



最新の気象予測 ～その理論と技術～

北海道大学地球惑星科学集中講義
札幌管区気象台 室井ちあし

集中講義の内容

- 1日目
 - 気象予測の基礎
 - 気象とコンピュータ
 - 数値予報モデル
- 2日目
 - 数値予報モデル(続)
 - データ同化
 - アンサンブル予報
 - (セミナー) 北海道の気象災害リスクと防災気象情報



数值予報モデル(I)

北海道大学地球惑星科学集中講義
札幌管区気象台 室井ちあし

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

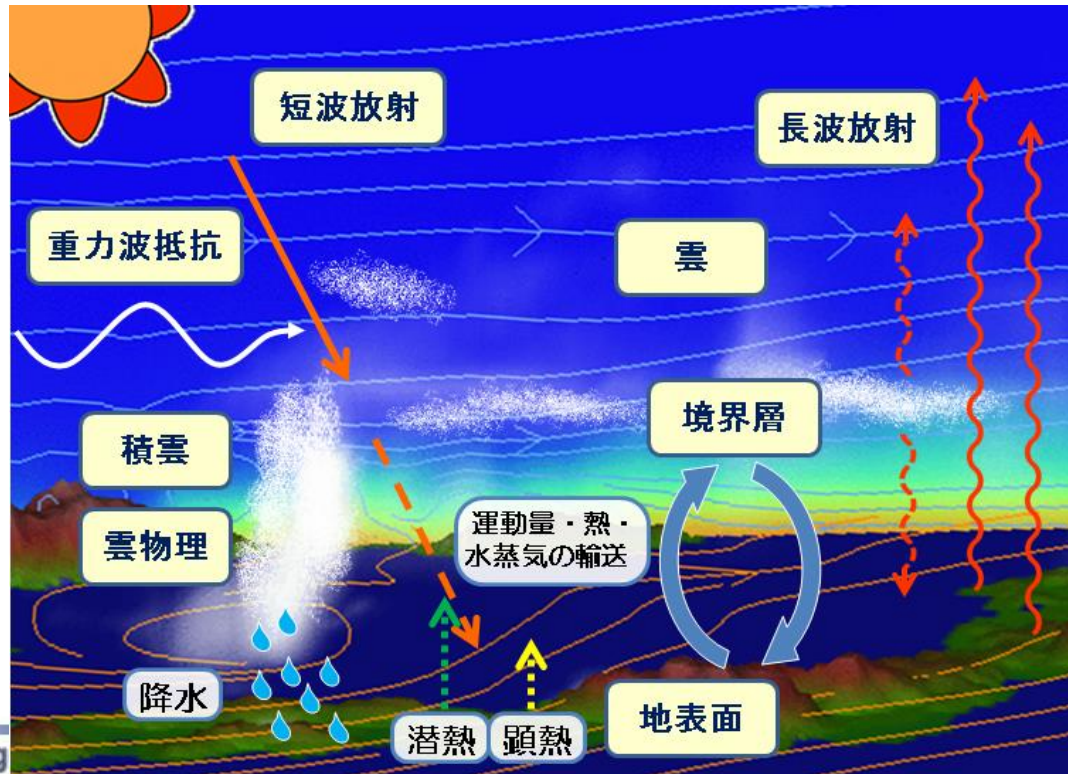
基礎方程式

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

Δt 時間間隔
 ϕ 予報変数

時間変化率

未来の値 現在の値



物理法則

A dramatic sky scene with dark, heavy clouds and a bright lightning bolt striking down on the right side. The foreground shows a dark silhouette of a forest or trees.

数値予報モデルの支配方程式

- 運動方程式
 - 3次元なので3方向
 - 鉛直方向は、重力と気圧傾度がバランスしている「静力学平衡」と仮定する場合があります
- 熱力学方程式
 - 温度を求めます
- 水蒸気の式
 - 水蒸気を求めます
 - 水を雲などにカテゴリー分けして、雲物理の方程式を解くこともあります
- 状態方程式
 - 気圧・温度・密度の関係
- 連続の式

運動方程式(水平方向)

$$\text{x方向} \quad \frac{\partial u}{\partial t} = \left[-u \frac{\partial u}{\partial x} - v \frac{\partial u}{\partial y} - w \frac{\partial u}{\partial z} \right] + 2\Omega v \sin \phi - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + F_x$$

$$\text{y方向} \quad \frac{\partial v}{\partial t} = \left[-u \frac{\partial v}{\partial x} - v \frac{\partial v}{\partial y} - w \frac{\partial v}{\partial z} \right] - 2\Omega u \sin \phi - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + F_y$$

ある地点で見た
水平風の時間変化 = 移流の効果 + コリオリの効果 + 水平の気圧傾度力 + 摩擦力・物理過程

x: 東西方向の座標
y: 南北方向の座標
z: 鉛直方向の座標
t: 時間

u: 風速の x 方向の成分
v: 風速の y 方向の成分
w: 風速の z 方向の成分
p: 気圧

ρ : 密度
 ϕ : 緯度
 Ω : 地球の自転の角速度
g: 重力加速度

運動方程式(鉛直方向)

- 静力学平衡の近似

水平運動のスケール >> 鉛直運動のスケール のときOK

鉛直方向の気圧傾度力と重力が釣り合うとする近似(静力学平衡の近似)が高い精度で成り立つ

$$0 = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} - g$$

鉛直の気圧傾度力と重力がつりあっている

高・低気圧のような空間スケールでは、鉛直加速度は無視できるほど小さい
(鉛直速度そのものは無視できない)

- 非静力学モデルの場合

メソスケール現象では鉛直スケールと水平スケールが同じ程度になる場合があるので、静力学平衡の近似が成り立たない。予報変数に鉛直方向の速度を含む

$$\frac{\partial w}{\partial t} = \left[-u \frac{\partial w}{\partial x} - v \frac{\partial w}{\partial y} - w \frac{\partial w}{\partial z} \right] - 2\Omega \cos \phi u - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} - g + F_z$$

ある地点で
見た鉛直風
の時間変化

=

移流の
効果

+

コリオリの
効果

+

鉛直の
気圧傾度力

+

重力

+ 摩擦力・
物理過程



質量の保存(連続の式)

- 質量保存の法則

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = \left[-u \frac{\partial \rho}{\partial x} - v \frac{\partial \rho}{\partial y} - w \frac{\partial \rho}{\partial z} \right] - \rho \left\{ \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} \right\}$$

ある地点で見た
密度 ρ の時間変化

=

移流の効果

+

収束発散による
密度変化

熱エネルギーの保存 気体の状態方程式

- 熱エネルギーの保存

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \left[-u \frac{\partial \theta}{\partial x} - v \frac{\partial \theta}{\partial y} - w \frac{\partial \theta}{\partial z} \right] + \mathbf{H} \quad \theta: \text{温位}$$

ある地点で見た
温位 θ の時間変化

=

移流の効果

+

非断熱過程による
温位の変化

(診断方程式)

気体の状態方程式:

$$p = \rho RT$$

R : 気体定数

T : 気温

水蒸気の保存

- 水蒸気の保存

$$\frac{\partial q}{\partial t} = \left[-u \frac{\partial q}{\partial x} - v \frac{\partial q}{\partial y} - w \frac{\partial q}{\partial z} \right] + M$$

ある地点で見た水蒸気 q の時間変化 = 移流の効果 + 非断熱過程による加湿

q : 比湿(モデリングの分野では混合比と呼ぶことがある)

- 雲物理過程を導入したモデルでは、雲水、雲氷、雨、雪、あられの混合比 (q_c, q_i, q_r, q_s, q_g) を追加

- 全球モデル : q, q_c

- メソモデル : $q, q_c, q_i, q_r, q_s, q_g$

領域モデルと全球モデル

- 領域モデルは見たいところを細かくシミュレーション
- 日本付近の天気予報、積乱雲・雷の発達シミュレーションなど、古くから需要があり、開発も盛ん
- 計算負荷もかかり観測データ取り扱いが複雑な全球モデルより、扱いが易しい地域モデルは、民間会社・途上国のニーズにもマッチ
- 側面境界の影響が甚大で、結局は外側の境界値の精度に依存してしまい、予報初期にしか意味がない
- 一方、細かい初期値を得ることが非常に困難で、予報初期(立ち上がり)の精度に限界がある

静力学モデルと非静力学モデル

非静力学モデル

- 静力学平衡の仮定を用いず、鉛直方向の運動を解くモデル
 - 通常は、鉛直方向の運動は卓越しない
 - 山岳波、発達する積乱雲は、静力学平衡では表現不可能
- 問題：音波をどうするのか？

Klemp and Wilhelmson (1978)

- “The Simulation of Three-Dimensional Convective Storm Dynamics”, JAS, 35, 1070-1096
- 「3次元雲解像モデルを用いて、雷のシミュレーションに成功した」
- 圧縮性方程式をそのまま解き、音波から来る CFL制限を「スプリット型」にすることによって回避した

Ogura and Philips (1962)

- “Scale analysis of deep and shallow convection in the atmosphere”, *J. Atmos. Sci.*, **19**, 173-179.
- 音波があらわれない非弾性方程式系を用いることで、音波の問題を回避した

非圧縮モデル

- 密度一定の基本場からのずれが小さいと仮定
 - 密度が3次元で一様であるとの仮定
 - 連続の式として非圧縮の式を用いる
 - 連続の式、運動方程式の ρ を基本場の値(定数)に書き換え、 p を基本場からの偏差に置き換える
 - 温位の偏差による浮力項は考慮
- 音波を含まない
- 高度による密度変化を考慮できないので、対流圏全層(あるいはそれ以上)を対象とするシミュレーションには用いられない

非弾性モデル

- 水平一様な基本場とそれからの偏差に分ける
 - 連続の式で密度の時間変化項は省略
 - 運動方程式の ρ を基本場の値(水平一様、鉛直には変化)、 ρ を基本場からの偏差に書き換える
 - 密度(温位、気圧)の偏差による浮力項は考慮
- 通常の気象現象に対して良い精度でなりたつ
- 音波を含まない
- 広い領域を対象とすると誤差が大きくなる
- 3次元楕円型方程式を解く必要がある

連続の式
$$\frac{\partial \bar{\rho} u}{\partial x} + \frac{\partial \bar{\rho} v}{\partial y} + \frac{\partial \bar{\rho} w}{\partial z} = 0$$

準圧縮モデル

- 密度に基本場の値を用いる
 - 連続の式で密度の時間変化項は(形式的に)省略しない
 - 気圧方程式を導いた後は連続の式は用いない
 - 密度の時間変化は予想しない
 - 運動方程式は非弾性モデルと同様の式を用いる
- 音波を含む
- 精度は非弾性系モデルと同程度
- 3次元楕円型方程式を解く必要がない

連続の式
$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial \bar{\rho} u}{\partial x} + \frac{\partial \bar{\rho} v}{\partial y} + \frac{\partial \bar{\rho} w}{\partial z} = 0$$

完全圧縮モデル

- 連続の式はそのまま用いる
- 方程式系に近似を含まない
- 音波を含む
- 質量の保存が計算誤差に敏感になるため、計算には注意が必要
- 現在は多くのモデルで利用されている
 - 気象庁非静力学モデル(NHM)など

連続の式
$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial \rho u}{\partial x} + \frac{\partial \rho v}{\partial y} + \frac{\partial \rho w}{\partial z} = 0$$



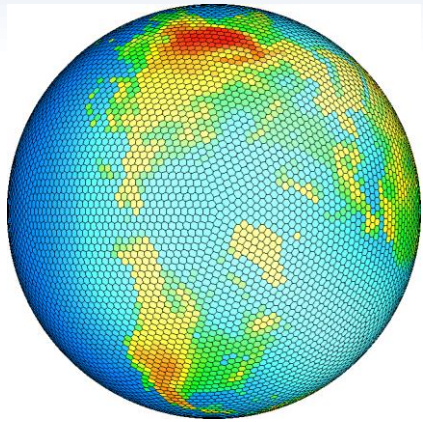
数值計算法

離散化

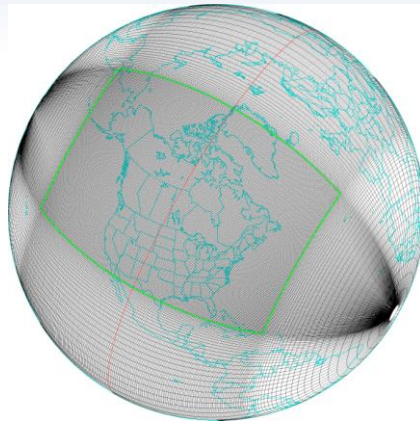
- 飛び飛びの値にする(離散化)
 - 計算機上では連続したものを扱えない
 - 自然界は無限に細かい格子とみなせる

- 離散化
 - 水平方向
 - 鉛直方向
 - 時間発展

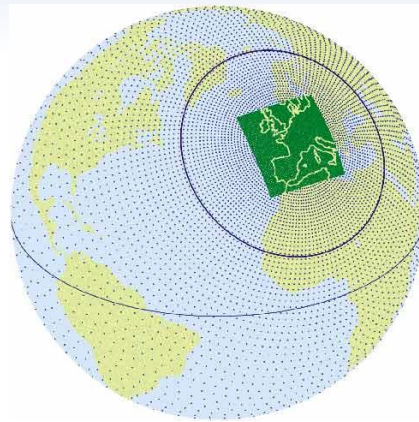
いろいろな格子



ドイツ気象局(DWD) GME
コロラド州立大学 BUGS
地球フロンティア・東大CCSR NICAM



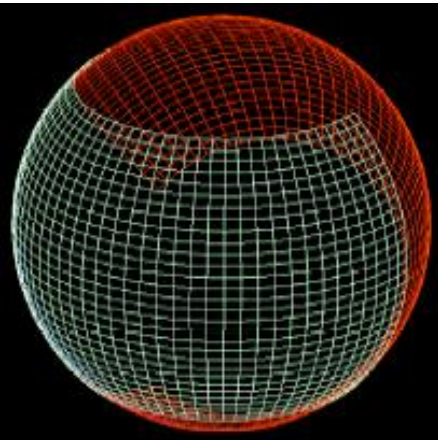
カナダ気象局(AES) GEM



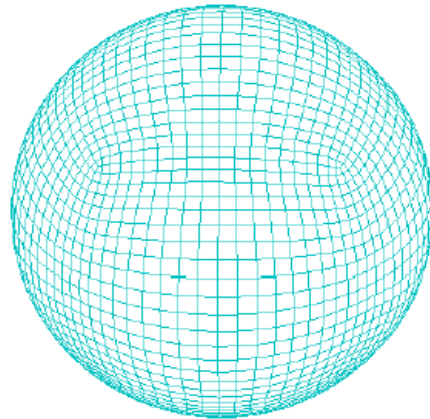
フランス気象局 ARPEGE



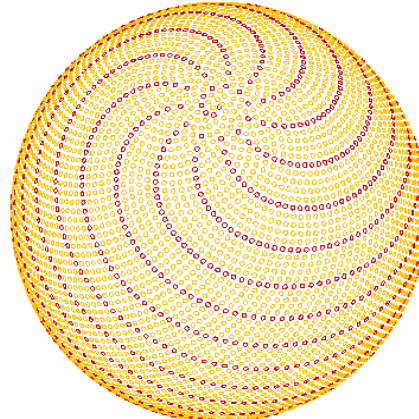
イギリス気象局 Unified Model (UM)



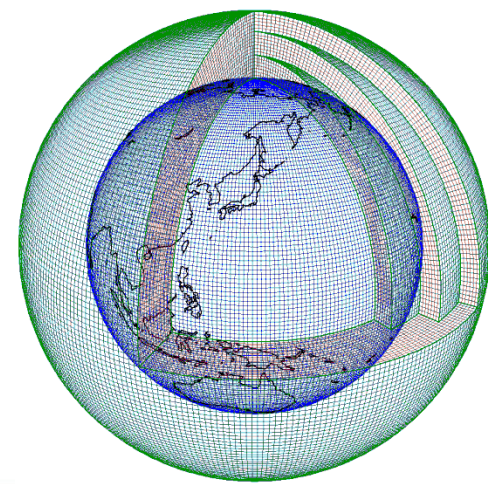
地球シミュレーションセンター Yin-Yang Grid (Chimera Grid)



気象庁 Conformal Cubic Grid



Fibonacci Grid



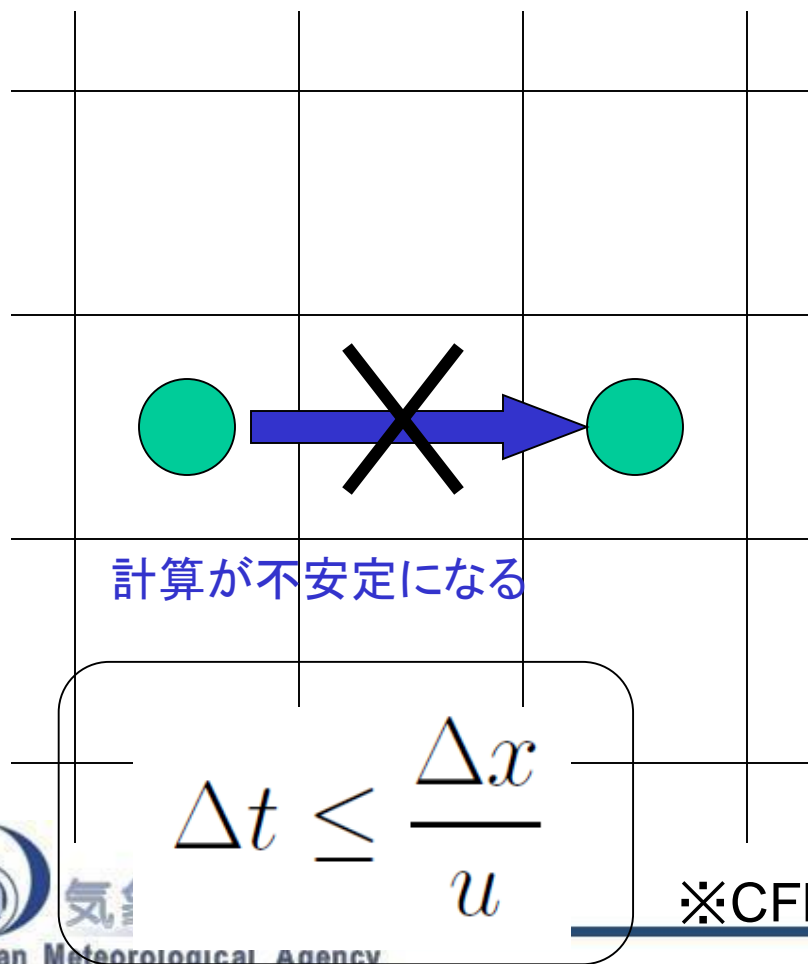
離散化(時間発展)

- 基礎方程式系は非線型連立偏微分方程式
 - ← 解析的に解くことはできない
 - 微小な時間 Δt (時間ステップ) で離散化して、数値積分

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} = F \quad \xrightarrow{\text{離散化}} \quad \phi_{t+\Delta t} = \phi_t + F_t \Delta t$$

- この時間積分法(前進スキーム)では計算が不安定になるので、実際は異なるスキームを用いる
 - 計算時間を短くするためには Δt を長くしたい

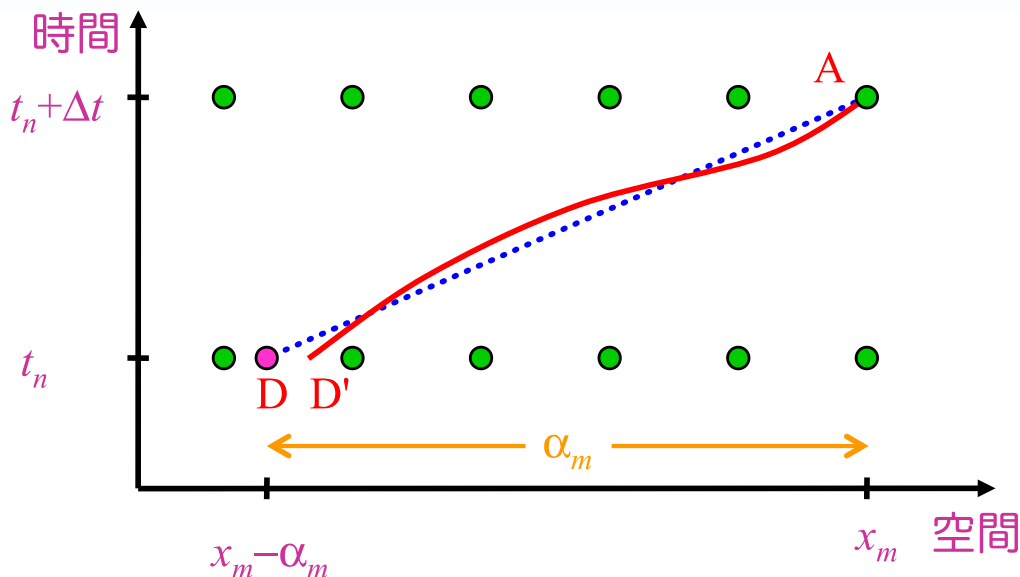
時間ステップに関する制限



- 1 回の時間ステップで隣の格子を飛び越えてはいけない
 - 時間ステップの大きさは格子の大きさにより制限される (CFL 条件)
 - 格子間隔 5 km のメソモデルでは $\Delta t = 24$ 秒

※CFL条件 (Courant-Friedrichs-Lewy Condition)

セミラグランジュ法



- 時間ステップごとに、各格子点に流れ着く粒子を考える。
- 時刻 t_n における格子点値がわかっている。
- α_m が求められれば(上流点探索)、Aでの値(未来値)が決まる。
- この方法はCFL条件には束縛されない(別の条件はある)

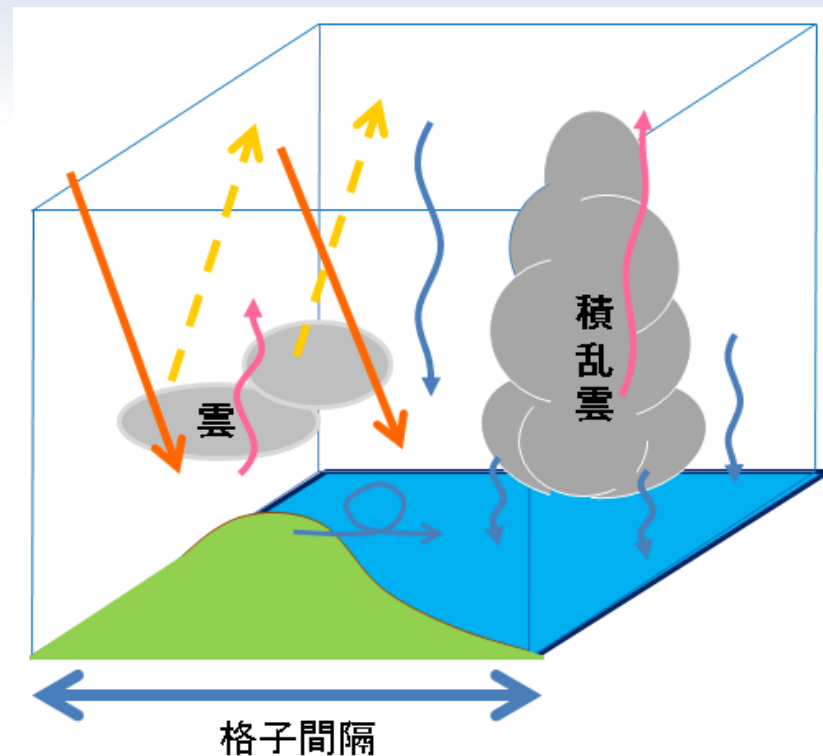
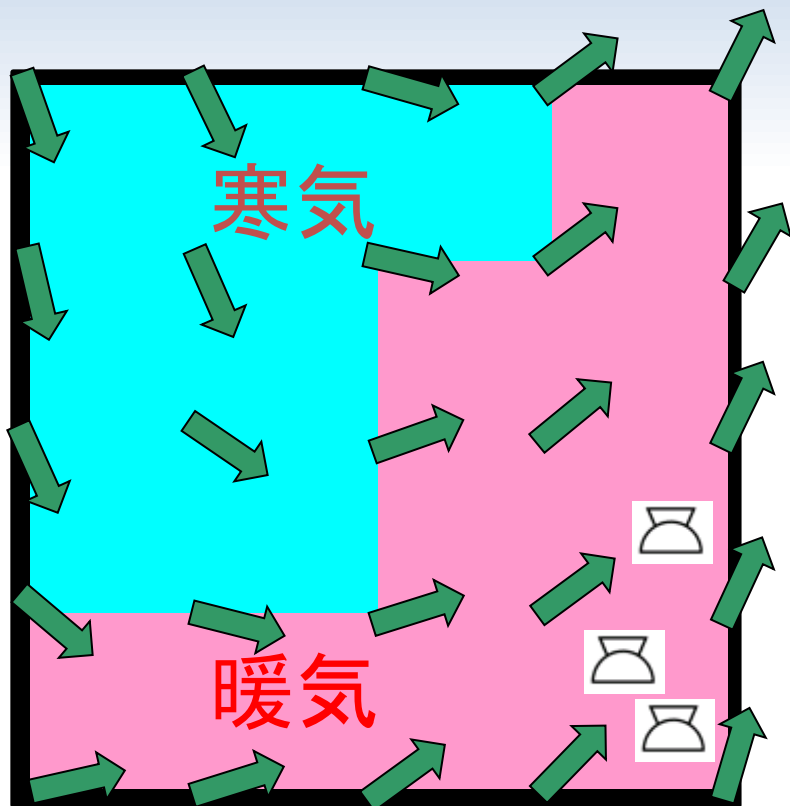
$x-t$ 平面上での粒子の軌跡。

$D'A$ は時刻($t_n + \Delta t$)に点 x_m に到達する粒子の真の軌跡。

DA は $D'A$ を直線で近似した軌跡。

●は格子点、●は内挿によって求められる点。

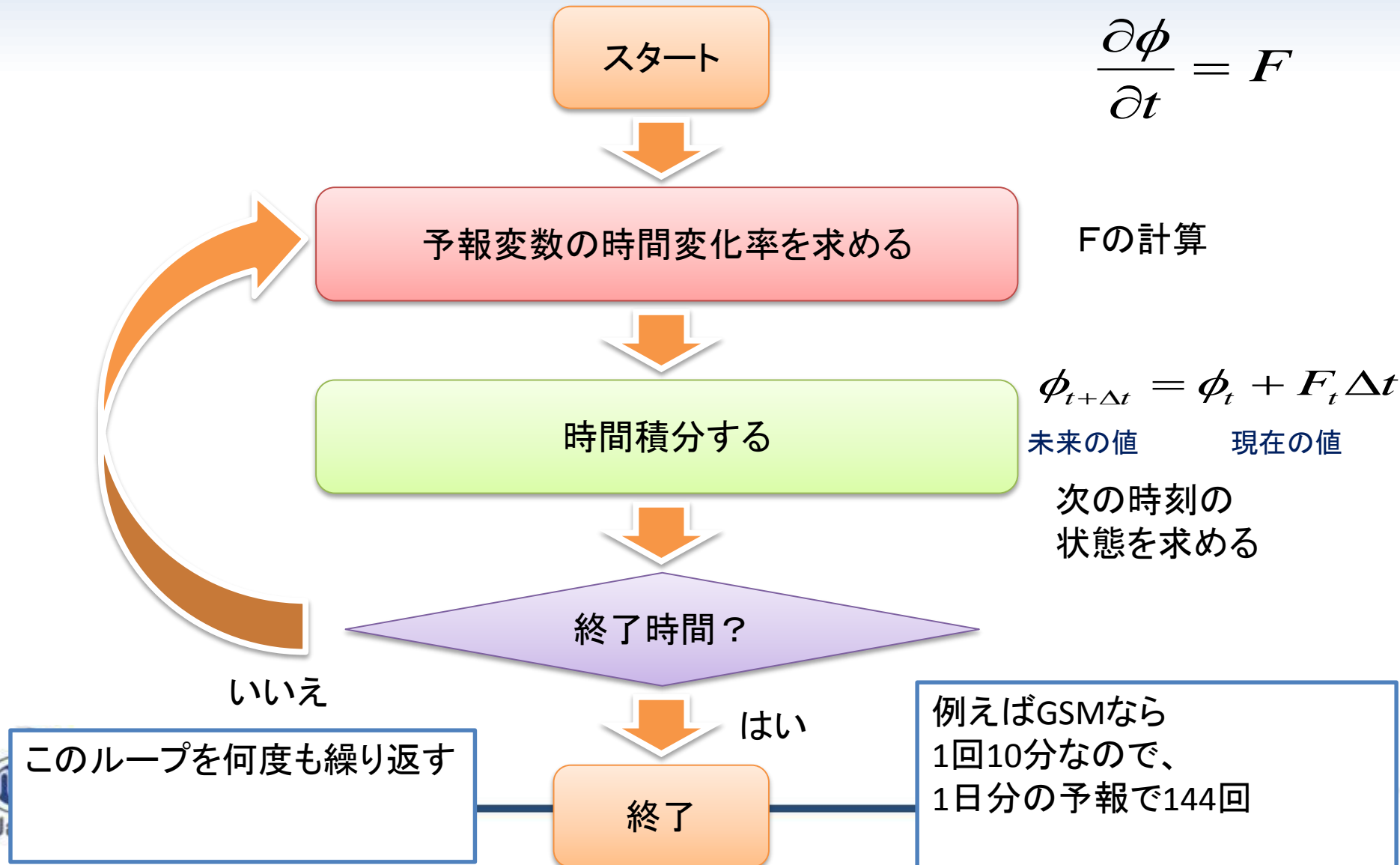
グリッドスケールとサブグリッドスケール



予報モデルの中では格子平均値しか情報が無い。
しかし、ひとつの格子点の中にも、多様な現象が含まれ、その揺らぎによる効果は本質的である。

このサブグリッドスケールの現象の影響をどう評価するか？は非常に難しい問題であり、モデルの不完全さの大きな原因である。境界層、接地境界層、重力波、積雲、雲・放射相互作用等が含まれる

数値予報モデルの計算の流れ



最も簡単な、1次元移流方程式

- 方程式

- 物理量 f が、速度 c で、 x 方向に動いている

$$\frac{\partial f}{\partial t} = -c \frac{\partial f}{\partial x}$$

- 適当な初期値、数値計算法を用いて解いてみる

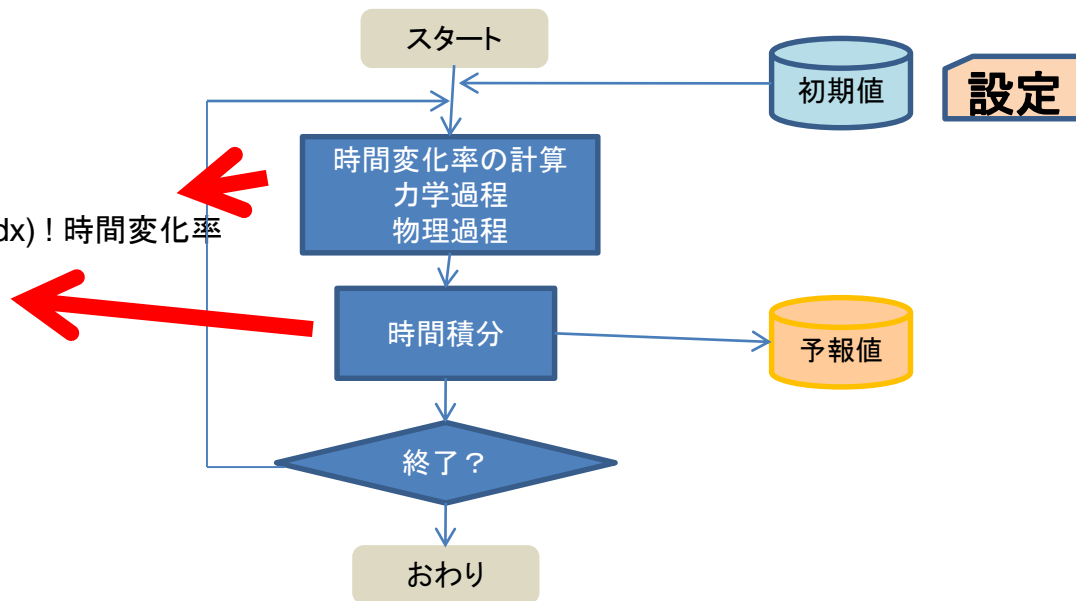
プログラム例

```
program adv
integer, parameter:: nx = 100 ! 格子数(問題サイズ)
real(8):: f(nx) ! 物理量の配列
real, parameter:: dx = 1000.d0 ! 格子間隔(細かい方が精度は良い)
real, parameter:: dt = 1.d0 ! 時間積分間隔
! 初期値設定
do l = 1, nx
    f(l) = ...
end do
! 時間ループ
do it = 1, 100
    do l = 1, nx
        dfdx = -c * ( f(l+1) - f(l-1) ) / ( 2.*dx ) ! 時間変化率
        f(l) = f(l) + dfdx * dt !
    end do
    ! 必要ならここで出力
    write(10) f
end do

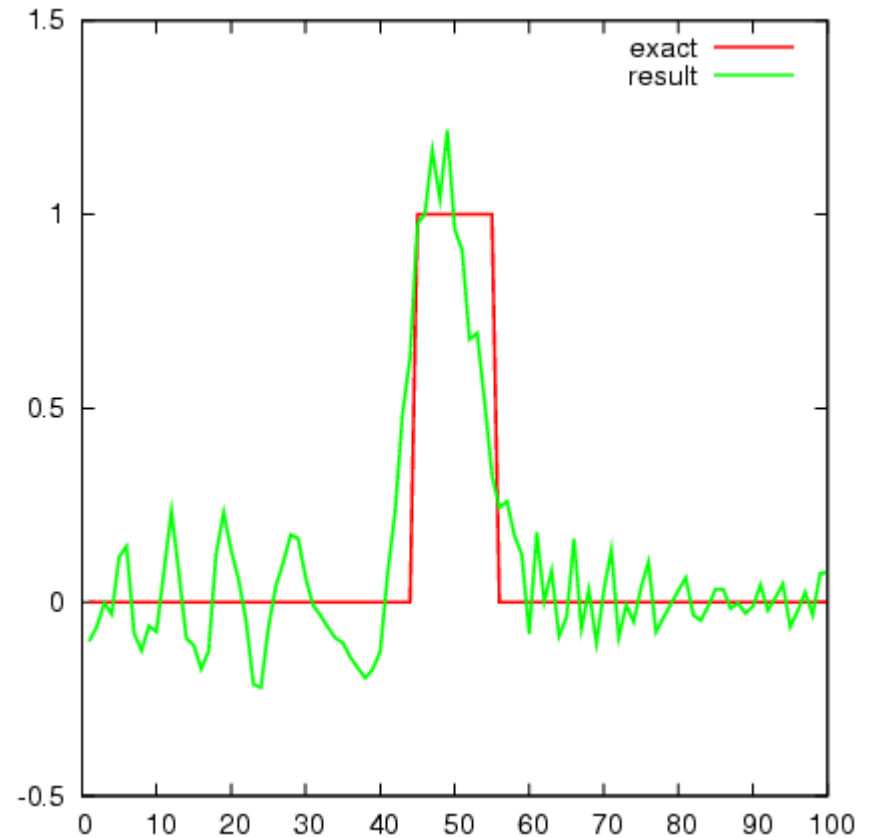
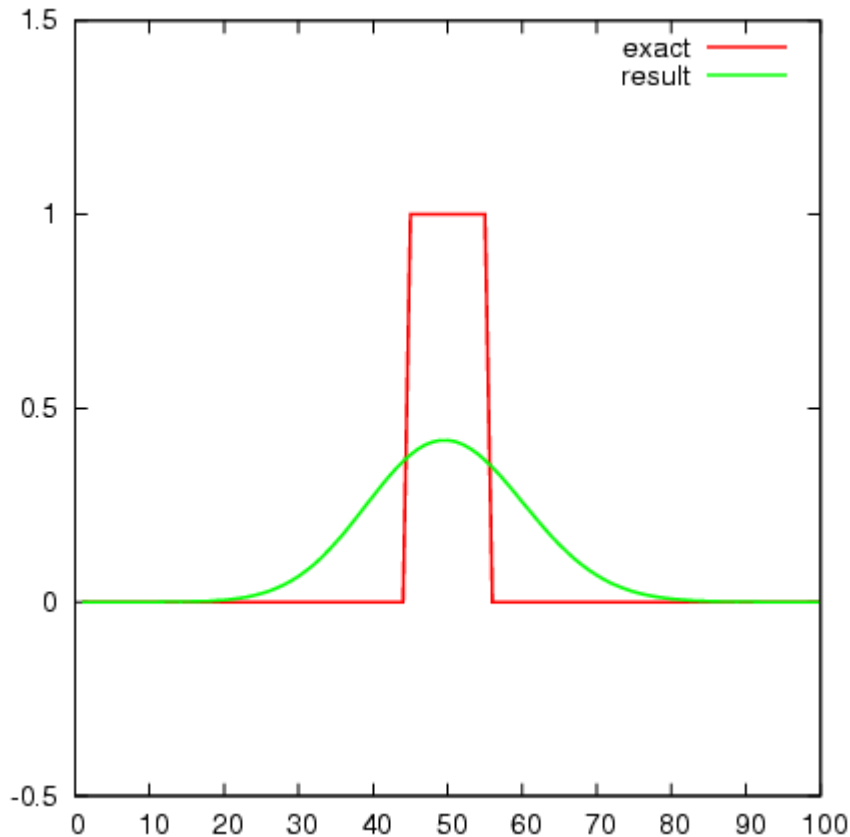
stop
end program adv
```

$$\frac{\partial f}{\partial t} = -c \frac{\partial f}{\partial x}$$

$$\frac{f^{t+1} - f^t}{\Delta t} = -c \frac{f_{i+1} - f_{i-1}}{2\Delta x}$$



結果の例



格子数を100として領域中央に $10\Delta x$ の矩形波をおいた場合の結果。

$\Delta x=1000\text{m}$ 、 $c=50\text{m/s}$ 、 $\Delta t=10$ とし、ちょうど1周するだけ時間積分した。

左が風上1次差分、右が中央2次差分を用いた結果。赤線が厳密解。緑線が数値解

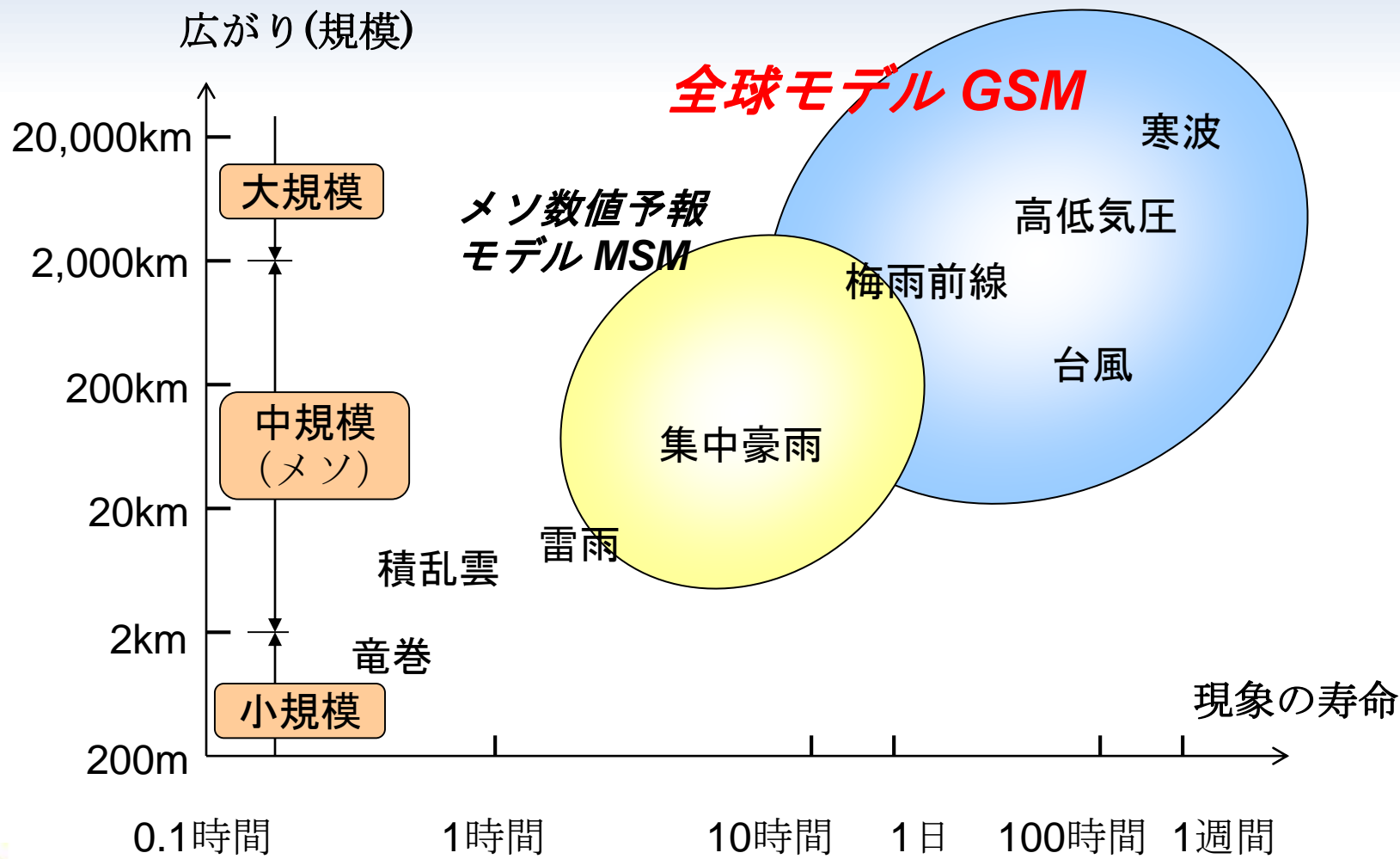
実際の数値予報モデル

- 原理は同じ
- これが複雑になり、数十万行に達する
- 「パッケージ化(カプセル化、隠蔽)」により、わかりやすいプログラムが採用されつつある
- しかし、計算精度については様々な原因が絡み合っており、総合的知識が必要



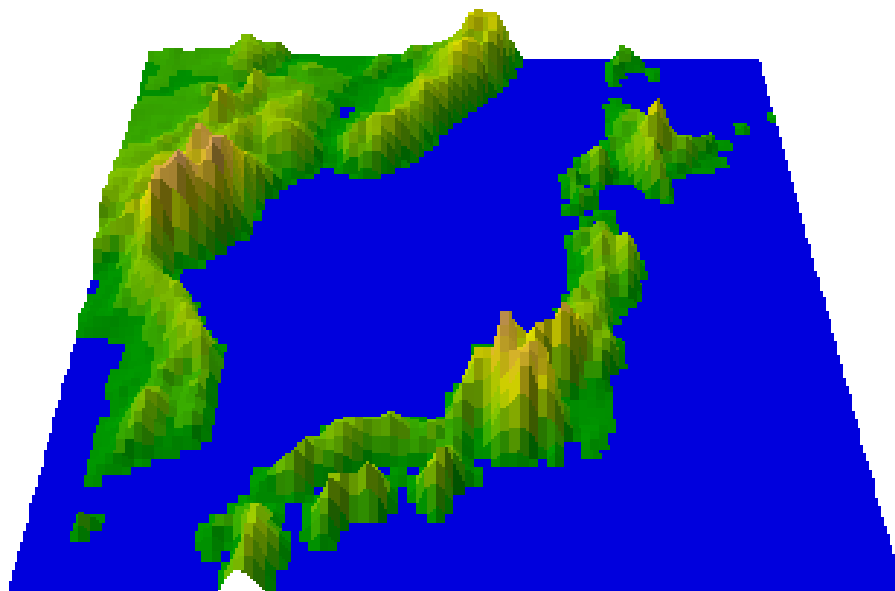
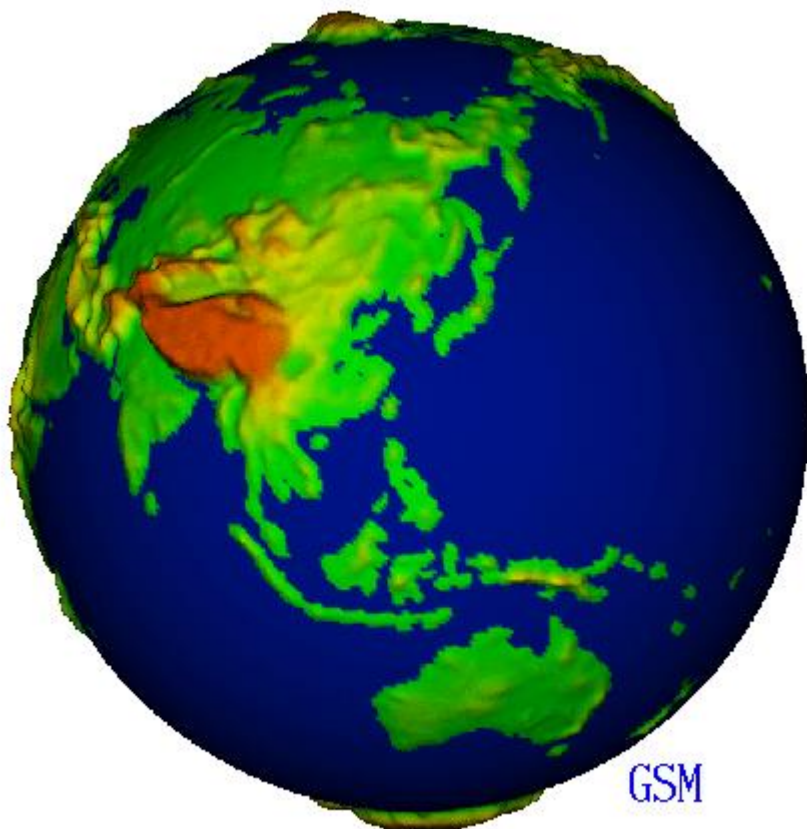
気象庁の数値予報モデル

数値予報モデルとその適用範囲



気象庁全球数値予報モデル(GSM)

- 解像度
 - TL959L60(2007.11～)。水平解像度約20km, 鉛直60層)
- 予報時間
 - 84時間(00,06,18UTC)
 - 216時間(12UTC)



現業全球数値予報システムの仕様

全球数値予報システム

$T_L 959L60$ (格子間隔 約20km:0.1875度)

84時間予報 00,06,18UTC初期値

216時間予報 12UTC初期値

4次元変分法 $T159L60$ (インナーモデル)

週間/台風アンサンブル予報システム

$T_L 319L60$ (格子間隔 約60km:0.5625度)

(週間) 216時間予報 12UTC初期値

(台風) 132時間予報 00,06,12,18UTC初期値 (台風あるとき)

SV法 51メンバー (週間)・11メンバー (台風)

1か月アンサンブル予報システム

$T_L 159L60$ (格子間隔 約120km:1.125度)

17日予報 日・月初期値 <異常天候早期警戒情報支援>

34日予報 水・木初期値 <1か月予報支援>

BGM+LAF法 25メンバー×2日分

季節アンサンブル予報システム

JMA/MRI-CGCM: $T_L 95L40$ (格子間隔 約200km:1.875度)

7か月予報 5日毎

BGM+LAF法 51メンバー (=9x5+6x1)

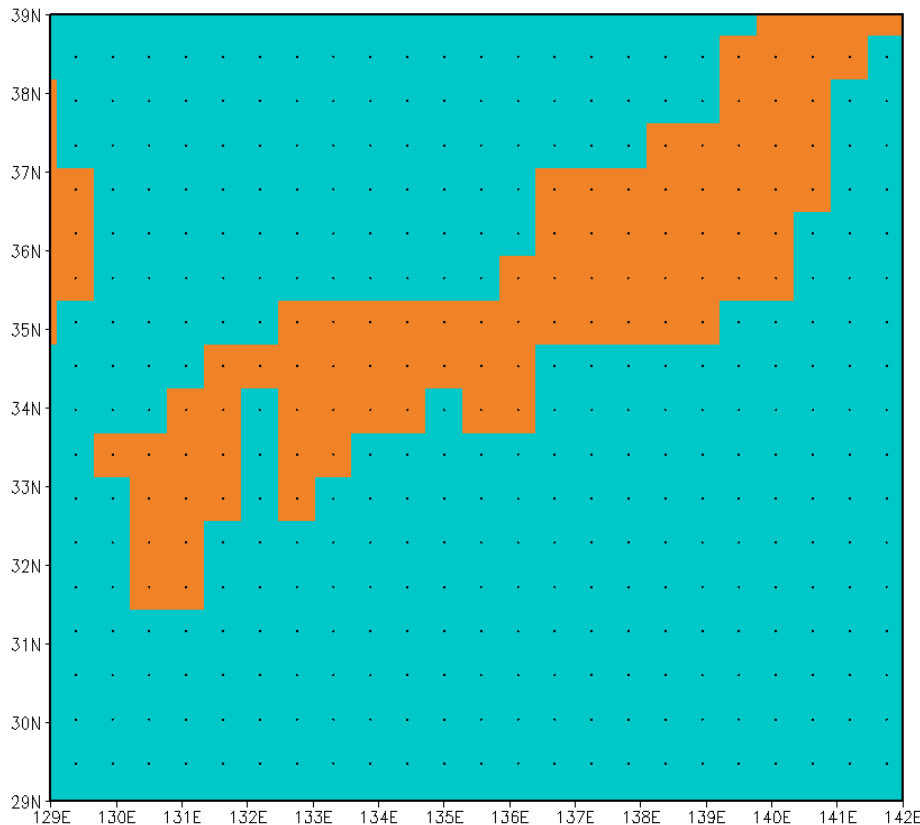
GSMの高解像度化(2007年11月～)

	旧GSM(60kmGSM)	新GSM(20kmGSM)
予報時間	36(06,18)/90(00)/216(12)	84(00,06,18)/216時間(12UTC)
水平解像度	約60km(TL319)	約20km(TL959)
鉛直解像度	40層(最上層は0.4hPa)	60層(最上層は0.1hPa)
時間積分	3タイムレベル(Δt は900秒)	2タイムレベル(Δt は600秒)
地形/海陸	60km相当	20km相当
海面水温	1° 格子の解析値	高解像度(0.25°) 全球海面水温解析値
海水分布	1° 格子の気候値	高解像度(0.25°) 全球海水分布解析値
積雪深	全球積雪深解析(1° 格子)のみ	日本域に地上観測とアメダスデータを適用
放射	<ul style="list-style-type: none"> ・エーロゾルは海陸別の分布 ・東西2格子、南北2格子間引き 	<ul style="list-style-type: none"> ・エーロゾルは地理的分布を考慮 ・間引き計算は東西4格子毎に変更
対流	<ul style="list-style-type: none"> ・積雲の運動量輸送は陽解法 	<ul style="list-style-type: none"> ・積雲の運動量輸送計算を陰解法に変更 ・CAPEの変化による積雲トリガーを導入
雲		<ul style="list-style-type: none"> ・60層化に伴う海洋層積雲スキームの調整



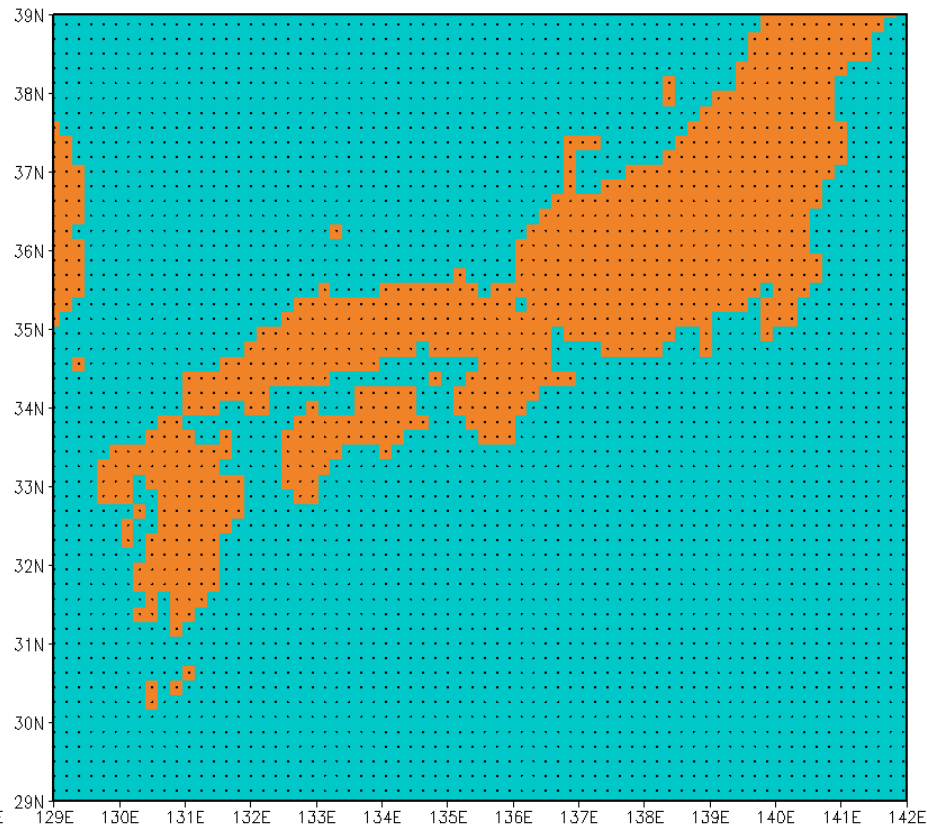
水平格子数

60kmGSM(T_L319)



Total # of points in
T_L319 grid: 640x320

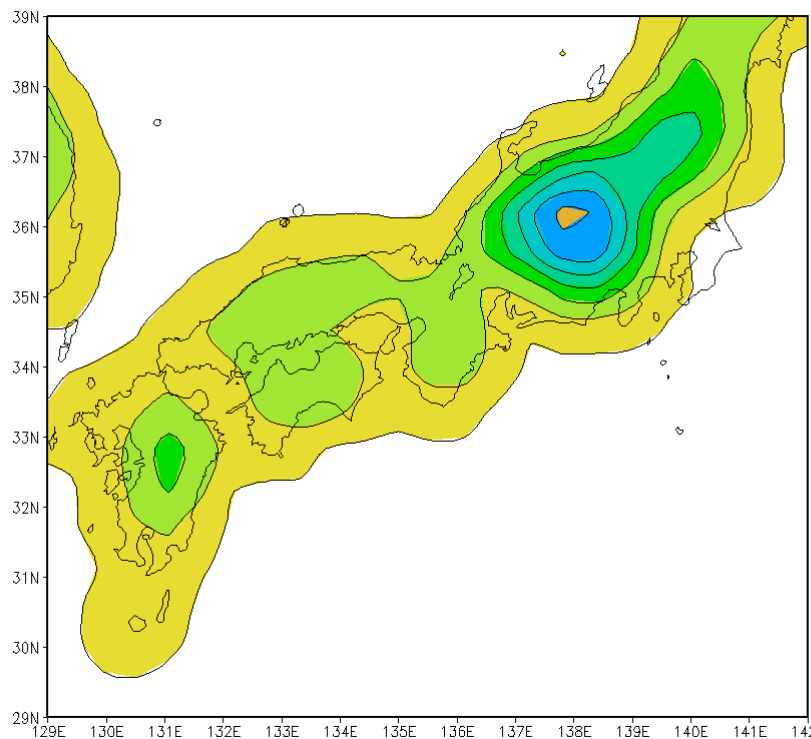
20kmGSM(T_L959)



Total # of points in
T_L959 grid: 1920x960

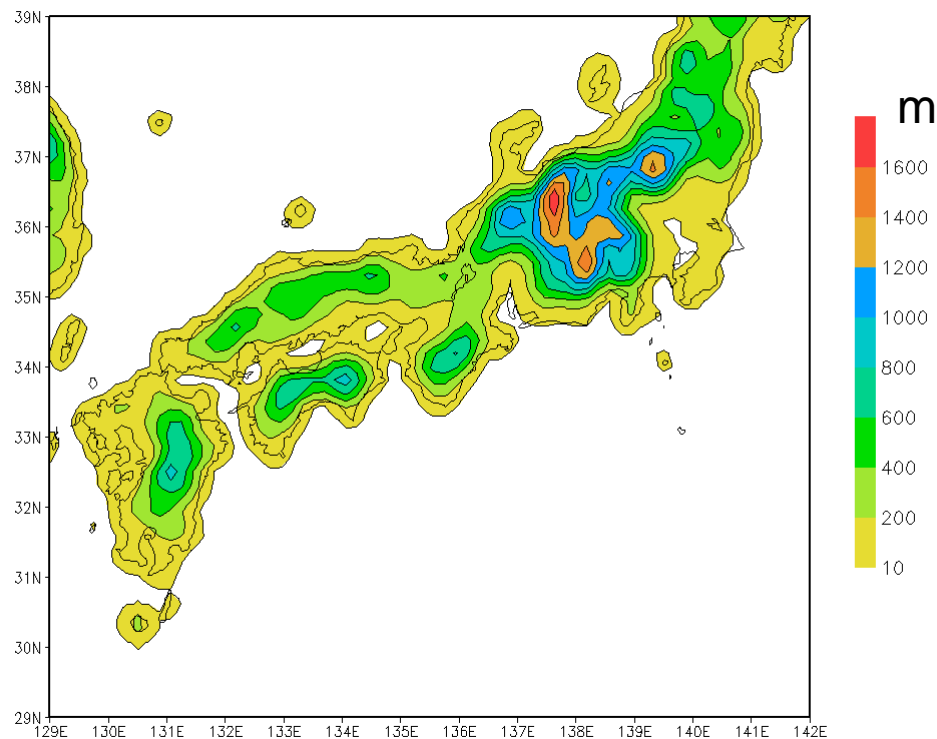
標高

60kmGSM(T_L319)



Grid spacing ~ 60km

20kmGSM(T_L959)



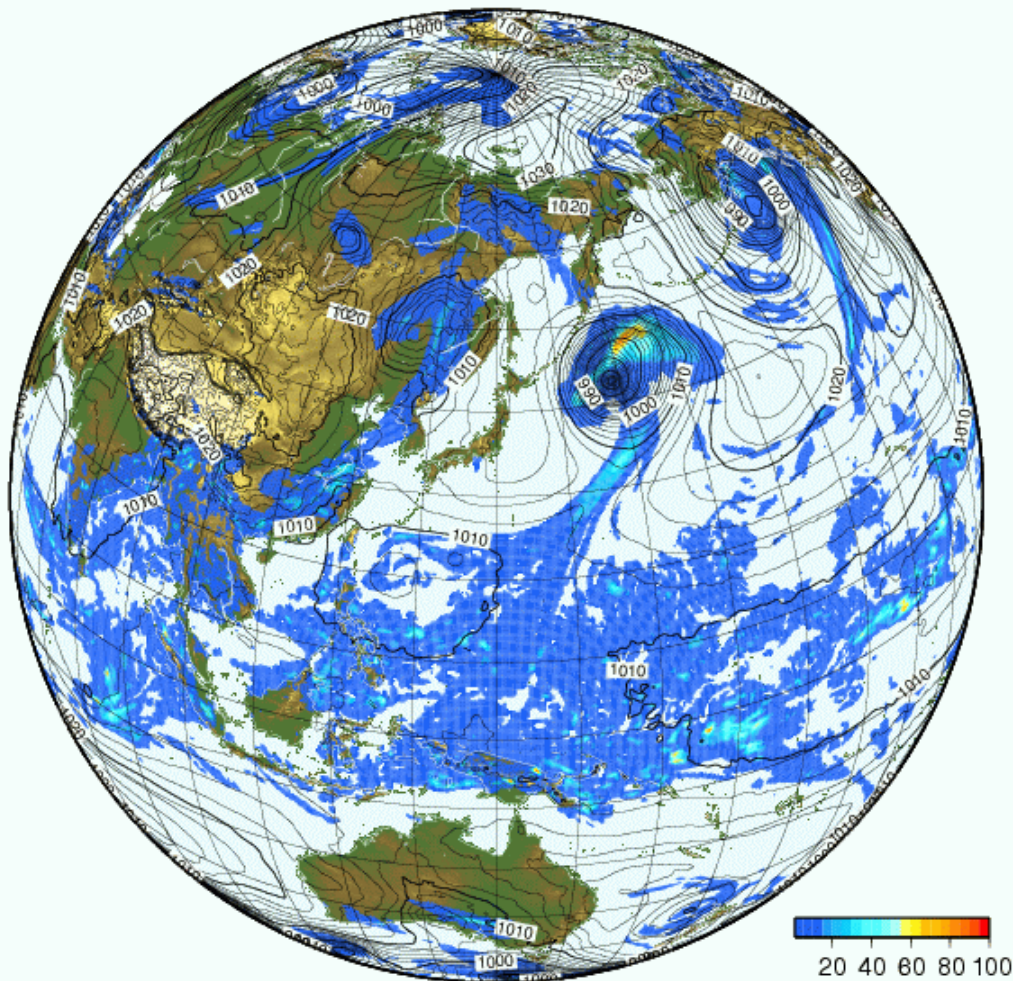
Grid spacing ~ 20km

全球モデルの役割

- 明後日予報、週間予報の基礎資料
 - 台風進路予報の基礎資料
 - 航空、海上交通支援の予報基礎資料
 - 波浪モデル入力データ
 - 移流拡散モデル入力データ など
-
- 短期(今日、明日)予報の基礎資料
 - 量的予報・ガイダンス作成の基礎資料
 - メソ数値予報モデルの側面境界条件
 - 台風強度予報の基礎資料

全球モデルによる予報例

GSM-TL959L60 2009.09.16.12UTC FT=108
(Valid Time: 09.21.00UTC)



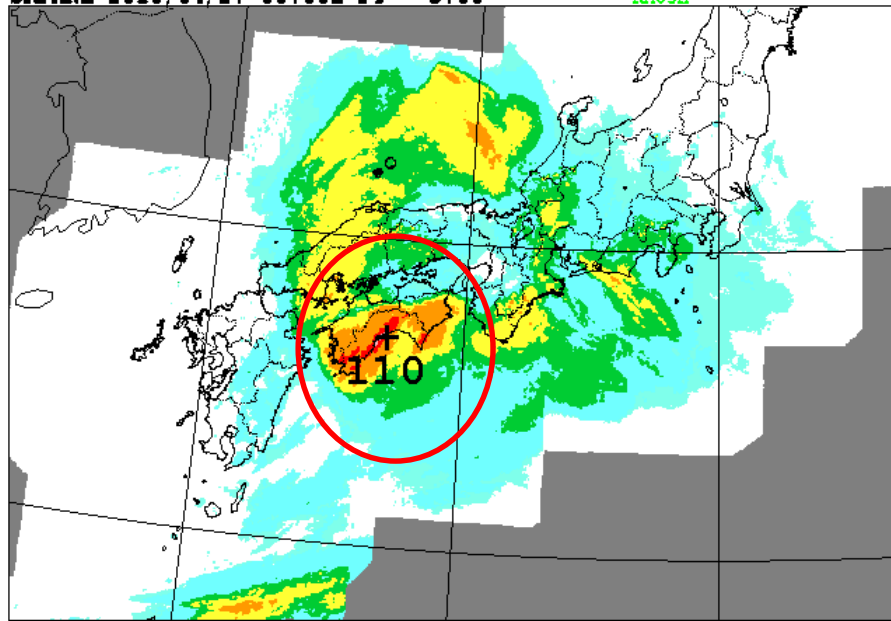
全球モデルによる予報例

2010/04/27 00UTC R3

解析雨量 MAX 110mm/3h

SREFANL 2010/04/27 00:00Z FT= 3:00

RR03H



RM60 CNT=0.4 1 5 10 20 50 100 MAX= 109.50 VALID= 04/27 12:00I

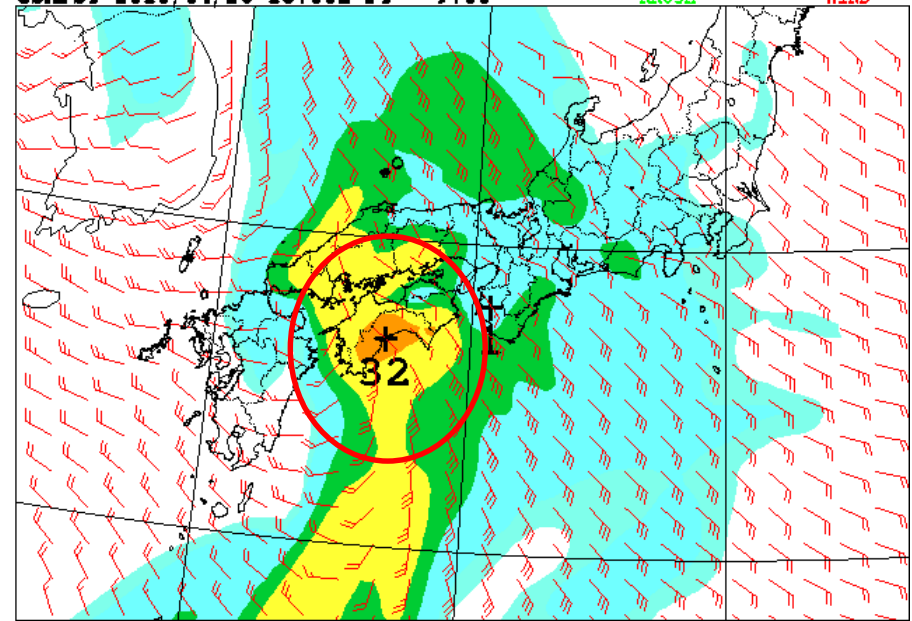
0.4 1 5 10 20 50 100

GSM (FT=9) MAX 32.0mm/3h

GSMEST 2010/04/26 18:00Z FT= 9:00

RR03H

WIND



RAIN CNT=0.4 1 5 10 20 50 100 MAX= 32.06 VALID= 04/27 12:00I

WIND (KNOT) MAX= 40.78 WIND= 1.22

0.4 1 5 10 20 50 100

気象庁全球数値予報モデル

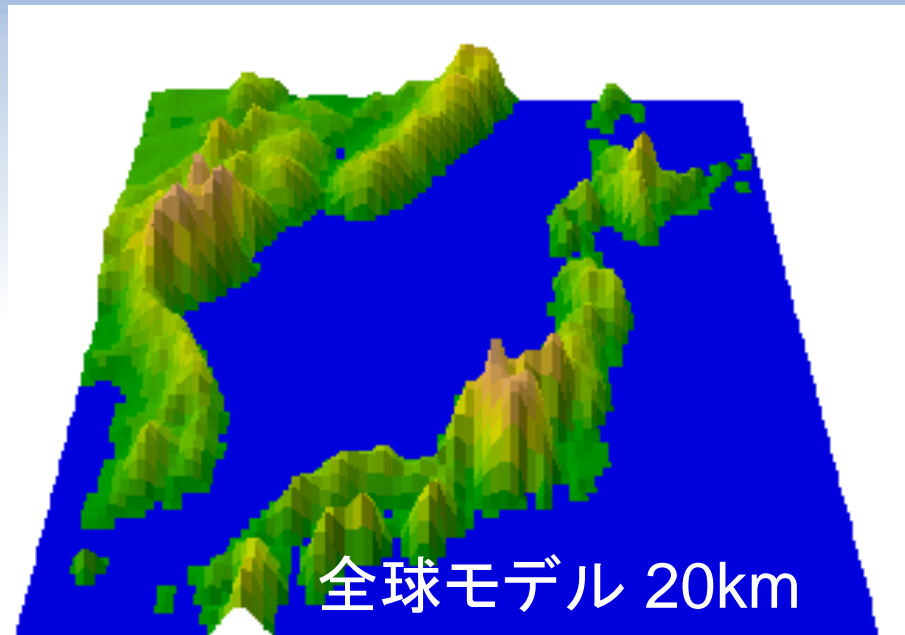
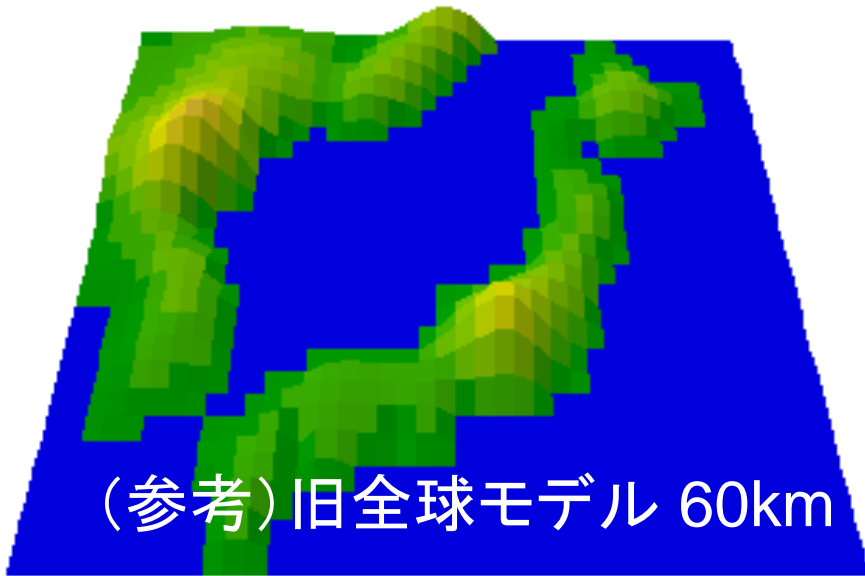
- 支配方程式: プリミティブ方程式
高解像度現象を表現、浅い大気進位の場合
- 水平離散化: スペクトル法(球面調和関数)、
変換法(物理空間、非線形項)
リデュースドガウス格子
- 鉛直離散化: 有限差分(Lorenz格子)
- 鉛直座標: ハイブリッド(σ - p)座標
- 時間積分: リープ・フロッグ、セミ・ラグランジュ、
セミ・インプリシットスキーム
- 水平拡散: 4次

高解像度GSMの仕様

予報時間	84(00,06,18)/216時間(12UTC)
水平解像度	約20km(TL959)
鉛直解像度	60層(最上層は0.1hPa)
時間積分	2タイムレベル(Δt は600秒)
地形/海陸	20km相当
海面水温	高解像度(0.25°)全球海面水温解析値
海水分布	高解像度(0.25°)全球海水分布解析値
積雪深	日本域に地上観測とアメダスデータを適用
放射	<ul style="list-style-type: none">・エーロゾルは地理的分布を考慮・間引き計算は東西4格子毎に変更
対流	<ul style="list-style-type: none">・積雲の運動量輸送計算を陰解法に変更・CAPEの変化による積雲トリガーを導入
雲	<ul style="list-style-type: none">・60層化に伴う海洋層積雲スキームの調整

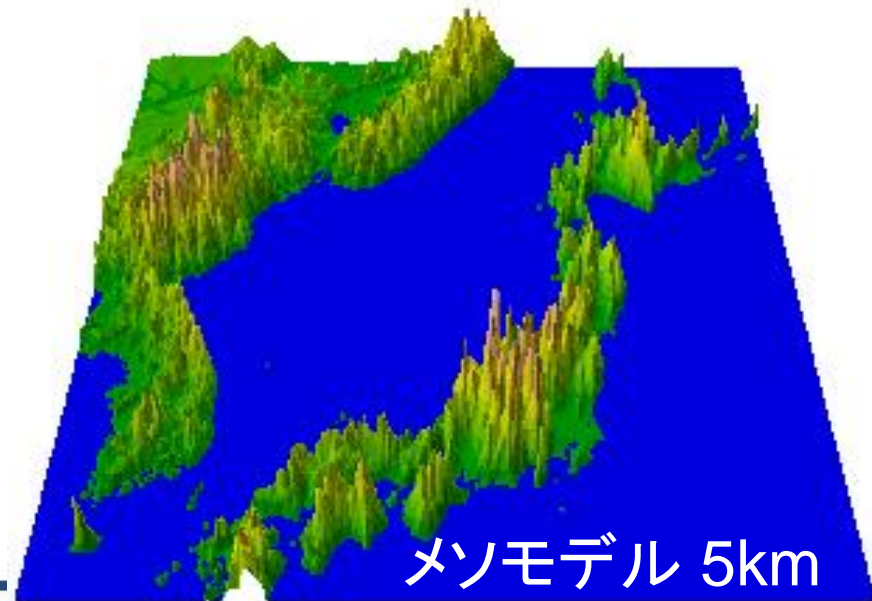
高解像度全球モデルの役割

- 明後日予報、週間予報の基礎資料
 - 台風進路予報の基礎資料
 - 航空、海上交通支援の予報基礎資料
 - 波浪モデル入力データ
 - 移流拡散モデル入力データ など
-
- 短期(今日、明日)予報の基礎資料
 - 量的予報・ガイダンス作成の基礎資料
 - メソ数値予報モデルの側面境界条件
 - 台風強度予報の基礎資料



東アジアにおける モデル地形

降水など、地形に大きな影響を受ける現象の予測には、地形も精密に表せるだけの分解能が必要である。



おわりに

レポート: どれか選択して回答

1. 1次元線形移流方程式を複数の数値計算法を用いてシミュレーションを実行し、計算結果について考察せよ。
2. 数値予報モデルの物理過程について、その概念とともに、積雲対流、境界層などのプロセスをひとつ取り上げて、その意義と課題について考察せよ。
3. 決定論的予報とアンサンブル予報について、その概念と予測可能性に触れながら、考察せよ。
4. データ同化の概念と気象分野で実際に利用される手法、その課題と展望について、考察せよ。
5. 天気予報の精度を100%にできるかどうかについて、天気予報全般あるいは台風や集中豪雨といった気象現象の一例をとりあげて、その予測可能性や数値予報モデルの課題とともに考察せよ。
6. 気象予測と社会とのかかわり、数値予報(コンピュータを用いた客観的な予測技術)が確立したことによる社会的影響と意義などについて考察せよ。