

【講座】

Dynamic Meteorology I, II

—気象学外国文献集紹介—

廣田 勇*・新田 尚**・時岡 達志*

1. まえがき

このたび日本気象学会より出版された気象学外国文献集の「気象力学I, II」に関し、その収録論文の簡単な解題を試み読者の利用の手助けに供したい。かかる文献集の発刊についてはいろいろと批判もあるが、座右に置く廉価な別刷集としての便利さのみならず、更に別の側面から考えると、この気象力学文献集は二・三の例外を除けば主として1960年代の論文を集めたものであり、これをひとつの *anthology* と見て、それ以前のものと比較すれば大戦後の気象力学の流れを概観し今後の方向を探ることも可能と思われる。このような読み方をする読者のためにも少し筆を加えてみよう。

なお、文中本文献集収録論文はゴシック体で示し、その後の比較の新しい関連論文のみ簡単に出典を附記した。古いものについては必要に応じ収録論文の *reference* 等からたどって頂きたい。

2. 旧版文献集との対比

気象学文献集の旧版は1960年から64年にかけて発刊され主として戦後から1960年頃迄の関連論文が集められているが、現在あらためて見直すと、*Dynamic Meteorology* の巻はなく、気象力学の大半の論文が *Cyclone and Anticyclone* 及び *Numerical Weather Forecasting* に分冊されている。この表題はまことに象徴的であり、1950年代の気象力学の特色が良く出ていると言える。すなわち、現代気象力学のひとつの出発点となった Charney (1947) と Eady (1949) の傾圧不安定理論 (上記の *Cyclone and Anticyclone* に収録) によりほぼ確立された長波の力学が電子計算機の発達と相まって数値予報の理論的・技術的手法の定着に至ったのが50年代の気象力学であり、その流れは60年代の大気大循環数値実験の輝かしい発展へとつながって行く。

一方、60年代の気象力学それ自体は大まかに言って更

にふたつの道を歩んだ。その大筋が本講座の主題の I と II で、I は「大気波動論」とでも呼ぶべきもの、II は「回転流体力学」と称せられるものである。まず前者については、50年代の力学の対象が主として準地衡風モデルの範囲での長波を中心としたものであったのに対して、60年代に入ってから観測の充実とも呼応して、地球大気中に存在するさまざまな波動現象——長波のみならず、重力波、フロント、超長波、熱帯擾乱、更には大気潮汐等々——に対応する個別的な理論が次々と花開き数学的・物理的厳密さを増すと共にさまざまなモデルによる具体的・定量的な数値計算も数多く行なわれるようになった。そしてまた一方この細分化と平行して熱・重力・回転と言ったような枠組みで流体運動を統一的に考える体系化の試みが、狭義の回転水槽室内実験から地球流体力学 (*Geophysical Fluid Dynamics*)、更には惑星流体力学 (*Planetary Hydrodynamics*) という概念へと発展して来た。この後者の筋道の基礎が本文献集 II に対応するものである。

斯様な歴史の流れを念頭に置いて以下個々の収録論文の要点を読みとって頂きたいと思う。なお、気象力学全般としてはこの *Dynamic Meteorology* の volume 以外に、大循環・総観気象と天気予報・台風 (以上既刊) 成層圏循環・高層大気・数値予報…等の巻にも重要な論文が数多く集められているので、それらをも併せ読まれるよう希望しておく。

3. Part I 収録論文

上述の如く、この Part I は大気波動擾乱の特性をさまざまな角度から取扱った論文の集成であるが、以下にそれぞれの論文を収録の順序に拘泥せず内容的にみて適当に分類しその要点を述べることにする。

まずいわゆる大気の力学的安定性の議論のはしりともいべきものが Kotschin (1932) である。彼はノルウェー学派のフロントモデルを発展させ、より現実的な境界条件をつけたモデルを構成しそのモデルの安定領域を

* 気象研究所予報研究部, ** 気象庁電計室

求めた。当時は数値解法が現在程容易ではなかったため、不安定波までは調べられなかったが、その後 Charney 等によって求められた傾圧不安定波がこのモデルでも表現されていたことは、Eliassen (1960) や後述の Orlandi (1968) によって明らかにされ再評価を受けるに至った。

一方、準地衡風モデルによる傾圧不安定理論は Charney, Eady 以後十年余を経て Green (1961) により新しい展開を見た。彼はその師 Eady の示唆により Charney モデルと Eady モデルの異同を明らかにする目的で両者の長を組み合わせたようなモデルについて差分法による固有値問題の数値解法を試み、全波長域に不安定波の存在することを示した。数値計算ではあるがしっかりと物理的考察を背景にした英国流のゴクのある論文で、以下の発展の貴重な出発点となった。Green の計算結果にヒントを得て Burger (1962) はこの問題をいわゆる singular perturbation problem として純数学的に取扱った。Green の求めた higher mode の不安定波に対応する固有値の存在が、波長と鉛直シアをパラメータとする全領域で複素積分の留数として表現される。全体としてきわめて数学的であるため当時日本ではあまり理解されなかったようであるが、現在あらためて気象現象との対応づけを意識しながら読んでみると面白かる。Miles (1964) も Green, Burger の発展として同じ問題を数学的に取扱っている。Burger が不安定解の存在のみを論じたのに対し、Miles は具体的に Strum-Leuville 型微分方程式を analytic に解き不安定波の発達率、位相速度等の性質を述べているのが特長である。

さて、これらの傾圧不安定理論はいずれも β 平面近似を用いた 1 次元モデル——すなわち東西波数と帯状流の鉛直シアをパラメータとし空間座標の変数は高さのみ——であったのに対して、Pedlosky (1964) は平均帯状流の水平（南北）シアの効果を検討したモデルを取扱った。鉛直方向には二層モデル及び連続モデルを用い、傾圧不安定の必要条件を示すと共に、不安定度（発達率）の上限を求めている。鉛直シアと南北シアの効果は数学的に分離出来ないような傾圧不安定問題はその後 McIntyre (1970, J. Fluid Mech.) によって更にくわしく調べられている。

帯状流の水平シアが不安定性に本質的な役割を持つ barotropic instability に関しては、Rayleigh 以来の古典理論を地球大気に応用したものとして Kuo (1949)

があるが、Lipps (1963) も回転地球上の 2 層発散パロトロピックモデルを解析的に扱い、現実的な帯状流の強さ・南北シアを与えて不安定波動解を求め、発散の効果が擾乱の発達を抑制することを示した。

帯状流の安定性の議論は上に述べた傾圧・順圧不安定理論以外にいくつかの独特の面白い問題がある。その一例として Charney and Stern (1962) による internal jet の不安定があげられよう。これは鉛直・南北両方向にシアを持った帯状流に下端で南北温度傾度がゼロ（従って地表で鉛直シア無し）という境界条件を課したモデルで、その不安定の必要条件は等温位面上での渦位の南北傾度が符号を変えずることである。このモデル設定の動機は冬期成層圏極渦の崩壊の力学的説明にあったが、不安定波動の性質（たとえば卓越波長、発達率など）には全然触れられておらず、現実大気との直接対応は観測の見地からも疑問である。しかし純力学的不安定問題として見るかぎり興味あるモデルといえよう。但し本論文の終りのほう（文献集では 124 ページ）左上の式で積分記号の前の符号が逆になっているので注意されたい。

円形渦の不安定に起因する子午面内の運動の発達については古くは Helmholtz 以来多くの研究により不安定の生ずる必要条件が知られていたが、Ooyama (1966) はその十分条件を理論的に解明した。現実大気中の問題としては従来台風の発達と円形渦運動との関連が論じられていたが、円形渦の不安定に伴う子午面運動が限られた領域のみに集中して生ずることなどから、台風の発達にとってこの種の不安定性による本質的な寄与はないことも本論文で指摘されている。

大気波動現象を説明する不安定理論のひとつにフロントモデルのリバイバルとでもいうべきものがある。Orlandi (1968) は前述 Kotschin のフロントモデルの詳細な数値解法を試み、このモデルに含まれるさまざまな不安定波の存在条件およびそれらのエネルギー特性を明らかにした。その結果によれば傾圧不安定波、Shear wave, Helmholtz wave 等がこのモデルに含まれていることがわかり、それら個々のモデルとこのフロントモデルとの関係が明らかにされた。

さて、以上述べてきたさまざまなタイプの不安定理論とは別系統に、地球大気波動の特性を論じた重要な論文がいくつかある。Hinkelmann (1951) はパロトロピック大気に対して線型理論を適用し波動解（気象学的波動と慣性重力波）の詳細な導出を行った。彼は更にその結

果をふまえて、高周波ノイズの filter out のこと、非地衡風成分を考慮することの意味を論じ、数値予報にプリミティブ方程式を使用することについての吟味を行っている。数値予報の主流が filtered mode を使う方向にあった50年代としては、これはかなりユニークな態度であったといえよう。本論文における考察はその後彼自身による世界最初の primitive baroclinic model の成果 (Hinkelmann, 1959; Rossby Memorial Volume) となつて結実し、他方 Phillips (1960, 本文献集数値予報に収録) に引き継がれて展開した initialization problem の源流ともなった。(なお本論文はドイツ語であるが、図書月報第15巻特別号に清水逸郎氏の和訳がある)。同じような意味で気象力学ひいては数値予報のひとつの基礎を与えるものとして地衡風調節の理論がある。この問題は従来我が国では馴染みが薄かったが、それは思うに出来上った結果だけをまず輸入してその背景を軽視したきらいがあった為かも知れない。地衡風調節をめぐる一貫した歴史的事情は、Bolin (1953) の論文の冒頭に述べられている。彼はそれ以前のバロトロピック流体からバロクリニック流体(但し成層斉一非圧縮の仮定)に拡張した地衡風調節過程を論じその後の展開の基礎を与えた。Washington (1964) はこれらを受け継ぎ、特に調節過程を詳しく述べるとともに、現象のスケールに応じた調節の仕方の違いを明確にした。このふたつの論文もまた initialization や data assimilation の理論的背景に資するところが大きいといえる。最近地衡風調節のすぐれた総合報告が Blumen (1972; Reviews of Geophysics and Space Physics) によって書かれていることを参考までに附記しておこう。

波動特性を論じたユニークな論文として Eliassen and Palm (1961) がある。これは大気下層に励起源を持つ波動によるエネルギーの上方伝播を取扱ったもので本文献集の「成層圏循環」に収録されている Charney and Drazin (1961) と好対照を為すものである。すなわち後者はどちらかといえば地球大気の場合(平均帯状流分布)そのものの特性を論じているのに対し、前者は逆に波動自体の持つ属性に議論の主眼を置いている。論文は二章から成り前半が層モデルによる重力波伝播の計算、後半はプラネタリースケールの波動伝播を扱い、波動に伴うエネルギーフラックスの物理的イメージを平易な記述で明快に論じているところは流石である。本論文の主要な結果は、Eliassen-Palm の関係式として大循環の論文などにしばしば引用されているので馴染深い読者も多

かろう。

4. Part II 収録論文

最初の三編の論文はページ数の都合で part II に回したが内容分類上は part I に入れられるべきものである。

Eliassen (1959) の前線形成理論は凝結熱放出の効果と地面摩擦が作る収束場の寄与を論じたものである。この論文で強調された凝結熱の効果は、その後の研究の結果第二義的なもので、第一義的には力学的な非地衡風効果によって前線帯のシャープな集中の生ずることがわかった。この事情は、本文献集11ページに附加した彼自身のコメントにもあるように、文献集「総観気象と天気予報」に収録の Eliassen (1966) を参照されたい。一方、本論文の価値として後の台風発達に関する Charney and Eliassen (1964; 文献集 tropical cyclone に収録) の研究につながっている点も見落してはならないであろう。

Lorenz (1960) は Fjórtoft (1953) の論じた波数間のエネルギーのやりとりの問題を具体化すべく順圧渦度方程式を最大限に単純化して三個の連立非線型方程式に縮約し平均帯状流と波動の相互作用を論じた。このモデルは大気中に見られるいわゆる zonal index cycle を説明するにはあまりに簡単すぎたが、大気波動の非線型相互作用の本質を鋭くとらえたユニークなもので、後に彼自身の手により発展された一連の非線型振動論の原点となっている。

回転球面上の大気振動の議論として、気象力学の伝統的な手法では主として中高緯度地衡風運動を念頭に置いた渦度方程式から導かれる広義の Rossby wave が関心のまゝであったが、一方同じ大気振動を扱う潮汐論では Laplace の tidal equation の解のひとつが Rossby wave に対応することが知られていた程度で、この二つのアプローチは一応別個の道を行って来た。しかし赤道大規模波動の存在とその特性が観測的に明らかにされるに及んで、両者はもはや別個のものではなくなった。このような事情を背景に、Lindzen (1967) は中緯度 β 平面近似及び赤道 β 平面近似と tidal eq. との対応を詳細に論じて、気象力学流の β 平面近似がそれぞれ equivalent depth の符号により分類される tidal eq. の二種類の解の良い近似になっていることを示した。この理解は赤道波動の理論的取扱いの数学的・物理的基礎づけを与えたものといえる。

さて、以下の論文が Part II の主題の「回転流体力学」であるが、各収録論文の紹介のまゝにこれまでの研

究の筋道についてひとことふれておこう。回転流体力学の気象学における位置づけは大まかにいって「回転流体システムの中の一つのレジームとして大気大循環を理解しようとする研究」ということになる。室内実験における回転水槽の外壁加熱・内壁冷却に伴う対流運動が、赤道加熱・極冷却に対する半球規模の大気運動とその枠組みにおいて類似していることは直観的にうなづけよう。問題は従って室内実験と現実大気との異同を逐次解明し、両者に共通する熱・重力・回転という条件から生ずる流体運動の本質を抽象し敷衍してゆくことにある。これまでの回転流体実験に関する研究は内容的に見て次の二つに大別される。ひとつは実験(数値実験をも含む)による流体運動の研究であり、これにはさまざまなパターンの識別とそのレジームを分ける遷移曲線の決定、流れの構造とそのメカニズムの解明等が含まれる。もうひとつは実験的に知られた遷移曲線が如何なるパラメータの組合せで決定されるかの力学を理論的に解明する試みである。これらの一連の問題のすぐれた review paper として Hide (1969; ロンドンでのシンポジウム報告, 英国気象学会刊 *The global circulation of the atmosphere* p. 196~221) を参照されたい。

前置きはこのくらいにして文献紹介に入ると、まず前者に属するものとして **Riehl and Fultz (1957, 1958)** はいわゆるロスビーレジームのうち3波数の波の解析を行った論文である。表面流と温度場の測定から地衡流の仮定を用いて直接測定困難な内部のパターンと垂直運動を計算し大気中の波動との類似性を述べ、特に間接子午面循環の意味を波動との関係で明らかにした。58年の論文では更に熱バランスと運動量バランスを調べ、エネルギーの流れがそれを見る座標系によって異なることを強調している。この研究により、室内実験と現実大気との間にいくつかの差異があるにせよ、そこに出現する波動に関しては大気中の場合と同じく本質的には傾圧不安定波であることが具体的に示されたことになる。一方 **Bowden and Eden (1965)** は上部軸対称領域に注目しハドレー循環に伴う温度場、熱輸送量の測定、内部透視容器による子午面流の観測を行い、それらが回転数の変化にどう支配されるかを詳しく調べた。更に **Fowles and Hide (1965)** は流れのレジームを支配するものは何かという問題を実験で組織的に研究し種々のパラメータの効果を巧妙に整理した。室内実験をあたかも一種のアナログコンピューターとして駆使する著者の立場が良く出ており、前述の Bowden and Eden の研究と共に後の定

量的な議論(例えば Williams (1967, J.A.S.) の数値実験)との対応にしばしば用いられる実験結果を与えている。

次に、実験で得られた軸対称流領域・波動領域の遷移曲線を理論的に説明する試みとしては、従来 Kuo (1957) や Davis (1959) の議論があり一応遷移曲線が求められてはいたが、**Lorenz (1962)** は1960年に提出した truncated system を2層傾圧をモデルに適用し、前二者の用いた強い物理的仮定をはずしてスマートに論じた。**Merilees (1968)** はこの Lorenz のモデルに含まれる非断熱項を室内実験に対応させやすい形に工夫してそれらの遷移曲線に及ぼす作用を調べた。単純化されたモデルであるにも拘らず室内実験と良い対応を示す結果を与え、遷移曲線の物理的意味を理解する上で大きな貢献をしたものといえる。**Lorenz (1963)** は更に truncated system を拡張して14個の連立非線型微分方程式系を構成し、それらを解析的にまた数値的に調べて非線型振動の立場から vacillation の機巧を説明した。

回転流体運動の測定や理論が進むにつれ、現実大気との直接対応という色彩はやや薄れ、実験容器壁の境界層の効果に強い関心が持たれ始めた。**Barcilon (1964)** は Ekman 層の効果を引き取り入れてハドレーレジームの安定性を議論した。Ekman 層は単に dissipation だけに効くのではなく内部領域の傾圧波動に伴う上昇下降流を吸い込みはき出す作用を持つことが示されている。**McIntyre (1968)** も摩擦の効果を考慮した軸対称の流れを解析的に扱い上下水平面境界層、内外壁の境界に沿う流れを内部の運動と独立に求めて、Williams の数値実験の結果と比較し良い一致を見ている。

最後に回転流体力学全般にわたる survey paper として **Lighthill (1967)** を加えておく。大気海洋中に存在する自然現象をより一般的基礎的な流体力学の立場から展望することは、具体的な気象学・海洋力学の研究にとっても広い視野を与えてくれるであろう。この paper ひとつをとってみても回転流体力学はやはり英国に伝統的な重み感が感ぜられる。ひるがえって我が国を考えるとこれまでこの分野での研究者層の薄みは否めなかったが、幸いにして最近、若手研究者の関心も高まり、本誌にも瓜生道也氏の「回転水槽実験のはなし」(天気, 1973年7月)、木村竜治氏の「回転流体の世界」(天気, 1973年10月印刷予定)の如き、オリジナルを含んだすぐれた総合報告が載るようになったのはまことによろこばしい。今後 Geophysical Fluid Dynamics に興味を示す

研究者層が益々増加することを期待したいものである。

5. あとがき

この気象力学文献集の構成に当っては、新田が基本となる論文リストを作り、何人かの意見を参考にして二・三の補足修正を行った。講座の執筆としては三者が分担して収録論文の要点をひろい上げ、廣田が内容別に適当な分類を試みてまとめた。個々の論文の採用理由や初心者向きの読み方などについて特にくわしくは述べなかったが大筋はつかんで頂けたことと思う。本講座がこれから気象力学を本格的に勉強して各自の興味分野の original paper を熟読しようとする方々にとっていささかの指針ともなれば幸いである。

Part I 収録論文リスト

- 1) Kotschin, N., 1932: Über die Stabilität von Margullesschen Diskontinuitätsflächen. Beitr. Phys. Atmos., **18**, 129~164.
- 2) Hinkelmann, K., 1951: Der Mechanismus des meteorologischen Lärmes. Tellus, **3**, 285~296.
- 3) Bolin, B., 1953: The adjustment of a non-balanced velocity field towards geostrophic equilibrium in a stratified fluid. Tellus, **5**, 375~385.
- 4) Eliassen, A., and E. Palm, 1961: On the transfer of energy in stationary mountain waves. Geofysiske Publikasjoner, **22**, No. 3, 1~23.
- 5) Washington, W.M., 1964: A note on the adjustment towards geostrophic equilibrium in a simple fluid system. Tellus, **16**, 530~534.
- 6) Green, J.S.A., 1960: A problem in baroclinic stability. Quart. J. Roy. Meteor. Soc., **86**, 237~251.
- 7) Burger, A.P., 1962: On the non-existence of critical wave-length in a continuous baroclinic stability problem. J. Atmos. Sci., **19**, 31~38.
- 8) Charney, J.G., and M.E. Stern, 1962: On the stability of internal baroclinic jets in a rotating atmosphere. J. Atmos. Sci., **19**, 159~172.
- 9) Lipps, F.B., 1963: Stability of jets in a divergent barotropic fluid. J. Atmos. Sci., **20**, 120~129.
- 10) Miles, J.W., 1964: Baroclinic instability of the zonal wind. Rev. Geophys., **2**, 155~176.
- 11) Pedlosky, J., 1964: The stability of currents in the atmosphere and ocean.
Part I. J. Atmos. Sci., **21**, 201~219.
Part II. J. Atmos. Sci., **21**, 342~353.
- 12) Ooyama, K., 1966: On the stability of the baroclinic circular vortex: a sufficient criterion for instability. J. Atmos. Sci., **23**, 43~53.
- 13) Orlandi, L., 1968: Instability of frontal waves. J. Atmos. Sci., **25**, 178~200.

Part II 収録論文リスト

- 1) Eliassen, A., 1959: On the formation of fronts in the atmosphere. The atmosphere and the sea in motion (The Rossby Memorial Volume) 277~287.
- 2) Lorenz, E.N., 1960: Maximum simplification of the dynamic equations. Tellus, **12**, 243~254.
- 3) Lindzen, R.D. 1967: Planetary waves on beta-planes. Mon. Wea. Rev., **95**, 441~451.
- 4) Riehl, H., and D. Fultz, 1957: Jet stream and long waves in a steady rotating-dishpan experiment: structure of the circulation. Quart. J. Roy. Meteor. Soc., **83**, 215~231.
- 5) Riehl, H., and Fultz, 1958: The general circulation in a steady rotating dishpan experiments. Quart. J. Roy. Meteor. Soc., **84**, 389~417.
- 6) Lorenz, E.N., 1962: Simplified dynamic equations applied to the rotating-basin experiments. J. Atmos. Sci., **19**, 39~51.
- 7) Lorenz, E.N., 1963: The mechanics of vacillation. J. Atmos. Sci., **20**, 448~464.
- 8) Barilon, V., 1964: Role of the Ekman layers in the stability of the symmetric regime obtained in a rotating annulus. J. Atmos. Sci., **21**, 291~229.
- 9) Bowden, M., and H.F. Eden, 1965: Thermal convection in a rotating fluid annulus: Temperature, heat flow and flow field observation in the upper symmetric regime. J. Atmos. Sci., **22**, 185~195.
- 10) 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.
- 11) Lighthill, M.J., 1966: Dynamics of rotating fluid: a survey. J. Fluid Mech., **26**, 411~431.
- 12) McIntyre, M.E. 1968: The axisymmetric convective regime for a rigidly-bounded rotating annulus. J. Fluid Mech., **32**, 625~655.
- 13) Merilees, P.E., 1968: On the transition from axisymmetric to nonaxisymmetric flow in a rotating annulus. J. Atmos. Sci., **25**, 1003~1014.