第7回気象庁数値モデル研究会
第4回データ同化ワークショップ

気象庁現業全球データ同化システムの現状と高度化に向けた開発

気象庁予報部数値予報課
太田洋一郎、門脇隆志

気象庁の主な数値予報システムの概要（短期～週間予報）

	局地	メソ	全球	週間アンサンブル	台風アンサンブル
目的	航空気象情報 （防災気象情報）	防災気象情報 航空気象情報	週間天気予報 府県天気予報 航空気象情報 台風予報	週間予報	台風予報
予報領域	日本周辺 (3160 km x 2600 km)	日本周辺 (4080 km X 3300 km)		地球全体	
水平解像度	2 km	5 km	0.1875°（~20 km)	0.5625°（~55 km)	
鉛直層 (上端高度)	60 層 (約20 km)	50 層 (約22 km)		60 層（0.1 hPa）	
予報時間 (初期時刻)	9 時間 (毎正時)	39時間 (00, 03,06, 09,12,15,18,21 UTC)	84 時間 (00, 06, 18 UTC) 264 時間 (12 UTC)	264 時間 (12 UTC)	132 時間 (00,06,12,18 UTC)
予報モデル	局地モデル(LFM)	メソモデル(MSM)	全球モデル(GSM)	GSM＋確率的物理過程強制法	
解析システム	局地解析 (3次元変分法)	メソ解析 (4次元変分法)	全球解析 (4次元変分法)	全球解析 +特異ベクトル法による初期摂動作成	
メンバー数	-	-	-	51	11

全球予報・アンサンブル予報の改善計画（短期）

- 高解像度GSM
  - TL959L60（トップ0.1hPa）→TL959 **L100（トップ0.01hPa）**

    物理過程計算の高精度化

    衛星データ（GNSS掩蔽、AMSUA成層圏チャンネル等）の有効利用

    成層圏の精度向上

  予報精度の大幅な改善が期待される。
- アンサンブル予報
  - 週間：TL319L60M51→**TL479 L60 M27×2/day**

    府県程度で地域特性を考慮できるように

    顕著現象の予測精度を向上
  - 台風：TL319L60M11→**TL479 L60M25**

    台風進路の信頼度情報の精度向上（メンバー数増）

    台風に伴う顕著現象の予測精度を向上

  水平高解像度化により、顕著現象に関する早期警戒情報支援を狙う

  その後、鉛直層増強、週間・台風・2週先アンサンブル予報を生成するEPS（統合EPS）の現業化を目指し、開発効率を高める

解析予報サイクルスケジュール

全球解析

速報解析 (EA)

予報のための解析

サイクル解析 (DA)

解析精度維持のための解析

メソ解析 (MA)

全球解析からほぼ独立

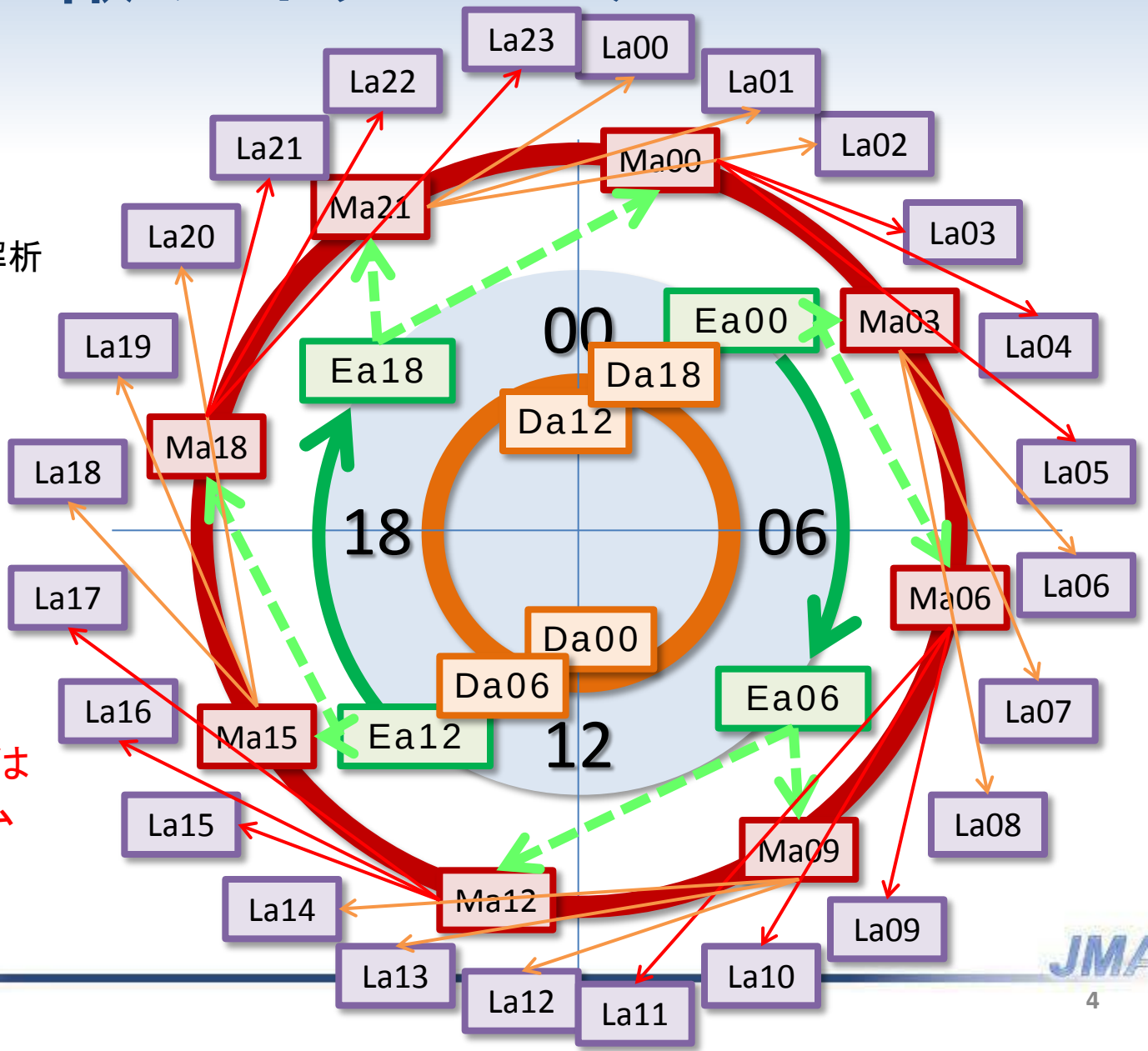
ただし境界条件はEfから

局地解析 (LA)

Maからデータを引き継ぐ

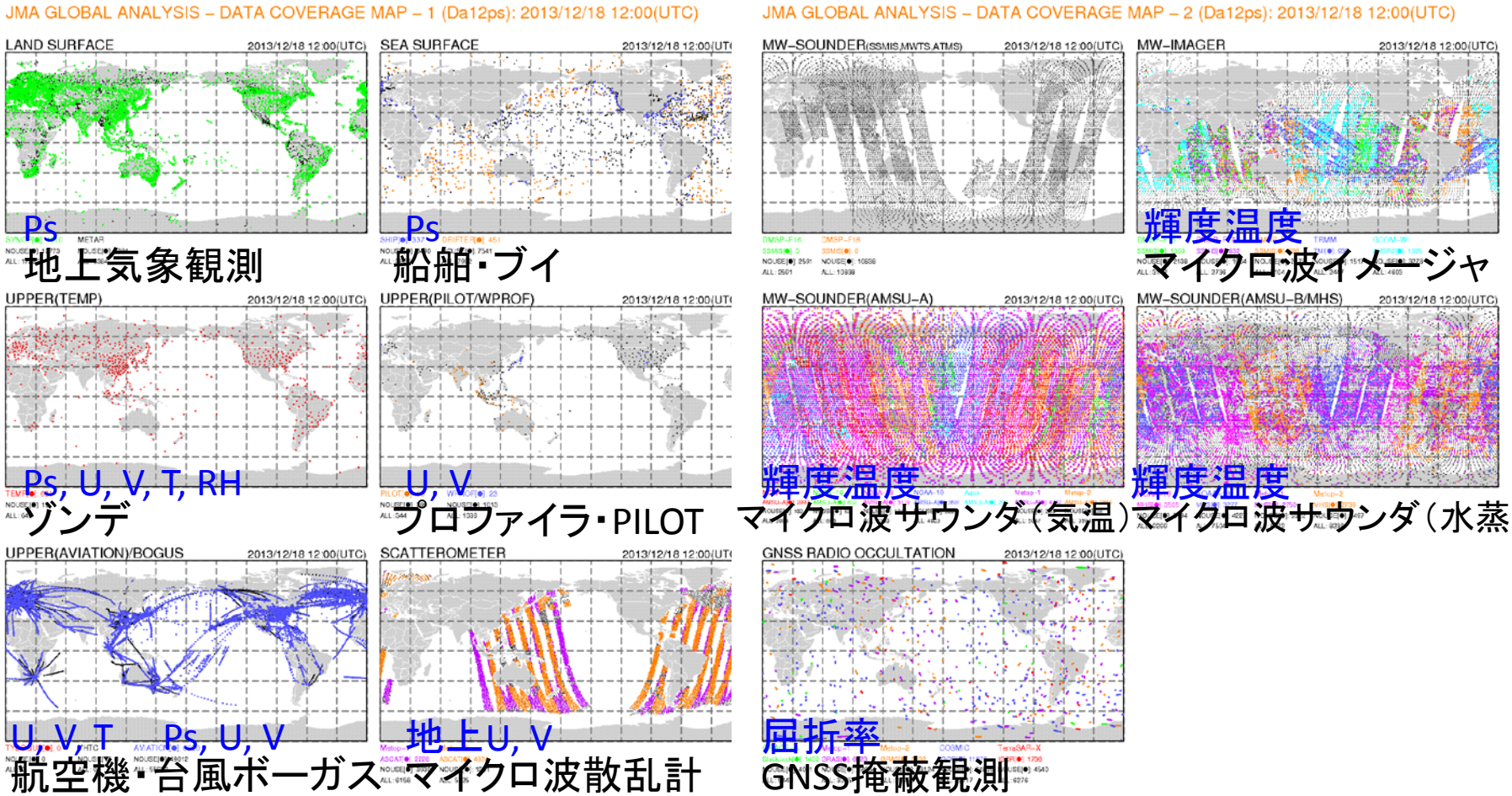
3時間前から解析するので、

-3hrより前のMa



全球解析予報サイクルは多くの数値予報システムの基盤となるシステム

データ同化に利用している観測（Da）



Ps
地上気象観測

Ps
船舶・ブイ

輝度温度
マイクロ波イメージャ

Ps, U, V, T, RH
ゾンデ

U, V
プロファイラ・PILOT

輝度温度
マイクロ波サウンダ（気温）

輝度温度
マイクロ波サウンダ（水蒸気）

U, V, T　Ps, U, V
航空機・台風ボーガス

地上U, V
マイクロ波散乱計

屈折率
GNSS掩蔽観測

U, V
大気追跡風

輝度温度
晴天赤外輝度温度

2013年12月18日12UTCの全球サイクル解析に用いられた観測データの分布

青字は同化に用いられる観測要素

（Ps：地上気圧、U,V：東西・南北風、T：気温、RH：相対湿度）

4次元変分法と
アンサンブル・カルマンフィルタ

4次元変分法（4DVAR）

利点
- 拘束条件を課すことが容易
  e.g.) インクリメントにおけるバランスの規定、digital filter、etc

欠点
- 流れ依存の背景誤差の情報が解析サイクルにより引き継がれない
- TL/AD型の場合、接線形モデルの開発コストがかかる

アンサンブル・カルマンフィルタ（EnKF）

利点
- 流れ依存の背景誤差が解析サイクルにより引き継がれる
- 接線形モデルの開発コストがかからない。

欠点
- 限られたメンバー数を用いることによるサンプリング誤差

解析サイクルで引き継がれる流れ依存の背景誤差情報を活かしつつ、
サンプリング誤差の問題を軽減する方法として、両者のハイブリッド化がある。

- 解析本体は変分法により行う。
- 背景誤差はアンサンブルデータ同化によりアップデートする。
- （必要に応じて）変分法解析において気候学的背景誤差を併用する。

変分法とアンサンブルのハイブリッド

ハイブリッド化の方法

- アンサンブル生成法の違い
  - EnDA（観測/モデルに摂動を与えた複数の変分法解析）VS EnKF/ETKF系
- ハイブリッドの仕方
  - 背景誤差Bの直接操作 VS 拡張制御変数型（アンサンブル各メンバーの重みを制御変数とみなす）
  - 気候学的Bの併用の有無
- (4次元)変分法の構築の仕方
  - TL/ADによる時間発展 VS アンサンブル部分の4D化によるTL/ADなし4DVAR

赤字は本実験で採用した設定

主な現業全球数値予報センターの動向

	アンサンブル生成法	ハイブリッドの仕方	変分法	今後の開発
ECMWF	EnDA	背景誤差分散・相関の操作	4DVAR (TL/AD)	メンバー数増強を検討
UKMO	Local ETKF	拡張制御変数型・気候学的B併用	4DVAR (TL/AD)	メンバー数増強を検討
NCEP	Serial EnSRF	拡張制御変数型・気候学的B併用	3DVAR	アンサンブル部分の4D化によるTL/ADなし4DVARの検討
CMC	観測摂動型EnKF	拡張制御変数型・気候学的B併用	4DVAR (TL/AD)	アンサンブル部分の4D化によるTL/ADなし4DVARの検討
NRL	ETKF	拡張制御変数型・気候学的B併用	4DVAR (TL/AD)	FY2014現業化予定（現在は気候学的Bのみ）

本実験で用いた方法

Lorenc (2003)、Buehner (2005)の手法

$$J(\mathbf{x}',\alpha_1,\ldots,\alpha_k)=\frac{1}{2}\mathbf{x}'^{\mathrm{T}}\mathbf{x}'+\frac{1}{2}\sum_{k=1}^{K}\alpha_k^{\mathrm{T}}\alpha_k$$

$$+\frac{1}{2}\left[\mathbf{HM}\left(\beta_1\mathbf{B}^{1/2}\mathbf{x}'+\beta_2\sum_{k=1}^{K}\mathbf{X}_k'\circ\left(\mathbf{C}^{1/2}\alpha_k\right)\right)-\mathbf{y}'\right]^{\mathrm{T}}\mathbf{R}^{-1}\left[\mathbf{HM}\left(\beta_1\mathbf{B}^{1/2}\mathbf{x}'+\beta_2\sum_{k=1}^{K}\mathbf{X}_k'\circ\left(\mathbf{C}^{1/2}\alpha_k\right)\right)-\mathbf{y}'\right]+J_c$$

ただし、$\mathbf{B}$:（静的）背景誤差共分散、$\mathbf{H}$:観測演算子、$\mathbf{R}$:観測誤差共分散、$\mathbf{M}$:接線形モデル、$\mathbf{y}'=\mathbf{y}-H(\mathbf{x}_b)$:D値（$\mathbf{y}$:観測値）、$\mathbf{x}'$:（通常の変分法の）制御変数、$\alpha_k$:アンサンブルの各摂動の重み（拡張制御変数）、$\mathbf{X}'$:アンサンブル摂動

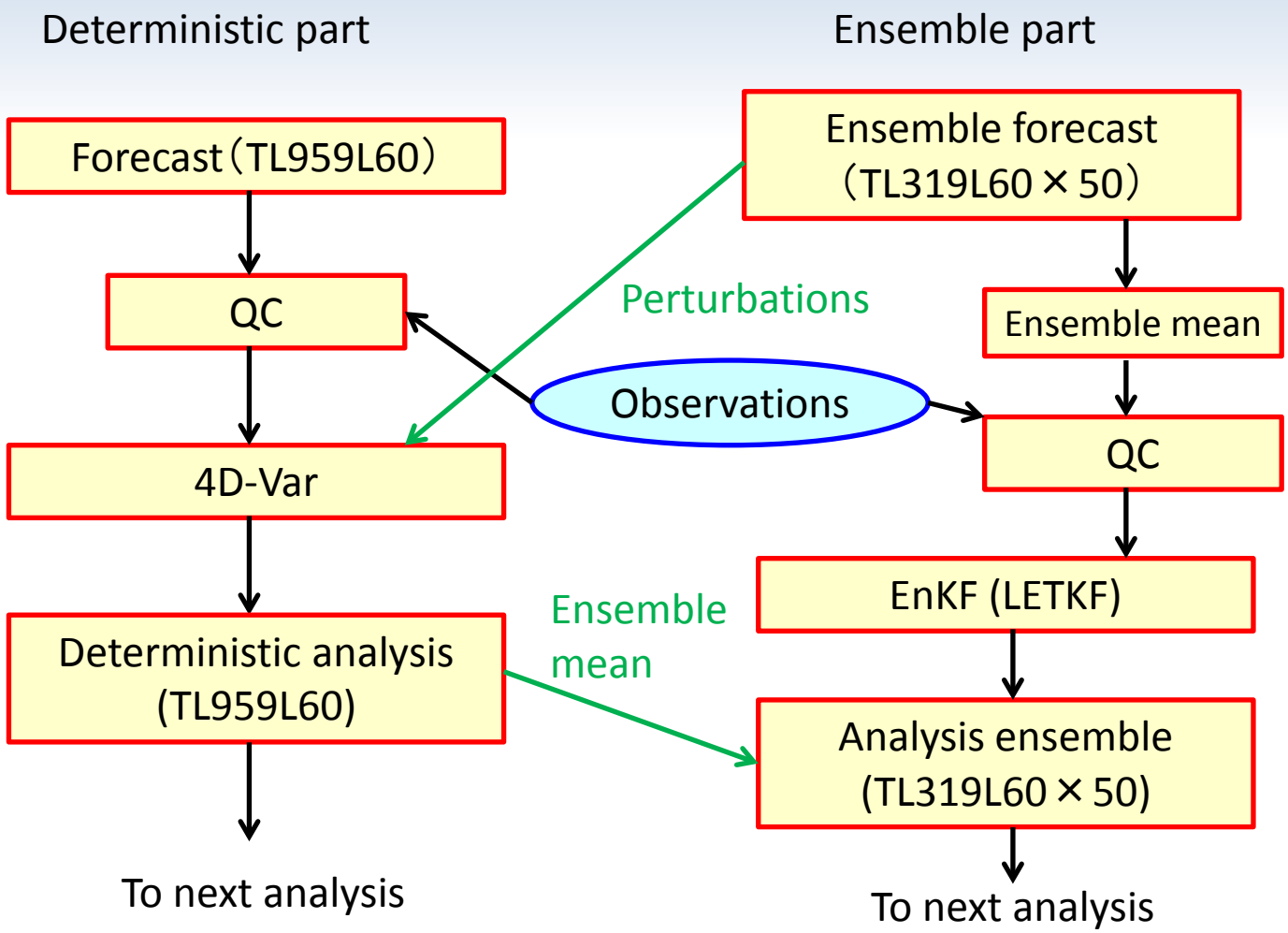
β_1=1、β_2=0で通常の強拘束4次元変分法

制御変数を拡張することにより、アンサンブル摂動による背景誤差を考慮する。
現業4次元変分法の設定からの実装が比較的容易。

アンサンブルアップデートにはLETKF (Hunt et al 2007)を用いる。

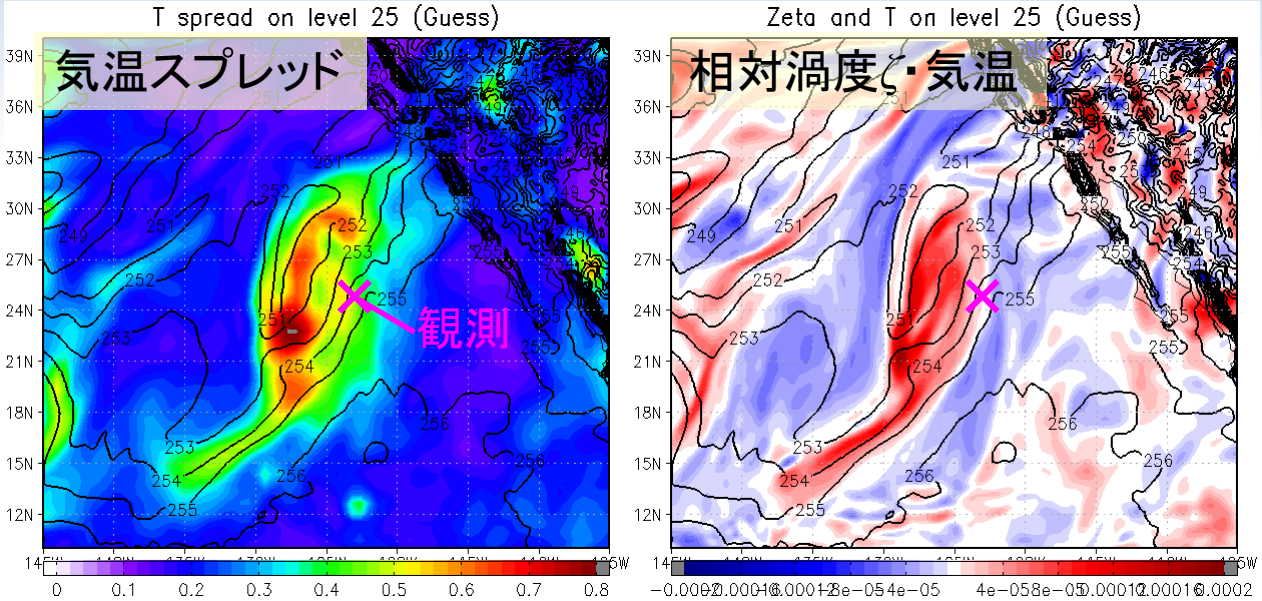
- 平方根フィルタ型のEnKFの一手法
- 流れ依存の背景誤差・解析誤差に従った精度の高いアンサンブル解析を生成
- 他のEnKFと比べて並列化効率が極めて高い

計算の流れ



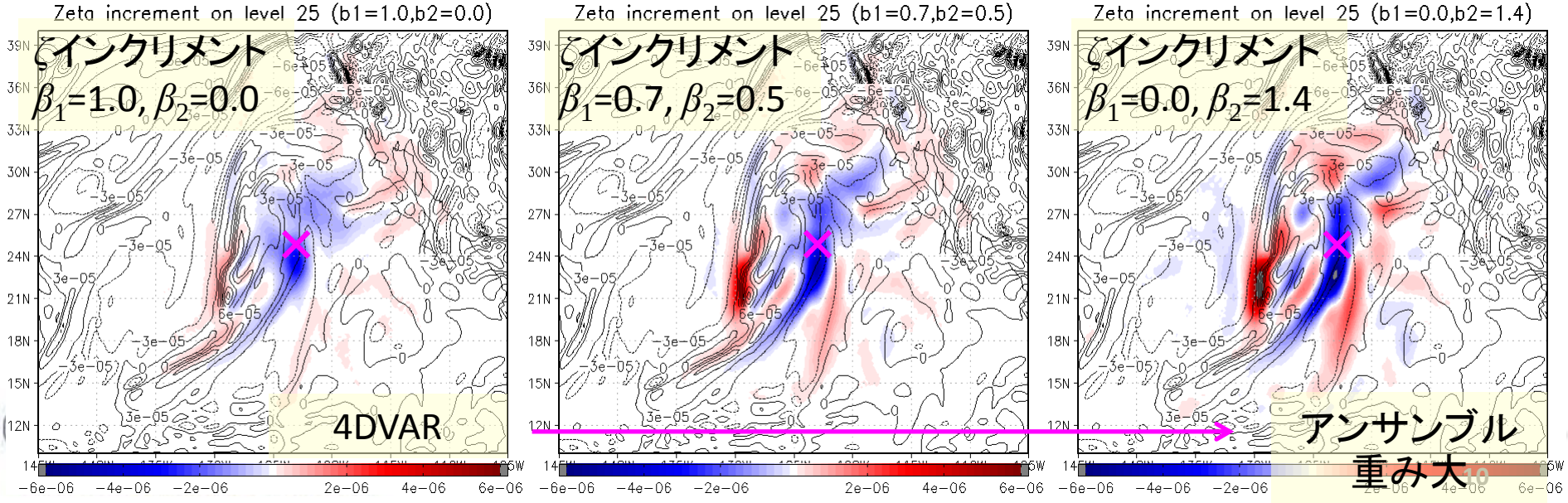
4DVARでのアンサンブル摂動の利用とEnKFでのアンサンブル平均の置き換えの両方を行っているので、2-way hybridとも呼ばれる。

1点同化インクリメント比較



1点同化の例（タイムスロット中央、D値+1Kの観測）

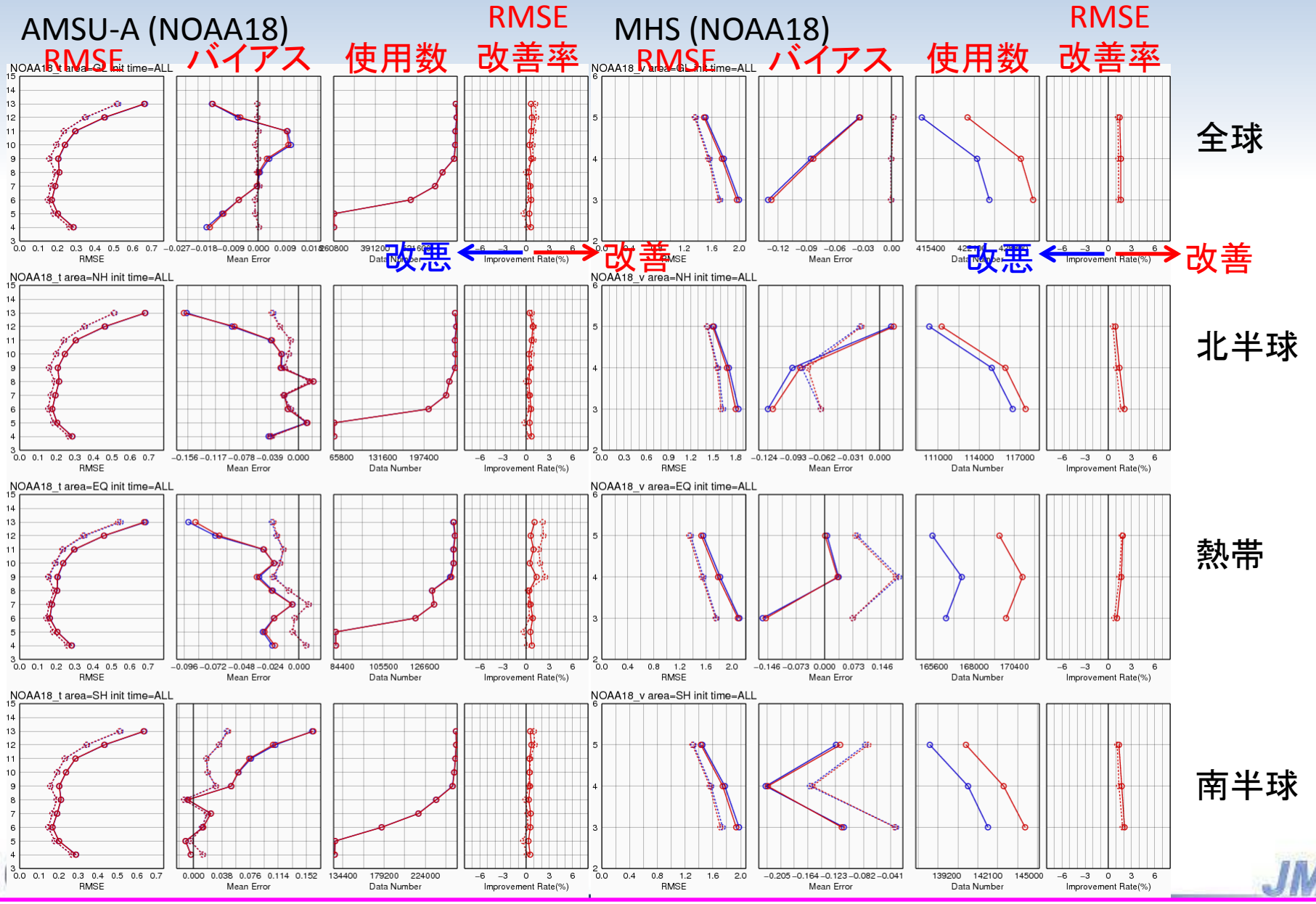
- 低気圧性循環に対応して、気温の水平勾配とスプレッドの大きい領域がある。
- この観測の同化は、気温を上げるとともに、低気圧の位相を西にずらす効果があると推定される。
- アンサンブルによる背景誤差を用いた場合、この効果がよりはっきりしてくる。



実験設定

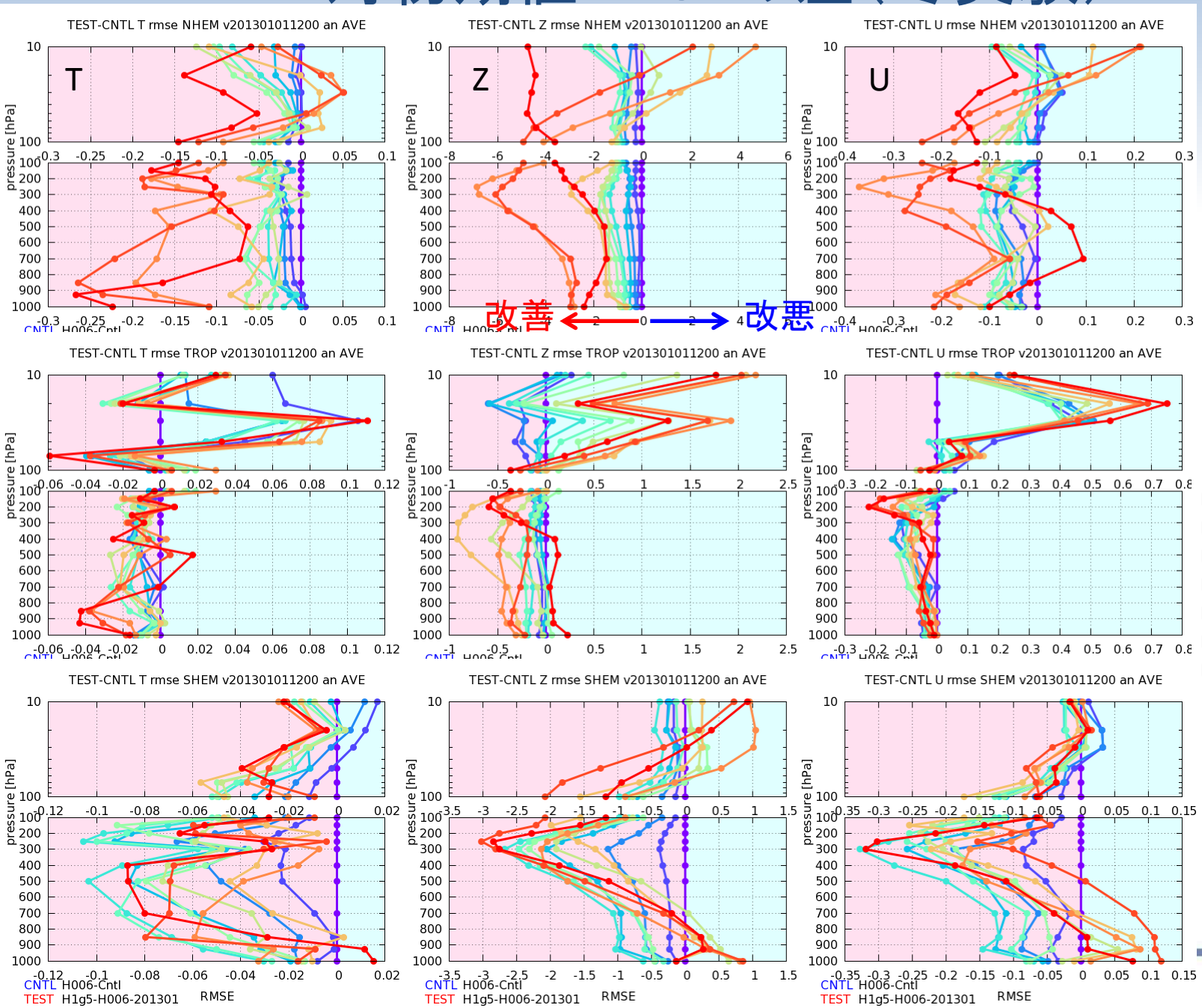
- コントロール：現業システム相当（2013年9月時点）
- テスト：現業システム相当+ハイブリッド化（β1=0.7, β2=0.5）
- アンサンブルメンバー数：50
- 局所化（Hybrid）：アンバランス変数（制御変数空間）、水平スケール800km、鉛直スケール0.8(lnp)
- 局所化（EnKF）：観測空間、水平スケール400km、鉛直スケール0.4(lnp)
- 実験期間
  - 冬：2012年12月10日00UTC～2013年2月11日18UTC (予報は1月の12UTC初期値)
  - 夏：2013年7月10日00UTC～2013年9月11日18UTC (予報は8月の12UTC初期値)
  - はじめの10日間は4DVARで気候学的Bのみを使用

観測データへのフィッティング（冬実験）



CNTL(観測—第一推定値)　CNTL(観測—解析値)　TEST(観測—第一推定値)　TEST(観測—解析値)

対初期値RMSEの差（冬実験）

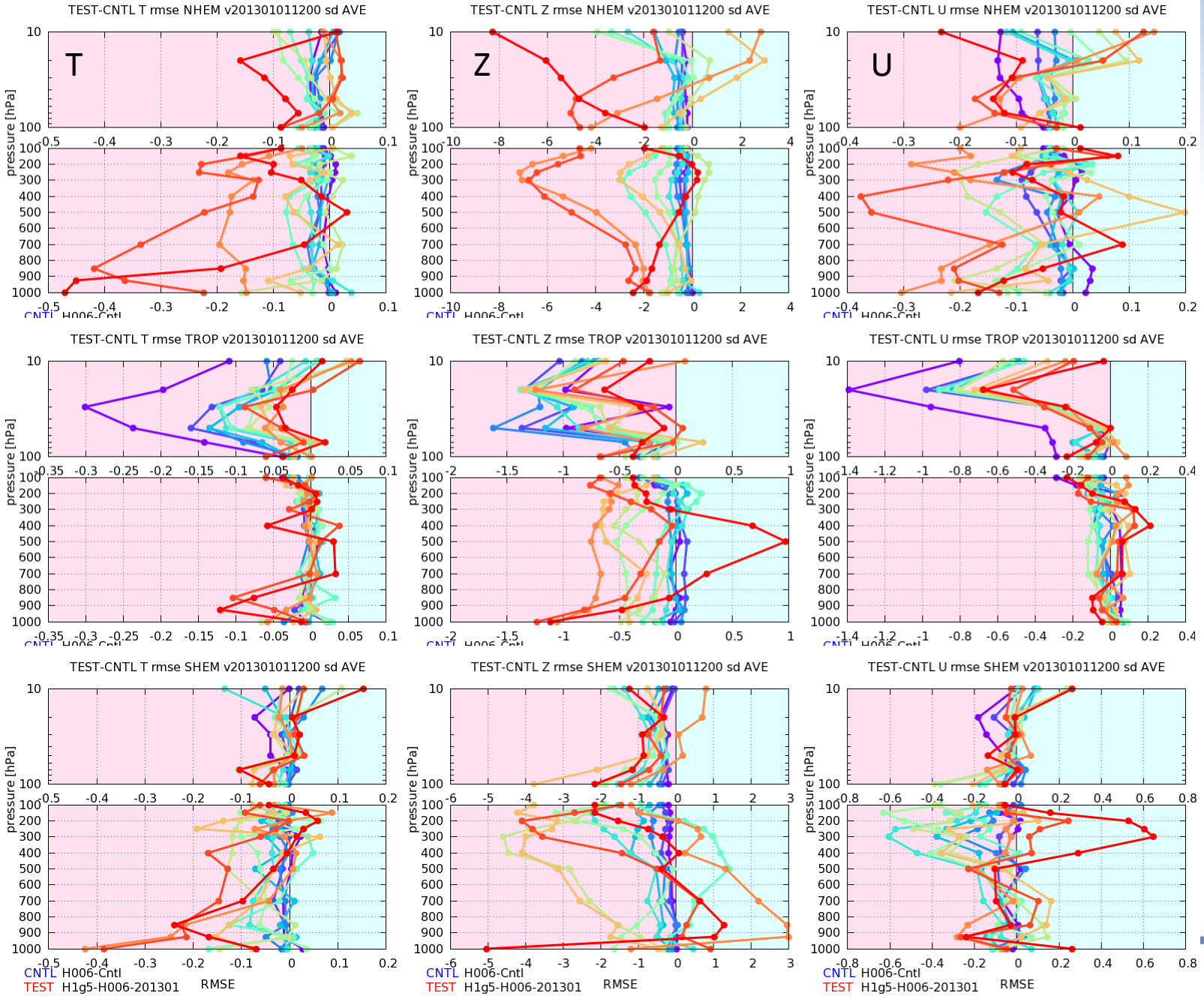


北半球

熱帯

南半球

対ゾンデRMSEの差（冬実験）

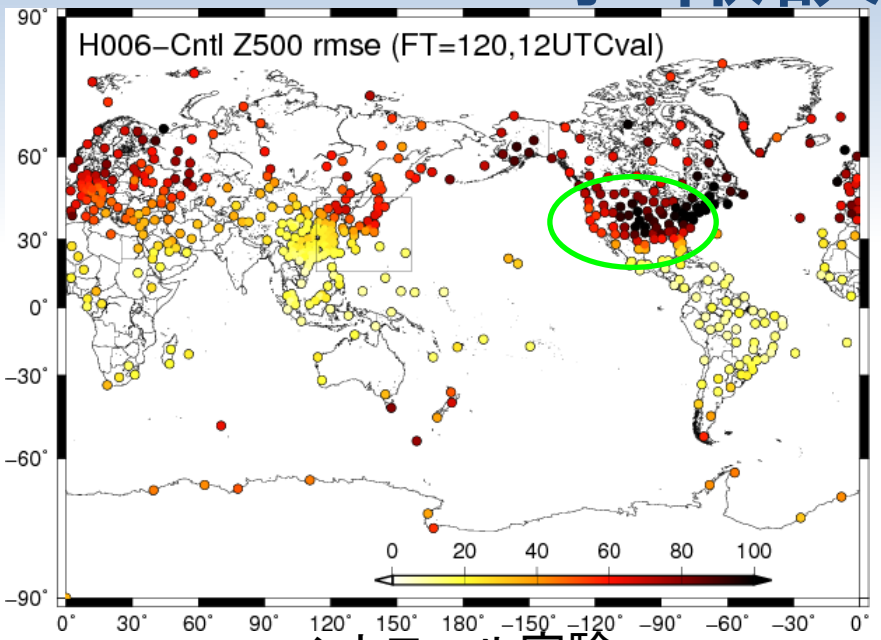


北半球

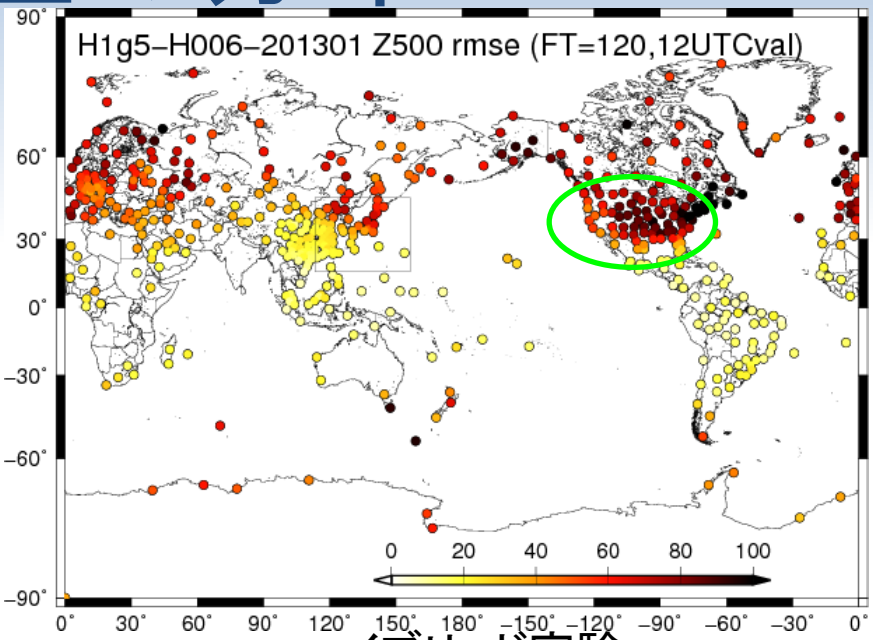
熱帯

南半球

予報誤差の分布

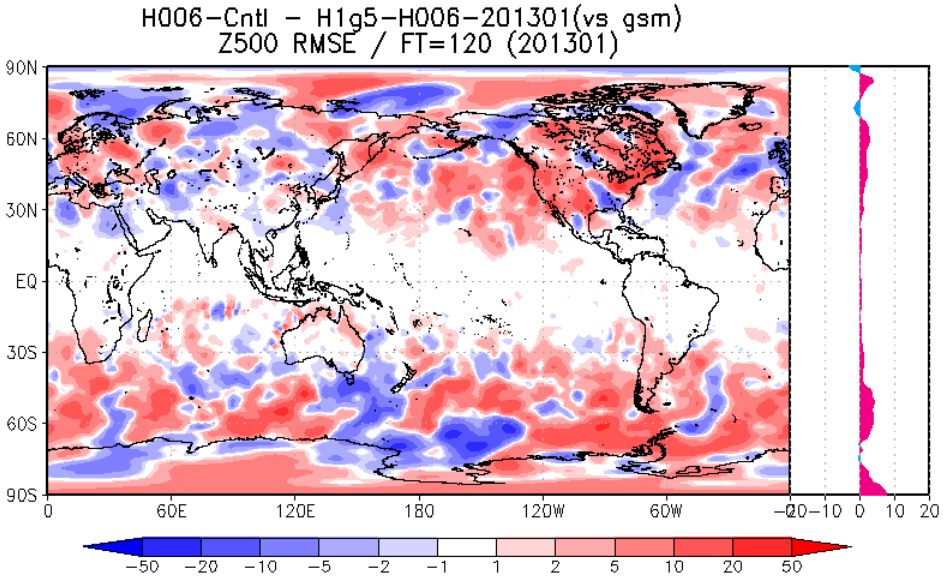


コントロール実験



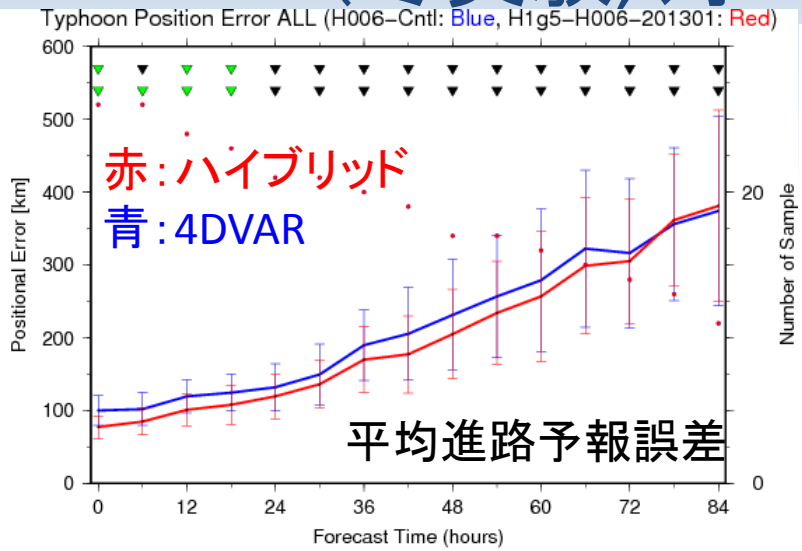
ハイブリッド実験

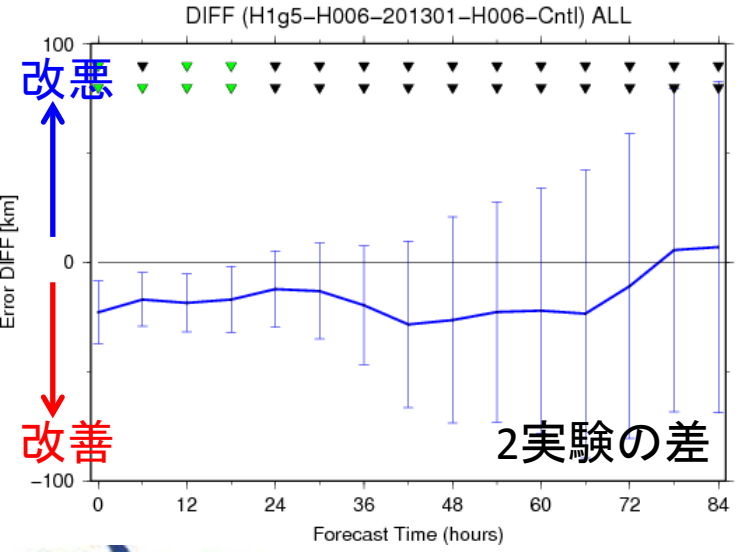
2013年1月の12UTC初期値の5日予報における、500hPa面高度の対ゾンデRMSEの比較



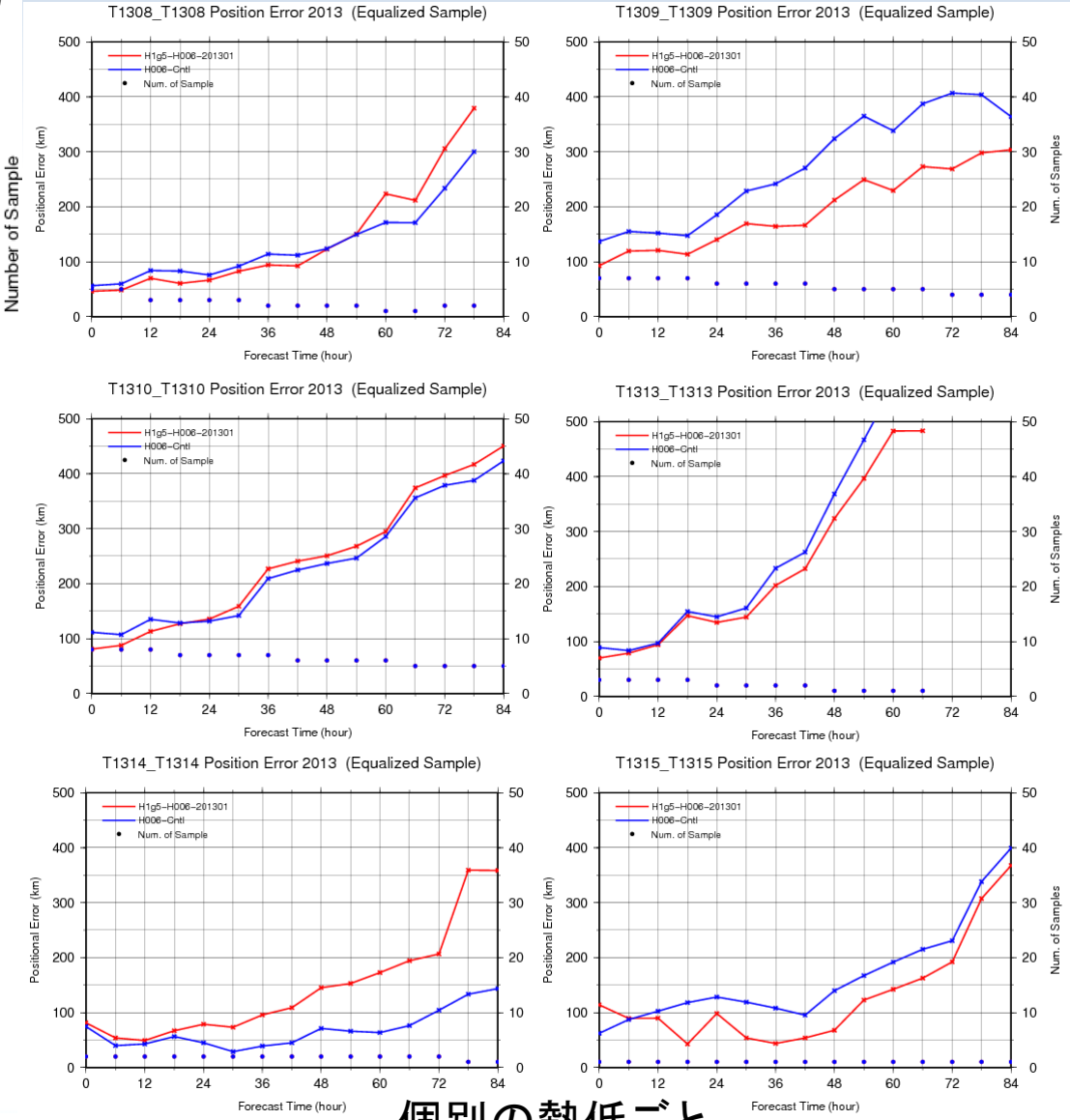
同対初期値RMSEの差
（コントロール実験ーハイブリッド実験）
赤：改善、青：改悪

南半球熱帯低気圧進路予報誤差
（冬実験, 対NOAA b-decksファイル*）





全事例平均



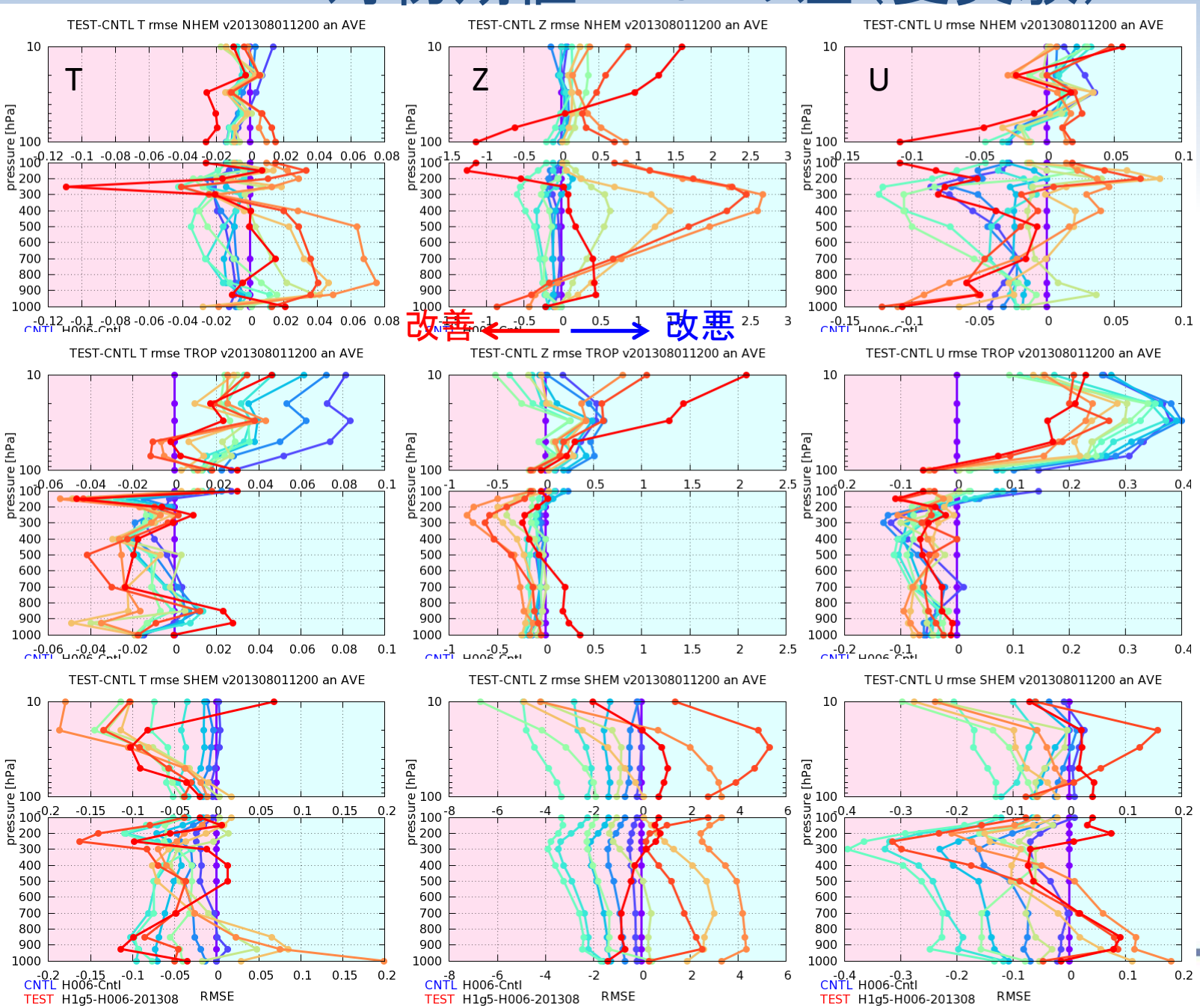
個別の熱低ごと

* NOAA・JTWC作成の熱帯低気圧初期位置情報をUCARが公開しているもの
http://www.rap.ucar.edu/hurricanes/repository/

検証まとめ（冬実験）

- 解析場
  - ゾンデに対し、解析値はあまり寄らないが、第一推定値は寄る傾向（図略）。
  - 解析値、第一推定値ともにAMSU-A、MHSに寄る。
    - MHSは使用データ数も増えている。
  - 熱帯成層圏の解析場が大きく変わる（図略）。
  - 対流圏下層は若干湿る（図略）。
- 予報
  - 対初期値検証は熱帯成層圏を除いて改善傾向
    - 熱帯成層圏は対初期値で悪いが、対ゾンデで強く寄せている。
  - 対ゾンデ検証は中立から改善傾向
  - 南半球の熱帯低気圧の進路予報は改善傾向

対初期値RMSEの差（夏実験）

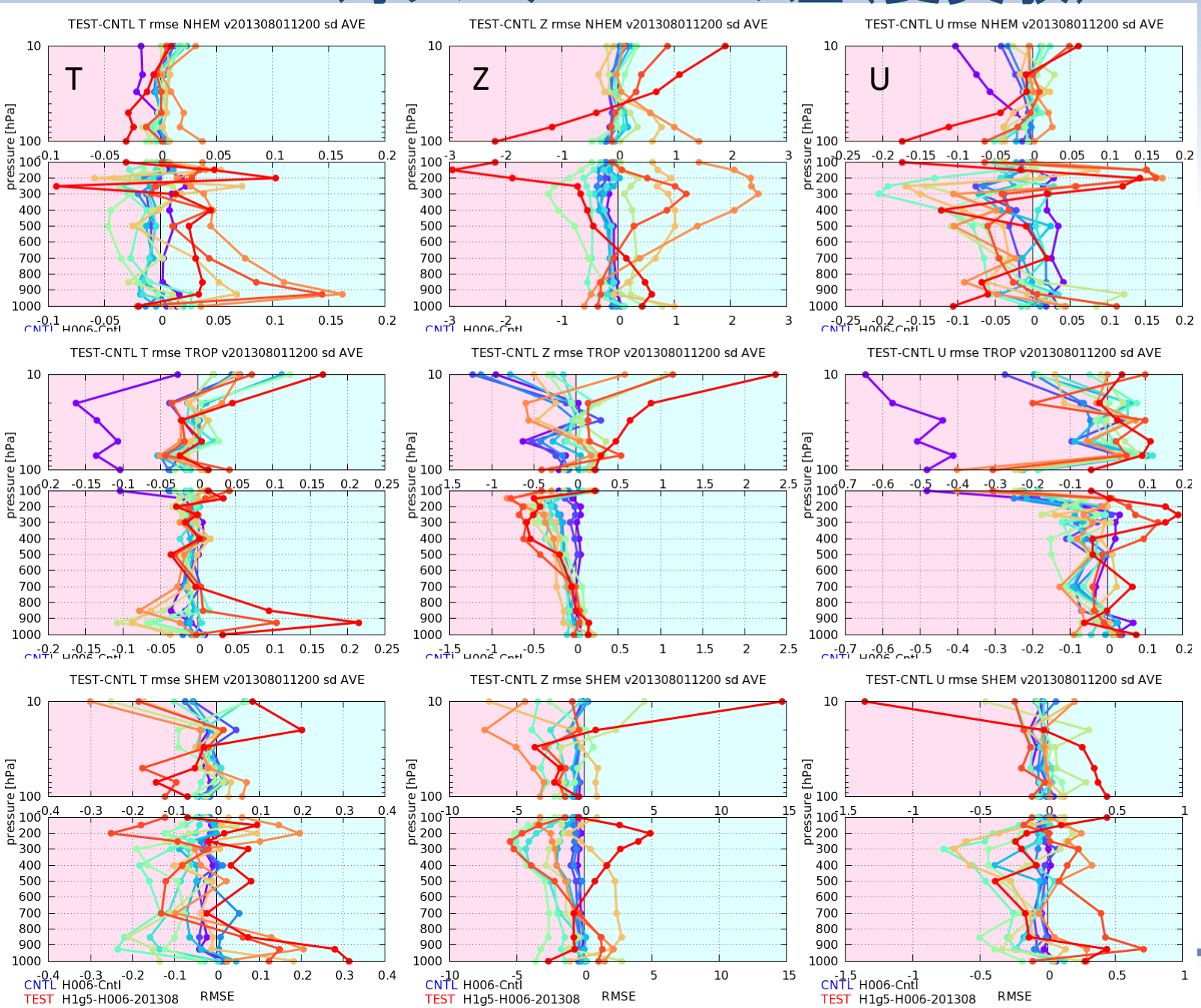


北半球

熱帯

南半球

対ゾンデRMSEの差（夏実験）

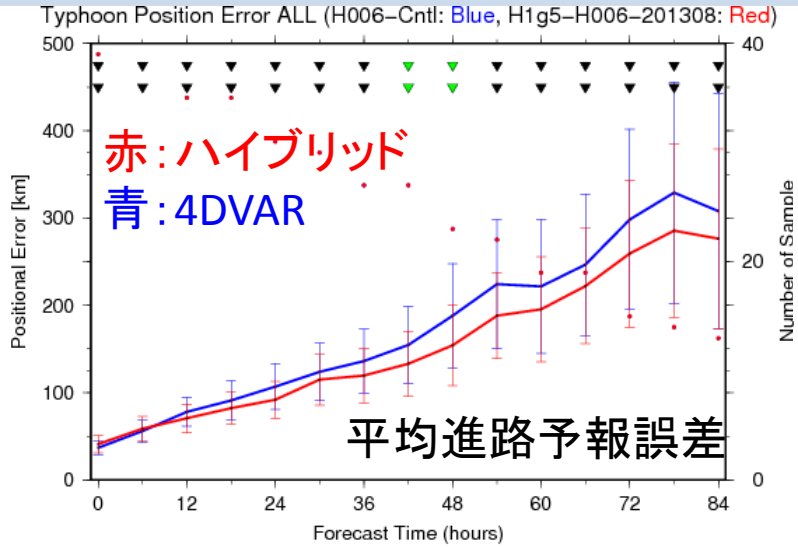


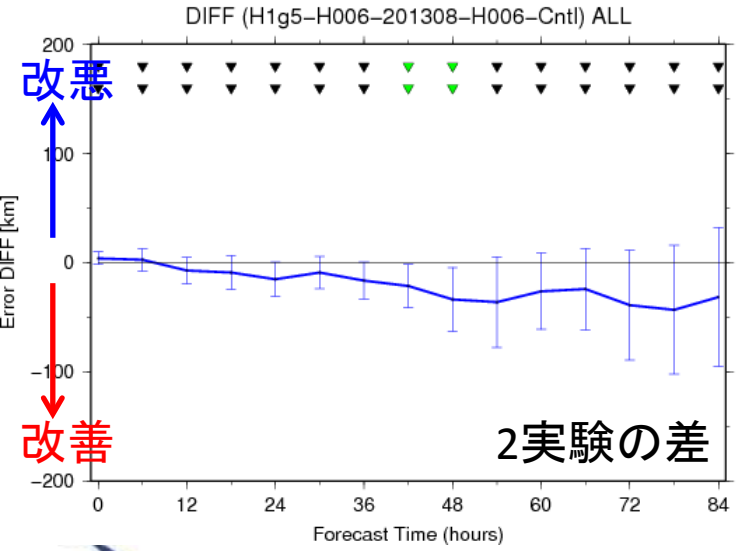
北半球

熱帯

南半球

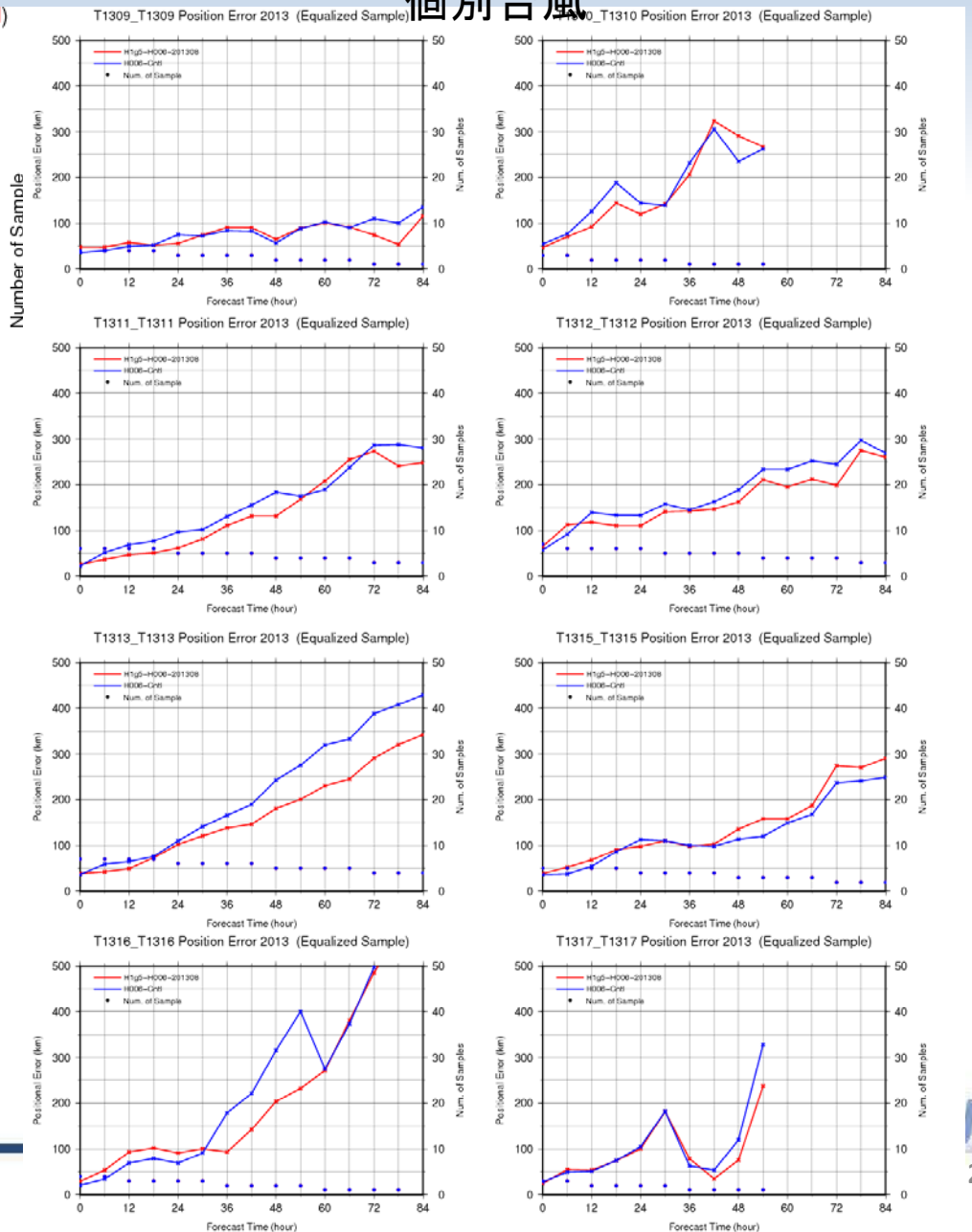
台風進路予報検証（対JMAベストトラック）





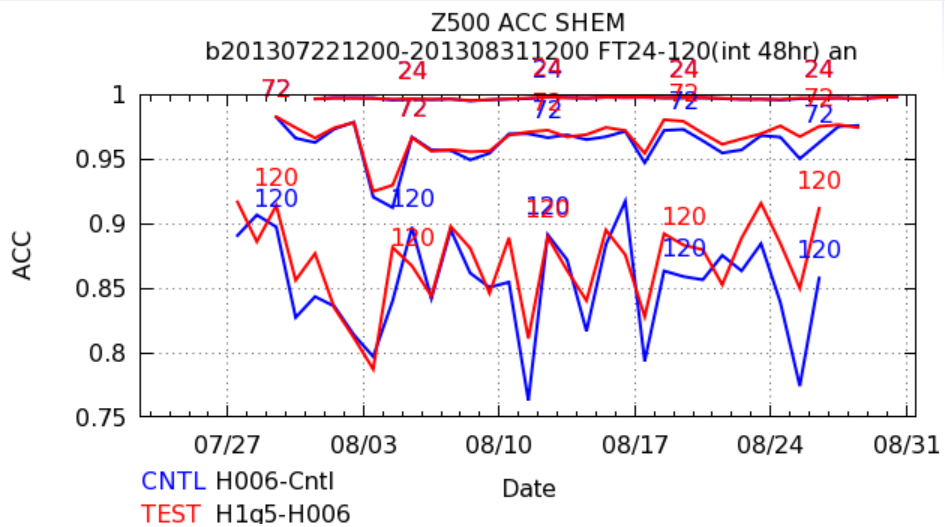
全事例平均

個別台風

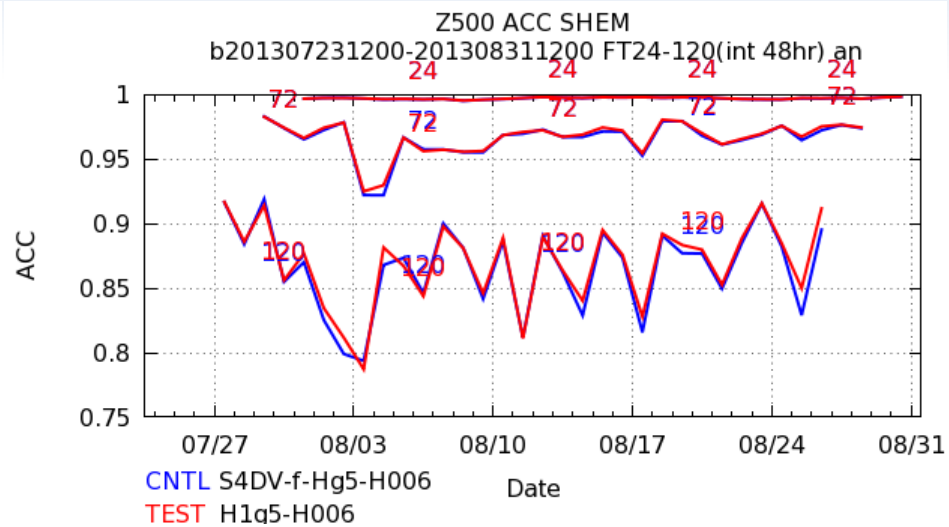


解析予報サイクルの効果

南半球500hPa面高度のアノマリー相関係数時系列比較
（横軸：初期時刻、図中の数字は予報時間）



青：4DVARサイクル実験
赤：ハイブリッドサイクル実験



青：ハイブリッドサイクル実験からの単発4DVAR実験
赤：ハイブリッドサイクル実験

ハイブリッド解析からの予報を第一推定値とした単発の4DVAR実験では、ハイブリッド解析と比べてあまり大きな予報精度の差は見られない。

⇒　解析予報サイクルを引き継ぐことにより、徐々にハイブリッド化の効果が現れている。

検証まとめ（夏実験）

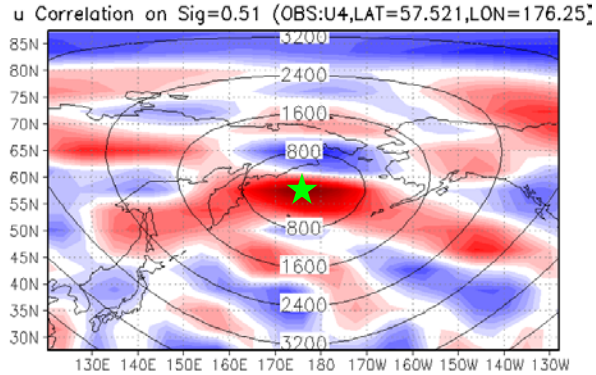
- 解析場（図略）
  - ゾンデに対し、解析値はあまり寄らないが、第一推定値は寄る傾向。
  - 解析値、第一推定値ともにAMSU-A、MHSに寄る。
    - MHSは使用データ数も増えている。
  - 熱帯成層圏の平均解析場の東西風が大きく変わっている。
    - EnKF単独実験では熱帯東西風以外も含めて成層圏が大きく変わる。
  - 対流圏下層は若干湿る。
- 予報
  - 対初期値検証は南半球と熱帯対流圏で改善傾向
    - 北半球の改善の幅が冬実験より小さく、中立かやや改善。
    - 熱帯成層圏は対初期値で悪い、解析がゾンデに強く寄せている。
  - 対ゾンデ検証は中立から改善傾向
  - 台風進路予報は改善傾向
    - 事例依存するものと思われる。

今後の検討課題

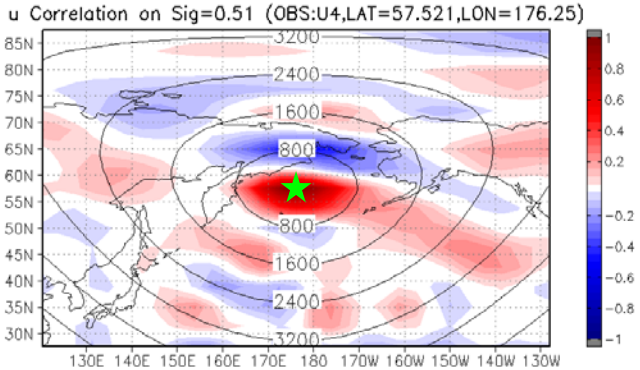
- 上層の扱いの是非
  - EnKF解析・摂動は成層圏より上でどのくらい信用できるものなのか？
  - 上層の特殊扱い（インフレーションダンピング）
- 事例解析の充実
  - 特に、顕著な擾乱に対する振る舞い
- EnKFにおける誤差共分散の局所化方法の見直し
  - 時間方向の局所化は本当に必要か？
    - 観測時刻と解析時刻の差で観測誤差を膨張させる局所化をかけている。
  - 水平局所化スケールの最適化
  - 非局所的な観測（衛星観測等）の鉛直局所化方法の見直し
- 計算コスト vs benefit
  - メンバー数
  - 解像度、etc…
- Static vs Ensemble、最適な重みは？

背景誤差共分散の局所化

アンサンブルデータ同化では、限られたメンバー数で誤差共分散を表現することによるサンプリング誤差が問題になる。



少数メンバーによる誤差相関

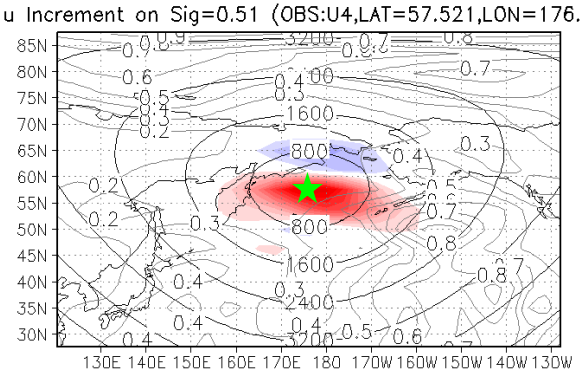


多数メンバーによる誤差相関

解析点から離れた誤差相関は相対的にサンプリング誤差が大きい

★は解析格子点

局所化の適用



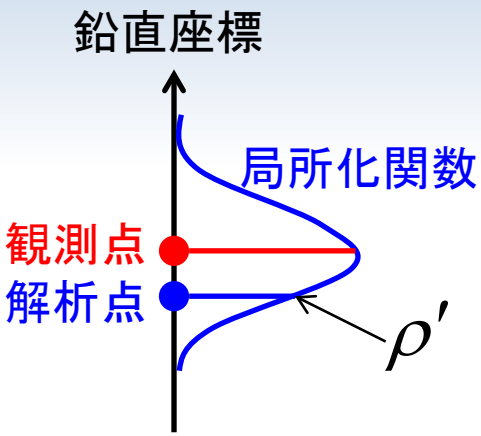
局所化適用後の誤差相関

誤差共分散に局所化を適用することにより、サンプリング誤差を抑える。

- 計算効率が高くなるメリットもある。

現在、LETKF・ハイブリッドデータ同化では観測点からの距離（水平・鉛直・時間）によってガウス型に減衰するような局所化をかけている。

衛星観測の鉛直局所化



従来型観測の場合

誤差共分散Bの局所化はBに対してかけるのが本来のやり方。

$$\rho \circ \mathbf{B}$$

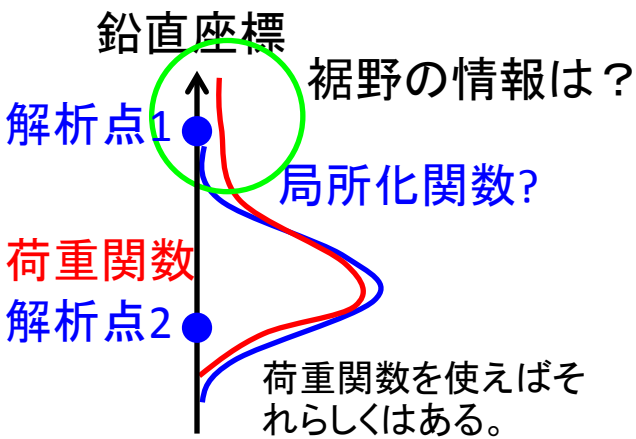
ただし、ρは解析格子間距離によって減衰する局所化関数

LETKFではその代りにローカルの解析に用いる観測誤差共分散Rを膨張させている。

$$\rho'^{-1} \circ \mathbf{R}$$

ただし、ρ'は観測・解析格子の距離によって減衰する局所化関数

観測の情報が「点」である場合は大きな問題はない。

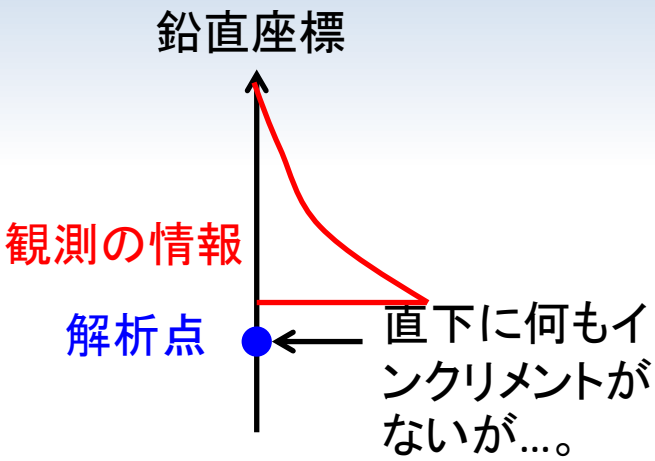


輝度温度観測の場合

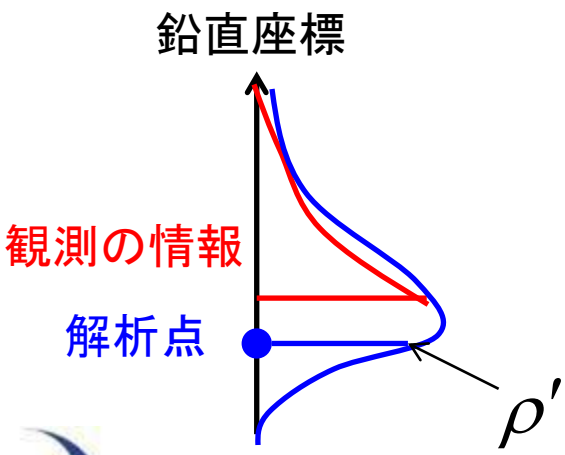
観測の情報が空間的に広がりがある場合、違いが大きくなる。

- 「観測点」は明示的に決まらない。
- 局所化関数の「形」にも工夫が必要。
  - 裾の広い分布をしている場合、端の方の情報が無視されることも。
- Bに直接局所化をかける方が精度がよいことが知られている（Campbell et al. 2010）
- 現在は規格化した荷重関数を局所化ρ'に用いている。

衛星観測の鉛直局所化



極端な観測の場合
（GNSS屈折角など）



しかし、観測情報の分布が極端な場合は、これでも問題がある。

- 同化での観測の利用が不適切になる場合がある。
- 観測種別によって局所化の方法が一貫しない。

観測情報の分布を表わす関数をfとし、従来型のGaussianな関数ρをかけて畳みこみ積分する方法を試行中。

- 衛星輝度温度観測ならfは荷重関数
- 従来型観測なら観測高度でf=1となるディラックのデルタ関数

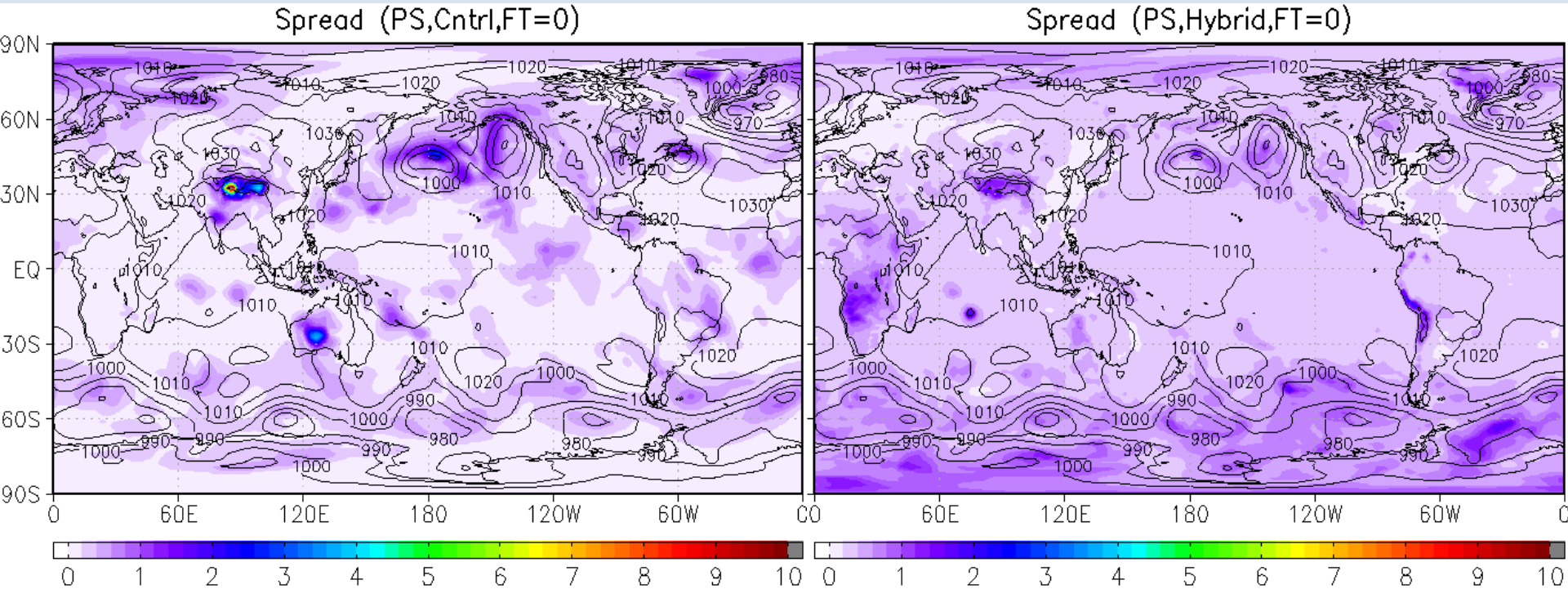
Bに直接局所化をかける場合に近付ける。

- ただし、観測空間で局所化を行っている以上、一致させることはできない。

アンサンブル予報との連携

- 現業の週間EPSでは特異ベクトル法(SV法)を初期摂動作成に用いている。
  - 評価時間に対して線形成長の大きいモードを求める。故に予報での摂動の成長率は大きい
  - ただし、摂動の大きさは任意（要チューニング）。解析誤差の大きさは反映しない。
  - 解像度はT63L40
- 一方、Hybridなデータ同化システムから解析のアンサンブルが得られる。
  - 解析誤差を反映した初期摂動
  - 解像度はTL319L60
- Hybridなデータ同化システムから得られる摂動を初期摂動として用いるアンサンブル予報実験を試みた。

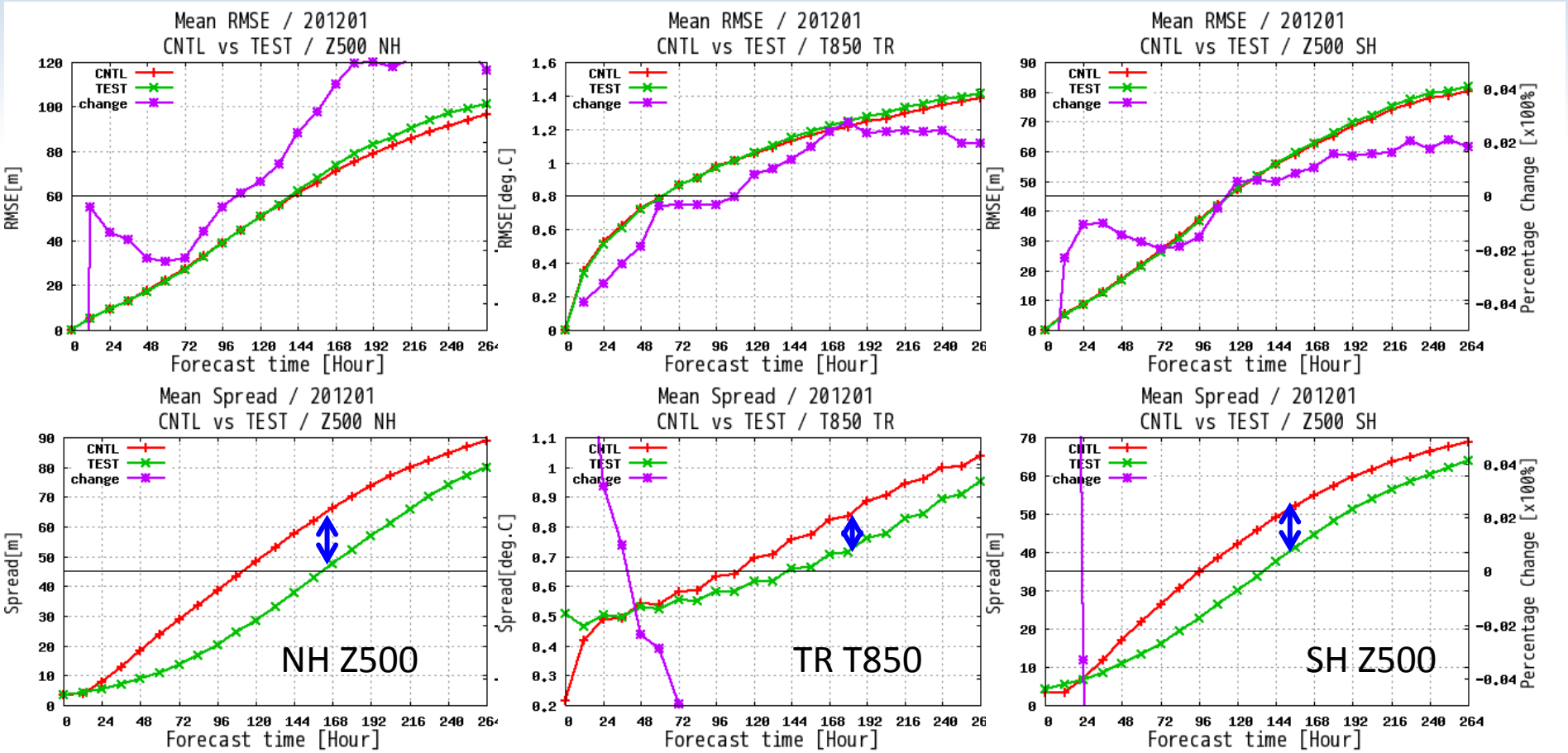
アンサンブル初期摂動の例



地上気圧のある初期時刻のスプレッドの比較。現業システム（左）、Hybrid(EnKF)摂動（右）

- SVは摂動が局在化する傾向が強い。
  - 中緯度では傾圧性の擾乱に集中する傾向。
- EnKFによる摂動は観測データ分布をおおよそ反映したような分布
- SVでは捉えられていないスケールの小さな現象の不確実性も捉えている（例：南インド洋の熱帯擾乱）。

アンサンブル予報実験検証（RMSE・Spread）



赤：現業相当の週間アンサンブル、緑：Hybrid摂動を用いたアンサンブル、紫：（緑ー赤）/赤

予報前半は改善する傾向だが、SVと比べて摂動の成長が遅いため、予報後半の悪化が目立つ。

まとめと今後

- 4DVARとLETKFのハイブリッドデータ同化システムの開発を行っている。
  - 解析サイクルによって引き継がれる流れ依存背景誤差情報の活用
  - 南半球を中心に予報精度の改善がみられる
  - 課題：上層の扱い、局所化の方法、計算コストと精度の兼ね合い、背景誤差の重みの最適化、等
- ハイブリッドデータ同化システムとアンサンブル予報の連携
  - 解析誤差を反映した初期摂動
  - 現状は、摂動の成長率が小さいことが課題
  - SVとの組み合わせの可能性

ご清聴ありがとうございました。