

氏 名	ほりのうち 堀之内 武
学位(専攻分野)	博 士 (理 学)
学 位 記 番 号	理 博 第 1811 号
学位授与の日付	平 成 9 年 3 月 24 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	Excitation of waves by organized cumulus convection and their interaction with the mean flow in the equatorial middle atmosphere (大気波動の積雲対流による励起と赤道域中層大気平均流との相互作用)
論文調査委員	(主 査) 教 授 廣 田 勇 教 授 木 田 秀 次 助教授 余 田 成 男

論 文 内 容 の 要 旨

赤道域で励起されて伝播する大気波動の力学は、この領域でコリオリ・パラメータが小さく、その緯度変化が大きいことに強く規定されている。ケルビン波やロスビー重力波のような赤道域固有の波動が存在し、平均流との相互作用では中・高緯度域と大きく異なる様相を示す。具体的には、成層圏赤道域東西風の準2年周期振動現象(QBO)が知られている。大気波動理論の発展により定性的な記述は可能になりつつあるが、実際に励起される波動の定量的把握やQBOに対する寄与など、依然として不明な点が多く残されている。この申請論文は、線型数値計算、非線型力学モデルの時間積分、および、単純化した大気循環モデル(GCM)の長時間積分という解析・実験手段を駆使して、赤道域における大気波動の励起と中層大気平均流との相互作用に関する定量的解析を行ない、それらの結果を提示したものである。

赤道域の大気波動は、おもに組織化した積雲対流活動に伴う加熱によって励起されているので、本論文では、まず、熱帯に局在した非定常な加熱を与えて、それに対する静止大気の応答を理論的に調べ、応答の時間発展や波動のエネルギーと運動量のスペクトル分布が加熱のパラメータにどのように依存しているかを明らかにした。球面上のプリミティブ方程式系を線型化して変数分離法を用いて問題を解いたことが特徴である。鉛直構造方程式の解析により応答の一般的性質を調べることができ、以下の点が明らかになった：卓越する応答は、赤道域に捕捉された鉛直伝播性波動と、全球的な非伝播性ノーマルモードである。前者の鉛直スケールは加熱のスケールの2倍程度であり、散逸の効果に依存して、ある振動数帯で極大の応答をとる。

また、理想化した確率論的な加熱過程の一試行として、時空間にガウス型をした加熱に対する応答の空間パターンを調べて、加熱の時間スケールに依存する二つのパターンに分類した。加熱の時間スケールが数日以上の場合には、応答の水平断面は初期にはGill(1980)のパターンを示し、やがて低緯度域で東西に広がる。一方、短い時間スケールの加熱の場合には、重力波が同心円的に広がり、やがてやはり低緯度

域で東西に応答が広がる。この解析ではラプラスの潮汐方程式を解いて木平構造を求めているので、ケルビン波、ロスビー波などそれぞれの波の種類に分けて応答を調べることが可能となり、励起された各波動のエネルギーおよび運動量の加熱時間・空間スケールに対する依存性を明らかにできた。また、現実的な強さの加熱に対して応答が線型的であることを確認した後、熱帯の潜熱放出総量に相当する現実的な加熱量で、観測される鉛直伝播性波動のエネルギーや運動量の大きさが再現できることを示した。同様に、ノーマルモードのエネルギーについても現実的な大きさの応答が得られた。

このような静止大気の線型解析により、加熱域に近い場所での応答は知ることができるが、遠く離れた領域への波動伝播は、現実大気の数値場・温度場や散逸過程に大きく依存する。そこで、高精度の放射スキームを組み込んだ全球の非線型プリミティブ方程式モデルを用いて、熱帯対流圏に局在した非定常な加熱によって励起された波動の中層大気への伝播と帯状平均場への作用を調べた。まず、春・秋分の帯状平均場の応答が上述の静止大気の線型応答と類似したものであることを示した後、この帯状平均場に QBO の異なる位相を重ねた 2 つの初期場を用いて、波動の伝播と帯状平均場に及ぼす作用を比較した。QBO の西風シアー期には、加熱のパラメータ値を少々変えても現実的かやや弱い程度の QBO 域の西風加速が得られる。一方、東風シアー期には、加熱の時・空間スケールが約 1 日、数千 km より大きいと、現実的な大きさの東風加速は得られない。このとき加速はおもにロスビー重力波とロスビー波によって為されているが、それらの振幅が現実の説明には十分でないことになる。加熱の時・空間スケールが小さければ、高波数の重力波が効果的に励起されて、現実的な大きさの東風加速をもたらす。

QBO の影響は、重力波伝播の変調を介して赤道域成層圏のみならず中間圏や中・高緯度域にも及ぶことが、一連の計算により明らかになった。QBO に同期した重力波の伝播経路等の変化に伴い、中間圏では中・低緯度に広がる運動量フラックス収束の変化が生ずる。この結果は、最近、上層大気探査衛星で発見された中緯度域にまで広がる中間圏 QBO を説明しうるものとなっている。また、ここで得られる全球ノーマルモード「5 日波」は QBO の位相に敏感であるが、そのような QBO 依存性は観測されていないので、現実大気中の 5 日波の励起源は熱帯域だけでなく中・高緯度にも求められるべきであることを示唆した。

以上の線型計算と非線型モデル実験では、組織化した積雲対流活動の効果を加熱項として外部から与えて解析した。しかし、現実の積雲対流活動は内部力学過程で自己組織化され、その時空間構造が決まっている。このように系の内部で波動が励起され、平均流と相互作用する過程を調べるために、1400 日以上にわたる GCM の長時間積分を行なった。モデルは、全波数 42 で切断したスペクトルモデルで鉛直分解能は成層圏で約 700 m である。単純化して全球が一定温度の海洋に覆われていると仮定し、積雲活動は湿潤対流調節スキームで表現した。長時間積分の結果、Takahashi (1996) に次いで QBO のシミュレーションに成功した。彼は水平拡散係数を一桁以上小さくしたが、今回の実験ではその必要がなかった。ここで得られた QBO の強さや時空間構造は現実大気と良く似ているが、その周期は 400 日と短い。しかし、この問題については、中・高緯度の下端条件を現実的なものにするによって誘起される子午面循環の効果を考慮することで、より現実的な周期になると推察できる。

このモデルで得られた赤道域下部成層圏における波動の詳細な力学解析により、以下のようなことが明

らかになった：波のエネルギーは現実に観測される値よりやや大きい。卓越するのは、等価深度が約200 m と40～100 m の重力波である。QBO に関与する運動量輸送の半分は赤道対称の基底モードによって行なわれている。すなわち、西風運動量はケルビン波、東風運動量は $n=1$ の重力波である。これらの東西波数は2～30の広い範囲にわたり、周期は1～3日のものが卓越する。位相速度の分布も連続的であり、かなりの成分が臨界高度をもっている。このモデルでQBOの加速に大きく寄与するのは流れからみた位相速度が小さな重力波であり、その鉛直波長は短い。この波の効果を正しく表現するには700 m 程度の鉛直分解能が必要であり、これまでのGCMでQBOが再現できなかった理由が赤道域の鉛直分解能不足であったことがこの実験により明らかになった。

論文審査の結果の要旨

赤道中層大気波動の力学と波動—平均流相互作用の問題は、1960年代初頭の赤道成層圏東西風準2年周期振動現象（QBO）の発見以来、30年にわたり議論されてきたが、観測の困難さと数値モデルの不完全さのため、現在でもなお、未解決の問題が多々存在している。

申請者は、この問題に対し、線型理論、非線型力学方程式系の数値時間積分、および簡略化した大気循環モデル（GCM）の長時間積分、の手段により、赤道成層圏力学の新しい局面を開拓することに成功した。

まず、波動の励起に関しては、球面上のプリミティブ方程式を線型化して、積雲加熱による大気の応答を計算した。その結果、赤道域固有のケルビン波、ロスビー波、重力波のそれぞれについて、波動の垂直伝播特性および波の持つエネルギーや運動量の大きさを定量的に示すことが出来た。また非線型方程式の数値解と比較し、波動の応答が線型理論でかなり良く表現されていることを確認した。これらの成果は、従来個別に行なわれてきた赤道波動論を統一的に理解する上で重要な貢献であると言える。

申請者はさらに、海水温度一定などの簡略化をした大循環モデルを用いて、対流活動により励起される各種赤道波の作用により平均帯状流が現実のQBOと同様の振動を示すことの数値シミュレーションに成功した。この成果の意義は、単にQBOの数値的再現にとどまらず、その振動を生み出す波動の力学的作用を詳細に解析し、各種波動のQBOにおける寄与の割合を定量的に明らかにした点にある。従って、この数値実験は、これまでの諸研究に比較して、赤道QBO理論に新しい発展をもたらしたものとして高く評価することが出来る。

これら一連の理論計算と数値実験の内容、およびそれに対する波動力学的解釈は、申請者の高い力量を立証するとともに赤道中層大気力学に優れた貢献を与えたものであり、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9年1月14日に、論文内容とそれに関連した口頭試問を行った結果、合格と認めた。