

プラネタリー波動論の歩み*

—気象学会賞受賞記念講演—

廣 田 勇**

1. はしがき

1960年代から1970年代の前半にかけて、プラネタリー波動を含む成層圏中間圏循環の研究は目ざましい発展をとげた。この間の事情は例えば1963年のベルリンシンポジウムに於ける Van Mieghem の総合報告“成層圏中間圏の大循環に関する新しい問題点”と Holton (1975) による最新のテキスト“成層圏中間圏の気象力学”とを並べてみれば一目瞭然である。前者が IGY 以降急速にひらけつつあった高層観測からの断片的知識をもとにくつつかの問題点を指摘して研究の方向を模索していたのに対し、後者はその後続く10年間の観測・解析・理論・数値実験の多岐にわたる実り多き研究成果を見事にまとめ上げ、気象力学の一分野としてのプラネタリー波動論に確固たる地位をしるしている。

我が国に話を限ってみても、1965年の気象学会春季大会における“成層圏に関するシンポジウム”(話題提供者：朝倉・村上・根山3氏)以来、この問題に関するさまざまな形の研究討論会が開かれて来た。その折々にふれて書きしるした筆者の当時の記録(廣田, 1966, 1967, 1968 a, b, 1969, 1970)を今よみ返してみると隔世の感を禁じ得ない。内容としても今や色あせた当時の問題意識は、しかしながら確実に次の研究ステップへの踏み台になっていたように思われ、時の流れをまのあたりにながめることが出来る。

以下は、過去十数年間、プラネタリー波動の研究の流れに身を置いた筆者の感想文である。総合報告のつもりは毛頭ないので断片的である点は御容赦を乞いたい。むしろ自分自身に対するいささかの反省をこめて、今後の研究に立向う態度をたしかめてみたいと思う。

2. プラネタリー・ロスビー波

気象力学としてのプラネタリー波動論は今を遡ること約40年、C.G. Rossby の時代に始まる。彼は当時ようやく可能となった高層観測(と言っても対流圏中層500 mbであるが)の解析を通して日々の天気を支配する cyclone wave よりもはるかに波長の大きい擾乱が西風帯状流の中をゆっくり動くことを見出した(Rossby *et al.*, 1939)。彼の偉大さはその波動現象を単なる総観的記述に終らせず、二次元非発散運動の枠組みの中で回転球面上の絶対渦度保存則を適用し、コリオリ因子の緯度変化(いわゆる β 項)がその運動の本質であることを見抜いた点にあった。これが世に謂うロスビー波の始まりである。しかし面白いことに、ロスビー達の最初の動機が天気予報の延長を目ざしたものであったにも拘らず、戦後の数値予報においては、モデルの不完全さの故もあってか、ロスビー波それ自体は“超長波の西進の問題”の難点にからんでむしろ天気予報とは離れてゆく運命にあった。

1957年からの IGY を契機として高層大気の観測が飛躍的に増大するにつれ、地球大気大規模循環の実態解析も急速に進展した。その結果、対流圏のみならず成層圏も含め地球規模の波動擾乱の存在が知られ始めた。それらの波は必ずしも古典的なロスビー公式に従うような単純な振舞いを示さない。実測の波はむしろ地理的位置の固定された定常的な様相を示すことが多い。にも拘らず、後程明らかにされるように、このプラネタリー・スケールの波もその本質は回転球面の特性つまりロスビーの β 効果と密接な関係を持っていることがわかる。この意味で現在は中高緯度に卓越する超長波を一般にプラネタリー・ロスビー波と呼ぶ。

停滞性のプラネタリー波動が主として冬の成層圏の極夜偏西風帯に卓越する事実をふまえて Charney と Drazin (1961) はこの波を対流圏下層に励起源を持ち西風中を伝播して上方にエネルギーを運ぶ“強制内部ロスビー

* An historical review of the studies on planetary waves.

** I. Hirota, 京都大学理学部

一波”としてとらえその力学の大筋を確立した。これは言うならば planetary atmosphere の“場の理論”である。得られる解そのものの量的な議論よりも、むしろその発想及び問題設定の大きさにおいて、今なお魅力あふれる論文である。これと対照的に、波動に伴うエネルギー輸送の意味づけを明瞭にした Eliassen と Palm (1961) の仕事もまた後に続く成層圏中間圏循環論の発展に一つの指針を与えている。しかしプラネタリー波動論はこれらの理論によって完了したわけではなかった。

3. 突然昇温をめぐる

“事実は小説よりも奇なり”とよく言われるのと同様に、自然現象もまた理論で記述されるものよりはるかに複雑かつ深遠である。この意味において、プラネタリー波動論のさきがけとして成層圏循環の諸問題をベルリンマップに象徴される徹底的な現象論の立場から追求したドイツの驍将 Scherhag 教授の名前は 1952 年の突然昇温の発見と共に忘れることが出来ない。Berlin warming 発見当時のいきさつを語った彼の講演 (1969) は今なお多くの教訓と示唆に富んでいるように思われる。

IGY 以降成層圏のゾンデ観測に基づいて、突然昇温を中心とした冬の成層圏循環解析が続々と行なわれるようになった。我が国においても 1960 年代の前半に Miyakoda (1963), Sekiguchi (1963), Murakami (1965) などの仕事が輩出した。現時点で結果論的な評価を下すとすれば、突然昇温の理解にとって所謂 Energetics (Lorenz 流の four box method) が最適のアプローチであったとは必ずしも言い難い。しかし一連の観測解析作業を通して成層圏における大規模波動擾乱のさまざまな実態や特性が明らかにされたことは誰も否定出来ないであろう。

筆者が成層圏に興味を持ちはじめたのは丁度このような時代であった。幸運なことに、1963 年の冬、いまだにその類を見ない程顕著な warming が発生した。当時のベルリンマップをはじめ見たときの印象は今もって忘れ得ない程強烈なものであった。緑色の地図をバックに、黒の等高度線、赤の等温線で描かれた 10 mb 面上の極夜渦の分裂と昇温のパターンはその後ながく心に焼きついて離れない。これは地球大気という大自然が我々に見せた最も美しい姿のひとつとさえ言えるであろう。研究の動機は素朴であればある程強い、と私は思う。

突然昇温をめぐる議論は、先に述べたエネルギー論のほかに、Murray (1960), Charney・Stern (1962), Matsuno・Hirota (1966), Hirota (1967, 1968 a) 等

の不安定論があったが必ずしも成功ではなかった。一方、昇温現象そのものというよりむしろ現実大気中のプラネタリー波動の力学的理解として、定常波の立体構造の解析 (Muench, 1965; Hirota・Sato, 1969) とモデル計算 (Dickinson, 1968 a, b; Matsuno, 1970), 非定常波動の解析とその成因論 (Deland・Johnson, 1968; Hirota, 1968 b, 1971) などの研究がさまざまな角度から相次いでなされた。これらの一連の研究は、見方によっては即物的・現象論的なものであり特に目新しい概念を生み出すものではなかったかも知れない。しかし大気現象の本質は様々な物理過程の複合体として特定の条件のもとに個性的な振舞いを示すことにある。この故に、一般論と個別的な現象論との両面は常に共存している必要があるのが気象学の特徴である。

突然昇温の力学的モデル化は Scherhag による発見から 20 年を経て Matsuno (1971) によって与えられた。彼は 60 年代の観測事実をふまえ、重力波の理論に用いられた“critical level における波動エネルギーの吸収”の概念を応用して、大気下層から伝わるプラネタリー波動が上層の帯状流と相互作用をひき起こし昇温に至るプロセスを明らかにした。ここにも一般論(基本的概念)と現実的状況設定との組み合わせの妙を見ることが出来ると言えるのではないだろうか。

4. 新しい観測と研究領域の拡大

これまで主として突然昇温現象に関連した冬の成層圏循環に話がかぎられていた。しかしプラネタリー波動は文字どおり地球大気全体の現象である。従って我々は新しい観測手段によってその視野を広げてゆくことになる。新しい観測は必然的に未知の現象を見出し、その具体的な記述は従来の理論的考察や認識を再確認或いは修正し、更には新しい理論を要請するに至る。具体的に言えば、北半球冬季成層圏からの発展として、まず上方の中間圏へ、次いで赤道を越えて南半球へ、更には時間軸に沿って冬から夏へ、また季節別へと進むことが可能になったわけである。

気球(ゾンデ)の到達限界高度(約 30 km)を越えて上部成層圏及び下部中間圏の探索は 1960 年代のはじめから気象ロケットにより為され始めた。ロケット観測は現在でもその時間空間密度が非常に小さいため解析上の取扱いが難しい。たとえば中間圏プラネタリー波動を検出するための北半球月平均調和解析などは出来ない。しかしながら、気温・気圧・風の直接測定という強味に加えて、大気密度の減少に伴い上層ほど擾乱の振幅が増幅さ

れて見える利点も含めて、気象ロケット資料は上部成層圏・下部中間圏（高度 30~60 km）の波動に関して多くの価値ある情報を提供している（Finger *et al*, 1966; Hirota, 1968 b; Quiroz, 1969）。

1970年代に入り、高層大気循環の観測的研究に一大革命をもたらしたものは言うまでもなく気象衛星による赤外放射観測の発展である。remote sensing による気温の間接測定というハンディを差し引いても、極軌道衛星による地球全体の長期間にわたる連続観測は、プラネタリー波動論にとって将にうってつけの手段であった。解析はまず未知の領域南半球の総観の記述に始まり、ゾンデ観測不可能な海洋上の空白を埋めると同時に、冬半球成層圏突然昇温に対応して夏半球全域が降温する事実など続々と新しい現象の解明が進んだ。

在米中にこれらを学んだ筆者が簡単なレポート（廣田, 1972）を書いたとき、外国の研究の紹介だけではなく日本でも自分で衛星資料を使ってみようと思ひ立ち、気象庁に死蔵されかけていた Nimbus III SIRS と ITOS-VTPR のデータを通報課の好意により貰い受け、当時興味を持っていた夏半球成層圏擾乱の解析に応用してみた（廣田, 1973）。研究の道は些細なところから展げるものである。結果は予想以上に成功であった。気象ロケットのタイムシリーズデータのスペクトル解析と VTPR データによる南半球 10 mb 面の調和解析とから、夏半球成層圏東風中の非定常プラネタリー波動の存在とその特性が検出された（Hirota, 1975）。夏半球波動は Scherhag (1960) 以来かすかな証拠が示されていたのみで、理論的には殆どかえり見られてはいなかったが夏冬両半球相互作用や帯状流の季節変動との対応の見地から興味ある現象と思われる。

気象衛星観測による成層圏プラネタリー波動の解析は Oxford 大学における SCR 及び PMR の開発によって更に組織的に進められている。1970 年の Nimbus 4 号以来現在の Nimbus 6 号に至るまで、初期の case study のみならず成層圏の平均温度場・南半球波動・両半球の干渉などについて衛星観測の特長を生かした研究が多い（Barnett, 1974, 1975; Harwood, 1975）。幸いにして筆者も Oxford 大学の 大気物理学教室でこれらの衛星資料を使う機会に恵まれ、1973~74年の2年間にわたる SCR の観測値から上部成層圏のプラネタリー波動の季節別特性を平均帯状流の季節変動と関連づけて論じた（Hirota, 1976）。

1975年6月打上げの Nimbus 6号に搭載された PMR

は観測領域を一挙に下部熱圏（ ≈ 90 km）まで高め、従来断片的な推測の域を出なかった中間圏以上の波動に関して新しい知識を提供しつつある。PMR のデータチェックはまだ完全に済んではいないが、1975/76 年冬期北半球の解析結果から、定常性強制内部ロスビー波が波数 1, 2 とも中間圏高度で最大振幅を持ち熱圏にまで侵入していること、その卓越緯度は中間圏の極夜ジェットより高緯度よりに偏倚していること、成層圏及び下部中間圏の突然昇温に伴い上部中間圏下部熱圏では逆に降温になっていることなどが見出されている（Hirota・Barnett, 1976）。夏半球に関してはまだ解析が良く行なわれてはいないが、中間圏東風帯状流中に伝播性ロスビー波とは異種と思われる大規模擾乱の存在が断片的ながら認められる。更に赤道領域の上部成層圏から中間圏にかけて顕著な帯状流の半年周期振動現象も、そのメカニズムについては殆ど解明されていないが、冬の中高緯度のプラネタリー波動との相互作用が示唆されている（Barnett, 1975; Hirota, 1976）。このように今後 SCR・PMR のより定量的な解析が進むにつれ、従来の伝播理論や不安定理論或いは波動一帯状流相互作用論の再検討が強く要請されるであろうことは間違いない。

5. プラネタリー波動論の面白さ

以上、きわめて大まかながら現在までのプラネタリー波動論の歩みを自己中心的に概観して来た。対流圏のロスビー波に端を発した議論は今や全地球的な規模において地上 100 km の熱圏にまで迫ろうとしている。そしてその歴史を貫く大きな流れとして、未知の大気現象に対する興味強い動機となっていた事実をまず挙げねばなるまい。突然昇温の発見はまさにその代表例と言える。

全く同様な事情は1960年代の後半から急速に発展した赤道成層圏波動論にも見られる。赤道波については本文では一切触れなかったが、その研究発展の歴史における最大の動機は赤道成層圏東西風の26か月周期現象であった。ゾンデ観測の風速の月平均値を smoothing して唯ならべただけの素朴な作業からあれ程に見事な自然の姿を浮き彫りに出来たことは全く感嘆する他はない。これこそまさに気象学の魅力であろう。この意味において、プラネタリー波動論に果した観測・解析の意義は大きい。気球・ロケット・衛星と観測手段も多様であり、それらから得られる情報の内容も対象とする現象の特性によってそれぞれ異なっている。目的に応じて手段を使いわけ、解析に独自の工夫を加えてゆくところにも別の面白さがひそんでいる。

しかしながら、観測・解析とは決して単なる素朴現象論や総観的記述のみに終るものではない。曾てロスビーがそうであったように、個別的な観測事実の中から普遍的本質的な物理過程を読み取って抽象化し体系化してゆくことこそ、更なる未知の領域に挑戦してゆくときの大きな指導原理となるはずである。プラネタリー波動論が気象学・大気物理学の一分野として確固たる地位を築き上げてきた背景には回転球面上の流体運動に関する気象力学の理論体系が作り上げられていることを忘れてはならない。

見方を変えて言えば、このように観測・解析から得られる自然像が気象力学更には地球流体力学という枠組みによる認識体系の中に見事にとけ込んでいるところにプラネタリー波動論の本当の面白さがあると思われるのである。

プラネタリー波動論は決して完成し終了したわけではない。高層大気の循環にはまだまだ知られざる側面が多い。今後地球大気中には突然昇温や26カ月周期の如き大発見は最早期待出来ないと言えようか。発見とは、その直前まで未知だったからこそ発見なのである。たとえ一見ささやかな事柄でも、未知の現象の追求は積み重なってやがて確固たる自然像となってゆく。これからも高層大気にそして広くは惑星大気全体にプラネタリー波動を追い求める道のりが続くであろう。Nature そのものに対する我々の興味は尽きない。

6. おわりに

今年に筆者の気象学研究者としてプロ生活10周年に当たる。その年に気象学会賞を頂いたことは大変うれしく思っている。長年ひとつのテーマを続けて来ることが出来たのは、ひとえに筆者が良い研究環境とすぐれた先輩同輩に恵まれた為と言える。特に大学院学生時代に筆者の興味を成層圏に向けて下さった都田菊郎博士(当時東大助教授)に厚く感謝の意を表したい。

文 献

- Barnett, J.J., 1974: *Quart. Jour. Roy. Met. Soc.*, 100, 505-530.
 —, 1975: *Ibid.*, 101, 835-845.
 Charney, J.G. and P.G. Drazin, 1961: *J. geophys. Res.*, 66, 83-109.
 Charney, J.G. and M.E. Stern, 1962: *J. atmos. Sci.*, 19, 159-172.
 Deland, R.J. and K.W. Jhonson, 1968: *Mon. Wea. Rev.*, 96, 12-22.
 Dickinson, R.E., 1968 a: *Ibid.*, 96, 405-415.
 —, 1968 b: *J. atmos. Sci.*, 25, 984-1002.
 Eliassen, E. and E. Palm, 1961: *Geofysiske Publikasjoner*, 22, 1-23.
 Finger, F.G. *et al.*, 1966: *Mon. Wea. Rev.*, 94, 651-661.
 Harwood, R.S., 1975: *Quart. Jour. Roy. Met. Soc.*, 101, 75-91.
 Hirota, I., 1967: *J. Met. Soc. Japan*, 45, 422-435.
 —, 1968 a: *Ibid.*, 46, 234-249.
 —, 1968 b, *Ibid.*, 46, 418-430.
 —, 1971: *Ibid.*, 49, 439-449.
 —, 1975: *Ibid.*, 53, 33-44.
 —, 1976: *Quart. Jour. Roy. Met. Soc.*, 102, (in press).
 Hirota, I. and J.J. Barnett, 1976: *Ibid.* (to be published).
 Hirota, I. and Y. Sato, 1969: *J. Met. Soc. Japan*, 47: 390-402.
 Holton, J.R., 1975: *Met. Monograph*, 15, No.37.
 Matsuno, T., 1970: *J. atmos. Sci.*, 27, 871-883.
 —, 1971: *Ibid.*, 28, 1479-1494.
 —, and I. Hirota, 1966: *J. Met. Soc. Japan*, 44, 122-128.
 Miyakoda, K., 1963: *Univ. of Chicago, Tech. Rept.*, 14.
 Muench, H.S., 1965: *J. atmos. Sci.*, 22, 349-360.
 Murakami, T., 1965: *J. Met. Soc. Japan*, 43, 262-283.
 Murray, F.W., 1960: *J. geophys. Res.*, 65, 3273-3305.
 Quiroz, R.S., 1969: *Mon. Wea. Rev.*, 97, 541-552.
 Rossby, C.G. *et al.*, 1939: *J. Marine Res.*, 2, 38-55.
 Sekiguchi, Y., 1963: *Univ. of Oklahoma, ARL-1277*.
 Scherhag, R., 1952: *Ber. Deutsch Wetterdienst*, 6, 51-63.
 —, 1960: *J. Met.*, 17, 575-582.
 —, 1969: *Tenki*, 16, No. 6. (Japanese translation).
 Van Mieghem, J., 1963: *Met. Abhandlungen, Band XXX VI*.
 廣田 勇, 1966: オメガ(気象庁電計室) 5, No. 4.
 —, 1967: 気象研究ノート, 91.
 —, 1968 a: 天気, 15, No. 2.
 —, 1968 b: 気象研究ノート, 95.
 —, 1969: グロスベッター(気象庁長期予報) 8, No. 1.
 —, 1970: 中間圏シンポジウム報告(東大宇宙航空研).
 —, 1972: 天気, 19, No. 6.
 —, 1973: 天気, 20, No. 7.