

気象庁による発電予測に関する 取り組み



山田 芳則

気象庁 気象研究所

気象データ活用ワークショップ
東大・生産研

2014年3月25日 13:00～17:30

施設等機関



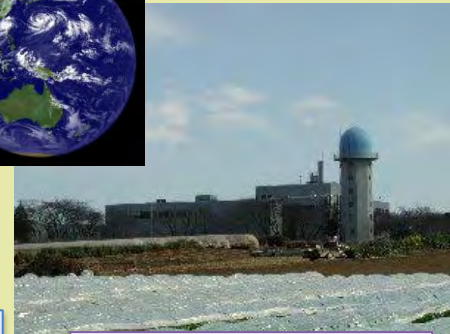
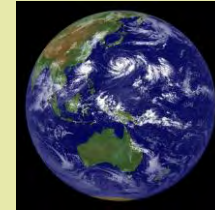
気象庁

札幌管区気象台
仙台管区気象台
東京管区気象台
大阪管区気象台
福岡管区気象台
沖縄気象台

地方気象台
測候所



気象研究所
(つくば)



気象衛星センター
(清瀬)



高層気象台
(つくば)

気象測器検
定センター



地磁気観測所
(柿岡)



気象大学校
(柏)

気象研究所 組織図



予報研究部 重点研究

■ 第一研究室

次世代非静力学気象予測モデルの開発に関する研究

- 非静力学モデルの高度化
- 全球非静力学モデルの開発

■ 第二研究室

メソスケールデータ同化とアンサンブル予報に関する研究

- メソデータ同化技術の高度化
- 観測データ利用手法の高度化
- メソアンサンブル予報技術の開発

■ 第三研究室

顕著現象の機構解明に関する解析的・統計的研究

- 顕著現象の実態把握・機構解明
- 顕著現象の要因に関する解説資料の作成
- 都市効果が顕著現象に及ぼす影響の評価

■ 第四研究室:

意図的・非意図的気象変化に関する研究

意図的気象変化に関する研究

エアロゾルの間接効果に関する研究

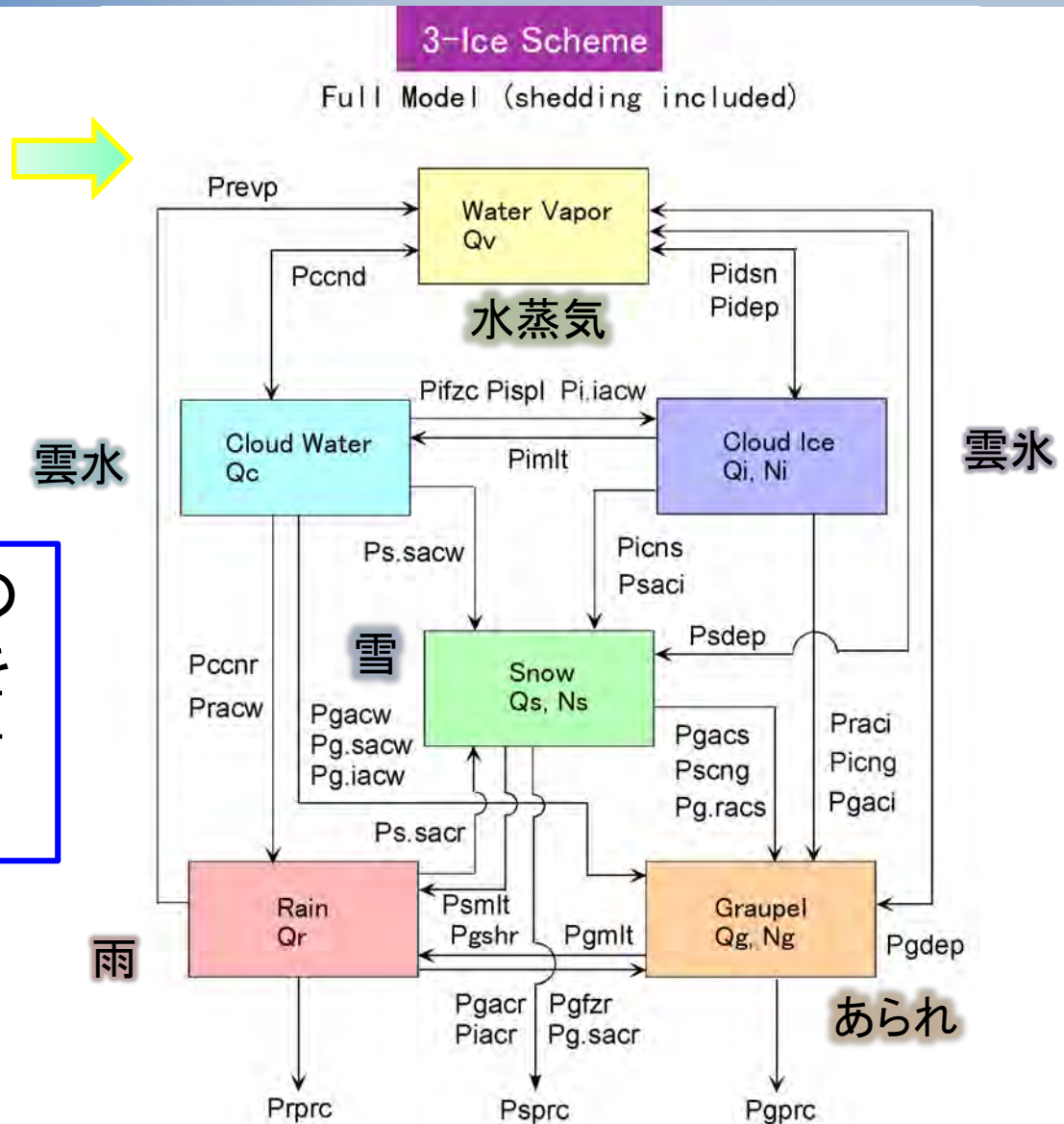
雲の微物理モデル

気象庁のメソ数値予報モデル (MSM) や局地モデル (LFM) で用いられている雲のモデル

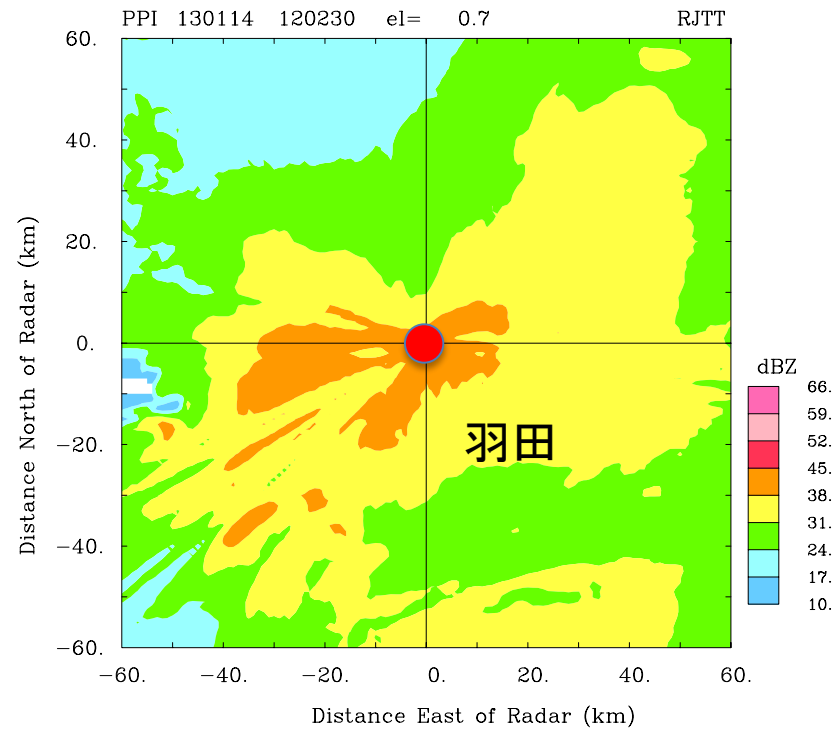
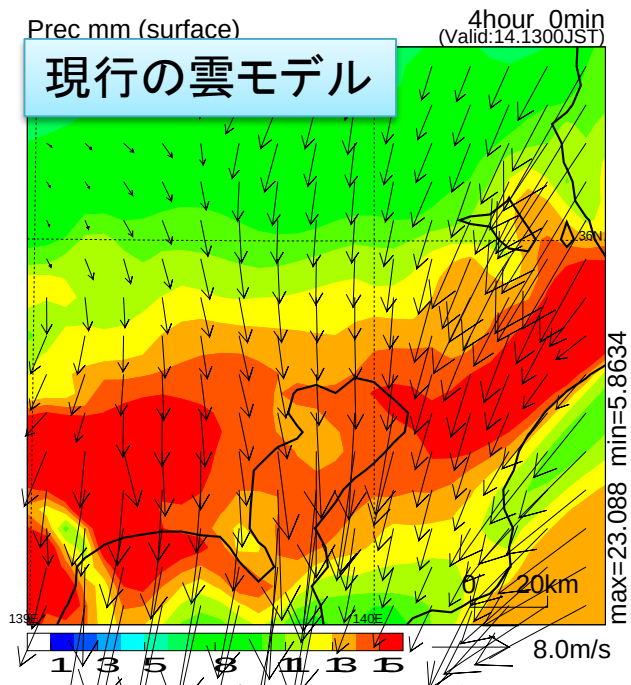
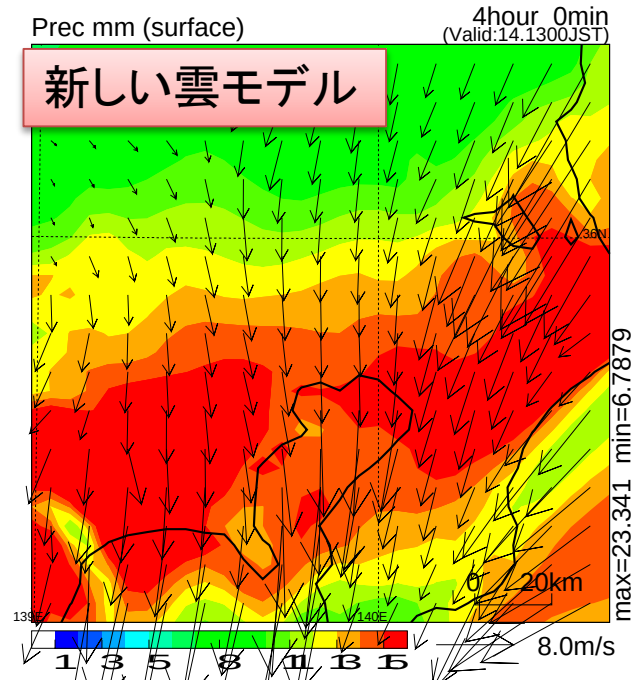
水物質

- 水蒸気
- 雲水
- 雨
- 雲氷
- 雪
- あられ

空間分布の
時間発展を
モデルで計
算



2013年1月14日 東京の大雪



羽田レーダーの反射強度

2011年1月16日12UTC初期値: 水平格子間隔 1 km

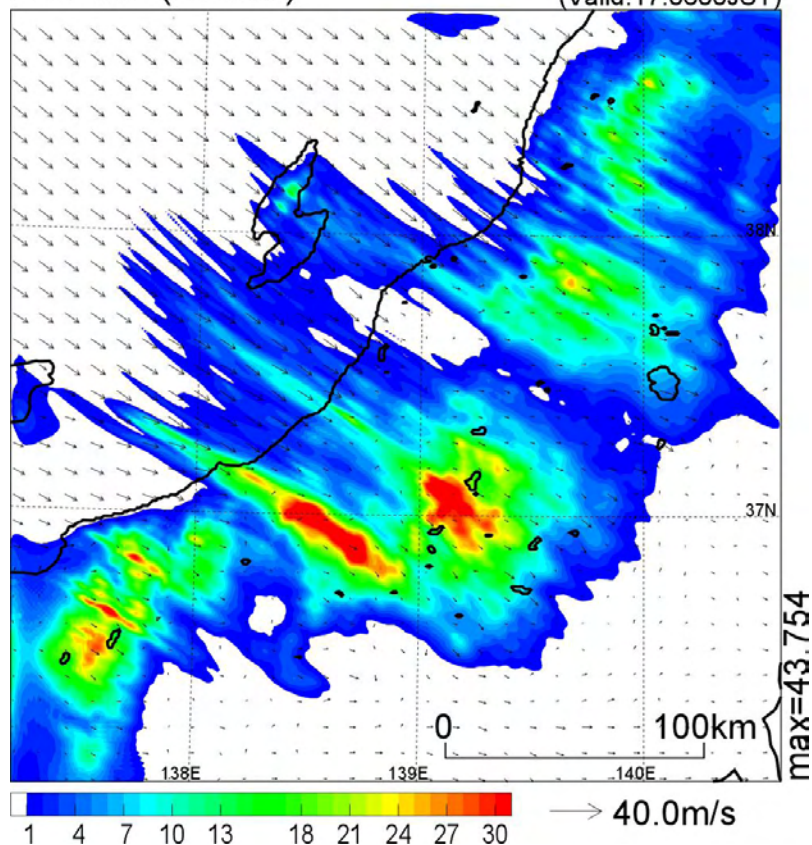
予報時間9時間目での1時間地上降水量

現行

Initial : 2011.01.16.1200UTC

Prec mm (surface)

9hour 0min
(Valid:17.0600JST)

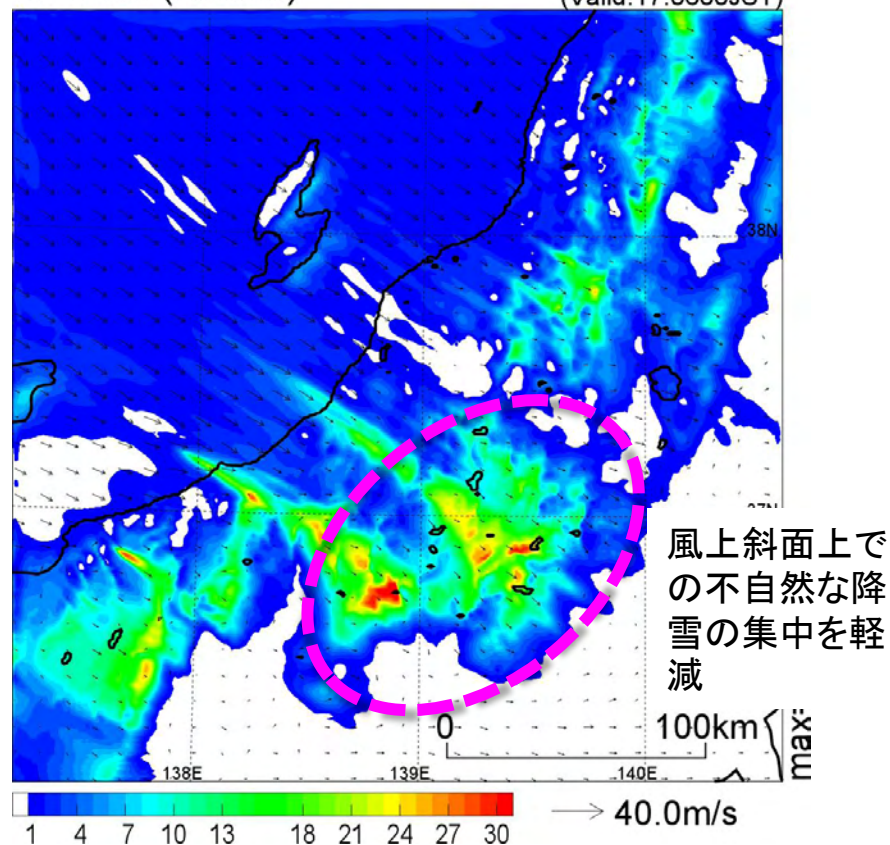


新

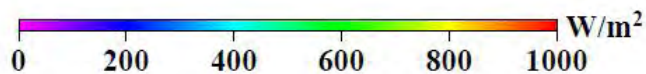
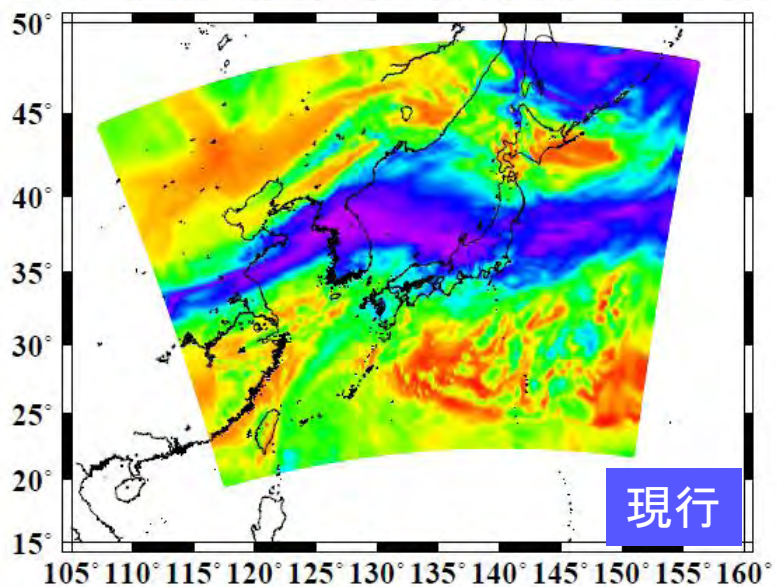
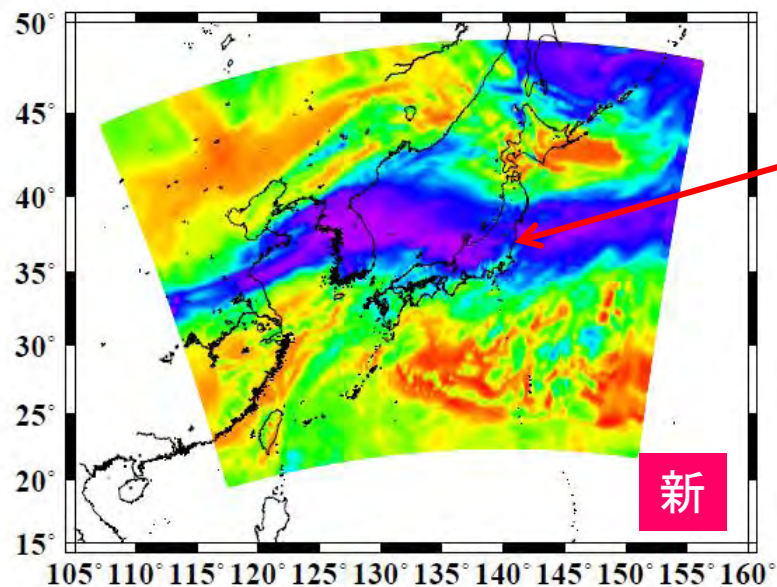
Initial : 2011.01.16.1200UTC

Prec mm (surface)

9hour 0min
(Valid:17.0600JST)

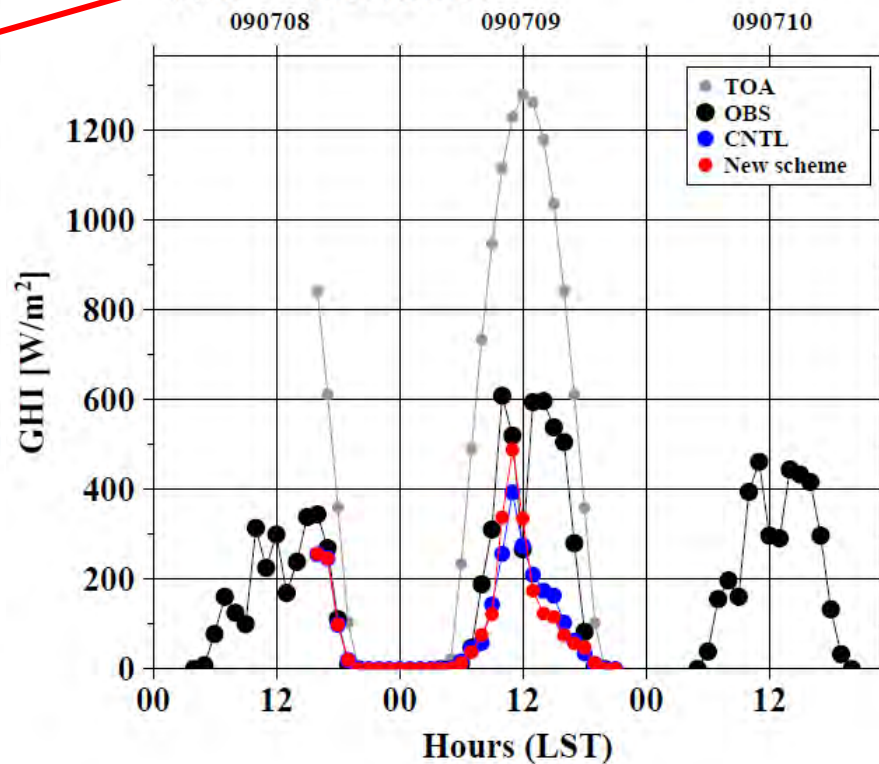


MSMによる予測日射量



つくば

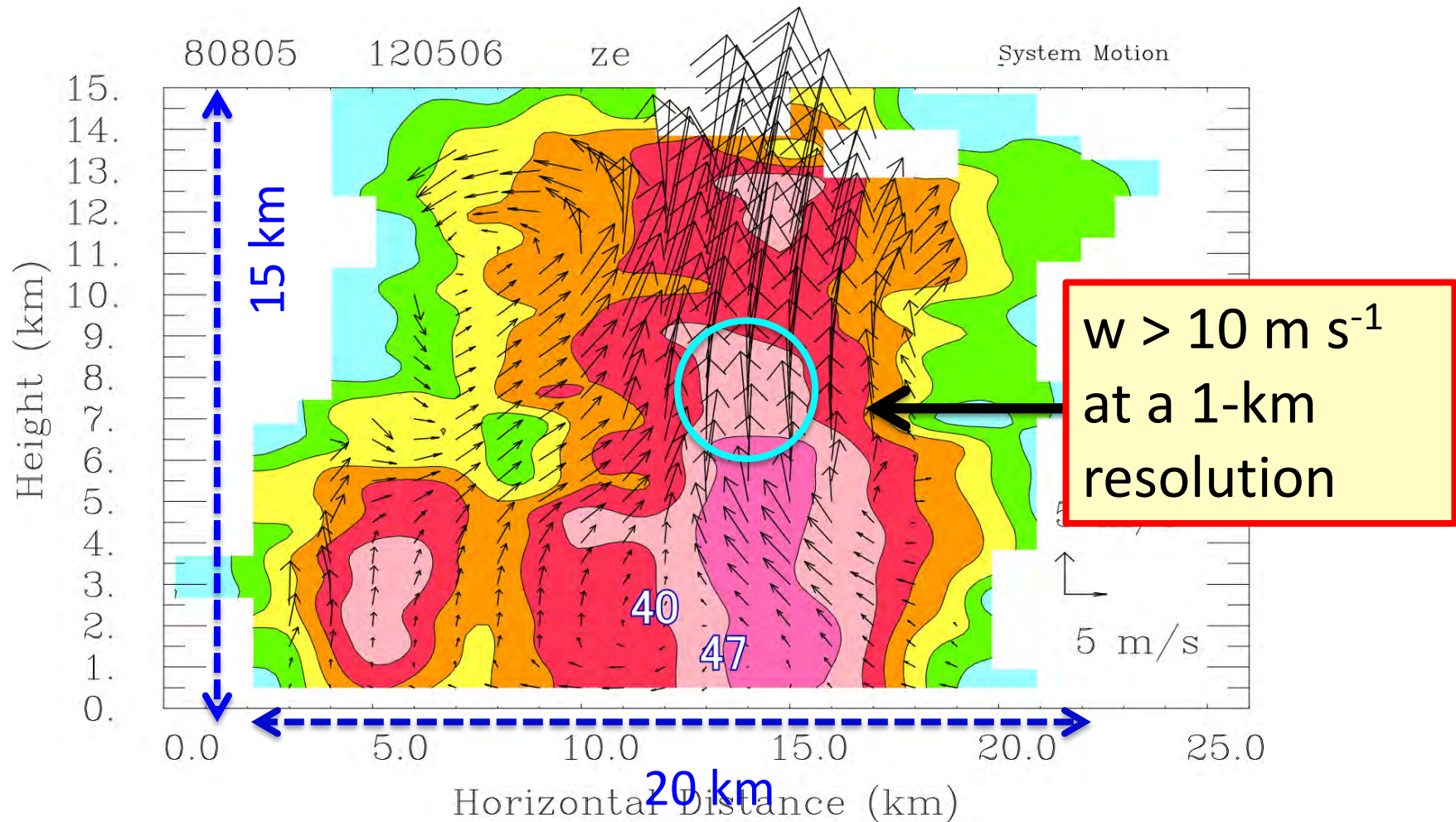
MSM Site: tsukuba



灰色: 大気外日射量
黒色: 観測値
青色: 現行
赤色: 新

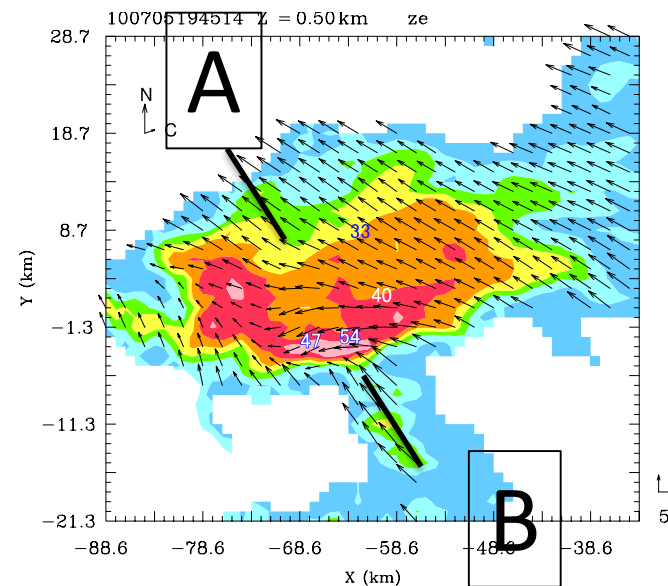
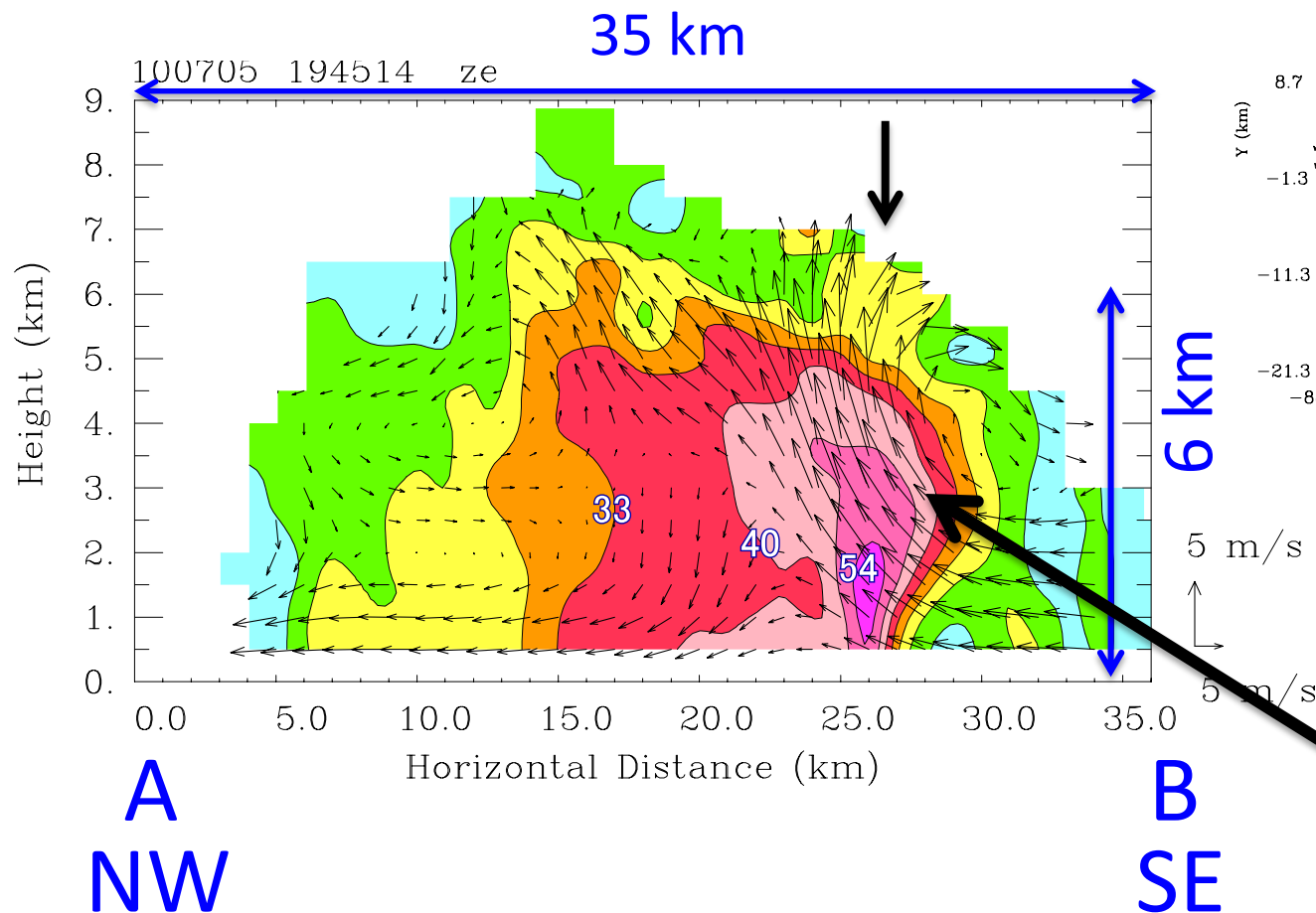
東京やその周辺でよく出現する活発な積乱雲 (producing more than 30 mm/30 min. rainfall)

2008年 雑司が谷の局地的豪雨



東京・板橋に大雨をもたらした積乱雲 (2010年7月5日)

1945 JST



Position of the
vertical cross-section

$w \sim 7 \text{ m s}^{-1}$ at
a 1-km
resolution

Arrows: vector representation of system-relative horizontal wind
and vertical component

気象研究所と太陽光発電研究との関わり

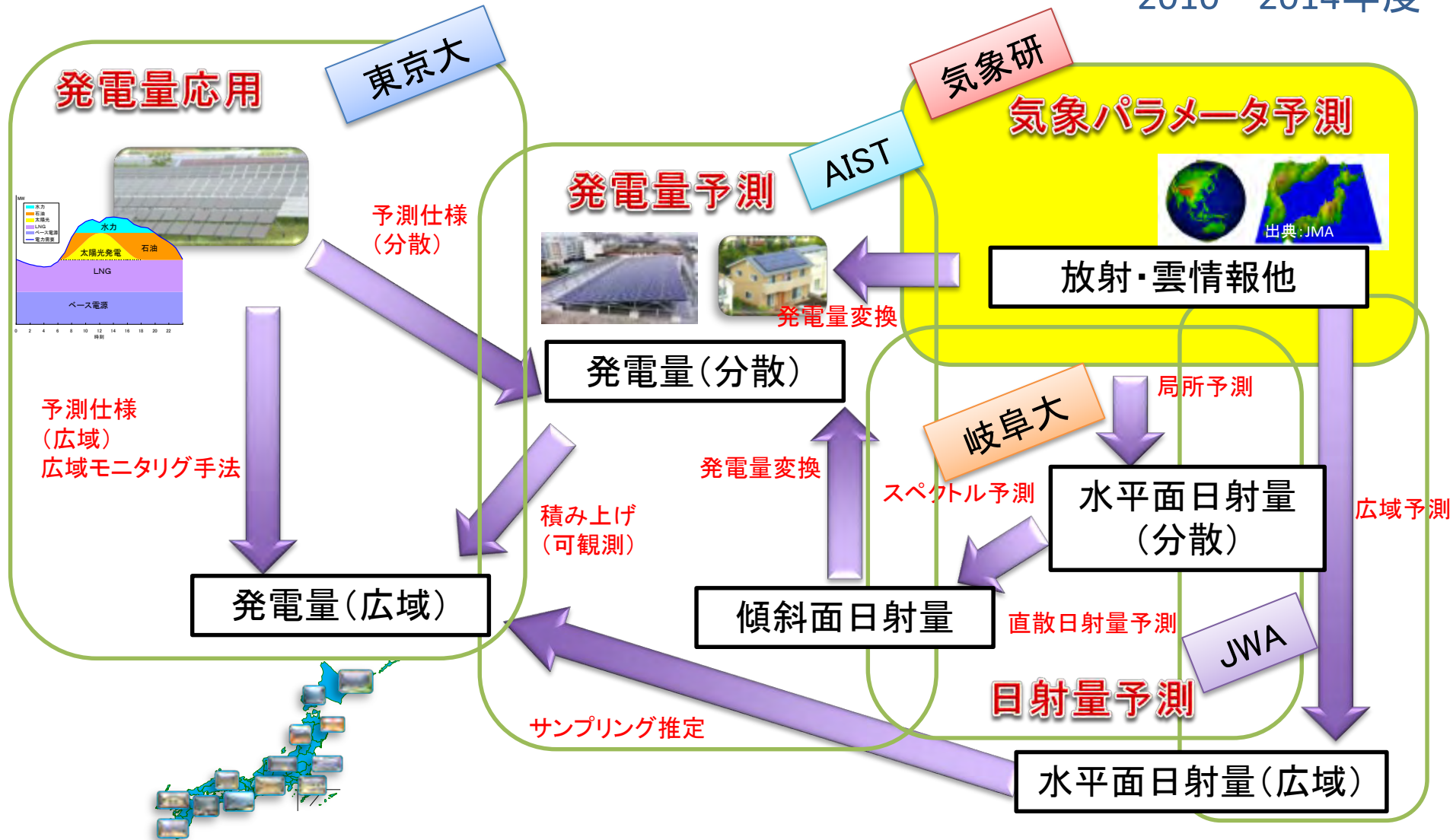
- 太陽光発電システム次世代高性能技術の開発
 - (独)新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)の公募課題
- 「6. 共通基盤技術」 PL: 黒川先生(東京工業大学)
- 6-1発電量評価技術等の開発・信頼性及び寿命評価技術の開発(平成22～26年度)
- (気象研究所は産業技術総合研究所との共同研究として参加)
- 利用する主な数値予報モデル: **メソモデル (MSM)**: 水平分解能 5 km

- 太陽光発電の予測不確実性を許容する超大規模電力最適配分制御
 - CREST 課題
- PL: 井村先生(東京工業大学)
- 平成24年10月から平成27年3月
- 気象研究所は協力機関として参加
- 利用する主な数値予報モデル: **LFM (局地モデル)**: 水平分解能 2 km

- 「系統サポート研究会」(平成25年度)
- 「再生可能エネルギー出力予測とその利用技術委員会」(平成25年度から)

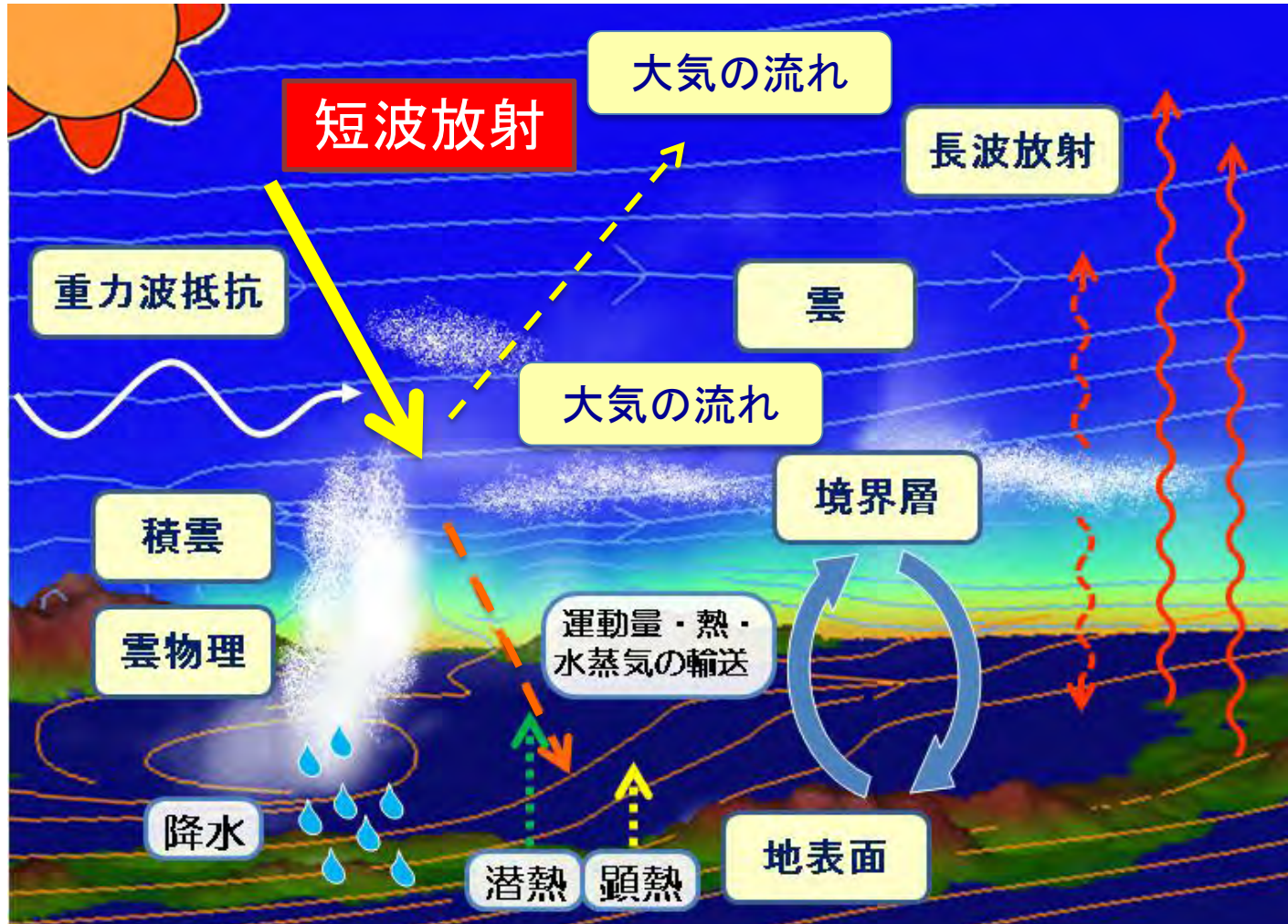
太陽光発電に関するNEDOプロジェクト

2010 - 2014年度

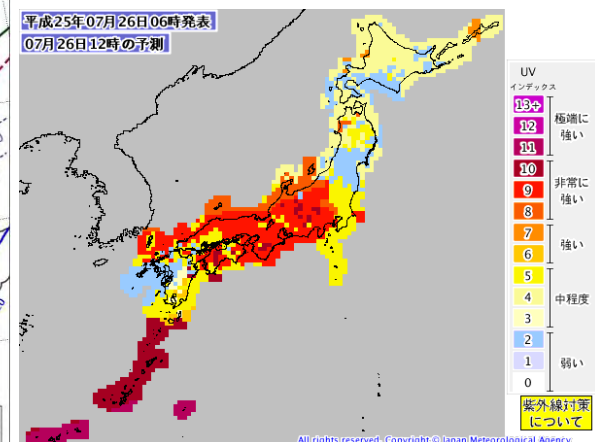
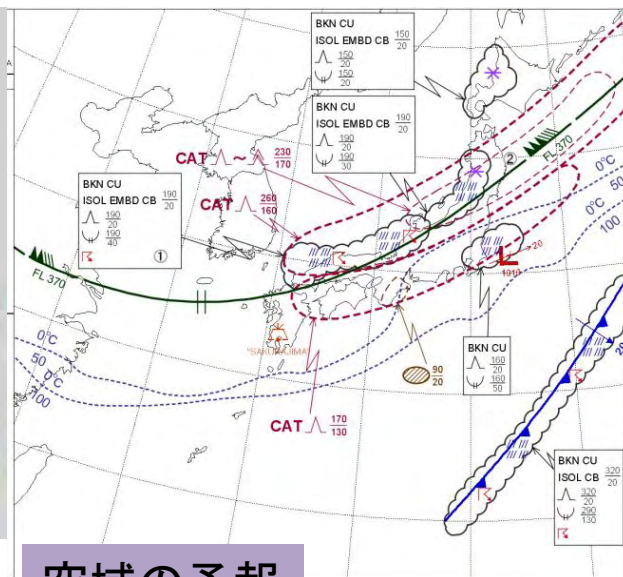
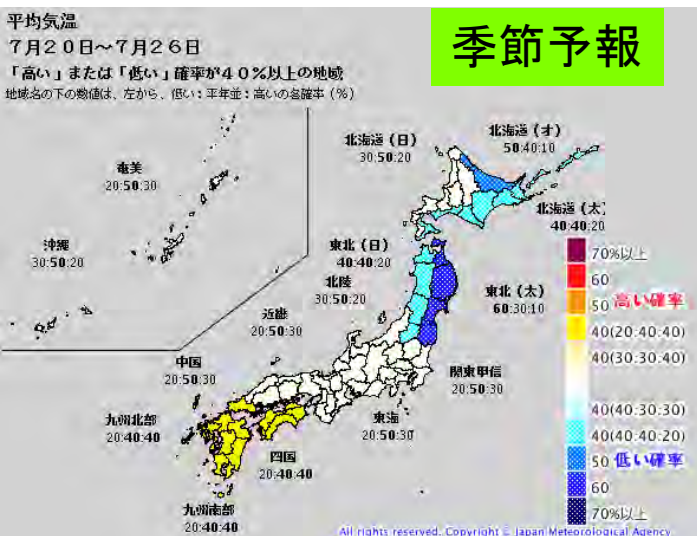
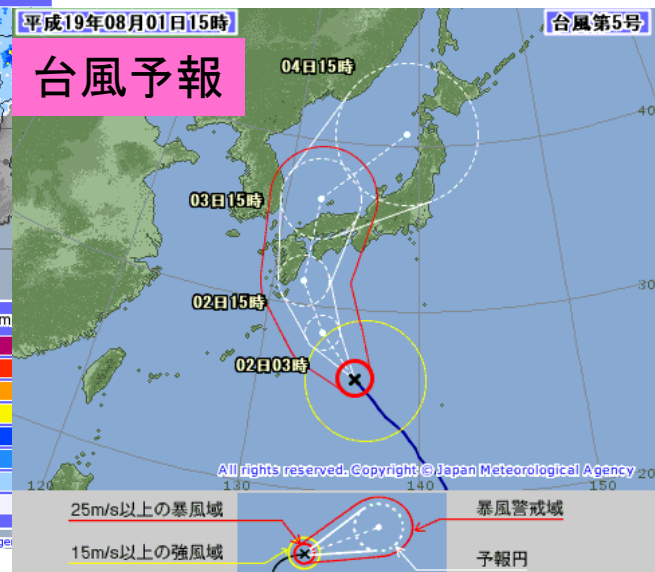
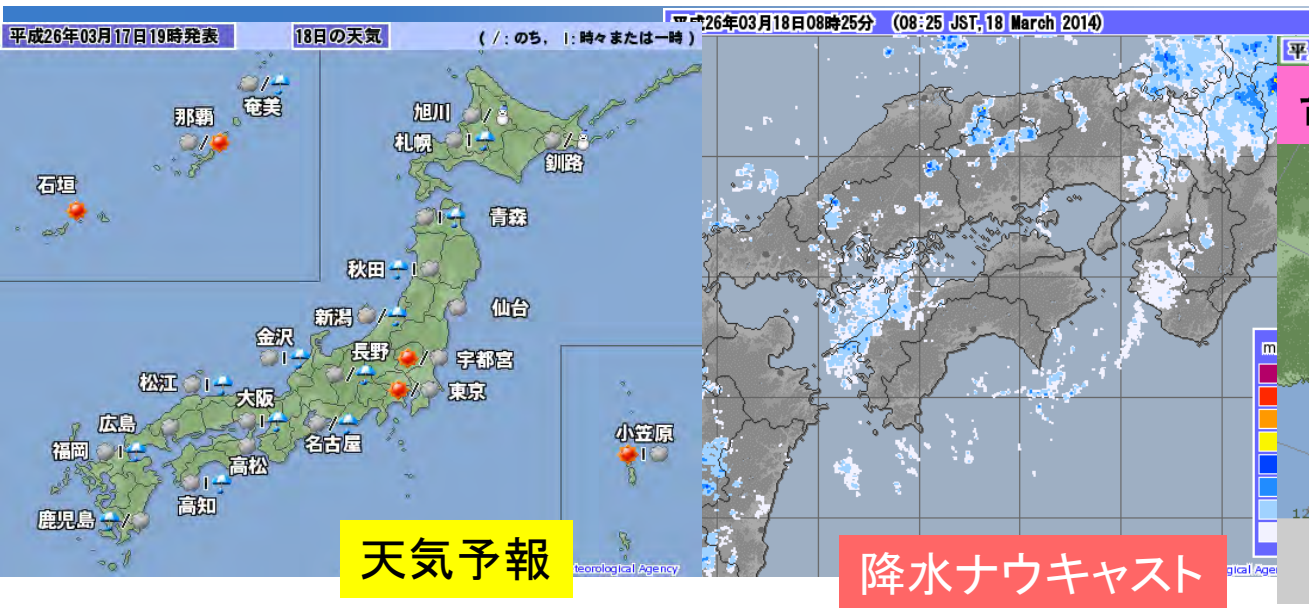


数値予報モデルに含まれる主な過程

現在の大気の状態(気温、風、湿度など)から、物理法則に基づいて数値計算を行い、未来の大気の状態を予測する



気象庁が発表している気象情報の一例



気象庁の予報業務の根幹：数値予報

気象庁で発表している予報

- 短期予報(明日、明後日まで)
 - 週間予報(1週間先まで)
 - 季節予報(1ヶ月、3ヶ月など)
- など

これらの予報のほとんどは、数値予報やそれから得られるガイダンス等の資料を基礎として、予報官の知見や判断を加えて作成されている。

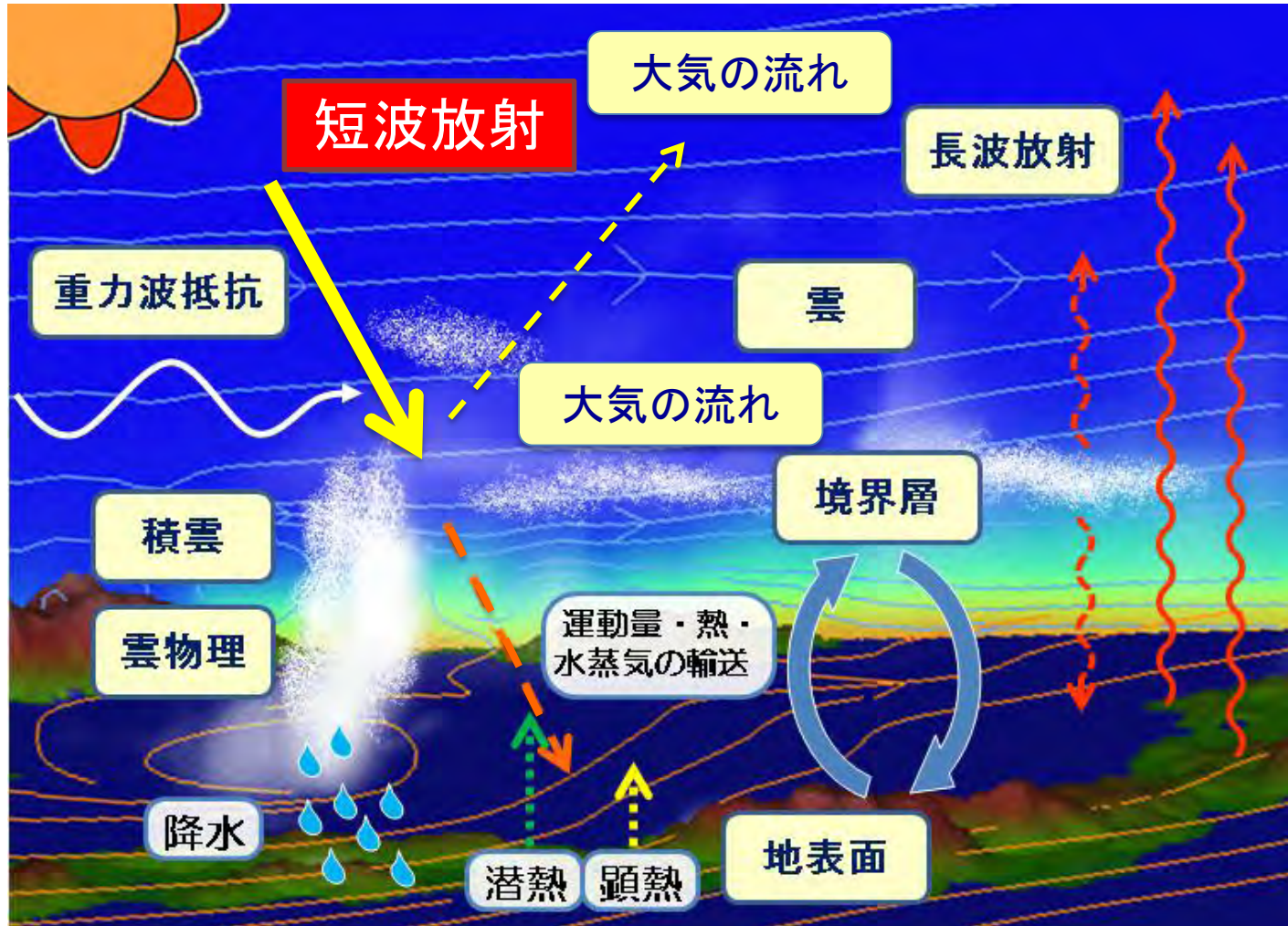
数値予報モデルとは

- 大気中に含まれる様々な現象の時間変化を表す物理法則(流体力学、熱力学など)を用いて、大気の将来の状態を計算するために用いられるもの(数値予報の手段)。
- 計算量が膨大であるので、通常はスーパーコンピュータを用いて計算を行う。
- 数値予報モデルに含まれる様々な過程を模式的に表したものが次のスライドの図である。モデルの中には、日射量(短波放射)の予測も含まれている。日射量の計算には、大気中の微粒子や雲などとの相互作用も考慮されている。



数値予報モデルに含まれる主な過程

現在の大気の状態(気温、風、湿度など)から、物理法則に基づいて数値計算を行い、未来の大気の状態を予測する



数値予報による予測

数値予報モデル

時間変化率

$$\frac{dA(\mathbf{r}, t)}{dt} = f(\mathbf{r}, t)$$

$A(t)$: 気温、風、日射量など
 t : 時間

将来の時刻
 $t = t$ での状態

$$A(\mathbf{r}, t) = \underbrace{A(\mathbf{r}, t_0)}_{\text{初期値}} + \underbrace{\int_{t_0}^t f(\mathbf{r}, t) dt}_{\text{モデル}} \quad t_0: \text{初期時刻}$$

数値予報モデルによる予測結果は、数値予報モデルと初期値とに依存する

$$A(t_1) = A(t_0) + \overline{f(t)} \cdot \Delta t \quad \text{at } t = t_0 + \Delta t$$

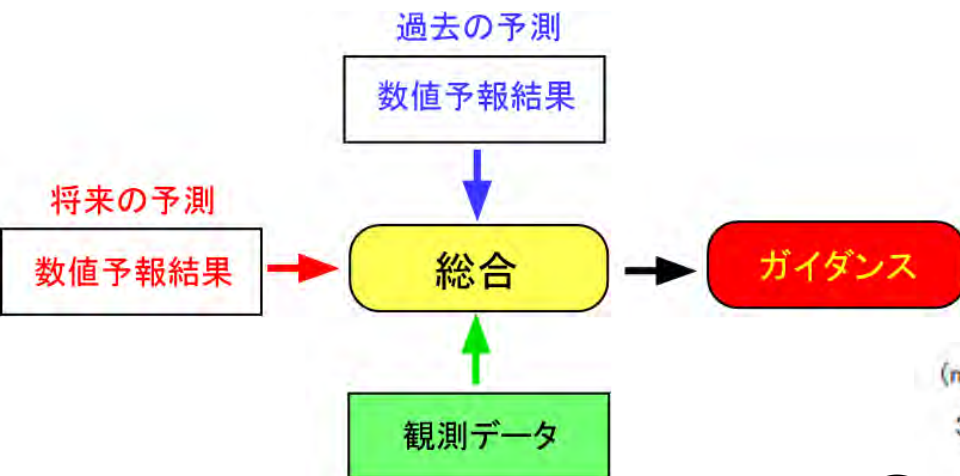
$$A(t_2) = A(t_1) + \overline{f(t)} \cdot \Delta t \quad \text{at } t = t_0 + 2\Delta t$$

$$A(t_3) = \dots$$

予測精度を向上させる取り組み ーガイダンスー

- 数値予報モデルで予測された大気の状態には一般に誤差が含まれています。
- このような誤差をできるだけ取り除いた処理をしてから、天気予報に用いています。
- このような処理をガイダンスと呼びます。

ガイダンス



- 数値予報モデルには一種の「癖」があるため、数値予報モデル結果からこの癖を取り除くこと
- 数値的に表現するのが難しいこと(天気の状態)を判定すること

風のガイダンス(一例)

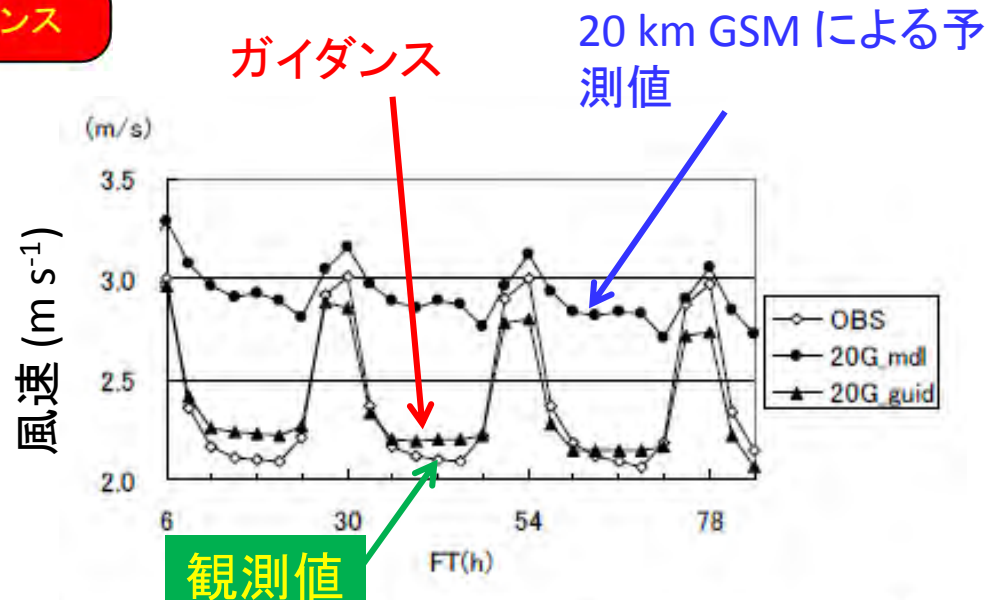
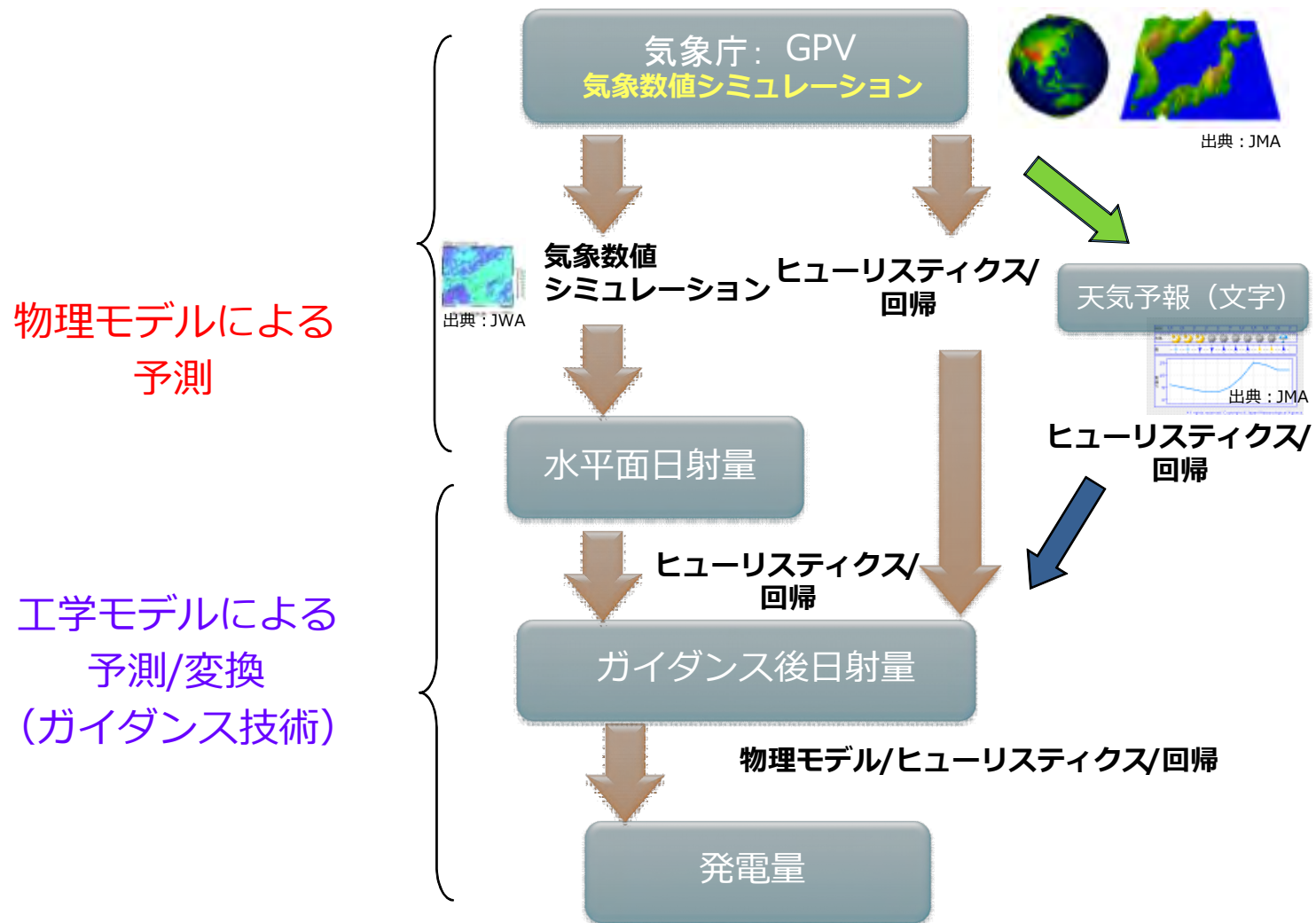
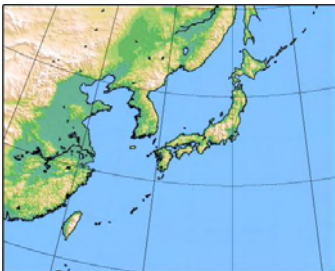


図3.4.6 20kmGSMの00UTC初期値の定時風速予報値(モデルGPV、ガイダンス)を、FT毎に観測値と比較(2006年1月で月平均)。横軸の目盛りは、ガイダンスの負バイアスが1日の中で最大となる時刻(06UTC)に対応。凡例は図3.4.1と同じ。

発電量予測技術の流れ



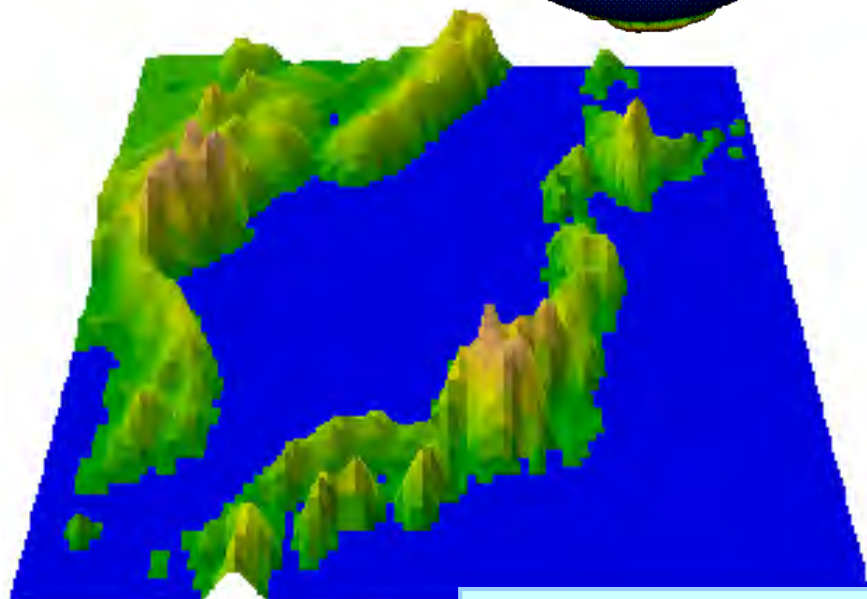
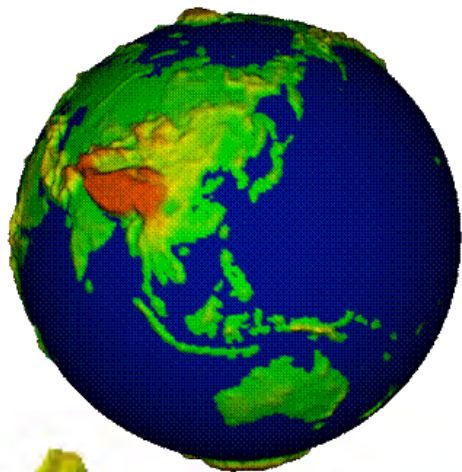
気象庁の現業数値予報システム

	全球	メソ	局地
目的	週間天気予報 府県天気予報 航空気象予報 台風予報	防災気象情報 航空気象予報	航空気象予報 防災気象情報
数値予報モデル	全球モデル(GSM)	メソモデル(MSM)	局地モデル (LFM)
予報領域			
水平解像度	TL959 20 km (0.1875 deg)	5 km	2 km
鉛直層数 (モデルトップ)	60 (0.1 hPa)	50 (21.8 km)	60 (20.2 km)
予報時間 (初期時刻)	84 時間 (00, 06, 18 UTC) 264 時間 (12 UTC)	39時間	9時間
初期条件	全球解析(4次元変分法)	メソ解析(4次元変分法)	局地解析(3次元変分法)

(2013年5月29日現在)

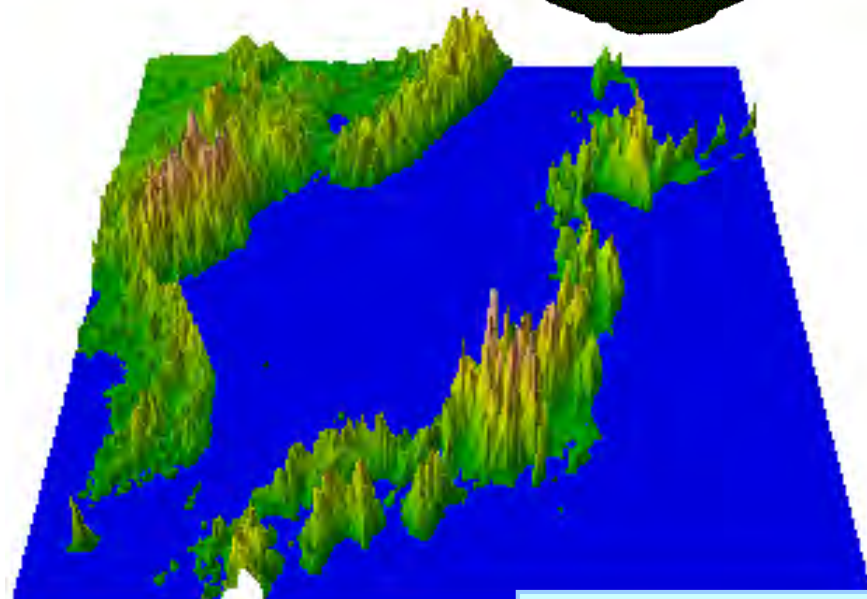
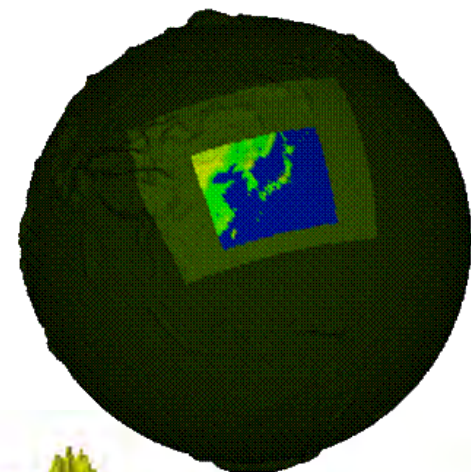
気象庁の現業数値予報モデル：地形の違い

全球モデル
(Global Spectral
Model: GSM)



格子間隔 ~20km

メソモデル
(Meso-Scale
Model: MSM)



格子間隔 5km

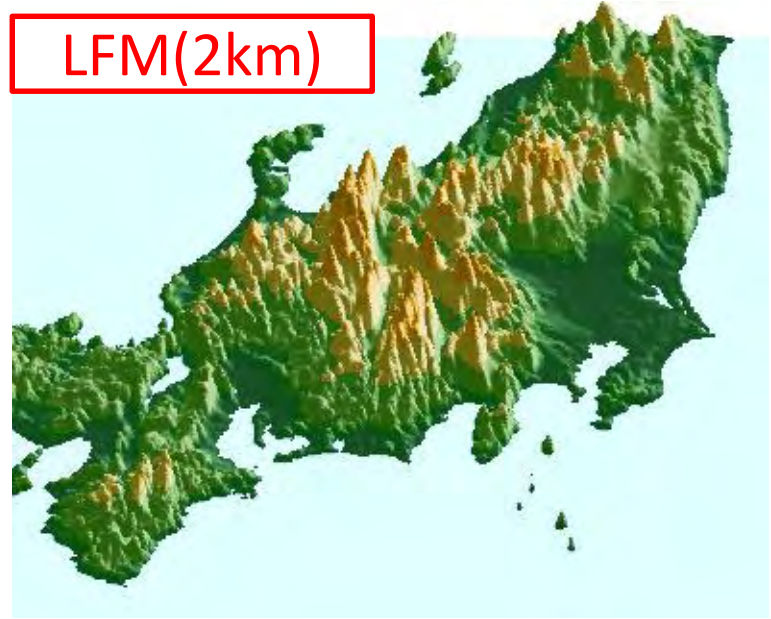
地形の違い

局地モデル (LFM)

MSM(5km)

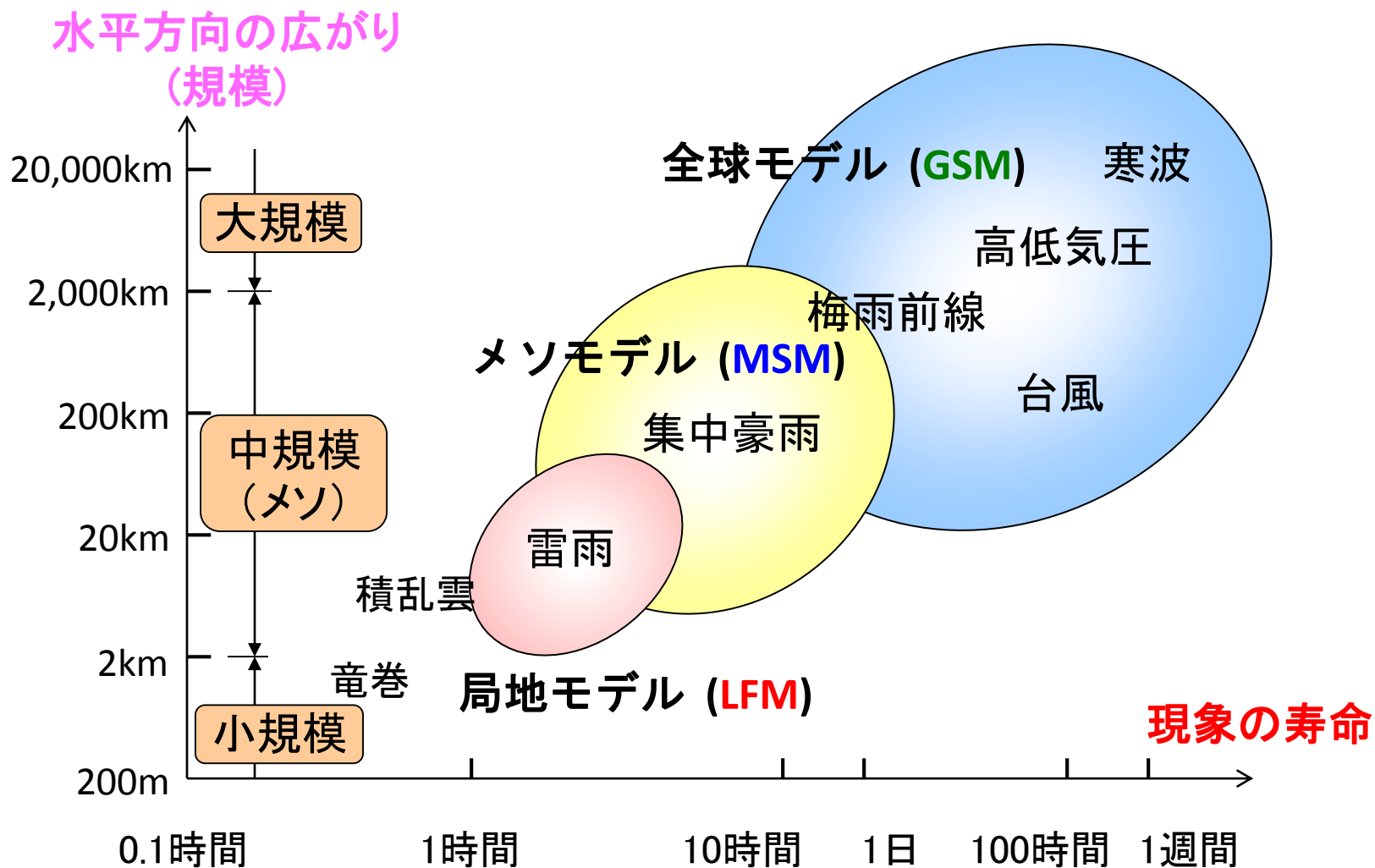


LFM(2km)

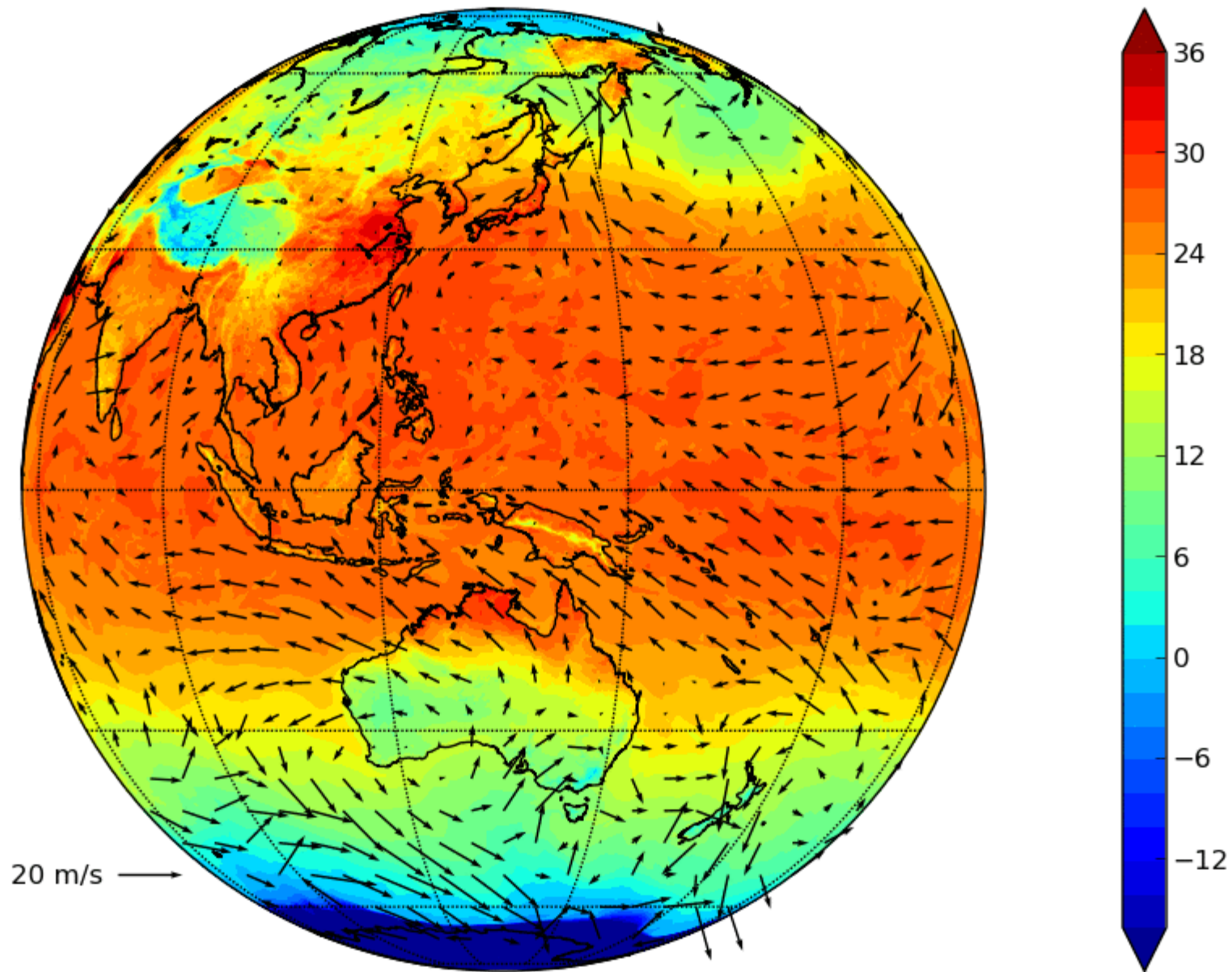


MSMとLFMの地形表現の違い

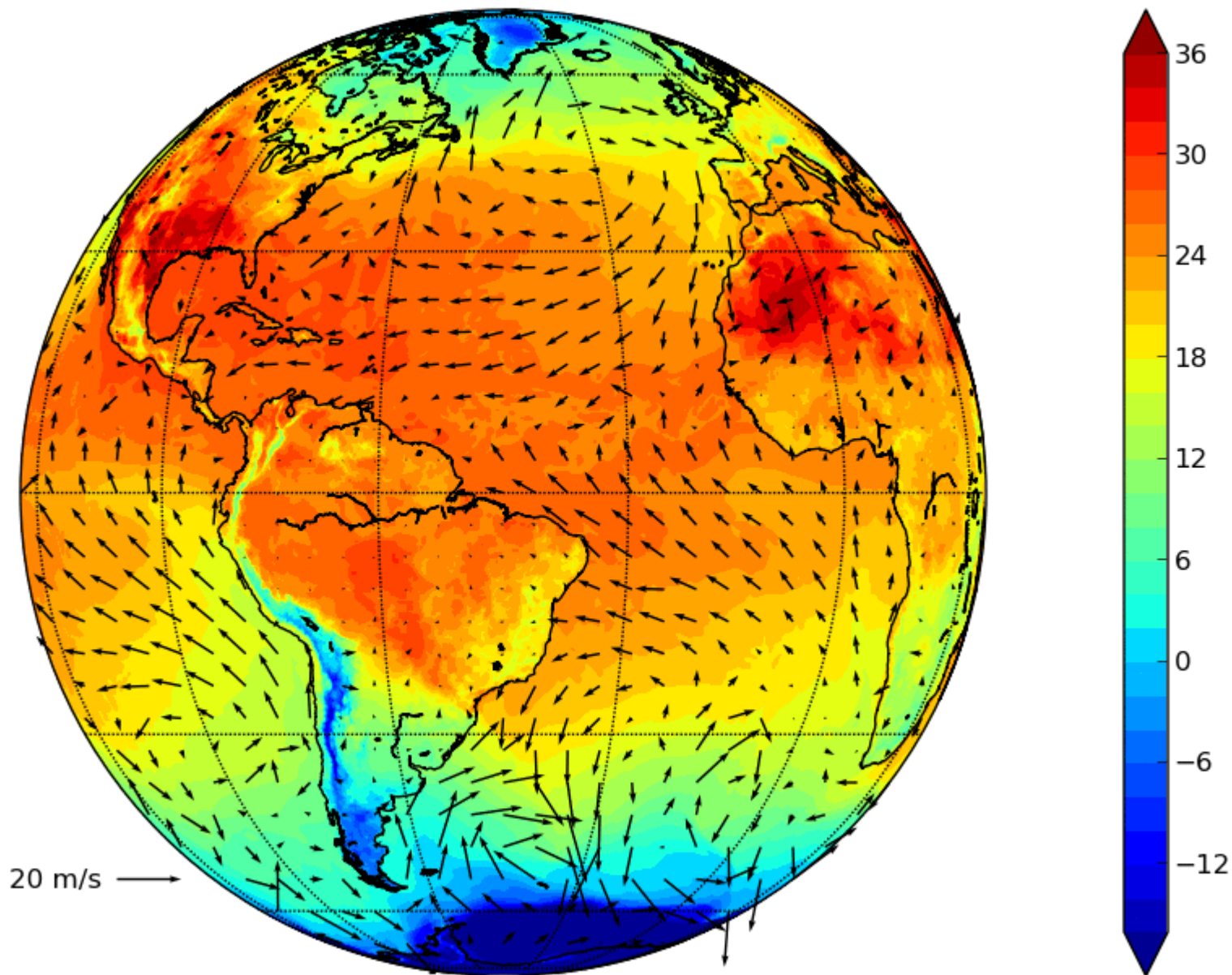
数値予報モデルとその適用範囲



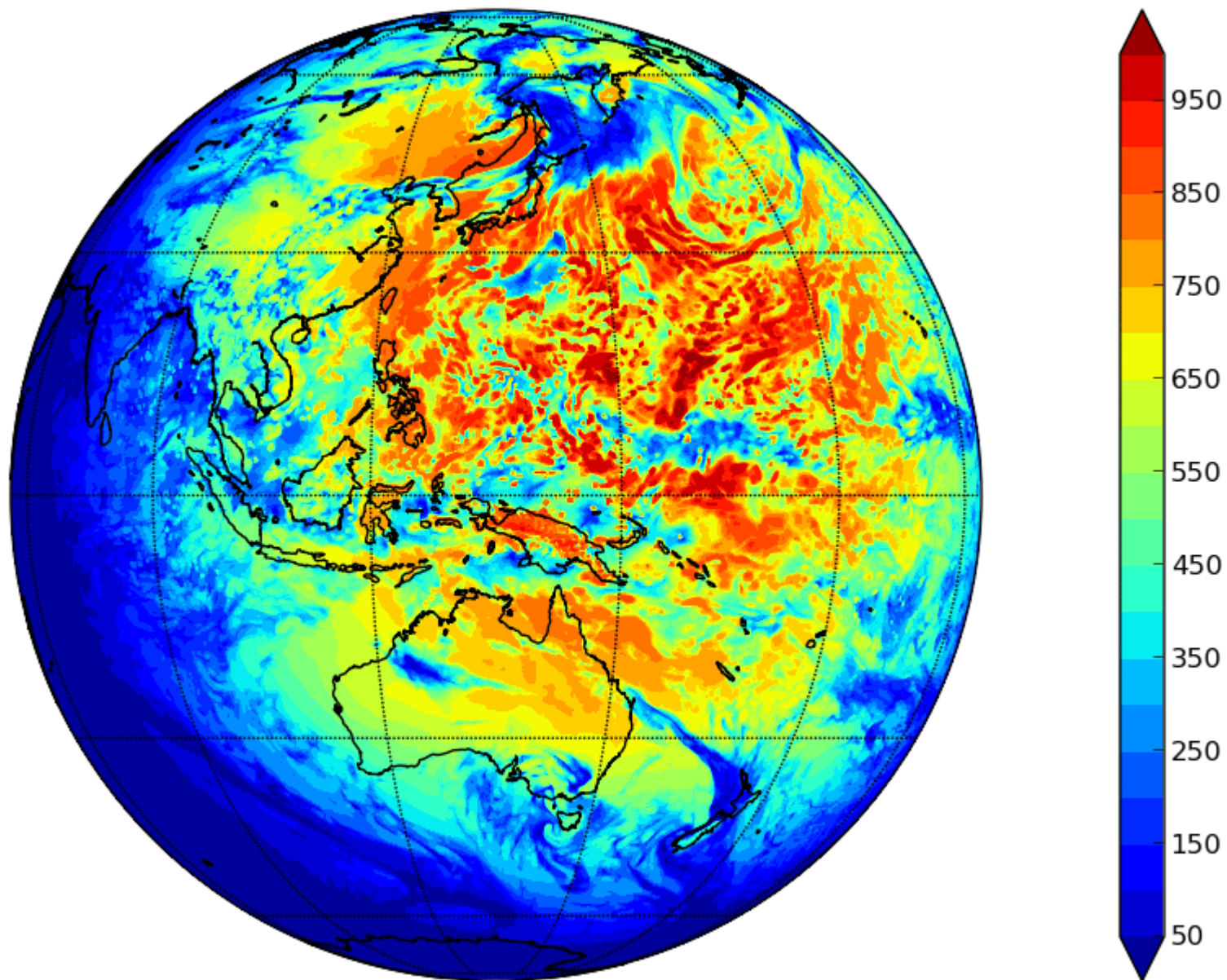
T and Wind at Surface 2010-08-01 11:00



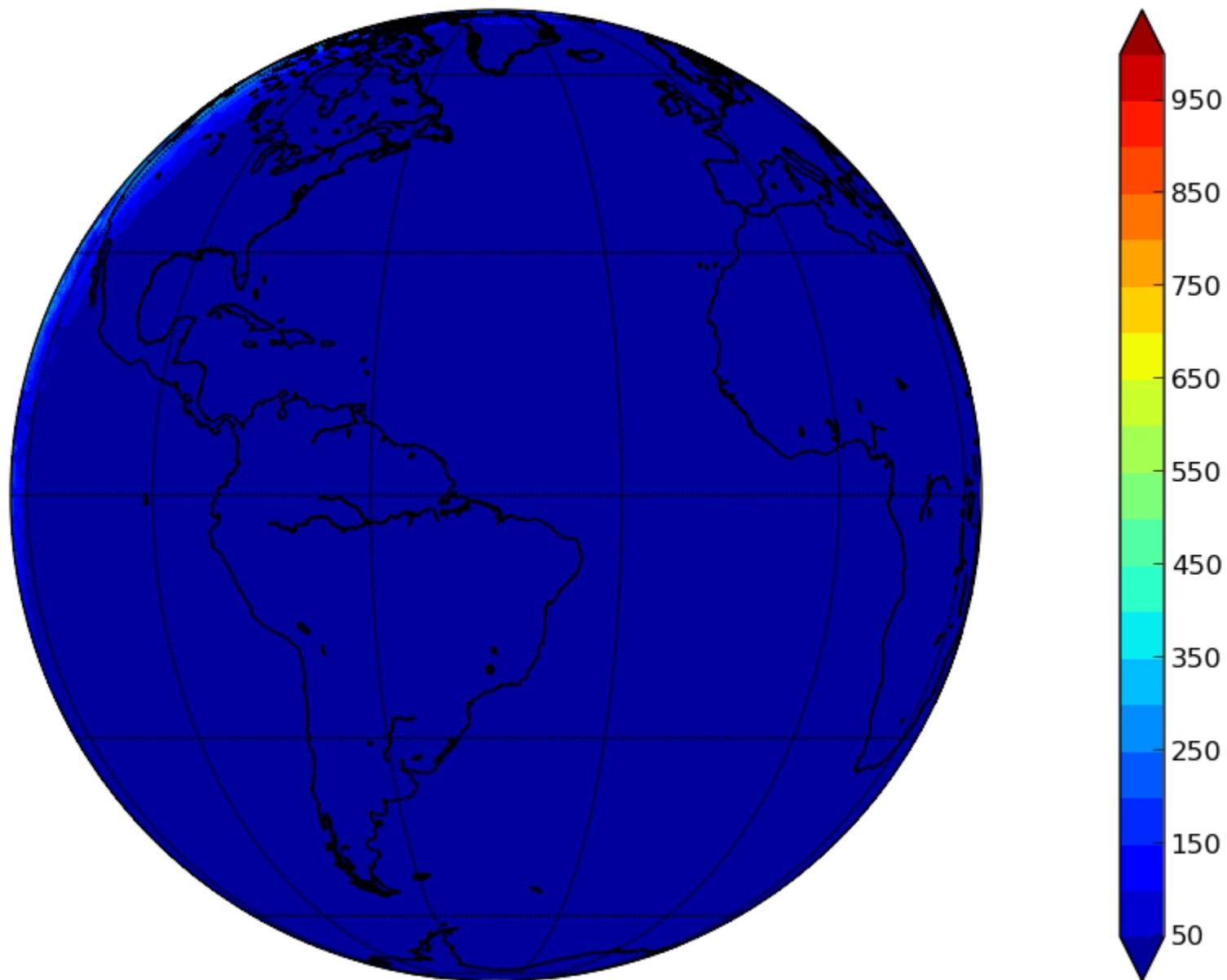
T and Wind at Surface 2010-08-01 11:00



Down. ShortWave at Surface 2010-08-01 11:00



Down. ShortWave at Surface 2010-08-01 11:00



2012年9月13日

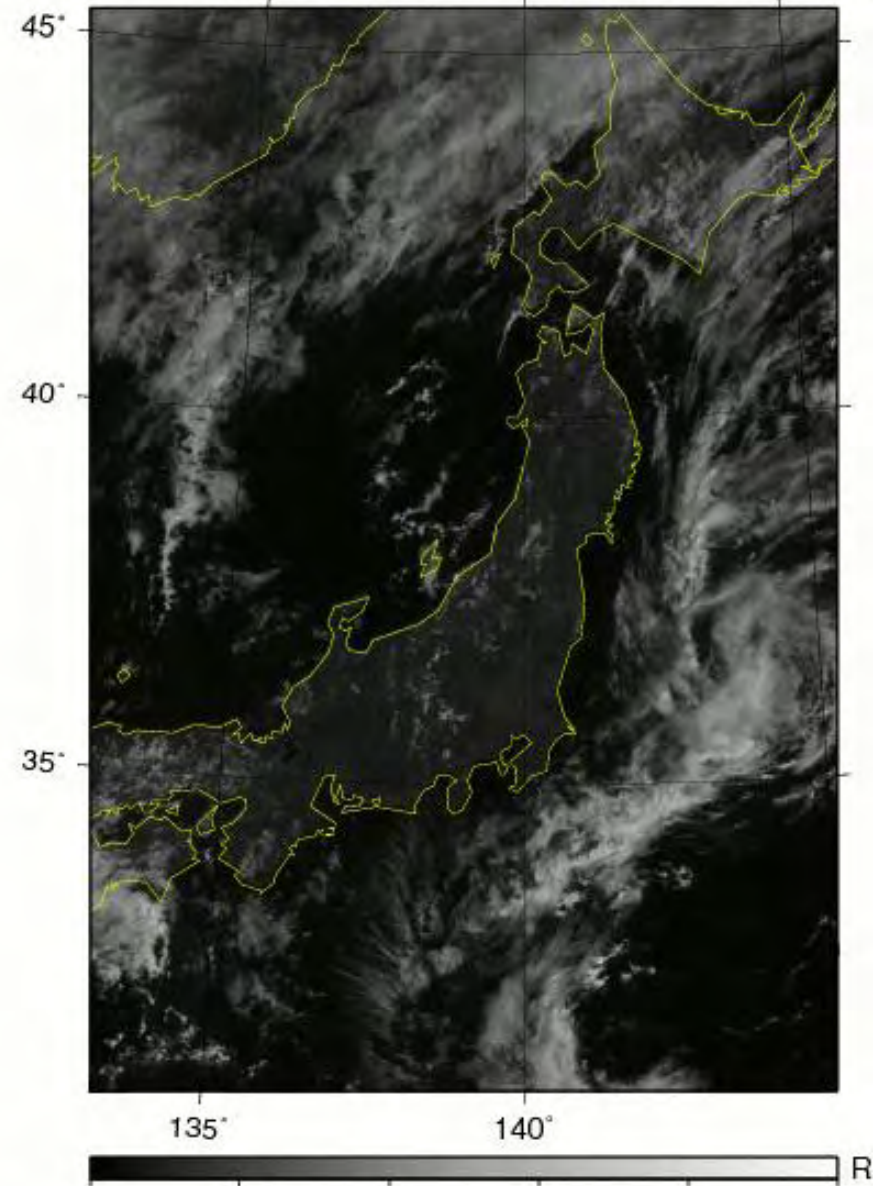
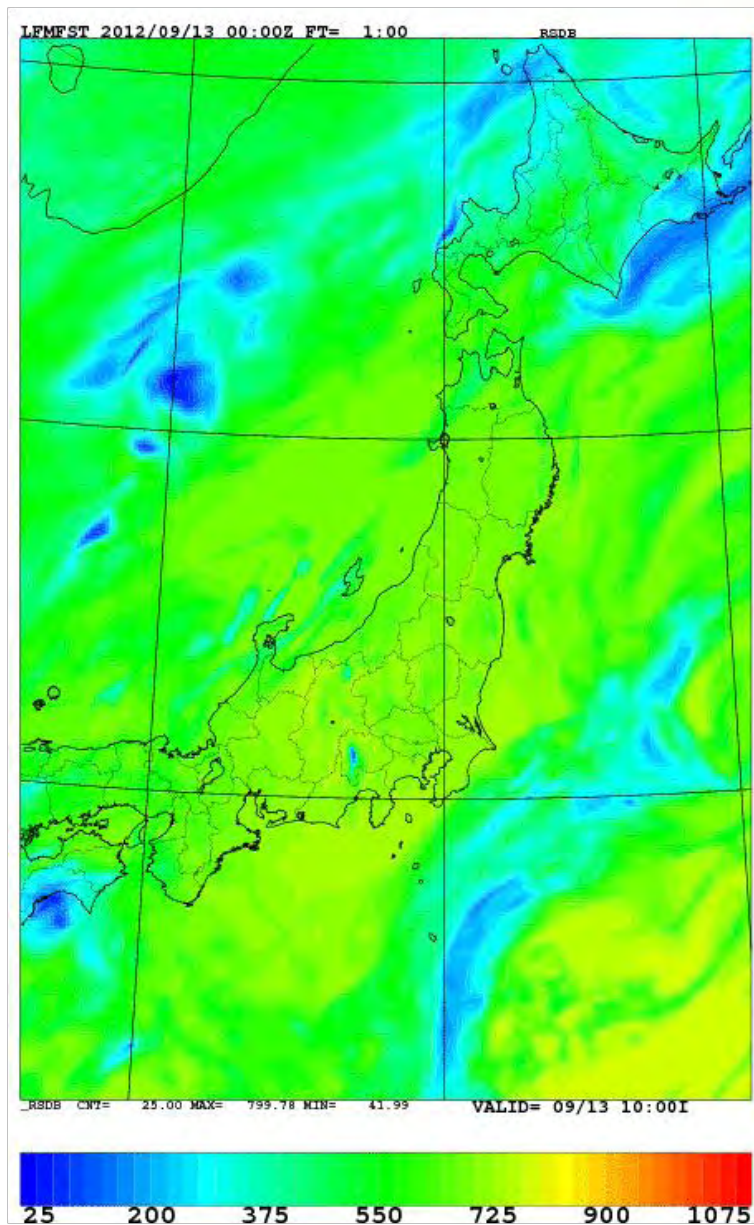
00UTC 初期値

LFM による予測日射量

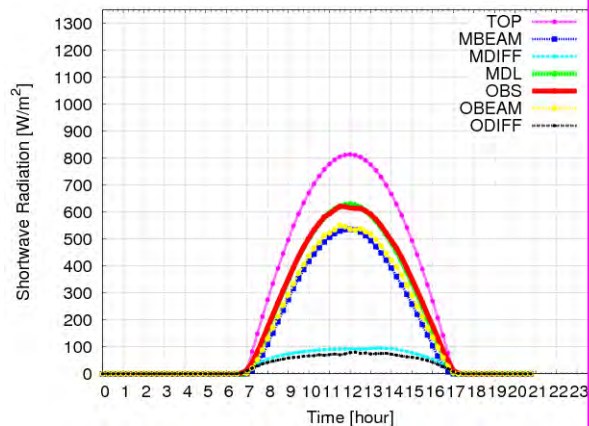
MTSAT2_VS

衛星画像:可視

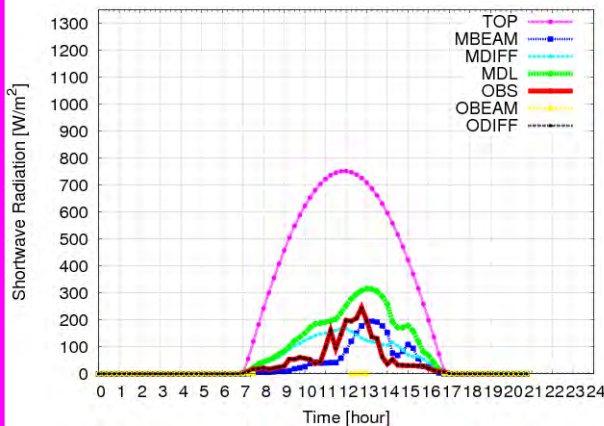
DATE 2012.09.13 01UTC



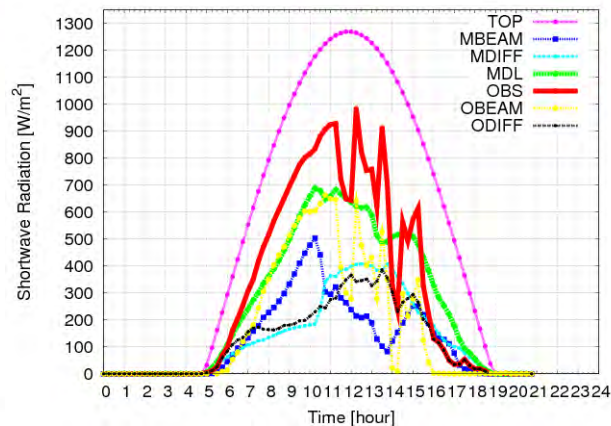
快晴(2010/01/26)



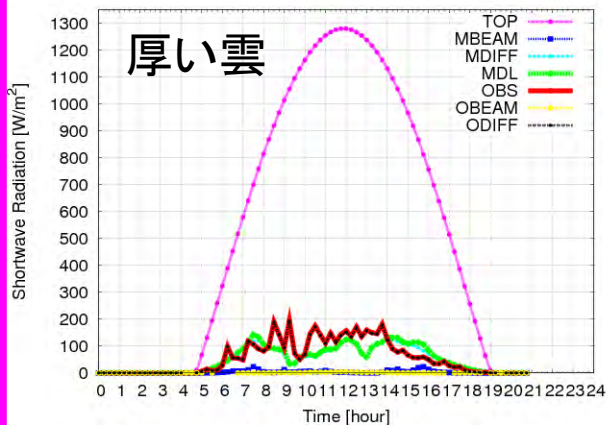
微過大(2010/01/11)



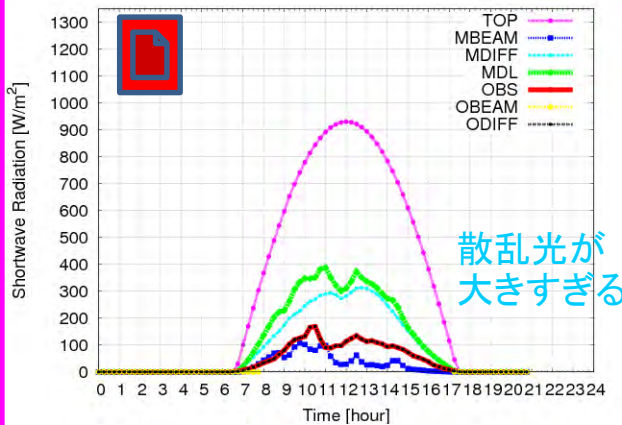
微過小(2010/07/25)



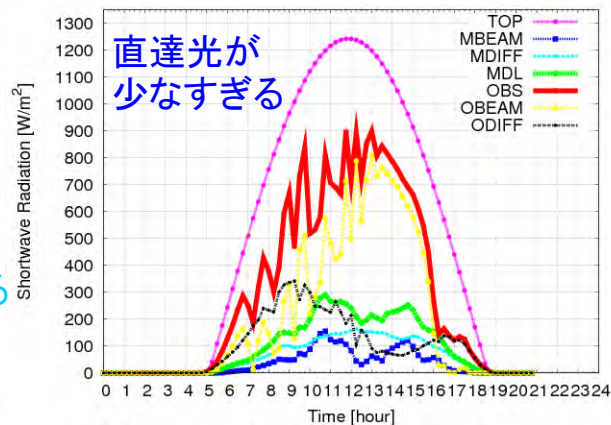
曇天(2010/07/13)



過大(2010/02/16)



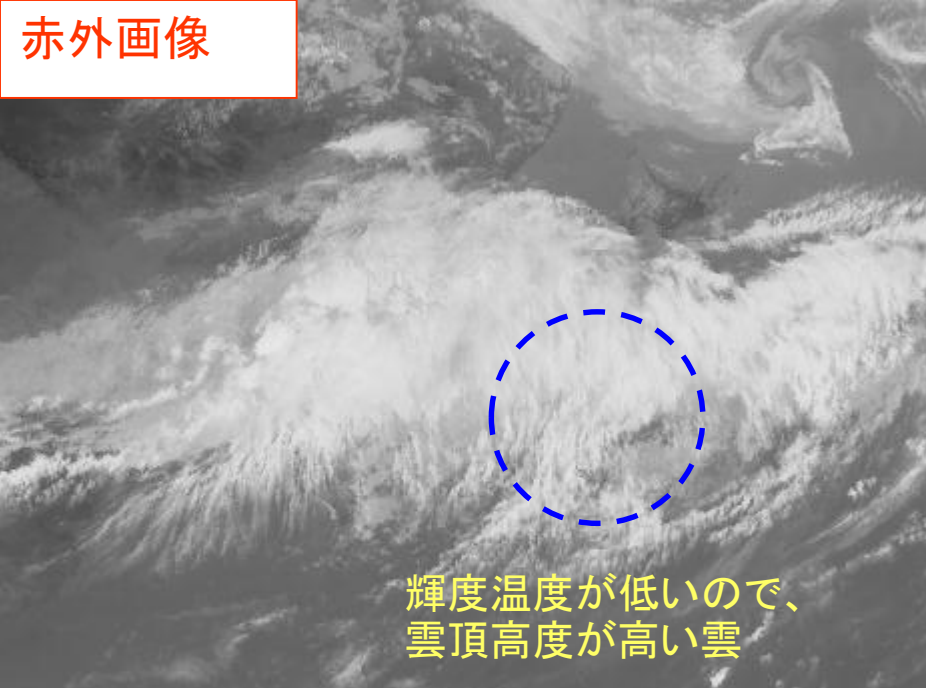
過小(2010/08/11)



桃: 大気上端値, 赤: 全天(観測), 黄: 直達(観測), 黒: 散乱(観測), 緑: 全天(モデル), 青: 直達(モデル), 水: 散乱(モデル)

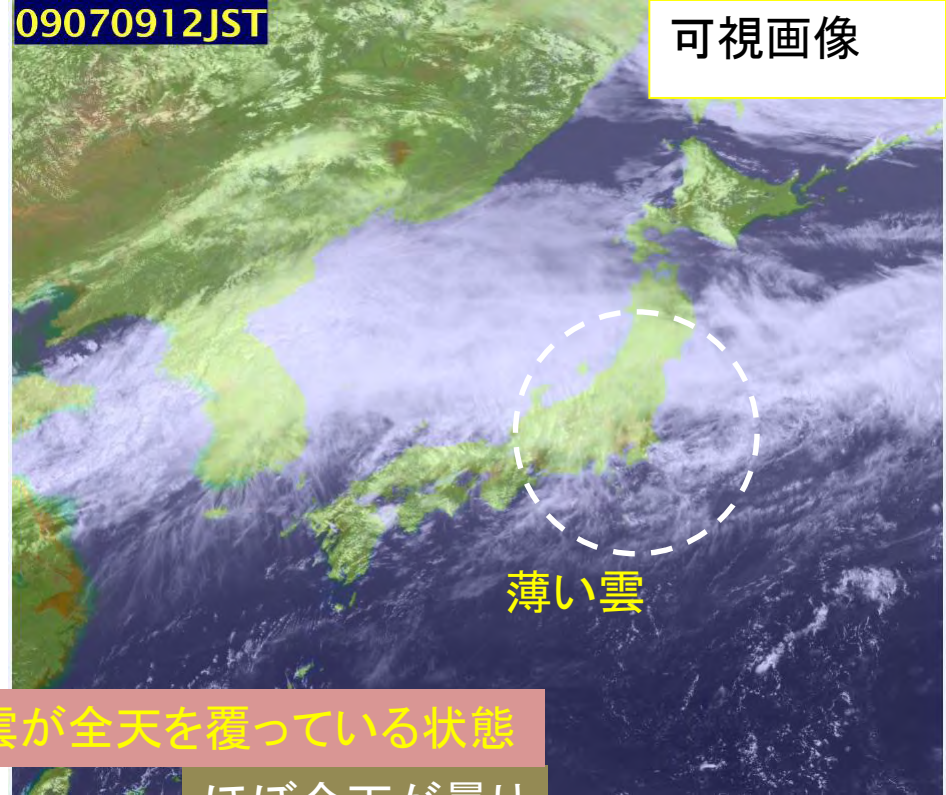
快晴時・厚い雲時の MSM の放射モデルは良好
モデル内での雲の表現とそれに関連した放射計算に改善の余地あり？

赤外画像



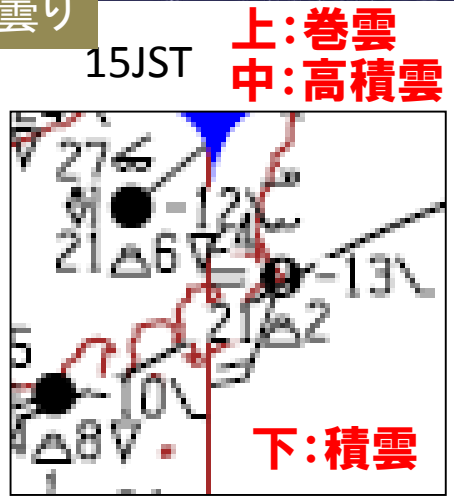
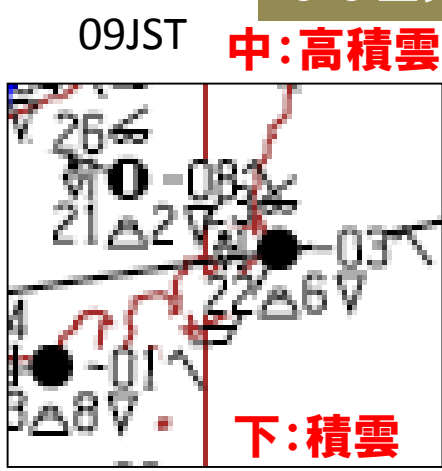
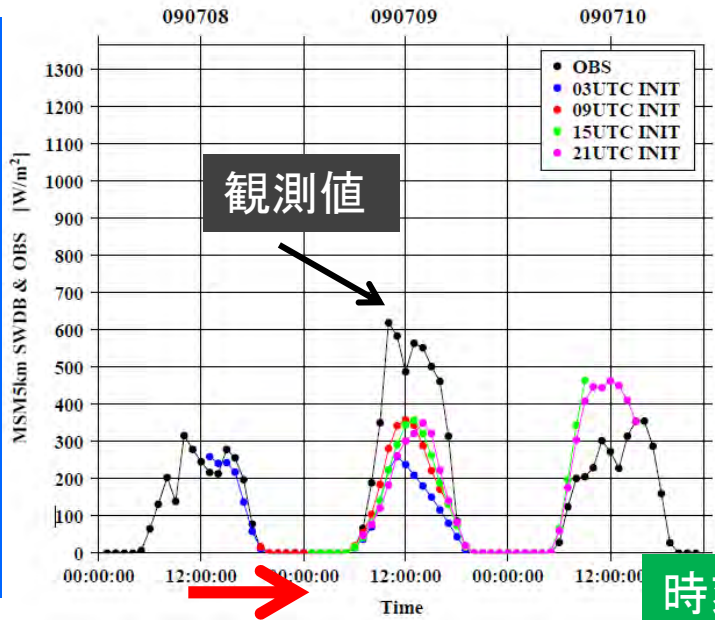
09070912JST

可視画像



高度が高く薄い雲が全天を覆っている状態
ほぼ全天が曇り

1時間当たりの全天日射量



2009年7月9日

全天日射量(1時間平均値) (散布図 月別) つくば

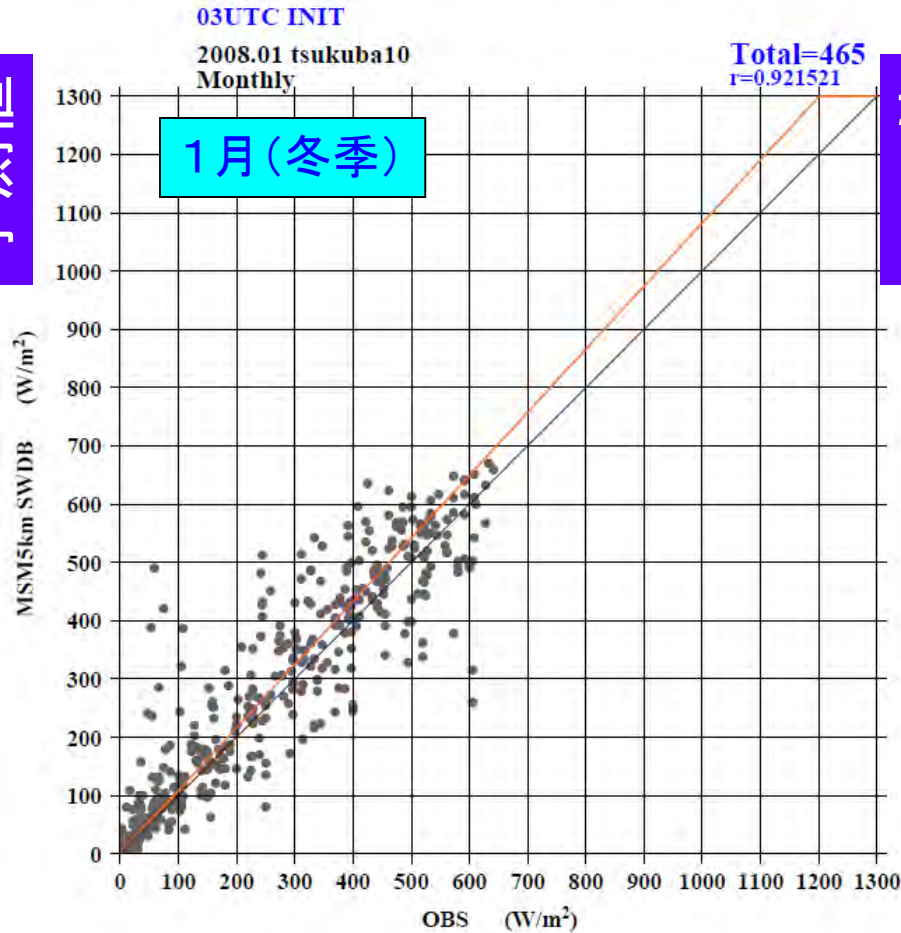
MSM

9格子点の平均値で検証

- 冬季のモデル予測値:良好
- 夏季のモデル予測値:観測との差が大きい値が多くなる

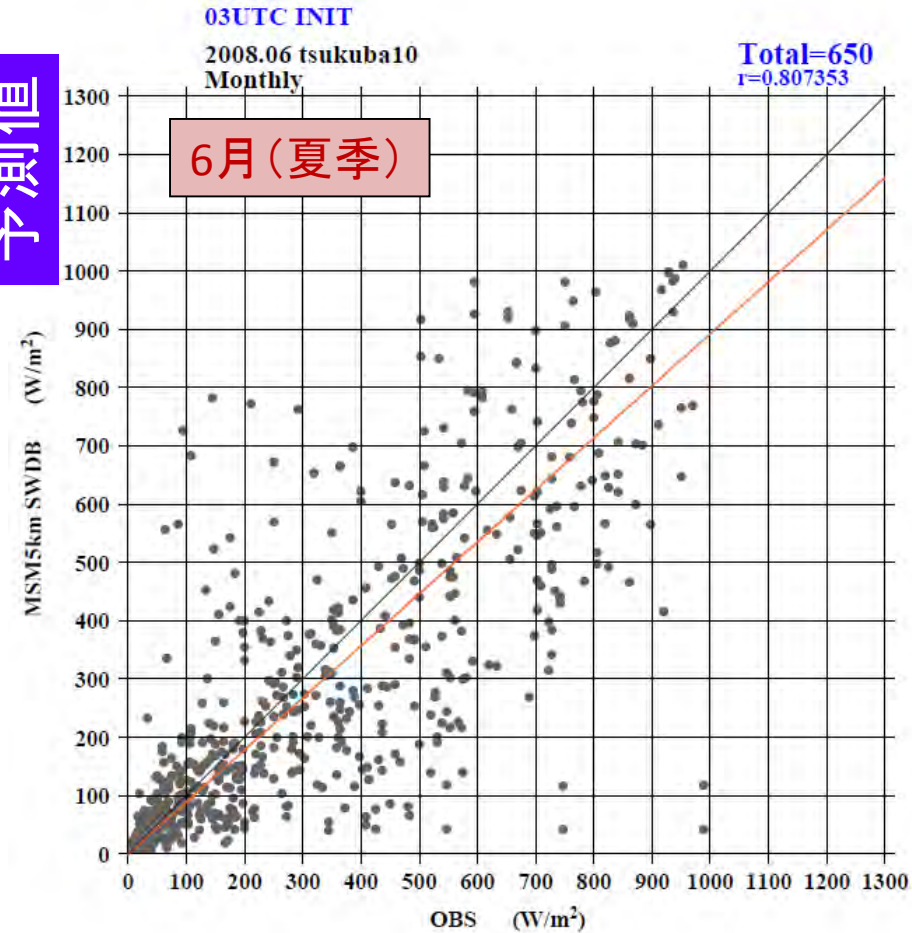
2008年

予測値



観測値

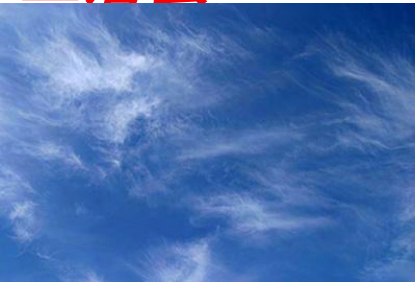
予測値



観測値

雲のタイプ(10種雲形)

上層雲



巻雲(ci)



巻積雲(cc)



巻層雲(Cs)

中層雲



高積雲(Ac)

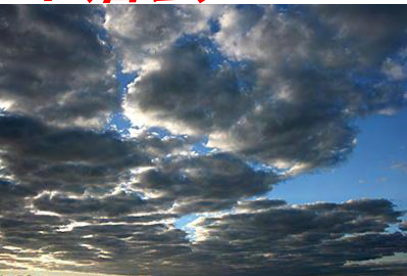


高層雲(As)



乱層雲(Ns)

下層雲



層積雲(Sc)



層雲(St)



積雲(Cu)



積乱雲(Cb)

MSM による予測日射量の誤差特性

- MSM やによる予測日射量の誤差やその特性の把握
 - 大気外の日積算日射量で規格化した誤差の大きさが 0.2 よりも大きくなる場合は、各月で約 10 %
 - 夏季(冬季)は予測値が過小(過大)傾向
 - 南西諸島で誤差が大きくなる傾向がある。
 - 誤差が大きくなるときの大気の状態は、降水をもたらさないような比較的薄い雲がほぼ全天を覆っている場合
 - 雲のタイプとしては、層積雲、積雲、高層雲、高積雲、巻雲など。
 - モデル内の雲量(下層、中層、上層)が適切に表現されていないと誤差が大きくなるようである
 - 1時間日射量の誤差の大きさ(大気外日射量で規格化した値)は平均で約 0.1 ~ 0.2, 最大で 0.5 程度で、夏季の方が誤差が大きい。
 - GSM による日射量予測値についても検証を進めている

信頼区間の推定

時間平均値

2010年の夏季(JJA)の予測誤差幅を利用

Coverage Rate(滞在率)

MAXMIN: 最大・最小値の幅(ヒゲ)のうちに観測値がどれほどの時間内にあるか。その割合。

BOX: 箱の中に観測値がどれほどの時間内にあるかを示す。

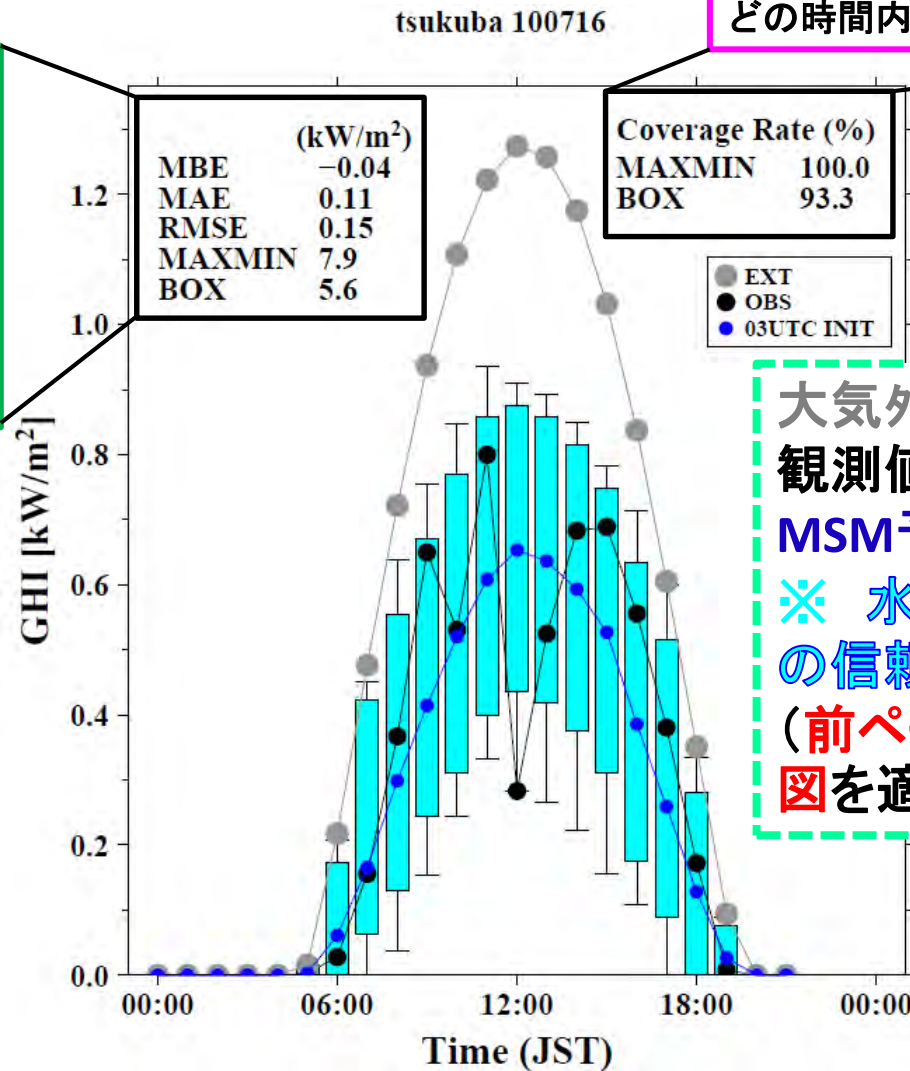
MBE: 日積算平均誤差 (kW/m^2)

MAE: // 平均絶対誤差

RMSE: 平方根平均二乗誤差

MAXMIN: 予測誤差幅の最大値と最小値の差(ヒゲの長さの積算値)

BOX: 予測誤差の最大(最小)値の上位10%を除いた誤差(箱の長さの積算値)



大気外日射(灰色)

観測値(黒)

MSM予測値(青)

※ 水色は予測値の信頼区間を示す(前ページの箱ひげ図を適用)

放射計算で用いる雲の改良

- MSMの予測誤差
 - 夏に日射量予測過小, 冬に日射量予測過大
 - 夏に雲量予測過大, 冬に雲量予測過小
 - 逆のセンス
- 雲量予測を改良すれば日射量予測の精度向上につながる

短波放射モデルのバンド構成

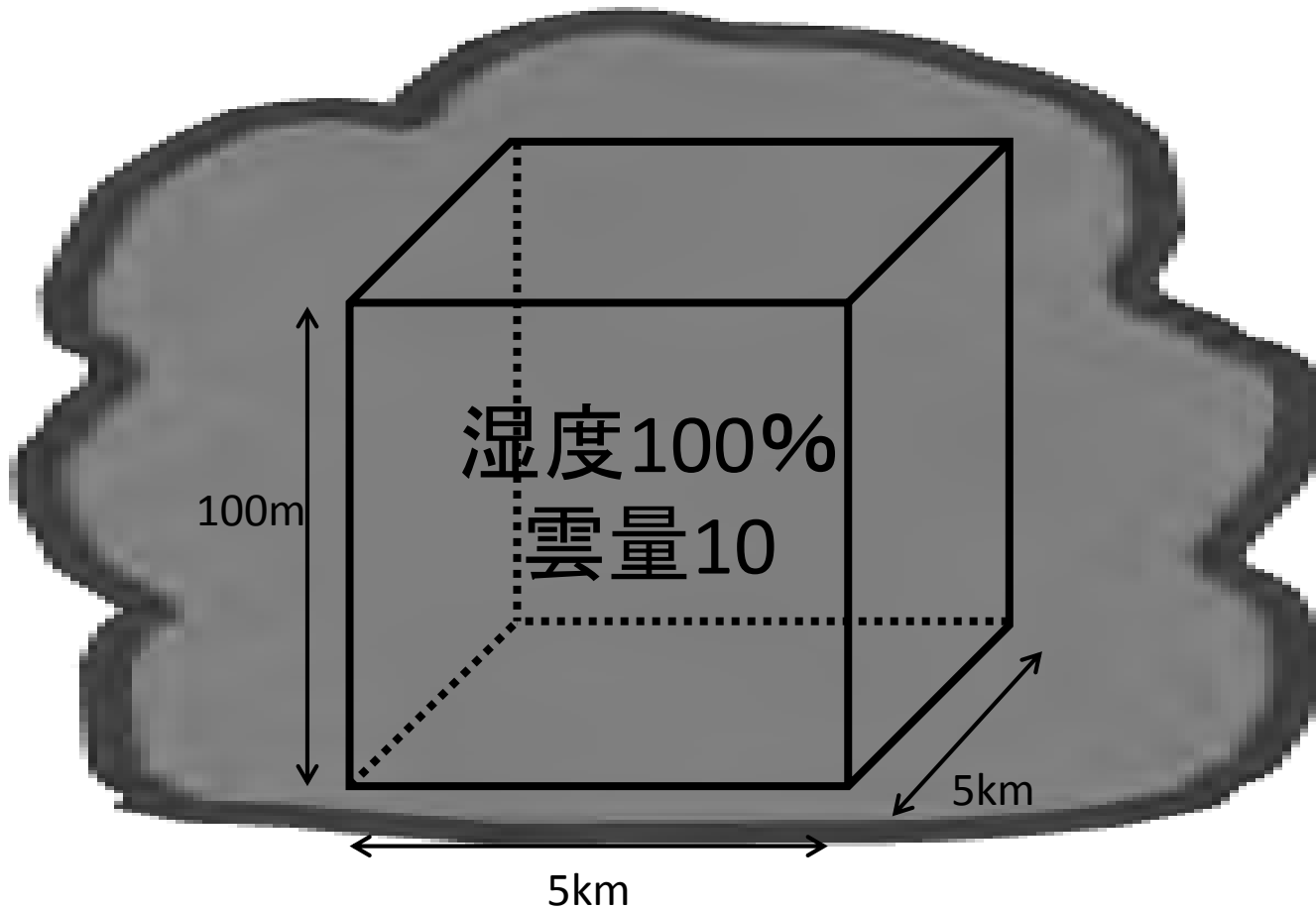
短波領域はBriegleb (1992) (BR), Freidenreich and Ramaswamy (1999) (FR)に基づき22のバンドに分割され、k-分布法で透過関数が求められる。

$$F = \sum_i^{22} \alpha_{\Delta\lambda_i} F_{\Delta\lambda_i}$$

$\alpha_{\Delta\lambda_i}$:短波放射輝度の割合
 $F_{\Delta\lambda_i}$:バンド平均フラックス

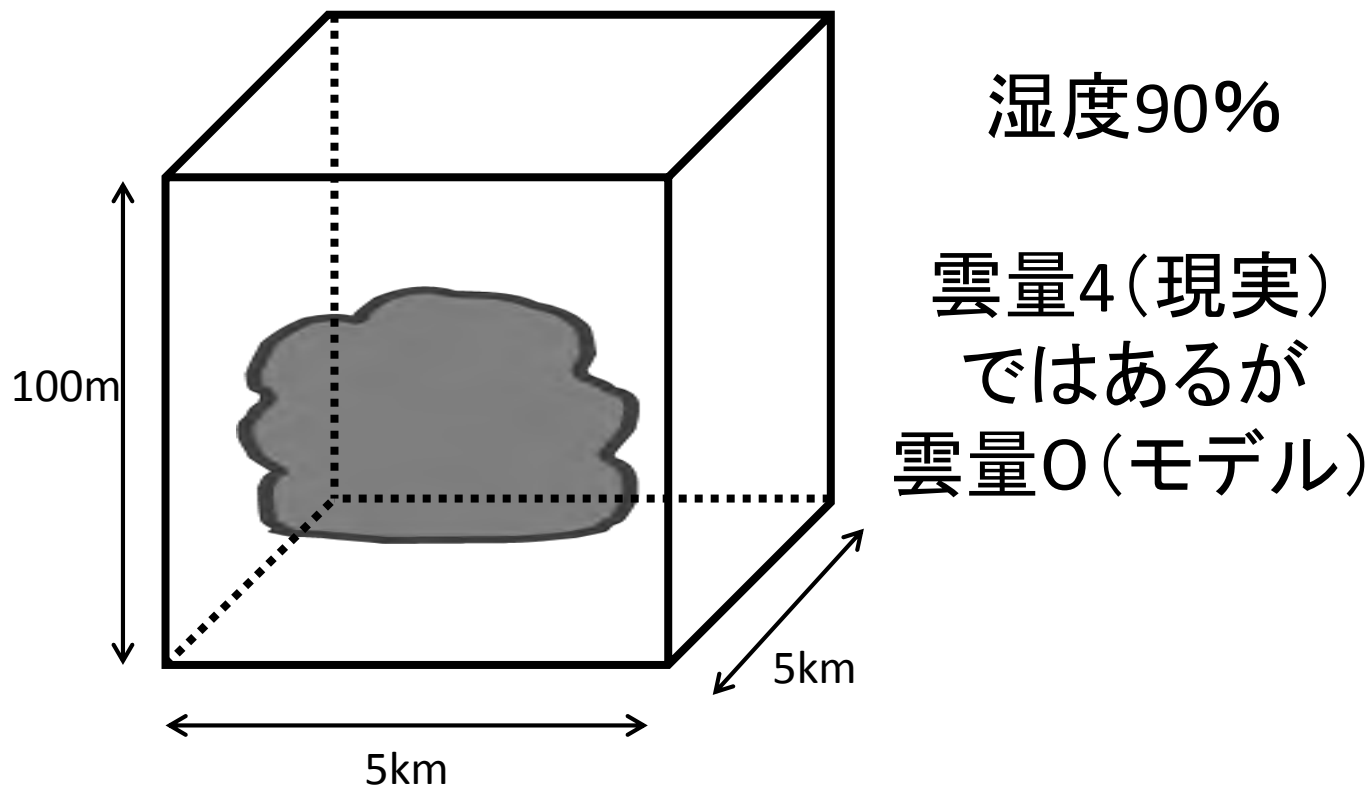
	紫外域		可視域		近赤外域	
バンド	22～13		12～8		7～1	
波長(μ m)	0.174～0.364		0.364～0.685		0.685～5.00	
水蒸気					BR	
酸素	Schumann–Runge band (FR)			B-band (FR)	A-band (FR)	
二酸化炭素					FR	
オゾン	Hartley–Huggins band (FR)		Chappius band (FR)			
空気分子	Rayleigh 散乱 (FR)					
エアロゾル	Mie 散乱・吸収					
雲粒	Mie 散乱・吸収（水雲と氷雲の光学特性の違いを考慮）					

数値予報モデルにおける雲量予測



格子内の平均で飽和していれば問題ない

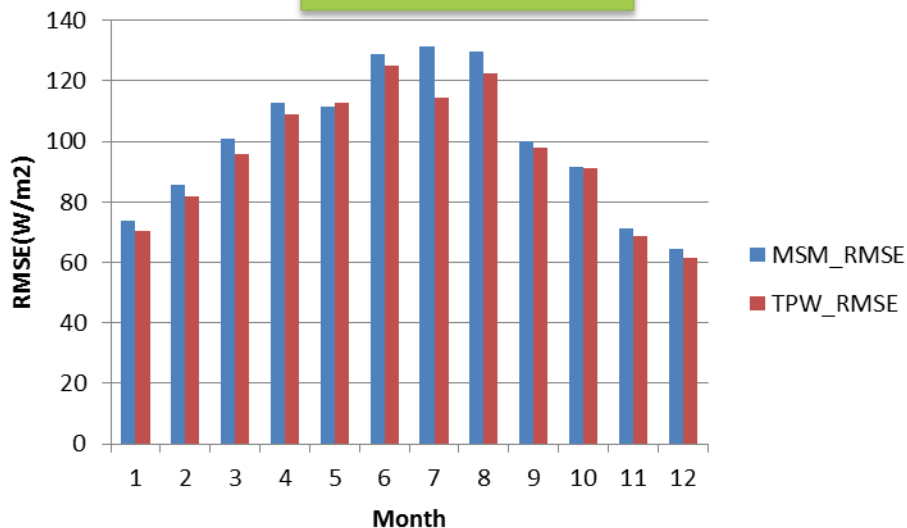
数値予報モデルにおける雲量予測



格子内の平均で飽和していない場合、部分的な雲を表現できない

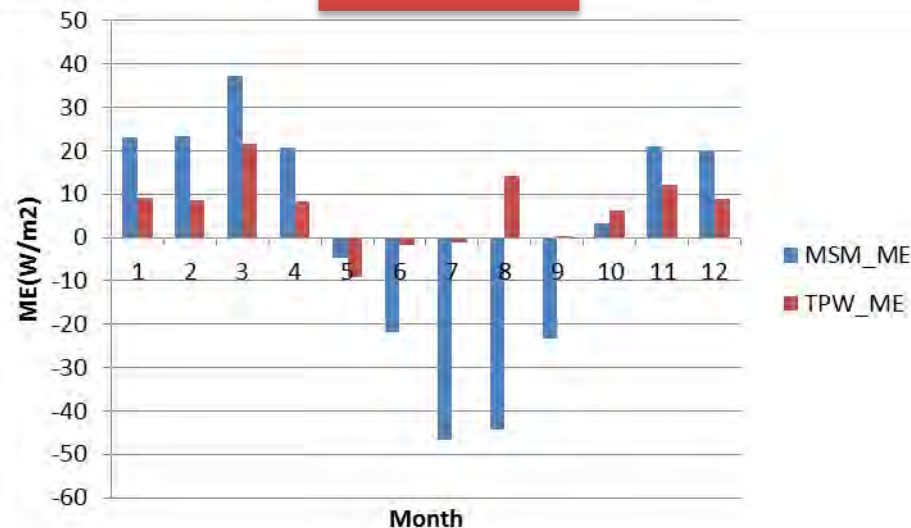
通年評価(2010年)の結果

RMSE



	ALL	winter	summer
MSM	100.239	81.29511	119.0794
TPW	95.96968	78.25711	113.5855

ME

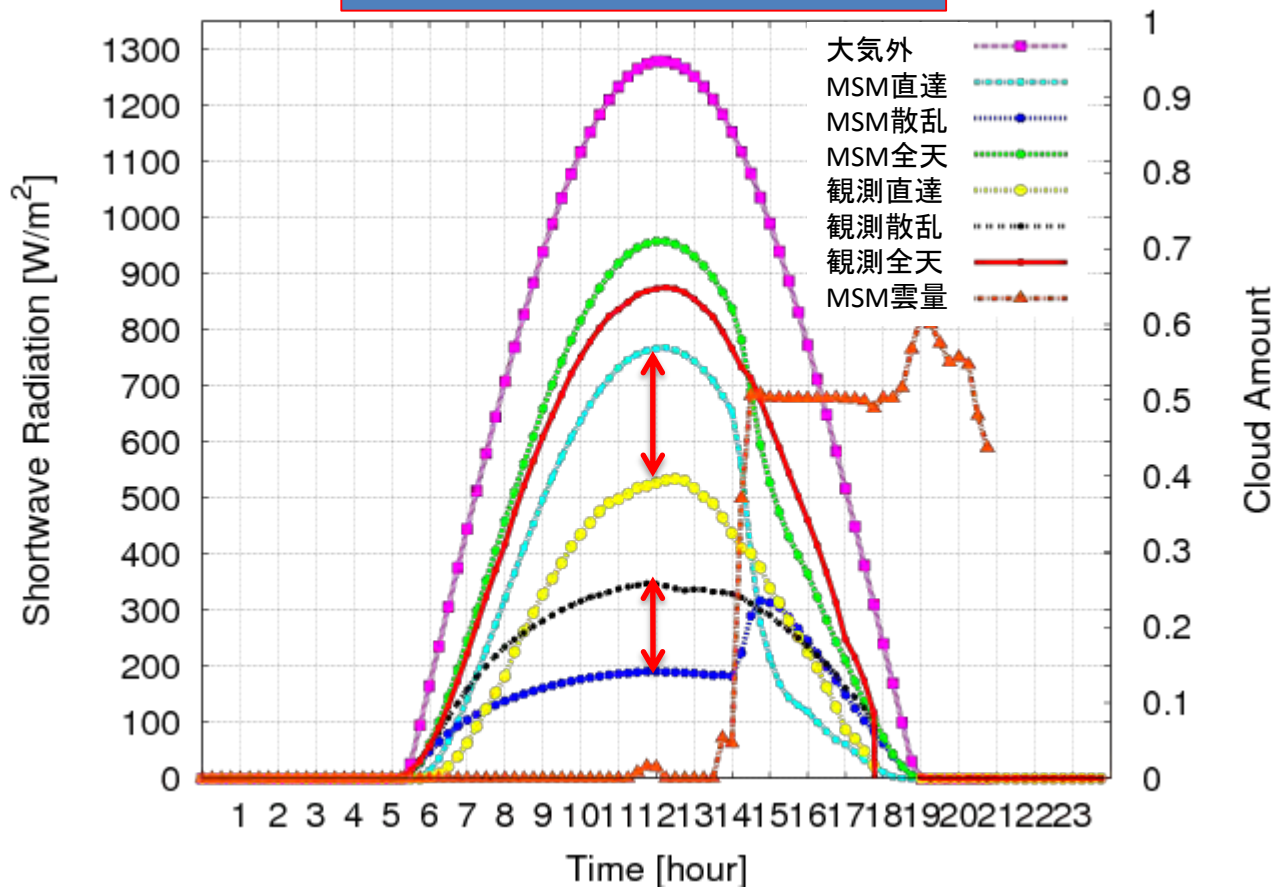


	ALL	winter	summer
MSM	0.443937	21.24791	-20.2464
TPW	6.40549	11.09868	1.737942

5月に若干誤差が拡大しているものの、
それ以外の月では誤差を軽減
通年で約5%の改善を達成
特に夏季の改善が顕著

エアロゾルの効果

2010年5月4日



時	日照時間 (h)	全天日射量 (MJ/m ²)	雲量	視程 (km)
9	1	1.73	0	15
10	1	2.39		
11	1	2.85		
12	1	3.11	0 +	15
13	1	3.17		
14	1	3.01		
15	1	2.6	0 +	10
16	1	2.01		
17	1	1.34		
18	0.9	0.6	0 +	10

黄砂日

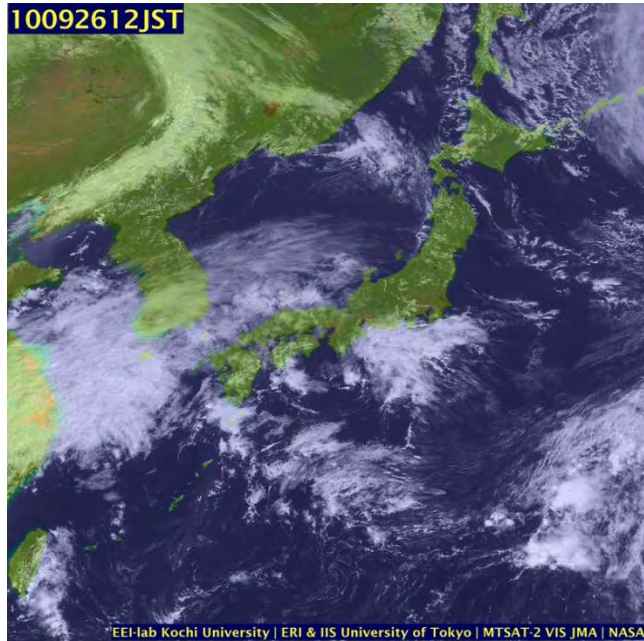
12時に直達・約250 W/m², 全天・約70 W/m²の誤差

■ 全天日射量 (GHI) の ramp down の予測可能性

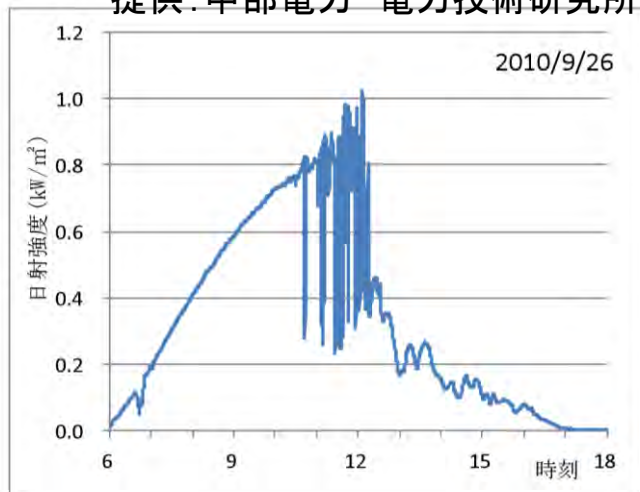
- 前日の予測 (MSM): 水平解像度 5 km
 - 前日の 12 UTC 初期値
- 当日朝の予測 (LFM): 水平解像度 2 km
 - 21 UTC 初期値 (午前6時)

2010年9月26日

衛星画像 2010. 9. 26



提供: 中部電力 電力技術研究所

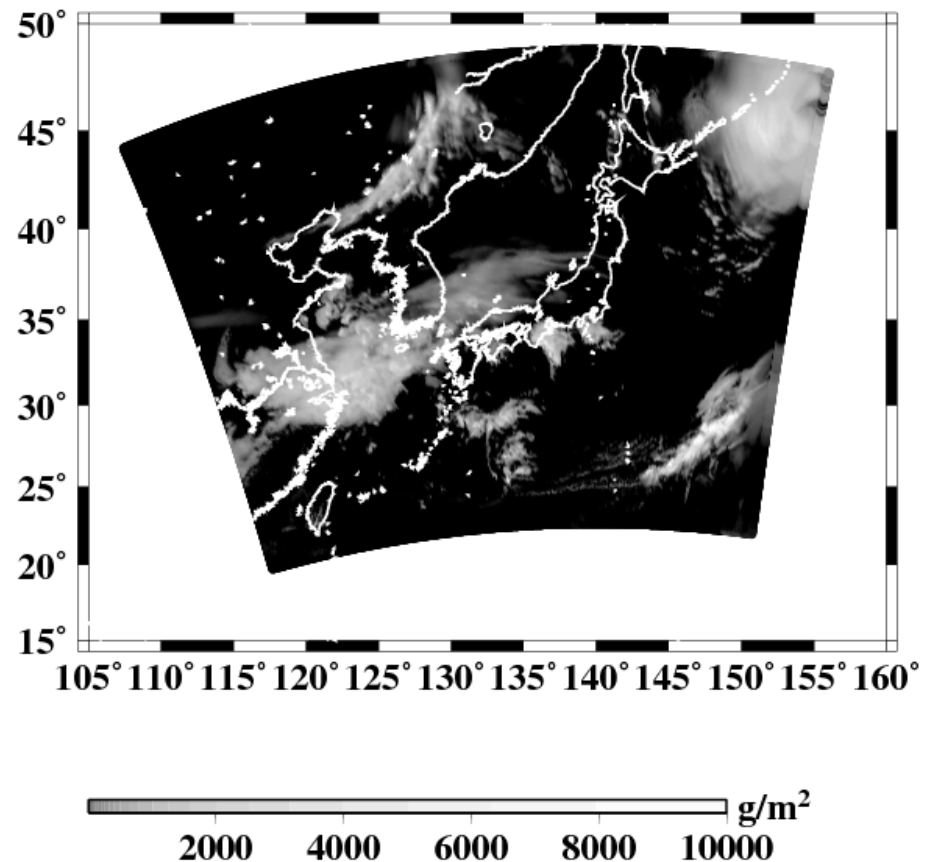


2010年09月25日12UTC 初期値

MSM

水物質の鉛直積算

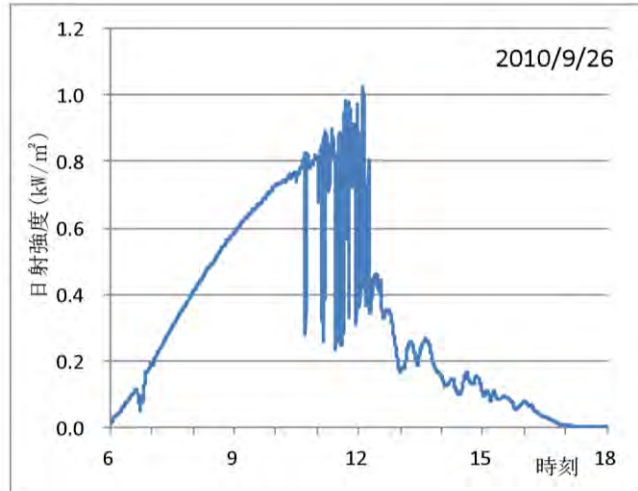
MSM TCWC 20100926 12JST orig



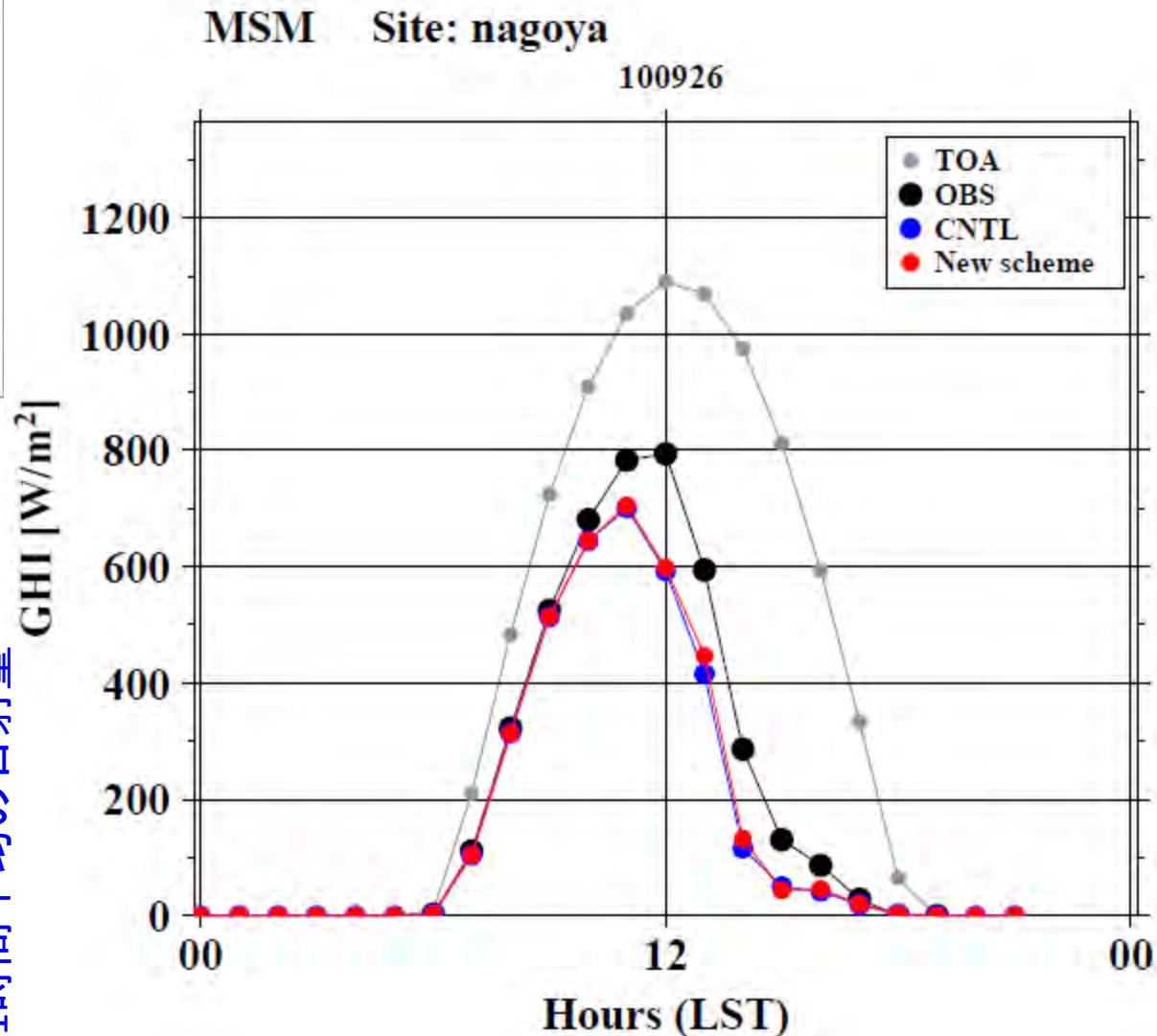
2010年9月26日

提供: 中部電力 電力技術研究所

2010年09月25日12UTC 初期値
MSM



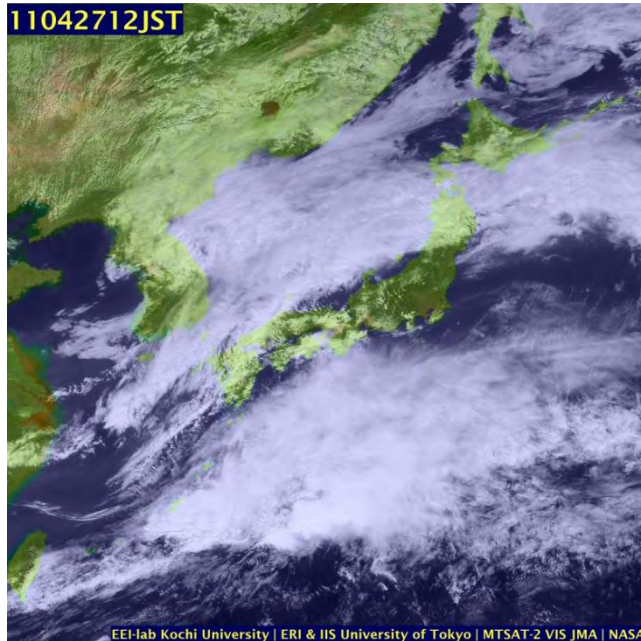
1時間平均の日射量



2011年4月27日

衛星画像 2011. 4. 27

11042712JST

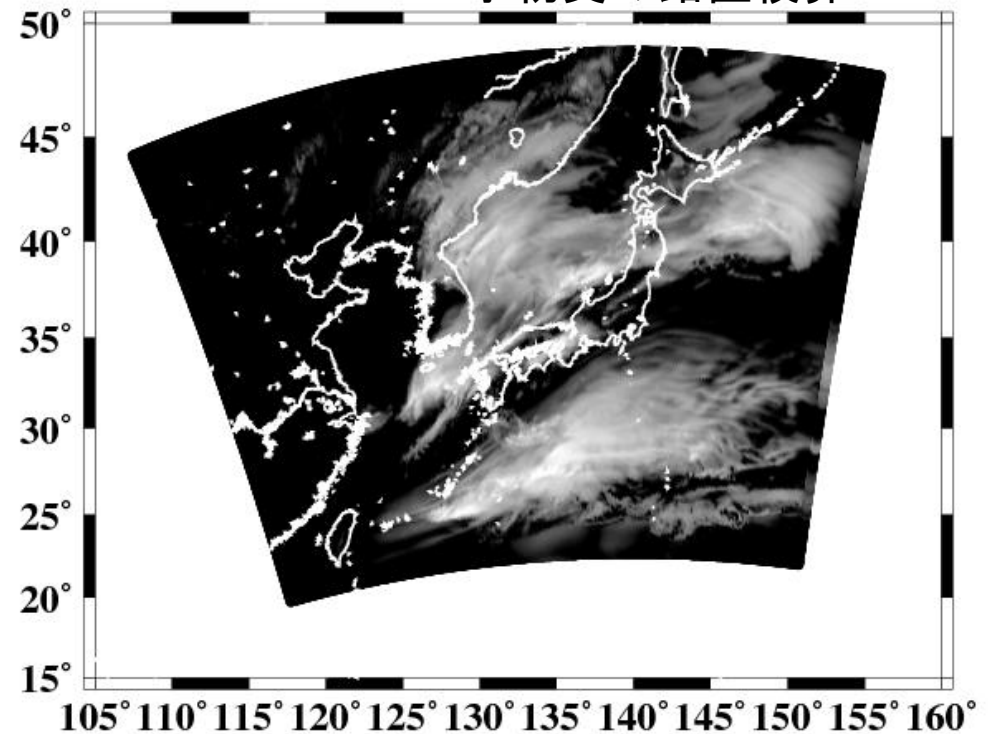


2011年04月26日12UTC 初期値

MSM

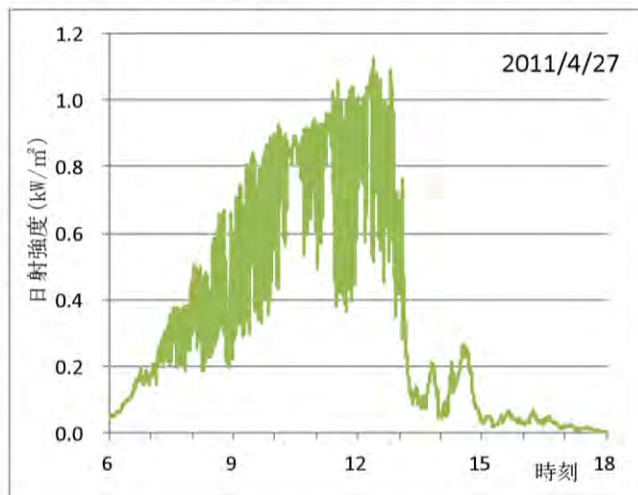
MSM TCWC 20110427 12JST orig

水物質の鉛直積算



2000 4000 6000 8000 10000 g/m^2

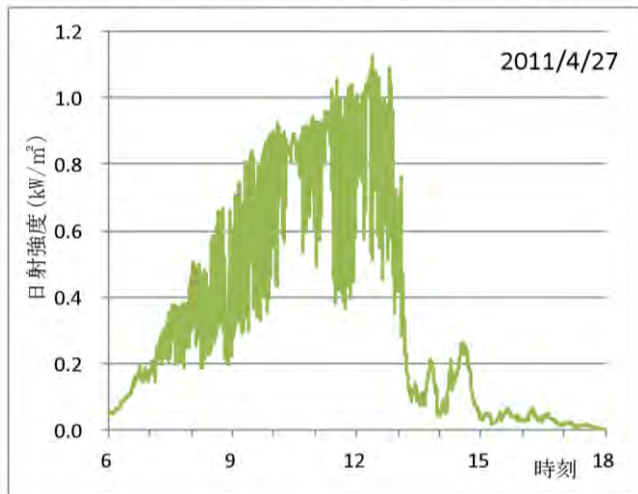
2011年4月27日（委員会でご説明した波形です）



提供: 中部電力 電力技術研究所

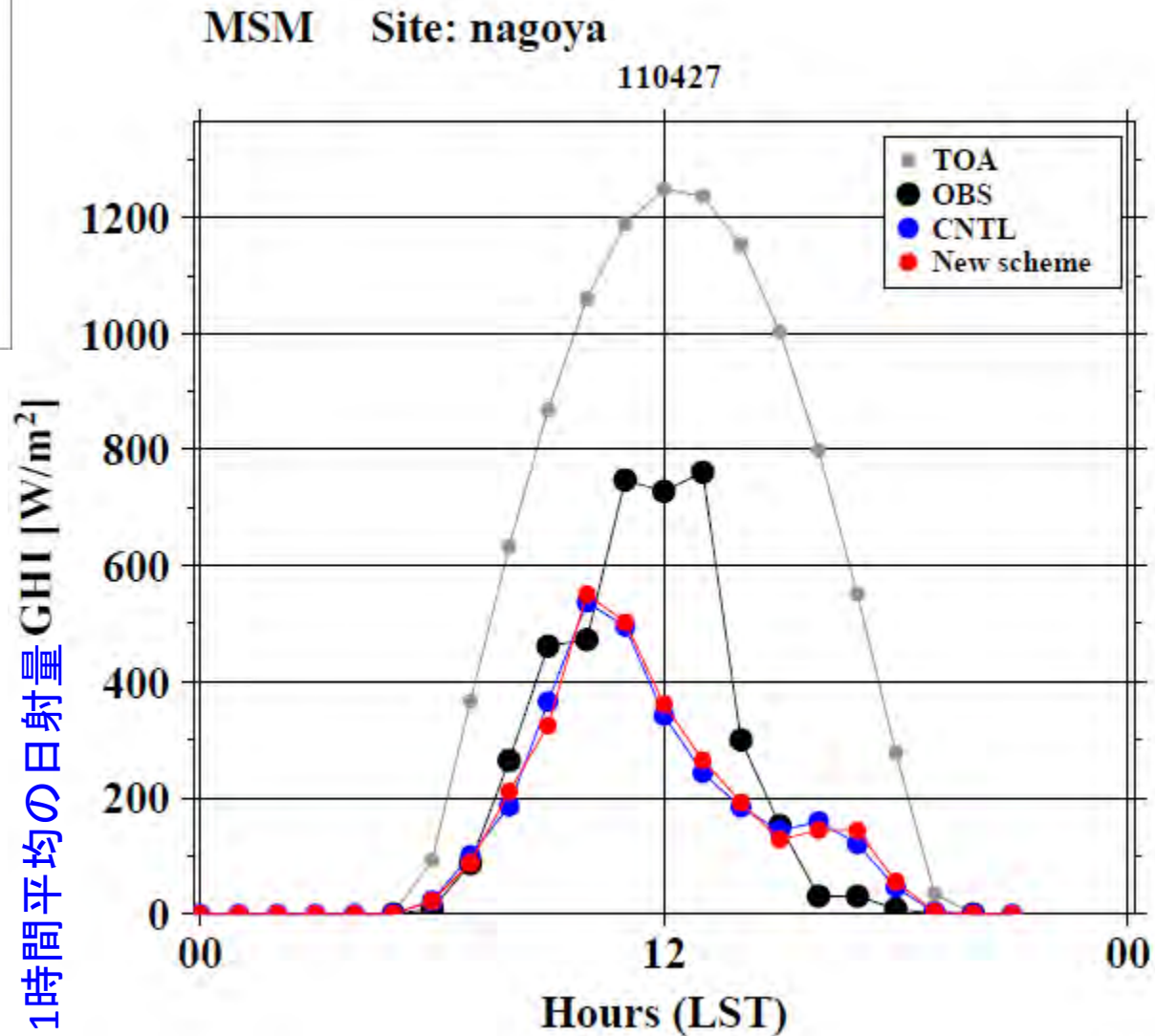
2011年4月27日

2011年4月27日 (委員会でご説明した波形です)



中部電力 電力技術研究所

2011年04月14日12UTC 初期値
MSM



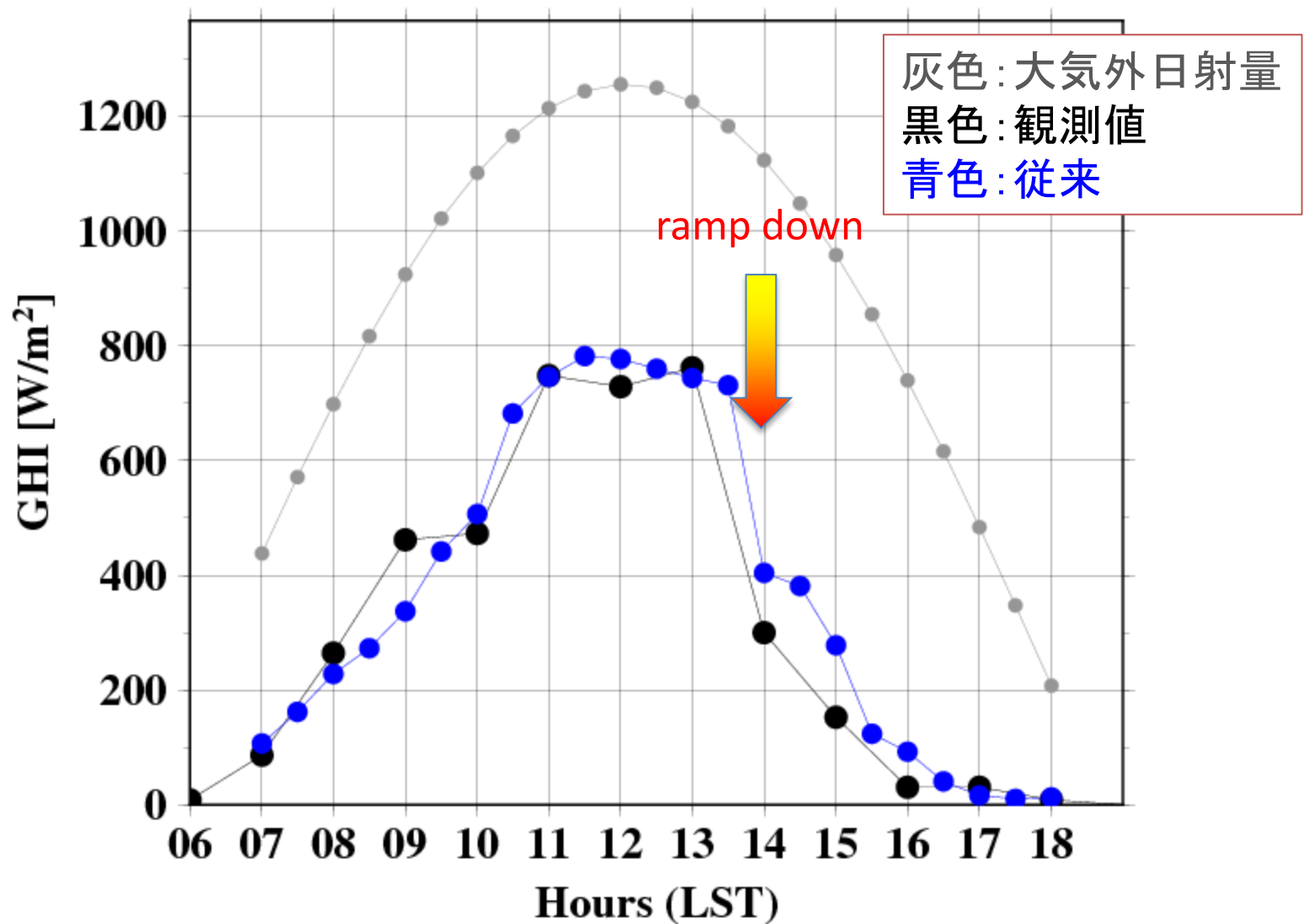
LFMによる予測可能性

2011.4.15の名古屋の日射ランプダウン事例
MSM の予測が悪かった事例

名古屋

LFM Site: nagoya

110427



風の ramp down の予測可能性に関する事例解析

- 3事例
 - 荻本先生が抽出された事例
 - 発電量と需要との関係も含まれている
- 2005年10月9日
- 2006年1月31日
- 2006年2月18日

数値実験の概要

- 水平解像度 5 km のモデルを用いる
 - 2013年5月29日以前の MSM と同じ設定
- 目的: 風の ramp down が前日に予測可能かどうかを調べること
- 初期値と境界値
- 領域解析 (水平解像度 20 km) を使用
- 20分ごとに風の予測値を出力

水平解像度 5 km: MSM(2013年5月29まで) で実験

領域モデル(RSM)

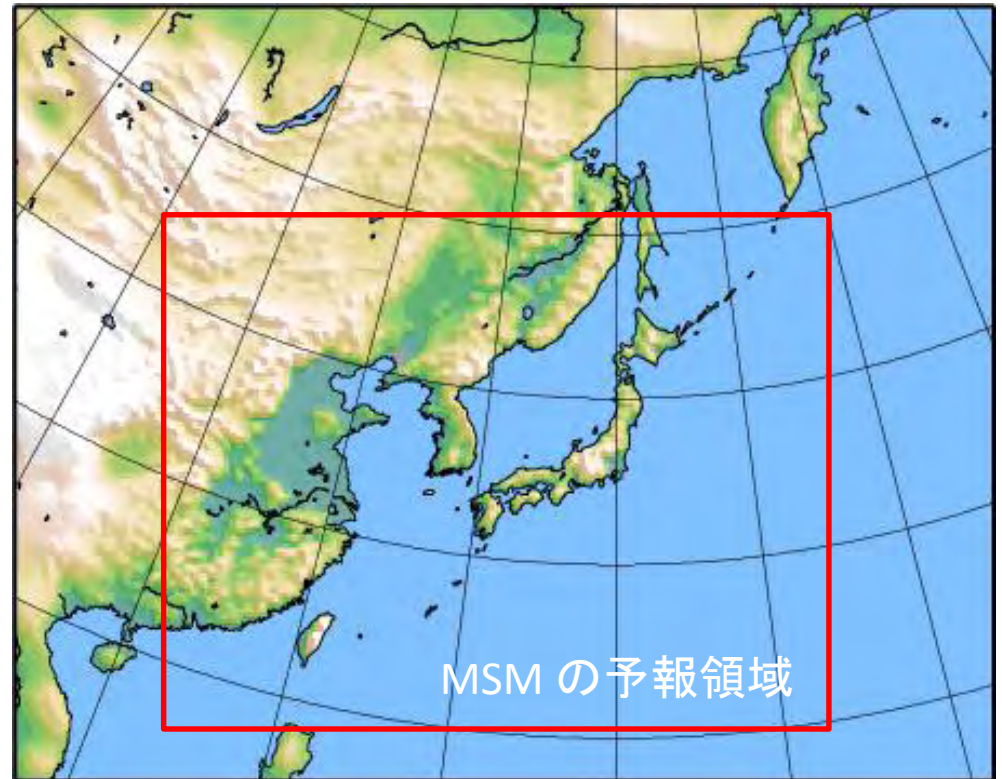
仕様(2007年11月運用終了時)

水平解像度: 20km
水平格子数: 325X257
鉛直層数: 40層
モデルトップ: 10hPa

初期時刻: 00, 12UTC
予報時間: 51時間
用途: 短期予報

データ同化システム:
4DVAR (40km)

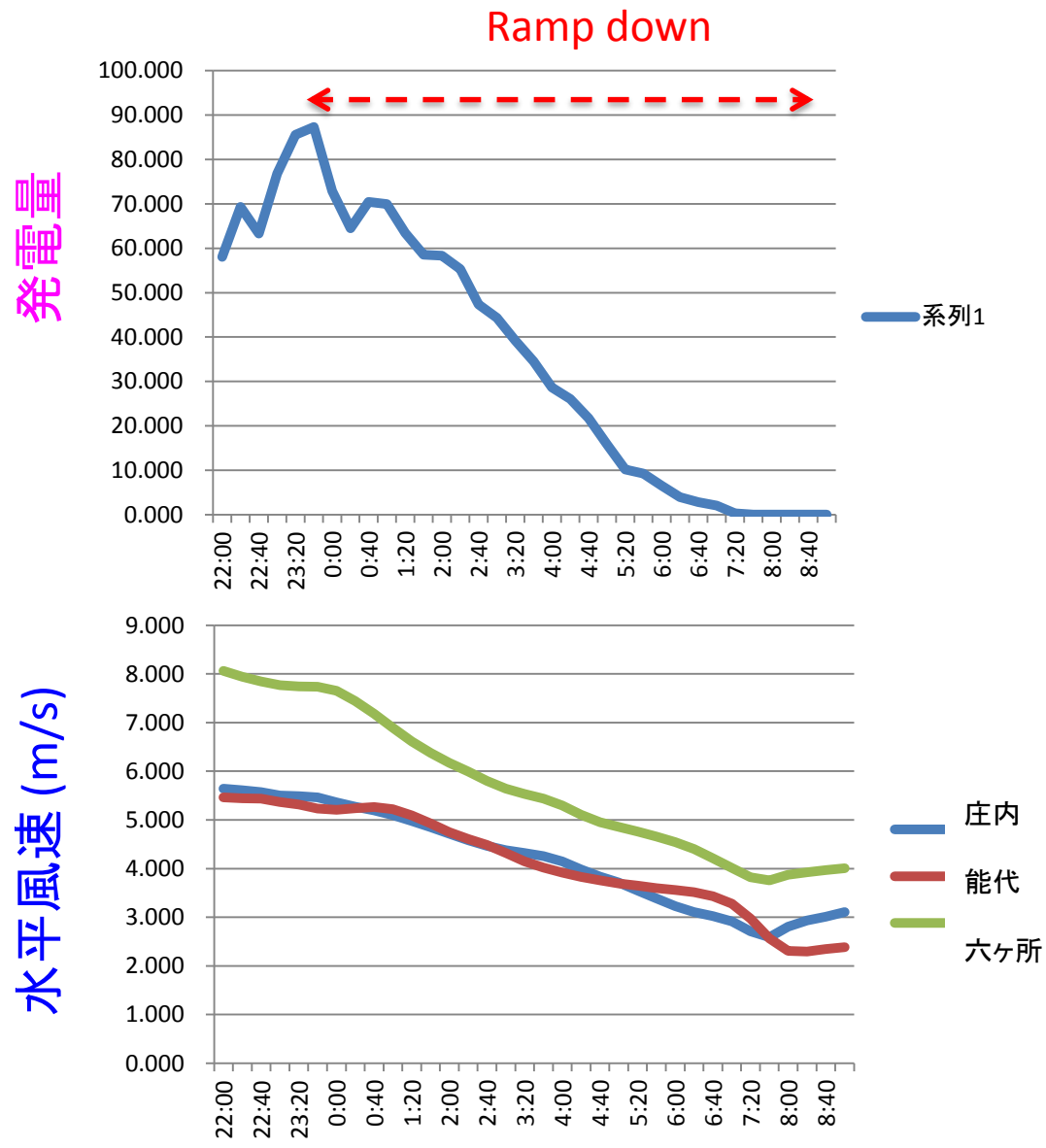
RSM の予報領域



MSM の予報領域

2005年10月9日

初期値
2005年10月8日00UTC



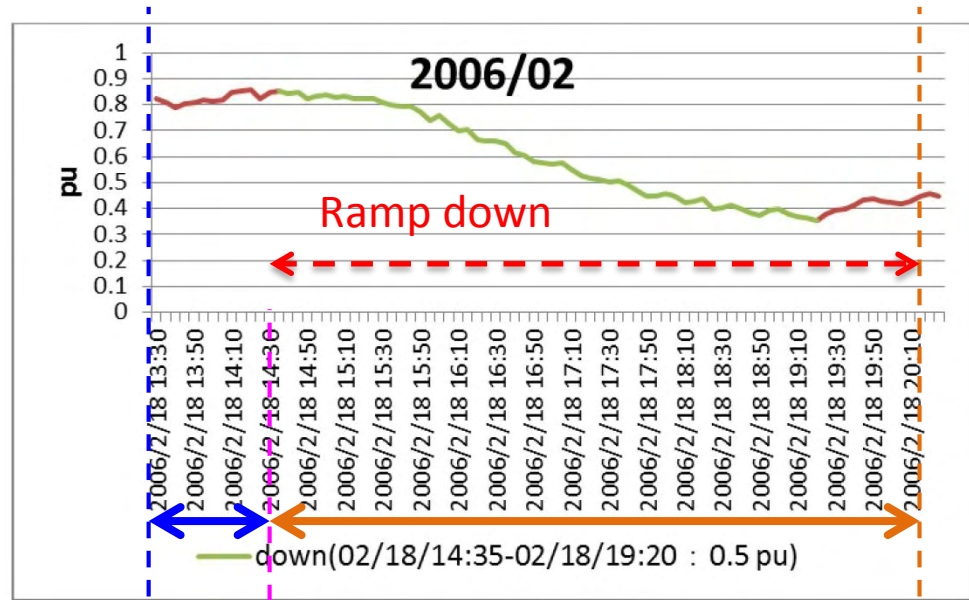
2006年2月18日

初期値

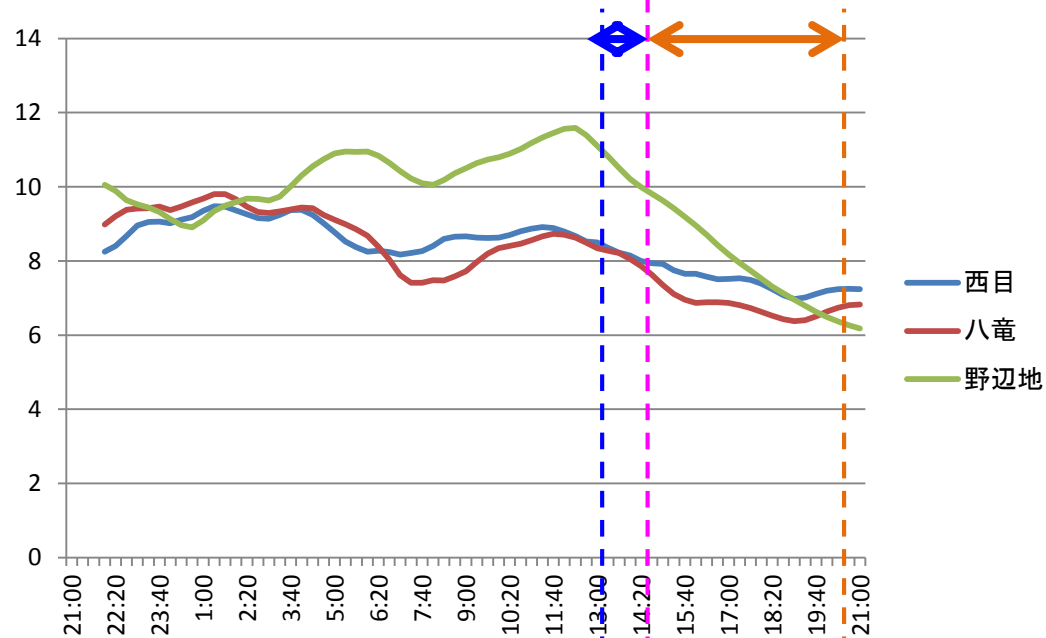
2006年2月17日12UTC

2つのグラフの時間
軸の違いに注意

発電量

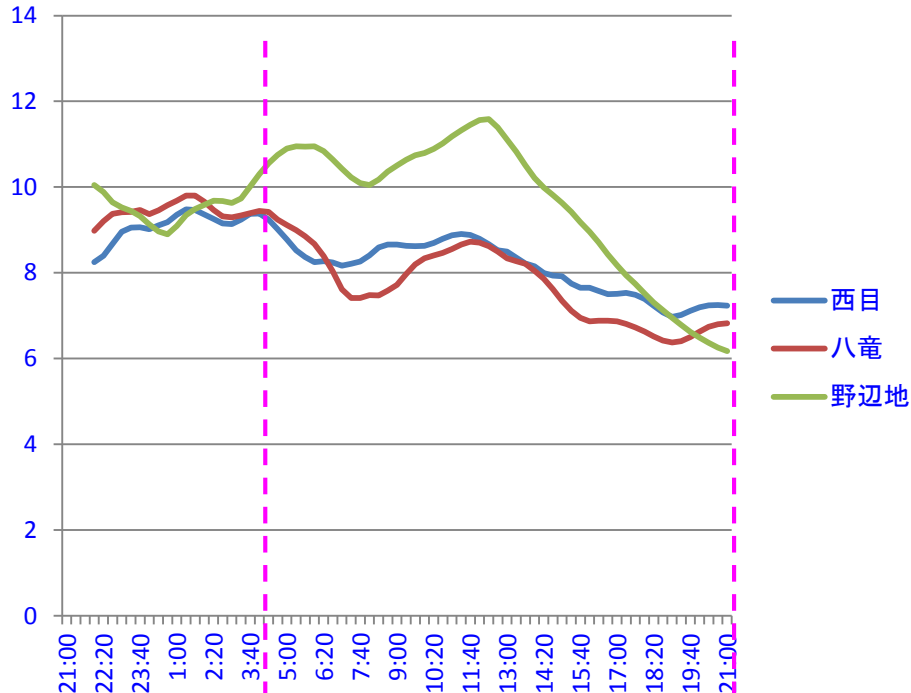


水平風速 (m/s)



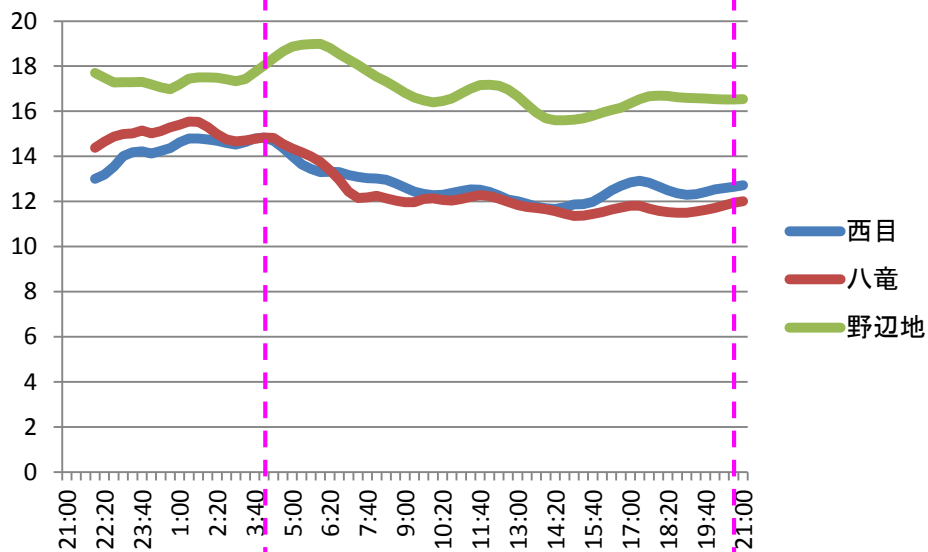
2006年2月18日

2005年10月9日



高度 0.02 km
モデル面 1

Ramp down



高度 0.53 km
モデル面 8

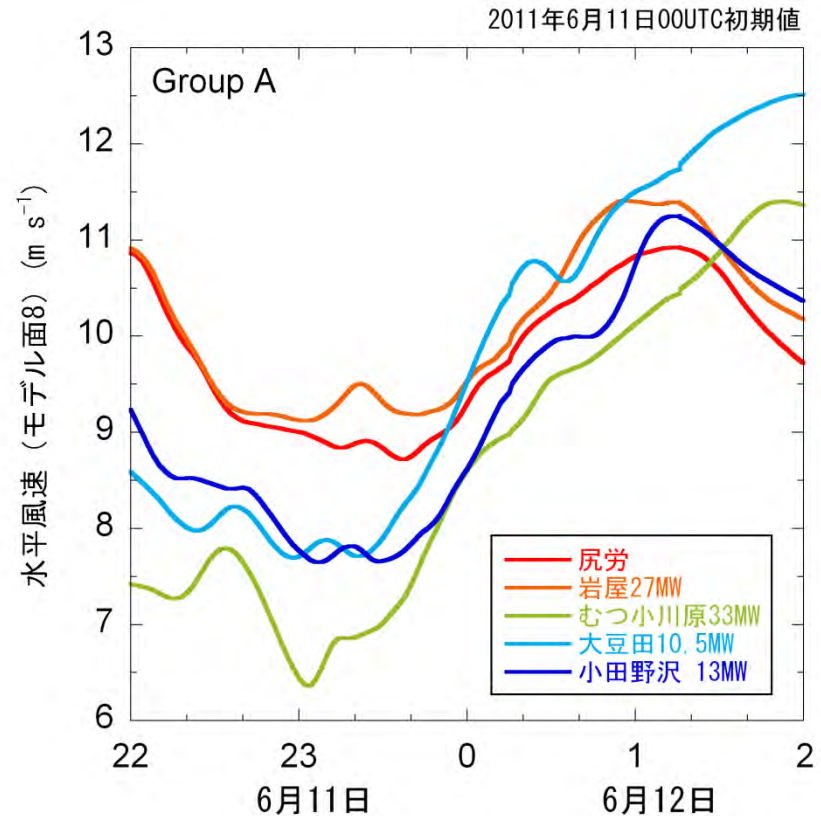
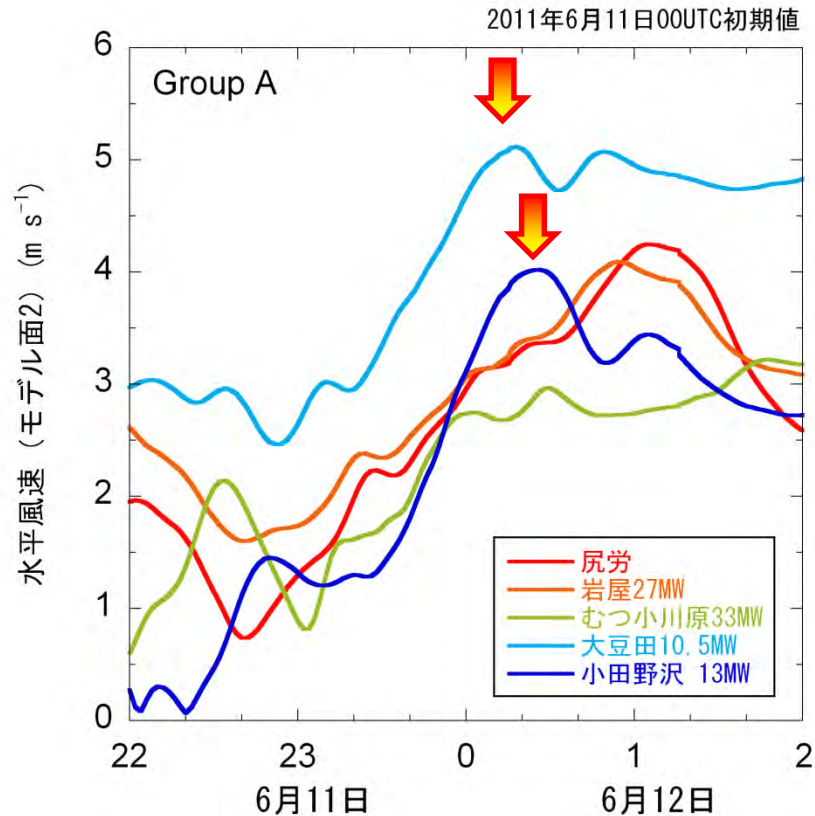
2つのグラフの
縦軸(風速)の
違いに注意

風の急変の予測可能性

2005年6月11日～12日

Group A

発電出力



LFM による風の予報の改善例

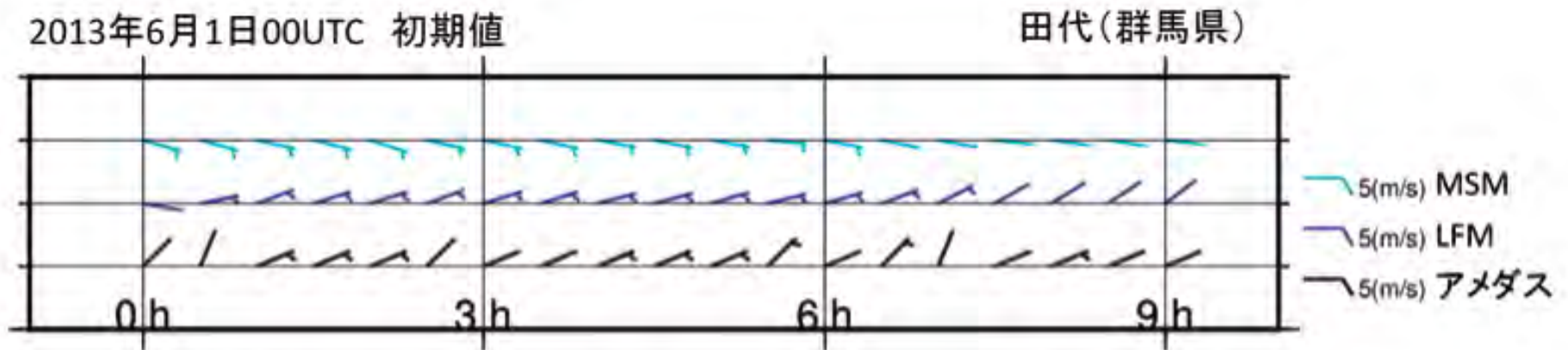


図 2.4.5 2013 年 6 月 1 日 00UTC 初期値の田代（群馬県）における MSM（水色）と LFM（青色）の風の予報（30 分おき）と対応するアメダス観測（茶色）。横軸は予報時間（単位:時間）、風速の単位は m/s で、矢羽根 1 本は 5m/s（短い矢羽根は 2.5m/s）を示す。

数値予報による予測

数値予報モデル

時間変化率

$$\frac{dA(\mathbf{r}, t)}{dt} = f(\mathbf{r}, t)$$

$A(t)$: 気温、風、日射量など
 t : 時間

将来の時刻
 $t = t$ での状態

$$A(\mathbf{r}, t) = \underbrace{A(\mathbf{r}, t_0)}_{\text{初期値}} + \underbrace{\int_{t_0}^t f(\mathbf{r}, t) dt}_{\text{モデル}} \quad t_0: \text{初期時刻}$$

数値予報モデルによる予測結果は、数値予報モデルと初期値とに依存する

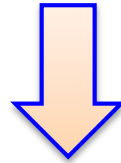
$$A(t_1) = A(t_0) + \overline{f(t)} \cdot \Delta t \quad \text{at } t = t_0 + \Delta t$$

$$A(t_2) = A(t_1) + \overline{f(t)} \cdot \Delta t \quad \text{at } t = t_0 + 2\Delta t$$

$$A(t_3) = \dots$$

アンサンブル予報とは

初期値（大気の状態を予測するための初期時刻の状態）に含まれる誤差を考慮して、異なる初期値から数値予報モデルを実行する方法



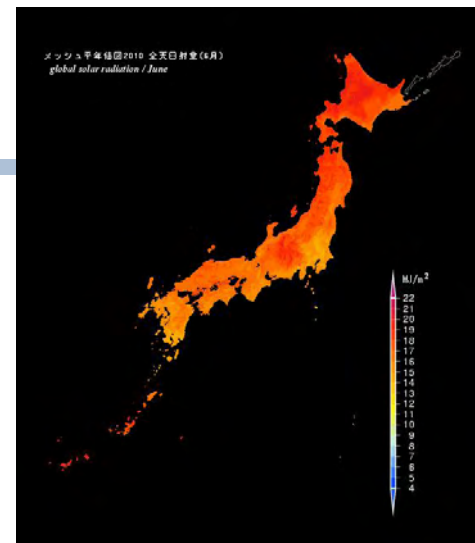
予測の幅や確率的な情報が得られる。

多数のモデル実行が必要なため、一般に解像度を粗くしたモデルを用いる

気象庁における放射の観測

気象庁が実施している日射・赤外放射(日射放射)の観測

- 気象庁では、国内5地点(札幌、つくば、福岡、石垣島、南鳥島)で日射放射観測(直達日射照度、散乱日射照度、下向き赤外放射照度の観測)を実施
- 地上気象観測として国内約50地点で全天日射量、地域気象観測として国内約850地点で日照時間の観測を実施。また、国内3地点(札幌、つくば、那覇)で紫外線の観測も実施。(2013年3月26日現在)
 - ・全天日射量は、気象庁ホームページから閲覧可



全天日射量の 1-km メッシュ気候値

直達・散乱日射量と下向き赤外放射量は気象庁ホームページに掲載されています。

気象庁が国内5地点(札幌、つくば(館野)、福岡、石垣島、南鳥島)で実施している日射放射観測にもとづくデータです。

 直達日射 直達日射 (直達日射とは)	 1時間ごとのデータ	直達日射量 つくば(館野) 2013 年 04 月 データ表示 リセット 札幌、つくば(館野)、福岡、石垣島、南鳥島の数値データ(PDF形式)が見られます
 散乱日射 散乱日射 (散乱日射とは)	 1時間ごとのデータ	散乱日射量 地点選択 年 月 データ表示 リセット 札幌、つくば(館野)、福岡、石垣島、南鳥島の数値データ(PDF形式)が見られます
 下向き赤外放射 下向き赤外放射 (下向き赤外放射とは)	 1時間ごとのデータ	下向き赤外放射量 地点選択 年 月 データ表示 リセット 札幌、つくば(館野)、福岡、石垣島、南鳥島の数値データ(PDF形式)が見られます

基準地上放射観測網(BSRN)



気象庁の4つの観測点が含まれる

まとめ

1. 数値予報の概要と数値予報モデルの紹介
2. 日射量の予測精度向上には、放射計算で用いる「雲」のモデルが非常に重要
3. MSM による日射量の ramp down の予測可能性は事例に依存する
 - 当日朝の LFM の予測は有用
4. 風の ramp down の予測可能性について、水平解像度 5 km の数値予報モデルを用いて調べた
 - 数値実験で用いた初期値と境界値が10年前のシステムで作成されたものであることに注意。
5. 翌日における風の ramp down の予測可能性は高い
 1. 予測可能性は時間変化率に依存
 2. どの高度の風の予測値が重要か？
6. 20～30分程度の風の急変についても予測可能性がある。
 - 急変については、解像度の高いモデルの方が予測可能性は高いと考えられる。

数値予報の概略については、
・太陽エネルギー学会誌(2013年)
・スマートグリッド(2014年予定。改稿中)

ご協力のお願い

観測データをご提供下さい



数値予報モデルの検証



数値予報モデルの改良や開発



数値予報モデルの予測精度の向上



より良い予測結果の提供
(再生可能エネルギー分野への還元)
防災気象情報や天気予報の高度化

ご清聴ありがとうございました



気象庁のマスコットキャラクター「はれるん」です