

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

「博士学位請求論文」審査報告書

審査委員 (主査) 理工学部 専任准教授

氏名 鈴木 秀彦

(副査) 理工学部 専任教授

氏名 立川 真樹

(副査) 理工学部 専任教授

氏名 長島 和茂

1 論文提出者 石井 智士

2 論文題名 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

(英文題) A Study of the Mountain Wave Excited by Small-Scale Topography and Its Propagation Process to the Upper Mesosphere

3 論文の構成

本論文は6つの章で構成されている。1章では地球大気における上部中間圏を含む超高層大気的位置づけ、およびその領域において卓越する大気重力波研究の重要性と課題、2章では大気光と呼ばれる普遍的な大気発光現象を利用した大気重力波の観測手法と研究に使用したデータセットについての詳細、3章では膨大な画像データから有効なデータを抽出し微弱な信号を取り出すための画像解析手法とその適用結果、4章では解析で得られた画像から抽出された小スケール山岳地形によって励起されたと考えられる大気重力波構造の励起源および励起頻度に関する考察と山岳波の励起頻度を表す新たな指標の提案、5章では4章で提案された指標の妥当性を示すための観測結果とその検証、そして6章では結論および将来の超高層大気の観測的研究に求められる方向性および展望が述べられている。

4 論文の概要

本論文は明治大学生田キャンパスおよび茨城県城里町において実施された大気光の地上イメージング観測結果から、下層大気の流れと地形の相互作用により励起され、高層大気へ伝搬してきた大気重力波(山岳波)による擾乱成分を抽出し、その励起伝搬過程および発生頻度の考察を行ったものである。特に比較的スケールの小さな山岳地形により励起される大気重力波が、下層から上部中間圏に運動量を輸送し、グローバルな大気循環に影響を与え得ることを示唆する研究であ

る。大気重力波とは重力により密度成層した大気中に生じた擾乱が、重力と浮力を復元力に流体中を伝搬する波動現象であり、超高層大気のグローバルな循環の主要な駆動源として知られている。大気光は超高層大気における発光現象の一つであるが、その明るさは微弱であり通常は肉眼等で確認することは困難である。特に都市部では地上からの人工光が観測の妨げとなるため、都市域での観測は特に難しい。本論文では近赤外領域で発光する OH 大気光強度の水平空間構造を広視野かつ高感度な CCD カメラおよび CMOS カメラによって計測し、得られた画像データを独自に開発した手法で解析することで、大気光中に現れる波動構造の検出を試みている。大気光観測は神奈川県の川崎市（明治大学生田キャンパス）と茨城県の城里町の2地点で実施された。生田キャンパスにおける観測データの解析結果では、2018年5月から2019年12月までの1年8か月の間に1例の山岳波動の検出に成功している。しかし、不検出であった日も含めた全観測日における気象背景場を調査したところ、より多くの日（28日間）において下層から上空への山岳波動の伝搬条件が満たされていることが判明した。そのために、関東平野周辺の山岳地形においては山岳波動の励起数そのものが少ないのではないかという仮説が立てられた。この仮説を検証するために、山岳波動の励起数の目安として、山越え気流の発生に伴って山の風下側に生じる波状雲の発生数の頻度分布が調査された。波状雲は下層大気の雲に見られる規則構造をもった雲であり、ひまわり8号による衛星画像により識別が可能である。本論文では生田キャンパスにおける大気光観測と同じ期間の日中に発生した波状雲の発生日時、発生位置、波面方向、波長などを調査し、日本上空においては波状雲の発生頻度（=山岳波の励起頻度）が東北地方と北海道で多く、生田キャンパスを含む関東地方では低いことを見出した。そこで、装置は茨城県の城里町に移設され、励起数が十分と予測される地域において観測が再開された。城里町では2021年8月から2022年9月まで大気光観測が行われた。城里町での観測期間における背景風速場を調べると、山岳波が伝搬可能な風速場条件を満たした日は、計7晩存在した。このうちの4晩はシステムの停止による欠測や曇天のため有効な観測データが取得できなかったが、残りの3晩については有効なデータを取得することができ、そのうちの1日において山岳波動の検出に成功した。観測条件および伝搬条件が整った上で得られたデータセットは3晩に過ぎなかったが、その中で1例の山岳波が検出されたことから、下層大気における山岳波の励起頻度は、生田周辺に比べて城里で高いと結論付けた。以上から励起及び伝搬の条件が整えば、小スケール山岳地形によって励起された山岳波動が超高層大気まで伝搬することが示された。さらに、この結果に基づき世界中の地形データを平均風速場と比較解析することで、山岳波動の励起源となりうる小スケール地形の分布を示している。この結果により従来山岳波のホットスポットであると考えられていた大規模な地形の他にも、多くの候補地が示された。これらの地形は狭い領域に局在するものであるが、地球全体でこれらの影響を積算すればグローバルな大気循環に影響を与え得るものであり、今後そのような小スケール山岳地形近傍において大気光イメージング観測を展開することが重要であることを主張するものである。

5 論文の特質

本論文は独自に開発した装置により得られた観測データより抽出した大気現象の発生メカニズムを、気象再解析データおよび衛星データ等を活用して考察し、得られた知見を応用することで着目する現象がグローバルな大気循環に影響を与える重要な因子となる可能性を示したものであ

る。本論文の第一の特質は着目した観測対象の独自性である。大気重力波を大気発光現象の一種である大気光をトレーサーとして検出・解析した先行研究は数多くあるが、多くの観測は抽出が比較的容易な、対地位相速度をもつ重力波の検出を、背景大気が十分に暗い郊外または極地にて試みたものである。一方、本研究で示されている対地位相速度を持たない、すなわち地形性の大気重力波の検出に注力した都市域での観測には独自性がある。第二の特質はデータの解析手法にある。地形性の重力波は励起源が固定されており、かつ下層大気は季節とともに周期的な変動を示すため、これらが超高層大気に与える影響が大きい場合、超高層大気循環に周期性をもたらす重要な因子となりうる。一方、単一地点でのイメージング観測では山岳波動による擾乱構造は装置の感度不均一や仰角ごとの大気透明度の違いや視線積分効果(Van Rijn 効果)によって生じる固定パターンとの判別が困難であり、特に水平波長の長い構造をイメージング観測から抽出することは容易ではない。本論文ではこの困難を克服するために、全天イメージャーの視野中心(光軸)に対し軸対称な構造をもつこれらの成分をデータから除去し、残差を長時間積算することによって得られる構造から、微弱な山岳波構造を抽出する方法がとられている。また膨大なイメージデータから晴天時の有効データのみを選定する際、イメージ中に捕捉される複数の星の像を検出することで晴天または曇天の判定を自動かつ客観的に行う手法もとられているが、これらの手法は大気光イメージデータから山岳波動を抽出するための解析方法としては独自性がある。また、大気重力波の観測頻度を励起頻度と伝搬過程の要素に分けて考察を行った点も特徴がある。これにより、山岳波動の地表付近での励起そのもの頻度が、超高層大気への影響を考える上で重要であること、地表付近の風速場と山岳地形の稜線の走向の関係が励起頻度の指標となることを見出し、関東平野上空というローカルな領域における影響のみならず、全世界の地形での山岳波動の励起頻度分布を議論している点に特質がある。

6 論文の評価

超高層大気におけるグローバルな大気循環を理解することは、下層大気における気象現象の予報精度向上や大気微量成分の輸送プロセスを理解する上で重要である。この大気循環の駆動源は地球各地で励起される大気重力波であることが知られているが、大気重力波の最小スケールは数10 kmオーダーと小さく、全球大気モデルに直接その効果を取り入れることはできていない。そのため、観測によって大気重力波の超高層大気への伝搬頻度や運動量フラックスを見積もるために、すでに多くの観測的研究が行われている。大気重力波は下層大気における活発な対流活動、大規模な気流の蛇行、山岳地形による空気塊の持ち上げ、そして火山噴火などの衝撃によって生じることが知られているが、本論文はこの大気重力波のうち、山岳地形による空気塊の持ち上げによって生じる山岳波動に着目した研究である。地形は固定されており、下層大気には季節変化があるため、山岳波動が超高層大気に与える影響はパターン化されていると考えられる。したがって、どの地形から、いつ励起された山岳波動が、どの程度、超高層大気に影響を与えているかを全球的に把握することが重要である。アンデス山脈や南極半島といった大規模山岳地形による山岳波動の超高層大気への影響はモデルと観測の両面で先行研究があるが、本研究では世界中に点在する小スケールの山岳波動によって励起される大気波動が、超高層大気に与える影響に着目した点に新規性がある。特に、独自のデータセットおよび解析手法を用いて神奈川県上空および茨城県上空の大気光イメージデータから、小スケール山岳地形由来と思われる構造をそれぞれ1

例ずつ検出することに成功したことは、山越え気流による波動の励起と、伝搬条件を満たす風系が同時に存在すれば、顕著な山岳地形でなくとも超高層大気に影響を与える大気重力波の励起源となり得ることを観測的に示した点は注目に値する。また、山岳波動の励起頻度に着目した点も重要である。地上摩擦の影響を受けない、いわゆる自由大気の高度は1000 m以上であるが、この領域における総観規模の風系は大気モデルにより比較的精度よく再現が可能である。したがって、各地形における山岳波動の励起頻度を正確に予測できれば、上記に述べたような山岳波動が超高層大気の大循環に与える影響の周期的変動を評価することが可能となる。本研究では、この下層大気における山岳波動の励起頻度が下層大気の風向と山岳地形の稜線がなす角という簡易なパラメーターでこれを評価できると提案した上で、この妥当性を自らの観測結果によって正当化している点が評価できる。すなわち、下層大気から大気光の発光層に至る伝搬経路の風系の条件に大きな違いのない神奈川県および茨城県の2地点において山岳波動の検出を試み、その検出頻度が茨城県において高かったことと、山岳波動の励起頻度すなわち波状雲の発生頻度が東北方面で高いという観測事実が整合することを示したことに意義がある。さらに、この知見に基づき、世界中に点在する山岳波ホットスポットの分布予想をしたことは、将来の超高層大気研究の観測的研究における重点観測領域を提案している点で展望があり、当該分野における学術的な価値が十分に認められる。

7 論文の判定

本学位請求論文は、理工学研究科において必要な研究指導を受けたうえ提出されたものであり、本学学位規程の手続きに従い、審査委員全員による所定の審査及び最終試験に合格したので、博士（理学）の学位を授与するに値するものと判定する。

以 上

主査氏名（自署）