

〔ながれマルチメディア〕

成層圏極渦を想定した準周期流における カオスの混合と輸送障壁

*京大・理 水 田 亮[†]
*京大・理 余 田 成 男

Chaotic Mixing and Transport Barriers in a Quasi-periodic Flow of the Stratospheric Polar Vortex

Ryo MIZUTA and Shigeo YODEN

Department of Geophysics, Kyoto University

(Received 27 June, 2001 ; in revised form 26 September, 2001)

(<http://www.nagare.or.jp/mm/2001/mizuta/index-ja.htm>)

Large-scale horizontal mixing and transport barriers around the circumpolar vortex in the winter stratosphere are studied using a two-dimensional barotropic model on a spherical domain. A barotropically unstable jet is forced in order to obtain a fluctuating polar vortex. A flow with quasi-periodic time dependence and an aperiodic flow with similar behavior are investigated using several Lagrangian analyses.

Effective mixing inside and outside of the polar vortex is observed in the quasi-periodic flow. The process of the mixing is typical of chaotic mixing. The mixing regions are where the perturbations grow through barotropic instability. Poincare sections give accurate locations of chaotic mixing regions, and transport barriers are identified as the edges of invariant torus regimes. In addition to the transport barriers associated with strong potential vorticity gradients, another type of transport barrier exists, which is not related to the steep potential vorticity gradient.

The structure obtained in the aperiodic flow is relevant to that in quasi-periodic flow. The evolution of the correlation function is more typical of a chaotic zone. Chaotic mixing is also characterized by high values of Lyapunov exponents. Isolated regions are found near the center of the polar vortex, corresponding to the invariant tori in the Poincare sections of the quasi-periodic flow.

冬季成層圏（高度約 15～50 km）の極渦内外における流体混合の力学過程については、オゾンホールの生成・消滅と関連づけて数々の研究が行われてきた。緯度 60 度付近に極大をもつ西風ジェットが極渦を形成し、極渦の縁にあたるジェットが南北方向の輸送障壁となっており、その中に空気は閉じ込められている。とくに南極域では、この輸送障壁によってつくられる天然の「密閉容器」がオゾン破壊物質の生成と保持、お

よび春季のオゾンホールの維持に深く関わっている。

本研究では、回転球面上の 2 次元非圧縮流体モデルを用いて、成層圏の極渦を理想化した状況を再現し、極渦周辺の大規模な混合過程と輸送障壁について調べた。順圧不安定となるジェットを強制として与えて極渦が時間的に変動するようにし、極渦が周期的に変形しながら回転する準周期解と、そのパラメータを少し変えて得られた非周期解の 2 つに関して、多数の流体粒子の動きをラグランジュ的に細かく計算し、動画を用いて混合

* 〒606-8502 京都市左京区北白川追分町

[†] E-mail: mizuta@kugi.kyoto-u.ac.jp

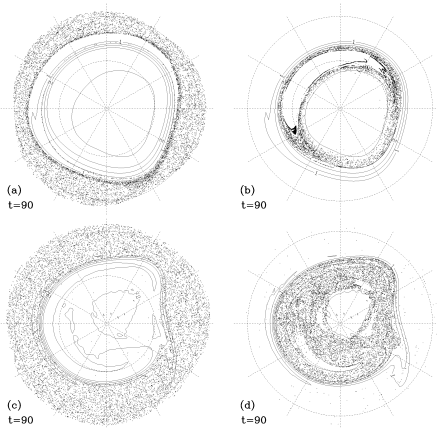


図1 準周期解(上), 非周期解(下)における多数の粒子の移流の様子。左が初期位置を渦の外側においたもの, 右が内側においたもの, コンターは流れ場のポテンシャル渦度(PV)をあらわす。極を中心としており, 緯度線はそれぞれ60度, 30度である。

に至る過程を詳しくとらえた。

図1は, それぞれの解の極渦の外側(左), 内側(右)で多数の粒子の散らばりを計算したものである。t = 0日に10000点ずつ, 半径0.05 radの円内にランダムに置いたものの90日後の移流の結果を示している。これらの流体塊は最初に西風ジェット南北シアーによって東西方向に大きく引き伸ばされ, 途中いたる所で折り曲げを受け, 何重にも折りたたまれている。この引き伸ばしと折りたたみの繰り返しにより比較的短時間で広範囲に粒子が混合されていることがわかる。極渦内の粒子はわずかに極渦の外側にもれるが, 極渦内外の交換は大きくない。極渦の中心域には粒子の入らない領域があり, それを取り囲むように3つの島状の構造も見えるなど, 90日間の移流でも極渦内に不均一な構造が残る。

図2は, 混合の局所的な量的指標として有限時間リアプノフ指数を計算したものである。この指数はごく近傍の軌道間の距離の指数関数的な増加率を表している。評価時間2日では時間が短いので, ジェット付近の水平シアーによる線形的な引き伸ばし効果が支配的である。評価時間90日の結果を見ると, 平均的に内側の値は外側より小

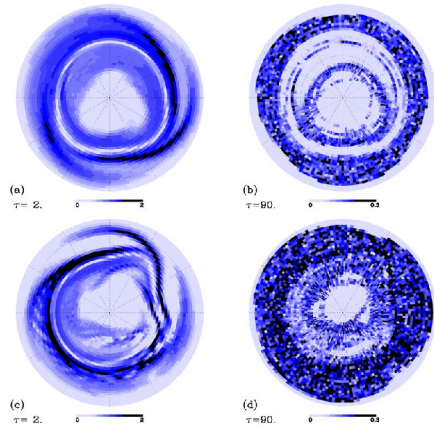


図2 最大有限時間リアプノフ指数の空間分布。格子点間隔が2度毎で, 20度より極側を調べている。評価時間を2日(左), および90日(右)とした結果を示す。上段が準周期解, 下段が非周期解での結果。

さい。25度より赤道側では指数の値は非常に小さくなっている。また, 極渦の内側では指数の分布が不均一で, その値の小さい, 大きな三角形型の領域が存在している。これは図1で粒子が入り込まなかった領域とほぼ一致している。

このように, 準周期流の中では典型的なカオスの混合が起こっていて, 極渦の外側, あるいは内側でも, 効率的な混合が見られることがわかった。混合領域は, 順圧不安定によって擾乱が発達する場所と一致する。ポアンカレ断面図により混合領域の正確な範囲を特定し, 不変トーラスの縁を混合の障壁とみなすことも可能となっている。極渦の縁付近のポテンシャル渦度の強い勾配に対応する障壁に加えて, このような強い勾配には対応しない, 別種の障壁が存在することがわかった。また非周期流においてもカオスの混合が支配的であるといえる。それは大きいリアプノフ指数によって量的にも特徴づけられ, 相関関数の時間発展もカオス領域に特徴的な様相を示している。極渦の中心付近には孤立領域が存在し, それは準周期流でのポアンカレ断面図で見られた不変トーラスに対応する構造となっていることが確認できる。