

全球大気解析の高精度化に関する研究

～観測データのインパクト評価と
誤差共分散行列の高精度推定～

CPS/WTK セミナー2020年8月3日(月) 16:30 -

石橋 俊之

気象庁 気象研究所 気象観測研究部 第3研究室 主任研究官

E-mail : [ishibasi\[at\]mri-jma.go.jp](mailto:ishibasi@mri-jma.go.jp)

自己紹介

- 現所属：気象庁 気象研究所 気象観測研究部 第三研究室 主任研究官
- 経歴：
 - 1998～ 気象庁
 - 2005～ 気象庁数値予報課。全球大気データ同化開発に従事。
静止気象衛星の輝度温度同化、変分法バイアス補正改定版の現業化等。
 - 2010～ 気象研究所台風研究部。全球大気データ同化研究。
 - 2019～ 気象研究所気象観測研究部（組織改編）。全球大気データ同化研究。

内容

1. 導入

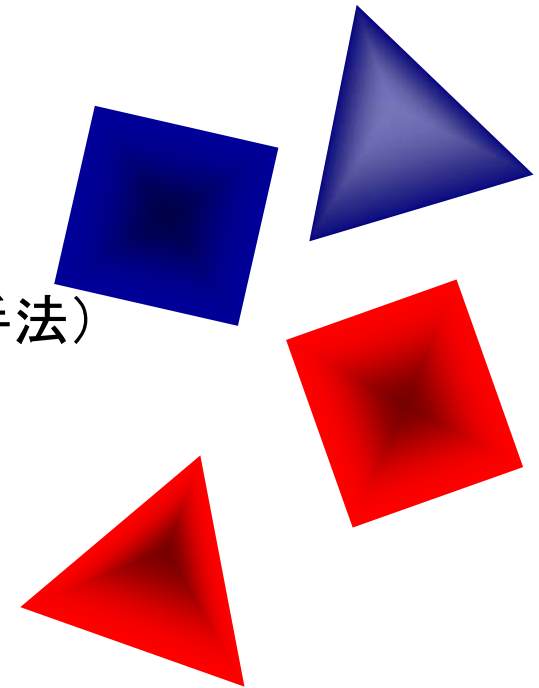
- 研究背景と目的
- データ同化による全球大気解析

2. 観測インパクト評価

- 前方計算による観測インパクトの直接評価(新手法)
- 随伴演算子による観測インパクト評価(FSO)

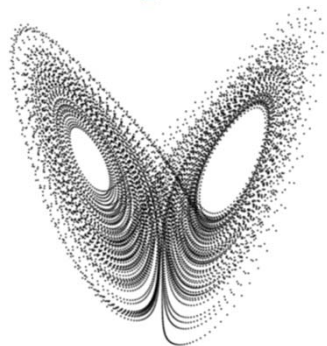
3. 誤差共分散行列の高精度推定

4. 結論



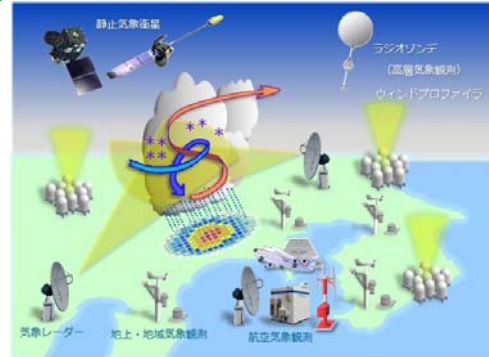
大気状態の解析とデータ同化

全球大気
の状態を
知りたい

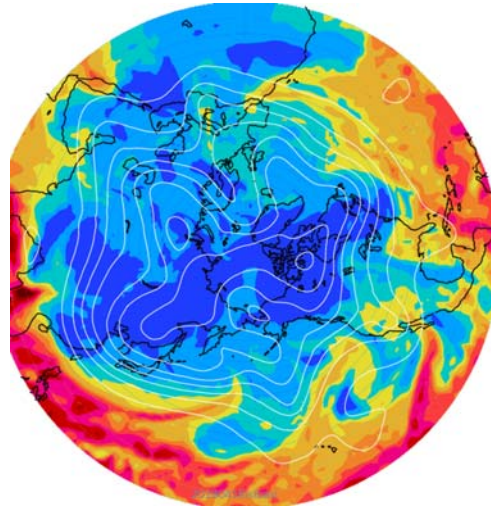


大気はカオス性(初期値
鋭敏性)を有する

Viana, M. (2000). What's new on Lorenz strange attractors?. The Mathematical Intelligencer, 22(3), 6-19.



多くの観測データ $\sim 10^6$



精緻な数値モデル $\sim 10^8$

$$P(\mathbf{x} | \mathbf{z}) = \frac{P(\mathbf{z} | \mathbf{x})P(\mathbf{x})}{P(\mathbf{z})}$$

大気状態に関する膨大な情報を不定性を考慮しながら統合する必要。
PDF(10^{16})による記述: データ同化

観測、計算可能な問題になるよう良く近似し、適切なPDFでより多くのデータを同化することがデータ研究のメインテーマ

大気解析：データ同化

- 大気に関する情報（観測や予測）の不定性は確率密度関数で表現できる。

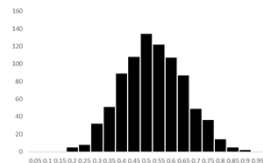
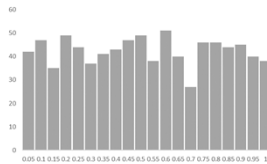
\mathbf{z} が生じているとき \mathbf{x} が生ずる確率：

$$P(\mathbf{x} | \mathbf{z})$$

- 条件付確率密度関数の間の恒等式（ベイズの定理）：

$$P(\mathbf{x} | \mathbf{z}) = \frac{P(\mathbf{z} | \mathbf{x})P(\mathbf{x})}{P(\mathbf{z})}$$

- 我々の持つ大気に関する情報を \mathbf{z} 、真の大気状態を \mathbf{x} とすると、この式から大気状態を推定することができる。例：最尤推定場。
- そのためには、予報や観測の誤差のPDFが必要である。しかし、真の大気状態は実質不可知であり、無限個の標本を得ることも不可能なのでこれは難問。
- 中心極限定理によれば、様々な確率過程が絡み合った結果の誤差はガウス分布で良く近似できる。



- したがって、PDFを**ガウス分布で近似**する。

$$P(\mathbf{z} | \mathbf{x}) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}^n \sqrt{|\Sigma|}} \exp \left\{ -\frac{1}{2} (\mathbf{z} - H(\mathbf{x}))^T \Sigma^{-1} (\mathbf{z} - H(\mathbf{x})) \right\}$$

近似表現することが必須

PDFは誤差共分散行列 Σ で決まる。

$H(\mathbf{x})$: 観測演算子⁵

大気解析：データ同化

● 最も確からしい場（最尤推定場）は $\operatorname{argmax}_x P(\mathbf{x}|\mathbf{z})$

● ガウス分布近似では
$$\operatorname{argmax}_x \frac{1}{\sqrt{2\pi}^n \sqrt{|\Sigma|}} \exp \left\{ -\frac{1}{2} (\mathbf{z} - H(\mathbf{x}))^T \Sigma^{-1} (\mathbf{z} - H(\mathbf{x})) \right\} P(\mathbf{x})$$

● 対数をとれば

$$\operatorname{argmin}_x J(\mathbf{x}) \quad ; \quad J(\mathbf{x}) = \frac{1}{2} (\mathbf{z} - H(\mathbf{x}))^T \Sigma^{-1} (\mathbf{z} - H(\mathbf{x})) - \ln\{P(\mathbf{x})\}$$

● 観測データ \mathbf{y} と短時間予報 \mathbf{x}_b を \mathbf{z} とし、気候学的な情報は使わない ($P(\mathbf{x}) = \text{const}$) とすると、

$$J(\mathbf{x}) = \frac{1}{2} (\mathbf{x} - \mathbf{x}_b)^T \mathbf{B}^{-1} (\mathbf{x} - \mathbf{x}_b) + \frac{1}{2} (\mathbf{y} - H(\mathbf{x}))^T \mathbf{R}^{-1} (\mathbf{y} - H(\mathbf{x}))$$

● さらに観測演算子を **接線型近似** すると

$$J(\mathbf{x}) = \frac{1}{2} \delta \mathbf{x}^T \mathbf{B}^{-1} \delta \mathbf{x} + \frac{1}{2} (\mathbf{d} - \mathbf{H} \delta \mathbf{x})^T \mathbf{R}^{-1} (\mathbf{d} - \mathbf{H} \delta \mathbf{x})$$

● 解析解は

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

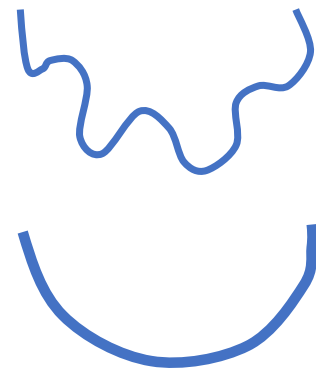
Σ : \mathbf{z} の誤差共分散行列 (Error Covariance Matrix: **ECM**)

\mathbf{B} : 背景誤差共分散行列; \mathbf{R} : 観測誤差共分散行列

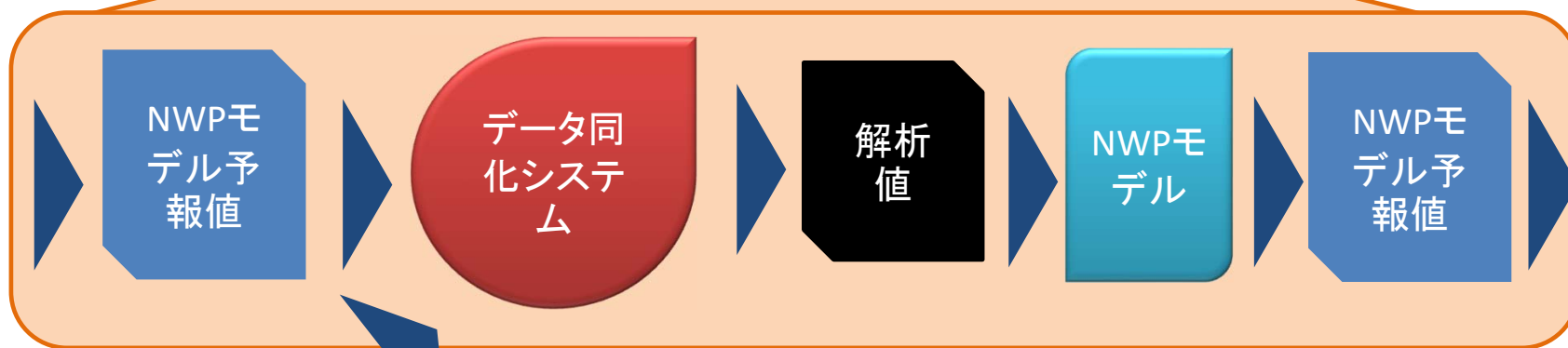
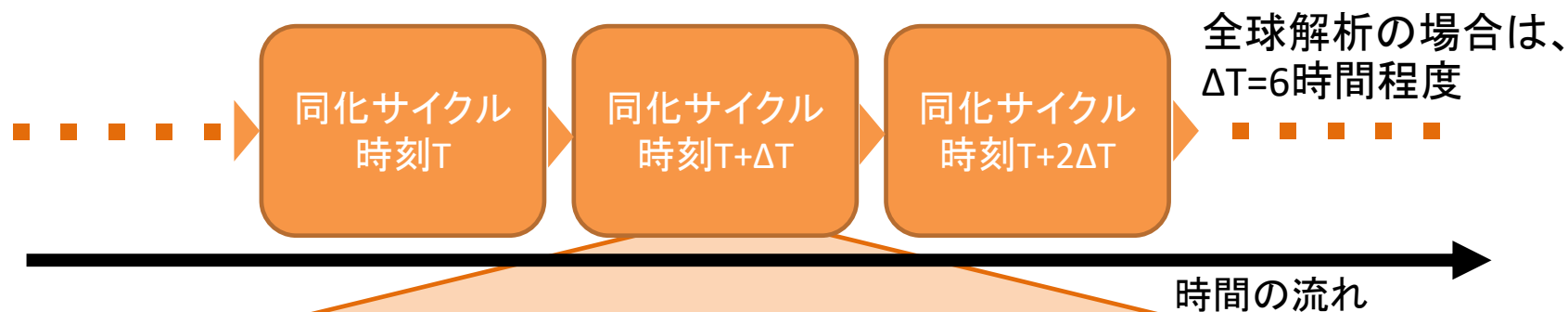
$H(\mathbf{x})$: 観測演算子; \mathbf{H} : $H(\mathbf{x})$ の接線型演算子

\mathbf{d} : D値ベクトル (観測と予報値の差); \mathbf{K} : カルマンゲイン

観測データ数個のモデル次元ベクトルの重ね合わせ。



数値天気予報(NWP)システムの概要



観測システム

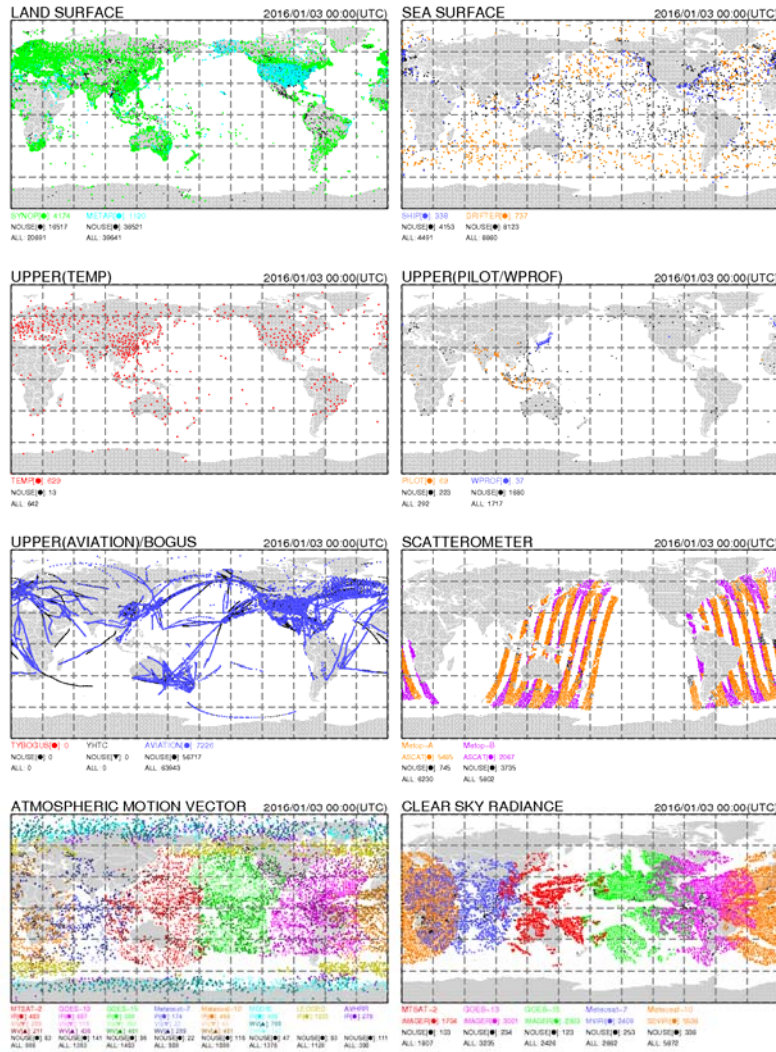
観測データ

観測データは大気解析の最も重要な情報

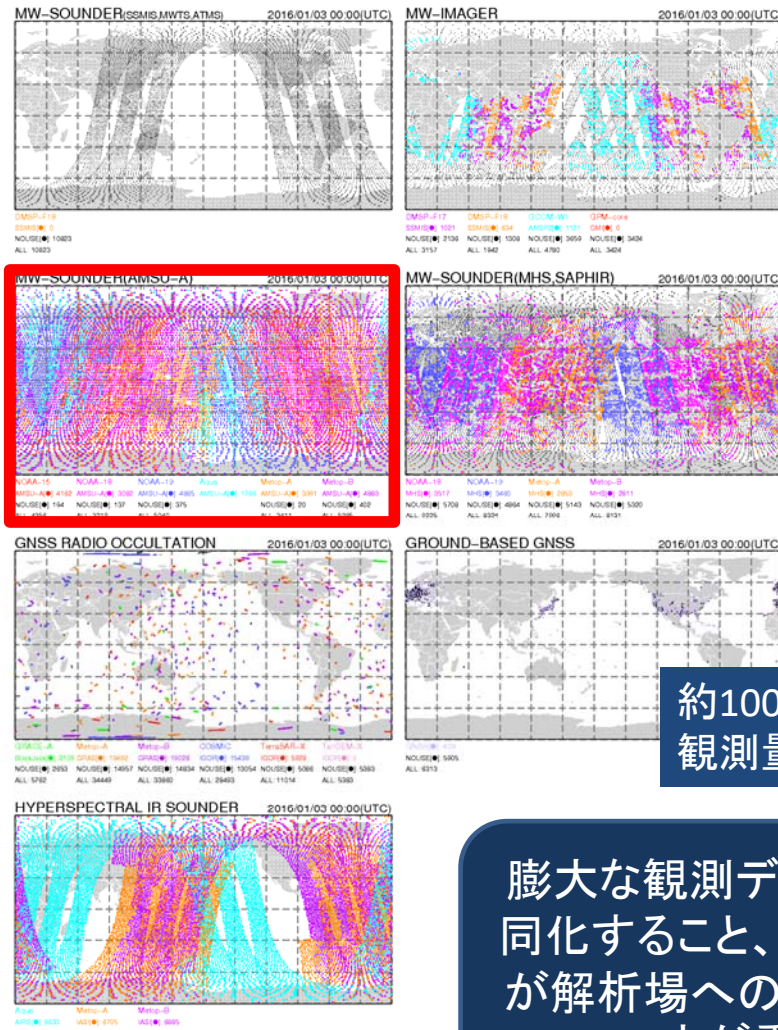


全球大気解析で同化される観測データ

JMA GLOBAL ANALYSIS – DATA COVERAGE MAP – 1 (Da00ps): 2016/01/03 00:00(UTC)



JMA GLOBAL ANALYSIS – DATA COVERAGE MAP – 2 (Da00ps): 2016/01/03 00:00(UTC)



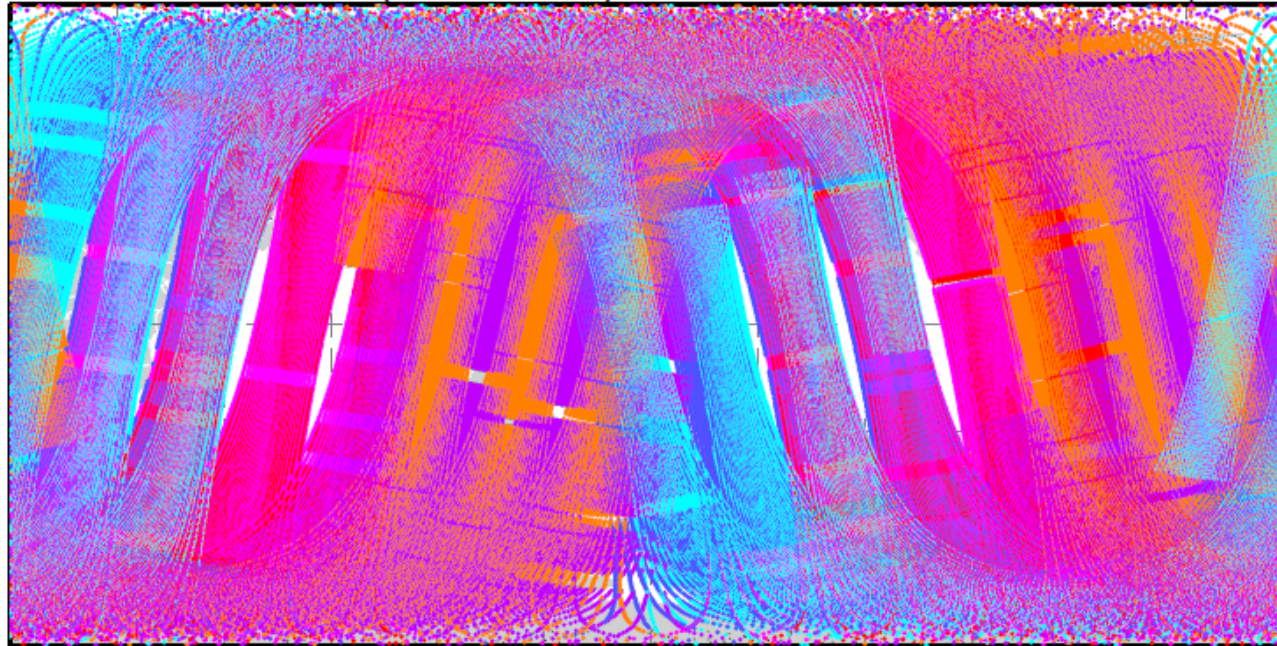
約100万データ/解析
観測量= H(気温, ...)

膨大な観測データを適切に同化すること、同化した観測が解析場への影響を知ることが重要。

将来的に利用可能なデータは数十倍

MW-SOUNDER(AMSU-A)

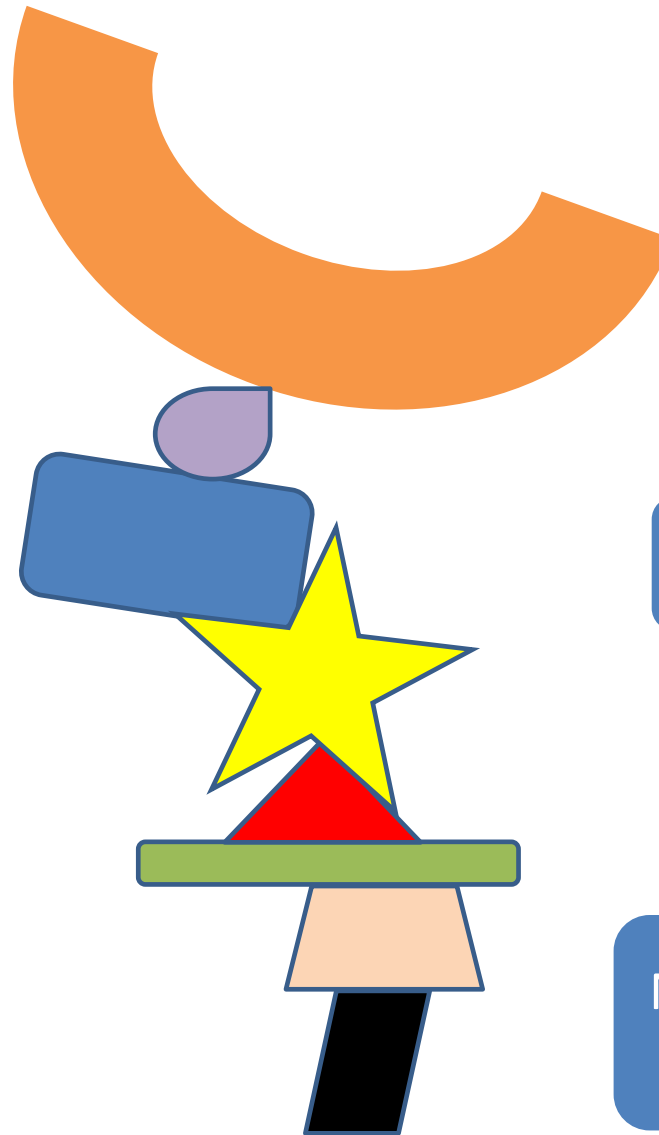
2014/08/21 00:00(UTC)



NOAA-15	NOAA-18	NOAA-19	Aqua	Metop-A	Metop-B
AMSU-A[●]: 69902	AMSU-A[●]: 78066	AMSU-A[●]: 68278	AMSU-A[●]: 68843	AMSU-A[●]: 72231	AMSU-A[●]: 74595
NOUSE[●]: 1065	NOUSE[●]: 604	NOUSE[●]: 2163	NOUSE[●]: 7	NOUSE[●]: 596	NOUSE[●]: 1356
ALL: 70967	ALL: 78670	ALL: 70441	ALL: 68850	ALL: 72827	ALL: 75951

より多くの観測を同化するためには、誤差共分散行列の近似精度を向上させる必要がある。

誤差共分散行列の課題



経験的調整の塊・・・

理論から乖離。

新規データの追加が難しい。
もうのらない・・・

観測データは正しく同化されているのか？

NWPシステムの改良がECMの
誤差の補償と区別できない。

研究背景

背景:

- 大気はカオス的性質をもつため大気状態(風速、温度、水蒸気量、気圧分布等)を正確に解析することは、難しい科学的課題となっている。
- データ同化(Data Assimilation: DA)は、大気に関する複数の情報源(観測、モデル予測、物理法則等)からの膨大な情報を無矛盾に統合することでこれを可能にする。
- DAを大気解析のような大自由度系の解析に適用するには、適切な近似によって系の自由度を下げる必要があり、「どのように近似するか」が大気データ同化研究の重要なテーマとなっている。
- 特にDAが基礎とするPDFを有限標本で良く近似することが不可欠である。中心極限定理によってガウス分布で近似することは多くの場合に良い近似となるため、ECMの推定問題に帰着する。
- 共分散行列は、観測データが解析にどう影響するかを規定するため、観測インパクトを解析することでECMの情報が得られる。ECMの推定と観測インパクト研究は対をなす研究と言える。
- データ同化で実装されているECMは多くの経験的調整パラメータを含んでおり、解析精度を強く制約している。
- 観測の解析場への影響を解析することは重要だが、既存手法では影響の時空間構造を解析できないなどの課題がある。

研究目的

目的:

- ECM全体を複数の推定手法を用いて高精度に推定し、これを同化システムに導入することで、解析、予報精度を改善する。ECM全体を対象とするこのような研究は、本研究がはじめての行うものである。
- 観測インパクトの時空間構造を解析できる新しい評価手法を構築し、既存手法と合わせて観測インパクト評価を詳細に行う。これはECMの性質を評価することでもある。
- 同化理論に基づくECMの高精度推定と詳細な観測インパクト評価によって高精度で妥当性の高い大気解析が可能になることを明らかにする。

本研究の構成

観測インパクト評価

R1:
観測インパクトの時空間構造
を解析できる新しいインパクト
評価手法の構築

R2:
随伴演算子による観測
インパクト評価

R3:
ECMの高精度推定

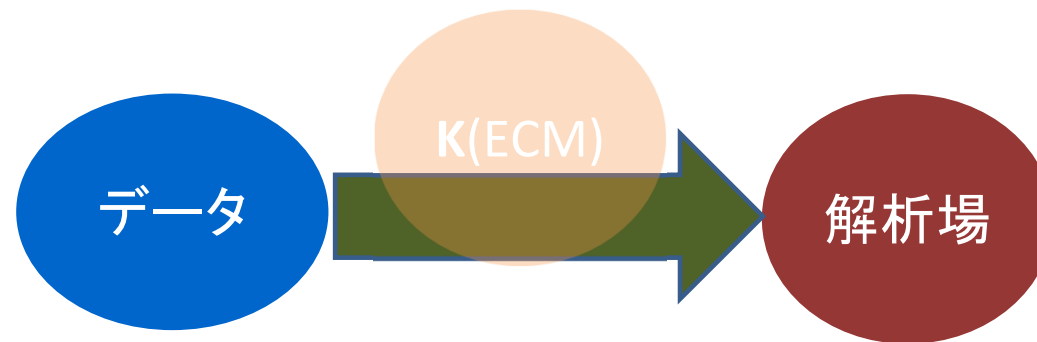


より多くの観測情報を取り入れた高精度な大気解析の構築

原著論文及び数値実験システムについて

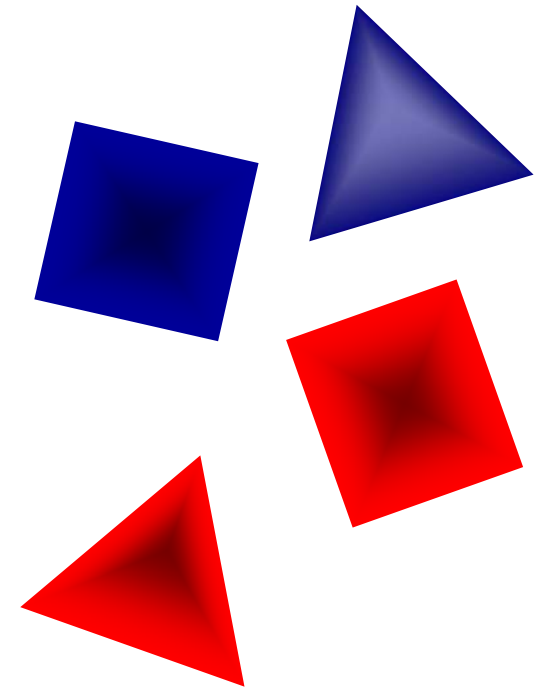
- 本発表は、以下の査読論文(単著)に基づく。
 - 前方計算による観測インパクトの直接評価(新手法)
 - Ishibashi, T., 2011: Tangent linear approximation based observation data impact estimation in 4D-Var. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 137, 1898–1912, <https://doi.org/10.1002/qj.871>
 - 随伴演算子による観測インパクト評価(FSO)
 - Ishibashi, T., 2018: Adjoint-Based Observation Impact Estimation with Direct Verification Using Forward Calculation. *Mon. Wea. Rev.*, 146, 2837–2858, <https://doi.org/10.1175/MWR-D-18-0037.1>.
 - 誤差共分散行列の高精度推定
 - Ishibashi, T., 2020: Improvement of Accuracy of Global Numerical Weather Prediction Using Refined Error Covariance Matrices. *Mon. Wea. Rev.*, 148, 2623–2643, DOI: 10.1175/MWR-D-19-0269.1.
- 本研究に用いた数値実験システムの説明
 - ベースとしたのは、気象庁全球数値天気予報システム(S1)を気象研究所計算機に移植したシステム(S2)である。
 - S1は気象庁数値予報課が主に開発。(発表者は2005-2009年度在籍。)
 - S2は2010年度に移植担当グループ(気象研究所、数値予報課)によって移植され、発表者はモジュールコンパイル、ジョブ管理スクリプトの作成等を担当。以降、計算機システム更新に伴う2回の移植、バージョンアップについては、発表者が主担当として実施。
 - 各研究では、S2を拡張して数値実験を実施。

2-1. 前方計算による 観測インパクトの直接評価



2-1. 内容

1. 導入
 - 研究背景と目的
 - 観測インパクトとは
2. 定式化
3. 気象庁全球NWPシステムの評価
4. まとめ



研究背景と目的

背景

- 観測データは、データ同化による大気解析において最も重要な情報の一つである。同化された各観測が解析場や予報場に与える影響（観測インパクト）を知ることは大気解析の高精度化に不可欠である。
- 一方で、観測インパクトを決定するカルマンゲインは数値予報モデルを含む非常に大きな行列であり、陽に構成することは難しいため、既存のインパクト評価手法にはインパクトの時空間構造を解析できないなどの課題がある。

目的

- 本研究では、観測インパクトの時空間構造を解析できる新しい観測インパクト手法を構築する。これはカルマンゲインの観測データへの作用を解析可能にするものである。
- 気象庁全球数値予報システムについて観測インパクトを解析し、インパクトの時空間構造等を解析する。

観測インパクトの定義と評価手法

■ 基本定義

□ 観測インパクトとは、観測データに**摂動**を与えた時の解析や予報場の変化である。

● 非線形観測インパクト

□ 観測データに与える**摂動**として、観測値だけでなく観測データセットの変化も含む場合の観測インパクトである。**したがって、カルマンゲインは変化する。**

□ 評価手法

✓ 観測システム実験 (observing system experiment: OSE).

● 線形観測インパクト

□ 観測データに与える**摂動**として、観測値の変化だけを含む場合の観測インパクトである。**カルマンゲインは不変。**

□ 評価手法

✓ 随伴演算子による評価 (FSO; Langland and Baker 2004)

✓ 前方計算による直接評価 (Ishibashi, 2011: **本研究**)

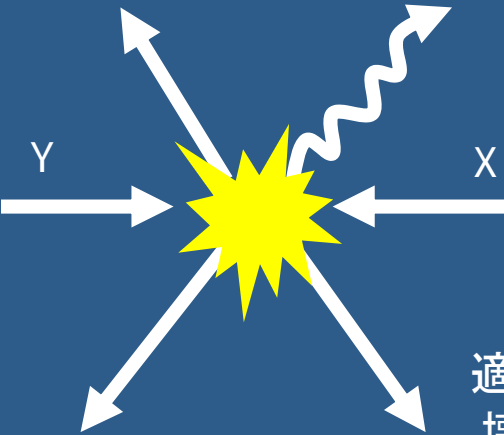
✓ Degrees of Freedom for signal (DFS)

2つの観測インパクトは異なる量である。
互い他の代替にはならない。

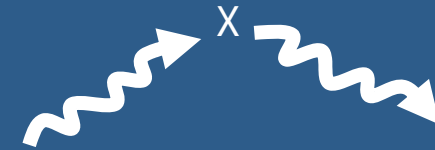
線型解析と非線型解析の比較イメージ

例1 Xを調べたい場合

両方の手法があることが望ましい。



適当なYとぶつけて粉々に
壊して破片を調べる(例、
素粒子実験)



Xを壊さない程度の相互作用で
の応答を調べる。(例、レーダに
よる降雨観測、衛星による輝度
温度、電波遅延量観測)

例2 $Du/Dt = F1(x) + F2(x)$ でのF1, F2の効果を調べたい場合

$F2(x) = 0$ として積分してみる。
 $Du/Dt = F1(x)$



F1(x)とF2(x)の大きさとDu/Dtの挙動
を比較する(項別寄与の解析)。

観測インパクトとカルマンゲイン

- 観測インパクトはKが決定。
- Kは数値予報モデルを含む $10^8 \times 10^6$ 程度の大きな行列であるため、Kを構成することは難しい。
- EnKFではKをモデルまたは観測空間で分割することで近似的に構成。
- 変分法はPDFの最大化問題を解くことで、問題を分割せずに解けるが、Kは陽に構成されない。本研究ではこの陽に構成されない（分割のない）Kの作用を解析する。

$$\delta \mathbf{x}_a = \mathbf{K} \delta \mathbf{y}$$

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

h: 観測演算子の接線型演算子
(時間推進を含まない)

M: 数値予報モデルの接線型演算子

既存のインパクト評価手法(DFS、FSO)では、Kのモデル次元の自由度は内積を取って消すことで評価を可能にしている。

例:

$$\delta(\mathbf{x}_a^T \mathbf{x}_a) = \mathbf{x}_a^T \mathbf{K} \delta \mathbf{y}$$

一方で時空間構造の解析はできない。

変分法とカルマンゲイン

- 変分法では**K**は陽に構成されないが、 D 値ベクトルに対する変分法の作用は、**K**の作用と同じである。
- **K**は暗に構成されている。
- Observing System Experiment (OSE)のように観測データセットを変えると**K**も変わるので、線形インパクトは解析できない

$$\mathbf{d} \Rightarrow [4D - Var] \Rightarrow \delta \mathbf{x}$$

operator **K**

$$\mathbf{d}_{P+Q} \Rightarrow [4D - Var]_{P+Q} \Rightarrow \delta \mathbf{x}_{P+Q}$$

$$\mathbf{d}_Q \Rightarrow [4D - Var]_Q \Rightarrow \delta \mathbf{x}_Q$$

$$\mathbf{K}_{P+Q} \neq \mathbf{K}_Q$$

定式化

- 解析インクリメントベクトルは、部分解析インクリメントベクトル (partial increment vectors: PIV) の重ね合わせで表される。

$$\delta \mathbf{x} = \delta \mathbf{x}^{*P} + \delta \mathbf{x}^{*Q} + \dots \quad \delta x_i^{*P} \equiv \sum_{r \in P} K_{i,r} d_r ; \quad \delta x_i^{*Q} \equiv \sum_{r \in Q} K_{i,r} d_r$$

- あるデータセットのインパクトはPIVで表される。
- D値ベクトル (観測値とモデル予測の差のベクトル) は、部分D値ベクトルの重ね合わせ (partial departure vectors: PDV) で表される。

$$\mathbf{d} = \mathbf{d}^{*P} + \mathbf{d}^{*Q} + \dots \quad d_r^{*P} \equiv \begin{cases} d_r & r \in P \\ 0 & r \notin P \end{cases} ; \quad d_r^{*Q} \equiv \begin{cases} d_r & r \in Q \\ 0 & r \notin Q \end{cases}$$

- PIVはPDVで書くと

$$\delta \mathbf{x}^{*P} = \mathbf{K} \mathbf{d}^{*P}, \quad \delta \mathbf{x}^{*Q} = \mathbf{K} \mathbf{d}^{*Q}, \quad \dots$$

- PIVの計算方法:

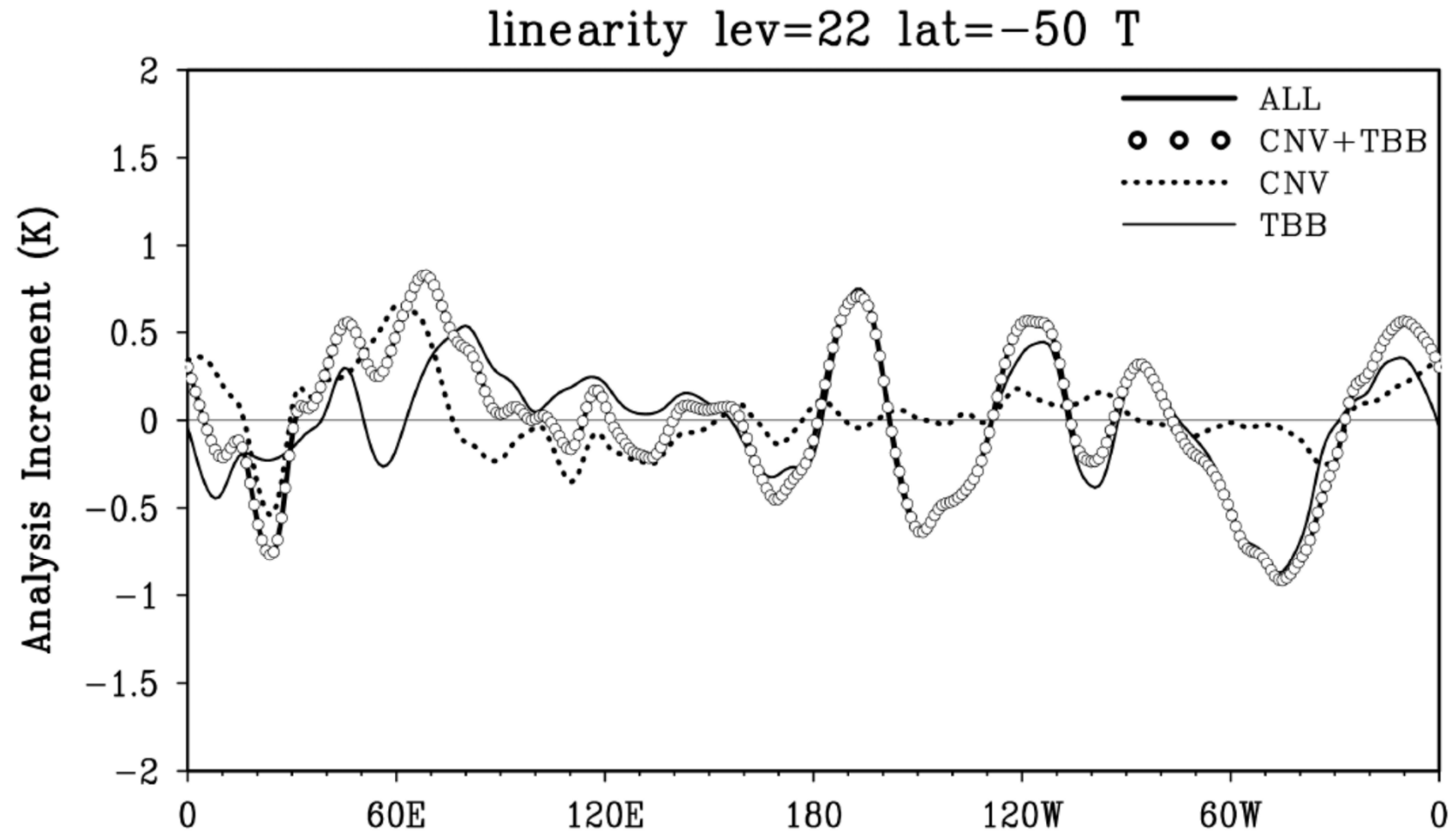
$$\mathbf{d}^{*P} \Rightarrow [4D - Var] \Rightarrow \delta \mathbf{x}^{*P}$$

operator **K**

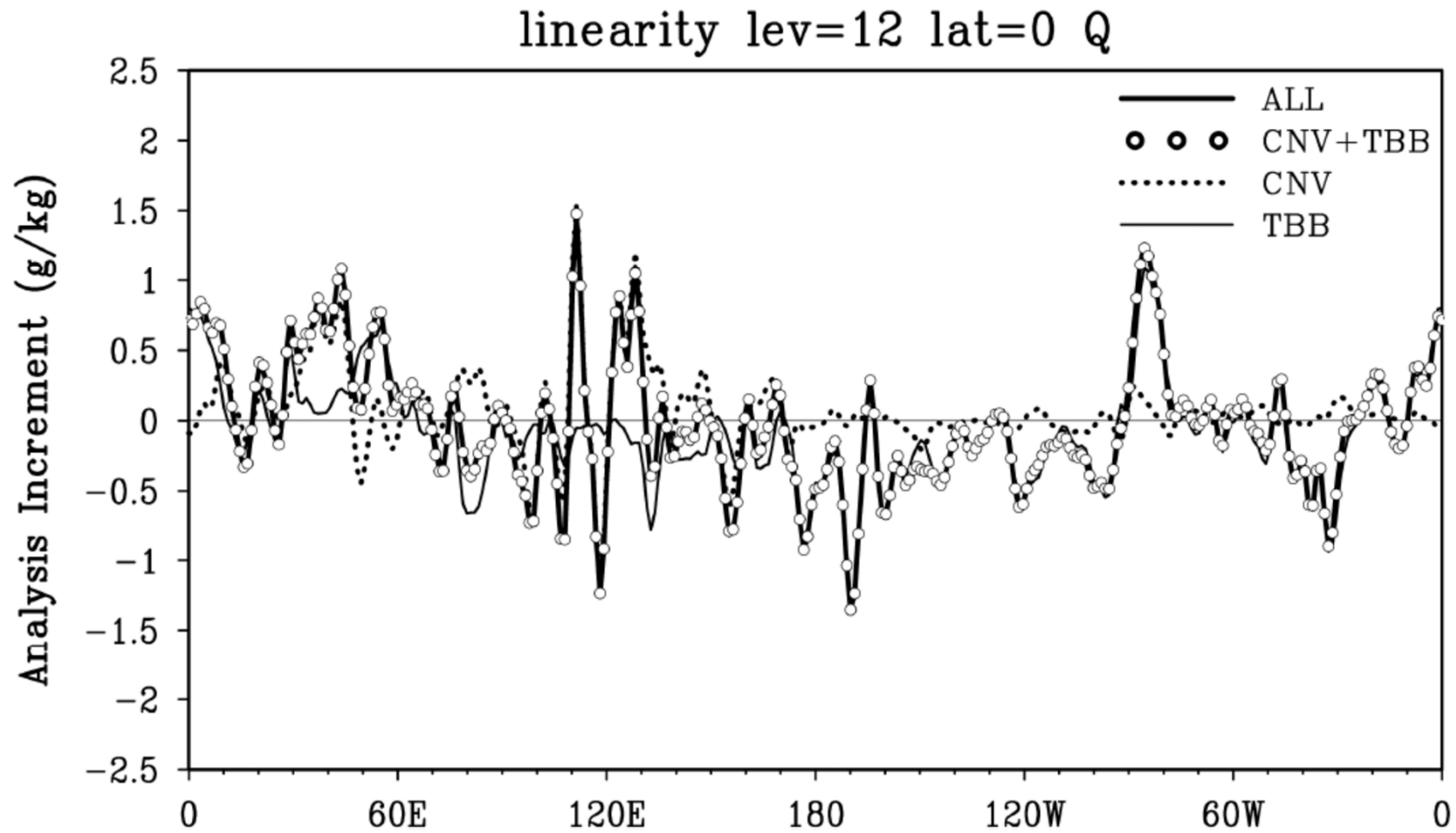
気象庁全球NWPシステムの観測インパクト

- 気象庁全球NWPシステム (JMA, 2013)
 - 実験には水平低解像度版20km→60kmを使用。
 - 予報モデル: プリミティブ方程式系のスペクトルモデル。鉛直層数は60。モデルトップは0.1hPa。
 - データ同化スキーム: 4次元変分法 (4D-Var)
 - 輝度温度観測のバイアス補正は変分法バイアス補正による。
 - 背景ECMはNMC法、観測ECMは対角行列でD値統計をベースに、いずれも経験的調整を含む。
- 観測インパクトの計算
 - ✓ 解析場、48時間予報場について、PIVを計算。
 - ✓ 解析対象: 2007/07/20 00UTC解析
- 観測データの区分
 - ✓ 衛星輝度温度観測 (TBB)、従来型観測 (CNV) に区分。CNVはさらにラジオゾンデ観測 (SONDE)、衛星風観測 (AMV)、その他に区分。

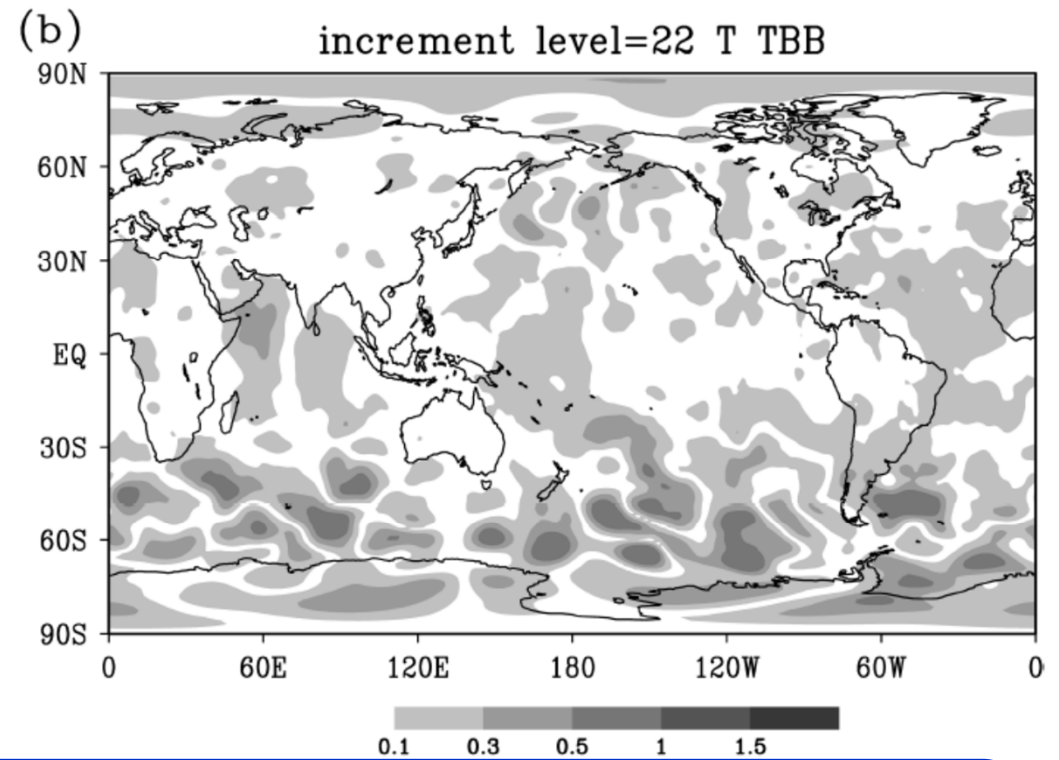
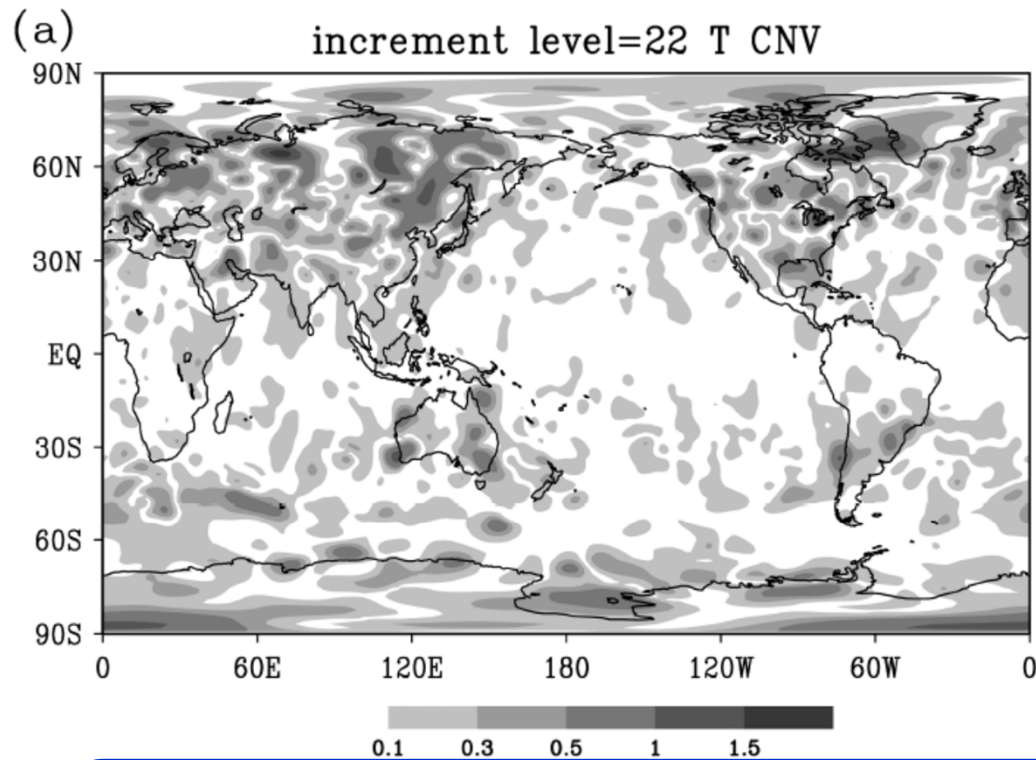
解析場の線形性：気温@500hPa 50° S



解析場の線形性: 比湿@850hPa 0°N

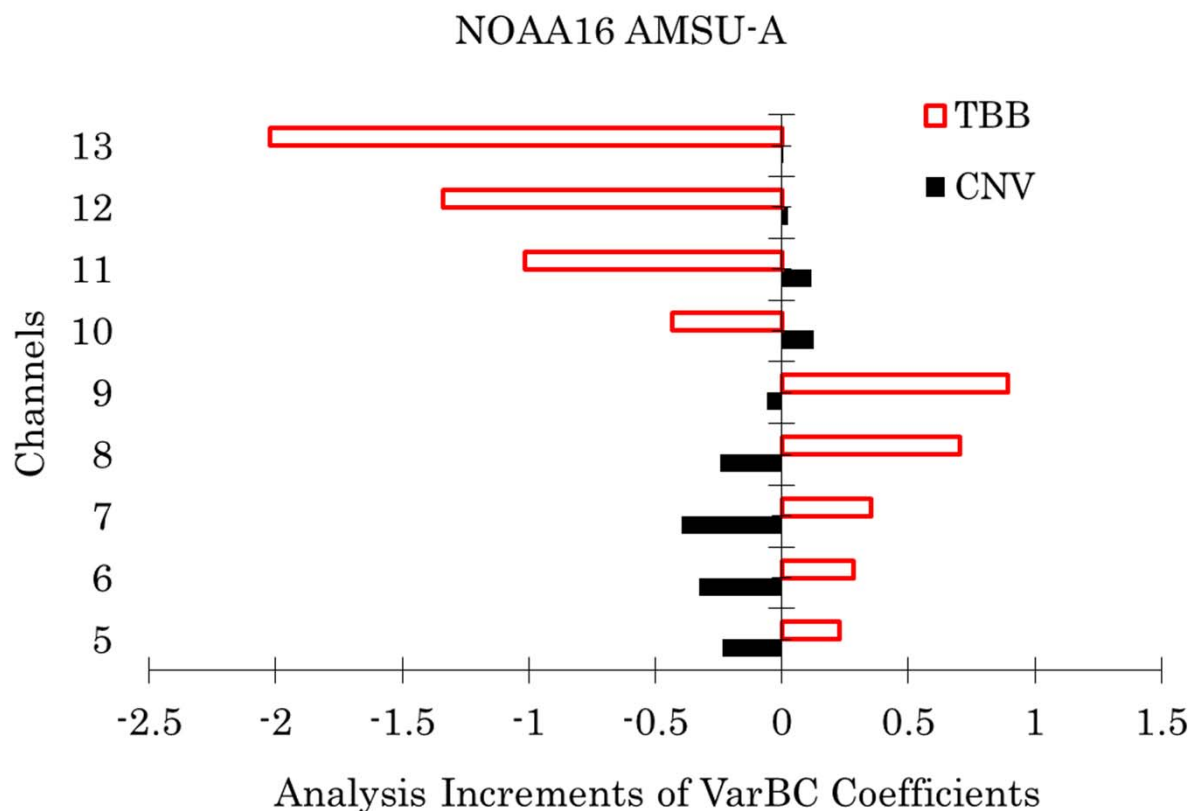


解析場への観測インパクト@500hPa T



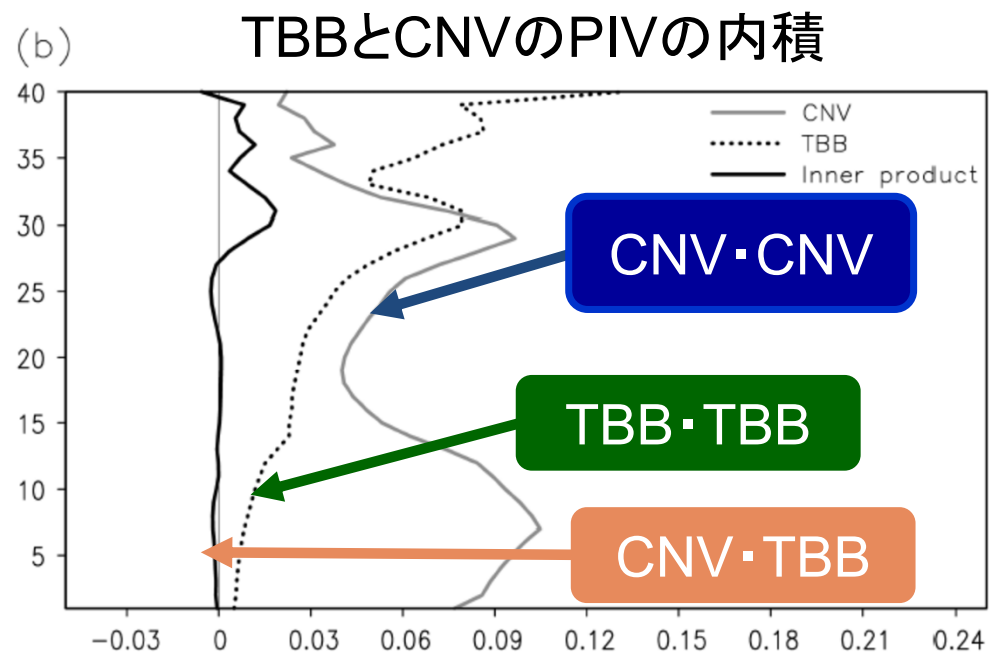
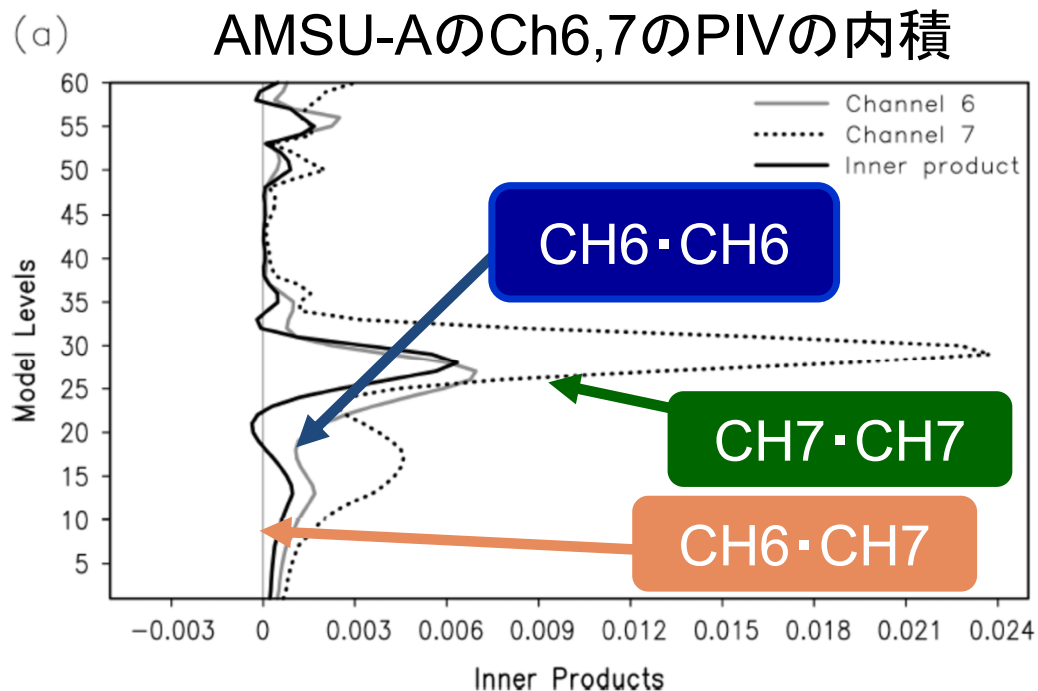
- CNVとTBBのインパクトは地理的に概ね分離。TBBの陸上での寄与が小さい。
- TBBの観測誤差分散が経験的調整により大きく設定されていること(3章で詳述: Ishibashi 2010, 2020)と整合的であり、ECMの客観推定によって、TBBからより多くの寄与が得られる可能性を示唆。

変分法バイアス補正係数への観測インパクト



- 衛星輝度温度観測のバイアス補正は、大気解析の中で同時に解析されている(変分法バイアス補正)している。
- 従来型観測からのインパクトは、衛星のバイアス補正において非常に重要である(アンカーエフェクト)。
- 左図ではCNVのインパクトが明瞭。

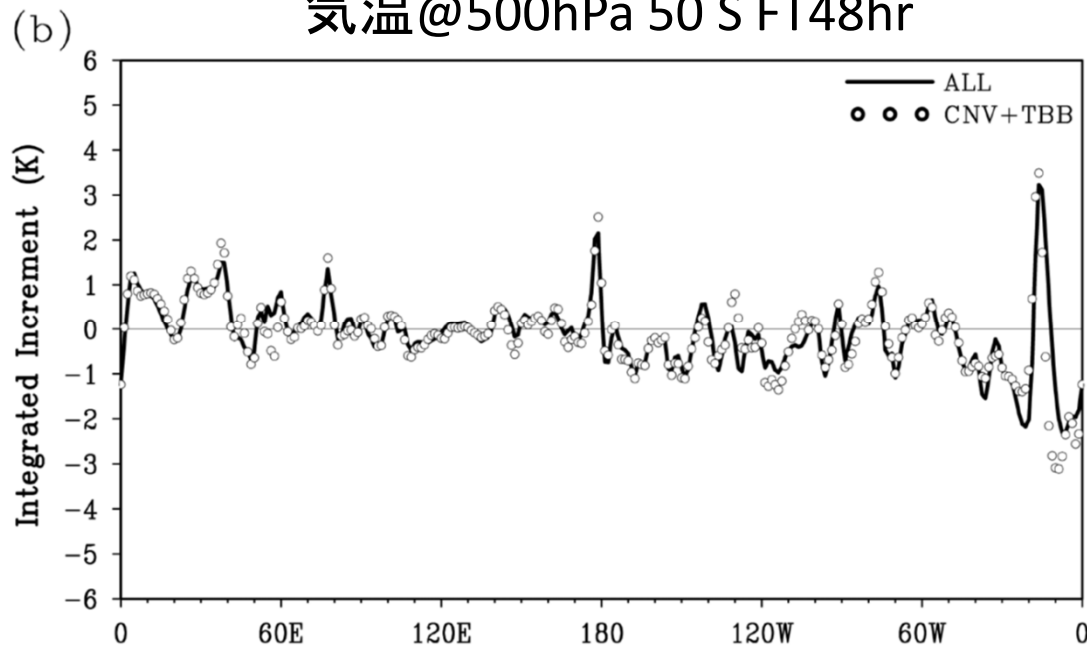
観測インパクトの干渉



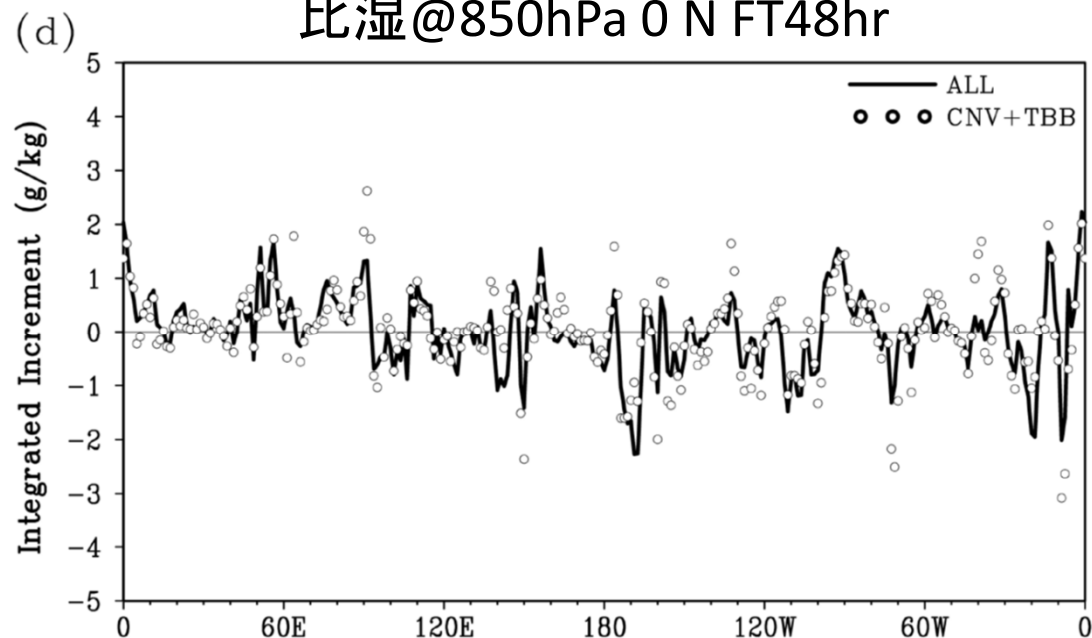
- 右図: CNVとTBBのインパクトは概ね分離。
- 左図: AMSU-Aのチャンネル6と7では干渉項は無視できない。

48時間予報場への観測インパクトの線形性

(b) 気温@500hPa 50°S FT48hr

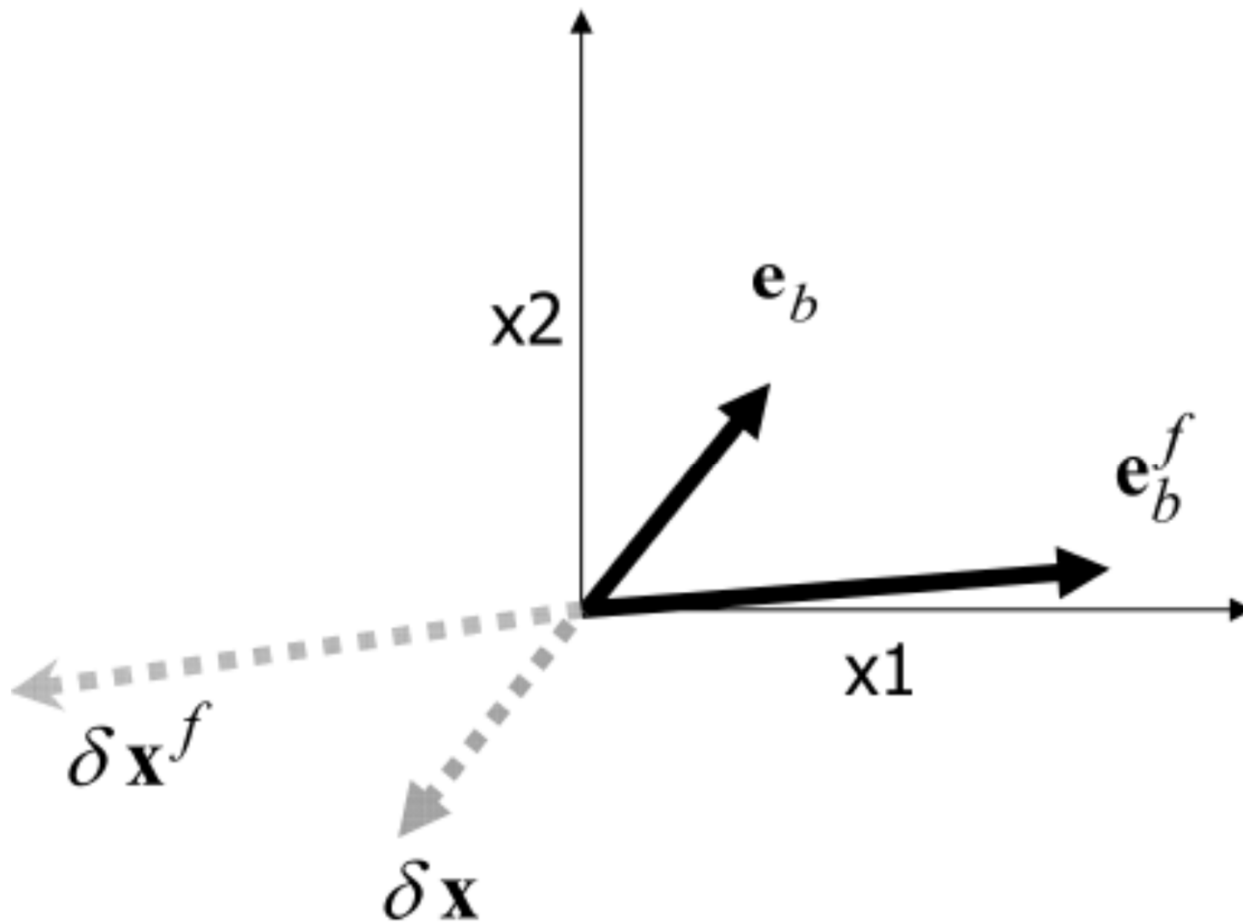


(d) 比湿@850hPa 0°N FT48hr



- 500hPa気温場については接線型近似は良く成り立っている。
- 赤道850hPaの比湿では非線形性が目立つ。熱帯下層比湿の線形解析は注意が必要。

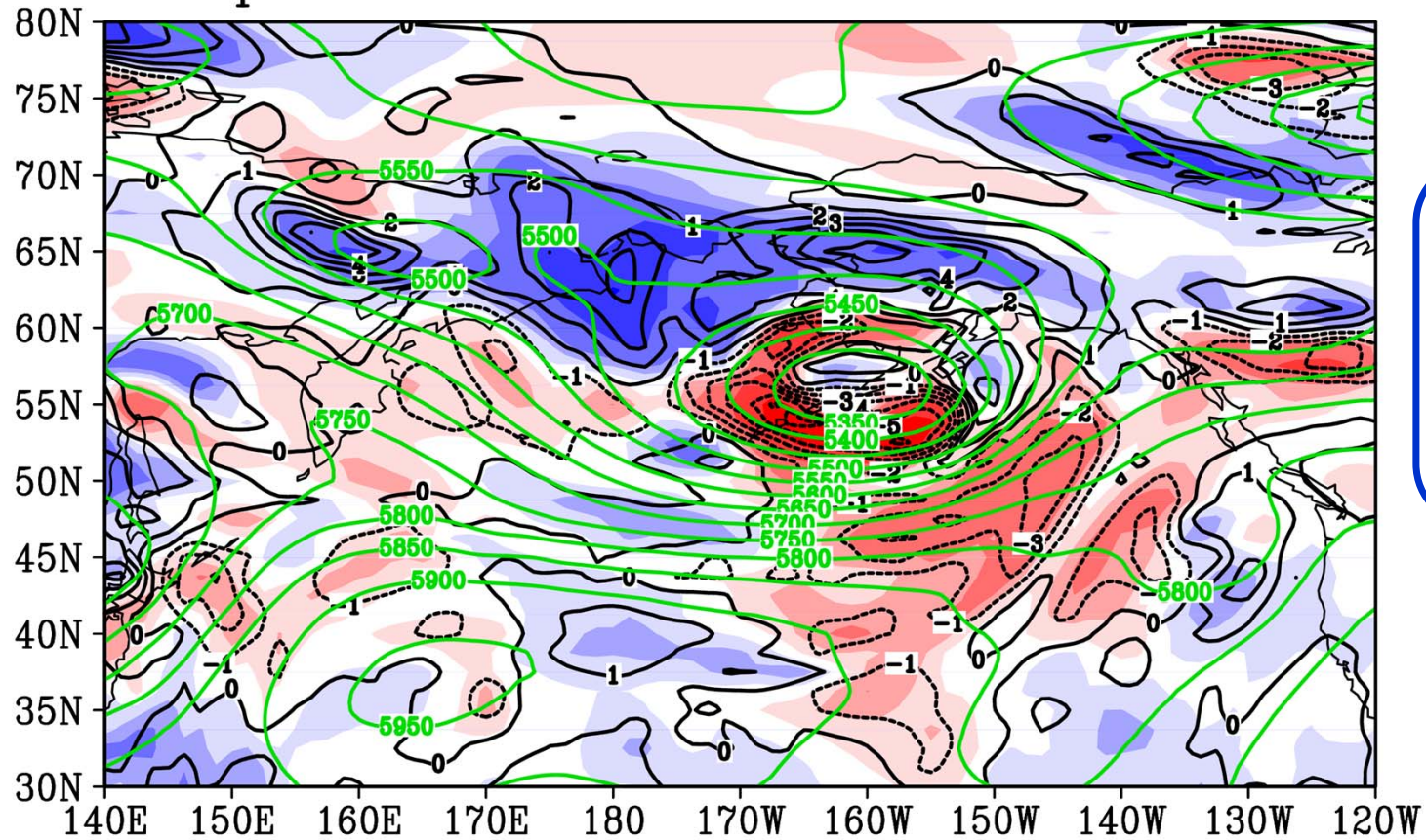
インパクトの時間発展と背景予報誤差



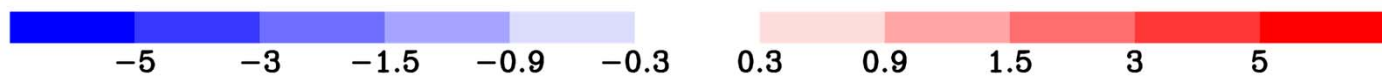
- 理想的な解析インクリメント(δx)は背景場の誤差(e_b)と同じ大きさで反対向き。
- 解析時刻では、背景誤差は小さすぎて正確に測定できない。
- 24時間程度予報すれば、誤差が大きく成長して測定可能になる。時間発展したインクリメント(δx^f)と背景誤差(e_b^f)を比べることで、 δx やPIVを評価できる。
- 観測インパクトの時空間構造の評価が可能になる。

インパクトの時間発展と背景予報誤差の例

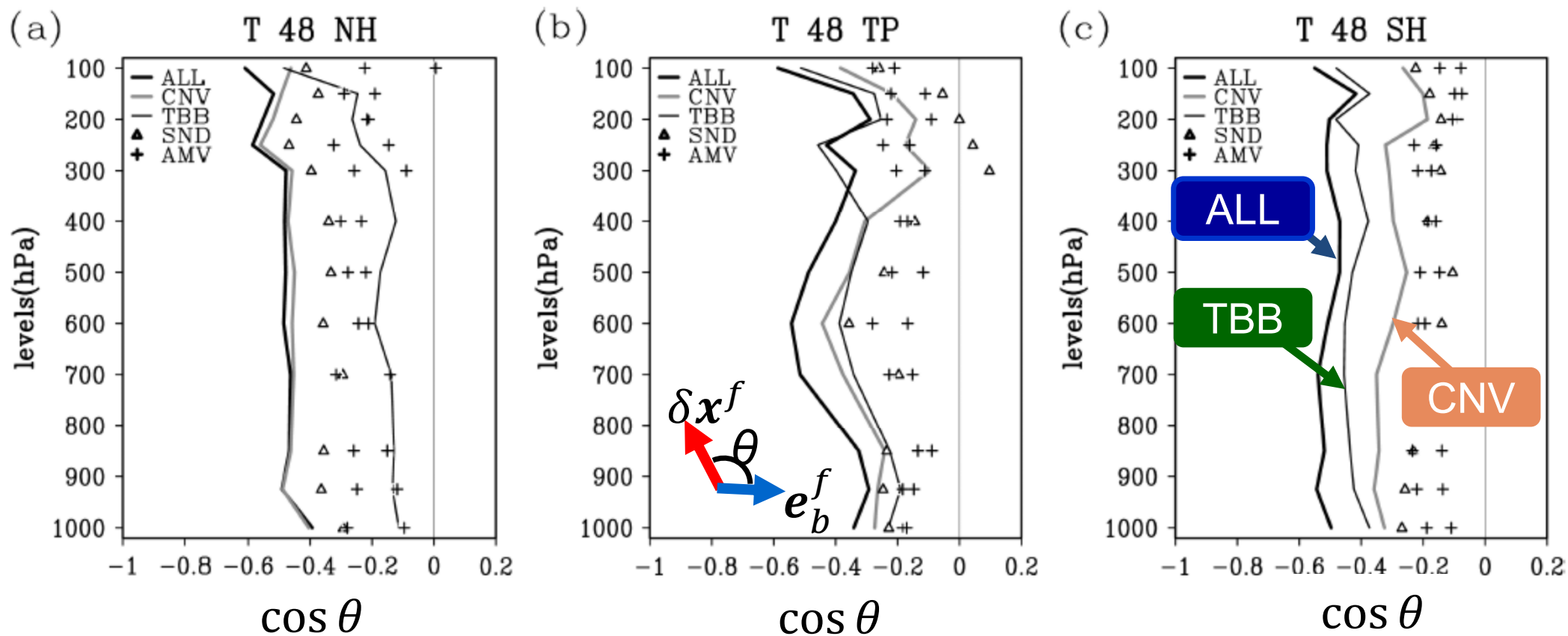
optimal inc and error t 500hPa 072200



- 500hPa気温の48時間予報場
- シェイド : δx^f
- 黒等値線 : e_b^f
- 緑等値線 : 高度場



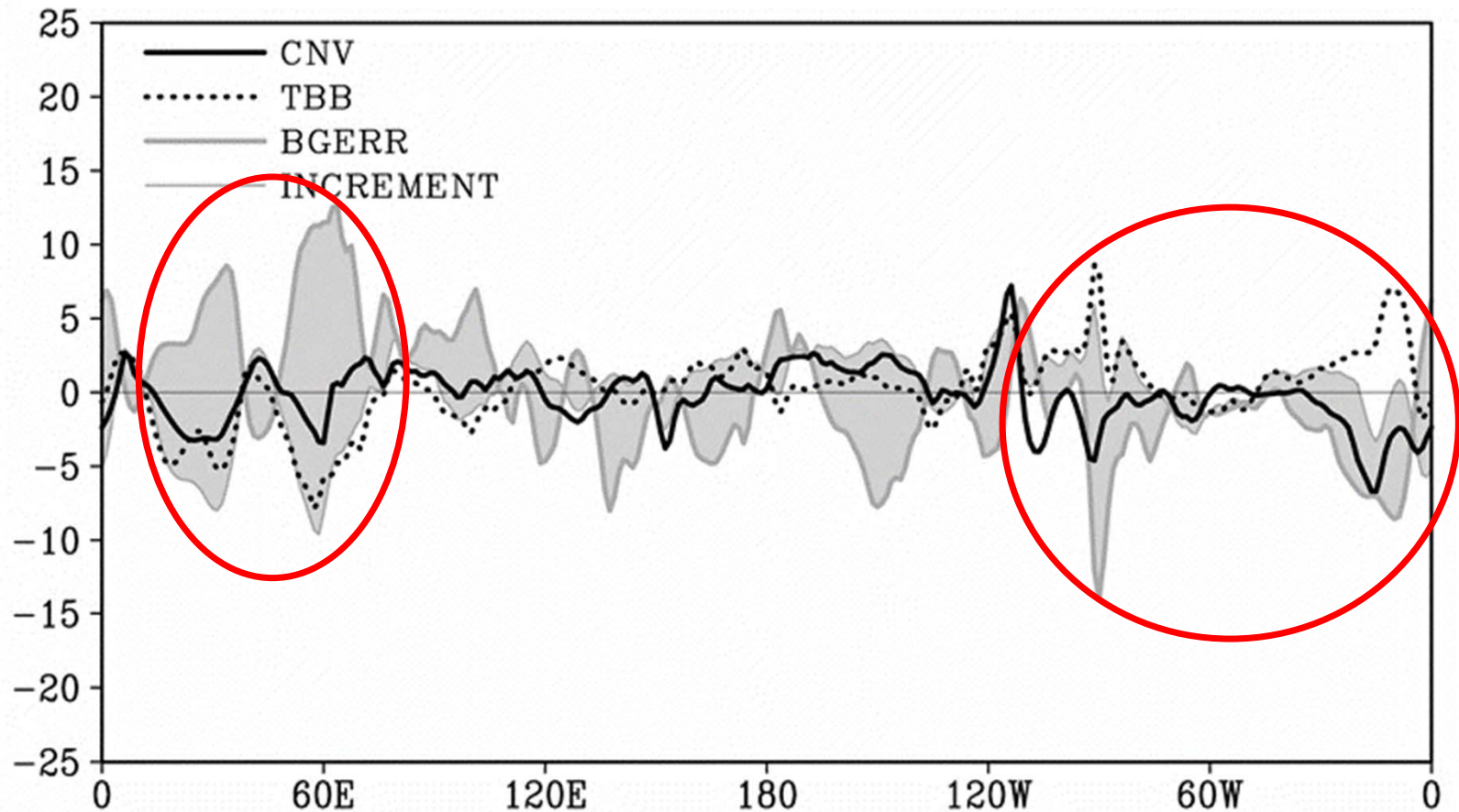
PIVと背景誤差の反平行性: FT48 T



- 背景予報誤差と主要な観測のPIVには期待されるとおり反平行性(負相関)がみられる。

PIVの背景誤差の空間構造: FT48 U

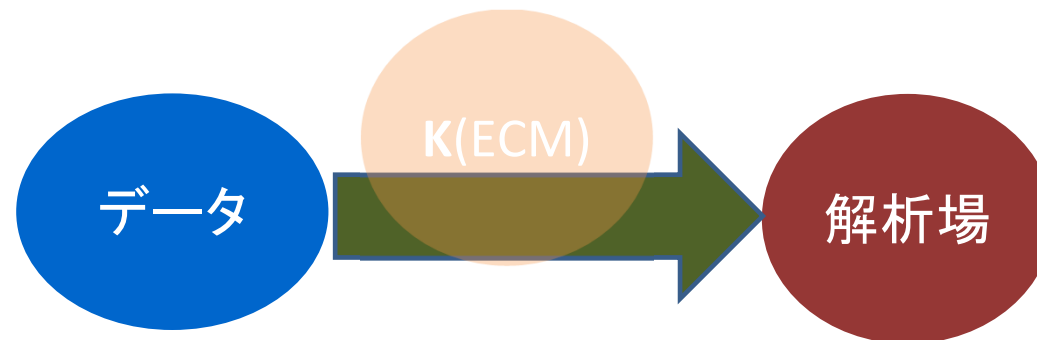
48時間時間発展させたPIVと背景誤差@50° S 250hPa U



2-1 まとめ

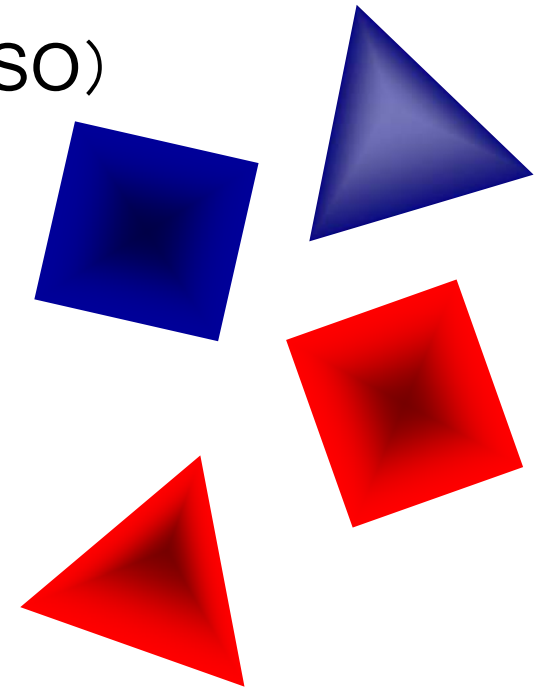
- インパクトの時空間構造を解析できる新しい観測インパクト解析手法を構築した。これはカルマンゲインの観測データへの作用を解析可能にするものである。
- 新手法を気象庁全球NWPに実装した。データ種別ごとにインパクトを解析した。
- 解析場については接線型性はほぼ完全に満たされており、新手法によるインパクト解析が有効であることがわかった。
- 予報場については48時間程度までは十分に接線型性が満たされており、インパクト解析が有効である。但し、赤道域の大気境界層内の比湿場は非線形性が相対的に強く線形解析には注意が必要である。
- 既存手法（FSO、DFS）は、異なるデータ種別感の観測インパクトの干渉項があるため、観測インパクトを厳密には分離できない。新手法では干渉項の評価が可能であり、TBB-CNV間では十分小さいが、AMSU-Aの隣接チャンネル間では無視できない大きさを持つことがわかった。
- 理想的なPIVは背景予報誤差と反相関するため、実際のPIVと背景予報誤差の時空間構造を比較することでPIV（観測インパクト）の評価が可能である。
- TBBのNHでのインパクトはSHに比べて顕著に小さい。データ分布や大きな誤差設定を考慮すると、ECMの客観推定によってNHでのインパクトが増加する可能性を示唆。

2-2. 随伴演算子による 観測インパクト評価 (FSO)



2-2. 内容

1. 研究背景と目的
2. 随伴演算子を用いた観測インパクト評価(FSO)
3. 実験
 - FSOの前方計算による評価
 - 気象庁全球NWPシステムの評価
4. 結論



研究背景と目的

背景

- 観測データは、データ同化による大気解析において最も重要な情報の一つである。大気解析の高精度化には、観測が解析場に与える影響を知ることが不可欠である。
- 随伴演算子による観測インパクト評価 (Forecast Sensitivity to Observation: FSO; Langland and Baker 2004: LB04) はこれを提供する。
- しかし、同手法によるインパクト評価は他の評価手法との比較検証がされていない。また、観測インパクトは、数値予報システムにも依存するため、より多くのシステムで評価し比較する必要がある。

目的

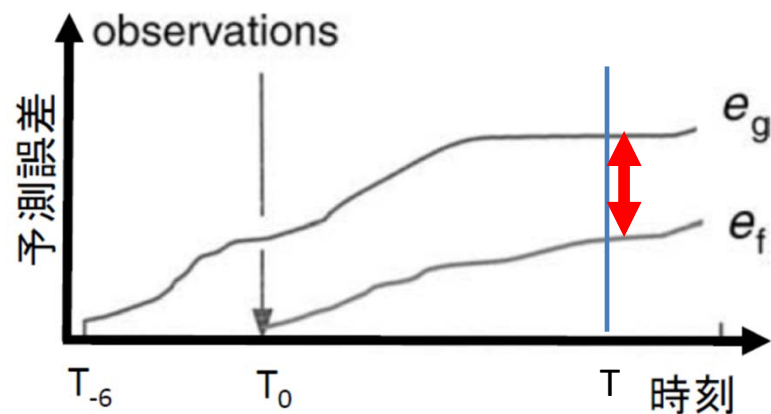
本研究の目的は以下の2つである。

- 随伴演算子による観測インパクト評価の妥当性を前方計算による直接評価と比較して検証する。
- 気象庁全球NWPについて観測インパクトを評価する。

LB04による観測データインパクト評価の概要

● 手法概要

- ✓ 右の図は、初期時刻が6時間異なる2つの予報の誤差の時間発展である。
- ✓ e_f は、時刻 T_0 の初期値、 e_g は6時間前の T_{-6} の初期値からの予報の予報誤差である。
- ✓ 時刻 T におけるこれらの差は、時刻 T_0 に同化された観測データにのみ起因することから、これによって、 T_0 に同化された観測データの全インパクトを定義できる。

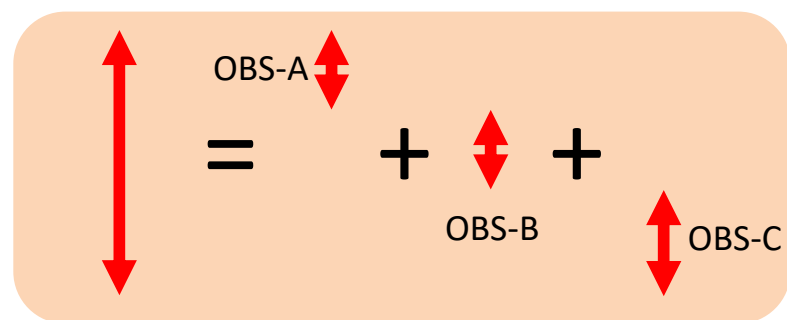


Langland and Baker (2004) Tellusを修正転載。

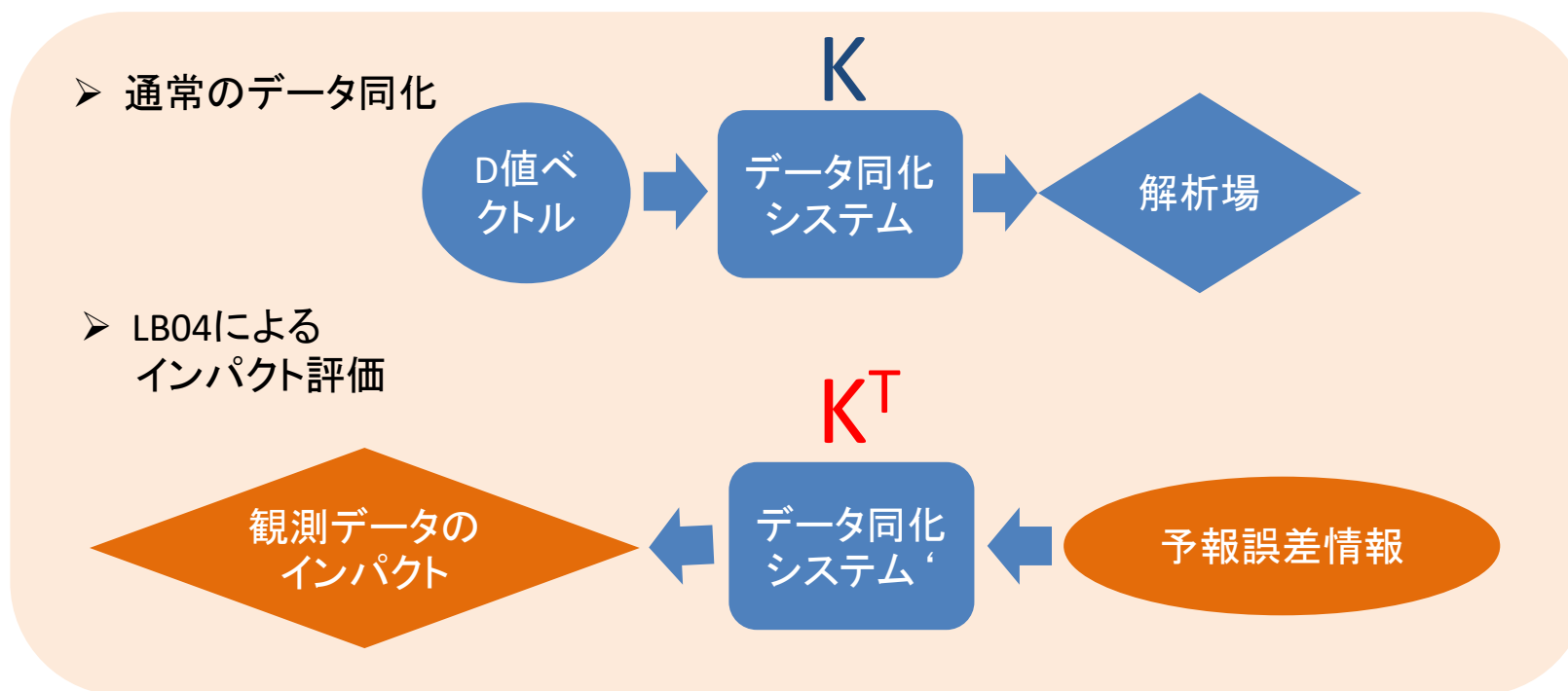
- さらに、数値予報システムの随伴演算子を用いることで、個々の観測データの予報精度への寄与(以降、Forecast Sensitivity to Observation: FSOと呼ぶ)を計算できる。

◆ 特徴

- ✓ 誤差成長を考慮した評価となる。
- ✓ 同化システムが理論から逸脱していても正しく診断できる。
- ✓ 一回の計算で全観測データの個々のインパクトの計算が可能。



数値予報システムの随伴演算子



- ✓ D値ベクトル: 観測値と予報値の差
- ✓ K: カルマンゲイン
- ✓ K^T: カルマンゲインの随伴演算子

FSOの定式化

$J(\mathbf{x}_0) \equiv [M(\mathbf{x}_0) - \mathbf{x}_{\text{ref}}]^T \mathbf{C} [M(\mathbf{x}_0) - \mathbf{x}_{\text{ref}}]$: 予報誤差の大きさを定義

$\delta J(\delta \mathbf{x}) \equiv J(\mathbf{x}_a) - J(\mathbf{x}_b) = (\mathbf{e}_a^f - \mathbf{e}_b^f)^T \mathbf{C} (\mathbf{e}_a^f + \mathbf{e}_b^f)$: 全観測インパクト

$\delta J_A(\delta \mathbf{x}) \equiv \sum_{p \in A} d_p g_p, \quad \mathbf{g} \equiv \mathbf{K}^T \mathbf{M}^T \mathbf{C} (\mathbf{e}_a^f + \mathbf{e}_b^f)$: 各観測のインパクト

$$\delta J(\delta \mathbf{x}) \approx \mathbf{d}^T \mathbf{K}^T \mathbf{M}^T \mathbf{C} (\mathbf{e}_a^f + \mathbf{e}_b^f) = \sum_A \delta J_A$$

C: ノルム定義行列; **M(X)**: 予報モデル; **M**: **M(X)**の接線型演算子;

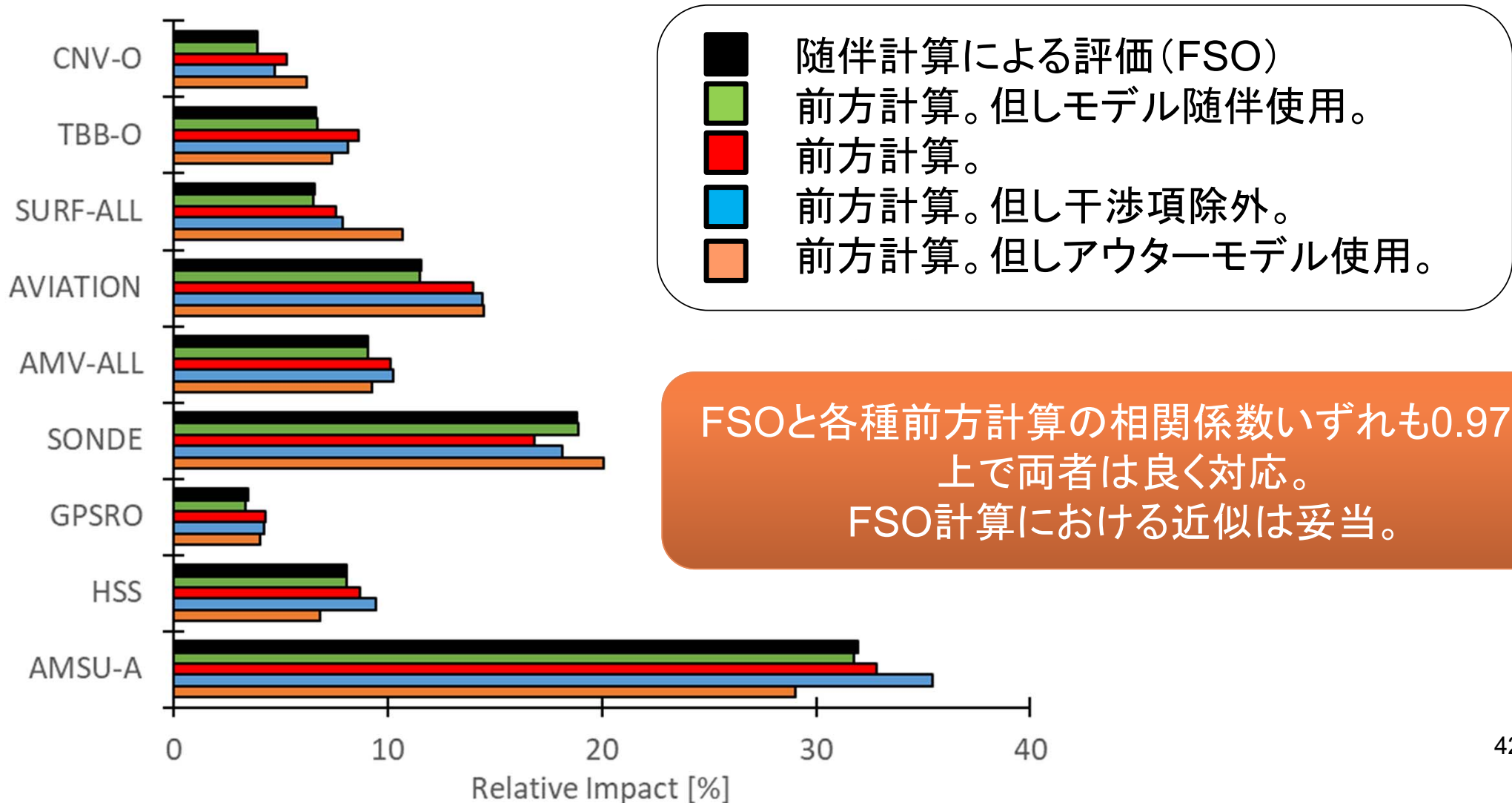
e^f: 予報誤差ベクトル(下付き添え字a, bは各々解析場、背景場を初期値とする予報の誤差);

K: カルマンゲイン; **d**: 観測とモデル推定値の差のベクトル; **x₀**: 初期場; **x_{ref}**: 参照解析場(真値の代替)。

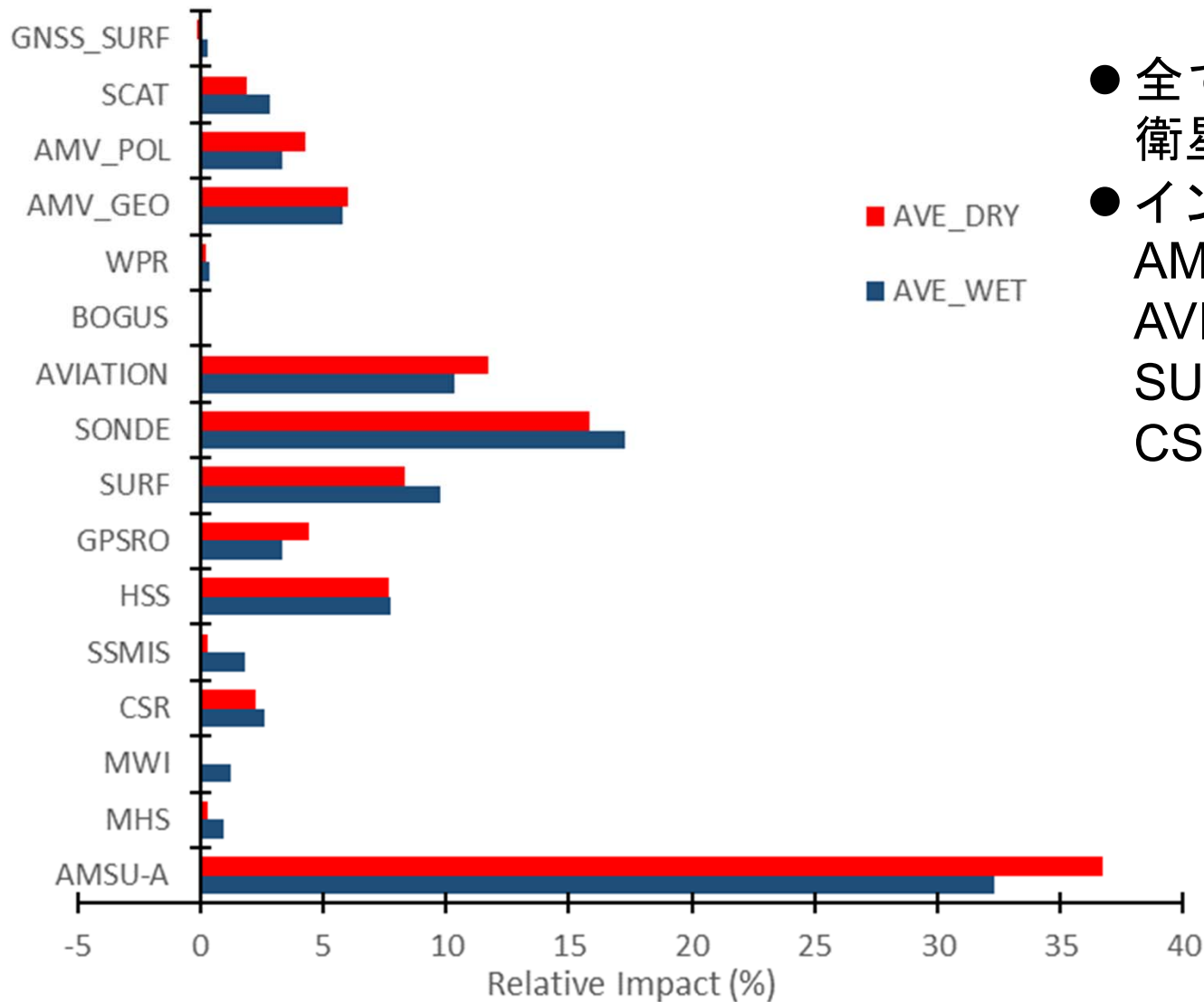
気象庁全球NWPシステムのFSO

- 気象庁全球NWPシステム
 - 予報モデル: プリミティブ方程式系のスペクトルモデル。水平解像度は約20km、鉛直層数は100。モデルトップは0.01hPa。
 - データ同化スキーム: 4次元変分法(4D-Var)
- FSOの計算
 - ✓ 有限摂動に対する定式化 (Ishibashi 2011, Lorenc and Marriott 2014)
 - ✓ 予報誤差の評価時間: 24時間
 - ✓ 予報誤差評価ノルム: 湿潤及び乾燥全エネルギーノルム
 - ✓ 期間: 2014/08/01 ~ 2014/09/09。00UTC解析のみ。
- FSOの評価
 - ✓ FSOによるインパクト評価は、前方計算による直接評価(Ishibasi 2011)と比較して評価。

FSOの前方計算による評価



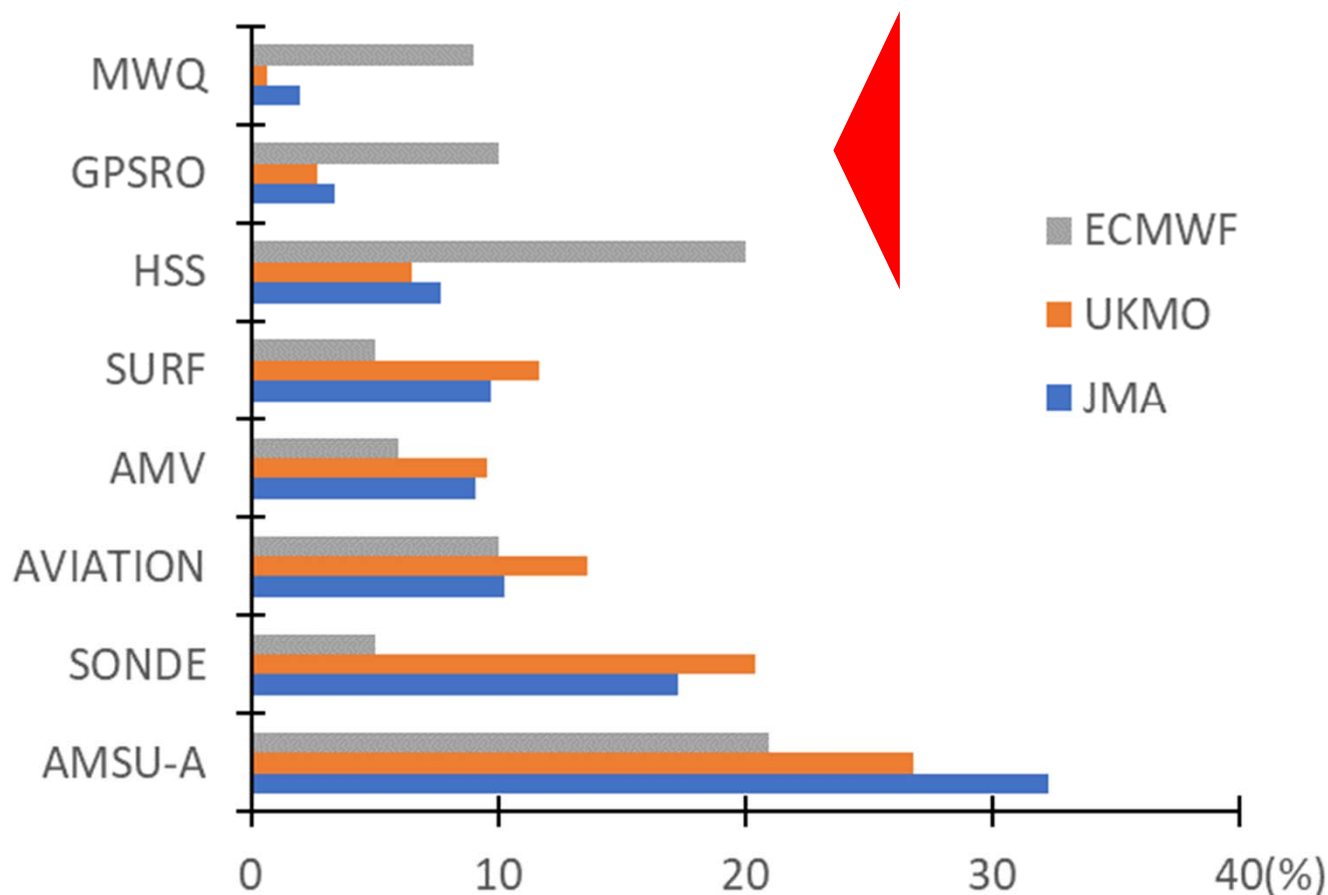
気象庁全球NWPシステムのFSO



- 全ての観測種別が予報精度に貢献。衛星だけでなく従来型も大きな寄与。
- インパクトの大きな観測種別は、AMSU-A (32.3%), SONDE (17.3%), AVIATION (10.3%), AMVs (9.1%), SURF (9.7%), HSS (7.7%), GPSRO, CSR, SCAT (3%)。

NWPシステム間比較

観測インパクトのNWPシステム比較

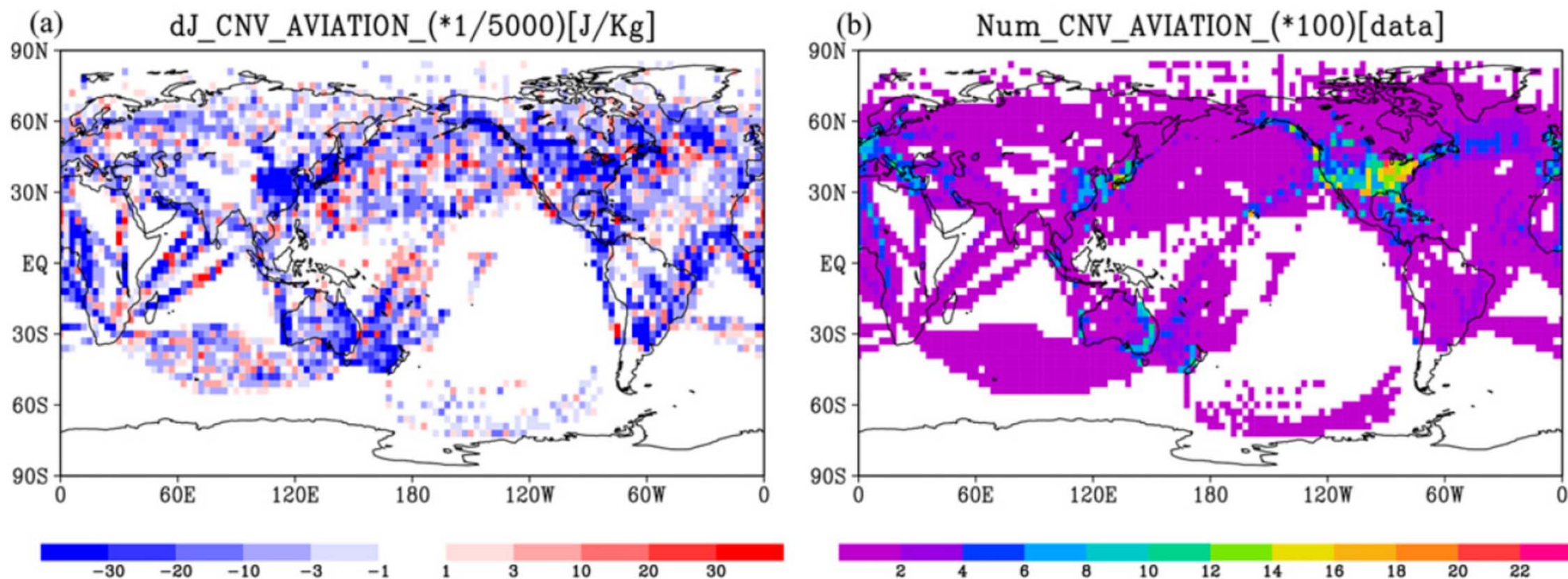


ECMWF: Cardinali and Healy (2014)

UKMO: Lorenc and Marriott (2014)

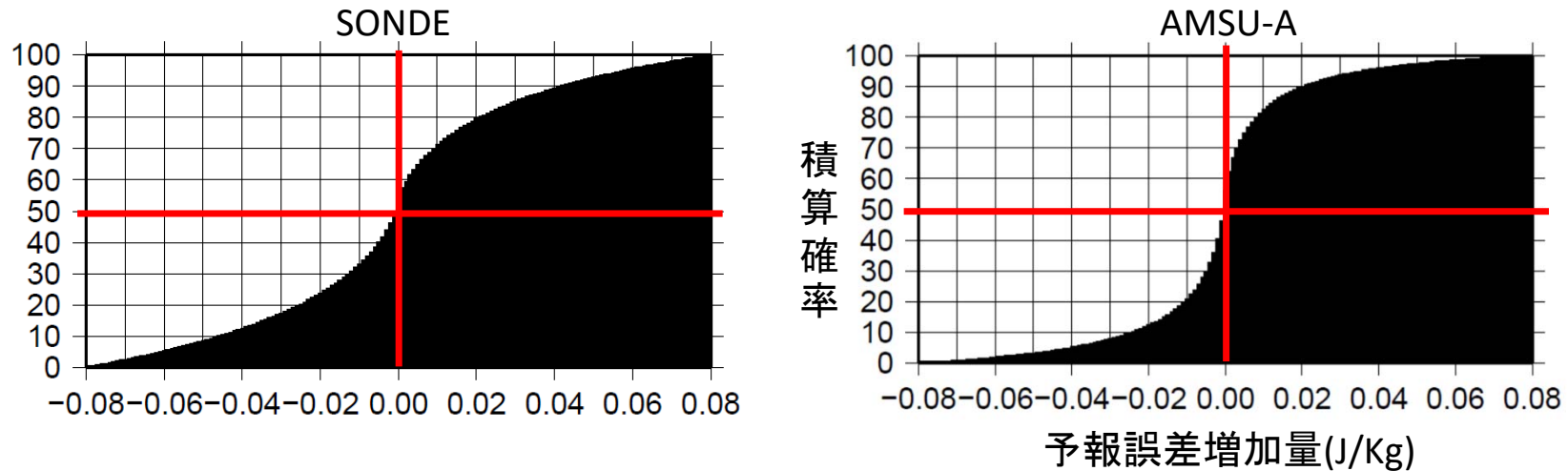
- 最も大きな違いは、ECMWFでは、水蒸気に感度のある輝度温度観測(MWQ)、GPSRO、赤外超多チャンネルセンサ(HSS)の寄与が非常に大きいこと。
- ECMの客観推定により、これらの観測からの寄与が増加する可能性。
- 南半球48時間高度場予報誤差は、ECMWF=13m, UKMO=15m, JMA=17m

FSOの空間分布の例：航空機観測



データ数が多く鉛直プロファイル観測のある空港付近だけでなく、
巡航高度の観測のインパクトも大きい。

積算確率分布関数



- ほぼ半数の観測データは予報誤差を減らし、半分は増やしている。
- PDFの傾きは SONDEの方が AMSU-Aより小さい。
- この傾きの違いは、 R と B の関係、1観測のもつ実際の情報量によるものと考えられる。
- FSOの単位はJ/Kg。観測データの同化により予報誤差が減少した場合が負。

インパクトのPDF: スカラー理論

● 観測インパクトのPDF

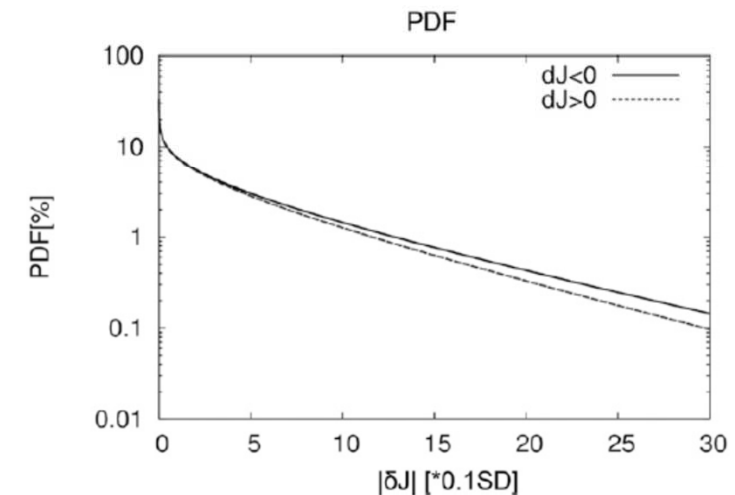
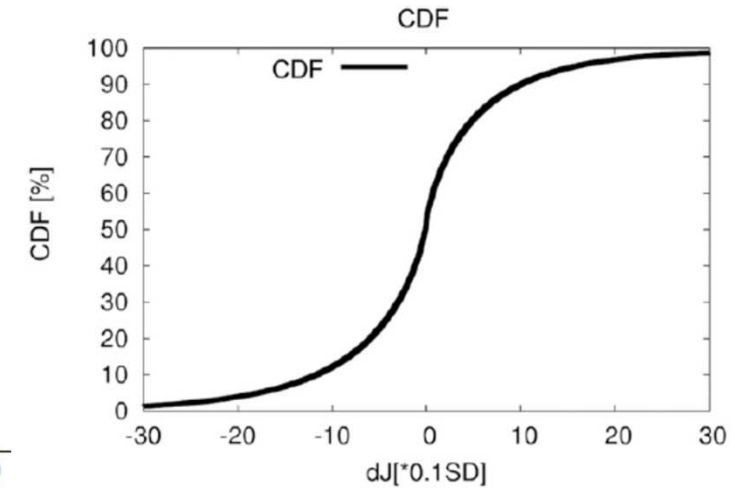
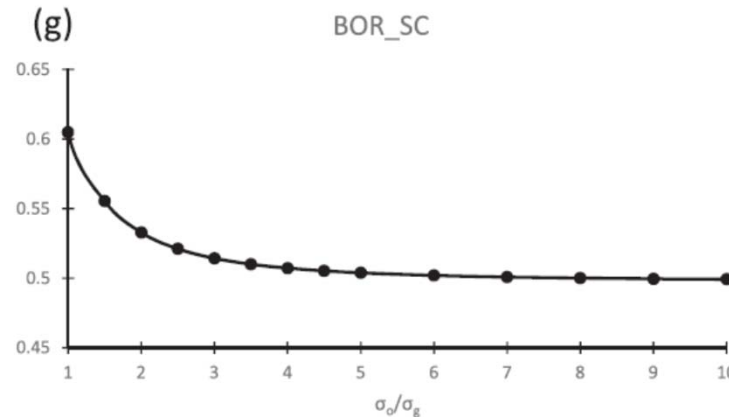
$$P(\delta J) = \begin{cases} \frac{1}{2\pi\sigma_a\sigma_b} \exp\left(\frac{\delta J}{2\sigma_b^2}\right) \int_{\delta J}^{\infty} dx \exp\left[-\frac{(\sigma_b^2 + \sigma_a^2)x}{2\sigma_a^2\sigma_b^2}\right] x^{-1/2}(x - \delta J)^{-1/2}, & \delta J > 0 \\ \frac{1}{2\pi\sigma_a\sigma_b} \exp\left(\frac{\delta J}{2\sigma_b^2}\right) \int_0^{\infty} dx \exp\left[-\frac{(\sigma_b^2 + \sigma_a^2)x}{2\sigma_a^2\sigma_b^2}\right] x^{-1/2}(x - \delta J)^{-1/2}, & \delta J \leq 0 \end{cases},$$

● 予報誤差を減らした観測の割合 (Beneficial Observation Rate: BOR)

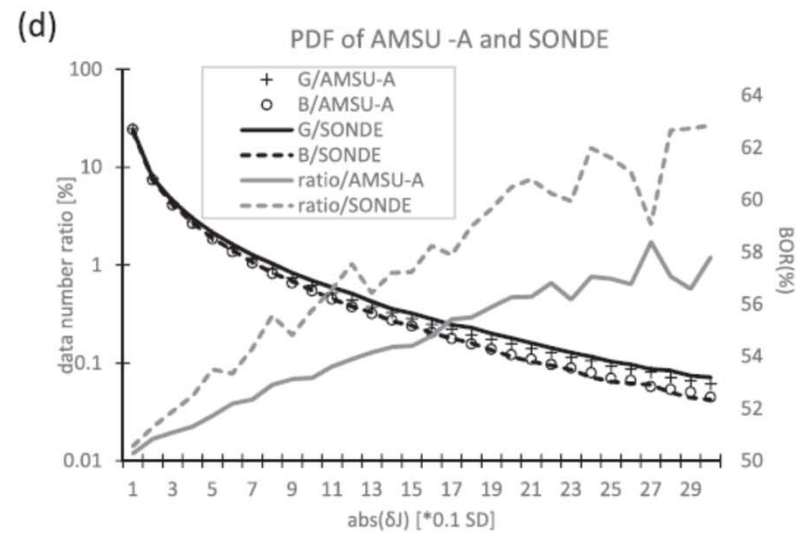
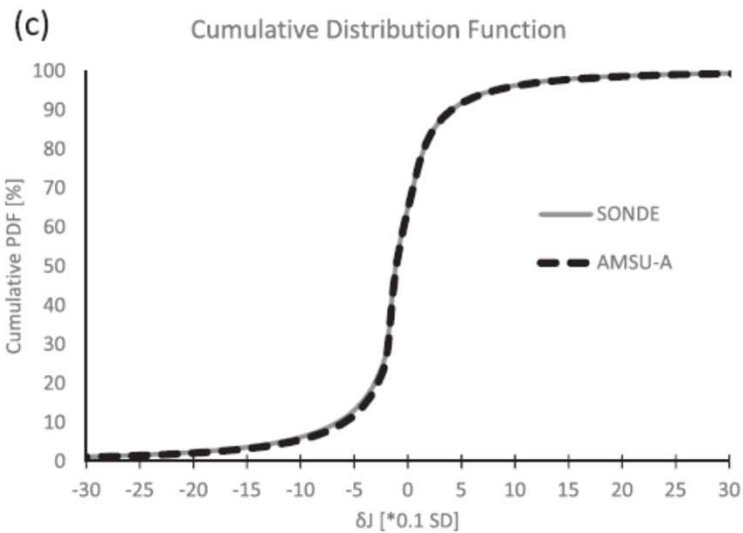
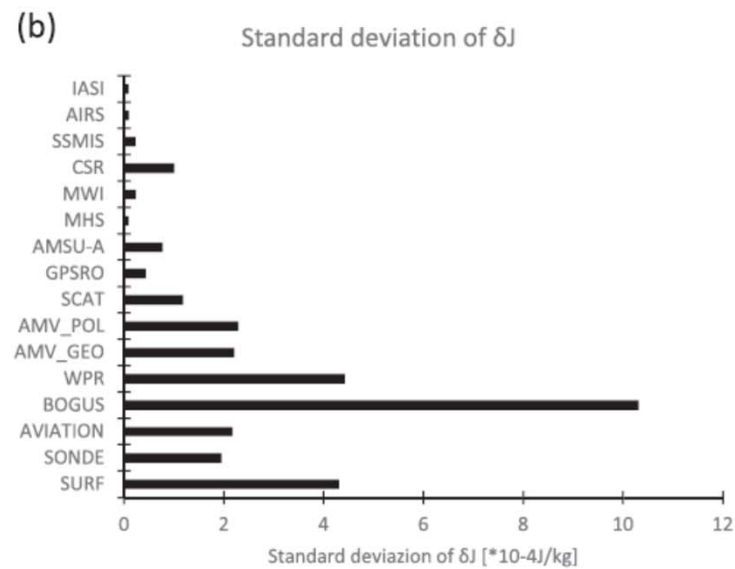
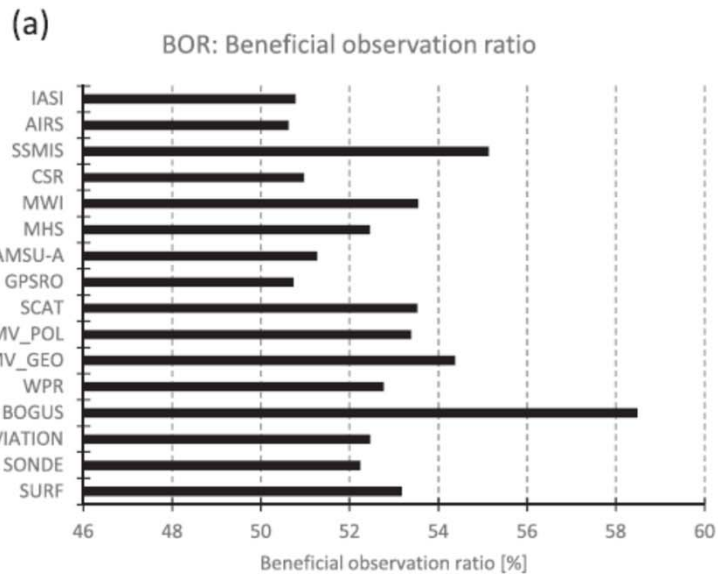
$$\text{BOR} \equiv \int_{-\infty}^0 P(z) dz = \frac{1}{2\pi r_{ab}} \int_{-\infty}^0 dg \exp\left(\frac{g}{2}\right) \int_0^{\infty} dy \exp\left[-\frac{(1/r_{ab}^2 + 1)y}{2}\right] y^{-1/2}(y - g)^{-1/2}$$

漸近挙動:

- $r_{ab}=1$: BOR=0.5
- $r_{ab}=0$: BOR=1



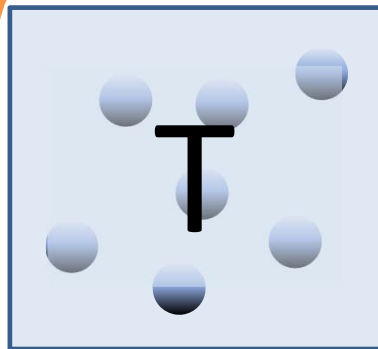
JMA全球NWPでのPDFとBOR



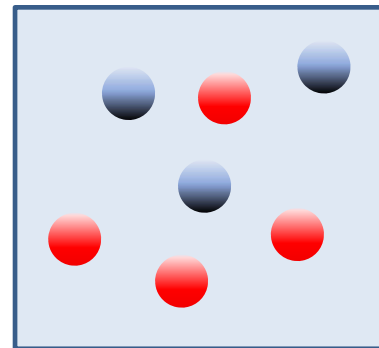
- ◆ 全ての観測種別についてBORは50%をわずかに大きい。
- ◆ 平均値は、51.1%。
- ◆ CNVのBORは52%以上
- ◆ TBBやGPSROのBORは52%未満。ただし、水蒸気センサを除く。
- ◆ PDFやBORはスカラー理論で良く説明できる。

観測データの統計的な振る舞いのアナロジー

熱・統計力学

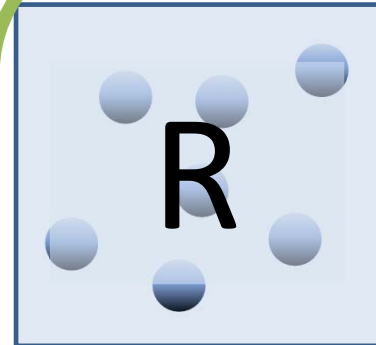


個々の分子の速度の統計情報のみ知っている。つまり部屋の温度 (T)。

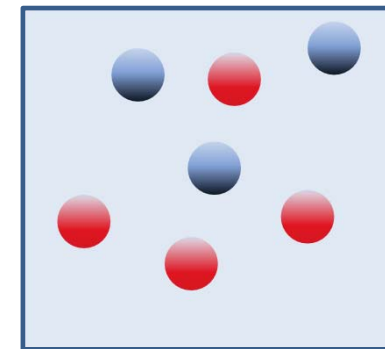
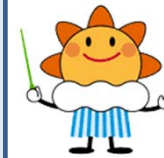


個々の分子の速度はわからない。

データ同化



データの統計情報のみ知っている。つまり誤差共分散行列 (R, B)。



個々のデータの誤差はわからない。

2-2のまとめ

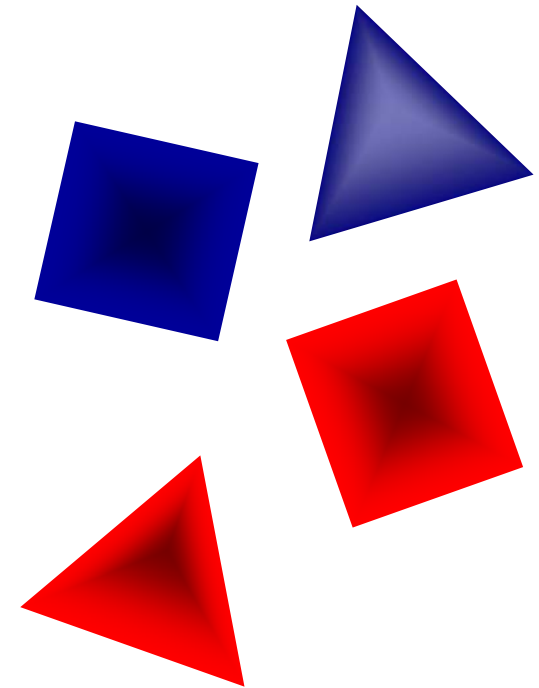
- JMA全球NWPシステムに随伴演算子による観測インパクト評価スキームを実装した。実装は有限摂動の定式化(Ishibashi 2011)に基づいた。
- 随伴演算子による観測インパクト評価と各種の前方計算による評価の相関係数は97%を超える。随伴演算子による評価は十分な妥当性がある。
- インパクトの大きい観測種別は、AMSU-A、SONDE、AVIATON、AMV、SYF、HSS、GPSROであり、これは他の主要数値予報センターでの解析結果と整合的。
- 一方で、ECMWFとの比較では、UKMOやJMAでは、GPSRO、HSS、水物質に感度に輝度温度のインパクトが小さい。ECMの客観推定で増加する可能性。
- 観測インパクトの確率分布について、平均場近似的な一次近似として導出されるスカラー理論に誤差比を実験値で与えるとJMAの結果とよく対応する。

3. 誤差共分散行列の客観推定による 全球大気解析の高精度化善



3章内容

1. 研究背景と目的
2. 誤差共分散行列の診断手法
3. 気象庁全球NWPシステムでの診断と実験
4. 結論



研究背景と目的

背景:

- NWPのためのデータ同化において、ECMを精度よく推定して利用することは、NWPの精度改善のために不可欠である。
- しかし、現行のECMは経験的調整を多く含んでおり、精度を強く制約している。利用可能な観測データの極一部(~数%)しか同化できていない。


目的:

- 本研究の目的は、ECM全体を複数の推定手法を用いて高精度に推定し、これを同化システムに導入することで、解析、予報精度の改善をすることである。
- このようなECM全体を対象とするこのような研究は、本研究がはじめての行うものである。


ECMの推定の先行研究

● 誤差共分散行列の推定方法

- ✓ NMC法 (Parrish and Derber 1992)
- ✓ アンサンブル予報による背景ECM推定 (EnKF, EnDA)
- ✓ モンテカルロ法 (Fisher 2003)
- ✓ HL法 (Hollingsworth and Lönnberg (1986)
- ✓ Desroziers and Ivanov (2001), Desroziers(2005a,b)
- ✓ Daescu (2008): 感度解析の応用。



Bの推定手法。いずれも振幅について別途推定が必要。



B,Rともに推定可能だが、観測空間での推定。

● 観測空間でのECM推定手法を用いた先行研究

- ✓ Bormann and Bauer (2010a, b): 3つの既存手法を使って診断。
- ✓ Bormann et al. (2011): **MWI**(マイクロ波イメージャ)について、水物質が誤差相関に与える影響を評価。
- ✓ Stewart et al. (2014), Weston et al. (2014), Bormann et al. (2015): **HSS**(赤外干渉計)のチャンネル相関の推定、相関を考慮した同化。

いずれも特定の衛星センサだけを対象にした限定的な研究。

誤差共分散行列の推定

主に4つの手法がある。

1. Desroziers (2005a)法 (以下、**D05**と呼ぶ)
✓ $\mathbf{R} = \langle (\mathbf{o} - \mathbf{b})(\mathbf{o} - \mathbf{a})^T \rangle$, $\mathbf{G} = \langle (\mathbf{a} - \mathbf{b})(\mathbf{o} - \mathbf{b})^T \rangle$
2. Desroziers (2005b)法
✓ 変分法のコストとKH行列のtraceの理論関係を利用。
3. モンテカルロ法 (Anderson (2000), Fisher (2003))
✓ \mathbf{B} に従うアンサンブルを生成。
4. HL法 (Hollingsworth and Lönnberg (1986))
✓ 観測誤差空間 $\mathbf{0}$ を仮定して、背景と誤差共分散を分離。

R: 観測誤差共分散行列
B: 背景誤差共分散行列
G: 観測空間に変換した \mathbf{B}
D: D値共分散行列
D値: 観測と予報値の差
 \mathbf{o} :=観測, \mathbf{b} =予報, \mathbf{a} =解析

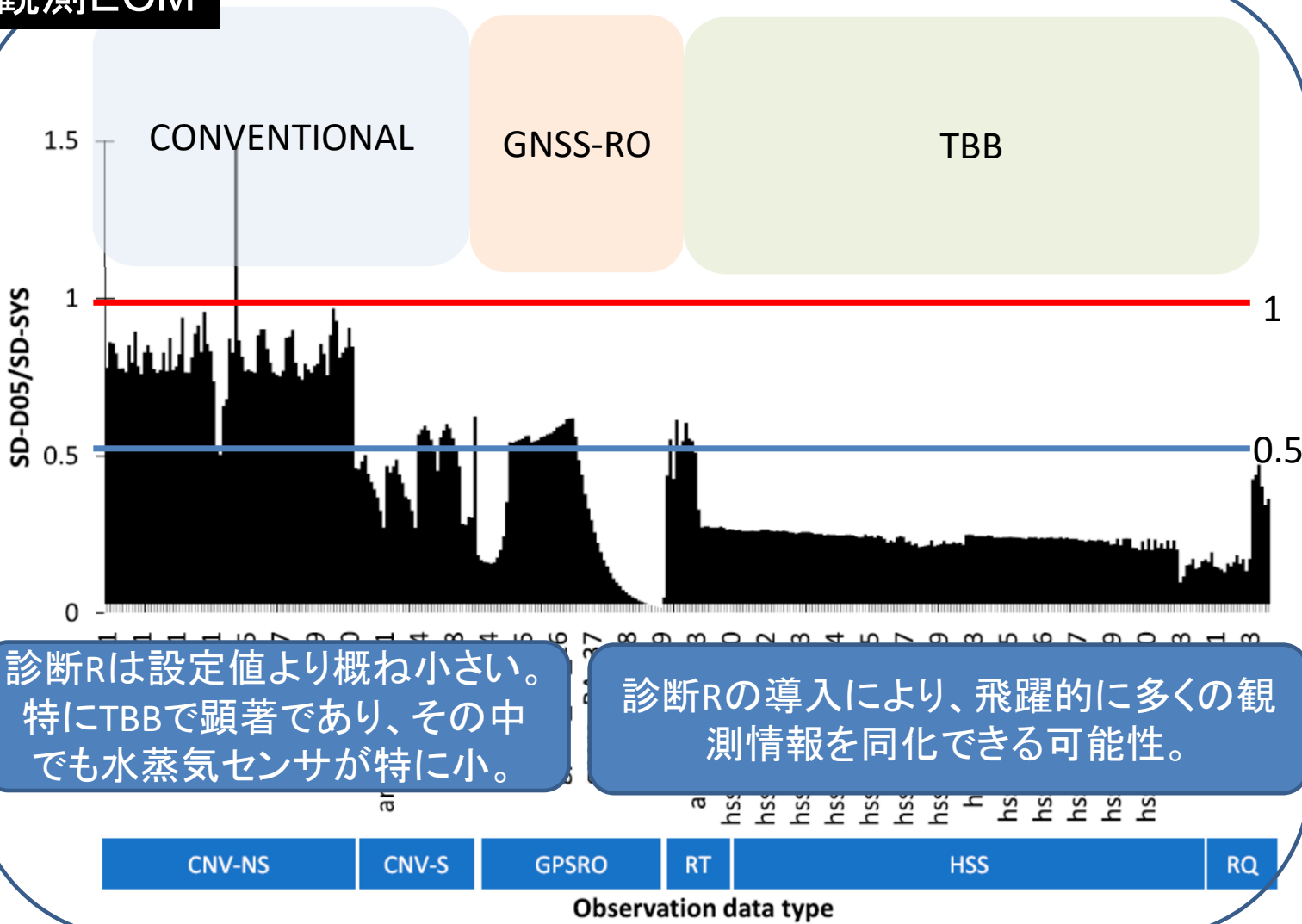
- 各手法とも、それぞれの仮定に起因する推定誤差がある。ここでは主にDesroziers (2005a)の方法(以下D05)で診断する。
- 推定されたECMには推定誤差の範囲で自由度が残る。この自由度は、ECMの一部ではなく全体を推定対象とすることで縮小できる。拘束する条件はできる限り簡潔なものとする。

ECMの推定

- JMAの全球NWPシステム
- 推定成分
 - 全ての観測データと背景場(モデル予報値)の誤差分散を推定。
 - 輝度温度観測については、チャンネル間相関、水平相関も推定。
- 推定に用いるデータ
 - 2016年8月の一か月のデータ(観測と背景場、解析場の差分)
 - 輝度温度観測については、5日分(20解析)のデータを使用
- 推定方法
 - D05を基本とし、HL法、モンテカルロ法で補完と検証。

誤差標準偏差：推定値/現行値

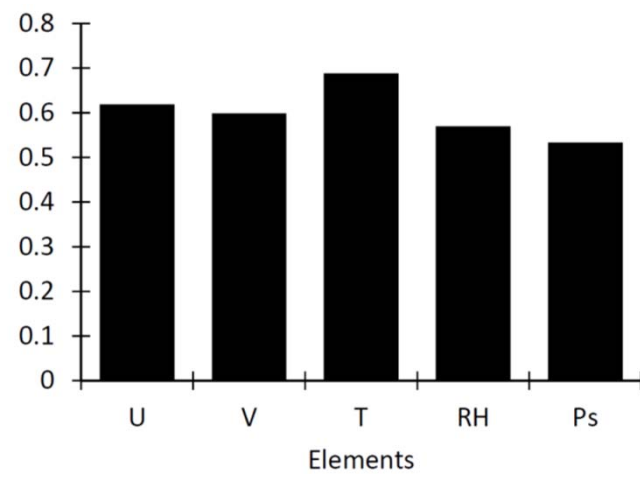
観測ECM



診断Rは設定値より概ね小さい。
特にTBBで顕著であり、その中
でも水蒸気センサが特に小。

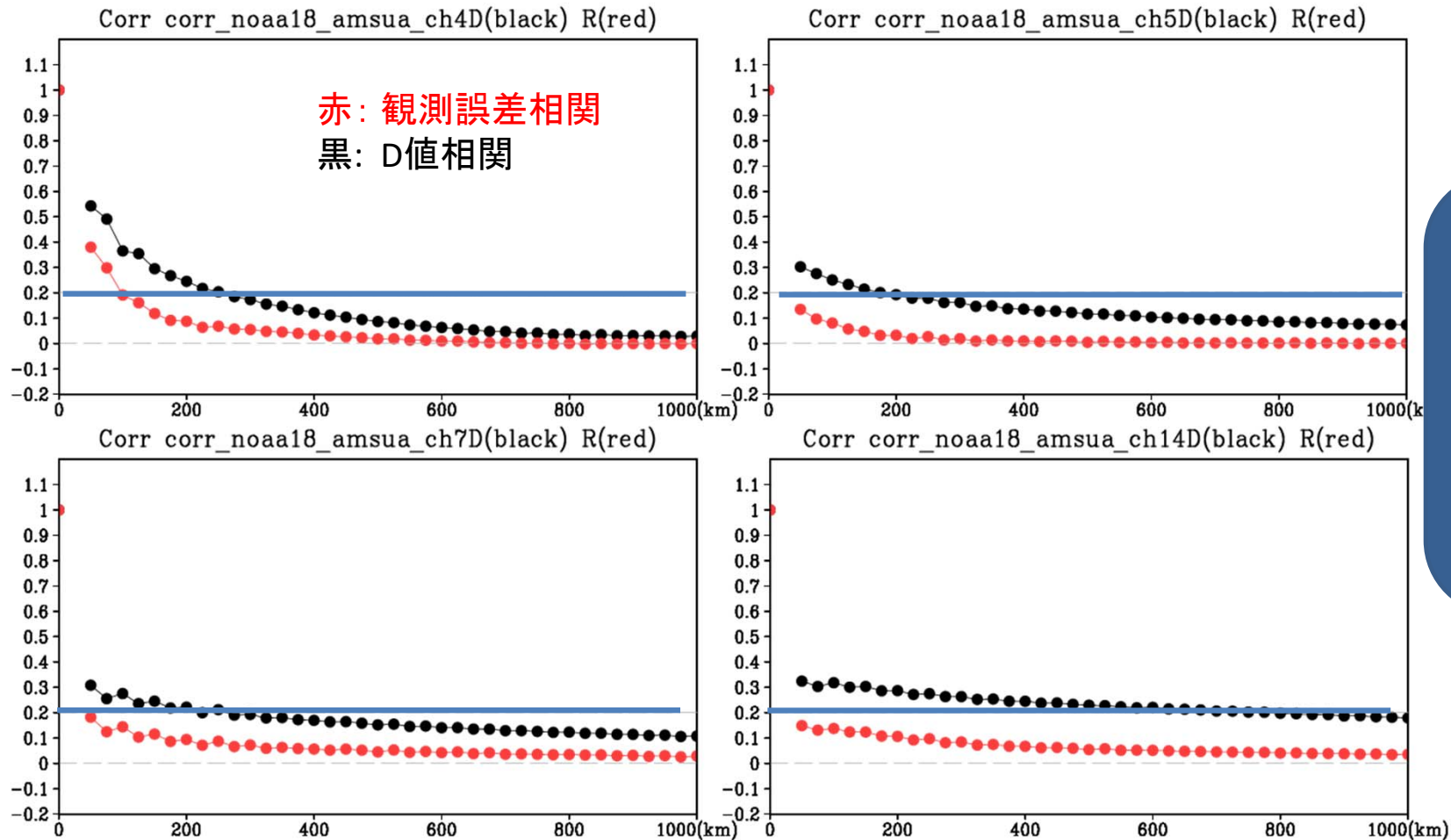
診断Rの導入により、飛躍的に多くの観
測情報を同化できる可能性。

背景ECM



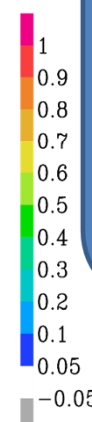
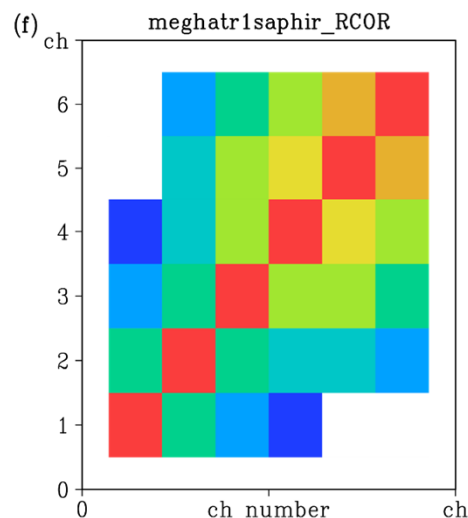
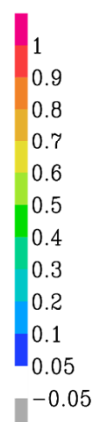
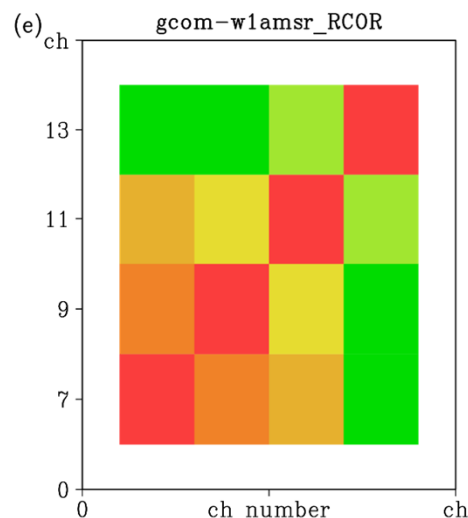
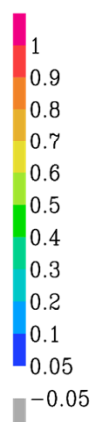
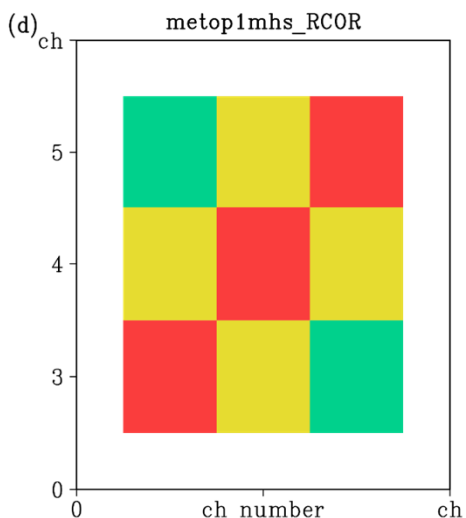
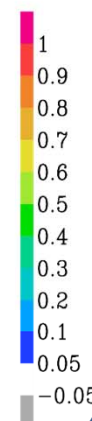
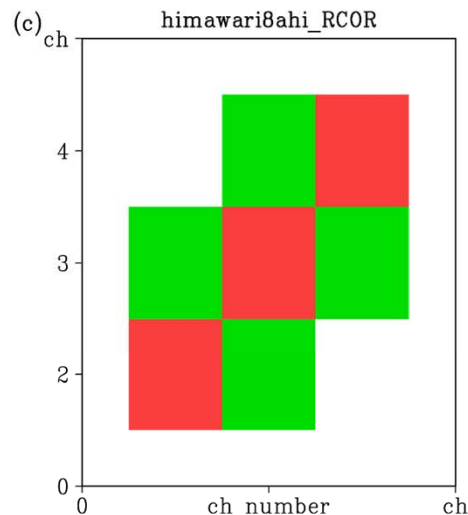
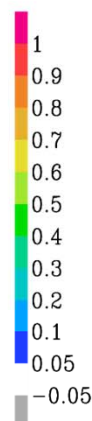
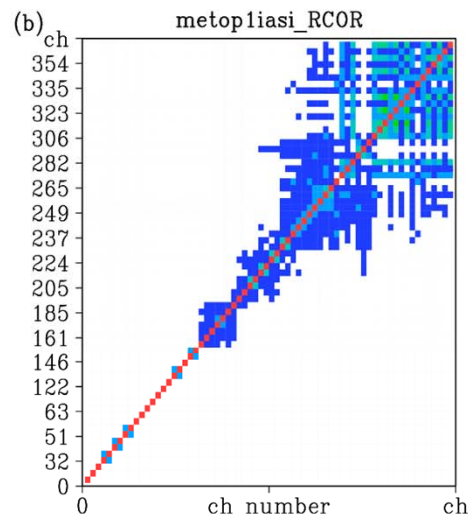
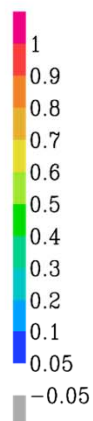
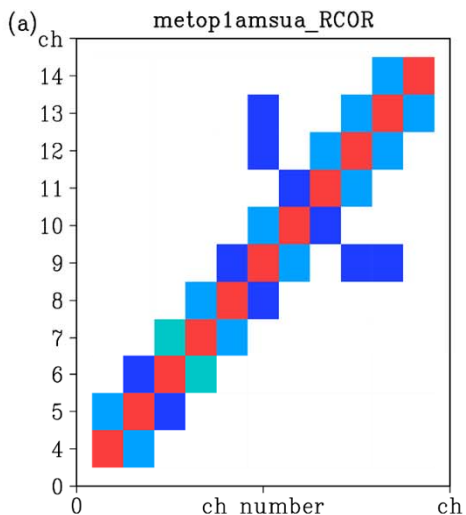
平均は0.6

AMSU-A観測誤差の空間相関



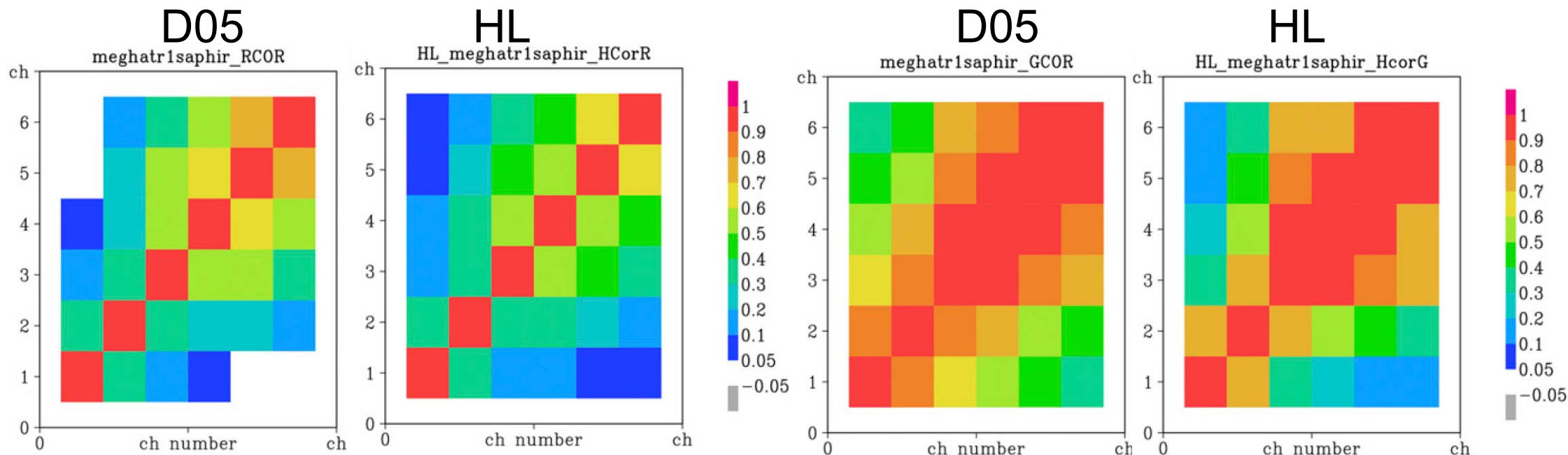
- 相関距離は50km ~100km程度。
- 現行の間引き距離250kmより短い。
- 5倍から10倍の高密度で同化できる可能性

衛星輝度温度観測誤差のチャンネル間相関



水蒸気センサについては、Ch間相関は無視できない大きさであり、非対角Rが必要。

D05とHL法によるチャンネル間誤差相関推定の比較



D05とHLによる推定は、0.1程度のずれがある程度で整合的。

D05で推定したECMを用いた数値実験

- 目的

- ✓ 全観測データについて推定したR, Bを同化システムに導入し、解析・予報精度を評価する。

- 実験システム

- ✓ 気象研究所に移植した気象庁全球数値予報システム

- ✓ Ver H011:TL959/L100

- 実験名

1. CNTL: JMAオリジナルシステム (B,Rは経験的調整を観測種別高度領域等毎に含む)。
2. EXP-BR-A5: D05で推定したB,Rを使用。AMSU-AはCNTLの5倍の高密度同化 (D05推定)。
3. EXP-BRT-A5: EXP-BR-A5と同様。但し、誤差分散の調整パラメータを**1つだけ**導入。
4. EXP-BRT-A10: EXP-BRT-A5と同様。但し、AMSU-Aは10倍の高密度同化 (D05推定上限)。
5. EXP-BR-A1 : EXP-BR-A5と同様。但し、AMSU-Aの高密度同化はなし。
6. EXP-BRT-A1 : EXP-BRT-A5と同様。但し、AMSU-Aの高密度同化はなし。
7. EXO-BRT-A5-WIN : EXP-BRT-A5と同様。但し、冬実験。

- 実験期間

- ✓ 夏実験: 2016/08/01~08/31, (冬実験: 2016/12/01~12/31)

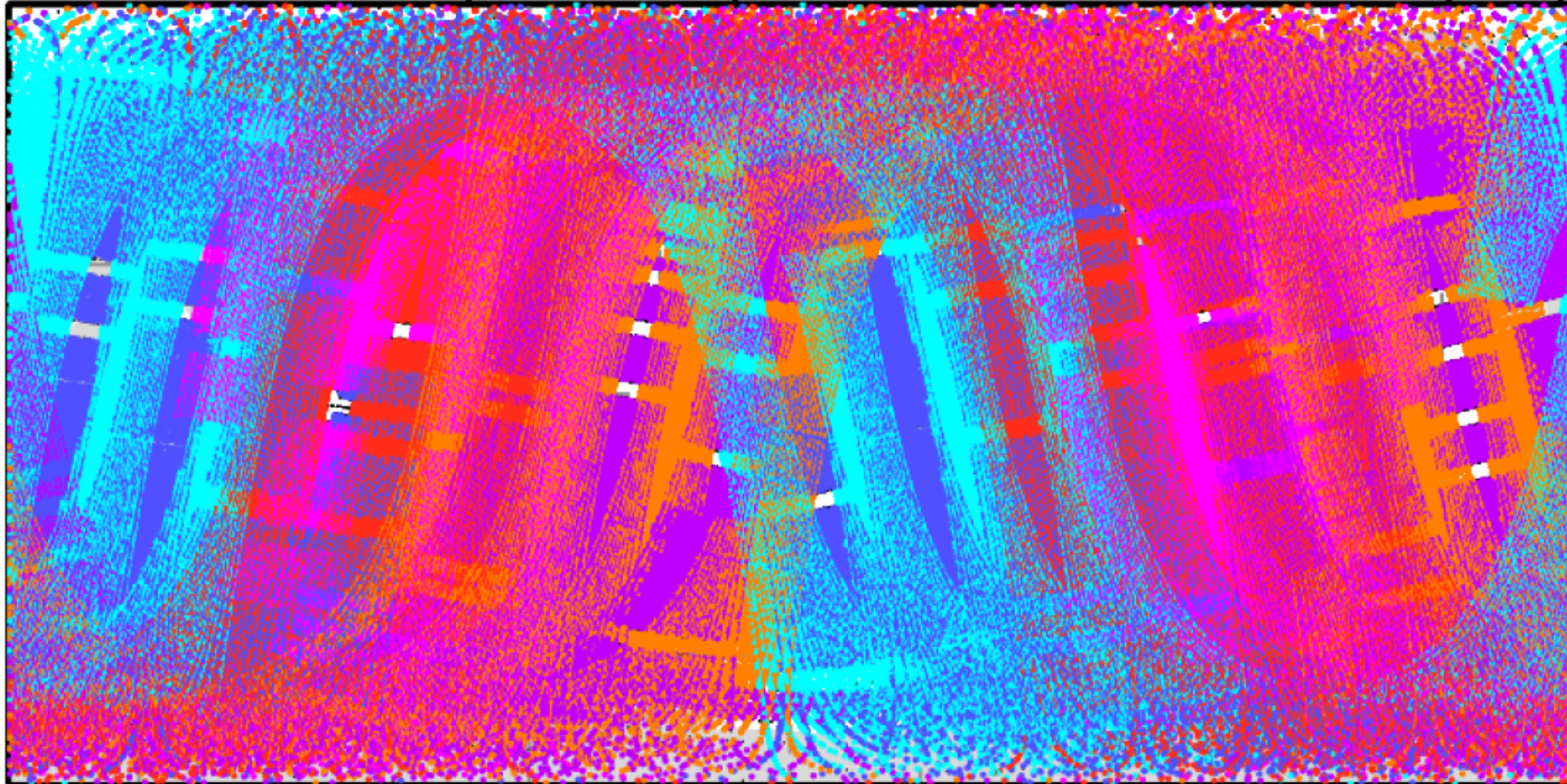
- 予報誤差評価: ERA5を真値として誤差を計算。

直接観測とGPSROのについて、D05推定値に背景ECMの係数をかけて観測誤差SDを縮小。VarBCのアンカ効果の維持。

AMSU-A

MW-SOUNDER(AMSU-A)

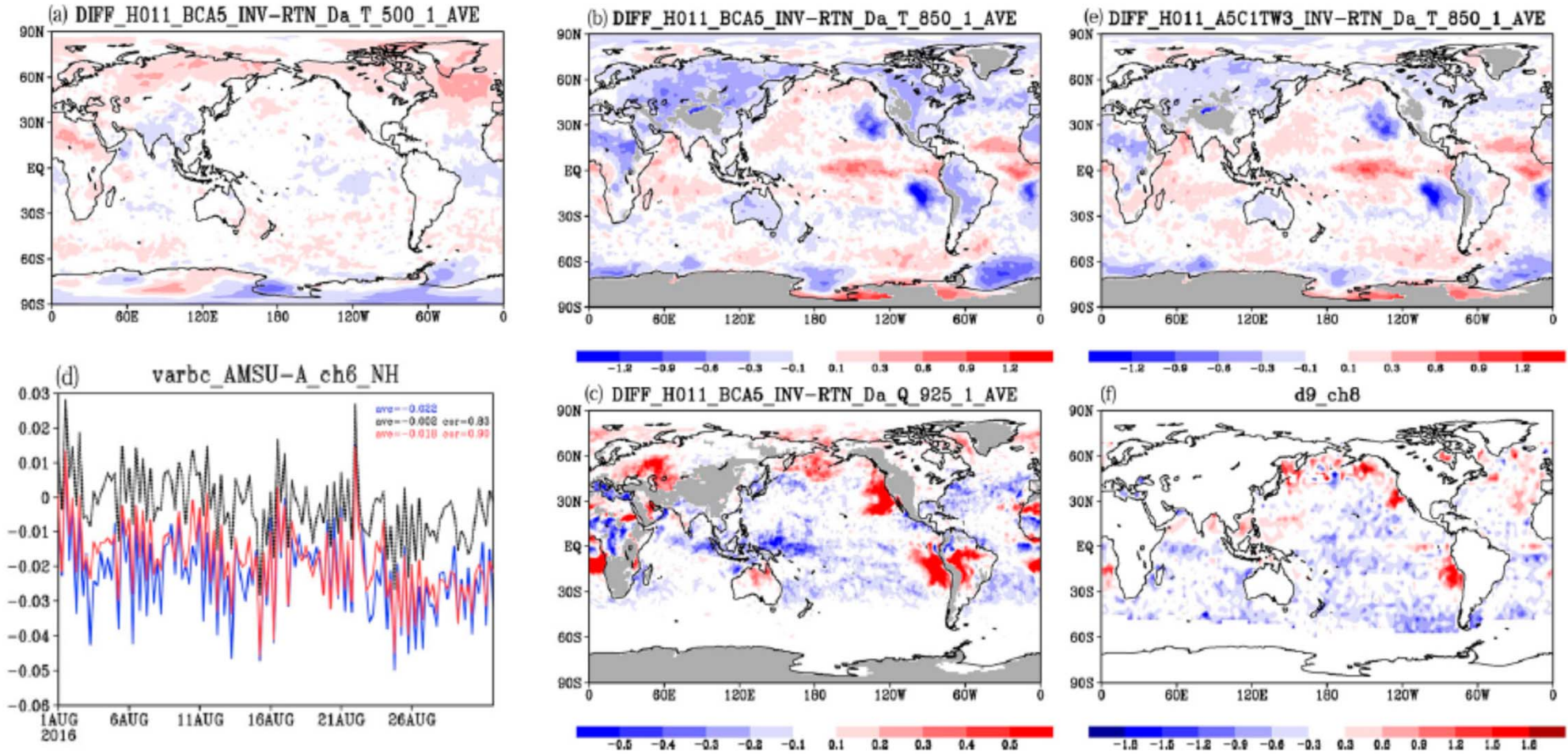
2016/08/31 00:00(UTC)



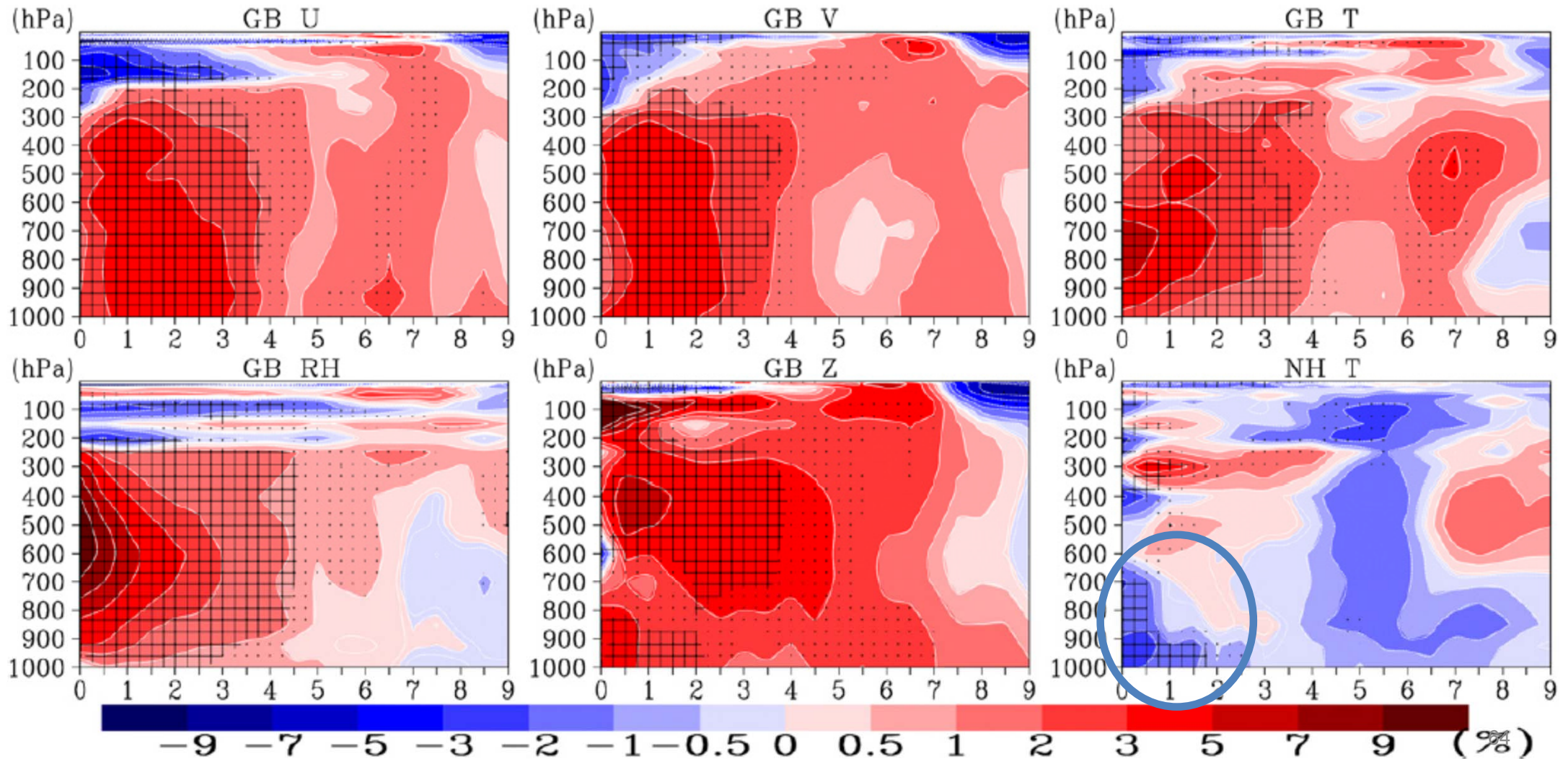
相関距離推定
に基づく
高密度同化
10倍

NOAA-15	NOAA-18	NOAA-19	Aqua	Metop-A	Metop-B
AMSU-A[●]: 41504	AMSU-A[●]: 26440	AMSU-A[●]: 36679	AMSU-A[●]: 36194	AMSU-A[●]: 32661	AMSU-A[●]: 37536
NOUSE[●]: 865	NOUSE[●]: 474	NOUSE[●]: 1278		NOUSE[●]: 133	NOUSE[●]: 2071
ALL: 42369	ALL: 26914	ALL: 37957		ALL: 32794	ALL: 39607

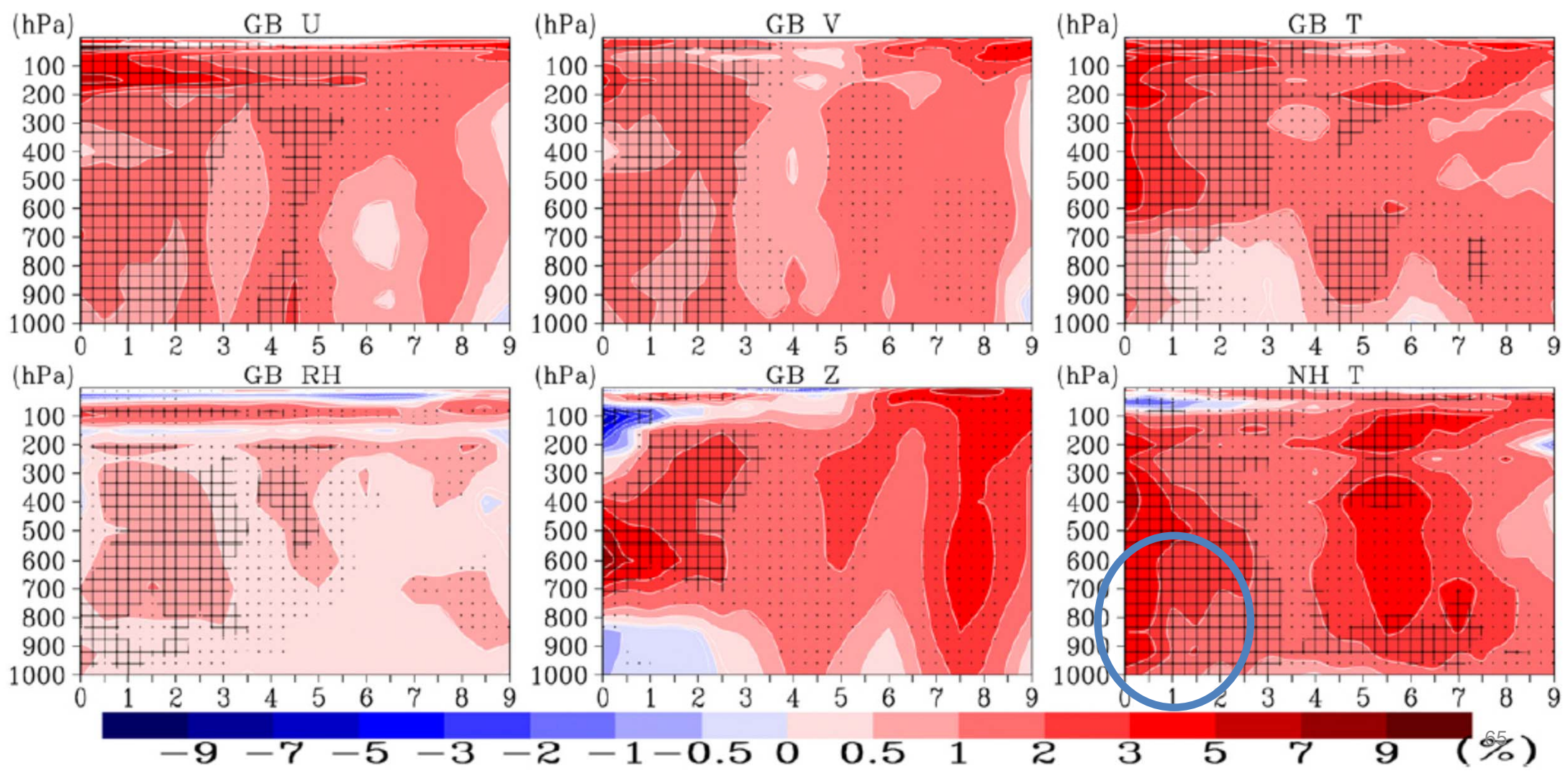
平均解析場の変化



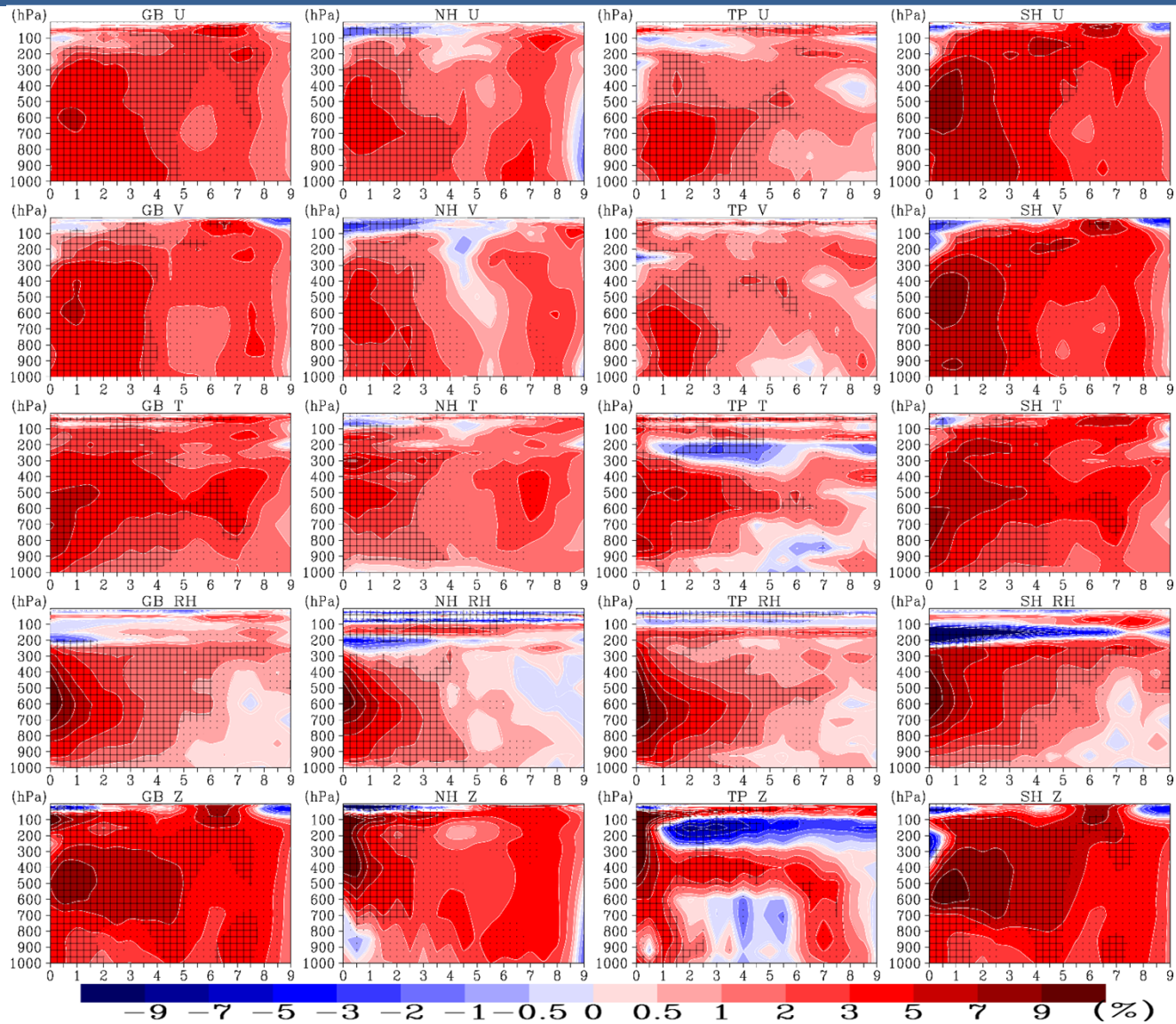
EXP-BR-A5 vs CNTL 予報RMSEの変化



EXP-BRT-A5 vs EXP-BR-A5 予報RMSEの変化



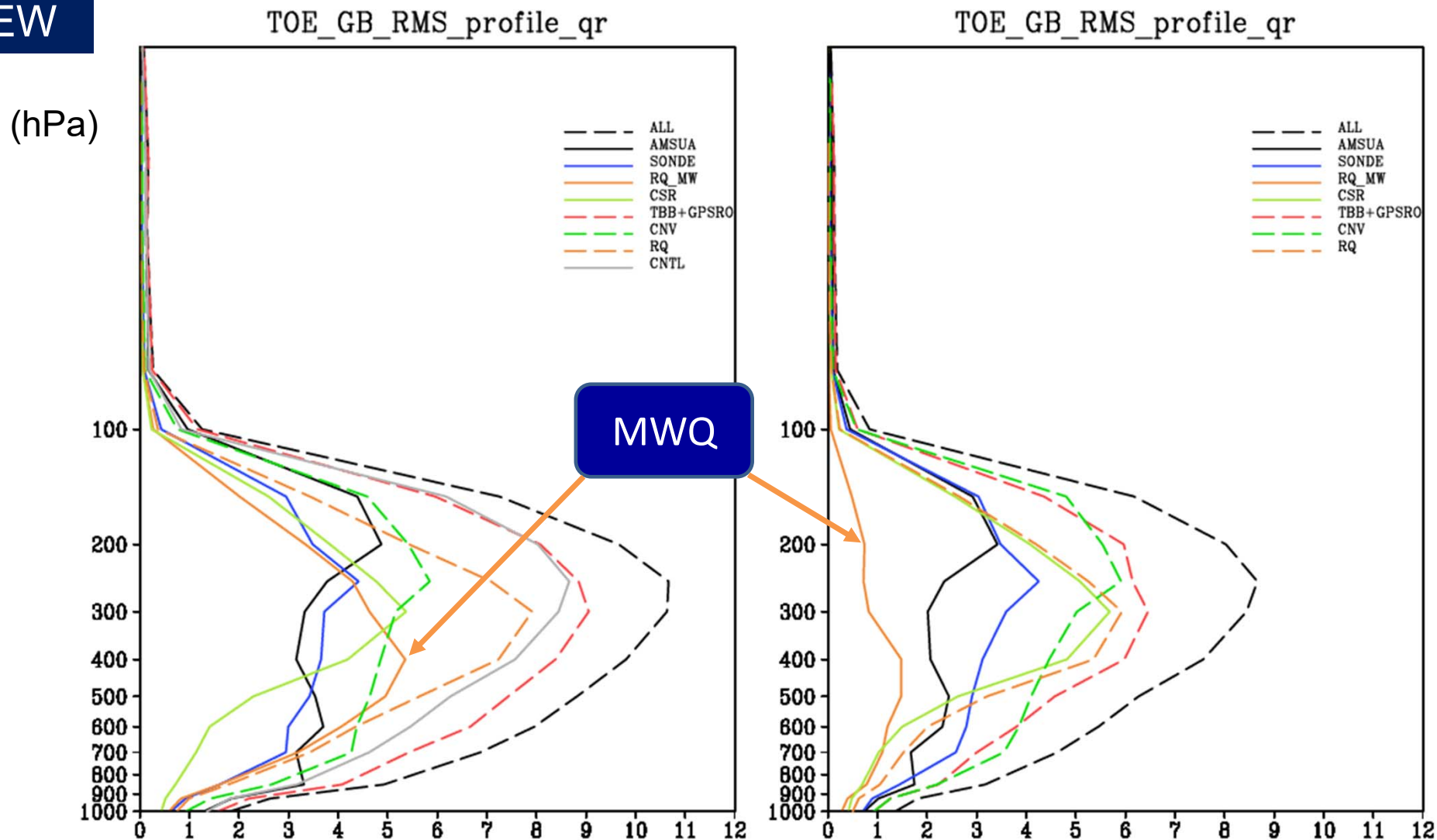
EXP-BRT-A5 vs CNTL 予報RMSEの変化



水蒸気解析場への観測インパクトの変化

NEW

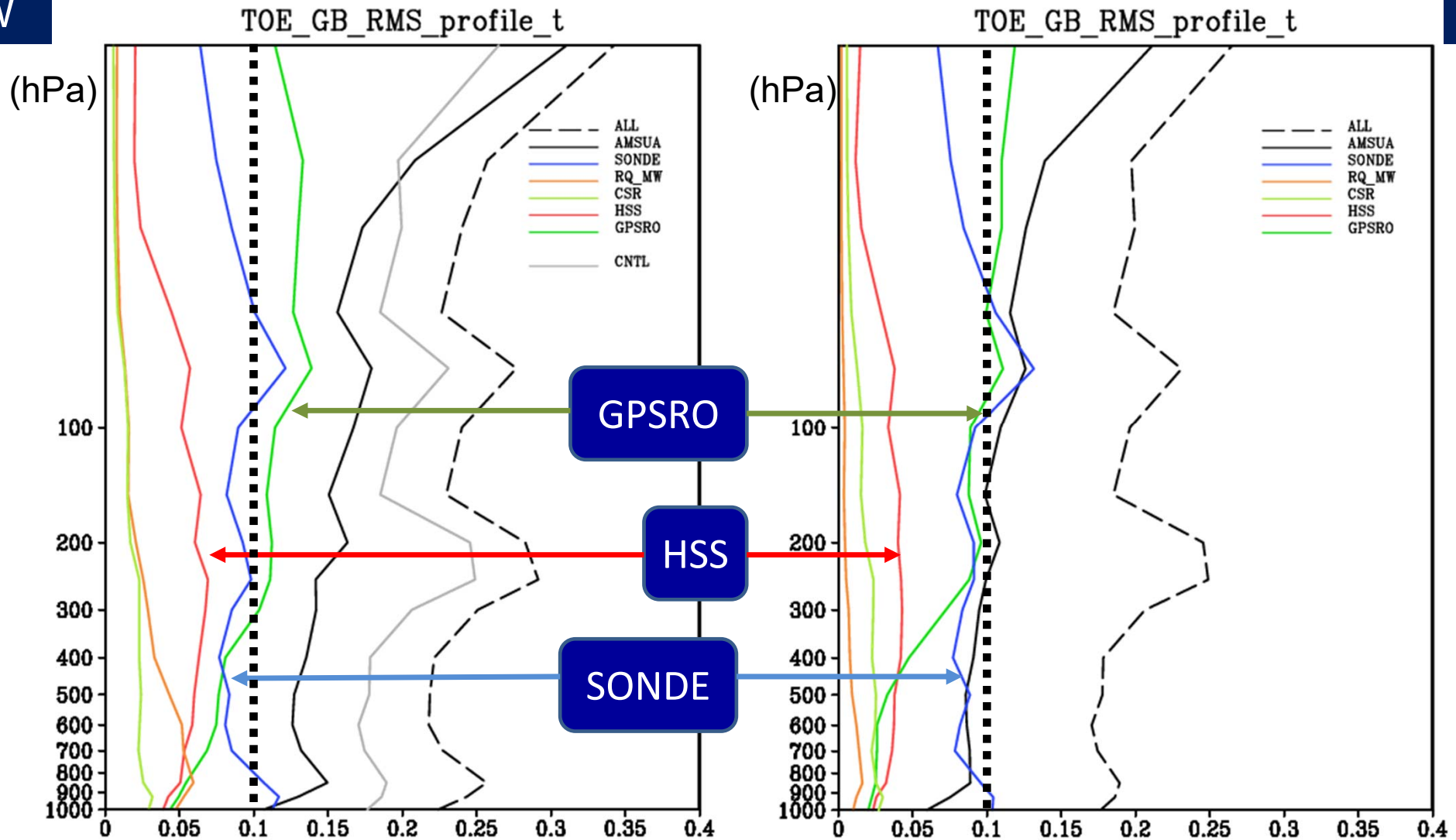
OLD



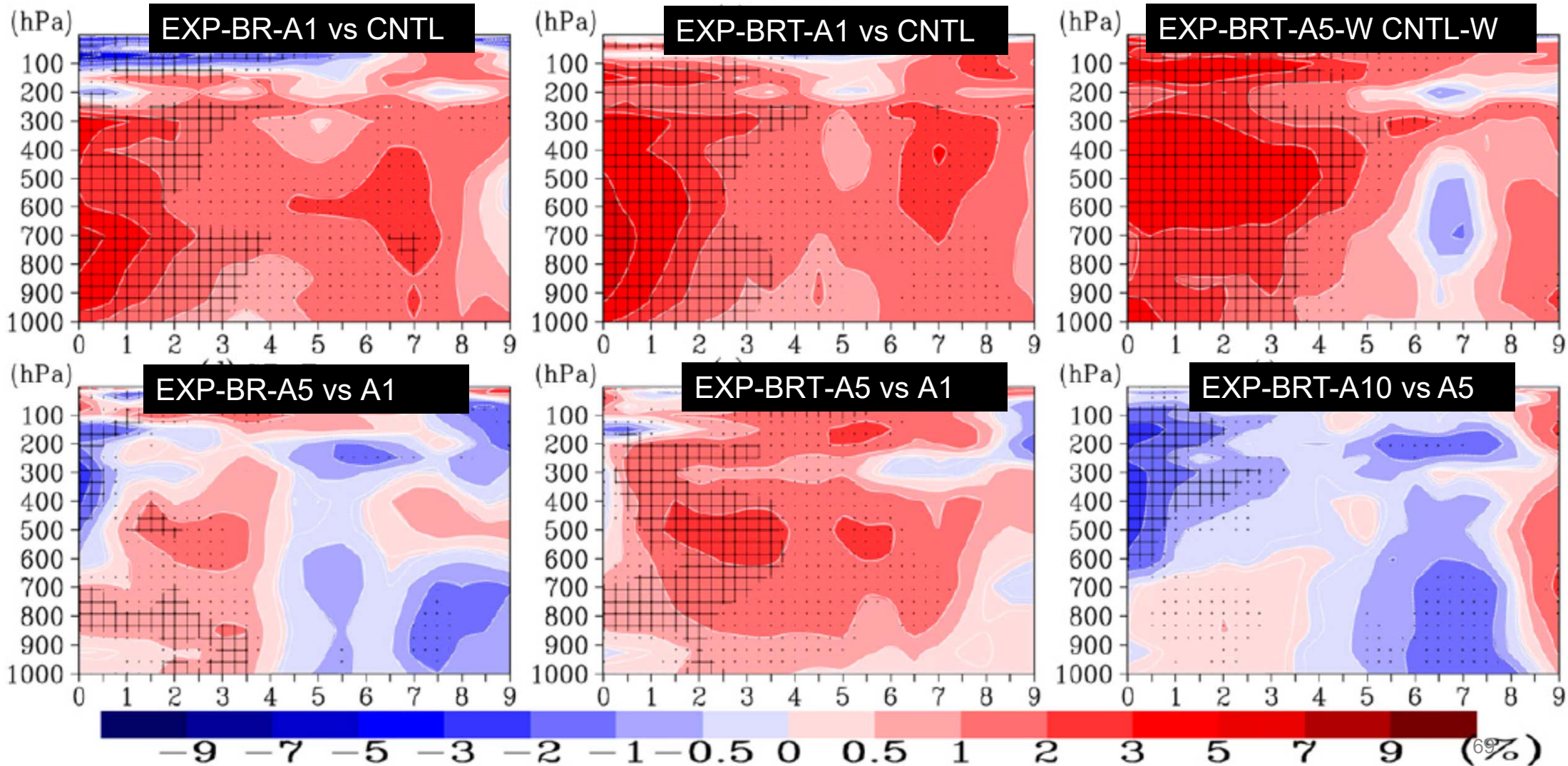
気温解析場への観測インパクトの変化

NEW

OLD

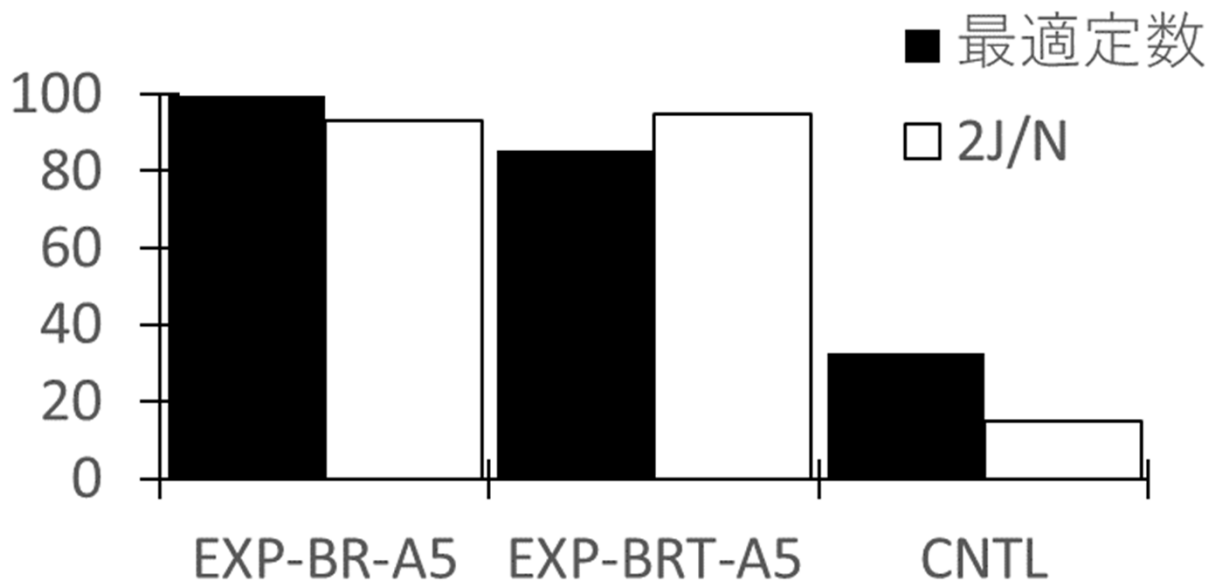


拡張実験における予報RMSEの変化



4D-Var 最終コストと2J/N

理論整合性



- 変分法の解析場についての評価関数Jを2倍したものは、理想的には自由度N (Nは観測データ数)の χ^2 分布に従う。
- 評価関数の定数倍は最尤推定場を変えないので、Jの分散が理論値を満たすようにこの定数を与える。
- Jの期待値と分散についての理論的關係
$$\frac{2\langle J \rangle^2}{N\sigma^2} = 1$$
がどの程度満たされるかで、理論整合性を測る。
- CNTLでは理論整合性は33%である。ECM全体の推定により、99%満たされる。調整パラメータを一つだけ入れる場合でも85%満たされる。
- 解析や予報精度とともに理論的整合性も大きく向上したことがわかる。

本章のまとめ

- ECMを複数の手法を組み合わせて推定し、気象庁全球NWPに導入して、予報精度や観測インパクトの変化を調べた。
- 推定されたECMのSDはほとんどの要素でCNTLよりかなり小さい値となった。水蒸気に感度のある輝度温度観測のチャンネル間誤差相関は大きく、無視できない。AMSU-Aの水平相関は、チャンネル4を除き50km未満である。
- 新しいECMによる同化予報数実験の結果は以下である。
 - ✓ 新しいECMは概ね予報精度を改善する。
 - ✓ 調整パラメータとして、GPSRO、非衛星従来観測について、誤差標準偏差に0.6の縮小係数を適用することで、予報精度は明瞭に改善する。0.6はBのSDの推定値から。
 - ✓ AMSU-Aを10倍にする実験はCNTLに対しては明瞭に精度改善。5倍に対する優位な改善はない。
 - ✓ 夏実験のデータで推定したECMは冬実験でも有効であり、推定はロバストである。
- 理論的整合性は、新しいECMの導入で90%前後に改善する。
- 観測インパクトは、ECMのSDから期待されるように、水蒸気輝度温度観測、GPSRO、HSSの寄与が大きくなっており、観測情報が拡充されている。

結論

- ECM全体を複数の推定手法を用いて高精度に推定し、これを同化システムに導入することで、解析、予報精度が明瞭に改善することが本研究で初めて明らかになった。理論的整合性も90%前後に向上する。
- 観測インパクトの時空間構造を解析できる新しい評価手法を構築し、既存手法と合わせて観測インパクトを評価した。インパクトの時空間構造の評価や確率的振る舞いのスカラー理論による説明が可能なことを明らかにした。既存の経験的調整を含むECMの課題や、客観推定に基づくECMの導入により観測インパクトが適切に変化することを解析した。
- 本研究によって、同化理論に基づくECMの高精度推定と詳細な観測インパクト評価によって高精度で妥当性の高い大気解析が可能になることが明らかになった。
- ◆ 本研究は、大自由度系の状態解析問題を扱ったものであり、大気解析だけでなく同様の性質をもつ他の物理系の状態解析にも資する可能性がある。