



# 天 気

1986年3月  
Vol. 33, No. 3

103 (大気大循環)

## 大気大循環モデルによる物質輸送の研究\*

—昭和60年度日本気象学会賞受賞記念講演—

木 田 秀 次\*\*

### 1. はじめに

個人的なことですが、気象庁気象研究所に勤務するようになって一昔以上もの時が経過しました。この間ずっと大気大循環や物質輸送に関する研究に従事できただけでも大変めぐまれていると思っているところに、このたび気象学会から、大学院時代のものを含めてこれまでの主な仕事を学会賞として評価して戴けたことは、幸せという他ありません。微力の私を指導し暖かく励まし続けて下さった岸保勘三郎先生、松野太郎先生、関口理郎先生らをはじめとする先生方や諸先輩、それに常に好意的な配慮をして下さった上司や同僚の方々に、改めて感謝の気持を表したいと思います。

1985年度春季大会では晴れがましくも記念講演として私の仕事の大まかな紹介をさせていただいたわけですが、本稿はその時の内容を一層かいつまんで書いたものです。たまたま生じた身の事情のため、詳しい解説が書けなかったり、また極度に執筆が遅くれてしまいました。それにもかかわらず、印刷に協力して下さった編集委員の花房竜男さんにこの場をかりて感謝します。

### 2. ラグランジュ的大気大循環の解析

この10年ほどになされた幾つかの研究によって、それ以前の大気大循環の描像はある厳しい制約が迫られてい

る。それは、今世紀中頃に成立した対流圏の3細胞子午面循環の描像が幻想ではなかったかとさえ思わせるほどである。

Hadley が18世紀に提案した半球1細胞の子午面大循環像（いわゆる古典的ハドレー循環）は、19世紀中頃から乱れ（擾乱）の存在の効果が考慮されるに及んで大修正を受け、その結果、中緯度には今日フェレル循環と呼ばれる子午面循環が登場した。そして、それは1950年前後に観測事実として確認されるに及んだ。つまりいわゆる3細胞子午面循環像である。

そのときの事情は、粗っぽく言うと、風の観測値に基づく解析から経度平均して得た大気運動 ( $\bar{v}$ ,  $\bar{w}$ ) が前に予想されていたフェレル循環に一致したということである。しかし、そこに何か問題がひそんでいると考えられたことはほとんどなかったようである。

ところで、われわれは子午面大循環という運動をどのようにイメージしているだろうか。これについては改めて言うまでもなく、空気塊が組織的に子午面断面上を循環している様子を思い浮かべるのが普通である。あるいはもう少し正確に表現するならば、経度方向に一樣な、という条件を付けておくべきであろう。

ところが、そのイメージをそのまま、経度平均として得られた子午面運動 ( $\bar{v}$ ,  $\bar{w}$ ) に当てはめると、場合によっては大きな誤りになる。にもかかわらず、それに気付かず通り過ぎてきたきらいがある。気象学的な擾乱において最初にその問題を指摘したのは、私が指導を受けた松野太郎先生であろうと思う。1972年頃の先生のセミ

\* A study on atmospheric transport mechanisms with general circulation models.

\*\* Hideji Kida, 気象研究所.

ナーにおいて、経度平均としての子午面運動と大規模擾乱の間に構造的な関係のあることを学び、「なるほど」と思ったものである。それ以来、真の子午面循環を追求することが私の1つの目標になった。

ここで、以上のことについてもう少し説明を加えよう。

いま、経度 ( $x$ ) 方向に関して全く乱れを含まないような3次元的な大循環を考える。つまり、その速度  $\mathbf{V}$  は、緯度 ( $y$ ) 方向と鉛直 ( $z$ ) 方向のみの関数であるとする。それは勿論、経度方向に平均 ( $\bar{\quad}$ ) をとって得られる運動系  $\bar{\mathbf{V}} (\bar{u}, \bar{v}, \bar{w})$  と完全に一致する。そのような  $\mathbf{V}$  の  $y, z$  成分を慣例に従って子午面循環と呼ぶ。

以上の連想として、乱れが含まれている場合でも、その経度平均運動 ( $\bar{v}, \bar{w}$ ) を子午面循環と考えるに問題はないと従来考えてきたわけだが、果してそれで良いか。経度平均して得られた運動系を乱れが除去されたものとするならば、それは元々乱れがない場合の運動と区別できないわけだから、経度平均の運動 ( $\bar{v}, \bar{w}$ ) を子午面循環とするに何ら問題はないように見える。

しかし、実際の大気中の乱れ (大規模擾乱) を詳しく考察してみると、その乱れ運動は経度平均をとっても必ずしも0にはならず、小さいけれどもある経度平均値として残る部分を有する場合がある (後に説明あり)。もしそうだとすればその時の経度平均値は乱れと不可分の関係にあり、本来乱れと別に成立しうる子午面循環の経度平均値とは、その起源が異なる。

さて、そのような予想を前提にして、先ず、乱れを含まないような子午面循環を空想し、それを Zonally Symmetric Motion とでも仮に呼ぶことにする。そして、それ以外を Zonally Asymmetric Motion と呼ぼう。後者を早速「乱れ・eddy」と呼びたいが、従来の定義の乱れは、経度平均からの偏差 ( $\prime$ ) を指すから、微妙に違っている。すなわち、乱れが存在している場に対して経度平均をとって得られるものは、ここで期待している Zonally Symmetric Motion ( $\equiv \mathbf{V}_S$ , 以後添字  $s$  を付ける) ではない。つまり、乱れの存在を前提にするかしないか、というところに注意してほしい。

次に、そういう  $\mathbf{V}_S$  に重畳する Zonally Asymmetric Motion ( $\equiv \mathbf{V}_A$ , 添字  $A$  を付ける) を考える。すぐ考えつく  $\mathbf{V}_A$  としては、経度平均をとると消えてしまうような乱れ (つまり  $\bar{\mathbf{V}}_A=0$ ) である。これだと、従来の定義でいう eddy (つまり  $\mathbf{V}'$ ) と同じである。

ここで1つの問題がある。それは、そのような乱れ  $\mathbf{V}_A (= \mathbf{V}')$  の振幅が空間的あるいは時間的に変化する場合である。その時には、 $\mathbf{V}'$  による空気塊のラグランジュ運動つまりトラジェクトリを追跡すると、一般的には、不特定の方向に移動する。

もしも考えている乱れ  $\mathbf{V}'$  が定常の超長波のような構造をもつものなら、その  $\mathbf{V}'$  による空気塊のラグランジュ運動は一定の組織的な移動 (ストークス・ドリフト) の生じることが分かっている。それにもかかわらず、定常波である以上、定常場を維持しているわけであるとなると、その乱れ  $\mathbf{V}'$  は、ストークス・ドリフトのみならず、それを打ち消すような仕掛けを乱れ自身の中に持っていないとはならないと考えられる。実は、その仕掛けとして、経度平均として残る運動が登場してくる。それを、例えば  $\bar{\mathbf{V}}_A (\bar{v}_A, \bar{w}_A)$  とでも表現する。

このように、 $\mathbf{V}'$  (これを改めて  $\mathbf{V}_A'$  と記号する。勿論  $\bar{\mathbf{V}}_A'=0$ ) が存在する所には、そしてその振幅が空間的に変化する場合には、 $\bar{\mathbf{V}}_A$  なる運動系がその乱れと不可分の関係で乱れにつきまとう。その  $\bar{\mathbf{V}}_A$  は、 $\mathbf{V}_A'$  と命運を共にし、 $\mathbf{V}_A'$  の存在を前提にして存在する。

前述のように、子午面循環という運動は、乱れとは一応独立して存立し得る運動である。少なくとも筆者はそのように考えたい。それならば、上の  $\bar{\mathbf{V}}_A$  のような運動つまり経度平均値として ( $\bar{v}, \bar{w}$ ) が0ではないような運動は一体どのように考えたら良いのか。それを考えるためには、一たん経度平均という操作を止め、その前の段階にもどって乱れの3次元構造を復元してみる必要がある。それには、先のラグランジュ的考察から言えるように、乱れに関する運動は  $\mathbf{V}_A'(x, y, z)$  と同時に  $\bar{\mathbf{V}}_A(y, z)$  を考えに入れるべきであるから、その和を再び改めて  $\mathbf{V}_A$  と書くことによって、

$$\mathbf{V}_A(x, y, z) = \bar{\mathbf{V}}_A(y, z) + \mathbf{V}_A'(x, y, z)$$

と表せる。すなわち、 $\bar{\mathbf{V}}_A$  は、3次元の構造をもつ  $\mathbf{V}_A$  に対して、経度平均という言葉は人為的な2次元化 (子午断面上) をほどこしたために見かけ上でくる乱れの一成分、と解釈できる。これを指して、乱れの影とよばれるが、なかなかうまい表現である。筆者がここで強調したいことは、3次元大気中での3次元の構造を有する乱れは、あくまでその3次元全体をもって乱れと呼ぶ方が適当なのではないかと言うことである。勿論、形式的には、従来通り、経度平均からの偏差の部分 ( $\mathbf{V}_A'$ ) のみを乱れと呼び、一方  $\bar{\mathbf{V}}_A$  を乱れによって誘導された子午面循環と呼ぶことも可能である。しかし、それは

あくまで「形式として」と理解すべきである。別の形式(座標)では、別の経度平均および偏差が生じうる。つまり、座標変換に対して、 $V_A$  なら不変であるが、 $V_A'$  は不変でない。

さて、以上のような解釈に基づき、空気塊の運動を表現するには、基本流としての  $V_S$  と乱れとを合成して、

$$\begin{aligned} V &= V_S + V_A \\ &= V_S + \bar{V}_A + V_A' \end{aligned}$$

と書けば良い。一方、従来の定義では、

$$V = \bar{V} + V'$$

であるから、経度平均値は、 $V_S$  と  $\bar{V}_A$  の和であると言える。

ここに至って、経度平均から得た子午面循環には乱れの一部を取り込んでいる、と従来の解析の結果を批判的に見る立場が成立する。

上のような運動成分の分離は、乱れと子午面循環とに関するラグランジュ的考察を基にして行われたが、それぞれの運動成分は空間座標と時間の関数として表現される、という意味において、オイラー的である。それでは、従来のものと今回のものとの違いがどこにあるかという、運動をある瞬間瞬間において把握するか、それとも、ある空気塊の運動を継続的に有限の時間の長さに亘って把握するか、の違いである。すなわち、ある空気塊の運動を記述するのに、 $(x, y, z, t)$  の1点の情報のみで記述するか、あるいは、 $(x, y, z, t)$  の4次元的空间での有限幅の情報を考慮に入れてある1点  $(x, y, z, t)$  における意味を記述するか、である。前者は、狭義のオイラー的記述、後者は広義のラグランジュ的記述とでもよぶことができるだろう。

唐突ですが、人間の振舞もまたオイラー的解釈とラグランジュ的解釈とができるのではないのでしょうか。

そういう雑談はさておき、通常の経度平均操作からは、 $V_S$  と  $\bar{V}_A$  とを分離することができないので、つまり  $V_S$  が得られないので、私は空気塊のトラジェクトリを追跡しラグランジュ的に解析することにした。その解析を行なうには密なデータが必要なので、観測データを用いては不可能である。それで、それに代わるものとして大気大循環モデルを用いた。そのためにはモデルの開発から始めたが、幸い多くの人の好意に助けられて(特に菊地幸雄さんには計算スキームを教えていただき、また計算の実行では高野健三先生の支援があり)、最初の計算は終了した。

そして、モデルに再現された大気大循環を解析した結果、特に子午面運動に関して、

$$V_S \ll \bar{V}_A \ll V_A'$$

のような関係になっているらしいことが分かった(Kida, 1977)。特に中緯度においてそうである。こういう状況であるから、真のと呼びたい子午面循環  $V_S$  は、乱れの影  $\bar{V}_A$  にかくされて表面化しない。すなわち、従来経度平均運動  $\bar{V}$  として得られていたものの中身はほとんどが  $\bar{V}_A$  であった、ということである。この  $\bar{V}_A$  は、中緯度においてはフェレル循環と呼ばれているものであるから、事はおだやかでない。古典的ハドリー循環にとって代わったフェレル循環が実は中緯度の大規模擾乱(高低気圧渦)の影に過ぎなかったとは。

### 3. 下部成層圏の輸送モデル

地球規模の観点で大気組成の人的影響が具体的な大問題になったのは、超音速機の成層圏飛行でオゾン層が変化するのではないかと危惧されたことである(1970年頃)。オゾンの研究はその頃急激に進展したが、オゾンの分布を理解するためには、組成の生成・消滅の光化学的機構とともに組成の輸送機構についての知識が必要である。

オゾンの場合には、下部成層圏の高度が特に重要であるが、その領域での輸送機構については色々と議論が重ねられてはいたものの必ずしも定説はなかった。しかし、1950年頃に出た Brewer-Dobson モデルと1965年頃に出た Reed-German モデルとは、下部成層圏の組成の輸送機構に二大潮流をなした感がある。前者は下部成層圏を赤道から極に向かって流れる子午面循環を主張し、後者は下部成層圏の大規模擾乱による主軸が傾斜した特殊な渦拡散を主張した。

他方、1960年中頃には成層圏の観測と解析が進み、下部成層圏には、子午面循環として半球2細胞循環が発見されており、そのうち中高緯度に位置する間接循環は、ちょうど対流圏のフェレル循環を上方に延長した形に分布している。このような子午面循環の登場によって、Brewer-Dobson モデルは大いに旗色が悪くなった。

ところが、数値モデルに基づく私のラグランジュ的な解析によると、成層圏の中高緯度に見られる間接的子午面循環も、対流圏のフェレル循環の場合と同じく、擾乱(超長波)の影とみなせること、またラグランジュ的子午面循環( $V_S$ )としては Brewer-Dobson モデルに相当する循環が存在することが分かった(Kida, 1983)。

その他、下部成層圏の空気塊のラグランジュ的運動としては、ほぼ温位面に沿う準水平方向の渦拡散も重要であることが分かった。従って、下部成層圏の輸送機構は、Brewer-Dobson型の子午面循環と準水平渦拡散との和であると言える。実は、このような輸送モデルはすでに Prabakara (1963) が彼のオゾン研究に採用している。しかし彼の時代には未だオイラー的運動とラグランジュ的運動との区別が意識されていなかった。

以上のようにして、対流圏ではその存在が希薄であった真の子午面循環は、下部成層圏においてその片鱗をのぞかせたと言えよう。それでもなお、混とんの中からやっと抽出できるという具合であるが。

#### 4. 中間圏から下部熱圏にかけて

それではさらに下部成層圏より上層ではどのような子午面循環が存在しているか。これについては、これまでの研究結果に基づきおおよそ見当をつけることができる。すなわちラグランジュ的の子午面循環は、経度平均の正味の放射加熱冷却とバランスする傾向が強いので、上部成層圏から下部熱圏までその関係を適用すれば、結局のところ、夏半球の加熱域から冬半球の冷却域に向かう子午面循環の存在が期待できる。そして、中間圏以上では大規模擾乱  $V_A$  が弱いので、 $\bar{V}_A$  も影をひそめて経度平均  $\bar{V}$  は  $V_S$  がそのまま陽に出てくる可能性すらある。つまり、中間圏以上では、真の子午面循環がなまの姿を見せるかも知れない。

では実際はどうかということになるが、これまで中間圏の大循環  $\bar{V}$  ( $\bar{u}, \bar{v}, \bar{w}$ ) を数値モデルで再現した何人かの研究者の試みによると、夏極から冬極に向かう全球1細胞の子午面循環が存在していそうである。しかし、これまでのところ、大気大循環モデルを用いて下部熱圏まで（つまり中層大気全体）を含む大気大循環の再現は行われていないので、前章までに述べてきたようなラグランジュ的解析は未だ行われていない。従って全球1細胞子午面循環の真偽については未だ分からないとすべきかも知れない。

これまで、中層大気全体を含むような大気大循環モデルの開発とその計算の実行がやや遅れ気味であったが、それには理由があった。それは、中間圏高度以上の経度方向の風に得体の知れない drag の作用することが Leovy (1964) 以来指摘されており、その drag の機構が良く分からないままであったからである。しかし、1980年前後にその drag についての理論的研究が進み、

Houghton (1978), Lindzen (1981), Matsuno (1982) などによって、対流圏で発生する内部重力波にその起源のあるらしいことが指摘された。そして、内部重力波と大循環との相互作用をパラメタライズすることによって、中層大気の大循環の概略が見事に再現されるに及んだ (Holton, 1982; Miyahara, 1984)。

その結果を見ると、中間圏界面付近に集中する強い子午面循環のあることが分かる。確かに、上部成層圏以上の領域では子午面循環は夏極から冬極へ向かう全球1細胞になるらしいが、その流れの中心は中間圏界面付近にあって、太陽放射加熱の大きな成層圏界面付近ではない点がおもしろい。

私は、1980年頃の議論に刺激を受け、いずれこの問題は大気大循環モデルによって再現され研究される必要があると思った。そして、実際に内部重力波の上方伝播が重要ならば、いきなり大循環モデルにとりかかる前に、より簡単なレベルの数値モデルで、内部重力波の振舞を調べなければならぬと考え、水平・鉛直の2次元プリミティブ・モデルを用いた数値実験に着手した。そして上層大気での drag の効果などで一、二の結果を得たが、その頃前述の Lindzen や Matsuno の成果が世に出た。それで、直ぐさま彼らの研究を参考にしつつ、それまでの経験を大循環モデルに生かす方向で数値実験を前進させることにした。すなわち、内部重力波の力学過程を、パラメタリゼーションという制約から解放させようと思った。

大気大循環のスケールに比較するとき内部重力波は小スケールと言うことができる。それゆえに、内部重力波は大循環モデルの中では気象学的ノイズとしてスムーズ・アウトされる憂き目にあってきたといえる。1つには、大気大循環の数値モデルの開発の途上、内部重力波は、悪さこそすれ意味のあることをしないとわれ続けられてきたからである。しかし、中層大気の大循環にとってはかけがえのない要因である。従って、数値モデルにおいても、ノイズ扱いせず、陽に内部重力波を表現することこそが必要になってきた。過去ののがい経験から、内部重力波を陽に扱う大循環モデルなどおおよそ不可能で時期尚早と思込まれていたが、私の2次元モデルによる経験からは、必ずしも不可能ではなからうという見通しが立った。

その事情を簡単に言うと、内部重力波を陽に表現できるだけの分解能が大循環モデルに与えられていさえすれば良からうということである。事実その判断の元に、分

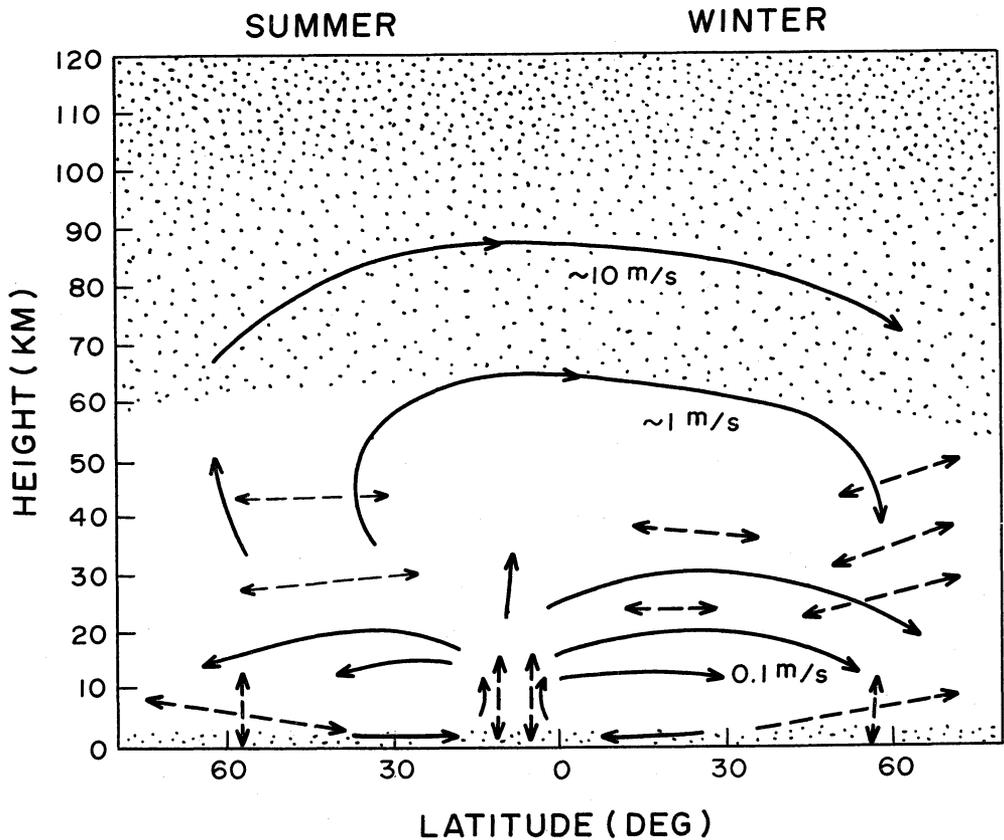


図 高度約 100 km までの大気の子午面断面でみたラグランジュ的運動の模式図。右半分が冬半球，左半分が夏半球。両端矢印の破線は混合運動の特徴的方向を表す。準水平方向の混合は主に大規模擾乱により，鉛直方向の混合は主に対流活動による。太実線は子午面循環を表す。点描領域は，小規模の乱れによる混合域を示している。なお，約 50 km 以下での南北両半球の非対称性は必ずしも確認されたものでないので注意してほしい。

解能を水平 100 km，鉛直 1 km 程度にとって中層大気大循環モデルを積分したところ，第 1 近似的ではあるが，中層大気の大循環が再現された (Kida, 1985)。ただし，そのモデルは，未だ東西方向に限られた領域しか扱っていないし，また解能も粗いので，今後，改めて地球全体の大気大循環を再現する必要がある。私の得た結果は，十分その可能性を示唆しているように見える。

さて，未だ不十分ながらも，私の数値実験で示された中層大気上部の子午面大循環の様相を見ると，おおむね Holton や Miyahara の結果に一致し，中間圏界面付近に集中的な子午面循環があり，その風速は 10 m/s のオーダーに達する。これだけ強い風速なので，この高度においては真の子午面循環をなまに見ることができそうであ

る。しかし，そもそもこの子午面循環を生み出しているのは内部重力波の碎波や消散過程であるから，変化の大きな内部重力波の振舞が大循環に重なって，従って，限られた観測では子午面循環が陽に引っかかるとは簡単には言えないだろうけれども。

### 5. ラグランジュ的に見た大気大循環像

自分の研究を振り返ってみると，対流圏に始まって中層大気の上部にまで，子午面循環を中心にした大気大循環の構造を追い求めてきたような感がある。しかし，このような経過は，それほど意図したものでなく，その時その時の興味や時流というものにふらふら影響されながらとにかく進んできた結果にすぎない。そういう漂流の

中で、大気大循環に対する色々な問題が私の興味をさそったけれども、そしてその多くを重要だと感じたけれども、ラグランジュ的な大気大循環像を考え続けることからはずれず、またそのことで精一ばいだったようだ。しかし、自分の微力からしてそれで良かったのかも知らない。

本稿の結論として、ここで再度、ラグランジュ的に見た大気大循環像のまとめを図によって示しておくとしよう(別図参照)。図中の両端矢印の破線は渦混合の運動を表し、太実線はラグランジュ的子午面循環を表す。また、点描の領域は小規模運動による混合を表す。図は南北の半球で非対称になっている。ただし、私の研究結果は、特に下部成層圏以下では半球モデルの年平均に基づいているので、そこでの非対称性は確認されたものではない。

さて対流圏では、子午面循環的な運動は弱く、強いて言うくと低緯度にそれらしいものが見られるぐらいで、空気塊の運動を支配しているのは、大規模擾乱による傾斜混合と積雲対流活動による鉛直混合とが卓越している。ただし、積雲に伴うラグランジュ運動は未だ良く分かっていないので想像に過ぎず、解釈に不十分なところがあり今後の課題であると受けとってほしい。

いわゆる古典的ハドレー循環は、圧倒的な渦混合に代わってほとんど存在しないといえるが、一方フェレル循環は全く存在しないことは本文中で述べた通りである。従って、対流圏はその名の通り、水平および鉛直の混合運動に支配されている領域と考えるべきである。このことは、対流圏の大気微量組成の輸送モデルとして渦拡散モデルが採用できることを示している。

次に下部成層圏では、赤道圏界面付近で上昇し、両極に向かって岐れた後、中高緯度で下降する Brewer-Dobson 型の子午面循環と準水平混合とが共存している。この領域での鉛直混合は、それら子午面循環と水平混合の組合せの結果として生じると解釈できる。なお、その子午面循環の流速はおおよそ  $0.1 \text{ m/s}$  のオーダーである。ただし、夏半球側の子午面循環および水平混合については、未だ確認できていない。

上部成層圏から下部熱圏にかけては、全球的な子午面循環が存在しているようである。特にその流速が大きいのは中間圏界面あたりで  $10 \text{ m/s}$  に達する。上部中間圏から下部熱圏の高度は、内部重力波の碎波が起り、そのため、鉛直混合が活発になっている。

さらに、約  $100 \text{ km}$  以上の高度では、分子拡散の効果が現わになり始める。そして、そこでの子午面循環の様相は未だ良く分からない。

## 6. おわりに

本稿を終了する前に、二、三の問題点を反省しておきたい。まず、私の研究は全て、簡単な物理過程の大気大循環モデルを用いて行われてきた点である。従って、今後一層現実的なモデルに基づいて追認する必要がある。またラグランジュ的解析の精度にも厳しい問題がある。しかし今のところそれを解決する方法がないので、統計的解釈にとどまっている。さらに、サブグリッド・スケールの運動の表現がほとんどできていない。これは特に対流圏において重要な問題である。以上いずれも困難な問題であるが、最終的には、超分解能モデルで解決してゆくことができると思われる。

今後の課題は、本稿で書けなかったものであらねばなるまい。すなわち、子午面循環の次には乱れ(擾乱)がおもしろそうである。

追記: 本稿はその性格上筆者の仕事を中心にして書かれており、観測的研究や理論的研究などで引用すべきものの多くが省略されています。言うまでもなく、他の研究者のその方面での研究成果に筆者の研究の大部分は負っているので、記述に、意図的でないまでも公正を欠いている恐れがあります。それで、本稿に関係する他の解説を紹介しておきたいところですが、残念ながら世界的にみても未だ適当なものが見当たらないようです。

## 文献(筆者分のみ)

- Kida, H., 1977: A numerical investigation of the atmospheric general circulation and stratospheric-tropospheric mass exchange: I. and II., *J. Meteor. Soc. Japan*, **55**, 52-70, 71-88.  
 Kida, H., 1983: General circulation of air parcels and transport characteristics derived from a hemispheric GCM: Part 1 and Part 2., *J. Meteor. Soc. Japan*, **61**, 171-188, 510-524.  
 Kida, H., 1985: A numerical experiment on the general circulation of the middle atmosphere with a three-dimensional model explicitly representing internal gravity waves and their breaking, *Pure and Appl. Geophys.*, **122**, 731-746.