



豪雨防災におけるメソモデルの課題

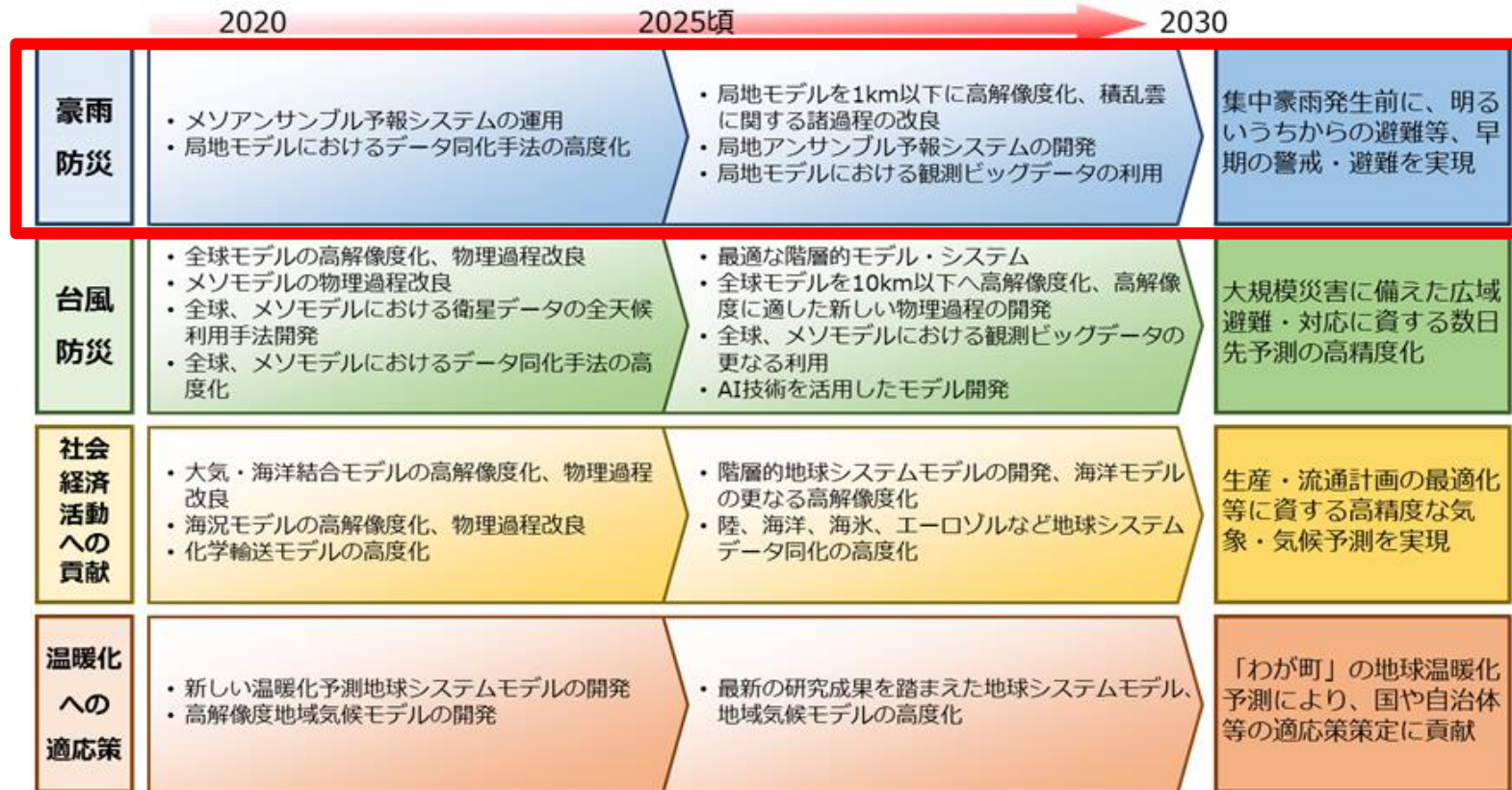
気象庁情報基盤部数値予報課
松林 健吾

目次

1. 豪雨防災
2. 現状のメソ・局地モデルにおける課題
3. 豪雨予測精度向上へ向けた開発
4. まとめ

「2030年に向けた数値予報技術開発重点計画」 (豪雨防災)

- 明るいうちからの避難等、早期の警戒・避難を可能にするため、線状降水帯を含む集中豪雨の予測精度を向上させる。



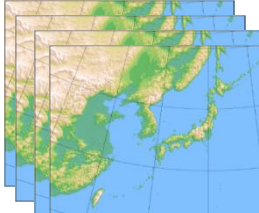


「2030年に向けた数値予報技術開発重点計画」で示された方向性(豪雨防災)

- 局地モデルを1km以下に高解像度化、積乱雲に関する諸過程の改良
- 局地アンサンブル予報システムの開発。
- 多くの観測種別を持ち、かつ、時間的、空間的に高密度な観測ビッグデータの更なる活用。
- 雲域や降水域を含む全衛星データの利用方法の開発。
- ハイブリッド同化の導入、観測誤差相関の取り扱いなどの高度化。
- 豪雨事例等のメカニズム研究による、最新の科学的知見に基づく改良。

https://www.jma.go.jp/jma/kishou/shingikai/kondankai/suuchi_model_kondankai/part3/gaiyou.html
https://www.jma.go.jp/jma/press/1810/04b/nwp_strategic_plan_towards_2030_181004.html

気象庁メソモデル・局地モデル

	局地モデル (LFM)	メソモデル (MSM)	メソアンサンブル (MEPS)
モデル 領域			
水平 解像度	2km	5km	5km
予報 期間	10時間 (毎時)	51時間(00,12UTC) 39時間(03,06,09, 15,18,21UTC)	39時間 (00,06,12,18UTC)
メンバー 数	1	1	21
主要な 目的	航空気象情報、防災 気象情報、降水短時 間予報	防災気象情報、降水 短時間予報、航空気 象情報、分布予報、 時系列予報、府県天 気予報	分布予報、時系列予 報、府県天気予報、 台風予報、週間天気 予報、航空気象情報
客観解 析手法	3次元変分法	4次元変分法	メソモデルの初期値 特異ベクトルの摂動 (初期値+側面)

- 豪雨等の防災気象情報の作成支援のため、メソモデル(MSM)と局地モデル(LFM)を運用。
 - 2019年からメソアンサンブル(MEPS)も運用開始。
- MSMは側面境界値を通じて、環境場をLFMへ提供。
- 豪雨防災へ向け、MSMとLFM両方の予測精度向上が必要。

現状のモデルの豪雨予測における問題点

平成29年7月九州北部豪雨の予測事例

MSM

- 降水系が線状になっておらず、降水系の風下への移動が表現されていない。量的にも過少。
- 対流スキームをOffにすればよいという問題ではない。線状の降水帯は予測されるようになるものの、降水域が広すぎ、量も過大。

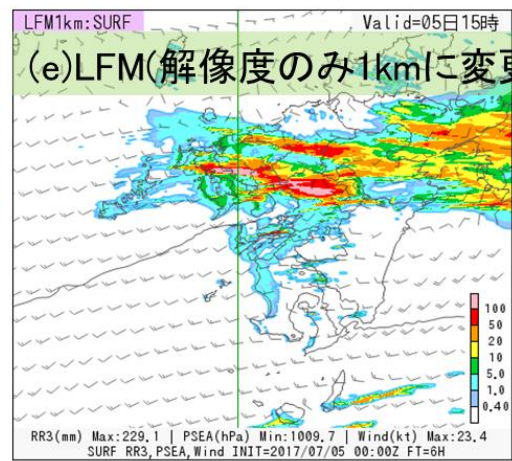
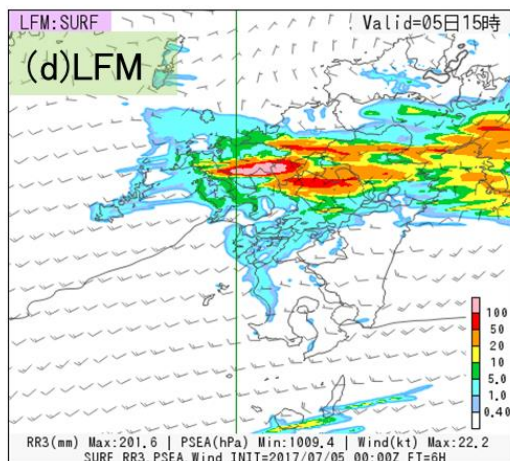
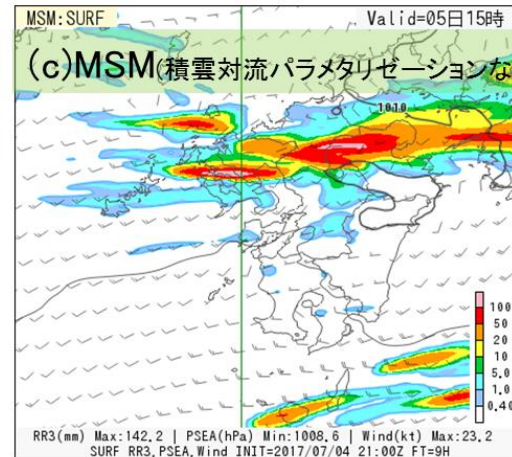
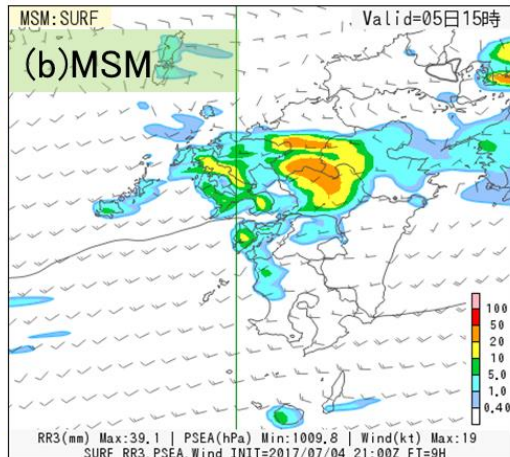
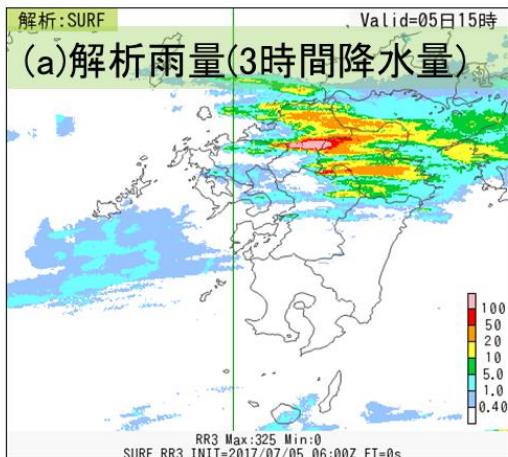
LFM

- 線状の降水域が予測されるものの、量的に過大な降水帯が複数予測。
- 発生位置のずれが大きく、停滞せずに下流に流れてしまう。

これらの傾向は、他の豪雨事例においても共通。

数値予報課報告別冊66号

<https://www.jma.go.jp/jma/kishou/books/nwpreport/nwpreport.html>



現状のモデルの豪雨予測における問題点

- モデルの解像度が不十分。
 - 100m解像度までは対流は完全には解像できないと言われている。
(Bryan et al. 2003)
 - 2030年までに**局地モデルを1km以下に高解像度化**。
 - 解像されないサブグリッド対流の鉛直輸送パラメタリゼーションは依然として重要な役割を果たす。
 - 単純な高解像度化だけでは、豪雨予測精度は改善しない。
- **対流に関わる過程(物理過程)および対流発生環境場の再現性を向上させるためのモデリングの高度化が不可欠。**

豪雨予測に向けた開発

モデルが表現する線状降水帯・豪雨予測特性を詳細に把握

高解像度モデル、LESなどを用いた基礎調査など



対流に直接関係する物理過程の改良

対流発生環境場に関係する物理過程の改良

LFM・MSMがもつ系統誤差のうち、対流形成に大きく影響を及ぼす要素をターゲットにして、環境場の再現性向上を図る

必要に応じて新規プロセスの導入

サブグリッド地形効果、対流による運動量輸送、コールドプール、など

対流に関わる物理過程

- メソ・局地モデルにおける物理過程
 - 対流に直接関係するプロセス
 - 積雲対流過程
 - 雲物理過程
 - 境界層・乱流過程
 - 対流発生環境場に関係するプロセス
 - 下部境界(陸面・海面)
 - 放射過程
 - この他、現状MSM, LFMでパラメタライズしていないプロセス
- すなわち、**全ての過程が対流および発生環境場に影響を及ぼすため、全ての物理過程の改良が必要不可欠。**

積雲対流過程

- MSM(5km), LFM(2km)では格子スケールで部分的に対流が解像され始める。
 - 対流のGrey zone
 - 解像されない対流については依然としてパラメタライズする必要がある。
- ただし、現在のモデル解像度では、従来の一般的な対流スキームが前提とする仮定が破綻。
 - 環境場による鉛直輸送は十分小さい
 - 補償下降流のようなスケールの大きな現象も含めて全てパラメタライズ
 - あるカラムの対流は、対流以外のプロセスによる環境場の不安定化と平衡状態にある(対流準平衡; Arakawa and Schubert 1974)
 - マスフラックスの時間変化をゼロとする(Steady state)
 - 格子内の対流域は十分に小さい($\sigma \ll 1$)

積雲対流過程

- 決定的な手法はなく、どこの気象機関でも研究が進められているが、~km解像度でも対流スキームが必要という認識は共通。

現業気象機関(高解像度領域モデル)	対流スキーム
UK Met Office(1.5km UKV)	Grey zone対応スキームCoMorphを開発中 (Whitall 2019)
NCEP(2km HWRF)	Scale-aware simplified Arakawa-Schubert(Pan and Wu 1995) またはGrell-Freitasスキーム(Grell and Freitas 2014)
Environment Canada(2.5km HRDPS)	Kain Fritschベース+prognostic convective velocity (McTaggart-Cowan et al. 2019)

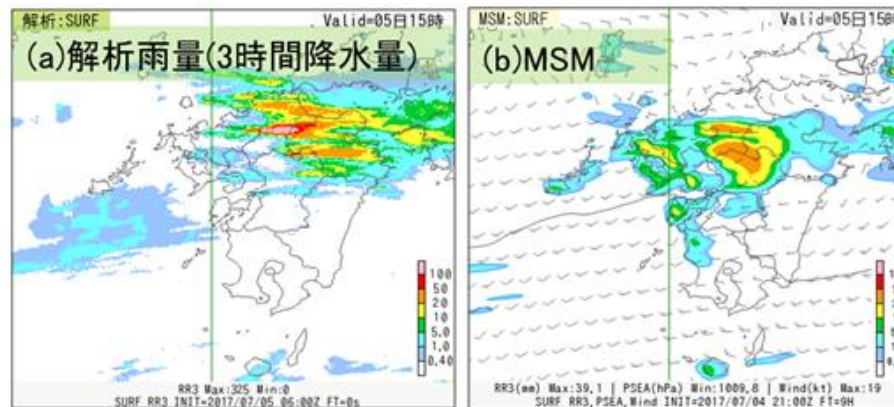
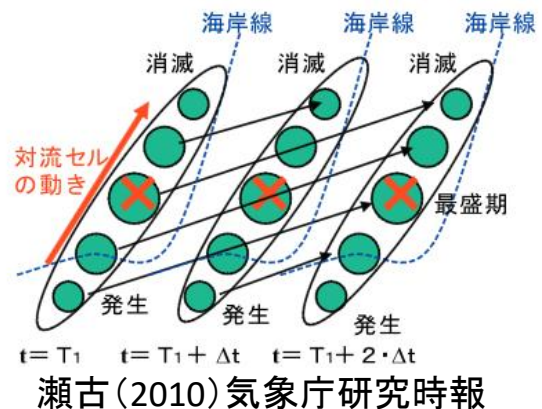
- 現在用いているKFスキーム(Kain and Fritsch 1990)を元に、Grey zoneへの適応対応、破綻している仮定の緩和を目指す。

積雲対流過程

- 現状の対流スキームでは、線状降水帯の形成・維持に必要なと思われるプロセス(対流の移動など)が足りていない。

– 最新のメカニズム研究を元に、豪雨の予測に必要な仕組みを導入すると同時に、破綻している仮定を取り除く必要がある。

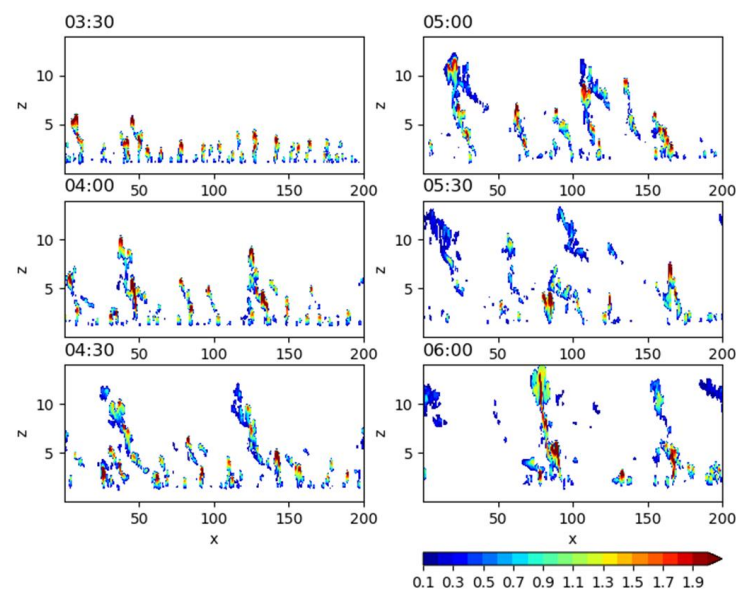
1. 対流準平衡を緩和しながら対流の移動するプロセスを導入(e.g. Pan and Randall 1998)
2. 補償下降流を部分的に格子スケールで担い、周辺格子を含めた収束場の表現を改善(e.g. Kuell et al. 2007, Malardel and Bechtold 2019)



現状のスキームは、カラム毎に独立にサブグリッドの対流を診断しているため、移動する対流を予測できない。

積雲対流過程

- リファレンスとして **asuca** による LES を活用し、**理想実験を通じて対流の基礎特性調査、および対流スキームの評価** を行う。
 - ただし、対流スキームの評価方法は自明ではない。
 - 対流スキームが診断する変数（マスフラックス、エントレインメント、デトレインメントなど）の抽出方法についても、検討が必要。



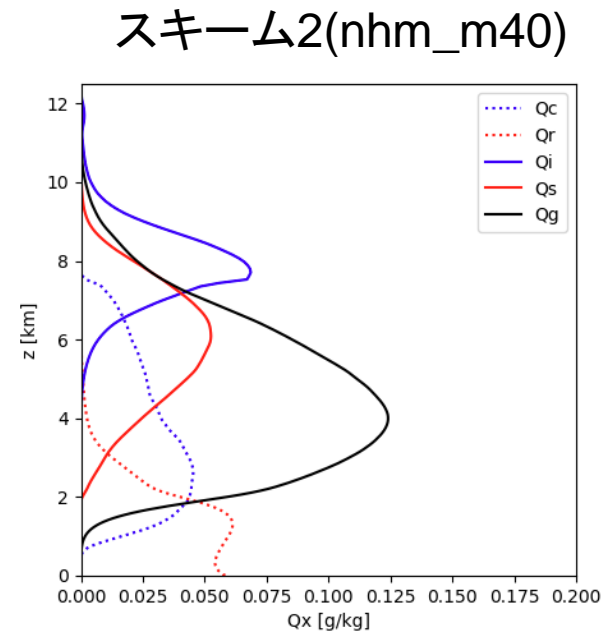
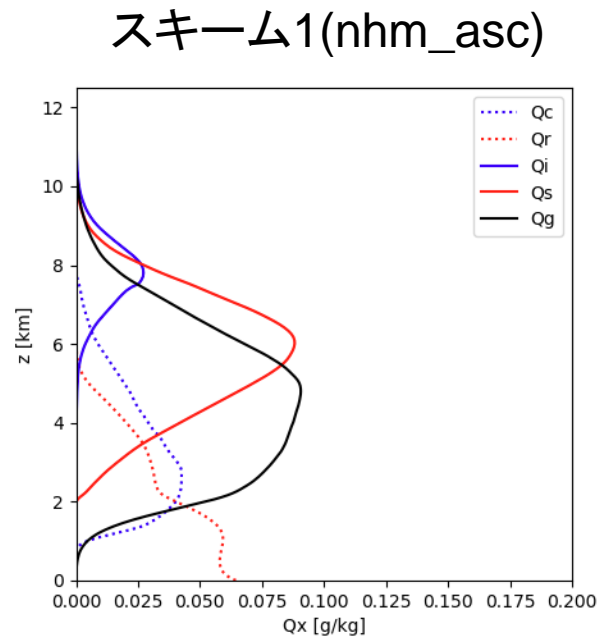
雲微物理を含むLESによる
TRMM-LBA理想実験
実行例

雲微物理過程

- 解像された対流系の振る舞いは雲微物理過程に敏感(Bryan and Morrison 2012; Weverberg et al. 2013)
 - 水物質のカテゴリ分け、相変化等のプロセス、水物質の粒径分布、落下速度、数濃度などを適切にパラメタライズできているかの調査を継続。
 - 特に、現在は Q_i/Q_s (/ Q_g)のカテゴリ分けに課題がある。
 - 格子内のサブグリッド効果(部分凝結や降水の占める割合)については、ほとんど検証が行われていない。

雲微物理過程

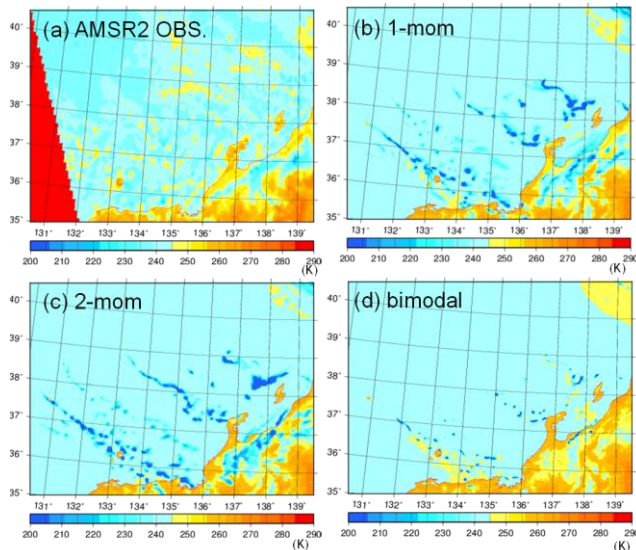
- 他スキームのリファレンスとするLESは、雲微物理過程に大きく影響を受ける。
 - 他スキームの開発のためにも、雲微物理過程の精度向上が必須。



LESによるEUROCS理想実験実行時の領域平均水物質鉛直プロファイル

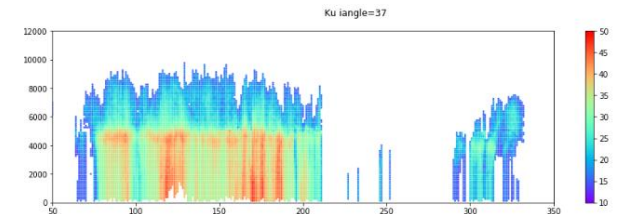
雲微物理過程

- 航空機等による直接観測および観測シミュレーターを用いた比較、および高度化を進める
 - なるべく多くの観測データと比較し、パラメータの不確実性を小さくしていく必要がある。

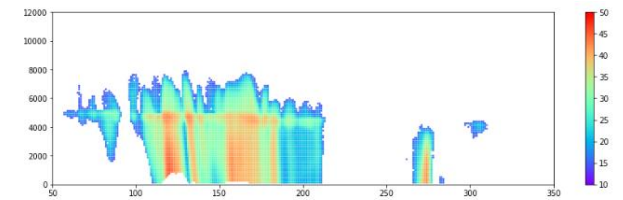


89GHz(V)マイクロ波輝度温度の観測およびJoint-Simulatorを用いてシミュレートした値(原2015)

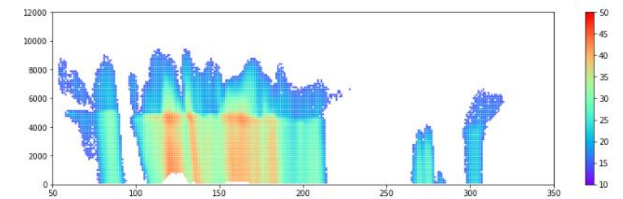
GPM/KuPR
による観測



MSM1702



MSM2003



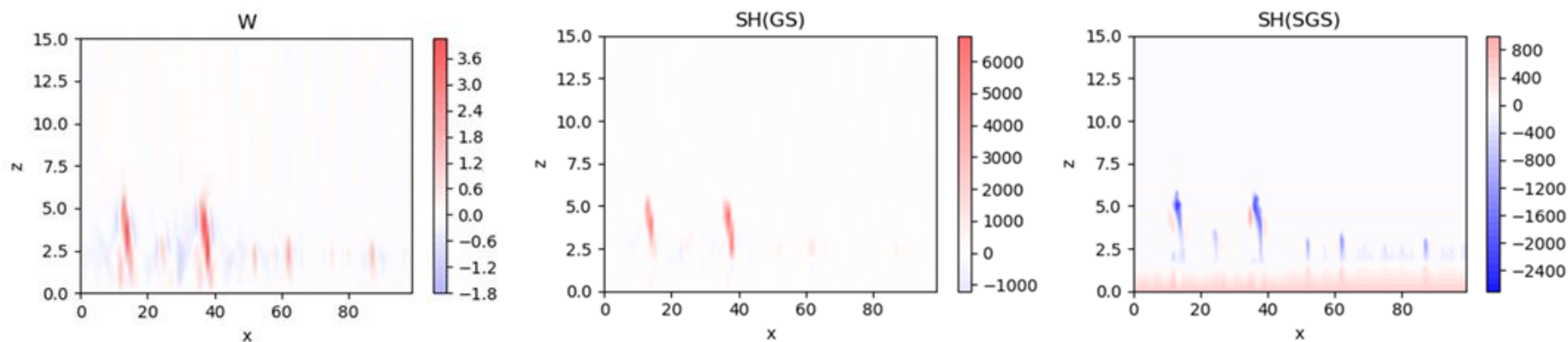
衛星搭載13.6GHzレーダーの観測
およびシミュレート値(幾田2019)

境界層・乱流過程

- 現行の境界層スキームであるMYNNモデル(Nakanishi and Niino 2009)の改善
 - 接地層のmaster lengthの扱いの検討
 - 飽和大気における適切な輸送の検討
- 雲微物理過程を含むasucaによるLES (Smagorinsky/Deardorff) 理想実験の拡充
 - 線状降水帯等をターゲットとした理想実験 (e.g. Ito et al. 2020) 等、リファレンスとして活用

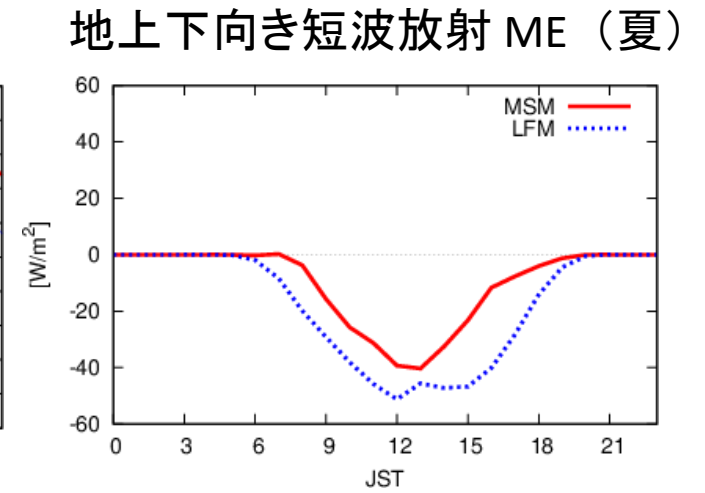
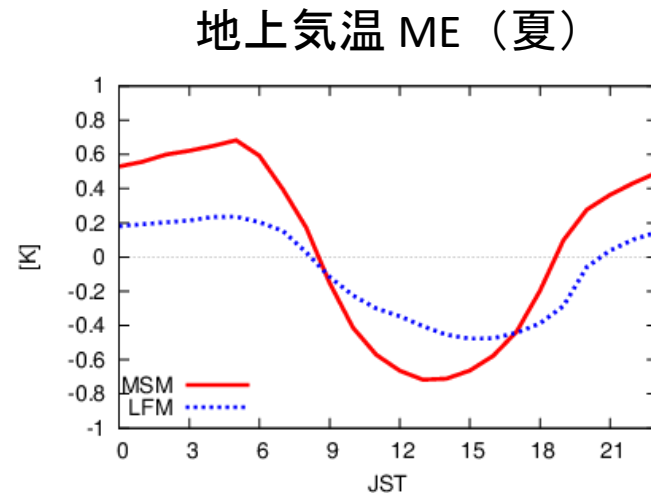
境界層・乱流過程

- 自由大気中の境界層スキームの扱い
 - 現状では、自由大気中に対しても境界層スキームを用いているが、その妥当性は明らかでない。
 - 格子スケール対流に対して、境界層スキームが格子スケールと逆向きのフラックスを計算。
 - 境界層スキームの自由大気中への拡張、もしくは自由大気中では別の乱流スキームの適用が必要



放射・陸面

- MSM・LFMともに、夏の日中の陸上地上気温の昇温が不十分。
 - 成層不安定化が不十分で、対流発生を遅れさせている可能性
 - 地上へ到達する短波放射が負バイアス
 - 衛星観測・観測シミュレーターを用いた、雲の3次元分布の検証
 - 陸面モデルの植生や土地利用に応じた日変化特性(特に日中)の表現は不十分
 - 陸面モデルの刷新



その他の物理過程

- サブグリッドの地形効果
 - 降水系に影響を与える可能性
 - 現状、メソ・局地モデルではサブグリッドの地形によって励起される渦輸送はパラメタライズしていない。
 - 形状抵抗パラメタリゼーションの導入の検討
 - 高解像度地形を用いて、サブグリッド地形が降水系に与える影響を調査中。
- その他、ミッシングプロセスがある可能性。
- 最新の研究を注視しながら、調査を継続。

まとめ

- 豪雨防災へ向け、2030年までに気象庁メソ・局地モデルでは
 - 局地モデルを1km以下へ高解像度化
 - 積乱雲に関する諸過程の改良を予定。
- ただ高解像度化するだけではなく、物理過程の改良が必須だが、調査・改良すべき項目は多岐に渡る。
- なるべく多くの開発課題で研究者の方々のご協力をいただき、開発を推進していきたい。

ご協力、よろしくお願いいたします

- 線状降水帯をはじめとする豪雨事例のプロセス解明
- Grey zone対流スキームに関する議論・アドバイス
- LES理想実験を用いた対流の特性調査、スキーム検証
- 直接観測や観測シミュレーターを用いた雲微物理過程のパラメーター推定
- 飽和対気に対する境界層スキームの適用妥当性検討
- 自由対気に適用可能な境界層スキーム、もしくは自由対気では別の乱流スキームを用いることの検討

参考文献

- 気象庁予報部, 2020:メソスケール気象予測の現状と展望.数値予報課報告・別冊第66号,気象庁予報部, 165pp.
- 原 旅人, 2015:衛星データシミュレータJoint-Simulator を用いた気象庁メソモデル・局地モデルの雲の検証.第8回気象庁数値モデル研究会
- 幾田泰醇, 2019:雲物理過程の改良とGPM衛星観測の再現.ワークショップ降雪に関するレーダーと数値モデルによる研究(第18回)
- 瀬古弘, 2010: 中緯度のメソスケール線状降水帯の形態と維持機構に関する研究. 気象庁研究時報, 62, 27030.
- Arakawa, A., and Schubert, W. H., 1974: Interaction of a Cumulus Cloud Ensemble with the Large-Scale Environment, Part I. J. Atmos. Sci.,31, 3, 674-701.
- Bryan, G. H., Wyngaard, J. C., and Fritsch, J. M., 2003: Resolution Requirements for the Simulation of Deep Moist Convection. Monthly Weather Review 131, 10, 2394-2416.
- Bryan, G. H. and H. Morrison, 2012: Sensitivity of a Simulated Squall Line to Horizontal Resolution and Parameterization of Microphysics. Mon. Wea.Rev.,140, 202-225.
- Grell, G. A., and S. R. Freitas, 2014: A scale and aerosol aware stochastic convective parameterization for weather and air quality modeling. Atmos. Chem. Phys., 14, 5233–5250.
- Ito, J., Tsuguchi, H., Hayashi, S., and Niino, H. 2021: Idealized High-Resolution Simulations of a Back-Building Convective System that Causes Torrential Rain. Journal of the Atmospheric Sciences 78, 1, 117-132.
- Kain, J. S. and J. M. Fritsch, 1990: A One-Dimensional Entraining/Detraining Plume Model and Its Application in Convective Parameterization. J. Atmos. Sci.,47, 2784-2802.
- Kitamura, Y., 2016: Improving a turbulence scheme for the terra incognita in a dry convective boundary layer. J. Meteor. Soc. Japan, 94, 491-506.
- Kuell, V., A. Gassmann, and A. Bott, 2007: Towards a new hybrid cumulus parametrization scheme for use in non-hydrostatic weather prediction models. Q.J.R. Meteor. Soc., 133(623), 479-490.
- Malardel, S. and P. Bechtold, 2019: The coupling of deep convection with the resolved flow via the divergence of mass flux in the IFS. Q.J.R. Meteor. Soc.,145, 1832-1845.
- McTaggart-Cowan, R., P. A. Vaillancourt, A. Zadra, L. Separovic, S. Corvec, and D. Kirshbaum, 2019: A Lagrangian Perspective on Parameterizing Deep Convection. Mon. Wea. Rev.,147, 4127-4149.
- Nakanishi, M. and H. Niino, 2009: Development of an Improved Turbulence Closure Model for the Atmospheric Boundary Layer. J. Meteor. Soc. Japan,87, 895-912.
- Pan H.-L., J. Wu, 1995: Implementing a Mass Flux Convection Parameterization Package for the NMC Medium-Range Forecast Model, NMC Office Note (1995), No. 409, p.40
- Pan, D.-M. and Randall, D.D.A., 1998: A cumulus parameterization with a prognostic closure. Q.J.R. Meteor. Soc., 124, 949-981.
- Weverberg, K. Van, A. M. Vogelmann, W. Lin, E. P. Luke, A. Cialella, P. Minnis, M. Khaiyer, E. R. Boer, and M. P. Jensen, 2013: The Role of Cloud Microphysics Parameterization in the Simulation of Mesoscale Convective System Clouds and Precipitation in the Tropical Western Pacic. J. Atmos.Sci.,70, 1104-1128.
- Whittall, M., 2019: A New Generalised Mass-flux Convection Scheme for the Met Office Unified Model. International Workshop on Convection Parameterization: Progress and Challenges.