



# 最新の気象予測 ～その理論と技術～

北海道大学地球惑星科学集中講義  
札幌管区気象台 室井ちあし

# 集中講義の内容

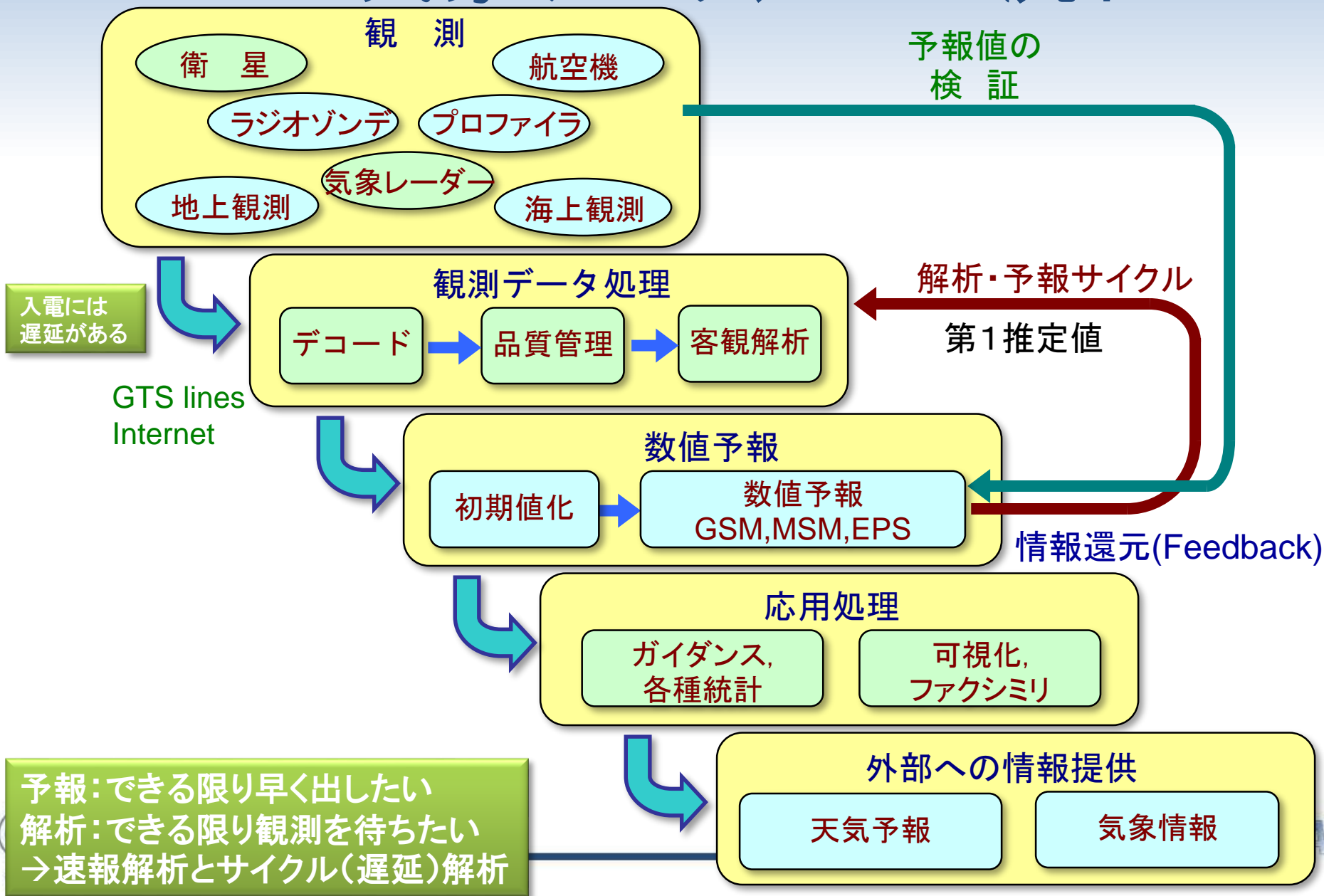
- 1日目
  - 気象予測の基礎
  - 気象とコンピュータ
  - 数値予報モデル
- 2日目
  - 数値予報モデル(続)
  - データ同化
  - アンサンブル予報
  - (セミナー) 北海道の気象災害リスクと防災気象情報



# データ同化

北海道大学地球惑星科学集中講義  
札幌管区気象台 室井ちあし

# 気象データ処理の流れ



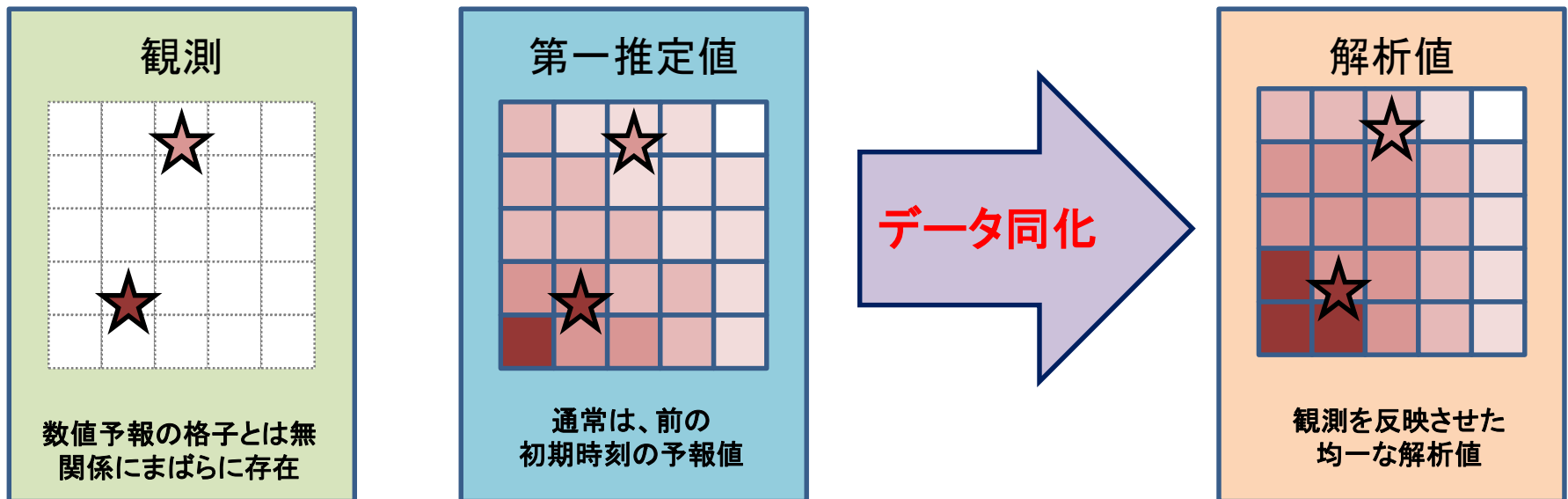
# データ同化とは

# 解析(データ同化)とは

- 初期値(現在の天気の状態)が分からなければ予報はできない
- 初期値を精度よく再現することが予報精度の向上に(決定的に)重要
- 初期値を作成するには圧倒的に観測データが少なく、地域的に偏在
- そこで、数値予報を観測データで修正して初期値を作成
- 正式には「客観解析」あるいは「データ同化」と言う。(最近は「データ同化」が一般的)

# データ同化の概要

- 観測値 + 予報値（第一推定値） → 解析値
  - 全球解析及びメソ解析では4次元変分法を採用
  - 局地解析及び毎時大気解析では3次元変分法を採用



# データ同化

- 観測値
  - × : 全格子・全要素のデータがそろっていない
  - △ : 観測誤差を内包している
    - ○ : が、基本的には現実を反映している
- 第一推定値
  - ○ : 全格子・全要素データがそろっている
  - △ : 予報誤差を内包している
    - × : 現実に沿っているか定かでない
- 双方のいい部分を合わせる
  - 第一推定値を観測値で修正(同化)する
- → データ同化



# 同化される観測データの種類と要素

- 直接観測
  - 地上観測、船、ブイ：地上気圧
  - ゾンデ：風、気温、相対湿度(←湿数から変換)
  - 航空機：風、気温(メソ)
- 地上リモートセンシング
  - ウィンドプロファイラ：風
  - ドップラーレーダー：風(メソ)
  - 気象レーダー(解析雨量)：降水量(メソ)
- 衛星
  - 大気移動風AMV：風
  - サウンダ(鉛直探査計)：放射輝度温度(全球)、気温(メソ)
  - マイクロ波放射計：降水強度(メソ)、可降水量(メソ)
  - マイクロ波散乱計：海上風
- 人工的なデータ
  - 観測型台風ボーガス：風、海面気圧
  - PAOB(オーストラリア気象局作成のボーガス)：海面気圧

全球：全球解析のみ  
メソ：メソ解析のみ

# 客観解析で使えるデータ#1 観測値



高層観測



地上観測



ブイ観測



航空機観測



海上観測  
直接観測



ウィンドプロファイラ

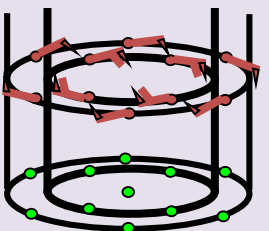


ドップラ  
レーダー




GPS

リモートセンシング  
遠隔観測

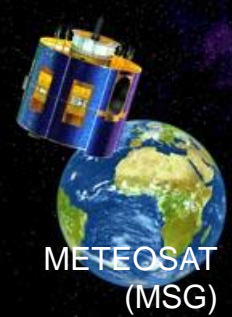


台風ボーガス

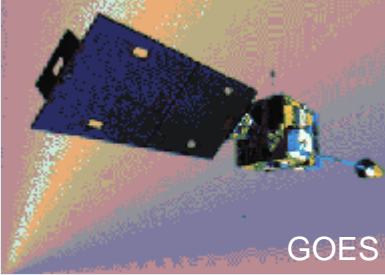
疑似観測



MTSAT




METEOSAT  
(MSG)




GOES

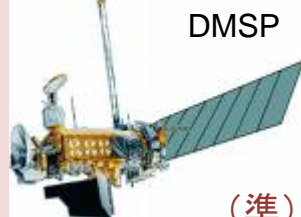
静止軌道衛星



NOAA




MetOP




DMSM

(準)現業衛星

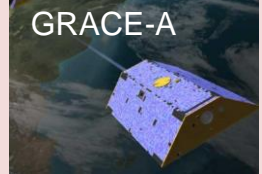
---



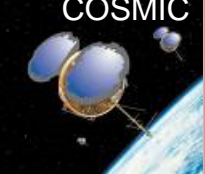
Aqua



TRMM



GRACE-A



COSMIC

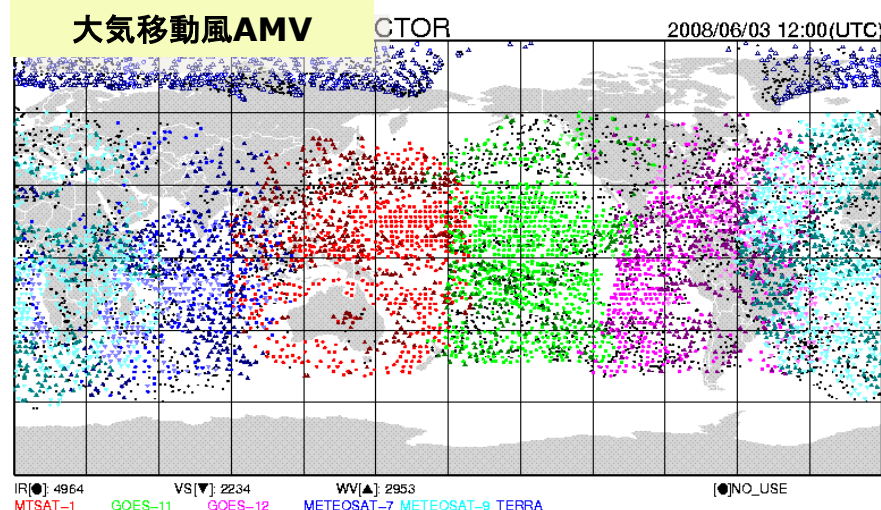
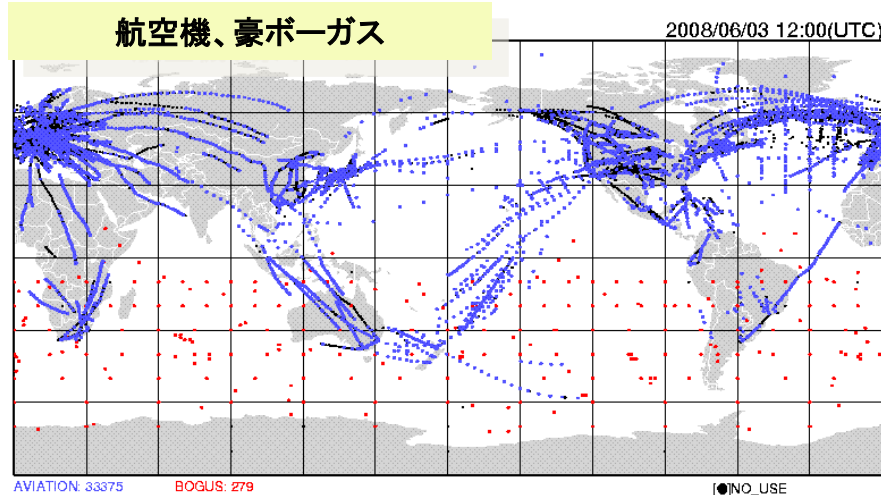
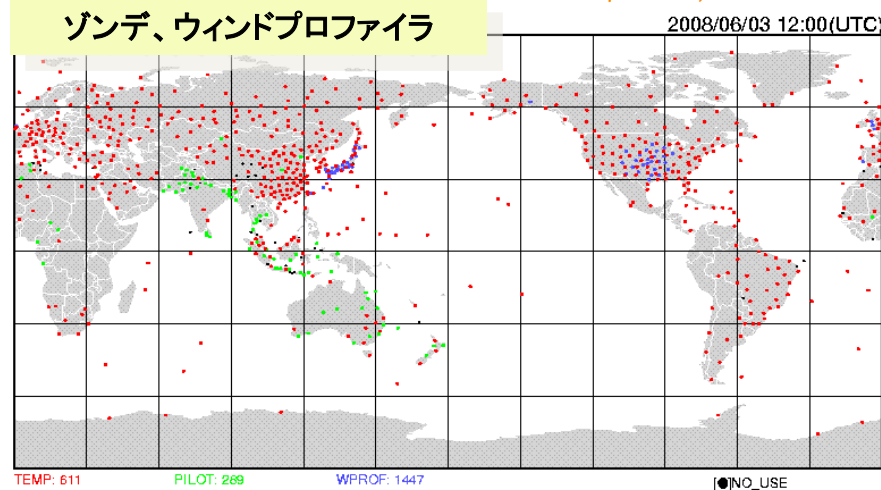
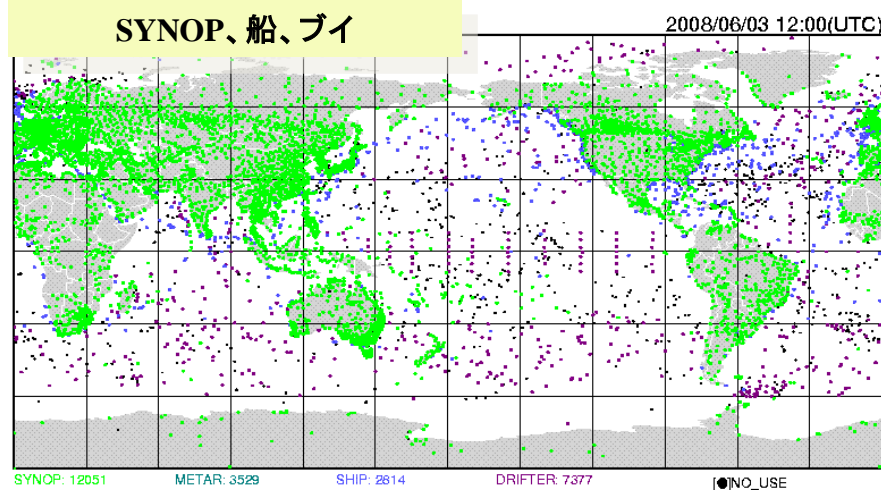
地球観測衛星

GPSRO衛星

低軌道衛星

# 観測データの分布例(全球)(1)

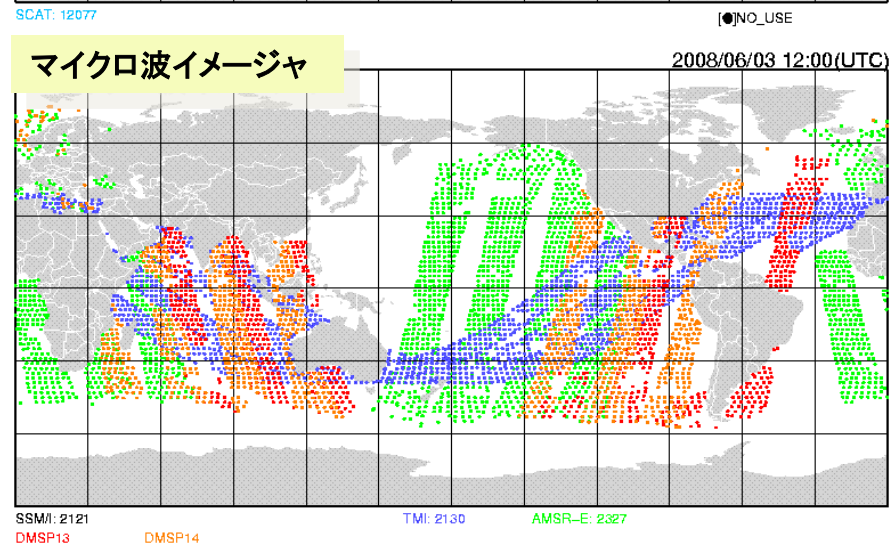
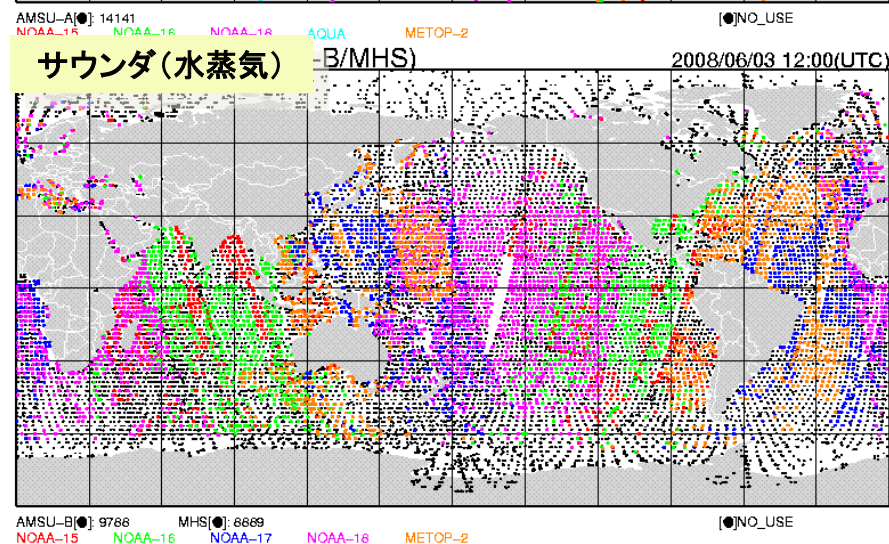
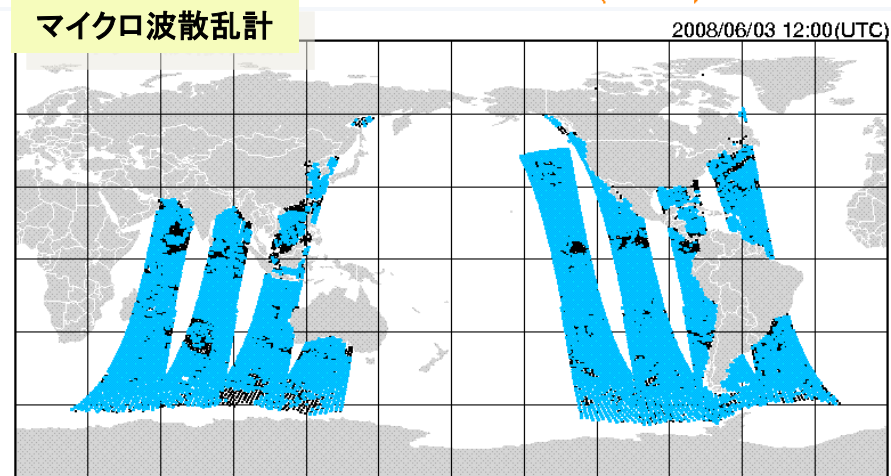
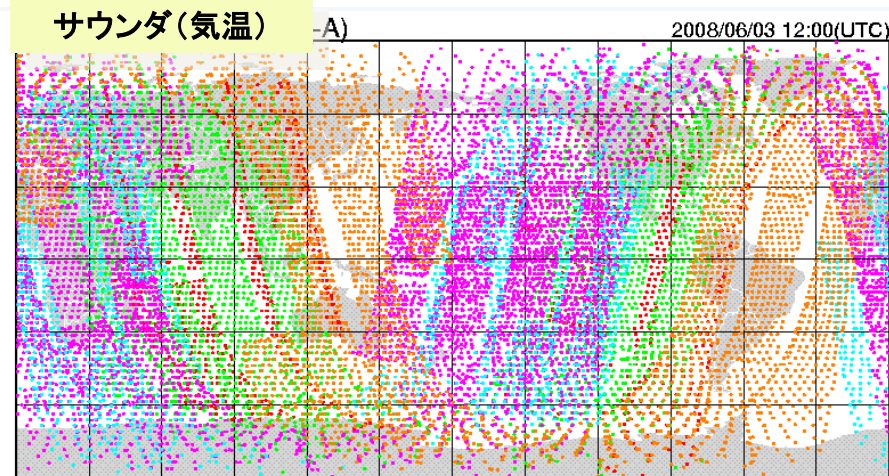
JMA GLOBAL ANALYSIS – DATA COVERAGE MAP (Da12ps): 2008/06/03 12:00(UTC)





# 観測データの分布例(全球)(2)

JMA GLOBAL ANALYSIS – DATA COVERAGE MAP (Da12ps): 2008/06/03 12:00(UTC)

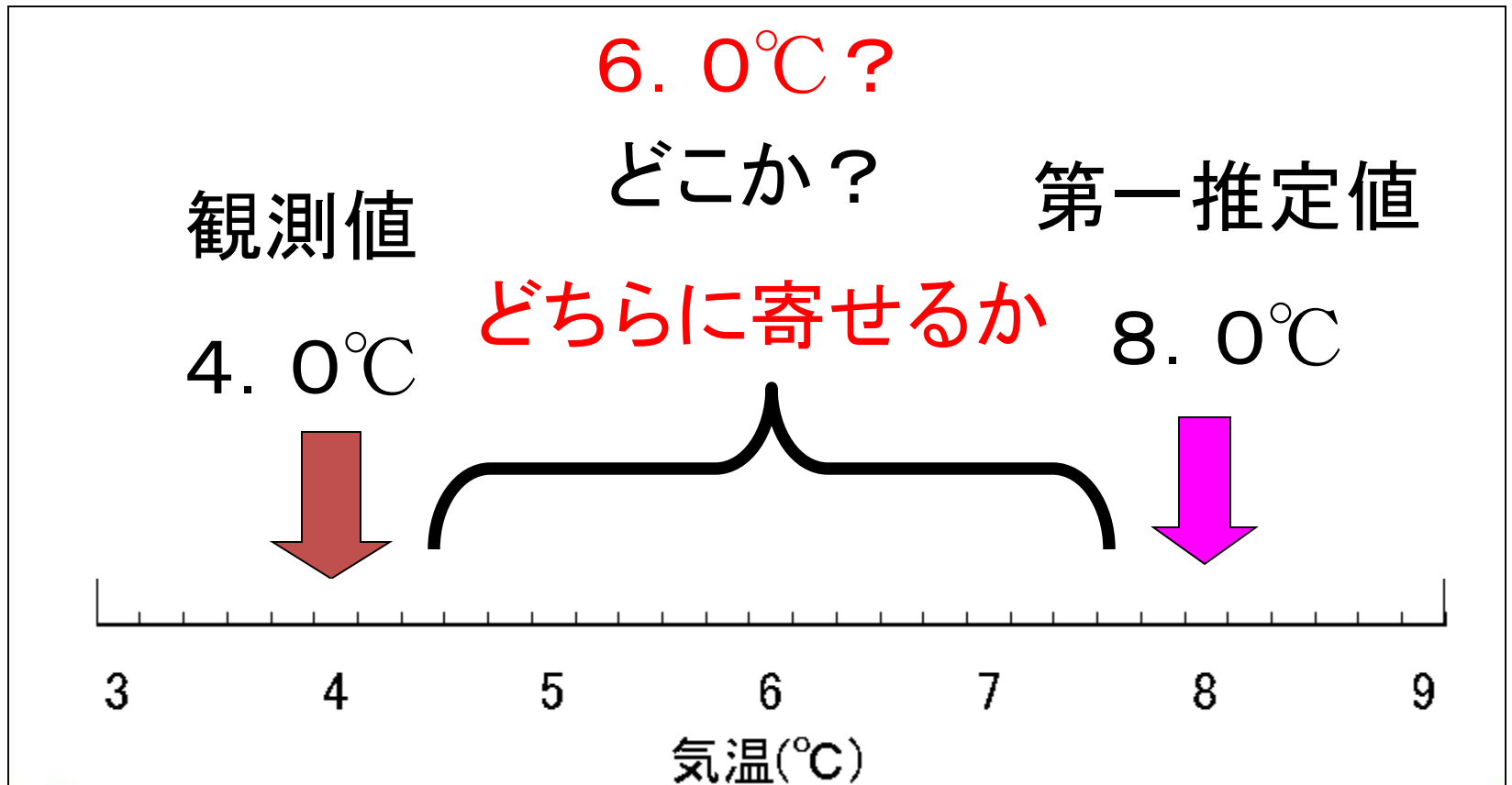


他に静止衛星の晴天輝度温度データがあります。

# データ同化とは・・・

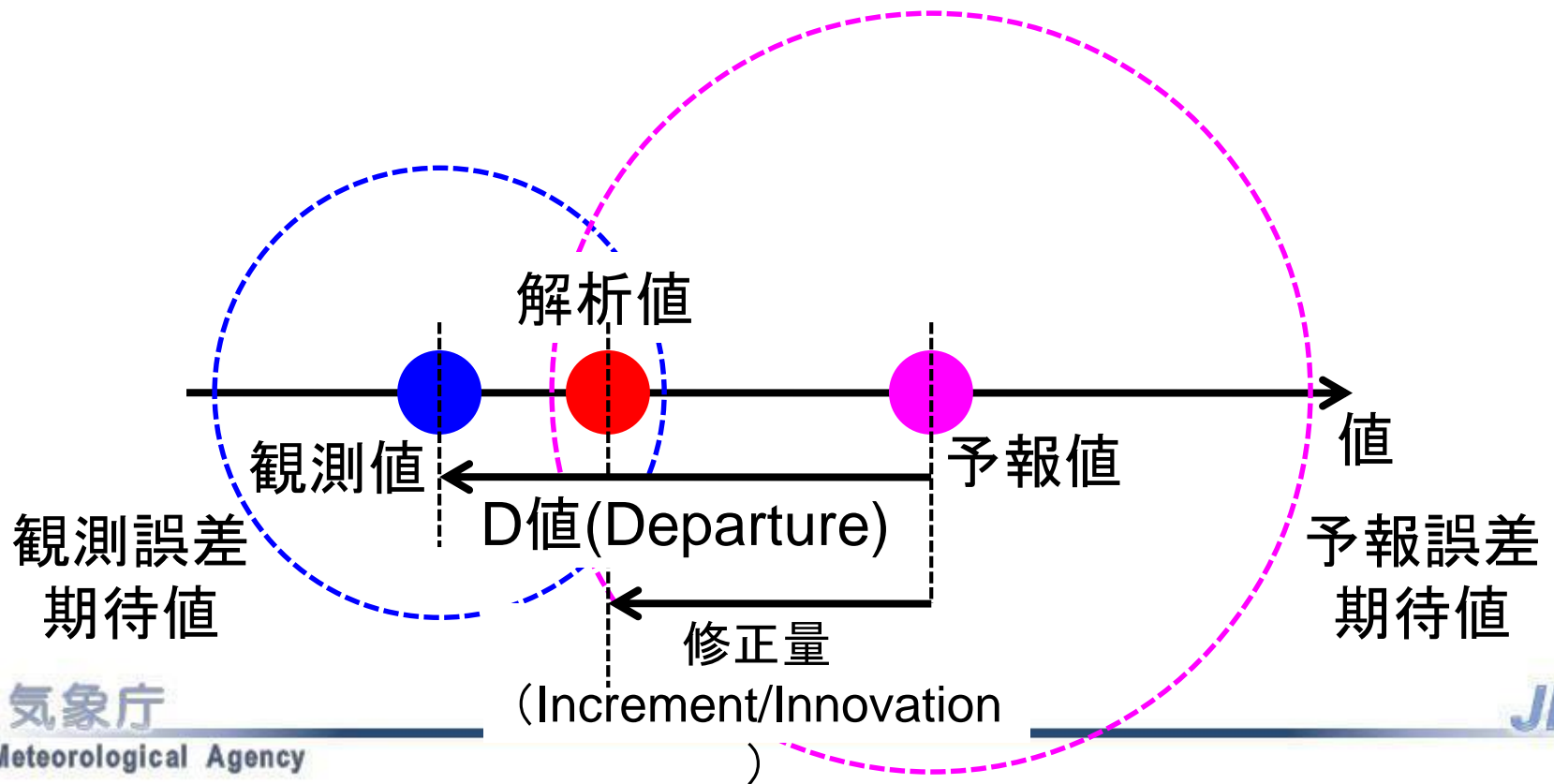
最も確からしい推定値を見つけること

情報 = データ + 信頼度 (誤差情報)



# 修正量の決定(誤差情報の利用)

- 予報値(背景値) $x_b$ には誤差 $\Delta x$ がある
- 観測値 $y_o$ にも誤差 $\Delta y$ がある
  - 統計情報から誤差の期待値は得られる
  - それらを基に最適な値を探し、得られた値が解析値 $x_a$



# 昔の手法

「最適内挿法」、「修正法」



※「第一推定値」は解析時刻を予報した前回の予報値

解析値が1回の計算で求められる。  
ただし、  
解析値と要素の異なる観測値は使えない。

適切な係数: 観測点と格子点の距離のみの関数(修正法)  
観測誤差と背景誤差の関係を統計的に考慮(最適内挿法)

# 最近の方法

## • 変分法

- 「解析値」を一発で求めることはあきらめ、「解析値の候補」を少しずつ変えて最適なものを求めることにする。
- 「解析値の候補」は「第一推定値」から出発し、繰り返し計算で「評価関数」を小さくする。
- 評価関数が最小となった時点(収束したとみなせる時点)で止める。

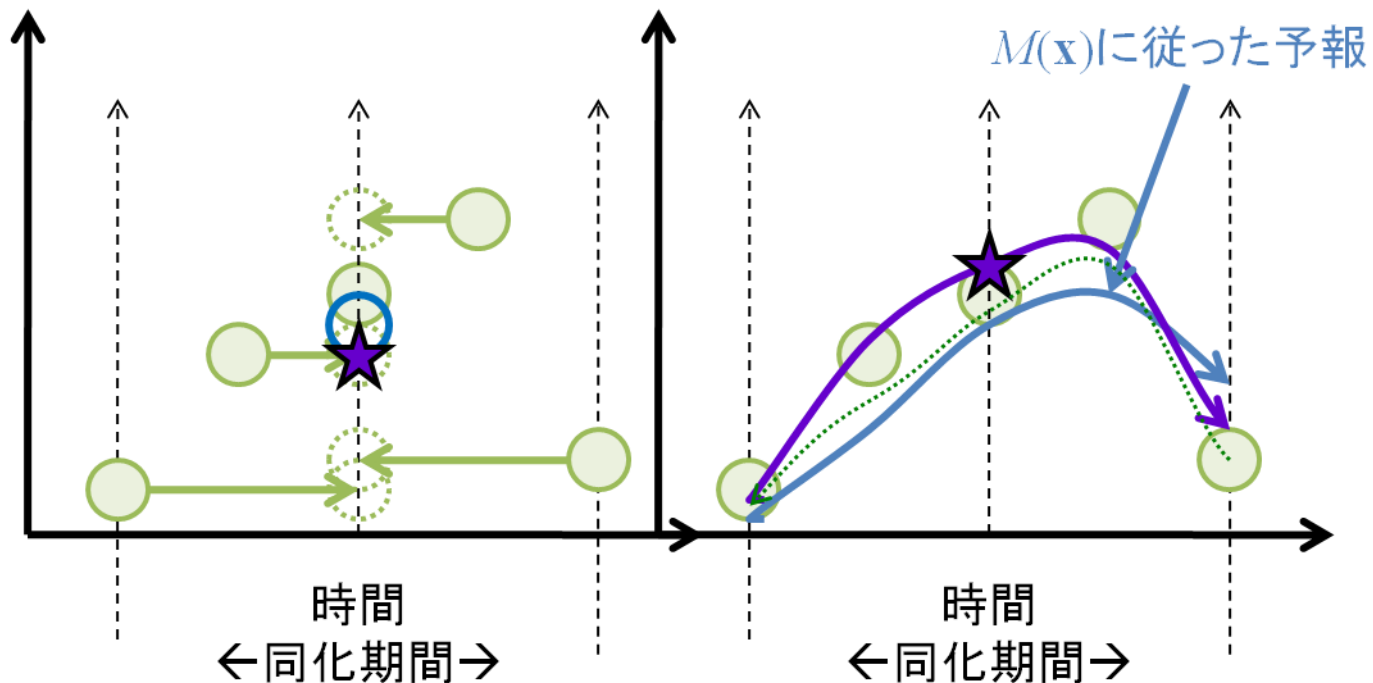
$$\text{評価関数} = \left( \text{解析値の候補} - \text{第一推定値} \right)^2 + \left( \text{解析値の候補から計算した値} - \text{観測値} \right)^2 \times \text{係数}$$

解析値が1回の計算では求められない。  
しかし、  
解析値と要素の異なる観測値も使える。



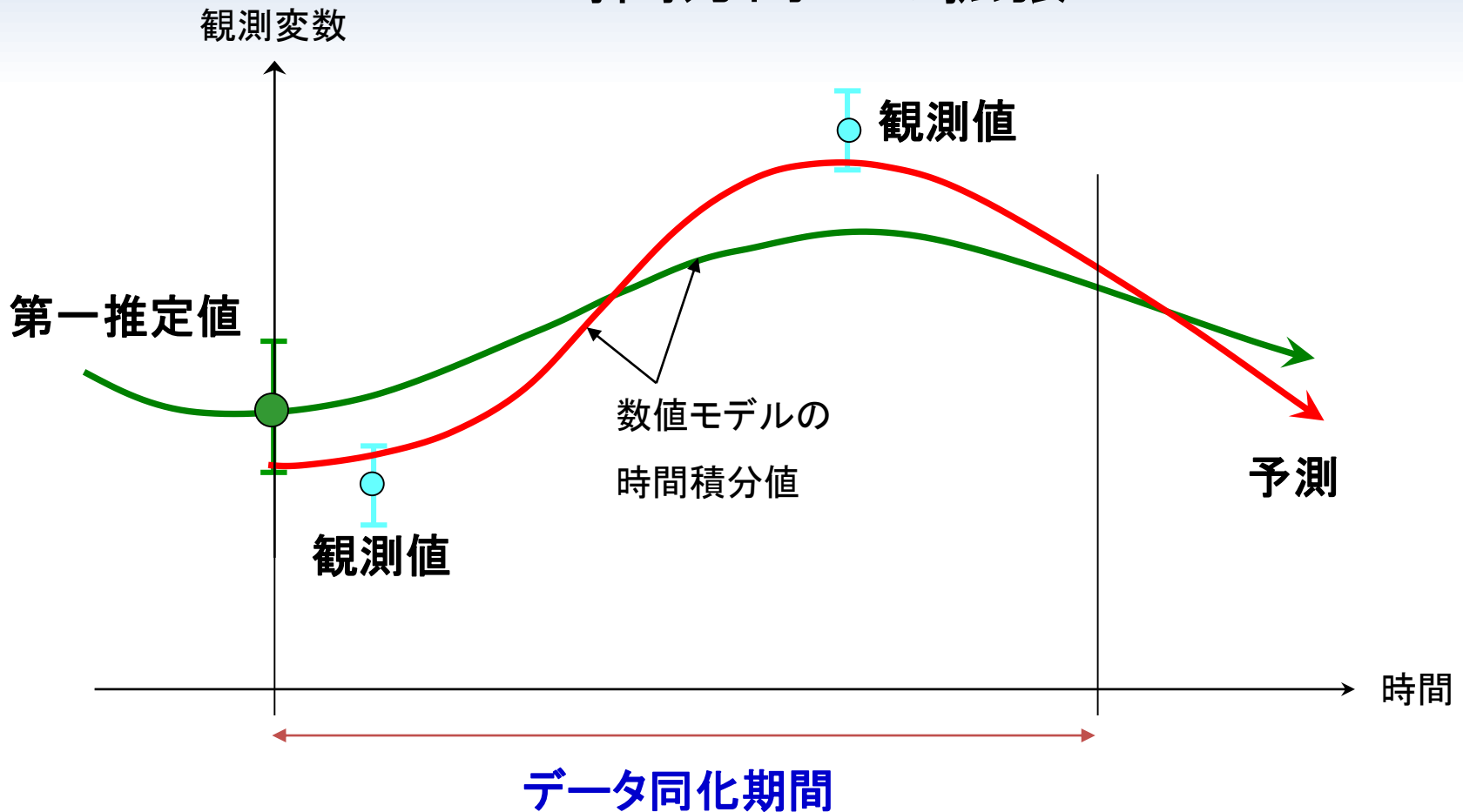
# 3次元変分法と4次元変分法

- 3次元変分法: 時間の変化を考慮しない
  - 観測値は解析時刻に得られたものと仮定して比較する
- 4次元変分法: 時間の変化を考慮する
  - 同化期間、モデル $M$ で時間発展させた値と比較する
    - これだけの場合: FGAT(First Guess at Appropriate Time)という手法
  - 差の還元はアジョイントモデル(接線モデルの転置)で行う



# 4次元変分法のご概念図

～時間方向への拡張～



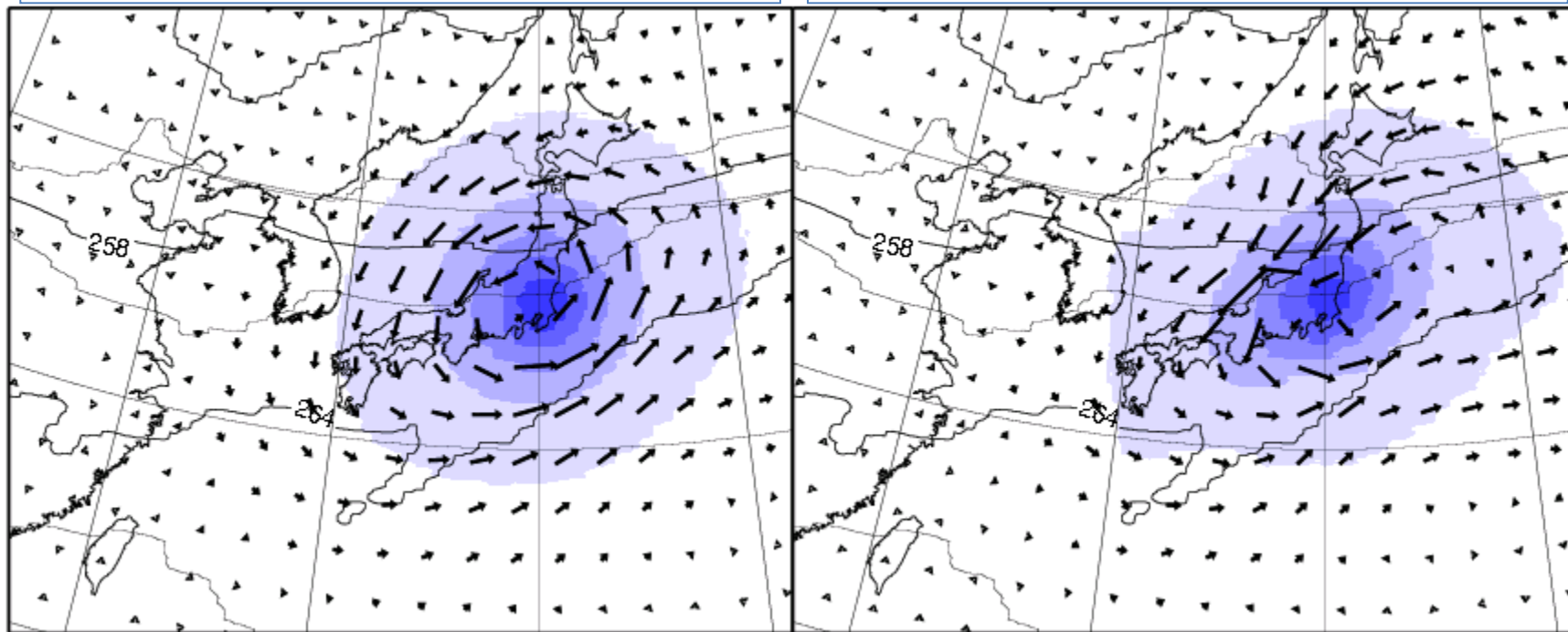
緑線は第一推定値からの数値モデルの時間積分値、赤線はデータ同化期間内で第一推定値と観測値に最も近い数値モデルの時間積分値で、後者をその期間内の解析値とする。第一推定値と観測値につけた縦線（エラーバー）は、それぞれの誤差の大きさを示す。

# 3次元変分法と4次元変分法

気温一点同化の例(風はバランス成分の影響)

3D-Var: 背景誤差に従い、基本的には等方

4D-Var: 場に従って変形し、等温線に沿った方向に伸びている



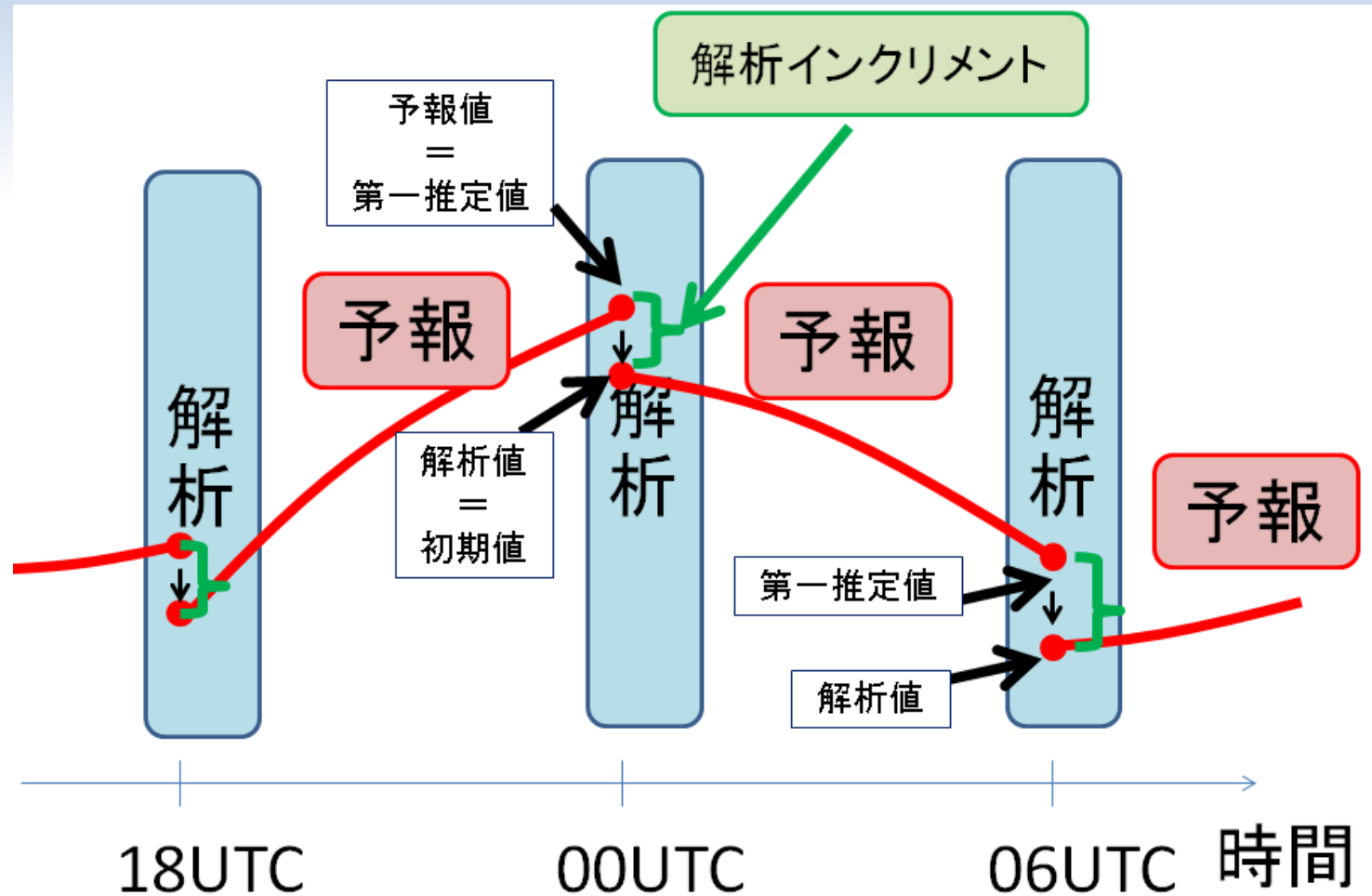
色: 気温のインクリメント / 矢印: 風のインクリメント



# データ同化サイクル (予報解析サイクル)

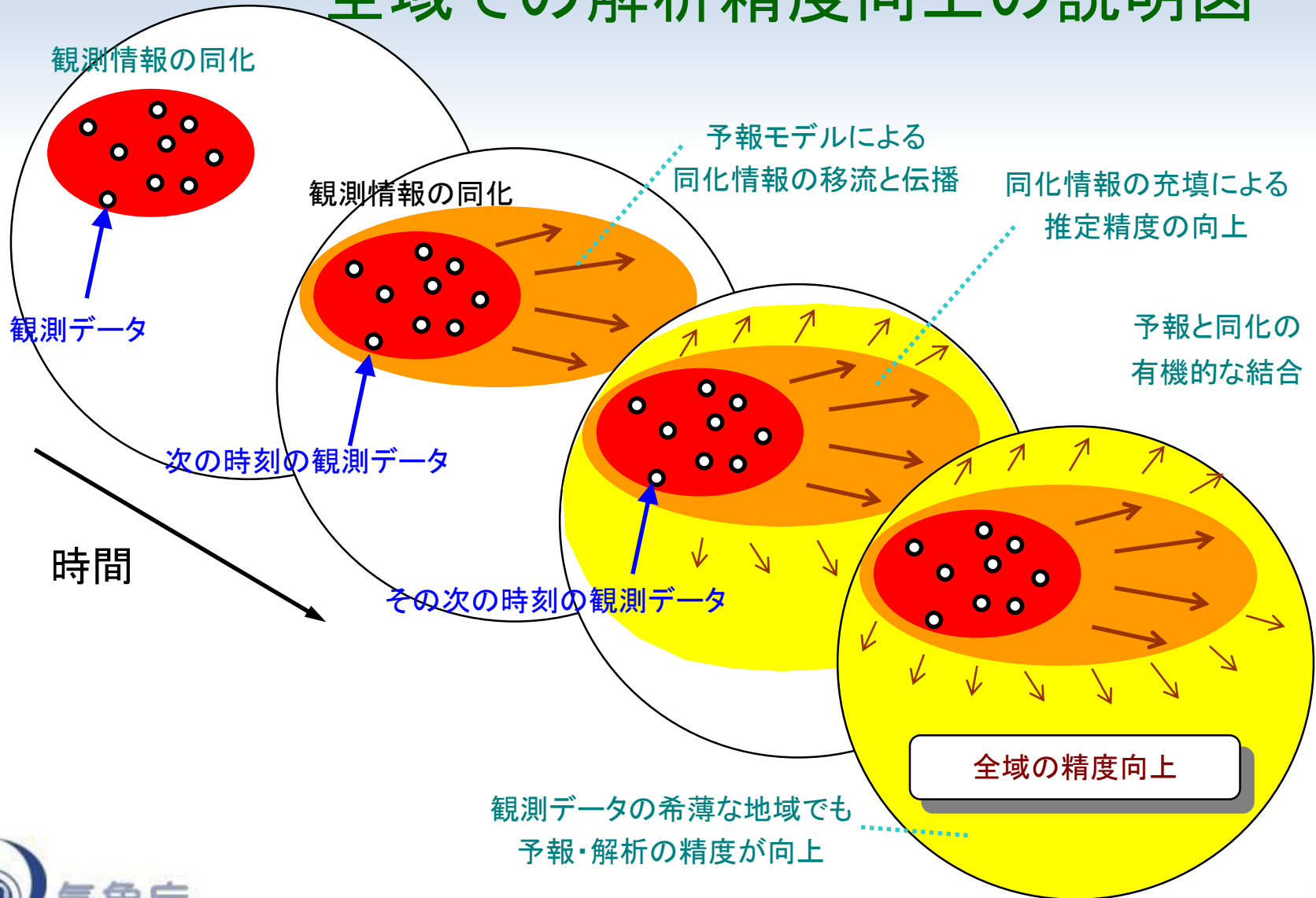
# データ同化サイクル

# 解析・予報サイクル



解析予報サイクルにより、観測データが無い領域においても合理的に算出することができる。

# 解析・サイクルによる 全域での解析精度向上の説明図





# データ同化サイクル

- **第一推定値**（前時刻の数値予報）を観測データで修正して初期値を作り、
- そこからの予報を次の**第一推定値**とすることを**データ同化（解析・予報）サイクル**という。
- この修正量のことを**インクリメント**という。
- サイクルにより、観測データの情報を伝播させる。

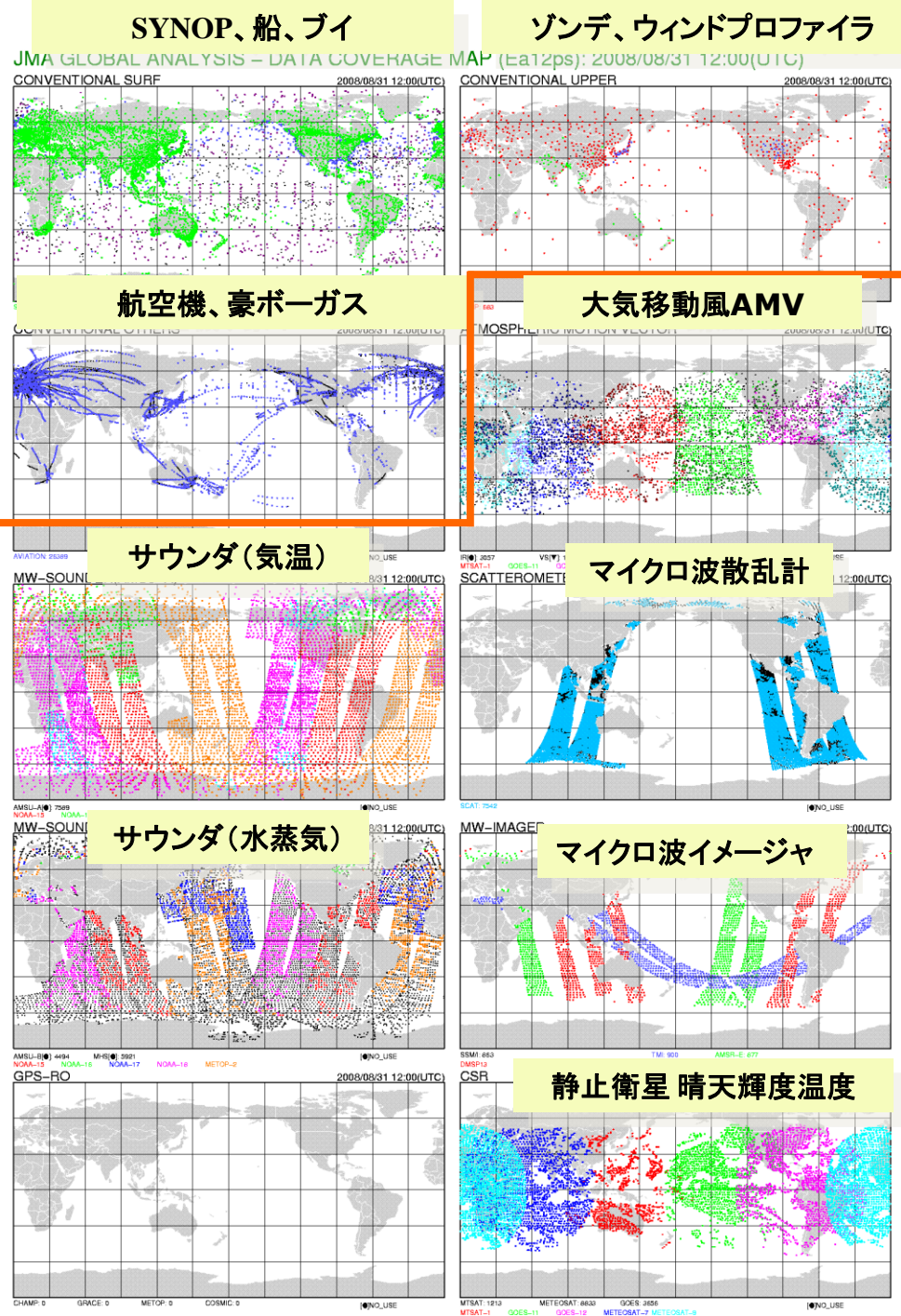


# 速報解析とサイクル解析

- 全球データ同化
- 速報解析
  - 全球予報のためのデータ同化は初期値の時刻の2時間20分後に処理を開始する—それ以降に入電したデータは使えない。→衛星データの入電が十分でない。
- サイクル解析
  - 十分なデータ入電を待ってサイクルをつなぐための解析で、データ同化サイクルの解析精度を維持するために行う。

# 全球速報解析で 処理されるデータの分布

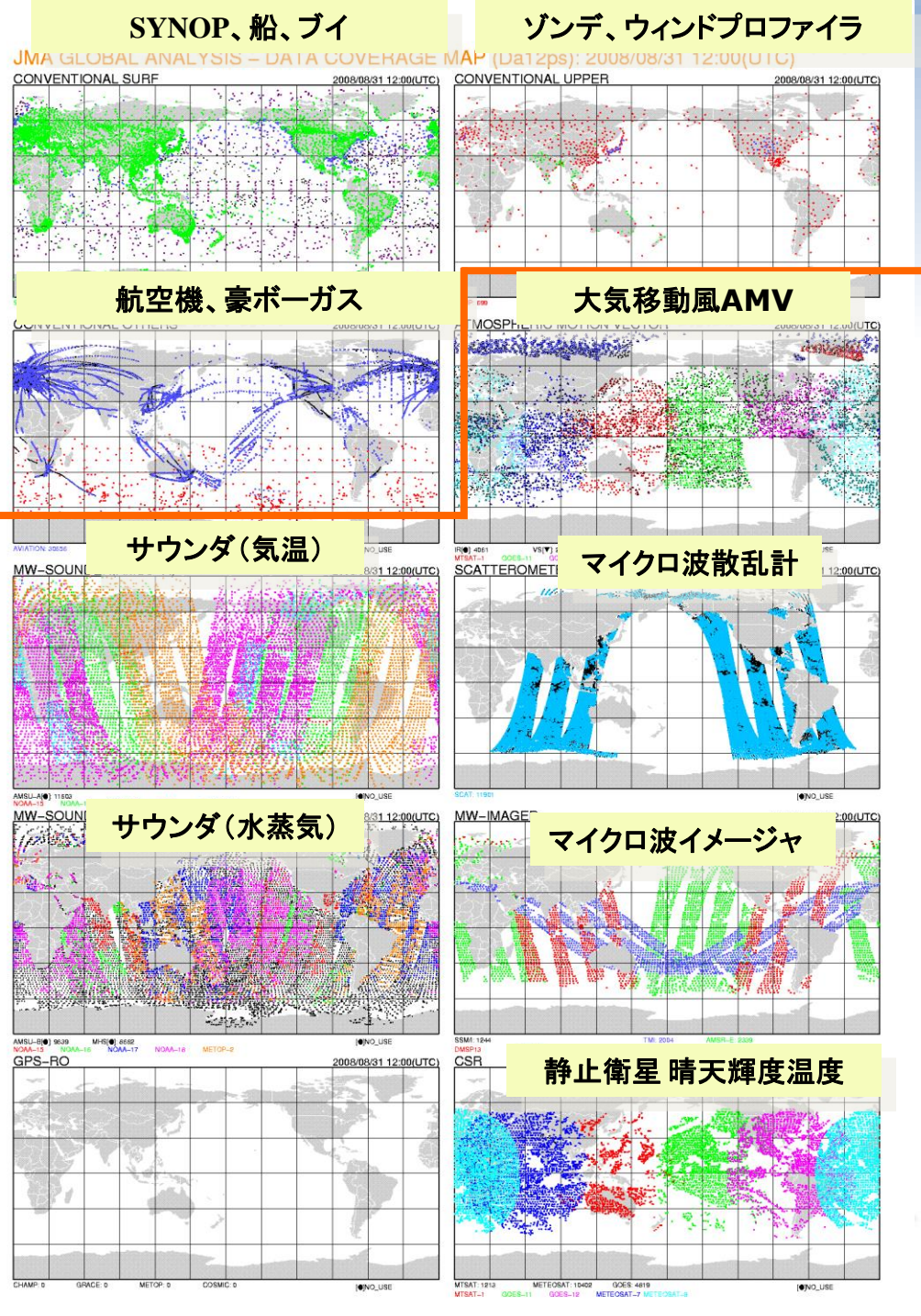
- 使用されたデータを種別・衛星ごとにプロット
  - 黒はQCなどでリジェクトされたもの
  - 間引きで除かれた衛星データはここにはプロットされていない
- データカットオフ時間(入電待ち時間)は  
2h20m  
(00/06/12/18UTC)



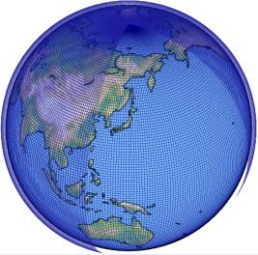



# 全球サイクル解析で 処理されるデータの分布

- 使用されたデータを種別・衛星ごとにプロット
  - 黒はQCなどでリジェクトされたもの
  - 間引きで除かれた衛星データはここにはプロットされていない
- データカットオフ時間(入電待ち時間)は  
11h35m(00/12UTC),  
5h35m(06/18UTC)



# 現業数値予報における解析システム

	全球解析	メソ解析	局地解析	気候解析
目的	各モデルの初期値作成			
領域				
解析時刻	6時間毎	3時間毎	毎時	6時間毎
手法	4次元変分法	4次元変分法	3次元変分法	3次元変分法
解像度(アウター)	約20km/100層	5km/50層	2km/60層	約110km/40層
解像度(インナー)	約55km/100層	15km/40層	5km/50層	約110km/40層
第一推定値	全球3-9時間 予報値	メソ0-3時間 予報値	メソ予報値 ([012]時間予報) +1時間予報x3	全球6時間 予報値
同化ウィンドウ	6時間	3時間	1時間x3	6時間
データ打ち切り時間	速報: 2h20m サイクル: 00,12UTC:11h50m 06,18UTC:07h50m	50min	30min	00UTC:36h35m 06UTC:31h00m 12UTC:25h20m 18UTC:19h35m



# 品質管理

# 同化システムで考慮する観測誤差

原因

特徴

対処方法

偶然誤差	現象自体の揺らぎや測定 のばらつきなど	正規分布, 不可避	データ同化で 考慮
系統誤差	測器の調整不良や物理的 変換の誤差など	一定方向のず れ	バイアス 補正
異常値 ラフエラー	人為的ミス, 測器の故障, 通信エラーなど	非常に大きな 誤差	品質管理で 修正・棄却
気象学的 ノイズ	システムの表現限界と観測 の空間代表性のギャップ	システムにより 変わる	データ同化で 考慮



## それではこれらにどのように対処するか

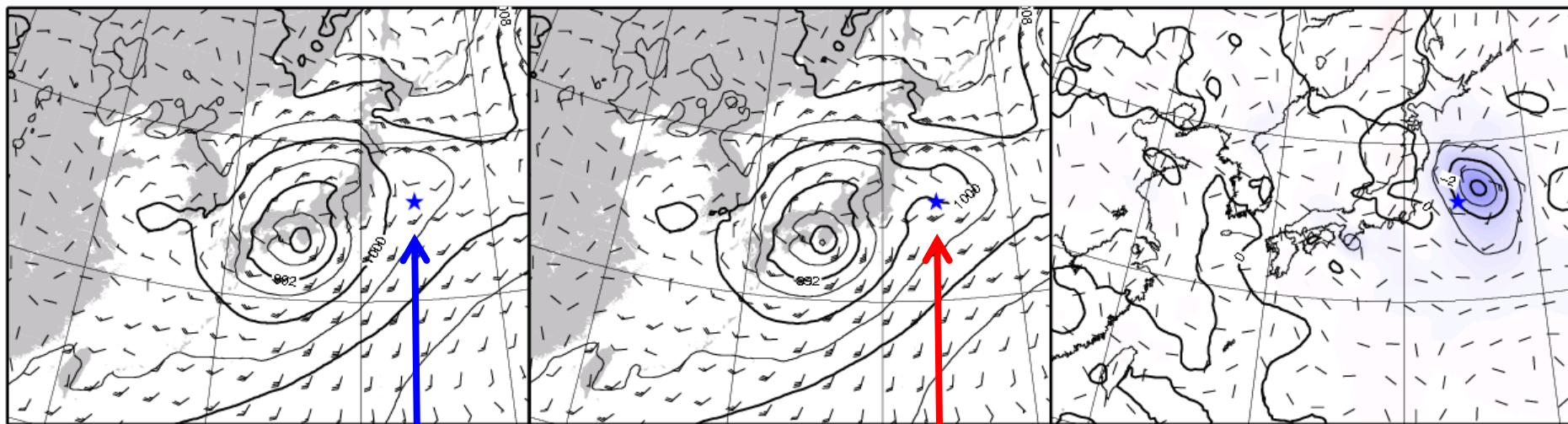
- バイアス補正
- 品質管理(QC)による棄却
  - 気候学的にありえない(気候値チェック)
  - ひとつの通報の中の情報が互いに矛盾(内的整合チェック)
  - 第一推定値から離れすぎている(外的整合チェック)

# 誤った観測データを同化した例

(a) 正常な観測を同化した

(b) 誤った観測を同化したと仮定した場合

(a)と(b)の差



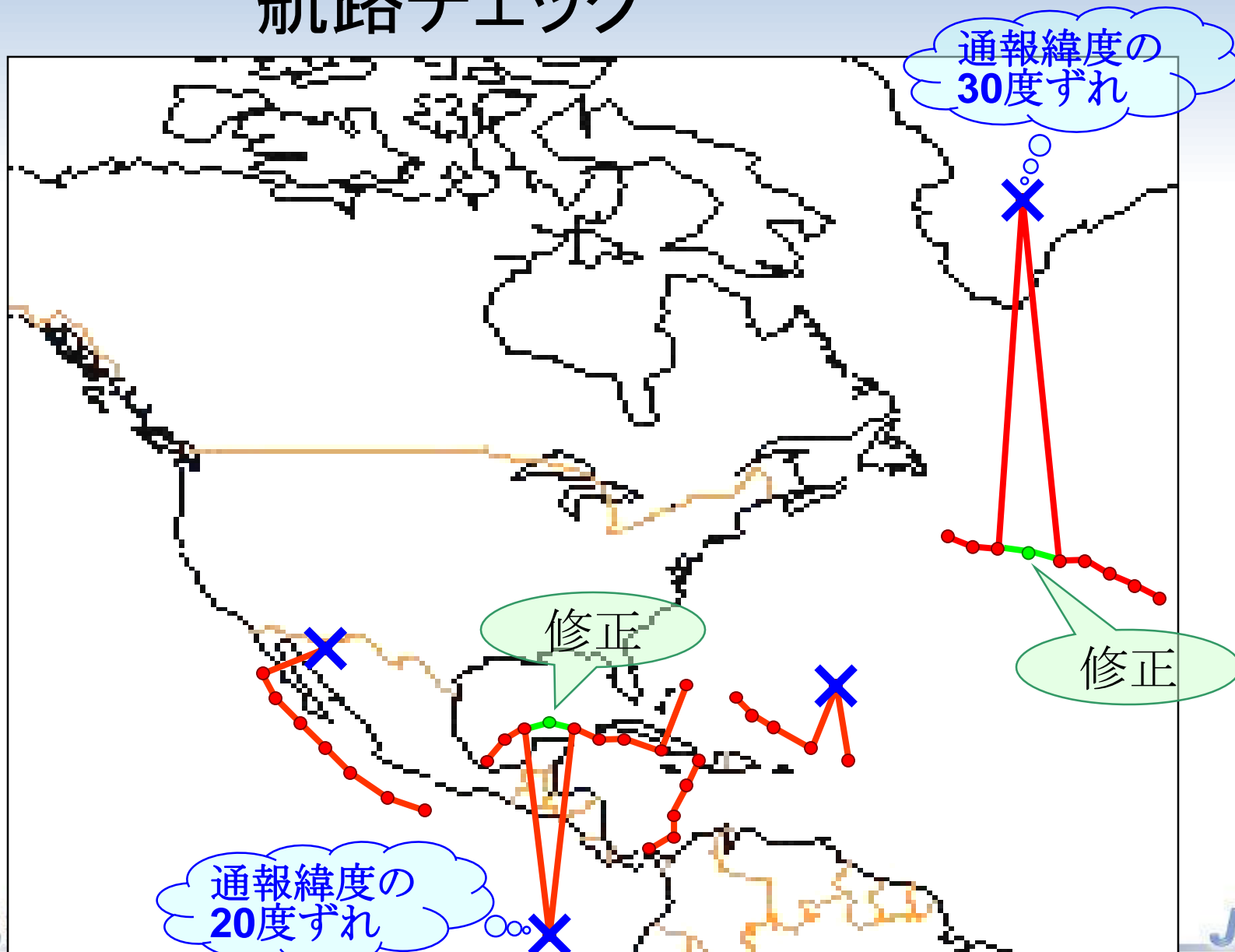
正しい観測

誤った観測を同化したと仮定

★の位置の船舶が、海面気圧として約980hPaの観測値を誤って20hPaほど低く通報し、それを利用したと仮定した場合の例

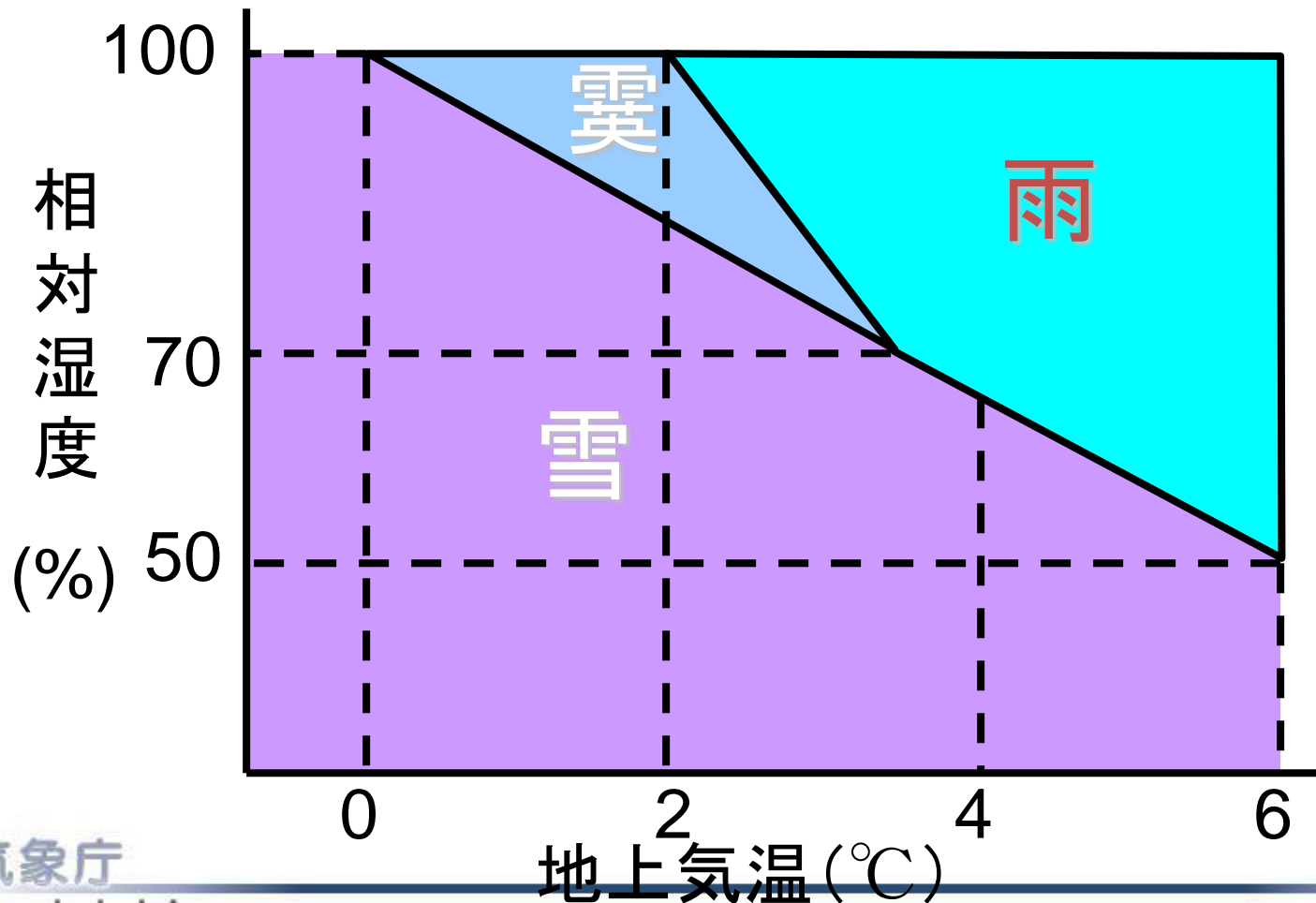


# 航路チェック



# 要素間整合性チェック

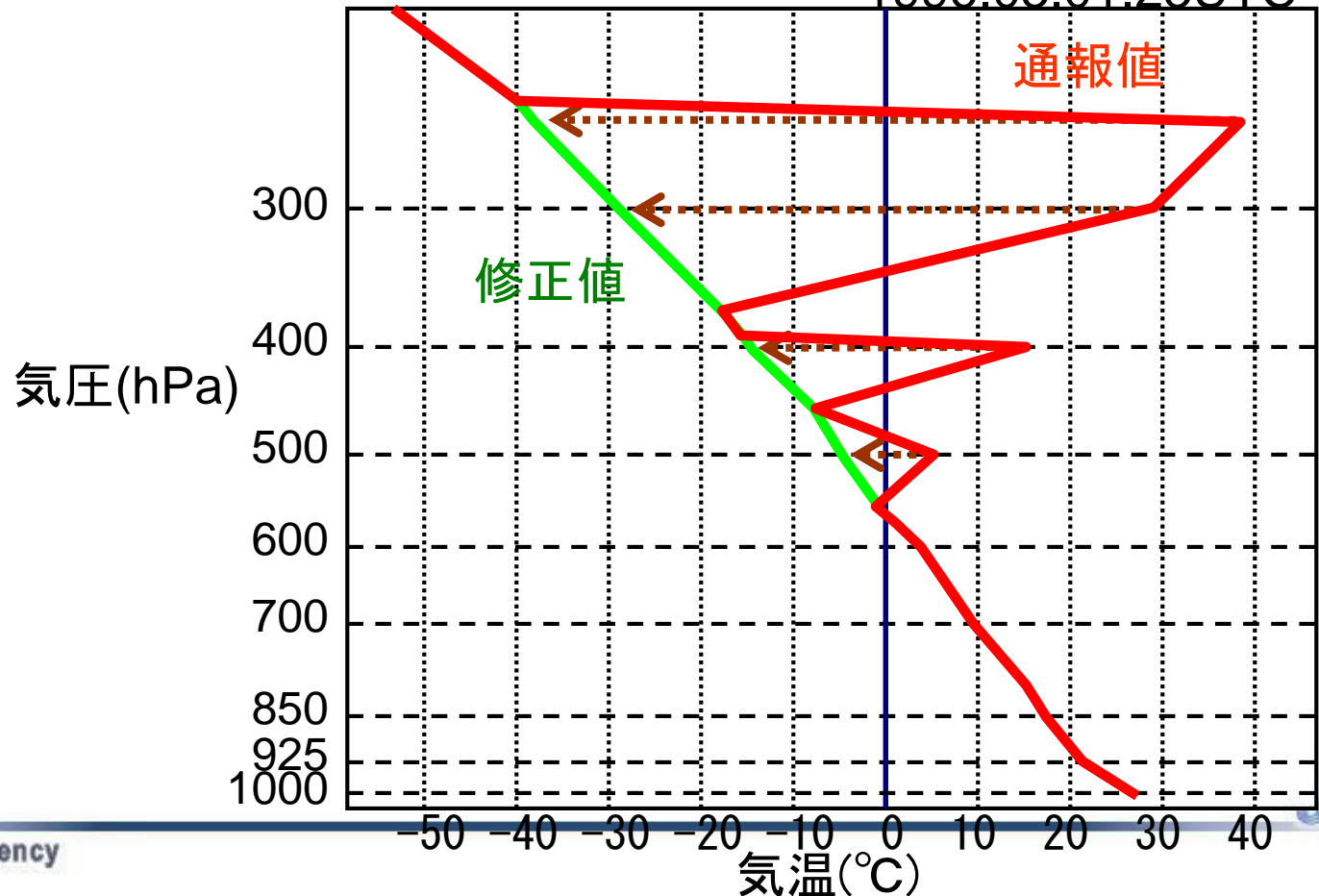
(例) 雨雪判別と相対湿度・気温の関係  
通報値の値がお互いに矛盾がないかどうかを判定する



# 鉛直整合性チェック

- ゾンデの例: 赤が通報値、緑が修正後の値
  - 4か所すべてが気温の正負の誤り

STATION 91643( 8.31S, 179.13E ) Funafuti  
1996.03.01.23UTC



# ゾンデバイアス補正

- ゾンデ気温観測のバイアスの原因

- 日射がセンサーに熱を与える
- センサーから熱が逃げる
- 測器システム特有の誤差

- 放射が原因の場合、昼夜に明らかな差

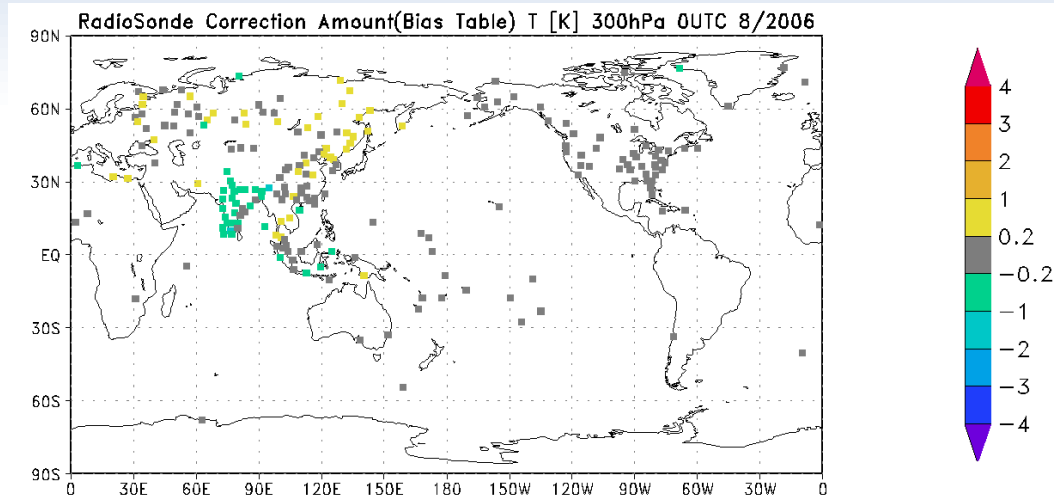
- 放射の影響を補正しない観測がある

- そもそも原因不明なバイアスもある

- →前月のD値統計から気温のバイアスを補正する

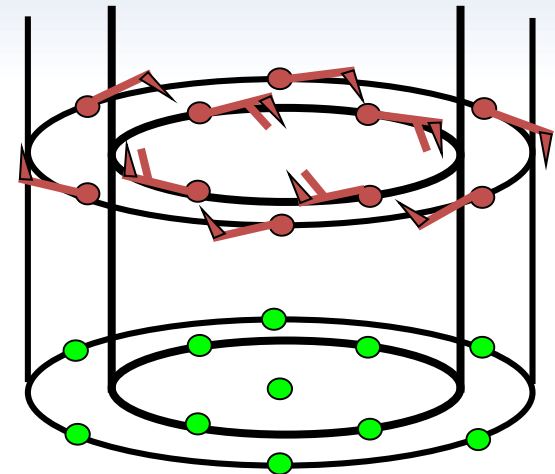
- 第一推定値にバイアスがないことが前提

- 実際にはモデルバイアスはある

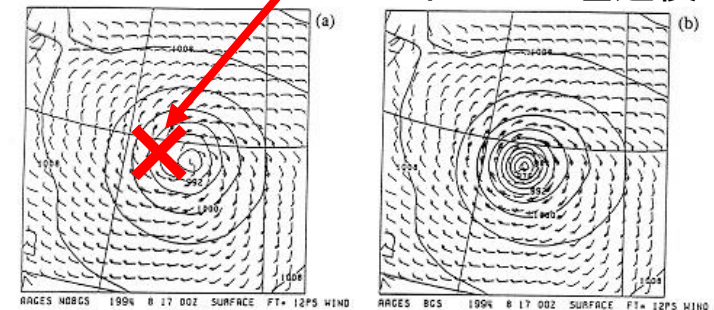


# 台風ボーガス

- 予報課で作られる台風位置情報(中心位置・中心気圧・強風半径)をもとに作成される人工的な台風の構造
- 擬似的な観測データとして与える。優先度は最高とする。
- 台風の位置、形状が初期値に反映される。
  - 防災上、重要
  - 強度はモデルの分解能に配慮して調整



第一推定値 実況の台風中心 ボーガス埋込後



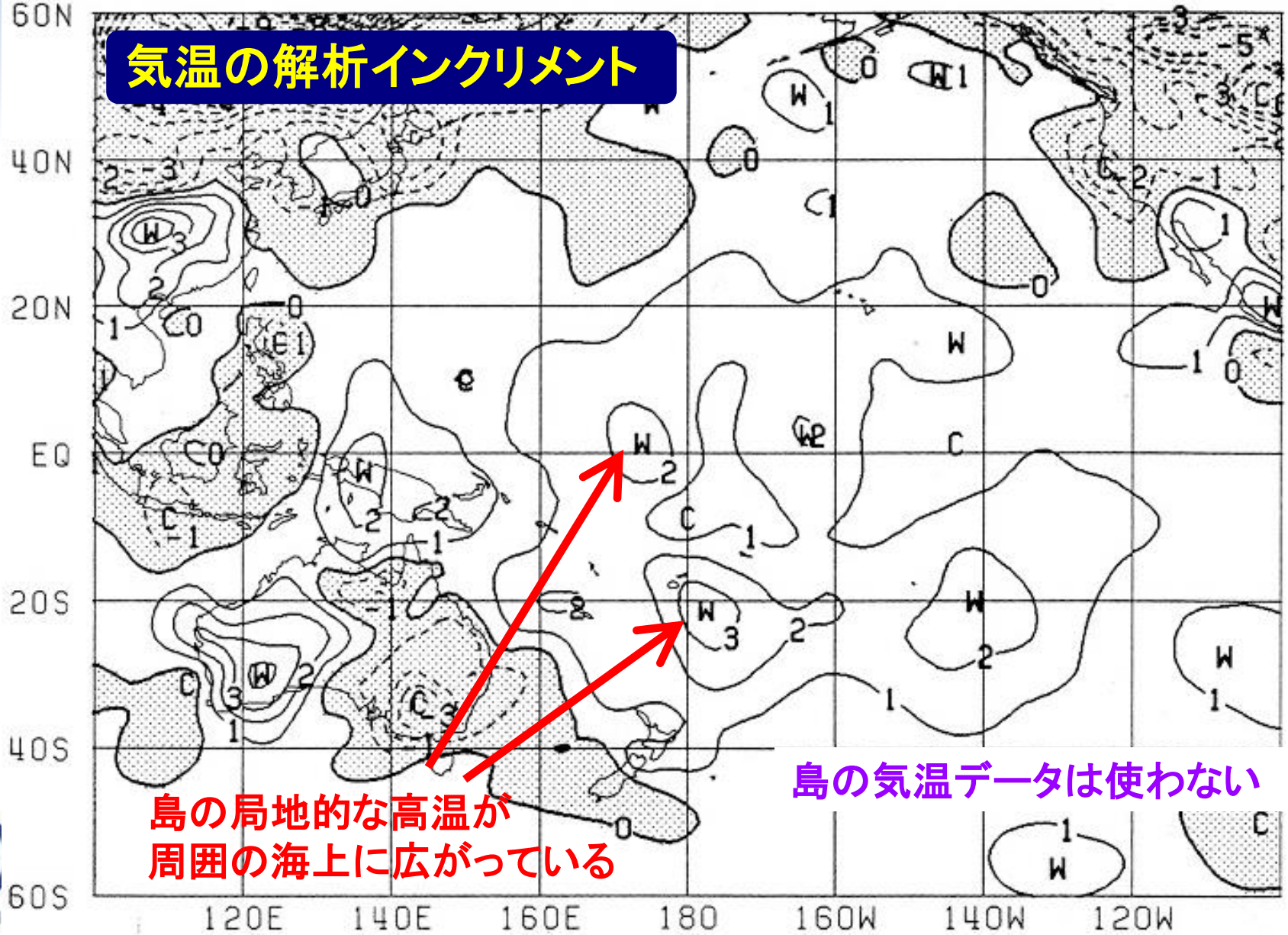
# データの間引き・選択

- 最適内挿法では1解析点ごとに使用するデータ数の上限があることにより、間引きが必要。
- 変分法では**観測が独立である限り**、間引きは必須ではない。しかし、代表性誤差や観測演算子の誤差が相関を持つ場合があることを考慮すると、同種の観測は解析格子の密度程度に間引くのが適当。
- 実際問題として、衛星データはデータ量が多すぎるため、間引かないと使えない。間引きが解析結果を大きく左右する場合がある。



# 観測データの特殊な空間代表性が問題になる場合

## 気温の解析インクリメント



島の局地的な高温が  
周囲の海上に広がっている

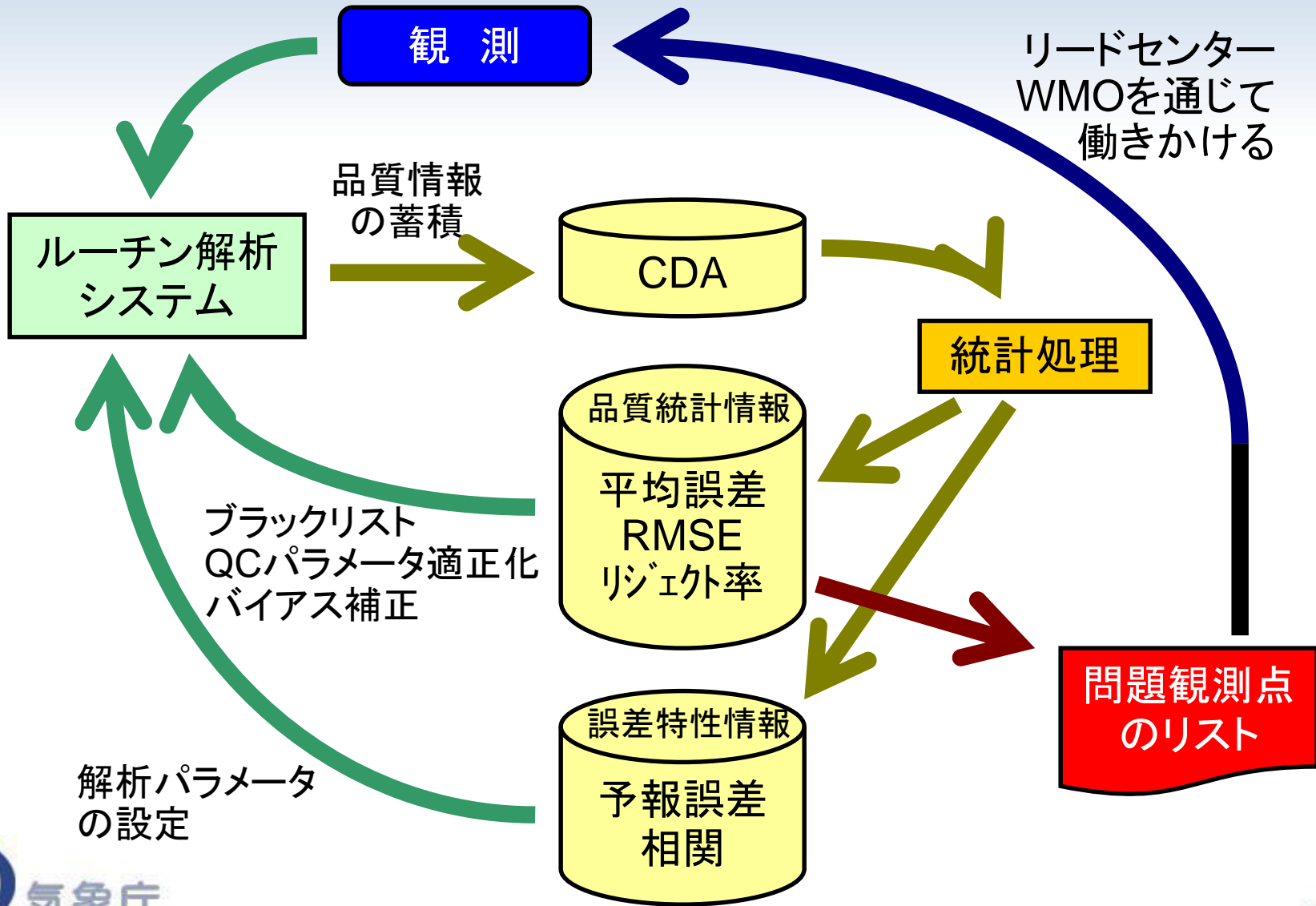
島の気温データは使わない

# ノンリアルタイム品質監視

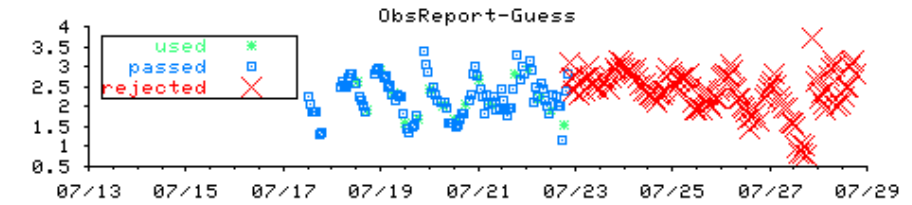
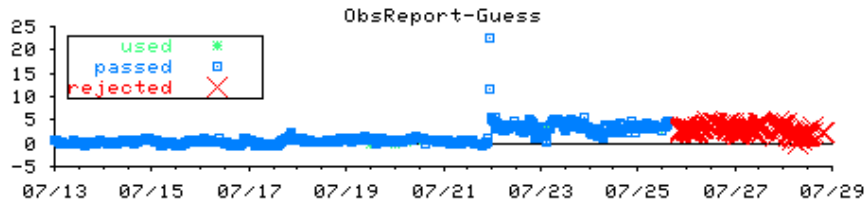
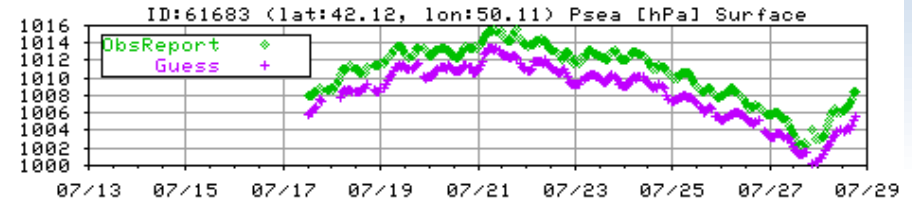
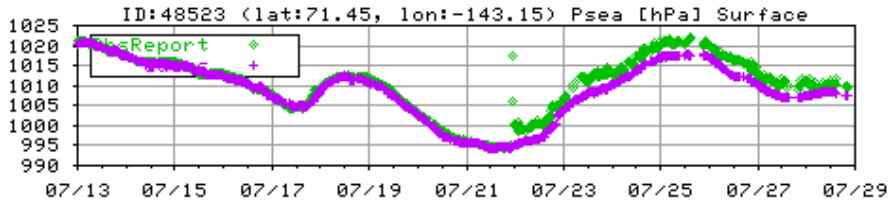
- 国際協力
  - 浮遊ブイ品質監視業務
  - 第Ⅱ地区地上観測データモニタリング業務(リードセンター)
  - 全球データモニタリングレポート(主要数値予報センター間で交換)
- ブラックリスト管理
  - 低品質のデータがデータ同化に入るのを防ぐ



# ノンリアルタイム品質管理

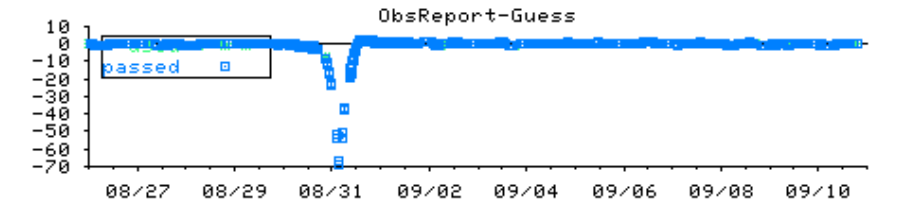
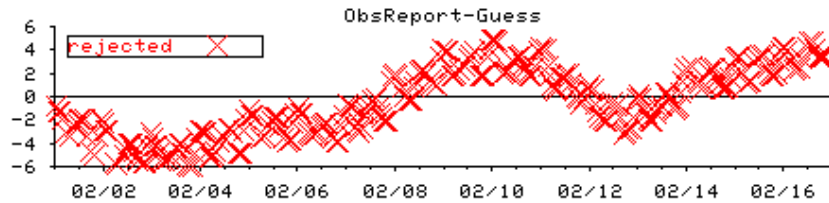
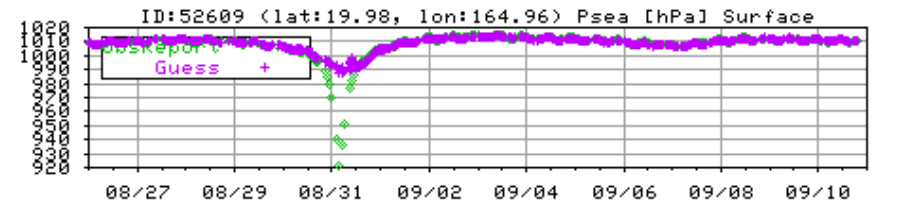
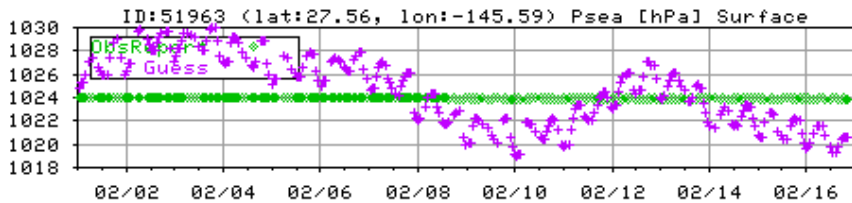


# 浮遊ブイのモニタリング例



突然バイアスが大きくなった例

常に一定のバイアスがある例



常に一定の観測値を報じる例(故障)

台風中心が通過した例(異常ではない)

# 観測の改善例

ID: 44265 (lat: 46.12N, lon: 91.47E)

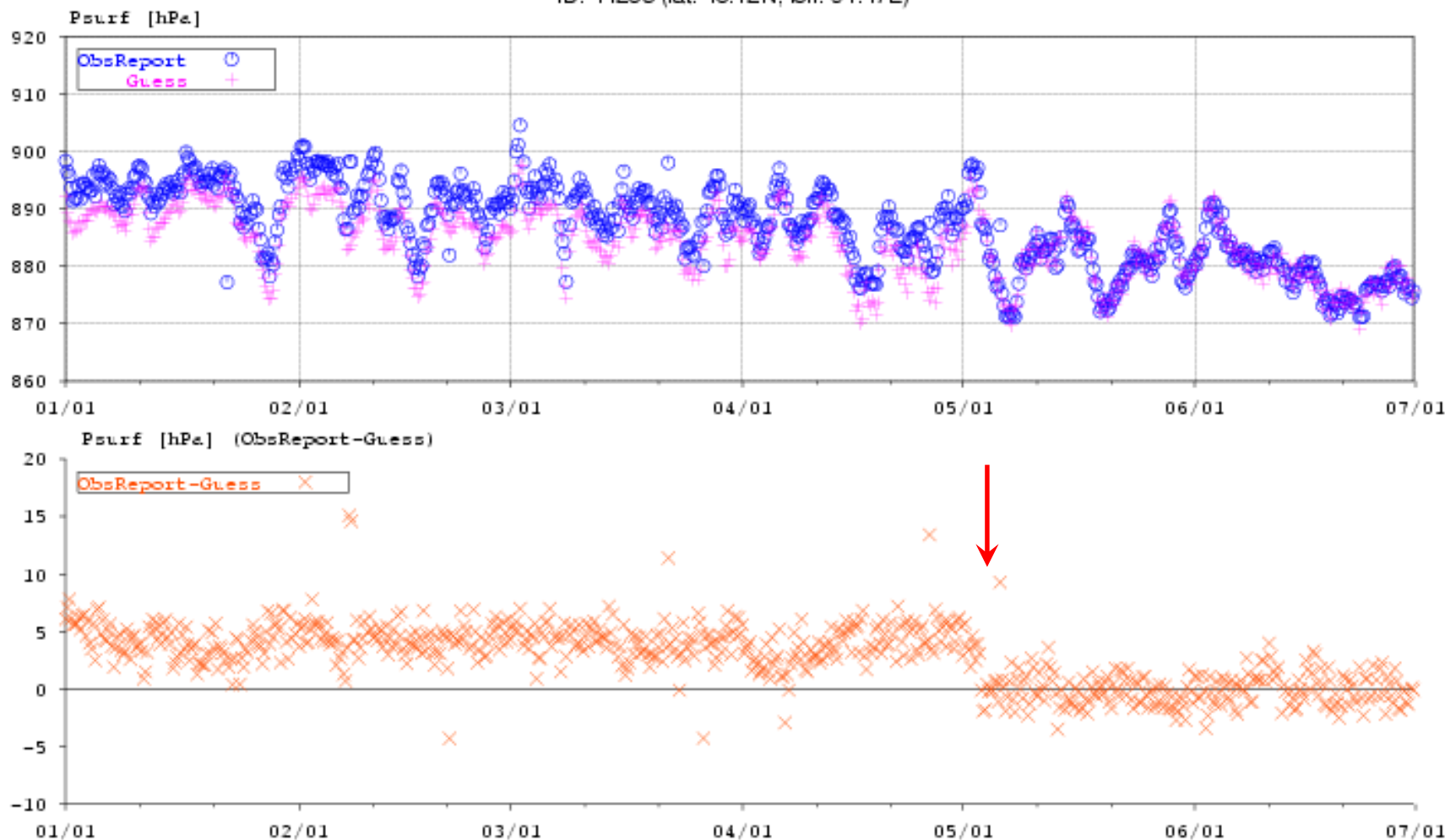


Figure 43(a) Time series of SLP observations minus first-guess increments for station 44265.

モンゴルの観測点 CBSLCから問題点を指摘し、修正された。

# 最近の衛星データ事情

# 衛星データの重要性

- 広域かつ均質な情報を、周期的・定常的に得ることができる
  - 現業的なシステムにとって重要
  - 海洋上や砂漠上、大気上層の観測
  - # データ空白域は解析精度が悪い ⇒ 大気3(4)次元的な観測情報が必要
- 直接観測では入手が困難な、様々な物理量を得ることができる
  - 例: 全球降水量、全球オゾン分布、大気上端外向き長波放射
  - モデルの検証にも有効
- 近年、高精度な衛星データが急増している。
  - 測器・通信技術の発達
- 同化手法の高度化(変分法の導入など)
  - 輝度温度の直接同化などにより、観測情報がより適切に活用
  - 多様な衛星データに対応可能
- 1990年代後半から、数値予報精度は、モデル改良だけでなく、同化システム・衛星データ利用によって大きく向上
- ただし雲や雨の観測情報の同化はまだまだ難しい

# 衛星・センサの分類

- 衛星

- 静止衛星と軌道衛星

- 静止衛星: MTSAT, GOES, METEOSAT
    - 軌道衛星: NOAA, MetOp, DMSP, TRMM, Aqua, Terra

- センサ

- 能動的と受動的

- 能動型は自ら電波を発射
    - 能動型はマイクロ波散乱計やレーダー、ライダー。他は受動型

- 観測波長(周波数): 紫外、可視、赤外、サブミリ波、マイクロ波

- データ同化で主に用いられるのは可視、赤外、マイクロ波



# 衛星データ特有の事情

- 開発が複数の機関にまたがる
  - 連携が重要
- 寿命が短い
  - 打ち上げ後直ちに利用開始できるように、準備は周到にしておく必要がある
- データ量が多く、中身が特殊
  - データの入手方法の開拓、「放射」に詳しい人材確保

# 衛星データ(輝度温度)のインパクト

- 衛星データの有無の影響

- Z500(500hPa GPH) 予報

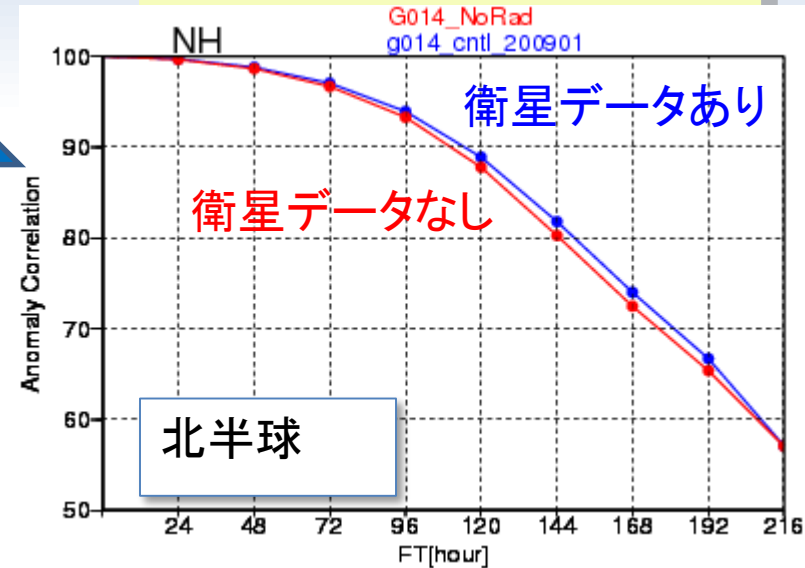
- ・ アノマリ相関

- 衛星データあり

- 衛星データなし

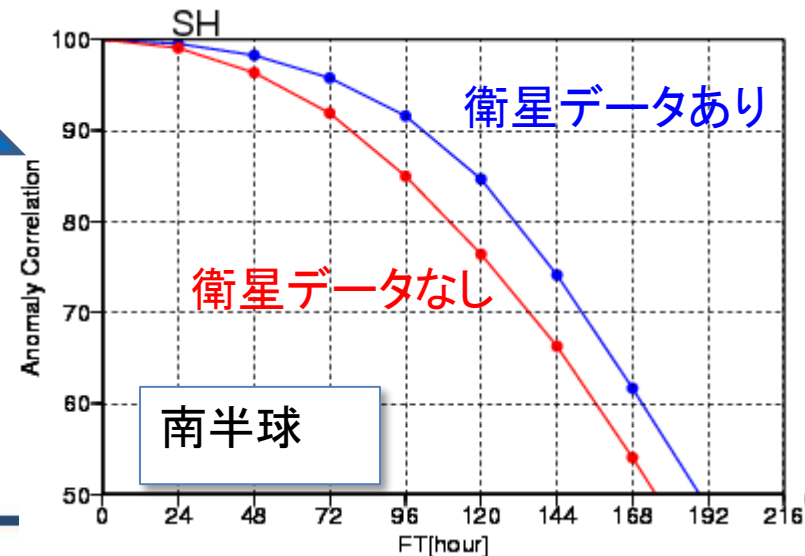
- 衛星データの有無で、特に南半球でスコアの差が大

Z500 アノマリ相関

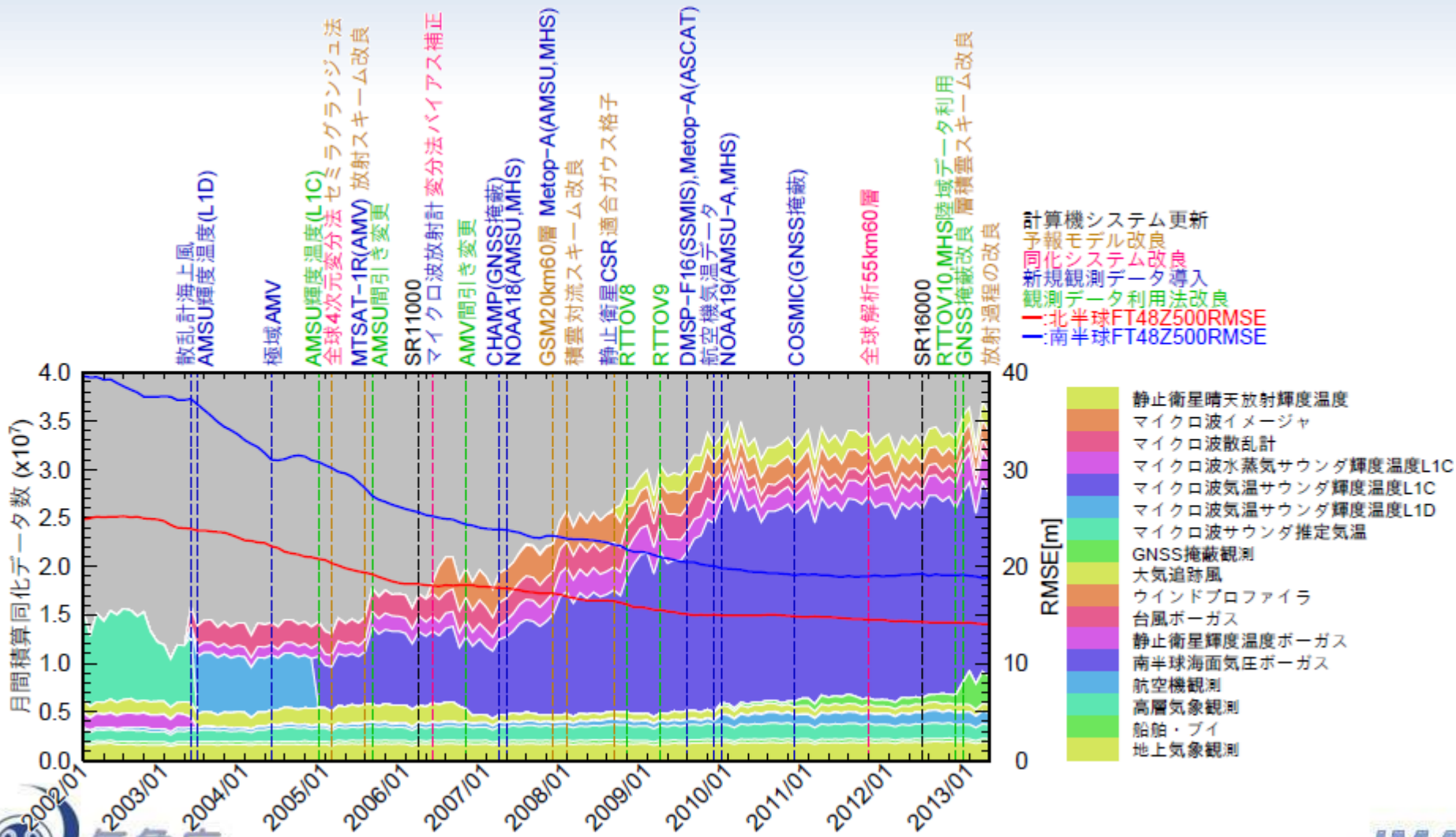


Better

Better



# 全球解析で利用している観測データ量とスコアの の経年変化



散乱計海上風  
AMSU輝度温度(L1D)

極域AMV

AMSU輝度温度(L1C)  
全球4次元変分法 セミラランジュ法  
MTSAT-1R(AMV) 放射スキーム改良  
AMSU間引き変更

SR11000  
マイクロ波放射計変分法バイアス補正

AMV間引き変更

CHAMP(GNSS掩蔽)  
NOAA18(AMSU,MHS)

GSM20km60層 Metop-A(AMSU,MHS)  
積雲対流スキーム改良

静止衛星CSR適合ガウス格子

RTTOV8

RTTOV9

DMSP-F16(SSMIS), Metop-A(ASCAT)  
航空機観測データ  
NOAA19(AMSU-A, MHS)

COSMIC(GNSS掩蔽)

全球解析55km60層

SR16000

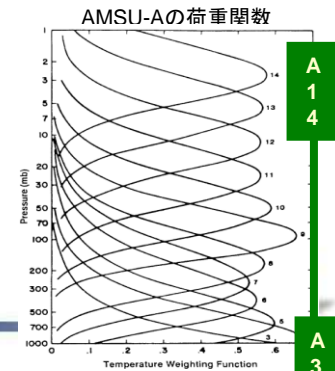
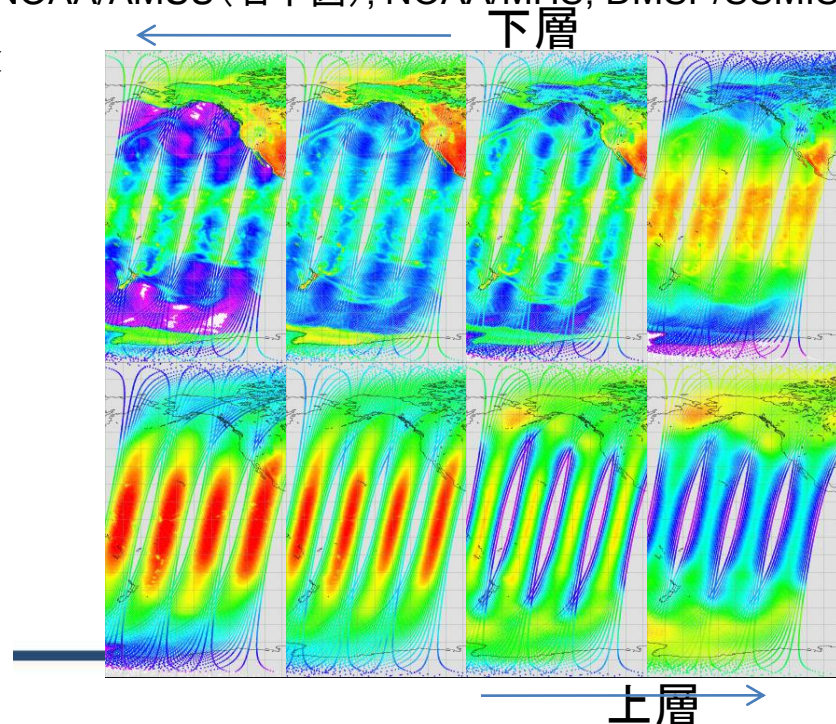
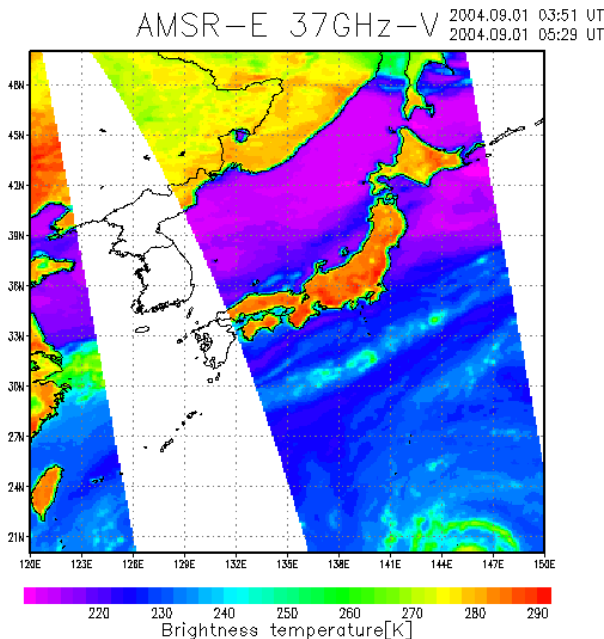
RTTOV10,MHS陸域データ利用  
GNSS掩蔽改良 層積雲スキーム改良  
放射過程の改良

コンピュータシステム更新  
予報モデル改良  
同化システム改良  
新規観測データ導入  
観測データ利用法改良  
—北半球FT48Z500RMSE  
—南半球FT48Z500RMSE

- 静止衛星晴天放射輝度温度
- マイクロ波イメージャ
- マイクロ波散乱計
- マイクロ波水蒸気サウンダ輝度温度L1C
- マイクロ波気温サウンダ輝度温度L1C
- マイクロ波気温サウンダ輝度温度L1D
- マイクロ波サウンダ推定気温
- GNSS掩蔽観測
- 大気追跡風
- ウインドプロファイラ
- 台風ボーガス
- 静止衛星輝度温度ボーガス
- 南半球海面気圧ボーガス
- 航空機観測
- 高層気象観測
- 船舶・ブイ
- 地上気象観測

# イメージャとサウンダ

- イメージャ(放射計):
  - (基本的に)一枚絵の画像データ
    - (可視赤外)MTSAT/Imager, GOES/Imager, NOAA/AVHRR, EOS/MODIS, ...
    - (マイクロ波)Aqua/AMSR-E(左下図), TRMM/TMI, DMSP/SSMIS(I), ...
- サウンダ(鉛直探査計):
  - 複数の画像の差分等からプロファイルを求める
    - (赤外)NOAA/HIRS, Aqua/AIRS, MetOp/IASI, ...
    - (マイクロ波)NOAA/AMSU(右下図), NOAA/MHS, DMSP/SSMIS(S), ...

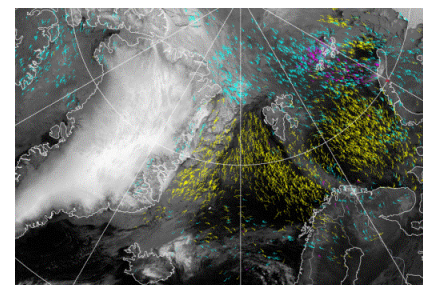
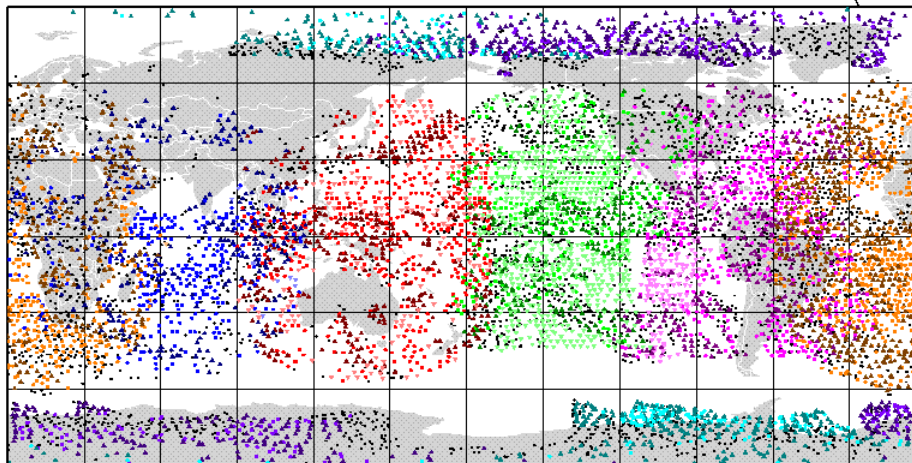
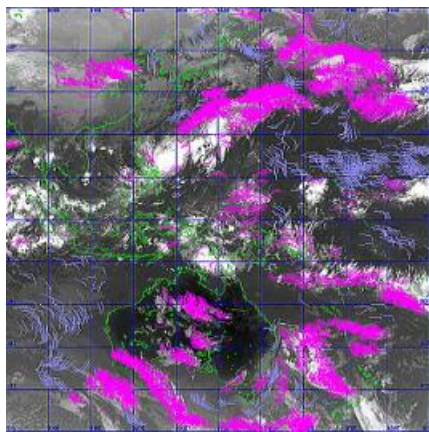




# 大気追跡風

- AMV: Atmospheric Motion Vector
  - 連続する複数の画像から、雲や大気のパターン追跡を行い、風を見積もるプロダクト
    - 静止衛星の主要プロダクト(60S-60N)
    - 近年(2003年頃から)極軌道衛星で極域の軌道の重なりから同様のプロダクトが算出されるようになった→極域衛星風

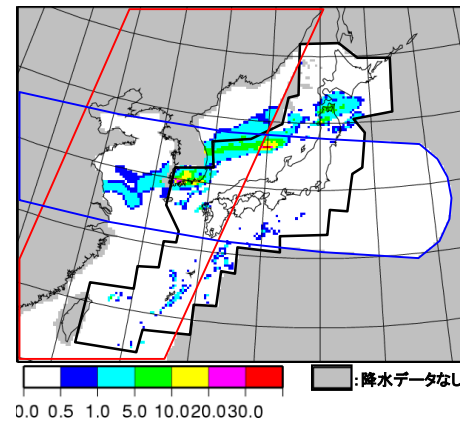
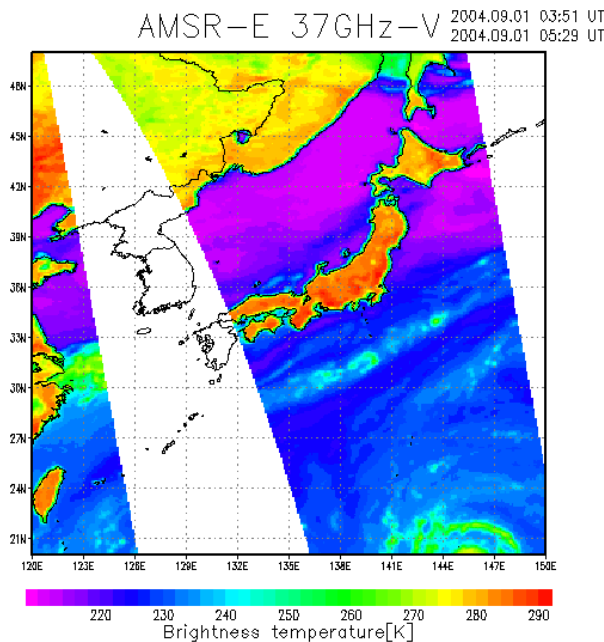
ATMOSPHERIC MOTION VECTOR 2010/04/04 00:00(UTC)



MTSAT-1	GOSE-11	GOSE-12	Meteosat-7	Meteosat-9	Terra	Aqua
IR[●]: 449	IR[●]: 255	IR[●]: 457	IR[●]: 307	IR[●]: 729	IR[●]: 280	IR[●]: 204
VS[▽]: 159	VS[▽]: 594	VS[▽]: 151	VS[▽]: 8	VS[▽]: 3		
WV[▲]: 342	WV[▲]: 255	WV[▲]: 315	WV[▲]: 289	WV[▲]: 733	WV[▲]: 540	WV[▲]: 425
NOUSE[●]: 180	NOUSE[●]: 916	NOUSE[●]: 805	NOUSE[●]: 335	NOUSE[●]: 718	NOUSE[●]: 610	NOUSE[●]: 456
ALL: 1130	ALL: 2020	ALL: 1728	ALL: 939	ALL: 2183	ALL: 1430	ALL: 1085

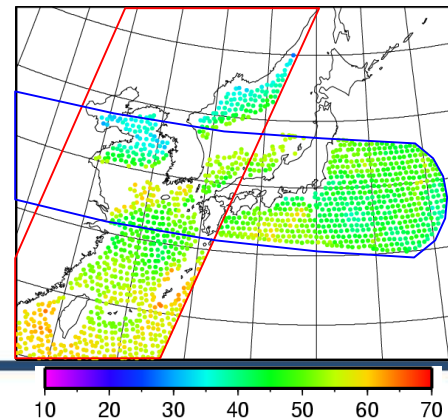
# マイクロ波イメージャデータ

- 同化利用されているプロダクト
  - 輝度温度(全球、海上・晴天域のみ)
  - 降水量リトリバル(メソ、海上・晴天域のみ)
  - 可降水量リトリバル(メソ、海上・晴天域のみ)
  - 下層水蒸気にインパクト



## 降水分布

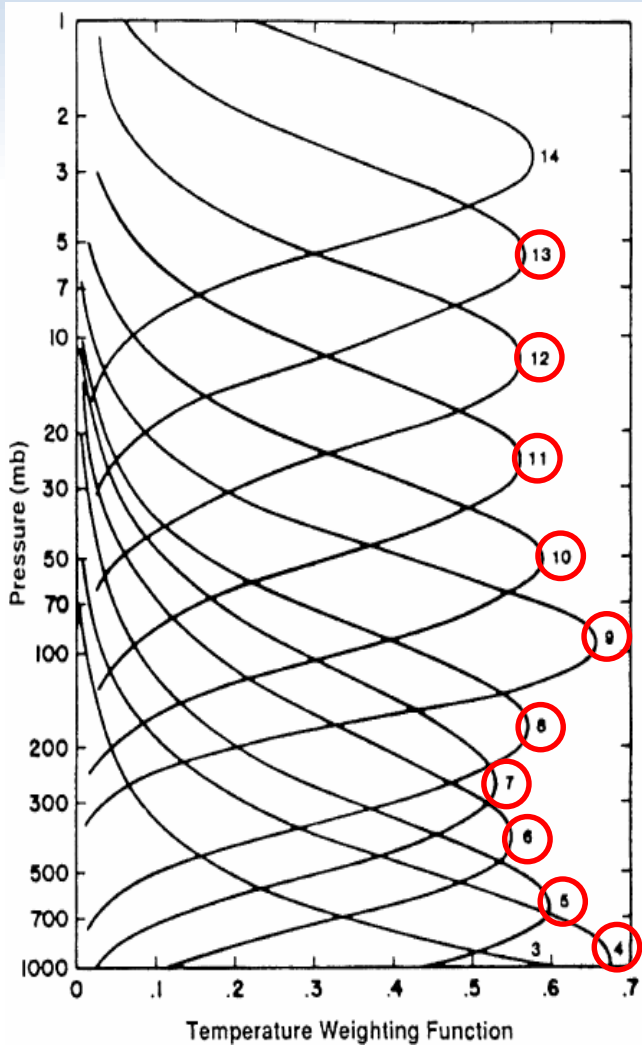
マイクロ波放射計  
推定降水強度と  
RAの合成



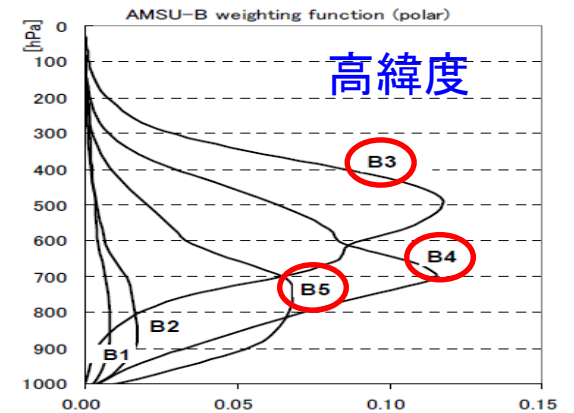
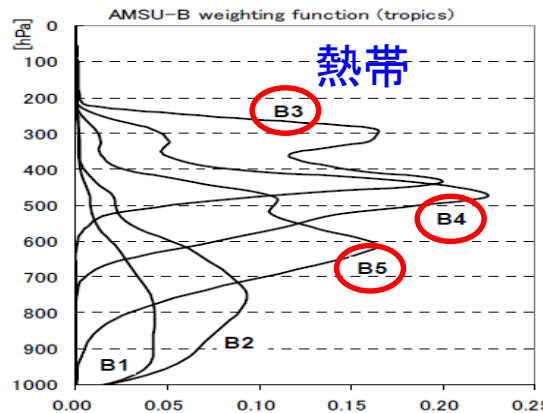
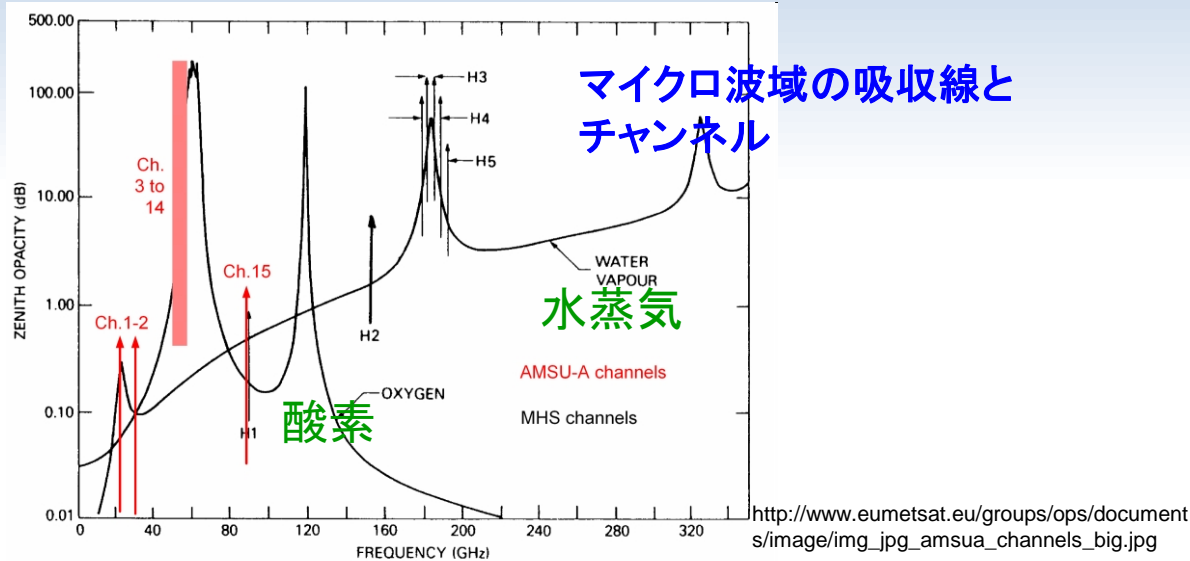
## 可降水量分布



# AMSU-A、AMSU-Bの荷重関数



AMSU-A ch3~14 の荷重関数  
(Janssen 1993)

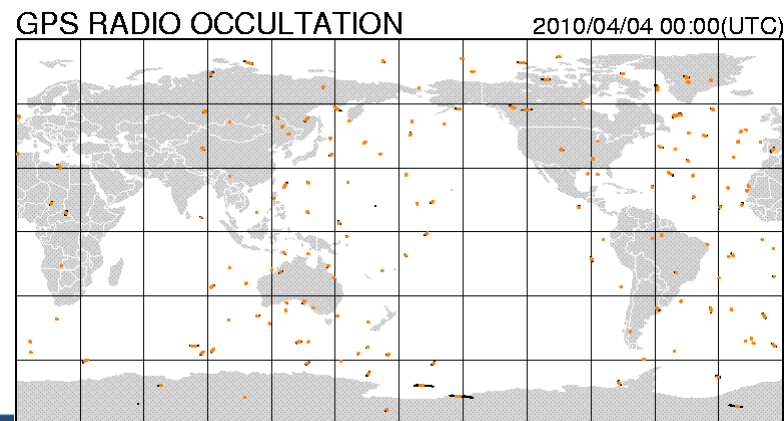
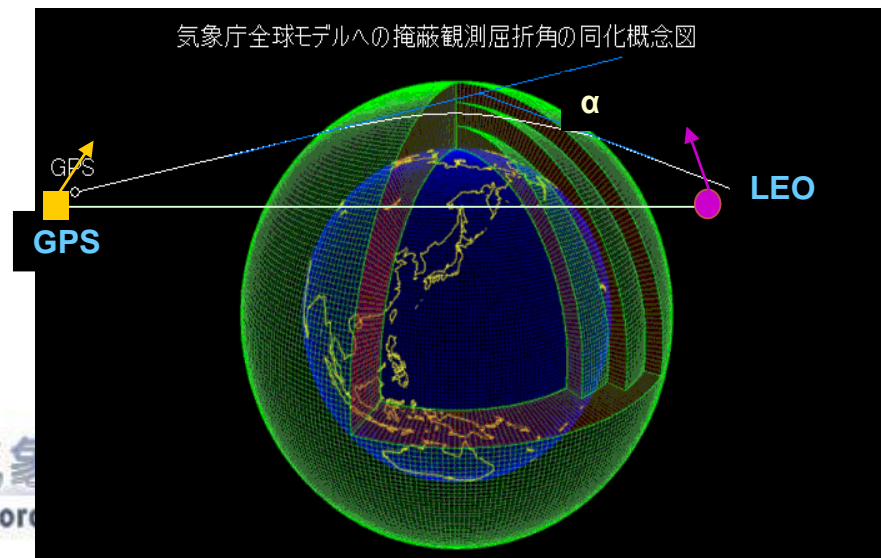


AMSU-B の荷重関数  
左:熱帯 右:高緯度

JMA全球解析で使用中のch

# GNSS掩蔽観測

- GNSS-RO(GPS-Radio Occultation)
  - MetOp/GRAS/COSMIC
  - GPS衛星(高度2万km)が発信する電波を、低軌道衛星(LEO, 高度数百km)のレシーバで受信
  - 電波は伝搬経路の大気の状態に応じて屈折
    - 測定されるのはそれによって生じる遅延量
    - 遅延量 → 屈折角 → 屈折率 → 気温・水蒸気量
      - 個々のリトリーブ処理(→)ではある仮定条件が入る
  - 水平分解能は低い(～200km)が、鉛直分解能は高い(0.5-1km)



# ひまわり8号

- 気象庁の静止気象衛星
- 2014年10月7日打上げ
- 2015年7月7日正式運用開始
- 画像の解像度が4倍、頻度は12倍に
- 世界初、カラーでの撮影が可能に
- 北海道・江別に運用副局
  - 正局は埼玉県は富山町・東京都

