

4011 : 602 : 604 : 7 (数値予報の歴史 ; 数値予報開始50周年 ; 記念講演)

1. 数値予報の歴史

—数値予報開始50周年を迎えて—

新 田 尚

1. はじめに

数値予報は物理法則に基づく気象の予測である。用いる物理法則は、ニュートンの力学法則と古典的熱力学法則である。18世紀に、天文学において古典力学を用いた天体運動の問題を解くことに成功するのを目にして、気象の問題も同様に解けるのではないかという希望が語られていたが、それを明確な形で示したのはV. ビャークネス (Bjerknes 1904) である。当時、それは無謀だという批判に対して、彼は「今、直ちに実現させようというのではなく、そうした方向での研究の必要性を強調したのだ」と応え、「トンネルを掘る作業員は、おそらくそれを利用することはないだろうが、やがて完成した暁には後世の人々が特急列車で通過するだろうことのために掘っているのだ」と予言している。今日、われわれはその通りに数値予報の恩恵を受けている。

ビャークネス (第1図) の早過ぎたかもしれない予言を自ら実行に移したのは、ダ・ビンチにも比せられ

るリチャードソン (第2図) で、1922年の『数値解析による天気予報』の著書 (Richardson 1922) の中で失敗に終わった彼の試みを示している。この「リチャードソンの夢」 (第3図) は、20世紀の半ばに米国、スウェーデンなどの西側諸国と旧ソ連圏で成功裡



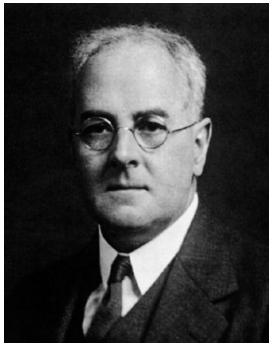
第1図 V. ビャークネス (1862-1951).

に復活し、高層気象観測などの拡充、コンピューターの発明とあいまって実用化に至り、1950年代半ば以降、今日まで発展の一途をたどっている。そして現在は、世界中の気象機関における天気予報業務の中核技術となるばかりか、その数値シミュレーションの技術は現代気象学の進展に不可欠となっている。この間に、気象学の進歩、コンピューターの発展、リモートセンシング技術を駆使した気象観測網の飛躍的な前進があり、これらの成果がまた数値予報の発展にフィードバックされていることはいうまでもない。そうした流れを見ていこう。

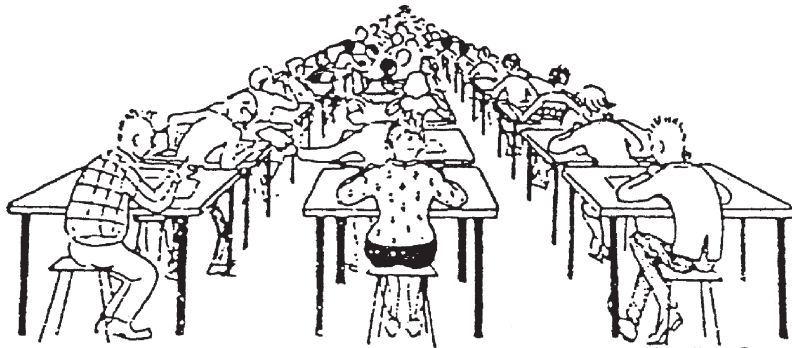
2. 数値予報にいたる気象学の進歩

2.1 前史1：ニュートンからV. ビャークネスまで

ニュートンの力学法則を流体運動に適用したものがナビエ-ストークスの方程式である。ビャークネスは、



第2図 リチャードソン (1881-1953).



第3図 リチャードソンが夢見た空想天気予報工場の想像図 (出典：ガンディン 1965, バーガーの転載許可済)。

回転地球上の流体運動方程式、熱力学方程式、連続方程式、気体の状態方程式、水蒸気の式を連立させて、気象予報を理論的に行うことを提案した。計算機の無い当時、数値解法は無理なので図式解法に希望を託したが、彼自身は実行しなかった。彼の提案を果敢にも人力で実行したのがリチャードソン (第2図, 第3図) である。

2.2 前史2：リチャードソンからロスビー、チャーニー、キーベル、オブコフ等まで、そしてフォン・ノイマン

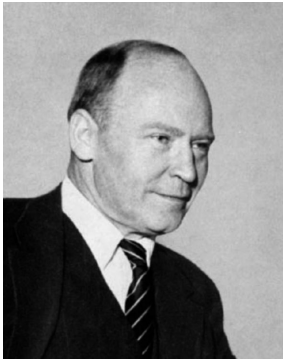
リチャードソンの試みから四半世紀を経て、米国でフォン・ノイマン (第4図) が、新しく開発した電子計算機のテスト用に数値解法による気象予報を取り上げ、指導的気象学者ロスビー (第5図) を中心に数値予報の研究チーム (プリンストン気象プロジェクト) を立ち上げた。その中核がチャーニー (第6図) で、ロスビーの研究した順圧 (バロトロピック) 渦度方程式に、自身の研究した地衡風近似という大気中の大規模運動に適した単純化を導入して、リチャードソンの失敗を回避する数値予報モデルを作り上げた。そして、1950年にはコンピューターENIACによる世界初の数値予報に成功した。さらに、1952年夏にはプリンストン高等研究所のコンピューターで傾圧 (バロクリニック) モデルによって米国東部を襲った大嵐の予報に成功した。順圧モデルは対流圏中層 (500 hPa) 面の予報、傾圧モデルは3次元の予報 (鉛直の複数面の予報) を行うものである。この成果を受けて、米国気象局と軍は合同数値予報組織を結成し、IBM701による数値予報の業務を1955年5月6日に開始した。

一方、故国スウェーデンに帰国したロスビーのイニシアティブで、そこでも数値予報研究が始まり、コンピューター-BESKの開発とあいまって、米国よりも早く1954年3月23日に業務的な数値予報が幕開けした。

同じ頃、旧ソ連圏でも独立に数値予報の研究が始まり、1959年順圧モデルによる数値予報がコンピューター-BESK, STRELAによって実施された (Kibel' 1957; Phillips *et al.*



第4図 フォン・ノイマン (1903-1957)
(© American Meteorological Society).



第5図 ロスビー (1898-1957)
(© The Rockefeller Institute Press).



第6図 チャーニー (1917-1981).

1960)。詳しい情報は現在でもなかなか判明しないが、第二次世界大戦をはさむ東西の気象研究の交流史の解明は重要と思う。

このように、数値予報の歴史にとってフォン・ノイ

マンの果たした役割は偉大だったが、ノーバート・ウィーナーによる「天気の数値予報は不可能」とする批判に、2人の天才の確執とカオスの予言をうかがえるように思える。いずれにしても、気象サイドに加えて、コンピューター・サイドからの数値予報の歴史を明らかにすることも重要であることを特に強調しておきたい(例えば、マクレイ(1998)参照)。

3. 数値予報の実現と業務化 —日本の場合—

V. ビャークネスの提案から半世紀を経て20世紀半ばに数値予報が実現し、本格的に天気予報のために業務化されることとなった(第1表)。その先駆けとなったのがスウェーデンと米国であるが、少し遅れて日本と旧ソ連が続いている。ここでは、わが国における数値予報の開発と業務化を中心にみていく。

第二次世界大戦によってわが国の気象界は国際的に鎖国状態にあったが、戦後の急速な国際交流によって気象研究も大きく発展した。

東京大学気象学教室の正野重方教授(第7図)は、「渦動論」の研究で学士院賞を受けた研究者だったが、いち早く数値予報の重要性に着目され、1953年末その研究を立ち上げるべくイニシアティブをとって、大学、気象研究所、中央気象台(後の気象庁)などの研究者・技術者を結集し、数値予報グループ(通称NPグループ)を結成した。このグループのメンバーの多くは、後に世界的に活躍することになる。

NPグループでは、図式計算法、リレー式計算機、初期の小型コンピューターなどを用いて、活発に研究活動を行った。残念ながら、本格的なコンピューターの開発はずっと遅れる。とはいえ、海外との交流はまだ乏しく、海外文献なども利用した手探りに近い状態が続いた。そのような時、岸保勘三郎(当時、東大、後に気象庁を経て東大教授)がチャーニーに招聘されてプリンストングループに加わり(1952~54年)、世界の第一線の数値予報研究の空気に直接接し、NPグループに伝えた。岸保は高等研究所のIASマシンを用いた実験的数値予報の成功に立ち会うことができ、その将来性を確信して帰国した。そしてやがて気象庁における数値予報業務の開始に中心的な役割を果たした。

NPグループの活動に対して、1954年朝日新聞社から学術奨励金100万円が贈られ、当時としては貴重な研究資金となって、研究の推進や全国的な予報現場での普及に貢献した。数値予報の研究面では、1954年の

第1表 世界各国の数値予報業務の開始時期。

1	1950年代業務開始のグループ スウェーデン (1954), 米国 (1955), 日本 (1959), 旧ソ連 (1959)
2	1960年代業務開始のグループ イタリア (1960), 中国 (1960), ベルギー (1962) イスラエル (1962), ノルウェー (1962), カナダ (1963), ニュージーランド (1963), 英国 (1965), ドイツ (西ドイツ:1966, 東ドイツ:1971), チェコスロバキア (1966), フランス (1968), オランダ (1968), オーストラリア (1969) [註] 本格的運用がこれより遅れた国もある。
3	1970年代業務開始グループ フィンランド (1970), アルジェリア (1972), デンマーク (1973), 国際機関:ヨーロッパ中期予報センター (1979) [註] このほかにも, 数値予報の業務を始めた国がたくさんあり, 本表は今後改定される必要がある



第7図 正野重方 (1911-1969)。

メイストームの予報 (図式解法による3層モデル, リレー式計算機による順圧予報など) において, 12時間予報で気圧変化量の予報と実況との相関係数0.7~0.92を獲得したほか, 長期予報の試み, 台風の進路予報の試み, 雨の予報の試みなど意欲的な取り組みがみられた。また, 渦度方程式の完全積分の研究など基礎的な研究も行われた。

そして1959年1月に気象庁におけるIBM704型コンピューター (当時としては大型コンピューター, しかし1バイト36ビット, 8Kバイトのコアメモリは, 今日のパソコンにもはるかに劣る) (第8図) の導入を迎え, 大学・気象研究所・気象庁の研究者・技術者が岸保をリーダーとして数値予報業務の立ち上げのためにチームを組むこととなった。そしてNPグループは, 業務化に携わる人々と研究センターの人々に実質的に二分されていった。気象庁では, やがて電子計算室が組織され専用の建物が建築された (第9図)。

数値予報の業務化に際しては, コンピューターの主

要な役割はデータ処理と予測計算に二分される。結局, 業務化の先輩である米国ソフトウェアの提供を受け, 関係者の並々な努力の末に, 1959年6月数値予報ルーチンが開始された。

これを契機として, 正野を中心に日本気象学会主催の「数値予報国際シンポジウム」が1960年11月に東京で開催され, 世界中から130名を超える著名な第一線研究者の参加を得ることとなった。このシンポジウムの開催は, わが国の研究者・技術者にとって世界への目を開き海外の研究者に直接接する絶好の機会となったばかりか, 数値予報の世界的な研究・開発にとっても重要なステップとなった。

ところで, 数値予報の研究と業務化の違いについても述べておきたい。研究の場合, 失敗も含めてその成果は将来の成功や発展にとってきわめて重要である。他方, 天気予報の現業における数値予報の出力図としての予想図などの予測結果は, ベテランの予報者の能力をはるかに上回るものでなければならない。いいかえれば, 経験豊富な予報者の十分な信頼が得られるものでなければならない。出発時点の数値予報は, 研究としては成功であったが, 天気予報の現場ではまだ海のものとも山のものともわからない, 海図のない海洋への航海に出発する船のようであった。このことは, 数値予報の業務化を実施した多くの国でも見られたことで, 一種のヒューマン・ドラマを見るようなものだったと思う。結局, 4でみるように, 数値予報モデルが高精度化し, 予想天気図, 降水量予報分布図など多くの出力図や統計処理された天気予報ガイダンスの精度が向上し, ベテラン予報者の真の信頼を得られるようになるまで, やはり10年ぐらいを要したのではないと思われる。

ここでは誌面の関係で詳しい説明は省略したが, 第



第8図 気象庁に導入された IBM704型電子計算機の全容（気象庁提供）。



第9図 予報部電子計算室の建物。

1表に示した世界各国における数値予報の業務化のヒューマン・ドラマは極めて多彩であり、数値予報開発者とベテランの予報者の関係が業務化開始の時期にも影響している。

そうした事情の中で特筆すべき出来事は、1979年のヨーロッパ中期予報センターの業務開始である

(Woods 2005)。ヨーロッパ共同体の合同の数値予報（特に中期予報）の業務主体として1975年に組織化されたが、各加盟国から参集した優秀な人材から構成された開発グループの能力はきわめて高く、たちまち世界をリードし、予報精度の点でもほぼ今日までトップの座を占めている。わが国を含めて、今日世界の数値予報センターのレベルは大変高くなっており、国際的な予報精度の比較コンテストでも、日、米、英、独、ロシア、カナダ、豪などが

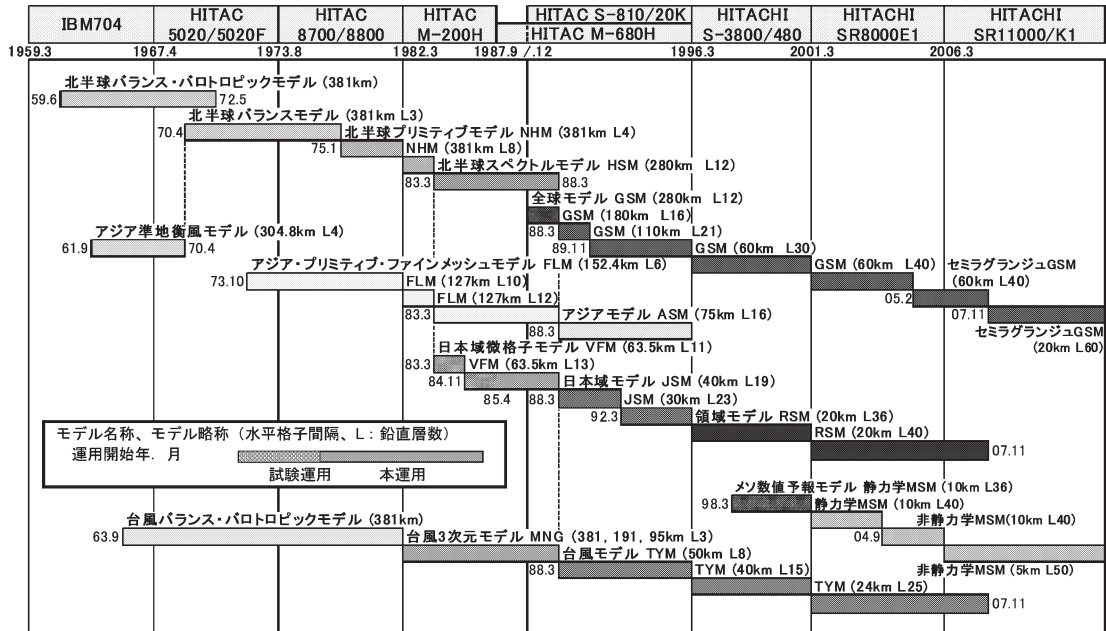
成績を競っているが、ヨーロッパ中期予報センターはほぼ常に先頭を走っている感がある。しかし、それが良い刺激となって、世界の各センターの、中でも若いメンバーが、国際的な交流を盛んにすると共に独自のオリジナリティーを発揮しつつあるのは心強い限りである。

4. 数値予報の発展を追って

数値予報が発展していく段階は、多かれ少なかれ世界的に共通しているようであるが、ここでは簡単にわが国の場合をみていく。なお、いきなりかなり専門用語が飛び出すことにもなる点は、誌面の関係でお許し頂きたい。

数値予報の発展段階は、大筋では次のように分類される。

- (1) 第1期：準地衡風モデルからバランスモデル（1950年代～1970年代）。この時期では、大規模大気運動のみに絞った数値予報モデルが用いられた。
- (2) 第2期：プリミティブモデルの発展（1970年代～1980年代）。この時期になってリチャードソンが試みた、仮定の少ない数値予報モデルに戻り、鉛直速度の方程式のみ静力学近似が用いられた。したがって、大規模大気運動のほか、重力・慣性波も予報方程式の解に含まれている。
- (3) 第3期：プリミティブモデルの高度化、気候モデルと非静力学モデル、さらに客観解析手法の精密化（1980年代終り～1990年代初め～現在）。この段階に



第10図 数値予報業務用の計算機とモデルの変遷 (気象庁提供)。

なると、リチャードソンの試みと本質的に同じ数値予報モデルとなり音波も解に含まれる。また、初期値を求める客観解析に非定時観測データもリアルタイムのモードで導入される。

第10図は、気象庁でおよそ5～10年の間隔で更新されてきたコンピューターとルーチンモデルの時系列的な発展の段階を示している。

5. おわりに

おおまかにいえば1世紀にも及ぶ数値予報の歴史を概観してきたが、ここに新しい技術が芽生え、生育し、果実を結ぶまでの幾重にも折り重なり、複雑に構成されてきたシーンを見る思いがしたし、人々の努力と献身の姿は、プロジェクトXとして私の目に写った。本文の詳細は、Persson (2004) や Wiin-Nielsen (1991), 新田ほか (2009) を参照していただきたい。

ここにひとつエピソードを紹介しよう。これは、1952年のことであった。リチャードソンがチャーニーに宛てて2通の手紙を出しているが、それはチャーニーが最初の数値予報に成功した結果を掲載して論文など5編を送ったことへの礼状であった。リチャードソンはチャーニー等の成功を祝福し、今後への期待を

寄せている。そして自分のその後の仕事の論文を送っている。こうした2人のパイオニアが30年を経て歴史的な交信をしたことはほとんど奇跡に近い出来事といえよう。ただ不幸なことに、少し後の1953年にチャーニーが追加して論文を送ったが、それはリチャードソンの没後に届いたとのことである。

最後に、フォン・ノイマンは、気象の数値予報だけでなく、流体力学分野への数値解析の導入を積極的に働きかけたが、リチャードソンのダムに関する論文をはじめ、数値解法を通して気象の数値予報と数値流体力学・数値流体工学との接点が見られることを報告しておく (Roache 1976)。

謝辞

本講演の準備の段階で、気象庁予報部数値予報課の永田前課長と隈課長、酒井技術専門官 (現大阪府)、経田予報官に多大なご支援をいただきました。厚くお礼申し上げます。

参考文献

Bjerknes, V., 1904 : Das Problem der Wettervorhersage, betrachtet vom Standpunkte der Mechanik und der Physik. Meteor. Z., 21, 1-7.

- ガンディン, 1965: 機械 (コンピュータ) が天気を予報する. 出版: レニングラード・Gidrometeoizdat, 170 pp. (ロシア語)
- Kibel', I. A., 1957 (英訳1963) : An Introduction to the Hydrodynamical Methods of Short Period Weather Forecasting. Pergamon Press, 381 pp.
- マクレイ (N. Macrae), 渡辺 正・芦田みどり訳, 1998: フォン・ノイマンの生涯. 朝日選書610, 朝日新聞社, 406 pp. (原書は1992年刊)
- 新田 尚, 二宮洸三, 山岸米二郎, 2009: 数値予報と現代気象学. 東京堂出版, 240 pp.
- Persson, A., 2004 : Early operational numerical weather prediction outside the USA - An outline to a history. 100 pp. (Symposium on the 50th Anniversary of Operational Numerical Weather Prediction の付録 CD-ROM に収録, http://www.weather.org.uk/reference/a_persson.html で閲覧可).
- Phillips, N., W. Blumen and O. Coté, 1960 : Numerical weather prediction in the Soviet Union. Bull. Amer. Meteor. Soc., **41**, 599-617. (伊藤 宏・磯野良徳, 1960 : ソ連邦における数値予報. 気象研究ノート, (11), 274-296が紹介)
- Richardson, L. F., 1922 : Weather Prediction by Numerical Process. Cambridge University Press, 236 pp.
- Roache, P. J., 1976 : Computational Fluid Dynamics. Hermosa Publishers, 453 pp. (翻訳: パトリック・ローチェ, 高橋亮一ほか訳, 1978 : コンピュータによる流体力学 (上・下). 構造計画研究所)
- Wiin-Nielsen, A., 1991 : The birth of numerical weather prediction. Tellus, **43AB**, 36-52.
- Woods, A., 2005 : Medium-Range Weather Prediction — The European Approach — The Story of the European Centre for Medium-Range Weather Forecasts. Springer, 270 pp.
-