



# 数値予報

～ 気象庁におけるスパコンを利用した気象予測 ～

第18回PCクラスタシンポジウム

平成30年12月14日

気象庁予報部数値予報課

数値予報モデル開発推進官 石田純一

# 講演内容

- 気象庁の業務について
  - 気象庁の任務
  - 予報業務とスパコンの関わり
- 気象庁のスーパーコンピュータシステム
  - これまでの歴史
  - 第10世代スーパーコンピュータシステム
  - システムの調達・構築・運用
- 将来計画
  - 交通政策審議会気象分科会提言
  - 2030年に向けた数値予報技術開発重点計画
  - 数値予報分野における連携について



# 気象庁の業務について

# 守ります 人と 自然と この地球

- 気象庁の任務
  - 台風・集中豪雨等の気象、地震・津波、火山、さらに気候変動などに関する自然現象の観測・予報等と、その情報の利用促進を通じて、気象業務の健全な発達を図る
    - 本スライドのタイトルは気象庁のキャッチコピー
- 気象庁におけるスパコンの関わり
  - 台風・集中豪雨等の気象の予報
  - 気候変動などに関する自然現象の予報

# 気象予報業務における数値予報の役割

## 観測資料

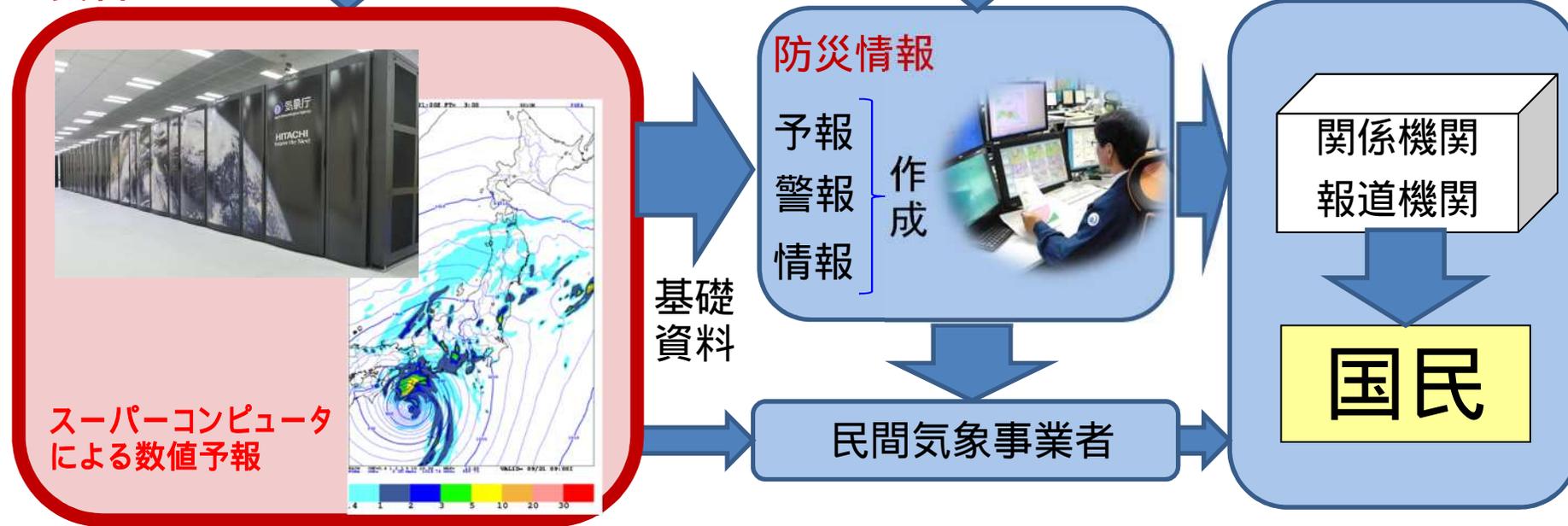


数値予報  
資料

初期値解析への  
入力データ

予報作業

実況監視



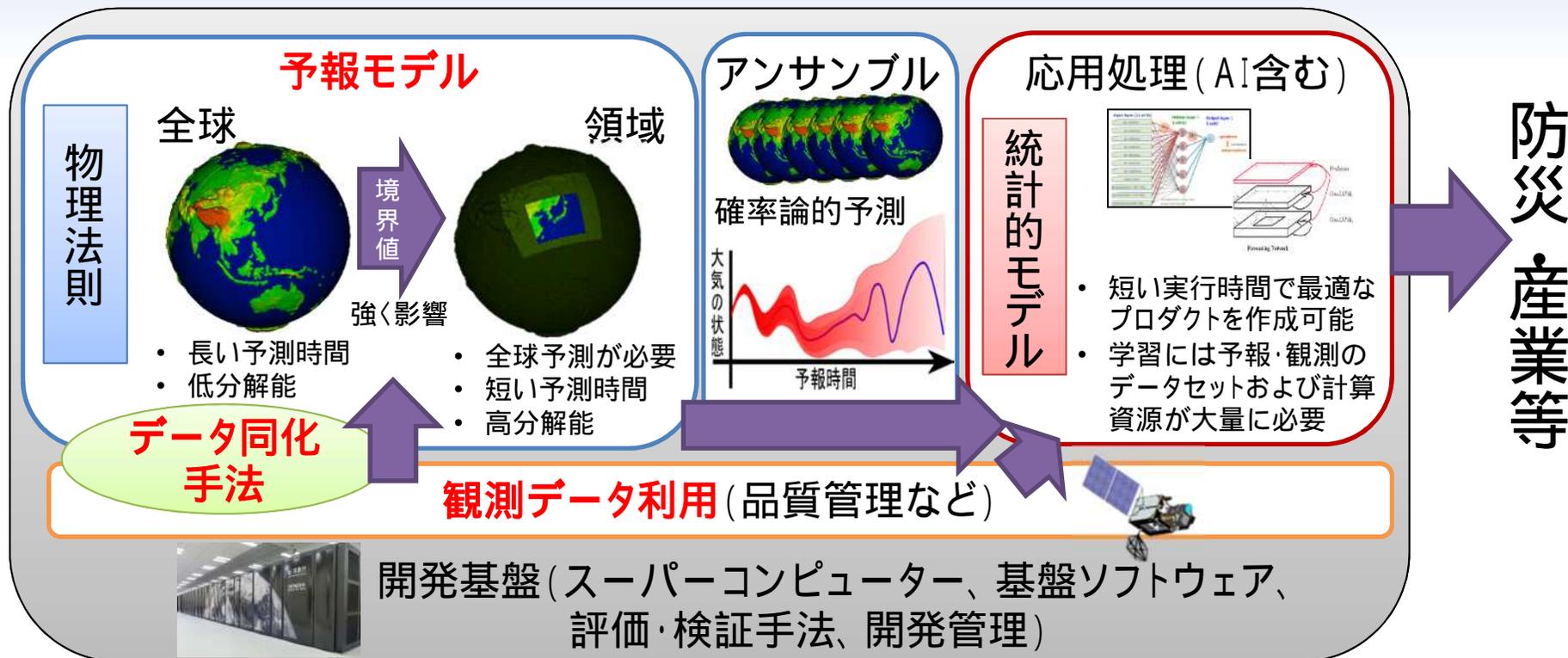
# 気象情報と数値予報

時間スケール	ニーズ(例)	気象庁の主な情報	数値予報システム
～1時間	局地的大雨・落雷・突風等に伴う災害の軽減	ナウキャスト(降水・雷・竜巻)	
～1日	大雨に対する備えや避難、交通の安全・効率的運行(運航)	気象警報・注意報、気象情報、航空気象情報	局地モデル、メソモデル、高潮・波浪モデル
1日～3日	上記のほか、台風に対する備えや避難、黄砂・スモッグ対策、太陽光発電、風力発電の量的予測	天気予報、気象情報、台風情報、航空気象情報、スモッグ気象情報、黄砂情報	メソモデル、全球モデル、高潮・波浪モデル、化学(物質)輸送モデル
3日～10日	上記のほか、レジャー、農業対策、雪害等への事前準備、電力需給計画	台風情報、週間天気予報、異常天候早期警戒情報	全球モデル、全球アンサンブル予報システム、高潮・波浪モデル
10日～1か月	農業対策、雪害等への事前準備、電力需給計画、産業活動の効率化	異常天候早期警戒情報、季節予報	全球アンサンブル予報システム
1か月～	天候の移り変わり、農業対策	季節予報	季節アンサンブル予報システム
10年～	地球温暖化対策 洪水への備え	地球温暖化予測情報	気候モデル(地球システムモデル)

**数値予報は気象庁業務の技術基盤**

# 現業数値予報の開発・運用

様々な空間分解能と予測時間を持つ数値予報モデルを、ニーズと科学的合理性の両面に  
 応じて効率よく組み合わせて運用(全体にわたる**開発項目は膨大**)



- 台風、集中豪雨などの予測精度向上へ向けて、構成要素それぞれの特徴を踏まえて精緻化・高度化を進めていくことが重要
- 現象の表現改善には**予報モデル**、初期値の精度向上には**観測データ利用・データ同化手法**の開発が鍵
- それぞれの課題に応じて**重点開発項目**を設定して開発を進めたい

# 数値予報モデルとは

支配方程式

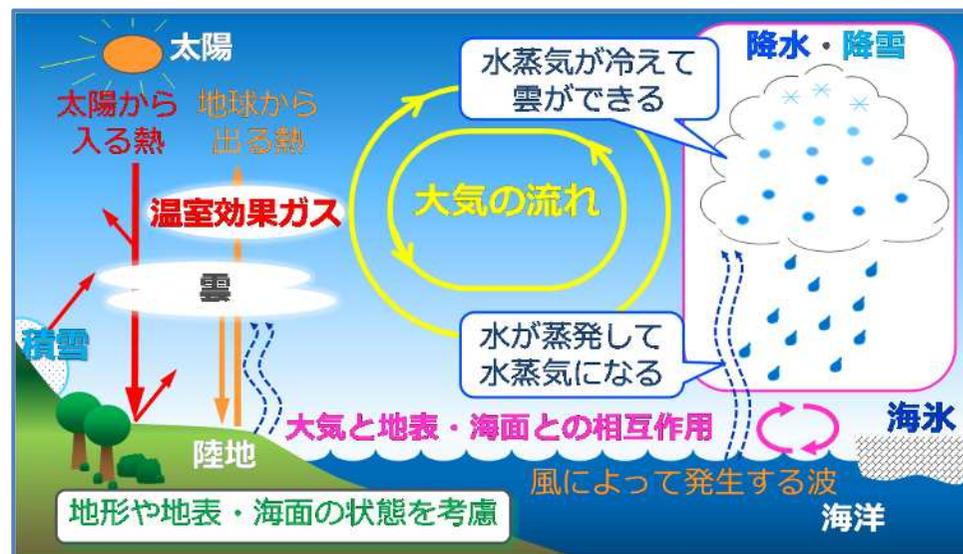
$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = -\nabla_j \cdot (\rho u^j) + F_\rho$$

$$\frac{\partial \rho u^i}{\partial t} = -\nabla_j \cdot (\rho u^i u^j) - (\nabla p)^i - \rho g \delta_3^i - 2\rho \epsilon^{ijk} \Omega_j u_k + F_{u^i}$$

$$\frac{\partial \rho \theta}{\partial t} = -\nabla_j \cdot (\rho \theta u^j) + F_\theta$$

$$\rho = \frac{p_0}{R\theta} \left[ \frac{p}{p_0} \right]^{\frac{C_v}{C_p}}$$

数値予報モデルとは、支配方程式(連立偏微分方程式)を空間方向に離散化して格子点上の値で代表させ、時間方向に離散化して逐次的に計算を行って予報値を得るもの



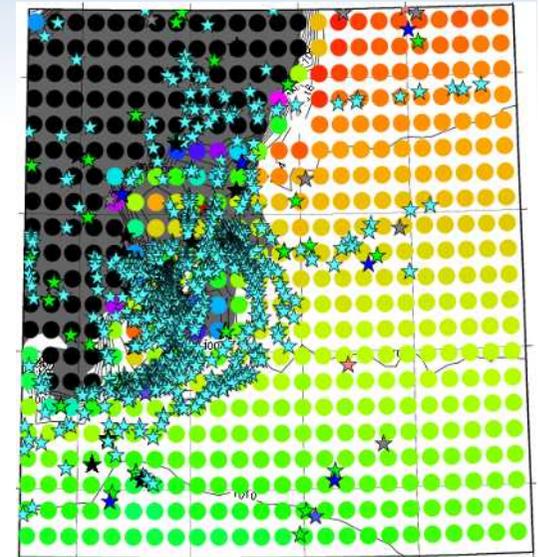
支配方程式を便宜上以下の2種類に分ける

- 格子点の値で計算される移流等(支配方程式の青枠)
  - 力学過程と呼び、流体力学におけるオイラー方程式と同じ
    - 全球モデルではスペクトル法、領域モデルでは有限体積法
- 格子点値では表現できないサブグリッド輸送や流れによらない輸送等(支配方程式の赤枠)
  - 物理過程と呼び、上図の様々な概念を計算する

# データ同化手法とは

数値予報値を観測値で修正し、最適な解析値(初期値)を作成すること

予報誤差と観測誤差からもっとも確からしい値を推定  
近年は、初期値を精度良く再現することが予報精度向上に決定的に重要



ある時刻における予報モデルの格子点値( )と観測データ( )

	数値予報値(第一推定値)	観測値
	全格子・全要素のデータがある	基本的には現実を反映
	予報誤差を持つ	観測誤差を持つ
×	観測値と比べると、現実に沿っているか定かでない	全格子・全要素のデータがない

変分法においては、評価関数  $J$  を勾配  $\Delta J$  を用いて最小値探索を行う

$$2J(x) = (x - x^b)^T B^{-1}(x - x^b) + (HMx - y^o)^T R^{-1}(HMx - y^o)$$

$$\nabla J(x) = B^{-1}(x - x^b) + M^T H^T R^{-1}(HMx - y^o)$$

ここで、格子点の数を  $n$ 、観測値の数を  $m$  として、 $x^b$  は第一推定値 ( $n$  次元)、 $y^o$  は観測値 ( $m$  次元)、 $B$  は背景誤差共分散行列 ( $n \times n$ )、 $R$  は観測誤差共分散行列 ( $m \times m$ )、 $H$  は観測演算子、 $M$  は数値予報モデル

# 観測データ利用(品質管理)とは

- 観測データには様々な誤差がある
- 誤差の大きいデータの除去や誤差の補正を行う
- Quality Control あるいはQCと言う
- 個々の観測機器の特性に応じた処理を行っている

種別	総称	原因	特徴	対処方法
観測に付随する誤差	偶然誤差 (ばらつき)	現象自体の揺らぎや測定のはらつきなど	正規分布、不可避	データ同化で考慮
	系統誤差 (バイアス)	測器の調整不良や物理的変換の誤差など	一定方向のずれ	バイアス補正
特に大きな誤差 (異常値)	ラフエラー	人為的ミス、測器の故障、通信エラーなど	非常に大きな誤差	品質管理で棄却
同化システムに依存する誤差	気象学的ノイズ	システムの表現限界と観測の空間代表性のギャップ	システムにより変わる	品質管理で棄却又は平均化処理等

# アンサンブルとは

- 初期値の不確実性
- 予報モデルの不完全性
- 大気のカオス的な性質
  - 初期値等の微小な誤差が、後の予報結果に大きな差を生むことがある

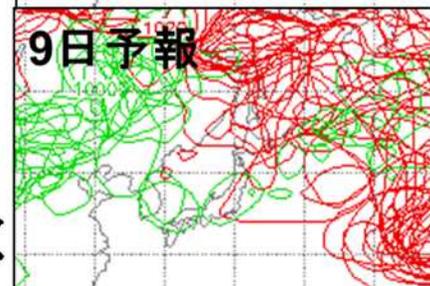
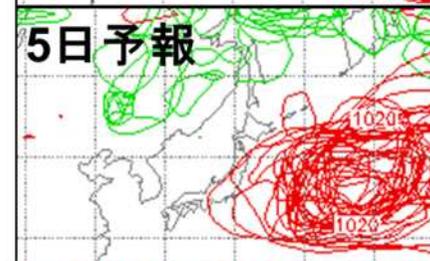
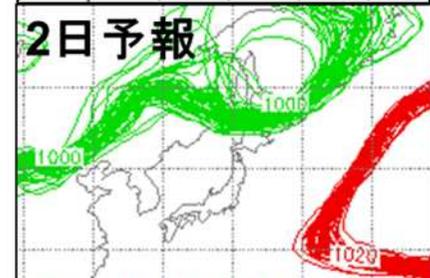
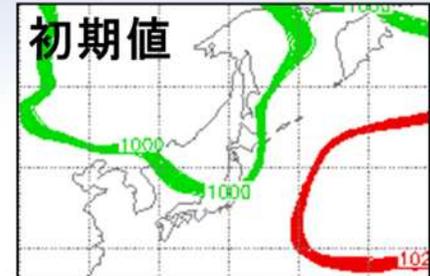


ひとつの予報結果のみで判断することは難しい

- わずかに異なる(摂動を加えた)初期値を用いて複数の予報を行う
  - 可能性のある複数のシナリオ
  - 予報の確実性(信頼度)の情報
- モデルや境界値の不確実性を考慮する手法もある

海面気圧の51個の予報の重ね描き図

初期値の  
違いは  
この程度



9日も予報  
すれば  
結果は  
大きくばらつく

# 応用処理・開発基盤

- 応用処理

- 数値予報が物理法則による予測であるのに対して、応用処理は統計的処理に基づいて数値予報による出力の補正を行う
  - 両者を併用して、より精度向上を目指す
- ニューラルネットワーク、カルマンフィルタ、線形重回帰、ロジスティック回帰等を利用
- ある格子点での値を補正において、1つの格子点もしくはその周辺の格子点の値のみを利用

- 開発基盤

- 計算機は安定稼動が求められる
  - 防災情報の観点では24時間365日休まず運用
- 数値予報を全体として安定に運用するためのスケジューリングの重要性
  - MPIプログラムと非MPIプログラムの混在
  - 実行順序の依存性(品質管理→データ同化→数値予報モデル)の適切な考慮

# 気象庁のスーパーコンピュータシステム

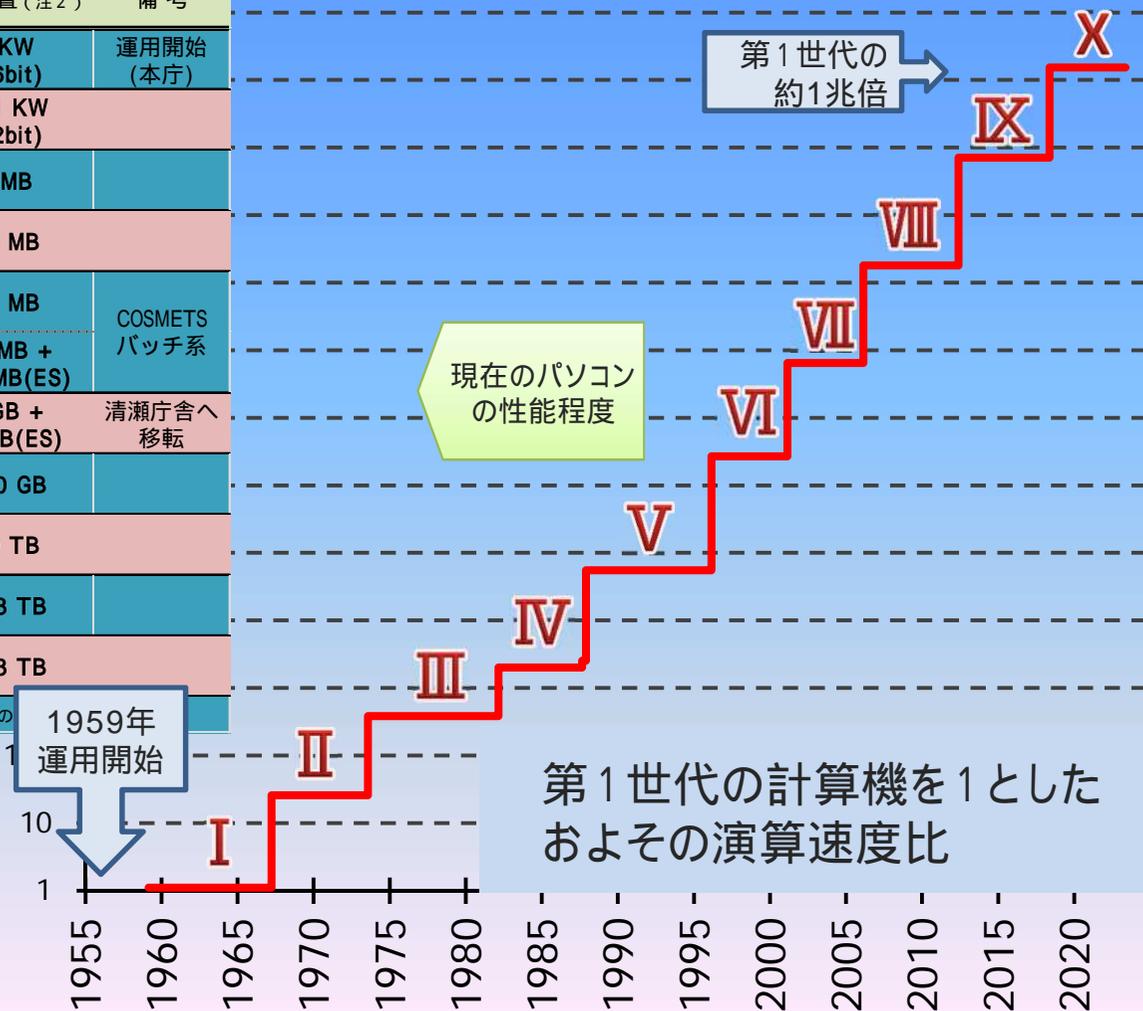
# 数値予報に用いる計算機の変遷

世代	運用開始年月	主計算機	演算速度(注1)	記憶装置(注2)	備考
	1959/3	IBM 704	84 $\mu$ sec	8 KW (36bit)	運用開始(本庁)
	1967/4	HITAC 5020/5020F	3.25 $\mu$ sec	131 KW (32bit)	
	1973/8	HITAC 8700/8800	0.22 $\mu$ sec	2 MB	
	1982/3	HITAC M-200H (2台)	0.084 $\mu$ sec	16 MB	
	1987/9	HITAC M-680	30 MIPS	32 MB	COSMETS バッチ系
	1987/12	HITAC S-810/20K	630 MFlops	64 MB + 512 MB(ES)	
	1996/3	HITAC S-3800/480	32 GFlops	2 GB + 12 GB(ES)	清瀬庁舎へ 移転
	2001/3	HITACHI SR8000E1	768 GFlops	640 GB	
	2006/3	HITACHI SR11000K1 (2台)	21.5 TFlops	10 TB	
	2012/6	HITACHI SR16000M1 (2台)	847 TFlops	108 TB	
X	2018/6	Cray XC50 (2台)	18PFlops	528 TB	

注1) 演算速度の単位  $\mu$  sec: 加減算演算1回あたり時間、IPS: 1秒間の命令実行回数、Flops: 1秒間の



現在のスパコン(Cray XC50)



気象 \* 普通のパソコン(100GFlops)の18万台分の処理性能

# 気象庁スパコンの歴史



初代 1959 ~  
IBM 704



3代目 1973 ~  
HITAC 8800/8700



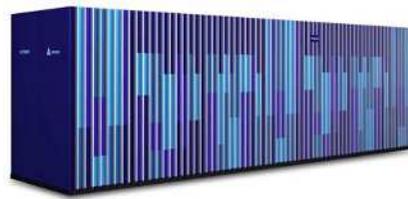
4代目 1982 ~  
HITAC M-200H × 2



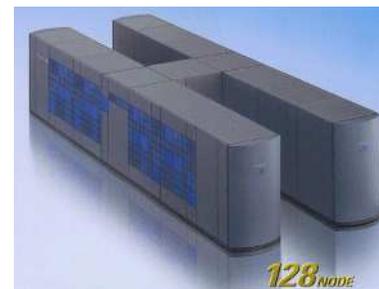
5代目 1987 ~  
HITAC M-680H  
HITAC S-810/20K



9代目 2012 ~  
HITACHI  
SR-16000M1 × 2



8代目 2006 ~  
HITACHI  
SR-11000K1 × 2  
45(46)位(2006/6)



7代目 2001.3 ~  
HITACHI SR8000E1  
18位(2000/11)

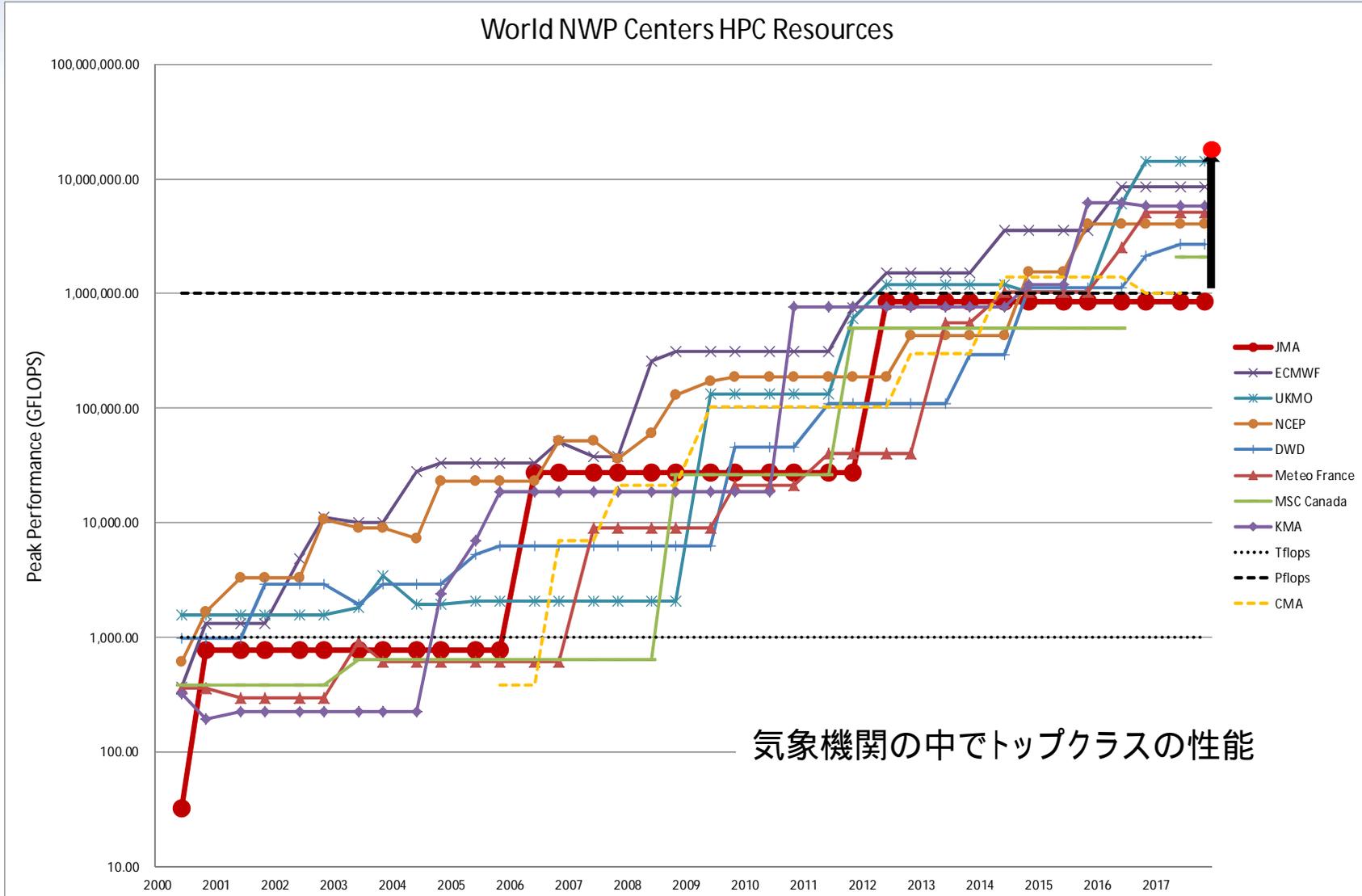


6代目 1996 ~  
HITAC S-3800/480  
27位(1995./11)

# スーパーコンピュータ主要諸元 (1台あたり)

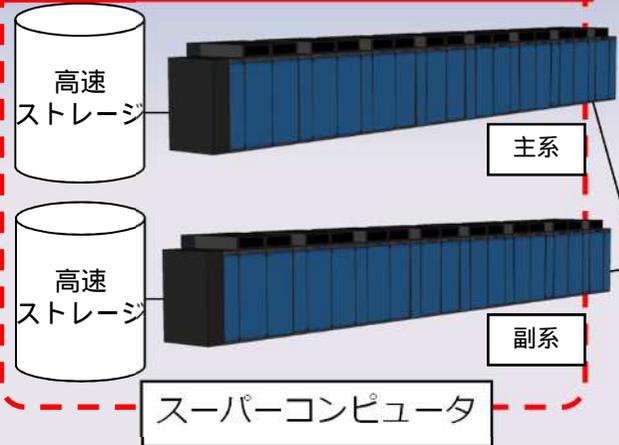
機種名	Cray XC50
総理論演算性能(計算ノードのみ)	9083 TFLOPS
総主記憶容量(計算ノードのみ)	264 TiB
ノード数(計算ノードのみ)	2816
1ノード理論演算性能(計算ノード)	3225.6 GFLOPS
1ノード主記憶容量(計算ノード)	96 GiB
CPU	Intel Xeon Platinum 8160 × 2 (2.1 GHz, 24コア)
OS	Cray Linux Environment、SUSE
高速ストレージ容量	1.6 PB × 3

# 各国気象センタのスパコン



# スーパーコンピュータシステム概要図

NAPS9の約10倍の処理能力(実効性能)  
理論演算性能は22倍: 9PFLOPS×2



リモート  
メンテナンス装置



支援要員

清瀬  
第一庁舎  
第二庁舎

監視端末

運用監視装置

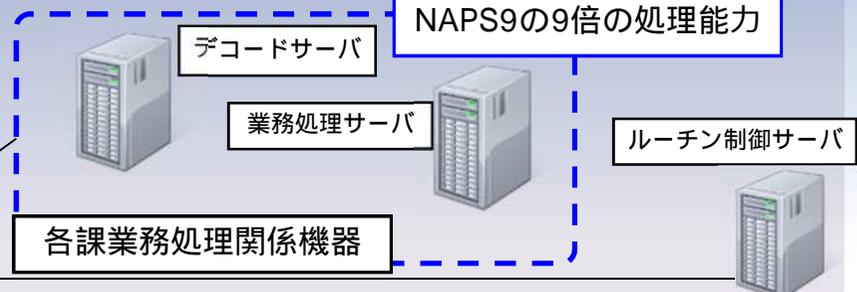


アデス等  
他システム

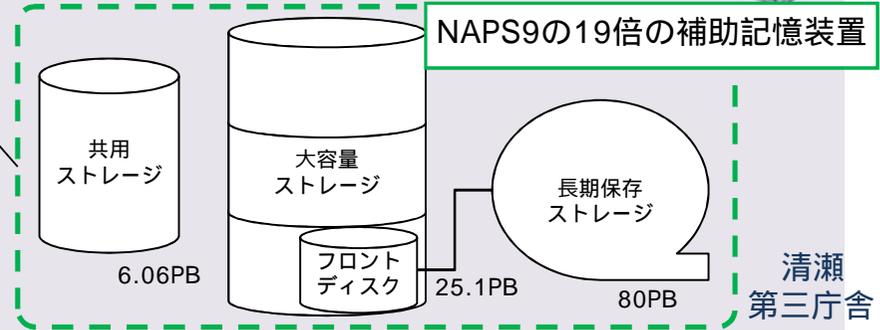
ネットワーク装置

Internet

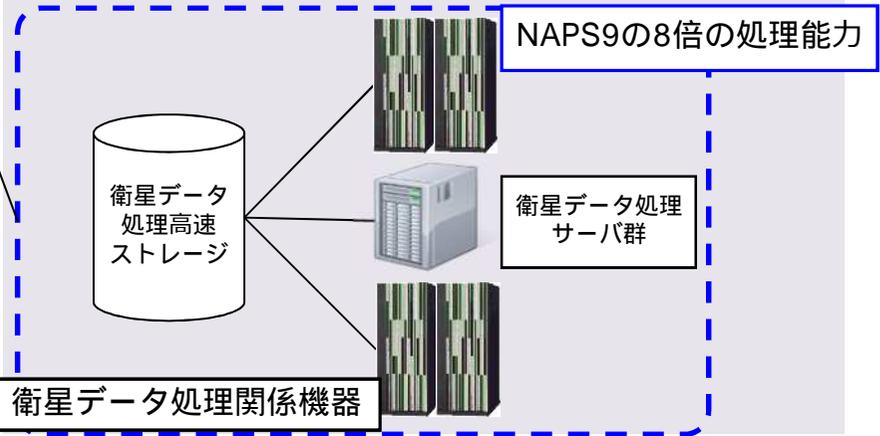
NAPS9の9倍の処理能力



NAPS9の19倍の補助記憶装置



NAPS9の8倍の処理能力



ネットワーク装置  
(本庁)

管理端末

現業端末

本庁基幹  
ネット

本庁庁舎



大阪管区  
気象台

衛星データ  
処理  
ストレージ  
(西局)

監視端末

西アデス等  
他システム

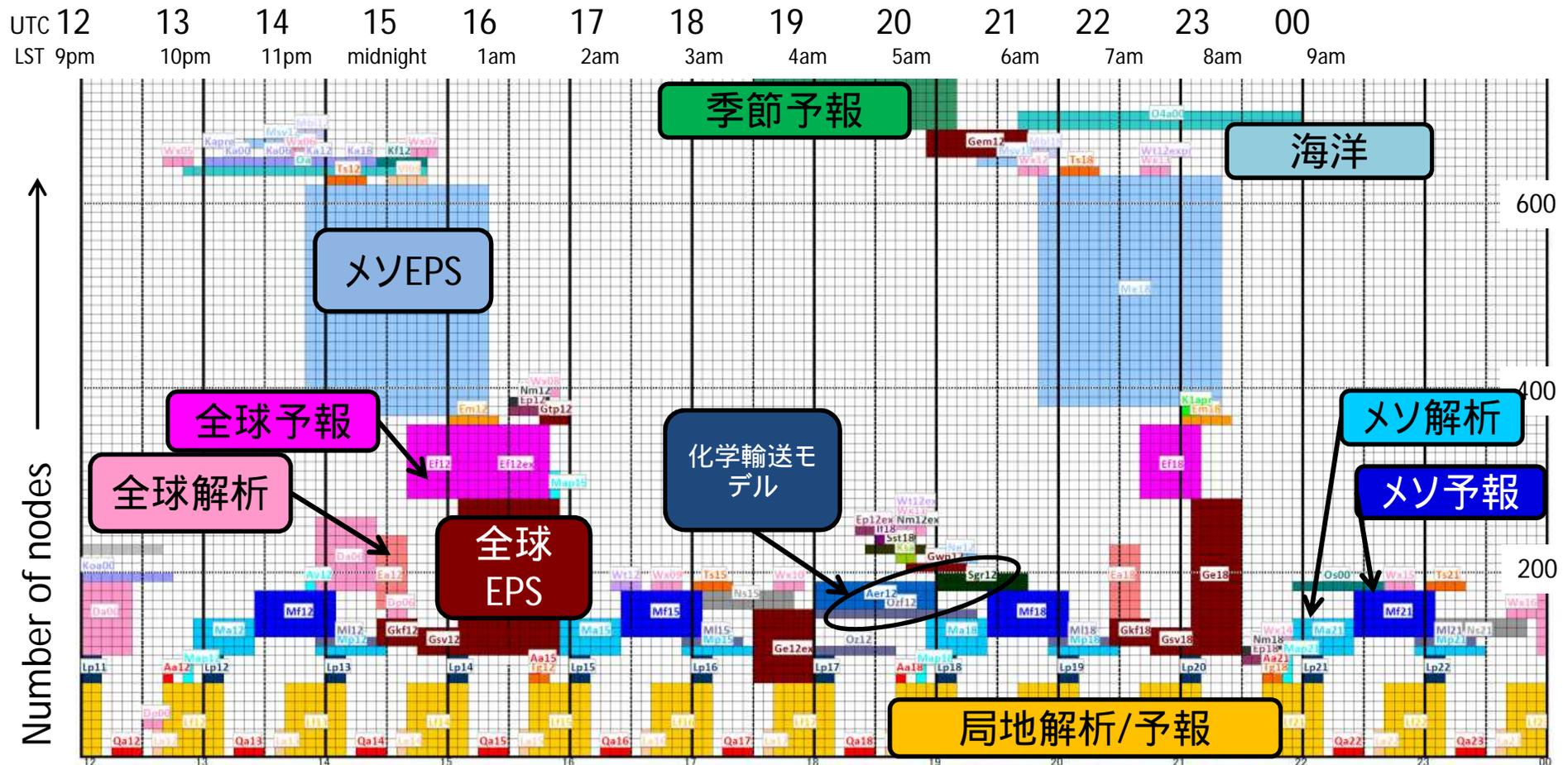
衛星データ処理  
サーバ群  
(西局)

数値予報BCP  
サーバ

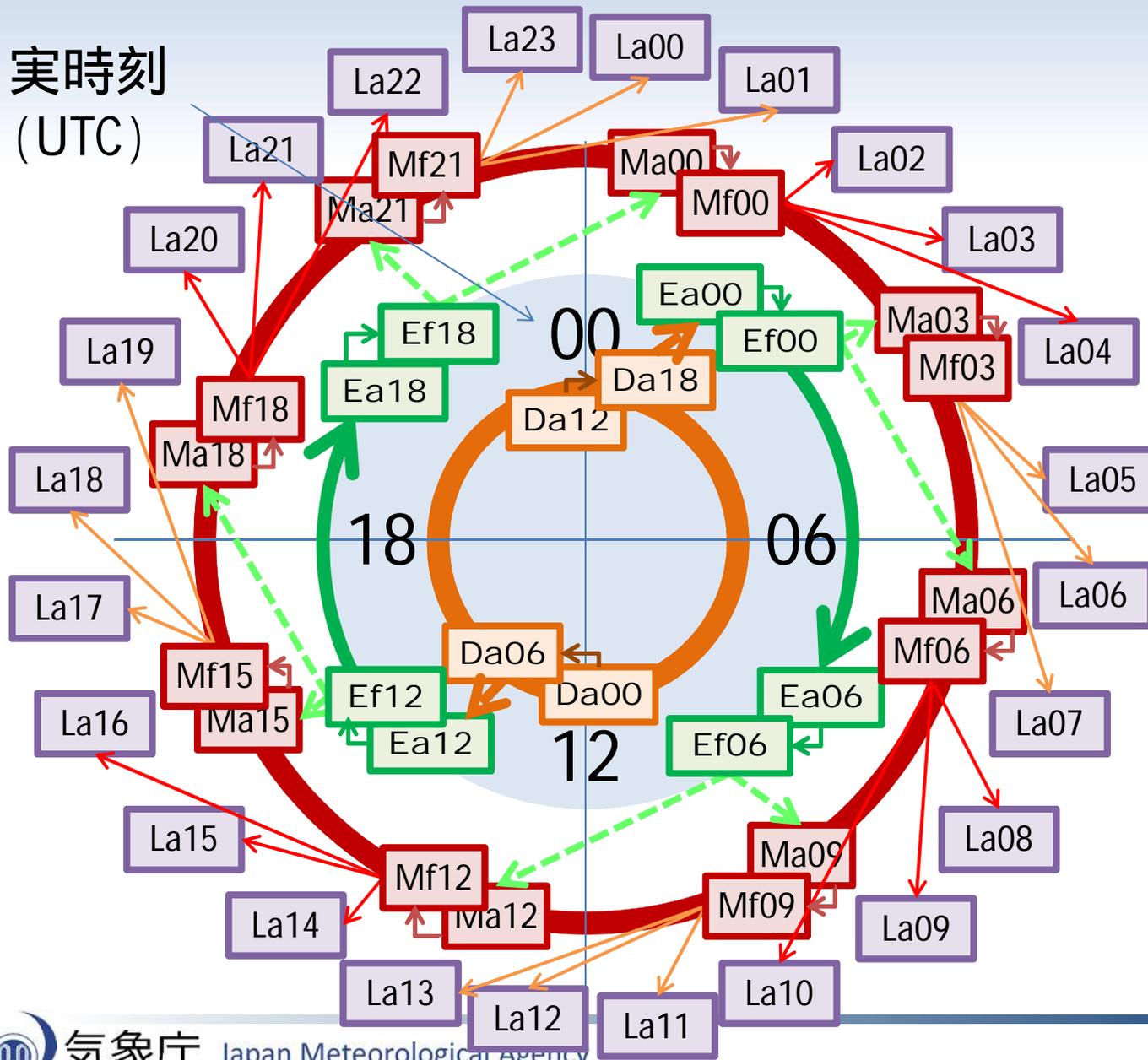
# 現業用スーパーコンピュータ

- 業務は24時間365日無停止
  - 普通のスパコンより高信頼性が求められる
  - が、1台が全く止まっていけない訳ではなく、全体として無停止であれば良い
    - 計算ノードが多少壊れていてもOK
  - 気象庁スパコンは主副の2台構成のため、主系が壊れたら、副系に切り替える
    - 副系は通常遊んでいる訳ではなく、開発業務で利用
  - また、数分の遅延は許容
    - この時間で主副の切り替えを実施する
  - 商用停電に備えて、全ての機器がUPSに接続
    - 長期停電に備えてストレージや主系の一部は発動発電機に接続

# 現業ジョブのスケジュール 夜間 (12-00UTC)



# 解析予報サイクルスケジュール



## 全球サイクル解析 (Da)

- 一番内側で自己完結したサイクルで精度維持のための解析
- 観測データの待ち時間を十分にとった後処理を実行

## 全球速報解析 (Ea)

- 全球予報のための解析
- Ea00,12はDa18,06解析値から第一推定値を作ること、より高い精度の維持を図っている

## 全球予報 (Ef)

## メソ解析 (Ma)

- メソ予報のための解析
- 全球解析からはほぼ独立しているものの、側面境界値を全球予報からもらっている

## メソ予報 (Mf)

## 局地解析 (La)

- 局地予報のための解析
- メソ解析・予測値を最初の第一推定値として使っている

局地予報はスペースの関係上、記載を省略

# 高可用性の実現 (データの同期)

- ある1つの業務の集まり(ex. 全球予報)が終了する毎に、出力したデータを待機系(通常副系)の高速ストレージにcopyをする
  - copy自体は普通のscp(同期ソフトは、信頼性の面から使用していない)
  - 1つの業務はおよそ30分くらい
- 稼動系に障害があると、主副切り替えをして、前回copyされた所からやり直す

主系と副系に同様の業務処理環境を構築  
(業務処理環境変更の際には同期)

スーパーコンピュータ主系

スーパーコンピュータ副系



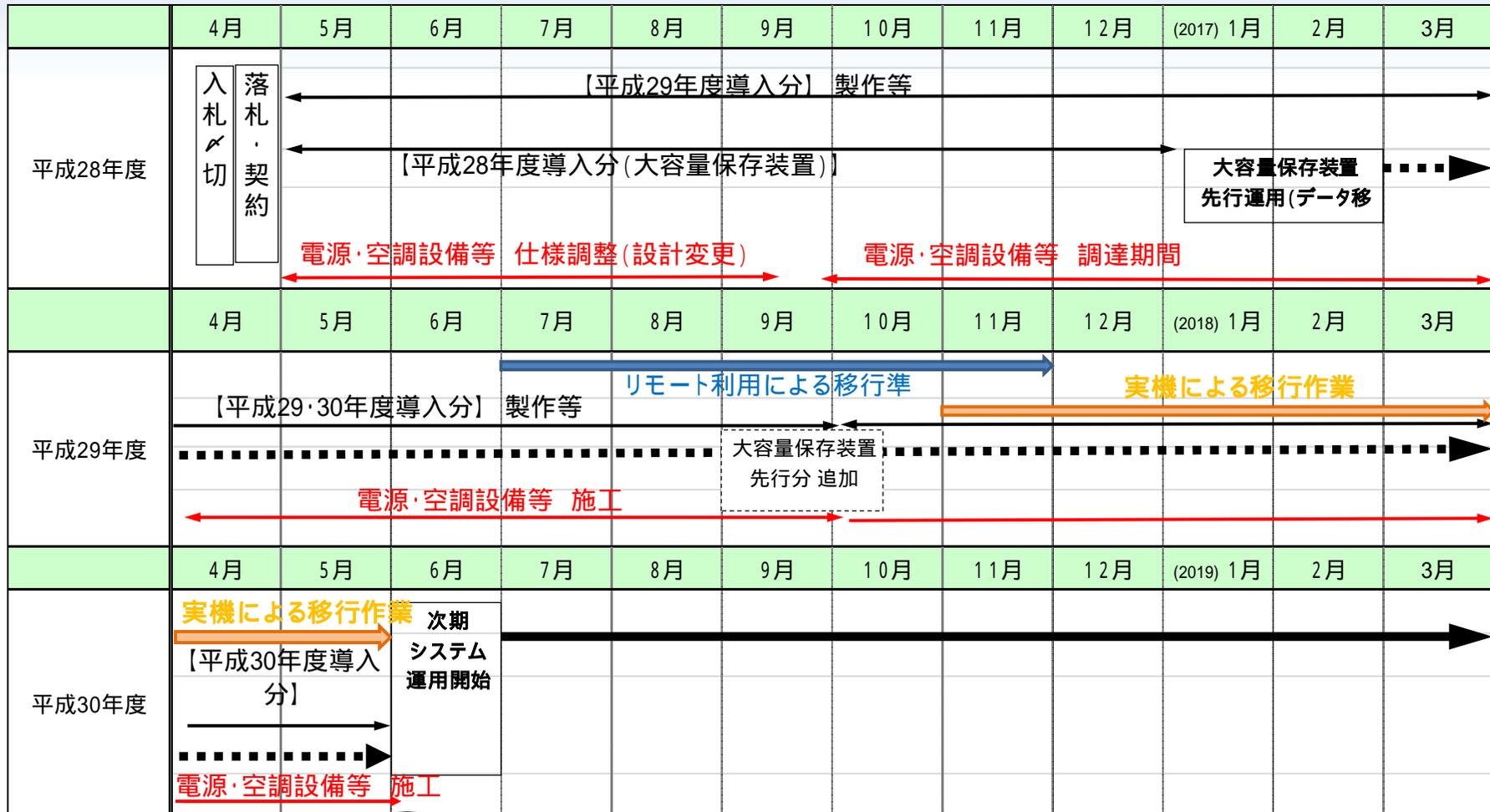
業務処理に必要な  
データを定期的にコピー



# 第10世代へのリプレース

- 気象庁スパコンの場合、リプレース期間はおおよそ2年
  - 普通の大学などは半年程度?
  - スパコンメーカーが決まってから、設備工事をしているため
  - 既存業務の移植に半年以上必要
    - 調達時にはベンチマークテストが(速く)動作すれば、どんなメーカー(アーキテクチャ)が入っても良しとしているため
- 既存のスパコンと並行運用をする
  - 単純に考えれば、既存+新規の場所と電気が必要
    - 今回は、電気が足りないため、新スパコンは並行運用期間は一部を止めて対応

# リプレーススケジュール



# リプレース時の業務移行

- 安全第1の方針の元、リプレース時(2018/6/5)は既存業務を単純移行を行う
  - 新規のプロダクトの提供などは、リプレース後に順次実施
    - 2018/6/26 全球モデル予報時間延長(84h->132h)
    - 2019/3(予定) メソ/局地モデル予報時間延長
    - 2019/6(予定) メソアンサンブルモデル運用開始
  - 大きな問題もなく、業務移行は実施された
    - 移行期間中にスパコンが問題なく利用出来た
    - 旧スパコンはOSがAIXであったが、移行先がスパコンが、標準的なLinuxであったため大きな問題は発生しなかった。

# リプレースの規模

- モデルや応用プロダクトの開発、維持管理は全て気象庁職員が実施
  - 外注はありません。
- 下記をおよそ150人で、約1年間で実施

1日に実施する業務の回数(ex全球予報)	725
1日に投入するバッチジョブの数	18,528
JCL(=shスクリプト)の数	10,000
プログラムの数	1441
ソースコードのファイル数	14,926
ソースコード行数	6,509,010

# リプレース時の電源切り替え

～5月21日(月)

現システム主系  
(ルーチン運用)

現システム副系  
(開発利用)

新システム主系  
(部分稼働、  
ルーチン試験)

新システム副系  
(部分稼働、  
開発利用)

5月21日(火)～24日(木)

現システム主系  
(ルーチン運用)

現システム副系  
(開発利用)

新システム主系  
(部分稼働、  
ルーチン試験)

新システム副系  
(停止)

5月24日(金)～6月4日(月)

現システム主系  
(ルーチン運用)

現システム副系  
(停止)

新システム主系  
(部分稼働、  
ルーチン試験)

新システム副系  
(停止)

6月5日(火)～7日(木) [新システム運用開始]

現システム主系  
(待機)

現システム副系  
(停止)

新システム主系  
(部分稼働、  
ルーチン運用)

新システム副系  
(停止)

6月8日(金)～

現システム主系  
(停止)

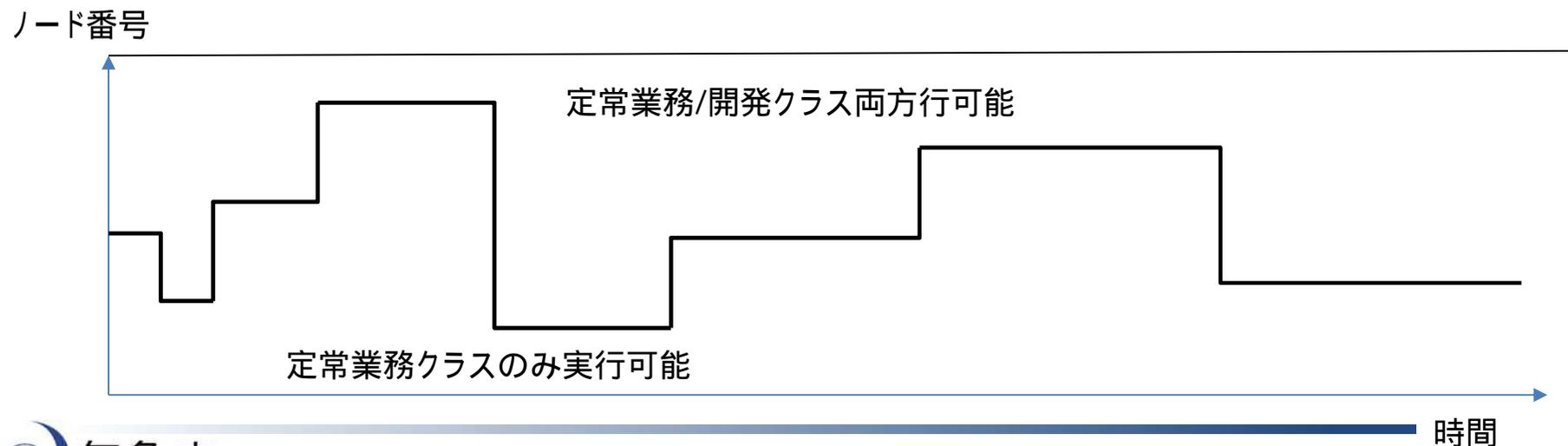
現システム副系  
(停止)

新システム主系  
(ルーチン運用)

新システム副系  
(開発利用)

# ノードの効率的な利用

- 実は、定常業務を実施している主系でも開発をしている
  - リプレース当初は、前システムの業務を単純移行したため、ノードが余っているため(もったいない)
  - が、定常業務に影響を与えないようにしないと事故が発生
- ストレージは定常業務/開発で分ける事で影響を防ぐ
- 計算ノードについては
  - 予め定常業務で使用するノードを想定し、開発クラス(キュー)を動的に特定のノードに投入出来ないようにすることにより、定常業務クラス(キュー)の実行を保証している。



# 今後のスパコン

- 気象庁のスパコンはリプレース毎に消費電力が増大している
  - 今回のスパコンは、2台で定格で4MW程度
  - 周辺システムや冷却なども含めれば、電気代だけで年10億弱
  - これ以上の電気を使うのは難しい
- 色々と工夫をして、消費電力を上げずに能力を増強する必要がある
  - GPU,FPGAなどCPUでは無いアーキテクチャの検討
  - 冷却効率の改善
  - プログラムの並列化効率向上

# 将来計画

# 交通政策審議会気象分科会の提言

- 平成30年8月に「2030年の科学技術を見据えた気象業務のあり方」が提言としてとりまとめられた
  - 平成30年1月の第24回気象分科会より審議
- 観測・予測精度向上のための技術開発、気象情報・データの利活用促進及びこれらを「車の両輪」とする防災対応・支援の推進等について、取組を進める



# 数値予報技術開発重点計画

- 交通政策審議会気象分科会提言「2030年の科学技術を見据えた気象業務のあり方」に示された気象・気候分野に関する技術開発を推進していく計画として策定
- 重点目標
  - 豪雨防災
    - 集中豪雨発生前に、明るいうちからの避難等、早期の警戒・避難を実現
  - 台風防災
    - 大規模災害に備えた広域避難・対応を可能にする数日先予測の高精度化
  - 社会経済活動への貢献
    - 生産・流通計画の最適化等に役立つ高精度な気象・気候予測を実現
  - 温暖化への適応策
    - 「わが町」の地球温暖化予測により、国や自治体等の適応策策定に貢献

# 数値予報分野における連携に向けた今後の期待

- 数値予報は、「数値予報モデル」・「データ同化」・「観測データの品質管理」・「アンサンブル」・「応用処理」・「開発基盤」等からなる複合体
  - それぞれにおいて、数値流体力学・気象学・物理学・数学・計算機科学等様々な学問分野の知見を反映
- それぞれの処理における計算機利用形態の違い
  - 大規模並列計算:「数値予報モデル」・「データ同化」
  - 小規模並列計算:「観測データの品質管理」
  - データ入出力:全てにおいてビッグデータの扱いが必要
- 如何にして計算機科学の進歩を精度向上に活かせるかが課題
  - 分解能の向上、アンサンブルメンバ数の増加、物理過程等のモデリングの精緻化...
- これらの課題解決のために、今後の計算機の動向を見据えた連携が必要
  - 大規模並列計算プログラムを中心としたGPU等のFeasibility Studyとそれを踏まえた開発の方向性の検討
    - 東工大(領域モデル:asuca)と東北大(全球モデル)で過去に調査実績あり
  - さらには、Co-designまでいければ...
    - ただし、様々な利用形態があることから、ハイブリッド構成が今後必要?
  - あらゆるプログラムにおいて移植性を高めつつ計算効率を追及
    - 調達ではベンチマークテストが(速く)動作すれば、どんなアーキテクチャでも可としている
    - 東工大との共同研究でCPU/GPU双方に利用可能なHybrid Fortranの開発