

氏名	みず た りょう 水 田 亮
学位(専攻分野)	博 士 (理 学)
学位記番号	理 博 第 2459 号
学位授与の日付	平 成 14 年 3 月 25 日
学位授与の要件	学 位 規 則 第 4 条 第 1 項 該 当
研究科・専攻	理 学 研 究 科 地 球 惑 星 科 学 専 攻
学位論文題目	南半球冬季成層圏極域でのカオスの移流による輸送・混合過程

論文調査委員 (主査) 助教授 余田成男 教授 木田秀次 教授 植田洋匡

論 文 内 容 の 要 旨

冬季の成層圏では、緯度60度付近に極大をもつ西風の極夜ジェット気流により周極渦が形成されている。北半球の周極渦は対流圏から伝播してきたプラネタリー波によって常に攪乱されており、時には周極渦が崩壊して突然昇温現象が発生することがある。一方、南半球では対流圏から伝播するプラネタリー波の役割が相対的に小さく、特に真冬には成層圏・中間圏域での流体力学的不安定性に起因した惑星規模の波動が卓越している。成層圏域の微量大気成分はこのような波動擾乱により準水平的に輸送され、まわりの空気と混合されている。本研究は、成層圏を理想化した球面上の2次元順圧モデルおよび現実大気の全球観測解析データを用いて、南半球冬季成層圏における周極渦の内外での輸送・混合過程を解析したものである。1980年代に始まった2次元流体中におけるカオスの移流の基礎的研究を踏まえて、成層圏極域での輸送・混合過程の理論的基盤を整え、現実大気での実態と年々変動の様子を明らかにした。

まず、球面上の2次元順圧モデルで順圧不安定となる帯状ジェット気流を強制することにより、準周期的にあるいは非周期的に時間変化する周極渦をつくり出した。有限時間リアプノフ指数の空間分布を求めて、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を定量的に示した。また、多数の粒子を微小な領域に配置して移流追跡計算を行ない、粒子群分布の相関次元の時間発展を求めて、巨視的なスケールから2次元的な分布となっていく様子を確認した。これはカオスの混合の一般的な特徴である。また、同じ多粒子移流計算で、周極渦の縁だけでなく渦の内部にも輸送障壁が存在することを見出した。この種の輸送障壁はポテンシャル渦度の大きな勾配に対応しておらず、周極渦の縁とは異なる力学メカニズムでつくられている。準周期流でポアンカレ断面図を作成して混合領域の正確な位置を特定し、不変トーラスの縁が輸送障壁となっていることを明らかにした。また、非周期的な流れにおいてもカオス的な混合過程が支配的である。同じ波のエネルギーをもつ準周期流に比べると、非周期流のほうがリアプノフ指数の平均値が大きく、カオス領域の面積の増大と対応していることがわかった。

2次元順圧モデルで得られた準周期解では、ポテンシャル渦度は時間的空間的になめらかに変化しているが、同じ流れのカオス領域では流体粒子の軌跡は周期性を持たず、ラグランジュ的保存量であるパッシブトレーサーの場合にはフィラメント状の微細構造が形成されていく。そこでまず、定常波動が一定速度で東進する周期解をとりあげ、ラグランジュ的な観点からポテンシャル渦度の非保存項の役割に着目して、微細構造の形成過程に関する詳細な研究を行なった。このような流れでは、流体粒子が波の臨界緯度にある淀み点に近づく際にはその速さが時間とともに減少し、同一の流線上にある2点間の距離は縮められるので、それらの間のパッシブトレーサーの勾配が大きくなる。これに対して、ポテンシャル渦度の時間変化には速やかに強制渦度場に緩和される効果が含まれるため、ポテンシャル渦度はつねに滑らかな分布となっている。しかし、強制のパラメータ値を変えて解の非周期性を増してゆくと、流れ場が不規則になり、より短時間で細かい構造が作り出されて、ポテンシャル渦度場にもフィラメント状の構造が形成維持されるようになる。

2次元順圧モデルで想定した状況は、4日波として知られる東西波数1の東進波がしばしば出現する冬季の南半球上部成

層圏に対応している。そこで、本研究ではさらに、現実大気の4次元同化データから得られた等温位面上の水平風分布を用いて、流れ場の年々変動と混合の強さの年々変動、および、それらの相関関係を解析した。1992年から2000年の9年間の真冬について、有限時間リアプノフ指数や閉じたコンターの伸長率を指標として、極渦の内部での混合の強さを量的に評価した。また、4日波の活動度の年々変動を調べて、各年での混合の様子を比較した。4日波が大振幅の年には周極渦の内側でも効率のよい混合過程が存在しており、小さな空気塊の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。一方、4日波が見られない年には、流れ場は極を中心とする剛体回転運動に近く、有限時間リアプノフ指数は低い値であった。空気塊はジェット気流の南北シアアーによって引き伸ばされており、そのコンターは時間とともに線形的に伸びている。このような混合の強さの年々変動は、極域での4日波に代表される波動擾乱の年々変動と高い相関関係にあることがわかった。

論文審査の結果の要旨

冬季成層圏域における地球規模の物質輸送・混合過程は、1980年代から90年代にかけてオゾンホールの原因究明とも関連して詳細に調べられた。北半球では対流圏から伝播してきたプラネタリー波の碎波により準水平的な輸送・混合が促進されること、南半球では周極渦の縁が輸送障壁となり、春までオゾン破壊物質を周極渦の内部に閉じ込めておくこと、などが明らかになった。しかし、これらの研究の多くは現実大気の観測解析データや大気大循環モデルを用いたものであり、成層圏での物質輸送・混合過程に関する理論的な研究は限られていた。一方、1990年代になると、2次元流体中におけるカオスの移流の概念を地球流体に応用する研究がなされたが、仮想的な流れ場を前提とする運動学的手法のものばかりであった。

本研究では、まず、球面上の2次元順圧モデルで成層圏周極渦を想定した流れ場を作り出し、カオスの移流の概念と手法を応用することによって、地球流体力学的な理論的研究と現実の成層圏大気中における物質輸送・混合過程の研究との融合を試みた。有限時間リアプノフ指数の空間分布を求め、微小な領域からの多粒子移流計算に基づいて相関次元を見積もることにより、成層圏極域の大気がカオスの混合の一般的な特徴をもつことをはっきりと示した。また、成層圏大気の4次元同化データを用いた解析により、有限時間リアプノフ指数や閉じたコンターの伸長率が混合の定量的指標として現実のデータでも有効に使えることを実証した。

また、2次元順圧モデルでの多粒子の移流計算により、周極渦の縁だけでなく渦の内部にも輸送障壁が存在することを初めて見出した。ポアンカレ断面図における不変トーラスの縁がこれらの輸送障壁に対応することを示し、これまで知られていたポテンシャル渦度の大きな勾配に対応する輸送障壁とは異なる力学メカニズムでつくられていることを指摘した。これは大気微量成分の空間的不均一性を維持できる新たなメカニズムの提案であり、現実の成層圏周極渦の内部にそのような状況が検出されるならば本研究の意義はより大きなものとなる。また、フィラメント状微細構造の形成過程に対しても、ラグランジュ的な視点からの記述と診断を行なった。

さらに、帯状ジェット気流の強制を変えた実験により、解の非周期性が平均リアプノフ指数で評価した混合の強さやポテンシャル渦度場の微細構造の形成過程に如何に影響するかを明らかにした。また、南半球上部成層圏における9年間分の観測解析データを用いた計算により、周極渦の内部での混合の強さがその領域での大規模な波動擾乱の大きさと高い相関関係にあることを明らかにした。

これら一連の数値モデルおよび観測解析データを用いた成層圏での輸送・混合過程に関する研究は、申請者の視野の広さと力量の高さを立証するものである。また、気象力学および地球流体力学とくに物質輸送・混合過程の力学の発展に寄与するものであり、高く評価することができる。よって、本論文は博士(理学)の学位論文として価値あるものと認定できる。

調査委員会は論文内容とそれに関連した口頭試問を行なった結果、合格と認めた。