

対 流 論

北 出 武 夫* 木 村 竜 治**

1. はしぎ

対流（正確には熱対流）とは、重力場の中に置かれた流体中に熱によって小さな密度変化が生じ、その浮力によって引き起こされる運動である。この運動によって、一般に熱が運ばれる。対流は、伝導、放射と並んで熱伝達の一形式として大気中における熱収支に重要な役割を果たしている。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、大気における大規模な運動は、たとえそれが熱によって引き起こされたとしても対流とは呼ばない。一般に、大気における水平スケールの大きな現象を記述するさい静力学の式が用いられるが、深さに比較して水平スケールが余り大きくない対流現象を取り扱う時には、浮力によって引き起こされる垂直加速力を無視できない。その意味において、ここで扱う対流現象は、静力学の式を用いない一般的な Boussinesq 方程式系によって記述される水平スケールの余り大きくない現象に限定する。大きな水平スケールを持つ運動の性質については他の項を参照されたい。また、水平スケールの比較的小さな対流現象に対しては地球の回転の効果はきわめて小さく、無視できる場合が多い。回転流体中での対流の性質については **回転流体力学** の項にゆずることとする。大気中の対流は、1 km 以下の下層大気中の対流、1 km から 10 km の積雲対流、10 km から 100 km の積雲集合の対流や中規模セル状対流等に分類できる。

2. 対流の基礎

(1) 全般的な対流の知識を得るために

大気中における対流に対する基礎方程式の導出に関して、小倉教¹ や **Ogura・Phillips** 論¹ を参照するとよい。ここでは、スケールアナリシスの手法によって圧縮性流体である大気においても浅い対流の場合 Boussinesq 近似が成り立つことが示される。気象学の中での対流の研究全般については、**京都シンポジウムの報告** 総¹ をみ

るとよい。ここでは、対流に関する研究の現状と問題点について各分野の専門家によってさまざまな角度から述べられている。また、**Gutman** 教² は大気中のさまざまなメソ現象を熱流体力学の立場から統一的に取り扱ったユニークな書で、ソ連における引用文献の豊富な点は米英にかたよりがちなわれわれにとっては有益であろう。対流現象全般の基礎物理学的な教科書として、**Turner** 教³ および **Stern** 教⁴ がある。Turner 教³ には、大気海洋だけでなく工学的な応用をも考えた回転を含まない対流現象を広く取り扱っている。それだけに簡潔すぎて、入門者が個々の記述を完全に理解するためには引用されている原論文にさかのぼる必要があるであろう。Stern 教⁴ は入門的教科書で記述は詳しくないが、対流現象の全体が手短かにまとめられている。**Selected Meteorological papers** 論² には対流に関する重要論文が集められているので、それによって学ぶのもよい。

(2) 下から一様に熱せられた時に生じる対流

この時生ずるセル状対流については、古く Bénard の室内実験以来よく知られており、それ以降数多くの実験的・理論的仕事がなされている。その理論は線形論の範囲内ではほぼ完成されており **Chandrasekhar** 教⁵ に理路整然とまとめられている。この本は、回転場での対流を含めて懇切丁寧に書かれており線形安定論の手法を学ぶには絶好の書である。また、回転流体の力学とベナール対流の理論の類似性についても触れている。直接論文に当たりたい方は、**Saltzman** 論³ による論文集がある。線形論では解決できないさまざまな問題についても多くの仕事が行なわれている。その概要については、北出¹ にまとめられている。非線形安定論の手法を知りたい方は、**Malkus・Veronis** 論⁴ を出発点とするとよい。最近の数値実験による研究については、**Lipps** 論⁵ や **Kitade** 論⁶ をみるとよい。**Krishnamurti** 論⁷ による精密な室内実験は、ベナール対流に対する全体像を与えてくれる。Rayleigh 数が非常に大きくなるとセル状対流は乱流的対流に移行する。この乱流的対流の構造に関する知識はまだ十分でないが、**Chen・Goldstein** 論⁸ の室内実

* T. Kitade, 気象研究所

** R. Kimura, 東大海洋研究所

験は乱流的対流のイメージを与えてくれるだろう。

(3) 局部的に熱せられた時に生ずる対流

この場合、加熱の仕方によって thermal および plume と称する対流が生ずる。Score^{教6}に thermal と plume, Priestly^{教7}には plume に関して詳しい記述がある。成層のある場での thermal や plume の振舞いや、それ以降の研究については、Turner^{総2}を参照するとよい。重要な概念である entrainment については Townsend^{論9}が詳しく解析し、正確には成り立たなくとも有用な近似であることを示している。

(4) 水平対流

水平対流 (horizontal convection) とは、水平方向の温度変化によって生じる対流で、これまでに述べてきた垂直対流 (vertical convection) と対比させた言葉である。鉛直方向には安定な密度成層を形成する点が垂直対流と著しく異なる(静力学近似が成り立つ場合が多い)。水平対流は、大気・海洋大循環をはじめ、季節風、海陸風、海洋のサーモクライン、ヒートアイランドによる対流等、自然現象に密接な関連がある。「水平対流」という概念をはっきり示しているのは、Stern^{教4}である。海陸風については、気研ノート、125^{総3}に特集がある。ヒートアイランドの対流については、Garstang *et al.*^{総4}を参照されたい。

3. 大気中での対流現象

(1) 下層大気中での対流現象

大気中における対流現象を理解しようとする時、第2章で述べたベナール対流や thermal, plume の理解が多いに役に立つ事はいままでもないが、大気中では状況はさらに複雑である。接地境界層中での対流は、Priestley^{教7}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・Panofsky^{教8}の方が教育的に書かれている。数値実験による研究も対流の性質に対する理解を与えてくれる。古典的な論文として、Ogura^{論10}を読むとよい。Kuo・Sun^{論11}はより現実に近い状態で地表付近での対流を取り扱っている。大気中では垂直シャーのある風の場での対流の性質を調べる必要がある。Kuo^{論12}の理論や Asai^{論13}の数値実験は一読に値する。

大気下層の状態を調べるためさまざまな観測が行なわれているが、Kaimal・Haugen^{論14}の鉄塔による観測、Hardy・Ottersten^{論15}によるレーダ観測、Nookester *et al.*^{論16}によるレーダとライダ観測、Warner・Telford^{論17}による飛行機観測、Hall *et al.*^{論18}の音波レーダに

よる観測等は、下層大気中における対流についてさまざまな情報を与えてくれる。

(2) 積雲対流

気象学一般または気象力学の教科書には、積雲の生じる条件の記述はあ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。これに対して、雲物理学の教科書はだいたい積雲力学に一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学の教科書を開くのが良い。その中でも、Borovikov *et al.*^{教9}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詳しく述べ、その後でエクマン層の対流、積雲の構造についてレビューしている。Byers^{教10}は、問題点をトピック的に取り上げて教科書風に述べている。Spuire^{論11}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よく紹介している。少し詳しく問題点を知りたい場合には、Anderson^{論19}を参照するとよい。積雲対流を一種の plume とみなす考え方があがるが、Squire・Turner^{論20}は定常な plume 理論を積乱雲に適用したものである。Warner^{論21}は、この plume モデルの不十分性を示している。他方、Kuo^{論22}は固有値問題として積雲対流を扱っており、Rayleigh の理論の一つの拡張ともみなせるものである。

近年、数値実験によって積雲対流の性質を調べる仕事が多くなる行なわれているが、それらを読むことによって積雲対流の性質をよりよく理解することができる。最近の積雲対流の理論的・数値的研究の秀れたレビューとして Cotton^{総5}があり、微物理過程の積雲対流モデルへの導入について詳しく述べている。この分野での引用文献が網羅されているので、積雲対流の理論的仕事を始めようという人はこのレビューから出発するとよい。論文としては、Ogura^{論23}の一読を勧めたい。最近の数値実験には二つの方向があり、その一つは積雲モデルに微物理学的過程を組み入れてその効果を調べる方向、もう一つは大規模運動に積雲対流の効果を組み入れるための基礎的作業としての方向である。前者に興味のある人は、武田^{解2}をみるとよい。論文としては Koenig・Murray^{論24}がある。後者に興味のある人は、浅井^{解3}が参考になる。また、Yamasaki^{論25}は、積雲対流を記述できる細かい格子を用いて台風の発達をシミュレートしようという試みであり、積雲群の振舞いや積雲の連続的な発生等のシミュレーションは積雲対流について多くの知見を与えてくれる。その他の積雲対流についての数値的

な研究として、山岳地帯での積雲対流をシミュレートした **Orville**論²⁶ や、一般流のある場での積雲対流の性質を扱った **Takeda**論²⁷ も興味深い。

積雲対流の放出する熱の効果を大規模運動に組み込むという実用的な観点からの仕事として、積雲対流のパラメタリゼーションの問題がある。パラメタリゼーションの方式はこれまでいくつか提出されており、特に台風の発達のシミュレーションに著しい成功を収めている。**山岬**論⁶ には、これまで提出された積雲対流のパラメタリゼーションの方式とその基礎的概念および問題点について適確に述べられている。直接論文に当たりたい人は、**Ooyama**論²⁸ や **Arakawa・Schubert**論²⁹ をみるとよい。また、これとは逆に、大規模運動の熱および水蒸気収支解析の結果と適当な積雲モデルを組み合わせて大気中の積雲対流の特性を求める仕事がいくつか行なわれている。これについては、**Nitta**論³⁰ をみるとよい。

積雲対流の観測事実については、古典的なものではあるが **Byers**論³¹ は非常に大規模な観測の報告である。**中山**論⁷ は総観的立場から見た雲を扱っている。写真による観測に興味のある人は、**Saunders**論³² をみるとよい。レーダによる雲の観測の一般的事実については **立平**論⁸ がある。ドップラレーダを使って積雲対流内の速度場を求めようとした **Batterson**論³³ も興味深い。飛行機によって雲の中に入って観測した **Musil et al.**論³⁴ もいろいろな情報を与えてくれる。人工衛星による雲の研究に興味のある人は、**気象衛星特集号**論⁹ を参照するとよいだろう。

文献

教科書

- 1) 小倉義光, 1966: 最近の気象力学, 気象研究ノート, 17, 1-61.
- 2) Gutman, J. H., 1971: J. H. GYTMAN によるメソ気象学的過程の非線形理論序説, 気象研究ノート, 108, 149 p.
- 3) Turner, J.S., 1973: Buoyancy effects in fluid, Cambridge Univ. Press, 367 p.
- 4) Stern, M.E., 1975: Ocean circulation physics, 246p., Part 2.
- 5) Chandrasekhar, S., 1968: Hydrodynamic and hydromagnetic stability, Oxford Univ. Press, 652p.
- 6) Scorer, R.S., 1958: Natural aerodynamics, Pergamon Press, 312p.
- 7) Priestley, C.H.B., 1959: Turbulent transfer in the lower atmosphere, Univ. of Chicago Press,

130p.

- 8) Lumley, J.C. and H.A. Panofsky, 1964: The structure of atmospheric turbulence, John Wiley & Sons, 239p.
- 9) Borovikov, A.M., Kh. Khrgian et al., 1963: Cloud physics, Israel Program, 392p.
- 10) Byers, H.R., 1965: Elements of cloud physics, Univ. of Chicago Press, 191p.
- 11) Squires, P., 1962: The physics of rain clouds (by N.H. Fletcher) の第1章, Cambridge Univ. Press, 386p.

解説

- 1) 北出武夫, 1974: ベナール型対流について, 天気, 21, 1-9.
- 2) 武田喬男, 1971: 降水セルの力学と数値実験, 天気, 18, 9-19.
- 3) 浅井冨雄, 1968: 積雲対流に関する理論的研究, 天気, 15, 227-236.

総合報告

- 1) 浅井冨雄他, 1971: 対流に関する研究の現状と問題点, 気象研究ノート 109, 1-174.
- 2) Turner, J.S., 1969: Buoyant plumes and thermals, Ann. Rev. Fluid Mech., 1, 29-44.
- 3) 中山章他, 1975: 海陸風と山越え気流, 気象研究ノート, 125, 1-244.
- 4) Garstang, M., P.D. Tyson and G.D. Emmitt, 1975: The structure of heat island, Review of Geophy. and Space Phys., 13, 139-165.
- 5) Cotton, W.R., 1975: Theoretical cumulus dynamics, Rev. Geophys. Space Phys., 13, 419-448.
- 6) 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.
- 7) 中山章, 1968: 総観的立場から見た雲, 気象研究ノート, 96, 1-115.
- 8) 立平良三, 1972: 気象レーダ特集号, 気象研究ノート, 112, 57-171.
- 9) 神子敏朗他, 1972: 気象衛星特集号(II), 気象研究ノート, 113, 1-139.

論文

- 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) 日本気象学会編, 1974: Selected meteorological papers, Convection, No. 21, 190p.
- 3) Saltzman, B., 1962: Selected papers on the theory of thermal convection, Dover Publications, Inc., New York, 461p.
- 4) Malkus, W.V.R., and G. Veronis, 1958: Finite amplitude cellular convection, J. Fluid Mech., 4, 225-260.
- 5) Lipps, F.B., 1976: Numerical simulation of

- three-dimensional Bénard convection in air, *J. Fluid Mech.*, **75**, 113-148.
- 6) Kitade, T., 1977: A numerical study of three-dimensional Bénard convection, Part III, On the preferred roll diameter, *J. Met. Soc. Japan*, **55**, 1-10.
 - 7) Krishnamurti, R., 1973: Some further studies on the transition to turbulent convection, *J. Fluid Mech.*, **60**, 285-303.
 - 8) Chu, T.Y. and R.H. Goldstein, 1973: Turbulent convection in a horizontal layer of water, *J. Fluid Mech.*, **60**, 141-159.
 - 9) Townsend, A.A., 1970: Entrainment and the structure of turbulent flow, *J. Fluid Mech.*, **41**, 13-46.
 - 10) Ogura, Y., 1962: Convection of isolated masses of a buoyant fluid: a numerical calculation, *J. Atmos. Sci.*, **19**, 495-502.
 - 11) Kuo, H.L. and W.Y. Sun, 1976: Convection in the lower atmosphere and its effects, *J. Atmos. Sci.*, **33**, 21-40.
 - 12) ———, 1963: Perturbations of plane Couette flow in stratified fluid and origin of cloud streets, *Phys. Fluids*, **6**, 195-211.
 - 13) Asai, T., 1964: Cumulus convection in the atmosphere with vertical wind shear: Numerical experiment, *J. Met. Soc. Japan*, **42**, 245-259.
 - 14) Kaimal, J.C. and D.A. Haugen, 1967: Characteristics of vertical velocity fluctuations observed on a 430m tower, *Quart. J. Roy. Met. Soc.*, **93**: 305-317.
 - 15) Hardy, K.R. and H. Ottersten, 1969: Radar investigation of convective patterns in the clear atmosphere, *J. Atmos. Sci.*, **26**, 666-672.
 - 16) Nookester, V.R., D.R. Jensen, J.H. Richter, W. Vizee and R.T. H. Collis, 1974: Concurrent FM-CW radar and lidar observation of the boundary layer, *J. Appl. Met.*, **13**, 249-256.
 - 17) Warner, J. and J.W. Telford, 1967: Convection below cloud base, *J. Atmos. Sci.*, **24**, 374-382.
 - 18) Hall, Jr. F.F., J.G. Edinger and W.D. Neff., 1975: Convective plume in the planetary boundary layer investigated with an acoustic echo sounder, *J. Appl. Met.*, **14**, 513-523.
 - 19) Anderson, C.E., 1960: Cumulus dynamics, Pergamon Press, 211p.
 - 20) Squires, P. and J.S. Turner, 1962: An entraining jet model for cumulonimbus updraughts, *Tellus*, **14**, 422-434.
 - 21) Warner, J., 1970: On steady-state one-dimensional models of cumulus convection, *J. Atmos. Sci.*, **27**, 1035-1040.
 - 22) Kuo, H.L., 1965: Further studies of the properties of cellular convection in a conditionally unstable atmosphere, *Tellus*, **17**, 413-433.
 - 23) Ogura, Y., 1963: The evolution of a moist convective element in a shallow, conditionally unstable atmosphere: A numerical calculation, *J. Atmos. Sci.*, **20**, 407-424.
 - 24) Koening, L.R. and F.W. Murray, 1976: Ice-bearing cumulus cloud evolution: Numerical simulation and general comparison against observations, *J. Appl. Met.*, **15**, 747-762.
 - 25) Yamasaki, M., 1977: A preliminary experiment of the tropical cyclone without parameterizing the effects of cumulus convection, *J. Met. Soc. Japan*, **55**, 11-31.
 - 26) Orville, H.D., 1968: Ambient wind effects on the initiation of cumulus clouds over mountainous terrain, *J. Atmos. Sci.*, **25**, 385-403.
 - 27) Takeda, T., 1971: Numerical simulation of a precipitating convective cloud: The formation of a "long-lasting" cloud, *J. Atmos. Sci.*, **28**, 350-376.
 - 28) Ooyama, K., 1964: A dynamical model for the study of tropical cyclone development, *Geofisica International (Mexico)*, **4**, 187-198.
 - 29) Arakawa, A. and W.H. Schubert, 1974: Interaction of a cumulus cloud ensemble with the largescale environment, Part I, *J. Atmos. Sci.*, **31**, 674-701.
 - 30) Nitta, T., 1977: Response of cumulus updraft and downdraft to GATE A/B-scale motion systems, *J. Atmos. Sci.*, **34**, 1163-1186.
 - 31) Byers, H.R., 1949: The thunderstorm (Report of the thunderstorm project), U.S. Department of Commerce, 287p.
 - 32) Saunders, P.M. 1961: An observational study of cumulus, *J. Met.*, **18**, 451-467.
 - 33) Battan, L.J., 1975: Doppler radar observations of a hailstorm, *J. Appl. Met.*, **14**, 98-108.
 - 34) Musil, D.J., W.R. Sand and R.A. Schlessener 1973: Analysis of data from T-28 aircraft penetrations of a Colorado hail-storm, *J. Appl. Met.*, **12**, 1364-1370.