

数 値 実 験 と は (1)

新 田 尚*

これまでの講座では、気象学の各分野の案内が行なわれてきた。その分野への入門をすすめるにせよ、この分野はもうおしまいだと門を閉じるにせよ、そこには入口という感じのものがあつた。一方これから取り上げる数値実験は、各分野を通して斜めから光をあてるような、気象学における新しい手法に関する世界である。筆者はすべての読者に入門をすすめるとは思わない。むしろこの世界の住人は読者のごく一部に限られるように思う。大部分の読者は、外からながめたり、また結果の単なる利用者となるだろう。しかしいずれの場合も、この手法について確かな眼を養っていただきたい。

周知のように、地球物理学的現象は実験室内での再現が困難で、せいぜい部分的に実験できるのみであつて、気象学として例外たりえない。しかし電子計算機の出現は、この事情を一変させてしまい、実際の大気現象にかなり似せて取扱えるようになった。筆者はこの出来事を気象学における一大革命とみたいと思うが、それを可能にしたのは単に電子計算機の発明だけでなく、その背景にはそれまでの気象学、中でも気象力学の発展と気象観測技術及び観測網の進歩・増大、数値計算技術の進展のあつたことは見逃せない。

大気現象は非常に複雑なため、ひと口に**数値実験**といつてもいろいろな段階があるように思う。しかしすべてに共通していえることは、対象とする現象を支配する物理法則、またその現象を実現させている固有の機構、それからこれらの数学的表現である所の方程式、こういうものさえ知っていれば、主として数値積分法によって電子計算機に支配方程式を解かせることができる。その結果、ある初期状態の将来への進展の模様を知り、あるいはある近似値から出発して定常状態に達して、それを詳しく解析することができる。このようにして、われわれが大気中の物理過程について限られてはいてもある意味

で**完全な観測値**をもつことになり、それと実測値との比較から既存の知識をチェックして修正できることになるわけである。

もう少し具体的にいうと、大気運動については、回転系上の Navier-Stokes の方程式がその基礎の運動方程式で、普通は対象とする現象の特性を考えてこれを簡単化して使う。地球大気は常に太陽からの短波放射をうけて暖まり、それ自身長波を放射して冷却して、地球大気全体として放射平衡状態にある。水蒸気、オゾン、炭酸ガスの分布が放射平衡の詳細を決め、水蒸気は凝結によって潜熱を放出する。大陸や海洋の分布は顕熱輸送や水収支を支配し、いろいろなスケールの山岳系は大気運動を一層複雑にしている。数値実験では、こうした個々の物理過程そのものを対象として取扱う場合もあるし、大気大循環のような総合的に扱う場合もある。個々の分野のことは、本講座のそれぞれの箇所を参照されたい。

それでは、**数値実験**は何を目標にしているのだろうか。その答は人によって違ふだろうが、筆者は理論的考察の結果を確かめる補助手段に使用する、いくつもの過程がいくつに複雑な現象の解明の道具とする、未知の要素が含まれている場合に物理的裏付けのある推定を行なうのに資する、といった事が目的になっていると考えている。所で数値実験に対して**数値シミュレーション**といういい方がよくなされるが、普通両者は殆んど同義語のように用いられている。しかし言葉のニュアンスからすると数値実験の方が広義のようで、数値シミュレーションというときは、実在の現象や過程を模写して再現する場合が多いようである。

次に文献を中心に展望をこころみよう。先述のように、数値実験の基礎をなすのが気象力学をはじめとする気象学の知識だから、**小倉：最近の気象力学(1)**をはじめ、本講座に登場した**廣田、新田、伊藤**などの紹介による文献でしっかり学んでおいて頂きたい。

地球科学の数値シミュレーション全般を展望したのに

* 気象庁予報部電子計算室

島津：地球科学とシミュレーションがある。特に気象学に焦点をおいたのが新田：気象力学における数値シミュレーションで、目下盛況の気象力学での数値実験を繰ぎらえして、その意味づけを求めている。こうした全体的にながめる視点を一度はもちたいもので、自分が大きい流れのどの辺にいるか知っておくようにしたいと思う。

数値実験の考えを最初に明確な形でうち出したのは気象の方では V. Bjerknes だといわれている。その考えは Richardson にうけつがれてやがて数値予報へと発展していくわけだが、そうした意味で気象学では数値予報が最初の数値実験あるいは数値シミュレーションだといえる。すなわち、大規模大気運動の短期間の変動の模写をするという意味で、この研究の流れは、いわゆる西側諸国とソ連などの東側諸国とではほぼ独立に進展したが、Charney や Kibel にその事情が述べられている。

数値予報が着々と成果をあげたあと今後の方向への模索がつづいたが、丁度その頃 Phillips: *The General Circulation of the Atmosphere: A Numerical Experiment* が発表され、等温大気から出発して極めて現実的な気象擾乱が出現し、約30日間の計算結果は文字通り最初の大気大循環の数値実験となった。この仕事は今からみると、いろいろ不備な点が目につくが、それまで実測からわかり、理論的に推定されていた大規模擾乱の重要な役割りを明確な形で示し、その後の大気大循環の数値実験への突破口をきりひらいた。その意味では是非最初に取り組んで頂きたい論文である。大循環関係には多数の文献があるが、そのうち代表的なものを列記しよう。二つの荒川を手引にして、Mintz, Smagorinsky et al., Manabe et al., Kasahara and Washington, Leith とすすまれば、それぞれの特色(すなわち Mintz の現実的な海陸分布の導入、Smagorinsky 等の放射過程の正確な取扱い、Manabe 等の水収支の考慮、Kasahara 等の高度を鉛直座標にとる方法、Leith の積雲対流群の集団効果の表現の工夫)を知ると共に、熱の取扱いに関して次第に実際的でこみ上げてきたことがわかるだろう。更に成層圏にも多く層をとった Manabe and Hunt では、下部成層圏の循環系やそこでの力学的な状態が調べられている。このモデルは海陸分布や凝結過程を含んでいないが、成層圏突然昇温に似た現象が現われている。その場合でも、下部成層圏では傾圧効果は小さくて擾乱は大部分対流圏からのエネルギー伝播によって維持されていることがわかる。その後、Manabe 等は、全球をおおう領域に実際と同じ海陸や山岳系を考

慮したモデルを設計し、凝結過程の有無に応じた大気の反応を調べて数々の興味深い結果を得ている。〔本文(2)の熱帯気象の項参照〕

一方以前から、海洋大循環に関して Bryan and Cox を中心とした仕事があり、面白い結果が出ているが、今や大気-海洋結合モデルによって気候の数値シミュレーションが手がけられる段階に達した。Manabe and Bryan は、その先駆的な結果を最近発表した。本論文の方は莫大なので、自分の興味に応じて、第1部の地面の水文学的過程を含んだ大気大循環、第2部の海洋大循環との結合、第3部の海洋モデル、を選択して読んでほしいと著者達は親切にしているが、気象の方からみて大切な要点は、J. Atmos. Sci. にのったノートに一応つくされている。一口にいうと、海洋循環の導入によって、熱の輸送過程が大きくかわり、一方降水分布が赤道海洋上で減り、大陸上で増加し、また沿岸ぞいにも増えている。また土壌の水収支をきちんと取扱った結果、砂漠が出現する。また降雪地帯や海水分布も一応もってもらしく出ている。まだ最初の試みなのでいろいろな欠点もあり、今回の仕事でどれだけ本質的に新しい展望が開けたか、これからよく吟味する必要があるが、現在季節変化を考慮した実験が進行中ときくので、今後の発展に期待したい。この気候のシミュレーションへ第一歩をふみ出した意味については、時間がたたないと何ともいえないことであろう。しかし筆者には気象学の歴史上で特筆すべき事柄のように思われる。今後観測事実との厳しい対照を経て改良されていくことを強く望みたい。

しかしながら、こうしたビッグ・サイエンシ的な仕事の中で、われわれが進む道はどこにあるか、という問題がある。日本の気象力学を専攻する者にとって真剣に取り上げられる必要があるだろう。筆者は、大気の運動過程中的重要な問題点を個別的なテーマとして深く掘り下げると共に、常に全体を組織的につかんでいくことがよいのではないかと考える。例えば、超長波の力学ということであれば、回転流体力学的な方面からのアタック、それが現実の大気の場合にうける取扱いの特殊化、解析事実との対比、非線型性などに焦点をおいた特殊目的の数値実験、そうして大気大循環の全体(といってもその中にいくつかの段階があるが)の中での役割やふるまいの理解というようなことを考えている。

主としてアメリカで行なわれている大気大循環の数値実験の中で、Kikuchi のワサビのきいた仕事が印象に残る。日本でもこうした仕事を足場に地がたがめができる

のではないだろうか。

最近**実験予報**という言葉がよくきかれるが、これは本質的には数値予報と同じである。しかし直接実用化を目標とせず、既存の最も複雑で現実の大気に近いと思われる数値モデルを用いて、われわれはどこまで気象現象を再現しうるか、を調べることを目的としている。実際には大気大循環の数値実験に用いられたモデルを改良したものが多く使われている。新田の簡単な紹介で物足りない読者は、直接原論文 (**Smagorinsky and Staff Members, Miyakoda et al.**) にすすんで頂きたい。豊富な図の中でいろいろ考えをめぐらすのも、充実した時間を与えてくれることだろう。一口にいうと、モデルがよく現実の大気に近いように改良されれば確かに結果はよくなる。予想天気図をみた感じが非常に実際のパターンであるといえる。しかし予報官を満足させるためには、擾乱の位置、示度、温度場の深まりなど大規模運動の予報を一層定量的に正確にすると共に、中小規模の現象との関連が必然的に問題となるだろう。

このように、数値予報は大規模擾乱の予報を対象としてスタートしたが、現在次第に大きい目標となりつつあるのが**中小規模擾乱**の数値シミュレーションである。かつて今世紀初頭に、ノルウェー学派によって提起されたいわゆる前線性波動理論は、その後傾圧不安定性による大規模波動の理論におおいかくされてしまっていた感があった。実際の数値予報を通じての経験によって、一方では超長波の重要性が認められると共に、他方では中小規模擾乱に対しても傾圧不安定性を背景とした準地衡風近似のモデルの限界が次第に明らかにされてきた。それらを整理して、中規模擾乱の重要性を指摘したのが **A. Eliassen** である。また理論の方からも **E. Eliassen, Orlanski** をはじめとする前線波動論の新しい立場からのリバイバルがなされた。この間の事情については**浅井・増田：前線波動論の回顧と展望**、によくまとめられている。1968年に日本気象学会がシンポジウムのテーマに取り上げたときの報告が、**中島・吉田・曲田：小低気圧——土佐沖低気圧についてにみられる**。それと**西本**による討論の経過報告を参照して頂けば、現状についての考え方がつかめると思う。このテーマについては、現場からの報告が未整理のまま沢山出されているように筆者には思われる。誰かそれらを総合的に整理して、事実に関してはこれだけのことがいえる、ということを明らかにしてもらえないだろうか。なにしろ中小規模現象についての観測はまだまだ不十分だし、現象の出現する場所が

海上になりがちであるから。

中小規模現象の数値シミュレーションの試みは、英国気象局で先づ名乗りをあげた。現在も進行中であるが、**Bushby and Timpson, Bushby** といった論文に詳しく述べられている。前線とそれに伴う降雨が、傾圧運動の範囲内で一応良く再現されているが、予想通り中小規模の特長の表現に欠けている。その点を更におしすすめようとしているのが **Gambo** である。彼はリチャードソン数のある臨界値をさかきにして、波長の短い傾圧波と前線性波動が存在することを、線型解析と数値実験で示していて興味深い。

中小規模現象の数値シミュレーションは、その複雑さと物理的効果の導入に関して殆んど大気大循環の数値実験に匹敵する内容を有していると思われる。そして今後の発展が大いに注目されるテーマである。最近世界的に各所で着手されはじめたときいているが、文献としては、**Wippermann, Berkofsky and Szillinsky** のトルネードの形成の数値実験などが出はじめた。

(未完)

文 献

(数値実験に関しては、大部分が原論文なので、本文の項目別にまとめて引用順に並べた。)

1. 総論的なもの

- 小倉義光, 1966: 最近の気象力学 (I). 気象研究ノート, **17**, 1-61.
 廣田 勇, 1969: 大気大循環論の紹介. 気象学入門講座 (3), 天気, **16**, 129-133.
 新田 尚, 1969: 気象力学への道. 気象学入門講座 (5), 天気, **16**, 233-236.
 伊藤 宏, 1969: 数値予報を学ぶには. 気象学入門講座 (10), 天気, **16**, 477-480.
 島津康男, 1969: 地球科学のシミュレーション. 科学, **39**, 230-236.
 新田 尚, 1970: 気象力学における数値シミュレーション. 気象研究ノート, **103**, 1-128.

2. 数値予報

- Bjerknes, V., 1904: Das Problem des Wettervorhersage, betrachtet vom Standpunkte der Mechanik und der Physik. Meteor. Zeit., Janur., 1-7.
 Richardson, L.F., 1922: Weather Prediction by Numerical Process, (ペーパー・バックス Dover, Publ., 1965, 236頁, 約800円).
 Charney, J.G., 1951: Dynamic forecasting by numerical process. Compendium Meteor. 470-482.
 Kibel, I.A., 1957: An Introduction to the Hydro-

- dynamical Methods of Short Period Weather Forecasting. (英訳 Pergamon Press, 1963, 383頁, 約6,000円)
- 3. 大気大循環の数値実験**
- Phillips, N.A., 1956: The general circulation of the atmosphere: a numerical experiment. *Quar. J. Roy. Meteor. Soc.*, **82**, 132-164.
- 荒川昭夫, 1963: 大気大循環の数値実験と長期予報の可能性. 東北技術だより, **7**, 34-37.
- 荒川昭夫, 1958: 最近の大気大循環論. 気象研究ノート, **9**, 229-362.
- Mintz, Y., 1964: Very long-term global integration of the primitive equations of atmospheric motion. *WMO Tech. Note.*, No. 66, 141-167. (約4,000円)
- Smagorinsky, J., S. Manabe, and J.L. Holloway, 1965: Numerical results from a nine level general circulation model of the atmosphere. *Mon. Wea. Rev.*, **93**, 727-768.
- Manabe, S., J. Smagorinsky, and R.F. Strickler, 1965: Simulated climatology of a general circulation model with a hydrologic cycle. *Mon. Wea. Rev.*, **93**, 769-798.
- Kasahara, A., and W. Washington, 1967: NCAR global general circulation model of the atmosphere. *Mon. Wea. Rev.*, **95**, 389-402.
- Leith, C.E., 1965: Numerical simulation of the earth's atmosphere. *Methods Comp. Phys*, **4**, 1-28.
- Manabe, S., and B.G. Hunt, 1968: Experiments with a stratospheric general circulation model: I. Radiative and dynamic aspects. *Mon. Wea. Rev.*, **96**, 477-502.
- Manabe, S., J.L. Holloway, Jr., and H.M. Stone, 1969: Tropical circulation in a time integration of a global model of the atmosphere. (未印刷. やがて発表されると思う.)
- Bryan, K., and M.D. Cox, 1968: A nonlinear model of an ocean driven by wind and differential heating. *J. Atmos. Sci.*, **25**, 945-978.
- Manabe, S., and K. Bryan, 1969: Climate calculation with a combined ocean-atmosphere model. *J. Atmos. Sci.*, **26**, 786-789.
- Manabe, S., and K. Bryan, 1969: Climate and the ocean circulation. *Mon. Wea. Rev.*, **97**, 739-827.
- Kikuchi, Y., 1969: Numerical simulation of the blocking process. *気象集誌*, **47**, 29-54.
- 4. 実験予報**
- 新田 尚, 1968: われわれは旬日予報の入口にたっている. うず, No. 1, 気象庁予報部電計室, 1-6.
- Smagorinsky, J., and Staff Members, 1965: Prediction experiments with a general circulation model. *Proceedings Int. Symp. Dyn. Large-Scale Proc. Atmos. (IAMAP/WMO)*, Moscow, 70-134.
- Miyakoda, K., J. Smagorinsky, R.F. Strickler, and G.D. Hembree, 1969: Experimental extended predictions with a nine level hemispheric model. *Mon. Wea. Rev.*, **97**, 1-76.
- 5. 中小規模擾乱**
- Eliassen, A., 1966: Motions of intermediate scale: fronts and cyclones. *Advances in Earth Science*, The M.I.T. Press, 111-138. (約10,000円)
- Eliassen, E., 1960: On the initial development of frontal waves, *Publ. Danske Meteorol. Inst., Meddelse*, No. 13.
- Orlanski, I., 1968: Instability of frontal waves. *J. Atmos. Sci.*, **25**, 179-200.
- 浅井富雄・増田三彦, 1968: 前線波動論の回顧と展望. 月例会ノート, **9**, 日本気象学会関西支部, 13-37.
- 中島暢太郎・吉田泰治・曲田光夫, 1968: 小低気圧——土佐沖気圧について. *天気*, **15**, 359-376.
- 西本清吉(編), 1968: 秋季大会シンポジウム 討論要旨. *天気*, **15**, 493-496.
- Bushby, F.H., and M.S. Timpson, 1967: A 10-level atmospheric model and frontal rain. *Quar. J. Roy. Meteor. Soc.*, **93**, 1-17.
- Bushby, F.H., 1968: Further development of a model for forecasting rain and weather. *Proceedings WMO/IUGG Symp. Num. Wea. Pred.*, Tokyo, (気象庁技術報告第67号) II-75-84.
- Gambo, K., 1970: Characteristic feature of medium scale disturbances in the atmosphere. (気象集誌掲載予定)
- Wippermann, F., L. Berkofsky, and A. Szillinsky, 1969: Numerical experiments on the formation of a tornado funnel under an intensifying vortex. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **95**, 689-702.