

大気光観測ネットワーク構築に向けた大気光カメラ開発：大気波動の検出

鈴木 臣¹⁾・深沢 圭一郎²⁾

Development of airglow camera system for multi-point airglow imaging measurements : Detection of wave structures

Shin Suzuki¹⁾ and Keiichiro Fukazawa²⁾

要約：本研究では、多地点観測用に開発した安価で小型の新型 OH 大気光カメラの観測画像から、大気波動構造の抽出をおこない新型大気光カメラの性能を評価した。2014年9月27日に信楽で得られた OH 大気光画像には、大気重力波ともリップル構造が観測され、新型カメラを用いた大気光イメージング観測の有用性が確認された。また、従来型の超高感度大気光カメラの同時観測データとの比較をおこなった。新型カメラでは大気光強度の変動はやや小さくなるものの、従来型のカメラ画像中に波構造が見られた時間は新型カメラ画像でも同様の構造を同定することができた。今後は理科教育への展開を通して新型大気光カメラによる多地点観測網を構築していく。

キーワード：ネットワーク観測, 大気光, 装置開発, 画像処理

はじめに

近年、地球科学的な自然現象の多地点観測において、初等中等教育機関との連携が重要視されるようになってきた。教育機関にとっては理科教育やアクティブラーニングに専門的な観測手法を取り入れることができ、研究者側は観測網の多地点展開とアウトリーチ活動を効率的におこなうことができるため、双方に大きなメリットがある。例えば、SSH (スーパーサイエンスハイスクール) 指定校を中心としたスプライト (超高層の雷) 観測網では、生徒と教諭が主導的に観測研究を進め、研究者がその活動に対して適宜助言する関係を築くことで、理数系教育としてだけでなく科学的な成果も挙げている。

筆者らは、大気光イメージング観測の多地点化を目指して、民生用の高感度 CCD カメラを使用した安価で小型の新型大気光カメラを開発した (鈴木・

山本, 2014)。大気光イメージング観測は、超高層大気 (高度およそ100 km 以上の大気) の発光現象である大気光をトレーサとして、大気波動を可視化するユニークな観測手法である。1990年代からのイメージセンサの飛躍的な性能向上により、微弱な大気光を撮像することが可能となった。観測は太陽光のない夜間に限られるものの、超高層大気の大気波動の動態について季節依存性や地域差が議論されてきた。最近では、複数の大気光カメラを利用した同時観測から、理論的に予想されていた長距離伝搬モードの波動 (Suzuki et al., 2013a) や、台風起源の同心円状の波動 (Suzuki et al., 2013b) の観測的証拠を捉えることに成功しており、多地点での大気光イメージング観測網を整備する機運が世界的に高まっている。

大気波動の一種である大気重力波は、重力を復元力とした波動であり、気象、地形、大気不安定など

1) 愛知大学地域政策学部

2) 京都大学学術情報メディアセンター

によって大気が上下に振動することで発生する。地球の至る場所で励起されやすく、大気光イメージング観測の重要なターゲットのひとつである（塩川・鈴木, 2018）。大気重力波は大気中を伝搬し、中間圏界面高度付近（高度約100 km）で崩れる際に背景大気に輸送してきたエネルギーや運動量を解放することで、局所的あるいは全球的な温度場・風系場の形成に影響を与えている。さらに、一部の波動はより高高度の熱圏・電離圏（高度100 km以上）へ侵入し、様々なプラズマ擾乱の種になると考えられている。電離圏のプラズマ変動は短波通信の欠測や衛星測位の誤差につながるものが知られており、電離圏の効果を適切に評価することが産業界からも求められるようになってきた。このように、下層大気や近傍宇宙から絶えず変動させられる超高層大気環境を把握することは、地球と宇宙の力学的なつながりを解明するという理学的な目的だけでなく、我々の社会基盤の維持にも貢献している。将来、ますます活発になる宇宙利用や国際宇宙ステーションに代表される人類の新たな生活圏としても、超高層大気的重要性は高まっている。

また最近、地震に起因する超高層大気の波構造が注目を浴びている。Makela et al. (2011) は、東北地方太平洋沖地震で発生した津波がハワイに到達した際、電離圏高度（250 km）にも津波の波面に対応した縞模様が見られていることを報告している。この縞模様は、津波が到達する前にハワイ上空の大気光画像で確認されており、はるか上空での大気光のモニタリングは、波の到達予測にもつながる可能性を示唆している。

筆者らが開発した新型大気光カメラは、超高層を伝播する大気波動の広域観測を狙ったものである。安価であるため限られた研究予算でも効率的に多地点に展開することができ、途上国での観測網拡大や高等学校での理科教育への展開も期待できる。特に、大気光イメージング観測は得られるデータが画像であるため、イベントの発見が容易でありデータの取り扱いも比較的わかりやすい。また地球科学的な自然現象においては、基本的に観測の再現性を求めることができないため、観測機会を多く確保しておく必要がある。津波の到来予測などの防災に活用

することを考えても、悪天候による観測の機会損失を小さくするため、理科教育を含めた地域との連携による観測網の形成は必須と言える。

本研究では、滋賀県甲賀市信楽町のMU観測所（34.9°N, 136.1°E）でおこなった新型大気光カメラのテスト観測で得られた2014年9月27日10:30–19:30UT（19:30–28:30JST）の大気光画像データから大気重力波構造の検出を試みた。また同観測所では名古屋大学宇宙地球環境研究所が運用する超高層大気イメージングシステム（OMTI）による大気光の定常観測が実施されており（Shiokawa et al., 1999; Shiokawa et al., 2009）、OMTIカメラとの同時観測から新型大気光カメラの性能評価をおこなった。

観測装置

開発した大気光カメラの概略図を図1に示す。天頂方向に向けたモノクロCCDビデオカメラ（WATEC WAT-910HX/RX）に視野角185°の魚眼レンズ（FUJINON YV2.2x1.4A-2 : F1.4）が取り付けられている。CCDチップ（SONY ICX418 : セルサイズ8.4×9.8 μm）は600 nm付近をピークとして近赤外域にも感度を持つ（波長900 nmにおける相対感度は約0.22）。また特定の波長の光のみを観測するため直径25 mmの光学フィルタ（Edmund #62987 : カットオン波長700 nmのロングパスフィルタ）を魚眼レンズとカメラの間に挟み込むことで、目的とするOH大気光（マイネル帯700–900 nm : 発光高度約85 km）のみを撮像する仕組みとなっている。カメラからのビデオ信号は、ビデオエンコーダ（AXIS M7001）で8 bitのJPEG画像（640×480ピクセル）に変換され、FTPでPC（MacBook Air）に保存される。OH大気光観測においては、露光時間4秒（=256 fields/60 fields per sec）、サンプリング周期4秒（=15 images/min）として運用した。

OH大気光用のフィルタのみの単色カメラであり、従来型の複数フィルタによる多波長観測カメラではないため単純な比較はできないが、光学系（魚眼レンズ+光学フィルタ+CCDカメラ）は非常に軽量（160 g : 従来型の約0.3%）かつ安価（約10万

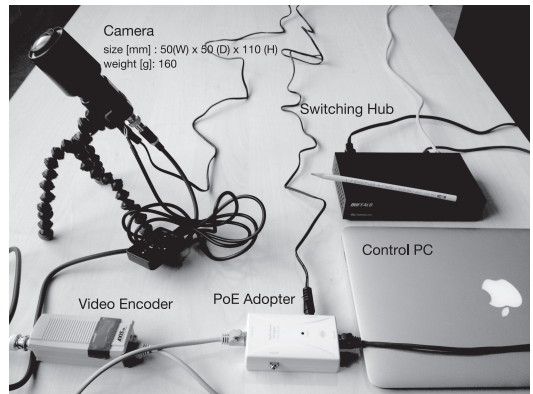
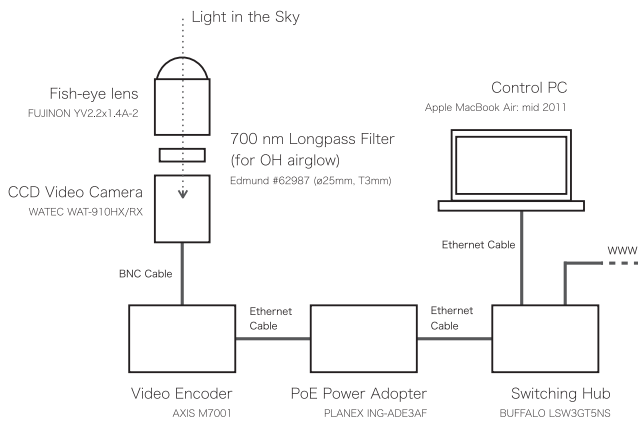


図1. 新型大気光カメラの概略図 (左) と外観 (右)。

円：従来型の1%) な構成となっている。複数台の観測ネットワークの形成が従来型に比べて遥かに効率的になるため、大気光観測の多地点展開に特化した仕様であるといえる。

画像処理

図2a に新型大気光カメラで得られた2014年9月27日14:46UT (23:46JST) のOH 大気光画像を示す。魚眼レンズを用いているため視野の丸い端が地平線であり、画像の上と左はそれぞれ北と東に対応する。視野全体に星が写っており、画像中央よりやや北側に東西方向に伸びた天の川銀河も確認できるが、このままではOH 大気光の強度変動 (波動構造) を確認するのは困難であった。本研究では以下の画像処理をおこない波動構造の抽出を試みた。

- 1) 1分間の画像データ (15画像) を合成して、4秒分解能の大気光強度 (観測画像) $I_t(x, y)$ から正分毎の1分分解能の積算値 $I'_t(x, y)$ を作成する。これにより各ピクセルの大気光強度に重畳するランダムノイズを減らしS/Nの高い画像となる。
- 2) 各1分積算画像について5分前の積算画像 I'_{t-5} との時間差分 I_{TD} を作成する。

$$I_{TD}(x, y) = I'_t(x, y) - I'_{t-5}(x, y)$$

時間差分をとることで大気光強度の時間変動が強調され、波動構造がよりはっきりと識別できる

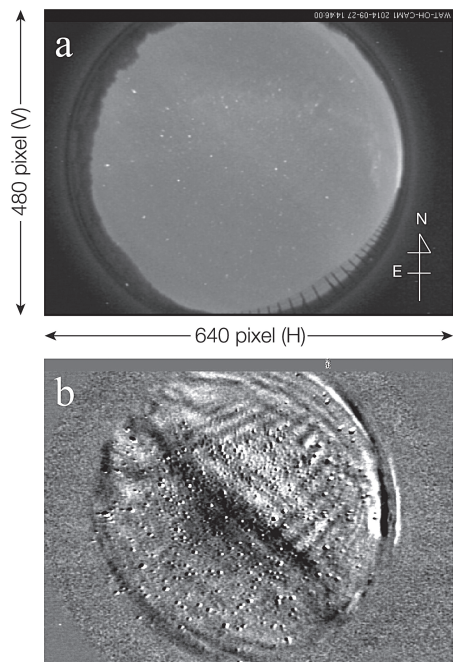


図2. (a) 信楽で観測された2014年9月27日14:46UTのOH 大気光画像と、(b) 画像処理後 (14:46UTの1分積算画像と14:41UTの1分積算画像の差分) の画像。

ようになる (Swenson and Mende, 1994)。上記の処理をおこなったOH 大気光画像を図2bに示す。画像左上から右下 (北東-南西) に伸びる波面が確認できる。これは、数十 km の水平波長を持つ大気重力波が重畳したものである。また画像右上 (北西方向) にリップルと呼ばれる局所的な波構造

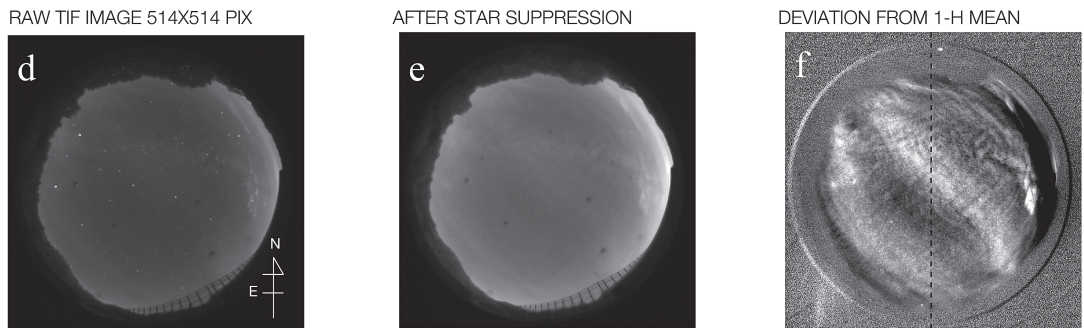
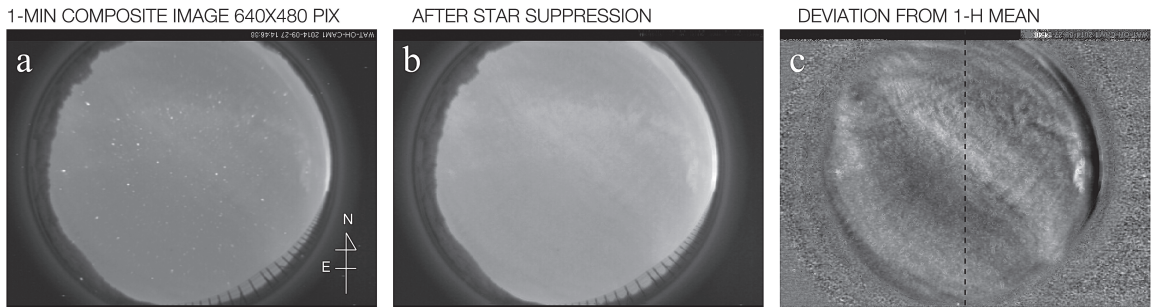


図3. 新型大気光カメラで得られた14:46UTの (a) OH 大気光画像, (b) 星除去後の画像, (c) 1時間移動平均からの偏差。(d-f) a-c と同じ。ただし, OMTI カメラの画像で得られた同時刻の OH 大気光画像を用いている。

(北西-南東方向の波面)が見られた。リップルは大気重力波より小さな波長(一般的に15 km 以下程度)を持ち, 大気不安定の指標となる構造である(Peterson and Adams, 1983; Suzuki et al., 2011)。特に, 図2bに見られるリップル構造は大気重力波の波面と直行しており, 大気重力波によって引き起こされた対流不安定の現れであると考えられる。このように比較的簡単な画像処理をおこなうことで, 新型大気光カメラの画像から大気重力波やリップルの構造を抽出できることが確認できた。

最後に, 従来型の大気光カメラ画像との比較から新型大気光カメラでの大気重力波観測の精度を検証した。OMTIは名古屋大学宇宙地球環境研究所が運用している大気光イメージング装置であり, 背面照射型の冷却CCD(HAMAMATSU C4880), テレセントリック光学系, OH, O(557.7 nm), O(630 nm), Na大気光観測用の3インチ干渉フィルタを有する多波長観測用の超高感度カメラである(Shiokawa et al., 1999)。OMTIではOH大気光を露光時間15

秒, サンプリング周期約330秒で観測しており, 14 bitのTIF画像(512×512ピクセル)として保存される。本研究では, 大気光画像を用いた大気重力波の解析でしばしば用いられる1時間移動平均からの偏差画像を用いて新型大気光カメラとOMTIの比較をおこなった。処理の手順は以下の通りである。

- 1) 観測画像中の明るい星を2次元のメディアンフィルタによって除去する。大気光画像中において星は数ピクセル程度の広がりを持つ点源として現れる。ここでは各ピクセル (x, y) のについて, 強度が視野内のピクセル強度の平均値 + 標準偏差より大きい場合, 近傍ピクセル $(x \pm 5, y \pm 5)$ の中央値で置き換えることで星を除去した。
- 2) 星除去後の画像について1時間の移動平均からの偏差を計算する。1時間の平均画像を背景光強度と考えることで, 偏差を波動構造の大気光強度振幅と見なすことができる。各ピクセルにおける偏差 $I_{DEV}(x, y)$ は以下の式で与えられる。

$$I_{DEV}(x, y) = \frac{I_t(x, y) - I_M(x, y)}{I_M(x, y)}$$

ここで, $I_t(x, y)$ および $I_M(x, y)$ は時間 t における大気光強度と $t \pm 30$ 分の平均強度である。

新型大気光カメラと OMTI で得られた画像の比較を図3に示す。図3a, 3d はそれぞれ新型大気光カメラと OMTI で観測された14:46UT の OH 大気光画像である。ただし, 図3a は正分毎の積算画像 $I_t(x, y)$ を用いた。OMTI 画像 (図3d) では, 東西方向に伸びる天の川がより明瞭に見え, 南東方向にやや不鮮明ながら大気重力波の構造も確認することができる。図3b, 3e はメディアンフィルタを用いて図3a, 3d から星を除去した画像である。両画像とも, 視野中の明るい星が取り除かれていることがわかる。図3c, 3f は星除去後の大気光画像の1時間移動平均からの偏差である。両画像のカラースケール ($\pm 10\%$) は同じである。OMTI カメラで観測された大気重力波構造 (北東-南西方向の波面) および北西領域のリップル構造 (北西-南東方向の波面) は新型カメラでも確認できる。また, OMTI カメラで波動構造として認識できた時間帯すべてにおいて, 新型大気光カメラでも同様の構造が確認された。このことから, “超高層大気の大気重力波の観測” においては, 安価な新型大気光カメラを用いた観測でも代用できると結論づけられる。図4に, 天頂付近を通る子午線 (図3c, 3f の点線) に沿った大気光強度の偏差を示す。OMTI (図4b) では画像中央部分の大気重力波構造の振幅は約3~5%であり, 画像中央からやや北でのリップルの振幅は1.5~2%であった。一方, 新型大気光カメラでは, 大気重力波およびリップルの振幅はそれぞれ1.5~3%と1%程度であった。新型大気光カメラの画像では, 大気光強度の振幅はやや抑えられる傾向にあることがわかる。これはそれぞれのカメラの感度の違いとダイナミックレンジの違い (新型カメラは8 bit = $2^8 = 256$ 階調, OMTI カメラは14 bit = 16,384階調) から生じると考えられる。OMTI カメラを用いた過去の研究においては, 大気重力波パラメータの統計解析を主に2~3%以上の大気光強度変動からおこなっている (Ejiri et al., 2003)。今後の新型大気光カメ

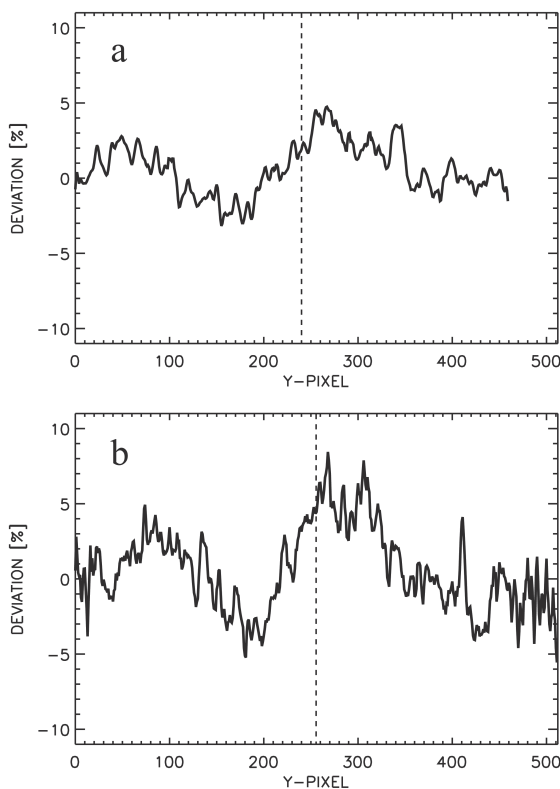


図4. (a) 図3c (新型大気光カメラ) および (b) 図3f (OMTI カメラ) の点線に沿った断面図。図中の縦方向の点線は画像中央ピクセルの位置をあらわす。

ラによる統計解析では, 小さな大気光強度振幅を持つ構造は検出されにくい傾向にあることを考慮しなくてはいけない。併せて, 新型カメラの観測限界 (観測できる大気光強度振幅の最小値) を従来型カメラとの同時観測から考察する必要がある。

おわりに

大気光イメージング観測の多地点化を目指して開発した小型で安価な新型 OH 大気光カメラの画像から, 超高層大気 (高度85 km) における大気波動の検出を試みた。2014年9月27日に信楽で実施したテスト観測のデータでは, 生データでは波動構造を確認するには至らなかったが, 簡単な画像処理 (1分間の積算画像の差分あるいは偏差) によって大気重力波とともに小スケールなリップル構造の検出に

成功した。従来の大気光カメラとの比較からは、新型大気光カメラでは観測される大気光強度変動が従来型のカメラよりも小さくなる傾向にあるが、超高層大気の波動を観測するという目的においては、新型大気光カメラは十分に有用であると結論づけられる。

今後は理科教育への展開、地域との連携を通して、複数の新型大気光カメラによるネットワーク観測体制を構築することで、超高層大気の波動の水平方向の広がり の 解明 や 地域 防災 への 活用 を 目指す。

謝辞

本研究の一部は京大 学 生 存 圏 研 究 所 生 存 圏 科 学 萌 芽 研 究、 名 古 屋 大 学 宇 宙 地 球 環 境 研 究 所 国 際 共 同 研 究、 国 立 極 地 研 究 所 一 般 共 同 研 究、 北 海 道 大 学 情 報 基 盤 セ ン タ ー 共 同 研 究、 お よ び 科 学 研 究 費 (26610155, 18K03728) の 助 成 を 受 け て 実 施 し た。 OMTI デ ー タ は 名 古 屋 大 学 宇 宙 地 球 環 境 研 究 所 か ら 提 供 さ れ た も の で あ る。

参考文献

Ejiri, M. K., K. Shiokawa, T. Ogawa, K. Igarashi, T. Nakamura, and T. Tsuda (2003), Statistical study of short-period gravity waves in OH and OI nightglow images at two separated sites, *J. Geophys. Res.*, 108 (D21), 4679, doi:10.1029/2002JD002795.

Makela, J. J., et al. (2011), Imaging and modeling the ionospheric airglow response over Hawaii to the tsunami generated by the Tohoku earthquake of 11 March 2011, *Geophys. Res. Lett.*, 38, doi:10.1029/2011GL047860.

Peterson, A. W., and G. W. Adams (1983), OH airglow phenomena during the 5–6 July 1982 total lunar eclipse, *Appl. Opt.*, 22, 2682–2685.

Shiokawa, K., Y. Katoh, M. Satoh, M. K. Ejiri, and T. Ogawa (1999), Development of optical mesosphere thermosphere imagers, *Earth Planets Space*, 51, 887–896.

Shiokawa, K., Y. Otsuka, and T. Ogawa (2009), Propagation characteristics of nighttime mesospheric and thermospheric waves observed by optical mesosphere thermosphere imagers at middle and low latitudes, *Earth Planets Space*, 61, 479–491.

Suzuki, S., M. Tsutsumi, S. E. Palo, Y. Ebihara, M. Taguchi, and M. Ejiri (2011), Short-period gravity waves and ripples in the South Pole mesosphere, *J. Geophys. Res.*, 116, D19109, doi:10.1029/2011JD015882.

Suzuki, S., K. Shiokawa, Y. Otsuka, S. Kawamura, and Y. Murayama (2013a), Evidence of gravity wave ducting in the mesopause region from airglow network observations, *Geophys. Res. Lett.*, 40, 601–605, doi:10.1029/2012GL054605.

Suzuki, S., S. L. Vadas, K. Shiokawa, Y. Otsuka, S. Kawamura, and Y. Murayama (2013b), Typhoon-induced concentric airglow structures in the mesopause region, *Geophys. Res. Lett.*, 40, 5983–5987, doi:10.1002/2013GL058087.

Swenson, G. R., and S. B. Mende (1994), OH emission and gravity waves (including a breaking wave) in all-sky imagery from Bear Lake, UT, *Geophys. Res. Lett.*, 21, 2239–2242.

塩川和夫, 鈴木臣 (2018), 『夜間大気光のふしぎ』, 幻冬社.

鈴木臣, 山本衛 (2014), 低廉大気光カメラの開発～超高層大気波動のイメージングネットワークの飛躍的拡充をめざして～, 第248回生存圏シンポジウム「生存圏ミッションシンポジウム」, 宇治, 2014年3月10日.