

対流現象を理解するために

木村 竜 治\*

1. まえがき

対流(正確に言えば熱対流)とは、流体の運動に伴って熱が運ばれる現象一般を指し、伝導、放射とならぶ熱伝達の一形式である。注)しかし、気象学においては、暗黙のうちに対流の意味を限定して使う傾向がある。すなわち、大気下層に与えられた熱を上方に伝える小規模な上下運動のみを対流と呼び、南北の水平温度差を解消するための大規模な大気の運動は、対流とは呼ばない。入門講座では大気の大規模な運動に関して、新田<sup>解1</sup>、広田<sup>解2</sup>があるので、この稿では主に上下の熱輸送に関連した対流現象を対象にする。大気中の対流は、水平スケールが1 km 以下(下層大気中の対流)、1 km から10km(積雲対流)、10km から100km(積雲集合の対流、中規模セル状対流)の3種に分類できるが、まだ、まとまった大系ができていない。従って、直接論文に当たって勉強せざるを得ない面が多く、この稿では論文紹介に重点をおく。

2. 対流の基礎

3.1 スケール・アナリシス 対流現象を理論的に調べようとする場合、まず対流運動をうまく表現する方程式系を導かなければならない。この操作は scale analysis と呼ばれ、対流に限らず気象力学の出発点として重要である。小倉<sup>教1</sup>はこの点を詳しく扱っている。論文では Ogura and Phillips<sup>論1</sup>が良い。

2.2 セル状対流を理解するために 下面を一樣に熱せられ上面を一樣に冷された粘性流体中に生じる対流現象は、ベナール(Bénard)が行なった室内実験以来、流体力学的不安定の問題として、理論的にも実験的にも、もっとも詳しく調べられており、対流の基本形と見なすことができる。

Chandrasekhar<sup>教2</sup>はこの問題の線型安定論を知るのに絶好の教科書である。数学的扱いが懇切丁寧で、線型

安定論の手法を手取るように教えてくれる。回転がある場合とない場合とを扱い、室内実験との比較も行なう。気象学関係では Sutton<sup>教3</sup>に線型理論の紹介がある。原論文に直接当たりたい方は、Rayleigh をはじめとする主要論文をまとめた Saltzman<sup>論2</sup>がある。ここにはベナール問題の他に、水平温度傾度がある回転流体中の対流(傾圧不安定波)に関する古典論文も載っている。

非線型理論になると、現在活発に研究が進められている段階で、まとめて述べた書物はなく、直接論文に当たって勉強しなければならない。線型理論を基にした非線型理論として Stuart<sup>論3</sup>、Malkus & Veronis<sup>論4</sup>が参考になる。乱流状態の対流の構造は、まだ十分に解明されていないが、Malkus<sup>論5</sup>、Kracichman<sup>論6</sup>が手掛りを与えてくれる。数値実験に興味のある方は Deardorff<sup>論7</sup>、Ogura and Yagihashi<sup>論8</sup>、Chorin<sup>論9</sup>を参照の事。Ogura and Yagihashi は室内実験との比較を詳しく行ない、Chorin は対流運動を例にあげて数値計算法の問題点を述べている。

2.3 実験的アプローチ 以上は主に数学を手掛りにするルートであるが、物理的側面からアプローチすることもできる。Chandrasekhar<sup>教2</sup>が問題を限定して厳密に扱うのに対し、Scorer<sup>教4</sup>はまったく対照的な方法を取る。茶わんの中の紅茶の運動(対流ではないが)からロスビー波まで非常に多くの現象を取り上げ、渦度や浮力のような物理概念を用いて説明を行なう。対流現象を物理的に理解し問題点を見つけるのには示唆に富む本であるが、完全に理解するには相当の物理的素養を要する。最後の章に研究方法論を述べているのが参考になる。

理論的に扱うのがむずかしい非線型現象も、室内実験で容易に再現できる場合があり、室内実験も有効な研究手段である。ベナール型対流に関する室内実験の古典論文は Chandrasekhar<sup>教2</sup>に引用されている。モデル実験に関しては Brunt<sup>総1</sup>、Fultz<sup>総2</sup>がある、少し古いですが、気象学ハンドブック<sup>総3</sup>、鈴木<sup>総4</sup>、藤原<sup>総5</sup>にも対流の記述がある。モデル実験の問題点は Rouse<sup>総5</sup>が扱っている。

注) 流体の運動が浮力によって生じるものを自由(又は自然)対流、その他の原因によって生じるものを強制対流という。

\* 東京大学海洋研究所

実験と自然現象の比較は孫野<sup>解3</sup>が興味深い。

### 3. 下層大気中の対流を理解するために

手短かに全体を知るためには雲物理の教科書<8, 9, 10>を見るとよい。積雲の発生に関連して下層大気中の対流に触れている。接地境界層内の対流は Priestley<sup>教6</sup>に詳細な記述がある。しかし観測事実の紹介に比べて、理論的扱いが簡略であり、大気乱流論の手法を勉強するには Lumley and Panofsky<sup>教7</sup>の方が教育的に書かれている。自由大気中の対流については Woodward<sup>論10</sup>があるが、モデルの紹介が主で、観測事実の記述は少ない。これに対し、Vulfson<sup>論11</sup>は著者の行なった膨大な観測をまとめたもので、統一した観測及び解析方法により、いろいろの条件下の対流の性質がすっきりとまとめられている。しかし温度変動の観測が主で、対流運動の形を決定することができず、著者自身、浮力を持った気塊の形を、連続的な plume (又は jet) と仮定した場合、および孤立した thermal (又は bubble) と仮定した場合とのそれぞれについて解析を行なっている。

この事からわかるように、下層大気中では、対流のパターンがまだ良くわかっておらず、理論的に扱おうとするためには、まず plume, thermal (及び cell 状対流) の基礎知識を知る必要がある。plume 及び thermal については Scorer<sup>教4</sup>に、plume については Priestley<sup>教6</sup>に (それぞれ著者自身が研究した課題でもあるので) 詳しい記述がある。論文では、plume に関しては Priestley and Ball<sup>論12</sup>, Morton et al.<sup>論13</sup> が古典的であり (後者の方が詳しい)、thermal に関しては Scorer<sup>論14</sup> が良く引用されるので、一読されたい。最近では Telford<sup>論17</sup> が、観測と理論との両面から研究を行なっているので参考になる。

下層大気中の対流の研究が遅れている最大の原因は、観測の困難さにあり、新しい観測手段の開発が重要課題である。最近レーダーによる対流の観測が報告されているが、Hardy and Ottersten<sup>論15</sup>は示唆に富む内容で、一読に値する。また電波の代りに音波を使う方法も報告されており (McAllister et al.<sup>論16</sup>)、今後ますます発展すると思われる。

### 4. 積雲対流を理解するために

積雲対流は大規模な大気の運動に関連しても、雲物理に関連しても重要である。しかし、気象学一般または気象力学の教科書は (積雲の生じる条件は記述されているが)、運動形態に関しては一般に非常に簡略に扱っている。これに対し、雲物理の教科書は大体雲力学特に積雲

力学に1章をさいているので、積雲対流を理解するためにはまず雲物理の教科書を開くのが良い。その中でも Borovikov et al.<sup>教8</sup>が特に詳しく扱っている。まず積雲の生じる総観的な条件を相当詳しく述べ、その後でエクマン層内の対流、積雲の構造についてレビューを行なう。積雲の定常モデル (Gutman の理論) を紹介しているのが特色である。文献 (特にソ連の文献) の引用も豊富である。Byers<sup>教9</sup>は引用文献は多くないが、問題点をトピックス的に取りあげ、教科書風に述べている。エクマン層内の対流に関連して、エクマン層の流体力学的不安定性を取りあげているのがユニークである。

Squires<sup>教10</sup>は教育的な記述ではないが、非常に良い総合報告である。積雲対流のいろいろな問題点について多くの論文を手短かに要領良く紹介している。1つ1つの記述は簡単になるが、これから積雲の研究を始めようとする人には良い指導標となるであろう。水平混合のレビューを詳しく行なっているのが特色である。少し詳しく問題点を知りたい場合は Anderson<sup>論10</sup>を参照するとよい。Atlas et al.<sup>総6</sup>, Newton<sup>総7</sup>にも積雲対流の記述があるが、中規模擾乱の記述が中心である (中規模現象に関しては入門講座に松本<sup>解4</sup>がある)。最近の研究状況を知るにはシンポジウムの記録<sup>論17, 論18</sup>が役に立つ。

観測事実については、中山<sup>総8</sup>, Ludlam and Scorer<sup>総9</sup>が参考になる。Byers<sup>論19</sup>は非常に大規模な観測の報告で古典的なもの。写真による観測に興味のある方は Saunders<sup>論20</sup>を出発点にするのがよい。

積雲対流の理論を原論文で調べたい場合は小倉<sup>論21</sup>の Introduction を見る。理論を分類し多くの文献をあげてレビューを行なっている。またこの論文自身、積雲対流の数値実験の古典的論文なので、この方面に興味のある方は是非一読されたい。最近の理論については浅井<sup>解5</sup>が参考になる。

最近、積雲の力学と雲物理を結びつけようとする研究が報告されており、雲の人工変換と関連して今後さかんになると思われる。この点に関しては Simpson et al.<sup>論22, 23</sup>, Arnason<sup>論24</sup>が参考になろう。

モデル実験は Scorer<sup>論14</sup>が古典的であり、これより以前のものは Fultz<sup>総2</sup>にまとめられている。Scorer 以後は、主に周囲の安定度によって thermal が受ける影響を調べようとする実験と、潜熱の効果をシミュレーションしようとする実験、の2つの方向がある。前者は Saunders<sup>論25</sup>の美しい実験が研究意欲をそそる。後者は Yang<sup>論17</sup>, Turner<sup>論26</sup>などの最近の論文を手掛りにする

のがよい。

### 5. 回転流体の対流を理解するために

回転系におけるベナール型対流は **Chandrasekhar**<sup>教2</sup> が詳しく扱っている。回転は対流運動を妨げると同時に、ある条件の下では運動が非定常になる（いわゆる overstability）というおもしろい性質を持つ。

水平温度傾度を与えた回転流体の対流は、大気大循環を単純化したモデルとして、多くの研究が行なわれている。手短かに概要を知るには **Greenspan**<sup>教11</sup> があるが、簡単すぎると思われる方は **Fultz et al**<sup>総10</sup> を見られたい。著者の10年にわたる実験結果をまとめたもので、歴史的経緯から説き起し、観察結果が詳しく述べられている。Fultz の実験の解析結果は **Riehl and Fultz**<sup>論27</sup> にまとめられている。Fultz が大気大循環との対応を重視するのに対し、Hide は流体力学の立場から扱おうとする傾向が見られる。**Frowlis and Hide**<sup>論28</sup> は定量的な室内実験の代表であろう。理論に関しては **Lorenz**<sup>論29</sup>, **Barclon**<sup>論30</sup>, **Eady**<sup>論31</sup> をあげておこう。Eady の論文は傾圧不安定を論じたもので、回転流体実験とは直接関係ないが、理論の仮定がうまく実験にあてはまるので、実験と実際の現象とを結びつけるものとして重要である。数値実験に関しては **Williams**<sup>論32</sup> が参考になるであろう。

この稿をまとめるに当り、孫野長治、浅井富雄、瓜生道也、小倉義光の諸氏に御意見をお伺いし、参考にさせていただいた。記して謝意を表します。また原稿の整理をしていただいた篠原和子さんに感謝します。

### 教科書リスト

- 1) 小倉義光, 1966: 最近の気象力学, 気象研究ノート, **17**: 1-61.
- 2) Chandrasekhar, S., 1968: Hydrodynamic and hydromagnetic stability. Oxford University Press, 652 p.
- 3) Sutton, O.G., 1953: Micrometeorology. McGraw-Hill, 333 p.
- 4) Scorer, R. S., 1958: Natural aerodynamics. Pergamon Press, 312 p.
- 5) 藤原映平, 1939: 渦巻の実験, 物理実験学, 第11巻, 気象学及地球物理学, 河出書房, 391 p.
- 6) Priestley, C.H.B., 1959: Turbulent transfer in the lower atmosphere. The University of Chicago Press, 130 p.
- 7) Lumley, J.C. and H.A. Panofsky, 1964: The structure of atmospheric turbulence. John Wiley & Sons, 239 p.
- 8) Borovikov, A.M., A.Kh. Khrigian and others,

- 1963: Cloud physics. Israel Program, 392 p.
- 9) Byers, H.R., 1965: Elements of cloud physics. The University of Chicago Press, 191 p.
- 10) Squires, P., 1962: The physics of rain clouds (by N.H. Fletcher) の第1章. The Cambridge University Press, 386 p.
- 11) Greenspan, H.P., 1968: The theory of rotating fluids. Cambridge University Press, 327 p.

### 解説リスト

- 1) 新田尚, 1969: 気象力学への道. 天気, **16**, 233-236.
- 2) 広田勇, 1969: 大気大循環論の紹介. 天気, **16**, 129-132.
- 3) 孫野長治, 1967: Visible meteorology. 天気, **14**, 241-243.
- 4) 松本誠一, 1970: メソ気象学を学ぶには, 天気, **17**, 79~82.
- 5) 浅井富雄, 1968: 積雲対流に関する理論的研究. 天気, **15**, 227-236.

### 総合報告リスト

- 1) Brunt, D., 1951: Experimental cloud formation. in Compendium of Meteorology edited by T.F. Malone. American Meteorological Society, Boston, 1255-1262.
- 2) Fultz, D., 1961: Developments in controlled experiments on larger scale geophysical problems. Advances in geophysics, **7**, 1-103.
- 3) 気象学ハンドブック編集委員会編, 1958: 気象学ハンドブック. 技報堂, 1321 p.
- 4) 鈴木清太郎, 実験気象(1). 予報研究ノート, 6巻1号, 2-18.
- 5) Rouse, H., 1951: Model techniques in meteorological research. in Compendium of Meteorology edited by T.F. Malone. American Meteorological Society, Boston, 1249-1254.
- 6) Atlas, D. et al. 1963: Severe local storms. Meteorological monographs, **5**, 247 p.
- 7) Newton, C.W., 1967: Severe convective storms. Advances in geophysics, **12**, 257-308.
- 8) 中山章, 1968: 総観的立場から見た雲, 気象研究ノート, **96**, 243 p.
- 9) Ludlam, F.H. and R.S. Scorer, 1953: Convection in the atmosphere, Quart. J.R. Met. Soc., **79**, 317-341.
- 10) Fultz, D. et al., 1959: Studies of thermal convection in a rotating cylinder with some implications for large scale atmospheric motions. Meteorological monographs, **4**, 104 p.

### 論文リスト

- 1) Ogura, Y. and N.A. Phillips, 1962: Scale analysis of deep and shallow convection in

- the atmosphere. *J. Atmos. Sci.*, **19**, 173-179.
- 2) Saltzman, B., 1962: Selected papers on the theory of thermal convection. Dover Publications, Inc., New York, 461 p. (論文集)
  - 3) Stuart, J.T. 1958: On the non-linear mechanics of hydrodynamic stability. *J. Fluid Mech.*, **4**, 1-21. (ベナール型対流に関して論じたものではないが応用できる)
  - 4) Malkus, W.V.R. and G. Veronis, 1958: Finite amplitude cellular convection. *J. Fluid Mech.*, **4**, 225-260.
  - 5) Malkus, W.V.R., 1954: The heat transport and spectrum of thermal turbulence. *Proc. Roy. Soc. A*, **225**, 196-212.
  - 6) Kraichnan, R.H., 1962: Turbulent thermal convection at arbitrary Prandtl number. *Phys. Fluids*, **5**, 1374-1389.
  - 7) Deardoff, J.W., 1964: A numerical study of two-dimensional parallel-plate convection. *J. Atmos. Sci.*, **21**, 419-438.
  - 8) Ogura, Y. and A. Yagihashi, 1969: A numerical study of convection rolls in a flow between horizontal parallel plates. *J. Meteor. Soc. Japan*, **47**, 205-217.
  - 9) Chorin, A.J., 1967: A numerical method for solving incompressible viscous flow problems. *J. of Computational Physics*, **2**, 12-26.
  - 10) Anderson, C. E., 1969: Cumulus dynamics. Pergamon Press, 211 p. (積雲対流に関するシンポジウムの記録)
  - 11) Vul'fson, N.L., 1964: Convective motions in a free atmosphere. Israel Program, 188 p. (単行本ではあるが著者の仕事をまとめたもの)
  - 12) Priestley, C.H.B. and F.K. Ball, 1955: Continuous convection from an isolated source of heat. *Quart. J. R. Met. Soc.*, **81**, 144-157.
  - 13) Morton, B.R., G. Taylor and J.S. Turner, 1956: Turbulent gravitational convection from maintained and instantaneous sources. *Proc. Roy. Soc. A*, **234**, 1-23.
  - 14) Scorer, R.S., 1957: Experiments on convection of isolated masses of buoyant fluid. *J. Fluid Mech.*, **2**, 583-594.
  - 15) Hardy, K.R. and H. Ottersten, 1969: Radar investigation of convective patterns in the clear atmosphere. *J. Atmos. Sci.*, **26**, 666-672.
  - 16) McAllister, L. G. et al., 1969: Acoustic sounding—A new approach to the study of atmospheric structure. *Proceedings of the IEEE*, **57**, 579-587.
  - 17) Proceeding of the International Conference on cloud physics., August 26-30, 1968, Tronto, Canada, 873 p.
  - 18) Proceedings of six conference on severe local storms. Chicago, Illinois, 8-10 April, 1969, Amer. Meteor. Soc., 372 p.
  - 19) Byers, H.R., 1949: The thunderstorm (Report of the thunderstorm project). U.S. Department of Commerce, 287 p. (観測結果の報告)
  - 20) Saunders, P.M., 1961: An observational study of cumulus. *J. Met.*, **18**, 451-467.
  - 21) Ogura, Y., 1963: The evolution of a moist element in a shallow, conditionally unstable atmosphere: A numerical calculation. *J. Atmos. Sci.*, **20**, 407-424.
  - 22) Simpson, J. et al., 1965: Experimental cumulus dynamics. *Reviews of Geophysics*, **3**, 387-431.
  - 23) Simpson, J. and V. Wiggert, 1969: Models precipitating cumulus towers. *Monthly Weather Review*, **97**, 471-489.
  - 24) Arnason, G. et al., 1969, Numerical simulation of the macrophysical and microphysical processes of moist convection. 気象庁技術報告, 67, WMO/IUGG 数値予報シンポジウム議事録, I-11~I-21.
  - 25) Saunders, P.M., 1962: Penetrative convection in stably stratified fluids. *Tellus*, **14**, 177-194.
  - 26) Turner, J.S., 1965: A laboratory model of an evaporating convective cloud. *Proceedings of the International Conference on cloud physics*, May 24-June 1, 1965, Tokyo and Sapporo.
  - 27) Riehl, H. and D. Fultz, 1958: The general circulation in a steady rotating-dishpan experiment. *Quart. J. R. Met. Soc.*, 389-417.
  - 28) Fowles, W.W. and R. Hide, 1965: Thermal convection in a rotating annulus of liquid: Effect of viscosity on the transition between axisymmetric and non-axisymmetric flow regimes. *J. Atmos. Sci.*, **22**, 541-558.
  - 29) Lorenz, E.N., 1962: Simplified dynamic equations applied to the rotating-basin experiments. *J. Atmos. Sci.*, **19**, 39-51.
  - 30) Barcilon, V., 1964: Role of the Ekman layer in the stability of the symmetric regime obtained in a rotating annulus. *J. Atmos. Sci.*, **21**, 291-299.
  - 31) Eady, E.T., 1949: Long waves and cyclone waves. *Tellus*, **1**, 33-52.
  - 32) Williams, G.P., 1969: Numerical integration of the three-dimensional Navier-Stokes equations for incompressible flow. *J. Fluid Mech.*, **37**, 721-750.