



# 地上からの水蒸気観測データ利用の 現状と課題

気象庁情報基盤部数値予報課  
村上康隆

# はじめに

- 現業数値予報システムでは多様な観測データを利用している。
- 観測が持つ情報を最大限引き出して数値予報システムの予測精度向上につなげていくことに資する開発課題について議論するべく、以下を紹介する。
  - 現業数値予報における観測データ利用の概要
  - 線状降水帯予測精度向上に向けて整備された観測データ利用開発の取組みと得られた経験

# 目次

- 現業数値予報における観測データの利用
  - 用途
  - 利用状況
  - データ同化
  - 求められる要件
- 線状降水帯予測精度向上に向けた観測データ利用開発
  - 背景
  - 船舶GNSS,地上マイクロ波放射計,アメダス湿度,レーダー
- まとめ

# 数値予報における観測データの利用

- 初期値作成（データ同化） ← 今日のお話
  - 現実の大気状態を捉えた観測データを用いて精度のよい初期値を作成する
  - 直接観測、地上リモセン、衛星観測等
- 境界値作成
  - 海面水温、海氷、積雪、地面アルベド等
- モデルの検証

# 数値予報で利用している観測

**高層観測**  
(写真: 気象庁HP)



**地上観測**  
(写真: 仙台管区HP)



**ブイ観測**  
(写真: 気象庁HP)



**航空機観測**  
(写真: 気象庁職員提供)



**海上観測** (写真: 気象庁HP)



**直接観測**

**ウインドプロファイラ**  
(写真: 気象庁HP)



**気象レーダー**  
(写真: 中部航空地方気象台HP)



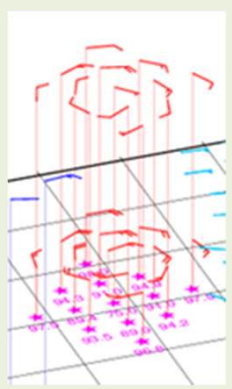
**GNSS受信機**  
(写真: 高層気象台HP)



**地上マイクロ波放射計**  
(写真: 気象庁職員提供)



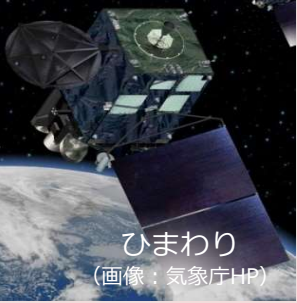
**地上リモートセンシング**




**台風ボーガス  
疑似観測**

**静止軌道衛星**


**ひまわり**  
(画像: 気象庁HP)



**GOES**  
(image: ©NOAA)



**METEOSAT**  
(image: ©ESA)



**低軌道衛星**

**NOAA**  
(image: ©NOAA)



**Metop**  
(image: ©ESA)



**GPM主衛星**  
(image: ©JAXA)



**GCOM-W1「しずく」**  
(image: ©JAXA)



**Suomi NPP**  
(image: ©NOAA)



**DMSP**  
(image: ©NASA)



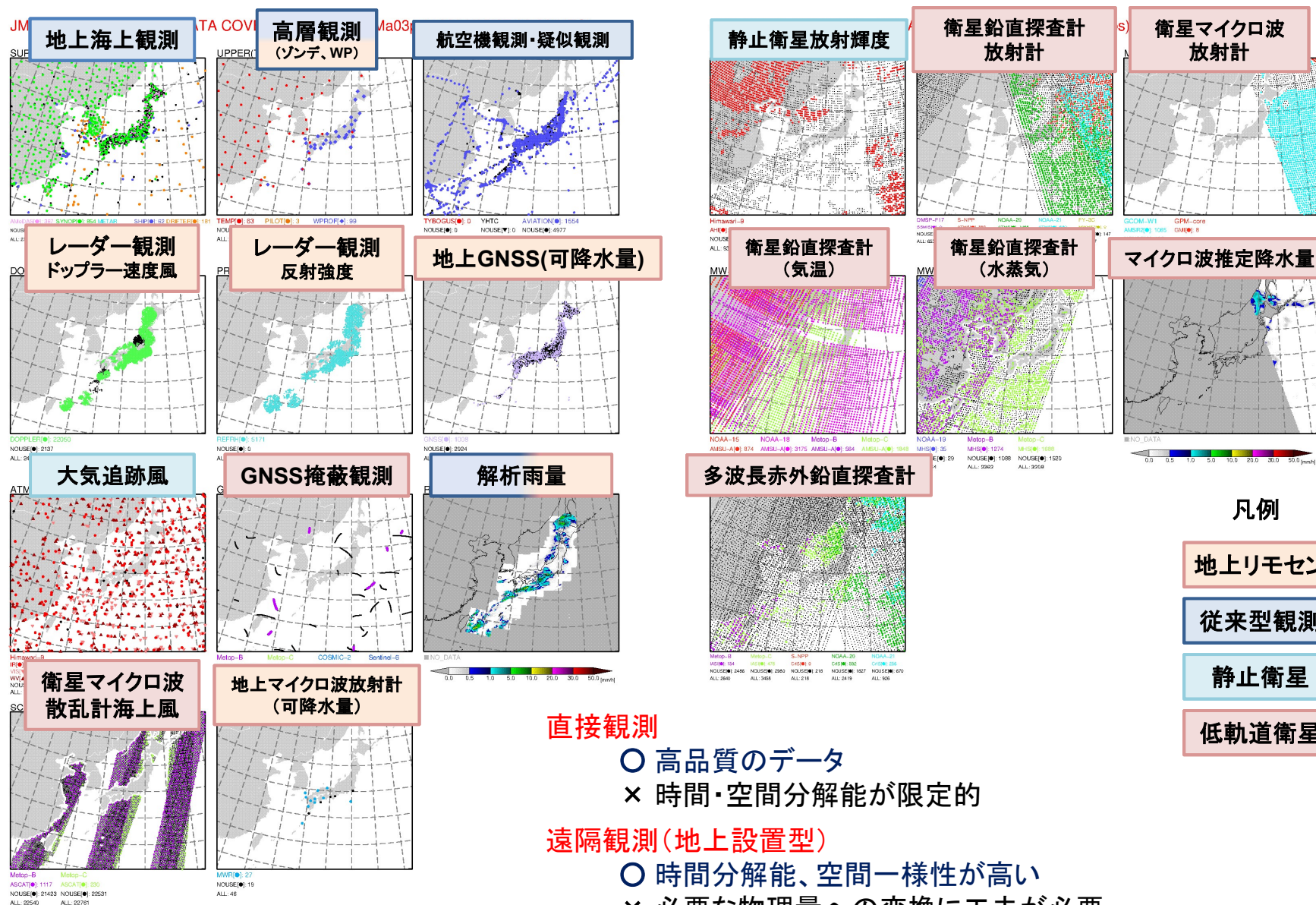
**FY-3** (image: ©CMA)



**TerraSAR-X  
TanDEM-X**  
(image: ©EADS Astrium.)

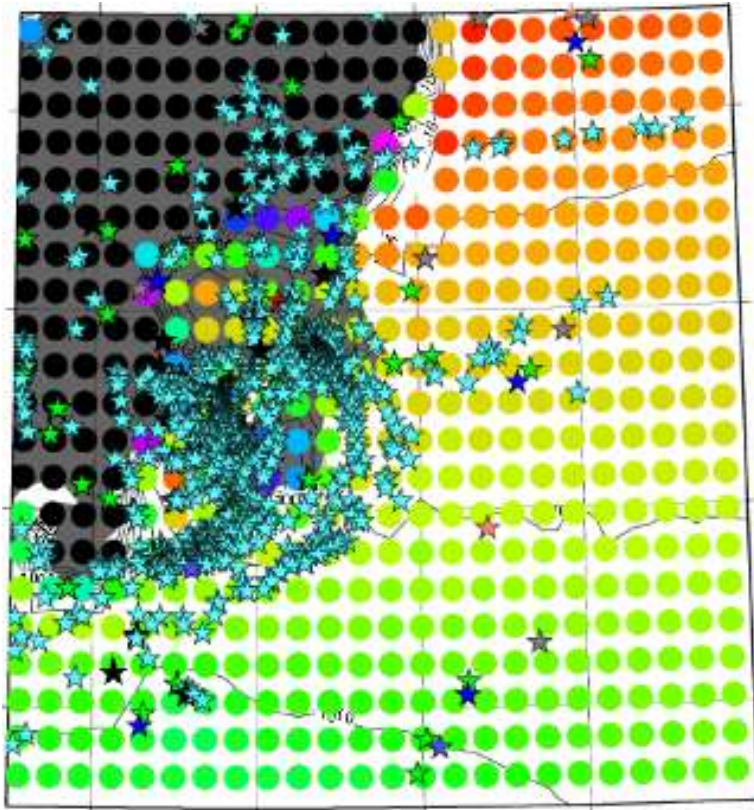


# 観測データ分布 (メソ解析)



# データ同化とは

第一推定値(前回の数値予報の値)と観測値及びそれらの誤差情報をもとに、第一推定値を観測値で修正して解析値(最も確からしい値)を作成する処理



20kmGSMの格子点値 (○) と  
入電した観測データ (☆)

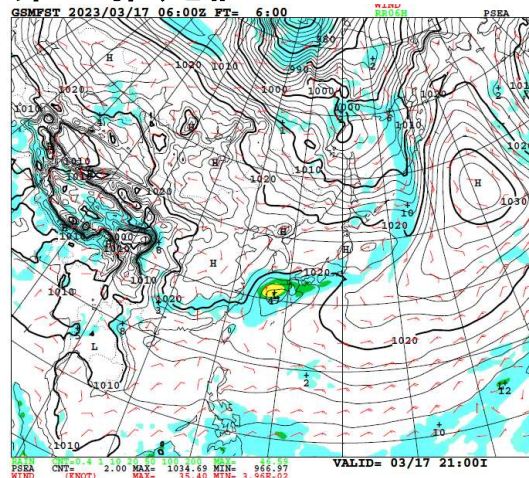
観測データと第一推定値(数値予報結果)の特徴

	観測値	第一推定値
◎	基本的には現実を反映している	全格子・全要素のデータが利用可能
△	観測誤差を内包	予報誤差を内包
×	全格子・全要素のデータがない	観測値と比べると、現実に沿っているか定かでない

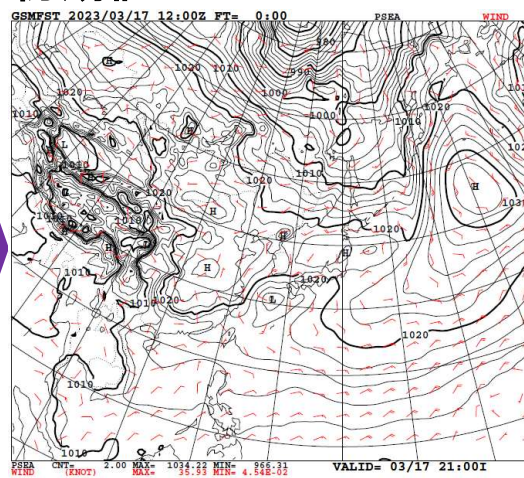
- 第一推定値は全格子点・全要素の情報を持っている。  
⇒「たたき台」として利用する。
- 観測値は現実を反映している。  
⇒観測値を利用してたたき台を「修正」する。

# データ同化による初期値の作成

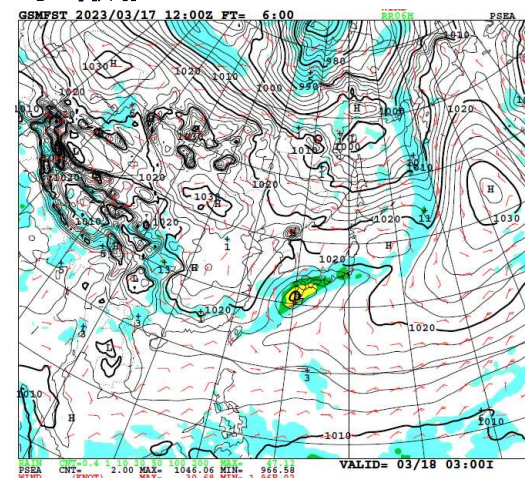
## 第一推定値



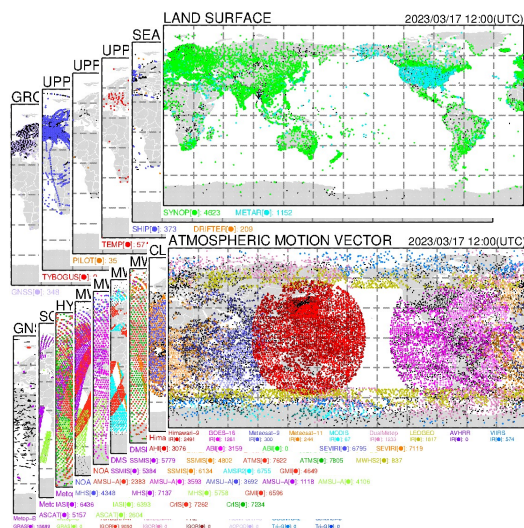
## 初期値



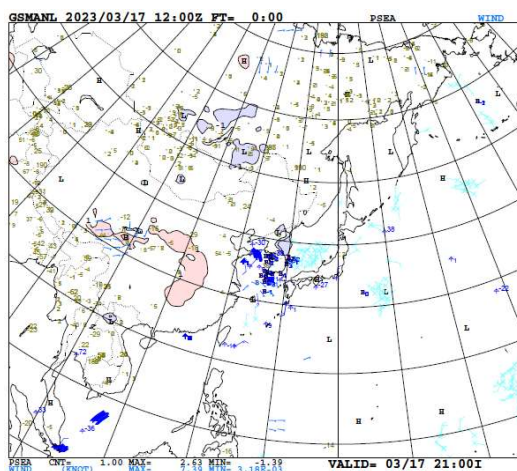
## 予報値



## 観測データ



## 修正量(インクリメント)



データ同化(客観解析)

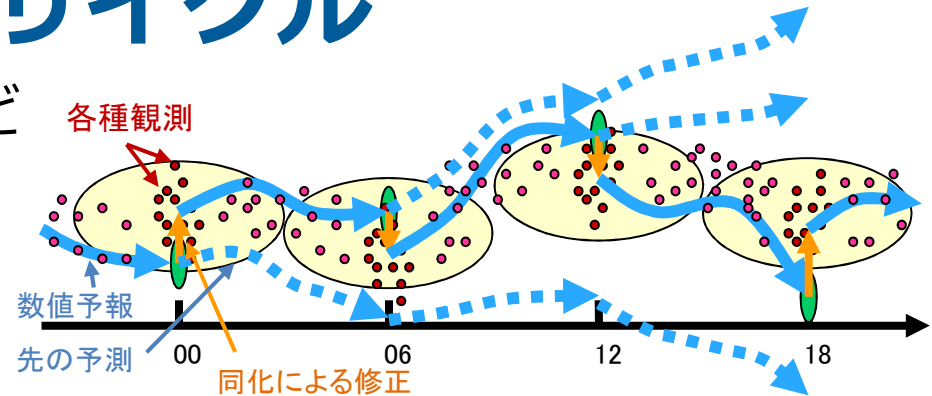
予測計算  
(数値予報モデルの実行)



# 解析予報サイクル

- 数値予報では予測時間が長いほど誤差が増大する。

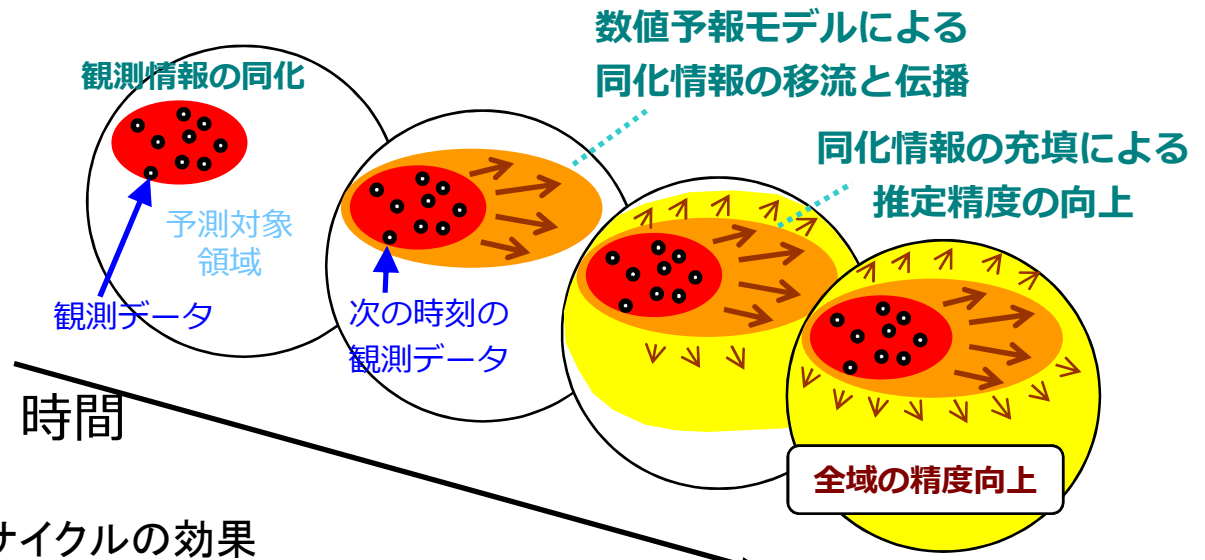
- 短時間の予測とデータ同化を繰り返して予測精度を保つ。
- 一度で修正できない大きな誤差は次のデータ同化で修正。



解析予報サイクルの仕組み

- 解析と予測の繰り返しを「解析予報サイクル」と呼ぶ。
  - サイクルを繰り返すことで、海上などの観測が少ない領域でも解析精度の向上が期待できる。

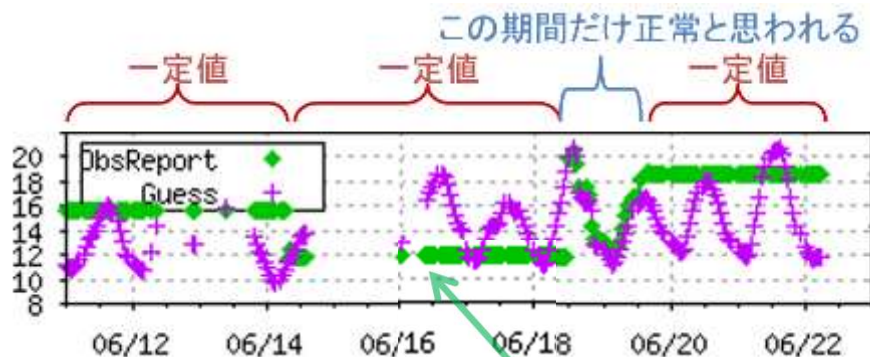
観測の数値予報への影響は複雑



解析予報サイクルの効果

# 品質管理の重要性

## 誤データの例 船舶からの気温データ



観測データには、誤差が含まれる。  
測定誤差、代表性誤差、変換誤差など。

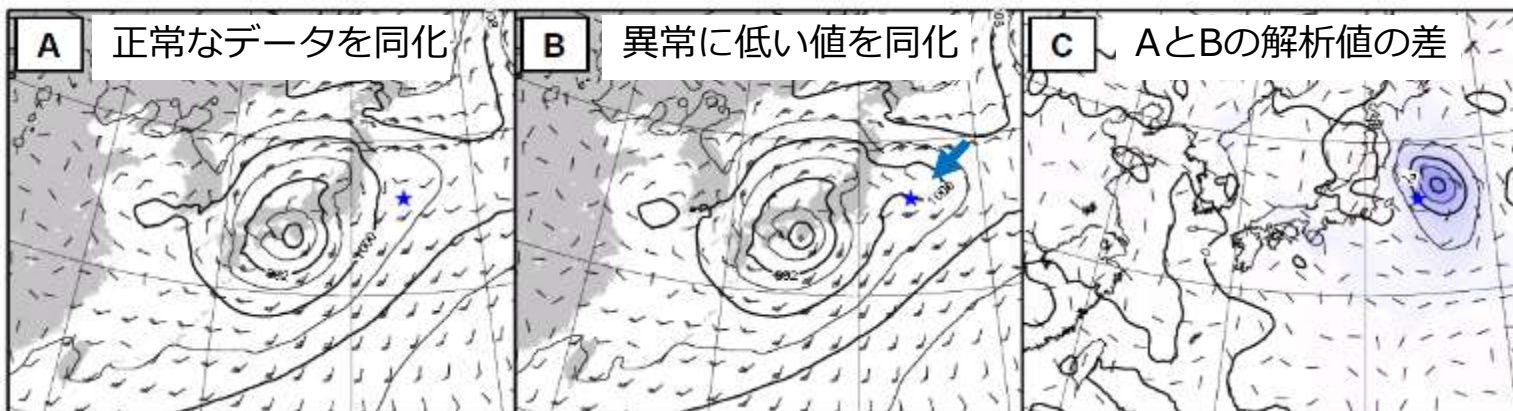
誤データの混入は、

- ・ 予測精度の低下
- ・ データ同化処理の異常終了の原因となりうる。

日変化が現れておらず、一定値の通報が続く。

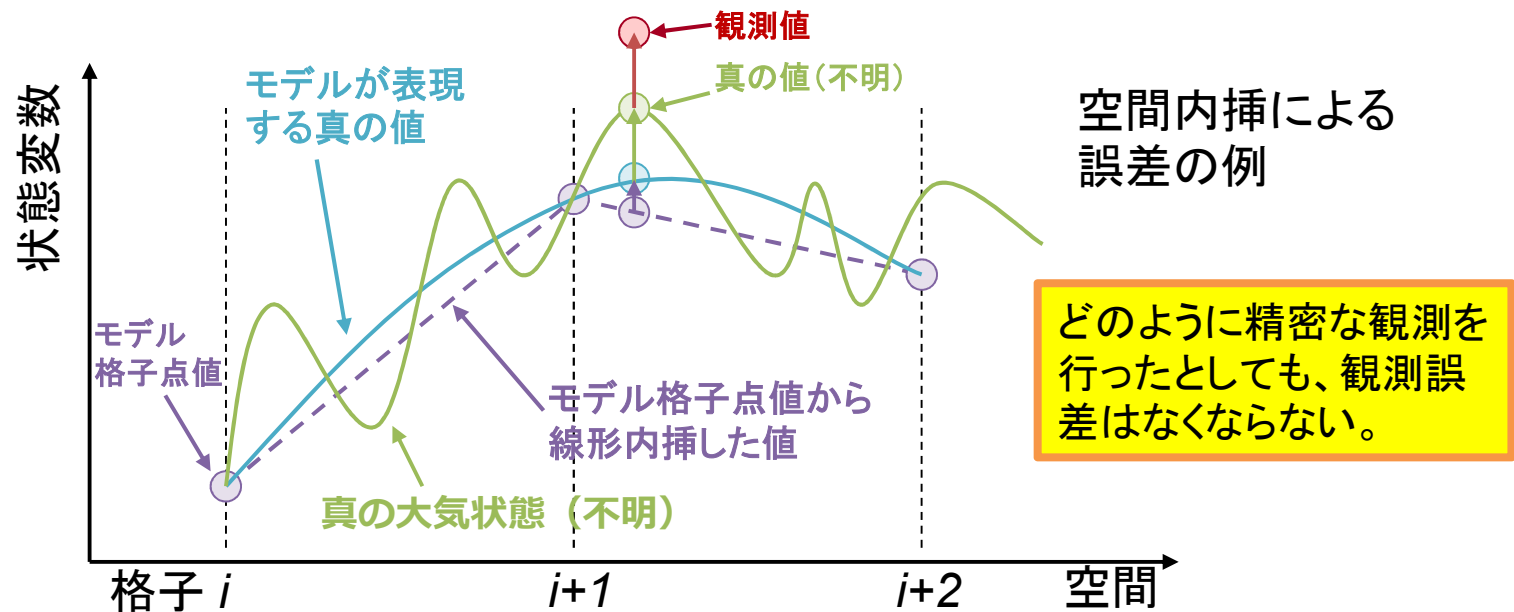
## 正常な観測データと異常な観測データが同化された時の違いの例

海面気圧  
解析値  
(等値線は  
4hPaごと)



# 観測誤差

- 観測誤差とは
  - 測定誤差： 測器等による誤差
    - 観測そのものの誤差（一般的な観測誤差）
  - 代表性誤差： 第一推定値の空間的な離散化による誤差
    - 格子で表現されないスケールの現象が誤差として扱われる。
  - 変換誤差： 格子点値を観測相当値に変換する観測演算子による誤差
    - 観測の要素や位置に合うよう第一推定値を変換する時に誤差が生じる。



# 主な観測データの処理

- 同化に適さないデータの除去
  - 低品質、観測・モデルの乖離が大きいデータ等
    - 第一推定値・周囲の観測データとの比較
    - 測器・領域・気象条件
- バイアス（系統誤差）補正
  - 観測・モデルの系統誤差を補正
- 観測誤差設定
  - 観測誤差共分散行列の対角成分
- 間引き・平滑化
  - 観測・モデルの代表性の考慮、観測誤差相関の軽減

**現業数値予報システムでの利用には、限られた計算資源・時間で実行でき、時刻や季節、現象等を問わず安定した予測精度が得られることが必要**

# 目次

- 現業数値予報における観測データの利用
  - 用途
  - 利用状況
  - データ同化
  - 求められる要件
- 線状降水帯予測精度向上に向けた観測データ利用開発
  - 背景
  - 船舶GNSS,地上マイクロ波放射計,アメダス湿度,レーダー
- まとめ

# 線状降水帯予測精度向上に向けた観測・予測の強化

## 【観測・予測の強化】令和6年度の取組状況

水蒸気観測等の強化、強化した気象庁スーパーコンピュータや「富岳」を活用した予測技術の開発等を計画通り着実に進めている。これらの成果を順次、予測精度向上、段階的な防災気象情報の改善、住民の早期避難、地域の防災対応につなげる。

### 観測の強化 観測の整備の強化及び新規観測データを活用した監視・予測の強化

アメダス湿度

#### 「アメダスへの湿度観測追加」

- 令和5年度までに433地点に整備済み。
- 令和6年度は105地点に整備予定。

#### 「気象レーダーの更新強化」

- 令和5年度までに全20地点中14地点で二重偏波レーダーに更新済み。
- 函館は令和7年度運用開始に向け機器の製作中。石垣島は令和6～8年にかけて更新予定。

#### 「洋上の水蒸気等の観測の強化」

- 機動的な気象観測を担う海洋気象観測船「凌風丸」の更新（令和6年3月）。
- 気象庁観測船2隻、海上保安庁測量船4隻、大型の民間船舶10隻によるGNSS水蒸気観測を継続。

#### 「地上マイクロ波放射計の整備」

- 令和4年度までに西日本太平洋南側沿岸域の17箇所に設置完了。

#### 「次期静止気象衛星」

- 令和5年3月に整備に着手、令和11年度の運用開始を目指す。

気象レーダー



海洋気象観測船「凌風丸」



次期静止気象衛星



地上マイクロ波放射計

### 水蒸気等の観測データ

### 予測の強化 スーパーコンピュータの利用及び数値予報モデルの高度化

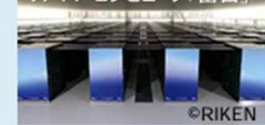
#### 「スーパーコンピュータ『富岳』を活用した開発」

- 開発中の数値予報モデルによる日本全域を対象としたリアルタイムシミュレーション実験を6月より実施中。
- 数値予報モデルの精度の改善に関する大学や研究機関との連携を進める

#### 「気象庁スーパーコンピュータシステムの利用、数値予報モデル改良による予測精度向上」

- 予報時間を10時間から18時間に延長した水平解像度2kmの数値予報モデル（局地モデル）の運用開始（令和6年3月）。
- 令和8年3月に予定している局地モデルの高解像度化（解像度2km→1km）及び局地アンサンブル予報システムの運用開始に向け、開発を継続。

スーパーコンピュータ「富岳」



©RIKEN



気象庁スーパーコンピュータ



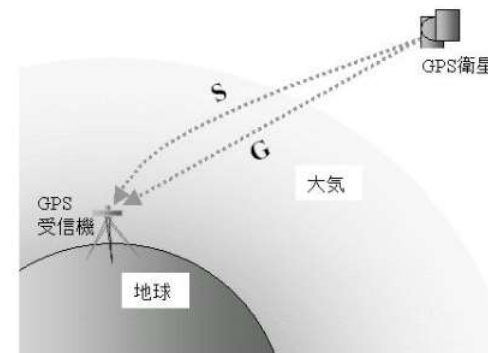
線状降水帯予測スーパーコンピュータ

二重偏波レーダー

線状降水帯予測精度向上ワーキンググループ（第8回）資料より（一部改変）

# 船舶GNSS

GNSS衛星が発信する電波を受信する。電波は大気中で減速・屈折するため、真空中を通過するときよりも遅れて到達する（大気遅延量）。



<https://www.metsoc.jp/kyoikuhukyu/resume/2011/Shoji.pdf>



天頂大気遅延量から求めた受信機上空の積算水蒸気量(可降水量)を同化メソ(2021/8～)、局地(2023/3～)

気象庁観測船2隻、海上保安庁測量船4隻、大型の民間船舶10隻によるGNSS水蒸気観測(令和6年度)

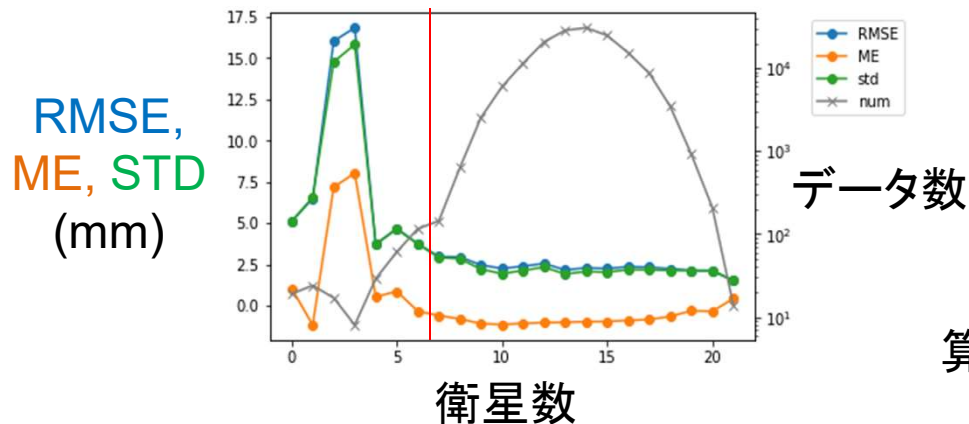
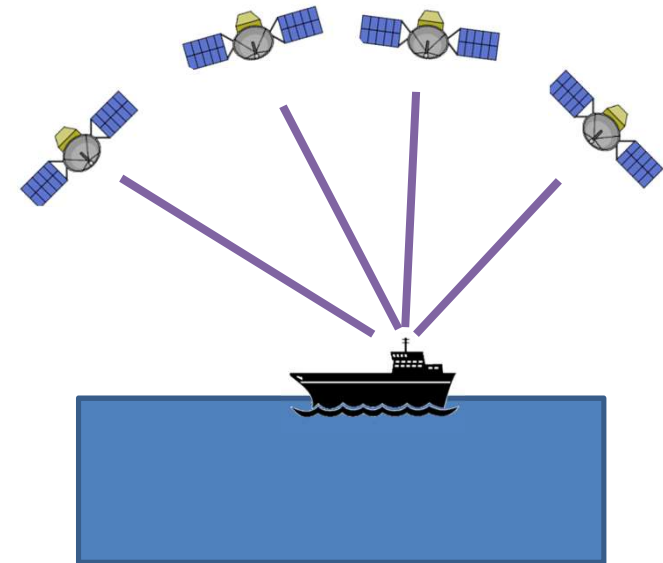
## 海洋気象観測船「凌風丸」



# 船舶GNSSの品質管理の例

- 局地解析に船舶GNSSを導入する際もメソ解析にも適用
- GNSS可降水量（天頂大気遅延量）の算出には、複数のGNSS衛星を利用。GNSS解析に用いる衛星数は衛星と受信機の位置関係によって変動。
- GNSS解析に用いる衛星数が少ない場合に解析精度が低下する傾向。
- 観測-第一推定値（O-B）統計結果を踏まえ、通報対象時刻における衛星数が7未満のデータは利用しないことに。

GNSS観測のイメージ

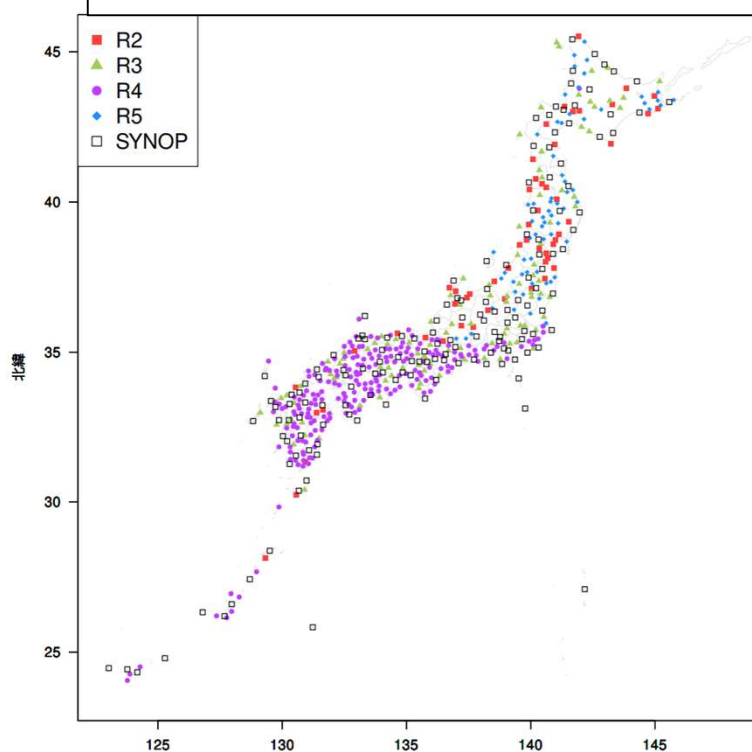


GNSS解析に用いた衛星数と  
算出された可降水量のO-B統計



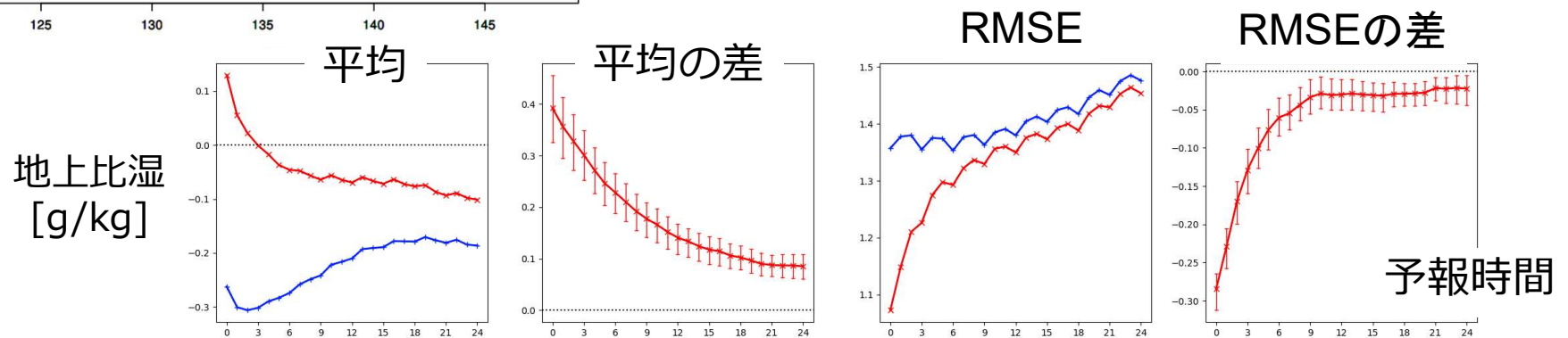
# アメダス湿度計

湿度計整備状況(R6.3時点)



- R2年度以降、地域気象観測所（アメダス）の観測機器に湿度計を順次整備中。
  - 433地点に設置済（R6.3時点）
  - 気象官署・特別地域気象観測所（SYNOP通報地点：約150か所）とあわせ、より多くの地上付近の湿度観測。
- メソ・局地数値では、R5.3よりアメダス湿度計の利用を開始。地上湿度は湿潤化。

メソ数値予報システムへのインパクト  
地上湿度観測（アメダス湿度+SYNOP）あり、なし



# 船舶GNSS・アメダス湿度計等のインパクト

## メソモデル、局地モデル、メソアンサンブル予報システムの改良

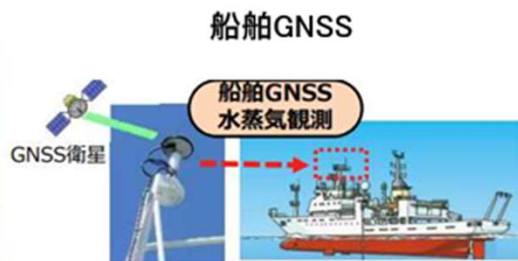
### (1) 観測データの利用法改良、新規利用開始

- ・アメダス湿度(メソ・局地: 利用開始)
- ・船舶搭載GNSS観測装置による水蒸気観測データ(可降水量)(メソ: 利用法改良、局地: 利用開始)
- ・欧州の極軌道衛星に搭載されたマイクロ波散乱計による海上風データ(局地: 利用開始)

降水予測の改善を達成  
- 観測データの高度利用など、今後の線状降水帯予測精度向上に向けた更なる開発にもつながる成果 -

### ●改良項目の例

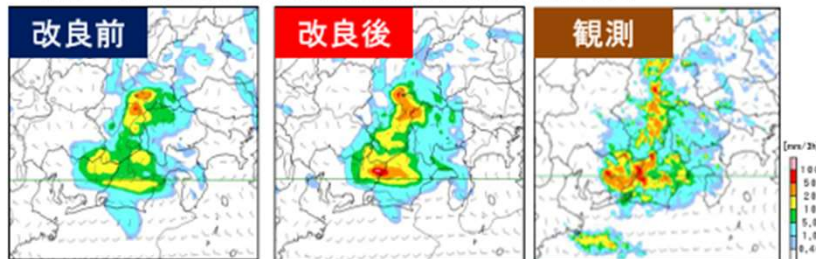
- ・強化した水蒸気観測データの利用拡充(メソ、局地モデル)  
アメダス湿度計



地上付近および洋上の水蒸気量に関する、より多くの情報を数値予報で利用

### ●改良の効果

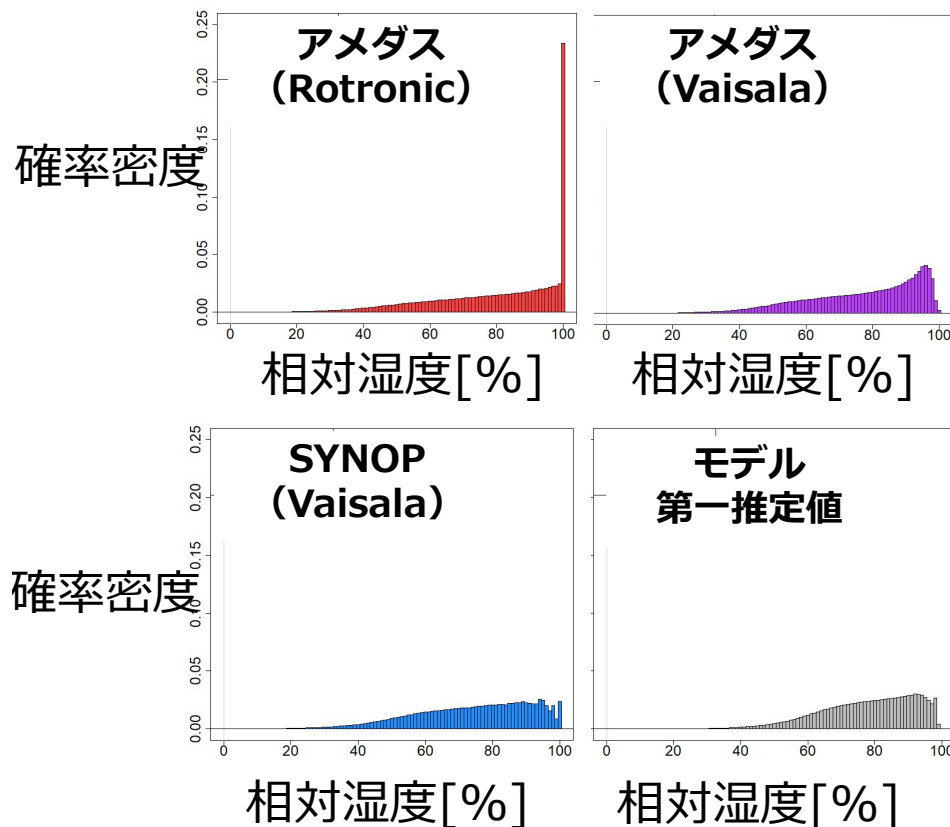
- ・事例: 夏季不安定降水の予測改善(メソモデル)  
令和3年7月13日21時を対象とした6時間予測の3時間降水量



アメダス湿度計データ利用などの効果により  
不安定降水の予測が改善

# 湿度計の観測特性

相対湿度の頻度分布

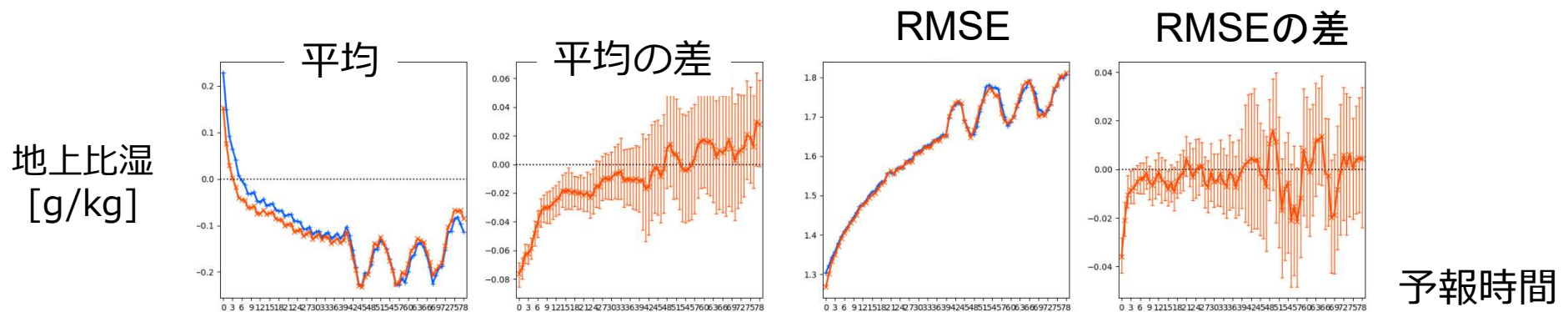


- 利用中の地上湿度データは電気式湿度計（静電容量式）にて観測しているが、測器の型式は複数存在。
  - Rotronic製 MP102(アメダス)
    - 加温なし
    - 相対湿度100%にピーク
  - Vaisala製 HMT155 (アメダス)
    - 加温あり
    - 相対湿度95%付近にピーク
  - Vaisala製 HMT333 (SYNOP)
    - 加温なし
- 高湿度域で測器毎のデータ特性が異なる。

# 観測特性の環境場依存性への対処

- アメダス湿度計は高湿度域で測器毎にデータ特性が異なるが、現在の設定は環境場によらず一定
  - アメダス相対湿度は地上比湿に変換して同化
  - メソ解析における観測誤差は0.7g/kg (RH3.6%@1013hPa,25°C)
- 高湿度域(>RH90%)にて解析値の観測への寄せ方を穏やかになるようにする。RH100%の時に観測誤差が背景（モデル）誤差の2倍程度となるように観測誤差がRH100%の時にRH90%の時の3倍となるように設定。
  - 数値予報モデルの湿度表現や水蒸気の空間変動をより考慮していくことが今後の課題。

メソ数値予報システムへのインパクト  
観測誤差変更前、変更後



# 地上マイクロ波放射計(MWR)

## 【背景】

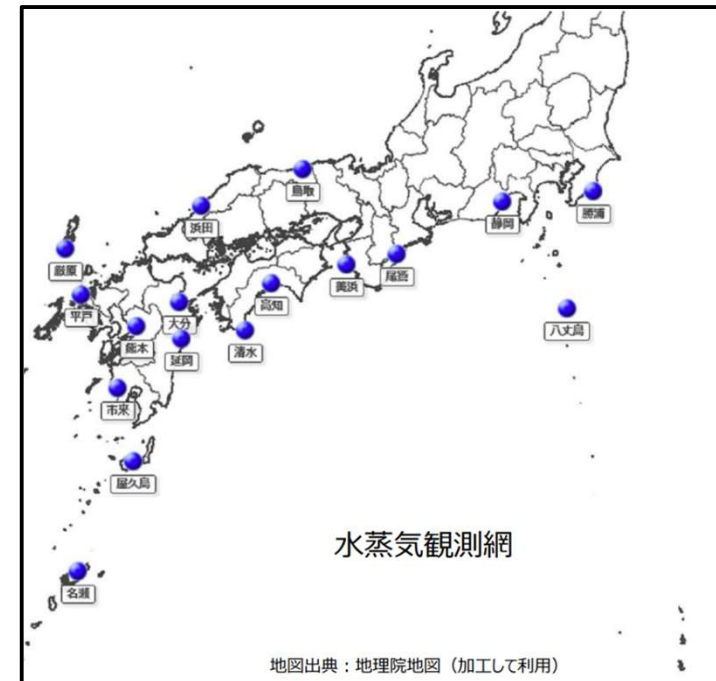
線状降水帯予測精度の向上に向けた観測強化の一環として、  
令和4年度に西日本を中心に設置。

## 【測器の概要】

大気中の水蒸気・雲水等が射出するマイクロ波(輝度温度)を測定。  
→ 大気下層の水蒸気情報が得られる。

## 【数値予報システムでの利用】

輝度温度から算出した可降水量をメソ・局地解析にて同化利用。  
→ 対流圏下層の水蒸気場の精度向上

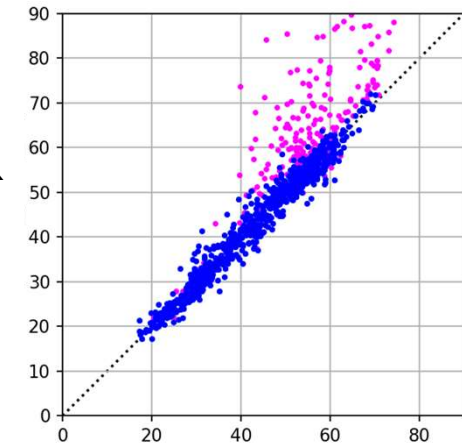


線状降水帯予測精度向上ワーキンググループ(第6回会合)資料より引用

# 地上MWRの品質管理

- 地上MWRが観測する波長の電磁波は降水の影響を受ける。
- 地上MWR付随の感雨計に加え、レーダー観測等も用い、観測点付近にて降水が観測された場合は利用しない（利用、リジェクト）。

可降水量の比較例(平戸)  
(地上MWR vs 地上GNSS)



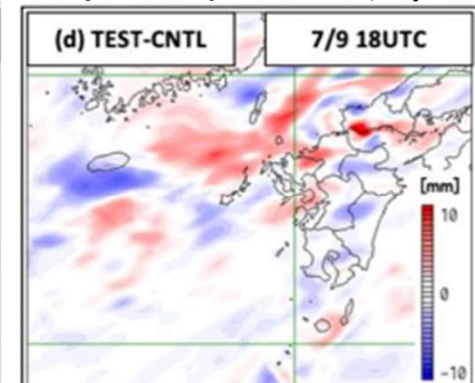
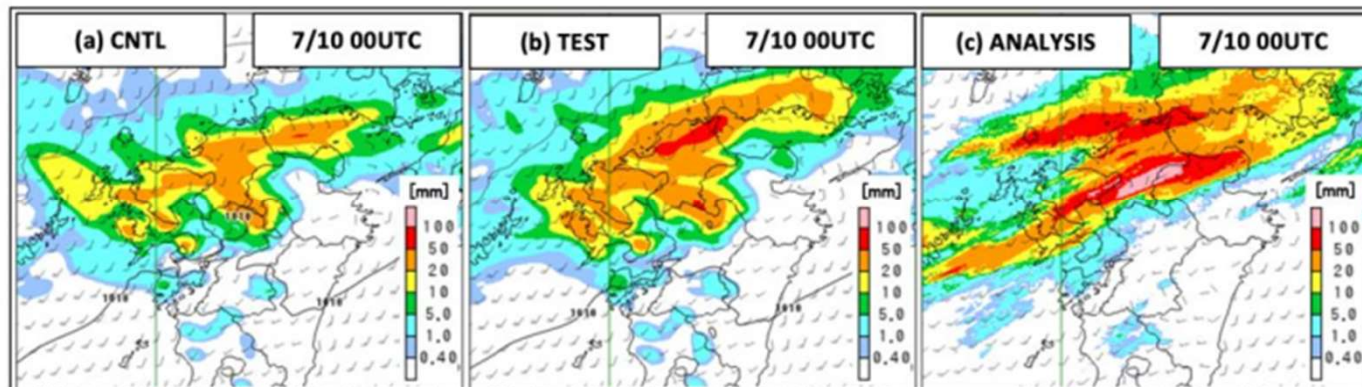
地上MWR  
(mm)

地上GNSS (mm)

## 改善事例

- 地上MWRが解析予報サイクルを通じて水蒸気場を修正、降雨予測が改善
- 2023年7月10日9時を対象とした  
メソ数値予報システムにおける6時間予測の3時間降水量（カラー）

可降水量の差分  
(MWR有-MWR無)

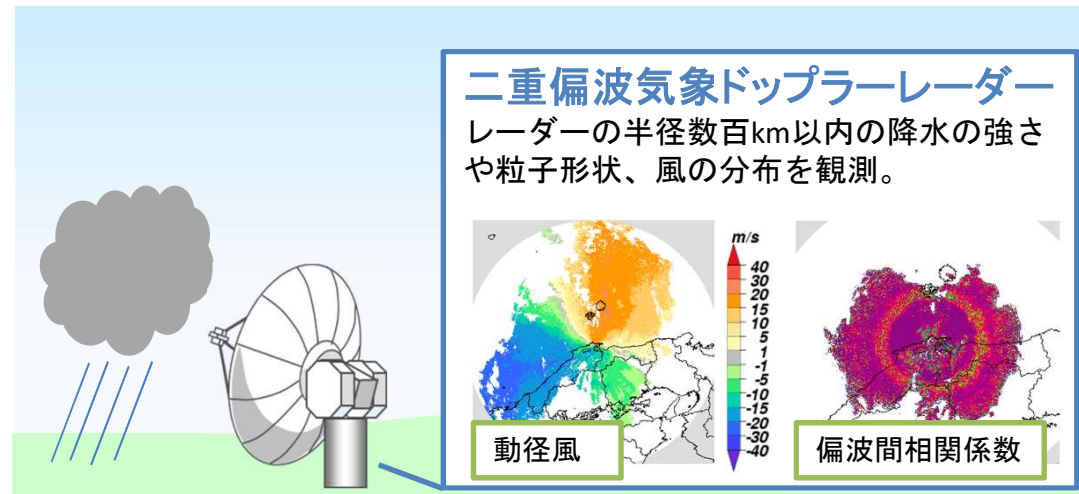


# 二重偏波ドップラー気象レーダー

- 全国20か所に設置されている気象庁のレーダーは二重偏波化が進められている。
- 二重偏波化により、非降水エコー（シークラッタなど）の除去や降雨減衰補正の精度が向上している。
- 数値予報システムでは精度が向上したレーダーデータを従前と同じ手法で利用しつつ、「富岳」を活用して利用手法の高度化に取り組んでいる。

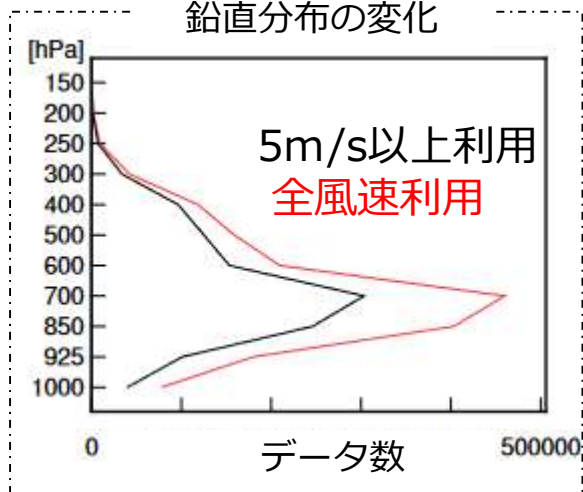


気象庁HPより



# 低風速動径風の利用

利用データ数の鉛直分布の変化

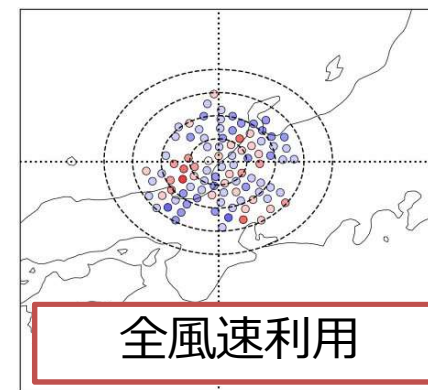
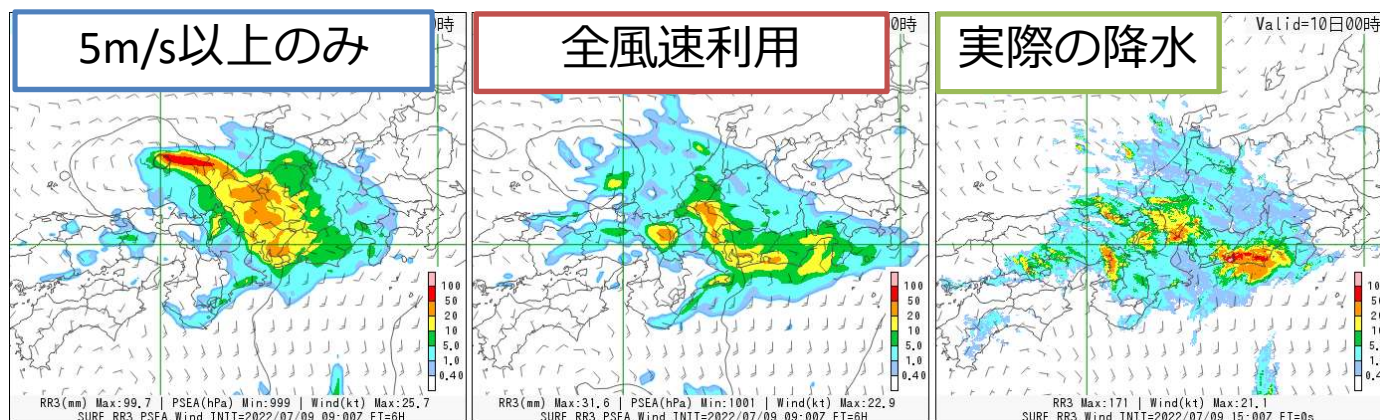


- 非降水エコーによる動径風データの利用を避けるため、現時点では動径風速が5m/s以上のデータのみ利用。
- 二重偏波化により非降水エコーの判性能が向上することから、利用する動径風の風速域を拡大するための利用手法の開発を防災科学技術研究所と実施中。
- 低風速データを利用することで、下層の風データが増加する。

## 改善事例

風速を弱める修正により、実況に近い降水分布を予測。  
メソ数値予報システムにおける6時間予測の3時間降水量（カラー）

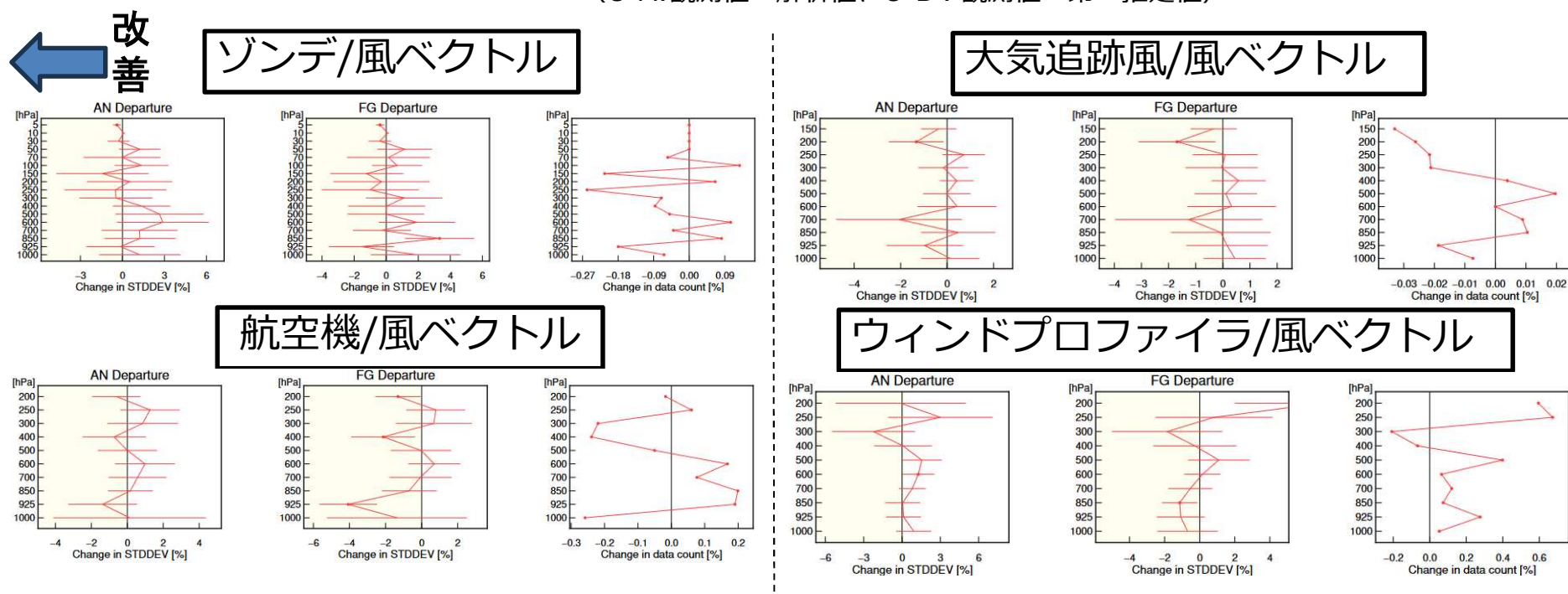
利用データのO-B分布  
(福井, 仰角0.7度)  
観測 > 第一推定値、  
観測 < モデル





# 低風速動径風データの利用による 第一推定値の他観測との整合性の変化

左：O-A標準偏差の変化率、中：O-B標準偏差の変化率、右：データ数の変化率  
(O-A:観測値-解析値、O-B:観測値-第一推定値)



700hPa以下は航空機とウィンドプロファイラでO-B標準偏差に減少（改善）傾向がみられる。一方で、ゾンデは850hPaのO-B標準偏差に増加（改悪）傾向がみられる。

**低風速データのインパクトをより引き出すべく、  
データ数の多い下層データの品質管理手法の高度化を実施中**

# まとめ

- 現業数値予報における観測データ利用の要件
  - 多様な観測データを限られた計算資源・時間にて利用
  - 時刻・季節・現象等を問わず安定した精度を確保する必要
- 線状降水帯予測精度向上に向けて新規観測データの利用開発を通して（改めて）得た経験
  - 観測手法に応じた品質管理。気象要素が同一でも観測手法が異なれば品質管理手法は同じではない。
  - 観測データの特性は測器型式・観測環境によって異なる。これを的確に反映させることも解析・予測精度向上に重要。
    - 特にリモートセンシングデータの特性は処理アルゴリズムに依存するので、アルゴリズムへの理解が必要。
  - 観測と数値予報モデルが表すものは異なる。実際の現象を理解しつつデータ利用手法を検討することが必要。
  - 観測データの解析・予測へのインパクトの理解には数値予報全般への理解が必要。