



2016年5月17日 第9回気象庁数値モデル研究会・第45回メソ気象研究会
第2回観測システム・予測可能性研究連絡会

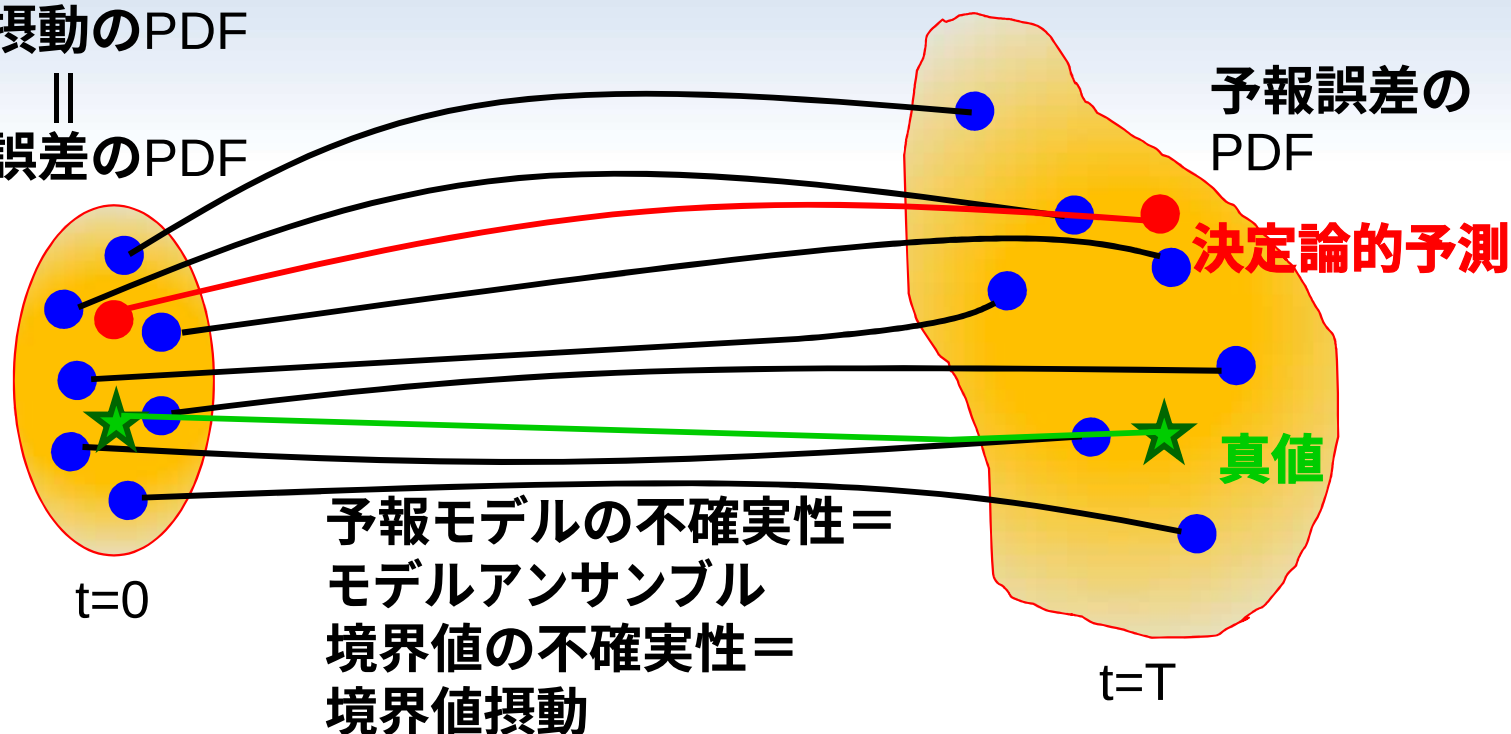
気象庁週間アンサンブル予報 システムの現状と展望

気象庁予報部数値予報課
太田 洋一郎

アンサンブル予報システム (EPS)

初期摂動のPDF

||
解析誤差のPDF



- **決定論的予測**では、一つの解析値から一つのモデル・境界条件を用いて一つの予測を得る。
 - **予測の信頼度に関する情報は得られない。**
- 本来は確率的な予測であるべきだが、確率密度関数 (PDF) の直接の予測は困難。
- アンサンブル予報システム (EPS) では予測のPDFを有限個の予測 (メンバー) により近似する。
 - EPSでは解析値・予報モデルの精度に加えて、**どのようにメンバーを構成 (サンプリング) するか**が重要となる。

アンサンブル予報に基づく気象情報 (短期～1か月)

週間天気予報

降水確率、予報の信頼度、気温の範囲を発表。

←週間アンサンブル予報システム
(週間EPS)

8月6日11時 東京都の週間天気予報

日付	7 水	8 木	9 金	10 土	11 日	12 月	13 火
東京地方 府県天気予報へ	晴時々曇 ☀️ ☁️	晴時々曇 ☀️ ☁️	晴時々曇 ☀️ ☁️	晴時々曇 ☀️ ☁️	晴時々曇 ☀️ ☁️	晴時々曇 ☀️ ☁️	晴時々曇 ☀️ ☁️
降水確率(%)	20/10/20/20	20	20	20	30	30	20
信頼度	/	/	A	A	C	B	B
東京	最高(℃)	33 (31～34)	34 (32～35)	35 (33～36)	35 (32～36)	33 (31～35)	32 (30～35)
	最低(℃)	25	26 (24～27)	26 (24～27)	27 (25～28)	27 (26～30)	26 (24～27)

台風情報 ←台風EPS

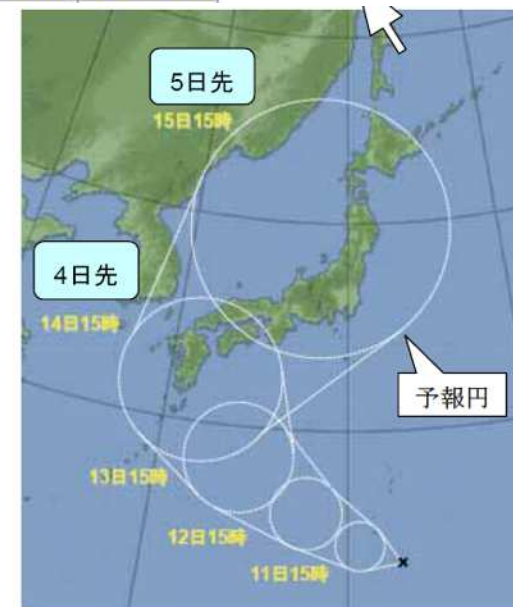
5日先までの台風進路を予報円として発表。

異常天候早期警戒情報 ← 1か月EPS

2週先までの週単位の気温や降雪量がそれぞれかなり高い(低い)、かなり多いとなる確率を発表。

1か月予報

1週目、2週目、3・4週目、1か月の気温、降水量、日照が平年と比べた3段階のカテゴリに入る確率を発表。



気象庁の現業EPSの仕様比較

	台風EPS	週間EPS	1か月EPS
主な利用	台風情報	週間天気予報	異常天候早期警戒 情報・1か月予報
実行頻度	1日最大4回	1日2回	土・日と火・水
予報期間	5.5日	11日	18日(土・日) 34日(火・水)
メンバー数	25	27	50 (25x2のLAF)
解像度	TL479L60 (最上層0.1hPa)		TL319L60 (同0.1hPa)
初期摂動	SV法 (北西太平洋・台風周辺)	SV法 (北半球・熱帯・南半球)	BGM法 (北半球・熱帯)
モデルアンサンブル	確率的物理過程強制法		
境界値摂動	なし		

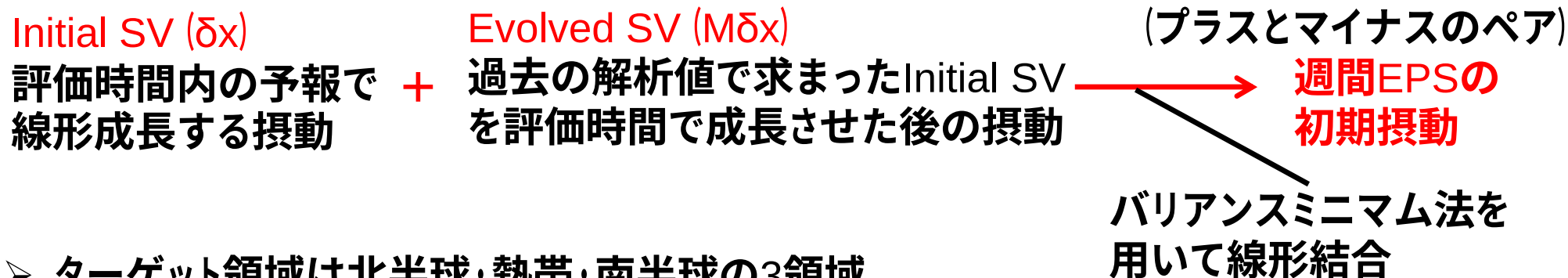
✓ それぞれの利用目的に応じた仕様

初期振動作成手法の高度化

現行週間EPSの初期摂動

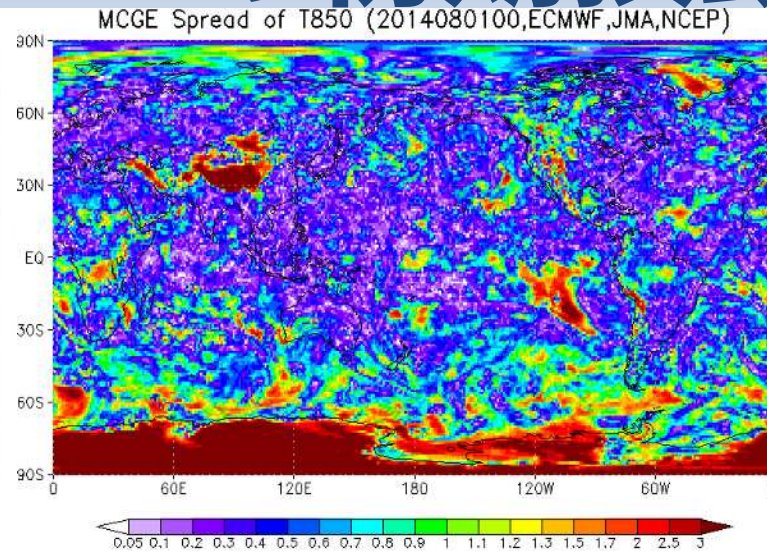
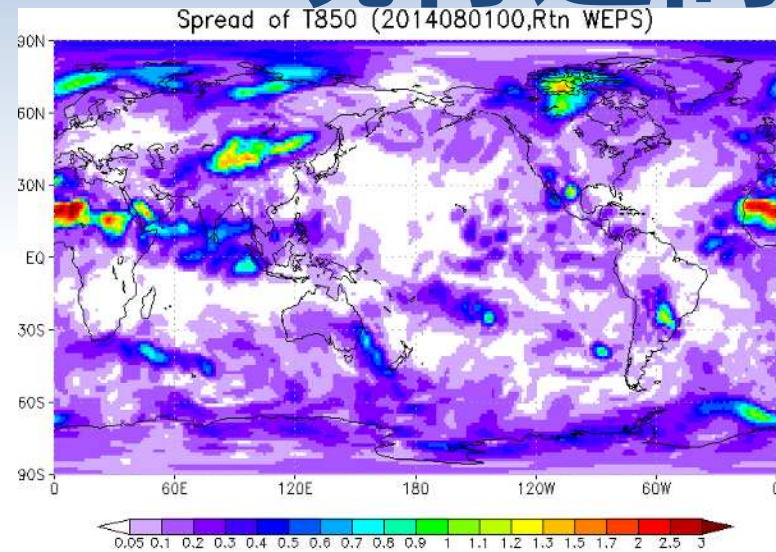
成長率 $\lambda = \frac{\|M\delta\mathbf{x}\|_f}{\|\delta\mathbf{x}\|_i} = \sqrt{\frac{(M\delta\mathbf{x}, E_f M\delta\mathbf{x})}{(\delta\mathbf{x}, E_i \delta\mathbf{x})}}$ の大きな摂動を求める。

M : 摂動予報モデル、 E_f 、 E_i : 評価時刻・初期時刻のノルム演算子、 $(\cdot, \cdot)$: 内積

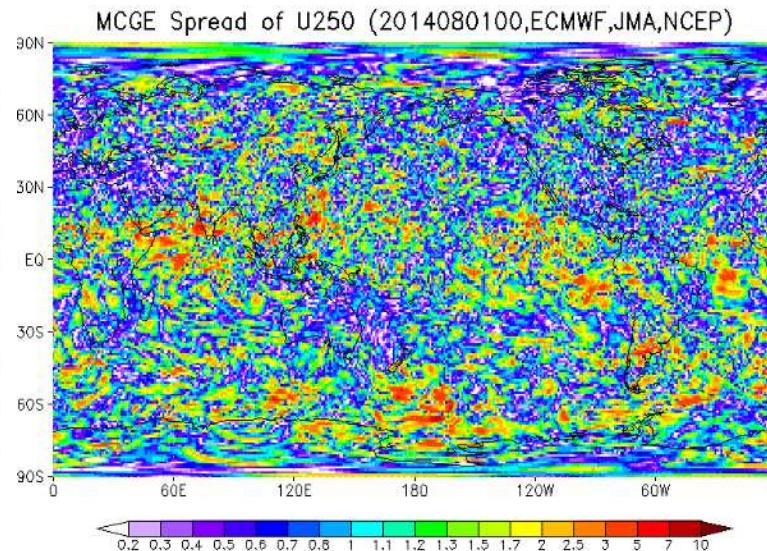
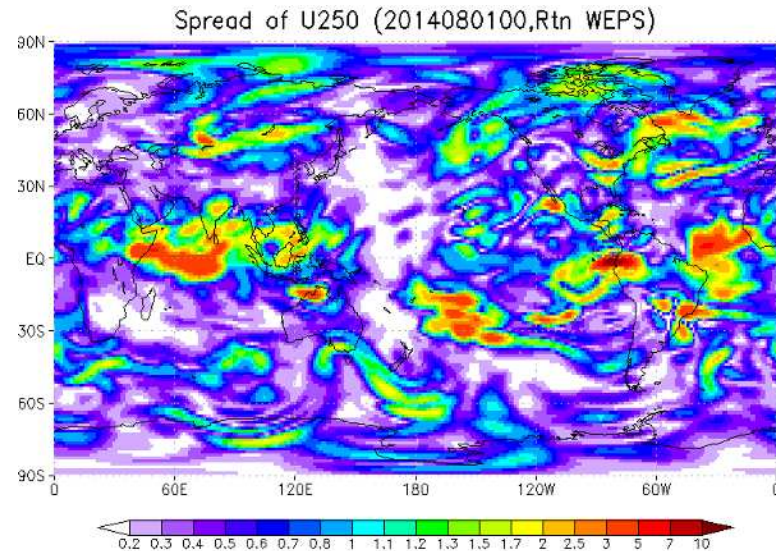


- ターゲット領域は北半球・熱帯・南半球の3領域
 - ・ それぞれの領域で線形結合した摂動を足し合わせて使用
- 予報で成長する摂動はInitial SV
 - ・ 中・高緯度では傾圧帯に集中して求まる
 - ・ 低緯度では対流モードが求まる
- Evolved SVはInitial SVを摂動予報モデルで評価時間で成長させたもの
 - ・ 解析誤差の第0近似
 - ・ 摂動のInitial SV単体での局在化を緩和する目的

現行週間EPSの初期摂動



850hPa
気温



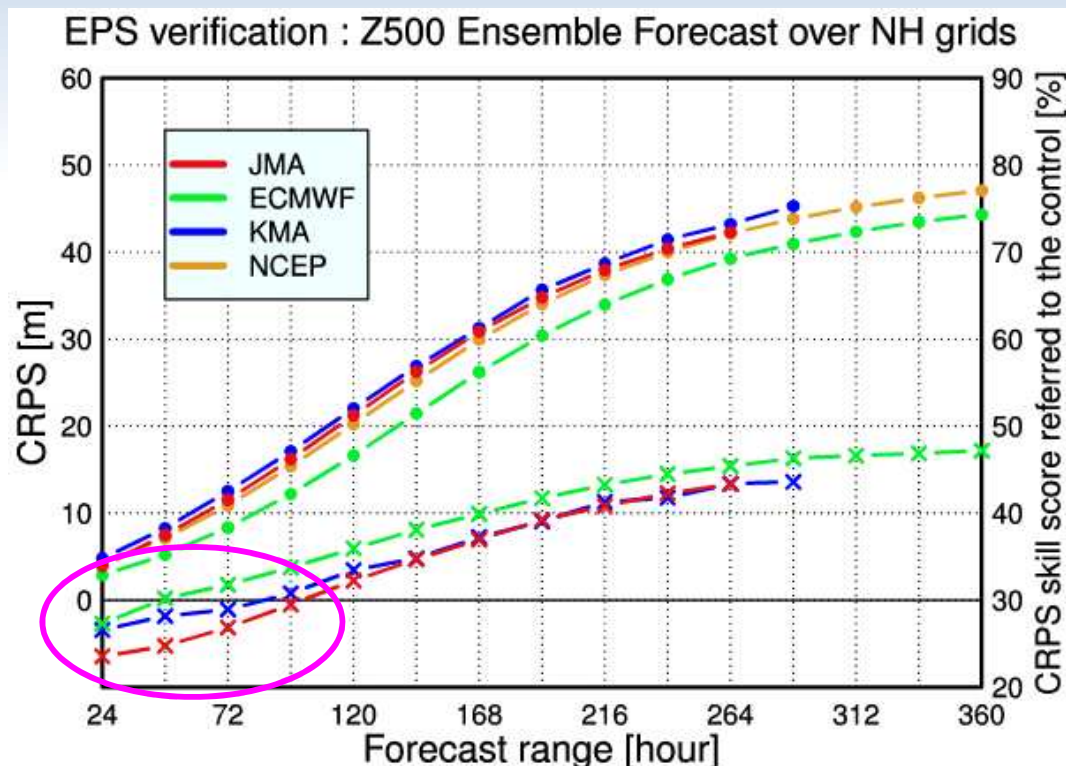
250hPa
東西風

2014年8月1日00UTC初期値の
週間EPSのスプレッド

同初期時刻のECMWF,NCEP,JMA
解析値のスプレッド

成長率は大いだが、解析誤差分布とは異なる摂動

予報初期のばらつきの表現



2014年9月～2015年8月の北半球500hPa面高度のCRPS (●:左縦軸) とコントロールランのCRPSに対するスキルスコア (×:右縦軸)

赤:週間EPS、緑:ECMWF、青:KMA

週間EPSは他センターと比べて予報初期のスキルスコアが低い。

週間EPSはメソEPSの境界条件 (境界値摂動) としての役割も果たす。

予報初期の確率予報精度を向上させる必要

アンサンブル・カルマンフィルタ (EnKF)

カルマンフィルタによるデータ同化

$$\mathbf{x}_a = \mathbf{x}_f + \mathbf{K}(\mathbf{y} - H(\mathbf{x}_f))$$

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

$$\mathbf{A} = (\mathbf{I} - \mathbf{K}\mathbf{H})\mathbf{B}$$

$\mathbf{x}_a$: 解析値、 $\mathbf{x}_f$: 第一推定値、 $\mathbf{K}$: カルマンゲイン
 $\mathbf{y}$: 観測値、 H : 観測演算子
 $\mathbf{B}$: 背景誤差共分散、 $\mathbf{A}$: 解析誤差共分散

現在、大気モデルのデータ同化で用いられている様々な手法は、基本的にこれが原点。

EnKFでは $\mathbf{B}$ をアンサンブル予報摂動 $\mathbf{X}_f$ で近似する。

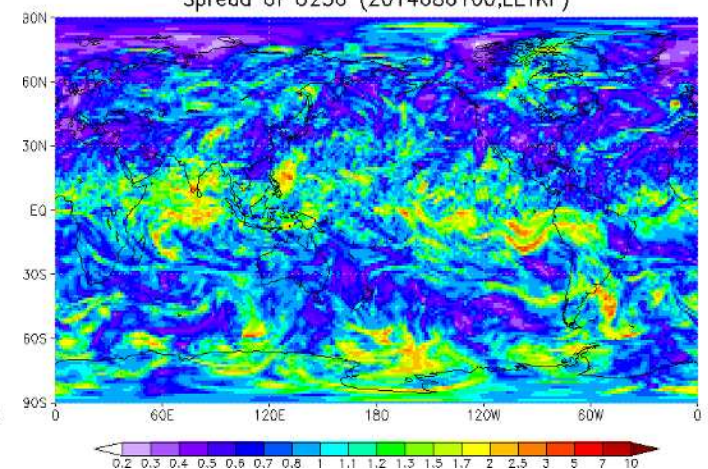
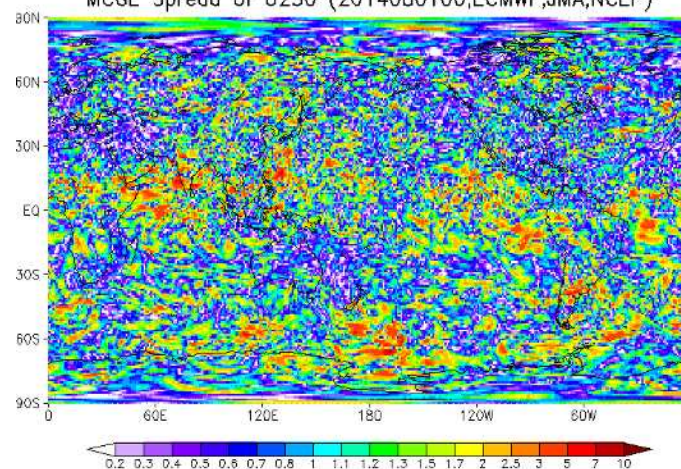
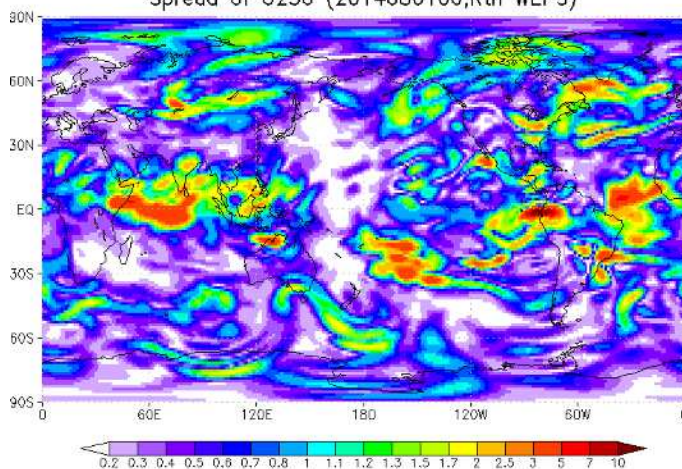
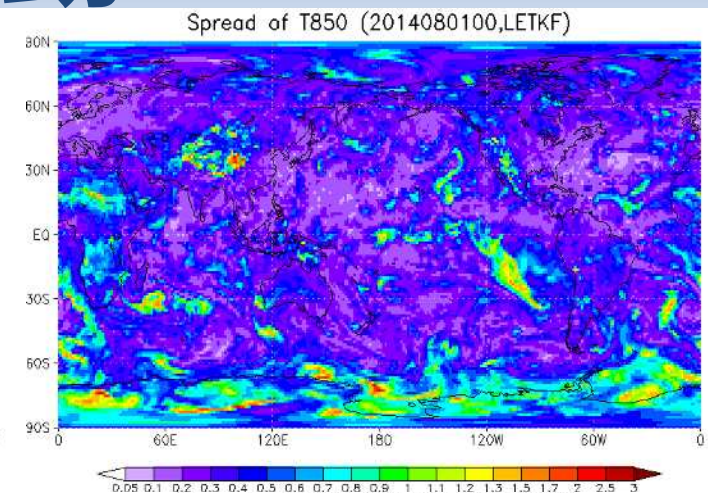
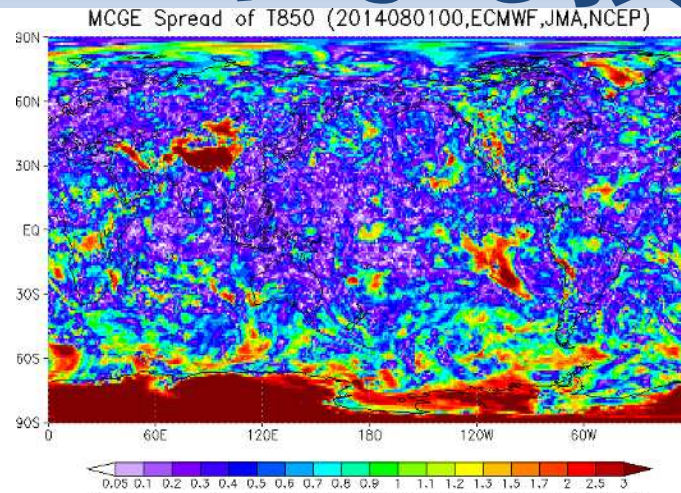
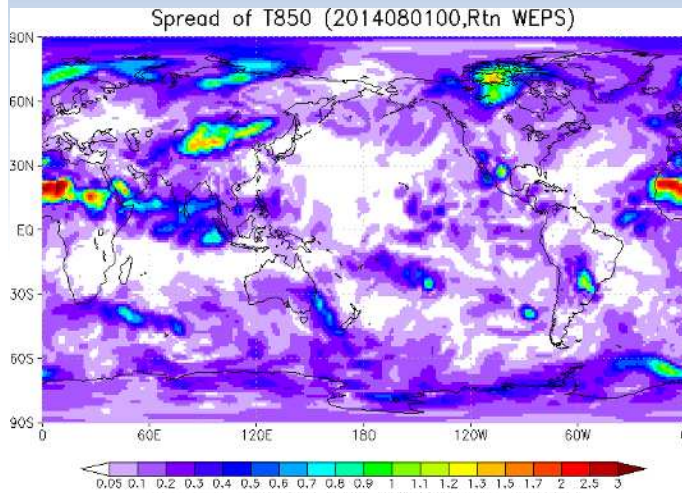
$$\mathbf{B} \approx \mathbf{X}_f \mathbf{X}_f^T / (m - 1) \quad \mathbf{A} \approx \mathbf{X}_a \mathbf{X}_a^T / (m - 1) \quad m: \text{メンバー数}$$

$\mathbf{x}_a$ へのアップデートの仕方、 $\mathbf{x}_f$ から $\mathbf{x}_a$ にアップデートする方法にはいくつか種類がある。
ここでは、その一種のLETKFを用いる。

$\mathbf{X}_a$ はデータ同化により求めた解析値の解析誤差を代表する摂動となる。

流れ依存の解析誤差に整合した摂動が得られる。

LETKFによる摂動



2014年8月1日00UTC初期値の
週間EPSのスプレッド

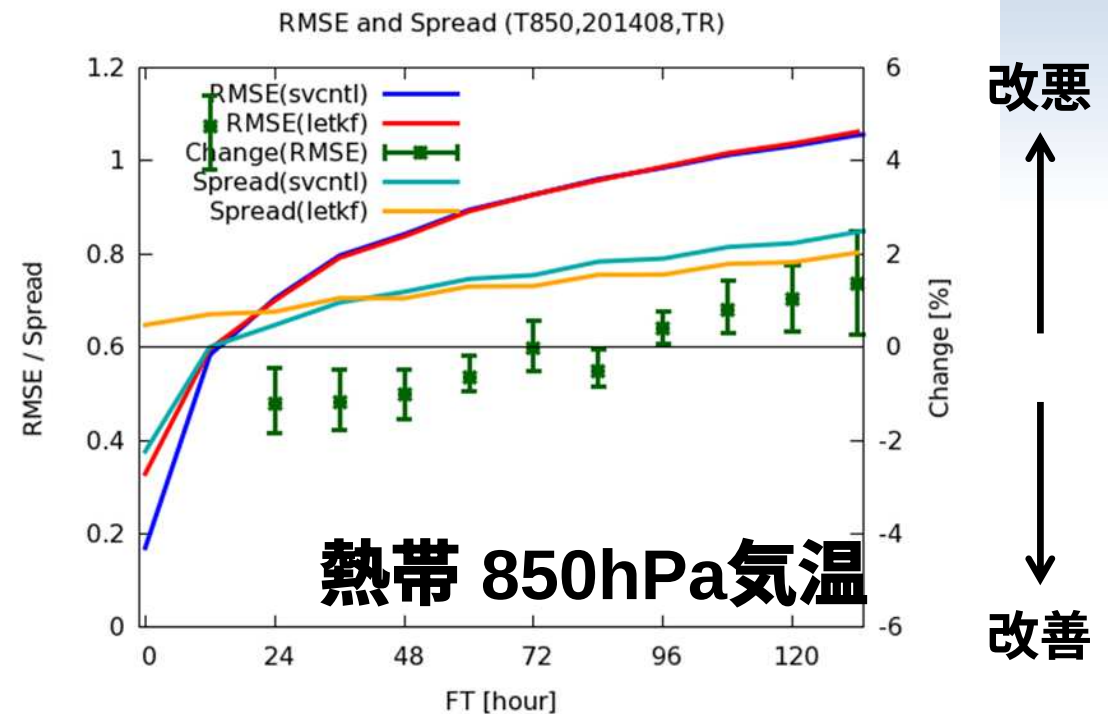
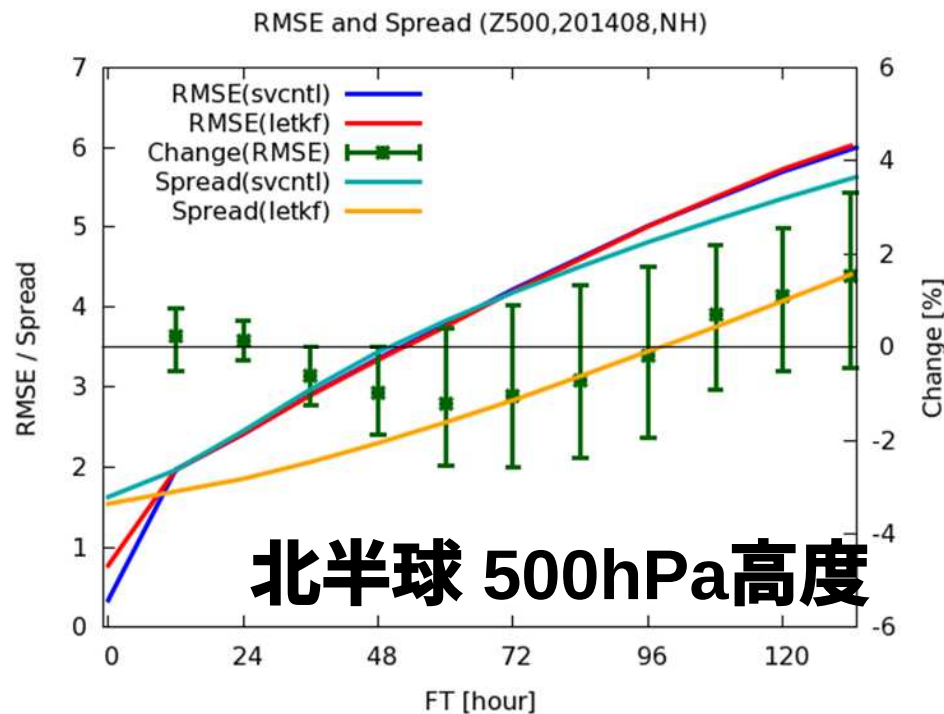
同初期時刻の3センタ
ー解析値のスプレッド

同初期時刻のLETKF
によるスプレッド

上段:850hPa気温、下段:250hPa東西風

より解析誤差の分布に近いばらつき

アンサンブル平均対解析RMSEとスプレッド



アンサンブル平均RMSE (青:週間EPS、赤:LETKF実験) とスプレッド (水色:週間EPS、橙:LETKF実験)、RMSEの変化率 (緑)。誤差幅は95%信頼区間。

予報前半は中立～改善、後半は改悪。

予報が進むとLETKF実験のばらつきがアンサンブル平均RMSEに対して過小となる (特に中・高緯度でSV実験と比べて顕著)。

FT=0で誤差が大きくなっているのは、LETKF実験の初期摂動の和が0になっていないため。

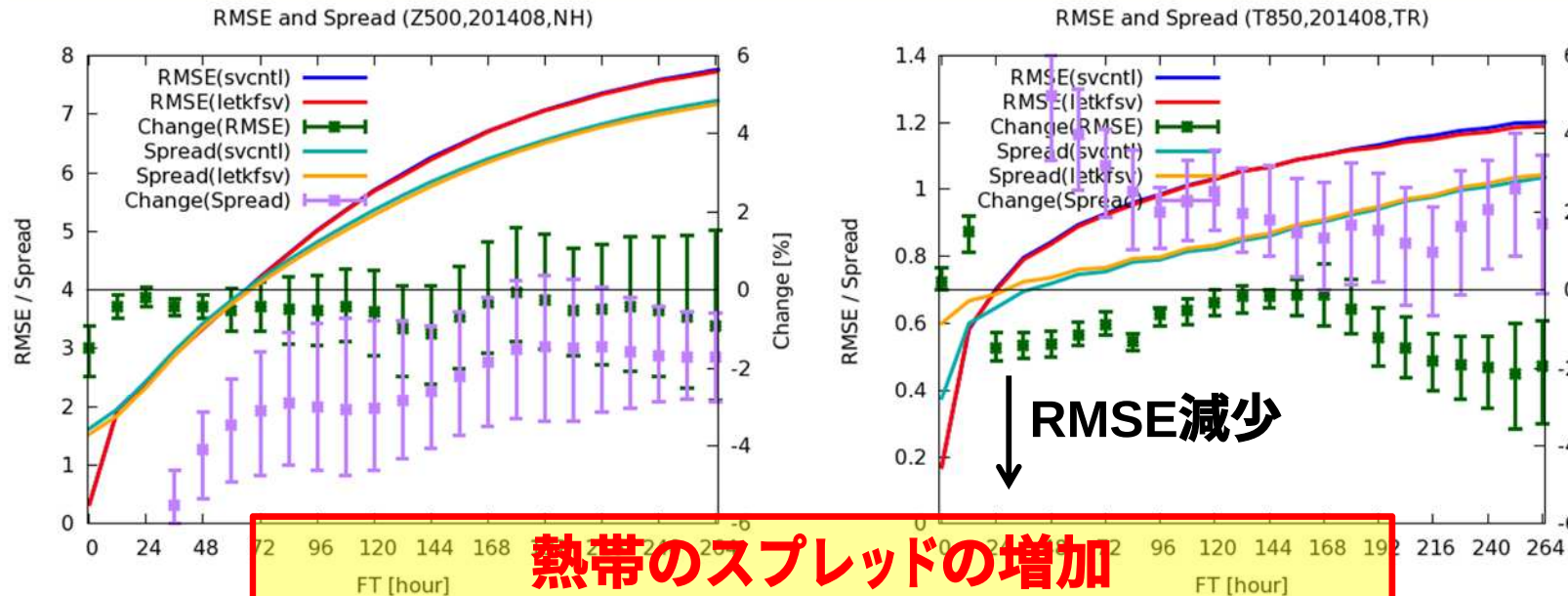
予報初期のばらつき表現はよくなったが、
摂動の成長が遅いため予報後半でばらつきが足りていない。

なぜばらつきが足りないのか？（仮説）

- 共分散の局所化などの人工的な操作が大域的な相関を持った摂動や解析変数間の力学的バランスを崩している可能性
 - 限られたメンバー数→サンプル誤差を軽減する措置が必要
 - メンバー数を十分に確保することが理想。
- 予報モデルや境界値の不完全性・不確実性が十分に考慮されていない。
 - モデルアンサンブル・境界値アンサンブルの充実を！
いづれにしても、現業EPSとしては
何らかの手当てをする必要がある。
LETKFにより予報初期の確率予測を、
SVにより中期予報におけるばらつきを確保する。

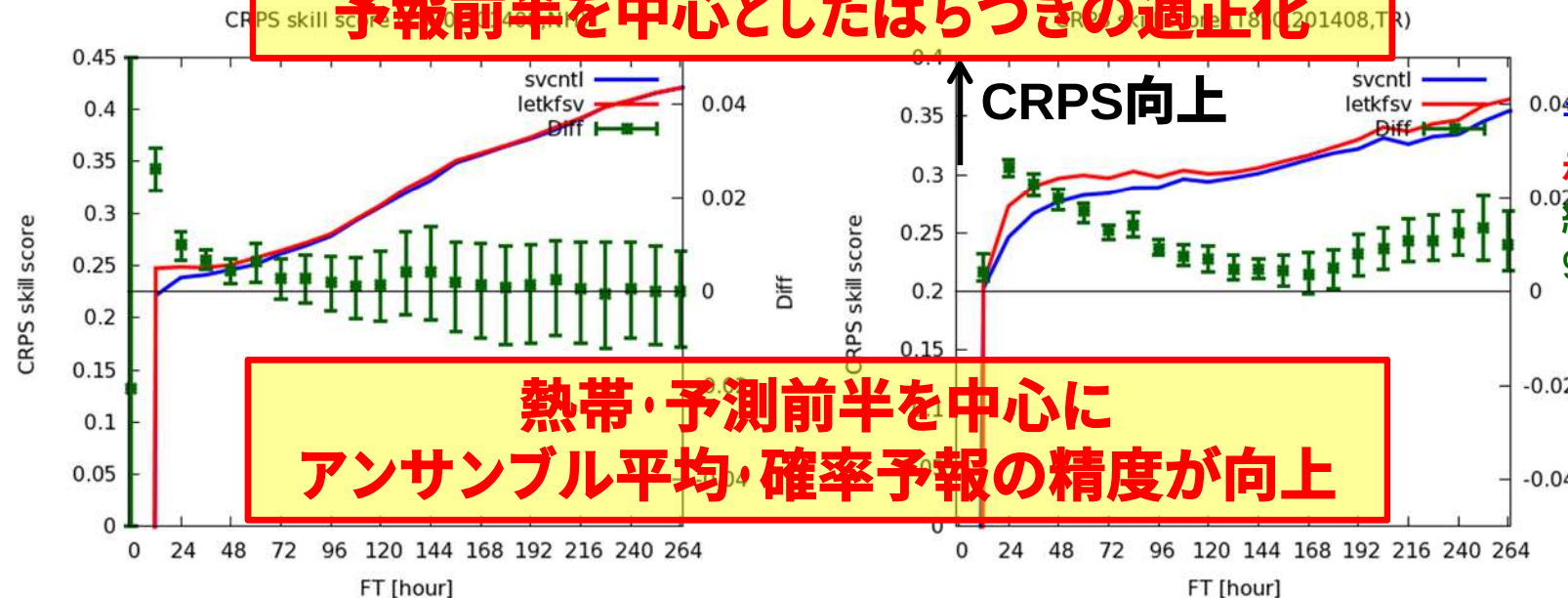
LETKFとInitial SVの組合せ実験

RMSE・スプレッド



青: アンサンブル平均RMSE (週間EPS)
赤: アンサンブル平均RMSE (LETKF+SV実験)
緑: RMSE変化率 (誤差幅は95%信頼区間)
水色: スプレッド (週間EPS)
橙: スプレッド (LETKF+SV実験)
紫: スプレッド変化率

CRPSスキルスコア



青: 週間EPS
赤: LETKF+SV実験
緑: 両実験の差 (誤差幅は95%信頼区間)

北半球500hPa高度

熱帯850hPa気温

海面水温摂動の導入

下部境界の取り扱いの現状

週間EPSにおける下部境界値

- 陸面：大気モデルと密に結合した陸面モデルで表現
 - ・ 大気の予測の不確実性に対する応答は表現。
 - ・ ただし、初期値は全メンバーで共通。→初期摂動の必要性
 - ・ 陸面モデルも共通。→陸面モデルのモデルアンサンブル
- 海面：気候値偏差固定のSST
 - ・ 大気がいかに変化しようと、全メンバーで同じSSTを与える。
 - ・ SSTの解析値、予測の不確実性を表現する摂動が必要。
 - ・ 将来的には、Skin SSTスキームの高度化、海洋混合層や海洋モデルとの結合が必要。
- 海氷：気候値偏差固定の海氷密接度
 - ・ いずれも全メンバーで共通の海氷密接度を使用。モデルでは密接度0.55を閾値とした海氷の有り無しの2値表現。→混在格子の導入
 - ・ 海氷密接度の解析値、予測の不確実性を表現する摂動が必要。

ここでは、偏差固定SSTの予測の不確実性を表現する摂動の導入を目指す。

SSTの不確実性の取り扱い

コントロールメンバーのSSTの「予報」

- 初期の気候値偏差固定

$$SST^f(T_0; t_f) - SST^f(T_0; 0) = SST^c(T_0 + t_f) - SST^c(T_0)$$

$SST^f(T; t)$: 初期時刻 T 予報時間 t のSSTの予報

$SST^c(T)$: T におけるSSTの気候値

- SSTの予報における時間変化が気候値で与えられる「気候値予報」と見なすことができる

SST摂動作成手法

- 気候値予報では過去の予報誤差のサンプルをとることで、統計的に整合した摂動を得ることができる。

摂動メンバ:

$$SST^f_i(T_0 + t_f) - SST^a(T_0) = SST^a(T_i + t_f) - SST^a(T_i)$$

コントロールメンバ: -)

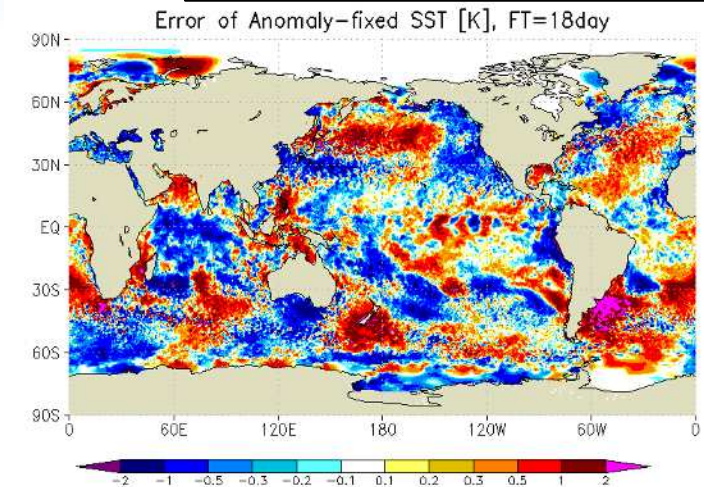
$$SST^f(T_0 + t_f) - SST^a(T_0) = SST^c(T_0 + t_f) - SST^c(T_0)$$

SST摂動:

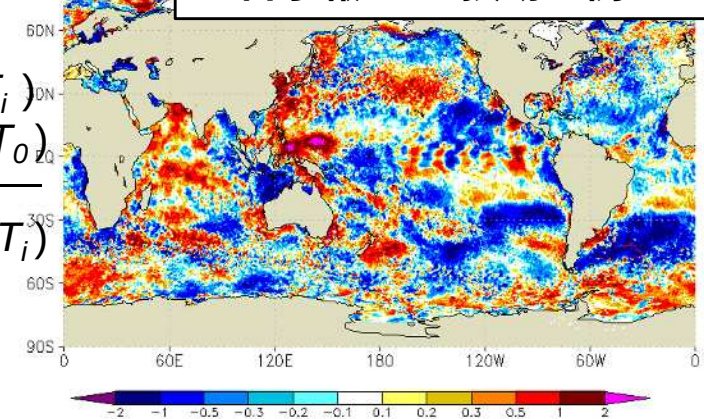
$$\Delta SST^f_i(T_0 + t_f) = SSTA(T_i + t_f) - SSTA(T_i)$$

- SSTの誤差の時間発展を自然に表現することができる。

18日予報のSST誤差の例



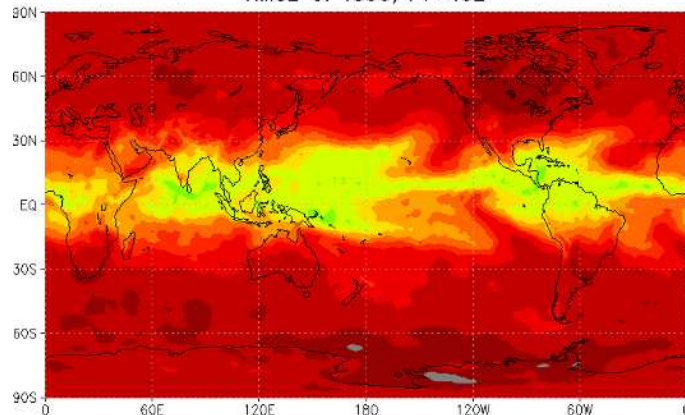
18日予報のSST摂動の例



統計的な作成手法だが、現実的なSSTの誤差の構造を捉えている。

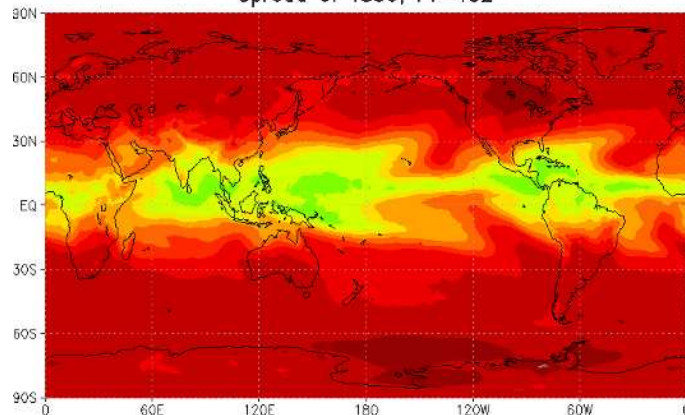
SST摂動のみ予報実験スプレッド (2013夏)

RMSE of T850, FT=432

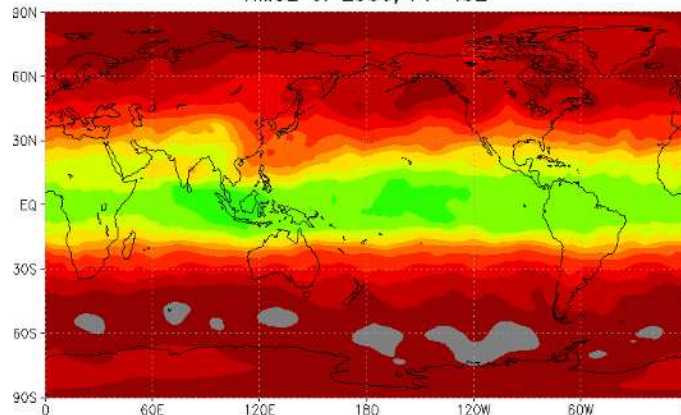


T850

Spread of T850, FT=432

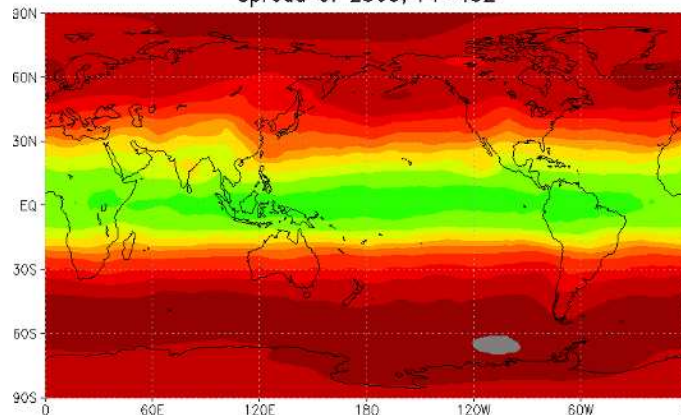


RMSE of Z500, FT=432



Z500

Spread of Z500, FT=432



SST摂動のみを与え、他はすべて同じ条件のアンサンブル予報実験を行い、SSTに解析値を与えた予報 (対照実験) と比較。

アンサンブル平均の対照実験からのRMSD (上段) とスプレッド (下段)

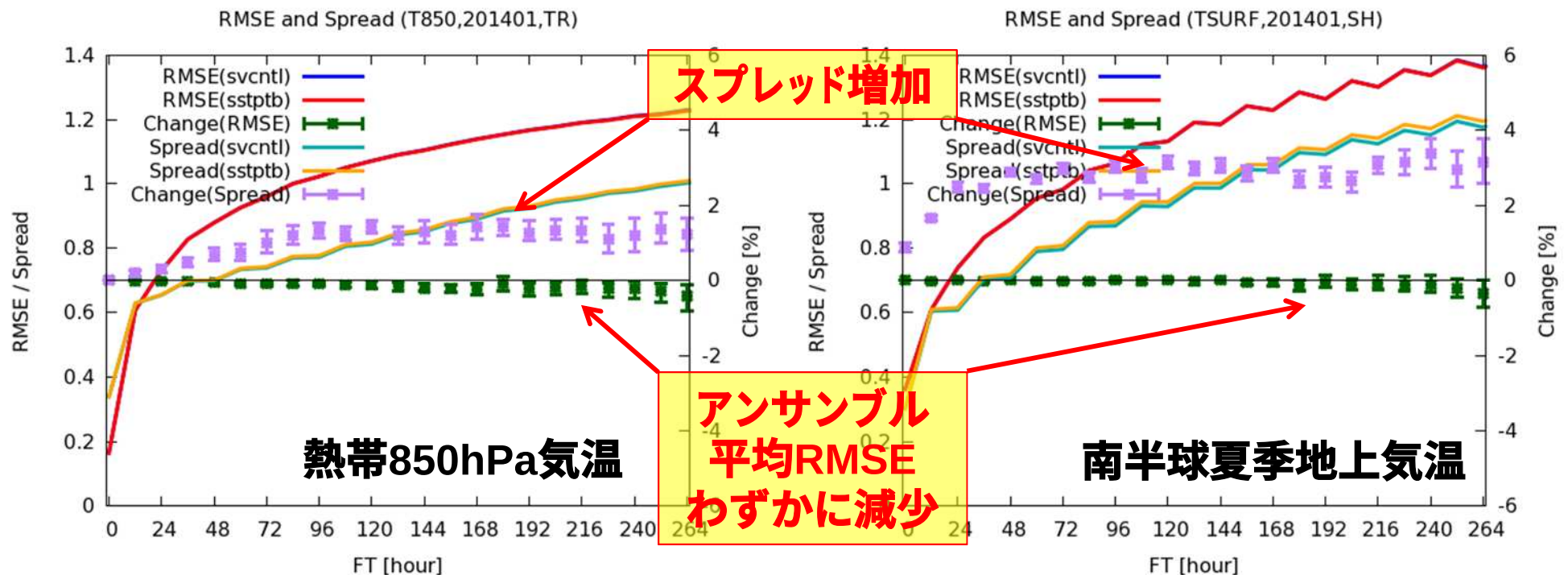
FT=432

- アンサンブル平均のRMSDとスプレッドは非常によく対応している。
- 予報前半ではばらつきはRMSDより大きいですが、予報初期の偏差固定予報SSTとSST解析値の差はSSTの解析誤差と比べても小さいと考えられるので、必ずしも過大とは言えない。

SST摂動のインパクト

週間EPSへのインパクト

- スプレッドが増加 (3%程度)
→ スプレッド・スキルの関係が改善された
- インパクトは熱帯で特に大きく、中・高緯度はこれより小さい。
- 熱帯では対流圏全層にわたって予報精度が改善している。
- 中・高緯度の予測へのインパクトは地上付近が中心。



まとめと今後の展望

ここまでのまとめと課題

- LETKFとInitial SVの組合せによって
 - 熱帯および予報初期を中心としたアンサンブル平均予報、確率予測精度の向上
 - LETKF単独では足りない予報中盤以降のばらつきを確保
- SST摂動の導入により、熱帯・夏半球を中心にばらつき増加。スプレッド・スキルの関係を改善
- データ同化との連携の可能性
 - 全球解析がハイブリッド4DVar・LETKFとなったとき、この摂動を全球EPSの初期摂動に使う可能性
- SVからの脱却
 - 熱帯ターゲットSVはできるだけ早期に見直したい
 - ノルム設定: 熱帯のばらつきを確保するため、大気下層に非常に大きな水蒸気の摂動を入れている。
 - 中・長期的には解析誤差共分散をよりよく近似する初期摂動を用いたEPSを実現すべき。
 - 境界値摂動・モデルアンサンブルのさらなる充実
- 大気・海洋モデル(or 海洋混合層、Skin SSTスキーム)の結合

気象庁の現業EPSの仕様比較 (再掲)

	台風EPS	週間EPS	1か月EPS
主な利用	台風情報	週間天気予報	異常天候早期警戒情報・1か月予報
実行頻度	1日最大4回	1日2回	土・日と火・水
予報期間	5.5日	11日	18日(土・日) 34日(火・水)
メンバー数	25	27	50 (25x2のLAF)
解像度	TL479L60 (最上層0.1hPa)		TL319L60 (同0.1hPa)
初期摂動	SV法 (北西太平洋・台風周辺)	SV法 (北半球・熱帯・南半球)	BGM法 (北半球・熱帯)
モデルアンサンブル	確率的物理過程強制法		
境界値摂動	なし		

- ✓ それぞれの利用目的に応じた仕様
 - ・ 複数のシステムを開発・運用することによる開発・管理コスト
 - ・ システムにより異なる予測結果に対する情報発表の整合性の確保
 - ・ 大気の初期値問題として扱える範囲は、一つのシステムで予測することができないか？ → 3つのEPSを統合した「全球EPS」の開発

全球EPSの仕様 (案)

	全球EPS
主な利用	台風情報・週間天気予報・異常天候早期警戒情報・1か月予報
実行頻度	1日最大4回 (通常2回)
予報期間	5.5日 (06,18UTC) 、18日 (火・水以外00,12UTC) 34日 (火・水00,12UTC)
メンバー数	11日先まで27、その後17
解像度	18日先までTL479L100 (最上層0.01hPa) 、その後TL319L100
初期摂動	SV法 (北半球・熱帯・南半球) + LETKF
モデルアンサンブル	確率的物理過程強制法
境界値摂動	海面水温摂動

- ✓ 台風～1か月まで3つのEPSの主な利用目的を全てカバーする全球EPS
- ✓ 1つのEPSを用いることによる気象情報発表の効率化、開発資源の集約
- ✓ 予報モデルは**最新の全球決定論予報モデルにさらに物理過程の改良を加えたモデル**を導入予定。
- ✓ 平成28年度末の現業化を目指す

予報モデルの更新

- **高解像度決定論予報モデル (GSM) の改善**
 - 2014年3月：鉛直高解像度化 (60層→100層)・モデルトップ変更 (0.1hPa→0.01hPa)・物理過程改良
 - 2016年3月：物理過程改良
 - これらの変更では、予報精度の大幅な向上、解析・予報特性の変化が確認されている。
- **現在の週間EPSのモデルは2014年3月の変更前のもの。**
 - 全球EPSでは最新の決定論予報モデルにさらに次期GSM改良に向けて検討されている改善項目を含んだモデルを採用予定。

台風～1か月EPSをカバーする シームレスな「全球EPS」に向けて

- 気象庁が運用する3つのEPS：台風EPS、週間EPS、1か月EPSを統合した全球EPSの開発を進めている。
 - 大気の初期値問題として扱える範囲を1つのEPSで予測
 - 最新の全球決定論予報モデルの改良を反映
 - 初期摂動作成手法の高度化、SST摂動の導入
 - 再予報データの週間EPSの時間スケールでの利用可能性
- 今後も、EPSの性能向上を目指した開発を進めていく。
 - 予報モデル、初期摂動、モデルアンサンブル、境界値摂動などの改良により、EPSの総合的な精度向上を。
 - 開発者・研究者からの視点だけでなく、ユーザーからのフィードバックも期待。
 - 様々なユーザーを満足させるシステムが作れるか、というチャレンジ。
- 参考
 - 数値予報課報告・別冊第62号「確率的な気象予測のためのアンサンブル予報の課題と展望」
<http://www.jma.go.jp/jma/kishou/books/nwpreport/nwpreport.html>