——アドヴァーンスド・コース——

熱帯気象学

山岬正紀* 新田 勁**

1. はしがき

さきに出された気象学入門講座（21）：**熱帯気象学への招待**（**柳井**，1970）は，1960年代までの熱帯気象学を学ぶ手引きであり，本稿ではそれ以後の発展を中心に述べることになっている．熱帯気象学の対象とする現象は多岐にわたっており，それらは中緯度との複雑な相互作用を通してわれわれに直接間接の影響を与えている．その中で最も関係の深いのは台風であろう．台風の発生と密接に関連する現象としては，熱帯収束帯やそこでの擾乱，および偏東風波動擾乱などがある．さらには，これらを支配する貿易風やモンスーン等の熱帯大循環の研究も重要である．熱帯気象を特徴づける重要な要素のひとつは，条件付不安定成層の故に起こる積雲対流である．これは，台風やその他多くの大規模擾乱のエネルギー源であり，これらの相互作用の研究は近年多くの人の関心を集めている．特に，1974年に行なわれた熱帯大西洋での特別観測 GATE からの成果が期待されている．成層圏では，準2年振動や大規模赤道波の発見以来，理論・解析ともに飛躍的な発展をみせた．一方，境界層・混合層についての研究は近年になって本格的に行なわれるようになり，特に積雲対流と深い関連をもつものだけにその重要性はいっそう増していくことであろう．

熱帯気象に関する論文は近年とくに多く，そのすべてを紹介することは不可能でありまたその必要もないであろう．ここで紹介する論文，総合報告などで引用されている論文をそれぞれの関心に応じて読んでいただければよいと思う．各論に入るまえに，全般的な参考文献に触れておこう．1970年代前半の研究の総合報告として，**Yanai**（1975）があり，これから熱帯気象学を学ぶ人はもちろん，研究に携わっている人にも大いに参考になる．その引用文献は豊富で，この期間における重要論文を網羅している．**Holton**（1972）は，その気象力学の教科書の中で熱帯大気の運動を取り上げ，積雲対流による熱放出の役割，成層圏および対流圏の波動擾乱などについてわかりやすく説明しており，気象力学の立場から熱帯大気の特性を理解するのに参考になる．また気象学外国文献集紹介の **浅井**（1973），**柳井**（1972）や **Garstang**（1972），**Garstang・Betts**（1974）も参考になるであろう．最近の研究の動向を知るには，**アメリカ気象学会**（1977）や **GARP** に関して熱帯の study conference（1976）の報告がある．なお，熱帯気象を初めて学ぶ人には，**NCAR** の夏の学校の講義メモ（1972）や前回にも引用されている**柳井**（1967）の総合報告，**浅井**（1967）等を最初に読むことを勧めたい．

2. 熱帯の大循環

熱帯大気の大循環に関しては，**Kidson** *et al.*（1969）を一読のうえ **Newell** *et al.*（1972，1974）による2冊の本を参考にしてほしい．7年間のデータをもとに35°Nから45°Sの領域を解析したもので，風・気温・水蒸気・雲量，雨量などの季節ごとの分布のみならず，運動量やエネルギーの収支解析，半年変動・年変動・準2年振動の解析結果も示されている．このほかに，輻射熱の分布や成層圏の大規模擾乱に関する報告も含まれている．輻射熱に関しては，この他に **Dopplick**（1972）を参考にしてほしい．

Bjerknes（1969）は熱帯太平洋の東西循環である Walker Circulation の重要性を指摘したが，**Krishnamurti**（1971 a，b）は熱帯の 200 mb の全球的な解析から，南北循環に匹敵する東西循環が全球的規模で存在することを明らかにし，Walker Circulation はその一枝にすぎないことを示した．その後この東西循環に関連して，チベット高気圧の果たす役割，準停滞性超長波，波動のエネルギー循環などに関する研究が数多くなされているが，それらについては **Krishnamurti** *et al.*（1973）および **金光**（1976）によくまとめられている．

前述の東西循環は，全球規模での海陸分布により励起された大規模循環（モンスーン）のひとつの現われとみることができるが，モンスーンについて概観するには，**Ramage**（1971）の教科書がある．最近のモンスーンに

* M. Yamasaki，気象研究所台風研究部．
** T. Nitta，東京大学理学部地球物理学教室．

関する研究の動向を知るには，**Krishnamurti** (*et al.*) (1977) のモンスーン特集号がよい．全球規模の循環についてのみならず，各種のモンスーン擾乱や積雲対流の役割など，著者21人による論文が収録されている．

ITCZ（熱帯収束帯）については，最近の気象衛星による観測技術の進展により，全球的な分布や位置の変動などその振舞いが詳しく解析されるようになった．**Godshall** (1968) は初めて TIROS による雲写真を用いて太平洋の ITCZ を解析し，風の分布と雲の分布がよく対応することを示した．**Hubert** *et al.* (1969) は熱帯太平洋での海水面温度と雲量との関係を調べた．また，**Gruber** (1972) は太平洋，大西洋の ITCZ の位置の季節的変動を議論している．一方，ITCZ 内の構造については **Estoque** (1975) と **Godbole・Ghosh** (1975) による解析があるが詳しい定量的解析は今後に残されている．

なお，気象研究ノート 129 号の第 2 章（井沢，門脇）に台風に関連して熱帯循環や ITCZ について述べられている．

大循環モデルにおいて熱帯大気がどのようにシミュレートされているかをみるには，**Manabe** *et al.* (1974) が必読の論文である．しかし，その前に **Manabe** *et al.* (1965)，**Manabe・Smagorinsky** (1967) の半球モデルによる年平均の状態のシミュレーションの結果や，**Manabe** *et al.* (1970) や **Holloway・Manabe** (1971)，**Manabe・Terpstra** (1974) の全球モデルによる 1 月の状態の結果に関する論文を読んでおく方が順序としてよいであろう．最初に挙げた Manabe *et al.* (1974) は，季節変化を考慮した最も進んだモデルによる結果であり，帯状平均場や，対流圏上部と地表付近での風系（ITCZ，モンスーン，貿易風），降水量の分布など，季節別の特徴がどのようにシミュレートされているかがわかり，また力学的な理解の手助けとなるであろう．また，Manabe・Holloway (1975) も併せ読んだらよいと思う．なお，1 月の状態に関しては **Kasahara・Washington** (1971) や **Kasahara** *et al.* (1973)，**Sommerville** *et al.* (1974)，**Gates** (1975) の論文があるが，熱帯の解析は前述の論文ほど詳しくはない．7 月の状態についても扱っている **Gates・Schlesinger** (1977)，**Stone** *et al.* (1977) にも目を通したらよいと思う．これらの論文を読めばわかるように熱帯における平均状態を理解するためには輻射に関する知識も必要であり，これらの論文で引用されているものを読んでほしい．また，帯状平均状態についての基礎的な理解を深めるには **Dickinson** (1971 a，b) の論文がある．潜熱の放出や擾乱による運動量輸送の役割を簡単化したモデルを用いて論じている．

北半球の夏季における熱帯循環の力学については，前述の**金光** (1976) の解説がある．Manabe らの結果のほかに，彼自身の実験予報の結果や，Colton や Krishnamurti 等による基礎的な研究を紹介している．海陸分布に対応する熱源が超長波に対して果たす役割や，帯状流の維持に対する超長波の重要性，異なったスケールの波の間の相互作用などの問題が述べられている．

準定常（1 カ月のオーダでの）な大規模擾乱についての基礎的な研究としては，**Webster** (1972, 1973 a，b）がある．山や熱源を仮定したときの大気の振舞いや，中緯度からの定常な強制力に対する熱帯の応答について論じている．

夏の循環の特徴のひとつであるインド付近のモンスーンの力学については，前述の論文のほかに，大循環モデルを用いた **Hahn・Manabe** (1975)，**Shukla** (1975) や **Washington・Daggupaty** (1975) の論文がある．また，モンスーンに関連して **Krishnamurti** *et al.* (1976) がある．冬のモンスーンについては **Washington** (1976) の論文とその引用文献をみればよい．最近インドで開かれたモンスーンに関する国際シンポジウムの報告として，**新田** (1977)，**金光** (1978) が近年の動向を知るのによい．

熱帯循環のメカニズムを理解するには，短時間予報モデルからの結果も役に立つ．実測のデータを用いた実験予報の最初は **Krishnamurti** (1969) で，ITCZ に関する24時間予報を行なった．**Miyakoda** *et al.* (1974) は数日以上の実験予報を大循環モデルを用いて行なっている．これは Krishnamurti と同様に春における熱帯循環を理解するのに役立つ．また，4 次元解析の実験の論文である **Miyakoda** *et al.* (1976) も参考になるであろう．

3. 対流圏の擾乱

1960年代後半から1970年代の初めにかけて，スペクトル解析，合成図の作成，力学計算などにより，波動の構造やエネルギー変換の様相が明らかにされた．対流圏は大きな熱源を含んでいたり，下の境界の影響を強く受けるということもあり，解析領域や時期の違いにより多種多様な特性をもつ擾乱が報告されている．それらを整理した総合報告として **Wallace** (1971) と **Yanai** (1971)

がある．また，**山岬・丸山・新田**（1976）はその後の研究成果も加味して対流圏擾乱のまとめを行なっている．**Julian**（1971）は3～7年の長期間のスペクトル解析によって4～5日周期変動に地域差があることを示し，**Wallace**（1972）は，経験的直交函数の手法により対流圏上部の混合ロスビー重力波と下層の偏東風波動とが強く関係しあっていることを示した．**Chang・Miller**（1977）は熱帯太平洋の解析で，海水面温度が偏東風波動の振幅・垂直構造に及ぼす影響を議論している．**Madden・Julian**（1972）により Rossby-Haurwitz 波と同定された周期約5日の波については，**Madden・Stokes**（1975）により73年間のデータからもその存在が確認され，さらに**Misra**（1975）により垂直構造が，また**Burpee**（1976）により雨との関係が調べられている．この波については**Rodgers**（1976）も参照されたい．

スペクトル解析の手法を気象衛星で得られた輝度分布に適用して波動を解析しようとする試みが，**Tanaka・Ryuguji**（1971）以来数多くなされてきた．それらについては，**Zangvil**（1975）の序説に詳しくまとめられている．彼はまた全球の輝度データの時間-空間スペクトル解析より波動の波長と周期を求め，これまでのゾンデのデータから得られた結果と比較し波動の種類を同定している．

モンスーン域での擾乱については**Murakami**（1976）や**Krishnamurti** *et al.*（1975, 1976）をはじめとして数多くの研究がなされているが，それらについては前述のモンスーン特集号を参照してほしい．GATE の解析で周期3.5日，波長2,500 km の擾乱が緯度11°N 上をアフリカ大陸内部から東部大西洋へ伝播することが明らかにされたが，その力学的構造，エネルギー循環については**Reed** *et al.*（1977）と**Norquist** *et al.*（1977）に詳しく報告されている．

対流圏の波動を説明する理論としては，順圧不安定，潜熱の放出によるもの，中緯度からのエネルギー伝播によるもの等があるが，それぞれどのような論文があるかは，**Yanai**（1971），**和田**（1974）をみていただきたい．上記のうち中緯度からのエネルギー伝播は，比較的スケールの大きな波動や成層圏の波動に適用されるものであろう．潜熱の放出による波動と考える研究は2つに大別され，熱放出を強制力として仮定して大気の応答を調べるもの（**Holton,** 1971; **Murakami**, 1972 a; **Estoque** *et al.*, 1977）と，不安定論とがある．後者は第2種条件付不安定（CISK）とよばれるもので，これについては**山岬**ほか（1976）でも述べられている．**Manabe** *et al.*（1974）の大循環モデルで得られている偏東風波動については，**Hayashi**（1974）がスペクトル解析を行なっている．インド付近の夏のモンスーン擾乱については**Krishnamurti** *et al.*（1976）の実験予報の論文があり，**Mak**（1975）は中部対流圏で顕著に見られるモンスーン低気圧を傾圧不安定によるものとして論じている．**Murakami**（1974）は，定常な熱源と16日周期（インドの雨の変動に見られる周期）の熱源とを仮定したときに，定常波（モンスーン循環）と波数1～3の transient wave がどのように振舞うかを調べている．これに関連して**Murakami・Frydrych**（1974）の論文がある．

台風については，**気象研究ノート129号「台風特集」**を見ればどのような論文を読んだらよいかわかることと思う．台風の発達と構造に関しては，特に**Ooyama**（1969）は必読の論文である．「台風特集」以後に出された論文としては，**Wada**（1977）の不安定論，**Anthes**（1977），**Jones**（1977 b），**Yamasaki**（1977 a，b）の数値実験などがある．

台風の移動や，大規模場の中での擾乱の振舞いを詳しく扱う必要がある場合には，nested grid や moving grid を用いるなど計算スキームのことが問題になってくる．台風の移動や計算スキームの問題については，**Ookochi**（1972, 1974），**Harrison・Elsberry**（1972），**Harrison**（1973），**Miller** *et al.*（1972），**Mathur**（1974）**Ceselski**（1974），**Ley・Elsberry**（1976），**Hoke・Anthes**（1977），**Madala・Piacsek**（1975），**Anthes・Hoke**（1975），**Jones**（1977 a）など近年多くの論文が出されている．

4. 成層圏

熱帯の成層圏，中間圏には年変動の他に準2年振動，半年変動があることが知られている．また1960年代後半には，混合ロスビー重力波とケルビン波が発見され，熱帯成層圏の研究は近年大きな発展をみせた．これらについては**Maruyama**（1967, 1971他）の論文や**柳井・丸山**（1969）の総合報告，およびその後の研究成果を加味した**Wallace**（1973）などがたいへん参考になる．また，**山岬・丸山・新田**（1976）にも目を通してほしい．

長周期変動に関する最近の研究としては，**Groves**（1973）がロケットのデータを用い，準2年振動の周期が1962年以前は約26カ月であったものが1962～1969年には約32カ月と長くなっていることを指摘した．**Belmont** *et al.*（1974）は12年間のレーウィンゾンデ，ロケットの

風のデータを解析し，準2年振動や年変動，半年変動，4カ月変動の振幅および位相の全球的分布を求めている．**Nastrom・Belmont**（1975）は同様の解析を気温について行なっている．また，**Groves**（1972）はロケットのデータを用いて60～130 km での風と気温の年変動を解析している．一方，1963年3月の Agung 噴火とその後の熱帯成層圏の循環，気温の変化との関係については，いろいろな角度から研究されているが，それについては**山元**（1978）の火山噴火と気候変化に関する総合報告の中で詳しくまとめられている．

Rao・Ramana Murti（1972）は，それまで主に太平洋のデータによって確認されていた混合ロスビー重力波がインドネシア地域においても存在することを示し，また **Parker**（1973）はインド洋上空およびアフリカ大陸上空でも検出している．最近，**Lindzen・Tsay**（1975）は成層圏の4～5日周期の変動には従来の混合ロスビー重力波以外にケルビン波と西進ロスビー波が混在している可能性を指摘している．また，**Odo**（1976）は約10日周期の波にも，ケルビン波のほかにロスビー波が混在していることを報告している．**Angel** *et al.*（1973）は12年間の7地点の 50 mb 上の風，気温のスペクトル解析を行なって，ケルビン波と準2年振動との関係を詳しく調べた．**Miller** *et al.*（1976）は，同様な長期間の解析をケルビン波と同時に混合ロスビー重力波についても行ない，準2年振動と波による運動量輸送との対応を調べている．

レーウィン・ゾンデのとどかない 30 km 以上の成層圏，中間圏の擾乱については不明な部分が多いが，**Fritz**（1970）と **Deland**（1973）は気象衛星の赤外放射測定（SIRS）のデータを用いて熱帯成層圏の西進波の存在を示した．**Barnett**（1975）と **Hirota**（1976）は Nimbus 5 の SCR のデータを用いて全球の成層圏における擾乱を解析し，上部成層圏においては中高緯度で波数1の停滞波が卓越し，赤道を通って冬半球から夏半球へ波によるエネルギーの伝播があること，低緯度での波動の振舞いは帯状流の半年周期と深く関係していることを示した．**Hirota**（1975）は，北半球の中低緯度のロケットデータを用い夏期上部成層圏・中間圏に周期10～20日の波動が存在することを指摘した．

成層圏の理論的な問題については，まず **柳井・丸山**（1969）の解説を読むのがよいと思う．赤道波に関する理論として必読の論文である **Matsuno**（1966）や **Lindzen**（1967），**Lindzen・Matsuno**（1968）を，また，準2年振動についての理論を解説しさらに今後の問題にもふれている．これらを読んだうえで，同様の問題についてのレヴューである **Wallace**（1973）も参考になる，1970年代に入ってからの論文としては，対流圏での熱源を仮定した場合の強制波に関する **Holton**（1972, 1973），**Murakami**（1972 b，1973），**Hayashi**（1976），**Chang**（1976 b），**Itoh**（1977），波と平均帯状流との相互作用（シアー中の波の伝播）に関する **Lindzen**（1970, 1971, 1972），**Uryu**（1974），**Andrews・McIntyre**（1976），準2年振動についての **Lindzen・Holton**（1968）を改良した **Holton・Lindzen**（1972）などがある．

大循環モデルにおける成層圏波動については **Manabe** *et al.*（1974）をスペクトル解析した **Hayashi**（1974）の論文が必読のものである．ここでは，対流圏における熱放出の重要性が示されている．ほかに **Kasahara** *et al.*（1973）の結果をスペクトル解析した **Tsay**（1974）がある．CISK 論としては，**山岬**ほか（1976）で引用した論文以後は **Kuo**（1975），**Holton**（1975 a），**Stark**（1976），**Chang**（1976 a）がある．準2年振動に重要な影響をもっていると考えられている成層圏上部での半年周期については **Meyer**（1970）が参考になるであろう．最近，成層圏と中間圏の力学についてのレヴューが **Holton**（1975 b）によって書かれており熱帯についても述べられているので読むことを勧めたい．

5. 積雲対流群の役割

積雲対流が大規模場に及ぼす役割の重要性は **Riehl・Malkus**（1958）以来指摘されてきたが，その後気象衛星からのデータが入手可能になり，積雲対流の組織化や大規模擾乱との関係についての情報が飛躍的に増大した．**JOC for GARP**（1970）は熱帯の積雲は cloud cluster に代表される数百 km 規模の集団に組織化されていることを示した．**Chang**（1970）はこのような雲の集団が数日周期で次々に西進していることを明らかにし，対流圏波動擾乱との間に強い関係があることを示した．**Martin・Suomi**（1972）は熱帯大西洋の cloud cluster の頻度分布，大きさ，寿命についての統計を行ない，さらに **Martin**（1975）は GATE のデータを用いて cloud cluster の移動，大きさ，寿命について詳しく調べている．**Williams・Gray**（1973）は大量の高層データを統計的に扱い，熱帯太平洋の cloud cluster の構造を求めた．また **Ruprecht・Gray**（1976）は同様な解析を大西洋の cluster にも適用している．一方 **Betts** *et al.*（1976）はVIMHEX（ベネズエラ気象・水象特別

観測）のデータからスコールライン（～100 km）の構造を求め，**Moncrieff・Miller**（1976）の力学モデルとよくあうことを示した．

Yanai（1961）は，その台風の解析の中で大規模場の熱と水蒸気の収支解析より間接的に積雲の効果を求め，台風の warm core の形成に積雲の凝結熱放出が重要なことを示したが，この手法は近年大規模場の収支解析から積雲に関する情報を得，詳しい相互作用の実態を調べようとする研究へと引き継がれている．**Yanai**（1971）は大規模場の収支解析の結果に積雲モデルを適用して雲の中を通る mass flux を求める方式を提唱した．**Yanai** *et al.*（1973）は，その方式を太平洋 ITCZ のデータに適用し大規模場に及ぼす積雲の効果を詳しく解析した．また **Gray**（1973）は別な手法で積雲の役割について議論し Yanai *et al.* とほぼ同様な結論を得ている．**Ogura・Cho**（1973）と **Nitta**（1975）は **Arakawa・Schubert**（1974）で使われた雲のスペクトル表現を用いて，観測から雲の mass flux のスペクトル分布を得る方式を示し，**Johnson**（1976）と **Nitta**（1977）は積雲内下降流の効果を取り入れた解析モデルを開発した．**Cho・Ogura**（1974）は同様な手法を Reed・Recker の波動の結果に適用し，偏東風波動と積雲との相互作用を調べた．一方，**Soong・Ogura**（1976）は個々の雲の効果を数値計算で求め，収支解析の結果に合わせるように雲の個数分布を決定している．

Austin・Houze（1973）は，レーダと雨量のデータから積雲による各種輸送量を見積もる手法を提唱し，**Houze・Leary**（1976）はその方式を熱帯領域の解析に適用し収支解析より得られた結果と比較している．

Pearce・Riehl（1969）は渦度の収支解析から積雲による渦度輸送の重要性を指摘し，また **Williams・Gray**（1973）と **Ruprecht・Gray**（1976）は cluster 内の渦度収支より，**Holton・Colton**（1972）は 200 mb の解析より積雲による効果の重要性を示した．**Reed・Johnson**（1974）は渦度の収支解析に **Yanai** *et al.*（1973）に対応する雲モデルを適用して雲の mass flux を求めた．

大規模場と積雲との相互作用に関する研究は GATE の中心課題のひとつで興味ある結果が次々と出されているが，それらについては**新田**（1978）の報告を参照してほしい．

積雲対流の効果を，台風や熱帯擾乱などの力学モデルに組み入れる場合のパラメタリゼーションの問題については，**Yanai**（1971）や **Ogura**（1972）のレヴューを読んだうえで **Ooyama**（1969, 1971），**Arakawa・Schubert**（1974）の論文が必読であろう．このほかに，台風で用いられてきたパラメタリーゼーションについては気象研究ノート 129 号の第 1 章でも述べられている．大規模場に対する積雲の効果に関する基礎的な論文としては，前述の **Soong・Ogura**（1976）がある．熱帯気象の理解には積雲対流自身の力学も重要であり，この入門講座「対流論」で紹介されている論文をみていただきたい．また「中小規模現象の気象学」も積雲対流群の役割を理解するうえで参考になるであろう．

6. 熱帯境界層

1946 年カリブ海で行なわれた特別観察を解析した **Bunker** *et al.*（1949）と **Malkus**（1958）の論文は，海面付近の surface layer に続く混合層，転移層，雲層内の温度，水蒸気の垂直構造を明らかにし，その後の熱帯境界層，雲層のモデル作成に多大の貢献を行なった重要論文である．貿易風帯逆転層下の風の垂直構造に関しては東部太平洋のデータを解析した **Riehl** *et al.*（1951）による先駆的仕事がある．その後1960年代後半から1970年代にかけて，LIE（ライン諸島特別観測），フロリダ大学による Barbados Experiment，ATEX（大西洋貿易風帯特別観測），BOMEX（Barbados 海洋・気象特別観測），VIMHEX 等の観測が大がかりに行なわれたが，それらから得られた海洋と大気の相互作用，貿易風帯逆転層下の垂直構造，混合層に及ぼす積雲の影響，収支解析，混合層と積雲のパラメタリゼーション等に関する近年の研究については，**Garstang・Betts**（1974）の総合報告があるので参考にしてほしい．そのうち BOMEX に関しては，**Holland**（1972）が境界層内の輸送量についての結果を詳しくまとめており，ATEX による輸送量の結果については **Dunkel** *et al.*（1974）がある．

その後 **Esbensen**（1975）は BOMEX のデータで雲層下の収支解析を行ない，雲層下においてもその上の雲の影響が大きいことを示した．VIMHEX を使った同様の研究に **Betts**（1976 b）がある．これまでの研究の多くは比較的天気のよい擾乱の少ない時の境界層を議論したものであるが，**Echternacht・Garstang**（1975）は積雲活動の激しい時には雲層下の構造も大きく変化することを示し，**Betts**（1976 a）は雨をもたらすメソ擾乱からの湿潤な下降流による雲層下の変質の様子を詳しく解析した．また **Lemone・Pennell**（1976）は飛行機による詳細な観測によって，積雲の活発な時にはかなり

雲層下深くまで雲スケールによって各種の垂直輸送がまかなわれていることを示した．

混合層に関する一次元モデルによる研究は多い．貿易風逆転層がある場合の混合層については，**Ball** (1960), **Tennekes** (1973), **Carson** (1973), **Stull** (1973), **Mahrt・Lenshow** (1976) が dry model で扱っており，**Lilly** (1968), **Schubert** (1976) は層積雲でおおわれた場合を論じている．積雲によるエネルギー輸送を含む場合については，**Ogura・Cho** (1974), **Betts** (1976), **Arakawa・Schubert** (1974) が参考になる．貿易風逆転層下の対流層については，**Mak** (1974, 1976), **Ogura** (1977) の論文がある．3次元モデルを用いたものとしては，**Deardorff** (1974 a, b) が混合層の発達の様子などをシミュレートしており，また **Sommeria** (1976) は積雲が存在する場合に対流層と混合層がどのように振舞うかを調べている．境界層の力学的構造については，摩擦収束に対する慣性項，成層，温度傾度などの効果を調べた **Mak** (1972), **Kuo** (1971, 1973) の論文があり，このほかに CISK との関連で**山岬**ほか (1976) でも述べている．なお，この入門講座の「大気境界層」にも目を通してほしい．

7. あとがき

熱帯気象学のどの分野をとってみても，これだけ読めばその分野のことが十分に理解できるような解説書や総合報告がないのは，これから研究を始めたいと思う人にとって不便なことである．特に，熱帯の大循環と対流圏の波動擾乱，境界層については近年解説書があまりなく，個々の論文を読んで自分なりに理解していく必要がある．他の分野についてもそうであるが，近年論文の数が非常に多く，また内容も適当でないものが少なくないので苦労する場合もあろう．論文を読むとき，よいものは素直に受け入れると共に適当な批判の目をもつことも大切であろう．本稿では，引用した論文と引用していないものとで論文としての価値には関係ない．解説や総合報告などで引用されているものは省略した場合が多いし，筆者らが疑問に思う論文でも引用している．以下の参考文献では紙面の都合で論文名や多くの共著者名は省き，また本文で引用したものでも割愛した場合もある．その著者の他の引用論文をみていただきたい．

文　献

全　般

柳井迪雄，1967：熱帯気象学の展望，天気，14, 73-91.

————，1970：熱帯気象学への招待，天気，17, 441-444.

————，1972, Tropical Cyclones —気象学外国文献集紹介—，天気，19, 51-54,

Yanai, M., 1975: Tropical Meteorology, Rev. Geophys. Space Phys., 13, 685-710, 800-808.

Holton, J.R., 1972: An Introduction to Dynamic Meteorology, New York, Academic Press, 319pp.

浅井冨雄，1967：熱帯循環における積雲対流，天気，14, 92-101.

————，1973: Tropical Meteorology —気象学外国文献集紹介—，天気，20, 693-696.

Garstang, M., 1972: A review of hurricane and tropical meteorology, Bull. Amer. Met. Soc., 53, 612-630.

————, and A.K. Betts, 1974: A review of the tropical boundary layer and cumulus convection, Bull. Amer. Met. Soc., 53, 1195-1205.

American Meteorological Society, 1977: 11 th Technical Conference on Hurricanes and Tropical Meteorology.

GARP Joint Planning Staff, 1976: Report of the Study Conference on the Development of Numerical Models for the Tropics, GARP Program on Numerical Experimentation, Report No. 13.

NCAR, 1972: Dynamics of the Tropical Atmosphere (Notes from a colloquium: Summer 1972), 587 pp.

熱帯大循環

Bjerknes, J., 1969: Mon. Wea. Rev., 97, 163-172.

Dickinson, R.E., 1971 b: Mon. Wea. Rev., 99, 511-523.

Dopplick, T.G., 1972: J. Atmos. Sci., 29, 1278-1294.

Estoque, M.A., 1975: J. Met. Soc. Japan, 53, 317-321.

Gates, W.L. and M.E. Schlesinger, 1977: J. Atmos. Sci., 34, 36-76.

Godbole, R.V. and S.K. Ghosh, 1975: Tellus, 27, 123-131.

Godshall, F.A. 1968: Mon. Wea. Rev., 96, 172-175.

Gruber, A., 1972: J. Atmos. Sci., 29, 193-197.

Hahn, D.G., and S. Manabe, 1975: J. Atmos. Sci., 32, 1515-1541.

Hubert, L.F., *et al.*, 1969: J. Atmos. Sci., 771-773.

金光正郎，1976：北半球夏季の熱帯循環とそのシミュレーション，天気，23, 533-549.

————，1978：モンスーン力学の国際シンポジウム報告，天気，25, 269-274.

Kasahara, A., *et al.*, 1973: J. Atmos. Sci., 30, 1229-1251.

Kidson, J.W. *et al.*, 1969: Quart. J. Roy, Met.

Soc., 95, 258-287.
Krishnamurti, T.N. 1969: Quart. J. Roy. Met. Soc., 95, 594-620.
———, *et al.*, 1973: Bull. Amer. Met. Soc., 54, 1234-1249.
———, *et al.*, 1976: J. Atmos. Sci., 33, 2350-2362.
———, *et al.*, 1977: Pure and Applied Geophysics, 115, 1087-1529.
Manabe, S. *et al.*, 1970: J. Atmos. Sci., 27, 580-613.
———, *et al.*, 1974: J. Atmos. Sci., 31, 43-83.
———, and J.L. Holloway, 1975: J. Geophys. Res., 80, 1617-1649.
Miyakoda, K., *et al.*, 1974: Mon. Wea. Rev., 102, 571-591,
———, *et al.*, 1976: J. Atmos. Sci., 33, 561-591.
Newell, R.E., *et al.*, 1972: The General Circulation of the Tropical Atmosphere and Interactions with Extratropical Latitudes, 1, MIT Press, 258 pp.
Newell, R.E., *et al.*, 1974: 2, 371 pp.
新田 尚, 1977: モンスーンに関する国際シンポジウムに出席して, 天気, 24, 375-379.
Ramage, C.S. 1971: Monsoon Meteorology, Academic Press, 296 pp.
Shukla, J., 1975: J. Atmos. Sci., 32, 503-511.
Somerville, R.C.J., *et al.*, 1974: J. Atmos. Sci., 31, 84-117.
Stone, P.H. *et al.*, 1977: Mon Wea. Rev., 105, 170-194.
Washington, W.M., 1976: Mon. Wea. Rev., 104, 1023-1028.
Webster, P.J., 1973 b: Mon. Wea. Rev., 101, 803-816.

対流圏の擾乱

Anthes, R.A., 1977: Mon. Wea. Rev., 105, 287-300.
Burpee, R.W., 1976: J. Atmos. Sci., 33, 2292-2299.
Ceselski, B.F., 1974: J. Atmos. Sci., 31, 1241-1255.
Chang, C.P., and C.R. Miller, 1977: J. Atmos. Sci., 34, 615-628.
Estoque, M.A., *et al.*, 1977: J. Atmos. Sci., 34, 77-86.
Harrison, E.J., 1973: J. Atmos. Sci., 30, 1528-1543.
Holton, J.R., 1971: J. Atmos. Sci., 28, 55-64.
Hoke, J.E., and R.A. Anthes., 1977: Mon. Wea. Rev., 105, 1266-1280.
Jones, R.W., 1977 b: J. Atmos. Sci., 34, 1528-1553.
Julian, P.R., 1971: Mon. Wea. Rev. 99, 954-965.
Krishnamurti, T.N., *et al.*, 1976: J. Met. Soc. Japan, 53, 208-225.
Ley, G.W., and R.L. Elsberry, 1976: Mon. Wea. Rev., 104, 1154-1161.
Madala, R.V., and S.A. Piacsek, 1975: Tellus, 27, 453-468.
Madden, R.A., and P.R. Julian, 1972: J. Atmos. Sci., 29, 1109-1123.
———, and J. Stokes, 1975: J. Atmos. Sci., 32, 831-836.
Mak, M.K., 1975: J. Atmos. Sci., 32, 2246-2253.
Mathur, M.B., 1974: J. Atmos. Sci., 31, 371-393.
Miller, B.I., *et al.*, 1972: Mon. Wea. Rev., 100, 825-835.
Misra, B.M., 1975: Tellus, 27, 469-483.
Murakami, M., 1976: J. Met. Soc. Japan, 54, 15-31.
Murakami, T., 1972 a: J. Atmos. Sci., 27, 827-836.
———, and M. Frydrych, 1974: J. Atmos. Sci., 31, 1549-1555.
Norquist, D.E., *et al.*, 1977: Mon. Wea. Rev., 105, 334-342,
Ookochi, Y., 1974: J. Met. Soc. Japan, 52, 387-390.
Ooyama, K., 1969: J. Atmos. Sci.,26, 3-40.
Reed, R.J. *et al.*, 1977: Mon. Wea. Rev., 105, 317-333.
Rodgers, C.D., 1976: J. Atmos. Sci., 33, 710-711.
Tanaka, H., and O. Ryuguji, 1971: J. Met. Soc. Japan, 49, 13-19.
Wada, M., 1977: J. Met. Soc. Japan, 55, 364-391.
和田美鈴, 1974: 熱帯対流圏の大規模擾乱, 天気, 21, 371-384.
Wallace, J.M., 1971: Rev. Geophys. Space Phys., 9, 557-612.
———, 1972: J. Appl. Met., 11, 893-900.
Yamasaki, M., 1977 b: J. Met. Soc. Japan, 55, 559-572.
山岬正紀, 丸山健人, 新田 勍, 1976: 熱帯気象, 気象研究ノート, 128, 60-75.
山岬正紀, 井沢龍夫, 門脇俊一郎, 野本真一, 岡村存, 奥田 穣, 1976: 台風特集, 気象研究ノート, 129, 267 pp.
Yanai, M., 1971: A review of recent studies of tropical meteorology relevant to the planning of GATE, Experiment Design Proposal by the Interim Scientific and Management Group (ISMG), 2, Annex I.
Zangvil, A., 1975: Mon. Wea. Rev., 103, 904-920.

成層圏

Andrews, D.G., M.E. McIntyre, 1976: J. Atmos. Sci., 33, 2049-2053.
Angell, J.K., *et al.*, 1973: J. Atmos. Sci., 30, 13-24.

Barnett, J.J., 1975: Quart. J. Roy, Met. Soc., 101, 835-845.
Belmont, A.D., *et al.*, 1974: Quart. J. Roy. Met. Soc., 100, 203-211.
Chang, C.P., 1976 b : J. Atmos. Sci., 33, 740-744.
Deland, R.J., 1973: Mon. Wea. Rev., 101, 132-140.
Fritz, S., 1970: J. Appl. Met., 9, 815-824.
Groves, G.V., 1973: Quart. J. Roy. Met. Soc., 99, 73-81.
Hayashi, Y., 1974: J. Atmos. Sci., 31, 180-218.
————, 1976: J. Atmos. Sci., 33, 183-201.
Hirota, I., 1975: J. Met. Soc. Japan, 53, 33-44.
————, 1976: Quart. J. Roy. Met. Soc., 102, 757-770.
Holton, J.R., 1975 a : Tellus, 27, 107-115.
————, 1975 b : The Dynamic Meteorology of the Stratosphere and Mesosphere, Met. Monographs, 15, No. 37, 216 pp.
Itoh, H., 1977: J. Met. Soc. Japan, 55, 222-239.
Kuo, H.L., 1975: J. Atmos. Sci., 32, 2229-2245.
Lindzen, R.S. 1972: J. Atmos. Sci., 29, 1452-1463.
————, and J.R. Holton, 1968: J. Atmos. Sci., 25, 1095-1107.
————, and T. Matsuno, 1968: J. Met. Soc. Japan, 46, 215-221.
————, and C.Y. Tsay, 1975: J. Atmos. Sci., 32, 2009-2021.
Maruyama, T., 1971: J. Met. Soc. Japan, 49, 146-157.
Matsuno, T., 1966: J. Met. Soc. Japan, 44, 25-43.
Meyer, W.D., 1970: J. Atmos. Sci., 27, 820-830.
Miller, A.J., *et al.*, 1976: J. Atmos. Sci., 33, 430-435.
Murakami, T., 1973: J. Atmos. Sci., 30, 984-996.
Nastrom, G.D., and A.D. Belmont, 1975: J. Atmos. Sci., 32, 1715-1722.
Odo, K., 1976: J. Met. Soc. Japan, 54, 351-360.
Parker, D.E., 1973: Quart. J. Roy. Met. Soc., 99, 116-129.
Rao, G.A., *et al.*, 1972: J. Met. Soc. Japan, 50, 325-331.
Stark, T.E., 1976: J. Atmos. Sci., 33, 2383-2391.
Tsay, C.Y., 1974: J. Atmos. Sci., 31, 330-339.
Uryu, M., 1974: J. Met. Soc. Japan, 52, 481-490.
Wallace, J.M., 1973: Rev. Geophys. Space Phys., 11, 191-222.
山元龍三郎，1978：火山噴火と気候変化，天気，25, 81-102.
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.

積雲対流群の役割

Arakawa, A., and W.H. Schubert, 1974: J. Atmos. Sci., 31, 674-701.
Austin, P.M., and R.A. Houze, 1973: J. Atmos. Sci., 30, 1100-1111.
Betts, A.K., *et al.*, 1976: Q.J. Roy. Met. Soc., 102, 395-404.
Chang, C.P., 1970: J. Atmos. Sci., 27, 133-138.
Cho, H.R., and Y. Ogura, 1974: J. Atmos. Sci., 31, 2058-2065.
Gray, W.M., 1973: Mon. Wea. Rev., 101, 839-855.
Holton, J.R., and D.E. Colton, 1972: J. Atmos. Sci., 29, 1124-1128.
Houze, R.A., and C.A. Leary, 1976: J. Atmos. Sci., 33, 424-429.
Johnson, R. H., 1976: J. Atmos. Sci., 33, 1890-1910.
Joint Organizing Committee, GARP, 1970: GARP Publ. Ser., No. 4, Appendix 1.
Martin, D.W., 1975: GATE Report No. 14, 1, 182-190.
————, and V.E. Suomi, 1972: Bull. Amer. Met. Soc., 53, 135-156.
Moncrieff, M.W., and M.J. Miller, 1976: Q.J. Roy. Met. Soc., 102, 373-394.
Nitta, T., 1975: J. Atmos. Sci., 32, 73-91.
————, 1977: J. Atmos. Sci., 34, 1163-1186.
新田　勉，1978：熱帯大西洋特別観測（GATE）に関する研究の現状，天気，25, 159-174.
Ogura, Y., 1972: GARP Pub. Ser., No. 8, ICSU/WMO, 20-39.
————, and H.R. Cho, 1973: J. Atmos. Sci., 1276-1286.
Ooyama, K., 1971: J. Met. Soc. Japan, 49, 744-756.
Pearce, R.P. and H. Riehl, 1969: Proc. WMO/IUGG Symp. Num. Wea. Pred., Tokyo, 1968, I-75-84.
Reed, R.J., and R.H. Johnson, 1974: J. Atmos. Sci., 31, 1784-1790.
Riehl, H., and J. S. Malkus, 1958: Geophysica, 6, 503-538.
Ruprecht, E., and W.M. Gray, 1976: Tellus, 28, 391-413.
Soong, S.T., and Y. Ogura, 1976: J. Atmos. Sci., 33, 992-1007.
Williams, K.T., and W.M. Gray, 1973: Tellus, 23, 313-336.
Yanai, M., 1961: J. Met. Soc. Japan, 39, 187-214.
————, 1971: (前出)
————, *et al.*, 1973: J. Atmos. Sci., 30, 611-627.

熱帯境界層

Ball, F.K., 1960: Quart. J. Roy, Met. Soc., 86, 483-494.
Betts, A.K., 1976 b : J. Atmos. Sci., 33, 2363-2382.
Bunker, A.F., *et al.*, 1949: Papers Phys. Oceanogr. Met., 11, No. 1.

Carson, D.J., 1973: Quart. J. Roy. Met. Soc., 99, 450-467.
Deardorff, J.W., 1976: Boundary-Layer Met., 7, 81-106, 199-226.
Dunckel, M., 1974: Boundary-Layer Met., 6, 81-106.
Echternacht, K.L., and M. Garstang, 1976: Mon. Wea. Rev., 104, 407-417.
Esbensen, S., 1975: J. Atmos. Sci., 32, 1921-1933.
Holland, J.Z., 1972: J. Phys. Oceanogr., 2, 476-486.
Kuo, H.L., 1973: J. Atmos. Sci., 30, 53-65.
Lemone, M.A., and W.T. Pennell, 1976: Mon. Wea. Rev., 104, 524-539.
Lilly, D.K., 1968: Quart. J. Roy. Met. Soc., 94, 292-309.
Mahrt, L., and D.H. Lenschow, 1976: J. Atmos. Sci., 33, 41-51.
Mak, M.K., 1972: J. Atmos. Sci., 29, 707-717.
———, 1976: Tellus, 28, 97-107.
Malkus, J.S., 1958: Papers Phys. Oceanogr. Met., 13, No. 2.
Ogura, Y., 1977: Tellus, 29, 240-244.
———, and H.R. Cho, 1974: J. Atmos. Sci., 31, 1850-1859.
Riehl, H., *et al.*, 1951: Quart. J. Roy. Met. Soc., 77, 598-626.
Schubert, W.H., 1976: J. Atmos. Sci., 33, 436-446.
Sommeria. G., 1976: J. Atmos. Sci., 33, 216-241.
Stull, R.B., 1973: J. Atmos. Sci., 30, 1092-1099.
Tennekes, H., 1973: J. Atmos. Sci., 30, 558-567.

続 気象学入門講座

気象学へのガイダンス（25.4）
〔基礎コース〕
気象解析の手引き（25.5）
気象力学・気象熱力学（25.6）
気象放射学
高層大気物理学入門（25.5）
雲物理学・降水物理学（25.8）
大気電気学・大気化学
気象観測と気象器械
気象統計について（25.7）
気候学
生活と気象（25.6）
〔アドヴァーンスド・コース〕
気象予測論（25.7）

これからの予定

回転流体力学を学ぶために（25.6）
対流論（25.6）
中小規模現象の気象学
大気大循環論
エーロゾルの気象学
気候変動論
熱帯気象学（25.8）
高層大気力学の諸問題
高層大気物性
大気境界層の物理
衛星気象学
レーダ気象学
惑星気象学（25.7）
自動気象観測（隔測）・通報システム

（太字は既に掲載されたもの，カッコ内は掲載された巻号）

応用気象学
大気汚染の気象学
実験気象学
天候・気候改変の気象学
海洋気象学
極気象学
気象災害論
気象教育論
気象データ処理法
〔研究のすすめ方〕
最近の気象資料
論文の書き方
気象学教科書・参考書のリスト