



線状降水帯予測における数値予報の課題

気象庁予報部数値予報課 氏家将志

はじめに

- 線状降水帯予測をはじめとした集中豪雨予測における数値予報の課題について、領域モデル(メソモデル、局地モデル)を中心に近年の状況及び今後の開発の方向性と課題を紹介する。
- ここでは日本の集中豪雨の多く(*)を占める、以下のような特徴を持つメソβスケールの停滞する線状の降水のことを「線状降水帯」と呼びます。
 - 積乱雲(数km)、積乱雲群(数十km)、線状降水帯(数10km～100km)の階層的な構造
 - 特に、降水の走向が上層の風速に平行なタイプ(いわゆるバックビルディング型)
 - 近年の事例: 平成26年8月豪雨、平成28年6月の熊本の大雨、平成29年7月九州北部豪雨、平成30年7月豪雨期間中に各地で発生した線状降水帯など

(*)・・・ 熱帯低気圧本体による事例を除いた集中豪雨の約2/3 (集中豪雨の定義、統計期間は 津口・加藤(2014)による)が線状といわれている。

数値予報モデル開発の背景

数値予報の役割

- 数値予報は、日々の天気予報・防災気象情報の基盤
→ これらの精度を向上するためには、数値予報の精度向上が不可欠



交通政策審議会気象分科会

「2030年の科学技術を見据えた気象業務のあり方」

・気象業務の方向性

観測・予測精度向上のための技術開発、気象情報・データの利活用促進、これらを「車の両輪」とする防災対応・支援の推進について、利用者目線に立ち、社会的ニーズを踏まえた目指すべき水準に向けて、取組を進める

https://www.jma.go.jp/jma/press/1808/20a/bunkakai_rep.html

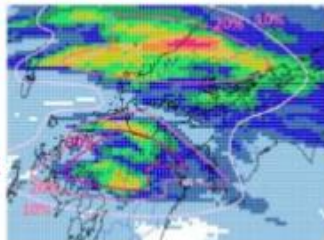
➡ 観測・予測精度向上に向けた技術開発に関する5つの目標(気象・気候)

目標② 半日前からの早め早めの防災対応等に直結する予測精度の向上

- ◎ 線状降水帯の発生 停滞等に伴う集中豪雨に対して、夜間の大雨にも明るいうちから対応できるよう、半日程度先までに特別警報級の大雨となる確率のメッシュ情報を提供するとともに、大雨・洪水警報の危険度分布」を更に高度化。
- 概ね3～5年後： メソアンサンプル予報及びAI技術を活用し、線状降水帯の発生・停滞の予測技術を高度化すること等によって、半日程度先までに特別警報級の大雨となる確率のメッシュ情報の提供を開始。
- 2030年： さらに局地アンサンプル予報の活用等により、数値予報技術を大幅に高度化することで、集中豪雨をより高い精度で更に地域を絞って予測できるようになる。さらに、半日程度先までの雨量予測を叩くことによる大雨・洪水警報の危険度分布」の更なる高度化を図る。これにより「我が事」感を持った早め早めの避難等の防災対応をより強力に支援。

概ね3～5年後

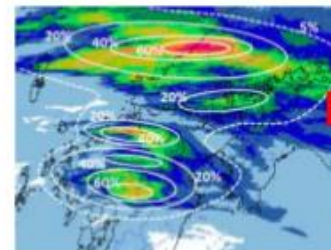
半日程度前から線状降水帯の発生・停滞等に伴う集中豪雨の発生可能性を把握



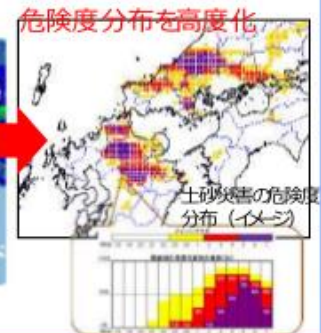
線状降水帯等に伴う集中豪雨発生の可能性 (概ね3年後のイメージ)

2030年

半日程度前から線状降水帯の発生・停滞等に伴う集中豪雨の可能性を確度高く把握し、これに伴う災害発生の危険度分布も提供



降水予測及び線状降水帯による大雨発生の可能性 (2030年イメージ)



2030年に向けた数値予報技術開発重点計画

交通政策審議会気象分科会からいただいたご提言(平成30年8月)を踏まえて重点計画を策定

1. 気象業務を巡る環境認識

- ① 自然災害の変化
- ② 社会情勢の急速な変化
- ③ 科学技術の飛躍的发展

2. 数値予報に関する気象庁のビジョン

国民一人一人の安全・安心を守り、活力ある社会を実現する数値予報イノベーション

3. 2030年における重点目標

自然災害や社会情勢の変化と科学技術の発展を踏まえ、ビジョンの実現に向けて重点目標を掲げる

① 豪雨防災

集中豪雨発生前に、明るいうちからの避難等、早期の警戒・避難を実現

② 台風防災

大規模災害に備えた広域避難・対応可能にする数日先予測の高精度化

③ 社会経済活動への貢献

生産・流通計画の最適化等に役立つ高精度な気象・気候予測を実現

④ 温暖化への適応策

「わが町」の地球温暖化予測により、国や自治体等の適応策策定に貢献

4. 技術革新の推進

重点目標の達成に向け、鍵となる技術革新を重点的に推進

- ① 次世代技術による地球の観測ビッグデータ活用
- ② 日本の気象を世界最高の精度と解像度でシミュレーション
- ③ 確率予測とAI技術の融合による意思決定支援

5. 開発マネジメントの強化

技術革新の実現には開発マネジメントの強化が必須

① 幅広い連携の推進

産学官オールジャパンの連携を実現するとともに、国際的連携も強化し、数値予報に関する研究と開発を力強く推進

② 開発者の育成と確保

世界最先端の科学技術に基づいた開発を実現するため、多様な人材の活躍を推進し、高度専門家や開発リーダーを育成

③ 研究・開発基盤の整備

スーパーコンピュータ、AI等基盤ソフトウェアなどの研究・開発を支える最先端のハード・ソフトを重点的に強化

「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)

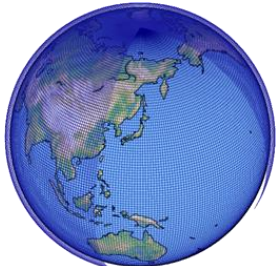
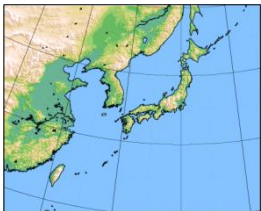
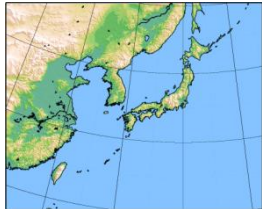
- 豪雨防災のための開発の方向性として、以下の点が示された。
 - 局地モデルを1 km 以下に高解像度化、積乱雲に関する諸過程の改良
 - 局地アンサンブル予報システムの開発。
 - 多くの観測種別を持ち、かつ、時間的、空間的に高密度な観測ビッグデータの更なる活用。
 - 雲域や降水域を含む全衛星データの利用方法の開発。
 - ハイブリッド同化の導入、観測誤差相関の取り扱いなどの高度化。
 - 豪雨事例等のメカニズム研究による、最新の科学的知見に基づく改良。

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

現業領域数値予報モデルの現状と課題

Current NWP models of NPD/JMA

	In Operation				Under Trial
	Global Spectral Model GSM	Meso-Scale Model MSM	Local Forecast Model LFM	Global Ensemble GEPS	Meso-scale Ensemble MEPS
objectives	Short- and Medium-range forecast	Disaster reduction Aviation forecast	Aviation forecast Disaster reduction	One-week forecast Typhoon forecast	Uncertainty and probabilistic information of MSM
Forecast domain	Global 	Japan and its surroundings (4080km x 3300km) 	Japan and its surroundings (3160km x 2600km) 	Global 	Japan and its surroundings (4080km x 3300km) 
Horizontal resolution	TL959(0.1875 deg)	5km	2km	TL479(0.375 deg)	5km
Vertical levels / Top	100 0.01 hPa	76 21.8km	58 20.2km	100 0.01 hPa	76 21.8km
Forecast Hours (Initial time)	132 hours (00, 06, 18 UTC) 264 hours (12 UTC)	51 hours (00, 12UTC) 39 hours (03, 06, 09, 15, 18, 21 UTC)	10 hours (00-23 UTC hourly)	264 h (00, 12 UTC) 132 h (06, 18 UTC)* 27 members	39h 21 members
Initial Condition	Global Analysis (4D-Var)	Meso-scale Analysis (4D-Var)	Local Analysis (2D-Var)	Global Analysis with ensemble (GX-LEPS)	Meso-scale Analysis with ensemble (GX-LEPS)

* when a TC of TS intensity or higher is present or expected in the RSMC Tokyo - Typhoon Center's area of responsibility (0°–60°N, 100°E–180°).

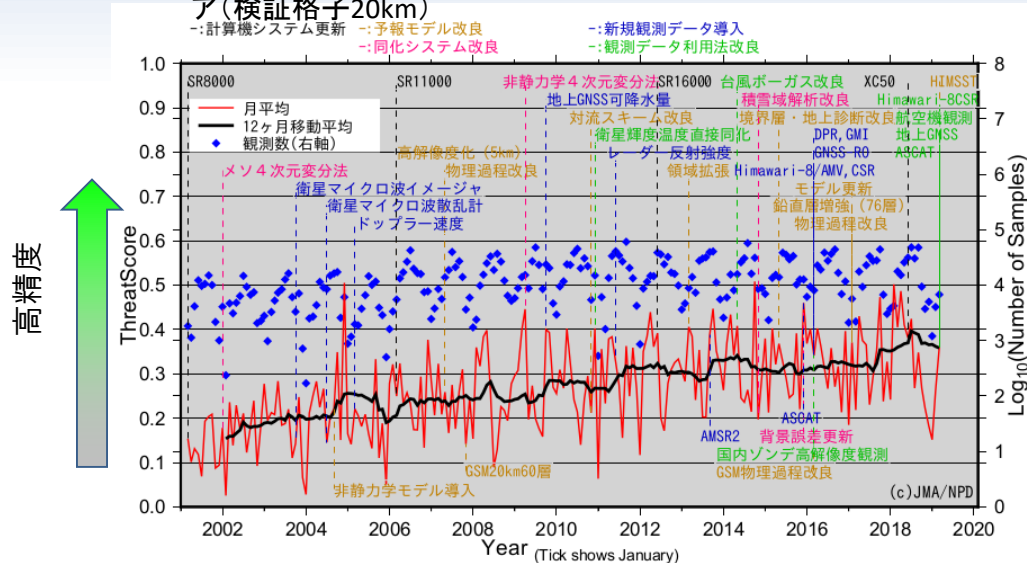
メソモデル(MSM),局地モデル(LFM)の主な仕様

	メソモデル (MSM)	局地モデル (LFM)
予報モデル	asuca	
格子間隔	5km(817x661)	2km (1581 × 1301)
鉛直層	76層(地上～21.8km)	58層(地上～20.2km)
積分時間間隔	100/3(=33.333...)秒	50/3(=16.666...)秒
初期値	メソ解析(MA) NHM ベースの4次元変分法データ同 化システム	局地解析(LA) asuca ベースの3次元変分法データ同 化システム
側面境界値	全球モデル(GSM)	メソモデル(MSM)
予報頻度・時間	1日8回 51時間予報(00, 12UTC) 39時間予報(03, 06, 09, 15, 18, 21UTC)	1日24回・10時間予報
対流の扱い	対流パラメタリゼーション (Kain and Fritsch 1990)を併用	対流のイニシエーション

asuca およびasucaをベースにした変分法データ同化システムについては数値予報課報告・別冊第60号、平成27年(2015年)度、29年(2017)度数値予報研修テキストに解説がある。

MSM, LFMの改良

MSMによる、10mm/3h以上の降水量の予測のスレツスコア
(検証格子20km)



MSM(赤)、LFM(青)による、10mm/1h以上の降水量のフラクシオンスキルスコア(検証格子10km)
FSS : R01, TH=10mm, FT=09

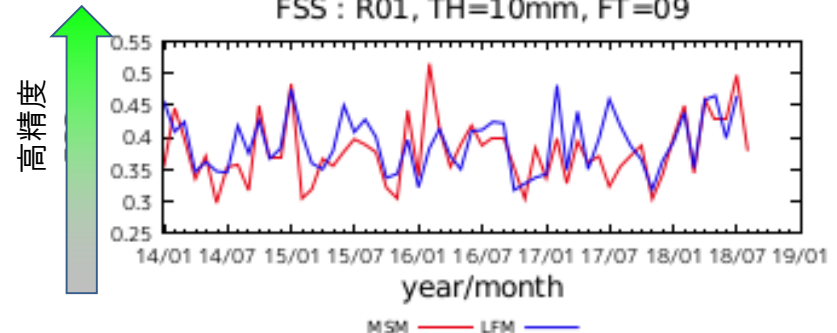


図 3.17 LFM と MSM の Fractions Skill Score (対解析雨量)。検証格子 10 km、空間スケール 80 km、閾値 10 mm/1h、FT=9、予報初期時刻：00, 03, ..., 21UTC。

安斎(2018, H30年度数値予報研修テキスト)

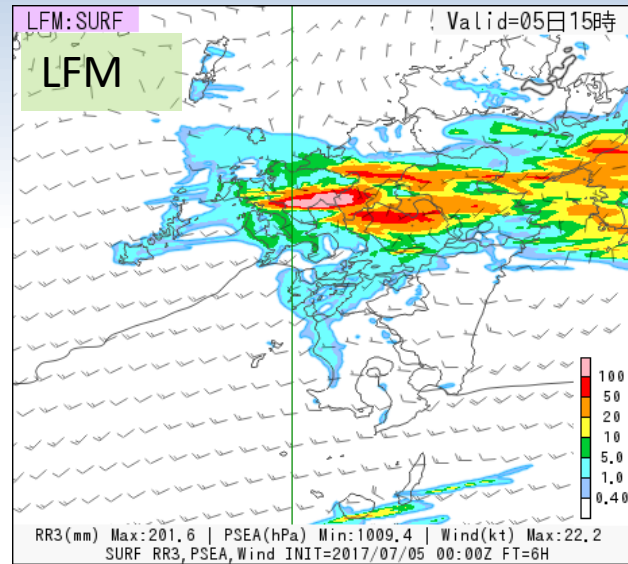
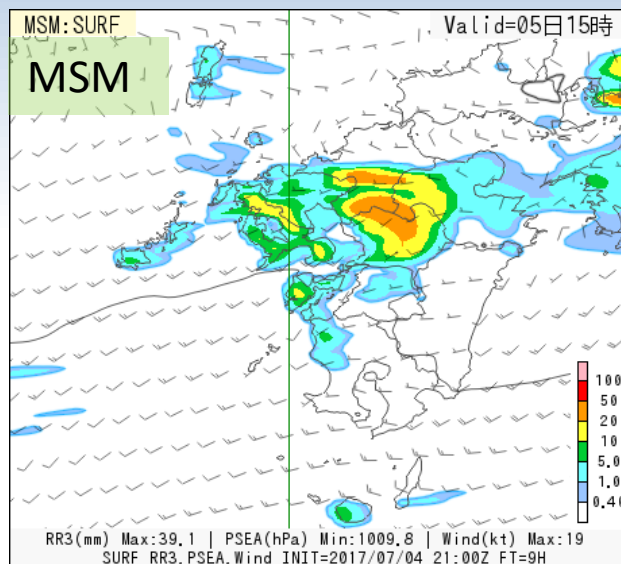
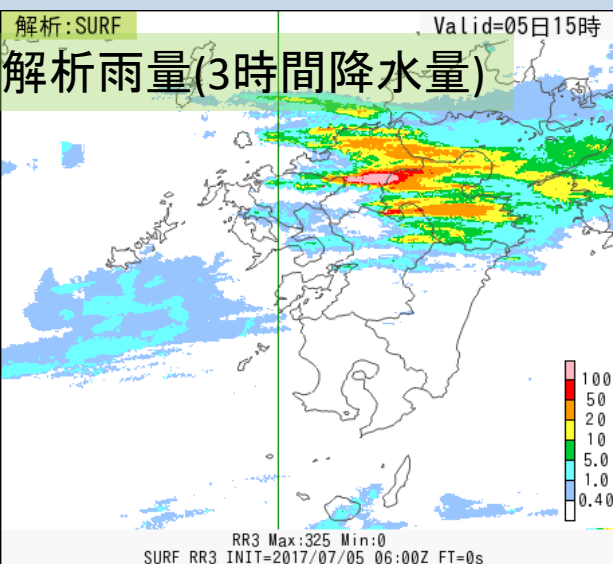
・モデル、観測データ利用、データ同化手法の改良により、MSM, LFMの予測精度は着実に向上している。LFMは特に夏季の短時間強雨の予測において、MSMよりも降水予測精度が高い。

・一方、線状降水帯は、スケールの小さい現象(メソβスケール)であり、その予測には環境場や対流の表現、初期値の把握、位置や持続の不確実性等、多くの要素が絡む。数値予報による予測には課題が多い。

MSM, LFMの線状降水帯予測に関する課題、 知見

- MSM, LFM共通
 - 解像度が不十分
 - LFMでも完全に対流を解像できているわけではない
- MSM
 - 線状降水帯が線状に組織化されにくい。
 - 降水の振る舞いが対流パラメタリゼーション(Convective Parameterization; CP)の設定に左右されやすい
- LFM
 - 対流の発生が遅れる。線状の降水が予測されるが、場所が絞りきれない。
 - 対流スキームを弱くかけることをイニシエーションとして用いることで遅れを抑制する。
 - 数値拡散が降水の組織化に大きく影響する。→ サブグリッドスケールでの水平混合の必要性を示唆

平成29年7月九州北部豪雨事例



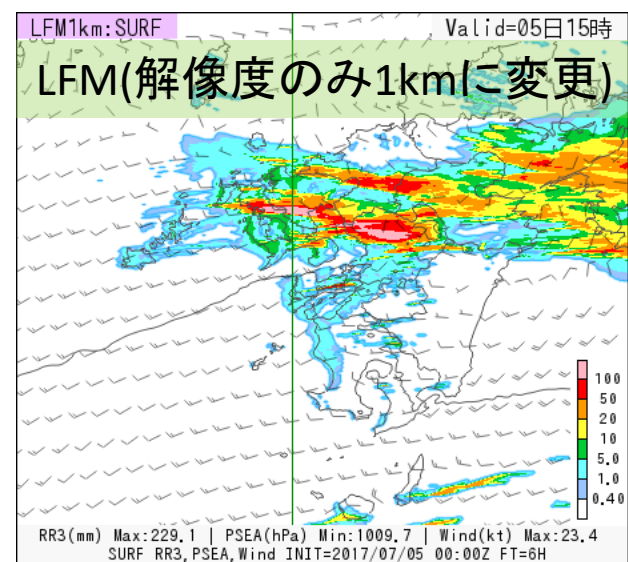
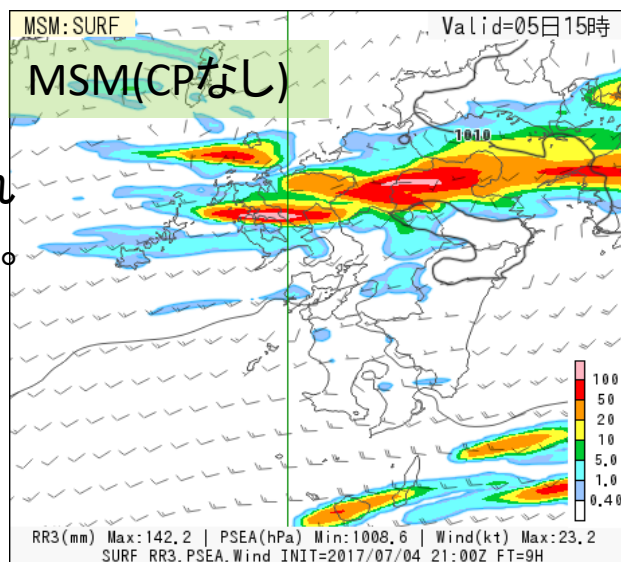
<MSM>

CPあり: 線状にならずパッチ状の降水が形成される。

CPなし: 線状の降水が予測され降水の過剰な集中が見られる。

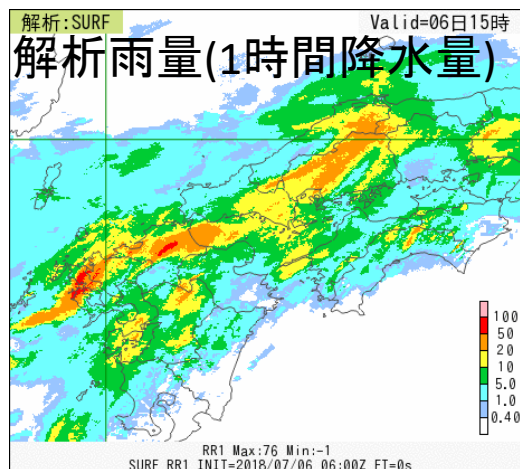
<LFM>

線状の降水は形成されるが、位置が絞り切れない、同じ場所での停滞を表現できない。
解像度1kmでも同様。

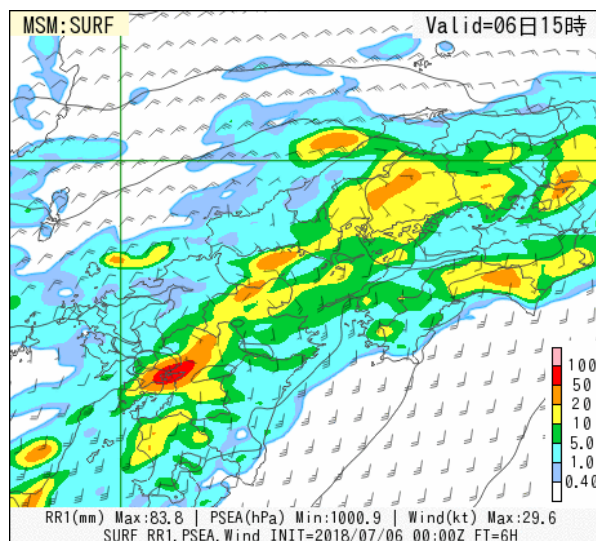


平成30年7月豪雨の期間中に見られた、線状降水帯事例

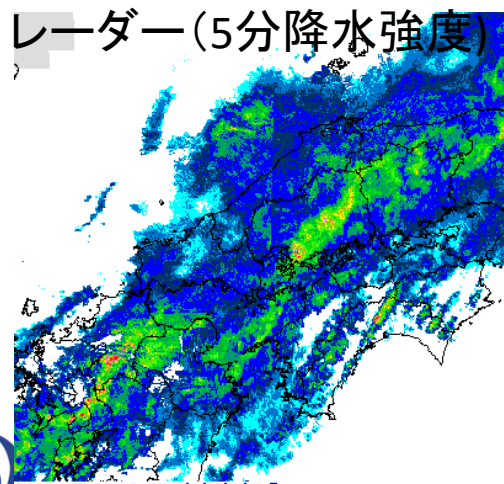
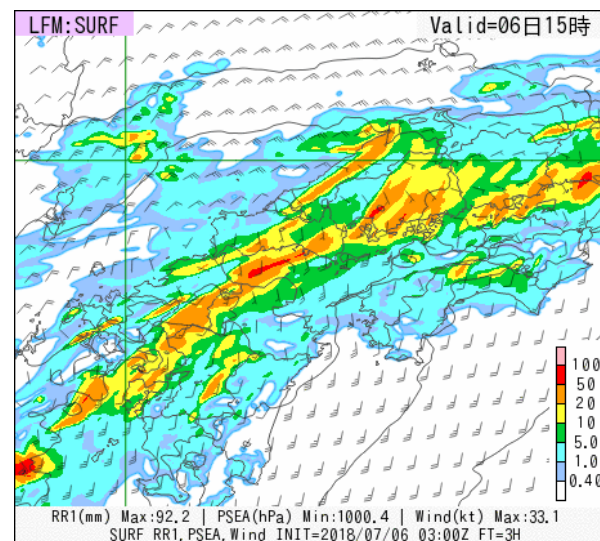
- 梅雨前線に伴う降水の中や、前線の南側に、局所的に線状の降水が見られる。
- 7/6夜の事例(広島)



MSM



LFM



<MSM>

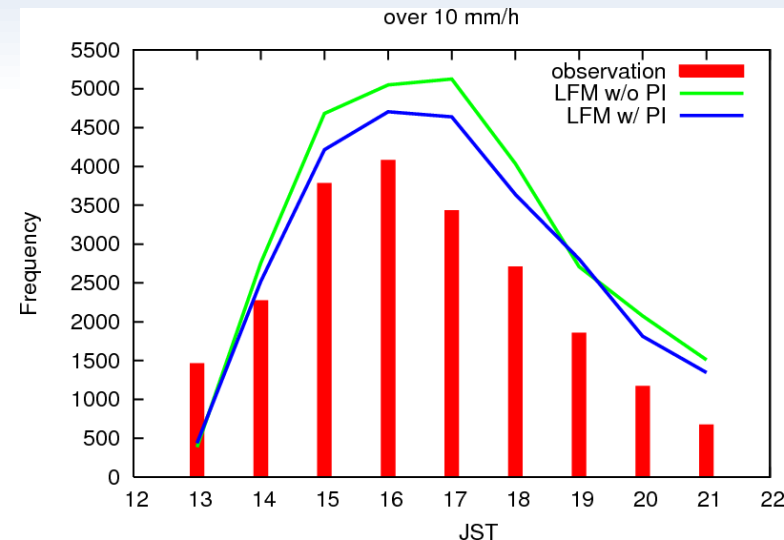
線状の降水が形成されにくい。

<LFM>

線状の降水は形成されるが、位置が絞り切れない、同じ場所での停滞を表現できない。

水平解像度数km程度のモデルにおける対流

- 水平解像度が数km程度では、対流が部分的に解像されるが、CPの助けは必要
 - CPが無いと格子スケールの上昇流が発生するまで成層不安定が解消されない。また、対流と周囲の環境場との乱流による混合は解像されない。
 - 対流の発生が遅れや、格子スケールの強すぎる降水をもたらす。
 - LFMでは、CPを弱くかけることで対流の立ち上がりをパラメタライズしている
(Parameterization of Initiation; PI)。
- 一方、従来のCPで用いられる仮定(対流域の面積が格子に対して十分小さいetc)は高解像度では成り立たなくなる。
- 力学過程で解像する現象、パラメタリゼーションで表現する現象の分け方を考え直す必要がある(いわゆる「対流のグレーゾーン」問題とも関連)。



松林・原(2017, 気象庁モデル研究会)

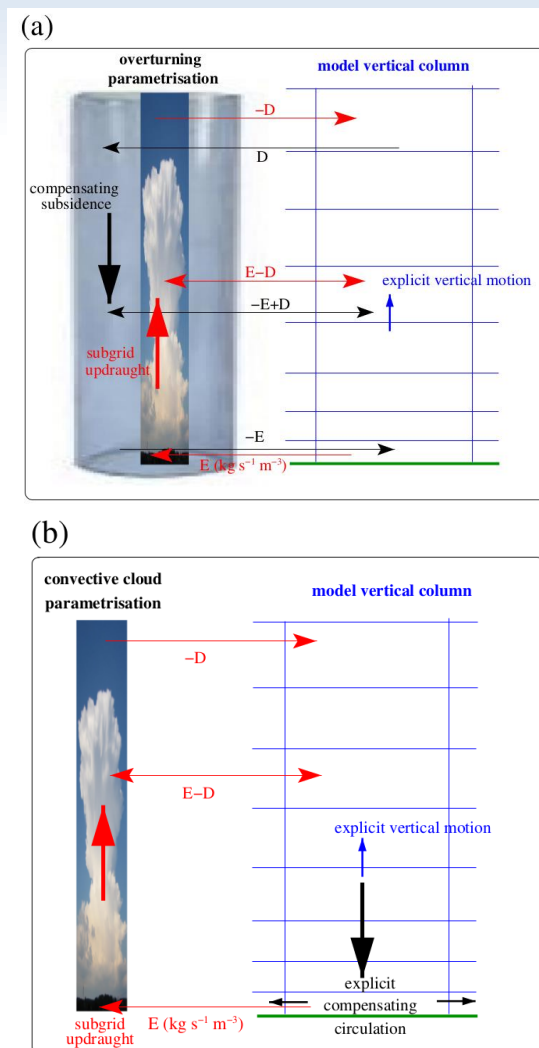
PIなしは、実況に比べて降水のピークの時間帯が遅れる

PI導入により、降水のピークの時間帯が観測と整合

対流の扱いの改良に関する方向性

- (物理的な根拠のある) 水平拡散？
- 対流性上昇流とそれに伴う環境場との混合はパラメタライズして、補償下降流は格子スケールの力学が担う。(Kuel et al 2007, Kuel and Bott 2008, Malardel and Bechtold 2019など)
- Met Officeの資料でも必要性についての言及がある(MOSAC資料など)
- ECMWFのIFSでもテストが始まっている

研究としても最先端の分野。



(Malardel and Betchtold 2019に加筆)

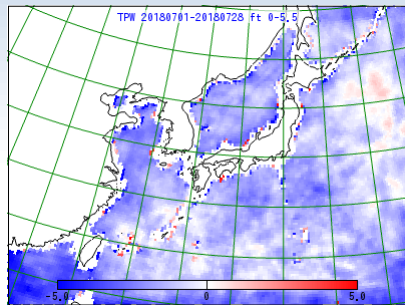
線状降水帯をもたらす環境場のモデリング

- 線状降水帯をもたらす環境場の特徴については、多くの先行研究がある。
 - 下層の水蒸気流入 (Unuma and Takemi 2016a; 気象研究所 2017 他)、中層の湿り (Unuma and Takemi 2016a; Kikuchi and Takayabu 2004; Derbyshire et al. 2004 他)
 - 水平風の鉛直シア (Yoshizaki et al. 2000; 瀬古 2010; Unuma and Takemi 2016b 他)
- 環境場(成層状態、水蒸気流入、循環等)の予測精度を向上させた上で、降水の表現を向上させることが重要
- 環境場の予測には、モデルの系統誤差(バイアス)が大きく影響する
 - 雲・対流・放射・地表面といった複数の過程の相互作用の結果なので、総合的に改良を進める必要がある。
 - 下層の水蒸気: 海面過程の精度向上
 - 中層の湿り: 雲微物理の精査、対流パラメタリゼーションによる水蒸気の輸送プロセスの改善
 - 陸上での対流活動の変化: 雲放射バイアスと対流活動の関係 (Weverberg et al. 2018)

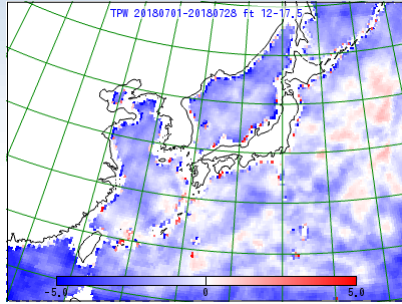
MSMの環境場予測の系統誤差の例(2018年7月)

可降水量[mm]の対RSS(衛星プロダクト) 平均誤差

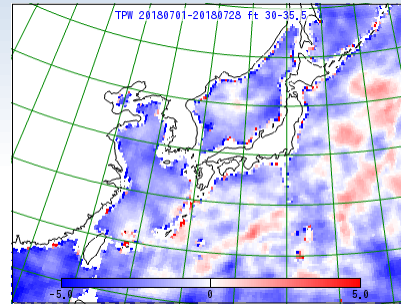
潜熱フラックス[W/m²]の
対OAFLUX平均誤差



FT=0-6の平均



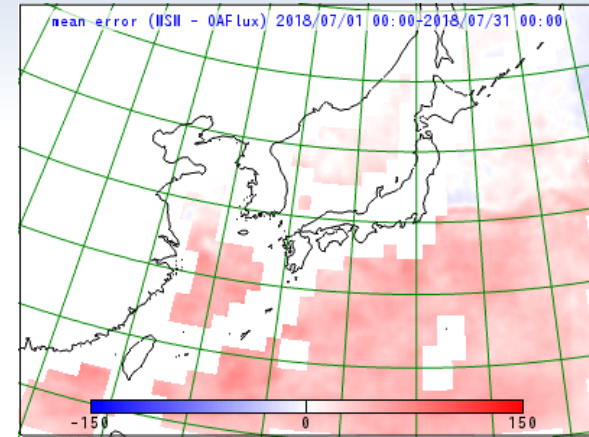
FT=12-18の平均



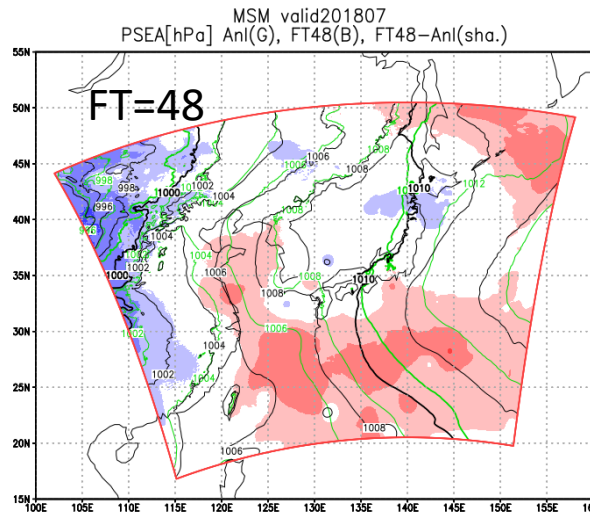
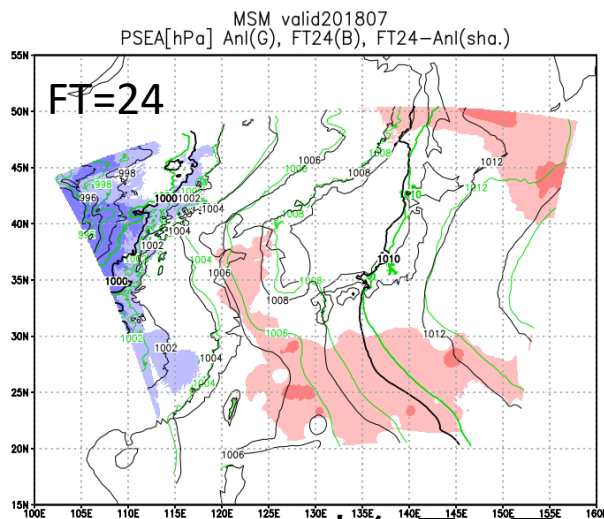
FT=30-36の平均



海上の上記は初期場は乾燥、予報時間が進むと湿潤。南の境界はGSMの乾燥バイアスの影響も受けている



海面更正気圧[hPa]の平均値(黒:予測、緑:解析)とその誤差(カラー)



暖湿気に関わ
る場には大きな
バイアスがある

高気圧の西への張り出しが強い

観測データ利用・同化システム

- 観測データ利用

- 高密度、高頻度観測の利用による、水蒸気場、風の場の解析場の高度化を通じた、線状降水帯予測精度の改善

- ひまわり8号高頻度大気追跡風(Kunii et al. 2016), 水蒸気バンドの同化による、湿り場の改善(Kazumori 2018)、赤外バンドの全天候・高頻度同化(Honda et al. 2018)
 - 洋上GNSS観測への期待

- 高密度・高頻度観測の利用を可能にする同化システム

- 流れ依存を考慮した4次元変分法データ同化システム
 - 水物質の制御変数を含む、接線形・随伴モデル(Ikuta 2016; Kawabata et al. 2018)
 - 観測誤差相関の考慮

- 共通

- モデルの系統誤差減少が観測データ利用、同化システムの高度化に資する(Geer et al. 2018など)。

アンサンブル予報システム

- アンサンブル予報システム

- 強制力の弱い場における誤差成長やメソ対流系の組織化における小スケールの初期摂動(+大規模スケール現象との相互作用)の影響の重要性を示唆する研究(Nielsen and Schumacher 2016; Weyn and Durran 2018など)がある。
- 一方、日本で発生する線状降水帯にターゲットを絞ったアンサンブル予報システムの研究は少ない
 - 環境場の不確実性
 - 水物質に関する摂動
 - 対流を発生させる位置の不確実性
 - 空間スケール
 - 初期摂動、境界摂動、物理摂動のあり方

知見が少なく、今後、知見の蓄積が最も必要な分野。

まとめ(1/2)

- 半日前からの早め早めの防災対応等に直結させるため、線状降水帯の予測精度向上が求められている。
 - 「2030年に向けた数値予報技術開発重点計画」において、高解像度予報システムの高度化の方向性を示した。
- 現業数値予報システムで線状降水帯の予測精度を向上させるためには、以下のような多くの課題に取り組む必要がある。
- 線状降水帯のモデリング
 - 対流の表現：高解像度化に加え、力学過程と対流パラメタリゼーションの役割分担の考慮が必要。
 - 線状降水帯をもたらす環境場の予測精度向上も必要で、重要な要素が先行研究で示されている。環境場の予測精度向上には、さまざまな物理過程やその相互作用に起因するMSM, LFMの系統誤差減少が必要。

まとめ(2/2)

- 観測データ利用、データ同化
 - 観測データの利用については、有効性を示す先行研究が多く、これらの成果の取り込みの検討が必要。また、観測データ利用高度化を可能にする同化システムの高度化(ハイブリッド、水物質も含めた4DVAR, 観測誤差相関等)も同時に進める必要がある。また、モデルの系統誤差減少がデータ同化の高度化にも必要
- 先端的な研究推進の必要性
 - 線状降水帯の予測の不確実性を捉えるためのアンサンブル摂動のあり方、グレーゾーンにおける対流の扱いのあり方は、未解明な部分が多く、今後知見の蓄積を早急に進めることが必要。
 - 先進的な研究開発が必要で、気象庁単独では困難な部分がある。
 - 関係する機関のご協力をいただき連携しつつ推進してまいりたい。

引用文献

- 安斎太朗, 2018: メソモデル、局地モデルの検証. 平成30年数値予報研修テキスト, 気象庁予報部, 43-47.
- Derbyshire, S. H., I. Beau, P. Bechtold, J.-Y. Grandpeix, J.-M. Piriou, J.-L. Redelsperger, and P.M.M. Soares, 2004: Sensitivity of moist convection to environmental humidity. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 130, 3055-3079.
- Geer, A. J., K. Lonitz, P. Weston, M. Kazumori, K. Okamoto, Y. Zhu, E. H. Liu, A. Collard, W. Bell, S. Migliorini, P. Chambon, N. Fourrie, Min-Jeong Kim, C. Köpken-Watts, and C. Schraff, 2018: All-sky satellite data assimilation at operational weather forecasting centres. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 144, 1191-1217.
- Honda, T., S. Kotsuki, G.-Y. Lien, Y. Maejima, K. Okamoto, and T. Miyoshi, 2018: Assimilation of Himawari-8 All-Sky Radiances Every 10 Minutes: Impact on Precipitation and Flood Risk Prediction. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 123, 965-976.
- Ikuta, Y. (2016b). Data assimilation with adjoint model including three-ice bulk cloud microphysics. In: 5th Annual International Symposium on Data Assimilation, 18-22 July, 2016, Reading, UK.
- 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.
- Kawabata, T., Schmitz, T., Adachi, A., Bauer, H.-S., Wulfmeyer, V., Nagumo, N., and Yamauchi, H.: Observational operators for dual Polarimetric radars in variational data assimilation systems (PolRad VAR v1.0), *Geosci. Model Dev.*, 11, 2493-2501,
- Kazumori, M., 2018: Assimilation of Himawari-8 Clear Sky Radiance Data in JMA's Global and Mesoscale NWP Systems. *Journal of the Meteorological Society of Japan. Ser. II*, 96B, 173-192.
- Kikuchi, K. and Y. N. Takayabu, 2004: The development of organized convection associated with the MJO during TOGA COARE IOP: Trimodal characteristics. *Geophysical Research Letters*, 31.
- 気象庁, 2018: 「平成30年7月豪雨」及び7月中旬以降の記録的な高温の特徴と要因について. 平成30年8月10日報道発表, 1-8.
- 気象研究所, 2017: 平成29年7月5-6日の福岡県・大分県での大雨の発生要因について. 平成29年7月14日報道発表, 1-8.
- Kuell, V., A. Gassmann, and A. Bott, 2007: Towards a new hybrid cumulus parametrization scheme for use in non-hydrostatic weather prediction models. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 133, 479-490.
- Kunii, M., M. Otsuka, K. Shimoji, and H. Seko, 2016: Ensemble Data Assimilation and Forecast Experiments for the September 2015 Heavy Rainfall Event in Kanto and Tohoku Regions with Atmospheric Motion Vectors from Himawari-8. *SOLA*, 12, 209-214.

引用文献

- 松林健吾, 原旅人 2017: 積雲対流パラメタリゼーションの概要と気象庁現業メソモデルの積雲対流スキーム. 第10回気象庁数値モデル研究会・第47回メソ気象研究会.
- Malardel, S. and P. Bechtold, 2019: The coupling of deep convection with the resolved flow via the divergence of mass flux in the IFS. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, in press.
- Nielsen, E.R. and R. S. Schumacher, 2016: Using Convection-Allowing Ensembles to Understand the Predictability of an Extreme Rainfall Event, Mon. Wea. Rev., 144, 10, 3651-3676.
- 瀬古弘, 2010: 中緯度のメソβ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, 1-74.
- Stirling, A., 2015: Understanding and representing atmospheric convection. MOSAC paper 20.18, 1-11.
- 津口裕茂, 加藤輝之, 2014: 集中豪雨事例の客観的な抽出とその特性・特徴に関する統計解析. 天気, 61, 455-469.
- Unuma, T. and T. Takemi, 2016a: Characteristics and environmental conditions of quasi-stationary convective clusters during the warm season in Japan. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 142, 1232-1249.
- Unuma, T. and T. Takemi, 2016b: A Role of Environmental Shear on the Organization Mode of Quasi-Stationary Convective Clusters during the Warm Season in Japan. SOLA, 12, 111-115.
- Vosper, S., 2015: UK models, resolution and physical parametrizations. MOSAC paper 20.18, 1-9.
- Weverberg, K. V. and co-authors, 2018: CAUSES: Attribution of Surface Radiation Biases in NWP and Climate Models near the U.S. Southern Great Plains. J. Geophys. Res.: Atmospheres, 123, 3612-3644.
- Weyne, J. A. and W. R. Durran, 2018: The scale dependence of initial-condition sensitivities in simulations of convective systems over the southeastern United States. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, accepted.
- Yoshizaki, M., T. Kato, Y. Tanaka, H. Takayama, Y. Shoji, H. Seko, K. Arao, K. Manabe, and Members of X-BAIU-98 Observation, 2000: Analytical and Numerical Study of the 26 June 1998 Orographic Rainband Observed in Western Kyushu, Japan. Journal of the Meteorological Society of Japan. Ser. II, 78, 835-856.
- 平成27年度数値予報研修テキスト第1章「asucaが導入された局地数値予報システム」、第2章「メソ数値予報システムの改良」(2015)
- 平成28年度数値予報研修テキスト第1.1節「メソ数値予報システムの特性の変化」、第2.2節「メソ数値予報システムの背景誤差の改良」、第4章「事例検討」(2016)
- 平成29年度数値予報研修テキスト第2.1節「メソ数値予報システムの改良の概要」、第2.2節「メソ数値予報システムの特性の変化」(2017)

数値予報課報告・別冊第60号「次世代非静力学モデルasuca」(2014)