

氏名・(本籍)	おおつかきよとし 大塚清敏
学位の種類	博士(理学)
学位記番号	理第1064号
学位授与年月日	平成7年11月29日
学位授与の要件	学位規則第4条第2項該当
最終学歴	平成元年3月 東北大学大学院理学研究科 (博士課程)地球物理学専攻退学
学位論文題目	Katabatic Wind and Meridional Circulation, and Their Roles in the Heat Balance of the Antarctic Troposphere in the Polar Night - Numerical Experiments with an Axisymmetric Model - (カタバ風、子午面循環の南極極夜の対流圏熱収支にお ける役割一軸対称モデルによる数値実験)
論文審査委員	(主査) 教授 田 中 正 之 教授 近 藤 純 正 教授 中 澤 高 清 教授 安 田 延 壽

論 文 目 次

謝辞

第1章 序論

第2章 モデルに関する記述

- 2. 1 計算領域および南極大陸の近似的表現
- 2. 2 支配方程式系
- 2. 3 パラメタリゼーション
 - 2. 3. 1 大気境界層の乱流
 - 2. 3. 2 赤外放射
- 2. 4 解法
 - 2. 4. 1 計算格子と支配方程式の差分表示
 - 2. 4. 2 サブグリッドスケールの水平拡散

2. 4. 3 時間積分スキーム

2. 4. 4 初期条件

2. 4. 5 境界条件

第3章 数値実験とその結果

3. 1 南極大陸上の流れと温度場の発達

3. 1. 1 計算条件に関する付加的説明

3. 1. 2 結果

3. 1. 3 地上風の観測と比較

3. 2 熱収支

3. 3 定常的なカタバ風と子午面循環の維持機構

3. 3. 1 海陸間の熱的コントラストが存在しない場合のカタバ風および子午面循環の発達

3. 3. 2 カタバ風と子午面循環の関係に関する考察

第4章 敏感度試験

4. 1 序論

4. 2 極向きの渦熱・運動量輸送が南極の帯状平均場に与える影響について

4. 2. 1 計算条件

4. 2. 2 モデルの応答

4. 3 重力波抵抗が南極の帯状平均場に与える影響

4. 3. 1 平均流に与える重力波抵抗の影響

4. 3. 2 モデルの応答

4. 4 本章の考察

第5章 結論

参考文献

図版

論文内容要旨

第1章 序論 (研究の背景)

本研究は、軸対称プリミティブモデルを用いて、南極大陸上の斜面下降風 (カタバ風)、子午面循環の形成・維持機構、および、それらの南極対流圏の極夜の熱収支における役割について考察したものである。冬季の南極では、大陸斜面の強い放射冷却に起因する接地逆移転層と、その中を吹くカタバ風が大陸スケールで発達している。カタバ風は、大気最下部における南極大陸からの空気の正味の流出をもたらすので、カタバ風層の上の対流圏中・上部には質量欠損を補う補償流としての極向きの流れが励起され、結果として子午面循環が形成される可能性がある。こうした考えに基づき、2次元の軸対称モデルを用いて、南極大陸表面の放射冷却が引き起こす斜面下降風、および対流圏内の子午面循環の形成に関する数値的実験がこれまでいくつか行われた。しかしそれらの研究ではカタバ風-子午面循環は維持されずに systematic に減衰し、最終的には極渦が強められ、帯状風のみが残るといった結果が得られていた。こうした結果は、カタバ風の定常性やそれが有意な斜面下降成分を有するという観測事実と反している。一方において、従来の数値実験的研究から得られた見解とは逆に、定常的な子午面循環の存在を示唆する現象が存在する。南極大陸上の冬季の特異な気温推移現象は、そのうちの1つである。大陸内部では、月平均の地上気温が冬の期間中ほぼ一定に保たれている。明瞭な年最低気温月の定義が困難であるということで、こうした気温推移現象は coreless winter と呼ばれている。さらに、大陸の地上における下向き放射の季節変化から、気温の水平的な推移現象は、南極の対流圏全体の深さにおよんでいるとされている。冬の南極では入射日射が僅少あるいは皆無であるので、こうした気温推移を維持するには、大気-地表面系の赤外放射冷却と釣り合うだけの熱が、大気の運動によって沿岸部から大陸内部へと輸送されていなければならない。一般に、中・高緯度地域の子午線方向の熱輸送は、傾圧波のような移動性の擾乱によるが、南極では大陸内部への低気圧侵入は少なく、そのため、定常性の高い平均子午面循環が大陸上で下降流をもたらすが、雲量が内陸ほどすくないという観測事実もそうした子午面循環の存在を支持している。本研究では、軸対称の2次元のプリミティブモデルを用いて、定常的なカタバ風および子午面循環の可能性について検討し、それらの冬季の南極対流圏の熱収支における役割について考察する。さらに、軸対称の仮定の妥当性についても議論する。

第2章 モデルに関する記述

計算対象領域は、南極を中心に半径3000km、上端が200mbの円柱の内部である。南極大陸は、最後部3800m、半径1500kmの軸対称大陸としてモデル化され、その断面形状は東南極の100E線付近の地形断面を近似したものになっている。支配方程式は、円柱座標で記述され、軸対称を仮定した静水圧平衡プリミティブ方程式系であり、差分法で解いた。大気中の赤外放射伝達は、全赤外領域で平均化された放射伝達方程式を解くことによって取り扱った。大気境界層は、接地層とエクマン層とからなると仮定した。接地層では、Monin-Obukhov の相似則が成り立つと仮定して地表面の摩擦応力および熱フラックスを算定し、エクマン層内の渦拡散係数は Brost and

Wyngaard (1978) に従って与えた。初期条件は、静水圧平衡にある水平方向に一様な静止大気を仮定した。初期条件における温度の鉛直分布は、南半球65Sの冬季3カ月間の帯状平均温度分布(Oort(1983)) を与えた。

第3章 数値実験およびその結果

本章では、3種類の30時間積分を行った。それぞれ Run1、Run2、Run3と称す。Run1は、control runである。また、Run2、Run3は、カタバ風—子午面循環系の定常的な維持機構を調べるために行った。また、Run1では、熱収支の診断も行った。計算条件は、次のようにした。

Run1：南極大陸沿岸部および周辺海上の大気（対流圏）は、低緯度からの低気圧の侵入による極向きの熱輸送や海洋の大きな熱慣性によって、冬季でも気温の低下率が非常に小さい（約-0.02 K/day）。したがって、Run1では、南極大陸周辺の海洋部分の地面の温度を強制的にほぼ一定に保つようにして、時間積分を実施した。この場合、大気の運動の駆動源は、南極大陸斜面の放射冷却と海陸間の大規模な熱的コントラストの2つになる。

Run2：Run1で導入した海陸間の熱的なコントラストを除外し、純粋に斜面の放射冷却のみによる流れの場の時間発展を調べた。

Run3：定常な子午面循環の形成にカタバ風の存在が不可欠であるか否かを調べるために、人為的にwell definedなカタバ風の発達を抑えるような計算条件を課して時間積分を行った。この場合、運動の主たる駆動源は、海陸間の熱的コントラストになる。

以上の計算条件に従って時間積分を実施した結果、以下のことがわかった。

Run1の結果

(1) 30日間の時間積分によって、定常なカタバ風—子午面循環が再現できた。従来の軸対称モデルでカタバ風—子午面循環の体系的な減衰が見られていたのと逆の結果である。計算で得られたカタバ風は、南極大陸で観測されるカタバ風の特徴をよく捉えたものであり、また、南極大陸上の接地逆転層も現実的なものが再現された。子午面循環に伴う下降流は2-3mm/sが支配的であり、下降流に伴う断熱圧縮は、大気の赤外放射冷却をほぼ相殺していた。時間積分開始後20日目以降は、系は、ほぼ定常に達し、地面およびその上の大気の水平的な温度推移が実現した。

(2) 定常状態では、系はほぼ熱平衡の状態になった。

- ・地面では、正味放射放射冷却と乱流顕熱輸送による加熱とが釣り合っている。
- ・カタバ風層内部では、放射、乱流顕熱輸送、内陸からの移流による冷却と、平均下降流による加熱とがほぼ釣り合っている。
- ・カタバ風層より上の自由大気中では、放射冷却は、子午面循環による熱輸送でほぼ補われている。

Run2およびRun3の結果

- ・斜面の放射冷却のみでは、定常な斜面下降風および子午面循環は維持できない (Run2)。
- ・海陸間の熱的なコントラストはそれ自身で、十分な強さの子午面循環を引き起こす。子午面循環の形成には、斜面下降風は必ずしも必要とはいえない (Run3)。

- ・南極大陸上の対流圏のカタバ風と子午面循環は、大陸斜面の放射冷却と海陸間の熱的なコントラストの両方によって駆動・維持される。従来の研究では、前者のみを重視し、後者の影響を十分に考慮しなかったことが子午面循環の減衰につながったものと考えられる。

第4章 敏感度テスト

本研究では、系の軸対称性を仮定しているが、子午面循環の強度には非軸対称成分の寄与も無視できない。準地衝風理論によれば、子午面循環は、非断熱加熱（放射、潜熱放出）の南北差、子午線方向の渦熱輸送の収束量の南北差、渦による極向きの西風運動量輸送の収束（西風加速）の鉛直勾配、局所的な摩擦（重力波抵抗、境界層内抵抗等）によって、その強さが決まる。各強制力のうち、非断熱加熱の南北差、および境界層内の摩擦は、Run1において取り入れているが、西風運動量や熱の擾乱による南北輸送、重力波抵抗の影響はこれまで考慮されなかった。ここでは、それらの効果をそれぞれ別々に外力として与え、モデルの応答を調べた。その結果、これらの影響は無視し得るほど小さくはないが、大陸上の子午面循環の形成要因としては二義的であることがわかった。また、これらは、大陸上の循環場に対し、現実に見られるような経度方向の不均一性をもたらすが、極夜における大陸上の大気循環やそれによる熱収支は、帯状平均的な性質でかなり説明できるであろうということが示された。

論文審査の結果の要旨

極夜期間の南極大陸では、太陽光の入射がないにもかかわらず、地表や対流圏の気温が極夜の初期に一定水準に達し、極夜期間中ほぼ一定に保たれるという興味深い現象が知られており「核のない冬」(coreless winter)と呼ばれている。この現象は、南極大陸の放射冷却を相殺する中・低緯度からの熱輸送があり、極夜期間を通じてほぼ一定の定常状態が実現しているためと考えられるが、その詳細は従来の多くの研究にもかかわらず、まだ解決されていない。

大塚清敏提出の論文においては、赤外放射の伝達、乱流顕熱輸送等の物理課程を従来によりはるかに詳細に考慮した二次元軸対称数値モデルを構成し、極夜期間中の定常的なカタバ風(斜面滑降風)と子午面循環をはじめて現実的な姿で再現するとともに、それら風系の維持機構およびそれが極夜の南極の特徴的気候の形成・維持に果たす役割を明らかにしている。この研究で得られた重要な知見の一つは、カタバ風と子午面循環の関係である。従来は、南極氷床斜面の冷却によりカタバ風が励起され、その補償流として対流圏全層に及ぶ子午面循環が生じて定常的な極夜の気候が維持されるというのが大方の見解であった。しかるに、本研究の詳細な検討により、斜面冷却のみでは、カタバ風の斜面下降成分も補償流としての子午面循環も維持できないこと、子午面循環は南極大陸と大陸周辺部との間の熱的コントラストにより、熱的な直接循環として励起されること、および子午面循環による内陸への質量輸送が、カタバ風の大陸周辺域への質量輸送を補償して、カタバ風を維持していることが明らかにされている。この研究は気象学の発展に寄与するものであり、著者が自立して研究活動を行うに必要な高度の学識と研究能力を有することを示している。よって大塚清敏提出の論文は博士(理学)の学位論文として合格と認める。