

# Tropical Meteorology

## —気象学外国文献集紹介—

浅井 富雄\*

### 1. はしがき

本シリーズ第4号「熱帯気象学」に収録されている論文は次の5篇である（第1頁と第81頁は差し違え）。

(1) Riehl, H., 1945: Waves in the easterlies and the polar front in the tropics. Dept. Meteor, Univ. Chicago, Misc. Rept., No. 17, 1-79.

(2) Bunker, A.F., B. Haurwitz, J.S. Malkus and H. Stommel, 1949: Vertical distribution of temperature and humidity over the Caribbean Sea. Pap. Phys. Oceanogr. and Meteor., MIT and WHOI, 11, 1-82.

(3) Riehl, H. and J.S. Malkus, 1958: On the heat balance in the equatorial trough zone. Geophysica, 6, 503-538.

(4) Hutchings, J.W., 1964: Large scale perturbations of the tropical circulation. Proc. Symp. Tropical Meteor., New Zealand Meteor. Service, 123-143.

(5) Palmèn E., 1964: General circulation of the tropics. Proc. Symp. Tropical Meteor., New Zealand Meteor. Service, 3-30.

これらの論文にはほぼ共通していえることは年代の古いことと大学や研究所の報告、シンポジウムのプロシーディングなどである点である。従って、学会誌では見られない大量の観測資料や天気図類も含まれた長篇が多い。

これらの論文の内容は既に教科書や総合報告に多くとり入れられており、最早一般の読者には原著にさかのぼる必要のないように思えるが、それなればこそ、熱帯気象学の発展の歴史に画期的意義をもつものであって研究者にとっては必読の論文ともいえる。本シリーズの第3号“Tropical Cyclone”に比して本号の内容の古いのは文

献集第1巻では前者の特集がなされたのに対し熱帯気象学については本号が最初のものであることにもよるであろう。また、通常の学会誌掲載論文ではなく、従って一般に入手し難いものであることにも留意されるべきであるが、めざましく発展した熱帯気象学の最近数年間の成果を除けば、収録論文以後に見るべきものがなかったことに最も大きな原因がある。近年の熱帯気象の研究に対する世界的な熱の入れ方は GARP の内容からもうかがえる通り、最早その遅れを放置できない段階に来ていることを示している。Line Islands Experiment (LIE), Barbados Oceanographic and Meteorological Experiment (BOMEX) など最近の一連の熱帯気象実験、今後予定されている GARP Atlantic Tropical Experiment (GATE)などを契機として熱帯気象学が大きく前進することは間違いない。このような見地から、本号はいわば熱帯気象学の「温故知新」編といえることができるであろう。

本号収録論文の(3)と(5)は熱帯大循環に関するもの、(1)と(4)は熱帯大規模じょう乱、(3)は熱帯対流圏下層、特に貿易風逆転下の対流層に関するもので、熱帯性低気圧を除く全分野に互っている。それぞれの分野の多数の参考文献から若干の論文を適切に選択することは筆者の能力を越えるので、個々の論文の引用は避けた。末尾に、教科書、解説、総合報告のみをリストしておく。

これまでの外国文献集の紹介欄では、通常選者が掲載論文の選定理由、収録されなかった他の重要文献、それらの概要や読むうえで注意を要する点などを丁寧に解説し、一般の読者やその方面の研究者に大いに役立ってきた。今回はこれまでとは少し趣が異なり、選者でも熱帯気象学の専門家でもない筆者が一読者として、筆者なりの読後感にもとづいて多少とも読者の参考に供し得ると思われるものを付け加えることである。従って、筆者の

\* T. Asai: 東京大学海洋研究所

見当違いや誤解が入るかも知れないが御了解願いたい。

## 2. 熱帯大循環

第2次世界大戦後、戦時中や戦争直後に蓄積された世界中の高層気象観測資料を組織的に利用する動きが起った。Starr (1954) らの MIT グループ、Bjerknes や Mintz (1955) を中心とした地球物理学教室創設間もない UCLA グループである。それぞれ大部の報告書「大気大循環の研究」にまとめられている。それらの主要部は外国文献集第1巻の第1, 2号“**general circulation, Part I, II**”に掲載済である。Palmén もほぼこの時期に低緯度帯の解析に関心をもち、IGY などその後の資料も追加して得られた成果の総括を1963年 New Zealand において開かれた熱帯気象学シンポジウムで報告した。それが第(5)論文“General circulation of the tropics”である。ここでいう熱帯大循環の主な内容は、熱帯対流圏において月、季節、年平均の緯度圏に沿って平均された、子午断面に示される風や温度場の維持や変動を解明するための収支解析的研究である。中高緯度帯では角運動量や熱量の南北交換に関して大規模乱渦による水平混合が支配的であることが前記報告書などによって明らかにされた。熱帯地方の大循環では大規模乱渦 (Rossby 型循環) の他に子午面循環による輸送過程が加わる。特に、後者の子午面循環の重要性の増大が熱帯大循環の特徴ともいえる。例えば、冬季の熱帯子午面循環 (Hadley 循環) に伴う質量輸送は中緯度の間接子午面循環 (Ferrel 循環) の6~7倍といわれている。

熱帯は角運動量やエネルギーの他の地帯に対する補給源になっている。熱帯大循環の理解にはやはり地球大気全体の大循環についての知識が背景になければならない。その見地から、Palmén と Newton の教科書 (1969) “**Atmospheric circulation systems**”の第1章及第2章は UCLA グループの成果にやや偏している。きらいはあるが解析面での現状の知識を整理するのに好適であり、Reiter の一連の総合報告のなかの1巻 (1969) “**Atmospheric transport processes, Part I: Energy transfers and transformations**”は各国の新しい文献も豊富に引用しているのでこの方面の研究には便利である。理論面では Lorenz (1967) の“**The nature and theory of the general circulation of the atmosphere**”がある。

熱帯地方の大循環では子午面循環 (Hadley 循環) の重要性が指摘されたが、その Hadley セルの赤道側上昇部が熱帯循環の源動力となっている。この部分での

エネルギー輸送機構に関する画期的な研究が Riehl と Malkus による第(3)論文“On the heat balance in the equatorial trough zone”である。赤道低圧帯から極側へ $10^\circ$ の緯度帯の大気に対する熱収支解析を通して背の高い対流による熱の鉛直輸送の不可欠なことを示し、赤道低圧帯における大規模じょう乱から対流にいたる一連の物理過程の序列について卓抜な見解を提示した。ここでのハイライトは鉛直質量輸送の大部分は積乱雲の上昇核中で行なわれ、その上昇核は周囲と殆んど混合することなく下層の空気を上方へ運び得る一種の煙突“hot tower”であるという仮説の提唱である。その後、彼等はこの仮説をハリケーンのエネルギー収支解析についても適用している (Riehl, H. and J.S. Malkus, 1961: Some aspects of hurricane Daisy, 1958)。この仮説が出発点となって、その定量的モデル、理論化が積乱対流のパラメタリゼーションの問題として今日発展しつつある。この間の事情については、浅井 (1967) の「熱帯循環における積雲対流」に解説されている。

一般に中緯度帯に比して観測資料の極めて乏しいことが熱帯におけるこの種の解析結果を不確実なものにしてきた。この状態は今日もなおあまり改善されていないが、現在進行中の GARP は、より豊富な観測資料と数値実験の研究によって議論の多い定量的問題の解明へ大きく前進することであろう。

## 3. 熱帯大規模じょう乱

前節では便宜上、大循環を帯状平均にしぼったが、熱帯地方でも中高緯度帯と同様、東西方向に移動したり停滞したりする種々の大規模じょう乱が見出され、それらはまた大循環の重要な構成要素であることは論をまたない。第(1)論文、Riehl の“Waves in the easterlies and the polar front in the tropics”は熱帯対流圏における各種じょう乱の構造についての解析的研究であり、なかでも偏東風波動に関する成果は特筆に値する。当時、偏東風帯を気圧中心が西方へ移動するという事実は既に知られていたが、Dunn (1940) のイサロバー解析によって、西インド・カリブ海域でイサロバーの中心が次ぎ次ぎに東から西へ移動することが明示された。第2次大戦中、シカゴ大学グループがプエルトリコに熱帯気象研究所を開設して以来、Riehl らはそこを拠点に低緯度地方の総観解析に傾注した。その成果が上記論文となって現われたのである。当時のお乏しい高層観測資料を有効に活用して、数1,000kmの水平規模をもつ偏東風波動の性状を明らかにし、更に偏西風波動の力学

(Rossby 波の理論)を偏東風波動に適用してその運動学的性質に言及している。これらの成果は **Riehl** (1954) 自身の教科書 “**Tropical meteorology**” 第 9 章に集大成されている。

第 (4) 論文 **Hutchings** の “Large scale perturbations of the tropical circulation” は前節で述べた第 (5) 論文同様、New Zealand での熱帯気象シンポジウムにおける総合報告である。**Hutchings** は熱帯循環における経度方向の変動や季節変動などの原因を大陸と海洋の分布(その熱的性質の差異)による所謂地域的なもの、大規模じょう乱と大循環との相互作用による地球規模のものに整理した。とりわけ重要な現象としてのモンスーンについて、**Jeffreys** (1926)、**Schmidt** (1946) 以来の前者の立場からの熱的循環理論、後者の立場からの **Yin** (1949) や中国科学院の人達 (1957) の偏西風帯のジェット流の季節変化と結びつける解析的研究をあげている。モンスーンについては最近の **Ramage** (1971) “**Monsoon meteorology**” やインドの夏季モンスーンについての **Das** (1968) “**The Monsoons**” が参考になる。

モンスーンは最も重要な熱帯大規模じょう乱の一つであるが、それに匹敵するもう一つの重要な現象は赤道成層圏で卓越する約26ヶ月周期の帯状流の変動である (**Reed** と **Rogers**, 1962)。また、**柳井**らのグループ、**Wallace** らのグループの一連の解析は熱帯大規模じょう乱に関する系統的な研究であり、新しい事実が見出されつつある。理論面では、**松野**、**Lindzen**、**Holton**、**山岬**らの熱帯における波動や準2年周期変動に関する論文は見逃がせない。**柳井** (1967) の「熱帯気象学の展望」、**柳井・丸山** (1969) の「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——」の解説や「天気」入門講座「熱帯気象学への招待」(**柳井**, 1970) は各分野毎の参考文献もあるのでぜひ目を通して欲しい。**Reed** (1965) の26ヶ月周期変動に関する総合報告、**松野** (1970) の解説「重力波と地衡風運動」、**Wallace** (1971) の西太平洋上の熱帯対流圏波動じょう乱のスペクトル解析についての総合報告も上記**柳井**らのそれと併せて読むことをすすめたい。

#### 4. 熱帯対流圏の下層

1944年以来、3次にわたり Woods Hole 海洋研究所が中心となってカリブ海域で海上気象観測が行なわれた。第 (2) 論文 **Bunker et al** “Vertical distribution of temperature and humidity over the Caribbean Sea”

は第2次の観測、即ち1946年春実施された西インド諸島の19.5°N, 66°W (プエルトリコ San Juan の北) と10°N, 79.5°W (パナマ Colo Solo の北) において船と航空機による貿易風逆転層下の大気の構造や積雲の観測結果に関するものである。Woods Hole 海洋研究所が行なったこの一連の観測は熱帯海洋上での最も本格的な研究観測であって、国際インド洋観測 (IIOE) やごく最近の GARP に関連した熱帯実験 (LIE, BOMEX など) にいたるまで、長年に亘ってこの方面での最も貴重な資料を提供し、また数々の成果をあげている。それらの多くは **Riehl** の熱帯気象学の教科書に見出すことができる。また、対流雲の研究に重要な貢献をした **Stommel** (1947) のエントレメント仮説もこの時の積雲の観測から生まれたものである。

本論文の最大のポイントは貿易風帯の気層の構造を明確にし、海洋から大気へ補給されたエネルギーを上方へ輸送する過程の物理的考察に端緒を開いたことにある。貿易風逆転層下は一見して積雲の存在する雲層 (cloud layer) とその下の層 (subcloud layer) に大別される。subcloud layer では気温の鉛直分布は乾燥断熱減率に近く、従って温位はほぼ一定となり、また混合比も殆んど一様で非常によくかきまぜられた均一な層であることがわかる (homogeneous layer と呼ばれる)。この subcloud layer を更に詳細に見れば最下層では気温減率は僅かに乾燥断熱減率より大きく、上半層では乾燥断熱減率よりやや小さく、雲層との間にかなり安定で混合比の急減する転移層 (transitional stable layer) が見出される。雲層は凝結高度から逆転層下面までを占め、気温分布は湿潤断熱減率より大きく条件付不安定な成層状態である。貿易風積雲の消長と subcloud layer や海面とのエネルギー交換の関係、雲層の大規模じょう乱に対する応答など、今日解明を急がれている多くの問題点が浮きぼりにされている。著者の一人、**Malkus** (1962) が “The sea” 第1巻第4章 “Large-scale interaction” に上述の事柄についての総合報告を掲載している。大気-海洋相互作用という一般の問題の他に、熱帯の大気境界層についての観測・理論両面からの研究は最近数年間急速に活発化しつつある。

#### 5. あとがき

文献集掲載論文5篇に直接関係する部分に話題を限定したため、その他の興味あるしかも重要な多くの問題、例えば、熱帯性低気圧は別にしても ITCZ、熱帯成層圏、南北両半球間の交換、中緯度帯との相互作用、熱帯対流

雲や cloud cluster, 熱帯じょう乱の解析や理論, 熱帯大気境界層など僅かしか或は全くふれられなかった。米国大気科学研究センター (NCAR) で例年開かれる夏季セミナーは昨年 (1972) 熱帯気象学 (熱帯大気の力学) をそのテーマにとりあげた。最近入手したその報告書から, GATE の Work shop を兼ねたこともあるが, 内容の充実した盛会の様子がよくうかがえる。

すぐれた関係論文が多数あるので, 以下には解説, 総合報告, 教科書類のみをとりあげておく。これらには引用文献が豊富にリストされているから, それを通して原著論文にさかのぼっていただきたい。

### 参考文献

- 1) 浅井富雄, 1967: 熱帯循環における積雲対流, 天気, **14**, 92-101.
- 2) Atkinson, G.D., 1971: Forecasters' guide to tropical meteorology. Tech Rept. 240, Air Wea. Service, U.S. Air Force.
- 3) Bjerknes, J. and Y. Mintz, 1955: Investigations of the general circulation of the atmosphere. Final Report, UCLA.
- 4) Das, P.K., 1968: The monsoons. Edward Arnold, 162pp.
- 5) Garstang, M., 1972: A review of hurricane and tropical meteorology. Bull. Amer. Meteor. Soc., **53**, 612-630.
- 6) GARP Publication Series および関係文献リストは浅井富雄, 1973: GARP に関する最近の動向, 天気, **20**, 364-368. 参照.
- 7) Lorenz, E.N., 1967: The nature and theory of the general circulation of the atmosphere. WMO, 161pp.
- 8) Malkus, J.S., 1962: The Sea, 第1巻 Physical Oceanography の第4章, Large-scale interaction. 88-294. John Wiley and Sons, New York.
- 9) Malkus, J.S. and H. Riehl, 1964: Cloud structure and distributions over the tropical Pacific Ocean. Univ. Calif. Press, 229pp.
- 10) 松野太郎, 1970: 重力波と地衡風運動, 天気, **17**, 349-352.
- 11) Mintz, Y., 1955: Final computations of the mean geostrophic poleward flux of angular momentum and of sensible heat in the winter and summer of 1949. Final Report, UCLA.
- 12) NCAR, ASP and GARP Task Group, 1972: Dynamics of the tropical atmosphere, Notes from a Colloquium, Summer 1972, 587pp.
- 13) Palmer, C.E., 1951: Tropical meteorology. Compendium of Meteor, Amer. Meteor. Soc., 859-880.
- 14) Palmer, C.E., 1952: Tropical meteorology. Quart. J. Roy. Meteor. Soc., **78**, 126-163.
- 15) Palmer, C.E., C.W. Wise, L.J. Stempson and G.H. Duncan, 1955: The practical aspects of tropical meteorology. U.S. Air Force Geophys., No., 76.
- 16) Palmén, E. and C.W. Newton, 1969: Atmospheric circulation systems: their structure and physical interpretation. Academic Press, New York, 604pp.
- 17) Ramage, C.S., 1971: Monsoon meteorology. Academic Press, New York, 296pp.
- 18) Reed, R.J., 1965: The present status of the 26-month oscillation. Bull. Amer. Meteor. Soc. **46**, 374-387.
- 19) Reiter, E.R., 1969: Atmospheric transport processes, Part 1: Energy transfers and transformations. U.S. Atomic Energy Commission, 253pp.
- 20) Riehl, H., 1954: Tropical meteorology. McGraw-Hill, New York, 392pp.
- 21) Starr, V.P., 1954: Studies of the atmospheric general circulation. Final Report, Part 1. MIT.
- 22) Wallace J.M., 1971: Spectral studies of tropospheric wave disturbances in the tropical western Pacific. Rev. Geophys. Space Phys., **9**, 557-612.
- 23) 柳井迪雄, 1967: 熱帯気象学への展望. 天気, **14**, 73-91.
- 24) 柳井迪雄・丸山健人, 1969: 熱帯成層圏大気の運動——準二年振動と大規模波動について——. 天気, **16**, 239-260.
- 25) 柳井迪雄, 1970: 熱帯気象学への招待. 天気, **17**, 441-444.
- 26) Zipser E.J., 1970: The Line Islands Experiment, its place in tropical meteorology and the rise of the fourth school of thought. Bull. Amer. Meteor. Soc., **51**, 1136-1146.