

## 数値予報を学ぶには

伊 藤 宏\*

### 1. ま え が き

天気図にみられる長波の数日先の様相を、その変動を支配する方程式を数値積分して求めることが数値予報である。一口でいえばそのようなものであるが、数値予報はかなり間口のひろい技術である。オペレーショナルの場合には、初期値は客観解析で求められている。かなりの精度をもった解を得るには数値計算法もおろそかにできない。然し、原理的な面は気象力学の一つの応用である。従って数値予報を学ぶ時には力学的な面が中心となるので、少なくとも気象力学の初歩の知識は必要である。次節で紹介する教科書は、それぞれ程度の差はあるが、数値計算法や客観解析にも簡単にふれてある。

さて、大気中のじょう乱を支配する法則に基づいて予報しようという考えは今世紀の始め頃からあった。1910年代には、英国の Richardson\*\* が予報方程式を数值的に積分する方式を作り、又自ら計算をしたが失敗に終わった。その後、高層観測網が充実したこと、大規模運動の理解が深まったこと、それに加えて電子計算機が出現したことによって、1940年代の終り頃から1950年の始めにかけて数値予報の基礎が確立された。1955年に、始めてアメリカで実用化され、その後ひきつづいて各国でオペレーショナルに計算されている。その間、予報精度を向上するために、大気におよぼす熱の効果も取り入れられるようになった。又、一方、研究面にも数値予報の手法が用いられ、台風の発達過程や大気大循環の特性を数值的に模写すること (Simulation) に成功した。これ等の数値実験の中で、より小さいスケールの現象である積雲

対流の大規模運動に及ぼす効果の重要性が明確に認識されるようになった。又、数値実験で開発された技術や知識は数値予報にもはねかえってきいている。最近では予報期間を、従来の、二、三日程度から半月ないしそれ以上に延長することや、フロント系に伴う天気現象を予報することも試みられている。数値予報を学ぶこととは、単にその技術的側面を会得することではなく、大気の大規模運動を物理的に理解することであるのだから、数値予報特有の勉強と同時に大気大循環の理解が望まれるところである。

### 2. 文 献

#### (a) 教科書・総合報告

数値予報の教科書として最初にあげたいものは、新気象学薦書の中の岸保：数値予報新講 (1968) である。同じ著者による旧版の気象学講座の中の数値予報論は大巾に書きなおされている。新版のものは、著者自身が述べているように、物理学の初歩の知識をもった人なら誰でもわかるように平易に書かれている。然し内容は旧版に比べてはるかに充実している。力学の式は最小限にとどめて、豊富に実例を引用して実際の大気現象を物理的に理解するように書かれているのが本書の特色といえよう。最近の発行であるだけに、近年の発展まで含まれている。同じ著者が予報技術者のための解説書として書かれた北半球バロトロピック予報、バロクリニック大気の性質、プリミティブ方程式解説 (I) 等は現在では絶版になって新しく入手することは困難であるが、それらの要点は上記の数値予報新講の中に織り込まれている。

気象力学の初歩の知識を必要とするが、上記のものより精しく数値予報の理論面を解説したものに村上：N.A. Phillips 教授の数値予報講義 (1960) がある。これは大学院における数値予報の講義の原稿の紹介である。著者の言葉を借りると、準地衡風モデルでは何故渦度方程式を用いるかという問題と数値計算に伴う誤差の解析に重点がおかれている。然しこれだけで数値予報の大意はつかめるようにまとめてある。又、最近では、新田：数

\* 気象予報部

\*\* [註] Richardson の提案及び計算結果は、1922年に一巻の本にまとめて出版された (Richardson, L. F., 1922: Weather Prediction by Numerical Process). 最近, Bulletin of American Meteorological Society の 1967年8月号で Pratzman がその紹介を行なっている。又、それに基づいて、岸保が科学の1968年 (vol. 38) の3月号で Richardson の仕事を紹介している。

値予報(1968)が気象庁予報部から発行された。これは気象大学校研修部予報科の研修資料として書かれたものに、加筆・訂正を施されたものである。広く文献を参照され、それらが手際よく総合されている。最近の発行であるので、近時使はれるようになったプリミティブ・モデルについても一章が設けられている。電子計算機のプログラムについて触れてあるのは本書だけである。

英文で書かれた教科書としては **P.D. Thompson: Numerical Weather Analysis and Prediction (1961)** がある。本書の特色は大気の大規模運動の波動性に重点をおいていることであろう。ノイズを除去する問題も波動論的に論じている。それだけに、スケール・アナリシスから長波の力学的特性を把握する面は稀薄のように思はれる。そのような一面はあるけれども、数値予報全般を勉強するには参考になり得る本といえよう。この本は吉田(1963)によって翻訳され、地球物理文献抄に収められている。教科書ではないが、アメリカの気象学会で編集された **Compendium of Meteorology (1951)** の中の **J.G. Charney: Dynamic Forecasting by Numerical Process** は、値数予報の生みの親の当時の考えを伺い知るといって興味がある。

数値予報の対象である大規模運動の力学を勉強するには小倉:最近の気象力学(I)(1966)及び **N.A. Phillips (1963): Geostrophic Motion** がある。前者は、著者が M. I. T. (Massachusetts Institute of Technology) の大学院において講義された気象力学の原稿を書き直されたものである。過去数年の間の気象力学の特徴は、大気中のさまざまなスケールをもつ現象の力学がよりよく理解されたことであるという考えで本書は書かれている。後者も同じ線に沿って書かれている。後者の内容の充実していることは定評のある所である。ただ、豊富な内容をかなり限られた紙数に盛り込んでいるので、勢い記述が圧縮されている所が散見される。両者とも文末に完備された文献リストがついているので、それ等を参照して原論文を読まれたほうが理解し易い箇所がある。兎に角、はじめて勉強される方には、とつきにくい面がある。その意味では、前者の方が読み易いであろう。この本も植村(1966)による翻訳が地球物理文献抄に収められている。

#### (b) 関連分野の文献

ここでは客観解析法と数値計算法に限ることにする。前にものべたように、上記の数値予報に関する教科書は

いづれも、これ等の題目について簡単に述べられている。これらの問題に興味を持たれる方のために、ここでは専門の文献をあげることにする。なお、近年、予報モデルの中に熱の効果が加えられるようになった。大気の熱収支に関しては、この入門講座(3)の廣田:大気大循環論の紹介(1969)を参照されたい。

客観解析法は特殊な問題であるだけにまとめられたものはあまりない。単行本として出版されているのは **L.S. Gandin: Objective Analysis of Meteorological fields (1963)** くらいであろう。ルーチンとして数値予報を行なっている国では、それぞれ固有の解析の方法をもっている。上記のものはソ連の方式を中心にまとめたものである。その他の所で使われている方式は原論文にたちもどる必要がある。(c)の論文・雑誌の項でふれることにする。

初期の数値予報の論文の参考文献の中にしばしば、**R.D. Richtmyer: Difference method for initial value problems** があげてある。それはこの方面の代表的著作のためと思はれる。然し、この本の前半は純粋数学の議論で、われわれ気象を専攻するものには理解することがむづかしい。数値予報(準地衡風モデル)に必要な数値計算の勉強には都田: **Contribution to the Numerical Weather Prediction-Computation with Finite Difference-(1962)** が便利である。ポアソン方程式のような楕円型偏微分方程式の境界値問題の数値解法である緩和法(Relaxation Method)に関しては、正野:緩和法入門がある。応用数学を専攻しようとする人のための偏微分方程式にたいする差分法の著書も沢山あるが、ここでは省略する。電子計算機のプログラムに関する著作も最近はきわめて多い。科学計算のプログラミングに便利な **FORTRAN** の入門書には森口: **FÖRTRAN IV 入門**, 浦: **FORTRAN 入門** がある。

#### (c) 論文・雑誌

1959年までの、数値予報に関する主要な論文は日本気象学会編: **Selected Meteorological Papers (1960)** のうちの **Numerical Weather Prediction I, II** に収められている。又、長波の力学に関するものは同論文集では **Cyclone and Anticyclone** の号の中にはいつている。現在編集が進められているこの論文集の続篇の中には前の論文集には見られなかった客観解析法に関するものや、最近用いられるようになったプリミティブ・モデルに関するもの等が収められる予定であるときいて

いる。長波の力学の端緒を開いた Rossby 教授の功績を記念するための論文集: **The Atmosphere and the Sea in Motion (1959)** の中に、数値予報関係の論文も含まれている。

近年、ほぼ隔年毎に、オスロー、東京(2回)、モスクワで国際数値予報シンポジウムが開催された。そして、オスローの場合をのぞいて、シンポジウムの議事録が出版されている。これらの論文集はその時々の問題点や発展の過程を伺うのに役立つ。なほ、客観解析法の論文も含まれているので、この方面の原論文を調べるのに役立つ。

予報技術者を主たる対象として、気象庁電子計算室から和文雑誌オメガが発行されている。毎日の数値予報の中の話題の他に、講座的のもの、諸外国の現況の紹介や時には最新のトピックスの易しい解説等が含まれているが文献の紹介はあまり行っていない。

今までにあげた文献による勉強の他に、実際の大气中のじょう乱の鉛直構造やその変動の様相を見ても必要なことと思う。又、準地衡風モデルで実際の大气中のじょう乱の変動がどれ位表現できるかを見ても有益である。天気図上でみられる程のじょう乱のうちで、どのようなじょう乱は比較的良好に予報でき、どのような場合には十分に表現できないかを認識しておくことは大切なことである。

〔附記〕 上記の本文の中では、入門講座ということで、どちらかといえば数値予報の原理や準地衡風近似モデルの勉強に必要な文献をあげた。然し、オペレーショナルな数値予報で準地衡風モデルからプリミティブ・モデルに移行した国もある。又、一方、フロント面に沿う天気活動に関する数値実験やら、台風の発生、大気大循環のシミュレーションにプリミティブ・モデルが盛んに使われている。上にあげた文献の中にもプリミティブ・

モデルにふれているものがあるが(4)、(6)等、概要をあたえるか又は解説に重点をおいたものである。ここではプリミティブ・モデルを実際に取り扱ってみる上で必要な知識を得る文献を断片的かつ最小限追加しておく。

プリミティブ・モデルに関する基礎に属する事柄として、風の場と気圧場の相互調節 (mutual adjustment) を一応勉強しておくことをお奨めする。このことは、先にあげた **N. A. Phillips: Geostrophic Motion** の中にも一小節があるが、更に詳しくは巻末の文献リストによって原論文にたちもどられたい。新田の詳しい総合報告が**オメガ: Vol. 7, No. 1**にある。

プリミティブ・モデルの初期値についての基礎的考察は **K. Hinkelmann (1953)**, **N. A. Phillips (1960)** によってなされている。最近では、初期の時点の近傍で予報と同一の計算を繰り返して初期値を求める技術も開発されている。(例えば、**新田 (1967)**)

プリミティブ方程式の数値積分を試み始めた頃は、大規模運動の上に所謂“ノイズ”が重なってあらわれて困ったものである。その難点を克服したのは**松野 (1966)** その他により提案された時間外挿の方式である。これらの方式を採用することによりプリミティブ方程式の積分は以前に比べてはるかに容易になり、また初期値についても以前ほど神経質になる必要がなくなった。

大気大循環の数値実験のように、積分期間が十分に長い場合に特に問題になる非線型不安定を巧妙に避けて、大気大循環の数値実験を成功させたのは**荒川 (1966)** の差分近似である。プリミティブ方程式にたいする彼の差分表現は、その他の面でも神経のゆきとどいた代表的なものといえよう。

終りに、この稿を草するにあたって、岸保勘三郎、新田尚両氏から有益なコメントを頂いたことに謝意を表したい。

## 文 献

### 教科書・総合報告

- 1) 岸保勘三郎, 1968: 数値予報新講, 180p. 新気象学叢書, 地人書館.
- 2) 岸保勘三郎, 1962: 北半球パロトロビック予報, 気象庁電子計算室報告別冊第5号, 73p.
- 3) 岸保勘三郎, 1963: パロクリック大気の性質, 気象庁電子計算室報告別冊第7号, 83p.
- 4) 岸保勘三郎, 1967: プリミティブ方程式解説 (I), 気象庁予報部, 53p.
- 5) 村上多喜雄, 1960: N.A. Phillips 教授の数値予報講義, 気象研究ノート, 11巻4号, 229-273.
- 6) 新田尚, 磯野良徳, 1968: 数値予報, 気象庁電子計算室報告別冊第10号, 145p.
- 7) Thompson, P.D., 1961: Numerical Weather Analysis and Prediction, Macmillan, 170p.
- 8) 吉田泰治訳, 1963: 数値解析と数値予報, 地球物理学文献抄, 11巻2~4合併号, 45~158.
- 9) Charney, J.G., 1951: Dynamic Forecasting by Numerical Process, Compendium of Meteorology.
- 10) 小倉義光, 1966: 最近の気象力学 (I), 気象研究ノート, 17巻1号, 1~61.

- 11) Phillips, N.A., 1963: Geostrophic Motion, *Reviews of Geophysics*, Vol. 1, No. 2, 123-176.
- 12) 植村八郎訳, 1966: 地衡流運動, *地球物理学文献抄*, 12巻7号, 283~331.

#### 関連分野の文献

- 13) Gandin, L.S., 1963: *Objective Analysis of Meteorological Fields*, Israel Program for Scientific Translation, Jerusalem.
- 14) Richtmyer, R.D.,: *Difference Method for Initial Value Problems*, Interscience publishers, 238p.
- 15) 都田菊郎, 1962: Contribution to the Numerical Weather Prediction—Computation with Finite Difference—, *Japanese Journal of Geophysics*, Vol. 5, Science Council of Japan, 79-190.
- 16) 正野重方: 緩和法入門, 朝倉書店.
- 17) 森口繁一, 1966: FORTRAN IV 入門, 東京大学出版会, 319p.
- 18) 浦昭二, 1966: FORTRAN 入門, 培風館, 192p.

#### 論文・雑誌

- 19) 日本気象学会編, 1960: Selected Meteorological papers, No. 14, No. 15, Numerical Weather Prediction, Part I, II, No. 3, Cyclone and Anticyclone.
- 20) B. Bolin 編, 1959: *The Atmosphere and Sea in Motion*, Rossby Memorial Volume.
- 21) Proceedings of the International Symposium on Numerical Weather Prediction in Tokyo, November 7-13, 1960, 656p.
- 22) Proceedings of the International Symposium, Moscow, June 23-30, 1965: Dynamics of Large-Scale Atmospheric Processes, 455p.
- 23) Proceedings of the WMO/IUGG Symposium on Numerical Weather Prediction in Tokyo, November 26-December 4, 1968.
- 24) 気象庁電子計算室: オメガ
- 25) 新田尚, 1968: オメガ, Vol. 7, No.1, 26-40.
- 26) Hinkelmann, K., 1953: Der Mechanismus des Meteorologischen Lärmes, *Tellus*, vol. 3, 285-296.
- 27) Phillips, N. A.: 1960: On the Problem of Initial Data for the Primitive Equations, *Tellus*, vol. 12, 121-126.
- 28) 新田尚, 1967: On Analysis and Initialization for the Primitive Forecast Equations, Tech. Memo. WBTM NMC-42.
- 29) 松野太郎, 1966: Numerical Integration of the Primitive Equations by a Simulated Backward Difference Method, *J. Meteor. Soc. Japan*, 44, 76-84.
- 30) 松野太郎, 1966: A Finite Difference Scheme for Time Integrations of Oscillatory Equations with Second Order Accuracy and Sharp Cut-Off for High Frequencies, *J. Meteor. Soc. Japan*, 44, 85-88.
- 31) 荒川昭夫, 1966: Computational Design for Long-term Numerical Integration of the Equations of Fluid Motion; Two-dimensional Incompressible Flow, part I, *Jour. of Computational physics*, Vol. 1, No.1, 119-143.
- 32) Mintz, Y. and Arakawa, A.,: The Four Basic Requirements for Numerical Weather Prediction, to be published by Holt, Rhinehalt and Winston, N. Y. C.