

氏 名	た ぐち まさ かず 田 口 正 和
学位(専攻分野)	博 士 (理 学)
学 位 記 番 号	理 博 第 2302 号
学位授与の日付	平 成 13 年 3 月 23 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	対流圏—成層圏結合系の内部変動に関する数値実験

論文調査委員 (主 査) 助教授 余 田 成 男 教 授 廣 田 勇 教 授 木 田 秀 次

論 文 内 容 の 要 旨

大気循環の長期変動は、数週間ないし月程度の時間スケールをもつ季節内変動と、1年周期変化、および、それからの偏差としての年々変動に分けられる。20年以上蓄積されてきた全球大気観測データの解析により、成層圏循環の長期変動は対流圏の変動より大きく、変動の様子が北半球と南半球で大きく異なることが明らかになってきた。このような成層圏循環の年々変動を、太陽活動や火山噴火をはじめとする各種外部強制に対する大気の応答として捉えようとする考え方が多いが、成層圏域の内部変動の重要性を指摘するいくつかの数値実験的研究もある。最近、対流圏と成層圏を切り離して考えるのではなく、それらを相互に力学的影響を及ぼしあっている結合系として捉えて、対流圏—成層圏結合系の長期変動を理解しようとする動きが出てきた。本研究は、簡略化した全球大気循環モデルを用いた一連の数値実験により、対流圏—成層圏結合系の内部変動として生じる季節内変動および年々変動の基本的特性を明らかにしたものである。

本研究では、対流圏成層圏大気大循環モデルの放射過程や微物理過程を簡略化したものに置き換えて、多数回の長時間積分実験を行なった。表面地形も東西には1つの正弦波形で与え、その振幅を実験パラメータとして長時間積分を繰り返すことにより、得られる内部変動が地形振幅に依存して定性的にも異なることを示し、変動のなかでの強制惑星波の相対的役割を系統的に明らかにした。数値実験は、基本的に次の3つの部分から成る：

- (1) 永続的な冬の条件下で行なった、季節内変動に関するパラメータ実験
- (2) 一年周期強制の条件下で行なった、季節進行と年々変動に関するパラメータ実験
- (3) 一年周期強制の条件下で行なった、1000年積分実験

まず、放射的な強制を冬の状態に固定して1000日積分を繰り返し、季節内変動に関するパラメータ実験を行なった。表面地形の東西波数、その振幅、あるいは、放射強制の基本温度場を変えて110通りの実験を行ない、季節内変動のパラメータ依存性を把握した。いずれの実験でも外部条件や境界条件は定常であるが、自励的な不規則変動が得られる。東西波数1の地形振幅を1000mとした標準実験では、極域成層圏において典型的な突然昇温現象が間欠的に10回発生した。対流圏では地形により強制された惑星波が帯状平均東西風や総観規模傾圧擾乱と相互作用して日々変動しているが、そこで増幅した惑星波が成層圏に伝播して突然昇温を引き起こす。また、大きな突然昇温現象後の下方影響も対流圏で数十日に及ぶ事例が得られた。地形振幅を変えたパラメータ実験では、成層圏域の季節内変動が次の4つのレジームに分類できることを示し、それぞれのレジームでの対流圏と成層圏の力学的結合における強制惑星波の相対的重要性を明らかにした。(Ⅰ) 地形振幅がゼロかごく小さな場合、成層圏周極渦はいつも放射平衡状態に近く、強く冷たい。このレジームでの成層圏の変動は、対流圏の傾圧擾乱の空間変調によって励起された惑星波の上方伝播によって引き起こされる。(Ⅱ) 地形振幅が小さな場合、周極渦はわずかに波打つ。成層圏の変動はそこでの惑星波と帯状平均流の弱非線型相互作用により起こり、対流圏変動とは比較的独立している。(Ⅲ) 地形振幅が大きな場合、周極渦は間欠的に崩壊し、成層圏突然昇温が起こる。標準実験はこのレジームに属するが、突然昇温の発現を反映して対流圏と成層圏は双方向に結合している。(Ⅳ) さらに大きな地形振幅の場

合、周極渦はたえず弱く暖かい。対流圏と成層圏の結合はやはり双方向的である。

つぎに、一年周期の放射強制を導入したパラメータ実験では、上の4レジームからそれぞれ2、3例をとりだし、合計10例について100年積分実験を繰り返した。毎日のデータを100年分平均し、成層圏循環の平均的季節進行のレジーム依存性を明らかにした。地形振幅を大きくするにつれて、成層圏に伝播する惑星波が大振幅となり、帯状平均東西風の減速効果も顕著になる。同時に、極域の温度は放射強制温度より高くなる。また、このような惑星波の影響が大きい時期もレジームに依存し、(Ⅱ)では春に、(Ⅲ)(Ⅳ)では真冬から春先にかけて大きい。この平均的季節進行からの偏差である年々変動についても調べ、やはり惑星波の活動が大きな時期に年々変動も大きくなっていることを示した。地形振幅が小さなレジーム(Ⅱ)での季節進行と年々変動は現実の南半球でのものに近く、一方、レジーム(Ⅲ)の変動は北半球でのものに似ている。これらの年々変動における対流圏と成層圏の結合の様子については、月平均データのラグ相関解析と主成分解析により調べ、成層圏突然昇温現象に関連した一連の変動であることを見出した。突然昇温の1ヶ月前には対流圏と成層圏で惑星波が増幅し、対流圏ジェットと極夜ジェットはともに極向きにシフトする。そして、突然昇温後には帯状平均東西風と惑星波振幅の偏差が数ヶ月の時間スケールでさらに極向き下向きに伝播する。両レジーム間の違いは、おもに突然昇温の出現時期の遅早である。

さらに、統計的に信頼できる議論をするために、(Ⅱ)(Ⅲ)から1例ずつを選び1000年積分実験を行なった。標本数が多く統計的な議論ができることを活かして、成層圏極域温度の月平均値の頻度分布からそれぞれの年々変動の特徴の詳細を明らかにした。南半球的な(Ⅱ)の場合、頻度分布は秋から春の長い期間にわたり正の歪度を持ち、特に初春に歪度が大きくなる。一方、北半球的な(Ⅲ)の場合、秋には正の歪度を持つ頻度分布であるが、冬には2つのモードを持つ分布となる。また、北(南)半球的な場合の実験で暖かい冬(春)の年々の時系列を統計的に調べたところ、それらが年々ランダムに発現することを見出した。さらに、成層圏の年々変動が一年をとおして進行する様子を主成分解析により調べ、これら2つの場合における相違点を指摘した。すなわち、北半球的な場合には、ひと冬をとおして成層圏が暖かいのか寒いのかの変動が卓越し、より短かな時間スケールの季節内変動や最終昇温も重要である。一方、南半球的な場合には、冬から春にかけての季節進行のタイミングが早いか遅いかが支配的な変動となる。

論文審査の結果の要旨

成層圏循環の長期変動は突然昇温現象の生起に大きく依存するが、大昇温現象の出現頻度は2～3年に1度であり、過去に観測された事例は20に満たない。その出現が太陽活動などの外部強制に依存するという主張もあるが、観測データの短さから統計的有意性の議論が十分には行なわれていなかった。一方、実験条件をコントロールできるという数値実験の特徴を活かして、たとえ外部強制が一定でも成層圏域の非線型内部力学過程による長期変動が可能であると主張する研究もあるが、極度に簡略化した低自由度の数値モデルを用いたものであった。逆に、現実大気を模する大気大循環モデルを用いて同様の数値実験をしようとしても、今日の計算機環境では気軽に100年や1000年の長時間積分を繰り返せるわけではない。このような現状認識のもとに、申請者は、大気大循環モデルの放射過程や微物理過程を簡略化してメカニスティックな大気循環モデルとし、実験パラメータを変えて長時間積分を繰り返すことにより、大気循環の内部変動に関する系統的な数値実験を行なった。大規模大気力学過程は陽に表現できるモデルで、外部条件を変えて100通り以上の実験を繰り返したり、1000年間という長期間の積分実験を初めて行なった。このような階層の数値モデルを用いた成層圏循環変動の基礎過程に関する実験的研究は過去に例がなく、この論文は新たな数値実験方法の提案ともなっている。

永続的な冬の条件下での季節内変動に関する実験、および、一年周期強制の条件下での季節進行と年々変動に関する実験では、表面地形の振幅を実験パラメータとして多数回の長時間積分を繰り返し、得られる変動の特徴が地形振幅にどのように依存しているかを詳細に解析した。地形の振幅が小さな場合でさえ非線型性の強い内部変動なので、これらの問題では小刻みなパラメータスイープ実験が必要であることを明示した。従来、現実大気の季節進行と年々変動に関する南北両半球の比較のなかで、対流圏で強制され成層圏に伝播する惑星波の相対的な重要性が指摘されてきたが、この研究では、惑星波の地形強制の大きさを変えた一連の数値実験で、年々変動の特徴が南半球的なものから北半球的なものへと徐々に変化していく様子を明瞭に示すことができた。力学過程の詳細な解析は今後の課題として残っているが、季節進行と年々変動における

強制惑星波の役割を初めて示した実験として高く評価できる。

また、地形強制が小さな場合と大きな場合の2例に絞った1000年積分実験では、十分に長いデータで統計的信頼性の議論を行なっている。成層圏極域温度の月平均値の頻度分布を例として、平均や標準偏差などの低次のモーメントは数百年程度の比較的短いデータでも少ない誤差で求められるが、歪度のような高次のモーメントを同程度の長さのデータで求めると誤差が大きいことを指摘した。また、年々変動が大きな季節には頻度分布の歪度が大きくなり、北半球的な場合には2つのモードを持つ分布となることを明瞭に示した。成層圏の年々変動の統計解析では、観測データの解析であれ大気大循環モデルを用いた実験であれ、従来、正規分布を前提として有意性を検討することが多かったが、これらの結果は、そのような正規分布の仮定をする検証法に警鐘を鳴らすものである。

対流圏と成層圏が力学的に結合し相互に影響を及ぼし合う系であること、および、そのような結合系の変動が大気循環の長期変動の重要な成分であることが、近年のいくつかの観測的研究により指摘され始めた。そのような流れを受けて、この研究では対流圏—成層圏結合系の内部変動に焦点を絞った数値実験的枠組を他に先駆けて提案した。現実大気の変動を考えるとときには、当然、さまざまな外部強制に対する大気の応答を考えなければならないが、それは変動量の分布関数の変化として認識されるはずである。この研究は、そのような今後の外部強制実験の基礎となるものでもある。

これら一連の数値実験的研究は、申請者の力量の高さを立証するものである。また、気象力学とくに対流圏成層圏域の長期変動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、平成13年1月29日、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。