

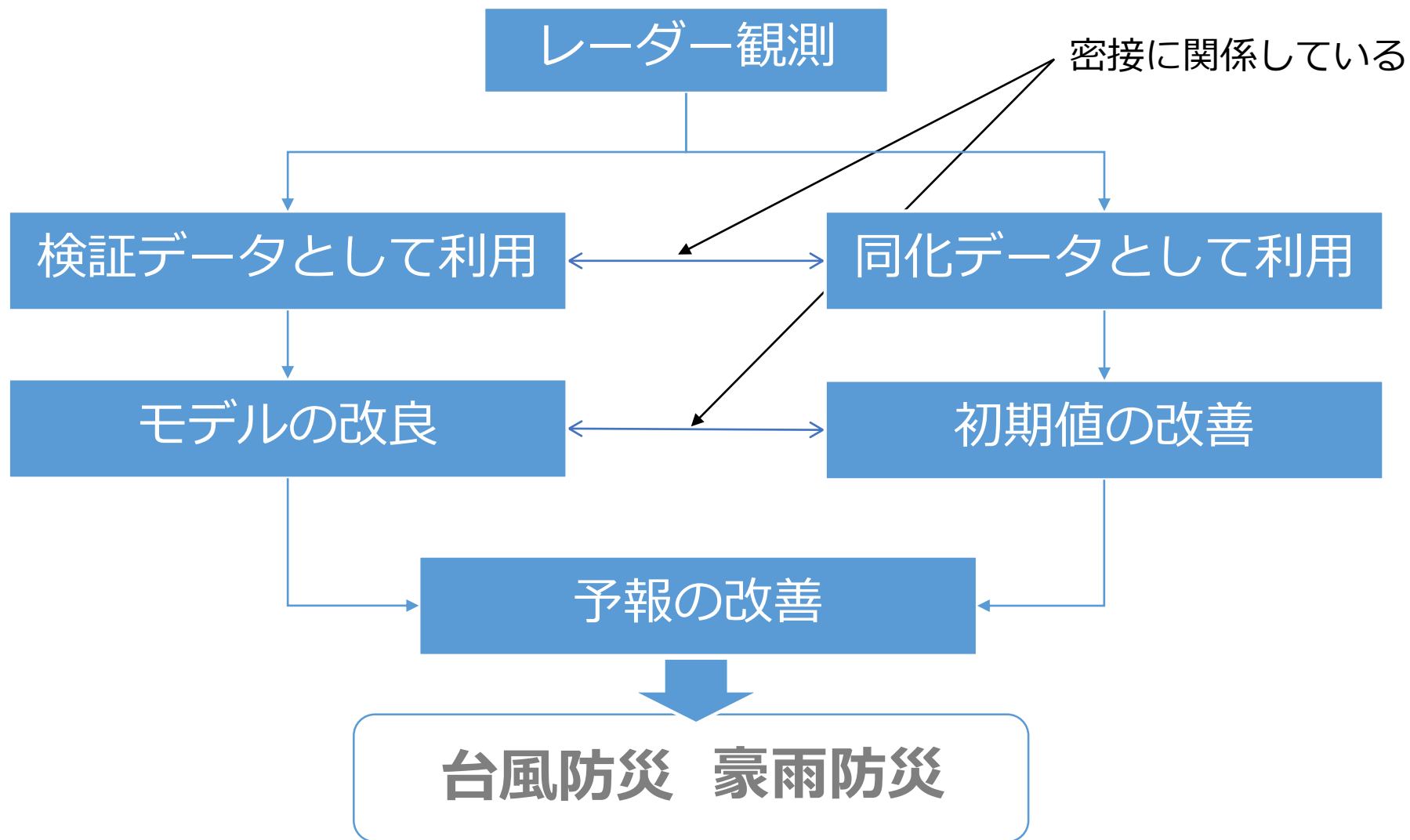
レーダーデータ利用の課題

幾田泰醇^{1,2}

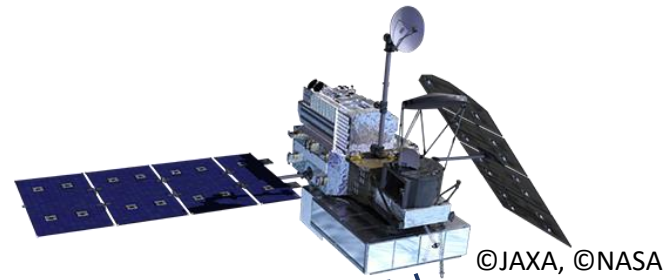
¹気象研究所気象観測研究部

²情報基盤部数値予報課

現業数値予報システムにおけるレーダー観測の立ち位置



モデルの検証



GPM衛星観測

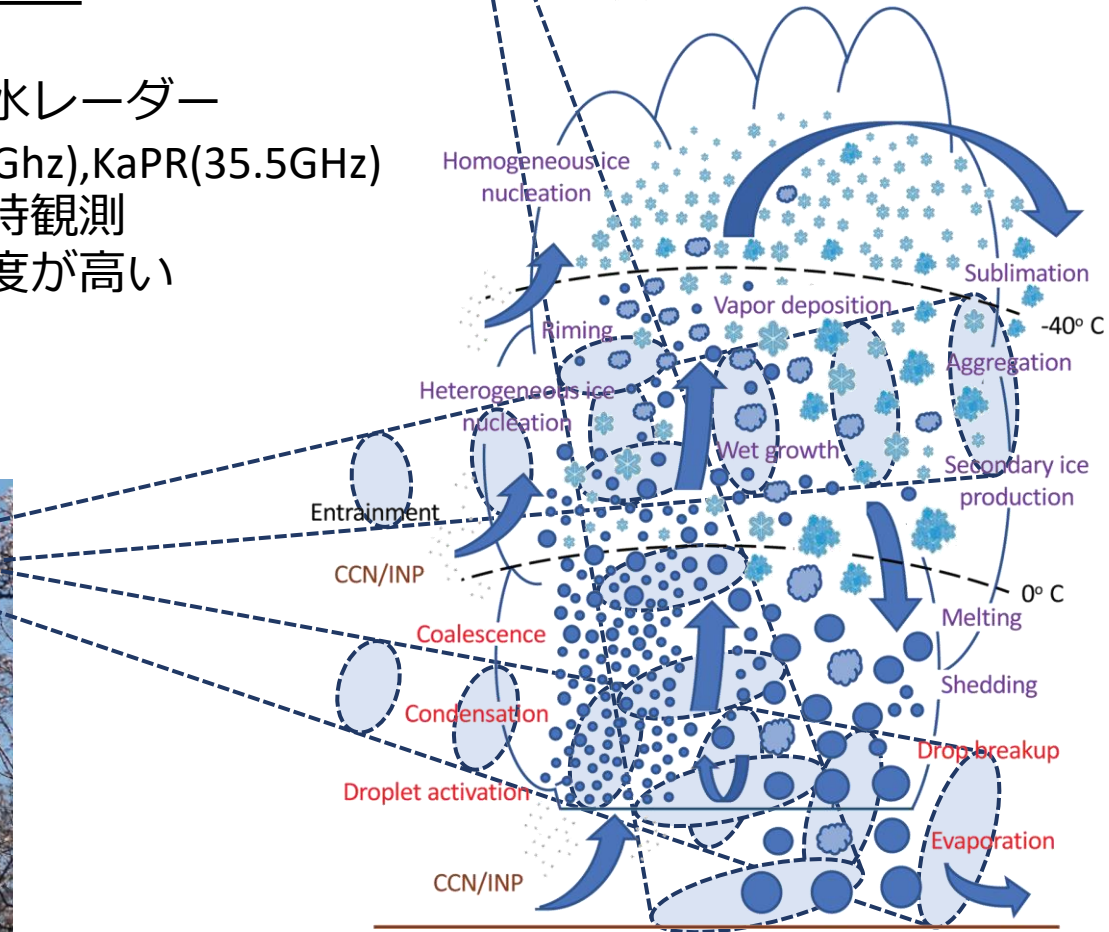
- 反射強度
 - 2周波降水レーダー
KuPR(13.6GHz), KaPR(35.5GHz)
による同時観測
 - 鉛直解像度が高い
- 輝度温度

偏波レーダー

- 反射強度
- ドップラー速度
- 偏波パラメータ
 - 反射強度差
 - 偏波間位相差変化率
- 水平解像度が高い



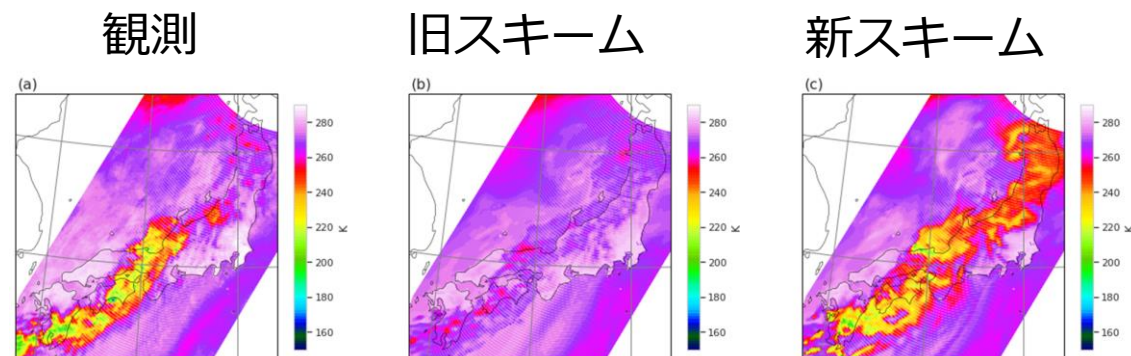
©JMA



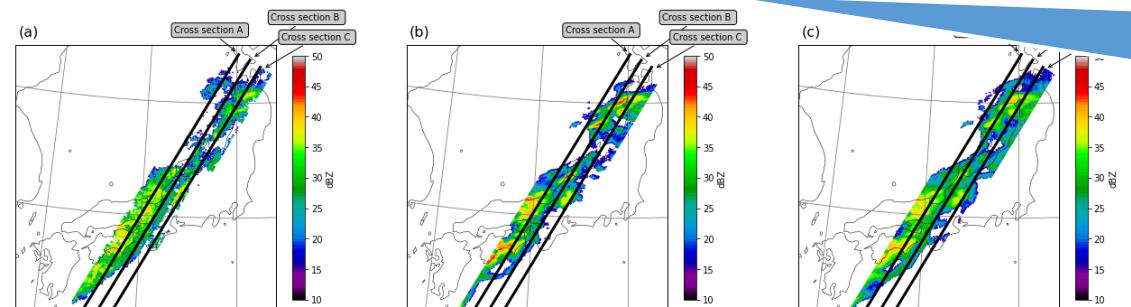
Morrison et al. 2020

GPMを用いた検証とスキームの改良

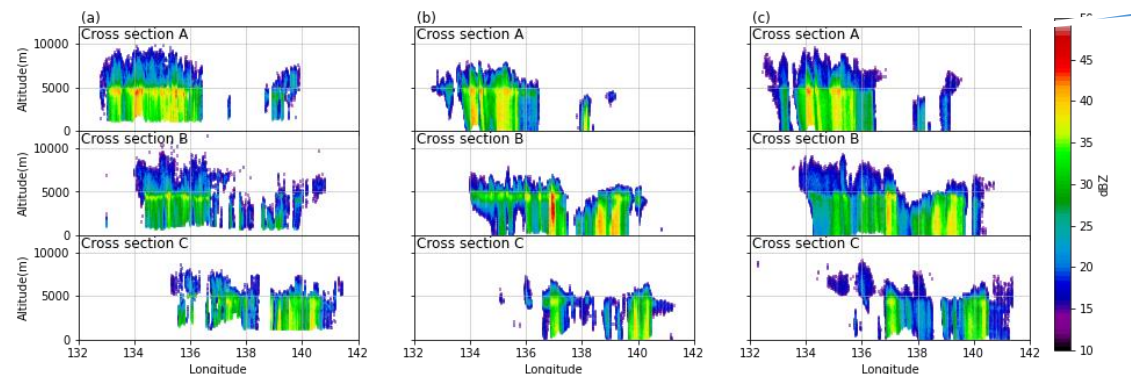
GPM/GMI(89GHz)
雲氷の水平分布



GPM/KuPR(13.6GHz)
降水の水平分布



GPM/KuPR(13.6GHz)
降水の鉛直分布



輝度温度は、RTTOV-SCATTを利用、反射強度はDPRシミュレーター(Ikuta et al. 2020)を利用してシミュレーション

検証によって旧スキームの問題点を抽出。上層の雲氷と下層の雨が過少であることがわかった。

検証結果を基にスキームを改良することで予測が改善した。

DPRシミュレーター

- 対象粒子
 - 雲水、雨、雲氷、雪、霰
- 散乱計算
 - 雲氷、雪 : DDA
 - 雲水、雨、霰 : Mie
 - 降雨減衰あり

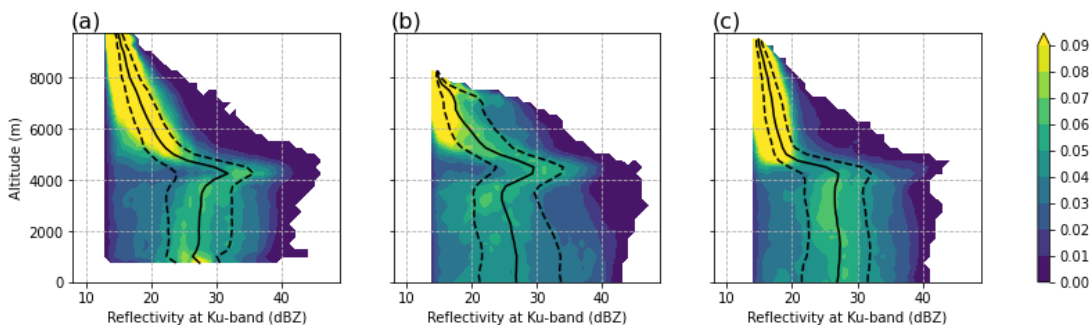
GPMを用いた検証とスキームの改良

観測

旧スキーム

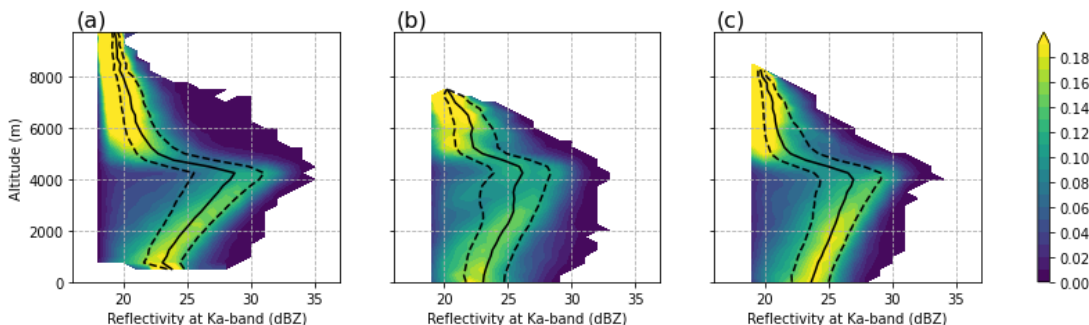
新スキーム

GPM/KuPR(13.6GHz)



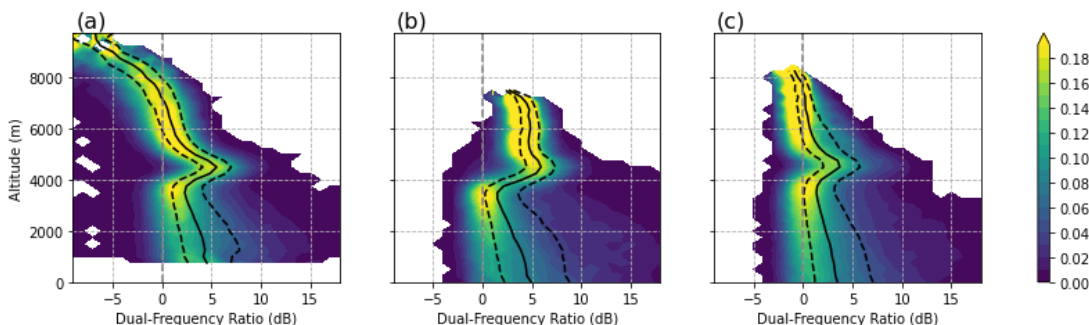
旧スキームの予測は上層と下層でバイアスが大きい。新スキームでは改善。

GPM/KuPR(35.5GHz)



旧スキームの予測は融解層以下で過少。新スキームでは改善。

DFR (KuPR-KaPR)



旧スキームでは上層で差が大きい（霰が多いことが原因）。

水物質の分布以外の予測も改善
2020年3月MSMに導入（Ikuta et al. 2020）

偏波パラメータを用いた検証

粒子を楕円体とみなす。

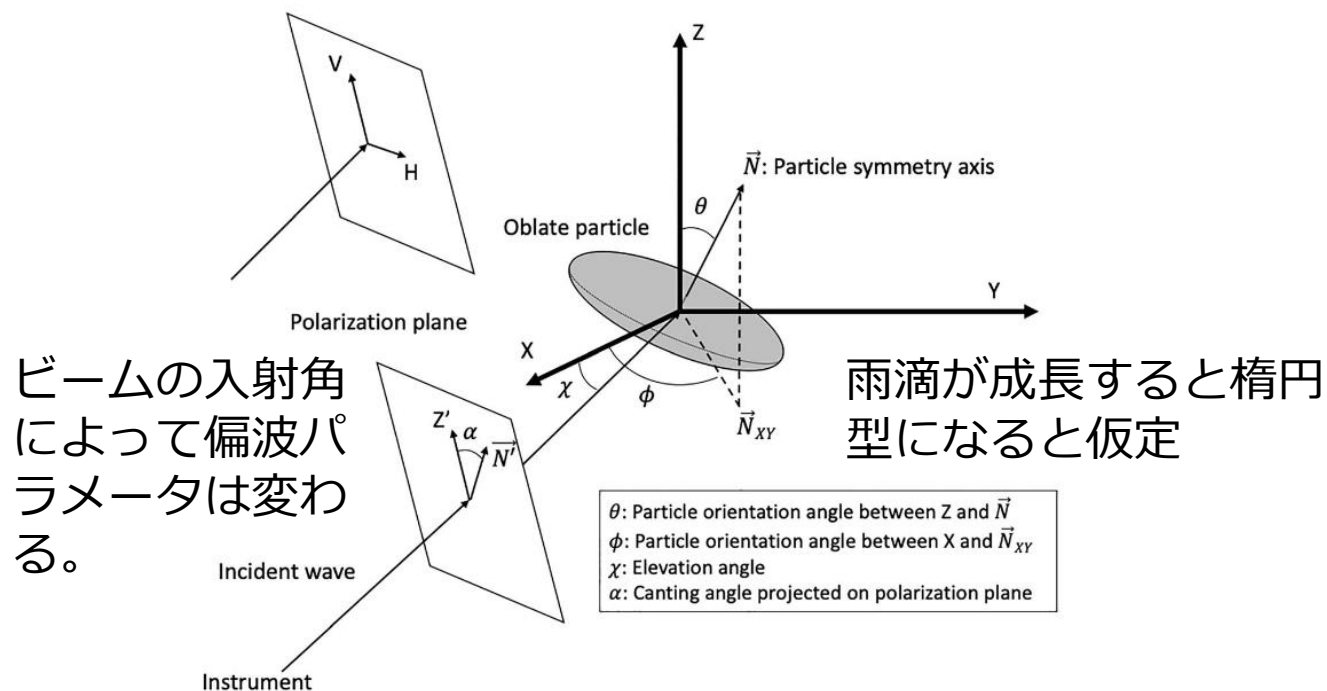


Figure 1. Scattering geometry of an oblate particle with a specific orientation direction ($\vec{N}$) within a Cartesian coordinate (X, Y, and Z). $\vec{N}_{XY}$ is the projection of $\vec{N}$ on the X-Y plane. $\vec{N}'$ and $\vec{Z}'$ are the projections of $\vec{N}$ and the Z axis on the polarization plane. V and H are the linear polarization base vectors. Adapted from Vivekanandan et al. (1991).

• 交通運輸技術開発推進制度

- 「関東圏の航空機の効率的な運航のための極端気象予測の高度化」
- 東大AORI 班
 - 佐藤正樹、久芳奈遠美、Woosub Roh、松岸修平、幾田泰醇（外来研究員・気象研）、清木達也（JAMSTEC）
- 東北大 班
 - 伊藤純至、臼井健（東北大理・院生）、吉村遼（東北大工流体研・院生）、吉野勝美（元ANA）

（敬称略）

PORALLIS（偏波レーダーシミュレータ：Matsui et al. 2019）

2019-09-08 1800UTC
PPI 0.7deg

成田空港二重偏波レーダー

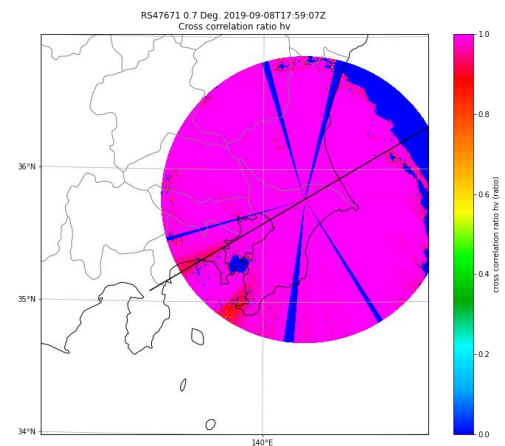
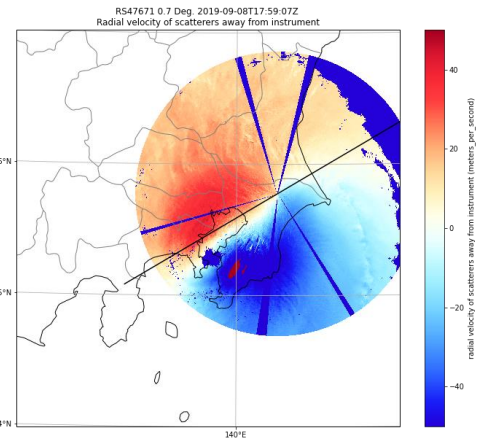
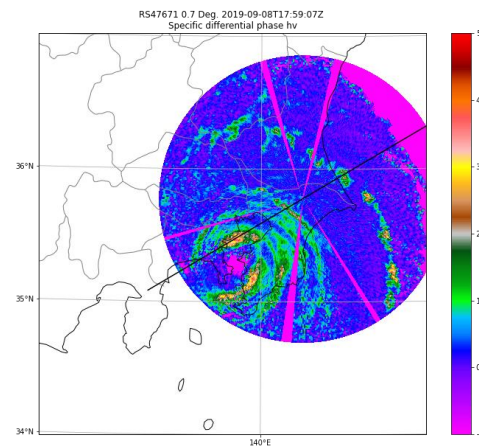
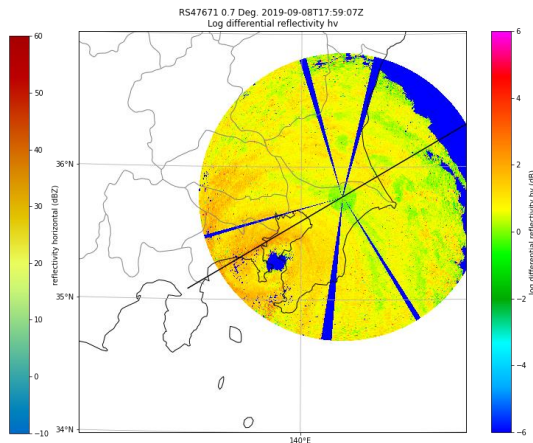
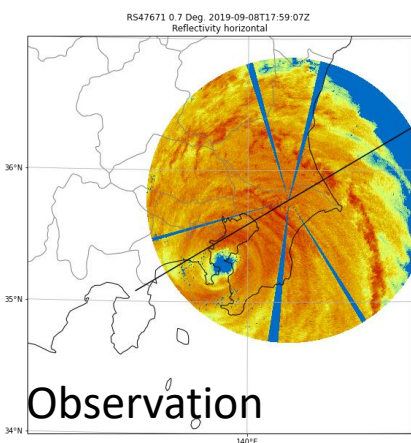
水平偏波反射因子

反射因子差

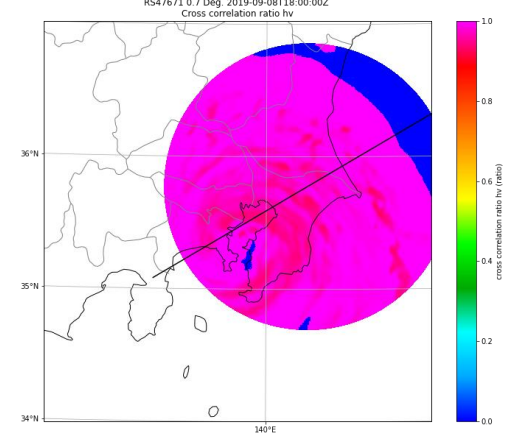
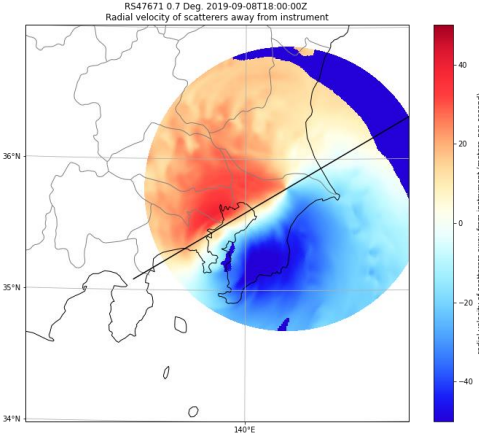
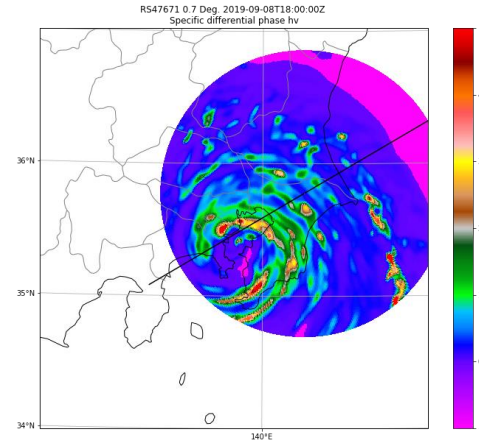
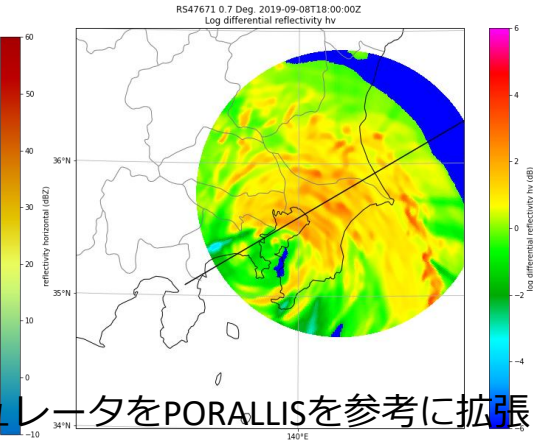
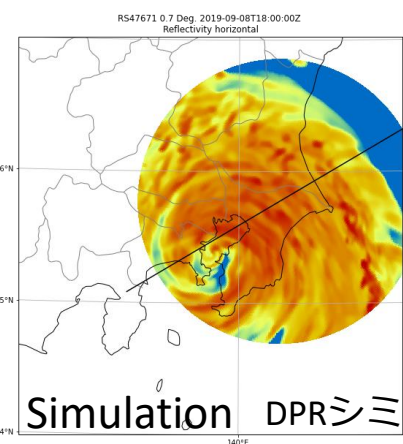
偏波間位相差変化率

ドップラー速度

偏波間相関係数



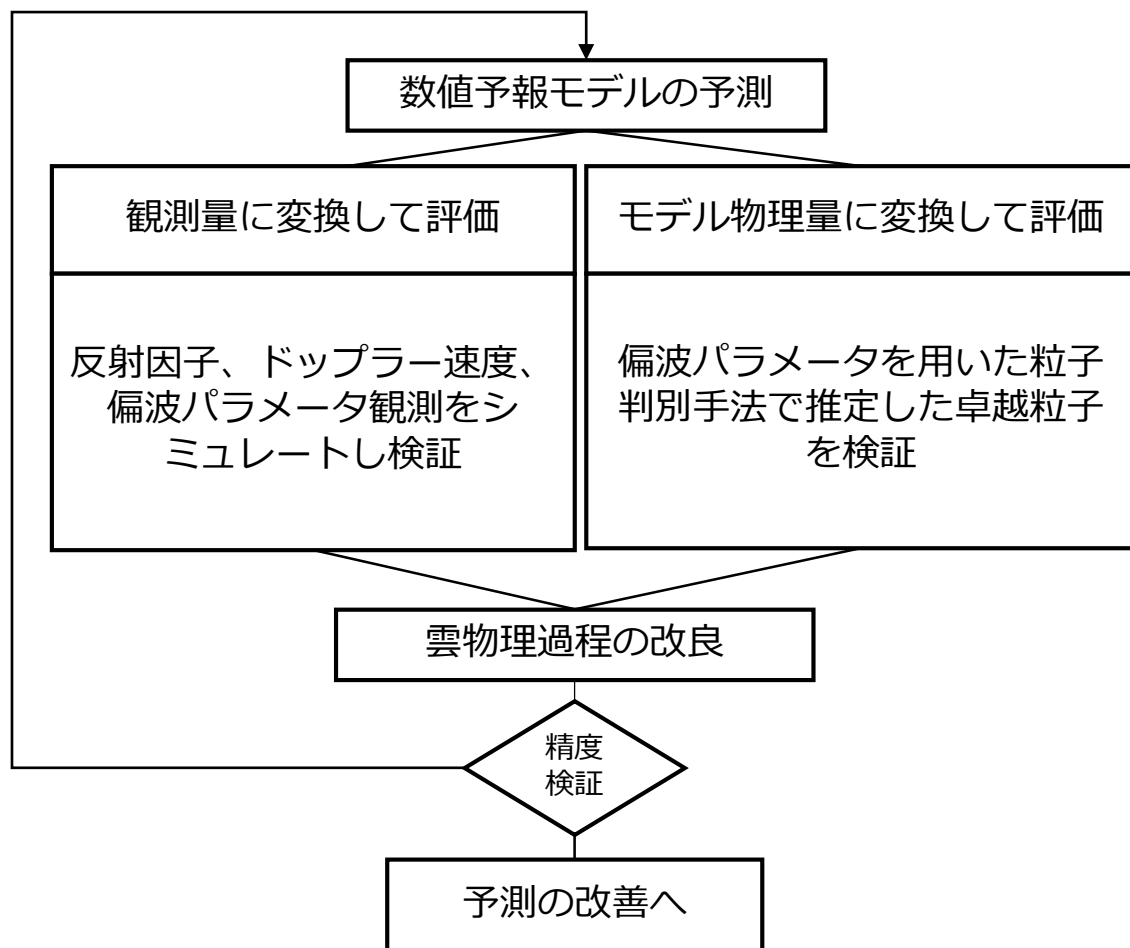
モデルのほうが粒子が大きい？



DPRシミュレータをPORALLISを参考に拡張

モデルの粒径分布や卓越粒子種別を調査中 → モデルの改良へ

モデル高度化の研究開発フロー



1. モデルの検証による問題点抽出

- 観測量に変換して評価
 - 反射強度、ドップラー速度、偏波パラメータの比較
- モデルの物理量に変換して評価
 - 卓越粒子の比較

2. 問題解決に向けた開発

- 雲物理過程の改良
 - 液相：偏波パラメータを基に雨粒子の粒径分布やプロセスの改良
 - 氷相：粒子判別結果を基に氷・雪・霰間の変換プロセスを改良

3. 予測精度の検証

- 精度向上が確認できない場合、研究開発フローを再実行

データ同化

メソ解析で同化している観測の Degrees of Freedom for Signal (DFS)

DFS: Chapnik et al. (2006)

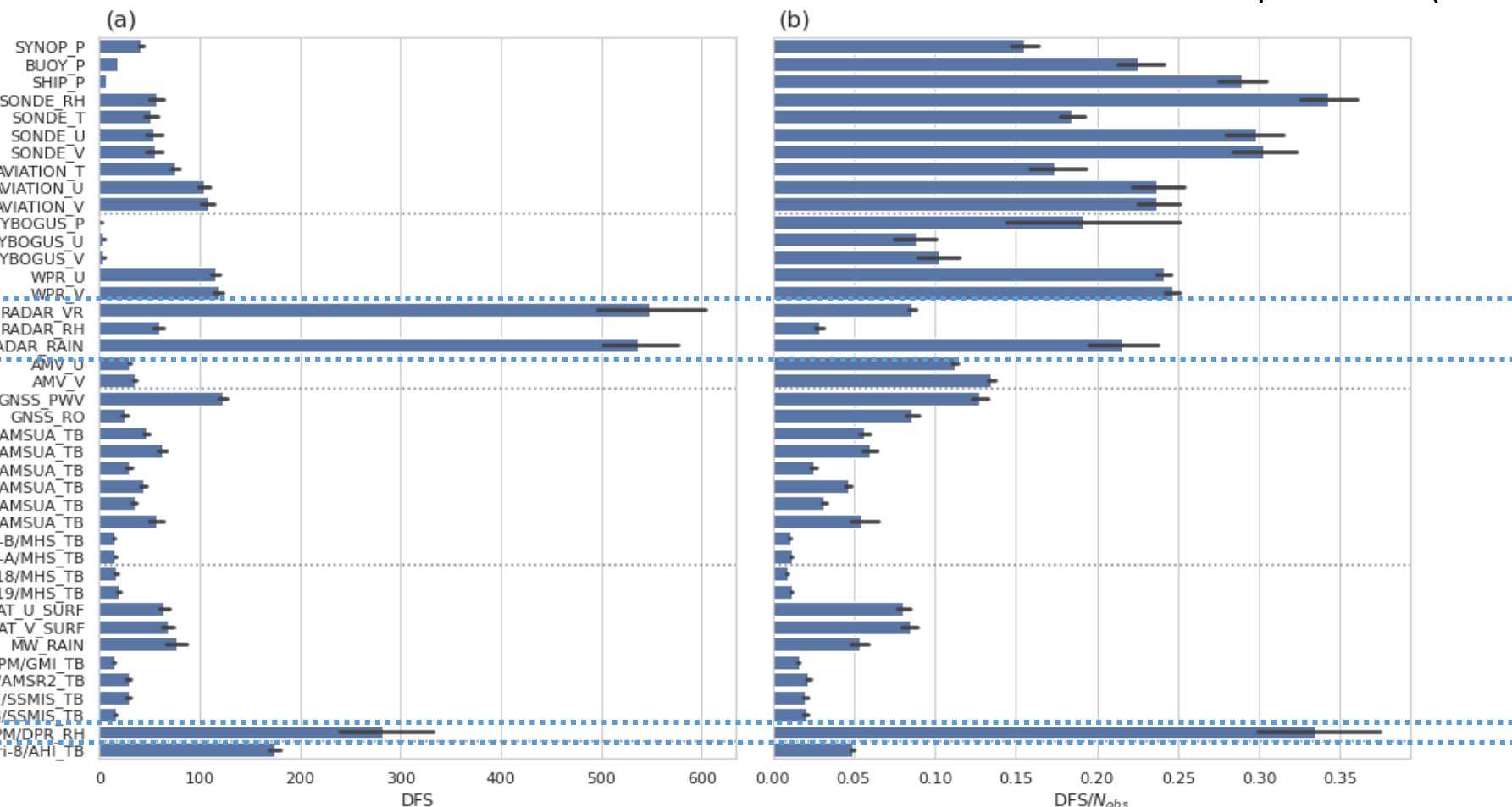
レーダー観測の
インパクトが大きい。

ドップラー速度

反射強度 (RHで同化)

解析雨量

GPM/DPR(RHで同化)



観測一つ当たりのDFS

レーダー同化

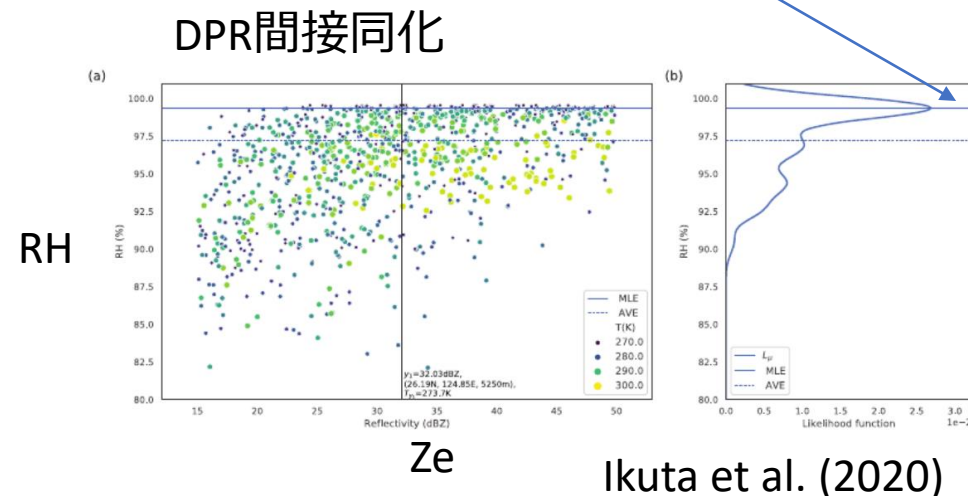
モデルのZe-RHの関係を基に、Ze観測からRHを推定

- 現状

- ドップラー速度
- 反射強度（RHプロファイルとして同化）
 - 地上レーダー、GPM/DPR
- 降水量

- 課題

- 短時間予測（LFM）用に潜熱ナudging
- 反射強度直接同化
 - 水物質を制御変数に追加
 - 流れに依存する背景誤差の導入
 - 接線形雲物理過程の導入



「JAXA 第2回地球観測研究公募」幾田、岡本室長（気象研）でGPM/DPR同化の研究開発を進めている。

GPM 潜熱加熱プロダクト (SLH)

高薮先生、横山さん、辻さん(AORI)、濱田先生(富山大)、
重先生(京都大)、山地さん(JAXA)

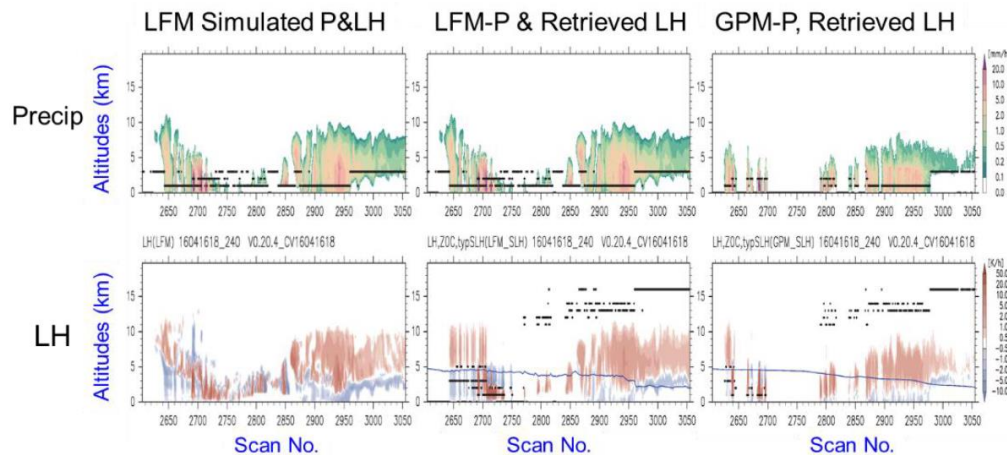
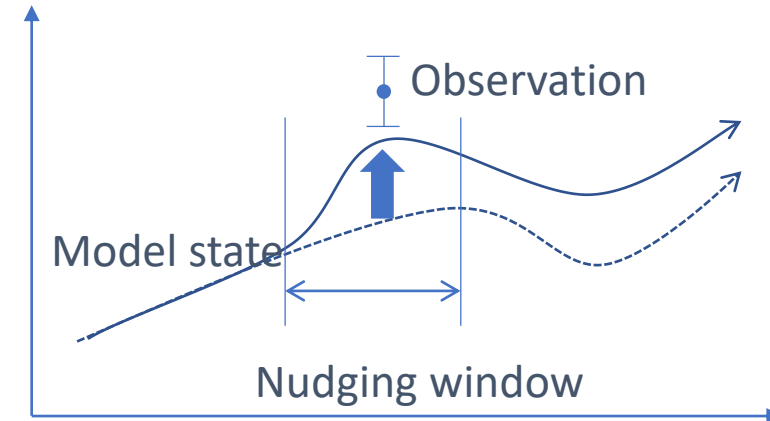


Fig. 10: Simulated and (LFM- & GPM-) retrieved LH along the GPM orbit shown in Fig. 9.

https://www.eorc.jaxa.jp/GPM/doc/algorithm/GPM_SLH_V06B_ATBD_20200706_fin.pdf

SLH Nudging



Gradual relaxation of the model state $\mathbf{x}$ toward the observation $\mathbf{y}$

Nudging term using Kalman gain (Lei et al. 2015).

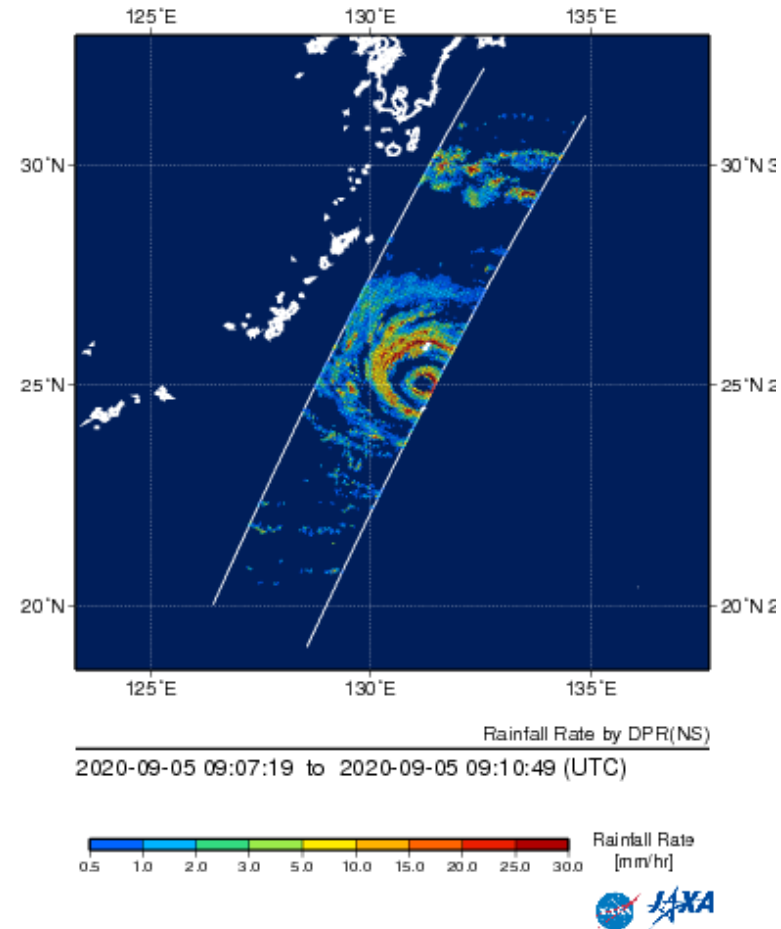
$$\frac{d\mathbf{x}}{dt} = f(\mathbf{x}) + C_n \mathbf{K} \cdot [\mathbf{y} - \mathcal{H}(\mathbf{x})]$$

$$\mathbf{K} = \mathbf{P}^f \mathbf{H}^T (\mathbf{R} + \mathbf{H} \mathbf{P}^f \mathbf{H}^T)^{-1}$$

$f(\cdot)$: Tendency function

C_n : Nudging coefficient

GPM/DPR

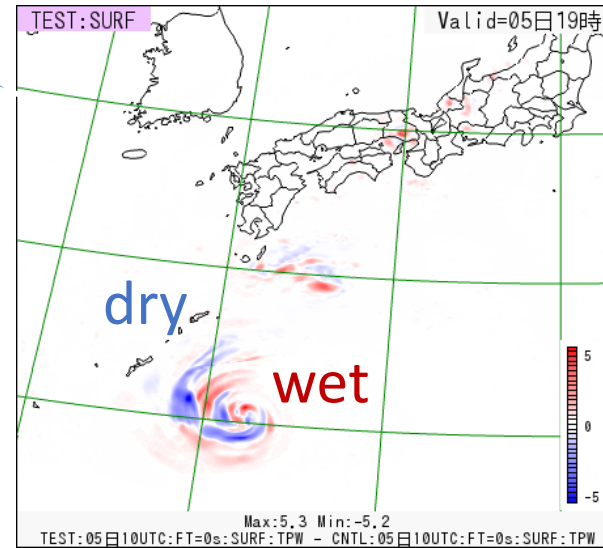


CONTROL: Exp. same as operational LFM.
TEST: CONTROL with SLH nudging.

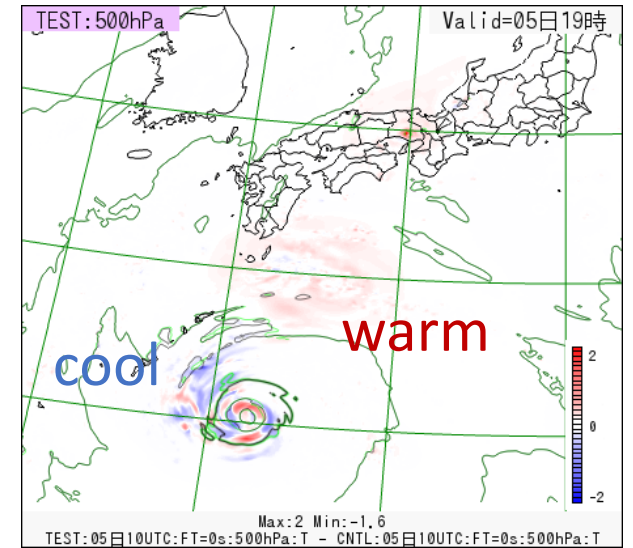
局地解析

潜熱加熱
ナudging

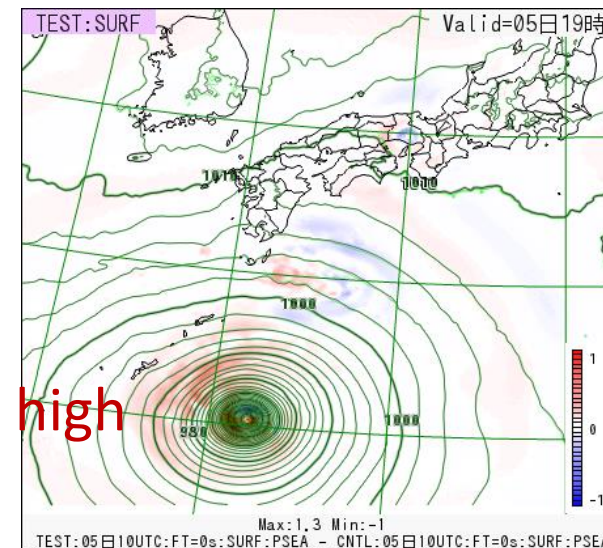
LFMの初期値: TEST(SLHあり)ーCONTORL(SLHなし)



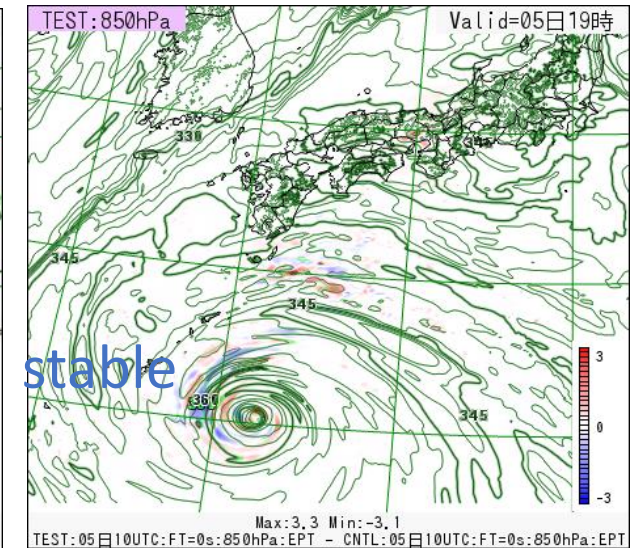
Total precipitable water



Temperature at 500 hPa



Sea level pressure

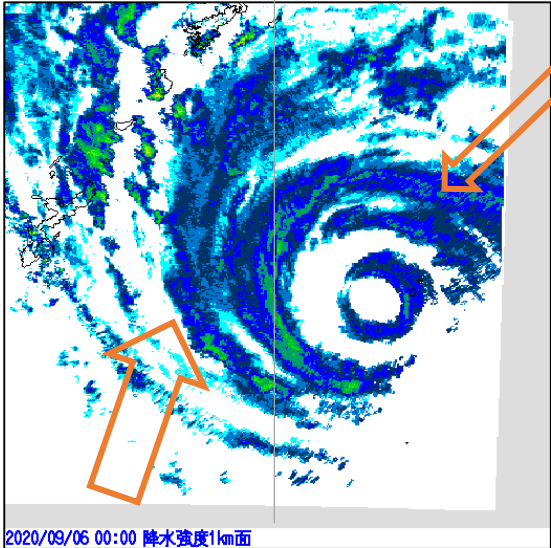


EPT at 850 hPa

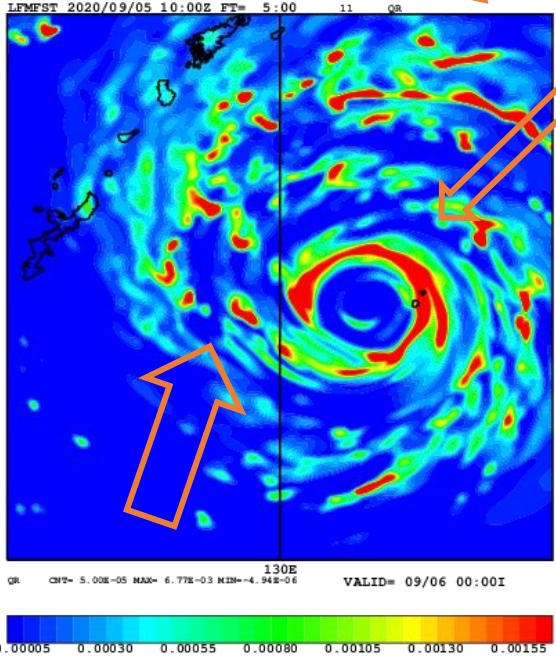
INIT: 2020-09-05 10:00UTC
Lead time = 05-hour
VALID: 2020-09-05 15:00UTC

LFMは、多重眼を再現できていない。
(今一步といった感じだが...)

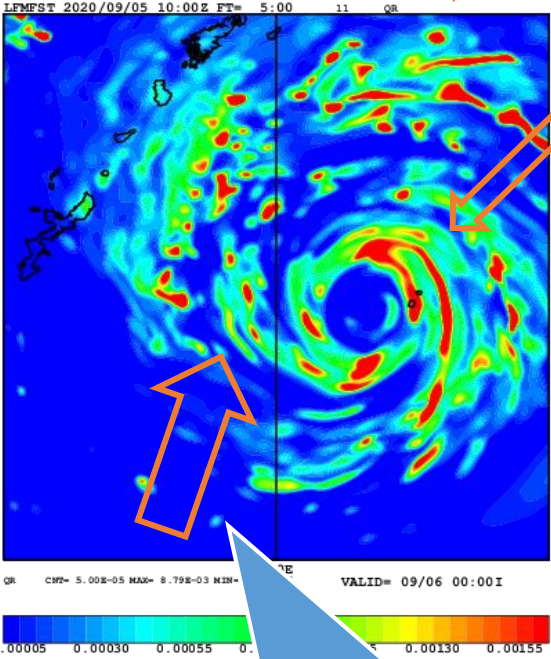
Precipitation intensity at alt.=1 km
by ground-based radar



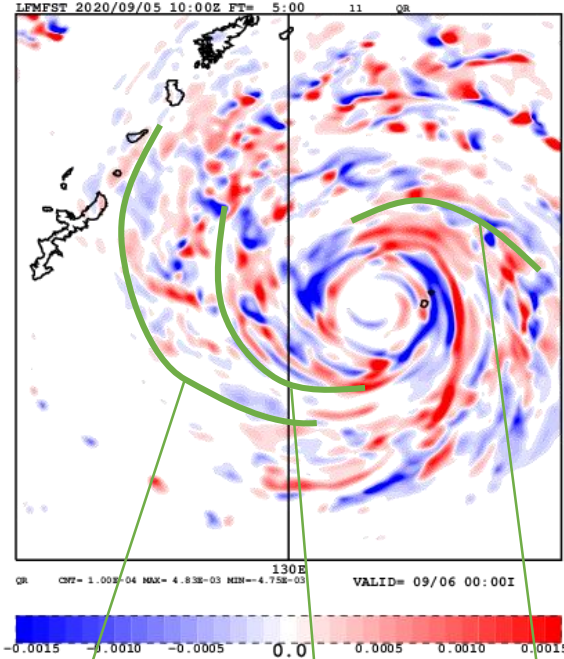
CONTORL: Qr at alt.=1 km



TEST: Qr at alt.=1 km



TEST-CONTROL: Qr at alt.=1 km

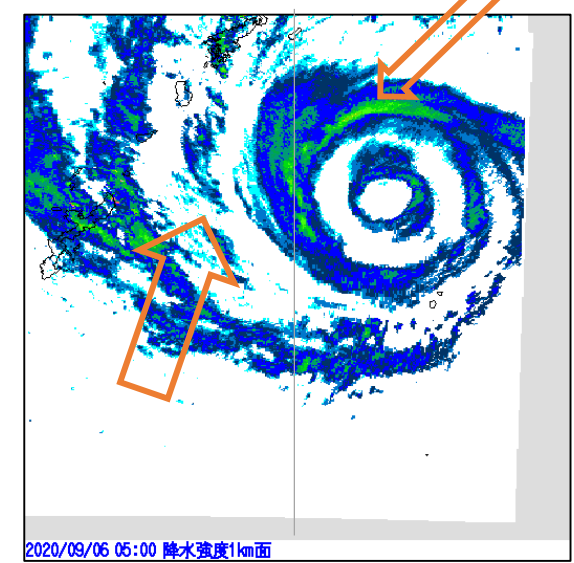


A B C

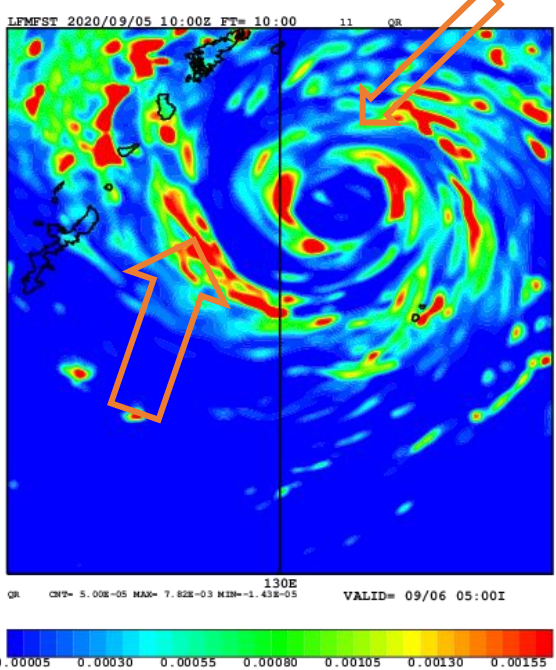
SLHナッジングでレインバンド
BとCは観測に近づいている。

INIT: 2020-09-05 10:00UTC
Lead time = 10-hour
VALID: 2020-09-05 20:00UTC

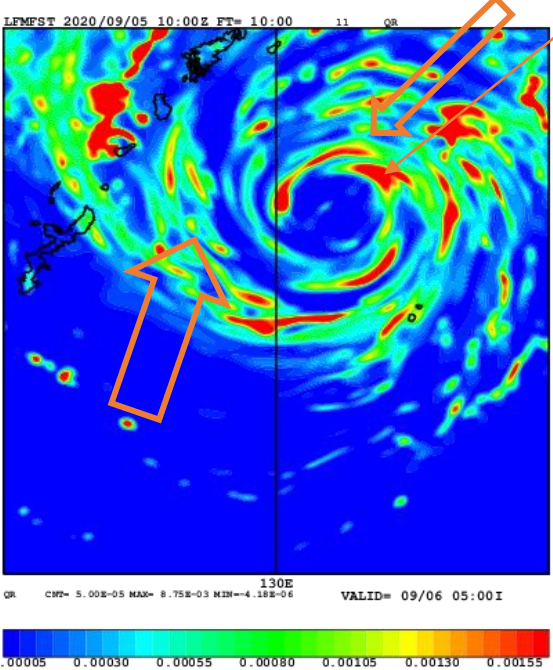
Precipitation intensity at alt.=1 km
by ground-based radar



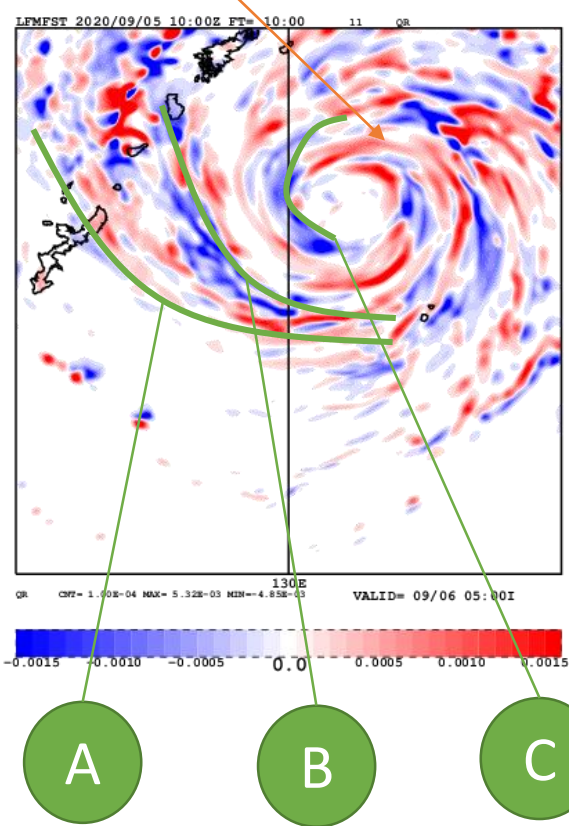
CONTORL: Qr at alt.=1 km



TEST: Qr at alt.=1 km



TEST-CONTROL: Qr at alt.=1 km



TESTではレインバンドA,B,Cの予測は観測に近づいた。
しかしSLHナッジングは台風の進路を変えるほどの威力はない。

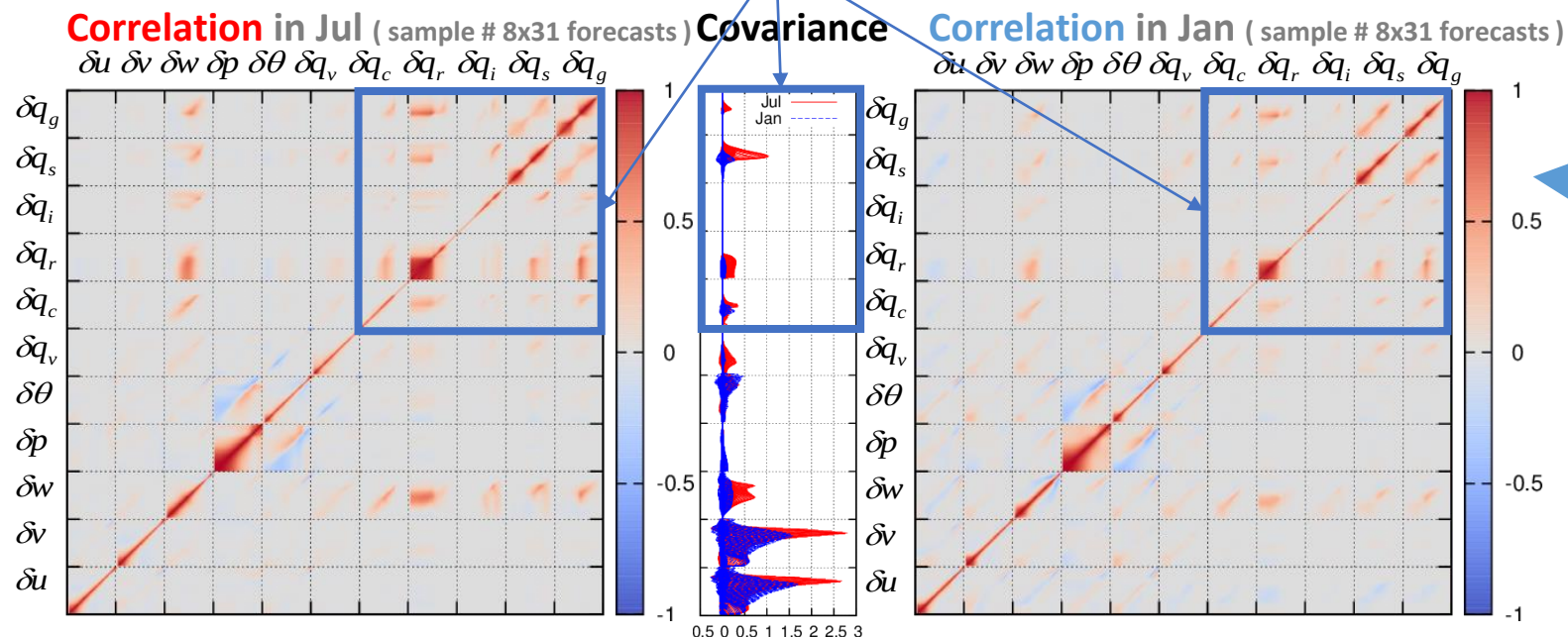
壁雲の降水が強くなっている。

反射強度直接同化

水物質の制御変数化には、水物質背景誤差が必要

水物質の背景誤差

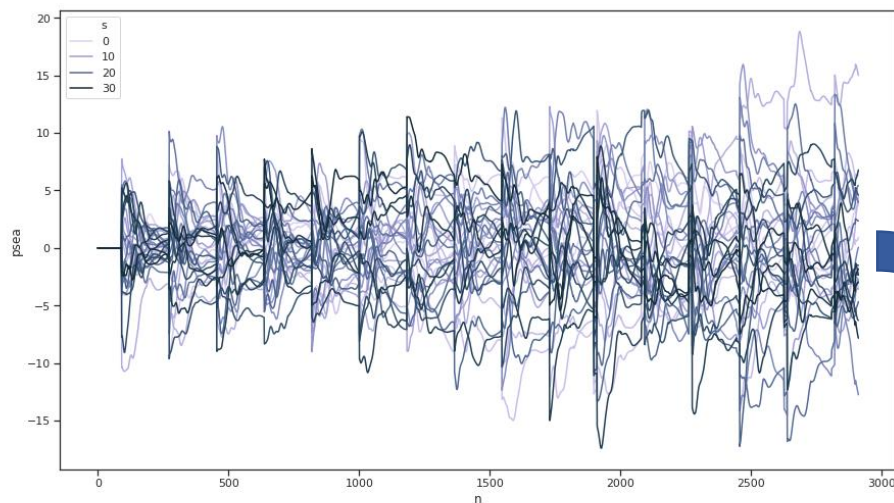
$$\mathbf{B}_{NMC} = \langle \mathbf{x}_{6h} - \mathbf{x}_{3h}, (\mathbf{x}_{6h} - \mathbf{x}_{3h})^T \rangle$$



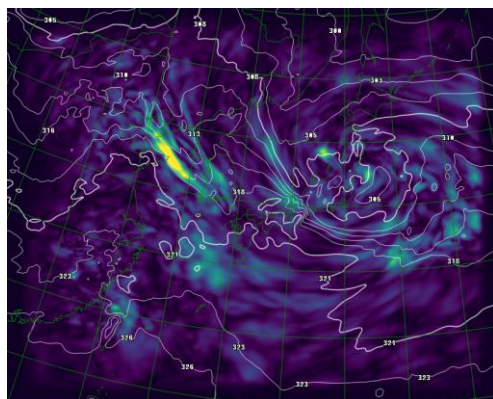
水物質の背景誤差は、気象場の影響が大きい。流れに依存する背景誤差を導入すべき。

データ同化のアンサンブル(EDA)を利用した Hybrid-4DVAR

メソ解析のEDA 30メンバー



σ_{Ens}



• 流れに依存した背景誤差の導入

- 拡張制御変数法 (Lorenc 2003)
- アンサンブル摂動
 - EDA : PO法
 - メソアンサンブル

気候学的背景誤差

$$J = \frac{1}{2} \beta_n^2 (\mathbf{x}_n - \mathbf{x}_{n0})^T \mathbf{B}_{NMC}^{-1} (\mathbf{x}_n - \mathbf{x}_{n0}) + \frac{1}{2} \beta_e^2 (\mathbf{x}_e - \mathbf{x}_{e0})^T \mathbf{B}_{ENS}^{-1} (\mathbf{x}_e - \mathbf{x}_{e0}) + \frac{1}{2} \sum_t (H_t(\mathbf{x}_0) - y_t)^T \mathbf{R}^{-1} (H_t(\mathbf{x}_0) - y_t)$$

アンサンブル予測から
求めた誤差共分散

令和2年7月豪雨事例

Hybrid-4DVarのインパクトを示す。
(レーダーは間接同化のまま)

予報時間 24時間

解析雨量

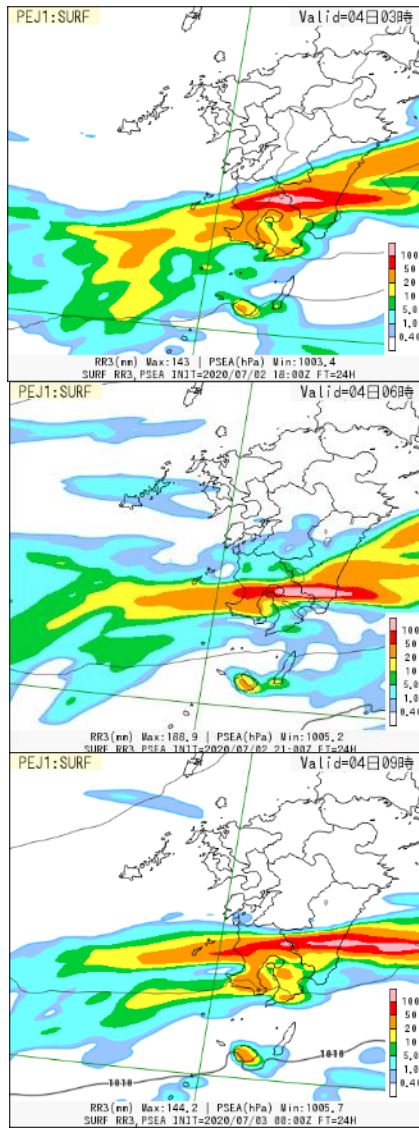
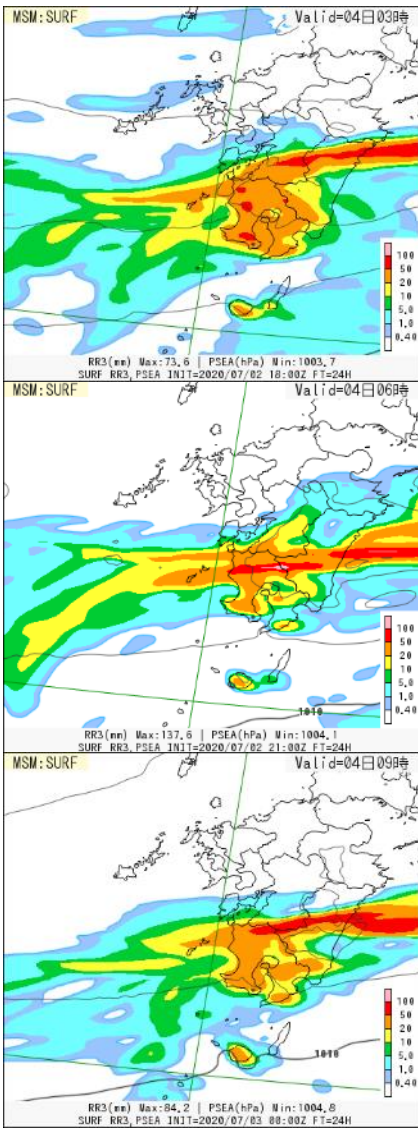
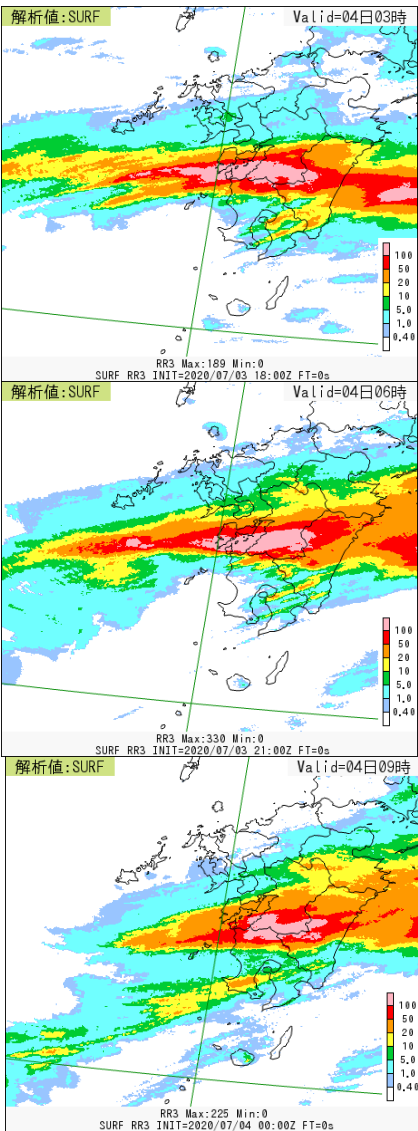
MSM

hybrid-4DVar w/ EDA(30)

対象時刻 7/3 18UTC

対象時刻 7/3 21UTC

対象時刻 7/4 00UTC



どの対象時刻でも位置ずれはあるが降水量は実況に近づいている。

令和2年7月豪雨事例

予報時間 12時間

対象時刻 7/3 18UTC

対象時刻 7/3 21UTC

対象時刻 7/4 00UTC

解析雨量

MSM

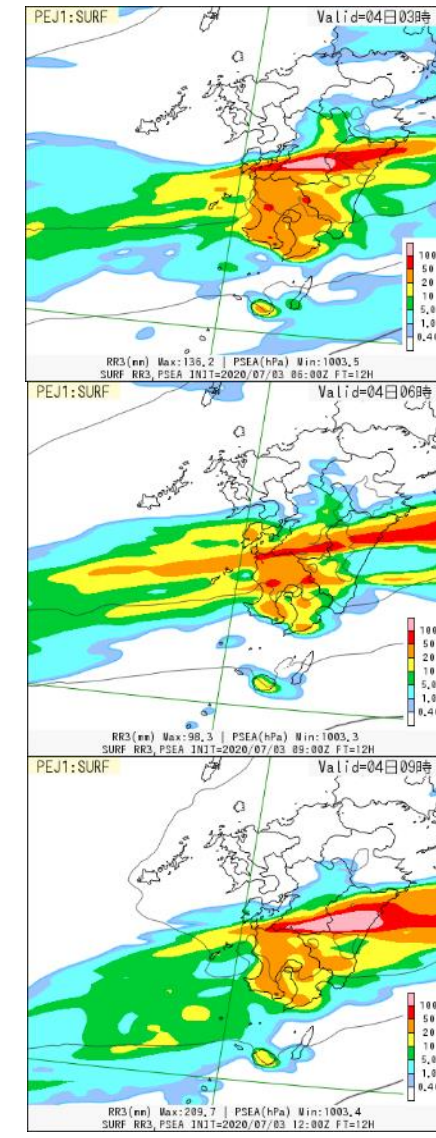
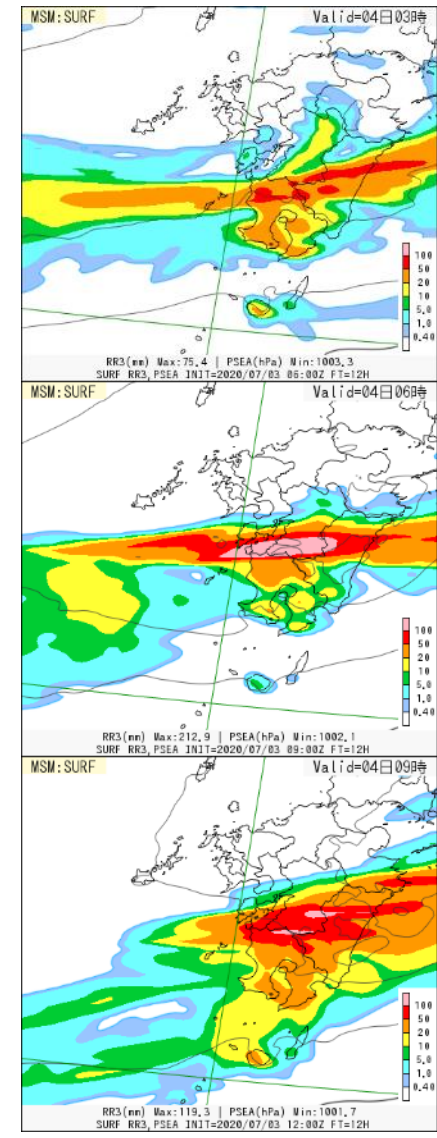
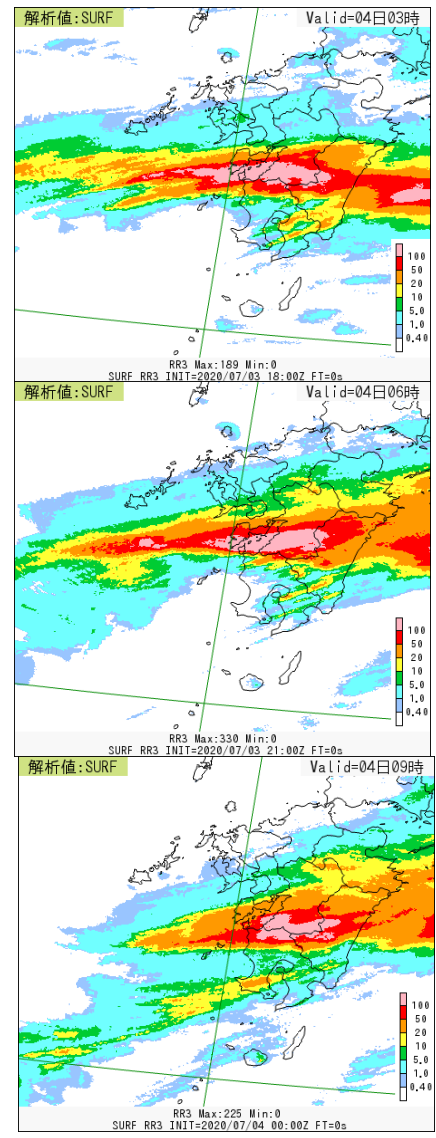
hybrid-4DVar w/ EDA(30)

Hybrid-4DVarのインパクトを示す。
(レーダーは間接同化のまま)

実況に近づいている。

この時刻は負けている。残念...

実況に近づいている。



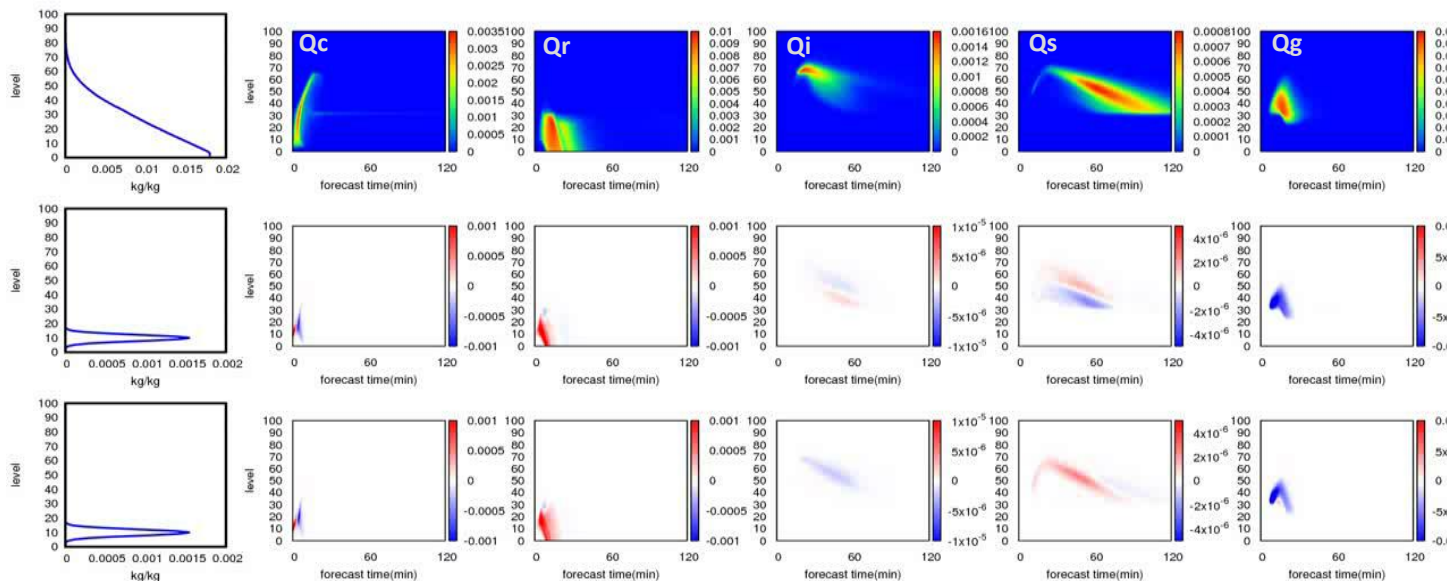
雲降水観測の直接同化

さらに予測精度を上げるために
同化手法の高度化を行う。

接線形雲物理過程が必要

Init. of Q_v

Single column TL/AD model based on KiD. (KiD, Shipway and Hill (2012))



$\mathcal{M}_t(x_0)$ 非線形モデル

$\mathcal{M}_t(x_0 + \delta x) - \mathcal{M}_t(x_0)$ 非線形モデルの差分

$\mathbf{M}_t \delta x$ 接線形モデル

接線形モデルの摂動と非線形モデルの差が乖離していない。
線形モデルでも意味のある情報を伝達できると期待。

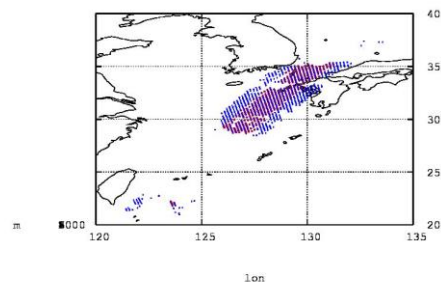
雲降水を捉えた反射強度（や輝度温度）観測を同化することで水物質の分布を修正する。モデルの拘束によって水蒸気や気温も修正される。

事前調査：試験的にDPRのみ直接同化した場合の解析インクリメント

GPM/DPRのインパクト

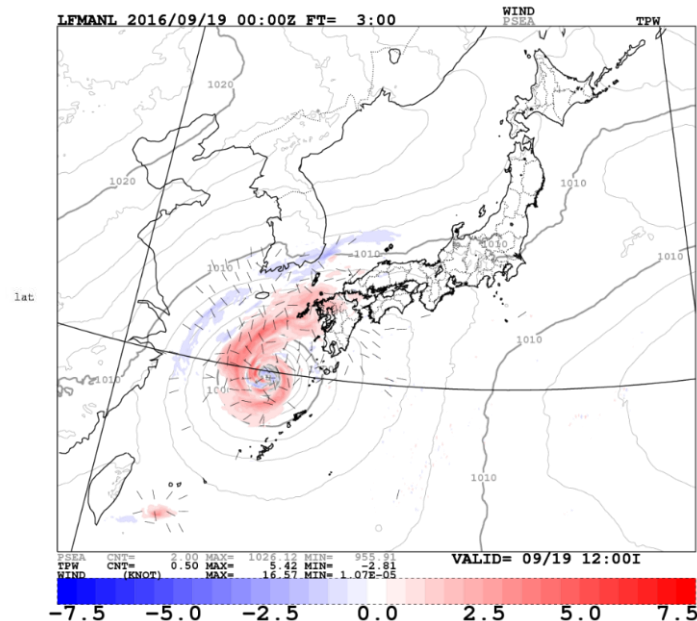
observation

- KaPR(35.5GHz)
- KuPR(13.6GHz)



Traditional DA

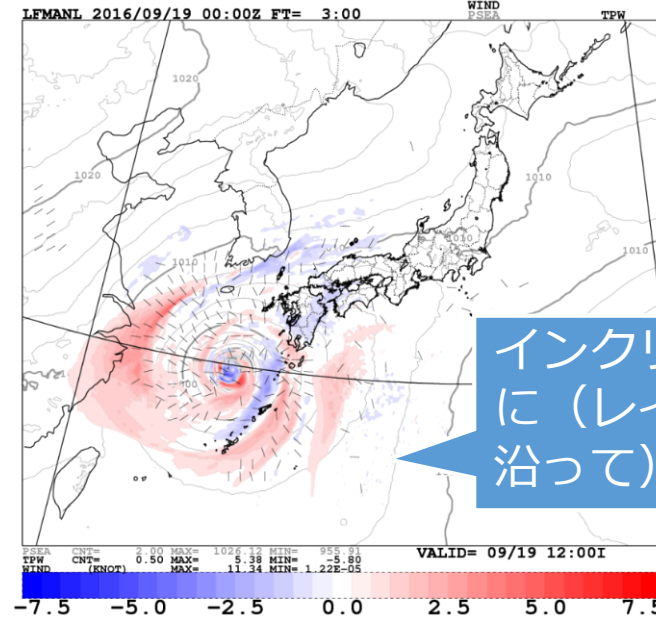
Climatological(100%)+Ensemble(0%)



Color shade: Total Precipitable Water
Barbs: Surface Wind

Hybrid DA

Climatological(50%)+Ensemble(50%) Nens: 12+1



Localization radius was set to 300 km.

インクリメントが広域に（レインバンドに沿って）広がる

雲降水に関する観測の同化の高度化によって、降水系の予測精度のさらなる向上が期待できる
→ 豪雨防災の高度化

現業数値予報システムへ

- 雲降水過程に関してモデルと同化は密接に関係する。
 - 予測できない観測量を同化しても予測は改善しない。
 - モデルを改良してバイアスを減らすことができれば最良
 - モデルだけチューニングしても解析予報サイクルしなければ真のパフォーマンスは測れない。
- 各研究成果を融合し予測精度を向上させる。
 - モデル開発と同化開発の同期が重要。
 - 非静力学モデルasucaを基にした変分法同化システム（asuca-Var）では、両者の同期が設計理念の一つとなっている。
 - asuca-Varは2020年3月にメソ解析で運用開始（Ikuta et al. 2020）。

まとめ

EarthCAREにも期待。またレーダーや衛星に限らず、モデルの参照値となるような観測データは可能な限り利用したい。

• 課題：モデルの検証と改良

- レーダー、衛星観測の精緻なシミュレーション（同化では観測演算子）
 - Joint-simulator, RTTOV, レーダーシミュレーターを活用
 - シミュレーションと観測を比較しプロセス研究を進める
 - シングルカラムモデルや高解像度モデルなど理想実験を活用
- スキームを改良し雲降水予測のバイアス低減

• 課題：データ同化

- 雲降水予測のバイアス低減（かなり重要）
 - 流れに依存した背景誤差導入
 - アンサンブルデータ同化とHybrid-4DVarの導入
 - 接線形雲物理スキームの精度向上
- 反射強度（+雲域輝度温度）の直接同化

将来的に対流スケールを対象とする場合、実直な方法だと莫大なメンバー数が必要になるので現業システムに導入するには何らかのブレークスルーが必要。

ご清聴ありがとうございました。