



高層大気力学の諸問題

廣 田 勇*

1. はじめに

成層圏・中間圏の気象力学をこれから本格的に勉強し、この道の専門家を目指す人々の為に、この分野の問題点を要約し、併せていささかの関連文献を紹介しよう。一応は学部程度の気象学を聴き気象力学の基礎を修得した読者を想定し、高層大気に関しては、たとえばこの手引きの基礎コース「高層大気物理学入門」等によりその概要を心得ていることを前提とする。さらに、本コースにもある「回転流体力学」や「大気大循環論」の素養があればなおいっそう好ましい。しかし、それらにも増して大切なことは心の準備であろう。自然に対する絶えざる興味と高みをめざす強い意志こそが、プロたらんとするものの必須条件であることは言をまたない。

2. 高層大気力学とは何か

大気の運動を支配する方程式系において、熱と摩擦の項を除けば、気圧 p と密度 ρ とは常に p/ρ (およびその微分) の形で入っているため、重力と転向力のみが作用するような大気の運動形態は密度 (したがって高度) の絶対値によらないことが分かる。つまり、この意味だけから言えば、対流圏と成層圏中間圏の力学を区別する理由はない。

しかし、実際には、成層圏中間圏の力学的現象が対流圏のそれとかなり異なっていることは誰の目にも明らかである。成層圏以高の領域では、移動性高低気圧は見られないし台風も前線もない。

それでは、低層と高層の力学過程を区別するような要因の違いとはいったい何であろうか。

まず第一に考えられるのは、大気の平均的な構造の違いである。低層と高層とでは物質分布と放射過程によってきまる熱収支バランスの内容が異なり、その結果、グローバルな気温の緯度高度分布が違う。したがって、誘起される子午面循環や温度風バランスから要請される平均風系も違ってくる。しかし、平均帯状流の強さやシアーの大きさの絶対値は低層と高層とで桁違いには変わらない。すなわち、大気の平均構造は必ずしもそれだけで

決定的な要因であるとは言えない。

次に考えられるのは、地表面の影響である。地面海面の存在は放射過程や水蒸気源として熱的に大きな効果をもたらすことは直観的にうなずける。流体力学的見地からすれば、これはまた下端の境界条件として重要な意味を持つ。傾圧不安定理論の例を想起すればすぐ分かるように、多くの場合、下層大気中の力学的不安定性(波動擾乱の発達)は下端の境界条件によって強く規定されている。この事情は、高層大気中に力学的不安定性を成因とする波動が特殊な例外を除いては存在しない(あるいは知られていない)ことと密接に関係している。

一方、これをエネルギー論の立場から見れば、次のようなことが言える。重力による成層のため、大気中のエネルギーの大部分は下層に貯えられており、その一部のみがある種の波動によって上層大気中に運ばれる。もしエネルギー密度を保存したまま波が高層に伝われば、大気密度の減少に伴い波動の振幅は増大し、その場の循環を支配するに至る。これが、高層大気力学においてさまざまな波動の伝播性の重要視されるゆえんである。不安定波動がその場の持つエネルギーを消費(変換)して自励的に発達するのに比べ、伝播性波動は系外からエネルギーを持ち込むのであるから、成層圏中間圏の波動の振舞いを記述するに際し、いわゆる Energetics(Lorenz 流の four-box method) はあまり本質的な意味を持たないことになる。

以上を要約すれば、高層大気力学の目的とは、一般の気象力学あるいは地球流体力学という大きな枠組みの中で、平均流、境界条件、エネルギー源等に関する特定の状況設定を行ない、それに応じて生ずる高層大気固有の運動状態を論ずることである。言い換えれば、そのような状況下で現実にはいかなる現象が生起しているかをまず知り、然る後にそれら個々の現象を力学的に説明するための方程式系の確立、線型解析、数値モデル計算などの具体的な手段が選択されることになる。

このように、一方では流体力学や熱力学の基本を背景としながらも、他方では現実に卓越する自然現象が指導

* I. Hirota, 京都大学理学部。

原理となるような学問の構成は、気象力学の本来的な性格であるように思われる（いわゆるスケール・アナリシスはその端的な例である）。高層大気力学の場合、この事情は特に著しい。たとえば、**Holton: The dynamic meteorology of the stratosphere and mesosphere** (1975) は、まさにこのような思想に基づいて書かれたテキストである。以前、天気1977年9月号にも紹介したように、この本は1970年代半ばまでに為された成層圏中間圏循環研究の優れた集大成であり、この分野の勉強・研究を本格的に始める人々にとって必読の文献と言える。構成は、(1)観測事実 (2)力学モデル（方程式系の整備）(3)安定性 (4)強制波と波動一帯流相互作用 (5)数値モデリングの各章から成り、約200編のオリジナルペーパーが引用されている。

したがって、本稿ではこの教科書を視点の中心に据え、以下それぞれのテーマの問題点をかいつまんで述べることにする。限られた紙数ゆえ、個々の原論文の指摘は最小限にとどめる（引用は著者名、年号、掲載誌の略符号* のみ）。

しかしテキストを読み進むにつれ、必要に応じて原論文を消化してゆくことは読者の責務である。この分野の研究は日進月歩であり、次々と新しい仕事が発表されている。たとえば、4年毎に開かれる IUGG 総会に合わせて行なわれる気象学各分野のレビューのひとつ **Dickinson** (1975) および 1979 年に書かれるであろう同種の総報告は、最新の論文目録としてぜひ目を通しておくことが望ましい。

3. 高層大気の実体

上に述べたように、まず必要なことは、高層大気の構造や運動に関し、その自然の姿を良く知ることである。それは、成層圏中間圏の大循環あるいは climatology と言ってもよい。

高層においては、一般に現象の空間スケールの大きなものが卓越しているの、帯状平均をした諸量の緯度高度分布が特にはっきりとした意味を持つ。それらを時間軸に沿って見れば、中高緯度に顕著な1年周期（季節変化、端的には冬と夏の違い）、赤道領域での準2年周期や半年周期等が注目される。

これらの特徴的な気温分布や平均帯状流分布は、その中に存在する波動擾乱の特性を規定する“場”としてとらえることができる。すなわち、コリオリ効果の緯度変化や下層大気中の励起エネルギー分布等とも関連して、高層大気中にはきわめて個性的な波動現象が卓越する。たとえば、冬季中高緯度のプラネタリー・ロスビー波とそれがもたらす突然昇温現象、赤道領域に固有のケルヴィン波や混合ロスビー重力波などがその好例である。

高層大気の実体（観測事実）に関する記述としては、Holton の第1章の他、やや古い **Murgatroyd** (1969) のまとめ、**Wallace** (1973) による赤道成層圏のレビューがあり、climatology は **Labitzke et al.** (1972) によるベルリンマップの集大成や **CIRA** (1972) などが挙げられる。新しいところでは、**CIAP Monograph 1** (1975) が良く、文献や図の引用が豊富なので成層圏に関する百科全書的な利用価値がある。

筆者の知るかぎりにおいて、世界的に一流の dynamician 達は皆、実に良く観測事実に精通しており、また常に新しい観測解析結果に注目している。裏返して言えば、これから力学理論に挑む人達の新しい仕事が非現実的なモデル遊びに墮ち込まないためにも、高層大気の実体に関する深い造詣が要求されよう。

4. 力学理論の現状と問題点

(1) 力学モデル（方程式系）

対流圏の気象力学は、歴史的に見て長波（傾圧不安定波）の記述を主目的とする準地衡風近似予報方程式系を作り上げ、次いで数値モデル（大循環モデルや数値予報モデル）の発展につれていわゆるプリミティブ方程式系に移行してきた。これと対照的に、高層大気力学においては、目標とする対象（現象）の違いに応じて、解析的な取り扱いを可能とするような独自の方程式系がいくつか構成されている。その流れの大筋は前出 Holton の第2章に述べられているが、もとをたどれば、Leovy (1964A), Lindzen (1967W), Dickinson (1968W) 等によって用いられたモデルに相当する。さらに源流をたずねれば、回転球面上の大規模な流体運動を統一的に記述するラプラスの潮汐論にまで遡ることになる。したがって、具体的な状況設定に応じた個々の計算の仕事は、より基本的な枠組みと常に対応づけながら理解されるべきである。

これに関連して老婆心ながら一言注意しておく、理論イコール計算と思込んでいる学生を時折見かけるが、物理数学の演習問題や計算機遊びにすぎないような

* A: Journal of the Atmospheric Sciences
G: Journal of Geophysical Research
J: Journal of the Meteorological Society of Japan
R: Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society
W: Monthly Weather Review

ものは理論とは呼べない。本当の理論とは、単に式を解くことではなく、含蓄のある式を導くことである。

(2) 伝播性ロスビー波と突然昇温

成層圏中間圏で、特に冬の極夜ジェット流中に卓越する大規模波動は、対流圏にそのエネルギー源を持つ強制内部ロスビー波の伝播問題として、Charney・Drazin (1961 G) 以来多くの研究の対象とされてきた。以後の議論の発展としては、平均風系の2次元(緯度高度)分布および球面の効果(Dickinson, 1968 W, 1968 A; Matsuno, 1970 A; Simmons, 1974 R, 1978 R)、高層における radiative damping の効果(Dickinson, 1969 G)、非定常波の励起の問題(Hirota, 1971 J; Clark, 1972 A) などがある。これらのモデルによる結果は、従来のゾンデ観測(30 km 以下)や断片的なロケット観測(60 km 以下)と対応づけて論じられてきたが、最近の衛星観測によれば、伝播性ロスビー波は下部熱圏(80 km 以上)にまで侵入していることが知られており(Hirota・Barnett, 1977 R)、定常波・非定常波およびそれらの季節・緯度変化も含め、さらに現実的な伝播モデルが要請されている。

突然昇温現象は、Matsuno (1971 A) によってそのメカニズムの大意が示されて以来、急速に理解が進んだ。その発展の筋道はおおよそ二つあり、ひとつは後述する“波動-帯状流の非線型相互作用”の議論、もうひとつはこれも後程第5節で示すようにさまざまな状況設定に応じた数値モデル実験である。後者はまた、南北両半球も含めて今後衛星観測の進歩につれ、ますます多様化してゆくであろう。

(3) 赤道波と準2年・半年周期振動

赤道成層圏波動の理論もまた、1960年代後半から始まったデータ解析と平行する形で発展している。赤道ベータ平面上の運動の一般論(Matsuno, 1966 J; Lindzen, 1967 W) に続いて、赤道波の伝播に及ぼすシアおよび radiative damping の効果(Lindzen, 1971 A; 1972 A)、対流圏の熱源による励起の問題(Hayashi, 1971 J; Holton, 1972 A; Itoh, 1978 J) などである。しかし、観測的に明らかにされている赤道波の卓越性(周期-波数選択律)はまだ十分良く説明されていない。

これらの波が、赤道成層圏帯状流の26ヵ月周期振動と密接に関係していることは良く知られている。26ヵ月振動の力学的機構は、これも突然昇温の場合と同様に、波動-帯状流相互作用の見地から説明されている(Lindzen・Holton, 1968 A; Holton・Lindzen, 1972 A)。しかし

ながら、上部成層圏から中間圏に至る領域の半年周期振動に関しては平均風については一応知られているものの、波動(ケルヴィン波)の存在が最近ようやく断片的なロケット観測から初めて示された(Hirota, 1978 A)のみであり、26ヵ月振動の場合と同様なメカニズムが推測されている段階にとどまっている。

伝播性波動が運動量を輸送することにより平均帯状流の加速・減速をもたらす、その結果がまた波自身の伝播特性にはね返るといふ、いわゆる波動-帯状流相互作用は、上述の突然昇温や準2年周期振動の具体的な現象例への応用のみならず、より基本的な問題として興味深い。この理論は、Bretherton (1969, J. Fluid. Mech.) が内部重力波について開拓し、Uryu (1974 J; 1975 J) が内部ロスビー波の場合に拡張した。これらを嚆矢として、最近には特に英国の研究者達により発展が試みられている(Andrews・McIntyre 1976 A; Plumb, 1977 A)。この間の事情は瓜生 (1976) による解説に詳しい。

(4) 大気潮汐と重力波

大気潮汐が下層大気の大気力学にとって比較的馴染みの薄いのは、ひとえにそれが対流圏の他の気象擾乱の陰に隠れて見えにくいためであろう。しかし歴史的に見れば、ラプラス以来2世紀にもわたる古典的な問題である。それが近年大気力学の問題として重要視されるに至ったのは、いくつかの理由が考えられる。そのひとつは、潮汐方程式が本来ロスビー波や赤道波をその解の一部に含むという統一理論の見地、もうひとつは、日射により励起される一日潮および半日潮が密度の減少に伴い中間圏以高で卓越し、そこで顕著な地球物理的現象を引き起こすことである。特に、後者の見地から大気潮汐に関する観測事実および理論を総合的に学ぶには、Chapman・Lindzen (1970) が好適であろう。ちょうど200頁の小冊子の中に、歴史的経緯から今後の問題点まで豊富な文献を引用しつつ要領良くまとめてあり、腰を据えれば学部学生でも一気に読み切れる。

大気中の内部重力波に関しても、潮汐の場合と似た事情が存在する。すなわち、流体力学的興味と高層大気中の現象論的重要性のふたつの側面である。ここに詳しく述べる余裕はないが、たとえば、田中・加藤 (1975) による解説、Hines *et al.* (1974) のアンソロジーなどを参照されたい。さらに本格的にこの問題を勉強したい人には Gossard・Hooke (1975) の教科書がある。

5. 数値モデリング

高層大気循環の数値モデリングには、地形や熱などの

諸々のプロセスを含んだ対流圏の大気大循環モデル (GCM) を多層化して成層圏までも対象領域にしたものと、一方、最初から高層の特性を考慮してそれ専用の目的で開発されたものがある。

前者は第2節で述べたように、本来低層も高層も同一の方程式系に従うとの見地から拡張されたものである。しかし、少なくとも現在までのところ、成層圏循環の simulation (再現) でさえ満足すべきものは少ない。その理由はいろいろあろうが、特に地表 (山岳) と最上層の境界条件に難点があるため、プラネタリー波動の生成励起・伝播特性の表現が不十分となり、ひいては平均温度場や風系の分布が実測とかなり異なってしまうためと考えられる。したがって、GCM のプロダクションから高層大気波動の力学的特性を検出した解析例として、ここでは、Hayashi (1973 A), Hayashi・Golder (1977 A) を挙げておくにとどめる。

これに対し、後者の範疇には、特定の対象に問題をしばったクリアーカットなモデルがすでにいくつか作られており、かなりの成功を納めている。古くは、中間圏の平均子午面循環を扱った Leovy (1964 A) のモデル、準2年周期に関する Lindzen・Holton (1968 A)、半年周期の Mayer (1970 A) モデルなどがあり、また突然昇温を対象としたものには、Clark (1970 W), Matsuno (1971 A), Trenberth (1973 W), Holton (1976 A) などが挙げられる。オゾンを中心とした光化学過程をも含む Cunnold *et al.* (1975 A) のモデルも興味深い。

後者のグループのモデリングに共通して言えることは、その目的を必ずしも現象全体の忠実な再現や予測には置かず、むしろ方程式系や物理変数に最初からある制限 (あるいは観測に基づく前提条件) を加え、個々のプロセスの機構をできるだけ明確にしようとしていることである。この意味では、数値計算という手段に頼っているものの、内容から見ると理論的色彩の濃いものと言えよう。このような数値モデリングは、いかなる理論的背景によって裏打ちされているかによってその価値が決まると言っても過言ではない。そして、明確な問題意識や指導原理の重要性は、室内実験、フィールド観測、データ解析等あらゆる研究手段に共通する事柄でもある。特に、数値モデリングの場合、重要なのは単に数値計算を実行することではなく、結果の解釈に耐えられるようなモデルを作ることにあるのだという点を、初心者のため

に重ねて強調しておきたい。

6. むすび

以上、高層大気力学の諸問題を概観しつつ文献の紹介と研究の心構えのようなものを述べた。大気現象に対する興味の持ち方が人によって異なるのと同じように、勉強の方法、それに応じて読むべき文献の価値判断もまた、それぞれ異なっていて然るべきである。その意味で本稿の手引きは、筆者の主観を交えたひとつの道しるべにすぎない。

いずれにせよ、近い将来、この手引きの読者の中から本当に高層大気はおもしろいと思ってその研究に全情熱を傾ける人が出てくれるならばガイド役としてこれに勝る喜びはない。

文 献

(本文中ゴシックで示したものを引用順に並べた)

- J.R. Holton, 1975: The dynamic meteorology of the stratosphere and mesosphere, *Met. Monograph*, 15, No. 37.
- R.E. Dickinson, 1975: Meteorology of the upper atmosphere, *Rev. Geophys. Space Phys.*, 13, No. 3.
- R.J. Murgatroyd, 1969: The structure and dynamics of the stratosphere, *The global circulation of the atmosphere*, Ed. by G.A. Corby, Roy. Met. Soc.
- J.M. Wallace, 1973: General circulation of the tropical lower stratosphere, *Rev. Geophys. Space Phys.*, 11.
- K. Labitzke *et al.*, 1972: Climatology of the stratosphere in the northern hemisphere, *Met. Abhandl.*, 100.
- CIRA, 1972: COSPAR International Reference Atmosphere, Akademie-Verlag, Berlin.
- CIAP Monograph, 1975: The natural stratosphere of 1974. DOT, U.S.A.
- 瓜生道也, 1976: 波とそのまわりの平均運動, *天気*, 23, 1.
- S. Chapman and R.S. Lindzen, 1970: Atmospheric tides, D. Reidel Pub., Holland
- 田中 浩, 加藤 進, 1975: 大気中の内部重力波, *気象研究ノート*, 126.
- C.O. Hines *et al.*, 1974: The upper atmosphere in motion, A. Geophys. Union.
- E.E. Gossard and W.H. Hooke, 1975: Waves in the atmosphere, *Development in atmospheric sciences*, 2, Elsevier Publ.