

小スケール山岳地形による山岳波の励起と上部中間圏への伝搬過程の研究

メタデータ	言語: Japanese 出版者: 公開日: 2023-05-31 キーワード (Ja): キーワード (En): 作成者: 石井, 智士 メールアドレス: 所属:
URL	http://hdl.handle.net/10291/00023143

2022年度 理工学研究科

博士学位請求論文（要旨）

小スケール山岳地形による山岳波の励起と上部中間圏への伝搬過程の研究

物理学専攻

石井 智士

1 問題意識と目的

浮力と重力を復元力として大気中を伝搬する大気重力波（水平スケール数 10 km～1000 km）は下層から中層、高層大気へ運動量を輸送する働きがあり、この運動量は中層および高層大気における地球規模の大気循環の主要な駆動源であると考えられている。したがって、大気重力波が下層大気で、いつ、どこで、どのように励起され、どの程度上層へと伝搬するかを明らかにすることは、地球の大気循環を理解するうえで重要である。山岳地形に風が吹き付け、山を乗り越える際に空気が持ち上げられて励起される地形性大気重力波は、特に山岳波と呼ばれる。山岳波の励起源は地上に固定されていることから、季節変動する下層風と相まって、中層、高層大気循環に一定の規則性を与える重要な因子であると考えられている。先行研究では、高解像度な地球の全球大気モデルを用いた数値実験により、アンデス山脈や南極半島といった東西方向に数 100 km、南北方向に数 1000 km の水平スケールを持つ広大な山岳地形が、成層圏～下部熱圏領域（高度 15 km～120 km）に当たる中層大気に運動量を輸送する山岳波の励起源として重要であることが示唆されている。これらの広大な山岳地形で励起される山岳波については、地上観測、航空機観測、衛星観測により、その励起・伝搬過程および上空へ輸送される運動量フラックスが定量的に明らかにされてきた。

一方、現在の地球大気モデルでは、高解像度なものでも水平スケールが最小で数 10 km の大気重力波を直接表現できず、時空間分解能が粗いという問題がある。そのため、多くの地球大気モデルでは、大気重力波の効果を間接的にモデルに取り入れるパラメタリゼーションという手法が取られている。ただし、山岳波のパラメタリゼーションにおいては、山岳波は世界中の山岳地域で一様な頻度で励起される、伝搬条件を満たす場合には瞬時に中層、高層大気まで伝搬する、励起源から鉛直方向にのみ伝搬する、といったように山岳波の励起・伝搬過程が仮定された状態でモデルに組み込まれているため、モデルと現実の大気循環との間には乖離があり、観測と一致しない部分がある。したがって、観測による研究においては、どこまで空間スケールの小さな山岳地形が上層大気に伝搬する大気重力波の励起に寄与しているかを明らかにすることが期待されている。しかし、これまでに水平スケールが 100 km 未満の小さな山岳地形によって励起される山岳波に着目し、励起源となる地形の形状、地形と背景風速場との関係、励起される波動の性質を網羅的に研究した例は少ない。

本研究の目的は、これまで観測例が少なく地球大気循環に与えるトータルの影響が定量的に明らかでない、水平スケール 100 km 未満の小スケール山岳地形による山岳波の励起・伝搬過程を解明することである。上部中間圏領域で発光する OH 大気光の地上観測により下層から中層大気に伝搬する山岳波の特性を捉え、衛星観測データの解析および地形データと背景風速データの解析により、山岳波の励起特性を明らかにする。

2 構成及び各章の要約

本論文の1章では、導入として地球大気分野の研究背景および、本研究の目的を述べる。大気力学の方程式から線形理論に基づいて大気重力波の分散関係式を導出し、大気重力波および山岳波が下層大気で励起され、中層、高層大気へ鉛直伝搬するために必要な背景大気場の条件について述べる。また、地球の全球大気モデルを用いた数値実験で中層大気に運動量を輸送する山岳波の励起源を推定した先行研究、山岳波の主要な励起源として認識されているアンデス山脈で実施された観測研究を紹介する。そして、本研究で実施したOH大気光観測の概要、観測拠点周辺の山岳地形の特徴と本研究の観測で検出が期待される山岳波の特徴について記述する。

2章では、上部中間圏領域で発光するOH大気光の励起発光機構および、大気光を超高層大気擾乱のレーザーとして地上から高感度なカメラを用いて観測する大気光イメージング観測の手法について詳細に説明する。明治大学生田キャンパスで実施したOH大気光イメージング観測では、冷却CCDカメラ、干渉フィルタ、円周魚眼レンズで構成された観測装置を使用した。観測装置の諸元と観測視野、観測の設定を示し、2018年5月から2019年12月まで実施したOH大気光イメージング観測の総観測時間と有効な観測データが取得できた時間をまとめ、解析対象のデータセットについて述べる。

3章では観測で取得した観測データ(大気光画像)の解析手法について述べる。本研究では、PCで観測装置を制御して日没から日の出まで自動スケジュール観測を行ったため、観測は気象条件に依らず毎晩実施した。OH大気光は高度約85kmに発光のピークを持つため、地上の天気が曇天の場合には、地上から観測することができない。観測で取得した画像データの中から解析可能な有効データを選別する手法を述べる。

また、大気光画像から山岳波を検出する手法を述べる。山岳波は対地位相速度を持たないという性質があり、地上からは停滞しているように観測されるため、原理的には、時間的に連続して取得した画像を積算することで、その波動構造が明瞭になる。しかし、実際には大気光が層状の発光源であるために生じる、観測高度角が低いほど明るく観測される効果(van Rhijn効果)や大気による光の吸収・散乱による減光、観測装置の感度が非一様であることなどが影響し、単純に積算しただけでは停滞性の波動構造が明瞭にならない場合がある。本章では観測データからこれらの影響を取り除く解析手法の詳細を述べ、取得した大気光画像に適用した結果を示す。これらの解析画像を精査した結果、約1年8カ月間のOH大気光観測において、明瞭な山岳波の検出は1例のみであった。この検出率は、これまでに先行研究で実施されたアンデス山脈における大気光観測による山岳波検出率と比較して低いことが分かった。

4章では、本研究のOH大気光イメージング観測で山岳波の検出数が少なかった原因を明らかにするために、①山岳波が下層から高層大気まで鉛直伝搬可能な風速場であったか、②観測拠点周辺の山岳地帯において山岳波の励起頻度はどの程度であったか、という2点の検証結果について述べる。①の検証として、気象再解析データを用いて、OH大気光を観測していた当時の背景風速場の鉛直構造を調査した。観測期間中に山岳波が中層大気まで伝搬可能な背景風速場条件を満たし、かつ、地上の天気が快晴でOH大気光が観測できていた日は28日あったことが判明し、本研究での山岳波の検出数がそれに比して少ないことが明らかになった。山岳波が励起され、周囲の大気に十分な水蒸気量が含まれるとき、山岳波に伴って波状の雲が形成されることが知られている。そこで、②の検証として、この波状雲を静止気象衛星ひまわり8号可視光観測画像から抽出することで日本域における山岳波の励起頻度分布を調査した。その結果、日本域においては東北地方で頻繁に山岳波が励起されており、関東地方の西側の山岳地帯では励起頻度が低かった。以上の検証結果と国土地理院標高データ、気象再解析データによる地形と風速場の関係を調査した結果から、山岳の稜線の向きと下層(高度1,000m)の風向のなす角度が60~90°となる割合が年間を通じて高い地域で山岳波は励起されやすいことが判明した。

5章では、日本域において頻繁に山岳波が励起されている東北地方上空を観測可能な茨城県北部に位置する城里町に観測装置を移設し、2021年9月から2022年9月まで実施したOH大気光イメージング観測の詳細と検出された山岳波について述べる。この観測では、従来使用されてきた冷却CCDカメラではなく、近年センサの感度が向上している民生用のカラーデジタルカメラを使用した。通常、民生用のカラーデジタ

ルカメラには赤外域の光をカットするフィルタが備わっているが、このフィルタを除去することで近赤外発光である OH 大気光の観測に成功した。城里町で実施した約 1 年間の OH 大気光イメージング観測で検出された山岳波は 1 例のみであった。気象再解析データを使用して観測期間中の背景風速場を推定したところ、山岳波の鉛直伝搬条件を満たさない日がほとんどであったため、山岳波の鉛直伝搬条件を満たし、かつ、OH 大気光を観測できた日は 3 日しかなかった。その 3 日のうち 1 日で山岳波が検出されていることから、山岳波の励起頻度自体は明治大学生田キャンパス西側の山岳地帯より東北地方の方が高いと考えられる。

6 章では、静止気象衛星ひまわり 8 号可視光画像の解析結果、気象再解析データと国土地理院標高データを統合した解析結果および、OH 大気光イメージング観測により明らかにした小スケール山岳地形による山岳波の励起・伝搬過程の特徴を結論として述べる。結びに今後の展望として、山岳波の検出頻度がより高いと考えられる場所に観測装置を増設し、小スケール山岳地形で励起され上部中間圏領域へ伝搬した山岳波の検出例を増やすことの重要性について主張する。