



令和7年度気象研究所研究成果発表会
2月21日(土) 13:30～ 気象庁講堂



地球全体の大気状態を知る ための研究

石橋 俊之

気象庁気象研究所気象観測研究部



内容

1. はじめに

- 地球全体(全球)の大気状態を知るとは？
- 大気状態推定の利用

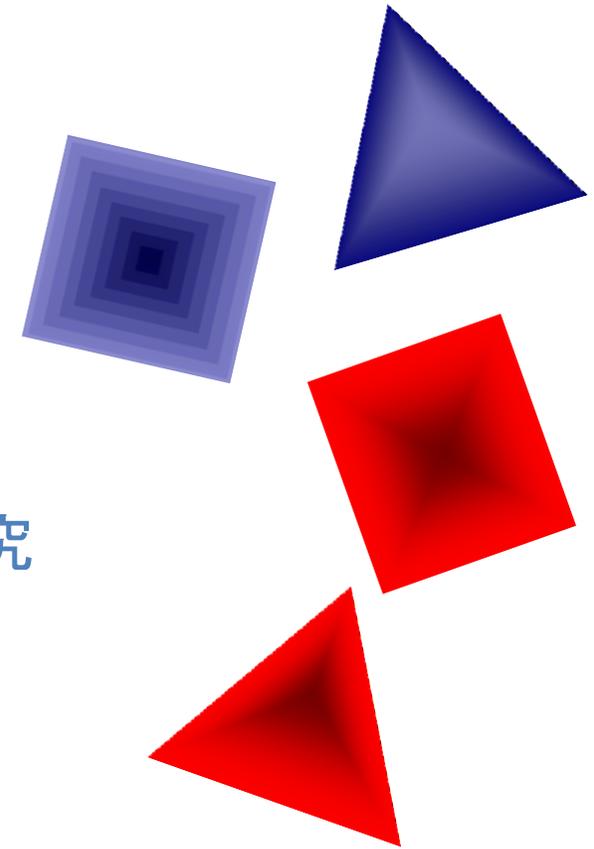
2. 大気状態推定の方法と課題

- データ同化

3. 最新の研究成果(本研究)

- データの曖昧さを推定して大気状態を知る研究
- たくさんの仮想地球を作って大気状態を知る研究
- 観測データの振る舞いを知る研究

4. まとめ



内容

1. はじめに

- 地球全体(全球)の大気状態を知るとは？
- 大気状態推定の利用

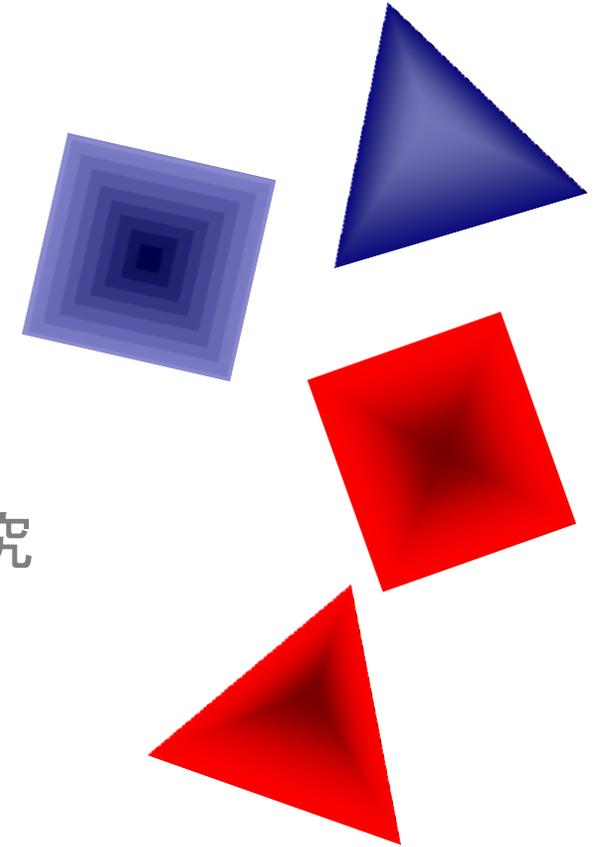
2. 大気状態推定の方法と課題

- データ同化

3. 最新の研究成果(本研究)

- データの曖昧さを推定して大気状態を知る研究
- たくさんの仮想地球を作って大気状態を知る研究
- 観測データの振る舞いを知る研究

4. まとめ

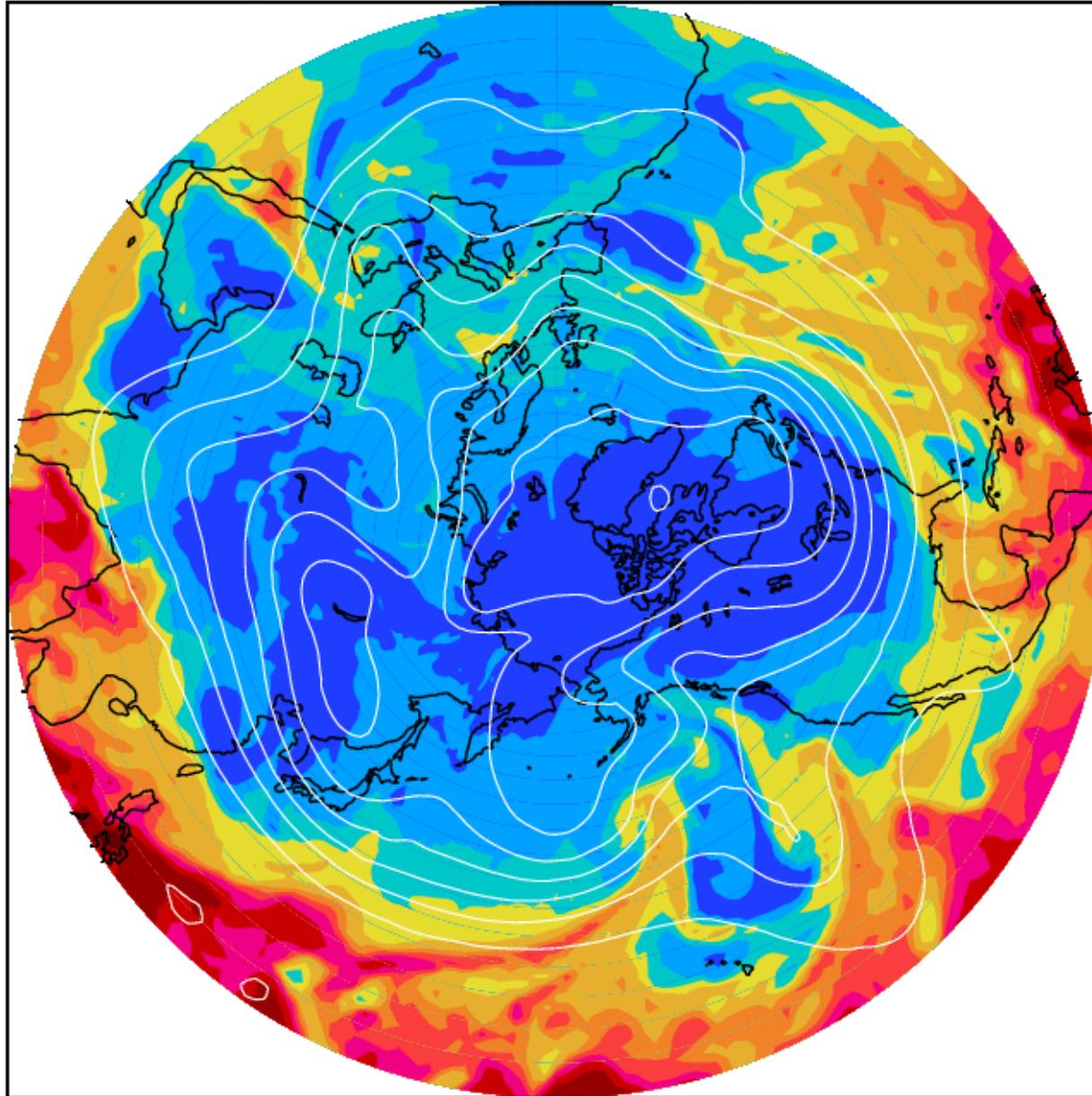


1. 大気の相互作用(つながり)

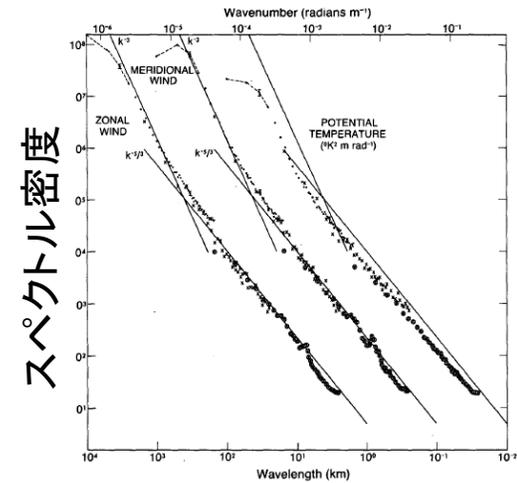
2018年1月1日~31日の
6時間ごとの大気の動き

色: 水蒸気量
850hPa
(約1.5km)

白線: 高度場
250hPa
(約10km)



● 様々なスケールの現象が相互作用している。



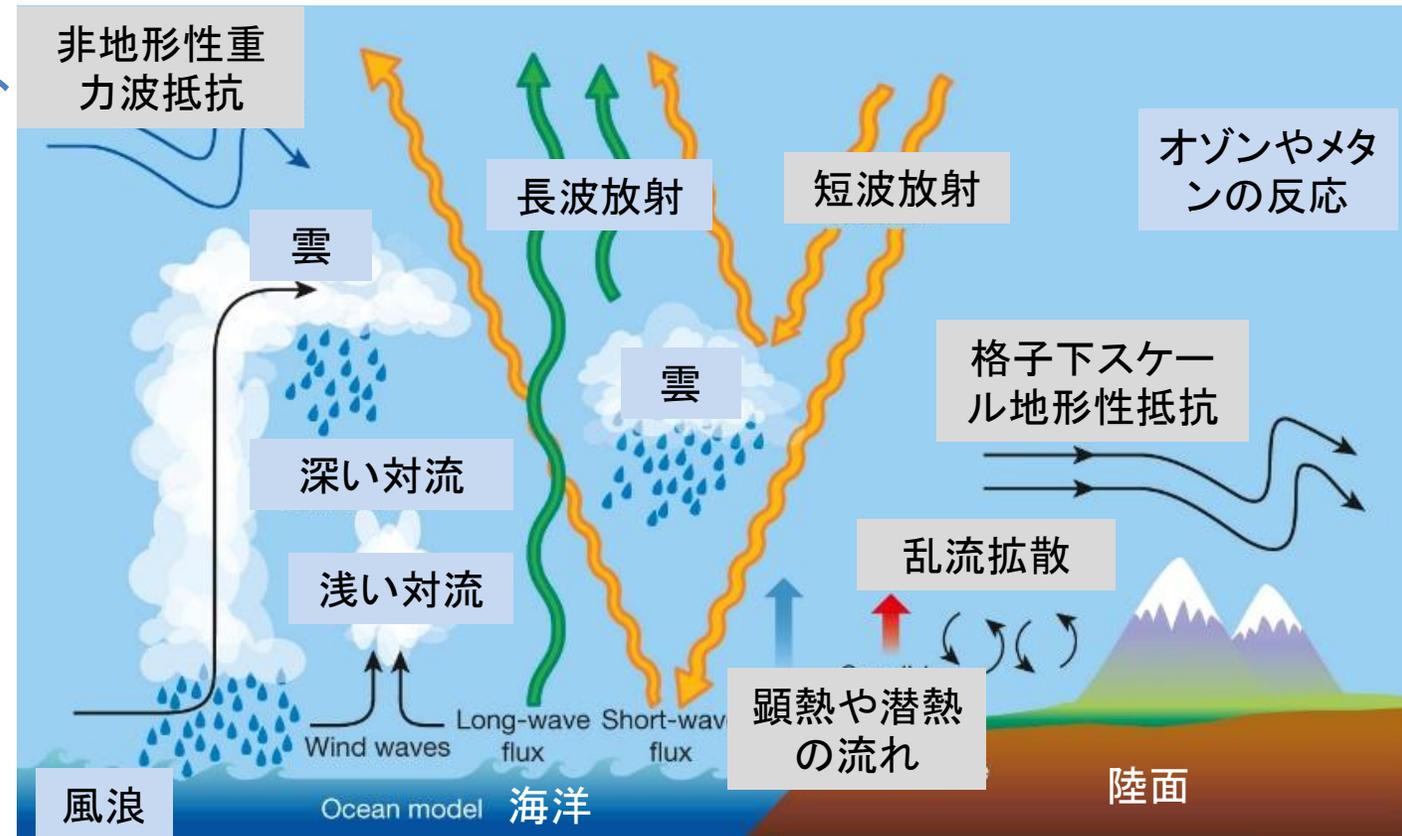
10,000 100 10 1 (km)

現象の大きさ

(Nastrom and Gage, 1985)

1. 大気状態推定とは

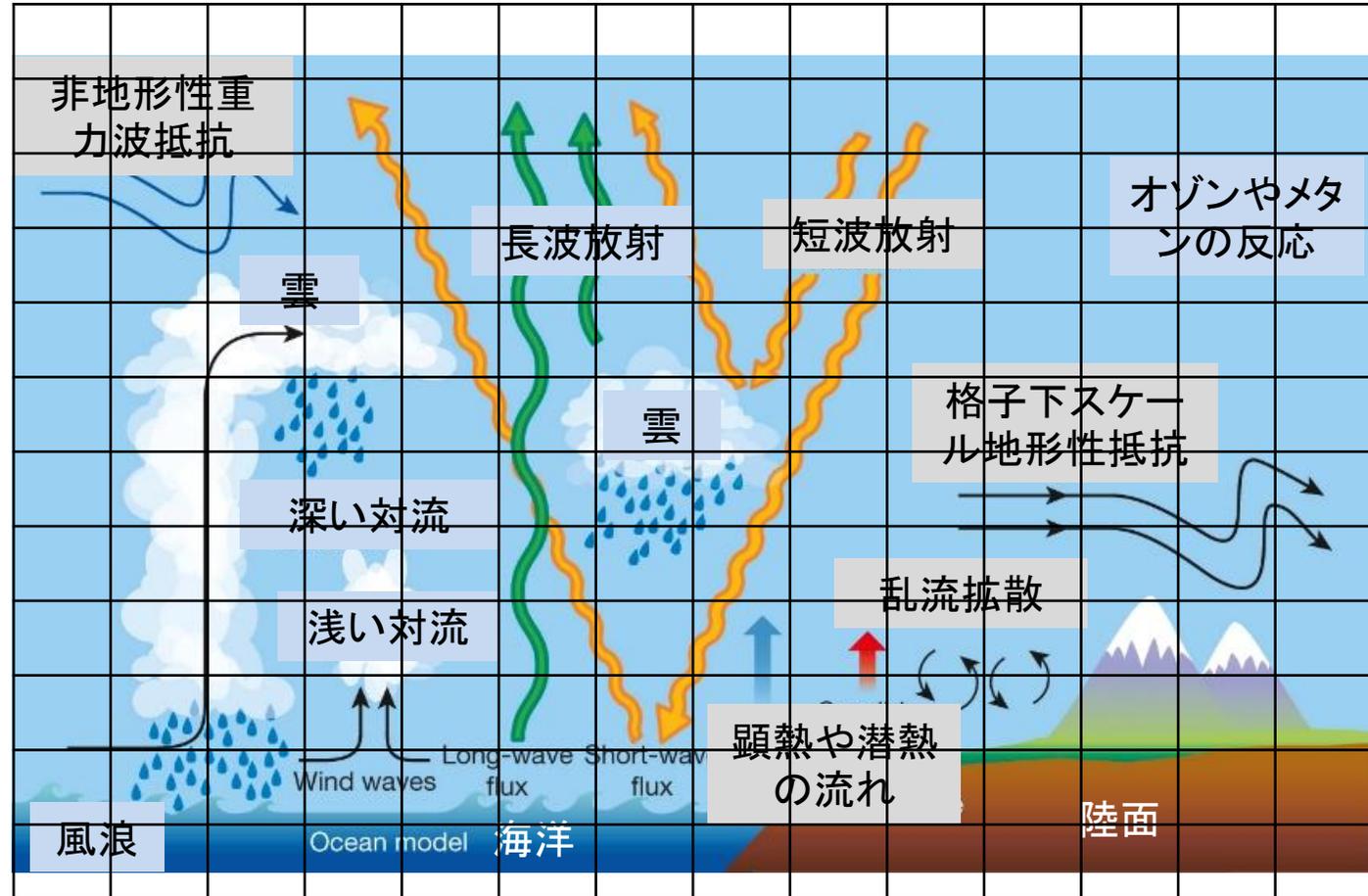
- ある場所の大気状態は、その場所の大気
がもつ物理量(温度、風向、風速、水蒸気量、
気圧、雲水量、雲氷量、雨水の量、雪の量
などの組)であらわされる。
- 大気を格子点の集まりで近似すると、全格
子点でこれらの物理量を知ることが大気状
態を知ることである。
- ◆ すべての格子点で誤差なく観測することは
現実には不可能であり、推定しなければなら
ない。これを**大気状態推定**と呼ぶ。



P Bauer et al. *Nature* 525, 47-55 (2015) doi:10.1038/nature14956

1. 大気状態推定とは

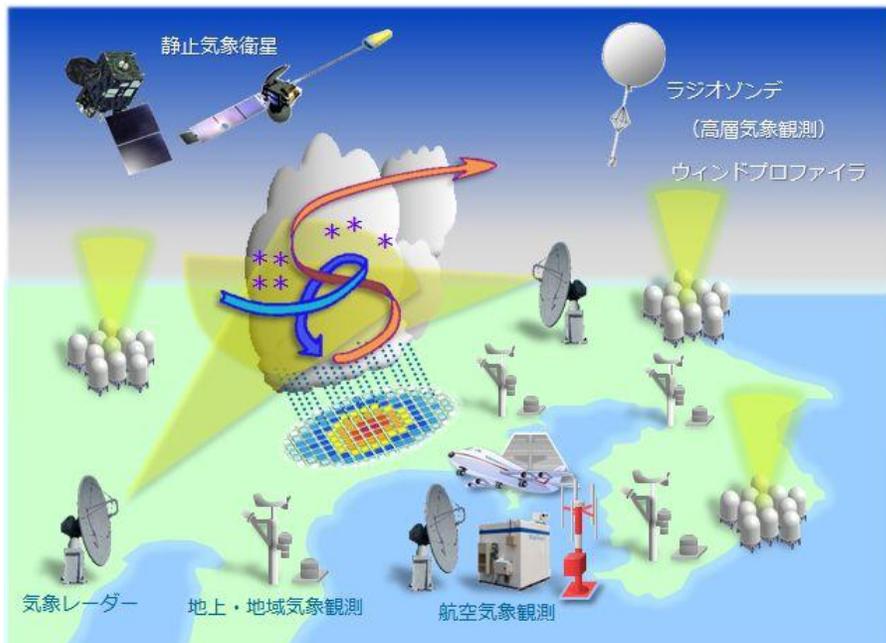
- ある場所の大気状態は、その場所の大気
がもつ物理量(温度、風向、風速、水蒸気
量、気圧、雲水量、雲氷量、雨水の量、雪の
量などの組)であらわされる。
- 大気を格子点の集まりで近似すると、全格
子点でこれらの物理量を知ることが大気状
態を知ることである。
- ◆ すべての格子点で誤差なく観測することは
現実には不可能であり、推定しなければなら
ない。これを大気状態推定と呼ぶ。



P Bauer et al. Nature 525, 47-55 (2015) doi:10.1038/nature14956

1. 大気状態推定の利用

地球大気全体の観測や予測



https://www.jma.go.jp/jma/kishou/known/kansoku/weather_obs.html

データ同化システム

- 数理統計学
- 物理法則

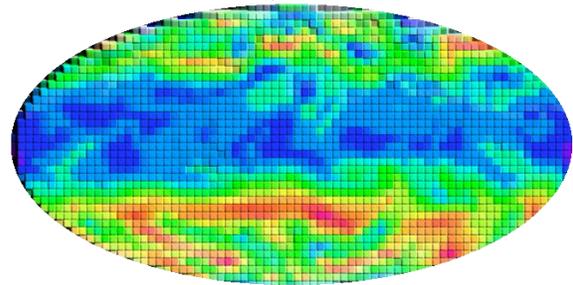
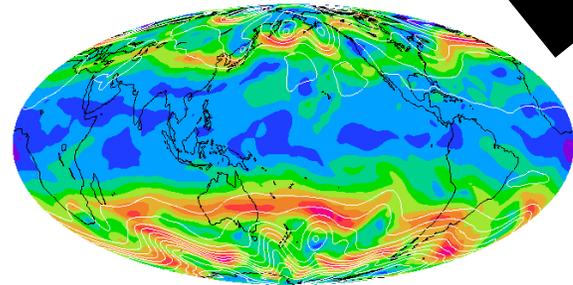
数値予報モデル

- 運動量の保存則
- 質量保存則
- エネルギー保存則

現在の大気状態

未来の大気状態

演算



- 大気科学研究のための基本情報
- 大気に関する社会基盤情報の生成に不可欠な情報
- 気象や気候予測モデルの作成や検証にも不可欠
- AI気象モデルの構築にも必須

- 大気に関する防災情報や天気予報等の基礎資料。つまり、社会基盤情報として不可欠。

大気状態推定や予測には、スーパーコンピュータが使われる。



内容

1. はじめに

- 地球全体(全球)の大気状態を知るとは？
- 大気状態推定の利用

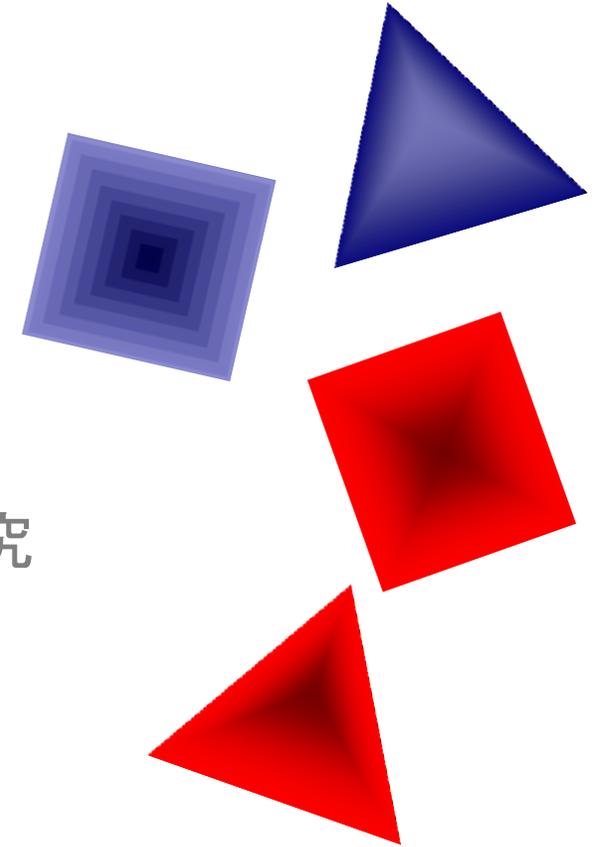
2. 大気状態推定の方法と課題

- データ同化

3. 最新の研究成果(本研究)

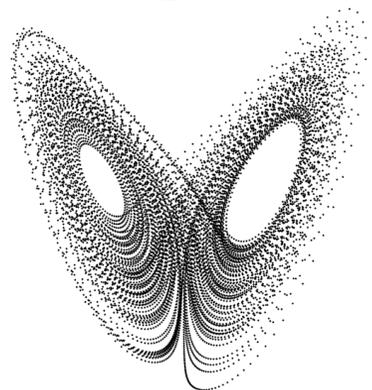
- データの曖昧さを推定して大気状態を知る研究
- たくさんの仮想地球を作って大気状態を知る研究
- 観測データの振る舞いを知る研究

4. まとめ



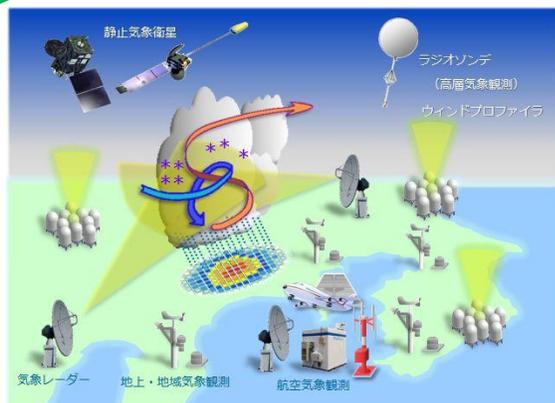
2.方法： 大気状態推定とデータ同化

全球大気
の状態を
知りたい **X**

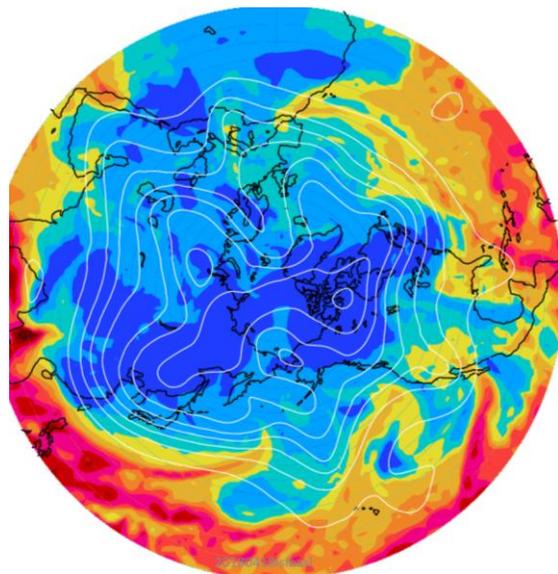


大気はカオス性(初期値
鋭敏性)を有する

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 $\sim 10^8$

大気状態が X である確率 = Z の曖昧さの関数

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



データ同化は、この式(ベイズの定理)を基礎として、曖昧さを持った膨大な情報を統合して、大気状態を推定する枠組みである。

- 大気状態は、最も確からしい状態(最大の確率を持つ状態)として、推定できる。
- そのためには Z の曖昧さを知る必要がある。

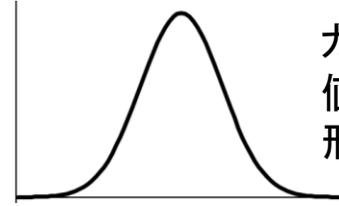
2.方法： 大気状態推定とデータ同化

大気状態が \mathbf{x} である確率 = \mathbf{z} の曖昧さの関数

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



\mathbf{z} の曖昧さはガウス分布で良く近似できる。#



ガウス分布は、平均値にピークを持つ山形の分布です。

(#の理由: 中心極限定理 + 観測や予報の性質)

- 大気状態は、最も確からしい状態として推定できる。
- $\mathbf{x} = \mathbf{f}_{\text{ECM}}(\mathbf{z})$

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

$$\delta \boldsymbol{\varepsilon} = \mathbf{z} - \langle \mathbf{z} \rangle; \quad \boldsymbol{\Sigma} = \langle \delta \boldsymbol{\varepsilon} \delta \boldsymbol{\varepsilon}^T \rangle = \begin{pmatrix} \mathbf{B} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{R} \end{pmatrix}; \quad Q(\mathbf{x}): \mathbf{x} \text{ と } \mathbf{z} \text{ を対応付ける関数}$$

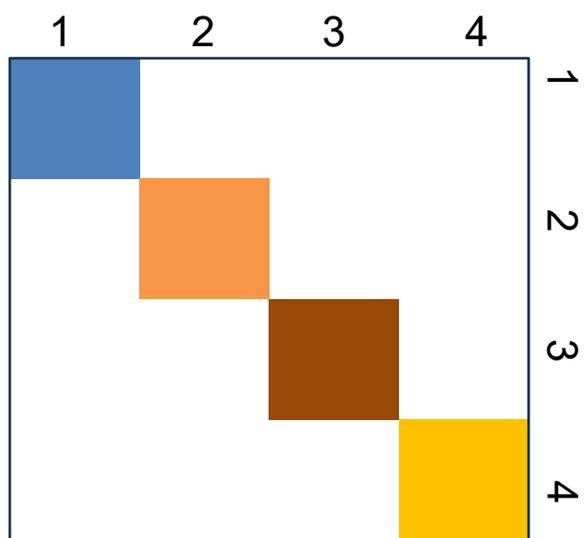
- ✓ $\boldsymbol{\Sigma}$ は誤差共分散行列 (Error Covariance Matrix; ECM) (10¹⁶個程度の数を2次元に並べたもの)。
- ✓ 観測成分Rと予測成分Bからなる。

ECMがわかれば大気状態推定できる！
ECMが大気状態推定の精度を決める！



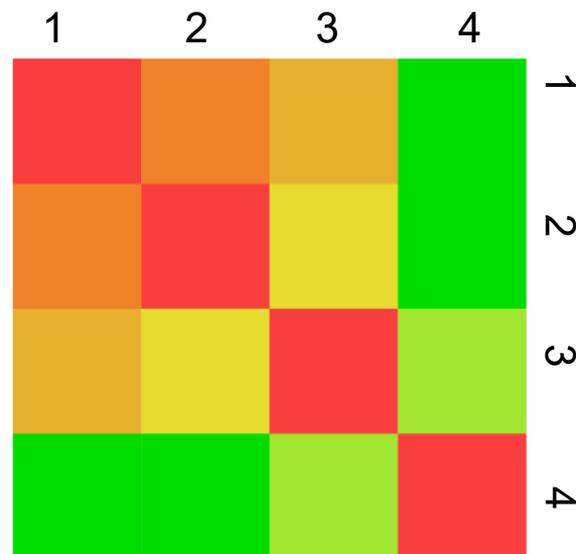
2.方法： 誤差共分散行列 (ECM)

ECM =



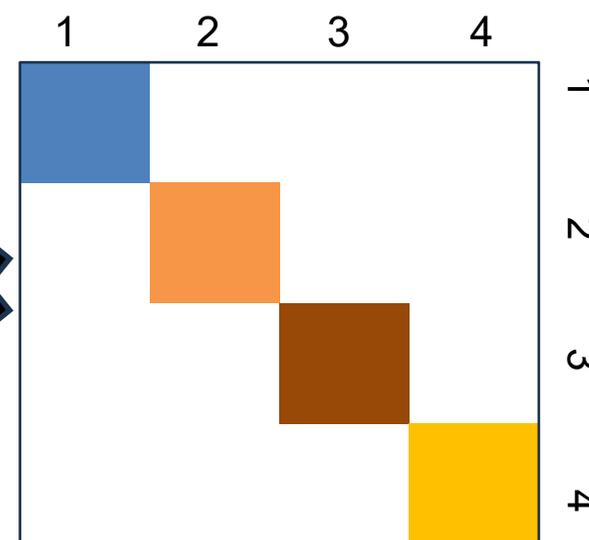
誤差の大きさ

×



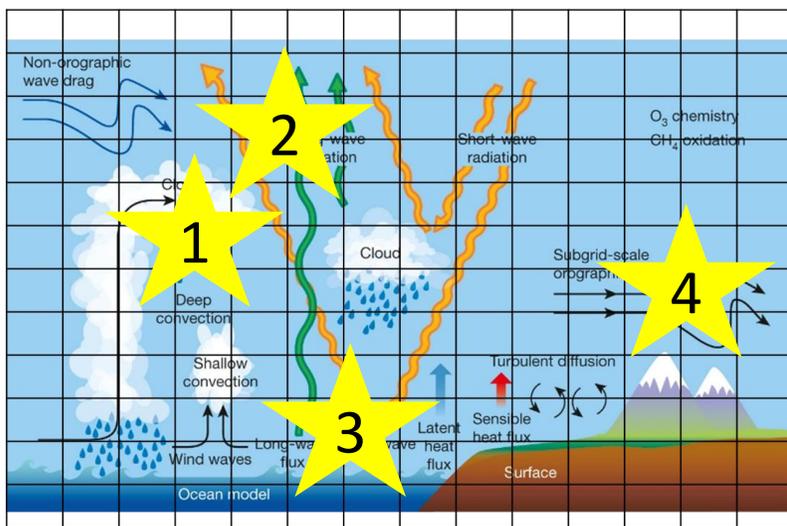
誤差の関係(相関)

×



誤差の大きさ

色は任意の数字を表す。



物理法則もここに含まれる



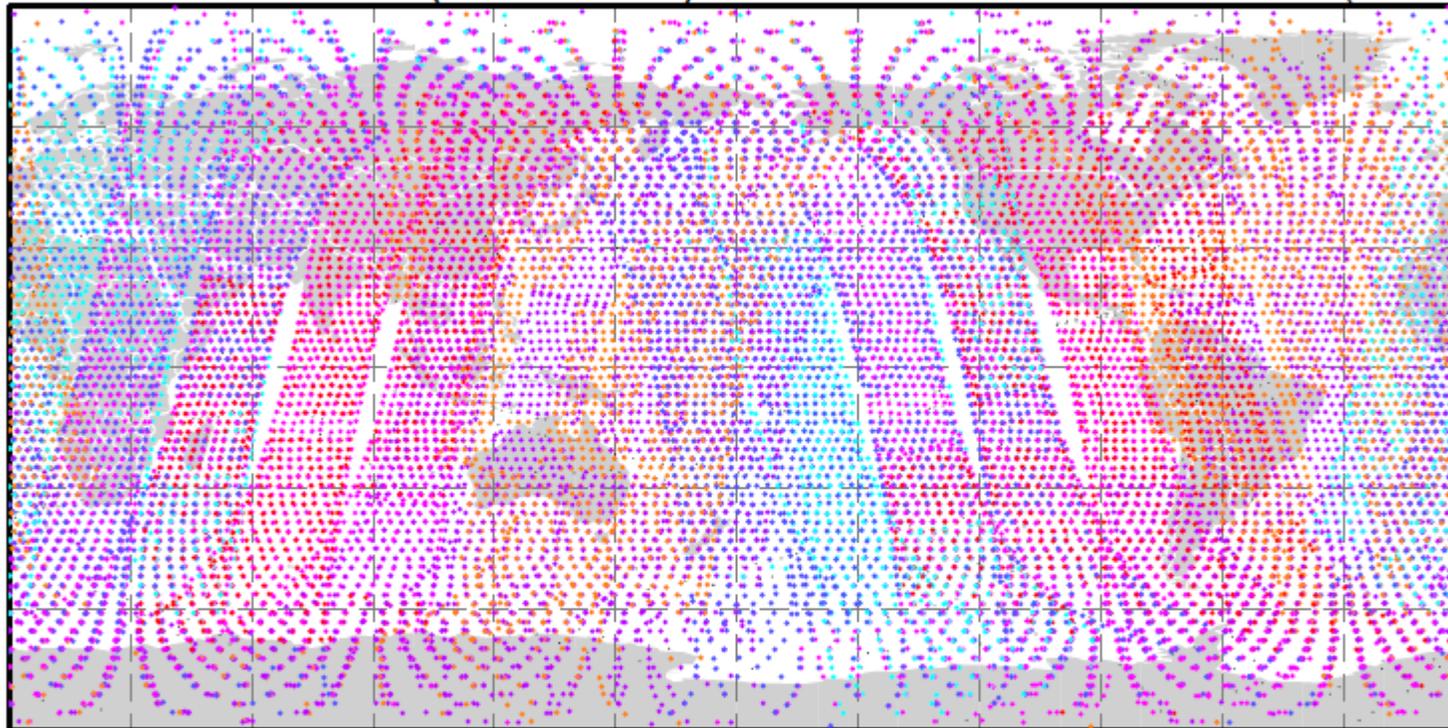
$$P(\mathbf{z}|\mathbf{x}) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}^n \sqrt{|\Sigma|}} \exp \left\{ -\frac{1}{2} (\mathbf{z} - Q(\mathbf{x}))^T \Sigma^{-1} (\mathbf{z} - Q(\mathbf{x})) \right\}$$

ECM

2.方法： 将来的に利用可能なデータは数十倍

利用中

MW-SOUNDER(AMSU-A) 2014/08/21 00:00(UTC)



| | | | | | |
|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| NOAA-15 | NOAA-18 | NOAA-19 | Aqua | Metop-A | Metop-B |
| AMSU-A[●]: 3010 | AMSU-A[●]: 5128 | AMSU-A[●]: 3995 | AMSU-A[●]: 2301 | AMSU-A[●]: 3569 | AMSU-A[●]: 4759 |
| NOUSE[●]: 142 | NOUSE[●]: 115 | NOUSE[●]: 315 | | NOUSE[●]: 50 | NOUSE[●]: 230 |
| ALL: 3152 | ALL: 5243 | ALL: 4310 | | ALL: 3619 | ALL: 4989 |

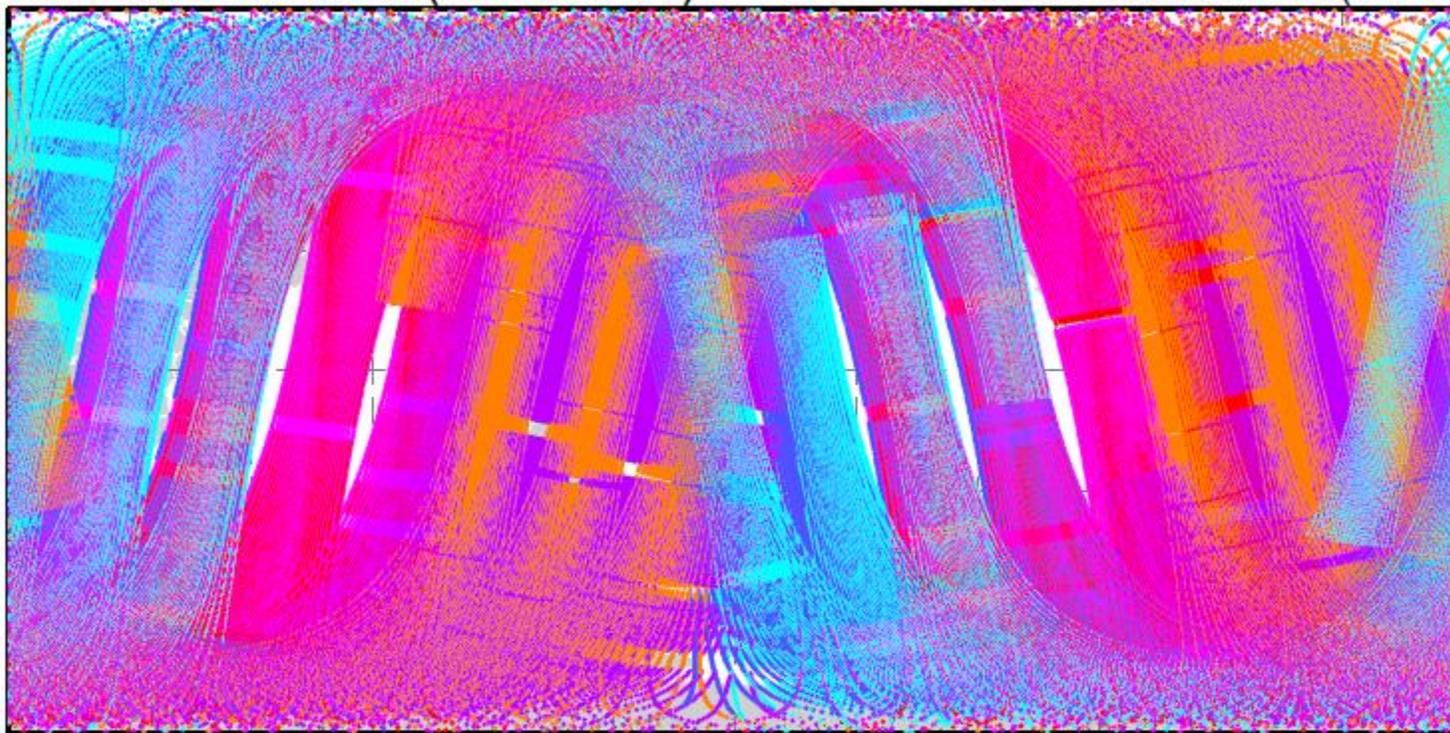
より多くの観測を同化するためには、誤差共分散行列の近似精度を向上させる必要がある。

2.方法： 将来的に利用可能なデータは数十倍

ECMの高
精度化で
利用可能
になる

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。

2.方法： 誤差共分散行列の課題

ECMは理論から一意に決まらない

ECMの値は、予報精度がよくなるように試行錯誤(少しずつ値を変えて何度も試す)によって決定されている。



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？

数値天気予報システムの改良が
ECMの誤差の補償と区別できない。

内容

1. はじめに

- 地球全体(全球)の大気状態を知るとは？
- 大気状態推定の利用

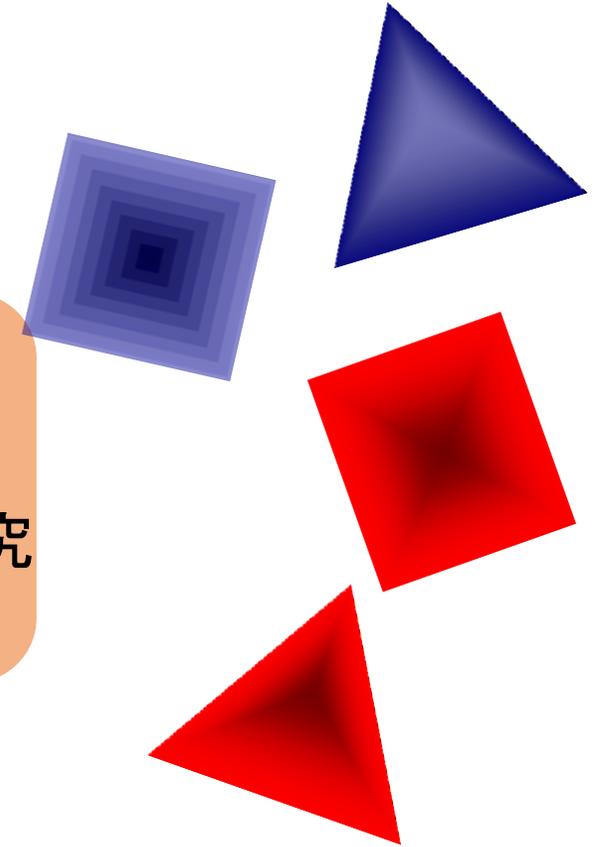
2. 大気状態推定の方法と課題

- データ同化

3. 最新の研究成果(本研究)

- a. データの曖昧さを推定して大気状態を知る研究
- b. たくさんの仮想地球を作って大気状態を知る研究
- c. 観測データの振る舞いを知る研究

4. まとめ



3.最新研究： 研究背景と目的

背景：

- 大気状態推定を高精度に行うためには、高精度のECMが必要である。
- しかし、現行のECMは経験的調整を多く含んでおり、状態推定の精度を強く制限している。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全体をデータ同化の理論に基づいて高精度に客観推定し、これを同化システムに導入することで、大気状態推定の精度を改善することである。観測データの基本的な性質についても調べる。

研究内容：最新の研究成果として以下の3項目について紹介する。

- a. データの曖昧さを推定して大気状態を知る研究
- b. たくさんの仮想地球を作って大気状態を知る研究
- c. 観測データの振る舞いを知る研究

3.最新研究a: 誤差共分散行列(ECM)の客観推定

主に4つの手法がある。ベイズの定理から導出される様々な関係式に基づく。

1. Desroziers (2005)法

$$\checkmark \mathbf{R} = \langle (\mathbf{o} - \mathbf{b})(\mathbf{o} - \mathbf{a})^T \rangle, \mathbf{G} = \langle (\mathbf{a} - \mathbf{b})(\mathbf{o} - \mathbf{b})^T \rangle$$

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))

✓ 観測誤差空間相関0を仮定して、観測と予測のECMを分離。

\mathbf{R} : 観測ECM

\mathbf{B} : 予報ECM

\mathbf{G} : 観測空間に変換した \mathbf{B}

\mathbf{D} : 観測と予報の差のECM

\mathbf{o} :=観測, \mathbf{b} =予報, \mathbf{a} =解析

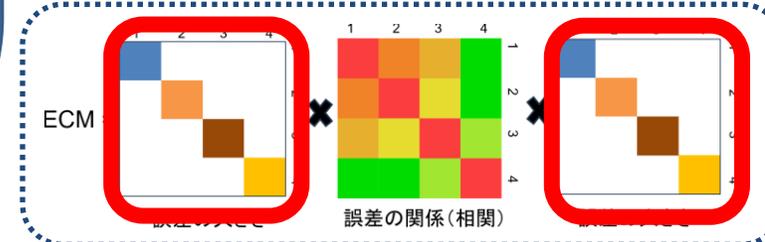
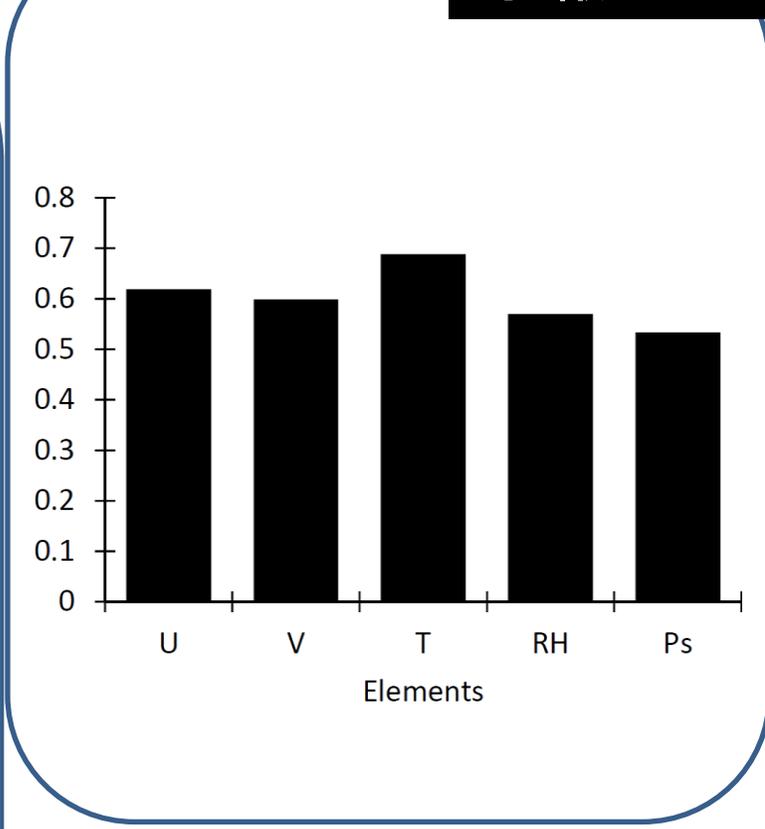
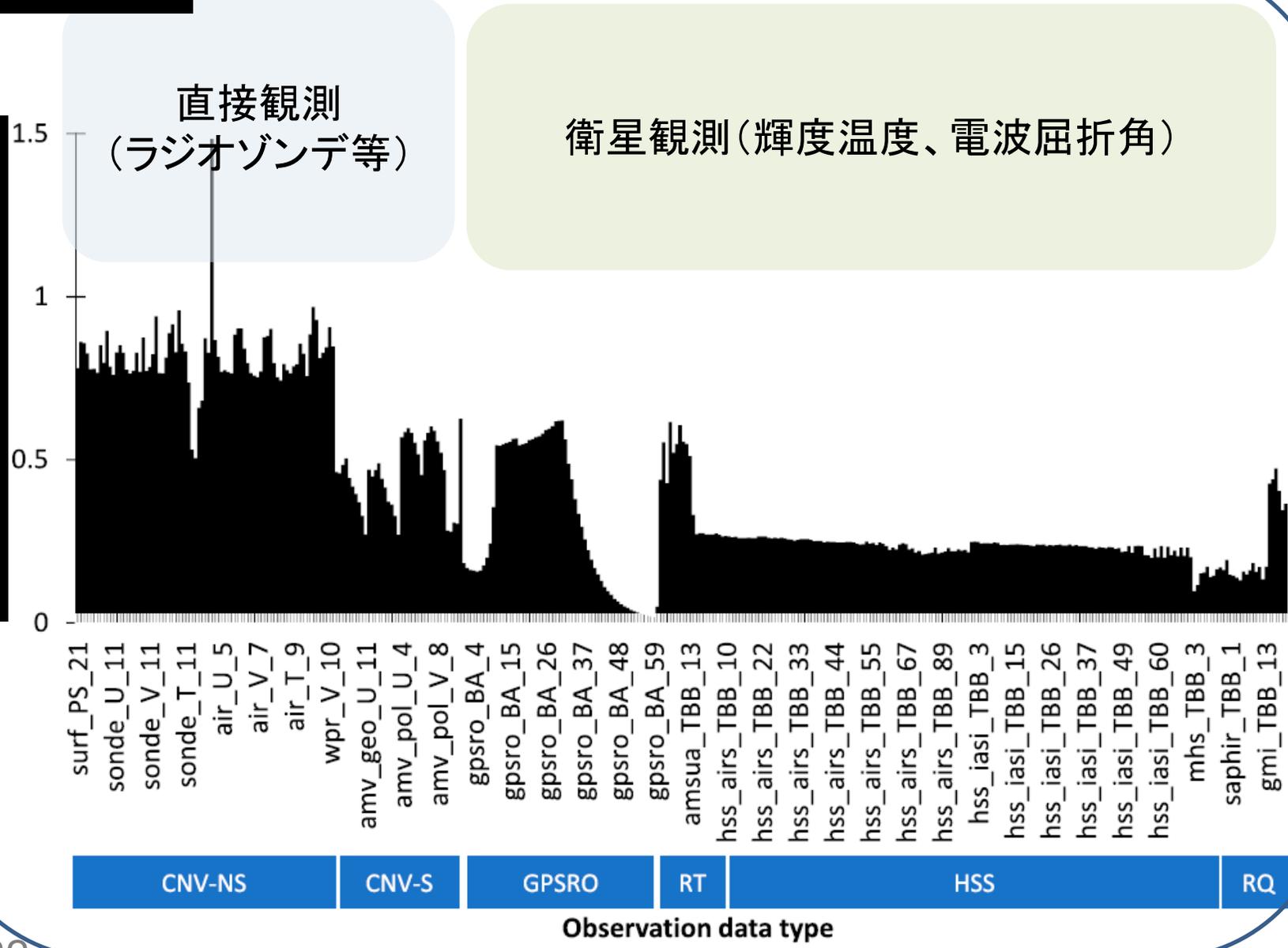
- いずれの手法も、それぞれの仮定に起因する推定誤差があり、現実のデータでどの程度の推定精度があるかは**未知**。ここでは主にDesroziers (2005)の方法で診断する。
- ECMはデータ全体の関係を記述するため、**すべてのデータのECMを客観推定することが重要**。これまでは特定のデータについてしか推定されていない。
- **全データのECMの客観推定は、本研究が初めて行うものである。**

3.最新研究a: 客観推定されたECM(誤差の大きさ)

観測ECM

予報ECM

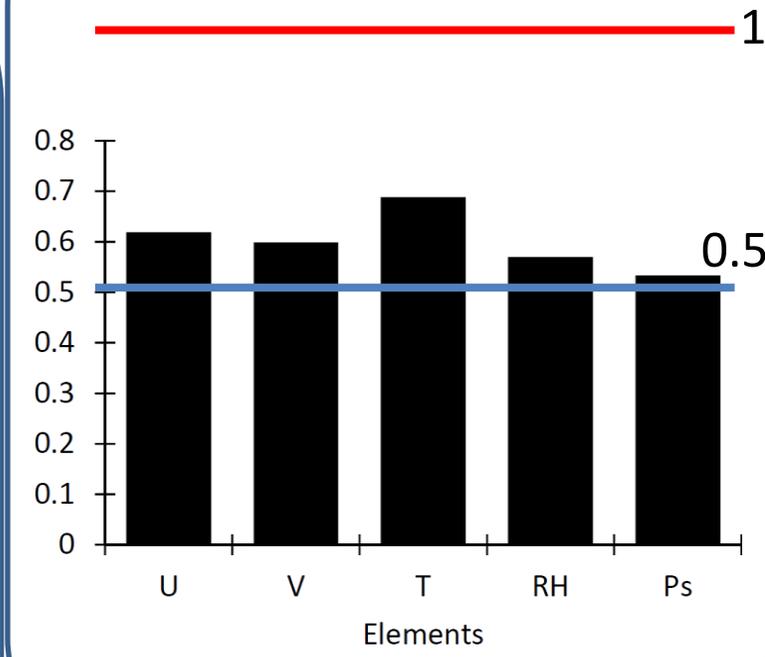
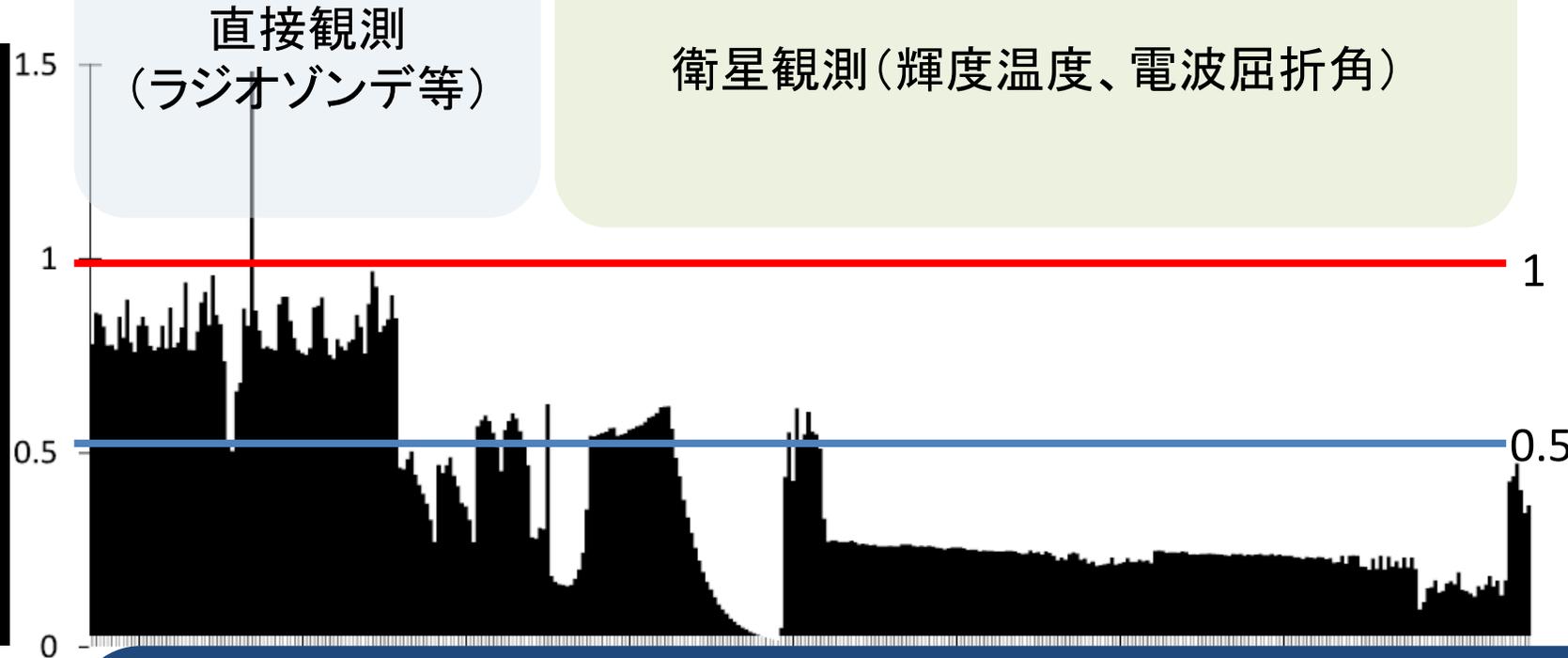
ECMの大きさ: 新/旧



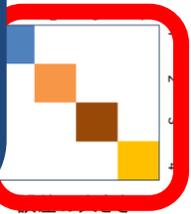
3.最新研究a: 客観推定されたECM(誤差の大きさ)

観測ECM

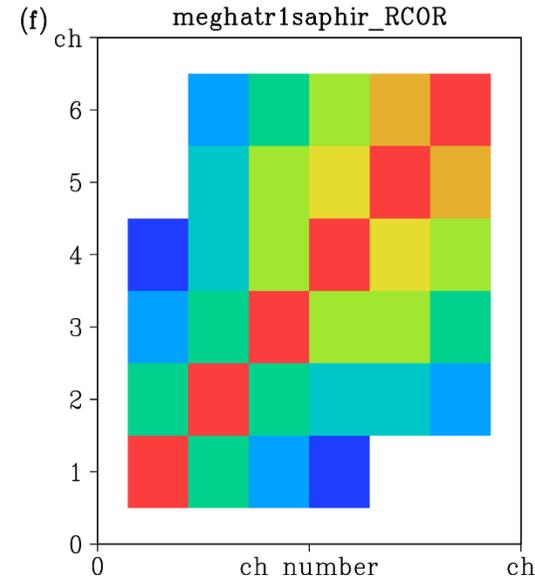
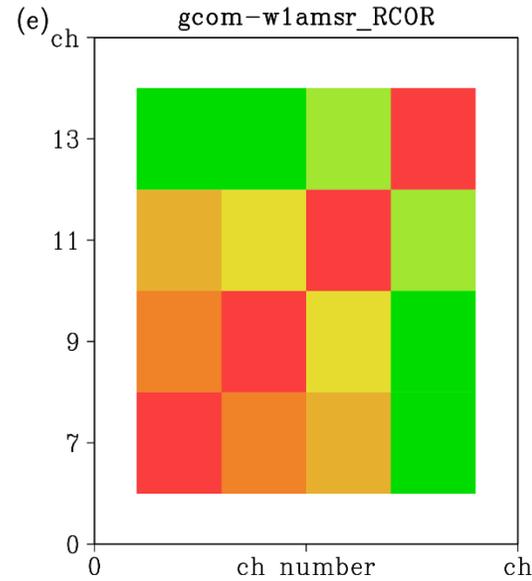
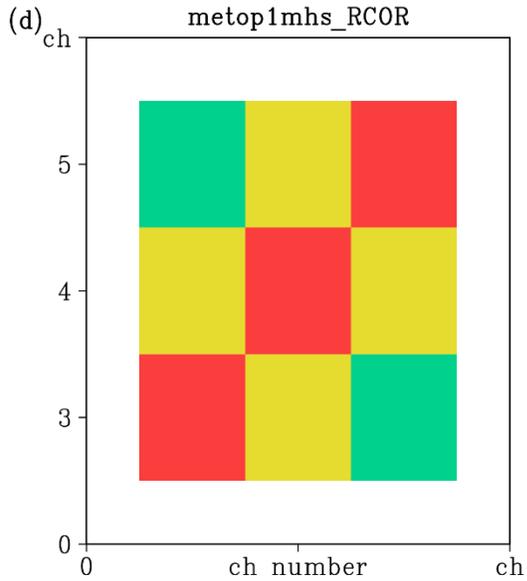
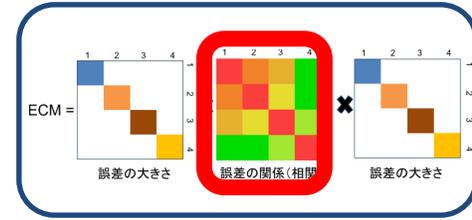
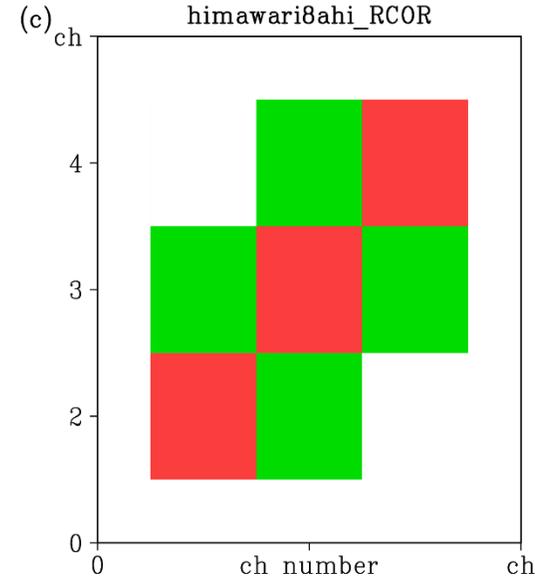
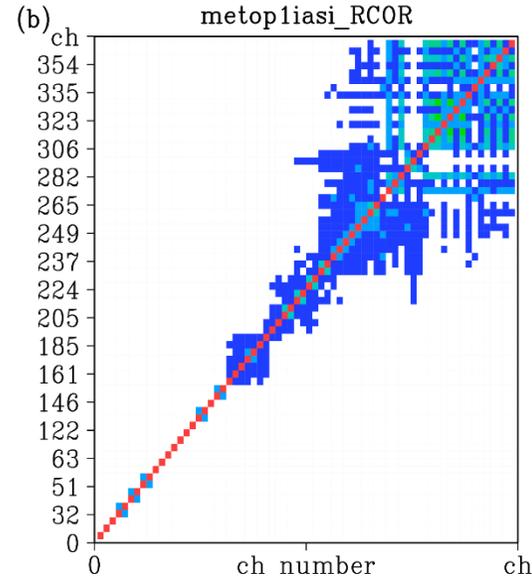
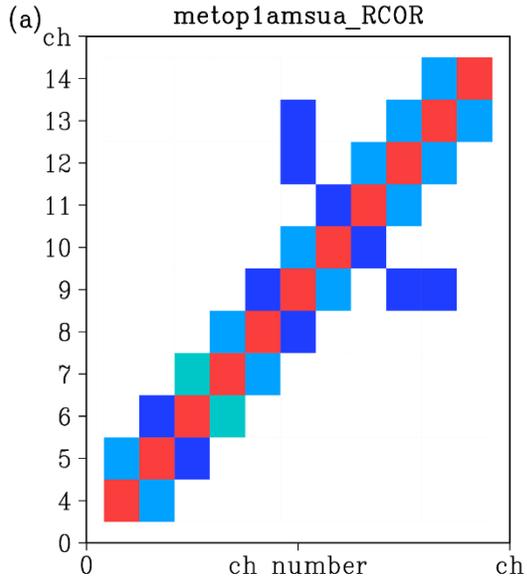
予報ECM



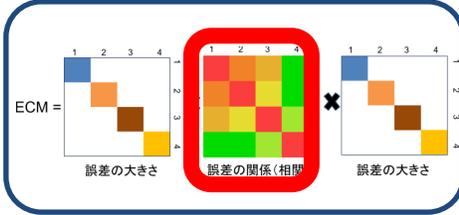
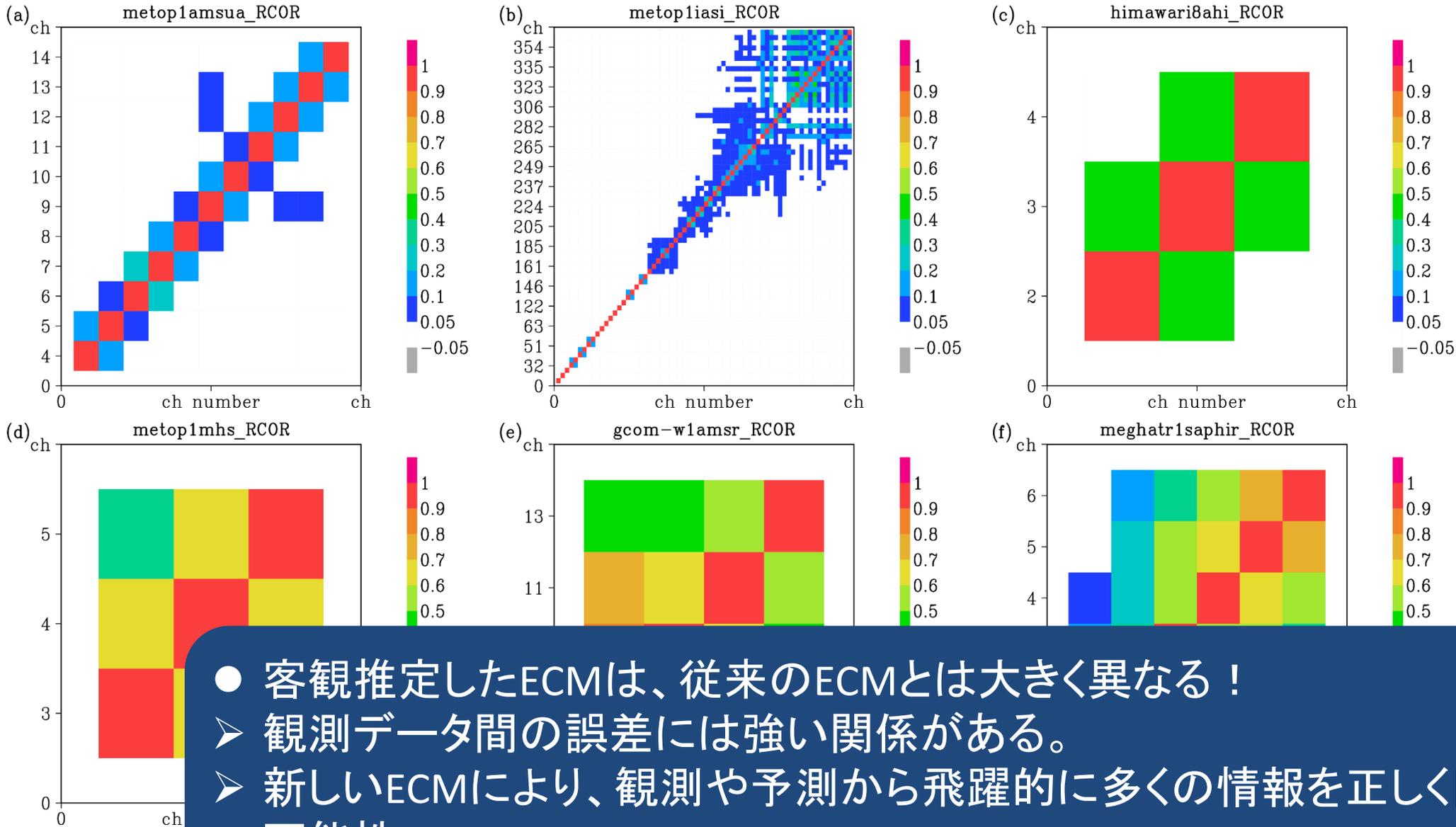
- 客観推定したECMは、従来のECMとは大きく異なる！
- 観測と予報の誤差はどちらも従来より小さい。衛星放射観測で特に顕著。
- 新しいECMにより、観測や予測から飛躍的に多くの情報を正しく同化できる可能性。



3.最新研究a: 推定されたECM(衛星観測誤差の相関)



3.最新研究a: 推定されたECM(衛星観測誤差の相関)

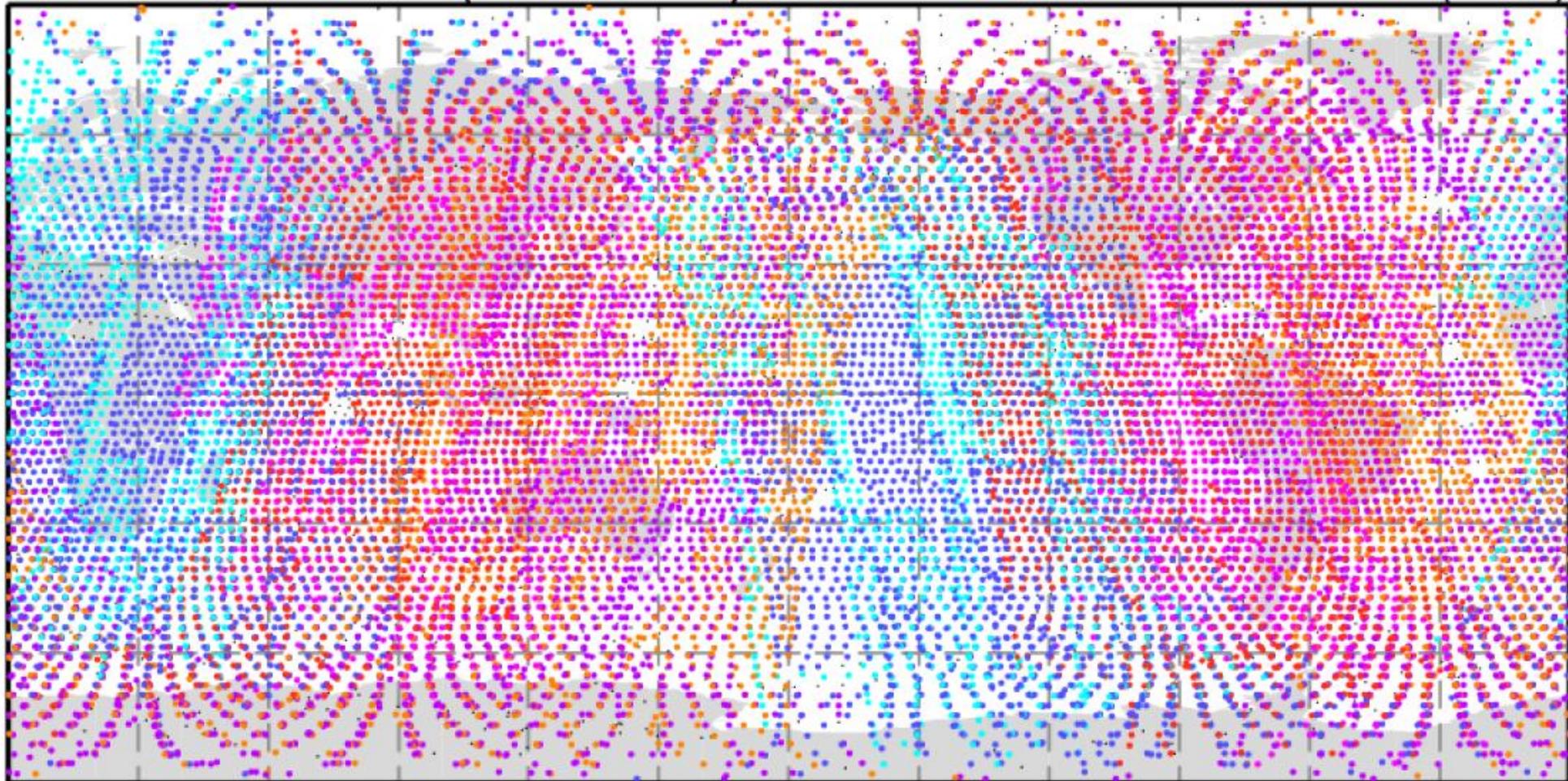


- 客観推定したECMは、従来のECMとは大きく異なる！
- 観測データ間の誤差には強い関係がある。
- 新しいECMにより、観測や予測から飛躍的に多くの情報を正しく同化できる可能性。

3.最新研究a: AMSU-A

MW-SOUNDER(AMSU-A)

2016/08/31 00:00(UTC)

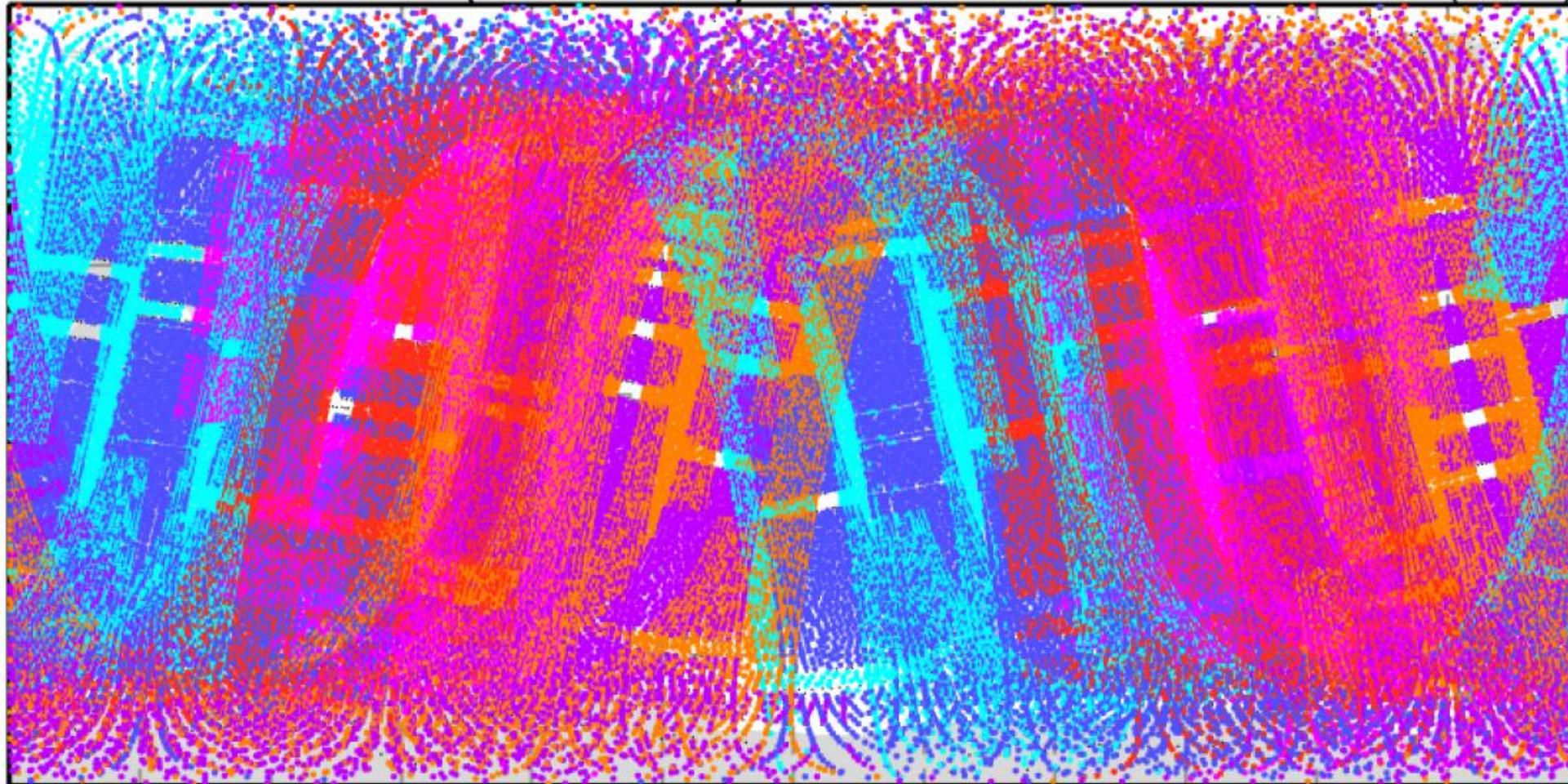


| | | | | | |
|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| NOAA-15 | NOAA-18 | NOAA-19 | Aqua | Metop-A | Metop-B |
| AMSU-A[●]: 3980 | AMSU-A[●]: 2538 | AMSU-A[●]: 4457 | AMSU-A[●]: 2690 | AMSU-A[●]: 3683 | AMSU-A[●]: 4518 |
| NOUSE[●]: 199 | NOUSE[●]: 101 | NOUSE[●]: 365 | | NOUSE[●]: 26 | NOUSE[●]: 615 |
| ALL: 4179 | ALL: 2639 | ALL: 4822 | | ALL: 3709 | ALL: 5133 |

3.最新研究a: AMSU-A

MW-SOUNDER(AMSU-A)

2016/08/31 00:00(UTC)



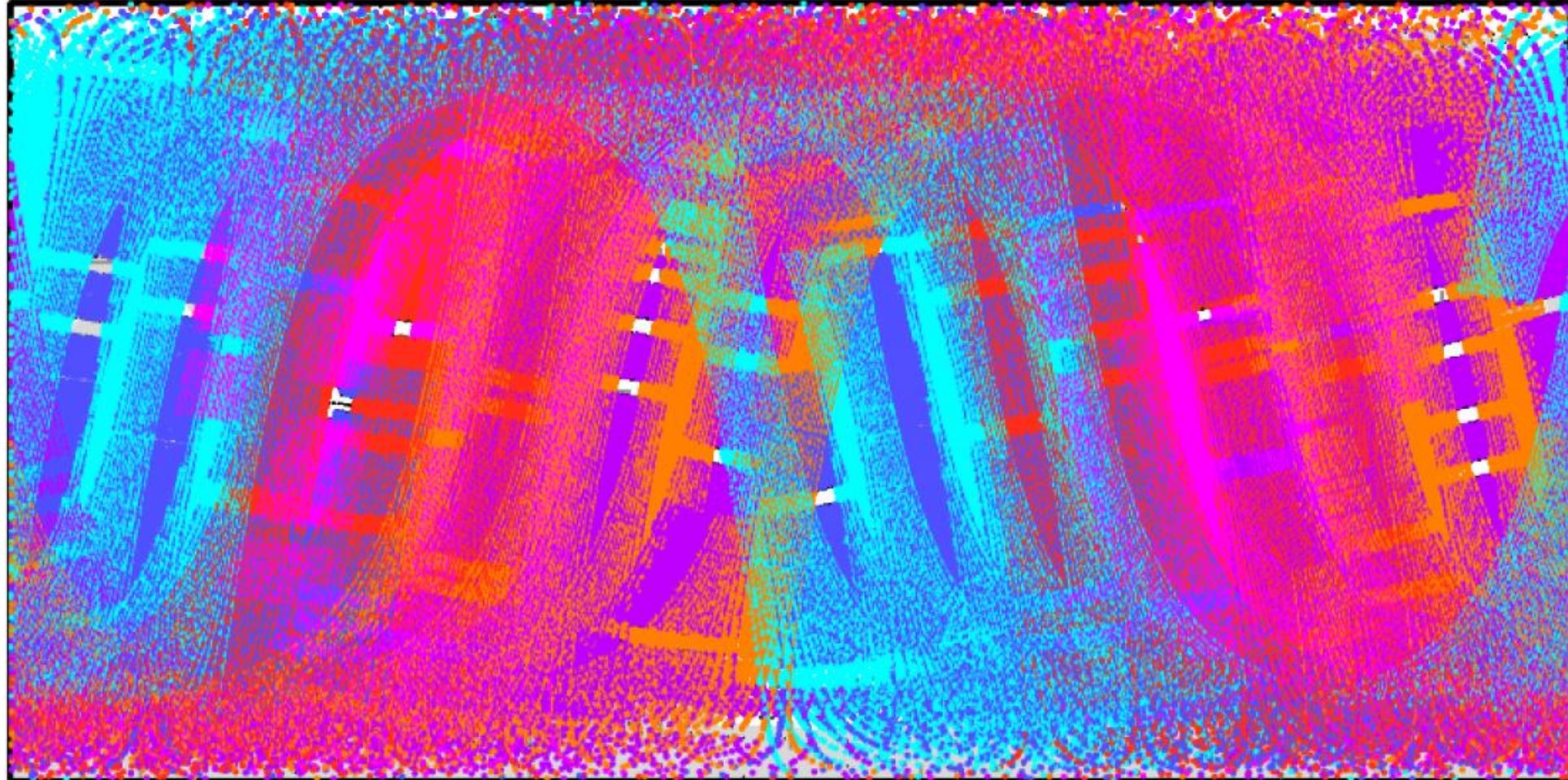
相関距離推定
に基づく
高密度同化
5倍

| NOAA-15 | NOAA-18 | NOAA-19 | Aqua | Metop-A | Metop-B |
|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|
| AMSU-A[●]: 19105 | AMSU-A[●]: 12686 | AMSU-A[●]: 20969 | AMSU-A[●]: 13254 | AMSU-A[●]: 17791 | AMSU-A[●]: 21212 |
| NOUSE[●]: 491 | NOUSE[●]: 284 | NOUSE[●]: 911 | | NOUSE[●]: 86 | NOUSE[●]: 1493 |
| ALL: 19596 | ALL: 12970 | ALL: 21880 | | ALL: 17877 | ALL: 22705 |

3.最新研究a: 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 |

3.最新研究a: ECM客観推定による 予報精度の改善

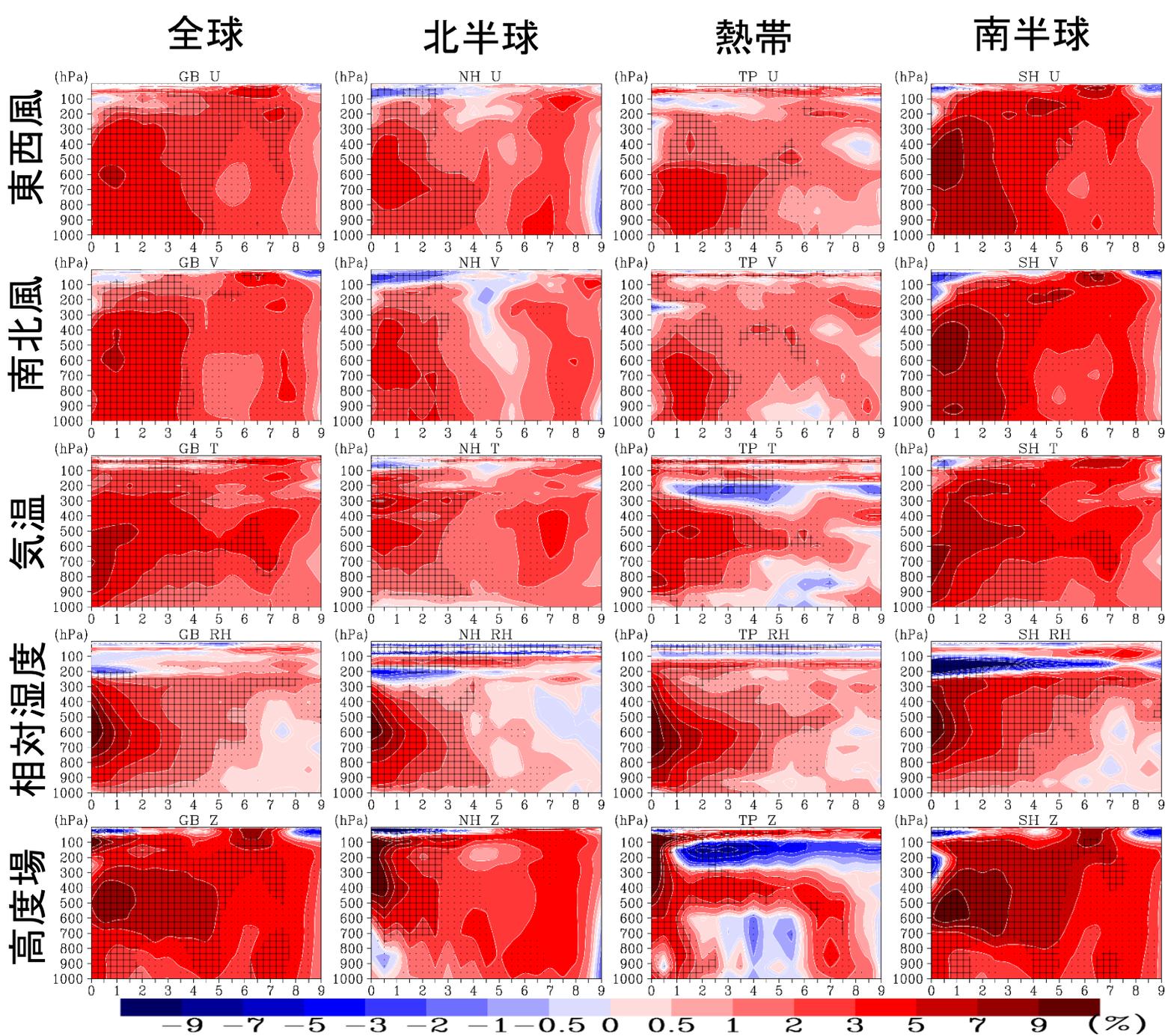
色=誤差改善率:

$$\frac{RMSE_{cntl} - RMSE_{test}}{RMSE_{cntl}} (\%)$$
 気圧高度 [1000-1hPa]
 予報時間 0-9日

赤: TEST (客観解析) がよい
 青: CNTL (経験的調整) が良い

* 真値=再解析データ(ERA5)

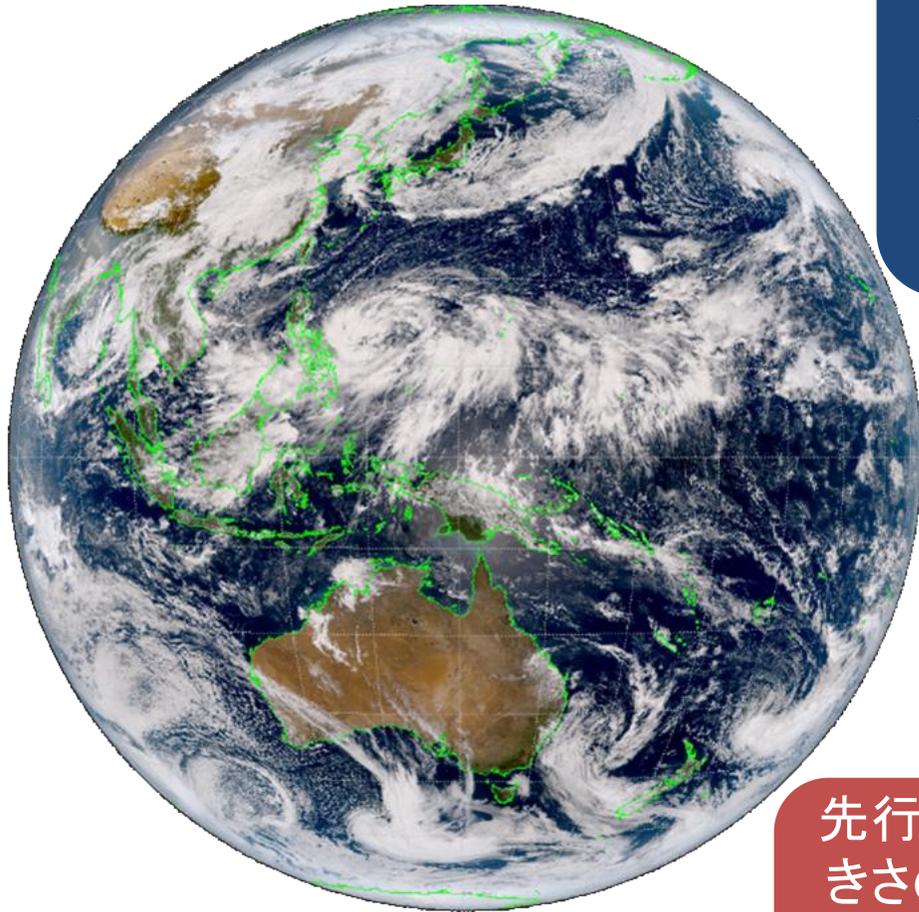
18



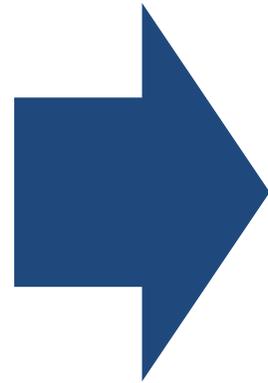
● どの領域、
どの要素で
も全体的に
予報精度が
改善



3.最新研究b: 全球大気のアンサンブル



少しずつ違うたくさんの地球をスパコンで生成して、予報ECMを推定(Fisher 2003の方法)

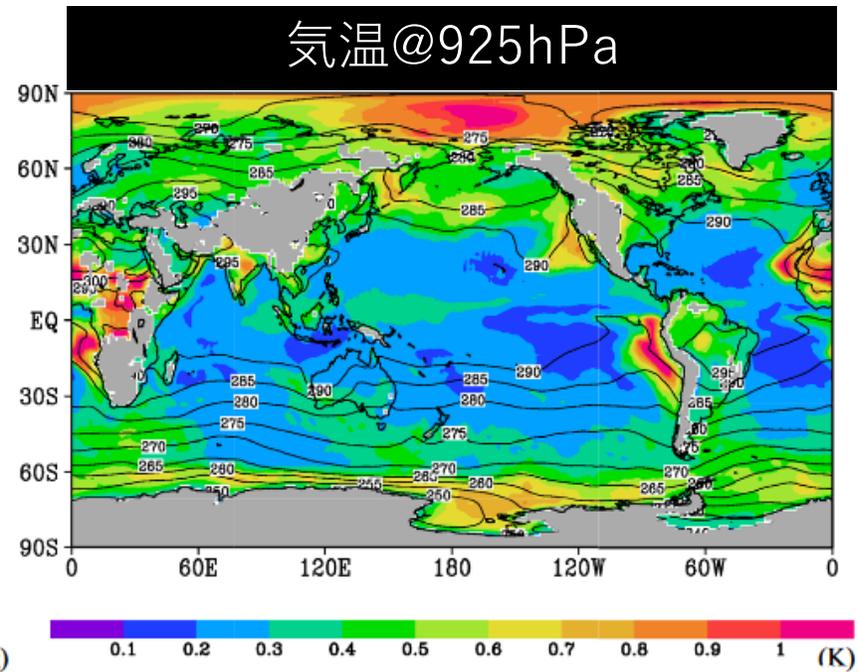
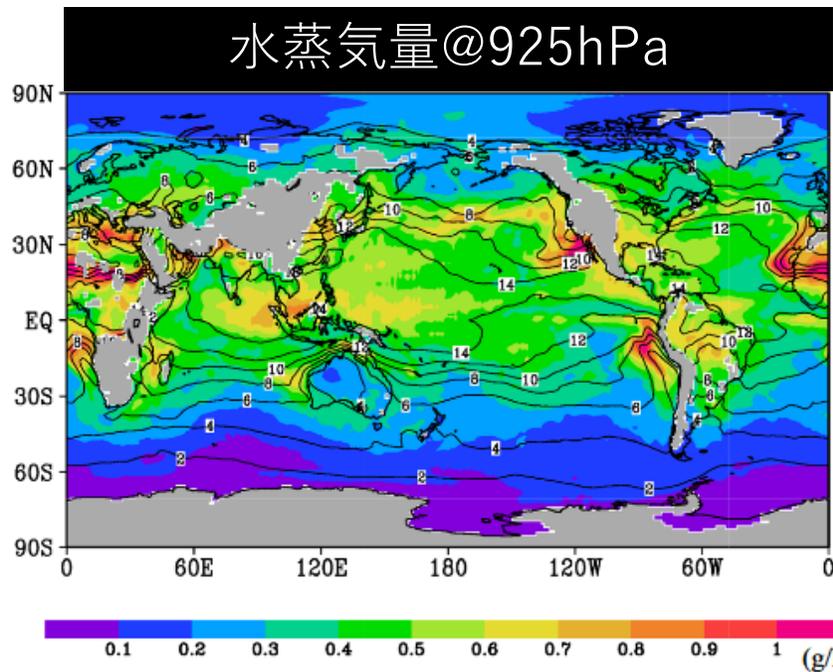


先行研究では誤差の大きさの調整が別途必要だったが、本研究ではRも客観推定済みなので調整は不要!

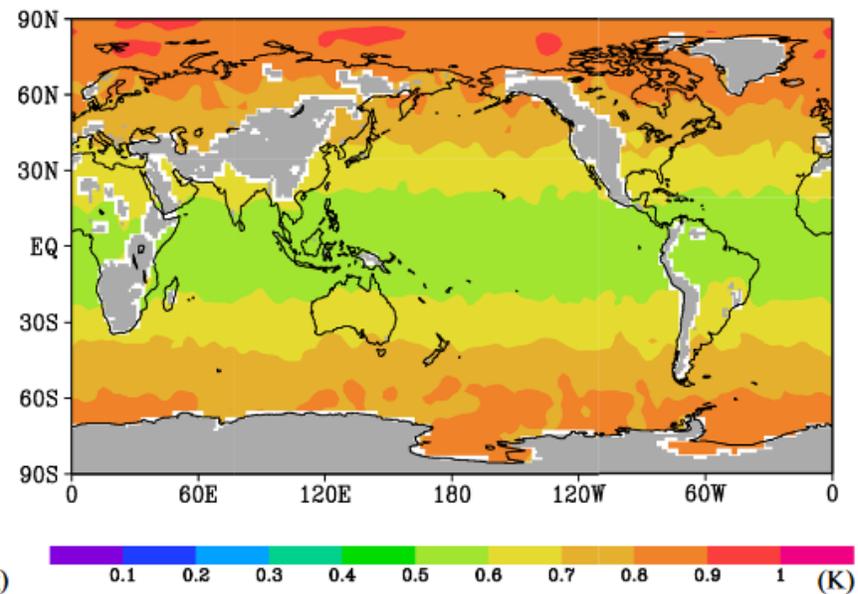
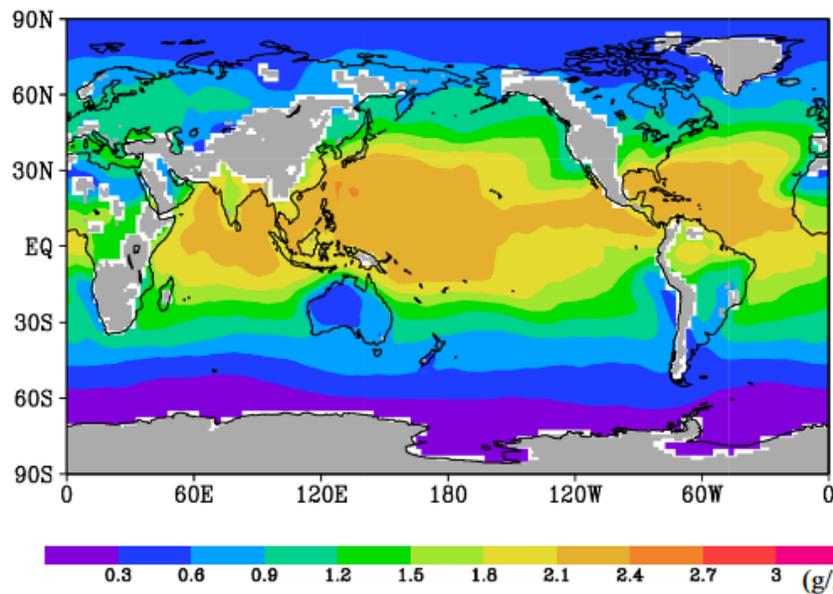


3.最新研究b: 客観推定されたB

新



旧



3.最新研究b: ECM客観推定(アンサンブル推定)による予報精度の改善

気圧高度 [1000-1hPa]

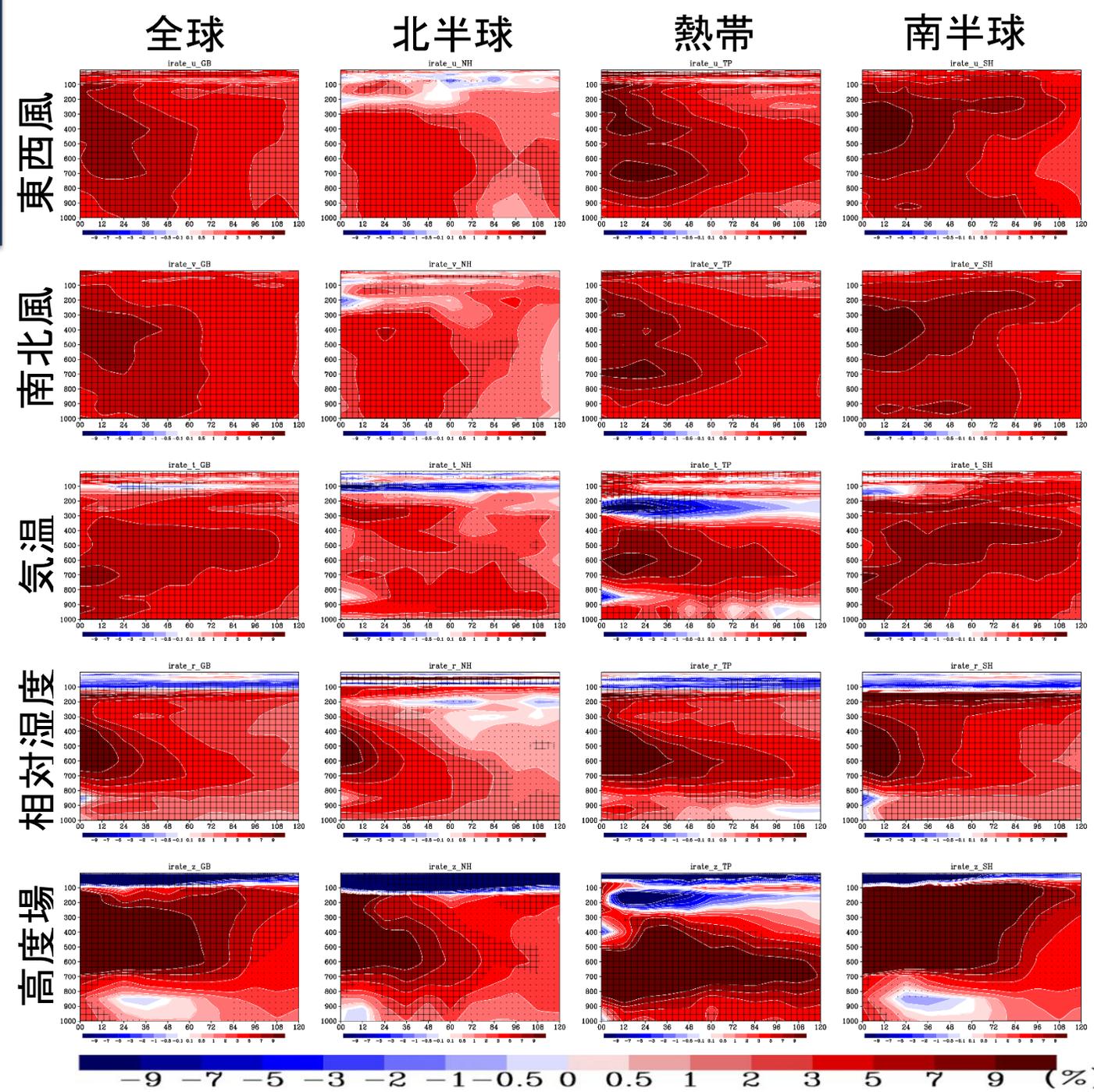
予報時間 0-5日

色=誤差改善率:

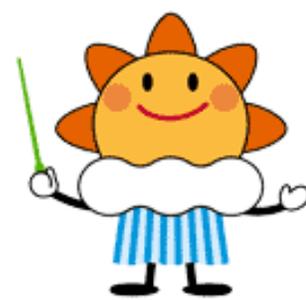
$$\frac{RMSE_{cntl} - RMSE_{test}}{RMSE_{cntl}} \quad (\%)$$

赤: TEST (客観解析) がよい
 青: CNTL (経験的調整) が良い

* 真値=再解析データ(ERA5)

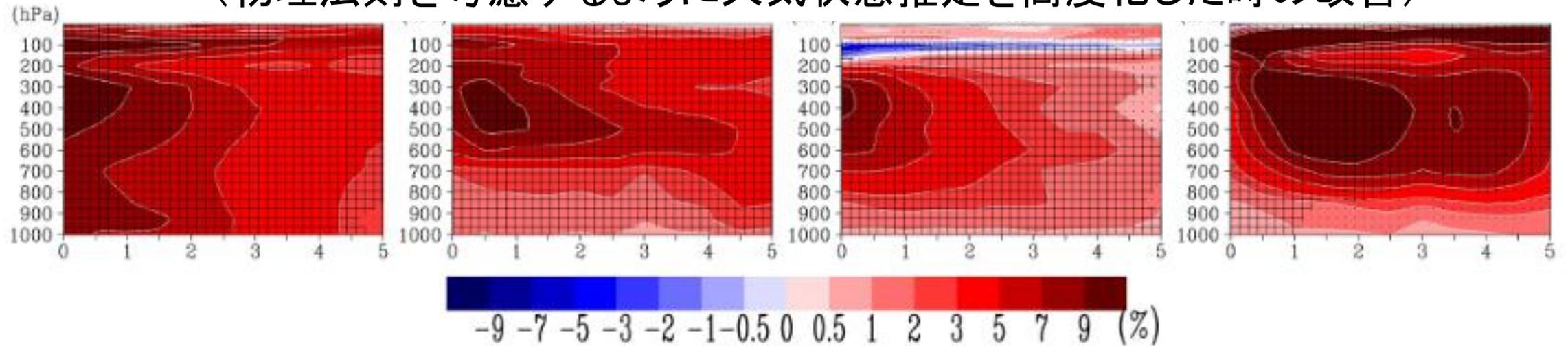


- どの領域、どの要素でも全体的に予報精度が改善
- aの方法よりさらに大きな改善



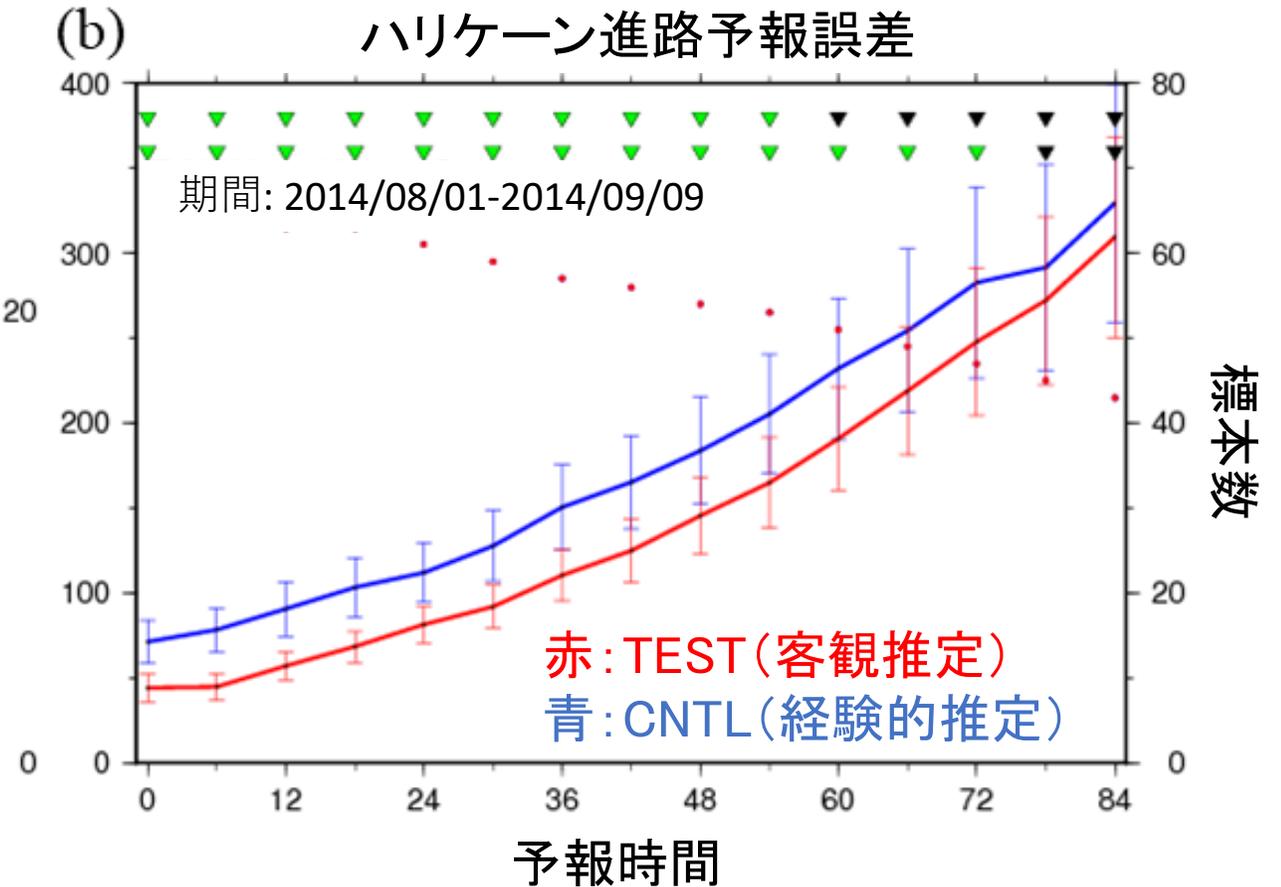
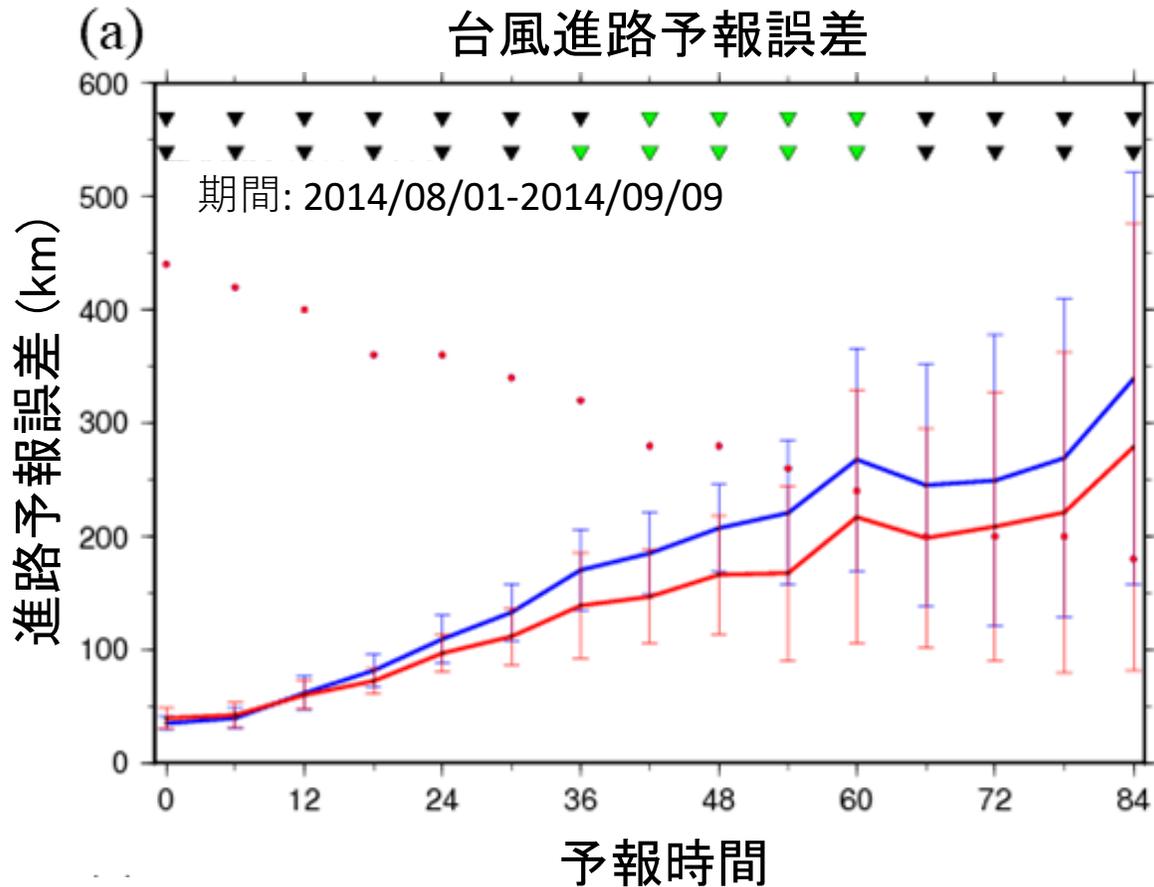
3.最新研究b: 最近30年の同化研究成果と比較

過去30年で最も大きかった改善の例:
(物理法則を考慮するように大気状態推定を高度化した時の改善)

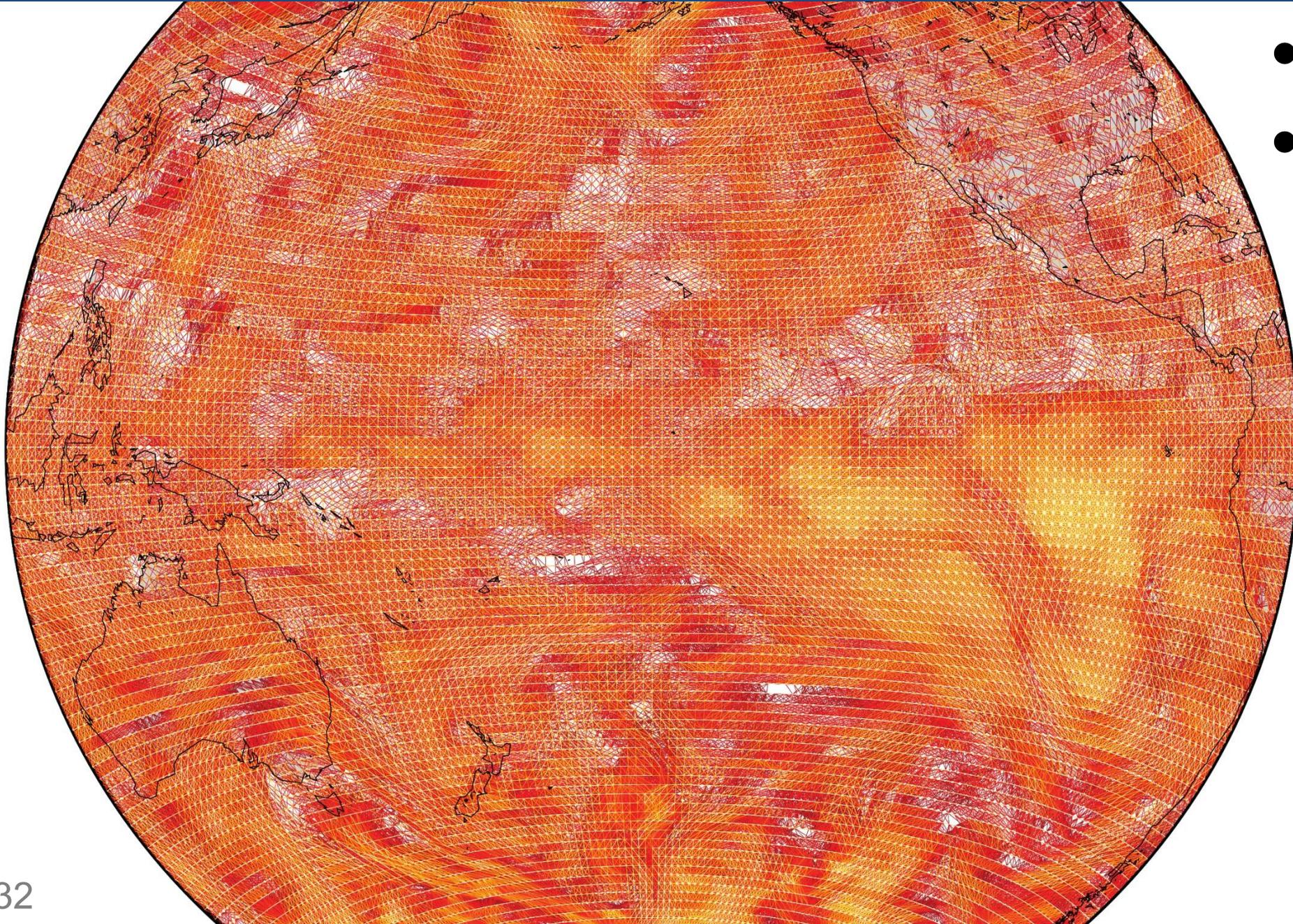


改善の大きさ(色)は本研究と同程度
であることがわかります。

3.最新研究b:熱帯低気圧進路予測の改善

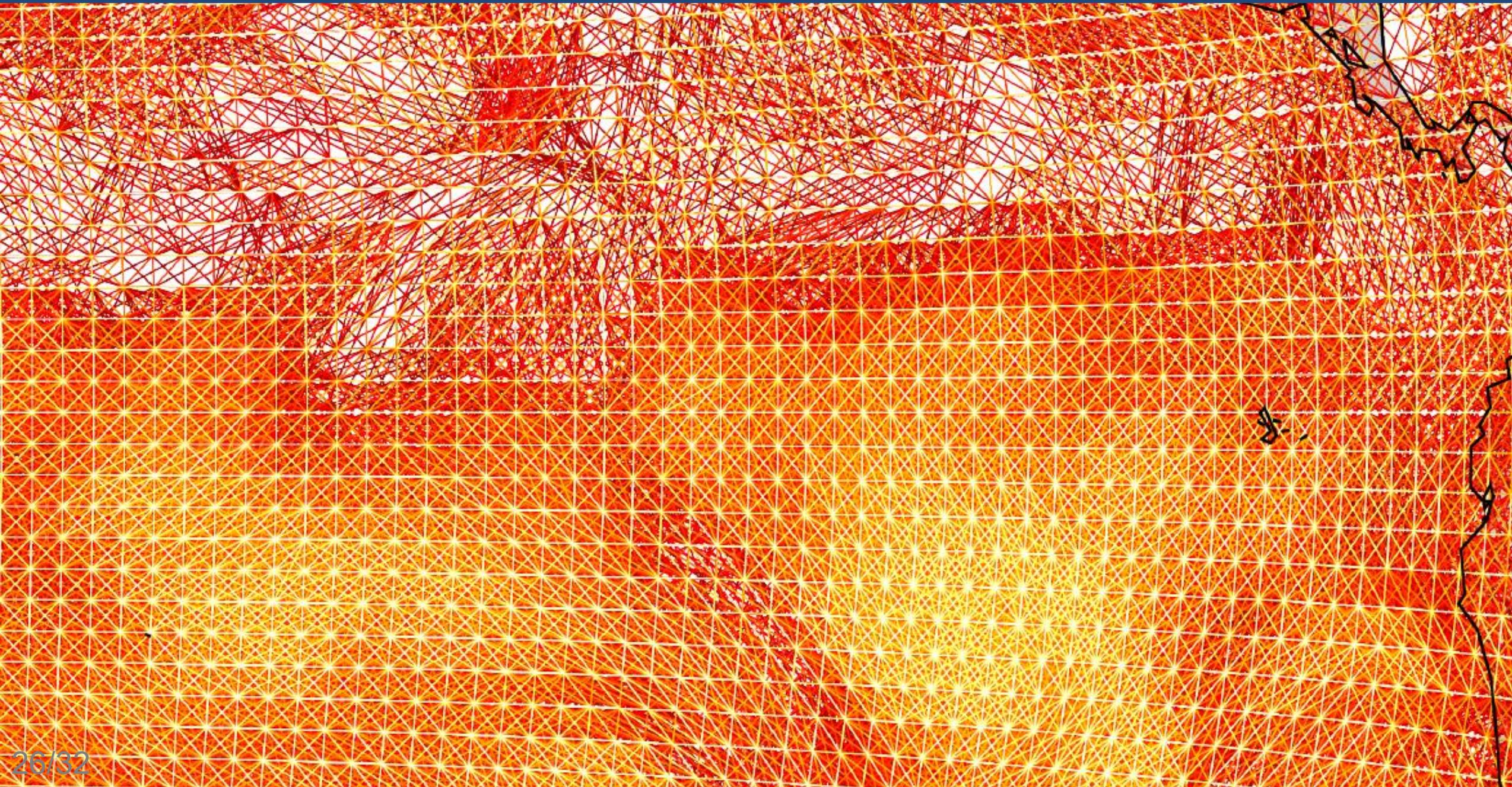


3.最新研究b: Bの構造(大気擾動のネットワーク構造)

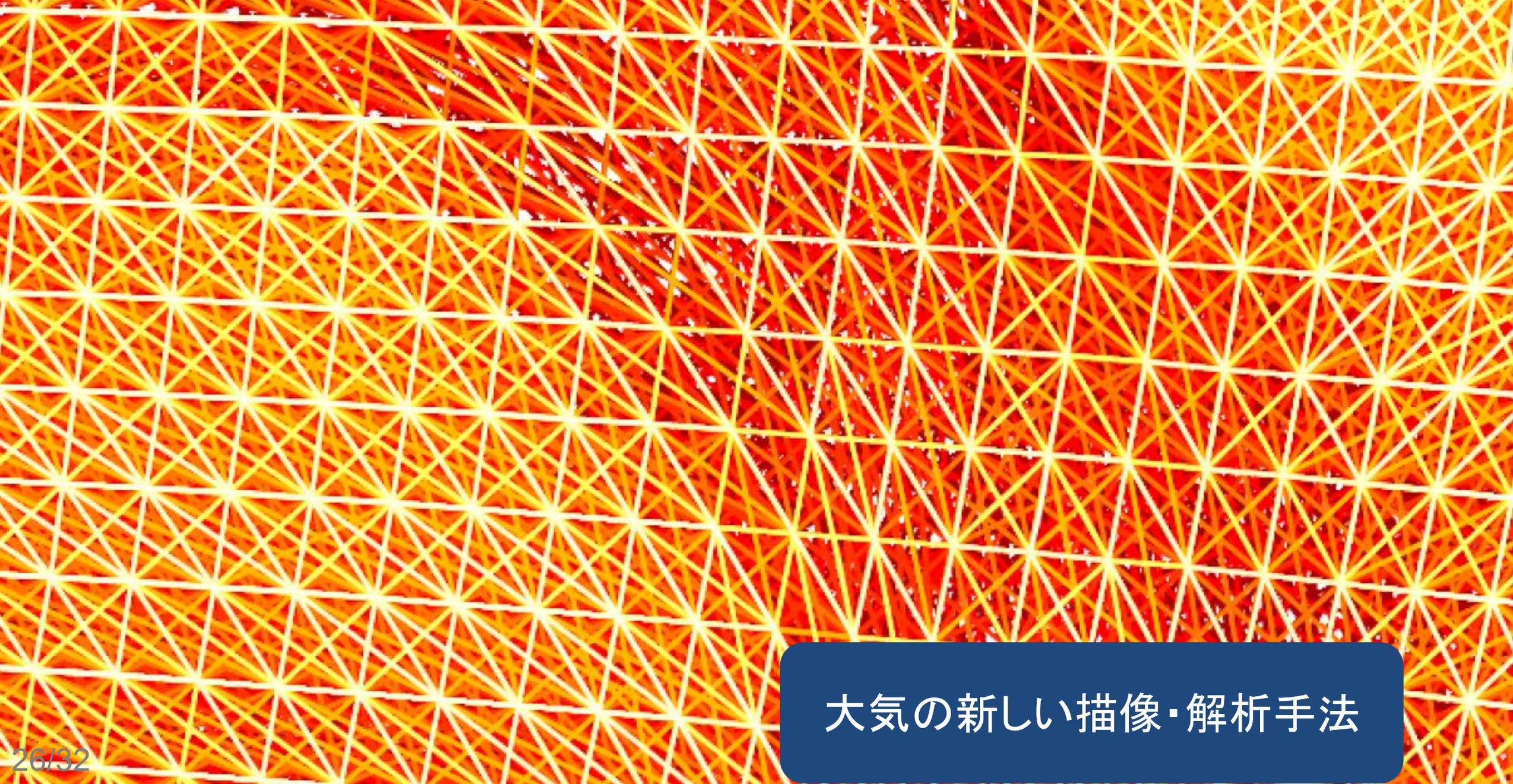


- 関係が強い格子を線で結んで表示。
- 明るい色ほど関係が強い。

3.最新研究b: Bの構造(大気擾動のネットワーク構造)



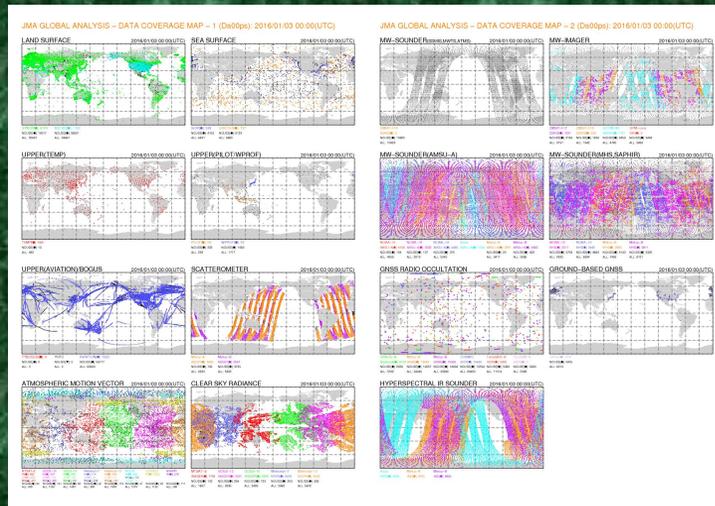
3.最新研究b: Bの構造(大気擾動のネットワーク構造)



大気の新しい描像・解析手法

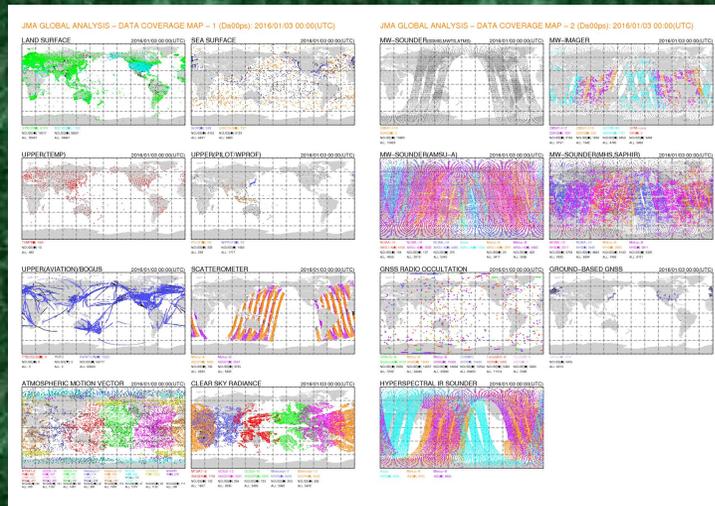
クイズ

観測データのうち、実際に予報の誤差を減らすのに貢献しているものの割合は何%でしょうか？



クイズ

観測データのうち、実際に予報の誤差を減らすのに貢献しているものの割合は何%でしょうか？

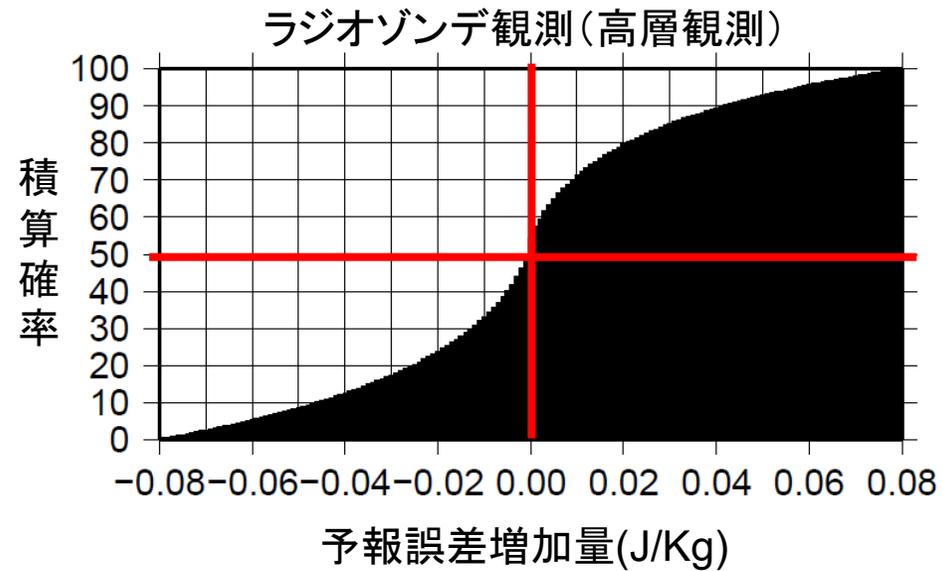


答え

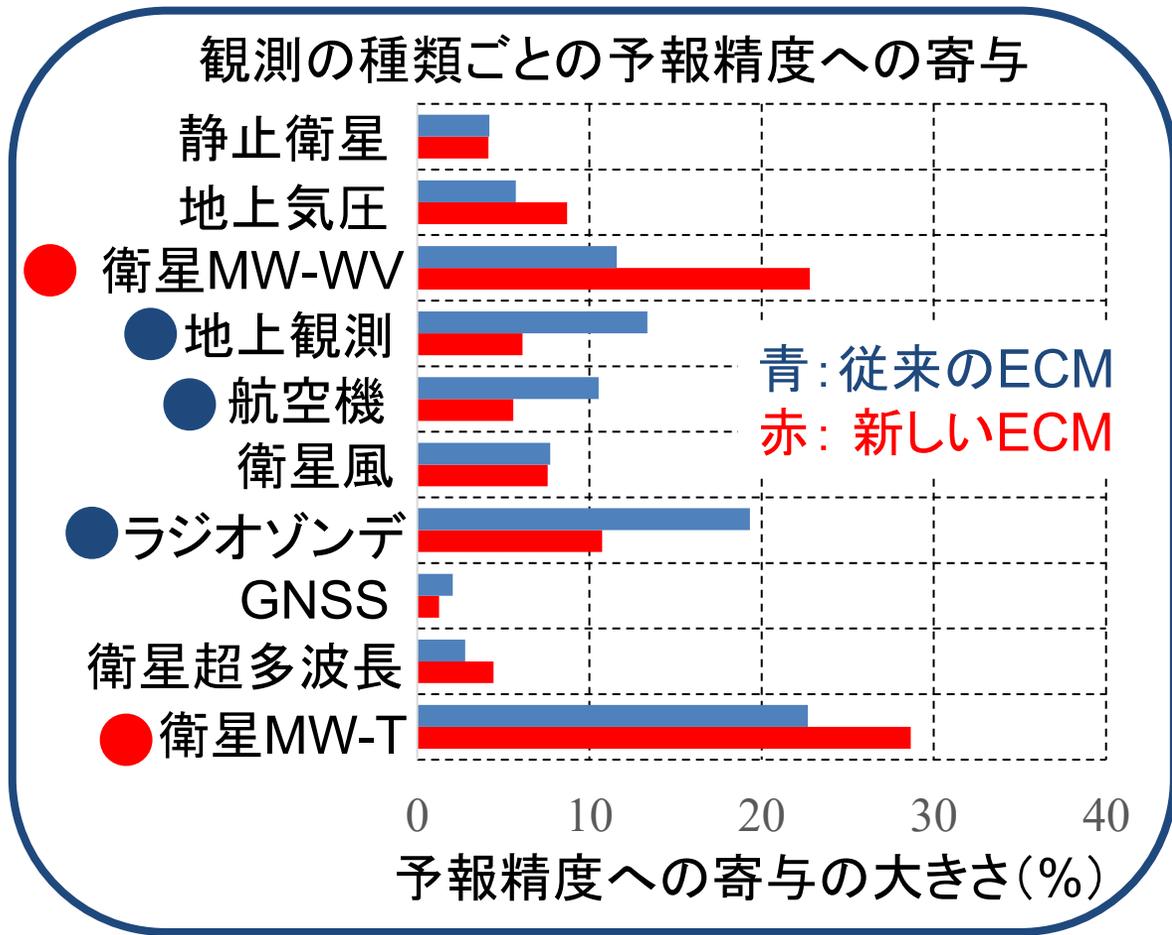
50%を少し超える程度



3.最新研究c: 観測データのインパクト 積算確率分布と平均的寄与



- 観測データ一つ一つが予報誤差を増やすように働いたか、減らすように働いたかを評価して、積算確率を計算した。
- 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。



補足

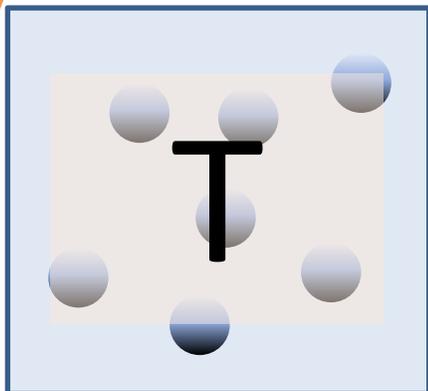
- 各観測種別の寄与の大きさは時空間変化する。
- 衛星観測にはラジオゾンデ等の直接観測が不可欠であるが、この評価には表れない。

3.最新研究c: 観測データの統計的な振る舞いのアナロジー

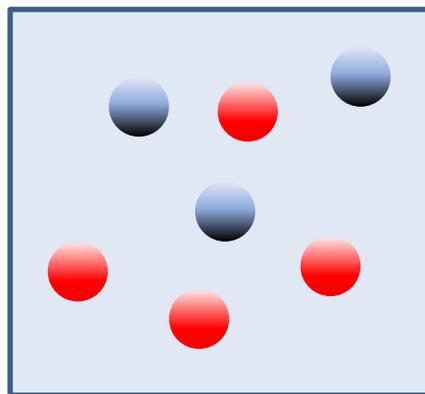
熱・統計力学

データ同化

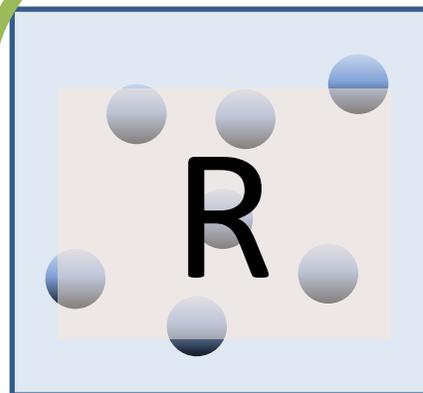
まえおき:
温度は分子の運動の激しさを表しています。



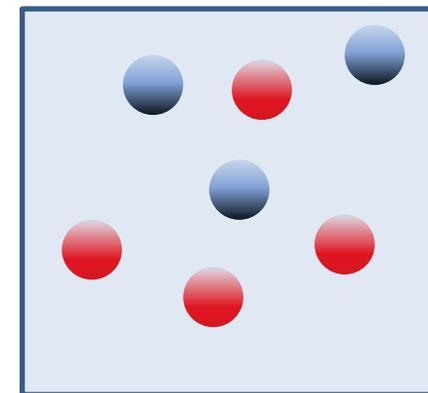
個々の分子の速度の統計情報のみ知っている。つまり部屋の温度(T)。



個々の分子の速度はわからない。



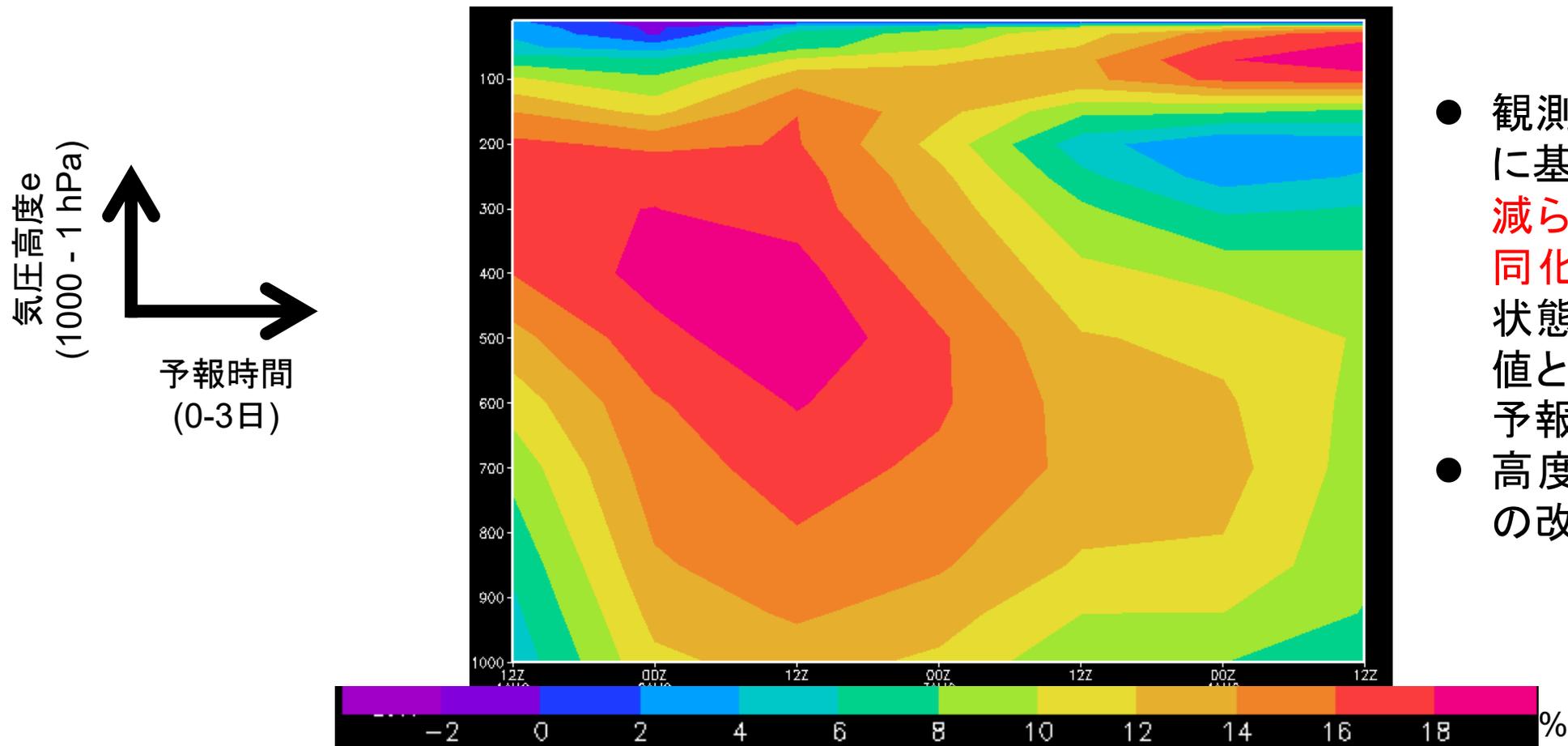
データの統計情報のみ知っている。つまり誤差共分散行列(R, B)。



個々のデータの誤差はわからない。

3.最新研究c: 観測データの再選択による高精度な大気状態推定

RMSEの改善率: 高度場



- 観測インパクト評価結果に基づいて、**予報誤差を減らす観測の効果のみ同化**(再選択)して大気状態推定し、これを初期値として予報した場合の予報精度の改善。
- 高度場の予測のRMSEの改善率(%)

内容

1. はじめに

- 地球全体(全球)の大気状態を知るとは？
- 大気状態推定の利用

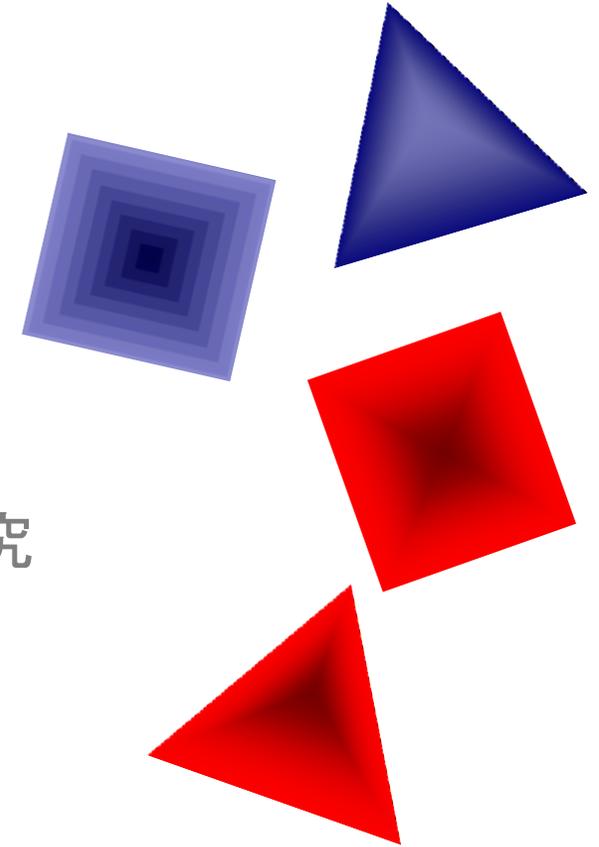
2. 大気状態推定の方法と課題

- データ同化

3. 最新の研究成果(本研究)

- データの曖昧さを推定して大気状態を知る研究
- たくさんの仮想地球を作って大気状態を知る研究
- 観測データの振る舞いを知る研究

4. まとめ



4. まとめ

- 全球の大気状態の推定は、大気のカオス性によって科学的に難しい問題である。
- それはまた、大気科学研究のための基本情報であり、社会基盤情報の生成にも不可欠である。
- 全球の大気状態は、誤差を持った膨大なデータ(観測や予測)をベイズの定理に基礎置くデータ同化によって無矛盾に統合することで推定されているが、そこではECMの精度が大きな課題となっている。
- 本研究では、すべてのデータのECMを同化理論から客観推定することで、全球大気の状態推定や予測精度が顕著に改善することを示した。
- 個々の観測が予報精度に与える影響を解析し、統計的な振る舞いや観測種別ごとの寄与の大きさを解析した。

◆ 大まとめ:

地球全体の大気状態を知るための研究は、科学的難問であると同時に、大気科学や社会生活の基盤情報の生成に不可欠である。大気状態推定で最も重要な量であるECMを理論に基づいて客観推定することで、大気状態推定の精度が大幅に向上した。

■ 今後の展望:

ECMの推定や観測データ利用等をさらに高度化し、より良い大気状態推定と大気科学及び社会基盤情報の生成を可能にする。



参考文献

● 基本事項

- Nastrom, G. D., and K. S. Gage, 1985: A Climatology of Atmospheric Wavenumber Spectra of Wind and Temperature Observed by Commercial Aircraft. J. Atmos. Sci., 42, 950–960, [https://doi.org/10.1175/1520-0469\(1985\)042<0950:ACOAWS>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0469(1985)042<0950:ACOAWS>2.0.CO;2).
- Bauer, P., A. Thorpe, and G. Brunet, 2015: The quiet revolution of numerical weather prediction. Nature, 525, 47– 55, <https://doi.org/10.1038/nature14956>.
- Fisher, M., 2003: Background error covariance modelling. Proc. ECMWF Seminar, Reading, UK, ECMWF, 45-64, <https://www.ecmwf.int/en/elibrary/74483-background-error-covariance-modelling>.
- Desroziers, G., Berre, L., Chapnik, B. and Poli, P., 2005: Diagnosis of observation, background and analysis-error statistics in observation space. Q.J.R. Meteorol. Soc., 131: 3385-3396. <https://doi.org/10.1256/qj.05.108>

● 大気状態推定における誤差共分散行列の重要性

- Ishibashi, T., <https://doi.org/10.1175/MWR-D-19-0269.1>
- Ishibashi, T., <https://doi.org/10.1029/2023EA003029>

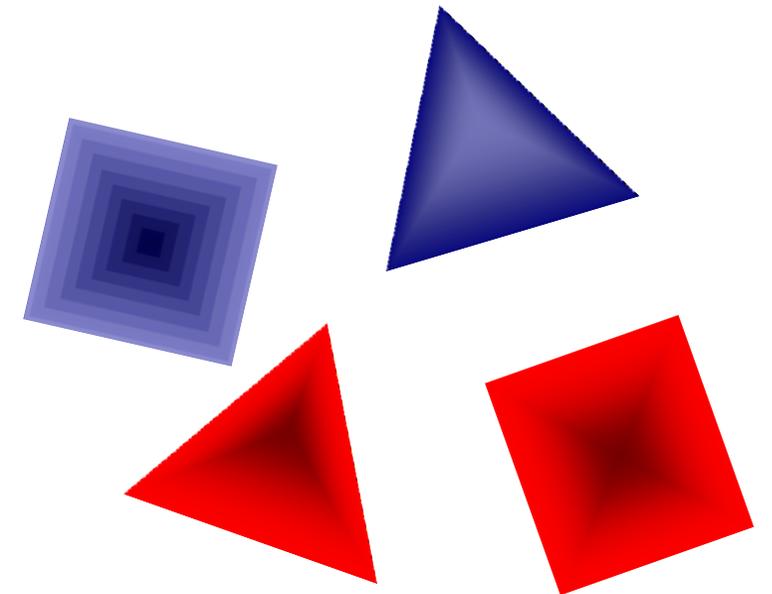
● 大気状態推定における背景誤差構造の重要性

- Ishibashi, T., <https://doi.org/10.1175/MWR-D-22-0242.1>
- Ishibashi, T., <https://doi.org/10.1038/s41598-024-71849-7>

● 観測が予報精度に与える影響評価

- Ishibashi, T., <https://doi.org/10.1175/MWR-D-18-0037.1>
- Ishibashi, T., <https://doi.org/10.1002/qj.871>

● 及び上記論文の参考文献



謝辞

JSPS科研費17K05658, 22K03726の助成に感謝します。

ご清聴ありがとうございました。

