解 説

大 気 の 大 循 環

松 野 太 郎^{*1}

(1986年6月27日受理)

General Circulation of the Atmosphere

Taro MATSUNO^{*1}

KEY WORDS : general circulation, tracer transport, large scale diffusion, global air pollution

1. 地球規模の物質輸送と大気大循環

最近, 小規模の大気汚染が減少する傾向にあるのに対して, より大規模の汚染が大きな問題となってきた。2 国間にまたがる酸性雨の問題, 地球全体が影響を受けると考えられる CO₂ 増加による気候変化の問題や微量気体によるオゾン層破壊の問題, 放射性物質による環境汚染の問題などである。これらの大規模大気汚染の問題においては, 汚染物質の大規模な輸送・拡散が問題となってくる。一工場とか都市域といった小規模の汚染に関係した輸送・拡散の担い手は, 海陸風などの局地循環や高度 1 km 程度の大気境界層中の乱流であるが, 大規模汚染をひきおこす大気の運動は, スケールが数千キロメートルの高・低気圧や地球規模のプラネタリー波に伴う風, さらに大気の大循環である。ここでは, 地球規模の大気汚染を念頭において, 大気の大循環と, それによる物質の輸送について概略を述べる。

2. 大気大循環 (平均運動)

大気の運動つまり風は, さまざまな時間スケール・空間スケールをもって変化しているが, 時間で 1 日, 空間で 1,000 km 程度より大きな成分を大規模運動と呼んでいる。大規模運動を, さらに大きな地球全体で眺めると, その特色は緯度によって異なるが, 同一緯度帯なら経度方向にはあまり変化しない。これは, 大規模運動

が基本的には極と赤道との間の日射強度の差に起因する大気の大循環として起こっているからである。そこで, 以後, 主として経度方向に平均した大気の運動の特色を見て行くことにする。

第 1 図は平均東西流の緯度・高度分布である。熱帯域を除き, 強い西よりの風 (偏西風) が吹いており, その中心は中緯度で高度 10 km 付近にある。この偏西風のため, 経度方向への物質の輸送は極めて速やかである。中国やソ連の原爆実験によって生じた放射性のチリが 2~3 日で日本にとどくことから明らかであろう。大まかにいえば, 10 日で地球を一周する程度である。このように, 東西方向には, あっという間に拡がってしまうが, 南北 (および上下) 方向の拡散は, もっとゆっくりしている。

第 1 図に対応して, 南北・上下方向の平均運動, すなわち平均子午面循環のようを示したのが第 2 図である。図から明らかなように, 南北各半球が 3 つのセル (細胞) に分かれて循環しており, 3 細胞循環と呼ばれる。これは質量輸送関数を示したもので, 定性的な循環パターンしかわからないが, 風速は, 低緯度にある一対のセル (ハドレー循環) が最も大きく, 地表付近の赤道向きの流れが 2 m/s 程度, 上層の反流は 1 m/s 弱である。また, 上下流の大きさは, 3 mm/s 程である。したがって, この循環によって亜熱帯から赤道まで物質が輸送されるに要する時間は 20 日程度と計算される。

中緯度 (30°~60°) に存在する逆向き循環の速さは, 低緯度の 1/3 ぐらいであるから, 30° から 60° まで物質

^{*1} 東京大学理学部地球物理学科; 東京都文京区本郷 7-3-1 (〒113)

Geophysical Institute, Faculty of Science, University of Tokyo; 3-1, Hongo 7-chome, Bunkyo-ku, Tokyo, 113 Japan.

第1図 平均東西流の緯度・高度分布 (12～2月)¹⁾ 第2図 平均子午面循環のパターン。線は質量流線関数で、流れはこれに沿っている¹⁾

が移動するには 60 日にかかる勘定になる。これは、東西に 360° を動くのに 10 日しか要しないのに比べると、ずいぶんゆっくりしている。

この推論は、しかし、正しくない。実は、中緯度地域で物質輸送に有効なのは、平均子午面循環ではなくて、温帯低気圧に伴う南北風による大規模渦拡散の効果が第一なのである。

3. ハドレー循環とロスビー循環

低緯度 (緯度 $< 30^\circ$) と中・高緯度では、大気大循環の様相が大変異っている。大気大循環は、本質的には赤道と極の間の日射加熱の差を原動力とする対流運動なのであるが、その形態 (様式) に 2 つの型がある。このことは、回転水槽で用いた模型実験によって最もよくわかる。

第3図は、回転水槽実験の結果の一例である。写真か

第3図 回転水槽実験で得られた回転流体の対流の2つの形態
左がハドレー型，中と右がロスビー型と呼ばれる。

第4図 大気大循環の模式図²⁾

ら見当がつくように、2重円筒状の容器に水をみだし、内外それぞれにも補助的な容器をつけて、内側を冷却し外側を加熱する。そして、容器全体を回転台の上にのせて、鉛直軸のまわりに回転させる。内側が北極、外側を赤道側に見たててのわけで、2重円筒間の水が大気に相当する。このように水平に温度差をつけた回転する流体中で、どのような対流運動が起こるかを観察する。

第3図の3つの写真は、2重円筒間の水の流れのもようを、表面にアミル粉のトレーサを浮かべて可視化したものである。左端のものが最も回転速度の遅い場合の結果で、右ほど回転を速くしてある。図からわかるように、回転が小さいときは、中心軸のまわりにほぼ同心円状の流れができる。半径(南北)方向および上下方向の動きを調べると、加熱している外壁近くで上昇し、表面近くで内側へ向かい、冷却している内壁近くで下降し、底面では内側から外側に向かう、という循環をしていることがわかる。これは、第2図の低緯度側の循環と同じで、このタイプをハドレー型循環と呼ぶ。

第3図の右の2つは、回転速度が比較的大きいときの表面(大気でいえば上層)の流れのもようである。ハドレー循環と異なって、中心軸のまわりの対称性は失われ、流れは経度方向に変化している。ところどころで内側から冷水が外側に向けて張り出し、その間では暖水が外側から内側に入りこんでいる。冷水と暖水の境には波状をした幅のせまい強い流れができています。このタイプをロスビー型循環と呼ぶ。実際の気では、中・高緯度の気が大気がこの型の大循環をしており、東西に並んだ温帯低気圧によって寒気が南下したり暖気が北上したりして南北の熱の輸送を行っている。

地球大気の大循環は、緯度30°あたりを境として、低緯度側は平均的な流れの卓越するハドレー循環、中・高緯度側は温帯低気圧で特徴づけられる変化の大きなロスビー循環となっている。これを模式的に描いたものが第4図である。図に示されているように、低緯度のハドレー循環域では、風の変化が小さいので、実際の風と第1図、第2図に示される平均風との差はあまり大きくない。第1図、第2図のハドレー循環は、その意味で実在する循環系である。これに対して、中・高緯度のロスビー循環では、経度方向の変化が重要であり、平均をとった結果は実際とはかけ離れたものである。特に第2図および第4図の断面中に描かれた中緯度の子午面循環は、平均をとった結果の、ある種の「見かけ」のものであり、個々の空気塊がこのように閉じた循環を行っているわけではない。中・高緯度における擾乱の重要性を示すために、変動する南北風の強さの目安として標準偏差の緯度・高度分布を第5図に示す。

大気大循環は、南北の加熱差に起因しておこる地球規模の対流であり、その役割として赤道から極に向けて熱エネルギーを輸送している。大循環の様式が低緯度側はハドレー型、中・高緯度はロスビー型と異なっているので、熱輸送のプロセスも異なっている。すなわち、ハドレー循環域では、実際の風と平均風との差が小さいので、第2図や第4図に示されている平均子午面循環によって熱が運ばれるが、ロスビー循環域においては、水平面内を南北に行ったりきたりする運動、簡単に言えば水平混合によって熱が運ばれる。この2つのプロセスによる熱の極向き輸送量を観測データから見積もると第6図のような緯度分布をしていることがわかる。緯度30°あ

(a) 12～2月の平均

第5図 南北風の変動の標準偏差

中緯度で最大となり、低緯度では小さいことに注意¹⁾。

第6図 大気大循環による熱エネルギーの極向け輸送を、平均子午面循環によるものと擾乱によるものとに分けた内訳²⁾

たりを境にして、熱輸送の方式が違うことが読みとれるであろう。

4. 中・高緯度における渦拡散

大循環によって大気中の物質は輸送・拡散される。大循環の様式が低緯度と中・高緯度で異なり、それによる熱輸送のプロセスが異なっているのだから、物質輸送の

プロセスも同様と考えられる。すると低緯度側では平均子午面循環による輸送が主役と思われるので、先に第2図をもとに議論したことは妥当である。他方、中・高緯度では東西方向にも時間的にも激しく変化する南北風によってかき混ぜられる効果の方が大きく、第2図にみられるような平均子午面運動による輸送は無視できる。

第7図 熱輸送の計算から求めた大規模渦拡散係数の緯度分布
4つの図は異なる高度でのもので、上から6~10, 3~6, 1.5~3, 0~1.5 km 層での値⁴⁾。

変化する風による攪拌効果を表現するには渦拡散が適している。そこで、第6図に示すように、変動する風による極向け熱輸送量を観測データから直接求め、同時に平均的な南北温度傾度を調べると、渦拡散係数を見積もることができる。こうして求めた水平渦拡散係数の大きさを高さ（相当する気圧が記入してある）別に緯度の関数として示したものが第7図である。どの高度でも中緯度（30°~60°）で拡散係数が大きくなっていることがわかる。

この拡散係数をもとに、中緯度における物質拡散の時間を求めよう。緯度50°で放出された物質が30°まで拡がる時間を考えると、拡散時間 $= (2,000 \text{ km})^2 / (3 \times 10^6 \text{ m}^2 \text{ s}^{-1})$ として約15日となる。中緯度を出発した物質は、およそこの位の時間で亜熱帯域まで拡散し、ついで低緯度のハドレー循環に乗って赤道まで達する。こうして、中緯度の汚染源から出た物質は、およそ30日で赤道から

極までの半球全域にゆきわたるようになる。

5. 赤道における輸送の壁

低緯度ではハドレー循環によって物質が輸送されるが、この循環系では先に記したようにモデル的な平均流がほぼそのまま実現していると考えてよい。したがって、第2図、第4図に見られるように、南北両半球の循環セルが別々に存在し、それぞれの中で空気が循環している。両半球の循環セルの間の空気の交換は弱く、このため赤道域は南北両半球間の物質輸送にとって壁のような役割をはたしている。先に見積もりをしたように、中緯度で放出された物質は、約30日で半球内全体にゆきわたるが、さらに赤道を越えて反対側の半球にまで拡がるには長い時間を要する。

赤道で循環が切れている、といっても第一近似の話で、弱いながら擾乱による渦拡散もあるし、また、インド・モンスーンのように局所的に赤道を越える流れもあ

第8図 大循環による輸送をすべて渦拡散で表現した場合の拡散係数の緯度分布 (モデル的)⁵⁾

る。このような過程により南北両半球の空気が交換され、物質も輸送される。この南北交換の時定数は、 CO_2 、CFM など人工起源のトレーサー物質の分布から見積もることができる。これらの物質は、人間活動の所産として年々増加しているが、その源はほとんど北半球中緯度地域である。これらのガスの濃度を測定した結果を見ると、両半球とも増加傾向にあるが、南半球の値の方が低く、北半球に対して1～2年遅れていることがわかる。すなわち、南北両半球の空気が一様化するには1～2年を要するのである。これは、各半球内の一様化時間が30日程度であるのと比べると、ずいぶんとゆっくりしている。

6. 地球規模輸送の拡散係数

輸送の機構を詳しく見れば上に記したような緯度帯による差異もあるが、大雑把に言えば、すべての運動を乱渦と見なし、汚染物質などは、それによる拡散によって濃度の不均一がならされて行く、と見なすこともできる。この場合の拡散係数の大きさを経験的に定めると、第8図のようになる。ある文献から取ってきた一例に過ぎないが、大まかな概念を掴んでほしい。今後、 CO_2 の分布やその季節変化の観測にもとづいて、もっと信頼できる値が得られるものと期待している。

7. 成層圏の大循環

成層圏は、物質の地球規模輸送に関して、ユニークな役割をはたしている。成層圏では雲ができたり、雨や雪が降ったりしないので、雲や雨による除去効果が働かない。このため各種の微量物質は、一たん成層圏に入り込

むと長時間そこに滞留し、成層圏大気の大循環に乗って地球上に広がってゆく。

成層圏中の大規模運動も対流圏同様、平均運動とそれからのずれ(擾乱)に分けられ、物質輸送も平均流による移流と擾乱による渦輸送に分けられる。形式的には同じに扱っても構わないが、内容的には大きく違う所がある。「擾乱」の実体が、対流圏では温帯低気圧・高気圧であるのに対して、成層圏では、プラネタリー波と呼ばれる地球規模の波動である点である。温帯低気圧に伴う風は不規模で大局的には乱流とみなすことができ、したがって温帯低気圧による物質の輸送は渦拡散として扱うことが許される。これに対して、成層圏中のプラネタリー波は特定の構造をもった波動で、それに伴う流れのパターンも規則的であり、したがって、その流れによる物質の輸送は拡散ではない。なお、プラネタリー波は平均東西風が東風の中には入り込めないという性質があるので、平均風が東風となる夏季には、ほとんど存在しない。

これらの事情から、成層圏での大規模輸送を定式化する際に、形式的に(平均流による移流)+(渦輸送フラックス)と表わし、渦輸送フラックスを、(渦拡散係数) $\times$ (物質の平均濃度の傾度)と書くと、渦拡散係数は異方性を持つテンソルで、しかも、ほとんど反対称であるべきことが理論的に導かれる。そして反対称テンソルの拡散係数と濃度傾度の積で表わされる物質のフラックスは、濃度の不均一を平滑化するような「拡散」ではなく、濃度の不均一をそのまま移動させる「移流」と同等であることが示される。

そこで、この部分を平均流による移流につけ加え、その結果が移流となるような「平均流」を考えたと便利である。実は、このように定義した平均流には明瞭な物理的意味がある。それは、「ラグランジュ的平均流」すなわち、個々の空気塊に印をつけて、それを長期間(プラネタリー波の周期よりも長い時間、約10日)にわたって追跡し、その間の正味の移動をもとに平均流を定義することと同等なのである。これは、空間に固定した座標で定義した普通の平均(オイラー平均)によるものとは異なっているが、長い寿命を持つ物質の輸送を扱うには、この方が適しているし、直観的にも分りやすい。

ラグランジュ平均した下部成層圏の子午面循環のパターンを第9図に示す。1950年前後に成層圏中の水蒸気やオゾンの分布をもとに推定されたもので「ブルーワー・ドブソン循環」と呼ぶ。その後、実測をもとにしたオイラー平均の循環像と合わないことから否定されていたが、近年、先に記したような事情が明らかになるにつ

第9図 下部成層圏の大循環（ブルーワー・ドブソン循環）のパターン（矢印）等温線も記入してある。

れ、ラグランジュ平均として正しいと考えられるようになった。図から明らかのように、赤道域で対流圏から上昇して来た空気が成層圏に入り、成層圏内で両極に向かって流れ、高緯度地方で下降して対流圏にもどる、という循環である。

この循環によって赤道域の強い日射（紫外線）によって作られたオゾンは両極地方に運ばれ、そこに蓄積される（下降によって圧縮され密度を増す）のでオゾン量の最大が極域に現われる。同様に成層圏の空気はすべて低温（ $\sim 200^\circ\text{K}$ ）の熱帯圏界面を通過したもので、水蒸気を凝結で失い、乾燥している。熱帯地方の火山噴火（クラカトア、フエゴ、エルチチョン等）で成層圏中に生じたエアロゾルは、この循環に乗って全地球に広がる。

8. 成層圏中での拡散

プラネタリー波の作用は物質濃度の不均一をならすような拡散ではないことを強調した。これはあくまで第一近似の話で、実際にはプラネタリー波による大きな南北移動に伴って真の拡散も起こる。特にプラネタリー波の碎波が起こる低緯度域や、冬季に時おり極域でおこる突然昇温の際にはプラネタリー波による輸送が重要となる。これをならして大雑把にみたときの拡散係数として $10^5 \text{ m}^2/\text{s}$ のケタの値が得られており、第9図に示した平均循環とともに、この効果も考えないといけない。火山噴火の際にエアロゾル層が高緯度へ向けて広がる速さ

は、第9図の平均流だけでは説明できない。

成層圏内の物質輸送は、ブルーワー・ドブソン循環による移流と水平面内（あるいは等温位面内）の渦拡散の2つの効果によっていると考えてよい。後者は、鉛直方向（等温位面をよぎる方向）の移動をひきおこさないから、成層圏に取りこまれた物質が対流圏に排出されるのは、高緯度地域での下降流によるのみである。成層圏の空気が対流圏に降りて来る具体的プロセスは、温帯低気圧の発達とそれに付随した上層での前線形成などに関係して間歇的に起こる。しかし、長期間にわたって平均してみると、ブルーワー・ドブソン循環と同じはずであり、その大きさは放射収支からも見積もることができる。そのような計算によると圏界面付近での下降流速は約 0.3 mm/s で、この割合で高緯度の成層圏の空気が全部おりてくるのに要する時間は約1年となる。この間に低緯度成層圏の空気が、あとをうめるように高緯度に移動するから、成層圏の空気全部が対流圏に入れ換わるのに要する時間は約2年ということになる。

（この解説は、国立公害研究所において昭和60年1月に行われた地球規模大気環境問題シンポジウムの報文に参考文献を加えたものである。）

参 考 文 献

- 1) R.E. NEWELL, J.W. KIDSON, D.G. VINCENT and G.J. BOER; "The general circulation of the tropical atmosphere and integrations with extratropical latitudes," Vol. 1 (1972), Vol. 2 (1974), MIT Press.
- 2) 高橋浩一郎, 山下 洋, 土屋 清, 中村和郎編; "衛星でみる日本の気象", p.123 (1982), 岩波書店, 東京.
- 3) 岸保勘三郎, 田中正之, 時岡達志; "大気の大循環" (大気科学講座4), 東京大学出版会, 東京 (1981).
- 4) A. WIIN-NIELSEN and J. SELA; *Mon. Weather Rev.*, **99**, 447 (1971).
- 5) G. CZEPLAK and C. JUNGE; *Adv. Geophys.*, **18 B**, 57 (1974).
- 6) A.W. BREWER; *Quart. J. Roy. Meteorol. Soc.*, **75**, 351 (1949).