

論文審査の結果の要旨

氏名 南原 優一

中層大気大循環は対流圏起源のロスビー波と重力波による運動量の再分配により駆動されると考えられてきた。しかし、近年の高分解能観測や高解像大気大循環モデルによる研究から、運動量の再分配がなされる過程で場が力学的不安定や非平衡となり、中層大気中でロスビー波や重力波が発生してさらなる運動量の再分配がおり、大循環を変調させることが断片的にわかってきた。このように、中層大気理解には、様々なスケールのロスビー波と重力波の共働を含む大気階層構造の理解が不可欠である。特に、オゾンホール規模にも関係する南半球冬季極渦の形状や変動には高緯度の重力波の重要性が指摘されているが、自然環境の過酷さから観測は容易ではなかった。このような背景の中、南極昭和基地に設置された大型大気レーダーである PANSY レーダーを用いて、申請者は、第 60 次南極地域観測隊越冬隊員として、2019 年に 2 種類のキャンペーンを実施した。得られた高精度・高分解能な観測データと重力波を解像する高解像度大気大循環モデルを用いた再現実験に基づき、Kelvin-Helmholtz (KH) 波から極渦までの広い時空間スケールに亘る南極大気階層構造の定量的理解を目的とする研究を行った。

第 1 章のレビューに続き、第 2 章では、KH 波から総観規模波動にわたる、南極大気階層構造のうち、比較的小スケールの現象に着目した力学研究を行った。2019 年 3 月と 8 月に、各 10 日間にわたり、PANSY レーダーの高機能性を活かした KH 波を検出可能な南極初の周波数領域干渉計 (FII) 観測と重力波を捉えられる標準観測を交互に行い、ラジオゾンデ同期観測も実施した。まず、エコー強度と鉛直風の時間高度断面から KH 波に特徴的な S 字型構造を 73 例検出した。このうち継続時間が長かった Case A の KH 波は、発達した低気圧に伴う強い地上風で励起された地形性重力波が作る強い鉛直シアによって持続的に励起される一方、深い構造を持つ Case B の KH 波は、同じ低気圧に伴う上部対流圏のジェットによって励起されることが示唆された。観測された KH 波の構造や波長は線形安定性解析の結果と調和的であった。KH 波の発生源と考えられる強い低気圧や強い地形性重力波は、いずれも冷たく急峻な南極大陸斜面に関連するものであり、南極沿岸部の典型的な事例であると考えられる。

第 3 章では、重力波から極渦にわたる、南極大気階層構造のうち、比較的大スケールの現象に着目した研究を行った。南極では珍しい 2019 年 9 月に発生した成層圏突然昇温を捉える PANSY レーダーとラジオゾンデの同時観測を実施した。この観測データと、下部熱圏をトップとする JAGUAR-DAS 大気再解析データ、および高解像度大気大循環モデル JAGUAR を用いた再現実験データを組合わせて、突然昇温に伴う大気階層構造の変動を詳しく解析し

た。まず、JAGUAR では、重力波の振幅変動はよく再現されているものの運動量フラックスは観測値の 1/5 程度と過小評価されていることがわかった。また、運動量フラックスの東西成分は、突然昇温発生前には極渦周りで負の値をとっていたが、突然昇温後には極渦の低緯度側へのシフトに伴い、正の領域が現れることも分かった。

さらに、この期間、南極域中間圏以上で顕著に見られた振幅の大きなロスビー波である東西波数 1 の準 6 日波 (Q6DW) に着目し、力学特性と発生機構について東西平均場および重力波との相互作用の観点から詳細に調べた。Q6DW は東向き (Q6DW-E) と西向き (Q6DW-W) の位相速度成分に分けられ、それぞれ突然昇温前と後に卓越していた。Q6DW-E と Q6DW-W は傾圧的で、ノーマルモード 5 日波とは異なる構造を持つ。Q6DW-E は高度 60-80km に見られ、傾圧不安定波であると考えられること、Q6DW-W は高度 40-60km に見られ、順圧・傾圧不安定な場から発生した内部ロスビー波と考えられることを示した。これらの順圧・傾圧不安定な場はいずれも下向きの残差循環による成層安定度の極大がもたらしており、突然昇温前は、ロスビー波と重力波による負の強制 (西風減速) が、突然昇温後は、Q6DW-E と重力波による正の強制 (西風加速) と対流圏からのロスビー波による負の強制が不安定な場の形成に寄与していた。

本研究は、自ら観測を計画・実施し、得られたデータを解析するとともに、理論的な線形安定性解析や高解像度大気モデルによる数値実験を組み合わせ、南極域上空の各種波動の発生や相互作用を調べたもので、南極大気の階層構造を理解する上で有益な気象学的知見を提供している。今後、事例の蓄積による普遍性の確認が必要であるが、本研究は貴重な事例として参照されることになると思われる。本論文の第 2~3 章の内容は、佐藤薫氏ほか 2 名の共同研究者との共著論文として投稿予定であるが、これらはすべて申請者が筆頭著者であり、主体となって観測、計算および解析をおこなったものであるため、申請者の寄与が十分であると判断される。

上記の理由から、博士 (理学) の学位を授与できると認める。