

集中豪雨を予測する

齊藤和雄 (気象研究所予報研究部)

1. 集中豪雨と局地的大雨
2. スーパーコンピュータと気象庁の数値予報
3. 豪雨予測に向けた研究開発
4. 次世代スーパーコンピュータへの期待

協力: 気象研究所 予報研究部、台風研究部、
気象衛星・観測システム研究部
気象庁予報部数値予報課ほか



集中豪雨と局地的大雨

集中豪雨

- 梅雨末期など日本付近に前線が停滞している時や台風接近に伴って起こることが多い
- 暖かく湿った空気が大気下層に流入し、積乱雲群が次々に発生発達して豪雨を降らせる

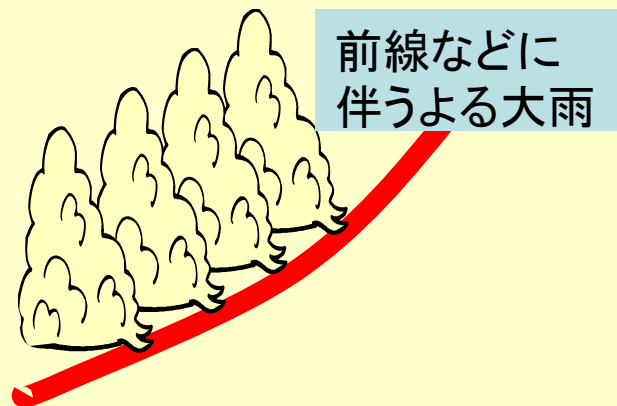
・台風接近時の大雨

台風の風の地形強制によるものはある程度事前の予想が可能になっている。台風の進路を正確に予測することが重要。



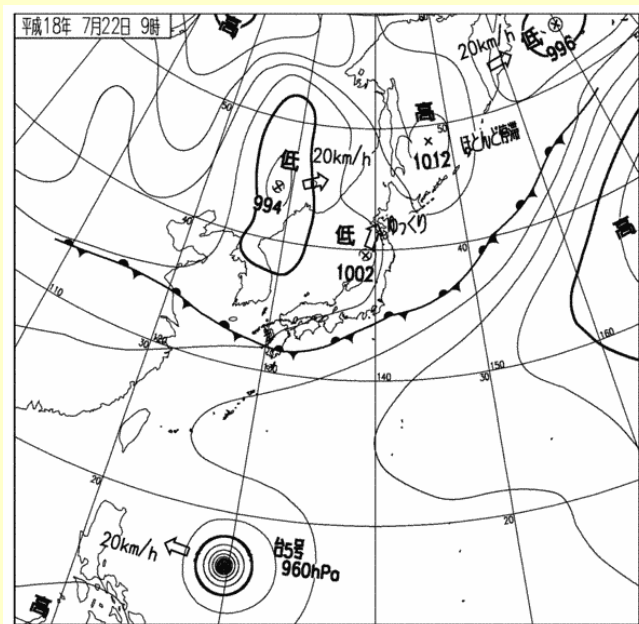
・梅雨末期の前線性の雨

空間的・時間的スケールが小さく(数十km、数時間～半日)、大雨のポテンシャルはある程度予想できるが、どこでどれだけ降るかを正確に予測するのはまだ難しい。

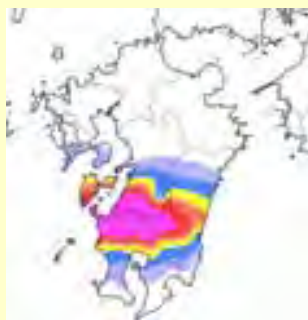


梅雨末期の前線性の雨の例

平成18年7月の南九州豪雨



7月22日午前9時の天気図



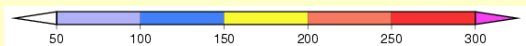
7月22日の
降水量



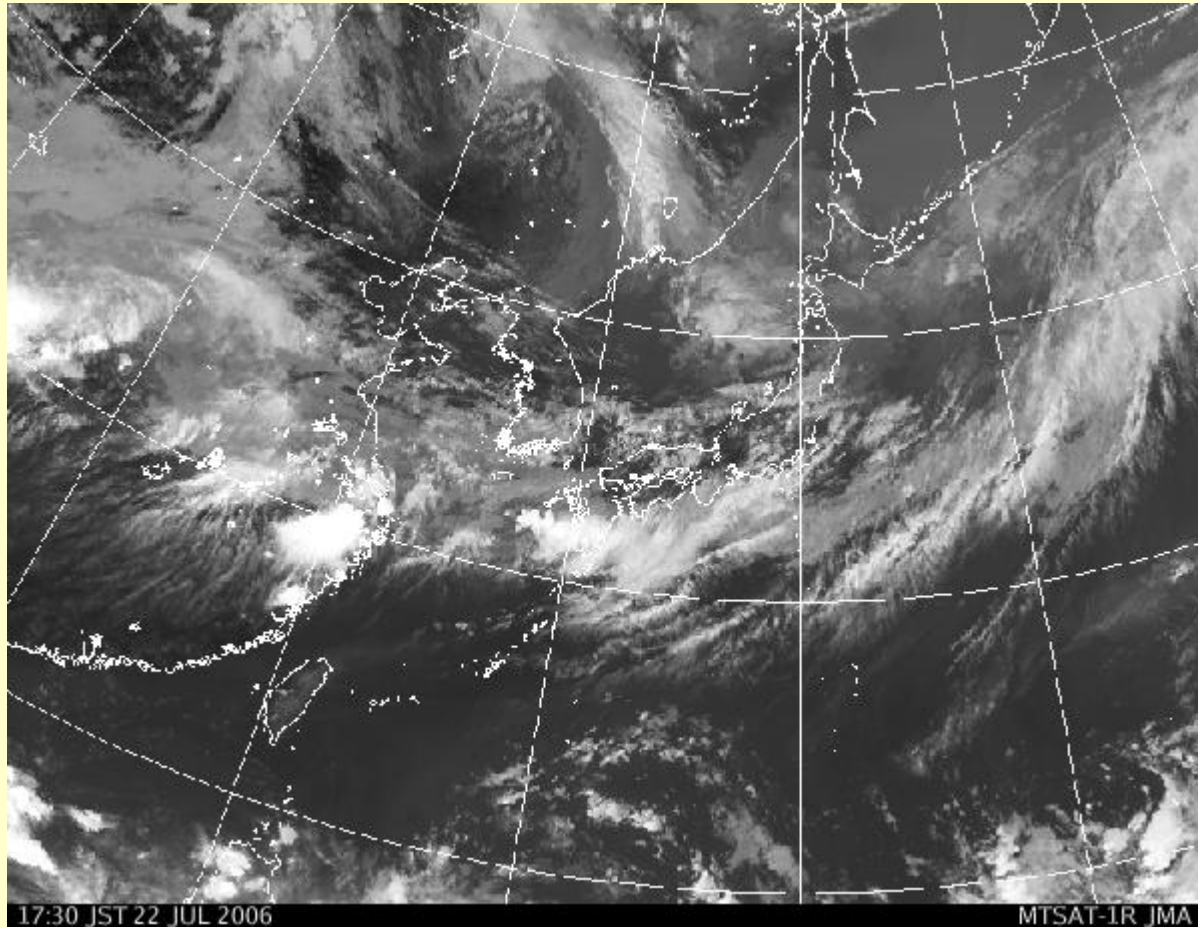
鹿児島県菱刈町、薩摩川内市で
土石流などにより死者3名



川内川流域の鹿児島県さつま町、湧水町などで浸
水約1,500棟

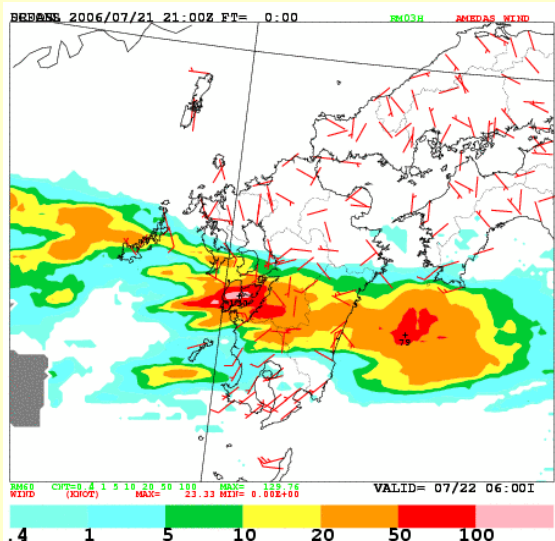


7月22日衛星画像

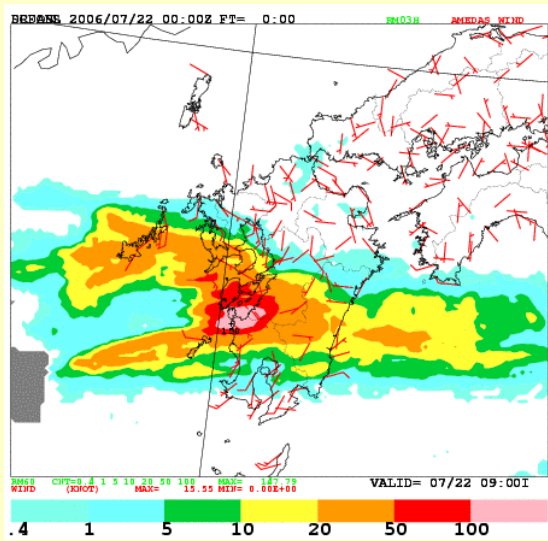


前線に沿って積乱雲群が次々に発生発達

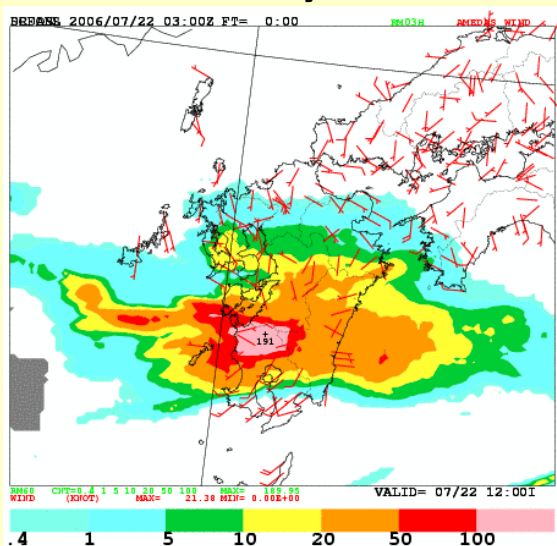
前線性集中豪雨の例(平成18年7月)



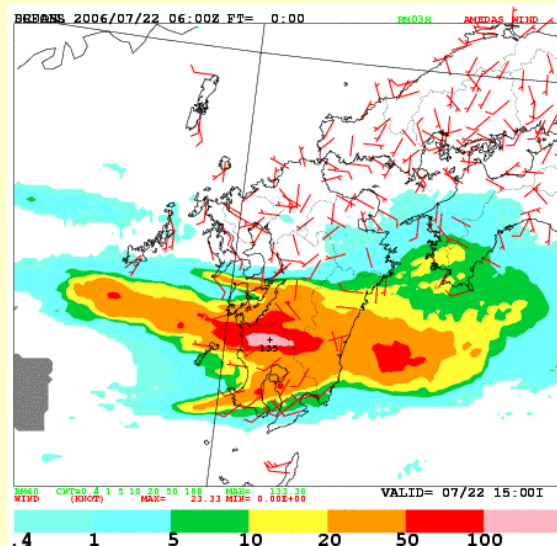
3-6時



6-9時



9-12時

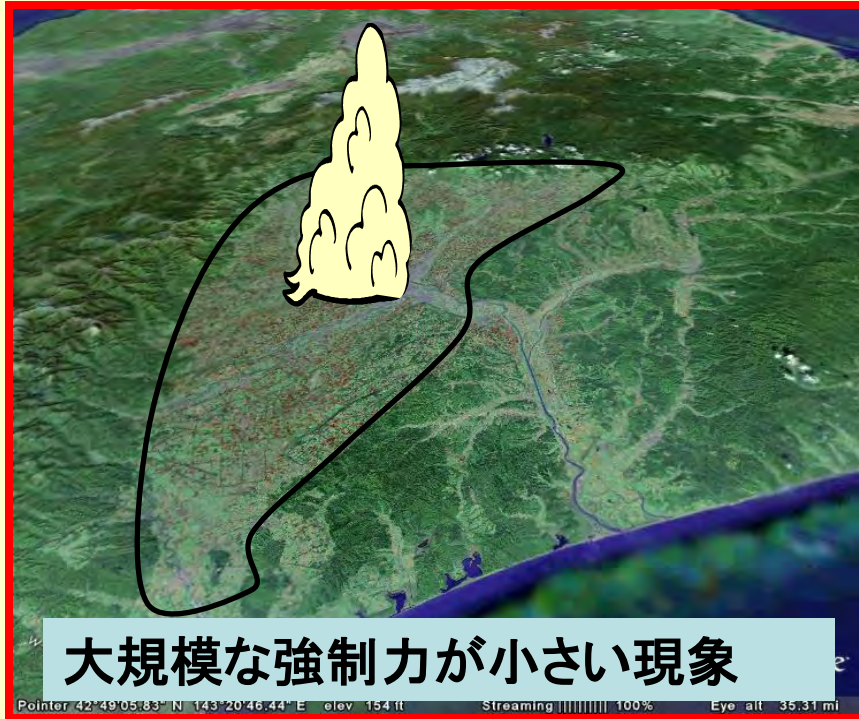


12-15時

2008年7月22日
解析雨量

梅雨前線に沿って強い降水が半日近く継続

局地的大雨



- あまり組織化しない少数の積乱雲で引き起こされる
- 集中豪雨よりさらに空間的・時間的スケールが小さい。
- 僅かな条件の違いで結果が大きく変わる

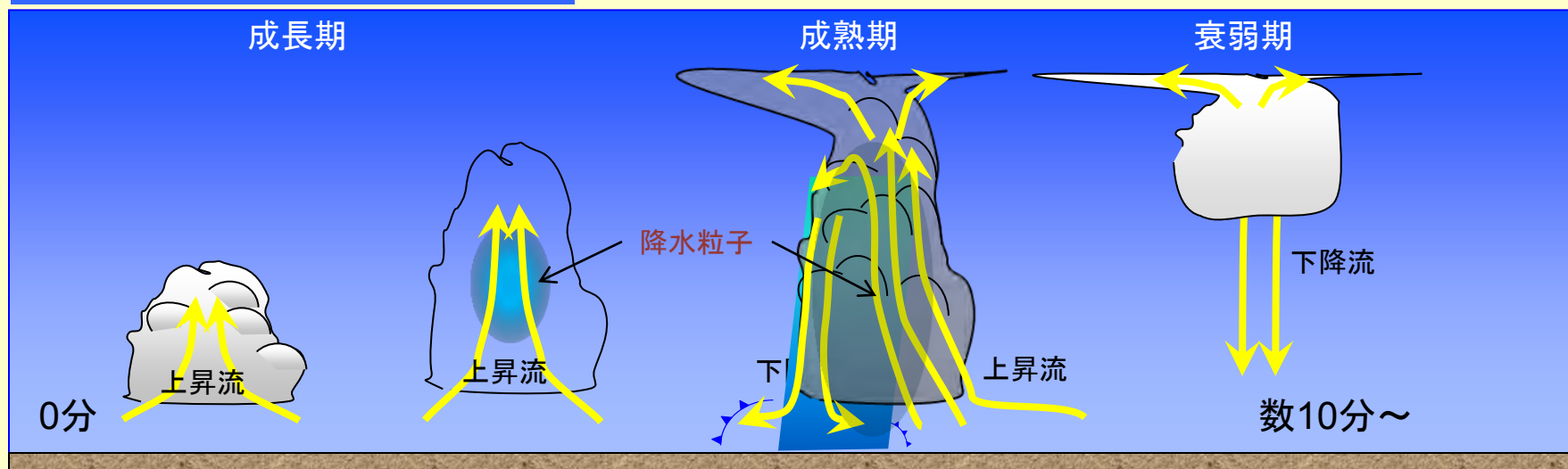
現時点では発生前の予測が非常に困難(「ゲリラ豪雨」などと呼ばれることもある)

積乱雲

局地的な大雨をもたらす積乱雲は、大気中の激しい対流現象であり、個々の積乱雲は、1時間程度の寿命。

集中豪雨では組織的な集団となって大雨をもたらす。

典型的な孤立積乱雲の一生の例



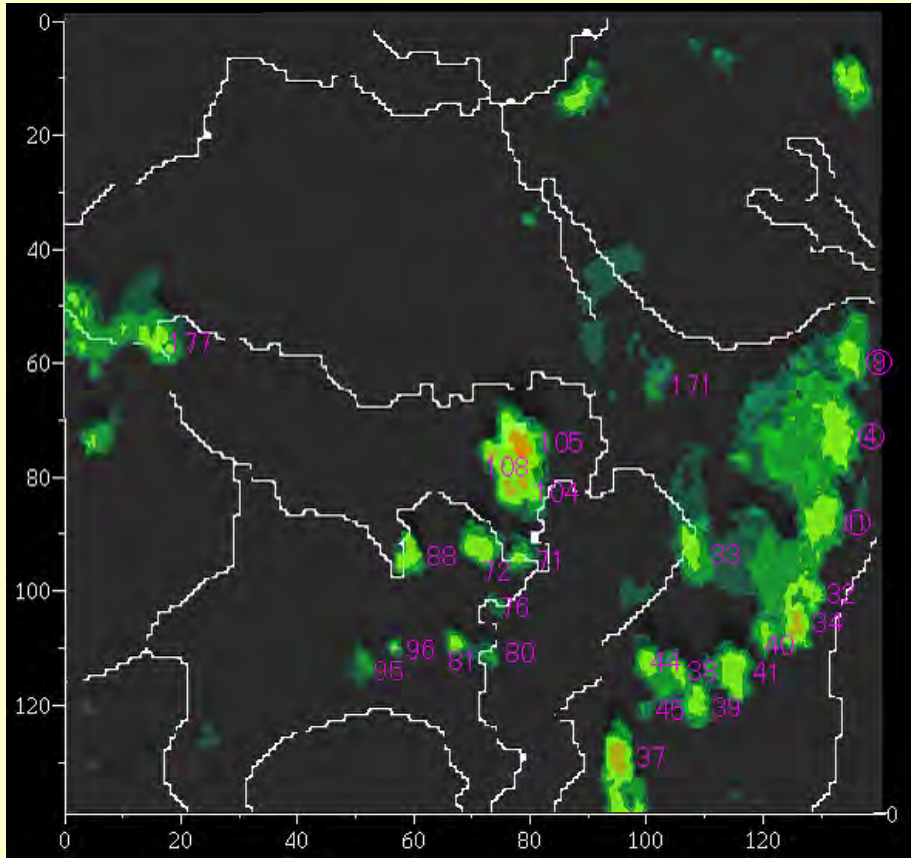
← レーダーが降水の存在を観測できる →

← レーダーが強い降水の存在を観測 →

← 地上で強い降水 →

← 積乱雲の一生 →

局地的大雨の例(平成20年8月5日)



140km四方の解析領域。2008年8月5日12時の反射強度30,40,50dBZの等値面を上から見た透視図。数字は積乱雲の番号。

9時から18時の間に179個の対流セルが出現

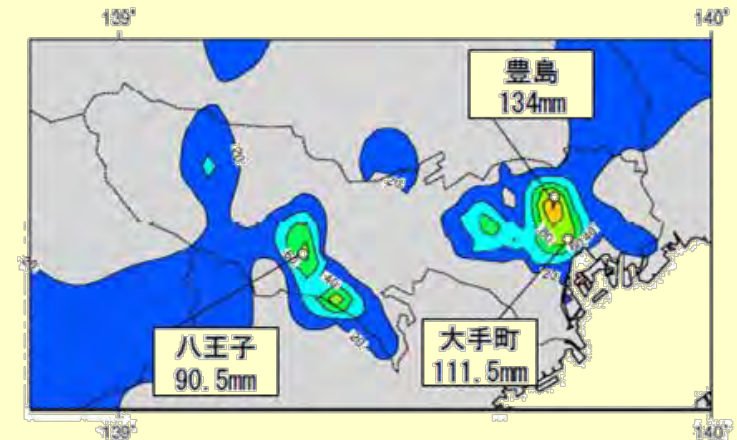
石原 (2010)

組織化しない積乱雲が各地に発生

⇒世田谷区雑司ヶ谷で下水道作業員事故

○日降水量分布図

平成20年8月5日



東京管区気象台気象速報(20.8.6)
降水量(mm)



注:降水量分布図はアメダス・東京都のデータを用いて描画しています。
(八王子・大手町はアメダス、豊島は東京都のデータ)

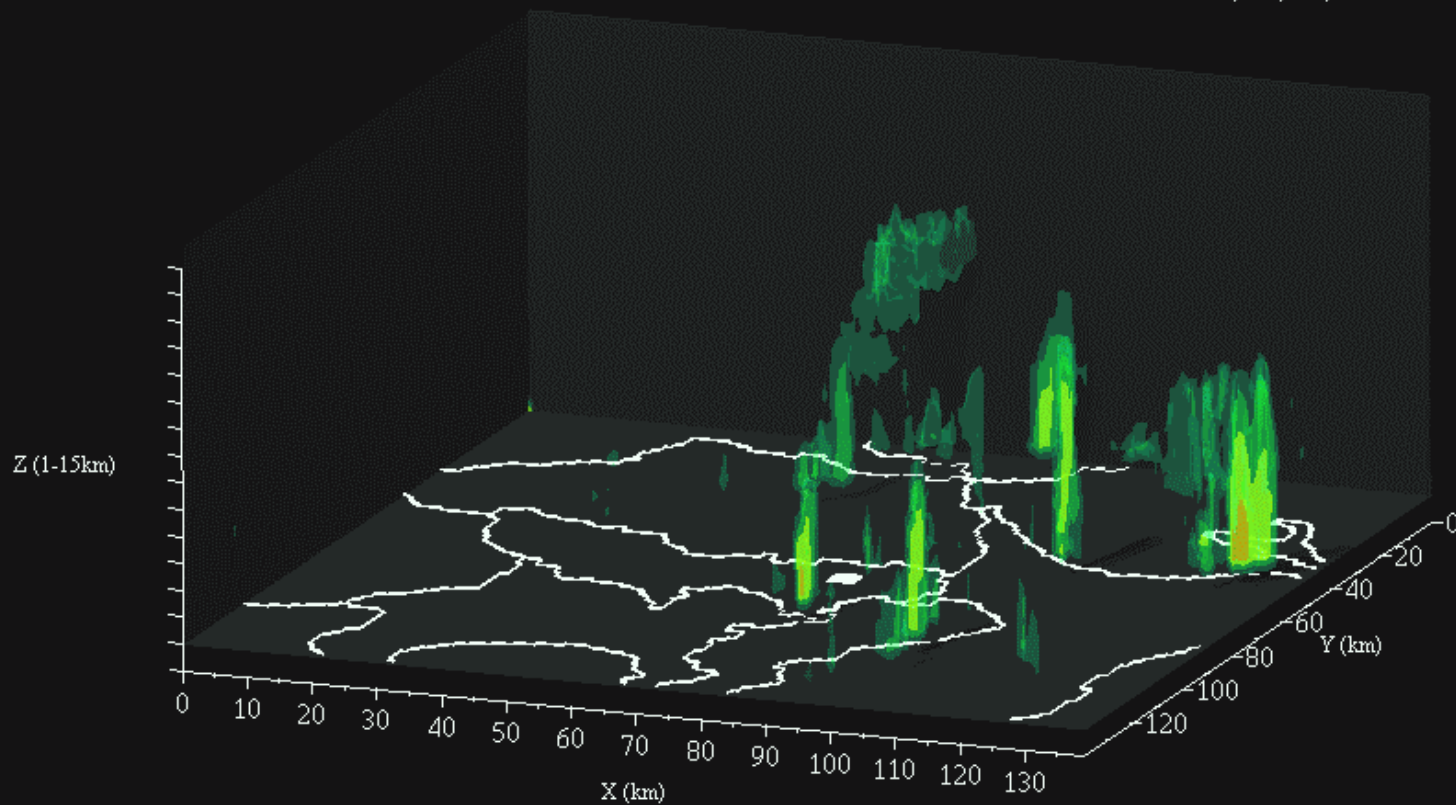
レーダーエコー図 09 時～18時

石原 (2010)

09:00JST

Thunderstorms on 05 August 2008

Iso-Surfaces of 20,30,40,50dBZ



9時から18時の間に179 個の対流セルが出現

局地的大雨の例

2008年7月28日



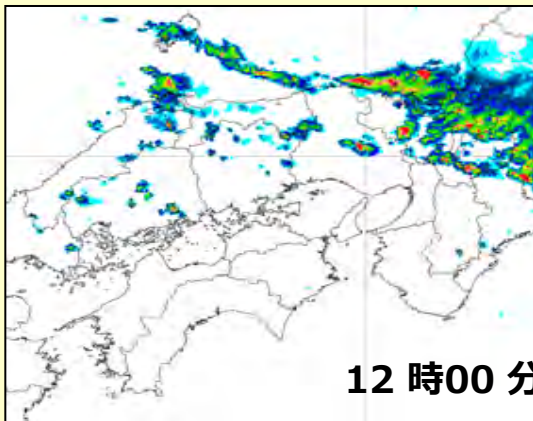
(a) 14:30 (-0.37m)



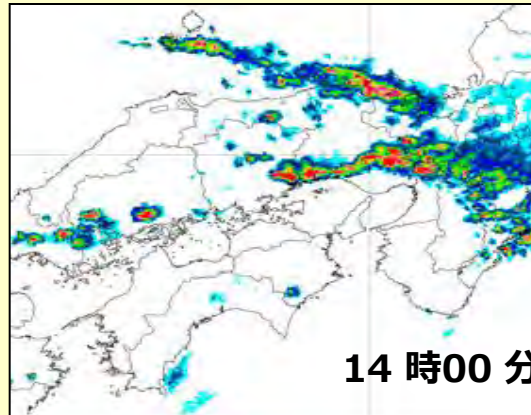
(b) 14:40 (-0.33m)



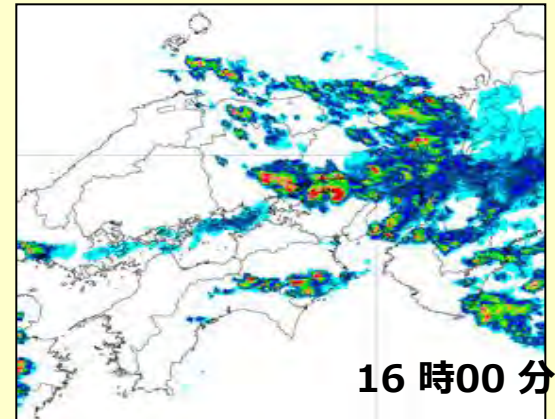
(c) 14:50 (1.01m)



12 時00 分



14 時00 分



16 時00 分

レーダー画像 (7月28日12時00分~16時00分)

非常に狭い範囲に線状降水帯 神戸市都賀川親水公園で増水事故

スーパーコンピュータと 気象庁の数値予報

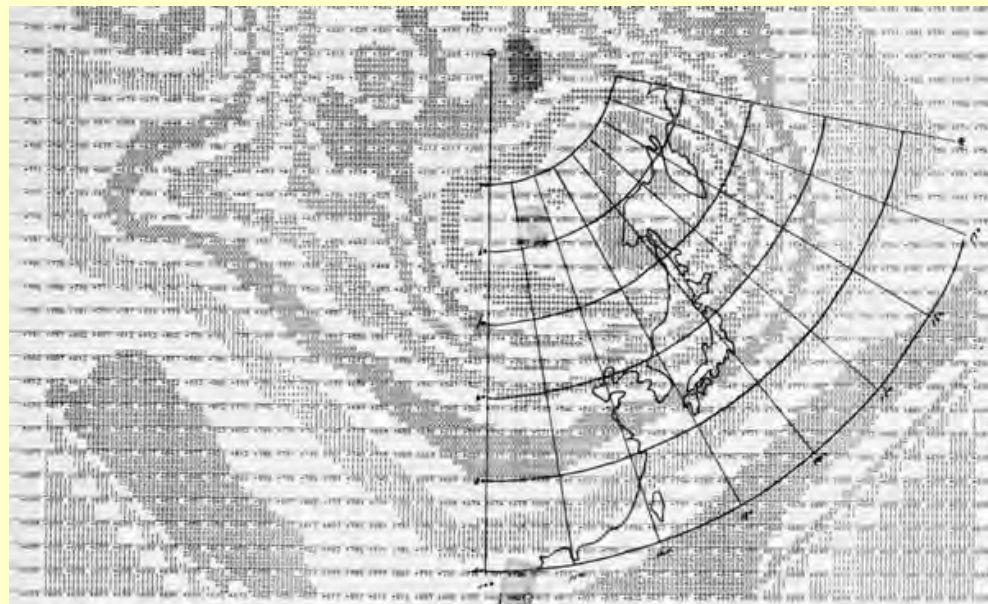
気象予測とコンピュータ

1950年、チャーニーらが最初の数値天気予報に成功

1959年、気象庁に日本初の大型計算機IBM704導入、翌年数値予報を開始

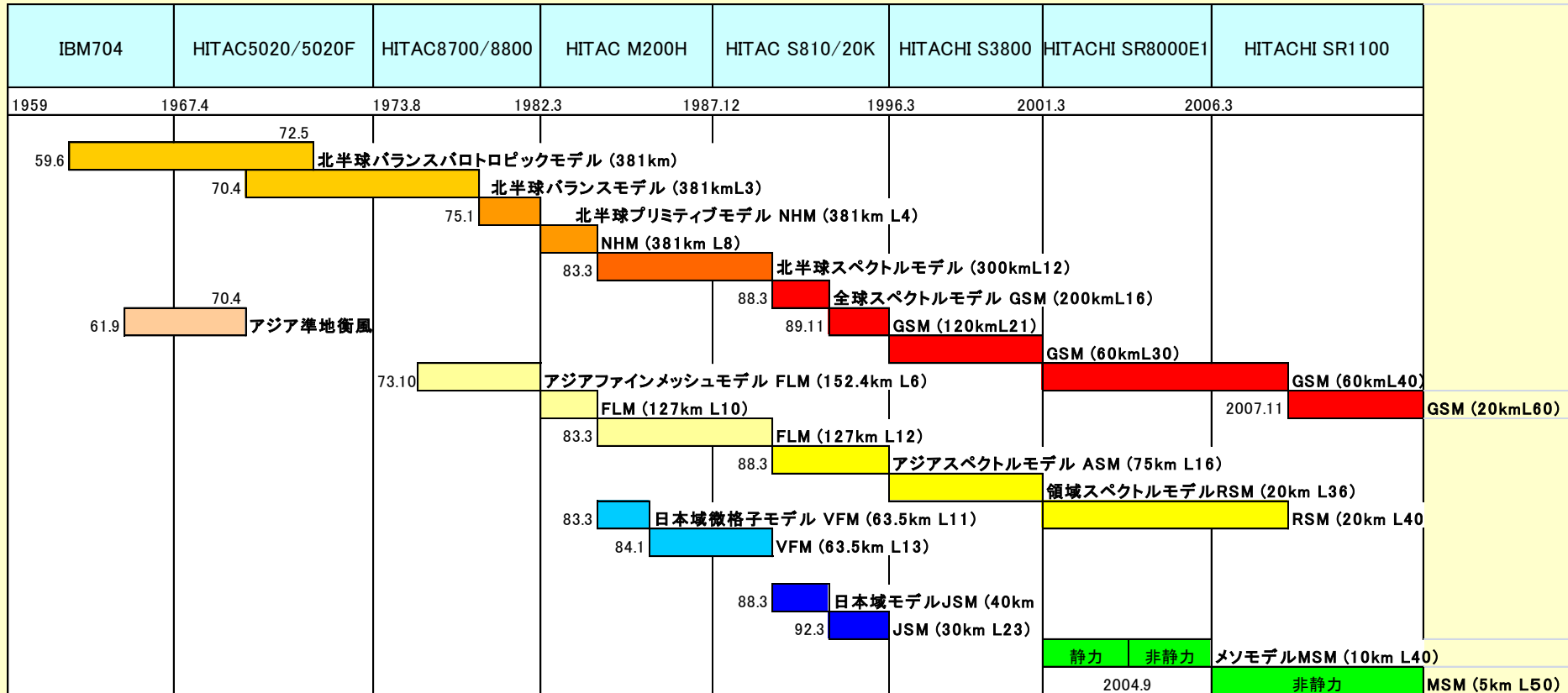


気象庁電子計算室IBM704



IBM704による1960年2月28日21時の
500hPa高度場解析
格子間隔380km

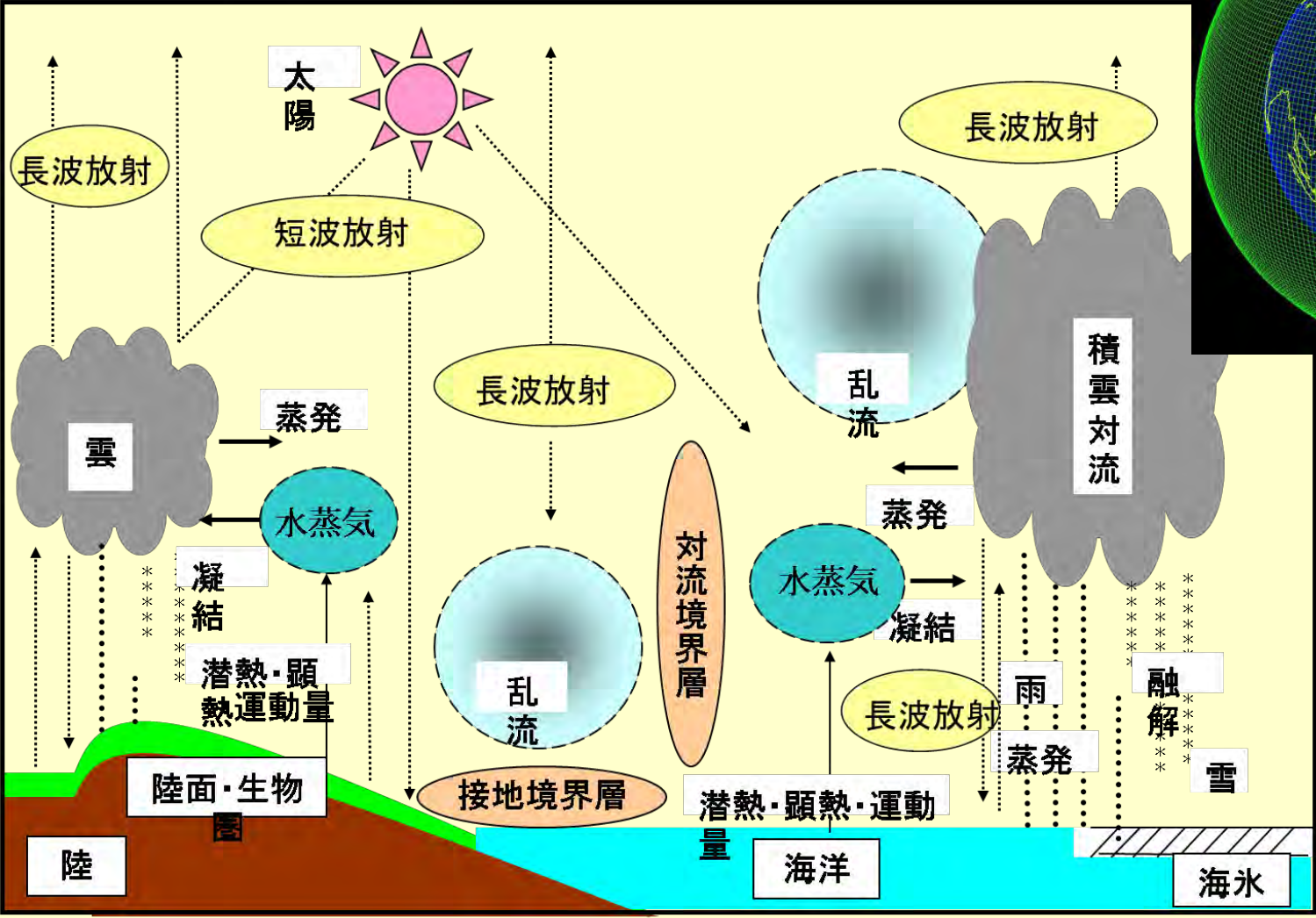
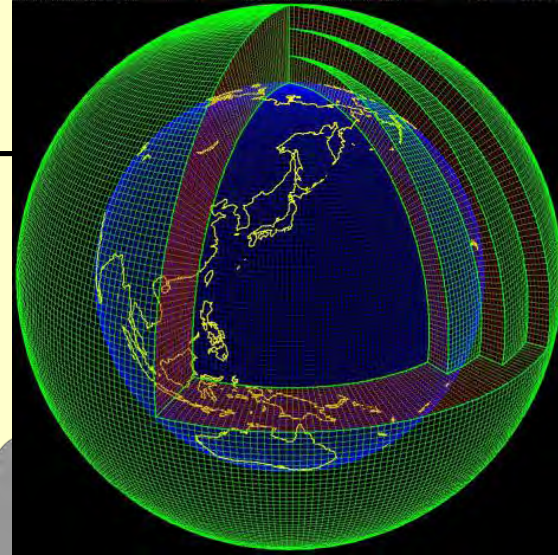
気象庁のコンピュータとモデルの変遷



現在の計算機システムは第8世代、更新の度に解像度を向上

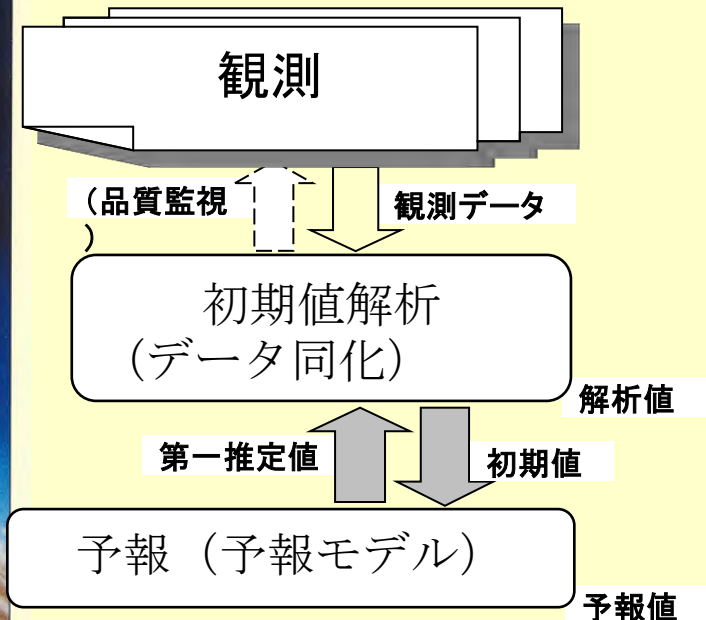
数値モデルによる大気現象の予測＝物理法則に基づいて、大気の状態の時間変化を定量的に求めて将来を予測する初期値問題

- ・モデル (領域、分解能、力学過程、物理過程)
- ・初期条件 (データ、解析手法) ・境界条件



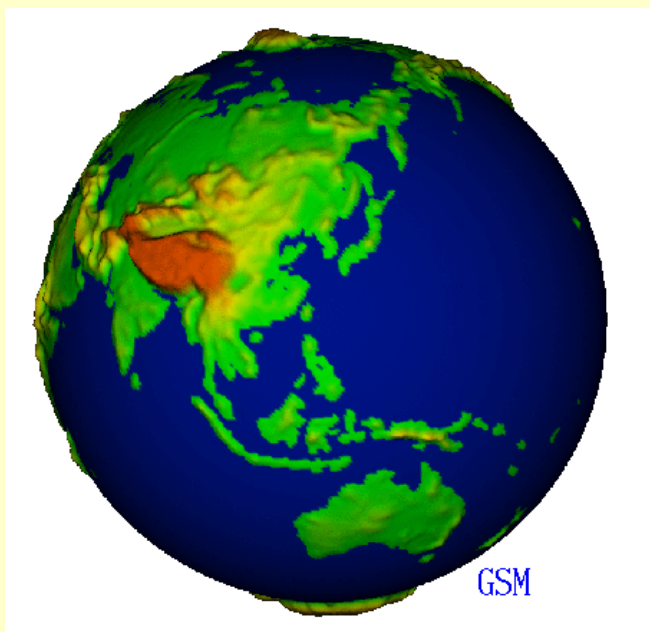
気象予測に必要な様々なプロセス

気象観測データと初期値作成



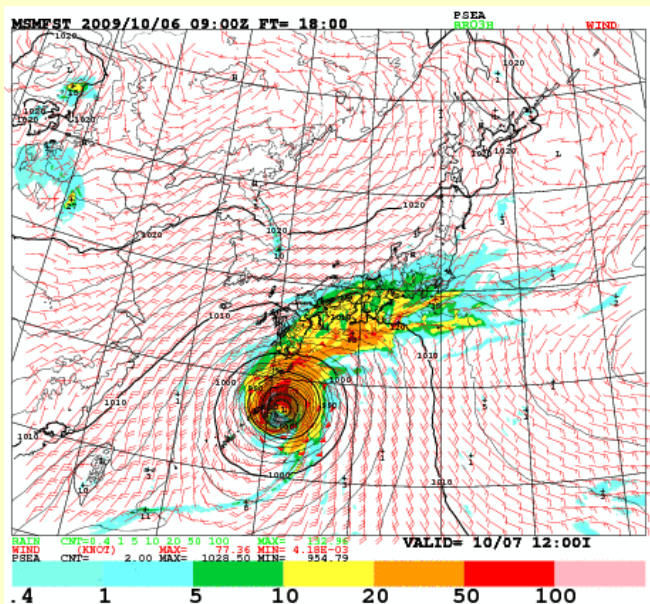
天気予報には観測データと初期値作成が大変重要
(気候予測と大きく異なる点)

現在の主な気象庁現業数値予報モデル



全球モデル (GSM)
9日予報
週間予報、天気予報等
データ同化 60 km60層
予報モデル 20 km60層

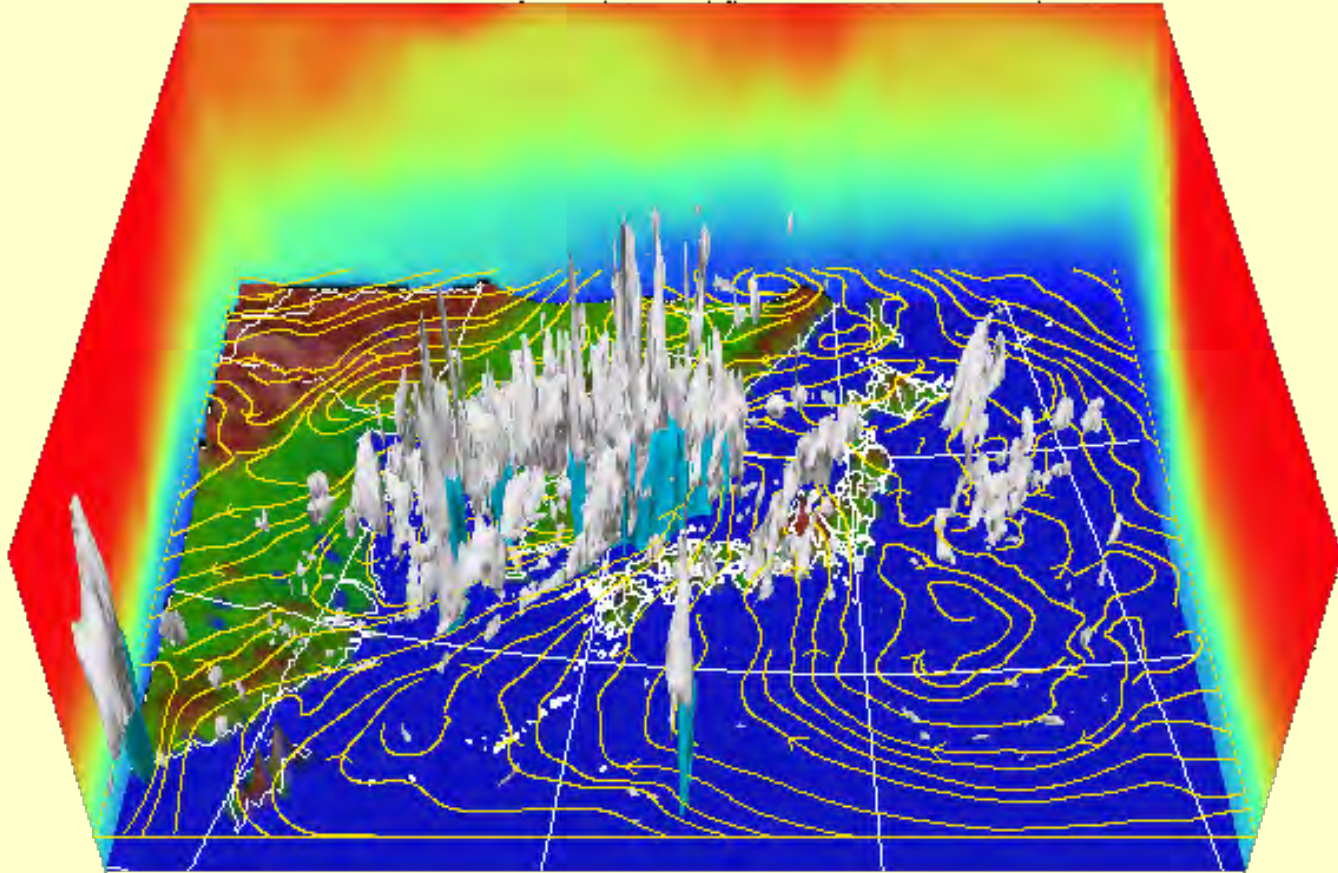
・・メソモデルに境界値を提供



メソモデル(MSM)
33時間予報
防災情報、航空予報等
データ同化 15 km40層
予報モデル 5 km50層

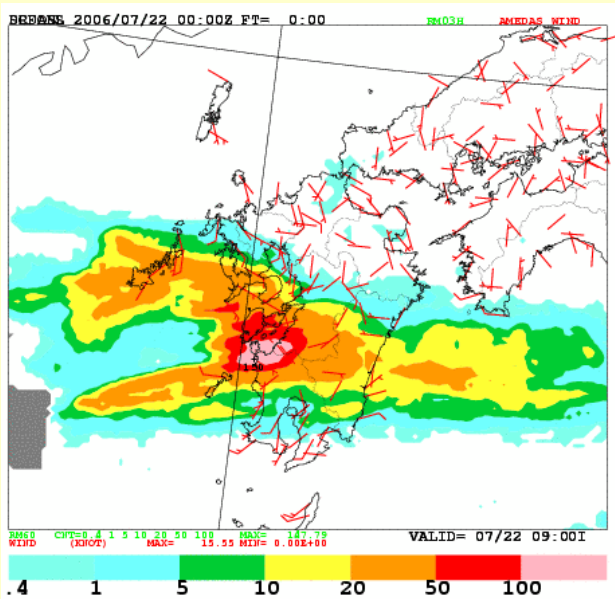
・・積乱雲はまだモデルの直接の予報対象にはなっていない

メソモデル(MSM)

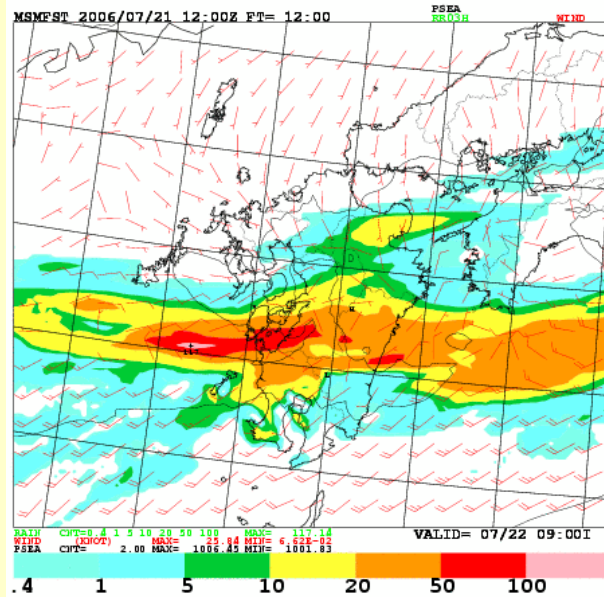


2004年9月から雲物理過程を含む非静力学モデルを導入
解像度は当初10km、2006年3月から5km

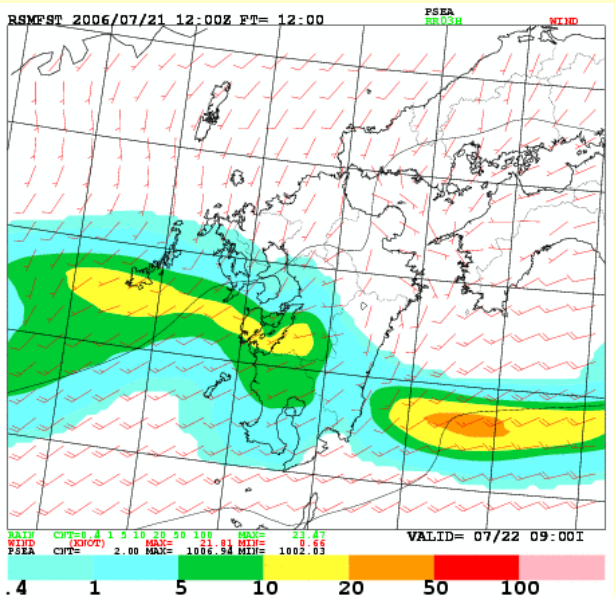
2006年7月22日の豪雨の予報例



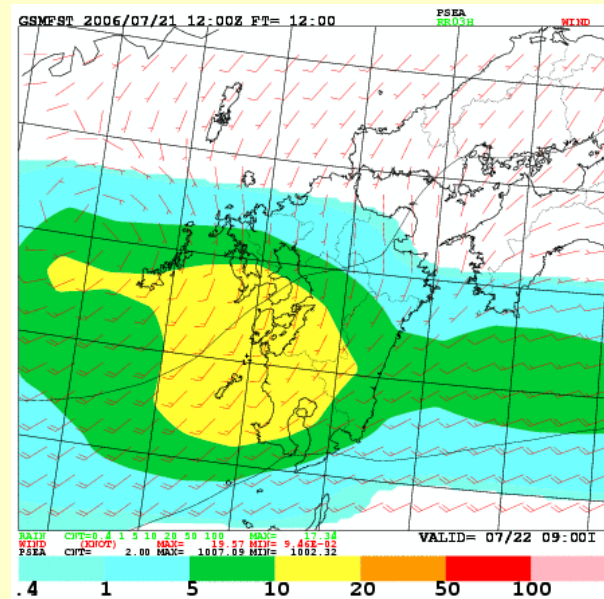
レーダーアメダス実況



5kmメソモデル(MSM)



20km領域モデル(RSM、当時)



全球モデル(GSM、当時60km)

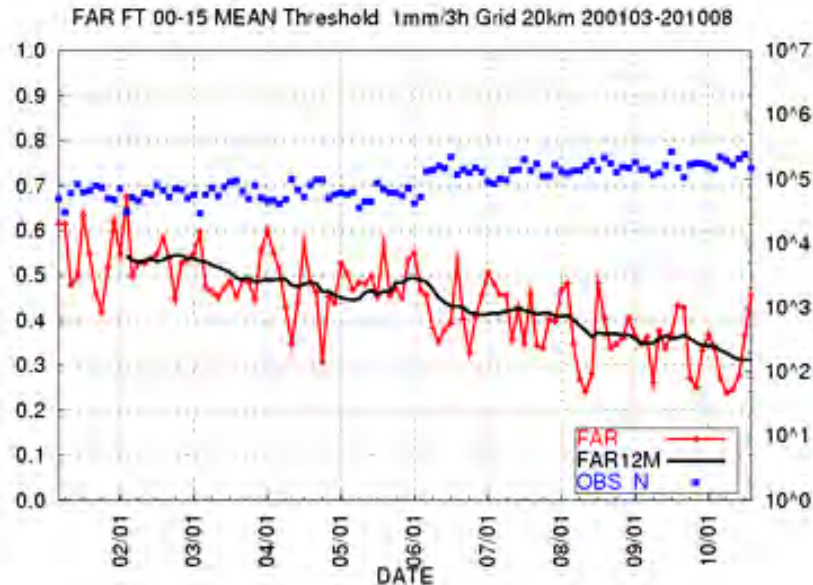
2006年7月19日9時前
3時間雨量

7月21日21時初期値
12時間予報

メソモデルは前線
性の大雨をある程
度予測

MSMの予測精度

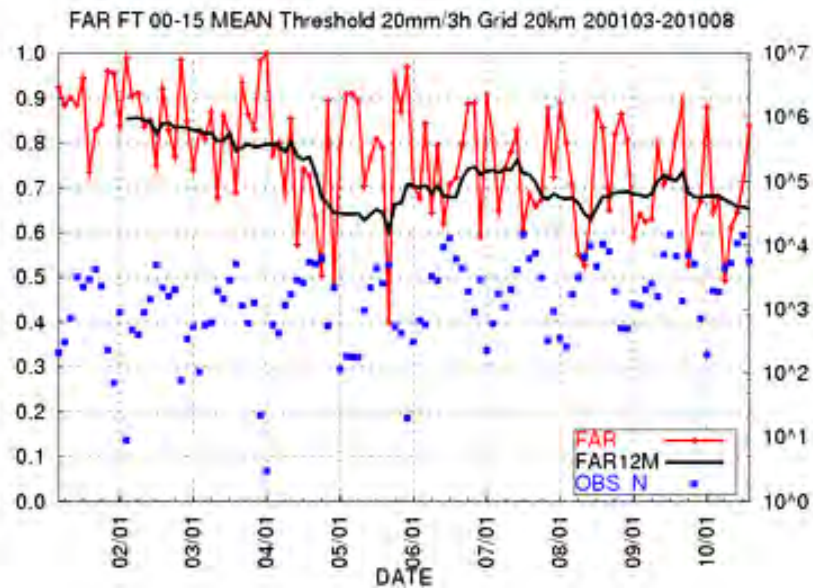
(2001年3月-2010年8月) (数値予報課検証による)



空振り率
弱い雨 (1mm/3hr)

降水の有無については、予測精度は
年々向上
当初60%近くが近年は30%前後に

モデルの改良と初期値作成手法の
高度化、新規データの利用



空振り率
強い雨 (20mm/3hr)

対流性強雨予測の絶対的な精
度は、依然不十分

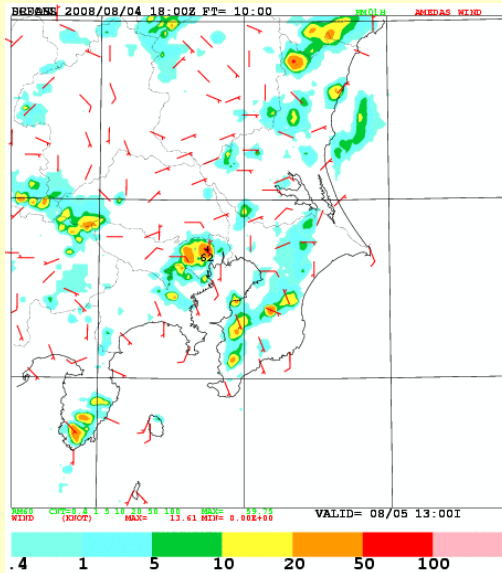
赤線は毎月のスコア、黒線は12カ月平均、青点は観測点の数

2008年の局地的大雨

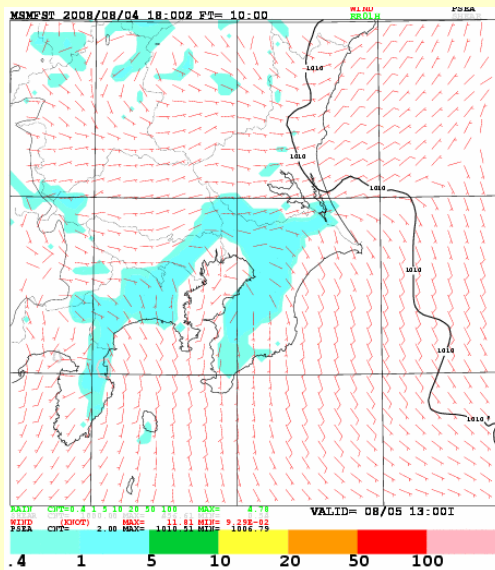
8月5日豊島区雑司が谷マンホール事故の時の予報

8月4日18UTC初期値
FT=10

12-13時の1時間雨量



解析雨量



MSM(5km)

降水域はある程度対応しているが、孤立積乱雲による局地的な強い雨は5kmモデルでは表現できていない

豪雨予測に向けた研究開発

局地的大雨の予測が難しい原因 と予測改善の方向性

1) 現象の空間的・時間的スケールが小さく、現在の数値予報では積乱雲を直接的な予測の対象にできていない。

⇒積乱雲の表現には、**雲を解像するモデル**(格子間隔2km以下)が必要

2) 数値モデルに取り込む観測データが十分でなく、初期値の精度が現象のスケールに対して十分でない。

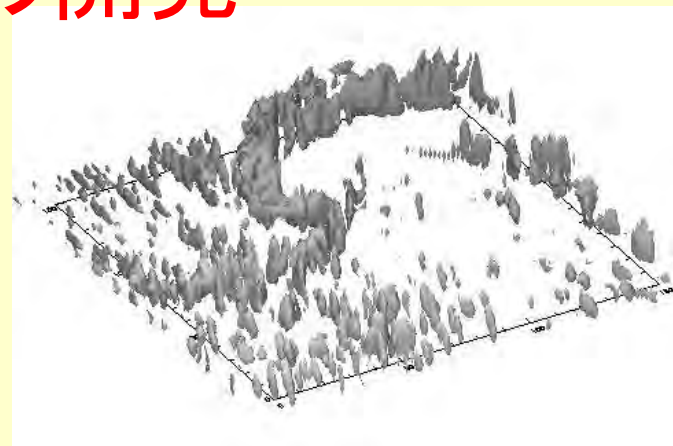
⇒現象のスケールに応じた**観測データをモデルに取り込む**(同化する)

3) 不安定な大気状態で発生する現象で、僅かな初期値や計算条件の違いで結果が大きく変わる。

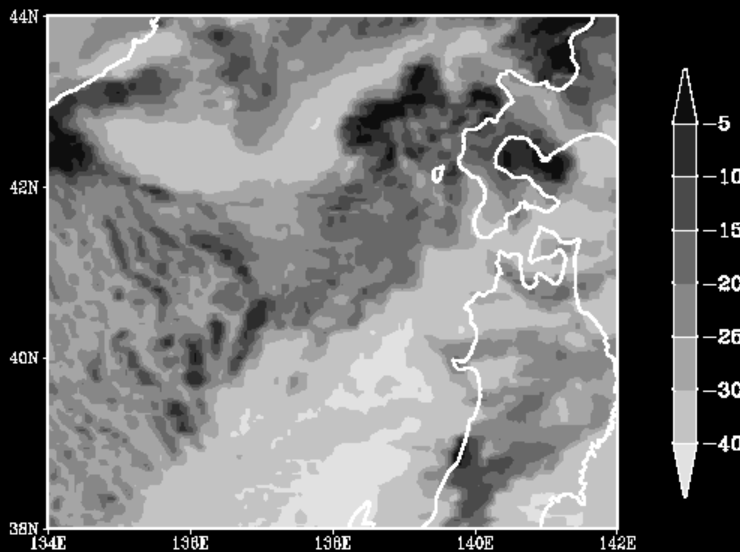
⇒初期値やモデルの不確定に基づく**予報の誤差を評価**する

雲解像モデルの開発

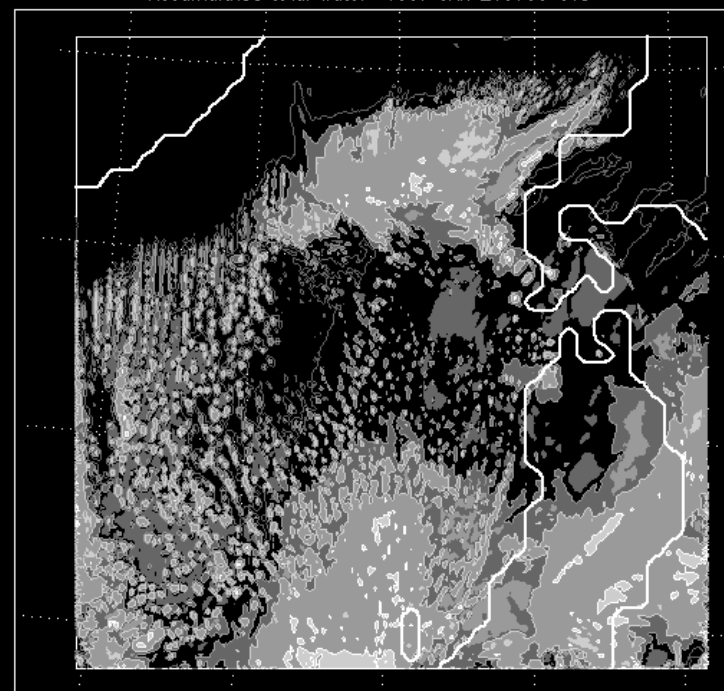
- 水平解像度2km
- 初期時刻 1997年1月22日6時



GMS-5 IR Data 1997 JAN 2108UTC



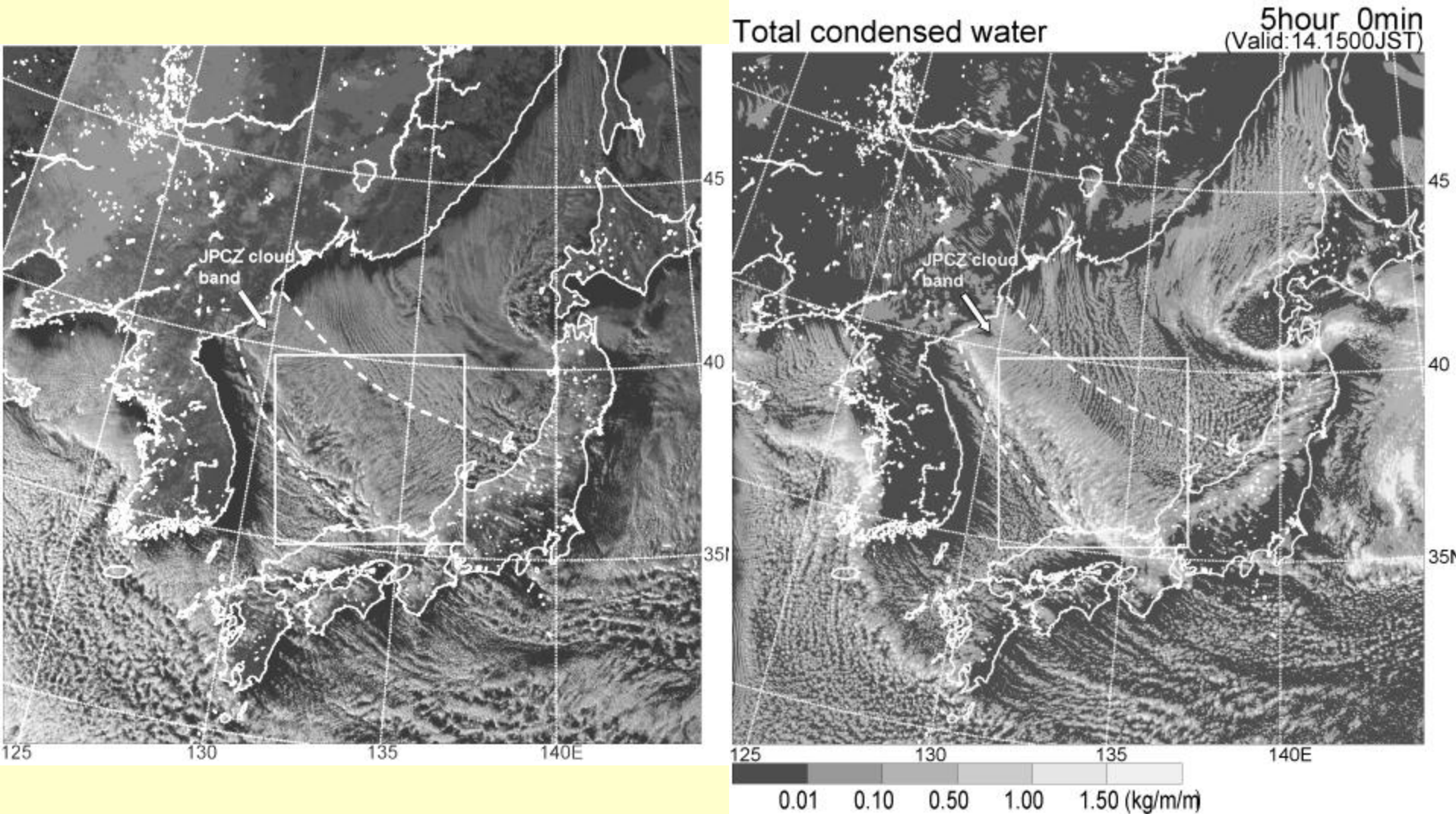
Accumulated total water 1997 JAN 210750 UTC



気象衛星ひまわり赤外画像

気象研究所でのシミュレーション

雲解像モデル

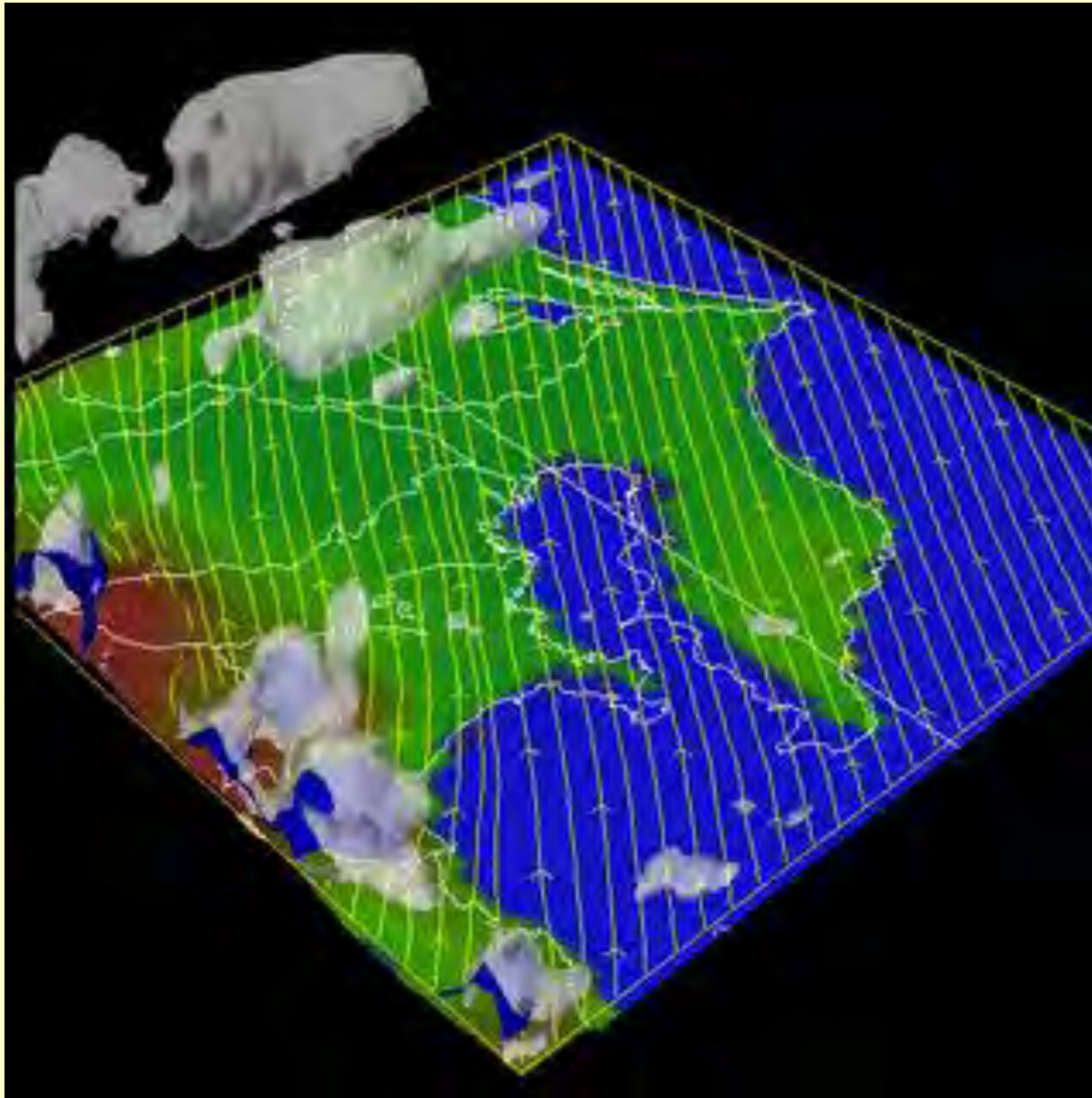


左：2001年1月14日午後3時の気象衛星（GMS-5）による可視画像。

右：格子間隔1kmの気象庁非静力学モデルによる予報（地球シミュレータで計算）。

Eito et al. (2010)

気象庁での2km局地モデルの開発



2003年4月30日3時初期値12時間予報

局地モデル

(10月から気象庁で試験運用開始)

解像度 : 2km60層

積雲対流をパラメタライズせずに表現

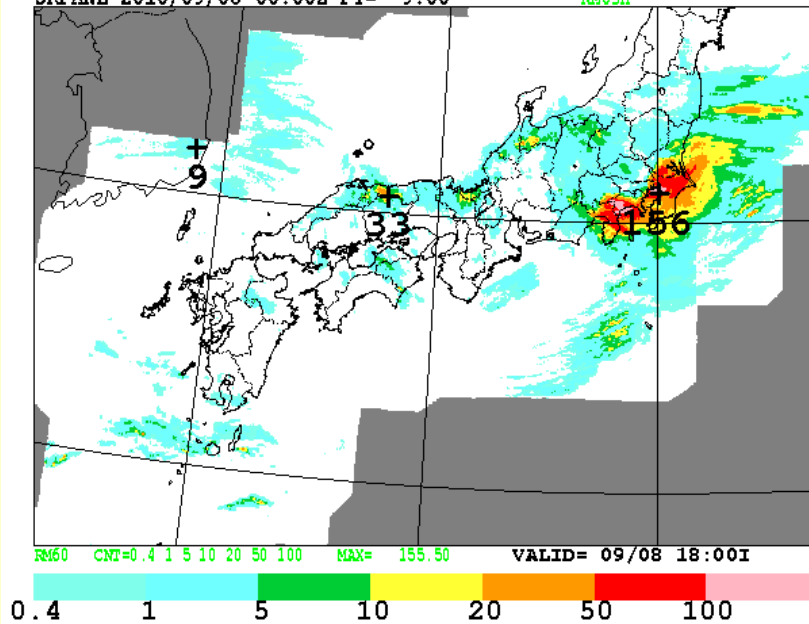
強雨の表現が改善

高速データ同化により迅速な結果配信

今年9月8日首都圏での集中豪雨、
15-18時の降水量の予測例

SRFANL 2010/09/08 00:00Z FT= 9:00

RR03H

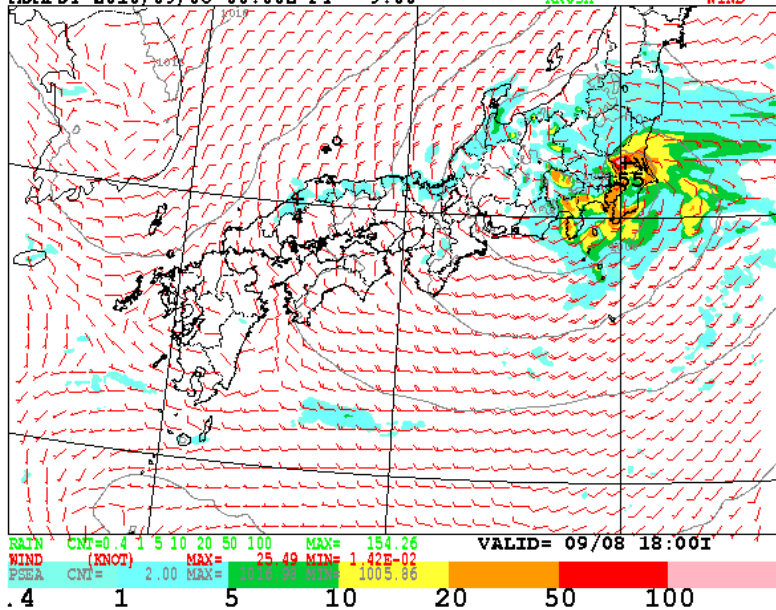


実況解析雨量

MSMFST 2010/09/08 00:00Z FT= 9:00

PSEA
RR03H

WIND

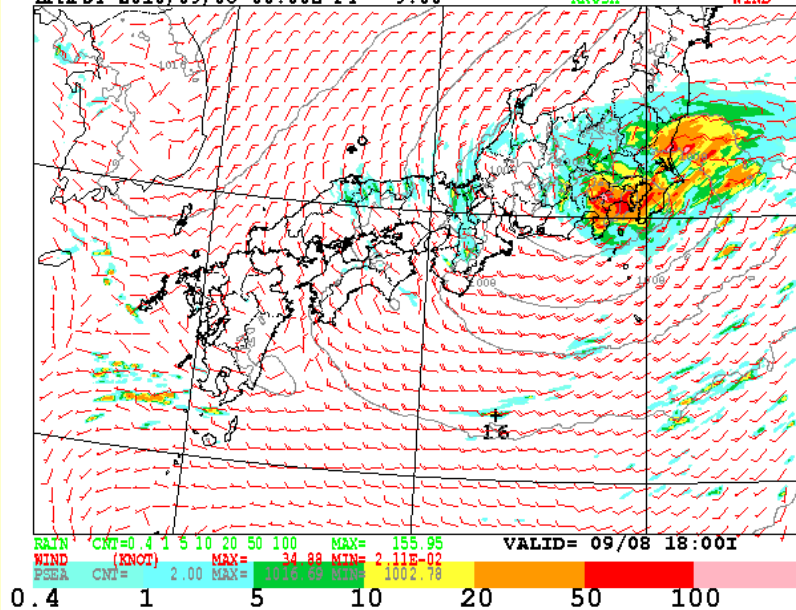


MSM(5km格子)

LFMFST 2010/09/08 00:00Z FT= 9:00

PSEA
RR03H

WIND



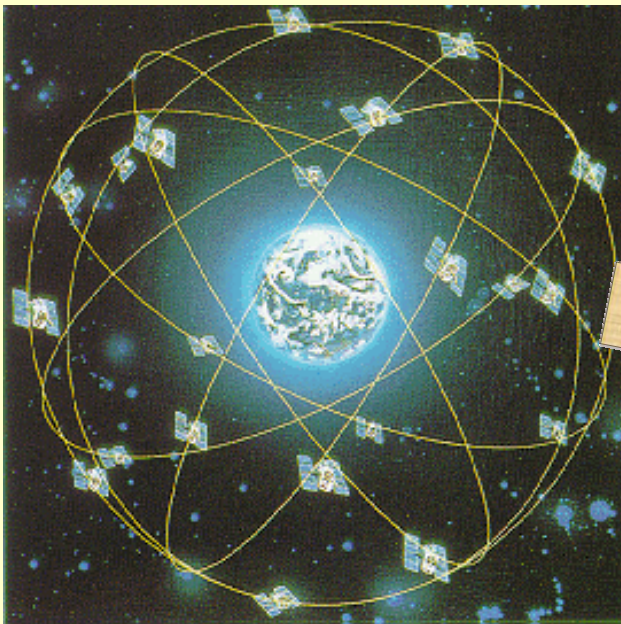
局地モデル(2km格子)

観測データをモデルに取り込む

GPS観測による水蒸気量データの利用

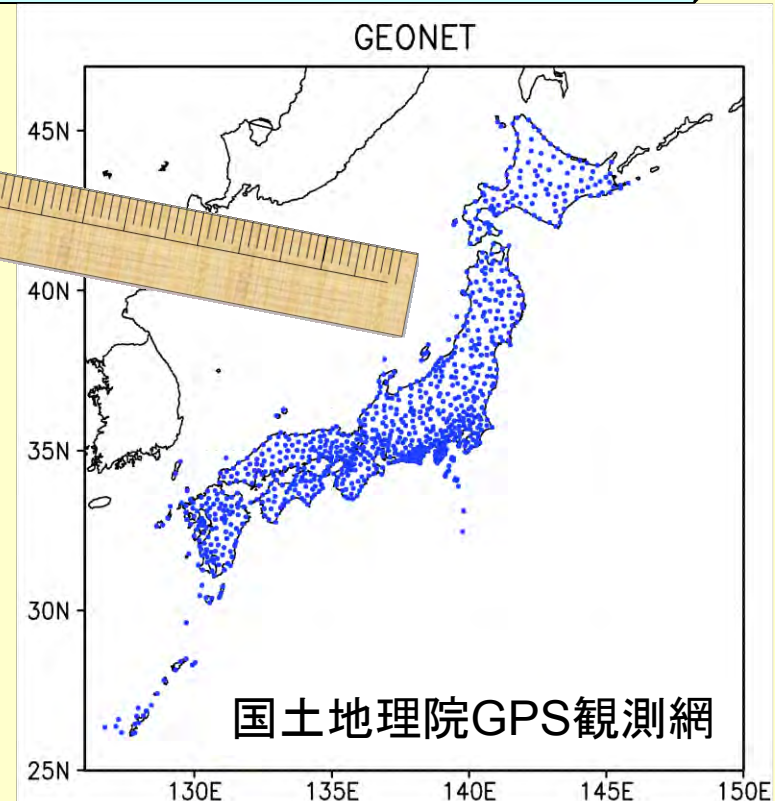
大気や水蒸気によって電波の到達
時間が変化

GPS電波の遅れを利用して、
空気中の水蒸気量を推定

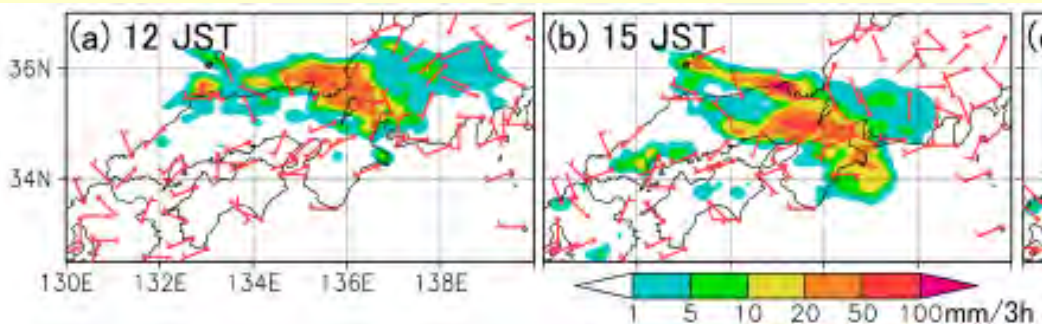


$$DL = 10^{-6} \int_s \left[77.6 \left(\frac{P_d}{T} \right) + 71.98 \left(\frac{e_w}{T} \right) + 3.754 \times 10^5 \left(\frac{e_w}{T^2} \right) \right] ds$$

AMeDASとほぼ同等の密度で水蒸気解析が
可能に 2009年10月からMSMでも利用



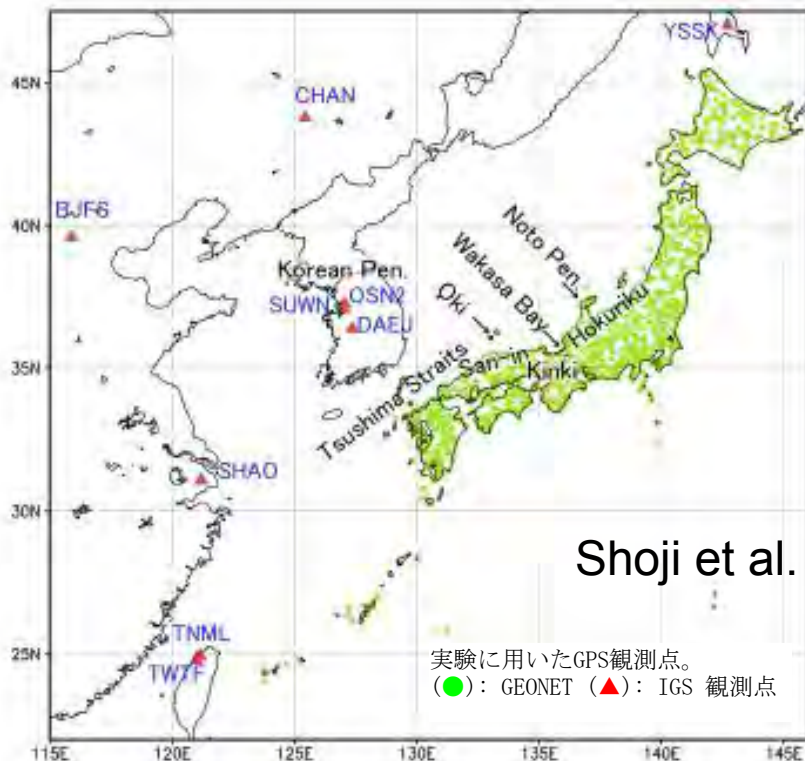
2008年7月28日，北陸地方及び近畿地方の大雨



2008年7月28日の解析雨量による前3時間降水量

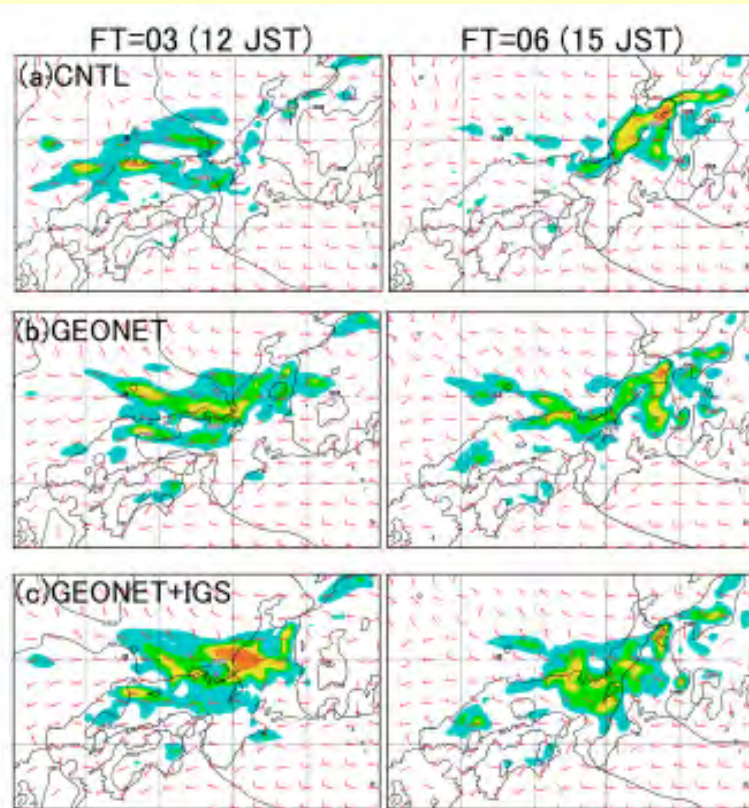
気象庁メソ解析システムを用いたGPS同化実験

GEONETに加えて国外GPS地点のデータを同化



Shoji et al. (2009)

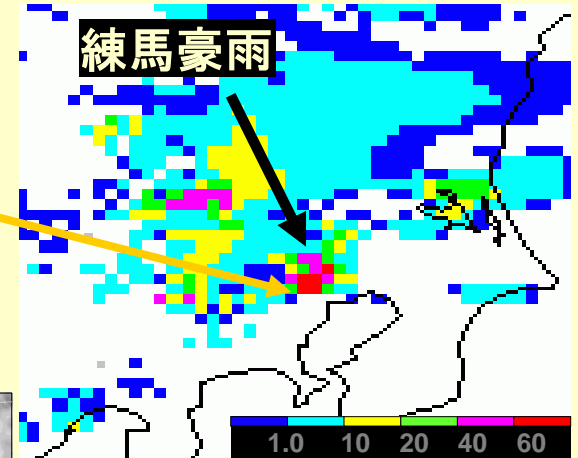
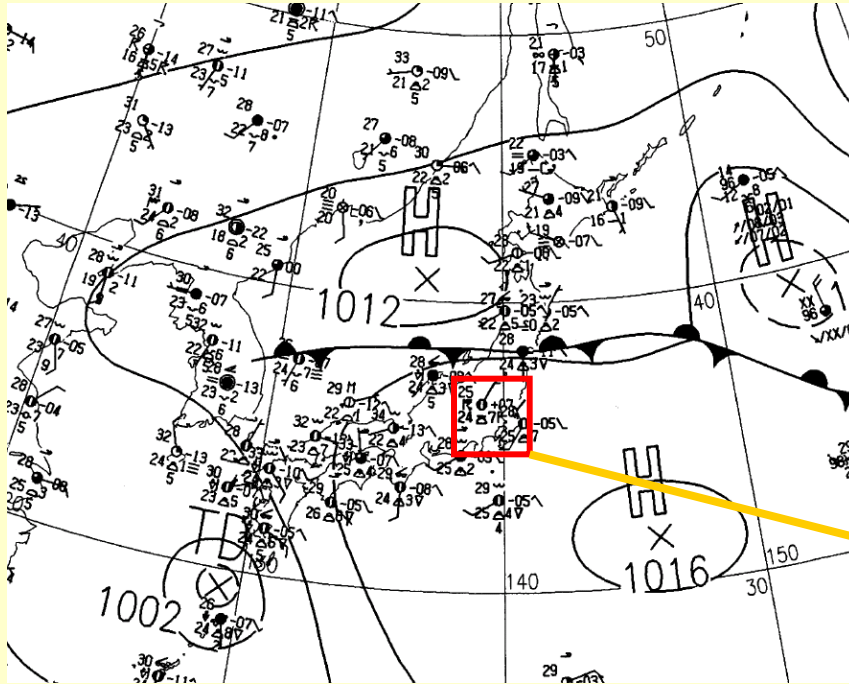
実験に用いたGPS観測点。
 (●): GEONET (▲): IGS 観測点



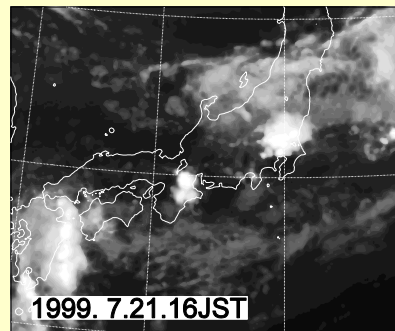
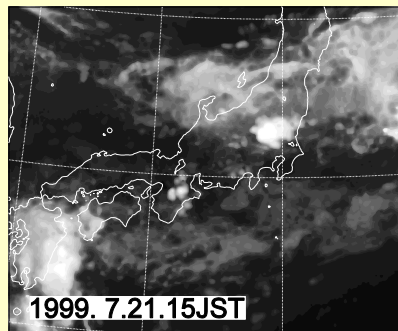
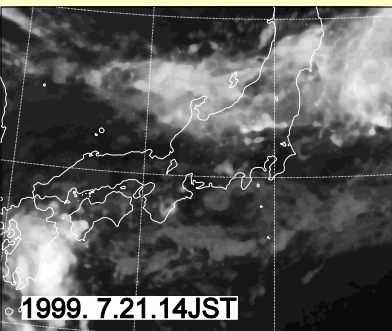
7月27日09時初期値の10kmNHIによる前3時間降水量。a) 通常のデータのみによる予報。b) 国内GPSの可降水量を同化した場合。c) 国外GPS 観測網データを追加した場合。

1999年7月練馬での局地的大雨

- 東京都練馬で、15-16時にかけて111mmの雨を観測
- 地下室への浸水で一人の男性が死亡。



地上天気図 1999.07.21 15JST

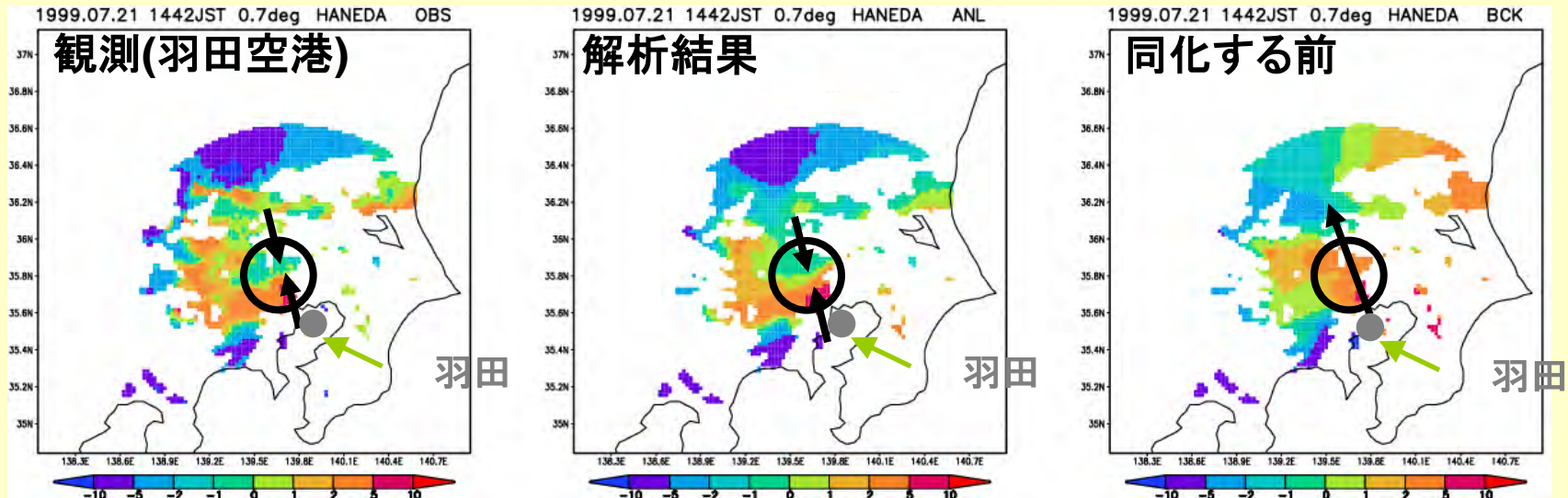


210 222 234 246 258 270 282 294(K)

210 222 234 246 258 270 282 294(K)

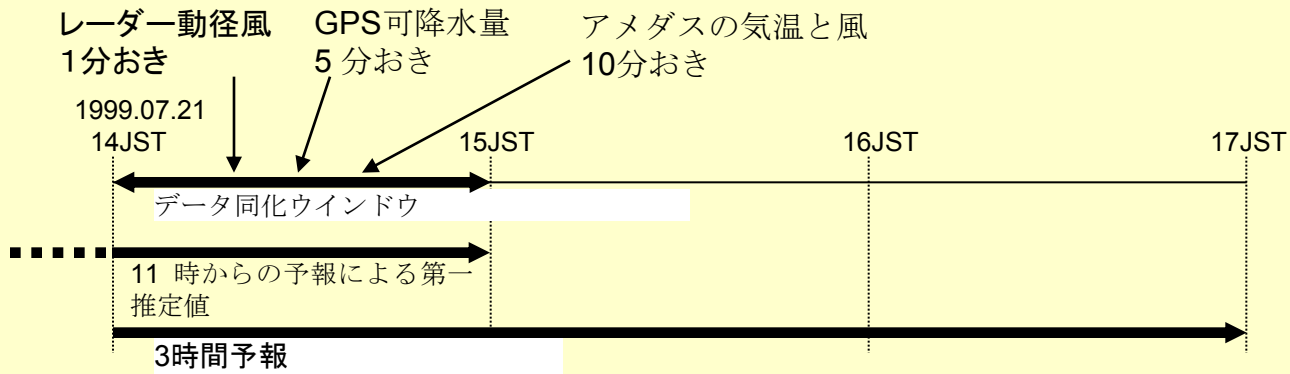
210 222 234 246 258 270 282 294(K)

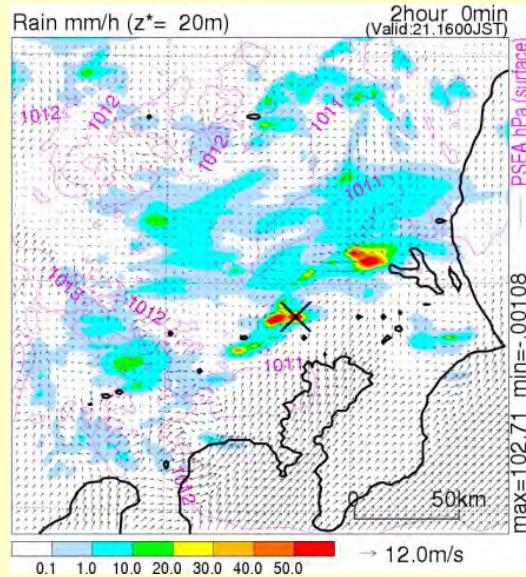
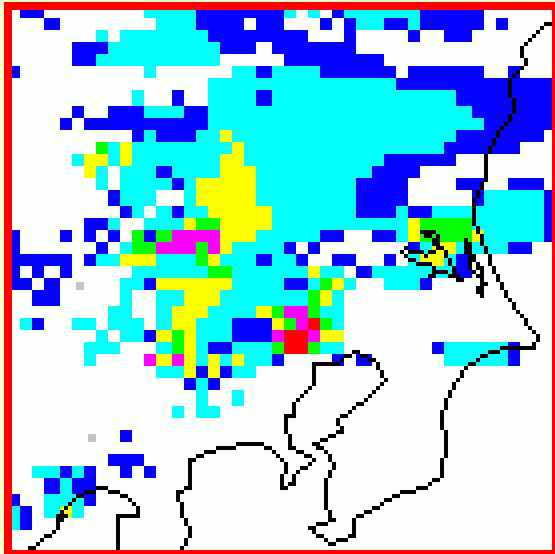
水平解像度2kmの非静力学4次元変分法で、ドップラーレーダ動径風やGPS可降水量を同化



1442 JST(練馬セルの発生時刻)。仰角0.7度。○は練馬セルの発生位置。

データの取り込みで海風による下層の収束がモデルで表現されたことが重要





•ドップラーレーダ動径風、アメダスデータ同化によって、地表風の収束線を表現

•GPS可降水量の同化によって水蒸気量を修正

・・豪雨をもたらした深い対流の再現に世界で初めて成功

成功はいくつかの好条件にもよる
(同化モデルは湿潤過程を含まない)

ゲリラ豪雨に予測システム 気象研究所が開発

大量の雨が狭い範囲に短時間降る「ゲリラ豪雨」を予測できる新システムを気象庁気象研究所が開発した。現状より地域を10倍細かく分けて分析、1999年の東京都練馬区の豪雨について発生前の情報だけで再現するのに成功した。同庁は今後、予報に導入したい考えで、今年夏に神戸市都賀川や東京都豊島区で起きたような増水事故の防止に役立つと期待される。

現在の天気予報は、雨量や風向きなどの情報を20分おきに、最短で1時間ごとに読み込んでいる。長さ数時間の積乱雲が突如出現する様子を表せず、ゲリラ豪雨の予測は無理だった。

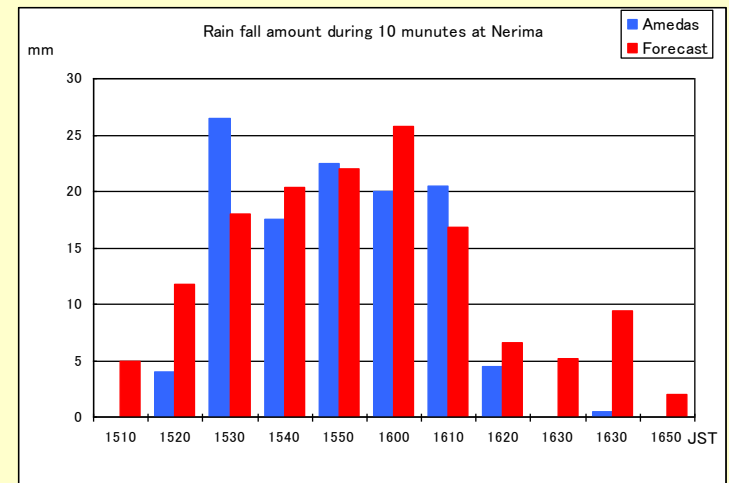
川畑拓矢主任研究官ら

は、2分おきに細かく計算するシステムを開発。ドップラーレーダーでとらえた風の向きと強さ、地域気象観測システム(アメダス)の気温、全球測位システム(GPS)による水蒸気量の情報をもつ1分10分ごとに入力、局所的な天気の変化も予測できる。

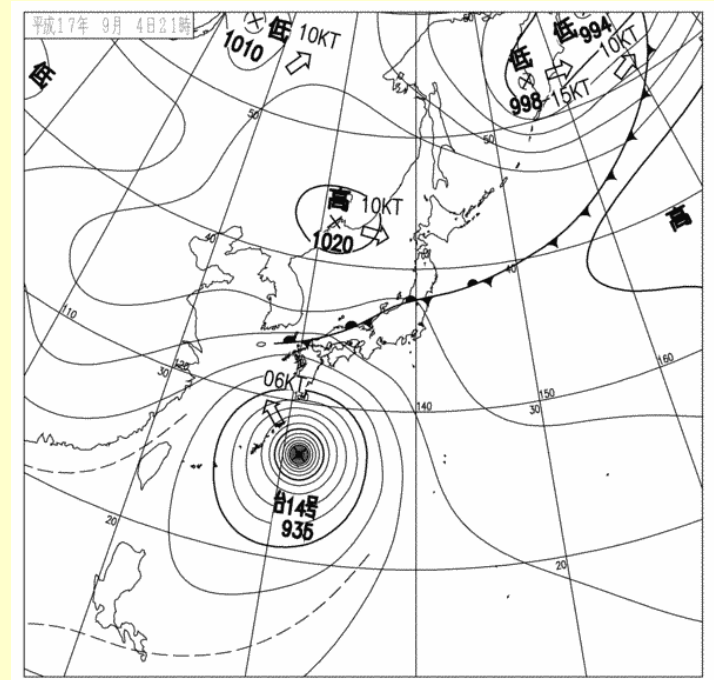
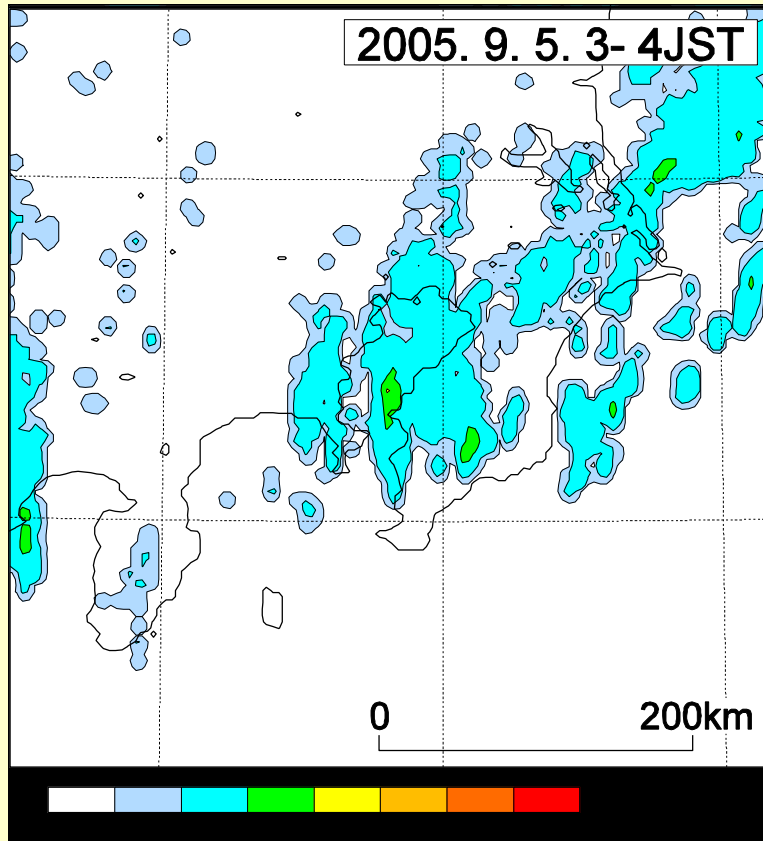
99年7月21日午後練馬に降った豪雨を、当日の2〜3時の気象情報を使って分析したところ、10分あたり15mmを超える雨が3時半〜4時10分に降ると推定され、観測と一致した。

ただ、新システムは現在の100倍以上の計算量が必要で、予報に活用するにはコンピューター能力を大幅に増強する必要がある。

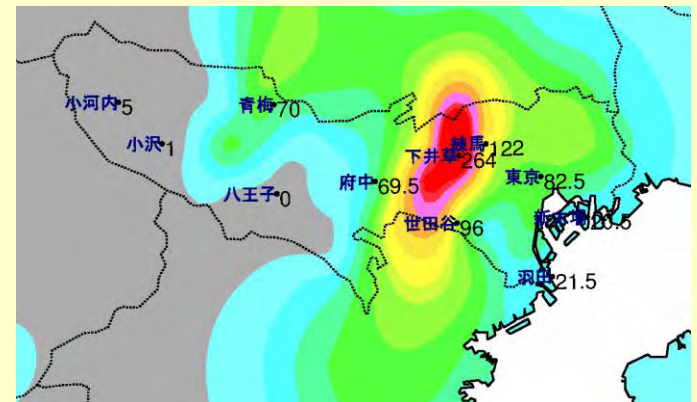
Kawabata et al. (2007)



2005年9月4日杉並豪雨



2005年9月4日、深夜から翌朝にかけて東京杉並区を中心に1時間100mmを超える豪雨。神田川、妙正寺川、善福寺川などが氾濫し、中野区と杉並区で3200棟が床上、床下浸水

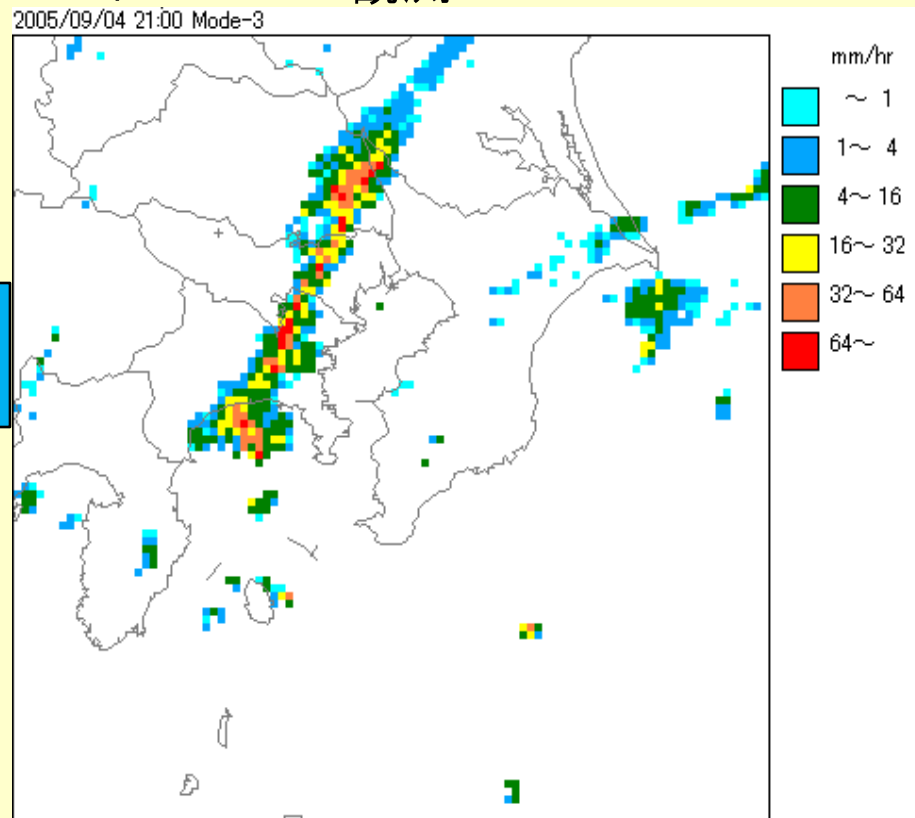
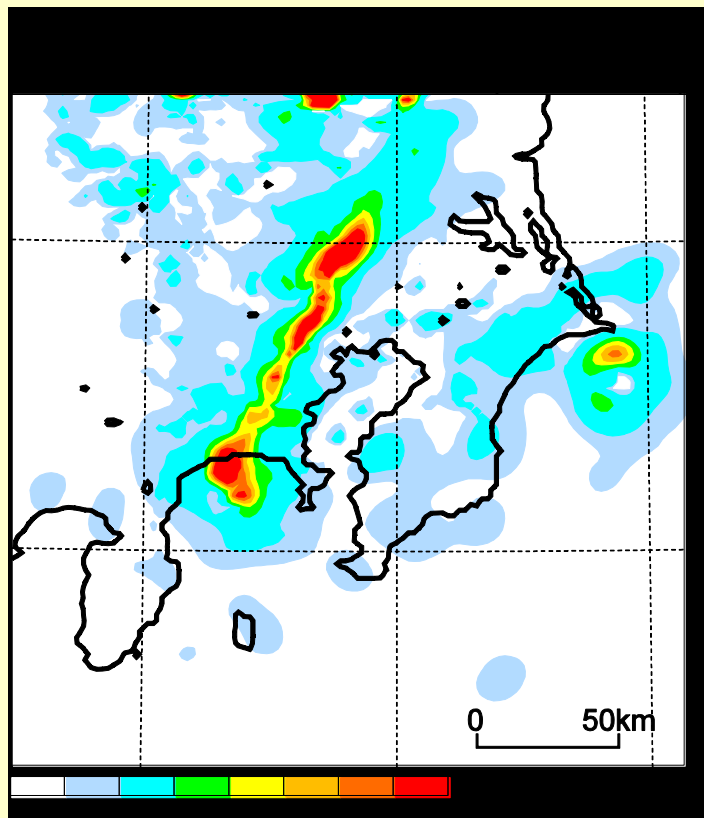


2005年9月4日杉並豪雨の同化実験

4DVAR解析

降水強度 (mm/h)

観測



同化ウインドウ内 2100JSTまでの
の再現状況

練馬のケースと同様なデータに加え、レー
ダー反射率を1分おきに同化

アンサンブル予報技術の開発

局地豪雨:

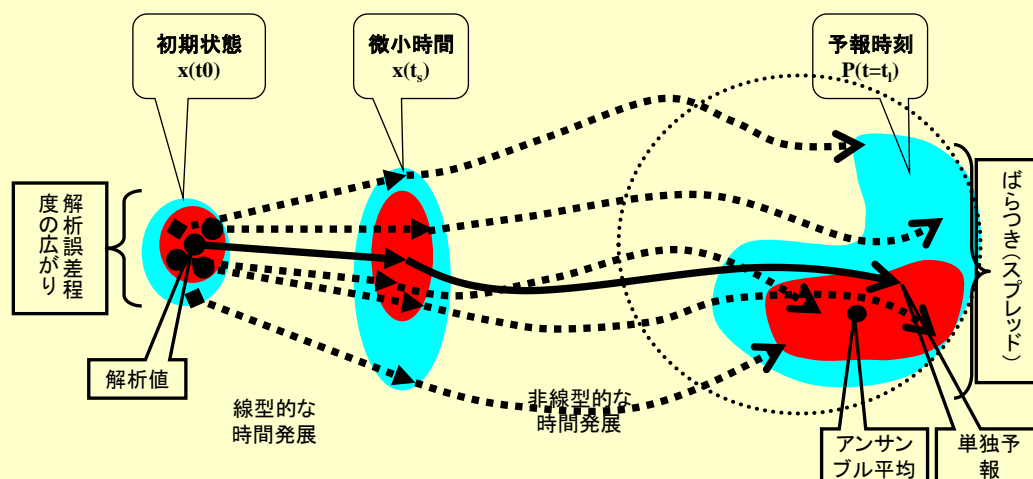
強制の弱い場でのメソ対流系による降水

・予報結果が初期値や条件の僅かな違いに敏感

→初期値やモデルには不可避の誤差がありそれが時間とともに増大

..個々の積乱雲を半日以上前から決定論的に予測することは、本質的に不可能

初期値等に含まれる誤差の時間発展を、摂動を与えた複数例の数値予測から見積る



1) 単独予報よりも統計的に精度が良い

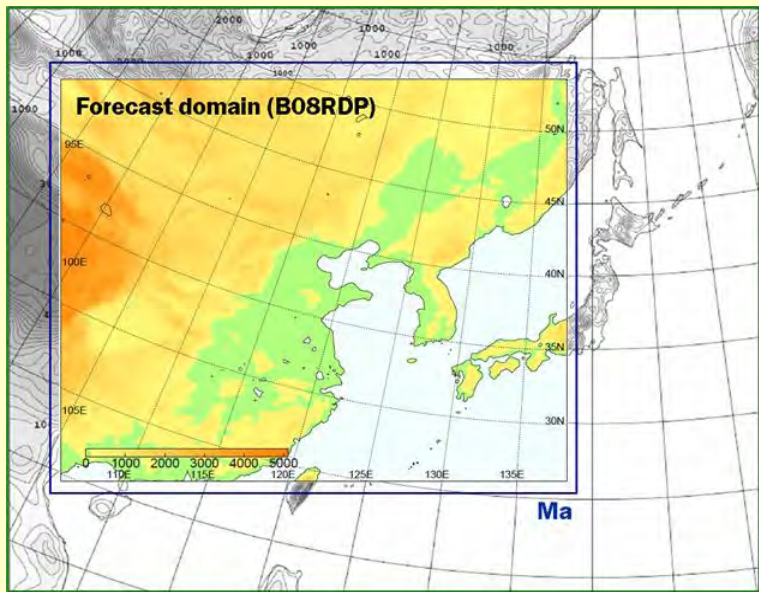
2) コストロスモデルの応用など、確率予報に基づく意思決定が可能になる

・週間予報や季節予報では実用化済み、メソ予報への応用が課題



WWRP北京オリンピック予報実証/研究開発プロジェクト (B08FDP/RDP)への参加

Sydney2000FDPに続く世界天気研究計画(WWRP)の国際研究プロジェクト Tier1領域アンサンブル 中国(NMC/CMA,CAMS/CMA)、米国(NCEP, NCAR)、カナダ(MSC)、日本(MRI/JMA)、オーストリア/フランス気象局(ZAMG)
 水平解像度 15 km、領域: 3500km × 3000km、(113E, 39Nを中心)、36時間予報。



北京域で4次元変分データ同化を実行、各種初期摂動手法をテスト
 気象研究所技術報告(HP)に掲載

朝日新聞
2008.9.8

アンサンブル予報で当てる

「日本の気象予報は、いまだかつて、どれくらい当たるか、という疑問が、その間接的な形で、北京オリンピックの予報実証プロジェクトを通じて、改めて問われることになった。アンサンブル予報という手法で、従来の予報よりも、より正確な予報が期待されている。その予報の精度を、北京オリンピックの予報実証プロジェクトを通じて、改めて問われることになった。」

「アンサンブル予報とは、複数の天気パターンを短時間で計算し、その中から最も適切な予報を選択する手法である。従来の予報よりも、より正確な予報が期待されている。」

「従来の予報の精度を、北京オリンピックの予報実証プロジェクトを通じて、改めて問われることになった。」

「アンサンブル予報の精度を、北京オリンピックの予報実証プロジェクトを通じて、改めて問われることになった。」

日本の天気予報、金メダル級

北京五輪で国際実験

アンサンブル予報による気象予報の精度を、北京オリンピックの予報実証プロジェクトを通じて、改めて問われることになった。アンサンブル予報という手法で、従来の予報よりも、より正確な予報が期待されている。その予報の精度を、北京オリンピックの予報実証プロジェクトを通じて、改めて問われることになった。」

ゲリラ豪雨に应用期待

「ゲリラ豪雨に应用期待」

「ゲリラ豪雨に应用期待」

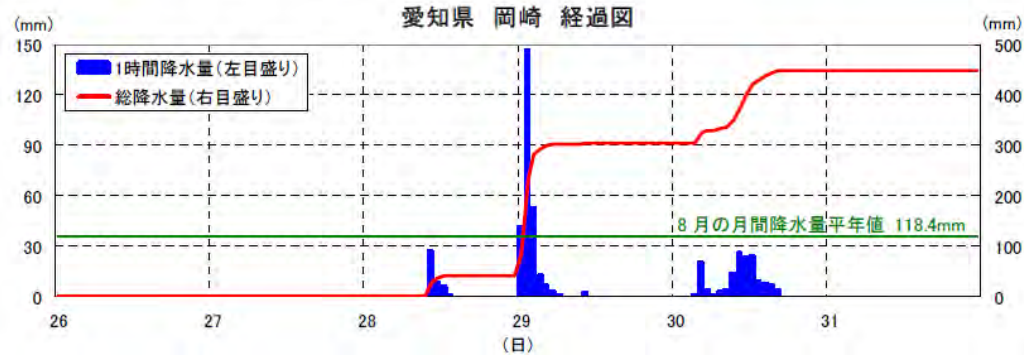
「ゲリラ豪雨に应用期待」

産経新聞
2008.9.20

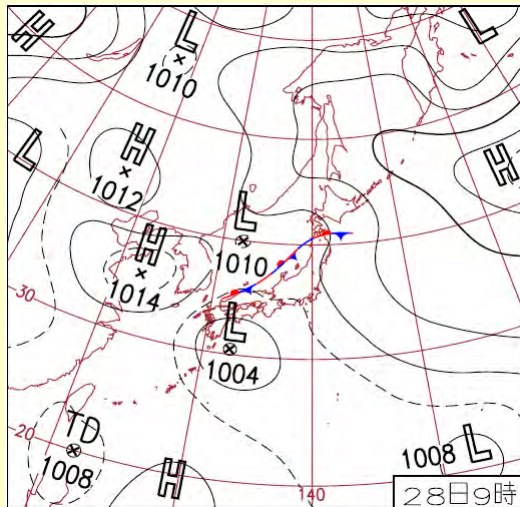
2008年8月岡崎豪雨への適用

- 停滞した前線の影響で、2008年8月28日夜から29日未明にかけて、関東・東海地方で激しい雨。
- 岡崎市では1時間100mm以上の猛烈な雨を記録。
- メソ解析を初期値にした予報では、豪雨の再現はできなかった。

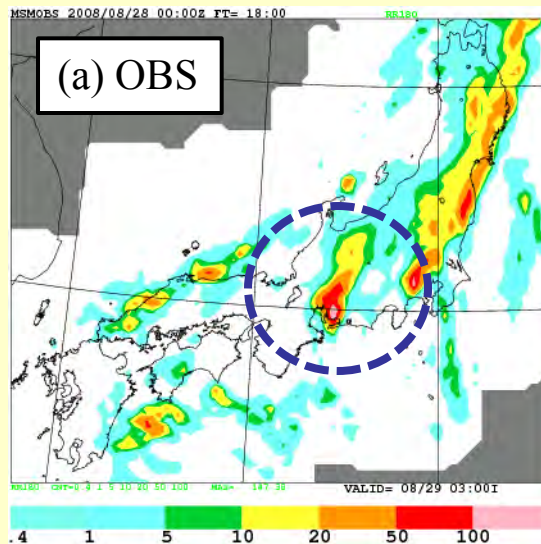
降水量時系列図 (8月26日~31日)



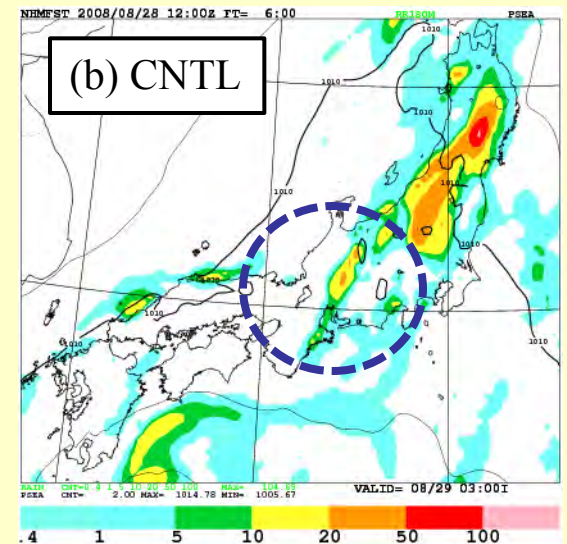
→ 北京プロジェクトで開発したシステムによるアンサンブル予報実験



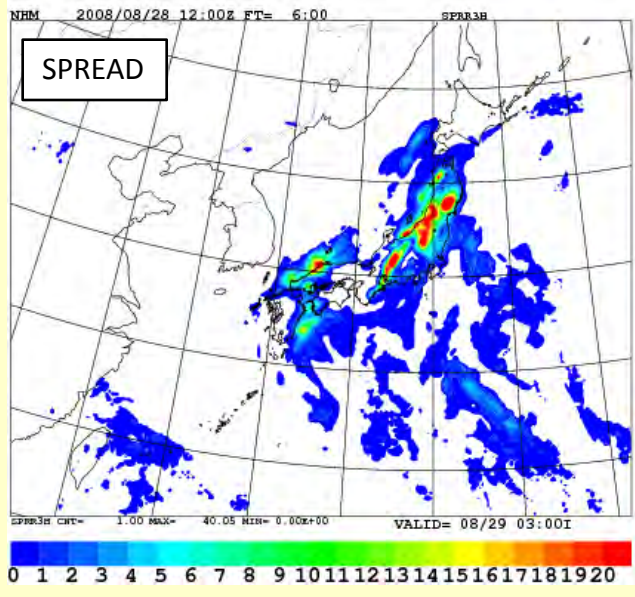
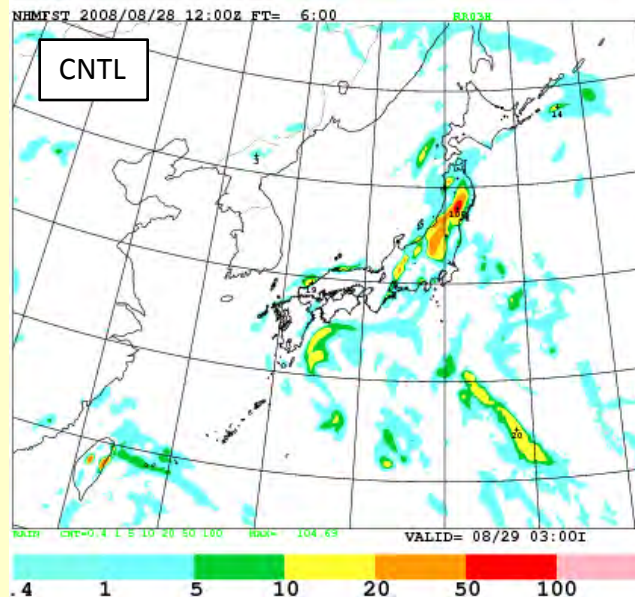
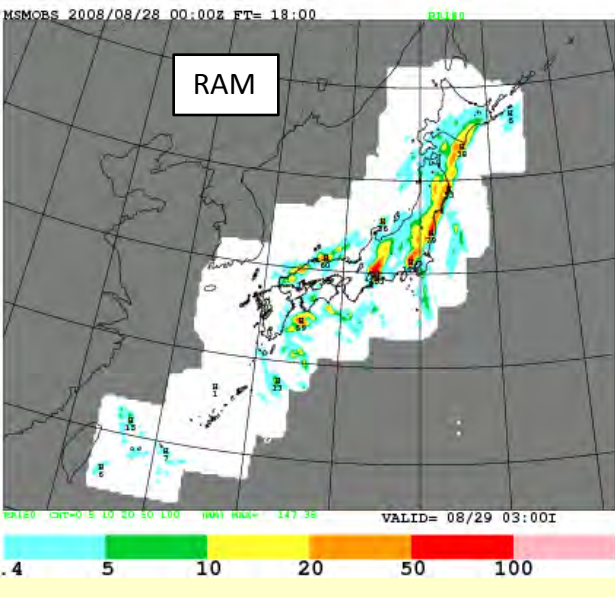
地上天気図 2008年8月28日9時



a) 2008年8月29日0-3時 の解析雨量, (b) 28日21時初期値の6時間予報による予測.



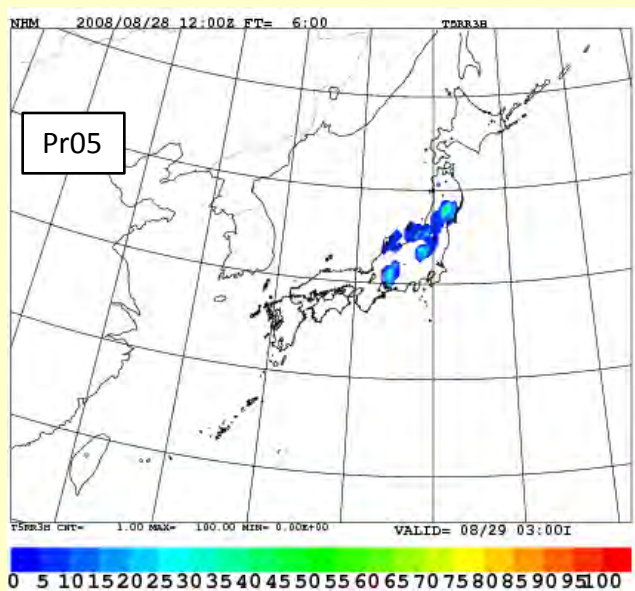
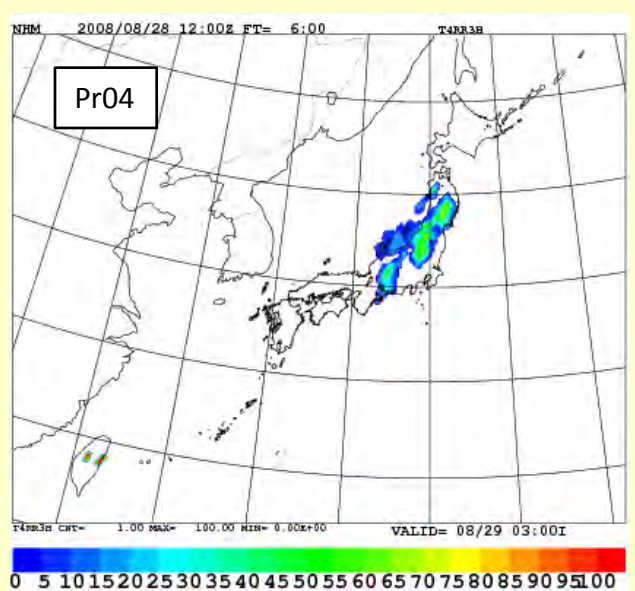
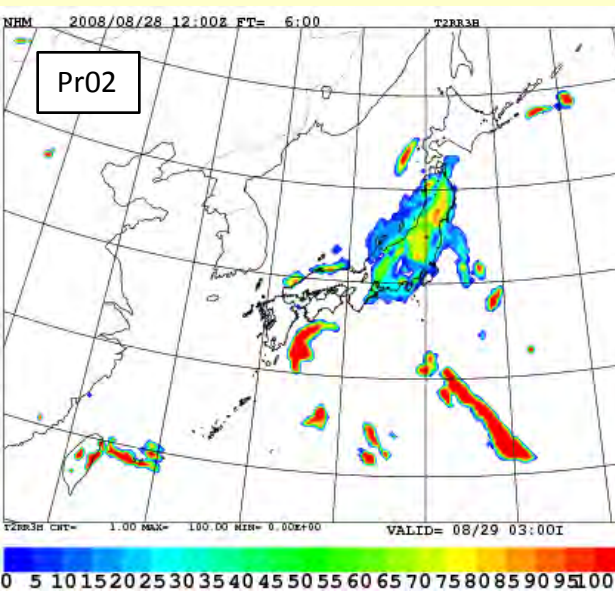
Kunii et al. (2009)



アンサンブル予報に基づく降水強度別発生確率

28日21時初期値の6時間予報

Pr02 : $\geq 5.0\text{mm}/3\text{hour}$ Prob.
 Pr04 : $\geq 20.0\text{mm}/3\text{hour}$ Prob.
 Pr05 : $\geq 50.0\text{mm}/3\text{hour}$ Prob.



アンサンブル予報を用いたGPS可降水量同化実験

2008年7月28日神戸豪雨

アンサンブル予報で予報誤差を推定し、データ同化に利用(アンサンブルカルマンフィルタ)

GPS可降水量を同化、1.6kmダウンスケール雲解像予報実験

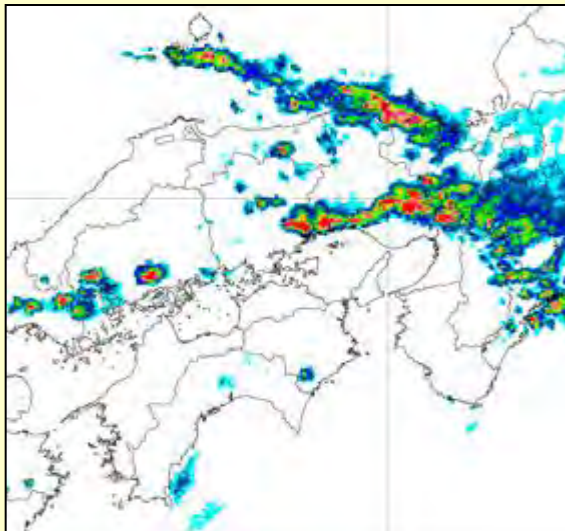


Fig. G-2-12. (a) Surface weather map at 00 UTC on 28 July 2008. (b) Rainfall intensity observed by JMA operational radar at 05 UTC on 28 July 2008.

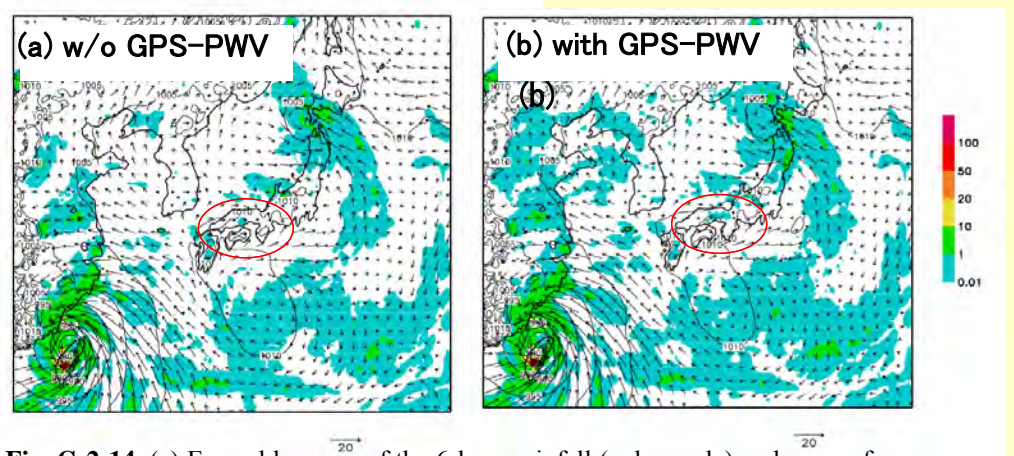
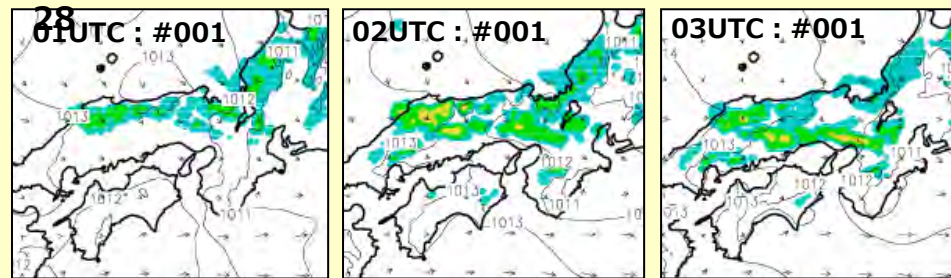


Fig. G-2-14. (a) Ensemble mean of the 6-hour rainfall (color scale) and sea surface pressure (contours) when MA and GA data were assimilated. (b) Same as (a) except for when MA data, GA data, and GPS-PWV data were assimilated.

(a) 5km-NHM Init : 00UTC



(b) 1.6km-NHM Init : 00UTC

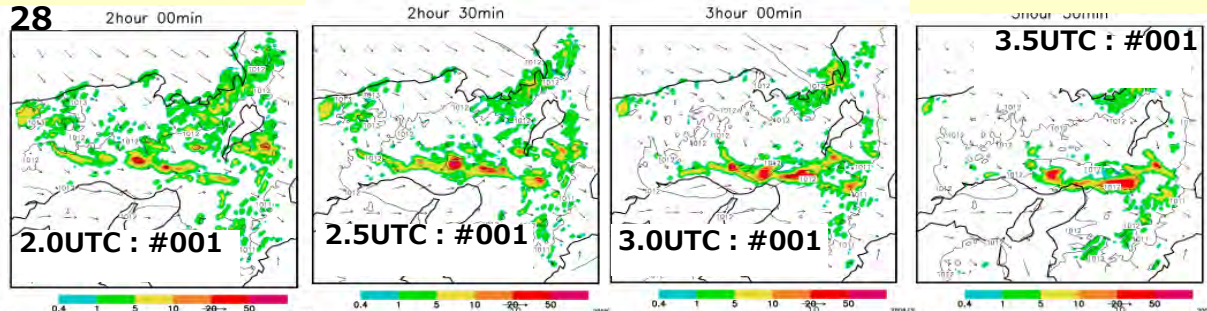


Fig. G-2-15. (a) Rainfall distributions obtained in downscale experiments by member #001 using NHM with grid intervals of (a) 5 km and (b) 1.6 km. Rainfall intensity in (b) corresponds to the 1-hour rainfall (the 10-minute rainfall multiplied by 6).

雲解像1.6kmでライン状の降水 (Seko et al. 2010)

次世代スーパーコンピュータ への期待

次世代スパコン戦略プログラム (高性能汎用計算機高度利用事業)

分野3) 防災・減災に資する地球変動予測

背景

地球温暖化時の台風の動向が今なお不明確、より高精度の集中豪雨予測のニーズ
地震発生時における避難・救援行動に必要な高解像度の被害予測、津波による浸水域等の高精度な情報のニーズ

戦略目標

地球温暖化時の**台風**の動向の全球的予測と**集中豪雨**の予測実証
および次世代型**地震**ハザードマップの構築と**津波**警報の高精度化

研究開発課題



(1) 防災・減災に資する気象・気候・環境
予測研究

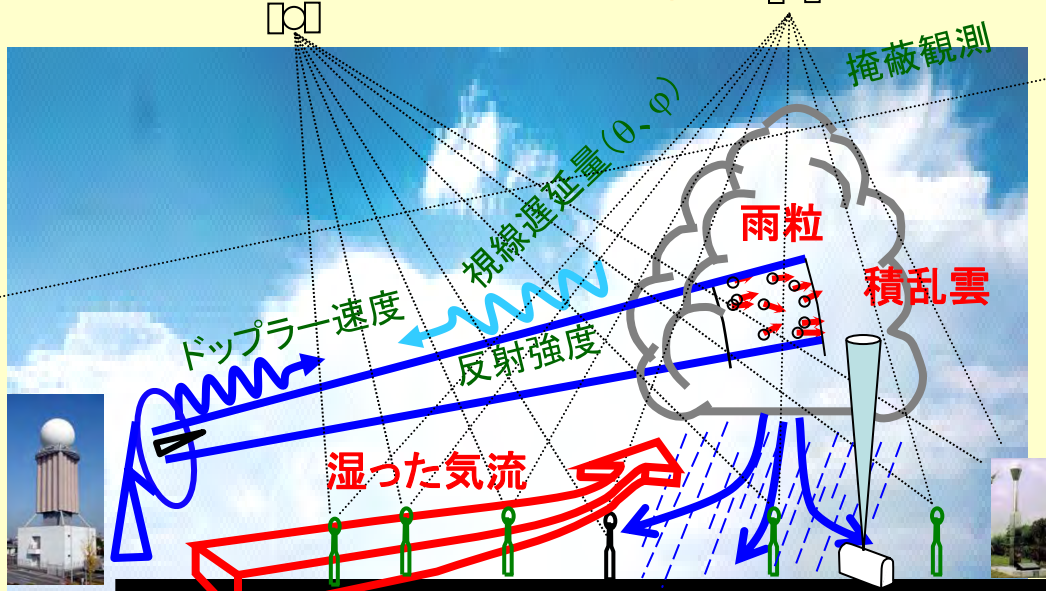


(2) 地震・津波の予測精度の高度化に
関する研究



領域雲解像4次元データ同化技術

GPS衛星 [a]



掩蔽観測

ドップラーレーダー、ライダー GPS受信機 マイクロ波放射計

高解像度、高頻度な観測データで、積乱雲周囲の風、温度、水蒸気、水物質の分布を捉え、雲解像(1-2km)モデルに4次元同化、

局地的な豪雨を力学的に直前予測する。

現在の現業同化システム(15km)の約1000倍の計算量が必要・次世代スパコンに期待

⇒実況監視と結びつけた市町村単位での迅速な警戒情報の発令

2009年(平成21年)3月29日(日曜日)

予測精度の向上 データ解析を工夫

GPS衛星、ドップラーレーダー、積乱雲、雨粒、湿った気流

数値予測に使う計算機の演算速度比 (100倍(導入時=1とする。気象庁の資料を基に作成))

10000	HTAC-SR11000K1
1000	HTAC-SP8000E1
100	HTAC-S3800-480
10	HTAC-S3100
1	HTAC-M080
0.1	HTAC-M00H
0.01	HTAC-T00-8800
0.001	HTAC-S020F
0.0001	HTAC-T04

数値計算に使うスーパーコンピュータ(気象庁提供)

局地豪雨の予測に挑戦

サイエンス science

計算技術が進歩 観測の充実カギ

キーワード

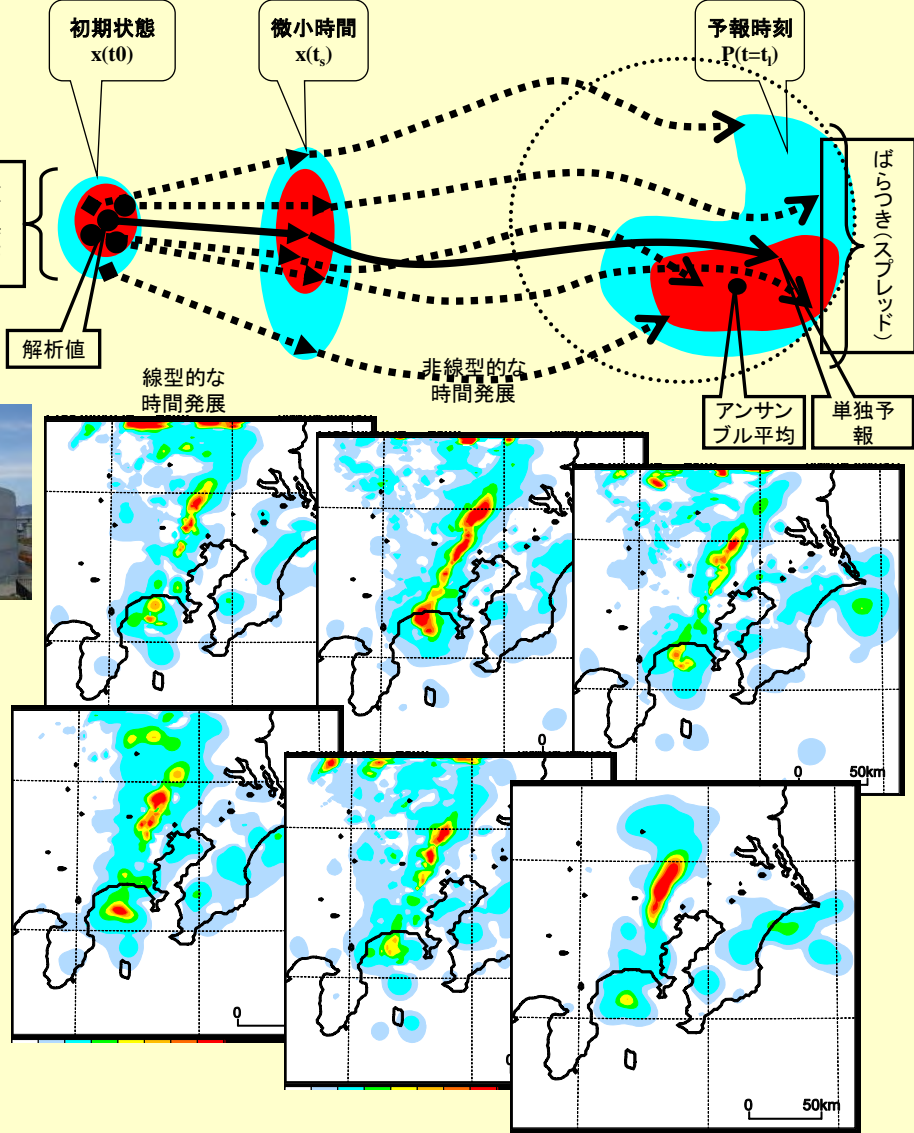
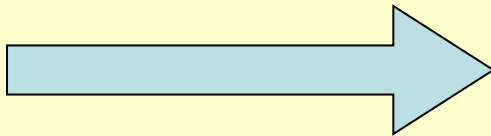
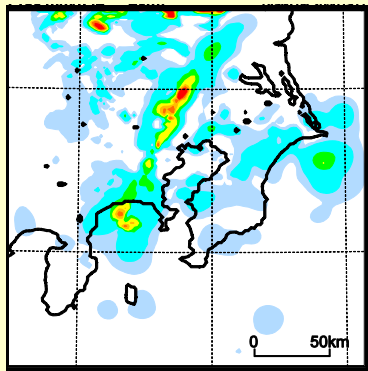
ドップラーレーダー

強風域など捕らえる

気象庁は、最新のドップラーレーダー観測データを用いて、局地的な豪雨を予測する技術を開発している。この技術は、従来の観測データよりも高解像度、高頻度な観測データを用いて、積乱雲周囲の風、温度、水蒸気、水物質の分布を捉え、雲解像(1-2km)モデルに4次元同化することで、局地的な豪雨を力学的に直前予測する。この技術は、現在の現業同化システム(15km)の約1000倍の計算量が必要で、次世代スパコンに期待されている。気象庁は、この技術の実用化に向けて、スーパーコンピュータを活用した数値計算の最適化を進めている。また、ドップラーレーダー観測データの精度向上を図るため、観測データの補正やフィルタリングなどの工夫を行っている。この技術は、防災科学技術研究所や統計数理研究所などと連携して開発されている。

海洋研究開発機構・防災科学技術研究所・統計数理研究所などと連携

雲解像度アンサンブル 予報



雲解像4次元データ同化技術と雲解像アンサンブル予測の手法を融合して、集中豪雨や局地的大雨の半日以上前の予測を、時間・場所・強度を特定して確率的に行う

現業数値予報の約1000倍の計算資源が必要・次世代スパコンに期待

⇒確率情報に基づくリスクマネジメント、事前の減災措置

海洋研究開発機構・東北大学・京都大学
防災研究所などと連携

まとめ

- 集中豪雨の正確な予測や局地的大雨の事前予測は現状では困難が多いが、最先端の研究ベースでは成果が出始めている。
- 数値モデルで積乱雲を表現することと精度の良い初期値を用意することが重要
- 実用化には多くの開発と膨大な計算資源が必要
⇒次世代スパコンへ期待
- 観測的研究との連携の必要性