



第7回「学際計算科学による新たな知の発見・統合・創出」シンポジウム

# 気象庁の現業数値予報システム

2015年10月19日 筑波大学大学会館 国際会議室

気象庁 予報部数値予報課

原 旅人

[tabito.hara@met.kishou.go.jp](mailto:tabito.hara@met.kishou.go.jp)

# 内容

- 気象庁の気象業務と数値予報
  - 数値予報とは？
  - 数値予報の気象業務での役割
  - 数値予報のコンポーネント
    - 解析
    - 予報
    - ガイダンス
- 数値予報モデルと高解像度化
- 気象庁の高解像度モデル
- 数値予報モデルの今後(究極の夢と現実)

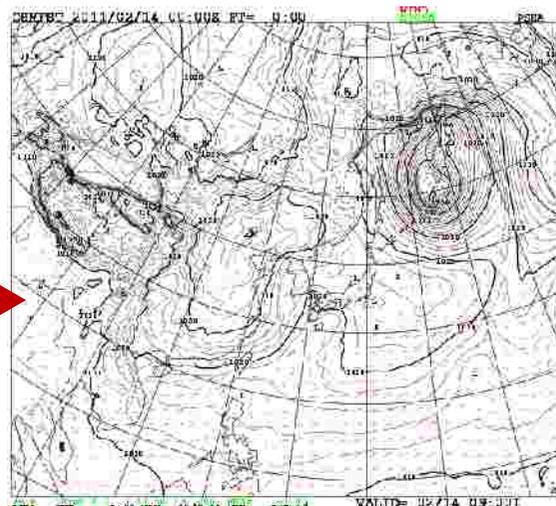
# 気象庁の気象業務と数値予報

# 数値予報とは

- 観測値を基に、ある特定の時刻の大気の状態を数値的に解析し
- 流体力学や熱力学などの物理法則に基づいて、その大気状態を時間発展させ、将来の大気の状態を予測すること

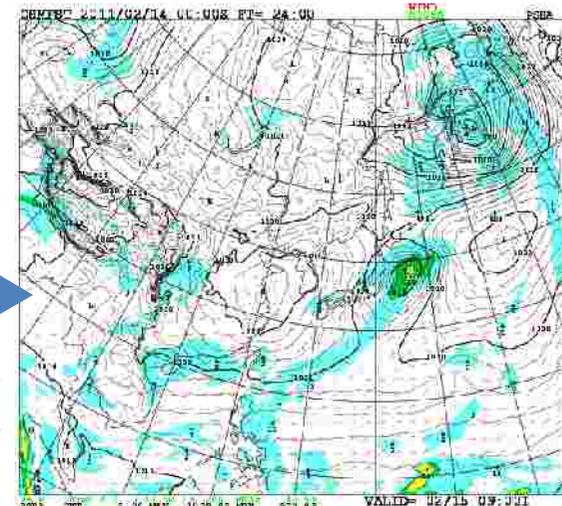


客観  
解析



ある時刻の大気状態  
(初期値)

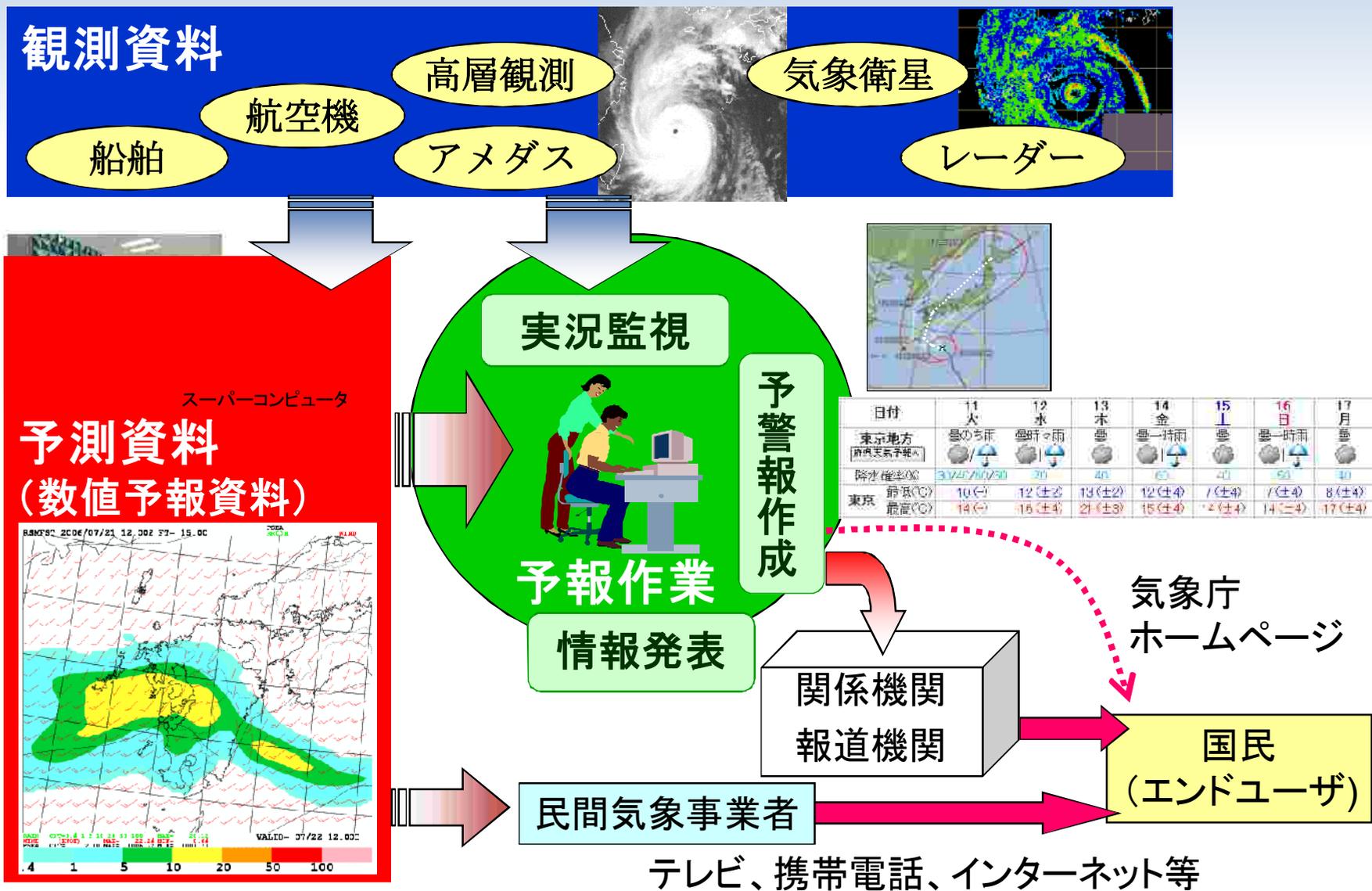
数値  
予報



将来(24時間後)の大気状態  
(予測値)

ある時刻の、大気の状態を表す要素  
(気圧,気温,水蒸気量,風向・風速など)  
の観測値

# 数値予報の役割 (1) 気象業務における数値天気予報の位置づけ



# 数値予報の役割(2) 数値予報は気象庁の業務の技術基盤

## 数値予報の顧客

- 全国の予報現場
- 民間気象事業者
- 地方公共団体等の防災機関  
(二次利用が中心)
- 国民(二次利用が中心)
- 海外の気象局
- 航空分野  
(航空管制、民航、パイロット)
- 海上交通分野(外洋、沿岸)
- 防衛分野  
(航空・海上・陸上自衛隊)
- 防災・水資源管理等
- エネルギーマネジメント(電力)
- 陸上交通・農業等



数値予報は根と幹(技術基盤)

# 実際の数値予報

大気の支配方程式:

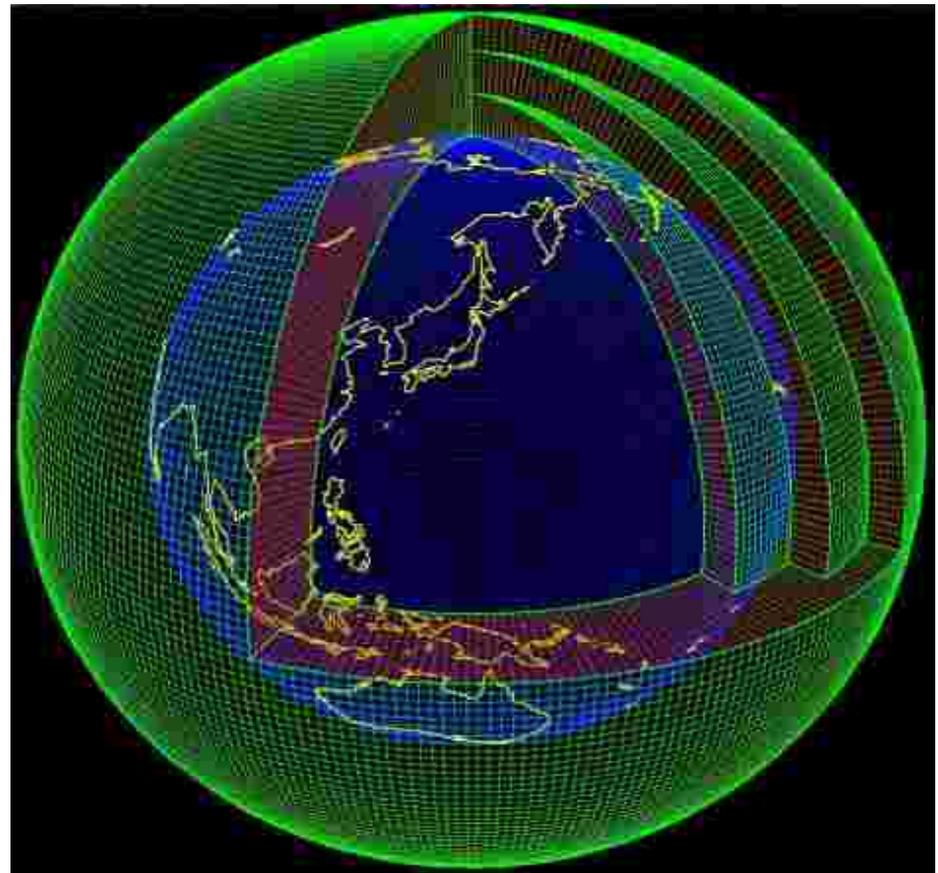
非線型項(変数どうしのかけ算、たとえば移流項)を含むため、  
一般には**解析的**に解けない → **数值的**に解く必要あり

## 空間的、時間的離散化

数値表現される仮想的な大気  
(モデル大気)で計算する

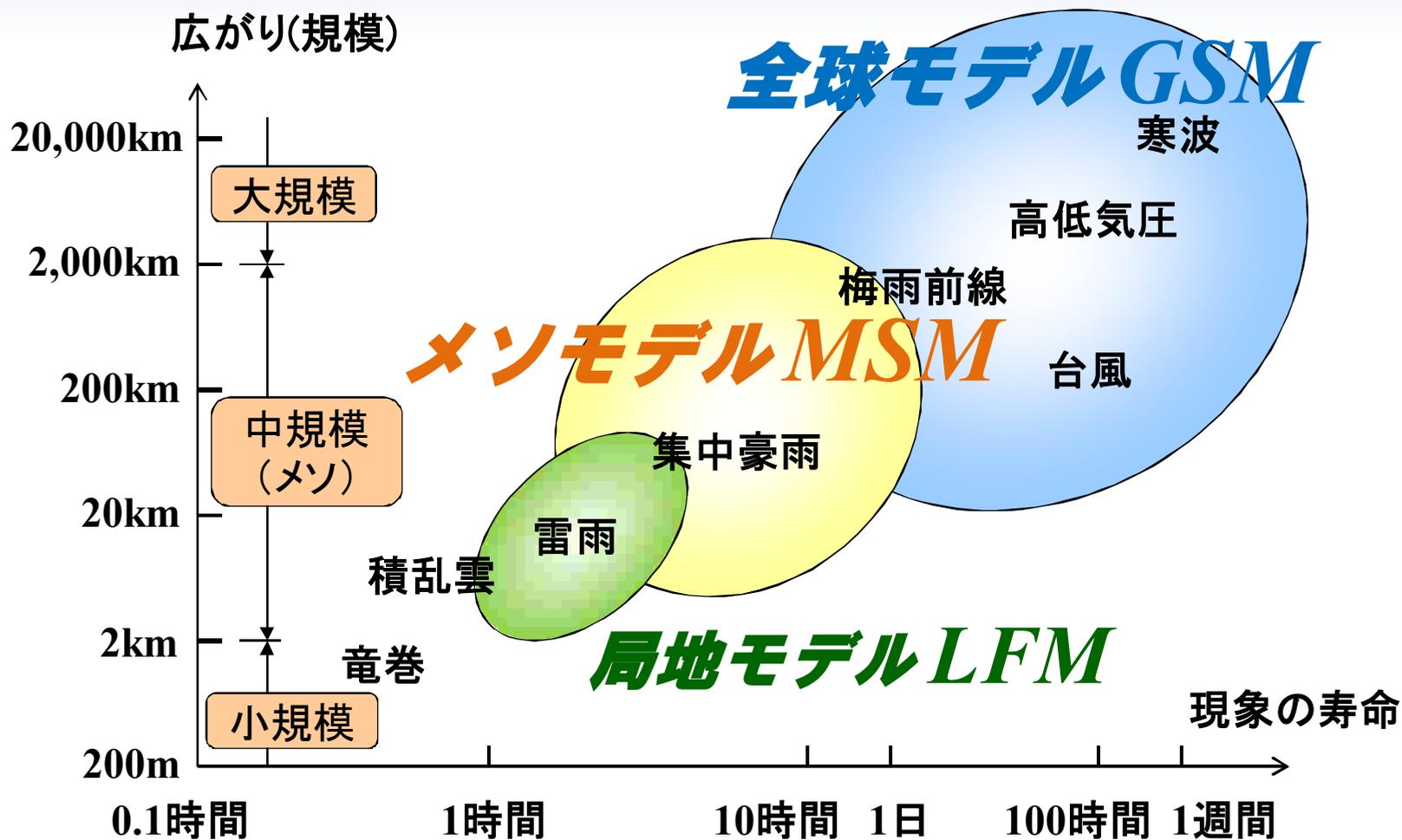
### 数値予報の主要コンポーネント

- ・初期の大気状態を解析  
データ同化システム
- ・将来の大気状態を推定  
数値予報モデル



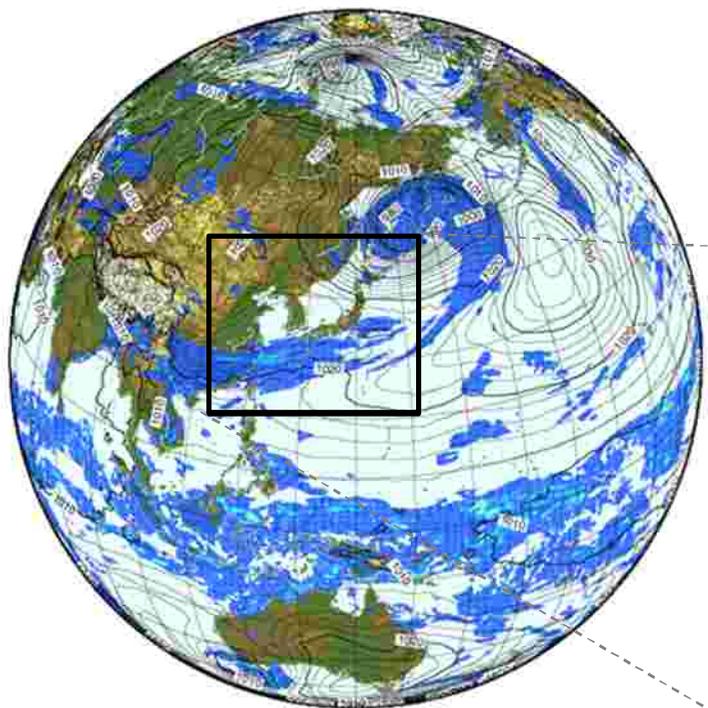
# 現象と予測可能性

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



# 気象庁の短期予報向け数値予報モデル

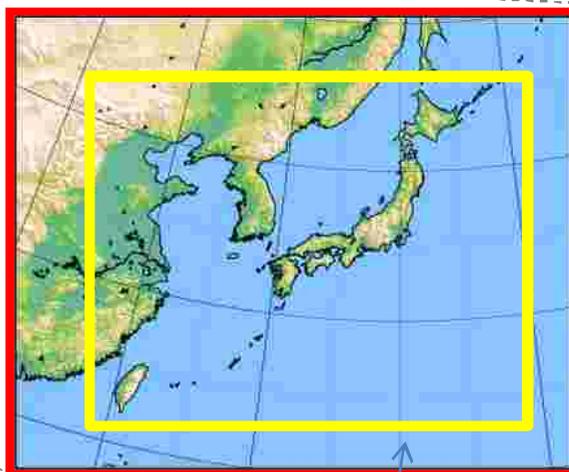
全球モデル  
(GSM)



水平格子間隔 ~20km

メソモデル  
(MSM)

水平格子間隔 5km

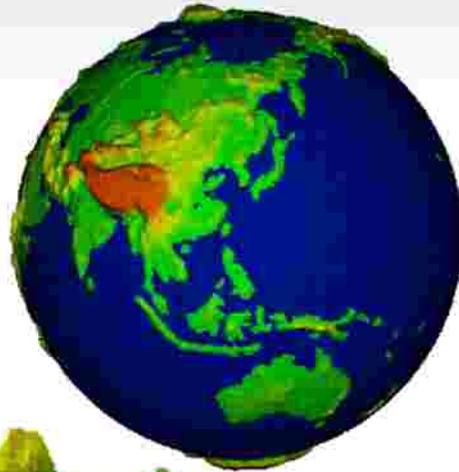


局地モデル  
(LFM)

水平格子間隔 2km

# 数値予報モデルの計算領域と地形

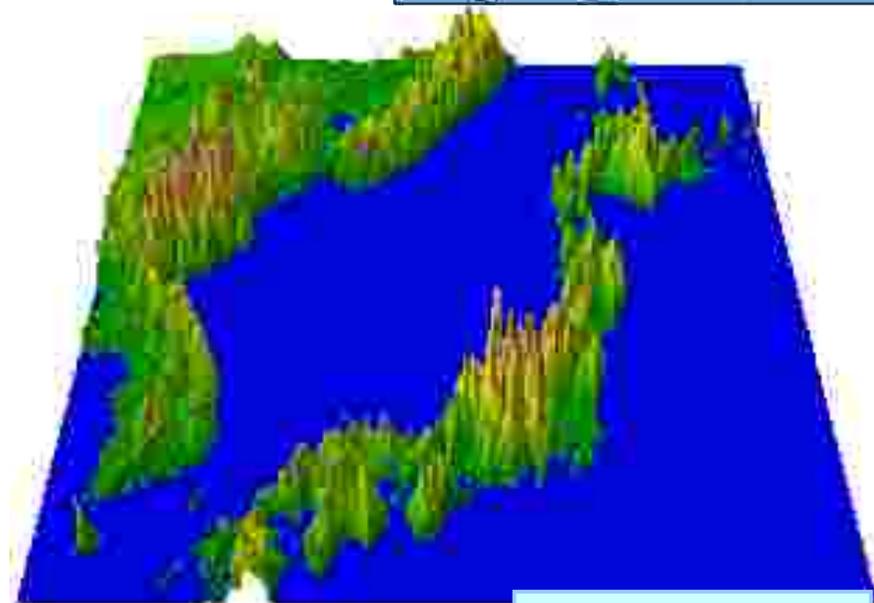
全球モデル



メソモデル



格子間隔 ~20km



格子間隔 5km

# 現業数値予報システムの仕様

短期予報用の大気モデルのみ、2015年3月現在

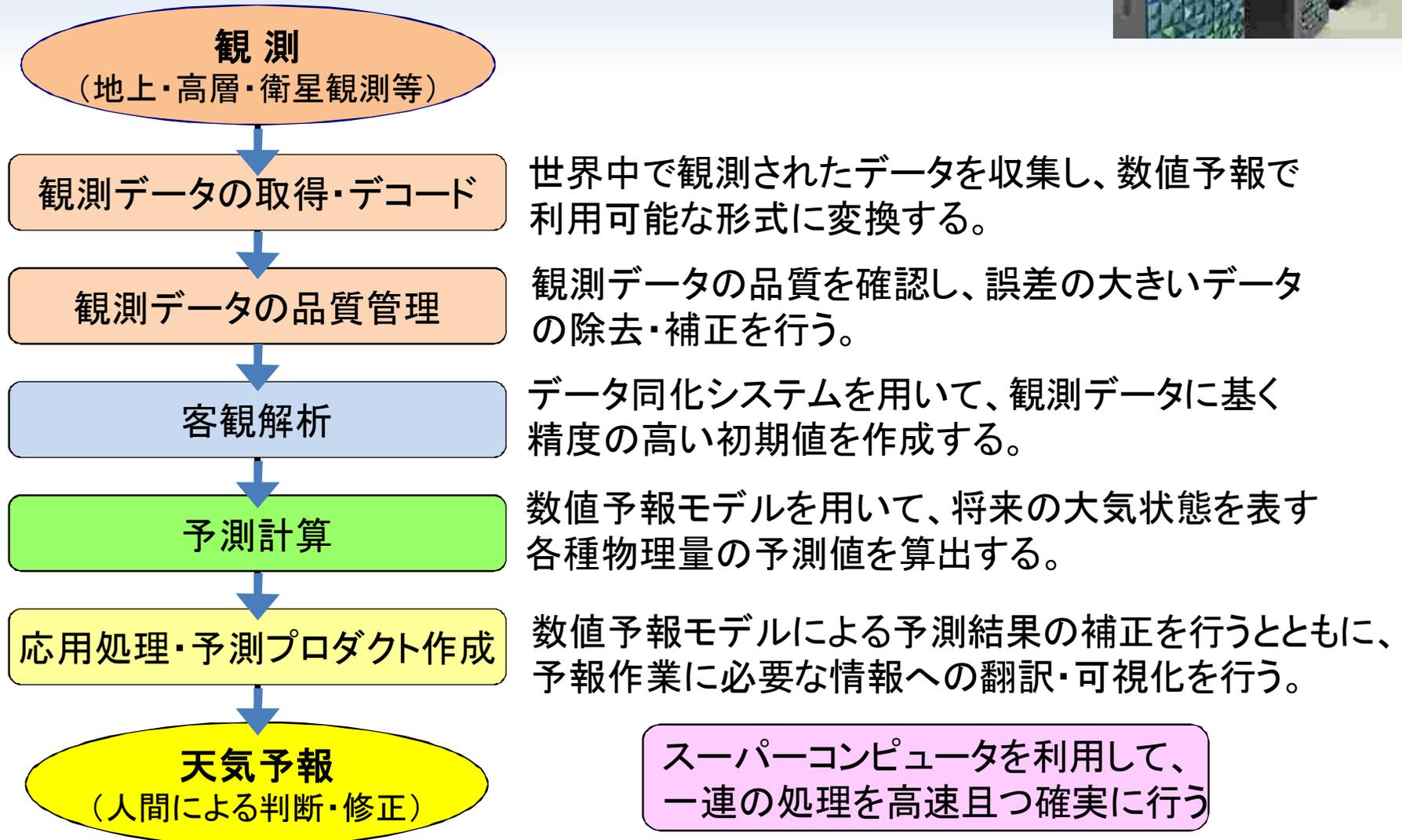
	モデル	領域 水平解像度	鉛直 層数	予報時間 (初期時刻(UTC))	目的
決定的予報	全球モデル (GSM)	地球全体 約20km	100層	84 hours (00,06,18)  264 hours (12)	<ul style="list-style-type: none"> <li>各種予報・ガイダンスの基礎資料</li> <li>各種数値予報モデルの入力値 (波浪, 黄砂, 移流拡散など)</li> <li>メソモデルの側面境界条件</li> </ul>
	メソモデル (MSM)	日本周辺 約5km	50層 (48+2)	39 hours (00,03,06,09, 12,15,18,21)	<ul style="list-style-type: none"> <li>各種予報の支援 (防災気象情報など)</li> <li>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)</li> <li>局地モデルの側面境界条件</li> </ul>
	局地モデル (LFM)	日本周辺 約2km	58層	9 hours (毎時)	<ul style="list-style-type: none"> <li>各種予報の支援 (飛行場予報, 防災気象情報など)</li> </ul>
確率的予報	週間 アンサンブル予報 システム(WEPS)	地球全体 約40km	60層	264 hours (00,12) ※各27メンバー ~54メンバー/日	<ul style="list-style-type: none"> <li>週間天気予報</li> <li>東南アジア等諸外国の予報支援</li> </ul>
	台風 アンサンブル予報 システム(TEPS)	地球全体 約40km	60層	132 hours (00,06,12,18) ※25メンバー	<ul style="list-style-type: none"> <li>台風進路予報</li> <li>※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</li> </ul>

※赤字は現スパコン導入(2012年6月)後に導入・更新された箇所

# 数値予報の流れ



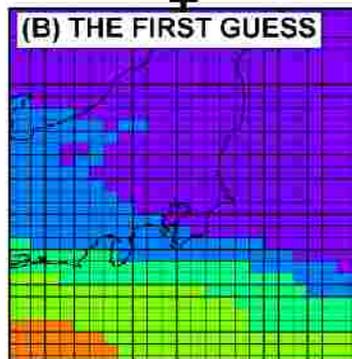
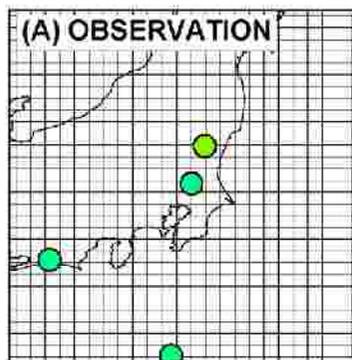
## 数値予報作成の流れ



# 解析(データ同化:初期値作成)の 手順

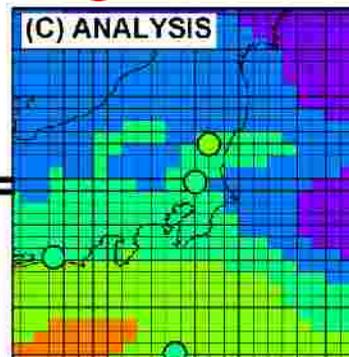
- ① 観測値と第一推定値(叩き台)の準備
- ② 観測値と第一推定値を比較(図D)
- ③ 右図の場合、第一推定値の気温が低いため、第一推定値の気温を上げるよう修正(図E)
- ④ 以上の処理の結果、解析値(図C)ができる

①観測値

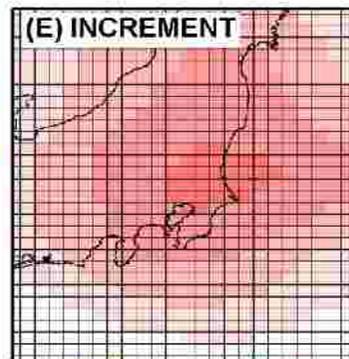
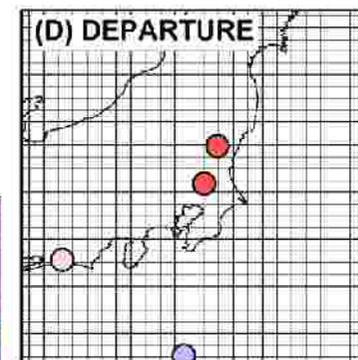


①第一推定値

④解析値

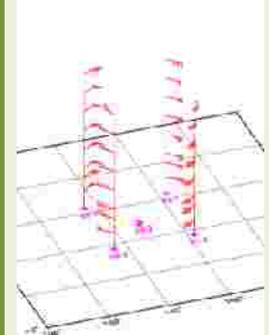


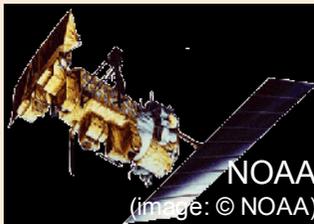
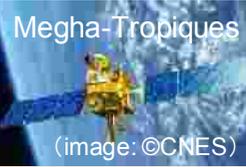
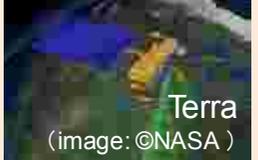
②観測値と第一推定値の比較



③第一推定値を修正

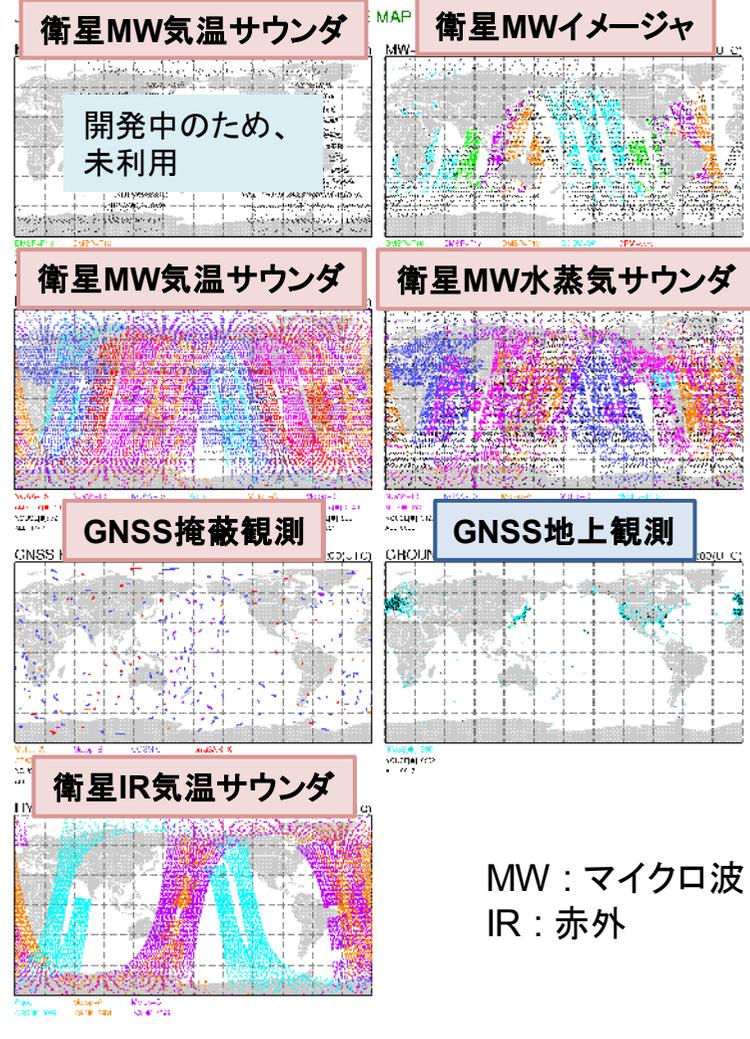
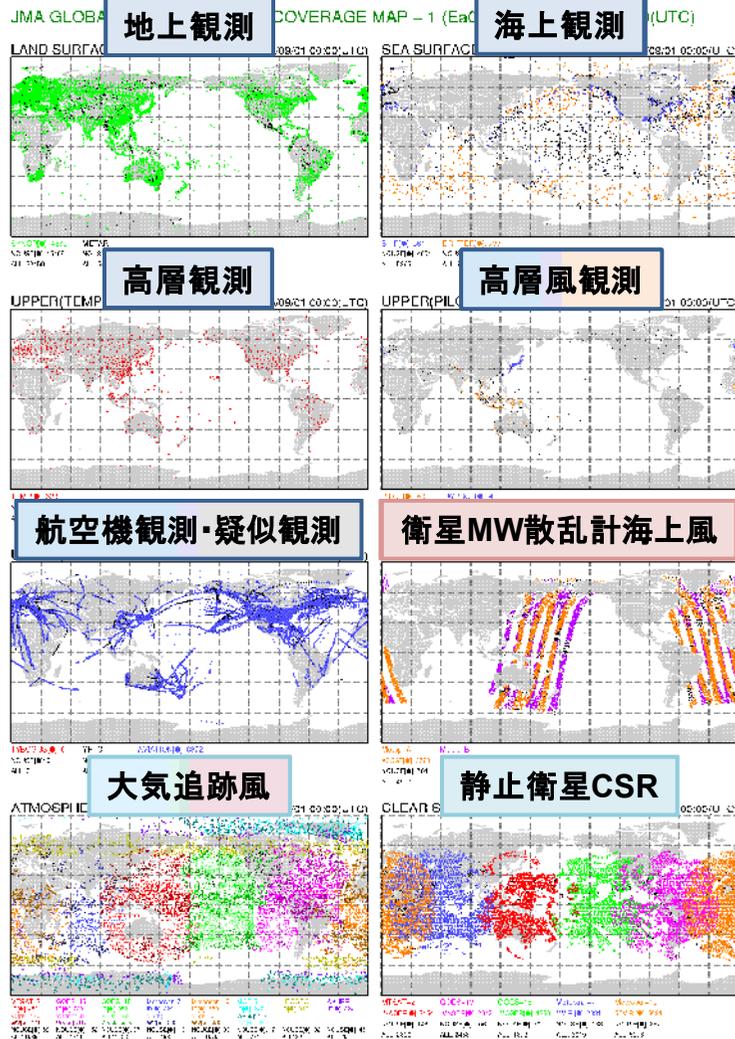
# 数値予報で利用している観測

 <p>高層観測 (写真: 気象庁HP)</p>	 <p>地上観測 (写真: 仙台管区HP)</p>	 <p>ブイ観測 (写真: 気象庁HP)</p>	 <p>ウィンドプロファイラ (写真: 東京管区HP)</p>	 <p>GPS受信機 (写真: 観測部提供)</p>	 <p>台風ポーガス</p> <p>疑似観測</p>
 <p>航空機観測 (写真: YS提供)</p>	 <p>海上観測 (写真: 気象庁HP)</p>	 <p>(ドップラー)レーダー (写真: 大阪管区HP)</p>	<p>リモートセンシング 遠隔観測</p>		

 <p>MTSAT (画像: 気象庁HP)</p>	 <p>METEOSAT (image: © ESA)</p>	 <p>NOAA (image: © NOAA)</p>	 <p>Metop (image: © ESA)</p>	 <p>DMSP (image: © NASA)</p>		
 <p>GOES (image: © NOAA)</p>	<p>静止軌道衛星</p>		 <p>Aqua (image: © NASA)</p>	 <p>Megha-Tropiques (image: © CNES)</p>	 <p>GRACE-A (image: © NASA)</p>	 <p>COSMIC (image: © UCAR)</p>
		 <p>Terra (image: © NASA)</p>	 <p>GCOM-W1「しずく」 (image: © JAXA)</p>	 <p>TerraSAR-X (image: © EADS Astrium)</p>	 <p>C/NOFS (image: © US AirForce)</p>	
		<p>地球観測衛星</p>		<p>GNSS掩蔽衛星</p>	<p>低軌道衛星</p>	

# 観測データ分布

(速報解析;+ 2<sup>h</sup>20<sup>m</sup>@00UTC)



開発中のため、未利用

MW : マイクロ波  
IR : 赤外

# 数値予報モデル

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

## 力学過程

主に力学(大規模な大気の流れ)を扱う「数値予報の骨格」

- 移流、コリオリカ、  
気圧傾度力、収束発散

## 物理過程

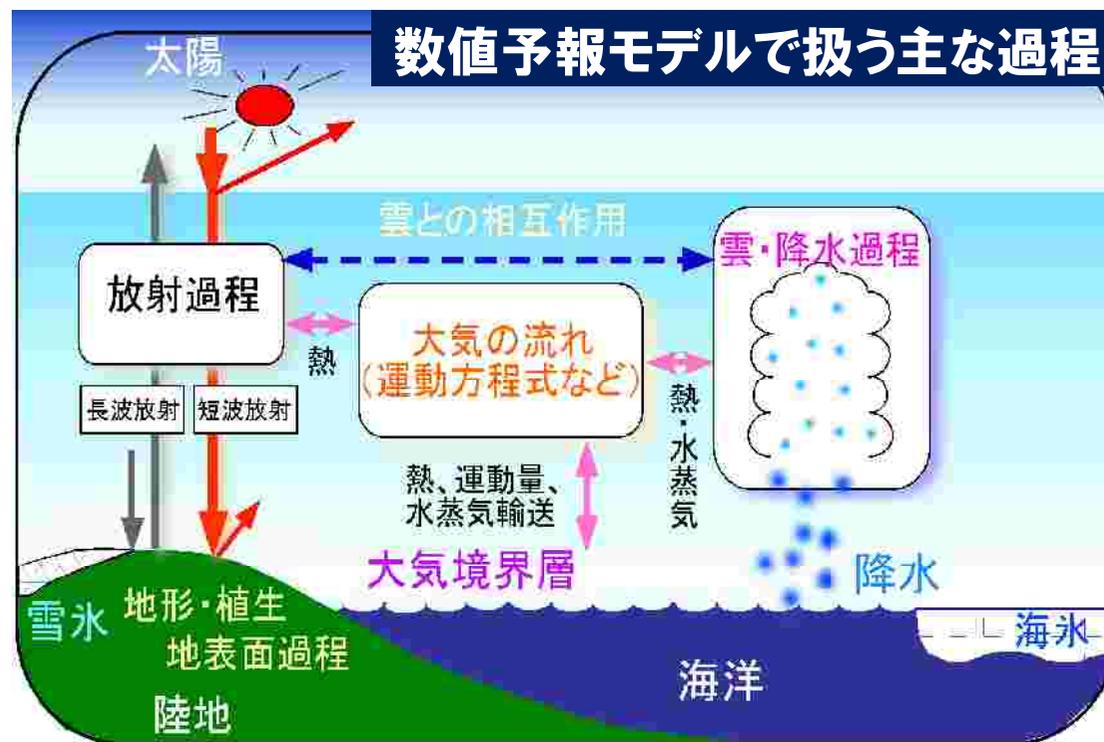
方程式系の時間変化率のうち

- 格子平均からのずれがもたらす効果(サブグリッドの輸送)
- 大気の流れでは表現できない運動量、熱(エネルギー)、水蒸気の輸送
- 格子内の非一様性の効果
- 水の相変化によるエネルギーの放出
- 放射、雲水、積雲、乱流、  
陸面、重力波
- 複雑で未解明な要素を含む

大気を記述する方程式

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} = F \Rightarrow \phi_{t+\Delta t} = \phi_t + F_t \Delta t$$

時間変化率                      未来の値                      現在の値



# 大気の方程式(詳細)

水平方向の  
運動方程式

$$\text{水平風の時間変化} = \text{移流の効果} + \text{コリオリの効果} + \text{水平の気圧傾度力} + \text{摩擦力}$$

鉛直方向の運動  
方程式 (MSM)

$$\text{鉛直風の時間変化} = \text{移流の効果} + \text{鉛直の気圧傾度力} + \text{重力} + \text{摩擦力}$$

または

静力学平衡の式  
(GSM)

$$0 = \text{鉛直の気圧傾度力} + \text{重力}$$

連続の式

$$\text{密度の時間変化} = \text{移流の効果} + \text{収束・発散の効果}$$

温位の予測式

$$\text{温位の時間変化} = \text{移流の効果} + \text{非断熱過程}$$

水物質の予測式

$$\text{水物質の時間変化} = \text{移流の効果} + \text{非断熱過程}$$

その他に状態方程式、等色々

# 物理過程

格子平均値についての  
支配方程式の一般形  
(保存則)

$$\frac{\partial \bar{\phi}}{\partial t} = -\underbrace{\nabla \cdot (\bar{\mathbf{u}}\phi)}_{\text{場の流れによるフラックス}} - \nabla \cdot \underbrace{\tilde{\mathbf{f}}_\phi}_{\text{場の流れによらないフラックス}} + \underbrace{\bar{K}_\phi}_{\text{生成・消滅}}$$

- 格子平均のフラックスのうち、格子平均の風速と物理量では表現できない部分を表現

$$\overline{\mathbf{u}\phi} = \bar{\mathbf{u}}\bar{\phi} + \underbrace{f'_\phi}_{\text{パラメタリゼーション}}$$

- 対流・乱流による運動量、熱、水蒸気の鉛直輸送など (サブグリッドスケール)
- 格子内の不均一性を表現
  - 雲の有無、地表面の植生など
- 格子内の生成・消滅 (熱、凝結、摩擦など)

いずれも、既知の格子平均値を用いて推定

=パラメタリゼーション

理論的背景に加えて統計・経験則を元に構成

→モデルの誤差要因のひとつ。

パラメタリゼーションの例

乱流による境界層内輸送によるフラックス

$$f'_{w\phi_i} = -K_{\phi_i}(\bar{\phi}_1, \bar{\phi}_2, \dots) \frac{\partial \bar{\phi}_i}{\partial z}$$

格子平均の風速と物理量では表現できない輸送  $f'_{w\phi_i}$  を格子平均値を用いて表現。

フラックスが求めれば、時間変化率が求まる。

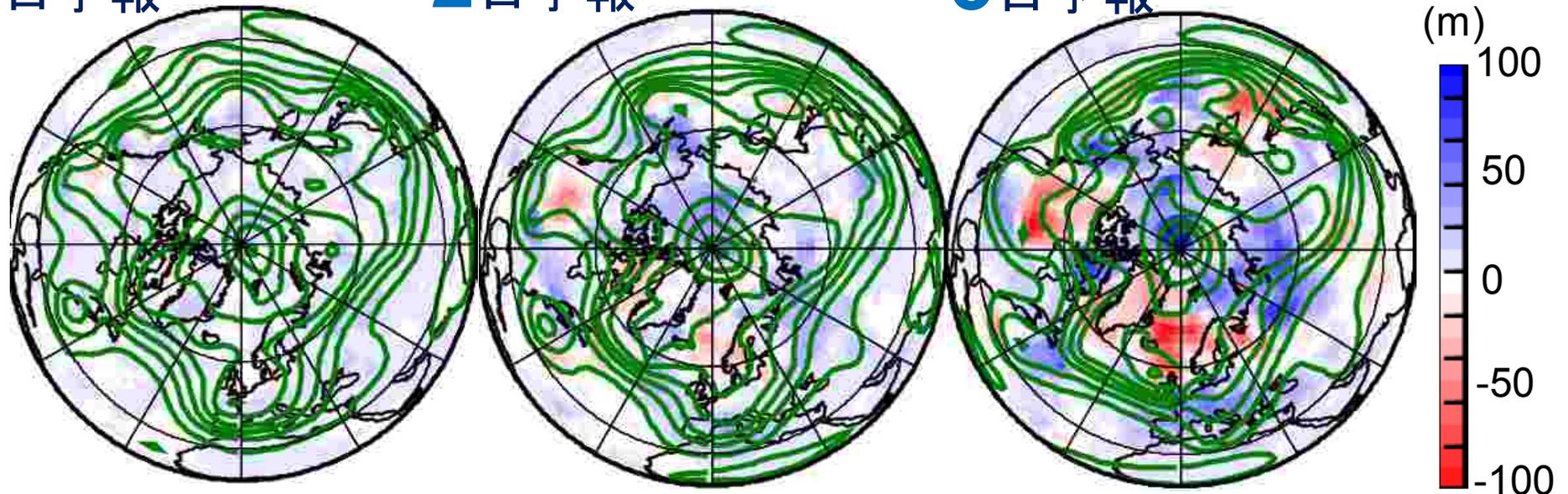
# 予測の誤差

- ・最新の観測情報を初期値に反映させたとしても、予報時間が進めば誤差は拡大してしまう
- ・誤差は”いつもどこでも一様”に発展するわけではない

1日予報

2日予報

3日予報



- ・2010年11月8日12UTC初期値の全球モデル(GSM)の予測
- ・緑線: 500hPaジオポテンシャル高度
- ・色: 対象時刻の解析値を真とした場合の予報誤差(色が濃いほど誤差が大きい)

# 予測に誤差が生じる理由

- 初期値の不確実性
  - 現在の大気の状態を、完全に知ることはできない
    - 観測は空間・時間的に疎
    - 観測には誤差がある
- 数値予報モデルの不完全性
  - 大気状態を完全に表現できない
    - 大気を完全に記述するには無限の計算機資源が必要
  - 物理法則を、近似的にしか計算できない
    - 計算コストの問題から、近似的な取り扱いをしている
    - 気象現象への理解の不足
  - 境界条件を正確に与えることはできない

# 予測精度向上に向けた開発の方向性

- 分解能を向上させる

- 現象の表現性の向上により、予測精度向上のポテンシャルを高める → ただし、分解能の向上に応じた物理過程などの改良も行う必要がある。

- 物理過程を改良する

- 現象についての理解を深め、モデル化に反映させる。
- 考慮していなかった過程を取り入れる。→ ただし、精緻化するだけでは予測精度向上には繋がらない場合もある。

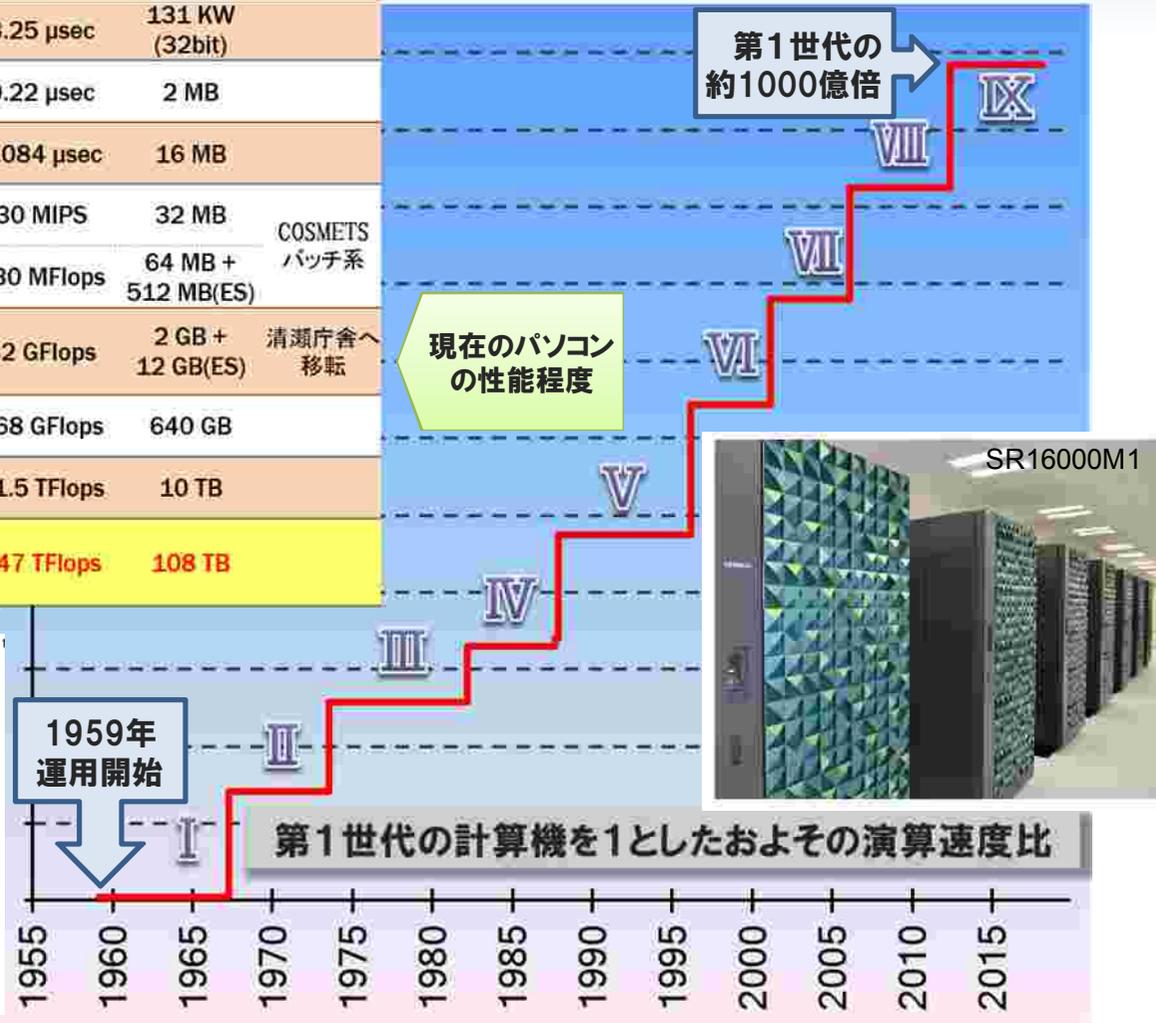
- 初期値の精度をよくする

- これまで利用していなかった観測データを利用する。
- データ同化手法・観測データ利用手法を改良する。
- ただし、物理過程などの数値予報モデル自体の改善も必要。

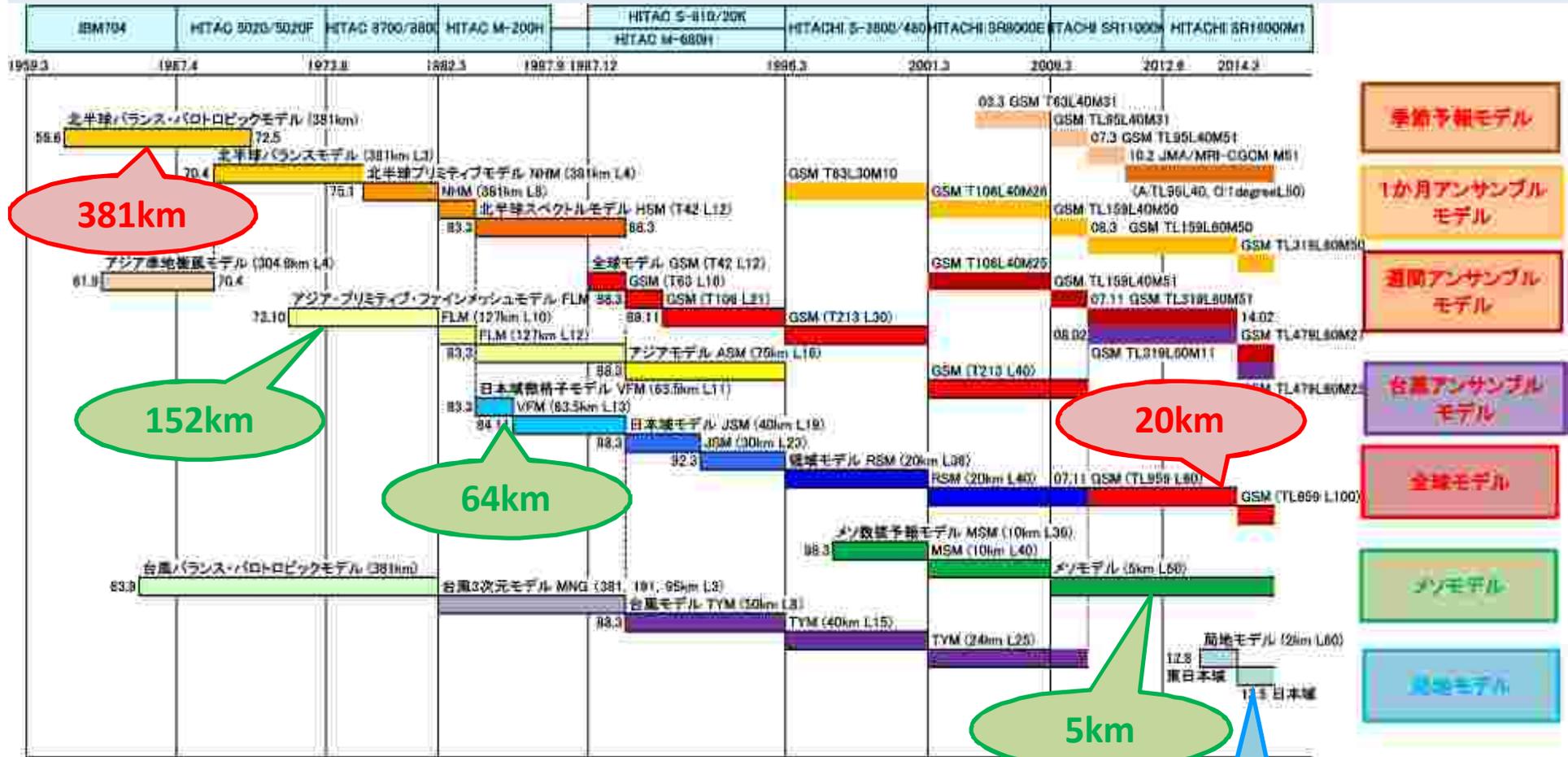
# 数値予報モデルと高解像度化

# 数値予報に用いる計算機の変遷

世代	運用開始年月	主計算機	演算速度	記憶装置	備考
I	1959/3	IBM-704	84 $\mu$ sec	8 KW (36bit)	運用開始 (本庁)
II	1967/4	HITAC-5020F	3.25 $\mu$ sec	131 KW (32bit)	
III	1973/8	HITAC-8700/8800	0.22 $\mu$ sec	2 MB	
IV	1982/3	HITAC-M200H (2台)	0.084 $\mu$ sec	16 MB	
V	1987/9	HITAC-M680	30 MIPS	32 MB	COSMETS パッチ系
	1987/12	HITAC-S810	630 MFlops	64 MB + 512 MB(ES)	
VI	1996/3	HITAC-S3800_480	32 GFlops	2 GB + 12 GB(ES)	清瀬庁舎へ 移転
VII	2001/3	HITACHI-SR8000E1	768 GFlops	640 GB	
VIII	2006/3	HITACHI-SR11000K1 (2台)	21.5 TFlops	10 TB	
IX	2012/6	HITACHI-SR16000M1 (2台)	847 TFlops	108 TB	



# 現業数値予報モデルの変遷



- 精度改善：高分解能化、精緻化
- 合目的性：分化
- 効率化：統合

# 高解像度化と精度向上

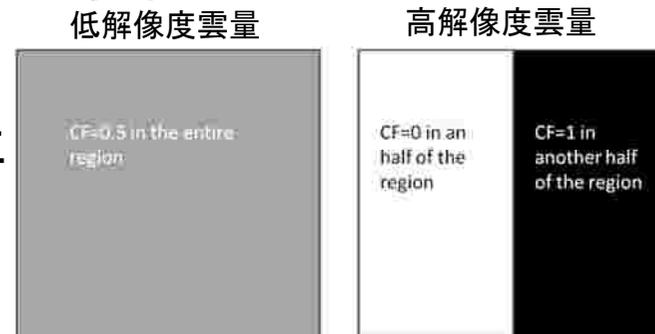
- 高解像度化によるメリット

- より高周波成分(=スケールが小さな現象)が表現され、その寄与がより直接的に反映。移流の誤差が小さくなる。

- 気象現象は地形によって引き起こされるものも多いため、細かな地形が表現できるようになることも重要。

- 格子内不均一性が小さくなる。

- 高解像度化によって、格子ごとに違いが表現できるようになる。



- フラックスの格子平均を、格子平均の速度と物理量で表現できるようになる:ただし、非常に高い解像度が必要。

# モデルにおける対流の表現

- 積雲対流は赤道域で地球の大循環の原動力であり、中緯度では災害をもたらす激しい現象に関連  
→モデルでの対流の表現は非常に重要
- 従来の解像度(5～数十km)では、解像度に比べて現象のスケールが小さく、積雲対流パラメタリゼーションが必要

– 低解像度モデルでは、パラメタリゼーションでほぼすべての対流に伴う鉛直輸送を表現

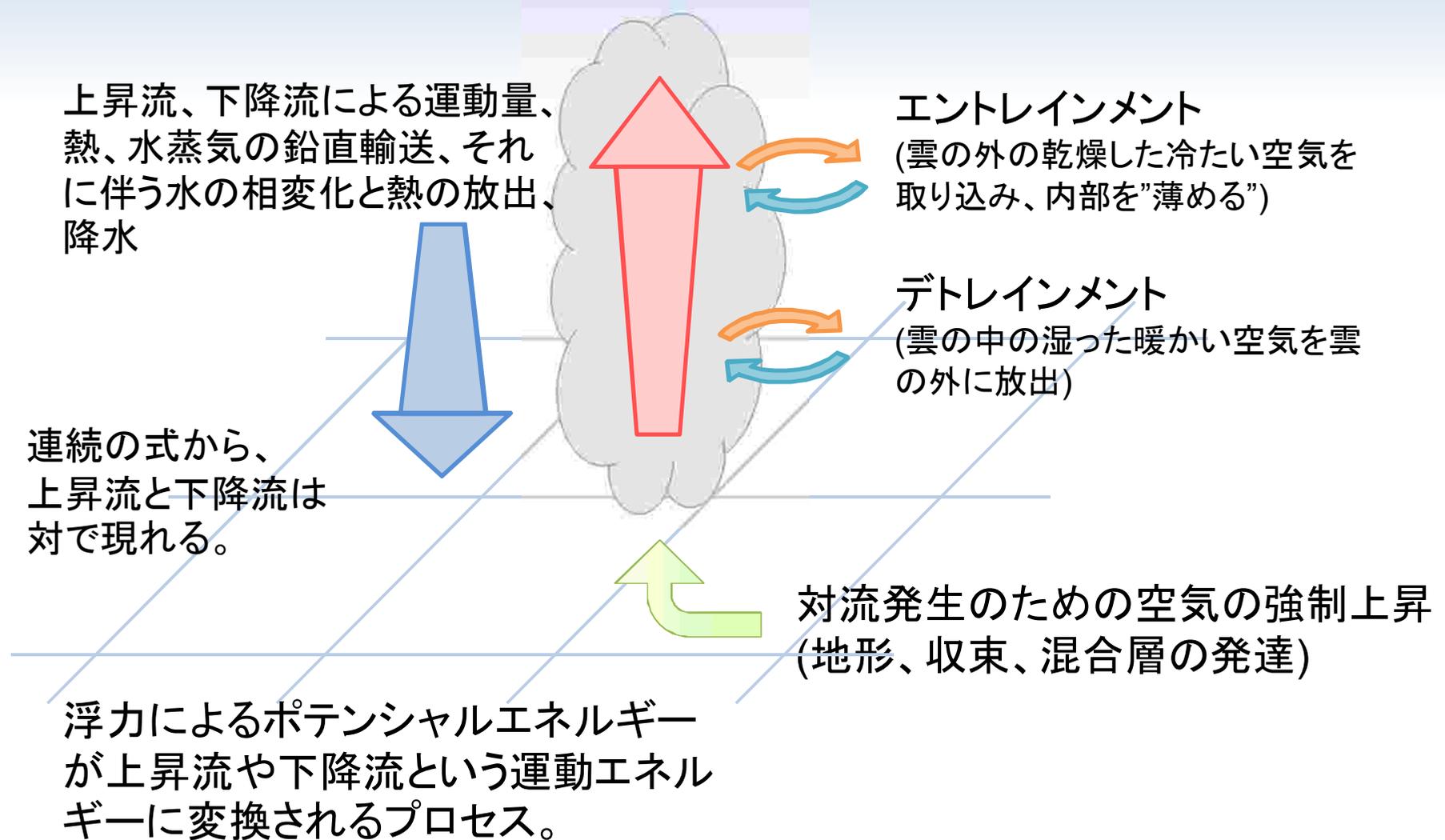
- 上昇流と下降流は対になって現れるので、格子間隔が大きいと格子平均の鉛直速度はほぼゼロ。

$$\overline{w\phi} \simeq f'_{w\phi}, \quad \bar{w} \sim 0$$

– 上昇流と下降流が別の格子で表現できるような高解像度モデルになると、パラメタリゼーションに頼らずに格子平均値で対流輸送が表現できるように

$$\overline{w\phi} \simeq \bar{w}\bar{\phi}, \quad f'_{w\phi} \sim 0$$

# 積雲対流という現象



# 積雲対流パラメタリゼーションの排除

- 積雲対流パラメタリゼーションは、モデル予測の大きな誤差要因のひとつ。

→高解像度化して積雲対流パラメタリゼーションに頼る必要がなくなれば、大きな誤差要因を排除できて、積雲対流の予測精度は向上すると期待されてきた。

→高解像化の流れ

気象庁でも水平格子間隔2kmの局地モデルの運用開始

- しかし、その発生、強さを適切に予測するには課題があることが最近になって意識されつつある。

- 解像されるフラックスとされないものの混在

: Grey Zone Problem

$$\overline{w\phi} = \underbrace{\overline{w\phi}}_{\text{resolved}} + \underbrace{f'_{w\phi}}_{\text{unresolved}}$$

- 発生、強さをコントロールする小さな現象の表現の欠如

: さまざまなスケールの混在

# Grey Zone problem

## 例:積雲対流

格子平均の鉛直速度では**全く輸送を解像できない**

格子平均の鉛直速度で**部分的に解像できる**

格子平均の鉛直速度で輸送を**すべて解像できる**

$$\overline{w\phi} \simeq f'_{w\phi}, \quad \overline{w} \sim 0$$

$$\overline{w\phi} = \overline{w}\overline{\phi} + f'_{w\phi}$$

$$\overline{w\phi} \simeq \overline{w}\overline{\phi}, \quad f'_{w\phi} \sim 0$$

100000

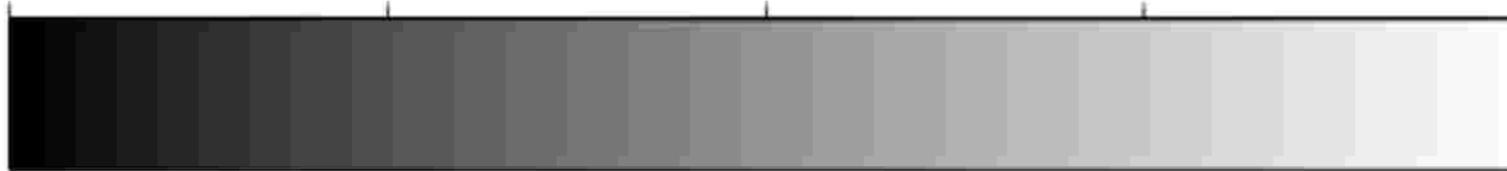
10000

1000

100

10

(m)



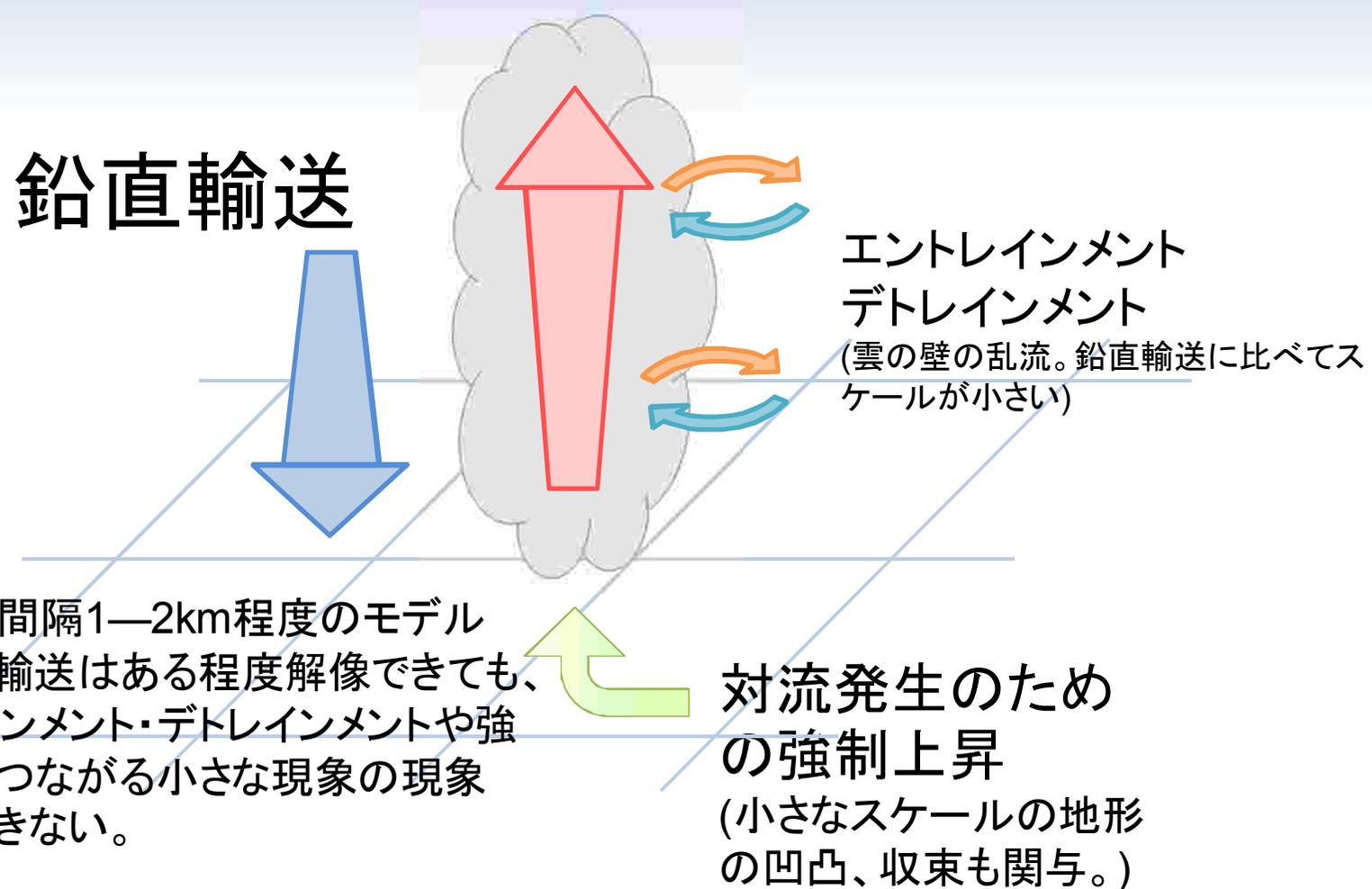
?

すべての輸送はパラメタリゼーションによる

パラメタリゼーションは必要ない

乱流では、Grey Zone を “**Terra Incognita**”(未知なる大地)と呼ぶ  
ただし、乱流の方が、Grey Zone 問題が現れるスケールが小さい  
(1km程度)

# 積雲対流におけるスケールの混在



# 気象庁の高解像度モデル

# 局地モデル (LFM)

- 水平格子間隔 2km のモデル
  - 気象庁で運用している最も高解像度であるモデル
- 空間的・時間的スケールがより小さな激しい現象（積乱雲、豪雨）の予測を目的
- 2012年8月に運用開始
  - 2012年6月に新しい計算機に更新
  - モデルは5kmモデルと同じJMA-NHM
  - 対流パラメタリゼーションを使用せず。
- 2015年1月には、次世代非静力学モデルとして開発してきた asuca にモデルを置き換え。
  - 対流の発生を表現するパラメタリゼーションを導入

# 次世代非静力学モデル asuca

## (従前のモデルの経験をもとに)

- 新しい計算科学の手法を採用
  - 有限体積法による保存性の確保
  - より高精度の時間積分、移流スキームの採用
  - 人為的な数値拡散(粘性)の除去
    - 数値拡散はその解像度では表現できない高周波のノイズを取り除くのが目的であるが、その強さによって予測が大きく変わる: 解像されている現象とパラメタライズすべき現象の区別がつきにくく、開発しにくい。
    - 時間積分、移流スキームが持つ粘性を活用
- 最近の計算機の趨勢を踏まえたフレーム
  - スカラー機向けを意識してメモリ参照を可能な限り局所化しキャッシュを活用できるように構築
    - 伝統的に気象モデルは大きなメモリバンド幅を必要としてベクトル機で使われることが多かった。
  - ノード間通信をまとめるなど、超並列に耐える仕様に。
- 継続的な開発が可能なモデル
  - プロジェクト管理システム(Redmine)を活用した開発の記録、文書化。
  - コードスタイルの遵守とそれを確保するための開発者相互のコードレビュー制度。
  - 物理過程開発を明確に分離して、物理過程ライブラリを通じて物理過程を導入
    - 物理過程単体での性能評価がしやすく、科学的な開発をしやすい開発環境に。

# asuca における対流の取り扱い

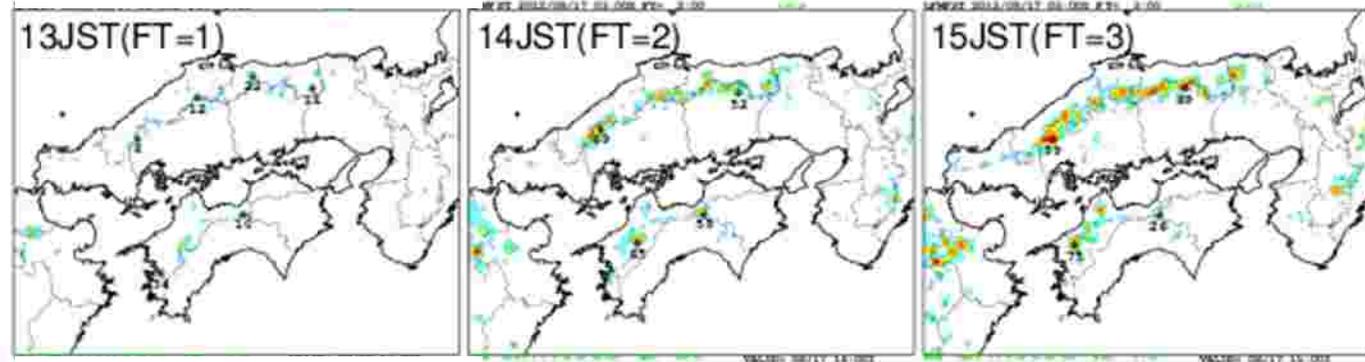
- 対流発生をもたらす強制上昇はスケールが小さなパラメタライズすべきものと考え、対流初期の弱い鉛直輸送のみをパラメタリゼーションによって表現
  - 初期の弱い鉛直輸送が表現できれば、そこに局所的な低圧部ができて、力学が収束を表現して対流による上昇流を表現することになることを狙う。
  - 従来は対流の発生が遅れる問題があったが、このパラメタリゼーションによって改善。
  - 物理過程ライブラリで単体での性能を確認しながら開発。
  - エントレインメント・デトレインメントなどの他のスケールの小さい現象の表現は今後の課題。

# 実況(解析雨量)

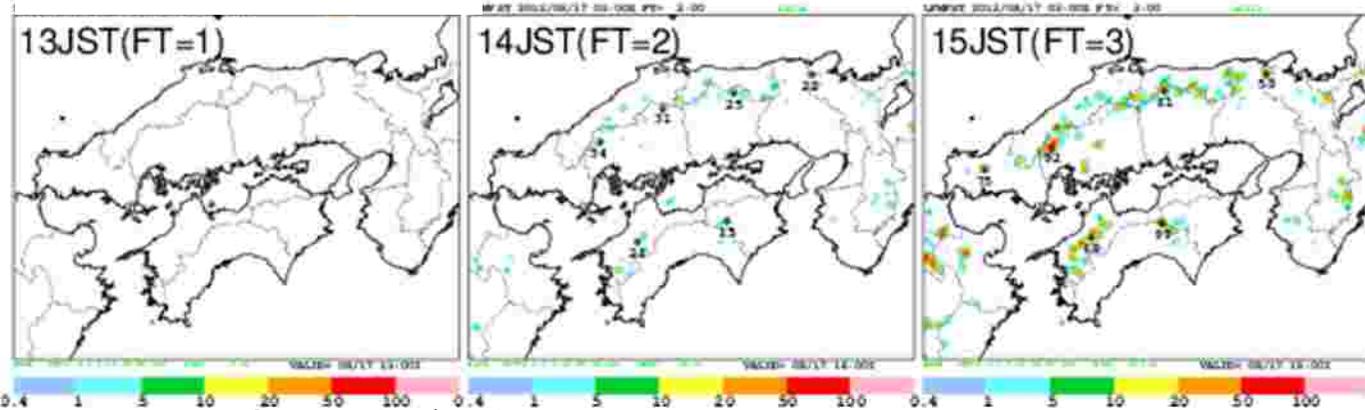
予測の例:  
対流発生初期



asuca



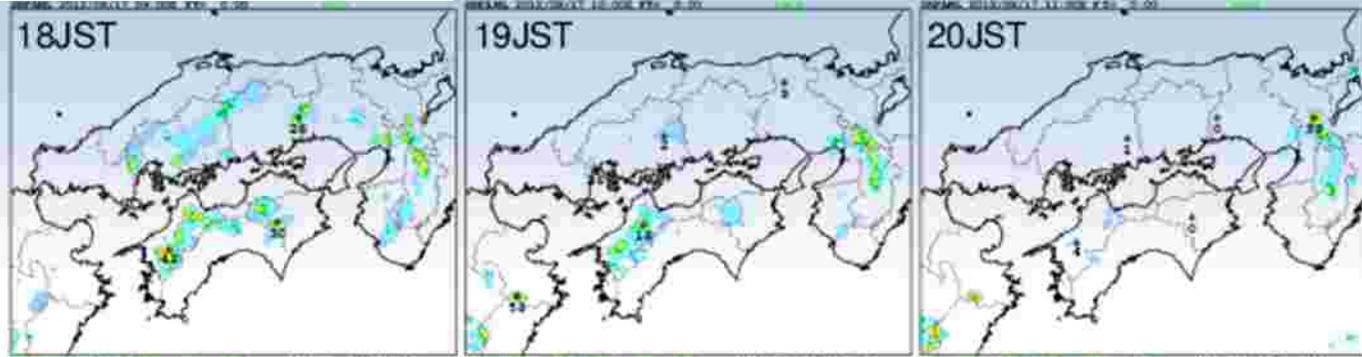
IBLFM



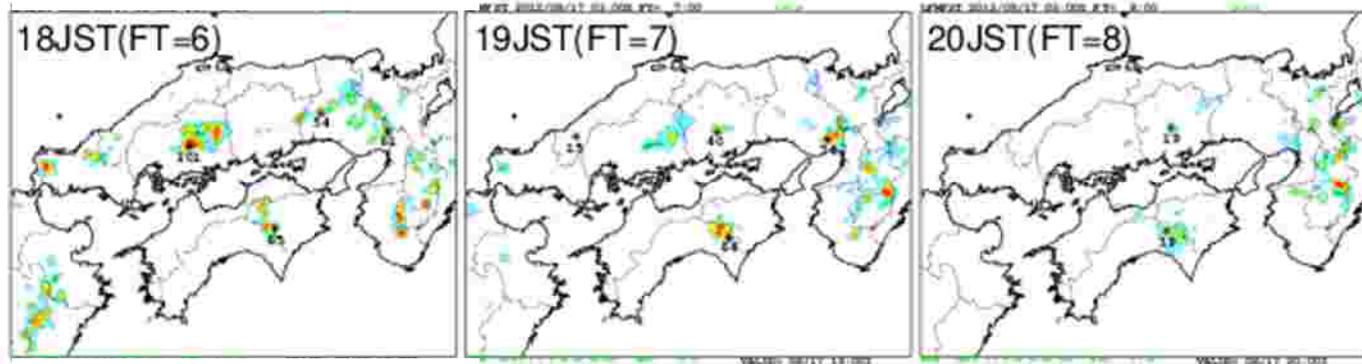
対流の発生が遅れている。

# 実況(解析雨量)

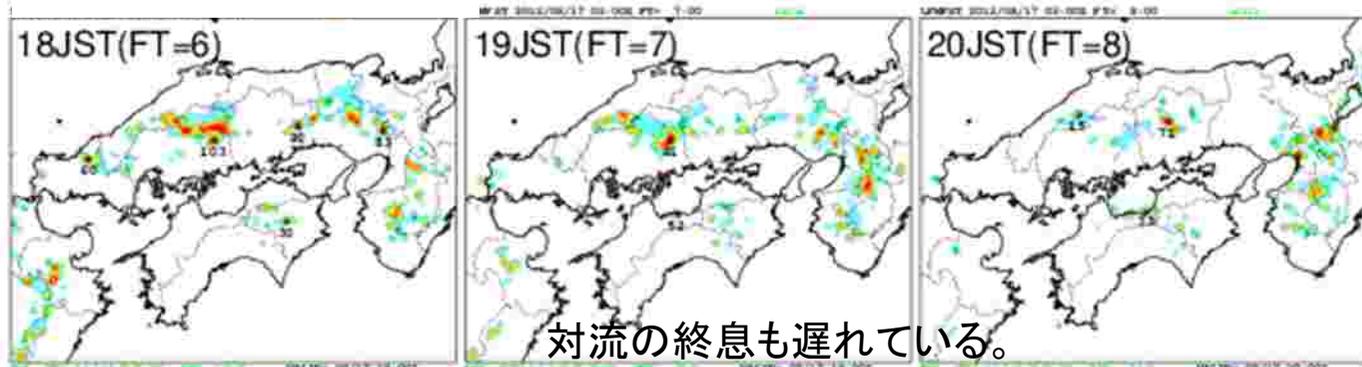
予測例:  
対流の終息期



asuca



IBLFM



対流の終息も遅れている。



# メソ数値予報モデルの今後 究極の夢

- 超高解像度のモデルを用いて、パラメタリゼーションを用いずに支配方程式を解くことだけで
  - 対流などに伴ういろいろな現象による時間変化を表現できるようになること
    - エントレインメントなどの小さな現象も表現するためには、水平格子間隔は100m以下は必要？
      - それでも表現できるかは、やってみないとわからないことも。
  - 格子内の不均一性を考慮しなくてすむこと
    - 雲の不均一性は解像度が180m以下にならないと無視できないといわれる。
- 今の予報領域(特に全球)を格子間隔100mで覆うのはまだまだ先の話。
  - 現在の全球モデルが約20km
    - 全球の格子間隔を100mにするには、800万倍の計算資源必要。

# メソ数値予報モデルの今後 現実編

- 計算機を大きくして解像度を高くすれば、自動的に精度が高くなるバラ色の時代は残念ながら終わった。
- 現業モデルとして運用できるモデルでは、解像できるスケールとできないスケールが混在する人類未踏の解像度に突入。そのようなスケールのモデル化に向き合っていく必要。

モデル開発者には苦難な時代に？ でも、

- 超高解像度モデルをリファレンスとしたパラメタリゼーションの開発の可能性
  - 経験則やパラメータチューニングに依存していた開発から脱却して、より科学的な開発に。

# まとめ

- 数値予報は気象庁の基幹業務
  - 数値予報なしでは天気予報もできない時代に。
  - 数値予報システムは、モデルの初期値を作成する「解析」、支配方程式を時間積分して未来の大気状態を予測する「予報」の2つの大きな部品から構成。
- 計算機の性能向上に伴い、モデルの高解像度化、高度化が進んできた。しかし、高解像度化だけでは自動的に精度向上が得られない時代に。
  - 解像されるスケールとされないスケールが混在(Grey Zone)。
- 最近の計算科学の知見や計算機の趨勢、継続的な開発などを念頭に次世代モデルを開発。
- 究極的には、対流パラメタリゼーションに頼らずに対流現象とそれに付随する現象を解像できる解像度で予測をしたい。しかし、まだ先の未来の話。
  - 一方、パラメタリゼーションの開発に超高解像度モデルを活用する動きが見られる。