

自己紹介

- 氏名
室井 ちあし(むろい・ちあし)
- 経歴
 - 1990年 東京大学理学部地球物理学科卒業
 - 1990年 気象庁入庁、札幌管区気象台
 - 1992年 気象庁予報部
 - 2001年 気象研究所予報研究部
 - 2006年 気象庁予報部 予報官
 - 2010年 気象庁予報部 数値予報班長
 - 2014年より現職
札幌管区気象台気象防災部長
- 現在の業務・専門
 - 防災気象情報の利活用推進
 - 気象シミュレーション、特に大規模数値計算





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

レポート

- 問題は最後に
 - 複数の問の中からひとつ選択し回答
- 電子ファイル(PDF, word など)で提出
- 提出は北大・小高先生宛 odakker@gfd-dennou.org にメールで
- 締切日 8/5(水)



気象予測の基礎

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

天気予報のニーズ

時間スケール	ニーズ(例)	気象庁の主な情報
～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
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
3日～10日	レジャー、農業対策	週間予報、異常天候早期警戒情報
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
1か月～	天候の移り変わり、農業対策	季節予報
10年～	地球温暖化対策 洪水への備え	温暖化予測情報

A vibrant rainbow arches across a sunset sky, with a dark horizon line at the bottom. The text is centered in the upper half of the image.

気象予測の歴史

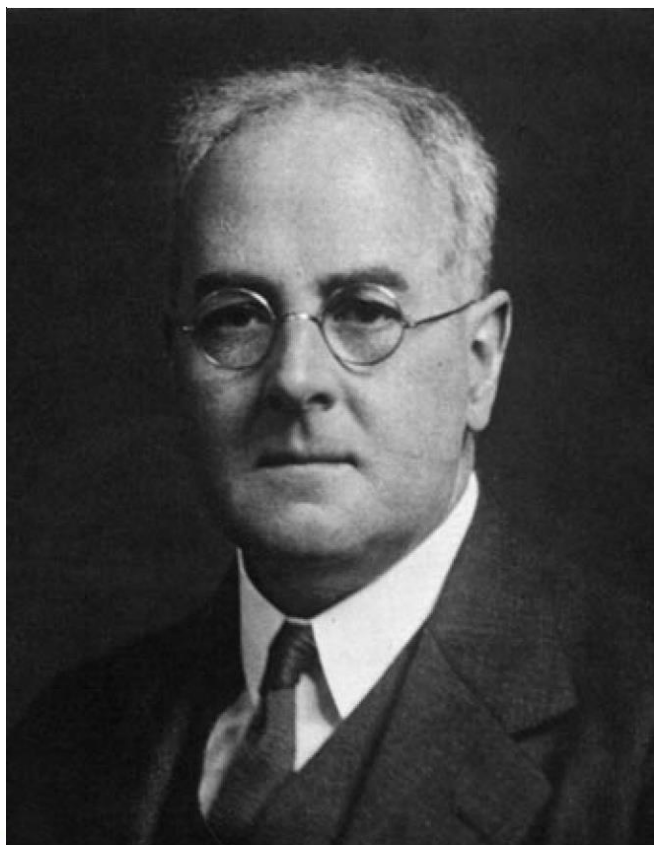
～客観的な天気予報を目指して～

科学に立脚した気象予測

- 観天望気
 - 諸葛孔明: 赤壁の戦い
 - 電気通信の開始
 - モールス: 電信発明 モールス信号提案 1837年
 - クリミア戦争
 - フランス艦隊の黒海での嵐遭遇(1854)
 - パリ天文台長 ルヴェリエ(海王星の存在予言で知られる)が天気図による天気予報を提案 フランス気象局の設立
 - 国際的な観測の標準化、データ交換の仕組みの確立
 - First International Maritime Conference (Brussels 1853)
 - AN UNIFORM SYSTEM OF METEOROLOGICAL OBSERVATIONS AT SEA
 - International Meteorological Organization (1873)
- 天気図から低気圧の移動を求め、それを時間外挿することが基本



物理法則を基盤とした 気象予測の提唱



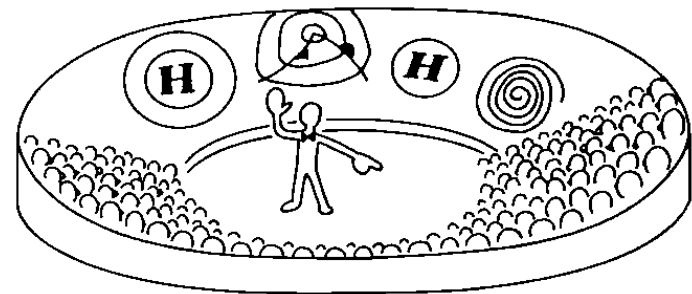
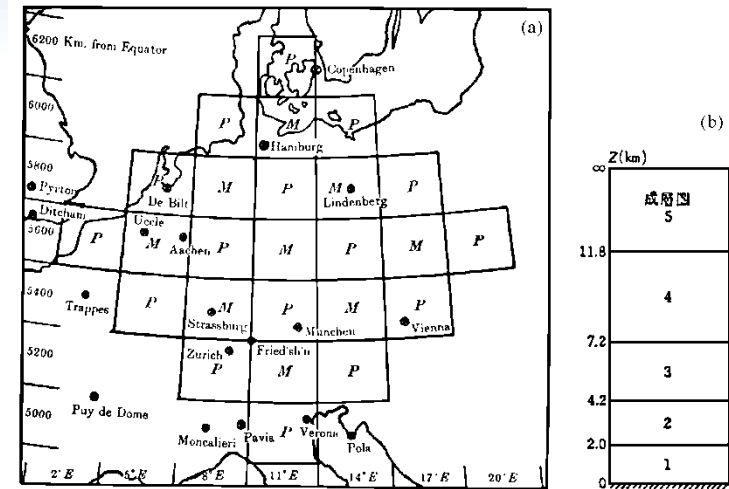
リチャードソン (1881-1953)



V. ビャークネス (1862-1951)

リチャードソンの夢

- 全地球をカバーするための6万4千箇所のデータ観測点を設置し
- オリンピックコロシウムに6万4千人の計算者を配備し
- 観測点のデータを各計算者に渡し、
- 隣接計算者との間のデータ交換を交えて計算、すなわち予測を行う。
- ところが、この構想は計算量の観点からあまりに無謀で、実現不可能と言われた。



リチャードソンの夢の実現

1. 気象学の進歩(気象擾乱に対する理解が深まる)
2. 高層気象観測などの気象観測データの拡充と国際交換の実現
3. コンピュータの発明
4. 数値計算法の進歩



フォン・ノイマン (1903-1957)

フォン・ノイマンプロジェクト を支えた気象学者



ロスビー (1898-1957)



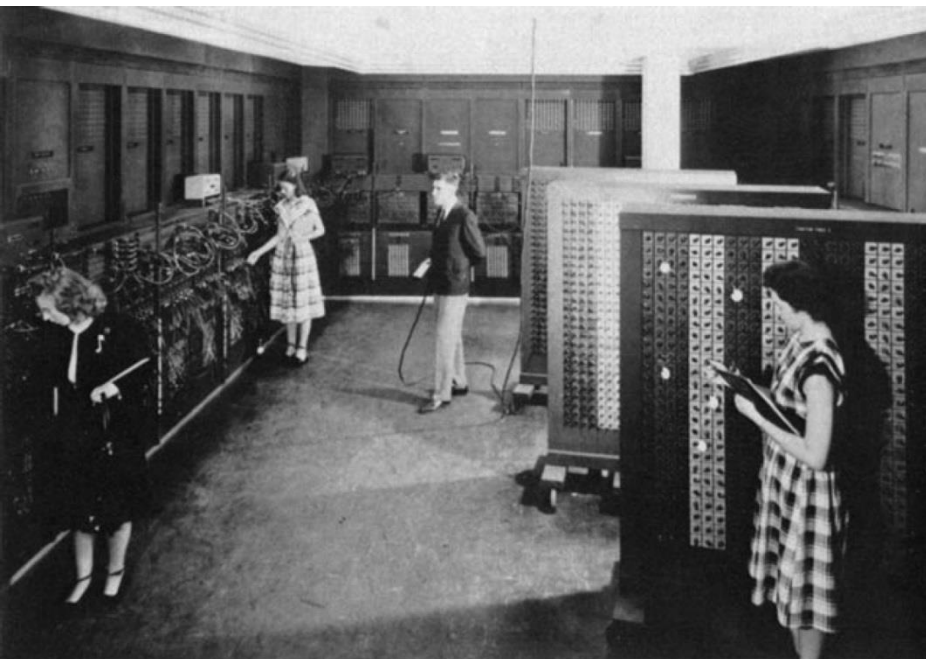
チャーニー (1917-1981)



おそらく1950年後期の、プリンストン大学高等研究所のコンピュータ・プロジェクトビル前の気象研究者のグループ。(左から右へ)ポリン、T・デイヴィス、チャーニー、ロスビー、スマゴリンスキー。(©American Meteorological Society)

ENIACを用いた最初の数値予報

1950年にコンピュータENIACを用いた初めての数値予報に成功した。(準地衡風近似のバロトロピック・モデルを用いた500hPa面の予報)



電子数値積分機・計算機(ENIAC)。1948年7月7日。アバディーン
の弾道研究所。



1950年、ENIACによる計算を見学したか、あるいはそれに参加した
人々。(左から右へ)H. ウェクスラー、フォン・ノイマン、M. H. フランケ
ル、ナマイアス、J. C. フリーマン、フィヨルトフト、ライケルデルファー、
チャーニー。(©American Meteorological Society)

数値予報業務の開始



JNWPUの最初の所長クレスマン(左)とADPや客観解析など情報処理の責任者A. ビーディエント(1960年ころ)。

米国では気象局と軍とが合同数値予報組織(JNWPU)を結成し、1955年5月15日に、IBM-701による数値予報の業務を開始。

これより少し前の1954年に、スウェーデンでは帰国したロスビーを中心に数値予報の業務を開始。

日本の取り組み NPグループ



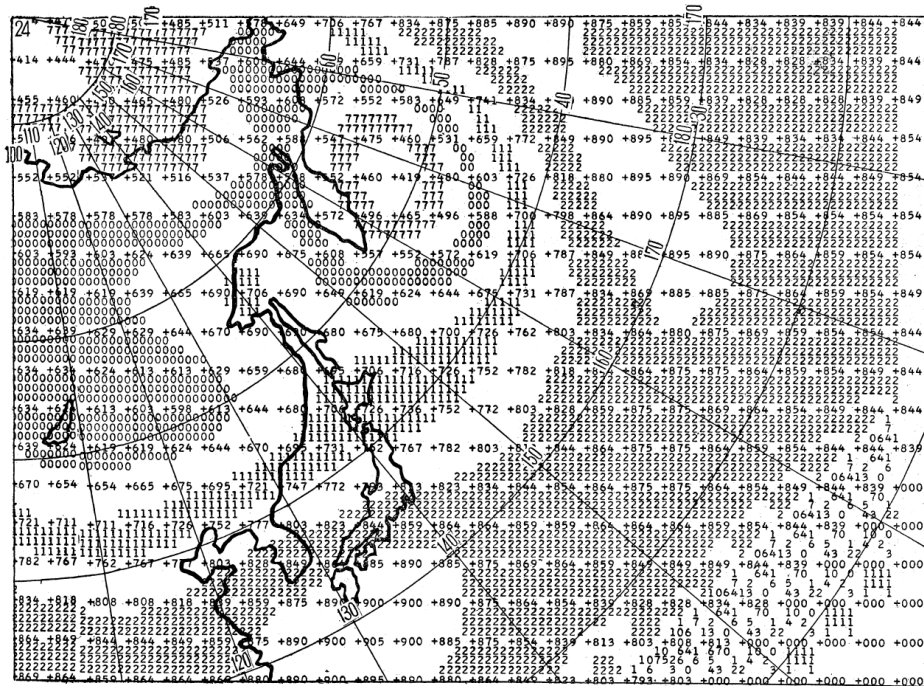
正野重方(1911-1969)

日本では、1953年東大教授の正野を中心に、数値予報グループ(NPグループ)が結成され、大学、気象庁気象研究所・予報課のメンバーなどが、数値予報の研究開発を始めた。その前年の1952年に岸保(当時東大)が、チャーニーの招聘でプリンストン・グループに参加し、高等研究所のコンピュータIASマシンによる数値予報の成功に立ち会ってNPグループに情報を伝えると共に、数値予報の将来性に確信を持って帰国した。

気象庁の数値予報

1959年、気象庁にIBM-704が導入された。同時に数値予報を担当する電子計算室を設置し、6月に数値予報の業務を開始した。

気象庁に導入されたIBM704型電子計算機の全容(気象庁提供)



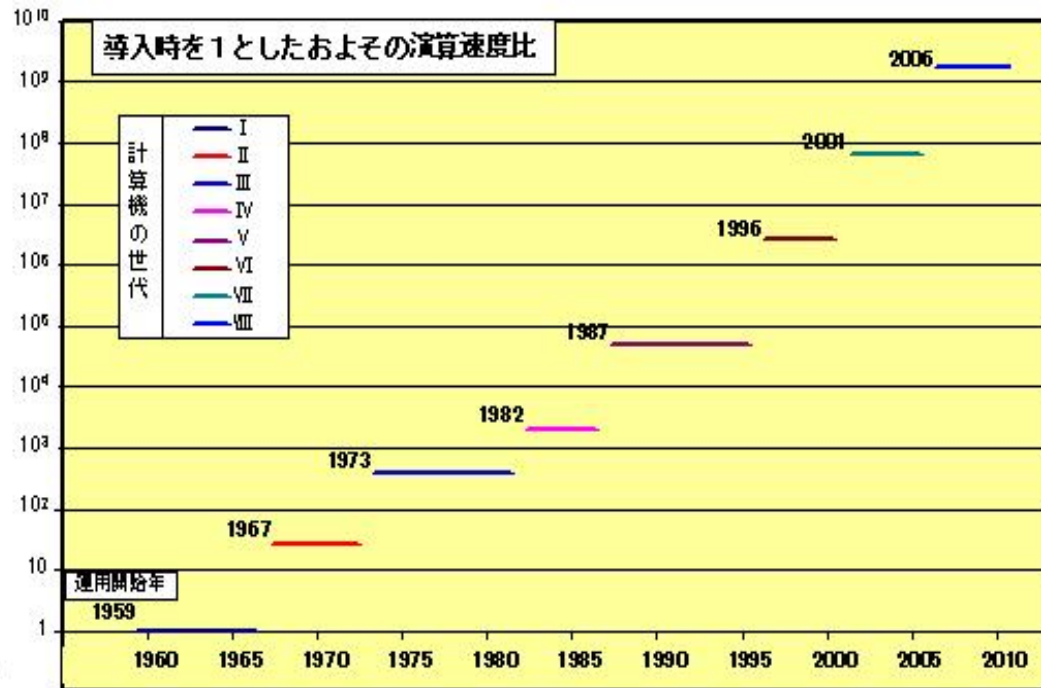
北半球一層バロトロピック・モデルで予報された高度場の電子計算機出力結果(気象庁提供)



予報部電子計算室の建物

1	<p>1950年代業務開始のグループ</p> <p>スウェーデン(1954)、米国(1955)、日本(1959)、旧ソ連(1955)</p>
2	<p>1960年代業務開始のグループ</p> <p>イタリア(1960)、中国(1960)、ベルギー(1962)イスラエル(1962)、ノルウェー(1962)、カナダ(1963)、ニュージーランド(1963)、英国(1965)、ドイツ(西ドイツ: 1966、東ドイツ: 1971)、チェコスロバキア(1966)、フランス(1968)、オランダ(1968)、オーストラリア(1969)</p> <p>[註] 本格的運用がこれより遅れた国もある。</p>
3	<p>1970年代業務開始グループ</p> <p>フィンランド(1970)、アルジェリア(1972)、デンマーク(1973)、など。国際機関: ヨーロッパ中期予報センター(1979)</p> <p>[註] このほかにも、数値予報の業務を始めた国がたくさんあり、本表は今後改定される必要がある。</p>

数値予報開始50年と計算機



50年前の計算機の数10億倍

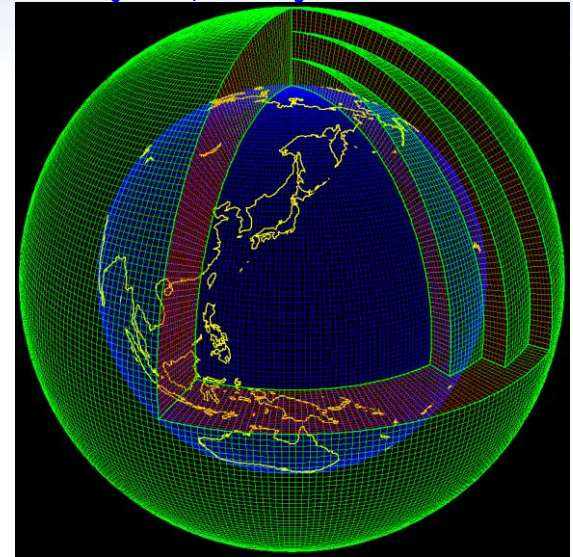
リチャードソンの人力数値予報の夢

数値予報の役割



数値予報モデルの計算量 (20kmメッシュ全球モデル)

- 格子数 8000万
- 計算量 240兆回/24時間予報
- 積分時間間隔 10分
- 計算時間(84時間予報＝約500ステップ) 約25分
- 必要な計算機資源 60ノード (960CPU)



膨大な計算量





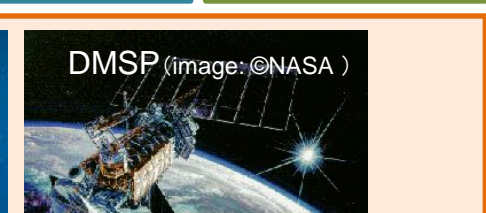



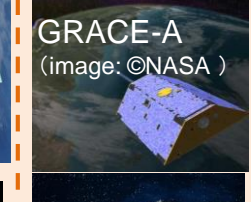
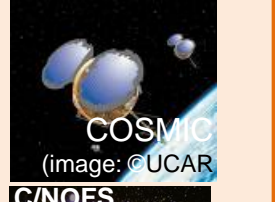
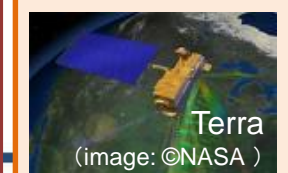
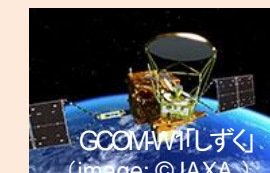

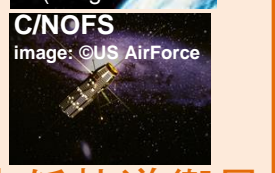


高速なスーパーコンピュータが必要



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>直接観測</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>			

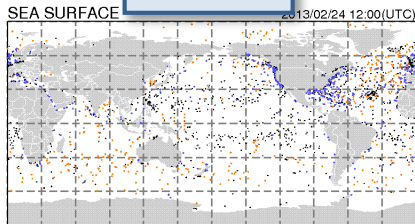
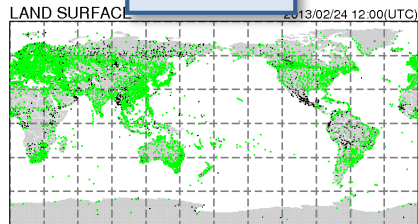
 <p>MTSAT (画像: 気象庁HP)</p>	 <p>METEOSAT (image: © ESA)</p>	 <p>NOAA (image: © NOAA)</p>	 <p>Metop (image: © ESA)</p>	 <p>DMSAT (image: © NASA)</p> <p>(準)現業衛星</p>	
 <p>GOES (image: © NOAA)</p>	<p>静止軌道衛星</p>	 <p>Aqua (image: © NASA)</p>	 <p>Megha-Tropiques (image: © CNES)</p>	 <p>GRACE-A (image: © NASA)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

観測データ分布 (全球サイクル解析)

JMA GLOBAL COVERAGE MAP - 1 (Data 2013/02/24 12:00(UTC))

地上観測

海上観測

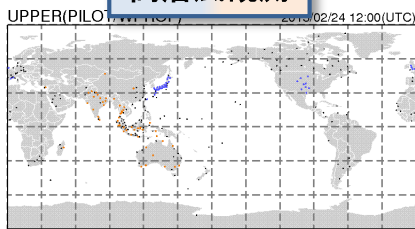
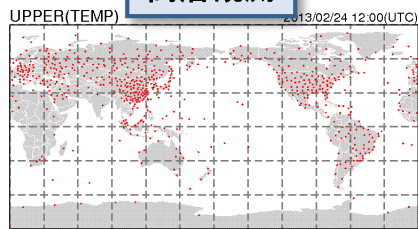


LAND SURFACE
SYNOPS: 4425 METAR: 12848
NOUSET: 12848 ALL: 19871

SEA SURFACE
SHIP: 407 DRIFTER: 395
NOUSET: 3369 ALL: 92

高層観測

高層風観測

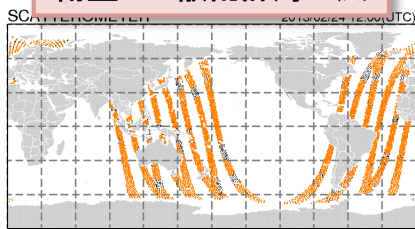
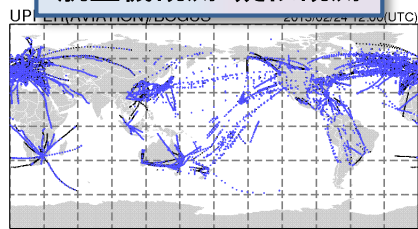


UPPER(TEMP)
TEMP: 925
NOUSET: 112 NO: 112
ALL: 0

UPPER(PILOT)
PILOT: 52 WPROF: 44
NOUSET: 152 NO: 152
ALL: 0

航空機観測・疑似観測

衛星MW散乱計海上風

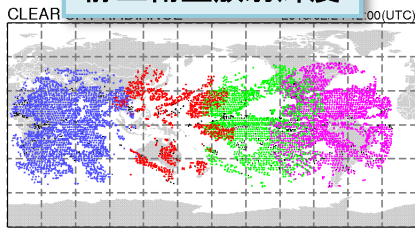
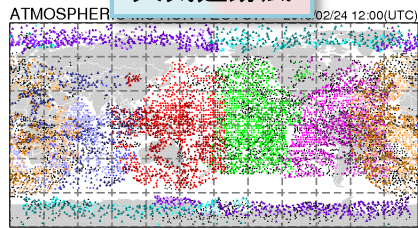


UPPER(AVIATION)
TYBOGUS: 0 YHTC: 0 AVIATION: 5301
NOUSET: 0 ALL: 0

SCATTEROMETER
Metop-2: 436
NOUSET: 115 ALL: 895

大気追跡風

静止衛星放射輝度



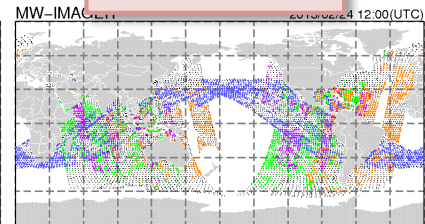
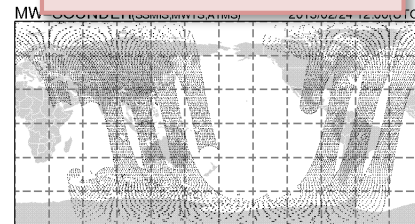
ATMOSPHERIC
METSAT-2: 598 GOES-13: 401 GOES-16: 720 Meteosat-7: 196 Meteosat-10: 385 Terra: 385 Aqua: 192
NOUSET: 407 WVA: 307 WVA: 732 WVA: 315 WVA: 444 WVA: 393 WVA: 393
NOUSET: 275 NOUSET: 891 NOUSET: 1098 NOUSET: 291 NOUSET: 1588 NOUSET: 458 NOUSET: 219
ALL: 1365 ALL: 1680 ALL: 2140 ALL: 1582 ALL: 3039 ALL: 1596 ALL: 828

CLEAR
METSAT-2: 1410 GOES-13: 3077 GOES-16: 5455 Meteosat-7: 365
NOUSET: 103 NOUSET: 218 NOUSET: 322 NOUSET: 345
ALL: 1513 ALL: 3455 ALL: 2711 ALL: 390

JMA GLOBAL COVERAGE MAP - 2 (Data 2013/02/24 12:00(UTC))

衛星鉛直探査計放射計

衛星MW放射計

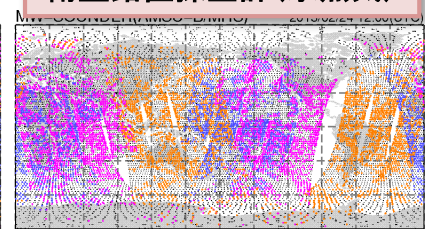
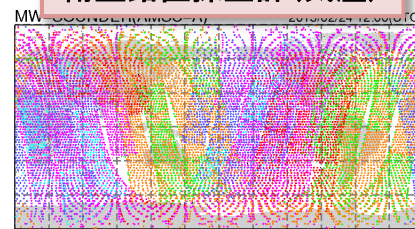


MW
DMSR-F16 DMSR-F18
SRR: 58
NOUSET: 40 ALL: 0

MW-IMAGER
DMSR-F16 DMSR-F17 DMSR-F18 TRMM
SRR: 58
NOUSET: 40 ALL: 0

衛星鉛直探査計(気温)

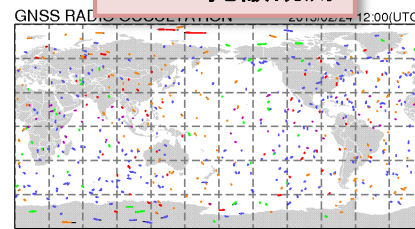
衛星鉛直探査計(水蒸気)



MW
NOAA-15 NOAA-16 NOAA-18 NOAA-19 Aqua Metop-2
NOUSET: 2000 ALL: 2044

MW
NOAA-18 NOAA-19 Metop-2
NOUSET: 5953 NOUSET: 3618 NOUSET: 6450
ALL: 9731 ALL: 6967 ALL: 9758

GNSS掩蔽観測



GNSS RADIO OCCULTATION
GRACE-A Metop-2 COSMIC TerraSAR-X GONDS
NOUSET: 1675 NOUSET: 5303 COSMIC: 11887 GONDS: 844 GONDS: 1103
NOUSET: 549 NOUSET: 2308 NOUSET: 4934 NOUSET: 6713 NOUSET: 11349
ALL: 8921 ALL: 27153 ALL: 74908 ALL: 9157 ALL: 13112

サイクル解析では速報解析に比べて利用可能データが30%ほど増える。特に衛星データの増が大きい。

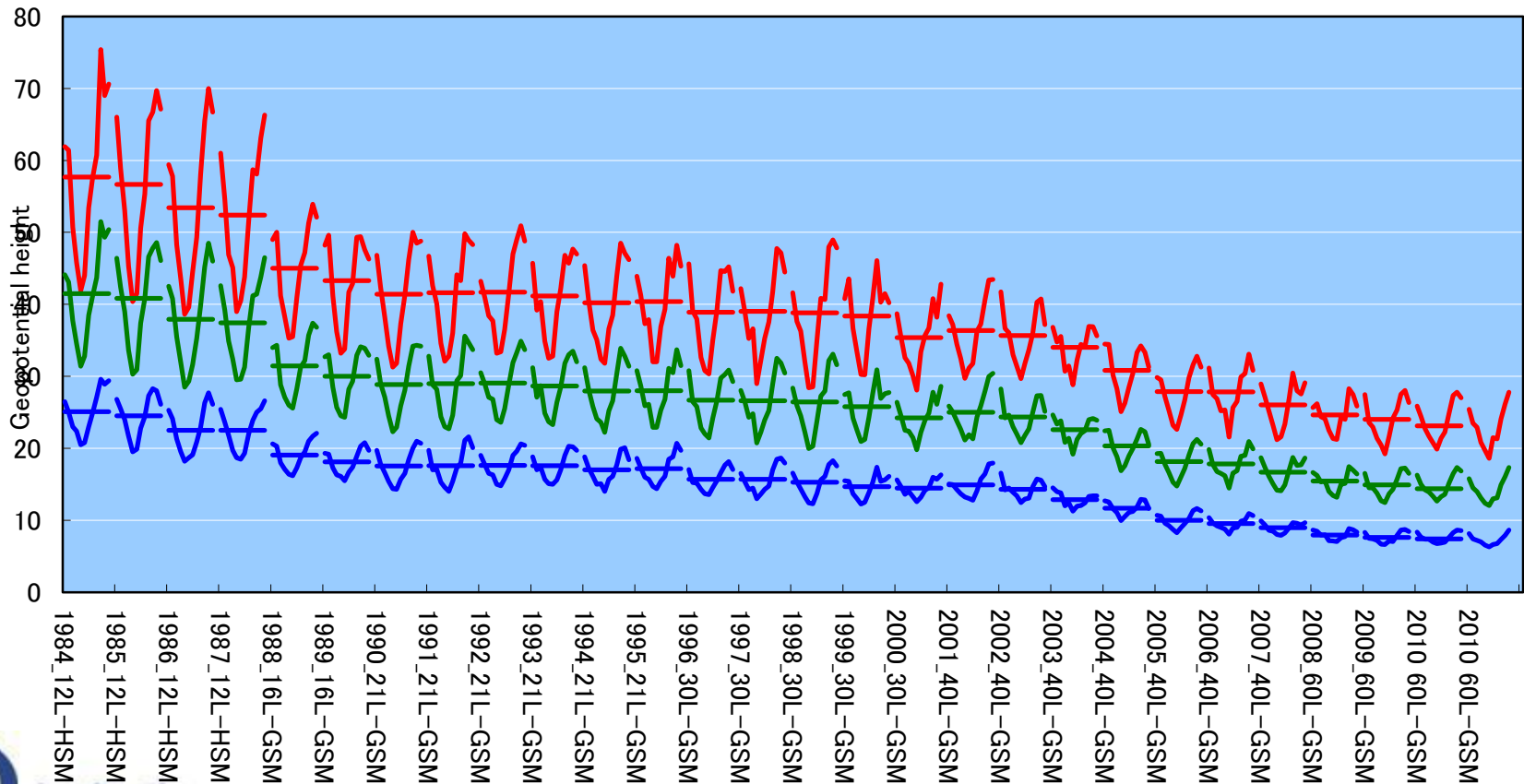
数値予報の歴史

- 数値予報を開始して、ただちに実用的であったわけではない
- コンピュータの性能向上、気象学の知見の蓄積、数値予報技術の進歩があって、50年以上にわたって徐々に精度向上が達成されてきた
 - 例えば、台風進路予報の精度は1990年頃に持続予報を上回り、予報官の発表予報とほぼ肩を並べるまでに至った

気象庁全球モデルによる北半球 500hPaの誤差(RMSE)の履歴

GSM Z500 (20N-90N) RMSE 00UTC/12UTC

— 24h_Fcst — 48h_Fcst — 72h_Fcst

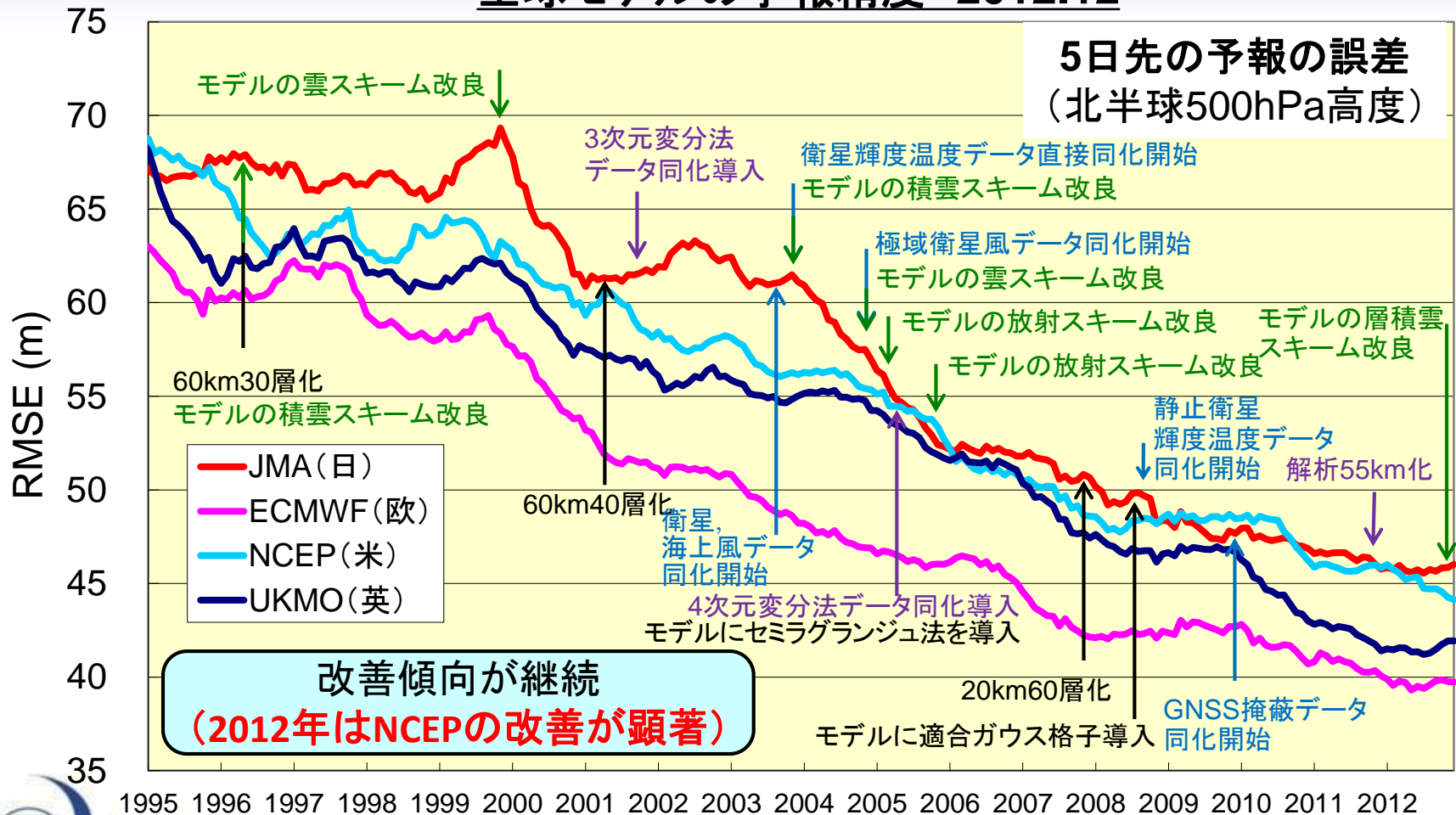


世界の数値予報

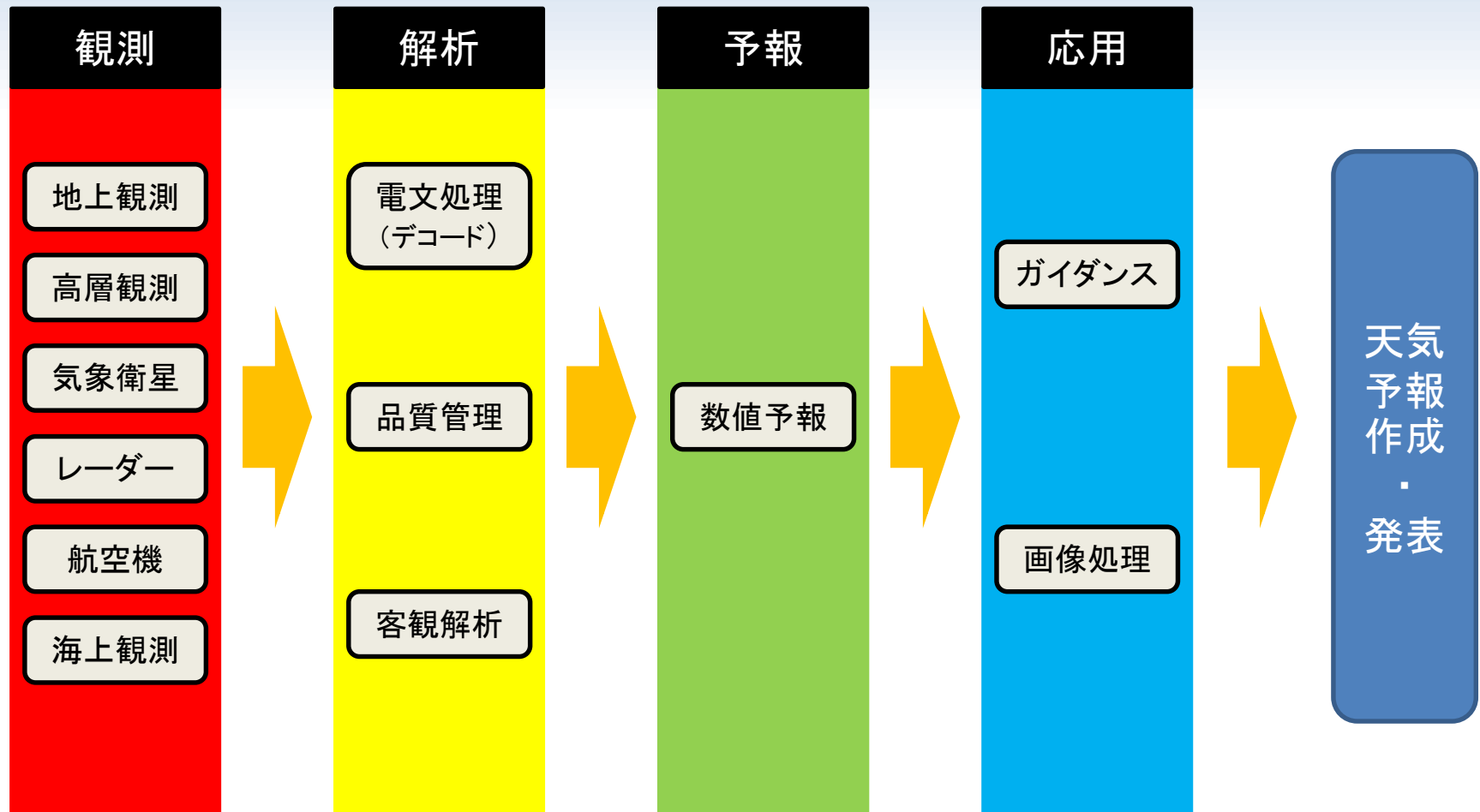
国名またはセンター名	全球モデル		全球アンサンブル予報モデル			領域モデルの 格子間隔・ 鉛直層数
	格子間隔 鉛直層数	予報 期間	格子間隔 鉛直層数	メンバ 数	予報期間	
日本	20km60層	9日間	60km60層	51	9日間	5km50層
欧州中期予報センター (ECMWF)	16km91層	10日間	32km62層 65km62層	51 51	10日間 +5日間	なし
イギリス (Met Office)	40km50層	6日間	90km38層	24	3日間	12km70層、 4km60層
フランス	37km60層	4日間	55km55層	11	2.5日間	2.5km60層
ドイツ	40km40層	7日間	なし			7km40層、 2.8km50層
米国 (NCEP)	52km64層 105km64層	7.5日間 16日間	160km28層	45	16日間	12km60層、 4km50層
カナダ	35km58層	10日間	100km28層	20	16日間	10km58層

北半球の5日予報の500hPa高度のRMSEの経年変化

全球モデルの予報精度 2012.12

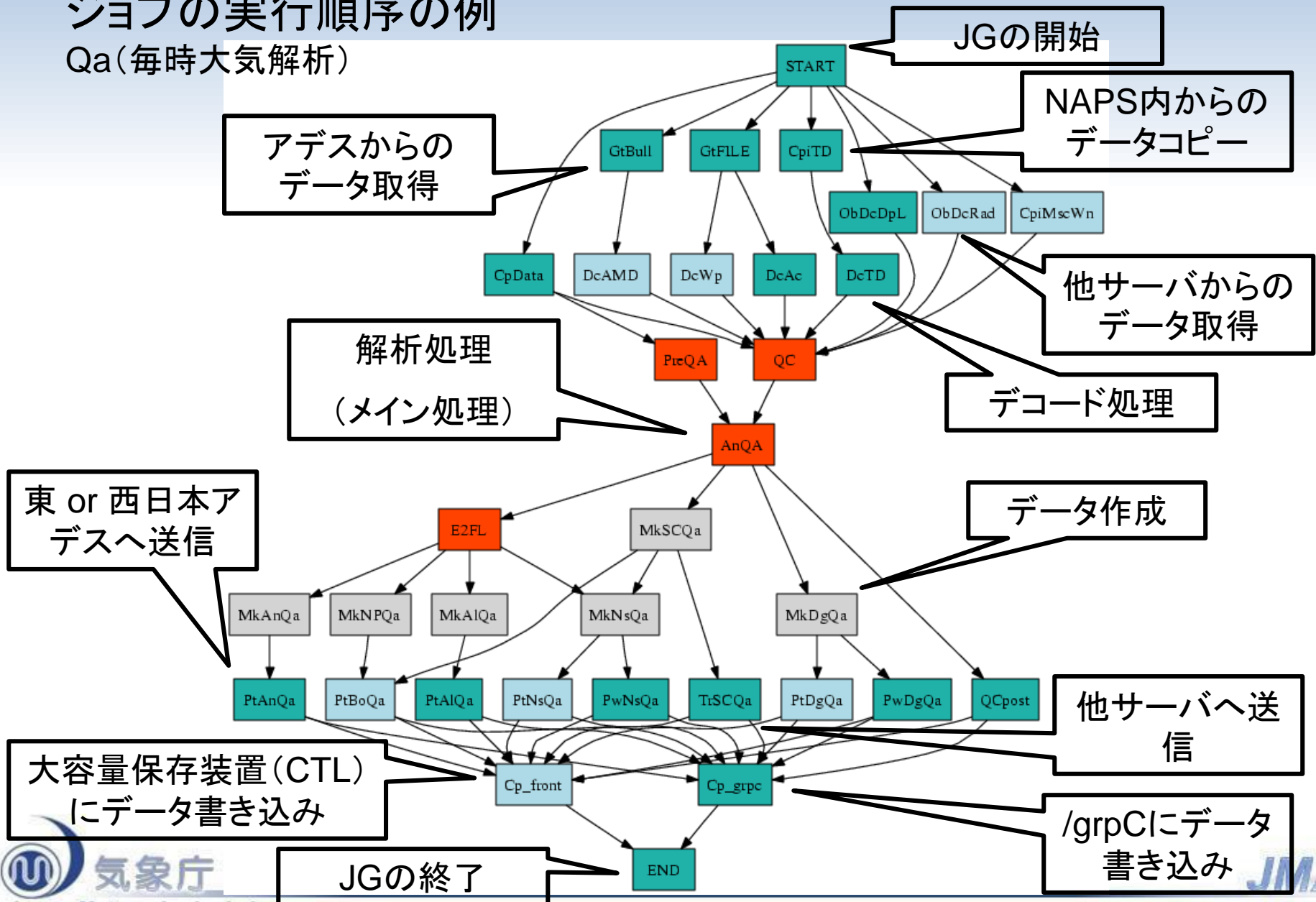


数値予報の流れ



ジョブの実行順序の例

Qa(毎時大気解析)



JGの開始

アデスからの
データ取得

NAPS内からの
データコピー

他サーバからの
データ取得

解析処理
(メイン処理)

デコード処理

東 or 西日本ア
デスへ送信

データ作成

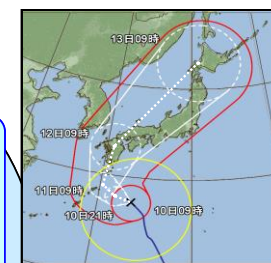
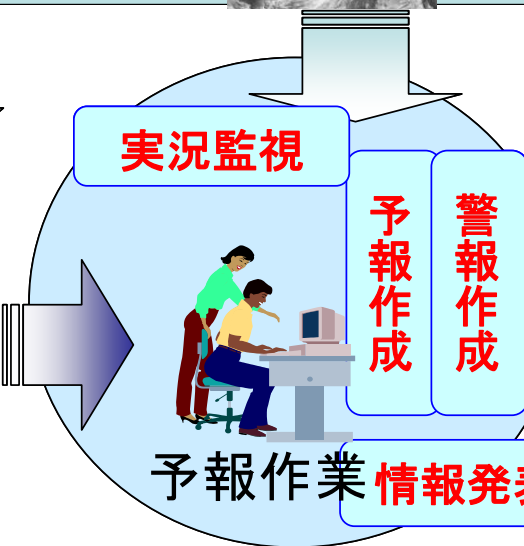
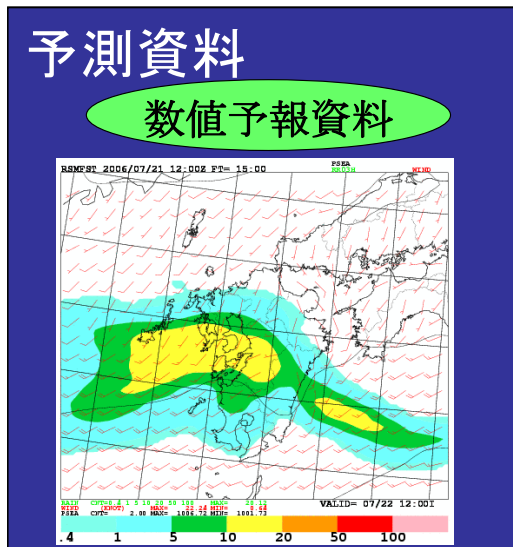
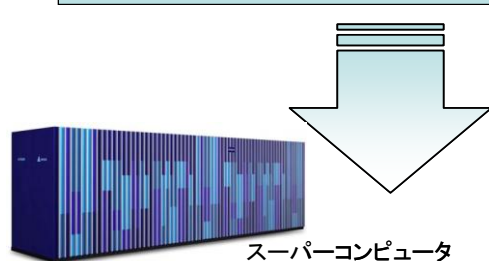
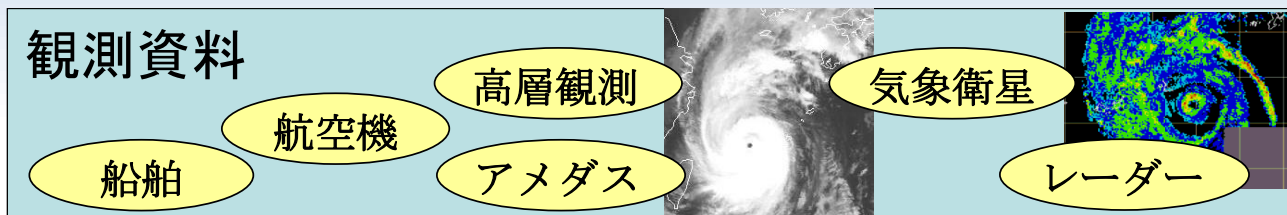
大容量保存装置 (CTL)
にデータ書き込み

他サーバへ送
信

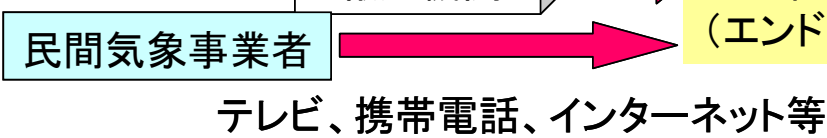
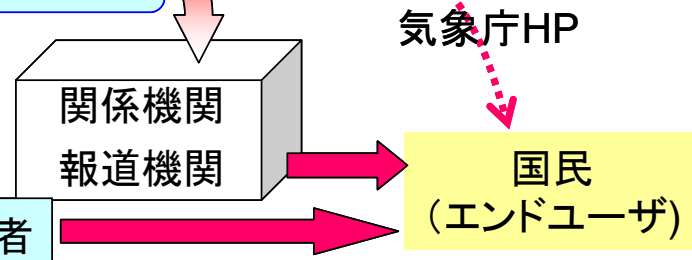
JGの終了

/grpCにデータ
書き込み

気象業務における数値予報の位置付け



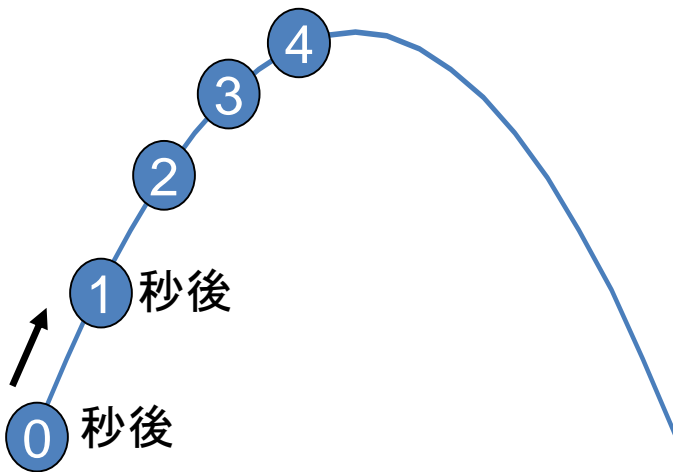
日付	11 火	12 水	13 木	14 金	15 土	16 日	17 月
東京地方 府県天気予報へ	曇のち雨	曇時々雨	曇	曇一時雨	曇	曇一時雨	曇
降水確率(%)	30/40/60/60	70	40	60	40	50	40
最低(°C)	10(←)	12(±2)	13(±2)	12(±4)	7(±4)	7(±4)	8(±4)
最高(°C)	14(←)	16(±4)	21(±3)	15(±4)	14(±4)	14(±4)	17(±4)



では、数値(天気)予報とは何？

ある特定の時刻の大気状態を数値的に解析し、物理法則に基づいて大気の状態の時間変化を定量的に求める(物理量の時間変化率を未来に向かって足し合わせる)ことにより、将来の大気の状態を予測する手法

例えば、ボールの軌道を予測することを考えます。



- 最初の状態がわかり
(ボールを投げる角度と初速度)
- 現象を支配する法則がわかれば
(ボールに働く重力と空気抵抗)
- **ボールの軌道は予測可能**

数値天気予報(以後"数値予報"と呼びます)も原理は同じ。

数値予報のねらい

- 予測の客観化、精度向上
 - 低気圧や台風の発生・発達、集中豪雨等による被害が毎年のようにある
- 物理法則に従うことが王道
- 膨大な量のデータ、方程式を高速に取り扱うには、コンピューター的能力を最大限に生かすことが必要

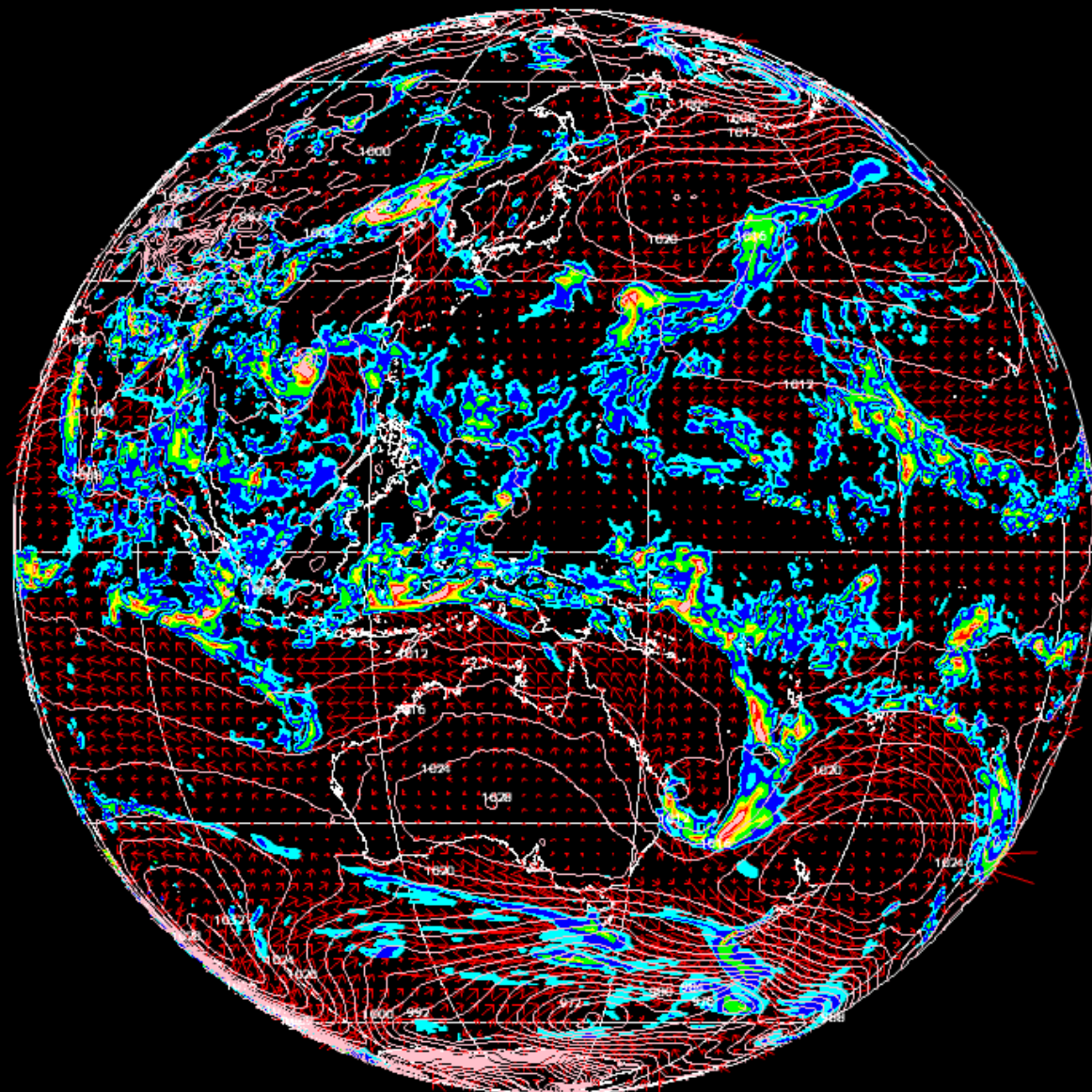
全球モデル GSM

地上気圧・風・前6時間降水量

初期時刻 2013年07月01日12UTC

予報時間 6時間

対象時刻 2013年07月01日18UTC



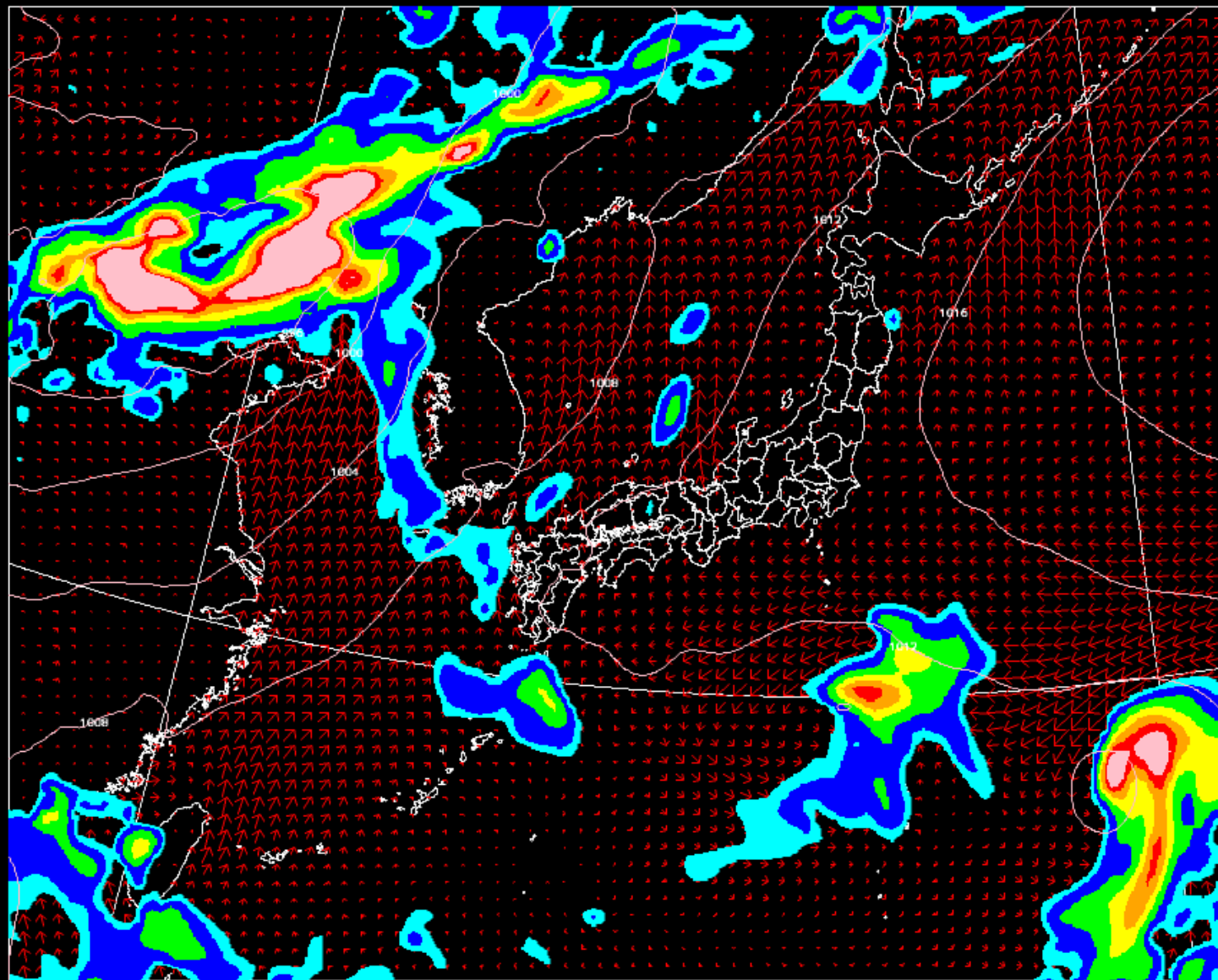
全球モデル GSM

地上気圧・風・前6時間降水量

初期時刻 2013年07月01日12UTC

予報時間 6時間

対象時刻 2013年07月01日18UTC



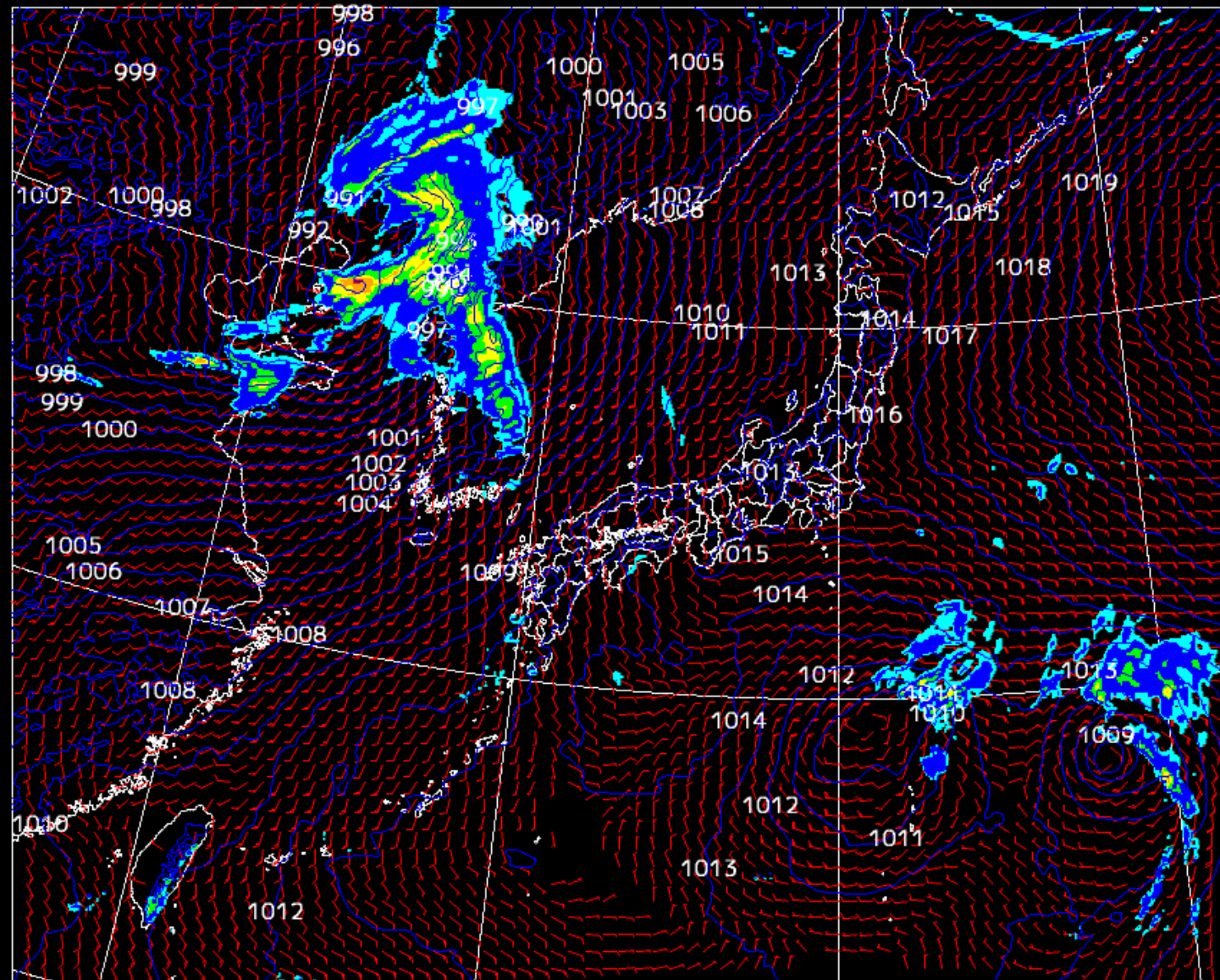
メソモデル MSM

地上気圧・風・前1時間降水量

初期時刻 2013年07月02日00UTC

予報時間 1時間

対象時刻 2013年07月02日01UTC



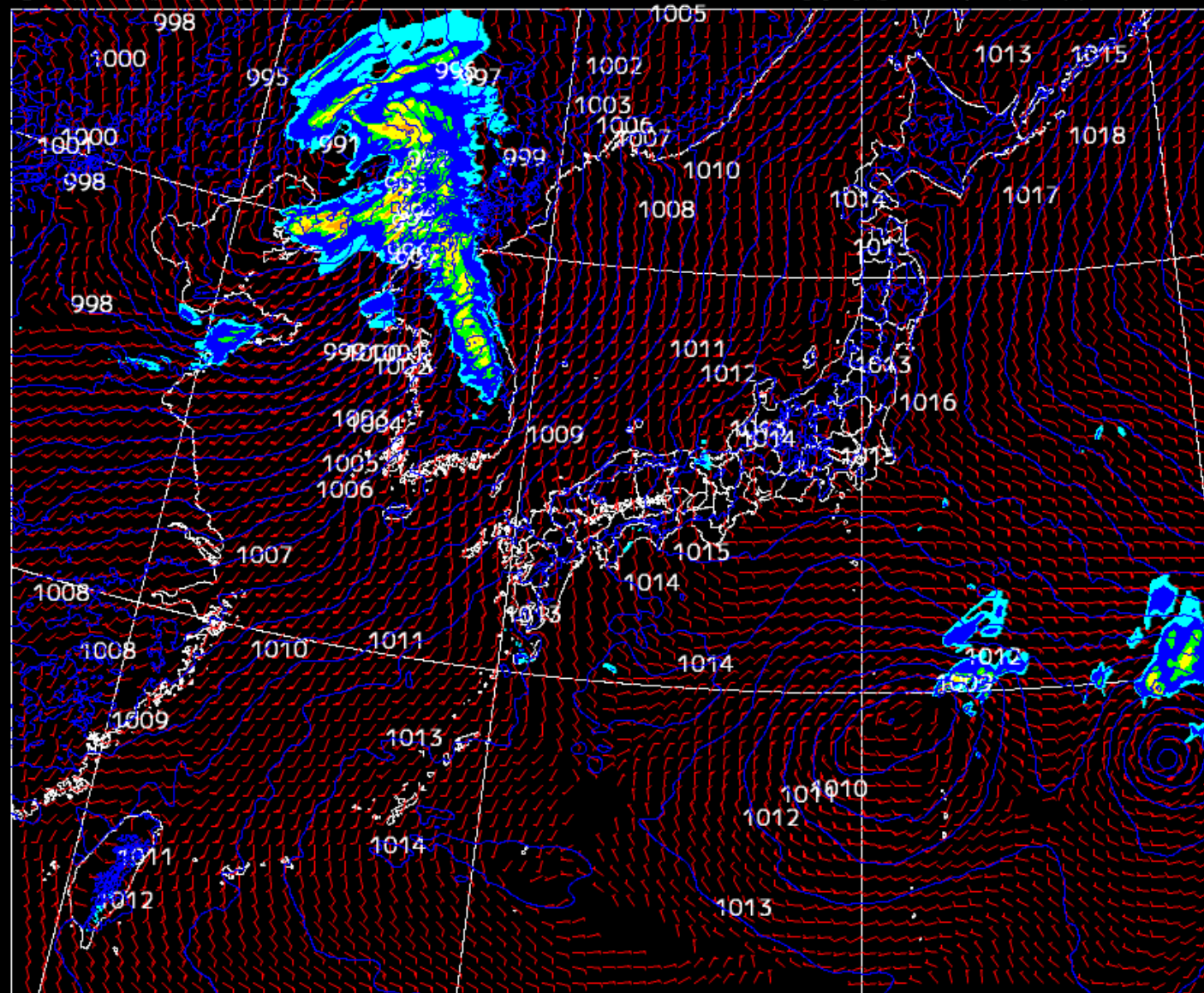
局地モデル LFM

地上気圧・風・前1時間降水量

初期時刻 2013年07月02日00UTC

予報時間 1時間

対象時刻 2013年07月02日01UTC

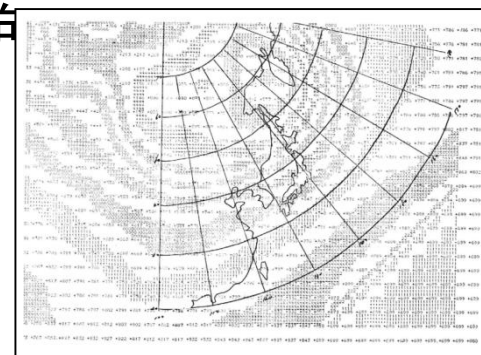
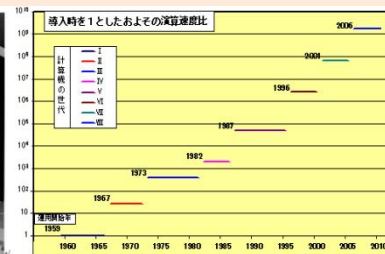


現業数値予報の歴史



リチャードソンの人力数値予報の夢

- 1959年、現業数値予報の開始
- 1975年、北半球プリミティブモデルの実用化
- 1988年、全球スペクトルモデルの実用化、物理過程向上により、**予報精度が飛躍的に向上**
- 1996年、全球モデル高解像度(T213L60)化、積雲対流スキームの高度化により**台風進路予報の成績が大幅に向上、1か月予報の数値予報を導入**
- 2001年、週間**アンサンブル予報**の実用化
- 2003年、3か月予報と季節予報の数値予報を導入
- 2005年、**データ同化手法に4次元変分法**を採用、衛星データ利用が進み**初期値や予報精度が向上**

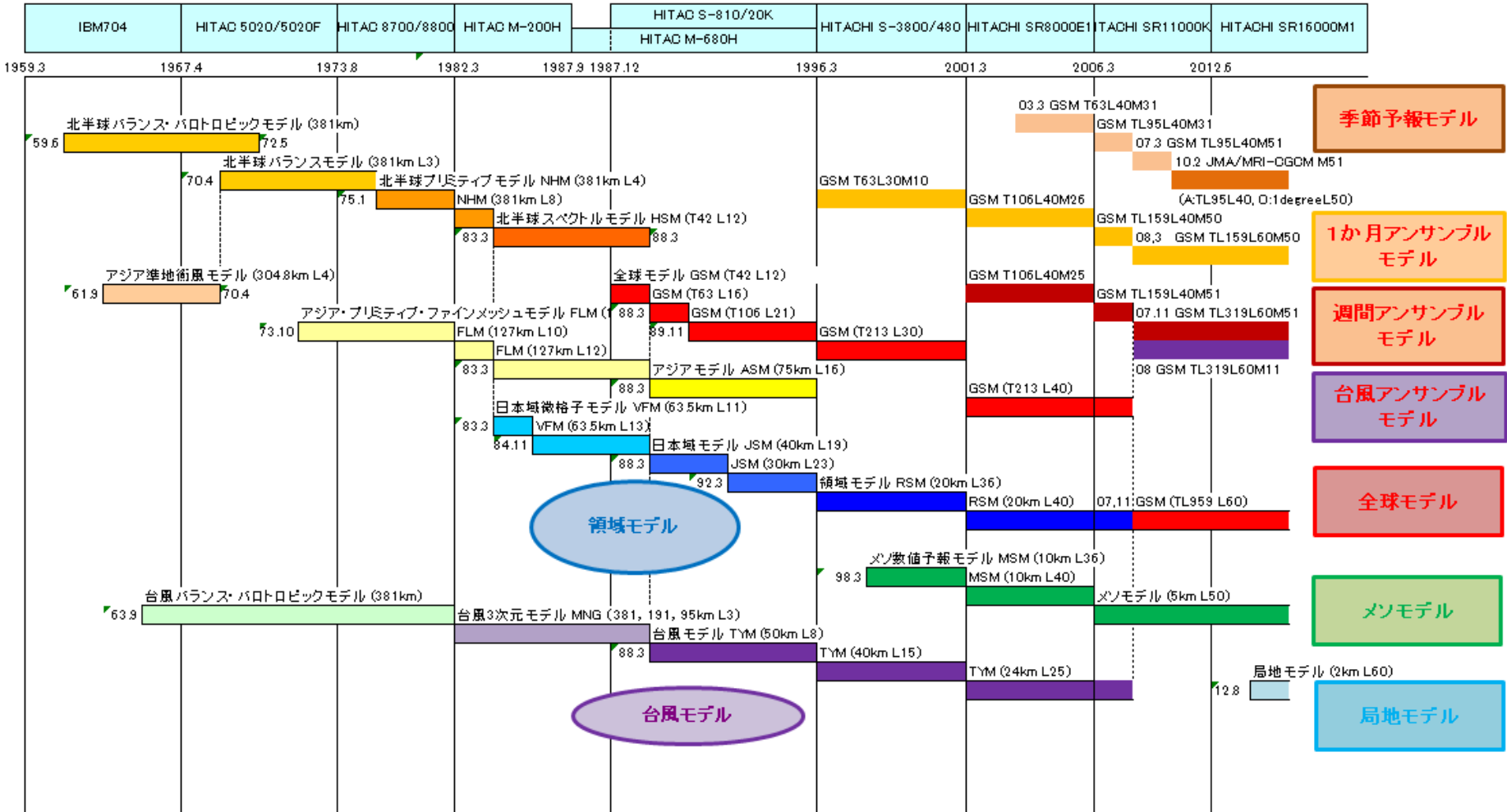


数値予報は、気象業務の基盤技術

天気予報のニーズと技術的課題

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	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、全球モデル、物質輸送モデル
3日～10日	レジャー、農業対策	週間予報、異常天候早期警戒情報	全球モデル、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	1か月アンサンブル予報モデル
1か月～	天候の移り変わり、農業対策	季節予報	季節予報モデル(大気モデル、海洋モデル)
10年～	地球温暖化対策 洪水への備え	温暖化予測情報	気候モデル(地球システムモデル)

気象庁の数値予報システムの変遷

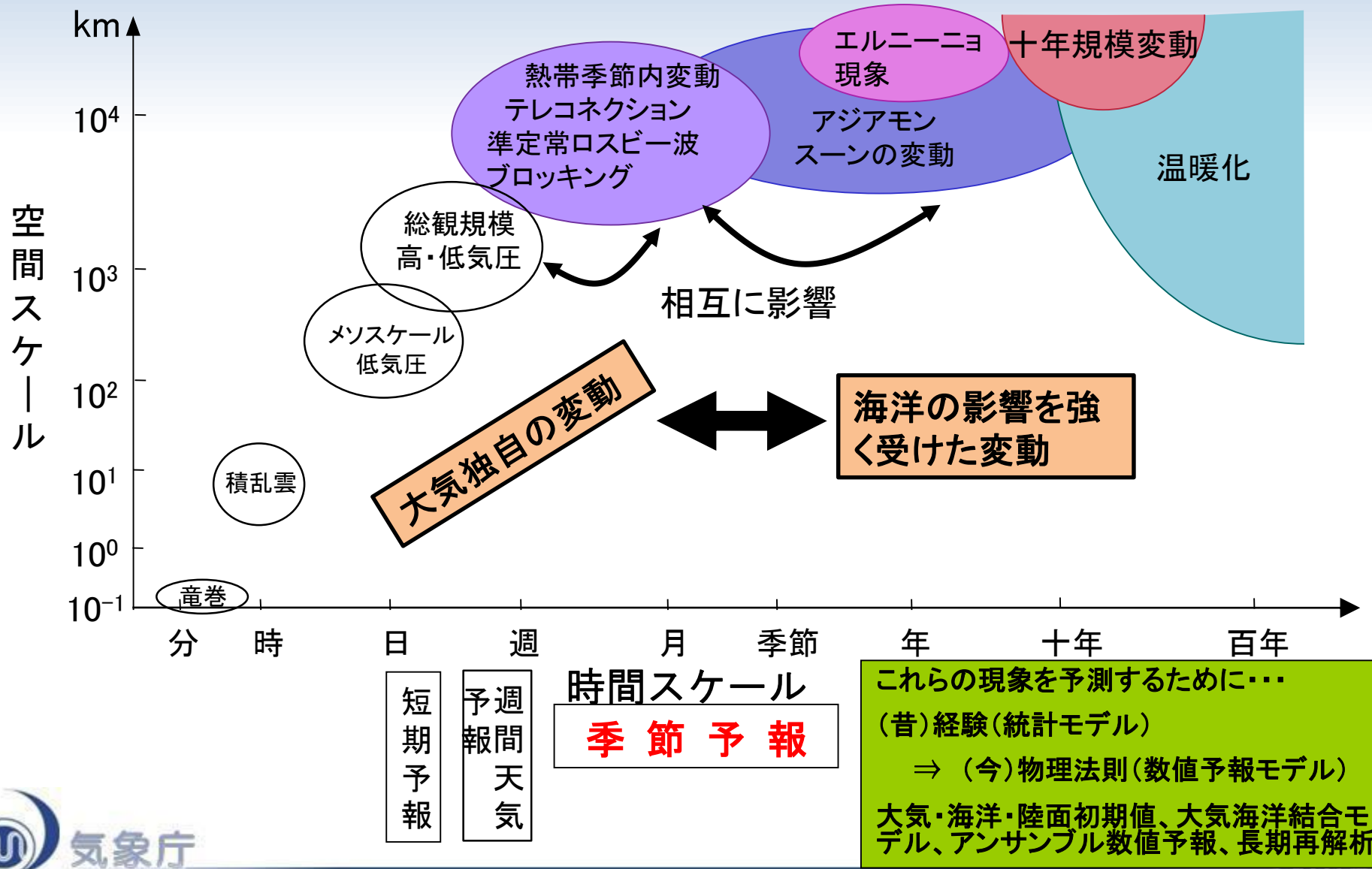


季節予報、気候変動予測

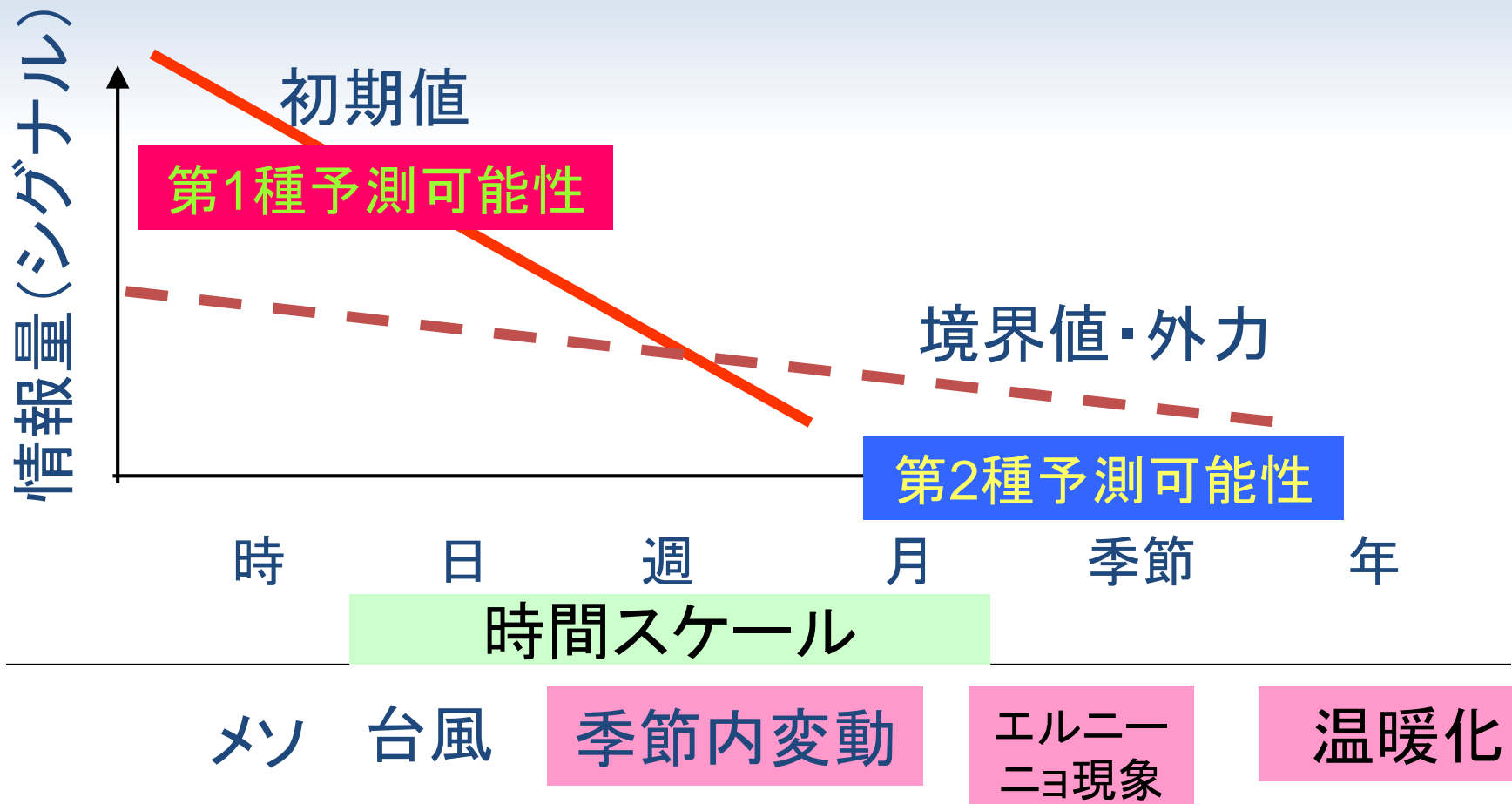
ナウキャスト・降水短時間予報

- 過去の降水域の動き、現在の降水分布を元に、目先1～6時間までをきめ細かく予測
- 現在の降水域とその移動速度から、将来の降水量を予測
 - 数値予報では気温や水蒸気を物理法則により予測し降水量を計算しており、降水域を直接取り扱わない
- 予報時間が延びるにつれて位置や強さのずれが大きくなるため、数値予報の予想結果も加味

季節予報が予測対象とする現象



初期値と境界値の重要性



予報時間が長くなると、初期値による第1種予測可能性が小さくなり、境界条件や外力による第2種予測可能性に頼ることとなる。

季節予報はなぜ可能か？

・季節予報の時間スケールで予測可能な、ゆっくりと変動する現象があるため。

○1か月予報では、大気内部の「長周期変動」が重要。

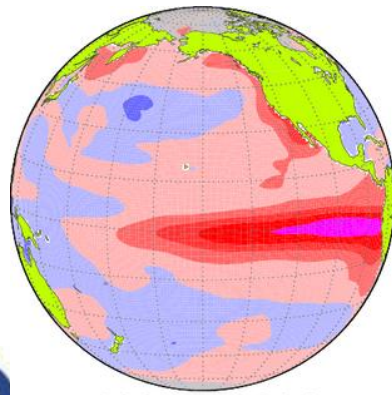
例：北極振動、MJO（熱帯の季節内振動）

○3か月予報では、海洋の影響を受けた大気的外部変動が重要。

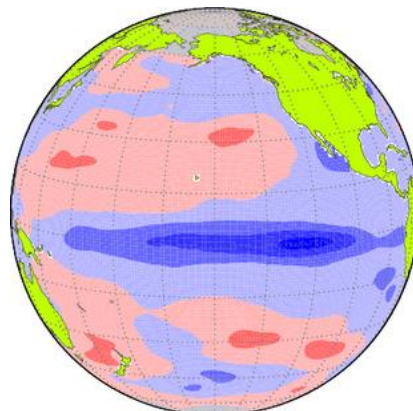
特に、気候システムの最も顕著な年々変動であり、予測も可能なエルニーニョ/ラニーニャ現象に伴う大気の変動。

季節予報にとってのシグナル

エルニーニョ現象



ラニーニャ現象



1997年11月の月平均
海面水温平年偏差(左)

1988年12月の月平均
海面水温平年偏差(右)

発表予報の種類と運用モデル

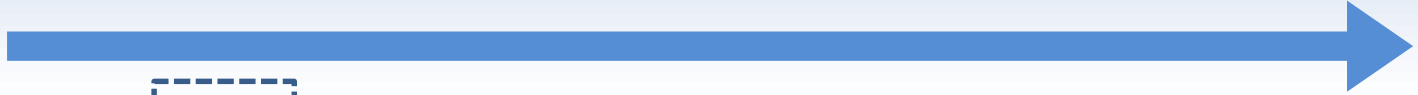
発表予報

1か月

3か月

7か月

運用モデル



異常天候早期警戒情報

7日平均

1週

2週

3・4週

1か月予報

1か月(4週)平均

大気モデル

T_L159L60
50 mem

3か月予報

1か月

1か月

1か月

3か月平均

結合モデル

AGCM:
T_L95L40

OGCM:
0.3°-1° x 1°
51 mem

暖・寒候期予報

3か月平均
(夏・冬)

エルニーニョ予測

エルニーニョ現象・インド洋海面水温予測

日本での長期再解析

1st JRA-25

気象庁＋(財)電力中央研究所

(1979~2004: 2006年3月24日計算完了)

2005年以降もJCDASとして気象庁が継続



2nd JRA-55 (JRA Go! Go!)

気象庁

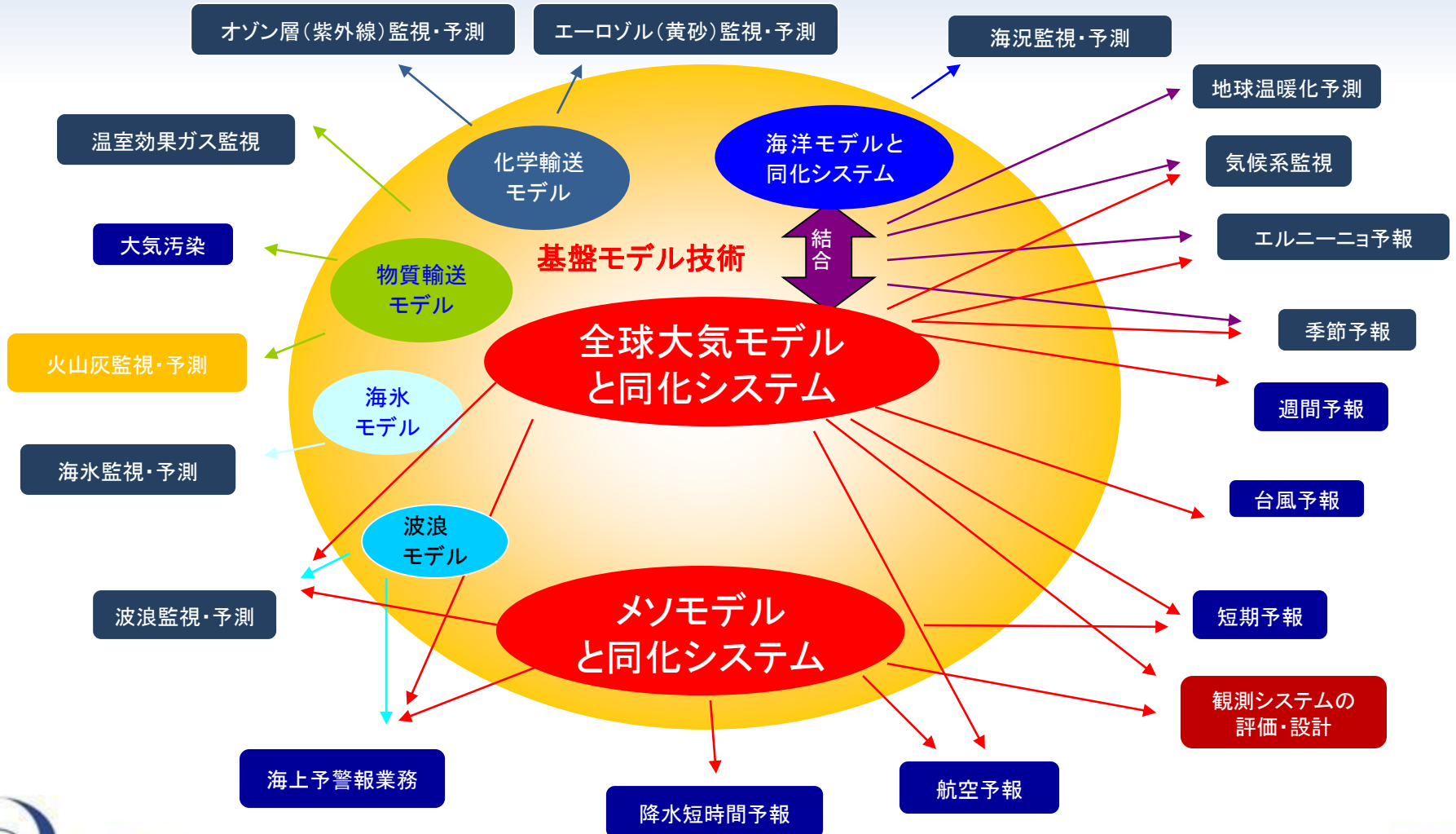
(1958~2012: 2013年3月28日計算完了)

2013年以後も継続予定。

4次元変分法で1978年以前に遡り50年以上
の計算を実施した世界初の長期再解析。



数値予報モデルが支える気象業務



気象予測データの利用先

- 全国の気象台
- 民間気象事業者
- 地方公共団体等の防災機関
- 国民
- 海外の気象局
- 航空分野(航空管制、民航等、パイロット)
- 海上交通分野(外洋、沿岸)
- 防衛分野(航空自衛隊を中核として陸上、海上も)
- 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