

# 第1章 概論

## 1.1 気象庁全球モデルにおける近年の改良<sup>1</sup>

### 1.1.1 はじめに

全球数値予報システムは、天気予報や週間天気予報、台風進路・強度予報での利用、メソ数値予報システムへの境界値提供をはじめ、多くの役割を担う基盤システムである。気象庁全球モデル (GSM: Global Spectral Model) は、この全球数値予報システムにおいて予測やデータ同化で用いられている数値予報モデルである。同時に、GSMは全球アンサンブル予報システム (山口 2017; 新保 2017) や季節アンサンブル予報システム (高谷・石川 2016)、気象庁長期再解析 (Onogi et al. 2007; Kobayashi et al. 2015) など多くの数値予報システムでも利用されており、様々な業務で幅広い役割を担っている。

気象庁は GSM の改良を重要な課題と位置づけ、スーパーコンピュータシステムの更新とともに、分解能の増強や計算手法の精緻化などの改良を行ってきた。1988 年の運用開始当初には、水平格子間隔が約 200 km、鉛直層数が 16 層であったものが、2018 年の時点で水平格子間隔が 20 km、鉛直層数が 100 層にまで向上している (室井 2009; 米原 2014a)。GSM の改良に加えて観測データ利用や解析手法の改良にも継続的に取り組んでおり、全球数値予報システムの予測精度は年々向上している (佐藤 2018)。

本報告は GSM の近年の開発成果と今後の展望をテーマにしている。GSM をテーマとした数値予報課報告・別冊は第 55 号以来 10 年ぶりとなる。本章では、概論として最新の仕様や近年の変更履歴を解説した後、海外数値予報センターの動向を踏まえつつ今後の展望に触れる。以降、第 2 章で力学過程、第 3 章で物理過程について議論し、第 4 章で開発における検証手法とともに改善すべき予測誤差を紹介する。

数値予報システムはこれまでの進歩により精緻かつ大規模で複雑なシステムになっており、予測精度を改善するためには観測データ利用手法、解析、予報モデルの幅広い分野において総合的かつ大規模な開発が不可欠である。気象庁では、その改良を効率的に進めていくために開発プロセスと開発体制の見直しを進めている (室井 2013; 石田 2017)。GSM においても大規模化と精緻化が進んでおり、これまでの開発プロセスの見直しが開発効率の向上に繋がっている。

2012 年 6 月に導入された第 9 世代スーパーコンピュータシステム (西尾 2011) においては、GSM のほぼ全ての物理過程に大きな改良が加えられた。その開発では、物理過程のそれぞれの基礎開発が進展しただけでなく、物理過程改良の妨げとなっていた compensating errors

(堀田・原 2012) を解消するために、多数の大規模な実験を可能とする計算機能力の飛躍的向上と総合的考察を重視した開発プロセスの見直しが大きな役割を果たした (米原 2017a)。現在は、複数過程の相互作用を念頭におきつつ、系統的に仮説-実験サイクルを繰り返すいわゆる科学的手法が開発において重視されるようになってきている。

開発プロセスの発展に合わせて、開発を支える様々な基盤についての高度化が進められてきた。作業仮説に基づいた実験の実施、結果の検証と分析、開発者間での結果の共有と議論といった開発サイクルを効率良く進めていくためには、組織的かつ系統的な進捗の管理、検証手法の高度化、各種実験の実施を補助するツールなど、開発の基盤を発展させることが不可欠であった。これら一連の見直しや高度化が GSM 改良の原動力の一つであったことは、本報告の各所で確認いただけるだろう。

気象庁は、今後も気象業務の基盤である数値予報を更に発展させていく計画である。2018 年 6 月 5 日に第 10 世代スーパーコンピュータシステム (栗原 2017) の運用を開始しており、この計算機を用いて、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活用される各種気象情報の更なる改善に取り組む (本田 2018)。GSM については、そ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が計画されている。加えて、物理過程の改善は予測精度向上に非常に重要であるため、積雲対流過程や境界層過程、重力波過程を中心に様々な物理過程の改良にも取り組む。

また、気象庁における数値予報技術開発の長期的な展望として、「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) が策定された。GSM は気象庁の基盤モデルであり、GSM に基づく各種の全球モデルは気候変動予測や環境予測などでも利用されている。また、境界値を通じた領域モデルの予測精度への影響も大きい。このように、GSM は重点計画で掲げられた 4 つの重点目標「豪雨防災」、「台風防災」、「社会経済活動への貢献」、「温暖化への適応策」の全てに関係しており、その役割は大きい。その中でも、特に重要な GSM の目標として、台風や梅雨による重大な災害に対する防災行動に資するため、台風の 3 日先の進路予測誤差を現在の 1 日先の誤差 (約 100 km) 程度にまで改善することや、領域モデルにより適切な境界値を提供することにより豪雨予測に資することが掲げられている。この達成は GSM 開発の最重要課題であり、最新の科学技術の成果を迅速に活用するとともに、目標の達成に資する研究開発にシッ

<sup>1</sup> 米原 仁

りと取り組むことが必要である。今後、庁内外の幅広い関係者と連携を深めつつ開発を進めていくことが更に重要になるであろう。GSMの各過程における中長期的な課題については、第2章及び第3章の各節で簡単に紹介する。

### 1.1.2 気象庁全球モデルの主な更新履歴

表1.1.1に、分解能など基本仕様の向上や物理過程の改良についてGSMの更新履歴を示す。GSMにはバージョン名が付けられており、予報モデルの変更に伴い改定されている。その形式は、全球数値予報システムに改良を導入した西暦の下二桁と月を「GSM」の後ろに付けたもので、例えば、2019年3月時点での最新GSMのバージョン名は、2017年5月に運用を開始しているため「GSM1705」になる。軽微な変更を除く全ての更新において新しいバージョン名が付けられており、各変更内容は単独の過程の改良からモデル全体にわたる総合的な改良まで様々である。表の中の分解能の表記について、はじめのTもしくはTLは三角形波数切断を意味し、その後の数字は切断波数を表す。Tの場合は2次格子、TLの場合は線形格子を意味する。また、その後のLは鉛直層を意味し、直後の数字は層数を表す。

表1.1.1に示したとおり、GSMはその運用開始以来、一部の停滞期を除いて1,2年に一度の改良を着実に積み重ねてきている。この表では並列化等の計算機利用に関する改善や予報時間延長などについては割愛したが、分散型メモリ計算機への対応や2次元分割化、キャッシュチューニング、ルジャンドル変換の高速化、入出力改良など、並列化・高速化や計算機アーキテクチャの変化への対応についても多くの開発が行われている。また、現業運用するモデルとして、利用者からの要望に対応して様々なプロダクトを計算し出力することにも多くの努力が払われている。

GSMが担う役割の面では、GSM0711において、2007年11月に運用を終了した領域数値予報モデル(RSM)と台風数値予報モデル(TYM)が担っていた任務を引き継いだこと(北川2006, 2007)は特筆すべきであろう。このとき、短期予報の基礎資料、量的予報、ガイダンス作成の基礎資料、MSMへの側面境界条件などの役割を引き継ぎ、GSMは気象庁の数値予報の確固たる基盤になっている。

表1.1.1のうち、GSM1212以降が第9世代スーパーコンピュータシステムにおける更新である。本報告は、GSMにおける近年の改良としてGSM1212以降を解説の対象とする。それより前の内容については、数値予報課報告・別冊第34, 35, 38, 42, 46, 50, 51, 55号等に記載があるので参照いただきたい。

表 1.1.1 GSMの主な更新履歴

バージョン	主な変更内容
GSM8803	運用開始 (T63L16、最上層 10 hPa)
GSM8911	T106L21 へ仕様向上、ハイブリッド座標系と新陸面過程の導入
GSM9603	T213L30 へ仕様向上、新積雲対流スキームの導入
GSM9912	雲水スキームの導入、積雲対流過程と放射過程の改良
GSM0103	T213L40・最上層 0.4 hPa へ仕様向上、積雲対流過程の改良
GSM0305	積雲対流過程の改良、及び雪の近赤外アルベドの調整
GSM0407	層積雲スキームの導入、雲氷落下・積雲対流スキームの改良、氷床アルベドの調整
GSM0412	晴天放射スキームの改良
GSM0502	TL319L40 へ仕様向上、セミラグランジュ移流スキームの導入
GSM0507	放射過程における雲の取扱いの改良、オゾン気候値の改定
GSM0711	TL959L60・最上層 0.1 hPa へ仕様向上、時間積分の 2 タイムレベル化、エロゾル気候値の改定
GSM0801	積雲対流過程の改良
GSM0808	力学過程の改良、適合ガウス格子の採用
GSM1212	層積雲スキームの改良
GSM1304	放射過程 (エロゾル気候値、水蒸気吸収係数) の改良
GSM1403	TL959L100・最上層 0.01 hPa へ仕様向上、放射・境界層・重力波・積雲過程の改良、陸面初期値利用の改良
GSM1603	積雲対流・雲・陸面・放射・海水・海面過程、及び力学過程の改良
GSM1705	積雲対流・雲・陸面・放射・海水過程、及び力学過程の改良

### 1.1.3 全球数値予報システムの最新仕様

最新 (2019年3月時点) のGSM1705について、力学過程及び物理過程の仕様を表1.1.2にまとめる。表におけるアウターモデル及びインナーモデルとは、データ同化プロセスにおいて用いられるモデルであり、アウターモデルは解析における第一推定値の計算に用いるモデルを、インナーモデルは解析修正量を求める計算に用いるモデルを指す。物理過程は予報モデル及びアウターモデルについてのものであり、インナーモデルは古いバージョンのものや簡略化したものを含んで

表 1.1.2 GSM の仕様 (2019 年 3 月時点)

力学過程		
支配方程式		プリミティブ方程式系
予報変数		東西風、南北風、気温、比湿、雲水量、地上気圧の対数
離散化		水平：球面調和関数を基底関数としたスペクトル法、鉛直：有限差分法
水平格子系		適合ガウス格子 (宮本 2005)
水平分解能		予報モデル及びアウトターモデル：TL959 (格子間隔約 20 km : 0.1875 度)、インナーモデル：TL319 (格子間隔約 55 km : 0.5625 度)
鉛直座標系		$\sigma - p$ ハイブリッド座標 (Simmons and Burridge 1981)
層数 (最上層)		100 層 (0.01 hPa)
移流+時間積分		2 タイムレベル セミインプリシット - セミラグランジアン法 (Yukimoto et al. 2011)
積分時間間隔		400 秒 (TL959)、600 秒 (TL319)
数値拡散		4 次の線形水平拡散を渦度、発散、仮温度に適用。スポンジ層として 2 次の線形水平拡散を 30 hPa より上層で発散に適用。
物理過程		
放射	長波	2 方向吸収近似 (Yabu 2013) による放射伝達、大気分子による吸収は 2 種類の $k$ -分布法で評価 (Fu and Liou 1992; Chou et al. 2001)。雲はマキシマム-ランダムオーバーラップ (Geleyn and Hollingsworth 1979) を仮定。光学特性は、水雲は Lindner and Li (2000)、氷雲は Ebert and Curry (1992) による。
	短波	$\delta$ -Eddington 法による散乱・吸収計算 (Joseph et al. 1976; Coakley et al. 1983)。雲はマキシマム-ランダムオーバーラップを仮定し、Collins (2001) に基づく簡略化した独立カラム近似を適用。光学特性は、水雲は Dobbie et al. (1999)、氷雲は Ebert and Curry (1992) による。
積雲対流		予測型クロージャーを用いるスペクトル型マスマックススキーム (Arakawa and Schubert 1974; Moorthi and Suarez 1992; Randall and Pan 1993)。雲モデルには氷相を考慮した簡易な雲微物理過程を用いる。
雲		確率密度関数に基づいた凝結スキーム (Smith 1990) を基本に、雲水から降水への変換や再蒸発、雪の融解などの単純化した雲微物理過程、及び雲氷と雪の落下スキームを含む。また、層積雲に関する診断的スキーム (Kawai and Inoue 2006) を使用。
境界層		乱流エネルギークロージャー型 (Mellor and Yamada 1974, 1982) と K クロージャー型 (Han and Pan 2011) のハイブリッドスキーム。
重力波	地形性	波長 $O(100)$ km に対する長波スキームと波長 $O(1-10)$ km に対する短波スキーム (Iwasaki et al. 1989; Palmer et al. 1986)。
	非地形性	定数励起源によるスペクトルパラメタリゼーション (Scinocca 2003)。
地表面		Monin-Obukhov 相似則に基づくバルク式、安定度関数は Beljaars and Holtslag (1991) を用いる。開水面と海水面は Best et al. (2004) の手法により混在格子として扱う。
陸面	植生	Sellers et al. (1986) によるスキームを改良した手法でモデル化。
	積雪	体積、密度、アルベド、温度等の変化を予測。
	土壌	熱伝導はフーリエの法則に従い、水分の移動及び凍結・融解が考慮される。土壌パラメータは衛星観測プロダクト等による。
海水		体積・形状・密度不変で物性が一樣の熱伝導体として扱う。内部の熱伝導はフーリエの法則に従い、表面では放射と乱流フラックスの上部境界条件、及び融解を考慮する。
化学過程		成層圏での簡易な診断型メタン酸化及び光乖離スキーム (Untch and Simmons 1999)。
海面水温		時間発展は、全球海面水温解析値の年平均偏差を、予報時間により季節変動する気候値に加える。
海水分布		時間発展は、南北半球ごとの全球海水密接度解析値の海水面積年平均偏差を維持するように、海水密接度の初期偏差固定予測値を気候値で修正する手法で扱う。

いる。

また、実行仕様についても簡単に記す。全球数値予報システムは1日4回実行されており、その初期時刻は00, 06, 12, 18UTCである。初期値を作成するための解析は、予報資料を作成するために行う速報解析と観測データを可能な限り集めて正確な実況を把握するために行うサイクル解析の2種類が存在し、ほぼ同じ解析システムを観測データの待ち受け時間を変えて実行している。待ち受け時間は、速報解析では2時間20分、サイクル解析では11時間50分(00, 12UTC)及び7時間50分(06, 18UTC)である。予測は速報解析を初期値として行われ、その予報時間は132時間(00, 06, 18UTC)、及び264時間(12UTC)である。

以下、GSM1212以降の各更新についてその狙いと成果の概要を時系列順に解説する。

#### 1.1.4 GSM1212

##### (1) 変更点の概要と狙い

亜熱帯大陸西岸の海上は海面水温が周囲に比べて低く、ハドレー循環の下降流域にあたることから強い逆転層が生じ、大気下層に層積雲が発生しやすい環境となっている(Wood 2012)。GSMには、それら海洋性層積雲を表現するために層積雲スキームが導入されている(Kawai and Inoue 2006)。層積雲スキームでは、逆転層の強さなど複数の条件を用いてモデルの格子点ごとに層積雲が存在するかどうかを判定しているが、GSM1212より前にはその条件に水蒸気量についての情報が含まれていなかった。これは、現実の海洋性層積雲では、環境場の相対湿度と層積雲の存在との相関は、逆転層の強さなどと比べて弱いことが知られていたためである(Slingo 1980)。しかし、水蒸気量に関する情報を含まない条件では、狙いとしている亜熱帯大陸西岸だけでなく、陸上や移動性高気圧に覆われた海上などでも層積雲が存在すると判定されてしまい、日中の砂漠や日本海などで現実には存在しない層積雲が表現されてしまう問題が存在した(小野田 2008)。このため、相対湿度がある閾値以上の場合にのみ層積雲が存在するという条件を追加する改良を行った(Shimokobe 2012; Furukawa and Shimokobe 2013)。

##### (2) 主な改善点

この改良により、海洋性層積雲の表現を維持しつつ、他の領域において過剰であった下層雲量を減少させた。特に、陸上の日中において、砂漠域を含む乾燥域で下層雲量が減少して地上に入射する短波放射量が適正化された。その結果、下層の気温や気圧がモデル内でより精度良く表現されるようになった。他にも、主に5日先までの予報時間において、850 hPa面における気温や海面更正気圧等において予測精度が全球域で改善していることが解析予報サイクル実験により確認されている。また、日本海において層積雲量が過剰であった事例などでも予測の改善が見られた(下河邊・古河

2012)。

#### 1.1.5 GSM1304

##### (1) 変更点の概要と狙い

放射によるエネルギー移動は大気循環の最も基本的な駆動源であり、放射過程で用いるパラメータをより精度の高いものに着実に更新し、放射を通じた大気の加熱・冷却の精度を改善していくことは重要な開発課題である。GSM1304では、放射過程においてエアロゾルの光学的厚さの気候値及び短波放射の水蒸気吸収パラメータが更新された。

GSMでは、エアロゾルによる放射の吸収と散乱の効果、いわゆる直接効果が考慮されており、その効果は全球放射収支や気候場に影響を与えている。直接効果の計算は、エアロゾルの光学的厚さや消散係数、吸収係数等に基づくが、GSMにおいては光学的厚さの地点依存性と季節変化を考慮するため、鉛直積算値の月別気候値を用いている(北川 2000; 村井 2009)。気象庁地球環境・海洋部環境気象管理官により作成された新しい気候値には、旧気候値と比べてより多くの衛星による観測データが用いられており、また統計期間が延長されている。その結果、新しい気候値では南極など一部の陸域で光学的厚さが過剰であった点が改善されており、サンフォトメータ<sup>2</sup>による地上観測の結果との整合性も高まっている(村井 2009)。

水蒸気による短波放射吸収は地球の放射収支に大きな影響を与える。対流圏では、雲を除けば水蒸気が最も大きな吸収源であるためその影響は特に大きい。GSMの放射過程では、水蒸気吸収について計算量を抑えつつ精度良く計算する必要があり、透過率の計算においてパラメタリゼーション手法として指数関数(ESFT: Exponential Sum Fitting of radiative Transmission functions)法を使用している。GSM1304では、GSMの放射過程にCollins et al. (2006)により提案された当時最新の吸収線データベース(Rothman et al. 2003)に基づいたパラメータを導入した。

##### (2) 主な改善点

この改良により、短波放射フラックスの大気上端や地表面でのバイアスが改善した。特に、晴天域での地表面下向き短波放射について、熱帯海上を中心に広い範囲でみられた正バイアス(入射過剰)やサハラ砂漠や南極大陸など陸域での負バイアス(入射不足)が大きく改善した。その結果、夏半球側の中高緯度では、対流圏下層の気温について5日先程度までの予測を中心に大きな改善が見られた。また、熱帯では、対流圏の気温や高度場について予報時間を問わず予測精度が改善した。

<sup>2</sup> 複数の特定波長の相対的な直達日射強度からエアロゾルの光学的厚さなどを観測する測器。

## 1.1.6 GSM1403

### (1) 変更点の概要と狙い

GSM1403では、鉛直層増強とともに物理過程が改良された(米原 2014a)。GSM0711以来、GSMの鉛直層数は60層で、気温など物理量が定義されるフルレベルの最上層の気圧は0.1 hPaであったが、GSM1403では鉛直層数を100層へと増強するとともに、最上層を0.01 hPaへ引き上げた。その目的は、成層圏・対流圏における大気鉛直構造表現の精緻化や、人為的な上部境界の影響の低減、また衛星観測データのさらなる利用である。図1.1.1に、60層と100層で比較した鉛直層の配置を示す。最上層の引き上げには4層を用いており、0.1 hPa以下では層数が1.6倍に増加している。鉛直方向の分解能は全ての高度で向上しているが、特に対流圏中上層から対流圏界面において向上幅が大きい。このとき、鉛直層増強にあわせて積分時間間隔を600秒から400秒へと短くしている。また、上部境界条件に由来する波の反射をより抑制するためにスポンジ層の見直しを行っている。

同時に、放射や重力波、境界層等の各過程を改良した(Yonehara et al. 2014)。放射過程には、2方向吸収近似を用いた長波放射スキーム(Yabu 2013)を導入し

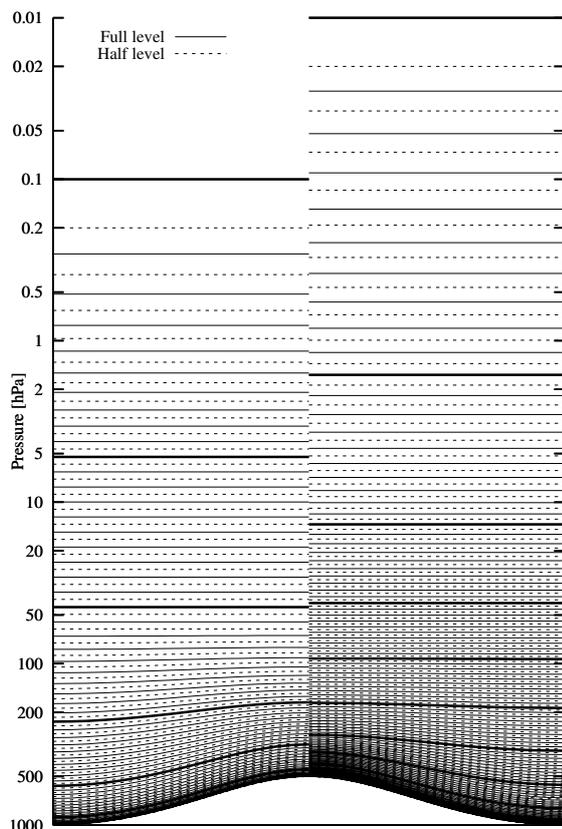


図 1.1.1 60層(左半分)と100層(右半分)の鉛直層配置。縦軸は気圧 [hPa]。実線は層を代表し気温や水平風等の物理量が定義されるフルレベル、点線は層間の境界にあたるハーフレベルであり、フルレベルは10層毎に太線で表示している。

た。このスキームは、高精度かつ高速な計算が可能なるものであり、透過関数の計算の精緻化等により大気中層の放射過程による加熱・冷却の精度が向上するとともに、計算に必要な時間が短縮した。短縮による時間の余裕を利用して、長波放射計算の時間間引き間隔を3時間から1時間へ短くし、同時に放射過程内での地表面気温の取扱いを精緻化した。

中層大気表現の改善と、それを通じた衛星観測データの解析でのさらなる有効利用を目的に、非地形性重力波の効果をレイリー摩擦を用いて簡素に表現していた代わりにScinocca (2003)によるパラメタリゼーション・スキームを導入した。

鉛直層配置の変化により生じた対流圏上層での大きな乾燥バイアスを解消するため、積雲対流過程におけるエネルギー再配分スキームを改良した。再配分スキームとは、降水の相変化やスキームの特性によって生じるエネルギー収支の不整合を、乾燥静的エネルギーの変化率が正となる層に配分して解消する手法である(第3.1節)。GSM1403における改良内容は、エネルギーを配分する層を対流圏全層から $-5^{\circ}\text{C}$ 層より下層に限定したものである。GSM1403までは、このエネルギー再配分スキームにより積雲対流過程内の融解プロセスが取り扱われていたため、この修正は融解過程を精緻化したことに相当する。

また、夜間など大気成層状態が安定な場合において境界層内の乱流輸送が過剰に表現された結果、地上気温の高温バイアスが生じていた問題等を改善するため、陸上での接地境界層におけるバルク係数の計算手法、及び境界層過程を改良した。

### (2) 主な改善点

一連の改良の結果、GSMの予測精度は様々な点で改善した。解析値を検証値とした全球的な予測精度は、熱帯対流圏下層の気温を除くと、様々な要素と領域について改善が卓越した。また、ラジオゾンデ観測を検証値とした検証でも、東西風、気温ともに対流圏を中心に予測初期から中盤にかけてRMSE (Root Mean Square Error) が小さくなった。日本域の検証結果では、対解析値、対ラジオゾンデ観測の両方について、多くの要素で改善が見られた。台風の進路予測は、改善幅は小さいものの改善した。また、非地形性重力波過程の導入により、成層圏準2年周期振動がある程度表現されるようになるなど、成層圏の予測表現も改善した。全球降水分布では、予測後半でも降水量を維持できるようになり、その結果、北西太平洋域を中心に大規模な収束・発散場が改善され、大規模循環場の表現が改善された(金浜 2014; 木南 2014)。

一方で、積雲対流過程での融解による冷却が $-5^{\circ}\text{C}$ 層より下層に集中したため、対流活動域を中心に下層の低温バイアスが悪化した。また、日本の南東海上を中心とする下層の低温バイアスの拡大に起因して、FT=72

頃までの 850 hPa 面気温や 500 hPa 面高度には悪化が見られた。

GSM1403 における予測特性の改善には、特に境界層過程と積雲対流過程が大きく寄与している。また、解析の第一推定値について、対流圏上層から成層圏下層において観測データとの整合性が高まり、観測データがより多く利用されるようになったことも寄与していると考えられる。一方で、GSM の短所として長らく指摘されている熱帯対流圏下層を中心とした低温バイアスがさらに拡大し、また 2 日予測程度までの日本域の降水予測精度が僅かに悪化したため、これらの点が GSM1603, GSM1705 の改良に向けた重要課題となった。

### 1.1.7 GSM1603

#### (1) 変更点の概要と狙い

GSM1603 では、積雲対流・雲・放射・海面などの物理過程を中心に多くの点で大幅に改良されており、台風進路予測や降水予測など様々な点について予測精度が大きく向上すると同時に、予測特性の観点からも GSM0711 以降最大の変化となった。GSM1603 についての一連の開発では、「予測誤差はモデルの諸過程が持つ問題が複雑に絡み合った結果生じている」という認識のもと、科学的な正しさを重視しつつ、GSM 全体を各過程の開発者が共同で開発する方針を取った。特に、GSM1403 の開発経験から得られた知見や問題意識に基づき (米原 2014b)、長年の課題であった中層乾燥バイアスや下層低温バイアスなどの予測特性改善に取り組み、多くの改良が行われた (米原 2016b; Yonehara et al. 2017)。

積雲対流過程においては、エネルギー再配分スキームの課題に端を発する様々な改良を行った。主要な点だけでも、固体降水を陽に扱う融解過程の導入、対流性上昇流域での雲水から降水への変換過程の導入、雲底の静的エネルギー見積り方法の変更、及び雲底以下の上昇流域にエントレインされる気塊への気温摂動付加など多岐にわたる。

同時に、雲過程では雲氷の落下計算において予測結果の積分時間間隔への依存性を減らすことを主な目的に改良を行った。それまで用いられていた雲氷の落下方程式は、連続系であるにもかかわらず積分時間間隔の値を陽に含む不自然なものであったが、より自然な方程式を採用するとともに、時間離散化の影響が小さい解法に変更した。また、雲水量を増やして気温場を改善することを狙って落下速度の調節も行われた。

積雲対流・雲の両方にまたがる改良として、過度な降水集中の緩和を目的に、積雲対流過程の結果を用いた雲過程での比湿ゆらぎ幅の調整を廃止した。比湿ゆらぎ幅とは、雲過程において 1 格子内の全水量分布がどれだけ平均値から揺らいでいるかを表す量であり、この値が大きくなれば、格子平均値の湿度がより低く乾燥

していても格子内に部分的に飽和している領域が存在でき、水蒸気が雲水に変換されやすくなる。GSM1403 までは、積雲対流過程の中で積雲が存在すると判定された場合には、この揺らぎ幅をかなり大きい値に設定していた。大まかに言うと、相対湿度が 60%程度でも雲水が生成されることがあったが、調整の廃止により 80%程度まで雲水は生成されない様に変更された。

GSM1403 まで利用されていた陸面過程の歴史は古く (佐藤・里田 1989)、1989 年まで遡ることができるが、GSM1603 まで大幅な改良は行われていなかった。GSM1603 では、大泉・保坂 (2000) や平井・堀田 (2009) などで報告された開発を引き継ぎ、陸面過程が全面的に刷新された。その変更は多岐にわたり、熱・水分で共通の 7 層の土壌層の導入、最大 4 層の積雪モデル導入など基本的仕様の大幅な向上、キャノピー・土壌・アルベドの取り扱いの精緻化、大気とのフラックス交換スキームの改良、植生分布や植生・土壌に関連する各種定数値の更新、土壌水分初期値として用いる気候値の更新などが含まれる。

短波放射過程における雲の取り扱いについて、1 格子内に複数の雲層の重なりを考慮する手法として、これまでの曇天域でのランダムオーバーラップに代えて、マキシマム・ランダムオーバーラップを導入した (Nagasawa 2012)。また、水雲粒の光学特性をパラメタライズする手法をより信頼性の高いもの (Dobbie et al. 1999; Lindner and Li 2000) へ見直した。その他に、放射過程で利用する成層圏の水蒸気量や温室効果ガスの気候値更新、これまで黒体として扱われていた地表面射出率を見直すなどの変更を行っている。

GSM1403 には、極域で大気下層の低温バイアスが大きく、特に海水域では予報時間が進むにつれてそのバイアスがより顕著になる問題が存在した。また、海面の接地境界層過程が簡易なものであり、フラックスの計算手法としての信頼性に課題があった。そのため、海水について、これまでは氷 1 層で表面 (skin layer) の取り扱い無しであったものを変更し、氷 4 層に加え表面を取り扱う新しいスキームを導入した。加えて、ひとつの格子は開水面か海水かのどちらかしか取り得なかったものを、海水密接度に応じて混在した状態を取り得るように接地境界層過程を精緻化した。また、開水面と海水面でのバルク係数の計算手法を Monin-Obukhov 相似則に直接基づくものに改良した。

#### (2) 主な改善点

一連の改良の結果、様々な点で予測特性が改善した (米原 2016a)。その一例として、図 1.1.2 にラジオゾンデ観測を検証値とした 700 hPa 面での比湿の月平均 ME (Mean Error) を改良前後で比較したものを示す。対流活動域を中心に、GSM の長年の問題であった中層乾燥バイアスが大きく改善しており、特に海洋大陸や華南、日本付近で改善が大きい。乾燥バイアスの改善

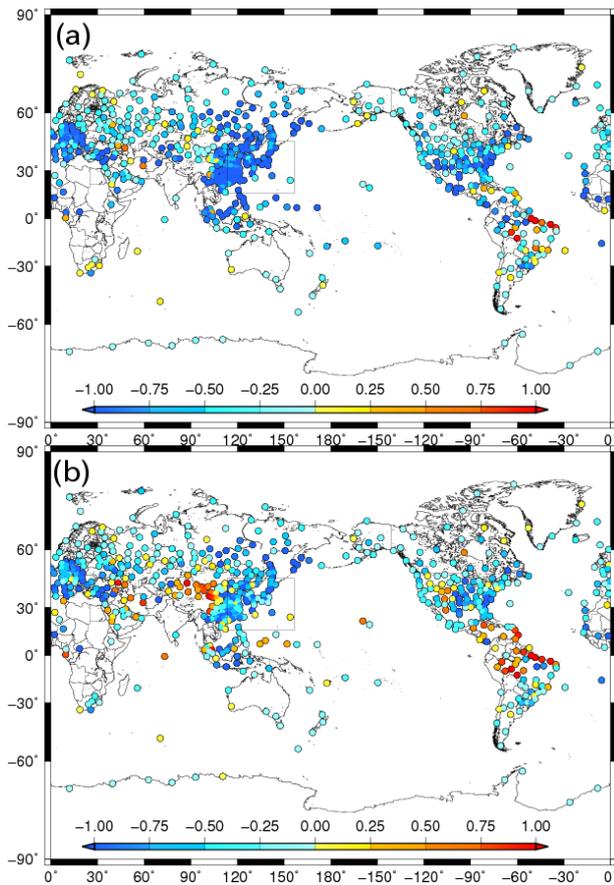


図 1.1.2 ラジオゾンデ観測を検証値とした 700 hPa 面での比湿 [ $\text{g kg}^{-1}$ ] の月平均 ME。(a) が GSM1403、(b) が GSM1603 の結果で、検証期間は 2015 年 8 月、12UTC 初期値の予報時間 FT=72 についてのもの。検証ツールの仕様により日本付近は四角で囲ってある。

には、直接的には比湿ゆらぎ幅の変更が最も寄与している。しかし、単純に比湿ゆらぎ幅のみを変更しただけでは、凝結熱が減り低温バイアスが大きく拡大してしまう。積雲対流、雲、放射過程の変更を組み合わせた結果、低温バイアスを改善しつつ中層乾燥バイアスを大きく改善することが可能になった。

放射過程の変更により、厚い雲が存在するカラム大気の変更前と比べて短波放射に対して光学的に薄くなったため、地表面に入射する短波放射は熱帯域を中心に増加した。その結果、海上の対流活動域を中心に、地表面への入射短波が過小なバイアスが改善している。

他にも、冬季陸上、特にユーラシア大陸北部において地上気温の高温バイアスが大きく改善した。これには、陸面過程の中の積雪モデルが刷新され、熱伝導率や熱容量などが適正化されたことや、土壌過程を強制復元法から熱伝導を解く方式に改良したことにより、大気からの強制力に対する土壌の応答が良くなったことが大きく寄与している。当初、地表面への長波放射入射が大きく不足していることや、北極海域で大気下層が大きな低温バイアスを持つことが原因で、陸面過程の変更だけを適用した場合には低温バイアスが大き

く拡大して改善が見られなかった。最終的には、雲過程の改良により、雲氷の落下速度が遅くなり上層雲量が増加した結果、冬の中高緯度では地表面での長波放射収支が改善されたことや、海水モデルの改良により北極海の低温バイアスが改善したことと合わせて、地上気温の高温バイアスを改善することに成功した。

また、台風進路予測精度の改善、日本の降水予測精度の大幅な改善、日中の地上気温の位相遅れの改善など多くの点で予測精度が向上した (米原 2016a)。

### 1.1.8 GSM1705

#### (1) 変更点の概要と狙い

GSM1705 では、GSM1603 の開発時に認識されていた課題を改善することを大きな目標とし、積雲対流、雲、放射、陸面、海面等多くの物理過程が改良された (米原 2017b; Yonehara et al. 2018)。また、気圧傾度力項の離散化見直しなど、力学過程でも改良が行われている。GSM1603 では、台風が発達しやすくなった影響で計算安定性が低下する事例がみられたことや、陸上を中心に地表面への短波放射の入射が過剰であること、熱帯の対流活動などに課題が残った。特に計算安定性の低下は、プログラムが異常終了した場合にプロダクトが作成されなくなるおそれがあるため、現業運用される数値予報モデルにとっては大きな問題である。また、地表面での放射収支は、陸上における地上気温や対流活動に強く関係しているため、短波入射の改善は最高気温予測や降水予測の精度に関わる。このような背景のもと、放射収支や気温、比湿のバイアスなどの基本的な部分の改善に取り組みつつ、台風表現の課題を改善して計算安定性を確保することを開発の最優先項目とした。また、それまでの開発方針に加え、より長い予報時間も対象に含む全球アンサンブル予報システムでの利用も想定し、物理過程の開発や低分解能版での評価を進め、放射収支の改善やバイアスの低減に努めた。

GSM1603 までの雲過程では、降水の蒸発・昇華と固体降水 (降雪) の融解の効果を扱う過程において、計算安定性を担保するため、再蒸発過程では気温の時間変化率に換算して  $10 \text{ K day}^{-1}$  相当の、融解過程では同様に  $20 \text{ K day}^{-1}$  相当の上限値が設定されていた。事例解析から、この上限により冷却量を抑えてしまうことが、降雪の予測結果やシャープな前線構造の表現などへ悪影響を与えていることが指摘されており (原ほか 2013; 原 2014)、計算安定性を確保しつつ上限を緩和することが課題となっていた。GSM1403 の時点では、この上限値を緩和できない理由が予測精度の面で存在した。対流圏の中層・下層の低温・乾燥バイアスが大きく、その状況で単純に上限を取り除くと大気が過剰に乾燥しているため降水の再蒸発も過剰になり、低温バイアスがさらに悪化するという点である。また、融解の上限値緩和も同様に低温バイアスを拡大する。こ

のことは、低温バイアスを上限の存在がある程度打ち消していたとも言える。この課題の解決は、GSM1603での改良が転機となった。積雲対流・雲過程の改良などにより対流圏中層・下層の低温・乾燥バイアスが大幅に改善したため、予測精度を向上させつつ再蒸発過程・融解過程を適切に扱うことが可能になった。GSM1705では、再蒸発過程では陰解法、融解過程では融解温度を湿球温度 $0^{\circ}\text{C}$ とする緩和型方程式を採用し、それぞれの計算安定性を向上するとともに、上限値を多くの現象で実用上はば問題にならない値にまで引き上げた。同時に、積雲対流過程にも同様の改良を適用している。

現実の積雲の水平スケールは数 km 程度よりも大きく、GSM の約 20 km の格子間隔においては、積雲中の上昇流域の雲量・雲水量を放射過程で無視できない。しかし、GSM1603 までの放射過程では、格子平均場の雲量と雲水量のみを用いており積雲の上昇流内の雲量と雲水量は考慮されていなかった。これは、GSM の積雲対流過程では積雲中からは層状性の雲水が格子平均場に排出されるのみであり、積雲の上昇流内の雲量と雲水量は格子平均場には反映されていないためである。この課題を改善するため、GSM1705 においては、積雲対流過程が用いる上昇流の質量輸送フラックスを用いて積雲中の上昇流域の雲量と雲水量を診断し、放射過程で用いることにした。この手法は、経験的なパラメータを含み調整の余地が大きいため、まず観測的事実に基づき確度が高い水雲粒の有効半径診断手法の改良を適用した後で、全体として放射収支の精度が向上するようにパラメータを調整している。

GSM1304 に引き続き、エロゾルの直接効果に関する過程を改良した。GSM1603 では、単一散乱アルベドや非対称散乱因子といった光学的厚さ以外のエロゾルの光学特性について、WMO (1986) に基づく季節依存性を持たない海洋型・大陸型の 2 タイプのものを採用していた。しかし、この手法では場所や季節ごとに異なるエロゾルの化学種・粒子サイズによる影響を十分に考慮できず、特に大陸型エロゾルの吸光性が概ね弱く、砂漠域などでの対流圏下部の加熱不足の一因となっていた。そのため、GSM1705 では、化学種や粒子サイズによる、光学特性や鉛直分布の違いを考慮した新スキームを導入した (Yabu et al. 2017)。このスキームでは、化学種・粒子サイズ別のエロゾル濃度分布を、気象研究所環境・応用気象研究部で開発されたエロゾル輸送モデルにより作成された 3 次元の月別気候値で与える。

## (2) 主な改善点

雲・積雲対流過程の改良の結果、蒸発・融解が効く現象において、冷却が不十分で気温が下がらない、上空で蒸発 (融解) すべき雨 (雪) が地上まで達する、地上付近まで雨 (雪) が達して気温が下がりすぎるといった課題が改善した。また、前線の温度傾度がより

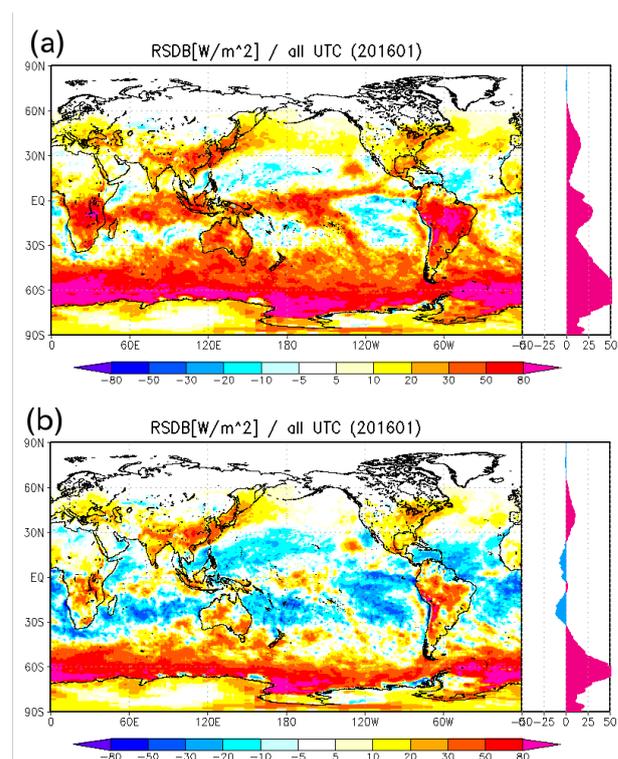


図 1.1.3 CERES プロダクトを検証値とした地表面下向き短波放射 [ $\text{W m}^{-2}$ ] についての月平均 ME。(a) が GSM1603、(b) が GSM1705 の結果で、検証期間は 2016 年 1 月、00, 06, 12, 18UTC 初期値の予報時間 FT=6 についてのもの。各図の右側には東西平均した ME を緯度ごとに表示している。

シャープに表現されるようになり、気温の低下がより適切に表現される事例が見られた。同時に、台風の周辺において融解・蒸発による冷却がより大きくなったため、中心気圧が発達しすぎる点が改善され、計算安定性が高まった。

地表面に入射する下向き短波放射の精度も大きく改善した。図 1.1.3 は CERES プロダクト<sup>3</sup> を検証値とした検証結果である。その結果、陸上で高温・多湿バイアスが改善され、また対流活動も適正化した結果、夏の弱い雨に対する降水頻度過剰バイアスが大きく改善した。

### 1.1.9 おわりに

本節では、GSM の歴史と最新の仕様を紹介するとともに、近年の改良についてその狙いと改善点の概要を解説した。気象庁では、GSM の基本性能の向上を重要な課題として継続的に開発を行っており、その予測精度は様々な面で改善している。

GSM は、既に気象業務に不可欠な基盤であるが、今後もその重要性はますます高まっていくであろう。特に、重点計画に掲げられた野心的な目標の達成に向けて、開発を加速していくことが求められている。多く

<sup>3</sup> 全球放射収支計によるプロダクト。 <http://ceres.larc.nasa.gov/>

の方のご知見を頂きながら、庁内外の幅広い関係者との連携を深めつつ開発を進めていきたい。

## 参考文献

- Arakawa, A. and W. H. Schubert, 1974: Interaction of a cumulus cloud ensemble with the large-scale environment, Part I. *J. Atmos. Sci.*, **31**, 674–701.
- Beljaars, A. C. M. and A. A. M. Holtslag, 1991: Flux Parameterization over Land Surfaces for Atmospheric Models. *J. Appl. Meteor.*, **30**, 327–341.
- Best, M. J., A. C. M. Beljaars, J. Polcher, and P. Viterbo, 2004: A proposed structure for coupling tiled surfaces with the planetary boundary layer. *J. Hydr. Meteorol.*, **5**, 1271–1278.
- Chou, M.-D., M. J. Suarez, X.-Z. Liang, and M. M.-H. Yan, 2001: A thermal infrared radiation parameterization for atmospheric studies. *Technical report series on global modeling and data assimilation, Vol. 19, NASA Goddard Space Flight Center*, 56pp.
- Coakley, J. A., R. D. Cess, and F. B. Yurevich, 1983: The effect of tropospheric aerosols on the earth's radiation budget: a parameterization for climate models. *J. Atmos. Sci.*, **40**, 116–138.
- Collins, W. D., 2001: Parameterization of Generalized Cloud Overlap for Radiative Calculation in General Circulation Models. *J. Atmos. Sci.*, **58**, 3224–3242.
- Collins, W. D., J. M. Lee-Taylor, D. P. Edwards, and G. L. Francis, 2006: Effects of increased near-infrared absorption by water vapor on the climate system. *J. Geophys. Res.*, **111**, D18 109.
- Dobbie, J. S., J. Li., and P. Chylek, 1999: Two-and four-stream optical properties for water clouds and solar wavelengths. *J. Geophys. Res.*, **104**, 2067–2079.
- Ebert, E. E. and J. A. Curry, 1992: A parameterization of ice cloud optical properties for climate models. *J. Geophys. Res.*, **97**, 3831–3836.
- Fu, Q. and K. N. Liou, 1992: On the correlated k-distribution method for radiative transfer in nonhomogeneous atmospheres. *J. Atmos. Sci.*, **49**, 2139–2156.
- Furukawa, T. and A. Shimokobe, 2013: Operational Implementation of Modification to Stratocumulus Parameterization Scheme in JMA's Global Spectral Model. *CAS/JSC WGNE Res. Activ. Atmos. Oceanic Modell.*, 6.5–6.6.
- Geleyn, J.-F. and A. Hollingsworth, 1979: An economical analytical method for the computation of the interaction between scattering and line absorption of radiation. *Contrib. Atmos. Phys.*, **52**, 1–16.
- Han, J. and H.-L. Pan, 2011: Revision of Convection and Vertical Diffusion Schemes in the NCEP Global Forecast System. *Weather and Forecasting*, **26**, 520–533.
- 原旅人, 白山洋平, 檜垣将和, 氏家将志, 2013: 2013年1月14日の関東大雪. 平成25年度数値予報研修テキスト, 気象庁予報部, 71–89.
- 原旅人, 2014: 最近発生した顕著事例に関する検討. 平成26年度数値予報研修テキスト, 気象庁予報部, 118–144.
- 平井雅之, 堀田大介, 2009: 陸面過程. 数値予報課報告・別冊第55号, 気象庁予報部, 99–108.
- 本田有機, 2018: NAPS10における改良計画. 平成30年度数値予報研修テキスト, 気象庁予報部, 2–5.
- 堀田大介, 原旅人, 2012: 物理過程開発のボトムアップ・アプローチとトップダウン・アプローチ. 数値予報課報告・別冊第58号, 気象庁予報部, 120–122.
- 石田純一, 2017: 数値予報システム開発のプロセス. 数値予報課報告・別冊第63号, 気象庁予報部, 4–10.
- Iwasaki, T., S. Yamada, and K. Tada, 1989: A parameterization scheme of orographic gravity wave drag with two different vertical partitionings, Part I: Impacts on medium-range forecasts. *J. Meteor. Soc. Japan*, **67**, 11–27.
- Joseph, J. H., W. J. Wiscombe, and J. A. Weinman, 1976: The delta-Eddington approximation for radiative flux transfer. *J. Atmos. Sci.*, **33**, 2452–2459.
- 金浜貴史, 2014: 全球の検証. 平成26年度数値予報研修テキスト, 気象庁予報部, 4–8.
- Kawai, H. and T. Inoue, 2006: A Simple Parameterization Scheme for Subtropical Marine Stratocumulus. *SOLA*, **2**, 17–20.
- 木南哲平, 2014: 日本付近の検証. 平成26年度数値予報研修テキスト, 気象庁予報部, 8–11.
- 気象庁, 2018: 2030年に向けた数値予報技術開発重点計画. 52pp.
- 北川裕人, 2000: 放射過程. 数値予報課報告・別冊第46号, 気象庁予報部, 16–31.
- 北川裕人, 2006: 高解像度全球モデル. 平成18年度数値予報研修テキスト, 気象庁予報部, 7–8.
- 北川裕人, 2007: 変更の概要. 平成19年度数値予報研修テキスト, 気象庁予報部, 1–4.
- Kobayashi, S., Y. Ota, Y. Harada, A. Ebata, M. Moriya, H. Onoda, K. Onogi, H. Kamahori, C. Kobayashi, H. Endo, K. Miyaoka, and K. Takahashi, 2015: The JRA-55 Reanalysis: General specifications and basic characteristics. *J. Meteor. Soc. Japan*, **93**, 5–48.
- 栗原茂久, 2017: 計算機(スーパーコンピュータシステ

- ム). 平成 29 年度数値予報研修テキスト, 気象庁予報部, 120–123.
- Lindner, T. H. and J. Li, 2000: Parameterization of the Optical Properties for Water Clouds in the Infrared. *J. Climate*, **13**, 1797–1805.
- Mellor, G. L. and T. Yamada, 1974: A hierarchy of turbulence closure models for planetary boundary layers. *J. Atmos. Sci.*, **31**, 1791–1806.
- Mellor, G. L. and T. Yamada, 1982: Development of a turbulence closure model for geophysical fluid problems. *Rev. Geophys. Space Phys.*, **20**, 851–875.
- 宮本健吾, 2005: 適合ガウス格子. 数値予報課報告・別冊第 51 号, 気象庁予報部, 39–42.
- Moorthi, S. and M. J. Suarez, 1992: Relaxed Arakawa-Schubert: A parameterization of moist convection for general circulation models. *Mon. Wea. Rev.*, **120**, 978–1002.
- 村井臣哉, 2009: 放射. 数値予報課報告・別冊第 55 号, 気象庁予報部, 87–90.
- 室井ちあし, 2009: 気象庁全球モデル. 数値予報課報告・別冊第 55 号, 気象庁予報部, 1–5.
- 室井ちあし, 2013: 開発管理の必要性. 数値予報課報告・別冊第 59 号, 気象庁予報部, 192–194.
- Nagasawa, R., 2012: The Problem of Cloud Overlap in the Radiation Process of JMA’s Global NWP Model. *CAS/JSC WGNE Res. Activ. Atmos. Oceanic Modell.*, **42**, 4.15–4.16.
- 西尾利一, 2011: 計算機 (スーパーコンピュータシステム). 平成 23 年度数値予報研修テキスト, 気象庁予報部, 68–70.
- 大泉三津夫, 保坂征宏, 2000: 陸面過程. 数値予報課報告・別冊第 46 号, 気象庁予報部, 48–66.
- 小野田浩克, 2008: 事例検証. 平成 20 年度数値予報研修テキスト, 気象庁予報部, 19–22.
- Onogi, K., J. Tsutsui, H. Koide, M. Sakamoto, S. Kobayashi, H. Hatsushika, T. Matsumoto, N. Yamazaki, H. Kamahori, K. Takahashi, S. Kadokura, K. Wada, K. Kato, R. Oyama, T. Ose, N. Mannoji, and R. Taira, 2007: The JRA-25 Reanalysis. *J. Meteor. Soc. Japan*, **85**, 369–432.
- Palmer, T. N., G. J. Schutts, and R. Swinbank, 1986: Alleviation of a systematic westerly bias in general circulation and numerical weather prediction models through an orographic gravity wave drag parameterization. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **112**, 1001–1039.
- Randall, D. and D.-M. Pan, 1993: Implementation of the Arakawa-Schubert cumulus parameterization with a prognostic closure. *The representation of cumulus convection in numerical models, AMS Meteorological Monograph Series*, **46**, 137–144.
- Rothman, L. S., A. Barbe, D. C. Benner, L. R. Brown, C. Camy-Peyret, M. R. Carleer, K. Chance, C. Clerbaux, V. Dana, V. M. Devi, A. Fayt, J.-M. Flaud, R. R. Gamache, A. Goldman, D. Jacquemart, K. W. Jucks, W. J. Lafferty, J.-Y. Mandin, S. T. Massie, V. Nemtchinov, D. A. Newnham, A. Perrin, C. P. Rinsland, J. Schroeder, K. M. Smith, M. A. H. Smith, K. Tang, R. A. Toth, J. Vander Auwera, P. Varanasi, and K. Yoshino, 2003: The HITRAN molecular spectroscopic database: edition of 2000 including updates through 2001. *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer*, **82**, 5–44.
- 佐藤均, 2018: 全球数値予報システムの検証. 平成 30 年度数値予報研修テキスト, 気象庁予報部, 42–43.
- 佐藤信夫, 里田弘, 1989: 生物圏と大気圏の相互作用. 数値予報課報告・別冊第 35 号, 気象庁予報部, 4–73.
- Scinocca, J. F., 2003: An accurate spectral nonorographic gravity wave drag parameterization for general circulation models. *J. Atmos. Sci.*, **60**, 667–682.
- Sellers, P. J., Y. Mintz, Y. C. Sud, and A. Dalcher, 1986: A simple biosphere model (SiB) for use within general circulation models. *J. Atmos. Sci.*, **43**, 505–531.
- 下河邊明, 古河貴裕, 2012: 層積雲スキームの改良. 平成 24 年度数値予報研修テキスト, 気象庁予報部, 92–96.
- Shimokobe, A., 2012: Improvement of the Stratocumulus Parameterization Scheme in JMA’s Operational Global Spectral Model. *CAS/JSC WGNE Res. Activ. Atmos. Oceanic Modell.*, 4.17–4.18.
- 新保明彦, 2017: 全球アンサンブル予報システムの概要. 平成 28 年度季節予報研修テキスト, 気象庁地球環境・海洋部, 1–8.
- Simmons, A. J. and D. M. Burridge, 1981: An energy and angular-momentum conserving vertical finite-difference scheme and hybrid vertical coordinates. *Mon. Wea. Rev.*, **109**, 758–766.
- Slingo, J. M., 1980: A cloud parameterization scheme derived from GATE data for use with a numerical model. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **106**, 747–770.
- Smith, R. N. B., 1990: A scheme for predicting layer clouds and their water content in a general circulation model. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **116**, 435–460.
- 高谷祐平, 石川一郎, 2016: 新季節アンサンブル予報システム. 平成 27 年度季節予報研修テキスト, 気象庁地球環境・海洋部, 5–19.
- Untch, A. and A. J. Simmons, 1999: Increased strato-

- spheric resolution in the ECMWF forecasting system. *ECMWF Newsletter*, 2–8.
- WMO, 1986: A preliminary cloudless standard atmosphere for radiation computation. World Climate Programme. *WCP-112*, **WMO/TD No.24**, 53.
- Wood, Robert, 2012: Stratocumulus Clouds. *Mon. Wea. Rev.*, **140**, 2373–2423.
- Yabu, S., 2013: Development of longwave radiation scheme with consideration of scattering by clouds in JMA global model. *CAS/JSC WGNE Res. Activ. Atmos. Oceanic Modell.*, **43**, 4.07–4.08.
- Yabu, S., T. Y. Tanaka, and N. Oshima, 2017: Development of a multi-species aerosol-radiation scheme in JMA’s global model. *CAS/JSC WGNE Res. Activ. Atmos. Oceanic Modell.*, 4.15–4.16.
- 山口春季, 2017: 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, 気象庁予報部, 35–41.
- 米原仁, 2014a: 変更の概要. 平成 26 年度数値予報研修テキスト, 気象庁予報部, 1–3.
- 米原仁, 2014b: 留意すべき日本付近での予測特性の変化. 平成 26 年度数値予報研修テキスト, 気象庁予報部, 24–34.
- 米原仁, 2016a: 全球数値予報システムの特性の変化. 平成 28 年度数値予報研修テキスト, 気象庁予報部, 4–29.
- 米原仁, 2016b: 全球数値予報システムの物理過程改良の概要. 平成 28 年度数値予報研修テキスト, 気象庁予報部, 1–3.
- 米原仁, 2017a: 活用例 (1)–全球モデル. 数値予報課報告・別冊第 63 号, 気象庁予報部, 29–49.
- 米原仁, 2017b: 全球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, 気象庁予報部, 1–7.
- Yonehara, H., M. Ujiie, T. Kanehama, R. Sekiguchi, and Y. Hayashi, 2014: Upgrade of JMA’s Operational NWP Global Model. *CAS/JSC WGNE Res. Activ. Atmos. Oceanic Modell.*, 6.19–6.20.
- Yonehara, H., T. Tokuhira, R. Nagasawa, M. Ujiie, A. Shimokobe, M. Nakagawa, R. Sekiguchi, T. Kanehama, H. Sato, and K. Saitou, 2017: Upgrade of parameterization schemes in JMA’s operational global NWP model. *CAS/JSC WGNE Res. Activ. Atmos. Oceanic Modell.*, 4.17–4.18.
- Yonehara, H., R. Sekiguchi, T. Kanehama, K. Saitou, T. Kinami, A. Shimokobe, D. Hotta, R. Nagasawa, H. Sato, M. Ujiie, T. Kadowaki, S. Yabu, K. Yamada, M. Nakagawa, and T. Tokuhira, 2018: Upgrade of JMA’s operational global NWP system. *CAS/JSC WGNE Res. Activ. Atmos. Oceanic Modell.*, 6.15–6.16.
- Yukimoto, S., H. Yoshimura, M. Hosaka, T. Sakami, H. Tsujino, M. Hirabara, T. Y. Tanaka, M. Deushi, A. Obata, H. Nakano, Y. Adachi, E. Shindo, S. Yabu, T. Ose, and A. Kitoh, 2011: Meteorological Research Institute-Earth System Model Version 1 (MRI-ESM1) –Model Description–. *Technical Reports of the Meteorological Research Institute*, **64**, 1–83.

## 1.2 気象庁全球モデルの展望<sup>1</sup>

### 1.2.1 はじめに

気象庁は2018年6月5日に新しいスーパーコンピュータシステムを導入し、第10世代数値解析予報システム(NAPS10)<sup>2</sup>の運用を開始した。このシステムはCray XC50(米Cray製)の主副2系統から構成されており、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。

一方、交通政策審議会気象分科会が取りまとめた「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<sup>3</sup>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<sup>4</sup>。この重点計画では、2030年までに台風の3日先の進路予報誤差を現在の1日先の誤差(約100km)程度にまで改善することを重点目標の一つとして掲げている。先進国を中心とした国々の数値予報センターにおいて全球モデルが運用されているが、最も精度の良い欧州中期予報センター(ECMWF: European Center for Medium-range Weather Forecasts)においても3日先の台風進路予報誤差は約200kmであり、当庁は更に後れを取っている(図1.2.1)。今後、NAPS10の高い処理能力を活かして、全球モデルの開発を精力的に進め、飛躍的な精度向上に結びつけていく必要がある。

本節では、第1.2.2項において海外数値予報センターで運用されているスーパーコンピュータや全球モデルなどの現状についてまとめ、第1.2.3項でNAPS10で計画している全球モデルの主要な開発課題を紹介するとともに、第1.2.4項で全球モデルの将来について展望する。

### 1.2.2 気象庁と海外数値予報センターの全球モデル

台風進路予報の精度を改善するためには、数値予報モデルの特定の部位だけを改良すれば良いというもの

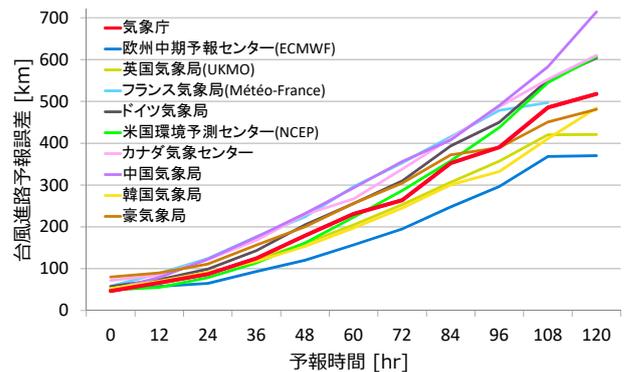


図1.2.1 気象庁を含む主要な数値予報センターの全球モデル(12UTC初期値のみ)による北西太平洋域の台風進路予報の実況(気象庁ベストトラック)に対する平均誤差[km]。横軸は予報時間[hr]。2016年に発生した26個の台風を対象としている。但し、各モデルで追跡出来たものを検証対象としているため、サンプル数はモデル毎に異なる。略称は本文で使用されているもののみ記載している。

ではなく、モデル全体の性能を向上させる必要がある。図1.2.1に示したように、多くの数値予報センターが、スーパーコンピュータシステムを用いて、全球モデルを開発・運用している。当庁を含む数値予報センターのスーパーコンピュータ並びに全球モデル及び全球アンサンブル予報システムの仕様については、数値実験作業部会(WGNE: Working Group on Numerical Experimentation)<sup>5</sup>が毎年取りまとめているが、これを基に独自に調査した結果を表1.2.1に示す。この調査結果を基に、当庁のGSMの性能の向上に必要な点について考察する。

本原稿を執筆している2019年2月時点においては、数値予報センターが利用しているスーパーコンピュータとしては、米Cray製のXCシリーズが主流である。2018年6月に更新した当庁のスーパーコンピュータが、2018年11月時点でのTOP500<sup>6</sup>の調査によれば最も性能が高く、当庁を含む多くの数値予報センターが100位以内の高性能な計算機を利用している。現時点では、最先端の現業数値予報システムを運用できるスーパー

<sup>5</sup> 気象、気候、水及び環境に関する全ての時間スケールでの予測のために利用する大気大循環モデルの開発を促進し、モデルの欠点を分析・解決していくことを目的に、世界気象機関(WMO: World Meteorological Organization)大気科学委員会(CAS: Commission for Atmospheric Sciences)と世界気候研究計画(WCRP: World Climate Research Programme)合同科学委員会が共同で設立した、主要な数値予報センターの代表からなる専門家チームである。年1回の頻度で会合を開催し数値予報モデルにかかる開発について議論するとともに、各センターの数値予報システムの情報を収集し、共有している。

<sup>6</sup> TOP500 (<https://www.top500.org>)とは、世界のコンピュータの性能ランキングであり、年に2回(6, 11月)更新される。NAPS10の主系、副系は2018年11月時点でそれぞれ28, 29位である。英国気象局(UKMO)のCray XC40は単体で22位であるが、NAPS10の2台を合わせた性能には届かない。ECMWFのCray XC40は2台構成であり、それぞれ42, 43位である。

<sup>1</sup> 本田 有機、坂本 雅巳

<sup>2</sup> 数値解析予報システム(NAPS: Numerical Analysis and Prediction System)という名称は、現在ではスーパーコンピュータシステムの正式名称ではない。慣習として使用されてきたこともあり、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も含めて、ここでは世代を明確にするためこの名称を用いる。

<sup>3</sup> 2018年8月20日付けで気象庁より報道発表が行われた。詳細は[http://www.jma.go.jp/jma/press/1808/20a/bunkakai\\_rep.html](http://www.jma.go.jp/jma/press/1808/20a/bunkakai_rep.html)を参照願いたい。

<sup>4</sup> 2018年10月4日付けで気象庁より報道発表が行われた。詳細は[http://www.jma.go.jp/jma/press/1810/04b/nwp\\_strategic\\_plan\\_towards\\_2030\\_181004.html](http://www.jma.go.jp/jma/press/1810/04b/nwp_strategic_plan_towards_2030_181004.html)を参照願いたい。

表 1.2.1 数値予報センターにおけるスーパーコンピュータ、全球数値予報システム及び全球アンサンブル予報システム

センター名 (略称)	計算機	決定論的予測 (予報期間)	アンサンブル予報 (予報期間、メンバー数)	データ同化 (インナー解像度)
気象庁	Cray XC50 (2 機構成)	TL959 L100 (11 日)	TL479 L100 (11 日、27)	4D-Var (TL319 L100)
欧州中期予報センター (ECMWF)	Cray XC40 (2 機構成)	TCo1279 L137 (10 日)	TCo639 L91 (15 日、51)	Hybrid 4D-Var (TL399 L137)
英国気象局 (UKMO)	Cray XC40 (3 機構成)	10 km L70 (7 日)	20 km L70 (7 日、18)	Hybrid 4D-Var (40 km L70)
フランス気象局 (Météo-France)	bullx DLC 720 (2 機構成)	TL1198C2.2 L105 (4 日)	TL798C2.4 L90 (4.5 日、35)	Hybrid 4D-Var (TL399C1 L105)
ドイツ気象局	Cray XC40 (2 機構成)	13 km L90 (7.5 日)	40 km L90 (7.5 日、40)	Hybrid 3D-Var (13 km L90)
米国環境予測センター (NCEP)	Cray XC40 (2 機構成)	T1534/TL574 L64 (10 日/16 日)	T574/TL382 L64 (8 日/16 日、21)	Hybrid 4D-EnVar (T574L64)
カナダ気象センター	Cray XC40 (2 機構成)	17.2 – 25 km L80 (10 日)	0.35° L45 (16 日、21)	Hybrid 4D-EnVar (0.35° L81)
中国気象局	Sugon TC4600 (2 機構成)	0.25° L60 (10 日)	0.5° L60 (15 日、30)	4D-Var (1° L60)
韓国気象局	Cray XC40 (2 機構成)	10 km L70 (12 日)	32 km L70 (12 日、49)	Hybrid 4D-Var (60 km L70)
オーストラリア気象局	Cray XC40 (2 機構成)	25km L70 (10 日)	33km L70 (10 日、18)	4D-Var (80 km L70)

(注意) 略称は本文で使用されているもののみ記載している。

コンピュータの環境は整っていると言える。

数値予報モデルの実効的な解像度 (Skamarock 2004) は必ずしも予測精度に直結する訳ではないが、高解像度化により地形や海陸分布、細かいスケールの現象をより正確に表現できる。解像度に合わせた物理過程の改良などに取り組む必要があるが、これらを合わせた成果として、予測精度の向上に結びつくことが多い。数値予報モデルの水平格子間隔や鉛直層数がモデルの実効解像度を定める主要因である。全球モデルの水平格子間隔<sup>7</sup>については、ECMWF の TCo1279 は約 9 km、米国環境予測センター (NCEP: National Center for Environmental Prediction) の T1534 は約 13 km である。また、フランス気象局 (Météo-France) の T1198 C2.2 は可変格子の解像度であり、欧州付近で最も高解像度となっていて、約 7 km (反対側の南西太平洋で約 37 km) である。このように、概ね水平格子間隔 10 km の全球モデルを先進的な数値予報センターでは運用している。当庁が運用している GSM は TL959 であり、その水平格子間隔は約 20 km である。運用開始した 2007 年 11 月には世界で最も高い水平解像度であった (室井 2009) が、現在では GSM より高解像度の全球モデルを運用する数値予報センターが増えている。一方、

<sup>7</sup> 球座標を採用する全球モデルでは、球面調和関数を基底関数とする波で離散化する場合が多い。波と格子を対応させる方法は複数あるが、東西波数と全波数の空間で三角切断 (triangular truncation) を行う場合先頭に “T” を付けて、切断波数  $nnn$  の場合は  $Tnnn$  などと表記する。線形格子 (linear grid) を採用した場合には先頭に “TL” を、三次格子 (cubic grid) を採用した場合には先頭に “TC” や “TCo” を付ける (Malardel et al. 2015)。

鉛直層数については、ECMWF が鉛直 137 層と最も高解像度ではあるものの、当庁も 2014 年 3 月より鉛直 100 層の GSM を運用しており、海外数値予報センターと比較しても鉛直分解能は高い。予報時間は概ね 10 日程度<sup>8</sup>であり、高低気圧などの総観スケールの予測可能性が概ね 2 週間程度と言われている中で、情報価値のある決定論的な予測ではこの辺りが限界であると思われる。海外の数値予報センターは、解像度の高い全球モデルを導入し着実に予測精度を改善してきており、よりきめ細やかなプロダクトを提供している。当庁としても、GSM の更なる高解像度化に取り組む必要がある。

全球アンサンブル予報システムについて、利用されている予報モデルの水平解像度を見てみると、ECMWF の TCo639 は約 18 km、NCEP の T574 は約 34 km である。また、Météo-France の T798C2.4 は欧州付近で 10 km (南西太平洋で約 60 km) である。当庁の全球アンサンブル予報システム (全球 EPS: Ensemble Prediction System) の TL479 は約 40 km であり、決定論的予測モデル同様、最先端の数値予報センターと比べて水平解像度が粗い。一方、鉛直方向の解像度に関しては、当庁は 100 層であり、ECMWF の 91 層よりも多い。これは、2017 年 1 月に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を統合して全球 EPS とした際に、GSM と同じモデルを全球 EPS の予報モデルとして利用することとし、物理過程の性

<sup>8</sup> 欧州では、10 日程度先までの中期予報については ECMWF が数値予報の業務を担うという事情があるため、若干予報時間が短くなっている。

能に重要な影響を与える鉛直層を GSM と合わせたためである。メンバー数は、ECMWF の 51 メンバーが最多であり、UKMO (United Kingdom Met Office) の 18 メンバーが最小である。当庁も 27 メンバーと多くはない。UKMO では前初期値からのメンバーと合わせてプロダクトを作成するなどの工夫をしているが、当庁はそのような取り組みをしていない。不確実性をよりの確に捉えるためにアンサンブルメンバーを増強する必要がある。

全球解析について、データ同化手法として 4 次元変分法が主流となっている。計算コストを抑えるために、水平格子間隔 50 km 程度の低解像度モデルがインナーモデルとして用いられている。また、海外数値予報センターは、データ同化にアンサンブル予報を組み合わせたハイブリッド同化（詳細は次項 (1) 参照）を導入することにより予測精度を向上させてきた。これを導入していない当庁としてはデータ同化システムの改善に取り組む必要がある。

### 1.2.3 NAPS10 における改良計画

台風予報をはじめとする国内の防災情報の作成支援を充実し、国際的に競争力がある全球モデルであり続けるために、NAPS10 の高い計算機性能を活かした GSM の開発に取り組んでいく。

NAPS10 の運用が開始された 2018 年 6 月に、2018 年度末までに台風強度予報の予報期間を現在の 3 日先から 5 日先まで延長する計画があり、これを支援するために、00, 06, 18UTC 初期値<sup>9</sup>の全球モデルの予報時間を 84 時間から 132 時間に延長している (坂本 2018)。今後、00UTC 初期値の GSM の予報時間を 264 時間まで延長する計画がある。また、NAPS10 運用期間中には、以下 3 つの主要な開発課題にも取り組む。

1. ハイブリッド同化の導入
2. 鉛直層増強と物理過程の改良
3. 水平高解像度化と物理過程の改良

これらの主要な開発課題の詳細については後述するが、新規の観測データの利用や、既に利用している観測データの利用手法の改良にも随時取り組んでいく。特に 2019 年度には、雲・降水域の衛星マイクロ波輝度温度データの利用 (計盛 2011) の開始を目指す。

#### (1) ハイブリッド同化の導入

予報精度の向上には、予報モデルの改良だけでなく、初期値の精度向上も重要である。このためには、初期値を作成するためのデータ同化システムを高度化する必要がある。その高度化の方法の一つがハイブリッド同化の導入である。当庁の全球解析の 4 次元変分法データ同化システムでは、過去の一定期間の予測データから計算された気候学的な背景誤差共分散を用いている (門脇 2005; 米原 2014)。ハイブリッド同化では、これ

にアンサンブルメンバーから得られる予報誤差共分散を組み合わせて用いる (Lorenz 2003) ことで、観測データを同化した時に、解析対象時刻の気象状況により整合する修正量を得ることが出来る。これにより初期値の精度を向上し、ひいては予測精度を向上することが出来る。当庁でもこのハイブリッド同化を導入し、初期値の精度向上に努める必要がある。

#### (2) 鉛直層増強と物理過程の改良

2014 年 3 月に、GSM の鉛直層を 60 層から 100 層に増強すると同時に物理過程の改良に取り組んだ (第 1.1.6 項; 米原 2014)。鉛直層の増強に合わせて、放射、境界層、重力波、積雲対流、陸面の物理過程の改良を行い、予測精度を向上した<sup>10</sup>。第 2 章及び第 3 章で述べるように、鉛直層増強は物理過程の働きとも相互に関係し合うものであり、これらの改良を適切に行い、予測精度の向上を実現してきた。NAPS10 運用期間中には、現在の 100 層から 128 層へと更に増強し、合わせて物理過程の改良を行うことで、一層の予測精度向上に努める。

#### (3) 水平高解像度化と物理過程の改良

天気予報や防災情報の支援のために、世界に先駆けて 2007 年 11 月に GSM の水平格子間隔を約 20 km とした (岩村 2008)。これ以来 10 年以上に渡り水平格子間隔は変更していないが、第 1.2.2 項で示したように、海外の数値予報センターでは既に 20 km よりも小さい水平格子間隔の全球モデルを運用している。当庁においても、天気予報や防災情報の支援を強化するために、高解像度で高精度の全球数値予報プロダクトが必要とされている。

NAPS10 期間中の GSM の水平高解像度化は、約 13 km の格子間隔にすることを目標としており、この段階では静力学平衡を仮定するモデルの運用を続ける予定である。その一方で、これまで 1 次格子を使用して球面調和関数への変換を行ってきたが、表 1.2.1 にあるように ECMWF では水平高解像度化の際に、エアシングやそれに伴うスペクトラルブロッキングの問題を回避するために 3 次格子の利用を開始した (Wedi 2014)。このことを鑑みて、当庁でも水平高解像度化に合わせて高次格子を使用することも視野に開発に取り組む。また、格子の配置や地形データの作成手法を見直し、高解像度化に対応する植生被覆・土地利用や陸水分布を適切に設定して、高解像度で高精度の全球数値予報プロダクトが提供できるように取り組んでいくことにしたい。

<sup>10</sup> この他、全球測位衛星システム (GNSS) 掩蔽観測データ利用手法の改良、未使用であった衛星輝度温度データの利用、地上 GNSS 天頂大気遅延量データの新規利用を合わせて実施した。

<sup>9</sup> 12UTC 初期値の全球モデルの予報時間は 264 時間である。

### 1.2.4 全球モデルの将来展望

第 1.2.1 項で触れたように、重点計画では、2030 年に向けた数値予報技術の開発の方向性が示されている(気象庁 2018)。この重点計画では、4つの重点目標を掲げているが、ここでは全球モデルと最も関わりの深い「台風防災」に着目し、その内容を簡潔に紹介する<sup>11</sup>。この重点目標では、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指しており、数値的な目標として 2030 年までに台風の 3 日先の進路予報誤差を現在の 1 日先の誤差(約 100 km)程度までに改善することを掲げている。

台風の進路予報改善のためには、環境指向流と台風の構造の両面から予測精度を向上する必要がある。前者については、熱帯や中緯度の大気の流れの予測の改善が求められている。特に、全球モデルの台風進路予測には転向後の進行速度が遅いなどの傾向が見られるため、上空の気圧の谷と台風との位置関係を改善することも課題と考えられる。後者については、台風の規模や台風自身が生み出す流れなどの予測精度の向上が重要である。また、台風に伴う大雨や風の予測については、メソモデルによる予測精度が重要となるが、メソモデルへ境界条件を提供する全球モデルには、台風の位置の正確な予測や水蒸気などの大規模場の予測精度の向上が求められている。

これらの課題に取り組むために、全球モデルや全球解析について以下の方向性をもって開発に取り組んでいく必要がある。

- より詳細な予測値をメソモデルへ引き継ぐために、全球モデルの水平格子間隔を 10 km よりも高解像度化すること。
- 乱流、積雲対流、雲などに関する物理過程を抜本的に見直すこと。
- 運動量輸送に関連する物理過程を高度化すること。
- 水平・鉛直高解像度化とそのために必要な力学過程と物理過程及び両者の相互作用を改良すること。
- 人工知能(AI)技術を活用して、物理過程のパラメータを最適化すること。
- ハイブリッド同化を導入すること。
- 高密度かつ高頻度な観測データを活用するために、観測誤差相関のある観測データを取り扱える手法を導入すること。
- 全球 10 km メッシュの高解像度海面水温データを作成すると同時に、海水温に関する効果の取り扱い手法を精緻化すること。

この他、雲・降水域のマイクロ波・赤外放射輝度温度

データを利用することや、様々な観測データの利用方法や品質管理手法の高度化に取り組んでいくことも重要である。

これらの課題には、第 1.2.3 項で示しているように既に具体的な開発計画を立てて開発に取り組んでいるものもある。今後は、当庁だけでなく、大学等研究機関や海外数値予報センターと一層連携を強化して開発に取り組み、3 日先の台風進路予報誤差を約 100 km 程度にまで改善するという野心的目標の達成に邁進していきたい。

なお、重点計画には、「豪雨防災」に関する重点目標もあり、線状降水帯の発生・発達予測精度を向上し、集中豪雨の可能性を高い確度で予測することで、早期の警戒と避難を可能にすることを目指している。目標達成のためには、局地数値予報システムの改良に取り組む必要があるが、側面境界を通して全球モデルは間接的に影響を与えている。集中豪雨の的確な予測のために、環境場の予測精度を向上させていく必要があり、このことに留意して前述の開発課題に取り組む。

### 参考文献

- 岩村公太, 2008: 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, 気象庁予報部, 1-6.
- 門脇隆志, 2005: 全球 4 次元変分法. 数値予報課報告・別冊第 51 号, 気象庁予報部, 100-105.
- 計盛正博, 2011: 雲、雨の影響を受けたマイクロ波輝度温度データの同化. 数値予報課報告・別冊第 57 号, 気象庁予報部, 77-83.
- 気象庁, 2018: 2030 年に向けた数値予報技術開発重点計画. 52pp.
- Lorenc, A. C., 2003: The potential of the ensemble Kalman filter for NWP: a comparison with 4D-Var. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **129**, 3183-3203.
- Malardel, S., N. Wedi, W. Deconinck, M. Diamantakis, C. Kühnlein, G. Mozdzynski, M. Hamrud, and P. Smolarkiewicz, 2015: A new grid for the IFS. *ECMWF Newsletter*, **146**, 23-28.
- 室井ちあし, 2009: 概論. 数値予報課報告・別冊第 55 号, 気象庁予報部, 1-5.
- 坂本雅巳, 2018: 全球モデルの予報時間延長. 平成 30 年度数値予報研修テキスト, 気象庁予報部, 5-6.
- Skamarock, W. C., 2004: Evaluating Mesoscale NWP Models Using Kinetic Energy Spectra. *Mon. Wea. Rev.*, **132**, 3019-3032.
- Wedi, N. P., 2014: Increasing horizontal resolution in NWP and climate simulations: illusion or panacea? *Phil. Trans. Roy. Soc. A*, **372**.
- 米原仁, 2014: 変更の概要. 平成 26 年度数値予報研修テキスト, 気象庁予報部, 1-3.

<sup>11</sup> 重点計画では、「台風防災」の他に、「豪雨防災」「社会経済活動への貢献」「温暖化への適応策」という重点目標を掲げており、それぞれについて数値予報モデルの現状と課題の分析、開発計画について示している。