

気象庁数値予報システムの最新動向

Current Status and Future Plans for NWP Systems in JMA

草開 浩*‡

1. はじめに

太陽光発電量予測にとって、適切な日射量予測は必要不可欠である。太陽から地球に入射した放射は大気中を伝達する際に大気を構成する分子や水蒸気、エアロゾル、雲などにより吸収・散乱され、一部が地表面に到達する。そのため、放射伝達をより正確に計算し、適切な地上日射量予測を得るには、精度の高い大気現象の予測が要求される。

気象庁では、数値予報システムを用いて大気現象の予測を行っており、その結果は天気予報や防災情報作成における基礎資料となっている。いわば、数値予報システムは天気予報業務における基盤技術である。2017年5月より、当庁の数値予報システムで計算した地上日射量プロダクトの配信を開始しており、天気予報業務だけでなく、太陽光発電の分野においても、数値予報の高精度化へのニーズが高まっている。

このような背景を踏まえ、本稿では、数値予報技術の概要（第2章）、気象庁における数値予報システムの現状（第3章）と今後の計画（第4章）について最新状況を紹介する。なお、数値予報技術および当庁の数値予報システムに関するより詳細な内容は気象庁予報部（2018）を参照していただきたい。

2. 数値予報の概要

2.1 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。

数値予報の仕組みを簡単に捉えるために、投げたボールの軌跡を予測することを例に挙げる。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

の位置を計算によって求めることができ、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、「現在の速度や位置が分かる」は現在の大気の状態（気温や風速）が分かることに対応し、「ボールに加わる力が分かる」は大気現象を支配する物理法則が分かることに対応する。これを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。数値予報を行うための計算プログラム群を「数値予報モデル」、または単に「モデル」と呼ぶ。

気象庁の全球モデルは水平格子間隔が約20 km、鉛直方向に100層を配置しており、格子数は全体で約1億3000万となる。また、水平格子間隔約5 km鉛直76層のメソモデルの格子数は約4100万、水平格子間隔約2 km鉛直58層の局地モデルの格子数は約1億2000万にも及ぶ。この全ての格子点に風や気温、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。実際の前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にデータを処理する必要があり、現業の数値予報の実行には超並列計算機である「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（第4.1節）は第10世代目のもので、その理論最大

* 気象庁予報部数値予報課（〒100-8122 東京都千代田区大手町1-3-4）

‡ e-mail : hiro.kusabiraki@met.kishou.go.jp

性能は 18,166 TFLOPS (1 TFLOPS 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おり、数値予報とコンピュータ技術とは密接な関係にある。

2.2 数値予報の流れ

数値予報のおおまかな流れを図 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」(第 2.3 節) 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」(第 2.4 節) という。特に短期予報や週間天気予報では、初期値の推定精度がその後の予測精度に大きな影響を及ぼすため、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、大気の状態を表す各種物理量の予測値を算出する(第 2.5 節、第 2.6 節)。

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(第 2.7 節)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の変換や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。

2.3 観測データと品質管理

数値予報を行うには、まず現実の大気状態を正しく捉えることが重要であり、それを実現するために、各種(気象)観測データが必要となる(図 2)。現在の数値予報では、世界各国の気象機関や宇宙機関(衛星運用機関)などの様々な機関から観測データをリアルタイムで取得し、各種品質管理によって誤データを排除・補正した上で、データ同化に活用している。

観測は大きく分けて直接観測、リモートセンシング(遠隔観測)、疑似観測に分類できる。リモートセンシングには、地上に設置された測器による地上リモートセンシングと人工衛星搭載の測器による衛星リモートセンシングがある。衛星リモートセンシングに用いられる衛星は、静止軌道衛星と低軌道衛星とに大きく分けられる。このうち低軌道衛星には、気象機関などが運用する現業衛星のほか、研究機関や宇宙機関が運用する地球観測衛星や GNSS(Global Navigation Satellite System) 掩蔽衛星がある。疑似観測は、実際の観測で得られたものでない情報をデータ同化で利用するために人工的に作成される、観測を模したものである。

2.4 データ同化

数値予報モデルを実行するためには、初めに 3 次元空間のすべての格子点で、初期時刻の気温、風、水蒸気量などの大気の状態(初期値という)を与える必要がある。不規則に分布した観測データから、

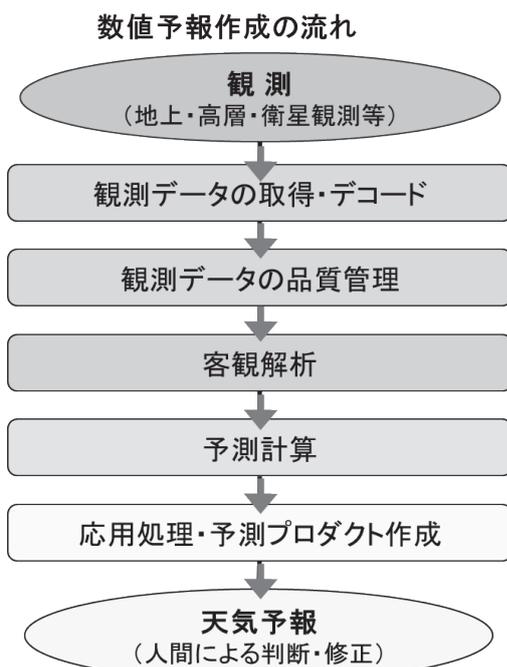


図 1 数値予報の流れ

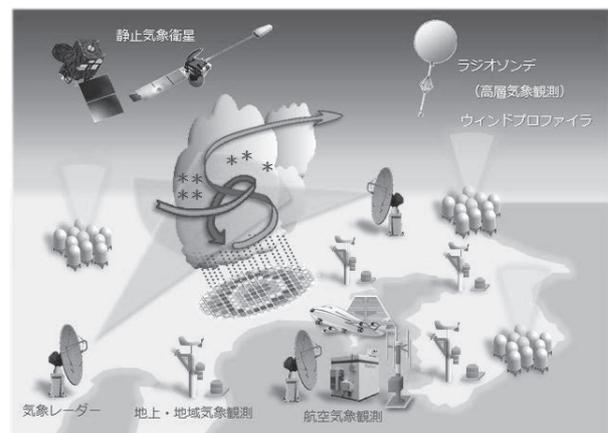


図 2 数値予報で利用する気象観測のイメージ

事前に定めた規則に従い、すべての格子点での大気の状態を求める過程を客観解析と言い、得られた状態を解析値という。

気象観測は、様々な場所や時刻で行われているが、現在の数値予報モデルの格子点数と比較すれば数は少なく、観測データの分布も不均一であるため、観測データだけから数値予報モデルに適した初期値が得られるわけではない。この欠点を補うために、直近の数値予報モデルによる予測値を基に観測データで修正し、もっともらしい解析値を求める。ここで、基となる予測値を「第一推定値」と言う。この解析値を求めるプロセスを「データ同化」と呼ぶ。

データ同化では、観測値を単純に解析値とするのではなく、観測値と第一推定値の双方に重みをつけて内挿して解析値を求めることになる。解析値が観測値側に寄るかそれとも第一推定値側に寄るかは、データ同化を実行する際にそれぞれの値の持つ誤差の統計的性質として与えられる「観測誤差」と「背景誤差」（第一推定値の誤差）の設定によって決まることになる。観測誤差が背景誤差より小さい場合は解析値が観測データ側に寄り、逆に観測誤差が大きい場合は解析値が第一推定値側に寄ることになる。

データ同化手法、つまり初期値の精度が数値予報精度に与える影響が大きいことが、とりわけ短期予報・週間天気予報の範囲では強く認識されている。このため、各国の気象機関において、より精度の良い解析値を得るための高度化への取組みが進められてきた。気象庁では、変分法と呼ばれるデータ同化手法を用いている。変分法では、観測で得られる物理量が、風、気温、水蒸気量といった数値予報モデルが必要とする物理量と一致しない場合にも、観測値を直接同化することが可能となる。先進的なリモートセンシング技術を応用した観測により、膨大な量の情報が取得可能となり、この観測を数値予報において活用することは極めて重要である。変分法によるデータ同化システムは、リモートセンシングによる観測をはじめとする多様な観測を利用する基盤となっている。

2.5 予測計算（数値予報モデル）

数値予報モデルは、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き、未来の値を計算する。この物理法則は、複雑な方程式の集まりであり、解析的に答えを求めることができない。そこで、様々な近似により方程式を簡素化した上で、時間・空間方向においてとびとびの値で表現し（離散化）、初

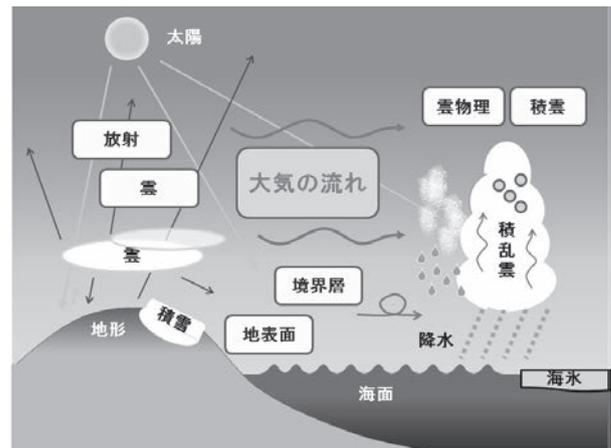


図3 数値予報モデルで考慮される過程

期状態を与え、コンピュータで時間積分の計算を行うことで解くことが可能になる。数値予報モデルは、数値予報全体の流れの中で中心的な役割を果たしており、大気の状態をできるだけ忠実に表現する能力を持つことが望ましい。

数値予報モデルにおいて、考慮されている過程を図3に示す。地球大気中には、大規模な擾乱からメソスケール擾乱、さらに小さな乱流などの様々な時間・空間スケールの現象が存在する。これらを正確に予測するため、数値予報モデルでは、大気の流れを基本として、積乱雲の発生発達、雲と放射の相互作用、境界層の大気の乱れに伴う運動量・熱・水蒸気の輸送など、非常に複雑な過程を取り扱っている。一方、音波などのスケールの小さい波動は、天気予報が対象とする大気現象に影響を与えることはほとんどなく、数値予報モデルでは必ずしもすべてが正確に解かれているわけではない。なお数値予報モデルが対象とする気象、大気科学の基礎的知識については、小倉（2016）や、日本気象学会（1998）などを参考にしていきたい。

数値予報モデルで用いられる物理法則の基礎方程式は以下のとおりである。

- ・運動方程式
- ・連続の式（質量保存の式）
- ・熱力学方程式
- ・水蒸気の方程式（水蒸気保存の式）
- ・気体の状態方程式

これらの方程式を数値的に解くことにより、運動方程式であれば風の時間変化、熱力学方程式であれば気温の時間変化を求めることができる。そのほかに

も、モデルが取り扱う過程に応じた方程式がこれに加わる（例えば、地中熱伝導方程式による地面温度の予測、など）。

以下では、現在の数値予報モデルで考慮されている様々な過程のうち、地上日射量と関係が深いものについて説明する。

2.5.1 放射過程

大気中には可視光・赤外線を中心にしたいろいろな波長の電磁波が飛んでいる。この伝播とそれによるエネルギーの吸収・放出を表現し、それによる気温変化を見積もるのが放射過程である（長澤 2012）。放射過程は、大きく短波放射と長波放射に分けて計算される。大気は太陽からの短波放射によって加熱され、大気自ら長波放射を出して冷却されている。大気中に雲があることで太陽からの日射を反射・吸収し地面に到達する放射量を減少させるとともに、雲から長波放射が周囲に出ることにより周囲の温度分布に影響を与える。放射過程は、地上気温の予測精度や雲の生成・消滅にも直接影響するとともに、大気の熱収支全体をコントロールする非常に重要なプロセスでもあり、長期間の予測精度にも重要な過程である。

2.5.2 放射過程における雲の扱い

晴天時の放射伝達については理論的な理解が進んでおり、放射による加熱・冷却率の推定精度は高いが、雲がある場合の放射の計算はかなり複雑になる。その理由は、それぞれの格子における雲をどのように決めるのか、雲が放射に与える効果をどのように考えるか、鉛直方向に雲がどのように重なっていると考えられるか、などの問題を解決する手段が一意に決まらないためである。この雲が放射に与える効果については、雲の不透明度に相当する「光学的な厚さ」を便宜上計算し、これを放射で利用することが行われている。また、雲の重なり方（「オーバーラップ」と呼ぶ）については、無相関に重なっている「ランダムオーバーラップ」、必ず最大限に重なっている「マキシマムオーバーラップ」、および隣り合う層は重なっていて他はランダムという両者の組み合わせの「マキシマムランダムオーバーラップ」がよく用いられる。ランダムオーバーラップは計算コストが低い鉛直層数に依存する（層数が多くなれば全雲量が大きくなる）という欠点がある一方、マキシマムオーバーラップは下層雲と上層雲がお互いに全く関係なくても常に重なり合っている事になり、あまり現実的でない。

2.5.3 雲・雲物理過程

大気中の水は気体・液体・固体の状態が存在し、晴れ、曇、雨、雪など天気予報とも密接に関係している。数値予報モデルにおいても適切に取り扱う必要がある。

雲の大きさは様々であり、数個の格子に渡る広がりを持つほどに発達した積乱雲や水平方向に広がった層雲が発生することもあり得るが、現在の数値予報モデルで設定される格子間隔では、それよりも小さい雲の方が多い。したがって、格子平均の物理量により直接雲の存在をすべて表すことはできない。しかし雲は大気において放射量に影響を及ぼす重要な要素であり、また雲は其中で降水粒子が生成、落下することにより地上に降水をもたらすものであるため、天気予報の精度にとっては非常に重要である。そのため、格子の中に部分的に雲が存在している状態「部分雲」を考える必要がある。部分雲の過程では、モデル格子内の雲量と水蒸気や雲水など水物質の分布や部分的な凝結を考慮することになる。多くの数値予報モデルでは、水蒸気や総水量から診断的に雲量を求める方法や、様々な過程によって雲量が増える効果をパラメタライズ（格子点の情報をを用いて格子以下のスケールの現象を近似的に表現すること）して雲量自体を予報する方法が採用されている（中川 2012）。気象庁の数値予報モデルでは前者の方法により、部分雲を診断計算している。

また、気象庁の領域モデル（メソモデル・局地モデル）では、雲の発達・衰弱の様子をより正確に表現するために、水の状態をいくつかのカテゴリー（雲水、雲氷、降水、雪、霰など）に分類し、相変化や衝突・拡散成長などのようなカテゴリー間の相互作用を考慮することによって、カテゴリー毎の量を予測する雲物理過程を導入している（原 2012）。

2.6 アンサンブル予報

数値予報の目指すところは天気予報を客観的に行うところにあり、大気の状態の把握と予測を高い精度で行うことに重点をおいた技術開発が進められてきた。その結果、現在の数値予報の精度は予報業務にはなくてはならない水準にまで達している。一方で、大気を持つカオスの性質「初期値鋭敏性」により、初期値の誤差が時間積分を進めるにつれ急速に増幅し、数値予報の精度を左右するまでに発達するため、将来予測の不確実性が消えることはない。そのため、これまでの数値予報結果に加えて、その「確からしさ」という情報も必要となる。この情報を得るために、気象庁では数値予報モデルの初期値など

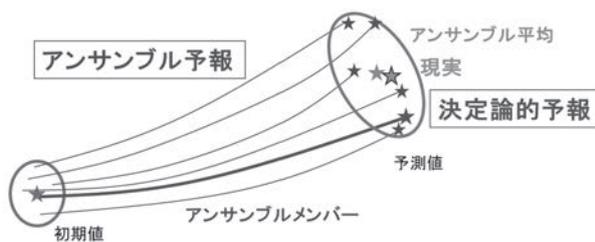


図4 決定論的予報とアンサンブル予報

に小さな摂動を加えて作成した複数の数値予報の集団（アンサンブル）から大気の状態を確率的に把握する手法（アンサンブル予報）も採用している（経田 2016）。図4に決定論的予報とアンサンブル予報の違いを示した。ここで、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」と呼び、その初期値にわずかな揺らぎを与えて複数の予測を行うのがアンサンブル予報である（それぞれの予測を「アンサンブルメンバー」と呼ぶ）。

アンサンブル予報では、膨大な計算結果が一度に得られる。予測結果を一つ一つ確認していくことは、限られた時間内に行わなければならない予報業務などにおいては困難である。このため、アンサンブル予報の結果を統計的に処理することで、効率的に計算結果を把握して、効果的に利用することが可能となる。

2.7 応用処理・ガイダンス

数値予報モデルの実行結果は未来の気象状況を予測した、気温、風、湿度、気圧などの数値データの集まりである。この数値データは、そのままでは予報官や一般のユーザーが扱いにくいいため、ユーザーが使い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んでいる。さらに、この

応用処理によって作成される製品を応用プロダクトと呼んでいる。

応用処理の主な目的は、数値予報の結果である数値データをユーザーが利用しやすい形式に加工することである。加工された製品は直接、図形式で提供される資料と、ユーザー側で可視化等の処理を行う目的で提供される格子点値やXML形式などの数値データに分かれる。

図形式の資料としてはFAX図やWeb等で表示が容易な画像ファイルによるもので、ユーザーが気象状況を視覚的に捉えやすく、また特別な処理をすること無く利用できるという利点があり、従来から広く用いられてきた。

図形式以外の応用処理プロダクトについて、予報作業に適した要素への変換や統計的な修正を施したものを「ガイダンス」と呼ぶ。ガイダンスは、天気予報や防災情報で使われる天気、最高・最低気温、降水確率、降水量、最大風速などを直接予測する資料であり、予報作業や注意報・警報の発表作業、飛行場予報の基礎資料として利用している。

3. 気象庁の数値予報システム

ここまでは、近年の数値予報モデルで利用されている技術について一般的に述べてきた。ここでは気象庁で現業的に実行されている数値予報モデルについて、その目的と仕様を述べる。気象庁の主な数値予報モデルの仕様は表1に、メソモデルと局地モデルの予報領域を図5に示す。

3.1 全球モデル

全球モデル（GSM）は、地球全体を予報領域とした数値予報モデルであり、短期予報、週間天気予報、台風予報を支援している。全球モデルの予測値

表1 気象庁の現業数値予報システムの仕様
(* GEPSの06, 18UTC初期時刻は1日2回を最大として、台風等が存在する場合に実行される)

数値予報システム (略称)	水平 分解能	鉛直層数 (最上層)	予報期間 (初期値の時刻 または実行頻度)	初期値	主な利用目的
局地モデル(LFM)	2km	58層 (約20km)	10時間(毎時)	局地 解析	航空気象情報、防災気象情報、 降水短時間予報
メソモデル(MSM)	5km	76層 (約22km)	39時間(03,06,09, 15,18,21UTC, 毎日) 51時間(00,12UTC, 毎日)	メソ 解析	防災気象情報、降水短時間予報、 航空気象情報、LFMの側面境界 条件
全球モデル(GSM)	約20km	100層 (0.01hPa)	132時間(00,06,18UTC, 毎日) 264時間(12UTC, 毎日)	全球 解析	天気予報・週間天気予報、台風の 進路・強度予報、MSMの側面 境界条件
全球アンサンブル予 報システム(GEPS)	約40km	100層 (0.01hPa)	5.5日間、27メンバー (06,18UTC*) 11日間、27メンバー(00,12UTC, 毎日)	全球 解析	台風の進路予報、週間天気予報、 異常天候早期警戒情報

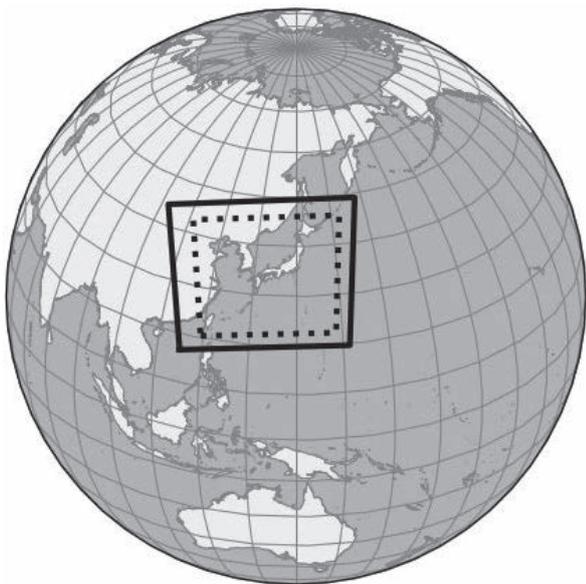


図5 メソモデル（実線）および局地モデル（点線）の予報領域

はメソモデルの側面境界値に利用されるほか、波浪モデルへの入力としても利用される。また、アンサンブル予報モデルや季節予報モデルにも、解像度や一部の仕様は異なるものの、基本的には同じ技術が使われている。

全球モデルは、1988年に静力学平衡の仮定をした静力学方程式系を基礎方程式として、スペクトル法を採用して実用化され、その後高解像度化と力学過程・物理過程の改良を重ねて、2007年11月から水平分解能約20 km（北川2006；岩村2008）、2014年3月からは鉛直100層（米原2014）でモデルの運用を行なっている。台風予報については従来の台風進路予報のほか、分解能と精度が高まったことで台風強度のガイダンス作成に利用されることが計画されている。

3.2 メソモデル

メソモデル（MSM）は防災気象情報、航空気象情報の作成を支援することを主な目的に、水平分解能5 km、鉛直76層で運用を行なっている数値予報モデルである（予測結果の例を図6に示す）。非静力学方程式系を基礎方程式とし、空間離散化には有限体積法を用いている。

2001年3月に水平分解能10 kmのモデル（当時は静力学平衡を仮定し、かつスペクトルモデル）として本運用を開始した（萬納寺2000）。2004年9月に非静力学モデルを導入し、2006年3月に水平分解能5 kmに高解像度化した。さらに、2013年3月に領域を拡張し（越智・石井2013）、2017年2月に

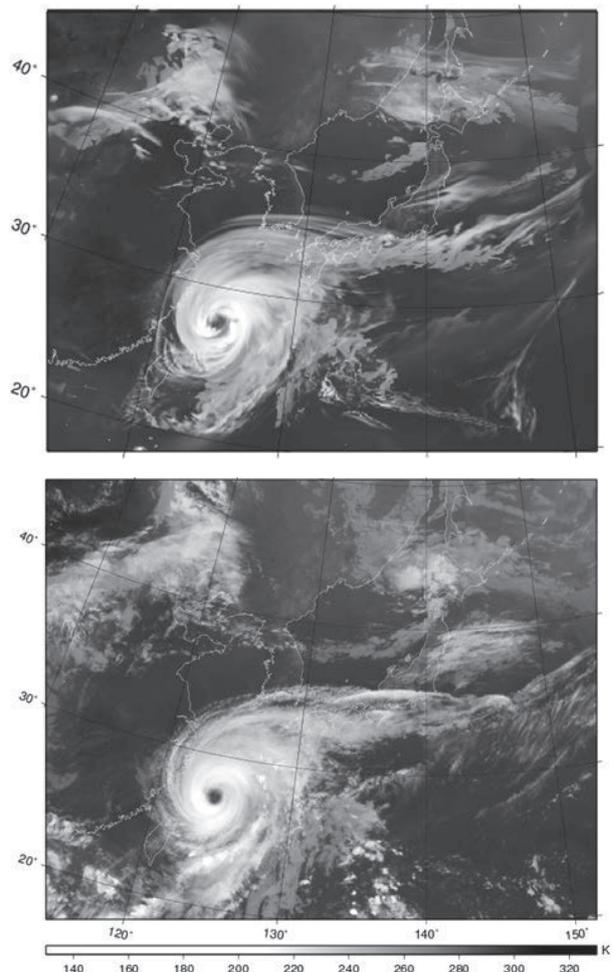


図6 数値予報モデルによる予測の例（2017年9月14日18時の赤外画像）（上）メソモデルによる24時間予報結果、（下）ひまわり8号による衛星観測画像

は鉛直解像度を増強するとともに力学過程・物理過程を刷新した新しい非静力学モデル asuca（気象庁予報部2014）に移行して、現在に至っている（原2017）。全球モデルと比較して詳細な雲物理過程が組み込まれ、境界層過程も高度化されているのが大きな特徴である。メソスケールの現象を精度よく予測し、ある程度の水平スケールをもつ大雨を表現できるなど、全球モデルにはない特徴を持つ。

3.3 局地モデル

局地モデル（LFM）は、航空気象情報、防災気象情報の作成支援を目的とする、水平2 kmメッシュ鉛直58層の数値予報モデルである。2012年8月に東日本領域で1日8回の運用を開始し（永戸ほか2012）、その後、2013年5月の仕様拡張で、日本を覆う領域での1日24回の運用に移行して（永戸ほか2013）現在に至っている。2015年1月には、メソモデルに先がけて、新しい非静力学モデル asuca の導入を行っている（原ほか2015）。

水平分解能が細かいことにより、発達した積乱雲を直接表現することが可能となっており、集中豪雨や突風など局地的な激しい現象を主な予測対象としている。

3.4 全球アンサンブル予報システム

全球モデルの予測不確実性に関する資料を提供し、確率情報・信頼度情報の作成作業を支援するために、全球アンサンブル予報システム (GEPS) を運用している。全球アンサンブル予報システムは、週間天気予報のために用いられていた週間アンサンブル予報システム (山口 2011) と、台風進路予報の支援のために運用されていた台風アンサンブル予報システム (太田・佐藤 2010)、1 か月予報、異常天候早期警戒情報を支援するための 1 か月アンサンブル予報システム (平井ほか 2015) を統合するシステムとして開発されたもので、2017 年 1 月から週間天気予報と台風進路予報の支援のために運用を開始した (山口 2017)。

予報モデルは全球モデルの低解像度版の水平約 40 km メッシュ鉛直 100 層のモデルである。予報モデルの不確実性を考慮するために、2010 年 12 月に週間アンサンブル予報システムに導入された確率的物理過程強制法 (米原 2010) を用いており、下部境界条件の不確実性を考慮するために海面水温摂動 (太田・堀田 2016a) を導入した。初期摂動には、LETKF (太田・堀田 2016b) と SV (酒井 2008) を組み合わせて作成する手法を用いている。

3.5 数値予報の限界と予測可能性

数値予報は初期値を適切な境界条件のもと、数値予報モデルを用いて時間積分することにより、予測計算が行われる。気象庁では 1959 年に官公庁としてはじめてスーパーコンピュータを導入し数値予報を行ってきた。新たな観測データの利用や数値予報モデルの改良などの継続的な技術開発およびそれを支えるスーパーコンピュータの性能向上により、予測精度は日々着実に向上している。しかし、数値予報には様々な誤差要因があり (石田 2017)、それが数値予報の不確実性をもたらす。

一つには初期値の不確実性がある。近年、初期値の精度が数値予報精度に与える影響が大きいことが、とりわけ短期予報・週間天気予報の範囲では強く認識されるようになってきている。客観解析は、各種観測データの充実と、データ同化手法の高度化 (変分法同化手法の採用)、観測データの予報変数への変換過程の排除 (直接同化) などを通して、観測データの数と分布、データのより効果的な利用の両面で

大きく改善されてきており、特に衛星データ利用の効果は大きい。しかし、依然として利用できる観測データの分布には時間的にも空間的にも偏りがあり、特に海上を進む擾乱の予測は不確実性が大きい。

数値予報モデルの不完全性も数値予報に不確実性をもたらす要因の一つである。数値予報モデルでは方程式系を計算機で数値的に解くために離散化を行うため必ず誤差が生じる。この誤差を小さくするためには離散間隔をより細かくして計算を行う必要があるが、そのためには膨大な計算機資源が必要となる。また、数値予報モデルでは格子より小さいスケールの効果を格子平均値で計算するためにその効果のモデル化を行っている。このとき、格子平均値といった限られた情報のみを用いて格子より小さいスケールの効果を記述する必要があるため、原理的な制約がある。そのほか、過程によっては解くべき方程式すら分かっていない、あるいは、解くべき方程式が分かっているにもかかわらず、膨大な計算が必要なため、極めて簡略化した近似式を用いざるをえないという問題もある。

3.6 地上日射量予測の現状と課題

地上日射量予測に関連の深い放射過程について言えば、晴天時の放射伝達については科学的理解が進んでおり、解くべき方程式 (放射伝達方程式) も分かっている。しかし、すべての吸収線一本一本に対して行うと計算量が膨大になるため、現業モデルとしては非現実的である。そのため、現業モデルではいくつかの周波数帯に分けて分布関数を仮定した上で計算を行っている。また、放射計算を空間・時間方向に間引くことで計算負荷を軽くする工夫も行っている。また、雲の予測は地上日射量に大きな影響を与える。第 2.5.2 項、第 2.5.3 項で説明したとおり、気象庁の数値予報モデルでは格子スケール以下の雲量を考慮に入れた放射伝達計算を行っているが、雲の生成・消滅や雲内の微物理過程には科学的に未解明なところが多くあり、モデル化も不確実性が高い。

これまでの調査の結果、気象庁数値予報モデルが予測した地上日射量には日本域において系統誤差があることが分かっている。特に、地上日射量観測と比較した場合、全球モデルの予測は過大傾向、逆にメソ・局地モデルのそれは過小傾向である。晴天放射過程についてはこれらのモデルで共通であることから、誤差特性の違いは雲の表現がモデル間で異なることに起因していると考えられる。メソモデルについて、Ohtake et al. (2015) では、各雲形の出現頻度と日射量誤差の関係を調べ、巻雲が多いときに

誤差が大きくなる傾向があることを示した。2017年にモデルが更新された後も同様の傾向が見られることが分かっており、今後は原因の調査と、見つかった問題点への対応策検討を行う方針である。

4. 数値予報技術開発体制の最新動向

4.1 新しいスーパーコンピュータシステム

気象庁は2018年6月5日に新しいスーパーコンピュータの運用を開始した。1959年に気象庁が初めて導入した科学計算用の大型コンピュータから数えて第10世代目となる。新しいスーパーコンピュータはCrayXC50（米Cray製）であり、2012年に導入された日立SR16000/M1（日立製作所製）と比べて実効性能で約10倍の処理能力をもつ。今後、このスーパーコンピュータを用いて、台風の影響や集中豪雨の発生可能性をより早い段階から精度良く把握するための防災情報の改善や、日常生活・社会経済活動の様々な場面で幅広く利活用される各種気象情報の更なる改善に取り組む。第10世代スーパーコンピュータシステムで運用する現業数値予報システムを含めて、以降では第10世代数値解析予報システム（NAPS10）と呼ぶこととする。

4.2 数値予報システムの改良計画

以下では、NAPS10運用期間中に予定している数値予報システムの改良計画について、仕様変更を中心に記載する。なお、数値予報予測精度の向上には、仕様向上だけでなく、数値予報モデルやデータ同化手法の改良、新規データ利用などの開発が非常に重要であり、仕様変更と合わせてこれらの改良に取り組んでいく。

全球数値予報システムについて、台風強度予報の予報期間を5日先まで延長するために、NAPS10の運用開始後の2018年6月26日に、初期時刻00, 06, 18UTCの全球モデルの予報時間を84時間から132時間へ延長した。更にNAPS10運用期間中には、初期時刻00UTCの全球モデルの予報時間を264時間まで延長する計画である。同期間中には、全球モデルの鉛直層数を現在の100層から128層へと増強し、その後水平格子間隔を現在の20 kmから概ね13 kmへと高分解能化することも計画している。

全球アンサンブル予報システムについては全球モデルと同じタイミングで鉛直層を現在の100層から128層に増強し、メンバー数を27メンバーから51メンバーに増やす計画である。その後、水平格子間隔を現在の40 kmから27 kmへ高解像度化する計画である。

メソ数値予報システムについて、2019年3月より、初期時刻00, 12UTCのメソモデルの予報時間を39時間から51時間へと延長した。メソモデルの水平解像度はNAPS10運用期間中には変更する計画はないが、鉛直層については、将来、現在の76層から96層へと増強する計画である。

局地予報システムについて、2018年度末までに、全初期時刻の局地モデルの予報時間を9時間から10時間へと延長する計画である。局地モデルの水平解像度はNAPS10運用期間中には変更する計画はないが、鉛直層については、将来、現在の58層から76層へと増強する計画である。

新しい数値予報システムとして、メソアンサンブル予報システム（MEPS）の運用開始を予定している。本システムはメソモデルの予測に対して信頼度や不確実性等の情報を付加することを目的としており、例えば大雨や暴風など災害をもたらす激しい気象現象が発生する可能性について、一つのメソモデルの予測結果のみでは把握が難しい場合でも、複数の予測結果を用いることによって、早い段階で把握することができるようになることを期待している。予定しているシステムの仕様について、水平分解能はメソモデルと同じ5 km、鉛直層数は76層で、実行頻度は1日4回（00, 06, 12, 18UTC初期値）、メンバー数は21メンバーである。NAPS10運用開始から約1年後となる2019年6月頃には正式運用を開始する計画である。また、将来はメソモデルの改良計画に合わせて、鉛直層を76層から96層へ増強する計画である。

4.3 2030年に向けた数値予報技術開発重点計画

交通政策審議会気象分科会は、自然環境や社会環境の変化、先端技術の展望を踏まえ、観測・予測精度向上のための技術開発と気象情報・データの利活用促進を、いわば「車の両輪」とした防災対応・支援の推進等について取り組みを進めるという「2030年の科学技術を見据えた気象業務のあり方」についての提言をとりまとめた。この提言で示された方向性に基づき、気象庁は、防災分野を始め社会における情報サービス基盤である数値予報の技術開発を強力かつ着実に推進していくために、「2030年に向けた数値予報技術開発重点計画」（以下、「重点計画」；気象庁2018）を策定し、2018年10月に発表した。

重点計画では、「国民一人一人の安全・安心を守り、活力ある社会を実現する数値予報イノベーション」というビジョンを掲げ、その実現に向けて4つの重点目標を設定した。これらのうち「温暖化への適応

策」を除く「豪雨防災」, 「台風防災」, 「社会経済活動への貢献」の3つが本稿で取り上げた日々の天気予報業務を支援する数値予報システムの開発業務と深く関係する。

4.3.1 豪雨防災

線状降水帯の発生・停滞などの予測精度向上により, 集中豪雨の可能性を高い確度で予測すること, 特に明るいうちからの避難など, 早期の警戒と避難を可能にすることを目標としている。

この目標を達成するための課題として, 局地モデルの予測精度や解像度が不十分であることや, 海上の水蒸気や風の初期値の精度が不十分であることが指摘されている。これらに対処するために, 局地モデルを1 km以下に高解像度化し積乱雲に関する諸過程を改良すること, 集中豪雨の予測の不確実性を適切に捕捉可能な局地アンサンブル予報システムの開発のほか, 多様かつ時間的・空間的に高密度な観測ビッグデータの一層の活用や最先端技術を駆使したデータ同化技術の開発などに取り組む必要がある。

4.3.2 台風防災

台風や前線に伴う大雨などの予測精度を向上し, 大規模風水害や高潮災害に対して, 数日前からの広域避難に関する防災行動の確実な実行を可能にすることを目標としている。

この目標を達成するための課題としては, 地球全体から詳細な予測まで幅広いスケールを効率的に扱う必要があることや, 環境指向流と台風の構造両面から台風予測を改善する必要があること, そして, 台風周辺の気象場の初期値精度が不十分であることが挙げられている。これらに対処するために, 全球・メソの決定論的予測モデルやアンサンブル予報システム, 及び, 高潮モデルなどを階層的に開発することや, 全球モデルの水平格子間隔を10 km以下へ高解像度化して解像度に適した物理過程を開発すること, 人工知能(AI)技術を応用したモデル開発を進めること, 観測ビッグデータの更なる活用などに取り組む必要がある。

4.3.3 社会経済活動への貢献

半年先までの気象予測の高度化・精度向上により, 気候リスク軽減や流通・生産計画の最適化を始め, 社会経済活動における生産性向上へ貢献することを目標としている。

重点計画では, この目標を達成するための課題としては主に長期予報の問題点が指摘されているが, 予測対象とする現象に応じて, 効率的・効果的に予

測する必要があることが指摘されている。豪雨防災や台風防災の重点目標を達成するために取り組む開発の成果(日射量や気温の改善など)を, こちらの目標達成に向けても活かしていく必要がある。

5. おわりに

太陽放射はあらゆる大気現象の駆動源であり, 地上日射量を正確に予測することは, 気温や風の予測精度向上につながるだけでなく, 防災・減災の要である台風や豪雨の予測精度向上にもつながる。また, 太陽光発電の分野においても高精度な日射量データへのニーズが高まっており, 現在の数値予報モデルが持つ系統誤差の縮小は重要な課題であると言える。第4章で紹介した数値予報技術開発重点計画では, ここで掲げた課題への取り組みを通して技術革新を実現するために, 産学官オールジャパンなどの幅広い連携の推進や最先端の研究・開発基盤の整備ということにも取り組み, 開発マネジメントを強化していく方針を打ち出している。多分野間でのフィードバックを活かしつつ, 数値予報システムをより高精度なものにしていくための技術開発を今後ともさらに進めていく予定である。

【参考文献】

- 1) 気象庁予報部, 第10世代数値解析予報システムと数値予報の基礎知識, 平成30年度数値予報研修テキスト, 51, 1-159 (2018), 気象庁予報部, 東京。
- 2) 小倉義光, 一般気象学(第2版補訂版), 1-320 (2016), 東京大学出版会, 東京。
- 3) 日本気象学会, 新教養の気象学, 1-144 (1998), 朝倉書店, 東京。
- 4) 長澤亮二, 放射過程, 数値予報課報告・別冊, 58, 90-99 (2012), 気象庁予報部, 東京。
- 5) 中川雅之, 雲過程, 数値予報課報告・別冊, 58, 70-75 (2012), 気象庁予報部, 東京。
- 6) 原旅人, 雲物理過程, 数値予報課報告・別冊, 58, 76-89 (2012), 気象庁予報部, 東京。
- 7) 経田正幸, はじめに, 数値予報課報告・別冊, 62, 1-3 (2016), 気象庁予報部, 東京。
- 8) 北川裕人, モデルの概要, 平成18年度数値予報研修テキスト, 39, 7-10 (2006), 気象庁予報部, 東京。
- 9) 岩村公太, 高解像度全球モデルの改良, 平成20年度数値予報研修テキスト, 41, 1-6 (2008), 気象庁予報部, 東京。

- 10) 米原仁, 変更の概要, 平成 26 年度数値予報研修テキスト, 47, 1-3 (2014), 気象庁予報部, 東京.
- 11) 萬納寺信崇, 領域モデル (RSM, MSM, TYM), 平成 12 年度数値予報研修テキスト, 33, 23-27 (2000), 気象庁予報部, 東京.
- 12) 越智健太, 石井憲介, 領域拡張・予報時間 39 時間化されたメソモデルの特性, 平成 25 年度数値予報研修テキスト, 46, 1-17 (2013), 気象庁予報部, 東京.
- 13) 気象庁予報部, 次世代非静力学モデル asuca, 数値予報課報告・別冊, 60, 1-151 (2014), 気象庁予報部, 東京.
- 14) 原旅人, メソ数値予報システムの改良の概要, 平成 29 年度数値予報研修テキスト, 50, 42-47 (2017), 気象庁予報部, 東京.
- 15) 永戸久喜, 藤田匡, 原旅人, 局地モデルの本運用, 平成 24 年度数値予報研修テキスト, 45, 72-86 (2012), 気象庁予報部, 東京.
- 16) 永戸久喜, 原旅人, 倉橋永, 日本域拡張・高頻度化された局地モデルの特性, 平成 25 年度数値予報研修テキスト, 46, 18-41 (2013), 気象庁予報部, 東京.
- 17) 原旅人, 幾田泰醇, 伊藤享洋, 松林健吾, asuca が導入された局地数値予報システム, 平成 27 年度数値予報研修テキスト, 48, 1-23 (2015), 気象庁予報部, 東京.
- 18) 山口春季, 週間アンサンブル予報における初期摂動作成手法の改良, 平成 23 年度数値予報研修テキスト, 44, 20-24 (2011), 気象庁予報部, 東京.
- 19) 太田洋一郎, 佐藤芳昭, 台風アンサンブル予報システムの改善, 平成 22 年度数値予報研修テキスト, 43, 66-70 (2012), 気象庁予報部, 東京.
- 20) 平井雅之, 宮岡健吾, 佐藤均, 杉本裕之, 南敦, 松川知紘, 高谷祐平, 新保明彦, 1 か月アンサンブル予報システムの変更の概要, 平成 26 年度季節予報研修テキスト, 1-5 (2015), 気象庁地球環境・海洋部, 東京.
- 21) 山口春季, 全球アンサンブル予報システムの導入, 平成 29 年度数値予報研修テキスト, 50, 35-41 (2017), 気象庁予報部, 東京.
- 22) 米原仁, 週間アンサンブル予報へのモデルアンサンブル手法の導入, 平成 22 年度数値予報研修テキスト, 43, 62-65 (2010), 気象庁予報部, 東京.
- 23) 太田洋一郎, 堀田大介, 海面水温摂動の開発, 数値予報課報告・別冊, 62, 77-84 (2016), 気象庁予報部, 東京.
- 24) 太田洋一郎, 堀田大介, 週間アンサンブル予報システムにおける LETKF の開発, 数値予報課報告・別冊, 62, 66-76 (2016), 気象庁予報部, 東京.
- 25) 酒井亮太, 気象庁の新しい週間アンサンブル予報システム, 天気, 55, 515-520 (2008), 日本気象学会, 東京.
- 26) 石田純一, 数値予報システム開発のプロセス, 数値予報課報告・別冊, 63, 4-10 (2017), 気象庁予報部, 東京.
- 27) H. Ohtake, J. G. da Sliva Fonseca, T. Takashima, T. Oozeki, K. Shimose and Y. Yamada, Regional and seasonal characteristics of global horizontal irradiance forecasts obtained from the Japan Meteorological Agency mesoscale model, Solar Energy, 116 (2015), 83-99.
- 28) 気象庁, 2030 年に向けた数値予報技術開発重点計画, 1-52 (2018), 気象庁, 東京.

略歴

草開 浩

2007 年 4 月～2008 年 9 月：関西航空地方気象台
観測課

2008 年 9 月～2010 年 3 月：関西航空地方気象台
神戸空港出張所

2010 年 4 月～2016 年 5 月：気象庁 予報部 数値
予報課

2016 年 6 月～2018 年 5 月：英国気象庁本局

2018 年 6 月～：現職