

第1部 数値予報の基礎知識

第1章 概要

1.1 はじめに¹

第1部は、天気予報の基盤技術となっている数値予報の基礎知識について、主に数値予報プロダクトのユーザーが理解しておくべき事項をまとめたものである。この第1章では、数値予報の概要についてまとめる。第2章では、数値予報への入力となる観測データの前処理と品質管理について、第3章では数値予報の初期値を作成するデータ同化について、第4章では予測値を計算する数値予報モデルについて、第5章では数値予報結果を予報作業に利用しやすく加工するアプリケーションについて、それぞれ述べる。また最後の第6章では、プロダクト利用上の留意点について述べる。

数値予報により作成される予測資料は、現代の天気予報・防災気象情報の作成作業においては必要不可欠である(図1.1.1)。しかし、物理法則に基づき、最新のスーパーコンピュータの能力をもって計算したとしても数値予報は完全ではなく、そのプロダクトには特性がある。したがって、予報作業において数値予報の性能を十分引き出すためには、数値予

報の原理や特性を十分理解した上で、プロダクトを利用していただきたい。

1.2 数値予報とは

「数値予報」とは、大気現象を支配する物理法則の方程式をコンピュータで解くことにより、その方程式の時間発展を計算し、将来の状態を客観的に予測することである。天気予報を目的としていることをより明確に示すため「数値天気予報」と呼ぶこともあるが、ここでは本研修テキストの標題のとおり、「数値予報」と記すこととする。

数値予報の原理である、方程式の時間発展を計算するという基本的な考え方を、ボールの軌跡の予測になぞらえて示したのが図1.2.1である。最初の位置からボールを斜め上に投げ出す状況を考えよう。現在の速度や位置とボールに加わる力がわかれば、1秒後の位置を知ることができ、これを繰り返すことによって、2秒後、3秒後と将来のボールの状態を予測することができる。原理的には未来の値をどこまでも求めることが可能である。

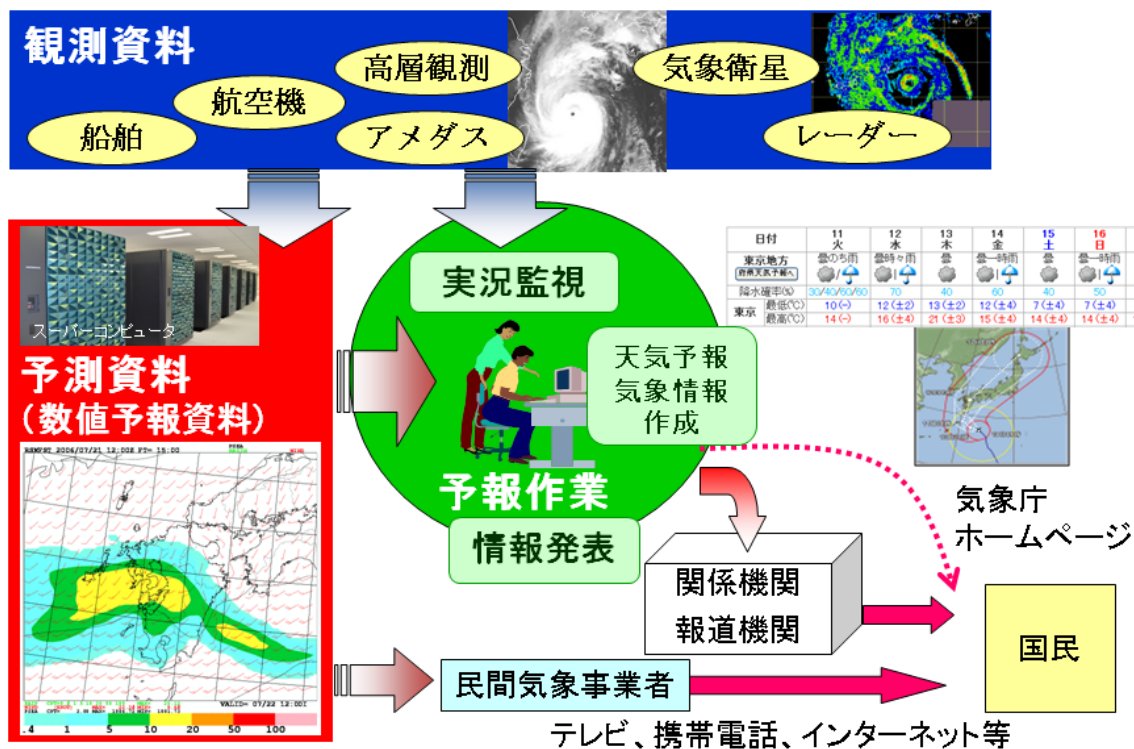


図 1.1.1 数値予報から見た、観測から気象情報までの流れ

¹ 第1章 室井 ちあし

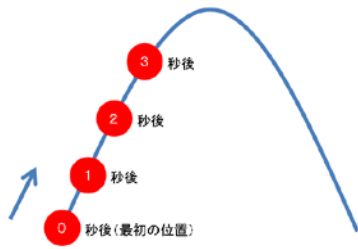


図 1.2.1 数値予報の基本的な考え方を、ボールの状態の予測になぞらえた模式図

実際の数値予報は、前述のボールの計算と比較すると非常に複雑であるが、基本的な考え方は全く同じである。コンピュータで取り扱いやすいように、大気の空間を規則正しく並んだ格子（図1.2.2）で区切り、その格子点における気圧、気温、風などの大気の状態をあらわす物理量を求めていく。原理的には、この格子間隔（メッシュ）が細かければ細かいほど、大気の状態をより正確に表現できる。

1.3 数値予報の流れ

ここで数値予報のおおまかな流れと本研修テキストの第1部の内容との対応を図1.3.1に示す。まず、現在の大気の状態を知るために観測データを収集する。観測データには様々な理由で誤差が含まれており、中には精度が悪く利用に適さない観測データ

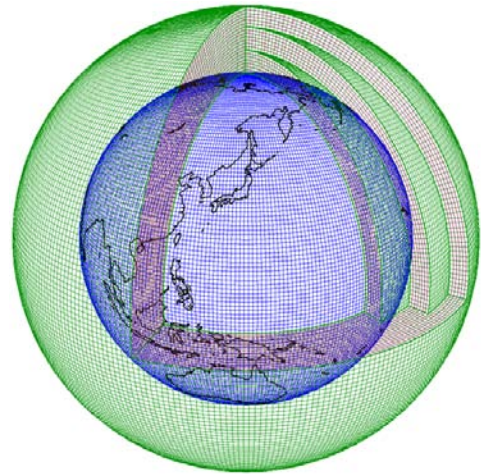


図 1.2.2 地球を覆う格子の模式図

も存在するためこれを除外する必要がある。これを「品質管理」と呼んでいる。次に、数値予報に適した規則正しく並んだ初期値を作成する。これを「データ同化」（または「客観解析」）という。特に短期予報や週間天気予報では、初期値の精度が予測精度に決定的な意味を持ち、この手順は非常に重要である。次に、データ同化で作成された初期値をもとに、数値予報モデルを実行する。「数値予報モデル」とは、地球の大気現象を支配する物理法則をできるだけ忠実に、コンピュータで時間発展を解くことによ

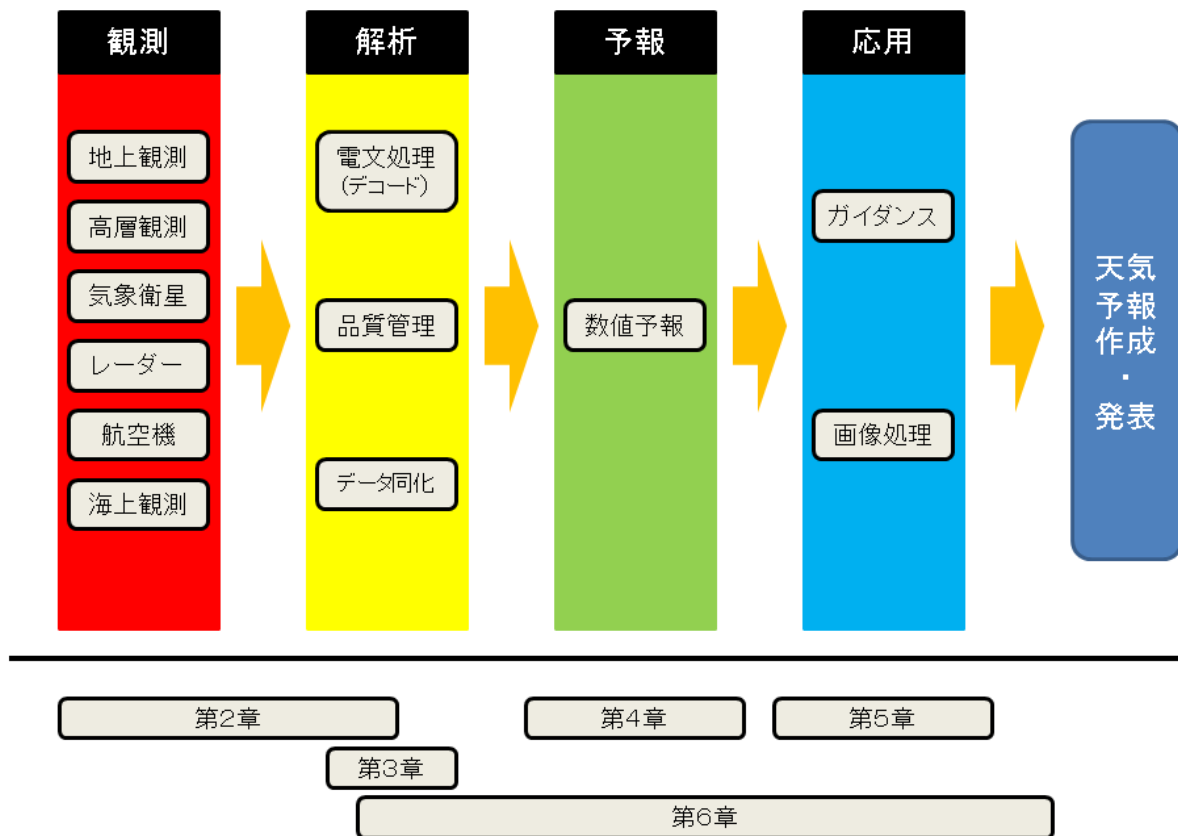


図 1.3.1 数値予報の流れ。本研修テキスト（第1部）の内容との対応を参考に示す

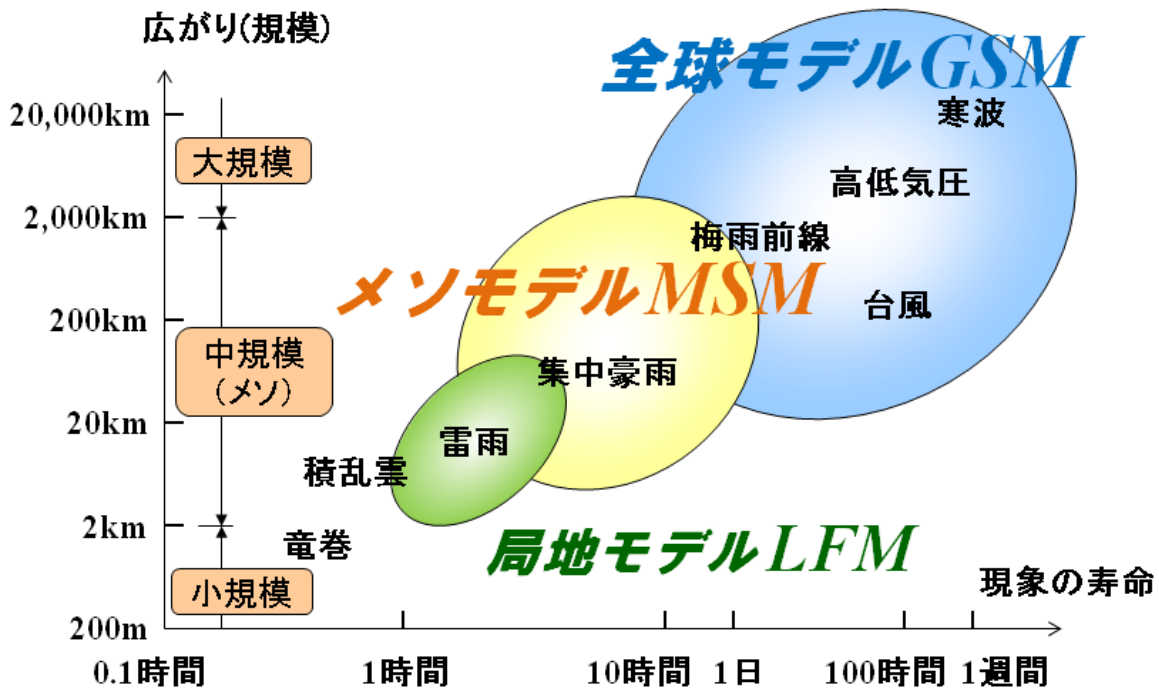


図 1.4.1 数値予報モデルが対象とする現象の空間・時間スケール（気象庁の数値予報モデルの場合）

り、未来の大気の状態を求めるプログラムのことである。最後に、数値予報の予測値を様々なガイダンスや画像として、予報作業に利用しやすく加工し、「プロダクト」として提供する。これが実際の天気予報や防災情報作成の際の基礎資料となっている。

1.4 全球モデルと領域モデル

地球全体を対象とした数値予報モデルを「全球モデル」と呼ぶ。一方、予報領域を興味のある地域に限定したものを「領域モデル」と呼ぶ。領域モデルの実行には側面境界値が必要で、全球モデルやより広い領域モデルから与えられる。

現業数値予報では全球モデルに加え、それより高解像度化された領域モデルを運用するのが一般的である。予報モデルで予測できる現象の空間スケールは、モデルの格子間隔の大きさに依存しており、現象の空間スケールに応じて、予測可能な時間スケールもおおよそ決まってくる（図1.4.1）。したがって全球モデルなど、より広域の予報モデルの結果をもとにしつつ、細かいスケールの予測についてはより高分解能の領域モデルの結果を参考にすると作業上有効である。

領域モデルをもってしても、大気中の細かい現象をすべて表現・予測できるわけではない。例えば水平分解能2kmのモデルでも、発達した積乱雲は何とか表現されるが、それ以下の個々の積雲やその中に発生する小さな渦、突風、竜巻などといったものは表現できない。

1.5 決定論的予報とアンサンブル予報

数値予報の目指す理想像は、地球の大気の状態を正確に把握し、物理法則をコンピュータで正確に解くことによって精度の高い予測値を作成することである。しかし実際には、観測データが十分得られない、あるいは予報モデルに様々な近似や仮定をしているなど様々な事情により、初期値やそこからの予測値には必ず誤差が含まれる。

数値予報本来の目指すところである、ある初期時刻に対してひとつの初期値からひとつの予測を行うことを「決定論的予報」といい、これに対して複数の予測を行うことを「アンサンブル予報」という（図1.5.1）。複数の予測のひとつひとつを「アンサンブルメンバー」あるいは単に「メンバー」という。アンサンブル予報では、わずかに異なる複数の初期値から予報を行うものや、境界値を異なるものに置き換えるもの、予報モデルの不確実性を考慮するもの、あるいはこれらの組み合わせで行われるものが

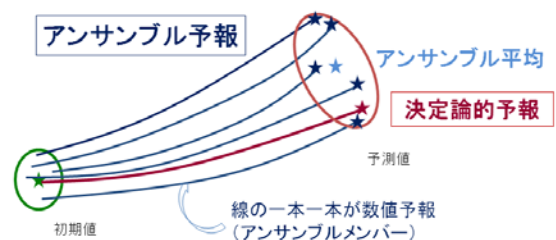


図 1.5.1 決定論的予報とアンサンブル予報

ある。

アンサンブル予報では、決定論的予報では知り得ない予測値の誤差を事前に見積もり、その信頼性についての情報を取り出すことができるため、予測対象や利用目的に応じて、決定論的予報とあわせてアンサンブル予報も運用されている。

アンサンブル予報は、ひとつの初期時刻に対して複数の予測計算が行われる。したがって、決定論的予報で使われる予報モデルそのままでは計算量が大きくなることから、決定論的予報で設定されるより粗い解像度でアンサンブル予報を実行する場合が多い。解像度を下げることによる精度低下の短所と、アンサンブル予報を充実させることで信頼度情報を得る長所は、相反する関係にある。決定論的予報とアンサンブル予報、それぞれの特性を十分理解してプロダクトを利用することが望ましい。

1.6 数値予報システム

数値予報ではデータ同化と数値予報モデルとが、予測精度を大きく左右する。このデータ同化と数値予報モデルの両者は技術的には密接な関係があり、データ同化を行う解析と予報モデルとが整合性のとれたものであることが重要である。品質管理・解析と予報モデルをあわせて「数値予報システム」と

呼ぶことがある。例えば、地球全体を対象とする全球解析と全球予報モデル、両者をあわせて「全球数値予報システム」と呼ぶ。また前述のアンサンブル予報について、初期摂動作成や予報モデルまで全体として「アンサンブル予報システム」と呼ぶことがある。

気象庁における数値予報システムを一覧にして表1.6.1および表1.6.2に示す。ここでは天気予報や防災気象情報を支援するための主な数値予報モデルのみをとりあげたが、現在の数値予報技術は、海洋・波浪、季節予報、気候変動予測、長期再解析、火山灰、黄砂・大気汚染予測など、さまざまな業務の技術基盤となっている。

1.7 解析予報サイクル、サイクル解析と速報解析

データ同化においては後述のとおり、前の初期時刻の予測値を「第一推定値」（たたき台）として用いている。これにより観測データがない領域の値や物理要素を合理的に算出することができる。例えば海上に移動し発達する低気圧や、梅雨前線上の小さなスケールの現象は、観測データだけでは精度よく解析することができないが、数値予報モデルによって表現された構造を解析で考慮することによって、次の初期時刻の予測に引き継ぐことができる。これ

表 1.6.1 気象庁の数値予報システム（決定論的予報）（2012 年 10 月末現在）

名称	全球数値予報システム	メソ数値予報システム	局地数値予報システム
データ同化	全球速報解析 全球サイクル解析	メソ解析	局地解析
データ同化手法	4 次元変分法	4 次元変分法	3 次元変分法
予報モデル	全球モデル(GSM)	メソモデル(MSM)	局地モデル(LFM)
解析時刻	00,06,12,18UTC	00,03,06,09,12,15,18,21UTC	00,03,06,09,12,15,18,21UTC
解像度	TL959 (約 20km) 60 層	5km 50 層	2km 60 層
予報時間	84 時間(00,06,18UTC) 216 時間(12UTC)	15 時間(00,06,12,18UTC) 33 時間(03,09,15,21UTC)	9 時間

表 1.6.2 気象庁の数値予報システム（アンサンブル予報）（2012 年 10 月末現在）

名称	週間アンサンブル予報システム	台風アンサンブル予報システム（注）
初期値	全球速報解析	全球速報解析
初期摂動作成手法	特異ベクトル(SV)法	特異ベクトル(SV)法
SV 計算対象領域	全球	北西太平洋領域＋熱帯擾乱周辺域
予報モデル	全球モデル(GSM)	全球モデル(GSM)
初期時刻	12UTC	00,06,12,18UTC
解像度	TL319 (約 55km) 60 層	TL319 (約 55km) 60 層
予報時間	216 時間	132 時間
メンバー数	51	11

（注）台風アンサンブル予報システムは、RSMC Tokyo の責任領域（東経 100 度–180 度、0 度–北緯 60 度）の中に、今後 24 時間以内に Tropical Storm 以上（最大風速 34kt 以上）の強度に発達することが見込まれる熱帯低気圧が存在するか、解析時刻で Tropical Storm 以上の強度で解析されている熱帯低気圧が存在するか、どちらかの条件が満たされている場合のみ実行される。その結果は、気象庁内の台風進路予報作業のために利用されており、プロダクトの部外配信はおこなっていない。

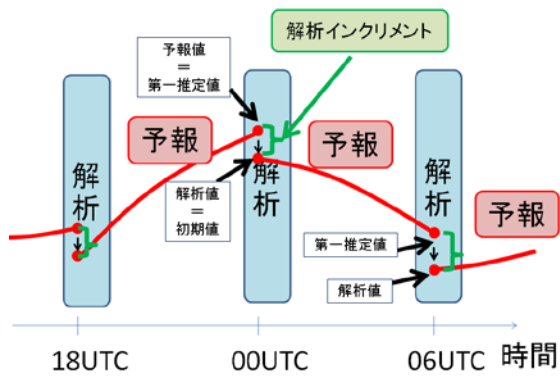


図 1.7.1 解析予報サイクルの仕組み

を「解析予報サイクル」と呼び、解析値と第一推定値との差を「解析インクリメント」あるいは単に「インクリメント」と呼ぶ。解析予報サイクルの仕組みを図1.7.1に示す。

ある時刻に対して同じシステムのデータ同化を複数回実施することがある。これは、観測データが入電するのに一定の時間が必要であることが理由である。十分時間が経てば利用可能な観測データの数は増え、初期値の精度がよくなり予測精度も向上すると期待される。しかしプロダクト配信時刻が遅くなることで、予報支援資料としての利用価値は下がってしまう。そこで、予報支援のためにいったんデータ同化を行なってプロダクトを提供し、より多

くの観測データが利用可能となったタイミングであらためてデータ同化を行う、ということが、特に国外の観測などのデータの入電に時間がかかる全球解析で行われる。速報的なデータ同化を「速報解析」と呼び、十分な数の観測データを利用して行うデータ同化を「サイクル解析」と呼ぶ。サイクルと呼ぶのは、そこからの第一推定値を用いて次の時刻のデータ同化を実施するため、情報が引き継がれていくからである。

このように数値予報では、データ同化と数値予報モデルとは互いに影響を及ぼしあう関係にある。気象庁の現業数値予報システムの解析予報サイクルと数値予報モデル、その側面境界値の関係を示したのが図1.7.2である。全球数値予報システムは、全球サイクル解析では6時間間隔の、メソ数値予報システムでは3時間間隔の、いずれも解析予報サイクルとなっている。

1.8 数値予報とコンピュータ

これまで述べたように、数値予報とは大気の状態を支配する物理法則をコンピュータで解くことである。気象庁の全球モデルは水平格子間隔が約20km、鉛直方向に60層を配置しており、格子数は全体で約8000万、水平格子間隔約5km鉛直50層のメソモデルは約2000万にも及ぶ。この全ての格子点に

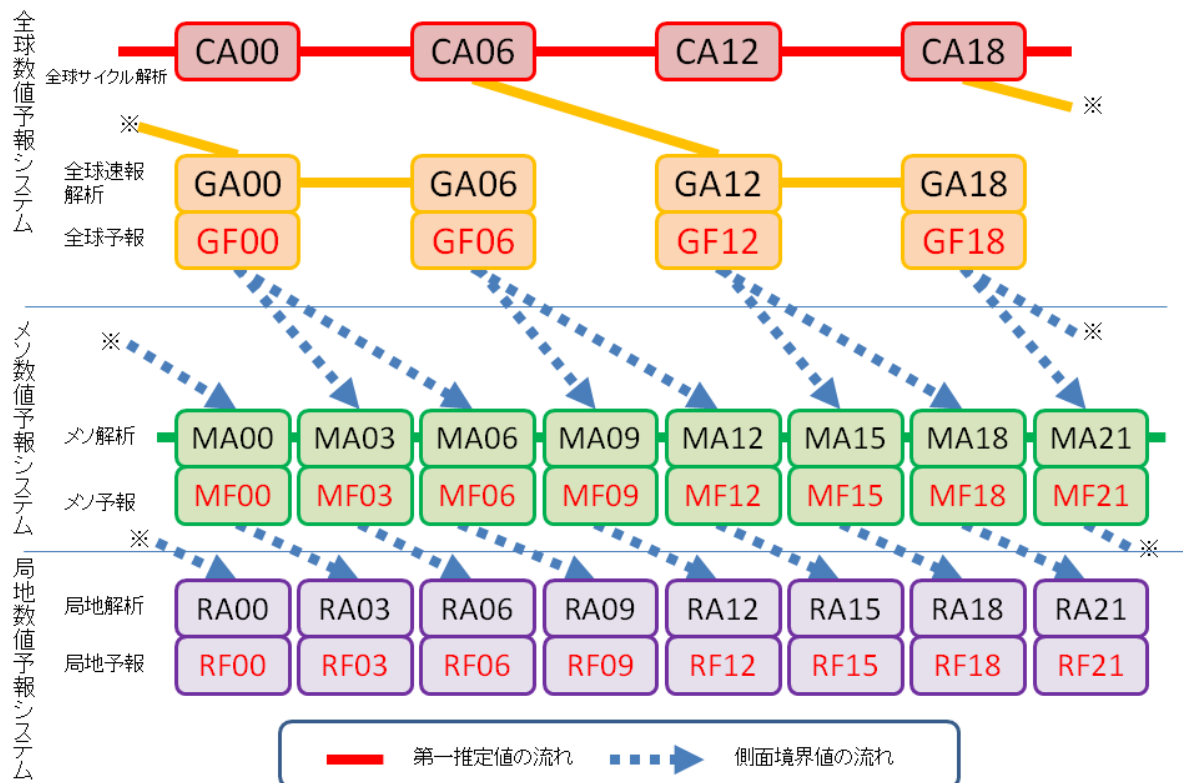


図 1.7.2 解析予報サイクルと数値予報システムの関係(2012年10月末現在)

CA：全球サイクル解析 GA：全球速報解析 GF：全球予報
MA：メソ解析 MF：メソ予報 RA：局地解析 RF：局地予報



図 1.8.1 気象庁の数値予報で用いられる現在のスーパーコンピュータ (HITACHI SR16000M1)

風や気温、水蒸気量などの物理量が配置される。

これを一定の時間間隔で時間発展の計算を行うことから、膨大な計算が必要となる。実際の予報作業に間に合うようプロダクトを提供するためには迅速な処理・高速な演算をする必要があり、現業の数値予報の実行では「スーパーコンピュータ」が用いられる。現在気象庁で用いているスーパーコンピュータ (図1.8.1) は第9世代目のもので、その理論性能は847TFlops (1TFlopsは1秒間に1兆回計算できることを示す単位) である。その性能を最大限に発揮するために、数値予報のプログラムには様々な工夫が行われているなど、数値予報とコンピュータ技術とは密接な関係にある。

1.9 数値予報の歴史

本章の最後に、数値予報の歴史について簡単に述べておきたい。

計算で天気予報を行うことを最初に試みたのは、イギリスの気象学者リチャードソンである。彼は1922年の著書の中で客観的な天気予報のため、物理法則に初期状態を与えて時間発展を解くというスタイルを提案し、大広間に人を集めて計算が可能と述べ、地上気圧の6時間予報を実際に手計算でやって見せている。しかし計算結果は正しくなかった。これらは「リチャードソンの夢」「リチャードソンの失敗」と言われる。

その後時代は変わって、天気予報の客観化を目指し1955年にアメリカで数値予報が実用化された。日本でも1953年に東京大学、気象研究所、気象庁の研究者・技術者が結集して数値予報グループ「NPグループ」が結成され、1959年に気象庁でも、官公庁としてはじめてスーパーコンピュータが導入され数値予報が開始された。コンピュータにより計算は自動的に行われるが、そこで動作するプログラムや入力データは、当時のまだ主流であったパンチカードシステムが使用され、人の手により穿孔されたカードが利用されていた。気象庁に導入された初代の



図 1.9.1 気象庁の数値予報で用いられた初代スーパーコンピュータ (IBM704)



図 1.9.2 キーパンチングの様子

スーパーコンピュータと当時のキーパンチングの様子をそれぞれ、図1.9.1と図1.9.2に示す。

当初のコンピュータは現在のパソコンよりも能力ははるかに低く、数値予報モデルも解像度が粗く非常に簡便なものであったため、そのプロダクトを利用する予報作業者の信頼を得るにはかなりの年月を要した。これまでの気象庁スーパーコンピュータと数値予報モデルの歴史 (アンサンブル予報を除く) を図1.9.3に示す。天気予報を近代化すべきであるという私達の先輩の熱い情熱と、その後のスーパーコンピュータの性能向上、気象学の進歩と大気現象のメカニズム解明、数値予報モデルの進化によって、徐々に精度向上が成し遂げられ、現在の天気予報を支える姿があると言える。

気象学の最新の知見を毎日の天気予報に反映させる、あるいは数値予報モデル開発者とプロダクト利用者とがコミュニケーションを十分に行うといった姿勢は、時代が変わっても現在でも同じであり、これが我が国において数値予報が根付いた大きな要因のひとつと考えられる。コンピュータが得意とする高速処理・高速演算能力と、人間が得意とする総合判断力・分析力やコミュニケーション能力、その両方のよいところを引き出していくことが、今後求められていると言えよう。

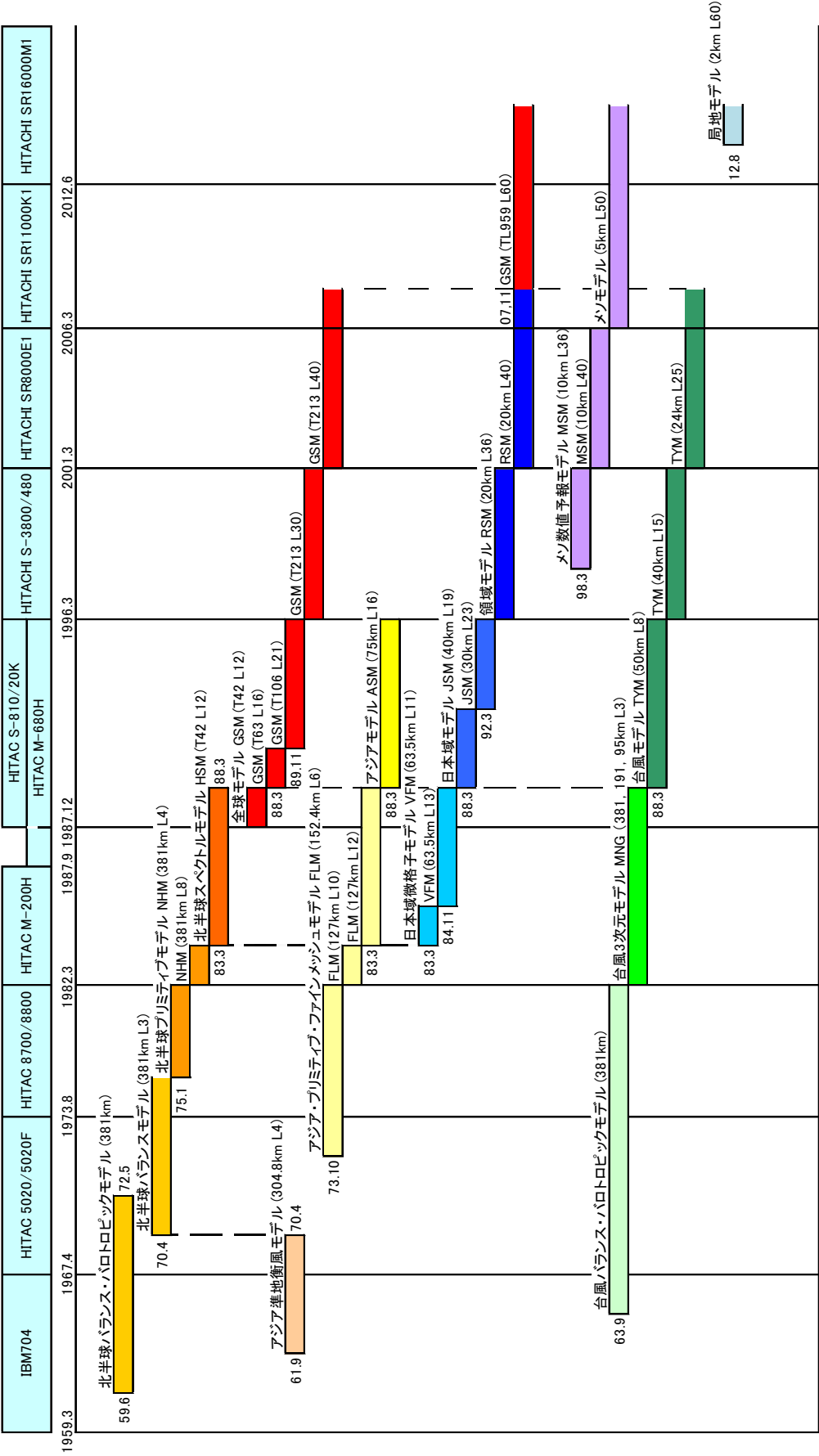


図 1.9.3 気象庁のスーパーコンピュータと数値予報モデルの歴史