

成層圏極渦におけるカオスの混合と輸送障壁

Chaotic mixing and transport barriers in stratospheric polar vortex

水田 亮[1], 余田 成男[1]

Ryo Mizuta[1], Shigeo Yoden[2]

[1] 京大・理・地球物理

[1] Department of Geophysics, Kyoto Univ., [2] Dept. of Geophysics, Kyoto Univ.

<http://www-mete.kugi.kyoto-u.ac.jp/mizuta>

冬季極域の成層圏では、緯度 60 度付近に極大をもつ西風ジェットにより極渦が形成されている。極渦の縁では、ジェットが南北方向の輸送障壁となり、その外側・内側のあいだの物質交換が非常に少なくなっている。その一方で内側・外側それぞれでは、混合が水平方向に効率よくおこなわれている。

そのような水平方向の混合について、2 粒子間の距離の指数関数的な増加が見られることからカオスの混合が少なからず役割を果たしていると考えられている。本研究では、まず回転球面上の 2 次元非発散流体の数値モデルを用いて極渦の変動に類似した準周期的な流れを再現し、粒子の軌跡のとり振舞いについて、カオスの混合の観点から解析をおこなった。さらに、現実の成層圏の水平風データを用いて、極渦周辺の混合過程や輸送障壁について調べた。

最初に、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、両者を比較しながらその中での混合過程を解析した。

準周期流の中では典型的なカオスの混合がおこっていて、極渦の外側、あるいは内側でも、効率的な混合がおこっていることがわかった。流体塊は最初に西風ジェットの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た。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た。混合領域は、順圧不安定によって発達するプラネタリー波の臨界緯度との一致が見られた。極渦についての過去の研究でも述べられているように、ポテンシャル渦度が強い勾配をもつ、極渦の縁付近に輸送の障壁が見られた。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。また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、そのような強い勾配に対応しない別種の障壁が存在していた。ポアンカレ断面図により混合領域の正確な位置を特定することができ、不変トーラスの縁が混合の障壁となっていることもわかった。

非周期流においても、カオスの混合が支配的であった。それは高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ものであった。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た。

次に、UKMO(英国気象局)の 4 次元同化データから得られる等温面上の風の分布を用いて、南半球上部成層圏における冬季の極渦の内部での輸送・混合過程を調べた。有限時間リアプノフ指数、コンターアドベクションなどの手法を用い、極渦が大きく変動しない真冬について解析した。1992 年から 2000 年の 9 年間について、風の場の年々変動と混合の強さの年々変動、およびそれらの間の関係を調べた。

この領域では周期約 4 日で東進する 4 日波と呼ばれる波動がしばしば見られる。この構造がよく見られるときと見られないときとで比較をおこなった。よく見られるときには極渦の内側でも効率のよい混合過程が存在していた。有限時間リアプノフ指数は外側での値に近いぐらいの高い値を持っている場所があり、コンターは時間とともに指数関数的に伸びることが確かめられた。このような混合過程は極渦内全体に一樣というよりは、70 度より極側でよく見られた。

一方同じ場所でも波動が見られない年もあった。そのような時には風の場は極を中心とする剛体回転に近く、混合は小さかった。有限時間リアプノフ指数は低く、物質コンターは時間とともに線形的に近い伸びを示した。空気塊はジェット付近の風の南北シアーによって引き伸ばされているだけと考えられる。

混合の強さにはこのように大きな年々変動が見られ、それはその場所でのポテンシャル渦度の擾乱についての強さの年々変動と関係づけられることがわかった。