

中層大気力学*

余田 成男**

1. はじめに

「中層大気」という言葉は今日でこそ学会のセッション名にもなっているが、それが広く使われるようになってまだ十年に満たない。前回の手引きシリーズでは、「高層大気物理学」、「高層大気力学」といった題目が並んでいる。成層圏と中間圏を指すこの領域の研究が急進したのは、中層大気国際協同観測計画 (Middle Atmosphere Program) が1980年代前半に実施されたからである。その頃には、人工衛星搭載の放射計や地上設置各種レーダーなどの新しい観測手段によって、それまでになかったデータが得られるようになった。こういったデータから、惑星ロスビー波や潮汐波・内部重力波などさまざまな大気波動の動態が解析された。それと同時に、このような大気波動の伝播や流れとの相互作用に関する力学理論がさらに発展し、充実し、そして、よく整理された。また、スーパーコンピュータなど計算機環境が良くなって、いろいろな階層の数値実験が盛んに行われるようになった。MAPに対する日本の学術的貢献は1にまとめられている。

この中層大気研究にとって充実した1980年代を踏まえて90年代をどのように展望するか、新しくこの分野を目指すにはなにを学ばよいか、特に力学の立場から私の個人的な考えを述べてみよう。

2. 90年代の展望：三つの主題と新展開

中層大気は安定な成層状態にある。そこでは対流のような不安定現象よりも、波動の伝播や流れとの相互作用が重要な力学過程である。大気中には、成層流体中での浮力を復元力とする重力波や回転球面上での波動であるロスビー波、赤道付近に固有の赤道波などが存在している。これらの波の働きで流れが変化し、その流れの状態が波の伝播を左右する。このような波と流れの相互作用

を用を鍵とする現象に、赤道成層圏帯状流の準二年周期振動 (Quasi-Biennial Oscillation)、冬期成層圏の突然昇温現象、中間圏界面付近の弱風層がある。これらの現象に対して、観測と資料解析による記述と、理論と数値実験による理解が進展してきた。しかし、我々はまだ完全な記述・理解からは程遠い現状にある。

2.1 準二年周期振動

Holton・Lindzen (2) は、対流圏から伝播してきた赤道波の効果を繰り込んだ鉛直1次元モデルを用いて、赤道波と帯状流の相互作用で周期振動が可能であることを初めて示した。このような相互作用メカニズムで周期振動が出現することが室内実験で検証され (3)、Holton・Lindzenの主張が支持された。この主題は、気象力学の諸問題の中で、観測と理論と実験がうまく組み合わせられ理解を深めたもっとも良い事例であろう。

子午面内2次元モデルでもやはり周期振動が可能であることが示されたが (4, 5)、これらは全て赤道波の効果を繰り込んだモデルである。波を陽にあらわす3次元モデルはまだこの主題に対しては用いられていない。波のもつ時間スケールと振動の時間スケールが大きくかけ離れており、最先端の計算機を用いても莫大な計算時間を要するからである。これまでの波の繰り込み方法が妥当であったかどうかを検討するためにも、3次元モデルを用いた数値実験が今後の課題であろう。

他方、観測側の課題は理論で仮定された赤道波の詳細な観測であろう。従来のゾンデ観測では観測点が限られ、観測高度も下部成層圏までである。衛星観測によって水平方向には均質で高分解能のデータが得られるようになったが、鉛直分解能が悪く、赤道波を解析することは困難である。新しい衛星測器によって赤道波の動態を解析する試み (6) があるが、QBOの位相と赤道波の動態との対応はまだ調べられていない。それができて初めて、Holton・Lindzenの理論が観測的に検証されることになる。新しい測器の開発も含めて、空間3次元的に均質で高分解能のデータを長期間にわたって得るための

* Middle Atmosphere Dynamics.

**Shigeo Yoden, 京都大学理学部.

努力をしなければならない。

2.2 突然昇温

Matsuno (7) が鉛直伝播するロスビー波の増幅による突然昇温メカニズムを発表して20年になる。その後、ロスビー波の共鳴不安定による突然昇温理論 (8) などが提出されてきた。MAP の始まる頃、McIntyre (9) はそれまでの多くの観測的研究を踏まえてこれらの理論の詳細を検討した。突然昇温が力学的過程で起こっていることは間違いないが、我々はまだその十分な理解には至っておらず、さらなる理論的・観測的研究が必要であると述べている。

80年代、この McIntyre が唱導者となって流布した力学的データ解析方法に、Eliassen-Palm フラックス診断法 (10) と等エントロピー面上でのポテンシャル渦度診断法 (11) がある。これらの解析方法は突然昇温現象にも応用されて、ロスビー波の活動度や伝播経路をデータから求めること (12, 13) や、極渦が崩壊してロスビー波が砕け散っているイメージを得ること (14, 15) ができるようになった。中層大気中で起こっていることはこのような表現方法で生き生きと記述できるようになったが、その突然昇温の起こるきっかけ、とくに、対流圏との結びつきに関しては依然として明確な結論が得られていない。

従来、南半球においては極渦が強くロスビー波が十分伝播できず、春先の最終昇温を除いて突然昇温は起きないと思われていた。ところが、1988年の8月末から9月にかけて、南半球で初めて冬の突然昇温が観測された (16)。詳細な解析 (17) によると、ロスビー波の増幅の様子が北半球とは大きく異なっている。それまでの突然昇温の常識を破るものが観測されたわけで、どのような条件で突然昇温が起こるのか、もう一度考え直さなければならない。

2.3 中間圏界面弱風層

80年代に入って、重力波—帯状流相互作用による弱風層の理論が提唱された (18, 19, 20)。大きく季節変化する中層大気の帯状流の中を選択的に下から伝播してきた重力波が中間圏界面付近で砕け、いつでも帯状流がほとんど無い状態にしているというからくりである。さらに最近では、対流圏で観測されるような、山岳や積雲に伴う重力波が直接中間圏界面まで到達するのではなく、小規模重力波の崩壊—地衡風調節→より大きな水平規模の重力波の発生・伝播、という過程の繰返しにより、僅かにもとの約1%のものだけが到達しているという主張が

ある (21)。

このようなイラストは出来たけれども、実際に起こっていることをどこまで観測し検証ができるのだろうか？今日の技術では、時間・空間スケールの小さな重力波を季節・地球規模で観測することは不可能である。断片的な観測をつなぎあわせて推論するしかないであろう。

2.4 新展開

中層大気の継続的観測により各種データの蓄積が続いている。これらを編集・整理することにより、正確で詳細な中層大気循環の気候状態 (長年平均としての一年周期変動) が得られるようになった (22)。また、気候値からのずれである年々変動に関する議論も可能になってきた。例えば、赤道域 QBO の全球に及ぼす影響や対流圏の年々変動と結び付いた変動、太陽活動の周期的変動に対する大気の応答などが調べられつつある。中層大気の熱的な緩和時間は太陽の一年周期強制の時間スケールに比べて十分に短いので、中層大気系のみで非周期応答 (つまり、年々変動) をすることは考えにくい。対流圏や太陽の変動との結びつきによって年々変動が引き起こされているのであろう。(もっとも、緩和時間の長い物質が重要な役割を果たすことがあれば、中層大気で閉じた年々変動も可能であろう。) このような中層大気循環の一年周期変動および年々変動に関するイラスト・モデル (23) はあるが、3次元モデルを用いた定量的研究は今後の重要な課題の一つである。

MAP から10年が経ち、一般には、見るものすべてが新しいという時代は終わったと認識されているかも知れない。しかし、我々は本当にどこまで中層大気を見ているのだろうか？確かに、衛星観測は全球的に均質なデータをもたらすようになったが、その空間分解能はまだ不十分である。McIntyre が言うように、くすんだガラス越しにものを見ているようなものである。また、観測される物理量も限られている。中層大気中の風の衛星観測はかつて無く、本年打上げられた UARS 衛星 (24) で初めて試みられる段階である。他方、地上からのレーダー観測は高い時間・鉛直分解能を持っている。しかし、地球全体でも数点か十数点で観測されているにすぎず、水平方向に複雑な構造を持つ現象の観測には適していない。将来、観測技術が飛躍的に向上し、今まで見ることが出来なかったものが見えるようになったとき、再び新発見の時代が来るであろう。

これまで、中層大気の力学について述べてきたが、最近の流行のひとつは地球 (大気) システム科学化であ

る。大気科学の三本柱は力学、放射、組成である。これらの素過程をそれぞれに究明するのが従来の大気科学の傾向であったが、これらの過程の結び付きに注目し、結合システムとしての振舞に着眼するのが地球（大気）システム科学である。中層大気における一例がオゾンホールである（この手引シリーズ中の「オゾン」参照）。南極域上空で冬の終りにオゾンが減少するが、強い極渦が維持される中で低温のため極域成層圏雲が形成され、雲粒表面での化学反応と光化学反応によりオゾンが減ると考えられている。これはまさに三つの過程の結合が基本の現象である。

この結合システムの中で力学の果たす重要な役割の一つが物質輸送である。オゾンをはじめ各種微量成分は、さまざまな形態の大気運動によって生成域から消滅域へと輸送されている。大気分子運動による拡散は統計力学で記述できる。では、波動という極めて組織的な運動形態の場合には物質はどのように輸送されるのだろうか？ この問題に関しては、25をはじめとする一連の研究がある。また、波の振幅が大きくなって砕波が起こると乱流的な混合の世界となる。さらに、季節平均のような時間スケールでみると、波の活動によって誘導された子午面循環による輸送（上下交換）が重要になる（26）。27はこのような全球規模での輸送過程に関する明快なレビューである。

3. 教科書・参考書

中層大気力学も基本は気象力学、地球流体力学である。気象学への手引きシリーズ中で紹介される（た）、これらの分野の教科書・参考書で力学の基礎を学んでいただきたい。最近の気象力学の教科書のなかでは、28が中層大気力学に関する主題を多く取り上げている。

中層大気力学の教科書としては29がある。組成、放射、力学の三本柱がバランス良く、わかりやすく書かれている。欲を言えば、出版から時間が経過しており、この十年間の特に力学関係の進展が含まれていないのが残念である。30は力学と組成の結び付きに重点をおいた教科書である。特に物質輸送に関する章は著者が専門とし魁となったところであり、読み応え十分である。

31は教科書ではなく、1982年にハワイで開かれた日米セミナーのプロシーディングであるが、そこではMAPの力学分野における重要人物の多くが登場し、最新の結果をどんどん発表している。当時の雰囲気を感じさせる一冊である。また、32は1987年の中層大気に関する

国際会議での発表をもとにした論文集である。80年代後半の研究動向を知る手がかりとなるであろう。最近の教科書では、33を忘れてはならない。500頁ちかい大著であり、これまでの中層大気力学の進展を具に学ぶことが出来る。しかし、初学者にはとても手に負えないであろう。「いつか一人前になって読みこなしてやろう」と思えばよいような教科書である。Lindzenの評したように、教科書というよりは専門家にとっては必携の「中層大気力学の最前線」といった趣の本である。

4. おわりに

確かに、MAPは中層大気という新天地を切り開く一大事業だったのかもしれない。新しい観測機器が開発され、発見があり、新しい力学概念が提出され、多くの人々がさまざまな活躍をした時代であった。玉石入り混じっていたかも知れないが、活気に満ちた時代であった。いま、1990年代に入り、中層大気研究も成熟の時代である。ミーハーに流行を追いかけるのではなく、じっくりと腰を据えて、将来の批判に耐え得るような研究をすべき時である。2節で述べた三つの主題は、気象力学という分野の中でも明確な問題設定が可能な大気現象である。そして、まだまだ理解できていない現象である。これから中層大気力学を学びたいという人に、そしてまた、気象力学、地球流体力学を学びたいという人に、この一文が何かの役に立てば幸いである。

2節の論文引用は必ずしも重要論文を網羅したものではない。そのような目的のためには、33の各章末にある参考文献を見ていただきたい。

参考文献

- 1) Kato, S., Ed., 1987: Japanese contributions to Middle Atmosphere Program (MAP). Kokusai Bunkensha Insatsusha Co., Ltd., 130 pp.
- 2) Holton, J.R. and R.S. Lindzen, 1972: An updated theory for the quasi-biennial cycle of the tropical stratosphere. *J. Atmos. Sci.*, 29, 1076-1080.
- 3) Plumb, R.A. and A.D. McEwan, 1978: The instability of a forced standing wave in a viscous stratified fluid: A laboratory analogue of the quasi-biennial oscillation. *J. Atmos. Sci.*, 35, 1827-1839.
- 4) Plumb, R.A. and R.C. Bell, 1982: A model of the quasi-biennial oscillation on an equatorial beta-plane. *Quart. J. R. Met. Soc.*, 108, 335-352.

- 5) Takahashi, M., 1987: A 2-dimensional numerical model of the quasi-biennial oscillations: Part I: J. Met. Soc. Japan, **65**, 523-536.
- 6) Salby, M.L., D.L. Hartmann, P.L. Bailey and J.C. Gille, 1984: Evidence for equatorial Kelvin modes in Nimbus-7 LIMS. J. Atmos. Sci., **41**, 220-235.
- 7) Matsuno, T., 1971: A dynamical model of the stratospheric sudden warming. J. Atmos. Sci. **28**, 1479-1494.
- 8) Plumb, R.A., 1981: Instability of the distorted polar night vortex: A theory of stratospheric warmings. J. Atmos. Sci., **38**, 2514-2531.
- 9) McIntyre, M.E., 1982: How well do we understand the dynamics of stratospheric warmings? J. Met. Soc. Japan, **60**, 37-65.
- 10) Edmon, H.J.Jr., B.J. Hoskins and M.E. McIntyre, 1980: Eliassen-Palm cross sections for the troposphere. J. Atmos. Sci., **37**, 2600-2616.
- 11) Hoskins, B.J., M.E. McIntyre and A.W. Robertson, 1985: On the use and significance of isentropic potential vorticity maps. Quart. J. R. Met. Soc., **111**, 877-946.
- 12) Palmer, T.N., 1981: Diagnostic study of a wavenumber-2 stratospheric sudden warming in a transformed Eulerian-mean formalism. J. Atmos. Sci., **38**, 844-855.
- 13) Kanzawa, H., 1982: Eliassen-Palm flux diagnostics and the effect of the mean wind on planetary wave propagation for an observed sudden stratospheric warming. J. Met. Soc. Japan, **60**, 1063-1073.
- 14) McIntyre, M.E. and T.N. Palmer, 1983: Breaking planetary waves in the stratosphere. Nature, **305**, 593-600.
- 15) Dunkerton, T.J. and D.P. Delisi, 1986: Evolution of potential vorticity in the winter stratosphere of January-February 1979. J. Geophys. Res., **91**, 1199-1208.
- 16) Kanzawa, H. and Kawaguchi, S., 1990: Large stratospheric sudden warming in Antarctic late winter and shallow ozone hole in 1988. Geophys. Res. Lett., **17**, 77-80.
- 17) Hirota, I., K. Kuroi and M. Shiotani, 1990: Midwinter warmings in the southern hemisphere stratosphere in 1988. Quart. J. R. Met. Soc., **116**, 929-941.
- 18) Lindzen, R.S., 1981: Turbulence and stress owing to gravity wave and tidal breakdown. J. Geophys. Res., **86**, 9707-9714.
- 19) Matsuno, T., 1982: A quasi one-dimensional model of the middle atmosphere circulation interacting with internal gravity waves. J. Met. Soc. Japan, **60**, 215-226.
- 20) Holton, J.R., 1982: The role of gravity wave induced drag and diffusion in the momentum budget of the mesosphere. J. Atmos. Sci., **39**, 791-799.
- 21) Zhu, X., 1987: Inertio-gravity waves in the middle atmosphere. Ph.D. thesis, University of Washington, 167 pp.
- 22) Rees, D., J.J. Barnett and K. Labitzke, Eds., 1991: COSPAR international reference atmosphere: 1986. Part II: Middle atmosphere models. Pergamon Press, 528 pp.
- 23) Yoden, S., 1990: An illustrative model of seasonal and interannual variations of the stratospheric circulation. J. Atmos. Sci., **47**, 1845-1853.
- 24) Reber, C.A., 1985: Upper Atmosphere Research Satellite (UARS) mission. NASA Goddard Space Flight Center #430-1003-001, 66 pp.
- 25) McIntyre, M.E., 1980: Towards a Lagrangian-mean description of stratospheric circulations and chemical transports. Phil. Trans. Roy. Soc. London, Ser. A., **296**, 129-148.
- 26) 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.
- 27) Holton, J.R., 1989: Global transport processes in the atmosphere. The handbook of environmental chemistry. Vol. 1 Part E, O. Hutzinger, Ed. Springer Verlag, 97-145.
- 28) Lindzen, R.S., 1990: Dynamics in atmospheric physics. Cambridge University Press, 310 pp.
- 29) 松野太郎・島崎達夫, 1981: 大気科学講座 3, 成層圏と中間圏の大気. 東京大学出版会, 279 pp.
- 30) 木田秀次, 1983: 気象学のプロムナード 16, 高層の大気. 東京堂出版, 211 pp.
- 31) Holton, J.R. and T. Matsuno, Eds., 1984: Dynamics of the middle atmosphere. TER-RAPUB, 543 pp.
- 32) Plumb, R.A. and R.A. Vincent, Eds., 1989: Special issue: Middle Atmosphere. PA-GEOPH, **130**, 149-616.
- 33) Andrews, D.G., J.R. Holton and C.B. Leovy, 1987: Middle atmosphere dynamics. Academic Press Inc., 489 pp.