

数 値 実 験 と は (2)

新 田 尚*

大気大循環にとっては、その原動力として熱帯地方の積雲対流群が不可欠だし、中小規模現象でも積雲対流の役割は重要である。同様に、積雲対流が決定的役割を果しているものに台風の発達過程がある。そこでの積雲対流の集団効果をどう取扱うか、が最初の大きい課題であったが、**Ooyama, Charney and Eliassen, Ogura, Kuo**等によって一応の解決をみて、円対称な場合については現実の台風に似た発達過程がシミュレートされた。ここにくる迄の迂余曲折した研究の歴史は、これから仕事をはじめられる人々に多くの示唆を与えらると思う。簡単な解説が、岸保によってなされているので参照されたい。ところで鉛直水平2次元の台風の発達がうまくシミュレートされて、一応もっともらしいエネルギーの流れや発達をコントロールしている要素の役割が確かめられたけれども、3次元の場合で非対称性を考慮したときどうなるか、といったことをはじめ、依然として残された問題が多い。最近、**Yamasaki** や **Rosenthal** は、2次元の場合についてプリミティブ方程式モデルを用いることに成功し、台風のような小規模で著るしい現象のより一般的な取扱いの可能性を示した。

低緯度に特に着目した数値シミュレーションも行なわれている。**Krishnamurti** は、実況資料を用いて、いろいろな効果を含んだプリミティブ方程式モデルでいきなり予報しているが、未知の領域ではやはりもう少し時間をかけて、ひとつひとつ確かめるような行き方が必要なのではなかろうか。**Manabe** 等は、先に大気大循環の所で述べたように、実際的な山岳系や海陸分布を含んだ全球的9層モデルで大気大循環の数値シミュレーションを行なったが、特にその結果の中から熱帯地方をとり出して熱帯循環の解析を行なっている。モデル大気のあるまいが、かなり現実的であるから、このモデルがシミュレートした熱帯も相当本物に近い所を示しているとみなせる。例えば、凝結過程を含んだ湿ったモデルで

は、対流圏下部と、対流圏上部から下部成層圏の両方に渦動運動エネルギーが認められ、しかも超長波から短波までスペクトルの分布がはっきりしている。一方、凝結過程を含まない乾いたモデルでは、対流圏下部のエネルギーは弱く、しかも波長の長い波が目立つ。一方、中緯度との運動エネルギーのやりとりを示す効果は、乾いたモデルの超長波領域でとりわけ著るしい。こうした例からもわかるように、数値実験は大気中の未知の機構について、ある程度明確な手がかりを与えてくれる。低緯度地方は、これからしばらく数値実験の絶好の対象となりそうである。

同じく規模は小さいながら顕著な現象として、山越え気流と、それに伴う **hydraulic jump** がある。それを数値的にシミュレートしようとする試みは、水平1次元の場合について、**Houghton and Kasahara, Arakawa and Oobayashi** 等によって着手された。彼等は静力学的平衡状態にある斉一、非圧縮流体の底面にベル状の障害物をおいて、一様に入ってきた流れの中での **jump** 現象を追跡した。この場合には、かなり正確な解析解が求まり、それと数値解とを照合することによって、より深く現象を理解することができる。**Oobayashi** は、これを更に水平2次元の場合に拡張した。大勢は変わらないが、2次元にしても流れの山を迂回する成分にくぐらべて、山を越える成分の方が圧倒的に卓越し、部分的には1次元にみられない現象があらわれることがわかった。この問題は、静力学系の枠の中で一層複雑なモデルで取扱われる方向にあり、一方、**Magata** は非静力学系について山を熱源とした取扱いをしている。力学、熱力学の両方にかかわる効果としてとらえるのも、今後の方向であろう。

気象現象の取扱いでいつも問題となり、またそれ自身、研究対象として面白いものにプラネタリー境界層がある。**黒崎**は、これを大気大循環の下部境界面としてとらえているが、プラネタリー境界層内での気象要素の日変化を再現しようとしたのが、**Estoque, Krishna** であ

* 気象庁予報部電子計算室

る。観測と照合すると結果はもっともらしいし、十分な観測がない部分は、定性的には数値実験で補うことができる。最近 **Sasamori** は、最終的に大循環の数値モデルにくみ入れることを目的として、プラネタリー境界層のモデル化を試み興味深い結果を得ている。こうした仕事は、これからも徐々に積みあげられるものと思うが、大きいスケールの運動をより正確に取扱うためのものと、そういうことを目的とせず、境界層内の微小スケールの現象に焦点をあわせたものとの二つの方向に大別されよう。前者は地面上ばかりでなく、海空の相互作用を考える上でもますます要望されるだろうし、後者は対流現象や乱流論と共に発展していくことだろう。そのいずれの方向でも、数値実験の手法が次第に重要になってきそうである。

対流現象そのものに直接取組んだ仕事も早くから手がけられていて、論文の数も莫大なものであるが、本入門講座(17)で木村竜治氏が取上げているのでここでは省略する。

大気潮汐は昔から気象力学を形成する重要な一分野であるが、最近大気熱潮汐の中で顕著な半日周期の成因をめぐって、観測、線型理論、数値実験の三者が相補い合う形で発展しつつあり、現象の説明及び物理像の構築に関するひとつの典型的な例といえよう。即ち **Siebert** が要約した所から **Kato, Lindzen** と進んできた理論は、水蒸気を主としオゾン副とする太陽放射の吸収因子の役割の重要性を強調した。一方 **Hunt and Manabe** は、先に紹介した大循環の数値モデルに太陽放射の日変化を導入し、人工的に吸収因子の働きを変えていって、主要な要因をさぐり、やはり吸収因子の決定的役割を裏づけた。大気上面の境界条件等まだまだ未解決な要素があって、最終的解決をみるに到っていないが、ここしばらくは賑やかな話題をよびそうである。

Hunt and Manabe は、同じく大循環の数値シミュレーション用のモデルを利用して、大気中の大規模な拡散の数値実験にとりくんでいる。即ち、赤道成層圏上空におかれた発生源からの tracer の半球の拡散や、大気中のオゾン分布の説明をしようという試みで、かなりもっともな結果を得ている。**Hunt** は更に光化学過程が力学過程と共存している場合に実験をすすめているが、上部成層圏から上の大気のみまの数值シミュレーションもいよいよ手をつけられた感がある。既にある程度の観測と理論的考察がなされているから、こうした中間圏以上も含む大気力学にとっても、数値実験は

貴重な研究手段となるだろう。なおオゾンの問題では関口が親切な解説を行なっている。

数値実験で、実際の大気やモデル大気について、いろいろな効果の影響の程度や人為的に与えた急激な変化(ショック)の波及程度を調べることは、特に制御実験(control experiment)とよばれている。これまで紹介してきた数値実験は、多かれ少なかれ制御実験の一種である。

Smagorinsky and Miyakoda は、いろいろな気象要素の相対的な独立性を調べるために、特定の要素に関する情報を突然忘れた場合とそうでない場合について数値的時間積分を行なっている。これは実況資料に基づくひとつのショック実験である。これによると、例えば上層の高度や風の観測さえしっかり整っていれば、地上気圧の大規模なパターンは忘れてもやがて再現される。こうした実験は、**Charney** 等によっても行なわれている。彼等は、人為的誤差を含む場合と含まない場合について、誤差が拡大する模様を追求している。こうした試みは、いずれも GARP の観測計画を樹てるための情報の収集を目的としている。

一方、気象衛星や超圧気球などが盛んに用いられて、観測手段が多岐にわたるようになると、時間的にも齊でない資料も利用して大気の状態を決める必要がある。目的が大規模運動なら、それを最もよく表現する解析法が必要となる。これらは、初期状態問題とか、資料の同化とか、或いは4次元解析とかよばれて、やはりGARP及びそれ以後の気象技術にとって重要な問題となろう。初期状態問題からの接近については、**新田**の紹介を参照されたい。大気中では種々の調節作用が働いているが、ここでは地衡流調節とよばれる作用が重要な背景をなしている。

最近、回転水槽実験が **Williams** によって数値シミュレートされるようになり、**Lorenz** によって行なわれた初期の理論的考察で殆んど無視されていた壁面の摩擦境界層の決定的役割が認識されだして、回転水槽内で実現している回転流体の三次元的運動を理解しようとする動きが活発化してきて注目される。流体物理という立場から気象力学をみなおす上でも、日本で盛んになってほしい分野である。

本文の元来の目的ではないが、近頃面白くなってきたのが、micro-physical process と中規模現象の結合で、そこでも数値実験の手法が次第に重要な役割を果たした。例えば身近かな所では、対流雲内の下降気流と雨滴

に関する **Takeda** の数値計算, **Syōno and Kimura** の凝結過程の数値実験, **Uchida and Ohta** の降水粒子の成長に関する数値シミュレーションなどがあるし, 最近では対流の life cycle に降水粒子の効果を考慮したり, 雷発生のシミュレーションの試みもあるときく。

以上断片的になったが, 数値実験の手法はこのようにして気象学の広い範囲にわたって利用されており, 確実に有用な情報を提供してくれている。一方では学問の進歩に貢献しつつ, 他方では予報技術の物理的基礎づくりに役立っている。(例えば **Smagorinsky** は, 最近そういった観点からの展望を試みている。) このような傾向は, 大気科学と密接に結ばれた海洋学の方でも盛んになってきている。例えば, 小倉・堀部・梶浦・上田・吉田の座談会: 海洋の科学や, 高野, 宮崎を参照されたい。北極海の氷分布が周囲の熱変化に対する反応の数値予報の試みが **Maykut and Untersteiner** によってなされている。

一方, **Leovy and Mintz** は火星大気の大循環の数値シミュレーションに, 地球大気に対する2層モデルを採用し, 現在わかっているパラメーターや大気要素の分布をもとにした火星大気の様相をさぐっている。例えば中緯度で傾圧効果と半日周期変化が同じ位の振巾をもつといったような, われわれの想像をかきたてる結果を出している。

ところで数値実験で行なわれるような微分方程式を差分表示におきかえた結果は, 普通, 本来の微分方程式の解をあらわしていると信奉されているが, やはり問題を含む所である。**Forsythe and Wasow** (和訳あり) や **Richtmyer and Morton** といった所がその問題に対処している。数値実験にとっては数値計算技術は不可決だが, それに関しては, 伊藤(入門講座10)を参照されたい。**Methods in Computational physics** (第3巻, 4巻)も中々示唆に富んでいるし, 雑誌では **J. Comp. Physics** (年4冊発行)がよさそうである。

数値実験ではともすれば, 計算結果の山に埋もれたり, ときには高価な遊びになりがちだが, 常に研究の流れの中での自分の位置づけを明らかにしておきたい。

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。)

6. 台風の発達過程と熱帯気象

Ooyama, K., 1969: Numerical simulation of the life cycle of tropical cyclones. *J. Atmos. Sci.*,

26, 3-40.

Charney, J.G., and A. Eliassen, 1964: On the growth of the hurricane depression. *J. Atmos. Sci.*, **21**, 67-75.

Ogura, Y., 1964: Frictionally controlled, thermally driven circulation in a circular vortex with application to tropical cyclones. *J. Atmos. Sci.*, **21**, 610-621.

Kuo, H.L., 1965: On formation and intensification of tropical cyclones through latent heat release by cumulus convection. *J. Atmos. Sci.*, **22**, 40-63.

岸保勘三郎, 1968: OMEGA. 6 及び 7.

Yamasaki, M., 1968a: Numerical simulation of tropical cyclone development with the use of primitive equations. *気象集誌*, **46**, 178-201.

Yamasaki, M., 1968b: A tropical cyclone model with parameterized vertical partition of released latent heat. *気象集誌*, **46**, 202-214.

Rosenthal, S.L., 1968: Preliminary results from numerical experiments with a primitive equation model designed to simulate the development of tropical cyclones. *Proceedings. WMO/IUGG Symp. Num. Wea. Pred.*, Tokyo (気象庁技術報告第67号), III-49-59.

Krishnamurti, T.N., 1968: Experiments in numerical prediction in low latitudes. 同前, III-61-71.

Manabe, S., J.L. Holloway, Jr., and H.M. Stone, 1969: (文献 3. 大気大循環の数値実験の項参照).

7. 山越え気流と hydraulic jump

Houghton, D.D., and A. Kasahara, 1967: Nonlinear shallow fluid flow over an isolated ridge. *Comm. Pure Appl. Math.*, **21**, 1-23.

Arakawa, S., and T. Oobayashi, 1968: On the numerical experiments by the method of characteristics of one-dimensional unsteady airflow over the mountain ridge. *Pap. Meteor. geophys.*, **19**, 341-361.

Oobayashi, T., 1969: A numerical study of two-dimensional airflow over an isolated mountain. *気象集誌*, **47**, 第2号掲載予定.

Magata, M., 1968: On the study of the airflow over mountains by the numerical experiment. *Proceedings. WMO/IUGG Symp. Num. Wea. Pred.*, Tokyo (気象庁技術報告第67号), III-51-63.

8. プラネタリー境界層

黒崎明夫, 1967: 大循環における境界層の問題. *グロースベッター*, **5**, 45-49.

Estoque, M.A., 1963: A numerical model of the atmospheric boundary layer. *J. Geophys. Res.*, **68**, 1103-1113.

Krishna, K., 1963: A numerical study of the diurnal

- variation of meteorological parameters in the planetary boundary layer. 1. Diurnal variation of winds. *Mon. Wea. Rev.*, **96**, 269-276.
- Sasamori, T., 1969: A numerical study of atmospheric and soil boundary layers. NCAR Manuscript No. 69-91.
- 9. 大気熱潮汐**
- Siebert, M., 1961: Atmospheric tides. *Adv. Geophys.*, **7**, Academic Press, 105-187.
- Kato, S., 1966: Diurnal atmospheric oscillation: I. Eigenvalues and Hough functions. *J. Geophys. Res.*, **71**, 3201-3209.
- Lindzen, R.S., 1966: On the theory of the diurnal tide. *Mon. Wea. Rev.*, **94**, 295-301.
- Hunt, B.G., and S. Manabe, 1968: An investigation of thermal tide oscillations in the earth's atmosphere using a general circulation model. *Mon. Wea. Rev.*, **96**, 753-766.
- 10. 大規模な拡散の数値実験**
- Hunt, B.G., and S. Manabe, 1968: Experiments with a stratospheric general circulation model: II. Large-scale diffusion of tracers in the stratosphere. *Mon. Wea. Rev.*, **96**, 503-539.
- Hunt, B.G., 1969: 同前. III. Large-scale diffusion of ozone including photochemistry. *Mon. Wea. Rev.*, **97**, 287-306.
- 関口理郎, 1969: オゾン層の光化学理論. *化学の領域*, **23**, 359-366.
- 11. 初期状態問題とショック実験**
- Smagorinsky, J., and K. Miyakoda, 1968: The relative importance of variables in initial conditions for numerical predictions. *Proceedings WMO/IUGG Symp. Num. Wea. Pred.*, Tokyo, (気象庁技術報告第67号), V-1-2.
- Charney, J.G., 1965: A global observation experiment. *Proceedings Int. Symp. Dyn. Large-Scale Proc Atmos (IAMAP/WMO)*, Moscow, 22-36.
- Charney, J.G., M.Halem, and R. Jastrow, 1969: Use of incomplete historical data to infer the present state of the atmosphere. *J. Atmos. Sci.*, **26**, 1160-1163.
- 新田 尚, 1968: 予報モデルと初期値について. *OMEGA*, **6**, **7**, 気象庁予報部電計室有志.
- 12. 回転水槽実験**
- Williams, G.P., 1967: Thermal convection in a rotating fluid annulus. Part. 1. *J. Atmos. Sci.*, **24**, 144-161; Part 2. *J. Atmos. Sci.*, **24**, 162-147; Part 3. *J. Atmos. Sci.*, **25**, 1034-1045.
- Lorenz, E.N., 1962: Simplified dynamic equations applied to the rotating-basin experiments. *J. Atmos. Sci.*, **19**, 39-51.
- 13. micro-physical process**
- Takeda, T., 1966: The downdraft in the convective cloud and raindrops—a numerical computation. *気象集誌*, **44**, 1-11.
- Syöno, S., and R. Kimura, 1969: Numerical simulation of nucleation process of model molecules. *気象集誌*, **45**, 377-390.
- Uchida, E., and S. Ohta, 1969: A simulation approach to the formation of precipitation particles using the Monte Carlo method. *気象集誌*, **47**, 279-291.
- 14. その他**
- Smagorinsky, J., 1969: Problems and promises of deterministic extended range forecasting. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **50**, 286-311.
- 小倉義光・堀部純男・梶浦欣二郎・上田誠也・吉田耕造, 1969: (座談会) 海洋の科学. *数理科学*, **7**, 11-20.
- 高野健三, 1969: 大循環のシミュレーション. 同前, 22-29.
- 宮崎正衛, 1969: 高潮予報のシミュレーション. 同前, 30-35.
- Maykut, G.A., and N. Untersteiner, 1969: Numerical prediction of the thermodynamic response of arctic sea ice to environmental changes. *Memorandum, RM-6093-PR*, The RAND Corporation, 173頁.
- Leovy, C., and Y. Mintz., 1969: Numerical simulation of the atmospheric circulation and climate of mars. *J. Atmos. Sci.*, **26**, 1167-1190.
- Forsythe, G.E., and W.R. Wasow, 1960: *Finite-difference Methods for Partial Differential Equations.* (Applied Mathematics Series, I. S. Sokolnikoff 編), John Wiley & Sons, Inc., 444頁, 約5000円, (和訳: 藤野精一訳: 偏微分方程式の差分法による近似解法(上) 294頁, 1400円, (下) 249頁, 1300円, 吉岡書店),
- Richtmyer, R.D., and K.W. Morton, 1967 (第2版): *Difference methods for initial-value problems.* Interscience Publishers, 405頁, 6000円.
- 伊藤 宏, 1969: (文献 **1**. 総論的なものの項参照)
- Alder, B., S. Fernbach, and M. Rotenberg 編. 1964: *Methods in Computational Physics.* 第3巻, 386頁, 5400円, 1965: 同前, 第4巻, 385頁, 5600円, Academic Press.
- Journal of Computational Physics:* Academic Press. 発行, 年4冊, 約10,000円.