



# 気象予測技術の将来

地球流体データ解析・数値計算ワークショップ

平成26年3月11日

気象庁 石田 純一

# 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、コリオリ力、  
気圧傾度力、収束発散

- **物理過程**

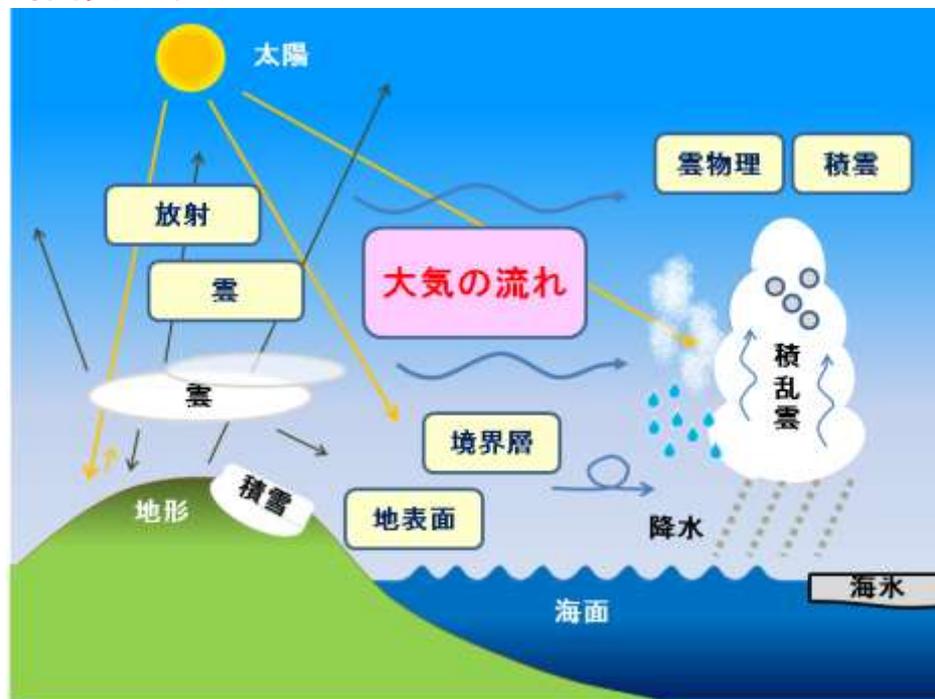
力学以外。方程式系の時間変化率のうち非断熱加熱・加湿項

- 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

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

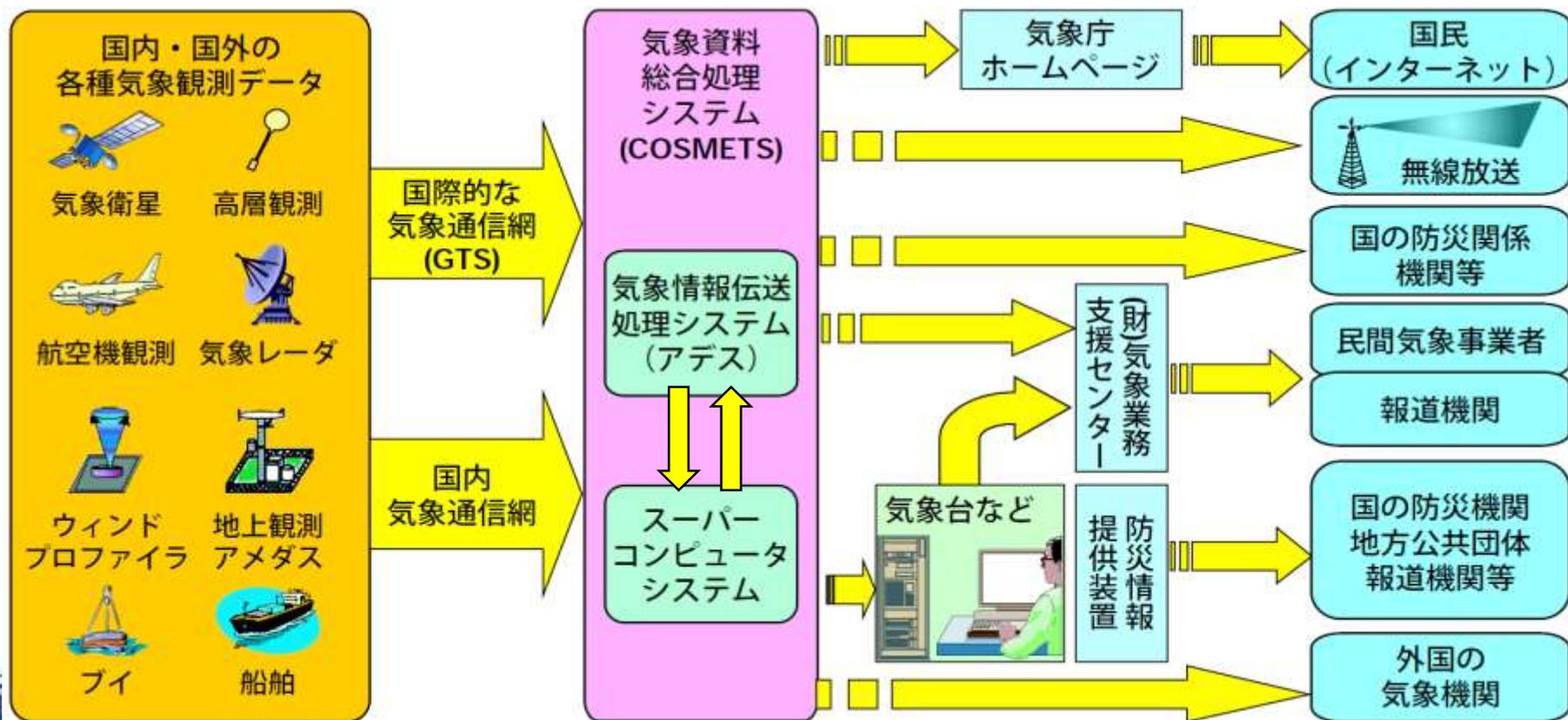
時間変化率      未来の値      現在の値



# 気象資料総合処理システム



システム運用室



# 気象業務における数値予報モデル

時間スケール	ニーズ(例)	気象庁の主な情報	数値予報モデル
～1時間	集中豪雨、都市型水害の減災	ナウキャスト(降水・雷・竜巻)	
～1日	大雨・台風に対する備えや避難	注意報・警報 天気予報、航空予報	局地モデル、メソモデル
1日～3日	上記のほか、交通の安全・効率的運行 黄砂・スモッグ 太陽光発電、風力発電の量的予測	天気予報	メソモデル、 <b>全球モデル</b> 、物質輸送モデル
3日～10日	レジャー、農業対策	週間天気予報、異常天候早期警戒情報	<b>全球モデル</b> 、週間アンサンブル予報モデル、台風アンサンブル予報モデル
10日～1か月	産業活動の効率化	異常天候早期警戒情報、季節予報	<b>1か月アンサンブル予報モデル</b>
1か月～	天候の移り変わり、農業対策	季節予報	<b>季節予報モデル(大気モデル、海洋モデル)</b>
10年～	地球温暖化対策 洪水への備え	温暖化予測情報	<b>気候モデル(地球システムモデル)</b>



# 気象庁モデルの種類

- **GSM 全球大気モデル**
  - スペクトルモデル
  - 1988年、T63(180kmメッシュ)で実用化、徐々に高解像度化、2007年よりTL959(20kmメッシュ)化
- **JMA-NHM 領域大気モデル**
  - 格子モデル
  - 現在5kmメッシュ、2012年より2kmメッシュモデルも運用開始
- **asuca 領域モデル(開発中,JMA-NHMの後継)**
  - 有限体積法、できるだけ局所アクセスとなるよう工夫、GPU版も
- **データ同化**
  - GSM用, NHM用等、それぞれに対応して存在、変分法(主な業務で利用)やアンサンブルカルマンフィルターなど複数の手法が開発
- **海洋モデル**
- **化学輸送モデル**

# 数値予報モデルの計算量

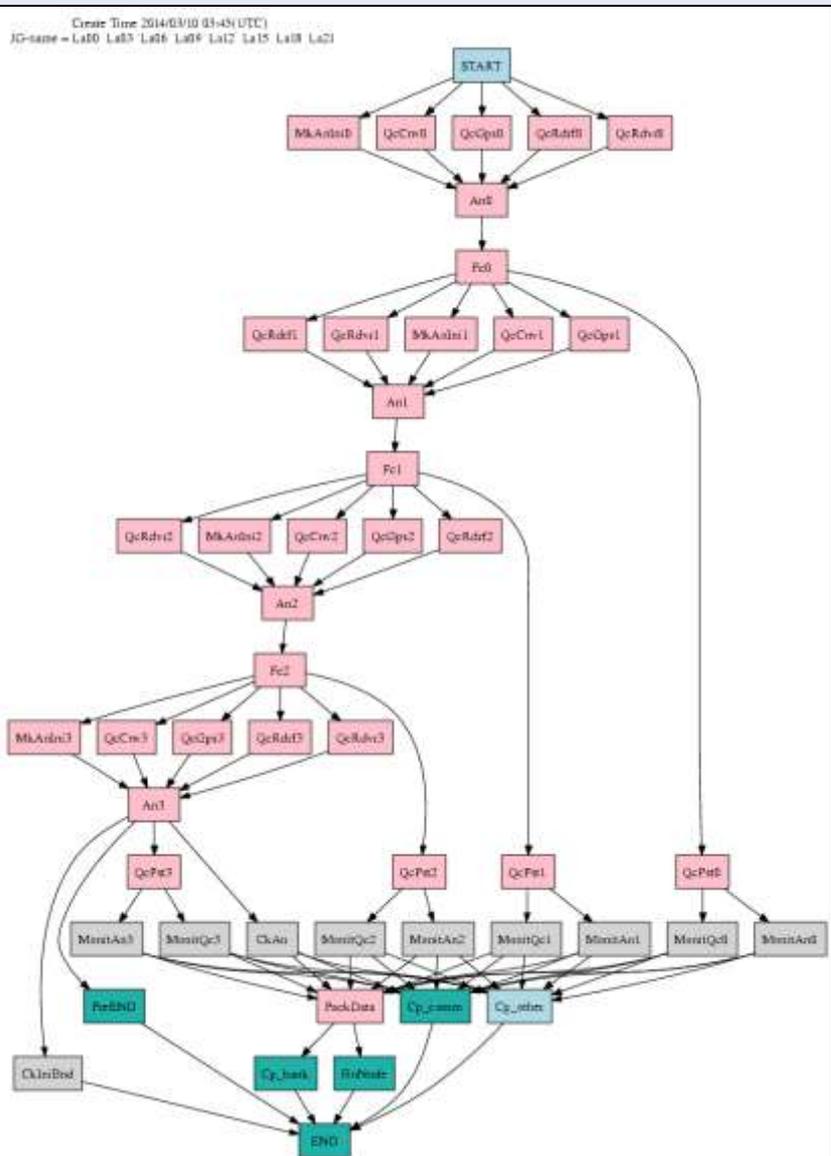
	全球モデル	メソモデル	局地モデル
格子数	8000万(20km)	2700万(5km)	12300万(2km)
積分時間間隔	10分(600秒)	20秒	8秒
計算時間	84時間予報 =約500ステップ 約23分	39時間予報 =7020ステップ 約28分	9時間予報 =4050ステップ 約18分
必要な計算機資源	15ノード(480CPU)	26ノード(832CPU)	100ノード(3200CPU)

項目	(旧)スーパーコンピュータ	(現)スーパーコンピュータ
機種	Hitachi SR11000/K1 (80ノード)×2 (数値予報業務用) Hitachi SR11000/J1 (50ノード)×1 (衛星データ処理業務用)	Hitachi SR16000/M1 (432ノード) × 2
最大浮動小数点演算速度	27.5TFlops(10.75TFlops × 2 + 6.08TFlops × 1)	847TFlops (423.5TFlops × 2)
主記憶容量	13.1Tbyte(5.0Tbyte × 2 + 3.1Tbyte × 1)	108.0TByte ( 54.0Tbyte × 2)
磁気ディスク容量	36.2TByte	348TByte
大容量記憶装置	2.0PByte(磁気テープ)	2.9PByte

# 気象庁におけるスパコン運用

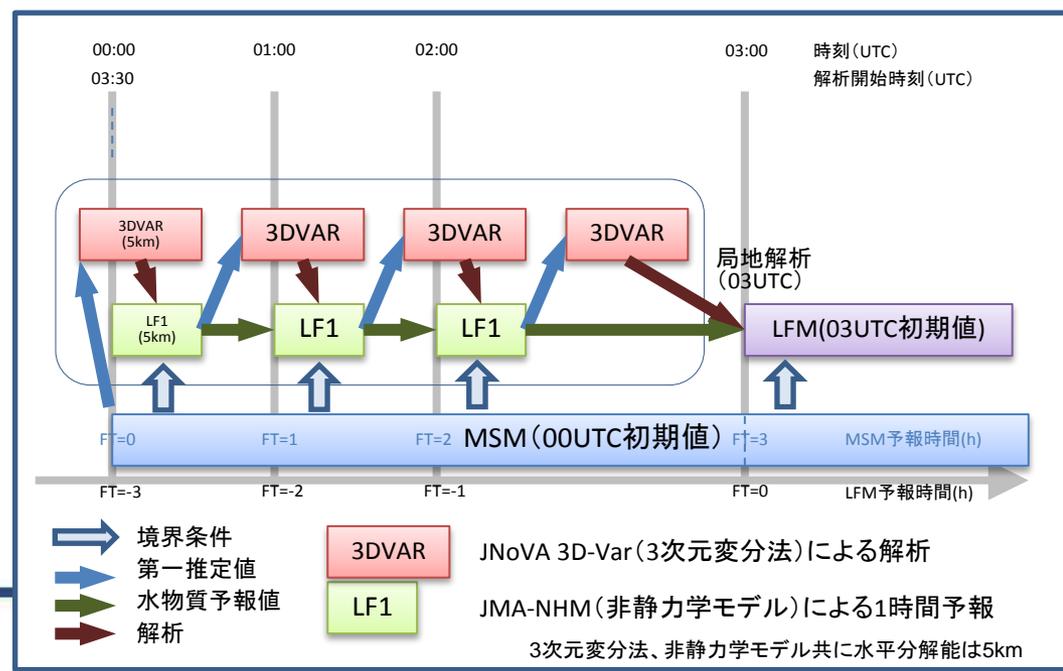
- 定時性
  - プロダクトの作成時刻は決まっている。
    - 定められた時刻までに計算を終える必要がある。
  - 定時性を確保するために並列化効率があまり高くななくてもプロセッサ数を増やすこともある。
  - 並列化効率が頭打ちとなり、いくらプロセッサ数を増やしても計算時間が短縮できない(かつ定められた時間に計算が終わらない)となると大問題。
- 多様なジョブ
  - 大きいものから小さいものまで様々なジョブが実行される。
  - それぞれのジョブには依存関係がある。
    - 側面境界値 : 全球予報 → メソ予報 → 局地予報

# 局地解析におけるジョブの依存関係の例



左: 局地解析のジョブネット図  
 下: 局地解析の処理の模式図

3次元変分法と非静力学モデルによる1時間予報を繰り返して局地モデルの初期値を作成。処理に要する時間は左図のSTARTからENDまで約15分。



# 全球モデル

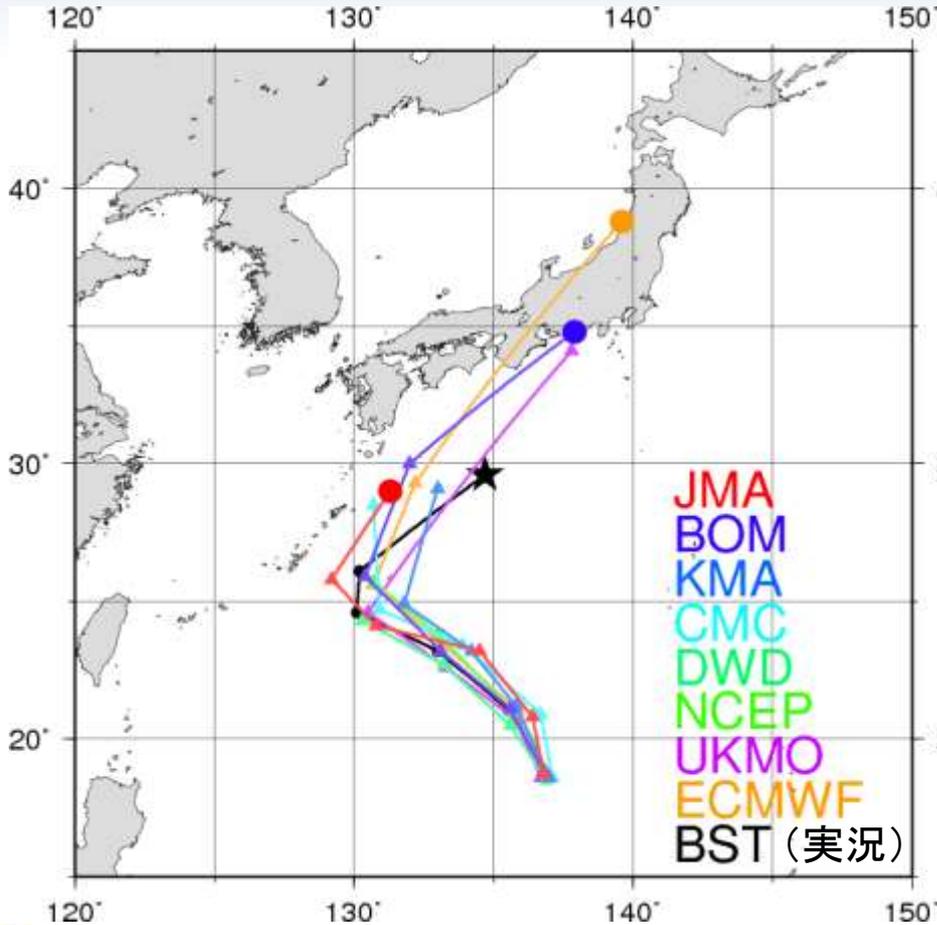


# 諸外国の現業気象機関の動向

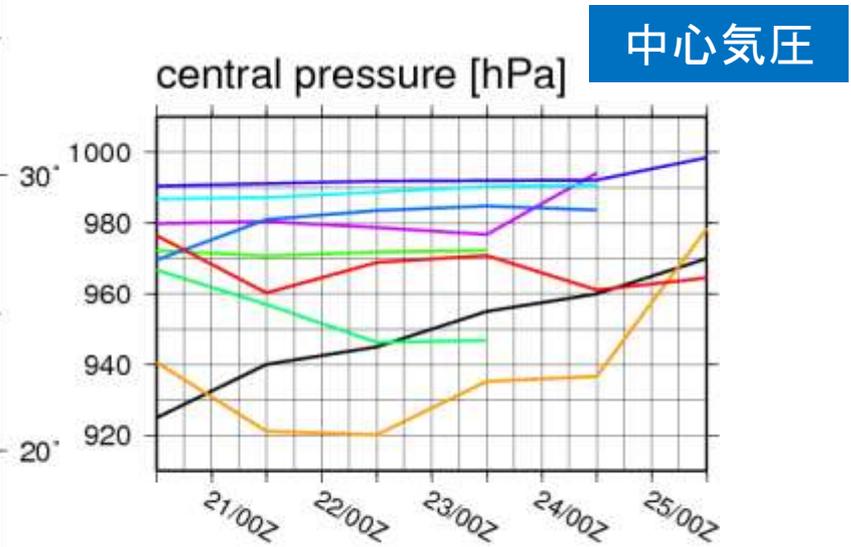
国名または センター名	スーパー コンピュータ システム	全球モデル	全球アンサンブル予報モデル		
		格子間隔 鉛直層数	格子間隔 鉛直層数	メン バ数	
日本 (JMA)	HITACHI	TL959L60(→L100)*1 (20km)	週間*2	TL479L60(40km)	27x2
			台風*3	TL479L60(40km)	25x4
欧州中期予報センター (ECMWF)	IBM(→Cray)	TL1279L137 (16km)	TL639L62(32km) TL319L62(65km)	51x2	
イギリス (Met Office)	IBM	25km70層	33km70層 60km70層	44x4 22x2	
フランス (Meteo France)	NEC→Bull	TL798L70 (25km)	TL538L65(37km)	35x2	
ドイツ (DWD)	NEC→Cray	20km60層	なし		
米国 (NCEP)	IBM	T574L64(27km)	T190L42(70km)	21x4	
カナダ (CMC)	IBM	25km80層	66km74層	20x2	

\*1: 2014年3月中に増強予定。 \*2: 2014年2月に増強。 \*3: 2014年3月に増強。

# 台風第27号(センター間の比較) (10月20日12UTC初期値)



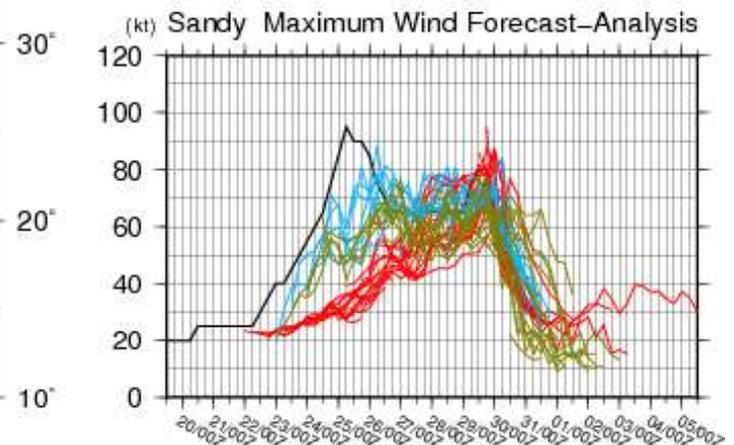
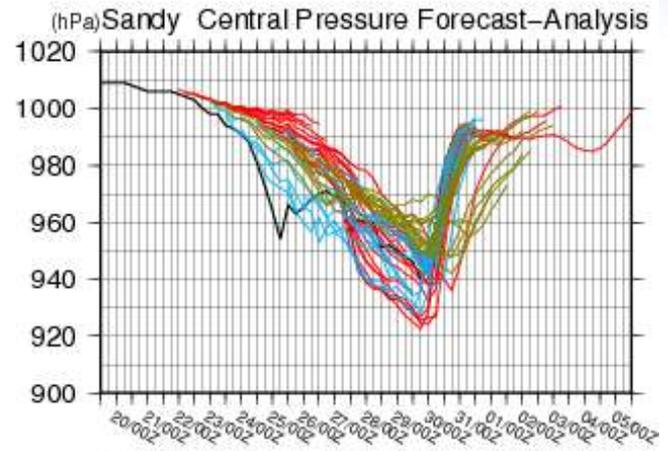
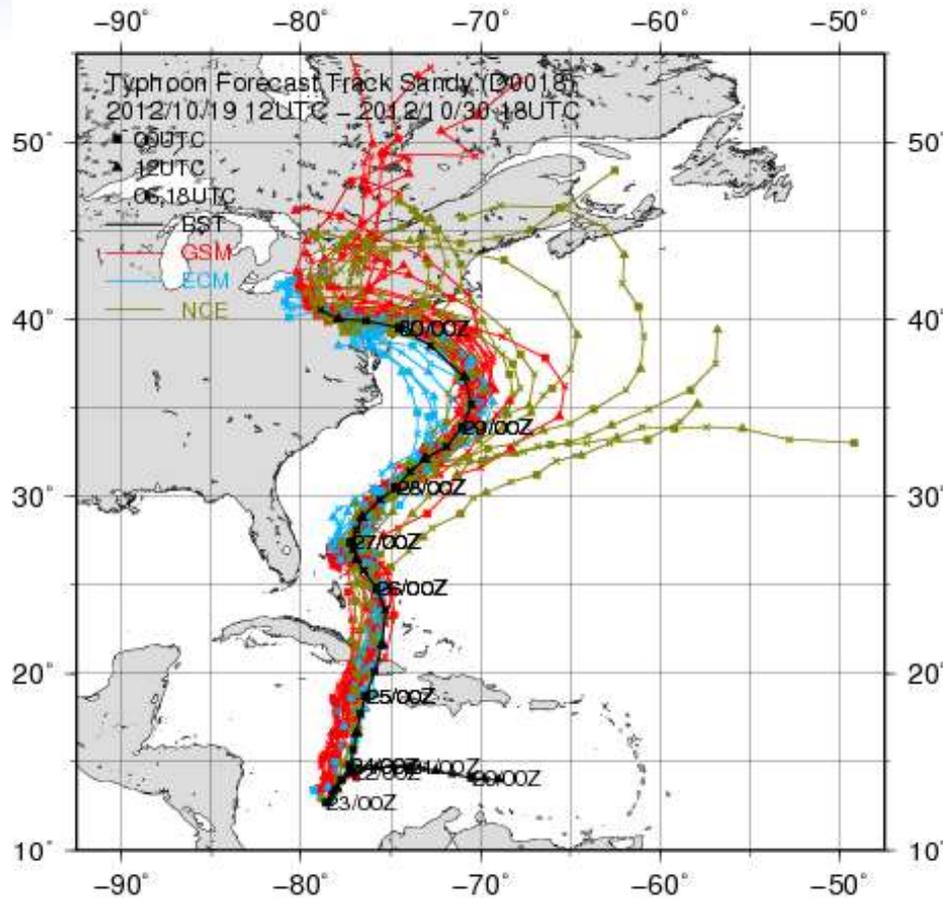
T1327(Francisco)  
2013/10/20 12z Init  
FT=120h



多くのモデルでは浅すぎて、  
中心位置の追跡に失敗している。

# Sandyの予想事例

Sandy (D0018) Typhoon Forecast and Analysis (Track and Intensity)



# ECMWFの高分解能化計画

HPC in Meteorology workshop, 1-5 October 2012

## IFS model: current and planned model resolutions

IFS model resolution	Envisaged Operational Implementation	Grid point spacing (km)	Time-step (seconds)	Estimated number of cores <sup>1</sup>
T1279 H <sup>2</sup>	2010 (L91) 2012 (L137)	16	600	1100 1600
T2047 H	2014-2015	10	450	6K
T3999 NH <sup>3</sup>	2020-2021	5	240	80K
T7999 NH	2025-2026	2.5	30-120	1-4M

1 - a gross estimate for the number of 'Power7' equivalent cores needed to achieve a 10 day model forecast in under 1 hour (~240 FD/D), system size would normally be 10 times this number.

2 - Hydrostatic Dynamics

3 - Non-Hydrostatic Dynamics



# 気象庁における 全球非静力学モデルの検討

- 平成21年度、「全球非静力学検討サブグループ」を設置し、報告書が取りまとめた。そこでは次期計算機で10数キロメッシュで全球非静力学モデルの実現、次次期計算機で5～10キロメッシュでの実現に触れた。
- 平成25年度、「次世代全球非静力学検討グループ」を設置し、フォローアップ、特に力学コアの選択に関する検討を行った。
- 候補
  - GSM
    - 現在のまま
    - 二重フォーリエ
  - NICAM
  - asuca を全球に拡張 (Yin-Yang格子をテスト中)

# GSMの今後

- 国民が切望する**気象予測の高精度化**のためには気象モデルの**高解像度化**、物理過程の精緻化が必要で、**高性能のスパコンを必要**とする。
- 現業天気予報ではスケジュールが決まっており、**スパコンでの計算・出力**にかけられる時間を長くできない。
- スペクトルモデルは、メモリアクセスや全対全通信の比率が高く、**今後の計算機動向に適切なアルゴリズムではない**だろう。
- 実際、一部外国現業気象機関・研究機関では、スペクトルモデルから**格子モデルへと移行**する動きもあり、気象庁でも**GPU向けモデル**の開発(後述)にも取り組んでいる。
- 外国現業気象機関はそれまでに培ってきたknow howを活かすことも念頭においており、徐々に動き出している。
- 現時点では**スペクトルモデルの優位性**が広く認識されており、気象分野では**ここ10年程度ですべて置き換わることはない**。
- 気象庁では、いつ、どのようなタイミングでどのような格子モデル(正20面体格子、Yin-Yang格子, etc.)に移行するか検討を行っているところ。

# 領域モデル

# 領域モデル(JMA-NHM)の概要

- 支配方程式 完全圧縮非静力学方程式系
- 力学過程
  - 予報変数  $\rho_u, \rho_v, \rho_w, \theta, p, q_v, q_c, q_r, q_i, q_s, q_g, N_i$ (メソのみ)
  - 離散化 有限差分法
  - 時間積分 リープフロッグ法+タイムフィルタ、split-explicit法
  - 移流項 中央4次精度(水平)、中央2次精度(鉛直)
  - 数値拡散 4次拡散+非線形拡散
- 物理過程
  - 雲物理過程 メソ: 3iceバルク法 局地: 1moment 3iceバルク法
  - 積雲対流 メソ: Kain-Fritschスキーム 局地: なし
  - 境界層 改良Mellor-Yamada レベル3
  - 放射(長波) 全球モデルと同じ
  - 放射(短波) 全球モデルと同じ
  - 地表面 平板地表面モデル

# 次世代非静力学モデルasuca

- JMA-NHMの後継
  - 2007年より開発開始
- 主として力学コアの改良を行っている。
  - 計算安定性の確保
  - 計算精度と計算効率の両立
  - 保存性の確保
  - etc.
- 物理過程は「物理過程ライブラリ」を利用。
- 局地モデル(格子間隔2km)での運用を目指して開発中。
  - 現業化までもう少し。

# asuca の目指すところ

- 十分な計算安定性
- 厳密に質量保存を満たす
- スカラー機での計算効率
- 人為的なパラメータの排除
- コードの整理 → 開発および維持・管理のしやすさ
- 科学的な見地に基づいた基礎からのモデル開発

# asuca と JMA-NHMの力学コアの比較

	asuca	JMA-NHM
支配方程式	完全圧縮非静力学方程式系 (フラックス形式)	完全圧縮非静力学方程式系 (準フラックス形式)
予報変数	$\rho u, \rho v, \rho w, \rho \theta_m, \rho$	$\rho u, \rho v, \rho w, \theta, \rho$
空間離散化	有限体積法	有限差分法
時間積分法	Runge-Kutta 3 <sup>rd</sup> (long and short)	Leapfrog with time filter (long) Forward-backward (short)
移流	流束制限関数 (Koren, 1993)	水平4次、鉛直2次+移流補正
座標系	一般座標系 / Map factor + 鉛直ハイブリッド	Map factor + 鉛直ハイブリッド
音波の扱い	Conservative Split-Explicit (Klemp et al., 2007)	Split-Explicit
水物質の落下	Time-split	Box-Lagrangian
数値拡散	なし	4次線形、非線形

※物理過程は基本的に同じ

# 入出力の扱い

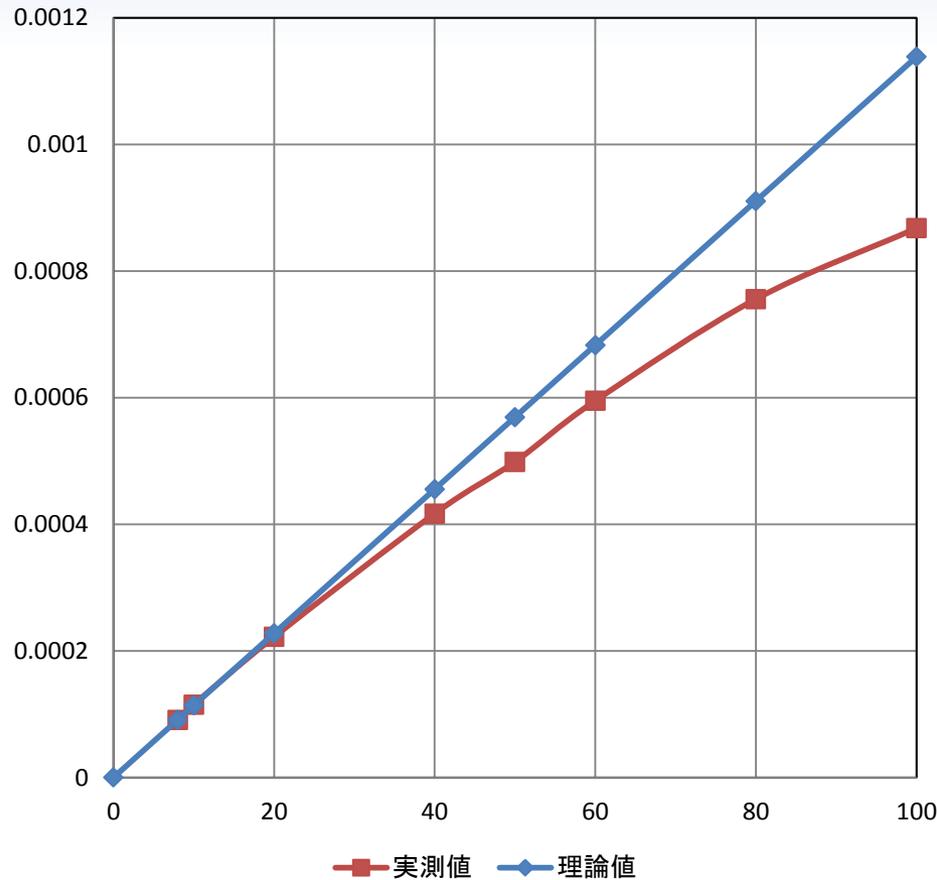
- 並列計算において、入出力のみを行うプロセス(I/Oプロセス)と計算のみを行うプロセス(計算プロセス)を設ける。
- 入力…先読み
  - 計算プロセスが計算している間に、先にディスクから読んでメモリに保持しておく(側面境界値など)。
  - (設定により)複数のプロセスで手分けして読み込み。
    - 各プロセスが利用できるメモリ量等の制限があるため。
  - 計算プロセスでデータが必要になった時点で、既にI/Oプロセスではデータを送る準備が整っている。
- 出力…たらいまわし
  - 計算プロセスは自分が持つバッファに出力データを退避させて通信を起動し後続計算をすぐに再開。
  - I/Oプロセスは自分のバッファに受信して出力する。
  - 出力時刻ごとに出力するI/Oプロセスを切り替える。
    - 出力時間間隔が短いと出力が終わる前に次の出力のタイミングとなってしまう待ちが生じるため。

# 複数のI/Oプロセスを用いた処理の模式図



# asucaの実行性能

## ノード数に対する実行時間

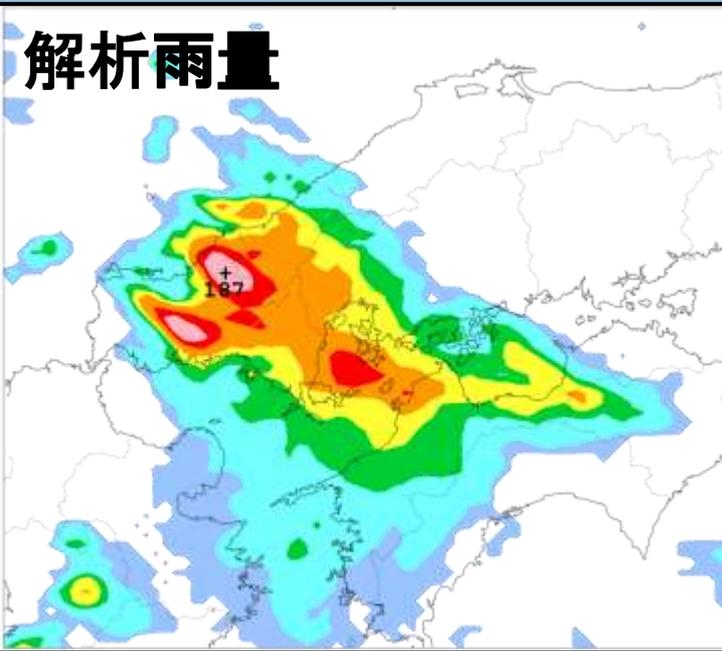


格子数 : 1571x1291x57  
格子間隔 : 2km  
予報時間 : 9時間  
タイムステップ : 16.67(=50/3)秒

入力データ量 : 263GByte  
出力データ量 : 52GByte

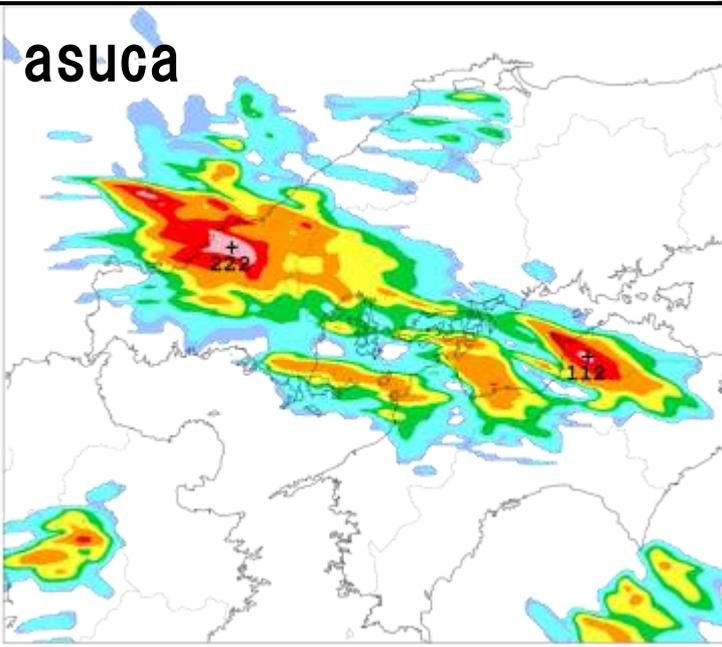
現業運用では、100ノードを用いて20分で予報計算を行う。

# 解析雨量

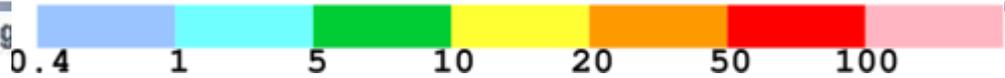
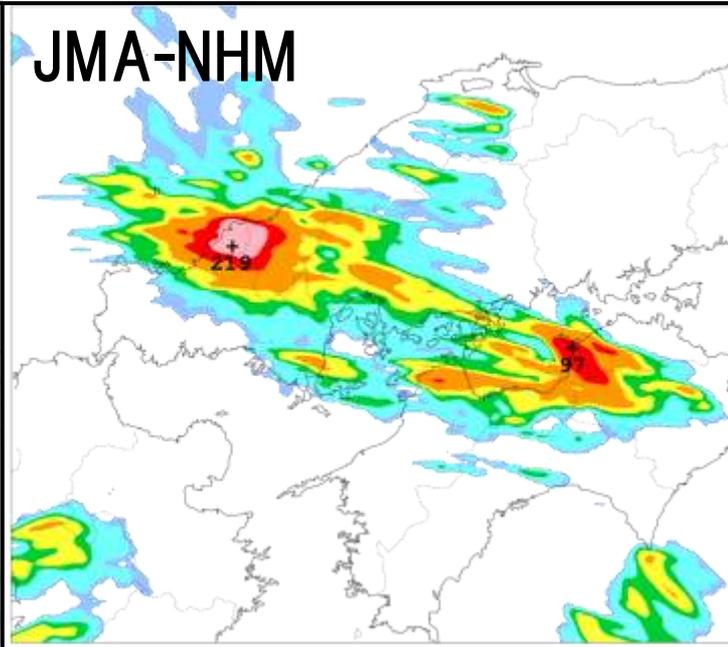


平成25年7月 山口・島根豪雨  
7月28日00UTC初期時刻の6時間予報  
左上:解析雨量(実況)  
左下:asuca(格子間隔2km)  
右下:JMA-NHM(格子間隔2km)

## asuca



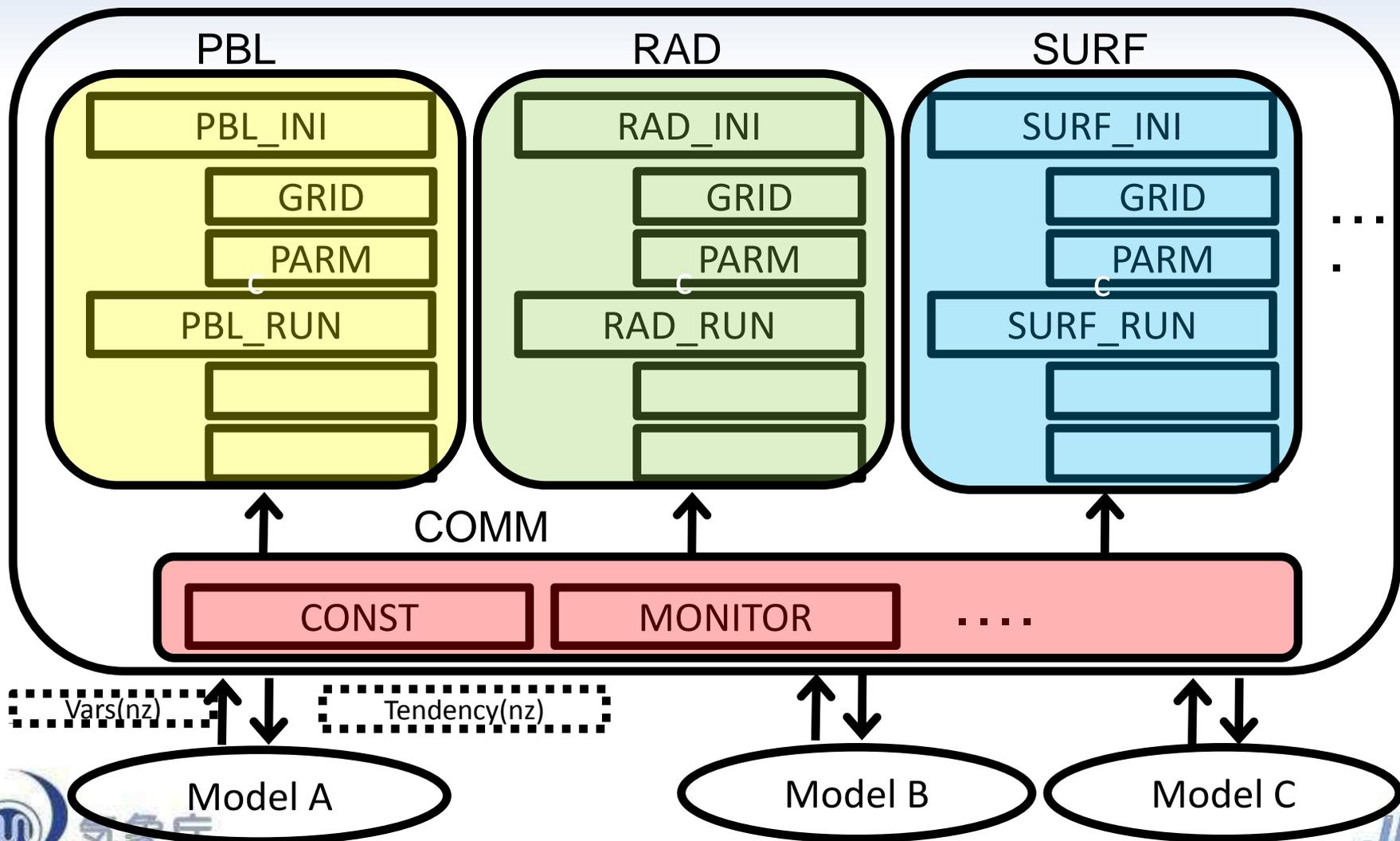
## JMA-NHM



# 物理過程ライブラリ

- **メソから全球(短期・気候)まで適用できることを目指す**
  - 各過程のスキームも1つに限らず実装。相互比較もできる
- (少なくとも)現在の物理過程は鉛直1次元→**鉛直1次元で実装**
  - モデルによってインデックスの順序が異なる場合でも適用可
    - ただし、変数の詰め替えが発生することがあるが、予報変数からの要素変換と一緒にやることができる。
  - メモリ参照範囲が小さいので、スカラーマシンで高い計算効率が期待。(ベクトル機では性能は出ない)
  - 鉛直1次元は見通しがよく、新たな発想にもつながる。
- **実モデルでの組み込み実績**
  - asuca
    - 現業モデルとして使う予定の**全ての物理過程**にライブラリを利用
    - 境界層、放射、地表面スキームを実装したときの実例
      - GABLS2, GABLS3のケースができるように初期値、強制力を設定し、サンプルと一致する結果が得られることを確認。
      - **asuca 開発者の手**でデバッグまで含めて**3日程度**の作業。

# 物理過程ライブラリ概念図



# 物理ライブラリを用いた基本的なコードスタイル

! 初期化: 物理定数、格子情報、オプション、パラメータのセット

```
call pp_phys_const_set
call pbl_grid_set(nz, z_f)
call pbl_option_ini(myn_level = 3)
call pbl_parm_ini(imp_rate = 1.0)
```

! 最外ループをOpenMPで並列化

```
!$OMP PARALLEL DO
!$OMP PRIVATE(...)
do j = 1, ny
  do i = 1, nx
    do k = 1, nz
      ! 配列の詰め替え及び変数変換(factor: 密度や計量など)
      val_1d(k) = val_3d(k, i, j) / factor(k, i, j)
    end do
    ! 前処理
    call pbl_pre(val_1d, tmp_1d)
    ! 本体
    call pbl_run(val_1d, tmp_1d, tend_1d)
    do k = 1, nz
      ! 配列の詰め替え及び変数変換
      tend(k, i, j) = tend_1d(k) * factor(k, i, j)
    end do
  end do
end do
!$OMP END PARALLEL DO
```

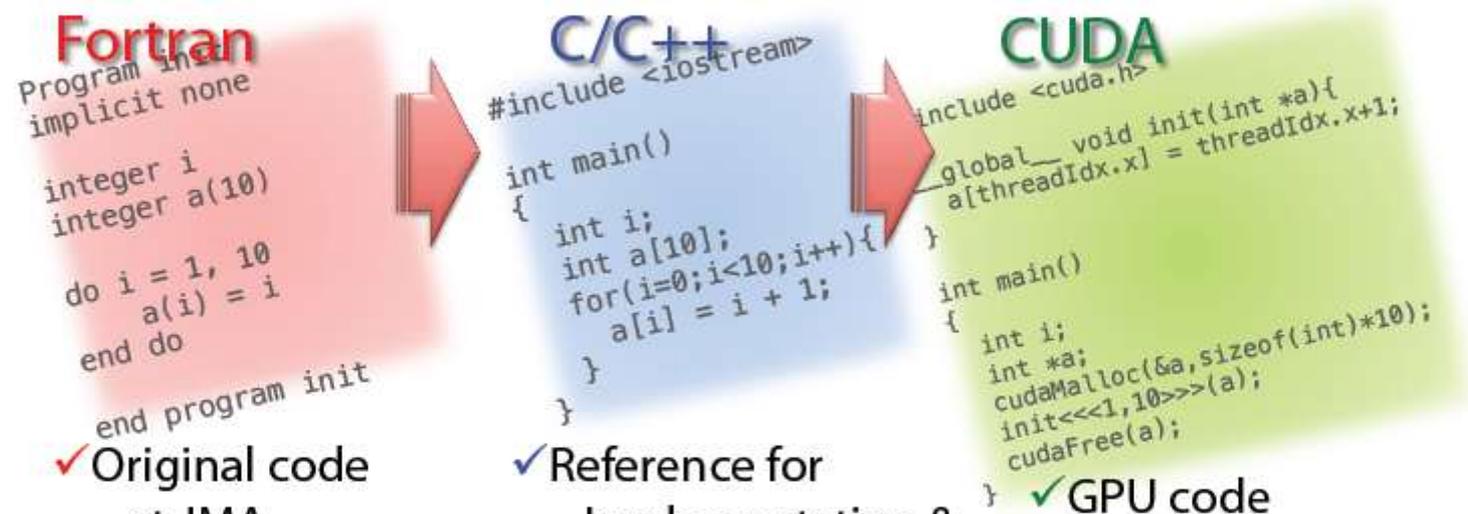
- スレッド並列化は大外の水平インデックスでOpenMPによってかける。
- ライブラリ内ではOpenMP指示行は不要なように設計。

# asuca on GPU

- 平成21年度より東京工業大学青木教授と共同で「汎用GPUを使用した数値予報モデルの高速化に関する研究」を開始。
  - 気象庁がasucaの開発を行いコードを提供し、東工大でGPUに移植。
  - SC10に投稿。Best Student PaperのFinalistに入ったが、惜しくも受賞は逃した。
- 平成24年度は東京工業大学、理化学研究所と「GPUコンピューティングによる数値予報モデルの高速化に関する研究」を実施。

# Our approach: GPU-based ASUCA

- Full GPU Application
- GPU-ASUCA is written from scratch in CUDA



✓ Original code at JMA

✓ Reference for Implementation & Performance

✓ GPU code

## Element order of 3 dimensional arrays

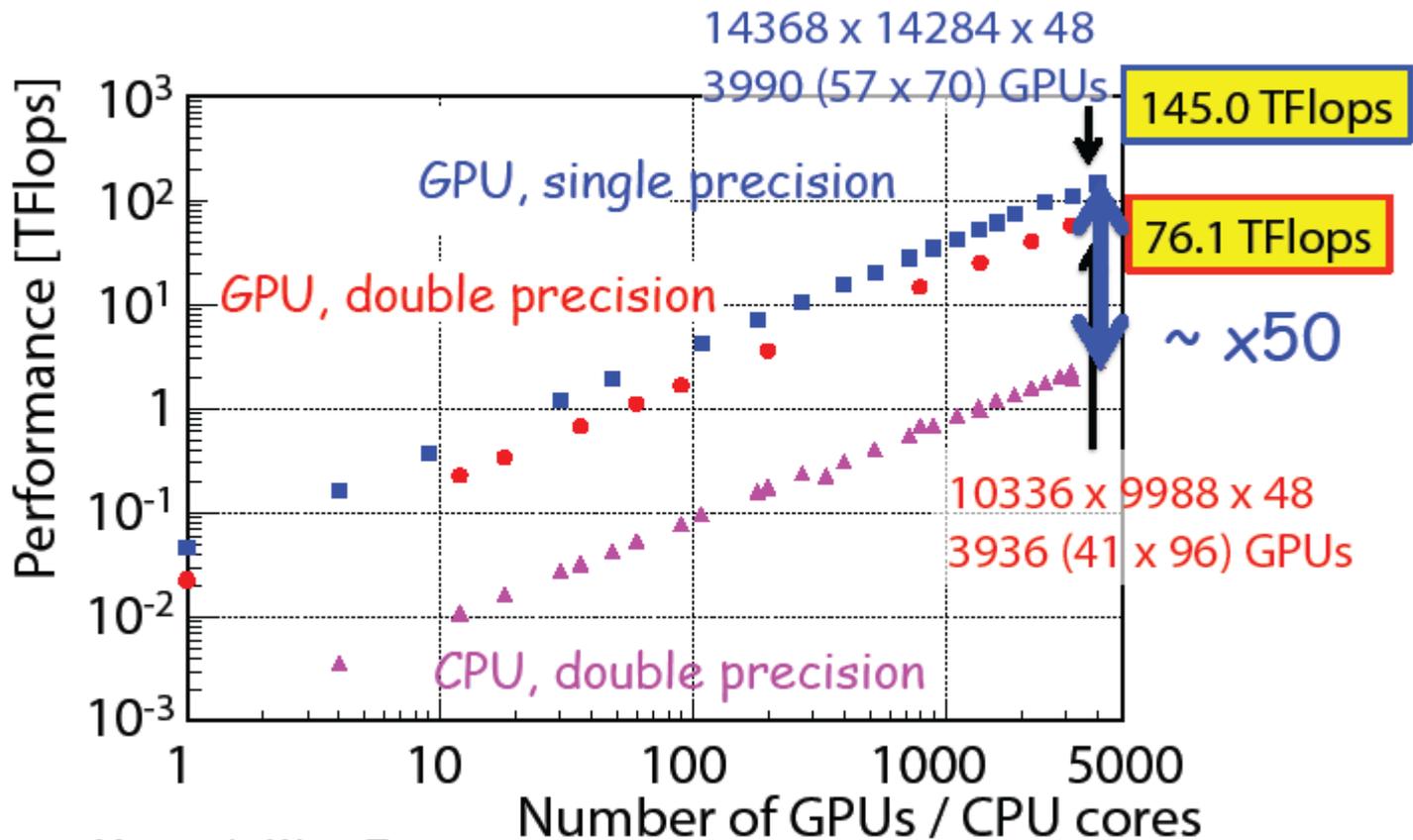
z,x,y (k,i,j)-ordering

x,z,y (i,k,j)-ordering

x,z,y (i,k,j)-ordering

➔ Improve the memory access performance of the GPU computing

# Performance of ASUCA on TSUBAME 2.0



■ Mountain Wave Test

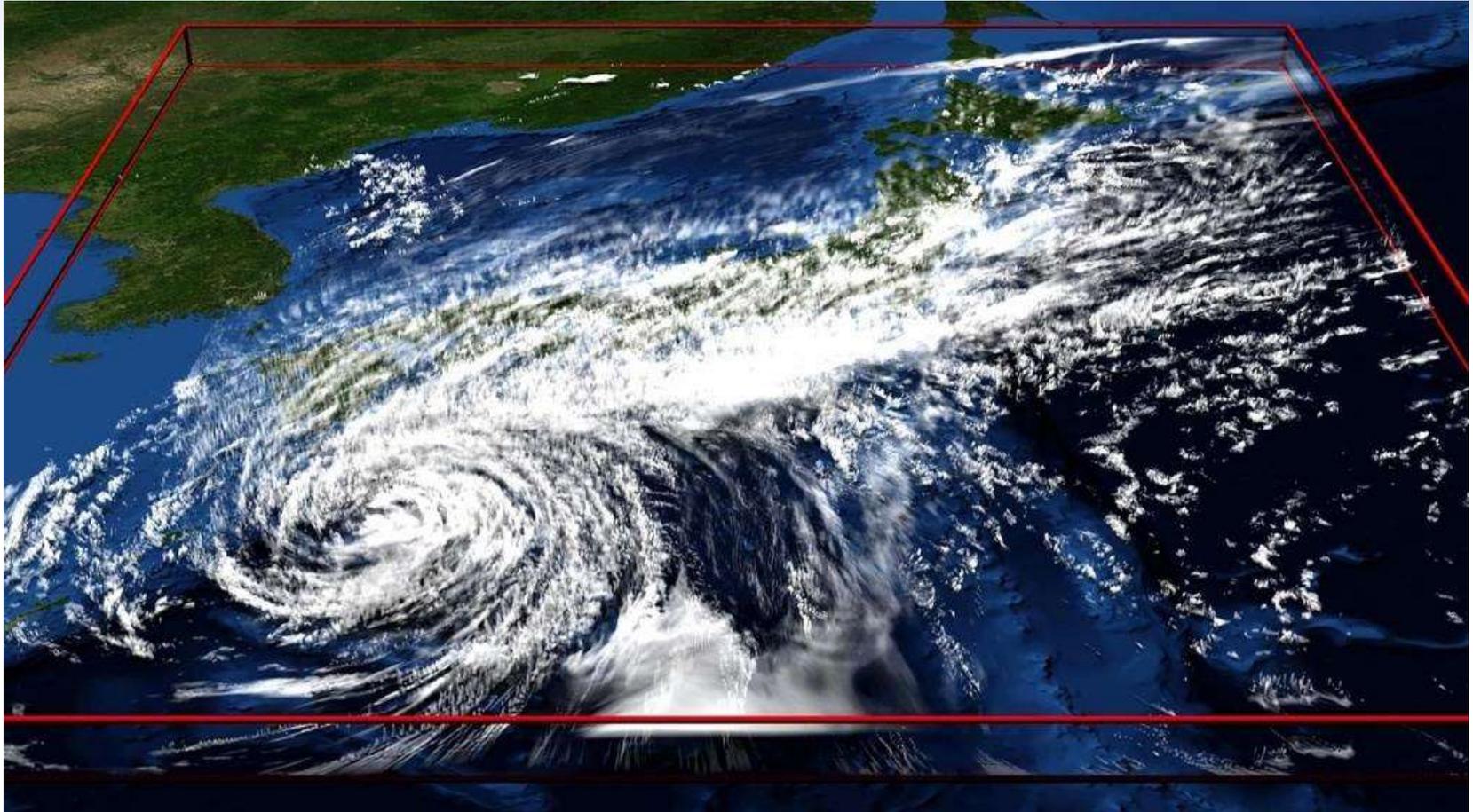
■ NVIDIA Tesla M2050 card / Intel Xeon X5670 2.93 GHz on TSUBAME 2.0 32

T.Shimokawabe@Tokyo Tech

# Real case of ASUCA operation

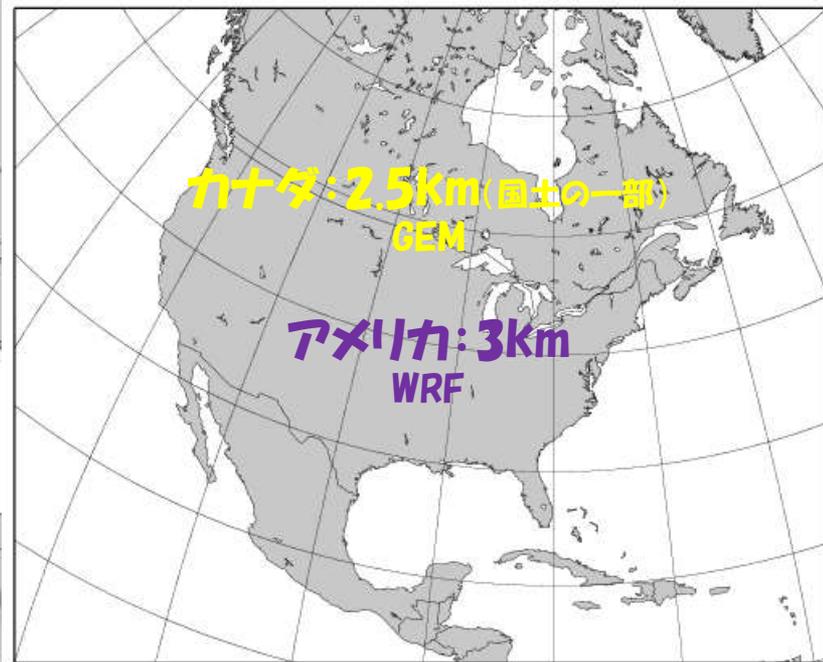
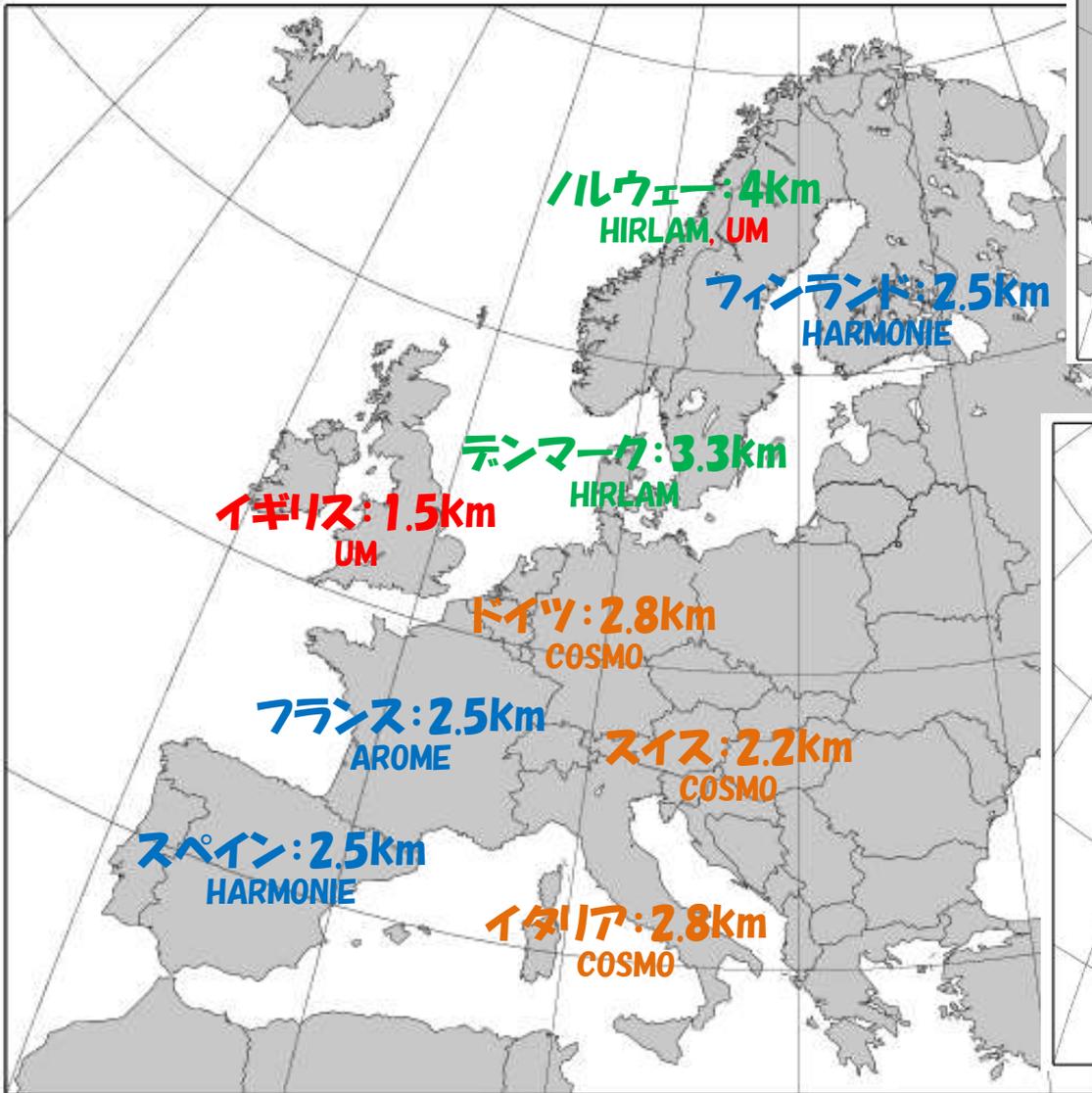
4792 x 4696 x 48 mesh (horizontal mesh resolution = 500 m)

437 GPUs on *TSUBAME 2.0*



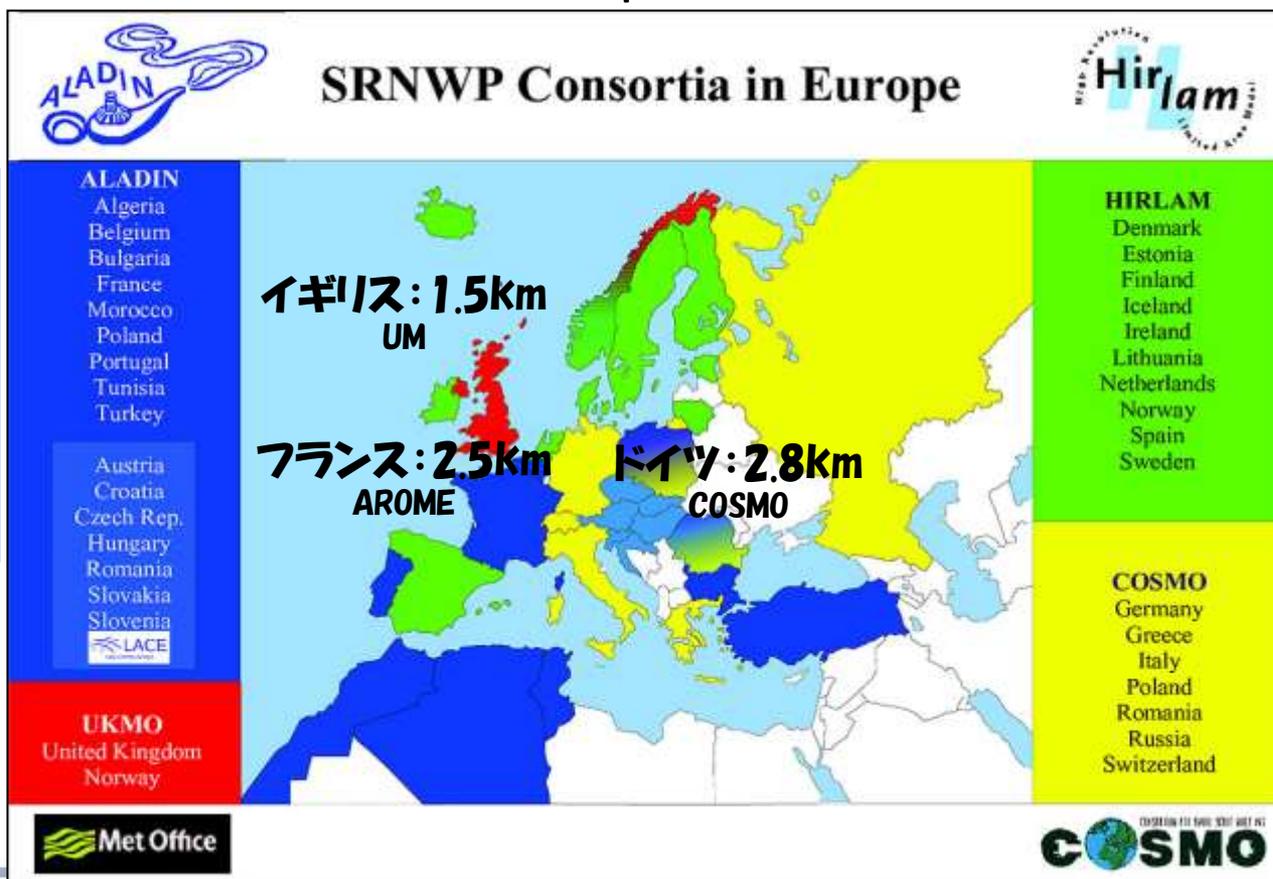
# 世界の現業高分解能モデル

※格子間隔5km以下、試験運用を含む。



# 欧州におけるメソ数値予報

- 複数の国でConsortiumを形成して共同開発し、各気象機関で水平格子間隔数kmのシステムを現業運用。
- コンソーシアムを横断する専門分野ごと(力学、物理、陸面、同化、EPS、検証、応用、システム)のExpert Teamを形成して連携。



**HIRLAM**  
(北欧諸国)

**COSMO**  
(独国気象局  
中心)

**ALADIN**  
(仏国気象局  
中心)

**LACE**  
(中欧諸国)

**UKMO**  
(英国気象局)

# 領域モデルの今後

- 防災・減災のために領域モデルにおいてもさらなる高分解能化、物理過程の精緻化が必要。
- 単に高分解能化しただけでは精度はあがらない。力学・物理過程ともに開発が必要。
  - 新たな力学フレームの開発
  - 物理過程開発の基盤としてのライブラリの開発
- 計算機技術は日進月歩であり、それに対応するための取り組みも重要。
  - GPUによるasucaの実行
  - シンプルなモデルを！
- 各国内で現業気象機関と研究機関等と連携するだけでなく、国際的な連携が欧州では行われている。

# まとめ

- 全球モデル・領域モデル共に気象予測の高精度化のためにさらなる高解像度化が必要。
  - 現業運用のため高性能のスパコンが必要。
- 単に高解像度化するだけでは精度向上につながらず、力学・物理過程の高度化が必要。
  - 開発のためにも高性能のスパコンが必要。
- 現業モデルとして運用するために様々な工夫を行っている。
- 将来の計算機技術の動向を念頭においた検討・開発が必要。
- 国家現業気象機関において、国際的な競争・連携が行われている。