日本における初期の数値予報の発展とその問題点

二　宮　洸　三*

1．はじめに

2018年５月16日の第３回気象学史研究会「日本での初期の数値天気予報」で三題の講演がなされた．その一つ「日本における初期の数値予報の発展とその問題点」の要旨を報告する．新田ほか（2009）は数値予報の科学史を著しているが，日本で数値予報が始まったころの問題点を補足して議論する．

2．時代的背景・気象学史の中の数値予報

数値予報（Numerical Weather Prediction: NWP, NP）は大気中の「３次元的格子点」上の幾つかの気象変数の時間変化を複数の物理法則方程式を連立させて求め，このステップを繰り返して（時間積分）気象変数の分布を予測する方法である．NP は基本的な気象予測の手段であるが，その科学的な内容・重要性は社会では正しく理解されていない．

NP の発展を時代的背景・気象学史の中で概観するために第１表（日本の事項はイタリック書体）を示した．NP が発展したのは1940年以降であるが，その基礎となる研究は17世紀から始まっている．19世紀初期に各国で地上気象観測が開始され天気図解析が進められ，気象現象の理解が深まった．20世紀前半には高層観測が行われ，極前線・温帯低気圧の構造が研究され力学的理解が深まり，NP が試みられた．20世紀中ごろには気象力学の研究が進み，電子計算機が開発されNP の実用化が進んだ．同年代には気象レーダーや気象衛星観測も始まった．

3．数値予報が実用化される以前の気象予測

●総観的・経験的・主観的予測の時代

高低気圧，前線，トラフ，リッジなどの循環系の実況と変化を高層天気図・地上天気図解析で確認し経験的知識も活用して移動・変化傾向を外挿する．原理的に～１日予報が限界であった．

●総観気象への力学的知見の導入された時代

循環系の変動を「渦度」の概念で理解し，「渦度保存則」に着目して移動・変化を予測した．

日本では力学的総観解析研究が不充分で（日本周囲の海洋域で観測データが少なく，海外のデータの利用も困難であった）基礎知識が蓄積されなかった．

●CAV trajectories method（Rossby 1940）の利用

絶対渦度（constant absolute vorticity：CAV）保存則 を用いてリッジ・トラフの移動・変化を予測する方法で，当時米国気象局で用いられた．（日本では使用されなかった．）

●準地衡風順圧モデルの図式解法（Fjortoft 1952）の利用

数値計算では500 hPa 高度から地衡風と渦度を求めて渦度の変化を予報し，予報された渦度から高度を計算する（ポアソン方程式を解く）．この計算を図式で行う方法が1950年ころ提案され，1950年代には日本の一部の気象台で試用され，学生演習でも取り上げられた．教育的価値はあったが計算機が使用されると実用性を失った．

4．リチャードソンの試みから準地衡風モデルへ

●Richardson（1922）の数値予報の試みと不成功

大気中には様々な空間スケールの現象が共存しており伝播速度が速い小スケール現象があるため数値積分の時間間隔を短くしないと（数値計算の安定性の問題）正確な予測ができない．この考察が不充分なため

* Kozo NINOMIYA（無所属）．
kníno@cd.wakwak.com
© 2018　日本気象学会

第1表　気象学史と時代的背景（斜体は日本のできごと）

西暦	社会的背景	科学史・気象学史
1600	*1603：徳川幕府*	1648: パスカル　大気圧 1662: ボイルの法則 1687: ニュートン力学の法則，万有引力
1700	1776: アメリカ独立 1789: フランス革命	1742: セルシウス　温度計 1761: オイラー　流体力学方程式・連続方程式
1800	1861-65: 南北戦争 *1868：明治元年* 1873: 国際気象機関会議 *1875：東京気象台* *1887：中央気象台*	この頃各国で地上観測開始 1820: ブランデス　天気図解析 1823: ラプラース　静力学平衡方程式 1827: ナビア　粘性流体運動方程式 1835: コリオリ　地球転向力 1851: ケルビン　熱力学法則 1856: ルブリェ　天気図解析による低気圧予測 1858: ヘルムホルツ　渦定理 1873: ファン・デル・ワールス　気体状態方程式
1900	*1912：大正元年* *1914-18：第1次世界大戦* *1926：昭和元年* *1937-45：日中戦争* *1939-45：第2次世界大戦* *1941-45：太平洋戦争*	1903: V. ビヤークネス　温帯低気圧構造 1905: 各国で高層気象観測開始 1921: J. ビヤークネス　極前線・低気圧 1922: リチャードソン　数値予報の試み（失敗） 1939: ロスビー　ロスビー波 1946: ノイマン　電子計算機による数値予報 1947: チャーニィ　傾圧不安定波 1949: チャーニィ　準地衡風モデル
1950	1950: WMO 設立 *1956：気象庁発足* 1963: WMO WWW（世界気象監視計画） 1967: WMO GARP（全球大気研究計画） 1975: ECMWF　設立 *1989：平成元年*	*1953：NP 研究グループ* 1955: クレスマン　数値予報業務化（USA） 1955: ローレンツ　有効位置エネルギー 1956: フィリップス　大気大循環モデル実験 1959: ヒンケルマン　プリミティブモデル論文 *1959：気象庁 NP 業務開始（準地衡風モデル）* *1960：国際 NP シンポジウム（東京）* 1960: USA 気象衛星 1964: ミンツ-荒川　大循環モデル 1965: スマゴリンスキー-真鍋　気候モデル 1966: USA 静止気象衛星 1969: 大山　台風数値実験 *1973-75：気象庁プリミティブモデル業務化* *1977：気象庁静止気象衛星ひまわり*

試みは成功しなかった．

● 準地衡風モデルの開発と付随した問題点

前記の不成功の原因を検討して，最重要な低気圧スケール（大規模）のみを抽出・表現する「簡略化」した方程式系による「準地衡風モデル」が1940年代後半に海外で開発され，数値予測計算に成功した．

「準地衡風の力学」は，大規模系に適合する方程式系の導出，その線形解析（傾圧不安定の理解，エネルギー変換の理解），診断的解析（渦度方程式，ω方程式，傾向方程式など），地衡風調節および数値予測モデルを含む知識体系である（Haltiner 1971などを参照）．日本での導入期には数値予報が強調され，その全体概念が充分に理解されなかった．準地衡風モデルで除去される中小規模現象を軽視する弊害を生じた．

また準地衡風モデルによる現象の予測結果の詳しい検証的調査や準地衡風力学に基づく「力学的総観気象解析」が不充分であった．

● 気象庁の最初期の数値予報

気象庁は1959年に，「電子計算室」を設立し，最初の電子計算機 IBM704を導入し，数値予報を開始した．当時は計算機システムの管理・運用業務も「電子計算室」が担当していた．1985年に，「電子計算室」は「数値予報課」に改組された．1990年代後期には，大型化した計算機本体は清瀬庁舎に移され，計算機の管理・運用業務は他の課に移された．

増田善信博士の回想録（私的文集冊子「日本の数値予報半世紀」の一部）によれば，当初計画では数値予報の開始時には独自開発した準地衡風傾圧2層モデル

を使用する予定だった．このモデルはテスト段階での「発達した低気圧」の事例では良好な予測性能を示したが，他の事例では予測精度に問題が見つかった．このため1959年６月の正式業務開始はアメリカ気象局が開発した準地衡風順圧モデルを基にしたモデルが使用された．そして，1959年12月から，北半球バランス順圧モデルが使用された．このモデルの開発には東大気象研究室の都田菊郎博士が大きく貢献された．

●教訓

研究論文では「発達する低気圧」などの予測成功例が報告されるが，気象業務ではすべてのケースでの精度の検証が必要である．類似した問題は米国でも見られている．「成功例の報告」がNPの推進に役立った一面もあるが，実用性を過剰に誇示する成果報告は好ましくない．また失敗の分析も進歩の基礎となるが，不成功例が学術誌に載ることは殆どない．

５．数値予報の科学研究と技術開発研究

●科学と技術

科学は新しい事実・概念・法則の発見を目指し，技術は社会的活用を目指す．科学と技術は相互に関連して共に進歩する．

●数値予報における必要事項

NPの実用化には，精度の明示と一定時間内の安定した出力が必要である．それを実現するためのデータ処理・客観解析・初期値解析・数値積分，出力データ伝達の一貫処理システムの構築，適用限界と精度評価の明示，さらに利用者（予報官）の気象学的知識の向上が必要であった．

●開発研究成果・数値予報データの公開の問題

気象庁の業務として多くの人々が参画する技術開発研究（特に観測システム，データ処理，客観解析，応用分野）は学術誌への発表になじまない，論文・学会報告は本来業務ではない等の偏見があり，開発研究成果は充分に社会に公開されなかった．

●技術開発研究と研究の多様性の必要

科学・技術史を見れば，開発初期には新技術が旧技術に優れているとは限らない．（実例：最初は，蒸気船は帆船に及ばなかった．）新技術の開発には正確な科学知識に基づいた将来性の判断が重要である．

事業には「選択と集中」が求められるが，基礎的知識を提供する科学には多様性が必要であり，研究分野での「政治的な過度の選択と集中」は多様性を損なう危険を伴う．幸い海外・国内の研究機関・大学では多様な研究が進められてきた．松野太郎博士の回想録（私的文集冊子「弥生の空」の一部）に1950年代の東大気象研究室の多様な研究活動が記されている．1960年の「東京数値予報シンポジウム」では，多くの新概念が海外からの参加者によって論じられていた．

６．客観解析・数値予報データの公開

●客観解析・数値予報データ部外公開の遅れ

NPデータ公開の前提条件として，NPの科学的基礎・根拠，精度・誤差幅，適合性（どの様な現象に有効か），具体的な使用法等の情報の開示が必要であるが部内開示に留まり，社会的公開が遅れた．

当時，数値予報は「予報官への予報支援資料」として位置付けられており，行政機関としての「統一見解」の必要（複数の情報は混乱を招く），計算機過信の恐れ，NPの精度不足，「決定論的NPの誤解のおそれ」などの理由によって公開が時期尚早とされた．

これらの問題が徐々に改善されたのは1970年代にプリミティブモデルが使用された後であった．

７．数値予報システムと業務の全体像

●数値予報システムと業務

NPを気象業務として遂行するには，下記の気象業務を実施するシステムが必要である：

気象観測（世界・国内）のデータ受信
データ整理編集・データ品質管理
客観解析（格子点データ作成）
初期値化（NPモデルに適合化した初期値作成）
数値予測（数値積分）
出力，応用プロダクト作成，伝達

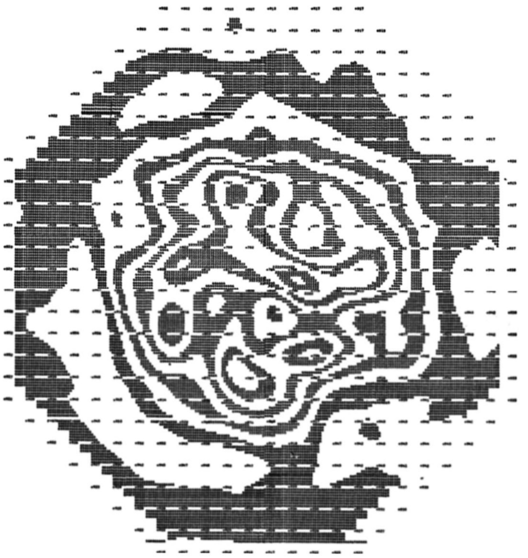
●1950年代の数値予報データの出力と伝達

1950年代では，天気図に等値線を描く出力ソフトも装置もなかった．当時の出力図は　数字をプリントする「プリンター」を使用した「ゼブラ（縞馬）模様」の等値線図であつた（第１図）．

庁内にはこれが配布され，各地気象台には「ゼブラ模様」を等値線に描き替えた図を無線FAXで送信したが受信したFAX画像は不鮮明であった．出力・伝送の状況が改善されたのは数年後であった．

●数値予報業務に関連する業務

予報モデル・システムの維持・改良・開発．
予報精度の評価統計
応用プロダクトの作成
データ管理・保存（原データは復元不能な知財．過



第１図　準地衡風順圧モデルによる500 hPa 高度場の予報．アメリカ気象局による1960年６月30日00UTC を初期値とした24時間予報図．等高線は18000，18200フィートなど200フィート（＝約60 m）間隔のゼブラ（縞馬）模様によって示す．Thompson（1961）の Fig. 14を引用．

去の現象，全球的現象，気候変動の研究に不可欠．電子媒体の劣化・変更・更新に対応する作業も必要.）

技術報告・研究報告・論文の作成

利用者への解説

これらの重要性は社会では十分に認識されていない．

８．その後の数値予報の発展と役割

●数値予報モデルの発展

NP モデルは以下の段階を踏んで進化した；

フィルターモデル（準地衡風モデル，バランスモデル）

プリミティブモデル（静力学平衡，鉛直加速度を直接計算しない）

非静力学モデル（鉛直加速度を直接計算する）

さらに物理過程計算の精密化，多種観測データの取り込み（４次元同化解析など）も並行的に開発された．

このような進化は計算機の進歩によって可能になった．一方高性能計算機への社会的・学術的要請が計算機のさらなる開発を促した．気象庁における NP モデルの高度化は計算機システムの更新（性能向上）とほぼ同時的に行われている．

また NP データを利用した多くの応用プロダクトは多くの部門で開発され使用されている．

●数値予報モデルの数値実験への貢献

気象の数値実験研究ツールとして，水圏・地圏・生物圏結合モデル，古気候モデル，気候モデル，大気大循環モデル，物質循環モデル，物理モデル，雲・水微物理モデル，理想化実験（単純化）モデルなどの多様な数値モデルが開発され利用されている．

●再解析データの作成

４次元同化解析による長期にわたる格子点データの作成・提供がなされている．再解析データは過去の現象解析研究・再現実験（の初期値・境界値），気候変動研究などに不可欠な基本的データとして使用される．

９．科学リテラシーと教育活動

●科学知識・情報の寡占

「富の寡占」が社会問題になっているが，科学・技術が専門化するにつれ「科学知識・情報の寡占」も問題になっている．多くの科学情報・データが公開されているが一般の人々がアクセスし難く，正確な知識が普及しない．社会の知財である科学知識・情報・データの寡占が懸念される．多数の人による理解と活用が望まれ，科学の寡占化を防ぐためにも，科学リテラシーの向上が必要である．気象分野でも，重要な「災害」,「環境」,「気候変動」問題などについて社会のリテラシーが求められる．

●科学知識・情報の普及と教育活動

第一線の研究者・開発者は学会・研究集会・学術論文誌・技術報告で最新の情報に接しているが，多くの人々が研究成果を学び理解する為には研究論文に加え，各レベルの適切な書籍（専門書，基礎テキスト，解説書）や講演・講座による普及活動が必要である．

第２表は数値予報と直接的・間接的に関連する気象学のテキストの例である．日本語の優れたテキスト（気象研究ノートを含む）もあるが，頁数が少なく記述が分り難いことがある．海外のテキストは頁・図版が多く内容豊富で判り易い．（第２表の書籍を引用文献に記載していない.）一般図書館ではこの様な気象学の書籍を見られず，書店で新刊を手にする機会も少なく（通販は利用できるが），個人の学習には大きな

不便を感じる．

10．後書きと謝辞

新田ほか（2009）を補足して「日本における初期の数値予報の発展とその問題点」を議論した．NP は進歩し続けているがその全体像は社会的に正確に理解されるに至っていない．また重要性・有益性も充分に認知されず社会的な強い支持を得ていない．日本の NP の創成期には特有な問題点があり，現在も類似の問題点が残されている．

この科学・技術史的報告が NP を含む気象業務の理解の向上に繋がれば幸いです．発言の機会を与えて下さった研究集会のコンビーナーと，研究会で頂いた有益なコメントに御礼申し上げます．

補　足

（1）モデルの概念的分類

●フィルターモデル（準地衡風モデル，バランスモデル）

大規模現象のみを対象とし，静力学平衡を仮定し（鉛直加速度を計算しない），鉛直流は ω 方程式で求める．準地衡風モデルは地衡風近似を，バランスモデルはバランス風近似を使用している．

●プリミティブモデル

静力学平衡を仮定し，鉛直速度は連続の式で求める．

●非静力学モデル

鉛直加速度も直接に計算．

●順圧モデルと傾圧モデル

順圧（バロトロピック）モデル：一層モデル

傾圧（バロクリニック）モデル：多層モデル

●計算方式による分類

格子モデル：格子点上のデータを差分計算

スペクトルモデル：格子点上のデータを球関数展開して演算．

●計算領域による分類

全球モデル：地球大気全体のモデル

領域モデル：地球大気の一部分のモデル．限られた計算機能力の中で高分解能化するためのモデル．自然界には存在しない人工的な境界を持つので境界の扱いに数値計算の工夫が必要である．

結合モデル：海洋・水圏・地圏・生物圏結合モデルなど．

（2）オイラーの表現

流体力学（NP でも）では「オイラーの表現方式」を用いる．この方式では，空間のある点における全微分変化は偏微分形式で書かれる．例えば

$du/dt = u\ \partial u/\partial x + v\ \partial u/\partial y + w\ \partial u/\partial z$ と書かれる．

第 2 表　数値予報とそれに関連した気象学の書籍の例

年	書名	著者・編者
1951	Compendium of Meteorology	Malone (edit)
1954	Physical Meteorology	Johnson
1954	気象力学序説	正野
1956	Weather Analysis and Forecasting (I and II)	Petterssen
1957	Dynamical and Physical Meteorology	Haltiner and Martin
1958	気象学総論	正野
1958	最近の大気大循環論	荒川
1959	Glossary of Meteorology	Huschke (edit)
1959	Rossby Memorial Volume	Bolin (edit)
1960	気象力学	正野
1961	Numerical Weather Analysis and Prediction	Thompson
1966	最近の気象力学	小倉
1969	Atmospheric Circulation Systems	Palmen and Newton
1969	The Global Circulation of the Atmosphere	Corby (edit)
1971	Numerical Weather Prediction	Haltiner
1972	An Introduction to Dynamic Meteorology	Holton
1972	気象力学に用いられる数値計算法	新田 ほか
1976	A Short Course in Cloud Physics	Rogers
1978	気象力学通論	小倉
1978	Meteorology over the Tropical Oceans	Shaw (edit)
1979	大気力学入門	栗原
1979	Geophysical Fluid Dynamics	Pedlosky
1980	Numerical Prediction and Dynamical Meteorology	Haltiner and Williams
1981	数値予報	増田
1981	Mesoscale Atmospheric Circulations	Atkinson
1982	Atmosphere-Ocean Dynamics	Gill
1983	Mesoscale Meteorology	Lilly and Gal-Chen (edit)
1983	Large-Scale Dynamical Processes in the Atmosphere	Hoskins and Pearce (edit)
1985	Handbook of Applied Meteorology	Houghton (edit)

（3）渦度

相対渦度 ξ は流体素分の回転を表す物理量で（x, y）座標では $\xi=\partial v/\partial x-\partial u/\partial y$ と書かれる．（円盤上の渦度は角速度の2倍である．）地球自転による渦度は $f=2\Omega\sin$（緯度）である．Ω は自転角速度であり，f をコリオリ因子と言う．（$\xi+f$）を絶対渦度と呼ぶ．気柱の鉛直方向の伸び縮みが無ければ絶対渦度は変化しない．

（4）気圧と等圧面高度

静力学平衡が成り立てば，高度は気圧に，気圧は高度に一義的に換算される．地上天気図では高度ゼロ面における気圧（海面気圧）の等圧線が描かれ，高層天気図（等圧面天気図）では等高度線が描かれる．フィルターモデルやプリミティブモデルでは（x, y, z）座標系のかわりに（x, y, p）座標系が使われる．

（5）乾燥大気のプリミティブモデル

乾燥大気のプリミティブモデルでは気象変数は，空気の密度，気温，風の3成分，高度，地上気圧の7個であり，それらは空気の状態方程式，水平風（2成分）の各運動方程式，熱力学の式，空気の連続の式，静力学平衡の式，地上気圧の変化の上部境界条件（合計7本）を連立して時間積分によって予測される．

（6）準地衡風順圧モデル

準地衡風順圧モデル（1層モデル）では，地衡風は高度場から求まり，準地衡風渦度も高度場から求められるから，気象変数は等圧面高度のみである．準地衡風渦度方程式で渦度が予測され，予測された渦度から高度が計算される（ポアソン方程式を解く）．このように，予測計算は単純化され当時の計算機でも計算できた．

参　考　文　献

Fjortoft, R., 1952: On a numerical method of integrating the barotropic vorticity equation. Tellus, 4, 179-194.

Haltiner, G. J., 1971: Numerical Weather Prediction. Wiley, 317pp.

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，224pp.

Richardson, L. F., 1922: Weather Prediction by Numerical Process. Cambridge University Press, 236pp.

Rossby, C. G., 1940: Planetary flow patterns in the atmosphere. Quart. J. Roy. Meteor. Soc., 66, 68-87.

Thompson, P. H., 1961: Numerical Weather Analysis and Prediction. Macmillan, 170 pp.