

# 1. 天気予報のできるまで

札幌管区気象台 松村 崇行

## 1. はじめに

テレビやラジオ、新聞などでお茶の間に届けられる天気予報は、日々の生活に密着した情報として欠かせないもののひとつでしょう。最近は、民間気象会社が独自に行う天気予報も広まり、携帯電話やインターネットの普及もあって、多彩な気象情報をいつでも気軽に手に入れることができるようになりました。

事業としての気象観測が日本で初めて行われたのは函館で 1872 年（明治 5 年）のこととされています。そして、1884 年（明治 17 年）に全国の天気予報が東京の中央気象台（当時）から毎日発表されるようになりました。それから 120 年あまり、（戦時中一時的に天気予報の公表が中断されたことはありましたが）気象の観測と予測は社会の変化に対応し幾多の変遷を重ねながら弛み無く続けられてきました。

天気の変化には一定の規則性が認められる場合があって、昔は雲の動きや太陽の見え方など空の様子を観察して天気を予測する観天望気が主流でした。その手法の一部は地域の“ことわざ”として受け継がれている場合もあるようです。また、こうした規則性は天気図の上でも見ることができるので、広範囲に行われた観測の成果を集めて描いた実況天気図から熟練した予報官が将来の気圧配置を予想し天気予報を作る時代が長く続きました。

現在は、高性能電子計算機（スーパーコンピューター）を用いた大気の数値シミュレーションが毎日の天気予報を支えています。ここでは、現在の天気予報や防災気象情報がどのように作られているのか、その舞台裏を紹介します。

## 2. 数値予報の原理

天気は大気の運動（風）や状態（気温、気圧、水蒸気量など）と密接に関わっています。大気は物理学で言うところの流体ですから、その運動や状態は流体の物理法則に従って変化しています。流体の運動や状態をきめる物理法則はいくつかの微分方程式で書き表すことができますので、現在の大気の運動と状態を与えてこの連立方程式を解けば未来の大気の運動や状態がわかることになります。このような予測手法を「数値予報」と言います。また、大気の運動や状態を表す微分方程式をコンピューターで解くように書き下したプログラムは「数値予報モデル」と呼ばれています。

自由落下する金属球や微小振動する振り子の運動ならば方程式系も簡単で、これを解くのも容易です。飛んでくる球を捕ったり、蹴ったり、打ち返したりするとき、人は直感的に物理法則を解いて未来の球の位置を予測していることになります。日食や月食など天体運動や、人工衛星、ロケットなどの軌道計算はこれより複雑になりますが、それでも対象となる物体の数が限られているので、長い期間を比較的精度良く予測することができます。数値予報では大気を網の目状の小さな空気の塊に分割し（図1）、そのひとつひとつについて運動や状態がどのように変化するのか計算しますので、その計算量は膨大です。しかも、ある空気塊は隣接

する空気塊や地面などに強く影響されますし、水蒸気が水滴に変化するときの放熱が空気の流れを変えたりします。これらの過程を方程式系に考慮することで計算は極めて複雑なものになります。数値予報モデルには、現実の大気で起こる様々な過程が網羅的に組み込まれています（図2）。あたかも仮想的な地球大気がコンピューターの中で実現されているようなものなのです。

明日の天気を予測するために24時間費やしていれば天気予報にななりません。限られた時間に膨大な計算を処理するため、数値予報にはスーパーコンピューターが必要です。数値予報モデルの振る舞いが現実の大気と似ていれば似ているほど、より精度の高い予測結果が得られるでしょう。コンピューターの計算性能が向上すれば、それだけ精緻な数値予報モデルを用いることができます。現実には、本来の物理法則に何らかの仮定や近似を適用して数値予報モデルをある程度簡略化していますし、網の目状に分割した空気塊の大きさは有限です。現在の最新鋭のコンピューターをもってしても、理想の数値予報を実現するにはまだまだ力不足なのです。

### 3. 気象観測データの収集

数値予報を行うために忘れてならないこと、それは現在の大気の状態をできるだけ正確に把握することです。その第一歩は観測です。大気に国境はないと言われるように、日本の天気を予測するには外国の観測も必要です。世界気象機関（WMO）の公表によると、現在世界には地上気象観測地点が約3900か所、国際観測通報船舶が約6900隻、気球を使った高層観測地点が約900か所あります。また航空機や人工衛星からも気象観測が行われています。気象観測は観測方法や使用する測器の性能、観測時刻から通報形式にいたるまで国際協定で詳しく決められていて、観測後速やかに国際通信回線を通じて交換されています。気象庁にも毎日何十万件もの観測データが入電しています。この他、日本国内には気象レーダー網や地域気象観測システム（アメダス）、ウインドプロファイラー高層風観測網などがあります。

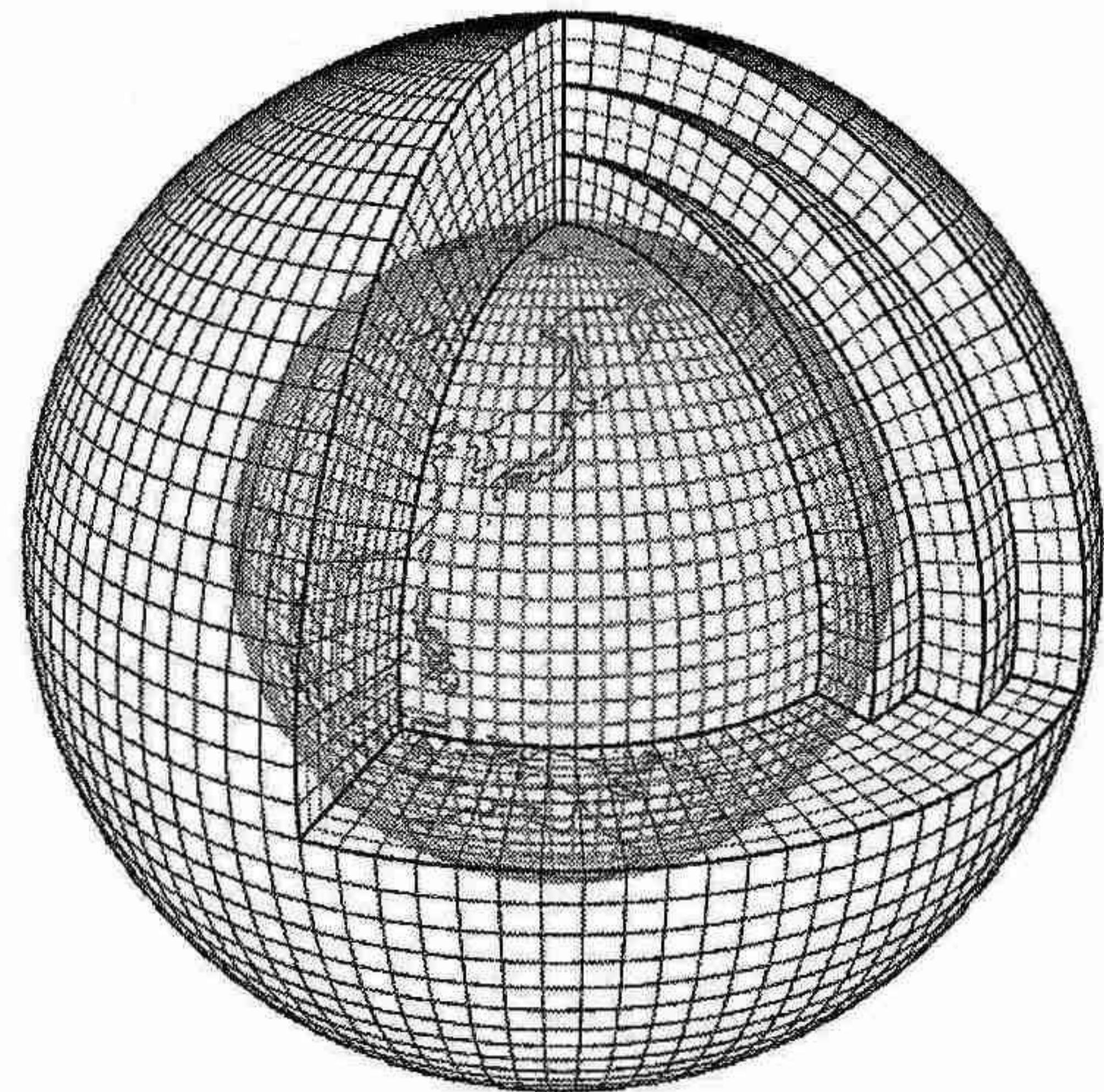


図1 数値予報モデルで使う網の目のイメージ。

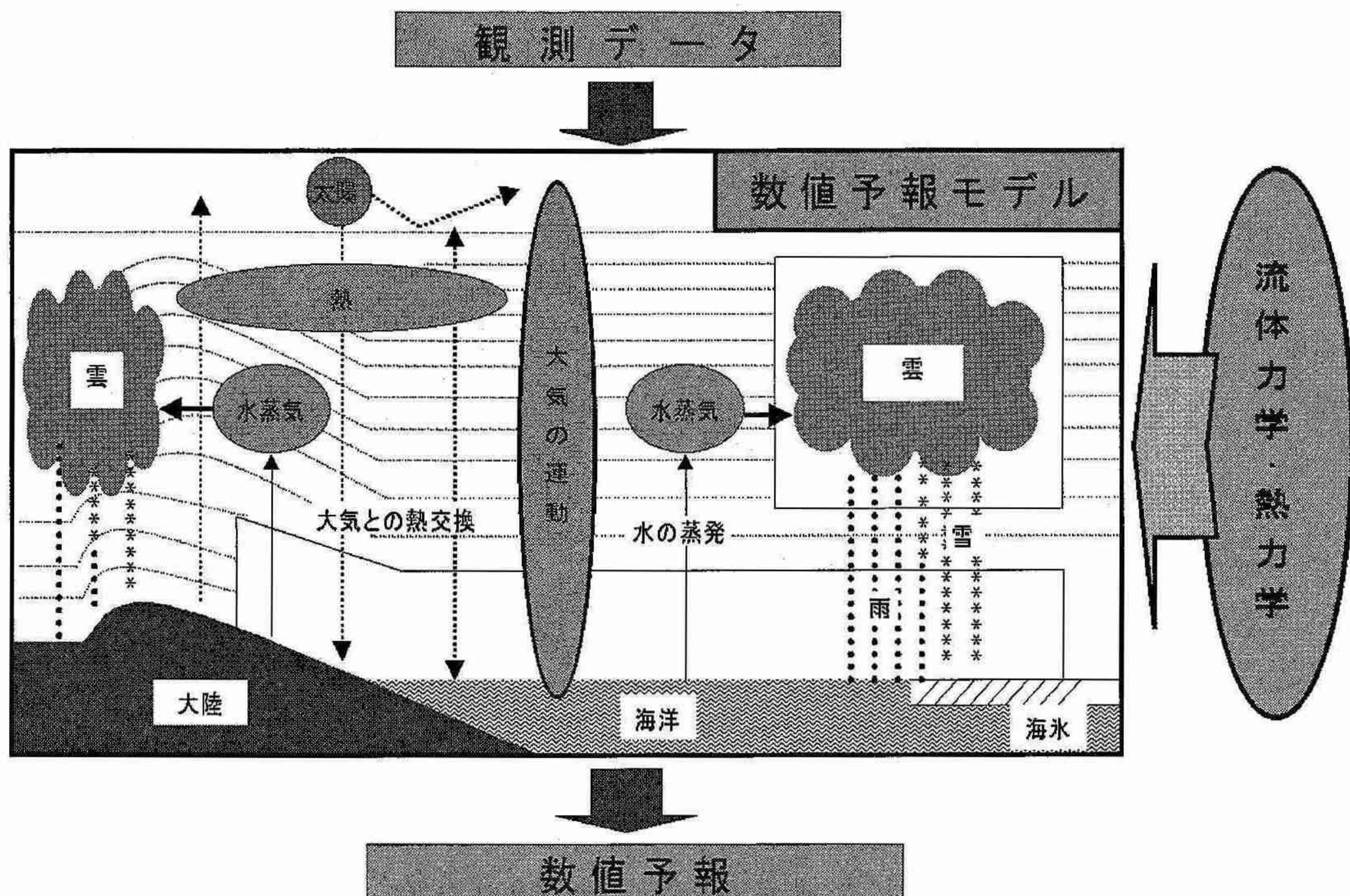


図2 数値予報の概念図

観測データの利用にも工夫が必要です。これだけたくさんの観測データがあっても、数値予報モデルの全ての網の目に不足なく気温、風、気圧、水蒸気量などを与えるには不十分です。地上や高層の観測地点は陸上の人団地に偏っていて、観測データの分布は空間的にも時間的にも著しく不均質です。また、人工衛星によって得られる観測データは、可視光や赤外線、マイクロ波といった電磁波の放射強度ですから、これを気温や水蒸気量などに変換しなければなりません。測器や観測手法によって観測誤差も違いますから、異なる観測データを同時に利用するためには観測誤差の程度に応じて取り扱いを変える必要があります。こうした点に留意しながら、様々な観測データを数値予報モデルに取り込んで、コンピューター上に現在の大気の状態を再現することを「データ同化」といいます。

個々の観測が独立に行われたとしても、風と気温のような要素の間には互いに物理法則に基づく因果関係があります。近隣の他の観測データとの間にも、その地点の過去の観測データとの間にも、やはり物理法則が成り立っています。例えば、一般に上空に行くほど気圧は下がります（静力学平衡）、北半球の低気圧は左巻き渦です（地衡風平衡）。ジェット気流はおおよそ西から東へ吹いています（温度風平衡）、発達中の温帯低気圧が地上にあれば上空の低圧部はその西側です（傾圧不安定理論）。データ同化では、こうした物理法則を拘束条件として利用することで互いに独立な観測データを結びつけ、空間的にも時間的にも一貫した現在の大気の状態を与えます。

#### 4. 気象庁の数値解析予報システム (NAPS)

数値予報等を実施する気象庁のコンピューターシステムは数値解析予報システム (NAPS) とよばれています。初代の大型計算機は 1959 年 (昭和 34 年) に導入されました。今年 (平成 18 年) 3 月に第 8 世代に更新したばかりです。その中核をなすスーパーコンピューターは 3 機構成で、その総合演算性能 (計算速度の合計) は、天気予報用としては世界でも指折りです。

現在、NAPS で常時運用されている主な数値予報モデルは 4 種類あり、用途に応じて使い分けられています (表 1)。全球モデル (GSM) は、その名の通り地球全体を予報対象域としています。網の目は水平方向に約 60km 間隔、高さ方向には地上から高度約 55km までを 40 分割しており、計算する空気塊の数は約 820 万に上ります。最も基盤的な数値予報モデルで、明後日予報や週間予報、台風予報などのために 1 日 4 回予測結果を出力しています。

領域モデル (RSM) は今日と明日の天気予報などのために予報対象領域を東アジアに限定したモデルで、1 日 2 回予測結果を出力しています。網の目は水平方向に約 20km 間隔、高さ方向には地上から高度約 31km までを 40 分割しており、計算する空気塊の数は約 330 万です。

メソ数値予報モデル (MSM) は短時間予報のためのモデルで、予報対象領域を日本付近に限定しています。1 日 8 回予測結果を出力しています。網の目は水平方向に約 5km 間隔で、高さ方向には地上から高度 21.8km までを 50 分割しています。計算する空気塊の数は約 2100 万に達します。

台風モデル (TYM) は台風予報のために必要に応じて最大 2 個の台風を対象に 1 日 4 回予測結果を出力しています。予報対象領域は台風の位置に応じて北西太平洋領域に機動的に設定されます。網の目は水平方向に約 24km 間隔、高さ方向には地上から高度約 28km までを 25 分割しており、計算する空気塊の数は約 180 万です。

モデル名称 (略称)	予報対象領域	水平格子間隔 東西 × 南北格子数	最上層 鉛直層数	予報時間 (初期時刻)	主な用途
全球モデル (GSM)	全球	60km 640 × 320	0.4hPa 40 層	90 時間 (00UTC) 36 時間 (06UTC) 216 時間 (12UTC) 36 時間 (18UTC)	明後日予報、週間 予報、台風進路予 報、国際空域予報
領域モデル (RSM)	東アジア	20km 325 × 257	10hPa 40 層	51 時間 (00, 12UTC)	今日・明日 天気予報
メソ数値予報 モデル (MSM)	日本付近	5km 721 × 577	21.8km 50 層	15 時間 (00, 03, 06, …, 21UTC)	防災気象情報、 降水短時間予報
台風モデル (TYM)	北西太平洋(台 風位置による)	24km 271 × 271	17.5hPa 25 層	84 時間 (00, 06, 12, 18UTC)	台風予報 (進路、強度)

表 1 気象庁の主な数値予報モデル

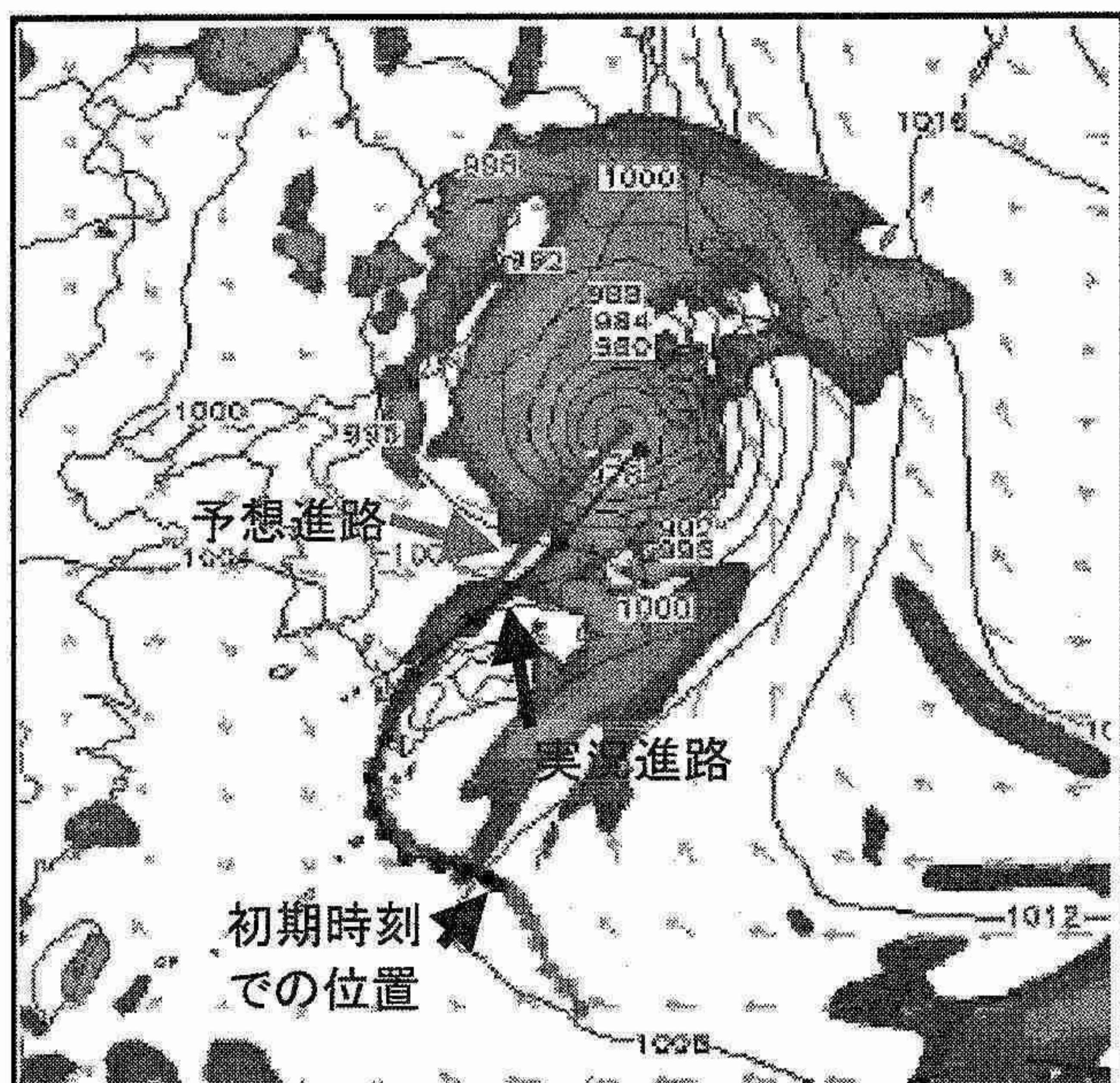


図3 台風モデルによる平成16年第16号台風の進路予想。2004年(平成16年)8月28日00UTCを初期時刻とする72時間後の予想図。等値線は海面更正気圧、塗り潰しは前6時間降水量。濃灰の太線が予想進路、黒太線は実況の進路で、6時間毎に丸印をつけた。淡灰の太線は初期時刻前の実況進路。

数値予報の例として、2004年(平成16年)の台風16号の進路予報を図3に示します。8月28日00UTC(日本時間午前9時)からスタートした72時間予想図です。濃灰線が台風モデルによる予想進路、淡灰線と黒線が実際の進路です。奄美諸島の北で大きく進路を変えていることや、九州上陸後に速度を早めていることが良く予想できています。

来年(平成19年)には、全球モデルの網の目が水平方向に約20kmまで細かくなり、現在の領域モデルや台風モデルに取って代わる計画になっています。

これらの計算結果は(財)気象業務支援センターを通じて気象事業者や一般利用者に届けられています。また、国際通信回線を通じて世界各国の気象機関に配信しています。

## 5. 降水短時間予報、降水ナウキャスト

数値予報は究極の天気予測手段ですが、観測データを収集してデータ同化を行い予測結果が得られるまでにそれ相応の時間が掛かります。たとえば、最も速報性の高いメソ数値予報モデルでも、観測終了から予測結果出力までに2時間あまり掛かります。3時間ごとに更新されますから、最新の予測結果が得られるまでは3時間前に得られた予測結果を使うことができますが、目先の1~2時間は既に実況が経過し予測として使うことができません。このため、数時間先までの予測には、もっと速報性の高い予

名 称	予報要素	発表頻度	予報時間	格子間隔
降水短時間予報	1時間降水量	30分毎	6時間	1km×1km
降水ナウキャスト	10分間降水量	10分毎	1時間	1km×1km

表2 降水短時間予報と降水ナウキャスト

測手法が必要です。

降水短時間予報は、全国（一部離島を除く）を対象に30分ごとに6時間先までの降水分布（1時間降水量）を1km四方で予測します（表2）。降水短時間予報は、複数の気象レーダーが観測した雨量分布を合成し、アメダスや自治体等の雨量計を使って補正したレーダーアメダス解析雨量を使います。レーダーアメダス解析雨量から雨域の移動速度を求め、地形による雨雲の発達や衰弱も考慮しながら、雨量を予測します。これを実況補外予測といいます。降水短時間予報の目先数時間にはこの実況補外予測を使い、後半は直近のメソ数値予報モデルが予測した降水量を組み合わせて6時間先までの予報を行います。降水短時間予報は観測終了から約20分で予測結果が得られます。

さらに速報性を高めた予測手法として、降水ナウキャストがあります。ナウキャスト（now·cast）とは、予報を意味する英語のフォアキャスト（fore·cast）に対して、現在（now）およびごく近い先まで（ここでは1時間以内）の“予報”を指します。降水ナウキャストは、降水短時間予報と同じ領域を対象に10分ごとに1時間先までの降水分布（10分雨量）を1km四方で予測します（表2）。降水ナウキャストの原理は降水短時間予報の実況補外予測と同じですが、速報性を高めるため少し簡略化しています。降水ナウキャストは観測終了から約3分で予測結果が得られます。メソ数値予報、降水短時間予報、降水ナウキャストの予報時間と予報頻度を表す図を図4に示します。

降水短時間予報、降水ナウキャストも（財）気象業務支援センターを通じて部外に配信されています。また、気象庁ホームページでも見ることができます。

## 6. 気象台での予報作成・発表

気象台の予報官は、数値予報や降水短時間予報、降水ナウキャストの予測結果を分布図や地点時系列表などとして手元のコンピューター画面に表示し確認しています。また、気象衛星「ひまわり6号」の雲画像や気象レーダー合成図、ウインドプロファイラー高層風、アメダス、高層観測など様々な実況データもコンピューター画面に表示して監視しています。

数値予報、降水短時間予報、降水ナウキャストは予測の対象となる現象の時間的・空間的スケールに応じて階層的に構成されています。予報官はこれら異なる手法の予測特性や有効期限、更新頻度などを

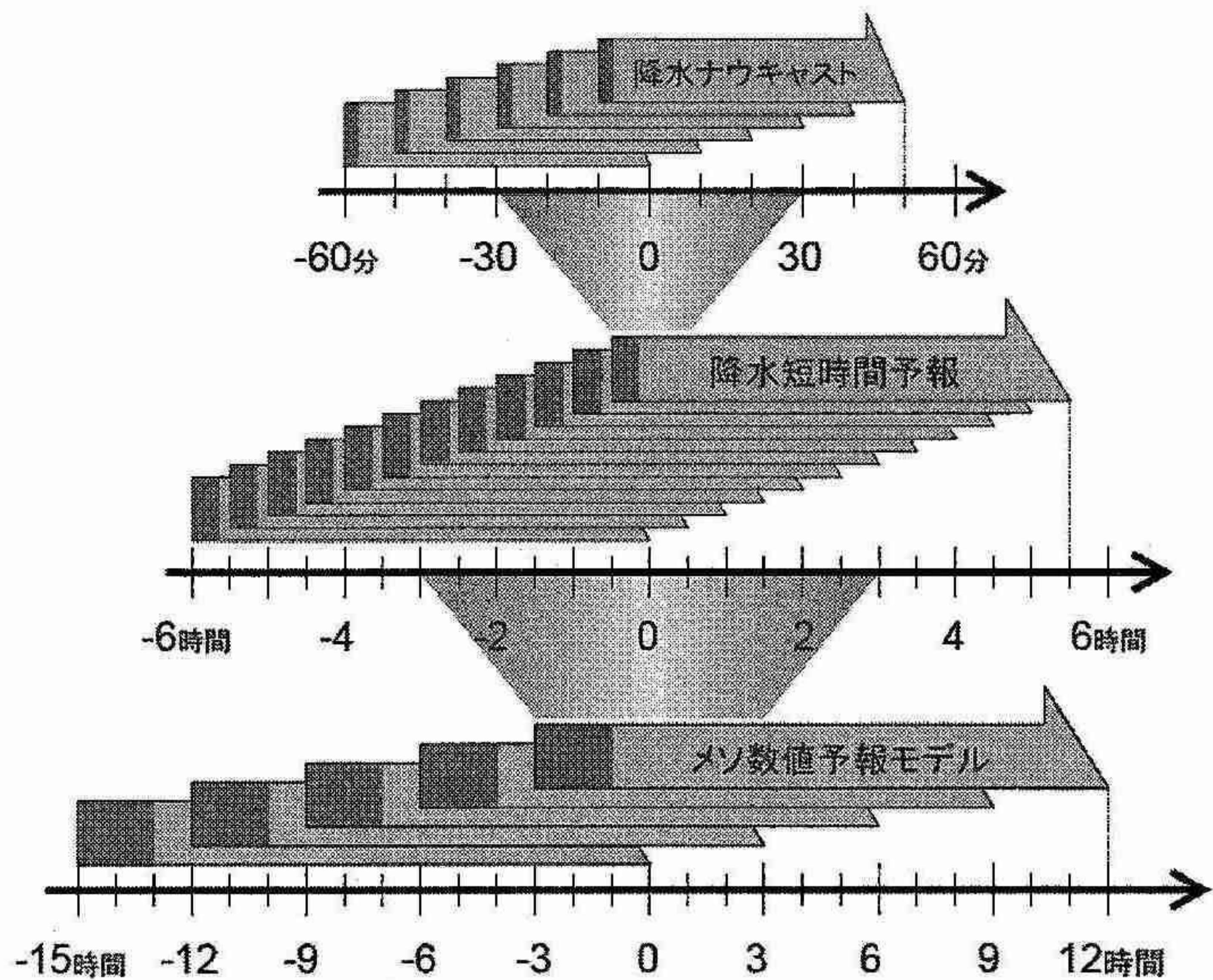


図4 降水ナウキャスト、降水短時間予報、メソ数値予報モデルの予報時間と予報頻度。予報のはじめの濃灰部分は結果出力までに実況が経過し予報に利用できないことを示す。

# 天気予報・防災気象情報のできるまで

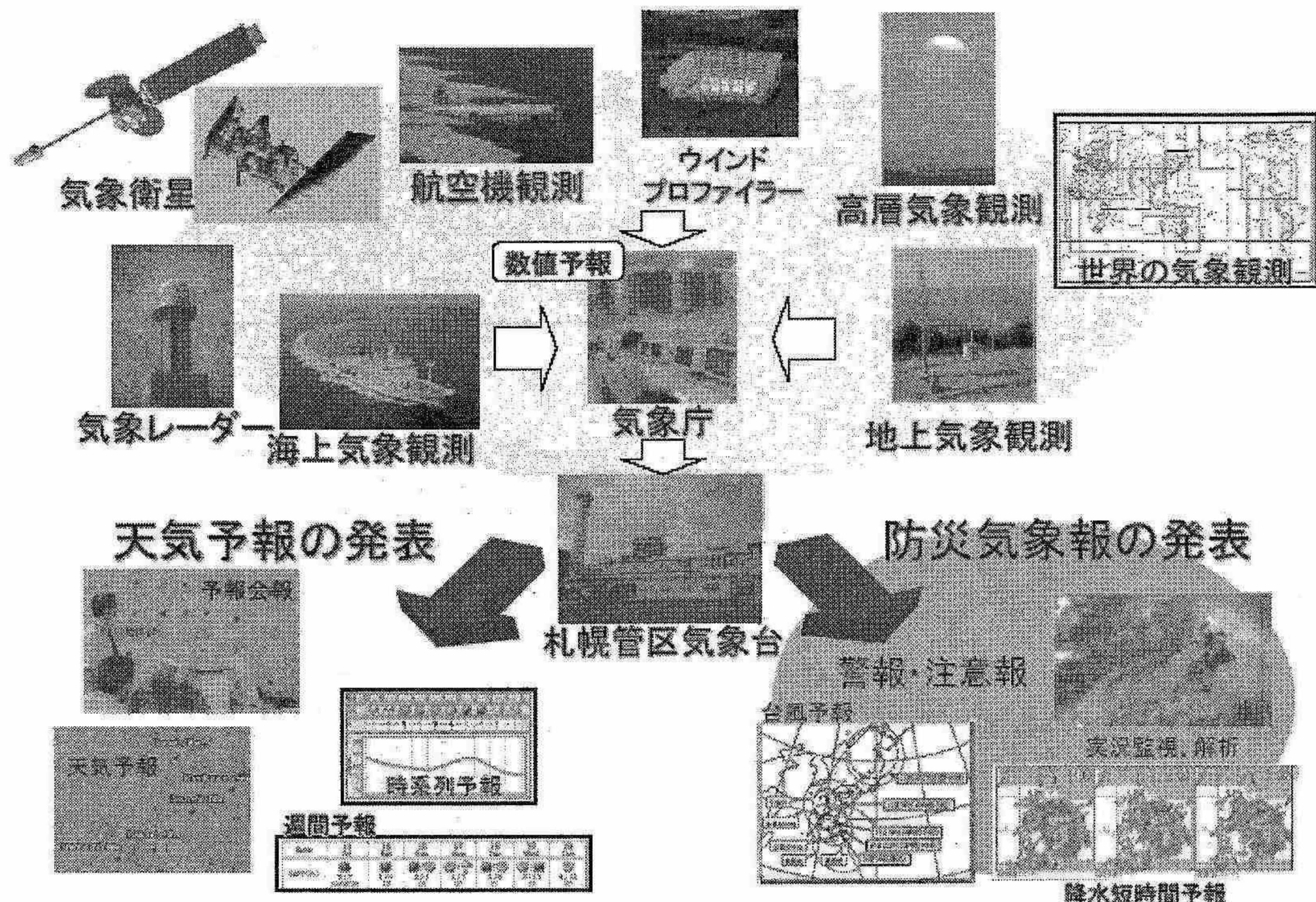


図5 天気予報・防災気象情報のできるまで（概念図）

勘案しながら、今後の天気推移のシナリオを組み立て、天気予報を作成します。定時の天気予報は1日3回、5時、11時、17時に発表しています。また、顕著な現象により気象災害が発生するおそれがあると判断した場合は、警報・注意報など防災気象情報を随時発表して関係機関や地域住民に警戒・注意を呼びかけます。そして、気象実況を常時多角的に監視して、予測シナリオを修正するべき兆しを捉えた場合には、直ちにこれを修正して予報や防災気象情報の発表に反映させます。

天気予報や防災気象情報ができるまでの概念図を図5に示します。

## 7. おわりに

国の機関としての気象庁は、国民の安全と安心のため、前節でも紹介した警報・注意報など防災気象情報の発表を責任を持って行っています。また、条約などで決められた国際的な責任を果たすため、世界に向けて気象情報を発信しています。そして、これらを実施するために備えられた機能を活用して、食糧、水資源、環境など国の重要課題に関わる気象情報や、国民の共有財産としての天気予報などを、民間気象事業者と分担・協力しながら、社会に提供し続けています。これらの業務を適切におこなうため、気象庁は、必要な観測網や監視体制を構築し維持するとともに、予測精度の向上を目指して調査研究・技術開発に日々努めています。