

第1章 概要*

1.1 はじめに

第 II 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。これは、平成 24 年度に発行された「数値予報の基礎知識」(気象庁予報部 2012) を最新の数値予報の知見を踏まえて更新したものである。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利用しやすい形式に加工する応用処理(特にガイダンス)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)。最先端の科学技術や最新の気象学や物理学の知見を活用し、高性能なスーパーコンピュータを利用する数値予報ではあるが、それでも解析や予測情報は完全ではない。数値予報の原理やプロダクトの特性を十分理解した上で、予報作業等において数値予報資料を適切に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方程式をコンピュータで解くことにより、その時間発展を計算し、大気の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。

数値予報の原理である、物理法則に代表される対象

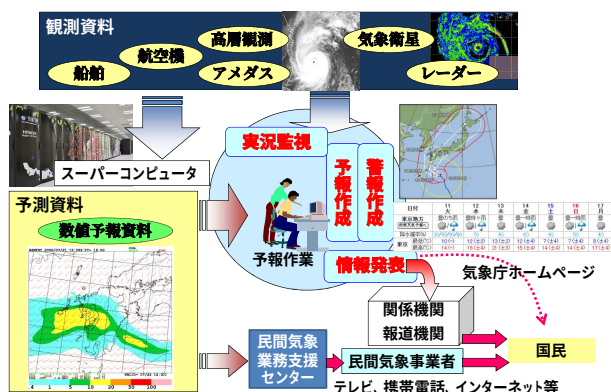


図 1.1.1 気象予報業務の流れ(数値予報の位置づけ)

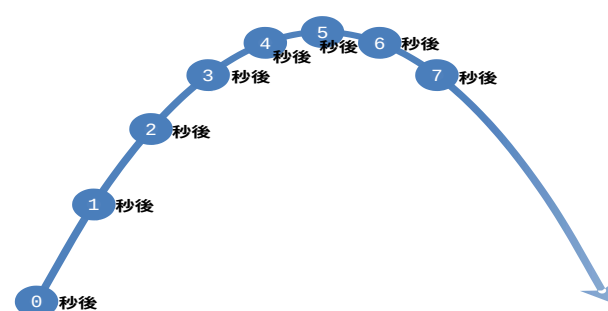


図 1.2.1 数値予報の基本的な考え方を、ボールの状態の予測になぞらえた模式図。白抜きの数字はボールの位置が予測された時間を示す。

となる物体の運動を支配する方程式をコンピュータで解くことにより将来の状態を客観的に予測する、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分かれば 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 秒後の位置も予測することができる。原理的にはボールが地面に落ちるまで、未来の値を求めることが可能である。

このボールの運動の予測計算と比較すると、大気現象を支配する方程式は非常に複雑ではあるが、実際の数値予報の基本的な考え方は同じである。コンピュータで取り扱えるように、大気を 3 次元空間に規則正しく並んだ格子(図 1.2.2)で区切り、それぞれの格子に大気の状態を表す気圧、気温、風などの物理量を配置する。これらの未来の値を、コンピュータで扱えるように離散化した方程式を用いて求めていく。

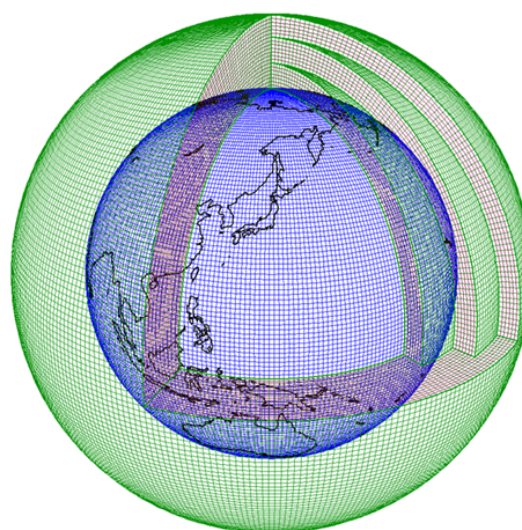


図 1.2.2 地球を覆う格子の模式図

* 本田 有機、室井ちあし

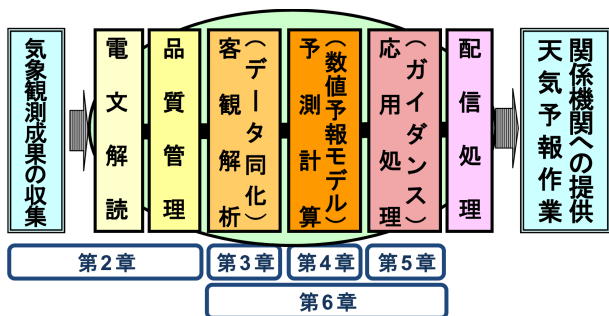


図 1.3.1 数値予報の流れ。本研修テキスト（第 II 部）の内容との対応を参考を示す

1.3 数値予報の流れ

数値予報のおおまかな流れと本研修テキストの第 II 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、世界中の観測データを収集し、数値予報で利用可能な形式に変換する。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も存在する。このため、収集した観測データの品質を確認し、誤差の大きいデータについては除外したり、補正したりする必要がある。これを観測データの「品質管理」という。

次に、品質管理を経て選別された観測データから、数値予報の初期値を作成する。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つため、精度の高い初期値を作成することは非常に重要である。

初期値が得られれば、大気現象を支配する物理法則を記述する方程式に基づいた「数値予報モデル」を用いて予測計算を行い、将来の大気の状態を表す各種物理量の予測値を算出する。

最後に、この予測値をユーザーが利用しやすい形式に加工する必要がある。この過程を数値予報の応用処理と呼び、その結果を応用プロダクトと呼ぶ。応用プロダクトには、可視化した図形式の資料や、利用しやすい要素へ変換したり、統計的な修正をした「ガイダンス」と呼ぶ資料があり、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、予報領域を特定の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。

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

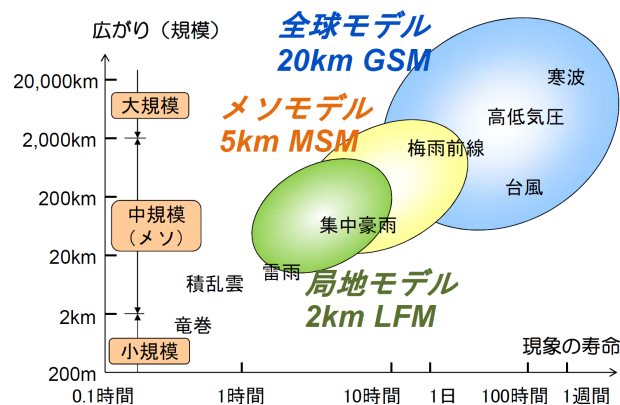


図 1.4.1 数値予報モデルが対象とする現象の空間・時間スケール（気象庁の数値予報モデルの場合）

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）。一般的に、全球モデルに比べて領域モデルは高解像度であり、予報時間が短い。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とすると作業上有効である。

しかし、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。例えば水平格子間隔 2 km のモデルでも、発達した積乱雲は何とか表現されるが、それよりも空間スケールが小さい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。

1.5 決定論的予報とアンサンブル予報

利用可能な観測データを同化して得られた最も精度の良い初期値から行う予測を「決定論的予報」と呼ぶ。しかし、どれだけ精度良く求めたとしても、初期値や境界値には誤差が伴う。また、数値予報モデルも、時空間方向に離散化することや大気現象をモデル化する時に設ける様々な近似や仮定から、予測に誤差が生じる。数値予報が対象とする大気は、初期値に含まれる僅かな誤差が時間が進むにつれて増大する、というカオス的な振る舞いをする性質をもっている。この予測誤差の成長の程度は一定ではなく、その時々の大気の状態によって変わる。これは、大気現象により予測可能性が異なるためである。

初期値の誤差の増大の様子を把握するために、決定論的予報の初期値に僅かなゆらぎを与えて複数の予測を行うことを「アンサンブル予報」といい、それぞれ

¹ 格子の値で表現出来ない現象でも、例えば積雲による熱や水蒸気の鉛直輸送などは格子スケールの大気現象の予測には重要である。このため、数値予報モデルで大気の状態を予測する時には、「パラメタリゼーション」という手法を用いて、表現出来ない現象の効果を考慮している。詳細は第 4 章を参照いただきたい。

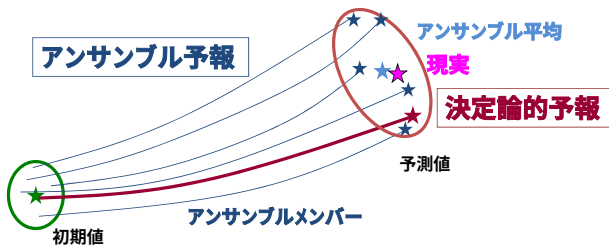


図 1.5.1 決定論的予報とアンサンブル予報

れの予報を「アンサンブルメンバー」あるいは単に「メンバー」という（図 1.5.1）。初期値にゆらぎを与えるほかに、境界値を異なるものに置き換えたり、数値予報モデルの不確実性を考慮したり、あるいはこれらを組み合わせたりして、アンサンブル予報を行うこともある。

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。また、アンサンブルメンバーの予測値を平均したものを「アンサンブル平均」と呼ぶが、平均することで予測誤差が打ち消し合い、決定論的予報よりも精度が改善する場合もある。このため、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。

アンサンブル予報では、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、決定論的予報と同じ解像度では計算量が大きくなることから、アンサンブル予報の解像度は下げて、メンバー数を増やすこともある。解像度を下げることによる精度低下の短所と、アンサンブルメンバー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

厳密な定義はないが、第 1.3 節で紹介した数値予報の流れのうち、観測データの品質管理から予測計算までを含めた処理を実行するプログラム群を「数値予報システム」という。例えば、地球全体を計算領域とするシステムを「『全球』数値予報システム」というなど、頭にシステムを特徴づける名称を付けることがある。

また、アンサンブル予報については、初期摂動作成やアンサンブルメンバーの計算やその後処理までの一連の処理を実行するプログラム群を「アンサンブル予報システム」という。こちらも「『全球』アンサンブル予報システム」など、システムの特徴となる言葉を頭につけることがある。

気象庁が運用する数値予報システムの一覧を本研修テキストの付録 A に掲載する。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システムの

みを取りあげたが、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

数値予報モデルの初期値は、観測データを用いて解析することで得られる。しかし、利用できる観測データの数は、数値予報モデルのすべての格子点上の物理要素（気温、気圧、風など）を全て決められるほど十分あるわけではない。このため、前の初期値からの予測値をたたき台（これを「第一推定値」という）として用いることで、観測データが十分ではない場所でも初期値の物理要素を合理的に算出することが出来る。また、梅雨前線上の小さなスケールの現象など、観測データだけでは精度よく把握することができない場合でも、数値予報モデルにより第一推定値に表現されていれば、次の初期時刻の予測に小さなスケールの現象を引き継ぐことができる。このように、解析値を初期値として実行した数値予報モデルの予測値を、次の初期時刻の解析の第一推定値に用いることを繰り返すシステムを「解析予報サイクル」という。解析予報サイクルの仕組みを図 1.7.1 に示す。

解析予報サイクルには、初期値や予測の精度を向上する意味で大きな利点がある。それは、観測データの影響を計算領域全域に広げる効果である。一つの観測種別のデータは局所的に存在する。1 回のデータ同化では、観測が存在する周辺までしか第一推定値を修正することが出来ず、初期値を改善する影響は限定的である。しかし、その初期値から数値予報モデルを実行して次の解析の第一推定値として利用することで、その観測の影響は周辺に広がっていく。この解析と予報を繰り返すことで、解析の影響を計算領域全体に広げることが出来る（図 1.7.2）。

ある初期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、解析の精度は良くなると期待される。しかし、これを

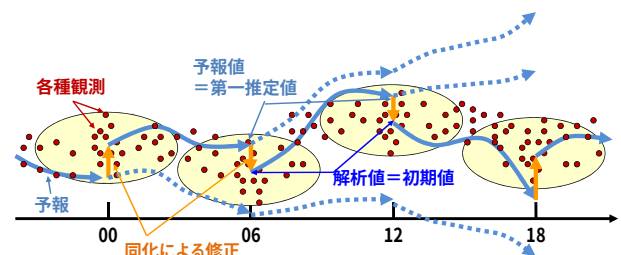
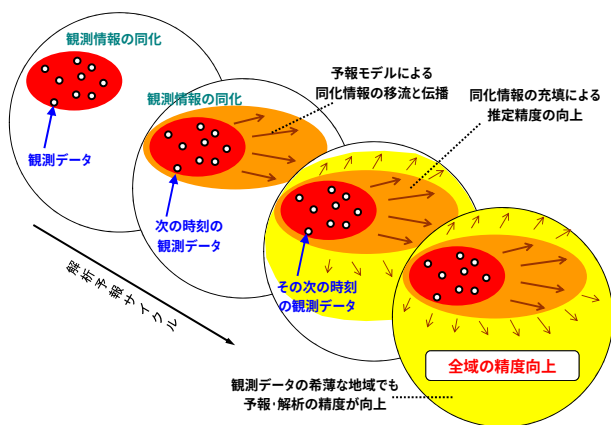


図 1.7.1 解析予報サイクルの仕組み



初期値として数値予報モデルを実行すれば、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速報的な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。そして、定期的にサイクル解析からの第一推定値を速報解析に用いることで、サイクル解析の精度の高さが速報解析に反映される。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。



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 (Cray XC50)

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、計算安定性が保証されない計算手法を用いていたため正しい計算結果は得られなかった。これらは「リチャードソンの夢」「リチャードソンの失敗」などと言われる。

その後科学技術も進歩し、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らの信頼を得るには不十分であった。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、気象学や計算科学、数値流体力学等の科学技術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。

気象学等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、時代が変わった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、今後も求められていると言える。



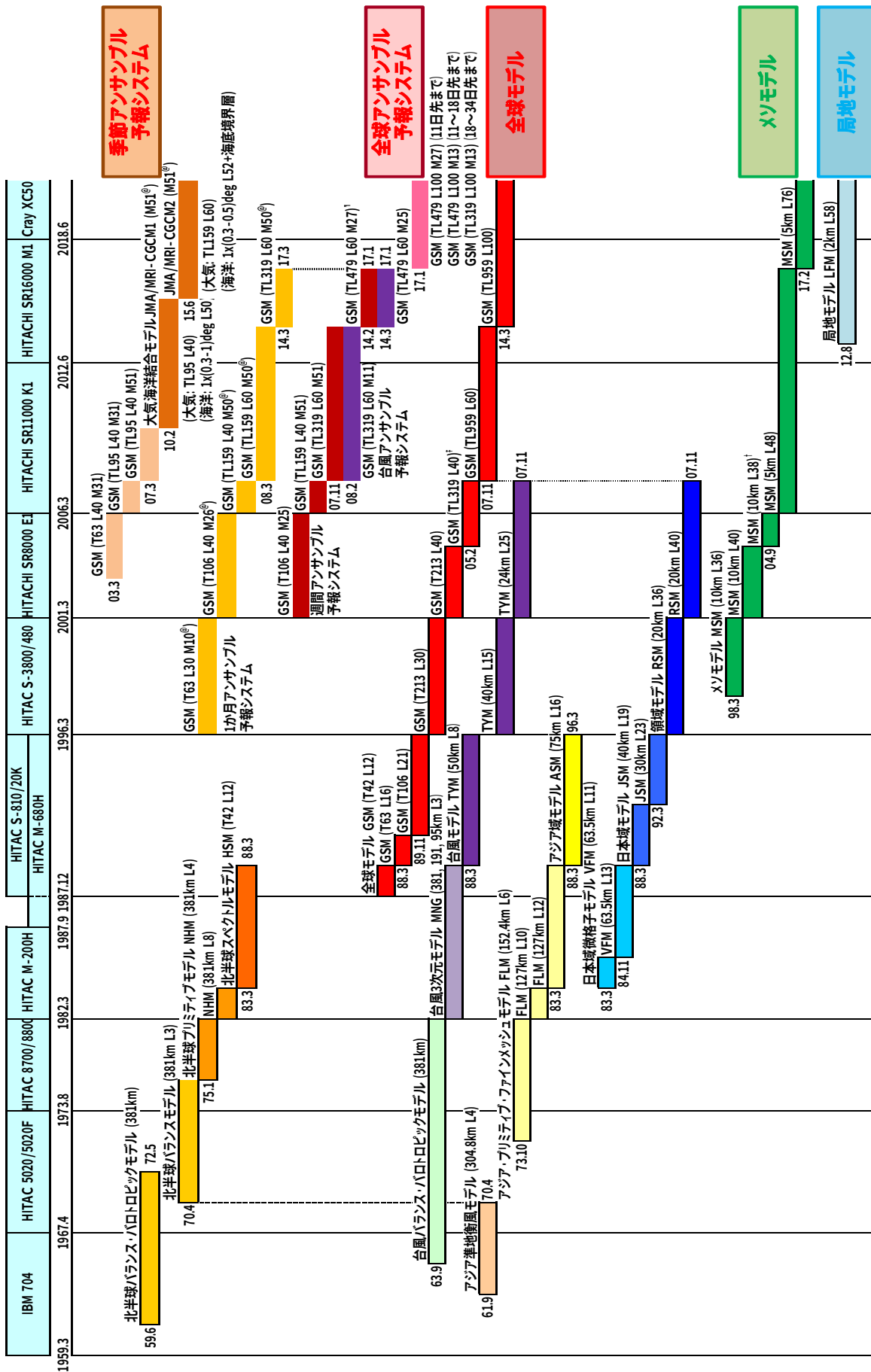
図 1.9.1 気象庁の数値予報で用いられた初代スーパーコンピュータ (IBM704)



図 1.9.2 キーパンチングの様子

参考文献

気象庁予報部, 2012: 数値予報の基礎知識. 平成24年度数値予報研修テキスト, 1-67.



T***: 切断波数 (二次格子) L***: 鉛直層数
 TL***: 切断波数 (一次格子) M***: アンサンブルメンバー数

図 1.9.3 気象庁のスーパーコンピュータと数値予報システムの歴史