

4011：604（数値予報開始50周年；記念講演）

2. 最新の数値予報

小 泉 耕*

1. はじめに

数値予報モデルはさまざまな要素技術から成り立っているが、この50年間それら個々の技術が同じように発展してきたわけではない。50年のうち最近の10年間に着目すると、特にデータ同化の技術開発で多くの成果が得られた「データ同化の時代」であったといえることができる。

筆者に与えられたテーマは「最新の」数値予報ということなので、本稿ではこの10年間の数値予報の改善に大きく寄与したデータ同化技術の発展について解説するとともに、現在（2009年2月時点）気象庁で現業

運用されている数値予報モデルを世界の動向を参照しながら紹介する。

2. データ同化技術の発展

冒頭にも述べたとおり、我が国の数値予報の50年の歴史のうち、最近の10年は「データ同化の時代」であった。世界的に見ても1990年代に入ってからデータ同化の技術開発が急速に盛んになり、米気象局が1991年に3次元変分法を導入して1995年に衛星リモートセンシングの放射強度データの同化を開始したことや、ECMWFが1997年に4次元変分法を導入したことに見られるように、各国の数値予報センターが近年こぞって変分法データ同化システムの導入をおこなってきた。気象庁でも、全球モデルについて3次元変分法

* 気象庁予報部数値予報課。

© 2009 日本気象学会

を2001年9月、4次元変分法を2005年2月に導入した。また、限定領域モデルの一つであるメソモデルについては4次元変分法を2002年3月に導入した。現業運用されている限定領域モデルへの4次元変分法の導入はこれが世界初であった。

このようにこの時期にデータ同化技術の開発が盛んになったのにはいくつかの理由があると思われる。一つには数値予報システムの開発がある種の行き詰まりに直面していたということがある。それまでの解像度の向上や各プロセスの精緻化が一定の成果を上げた後、新たな開拓分野を模索していた開発者の目が、それまであまり顧みられてこなかった初期値の精度向上に向けられたということである。二つ目には、計算機性能の向上である。変分法という数学の手法を数値予報モデルの初期値作成に使う、というアイデアはすでに1950年代に提案されていた (Sasaki 1958)。しかし、当時の計算機では膨大な計算時間が必要となり、実用的な技術とは見なされなかった。それが計算機性能の向上により、1990年代になってようやく実用可能になってきたのである。三つ目には衛星リモートセンシングの発展がある。人工衛星から地球を観測する技術は急速に発展し、様々な衛星が多量の観測データを提供してくれるようになったが、衛星では気温や風といった物理量を直接測ることはできないため、衛星が観測した「放射強度」という物理量を数値予報モデルの初期値に取り込むための新しい技術が強く求められるようになった。変分法データ同化技術はこの要求に応えるものだったのである。

本節ではデータ同化とは何か、ということから始めて、変分法を中心に最近のデータ同化技術開発を概観する。

2.1 データ同化とは何か

数値予報は大気の状態の数値シミュレーションであり、大気の現在の状態から出発して物理法則に従って未来の状態を算出するものである。数値シミュレーションが数値「予報」として価値を持つためには（つまり、算出された未来の状態が「現実に似たもの」となるためには）、計算の出発点である初期値が現実に似たものであることが必須である。初期値の段階で現実とかけ離れていたのでは信頼できる予報はおぼつかない。

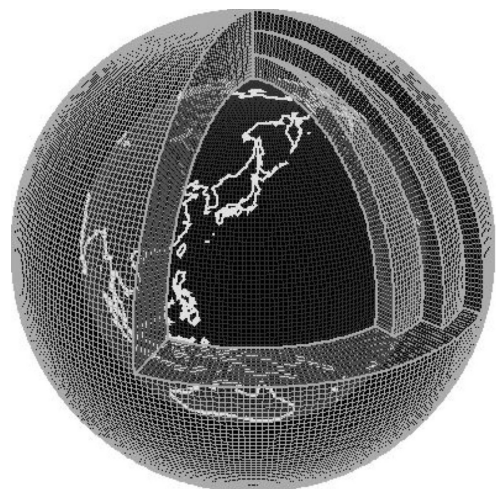
さて、数値予報の初期値は「現在の状態」であるから、観測データに基づいて作られる。数値予報モデルでは、周知のとおり、大気を第1図のような格子点の

集まりとして表現するから、理想を言えばこれらの格子点すべてにおいて気温や風といった量の観測が必要である。しかし実際には観測データの数は格子点の数に比べて圧倒的に少ない。たとえば、気球に付けた測器で上空の大気の状態を観測するラジオゾンデ観測のデータの分布は第2図ようになっており、海上にはほとんどデータが無いことはもとより、陸上でもアフリカなどでは数が非常に少ないことがわかる。今日では後で述べるように衛星からのリモートセンシングのデータが使えるようになったので、海上の大気上層の観測は増えてきてはいるが、それでも数値予報モデルの格子点を十分に満たすだけの観測データは存在しない。なお、衛星リモートセンシングではデータの水平間隔が数値予報モデルの格子よりも細かい場合もあるが、同じ観測装置で近接した場所を測定したデータは互いに独立ではないため、「独立した観測情報」という意味ではまだ十分とはいえない。

そこで「データ同化」という考え方が出てくる。「同化」とはもともと「異質なものをなじませて同質なものにする」といった意味だが、ここでの意味は「シミュレーション」と「観測データ」という二つの異質なものをなじませる、ということである。先に述べたとおり、観測データだけでは初期値を作るには足りないため、数値予報の結果と観測データを混ぜ合わせることで不足分を補うのである。

2.2 最新のデータ同化技術—「変分法」について

数値予報におけるデータ同化というのは、簡単に言



第1図 数値予報モデルの格子点の例。

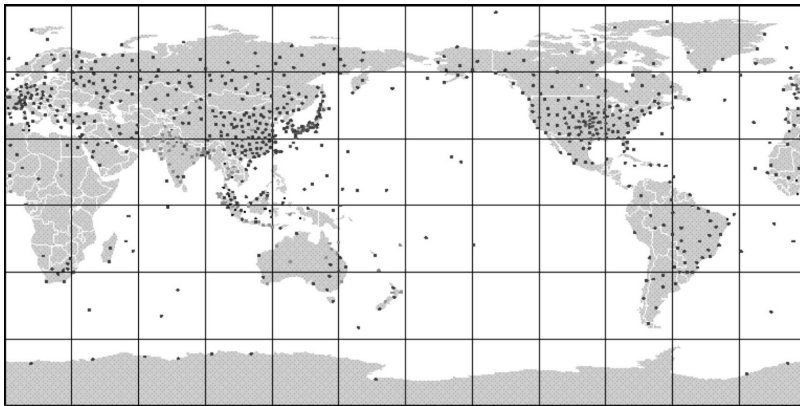
例えば「数値予報結果を観測データで修正すること」ということになる。両者はもともと別のものだから、これらが滑らかにつながるように、様々な手法が提案されてきた。「変分法データ同化」はそのうちの最も新しい技術の一つである。

変分法データ同化の詳しい解説は他に譲るが（たとえば、露木 2008），ごく簡単に言うと「データ同化結果がある拘束条件に従うように，繰り返し計算によって解を求める手法」ということになる。繰り返し計算が必要なため計算に時間がかかり，計算機の能力が向上しないと実用化できなかったことは先に述べたとおりである。ここでの「拘束条件」は3次元変分法ではたとえば「観測データによる修正が地衡風バランスし

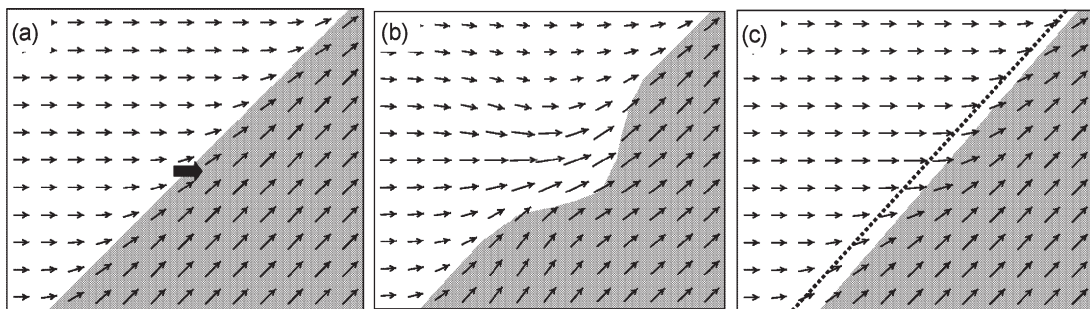
ていること」といったものであり，4次元変分法では「数値予報モデルそのもの」である。

「モデルが拘束条件になる」ということを模式的な例で見てみることにする。第3図aがデータ同化のもとになる数値予報結果（第一推定値）だとして，この領域の中心で風を観測し，第一推定値よりも強い西風が得られたとする。この観測値を観測の場所にそのまま埋め込んだのでは，その周囲との間に不自然な不連続ができてしまう（第3図b）。そこで4次元変分法では，第一推定値を直接修正するのではなく，第一推定値として使われる予報の初期値を修正して，予報結果である第一推定値が観測に近づくようにする（第3図c）。「数値予報モデルが拘束条件になる」とはこの

ような意味である。第3図の場合は，予報結果の風が図の中心で強くなるように初期値が修正された結果，風のシアの位置が東にずれた場が得られている（第3図cの点線は第3図aでの風のシアの位置を示している）。このように，4次元変分法では「データ同化結果＝モデルの予報」であるから，観測のない場所についてもモデルの予報として物理的に矛盾のないような場へと修正されることになる。先に触れたよう



第2図 2009年2月17日21時（日本時）の観測として通報された高層観測データの分布。ほとんどがラジオゾンデだが，日米欧の一部にウィンドプロファイラのデータを含んでいる。



第3図 4次元変分法による修正の模式図。風のシアが明瞭になるように，南西風の領域に陰影を付けた。第一推定値（a）に西風と南西風のシアがある状況で，場の中央に第一推定値よりもやや強い西風が観測されたとする。観測点付近を観測値に近づける従来手法（b）では風のシアが不自然に歪む結果となるが，4次元変分法（c）は過去にさかのぼって初期値を修正するので，得られた結果は自然なものになる。点線は（a）での風のシアの位置を表す。

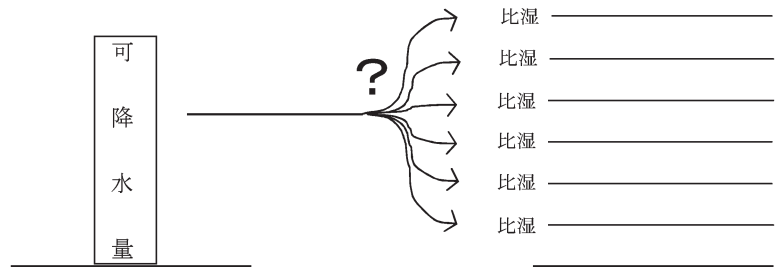
に、データ同化においては観測データは数値予報モデルの自由度に比べて不足しているから、「観測データのない場所」をどのように修正するか、がデータ同化技術の良し悪しを分ける重要なポイントである。その意味で4次元変分法は現時点で最もすぐれたデータ同化技術の一つといえる。

2.3 衛星データ同化

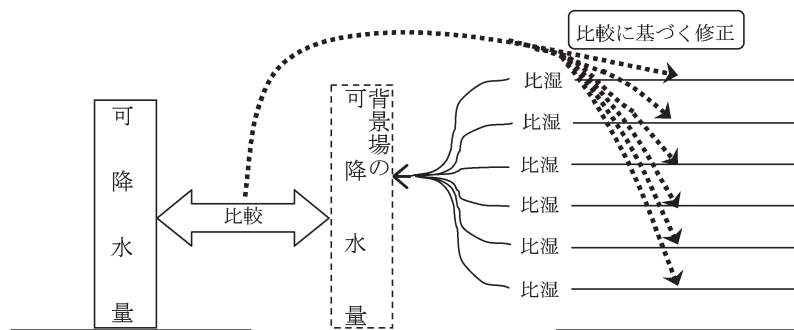
変分法データ同化技術の利点の一つは、データ同化の変数と異なる物理量を同化できるということにある。変分法以前の手法では、気圧・気温・風・比湿といったモデルの予報変数に変換できる物理量の観測データしか扱うことができなかったから、衛星のリモートセンシングによって観測される放射強度などの量は、いったんならかならぬ方法で気温等に変換しないと同化することができな

かった。たとえば、マイクロ波放射計などで観測できる可降水量を例にとると¹¹（第4図）、可降水量は水蒸気を鉛直方向に積算した量だから、変分法以前の手法で扱うためには、これを何らかの方法で各高度における水蒸気量に変換する必要があった。しかし、もともと総量しかないものを個々の部分に分けることには無理があり、どんな方法で変換したとしても、得られた各高度の水蒸気量には大きな誤差が含まれてしまう。可降水量がどんなに精度良く観測されたとしても、変換によって品質が劣化することを避けることはできなかったのである。こうした理由から、変分法以前の時代には、衛星リモートセンシングのデータはあまりデータ同化で活用されてこなかった。

変分法の導入以後この状況は一変し、今や衛星の



(a) 従来手法ではモデルの各層の水蒸気量（比湿や相対湿度）でないと同化できないので、可降水量（水蒸気の鉛直積算量）の観測データが与えられた場合、それを各層に振り分ける必要がある。しかしどのように振り分けても正しいという保証はなく、元のデータの品質を落とすことになる。



(b) 変分法ではモデルの場（背景場）から可降水量を算出してそれを観測データと比較し、観測データに近づくように繰り返し計算によってモデルの場を修正する。観測データの品質を落とすことなく同化することができる。

第4図 可降水量の同化を例とした従来手法と変分法の比較。

データは数値予報の初期値作成にとって欠かすことのできないものとなっている。1990年代後半以降における世界の数値予報の精度向上は多くの部分をデータ同化の発展に負っている。それは、変分法という技術そのものよりも、それによって飛躍的に多くのデータが利用できるようになったことの寄与が大きい。気象庁では現状で第1表のような多種の衛星データを数値予報の初期値作成のために利用している。いまや衛星データは数値予報にとって欠かすことのできないものだが、衛星は数年から10年程度で寿命が尽きて世代交代し、その際に測器が変更されることも多いため、数値予報の初期値精度を維持・向上させるためにはたえず新しい衛星データの利用開発を進めて行かなければいけない。

このようにこの10年間は、データ同化技術の進歩とともに、衛星データの利用が急速に拡大した時期でもあった。衛星データの利用は、特に南半球の予報精度

¹¹ 厳密に言えばマイクロ波放射計で観測されるのは放射強度であって可降水量ではないが、放射強度から可降水量への変換は比較的誤差が少なくできる。

を大きく改善するなど、数値予報精度の向上をもたらしたとともに、数値予報開発のあり方を大きく変えることにもなった。今日では多くの数値予報センターが数値予報モデルそのものの開発に匹敵する数のスタッフを衛星データの利用開発に充てている。

第1表 気象庁の数値予報システム（全球モデル、メソ数値予報モデル）で同化している衛星データ。

衛星/測器		全球モデルでの同化要素	メソモデルでの同化要素
サウンダ	NOAA15-17/AMSU-A,-B	放射強度	気温
	NOAA18/AMSU-A,MHS	放射強度	気温
	Aqua/AMSU-A	放射強度	(不使用)
	Metop/AMSU-A,MHS	放射強度	気温
マイクロ波イメージャ	DMSP13/SSMI	放射強度	可降水量, 降水強度
	TRMM/TMI	放射強度	可降水量, 降水強度
	Aqua/AMSR-E	放射強度	可降水量, 降水強度
赤外・可視イメージャ	MTSAT-1 R (ひまわり 6号), Meteosat-7,9, GOES-11,12	水蒸気チャネル 放射強度	(不使用)
		大気追跡風	大気追跡風
	Aqua,Terra/MODIS	大気追跡風	大気追跡風
散乱計	QuikSCAT/SeaWinds	海上風	海上風

3. 現在の数値予報モデル

本節では2009年2月時点で気象庁が現業運用している数値予報システムについて紹介する。

3.1 気象庁のモデル構成

気象庁で運用している数値予報モデルの一覧を第2表に掲げた。大きく分けると、地球大気全体を予報対象とする「全球モデル」、日本周辺のみを高解像度で予報する「メソモデル」および「アンサンブル予報モデル」で構成されている。

3.1.1 全球モデル

大気は切れ目無く地球全体を覆っているものだから、その全体を対象とする全球モデルが数値予報モデルとして自然な形であると言える。次に述べるメソモデルのような限定領域モデルには側面境界条件を与えるものが必要で、通常それはより広い領域をカバーす

第2表 気象庁で運用している数値予報モデル（2009年3月現在）。

予報モデルの種類	モデルを用いて発表する予報	計算領域と水平分解能	予測時間（初期時刻）	実行回数
メソモデル	防災気象情報, 降水短時間予報, 航空予報	日本周辺 5 km	15時間 (03, 09, 15, 21時) 33間 (00, 06, 12, 18時)	1日8回
全球モデル	分布予報, 時系列予報, 府県天気予報, 台風予報, 週間天気予報, 航空予報	地球全体 20 km	84時間 (03, 09, 15, 21時) 216時間 (21時)	1日4回
台風アンサンブル予報モデル	台風予報	地球全体 60 km	132時間 (03, 09, 15, 21時)	1日4回
週間アンサンブル予報モデル	週間天気予報	地球全体 60 km	216時間 (21 UTC)	1日1回
1か月予報モデル (アンサンブル)	1か月予報, 異常天候早期警戒情報	地球全体 110 km	34日間 17日間	それぞれ 週1回
季節予報モデル (アンサンブル)	3か月予報, 暖候期・寒候期予報	地球全体 180 km	120日間 210日間	月1回
エルニーニョ予測モデル	6か月先までのエルニーニョ現象等の見通し	地球全体 大気：180 km 海洋：1度	210日間	月1回

るモデルによって与えられるから、つきつめると全球モデルがなければ限定領域モデルを運用することは不可能である。全球モデルは数値予報システムの根幹をなしていると言って良い。

現状での全球モデルの用途は、明日・明後日およびそれより長い天気予報や台風進路予報に使われる他、前述のとおりメソモデルの側面境界条件を提供する役割がある。

2007年11月に気象庁は全球モデルの解像度をそれまでの格子間隔約60 km から約20 km に向上させた(北川 2008)。解像度を上げる以前は、全球モデルとメソモデルの中間的な解像度を持つ領域モデルや台風モデルが運用されていたが、これらの役割は全球モデルに統合された。

なお、3.1.3項で述べるアンサンブル予報モデルで用いられるモデルも全球モデルである(ただし、解像度は異なる)。

3.1.2 メソモデル

数値予報モデルは解像度を上げればよりスケールの小さな現象が表現可能になり、予測の精度が上がる。たとえば格子間隔20 km と5 km との違いを地形で見ると第5図のようになる。集中豪雨等の激しい現象は現象のスケールが小さいこともあり、正確な予報のためにはモデルの解像度を上げる必要がある。特に、防災気象情報の基礎資料となるメソモデルの解像度はできるだけ高い方が望ましい。しかし一方で、予報結果の迅速な提供も重要であるから、いたずらに解像度を上げて計算時間が増えることも好ましくない。このように、解像度と計算時間の兼ね合いは現業数値予報センターにとって常に思案のしどころである。気象庁では2006年3月にスーパーコンピュータを日立SR11000Kに更新した際にメソモデルの格子間隔をそれまでの10 km から5 km に向上させつつ、データカットオフ時間¹²を含めて初期値の時刻から2時間30分以内に予報結果を提供するというスケジュールを維持している。

3.1.3 アンサンブル予報モデル

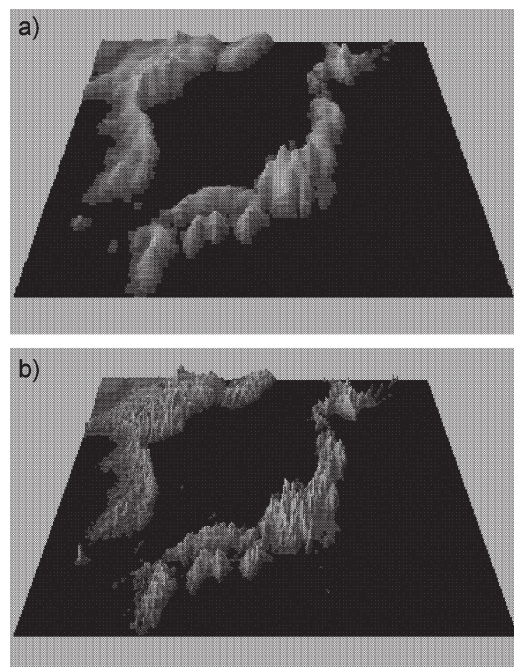
大気の振舞はカオス的であり、最初の状態のわずかな違いが急速に成長する性質を持っているので、たとえ完璧な予報モデルがあったとしても、初期値に含まれるわずかな誤差が時間と共に大きくなり、一定時間以上の長時間予報には情報価値が無い、と言われてい

る。

では、数値予報モデルによる長時間予報は無意味なのか、というと、必ずしもそうではない。確かに数値予報には誤差が付きものだが、この誤差がどのような場所にどのような形で現れるか、があらかじめわかれば、その情報は利用価値がある。この「誤差の予測」を実現するのが「アンサンブル予報」である。

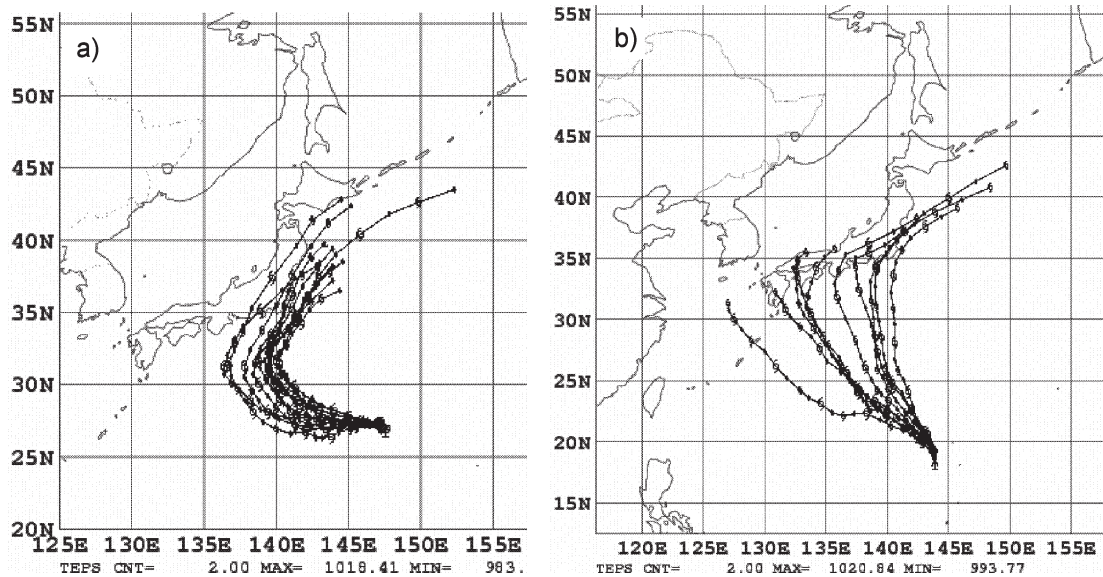
アンサンブル(ensemble)とはもともとフランス語で「集まり」の意味で、ここでは「初期値がわずかに異なる数値予報の集まり」を指している。つまり「初期値の誤差が成長する」というカオス的の性質を利用して、初期値にわざと微小な変更を加えた予報を複数行うことで、「予報の誤差がどの範囲に入るか」をあらかじめ知ろうというわけである。

気象庁では、週間予報から季節予報に亘る長時間予報のための数値予報として、それぞれアンサンブル予報モデルを運用している(酒井 2008)。また、2008年2月からは台風進路予報に焦点を絞った「台風アンサンブル」の運用も始まっている(山口 2008)。第6図は台風アンサンブルの試験期間中の予報例である。第6図aのように全てのメンバがほぼ同じコースを予報していれば予報誤差は小さいと期待できるが、第6



第5図 日本周辺の地形。格子間隔20 km の場合 (a) と5 km の場合 (b)。

¹² 初期値時刻の観測データの入電を待つ時間。



第6図 台風アンサンブル予報の例。(a)は2007年9月3日03時(日本時)を初期値とする台風9号についての予報。ほぼすべての予報で進路が関東をかすめており、信頼度は高い。(b)は2007年7月29日09時(日本時)を初期値とする台風5号についての予報。西日本に接近するコースから関東をかすめるコースまで、ばらつきが大きい。

図bのように大きく異なる複数のシナリオが予報されている場合には、実際の進路がどちらに振れることもありうるので、広い範囲で台風の接近に備える必要がでてくる。

現在は台風進路のバラツキを「予報円」という円形の広がりで表現しているが、モデルの誤差はいつも等方的に広がるわけではなく、第6図bのように特定の方向には大きくばらつくが、それ以外の方向にはばらつきは少ない、ということもある。将来的にはアンサンブル予報の結果をもとに台風進路予報の「予報円」を「円」ではない形にするといったことも可能になるかもしれない。

3.2 外国数値予報センターの動向

外国の数値予報センターでも、全球モデル・(メソモデル等の)限定領域モデル・アンサンブル予報モデル、というモデル構成が多く採用されている(第3表)。

ただし、欧州においては、欧州中期予報センター(ECMWF)という、欧州諸国の共同出資によって設置されたセンターが全球モデルを運用しているため、本国周辺を対象とする限定領域モデルのみを運用している気象機関もある。また、その限定領域モデルについては、各国が独自に開発するのではなく、北欧のグ

ループ(HIRLAM)、フランスを中心とするグループ(ALADIN/AROME)、ドイツを中心とするグループ(COSMO)など、複数の国が共同でモデル開発を行うケースが増えている(今後HIRLAMとALADIN/AROMEのグループが協力していくという話もある)。英国は欧州内ではあまり大きなグループを形成してはいないが、自国のモデルをオーストラリアや韓国に提供し、共同研究の形での協力を進めている。このように、数値予報モデル開発における国際協力が特に欧州で近年活発になってきている。

また、新しい傾向として、メソモデルによるアンサンブルをめざすセンターが増えてきている。長時間予報だけでなく、スケールが小さく激しい現象についても数値予報の誤差はしばしば大きくなるので、アンサンブル予報モデルによって「起こりうる複数のシナリオ」をあらかじめ把握しておく、ということは意味があるであろう。ただし、メソモデルの予報時間は一般に短く、激しい現象に対しては迅速かつ具体的な防災行動が求められるので、アンサンブル予報が提供する「確率的な情報」をどのように活用できるか、については必ずしも明確な方向性が打ち出されているわけではないようである。気象庁でもメソアンサンブルのための技術開発を進めているが、システム開発だけでな

第3表 世界の主な数値予報センターのモデルの解像度と予報時間（世界気象機関の数値実験作業部会がまとめた資料による。2009年1月時点。元資料ではスペクトルモデルの解像度を波数で記載してあるが、本表では便宜的に距離の概数を示した）。アンサンブル予報モデルについては、2週間程度より短い予報に用いるもののみとした。なお、欧州中期予報センターの「予報期間」にある「+5日間」は11日目を以降の5日間を意味する。

国名またはセンター名	全球モデル		全球アンサンブル予報モデル			限定領域モデルの 格子間隔・鉛直層数
	格子間隔・ 鉛直層数	予報期間	格子間隔・ 鉛直層数	メン バ数	予報期間	
日本	20 km60層	9日間	60 km60層	51	9日間	5 km50層
欧州中期予報センター	25 km91層	10日間	50 km62層 80 km62層	51 51	10日間 +5日間	なし
イギリス	40 km50層	6日間	90 km38層	24	3日間	12 km70層, 4 km60層
フランス	37 km60層	4日間	55 km55層	11	2.5日間	2.5 km60層
ドイツ	40 km40層	7日間	なし			7 km40層, 2.8 km50層
米国	52 km64層 105 km64層	7.5日間 16日間	160 km28層	45	16日間	12 km60層, 4 km50層
カナダ	35 km58層	10日間	100 km28層	20	16日間	10 km58層

く、その活用方法の検討もあわせて進めていく必要がある。

全球モデルの水平解像度は、気象庁が2007年11月に格子間隔約20 kmのモデルを現業化したときにはこれが世界最高であった。しかし、2009年にはドイツと英国がそれぞれ20 km, 25 kmのモデルの導入を目指しているほか、2010年にはECMWFが15 kmのモデルの導入を計画しているなど、各センターの全球モデルの水平格子間隔は20 km程度以下が主流になっていく模様である。

4. これからの課題

「データ同化の10年」もそろそろ成熟期に到達したようで、変分法が導入されはじめた頃のように、データ同化技術の改良や新規データの利用で予報精度が大きく改善するというケースは少なくなってきた。もちろん衛星データをはじめとする観測システムの充実の恩恵を受ける形での改善はこれからも着実に続くであろうし、データ同化技術そのものについても、アンサンブルカルマンフィルター（三好 2005）という新しい技術の研究が盛んに行われているから、近い将来になんらかのブレイクスルーが起こる可能性は否定できない。

とはいえ、データ同化技術が発達したことにより、ここでもう一度数値予報モデルそのものの精緻化・高精度化への要求が高まった、と筆者は感じている。前節で豊富な衛星データが予報を改善してきたことを述べたが、時には「観測データを多く利用するとかえっ

て予報精度が悪化する」という現象が発生して開発者を悩ませることがある。これは、数値予報モデルの中でシミュレートされていることと現実との間の乖離が大きい（つまりモデルの誤差が大きい）ために、現実を観測したデータがモデルにうまくなじまない、ということである。代表的な例として、熱帯域の水蒸気観測の同化が難しいことは多くの数値予報センターのデータ同化担当者が経験するところとなっている。このことは、観測データを今以上に活用するためにはモデルの改良が欠かせない、ということの意味している。その一方で、衛星データの充実によってこれまで観測できなかった物理量が観測できるようになり、数値予報モデルの評価・検証を新しい視点で行うことができるようになってきている。

つまり、データ同化が成熟してきた今こそ、モデルの更なる高精度化への要求が高まるとともに、観測データの充実という意味でモデルの高度化のための環境が整ってきた時期であると言え、今こそ数値予報モデルそのものの高度化にもう一度力を注ぐべき時代になった、と考える。

参考文献

- 北川裕人, 2008: 気象庁の新しい高解像度全球数値予報モデルについて. 天気, 55, 509-514.
 三好建正, 2005: アンサンブル・カルマンフィルターデータ同化とアンサンブル予報の接点一. 天気, 52, 93-104.
 酒井亮太, 2008: 気象庁の新しい週間アンサンブル予報シ

- システム. 天気, **55**, 515-520.
- Sasaki, Y., 1958 : An objective analysis based on the variational method. J. Meteor. Soc. Japan, **36**, 77-88.
- 露木 義, 2008 : 変分法. 気象研究ノート, (217), 33-68.
- 山口宗彦, 2008 : 気象庁台風アンサンブル予報システム. 天気, **55**, 521-531.
-