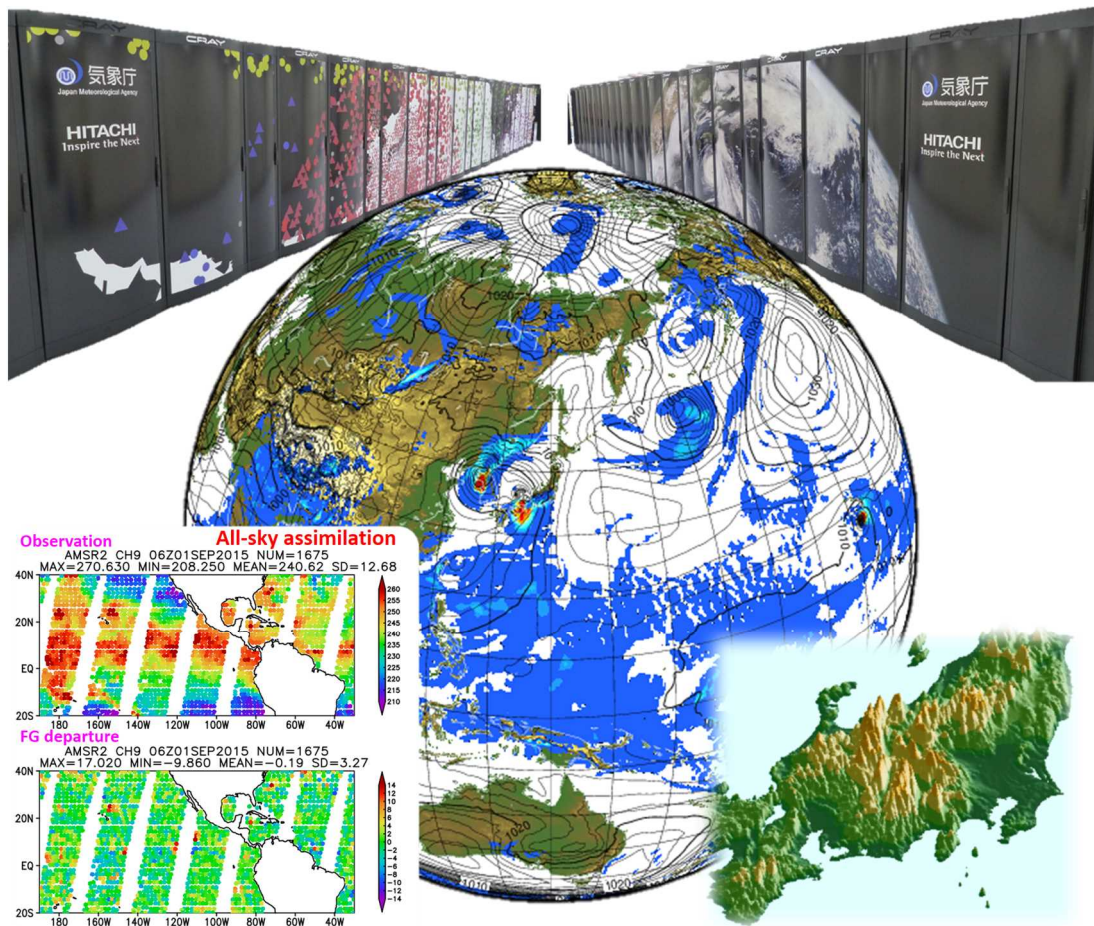


数値予報 60 年誌

～数値予報課 60 年(1959 - 2019)の歩み～



気象庁予報部数値予報課

まえがき

1959年に数値予報業務が開始され、今年2019年で60年を迎えることとなります。ちょうど平成から令和へと変わる時代でこの節目を迎えられたことは、喜ばしく思います。

そこで60年を記念し、「数値予報60年誌」を編纂する運びとなりました。

第1部は現役の数値予報課職員を代表し、まずプログラム班長と数値予報モデル開発推進官から平成30年間の数値予報技術の変遷として、気象庁スーパーコンピュータと現業数値予報システムについて、終わりに小職から令和時代の数値予報をテーマに、それぞれ記述しています。

第2部は今後の数値予報への期待と題し、気象庁の「数値予報モデル開発懇談会」委員をはじめとする有識者の先生などからご寄稿を頂戴しましたので、掲載させていただくこととしました。

気象庁では2018年10月、「2030年に向けた数値予報技術開発重点計画 ～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～」を策定し、数値予報の高度化・精度向上の取り組みを強力に推進する所としたところです。

60年という節目を迎え、これまでの数値予報技術開発に尽力された関係各位に敬意を表するとともに、社会のニーズや周囲からの期待に応え、数値予報のさらなる発展に取り組んで参りたいと考えておりますので、今後ともご指導よろしくお願いたします。

数値予報課長 室井ちあし

目次

第1部 平成30年間の数値予報技術の変遷	1
1.1 平成30年間の数値予報技術の変遷	1
(1) 気象庁スーパーコンピュータ.....	1
(2) 気象庁数値予報システム.....	12
1.2 令和時代の数値予報	26
第2部 今後の数値予報への期待	35

第 1 部 平成 30 年間の数値予報技術の変遷

1.1 平成 30 年間の数値予報技術の変遷

(1) 気象庁スーパーコンピュータ¹

平成の 30 年間(1989～2019 年)に気象庁で現業運用されたスーパーコンピュータシステムは NAPS5 から NAPS10 の 6 世代にわたる。各 NAPS 世代のスーパーコンピュータの仕様をまとめたものを表 1.1.1 に示す。NAPS2(1967 年運用開始)以降、NAPS9 まで日立製作所のスパコンが利用されてきたが、昨年運用開始の NAPS10 において 51 年ぶりに他社(米国クレイ社)のスパコンに更新された(システム受注者は引き続き日立製作所)。

表 1.1.1 NAPS5 から NAPS10 までのスーパーコンピュータ仕様

	NAPS5	NAPS6	NAPS7	NAPS8	NAPS9	NAPS10
運用期間	1987-1996	1996-2001	2001-2006	2006-2012	2012-2018	2018-2024?
機種名	S-810/20K	S-3800/480	SR8000E1	SR11000/K1 (サブシステム 2,3) SR11000/J1 (サブシステム 1)	SR16000M1 (主系・副系)	クレイ XC50 (主系・副系)
理論性能	630 MFlops	32 GFlops	768 GFlops	21.5 TFlops 6.08 TFlops	847 TFlops (主副合計)	18.16 PFlops (主副合計)
CPU	ベクトル (日立開発 LSI)	ベクトル (日立開発 LSI)	日立開発 PowerPC	IBM POWER5+ IBM POWER5	IBM POWER7	Intel Xeon 8160
ノード数	1	1	80	160 50	864	5,632
CPU 数	1	4	640	2,560 800	3,456	11,264
CPU コア数	1	4	640	2,560 800	27,648	270,336
メモリ量	64 MB ES 512 MB	2 GB ES 12 GB	640 GB	10 TB 3.1 TB	108 TB	528 TiB
ストレージ (高速)	35 GB	205.7 GB	2.7 TB	13.6 TB	348 TB	9.6 PB
ストレージ (大容量)	40 GB (光ディスク)	2.12 TB (磁気テープ)	80 TB (磁気テープ)	36.2 TB 2 PB (磁気テープ)	2.9 PB	25.1 PB 80 PB (磁気テープ)
スパコン OS	VOS3/ES1	VOS3/AS	HI-UX/MPP	IBM AIX 5L	IBM AIX 7	CLE6.0 SUSE12.2

¹ 片山 桂一(プログラム班長)

初代 NAPS (IBM704) から NAPS10 までの性能向上の状況を図 1.1.1 に示す。

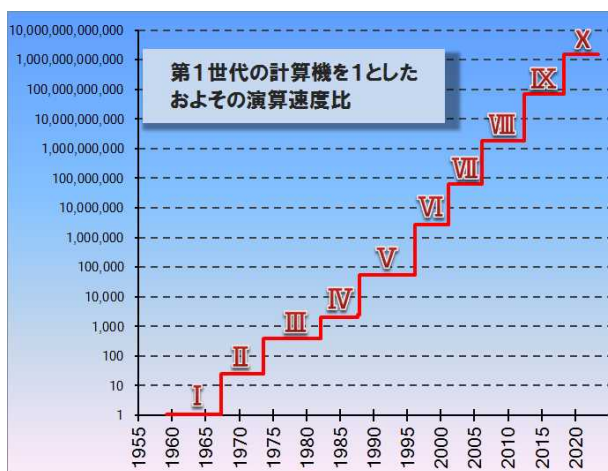


図 1.1.1 歴代 NAPS の性能。初代 NAPS (IBM704) を1とした演算性能比を示す。

理論性能で見ると NAPS10 (XC50) は主系及び副系それぞれ 9 PFlops、合計 18 PFlops あまりに達し、NAPS5 (S-810) の 2,880 万倍の性能アップとなっている。日本の気象庁だけではなく、諸外国の気象機関もほぼ同様のスパコン更新状況となっている (図 1.1.2)。

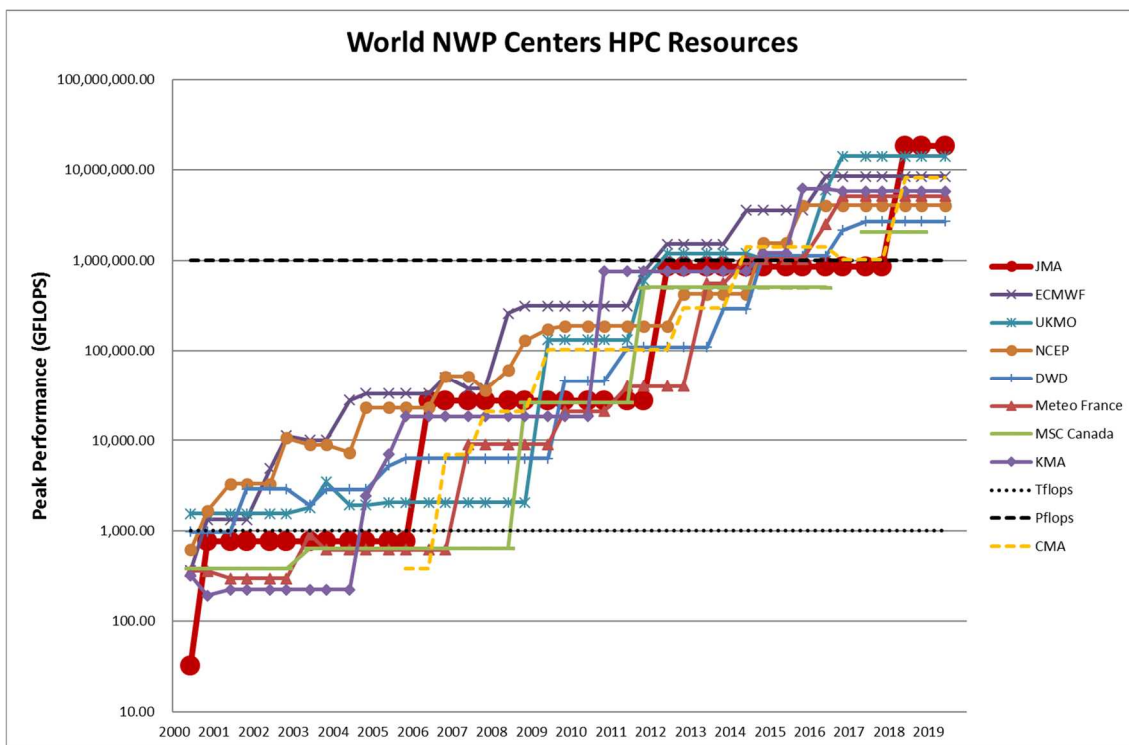


図 1.1.2 各国数値予報センターのスパコン性能比較 (Top500 ランキングのデータより作成)

この30年間、スパコンのアーキテクチャは大きく変化し、これに合わせて数値予報ルーチンのプログラムの書き換えも相当な規模で実施されてきた。ここではスパコンのハードウェア、ソフトウェア、プログラミング開発環境、そして数値予報ルーチン構築・運用のために開発されたライブラリ・ツール類等について簡単に振り返る。

(a) スパコンのハードウェア

NAPS5(1987年12月運用開始)で導入されたS-810は日立最初のスーパーコンピュータとして登場²したベクトル型の計算機であった³。ベクトルプロセッサは日立開発のカスタムLSIを41個配置したロジックボードで構成されていた⁴。S-810は「高速演算装置」として導入されたが、このほか大型汎用機のM-680Hが「バッチ処理装置」として運用された。

NAPS6(1996年3月運用開始)で導入されたS-3800は、S-810/S-820シリーズを性能アップした上位互換のベクトル型スパコンであった。4台までのマルチプロセッサ構成とすることが可能で、NAPS6スパコンもこの最大構成であった。主記憶を4台のプロセッサで共有する共有メモリ型並列のプログラムを実行することで高速計算が可能であった。

2000年代に入ると各メーカーのスパコンは次々と並列スカラ計算機に切り替わっていった⁵。

NAPS7(2001年3月運用開始)で導入されたSR8000はPowerPCベースの日立開発RISCプロセッサを用いた並列コンピュータであった。実行性能を向上させるために「協調型マイクロプロセッサ機構」及び「疑似ベクトル処理機構」を採用し、ノード間の通信を高速化するために「多次元クロスバネットワーク」を搭載した。

NAPS8(2006年3月運用開始)で導入されたSR11000はIBM開発のPOWER系プロセッサを搭載した並列コンピュータであった⁶。NAPS8から衛星データ処理システムと一体整備することとなり、衛星データ高度処理システム(サブシステム1、SR11000/J1)が1台先行納入され、翌年NAPSスパコン(サブシステム2及び3、SR11000/K1)が2台整備された。

NAPS9(2012年6月運用開始)で導入されたSR16000はIBM開発のPOWER7を搭載した並列コンピュータであった。

SR11000及びSR16000はIBM製のCPUを搭載し、OSもIBM AIXを採用していることから、内容はほぼIBMのスパコンであった⁷。

NAPS10(2018年6月運用開始)ではスパコンメーカーがクレイに切り替わり、XC50が導入された⁸。米国クレイのXCシリーズのスパコンはすでに各国の数値予報センターにおいて導入

² NAPS5以前に導入された日立Mシリーズは大型汎用機という扱いである。

³ S-810の発表が1982年だが、この頃IBM PCやMacintosh等のパソコンも登場している。

⁴ 現在のCPUのように1チップではなく、多数のLSIの組み合わせでベクトルプロセッサを構成。

⁵ NECだけは現在でもベクトル型スパコン(SX-Aurora TSUBASA)を開発・製造している。

⁶ モデルH1はPOWER4+、モデルJ1にはPOWER5、モデルK1にはPOWER5+が搭載された。

⁷ ノード(マザーボード基板)や実装技術は日立製。日立のカタログには「世界最高クラスの実装技術」と記述されていた。

⁸ システムインテグレーターは引き続き日立。日立はスパコンの新規開発が止まった状態のよう。

済みであり⁹、気象庁に納入されたマシンも運用開始後の障害はこれまでの世代の NAPS スパコンに比べて非常に少ない¹⁰。NAPS10 の XC50 ではインテル製 CPU の Skylake-SP(Xeon Platinum 8160)を搭載し、高速ストレージとして DDN 社の Lustre ファイルシステムを採用した。クレイスパコンではフロントパネルのデザインを特注することが通例となっており、日立専属デザイナーと打合せを重ね、主系に静止衛星観測データのカバレッジマップ、副系に大型台風接近時のひまわり可視画像をプリントすることとした(図 1.1.3)。

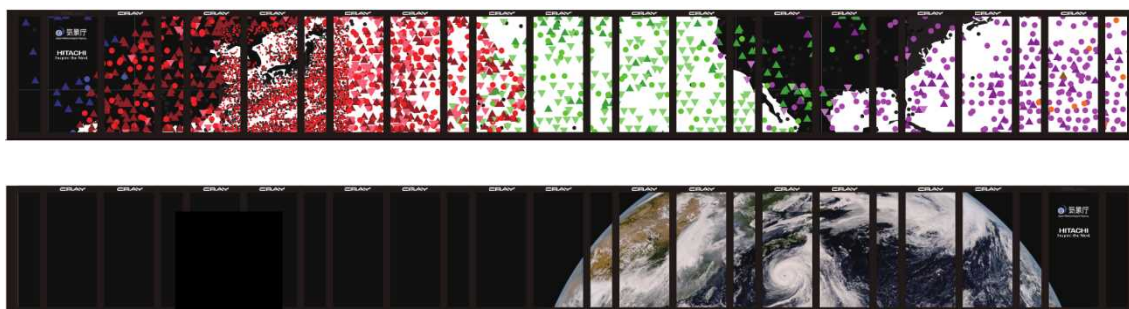


図 1.1.3 NAPS10(クレイ XC50)のフロントパネル。日立製作所のデザイン画より。上段が主系、下段が副系。(スパコンの横幅は約 18 m あるため、計算機室内でこのような写真の撮影は不可能。)

NAPS6 からは世界のスーパーコンピュータ性能ランキングである Top500 に登録を行っており¹¹、初回登録時は NAPS6 が 28 位、NAPS7 が 18 位、NAPS8 が 45 及び 46 位、そして NAPS10 が 25 及び 26 位と上位の順位を獲得してきた。(図 1.1.4)

スパコンシステムは NAPS5 までは東京都千代田区大手町の気象庁本庁(3 階)に整備されたが、NAPS6 以降については東京都清瀬市の気象衛星センター及びシステム運用室に設置されている。(図 1.1.5)

日立製スパコンについては気象庁 NAPS と同じ機種が、東京大学において先行導入されることが多かった(表 1.1.2)。東大で運用された経験による改良(バグ取り)を経ることが、気象庁現業スパコンの安定稼働に結びついていたことは無視できない。

⁹ ECMWF、Met Office、NCEP、DWD、BoM、KMA、カナダ、スイス、インド、ロシア及び南アフリカなど非常に多くの気象機関へ納入されている。

¹⁰ ノード数・CPU 数が多いことから部品故障はしばしば発生するが即時にシステムから切り離し、部品を交換するため、業務影響は非常に少ない。

¹¹ NAPS9 を除く。NAPS9 がエントリーしなかったのはベンチマークを実行する時間的な余裕がなかったため。

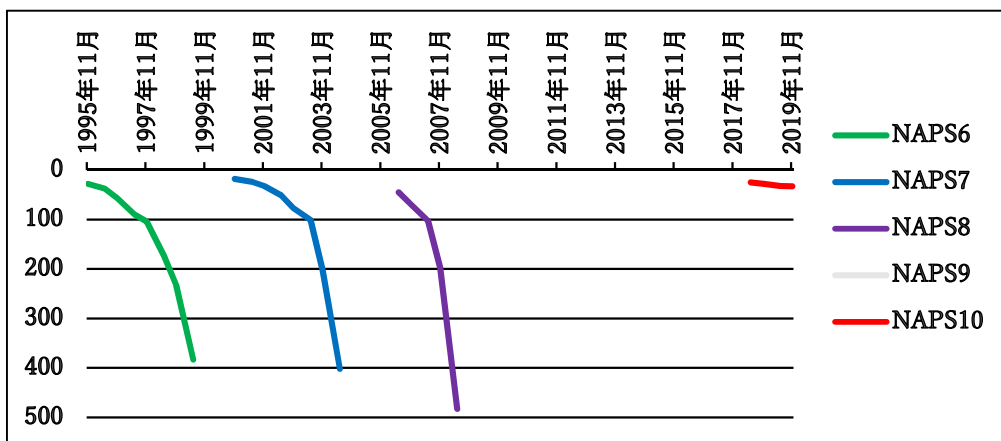


図 1.1.4 NAPS6 から NAPS10 までの Top500 ランキングの変遷
(Top500 ランキングリストは毎年 6 月と 11 月の年 2 回公表される。)

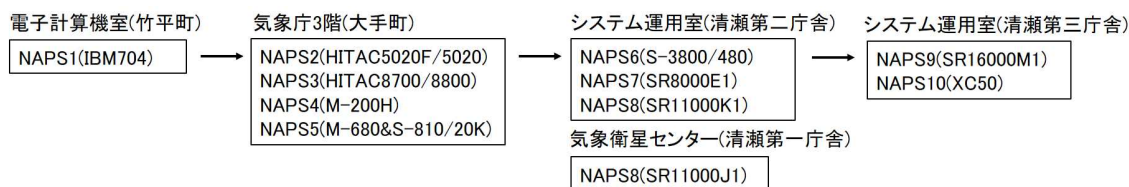


図 1.1.5 NAPS スパコン設置場所の変遷

表 1.1.2 気象庁と東京大学の日立製スパコンの導入時期(年)

	気象庁	東京大学
S-810	1987	1983
S-820	—	1988
S-3800	1996	1993
SR2201	—	1996
SR8000	2001	1999
SR11000J1	2005	2005
SR16000M1	2012	2011

(気象庁は運用開始年、実際には半年程度先行して設置・移行作業開始となる。)

(b) スパコンのソフトウェア

NAPS6 (S-3800) までのベクトル計算機時代では OS に日立の VOS3 が採用されていた。ジョブ制御スクリプトの JCL や端末上で動作するエディターソフトの ASPEN (アスペン)、浮動小

数点形式が IEEE 形式ではなく、M 形式¹²など現在の UNIX 系 OS 搭載スパコンと比較すると異なること(使いづらいこと)は多い。なお、JCL については後述の数値予報ルーチンツールの「JCL」の起源となっている。

NAPS7(SR8000)以降は UNIX 系 OS がスパコンに搭載されている。利用可能なエディターも vi や emacs 系統が使えるようになり、操作性は格段に向上した。その反面、コマンドの利用やシェルスクリプトの記述等柔軟性が高いことから、数値予報ルーチンの申請スクリプト等が様々なスタイルとなっていたため、ルーチンの管理には一定の制限が必要ということで、後述の数値予報ルーチンツールが徐々に整備されていくことになる。

UNIX 系スパコンでは高速なファイル入出力を達成するためにファイルシステムの選択が重要になる。NAPS7(SR8000)では日立独自の「ストライピングファイル機構¹³」、NAPS8(SR11000)では GPFS¹⁴、NAPS9(SR16000)では HSFS¹⁵、NAPS10(XC50)では Lustre が採用されている。

UNIX 系スパコンにおける OS は、NAPS7(SR8000)が日立製 HI-UX、NAPS8(SR11000)及び NAPS9(SR16000)が IBM 製の AIX、そして NAPS10(XC50)は SLES(SUSE Linux Enterprise Server)¹⁶と徐々に世界的に広く使われている UNIX や Linux に移り変わってきている。

(c) プログラム開発環境

計算機と同様にコンパイラについても NAPS2(HITAC5020)から NAPS9(SR16000)までの約 50 年間にわたって日立製の(最適化)Fortran コンパイラが利用されてきた。

NAPS5(S-810)では FORTRAN77 規格の「FORT77/HAP」、NAPS6(S-3800)ではこれに自動並列化機能がサポートされた。

NAPS7(SR8000)では「最適化 FORTRAN77」と「最適化 Fortran90」が提供された¹⁷。

NAPS8(SR11000)と NAPS9(SR16000)では引き続き「最適化 Fortran90」が提供された¹⁸。

NAPS10(XC50)では Cray コンパイラ、Intel コンパイラ及び GNU コンパイラの 3 種類の開発環境が利用可能となり、必要に応じて使い分けができるようになった¹⁹。また日立製コンパイラから他社コンパイラへの初の書き換えとなり、移植作業に相当な時間を必要とした²⁰。

¹² 日立のメインフレーム(M シリーズ)の形式なので M 形式、IBM のメインフレームと互換なので一般的には IBM 形式と呼ばれる。

¹³ SR16000 以降の HSFS(Hitachi Striping File System)へつながる日立製ファイルシステム。

¹⁴ IBM により開発された分散ファイルシステム。General Parallel File System。現在は ISS(IBM Spectrum Scale)という製品名。

¹⁵ 運用開始までなかなか高速ストレージが安定しなかったことを覚えておられる方も多いはず。

¹⁶ 計算ノード(ESM ノード)では CLE(Cray Linux Environment)というクレイによりカスタマイズされた Linux カーネルが動作している。

¹⁷ Fortran90 が普及するにつれて有志による「気象庁コーディングルール」の検討が始まり、数値予報モデルのソースコードが FORTRAN77 からモジュールを利用できる Fortran90 へと書き換えられていった。

¹⁸ C 言語については NAPS8 まで日立最適化 C が、NAPS9 では IBM XL C が提供された。

¹⁹ NAPS10 においては全球モデル系が Cray コンパイラ、領域モデル系が Intel コンパイラを使用している。

²⁰ 2015(平成 27)年度に整備された首都圏ストレージ(首都圏空港及び周辺空域予報高度化開発用ストレージ)ではインテル CPU のサーバと Intel コンパイラ(及び PGI コンパイラ)が利用可能であったため、NAPS10 に先行して数値予報ルーチンのプログラムの移植及びテストが行われた。

NAPS6 (S-3800) 以降はマルチプロセッサのスパコンとなり、プログラムを高速実行するためには並列化に対応することが必要となった。NAPS6 では DO ループに対する自動並列化や、指示行を挿入して複数の処理を並列で実行することが可能であった。

NAPS7 (SR8000) 以降は MPI ライブラリが利用可能となり、ノード間の並列処理 (分散メモリ型並列化) は MPI が、ノード内の共有メモリ型並列化 (スレッド並列) はコンパイラによる自動並列化または OpenMP が使用された²¹。数値予報ルーチンは実行時間が決められており、高速なプログラム実行が求められるため、プログラム開発者は並列化プログラミングに関する知識も習得する必要がある。

スレッド並列化については、ノード内の CPU 数・コア数が増加する傾向 (NAPS7 は 8 個、NAPS8 は 16 個、NAPS9 は 32 個、NAPS10 は 48 個²²) となっており、プログラムの並列化率を高めるためには様々な工夫が必要になってきている。

(d) NuSDaS

数値予報 GPV のファイル形式については、NAPS6 (S-3800) までは GVD1 (直接編成) 及び GVS1 (順編成) というフォーマットがルーチンで使用されていた。NAPS7 については OS が UNIX 系となることから、新たな GPV ファイル形式の検討が 2000 年に開始された。

プログラム班により開発された NuSDaS (Numerical Prediction Standard Dataset System) は定義ファイル (テキスト) とデータファイル群 (バイナリ) を別のディレクトリで管理するデータセットで、読み書き用のライブラリ (API) により、データセットへの操作が容易に行える構造になっていた。NAPS7 への移行期間中より利用可能となり、各ルーチンプログラムは NuSDaS 向けに改修された。

最初のバージョンは日立の OS のみ動作がサポートされたが、その後数値予報課内の有志らによりインテル CPU (リトルエンディアン) への対応やネットワーク NuSDaS の開発等が行われ、NAPS だけではなくアデス等他のシステムにも利用が広がった。最新のバージョン (1.4) ではデータ圧縮形式の追加 (複合差分圧縮) 等をサポートするなど、さらなる改良が続いている。

(e) 数値予報ルーチンツール

NAPS7 (SR8000) から OS が UNIX (日立 HI-UX) となり、コマンドの操作性やスクリプト作成の自由度は増大したが、反面数値予報ルーチンではミスが多発することとなった。NAPS8 の構築に向けて、ルーチン管理を効率化する JCL、PBF 等のツール類が考案され、やがてこれらをまとめてリレーショナルデータベース (PostgreSQL) とバージョン管理 (Subversion) で一括管理を行うシステム「RENS (Routine Environment for Numerical weather prediction System)」の開発が開始された (図 1.1.6)。NAPS8 以降、数値予報ルーチンの障害発生件数は激減し、現在に至っている (図 1.1.7)。

²¹ SR8000 を使い始めたころは MPI+自動並列化を選択する処理が多かったが、各数値予報モデルを他機関及び他機種種のスパコンで動かす機会が増えていったことから徐々に MPI+OpenMP の選択が行われるようになった。

²² IBM の SMT やインテルのハイパースレッディングを使える場合はこの 2 倍のコア数となる。

•JCL (Job Control Language)

NAPS7 の中頃(2003 年ころ)に開発開始(JPP/JCL)。VOS3 の JCL に類似したジョブ制御言語。この言語で書かれたファイルをシェルスクリプトに変換するコマンド(jcl2sh)により UNIX で実行可能なスクリプトファイルを生成する。

•PBF(Program Build File-format)

PBF は一定の様式でソースファイル、ライブラリファイル及びインクルードファイル等を記述することで、NAPS での利用に適した makefile を自動生成し、コンパイルまで行うことが可能なツール。

•JDF(Job Definition File)

JDF は JG(ジョブグループ)やジョブの各種内容を記述したテキストファイル。実行開始時刻や先行ジョブ等の設定が可能。RensDB への登録・利用や、後述する ROSE で使用される。

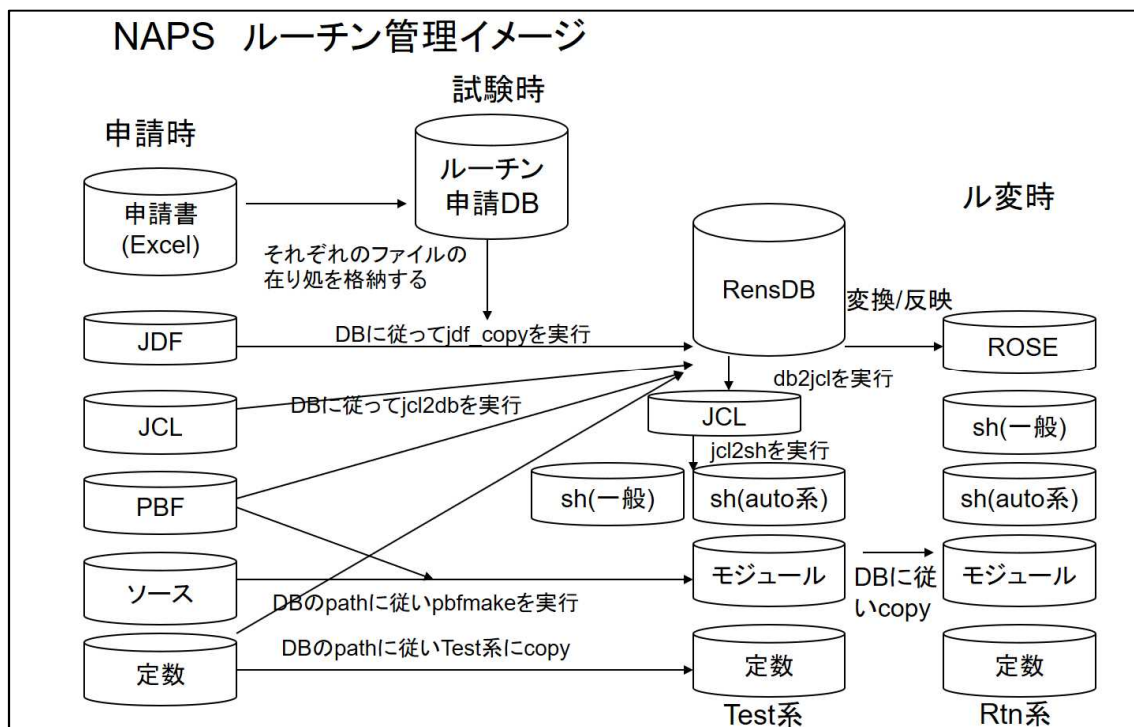


図 1.1.6 RENS による数値予報ルーチン管理のイメージ図

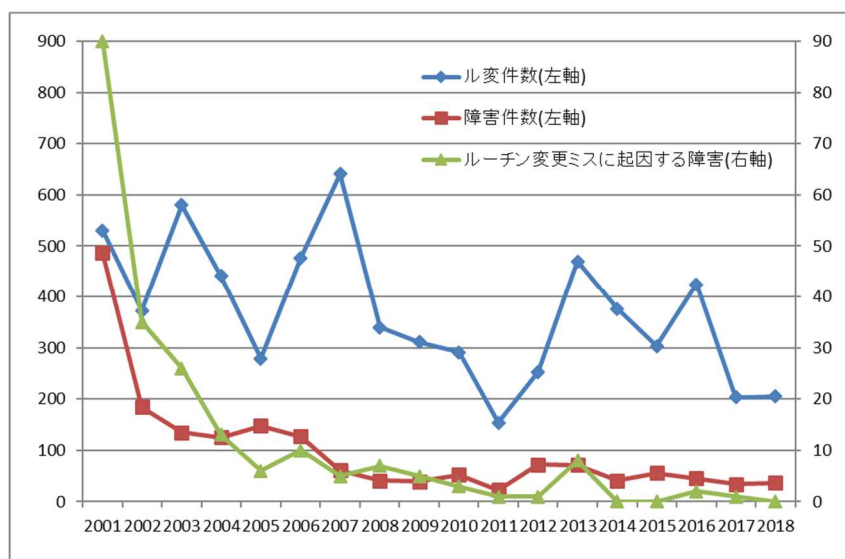


図 1.1.7 数値予報ルーチン障害発生数

数値予報ルーチンのジョブ制御には長い間、日立作成の「JNOS(JMA Nwp Operating System)」が運用されてきた。NAPS10 ではこれに替わり、プログラム班作成の「ROSE (Routine Operation and Scheduling Environment)」が利用されている(図 1.1.8)。JNOS については日立開発であり、NAPS の毎更新時に相当なコストがかかっていたこと(その分をハードにかけたかったこと)、自前のジョブ管理ソフトがあればスパコンベンダーが変更になってもスムーズな移行が可能になること等の理由により、ROSE の開発は 2008 年ころに開始された。ROSE は BCP サーバ²³や NAPEX (数値解析予報実験システム) 等で実績を積み、改良を重ねることで、NAPS10 において正式に業務利用されることになった²⁴。

(f) NAPEX (数値解析予報実験システム)

2001 年の NAPS7 更新後、OS が UNIX に切り替わったことを契機として、解析・予報サイクル実験を効率的に行うために、ECMWF の事例を参考とした実験システムの構築が数値予報班の有志により開始された。これによりユーザーは用意されたシェルスクリプトを実行することで以前よりも容易にサイクル実験を行うことが可能となった。

NAPS8 ではルーチン管理ツールとして利用が開始された JCL 及び PBF を NAPEX でも利用可能とすることで、数値予報ルーチンの実行モジュールやシェルスクリプトをほぼそのまま用いてサイクル実験を行うことができるようになった。

NAPS9 ではさらにジョブ制御プログラムにプログラム班開発の ROSE を組み込むとともに、実験設定をデータベース管理することで、実験履歴の記録及び参照を可能とし、サイクル実験の再現性の向上を図った。

²³ 2008(平成 20)年度末に整備された。数値予報ルーチン障害時のバックアップとして NCEP の GPV をインターネットから取得し、各種 FAX 図を作成する環境をテスト的に構築した。

²⁴ 2019 年(令和元年)の気象記念日にて長官表彰をいただいた。

当初 NAPEX は全球モデルのみであったが、その後メソモデル及び局地モデルについても順次整備され、現在は各モデルのガイダンス作成処理に関しても組み込みが検討されている。NAPEX は数値予報モデル及びデータ同化を開発するための強力なツールとしてなくてはならないものに進化を遂げた。

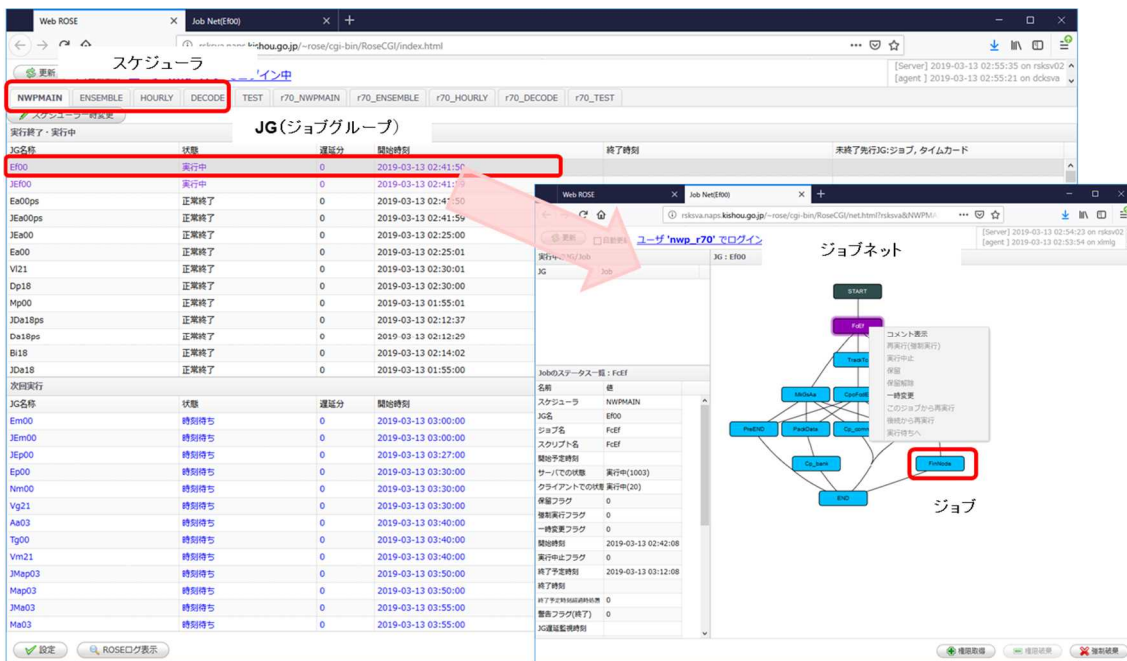


図 1.1.8 ROSE の操作画面例 (WebROSE)

(g) 今後の NAPS 更新に向けて

今後のスパコン更新において一番大きな課題は清瀬庁舎の電力量の制限である。NAPS10 の最大消費電力は片系 1.6MW で両系合わせると 3MW 程度の電力量を使用している。清瀬庁舎は特別高圧線を 2 本(本線:10MW、予備線:10MW)引いており、最高 20MW まで利用可能だが、現在の庁舎内設備でスパコンを常時安定稼働するための上限はおおむね 5~6MW 程度とみられている。またスパコンの冷却方法が水冷の場合、現在の屋上チラー(冷却水循環装置)の処理能力は 4.4MW となっているため、さらに電力量は制限される。

今後の NAPS 更新については大型データセンター等の外部施設の利用可能性についても調査・検討を進めているところである。

(h) (おまけ)NAPS 以外の開発資源

数値予報課では NAPS 更新でスパコンのハードウェア構成が大きく変わりそうな時期や、NAPS だけでは開発資源が不足する時期に、移行用・開発用の小規模な計算機を別途調達してきた²⁵。ここではその主なものについて簡単にまとめておく。

²⁵ 飛行場予報プロダクト開発支援装置(飛行場ミニスーパー)以降は整備を情報通信課にお願いしている。

・並列同化実験装置

日立 SR2201 の 8 ノードマシンを本庁 3 階に設置。1999 年(平成 11 年)3 月利用開始。NAPS7 移行に向けて、数値予報モデルの UNIX 対応、MPI 並列化作業等に利用された。

・防災情報モデル開発システム(本庁ミニスーパー)

SR8000F1 の 8 ノードマシンを本庁 3 階に設置。2001 年(平成 13 年)7 月利用開始。本庁のメソモデル開発及び地方官署の NHM を使用した研究に利用された。地方官署からは 220 人以上のユーザーが登録され、活発な調査・研究活動が行われた。

・気象データ処理ソフトウェア開発支援装置(清瀬ミニスーパー)

SR8000F1 の 8 ノードマシンを清瀬庁舎に設置。2003 年(平成 15 年)10 月利用開始。主にセミラグランジュ全球モデルや全球 4 次元変分法の現業化に向けた開発作業に利用された。

・飛行場予報プロダクト開発支援装置(飛行場ミニスーパー)

NEC SX-9F3 の 3 ノードマシンを本庁 3 階に設置。2009 年(平成 21 年)3 月利用開始。主に LFM 現業化に向けた開発作業に利用された。なお東北地方太平洋沖地震(東日本大震災)に伴う東京電力管内の電力不足により 2011 年 3 月 15 日から 4 月 27 日まで停止した。

・高分解能航空ガイダンス開発アーカイブ装置(航空アーカイブ)

日立 HA8000/RS210-h(Xeon E5-2690 x 2)の 8 台構成。清瀬庁舎に設置。2014 年(平成 26 年)2 月利用開始。共有ストレージは 1.2 PB。

・首都圏空港及び周辺空域予報高度化開発用ストレージ(首都圏ストレージ)

富士通 RX2540M1(Xeon E5-2670v3 x 2)の 24 台構成。清瀬庁舎に設置。2016 年(平成 28 年)3 月利用開始。共有ストレージは 9.6 PB。NVIDIA 製 GPU を 4 枚増設。

・下層ウィンドシアア予測情報作成装置

DELL R940xa(Xeon Gold 6138 x 2)²⁶の 12 台構成。清瀬庁舎に設置。2018 年(平成 30 年)12 月利用開始。共有ストレージは 10.2 PB。NVIDIA 製 GPU を 4 枚増設。

航空アーカイブ、首都圏ストレージ及び下層ウィンドシアアについては、数値予報課共有ストレージとして NAPEX の実験データ等の保存に利用されるとともに、各種プログラムのインテル CPU への移植及び動作確認(ベンチマーク作成等)にも有効利用された。また、GPU 搭載サーバでは AI(機械学習、深層学習)に関する調査・開発が行われている。

²⁶ GPU 搭載の 1 台は 4CPU。

(2) 気象庁数値予報システム¹

気象庁は1959年(昭和34年)3月に官公庁として初めてスーパーコンピューター(当時は、大型計算機と呼ぶ)を導入し、その年の6月から数値予報業務を開始しました。米国気象局が世界で初めて数値予報業務を開始した1955年から遅れること4年です。当庁の数値予報は、北半球バランス・バロトロピックモデルからスタートしました。これまで現業運用されてきた数値予報モデルの歴史を図1.2.1に示しています。第1項で書いたように、平成の30年間(1989～2019年)に気象庁で現業運用された数値予報システムは第5世代数値解析予報システム(NAPS5)から第10世代数値解析予報システム(NAPS10)の6世代にわたります。数値予報50周年を迎えた2009年はNAPS8が運用されていました。

NAPS5では全球モデル(GSM)を、NAPS6ではメソモデル(MSM)を、NAPS7では全球アンサンブル予報システム(GEPS)の前身である週間アンサンブル予報システムを、NAPS8では台風アンサンブル予報システムを、NAPS9では局地モデル(LFM)を、NAPS10ではメソアンサンブル予報システム(MEPS)の運用を開始しています。以下、それぞれについて振り返ってみます。現在運用されている数値予報システムは表1.2.1に示す通りです。

表 1.2.1 現在運用中の数値予報システム一覧(但し、毎時大気解析、季節アンサンブルを除く)

数値予報システム	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	全球アンサンブル予報システム (GEPS)	メソアンサンブル予報システム (MEPS)
主な利用目的	天気予報 週間天気予報 台風進路予報・強度予報 MSM側面境界条件	防災気象情報 降水短時間予報 航空気象情報 天気予報 LFM側面境界条件	航空気象情報 防災気象情報 降水短時間予報	台風進路予報 週間天気予報 早期天候情報 2週間気温予報 1か月予報	防災気象情報 航空気象情報
予報領域	全球	日本とその周辺領域 (3160 km x 2600 km)	日本とその周辺領域 (4080 km x 3300 km)	全球	日本とその周辺領域 (3160 km x 2600 km)
予報モデル	全球モデル (GSM)	メソモデル (MSM)	局地モデル (LFM)	GSM+確率的物理過程強制法	MSM
水平格子間隔	TL959 (≈ 20 km)	5 km	2 km	TL479 (≈ 40 km) (~432時間) TL319 (≈ 55 km) (432時間~)	5 km
鉛直層数 (上端高度)	100層 (0.01 hPa)	76層 (21.8 km)	58層 (20.2 km)	100層 (0.01 hPa)	76層 (21.8 km)
予報時間、メンバー数 (初期時刻)	264時間 (12 UTC) 132時間 (00, 06, 18 UTC)	51時間 (00, 12 UTC) 39時間 (03, 06, 09, 15, 18, 21 UTC)	10時間 (毎正時)	132時間、27メンバー(06,18UTC、台風等が存在する時※) 216時間、27メンバー(00,12UTC、毎日) 432時間、13メンバー (00, 12 UTC、毎日) 816時間、13メンバー (00, 12 UTC、火水)	39時間 (00, 06, 12, 18 UTC)
初期値	全球解析	メソ解析	局地解析	全球解析+初期摂動	メソ解析+初期摂動
解析手法/初期摂動作成手法	ハイブリッド4次元変分法	4次元変分法	3次元変分法	特異ベクトル法、局所アンサンブル変換カルマンフィルター	特異ベクトル法
データ待受時間	[速報解析] 2時間20分 [サイクル解析] 11時間50分 (00,12 UTC) 7時間50分 (06,18 UTC)	50分	30分	-	-

(※) 全般海上予報区(赤道~北緯60度、東経100~180度)内に台風が存在する、または同区内で24時間以内に台風になると予想される熱帯低気圧が存在する場合、または、全般海上予報区外に最大風速24ノット以上の熱帯低気圧が存在し、24時間以内に予報区または風暴警戒域が同区内に入ると予想された場合に実行される

¹ 本田 有機(数値予報モデル開発推進官)

(a) 全球数値予報システム(全球モデルと全球解析)

平成が始まる直前の1987年12月に全球を計算対象とする全球モデル(GSM)の試験運用を開始しました。1988年3月には北半球スペクトルモデルの運用を終了し、GSMの本運用を開始しました。運用開始以降のGSMの主な変更は米原(2019)に、非常に良くまとめられています。ここでは、米原(2019)の表1.1.1を再掲することで、GSMの変更履歴の概要を紹介することといたします(表1.2.2)。なお、表1.2.2のGSMyyymmはGSMに改良が導入された西暦の下二桁(yy)と月(mm)を示しています。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わしています。Tの場合は2次格子、TLの場合は線形格子を意味しています。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わしています。

GSMの改良は継続的に行われていますが、2002年度から2004年度前半までの2年間半には「全球モデル開発推進プロジェクト」が実施されました(気象庁予報部2004, 2005)。「短期予報の精度を世界のトップレベルに」というビジョンのもと、「500hPa高度の24時間予報誤差の前12ヶ月平均値を、プロジェクト開始時点(2002年度当初)に比べて25%減らすこと」という具体的な数値目標を設定して様々な開発に取り組み、プロジェクトが終了した2004年9月には、数値目標に対する達成率が北半球は78%、南半球は100%という成果を挙げました。なお、本プロジェクトの開発課題の一つであった全球4次元変分法(全球4DVar)を2005年2月に全球解析に導入しています。

数値予報50周年を迎えた2009年以降は、2012年12月から2017年5月まで5回、GSMの改良が行われていますが、それぞれの改良について変更点の概要と狙い、および、主な改善点が米原(2019)に記載されています。水平解像度に関しては、2007年11月に、当時としては世界最高の水平解像度を誇るTL959(約20km)に高解像度化されて以来特に変わりはありません。全球解析のインナーモデルの水平解像度は、既にGSMに実装されていたセミラングレンジ法などの技術を導入することで、2011年11月にT159からTL319(約55km)に更新されました(門脇・吉本2012)。GSM及び全球解析の鉛直層は、大気成層圏・対流圏における鉛直構造の表現の精緻化や、人為的な上部境界の影響の低減、衛星観測データのさらなる利用を目指して、2014年3月に60層から100層へ増強され、モデルトップも0.1hPaから0.01hPaへ引き上げられ、合わせて放

表 1.2.2 GSM の主な更新履歴
(米原 (2019) 表 1.1.1 再掲)

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、雲水落下・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、セミラングレンジ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、エー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 (エーロゾル気候値、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

射や重力波、境界層等の各物理過程も改良されています(米原 2014)。その後 2 年かけて、「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に則り、積雲対流・雲・放射・海面などの多くの物理過程を改良し、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の改善に成功しました(米原 2016)。NAPS9 の最後の更新となる 2017 年 5 月には、前回の更新時に認識はされつつも改善出来ていなかった問題に取り組み、再び積雲対流、雲、放射、陸面、海面等多くの物理過程を改良しています(米原 2017)。2019 年 12 月には、全球アンサンブル予報システム(全球 EPS)から算出した予報誤差を考慮した手法(ハイブリッド同化)へ高度化しました(気象庁 2019)。

GSM は全球アンサンブル予報システムとともに、台風予報や短期・週間天気予報を支援する基盤モデルとなっており、季節予報モデルや気候モデルとしても利用されており、今日では全庁的な開発体制がとられています。全球モデルについて書かれた最新の数値予報課報告・別冊(気象庁予報部 2019)も、数値予報課、気候情報課や気象研究所などが分担して執筆しています。

(b) 全球アンサンブル予報システム(週間アンサンブルと台風アンサンブル)

2001 年 3 月に NAPS7 の運用とともに、週間天気予報の支援を目的として、週間アンサンブル予報システム(週間 EPS)の運用を開始しました(経田 2001)。運用開始当初は、初期値摂動は成長モード育成法により作成していましたが、2007 年 11 月に特異ベクトル法を導入しました。更に、予報モデルの不確実性を考慮するためにモデルアンサンブル手法として、2010 年 11 月には確率的物理過程強制法が導入されました。週間 EPS の改良については越智(2016)にまとめられています。

台風への適切な防災対応判断の支援に向けて台風進路情報を充実させるため、アンサンブル予報による不確実性の情報を付加し、また、アンサンブル平均による台風進路予報の精度向上を期待して、2008 年の台風第 1 号(つまり、2008 年 2 月)より、台風アンサンブル予報システム(台風 EPS)の運用を開始しました(小森・山口 2008)。台風 EPS は、気象庁予報部予報課の予報担当者による熱帯低気圧の解析に基づいて熱帯低気圧が日本付近に発生する場合²に、1 日 4 回 00, 06, 12, 18UTC を初期時刻として実行されました。台風 EPS の改良については経田(2016)を参照ください。

気象庁は、週間 EPS と台風 EPS に加えて、1 か月予報支援のために 1 か月アンサンブル予報システム運用をしていました。これらのシステムを一体的に開発し、開発成果の共有や相互活用を促進するとともに、システム間の数値予報資料の整合性の向上や、運用に必要な計算機資源の効率的な利用を図るため、2017 年 1 月に週間 EPS と台風 EPS を置き換える形で全球 EPS の運用を開始し、同年 3 月には予報時間を 1 か月先まで延長しました(山口 2017)。これに伴い、1 か月

² 全般海上予報区(赤道～北緯 60 度、東経 100～180 度)内に台風が存在する、または同区内で 24 時間以内に台風になると予想される熱帯低気圧が存在する場合、または、全般海上予報区外に最大風速 34 ノット以上の熱帯低気圧が存在し、24 時間以内に予報円または暴風警戒域が同区内に入ると予想された場合に実行される。

EPS の運用は終了しました。全球 EPS を導入するにあたり、大きな改良がされています。鉛直層数が 60 層から 100 層に増強され、予報モデルも導入当時の最新のバージョンに更新されました。初期値摂動作成手法には、新たに局所アンサンブル変換カルマンフィルタ(LETKF)が導入されました(太田・堀田 2016a)。そして、海面水温摂動を新たに導入し、下部境界の不確実性も考慮し始めました(太田・堀田 2016a)。これ以降、2019 年末まで大きな変更は行われていません。

(c) メソ数値予報システム(メソモデルとメソ解析)

メソ数値予報システムは、NAPS7 が導入された 2001 年 3 月に運用を開始しました。運用開始から今日までのメソ数値予報システムの変遷については、本田(2008)と成田(2020)にまとめられています。

運用当初はメソモデル(MSM)として領域スペクトルモデル(RSM)と同じ静力学モデルが用いられていましたが、2004 年 9 月に気象庁非静力学モデル(JMA-NHM)(気象庁予報部 2003, 2008; Saito et al. 2006)が導入されました(藤田 2004)。NAPS8 が導入された 2006 年 3 月には、水平格子間隔が 10km から 5km に高解像度化され、予報頻度も 1 日 4 回から 8 回になりました(荒波ほか 2006)。2007 年 5 月には予報時間が 15 時から 33 時間へ延長されています³(原 2007)。その後、NAPS9 が導入されて 1 年後の 2013 年 3 月に、側面境界に近い地域の予報精度の向上と、局地モデル(LFM)へのより適切な側面境界値の提供を目的に、予報領域が拡張されました(越智・石井 2013)。また、同年 5 月には、予報作業の支援強化と、TAF(運航用飛行場予報)の有効期間と発表時刻の変更への対応のために、全初期時刻における予報時間を 39 時間に延長しました(越智・石井 2013)。NAPS10 になり、防災気象情報等の作成支援への MSM の利活用を更に進めるために、2018 年 3 月に、00, 12UTC 初期値の予報時間を 39 時間から 51 時間へと延長しました(荒巻・氏家 2018)。

2004 年に導入された JMA-NHM は、導入当時に力学・物理過程が大幅に改良されていますが、2006 年の高解像度化、2007 年の予報時間延長に合わせて力学・物理過程の改良が行われています(石田ほか 2005; 荒波ほか 2006)。2010 年 11 月には、地形に沿った不自然な降水を改善するため、積雲対流スキームを改良しています。(成田・森安 2010)。その後は、局地モデルの開発やスパコン更新への対応により注力していましたが、2015 年 5 月に、局地モデルに導入された asuca(後述)の開発の中で得られた知見を活かして、境界層の改良等が行われています(原ほか 2015b)。

一方、JMA-NHM の改良を行う傍ら、2007 年から次世代非静力学モデル asuca の開発が進められました(気象庁予報部 2014)。asuca の開発理念は、基本的に、長年改良が続けられてきた JMA-NHM の良いところを引き継ぎつつ、最先端の知見を取り入れて、データ同化も一体に効率的な開発を行える現業数値予報システムを構築することです(石田・藤田 2014)。4DVar に必須である接線形・随伴コードは予報モデルと同じプログラムに組み込まれ(小野 2014)、物理過程は

³ 1 日 8 回のうち 4 回(03,09,15,21UTC 初期値)の予報時間を延長しています。

JMA-NHM とも共有出来るように独立したライブラリとして整備されました。asuca は局地モデル (LFM) に先ずは導入され(後述)、2017 年 2 月に MSM として導入されました(原 2017)。

MSM の初期値を作成するメソ解析には、2002 年 3 月に、領域解析としては世界初の 4 次元変分法(4DVar)である静力学メソ 4DVar が導入されました(石川・小泉 2002)。しかし、その翌年から JMA-NHM に基づいた非静力学メソ 4 次元変分法(JNoVA)(気象庁予報部 2010)の開発が開始され、2009 年 4 月に更新されました(本田・沢田 2009)。その後、2015 年 12 月には背景誤差共分散行列の定式化を改良し誤差統計を取り直す(藤田ほか 2016)など改良されています。

asuca 同様、asuca に基づいた変分法解析システム(asuca-Var)(幾田 2014)の開発も進められており、局地解析に先ずは導入され(後述)、2020 年 3 月にはメソ解析として導入される予定です。

この他、2019 年 3 月には、下部境界条件に使われている海面水温(SST)を、全球日別海面水温解析(MGDSST; 栗原ほか 2006)から北西太平洋高解像度日別海面水温解析(HIMSST; 気象庁地球環境海洋部 2016)に変更しました(太田ほか 2019)。

(d) メソアンサンブル予報システム

2019 年 6 月に本運用が始まったメソアンサンブル予報システム(MEPS)は、MSM の予測に対し信頼度・不確実性等の情報を付加することを目的とした、最も新しい現業数値予報システムです(河野ほか 2018)。その開発の歴史は長く、2005 年に JNoVA のために開発をしていた JMA-NHM の接線形・随伴モデルを用いた特異ベクトル法(SV 法)によるメソアンサンブル予報の研究が気象研究所で始まり、この研究成果を引き継いで 2007 年から数値予報課で現業化に向けて開発が進められました(小野 2010)。全球特異ベクトル法とメソ特異ベクトル法を組み合わせる初期摂動を作成する MEPS を構築し、2015 年 3 月から部内試験運用を開始しています(小野 2016)。当初は 1 日 1 回、11 メンバーの仕様でしたが、NAPS9 から NAPS10 へ更新されたのを機に、1 日 4 回 21 メンバーへと仕様が拡張されました。部内試験運用期間中は、MEPS の特性を確認し、正式運用に向けた改良を随時導入するとともに、気象庁内において現業予報作業での利用方法の検討を行ってきました。量的予報の基礎資料である MSM のアンサンブル予報システムであることから、MEPS の解像度も MSM と同じにしています。その分計算コストが高いため、MSM の予報頻度が 1 日 8 回であるのに対して、1 日 4 回に抑えられています。

2020 年 3 月には、MEPS の各メンバーに MSM ガイダンスと同じ手法を適用したメソアンサンブルガイダンスの本運用が始まります(石川ほか 2019)。

(e) 局地数値予報システム(局地モデルと局地解析)

防災気象情報や飛行場予報の高度化を目的に、NAPS9 での本運用を目指して NAPS8 から局地モデル(LFM)の開発は始まっています(竹之内ほか 2008)。当初は計算機資源が十分確保出来ないことを危惧して、日本領域を複数の計算領域(具体的には 3 領域)で被うようなことも検討されていました(氏家 2009)。2010 年 11 月から LFM の試験運用を開始していますが、この時も東北地方南部から九州地方を覆う西日本を中心とした領域でした(永戸ほか 2010)。予報モデルは

MSM と同じ JMA-NHM を採用していましたが、積雲対流パラメタリゼーションの不確実性を避けるため、水平格子間隔を 2km として、このパラメタリゼーションを利用していませんでした。試験運用では 1 日 8 回 9 時間予報を行っていましたが、本運用時には毎時の運用を計画しており、限られた時間内で最新の観測データを有効に使うことが求められていました。このため、LFM の初期値を作成する局地解析には、計算に要する時間の短い非静力学メソ 3 次元変分法 (JNoVA-3DVAR) が採用されました(藤田・倉橋 2010)。局地解析の水平格子間隔も 5km としています。しかし、より多くの観測データを利用して解析の精度を高めるために、初期時刻の 3 時間前から JNoVA-3DVAR による解析と 1 時間予報を繰り返す同化システムとなっています。2011 年 3 月の東日本大震災を機に、北海道～近畿地方を覆う東日本を中心とした領域に変更して試験運用を継続し、NAPS9 が導入された 2 か月後の 2012 年 8 月に本運用となりました(永戸ほか 2013)。2013 年 5 月には、予報頻度を 1 日 24 回に増強し、予報領域も日本全域を覆うように拡張されました。

2015 年 1 月に、次世代非静力学モデル asuca を LFM として、変分法データ同化システム asuca-Var (3 次元変分法) を局地解析として導入しました(原ほか 2015a)。この際に、積雲対流の発達初期における鉛直輸送の表現向上を主目的としたパラメタリゼーションを導入しています(河野・原 2014)。また、asuca-Var により、地中温度と土壌体積含水率の解析変数化や偽相対湿度インクリメント調節の導入など高度化されています。NAPS10 へ更新後の 2019 年 3 月には、航空交通管理のための気象情報提供での利用における利便性の向上を目的として全初期値の予報時間を 9 時間から 10 時間に延長しています(荒巻・氏家 2018)。

(f) 毎時大気解析

大気の実況監視を目的として、1 日 24 回毎正時に風と気温の客観解析を行っています。2001 年 4 月に「毎時下層風解析」として運用を開始し、2003 年 11 月に航空ユーザー向けに上層風の解析を開始するのを契機に「毎時風解析」となり、2006 年 3 月には「毎時大気解析」として気温の解析も開始しました(西嶋 2005)。2007 年 3 月には、最適内挿法から、当時開発中であった JNoVA を元にした 3 次元変分法へと更新されました(藤田 2007)。3 次元変分法に高度化したことで、ドップラーレーダによる風を動径風データとして同化することが可能となりました。

2017 年 7 月には、局地解析にも導入されていた asuca-Var (3 次元変分法) に更新されています(原・工藤 2017)。

(g) 観測データの利用

初期値作成のために、多種多様な観測データが利用されています。2000 年代には解析手法として変分法が採用されはじめ、解析変数と線形関係にない観測データを同化することが出来るようになり、衛星輝度温度データ等の直接同化が可能となりました。2001 年 9 月、全球解析に 3 次元変分法が導入され、2003 年 5 月には ATOVS 輝度温度の直接同化が始まりました(計盛・岡本 2004)。メソ解析には 2002 年 3 月に 4 次元変分法が導入され、同時に解析雨量の同化が始まりました(石川・小泉 2002)。2000 年代は衛星データを中心に新規利用が進みましたが、2010 年代も

その傾向は変わりありません。図 1.2.2 及び図 1.2.3 は、全球解析及びメソ解析に同化されている観測データの量と種類について時系列で示していますが、今日では衛星データの占める割合が非常に大きくなっています。この図でも際立っているハイパースペクトル赤外サウンダ(HSS)データなど、ここ 10 年に着目して新規に利用開始した観測データのいくつかについて紹介したいと思います。なお、2015 年頃までの観測データの利用の現状については、気象庁予報部(2015)にまとめられています。

まずは、それぞれ 2014 年と 2016 年に打ち上げられた、次世代イメージャを搭載したひまわり 8・9 号です。空間解像度が赤外画像で 4 km から 2 km に、観測チャンネル(バンド)数が 5 チャンネルから 16 チャンネルへ、時間分解能が 30 分から 10 分(フルディスク観測)へと増強されました。水蒸気チャンネルの晴天放射輝度温度データ(CSR)は 1 チャンネルから 3 チャンネルになり、2016 年 3 月より利用を開始しています(計盛 2016)。また、大気追跡風も算出方法を高度化したことで質と量も改善しており、CSR と同時に利用を開始しています(山下 2016)

次は、HSS データに着目します。HSS は数千のチャンネルをもつ赤外サウンダで、対流圏や成層圏の気温や水蒸気の鉛直分布に関する情報が得られます。2002 年に打ち上げられた Aqua 搭載 AIRS をはじめ、Metop 搭載 IASI や Suomi-NPP および NOAA-20 搭載 CrIS のデータが利用可能です。他国の数値予報センターから数年遅れとなりましたが、2014 年 9 月に AIRS と IASI データの利用を開始し(岡垣 2015)、2018 年 3 月には CrIS データも利用を開始しました(亀川・計盛 2017)。

Suomi-NPP および NOAA-20 に搭載された次世代マイクロ波放射計 ATMS は、マイクロ波気温サウンダ AMSU-A や同水蒸気サウンダ MHS の後継センサーで、今後も米国の次世代現業極軌

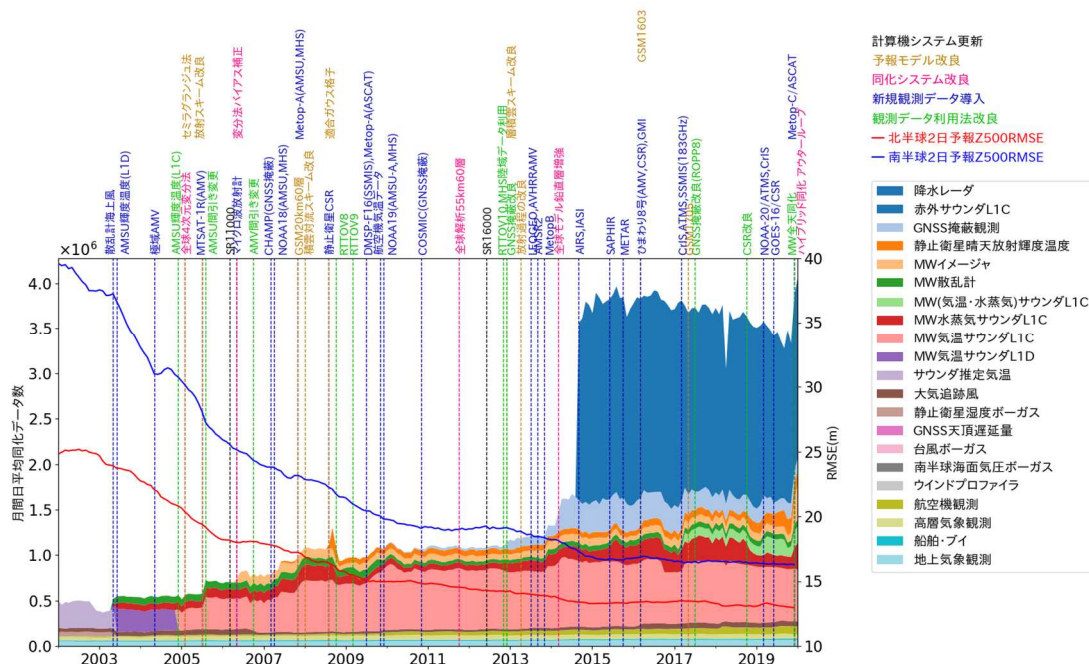


図 1.2.2 全球解析に同化されている観測データ数の時系列 (2002 年 1 月～2020 年 1 月)

道衛星に搭載される予定です。2017年3月に全球解析で利用を開始しています(平原 2017)。

地上リモートセンシングについては、レーダー反射強度に着目します。前述のとおり、解析雨量という形でメソ解析に同化されていますが、解析雨量には地上付近の低い仰角データしか利用されていません。数値予報結果から反射強度をシミュレートし、これを観測と比較し、最終的には観測された反射強度から推定される疑似的な相対湿度の鉛直1次元プロファイルデータを算出し同化する方法を新たに開発し、2011年6月より3次元の反射強度データの同化を開始しています(幾田 2011)。この手法を応用して、世界で初めて全球降水計画(GPM)衛星搭載二周波降水レーダ(DPR)のデータ同化をメソ解析で開始しました(幾田 2016)。

従来型観測については、高層観測データの利用に着目します。気象庁の高層観測では2010年までにレーウィンゾンデからGPSゾンデへの切り替えが完了しています。また、BUFR形式での高層観測データ通報の開始により、鉛直方向に高解像度のデータを取得することが出来るようになりました。2016年3月より、この高解像度データの利用をメソ解析で開始しましたが、これを機に、ゾンデが上昇するときに風に流された位置で同化出来るようになりました(酒匂 2016)。

最も新しい改良は、2019年12月に実施されたマイクロ波輝度温度データの全天同化です。全球解析のハイブリッド同化と合わせて実施され、これまで未使用であった雲・降水域のデータの利用を開始しています(気象庁 2019)。

ここで紹介したもの以外にも、初期値の精度改善のため、多くの新規観測データの利用を開始し、また、既に利用している観測データの利用方法の改良を実施しています。

なお、観測データの利用に際しては、予報精度への影響を評価するために、観測システム実験(OSE)を行っています。しかしこの手法は計算コストが非常にかかります。これを補うために、

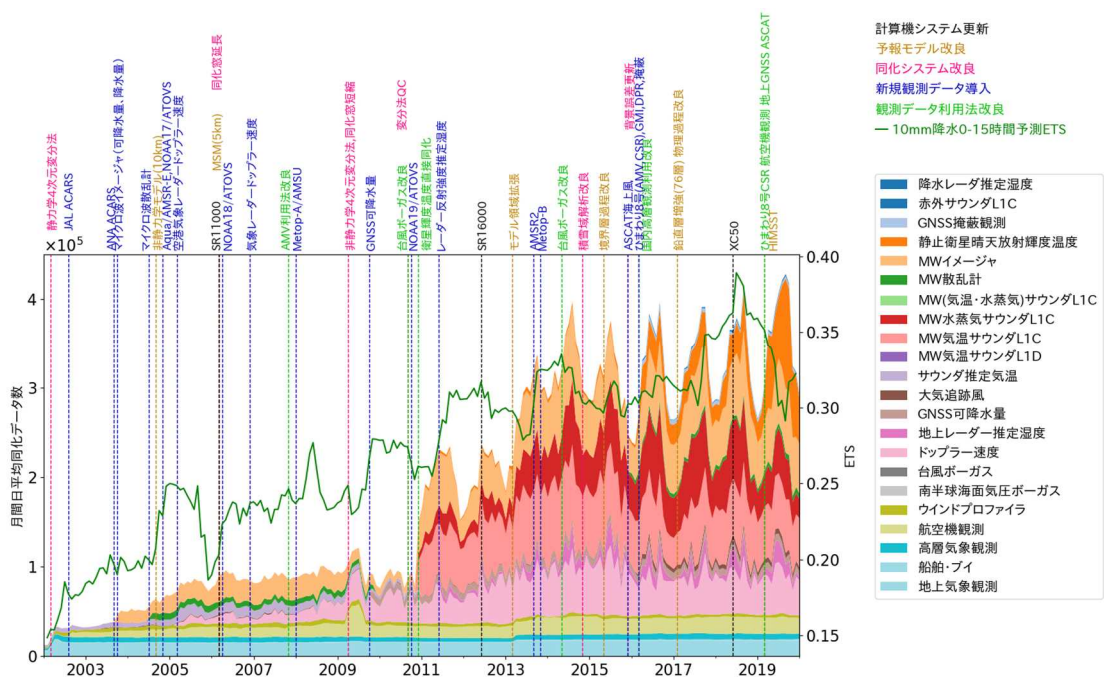


図 1.2.3 メソ解析に同化されている観測データ数の時系列(2002年1月～2020年1月)

4DVarのインナーモデルとして開発された接線形・随伴モデルを用いたFSOI(Forecast Sensitivity to Observation Impact)という感度解析手法が提唱されており、気象庁でもこれまで数度評価を実施し、他の数値予報センターと同様、今日の予測精度は衛星データに大きく依存していることなどが分かっています(石橋 2015)。

(h) ガイダンス

1977年6月に初めて降水ガイダンスの配信を開始し、今日では天気予報や航空気象予報向けに様々なガイダンスが作成されています(表 1.2.3 参照)。ガイダンスについては気象庁予報部(2018)にまとめられています。

平成以降では1996年3月からカルマンフィルタ(KF)やニューラルネットワーク(NN)と呼ばれる逐次学習型ガイダンスが導入され始めました。

天気予報ガイダンスについては、2010年以降では、視程分布予想の追加(MSM2011年、GSM 2013年)、GSM・MSM24時間最大降水量ガイダンスの手法をNNから線形重回帰(MLR)に変更(2013年)、時系列湿度ガイダンスの追加(2016年)、MSM降雪量地点ガイダンスの追加や仕様拡充(2016年)、LFM降水量ガイダンスの開始(2018年)等が実施されています。2019年3月には、MSMやLFMの予報時間延長に合わせて、ガイダンスの予報時間も延長されています。また、2019年7月には、

表 1.2.3 現在運用中のガイダンス一覧

天気予報ガイダンスの一覧			
ガイダンス名	予測要素	手法	対象
降水ガイダンス	平均降水量	KF, FBC	20km格子 (GSM)
	降水確率	KF, FBC	5km格子 (MSM)
	最大降水量	NN, MLR	
降雪ガイダンス	雪水比・降水種別・最大降雪量	DM	5km格子
	降雪量地点	NN, FBC	アメダス地点
気温ガイダンス	時系列・最高・最低気温	KF	アメダス地点
	格子形式気温	KF	5km格子
風ガイダンス	定時・最大・最大瞬間風速	KF, FBC	アメダス地点
天気ガイダンス	日照率	NN	20km格子 (GSM)
	天気	FC	5km格子 (MSM)
発雷確率ガイダンス	発雷確率	LR	20km格子
湿度ガイダンス	時系列湿度	KF	気象官署(特別地域)
	日最小湿度	NN	気象観測所含む)
視程ガイダンス	視程分布予想	DM	20km格子 (GSM) 5km格子 (MSM)

航空気象予報ガイダンス			
ガイダンス名	予測要素	手法	対象
気温ガイダンス	時系列・最高・最低気温	KF	国内空港
風ガイダンス	定時・最大・ガスト風速	KF, FBC	
	ガスト発生確率	LR	
視程ガイダンス	天気	FC	
	視程、視程確率	KF, FBC	
雲ガイダンス	雲量、雲底高度	NN, FBC	
	雲底確率	LR	
発雷確率ガイダンス	発雷確率	天気予報Gから作成	
降雪ガイダンス	最大降雪量		
航空悪天GPV	乱気流指数	LR	0.5度格子(GSM) 1.25度格子(GSM) 40 km格子(MSM) 10 km格子(LFM)
	着氷指数	DM	
	積乱雲量、雲頂高度	DM	
	視程分布予報	DM	
	風、気温、湿度などの一般要素	モデルから内挿	

(※手法) MLR(線形重回帰)、KF(カルマンフィルタ)、NN(ニューラルネットワーク)、LR(ロジスティック回帰)、DM(診断手法)、FBC(頻度バイアス補正)、FC(フローチャート)

GSM12 時間・48 時間・72 時間最大降水量ガイダンス、MSM12 時間最大降水量ガイダンスの部内運用を開始しています。

また、航空気象予報ガイダンスについては、視程ガイダンスの改良(2010 年)、風ガイダンスの改良(2010, 2013 年)、雲底確率ガイダンスの追加(2010 年)、ガストガイダンスの追加(2011 年)が実施されている他に、飛行場予報(TAF)の予報時間延長に対応するため、航空気象予報ガイダンスの予報時間も 39 時間に延長されています(2013 年)。さらに、空域予報を支援する資料である航空悪天 GPV に乱気流指数が追加され(2010 年)、改良が実施されています(2014 年, 2018 年)。

なお、2020 年 3 月には、MEPS ガイダンスの運用が開始される予定です。

参考文献

- 気象庁, 2019: 台風進路予測や降水予測の精度が改善します～全球モデルの初期値作成処理の高度化～. 令和元年 12 月 10 日付け報道発表.
- 気象庁地球環境海洋部, 2016: 北西太平洋高解像度日別海面水温解析格子点資料の提供について. 配信に関する技術情報(海洋編)第 444 号.
- 気象庁予報部, 2003: 気象庁非静力学モデル. 数値予報課報告・別冊第 49 号, 気象庁予報部, 194pp.
- 気象庁予報部, 2004: 全球モデル開発プロジェクト(I). 数値予報課報告・別冊第 50 号, 気象庁予報部, 142pp.
- 気象庁予報部, 2005: 全球モデル開発プロジェクト(II). 数値予報課報告・別冊第 51 号, 気象庁予報部, 117pp.
- 気象庁予報部, 2008: 気象庁非静力学モデル II - 現業利用の開始とその後の発展 -. 数値予報課報告・別冊第 54 号, 気象庁予報部, 265pp.
- 気象庁予報部, 2010: 非静力学メソ 4 次元変分法. 数値予報課報告・別冊第 56 号, 気象庁予報部, 106pp.
- 気象庁予報部, 2014: 次世代非静力学モデル asuca. 数値予報課報告・別冊第 60 号, 気象庁予報部, 151pp.
- 気象庁予報部, 2015: 観測データ利用の現状と課題. 数値予報課報告・別冊第 61 号, 気象庁予報部, 98pp.
- 気象庁予報部, 2018: ガイダンスの解説. 数値予報課報告・別冊第 64 号, 気象庁予報部, 248pp.
- 気象庁予報部, 2019: 全球モデルの改良と展望. 数値予報課報告・別冊第 65 号, 気象庁予報部, 164pp.
- 荒波恒平, 原旅人, 瀬川知則, 三浦大輔, 成田正巳, 本田有機, 2006: メソ数値予報モデルの改良と予報時間延長. 平成 18 年度数値予報研修テキスト, 気象庁予報部, 55-92.
- 荒巻健智, 氏家将志, 2018: メソ・局地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, 7-8.
- 幾田泰醇, 2011: メソ解析におけるレーダー反射強度データの同化. 平成 23 年度数値予報研修テキスト, 気象庁予報部, 9-12.
- 幾田泰醇, 2014: asuca 変分法データ同化システム. 数値予報課報告・別冊第 60 号, 気象庁予報部, 91-97.
- 幾田泰醇, 2016: GPM/DPR データのメソ解析での利用開始. 平成 28 年度数値予報研修テキスト, 気象庁予報部, 51-53.
- 石川宜広, 小泉耕, 2002: メソ 4 次元変分法. 数値予報課報告・別冊第 48 号, 気象庁予報部, 37-59.
- 石川宜広, 山下浩史, 井上卓也, 森祐貴, 工藤淳, 小林大輝, 土田尚侑, 井藤智史, 2019: メソアンサンブルガイダンス. 令和元年度数値予報研修テキスト, 気象庁予報部, 16-55.

石田純一, 瀬川知則, 大森志郎, 中山寛, 2005: 新しいメソ数値予報モデル. 平成 17 年度数値予報研修テキスト, 気象庁予報部, 14-32.

石田純一, 藤田匡, 2014: asuca の開発理念. 数値予報課報告・別冊第 60 号, 気象庁予報部, 19-28.

石橋俊之, 2015: FSO による評価. 数値予報課報告・別冊第 61 号, 気象庁予報部, 90-93.

氏家将志 2009: 高分解能局地モデルの開発と実験運用. 平成 21 年度数値予報研修テキスト, 気象庁予報部, 90-96.

永戸久喜, 石田純一, 藤田匡, 石水尊久, 平原洋一, 幾田泰醇, 福田純也, 佐藤芳昭, 石川宜広, 吉本浩一, 2010: 局地モデルの試験運用. 平成 22 年度数値予報研修テキスト, 気象庁予報部, 1-27.

永戸久喜, 原旅人, 倉橋永, 2013: 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, 気象庁予報部, 18-41.

太田行哉, 岡部いづみ, 小屋松進, 西本秀祐, 谷寧人, 2019: メソ解析における観測データ利用の改良及びメソ数値予報システムにおける北西太平洋高解像度日別海面水温解析の利用開始. 令和元年度数値予報研修テキスト, 気象庁予報部, 61-67.

太田洋一郎, 堀田大介, 2016a: 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・別冊第 62 号, 気象庁予報部, 66-76.

太田洋一郎, 堀田大介, 2016b: 海面水温摂動の開発. 数値予報課報告・別冊第 62 号, 気象庁予報部, 77-84.

大野木和敏, 入口武史, 2003: 数値解析予報実験システム NAPEX. 気象庁測候時報, 70, 171-187.

岡垣昌, 2015: ハイパースペクトル赤外サウンダ. 数値予報課報告・別冊第 61 号, 気象庁予報部, 43-46.

越智健太, 2016: 週間アンサンブル予報システム. 数値予報課報告・別冊第 62 号, 気象庁予報部, 27-34.

越智健太, 石井憲介, 2013: 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, 気象庁予報部, 1-17.

小野耕介 2010: メソ特異ベクトル法. 数値予報課報告・別冊第 56 号, 気象庁予報部, 93-104.

小野耕介 2014: 接線形・随伴モデルの実装. 数値予報課報告・別冊第 60 号, 気象庁予報部, 98-103.

小野耕介 2016: メソアンサンブル予報システムの開発状況. 数値予報課報告・別冊第 62 号, 気象庁予報部, 100-113.

計盛正博, 岡本幸三, 2004: ATOVS 輝度温度の直接同化. 数値予報課報告・別冊第 50 号, 気象庁予報部, 93-104.

計盛正博, 2016: ひまわり 8 号晴天放射輝度温度の利用開始. 平成 28 年度数値予報研修テキスト, 気象庁予報部, 46-49.

亀川訓男, 計盛正博, 2017: 全球解析における SuomiNPP/CrIS 輝度温度データの利用開始. 平成 29 年度数値予報研修テキスト, 気象庁予報部, 73-74.

門脇隆志, 吉本浩一, 2012: 全球解析の高解像度化. 平成 24 年度数値予報研修テキスト, 気象庁予報部, 87-91.

河野耕平, 原旅人, 2014: LFM としての asuca の特性. 平成 26 年度数値予報研修テキスト, 気象庁予報部, 108-117.

河野耕平, 氏家将志, 國井勝, 西本秀祐, 2018: メソアンサンブル予報システム. 平成 30 年度数値予報研修テキ

- スト, 気象庁予報部, 1-15.
- 経田正幸, 2001: 週間アンサンブル予報. 平成 13 年度数値予報研修テキスト, 気象庁予報部, 38-41.
- 経田正幸, 2016: 台風アンサンブル予報システム. 数値予報課報告・別冊第 62 号, 気象庁予報部, 35-42.
- 栗原幸雄, 桜井敏之, 倉賀野連, 2006: 衛星マイクロ波放射計, 衛星赤外放射計及び現場観測データを用いた全球日別海面水温解析. 測候時報, **73**, S1-S18.
- 小森拓也, 山口宗彦, 2008: 台風アンサンブル予報システムの導入. 平成 20 年度数値予報研修テキスト, 気象庁予報部, 27-30.
- 酒匂啓司, 2016: 国内ラジオゾンデ高解像度観測データのメソ解析での利用開始. 平成 28 年度数値予報研修テキスト, 気象庁予報部, 59-62.
- 竹之内健介, 荒波恒平, 中山寛, 藤田匡, 2008: 高分解能局地モデル. 数値予報課報告・別冊第 54 号, 気象庁予報部, 195-222.
- 成田正巳, 森安聡嗣, 2010: メソモデルの対流スキームの変更. 平成 22 年度数値予報研修テキスト, 気象庁予報部, 53-62.
- 成田正巳, 2020: メソ・局地数値予報システムの改良. 数値予報課報告・別冊第 66 号, 気象庁予報部, 1-7.
- 西嶋信, 2005: 毎時大気解析. 平成 17 年度数値予報研修テキスト, 気象庁予報部, 63-65.
- 原旅人, 2007: モデルの変更点の概要. 平成 19 年度数値予報研修テキスト, 気象庁予報部, 29-31
- 原旅人, 幾田泰醇, 伊藤享洋, 松林健吾, 2015a: 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, 気象庁予報部, 1-23.
- 原旅人, 飯塚義浩, 白山洋平, 工藤淳, 草開浩, 2015b: メソ数値予報システムの改良. 平成 27 年度数値予報研修テキスト, 気象庁予報部, 24-49.
- 原旅人, 2017: 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, 気象庁予報部, 42-47.
- 原旅人, 工藤淳, 2017: 毎時大気解析の変更. 平成 29 年度数値予報研修テキスト, 気象庁予報部, 61-65.
- 原旅人, 雁津克彦, 江河拓夢, 佐藤芳昭, 石橋俊之, 2017: 数値解析予報実験システム(NAPEX). 数値予報課報告・別冊第 62 号, 気象庁予報部, 62-75.
- 平原洋一, 2017: 全球解析における Suomi-NPP/ATMS 輝度温度データの利用開始. 平成 29 年度数値予報研修テキスト, 気象庁予報部, 70-74.
- 藤田司, 2004: 非静力学メソ数値予報モデルの概要. 平成 16 年度数値予報研修テキスト, 気象庁予報部, 1-9.
- 藤田匡, 2007: 毎時大気解析の高度化. 平成 19 年度数値予報研修テキスト, 気象庁予報部, 98-101.
- 藤田匡, 福田純也, 塚本暢, 2016: メソ数値予報システムの背景誤差の改良. 平成 28 年度数値予報研修テキスト, 気象庁予報部, 63-67.
- 藤田匡, 倉橋永, 2010: 局地解析. 数値予報課報告・別冊第 56 号, 気象庁予報部, 68-72.
- 本田有機, 2008: メソ数値予報モデルと気象庁非静力学モデルの歴史. 数値予報課報告・別冊第 54 号, 気象庁予報部, 1-6.
- 本田有機, 澤田謙, 2009: 非静力学メソ 4 次元変分法の現業化. 平成 29 年度数値予報研修テキスト, 気象庁予報部, 65-71.
- 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.

山下浩史, 2016: ひまわり 8 号大気追跡風データの利用開始. 平成 28 年度数値予報研修テキスト, 気象庁予報部, 43-46.

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.

米原仁, 2016: 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, 2017: 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.

米原仁, 2019: 気象庁全球モデルにおける近年の改良. 数値予報課報告・別冊第 65 号, 気象庁予報部, 1-11.

Saito, K., T. Fujita, Y. Yamada, J. Ishida, Y. Kumagai, K. Aranami, S. Ohmori, R. Nagasawa, S. Kumagai, C. Muroi, T. Kato, H. Eito and Y. Yamazaki, 2006: The Operational JMA Nonhydrostatic Mesoscale Model. *Mon. Wea. Rev.*, **134**, 1266-1298

1.2 令和時代の数値予報¹

要旨

1959年に数値予報業務が開始されてから60年、高解像度化や物理過程改良の改善により数値予報は発展を遂げてきました。平成の時代は予報モデルの改良のみならず、データ同化やアンサンブル予報技術の発展が特に顕著であり、ガイダンスをはじめとする応用技術も大幅に進歩し、数値予報プロダクトは天気予報の基礎資料としての地位は確固たるものとなりました。一方、数値予報システムは肥大化・複雑化し続け、地球システムモデル開発やモデル統合化、評価指標の充実、開発支援基盤の整備などが大きな課題として残されています。

これからの令和の時代、数値予報が社会基盤としてさらに発展するためには、ひとつひとつの開発を着実に進めるとともに、幅広い連携を進めて新しい技術や研究成果の現業への導入を積極的に進め、また複数の開発成果を最終的に統合することをより一層意識して取り組む必要があります。

1. はじめに

令和時代の数値予報という題目で今後の数値予報の展望を述べたいと思います。しかしながら、そうした展望や明るい未来を目指してなどということは、公式には気象分科会の提言や数値予報技術開発重点計画ですすでにお示ししているところです。そこで、これまでの数値予報課の取り組みを振り返りながら、残された検討課題や後世に期待する取り組みを書き記し、令和時代に期待する将来の展望に変えたいと思います。

数値予報50周年の際に、日本気象学会2009年度公開気象講演会「数値予報の過去・現在・未来～数値予報現業運用開始50周年記念～」が開催されており、その報告がまとめられています(隈, 2009、新田, 2009、小泉, 2009、木本, 2009)。以下の報告ではこれらと現在の取り組みとを対比させつつ、これからの数値予報技術の発展の方向性を述べたいと思います。

2. 高解像度化と将来のコンピュータ

1959年に数値予報業務が開始された当初から、物理法則を数値的に解くという基本を持ち、精度の高い天気予報を支援することを目的としたため、数値予報の高度化の方向性としてこの60年間、数値予報モデルの高解像度化を目指してきたのは必然でした。高解像度化すると計算量が大幅に増えるため、数値予報の高解像度化はスーパーコンピュータの能力向上とともにありました。平成の時代においても、2004年の非静力学モデルのメソ数値予報システムへの導入、全球モデルが2007年に約20kmメッシュへと高解像度化がその顕著な成果でした。

現在の局地モデルの水平解像度は2km、全球モデルの水平解像度は約20kmです。より精度の高い気象情報を求めるニーズが高まっているほか、先行研究でも100～500mメッシュ程度の雲解像スケールとすることで精度向上できる可能性が数多く示されており、今後も高解像度化への挑戦は続いていくでしょう。次世代の局地モデルは1km、全球モデルは5kmあるいはそれ以下の解像度を目指すことが目標となるべきであり、全球モデルの非静力学化も当然視野に入ってくること

¹ 室井 ちあし(数値予報課長)

になります。

積雲対流などモデルで直接解像できないスケールの現象は、パラメタリゼーションによりモデルで表現がされています。従来は、概ね 5km 以上の水平解像度では積雲対流の効果をパラメタリゼーションで考慮する必要があるとされてきたため、水平解像度 2km の気局地モデルでも当初は積雲対流パラメタリゼーションが用いられていませんでした。しかし、対流の立ち上がりが遅れる、上昇流が強すぎるといった課題があり、対流の発生(イニシエーション)を表現する手法が導入されています。どの程度までメッシュを細かくすればパラメタリゼーションが不要になるのか、決着は着いていませんが、数値予報課でも 2km 以下の水平解像度のモデル開発にも取り組んでいるところです。

これまではスパコンの能力向上を背景に、天井知らずに高解像度化を目指してきましたが、このまま 10mメッシュ、あるいは 1m メッシュ・気象シミュレーションとして当面目指す解像度はどのくらいか? という議論は当然されていくでしょう。降水予測精度向上のために雲を解像することの重要性には共通理解があると思いますが、力学過程と物理過程のカップリング、あるいは計算時間がいくらかかっても許容される研究としては意味があっても、リアルタイムで速報的にプロダクト提供が求められる現業数値予報としてコストパフォーマンスが極大となる、実用上ふさわしい解像度の上限が、もしかするとあるのかもしれない。

コンピュータの動向も目が離せません。これまではムーアの法則によってノイマン型コンピュータの発展に支えられてきました。しかし平成の終わりからムーアの法則にも限界が見え始め、省電力化の追求とともに計算性能を高める工夫が求められるようになりました。現業数値予報を開発・運用する数値予報課としては、スーパーコンピュータの性能を最大限に発揮すべくプログラムの最適化にも力をいれてきましたが、国家プロジェクトである「京」においても、システムとアプリケーションとを協調的に開発する co-design の思想が取り入れられてきました。次世代コンピュータに注目が集まっており、中でも長期的に最も大きな期待が寄せられているのは量子コンピュータです。エンドユーザーに与える影響については今のところその動向は不透明ですが、今後の開発動向によっては数値予報で量子コンピュータを活用する時代が意外と早く到達し、超高解像度化が実現し、気象予測にブレークスルーがもたらされる時代が意外と早く到達するかもしれません。

3. 予報時間延長とモデル系統誤差の減少

気象予報はより先のことを知りたいというニーズにより発展を遂げてきました。また近年は頻発する豪雨災害を受けて、より早い段階からの避難行動が求められ、それを支援するための早期の防災気象情報が求められています。また農業や漁業、様々な社会経済活動を支援するためにも、これまでよりも長期の予測が求められています。言うまでもなく大気現象はカオスであり、先のことまで正確にすることは限界がありますが、数値予報はこれまでチャレンジを続け、2013 年には高解像度全球モデルの予報時間は 11 日まで延びました。その予報時間を今後2週間先、1か月先を目指していくためには、これまでは不可能と言われていた MJO の予測の成否がカギを握ると言われています。

予報時間延長を果たすためには様々な取り組みが必要になりますが、中でも重要なのがモデル系統誤差の減少です。長い数値予報の歴史の中でも、モデル高解像度化や物理過程改良等によって系統誤差の大幅な減少が達成できました。系統誤差はモデルが不完全であることに起因する

との考えから物理過程の精緻化には大きな開発コストをかけて取り組んできましたが、近年は compensation errors への対策が大きな問題となっています。Compensation errors とは適切な和訳が見つかりませんが、複数の過程の誤差が大きかつこれらが打ち消し合って、全体としては誤差が小さくなっている状態を指します。このような状況においては、ある物理過程を改良して誤差を減らしたとしても他の物理過程が以前のままであれば、合計としては誤差が増大してしまい悪化しているように見えるという状況が見られるようになっていきます。数値予報モデルが精緻化・複雑化した現在やこれからにおいて、さらに系統誤差を減少させるうえで compensation errors への対策が必要になります。単一の改良による実験とその評価にとどまるのではなく、最初から複数の開発課題を統合して完成させることを念頭におき、調整することが望まれています。

4. 地球システムモデル

前章の予報時間延長と深く関係することとして、大気海洋の相互作用、大気化学や陸面、さらには海洋の炭素循環、生物の過程を含んだ「地球システムモデル」、あるいは「統合地球環境モデル」の開発があります。より時間スケールの長い季節予報や地球温暖化予測では早くからこの課題に取り組んでおり、また黄砂や大気汚染については天気予報と同じ時間・空間スケールでこのモデル化に取り組まれてきています。数値予報の天気予報から地球環境監視予測への拡張については、数値予報の 50 周年の節目においても木本(2009)においても将来の飛躍が大きく期待され、短期予報から長期予報、地球温暖化予測まで統一したモデルで行う、シームレス予測についても言及されていました。

それから 10 年たった今、地球システムモデルの必要性は変わらず、重要性については増大していると言えます。地球温暖化の影響が局地的な大雨や台風強度に影響を与えている可能性が議論される中で、海面水温や二酸化炭素量を外部から与えるという手法では十分ではないのは明らかです。実際にも気象研究所では大学や研究機関と協力して、地球温暖化予測を主目的とした地球システムモデル MRI-ESM2 の開発に注力し、IPCC へのインプットなど大きな成果をあげてきました。

それでもこの 10 年で、数値予報課が担う全球大気モデルと気候モデル、地球システムモデル開発との連携は期待されたほどは十分ではなく、「統一モデル」への動きは鈍かったと言わざるを得ません。理由は、①天気予報のスケールでは海洋や大気化学と大気との相互作用のモデル化について解決に至らず、初期値作成の問題も含めて課題が残っていること、②大気と海洋・化学とでは最適なパフォーマンスが得られる解像度が一般に異なるため、モデルのパラメタリゼーションや結合部分で必要となるカップラー等の共用が難しく「統一モデル」を目標とする共通認識が十分に持てなかったこと、③マネージメント上の課題として、「統一モデル」を複数の部署で開発することになれば、それぞれの現業モデルに対して必要な要件の絞り込み、開発計画の作成や現業化方針等の決定について組織を超えて行わなければならない、それに見合った体制が十分とれなかったこと、などが挙げられます。

しかしながらモデル開発の立場としてはもちろん、社会の期待としても気候変動、地球温暖化による将来の顕著現象への影響の解明、台風強度の予測精度向上に対するニーズは極めて大きく、残された課題についてはこれからのモデル関係者が知恵を出して解決していくことが強く望まれて

います。例えば海洋結合の効果について短期から長期まで合理的な取り扱いをする手法として、予報初期は偏差固定 SST を用い、徐々に別モデルで計算された予測 SST を利用する、二段階 SST 法が提案されています。全球大気モデルの開発をリードしてきた数値予報課の果たすべき今後の役割は非常に大きいと考えています。

5. データ同化とアンサンブル、観測ビッグデータ

平成時代の数値予報は、データ同化の重要性がひときわ大きく認識されたと言ってよいでしょう(小泉, 2009)。変分法データ同化の実用化による衛星データの同化が飛躍的に進歩し、初期値の精度が大幅に向上、予測精度にも大きなインパクトがありました。またデータ同化に深く関係することとして、アンサンブル予報技術も大きく進歩し、予想の不確実性を示す資料として予報現場にも浸透したと言えます。一方、世界気象機関(WMO)観測システム研究・予測可能性実験国際研究プロジェクト THORPEX は、アンサンブル予報データの高度利用を図り、観測システムと数値予報とが双方向型気象予測システムを目指しました。これらの取り組みは、予報モデルとデータ同化、アンサンブルの分野において、研究コミュニティと現業とが効果的にリンクした成功例と言えるでしょう。

数値予報で利用する観測データに目を移すと、「観測ビッグデータ」という言葉で代表されるとおり、高分解能・高精度の気象衛星「ひまわり」やフェーズドアレイ気象レーダーなど詳細な観測データが入手・利用可能となっており、数値予報でまだ十分利用できていない観測データが依然として数多く残されています。特に水蒸気のデータの活用は、降水予測の精度向上に大きな効果があることが様々な研究によりわかってきましたが、現業での利用はまだ課題があります。予報モデルのバイアス軽減の取り組みとも連携して、利用する観測データの数と質を向上させていくことが必要です。観測データの品質管理については、できるだけ多くの観測データを利用するという基本コンセプトのもとで、長年の現業数値予報の経験を元に、品質の悪い観測データをはじく処理も重要な役割を果たしてきました。今後は品質管理部分においても AI 技術の導入が期待されます。

また観測データに関する大きな流れとして、WMO で全球基本観測ネットワーク GBON(Global Basic Observing Network)の構想が打ち出されています。その役割として、世界全体の共通の技術基盤である数値予報に必要な観測を維持、発展させていくことに重点が置かれています。これまでも例えば、ラジオゾンデや漂流ブイによる観測の減少(一時的で、その後回復したものもあります)などがありました。こうした動きは事前連絡があることは少なく、その度に世界の数値予報関係者間においてほぼリアルタイムで情報を共有し、状況を打開するように努めました。このように、数値予報にとって重要な観測をいかに維持するかが、将来にわたって重要な課題になると考えられ、数値予報センター間のみならず観測ネットワークの維持運用に関わる他の宇宙機関や観測機関とも協力して進めていくことが期待されます。

データ同化技術については、全球解析において 2019 年 12 月に、4 次元変分法の背景誤差として気候値とアンサンブル予報から得られた値とを組み合わせるハイブリッド同化の実用化により、現業システムとしては成熟した形を築くことができましたと言えます。ただ、研究目的ではより簡便なアンサンブル同化が用いられることが多く、複雑なデータ同化手法は研究と現業との連携の妨げになることがあるほか、現業システムの評価そのものを難しくしている面もあります。

アンサンブル予測技術については、初期値・境界値・予報モデルの不確実性をより合理的に考

慮したアンサンブル予測手法の確立が求められます。それには、データ同化から得られた解析誤差に関する情報、予報モデルの物理過程改良から得られた知見などを役立てる必要があります。研究開発に従事する職員の垣根を越えた連携がより一層求められることとなります。2019年6月、新たにメソアンサンブル予報の運用も開始されました。これまでの全球アンサンブル予報で長年培った開発経験や利用上のノウハウを活かして、大雨のポテンシャル、不確実性の高い領域が事前に把握できるように、メソアンサンブル予報の改良や高度利用について今後の発展が期待されます。

これらの取り組みが実現できれば、THORPEX が目指した「双方向型気象予測システム」の現業での実現に大きく近づくことになるでしょう。

6. 応用技術

物理法則を数値的に解き、精度の高い予測を行うのが数値予報の王道です。しかし、モデルと実際の地形の違いなどによって系統的なバイアスが存在するため、簡便な方法で数値予報結果を修正することが、ガイダンスの考え方でした。ガイダンスをはじめ、数値予報技術を応用することで、より精度の高い予測資料作成を目指したのが、応用技術です。

1977年にガイダンスの運用開始、数値予報課アプリケーション班が1991年に発足、その後も様々なプロダクト開発やそれにあわせた体制強化が行われてきました。1996年に随次学習型のニューラルネットワーク、カルマンフィルターの登場・実用化され、ガイダンスの運用開始から40年あまり経過し、予報業務におけるガイダンスの地位を確固たるものになり、応用技術の重要性は日に日に増してきました。これまで数値予報30周年、50周年の節目においてもガイダンスや応用技術が深く語られる機会は多くはなかったかもしれませんが、これからは数値予報の歴史を振り返り、また展望を語る上では、ガイダンス・応用分野を抜きにすることはできません。

近年、第3次AIブームの到来と言われており、気象分野においても最新AI技術の活用が期待されています。スーパーコンピュータにおいても、それまで用途が限定的で利用のハードルが高かったGPUがAIブームによって汎用的なものへと飛躍しつつあります。AI技術は実況監視、異常検出など様々な分野での活用ができそうですが、中でも気象予測においても広がりが見込まれます。物理法則に立脚した数値予報と最新AI技術とが対決するのか、それとも共存するのかは大変興味深いところです。AI技術で高い精度を上げるにはデータ数を増やすことが重要であり、特に、頻度の少ない現象を予測するためには小手先のデータ収集では足りないと考えられ、気象においてもビッグデータの蓄積が重要な要素と考えられます。ビッグデータといえばGAFAM、ビッグテックが頭をよぎります。データを巡る競争はこれから熾烈になると考えられ、彼らが本気を出すと中途半端な取り組みは駆逐される可能性もあるでしょう。第1次AIブームの1950～60年代が数値予報の導入期と、第2次AIブームの1980年代が数値予報とその応用技術の発展期と、重なったことも印象的です。第3次ブームによりどのように進化をとげるのかは、非常に興味深いところです。

物理法則に立脚する部分を数値予報班、応用技術の部分をアプリケーション班で、技術的なアプローチの違いによって分担するというやり方は、それぞれの技術発展を開拓してきた上で、いかにも数値予報課流であると言え、成功に導いた大きな要因と考えることができます。数値予報の長い歴史の中で、数値予報の利用はどんどん広がり、応用技術も進化してきました。一方、一般の方からは、「モデルの降水予測と降水ガイダンス、ナウキャストや短時間予報といろいろあるけれど、

何が違うのか？」と問われることもあり、ひとたび道を間違えると様々な資料が乱立し、情報の受け手が混乱することも考えられます。数値予報とその応用技術が社会に受け入れるためには、よりわかりやすい説明が必要になると思われまます。

7. 評価指標の充実

これまで述べたように、数値予報はその精度向上とともに利用が広がり、予報業務に着実に貢献し続けることができました。さらなる予測精度向上のために物理過程の精緻化が進められ、より予報時間の長い気候モデルや、より複雑な地球システムモデルの開発も進められ、さらにガイダンスなど応用技術も発展しました。その結果、モデルの開発項目は極めて多岐にわたることになり、また数値予報を改良したことによる影響範囲も大幅に広がりました。

一方、ある物理過程を改良したからといってモデル全体が改良されるとは限らず、観測データを多く利用したことでかえって予測精度が悪化する(小泉, 2009)、また予報モデルを改善してもガイダンスではむしろ悪化するという事態も見られるようになり、総合システムとしての数値予報の開発・評価は困難度を増しています。

数値予報の予測精度を見る尺度として長年、北半球や南半球の 500hPa 高度面の高度と地上気圧などが標準的に用いられており、雨や台風に着目した検証も充実してきました。これらは数値予報の標準的なプロダクトあるいは予報業務における重要な指標であるとともに、数値予報の精度を客観的に見るに適したものと考えることができます。一方で、予想精度が向上した現代において、短期予報から長期予報まですべての指標で改善を目指すことは非常に困難です。目的を明確にして何らかの一部改良することを目指すしかありませんが、何を重視するかを開発者自らの価値観のみで判断することは好ましくありません。対客観解析の評価指標を見る上では、モデルの誤差によって過小評価がされていないかを考慮する必要もあり、数値予報の様々な過程について科学的に考察した上で指標を明確にし、その中で目的に応じて指標を使い分ける工夫が求められています。そうした状況になってもなお、得られた指標からモデル改良へのフィードバックを得ることは今後も困難を極めるでしょう。数値予報システムが成熟した現在においては、ひとつひとつの開発成果による改善幅が小さくなりつつあります。実験を行った結果は事例や実験期間に依存することが多く、事例依存性があることに留意し誤差幅も考慮する必要があります。

週間アンサンブル予報、台風アンサンブル予報と季節アンサンブル予報は、2017 年 3 月にシステムが統合されました。これらを統合によって、開発コストや維持管理コストを大幅に下げることができ、また運用面においても重複したルーチン運用が回避できるため、大きな効果があったと言えます。一方、これら3つのアンサンブル予報システムは、週間予報、台風予報、季節予報と異なる目的を持ち、モデルや初期値作成手法を改良したところで、すべての指標・すべての業務が改善されるとは限りません。そこで、改良時において重視すべき指標について議論を行い、アンサンブル予報システムの改良に関するガイドラインを策定しました。例えば、先に述べた大気海洋結合の効果、地球システムモデルについても、大気海洋を結合させることにより台風強度、海面水温の低下がより精度良く表現されることは先行研究により十分にわかってきました。しかしながら大気下層のプロファイルや大気の循環にも大きな影響があり、現業モデルとしての実用化を目指すためには、台風以外の指標も重視し改善を目指す必要があります。今後、天気予報のモデルから地球システ

ムモデルまで幅広く開発も視野に入れるのであれば、評価すべき指標について議論を深め、こうしたガイドラインを作成することが期待されます。

8. 開発支援基盤の整備

数値予報に限らず、目標達成のためには計画・実行・評価・改善を繰り返す PDCA サイクルによって、業務を継続的に改善していくことが有効です。数値予報についても、誤解を恐れずに述べると、高解像度化すれば結果は確実に改善されると考えていた時代もあったかもしれませんが。しかしながら、データ同化の品質管理やモデルの物理過程の精緻化などの重要性が高まり、数値予報システムが高度化・複雑化しており、モデルを高解像度化すれば確実に改善されるとは言えなくなると考えられます。特に 2007 年に全球モデルの水平解像度を 20km に向上させた際には、セミラグランジュ法を導入して大幅な解像度増強にもかかわらず、その後の予測精度向上にかなり苦しみました。

この反省から数値予報課では開発支援基盤の整備に取り組みました。ひとつはプロジェクト管理ツール、プログラムのバージョン管理ツールの導入であり、これによって、開発、評価、現業化までの開発者支援・チェック体制強化を行うこととしました。これによって開発の進捗状況やプログラムの変更の履歴などがひとめでオンライン上でわかるようになり、進捗管理やプログラムのバグ発見などが効率的にできるようになりました。あわせて、数値予報改良のガイドラインを策定し、数値予報モデル等を更新して改善するための標準的な実験設定(実験期間の目安)を定め、その改善をしっかりと評価ができる仕組みを整えました。

数値予報課内の動きとして、2011 年に数値予報班に基盤整備グループが新たに発足、開発者が共通で利用する実験システムの維持管理を中心に開発支援基盤を専門で担当することになりました。現業システムの維持管理を担うプログラム班と、数値予報モデルやデータ同化の開発を行う数値予報班とが互い協力する体制が構築できたことも効果的でした。専門的な課題に取り組むことが、ともすれば専門家を育てることと認識されることがありますが、それだけではなく、専門家同士が以下に活発に議論ができるか、協力ができる仕組みが用意できるかが、その後の研究開発の成果を束ねて大きくしていく上でますます重要となっていくでしょう。

9. 幅広い連携・マネジメント

数値予報は、気象学、物理学、計算科学などの最新の技術を結集させ実利用を目指してきました。中でも、数値予報の実現と業務化にあたっては、正野重方教授を中心と大学、気象研究所、中央气象台(のちの気象庁)などの研究者・技術者大学等と連携した数値予報グループ(通称:NPグループ)によって成し遂げられました(新田, 2009)。その後も最新の成果を業務化するために、大学等と気象庁との連携は継続してきましたが、数値予報モデルの複雑化や肥大化とともに、現業と研究とのギャップが時折感じられるようになりました。また数値予報の活躍の広がりとともに、短期予報から季節予報、地球温暖化予測まで様々な分野で数値予報技術が利用されるようになり、その改良の着眼点もそれぞれの分野で独自に議論されることが多く、気象モデルと気候モデルとでほとんど同じ技術を利用していながら、なかなか話がうまくかみ合わないという場面も見られました。

こうしたギャップを埋めるため、WMO の数値実験作業部会(WGNE)で気象・気候分野の共通プ

プロジェクトが検討されるようになり、積雲対流のパラメタリゼーションにおけるグレーズン問題をはじめ、物理過程に関するワークショップで一緒に議論を交わすなど、様々な取り組みも行われています。国内においても気象・気候が垣根を越えて共同でモデル開発を進めるべきであって、これから数値予報がさらに発展するためには、短期予報から地球温暖化予測まで多くの研究者・開発者がより一層連携することが求められます。気象庁でも大学等の研究機関との連携を強化するため、「数値予報モデル開発懇談会」を 2017 年から立ち上げたところですが、これまで述べた課題を解決するためには気象・気候に限らず、計算機科学や AI、衛星観測など、より幅広い分野の専門家との連携が必要です。

数値予報が気象予測の基盤技術となり、またインターネットやスマホの普及で気象庁以外の民間気象会社あるいは外国の数値予報結果等が手軽に閲覧できるようになりました。それとともに気象庁の予報精度、数値予報の予測精度にも関心が高まっており、欧米との予測精度の差が議論されることも増えてきました。全球モデルの精度については欧米とは差がつけられていると認識しています。詳細な分析を述べているスペースは残念ながらありませんが、これまで述べてきたとおり、数値予報のさらなる精度向上は一筋縄ではいかず、複数の課題をトータルとして解決していくことが求められています。しかしながら日本人の本来得意とする几帳面さ、緻密さがこの数値予報開発では十分に活かされていない気がしています。これまでは個人の意志や能力を重視するあまり、全体としての優先度を踏まえた取り組み、先を見据えた研究開発、その成果を現業化につなげる努力がいずれも十分でなかった面があります。

欧米の数値予報のリーダーと会うたびに、彼らはみな科学者として優秀であるとともに、強いリーダーシップを備えていると感じます。我が国においても今後は、開発者・リーダーを想定した個人の能力開発や人材育成を行うとともに、優先度の高い開発により網羅的に取り組めるよう、オールジャパンでの開発戦略の策定とフォローアップ、組織運営・マネジメントの強化が必要と考えられます。

10. おわりに～社会の基盤となるために～

数値予報はこの 60 年で大幅な精度向上を果たし、天気予報の基礎資料としての地位は確固たるものとなりました。これはひとえに、コンピュータを用いて物理法則に基づき客観的な予測を行うことが正しい道であると、世代を超えて強い信念を持ち実行し続けて実用可能なことを示した成功の物語と言えます。

気象は人々の日常生活や社会経済活動に大きな影響を与えて続けています。天気予報・防災気象情報は生活により密着なものとして、さらに気象災害を防止あるいは被害を軽減する重要な情報として定着していますが、数値予報の精度向上はこれらにも大きく貢献してきました。テレビの天気予報でも低気圧や台風の接近が予想される場合、従来は等圧線が主体の天気図によって解説されることが主流でしたが、最近では数値予報の量的・面的な結果がアニメーションによって詳細にわかりやすく示されることが増えました。

正確で詳細な気象情報に対するニーズは、近年の大雨災害・台風災害や地球温暖化の影響に対する国民の関心の高まりもあり、ますます増大していると言えます。数値予報はこれからも気象予測において不可欠な資料としてありつづけるとともに、単なる気象予測資料からさらに飛躍して、あ

らゆる場面で数値予報の予測結果が社会基盤情報として利用されるべく、今後も技術開発に取り組む必要があります。

目指すところは、リアルタイムで得られる観測データをできるだけ多く収集し、科学的な手法によって予測データをはじき出すこと、に尽きます。これまで王道と考えてきた、物理法則に基づく数値予報技術とともに、従来とは違う新たなアプローチ、それが果たして人工知能なのかビッグデータ活用なのかは、あるいは量子コンピュータなのかは現時点では不透明ですが、イノベーションを切り開く可能性がある新たな手法も複合的に組み合わせて、国民の命と財産を守るために、令和の時代においてさらなる飛躍を目指し、気象予測情報の価値をより一層高めていくことが望まれています。

なるべく未来の話をつまみやすく考えたあまり、過去の振り返りや平易な解説が多くを占めてしまいましたが、これも筆者の力不足によるものです。次世代のリーダーがここに述べた以上の問題意識を持って、様々な分野の方々と協力しながら力強く未来の数値予報を牽引していただくことを期待し、この稿を閉じたいと思います。

参考文献

- 木本 昌秀, 2009: 2009 年度春季大会 公開気象講演会「数値予報の過去・現在・未来—数値予報現業運用開始 50 周年記念—」の報告3. 今後の数値予報への期待, 天気, 11, 908-913.
- 隈 健一, 2009: 2009 年度春季大会 公開気象講演会「数値予報の過去・現在・未来—数値予報現業運用開始 50 周年記念—」の報告はじめに, 天気, 11, 893.
- 小泉 耕, 2009: 2009 年度春季大会 公開気象講演会「数値予報の過去・現在・未来—数値予報現業運用開始 50 周年記念—」の報告2. 最新の数値予報, 天気, 11, 900-907.
- 新田 尚, 2009: 2009 年度春季大会 公開気象講演会「数値予報の過去・現在・未来—数値予報現業運用開始 50 周年記念—」の報告1. 数値予報の歴史—数値予報開始 50 周年を迎えて—, 天気, 11, 894-899.

(追記)

本稿をまとめている 2019 年 12 月に、気象庁の体制強化の方針がまとまり、数値予報モデルを分野横断的に開発する体制を整備することになりました。これは、本稿で述べている数値予報モデルの高度化、地球システムモデルの開発や気象研究所・大学等との連携、開発支援基盤の整備等を進めていく上で非常に有効な体制となります。

数値予報課は新たに予測技術基盤課となります。これを契機に、数値予報が気象予測の基礎資料のみならず社会の基盤として確固たる地位を築いていくべく、さらに発展することを切に願っています。

第2部 今後の数値予報への期待¹

牛山朋来氏(土木研究所水災害・リスクマネジメント国際センター)

私たちは気象庁 GSM を境界条件として、アンサンブルカルマンフィルターを用いた領域アンサンブル予報を行い、数々の豪雨災害を対象に洪水予測実験を行ってきました。その結果、2012 年や 2017 年の九州北部豪雨、2014 年の広島豪雨災害などの水平スケールの小さな降水帯に関しては予測が困難ですが、2015 年の関東東北豪雨、平成 30 年 7 月豪雨、そして令和元年台風第 19 号等の台風や前線にともなう豪雨現象では、洪水到来の予測がおおよそ 24 時間前からある程度可能という感触を得ました。また、予測精度も年々改善しており、気象庁 GSM の改良が進んでいることを強く感じています。今後も GSM の予測精度が向上し、MEPS 等の領域アンサンブル予報と組み合わせることにより、将来は 48 時間前、72 時間前から大規模洪水の到来を予測可能になるものと期待されます。そうなれば、避難準備や避難行動を十分余裕をもって行うことができるようになり、洪水被害を大幅に減少できるものと期待されます。

一方、九州北部豪雨や広島の豪雨災害に代表される水平スケールの小さい線状降水帯については、当面予測は困難だと推測されます。しかし、十分な計算機資源を投入した高解像度実験が行われるなど、現象の理解は進んでいるものと思われ、今後さらに理解が進むことを期待しています。

大西晴夫氏(一般社団法人日本気象予報士会 代表理事)

「AI時代の数値予報と予報官の役割は？」

数値予報 60 周年、おめでとうございます。

私が数値予報課(電子計算室)に在籍したのは 1970 年代後半から 80 年代初めで、数値予報モデルはプリミティブ化した北半球モデルとアジアファインメッシュモデル(ファインメッシュと言っても格子間隔は 152km)で、北半球モデルがスペクトル化される直前でした。毎日、数値予報班から予報課の会報に出向き、数値予報の結果についての解説を行っていましたが、トラフの遅れ進みについての見解を述べるのが精一杯で、会報を仕切る主任予報官からは、「はいご苦勞様」の一言で終わり。後は予報官の「経験とカン」が幅を利かす時代でした。

当時の電計室で、ある同僚の方が「モデルの降雨予想の結果などを、もっとテレビ放送でも使ってもらったらいいいのでは」と発言されたところ、みんなから袋だたきにあっていたことを思い出します。当時のモデルの精度は、冬型気圧配置時の関東平野の晴天がどうにか出るかどうかという程度で、とてもモデルの結果をそのまま放送で使えるものではありませんでした。そのことを思うと、現在ではモデルの降水量予想の結果がそのまま放送されるなど隔世の感があります。モデル開発の地道な努力の結果だと数値予報課の方々に敬意を払わずにいられません。それでも、視聴者が 1 格子の降水予想を見て、その時刻にその場所で降るといふふうに理解されているのは、ちょっと違うだろうとは思いたくなりますが。

¹ 順不同で掲載させていただきました。所属は 2019 年度の所属です。職員の役職は令和 2 年 3 月 1 日現在のものです。

最近はAI技術が急速に進化しており、数値モデルの結果から天気や気温などの予報要素に変換することにかけては、「AIにお任せ」の時代に入りつつあると感じます。それでも、さすがのAIも精度の良いモデルの結果がなければ何もできません。モデル開発の戦略を立てるのは人間の仕事であることは、これからも変わらないでしょう。一方、予報官が「予報官」であり続けるためには何をやるのかについては、明確に答えることができません。私は現在、日本気象予報士会の会長も務めており、気象予報士資格のあり方についても思うところの多い毎日です。

佐藤正樹氏(東京大学大気海洋研究所)

気象庁が策定した「2030年に向けた数値予報技術開発重点計画」では全球モデルの水平格子間隔を10km以下へ高解像度化することを開発の方向性としている。水平解像度を高解像度化することにより、台風の進路・強度の予測精度の向上が期待される。そして2030年の時点では、その先の水平格子間隔5km以下の全球非静力学モデルが視野に入り始められると思われるが、実現するのはさらに5~10年以上先だろうか。そうなれば、積雲クラスターや季節内振動等の雲降水システムの再現性が向上し、また全球モデルと領域モデルの力学・物理過程が共通化されて、全球・領域モデルを統合的に開発することが可能になるだろう。我々は2005年頃より全球非静力学モデルNICAMを開発し、これを用いた研究を推進してきたが、このようなモデルが30年以上を経て現業へ展開が可能になることを考えると、まさに次世代モデルとしての役回りを意識せざるを得ない。その経験からいえば、数値モデルの高解像化とともに、モデルの最大の不確実性の要因である雲・降水過程の改善・改良を期待したい。人工衛星観測や地上リモセン観測等により高頻度・高解像度の多様な雲・降水の観測データが利用可能であり、例えば、全球モデルの計算結果は静止気象衛星ひまわりと同等な解像度での直接比較・検証が可能である。数値モデルの水蒸気・雲から雨までに至るプロセスを観測データによって検証し、数値モデルの中でのこれらの表現を現実的に向上させることによって、台風や集中豪雨の予測精度が向上していくと期待される。

立平良三氏(元気象庁長官)

一ユーザーとしての実感では、最近の天気予報の精度向上は顕著で、数値予報の進歩がその最大要因であろうことは疑いない。筆者は数値予報の精度向上に従事した経験がないので、ここではまず数値予報の利用促進について私見を述べる。

天気予報を意思決定に適正に利用する場合、その精度情報は必須と考えている。年平均的中率といった統計的な精度ではなく、天気予報の発表ごとにその精度が付加されていることが望ましい。アンサンブル予報はこの方向を目指すものの一つと考えられる。

確率予報は、精度表示のための実用的な形式と考えられ、すでにいくつかの確率形式の予報が発表されている。今後の数値予報の開発においては、確率形式の予報発表を支援する方向の開発を強化すべきと考える。ただし確率形式の予報が、十分に利活用されるためには、利用者側に「確率利用リテラシー」といったものが必要であろう。

数値予報の改善の一つの要因として、初期値の問題がある。各種のリモートセンシング技術による初期値改善が期待される一方で、直接測定の補強も検討の余地がある。例えば相対湿度のような水蒸気に関する要素をアメダスの観測要素に加えることは、短時間の大雨予警報の改善に大き

く寄与するものであり、コストパフォーマンス的にも優れた選択ではなかろうか。

中北英一氏(京都大学防災研究所)

「河川管理からの期待」

河川の出水、内水氾濫・都市浸水、土石流・斜面崩壊の等の実時間でのリスク予測やそれによるリスク回避、避難のためには、豪雨(台風による豪雨、梅雨期の集中豪雨、ゲリラ豪雨)に関する気象予測に期待するところがとても大きい。それらの情報は、ダム貯水池の実時間運用を含めた河川の管理(電力ダムも含む)、排水ポンプの実時間運用を含む雨水排除、自治体による避難勧告・指示の発令や住民自らの避難の開始、鉄道・道路の安全運行管理に活用されるポテンシャルを有している。

しかし、必要となる予測リードタイムや空間スケールは目的によって大きく異なり、もちろん予測精度も異なる。たとえば、緊張する実時間河川管理の場合、対象とする河川流域やダム貯水池の規模、ならびに体制に入るかどうかの判断から始まる各ステージによって異なる。特に、昨今その頻度が増えているダム貯水池の異常洪水時防災操作の場合、レーダベースの短時間予測やLFMによる予測の時間安定性と幅の情報が必要となる。降雨予測量が増える減るとの毎時毎時交互に異なる不安定な予測は容量の小さなダム貯水池の下流を危険なものにする。最確値と幅はオペレータの決断を大きくサポートする。もちろん逆に、どこまでの予測精度が実現すればいかなる高度な実時間管理が可能となるかを河川管理側から明らかにすることも極めて重要である。そして、河川管理者自らがこれらの要求を満たすことを自らできる範囲で実現することも大切と考えている。

気候変動によるとも考えられる昨今の豪雨頻度と強度、総降雨量の増加は、実時間降雨予測とそれによるダム流入量等の流量予測、氾濫予測、土壌水分量予測の重要性を益々高めている。益々の数値予報の発展に期待したい。

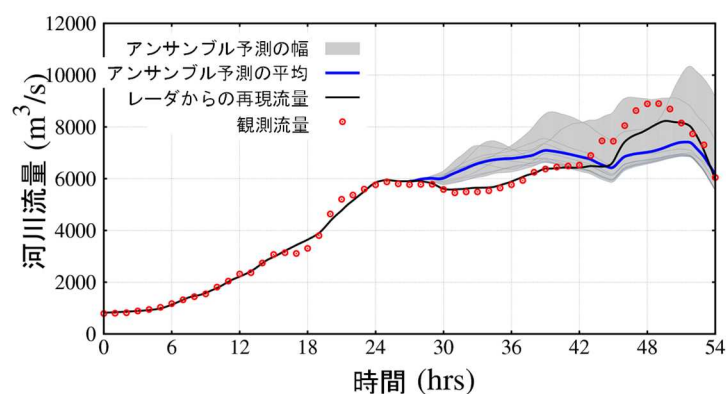


図 : Yu, Wansik, Eiichi Nakakita, Sunmin Kim, and Kosei Yamaguchi, Improvement of rainfall and rainfall forecasts by blending ensemble NWP rainfall with radar prediction considering orographic rainfall, Journal of Hydrology, Vol.531, pp.494-507, doi:10.1061/jhydrol.2015.04.055, 2015.

新野宏氏(東京大学大気海洋研究所)

1959年に始まった我が国の数値予報は、関係者の不断の努力と電子計算機の発展により、モデルの高度化・高解像度化やデータ同化手法の導入が進み、防災や国民生活に不可欠な予測情報を提供する基盤的ツールとなってきた。しかし、今後の高解像度化による予報精度の向上には2つの課題が見えてきている。1つは半導体の微細化が限界に近づき、電子計算機の性能向上が鈍化していること、もう1つは水平解像度が現行の局地モデルの2kmより小さくなると、積雲対流や大気境界層の乱流の一部が解像され、既存のパラメタリゼーションが使えなくなる「グレーゾーン」に足を踏み入れることである。今後は、局地モデルで局地的豪雨や竜巻の可能性が予想されたときには、「グレーゾーン」を飛び越える水平100m解像度のモデルを局所的にネストした予報を行うなどの柔軟な取り組みも検討の余地があろう。アンサンブル予報においては、長期・短期を問わずGPVデータを直接利用したいユーザーや防災・日常生活に使いやすい形の確率情報の提供を希望するユーザーなど、多様な要望を考慮した取り組みが期待される。

一方、高時間・空間解像度の「ひまわり」に加えて、今後は二重偏波機能を付加した現業レーダー、湿度計を付加したアメダスなどの新しい観測機器の導入が予定されており、これらの大量の観測データの同化、AIも利用した物理過程のパラメタリゼーションの開発、大気と海洋を結合した台風予報モデルの開発などによる予測精度の向上にも期待したい。

これらの多様な開発を通して世界の気象機関との予報精度の競争に肩を並べていくためには、大学等研究機関との積極的な連携にも期待したい。

新田尚氏(元気象庁長官)

気象庁では、昨年10月に「2030年に向けた数値予報技術重点計画」を公表し、この「重点計画」において、数値予報の高度化・精度向上についての目標を掲げています。そしてこれを次世代への道標とする期待と、大学等研究機関との一層の連携を進めることを明示しておられます。

私は、基本的にはこの「重点計画」すべての実現を最も期待しておりますが、中でもAI技術の活用に向けた本年1月の理化学研究所革新知能総合研究センター(理研AIPセンター)との共同研究契約において、数値予報技術が中心的な役割を果たすこと、気候予測においてより精度の高い結果を得よう数値予報技術がより一層貢献することを願っています。

愚弟的なことは、現在の私には能力的に言えませんが、数値予報課のみなさまが他課や気象研究所をはじめとする多くの大学等研究機関との連携で中心的な役割を果たされることを期待しております。

二宮洸三氏(元気象庁長官)

「数値予報(NP)のさらなる発展を願って」

予報モデルは準平衡風モデル、プリミティブ・モデルを経て、非静力学モデルへと進化し、解析も修正法、最適内挿法から、四次元同化へと進化し、多様な観測データを取り込む時代になりました。その利用範囲も、局地的短期間予測から全球的季節予報にまでも広がってきました。今後どのような革新的進歩があるのか想像しかねますが、気象業務の中核技術としてNPの重要性はさらに高まるに違いありません。

現在でも NP は予測基礎技術としての役割にとどまらず、データ管理・保存、再解析、関連プロダクトの発信と多様な貢献を果たしております。しかし現在でも、NP の成果は気象業務の枠組み中で十分に活用されず、NP の成果は有効に社会に届けられず、従って社会的に十分に認知されていません。NP の発展のためには社会の理解・支持を深めることも大切です。そのためには、NP の成果報告を庁内に留めず、内外の学術集会・学会誌に報告することが大切です。また特異現象についての NP の能力(と問題点)を示す事例研究も大切です。

豊富な気象学的知見を身に着け、国際的経験も積まれた NP 担当者が、NP の枠を超えて、気象業務全体の管理・計画・立案・企画分野で先導的役割を果たされることが NP を包括する気象業務全体の発展に大切です。現役の皆様の広範囲の分野での御活躍を期待します。

廣岡俊彦氏(九州大学大学院理学研究院)

数値予報業務開始 60 周年おめでとうございます。

思い起こせば、21 世紀の冒頭、「成層圏プラットフォーム」という、高度 20km ほどの上空に滞留型の飛行船を浮遊させ、通信や放送の中継に使おうというミレニアムプロジェクトがあり、私はその委員として、日本の 20km ほどの上空で、どのような風が吹いているのかを調査していました。飛行船の動力源との関係から、あまり強風が吹くと滞留できないので、強風となる予報があれば、それを避けて、風の弱い高度や緯度に移動するというのを想定していましたが、日本付近で冬季に強風となるのは成層圏突然昇温と関係あるらしいということで、成層圏突然昇温の予測可能性というのを調べることにしました。その当時、現業モデルを用いた成層圏の予測可能性など調べている研究はなく、数値予報課のアンサンブル週間予報が、水曜と木曜のみ 1 か月間に延長されているのを利用し、当時の担当者に、その頃全て廃棄されていたアンサンブル予報メンバー全てのデータを残してもらうよう、無理を言うてお願いし、その予報データを用いて、2004 年頃から、京都大学の向川均さんと一緒に、成層圏の予測可能性の研究を開始しました。結果は驚くべきもので、対流圏の予報よりはるかに長く、事例によっては 1 か月ほど前から昇温を予測できており、引き続き、そのように長くなる要因や、予測可能性が悪くなるのはどんなときか、などと一連の研究を進めました。残念ながら成層圏プラットフォームそのものの計画は頓挫しましたが、そのようなニッチ産業的だった成層圏の予測可能性の研究も、今から 10 年前の 2009 年 1 月に生じた史上最大規模の突然昇温現象を契機に、世界中の研究者が同様の予測可能性の研究に乗り出し、今では、SNAP(成層圏予測可能評価ネットワーク)という国際的な枠組みのもとで、世界中の機関の数値予報モデルの予測可能性が大々的に調べられるようになってきました。その結果を見るたびに、気象庁のモデル頑張れと、密かに応援しているのですが、現状では ECMWF、UKMO が一歩先を進んでいるようです。この先は是非とも、これらのモデルを凌駕するべく、数値予報課のモデルの着実な発展を期待して止みません。

増田善信氏(元気象庁電子計算室)

「電子計算室発足のころと現代—ますます研鑽を積み、次世代への発展を—」

先日、ある小冊子に1文を頼まれ、台風15号、台風19号など一連の気象災害を取り上げたが、そこに「台風の進路予想はよくなった。早めに対処を」と書いたほど、台風の進路予報の精度の向上に目を見張っている。台風の数値予報はIBM704導入の最大の目的であったので、本当に素晴らしいと思う。

IBM704が導入され、テスト運用を開始したのは1959年2月末であった。4月1日運用開始までの時間はわずかだった。850, 500hPaを使った準地衡風2層モデルだったから、二つの天気図の読み取り、データのパンチ、読み取りとパンチ・ミス訂正など本当に大変だった。しかし、最も困ったのは予報精度が悪かったことだった。気象庁長官が大蔵省に行って了解を求め、アメリカの500hPaバロトロピック・モデルで5月1日からルーチンにはいった。

なぜ、ルーチンに耐えられないほど予報精度が悪かったのか。この2層モデルは岸保・鍋島両氏がアメリカで6か月もかけてテストしたものでプログラムは完ぺきだったが精度が悪かった。多くの意見が出されたが確たる回答はない。私はテストにもっていった2例とも、低気圧の急速発達、すなわち傾圧不安定の例だったからだと思った。傾圧不安定は2層モデルでもほぼ完ぺきに予報できる。アメリカでは準地衡風3層モデルでNovember stormの予報に成功し、これが数値予報のルーチン化に道を開いた。多くの数値予報の解説書も予報の成功例として低気圧の急速発達の例を載せている。ここに落とし穴があったのではないかと思っている。

計算機は大型化し、高速化している。素晴らしいことだが、ますますブラックボックス化する恐れがある。数値予報は物理学だということを忘れず、研鑽を積んで、ますます発展されることを期待している。

三好建正氏(理化学研究所)

「目指せ世界一！」

日本の現業数値予報60周年、おめでとうございます。私は2002年から2008年まで数値予報課に在籍し、データ同化システムの開発に携わりました。その間、2003年から2年間、メリーランド大学に留学する機会もいただきました。私は気象庁で大事なことを教わり、私の人生は気象庁で方向付けられました。気象庁でお世話になった方々には心より感謝の気持ちでいっぱいです。前回50周年の時は2009年でしたが、ちょうどメリーランド大学に移ったばかりの頃でした。その時も本稿と同じ「目指せ世界一！」というタイトルで寄稿し、日本の数値予報の精度が60周年の時には世界一になっていることへの期待を述べました。しかし、世界一にはまだ一歩、二歩、いやもっと、足りないのが現状です。

世界一を目指すことは大変重要です。まずモチベーションが違います。また世界一に挑んでいるという誇りも生まれます。世界一を目指すときに重要なのは、他よりも一歩先に行くことです。他と同じことをしては、常に二番煎じでしかありません。

私は現在、理化学研究所といういわば国策研究所で、科学研究を生業としています。世界一の研究を行い、世界をあとと言わせることを考えています。そして、日本人の誇りを生むように願っています。世界一の研究を行うには、誰も考えたことがないことを考え、誰もやったことがないことをや

ることです。私は、「ビッグデータ同化」という構想を打ち立て、100m メッシュのモデルで 30 秒毎に更新する 30 分後の積乱雲の予測という、世界の先端研究とは桁違いの計算を実行に移しました。これには、世界一の「京」コンピュータと、最新鋭のフェーズドアレイ気象レーダの幸運な組み合わせがありました。

科学研究と現業予報の間には、様々なギャップがあります。しかし、世界一を目指し、日本の誇りを世界に示すことには変わりありません。気象庁の技術開発においても、研究コミュニティと連携を取ったオール日本の取り組みが始まっています。歴史ある日本の現業数値予報が世界一になるよう願っています。私も科学研究を通じて少しでも貢献したいと思います。

向川均氏(京都大学大学院理学研究科)・榎本剛氏(京都大学防災研究所/JAMSTEC APL)

『『予測できる時代』の課題』

地震や火山とは異なり、気象災害は予測できるといってよい。このような認識が得られるようになったのは、数値天気予報の精度が向上し、信頼性が高まったからである。

数値予報の精度向上には、戦後相次いで渡米された小倉義光、大山勝道、荒川昭夫、笠原彰、都田菊郎、栗原宜夫、真鍋叔郎の諸先生方や、80年代に続いた金光正郎先生等日本人の貢献が大きい。限られた計算機資源の下で、現在の数値予報技術の基盤を築き上げた。お弟子さんたちには日本人は多くないので、意識的に知見を継承し発展させていくことが必要である。

現代は、計算機や通信が高速化され、入手可能な数値モデルやデータも充実しているが、ほとんど知識のないままモデルやデータを使うことが日常になりつつある。モデルの開発においても、原理や意図を理解せぬまま手法を実装したり、単に解像度やアンサンブル数を増やしたり、闇雲に複雑な物理過程を採用したり、アーキテクチャの都合で計算手法を選択したりしてしまう誘惑がある。

信頼性の高い数値予報であるが、台風予報の大外し事例の低減や、長期予報の精度向上など課題は山積している。課題の解決には、データ同化手法や数値モデルの仮定や近似を見直し、適切な数値手法を探したり、考案したりする不断の努力が必要とされる。先人に学び、気象庁と大学との連携をさらに密にして、数値予報技術の発展に寄与できるような研究開発に取り組みたい。また、恵まれた環境に甘んじることなく、自分で考えることができるような人材を育成していきたいと考えている。

松山洋氏(首都大学東京 地理情報学研究室)

「今後の数値予報への期待」

このたびは、気象庁の現業数値予報業務 60 周年、おめでとうございます。昔も今も、客観解析データを使って研究を進めてきた者としては、大変嬉しい限りです。

今後の数値予報への期待としてまず挙げられるのは、顕著な気象災害の発生予測だと思います。この点に関して、「平成 30 年 7 月西日本豪雨」にしても、「2019 年台風 19 号」にしても、気象庁は十分なりードタイムを持って記者会見を行ない、「命を守る行動を取って下さい」と国民に呼びかけています。この点、気象庁は大変よくやっているといます。

それにも関わらず、人命を含む甚大な被害が生じてしまうのはどうしてでしょうか？ 教科書的な

記述になってしまいますが、「自分だけは大丈夫」、「ここだけは大丈夫」といった正常性バイアスが働いてしまっているのでしょう。また、早め早めに行動を起こせばよいのですが、夜には避難するのが難しいことも挙げられます。ただし、この先、気象庁からの情報を受け取る側が、この重大さを真摯に受け止めて対応するならば、不動産はともかく人的被害は減らせると思います。

梅雨前線に伴う豪雨にしろ、台風に伴う災害にしろ、地球温暖化にともなうこれまでの経験知が役に立たない状況に突入しつつあります。こういった時代こそ、数値予報の役割は大きく、今後もタイムリーに正確な予報を出していただくことを希望しています。

北村利次氏(元気象庁電子計算室)

「初国産電子計算機導入のころ」

「キショウチョウヨホウブ デンシケイサンシツニサイヨウケツテイス」東京大手町の気象庁で面接を受けた翌日電報を受けた私は、1967年4月気象庁に入庁した。時を同じくして、国産初の大型汎用電子計算機 HITAC5020 E/F が導入され、本格的な数値予報の運用が始まった。初めて接する電子計算機に心が躍った。

数値予報課の前身、当時の電子計算室は毛利室長のもと、岸保数値予報班長、磯部データ処理班長ほか45人ほどの陣容であった。難解な理論をより難解に説明する人が多い中、岸保さんは談話会での説明が大変わかりやすく好評であった。磯部さんは国内ではまだ目新しい計算機言語を駆使し、私はアセンブリ言語の特訓を受けた。6年間の在籍中、客観解析を担当した。後に岸保さんは東大教授に、磯部さんは日立製作所に転出し、穏やかでいつも笑顔を絶やさなかった毛利さんは長官に就任した。

今日の数値予報の礎を築いた初期の開発段階において、計算機のプログラマーやキーパンチャーの存在を忘れてはならない。これらの人々の献身的な活動なくして、計算機の機能は発揮出来なかった。

先年、私は南太平洋サモア独立国政府気象局でアドバイザーとして滞在した。予報官は巧みに NOAA の数値予報資料や衛星画像をリアルタイムに活用していた。HIMAWARI 受信可能エリアの発展途上国で衛星画像と補完して利用するため、日本の数値予報も一層情報を発信してほしいと願っている。

大滝俊夫氏(元気象庁電子計算室)

電子計算室として予算が通った時代は、いわゆるオペレーター、プログラマーはいない。もちろん数値予報関係のプログラマーは立派な体制を持っていた。ただし、予算の理由で、電子計算室の要素は十分でなく、いわゆるプログラマーはいなかった。従って、計算機の運用も電計室中心になり、他課の不平もあった。

その結果、オペレーター、プログラマーの導入を兼ねて、管区から一人ずつ集め、日立に依頼してオペレーター、プログラマーの養成に約1年をかけた(場所は日立製作所の研究所)。

オペレーターの養成後、計算機の運用は数値予報までで、あとはその開発と他課のプログラム開発、ルーチン及び数値予報の開発に時間がとられた。

計算機室として運用を始めたのは、HITAC502が導入された後で、先に召集された人たちがオ

ペレーター、プログラマー(FORTRAN 使用)として計算に携わった。

やがて、羽田から 50 名くらいのオペレーターの導入があり、今までのオペレータは、数値予報以外のプログラムの開発に従事する。この間、いろいろな問題が他課との間で起きたが、何とか乗り越えて次第に一般の計算機室の様相となっていた。

以上、簡単に計算室のなりはじめをまとめてみましたが、実際には大変なものがあったことも事実で、すべてではないが、前に刊行された電計室からの小雑誌二冊によく書かれています。

浅田正彦氏(元気象庁電子計算室)

「今後の数値予報への期待」

地球温暖化が進み、過去の気象データが使えなくなってきた。明日・今日・昨日の気象情報は地方自治体に任せて数値予報により明後日以降の予報の局地化、細時化をもっと進めてほしい。さらに 2045 年(AI 革命)に備え、大気の運動方程式に基盤を置く数値予報こそ、AI を導入し、高速高性能の電子計算機を駆使して発展させるべきと思います。

八木正允氏(元気象庁電子計算室)

私が電子計算室在籍中に、数値予報モデルはバランス・モデルから、アジア域は p 座標系プリミティブ・モデルに、北半球域は σ 座標系プリミティブ・モデルに変わった。その後の数値予報モデルの急速な発展には、びっくりしました。

退職後も、休日前にはよく気象庁ホームページで天気予測経過を見えています。

さて、私の「今後の数値予報への期待」は二つあります。一つ目は、気象災害に直結する台風、低気圧・前線、線状降水帯などを、「もっと精度よく予測できる短期予報モデル」を作ることです。

二つ目は、エルニーニョ現象・ラニーニャ現象をも含む「10 年程度の気候変動を予測する大気海洋結合モデルの開発」です。ただし、モデルの開発などには、人手と計算機資源が必要ですから、気象研究所の「気象予報研究部」、「台風・災害気象研究部」、「気象観測部」、「気候・環境研究部」、「全球大気海洋研空部」などの関係者にも、積極的に協力してもらえたらよいと思います。

一つ目と二つ目のモデルが開発・改良されれば、その中間に位置する季節予報も、おのずと改善されるのではないのでしょうか。

巽保夫氏(元気象研究所所長)

数値予報 60 周年おめでとうございます。

私が最後に数値予報課に在籍した 20 数年前に思い描いていた数値予報の将来の姿は、私の想定を超えてすでに実現されたと感じます。特に台風については、強度を含めここまで出来るようになったのかと感銘すら覚えます。

とはいえ、数十年～百年に一度といわれる異常気象の発生が常態化しており、防災・減災への更なる対応が求められる一方で、温暖化に代表される人間活動を起源とする気候変動の兆候が地球規模で顕在化しており、将来の地球環境への懸念が拡がりを見せています。

こうした中で、気象庁の数値予報部門には、災害をもたらす激しい現象のより詳細な予測が求められる一方、地球温暖化などに対処するためのより精密なモデル開発を担う国内の中核部隊の一つとしての役割が強く求められるものと思います。日本の数値予報の一層の発展を願っています。

安富裕二氏(元成田航空地方気象台長)

「今後の数値予報への期待」

私が勤め始めた時期は数値予報発足から10年足らずの頃でしたが、その将来の可能性には限らない魅力を感じていました。数値予報現業化にあたり、予測可能性の限界を考慮し1日二回運用を決断して、財政当局等の説得に尽力された窪田正八氏の実行力に学ぶこと多しと感じています。現在はネットでも利用できるメソモデルの予測成果を日々感謝を込めて享受しております。

今後目指すべきは、気象学会 2018 年度春季大会シンポジウムの「防災・減災のための観測・短時間予測技術の未来」で既に共有されている方向性に共感しております。モデルの細密化。それに耐える実況データの確保は、永遠の課題と言えましょう。人材確保・育成の観点では、メソ現象に係る再解析データの活用による、各種現象のメカニズムの理解促進が期待されます。様々なアプリケーションモデルも有効なツールとなるでしょう。

大規模な組織改編が計画されているとのことですが、如何なる組織形態であろうとも、予測技術の基盤が数値モデルとなっている現在、観測から、予測モデル出力、情報作成・発信までの一連の関連部署間の壁を極力薄くした連携強化を期待します。この一連の流れを見通すスーパーバイザーの必要性を感じますが、気象業務に携わる皆さまが、大局を見る鳥の眼と、自らの担当分野における課題を細部まで見据える虫の眼の両方を兼ね備えることを目標に励んで戴きたいと期待しております。

大野久雄氏(応用気象エンジニアリング)

「1km 分解能 LFM の早期現業化を期待します」

現在の 2km 分解能 LFM は、そのエキサイティングな表現力で我々を魅了し続けています。

豊かに表現される現象は、『マクロバースト、ガストフロント、スコールライン、MCC など、雷雨に関連するメソ気象』、『山岳波、山越え気流、フェーンとボラ、だし風などの局地風、境界層ジェット、山岳風下の水平渦など、山岳地形で生じるメソ気象』、『陸風、海風、陸上の水平ロール対流など、地表面加熱・冷却でドライブされるメソ気象』など、多岐にわたります。

そうしたメソ気象の複合として、(1)谷風循環→尾根筋での雷雨発生→斜面を下るガストフロント→平野に生じた海風前線との衝突→平野での新たな雷雨発生；(2)例えば鳥海山の日本海側がフェーンで昇温する際、同山の背後にできる正負の渦ペアが日本海の冷気を呼び込むため、秋田・山形県境付近は昇温しない；など「なるほどそうか！」という事例にも事欠きません。

『2km 分解能でこうなのだから、これが 1km 分解能になったらどんな世界が見えるのだろうか』、こう考えたときのワクワク感はたまりません。地面の湿り具合の取り扱い次第では更に深い世界が見えそうですし、航空気象サービスでは低層ウィンドシア情報の質が飛躍的に高まると思っています。1km 分解能 LFM の早期現業化を期待する次第です。

補足の一つ。『現在の 2km 分解能 LFM を、開発途上国領域(例えばマニラ FIR)でランさせ、その GPV を当該国が利用する』ことの実現も期待します。当該国の航空気象サービスの劇的な質の向上をとおして国際貢献ができるからです。

私の在籍当時、Very Fine Mesh Model の水平分解能は 63.5 km。本格的な放射伝達過程や境界層過程を取り入れた革新的なものでしたが、物理過程も含めて現在の LFM とは隔世の感があり

ます。数値予報モデルの高度化の凄さに感動しつつ、貴課の益々の発展を祈念いたします。

永田雅氏（元気象研究所所長）

台風進路予報の誤差の減少や不安定降水の予測の改善等により、数値予報 50 年からの 10 年間の着実な進歩を実感しています。この間の関係各位のご尽力に敬意を表します。今後も、優秀なスタッフの組織力を活かし、内外の関係機関との連携を深め、更なる発展を実現されると信じています。

60 年の節目に当たり、ここ数年、外から気象庁の業務を見ていて、今後の数値予報に最も期待することは、利用者目線の取り組みの強化です。最終利用者に至るまでの数値予報製品(情報)の流れと活用の状況をモニターし、中間～最終の利用者とできる限り意思疎通を図って連携を深め、高度化・精緻化した製品(情報)を利用し尽くすと共に、利用しやすい応用製品(情報)の開発・改善が進むことを期待しています。

限られた具体例ですが、非常に高い時空間解像度の予測値であっても、その実現確率や分かり易い誤差の情報が伴わなければ有効活用は困難です。また、アンサンブル(台風)予測の結果が台風進路予報の予報円の半径(r)という一つのパラメタにしか反映されないとすれば大変「もったいない」ことです。T1919 の洪水災害を目の当たりにして、例えば、各河川の要所の水位が氾濫危険水位を超える確率の時系列予測のような、防災活動に直結する情報を数値予報に基づいて早い時間帯から提供できないだろうか、などと考えました。

国民共通の財産である数値予報の製品が、ユーザーフレンドリーな利用ツールと共に、身近に誰でも使えるものになれば素晴らしいと思います。

瀬上哲秀氏(元気象研究所所長)

「数値予報ワンチーム」

あれからもう 30 年たつんだ。この原稿の依頼を受けたとき、あまりの時の速さに正直驚いた。そして、当時のことがいろいろ思い出された。記念事業として、諸先輩をお招きして講堂で盛大な記念パーティを開き、NPD のロゴ入り T シャツを作り、記念冊子を発刊するなど、みんなで協力しアイデアを出しあい、手作りでいろいろやった。数値予報課にいられて幸せだった。当時の課員はもう誰も残っていないだろう。それが良かったのか、数値予報は当時では考えられないほど素晴らしく発展している。

あの頃学会で発表すると、数値予報はサイエンスではない、テクノロジーだ、などと陰口をたたかれた。当時、数値予報モデルで実データを用いたシミュレーションは大学ではほとんどできなかった。やっかみもあったのかもしれない。しかし、最近では数値予報モデルや客観解析の入手が容易になり、学会発表でも実データを使った数値シミュレーションが花盛りである。

そうした環境を生かし、大学等との連携、一般論ではなく具体的なテーマを決めての連携をぜひ進めていただきたい。データ同化を含めて数値予報システムの構築は、ビッグプロジェクトになってきている。ひとり数値予報課だけの力で更に発展させ、世界に伍していくのはますます厳しい時代になってきている。気象研究所はもとより、大学や他の研究機関とも力をあわせて、ワンチームとして開発を進めることが非常に重要である。

昨年の7月豪雨や今年の台風15号、19号による災害など、気象災害への国民の関心は極めて高くなっている。数値予報課がワンチームのキャプテンとして日本の気象界を引っ張り、数値予報を更に発展させ、国民の期待に応えられんことを切に希望する。

平隆介氏(気象業務支援センター)

「今後の数値予報への期待」

数値予報60周年、おめでとうございます。

私は、気象庁を退職した後、アジアの発展途上国(フィリピン)の気象局の技術能力向上のJICAプロジェクトに携わる機会がありましたが、その中で感じたことをお伝えします。

そのプロジェクトでは、先進国から提供される数値予報データ(GPV)を有効に活用して、予報業務の近代化を進めることが大きな柱になっており、私は、フィリピンの若手職員を指導して、気象庁の全球モデルGPVを用いた気温ガイダンスの作成に取り組み、業務利用を開始する、という成果を上げることが出来ました。この過程では、数値予報課の方々には、カルマンフィルター技術に関する助言など、大変お世話になりました。改めて、お礼申し上げます。

海外に行ってみますと、WISサーバ上で提供している全球GPVは正に気象庁の顔というべきプロダクトで、これを頼りに、私の技術支援も進められましたし、その後の彼らの業務もこれに大きく依存して遂行されており、本当に頼りになる予測基盤として見えています。

同時に、これらの国では、欧米の数値予報センターから提供される数値予報資料も並行して活用されており、日々これらの精度は見比べられている、ということも是非知っておいていただきたいと思います。

高度化したデータ同化・予測モデル技術を世界に伍して発展させていくことは、生易しい課題ではないと思いますが、是非、国内の諸専門家とも協力して、各国の予報業務から頼りにされるプロダクトを送り出し続けてほしいと思います。

中山博義氏(日立製作所公共システム事業部)

「今後の数値予報に対する期待」

昭和62年数値予報に初めてスーパーコンピュータ(以下、「スパコン」という。)が導入された。HI TAC S-810/20Kというもので、気象庁本庁の3階の機械室内に設置された。その次のシステムからは、清瀬市のシステム運用室に設置され、現在のNAPS10でスパコンとしては6代目である。私は、何らかの形でほぼその6代の全てに係わることができた。スパコンは当初1系統だけだったが、その後正副の2系統となり、耐障害性や予測精度の向上とともに重要性が高まってきた。

数値予報プロダクトの主目的が天気予報であった頃から、今や防災目的に軸足を移し、各方面で認められるようになったことは、この60年間従事し、鋭意努力された職員各位の情熱と不断の努力の賜物であると思う。

さて、お題の今後の数値予報に対する期待であるが、昨今気象庁データの利用推進が求められ、一般的な事業における需要予測などのためのビッグデータのの一つとして注目されている。こういった方面からの要望を真摯に反映していくことが、更なる重要性の向上に繋がると考える。単に予報のためのデータだけでなく、広く一般的な生活に密接に結び付く形態を追加していくことで、

今後の予算確保や国民からの信頼が得られると思う。

今後とも新技術の継続的な採用と、気象庁外からの要望に広く目を向け、永続的な進化がなされていくことを願っている。

隈健一氏(東京大学先端科学技術研究センター)

「還暦を迎えた数値予報の新たな発展に向けて」

数値予報 60 周年おめでとうございます。数値予報の誕生と同じ年に生まれ、30 周年を若手職員として迎え、50 周年を数値予報課長として迎え、そして還暦を迎えて気象庁を退職した年に 60 周年となったこと、不思議な縁を感じています。その間、数値予報が予報の現場でなかなか信用されず、世の中からもほとんど認知されていなかった時代から、数値予報結果から社会が大きく動くようになった今の時代への発展に微力ながら貢献できたことを感謝しています。

還暦を迎えた数値予報、次の一回りではどう変わっていくのでしょうか。モデリングは、大気、陸面、海洋、そして時空間スケールを超越した大きな枠組みへの発展が期待されます。そのもとの、雲物理、対流、境界層、海洋、植生などの各プロセスについて観測や実験事実を通じて自然界をより正しく再現できるものに磨き上げていくことが重要です。さらにデータ同化により衛星観測など様々な観測に基づく3次元データを作成し、予報精度の向上を図ることはもとより、30 年前に佐藤信夫さんが提唱した「地球環境監視予測システム」がどのような形で具体化していくのか楽しみです。

より精度の高いデータ作成を目指すとともに、数値予報データを社会との共有インフラとして、水文、電力、交通など様々な分野で活用していくことで、さらに社会への貢献となりますし、数値予報という技術基盤への社会の理解も高まると思います。このためにはデータ提供に留まらず、社会各分野との様々なコミュニケーション、連携を進めていくことが有効と考えています。

2019 年 4 月に気象研究所が新しい組織体制となりましたが、前年度の気象研究所の所長として、これからの 30 年の数値予報を支える研究体制を頭に描きながら構築した体制でもあります。気象研究所のみならず大学等の研究機関とオールジャパンで開発を進めていただくことで、まだまだ日本は世界のトップに立つだけの力はあると信じています。今後のさらなる発展を祈念して数値予報還暦のお祝いの言葉とさせていただきます。

斉藤和雄氏(気象業務支援センター/東京大学大気海洋研究所)

2018 年、2019 年と続けて豪雨や台風で大きな気象災害が発生しました。近年の天気予報の精度向上には目覚ましいものがあり、2019 年台風第 19 号では上陸数日前の早い段階からかなり正確な進路予報が出て災害の軽減に大きく貢献したと思いますが、それでも実際の雨がどこでどれだけ降りそれにより何が起きるかを具体的な情報として事前に出すことに関しては、まだクリアすべき多くのステップがあるように感じています。水文モデルとの連携を強め具体的な災害発生リスクそのものの予測につながる高精度高解像度のアンサンブル予測の必要性を感じます。気象庁を離れて 2 年近く、ベトナムを中心とする東南アジアの方々と仕事する機会が多いのですが、日本がアジアでの技術的な地位を保持していくためにも全球予報の一段の精度向上にも頑張りたいと思います。

米国気象学会のモノグラフ AMS Monographs では 2018 年に A Century of Progress in Atmospheric and Related Sciences という米国気象学会百周年記念号を刊行しており、科学コミュニティのサポートから成層圏中間圏の理解に至る 27 の章で気象学の様々な分野の 100 Years of Progress をまとめています (<https://journals.ametsoc.org/toc/amsm/59>)。第 13 章が 100 Years of Progress in Forecasting and NWP Applications で、著者の一人として数値予報黎明期の気象庁の活動や日本の大学での研究について書かせてもらいました。

Benjamin, S., J. Brown, G. Brunet, P. Lynch, K. Saito, and T. Schlatter, 2019: 100 Years of Progress in Forecasting and NWP Applications. *Meteor. Monogr.*, **59**, 13.1–13.67.

高瀬邦夫氏(日本気象協会)

「夢は雲解像現業モデル、AIに負けるな」

定年後、第 1.5 の人生で数値予報資料と向き合うことが多くなりました。改めてここまで進化したのかと驚くばかりですし、予測結果を眺めながら、「フムフム、ここはあの仕組みの結果やな」と一人合点して悦に入っています。

入庁したのが 1979 年、数値予報 20 年の年。本庁予報課で天気図当番になった 1982 年頃は、アジア・プリミティブ・ファインメッシュモデル(FLM):129 km/10 層、北半球プリミティブモデル(NHM):381 km/8 層、台風3次元モデル(MNG):381・191・95 km/3 層(中心付近を 2 段階のネスティング)でした。モデル仕様は資料から引用したのですが、1982 年台風 5 号で、温帯低気圧化しつつあった台風の渦の追跡が難しく、漁船遭難につながった記憶は鮮明です。

さて、昔話の場所ではありませんね、依頼事項は、今後に期待する事でした。

「雲解像の現業予報モデルの実現」です。

バックビルディング、線状降水帯、スーパーセル……。40 年以上前の修士院生の頃、対流性降水系をテーマとしていました。集中豪雨をもたらす降水システムにおいて、すでに、これらはほぼ観測的事実でした。メカニズム解明と数値実験での再現も進みつつありました。

時おり思いだしつつも業務に追われていたところに、10 年ほど前に「ゲリラ豪雨」の用語が発掘され、今も「今後取り組むべき云々……」の課題です。若かりし頃に憧れた人が、まだ、独り身でおられる、のようなものです。アプローチしたい(≒解明したい)です。しかし、知力・気力・体力の順に衰えが進んでいます。衰えなくても無理だったと自覚しています。

解明が進み、詳細な観測データが揃い、現業予測が実現する日を夢見ています。その時まで、理詰めの数値予報が、力ずくのビッグデータ&ディープラーニングに打ち負かされないように。

田中省吾氏(気象業務支援センター)

「社会全体を数値予報メンバーに」

多くの先進的かつ粘り強い先人の方々のひた向きの努力により、今や数値予報技術(監視・分析・情報通信技術含め)は、社会活動における当たり前の基盤ツールになっている。

かつては、航空、海運、電力などごく一部の企業が利用者だったが、支援センターの配信利用者は、最近5年だと毎年のべ約 50 者(純増は約 30 者)、年率約 10%増となっており、国内にとどまらず世界各国の企業も加え、その総数はのべ 500 者以上に急増している。これは数値データの

直接利用者の話だが、その派生物を活用しているのは、携帯の普及を考えるとほぼ全世界の人々といってもよい状況ではないだろうか。こうした利用規模の増大は、裏を返せば数値予報の精度向上や内容充実が社会活動に与えるインパクトも膨大だということである。

これからの数値予報機能のさらなる発展に取り組む方々には、唯我独尊ではなく、常に現在そして10年、20年先の社会全体を俯瞰し、日本や世界中の方々に数値予報の重要性・ありがたさを「水や空気」と同じように当たり前と感じ、共に連携・協力してくれるメンバーにしてしまうことを目指してほしい。

天気予報を天気予定の様に感じて日々の生活に利用されている皆様に、目の前で展開される様々な地球変化をリアルタイムかつ高精度に再現する時が必ず来ると信じている、数値予報のいち応援者からの戯言でした。10年、20年そして50年後(生きてないな…)が楽しみです。気象庁のみならず関係者が一丸となって頑張ってください。

佐々木洋氏(気象業務支援センター)

「今後の数値予報への期待」～顕在的な需要に応える実用的な数値予報～

人間なら1959年生まれ(私と同じ年)ということだが、世代が変わる度にひと桁性能が向上する数値予報は、より一層の成長が期待され、世の中に無くてはならない「実用的な存在」となっている。数値予報へ寄せられる期待は、すなわち気象庁・気象行政への期待であり、「顕在的な需要」と言っても差し支えないだろう。

その数値予報、まずは安定的に稼働されることが第一だが、その上で、将来に向けて期待するところを述べてみる。素人目線(妄想を含む)であることを予めご容赦いただきたい。

- ・(何を)台風、集中豪雨、地球温暖化の予測を、
- ・(どうする)ナンバーワンの精度で、いつでもどこでも提供する。

日本という国において「自然災害を防ぐ」ということは極めて重要な命題であり、特に、台風の進路予報・強度予報の精度を上げることには、何よりも優先度を上げて、「台風予報なら日本の気象庁が世界一」と言われるくらいに取り組んでほしい。実現のための王道は、大気海洋の結合モデル(全球モデル)の発展ということなのであろうが、台風予報に特化した取り組みがあっても良いと思う。

一方、集中豪雨予測は全球モデルである必要はなく、メソモデルとして棲み分けるのであろうが、先端の観測予測技術・マンパワーを存分に注ぎ、牽引力のあるシステム・システム開発体制を期待したい。

そして、温暖化予測には世界中の願いが寄せられる。全球モデルをベースとする気候モデルに、海洋と大気圏の諸過程の精緻化、土壌・積雪・海氷モデル、温室効果ガスをも予報変数化するような、斬新な開発が加わり進展することを期待したい。

科学の世界では、実用的でなくとも、すぐに世の中の役に立たなくとも許容されるべきことがある。しかし、気象庁の数値予報は常に実用を目指さなければならない、と私は思う。そのためには、安定稼働と共に、いつでも、誰でも、どこでも、その恩恵に浴せることが理想だ。社会と連携して、是非そのような環境を整えていただければと思う。

最後に、そんな数値予報を支え、開発に取り組んでいる関係者各位に敬意を表するとともに、益々のご発展を祈念したい。

新美和造氏(元気象庁予報部数値予報課)

「今後の数値予報への期待」

数値予報技術については、私のような素人があれこれ言う立場にないので、益々の精度向上を願うのみですが、数値予報を利用する立場から期待することを一言述べさせていただきたいと思います。

気象庁内では、数値予報課の開発担当者と、利用する立場の全国の予報担当者の間での意見交換とそれを受けてのフィードバックは常々されていることと思いますが、民間の数値予報利用者との意見交換の場があれば良いのにと願っております。

この夏お手伝いさせていただいた株式会社ヤマテンの予報作業現場では、山の天気予報のために、GSM や MSM の予測結果を詳細に解析して予報に反映させておられました。山の天気予測には、一般的な地上の天気(晴れ、曇り、雨、雪)では不十分で、どの高さに雲ができて、降水があるのかということまで詳細に検討する必要があります。そのためには、相当詳しくモデルの予測を検討することになるのですが、なぜモデルの予測がそうなるのか疑問に思うことも多々あります。モデルの技術的なことを十分理解できていないための誤解も少なからずあると思います。こういった数値予報のヘビーユーザーと数値予報技術担当者との懇談は、利用者にとっての利益になるだけでなく、モデルの技術開発にも役に立つのではないのでしょうか。ぜひとも、こういったソフト面の取り組みも検討していただければと願うばかりです。

高野清治 (福岡管区気象台気象防災部地球環境・海洋課 元気象研究所所長)

「今後の数値予報への期待」

私自身は数値予報課 OB といっても併任を除けば在籍は 1 年だけで、むしろ週間予報や季節予報の担当者として数値予報のユーザーとしての経験が長いのでこの視点から述べてみたい。

この 30 年余りで思うのは数値予報の精度向上である。再任用として久しぶりに現場に復帰してみると 30 年前と比べると週間予報も 1 か月予報も精度が大きく向上したのが実感された。特に台風予報に関しては、2019 年台風第 19 号の予測に見られるように大きく向上した。夏になると北上バイアスのせいで週間予報用の数値予報では毎日のように日本付近に台風がうろうろし週間予報作成に悩まされた(そしてたまにだが実際に来る!)頃と比べるとまさに隔世の感である。

今後のモデル開発に望むことは気象の予測の精度向上に加え、相互作用して気象に影響を与える海洋、海氷、エアロゾルなど他の要素の予報も一体としてできる地球システムモデルを目指してほしいということである。予報現場で週間や 1 か月数値予報を見ていると海面水温偏差が固定されているため、海面水温偏差が高いところでいつまでも積雲対流が立ち続けているように思える。これらは特に夏場の太平洋高気圧の消長や台風等の予報に影響を与えているように見える。また、日本付近では周りの海水温や海氷も地上気温の予測などに影響を与えているようだ。難しいことは承知しているが、短期予報や週間予報の精度向上のためにもぜひ取り組んでいただければと思う。

長谷川直之 (気象庁予報部長)

「さらに社会に貢献する数値予報をめざして」

情報通信技術が飛躍的に向上し、普及し、大量のデータが流れ、使われるようになった。これを

人々のよりよい生活に結びつけようと、産官学が連携して取り組んでいる。その旗印が Society 5.0 だ。人口動態、地図、交通量、電力使用量や各種経済活動量など多様なデータを処理し、それを使って様々な意思決定や自動制御などを行うことで、社会的な問題を解決し、生活を豊かにしようとするものである。

その流れに、気象データが乗り遅れるようなことは避けたい。気象は、どんな分野とも関係するし、中でも、未来を表す数値予報データは、極めて有用だ。防災はもちろん、観光、交通、医療、製造、サービス、趣味・娯楽等あらゆる社会・経済活動で、直接に、間接に、他分野のデータとともに活用され、よりよい社会の実現に貢献することが期待される。

そのためには、数値予報データが誰にでも、どんなシステムからでも、手軽に、適切に使うことができる環境が構築されるよう、情報通信分野との連携や普及・啓発などの取り組みを進めたい。そして何よりも、更なる精度向上が欠かせない。精度の善し悪しは、データ活用の幅と直結する。それに、データやサービスは容易に国境を越えてくるため、外国の数値予報センターに遅れをとるわけにはいかない。庁外の多くの研究者、関係機関等と目標を共有して連携を進め、戦略的に、持続可能な形で技術開発に取り組みたい。諸先輩、関係各位のご支援をよろしくお願いします。

大林正典（気象庁地球環境・海洋部長）

「今後の数値予報への期待」

私は、昭和最後の年に数値予報課で現業を経験した後、平成の始まりに予報課に異動して降水短時間予報(降短)担当となりました。当時、降短はNAPSのメインフレームで実行されており、数値予報課の担当者と協力して開発していました。その頃は、数値予報結果が予報作業の中心となり、新 L-ADESS 端末で GPV の利用も始まる等、気象業務の根幹としての数値予報の地位が固まった時期でした。実況補外を基本とする降短は過渡期の技術であり、早晚数値予報にとって代わられるという見方が優勢だった数値予報課では、降短担当は若干肩身の狭い思いもされていたようでした。

それから 30 年。予報課イントラのツールで予測精度を調べてみると、FT3 では、降水の有無(10km 平均 1mm)では MSM の精度が 2007 年頃から実況補外型予測(EX6:盛衰予測を含む)を上回るようになって一方、強雨(同 20mm)では、まだ EX6 を下回っています。

近年、強雨域補外の改良や地形性降水予測に利用する数値予報予測値の精度向上等による EX6 の改善と、性能の上がった MSM・LFM とのマージ手法の改善等により、降短の予報精度は、格段に向上してきています。一方でスコアの改善幅が徐々に小さくなってきており、更なる改善が難しくなっているようです。

線状降水帯等の豪雨の短時間予測改善は防災上の最重要課題であり、降短のブレークスルーにつながるデータ同化技術、モデル技術の高度化を最も期待しています。

竹内義明（気象研究所所長）

「還暦の先の未来へ」

60周年お慶び申し上げます。私の出生が現業数値予報業務の開始と同じ年度なので感慨深いものがあります。

これまで主にリモートセンシングを通して数値予報に関わってきましたが、この分野はまだまだ発展の余地が大きいと考えます。

地上観測については、二重偏波フェーズドアレイドップラーレーダの全国展開という究極の目標を目指して進化するレーダーに加え、地上 GNSS(海陸とも)や放送電波を用いた大気データの即時同化利用が期待されます。

衛星観測については、可視・赤外の高頻度高解像度観測、GNSS 掩蔽観測等に加え、静止衛星ハイパースペクトルサウンダや衛星レーダ・ライダーによる全球高解像度三次元大気海洋データの短期から季節予報への利用が期待されます。近い将来、台風発生・急発達を含めた台風生涯予測も実現することでしょう。

数値予報結果の見せ方もずいぶん変わると思います。昨年度大阪管区気象台長として地方気象台を視察した際の若手職員とのダイレクトトークでは「受け取った住民が数日後に予想される天気や災害を仮想体験できるような仕組みができているだろう」と話しました。

結びに、長年にわたって数値予報業務やプロダクト利活用に携わってきた皆様、その基礎研究に取り組んできた皆様、予算・施設面から支援頂いた皆様、更には将来これらの役割を担う皆様に対して深く敬意を表します。

藤田司（気象庁地球環境・海洋部海洋気象課海洋気象情報室長）

「今後の数値予報への期待」

入庁 6 年目、私は本庁予報課に在籍していましたが、メソ量的予報と仮称されていた 20km メッシュ予報を準備する時期にあって、主任予報官が「数値予報なんて昔は道楽でやらせていたようなものだ」と語っていたことを記憶しています。その言葉の前段は「今でこそ重要な技術になっているけれど」というものでした。およそ 25 年前、数値予報の精度向上が気象予報に人が不要な時代が来るとさえ思わせた時期のことですが、時代の変わり目の一つだったようです。

その後、モデリングだけでなく、関連する様々な技術が大いに進んで精度は飛躍的に向上しました。道楽は実用技術となり、基盤技術とまで呼ばれるようになって久しいところです。その道のりは平坦だったということではなくて、いつも足りない資源のやりくりや効率化の努力に加え、執念と言ってもよいほどの開発者の情熱に支えられてきたと思います。

数値予報の進歩に伴い、天気予報を含む防災や産業振興などにおける利用も大きく広がり、予報者の役割も変わってきています。同時に、より詳しく、より精度の高い情報が求められるようになっていきます。将来は、24 時間生活の隅々で活用されるのかもしれませんが。便利ですね、きっと。でも、実用だけでなく、自然の探求という気持ちで最高の気象シミュレータを開発できるとよいなど個人的には思います。それは必ず役に立ちますし。いかがでしょう。

大野木和敏（気象研究所研究調整官）

「系統誤差の小さなモデルへの期待」

長期再解析 JRA-25 と JRA-55 を担当した経験から述べたい。長期再解析は現業全球解析予報システムに準拠していることから、その性能は使用したシステムの性能を示していると言ってもよい。最初の JRA-25(2004 年 3 月のシステム準拠)は熱帯低気圧や降水量の解析精度は優れている

たが放射収支や気温の鉛直分布等には問題が多かった。当時、データ同化の開発で新しい衛星データを入れると予報スコアが悪化する問題があったが、モデルの系統誤差が大きいことによる観測データとの間の不整合が理由とみられる。次の JRA-55(2009 年 12 月のシステム準拠)では、放射過程等が改良されたモデルを用い、衛星を含む観測データの品質管理や利用法を丁寧に調整した結果、その品質は JRA-25 から大きく改善された。2010 年代には数値予報課での物理的整合性のとれたモデル開発の方針と、並行して開発管理サーバの利用、NAPEX や各種評価ツール類の整備が進み、現業モデルの物理過程が大きく改善された。それらの成果を導入した

新しい再解析 JRA-3Q(2018 年 12 月のシステム準拠)では JRA-55 からの品質改善が確認されている。系統誤差の小さなモデルであれば観測データとの整合性がよくなり新たな衛星データを導入しやすく、気候解析、季節予報や気候予測でも利用しやすい。気象庁モデルが系統誤差の小さな優れたモデルとして世界中から高く評価されることを期待したい。

石田純一（札幌管区気象台気象防災部長）

「今後の数値予報への期待」

この度は、「数値予報 60 周年誌」を発刊されるとのこと大変おめでとうございます。

平成 7 年に数値予報課に配属となった後、若干の出入りはあったものの、昨年度末までで、通算ではおよそ 20 年数値予報課で働かせていただきました。心に残っていることはいろいろとありますが、直近の出来事として、「2030 年に向けた数値予報技術開発重点計画」(以下、重点計画)策定と英国気象局・欧州中期予報センターへの出張調査を挙げます。

重点計画では、「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」といった 4 点を重点目標として掲げることができました。掲げている目標はチャレンジングではありますが、これらに対する社会のニーズが増加してきていることは現職でも痛感しているところです。

また、出張調査では英国の両機関における開発管理(開発体制、開発プロセス、開発計画、部外連携、人材育成など)について聞き取り調査をさせていただきました。多くの点で学ぶところがありましたが、総じて言えることとして、凡人では気づかないこれさえやれば大丈夫というような特効薬は数値予報開発には存在せず、当たり前のことを当たり前のこととして、継続してやり抜くことが大事ということです。

これまでの数値予報開発を地道にこつこつと継続してきたからこそ今があるものと思います。重点目標の達成に向けて、しっかりとした開発管理のもと、一步一步着実に開発を進めていけば、チャレンジングな目標であってもいずれは達成し、今後増加する社会ニーズにもいずれ応えられるものと信じております。数値予報 70 周年、80 周年…とさらに発展していくことを期待しています。

高田伸一（福岡航空地方気象台長）

「今後の数値予報への期待」

数値予報 60 年おめでとうございます。私も今年度で 60 歳となること、数値予報課には 3 回計 16 年間在籍したこともあり、感慨深いものがあります。

現在地方官署にいますが、数値予報課に在籍していた時より、数値予報の精度向上が非常に重要であると感じます。気象分科会提言「2030 年の科学技術を見据えた気象業務のあり

方」において、観測・予測精度向上のための技術開発を推進することが示され、また気象審議会では気象・気候予測の根幹である数値予報の技術開発を推進していくための「2030年に向けた数値予報技術開発重点計画」が策定されました。本庁組織改編に合わせ、数値予報業務は今までにない大きな変革の時でしょう。外との連携、人材育成・獲得、開発のマネジメント強化など改善すべき多くの課題があると思いますが、今後の変革に期待しています。

60年前にはたぶん天気予報はあまり当てにされていなかったと思います。20年前には天気予報で列車の計画運休や住民の事前避難が行われることなどありませんでした。今後も数値予報の精度向上及びその有効利用により社会活動は大きく変化してゆくでしょう。数年前、数値予報課に在籍していた時に、あるAIの関係者に数値予報データを渡したことがあります。その際、その方は上空の風と気温の予測精度が高いことに驚いておられ「これは日本の宝だ」とおっしゃっていました。今後も多くの困難があるでしょうが、「日本の宝」がさらに輝きを増し、その宝がもたらす社会変化を退職後も楽しみにしています。

永田眞一（甲府地方気象台長）

「今後の数値予報への期待」

数値予報課を卒業してから約2年、大阪府及び山梨県の各自治体の防災対応を支援する業務に携わってきました。首長訪問を行った際にも多くの首長から、気象庁が発表する各種予測情報の精度向上について（リップサービスもあると思いますが）お褒めの言葉をいただいております。その一方で、各自治体が効果的・効率的な防災対応を行う上で最も必要としている集中豪雨の予測精度（量・時間・場所）については各自治体防災担当者の満足いただくレベルに達していないのが実情で、大幅な精度向上の要望をいただくことも少なくありません。

気象現象のさらなる局地化・集中化・激甚化が見込まれる中、気象災害による人的被害を防ぐためには、各自治体それぞれの実情に即したきめ細かな高精度気象予測に基づく自治体支援が必要不可欠であり、それが気象庁・気象台へのさらなる信頼強化につながります。「2030年の科学技術を見据えた気象業務のあり方」では、集中豪雨や台風の予測について中期的かつ極めてチャレンジングな目標が設定されていますが、きめ細かな自治体支援という観点ではこの目標でも不十分な状況です。数値予報モデル開発に携わる皆様におかれましては、気象庁・気象台が地域防災支援に数値予報が極めて重要な位置づけとなっていることを今一度ご認識いただいた上で、「・・・あり方」で掲げた目標のさらに先を見据え、英知を結集させて開発を推進していただくことを期待いたします。

豊田英司（気象庁予報部情報通信課主任技術専門官）

「今後の数値予報への期待」

この60年で数値予報は、学者の夢から予報業務の基幹となるまで成長しました。それは高速化する計算機に支えられた力学的予測の勝利でありました。一方で通信網の発達により、グローバル化する海外機関と比較されることは避けられなくなりました。これまで築いたシステムを維持精緻化することも大切ですが、日本で国費を投じて数値予報する意義が理解されるためには、新たな価値創出に向けた挑戦が不可欠です。

個人的には、次の3つに期待します。

まず機械学習ダウンスケーリング。週間予報後半に総観場への地形応答を加味することにはメソ力学モデルより経費効率的で防災的にも評価されると予想します。

ついで時間軸方向での機械学習予想。いかにも素人ばい発想であるが故に予測可能性限界を実践把握していて欲しいところです。

三つ目はこのような挑戦(具体は違ってでもいいのです)を支援するために、庁内外問わずより多くの若い才能がより生のデータに触れられる環境を作ることです。IT 界では地方を超え、組織の垣根を越えて巨大データを共有することが夢ではなくなっているのですから、活用しない手はありません。

数値予報課は離れましたがこんなことを考えつつ時折無理を言うつもりです。よろしくおつきあいください。

木村陽一（気象庁観測部観測課観測システム運用室主任技術専門官）

未来を見通したいとの人類の欲求に沿って、将来の天気を予想する数値予報技術は発展してきた。

一方、たった一つの見通しだけを頼りにする決定論的手法の限界もわかり、確率予報、アンサンブル予報による、幅をもった未来予測表現技術も用いられているところである。

その結果、将来の予想として、Aの見通しもあればBの可能性もある、という状況が出現し、今度は逆に、「結局AなのかBなのかどっちなの？」との、素朴すぎて答えに窮する場面が出現している昨今である。このような状況に対して、皆さんは、どのように説明しているのであろうか。

Aが起きる可能性はX%程度、Bが起きる可能性はY%、よって適切な意思決定としては、、、と、コストモデルを用いて定量的に検討することもできるところではあるが、こうした議論は科学者グループ内では理解が進んでも、一般にはなかなか通じない。

そんな状況で使えるフレーズが気に入っていて、私は様々な場面で多用しているので、それをもって数値予報開始 60 年目の私の考え方としておきたい。

明治末から昭和初めにかけて、短い人生を駆け抜けた金子みすゞの詩からの引用で、「みんなちがって、みんないい」。

大和田浩美（気象庁観測部計画課気象技術開発室課長補佐）

今年は現業数値予報業務を開始して 60 周年の年とのことで、心よりお祝い申し上げます。その間の 13 年間で数値予報課で過ごさせていただいたことを懐かしく思い出すとともに、すばらしい方々とご一緒できたことを今でも誇りに思っています。

数値予報課で過ごした 13 年間で、一番思い出に残っている年は 2011 年度です。震災後の 2011 年 4 月に 2 度目の転入をしました。そのときの数値予報課は環境緊急対応の当番でみな疲れ切っていましたが、わたしが配置された観測データ処理グループは非常に雰囲気がよく、仲間に恵まれ、自分の気持ちはいつも前向きでした。そして「いつか GSM を世界一のモデルに」と強く願いながら、GNSS 掩蔽データ同化の開発に取り組み始めました。

観測データ処理グループでは、今でもそうだと思いますが、それぞれが個別の測器や衛星の主

担当となって開発を進めます。当時、周囲の仲間たちとは、自分の担当以外の測器や衛星についても広く情報共有することが日常になっていて、そのおかげで自分の担当している GNSS 掩蔽データ同化の改良が大きく進みました。世界一になるためには、自分の担当以外の分野についても知る努力が必要と、このときから確信するようになりました。わたしにとって 2011 年度は、今自分が持っている開発に対する考えの基本ができた年度でもあったと思います。

当時の仲間は、ほとんどがその後数値予報課を離れ、今はそれぞれの部署で大活躍しています。部署が変わってもみな、いつか GSM が世界一のモデルになることを願いながらそれぞれの業務を頑張っていると思い、それを励みに思いながら、自分も慣れない仕事を頑張っています。いつか GSM が世界一のモデルになりますように。

岡本幸三（気象研究所気象観測研究部第三研究室長）

「数値予報への期待:衛星利用の立場から」

私が数値予報課に入ったのは 1996 年ですが、それ以来衛星の利用、特に数値予報初期値作成のためのデータ同化に携わってきました。当時は 60km 分解能の全球モデル、最適内挿法による解析、衛星データは赤外サウンダによる鉛直気温分布データや静止衛星による大気追跡風などが運用・利用されていました。しかし、外国の数値予報機関では変分法を用いた輝度温度の同化という、その後の数値予報精度を大きく向上させる開発・現業化が進み、気象庁でもこの分野の強化が始まったところでした。数値予報課での最初の仕事は、1次元変分法を用いた赤外サウンダの処理という重要な課題を与えていただき、内外の専門家の方々から教を請いながら仕事を進め、現業化したことを思い出します。

その後今日に至るまで、衛星データの同化は、衛星観測やデータ同化システムの高度化と合わせて急激に発展し、今日の数値予報システムを支える重要な基盤となっています。数値予報モデルが様々なプロセスを取り込み高度化・精緻化しているように、衛星データ同化も様々な衛星を取り込み、また全天候・全地表面というあらゆる条件での利用に向けて高度化・精緻化が行われています。地球環境や自然災害の把握・予測をさらに正確・適切に行っていくためには、衛星観測システムを維持・発展させ、観測情報をこれまで以上に有効に活用できるよう数値予報システムを高度化させていく必要があります。これを今後の数値予報に期待するとともに、自らの課題として研究・開発を行います。

藤田匡（気象研究所気象観測研究部第四研究室主任研究官）

昨年度まで数値予報課に在籍させていただき、先輩がたの築き上げられた高度なシステムを直接拝見し、問題発見から開発、現業化、運用にわたる多くの開発者の皆様の継続的な取り組みによりさらなる高度化、精度向上が達成されていく過程に触れさせていただく機会が与えられましたのは貴重な体験でした。

同時に、システム全体がますます大規模になり、それぞれの分野に高い専門性が求められ、相互に及ぼす影響にも意識が求められるようになり、また、プロダクトとしての有効性も示すことが重要となるなど、課題が高度で広範囲になってきており、開発はもちろん、課題への取り組みの企画立案や運用管理、開発基盤の整備も重要性を増し、多くの力が注がれておりますことも拝見いたし

ました。

予報業務の基幹である数値予報技術に多くの方々のご尽力により高い成果が挙げられておりますことに敬意を表しまして、今後の数値予報のさらなる発展に期待いたします。

石橋俊之（気象研究所気象観測研究部第三研究室主任研究官）

「今後の数値予報への期待について」

今後の数値予報に期待することはさらなる高精度化である。過去 20 年のデータ同化の研究開発では、4次元変分法等への同化手法の高度化と衛星輝度温度等の直接同化が精度改善に大きく寄与した。筆者はこのような流れの中で静止衛星輝度温度の直接同化や変分法バイアス補正改良版の現業化、誤差統計情報の高度化等の研究開発に携わってきたが、今後 20 年では以下を期待する。データ同化の研究開発はベイズ推定の良い近似系を構築することとも言えるが、2 つの方向がある。1 つは計算機の演算性能の向上による精度改善である。同化ではより大規模な統計集団の実現、予報モデルではより精緻な物理過程の実装等による精度改善がある。計算機環境は今後大きく変化する可能性があり能動的な対応が必要である。もう 1 つは解析的な進展である。同化では物理法則等先験的知見を統計集団に付加して高精度な誤差統計情報を生成する方法や計算や記憶量自体を抑制した計算手法の研究の進展を期待する。大気と海洋等の他媒体との結合同化、化学過程や精緻な雲物理過程との結合等多くの課題で両者が必要である。これらにより、既存観測や他媒体の観測からより多くの情報が同化されるようになる。気象場の社会基盤への影響の評価（広義の観測量演算子）の発展も期待する。数値予報の研究開発環境については、現業機関と研究機関の相互理解や知見・技術の相互利用、広時空間帯での評価、多様な人材が研究開発に専念できる環境を期待する。

小林ちあき（気象研究所気候・環境研究部第一研究室主任研究官）

「今後の数値予報への期待」

数値予報 60 年おめでとうございます。私は数値予報課に平成の始めに在籍し、その後、長期予報課(当時)や気候情報課、気象研究所等の部署で、数値予報と関連の深い業務にかかわってきました。その間、感じていることは、当たり前なようですが、数値予報は気象庁の重要な基盤技術であることです。今後、地球システムモデルの開発が目指されているように、この技術は、大気だけではなく、地球の水圏、気圏の全体の再現や予測に使われていくことでしょう。私自身は、大気、海洋、微量気体の全球の状態が、地球システムモデルによる再解析により、過去から現在まで再現され、そのプロダクトがさまざまな現象の理解に利用されることに期待しています。おそらく、数値予報プロダクトは、私たちが今思うより多様な使われ方が行われていくと思います。開発に携わる方には、ぜひ幅広い視野を持ち、各種課題に取り組みますよう、期待しています。

平井雅之（札幌管区气象台気象防災部地球環境・海洋課長）

現業数値予報開始 60 年、おめでとうございます。小職は 2014 年から季節予報に関わっており、数値予報の予測結果を利用させていただいている観点から投稿します。

季節予報分野では、今年(2019 年)「2 週間気温予報」を開始し、週間天気予報の対象より先にあたる 2 週間先にかけての予報を拡充しました。小職の勤務している北海道地方では、今年は 5

月末(国内の5月の最高気温記録の上位19地点を北海道の各地点が独占)、7月末から8月初め(札幌の電気店で扇風機の在庫切れが話題に)、10月初めと立て続けに記録的高温に見舞われましたが、いずれの事例も数値予報の予測結果をもとに顕著な高温となる可能性を早期に注意喚起することができました。また、1か月予報の分野でも、近年は非常に高い確率予報値を付けられることが多くなり、シグナルの大きい予報を発表できるようになってきました(例えば、毎週1回発表している全国4区分の向こう1か月の気温の3階級予報確率値で70%以上の大きい値を付けられた事例数は、約10年前の2006年~2010年の5年間で42回に対し、2016年~2019年8月の3年8か月間で118回)。さらに、長期予報の分野では、10年前は予報検討においてエルニーニョ/ラニーニャ現象の動向以外の数値予報の結果はあまり考慮されず、ENSOと日本の天候の統計が重視されてきましたが、近年では数値予報の大気循環場の予測結果が重視され、初期値変わりも小さくシグナルを適切に捉えてられるようになってきました。

このように、近年は季節予報の現場でも、数値予報の予測精度の向上を実感できるようになってきました。それでも、現状では季節予報にとっては予測精度の向上の余地は大きく、今後の進展が期待できます。

村井臣哉（網走地方気象台予報官）

「あれから10年、そして次の10年へ」

2002(H14)年から8年間、数値予報モデルの開発に携わらせていただく機会がありました。ちょうど「数値予報50年」の節目を迎えた前後です。それから約10年経ちますが、数値予報研修テキストや数値予報課報告等を拝見する度に、十年一昔どころか、五年、三年一昔の勢いで数値予報モデルが変化していることを実感します。

開発に関わった当初、水平60km相当のT213L40だった全球モデルが、在籍中に20km相当のTL959L60にまで高解像度化し、物理過程にも様々な改良が加えられました。そして、現在に至るまで、小職の開発の痕跡がないほどに更なる改良・開発が進められ、発展しています。

今から10年後も変わらず、数値予報モデルの予測精度が求められ続けるでしょう。しかし、これを利用する側の環境は大きく変化し、気象庁の予報の現場では、少ない人数で、より多量の情報を、もっと効率的に利用することが求められます。このため、数値予報結果の「見せ方」にも更なる工夫が必要になると想像します。各気圧面の予想図を頭の中で合成して時間変化させて考える時代から、低気圧等の予想が三次元的に可視化され、立体構造を瞬時に理解できる時代へ変わるかもしれません。AI技術との融合も計画されているようですし、次世代の数値予報に期待しています。

今野暁（気象庁予報部業務課技術開発計画係長）

今後の数値予報への期待として、私がとある空港出張所で勤務していた時に同僚と話した夢のようなお話を紹介しようと思います。当時の空港出張所では日中二人体制で勤務し、一人は観測当番としてMETARやSPECIを打つ担当、もう一人は解説当番として天気図の解析やパイロットへのブリーフィングなどを担当していました。その日の空港の天気は悪くなく、一通り仕事を終えて、ふと貼ってある天気図を二人で見たときだったかと思います。

「白黒の FAX 天気図の上にトラフをどう書くか」といった話から、「色つきの天気図の方が普通に見やすいだろう」という話にいたり、「こんなものよりも 3 次元で表示するとかそのうち出来るようになるだろ」、「近い未来では予報官がゴーグルをつけて数値予報の世界に入り込んで作業するようになって、粘土を捏ねるように初期値を捏ねて、即座に思った通りの数値予報を実行できたりするのでは無いか」と話が膨らんでいきました。

予報業務では実況と予想の比較が基本ですが、比較の手法やツールの開発も重要と思います。AR や VR といった数値予報の世界に入ったり、現実と重ねたりするシステムが出来れば、防災のみならずモデル開発にも一役買うのでは無いかと思っております。

佐野達哉（大阪管区気象台気象防災部通信課）

数値予報開始 60 周年、おめでとうございます。この 60 年の直近の 1 年半ほど、周辺に携わっただけの若輩で僭越ではございますが、期待のほどを申し上げたく存じます。

私が期待するのは、「数値予報データをより広汎に公開し、使ってもらおう」ことです。

数値予報に携わった折感じたのは、独自のデータの多さです。他に類を見ないデータを扱う故に無理からぬことと承知してはおりますが、その内容・形式とも極めて専門性が高く、とすれば排他的とさえいえる形式で(数値予報だけに限定した話ではないのですが)、オープンデータの潮流には不向きと考えています。また、利用に相応の識見が必要で、これも世に公開しづらいことに拍車をかけていると思います。

無論、数値予報の極めて膨大なデータ量を鑑みれば、ハードウェアが進歩したとはいえオープンデータ化には些か多くのハードルがありましょう。しかし、自宅に居ながらにして数値予報資料が見られれば大変魅力的ですし、世に広く公開したデータが有識者諸賢のアイデアを引き出すとも考えます。

60 周年を迎えた数値予報は、極めて専門的な知見の塊です。その貴重な財産を、幅広く公開するとともに使ってもらえるように普及啓発することができれば、これまで以上に数値予報の価値が世に認められると感じています。その専門性を維持したまま、門戸を広げデータと知見を広汎に提供する…両極とは存じますが、数値予報へ期待することでございます。

木南哲平（気象庁予報部数値予報課技術専門官・NOAA/NCEP 派遣中）

今後の数値予報にはまずシステムの共通化・簡易化を期待する。その上でこそシステムの更なる高度化が可能である。小職は数値予報課に 2018 年 10 月まで 8 年間在籍した後、NOAA/NCEP へ 2 年間の予定で派遣中である。NCEP/NOAA は大学や NASA、軍などとの連携が活発で、その開発コミュニティは JMA/NPD に比べて巨大である。各機関はそれぞれの目的・視点から開発を進め、その成果物は GitHubなどを介してマージされる。また、NCEP の予報モデルである WRF やデータ同化システムである GSI はコミュニティ版のパッケージが DTC を通じて公開されており、メンバー登録すれば誰でも利用可能である。GSI は全球・領域解析のいずれにも対応しており、アンサンブル同化も実行できる。用途が広く、利用のハードルが低いからこそ多くの研究者に利用してもらえ、さらに利用者から開発者側へと巻き込むこともできるだろう。さらに、次世代の統合データ同化システムとして開発が進められている JEDI では Docker や Singularity などのコンテナや AWS も利

用可能であり、自前のスパコンを持たない一個人でも開発に参加できる。参加者が増加する一方、コードの配置や文法、実行手順の標準化とそれらに対する自動チェック機能も整備されおり、システムの肥大化・複雑化を抑える努力もなされている。気象庁でも持続可能な開発のために部外連携はますます重要になると思われるが、残念ながら現在の気象庁システムは部外研究者にとっては使いづらい側面があるのではないかと思う。気象庁でもシステムの共通化と現代のネットワーク技術に適応した開発体制構築が進むことを期待している。

数値予報 60 年誌
～数値予報課 60 年(1959-2019)の歩み～
2020 年 3 月 27 日発行

編集・発行 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

©2020 気象庁
著作権法で定める範囲を超えて、無断で転載
または複写することを禁止します。