

気象予測論

齋藤直輔*

天気予報、この古くて新しい問題は、今日ふたたびその方法論が活発に論じられている。数値予報モデルの実用化と共に、大気の状態変数の予測だけでなく天気現象そのものの予測(あるいは天気への翻訳)も繰り返し試行されてきた。電子計算機による多量の情報量の処理と予報の品質管理は絶えずこの問題を再燃させ、人々に予報の方法の体系化を問いかけているようである。しかし、事柄はそう簡単でない。予測の対象の捉え方、定義の仕方は各人によって程度の差はあれ、異なっている。天気予報における程、先人の遺産、自分の経験が空しく思われることの多い技術はないようだ。学問・智識の進歩に比して実際の予報成績が眼に見えて向上しないことはよく指摘されるが、これに対する答はなかなか一般には理解してもらえない。われわれが大気の中に予測の対象として認識している系は、単一の系でなくてほとんど複合体であり、開いた系であり、しかも生成・消滅する。すなわち、さまざまなスケールの現象から成っている。個々の現象、たとえば、水蒸気から雨滴への過程、メソ系の構造、総観規模の組織の力学、大循環の様相とその理論等はそれぞれ目ざましく進歩している。しかし、それぞれの系の予測をする場合には、それより小さい系の振舞いや影響は統計値、あるいは積分値として、平均的な取り扱いをしなければならない。

最終的な予測をたてる時は、理論的に(不完全ではあるが、少なくともそれぞれの智識の段階に応じて理論的に)予測可能なものから数ステップも飛躍して予測する。かような現状だから、予測は不可能として潔癖な態度をとる立場と、さまざまなスケールの現象からなり、予報可能性もそれぞれのスケールに応じて階級があるという背景をふまえた上で予測するという立場に大別できそうである。そして、理論的に、技術的に、数ステップのギャップを埋めようと努力している。この過程でさまざまな予測論や予測の critical review がある。数値モデルにおける多くの物理過程のパラメタリゼーション、

総観予報における総観モデルと統計に基づくポテンシャル予報(現象として総観図上にまだ捉えられない系ではあるが、将来発生の可能性が高い現象として予測すること)、あるいは総観規模の数値予報結果を局地的な天気のパラメータとしていかに解釈するか、等の最近の努力は、いずれも、このギャップを埋めるものとして大変に興味深く、筆者はこの方面の研究者が増えてくることを望んでいる。近年、MOS (Model Output Statistics) という手法が米国で盛んである。上に述べた最後の問題に対処するために、異なったスケールの現象を統計的に結びつけようとするもので、1950年代の中頃から W.H. Klein などがやっていた仕事の延長であろう。統計処理の研究者にはおもしろいものであるが、物理過程に重きをおく研究者にとっては、あまりに大胆に見える仕事もないわけではない。しかし、先に述べた現象の複合性からして避け難い予測可能性の階級を考えると、いずれの段階の予測であれ、予測対象の不確定性を統計的推論できちんとしておくことや、ランダム現象として取り扱っていい対象の統計的予測の研究は、局地的な降水から気候変動に及ぶまでの幅広い範囲のそれぞれの領域でやっておく必要がある。

まず、予測論のうちで一般的な天気予報についての評論と、参考書をあげてみたい。Sutcliffe: *Predictability in meteorology* は、1954年発表のものだが、予測論として今なお一読に値するし、これで十分である。これ以後はもう今日の時代につながっていて、智識や技術の進歩が異なったスケールの間をどのように結びようとしているかの先に述べた努力の過中にある。Sutcliffe 以後の今日の問題である、the right balance between the man and the computer in the forecasting business まで触れたものに、Sawyer: *Weather Forecasting its—past and future* (1973) がある。これは、天気予報の歴史を語る間に予報論がおのずと語られているもので、同種のものに Bergeron: *Methods in scientific weather analysis and forecasting—an outline*

* N. Saito, 上智大学理学部

in the history of ideas and hints at a program

(1959), 斎藤：総観解析の歴史について的小論 (1971) がある。

予報経験者が集まって、Weikham (1970) の本を元にして、しかし彼の論説に必ずしもとらわれずに予報方法論を自由に論じたことがある。それをまとめたものが、斎藤編：予報方法論に関するシンポジウム (1972) である。ここで、今日の問題である予報者と数値予報の関係について初期の討論をみることができる。同じく、この時代の総観法と数値予報の相互のあり方に触れたものに、斎藤：天気予報 (1973) がある。さらに、最近のメソスケール現象の数値モデル化の進歩をふまえての大規模から局地の予報までの展望を、Bengtsson (1976) がまとめている。

天気予報に関する標準的教科書を挙げておく。当然、この中には著者の予測論が読み取れる。まず、高橋：応用気象論 (1961) は、天気要素の量的予報に触れると同時にオペレーション・リサーチの立場からの予測論が特色である。小冊子であるが同じ著者の天気予報—理論と実際 (1977) は入門書であるが、著者の長年の思想のエッセンスが込められている。Monin: Weather forecasting as a problem in physics (1972) は、読者によっては著者の考えに必ずしも同意できぬ点があるかもしれないが、基本的で非常に教訓的である。長期予報や気候変動をやる人に特に勧める。さらに、長期あるいは気候予測における予測とは何かを考える場合には、Lorenz: Climatic determinism (1968) が見逃せない。その議論は、思考実験ではあるが示唆にとみ、予測のために実際のデータ処理に追われている時に一読してみるのがよい。

一般的なものを終えるにあたって、プロフスキー：科学とは何か (科学の共通感覚) を勧める。これは予測論を取り扱ったものではないが、科学の中心をなした三つの観念、秩序の観念、原因の観念、偶然の観念の系譜をたどったもので示唆にとみ、予測と方法の基本的考察に役立つ。

次に、予測の基礎となるモデルや理論や技術の紹介に移るが、広範囲の文献全部を教え挙げられないし、筆者自身そんなに多くの論文に目を通していない。そこで、小数の例を除き、単行本と総合報告の紹介にとどめ、読者自身で総合報告に載っている論文リストをたどっていただきたい。

総観スケール現象の予想

総観規模の予測の元になるモデルは、今日ではすでに数値予報モデルが定着している。まず、1970年の夏にフランスの Lannion で開かれた大学院学生 および若い科学者達のための夏期学校での、N.A. Phillips (大スケール天気予報の原理)、J.C. Charney (プラネタリー流体力学)、D.K. Lilly (sub-synoptic スケールの運動と二次元乱流)、A.S. Monin (プラネタリー大気境界層)、P. Morel (4次元気象データ解析と初期値の与え方) P. Quency (山岳波によるエネルギーの輸送と分散) の講義を Morel が編集した **Dynamic meteorology** (1973) がある。内容の程度は高い。基礎的な数値予報の教科書には、**Haltiner: Numerical weather prediction** (1971)、実際の数値モデル自体の解説には、本邦では、**気象庁電子計算室：電子計算室報告シリーズ** がある。外国のものを概観するには、**GARP Publication Series No. 14** がよい。1974年の出版で必ずしも現状ではないが、米国の Geophysical Fluid Dynamics Laboratory の9レベルおよび18レベル全球モデル、大気-海洋結合モデル、海洋モデル、Goddard Institute for Space Studies の9レベル全球モデル、National Center for Atmospheric Research の全球多層モデル、National Meteorological Center の8層全球モデル、3レベル全球モデル、Rand Corporation の全球2層モデル、Lehigh 大学の全球2レベル予報モデル、ソ連の Hydrometeorological Research Center の全球5レベル大循環モデルおよび半球4レベルスペクトルモデル、Novosibirsk 計算センターの半球延長予報モデル、英国の気象局の全球5レベルモデル、同じく英国のモデリング研究の大学グループの5レベル大循環モデル、本邦電子計算室の半球4レベルモデル、気象研究所の3レベルモデル、スウェーデン気象研究所の半球4レベルモデル、オーストラリアの5レベルスペクトルモデル、デンマーク理論気象研究所の半球スペクトルモデルが述べられている。ごく最近、**気象研究ノート第134号**に **新しい数値予報** と題して本邦の数値予報研究者の手になる総合報告が出た。数値モデルの研究には数値計算法の智識が不可欠であることは言うまでもない。これには、**新田 尚編：気象力学に用いられる数値計算法** (1972) が広範の問題を取り扱っている。グリッドシステム法に関して差分式の基礎から応用まで詳述した **Mesinger と Arakawa のテキスト (GARP Publication Series No. 17)** は待望のものである。

数値予報モデルをはじめ、予報可能性、統計的-力学的予報、初期値の問題、客観的予報あるいは確率予報、予報の検定と応用の幅広い問題について、National Center for Atmospheric Research の研究グループが主催して1976年の夏、天気予報に関するセミナーが開かれ、そのノートが NCAR から **Weather forecasting and Weather forecasts: Models, Systems, and Users** と題して出版された。わが国でも重視されている諸問題を、NCAR がリーダーとなって建設的に、技術的に勉強会を行なっていること自体がすばらしい国柄だと思う。

メソ現象の予報

メソ現象は、本邦では北陸豪雪、梅雨期の豪雨を中心にしてその研究が進められてきた。豪雪研究の総合報告はすでに、北陸豪雪調査報告(気象庁技術報告第66号)が1968年に出版されている。豪雪の解析については、気象庁の研究者・技術者の手になる、昭和47年7月豪雨調査(気象庁技術報告第84号)、梅雨末期集中豪雨報告(気象庁技術報告第86号)がある。後者の第5部 豪雨の予想・監視技術の展望は、实际的な予報体制に基礎をおいた予測論でもある。気象学会のメソ気象シンポジウムの報告をまとめた、中島暢太郎編：**メソ気象**(1974)は観測から数値予報に及ぶ各種の問題を論じている。

総観規模よりも小さい現象の予測へのアプローチは、便宜上三つの方向に分けられよう。一つはメソ現象の数値モデル化の研究である。降雨や局地風は、与えられたマクロな場の流れや温度、地面状態等の枠組の中で小擾乱の振舞いとして数値シミュレーションができる。これについては、グットマン：**メソ気象的過程の非線型理論序説**(1969)が基礎的である。Pielke：**A threedimensional numerical model of the sea breeze over South Florida**(1974)、Saito：**Numerical experiments of the land and sea breeze circulation**(1977)はそうした方向に関する数値実験の一例である。降雨については、要するに積雲対流群の数値のシミュレーションに他ならない。こうしたメソ現象のシミュレーションがある程度成功しても、予報のルーチン・モデルになるまではいくつかの段階を経なければならないだろう。メソ現象の数値実験研究の紹介は、気象予測論の主題というよりも対流論や中小規模現象の気象学の領域に入るので、本文では簡単に述べておく。なお、台風に関しては全く触れないで熱帯気象学にゆずる。集中豪雨現象の数値実験に関する展望あるいは総合報告には、Anthes：**Numerical prediction of severe storms—**

Certainty, probability, or dream?(1976)、吉崎：**アメリカの雷雲について**(1977)があってそれぞれ最近の動向を知ることができる。熱帯の積乱雲のシミュレーションの一例として、Moncrieff・Miller：**The dynamics and simulation of tropical cumulonimbus and squal lines**(1976)を挙げておこう。大規模予測モデルに積雲対流現象の効果を組み入れる方式としてのパラメタリゼーションの手法の研究も、メソ現象の物理的解釈という点で、現象の量的予測につながるものである。この方面の研究の代表として、Kurihara：**A scheme of convective adjustment**(1973)と Arakawa・Schubert：**Interaction of a cumulus ensemble with the large-scale environment Part 1**(1974)が挙げられよう。

第二の予測法は、総観モデルに基づく総観気候学の手法で、古くは Jacobs：**Synoptic climatology**(1946)に始まる。この手法は、河村：**メソスケールの総観気候学**(1969)に引き継がれ、発展した。

第三は、総観スケールの観測量、あるいは計算量と局地的な観測値、またはその分布を統計的に結びつける方法である。このことを純統計的方法(たとえば多重相関の方式)で行なう時は、資料の長さ、あるいは代表性(年のくせなど)が問題になる。種々の大気変数の場が大気構造を示す代表であると考えて、パターンの分類に統計分析を応用した、統計総観法とも呼ぶべき分野の研究も現われ始めた。この種の研究も今後、発展してゆくことを期待したい。

同じく統計学的扱いを含むのであるが、第一、第二の方法の考え方を交えて、現象のモデルを設定して、統計の対象となる変数を決めてゆく方法もある。それは、数値シミュレーション、あるいは数値モデル程に厳密に閉じた系ではないが、観測や解析の結果をふまえて、あるいは第一のカテゴリーの研究結果を考慮しつつ、診断的なメソモデルを作る。そして、最も基本的と思われる観測値や物理量とメソ現象の観測された強度との間の統計的関係を決めておくやり方である。立平・斎藤：**豪雨予想の一方方法(ブラック・ボックス法)**(1973)や 豪雨ワーキンググループ：**高層風と降水量一短時間降水量予報の試み**(1973)などがその例である。

以上の三つの方式、つまり大規模場から局地の天気をいかに解釈するかについて、1976年ワルシャワでWMO主催のシンポジウムが開かれた(天気第25巻72-73頁参照)。その時の論文集 WMO(1976)は、この古くて新

しい予想法の最近の情勢を知るに便利である。わが国をはじめ多くの国々では、局地の天気予報には地形あるいは地表面の状況の効果をうまく取り入れることが当面の問題である。必ずしも代表的という意味でないが最近のこの方面の仕事の一例として、**Keyser・Anthes: The applicability of a mixed layer model of the planetary boundary layer to real-data forecasting** (1977) を挙げておこう。

統計的あるいは stochastic 予報

統計的予報については、筆者は専門でないので詳しく述べることはできない。統計的予報の最近の総合報告としては、**Julian・Murphy: Probability and statistics in meteorology: A review of some recent development** (1972) がある。stochastic-dynamic prediction, assimilation of observed data, time-series analysis, statistical weather forecasting, probability forecasting, precipitation modification statistics の六分野の最近の発展を概観し、各分野の問題を示している。これらの問題は学際的な研究を必要とする。この評論にもられた文献からさらに勉強してほしい。**Murphy・Winkler: Probability forecasts: A survey of national weather service forecasters** (1974) は、予報官を対象にした確率予報、特に降雨予報について質問調査を行なった結果の分析を報じている。

stochastic-dynamic prediction としては、**Lorenz**の一連の仕事を見逃がすわけにいかぬ。興味ある人は、たとえば、**Lorenz: An experiment in nonlinear statistical weather forecasting** (1977) とその引用文献をたどってほしい。

最近、気候予測における stochastic dynamics の研究として注目すべき、Hasselmann 等の一連の研究が現われた。すなわち、**Hasselmann: Stochastic climate models, Part 1, Theory** (1978), **Frankignoul・Hasselmann: Stochastic climate models, Part 2, Application to sea-surface temperature anomalies and thermocline variability** (1977), **Lemke: Stochastic climate models, Part 3, Application to Zonally averaged energy models** (1977) である。

本稿を草するにあたり、気象研究所の岡村存博士の助言を得たことを感謝する。

文 献

- Sutcliffe, R.C., 1954: Arch. Met. Geophys. Biokl., Series A., 7, 3-15.
- Sawyer, J.S. 1973: WMO Technical Note No. 130, Lectures presented at the IMO/WMO Centenary Conferences, Vienna and Geneva, Sept. 1973, 13-28.
- Bergeron, T., 1959: The Atmosphere and the sea in motion, Rockefeller Institute Press, New York, 440-474.
- 斎藤直輔, 1971: 測候時報, 36, 367-380.
- Wickham, P.G., 1970: The practice of weather forecasting, Her Majesty's Stationary office, London, 187 pp.
- 斎藤直輔編, 1972: 研究時報, 24, 35-56.
- 斎藤直輔, 1973: 天気, 20, 163-169.
- Bengtsson, L. (新田 尚訳), 1976: 局地予報のための大規模場の数値予報の天気への解釈, 測候時報, 44, 267-277.
- 高橋浩一郎, 1961: 応用気象論, 岩波書店, 292 pp.
- 高橋浩一郎, 1977: 天気予報一理論と実際, 海洋出版株式会社, 126 pp.
- Monin, A.S., 1972: Weather Forecasting as a problem in physics, The MIT Press Cambridge, Massachusetts, and London, England, 199 pp.
- Lorenz, E.N., 1968: Meteorological Monography, 8, 1-3.
- ブノスキー (三田・松木訳): 科学とは何か (科学の共通感覚), みすず書房, 228 pp.
- Morel, P., ed., 1973: Dynamic Meteorology, D. Reidel Publishing Company, Dordrecht, Holland/Boston, U.S.A., 622 pp.
- Haltiner, G.T., 1971 Numerical Weather Prediction, John Wiley and Sons Inc.
- ICSU/WMO, 1974: Modeling for the First GARP Global Experiment, GARP Publ. Series No. 14, (Secretariat of WMO, Case postal No. 5, CH-1211 Geneva 20, Switzerland より入手可能)
- 日本気象学会編, 1978: 気象研究ノート, 134,
- 新田 尚他, 1972: 気象研究ノート, 110, 158.
- Mesinger, F. and A. Arakawa, 1976: Numerical Methods used in atmospheric Models, 1, GARP Pub. Series No. 17 (Secretariat of WMO, Case postal No. 5, CH-1211 Geneva 20, Switzerland)
- NCAR 編: Weather Forecasting and Weather Forecasts: Models, Systems, and Users., 1, 2, Note from a colloquium: Summer NCAR/CQ-5+1975-ASP.
- 気象庁, 1968: 気象庁技術報告, 66.

- 気象庁, 1973: 気象庁技術報告, 84.
 気象庁, 1974: 気象庁技術報告, 86.
 中島暢太郎編, 1974: 気象研究ノート, 120, 129.
 Gutman, (浅井富雄紹介) 1969: 気象研究ノート, 108, 139.
 Pielke, R., 1974: Mon. Wea. Rev., 102, 115-139.
 Saito, N. 1976: Pap. Met. Geophys., 27, 99-117.
 Anthes, R.A., 1976: Bull. Ame. Met. Soc., 57, 423-430.
 吉崎正憲, 1977: 天気, 24, 351-373.
 Moncrieff, M.W. and M.J. Miller 1976: Quart. J.R. Met. Soc., 102, 373-394.
 Kurihara, Y., 1973: Mon. Wea. Rev., 101, 547-553.
 Arakawa, A. and W.H. Schubert, 1974: J. Atoms. Sci., 31, 674-701.
 Jacobs, W.C., 1946: Bull. Amer. Met. Soc., 27, 306-311.
 河村 武, 1969: 現代気象学論説, 東京堂, 156-173.
 立平良三, 斎藤直輔, 1973: 研究時報, 25, 31-42.
 豪雨ワーキンググループ, 1973: 研究時報, 25, 103-116.
 WMO, 1976: Papers presented at the WMO symposium on the interpretation of broad-scale NWP products for local forecasting purpose (Warsaw, 11-16 Dec. 1976), WMO-No. 450.
 Keyser, D. and R.A. Anthes, 1977: Mon. Wea. Rev., 105, 1351-1371.
 Julian, P.R., and A.H. Murphy, 1972: Bull. Ame. Met. Soc., 53, 957-965.
 Murphy, A.H., and R.L. Winkler, 1974: Bull. Ame. Met. Soc., 55, 1449-1453.
 Lorenz, E.N., 1977: Mon. Wea. Rev., 105, 590-602.
 Hasselmann, K., 1976: Tellus, 28, 473-485.
 Frankignoul, C., and K. Hasselmann, 1977: Tellus, 29, 289-305.
 Lemke, P.L., 1977: Tellus, 29, 385-392.

補講 (1)

台風の子報

岡村 存*

天気予報とならんで古くから一般の関心を集めてきたものの一つに、台風の子報の問題がある。このことは、1950年代に数値予報が発足したとき、日本ではまず台風の数値予報が試みられたいきさつからも察知できる。当時は、従来の経験則に基づいた予測法を打破するものとして大いに期待され、研究も盛んに行なわれ、台風の数値予報に関する数多くの論文が発表された。このような背景のもとで当時の知識を総合的にまとめた、**笠原・増田：台風論** (1956) は入門書として今日でも捨てがたい参考書であろう。

その後は、最近に至るまで日本では台風に関する単行本がほとんど刊行されていない。わずかに最近、**気象研究ノート129号** (1976) に台風特集号が出版されたくらいである。この本は、最近の台風研究に関する総合的な紹介がなされ、実際の台風の進路予報法にまで言及しているので、やや高度の総括的な知識を得るのに最適の

書であろう。

このほか、現場の技術者を対象として書かれたものに**気象庁予報部：予報作業指針** (1974) があり、日本における台風予報法の現状を知るのに便利である。技術者のための解説書は東南アジア諸国など世界各地からも出版を要請されており、これに応じるため、WMO では近々、台風の強さと移動の子報に関するマニュアルを刊行する予定である。

単行本が少ないため、もっと立ち入った議論や具体的な予報法を知るにはどうしても論文を読むしかない。予報に関する論文は、大別して統計的方法によるものと力学的的方法によるものに分けられる。

統計的方法の例としてまず挙げるべきものに、選別法を用いた重回帰法がある。その例として、**Arakawa: Statistical method to forecast the movement and the central pressure of typhoons in the Western North Pacific** (1964) では予報因子として過去24時間内の台風中心付近の地上気圧分布値を取り上げ、台風の

* Y. Okamura, 気象研究所予報研究部