

気象力学・気象熱力学

浅井 富雄*

1. はじめに

1960年代に入って気象学の進歩は目覚ましく、文献は洪水のように氾濫し始めた。それと共に、教科書、総合報告、解説類もたくさん出回るようになり、一般の読者のみならず専門家の便宜にも供されている。ここでは、1970年以降に新しく刊行された気象力学の基礎を学ぶのに役立つ出版物を掲げる。1970年以前のものについては、前回の入門講座のなかの「気象力学への道」(新田, 1970)を参照して欲しい。1970年以前ものは重複を避けるために割愛したのであって、新しい図書が必ずしも良書とは限らない。とりわけ、気象力学の基礎は時代と共に変わるものではなく、古典的名著も少なくない。解説書類はガイド付き団体旅行のようなもので、要領よく短時間で全体像が分かったような気持ちにさせてくれる。しかし、日頃経験するように、自分自身の足で歩き、目で確かめ、道に迷い、袋小路に入ったりしつづ目的に達する、そのような勉強法が必要である。

2. 気象力学とは

地球大気は、窒素、酸素、アルゴン、……、炭酸ガス、水蒸気などから成る混合気体である。対流圏、成層圏を含む少なくとも数十kmの高度までの大気は、ほぼ電氣的に中性の連続体として取り扱える。一方、大気中の水成分は、固相、液相、気相間を転移し、その際潜熱を放出あるいは吸収する。また、大気構成気体は、太陽からの短波放射や地球表面からの長波放射を選択的に吸収する。このように、大気は熱的にきわめて活発な流体である。回転する地球(惑星)大気の運動の機構を、熱力学と流体力学に基づいて説明することを目指す分野が気象力学であり、ここでは気象熱力学を含めた広い意味で用いることにする。

大気運動を説明するアプローチを大別すると二通りある。一つは観測資料に基づき現象の構造や時間変化を解

析し、その解析例を集積してそこから現象の法則性を抽出し、モデルをより精緻なものにしつづ現象の理解に迫る。いわば帰納的方法であり、総観気象学はそのカテゴリーに属している。他の一つは既知の物理法則、すなわち、液体力学および熱力学の法則に基礎をおいて現象の機構を解きほぐし、変動を予測し、それを実況と対比することを通して現象の理解に接近しようとする演繹的方法であり、気象力学と呼ばれるものである。

総観気象学においては、気象観測網は不十分なため、力学的な知見を部分的に採用したり、これまでの観測・解析により蓄積された知識を利用してその不足をカバーしつづ解析を行ない、実態の把握を第一義的目標としている。一方、気象力学の場合にも、大気の運動を支配する物理法則あるいはその定式化がすべて確立されているわけではないから、部分的に仮説や経験的知識を用いて現象をモデル化したり、その変動を予測しようとする。これまで、両者はそれぞれの欠点を補い合って大気現象の解明に寄与してきた。

ともあれ、大気の運動法則を定式化した運動方程式を与えられた初期条件と境界条件のもとで解くことによって、将来の大気の状態を決定論的・定量的に予測することが気象力学の目標である。既に、19世紀末から上記の線に沿った研究が V. Bjerknes らによって行なわれ、1910年代に Richardson は非線型の流体力学方程式を数値的に解き、天気の力学的数値予報を試みた。その結果は失敗に終わったが、第2次世界大戦後、その失敗の原因の多くが克服され、今日の数値予報として発展しつづめることは周知の通りである。

3. 1970年代の気象力学

第2次世界大戦後、気象学のめざましい発展の過程で、大気中には物理的性質を異にした空間、時間スケールの異なる現象が共存し、それらが相互に作用し合っているという認識が生まれた。1960年代はスケール概念が定着し、そのなかで大規模大気運動の力学が確立した

* T. Asai, 東京大学海洋研究所

時期である。最近出版された Holton や 小倉 の気象力学の入門書にも色濃く反映している。筆者らの世代が学生時代に読んだ気象力学の教科書は、理論と実際の現象の間にはかなりの隔りがあり、ごく限られた現象への理論の部分的な応用(適用)例として両者が結びつけられていた。このような相互の違和感が今日の教科書では全く取り除かれている。

1970年代の気象力学の特徴を一口で言えば、単に対流圏の大規模運動の力学にとどまらず、雲などを含む中小規模現象や長期の気象変動の分野にも、また、上層大気、地球以外の惑星大気、境界層、熱帯気象へと多種多様な大気現象の分野にも浸透し、気象学の一分野の学問としてとどまらず、気象学全般の血となり肉となりつつある時代とみることができるといえる。

4. 一般基礎

とりあえず、一般基礎と専門基礎に分けよう。前者は気象についての勉強をするが、必ずしも気象力学の分野に進むとは限らない人、あるいは気象学以外の分野の専門家で気象力学に関心をもつ人を対象とし、後者は将来気象力学の分野へ進もうとする人を対象とする。もっとも、両者を区別する明確な線があるわけではない。

気象学入門書の一部にたいいてい気象力学のさわりが手短かに触られている。山本 義一：新版気象学概論(第3, 5章)(1976)、Wallace・Hobbs: *Atmospheric Science* (第2, 8章)(1977)、Houghton: *The physics of atmosphere* (1977)。これによって気象学の概要と気象力学の位置づけを理解しておいて欲しい。

数式にわずらわされずに環境としての大気の大規模な物理像——エネルギーや物質の循環——を把握するには、Strahler: *Environmental geosciences*(1973)がある。理工系の学生には、Eskinazi: *Fluid mechanics and thermodynamics of our environment* (1975) や Scorer: *Environmental aerodynamics* (1978) は平易ではないがとりつき易いかもしれない。Scorer の新刊書は、*Natural aerodynamics* (1958) に全面的に手入れをし大幅に増補したユニークな教科書である。

最近のめざましい気象学の発展は、一般気象学のなかで気象力学の基礎にかなりの頁数をさくことを不可能にした。やはり、気象力学の専門書をひもとかざるを得ない。最近の代表的な教科書は、Holton: *An introduction to dynamic meteorology* (1972) と 小倉：気

象力学通論(1978)であろう。そして、両者には多くの共通性が見られる。前回の入門講座でも紹介された小倉の「最近の気象力学(Ⅰ)」(気象研究ノート, 17, 1966)の続編が待たれていたが、前回積み残されていた傾圧不安定を中心とした大規模擾乱の力学的安定性の問題、大気波動論、大気大循環、大気境界層、さらに海洋の大規模運動も加え、また、内容も読み易くなっている。スケール概念、それを通しての大気現象の認識が近代気象力学の特徴であり、複雑な大気現象の解明に貢献したとする著者の考えが滲み出ている。本書は、気象力学の骨格を与えることを目的としているので、たとえば、Palmen・Newton: *Atmospheric circulation system*(1969)など、大気運動の実態に関する教科書と併せ読むことによって、読者自身がその骨組みに肉付けをし、さらに内容豊かなものにすることができる。

準地衡風理論を中心に据えた Holton らに比して、Dutton: *The ceaseless wind—an introduction to the theory of atmospheric motion* (1976) は古いスタイルの教科書であるが、広い幅の読者層に当てている。Van Mieghem: *Atmospheric energetics* (1973) は、レベルは高くなるが種々のスケールの運動系とそれらの間の相互作用におけるエネルギー過程を理解するためのバックグラウンドを与えてくれる。Iribarne・Godson: *Atmospheric thermodynamics* (1973) は特に新しい内容を含んではいないが、数少ない気象熱力学の専門書である。Reuter: *Die Wettervorhersage* (1976) は、天気予報の力学的背景と総観気象学との合本で、昔、よく読まれた Petterssen: *Weather analysis and forecasting* に似ている。

一般基礎として、「流体力学」「熱力学」の教科書により流体の運動法則や熱力学法則の物理的意味や数学的表現、移流、渦度、循環、発散、エネルギーその他諸々の概念は会得しなければならないが、その理解は具体的な問題に自ら対処することによって確かめられる。数学の公式も暗記ではなく応用問題を解くことによって自分のものとなるように、基礎と応用との往復運動によって基礎概念の理解も深まってゆく。したがって、力学の応用方面にも少し目を向けることは必要である。数値予報はその代表例で、気象力学の教科書はほとんど一部をその記述にあてているが、もっとまとまったものとしては、Haltiner: *Numerical weather prediction* (1971)、間もなく出る 岸保勤三郎他：新しい数値予報(1978)、Phillips: *Models for weather prediction* (1970)、

Monin: Weather forecasting as a problem in physics (英訳 1972) などがあつた。前二者は特に内容が具体的でとりつき易い。

5. 専門基礎

理工系学部で学ぶ流体力学は、多くの場合均質非圧縮完全流体の力学に限られているので、今後気象力学を目指す人にはもの足りない。回転流体、成層流体、圧縮性流体、粘性流体に関する基礎理論、波動論、安定性理論、乱流論などについての勉強もしたくなるであろう。これらについては、前回の入門講座で紹介済みの **Greenspan: The theory of rotating fluids**, **Batchelor: The theory of homogeneous turbulence**, **Lin: The theory of hydrodynamic stability**, **Chandrasekhar: Hydrodynamic and hydromagnetic stability**, **Monin・Yaglom: Statistical fluid mechanics** などの他に、**Turner: Buoyancy effects in fluids** (1973), **Tolstoy: Wave propagation** (1973), **Beer: Atmospheric waves** (1975), **Gosard・Hooke: Waves in the atmosphere** (1975), **田中・加藤: 大気中の内部重力波** (1975), **Holton: The dynamic meteorology of the stratosphere and mesosphere** (1975), **巽・後藤: 流れの安定性理論** (1976) などが付け加えられる。**Reid 編: Geophysical fluid dynamics** (1971), **Veronis: The analogy between rotating and stratified fluids** (1970), **Kuo: Dynamics of quasi-geostrophic flows and instability theory** (1973) など地球流体力学の立場からのレビューであり、回転流体力学 (アドヴァンスト・コース) でさらに詳しい文献が用意される。

Morel 編: Dynamic meteorology (1973) は、フランス国立宇宙研究センターで1970年開かれた夏季講座の講義録である。**Charney: Planetary fluid dynamics** (MIT での講義内容とほぼ同じ), **Phillips: Principles of large scale numerical weather prediction** (Annual Review of Fluid Mechanics 第2巻の Models for weather prediction を参照), **Lilly: Sub-synoptic scales of motion and two-dimensional turbulence**, **Monin: Boundary layers in planetary atmospheres** (Annual Review of Fluid Mechanics 第2巻の The atmospheric boundary layer を参照), **Queney: Transfer and dissipation of energy by mountain waves** などが含まれており、大学院修了程度である。

大気大循環論は気象力学の精華ともいえる。やや入手

しにくいかもしれないが、最近の GARP Publications Series はその現状や将来の動向を考える上で参考になる。Methods in Computational Physics の第17巻 (1977) や **Morel: Atmospheric Dynamics and the numerical simulation of atmospheric circulation** (1973) は、米 (NCAR, UCLA, GFDL), 英、豪などの大循環モデルを概観するのに役立つ。**Miyakoda: Weather forecasts and the effects of the sub-grid scale processes** (1976) は、1975年ヨーロッパ中期予報センターで開かれた中期予報 (~10日先の天気予報) の科学的基礎に関するセミナーでの講義録である。数値予報の現状と改善の可能性、とりわけ sub-grid-scale パラメタリゼーションについて詳しい。**気象庁予報部: 数値予報による延長予報** (1978) も併せて読むとよい。ここで用いられる数値計算法の基礎を固めたいならば、**新田他: 気象力学に用いられる数値計算法** (1972), **Marchuk: Numerical methods in weather prediction** (1974), **Meisinger・Arakawa: Numerical methods used in atmospheric models** (1976), **Kreiss・Olinger: Methods for the approximate solution of time-dependent problems** (1973) などがあつた。

最近、わが国の気象学会でも境界層に関する研究発表が著しく増えている。その分野の学問の発展段階にもよるが、断熱大気運動に基づく大規模気象の短期予報 (1~2日予報) の基礎が固まり、予測期間の延長と局地 (中小規模) 気象の予測への関心の高まり、大気環境の人為的汚染の実態の把握や保全などの社会的要請などが強いインパクトを与え、大気境界層の実態や変動機構、エネルギーや運動量の乱流輸送や乱流構造に対する研究が増大したものと思われる。**Monin: The atmospheric boundary layer** (1970), **Brown: Analytical methods in planetary boundary-layer modelling** (1974), **Plate: Aerodynamic characteristics of atmospheric boundary layers** (1971), パラメタリゼーションに重点を置いた論文集の **Wippermann: The planetary boundary layer of the atmosphere** (1973), 米国気象学会主催の講義ノート **Haugen 編: Workshop on micrometeorology** (1973) など、GARP の影響を強く反映しているものもあるが現状サーベイにはよい。大気境界層を本格的に勉強しようとする人には、前述の **Monin・Yaglom** (英訳, 1971) の他に、**島貫: 境界層と乱流** (1973), **Tennekes・**

Lumley: A first course in turbulence (1972) などがあ

る。
気象力学のユニークな側面の一つは水の相変化や降水を伴う大気力学である。しかしながら、これが現実の問題となってきたのは1960年代以降であり、雲力学として発展しつつある。湿潤大気学として体系化されるには尚早であろう。

Mason: The physics of clouds (1971), **Mason: Clouds, rain and rainmaking** (第2版) (1975),

Rogers: A short course in cloud physics (1976)

など雲物理学の好著はあるが、いずれも微物理過程が中心となっている。実験室で再現し得る多くの微物理過程の理論的基礎は、再現し難い巨規的力学効果に比してしっかりしているからであろう。ドップラ・レーダなどによる雲内の気流系の観測が実用化されると、雲や降水の微物理過程と雲内外の気流との相互作用、また雲の集団の組織化と大規模擾乱との相互作用など、雲力学の発展が期待される。**Pruppacher 編: Cloud dynamics** (1976), **Cotton: Theoretical cumulus dynamics** (1975), **Simpson: Precipitation augmentation from cumulus clouds and systems**(1975), 浅井: 積雲対流(1975), 山岬: 台風の構造と発達力学(1976)などは現状や動向を把握するのに便利である。

以上、参考図書はしぼるつもりであったが、幅広い読者層を考えているうちかなりの数に達してしまった。たくさんの図書に目を通すことがベストではない。要は、力学の基本的概念や法則を正確に身につけることである。多くの参考書をつまみ食いするよりは、数は少なくても熟読玩味することが大切である。読みの深さに応じておのずから大気現象の理解の深さにも差異が生ずるのであろう。

文献

1970年以降に発行された教科書と若干の総合報告書に限定した。1970年以前のものについては前回の入門講座「気象力学への道」(新田尚, 1970)を、論文については今回の入門講座のアドヴァンスト・コースの関連分野を参照していただきたい。

一般基礎

- 山本義一, 1976: 新版気象学概論, 朝倉書店, 235 pp.
Wallace, J.M. and P.V. Hobbs, 1977: Atmospheric science—An introductory survey, Academic Press, 467 pp.
Houghton, J.T., 1977: The physics of atmosphere, Cambridge Univ. Press, 203 pp.

Holton, J.R., 1972: An introduction to dynamic meteorology, Academic Press.

小倉義光, 1978: 気象力学通論, 東大出版会, 249 pp.

Dutton, J.A., 1976: The ceaseless wind—an introduction to the theory of atmospheric motion, McGraw Hill, Inc., 579 pp.

Iribarne, J.V. and N.L. Godson, 1973: Atmospheric thermodynamics, D. Reidel Publ. Co., Boston.

Van Mieghem, J. 1973: Atmospheric energetics. Clarendon Press, 306 pp.

Eskinazi, S., 1975: Fluid mechanics and thermodynamics of our environment, Academic Press, 422 pp.

Strahler, A.N. and A.H. Strahler, 1973: Environmental geosciences: Interaction between natural systems and man, Hamilton Publ. Co., 511 pp.

Scorer, R.S., 1978: Environmental aerodynamics, Ellis Horwood Lmt., 488 pp.

Reuter, H., 1976: Die Wettervorhersage-Einführung in die theorie und Praxis, Springer-Verlag, 208 pp.

専門基礎

Turner, J.S., 1973: Buoyancy effects in fluids, Cambridge Univ. Press, 367pp.

Veronis, G., 1970: The analogy between rotating and stratified fluids, Ann. Rev. Fluid Dyn., 2, 37~66.

Reid, W.H. ed., 1971: Geophysical Fluid Dynamics, Mathematical problems in the geophysical sciences, 1, Amer. Math. Soc., 383pp.

Tolstoy, H.L., 1973: Wave propagation, McGraw-Hill Inc., 466pp.

Kuo, H.L., 1973: Dynamics of quasi-geostrophic flows and instability theory, Advances in Appl. Mech., 13, 247~330.

Beer, T., 1975: Atmospheric waves, Adam Hilger, 300pp.

Gossard E.E. and W.H., Hooke, 1975: Waves in the atmosphere—Atmospheric infrasound and gravity waves: Their generation and propagation, Elsevier, 456pp.

田中浩, 加藤進, 1975: 大気中の内部重力波, 気象研究ノート, 126, 72pp.

巽友正, 後藤金英, 1976: 流れの安定性理論, 産業図書, 275pp.

Morel, P. ed., 1973: Dynamic meteorology, D. Reidel Publ. Co., Boston, 622pp.

Morel, P., 1973: Atmospheric dynamics and the numerical simulation of atmospheric circulation, Lecture Notes in Physics, 18, 12~71.

Holton, J.R., 1975: The dynamic meteorology of

- the stratosphere and mesosphere, *Met. Monogr.*, 15, No. 37, 216pp.
- Chang, J. ed., 1977: General circulation of the atmosphere, *Methods in Computational Physics*, 17, Academic Press, 337pp.
- 数値予報**
- Haltiner, G. J., 1971: Numerical weather prediction, John Wiley & Sons Inc., 317pp.
- Phillips, N.A., 1970: Models for weather prediction, *Annual Review of Fluid Mechanics*, 2, 251~292.
- Monin, A.S., 1972: Weather forecasting as a problem in physics (英訳版), MIT Press, 199pp.
- 岸保勘三郎他, 1978: 新しい数値予報, 気象研究ノート, 134.
- 新田 尚他, 1972: 気象力学に用いられる数値計算法, 気象研究ノート, 110, 158pp.
- Marchuk G.I., 1974 (英訳): Numerical methods in weather prediction, Academic Press, 277pp.
- Kreiss, H. and J. Oliger, 1973: Methods for the approximate solution of time-dependent problems, *GARP Publ. Series*, No. 10, WMO, 103pp.
- Miyakoda, K., 1976: Weather forecasts and the effects of the sub-grid scale processes, *Seminars on Scientific Foundation of Medium Range Weather Forecasts*, 380~593.
- 気象庁予報部, 1978: 数値予報による延長予報, 122pp.
- 境界層の力学・乱流論**
- Haugen, E. ed., 1973: Workshop on micrometeorology, *Amer. Met. Soc.*, 392pp.
- 島貫陸, 1973: 境界層と乱流, 気象研究ノート, 114, 1~69.
- Tennekes, H. and J. L. Lumley, 1972: A first course in turbulence, MIT Press, 300pp.
- Brown, B.A., 1974: Analytical methods in planetary boundary-layer modelling, Adam Hilger, 147pp.
- Wippermenn, F., 1973: The planetary boundary-layer of the atmosphere, *Deutscher Wetterdienst*, 346pp.
- Csanady, G. T., 1973: Turbulent diffusion in the environment (*Geophysics and Astrophysics Monograph* 3), D. Reidel.
- Monin, A. S. and A. M. Yaglom, 1971 (英訳): *Statistical Fluid Mechanics*, MIT Press, 1, 769 pp.; 2, 874pp.
- Monin, A.S., 1970: The atmospheric boundary layer. *Annual Review of Fluid Mechanics*, 2, 225~250.
- Plate, E., 1971: Aerodynamic characteristics of atmospheric boundary layers, U. S. Atomic Energy Commission. 190pp.
- 雲力学**
- Pruppacher, H. R. ed., 1976: Cloud dynamics, Contributions to current research in geophysics, 2, Birkhauser Verlag Basel, *Pure and Applied Geophysics*, 113 (1975), 713~1084 reprint.
- Simpson, J., 1976: Precipitation augmentation from cumulus clouds and systems: Scientific and technological foundations, 1975, *Adv. in Geophy.*, 19, 1~72.
- Cotton, W.R., 1975: Theoretical cumulus dynamics, *Rev. Geophys.*, 13, 419~448.
- 浅井富雄, 1975: 積雲対流, 海洋学講座3, 東大出版会, 85~112.
- 山岬正紀, 1976: 台風の構造と発達の力学, 気象研究ノート, 129, 1~64.
- Rogers, R. R., 1976: A short course in cloud physics. Pergamon Press, 227pp.
- Mason, B. J., 1971: The physics of clouds, Clarendon Press, 671pp.
- Mason, B. J., 1975 (2nd ed.): Clouds, rain and rainmaking, Cambridge Univ. Press, 189 pp.