

# 気象予測における 衛星観測への期待

岡本 幸三

(気象庁気象研究所)

国立研究開発法人連携講座 フロンティア宇宙工学研究拠点  
(地球観測センサ科学研究拠点) ワークショップ

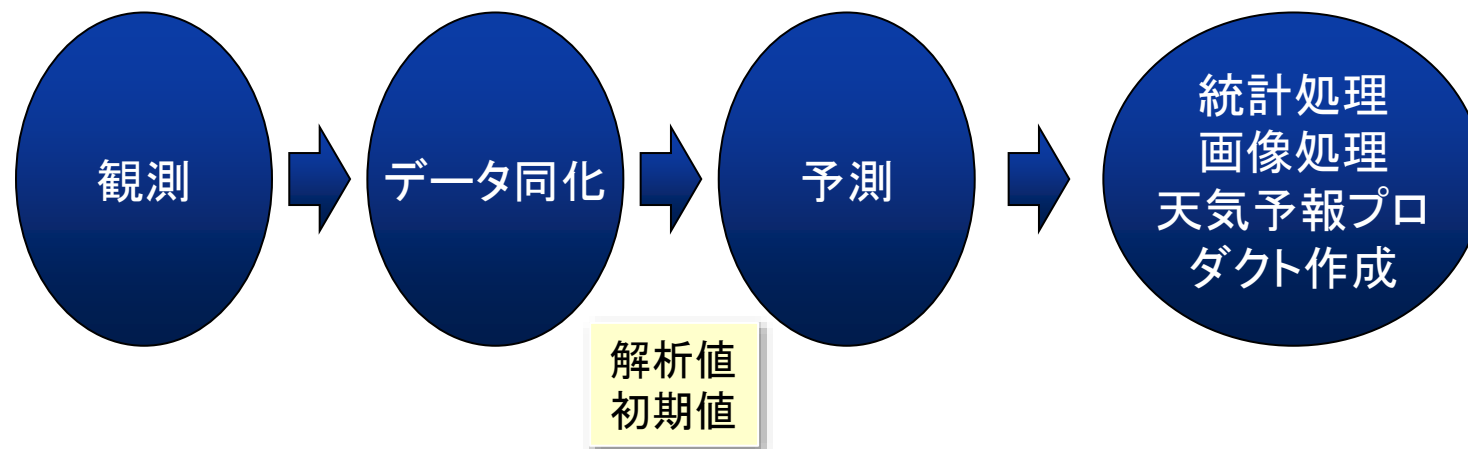
2022年2月15日、オンライン

1. 利用の現状
2. 予測精度改善の効果
3. 今後の期待と課題

## 講演の要旨

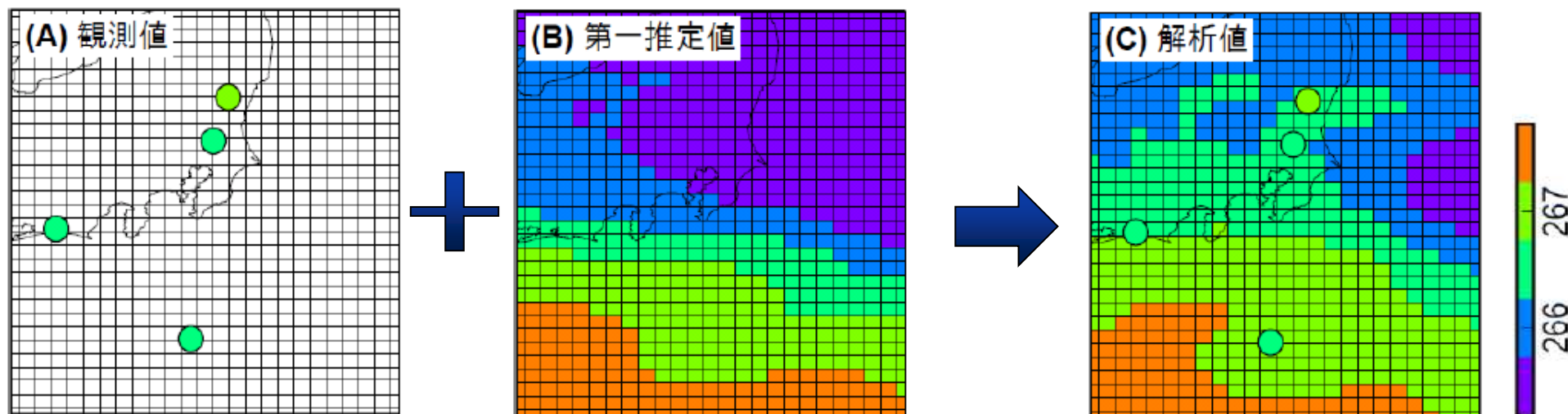
- ✓ 気象予測精度の維持・向上のためには、衛星観測は不可欠
- ✓ 更なる気象予測精度の向上のために、期待すること
  - ✓ 観測の頻度、領域、精度・解像度・多波長の向上、新しい要素(物理量)の観測
  - ✓ 安定・長期運用、配信時間の迅速化も重要
  - ✓ 衛星観測開発・運用者との連携の強化

- 今日の気象予測は、数値予報システムに基づき作成される
- **数値予報**とは、物理的・統計的な法則に基づき、計算機を用いて将来の状態を計算・予測すること
- 将来予測のためには、**初期値**（現在の大気状態）の正確な把握が必要
- **データ同化**により、**解析値**を作成し、初期値として用いる



- 物理・統計的な関係式を用いて、**観測**と**第一推定値**の整合した値(大気状態)を求めること。結果を**解析値**と呼ぶ。
  - 第一推定値として、数値予報モデルによる短期予測を用いることが多い
- → 数値予報モデルで大まかな大気状態を推定し(第一推定値)、観測データを用いて現実の情報を反映・修正して、解析値とする。
- 解析値は、予測初期値だけでなく、気候分析や物理メカニズム解明、データ処理のための補助データとしても用いられる

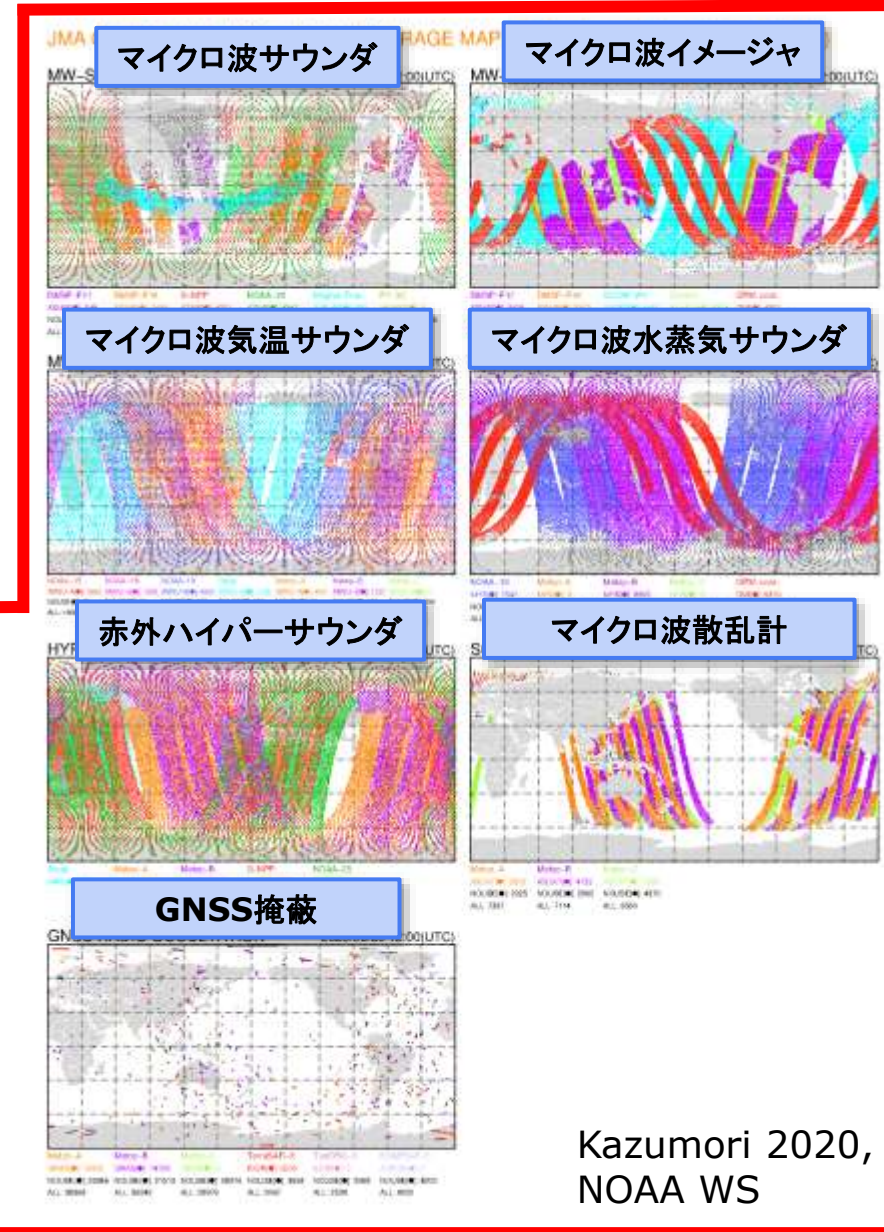
佐藤 2013, 気象庁



# 気象庁のデータ同化システムで用いられる観測データ分布

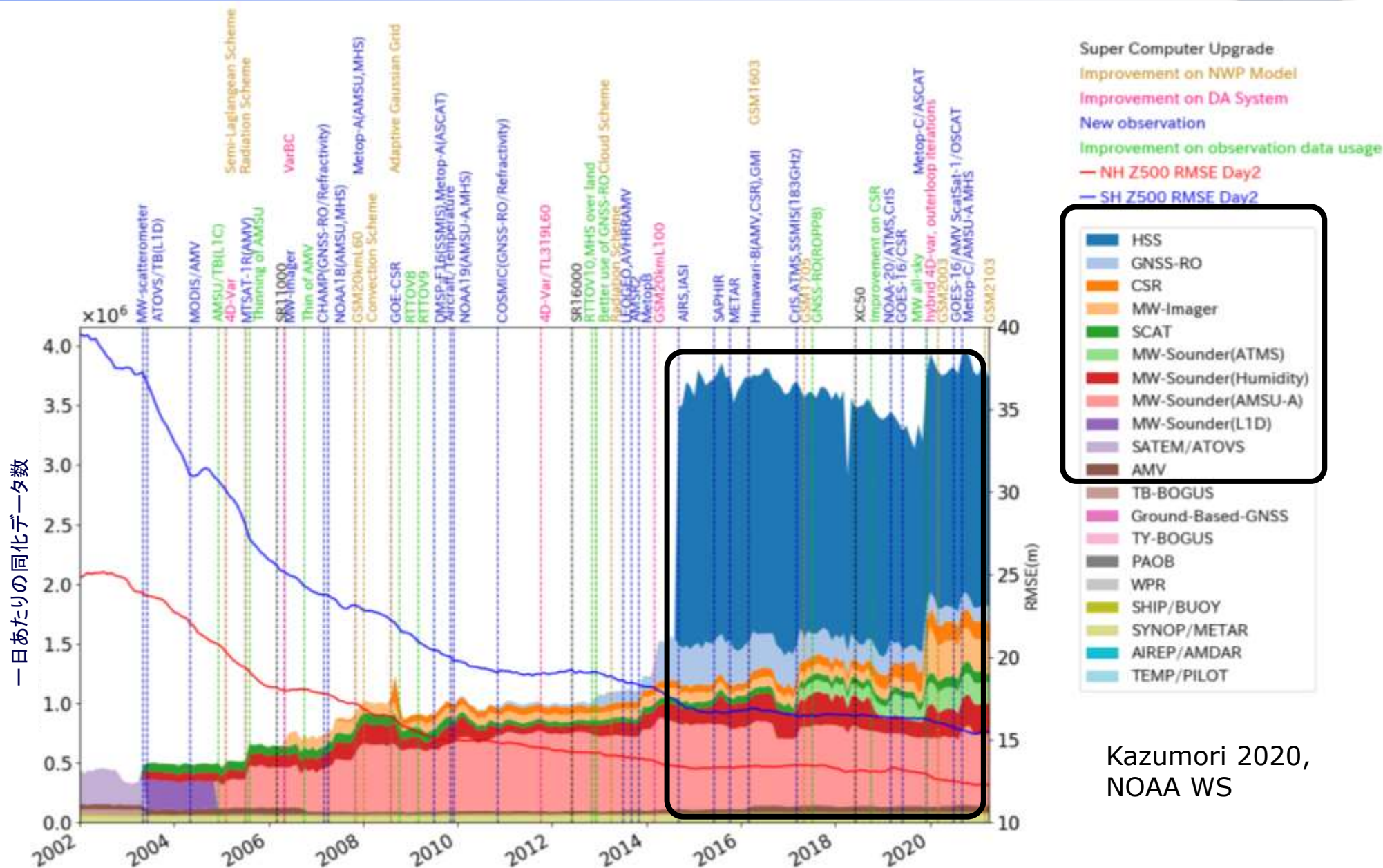
## ■ 気象庁の現業全球解析で使われる観測データ分布(6時間内)

■ 2020年6月28日 09-15 UTC



# 同化された全球観測データ数の変遷

- 一日あたり400万弱の観測データを利用
- その殆どを衛星観測が占める



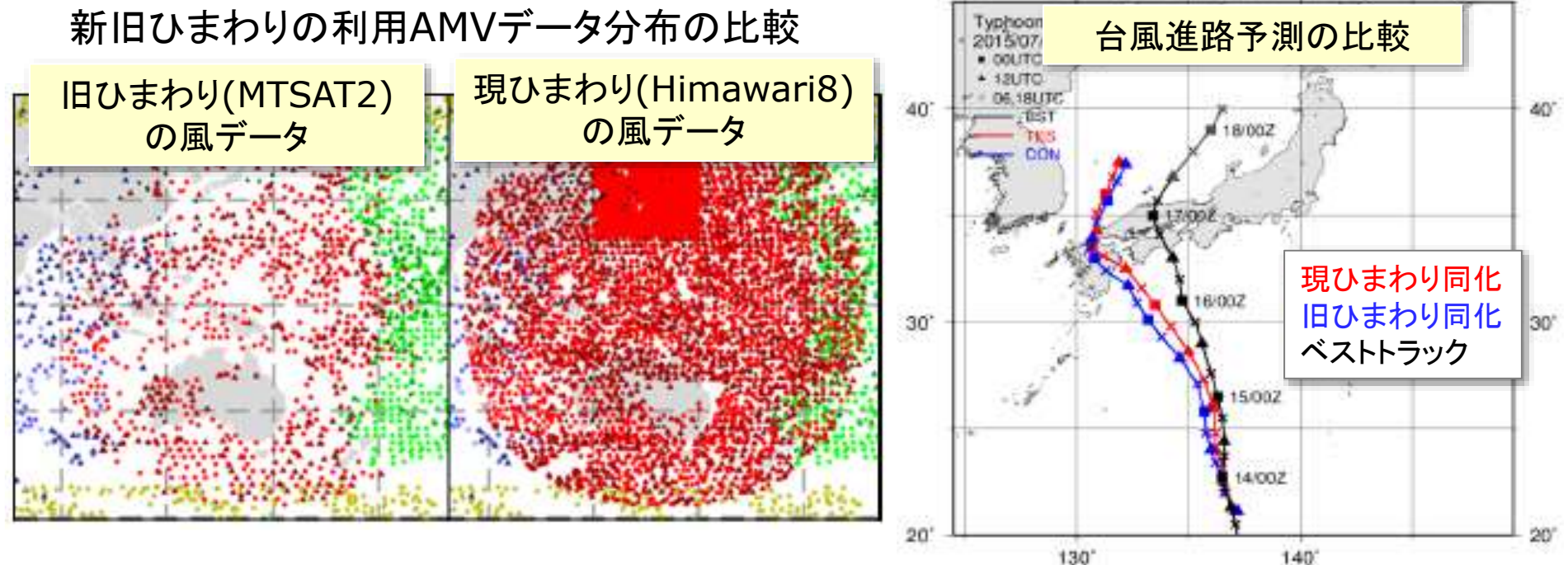
Kazumori 2020, NOAA WS

1. 利用の現状
2. 予測精度改善の効果
3. 今後の期待と課題

# 衛星同化による予測改善例：ひまわり

- 静止気象衛星データの同化
  - 風データ(大気追跡風AMV)や、晴天域の赤外水蒸気バンドの輝度温度データ
  - ひまわり8号は、従来静止衛星より、高精度・高頻度化
- ひまわり8号のAMVを同化することにより、従来ひまわりデータの同化と比べ、台風進路予測や降水予測が改善

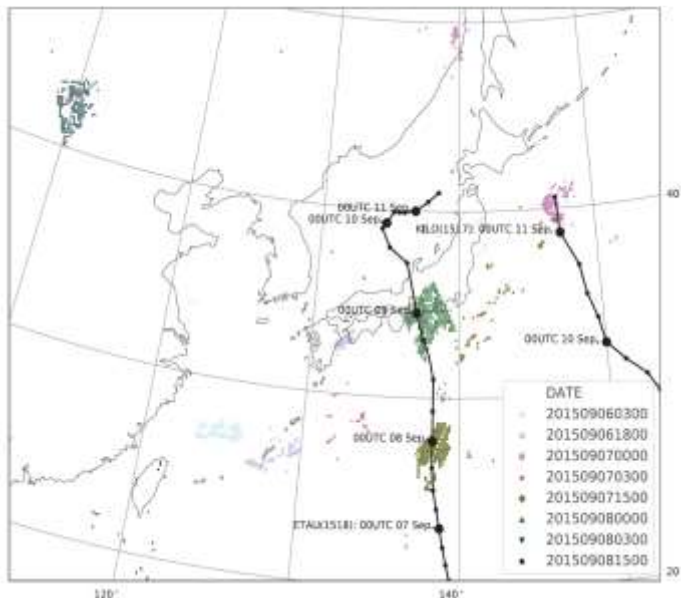
山下 (2017気象庁数値予報課報告別冊)



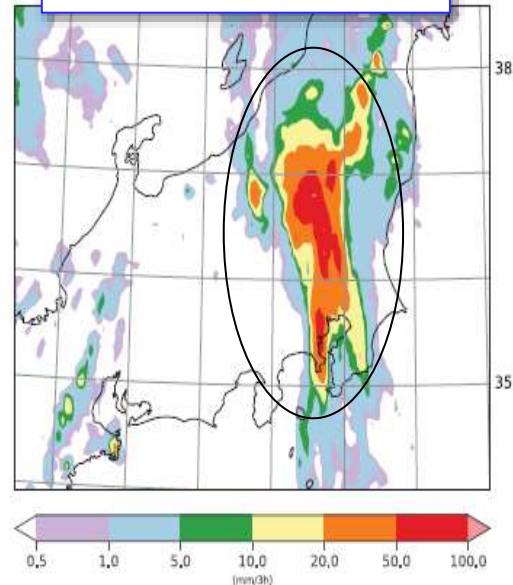


- GPM衛星搭載DPR(降水レーダ)を気象庁メソ同化システムに追加
  - 湿度の鉛直分布として同化
- 台風に伴う海上の水蒸気流入の解析を改善し、降水予測を改善

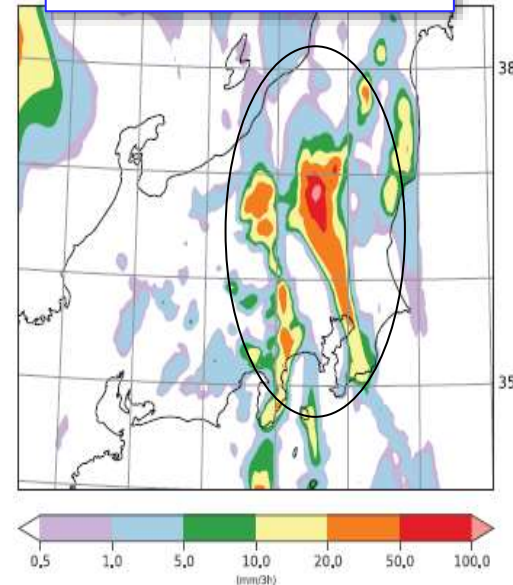
DPRの有無による解析を初期値とする33時間予測を、実況と比較  
2015年9月9日 09UTC



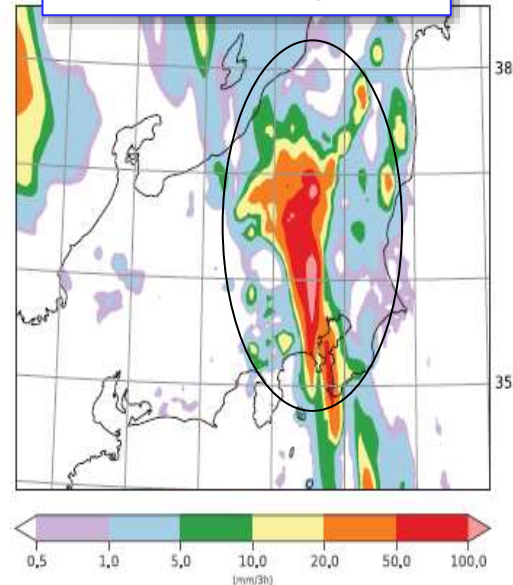
(a) 実況



(b) DPR同化無し



(c) DPR同化有り



# 衛星観測の有無による予測精度の違い

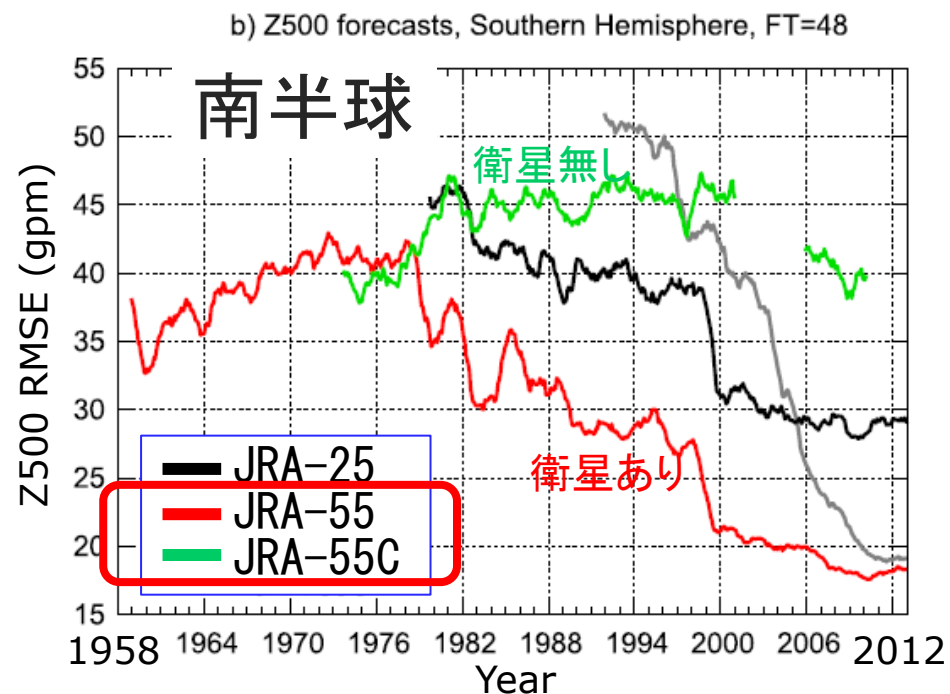
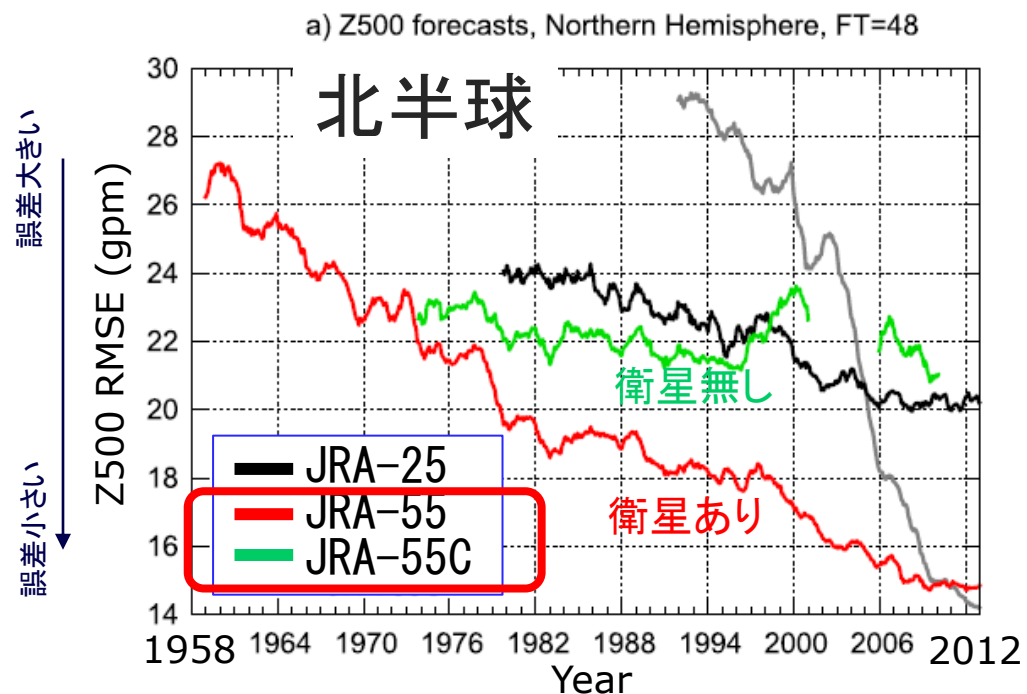
## ■ 再解析値を初期値とした予測誤差の変遷

- 再解析: 固定させた同化システムや予報モデルを用いて、過去に遡ってデータ同化を実施。気候解析等に用いる
  - システム・モデルが常に改良され続ける現業システムと比べ、観測データそのものの効果の変遷を確認できる
- JRA55(衛星データも利用した再解析)と、JRA55C(衛星データを除いた再解析)を比較

## ■ 衛星観測を利用することで、予測精度は大幅に改善

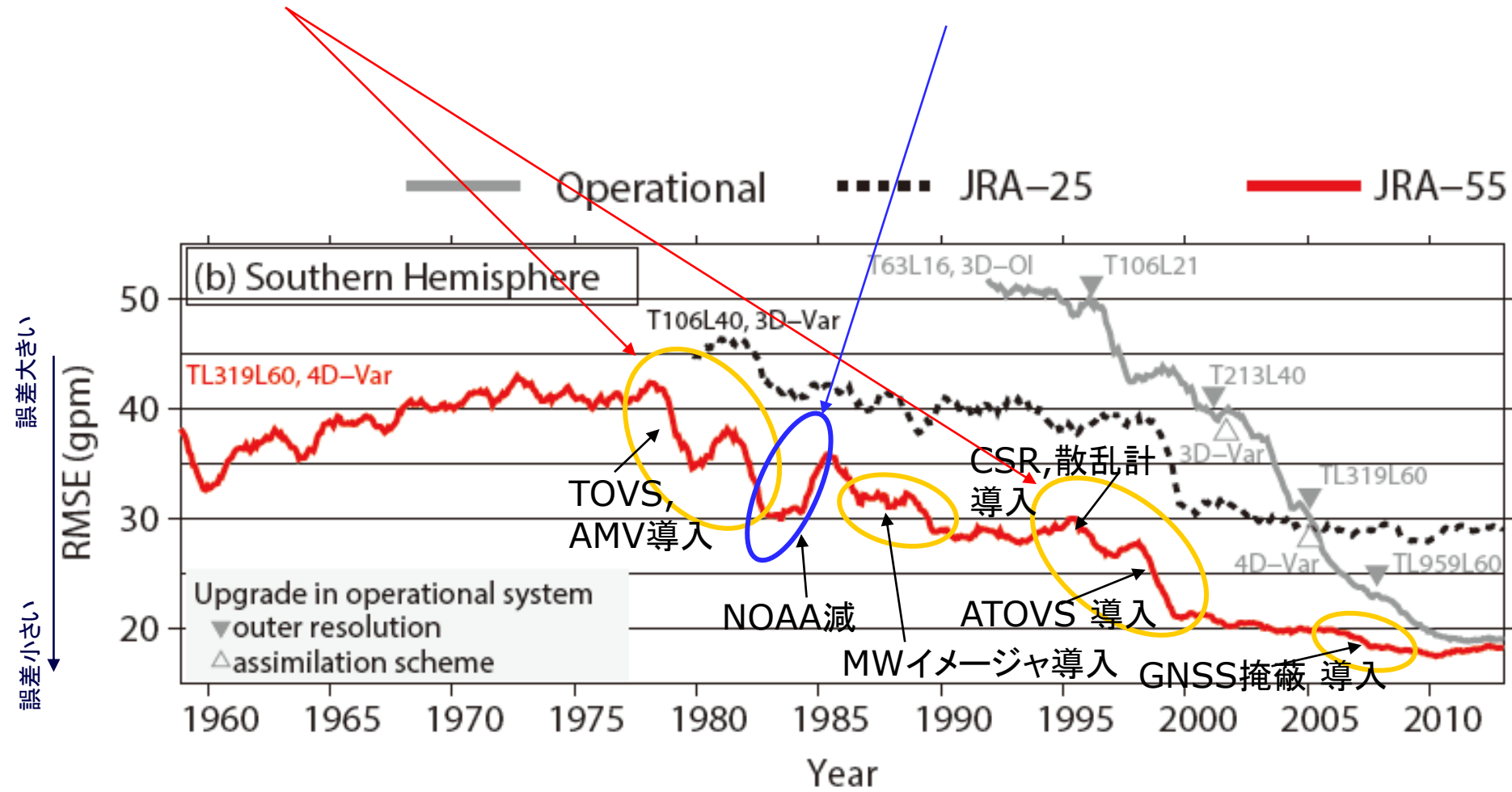
- JRA55Cは、JRA55の1970年代の精度しかない

Kobayashi et al. (2014, sola)



# 衛星観測の変化による予測精度の違い

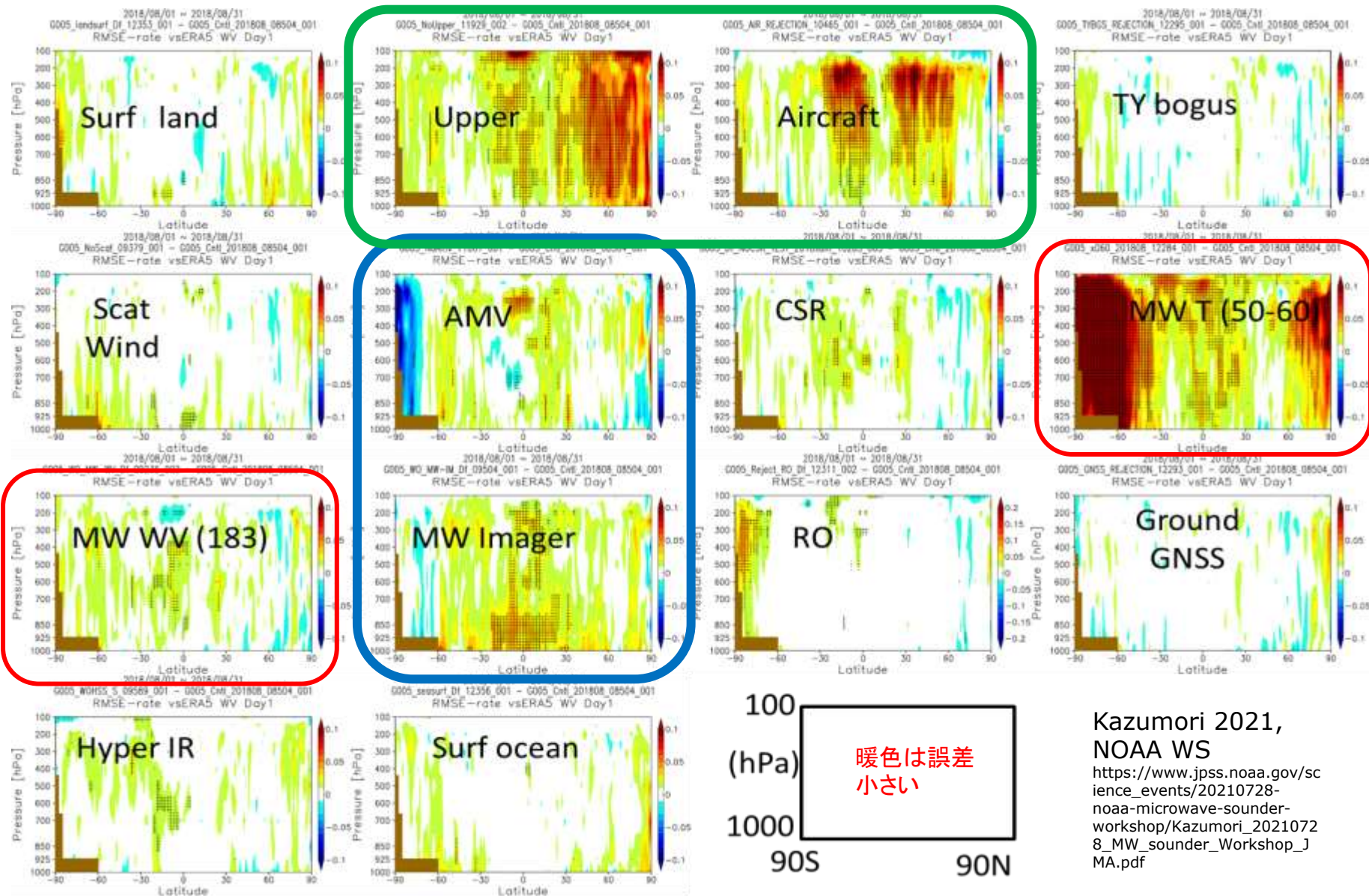
- 再解析値を初期値とした南半球の予測誤差の変遷
- 新規衛星の導入による改善、衛星数減少による改悪



Kobayashi et al. (2015, JMSJ)を一部改訂

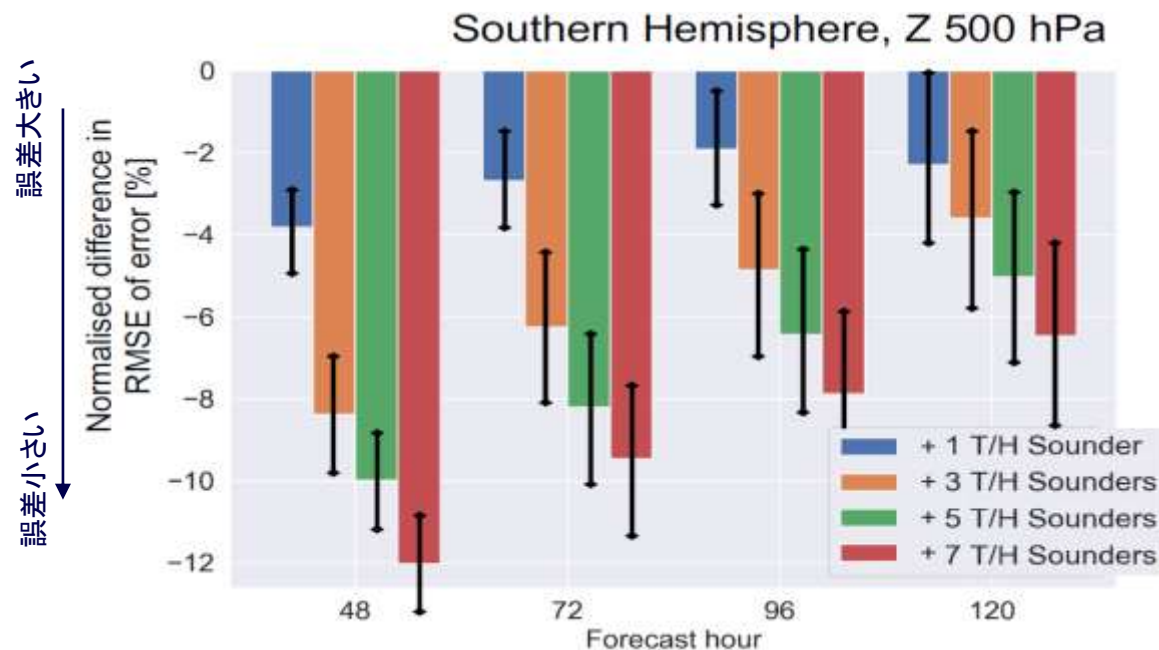
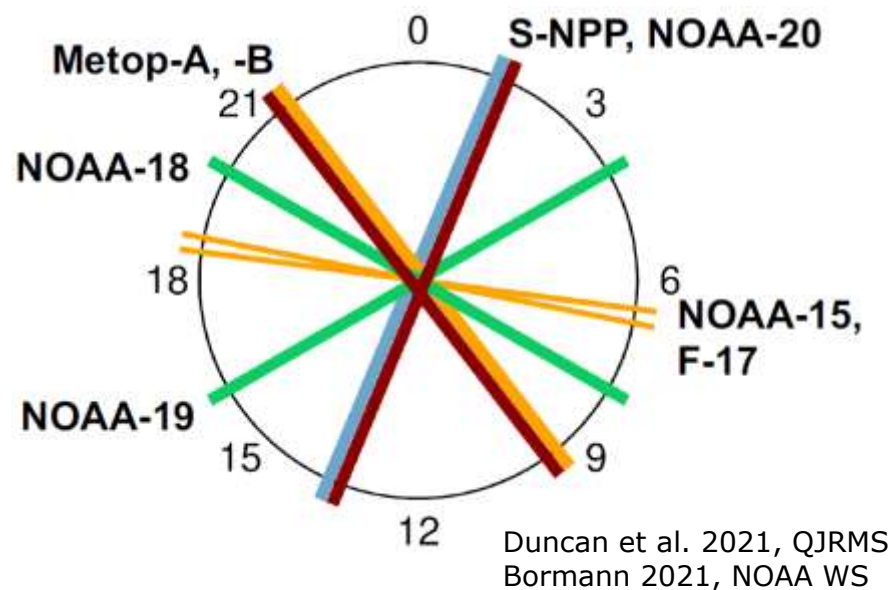
# 様々な観測の予測改善効果の比較

- 各観測の利用による、風の1日予測改善効果
  - 各観測を現業システムから除去したときの予測改悪量から計算
  - 月・経度平均した緯度・高度断面
- **マイクロ波サウンダ**が最も効果大きい。熱帯では**マイクロ波イメージャ**や**大気追跡風**が大きい
- **ゾンデ**や**航空機観測**も大きな効果。ただし北半球や上層に偏る



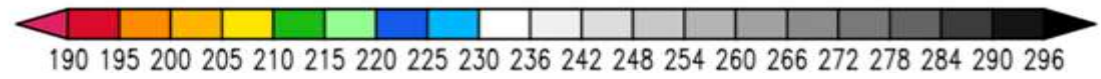
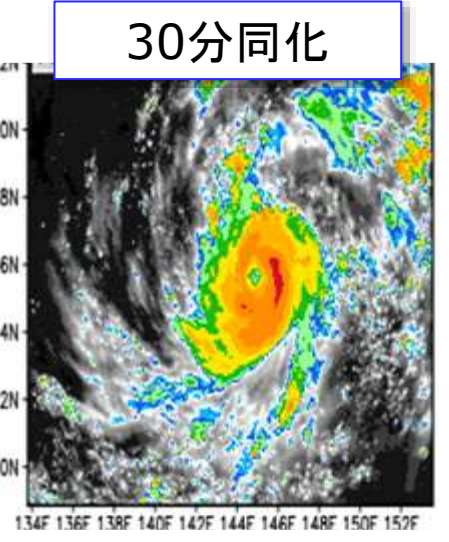
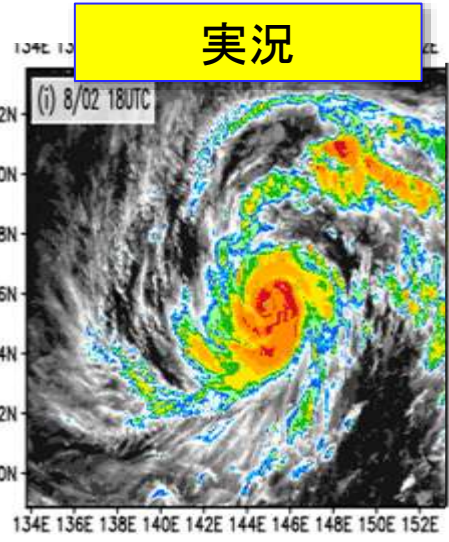
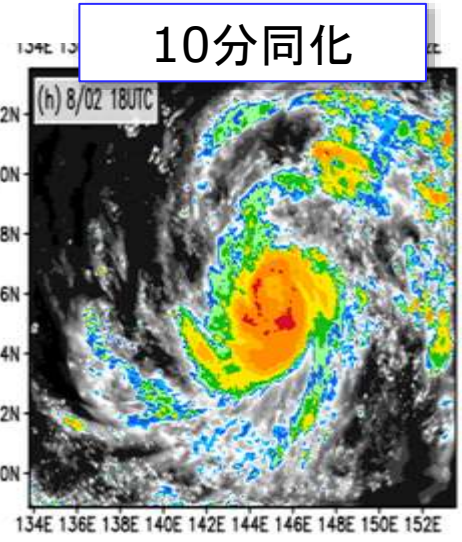
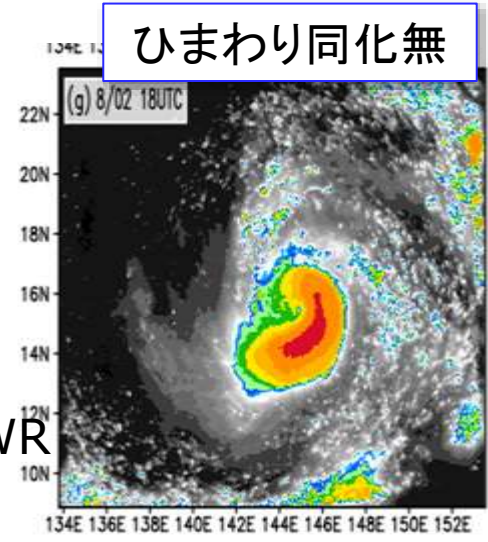
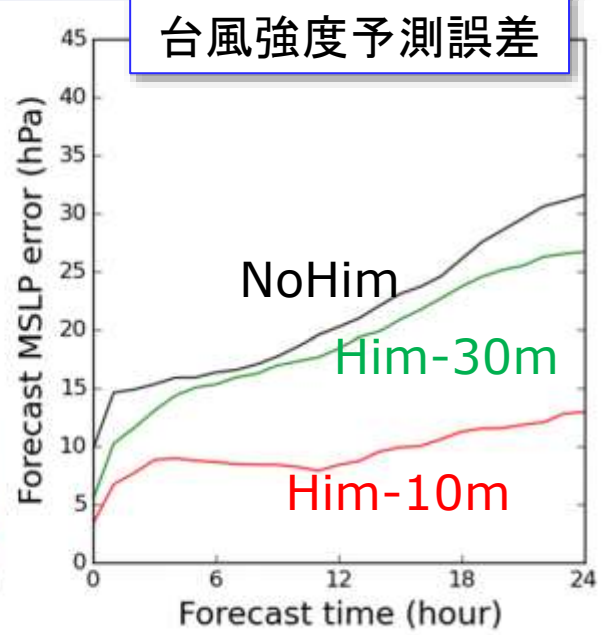
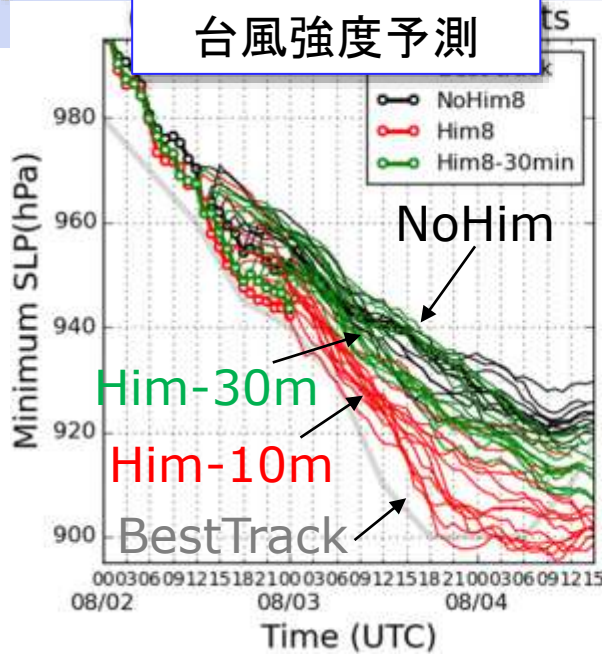
Kazumori 2021,  
NOAA WS  
[https://www.jpss.noaa.gov/science\\_events/20210728-noaa-microwave-sounder-workshop/Kazumori\\_20210728\\_MW\\_sounder\\_Workshop\\_JMA.pdf](https://www.jpss.noaa.gov/science_events/20210728-noaa-microwave-sounder-workshop/Kazumori_20210728_MW_sounder_Workshop_JMA.pdf)

- 異なる軌道・時間の衛星観測を追加することによる、予測誤差の変化を調査
  - 類似の軌道・センサ(マイクロ波サウンダ)を搭載した衛星観測をセットにして、1, 3, 5, 7セット追加する
    - NOAA15,17,18,19,20, Metop-A,B, S-NPPのAMSU-A,MHS,ATMS
- 観測頻度・範囲が増すほど、予測誤差が減少
  - さらなる衛星の追加による改善の可能性も示唆
    - 現在はかつて無いほどマイクロ波サウンダによる観測網が(たまたま)構築されているにも関わらず



# 観測頻度・範囲の重要性(台風)

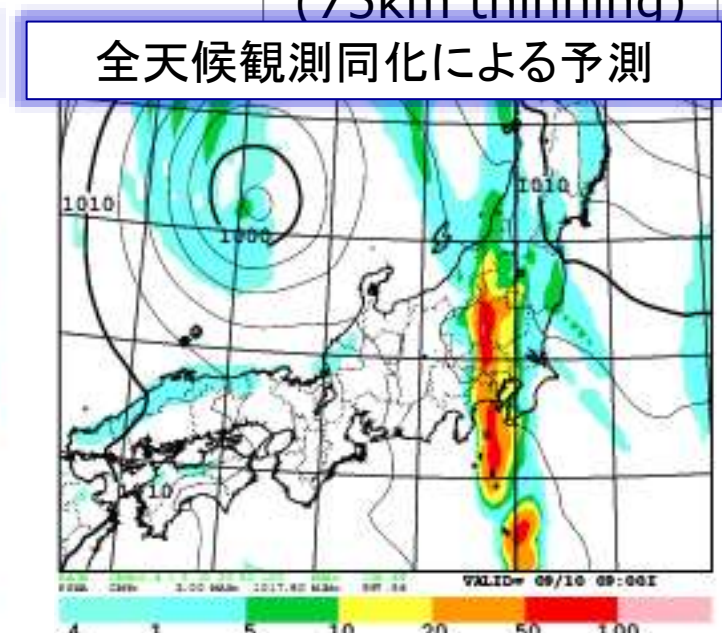
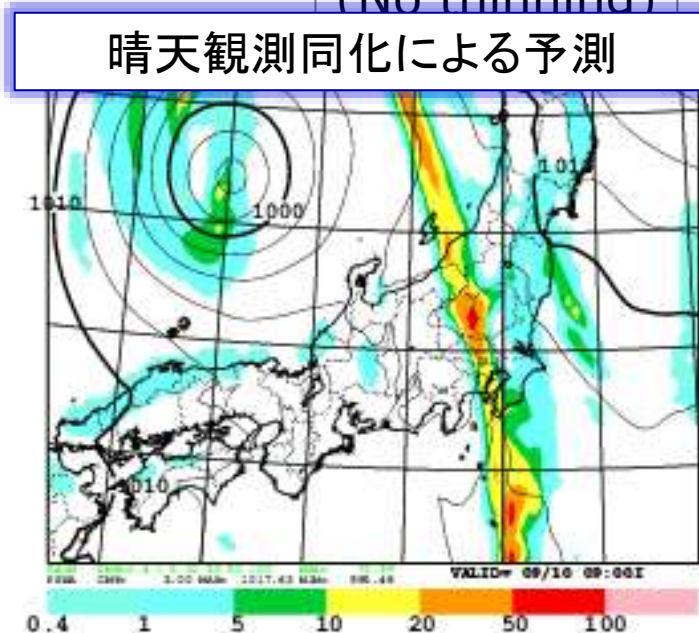
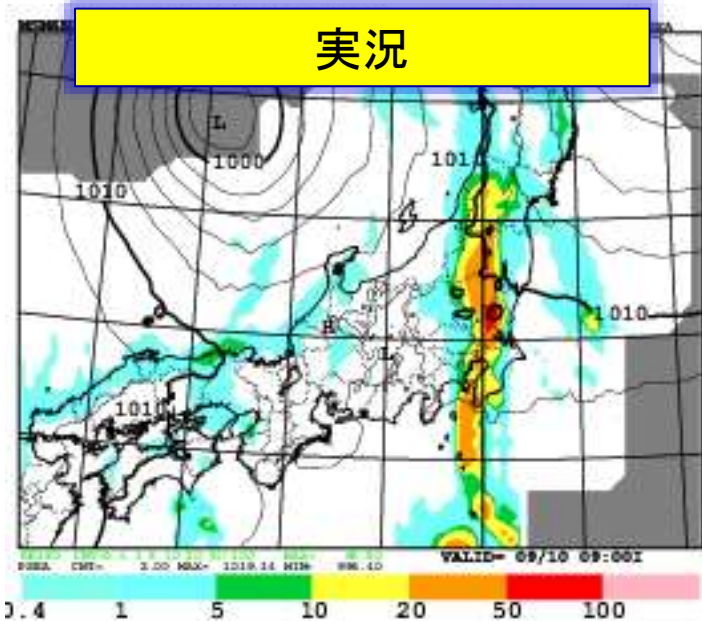
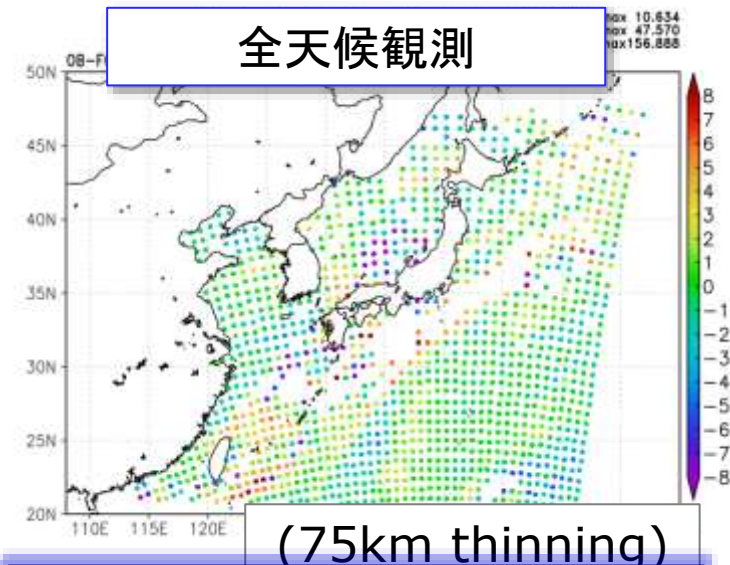
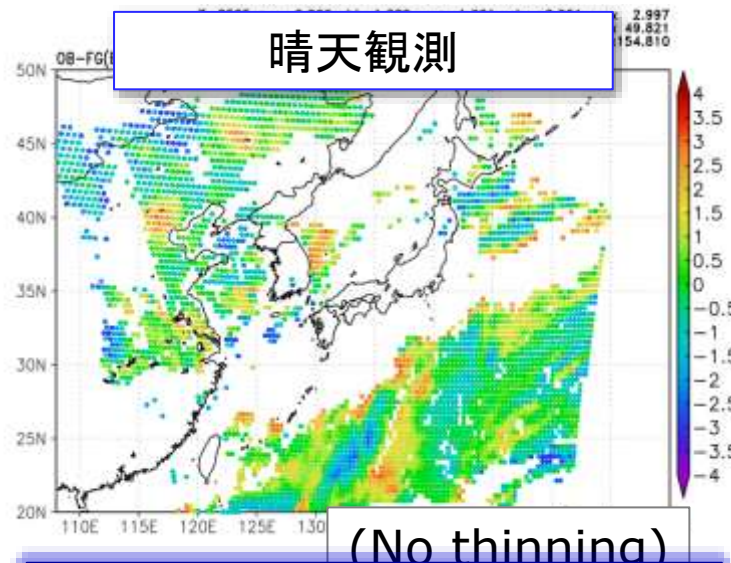
- ひまわりの赤外データの頻度の違いを比較
  - 10分ごと、30分ごとの全天候輝度温度
- どちらも台風の構造の解析や急発達への予測をより正確に表現
- 10分ごとに同化するほうが、30分ごとの同化よりも、予測改善が大きい



Honda et al. 2018, MWR

# 観測頻度・範囲の重要性(豪雨)

- ひまわりの赤外輝度温度同化の効果
- 現在は晴天域だけで同化→ 観測利用範囲の偏りが大きく、時間に応じて変動
- 雲域も含めて同化することにより、より均質・広範囲な同化利用が可能に
- → 予測精度の向上に加え「初期値変わり」を低減



1. 利用の現状
2. 予測精度改善の効果
- 3. 今後の期待と課題**



- 衛星観測の頻度、領域、精度、解像度、多波長の更なる向上に期待
  - モデルの解像度は10km前後から数kmに
  - 大気鉛直解像情報はますます重要
    - 高頻度・広域の下層水蒸気情報 → 線状降水帯等の豪雨予測に有効
- 安定・長期の運用、データの即時配信も重要

# 即時配信の重要性

## ■ 現業運用スケジュールの制約

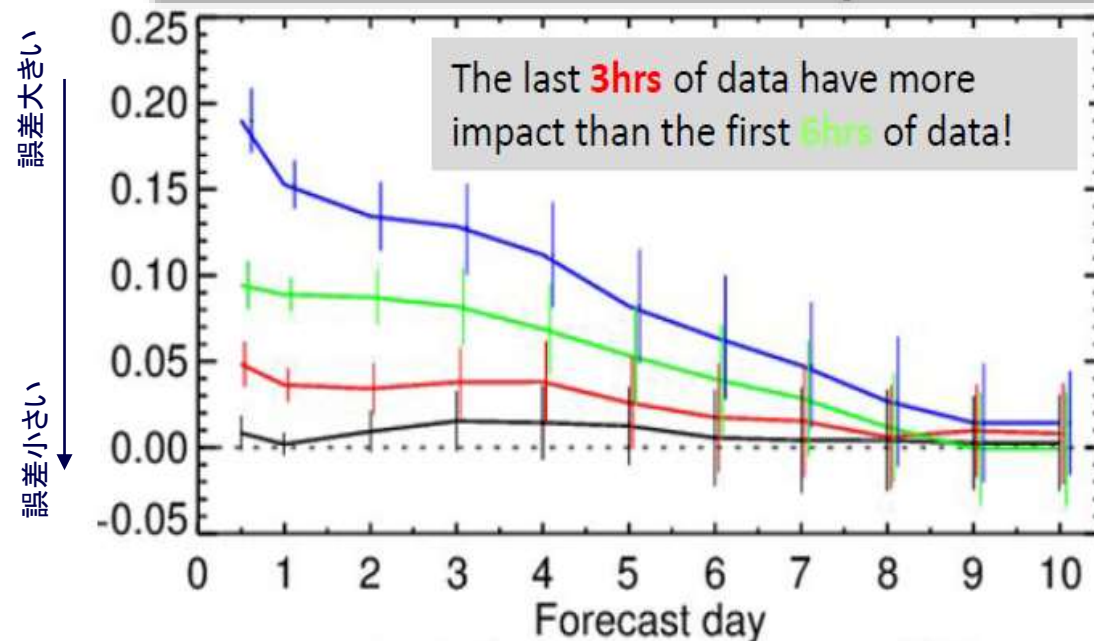
- データ入電待ち時間: 全球(速報): 2時間20分、メソ: 50分、局地: 30分
- 例: 9時初期値予測には、11時20分までに入電した観測を用いる
- この後に入電したデータはサイクル(遅延)解析には使われるが、予測への効果は減少する

## ■ 即時配信を強化することにより、利用可能観測(範囲・頻度)が増強

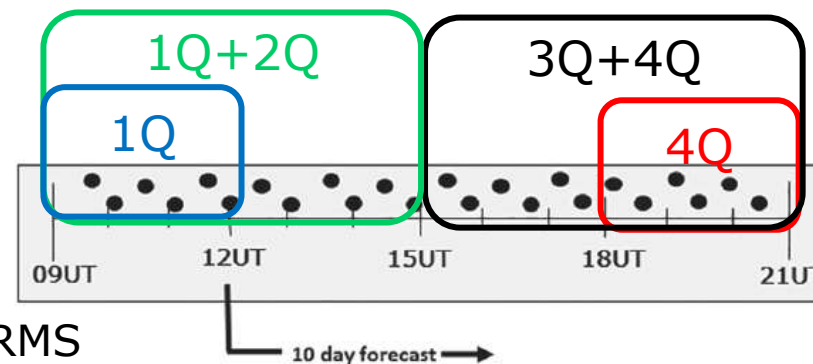
## ■ また最新観測データほど、予測改善効果が大きい (McNally 2021)

- 最新の大気情報を反映、同化処理による情報伝搬(特に風)

同化窓内の観測時間と予測精度の関係  
一部の時刻の観測しか同化しない場合に、全観測を同化した時と比較してどの程度予測誤差が増加するかを、予測時間ごとに表示



(1Q, 1Q+2Q, 3Q+4Q, 4Q)

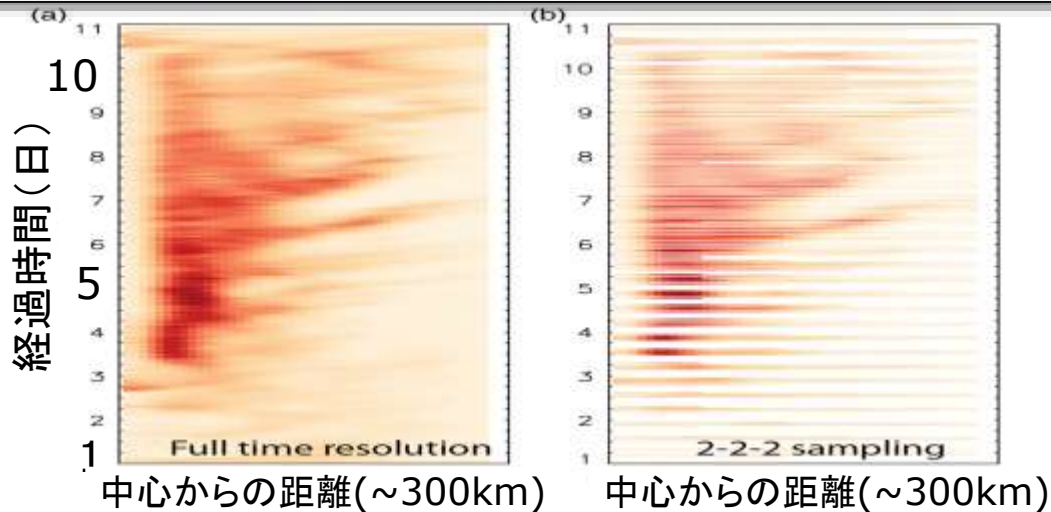




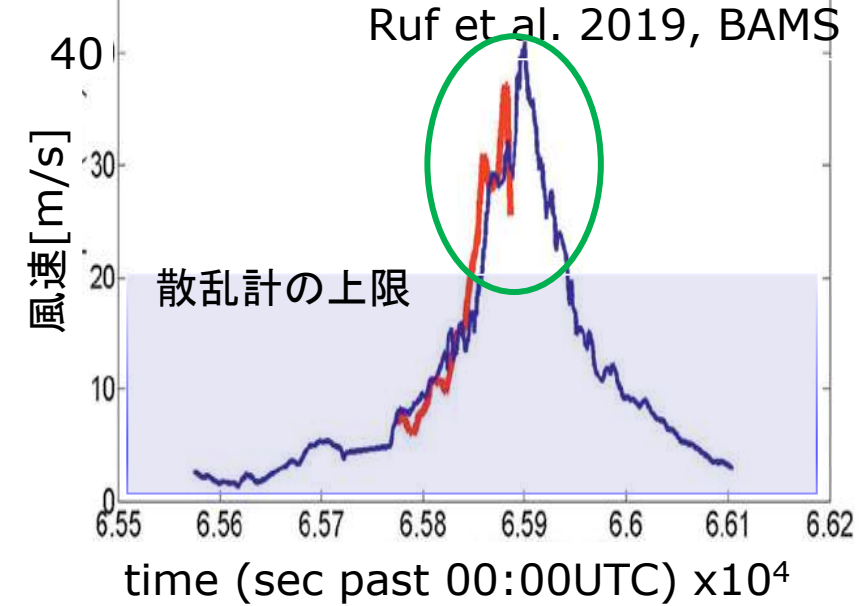
# 小型衛星の利用

- 高頻度観測や新しい観測に期待
  - CYGNSS: GNSS反射計による台風下の強風速の観測
  - TROPICS: マイクロ波サウンダの熱帯高頻度観測
  - Spire: GNSS掩蔽観測の全球高頻度観測
- 一方で、品質の安定性や継続性、利用コストに懸念
  - 開発・運用機関との情報共有や連携を希望

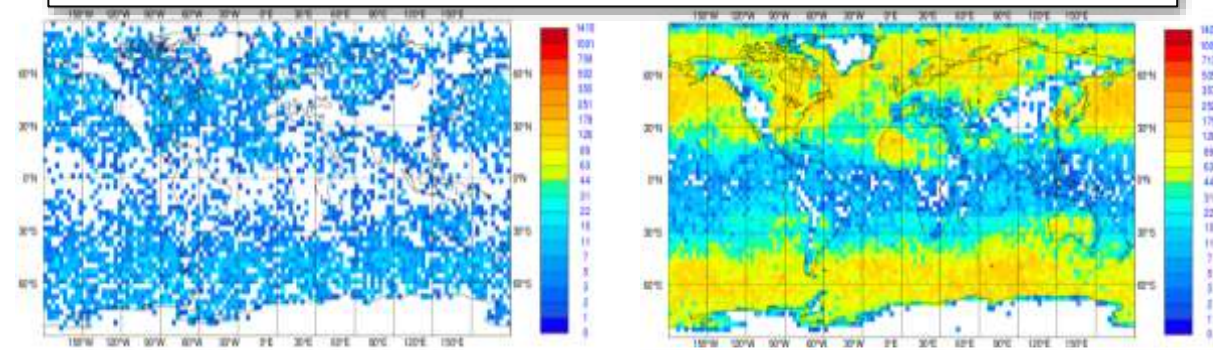
TROPICSによる台風観測サンプリングシミュレーション  
(左) 台風周辺の降水予測時間変化、(右) 観測サンプリング(~30分)



CYGNSS(青線)による  
ハリケーン海上風速の観測時系列  
赤線は検証データ(航空機搭載MWイメージャ)



Metop-B/GRAS(左)とSpire(右)のGNSS掩蔽観測分布  
2021/12/31-2022/2/11



<https://www.ecmwf.int/en/forecasts/charts/obstat/>

## ■ 測器開発・衛星運用機関との連携強化

- 観測特性のより深い理解に基づく、利用開発の高度化
- 観測品質情報の迅速な共有
- 将来計画衛星観測の先行的な同化開発や評価：観測システムシミュレーション実験（OSSE）

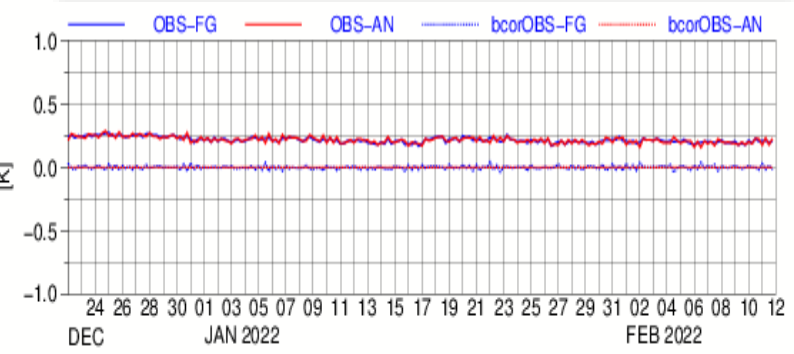
## ■ データ同化処理技術の高度化

- これまで利用が不十分だった観測情報活用
  - 高頻度（<数10分）、高分解能（数km）、雲降水や地表面の影響が大きな観測など（全天候・全地表面同化）
- 新規衛星の迅速な活用
  - 大型の現業・研究衛星だけでなく、小型衛星も

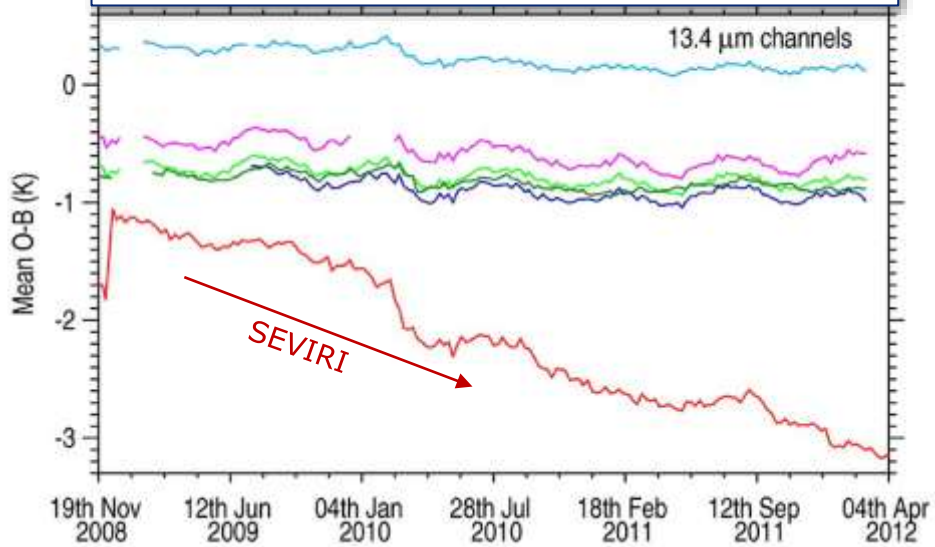
- データ同化では、観測(誤差)特性(バイアス、分散、相関等)の正確な把握が重要
  - 誤差の共分散は同化の重要なパラメータ
  - 観測の特性変化(分散やバイアス増大など)には適切に対応する必要がある
- 同化処理内では、モデルから観測相当量が常時計算される → 観測値ー計算値(O-B)
  - 現業システムでは、O-Bを用いて、観測特性を常時・全球でモニターし、変化に対応している
- → 観測品質のリアルタイム監視システムとしても有用

Saunder et al. 2013, IEEE

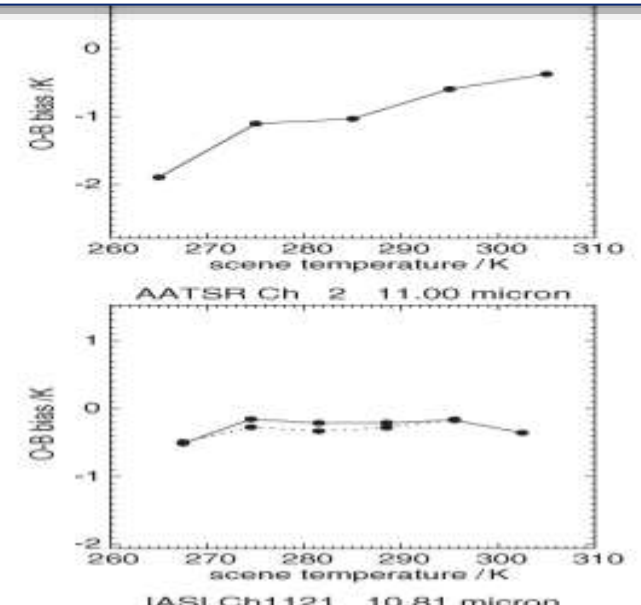
O-B平均値の短期時系列モニター  
S-NPP/ATMS ch6  
2021/12/24 - 2022/2/12



O-B平均値の長期時系列モニター  
SERVI, HIRSなどの13μm chのO-B平均  
2008/11/19 - 2012/12/4/3



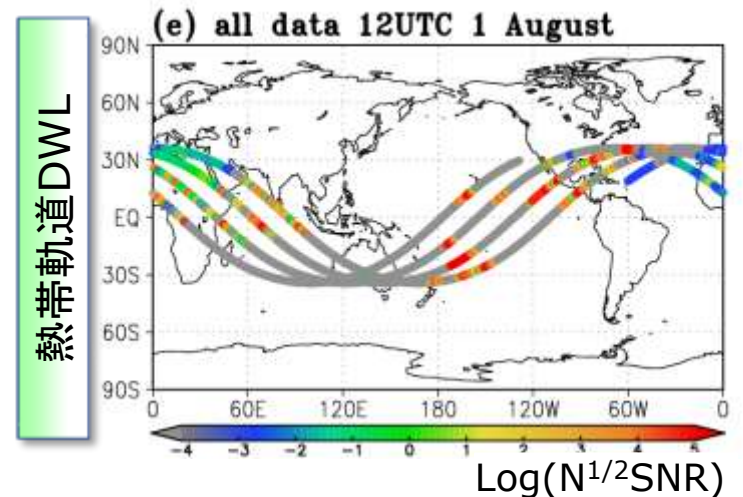
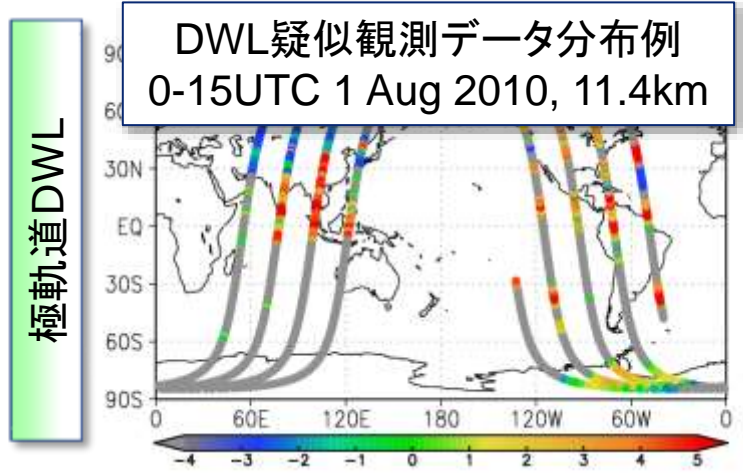
O-B平均値のシーン温度依存性  
Metop/HIRS(上)、AATSR(下)



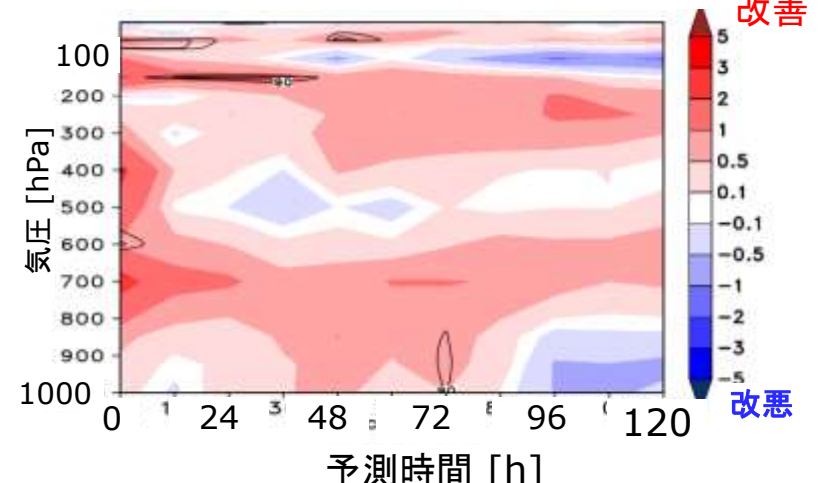
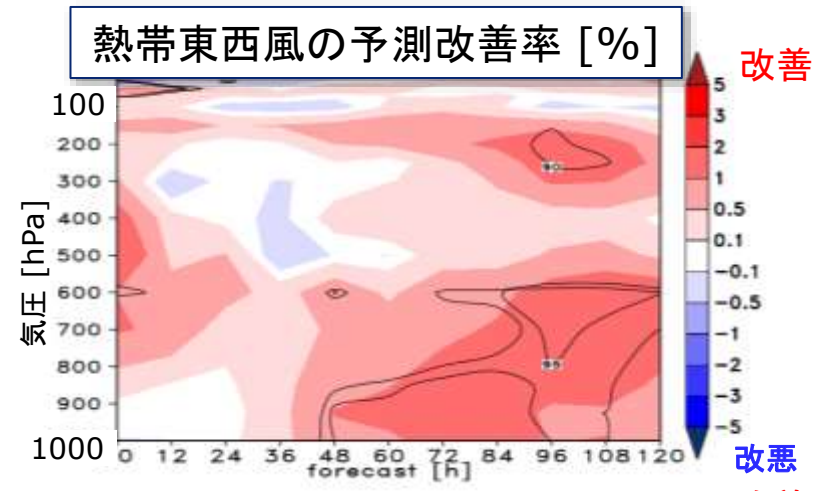
- OSSE: ある(「真」の)場に基づいて、擬似的な観測システムを構築し、観測システムや同化システムを評価
  - 衛星観測の仕様や効果の事前評価、同化の早期開発が可能

## ■ ドップラー風ライダーDWLのOSSE

- 風の全球鉛直分布観測
- 極軌道衛星または熱帯軌道衛星に搭載したDWLを想定して、疑似観測算出し同化実験を実施
- → いずれの軌道によるDWLも、予測を改善することを確認
- センサ・シミュレータ・衛星・同化の専門家が協力して実施
- ひまわり後継衛星についても実施
  - 赤外ハイパースペクトルサウンダの効果进行调查 (Okamoto et al. 2021, sola)



Okamoto et al. 2018, JMSJ



- 気象予測精度の維持・向上のためには、衛星観測は不可欠
  - 広域・定常的・高精度な観測情報が必要であり、衛星観測の特徴はこれに合致
  - 現在でも既に、(気象衛星に限らず)多様・大量な衛星観測を利用
  - 利用技術の高度化や衛星観測の充実・高精度化により、衛星観測の寄与は近年ますます増大
    - 特に気温・水蒸気・風の鉛直分布の観測による予測改善効果が大きい
- 更なる気象予測精度の向上のために、観測の頻度、領域、精度・解像度の向上や、新しい要素(物理量)の観測に期待
  - 安定・長期運用、配信時間の迅速化も重要
  - 衛星観測情報をより有効に活用するため、利用技術の高度化や計算能力の増強も必須
- 衛星観測開発・運用者との連携強化にも期待
  - 観測特性や品質情報の共有、新規衛星の早期利用や事前評価