

熱帯気象学への招待

柳井 迪 雄*

仮に南北30度を熱帯と中・高緯度地方との境目とすると、熱帯の大気は全地球大気の1/2を占める。この広大な領域中の種々の現象、また熱帯大気中の諸過程が中緯度大気におよぼす影響等をいろいろな角度から追究しているのが熱帯気象学である。大気の大循環を理論的に説明しようとした最初の試みといわれる **Hadley** (1735) の論文の標題が“Concerning the cause of the general trade winds”であったことから知られるように、熱帯気象学は貿易風や赤道無風帯の存在を説明し、また台風やモンスーンなど熱帯地方特有の現象を取扱う学問として古くから存在した。しかし観測の不備と、理論的手法の欠如から、近年に至るまで記述的な段階に止っていた。しかし最近では観測事実も豊富になり、解析法の近代化、力学理論の発達、数値シミュレーションの発展などによってこの分野において多くの新しい研究課題が提起され、また **GARP** 計画等からも知られるように大気大循環のより深い理解のためには熱帯気象の問題が極めて重要であることが認識されるようになった。

気象学のすべての問題について言えることであるが、熱帯気象学を学ぶにも、熱帯の大気中に起る諸現象への興味と、オーソドックスな研究方法を身につけるという両面が必要である。現在の熱帯気象学は、気象力学の基礎、対流論、大気大循環論などと切離して論ずることはできない。以下はその前提の上に、特に熱帯の問題に立ち入ろうとする場合の手引きのつもりである。

1. 一般的参考書

熱帯気象学で取扱われる問題を概観するには **Riehl** (1954) の教科書がある。発刊以来かなりの年数を経ているが古典としての定評がある。熱帯地方の風系、降水量分布などの気候学的記述から始まり、対流、雲物理、天気解析法、偏東風波動等の擾乱、熱帯低気圧そして大循環に至るまで豊富な実例を示しながら重要な事実と、基本的な解釈とに触れている。記述的な本なので通読するには必ずしも適していないが、研究者にとっては今で

も問題の素材で一杯といった感じの貴重な文献である。最近出た **Palmén** と **Newton** (1969) の教科書も第14章、15章を熱帯気象、熱帯低気圧論にさいており、入門に手頃である。またこの本の第1, 2章にある程度の大気大循環の知識は熱帯気象学を勉強するにも必要である。

近年研究の対象になっている問題のみをざっと展望するには **柳井** (1967) の総合報告を一読していただきたい。熱帯低気圧の構造、発生と発達、大規模擾乱、大循環、成層圏の現象、低緯度の気象力学について近年の主要な仕事と、問題の所在を述べてある。但し積雲対流の問題には触れていない。1967年に今後の見通しを述べた問題の多くがその後めざましく発展している。また同じ1967年に **Stockholm** で開かれた **GARP** 研究会議の報告書(日本語訳, 1968)の第3・2章は何人かの専門家の討論結果を **Charney** が主になってまとめたもので、大気大循環の解明のために必要となる熱帯気象学の諸問題を分析した優れた文献でもある。

2. 熱帯の大気大循環

熱帯は地球大気の大循環にとっては熱源であり、それには日射量と長波放射量との差と、水蒸気の凝結による潜熱の放出が寄与している。**Hadley cell**, **ITC** (熱帯収束帯)、貿易風等の生成と維持、エネルギー変換と輸送、半球間、そして中緯度大気とのエネルギー交換等数多くの問題がある。

大気大循環における熱帯の役割について考えるには、**Palmén** (1964) の総合報告か、前記 **Palmén** と **Newton** (1969) の教科書の第1, 2章を読むのが良い。もっと本格的に勉強するには是非大循環論そのものの素養が欲しい。さいわい日本には荒川 (1958) による第一級の総合報告があり、また最近では **Lorenz** (1967) が大変格調の高い、しかも平易明解な教科書を出している。

熱帯における種々の平均量、また運動量、顕熱、潜熱の輸送、さらに最近浮び上ってきた両半球間の交換の問題については **飯田** (1967) の労作がある。最新の研究論文としては **Kidson et al.** (1969) がある。

研究段階にある人達には、熱帯大循環の最良の教科書

* カリフォルニア大学気象学教室, ロサンゼルス

は実は最先端の数値シミュレーションの論文(例えば **Manabe et al.**, 1970)である。これは現在考えられる最高の技術を駆使し、積雲対流の効果をとり入れた全球モデルによる熱帯循環のシミュレーションの結果である。数値シミュレーションの専門家は同時に比較の対象となる実際の大循環についても最新の資料に通じており、よく言われるように現在では最良の気候学者は、実は数値実験の専門家達なのである。

3. 熱帯における積雲対流

熱帯大気の力学を中・高緯度大気のとそれと区別する第一の特徴は、湿潤で潜在不安定な大気を扱うということである。台風の発生について考えるにしても、あるいはもっと大規模な大気循環におけるエネルギー収支を考えるにしても、積雲や積乱雲に伴う凝結熱の発生、熱、水蒸気などの対流による上方への輸送を抜きにしては議論できない。また積雲対流への水蒸気の供給源となる海面近くの湿潤層のメカニズム、大規模な流れと積雲対流群とを結びつける境界層の役割など一連の問題がある。

浅井(1967)の総合報告は貿易風帯の湿潤層、積雲、熱帯収束帯や擾乱における積雲対流の役割などを簡潔にまとめている。これに関連して **Bunker et al.** (1949)の論文は古典として今でも重要である。熱帯のエネルギー収支にとっての積乱雲による熱の上方輸送の重要性を指摘した **Riehl** と **Malkus** (1958)も重要な論文である。熱帯の海上における積雲の組織 (cloud cluster) と大規模な擾乱との関係は、今後の重要な課題であるが、**Malkus** と **Riehl** (1964)の膨大なレポートは、太平洋上の雲の写真観測と擾乱の解析とを結び付けようとした先駆的な労作である。このほか、積雲対流に関する観測事実、さらに雲層下のプロセス、海洋と大気とのエネルギー交換などを勉強するには **Malkus** (1962)の総合報告、**Roll** (1965)の教科書などが優れている。

積雲対流の力学的理論は **Stommel** (1947)による entrainment の導入に始まり、多くの人々により bubble モデル、plume モデルなどが提出され、近年では流体力学に基礎をおく数値シミュレーションが行なわれ、さらにその上雲物理的效果をとり入れる試みも行なわれている。少し古いのが、**Anderson** (1960)が編集した“cumulus dynamics”に積雲対流に関する論文が多数集められている。積雲の数値シミュレーションについては **Ogura** (1963)の総合報告が優れている。

熱帯気象学としての最大の関心は、積雲がどのような条件下で組織的に発生し、また積雲対流が熱や運動量の

輸送を通じて大規模な流れをどう変えて行くのかということにある。この問題は **Asai** と **Kasahara** (1967)により手がけられ始めた。浅井(1968)の学会賞記念講演は、一連の研究をまとめた独創的な解説である。

4. 熱帯低気圧論

台風・ハリケーンなど熱帯低気圧の研究は、熱帯気象学の中で最も古く、かつ進歩した分野である。前記の **Palmén** と **Newton** (1969)の第15章に発生条件、構造、発達機構などの概説がある。**Riehl** (1954)の教科書では第11章が熱帯低気圧論にあてられ、かなり詳しく述べられている。専門書と教養書の中間的なものとしては **Dunn** と **Miller** (1960)による教科書がある。

理論的な内容も含んだ現在の熱帯低気圧論の大要は **Yanai** (1964)が最も詳しい。もともと発生論の review として書かれたものであるが、成長した熱帯低気圧の構造と力学、エネルギー論、境界層の役割、発生の解析、対流不安定、慣性不安定などの理論や数値モデル、積雲対流のパラメーター化などの問題に触れている。これ以後の重要な発展は **Ooyama** (1964)と **Charney** と **Eliassen** (1964)により提出されたいわゆる第2種条件付不安定理論とそれに基く数値シミュレーションである。最近山岬(1970)によって彼自身の最新の成果をとり入れた詳しい解説が出された。

熱帯低気圧内の眼、レイン・バンドなどのメソ・スケールの問題は、未だ力学的に十分解明されておらず、主としてレーダーによる観測的研究の段階にある。**Donaldson** と **Atlas** (1964)の総合報告が網羅的である。

なお熱帯低気圧については時々行なわれる国際シンポジウムやセミナーなどの proceedings に面白い文献が出ている。特に1963年に Rotorua で行なわれたものは優れた総合報告を含み、また1962年東京で開かれた WMO セミナーの報告書には熱帯低気圧の発生統計など世界各地の貴重な資料が多くのもせられている。

5. 熱帯対流圏の擾乱

熱帯低気圧以外の大規模な擾乱として偏東風波動や、上部対流圏の渦などの存在が1940年代から指摘されていたが、本格的な研究は最近になって始まった。古典的文献としては **Riehl** (1954)の教科書と、**Palmer** (1952)の総合報告が代表的である。

近年時系列資料のスペクトル解析によって、熱帯擾乱の研究は新しい段階に入った。**Yanai et al.** (1968)、**Wallace** と **Chang** (1969)、**Nitta** (1970 a)、**Yanai** と **Musapiani** (1970)等の研究により、擾乱のスケ

ール、構造についての統計的知識が得られ始め、さらに最近では擾乱のエネルギー・サイクルについても定量的な解析が行なわれている (Nitta, 1970 b, c)。これらの研究は漸く体系化しつつある段階なのでまとまった総合報告が望まれる。

6. 熱帯成層圏

赤道上の帯状風の準2年振動の発見以来めざましく研究の進んだ領域である。2年振動に関しては **Reed** (1965) の総合報告に詳しい。 **Lindzen** と **Holton** (1968) による理論まで含めた up to date な解説は **柳井と丸山** (1969) に詳しく述べられている。

最近になって発見された熱帯成層圏の波動の問題は、 **Matsuno** (1966) の赤道波理論とも、また準2年振動の問題とも関連し、熱帯気象学に新しい分野を開いた。上記 **柳井と丸山** (1969) あるいは **Wallace** (1969) の総合報告を一読の上、是非 **Maruyama** (1967, 1968), **Wallace** と **Kousky** (1968) の論文を読んで欲しい。

7. 低緯度擾乱の力学

大規模な赤道波の発見、数値シミュレーションによる熱帯擾乱のエネルギー・サイクルに関する示唆などは、低緯度地方の擾乱に関する統一的な理論を要請する。ここではコリオリ因子が急激に変化することと、凝結熱の放出が重要な役割を果すという2つの特有な問題、それに中緯度擾乱との相互作用の可能性など目下発展途上の興味ある問題が山積している。

赤道付近の波動解については **柳井と丸山** (1969) の解説が入門に良く、その上是非 **Matsuno** (1966), **Lindzen** (1967) の原論文を読むべきである。

最近ではさらに波動の発生、維持機構に立入った理論的研究が進みつつあり、 **Mak** (1969) の中緯度擾乱による励振説、 **Yamasaki** (1969), **Hayashi** (1970) による凝結熱放出による不安定波動説などの力作が発表されている。これらの論文を読みこなすには、気象力学一般の基礎知識の外に、台風論、大気潮汐論、大気大循環論などの巾広い素養が望まれる。

追記 この「入門」の文献リストは、筆者の知識の精粗の他、各研究分野の発展の段階がまちまちであることにもよって不統一なものになった。またモンスーンなど熱帯大陸が関与する問題については筆者は専門外なので、一切省略した。他の適任の方をお願いしたい。

文献

(引用順、重複は省略)

1. 熱帯気象学一般

1970年9月

Riehl, H., 1954: Tropical Meteorology. McGraw-Hill, 392pp.

Palmén, E., and **C.W. Newton**, 1969: Atmospheric Circulation Systems, Their Structure and Physical Interpretation. Academic Press, 603pp. (Chapter 1, 2, 14, 15).

柳井迪雄, 1967: 熱帯気象学の展望. 天気, **14**, 73-91.

大気科学小委員会, 1968: 報告 地球大気開発計画研究会議 (GARP). (日本気象学会事務局で入手可能).

2. 熱帯の大気大循環

Palmén, E., 1964: General circulation of the tropics. Proc. Symposium on Tropical Meteorology, 1-30. New Zealand Meteor. Service, Wellington, New Zealand.

荒川昭夫, 1958: 最近の大気大循環論. 気象研究ノート, **9**, 229-362.

Lorenz, E.N., 1967: The Nature and Theory of the General Circulation of the Atmosphere. World Meteorological Organization, 161pp.

飯田睦次郎, 1969: 南北両半球大気間の相互作用. 気象研究ノート, **92**, 412-458.

Kidson, J.W., **D.G. Vincent** and **R.E. Newell**, 1969: Observational studies of the general circulation of the tropics: long term mean values. Quart. J. Roy. Meteor. Soc., **95**, 258-287.

Manabe, S., **J.L. Holloway, Jr.**, and **H.M. Stone**, 1970: Tropical circulation in a time-intergration of a global model of the atmosphere. J. Atmos. Sci., **27**, (in press).

3. 熱帯における積雲対流

浅井富雄, 1967: 熱帯循環における積雲対流. 天気, **14**, 92-101.

Bunker, A.F., **B. Haurwitz**, **J.S. Malkus** and **H. Stommel**, 1949: Vertical distribution of temperature and humidity over the Caribbean Sea. Papers in Phys. Oceanogr. and Meteor., **11**, No. 1, 82pp.

Riehl, H., and **J.S. Malkus**, 1958: On the heat balance in the equatorial trough zone. Geophysics, **6**, 503-538.

Malkus, J.S., and **H. Riehl**, 1964: Cloud Structure and Distributions over the Tropical Pacific Ocean. Univ. California Press, 229pp.

Malkus, J.S., 1962: Large-scale interactions. The Sea (M.N. Hill ed.), Vol. 1, Chap. 4, 88-294.

Roll, H.U., 1965: Physics of the Marine Atmosphere. Academic Press, 426pp.

Stommel, H., 1947: Entrainment of air into a cumulus cloud. J. Meteor., **4**, 91-94.

Anderson, C.E. (ed.), 1960: Cumulus Dynamics.

Pergamon Press, 211pp.

Ogura, Y., 1963: A review of numerical modeling research on small scale convection in the atmosphere. *Meteor. Monographs*, **5**, No. 27, 65-76.

Asai, T., and A. Kasahara, 1967: A theoretical study of the compensating downward motions associated with cumulus convection. *J. Atmos. Sci.*, **24**, 487-496.

浅井富雄, 1968: 積雲対流に関する理論的研究. *天気*, **15**, 227-236.

4. 熱帯低気圧論

Dunn, G.E., and B.I. Miller, 1964: Atlantic Hurricanes. Louisiana State Univ. Press, 337pp.

Yanai, M., 1964: Formation of tropical cyclones. *Rev. Geophys.*, **2**, 367-414.

Ooyama, K., 1964: A dynamical model for the study of tropical cyclone development. *Geofisica Internacional (Mexico)*, **4**, 187-198.

Charney, J.G., and A. Eliassen, 1964: On the growth of the hurricane depression. *J. Atmos. Sci.*, **21**, 68-75.

山岬正紀, 1970: 台風の発達の力学. *天気*, **17**, 207-227.

Donaldson, R.J., and D. Atlas, 1964: Radar in tropical meteorology. *Proc. Symp. Tropical Meteorology*, 423-473. New Zealand Meteor. Service. Wellington, New Zealand.

Hutchings, J.W., (ed.), 1964: Proceedings of Symposium on Tropical Meteorology, Rotorua, New Zealand, 1963. New Zealand Meteor. Service. Wellington, New Zealand.

Japan Meteor. Agency, 1963: Proceedings of the Inter-Regional Seminar on Tropical Cyclones in Tokyo (気象庁技術報告, 第21号).

5. 熱帯対流圏の擾乱

Palmer, C.E., 1952: Tropical meteorology. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **78**, 126-163.

Yanai, M., T. Maruyama, Ts. Nitta and Y. Hayashi, 1968: Power spectra of large-scale disturbances over the tropical Pacific. *J. Meteor. Soc. Japan*, **46**, 308-323.

Wallace, J.M., and C.-P. Chang, 1969: Spectrum analysis of large scale wave disturbances in the tropical lower troposphere. *J. Atmos. Sci.*, **26**, 1010-1025.

Nitta, Ts., 1970a: Statistical study of tropospheric wave disturbances in the tropical Pacific region. *J. Meteor. Soc. Japan*, **48**, 47-60.

———, 1970b: On the role of transient eddies

in the tropical troposphere. *J. Meteor. Soc. Japan*, **48**, 348-359.

———, 1970c: A study of generation and conversion of eddy available potential energy in the tropics. *J. Meteor. Soc. Japan*, **48**, (in press).

Yanai, M., and M. Murakami, 1970: Spectrum analysis of symmetric and antisymmetric equatorial waves. *J. Meteor. Soc. Japan*, **48**, 331-347.

6. 熱帯成層圏

Reed, R.J., 1965: The present status of the 26-month oscillation. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **46**, 374-387.

Lindzen, R.S., and J.R. Holton, 1968: A theory of the quasi-biennial oscillation. *J. Atmos. Sci.*, **25**, 1095-1107.

柳井迪雄, 丸山健人, 1969: 熱帯成層圏大気の運動—準2年振動と大規模波動について—. *天気*, **16**, 239-260.

Wallace, J.M., 1969: Some recent developments in the study of tropical wave disturbances. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **50**, 792-799.

Maruyama, 1967: Large-scale disturbances in the equatorial lower stratosphere. *J. Meteor. Soc. Japan*, **45**, 391-408.

Maruyama, 1968: Upward transport of westerly momentum due to large-scale disturbances in the equatorial lower stratosphere. *J. Meteor. Soc. Japan*, **46**, 404-417.

Wallace, J.M., and V.E. Kousky, 1968: Observational evidence of Kelvin waves in the tropical stratosphere. *J. Atmos. Sci.*, **25**, 900-907.

7. 低緯度擾乱の力学

Matsuno, T., 1966: Quasi-geostrophic motions in the equatorial area. *J. Meteor. Soc. Japan*, **44**, 25-43.

Lindzen, R.S., 1967: Planetary waves on beta-planes. *Mon. Wea. Rev.*, **95**, 441-451.

Mak, M.K., 1969: Laterally driven stochastic motions in the tropics. *J. Atmos. Sci.*, **26**, 41-64.

Yamasaki, M., 1969: Large-scale disturbances in the conditionally unstable atmosphere in low latitudes. *Papers in Meteor. and Geophys.*, **20**, 289-336.

Hayashi, Y., 1970: A theory of large-scale equatorial waves generated by condensation heat and accelerating the zonal wind. *J. Meteor. Soc. Japan*, **48**, 140-160.