
  - コンパクト性が高い.
    - 現代的な大型計算機に適している.
- ・メソスケールや大循環スケールの大気計算に対する ■
   DGM の適用性が検証されてきた.

(Giraldo and Restelli, 2008; Kelly and Giraldo, 2012; Marras et al., 2016 等)

本研究では、大気 LES に焦点を当てて、
 DGM の数値的特性を調べている.

KT2021 と同様の観点で, DGM の場合に, 必要とされる精度の次数(多項式の次数 *p*) はいくつか?



$$\hat{f}(u_r, u_l) = \frac{1}{2} \left[ f(u_r) + f(u_l) - \alpha (u_r - u_l) \right]$$

- 要素境界のフラックスは, 近似リーマン問題に基づく数 値流束で評価する
- 数値流束に安定化項が含まれる => 数値粘性をもたらす



### **DGM の枠組みにおける数値指標の定式化 (1/2)**

- Kawai & Tomita (2021) のような修正方程式 に基づく定式化を, DGM に適用するのは現実 的に難しい.
  - p>1 に対する修正方程式を導出する場合, 代数的な操作が複雑になり過ぎる.

 そのため, DGM の基礎的な数値特性を 調べた先行研究 (e.g., Moura et al.,
 2015; Alhawwary and Wang, 2018) に 倣って, フーリエ固有値解析を適用す

 $\frac{\partial f}{\partial t} + \frac{\partial Uf}{\partial x} = 0$ 

―――――――――――――――――――――――――――――――――――――		
1st-order upwind	$(f_i - f_{i-1})/\Delta x$	
2nd-order central	$(f_{i+1} - f_{i-1})/(2\Delta x)$	
3rd-order upwind	$(2f_{i+1} + 3f_i - 6f_{i-1} + f_{i-2})/(6\Delta x)$	
4th-order central	$(-f_{i+1} + 8f_i - 8f_{i-1} + f_{i-2})/(12\Delta x)$	

#### 対応する修正方程式中に現れる数値誤差項

1st-order upwind	$-\frac{f_{x(2)}\Delta x}{2} + \frac{f_{x(3)}\Delta x^2}{6} - \frac{f_{x(4)}\Delta x^3}{24} + \frac{f_{x(5)}\Delta x^4}{120} \dots$
2nd-order central	$+\frac{f_{x(3)}\Delta x^{2}}{6}+\frac{f_{x(5)}\Delta x^{4}}{120}+\frac{f_{x(7)}\Delta x^{6}}{5040}+\frac{f_{x(9)}\Delta x^{8}}{362880}\dots$
3rd-order upwind	$+\frac{f_{x(4)}\Delta x^{3}}{12} - \frac{f_{x(5)}\Delta x^{4}}{30} + \frac{f_{x(6)}\Delta x^{5}}{72} - \frac{f_{x(7)}\Delta x^{6}}{252} \dots$
4th-order central	$-\frac{f_{x(5)}\varDelta x^4}{30} - \frac{f_{x(7)}\varDelta x^6}{252} - \frac{f_{x(9)}\varDelta x^8}{4320} - \frac{17f_{x(11)}\varDelta x^{10}}{1995840} \dots$

DGM の場合, このような数値誤差項の表現を 導くことが難しい.

### 数値指標の妥当性の検証 (1/2): 実験設定



地表からの熱フラックス: 200 W/m<sup>2</sup>

- 有効格子幅 Δx<sub>eff</sub> は, 10 m に固定
- 多項式の次数 (p) を 1, 3, 5, 7, 11 と変える

- ・R<sub>diff</sub>から得られた示唆の妥当性を検証するために, 理想化した惑星境界層乱流の数値実験を実施した.
- ・使用したモデル: DGM に基づく大気 LESモデル\*
  - 数値安定化に関する機構
- \* FE-Project: https://ywkawai.github.io/FE-Project\_web
- 数値流束(Rusanov, 1961)に付随する数値粘性
- 32 次の modal フィルタ
  - ・最高次モードに対する減衰時定数~10<sup>3</sup>Δt
- 乱流モデル: Smagorinsky-Lilly model (Brown et al., 1994)
- Nishizawa et al. (2015), KT2021 と同様に, 乱流モデルの空間フィルタ長を 2Δx<sub>eff</sub> とする.
  - SGS 項に比べて数値粘性が十分小さければ, エネルギー スペクトルは 8 格子程度まで -5/3 乗則に従う.



(2)

### <u>DGM の枠組みにおける数値指標の定式化 (2/2)</u>

③結合モードに対する減衰時定数と位相速度

① 1 次元線形移流方程式の半離散化式

$$\frac{h_e}{2U}\frac{\partial \vec{Q^e}}{\partial t} = L\vec{Q}_L^e + C\vec{Q^e} + R\vec{Q}_R^e$$

フーリエ固有値解析  

$$q^{e}(x,t) = \exp\left[\hat{i}(kx - \tilde{\omega}t)\right]$$
  
波数 k, 数値振動数: $\boldsymbol{\omega}$ ]の波型の解を  
仮定する

$$\left(-\hat{i}\frac{h_e}{U}\tilde{\omega}\right)\vec{\alpha} = A\vec{\alpha}$$

固有値問題を解くことで,数値振動数が得られる. この結果を使って,数値解を陽に書き表すことができる.  $q^{e}(\xi,t) = \sum_{i=0}^{p} Q_{i}^{e}(t) l_{i}(\xi) = \left[\sum_{j=0}^{p} \theta_{j}(\vec{\alpha})_{j} e^{\hat{i}(kx_{e}-\tilde{\omega}_{j}t)}\right]^{T} \cdot \vec{l}(\xi).$ 

数値解の増幅率と位相速度誤差

$$G(k,t) = \left[\frac{\int_{-1}^{1} |q^{e}(\xi,t)|^{2} d\xi}{\int_{-1}^{1} |\sum_{i=0}^{p} Q_{i}^{e,\text{ex}}(t) l_{i}(\xi)|^{2} d\xi}\right]^{\frac{1}{2}} \qquad \Delta \psi(k,t) = \left|\text{angle}\left[\int_{-1}^{1} q^{e}(\xi,t) \times \left(\sum_{i=0}^{p} Q_{i}^{e,\text{ex}}(t) l_{i}(\xi)\right)^{*} d\xi\right]\right| \cdot (p+1)^{-1}$$

を用いることで, KT2021 に対応する減衰時定数と位相速度を以下のよ うに計算する.

$$T_{\rm e,num} = \frac{s\Delta t}{|\log G(K, s\Delta t)|}, \qquad S_{\rm p,num} = \frac{p+1}{s\Delta t} k^{-1} \Delta \psi(K, s\Delta t)$$

(注:数値解は複数のモードから構成されるので, これらの量は厳密には「みなし」量で ある.)

④ 最終的な R<sub>diff</sub> と R<sub>disp</sub>の形式  

$$R_{diff} = \frac{1}{\eta} \left(\frac{\pi}{m}\right)^{\frac{4}{3}} \frac{|U| (c_{r,DG})^{-1}}{(2\pi C_s)^2} \left(\frac{\pi}{l}\right)^{-2} (\Delta x_{eff})^{-\frac{1}{3}} \frac{|\log G(k, s, c_{r,DG})|}{s(p+1)}$$

$$R_{disp} = \frac{1}{\eta'} \left(\frac{\pi}{m}\right)^{\frac{1}{3}} \frac{|U| (c_{r,DG})^{-1}}{(\pi C_s)^2} (\Delta x_{eff})^{-\frac{1}{3}} \frac{\Delta \psi(k, s, c_{r,DG})}{s}$$

 $(\pi C_s)^2$ 



- スペクトル精度に関する超収束の特性によって、well-resolved な波長(I>8) での R<sub>diff</sub> & R<sub>disp</sub> は、同 程度の次数の FDM と比較して非常に小さい.
  - DG p=3 の R<sub>diff</sub> や R<sub>disp</sub> は FDM UD7 に近く, KT2021 の数値的条件を満たす.
- 一方, p=7 といった高次の DGM においても, I<6 に対する数値誤差は避けられない.



- 計算負荷を下げるために非線形項の計算を単純化した DGM では、数値不安定を抑制するめに、数値流 束の安定化項の他にも数値安定化の機構が必要な場合がある
- 次のスライドで示す LES 実験では, modal フィルタを追加する必要があった.
  - ・フィルタの最小強度設定: 次数 32, 最高次モードに対する減衰時定数 O(10<sup>3</sup> Δt)
- R<sub>diff</sub> & R<sub>disp</sub>の解析に, modal フィルタの影響を考慮することもできる.
   上記の最小強度のフィルタ設定では, R<sub>diff</sub> & R<sub>disp</sub> は大きく変化しない.

### 数値指標の妥当性の検証 (2/2): 実験結果

3次元速度のエネルギースペクトル



pが3以上あれば、エネルギースペクトルは約8格子付近まで-5/3乗則に従う
 =>最近では、我々の結論として、

p=4~5が必要としている。

- p=3の結果は、約8格子付近まで参照解(p=11)のスペクトルに非常に近いが、約5格子より短波長側では、参照解に比べて急な傾きを持つ.
  - 数値流束や modal フィルタに伴う数値粘性の影響を反映している.

これらの結果は, R<sub>diff</sub> から得られ る示唆とおおよそ整合する



- O(10-100 m)の格子幅による将来的な高解像度大気計算を念頭に,高精度流体スキームが大気 LES に与える影響を調べている.
  - 我々の先行研究によれば, FDM の枠組みでは, 移流項に対して 7-8 次精度必要であることが示唆されるため, 高精度化の容 易な不連続ガラーキン法(DGM)に注目している.
- フーリエ固有値解析を用いて,1次元の線形移流方程式における DGM の数値粘性誤差と数値分散誤差を定量的に調べた.
  - KT2021 で導いた数値指標(R<sub>diff</sub> & R<sub>disp</sub>)を DGM の枠組みに拡張した.
  - 様々な多項式の次数(p)に対して、R<sub>diff</sub> & R<sub>disp</sub>の格子幅と波長依存性を調べた。
    - 風上化を含む数値流束を用いた場合, 少なくとも p=3 は必要である. =>p=4~5に修正中
- 導いた数値指標の妥当性を調べるために, DGM に基づく大気 LES モデルを使って, 理想化した大気境界層乱流の数値実験を実施した.
  - エネルギースペクトルは, R<sub>diff</sub> から得られる示唆とおおよそ整合することが確認できた.

以上の結果は、 Kawai & Tomita(2022a)理論編/Kawai & Tomita(2022b)実証編 :2本の姉妹ペーパーとして近日投稿予定



# <u>全球大渦解像への長い道のり</u>

- 課題の列挙
  - ・ DG法
    - DG法を用いた高次精度ダイナミカルコアの構築
      - 河合さんと、cubed sphere with DGへ突き進む(完全3次元DGです) (あ、もうできちゃってるのか、、)
    - DG法で、物理過程はどう乗せるべきか?
      - elementベース? Nodeベース?
      - そもそも、effective resolution 8格子程度以下は捨てるとしたら、elementベースでいいかも?
    - 山の問題
      - Terrain-followingいつまで使うのか?
    - 個人的には、20面体格子上でのローカルスペクトル法を考えてみたい。
  - Smagorinskiモデルの問題:
    - 拡散系のパラメタリゼーションなので、スペクトルのテールがだらだらと落ちる。
    - これは問題?
  - ・雲微物理、放射、そのほか、どうやって少しづつ精緻化していくのか?
    - やりすぎると、わけわかんなくなる?
  - いやいや、もっと大きな問題あるだろう!





# <u>湿潤LESの構築(原理に基づく雲と乱流の一体化ス</u> <u>キーム)、どうやってやっていくか?</u>

- 凝結を伴う現象をDNSでデータベース化
- そこから、原理の推論
- ・モデル化
- これまでで、私の中で何の「気づき」があったか?
  - モデル構築と「自分が知りたいこと」は、同時にやった方が妄想力があがる!



- モデル構築したとき、その有効性を端的に示せる。
- •現実実験は複雑すぎて、なにがどうなってんのかわからん。
  - ・ 莫大な計算結果は出てくるけど、、、
  - ・理解した気になれない、、、
- 最もシンプルな題材は、、、
- というか、私の原点(学生時代)に戻るとすると、、
  - 放射対流平衡などの単純な系におけるレジーム探索
  - コリオリカ、混合層、少しずつ拡張しつつ、水惑星へ。。
- というのが、楽しそうだ!
- ・理想実験での気候の本質的理解とアグレッシブなモデル開発は両輪



- 最近の話題は、CSA (雲が勝手にaggregationしていく)
- 命題:
  - ・CSAは実験設定(解像度や領域)に対してどのように応答するのか?
  - ・CSAは特徴的距離を持つのか?
  - CSAが更にあつまったら?どんなふうになるの?
  - コリオリがちょっとでもあると、、
  - ・海洋混合層のSSTを動かすとレジームはどう動く?

約500~1,000kmスケールの領域における対流自己凝集

ここから柳瀬さん (RIKEN)のスライドより

Convective self-aggregation (CSA; Wing et al., 2017, Surv Geophy; Muller et al., 2022, Annu. Rev. Fluid Mech.) …放射対流平衡(RCE)シミュレーションにおける雲の自発的な湿潤対流クラスタリング



## ~1,000~6,000kmスケールの領域(大領域)における対流自己凝集

### ■CSA の特性と領域サイズ

• Patrizio & Randall (2019) conducted RCE simulations with domain size up to ~6,000 km



■領域サイズをさらに大きくすることで、複数の集約されたクラスターが出てくる ■これにより、領域によって制約されない(またはほとんど制約されていない)CSAの自然な特性を理解



### めっちゃ、でかい領域でやってみよう!(結構面白いことが分かってきたぞ、、!)

■ Model: SCALE-RM version 5.3.3 (Nishizawa et al., 2015; Sato et al., 2015)

\* Non-hydrostatic, fully-compressible, and three-dimensional, regional atmospheric model

Common settings [same as Yanase et al. (2020), Muller & Held (2012), and Tompkins & Craig (1998)]

- Physical process (\* NO cumulus and planetary boundary layer parameterization scheme used)
  - Microphysics: 6-class 1-moment bulk type (Tomita, 2008)
  - Turbulence: Smagorinsky-Lilly type (Brown et al., 1994; Scotti et al., 1993)
  - Surface: Bulk type based on a universal function (Beljaars & Holtslag, 1991; Wilson, 2001)
  - ➢ Radiation: 2-strm broadband type (Sekiguchi & Nakajima, 2008); TOA downward SW fixed.
- Domain configuration (\* NO the Coriolis force)
  - Horizontal: <u>Doubly periodic square</u>
  - ➢ Top: 24 km with 6 km sponge layer
  - ➢ Bottom: <u>SST fixed 300 K</u>
  - ➤ Layer num: 64

#### Control parameters

- (Horizontal grid spacing: 8 km)
- Horizontal domain size (L): 768–24,576 km





47





- ◆小規模領域では?(L768, L1536, L3072)

  ✓ <u>単一のクラウドクラスター</u>
- ✔ 水平スケール: ドメインサイズに比例していく。
- ✓水平形状: 円形(L768, L1536) or バンド状 (L3072)
- ◆大規模領域では?(L6144, L12288, L24576)

Transient stage (Day 50);

- ✓ <u>複数のクラウドクラスター</u>
- ✓ <u>水平スケール: ドメインサイズとの比例関係が崩れる</u>
   ✓ <u>水平形状: 円形</u>

Quasi-equilibrium stage (Day 150 or 200);

- ✓ <u>複数の組織単位(L6144では明確ではないが)</u>
- ✓ <u>水平スケール:数千キロメートル?</u>
- ✓ 水平形状: メッシュ状の組織



結果:水平分布



OLR (W m<sup>-2</sup>)

#### 結果:特徴的な水平スケール

✓ PWの水平パワースペクトル密度(PSD)φ\_"PW"(k\_h)は、波長が増加するにつれて増加した(104~5×106m)。
 ✓ 大規模なドメイン実行のPSD分布は、明確なピークを有していた。

✓ PSD加重長はドメインサイズとともに増加し、3,000-4,000kmに収束した。

$$k_{\rm PW} = \frac{\sum \frac{2\pi}{k_h} \phi_{\rm PW}(k_h)}{\sum \phi_{\rm PW}(k_h)}.$$

$$k_h = \sqrt{k_x^2 + k_y^2} : \text{total horizontal wavenumber}$$

$$k_x, k_y: \text{horizontal wavenumbers in the } x, y \text{ directions}$$





RCEにおける自発的に形成された大規模湿潤対流組織の特徴的な形態と距離を調べるため、大領域(>10,000km)の 雲解像シミュレーションを行った.

- ✓ 雲凝集領域は準平衡期に網目状の構造をとった。
- ✓ドメイン平均化された量は、約5,000 kmを超えるドメインで収束する。
- ✓ 組織の特徴的な水平波長は3,000-4,000 kmであった。
- ✓ PBL浮力は、水平スケールを決定する上で役割を果たす

Yanase et al.(2022) submitted to GRL



- ・当面、水惑星まで、いろいろできそう。
- ・あれ、全球LESはどうなった??!
- ・理想実験と新規モデル要素開発は両輪