



高速放射伝達モデルRTTOVを使った衛星観測データの同化

気象庁予報部数値予報課
岡垣晶

もくじ

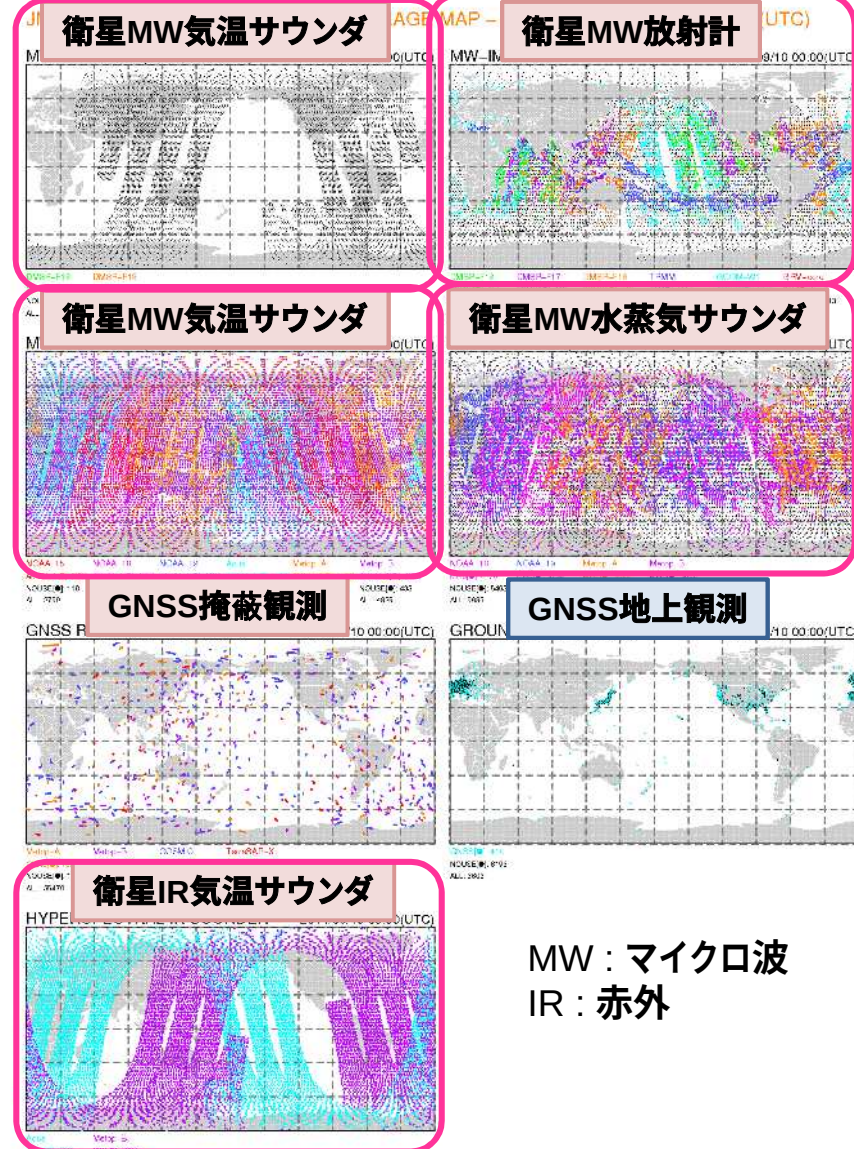
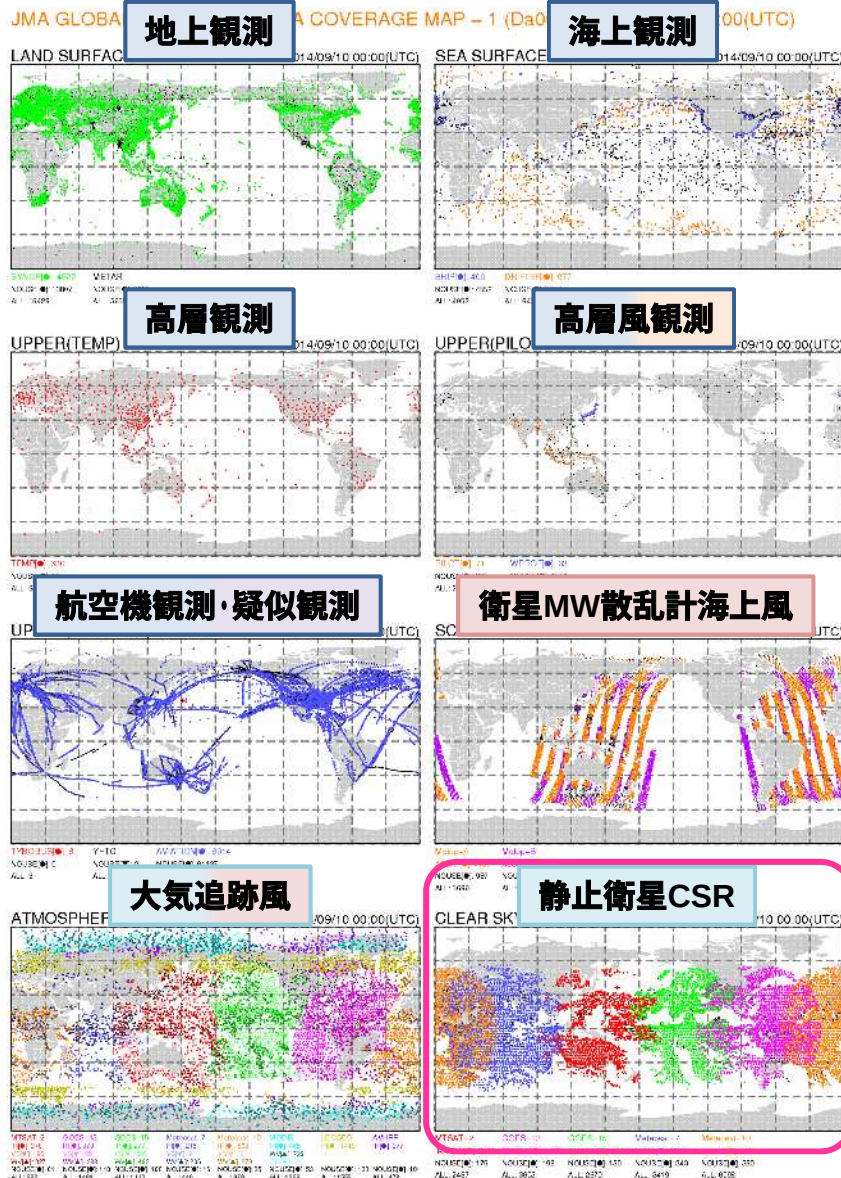
- イン트로ダクション
 - 気象庁の数値予報解析システムと観測データ
- RTTOVによる輝度温度計算と同化
 - RTTOVの特徴
 - 変分法による輝度温度同化
 - リトリブ量と直接同化
- 同化の高度化に向けた課題

数値予報解析システムの仕様

	全球解析	メソ解析	局地解析
主目的	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
手法	4次元変分法	4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/58層
解像度 (インナー)	約55km/100層	15km/40層	5km/48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
同化ウィンドウ	6時間	3時間	1時間x3
データ打ち切り時間	速報: 2h20m サイクル: 00,12UTC:11h50m 06,18UTC:07h50m	50min	30min

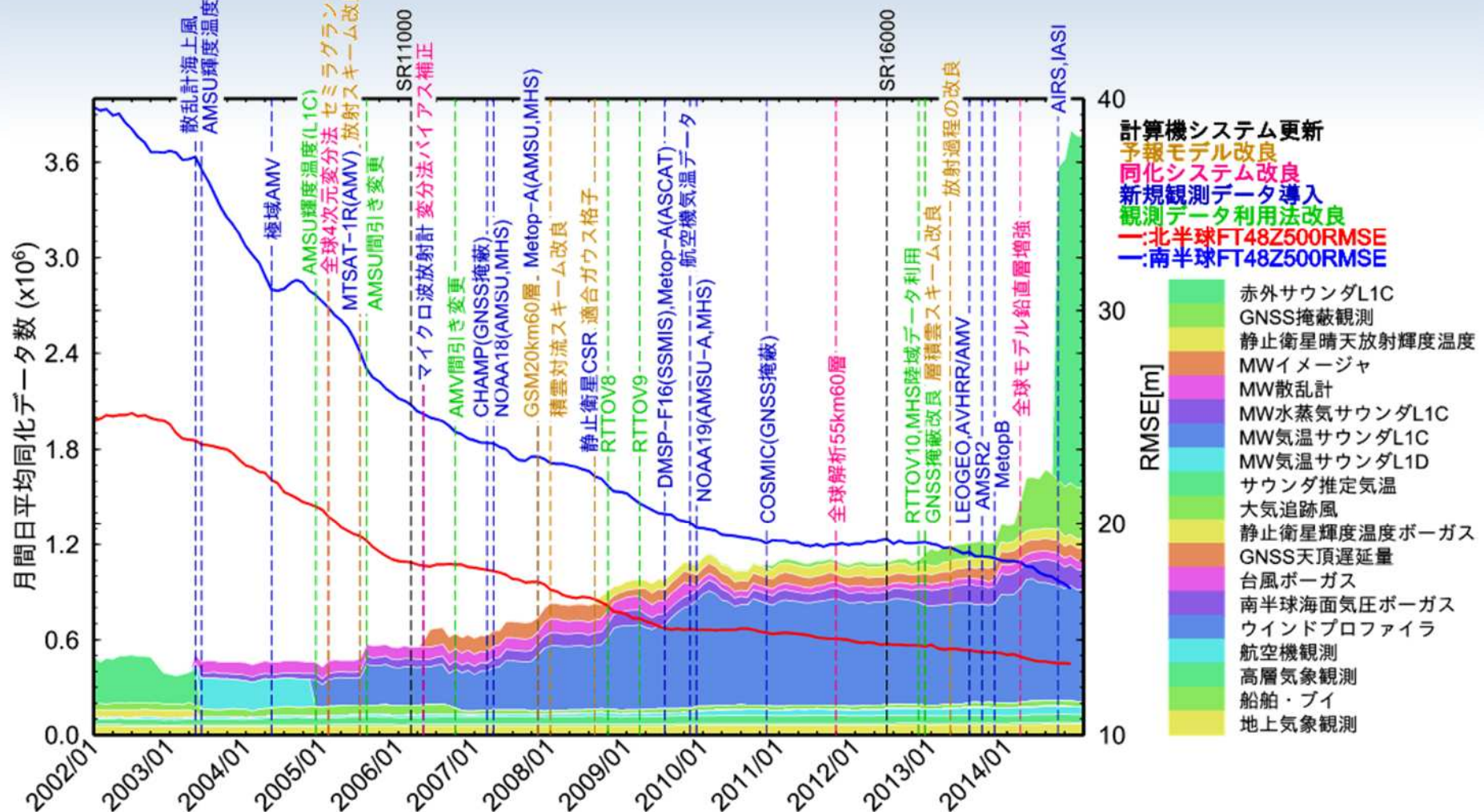
観測データ分布 (サイクル解析; +11^h50^m@00UTC)

RTTOVによる輝度温度同化



MW : マイクロ波
IR : 赤外

利用データ数の時系列 (全球サイクル解析)



- データ数の増加に伴って、予報誤差が減少
- 衛星データの割合が年々増加 (利用可能なデータの増加と、利用方法の改良)
- 予報精度の維持・向上のためには、新しい観測への対応と、それに適した利用方法の開発を、継続して行う必要がある

RTTOVによる輝度温度計算と同化

第8回気象庁数値モデル研究会「数値予報を用いた衛星観測シミュレーション」

RTTOV <https://nwpsaf.eu/deliverables/rtm/>

衛星の視線
方向

太陽の角度

観測地点での
大気・地表の状態変数

x

放射伝達モデル

$$y = H(x)$$

$$H_{ij} = \frac{\partial y_i}{\partial x_j}$$

y : あるセンサの観測 (するだろう) 値

iはチャンネル番号、
jは要素/鉛直レベル番号

特徴

- 実在の衛星搭載センサが観測する放射輝度をシミュレート
 - 過去～近い将来の幅広いセンサに対応
- 高速
 - 現業数値予報での利用を念頭に
 - ~1ms for 40 channel ATOVS on a desktop PC
 - 晴天放射なら
 - 各層の光学的厚さを回帰式で近似
- 接線形,随伴モデル(TL,AD)にも対応
 - 変分法データ同化での利用

Platform	RTTOV ID	Sat ID range
NOAA ¹	1	1 to 19
DMSP	2	8 to 18
Meteosat	3	1 to 7
GOES	4	4 to 16
GMS	5	5
FY2	6	2 to 4
TRMM	7	1
ERS	8	1 to 2
EOS	9	1 to 2
METOP	10	1 to 2
ENVISAT	11	1
MSG	12	1 to 3
FY1	13	3 to 4
ADEOS	14	1 to 2
MTSAT	15	1 to 2
COROLIS	16	1
JPSS/NPP	17	0
<i>GIFTS</i>	18	1
Sentinel3	19	1
MeghaTropique	20	1
<i>Kalpana</i>	21	1
Spare	22	-
FY3	23	1 to 3
COMS	24	1
METEOR-M	25	1
GOSAT	26	1
CALIPSO	27	1
Reserved	28	-
GCOM-W	29	1
Nimbus	30	6
Himawari	31	8 to 9
MTG	32	1
Saral	33	1
Metop-SG	34	1
Landsat	35	4,5,7,8
<i>Jason</i>	36	4
GPM	37	1
<i>INSAT-1</i>	38	1 to 4
<i>INSAT-2</i>	39	1 to 5
<i>INSAT-3</i>	40	1 to 5
Reserved	41	-

¹ Includes TIROS-N

RTTOVがサポートしているプラットフォームとセンサ。2014年6月時点。(Hocking et al. 2014)

Sensor
HIRS
MSU
SSU
AMSU-A
AMSU-B
AVHRR
SSM/I
VTPR1
Spare
TMI
SSMIS
AIRS
HSB
MODIS
ATSR
MHS
IASI
AMSR-E
GMS imager
ATMS
MVIRI
SEVIRI
GOES imager
GOES sounder
MTSAT imager
FY2-3/4 VISSR
FY1 MVISR
CrIS
Spare
VIIRS
WINDSAT
<i>GIFTS</i>
SSM-T1
SSM-T2
SAPHIR
MADRAS
Spare
VHRR
INSAT imager
INSAT sounder
FY3 MWTS
FY3 MWHS
FY3 IRAS
FY3 MWRI
GOES-R ABI
COMS MI
MSUMR
Reserved
Calipso IIR
ESA MWR
Reserved
SCAMS
SMMR
AHI
IRS

AtiKa
IASI-NG
TM
FCI
AMSR1
AMSR2
FY2-2 VISSR
SLSTR
TIRS
AMR
OLI
IRIS
ICI
GMI
MWTS-2
MWHS-2
ASTER
Reserved

RTTOVで計算可能な衛星 ／センサ

- 過去～現在～近い将来のセンサをサポート
 - 打ち上げ前でも、センサ応答関数を基に対応
 - e.g. himawari8/ahi
 - すでに運用終了したものもサポート継続
 - 再解析での利用
 - 打ち上げ後の実観測を基に修正されることも
- 赤外、マイクロ波
 - 最新バージョン11では可視・近赤外も

晴天放射計算

大気上端での上向き放射輝度

$$L^{Clr}(\nu, \theta) = \tau_s(\nu, \theta) \varepsilon_s(\nu, \theta) B(\nu, T_s) + \underbrace{\int_{\tau_s}^1 B(\nu, T) d\tau}_{\text{大気からの寄与}} + (1 - \varepsilon_s(\nu, \theta)) \tau_s^2(\nu, \theta) \int_{\tau_s}^1 \frac{B(\nu, T)}{\tau^2} d\tau$$

大気からの寄与

τ : 大気の透過率

d : 光学的厚さ $\tau = e^{-d}$

$$d_{i,j} = d_{i,j-1} + \sum_{k=1}^K a_{i,j,k} X_{k,j}$$

$d_{i,j}$: チャンネル i での、レベル j から宇宙までの光学的厚さ

K : 説明変数の数

$a_{i,j,k}$: 回帰係数

$X_{k,j}$: 説明変数 (大気状態に依存)

- ラインバイライン (LBL) モデルにより、さまざまな大気プロファイルにおける、各層の光学的厚さを精密に計算しておく。
- LBLで計算した光学的厚さを目的変数とし、各層の持つパラメータ (説明変数) で回帰式を作成する。
- RTTOVは、この回帰係数と、ユーザが入力した大気状態で構成する説明変数とを使って、任意の層の光学的厚さを計算する。

透過率

1

τ

$\tau + \Delta\tau$

τ_s



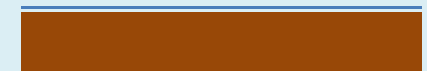
光学的厚さ

0

:

d

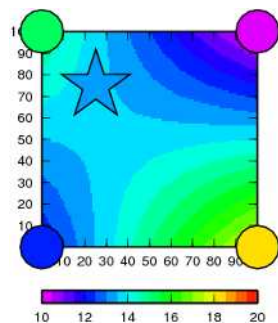
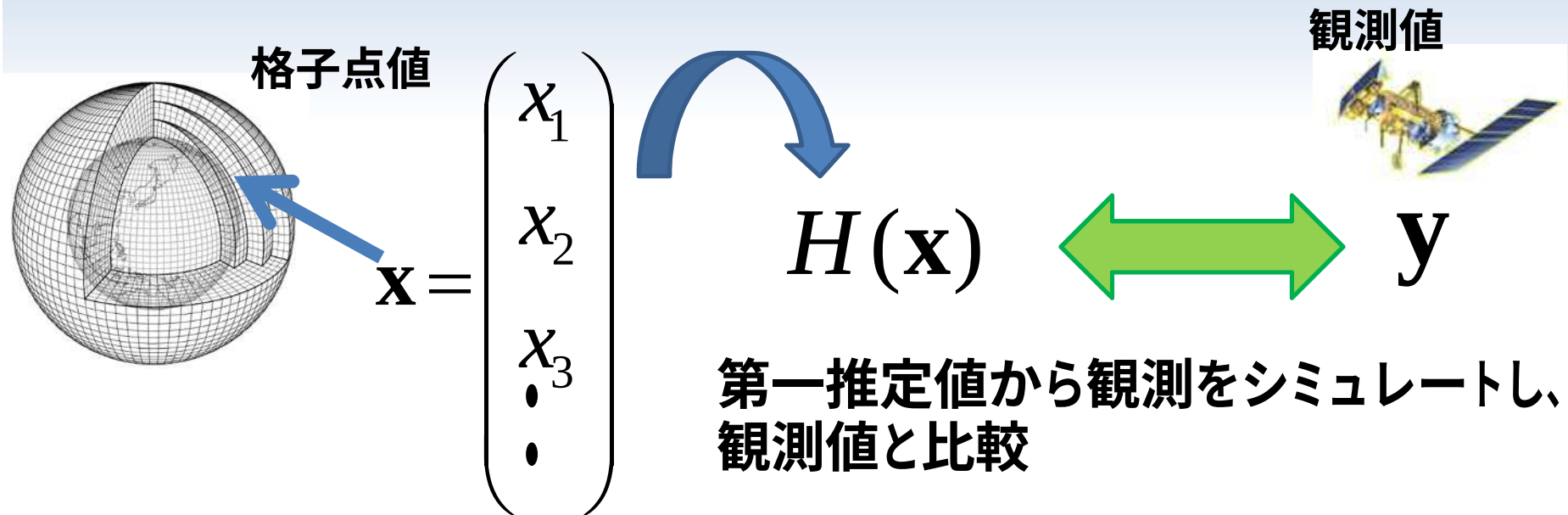
$d + \Delta d$



RTTOVの計算 v10

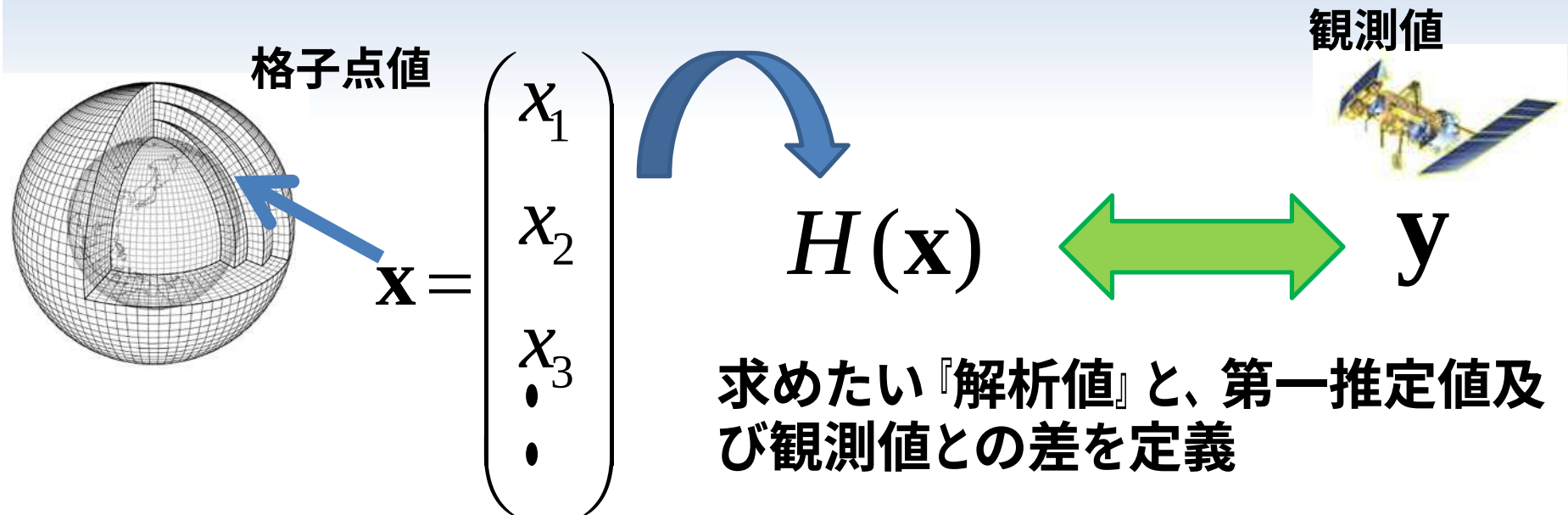
		赤外	マイクロ波
LBLモデル		LBLRTM v11.1 (Clough et al., 2005)	AMSUTRAN (a version of MPM, Liebe 1989)
吸収線DB		MTCKD (連続吸収帯) HITRAN2004 (Rothman et al., 2005) (分子吸収)、ただし HITRAN_2000 (Rothman et al., 2003) (オゾン1000-1080cm ⁻¹) GEISA_2003 (Jacquinet-Husson et al., 2005) (水蒸気1700-2400cm ⁻¹)	MPM-92
可変気体		H ₂ O, O ₃ , CO ₂ , NO, CH ₄ , CO	H ₂ O
層数		51 (ハイパースペクトルサウダは101)	51
学習用プロファイル		83 profiles from ECMWF analyses (Chevallier et al. 2006)	
地表 面射 出率	海	ISEM (Sherlock 1999)	FASTEM 1-5 (Liu et al 2010)
	陸	atlas (Seeman et al 2008, Borbas et al 2007)	atlas, TELSEM (Prigent 2008, Aires et al 2011) or Karbou et al. (2006)
雲・降水		Scaling approximation, Stream method (Matricardi 2005)	δ-Eddington approximation (Bauer et al 2006) Profile-average cloud fraction (Geer et al 2009)

変分法によるデータ同化



- モデルと観測とのマッチング
 - 空間内挿 e.g. 周囲4点からの線形内挿, 最近接格子
 - 時間内挿 e.g. 前後のタイムステップからの線形内挿, 最近接ステップ
- 観測される物理量 (e.g. 放射輝度) の導出 ←シミュレーション
- モデル格子相当の観測値をひねり出す、というアプローチも

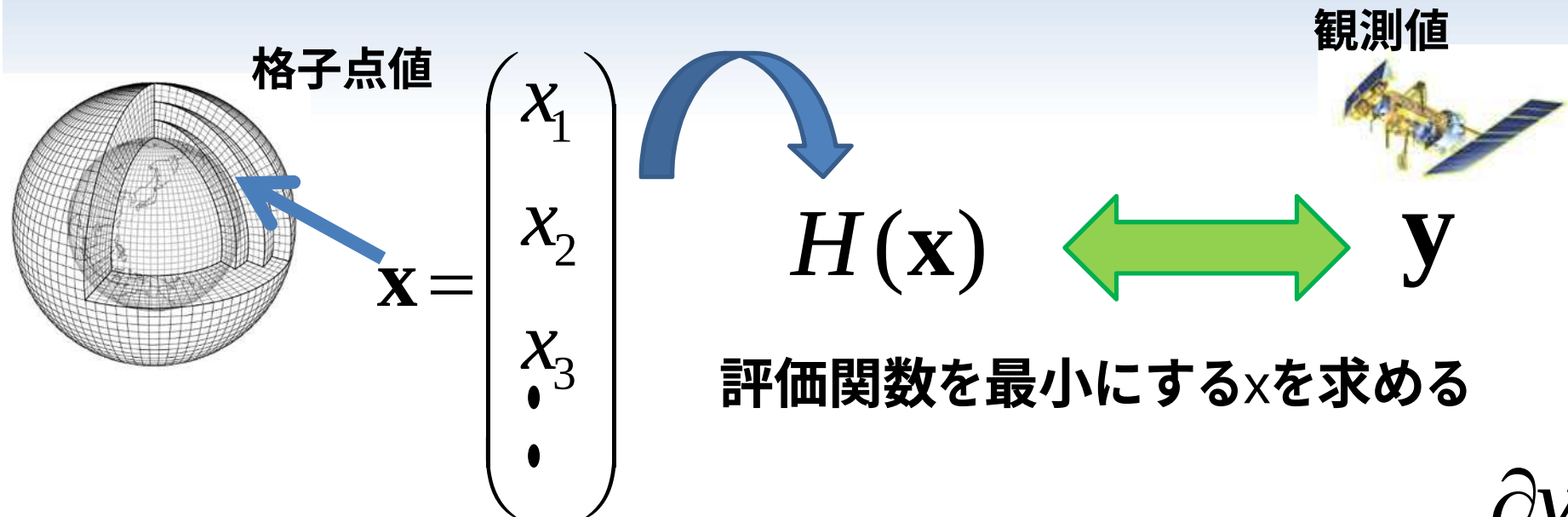
変分法によるデータ同化



$$2J(\mathbf{x}) = (\mathbf{x} - \mathbf{x}_b)^T \mathbf{B}^{-1} (\mathbf{x} - \mathbf{x}_b) + (H\mathbf{x} - \mathbf{y})^T \mathbf{R}^{-1} (H\mathbf{x} - \mathbf{y})$$

- J: 評価関数(cost function)
 - x: 解析値
 - $\mathbf{x}_b$: 第一推定値
 - B: 第一推定値の誤差
 - y: 観測値
 - R: 観測値の誤差

変分法によるデータ同化



$$\nabla J(\mathbf{x}) = \mathbf{B}^{-1}(\mathbf{x} - \mathbf{x}_b) + \mathbf{H}^T \mathbf{R}^{-1}(\mathbf{H}\mathbf{x} - \mathbf{y}) \quad H_{ij} = \frac{\partial y_i}{\partial x_j}$$

- 最小値探索で評価関数の勾配 ∇J を使う
- ∇J の計算に、線形化した H を使う

リトリリーブ量同化と輝度温度(直接)同化

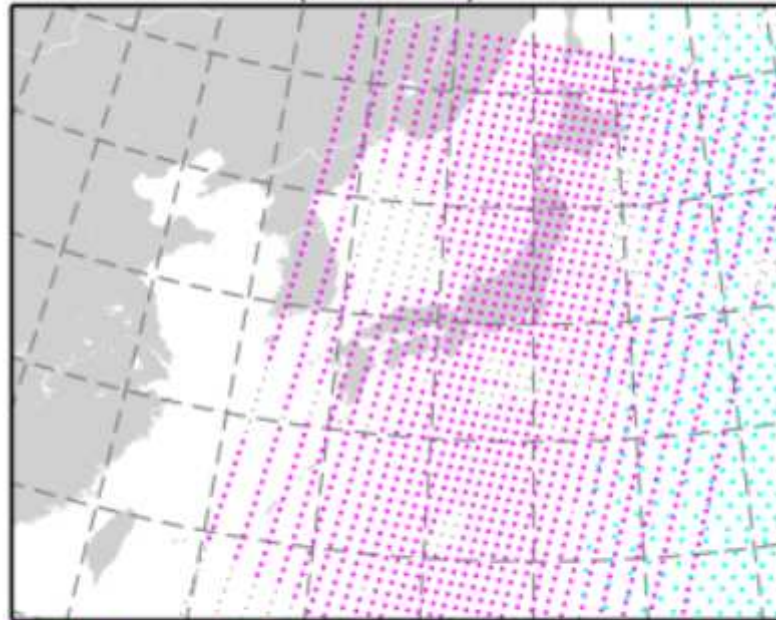
	○	×
リトリリーブ量同化	- 観測演算子が単純 - 最適内挿法など比較的単純な同化スキームでも利用可能	- アルゴリズム開発に時間がかかる - リトリリーブの過程における誤差 (様々な仮定等) の混入 - 作成方法、プロダクトの仕様が、配信元に委ねられる (算出地点数が変わったり、いきなり誤差特性が変わることも)
輝度温度直接同化	- アルゴリズム開発の必要がない →打ち上げ～利用開始までの期間短縮 - 誤差特性が比較的単純 - 利用者のニーズに応じて、利用方法を柔軟に設定できる	- 観測演算子が複雑 - 最適内挿法など比較的単純な同化スキームでは利用できない

- リトリリーブ(retrieve)とは
 - 観測値から気象に関わる物理量を算出すること
 - 例:放射輝度から、気温・水蒸気・雲水量の鉛直分布を求める
 - 算出の際、モデルGPVを利用することも
 - 90年代頃まで、数値予報に同化される衛星データの主流

リトリーブ量同化と輝度温度同化 データ分布の違いの例

メソ, 2010年

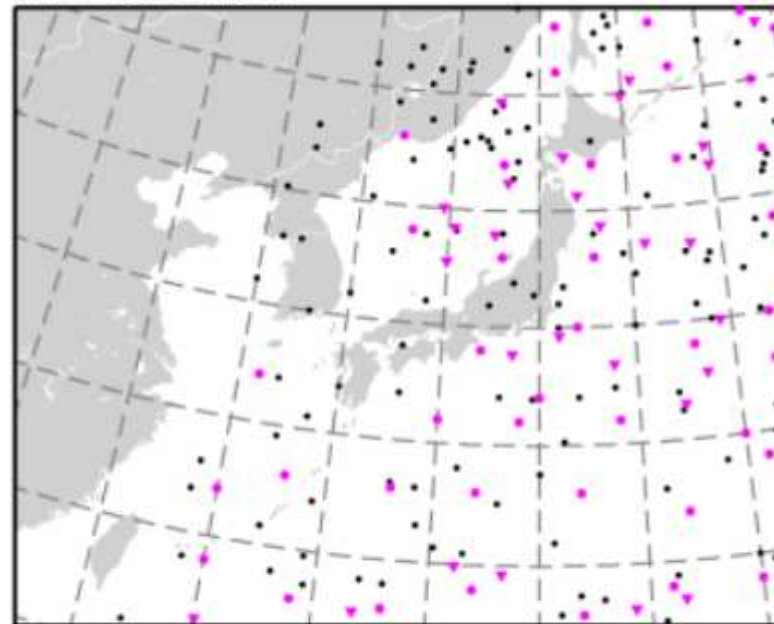
MW-SOUNDER(AMSU-A)



NOAA-18 Aqua
AMSU-A[●]: 1422 AMSU-A[●]: 328
NOUSE[●]: 161 NOUSE[●]: 32
ALL: 1583 ALL: 360

輝度温度データ(AMSU-A)

MW-SOUNDER



NOAA-15 NOAA-17 NOAA-18 NOAA-19 METOP-2
SATEM[●]: 43 SATEM[●]: 0
ATOVS[▼]: 29 ATOVS[▼]: 0
MSC[▲]: 0 MSC[▲]: 0
NOUSE[●]: 16 NOUSE[●]: 113
ALL: 88 ALL: 113

リトリーブ気温データ

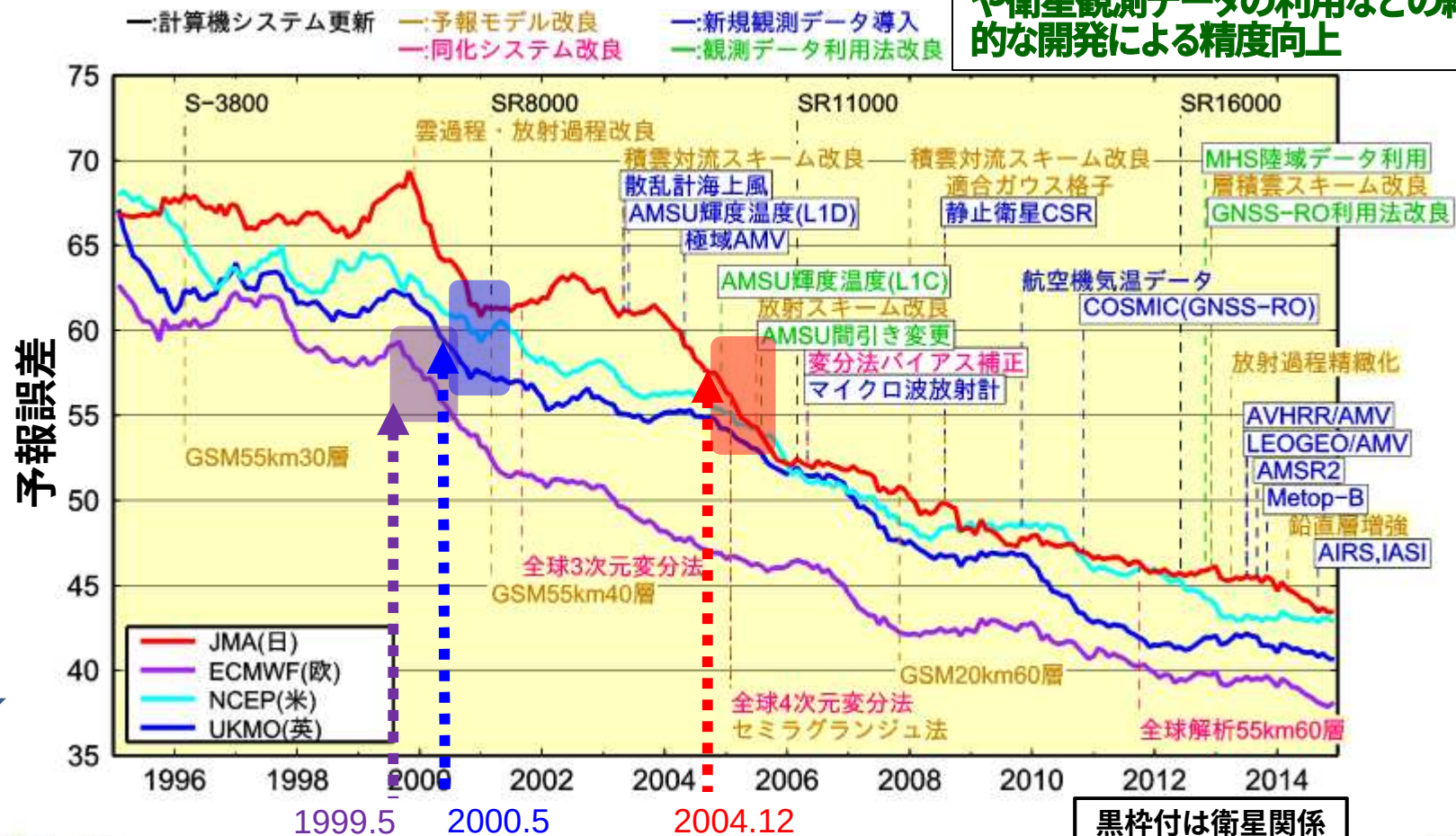
全球モデルの改良と精度向上

北半球5日予報500hPa高度RMSEの経年変化

(1995年1月～2014年12月、前12ヶ月移動平均)

予報モデル・データ同化システム改良
や衛星観測データの利用などの継続
的な開発による精度向上

低
↑
精度
↓
高

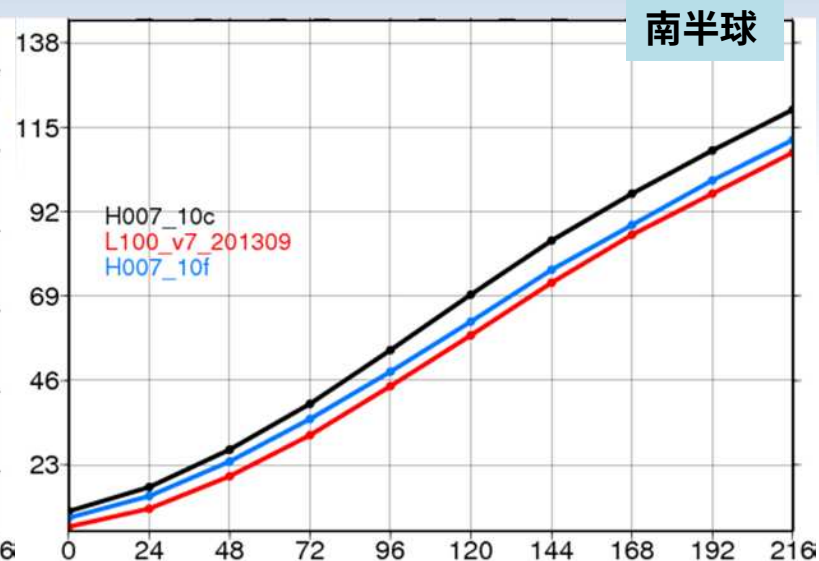
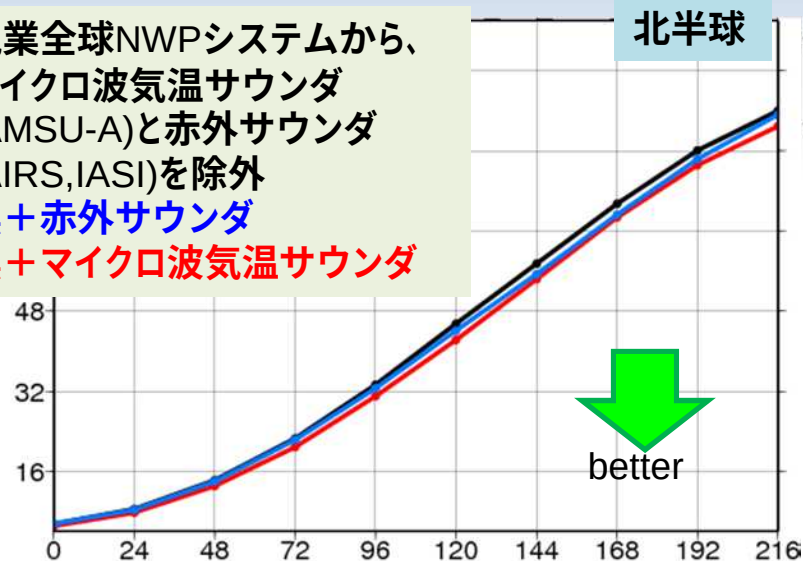


輝度温度同化のインパクト

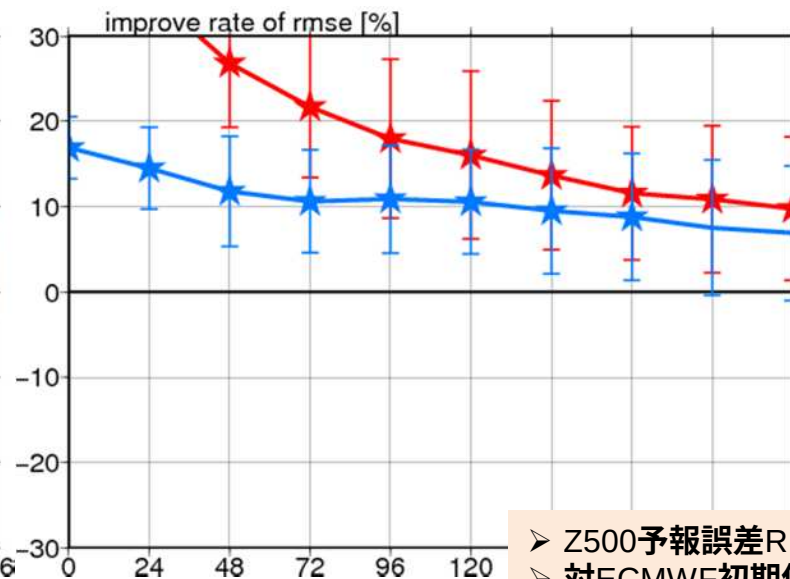
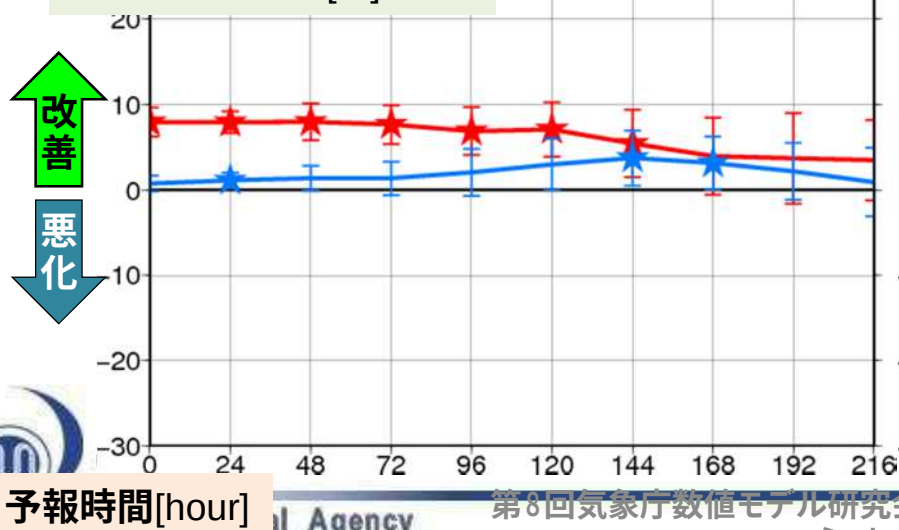
黒：現業全球NWPシステムから、
マイクロ波気温サウンダ
(AMSU-A)と赤外サウンダ
(AIRS, IASI)を除外

青：黒＋赤外サウンダ

赤：黒＋マイクロ波気温サウンダ



黒に対する青又は赤の
RMSEの改善率[%]



- Z500予報誤差RMS
- 対ECMWF初期値
- 2013年8月21日～10月11日
- エラーバーは95%信頼区間



予報時間[hour]

第8回気象庁数値モデル研究会「数値予報を用いた衛星観測シミュレーション」

衛星データ同化の高度化に向けた 課題

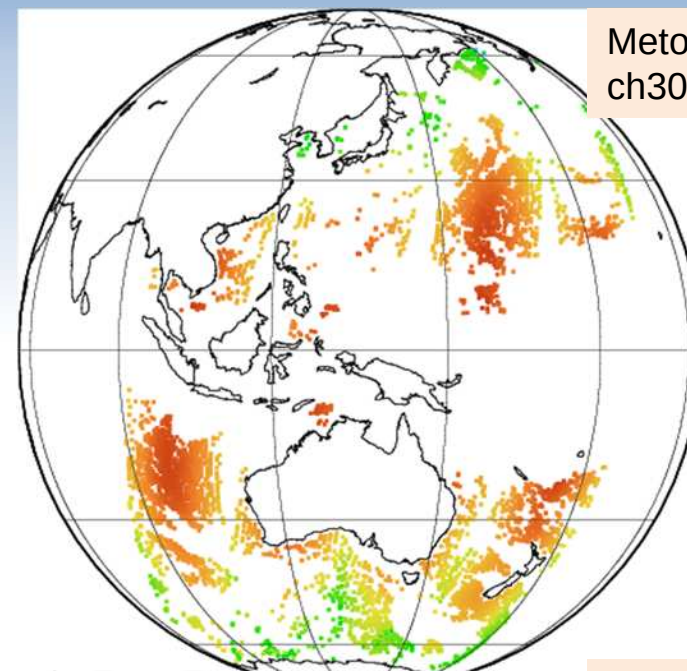
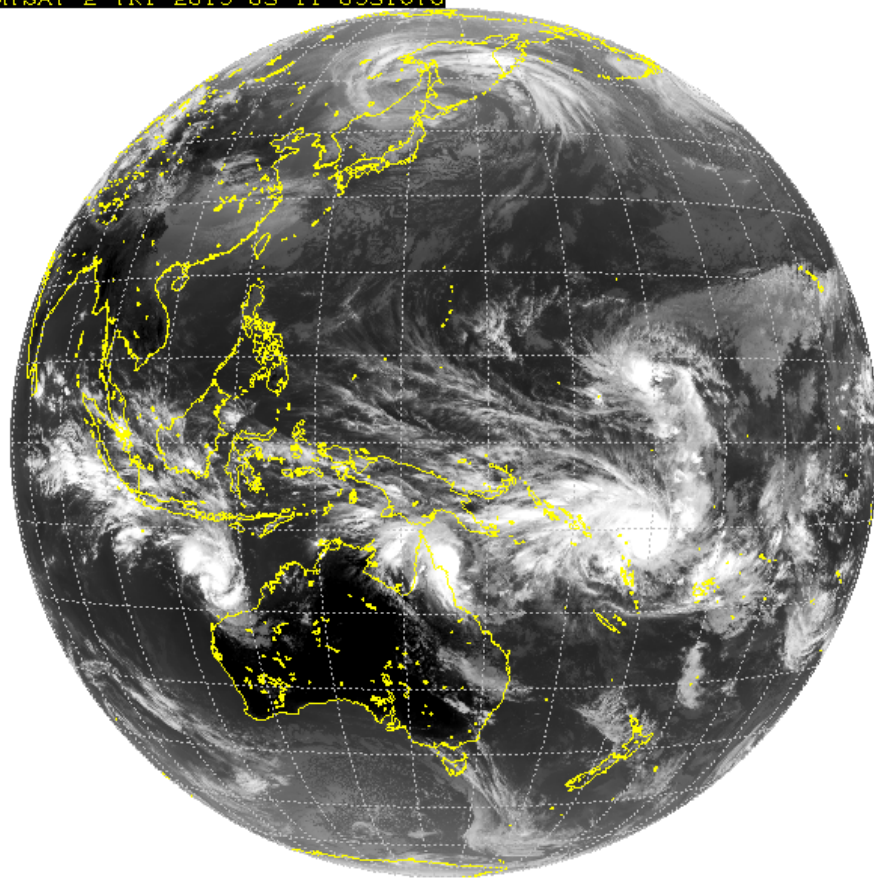
第8回気象庁数値モデル研究会「数値予報を用いた衛星観測シ
ミュレーション」

衛星データ同化の高度化に向けた課題

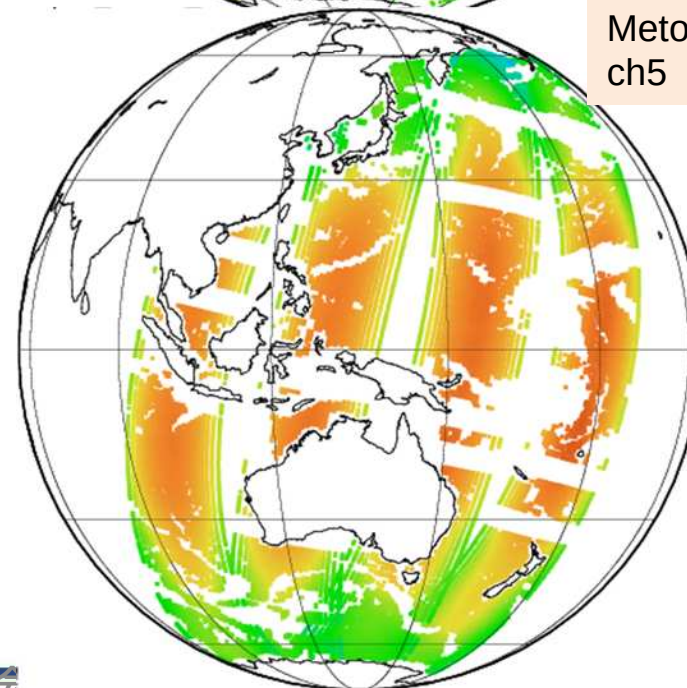
- 雲・降水域の輝度温度データの同化
 - 現在は、雲・降水の影響を強く受けた輝度温度データは同化されていない
 - (例外: メソ解析での、マイクロ波イメージャ輝度温度からリトリブされた降水強度)
 - 雲・降水域による射出・散乱を考慮した放射伝達モデルと、雲・降水についての高精度な第一推定値が必要
- 陸域輝度温度データ同化の高度化
 - 現在は、陸域の地表面射出率として、マイクロ波サウンダでは気候値、赤外センサは固定値を利用
 - 陸面射出率及び地表面温度を適切に求めることが必要
- 衛星搭載レーダー・ライダーの利用
 - 観測演算子 (シミュレータ) の開発、高精度な第一推定値が必要
 - 小さな空間スケールの観測からどのように情報を取り出すか？

- 対流圏中～下層に感度があるチャンネル(IASI309, AMSU-A5)の利用地点の例
- 陸は同化していない
- 雲・降水に強く影響を受けたデータは同化していない
 - 赤外ではマイクロ波に比べてより厳格に除去する
 - 観測するチャンネルによって雲・降水に影響を受けているか否かの判断は異なる
 - 一方で、雲・降水域は気象予測にとって重要な領域

MTSAT-2 IRI 2015-03-11 0531UTC



MetopB/IASI
ch309

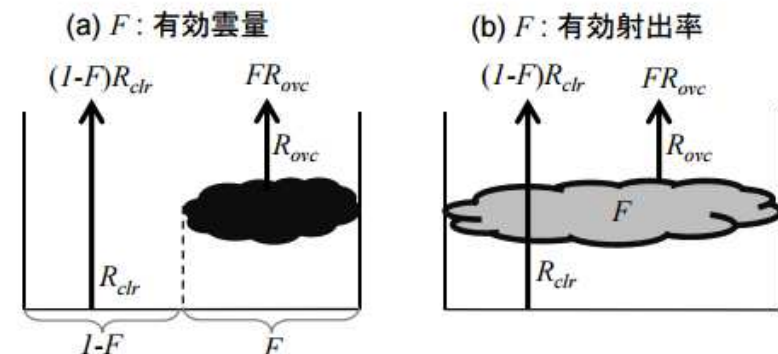


MetopB/AMSU-A
ch5

赤外雲域同化のアイデア

- Simple cloud
 - 仮定: 単層の均一な雲
 - 雲の影響を雲頂高度、有効雲量 (雲量×射出率) のみで表す
 - 大気上端で観測される放射輝度を下の式で近似
 - カラム内の雲の不均一性、オーバーラップ、散乱などの複雑な計算を避けることができる
 - × 薄い上層雲が存在する多層雲、射出率の異なる複数の雲
 - × 射出率の波長依存性が重要になるような広い波数域

$$L(\nu, \theta) = (1 - N)L^{Clr}(\nu, \theta) + NL^{Cld}(\nu, \theta)$$



MTSAT2 IR1

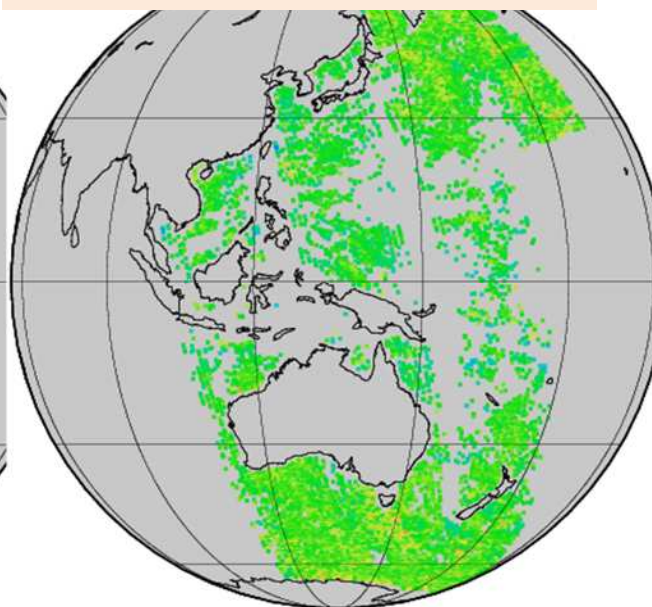
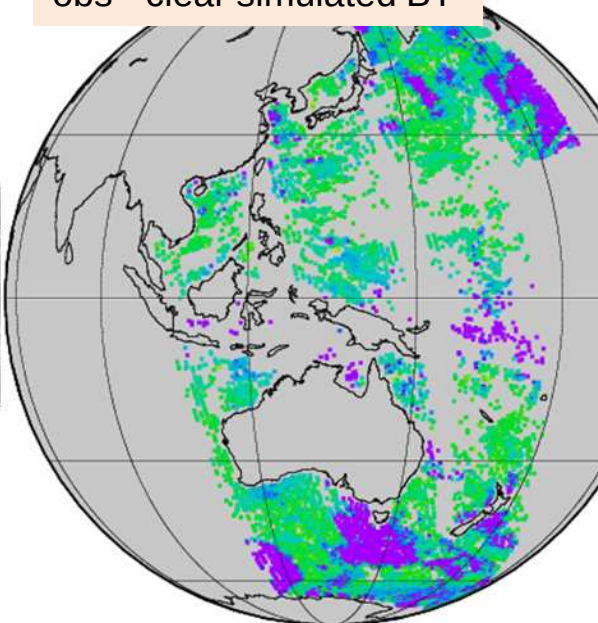
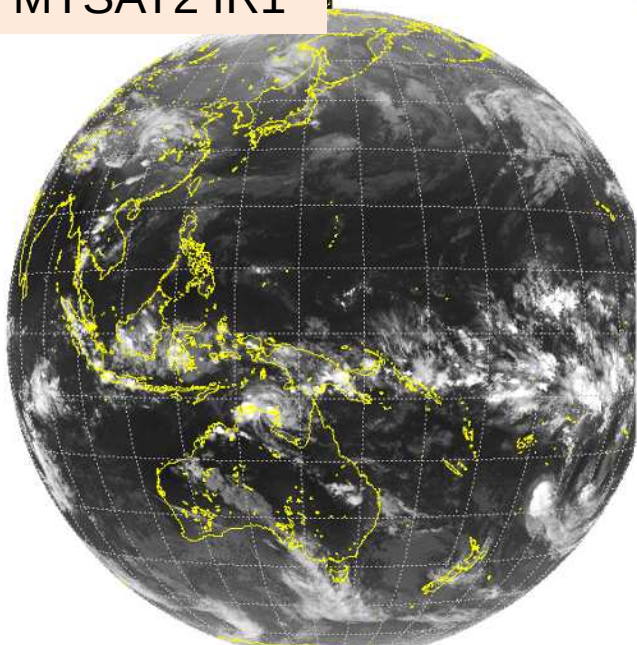
2015/3/22 12UTC

曇り地点

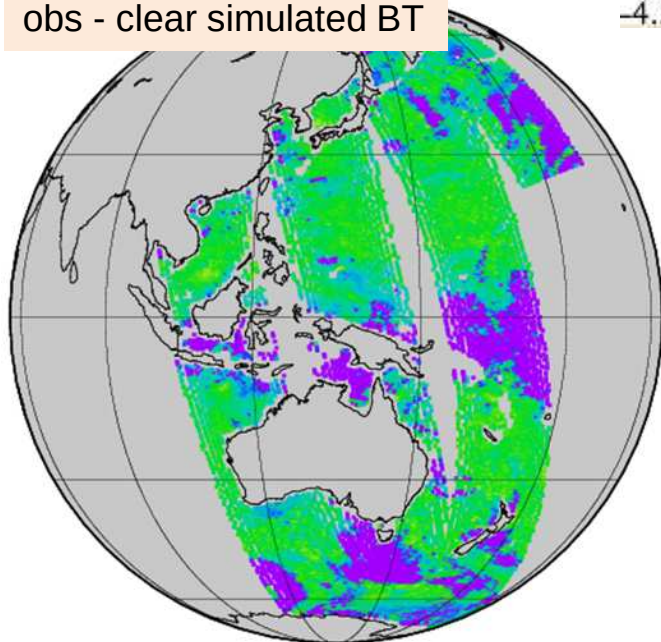
obs - clear simulated BT

曇り地点

Obs - simple cloud simulated BT



MetopA/IASI ch309
obs - clear simulated BT



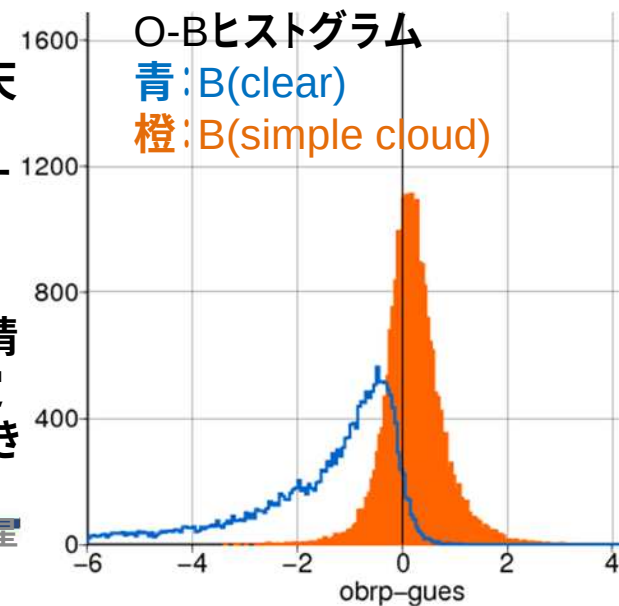
- 現在は、曇り地点は除外し、晴天放射のみ同化している
- 特に赤外は雲の影響を受けやすく、多くのデータが利用できない
- Simple cloudの仮定が成り立つような条件下では、ある程度の精度で雲頂高度と有効雲量を推定できれば、雲域の情報も同化できる可能性

気象庁数値モデル研究会「数値予報を用いた衛星
シミュレーション」

O-Bヒストグラム

青: B(clear)

橙: B(simple cloud)



まとめ

- 数値解析システムで利用している放射伝達モデル RTTOV
 - 現業での利用に適した特性
 - 高速な放射計算
 - 変分法同化システムでのTL/ADの利用
 - 過去～現在～近い将来の衛星、センサに対応
- 衛星観測データは、予報精度維持・向上のため特に重要
 - リトリーブ量同化→輝度温度同化
- 利用の高度化に向けて
 - 雲・降水域、陸域での利用拡大



ご清聴ありがとうございました

第8回気象庁数値モデル研究会「数値予報を用いた衛星観測シミュレーション」