

ダウンワード・コントロール

中層大気の大循環を考えると、とくに中・高緯度の擾乱の役割は重要である。具体的には、対流圏から伝播してきた惑星規模のロスビー波や中・小規模の内部重力波が大振幅となって破碎したり、放射や粘性で減衰することによる力学的効果である。ケンブリッジ大学の McIntyre のグループは、波によって駆動される平均子午面循環に関する従来の断片的な知識を総合し発展させ、その基本過程を「ダウンワード・コントロールの原理」として提案した (Haynes *et al.*, 1991)。ワシントン大学の Holton のグループは、この原理に基づいて平均子午面循環の強さが見積もれることを示し、低緯度域下部成層圏で上向き質量フラックスが季節変化していることを発見した (Holton, 1990; Rosenlof and Holton, 1993)。さらに、最近のいくつかの衛星観測により、ダウンワード・コントロールの原理を独立に支持する解析結果が出始めている。これまで、成層圏-対流圏間の物質交換は圏界面付近の総観規模や小規模の現象に伴う過程として捉えられることが多かったが、このダウンワード・コントロールの概念は、中層大気大循環の枠組の中でとくに惑星規模の擾乱が物質交換に果たす役割の重要性を指摘するものである (Holton *et al.*, 1995)。

1. ダウンワード・コントロールの原理

Haynes *et al.* (1991) は、中層大気の内転軸対称な子午面 2 次元モデルで、運動方程式の帯状 (東西) 成分に外力が加えられたときの大気の応答を数学解析と数値実験により調べた。この外力は、対流圏から伝播してきた波動が碎波・散逸することにより生じる波の運動量から帯状平均流への転化を念頭においたもので、中緯度成層圏内に局所的に与えている。放射加熱率をニュートン加熱/冷却で線型近似して線型応答問題とし、適当な境界条件のもとに応答の詳細を調べた。

第 1 図(a)は、時間変化をゼロとして定常応答を求めた一例である。中緯度成層圏の陰影部に西向きの外力 (ロスビー波が碎波・散逸する場合に相当する) を強制

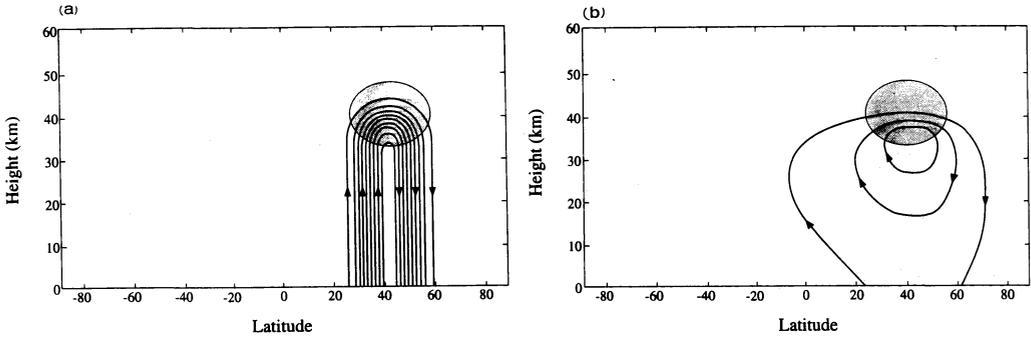
したときの質量フラックスの流線関数である。子午面循環は強制域の下側だけにあり、強制のないところでは鉛直流のみの循環になる。定常応答の場合、鉛直流 $w(\phi, z)$ は運動方程式の帯状成分と連続方程式 (質量保存則) から南北流を消去することにより得られ、準地衡近似をした場合には次になる:

$$w(\phi, z) = -\frac{1}{\rho_0 \cos \phi} \frac{\partial}{\partial \phi} \left\{ \frac{\cos \phi}{2\Omega \sin \phi} \int_z^\infty \rho_0 F(\phi, z') dz' \right\}. \quad (1)$$

ここで、独立変数の ϕ は緯度、 z は高度であり、定数 Ω は地球の自転角速度、 a は地球半径、また ρ_0 は z のみに依存する基本場の密度であり、 $F(\phi, z)$ は強制外力である。そして、境界条件としては、 $z \rightarrow \infty$ で $\rho_0 w \rightarrow 0$ を課している。式(1)は、ある高度での鉛直流が、それより上にある F の分布だけで決まり、それより下の力学過程には依存していないことを示している。言い換えれば、外力 F は下方のみにその影響を及ぼす (つまり、「ダウンワード・コントロール」する) ことになる。

この場合、子午面循環は放射加熱/冷却によって駆動されているのではなく、外力 (実際には、波によって誘起される力) だけで決まっていることに注意すべきである。定常状態では、熱力学方程式で上昇 (下降) 流による断熱冷却 (加熱) と正味の放射加熱 (冷却) が釣り合うように長波放射つまり温度場が調節されている。すなわち、上昇 (下降) 域では放射平衡温度より低温 (高温) で正味の放射加熱 (冷却) となっている。このような子午面循環が「波によって駆動される循環」といわれる所以である。

Haynes *et al.* (1991) は、強制を周期変化させたり、ある時にスイッチオンしたりして、強制がより一般的な時間依存性をもつ場合にも基本的にこの原理が成り立つことを綿密に確かめている。第 1 図 (b) はそのような結果の一つで、第 1 図 (a) とは対照的に放射の緩和時間よりも十分短い周期で強制を振動させた場合の応答である。これは断熱応答として調べられてきた状況で、



第1図 陰影部に西向き外力を強制したときの子午面循環(質量フラックスの流線関数)の応答(Holton et al., 1995 より). (a)定常応答, (b)断熱応答.

第1表 ダウンワード・コントロールの原理を用いて見積もられた, 100 hPa レベルでの熱帯域の上向き質量フラックス [$\times 10^8$ kg/s]. Holton (1990) は Oort の1958年から73年までの15年間気候値データをもとにした結果. UKMO は1979年から89年までの英国気象局解析データをもとに Rosenlof and Holton (1993) が計算した結果. 大気大循環モデルを用いたこの推定方法の妥当性評価によると, 春・秋の見積りは定常性の仮定に問題があり, 信頼度が低い.

期間	12~2月	3~5月	6~8月	9~11月	年平均
Holton	93.3	56.1	47.2	62.4	64.8
UKMO	114.0	76.4	55.8	70.3	79.1

具体的イメージとしては成層圏突然昇温現象などがある. この場合にも, 質量の重みを掛けた子午面循環はほとんど強制の下側にあり, 応答は下方にまた熱帯域にまでわたっている. ここで, 応答が強制から離れたところにまで及ぶのは, それが楕円型の偏微分方程式で記述されているからである(定常の場合には双曲型になっている). この例のように, 非定常の場合には一般に影響が緯度方向に広がるので, 中緯度域で与えた強制の熱帯域への影響を意識して「ダウンワード」でなく「非局所的」コントロールと呼ぶことがある.

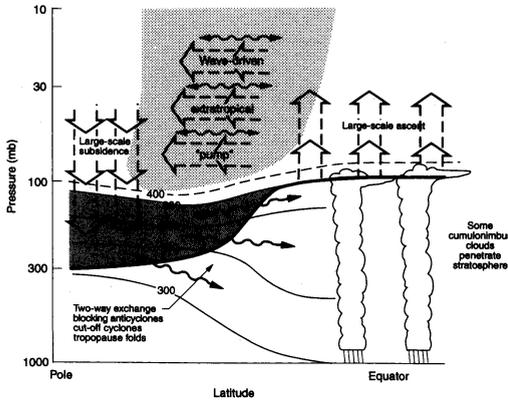
これに対して, 非定常な外力が赤道付近に与えられた場合には, 全く異なった応答となる. 赤道大気の準二年周期振動(QBO)が具体的な現象であるが, 力が与えられたところで東西風を加速し, それと辻褃が合うように温度場・子午面循環が決まっている(Plumb and Bell, 1982). もっとも, このQBOに伴う子午面循環は二次的なものであり, 熱帯域成層圏の帯状平均した上昇流も, 第1図(b)のような中・高緯度域の波に起因する非局所的コントロールによると考えられてい

る(Holton et al., 1995).

2. 観測的研究

全球規模で鉛直流を気象データから見積もるのは容易なことではない. 例えば, 温度分布と放射加熱率の分布がわかれば, 熱力学方程式を用いて鉛直流を求めることができるが, 対流圏界面付近では正味の放射加熱率を精度良く求めることが難しく, 鉛直流の見積りにも困難が伴う. これに対して, ダウンワード・コントロールの原理を応用すれば, 平均子午面循環をそれなりの精度で見積もることが可能となる.

大気大循環論では, 3次元大気の支配方程式系をある種の帯状平均とそれからのズレ(擾乱)に分けて議論することが多いが, そのような分離方法のひとつに波の効果を考慮した変形オイラー平均(Transformed Eulerian Mean; TEM)がある(Andrews et al., 1987). これまでに示したダウンワード・コントロールの原理は, このTEM方程式系でも同様に成り立つ. 擾乱による帯状流強制がエアッセン-パームフラッ



第2図 成層圏-対流圏間の物質交換の力学的側面 (Holton *et al.*, 1995). 太線は対流圏界面, 細線はそれぞれの等温位面を示す. 太い破線矢印は, ダウンワード・コントロールの原理に基づく残差平均子午面循環を表し, 両方に矢ジリのある波矢印は, 大規模な擾乱による準水平混合を表す.

クスの発散で表記されることになり, 結局, 擾乱による運動量と熱のフラックスの分布がわかれば, 2次元問題の「強制外力」を実際のデータから求めることができる. ここで, TEM 方程式系での子午面循環は, 残差平均子午面循環と呼ばれるものである. この残差循環は, 標識をつけた空気塊を追跡して得られるラグランジュ平均子午面循環と完全に一致するものではないが, その目安となるものである. 後者と違ってオイラー的なデータから容易に求められるので, 物質循環の議論ではよく使われている量である.

Holton (1990) は, Oort の気候値データをもとにダウンワード・コントロールの原理を応用して, 100 hPa レベルでの季節平均した質量フラックスの推定を試みた. また, Rosenlof and Holton (1993) は, 英国気象局解析データを用いてさらに精密な見積りを行い, 同時に大気大循環モデルの出力結果をもとにこのような推定方法の妥当性を評価した. これらの結果の一部を第1表に示す. 古いデータは観測の空間分解能が粗いので2割程度小さな値となっているが, ともに北半球の冬に最大, 夏に最小という季節変化を示している. これは, 北半球の冬季惑星規模擾乱の強さが南半球のそれよりも大きく, その砕波・散逸によって駆動される残差循環も北半球冬季のほうが強いためである. 100 hPa より上の大気の質量は 5.2×10^{17} kg であり, 2.5×10^{17} kg/年の割合いで出入りがあるから, 中層大気はおよそ2年で対流圏大気と入れ替っていることにな

る. (もつとも, 中層大気中では速やかな混合が起こっているわけではないので, この数字には注意が必要であるが.) この入れ替り率は CFCl_3 のような長寿命のトレーサー物質の観測をもとにしたフラックスの見積りとほぼ一致する結果となっている (Holton *et al.*, 1995).

熱帯域の温度変動は, 太陽放射の季節依存性を考えると半年周期が卓越しそうだが, 実際には下部成層圏では1年周期の変動が卓越している. 100 hPa 付近では2月はじめに最低気温となる1年周期変動があることが1960年代から知られていたが, Yulaeva *et al.* (1994) は, NOAA 衛星搭載のマイクロ波観測装置による全球温度観測により, この1年周期変動を再確認し, さらに, 中・高緯度域での逆位相の変動との打ち消し合いにより全球平均温度はほとんど季節変化していないことを見出した. 惑星規模擾乱の活動が最も大きい北半球の冬に熱帯域が最低気温となり, それが中・高緯度域の温度変動と打ち消し合っていることは, この1年周期変動がダウンワード・コントロールによる季節変化であることを示唆するものである.

最近の上層大気研究衛星 (UARS) の華々しい成果の一つに, 赤道域下部成層圏の水蒸気観測がある (Mote *et al.*, 1995). 水蒸気量の時間-高度断面図から, その1年周期変動が上方におよそ 0.3 mm/s の速さで伝わっていること, この上昇速度自体が季節変化しており, それが北半球の冬に大きいこと, 上昇速度は QBO の影響も受けているが変動幅は1割程度であること, などが見い出された. これらの観測事実は, 熱帯域の圏界面を通して成層圏に流入した大気が, 波によって駆動される残差平均子午面循環で上方に運ばれていることを示唆している. 水蒸気量自体の季節変化は対流圏界面を通しての流入量の変化に依るもので, 圏界面付近の温度に強く依存していると考えられる. また, 最近, 成層圏亜熱帯域に水平輸送の「障壁」があり, 熱帯域の大気が中緯度の大気と混合しにくい状況にあることが指摘され始めたが, 熱帯域での水蒸気変動のシグナルが2年近く残り上方に伝わっていることと辻褃の合う結果となっている. 彼らはこのような描像を「大気のテープレコーダー」と呼んでいる. レコードヘッドが圏界面にあり, ダウンワード・コントロールでテープがまわされるが, その移動速度は上述の季節変化や QBO による影響を受けているというイメージである.

3. 成層圏-対流圏間物質交換の新しいイメージ

成層圏と対流圏は運動量やエネルギーを交換するばかりでなく、大気物質そのものを交換する。そのような交換過程は成層圏オゾンの収支を理解するうえで重要であり、また、大気放射過程で重要な物質の混合比を決めているという点で気候力学の問題の鍵となる過程でもある。

第2図は最近の研究成果をもとに成層圏-対流圏間の物質交換の力学的側面をまとめた模式図である(Holton *et al.*, 1995)。物質循環の立場からすると、対流圏界面そのものよりも熱帯域対流圏界面とおなじ等温位面(〜380°K)を通しての物質交換のほうがより本質的である。この面は, Hoskins (1991) のいう“overworld”と“middleworld”の境界にあたる。“overworld”は安定な密度成層をしており、乱流による鉛直混合は非常に弱い。また、総観規模擾乱も弱く、ここでの物質輸送はほぼ惑星規模の擾乱によって決まっている。放射緩和時間より短い時間規模では、そのような運動はおおむね断熱的であり、ほぼ等温位面に沿った準2次元的な物質混合(水平波矢印)となる。一方、長い時間規模では、ダウンワード・コントロールの原理に基づく残差平均子午循環によって、等温位面を横切る輸送(鉛直太矢印)が起こる。波によるこの残差循環の駆動は非局所的であり、つねに低緯度で吸い上げ高緯度で押し下げているので、「吸引ポンプ」に例えられることがある。

従来、成層圏-対流圏間の物質交換は、低緯度域における積乱雲の貫入や中緯度域におけるブロッキング高気圧や切離低気圧、圏界面の折り畳みなど、圏界面付近の小規模・総観規模の現象に伴う過程として捉えられてきた。しかし、それぞれのイベントごとに交換量を見積もり、その出現頻度を掛け合わせて物質交換量を推定することは、誤差が大きいたへん困難なことであった。これに対して、ダウンワード・コントロールの原理に基づく見積りはそれなりの精度がある。しかも、この原理は、成層圏-対流圏間の物質交換において惑星規模の擾乱が本質的な役割を果たしていることを初めて指摘したものである。これらの点でダウンワード(非局所的)・コントロールの原理は、重要で画

期的な概念であるといえよう。

参考文献

- Andrews, D. G., J. R. Holton and C. B. Leovy, 1987 : Middle Atmosphere Dynamics, Academic Press, 489pp.
- 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.
- Holton, J. R., 1990 : On the global exchange of mass between the stratosphere and troposphere, *J. Atmos. Sci.*, **47**, 392-395.
- 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 in press.
- Hoskins, B. J., 1991 : Towards a PV- θ view of the general circulation, *Tellus*, **43A B**, 27-35.
- Mote, P. W., K. H. Rosenlof, M. E. McIntyre, E. S. Carr, J. S. Kinnery, H. C. Pumphrey, R. S. Harwood, J. R. Holton, J. M. Russell III, J. W. Waters, and J. C. Gille, 1995 : An atmospheric tape recorder : the imprint of tropical tropopause temperatures on stratospheric water vapor, *J. Geophys. Res.*, submitted.
- Plumb, R. A. and R. C. Bell, 1982 : A model of the quasi-biennial oscillation on an equatorial beta-plane, *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **108**, 335-352.
- Rosenlof, K. H. and J. R. Holton, 1993 : Estimates of the stratospheric residual circulation using the downward control principle, *J. Geophys. Res.*, **98**, 10465-10479.
- Yulaeva, E., J. R. Holton and J. M. Wallace, 1994 : On the cause of the annual cycle in tropical lower-stratospheric temperatures, *J. Atmos. Sci.*, **51**, 169-174.

(京都大学大学院理学研究科 余田成男 ;
ワシントン大学大気科学科滞在中)