

衛星搭載風ライダーを用いた 気象予測の改善



岡本幸三*^{1,2},

石井昌憲²、石橋俊之³、田中泰宙⁴、Philippe Baron²、
久保田拓志⁴、境澤大亮⁴、佐藤洋平⁴、蒲生京佳⁵

1:気象研、2:NICT、3:気象庁、4:JAXA、5:富士通FIP

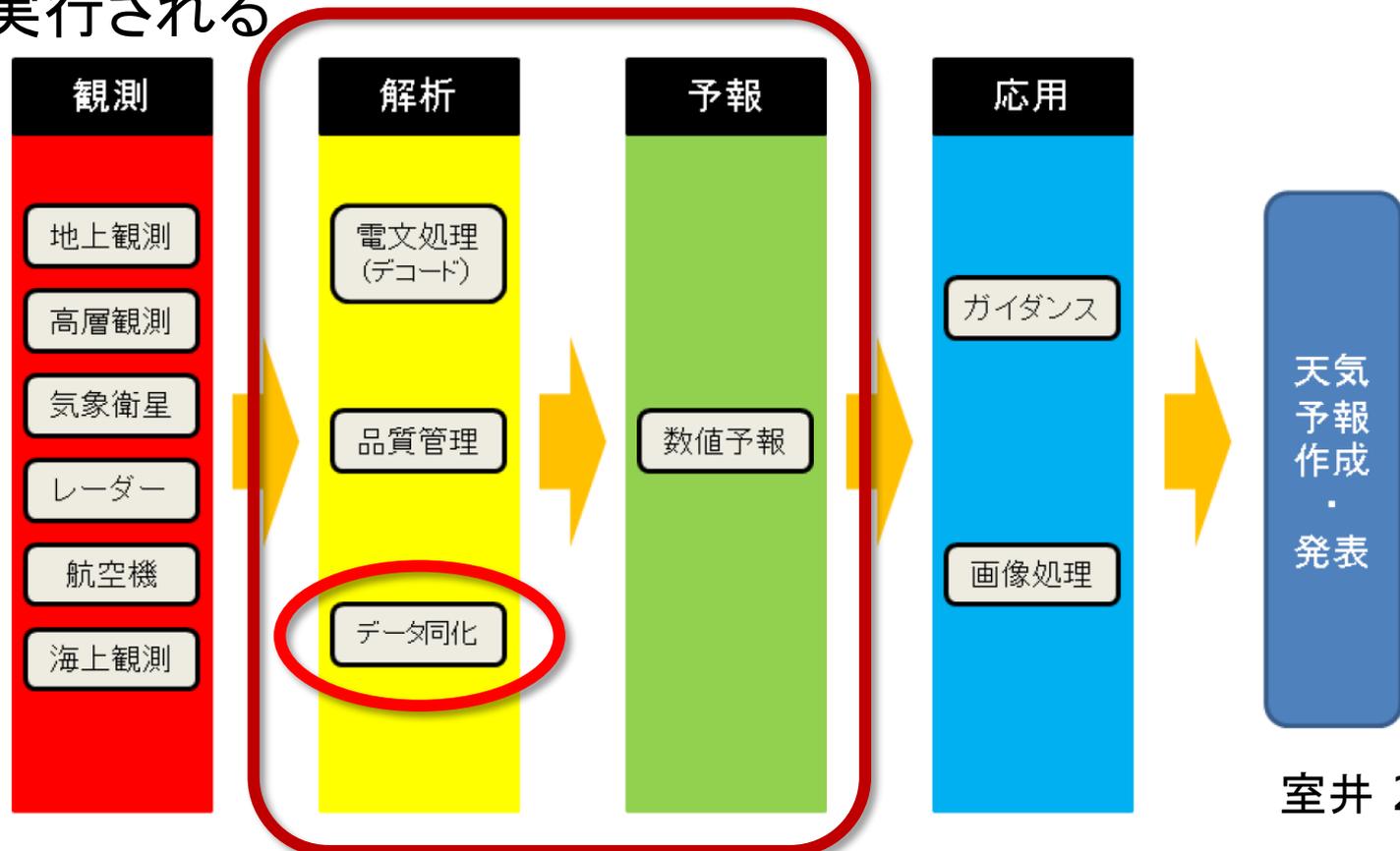
内容

- 1. 数値予報と衛星データ
 - 数値予報とは？ データ同化とは？
 - 衛星データの重要性
- 2. 衛星搭載のドップラー風ライダー(DWL)
 - 宇宙から風を測る
- 3. 衛星搭載DWLの数値予報への効果
 - 存在しない衛星観測の効果を定量的に調査する
 - 観測システムシミュレーション実験(OSSE)
- 4. まとめとコメント

1. 数値(天気)予報と衛星データ

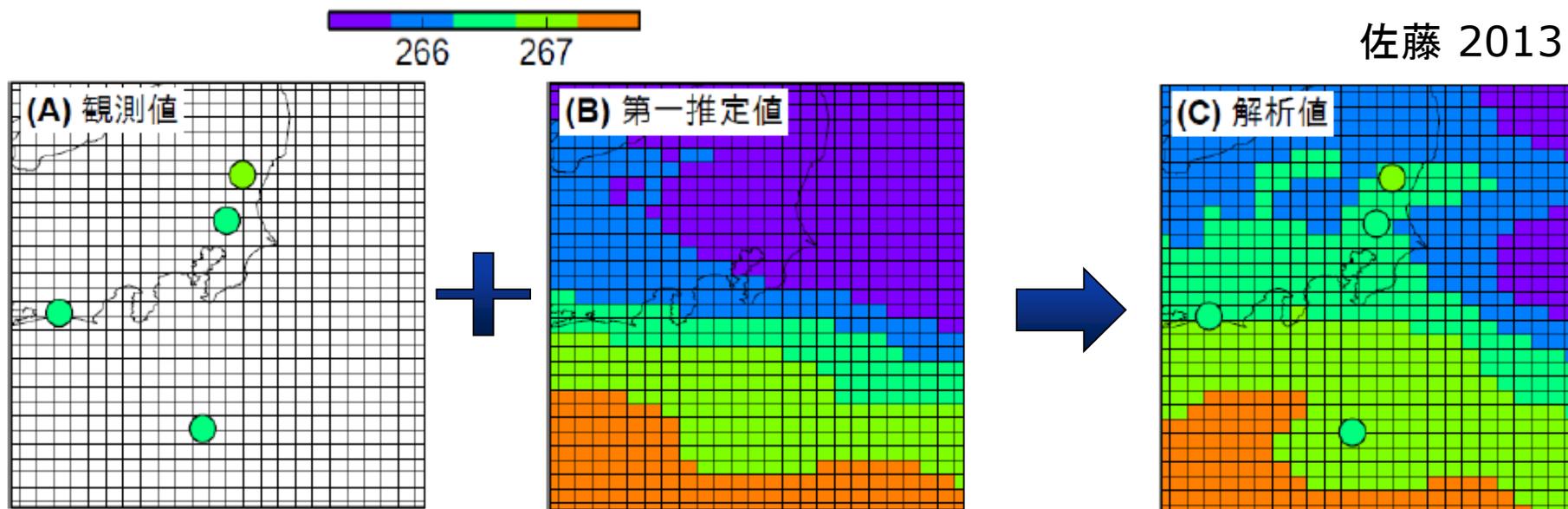
数値予報とは？

- 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
- **天気予報**や**防災情報**の基礎資料として使われる
- 観測データ、予報モデル、データ同化(解析)システムを用いて実行される



データ同化とは？

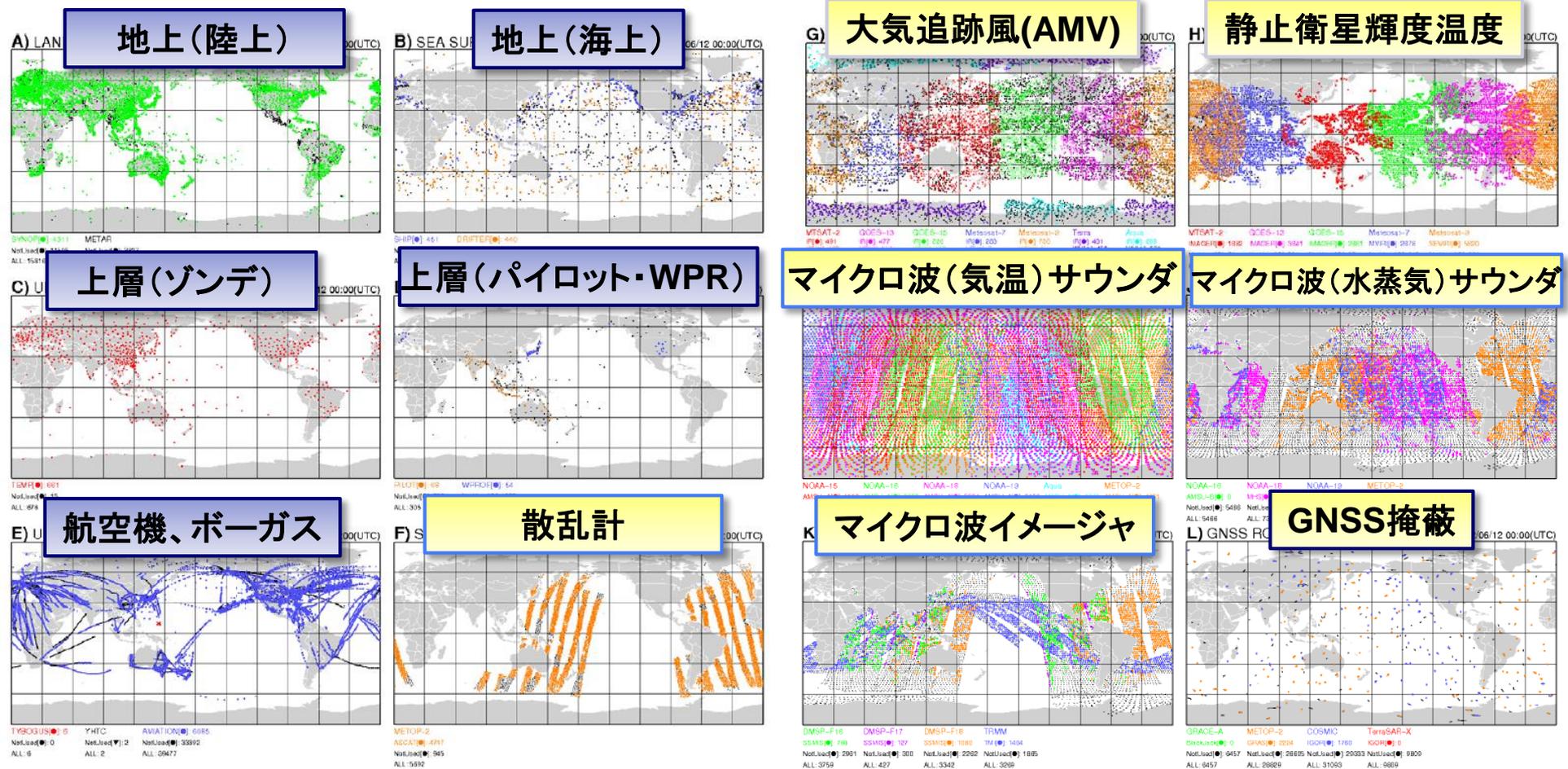
- **観測値**と**第一推定値(予報値)**を用いて、**整合した値**(大気状態)を、物理・統計的な関係式に基づいて求めること
 - 作成された値を**解析値**と呼ぶ
 - 第一推定値として、数値予報値(モデル結果)を用いることが多い
 - →観測・モデルと比較して、時間的・空間的に均質で高精度
 - 大気科学の研究や、環境監視、**数値予報の初期値**として用いられる



気象庁全球データ同化システムで使われている観測データ

2012年6月11日 21UTC ~ 12日 03UTC

佐藤 2013



全球予報改善に対する各観測の寄与率

■ 寄与率が高いもの

- 1. マイクロ波サウンダ
- 2. ラジオゾンデ
- 3~5. 航空機、赤外サウンダ、衛星風

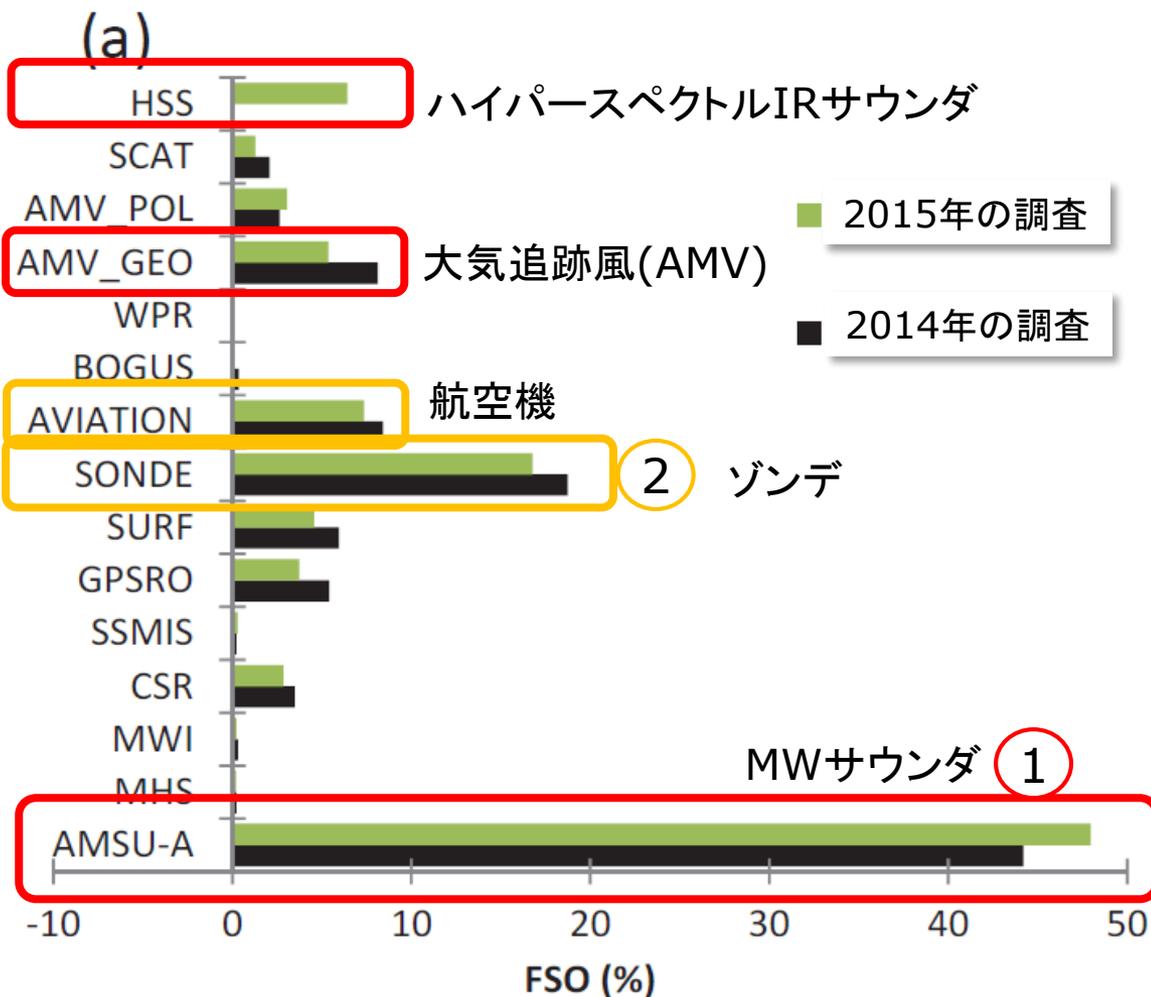
■ 寄与率を決めるもの

- 観測の精度や数
- データ同化システムの性能

■ 衛星データの効果は、年々増大

- 衛星観測の高精度・多様化、データ同化システムの高度化

- 注意！この評価方法(FSO)では、現在存在しない、もしくは十分に利用されていないデータの潜在的な寄与は考慮されない



衛星観測データの特徴と効果(インパクト)

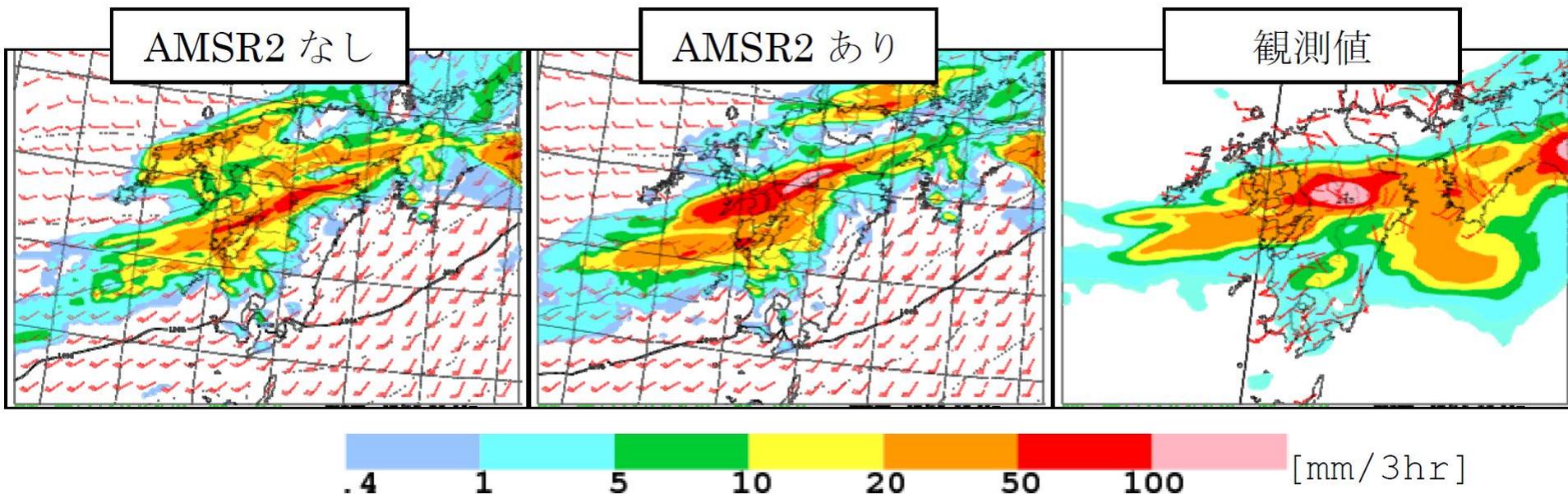
■ 衛星観測の特徴

- **広域、均質** → 海洋上や大気上層など他の観測では困難な領域も観測
- **定常(常時)** → 現業的な利用では特に重要

■ 例(以下の図): GCOM-W/AMSR2

- AMSR2を同化することによって、海上の水蒸気の解析が改善し、九州の豪雨予測が改善

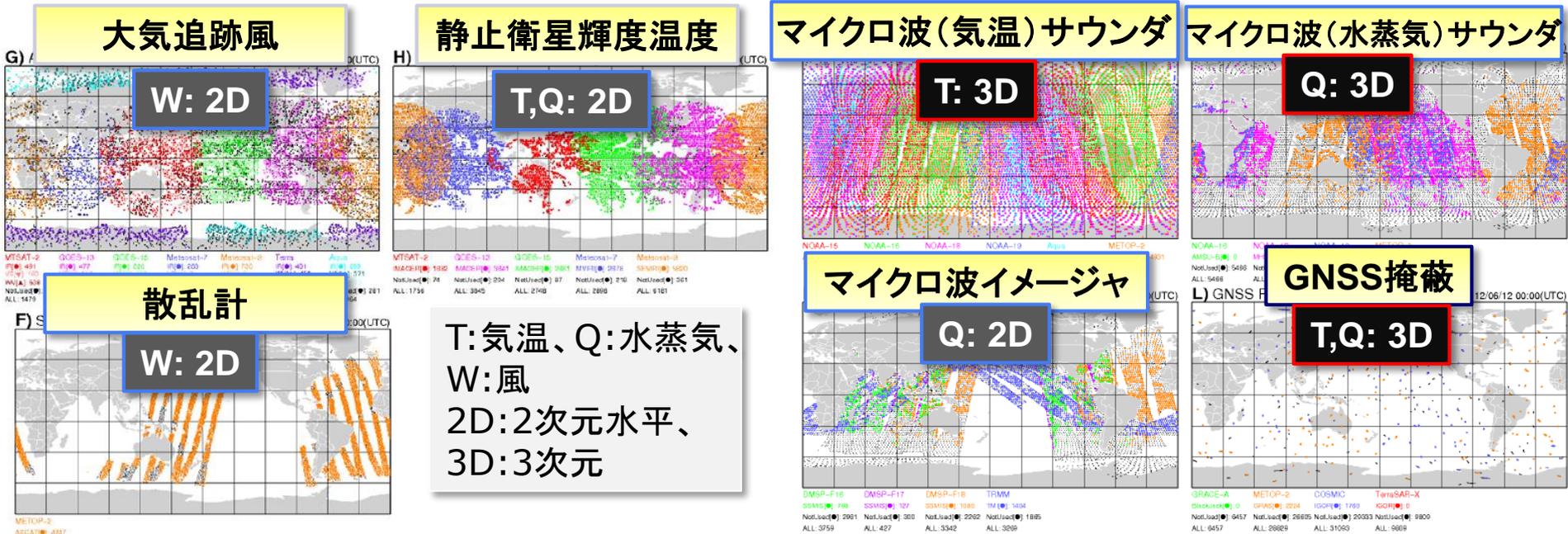
気象庁 2013 http://www.jma.go.jp/jma/press/1309/12a/20130912_AMSR2_JMA_JAXA.pdf



2. 衛星搭載の風ライダー(DWL)

数値予報で同化している観測要素

- 気温、水蒸気、風、地表気圧、これらと密接に関係した観測量(可降水量、輝度温度、、、)
- 数値予報精度向上のため、広域・高頻度・高精度な観測が必要
- 気温、水蒸気は、衛星サウンダ(鉛直探査計)により、鉛直方向を含む全球的な3次元観測が(ある程度)実現されている
- 風は、全球的な鉛直分布観測が極めて限定的



数値予報システムで同化している風データ

■ゾンデ

- 高精度・全天候観測可能。しかし観測域・頻度が限定的

■ ウインドプロファイラー(WP)、ドップラーレーダー(DR)

- 高精度・高頻度。しかし観測域が限定的

■ 航空機

- 高精度・高頻度。しかし空港周辺や航空路に限定。

■ 衛星イメージャによる大気追跡風(AMV)

- 高頻度・複数衛星によって広域観測(ほぼ全球)。しかしほぼ単層で、高度推定精度は高くない

■ 衛星マイクロ波散乱計

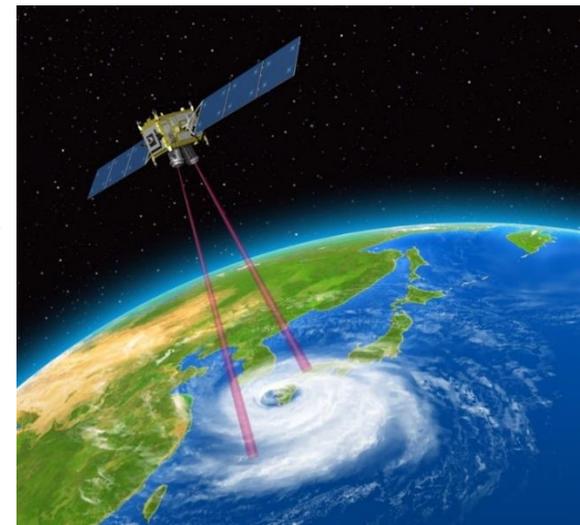
- 海上風。高精度・観測域は比較的広い

広域(全球規模)で鉛直プロファイルを風を観測する定常的なシステムは、現在は存在しない

衛星搭載ドップラー風ライダー(DWL)

- 全球的な3次元風観測を実現する有力な候補
 - WMO technical report 2012-1
- エーロゾルや大気分子で散乱されるライダー光のドップラーシフトを測定することにより、ライダー視線方向の風速を得る
- 地上ドップラー風ライダーは、空港などで現業的に運用

- 欧米でも重要性を認識
 - ESA(欧州宇宙機関)では2016年にADM-Aeolusを打ち上げ予定
 - NASAでも技術的検討及び航空機観測を実施
- 日本
 - サイエンス検討チーム(代表:岩崎・東北大教授、気象研、気象庁、東大、理研など)で検討中
 - ライダ技術検討チーム(NICT,JAXA,東北工大など)で地上・航空機搭載機を開発中



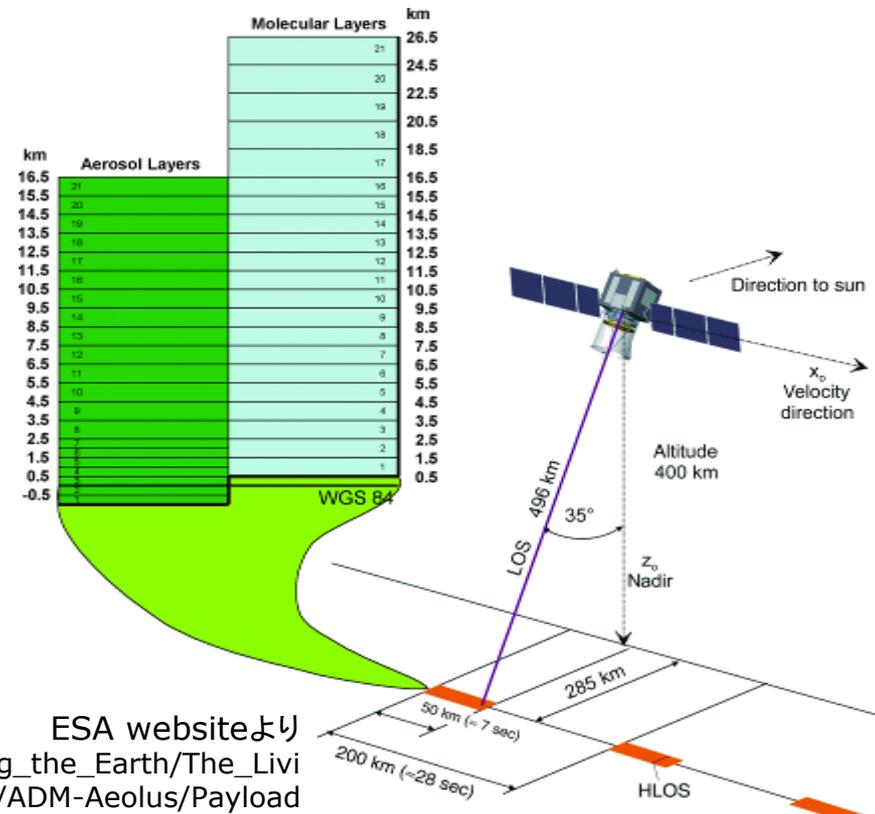
DWLの開発（国際動向）

ADM-Aeolus/ALADIN (欧州)

- 2016年に打ち上げを予定している、世界初の衛星搭載DWL
- 視線方向だけの風速鉛直分布を観測
- 大気上層観測に適する
- 数値予報センターが主なユーザー

比較: NICTのDWLは、

- 風ベクトルの鉛直分布を観測
- 大気下層観測に適する
- 昼夜問わず観測が可能
- 打ち上げ計画は白紙



ESA websiteより

http://www.esa.int/Our_Activities/Observing_the_Earth/The_Living_Planet_Programme/Earth_Explorers/ADM-Aeolus/Payload

ここまでのまとめ

- 数値予報は、観測データ・データ同化・数値予報モデルが重要な要素であり、これらの性能が予報精度を決定する
- 衛星データは、均質・広域・定常的な観測を行うことから、重要な観測手段。近年その重要性はますます高まる
 - 今日の気象予測・防災情報は、衛星観測がないと大幅に精度が劣化
- 風の観測は多数あるが、全球的な鉛直分布観測は不十分
- 衛星搭載のドップラー風ライダー(DWL)は、この数値予報からの観測ニーズを満たす有望な候補

疑問点

- 衛星搭載DWLは、本当に数値予報に効果があるのか？
- あるとしたら、どのくらいあるのか(定量的な評価)？
- どのようなDWLを作れば、大きな効果が得られるのか？

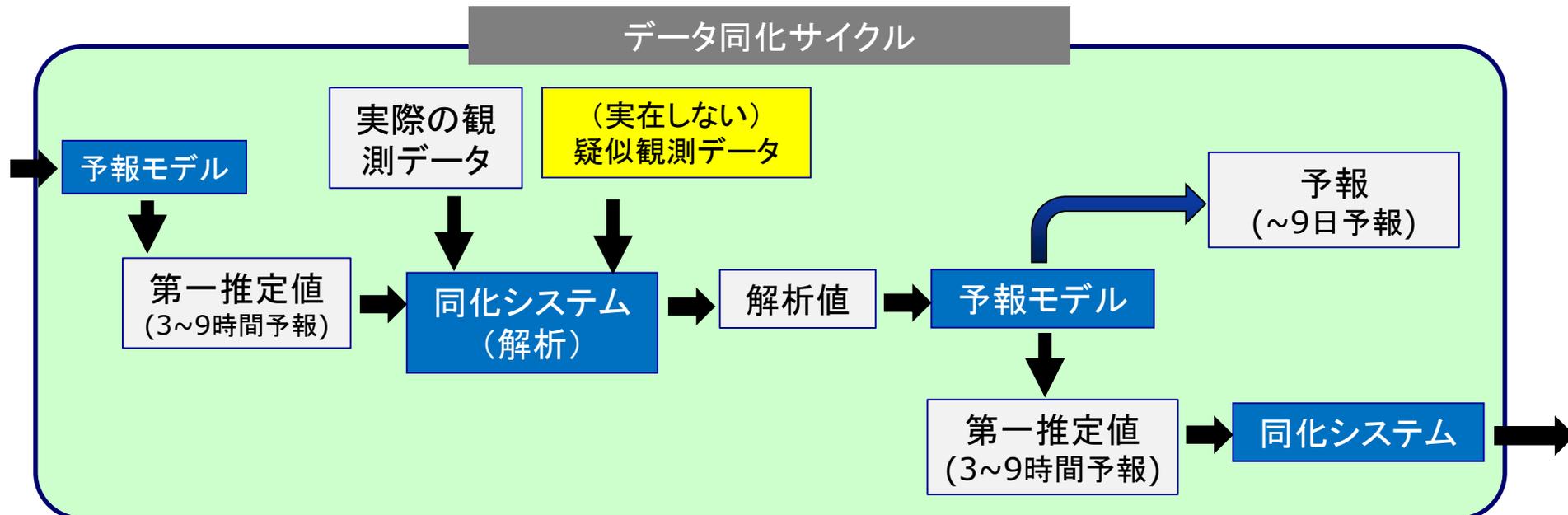
- (ユーザー側の要望)実際にDWLが実現するのであれば、なるべく早期かつ効果的に利用したい

- → OSSE(観測システムシミュレーション実験)
 - これら全ての疑問の解決に向けた材料を提供

3. 衛星搭載DWLの数値予報への効果 -OSSEを用いた調査-

OSSE (観測システムシミュレーション実験)とは

- Observing System Simulation Experiment
- 仮想的なデータを疑似的に作成(シミュレート)して、データ同化サイクル(実験)を実施
- 通常のデータ同化サイクル(実験)は、実際の観測データだけを扱う。



DWLのOSSEを実施するための課題

- 課題1: 精度の高い大気場(風・エアロゾル・雲)が必要
 - 疑似観測を作成するための入力
 - 「感度解析」によって予報誤差を減少させる解析場(風、気温など)を計算(SOSE疑似真値場; Marseille et al. 2008; Ishibashi 2014)
 - エアロゾル場は、疑似真値場と整合するように、全球エアロゾルモデルから作成

- 課題2: 精度の高い衛星DWLシミュレータが必要
 - ライダー本体: ISOSIM-Lシミュレータ
 - NICTにおいて2001年頃から開発。近年大幅に改良(Baron et al. 2012)
 - 衛星システム: JAXAの専門家によって、軌道や熱・電力制御などを検討

ライダーシミュレータ ISOSIM-L

NICTサイエンスクラウド
コンピュータで**ビッグ
データ**を高速計算処理

気象場の入力

ライダーシステムパラメータ

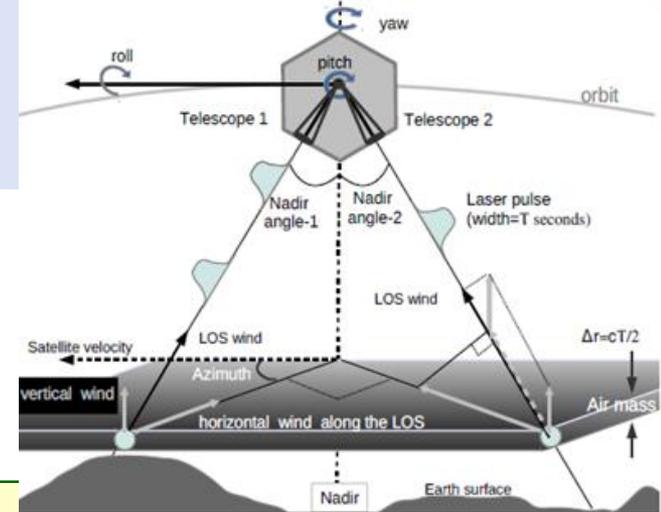
- レーザ (エネルギー、繰返し周波数、発振波長等)
- 受光部 (望遠鏡口径/数、光検出効率等)
- 観測方向、観測方向数
- 空間分解能、時間分解能
- 衛星情報
- 大気の均一性/不均一性

1レーザショット毎に疑似信号作成及び周波数解析処理

時空間分解能に対応した平均処理

疑似風観測データ

- 風速、風速誤差
- 受信電力、SNR
- 平均周波数スペクトル、平均スペクトル幅



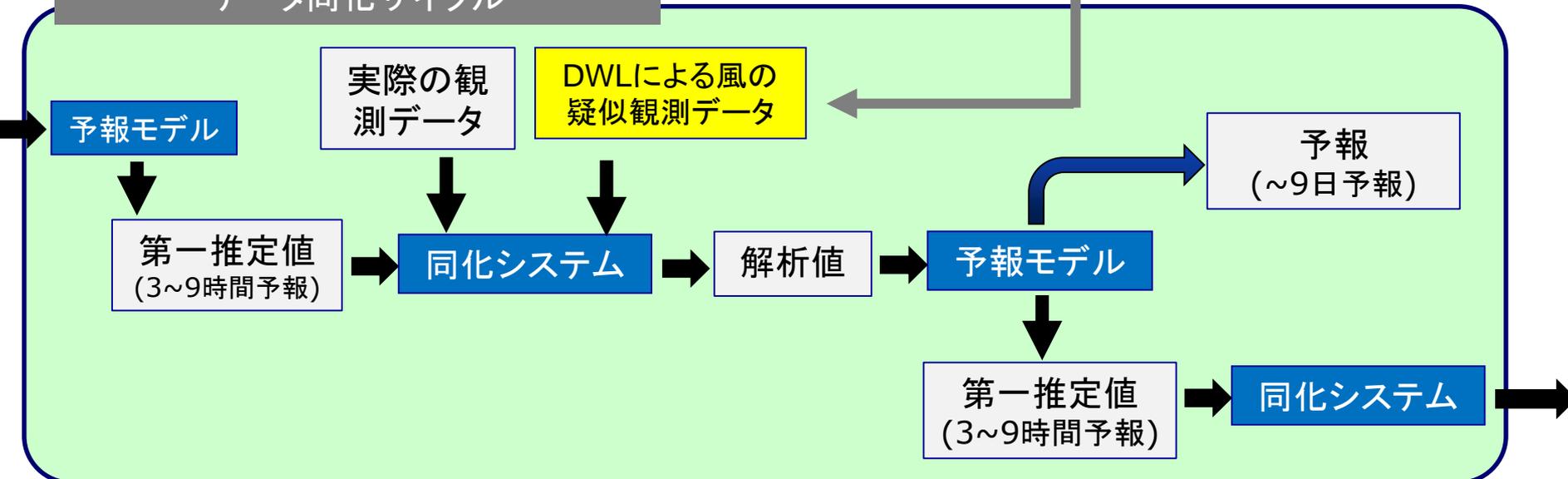
DWLのOSSEの流れ

DWL疑似データの作成 (off-line)



Okamoto et al. 2014

データ同化サイクル



現在想定しているDWL・衛星

■ DWL

- コヒーレント方式、波長 $2.0\mu\text{m}$
- パルスエネルギー: 125mJ 、繰り返し周波数: 30Hz
- 2本のレーザーで、2つの視線方向風を測定(方位角 45 度、 135 度)
- 天底角度 35 度
- 平均処理
 - 水平: 100km
 - 鉛直: 19層 (地表~ 27km)
 - 分解能: 0.5km ($Z < 3\text{km}$), 1km ($3 < Z < 9\text{km}$), 2km ($9 < Z < 27\text{km}$)

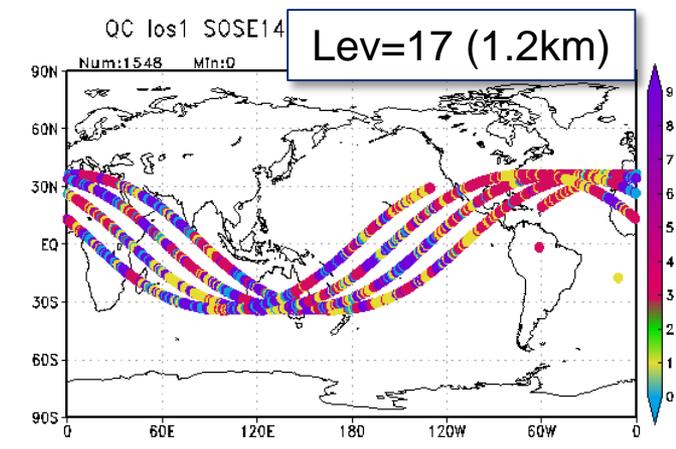
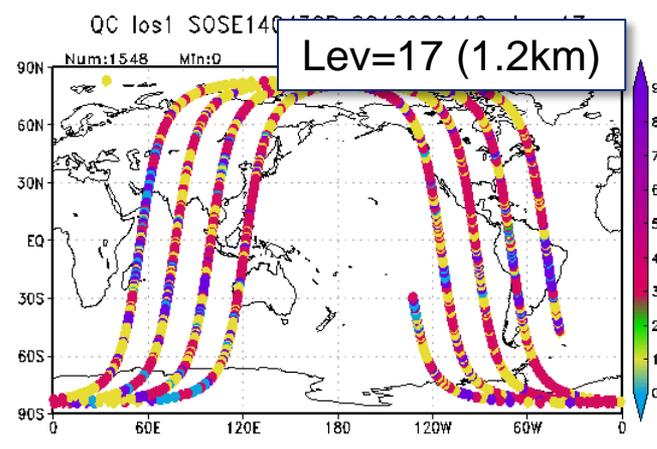
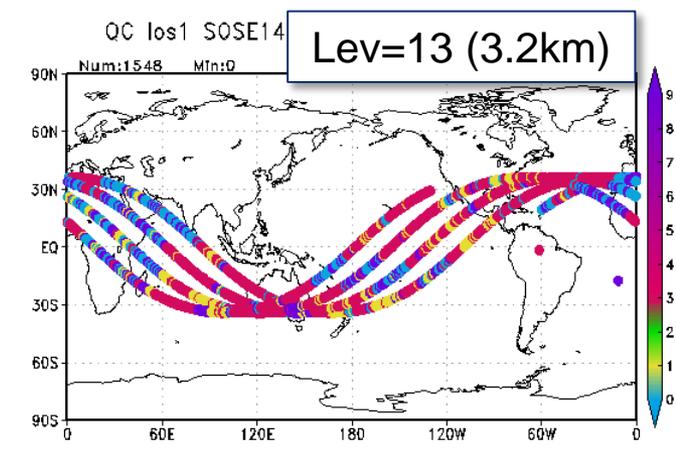
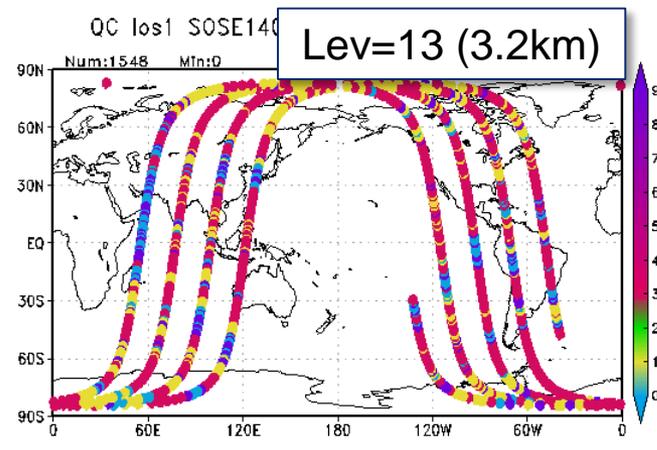
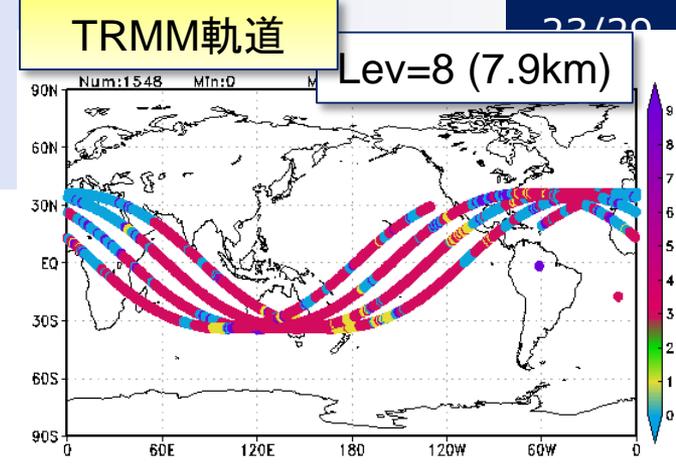
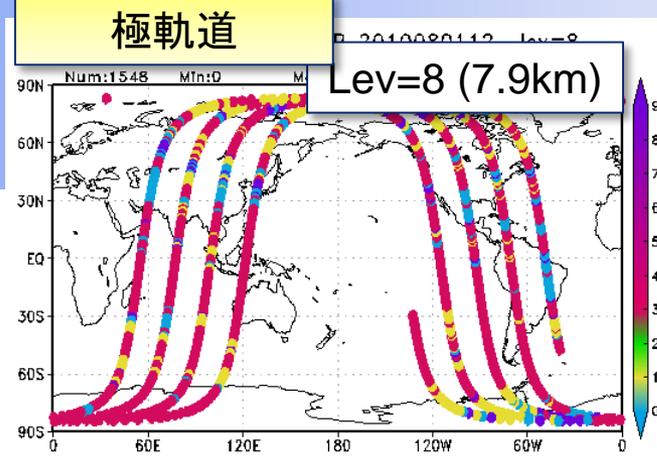
■ 衛星

- 超低高度衛星 SLATS
- 太陽同期極軌道と低傾斜角軌道(例: TRMM衛星)を想定

2010年8月1日12UTCの解析で処理されるDWLデータ

- 09~15UTCのデータを利用

Pass all QC
 Anomalous
 Large Error
 Gross Error



DWLによる予報初期値(東西風)の改善具合(1)

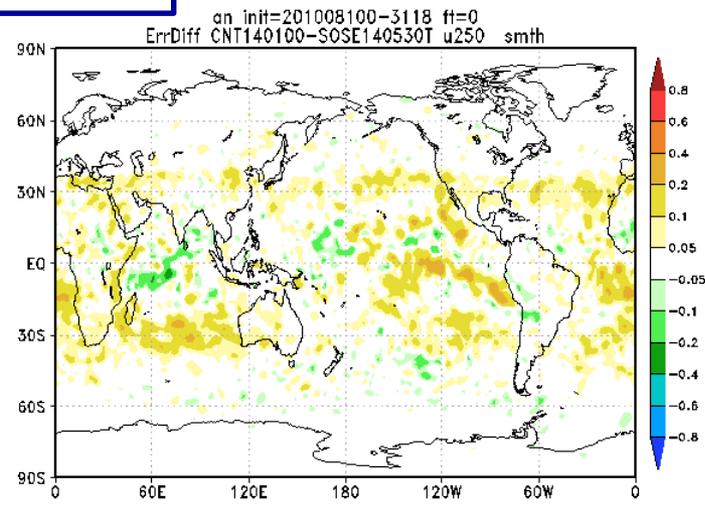
予報初期値の改善具合を東西風速差／東西風速値 [%]としてマップ評価

暖色ほど予報が改善している

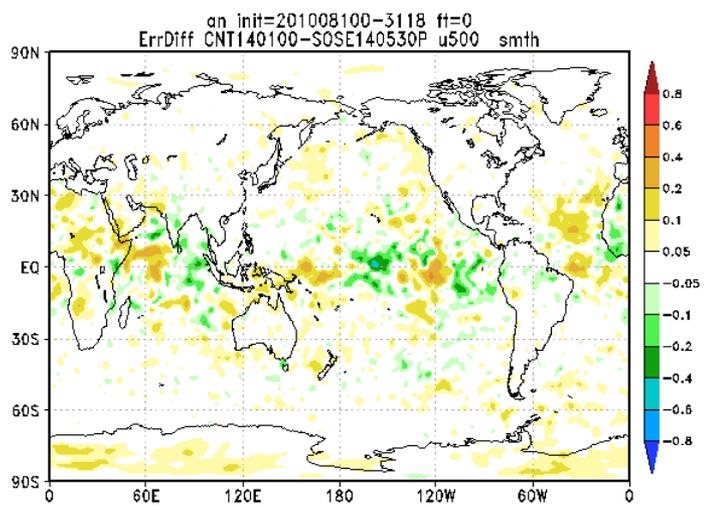
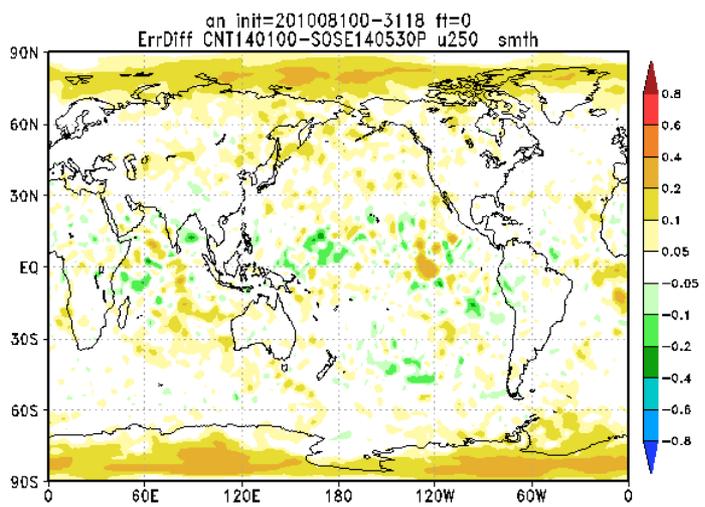
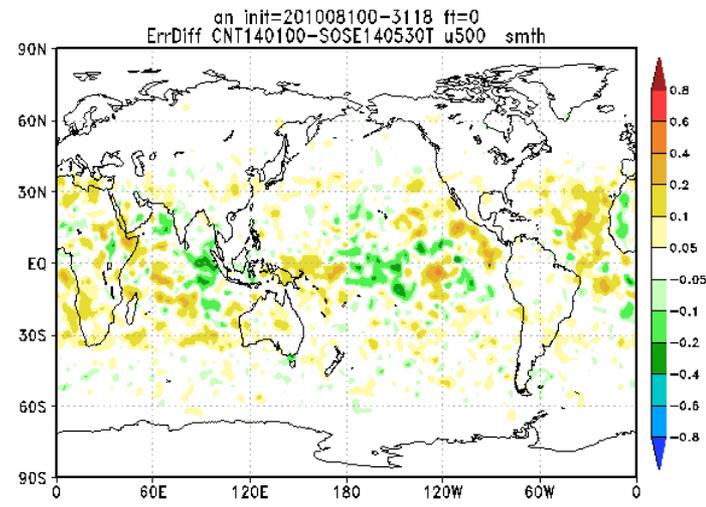
TRMM軌道のDWLを使用した場合

極軌道のDWLを使用した場合

200hPa面 (高度約11km)



500hPa面 (高度約6km)



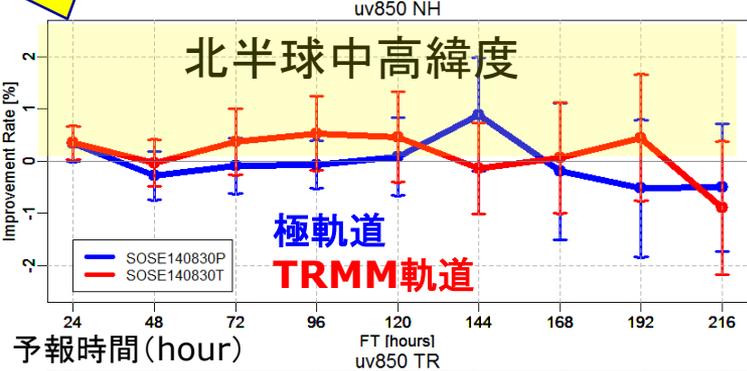
DWLによる予報値(風速)の改善率

正の値は予報改善を表す

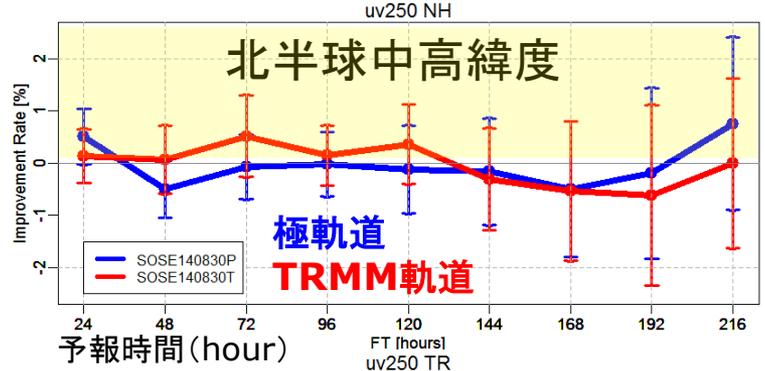
850hPa面(高度約2km)

250hPa面(高度約10km)

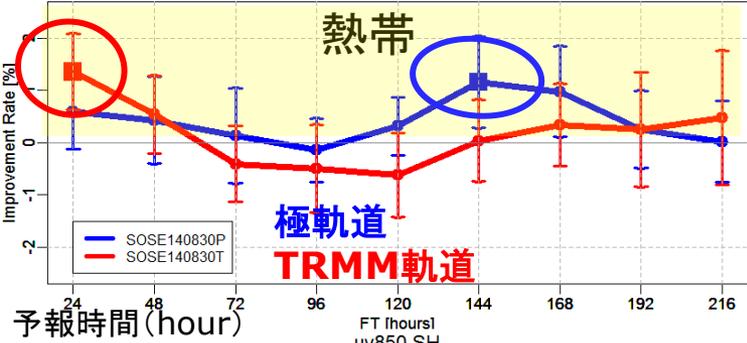
予報の改善度



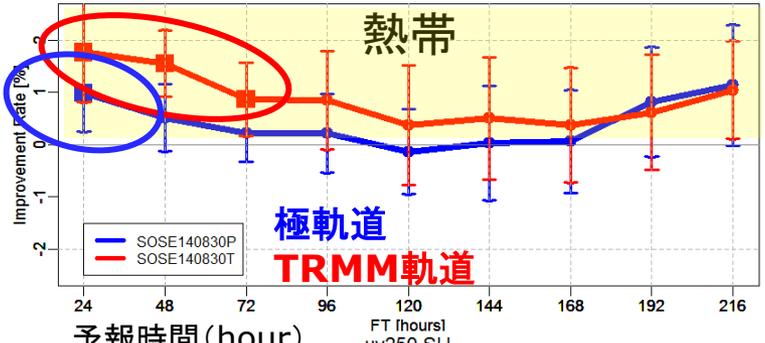
予報の改善度



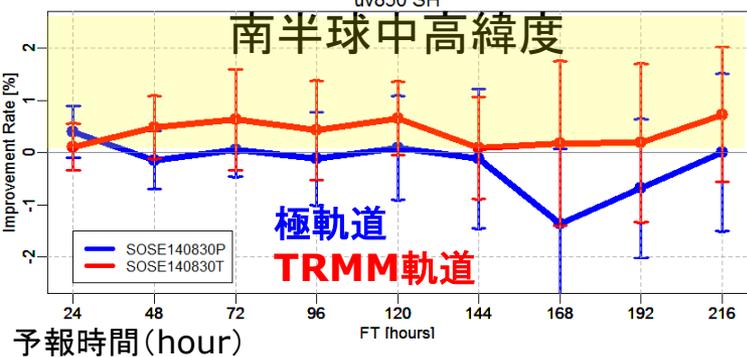
予報の改善度



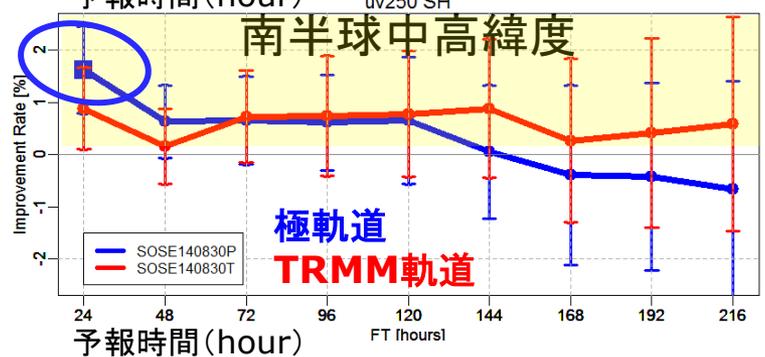
予報の改善度



予報の改善度



予報の改善度



台風進路予報へのインパクト評価(3)

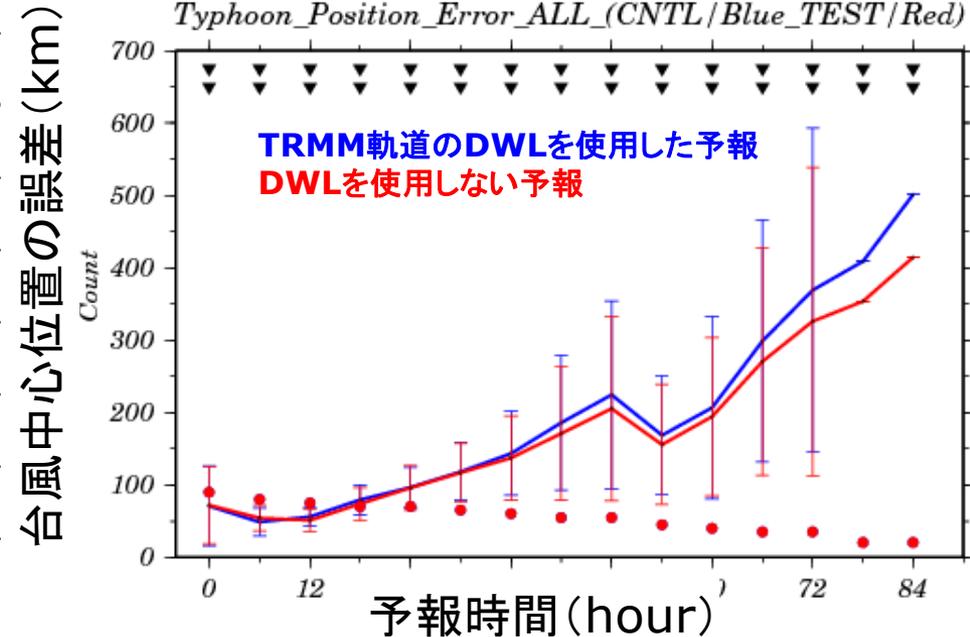
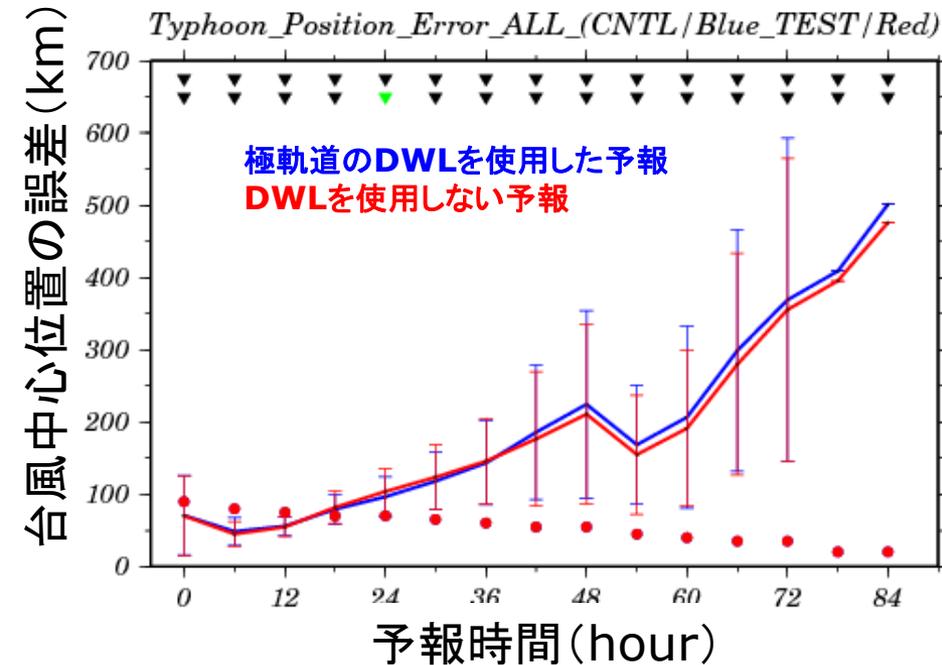
台風進路予報誤差(2010年8月の1か月分)

84時間予報までの台風中心位置の誤差

縦軸:位置誤差(km)、横軸:予報時間(hours)

極軌道のDWLを使用した予報と
DWLを使わない予報の評価

TRMM軌道のDWLを使用した予報と
DWLを使わない予報の評価



最初の疑問に戻ると

- 衛星搭載DWLは、本当に数値予報に効果があるのか？
 - 改善の効果を確認(これまでの調査では)
- あるとしたら、どのくらいあるのか(定量的な評価)？
 - 初期調査の段階なので、現時点では定量的な議論は難しい。今後調査していく
- どのようなDWLを作れば、大きな効果が得られるのか？
 - 軌道の異なる衛星による効果を調査中
 - 今後はライダーパラメータの違いも調査
- (ユーザー側は)実際にDWLが実現するのであれば、なるべく早期かつ効果的に利用したい
 - 現業データ同化システムを使って、実現前から開発を開始している。効果的な利用方法の開発について十分な時間を確保可能。

コメント

- OSSEの結果は絶対ではない!
 - 仮想的な大気場から、仮想的な観測データを作るため、これらの作り方によって結果が変わる場合がある
- 結果の解釈には注意が必要
 - 他のOSSE方法や、類似の実観測を用いたデータ同化実験結果と比較するなどして、結果の頑健性・統計的有意性を意識する必要がある
- とはいえ、OSSEは、ある観測システムの効果を客観的に調べ、利用に向けた準備を促進することを可能とする、極めて有効な手段であることは間違いない
 - DWLだけでなく他の観測システムに対しても適用可能
- 気象機関(数値予報センター)と、衛星・測器開発機関との連携がさらに重要に!

まとめ

- 信頼性の高い天気予報・防災情報を作成するために、数値予報の改善が不可欠
 - 衛星データを初めとして多様な観測データを同化
- 全球的な3次元の風観測は重要
 - 現在の風観測では、広域かつ3次元的な情報が不十分
- 衛星搭載DWL(ドップラー風ライダー)のOSSE(観測システムシミュレーション実験)を実施し、数値予報精度への効果を客観的に調査中
 - ライダーシミュレータ、データ同化システム、OSSEシステムを構築
 - 予備実験では、風の予報や台風進路予報が改善することを確認
 - 今後は、同化システムやライダーシミュレータの改善、ライダー観測設定による効果の違いを調査
- 気象・衛星・測器開発機関との連携により、効果的・効率的な観測システムの構築や観測利用を促進

