



天気予報を支えるHPC

～「数値予報」の実際～

令和6年8月6日

気象庁 情報基盤部 数値予報課

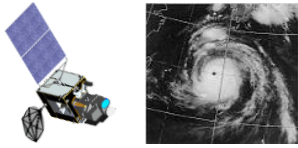
長谷川昌樹

1. 数値予報とは

こんにちの気象観測・予報業務

観測データ（国内外）

気象衛星
観測網



高層気象観測網
ラジオゾンデ
ウィンドプロファイラ
航空機



レーダー気象
観測網



地上気象観測網
各気象官署
アメダス観測



海洋気象観測網
海洋気象観測船
一般船舶



外国気象機関



観測データ収集

解析・予測・情報作成

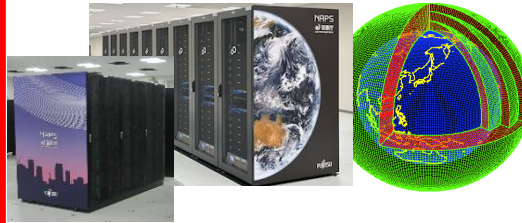
予報官（全国の気象台）

今後の予測・情報の作成



24時間体制
実況監視
予測資料の分析

スーパーコンピュータシステム
大気の状態予測（数値解析予報）



気象情報伝送処理システム（アデス）

国内外のデータ収集・配信



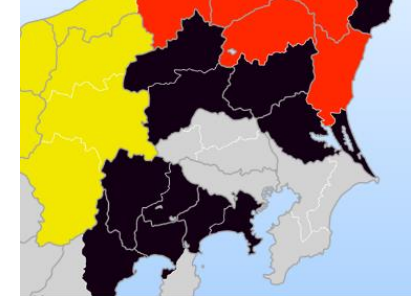
取り扱うデータ量(R4年度)
1日に新聞約14,000年分
(2.1TB)

防災に資する各種気象情報

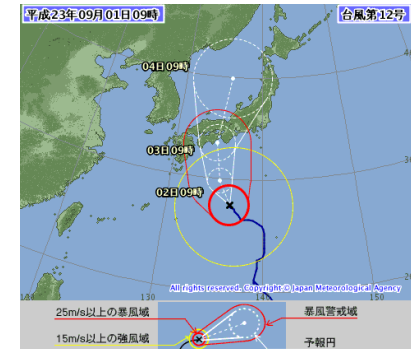
⇒ 防災気象情報

特別警報・警報・注意報

■特別警報 ■警報 ■注意報 □発表なし



台風情報

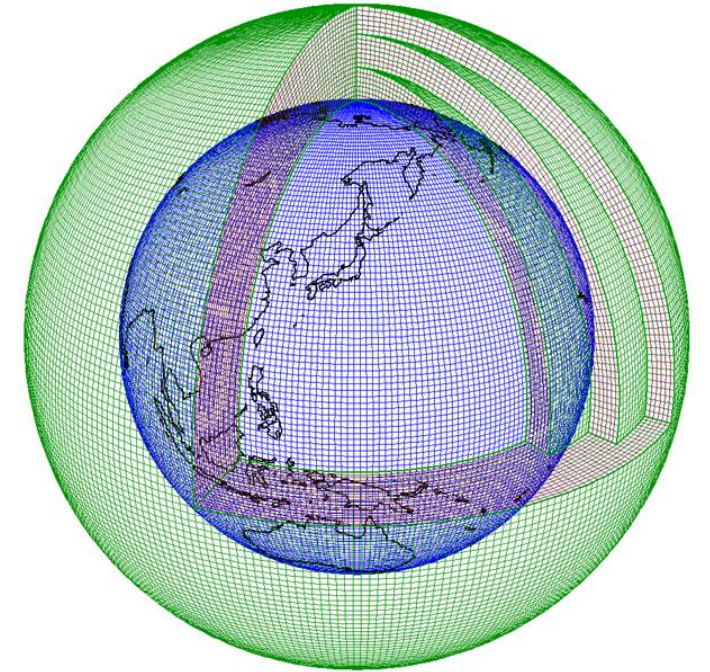
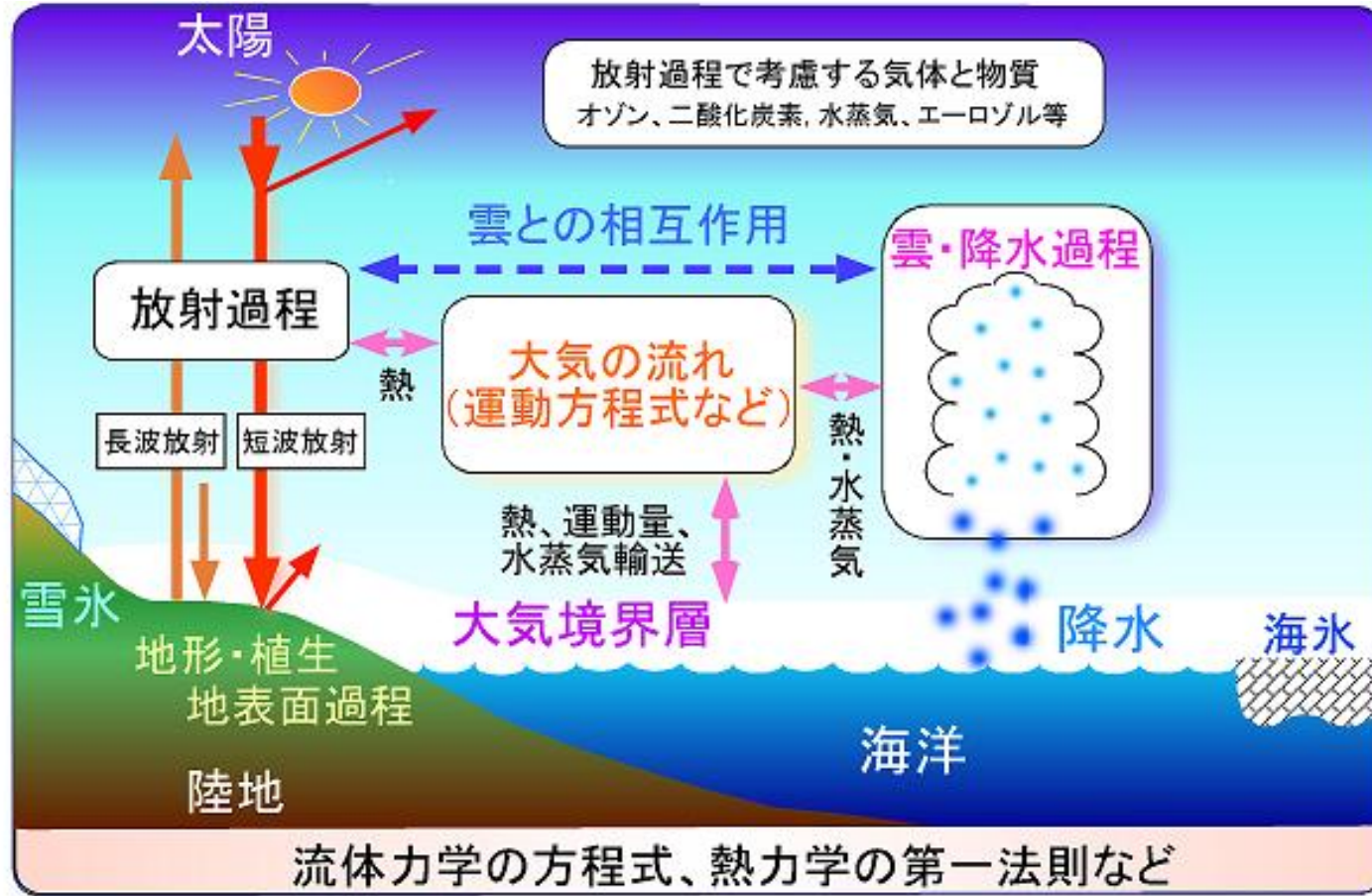


気象情報

高解像度降水ナウキャスト
天気予報・週間天気予報
天気図 等

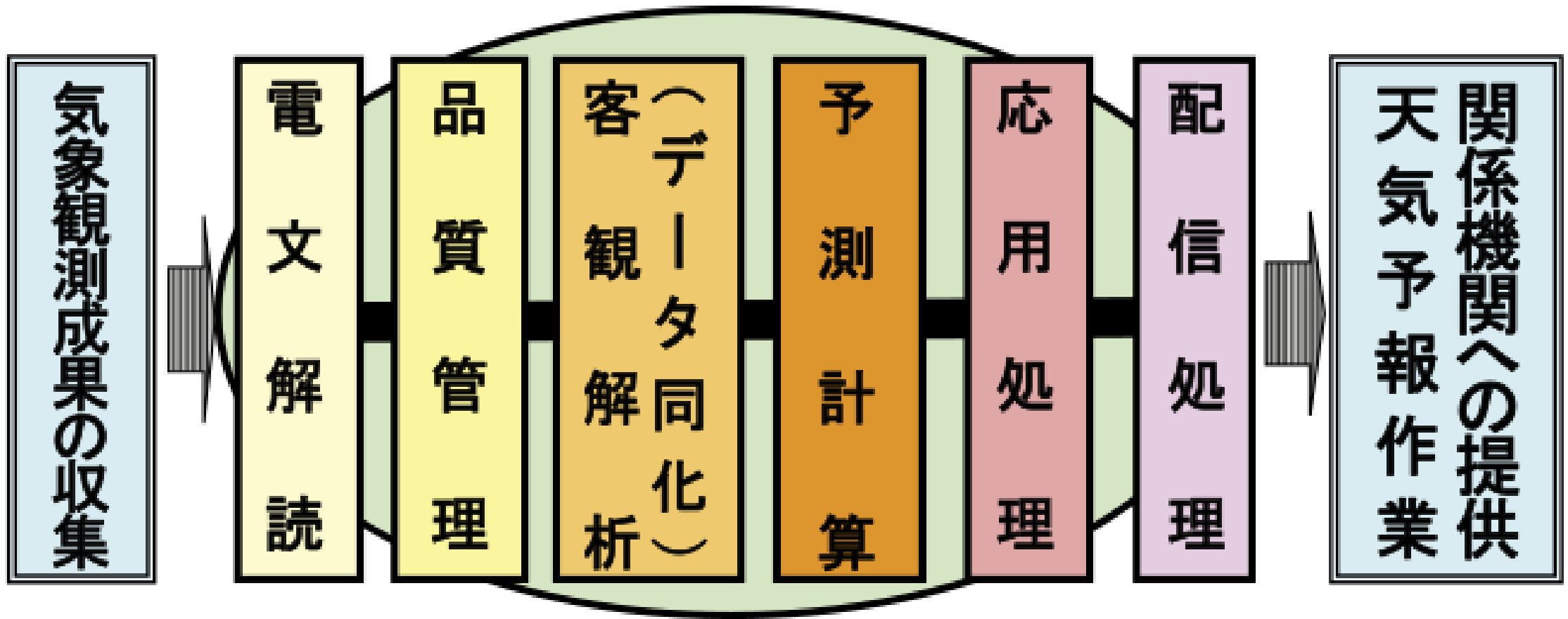
情報発表

気象予報の中核：数値予報

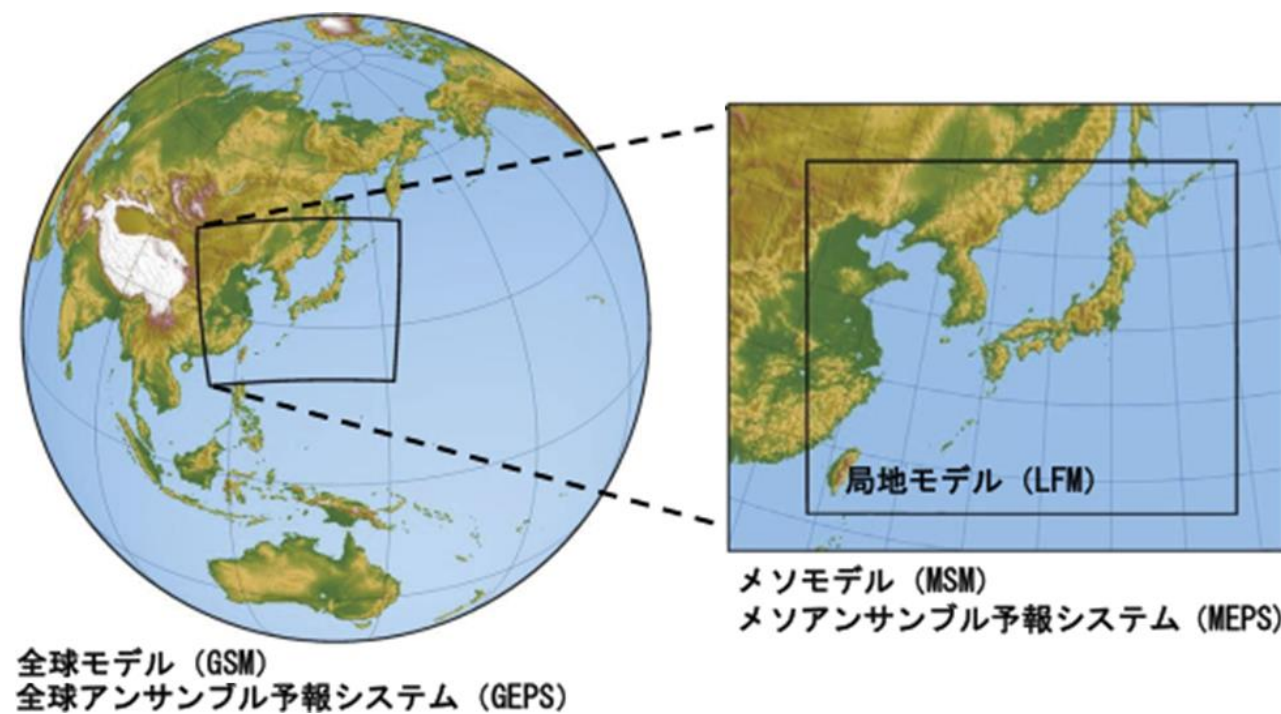
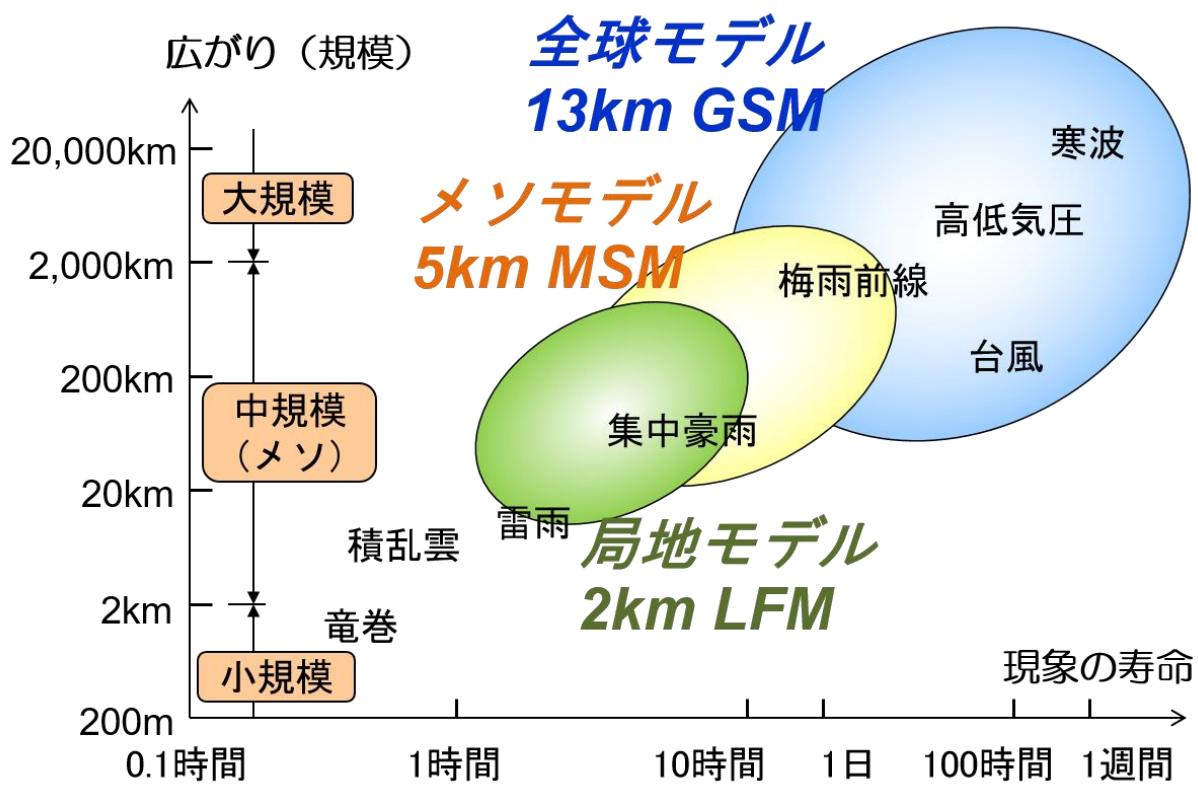


- 計算機（コンピューター）を用いて地球大気や海洋・陸地の状態の変化を物理法則に基づく**数値計算（シミュレーション）**によって予測
 - 計算機上に、「地球大気や海洋・陸地の状態」を再現：「**数値予報モデル**」

気象予報の中核：数値予報の流れ

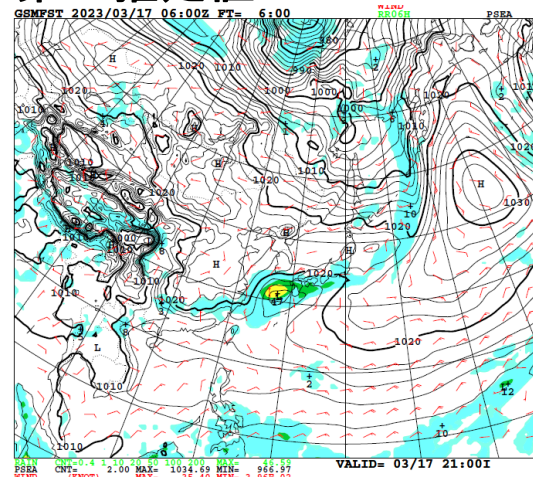


気象現象のスケールと、数値予報モデルの種類

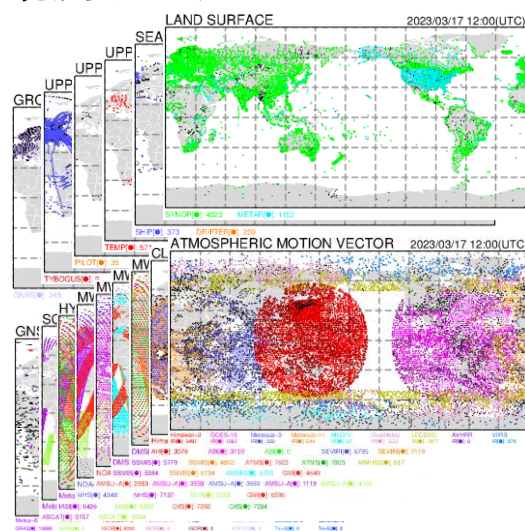


データ同化による初期値の作成

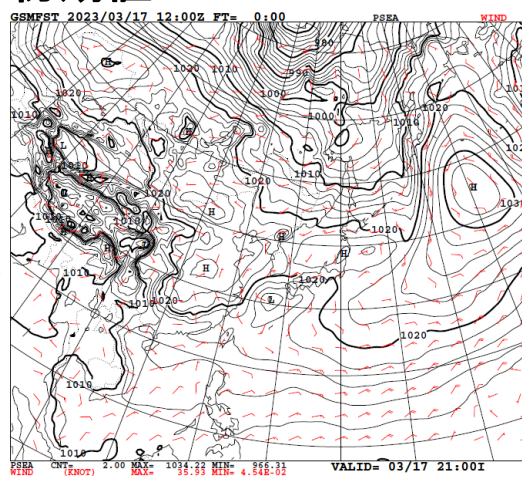
第一推定値



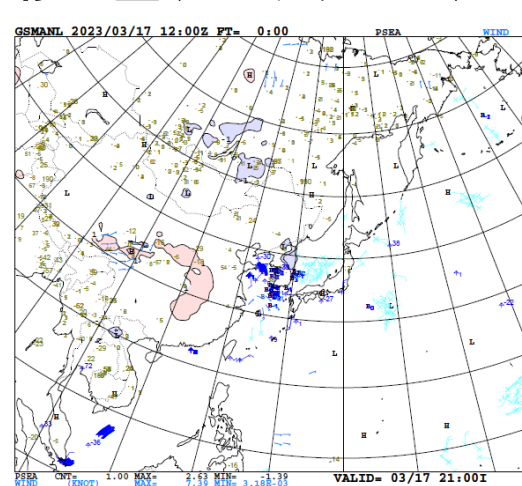
観測データ



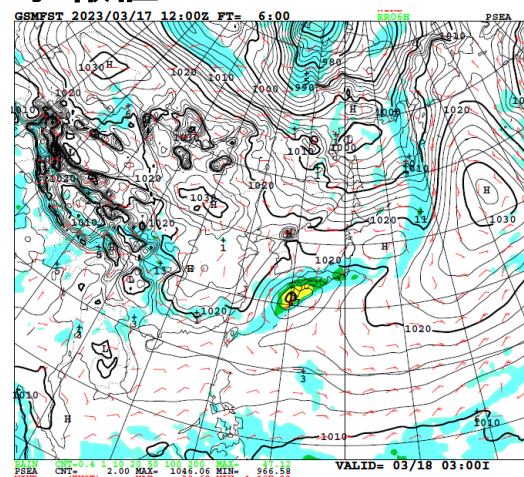
初期値



修正量(インクリメント)

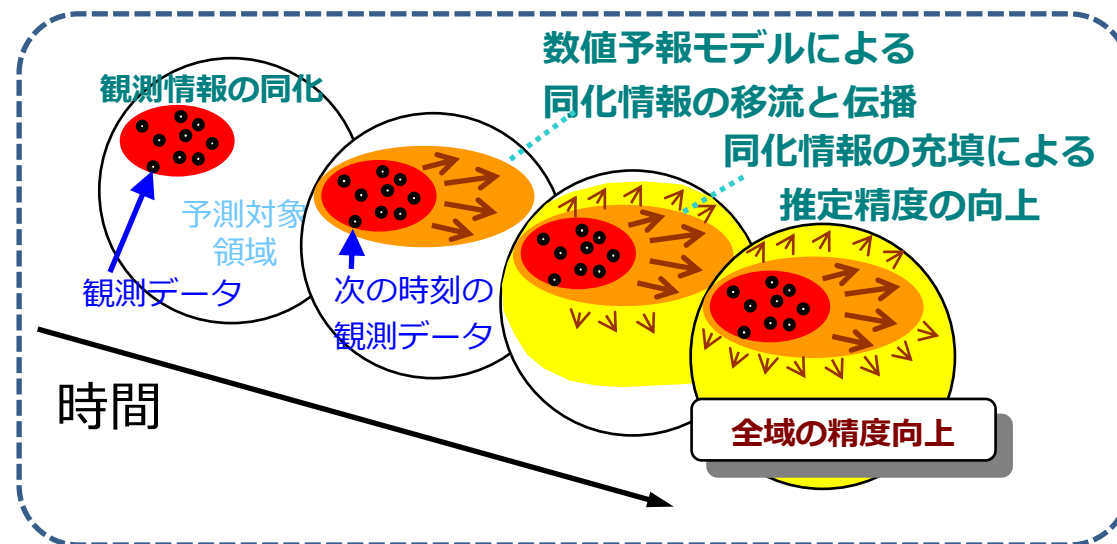


予報値

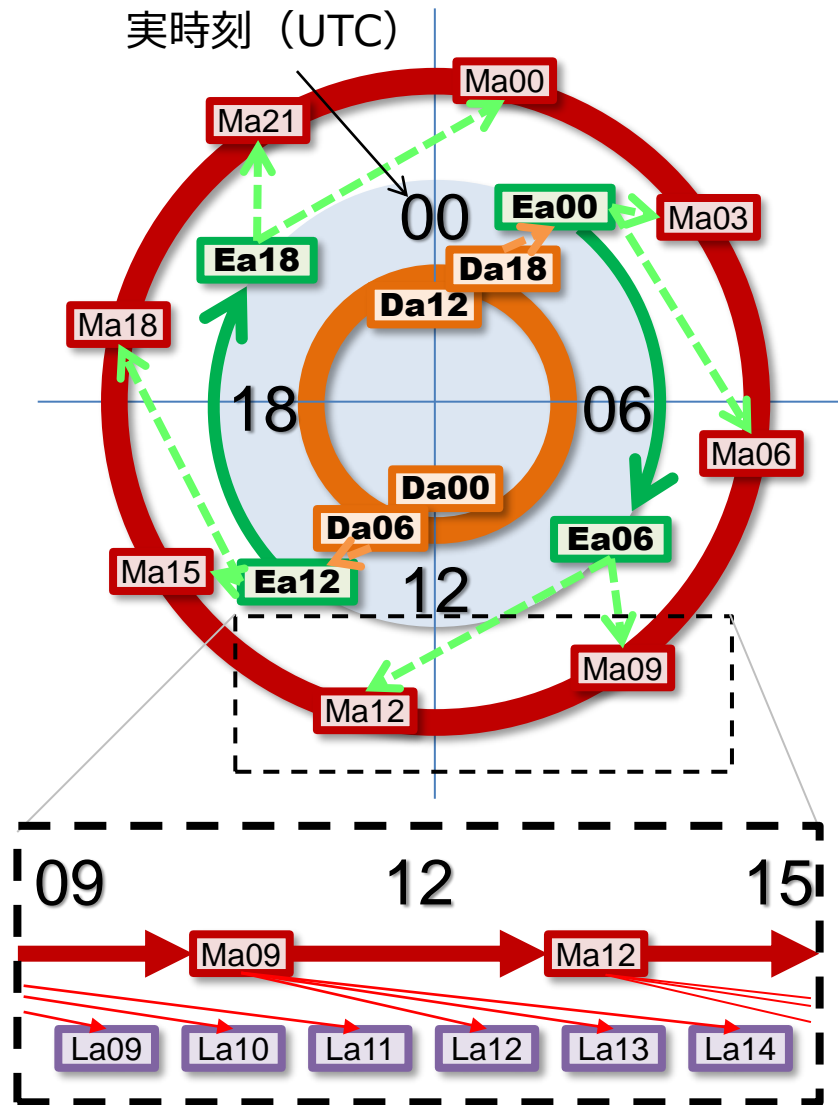


データ同化 (客観解析)

予測計算
(数値予報モデルの実行)



解析予報サイクル



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
- そのため観測データの待ち時間が最も長い

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

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

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おり、サイクルとはなっていない

数値予報計算の特徴

- 対象とする現象のスケールに応じた、複数の種類がある
 - よりスケールの大きなモデルへの依存関係があることが多い
- 単発の計算に閉じないことが多い
 - モデル本体以外の処理との依存関係も考慮が必要
 - 適切な初期値のために、「解析予報サイクル」による一定期間の計算の蓄積が必要
- 計算時間の制約が強いことが多い
 - 予報のためには、実時間の処理が必要
 - 再現実験も、長期間を対象にすることが多い

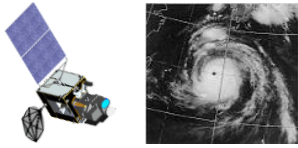


2. 業務処理（ジョブフロー） 制御ソフトウェア「ROSE」

気象観測・予報業務の成果物（製品）

観測データ（国内外）

気象衛星
観測網



高層気象観測網
ラジオゾンデ
ウィンドプロファイラ
航空機



レーダー気象
観測網



地上気象観測網
各気象官署
アメダス観測



海洋気象観測網
海洋気象観測船
一般船舶



外国気象機関



観測データ収集

解析・予測・情報作成

予報官（全国の気象台）

今後の予測・情報の作成



24時間体制
実況監視
予測資料の分析

スーパーコンピュータシステム
大気の状態予測（数値解析予報）



気象情報伝送処理システム（アデス）



国内外のデータ収集・配信
取り扱うデータ量(R4年度)
1日に新聞約14,000年分
(2.1TB)

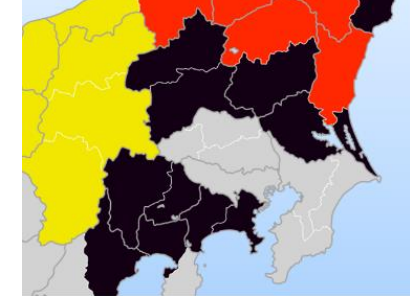
情報発表

防災に資する各種気象情報

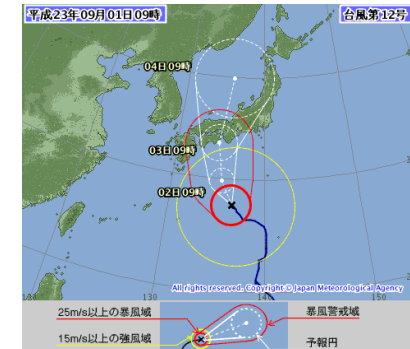
⇒ 防災気象情報

特別警報・警報・注意報

■ 特別警報 ■ 警報 ■ 注意報 □ 発表なし



台風情報



気象情報

高解像度降水ナウキャスト
天気予報・週間天気予報
天気図 等

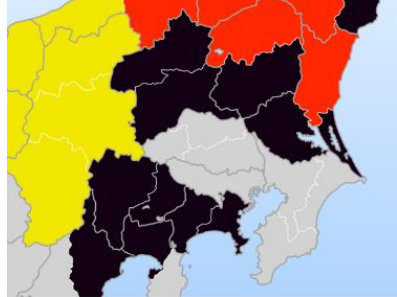
気象観測・予報業務の成果物（製品）

防災に資する各種気象情報

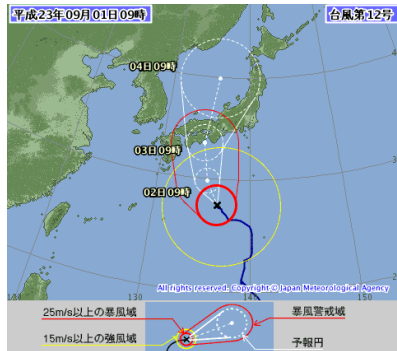
⇒ 防災気象情報

特別警報・警報・注意報

■特別警報 ■警報 ■注意報 □発表なし

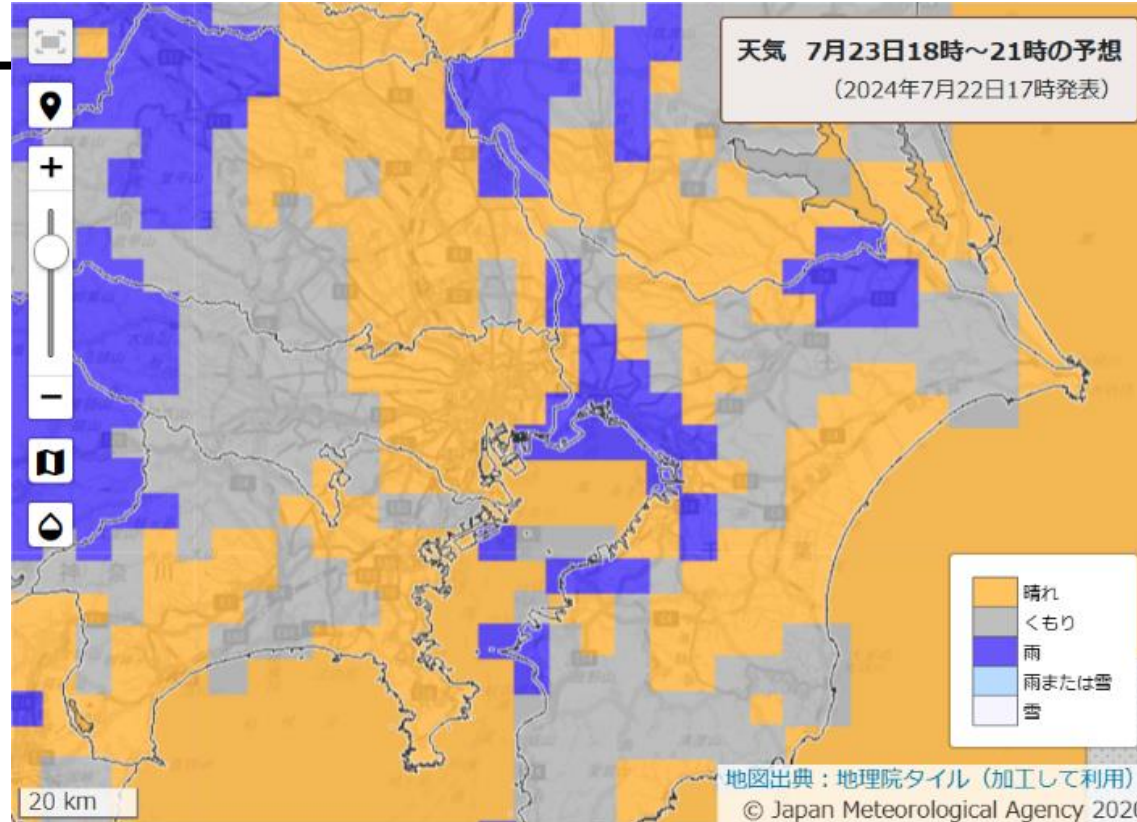


台風情報



気象情報

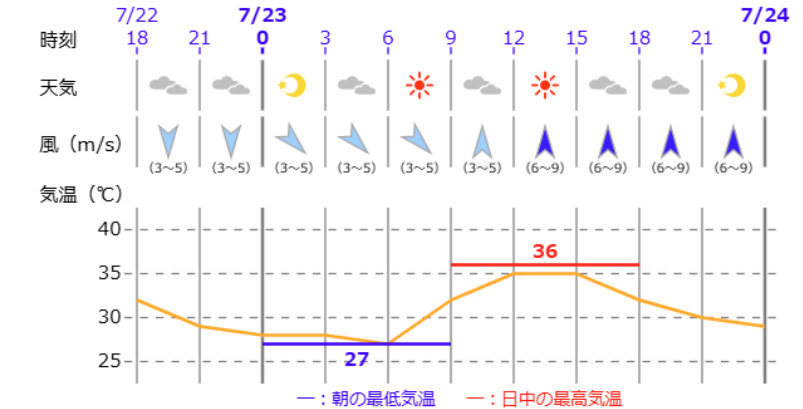
高解像度降水ナウキャスト
天気予報・週間天気予報
天気図 等



天気分布予報

地域時系列予報

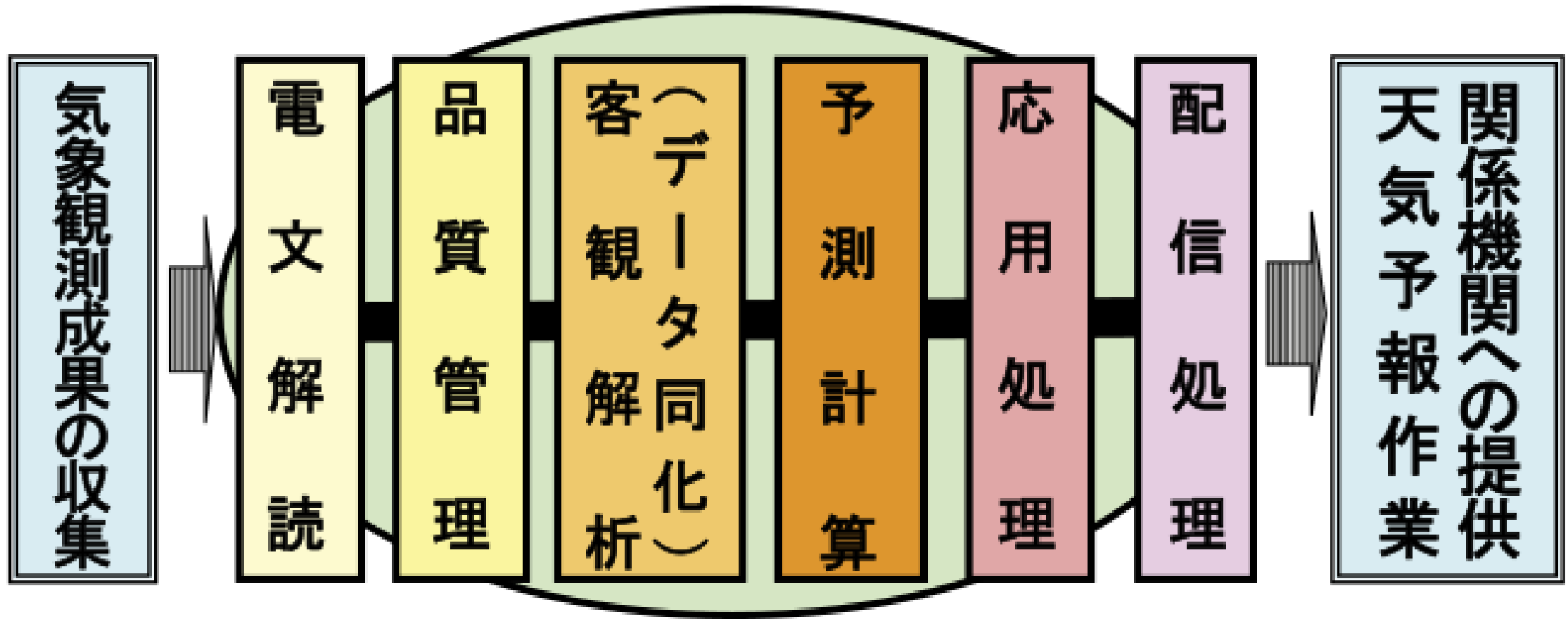
千葉県／北西部【気温：千葉】
銚子地方気象台 2024年7月22日17時発表



© Japan Meteorological Agency 2020

地域時系列予報

気象予報の中核：数値予報の流れ（再掲）



JG (ジョブグループ) 一覧

スケジューラ
黒：NWPMAIN
緑：ENSEMBLE
赤：HOURLY
青：DECODE

スパコン

デコード

NAPS11s

2024年4月現在

※NAPS11sの場合は更にスケジューラ名の先頭に「11sR-」が付く。

季節予報

Ks 全球海氷解析

Kapr 気候プロダクト

K4pr 3か月プロダクト

K8pr 暖寒候期プロダクト

Ceb 季節予報前処理

Coa 全球海洋データ同化

Ce 季節アンサンブル予報

Cep 6か月プロダクト

全 球

Da 全球サイクル解析

Dp 全球解析プロダクト

Ea 全球速報解析

Ef 全球予報

Ep 全球予報プロダクト

Sst 海面水温解析

Sstp 海面水温プロダクト

Gsv 全球アンサンブル初期摂動

Ge 全球アンサンブル予報

Gwp 全球アンサンブルプロダクト

Gtp 台風予報プロダクト

Gem 全球アンサンブル予報(1か月)

K2wpr 2週間予報プロダクト

K1[fs]pr 1か月予報プロダクト

メソ・局地

Em メソ用初期値切り出し

Ma メソ解析

Mf メソ予報

Mp メソ予報プロダクト

Msv/Mbl メソアンサンブル初期摂動

Me メソアンサンブル予報

Mep メソアンサンブルプロダクト

Ha 局地解析

Hf 局地予報

Hp 局地予報プロダクト

デコード

Ftp ファイル取得

Dc Da,Ea,Ma用デコード

Ds Ks用デコード

Dk Kc用デコード

Dx データ取得・デコード

DI Ha用デコード

De Ep用デコード

Dt TKS用デコード

Dz データ長期保存

Dq Qa用デコード

Dm Mp用デコード

Dr Aa用デコード

環 境

Ozf オゾン解析・予測

Aer エアロゾル解析・予報

Sgl 領域大気汚染気象予測

海 洋

Nm 全球沿岸波浪予報

Tg アジア域高潮予測

Ne 波浪アンサンブル予報

Oda/Oea 日本沿岸海況監視解析

Oep 日本沿岸海況監視プロダクト

Ns 浅海波浪予報

Ts 日本域高潮予測

Te 日本域台風時高潮確率予報

Oef 日本沿岸海況監視予報

解析・検証他

Qa 三十分大気解析

Av 航空高層断面図

Aa 天気図支援地上解析

Wt WAFS WINTeM図

Bi 観測データバイアス計算

Wx WAFS 悪天予想図

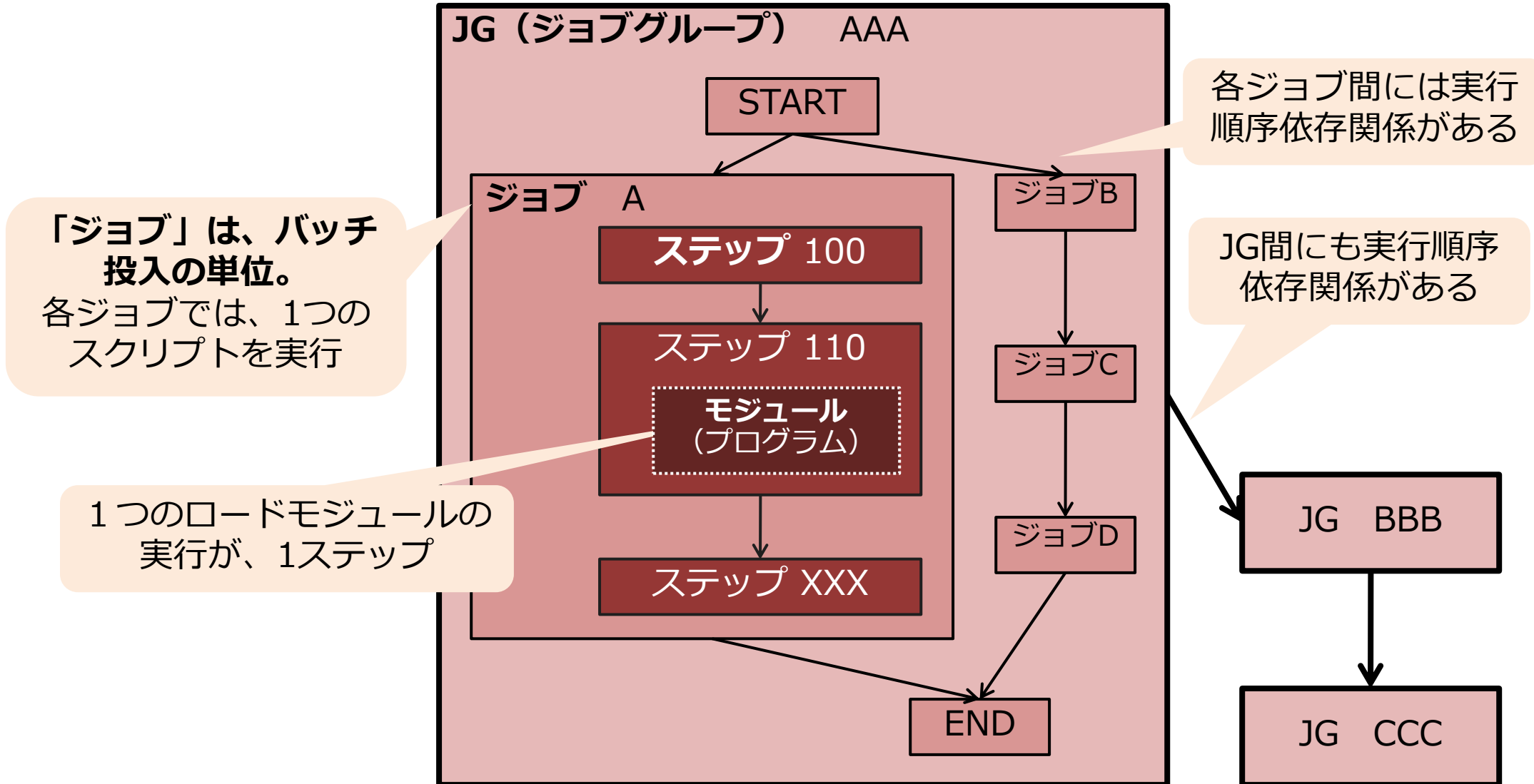
長期再解析

Kcb 気候解析(JRA3Q)前処理

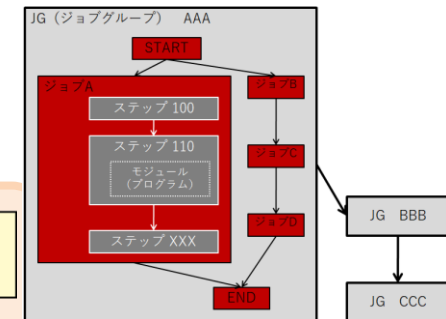
Kc 気候解析(JRA3Q)

Kcf 気候解析(JRA3Q)延長予報

業務処理の構造と用語



JGのジョブネット (ジョブの実行順序) の例



陸面モデル
予報計算

積雪深解析

地面解析

JG : Ma_ex

START

JGの開始

QcRdrf1

QcRdrf2

QcRdvr

QcRo

QcScat

QcTb

FcLnd

QcCnv

QcGnss

QcMwr

QcPr

QcRdrf0

QcRa

MkObs

観測データを結合

観測データの種別に
応じた品質管理

AnSnow

AnLnd

An4d

解析 (四次元同化計算)
本体

MkIAn

解析対象開始時刻の
初期値作成

FcAn

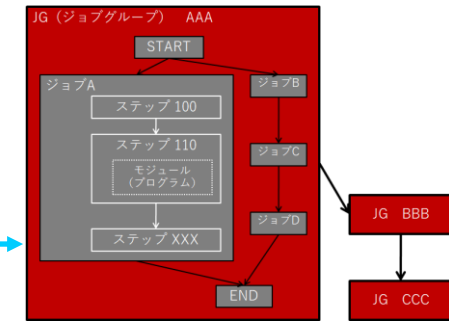
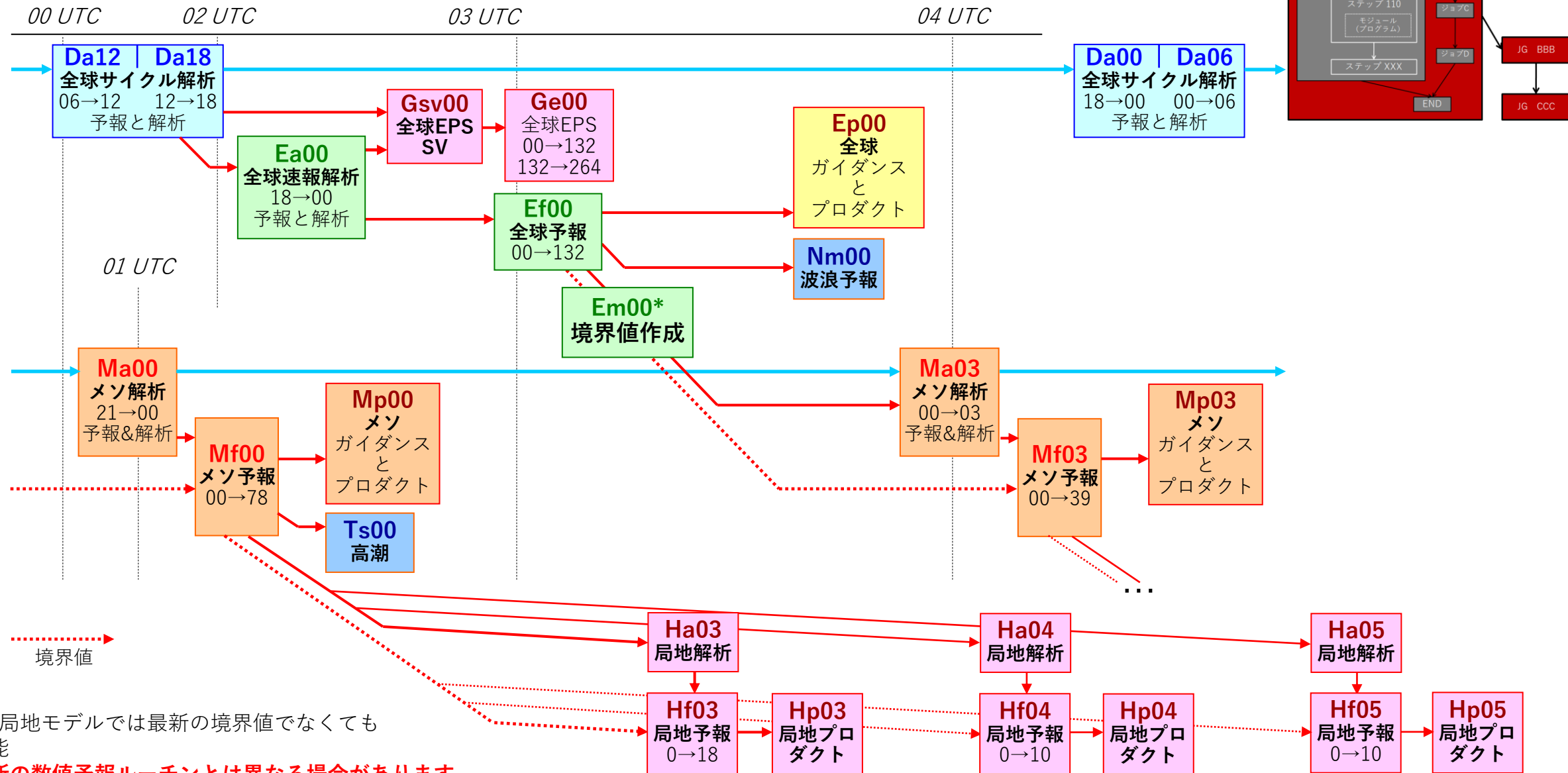
解析値作成のための
解析対象期間の予報計算

END

JGの終了

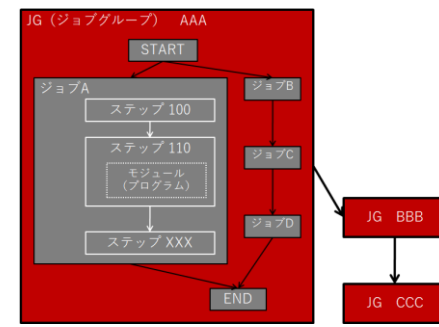
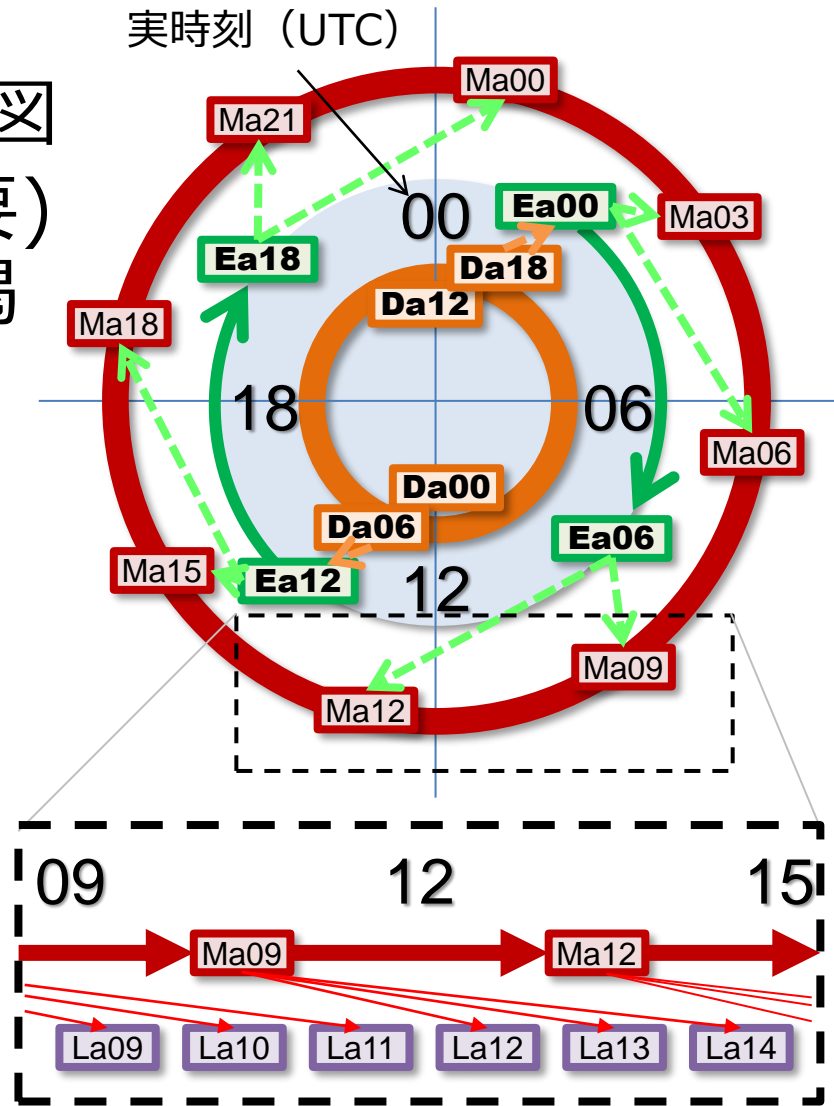
注) 最新の数値予報ルーチンとは異なる場合があります

ジョブグループ間のデータ依存関係の例



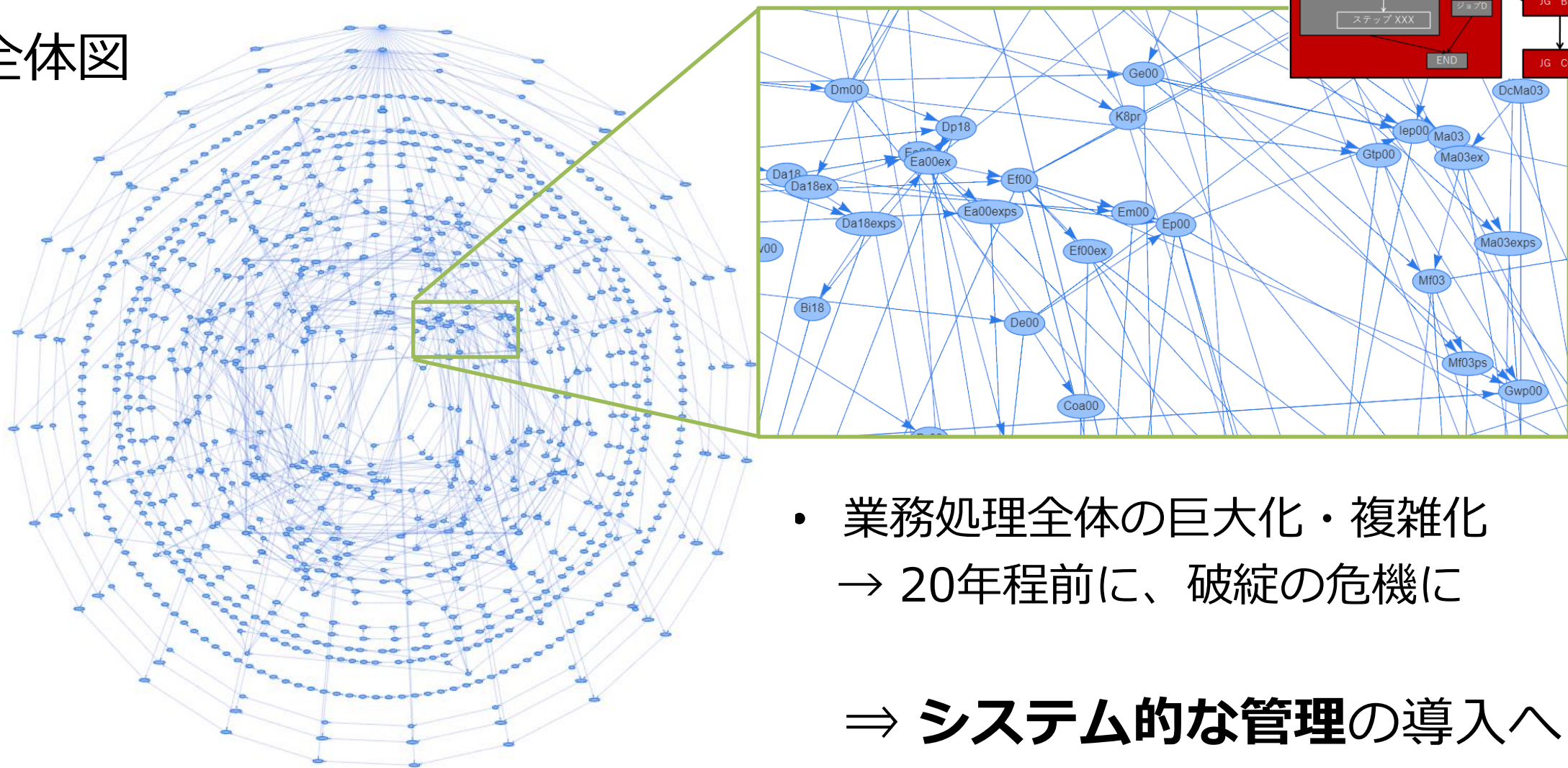
ジョブグループ依存関係の全体像

概念図
(概要)
再掲



ジョブグループ依存関係の全体像

全体図



- 業務処理全体の巨大化・複雑化
→ 20年程前に、破綻の危機に

⇒ システム的な管理の導入へ

業務処理のワークフロー制御

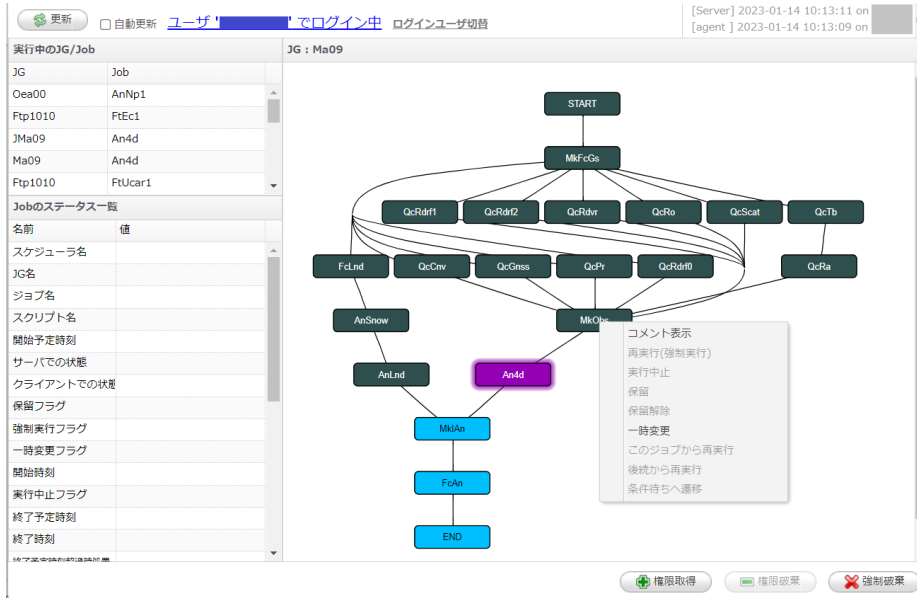
- ワークフロー制御のため、内製ツール「ROSE」を用いて、数値予報システムの運用と開発を実施
 - 定時時刻起動（定時性の確保）
 - ノード障害等の異常時の再実行機能（可用性の確保）
- DBMSを用いて、各種情報を管理
 - ジョブ間・ワークフロー間の依存関係
 - 各処理単位の入力ファイル・出力ファイルすべて
 - 各ジョブの構成要素（ソースや定数ファイルと、そのリビジョン）
 - 業務処理の実行状況
 - PostgreSQLとRubyによる実装
- 可用性に関してはスパコン自体を主副二重系で構成し、耐障害性を確保
- リアルタイムジョブ（運用ジョブ）と開発ジョブ（リアルタイム性不要）を同居させるため、ノードスケジューラを開発

左図はノードスケジューラの状況

「10」のノードは10分以下の開発ジョブしか実行できない（＝まもなくリアルタイムジョブをここで実行する）

「180」のノードは180分以下の開発ジョブが実行可能（＝向こう3時間はリアルタイムジョブ実行予定がない）

この数字は動的に更新され、リアルタイム実行に必要な資源を確実に確保しつつ、開発用にも資源を随時解放できる



主系	Cabinet-6												Cabinet-7															
11:42																												
chassis	0				1				2				0				1				2				0			
slot\ node	0	1	2	3	0	1	2	3	0	1	2	3	0	1	2	3	0	1	2	3	0	1	2	3	0	1	2	3
15	10	10	10	10	10	10	25	10	10	10	10	T	15	15	15	15	180	180	180	180	180	180	180	180	180	180	180	180
14	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	15	15	180	180	180	180	180	180	180	180	180	180	180	180
13	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	180	180	180	180	180	180	180	180	180	180	180	180
12	10	10	10	10	10	10	10	10	10	180	10	10	10	10	10	10	180	180	180	180	180	180	180	180	180	180	180	180
11	10	10	10	10	L	N	D	P	10	10	10	10	10	10	120	10	180	180	180	180	180	180	30	180	180	180	180	180
10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	180	180	180	180	180	180	180	120	180	180	180	180
9	10	10	10	10	-	-	-	-	10	10	10	10	10	10	10	10	180	180	180	180	180	180	180	180	180	180	180	180
8	10	10	10	10	-	-	-	-	10	10	10	10	10	10	10	10	15	15	15	15	180	180	180	180	180	180	180	180
7	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	15	15	15	15	180	180	180	180	180	180	180	180
6	10	10	10	10	10	10	10	90	10	10	10	10	10	10	10	10	15	15	15	15	180	180	180	180	180	180	180	180
5	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	15	15	15	15	180	180	180	180	180	180	180	180
4	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	15	15	15	15	180	180	180	180	180	180	180	180
3	10	10	10	10	L	N	L	D	10	10	10	10	10	10	10	10	15	15	15	15	180	180	180	180	240	180	180	180
2	10	10	10	10	10	120	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	15	15	15	15	180	180	180	180	180	180	180	180
1	10	10	10	10	-	-	-	-	10	10	10	10	10	10	10	10	10	15	15	15	15	180	180	180	240	180	180	180
0	10	10	10	10	-	-	-	-	10	10	10	10	10	10	10	10	15	15	15	15	180	180	180	180	180	180	180	180

業務処理における要請（なぜ、こうなっているか）

- 異常発生に際して、可及的速やかな回復・復旧が必要
 - 「適切な単位」での「再実行」（または「代替処理」）による回復が基本
 - 「再実行の単位」を、「ジョブ」としている
 - ジョブ間のデータ受け渡しは、永続的でありたい → ファイル渡し
 - 処理の状態遷移で重要なアトミック性の確保にも、ファイルシステムの機能（renameシステムコール等のアトミック性）を活用
- **冪等性の確保**を中心とした、いくつかの厳しい規則も
 - 入力と出力は、独立させる（入力を書き換えることは、禁止）
 - 「現在時刻」の参照禁止（時刻情報は、制御処理が与える）
- 規則が自然に反映されるツール類も整備・活用

「ROSE」の機能概要

- ROSE外部の関連DBとの連携
 - 各ジョブの構成要素・入出力ファイルの情報を管理
 - ジョブ・ジョブグループ間の依存関係を管理
- 実行管理サーバ
 - 業務処理実行状況を管理（時刻・条件に応じたジョブ投入、状況把握）
 - ノード資源のスケジュール制御
- ユーザインタフェース
 - 業務処理実行状況を表示
 - 異常となった処理に関する手動介入操作
 - 異常発生に伴う運用者の行動支援（対応マニュアル表示）



3. 数値解析予報実験システム 「NAPEX」

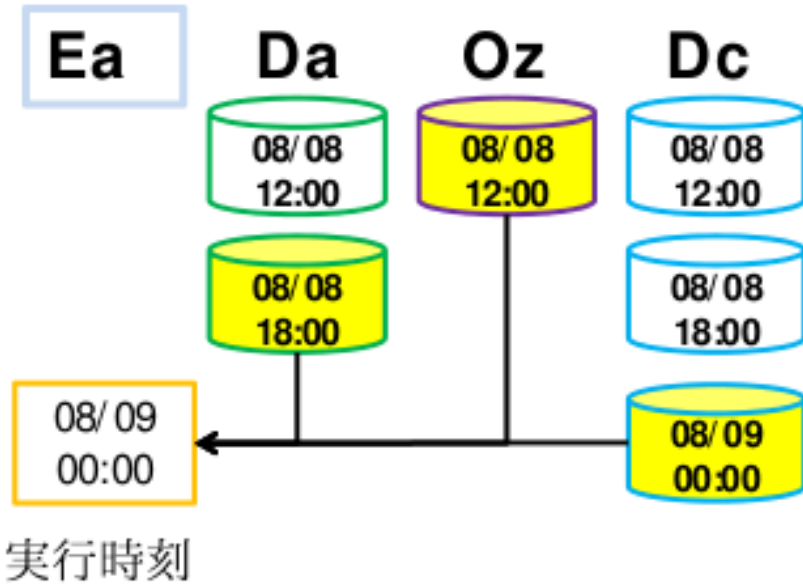
「実験システム」の動機

- (理想実験ではない) 実データを使った試験のためには
 - 適切な初期値 (や、領域モデルでは境界値も) が必要
 - 統計的な比較評価のために、一定期間を対象とした蓄積が必要
- いずれも、解析予報サイクルの実行が必要
 - 観測データだけでなく、複数回に及ぶ計算データの引継ぎなど、取り回しが非常に複雑になる
 - 対照計算も含め、実験に用いるデータやプログラムの管理も大変

⇒ システム的な支援が求められた：2001年頃から開発開始

例：入力データの選択・準備

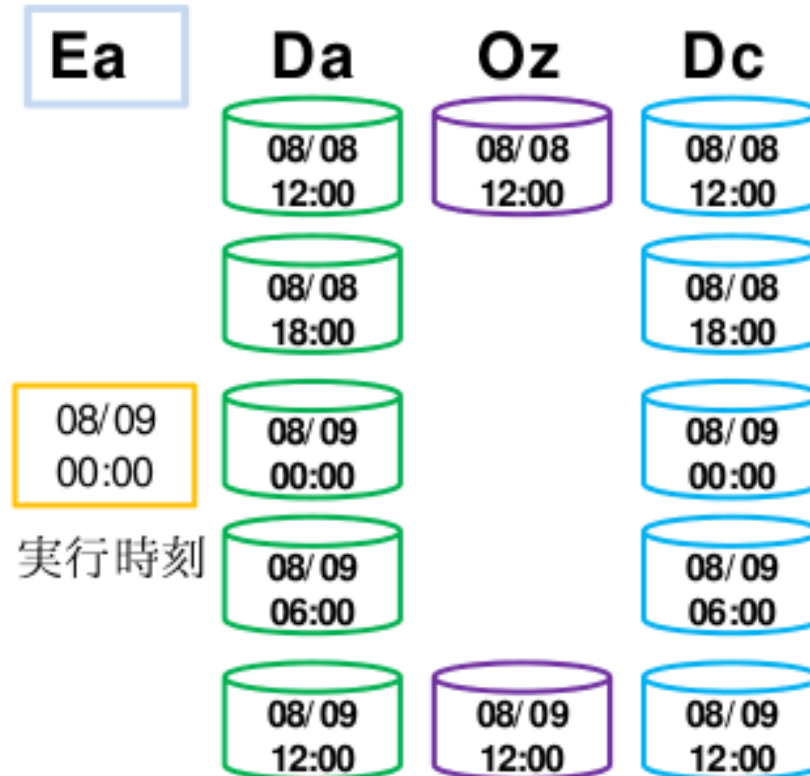
業務処理



業務処理：

リアルタイムで実行するため、
Da, Oz, Dc の最新データが
黄色で示したものであると
容易にわかる

解析予報実験



例：Eaの実行に
Da, Oz, Dcの最新
データが必要で
あるとき

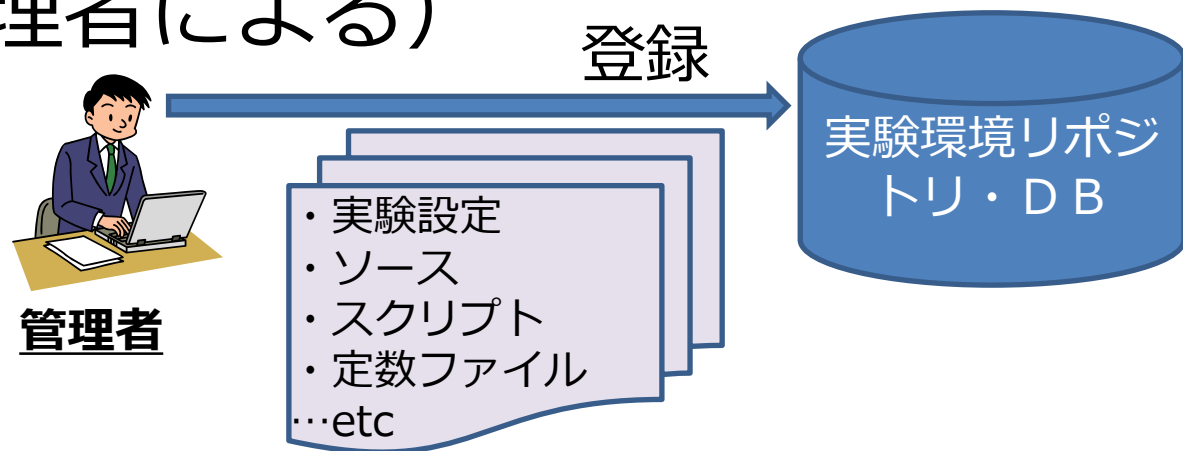
解析予報実験：

過去の計算を行うため、
当時の最新データが
どの時刻のものなのかを
判別しなければならない

NAPEXによる「実験」作業

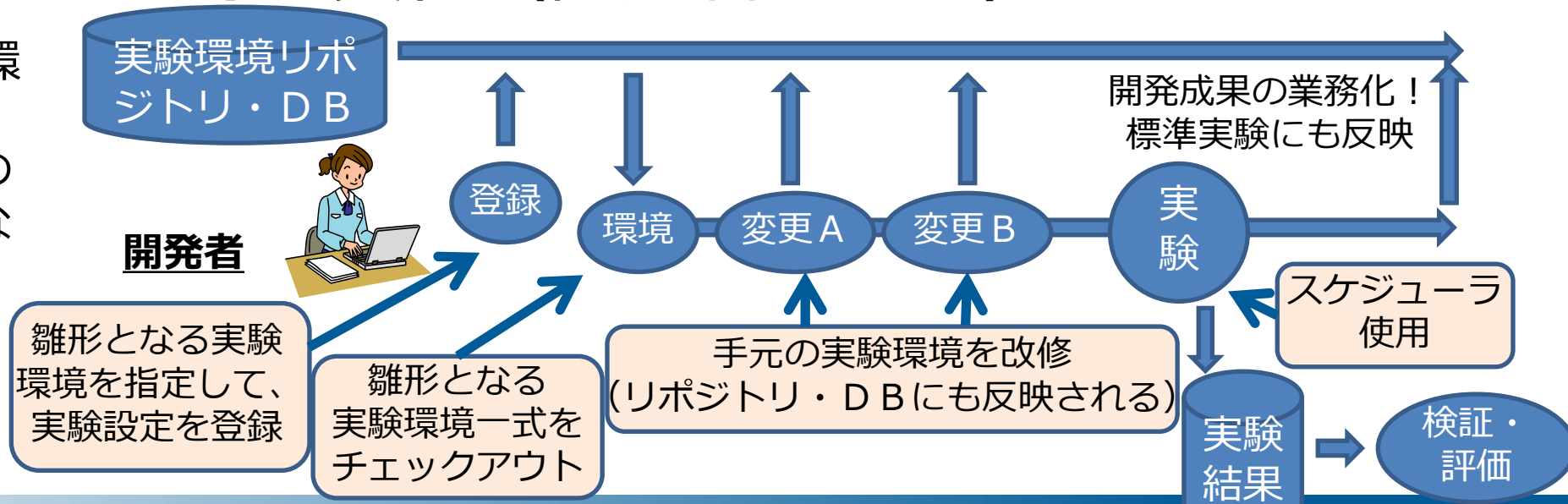
1. 「標準実験環境」の準備（管理者による）

- 現業化された開発成果などをマージしたもの
- 基本的に最新の業務環境に準ずる
- 必要に応じて標準実験環境による**コントロール**
（対照）実験を実行



2. 「実験環境」の登録・実行（開発者による）

- **雛形実験**から実験環境を構築し、実験
 - 標準実験、他の開発者の実験なども指定可能



「NAPEX」の特徴

- 複雑な処理・データ取り回しの支援
 - 知見・技術の共有：作業の効率化
- バージョン管理
 - 再現性の確保
- 業務システム（ROSE）との連携・共通化
 - 業務への組み込みを前提とした開発作業

4. 気象庁の取組

気象庁HPCの歩み

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	備考
I	1959/3	IBM 704	運用開始(本庁)
II	1967/4	HITAC 5020/5020F	
III	1973/8	HITAC 8700/8800	
IV	1982/3	HITAC M-200H(2台)	
V	1987/9	HITAC M-680	
	1987/12	HITAC S-810/20K	
VI	1996/3	HITAC S-3800/480	清瀬庁舎へ移転
VII	2001/3	HITACHI SR8000E1	
VIII	2006/3	HITACHI SR11000K1(2台)	
IX	2012/6	HITACHI SR16000M1(2台)	清瀬第3庁舎に設置
X	2018/6	Cray XC50(2台)	
XI	2024/3	Fujitsu PRIMERGYCX2550 M7(2台)	
線状降水帯予測スーパーコンピュータ			
	2023/3	Fujitsu PRIMEHPC FX1000(2台)	館林データセンターに設置



○ 新しいスーパーコンピュータシステム（気象庁クラウド環境を含む）

新しいスーパーコンピュータシステム
(令和6年3月5日運用開始予定)



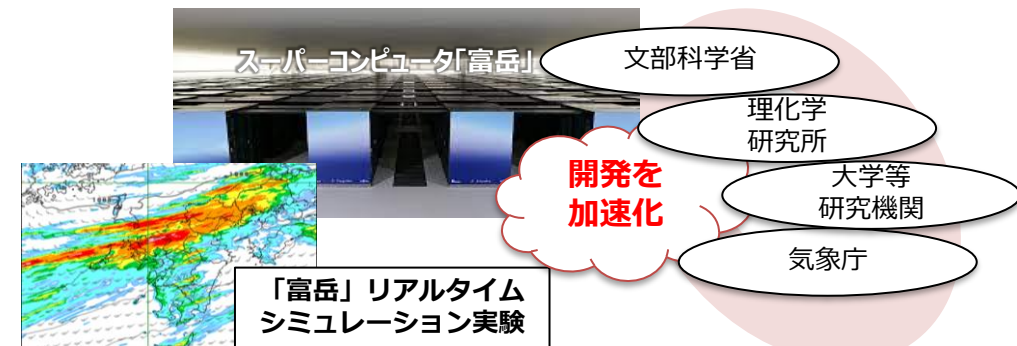
近年の数値予報技術開発

- 気象庁の取組：平成30年（2018年）～
 - 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」
 - 気象庁「2030年に向けた数値予報技術開発重点計画」
- 令和3年（2021年）～
 - 線状降水帯の予測精度向上等に向けた取組の強化・加速化
 - 観測の強化、**予測の強化** ⇒ 情報の改善

	2020	2025頃	2030
豪雨防災	<ul style="list-style-type: none">メソアンサンブル予報システムの運用局地モデルにおけるデータ同化手法の高度化	<ul style="list-style-type: none">局地モデルを1km以下に高解像度化、積乱雲に関する諸過程の改良局地アンサンブル予報システムの開発局地モデルにおける観測ビッグデータの利用	集中豪雨発生前に、明るうちからの避難等、早期の警戒・避難を実現
台風防災	<ul style="list-style-type: none">全球モデルの高解像度化、物理過程改良メソモデルの物理過程改良全球、メソモデルにおける衛星データの全天候利用手法開発全球、メソモデルにおけるデータ同化手法の高度化	<ul style="list-style-type: none">最適な階層的モデル・システム全球モデルを10km以下へ高解像度化、高解像度に適した新しい物理過程の開発全球、メソモデルにおける観測ビッグデータの更なる利用AI技術を活用したモデル開発	大規模災害に備えた広域避難・対応に資する数日先予測の高精度化
社会経済活動への貢献	<ul style="list-style-type: none">大気・海洋結合モデルの高解像度化、物理過程改良海況モデルの高解像度化、物理過程改良化学輸送モデルの高度化	<ul style="list-style-type: none">階層的地球システムモデルの開発、海洋モデルの更なる高解像度化陸、海洋、海氷、エロソルなど地球システムデータ同化の高度化	生産・流通計画の最適化等に資する高精度な気象・気候予測を実現

「富岳」を活用した数値予報モデル開発の加速化

- 令和3年度から、「富岳」の政策対応枠を活用し、局地アンサンブルや全球モデルの開発を実施中。令和4年度から、高解像度（1km）局地モデルのリアルタイムシミュレーション実験を実施。
- 業務向けの開発システムとほぼ同様の実験システムを「富岳」へ移植。令和5年度から、公募による共同研究（観測データ高度利用に係る研究3件）を開始、研究機関等と連携した開発を推進。



5. まとめ

まとめ

気象庁では、**業務システム**の重要な要素として**HPCを活用**している
天気の数値シミュレーション「数値予報」を24時間・365日、欠かすことなく実行

- 観測データを用いる気象計算は、処理やデータの取り回しが複雑
 - 現象の規模に応じたモデル（の組み合わせ）が必要＋「解析予報サイクル」が必要
 - ジョブの実行状況監視や、後続ジョブの投入条件設定と制御、資源の予約など、ワークフローの管理には高度な機能が必要
- 業務処理では、確実な実行と厳しい時間制約が求められる
 - 「ジョブの再実行」による状況回復 → ジョブの実行に関する**冪等性**が重要
 - 冪等性≡再現性の確保は、検証のためにも重要
 - 受け渡しデータは永続性≡ファイル渡しが必要：ストレージ/ファイルシステムが非常に重要
- 開発作業では、大規模で複雑な処理の再現性確保が重要
 - 支援機能によって、使うデータや周辺処理も含めたバージョン管理も
 - 業務処理と共通の道具が活用できれば、開発成果の業務化作業も、より円滑に
 - 開発においても、冪等性・可用性・定時性は重要

参考文献

- 気象庁情報基盤部、2024: 令和5年度 数値予報解説資料集
<https://www.jma.go.jp/jma/kishou/books/nwpkaisetu/nwpkaisetu.html>
- 気象庁予報部、2017: 数値予報モデル開発のための基盤整備および開発管理、平成28年度 数値予報課報告・別冊 第63号
<https://www.jma.go.jp/jma/kishou/books/nwpreport/nwpreport.html>