

天気予報システム*

立 平 良 三**

1. はじめに

天気予報は気象学の最大の応用分野であり、相互に刺激しあいながら発達してきた面が大きい。気象学の最新の成果はできるだけ速やかに気象業務に取り込まれることが望ましく、また予報上の問題点が研究者に魅力あるテーマを提供することも多々ある筈である。

米国と比較すると、日本の気象研究者の層の薄いことはよく指摘される場所である。しかし、それを考慮してもなお、大学における天気予報に直接関係する講座の数とか、学会誌やシンポジウムなどでの天気予報関連のテーマの比重は低いように思える。その理由の一つとして、気象庁が第二次大戦以前は文部省に所属していたことから推察されるように、天気予報に必要な気象学の研究も自前でという姿勢が強かったことが挙げられよう。しかし、近年は気象庁が防災など行政責任への対応に迫られ、また気象学の高度化専門化も相俟って、大学など他の研究機関との積極的な協力が必要な状況にあると考える。

天気予報のシステムも他のテクノロジーと同様、近年の発展は目覚ましいものがある。しかしまだ、天気予報というと「緑の芝生に映える白い百葉箱」「自ら描いた天気図を前に明日を予想する予報官」と言ったイメージが残留しているのではなかろうか。この小文では、天気予報システムの現状を解説的に紹介するものであるが、これが気象業務と気象学研究との連携強化に少しでも役立てばと願っている。また、1993年5月の気象業務法改正により、これから到来する「予報自由化」時代の予報業務および民間の予報事業のありかたを考える上での参考にもなれば幸である。

2. 天気予報システムの四要素

天気予報システムは次の四つの要素から構成されて

* Weather Forecasting System.

** Ryoza Tatehira, 電気通信大学.

© 1994 日本気象学会

いると考えられる。

- (1) 気象観測
- (2) 気象観測データの集配信
- (3) 気象観測データの予測処理
- (4) 予測結果の伝達

これらの要素が、その時点での大気現象の理解と関連テクノロジーの水準に合わせて最適の予報システムへ構築されるわけである。

近代的な天気予報事業は約140年前にスタートしたが、それは低気圧という暴風雨を伴う大気現象の発見に基づき、各種気象観測測器(特に気圧計)の発明および観測データの集信のための電信の発明によって構築されたものであった。当初の「気象観測データの予測処理」は、地上天気図を作成して予報官が気象学的知識と経験で判断するというものであった。

現在の予測処理の中核になっているのは数値予報(3, 13, 14, 23)であり、数値予報の予想結果を利用したMOSなどの客観的「天気への翻訳」(1, 8)である。ただし、目先数時間を予報対象期間とする短時間予報の場合は、数値予報の比重は低下する。まず現在は数値予報の出力は一日二回なので、細かい時間間隔で発表しなければならない短時間予報とは整合しない。また初期時刻から出力までに数時間かかるので、短時間予報の予報期間の大半は既に経過している。地域的にも、局地的な小スケールの表現が要求され、数値予報予想図からの天気翻訳がより難しくなる。しかし、短い時間の予報ほど、もっとも単純かつ基本的な予測処理である外挿の精度が高くなってくる。現在、気象庁の発表している降水短時間予報(7)は初期時刻の細かい1時間雨量分布(レーダーアメダス解析雨量図)(9)の外挿を基本としたものである。

天気予報システムを構成する要素のうち、「(2)気象観測データの集配信」「(4)予測結果の伝達」はともに通信技術に関連する所が多いので、「(1)気象観測」「(3)気象観測データの予測処理」を解説する際に必要

に応じ言及することとする。

3. 気象観測の役割

気象観測が天気予報システムにおいて受持つ役割としては次のようなものが考えられる。

- (a) 実況速報
- (b) 短時間予報の初期値解析
- (c) 数値予報の初期値解析
- (d) 統計的天気翻訳式を作成する際の天気実況
- (e) 天気系概念モデル

気象観測データはそのまま即時に通報するだけでも有用な情報となる場合がある。例えば、集中豪雨用の防災気象情報の一つである「記録的大雨に関する情報」は実況の速報ではあるが、災害の発生まで若干のタイムラグのあることが多いので、防災上に有用な情報となりうる。また、大気現象には多少とも持続性があるので、この面からも有用性が保証される。テレビの天気解説にレーダー、アメダス、気象衛星の画像がしばしば登場する理由の一つである。実況速報の有用性は画像のような情報量の多いものを迅速に収集して処理・伝達する通信技術の発達に支えられている。

予報の難しさに隠れて、実況把握の難しさはあまり認識されていないが、日本の気象業務の最大の課題ともいえる集中豪雨にしても、レーダーアメダス解析雨量図の登場でやっと見逃しが根絶できたというのが実情である(9)。風についてはまだまだアメダスで把握できない局地的強風が存在する。

気象庁の降水短時間予報は少なくとも3時間先までは有意な精度を維持している(7)。ここで有意というのは、持続予報(現在の降雨がそのまま持続すると予想)の精度を上回るという意味で使っている。この精度に寄与している最大の要因は、初期値であるレーダー・アメダス解析雨量図(5 km メッシュ)が十分な精度と分解能を保持していることであろう(9)。降水短時間予報は初期時刻の約20分後に配信される。レーダーアメダス解析雨量の計算や予測処理はコンピュータによって迅速に行われなければならない。レーダー観測のデータ(エコー強度)は本来アナログであり、また降水エコーのほか山岳などからの地形エコーも混在している。そこで、まず地形エコーを除去(19)してデジタル化し、各レーダーサイトから気象庁に集信してコンピュータ処理される(16)。ちなみに、このようなきめ細かい量的な降水短時間予報をルーチン的に実施しているのは、日本だけである。

風についても、降水短時間予報のようなきめ細かい目先の予報のニーズは高いと思われるが、初期値解析はアメダス風だけが頼りであり、しかも地上風の測定値はごく近傍の地物に大きく影響されることから、実用的精度に達するのは難しそうである。

数値予報の初期値解析にもっとも基本的な観測データはレーウィンゾンデ観測である。気象庁の数値予報のメッシュサイズは当初の約400 kmから最近の約30 km(日本モデル)にまで細分されてきたが、レーウィンゾンデ観測の地点増加は殆ど無い。航空機観測による風・気温、気象衛星観測による風・気温・湿度などの推定、レーダーエコー分布からの潜熱放出量や水蒸気量の推定、などが初期値解析に補助的に利用されている。これらのデータは数値予報の初期時刻とは必ずしも一致しないが、予報解析サイクル(10, 13)の採用により効果的に初期値解析に取込まれている。このような努力にも拘らず、初期値解析の分解能不足のため数値予報のメッシュを細かくすることは主として地形効果の予想の向上に寄与しているといった状況にあり、新しいメソスケール観測網の構築が待たれている(10)。

MOSのような統計的天気翻訳の場合、翻訳式(回帰式)の精度は多分に標本の大きさに依存する。そのためには、統計の期間を長くとる必要があるが、これは数値予報のモデル更新のプレーキになる。アメダス雨量(平均17 km 間隔)のような稠密なデータを回帰式の予報変数(天気実況)に使えば、局地的な天気翻訳が可能になるだけでなく、実質的に標本数を増加させる効果もある。気象庁では、さらにレーダーアメダス解析雨量図(5 km メッシュ)を予報変数とすることで精度向上を達成している。

短時間予報の延長には、メソ数値予報モデル(当面10 km メッシュ程度)のようなもっと物理的な予測手法を導入する必要があるが、観測網やコンピュータ資源などにネックがあり、当面はメソ天気系の概念モデル(11, 22)に期待することになる。モデルの構築に際してまず必要なのは時間的空間的にきめ細かい観測である。ただし、この場合はルーチン観測である必要はない。

4. 予測処理の変遷

気象観測データを処理して将来の天気を予測するプロセスは、観測技術、通信技術、データ処理技術と整合をとりながら進展してきた。約140年まえ予報業務が

スタートした時点では、手動の電信で集められたデータを手書きで地図に記入し、鉛筆と消しゴムで天気図に仕上げるといったプロセスに大きな比重が置かれていた。天気図は天気予報を担当する各气象台や測候所ごとに作成され、「天気図を千枚は書かねば一人前でない」とか「他人の書いた天気図で予報が出せるか」といった時代が続いた。

その後、予報業務にFAXや数値予報が導入されたが、これらの天気予報システムにおける位置付けについては、NWW (National Weather Watch) 計画(4)が登場するまで突っ込んだ議論のないままに経過した。NWW 計画は WWW (World Weather Watch) 計画の国内版といった意味の命名で、各種テクノロジーの進歩を背景に、「地域的・時間的にきめ細かい量の予報」のための効率のよい短期予報システム構築を目指すものである。1970年代後半にスタートし、1980年代後半に一応の目標を達成したが(5)、現在さらに最新の技術を取り入れてレベルアップが図られている。

NWW では天気予報の中核に数値予報を置き、さらにその予想結果を MOS などの客観的手法で局地的な天気図に翻訳し、天気予報にすぐ使えるような予測資料、つまり最終製品型予測資料を予報官に配布するという方針をとった(6, 18)。天気図(地上、高層)や数値予報の予想図なども気象庁本庁で一括作成配布されるようになり、各予報担当官署は FAX やワークステーション画面で見ることができる(5)。また各管区气象台や地方予報区を担当する气象台(全国に11)もそれぞれの担当域に共通して必要な予測資料(主としてメソ現象関連)あるいは指示報の発信を担当するという形で、いわゆる各級予報官署の系列化が推進された(6)。

NWW で、従来にない新しい天気予報として登場したのは、降水確率予報と降水短時間予報(19)である。確率予報は、終戦直後に仙台管区气象台の森田台長の指導のもとに取り組みされたが、予測手法の面で行き詰まったと聞いている。NWW で実用化された MOS 技術によれば天気現象の発生確率の客観的予測は容易で、これを予報官が修正して発表するという形で1980年にまず降水確率予報がスタートした。このほか大雨確率、雷確率、雪確率などの予想値も MOS で計算されるようになったが、直接には発表されず予報文作成の参考にされてきた。1994年度からは、さらに一歩進めて、これらの客観的予想値を総合して、天気予報文を自動的に作成する技術が実用に供されている。以上

のような予報システムの変遷は米国をはじめ先進諸国においても、それぞれの国の特色はあるにせよ基本的には同じ道をたどっている(1)。

現在の天気予報システムでは、以前は予報官の役割であった作業のかなりの部分が客観的技術によって肩代わりされている。このため、予報官の存在理由が稀薄になったのでは、といった誤解もある。しかし本来の NWW の趣旨は、Machine (数値予報や客観的天気翻訳) の活用によって Man の負担を軽くし、予報官は Man にしかできないことに集中させることにあった(18)。

「Man にしかできないこと」としてまず考えられるのは、Machine 資料の修正である。客観的予想資料(数値予報や天気翻訳)の精度は着実に向上しているが、予報技術者による修正が必要な局面はまだ残されている。客観的予想資料は今のところ12時間おきにしかならず計算されないし、出力が初期時刻の数時間後なので、最新の気象観測データによる修正は Man の仕事である。この修正は、頻繁な更新を必要とする目先数時間から半日程度の予報の場合に特に効果的であり、また激しい天気現象の場合は注警発表など防災上の観点からも極めて重要な作業である。

ここで最新の気象観測データとは、具体的にはレーダー、アメダス、気象衛星など、時間的・空間的にきめ細かい、いわゆるメソスケール観測網によるものを意味する。降水については、これらのデータから作成された客観的予想資料(降水短時間予報)があるが、3時間先までであり、その延長は予報技術者が担当せねばならない。

この種の修正は主としてメソスケール以下の大気現象に関連するものであり、大規模現象とは違ってメカニズムの理解が進んでいない現状では、体系的な技術にまとまるまでに至っていない。現在、統計的手法やメソ天気系の概念モデルの開発といった形での努力が続けられている。

修正の問題に限らず、一般に予報官の役割は、予報現場における作業から技術開発に移行する趨勢にある。予報現業の作業はできるだけ Machine に任せ、Man はその作業の流れを監督し、改善を図るといわけて、いわば職人 (Artisan) から監督者 (Supervisor) への変身である(18)。つまり予報官の任務は、予報に関連する科学技術の現状と国民の多様なニーズの動向を適確に把握し、天気予報システムの最適化のための技術開発に協力することに比重が移りつつあるという

ことである。

5. 予報精度の現状

天気予報の中核的技術である数値予報の精度向上は目覚ましいものがある。例えば、500 hPa の36時間予想の場合、ジオポテンシャル高度の傾度の RMSE (Root Mean Square Error) に基づくスキル・スコアは、1960年代の50%強から1990年代には95%を越え、完全的中 (100%) に近づいている (米国気象局 NMC) (17)。日本でも同様な精度向上が達成されている (14)。しかし、ジオポテンシャル高度が完全に予想されても、それだけで天気予報的中は保証されない。降水などメソスケール以下の大気現象に大きく依存する天気現象が多いからである。例えば、気象庁の数値予報 (日本モデル) で6時間に1 mm 以上の降水の有無を予想した場合の精度は、スレット・スコアで0.4~0.5程度 (18~24時間予想) にまで改善されてきたが、完全的中 (スレット・スコア1.0) にはほど遠い (15)。さらに MOS によって降水量に翻訳しても大幅な精度向上が期待できるわけではない。ちなみに、降水短時間予報の精度は2~3時間先の予想の場合、やはりスレット・スコア0.4程度の精度である (1時間に1 mm 以上の降水の場合) (7)。日本モデルに比較して、目先数時間の予想なのに精度が悪いように見えるが、これはスレット・スコアの計算が、日本モデルでは約80×80 km 領域の6時間雨量なのに対し、降水短時間予報は5×5 km 領域の1時間雨量と細分化されていることによる。

このような現状であるから、天気予報の利用には、精度を考慮した合理的な取扱いが不可欠である。気象庁が組織的な予報精度評価を実施し始めたのは1984年のことであるが、その目的は、予報技術の改善の基礎資料とすること、及び適切な予報利用のための情報を提供することにあった。

しかし、このような予報精度評価は、主として統計的検証であり、できれば予報の度ごとにその精度が表示されれば便利である。つまり「予報精度の予測」であり、これを行う実用的な手段の一つが確率予報である。予報の利用というのは、結局のところ予報に基づいて意思決定し、ロスを防ぐ対策をとることである。対策にはコストが必要であり、カテゴリー予報を利用して対策を取る場合、コストがロスを上回ることも起こる。確率予報の場合はそのような矛盾をさけることができる (20)。

6. 天気予報システムの今後

天気予報システム、あるいはもっと一般的に気象業務のありかたは、国ごとに差があって当然である。その国の気象特性や社会構造に合わせて最適なシステムが構築されねばならない。日本では米国のように激しいトルネードはなく、人口密度にも大きな差がある。しかし、集中豪雨や熱帯低気圧による被害は共通しており、生活様式にもかなりの類似点があるところから、米国大気海洋庁 (NOAA) が推進中の気象業務の近代化とリストラ (2) は日本の天気予報システムの将来を考える上で参考になり得よう。

NOAA の気象業務近代化で最も重点を置いているのは、トルネードや集中豪雨のような人命に関わる気象現象に対する警報を、できるだけ地域を限定ししかも早期に発表することである。近代化のための技術的裏付けとしてはまず WSR-88D 型ドップラーレーダーが挙げられている。気象局は航空局および国防省と協力して全米に150台配置する計画を進めている。トルネードや集中豪雨などは激しい雷雲に伴うものであるが、ドップラーレーダーによって激しい雷雲発達の前兆が識別できるようになり、またその監視や移動の予測が可能になった。人手による地上気象観測および通報は、約1300か所に設置された自動地上観測システムに置き換えられ、気象技術者は最も期待されている業務、つまり激しい雷雨などメソスケールの天気現象の解析・予報作業に専心できることになる。

オクラホマでの実用テストによると、WSR-88D 設置後の「激しい雷雲」に対する警報の精度は驚異的な向上を示した。例えば警報の「空振り」は80%から20%に激減し、「見逃し」も50%から10%に減少している (12)。天気予報の歴史において、このような急激な精度向上はかつて無かったことである。

リストラ計画の策定にあたっては、「現状継続」と「リストラ実施」の双方について「費用-効果解析」が実施され、費用-効果比はそれぞれ「1対8」と「1対5以下」という結果を得ている (2)。つまりリストラを実施すれば、気象業務にかかる費用は8倍になって米国民に還元されるという結果である。

米国のリストラ計画では、ドップラーレーダーなど気象観測の充実が中核になっている。近年の予測処理の発展はコンピュータ技術の急速な進展に負うところが大きい。幸いコンピュータのコスト・パフォーマンスの低下により、比較的容易にシステムのレベルアップを達成することができた。しかし、レーダーや

気象衛星など近代的気象測器のほうのコストは性能の向上と共に上昇の一途をたどっている。このような情勢の下で天気予報システムの向上を図るためには、日本でも「費用-効果解析」を試みて、天気予報システムの有効性について各方面の利用者の理解をうる努力が必要と考える。

参考文献

- 1) Carter, G. M., J. P. Dallavalle and H. R. Glahn, 1989 : Statistical forecasts based on the NMC s numerical weather prediction system, *Wea. Forecast.*, **4**, 401-412.
- 2) Friday Jr., E. W., 1994 : The modernization and associated restructuring of the National Weather Service : An overview, *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **75**, 43-52.
- 3) 木田秀次, 1990 : 我国の数値予報システムの現状 (1) 概要, *天気*, **37**, 591-602.
- 4) 気象庁総務部企画課, 1978 : 国内気象監視 (NWW) について, *測候時報*, **45**, 1-7.
- 5) 気象庁予報部, 1987 : 気象資料総合処理システムの概要, *測候時報*, **54**, 271-302.
- 6) 気象庁予報部業務課, 1979 : 予報業務の改善について, *測候時報*, **46**, 53-85.
- 7) 気象庁予報部予報課, 1991 : 降水短時間予報プロジェクト作成におけるデータ処理について, *測候時報*, **58**, 189-207.
- 8) 気象庁予報部, 1991 : 天気予報ガイダンスの解説, 気象技術参考資料集, 気象業務支援センター.
- 9) 牧原康隆, 1993 : レーダー・アメダス合成図の精度, *気象*, **37**, No. 6, 4-8.
- 10) 中村誠臣, 1993 : 気象庁狭領域モデルの概要, *気象*, **37**, No. 7, 10-15.
- 11) 小倉義光, 1993 : 局地予報の数値モデルと概念モデル, *天気*, **40**, 820-823.
- 12) Polger, P. D., B. S. Goldsmith, R. C. Przywarty and J. R. Bocchieri, 1994 : National weather service warning performance based on the WSR-88D, *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **75**, 203-214.
- 13) 佐藤信夫, 1991 : 我国の数値予報システムの現状 (2) 全球解析予報システムの現状, *天気*, **38**, 11-31.
- 14) 瀬上哲秀, 1991 : 我国の数値予報システムの現状 (3) 狭領域モデルの概要, *天気*, **38**, 93-102.
- 15) 瀬上哲秀, 1993 : メソスケール数値予報の現状と将来, *天気*, **40**, 813-816.
- 16) 迫田優一, 1990 : 気象レーダーのデジタル化について, *天気*, **37**, 659-670.
- 17) Shuman, F. G., 1989 : History of numerical weather prediction at the NMC, *Wea. Forecast.*, **4**, 286-296.
- 18) 立平良三, 1979 : 気象予測(天気予報の現状と展望), 計測と制御, **18**, 650-658.
- 19) 立平良三, 1980 : レーダーエコーの位相の利用(地形エコー除去など), *天気*, **27**, 837-842.
- 20) 立平良三・保科正男, 1984 : 確率予報, 気象研究ノート, **150**, 1-22.
- 21) 立平良三, 1986 : 新しい天気予報, 東京堂出版, 186PP.
- 22) 立平良三, 1989 : 降水短時間予報の今後(天気系モデルの利用), *気象*, **33**, No. 5, 4-7.
- 23) 上野充, 1991 : 我国の数値予報システムの現状(4), *天気*, **38**, 141-147.