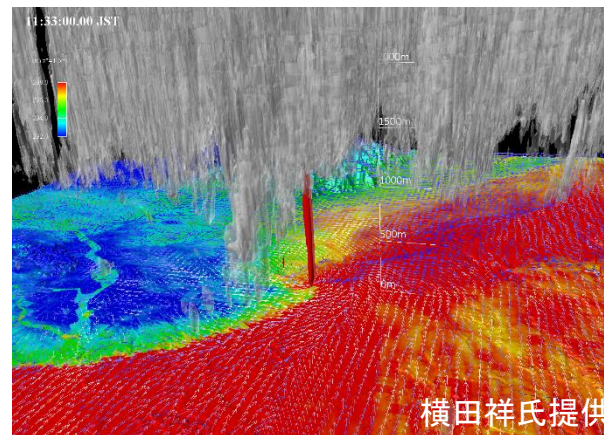
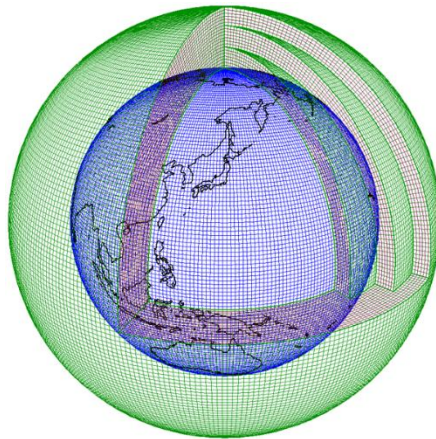


数値予報の過去・現在そして未来



東京大学大気海洋研究所
新野 宏

1. はじめに

天気予報の変遷

1820

1955

経験に基づく(主観的)天気予報

観天望気 太陽や月に暈がかかると雨
夕焼けの次の日は晴れ

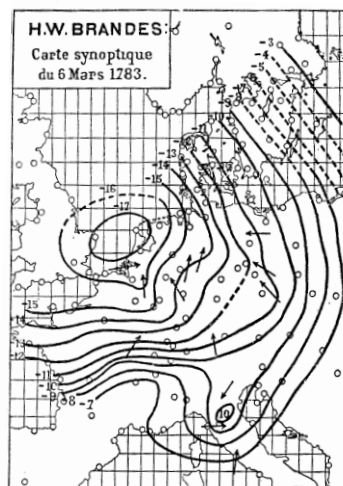
最初の天気図(H. ブランデス)

予報官の知識・経験に強く依存

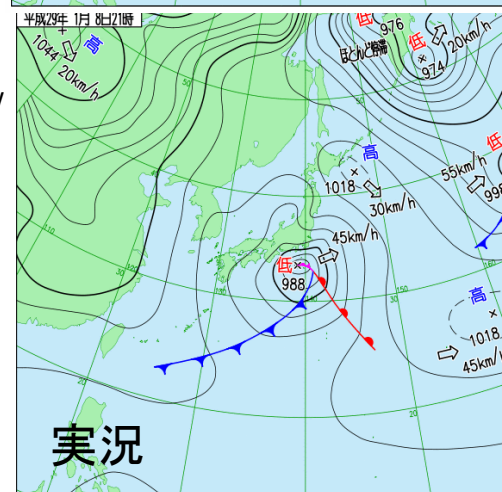
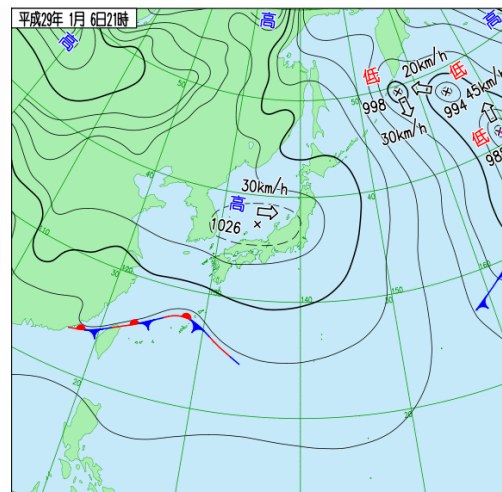


https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/d/d0/Halo_Solar_and_contrail.JPG/420px-Halo_Solar_and_contrail.JPG

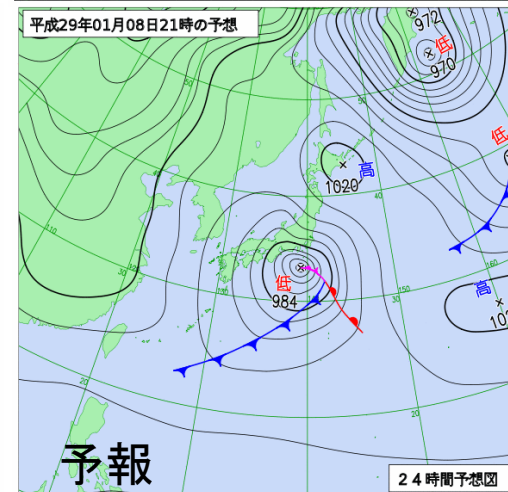
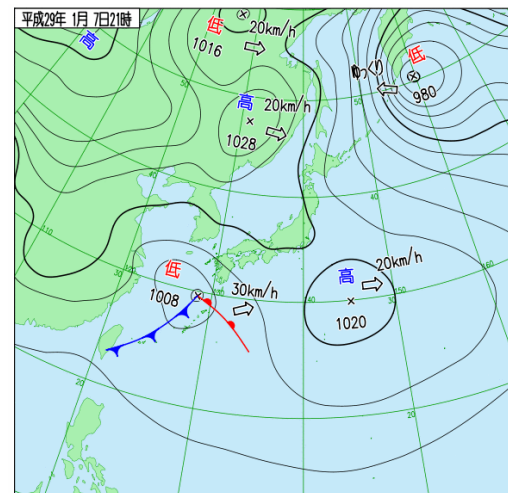
物理法則に基づく(客観的)天気予報



Brandesのデータに基づきHildebrandsson & de Bort (1907)が描き、Shaw (1926)に掲載されたものを斎藤(1982)から引用



実況

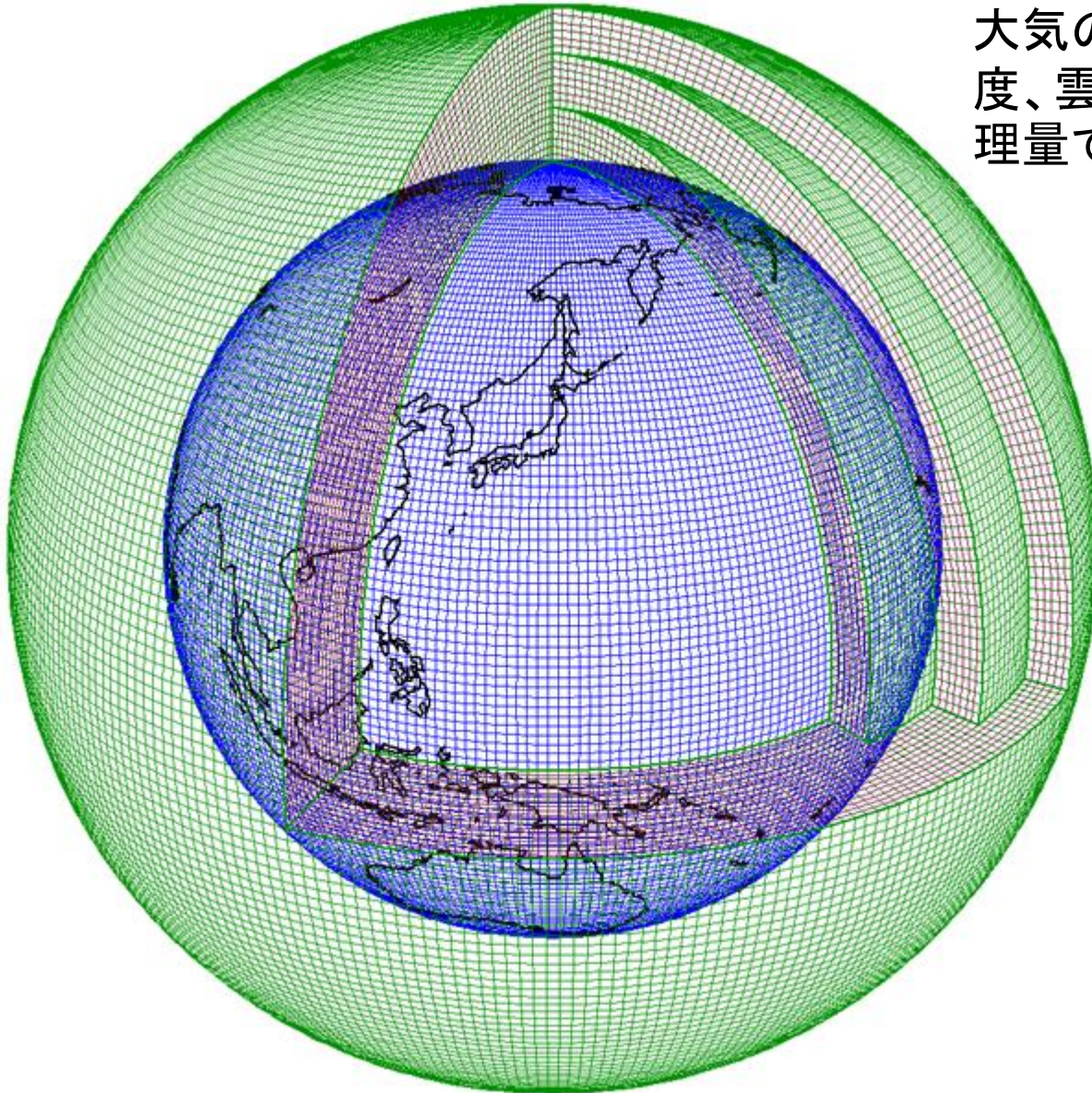


予報

24時間予想図

天気図は気象庁提供

数値予報とは？



大気の状態は、気圧、風、気温、湿度、雲粒・雨粒・雪・霰・雹などの物理量で表わされる

これらの物理量の時間変化は物理法則を表す方程式で記述される。

大型計算機を使って、3次元の「格子点」で方程式を解いて、物理量の時間変化を求めることにより、将来の大気の状態が予測できる。
→数値(天気)予報

数値予報の原理—熱伝導方程式を例として

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \kappa \frac{\partial^2 T}{\partial x^2}$$

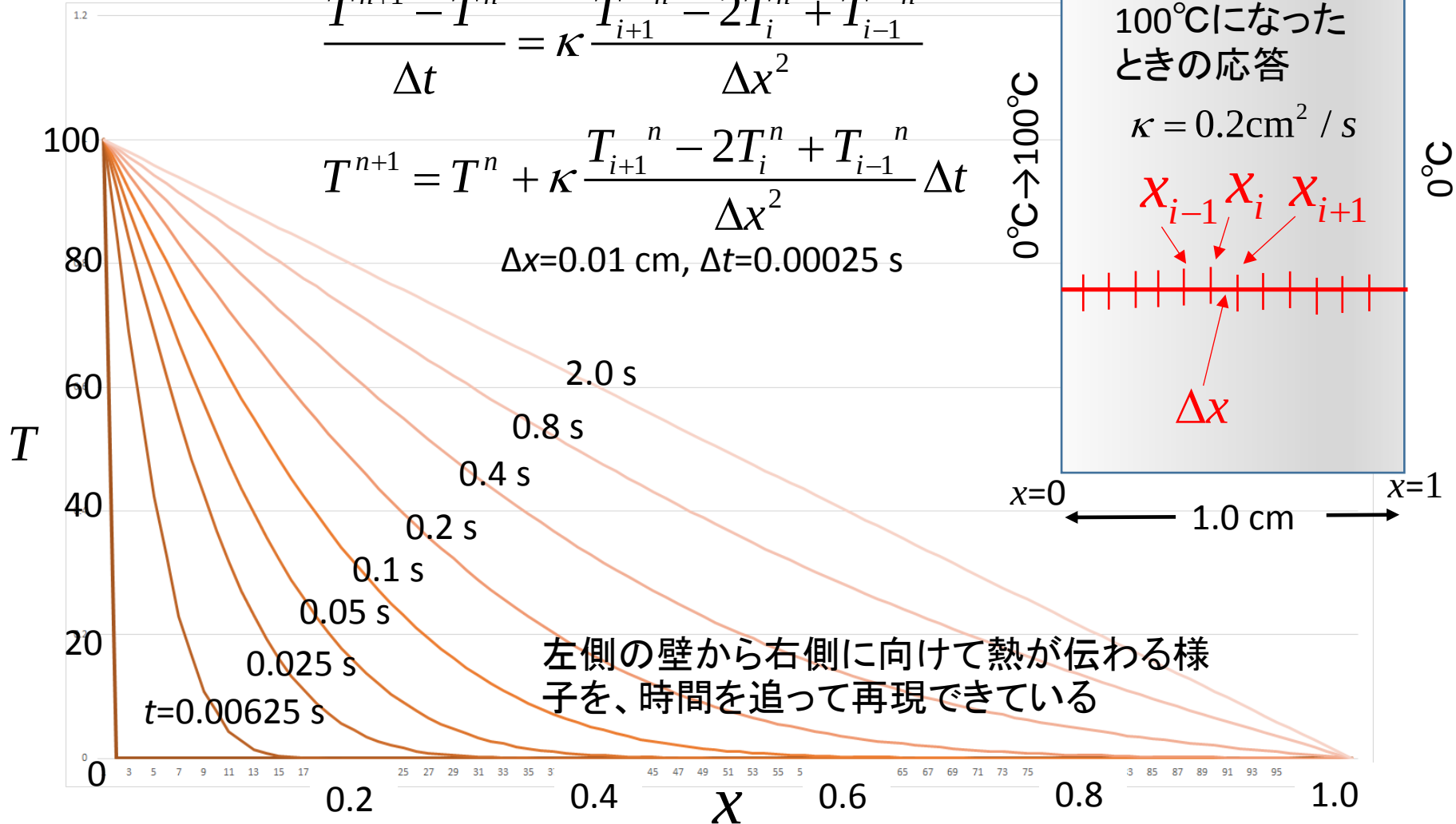
T : 温度、 κ : 温度拡散係数

t : 時間、 x : 左の壁からの距離

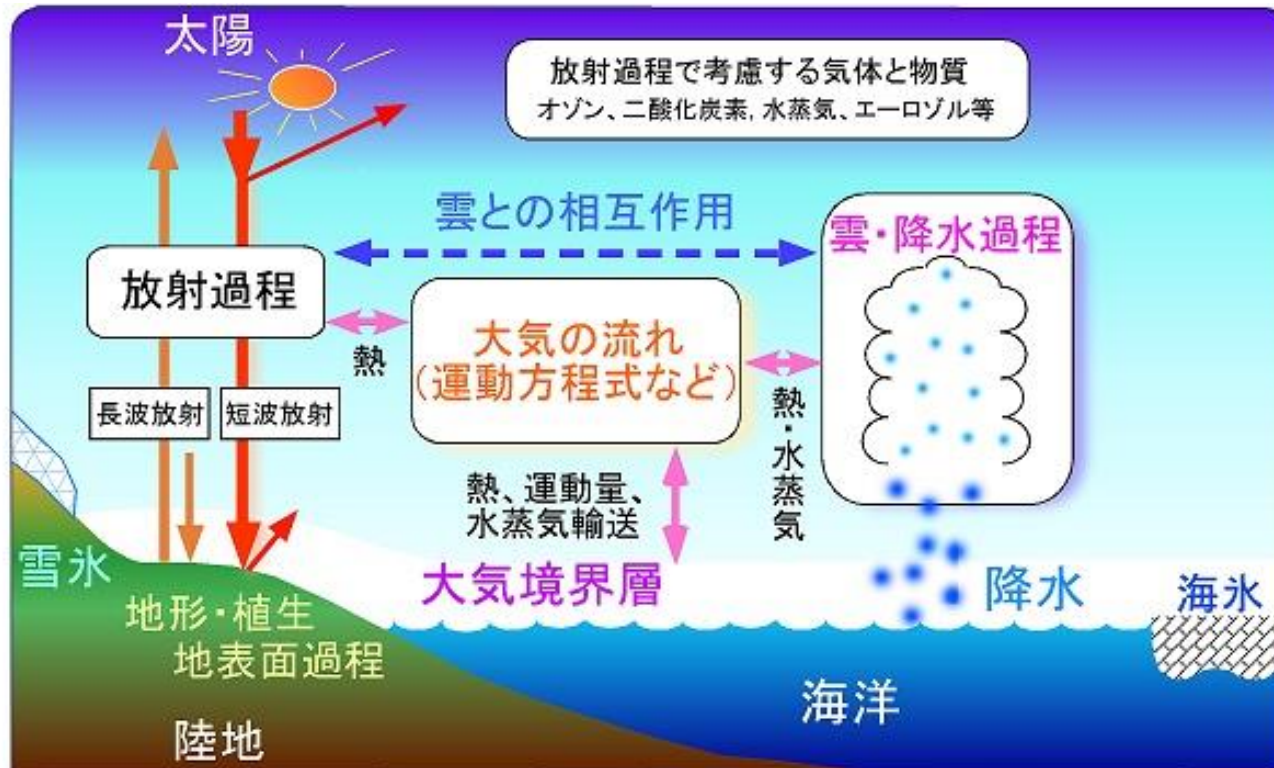
$$\frac{T^{n+1} - T^n}{\Delta t} = \kappa \frac{T_{i+1}^n - 2T_i^n + T_{i-1}^n}{\Delta x^2}$$

$$T^{n+1} = T^n + \kappa \frac{T_{i+1}^n - 2T_i^n + T_{i-1}^n}{\Delta x^2} \Delta t$$

$\Delta x = 0.01 \text{ cm}, \Delta t = 0.00025 \text{ s}$



大気中で起きている様々な物理過程



コリオリ力
大気潮汐

- 放射: 日射は地球大気のエネルギー源 (<http://www.jma.go.jp/jma/kishou/known/whitep/1-3-1.html>)
- 大気の流れによる熱や運動量・水蒸気などの輸送
- 雲と降水: 水蒸気の凝結・蒸発、降水粒子の成長・凍結・融解など
- 陸面や海洋との相互作用: 大気境界層の乱流渦による熱・水蒸気の輸送

～「数値予報モデル」はこれら様々な物理過程を表す物理法則の式を格子点で解くことにより将来の大気の状態を予測

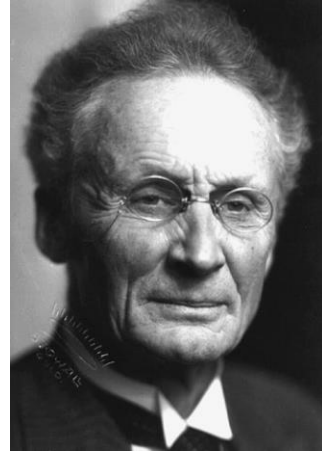
2. 数値予報に至る歩み

1757年 流体力学の基礎方程式の導出(オイラー)

1823, 1845年 ナビエ・ストークス方程式の導出

1904年 大気運動の基礎方程式(プリミティブ方程式)の導出
(V. ビヤルクネス)

1922年 リチャードソンの夢



V. ビヤルクネス



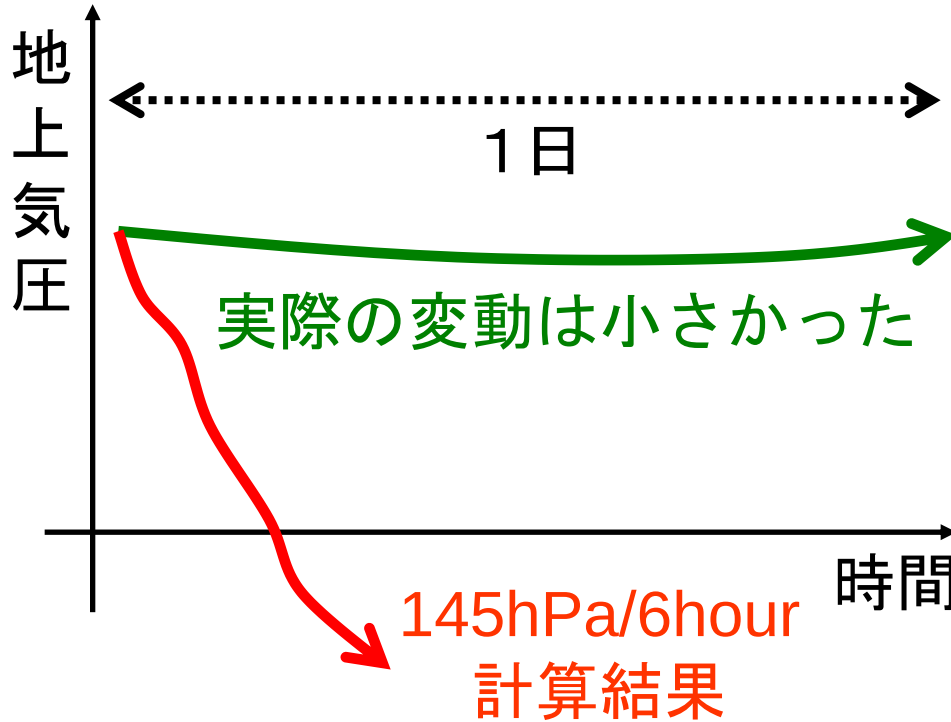
リチャードソン
(英1881-1953)

2枚の写真はLynch (2008, J. Comp. Phys., 227, 3431-3444)のFig.1による:以下数枚のスライドで同様

リチャードソンの夢

1922年 数値的手法による天気予測

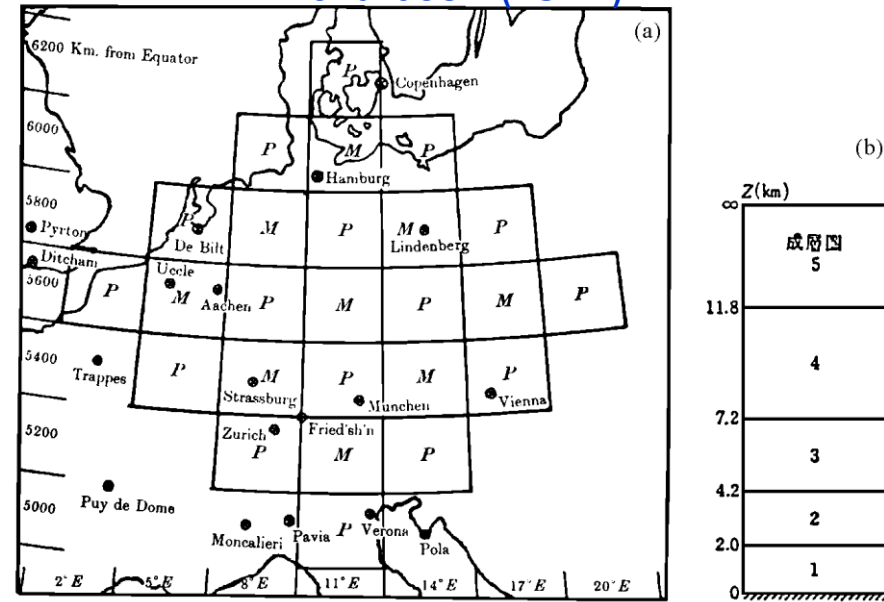
人手により膨大な計算作業で数値予報に挑戦
6時間予報に6週間かかった。



現実に見られるよりもはるかに大きな気圧
変化が予測され、失敗に終わる

リチャードソンが用いたプリミティブ方程式系は、高速で伝播する重力波という波が含まれるが、これを適切に予測する数値計算法を用いなかったため、良い結果が得られなかったと思われる。

Richardson (1922)



リチャードソンが用いた水平格子(～200km)と鉛直層(5層)



「6万4千人が大きなホールに集まり一人の指揮者の
元で整然と計算を行えば、実際の時間の進行と同程
度の速さで全球の予測計算を実行できる」と提案

(<http://www.jma.go.jp/jma/kishou/known/whitep/1-3-2.html>)

数値予報に至る歩み

1757年 流体力学の基礎方程式の導出(オイラー)

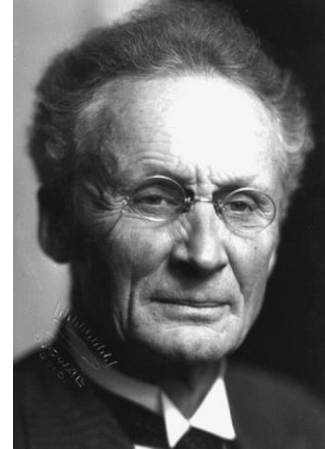
1823, 1845年 ナビエ・ストークス方程式の導出

1904年 大気運動の基礎方程式(プリミティブ方程式)の導出
(V. ビヤルクネス)

1922年 リチャードソンの夢

1937年 米国で高層気象観測始まる

1939年 ロスビー波の発見



V. ビヤルクネス



リチャードソン
(英1881-1953)

電子計算機の登場

1946年ノイマン(ハンガリー&米1903-1957)が
数値予報への電子計算機の応用を提案

米国ペンシルバニア大学

デジタル計算機エニアック「ENIAC」(Electronic Numerical Integrator and Computer)

真空管:17,468個、重量:30t、消費電力:150KW

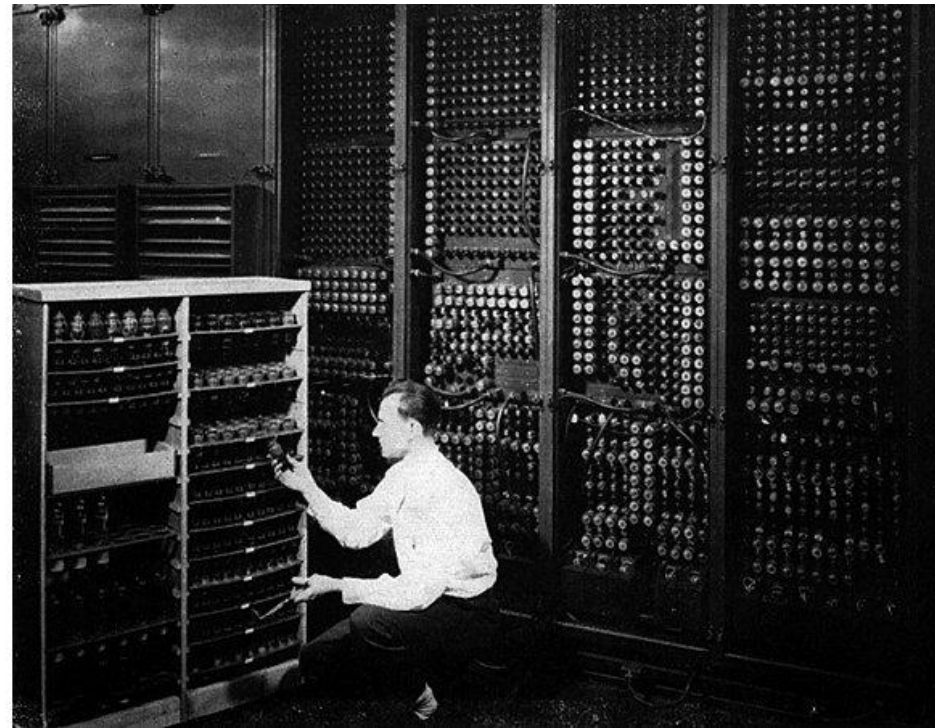
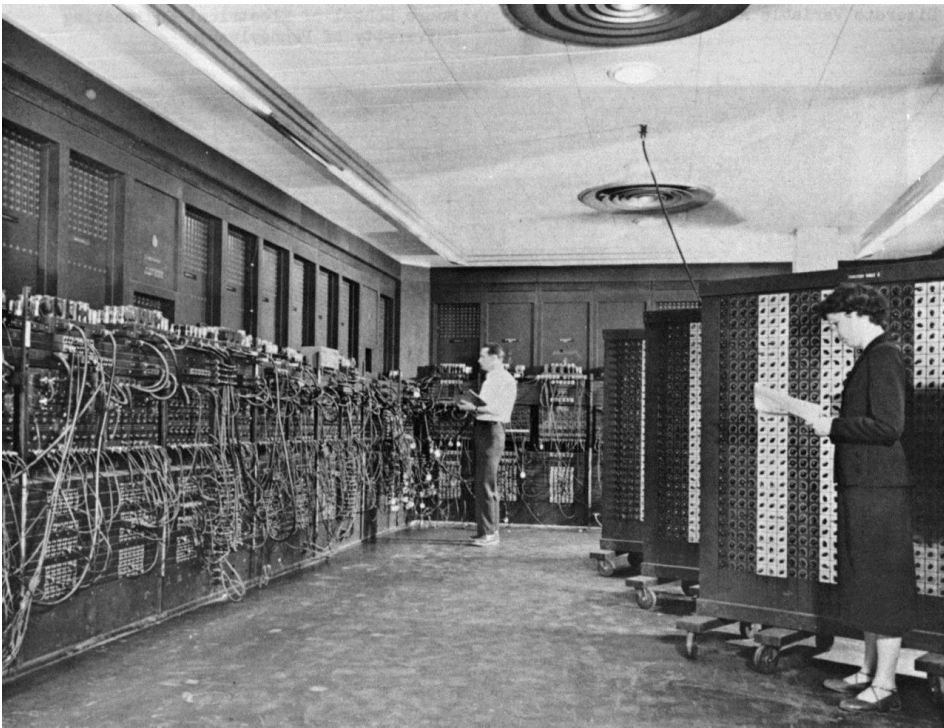


写真:プログラミングは配線変更とスイッチで、真空管は壊れるので交換が必要(アメリカ陸軍撮影)

数値予報に至る歩み

1757年 流体力学の基礎方程式の導出(オイラー)

1823, 1845年 ナビエ・ストークス方程式の導出

1904年 大気運動の基礎方程式(プリミティブ方程式)の導出
(V. ビヤルクネス)

1922年 リチャードソンの夢

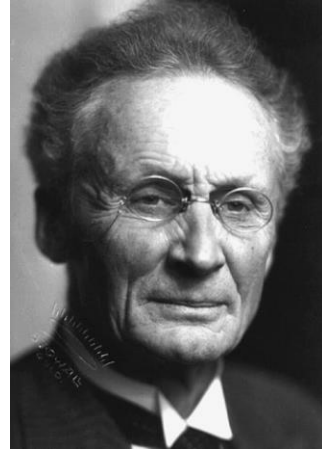
1937年 米国で高層気象観測始まる

1939年 ロスビー波の発見

1947年 温帯低気圧の力学理論(チャーニー)

1949年 準地衡風方程式系の導出(チャーニー)

1950年 初めての数値予報(24時間)に成功(チャーニーとノイマン)
1層順圧モデル(Charney et al., 1950)



V. ビヤルクネス



リチャードソン

著作権の関
係で非表示

チャーニーの写真はLynch (2008, J. Comp. Phys., 227, 3431-3444)のFig.2を参照

チャーニー

初めての数値予報

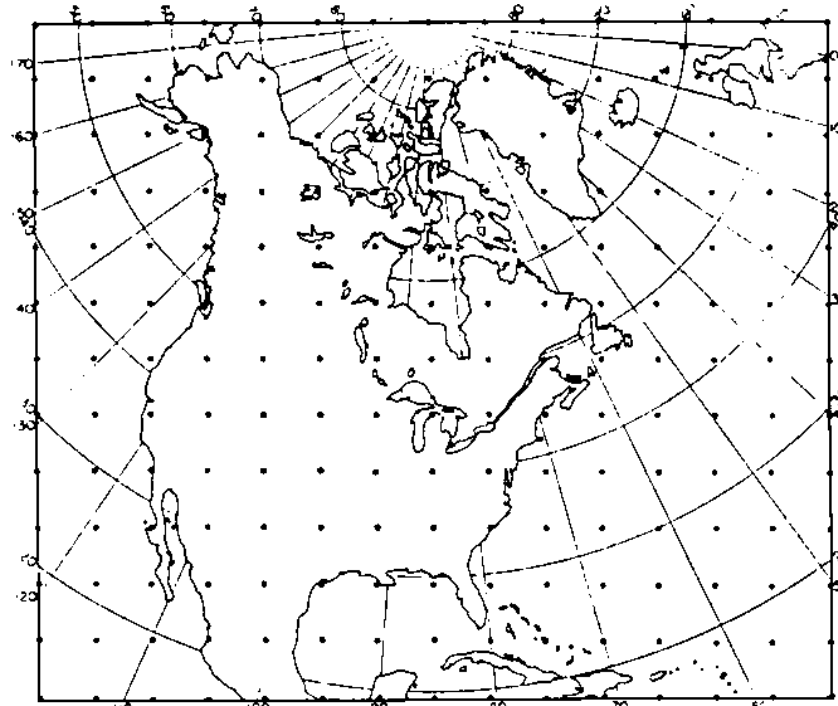
1946年 エニアック完成

1950年 24時間の数値予報に成功
(チャーニー・ノイマンら)

格子間隔 45°Nで 736km

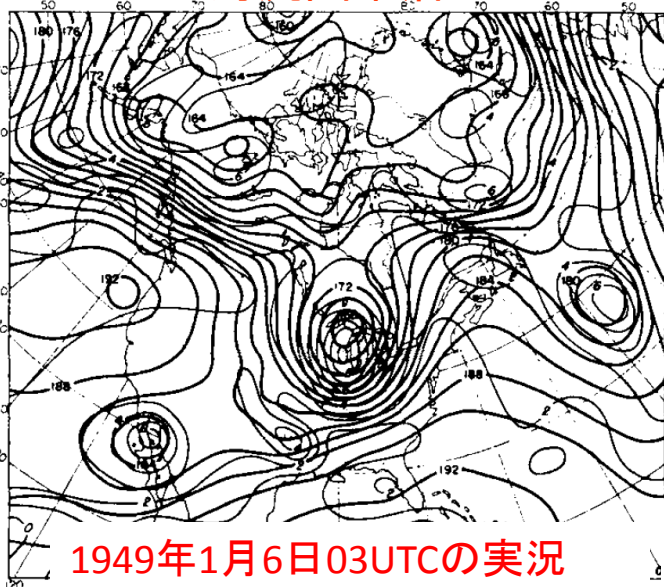
格子点数 15×18個(右図)

準地衡風の順圧モデル(伝播の速い内部
重力波を含まない!)

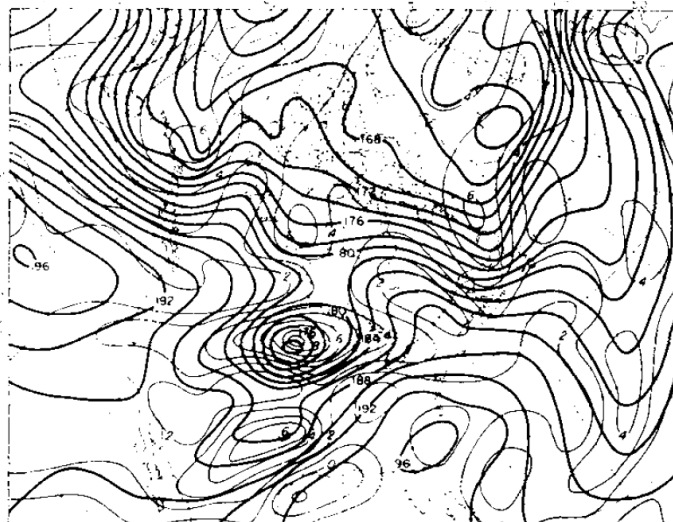


(Charney et al., 1950)

対流圏中層500hPaの等圧面高度と渦度



1949年1月6日03UTCの実況



1949年1月5日03UTCからの24時間予報

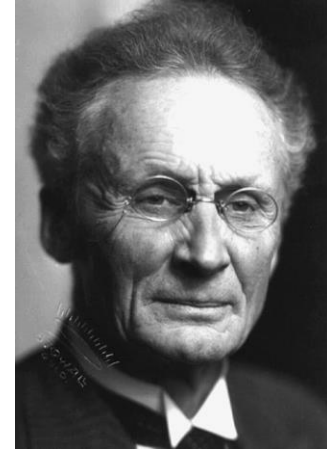
24時間予報2例
の計算に35日
(正味の計算時
間は 24時間
予報に24時間)

数値予報に至る歩み

1757年 流体力学の基礎方程式の導出(オイラー)

1823, 1845年 ナビエ・ストークス方程式の導出

1904年 大気運動の基礎方程式(プリミティブ方程式)の導出
(V. ビヤルクネス)



V. ビヤルクネス

1922年 リチャードソンの夢

1937年 米国で高層気象観測始まる

1939年 ロスビー波の発見

1947年 温帯低気圧の力学理論(チャーニー)



リチャードソン

1949年 準地衡風方程式系の導出(チャーニー)

1950年 初めての数値予報(24時間)に成功(チャーニーとノイマン)
1層順圧モデル(Charney et al., 1950)

著作権の関
係で非表示

1955年 米国で数値予報を開始(IBM701) 北半球順圧モデル

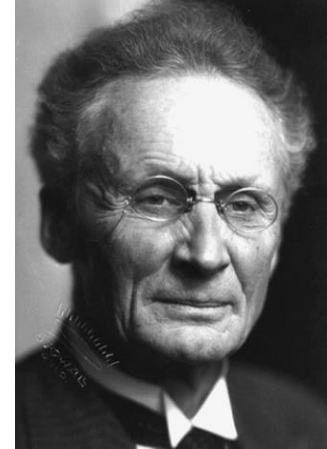
チャーニー

数値予報に至る歩み

1757年 流体力学の基礎方程式の導出(オイラー)

1823, 1845年 ナビエ・ストークス方程式の導出

1904年 大気運動の基礎方程式(プリミティブ方程式)の導出
(V. ビヤルクネス)



V. ビヤルクネス

1922年 リチャードソンの夢

1937年 米国で高層気象観測始まる

1939年 ロスビー波の発見

1947年 温帯低気圧の力学理論(チャーニー)



リチャードソン

1949年 準地衡風方程式系の導出(チャーニー)

1950年 初めての数値予報(24時間)に成功(チャーニーとノイマン)
1層順圧モデル(Charney et al., 1950)

著作権の関
係で非表示

1955年 米国で数値予報を開始(IBM701) 北半球順圧モデル

1959年 日本で数値予報を開始(IBM704) 北半球順圧モデル

チャーニー

日本の数値予報の夜明け

IBM704型電子計算機(日本政府が導入した最初の大型計算機)



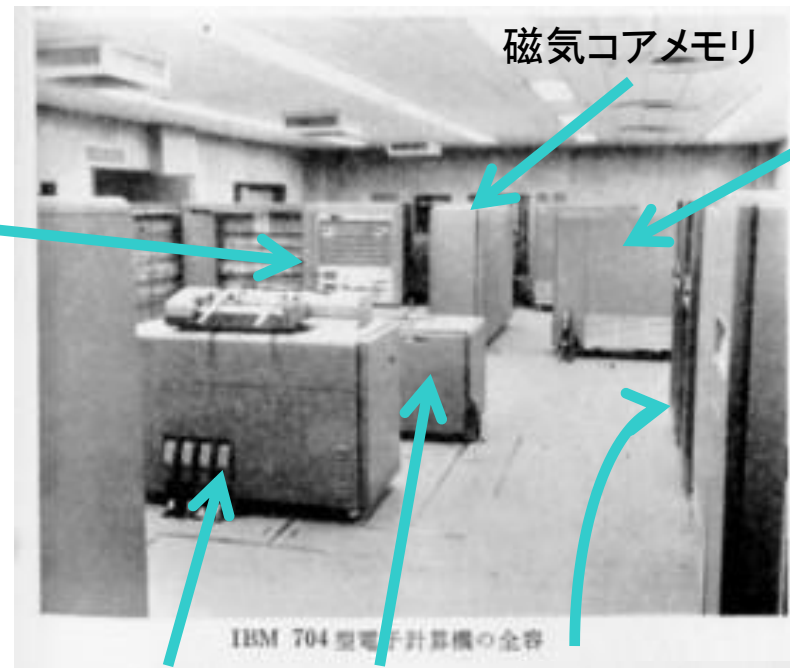
(気象庁提供)



中央演算装置

磁気コアメモリ

磁気ドラム



プリンタ カードリーダ

プログラム及びデータを
パンチカードにより入力



磁気テープ装置

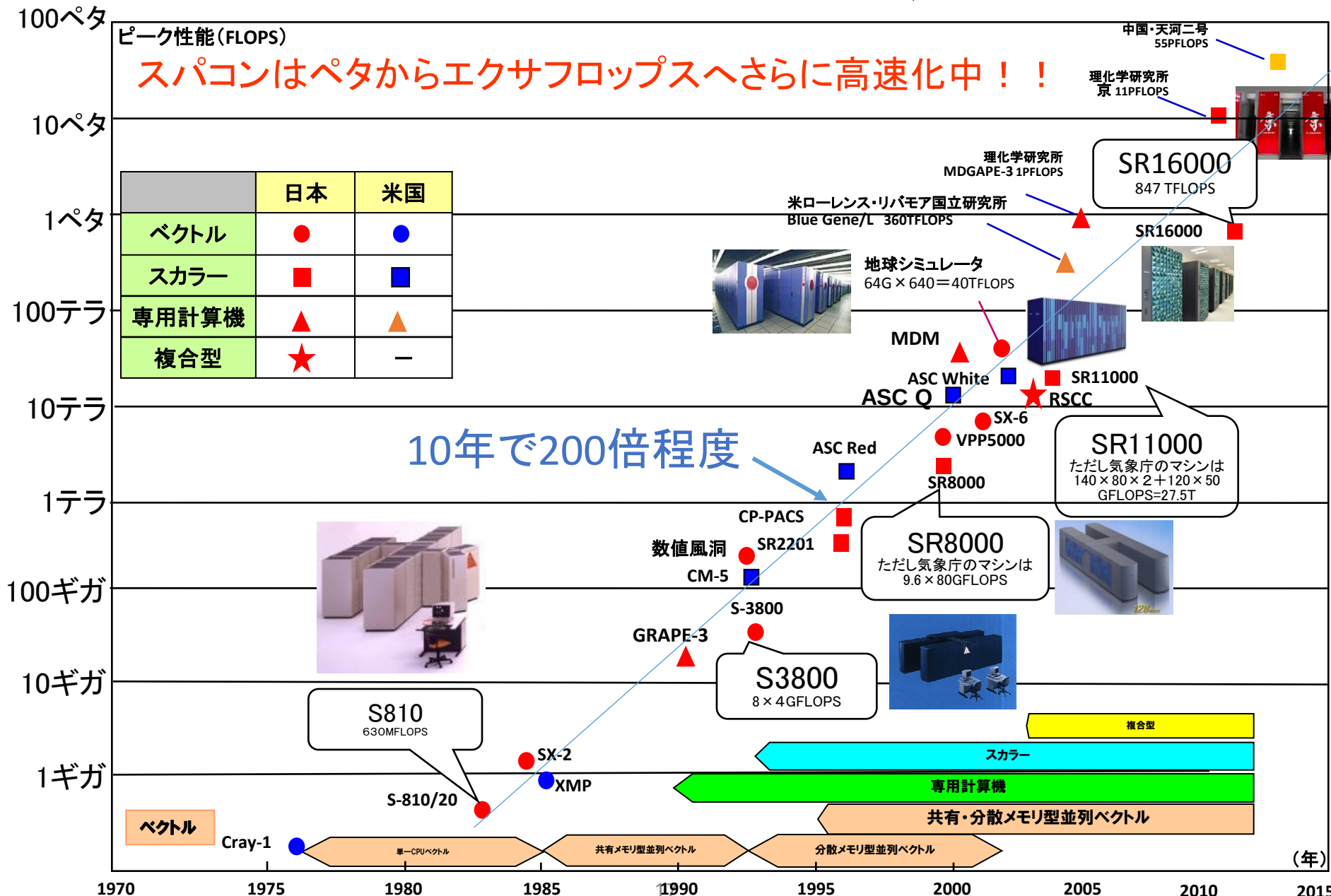
数値予報業務の開始

1959年 気象庁がIBM704を導入

1960年 北半球順圧モデル(1層)を業務化

	1959年	2015年	
主記憶容量	36KB	108TB	(30億倍)
最大理論演算性能	12Kflops	847Tflops	(700億倍)
モデル	北半球数値予報モデル	全球数値予報モデル	
水平解像度	381km	20km	
鉛直層数	1層	100層	
予報頻度	1回/1日	4回/1日	

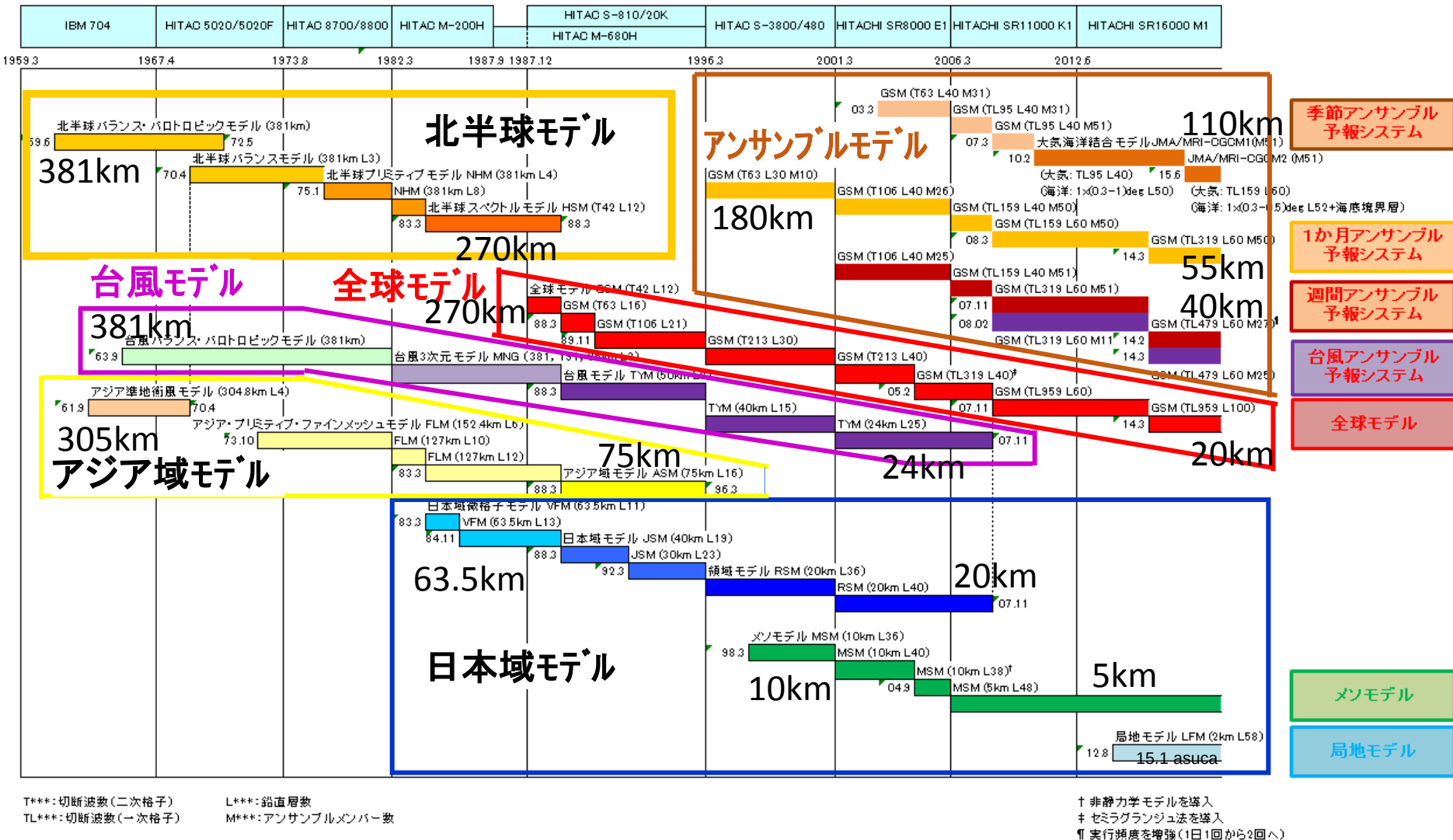
スーパーコンピュータの発展



1テラフロップス(TFLOPS): 1秒間に1兆回の浮動小数点演算を行う処理速度

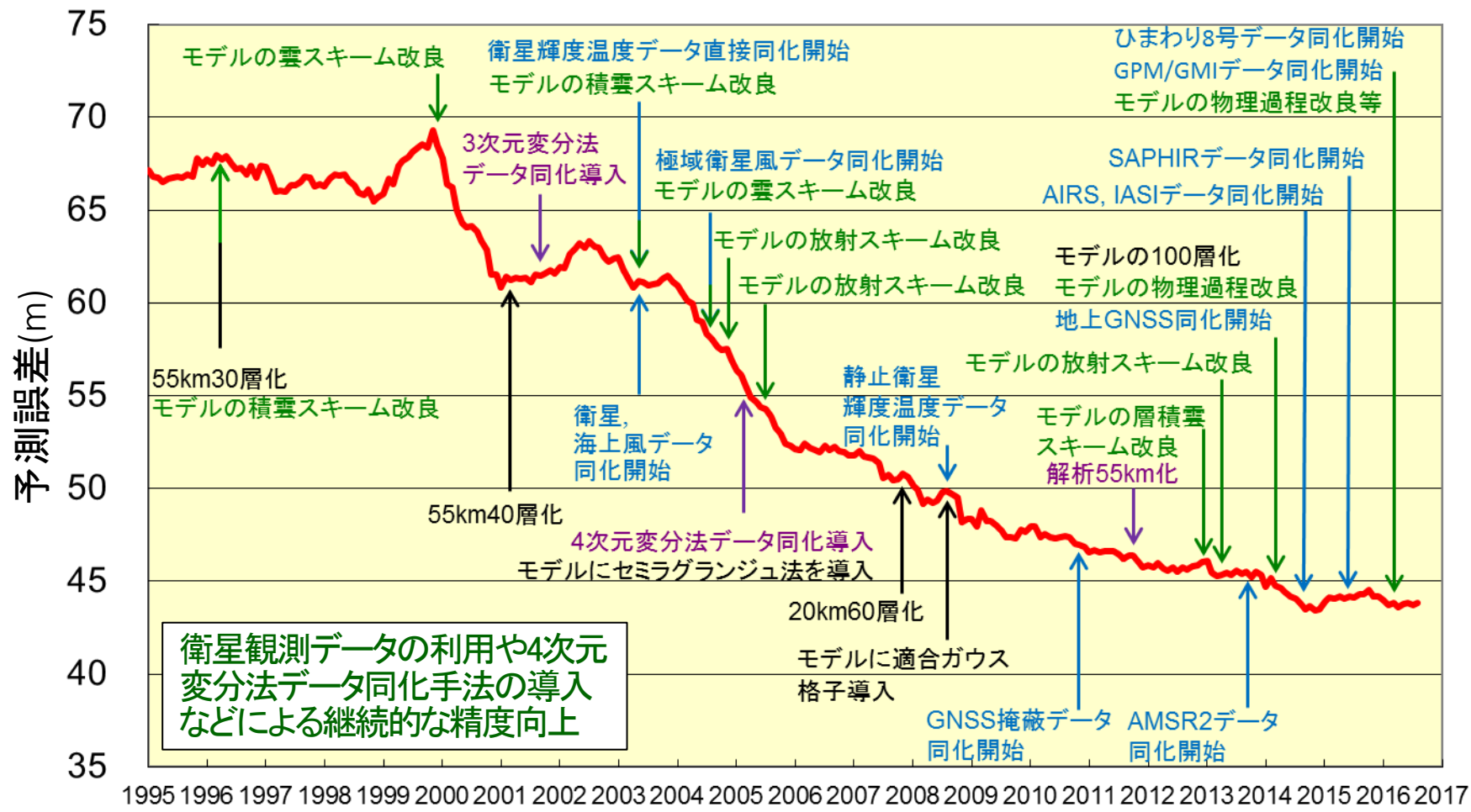
(気象庁提供の図を改変)

気象庁の現業数値予報システムの進化



北半球500hPa高度の5日予報RMSE経年変化

(1995年1月-2016年8月、前12ヶ月移動平均)



気象庁の全球数値予報システムの主な変更点:

(緑:モデル物理過程、黒:モデル力学過程・解像度、
紫:データ同化システム、青:新たに同化されたデータ)

(気象庁提供)

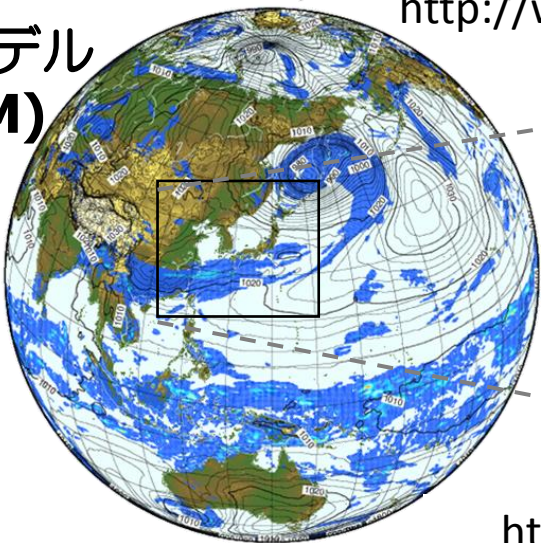
3. 現在の数値予報

気象庁現業数値予報システム (短期予報) の仕様 (2016年4月現在)

	モデル	領域 水平解像度	鉛直 層数	予報時間 (初期時刻(UTC))	目的
決定論的予報	全球モデル (GSM)	地球全体 約20km	100層	84 時間 (00,06,18) 264 時間 (12)	- 各種予報・ガイダンスの基礎資料 - 各種数値予報モデルの入力値 (波浪, 黄砂, 移流拡散など) - メソモデルの側面境界条件
	メソモデル (MSM)	日本周辺 約5km	50層 (48+2)	39 時間(3時間毎; 00,03,.....)	- 各種予報の支援 (防災気象情報など) - 各種数値予報モデルの入力値 (波浪, 高潮, 火山灰移流拡散など) - 局地モデルの側面境界条件
	局地モデル (LFM)	日本周辺 約2km	58層	9 時間 (毎時)	各種予報の支援 (飛行場予報, 防災気象情報など)

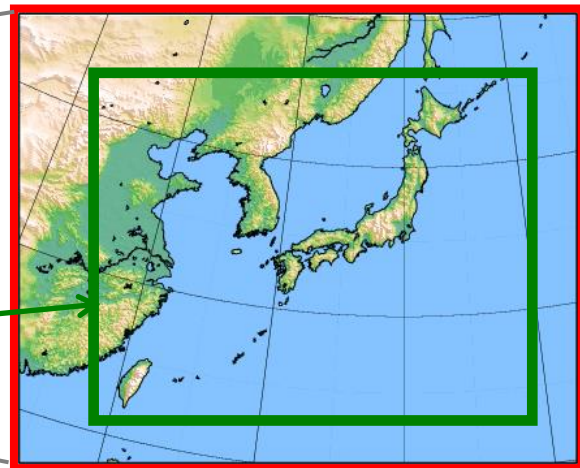
<http://www.jma.go.jp/jma/kishou/known/whitep/1-3-5.html>

全球モデル
(GSM)



メソモデル
(MSM)

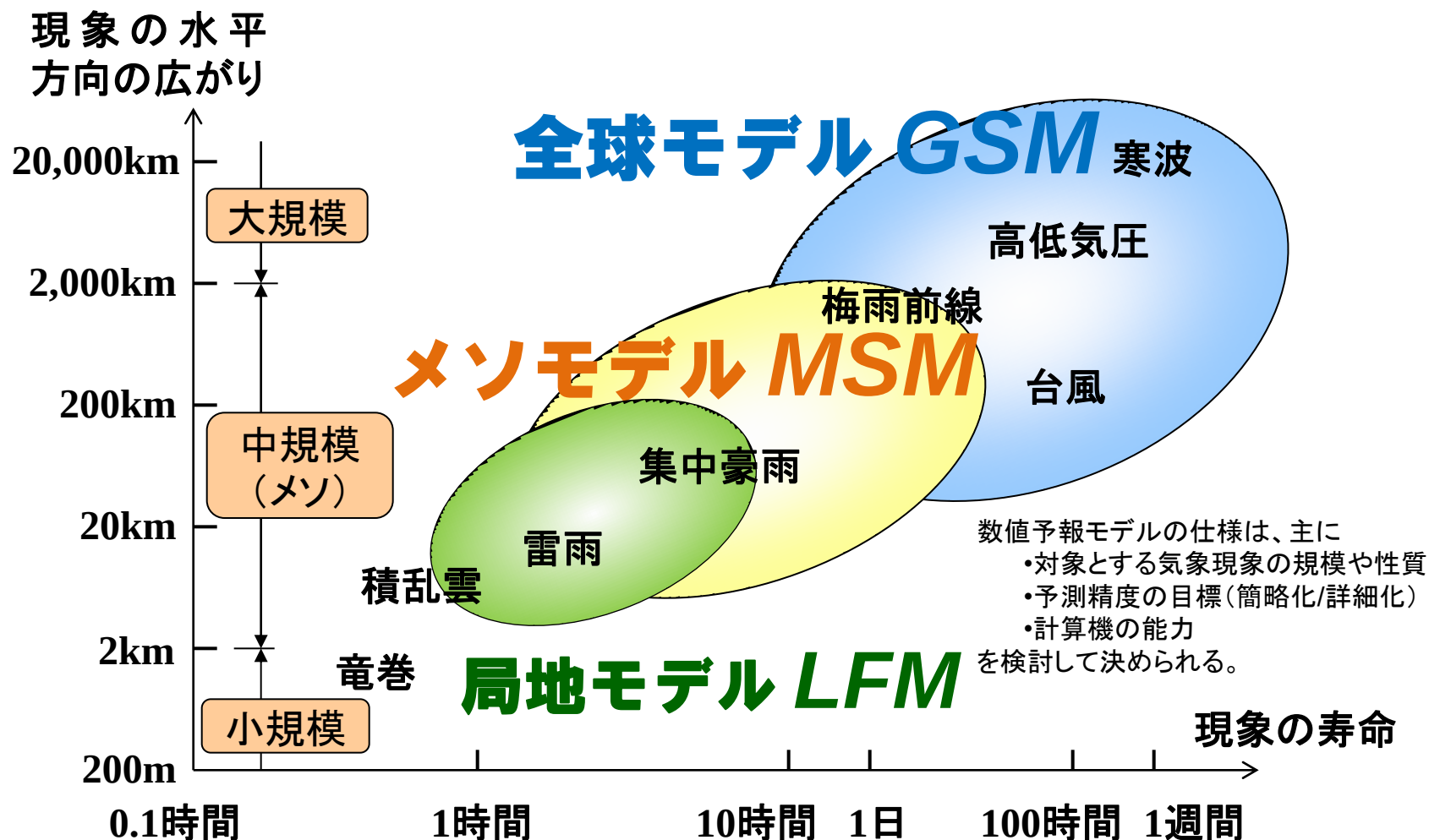
局地モデル
(LFM)



<http://www.jma.go.jp/jma/kishou/known/whitep/1-3-6.html>

各モデルの予測対象

予測可能な時間の限界: 予測対象や初期状態によって異なる



全球モデル

日本時間の2016年8月27日21時を初期値とした
264時間(11日間)の予報

GSM(Global Spectrum Model)

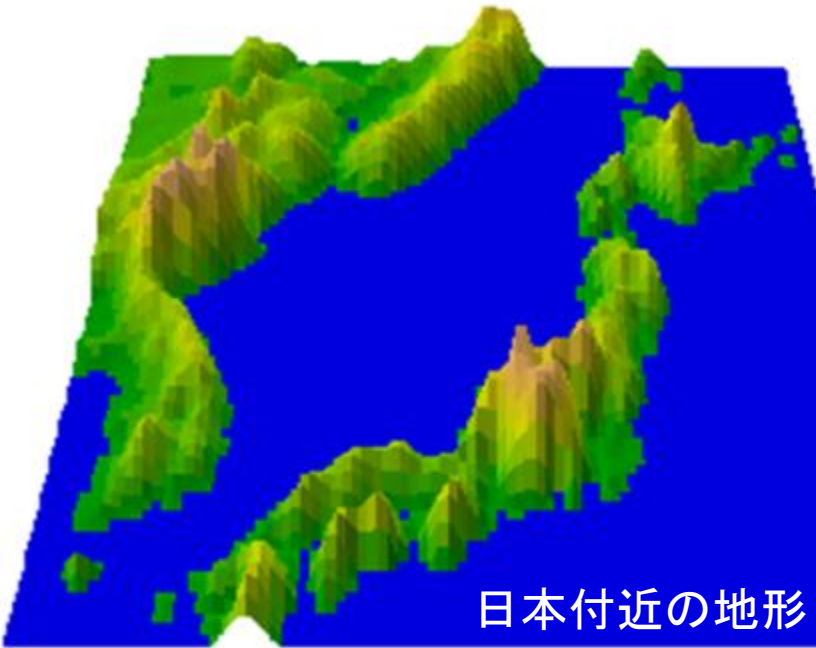
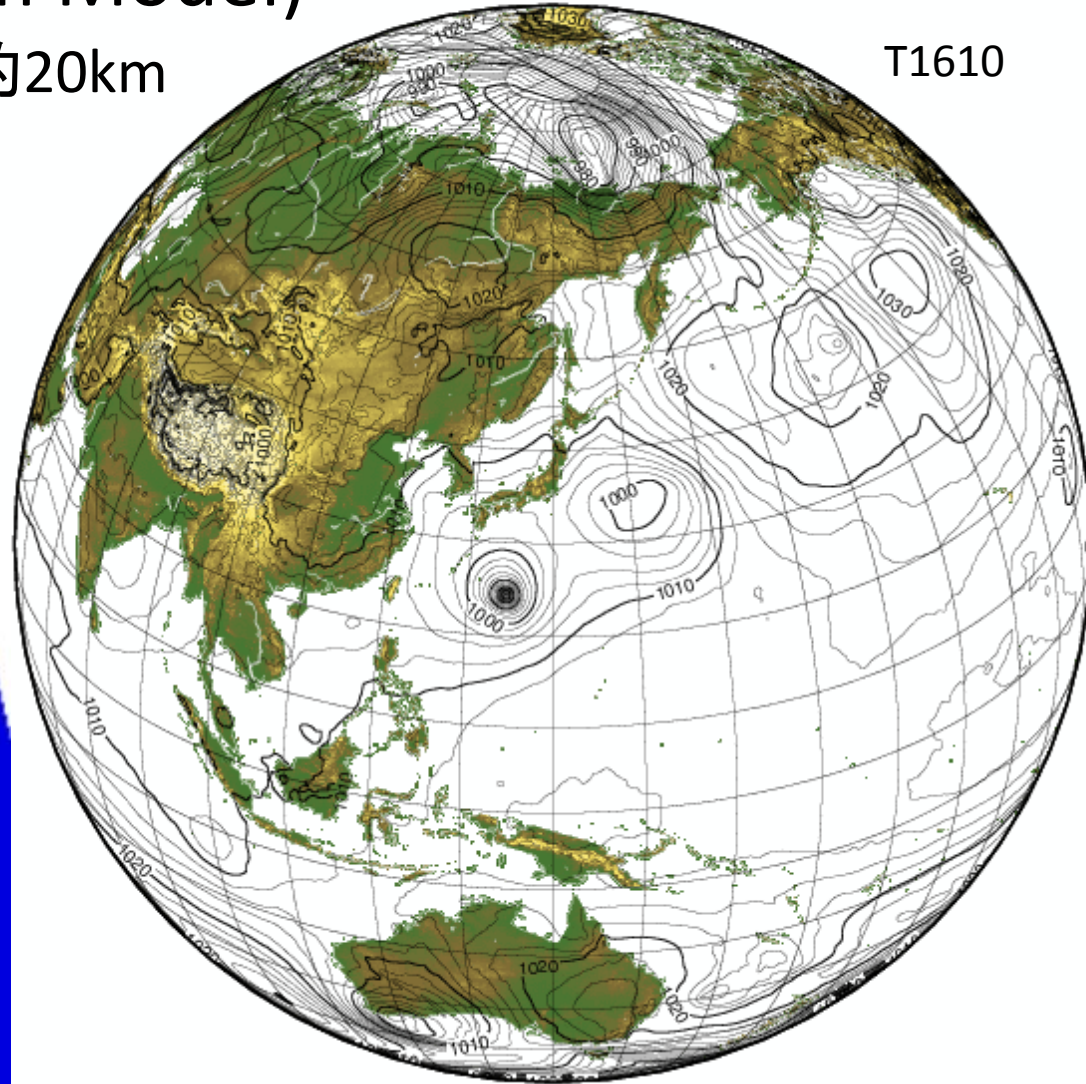
GSM-TL959L100 2016.08.27.12UTC FT=000

(Valid Time: 08.27.12UTC)

水平解像度約20km

T1610

- ・ジェット気流は10-20日で地球を一周
- ・積乱雲などは表現できない
- ・メソモデルの境界条件に必要



日本付近の地形

<http://www.jma.go.jp/jma/kishou/known/whitep/1-3-5.html>

メソモデル・局地モデル

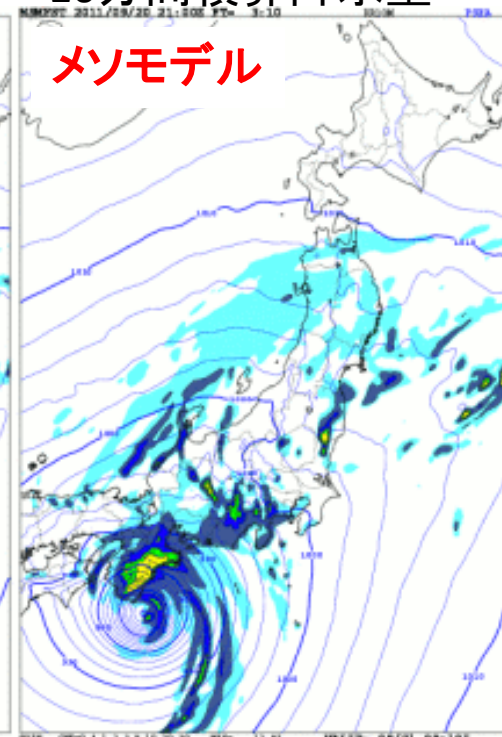
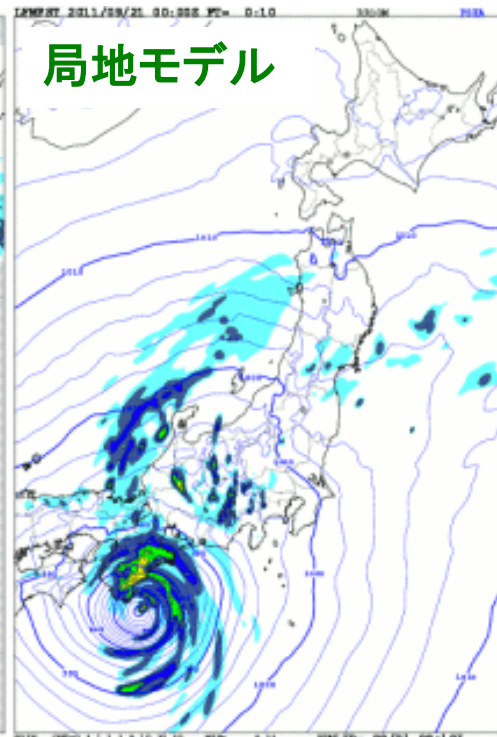
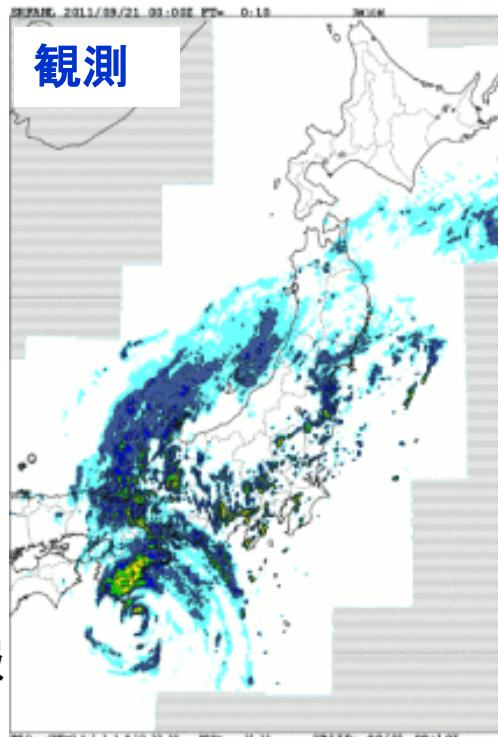
<http://www.jma.go.jp/jma/kishou/known/whitep/1-3-6.html>

10分間積算降水量

観測

局地モデル

メソモデル

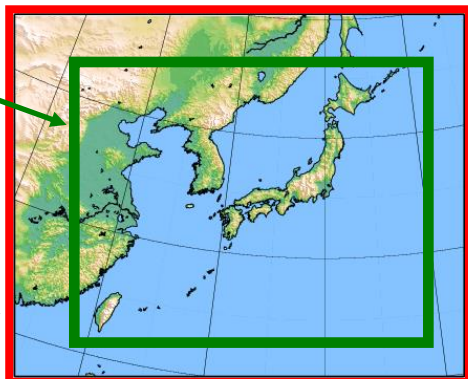


メソモデル

1日8回39時間予報
大雨・暴風

局地モデル

1日24回9時間予報
積乱雲もある程度解
像可能
局地的大雨のポテン
シャル



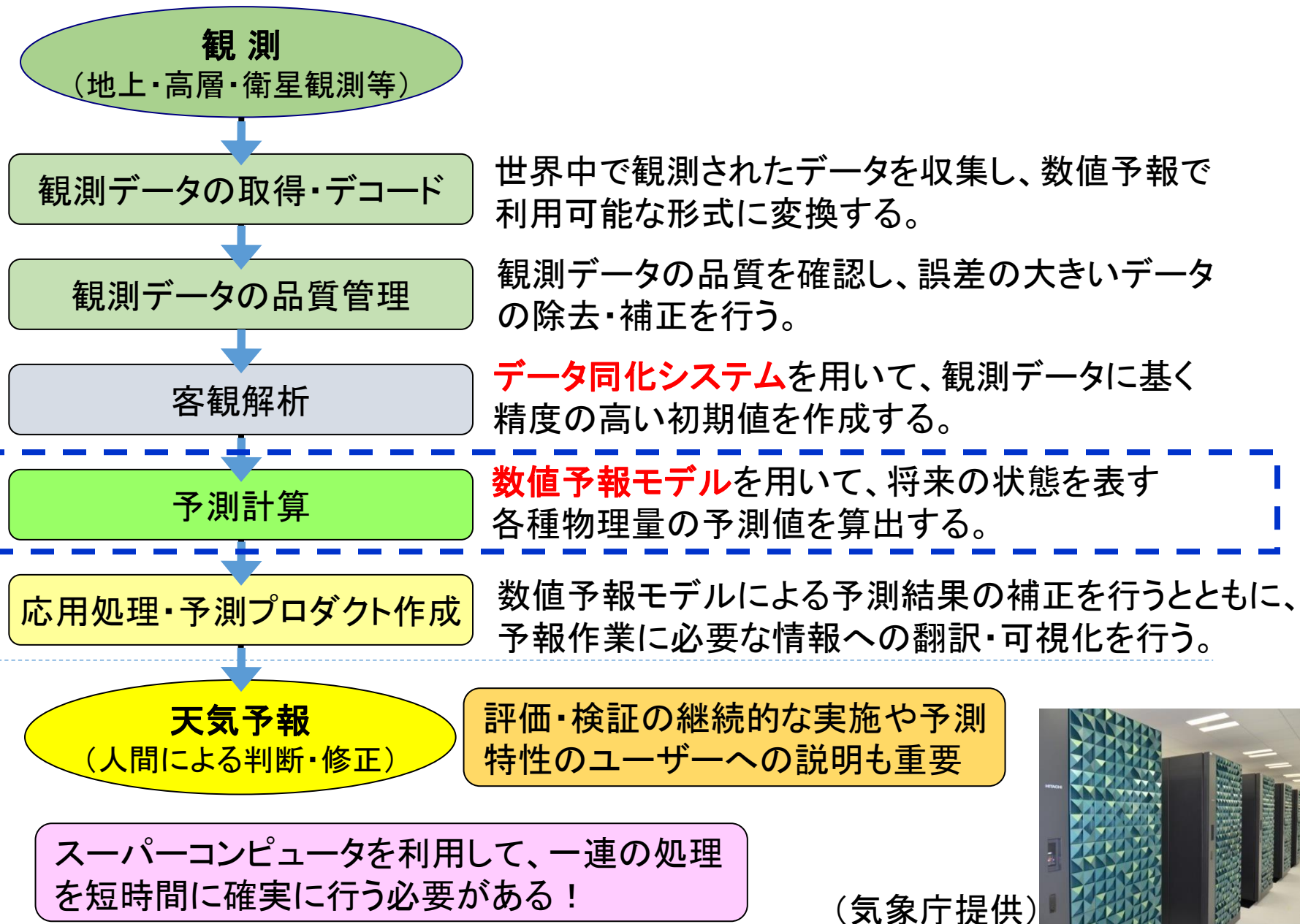
水平格子間隔2km



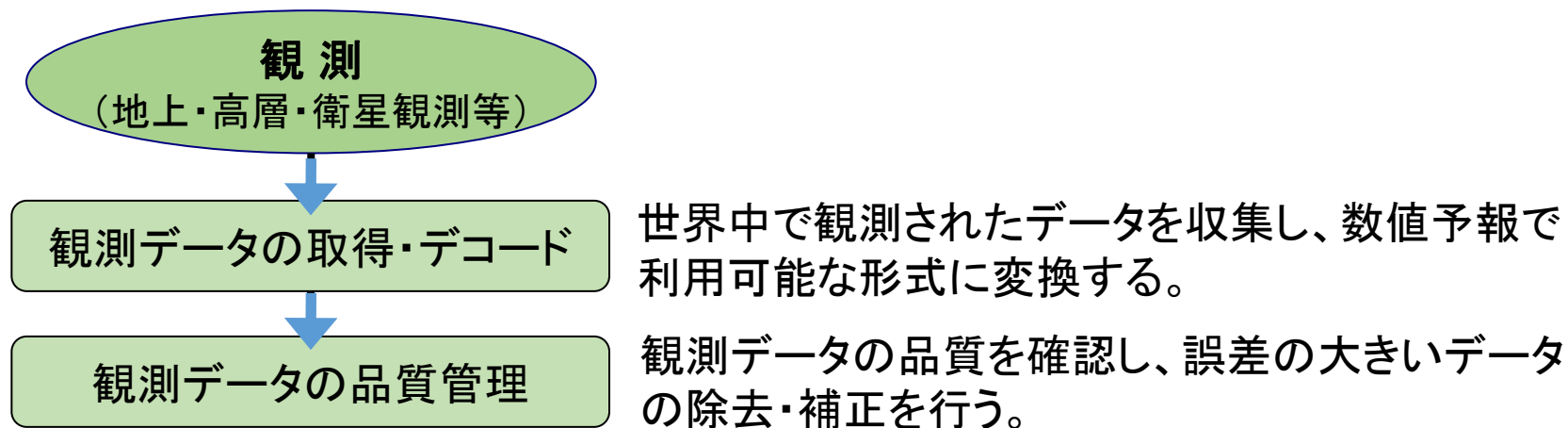
水平格子間隔5km

数値予報の流れ

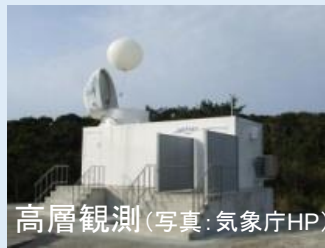
本日の講演



数値予報の流れ



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: YS提供)



海上観測 (写真: 気象庁HP)

直接観測



ウィンドプロファイラ
(写真: 東京管区HP)

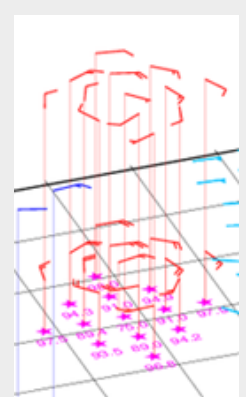


(ドップラー) レーダー
(写真: 大阪管区HP)



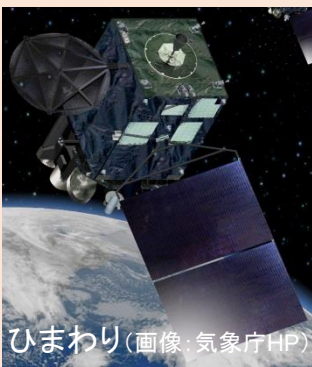
GNSS受信機
(写真: 観測部提供)

リモートセンシング 遠隔観測

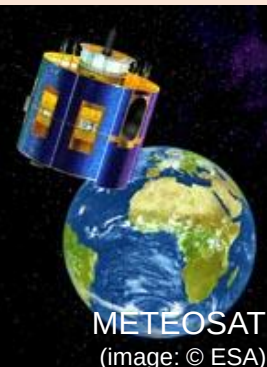


台風ボーガス

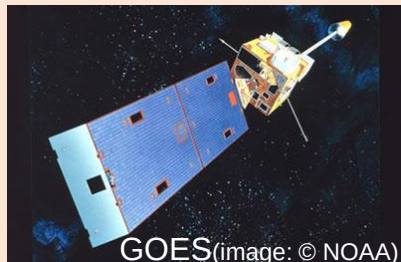
疑似観測



ひまわり (画像: 気象庁HP)



METEOSAT
(image: © ESA)



GOES (image: © NOAA)

静止軌道
衛星

(準) 現業衛星



NOAA
(image: © NOAA)



Metop
(image: © ESA)



DMSP (image: © NASA)



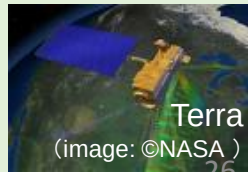
Aqua
(image: © NASA)



Megha-Tropiques
(image: © CNES)

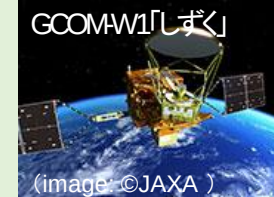


GPM主衛星
(image: © JAXA)



Terra
(image: © NASA)

地球観測衛星
低軌道衛星



GCOM-W1「しずく」
(image: © JAXA)



COSMIC
(image: © UCAR)



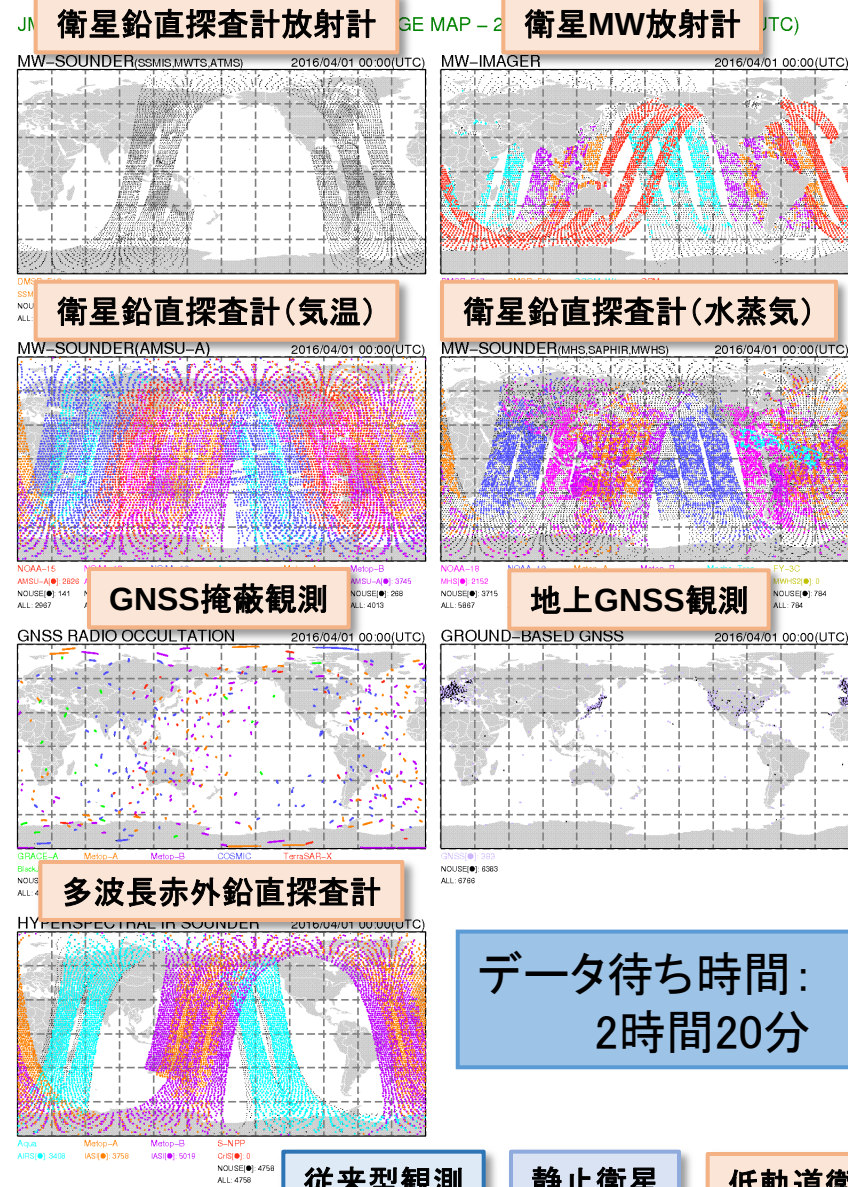
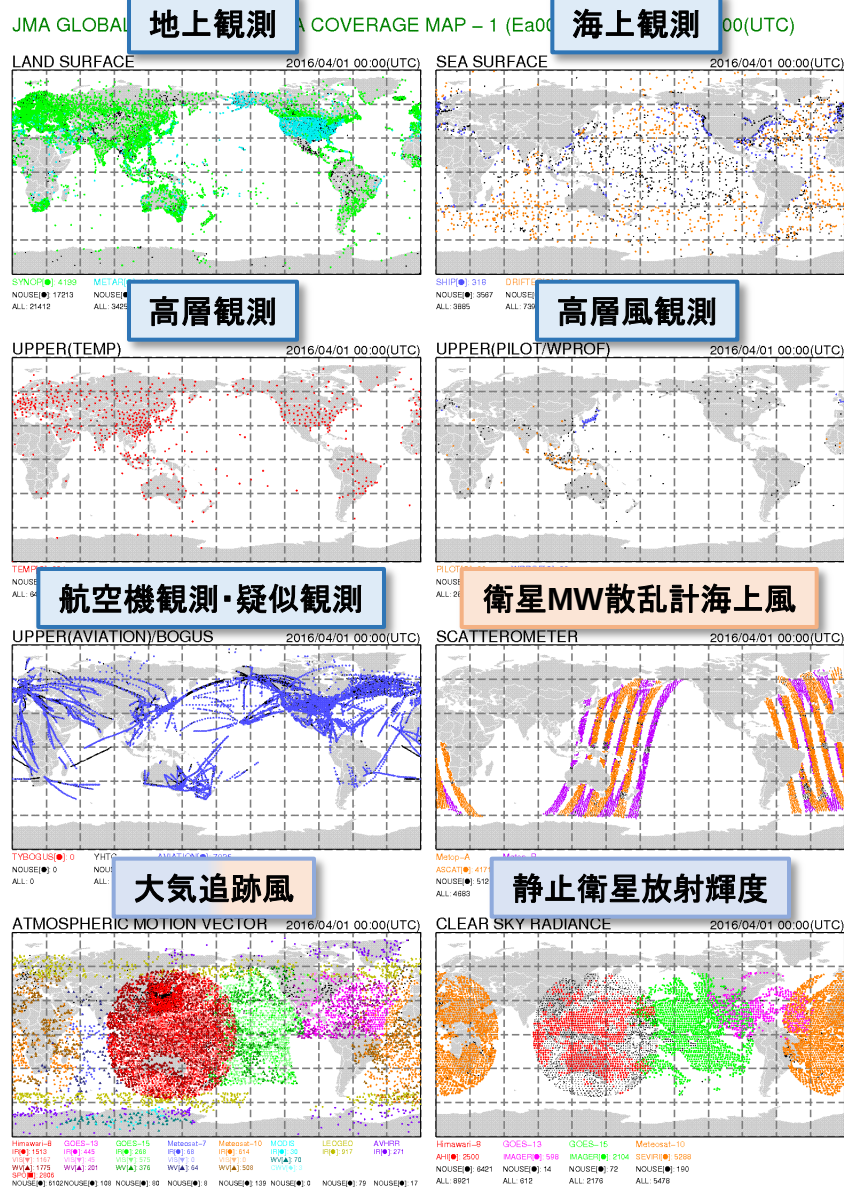
GRACE-A,B
(image: © NASA)



TerraSAR-X
TanDEM-X
image: © EADS Astrium

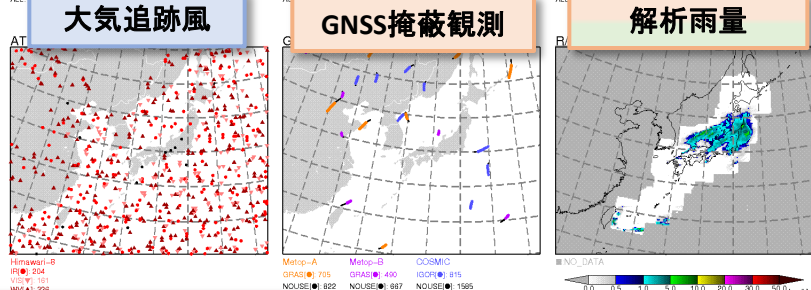
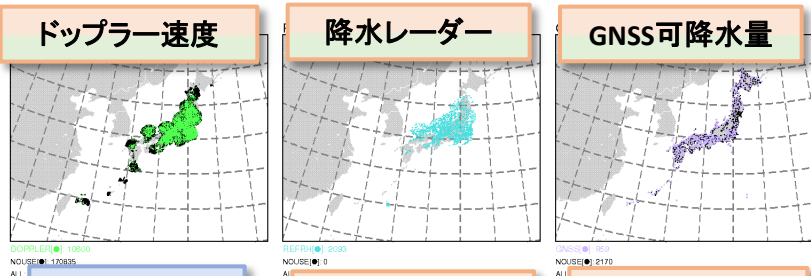
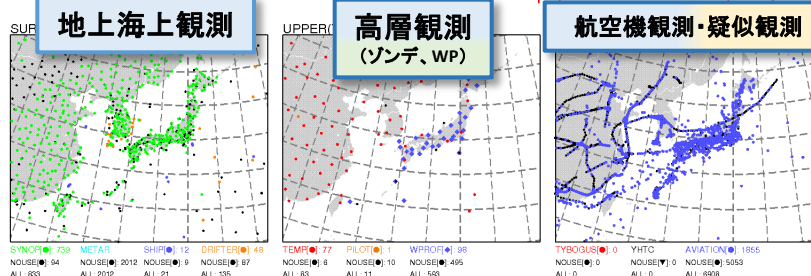
GNSS掩蔽衛星
(気象庁提供)

観測データ分布（全球速報解析）

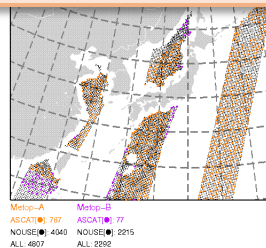


観測データ分布（メソ解析）

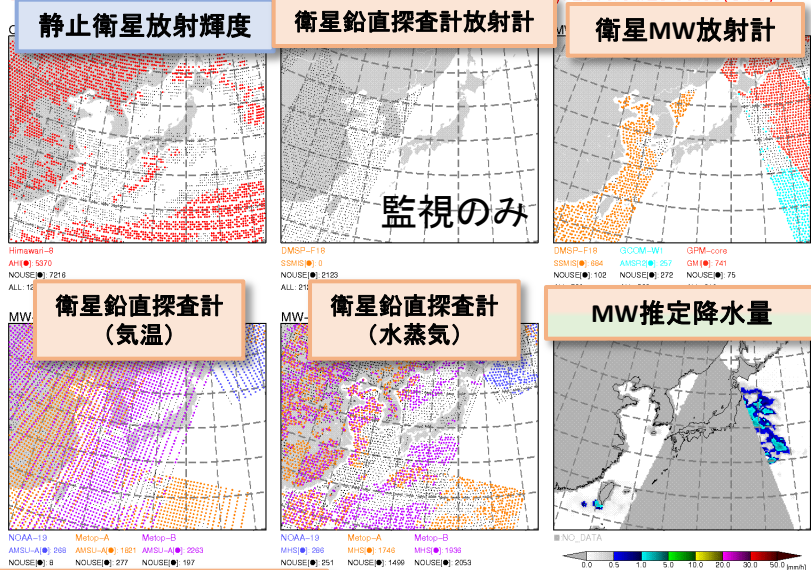
JMA MESO ANALYSIS - DATA COVERAGE MAP - 1 (Ma03ps): 2016/04/28 03:00(UTC)



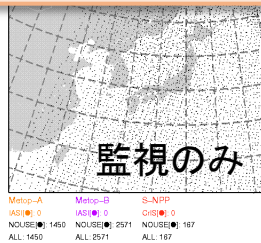
衛星MW散乱計海上観



JMA MESO ANALYSIS - DATA COVERAGE MAP - 2 (Ma03ps): 2016/04/28 03:00(UTC)



多波長赤外鉛直探査計

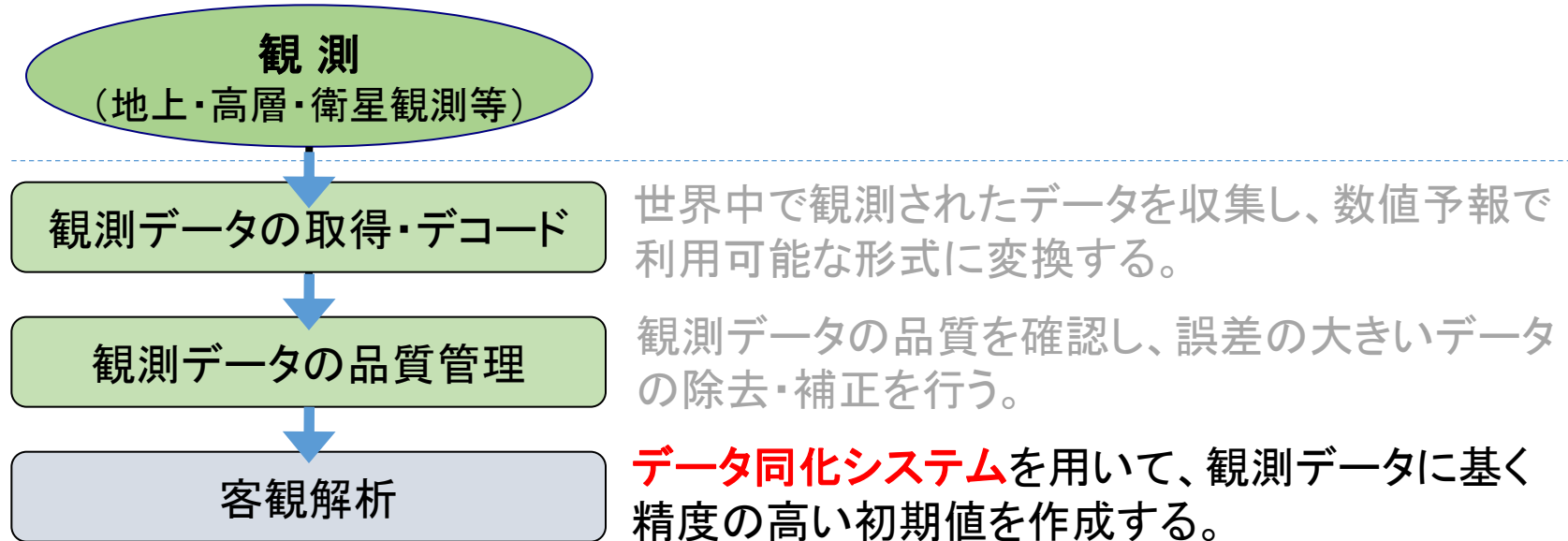


データ待ち時間: 50分

メソ解析ではデータ入電待ち時間が50分と短いため利用できるデータは限られる
衛星データについては衛星センターの直接受信データが重要

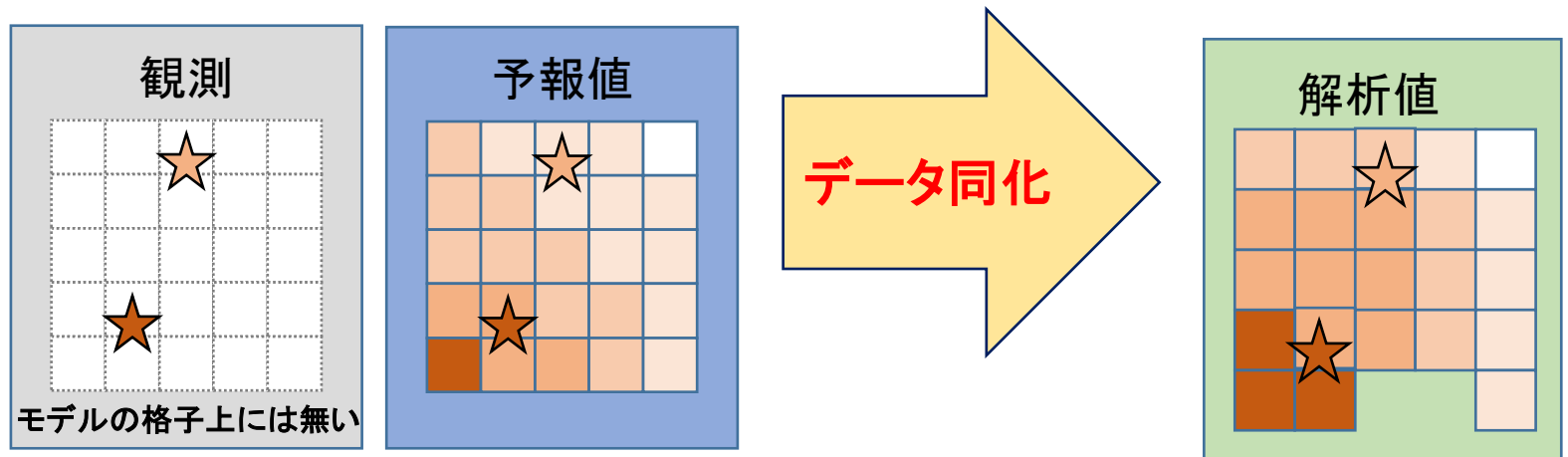
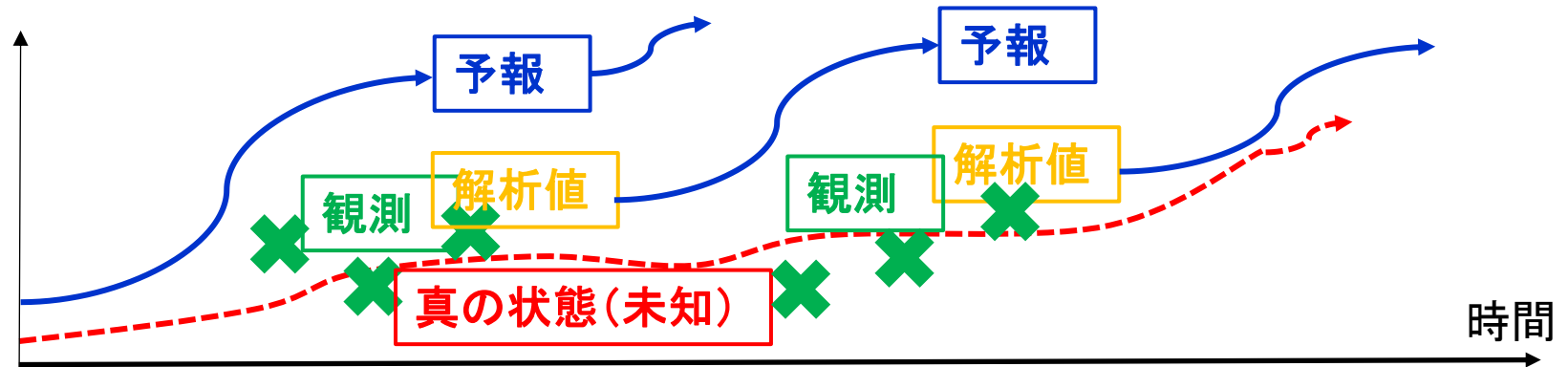
数値予報の流れ

数値予報作成の流れ



データ同化(客観解析)の概要

- 数値予報モデルの実行には
 - 全格子点・全予報物理量に対する初期値が必要
 - 全球モデルでは約 3×10^8 個
- 予報値＋観測値→最も信頼できる初期値(解析値)



- 初期値の精度は予報精度に決定的に重要

(気象庁提供)

数値予報の流れ

観測
(地上・高層・衛星観測等)

観測データの取得・デコード

世界中で観測されたデータを収集し、数値予報で利用可能な形式に変換する。

観測データの品質管理

観測データの品質を確認し、誤差の大きいデータの除去・補正を行う。

客観解析

データ同化システムを用いて、観測データに基づく精度の高い初期値を作成する。

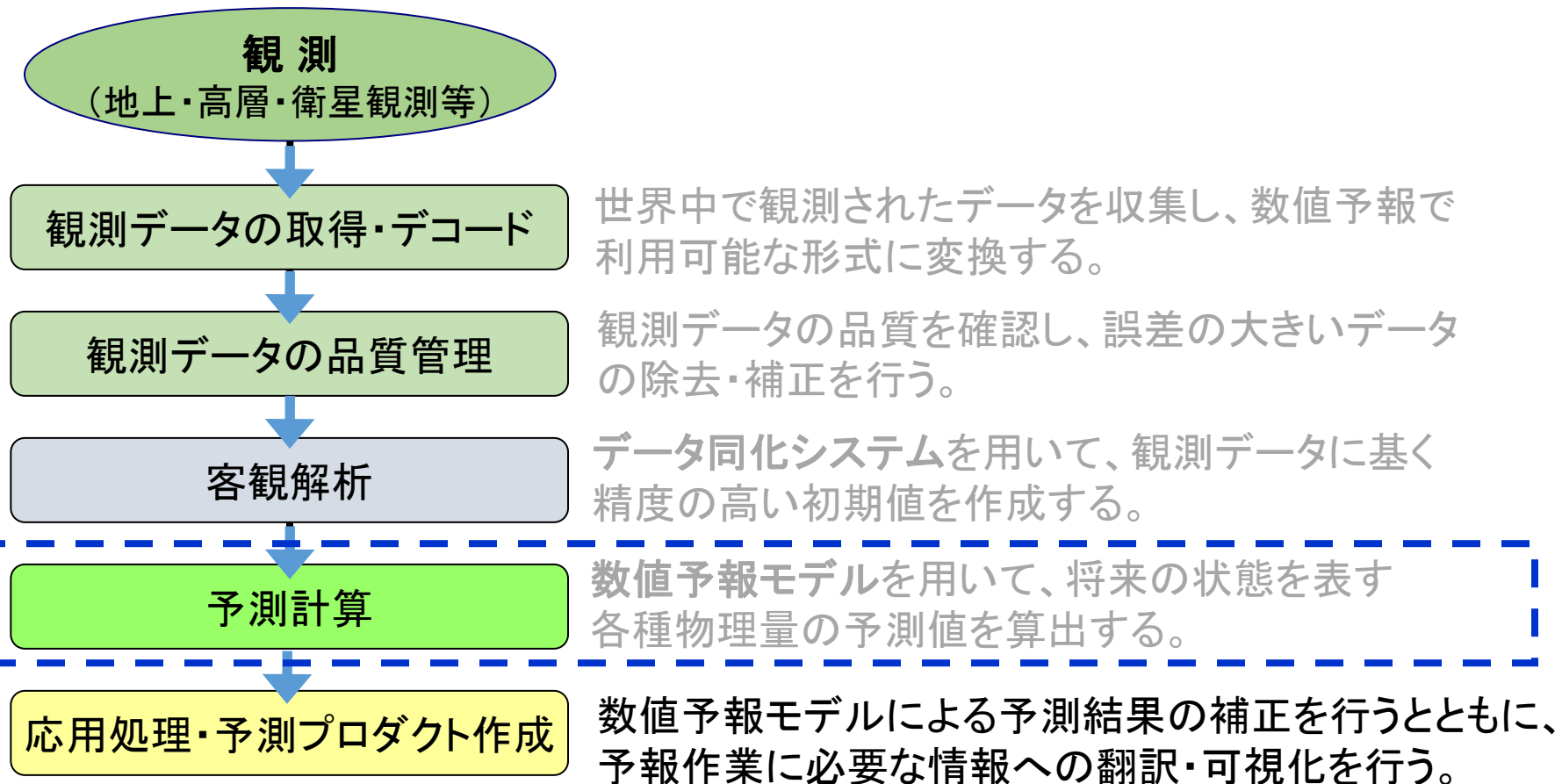
予測計算

数値予報モデルを用いて、将来の状態を表す各種物理量の予測値を算出する。

本日の講演

数値予報の流れ

本日の講演

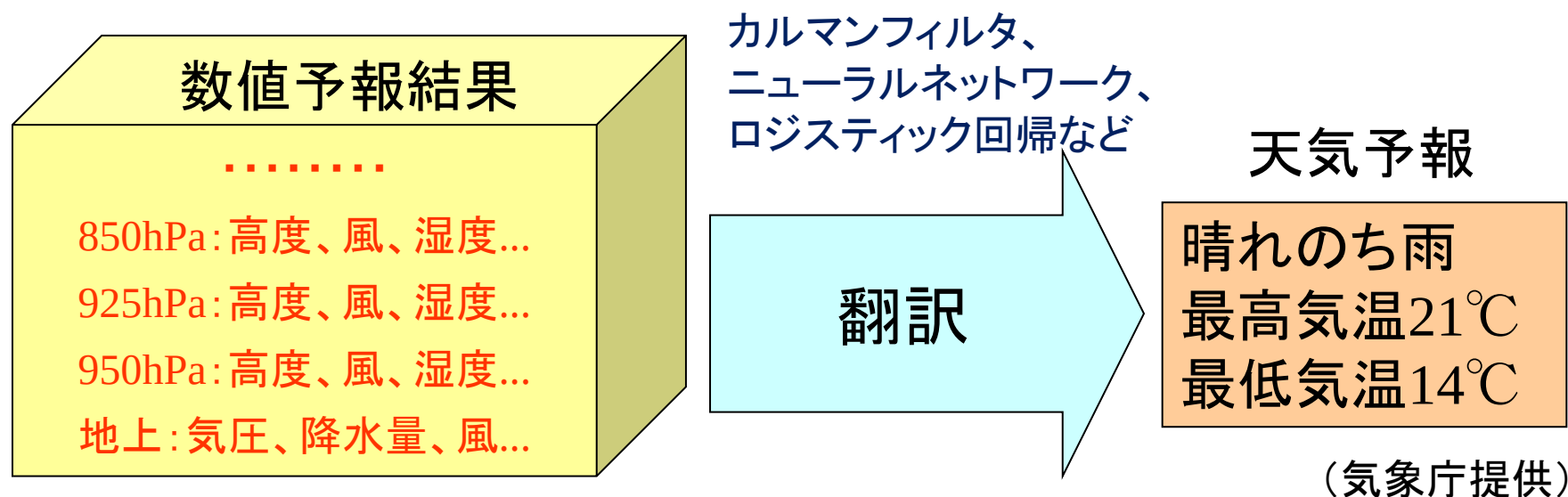


応用処理・予測プロダクト作成

「ガイダンス」

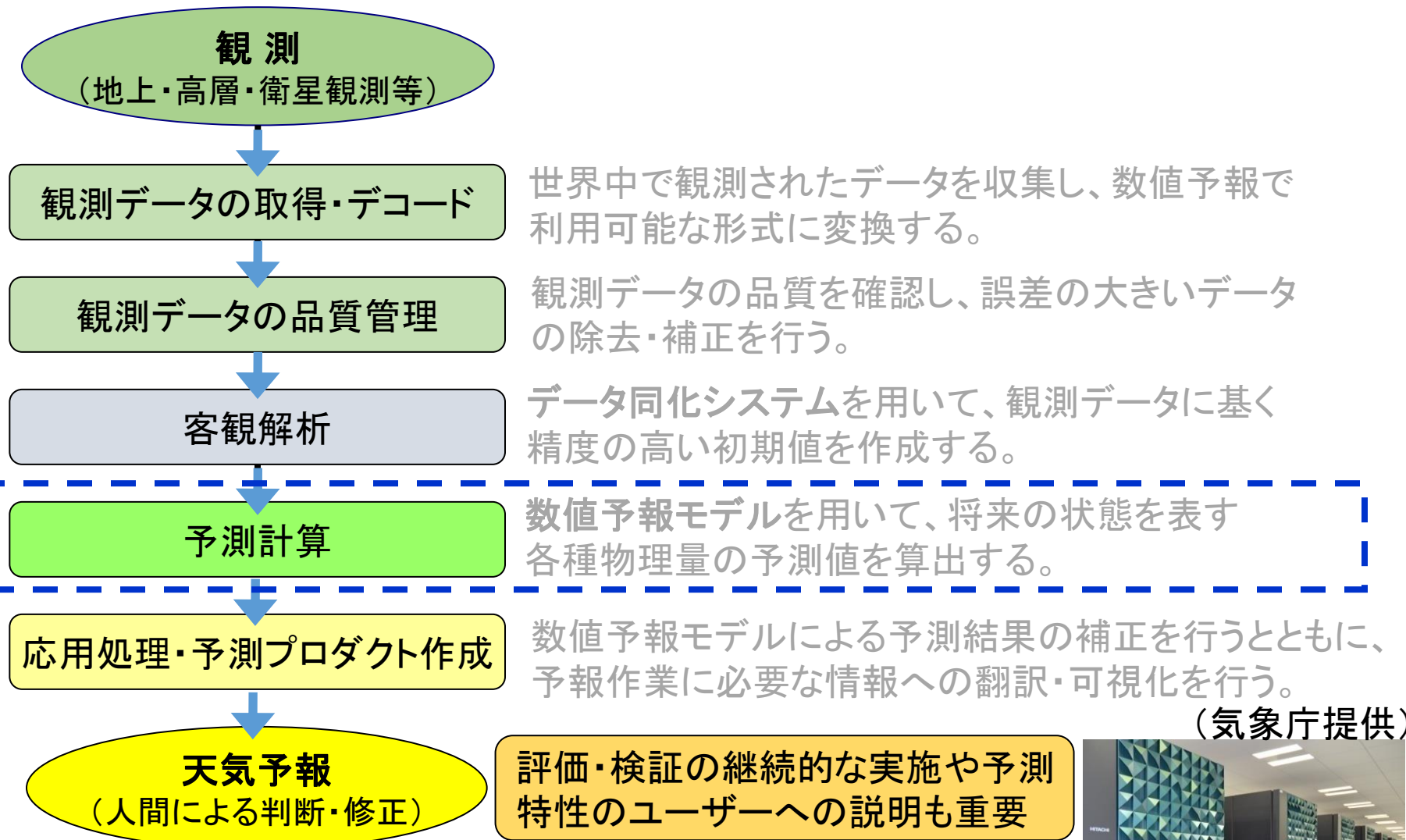
数値予報による物理量の予測結果に、統計的手法を用いて、客観的に予報精度を改善したり、予報官が利用しやすい形に加工して、予報作業を支援する「翻訳」を行うもの

- モデルが直接予報しないものの予測(降水確率、発雷確率など)
- 数値予報の系統誤差の修正(モデルと実際の地形の差を補正する等)



数値予報の流れ

本日の講演



以上の作業を短時間で処理する必要

スーパーコンピュータが不可欠
↔ モデルの解像度



現在の数値予報

気象庁現業数値予報システム（短期予報）の仕様（2017年1月現在）

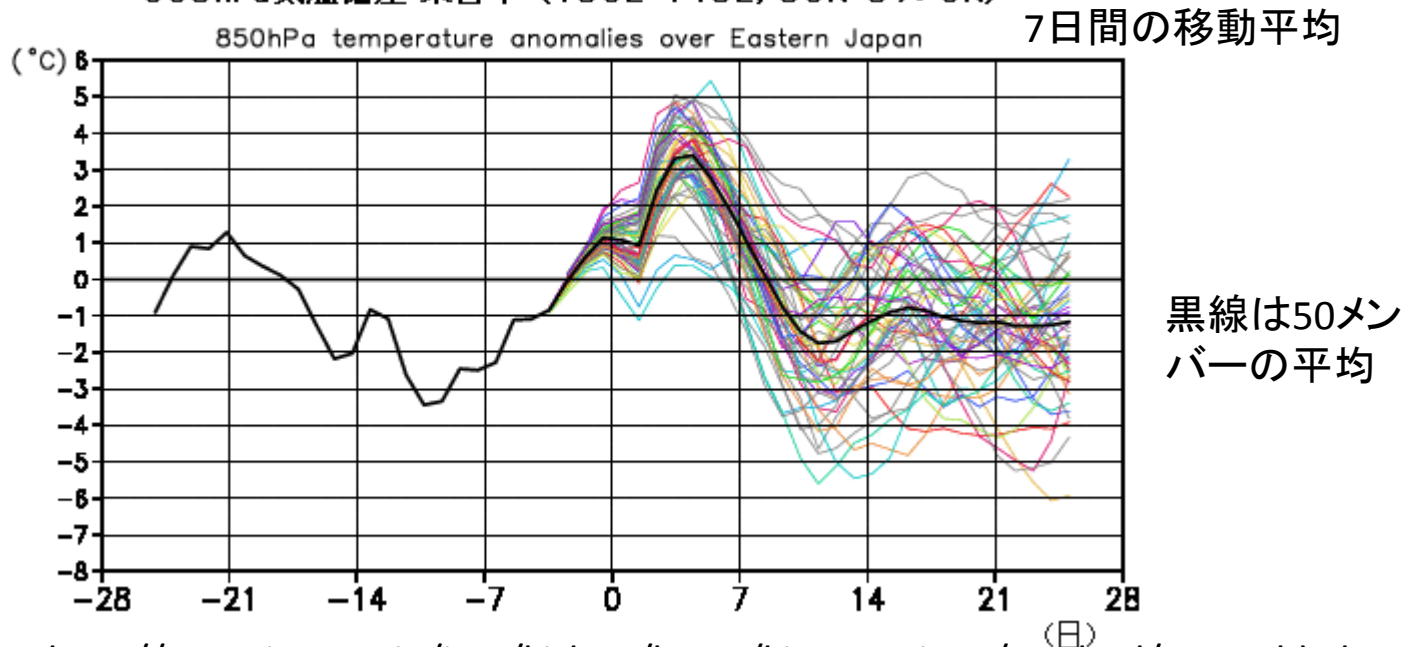
	モデル	領域 水平解像度	鉛直 層数	予報時間 (初期時刻(UTC))	目的
決定論的予報	全球モデル (GSM)	地球全体 約20km	100層	84 時間 (00,06,18) 264 時間 (12)	- 各種予報・ガイダンスの基礎資料 - 各種数値予報モデルの入力値 (波浪, 黄砂, 移流拡散など) - メソモデルの側面境界条件
	メソモデル (MSM)	日本周辺 約5km	50層 (48+2)	39 時間(3時間毎; 00,03,.....)	- 各種予報の支援 (防災気象情報など) - 各種数値予報モデルの入力値 (波浪, 高潮, 火山灰移流拡散など) - 局地モデルの側面境界条件
	局地モデル (LFM)	日本周辺 約2km	58層	9 時間 (毎時)	各種予報の支援 (飛行場予報, 防災気象情報など)
確率論的予報	全球 アンサンブル予報 システム(GEPS)	地球全体 約40km	100層	264 時間 (00,12) ※132 時間 (06,18) 各27メンバー	- 台風進路予報 - 週間天気予報 - 東南アジア等諸外国の予報支援 ※台風発生が予想される時、 台風が存在する時等に行われる

メソアンサンブル予報システムを開発中

アンサンブル予報

初期値を少しだけ変えた50通りの全球モデル(水平解像度約60km)の予測

850hPa気温偏差 東日本 (135E-140E, 35N-37.5N)



http://www.jma.go.jp/jma/kishou/known/kisetsu_riyou/method/ensemble.html

・大気運動のカオス性

初期値が少し異なるとある時間後には大きく異なる状態になってしまう。

・初期値の不確定性

観測誤差、ある時刻の格子点の値を求めるときの誤差

・数値モデルの不完全さ

格子間隔で表現できない物理過程を格子点の値から近似的に求める手法(パラメタリゼーション)等の誤差

・最も可能性の高い状態の予測

アンサンブル予報の利点

・ばらつきの大きさ→**予報の信頼度**に関する情報

・起きうる**極端な現象の可能性**を知ることができる

アンサンブル予報の利用例 (気象庁ホームページより)

週間天気予報：東京都

再読込

1月21日11時 東京都の週間天気予報

日付		22 日	23 月	24 火	25 水	26 木	27 金	28 土
東京地方 府県天気予報へ		晴時々曇 	晴時々曇 	晴 	晴 	晴時々曇 	曇 	曇一時雨 
降水確率(%)		10/10/0/0	20	10	10	20	40	50
信頼度		／	／	A	A	A	C	C
東京	最高(℃)	12	9 (6～10)	7 (5～8)	7 (6～9)	9 (6～11)	11 (7～12)	14 (11～18)
	最低(℃)	2	0 (-1～4)	0 (-1～3)	-1 (-2～2)	1 (0～3)	1 (-1～2)	6 (4～8)

信頼度

内容

A

確度が高い予報

適中率が明日予報並みに高い

降水の有無の予報が翌日に変わる可能性がほとんどない

B

確度がやや高い予報

適中率が4日先の予報と同程度

降水の有無の予報が翌日に変わる可能性が低い

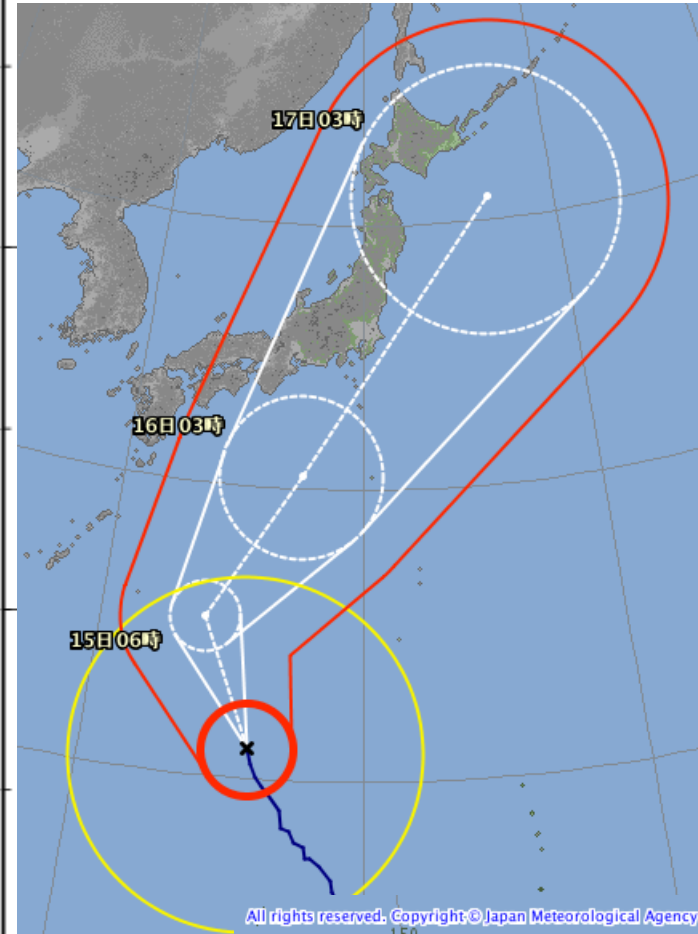
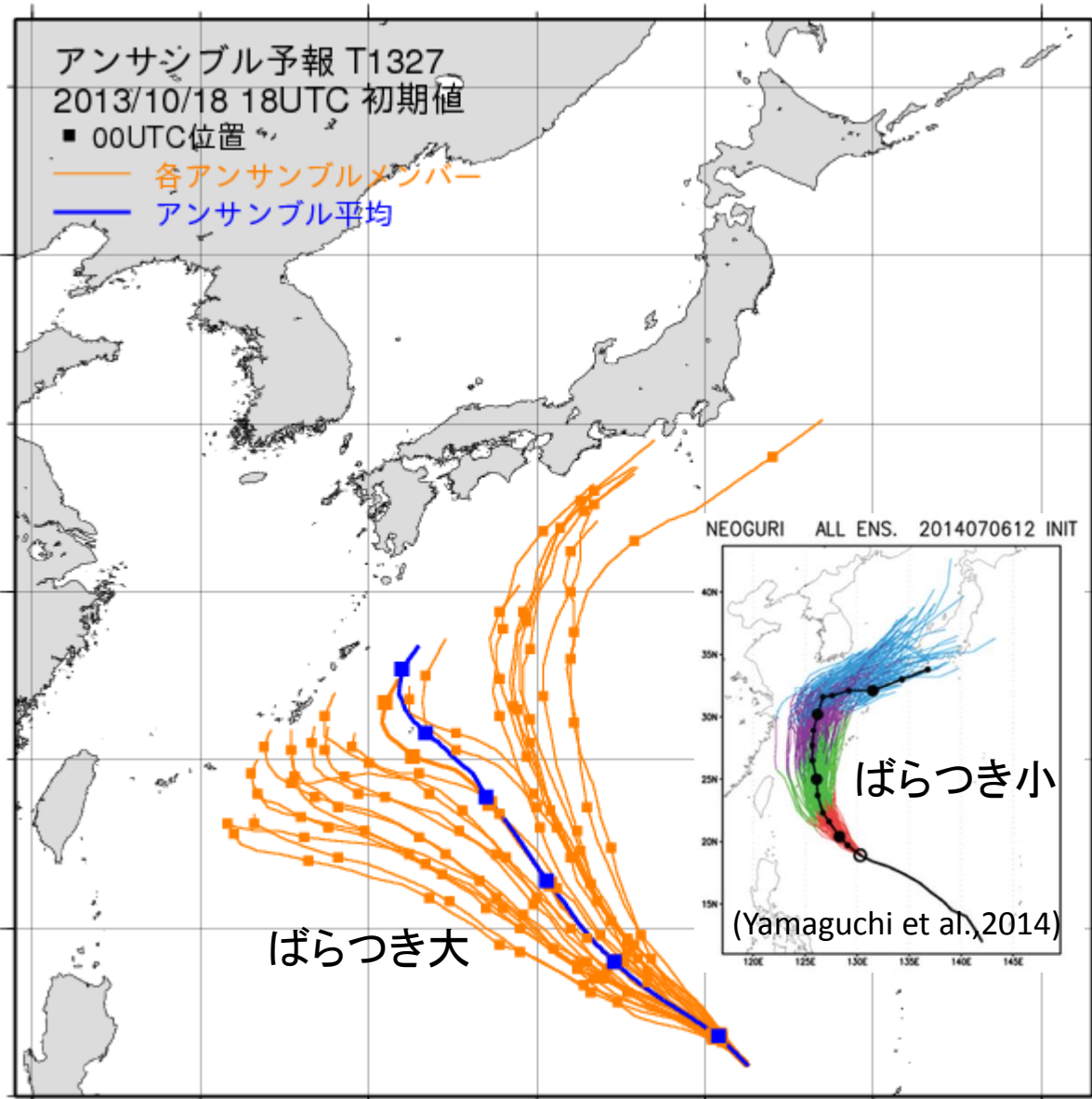
C

確度がやや低い予報

適中率が信頼度Bよりも低い

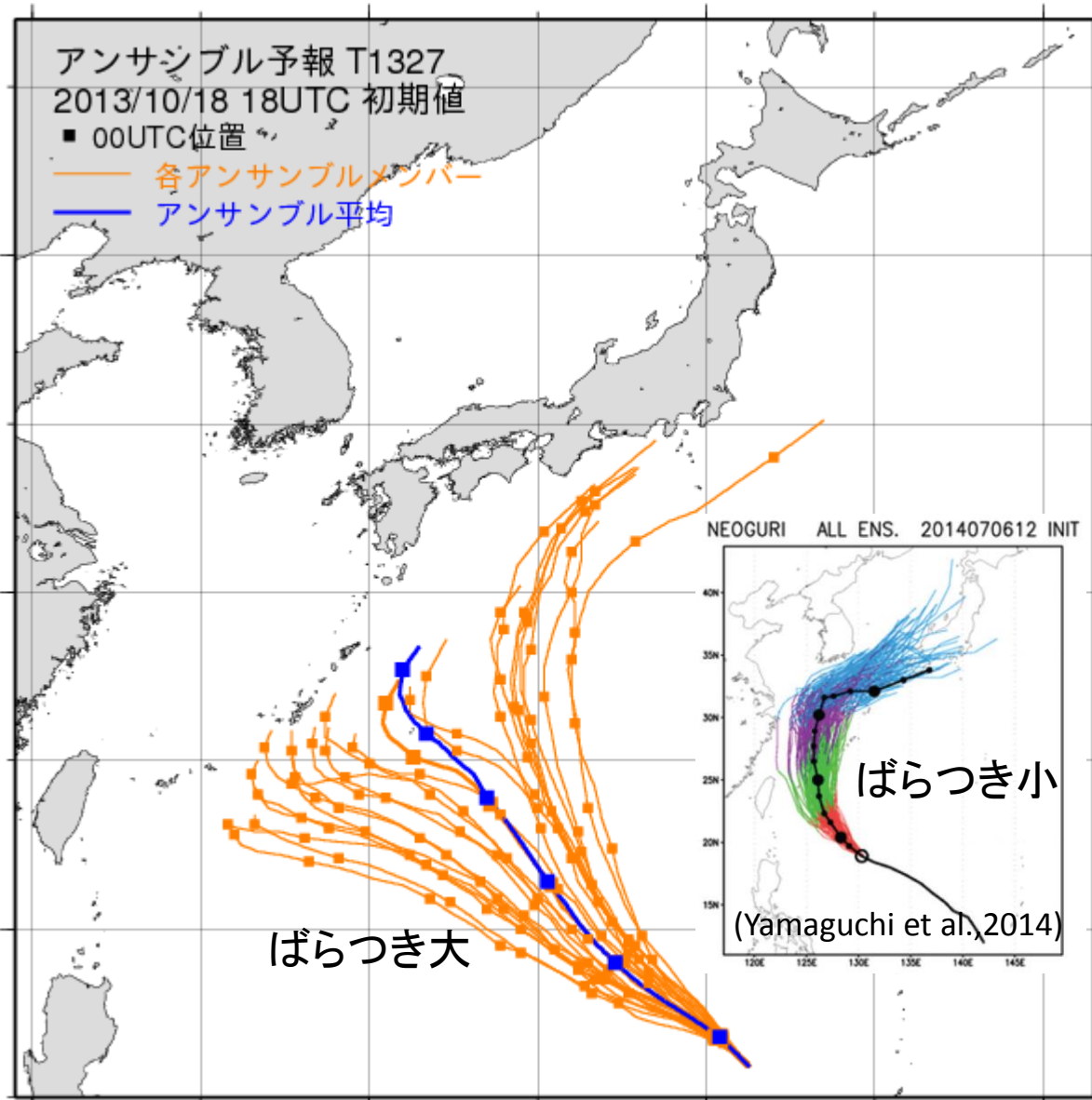
もしくは降水の有無の予報が翌日に変わる可能性が信頼度Bよりも高い

台風進路のアンサンブル予報の例

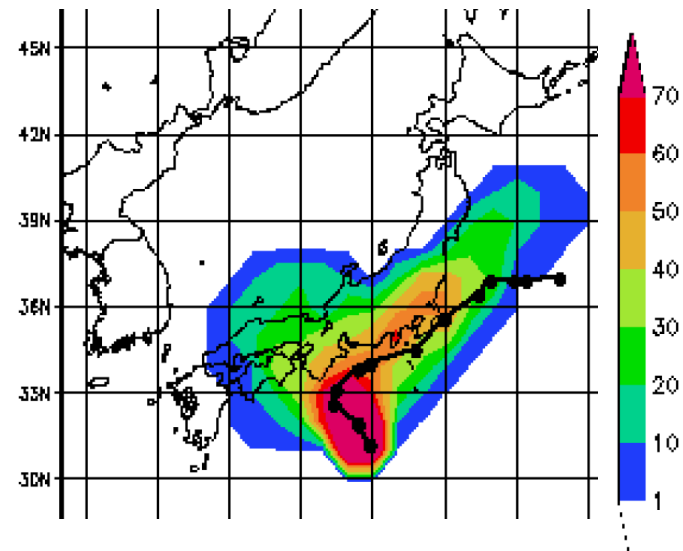


- ・予報円の大きさ等にご利用
- ・早めの防災体制にご利用？

台風進路のアンサンブル予報の例



2006年8月7日12UTC初期時刻
による台風接近確率図
(山口, 2006)



- ・予報円の大きさ等にご利用
- ・早めの防災体制にご利用？

数値予報の用途：防災と社会活動に不可欠な情報の提供

防災

予報物理量

- ・風
- ・気温
- ・湿度
- ・雨・雪
- ・気圧

災害に関わる物理量

- ・大雨
- ・強風
- ・高温・低温
- ・大雪

数値モデルを利用した予測

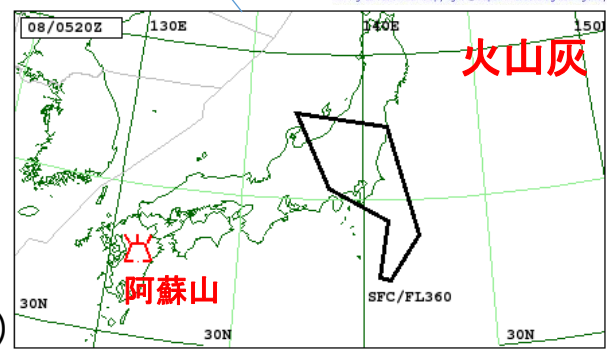
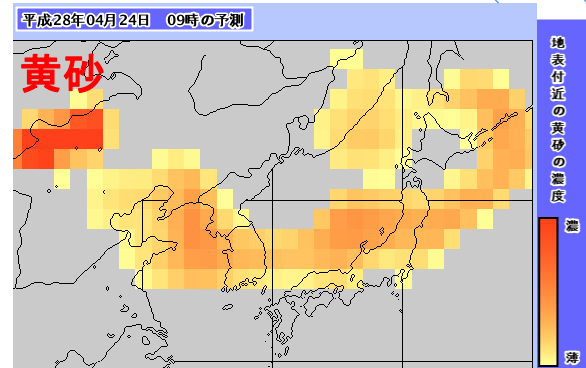
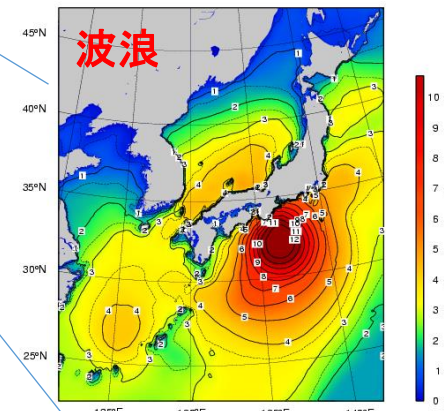
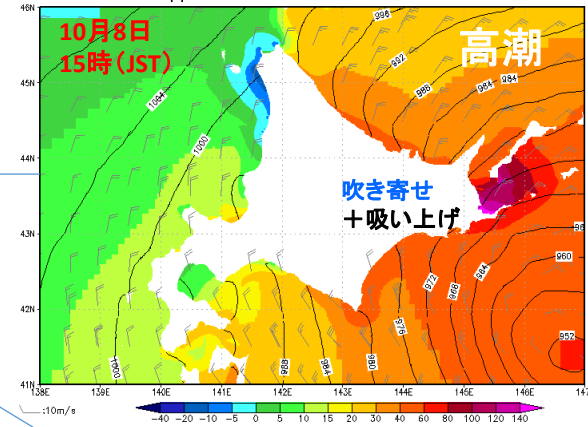
- ・土砂災害
- ・洪水
- ・高潮
- ・波浪
- ・雷
- ・竜巻等突風
- ・晴天乱流
- ・火山灰の拡散
- ・黄砂の輸送

社会活動

- ・火力発電所等の稼働スケジュール(太陽光発電の影響も)
- ・コンビニや仕出し屋の製造・仕入れ量
- ・霜害、雹害への備え
- ・海上交通や漁船の安全運航や経済的運航
- ・航空機の安全運航や経済的運航

(図は気象庁提供)

MSM10月8日03UTC初期値
(リードタイム=3時間、「ほぼ実況」とみなせる。)
Sapporo FT=03 valid=06Z08OCT2015



我が国独自の数値予報モデルの必要性

1. 全球モデル

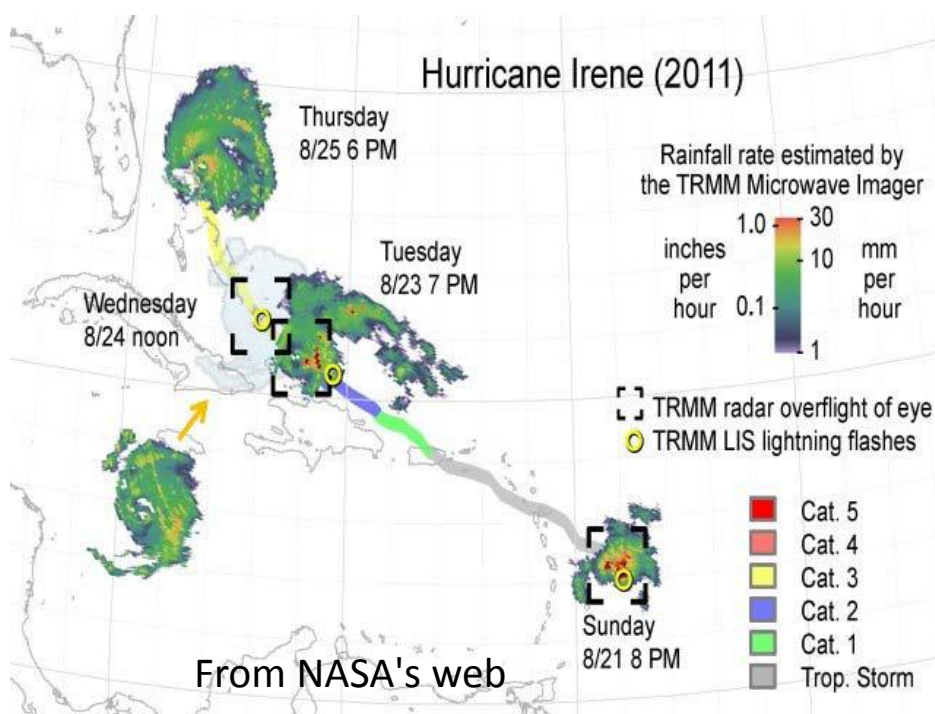
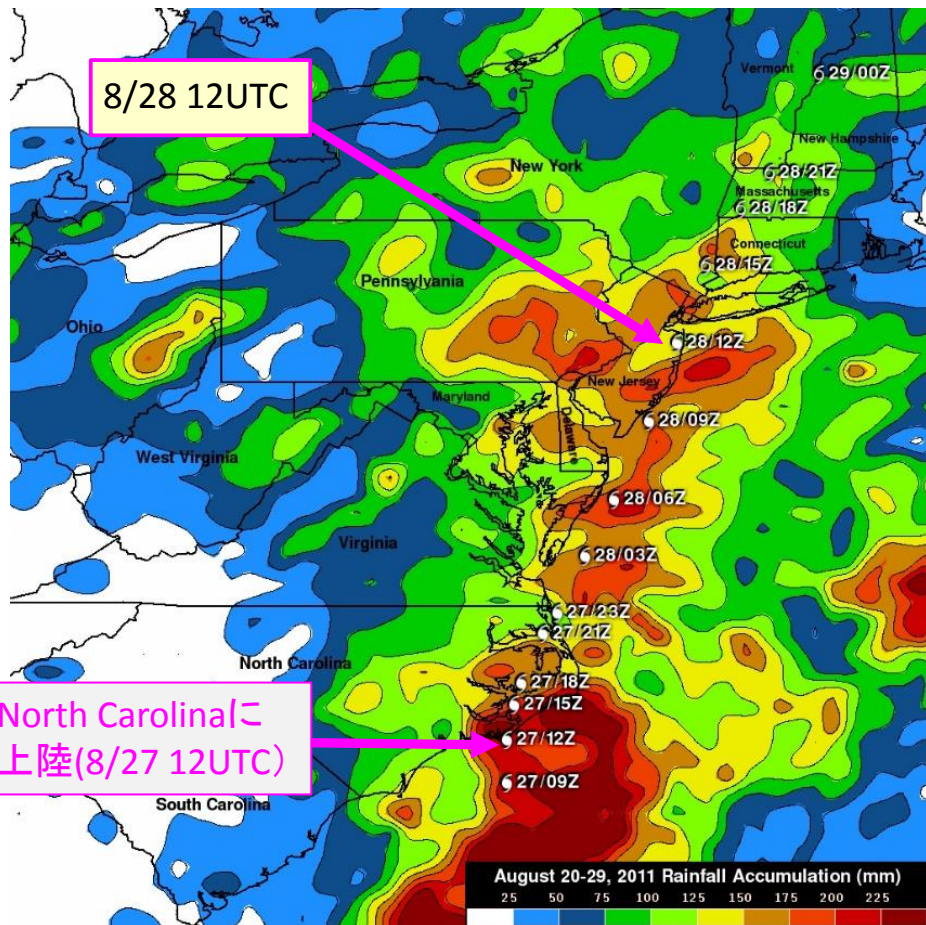
1) メソモデル・局地モデルへの境界値

2) グランドアンサンブル:

世界の主要な予報センターが独自の数値予報モデルを持つことでより良い予報が可能となる。

ハリケーン・アイリーン(2011年8月)

米国で死者40人
被害総額158億ドル



Kill Devil Hills,
North Carolina
(2011/8/25)



Central Grand Station, NY(2011/8/27)

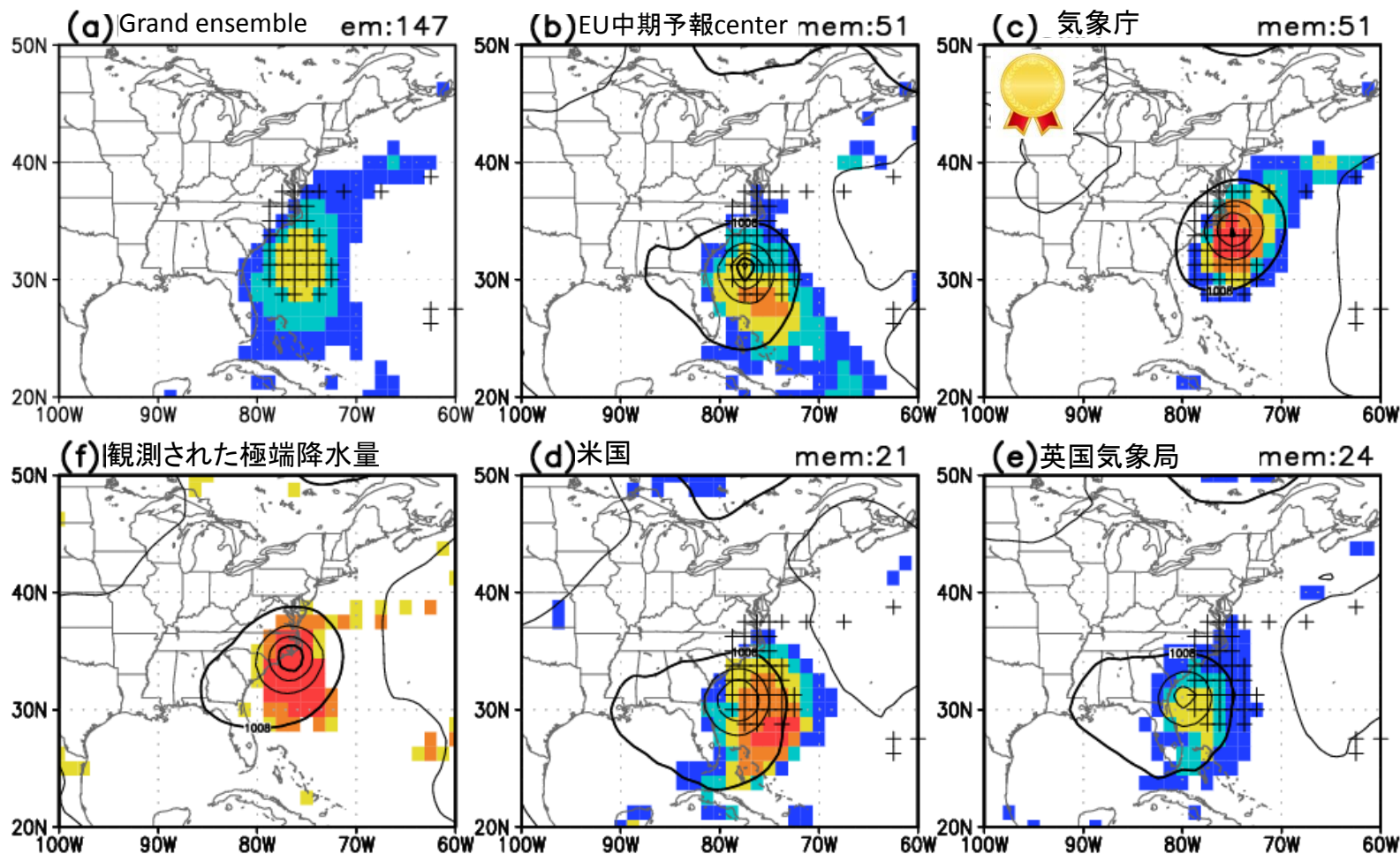
(筑波大・松枝未遠氏提供)

グランドアンサンブル(世界の4予報センターのアンサンブル予報を利用)

ハリケーン・アイリーン(2011年8月)

5日予報

2011年8月26日12UTCからの24時間に極端降水量
(気候値の上位95%を超える)が起きる確率



等値線: 観測された気圧(hPa)

■ 観測された降水量が気候値の90%、
95%、99%を超えた領域

+: 観測で気候値の95%を超えた

等値線: 標準の予報の気圧(hPa)



気候値の上位95%を超える確率(%) (筑波大・松枝未遠氏提供)

我が国独自の数値予報モデルの必要性

1. 全球モデル

1) メソモデル・局地モデルへの境界値

2) グランドアンサンブル:

世界の主要な予報センターが独自の数値予報モデルを持つことでより良い予報が可能となる。

2. メソモデル・局地モデル

1) メソスケールの激しい現象(集中豪雨や竜巻等)の予報、
わが国独自に行う必要

2) 大気現象がもとで起きる災害等の予測や社会活動に有用な情報提供

独自の数値予報モデルと結合したモデル開発が必要。

- ・ 台風や低気圧に伴う高潮・波浪等の予報(海洋モデル)

- ・ 土砂災害

- ・ 洪水

- ・ 火山灰の移流拡散

.....

より良い予報を提供するためには

- より信頼できる数値モデルに：物理過程の改良
雲物理、乱流、放射、……
- データ同化：新しい観測データの利用とデータ同化手法の改良
多様な衛星のデータ、偏波レーダーやフーズドアレイレーダー
- 優れたスーパーコンピュータ：
より高い解像度、より多くのアンサンブル、
より多くの観測データの利用、より優れたデータ同化
- 大気現象によって起きる多様な災害への応用：
土砂災害、洪水、高潮、……

4.将来の数値予報に向けて

—「京」コンピュータを使った最近の研究*を中心に

1) 物理過程の改善：（例）雲物理過程

*フラッグシップ2020プロジェクト

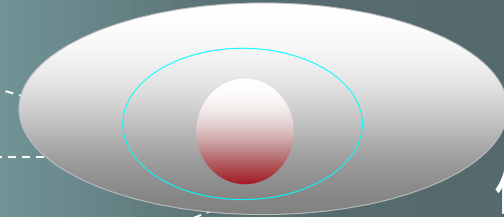
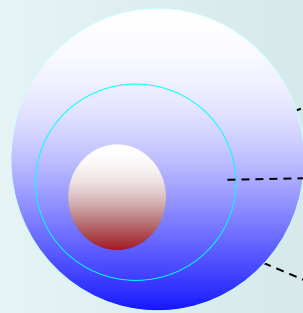
重点課題4「観測ビッグデータを活用した気象と地球環境の予測の高度化」

サブ課題A 「革新的な数値天気予報と被害レベル推定に基づく高度な気象防災」

雲・降水粒子の物理化学特性

水粒子(雲・雨)

氷粒子(雪・霰・雹など)



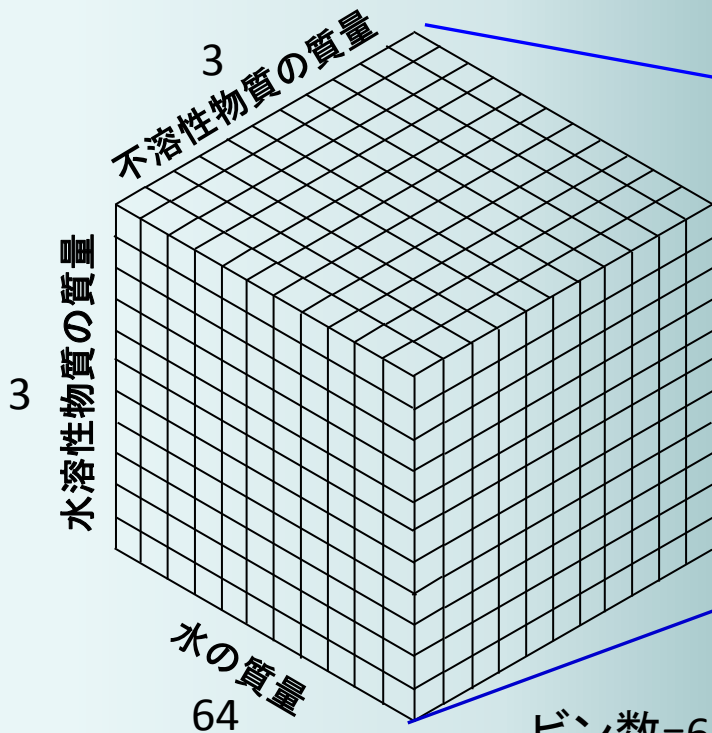
水の質量

不溶性物質の
質量

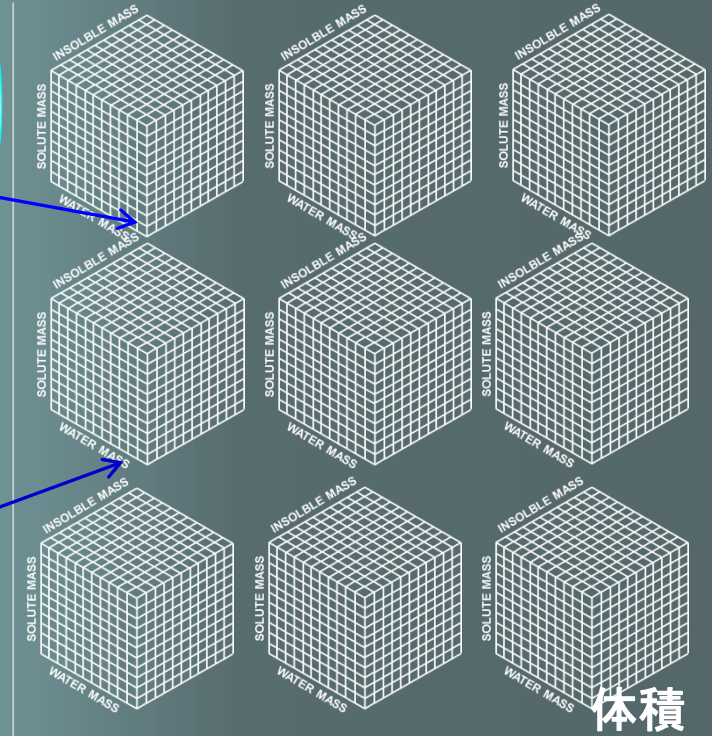
水溶性物質の
質量

縦横比

体積(密度)



縦横比
8



ビン数=64×3×3×8×8=36,864

(気象研・橋本明弘氏提供)

2次元大気での積乱雲の発達の実験

領域サイズ 80km × 10.km 水平解像度1km 鉛直解像度100~460m

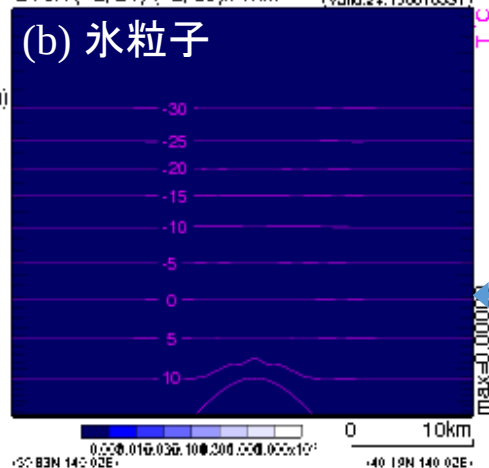
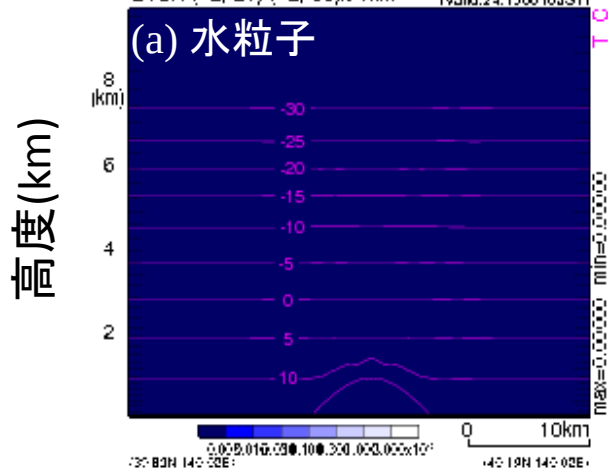
2007年5月10日12時の館野の温度・湿度プロファイル (1m/s)/kmの弱い西風シア

Initial : 2003.10.24.0600UTC

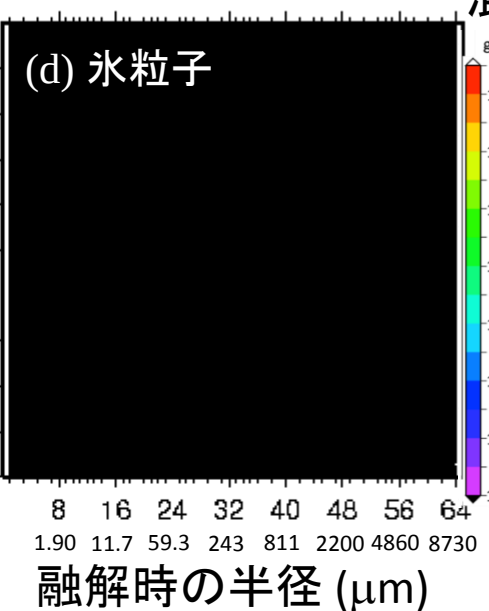
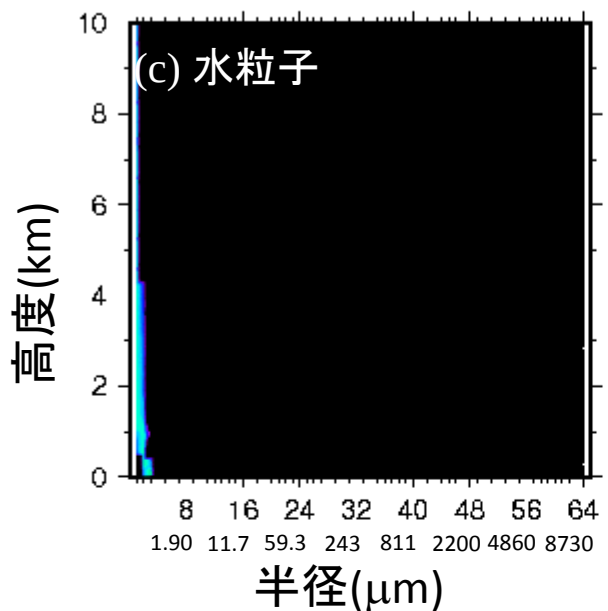
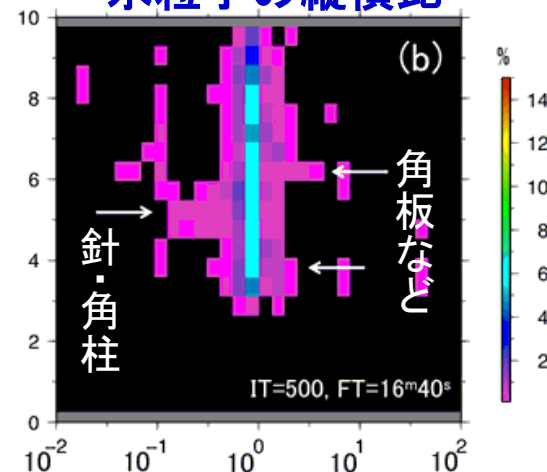
混合比

QY6H (2, 21)-(2, 59)x 1km Ohour 0min 10sec (valid:24.130010JST)

QY6H (2, 21)-(2, 59)x 1km Ohour 0min 10sec (valid:24.130010JST)



氷粒子の縦横比



混合比

- ・観測事例の再現実験と再現性の評価、モデルの精緻化
- ・H31年度:「ポスト京」コンピュータにむけた最適化

(気象研・橋本明弘氏提供)

4.将来の数値予報に向けて

—「京」コンピュータを使った最近の研究*を中心に

1) 物理過程の改善：（例）雲物理過程

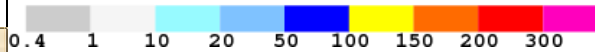
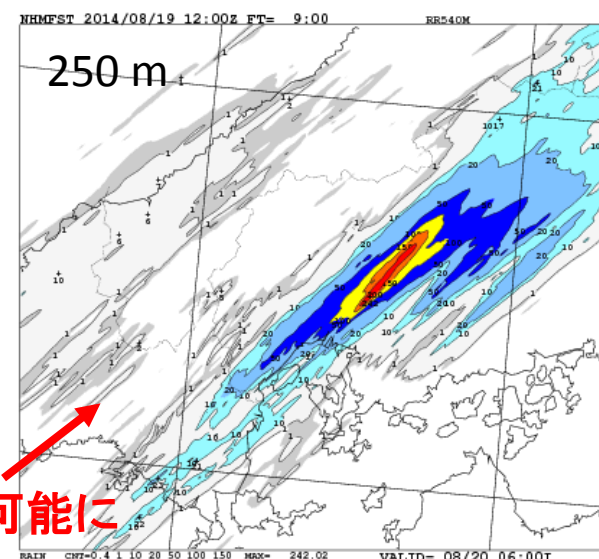
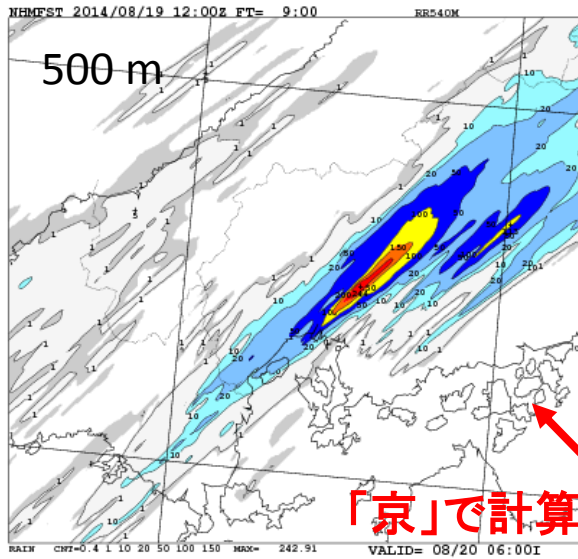
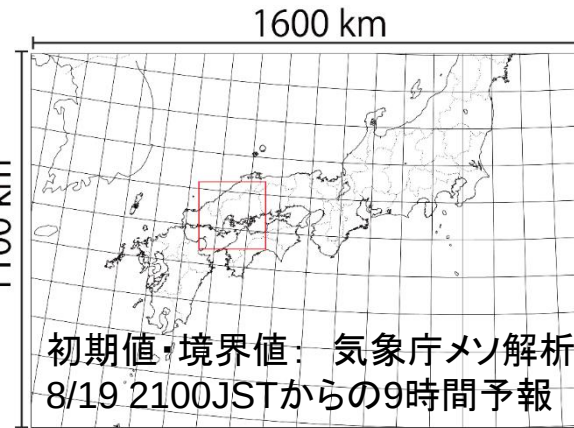
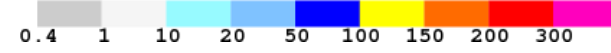
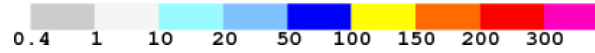
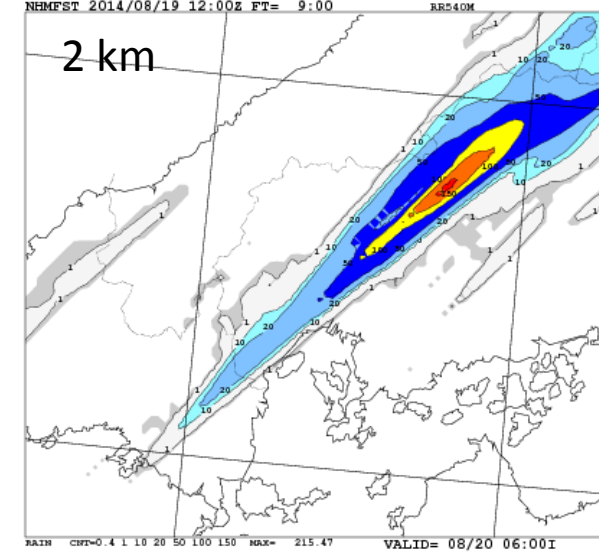
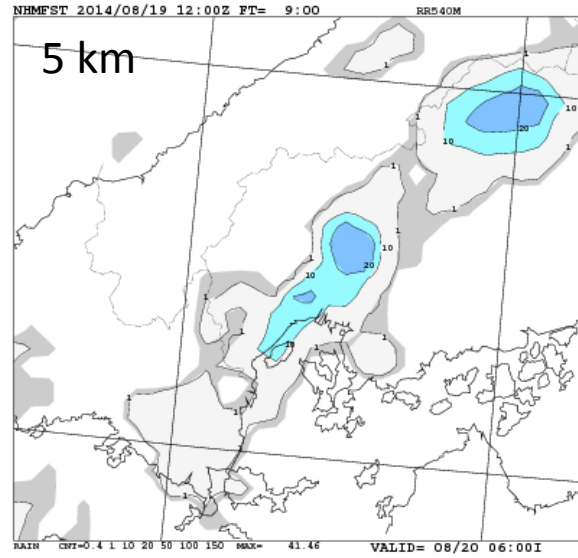
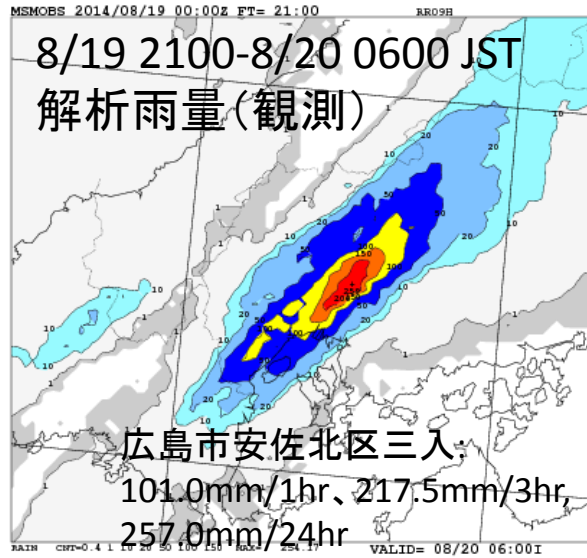
2) 高解像度化＋関連現象のモデルでの利用：
広島の豪雨と土石流

*フラッグシップ2020プロジェクト

重点課題4「観測ビッグデータを活用した気象と地球環境の予測の高度化」
サブ課題A 「革新的な数値天気予報と被害レベル推定に基づく高度な気象防災」

広島市の豪雨(2014年8月20日)

死者74名
家屋の全半壊255棟
(広島県災害対策本部2014/9/19)

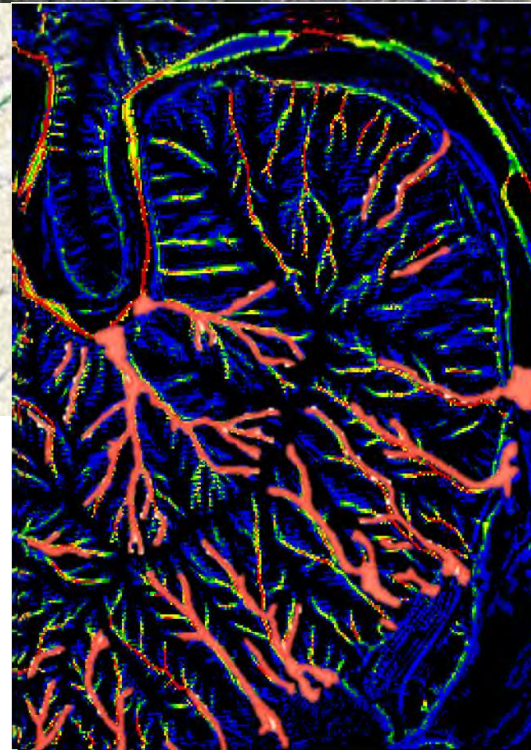


「京」で計算可能に

(JAMSTEC 大泉 伝氏提供)

水平解像度	Time Step (second)	NX	NY	NZ
5km	24	321	321	50
2 km	10	800	550	60
500 m	2	3197	2197	85
250 m	1	6393	4393	168

土石流モデル



水平解像度
250mの大気モ
デルの予報を
もとに求めた8
月20日02時の
土石流の分布

ピンク:実際の土石
流分布

(京都大学
山敷庸亮教授
提供)

(Yamashiki, 2015)

4.将来の数値予報に向けて

—「京」コンピュータを使った最近の研究*を中心に

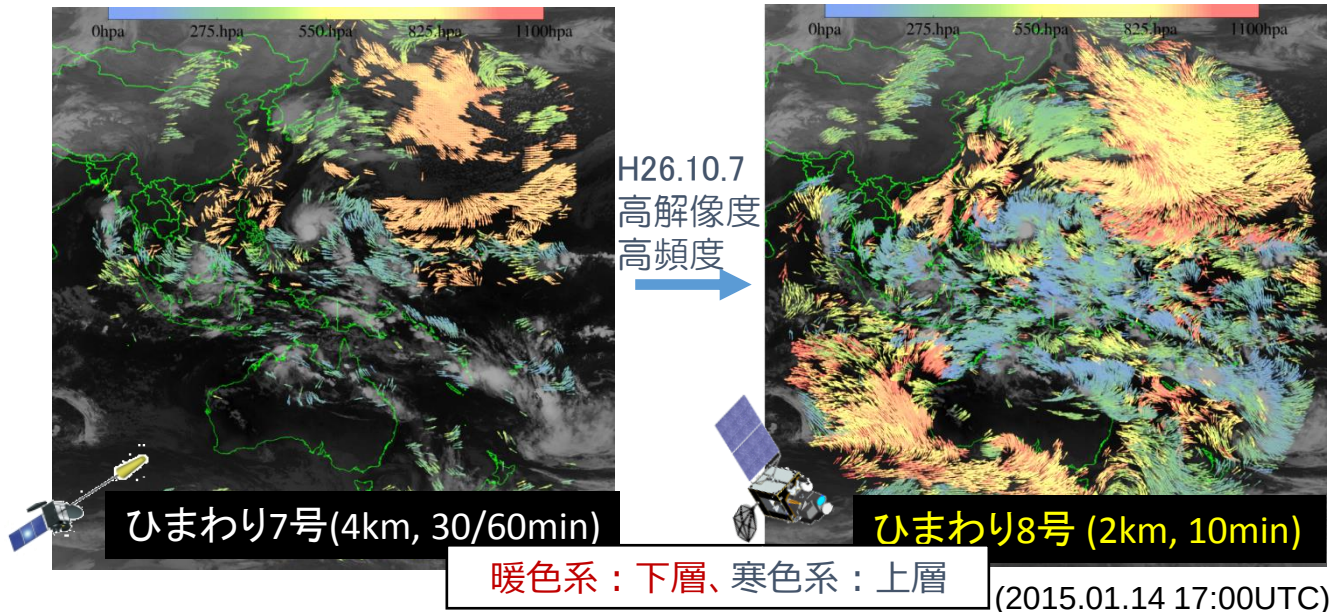
- 1) 物理過程の改善：（例）雲物理過程
- 2) 高解像度化＋関連現象のモデルでの利用：
広島の豪雨と土石流
- 3) 最新の観測データの同化とアンサンブル予報
 - ・平成27年関東・東北豪雨
 - ・平成24年つくば竜巻

*フラッグシップ2020プロジェクト

重点課題4「観測ビッグデータを活用した気象と地球環境の予測の高度化」
サブ課題A「革新的な数値天気予報と被害レベル推定に基づく高度な気象防災」

平成27年9月 関東・東北豪雨

新しい観測データの同化
+ アンサンブル予報

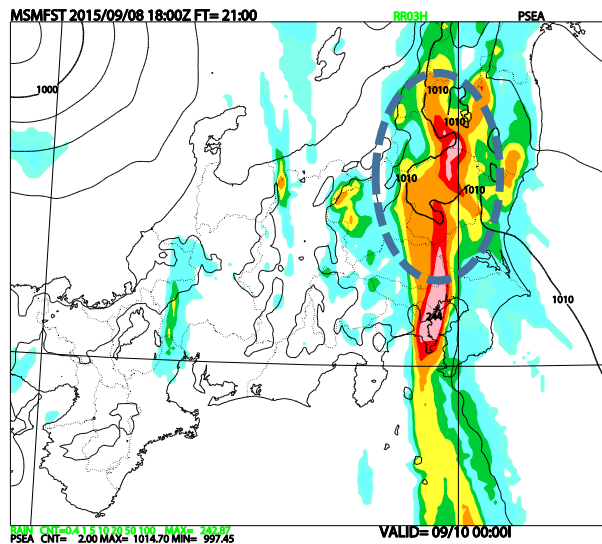
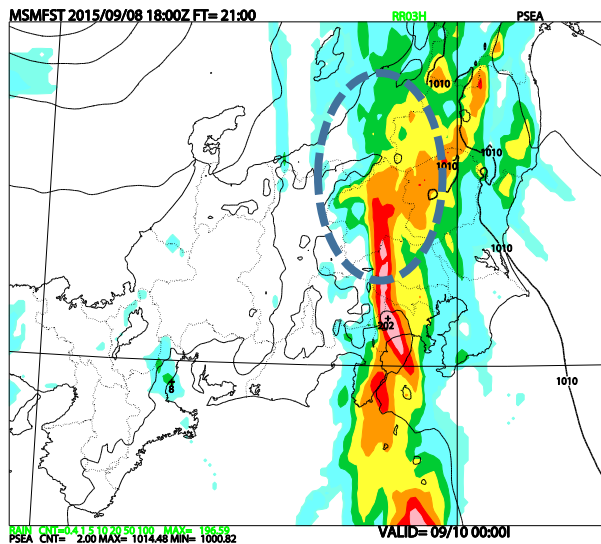
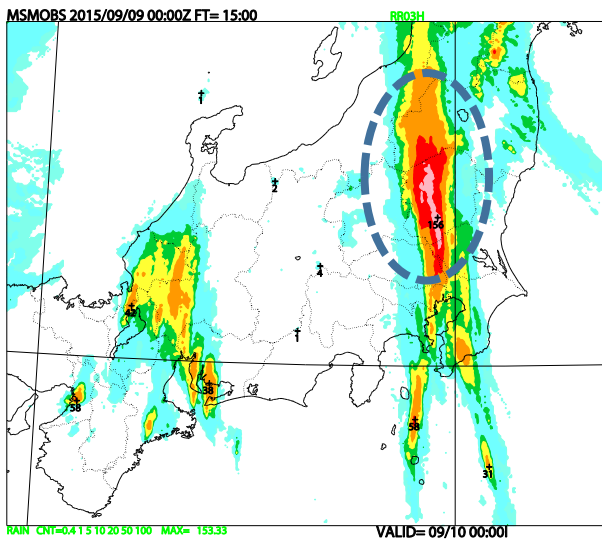


平成27年9月10日0時における前3時間積算雨量の分布（9日03時からの21時間予報）。

観測データ

高頻度大気追跡風 なし

高頻度大気追跡風 **あり**



0.4 1 5 10 20 50 100

0.4 1 5 10 20 50 100

0.4 1 5 10 20 50 100

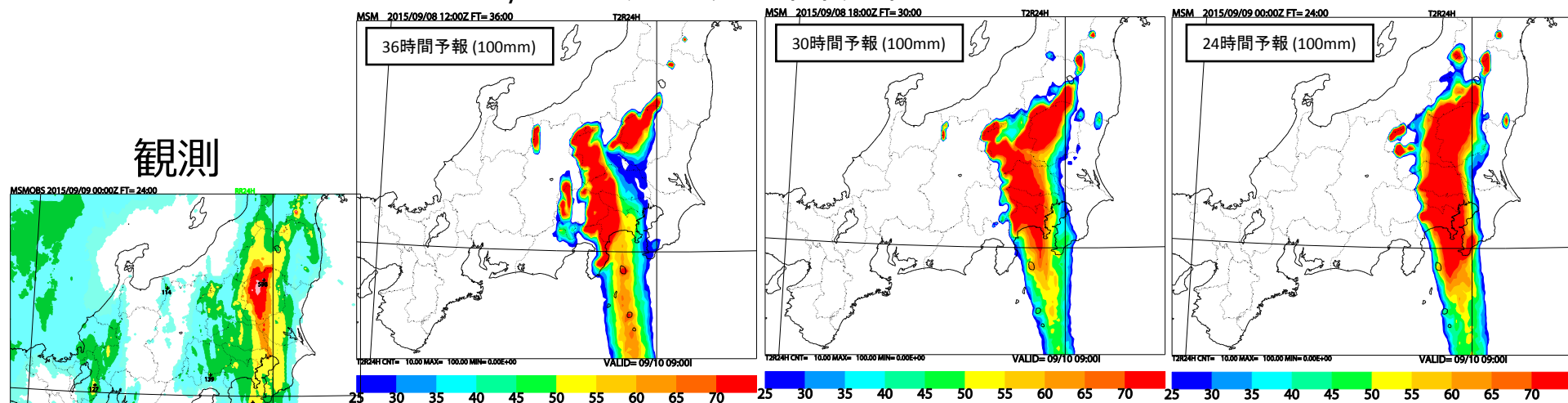
ひまわり8号高頻度大気追跡風の同化により、降水帯が観測に近い位置で予想されるようになった。

(気象研・國井 勝氏提供)

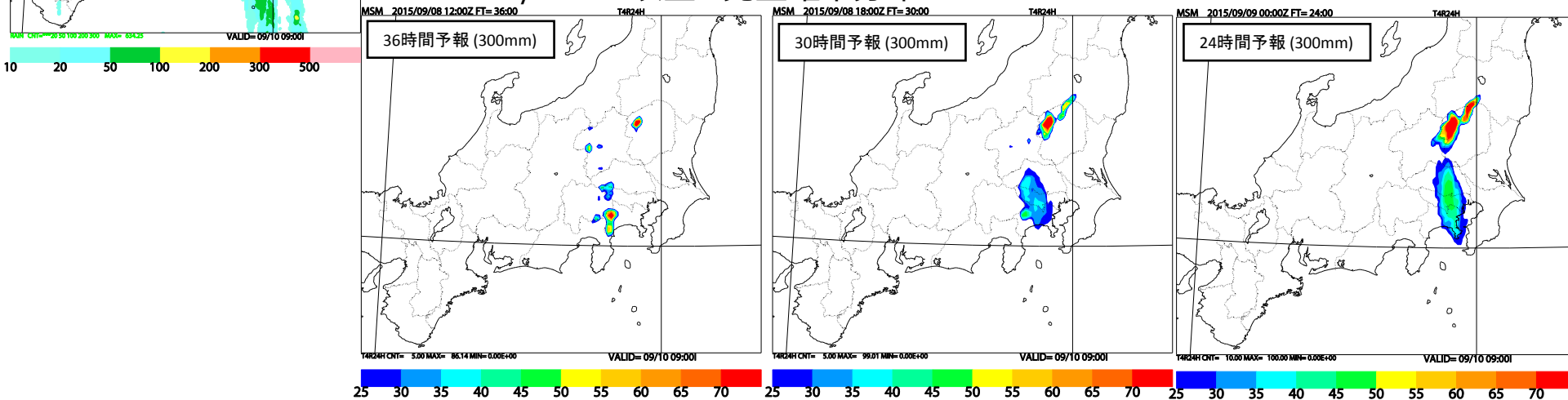
アンサンブル降水予測

平成27年9月9日9時～10日9時の24時間積算降水量の発生確率分布。

100 mm / 24 h 以上の発生確率分布



300 mm / 24 h 以上の発生確率分布



4.将来の数値予報に向けて

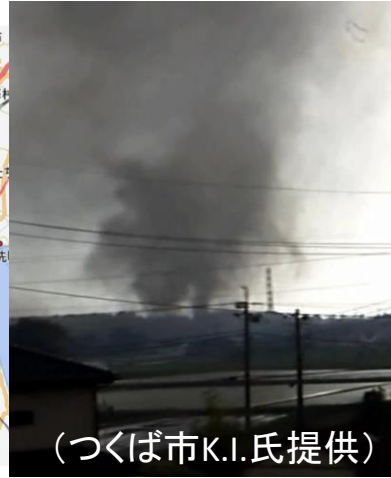
—「京」コンピュータを使った最近の研究*を中心に

- 1) 物理過程の改善：（例）雲物理過程
- 2) 高解像度化＋関連現象のモデルでの利用：
広島の豪雨と土石流
- 3) 最新の観測データの同化とアンサンブル予報
 - ・平成27年関東・東北豪雨
 - ・平成24年つくば竜巻

***フラッグシップ2020プロジェクト**

重点課題4「観測ビッグデータを活用した気象と地球環境の予測の高度化」
サブ課題A「革新的な数値天気予報と被害レベル推定に基づく高度な気象防災」

つくば竜巻 (2012年5月6日)



死者1名、負傷者37名
住家の全壊89, 半壊192, 一部損壊384棟

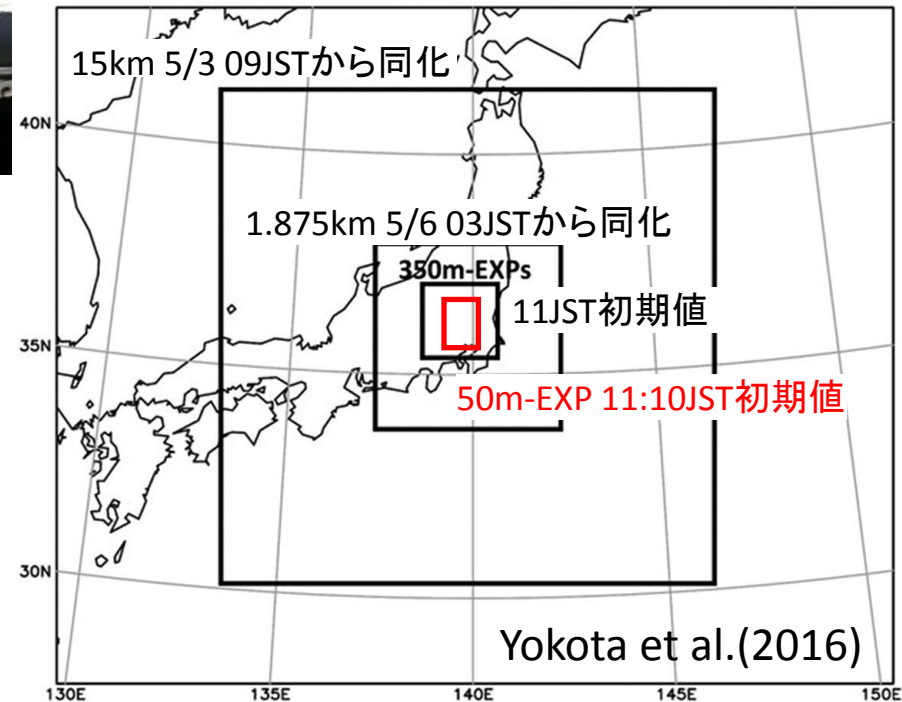
データ同化+アンサンブル予報(32メンバー) +ダウンスケーリング

現業観測: 地上観測 (気圧), ラジオゾンデ (風, 湿度, 気温), 航空機観測 (風, 気温),
レーダー (風, 湿度), ウィンドプロファイラ (風)

高解像度レーダー観測: 東京・羽田・成田・気象研レーダーの動径風,

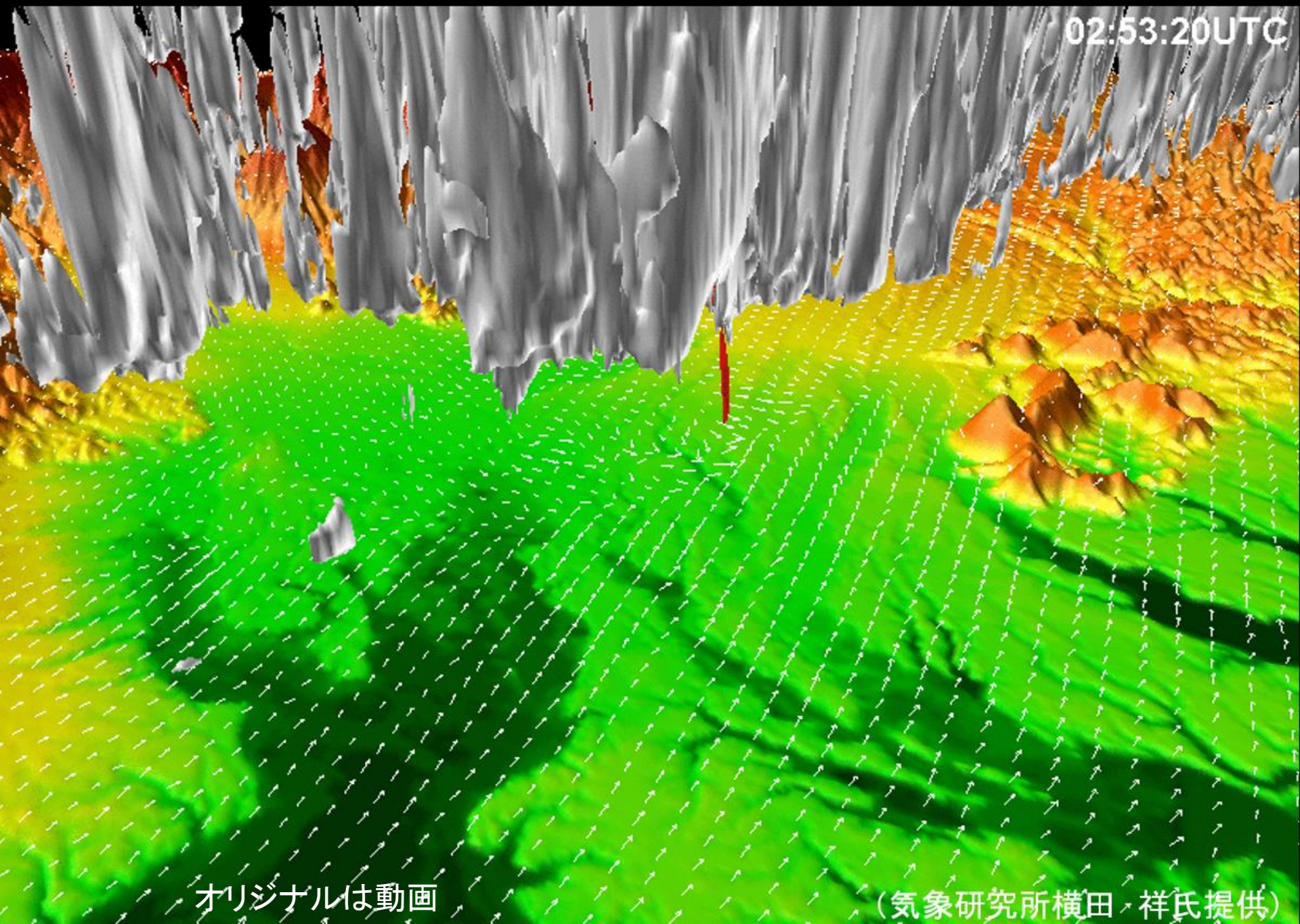
気象研偏波レーダーの反射強度と比偏波間位相差から推定した雨水量

地上観測: 気象官署・アメダス・NTTドコモ環境センサーネットワークの風, 気温, 湿度



水平解像度350mの実験結果 (赤色: 渦度 $> 0.05 \text{ s}^{-1}$, 灰色: 雲水 $> 0.3 \text{ g kg}^{-1}$)

02:53:20UTC

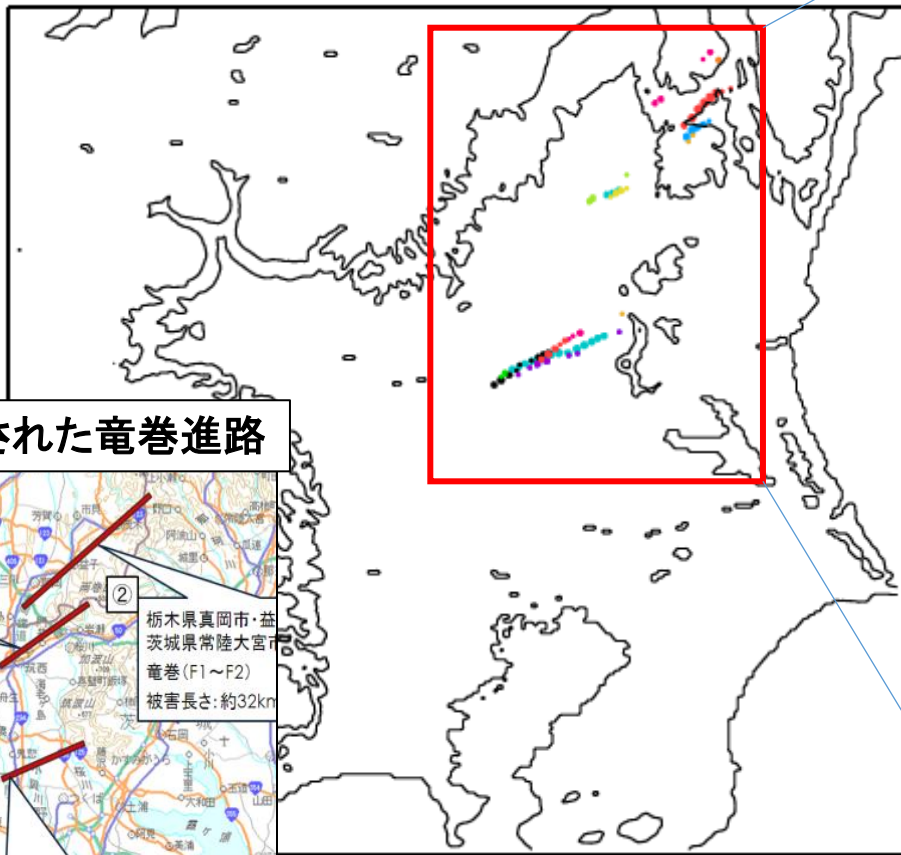


オリジナルは動画

(気象研究所横田・祥氏提供)

350m解像度のアンサンブル予報

渦度が0.1(1/s)以上の渦の位置



83%のメンバーで発生.
継続時間 6-36分

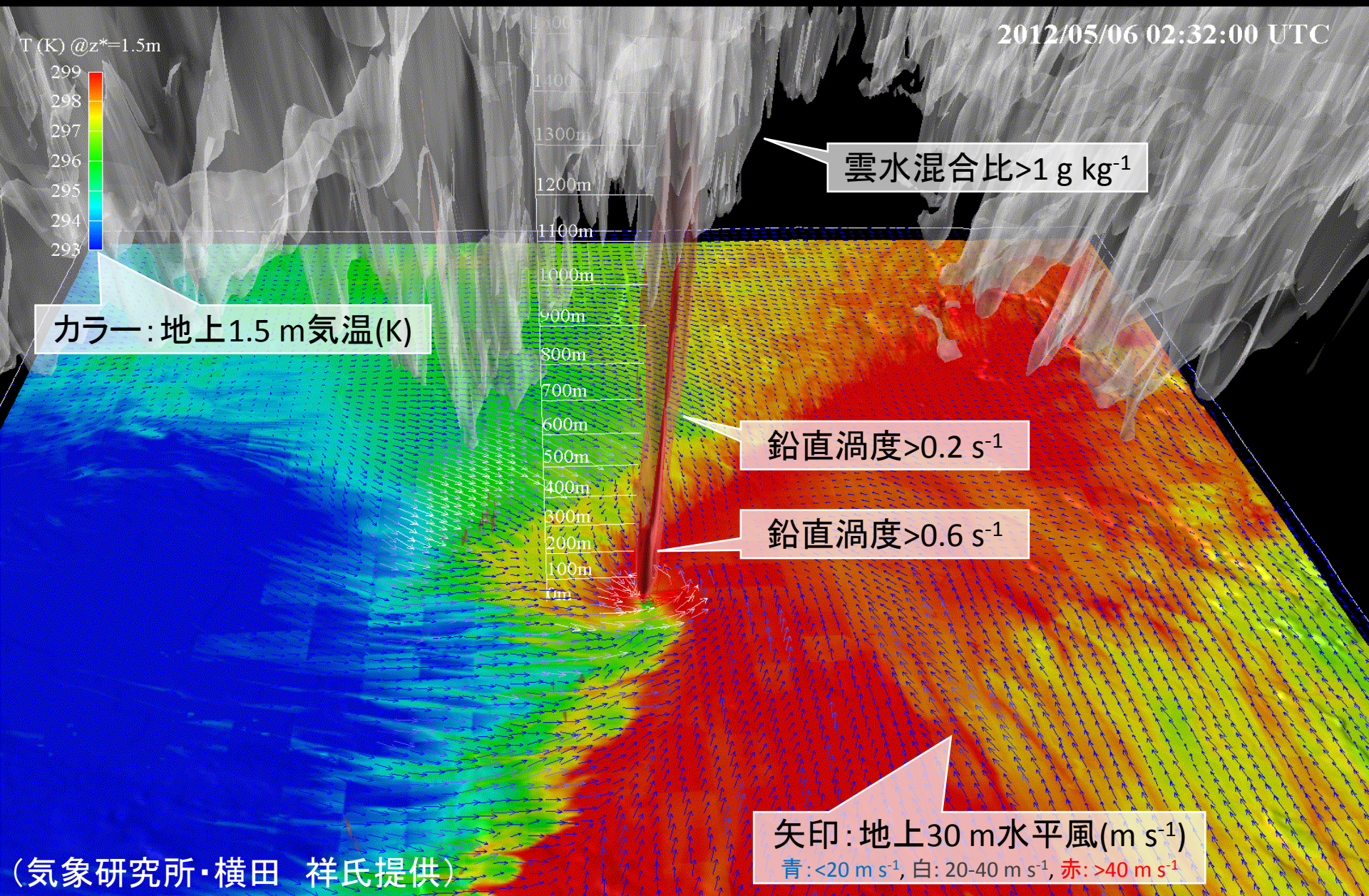
- ・観測より10km程度北にずれているが3箇所で竜巻に対応すると思われる下層のメソサイクロンを再現。
- ・位置と継続時間はメンバー毎に異なる。

(気象研究所 瀬古 弘氏提供)

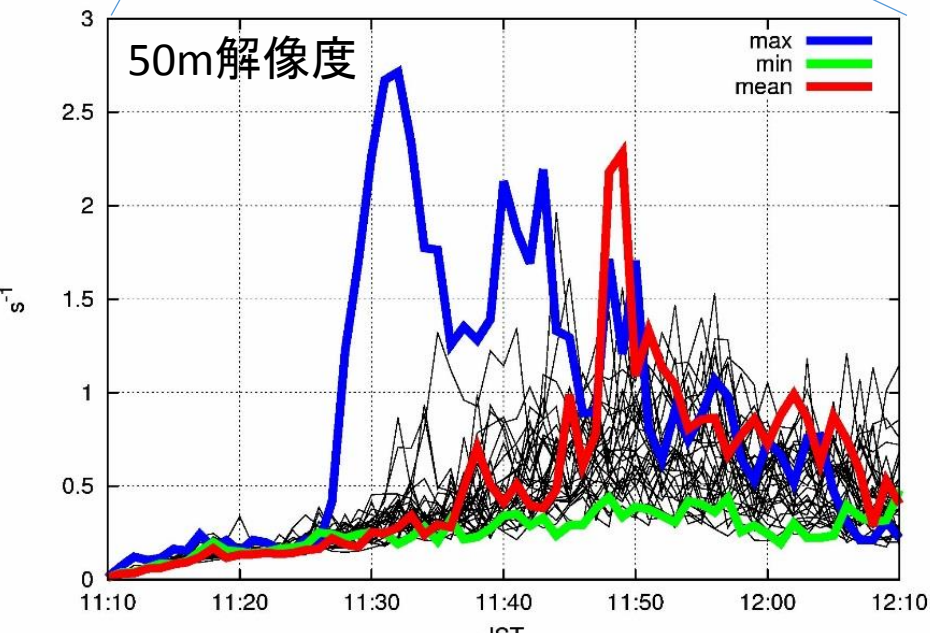
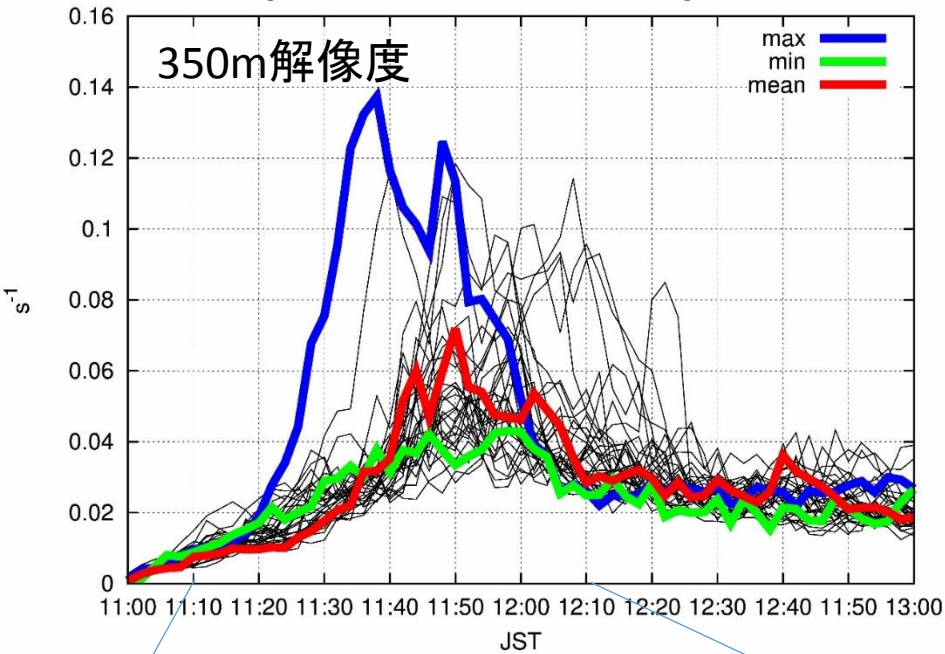
<http://www.jma.go.jp/>

水平解像度50mの実験

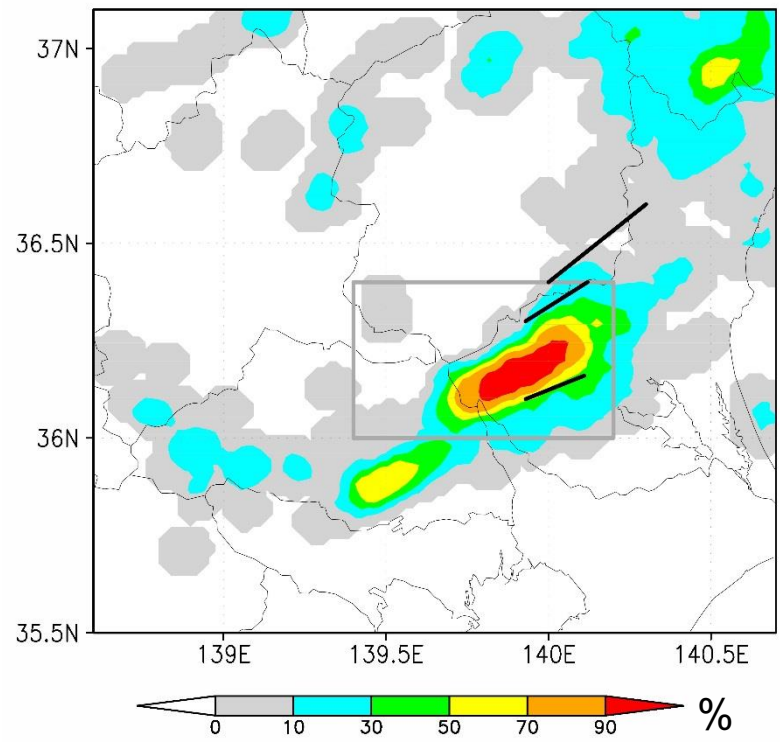
最も強い渦が発生したメンバーの渦度最大時刻のようす



最大渦度（渦の回転の強さ）の時間変化



渦度0.03/s以上の渦が 5km以内を通過する確率



青: 最大渦度が最も大きいもの
緑: 最大渦度が最も小さいもの
赤: 初期状態を32メンバーの平均
で与えたもの

(気象研究所・横田 祥氏提供)

5. まとめ

- ・数値予報は将来の大気の状態を、物理法則に基づいて**客観的に予測し、防災・社会活動に不可欠**な情報作成のもととなる資料を提供する。
- ・数値予報システムはコンピュータの性能の向上と共に、50年間に高度に進化してきた。
- ・数値予報の改善には世界数か国の予報センターがしのぎを削っており、**各国が独自の予報モデルを有することが重要**（例：グラントアンサンブル、局地予報）
- ・数値予報システムは今後も進化を続け、予測精度の向上や多様な情報の提供に貢献する。
- ・豪雨や竜巻などの予報には「メソモデルを用いたアンサンブル予報」※に基づく**発生確率の空間分布**のような情報提供が予想される。→防災に有効な**活用方法**の検討が必要。

※（気象庁では平成30年度更新のスパコンでの運用に向けて開発中）