

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 19 日現在

機関番号：33901

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2014～2016

課題番号：26610155

研究課題名(和文) 超高層大気における音波のイメージング観測

研究課題名(英文) Imaging observations of acoustic waves in the upper atmosphere

研究代表者

鈴木 臣 (SUZUKI, Shin)

愛知大学・地域政策学部・准教授

研究者番号：60397479

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,900,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、超高層大気で発光するOH大気光をトレーサにして、下層大気から超高層大気に至る音波のイメージング観測を試みた。2016年に3度の特別実験を実施したが、音波の2次元構造の検出には至らなかった。この結果から、音波は超高層大気において背景光強度に対して3%以下程度の強度変動をもたらす、あるいは、極めて低い出現率である、という知見を得た。また、同時におこなった低コストな大気光カメラの開発からは、今後の大気光観測網の飛躍的な多地点化の展望が開け、低コストカメラによる音波のイメージング観測の可能性も示唆される結果となった。

研究成果の概要(英文)：In this study, we tried to make imaging observation of acoustic waves in the upper atmosphere through OH airglow. Although we could not detect any acoustic-wave signatures in the airglow images obtained during special campaigns in 2016, this study offers valuable insights into the acoustic waves in the upper atmosphere: acoustic waves would induce small (less than 3%) airglow intensity perturbations and/or would be even less likely to propagate into the upper atmosphere compared to gravity waves. Additionally, the low-cost airglow camera developed in this study will greatly help an expansion in ground-based airglow imaging network.

研究分野：超高層物理学

キーワード：音波 超高層大気 大気光

1. 研究開始当初の背景

近年の超高層大気観測に特化した国際的な光学・電波観測網の拡充は、下層と超高層大気の間をつなぐつながりを解明することが、地球大気の短期・長期的変動の理解において重要であることを物語っている。

“音波”は大気波動で最も周期が短い波動であり、主に下層大気擾乱で発生し、高層へと伝搬する。近年では、地震に伴う音波が2次的な波動の種になり、電離圏でプラズマ擾乱を引き起こすことも分かってきた。しかし、超高層大気における音波が、どのような水平空間構造を持つのかは、未だよく分かっていない。

一方で大気光カメラは、超高層大気における波動の水平2次元構造が得られるユニークな観測器である。主に周期数十分の大気重力波の観測に焦点を当てており、大気重力波が大気の上下結合において担う役割が定性的・定量的に解明されつつある。これらの研究では大気重力波の理論的な最低周期(約5分)に近い短周期波動も観測されている。したがって、大気光観測からは、大気重力波のみならず、さらに周期の短い音波モードの大気波動の水平構造の観測も可能になると考えた。

2. 研究の目的

(1) 本研究では、大気光イメージング観測から超高層大気における音波の水平2次元構造を観測的に捉えることを目的とする。

(2) 音波の位相速度(音速)の二乗は温度に比例することから、世界初となる音波のイメージング観測は、超高層大気温度モニターとして活用できる可能性もある。

3. 研究の方法

(1) 本研究では、信楽に設置された大気光カメラで得られるOHマイネル帯の大気光(波長域:700~900nm, 発光ピーク高度:約85km)の全天画像(512x512pixel)から、音波モードの波構造を検出する。初めに、その検出環境を構築した。波動検出の画像処理は以下の手順でおこなった。

・得られる全天大気光画像についてメジアンフィルタによる星の除去をおこない、地理座標(東西・南北の水平面300x300km)に変換する。

・3次元FFT(水平空間方向+時間方向)により、東西波数、南北波数、周波数の空間を持つスペクトルに変換する。

・有意なパワーを持つピークについて、水平波長と位相速度を導出して周期を計算し、音波の周期域(中間圏界面付近でおおよそ4分以下)の波動のパラメタリゼーションと検出を行なう。

・スペクトルの逆FFT変換により、音波のみを画像に戻すことで、音波の2次的描像を得る。

これらの解析には、研究代表者らが開発した“大気光画像から波動構造を自動検出する手法”[Suzuki et al., 2007]を応用した。ただし、上記の手法は大気重力波(周期数10分)の検出に特化している。本研究課題の遂行には、大きな位相速度(300m/s以上)かつ短周期(4分以下)の波動を捉えることが求められるため、検出処理の調整をおこなった。

なお、本研究においては、検出された大気波動のカットオフ周期を4分とした(4分以下の周期を持つ波動を音波と考える)。これは中間圏界面の温度の変動幅を考慮しても妥当な仮定であり、同時に観測される大気重力波などの長周期波動と、本研究のターゲットである音波を十分に区別することができる。

(2) また、併せて、オーバーラップした視野での同時観測によるOH大気光の高度推定を試みるため、低廉なサブカメラを開発した。通常、1点のカメラ観測では高度情報を得ることができないため、大気光の発光高度は仮定することになる。サブカメラには音波を検出する精度は無いが、OH大気光の発光高度を三角測量から推定することができる。大気光の発光高度は、信楽で運用されているMUレーダーとの同時観測で波のパラメータを計算する際に用いる。

4. 研究成果

(1) 音波モードの波動構造を検出するソフトウェア開発をおこなったのち、信楽大気光カメラの特別観測を申請し、音波観測に特化した観測を実施した。これはOH大気光のみを30秒サイクル(15秒露光)という高サンプリングで観測するものである。これにより、2016年3月6日から3月12日までの7晩(超高層音波観測キャンペーン1)の特別観測モードのデータが得られた。ただし、この期間にはMUレーダーとの同時観測は実施できなかった。

さらに、2016年4月4日から4月10日の1週間(超高層音波観測キャンペーン2)と2016年11月28日から11月30日の3日(超高層音波観測キャンペーン3)についても信楽大気光カメラの特別実験を申請し、音波観測モードのOH大気光画像データを得ることができた。さらに、これらの期間については、MUレーダーの流星観測モードの申請も併せておこなっており、2016年4月6日と4月8日の2晩(超高層音波観測キャンペーン1期間中)、2016年11月28日、29日、30日の3晩(超高層音波観測キャンペーン2期間中)において、大気光カメラとMUレーダーによ

る同時観測が実施された。

これらの観測実験で得られた大気光画像に、本研究で開発した処理を施したところ、大気重力波の構造は抽出できたものの、音波を示すような大きな位相速度(300 m/s 以上)で4分以下の周期を持つ波動構造は検出されなかった。

音波の伝搬に伴う大気光強度変動がそもそも非常に小さくノイズスペクトルに埋もれて検出されなかったのか、観測実験を実施した晩には顕著な音波が存在しなかったのか、を切り分けるには至らなかったが、少なくとも本研究で開発した画像処理を用いた解析では、超高層音波観測キャンペーンで得られたデータから音波を検出できないという結論が得られた。

今後は、定期的に音波観測モードの特別実験を申請してイベント数を増やすとともに、画像処理をさらに工夫することで、より小さな大気光強度変動の振幅を持つ波動を検出することができる環境を構築して、音波のイメージング観測の実現につなげたい。考えられる画像処理としては、波動構造の大気光強度変動の位相関係が埋もれない程度に画像の複数枚加算をおこない、波動構造のシグナル-ノイズ比を稼ぐことなどが挙げられる。また、数値実験と組み合わせることで超高層大気における音波の水平構造のより現実的な姿を明らかにしていきたい。

(2) 音波の検出には至らなかったものの、本研究で進めた民生品カメラを用いたサブカメラの開発では著しい成果があった。

サブカメラは、視野180度の魚眼レンズおよび近赤外光観測用の光学フィルタを取り付けた廉価な民生品 CCD カメラである。光学フィルタは、透過波長700 nm 以上のロングパスフィルタを用いており、長波長側は CCD チップの感度特性によっておよそ900 nm までに制限される。両者の組み合わせにより、波長域700-900 nm のマイネル帯 0H 大気光を撮像することが可能となる。

視野がオーバーラップする複数点でのイメージング観測で得られる大気光画像から、三角測量の要領で構造の高度 (= 大気光高度) を推定することが可能となる [Suzuki et al., 2010]。サブカメラは、MU レーダーの中間圏高度の風速観測と組み合わせで得られる波動の固有パラメータ (固有位相速度) の計算をより精度良くおこなうことができると考え、大きな位相速度の大気重力波と音波を判別することを目的に開発した。

サブカメラ開発およびサブカメラ観測候補地選定の遅れから、上述した超高層音波観測キャンペーンにおいて信楽大気光カメラとの同時観測は実施することはできなかったが、本研究ではサブカメラ (通常の大気光観測システムに比べて40分の1程度の価格で作成が可能) による大気光イメージング観測 (大気波動の2次元構造観測) を大きく進

展させるに至った。計画当初は、大気光強度変動の大きな波動構造を捉えることを目的にしていたが、低廉カメラに特化した波動検出ソフトウェアを開発することにより、「大気光画像からの大気重力波構造の検出」という点においては、既存の信楽カメラと遜色のない精度で構造を捉えることが可能であることが確認できた。

具体的な、画像処理の手順は以下のとおりである。

サブカメラでは4秒露光で1分間に6枚の0H大気光全天画像(8-bit jpeg, 640 × 480 pixel) が得られる。この生画像では大気光強度変動が20% 近くの比較的はっきりとした大気波動しか認識することができない。

次に、1分ごとの画像6枚を足しあわせた加算画像を作成する。

さらに、時間分解能1分の各加算画像 I について、5分後の加算画像 I' との差分画像 I_{diff} を作成する。画像のピクセル値は、

$$I_{diff} = (I - I') / MEAN(I)$$

となる。ここで、 $MEAN(I)$ は加算画像 I の全体の平均カウント値である。

これらのテスト観測で得られたサブカメラの大気光画像にこれらの処理をおこなったところ、背景の大気光強度に対して3-5%程度の振幅を持つ大気波動まで検出されることがわかった。過去におこなわれてきた長期の大気光イメージング観測に基づく統計解析においては、大気重力波イベントとしてカウントされる大気光強度振幅のほとんどが5%以上であることから、本研究で開発した手法を用いれば、サブカメラでも十分に大気重力波を検出でき、低廉なカメラシステムを用いて、大気波動の統計的な解析をおこなうことが可能であることを示唆する。

さらに、水平波長10 km程度の極小スケールの波構造もサブカメラシステムで確認された。このような極小スケールの構造は“リップル構造”と呼ばれ、大気不安定に伴って現れることが知られている。大気不安定の水平構造の研究においても、低廉な大気光カメラの有用性を確かめることができた。

(3) 以上から、本研究では、超高層大気における音波のイメージング観測には至らなかったものの、音波は超高層大気において大気重力波に比べてかなり小さな大気光変動 (背景光強度に対して3%以下) をもたらず、あるいは、大気重力波に比べ極めて低い出現率である、という知見を得た。また、同時におこなった低廉な大気光カメラの開発からは、今後の大気光観測網の飛躍的な多地点化の展望が開け、低廉カメラによる音波のイメージング観測の可能性も示唆される結果となった。

<引用文献>

Suzuki, S., K. Shiokawa, Y. Otsuka, T. Ogawa, M. Kubota, M. Tsutsumi, T. Nakamura, and D. C. Fritts, Gravity wave momentum flux in the upper mesosphere derived from OH airglow imaging measurements, *Earth, Planets and Space*, 59, 421-428, 2007.
Suzuki, S., T. Nakamura, M. K. Ejiri, M. Tsutsumi, K. Shiokawa, and T. D. Kawahara, Simultaneous airglow, lidar, and radar measurements of mesospheric gravity waves over Japan, *Journal of Geophysical Research*, 115, D24113, doi:10.1029/2010JD014674, 2010.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 0 件)

〔学会発表〕(計 14 件)

Suzuki, S., and K. Shiokawa, Performance evaluation of low-cost airglow camera for mesospheric gravity wave measurements, 2016年12月14日, San Francisco (アメリカ).
鈴木臣, 中間圏重力波観測用低コスト大気光カメラの性能評価3: 画像処理, 日本地球惑星科学連合2016年大会, 2016年5月24日, 幕張メッセ(千葉県・千葉市).
鈴木臣, 大気光多地点観測ネットワークの構築に向けて, 地域ネットワークによる宇宙天気観測・教育活動に関する研究集会, 2016年3月10日, 九州大学西新プラザ(福岡県・福岡市).
Suzuki, S., Designing a superdense ground-based camera network for airglow imaging, 2nd Annual Meeting on Advanced Computing System and Infrastructure 2016, 2016年1月19日, 九州大学医学部百年講堂(福岡県・福岡市).
Suzuki, S., and K. Shiokawa, Performance evaluation of low-cost airglow camera for mesospheric gravity wave measurements: Part II, 第138回地球電磁気・地球惑星圏学会, 2015年11月2日, 東京大学本郷キャンパス(東京都・文京区).
鈴木臣, 中間圏重力波観測用小型大気光カメラの性能評価, 電気通信大学宇宙・電磁環境研究センター研究集会(招待講演), 2015年12月25日, 電気通信大学(東京都・調布市).
Suzuki, S., and K. Shiokawa, Performance evaluation of low-cost airglow camera for mesospheric gravity wave measurements, 日本地球惑星科学連合2015年大会, 2015年5月

26日, 幕張メッセ(千葉県・千葉市).
鈴木臣, 塩川和夫, 低コストカメラによるOH大気光観測網の展開, 緯度間結合の大気科学研究集会, 2015年3月26日, 国立極地研究所(東京都・立川市).
Suzuki, S., J. Park, Y. Otsuka, K. Shiokawa, H. Liu, and H. Lühr, CHAMP and ground-based airglow measurements of plasma density perturbations in the top-/bottom-side ionosphere associated with MSTID, United Nations/Japan Workshop on Space Weather, 2015年3月2-6日, Luigans Fukuoka(福岡県・福岡市).
鈴木臣, Jaeheung Park, 大塚雄一, 塩川和夫, Huixin Liu, Hermann Lühr, CHAMP衛星で観測されたMSTIDに伴う電離圏F層上部の電子密度変動, 第136回地球電磁気・地球惑星圏学会, 2014年11月1日, キッセイ文化ホール(長野県・松本市).
鈴木臣, 塩川和夫, 大塚雄一, 村山泰啓, 川村誠治, 広域多地点大気光観測による中間圏大気重力波, 日本気象学会2014年秋季大会, 2014年10月21日, 福岡国際会議場(福岡県・福岡市).
鈴木臣, 短期・局所的な地表/気象変動が及ぼす超高層大気の変動, 中間圏・熱圏・電離圏研究集会2014年9月23日, 情報通信研究機構(東京都・小金井市).
Suzuki, S., J. Park, Y. Otsuka, K. Shiokawa, H. Liu, and H. Lühr, Coordinated measurements of medium-scale traveling ionospheric disturbances with ground-based airglow imagers and CHAMP satellite, Asia Oceania Geosciences Society 11th Annual Meeting, 2014年7月29日, Royton Sapporo Hotel(北海道・札幌市).
Suzuki, S., K. Shiokawa, and Y. Otsuka, Multipoint airglow imaging measurements of mesospheric gravity waves over Japan, 日本地球惑星科学連合2014年大会, 2014年4月19日, 幕張メッセ(千葉県・千葉市).

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

出願状況(計 0 件)

取得状況(計 0 件)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

鈴木臣(SUZUKI Shin)

愛知大学・地域政策学部・准教授

研究者番号: 60397479