

ベルリン現象から50年

—突然昇温研究の現代的意義—

廣 田 勇*

1. はじめに

この解説は昨年(2002年)の10月に札幌で開かれた気象学会秋季大会における第32期理事長学術講演の要約である。

2002年は気象学史上のひとつの大きなエポックであるティスラン・ド・ボール(仏)の気球観測による成層圏の発見(1902)からちょうど100年目に当る記念すべき年であった。さらにこの年はまた、シェルハーク(独)による「ベルリン現象=成層圏突然昇温」の発見(1952)から50年という記念すべき節目の年にも当たっている。

本論ではベルリン現象発見から半世紀にわたる成層圏力学の進歩の足跡を辿り、突然昇温の研究に端を発した様々な新しい問題意識がどのように発展し現代に繋がっているかを概観してみることにする。突然昇温そのものに関しては、すでに7年前の気象研究ノート186号に詳しく議論したことがあるので(廣田, 1996)、ここではむしろ、研究の流れの中に見られるパラダイムシフト、すなわち新概念の提起による理解の深化と認識体系の再構築の幾つかを浮き彫りにしてみたい。この目標は、2年前の第31期理事長学術講演(廣田, 2001)で述べた理念・思想とも共通して、気象学の発展のあるべき姿を例示することである。それ故、以下の議論の含意は単に成層圏力学分野に限ることなくひろく気象学・大気科学各分野にそのまま当てはまる事柄として受け止めていただければ幸いである。

2. ベルリン現象の発見

50年前と言えば若い世代の人々にとって遠い歴史上

の出来事のように思われるかも知れないので、まずは当時のことをごく簡単に述べておこう。

第二次世界大戦の終結後、連合軍によって分割統治されていたベルリンの米国(US)ゾーンで、1952年の2月下旬に成層圏の気温が僅か数日間に40度以上も上昇するというそれまでの常識を覆す出来事が見出された。これがいわゆる「ベルリン現象」の発見である。発見者は当時ベルリン自由大学の気象学教室にあって米軍開発の新型気球ゾンデを活用するなど高層大気観測解析の指導者をつとめていたリヒャルト・シェルハーク教授。

この現象に関して「ドイツ気象台報告」に独逸語で発表された彼の論文(Scherhag, 1952)は以後の成層圏研究の「偉大なる第一歩」であると言っても褒めすぎではなかろう。素朴ながら力強いこの論文の最大の特長は、この昇温が地上天気図に見られるような総観規模現象とは異なり、今の言葉でいうプラネタリスケールの現象であることを示した点にある(第1図)。

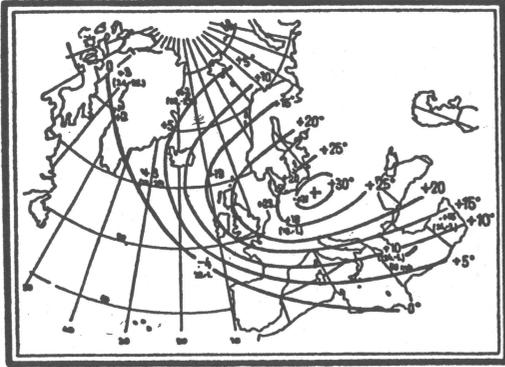
このような新しい成果をもたらした当時の気象学の背景やシェルハーク自身の学問的理念については近年の好著“The Stratosphere”(Labitzke and van Loon, 1999)に詳述されているのでそれに委ねる。その本から借用した余談を加えるなら、成層圏の昇温が最初に観測された地名に因んで、以後1950年代から60年代のはじめまでは「ベルリン現象」と呼ばれ、その証拠に現在でもドイツの百科事典にはBerlin PhenomenonがBerliner Philharmoniker(ベルリン・フィル)と並んで載っているという。

引き続き他の論文でも当初はシェルハークの原題に倣ってexplosive warmingやabrupt warmingなどの言葉が用いられ、sudden warming(突然昇温)の用語がジャーナルで定着するようになったのは1960年以降のことである。

* 京都大学名誉教授。hirota@kugi.kyoto-u.ac.jp

—2002年10月9日受領—

—2002年10月25日受理—

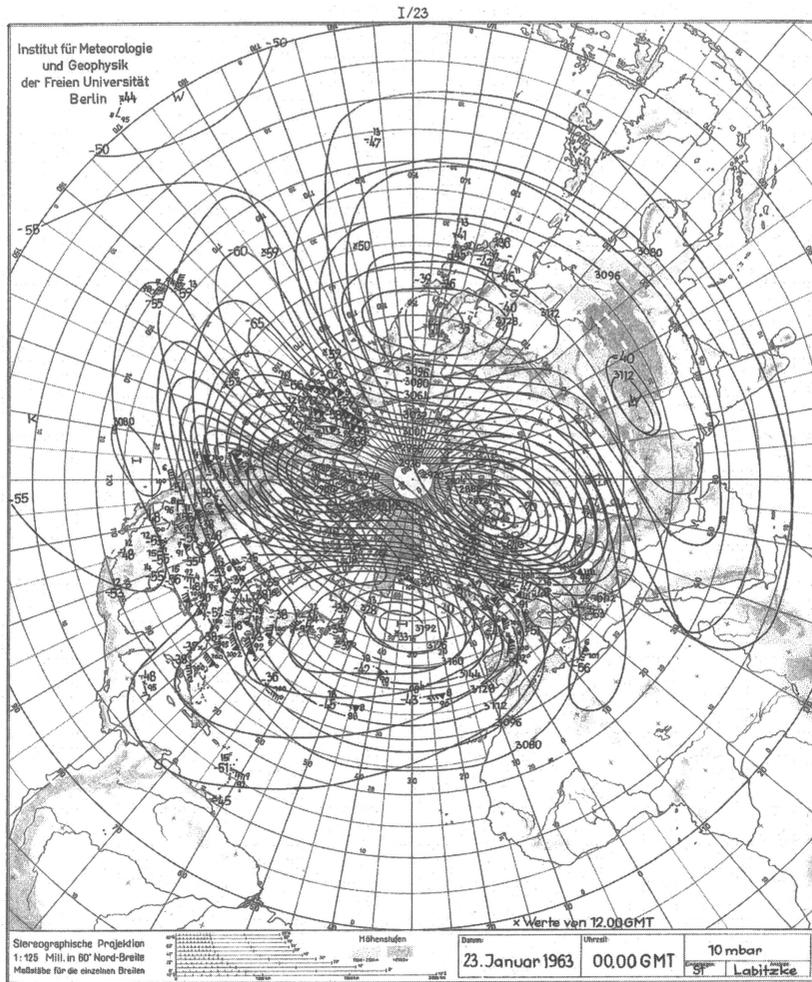


第1図 1952年2月22日から29日までの41 mbにおける気温変化分布図 (Scherhag, 1952).

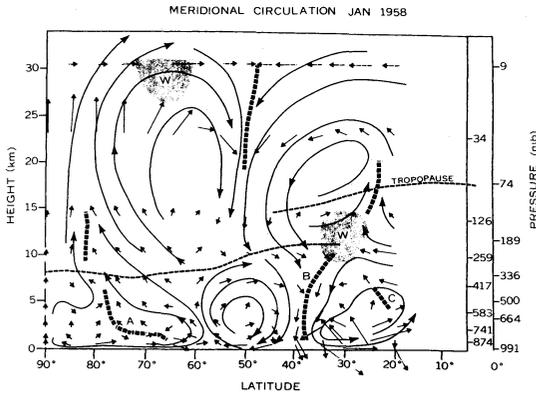
いずれにせよ、この議論の出発点として「特定地域上空の成層圏で短期間に起こる急激な温度上昇」が最大の関心事であったことに注意しておこう。後述するように、1960年代後半の議論に見られる最初の発想転換がもたらされるまでは、“warming”こそがこの問題の中心テーマだったのである。

3. 成層圏天気図と様々な現象論

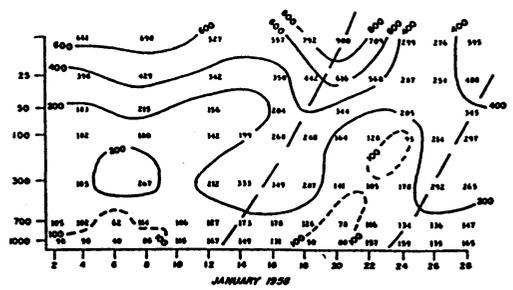
シェルハークによるベルリン現象発見の後を受けた1950年代から60年代ははじめにかけての大きな発展としては、まず1957—58年のIGY (国際地球観測年) になされた全球規模観測網の充実と、その観測データに基づくベルリン自由大学の成層圏天気図 (いわゆる Ber-



第2図 典型的な昇温パターンを示すベルリン天気図, 1963年1月23日, 10 mbの例. 解析者はカーリン・ラビツケ.



第3図 1958年1月の月平均子午面循環。成層圏中高緯度で極域上昇流の「逆循環」が見られる (Miyakoda, 1963).



第4図 50Nに沿う東西波数1の振幅の時間高度断面図。数字の単位はm。鉛直群速度が約5 km/dayの間欠的エネルギー上向き伝播が見られる (Muench, 1965)。

lin Map) の発刊が挙げられよう。

気球 (ラジオゾンデ) による成層圏観測に基づく北半球規模の解析から、1960年代前半には突然昇温に関する様々な現象論・形態的記述が盛んに行なわれるようになった。第2図はその一例で、これは後々まで事例解析によく用いられた1963年1月の昇温時における北半球10 mbの等圧面高度と気温パターンで、東西波数が2のプラネタリー波の急激な増幅に伴うカナダ上空の強い昇温がひと目で見て取れる。

しかし、現在の眼でこの図を詳細に見直すなら、北半球図とは言っても北米大陸・ヨーロッパ・極東域を除いてはゾンデ観測地点がきわめて限られており、この僅かなデータで良くこれだけの半球分布が描けたものだとして、あらためて感心させられる。データの多い対流圏からの鉛直構造および日を追っての時間的連続性に頼ってのことであつたらうが、現在、たとえば衛星観測を加えて作製されたNCEP/NCAR (米国環境予測センター/大気科学センター)再解析データなどの全球格子点値が誰でも自由に活用できる状況と比べて隔世の感を禁じ得ない。逆にいえば、このような開拓期における先人の勇気あるチャレンジ精神には今も学ぶべきところが大きい。

1963年冬の突然昇温の持つもうひとつの大きな特徴は、わが国で今なお語り草になっているサンパチイチ豪雪 (昭和38年1月のシベリア高気圧の発達に伴う日本列島上の北西季節風の強化継続) に象徴される対流圏成層圏結合の問題意識がこのとき既に提起されていたことである。これもまた、本文第7節で述べるように、それから40年経った現在、依然として未解決の大

問題として残されているのである。

1960年代に入り、世界各地における成層圏ゾンデ観測の充実とベルリンマップ解析などに基づいて突然昇温の観測解析研究が数多く輩出した。その間の事情は、田宮 (1979) による関連文献収集に如実に見られるとおりである。それらは主として昇温に関する現象論的記述であるが、その中で以後の発展に繋がった主要なものとして次のような研究を挙げることができる。

(a) Miyakoda (1963) は、1958年1月の昇温例について、ロレンツ方式のEnergetics (いわゆる4-box法解析) により、成層圏波動の急激な増幅が系外 (下層大気) からの擾乱エネルギーの流入によるものであることを明らかにした。また、東西帯状平均した子午面循環 (第3図) を提示し、成層圏大規模波動による極向き熱輸送が極域平均上昇流の断熱冷却と相殺していることを立証した。この平均子午面循環像は、後の言葉でいうオイラー平均であるが、後述の「非加速定理」の解釈への重大な伏線となるものであった。

(b) Reed *et al.* (1963) も1957年2月の昇温例についてEnergeticsの手法で解析を行ない、カナダや北欧といった特定地域での温度変化に着目するのではなく、帯状平均場で見えた気温変化が極域で上昇、中低緯度で下降であることを示した。Julian and Labitzke (1965) も1963年1月の典型的昇温 (第2図) に関して同様な結果を示し、さらに、Miyakoda (1963) の示した「成層圏へのエネルギー流入」に対応するものとして、突然昇温発達の引き金として対流圏におけるブロッキング現象の重要性を強調した。

(c) 対流圏から成層圏への影響をより明確に示したのがReed教授の指導下で行ったMuench (1965) の解析で、50Nに沿う東西波数1の増幅がまず下層から

始まり時間とともに成層圏に伝播してゆく様子を鮮やかに示した(第4図)。この図に示された過程は定常プラネタリー波の鉛直伝播(Charny and Drazin, 1961)の枠を超えた非定常プロセスであり、次節に述べる「非加速定理の破れ」を暗示するものであった。

(d) Hirota and Sato (1969) は、それまでの研究が主として昇温=温度変化に着目していたことに対し、冬季成層圏の非定常波動鉛直伝播と東西平均風速変化の対応を調べ、その両者が2週間くらいの時間スケールで良い逆相関を持って変動していることを示した。これは、ベルリン現象の本質が突然昇温というよりむしろ極夜西風ジェットの「突然減速」であるという解釈の下地を与えるものであった。

これらの現象論的記述とは別に、1960年代の突然昇温研究におけるもうひとつの流れは、この現象を成層圏極渦の力学的不安定として捉えようとしたことである。この問題について本論ではこれ以上深入りしないが、昨年逝去された関口理郎氏がCharney and Stern (1962) の「内部ジェットの不安定理論」の不備を鋭く指摘されたお仕事(Sekiguchi, 1963)は記憶に留めておくに値しよう。

4. 現象論から一般論へ

上に述べた1960年代の個々の研究によって明らかにされた昇温現象の諸特性を総合する形で、1970年代のはじめにMatsuno (1971) は突然昇温現象の発生機構を説明するひとつの力学模型を提唱した。その詳細は教科書(松野・島崎, 1981)に譲るとして、ごく大まかにいうなら「対流圏で何らかの原因により急激に増幅したプラネタリー波が上向きに伝播してくると、波の上端部分で背景風の減速が生じ、それに対応する温度風の関係から極域での下降流、したがって昇温が生ずる」ということである。

これが前節で指摘した「ベルリン現象の本質は突然昇温というより突然減速である」という意味である。一言説明を追加するなら、Charney and Drazin (1961) の非加速定理とは「定常伝播波動はその2次効果一波の振幅の2乗の項の作用を考慮しても背景場の変化をもたらさない」ということであり、その裏返しとして、もし波が非定常ならば非加速定理が破れ背景平均流の加速減速が生じうる、というわけである。因みにこの概念の適用は、突然昇温の議論の前から赤道成層圏東西風準2年周期振動(QBO)の力学的メカニズムに関しLindzen and Holton (1968)によって夙に具体

的な形で提示されていたことを指摘しておく。

しかしながら、本論の趣旨にとってより重要なことは、個々の力学過程の詳細な説明そのものではなく、問題の枠組みをどう設定するか、という点にこそある。

そもそも考えてみれば、シュルハーク以来の問題意識が「ベルリン現象」あるいは「突然昇温」の呼称に象徴されていたことからわかるように、ある物理過程を「現象」と見ることは、それを「一過性の出来事」つまり「イヴェント」として捉えていたことを意味している。“Phenomenon”という言葉自体、語源に溯ってみれば、日常的ではない珍しい特異な出来事、という意味が込められているのである。

だが果たして、突然昇温とは単なるひとつの特殊なイヴェントに過ぎないのであろうか。そしてその出来事の仕組みを既存の知識や概念の応用・組合せで説明しただけで問題がすべて解決された満足できるであろうか。或いはまた、特定時期の観測例に合わせた数値シミュレーションがある程度現実大気の振舞いに似た結果を示したのは良いとしても、それはより深い問題の本質理解に到るヒント提示の段階であると見なすべきなのではなかろうか。

ここで一挙に大風呂敷を広げるなら、天球における惑星の位置変化を説明することから生まれたケプラーの法則(良い意味での現象論!)がニュートンの万有引力の法則確立に繋がり、更には惑星楕円軌道の説明のみに留まらないニュートン力学というより大きな世界を創り上げてきた歴史を想い起してみよう。

気象学の世界でも個別的現象論から一般論へと発展した好例は枚挙にいとまがない。たとえば、対流圏総観規模擾乱は、まず日常の人間生活に密着した天気現象として嵐という見方に端を発し、天気図解析によって低気圧として空間規模の広がりや移動が知られ、風や気温の三次元分布が前線波動論を経て傾圧不安定理論の根拠となった。そして更に、単一擾乱の一過性発達という捉え方を超え、やがて高低気圧の熱や運動量輸送を通しての大循環に果たす役割という作用論にまで認識が高められてきた。同様に台風についてみれば、熱帯性低気圧(孤立渦)の発生発達論の中から生まれた積雲対流の作用論が現在のメソ気象学の最も基本的な問題意識を高めると同時に、対流圏大循環における熱バランスに果たす水蒸気の役割という極めて奥の深い問題提起にも繋がってきているのである。

次節以下では、このような視点から、ベルリン現象に端を発した研究が、1970年代以降、単なるイヴェン

トとしての説明に留まることなく、次々と新しいパラダイムの転換をもたらしてきた有り様を概観してみることにしよう。

5. 中層大気力学の新しい展開

1970年代の成層圏大規模力学において新たな発展の第一歩となったのが、先に述べた「非加速定理」を背景とした Uryu (1974, 1975) の「波に伴う運動量」の概念化の仕事であった。しかしこの本格的な理論の詳細を語ることは本論の遠く及ぶところではない。後に量子力学との相似性から「フォトンアナロジー」と呼ばれるようになった「運動量=エネルギー/位相速度」の美しい表現に関心のある読者は、是非、彼自身の筆による本誌解説（瓜生, 1976）を参照されたい。

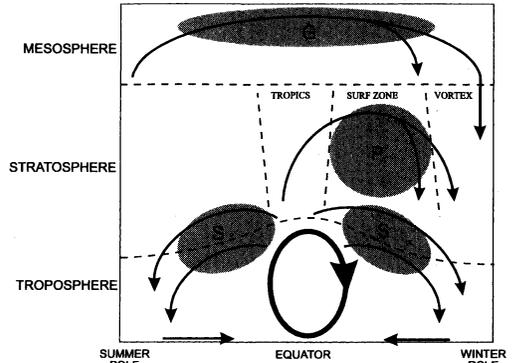
この仕事の意義は、突然昇温現象の説明という枠組みをはるかに超えて、伝播性強制プラネタリー波動の成層圏中間圏循環に及ぼす作用を抽象化・一般化したところにある。それは引き続き1970年代の後半に英国のケンブリッジグループによってなされた Elassen-Palm (E-P) フラックスと Transformed Eulerian Mean (TEM) 方程式系の定式化に対する重要な動機・基盤を与えるものであった。(TEM 方程式系についてはたとえば Andrews *et al.* (1987) のテキストを参照のこと)。

これらの新しい理論的仕事の価値は、それによって同じ現象を見る着眼点が従前に比べ明らかに一段と高められたことにある。

やや専門的にはなるが具体例をいくつか挙げよう。

その代表例は先にも少し触れた中層大気（成層圏中間圏）の平均子午面循環、ひいては中層大気大循環そのものの因果論的解釈・理解である。子午面循環に関しては、古くは成層圏オゾンの緯度分布から推論されたドブソン循環あるいは水蒸気分布に基づくブリューワー循環（いずれも赤道から両極に向かう直接循環）が知られていたが、この循環の成因としては、初期には放射熱源（太陽放射加熱と赤外放射冷却の差）によって駆動される熱循環（thermally driven circulation）として解釈されていた（たとえば Murgatroyd and Singleton, 1961）。しかし注意すべきは、この放射熱源の見積もりには気温の実測値を用いた赤外放射冷却が既知のものとして与えられていることである。本来、気温はアприオリに与えられるものではなく、大循環の内部変数として決められなければならない。

TEM 方程式系はこの間の事情を実に明快に示して



第5図 様々な波動の作用により励起される中層大気子午面循環の模式図。太い矢印で示してある熱対流圏の循環は熱的励起のハドレー循環。S, P, G は夫々、総観規模擾乱、プラネタリー波動、重力波の碎波に伴う作用を表わす (Plumb, 2002)。

くれる。すなわち、波動の作用としての E-P フラックスの発散 $Div. F$ が平均子午面循環（残差循環）の南北成分の強さを決め、質量保存則からそれに見合う上昇下降流が決まり、その上昇下降流による断熱冷却加熱および短波放射加熱とバランスするように温度場が決定される。東西風はその温度場と温度風バランスを保つように吹く。つまり、中層大気大循環の本質は「波動によって駆動される循環 (wave-driven circulation)」であるという新しい解釈が生み出されたのである。

この理解の背景には前節で述べた非加速定理とその破れ概念が深く根を張っていることを重ねて強調しておこう。そして、この段階に至れば、波動の作用が昇温現象のような一過性の出来事を超越して中層大気大循環全体にとって不可欠な要因であることが明らかである。これこそまさに「パラダイムシフト」の言葉がぴったりではないか。

この間の事情を明快に論述した解説としては Dunkerton (1978) と Plumb (1982) を挙げておく。それを更に発展させたのが最近の Plumb (2002: 第5図) であり、日本語のテキストとしてはこの因果律を「記号論理式」を用いて説明した廣田 (1992) がある。

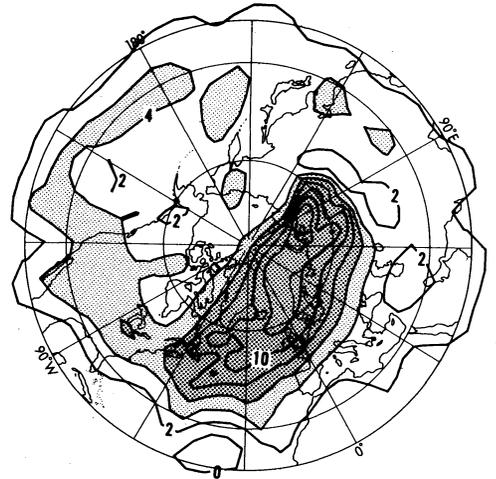
このような “wave-driven circulation” の概念を別の言葉で表現したのが「ダウンワードコントロール」である (Haynes *et al.*, 1991, Holton *et al.*, 1995, 余田, 1995)。その言わんとする意味は、中層大気中で波の作用に伴う $Div. F$ が存在するときその周りに誘

起される子午面流が下層の対流圏循環を支配する（つまり下方への影響・効果）という考え方である。これはこれでひとつの新しい概念提起ではあるが、しかし、波動作用の影響の及び方は必ずしも上から下への一方通行とは限らない。この点については後ほど再び触れることにしよう。

中層大気子午面循環の新しい理解がもたらしたもうひとつの大きな進歩は、オゾンや水蒸気に代表される大気微量成分に関する「グローバル物質輸送」の議論である。もちろんこれは上述のドブソン循環以来、古くからの問題ではあるが、近年の衛星グローバル観測の蓄積・充実と TEM 理論に象徴される力学的解釈との結合によって、従前の定性的推論の域を脱却した高精度の定量的記述が可能となってきた。ここではその一例として、UARS 衛星観測に基づく大気微量組成の鉛直分布変化から南極域成層圏の平均下降流を大規模波動に伴う Div. F と結び付けて算定した Kawamoto and Shiotani (2000) を挙げておくに留めるが、上述の Plumb (2002) の論旨が成層圏における輸送過程であることに象徴されるように、近年の中層大気化学の目覚ましい発展が大規模力学と極めて強く結びついてきていることを指摘しておきたい。

このように、非定常伝播波動の作用を TEM 方程式系で記述することが出来るようになったとき、当然のことながら、それでは Div. F をもたらず擾乱の実態は何か、という問題が生ずる。1980年代の衛星観測の発展を背景に、これも英国グループが1940年代以来の古典的概念である potential vorticity (PV=渦位) の現代的解釈として成層圏における等温位面上での PV 分布図を描き(第6図)、 Div. F を生み出すプラネタリー波の碎波の実態を具体的に示した。このような波の振舞いが、突然昇温のような一過性の特異な出来事ではなく、しかし本質的にはそれと同じ作用を担って冬期間に断続的に働き放射場とバランスした形で極夜ジェットの強さを恒常的に保っている有り様は、Shiotani and Hirota (1985) の解析結果(第7図)によって如実に示されている。

突然昇温を単一イベントの説明ではなくより大きな枠組みから再認識しようとするもうひとつの試みは、中層大気循環全体を「非線形システム」として捉えることである。Yoden (1987) は背景東西風の強さと下層境界条件として与える波動強度との2つをパラメータとする非線形力学システムが多重解を持つことから、従前の個別的な昇温模型 (Matsno, 1971 ;



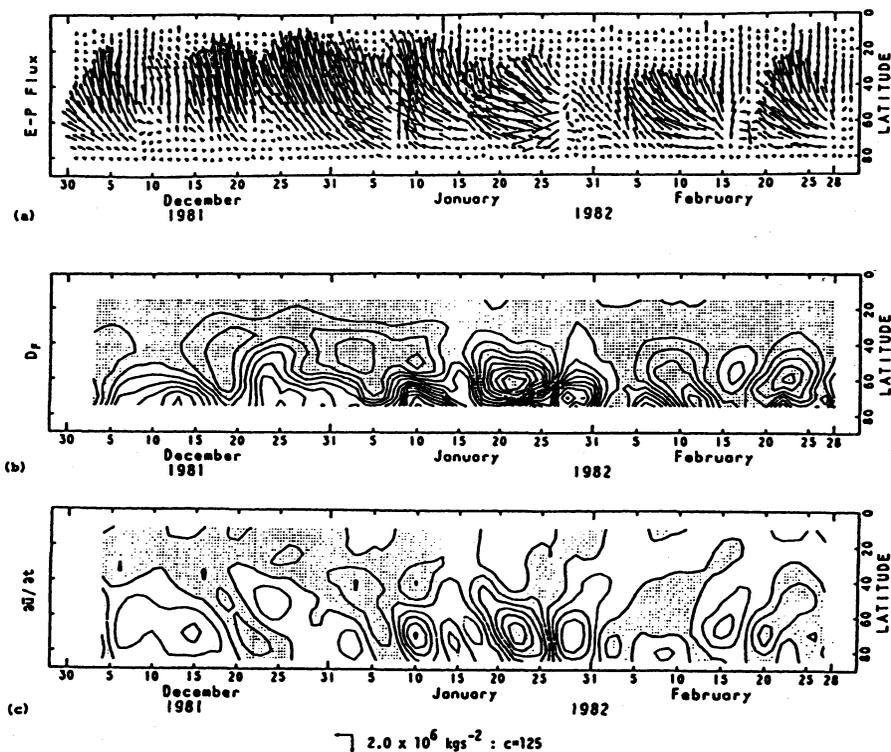
第6図 成層圏プラネタリー波の碎波の実態を示す850Kの等温位面上(高度約30 km)における渦位Qの分布図。1979年1月27日の例 (McIntyre and Palmer, 1983 ; なお、この図は後になって計算上に些細な間違いのあったことが著者自身によって指摘・訂正されたが、内容の本質は本文の論旨に抵触しないので原図のまま用いた)。

Holton and Mass, 1976 ; Chao, 1985など) がそのシステム内でどう位置づけられるかの俯瞰的解釈を与えた。これもまた一段と高い認識をもたらしたパラダイムシフトの好例と言えよう。

6. 南北両半球への発展

気象学のどの分野においても、理論の進歩と観測の発展が車の両輪の如く相補的に展開されてゆくものであることは言を俟たない。1980年代以降の中層大気衛星観測の充実もまたその例にもれない。特に、地形等下層の条件が相異なる北半球と南半球の対比は、天然の大実験場としてさらに新しい問題意識を提起するものであった。それまでは、南半球での観測の不足と昇温現象それ自身の発生の違いにより、突然昇温の事例解析は主として北半球の冬季に議論が限られていた。

しかし、全球衛星観測の進展により、波動と平均流の相互作用としての中層大気大循環像が明らかになるにつれ、1980年代中葉以降にクローズアップされたいわゆる南極オゾンホール問題に魁けて、南北両半球における平均風系・温度場・波動等の差異が強い興味の対象となってきた。その一例が1980年代初頭の京都大学成層圏研究グループ(廣田・廣岡・塩谷)が示した



第7図 プラネタリー波の碎波に伴う、北半球5 mbにおけるE-Pフラックス(a)、その発散(b)および帯状風時間変化(c)。突然昇温と本質的に同じ作用が冬期間を通して繰り返し起きている積算効果が見られる (Shiotani and Hirota, 1985)。

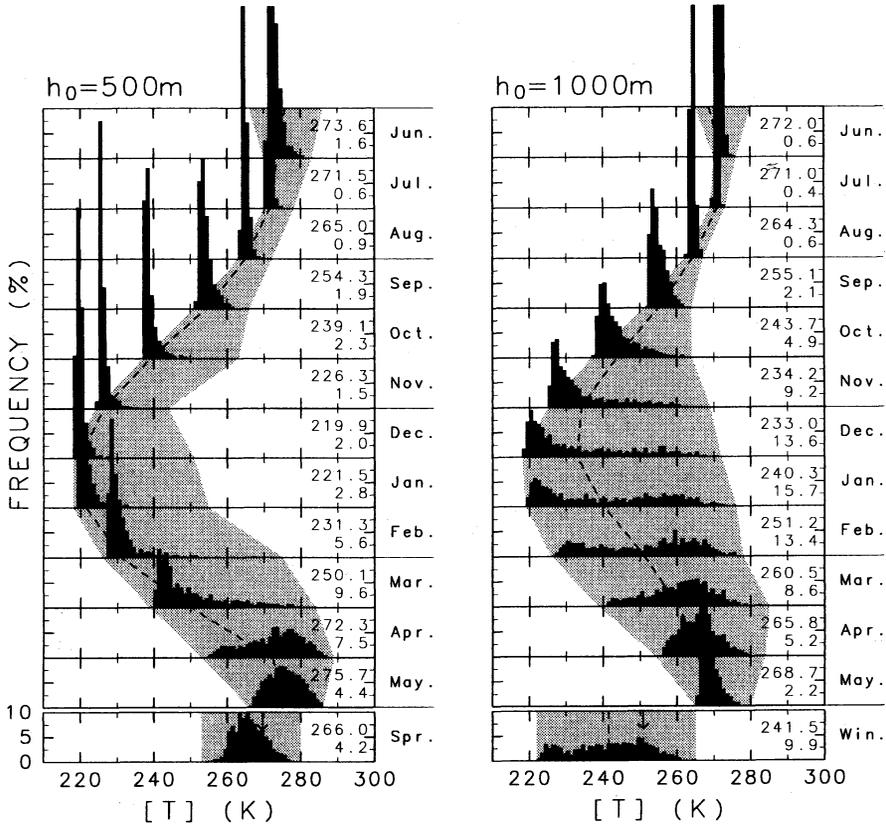
ような両半球の季節進行の差である (Hirota *et al.*, 1983)。より具体的に言うなら、極夜ジェット、プラネタリー波の活動度がともに北半球では1月2月の真冬に見られるのに対し、どうして南半球では9月10月といった晩冬から春先に極大値が出現するのか。これは従来の大循環数値モデル (GCM) で両半球の観測事実に似たものが再現 (simulation) できればそれで良いといった安直な問題ではない。

1990年代に入ってから以後は「簡略化された中層大気数値モデル」をうまく使い、戦略目標を明確に絞った論理性の高い「数値実験」が行われるようになってきた。ここでは、その好例として Taguchi and Yoden (2002) による「千年積分」の結果を示そう (第8図)。千年にも亘る数値時間積分を行うことの長所は、現実大気の観測が北半球といえども高々50年弱の蓄積しか無いことに比べ、長年の数値計算結果からは統計的に十分有意な議論が可能な点にある。

彼らは簡略化した全球 GCM にプラネタリー波を強制する地形 (大規模山岳) を入れ、山の高低に対応し

た中層大気の応答の差異を詳細に解析することによって南北両半球に相当する季節進行の特徴を統計的に良く表現することに成功した。この第8図は、すでにベルリンデータに基づく統計から定性的に知られていた通称「ラビツケ図」(Labitzke and Naujokat, 1983) の意味を、中層大気を持つ「自己内部変動」として解釈できることを明らかにした点で極めて意義深い。さらにまた、南半球の季節進行の独自性に関して、このような観測事実および数値実験を相補うものとして、Wakata and Uryu (1987), Yoden (1990), Scott and Haynes (2002) などによる理論的研究があることも付記しておこう。

南北両半球の違いを通して成層圏力学の特性を見るもうひとつの興味ある問題は、横の境界条件としての赤道成層圏 QBO が中高緯度の循環に及ぼす影響である。この問題は1970年代の限られたデータから北半球について議論した Holton and Tan (1980) を嚆矢として、それ以後のデータをも加えた Labitzke and van Loon (1988) や Naito and Hirota (1997) があるが、



第8図 簡単化 GCM の1000年積分による、緯度80度、2.6 hPa における月平均温度の頻度分布図。左が強制地形高度500 m(南半球に対応)、右が同1000 m(北半球に対応)。薄いハッチは変動幅、下欄は季節平均を表わす (Taguchi and Yoden, 2002)。

南半球について見ればその影響の及び方が北半球とはかなり異なっていることが知られるようになってきた (Baldwin and Dunkerton, 1998 ; Naito, 2002). この問題もまた簡略化 GCM で赤道東西風速をパラメータとする数値実験による進展が見られ、QBO の影響がその振幅強度に単純には比例しないこと、つまりこの系の非線型性を示す興味ある結果が得られ始めている (Naito *et al.*, 2003).

7. 力学上下結合

突然昇温研究の初期の段階では、ミュンチの示した第4図、あるいは都田やラビツケなどが指摘した引き金としての対流圏ブロッキング現象、などのように、「何か知らないが原因は対流圏にあり、その擾乱が上方に伝わった結果としての成層圏の振舞い」という見方が支配的であった。その背景にチャーニー・ドレイジンの鉛直伝播論があったことも確かである。(大気上方

からの太陽活動の影響という視点はいまは問わないことにする)。

ところが一方、本文の第5節で触れたように、中層大気で起きる砕波に伴う Div. F が子午面循環を誘起し下層に影響を与える、というダウンワードコントロールの考え方もありうる。この一見相反する見方をどう統一的に解釈すれば良いのであろうか。これはもはや、突然昇温現象、といった限定された視点を超えて、より大きな枠組みから捉えられるべき問題である。

先に第5図として示したプラムの子午面循環模式図を見れば、下部成層圏では総観規模擾乱 (S)、成層圏中間圏ではプラネタリー波 (P)、そしてさらに上では重力波 (G) が駆動力の主役を担っている。これらはもともと (様々な物理過程により) 対流圏で励起生成されたものが中層大気に上向きに伝わってきたものが殆どである。その意味では原因は下層にある。しかし

その伝播特性は中層大気自身の風系や温度構造で規定されているのであるから話は単純ではない。一方、かと言って、大気はひとつつながりなのだから地表から高度100km以上まで多層にしたGCMでまるごと数値計算してしまえばよからう、というだけではこれまた芸がない。

ここにおいて「下層・中層大気の力学的上下結合」あるいは「対流圏—成層圏の交換過程」という問題提起があらためて成り立つ。先に挙げた Holton *et al.* (1995) はその一例であり、熱的・力学的に異なる特性を持つ上下層をひとつの結合システムとして捉える明確な視点が要求される。Yoden *et al.* (2002) はこのような立場から最近の数値実験研究の総括を与えている。

これをさらに敷衍するなら、放射・組成・力学を総合した気候システムにおいて、成層圏が対流圏の気候に及ぼす影響、という発想にも繋がる。事実、WCRP (世界気候研究) の一環として1990年代からスタートした SPARC (成層圏が気候に及ぼす影響研究) の国際プロジェクトはこのような背景から生まれてきたものである。

しかしながら、プロジェクトとは言っても短期目標に沿った共同作業ではない。その中心をなすものは、個々の物理過程の持つ意味をより深く理解し解釈を与えるような研究でなければならない。力学上下結合は古くからの問題であると同時に、現在、依然として未解決の興味ある研究テーマなのである。長年にわたる観測データ解析の立場から、南極オゾンクロワッサンの地理的位置や強さの経年変化に象徴される南半球成層圏循環の年々変動特性を対流圏擾乱の変動と結び付けて論じた Hio and Hirota (2002) もそのひとつのステップである。

これも含め、本論の後半部に引用した新しい論文のいくつかは2001年3月に京都で開かれた日米セミナー「力学・放射・化学過程を通しての対流圏と成層圏の結合」で発表されたものを集めて昨年9月に刊行された JMSJ (気象集誌) 特集号 (第80巻第4B号) に印刷されているものである。

8. 温故知新…おわりに

以上駆け足でベルリン現象発見から50年間にわたる成層圏力学の足跡を概観してきた。しかし最初にお断りしたようにこれはこの研究分野の本格的な総合報告ではない。むしろ主張したかったことは、如何なる分

野においても進歩発展とはそれまでの成果を良い意味での踏み台にして着実に新しい世界を開拓してゆくことの重要性なのである。古きをたずね新しきを知る、という努力のなかに、あるときは先達の先見の明にあらためて敬服し、またあるときは視野が限定され展望が欠けていたことへの反省もあろう。

これに関連して思い起こすのは、我が国の気象力学の先覚者であった正野重方先生が今から半世紀も前に岩波の「科学」にお書きになった解説 (正野, 1953) 中の「物理的には擾乱は大循環の不可欠な要素なのである。したがって大気の擾乱の研究が直ちに大循環の研究ともなるのである」(原文のまま)の一文である。これはまさに、現在でもそっくりそのまま通用する至言である。本論のモチーフはこの恩師の一言を忠実になぞったに過ぎないとさえ言える。

逆に、少しばかり辛口の批判を許していただけのなら、1970年代後半から80年代にかけて、気象力学はもう終わった、と言わんばかりの発言を何度か耳にしたことがあるが、そのような立場や態度からは、結局、その後何も新しいものが生まれては来なかったという事実を厳しく見据えねばなるまい。

ベルリン現象に端を発した様々な研究は、一見同じ問題を繰り返し扱ってきただけに過ぎないと思われるかもしれないが、それは決して古い問題への単なる回帰や堂々巡りではない。学問の進歩とはまさに螺旋階段を昇るが如く常に一歩ずつ新しい高みに到達してゆくところにこそ意義がある。本論の後半部に示したものはその極く一部に過ぎないが、中層大気科学の世界がこの二三十年間に次々と幹や枝葉を伸ばし豊かな実りをもたらしてきたことはおわかりいただけたものと思う。そしてそれはまた、個々の分野・テーマの如何を問わず、これから新しく研究の第一歩を踏み出してゆく若い世代の人々にとって、大気科学が常に魅力に満ち溢れた発展性のある世界であることを意味しているのである。

謝 辞

本文の草稿に対してご専門の立場から貴重なコメントを寄せて下さった廣岡俊彦・内藤陽子の両氏と天気編集委員として詳細なご指摘を下さった中村尚氏に厚くお礼を申し上げます。

参 考 文 献

Andrews, D. G., J. R. Holton and C. B. Leovy, 1987:

- Middle atmosphere dynamics, Academic Press, 489 pp.
- Baldwin, M. P. and T. J. Dunkerton, 1998 : Quasi-biennial modulation of the southern hemisphere stratospheric polar vortex, *Geophys. Res. Lett.*, **25**, 3343-3346.
- Chao, W. C., 1985 : Sudden stratospheric warmings as catastrophes, *J. Atmos. Sci.*, **42**, 1631-1646.
- Charney, J. G. and P. G. Drazin, 1961 : Propagation of planetary-scale disturbances from the lower into the upper atmosphere, *J. Geophys. Res.*, **66**, 83-109.
- 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.
- Dunkerton, T. 1978 : On the mean meridional mass motions of the stratosphere and mesosphere, *J. Atmos. Sci.*, **35**, 2325-2333.
- Haynes, P. H., C. J. Marks, M. E. McIntyre, T. G. Shepherd and K. P. Shine, 1991 : On the "downward control" of extratropical diabatic circulations by eddy-induced mean zonal forces, *J. Atmos. Sci.*, **48**, 651-678.
- Hio, Y. and I. Hirota, 2002 : Interannual variations of planetary waves in the southern hemisphere stratosphere, *J. Meteor. Soc. Japan*, **80**, 1013-1027.
- Hirota, I. and Y. Sato, 1969 : Periodic variation of the winter circulation and intermittent vertical propagation of planetary waves, *J. Meteor. Soc. Japan*, **47**, 390-402.
- Hirota, I., T. Hirooka and M. Shiotani, 1983 : Upper stratospheric circulations in the two hemispheres observed by satellites, *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **109**, 443-454.
- 廣田 勇, 1992 : 「グローバル気象学」東京大学出版会, 148pp.
- 廣田 勇, 1996 : 成層圏突然昇温研究の歴史と展望, 気象研究ノート, (186), 97-113.
- 廣田 勇, 2001 : クラシック気象学, 天気, **48**, 5-10.
- Holton, J. R. and C. Mass, 1976 : Stratospheric vacillation cycles, *J. Atmos. Sci.*, **33**, 2218-2225.
- Holton, J. R. and H. C. Tan, 1980 : The influence of the equatorial quasi-biennial oscillation on the global circulation at 50 mb, *J. Atmos. Sci.*, **37**, 2200-2208.
- Holton, J. R., P. H. Haynes, M. E. McIntyre, A. R. Douglass, R. B. Rood and L. Pfister, 1995 : Stratosphere-troposphere exchange, *Rev. Geophys.*, **33-4**, 403-439.
- Julian, P. and K. Labitzke, 1965 : A study of atmospheric energetics during January and February 1963 stratospheric warming, *J. Atmos. Sci.*, **22**, 597-610.
- Kawamoto, N. and M. Shiotani, 2000 : Interannual variability of the vertical descent rate in the Antarctic polar vortex, *J. Geophys. Res.*, **105**, 11935-11946.
- Labitzke, K. and B. Naujokat, 1983 : On the variability and on trends of the temperature in the middle atmosphere, *Contributions to Atmospheric Physics*, **56**, 495-507.
- Labitzke, K. and H. van Loon, 1988 : Associations between the 11-year solar cycle, the QBO and the atmosphere, *J. Atmos. Terres. Phys.*, **50**, 197-206.
- Labitzke, K. and H. van Loon, 1999 : The stratosphere-phenomena, history, and relevance, Springer-Verlag, 179pp.
- Lindzen, R. S. and J. R. Holton, 1968 : A theory of the quasi-biennial oscillation, *J. Atmos. Sci.*, **25**, 1095-1107.
- Matsuno, T., 1971 : A dynamical model of the stratospheric sudden warming, *J. Atmos. Sci.*, **28**, 1479-1494.
- 松野太郎, 島崎達夫, 1981 : 「成層圏と中間圏の大気」, 東京大学出版会, 279pp.
- McIntyre, M. E. and T. N. Palmer, 1983 : Breaking planetary waves in the stratosphere. *Nature*, **305**, 593-600.
- Miyakoda, K., 1963 : Some characteristic features of winter circulation in the troposphere and lower stratosphere, Tech. Rept. 14, Univ. of Chicago, 93 pp.
- Muench, H. S., 1965 : On the dynamics of the winter stratosphere circulation, *J. Atmos. Sci.*, **22**, 349-360.
- Murgatroyd, R. J. and F. Singleton, 1961 : Possible meridional circulations in the stratosphere and mesosphere, *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **87**, 125-135.
- Naito, Y. and I. Hirota, 1997 : Interannual variability of the northern winter stratospheric circulation related to the QBO and the solar cycle, *J. Meteor. Soc. Japan*, **75**, 925-937.
- Naito, Y., 2002 : Planetary wave diagnostics on the QBO effects on the deceleration of the polar-night jet in the southern hemisphere, *J. Meteor. Soc. Japan*, **80**, 985-995.
- Naito, Y., M. Taguchi and S. Yoden, 2003 : A parameter sweep experiment on the effect of the equatorial QBO on the stratospheric sudden warming events,

- J. Atmos. Sci. (accepted)
- Plumb, R. A., 1982 : The circulation of the middle atmosphere, *Australian Meteor. Mag.*, **30**, 107-121.
- Plumb, R. A., 2002 : Stratospheric transport, *J. Meteor. Soc. Japan*, **80**, 793-809.
- Reed, R. J., J. Wolfe and H. Nishimoto, 1963 : A special analysis of the energetics of the stratospheric sudden warming of early 1957, *J. Atmos. Sci.*, **20**, 256-275.
- Scherhag, R., 1952 : Die explosionartigen Stratosphärenwärmungen des Spätwinters 1951-1952, *Ber. Deut. Wetterd.*, **6**, 51-63.
- Scott, R. K. and P. H. Haynes, 2002 : The seasonal cycle of planetary waves in the winter stratosphere, *J. Atmos. Sci.*, **59**, 803-822.
- Sekiguchi, Y., 1963 : Energy variation in the stratosphere during the winter season and its relation to dynamic stability of the polar vortex, *ARL-1277-3. Univ. of Oklahoma Res. Inst.*, 46pp.
- Shiotani, M. and I. Hirota, 1985 : Planetary wave-mean flow interaction in the stratosphere : a comparison between northern and southern hemisphere, *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **111**, 309-334.
- 正野重方, 1953 : 新しい大気大循環論 I, II, *科学*, **23**, 332-338, 416-422.
- Taguchi, M. and S. Yoden, 2002 : Internal interannual variability of the troposphere-stratosphere coupled system in a simple global circulation model, Part II : millenium intergations. *J. Atmos. Sci.*, **59**, 3037-3050.
- 田宮兵衛, 1979 : 成層圏突然昇温に関する研究の展開について, *地学雑誌*, **88**, 296-312.
- Uryu, M., 1974 : Mean zonal flows induced by a vertically propagating Rossby wave packet, *J. Meteor. Soc. Japan*, **52**, 481-490.
- Uryu, M., 1975 : On the mean motions induced around a planetary wave packet on a rotating sphere, *J. Meteor. Soc. Japan*, **53**, 45-54.
- 瓜生道也, 1976 : 波とそのまわりの平均運動, *天気*, **23**, 3-22.
- Wakata, Y. and M. Uryu, 1987 : Stratospheric multiple equilibria and seasonal variations, *J. Meteor. Soc. Japan*, **65**, 27-42.
- 余田成男, 1995 : ダウンワード・コントロール, *天気*, **42**, 657-660.
- Yoden, S., 1987 : Bifurcation properties of a stratospheric vacillation model, *J. Atmos. Sci.*, **44**, 1723-1733.
- Yoden, S., 1990 : An illustrative model of seasonal and interannual variations of the stratospheric circulation, *J. Atmos. Sci.*, **47**, 1845-1853.
- Yoden, S., M. Taguchi and Y. Naito, 2002 : A review on numerical studies on time variations of the troposphere-stratosphere coupled system, *J. Meteor. Soc. Japan*, **80**, 811-830.

50 years after the Discovery of the Berlin Phenomenon
—Relevance of Sudden Warming Studies

Isamu HIROTA

President of the Meteorological Society of Japan, Professor Emeritus of Kyoto University.

(Received 9 October 2002 ; Accepted 25 October 2002)
