

## SEEK キャンペーンにおける OH 大気光発光層の高度決定

土岐 剛 史<sup>1</sup>・高橋 幸 弘<sup>1</sup>・山田 嘉 典<sup>1</sup>  
福西 浩<sup>1</sup>・中村 卓 司<sup>2</sup>・M. J. Taylor<sup>3</sup>

### Height Determination of the OH Airglow Layer Based on the Imaging Observation during the SEEK Campaign

By

Tsuyoshi TOKI, Yukihiro TAKAHASHI, Yoshinori YAMADA, Hiroshi FUKUNISHI,  
Takuji NAKAMURA and Michal J. TAYLOR

**Abstract:** In order to investigate the relationships between gravity wave structures of airglow and the quasi-periodic field-aligned irregularities observed by radars, we carried out the ground-based imaging observations at three sites in Kagoshima and at Shigaraki during The SEEK (Sporadic-E Experiment over Kyushu) campaign. Simultaneous observations of OH airglow were conducted using two all-sky CCD imagers installed at Uchinoura and Yamagawa, Kagoshima, Japan, respectively. All-sky images of OH airglow displayed a distinct wave structure with a horizontal wavelength of  $\sim 23$  km at both sites on August 19, 1996. The neutral winds in the altitude range of 60-100 km were observed simultaneously by the MF radar at Yamagawa. Applying a triangulation method to these data, we have estimated the height of this small-scale wave structure. The estimated altitude was  $89 \pm 3$  km, which was just below the neutral wind enhancements (reaching  $\sim 120$  m/s) observed in the altitude range of 91-94 km by the MF radar.

#### 概 要

1996年8月に実施されたSEEKキャンペーンにおいて、地上からの高感度イメージャーによる大気波動の観測が鹿児島県内の内之浦、山川、大隅と信楽の計4カ所で実施された。キャンペーン期間中の鹿児島地方は天候に優れない日が多かったが、8月9日から22日の間に、内之浦、山川、大隅でそれぞれ、4夜、7夜、1夜、大気光イメージデータが取得された。信楽での観測は8夜であった。今回の地上からの大気光観測の主な目的は、レーダーで観測される電離圏における準周期的イレギュラリティーと大気光に見られる中性大気中の重力波の特性を、ロケットによる観測とあわせてそのメカニズムを検討説明することにある。各観測データと比較する上で、大気光の発光高度を正確に決定することは極めて重要な課題である。我々は鹿児島の3カ所の観測から、三画法を用いてOH大気光の

---

<sup>1</sup> 東北大学大学院理学研究科, <sup>2</sup> 京都大学超高層電波研究センター

<sup>3</sup> Space Dynamics Laboratory and Physics Department, Utah State University, USA

発光高度の推定を計画した。残念ながらロケット打ち上げ時は天候に恵まれず同時観測データは得られなかったが、キャンペーン期間中内之浦と山川に設置された2台の大気光全天イメージャによる同時観測に成功した。8月19日の晩、2台のイメージャで同時に顕著なOH大気光の波状構造を観測した。これら2地点で同時に取得された画像に、大気波動構造の発光高度決定としては初めて、FFT及び精密な三角法を用いて解析を行った。その結果、波状構造の発光高度は $89 \pm 3$  kmと求められた。これはロケット観測などによる従来の結果とほぼ一致する。MFレーダーによって、この高度の数km上空で同時に強い南向きの風速シアが観測されており、重力波の発生原因の有力な候補と考えられる。

**重要語：**大気光, OH, 高度, 三角法

## 1. はじめに

中緯度における電離圏観測された準周期的なイレギュラリティの生成機構を説明する2つのモデル[Woodman et al., 1991; Tsunoda et al., 1994]ではイレギュラリティの原因として背景の中性大気中の重力波を考えている。その為イレギュラリティの頻発する夏期の中緯度における重力波の観測、およびキャンペーン期間中に大気光イメージングによる重力波の観測とロケットから得られる電子密度や分極電界の空間分布、中性風の鉛直分布などのデータを比較・検討することはイレギュラリティの生成機構を解明する上で非常に重要な役割を担っている。残念ながらロケット打ち上げ時の天候に恵まれず、同時観測には成功しなかったが、キャンペーン期間中種子島に設置されていた可搬型VHFレーダー及び山川に設置されているMFレーダーとの同時観測には成功した。

大気光イメージング観測は機器の発達に伴い飛躍的な進歩を遂げており、最近では撮像装置に高感度CCDを使用した大気光の観測結果が多く発表されるようになった[e.g., Taylor et al., 1995]。今回の観測で使用したイメージャは従来の倍近い感度のある背面照射式のCCDカメラで、積分時間を短くすることにより、時間・空間分解能の高いデータを取得できている。東北大学のイメージャでは観測波長を変えないことにより、時間分解能が高いだけでなく、波長の違いに起因するフォーカスの甘さなども無い、質の高いデータの取得に成功している。ロケット(S-310-26)打ち上げの際にはロケットより噴出されたTMA発光雲の撮像にも成功した(図3)。また今回の観測では内之浦と山川の2地点から大気光イメージングの同時観測を行うことにより、大気光に見られる波状構造の発光高度を直接求めることを試みた。発光高度を正確に決定することは大気光による重力波のデータを他の観測結果と比較する上で非常に重要であるだけでなく、大気光の発光自体が中層、高層大気の化学及び力学過程に支配されているため、中間圏、熱圏下部を理解するに当たって非常に重要である。OH大気光の発光高度の観測は中緯度、高緯度共にロケット[e.g., Lopez-Moreno et al., 1987]や地上観測[e.g., Hecht et al., 1997]により数多く行われ、その結果はほとんど85~90 kmである。ロケット観測はそのほとんどの場合がロケットの進行方向を向いたフォトメータから発光の積分量を観測しその変化から高度を求めており、地上観測から発光高度を求めている場合はたいていイメージング等から求めた回転温度とNaライダーから求めたドップラー温度により高度を決定している。またLowe et al., [1996]はWINDYII/UARS衛星より地球規模で平均的なOH大気光の発光高度を観測しており、その結果は88 kmであった。しかしながらこのような結果のほとんどは平均的な発光高度の観測であり、「波状構造」の発光高度についての情報は提供していない。今回試みたイメージングの2点観測から三角法を用いて高度を求める手法は、Taylor et al., [1995]にてOI(557.7 nm)大気光に対して用いられている。彼らはALOHA-93キャンペーン中に2台の高感度CCDカメラをハワイ諸島の異なる二つの島に設置し同時観測を試みた。そしてOI(557.7 nm)大気光の発光高度は95 kmであると報告すると共に三角法による高度決定が非常に有効な手段であることを示した。ところがOH大気光について三角法による高度決

定を行っているのは Peterson and Kieffaber, [1973] だけであり、非常に限られている。本発表では OH 大気光イメージング観測と VHF レーダー、MF レーダーの観測結果から中性大気中の波動と電離圏イレギュラリティとの関連を考察し、重力波の各パラメータを報告するとともに、1996年8月19日に2地点で観測されたデータによる三角法を用いての高度決定について報告する。

## 2. 観 測

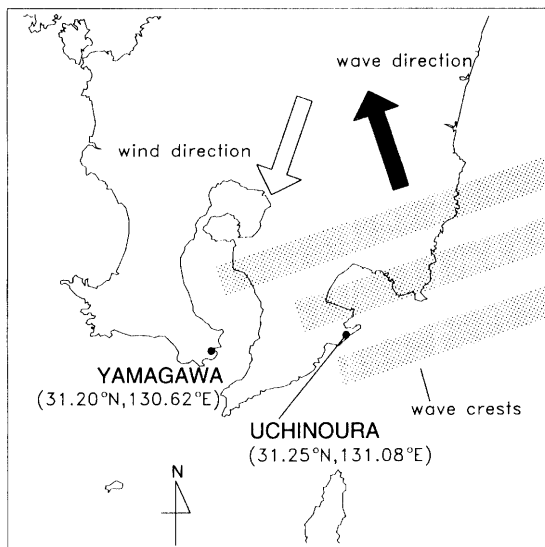


図1 SEEK キャンペーン期間中に設置された2台の全天イメージャの位置および8月19日に観測された波状構造の位置、波の進行方向、背景風の方向。

東北大学は宇宙研鹿児島宇宙空間観測所の東側に隣接する内之浦町民運動場 (31.25° N, 131.08° E) に TMA 観測と共用する形で建てていただいたプレハブ (図2) で、ユタ大学は通総研山川測候所敷地内 (31.20° N, 130.62° E) にて観測を行った。2地点間は経度方向に0.46度、緯度方向に0.02度離れており、距離は約44 kmである (図1)。内之浦の観測地の境界は非常に良く、仰角20°以上に関しては方位角にして360°の視野が開けていた。観測はSEEK 期間中の8月10日から22日まで2地点での同時観測を行った。ロケット (S-310-26) の打ち上げられた8月22日は雲が散在しており、大気光の観測はできなかったが、TMAの発光雲をとらえることができた (図3)。また8月19日には2地点で顕著な大気光の波状構造を同時観測することに成功した。2基目のロケット (S-310-25) の打ち上げられた8月26日はすでに光学的

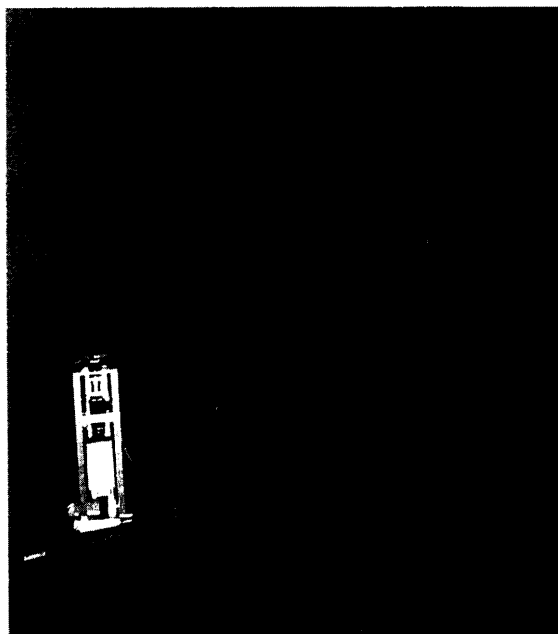


図2 内之浦町民運動場に設置された観測所及び観測の様子

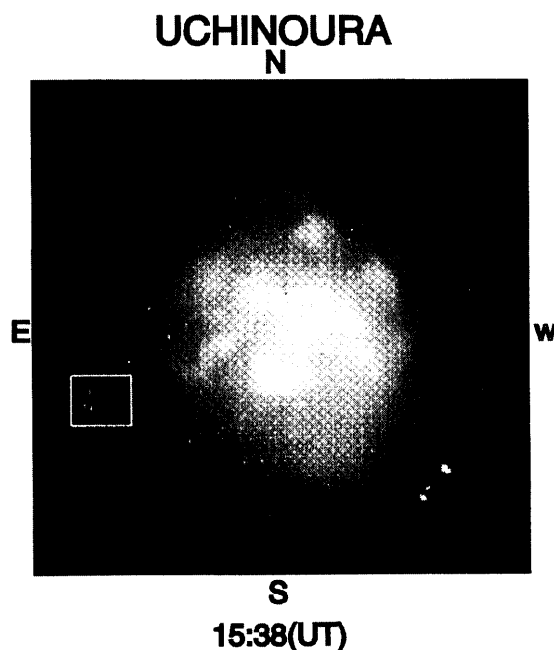


図3 8月20日のS-310-26号機の打ち上げ時に全天イメージの中に入ったTMA発光雲 (白枠の中)

表1 各観測点での観測時間 (UNIVERSAL TIME)

山川のデータは大気光に波状構造が確認できた時間を示す。いずれの日も雲が流れていたため連続したデータは1時間未満である。内之浦のデータに関しても観測中に雲が広がっている場合がある。

	UCHINOURA	OSUMI	YAMAGAWA	SHIGARAKI
August 9	— (no data)	—	—	13:36 ~ 17:45
10	—	—	—	—
11	—	—	—	12:16 ~ 17:57
12	—	—	—	—
13	—	—	—	—
14	—	—	—	—
15	13:30 ~ 18:00	—	14:30	15:04 ~ 19:12
16	—	—	12:30 (faint 630 nm depletion)	
17	—	14:30 ~ 16:40	13:20 (strong 630 nm depletion)	13:09 ~ 18:01
18	12:50 ~ 18:00	—	12:00 (faint 630 nm depletion)	12:29 ~ 19:19
19	13:10 ~ 16:40	—	14:30 (OH/OI gravity wave)	12:57 ~ 18:40
20	— (TMA trail imaged)	—	— (TMA trail imaged)	12:26 ~ 17:04
21	—	—	13:30 (faint 630 nm depletion)	—
22	14:40 ~ 19:10	—	15:20 (OH) ; 19:00 (OI)	14:48 ~ 18:48

### All-sky Imager

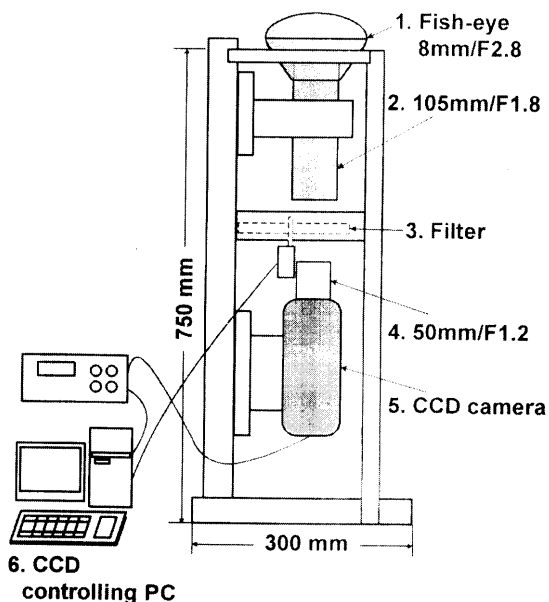


図4 全天イメージャの概観

観測シーズンを過ぎており、観測は終了していた。内之浦、山川、大隅および信楽での大気光の観測結果をまとめると表1のようになる。表からも明らかなように内之浦での天候の条件はあまり優れていない。南国特有の天気の変り易さのためか低空を雲が通過し突然の雨に見舞われ、夜半に観測を中止する機会も多く、また湿度が非常に高いため、連日明け方になると観測地はもやで覆われ観測不可能な状態になった。逆に懸念された漁り火の影響はほとんど受けなかった。

### 3. 観測装置

今回東北大学で大気光観測用に開発し内之浦に設置した全天イメージャの概観を図4に示す。光学系は全て35 mm版の1眼レフカメラ用の市販レンズで構成されている。図4に示すように対物レンズに視野180度の魚眼レンズを使用し、結像される全天画像を100 mm f1.8のレンズで1度コリメートし平行光束になったところでフィルターを通し、最後に50 mm f1.2のレンズでCCDチップ上に全天画像を再結像させている。コリメートレンズと結像レンズの焦点距離の関係から、全天のイメージャがCCDチップ上に収まるようになっており、フィルター透過時の光束の平行度は約7度となっ

ている。カメラには背面照射式の冷却 CCD (HAMAMATSU C4880-72) を使用しており、ペルチェ素子によってチップは外気温 30 度時に、 $-40$  度まで冷却され、その分解能は  $512 \times 512$  ピクセルである。背面照射式の CCD を使用することにより、チップの量子効率 は波長  $400 \sim 750$  nm の範囲で 80% を越えており、波長域によっては今までの CCD に対して倍近い感度を持つようになった。今回の OH 大気光観測にはフィルターにゼラチンフィルターである SC68 (680 nm 以上の波長の光のみ透過) を使用している。この時 CCD カメラの感度特性は長波長側で 900 nm までである。その為実際の透過範囲は 680 nm  $\sim$  900 nm となっている。システムは全てパソコンによって制御されており、1 枚の画像の積分時間は 20 秒、画像取得間隔は約 32 秒である。

一方ユタ大学によって設置されたイメージャも視野は 180 度であり分解能は  $512 \times 512$ 、フィルターには干渉フィルターを使用している。このシステムでは OH (フィルターの透過域は 715-930 nm で、865 nm にノッチが入っている)、OI (557.7 nm, 630.0 nm)、Na (589.2 nm) それぞれの大気光のデータを取得しており、その間隔は OH に関しては 1  $\sim$  2 分 (積分時間は 15 秒)、そのほかの輝線については約 5 分である。

#### 4. 1996 年 8 月 19 日の重力波

SEEK 期間中の 8 月 19 日の 13:15  $\sim$  16:30 UT には小規模重力波によると考えられる波状構造が OH 大気光に観測された (図 5)。13:43 UT 頃に東西方向にのびる波長 23.5 km の波状構造が南側より 1 度現れ、そのまま見えなくなった。その後 14:41 UT には同様な東西にのびる波長 23.5 km の波状構造が現れ、15:36 UT 頃まで伝播方向を少しずつ半時計回りに変えながら存在し続けた。15:36 UT をすぎると北西から南東方向にのびる細かい構造の波が全天を覆い、それまで見えていた東西にのびる波状構造は確認できなくなった。この直後全天は雲に覆われ大気光の観測は不可能となった。図 1 に波状構造の位置とその伝播方向が矢印で記してある。SEEK 期間中鹿児島県山川にある MF レーダーにより高度 60  $\sim$  100 km の中性風の風向、風速データの観測が行われた。図 1 中の白地の矢印は山川の MF レーダーのデータから得た高度 90 km 付近での中性風の風向を示している。MF レーダーのデータによると 8 月 19 日の 13:00 UT ごろから OH 大気光の発光層が存在すると考えられている高度の数 km 上空の 91-94 km の高度で、南向きの風速が約 120 m/s まで速くなっていた。この風速の変化は半日

潮汐の結果と考えられる。この南向きの風によって生まれたシアーが大気重力波を発生させる背景となり、間接的に大気光に波状構造を作り出す原因になったと考えられる。

15:14  $\sim$  15:25 UT に観測された波状構造の波長、周期、見かけ上の速度、進行方向はそれぞれ 23 km、9 分、43 m/s、北北西であった。MF レーダーによるとこの時の高度 89 km 付近での中性風速は 65 m/s なので、重力波の固有パラメータは周期 4.3 分、速度 89 m/s であると考えられる。また 8 月 19 日 12:00  $\sim$  1800 UT の間には E 層イレギュラリティーによる QP エコーが種子島に設置されていた VHF レーダーによって観測されていた。しかしながら QP エコーの伝播方向は南向きであり、OH 大気光によって観測された波状構造とは反対向きであった。よって OH 大気光に観測された波状構造は直接的に E 層イレギュラリティーによって引き起こされたものではないと考えられる。

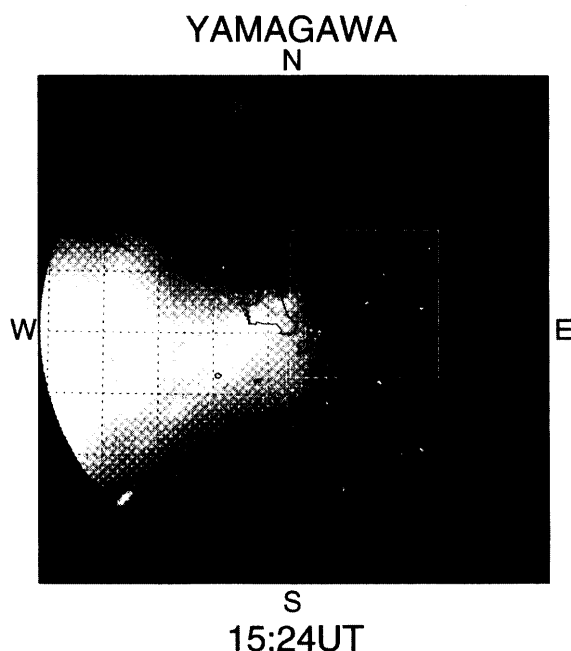


図 5 地理座標上に変換された 15:24 (UT) の全天画像。

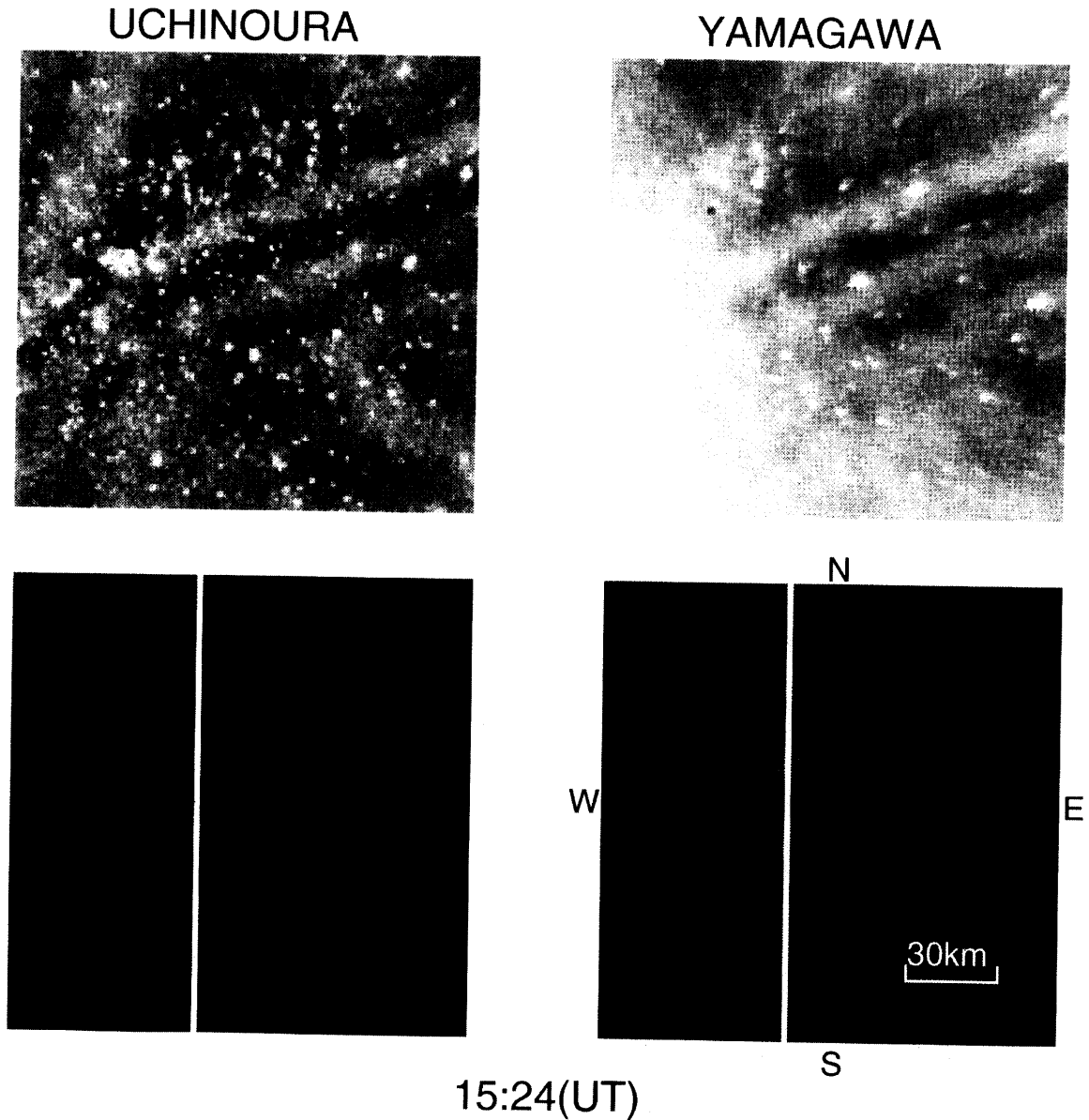


図6 (上段) 15:24 (UT) に2地点で得られたデータのそれぞれから図5の白線部分と地理的に同一の場所を切り出したもの。

(下段) 上段の画像に対して2次元FFTを用いて星の影響を除去したもの。白線は東経131.18度の子午面。

## 5. 画像処理・結果

今回は2地点で同時観測に成功した8月19日15:15～15:30 UTのデータの解析を行った。取得された画像はまず暗電流補正、感度むら補正を行う。次に地理座標変換の基準となる天頂を、星の位置を用いて精度約0.3ピクセルで導出する。大気光の発光高度を89 kmに仮定して地理座標変換した結果を図5に示す。地理座標変換は高度に対して1 km刻みに84～94 kmについて行った。東北大学のデータについてはこの時点で更に15:16～15:30 UTのデータから平均画像を作りそれを差し引くことにより天の川の大気光データに与える影響を軽減してある。図5中の白線で囲まれた範囲(150 km×150 km)を地理的に重なるように2地点のデータからそれぞれ切り出し(図6上)メジアンフィルターで大まかに星を取り除いたあとフーリエ変換をかけた波数空間上にう

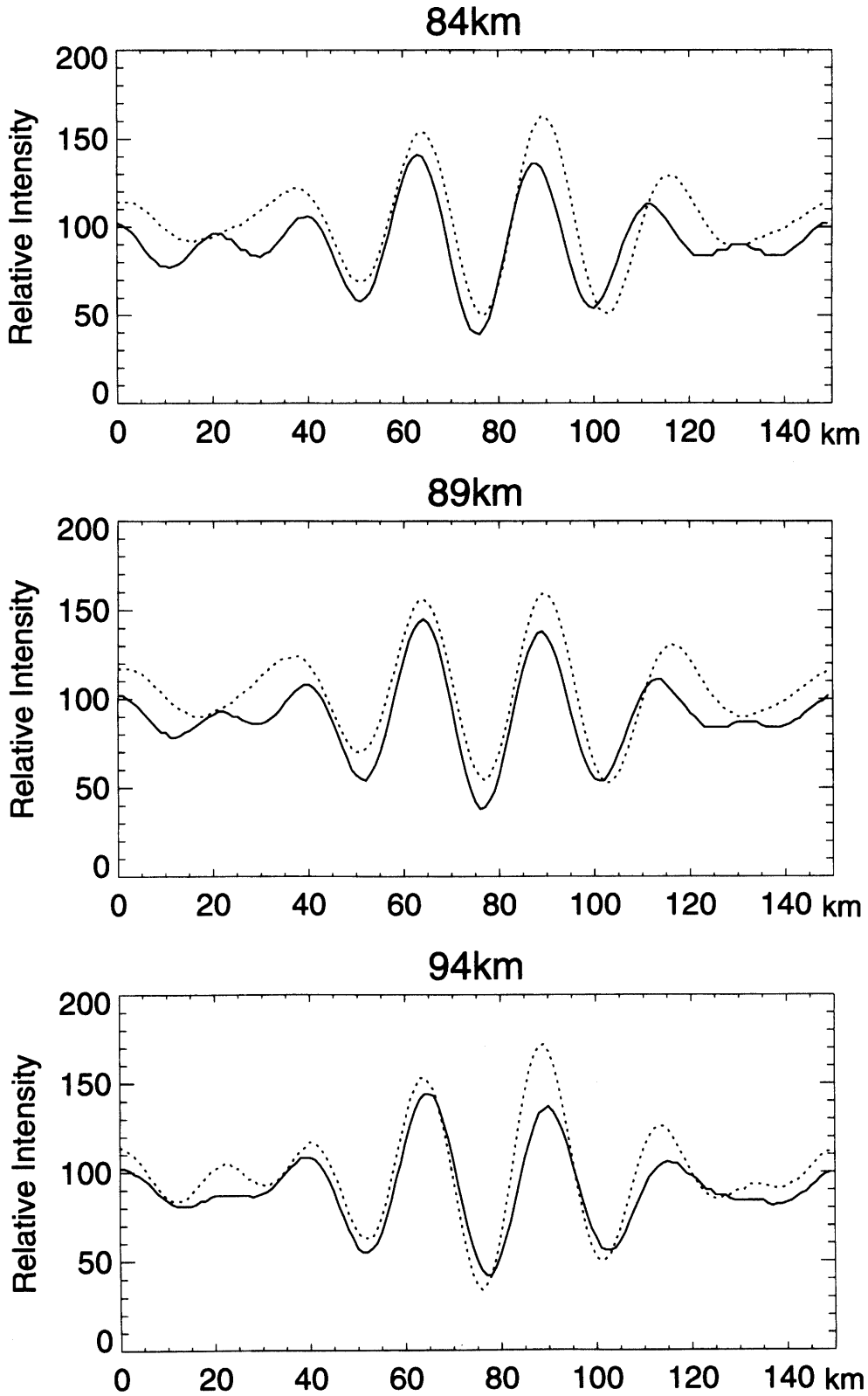


図7 図6に示した白線に沿った大気光画像のプロファイル。2地点からの画像のプロファイルをそれぞれ 84,89,94 km の各高度で座標変換したものを上から示す。実線は内之浦、破線が山川でそれぞれ15:24 (UT) に得られたデータのものである。

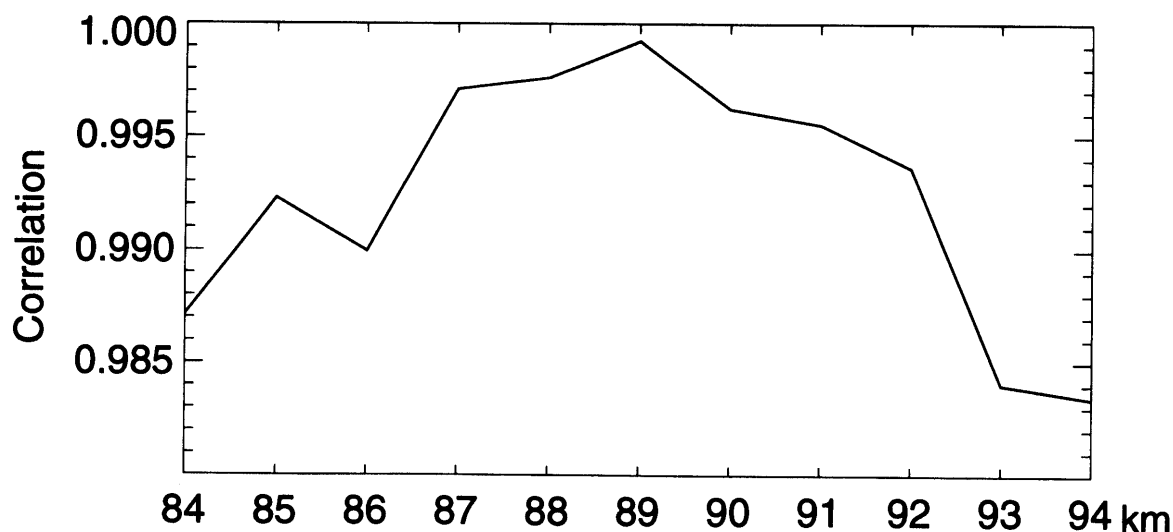


図8 図7で示した2地点からの15:24 (UT) のデータのプロファイルの相互相関を発光高度 (84~94 km) ごとに取ったもの。

つす。そこで波長21~40 kmの波動成分のみを残しフーリエ逆変換をかけ画像を再構成する (図6下)。この画像中の白線部分について、輝度のプロファイルを各高度ごとに2地点分の15:24 UTのデータを重ねたものうち代表的な高度 (84, 89, 94 km) について表示したものが図7である。画像中の白線の位置について、輝度のプロファイルを各高度ごとに2地点のプロファイルの相互相関係数をプロットしたものを図8に示す。この図8から、1996年8月19日15:15~15:30 UTに鹿児島上空で観測された大気光の波状構造の発光高度は、 $89 \pm 3$  kmであると考えられる。

## 6. 議 論

画像を地理座標変換するにあたって必要な天頂座標の決定の際に $\pm 1$ ピクセルの星の位置の読みとり誤差から考えられる。また今回の観測では2台のイメージャを正確には同期させておらず、10秒以内の積分時間のずれが存在する。これらを考慮すると高度にして $\pm 3$  kmの誤差が考えられる。しかしこの誤差幅は半値幅にして約8 kmと考えられている発光層の厚みより小さい。また発光層自身の厚みに起因する誤差に関しては観測した2点が近く ( $\sim 44$  km)、また天頂付近の構造で議論しているため無視できると考えられる。本研究の結果から求められた発光層の高度 $89 \pm 3$  kmはWINDYII/UARSの観測結果の高度88 kmより若干高いが、地上観測を含む多くの観測結果からかけ離れたものではない。

## 7. ま と め

SEEK期間中に内之浦、山川の2点で得られたOH大気光の全天画像を地理座標変換し、2次元FFTを用いて大気光の波状構造を抜き出し三角法により発光高度を決定することに成功した。その結果では1996年8月19日15:24 UT頃に鹿児島上空で観測されたOH大気光の波状構造の発光高度は $89 \pm 3$  kmであった。この発光高度はWINDYII/UARSの観測結果の高度88 kmや、一般的に発光層が存在すると考えられている87 kmより若干高いが、測定誤差を考慮するとこれまでに行われたロケット観測や地上観測の結果とほぼ一致するということができる。またMFレーダー及びVHFレーダーの観測結果から重力波の各種パラメータを求め大気光パラメータと比較した結果、電離圏イレギュラリティと重力波の間には直接的な関係は見い出せなかった。またMFレーダーによってOH大気光の発光層上空数kmで観測された強い南向きの風速シアは、OH大気光で観測さ



れた重力波の原因の有力な候補としてあげられる。今後このような事実を確認するためには、大気のようなパラメータを求めることが可能となる地上、ロケット、衛星などによるさらなる共同観測が重要である。

#### 謝 辞

SEEK キャンペーン期間中、観測所の提供と様々な点で便宜をはかって下さった宇宙科学研究所、通信総合研究所、京都大学超高層電波研究センターのスタッフおよび大隅町の皆様に感謝致します。

#### 参 考 文 献

- Hecht, J. H., R. L. Walterscheid, D. C. Fritts, J. R. Isler, D. C. Senft, C. S. Gardner and S. J. Franke, Wave breaking signatures in OH airglow and sodium densities and temperatures 1. Airglow imaging, Na lidar, and MF radar observations, *J. Geophys. Res.* 102, 6655–6668, 1997.
- Lopez-Moreno, J. J., R. Rodrigo, F. Moreno, M. Lopez-Puertas and A. Molina, Altitude distribution of vibrationally excited states of atmospheric hydroxyl at levels  $v = 2$  to  $v = 7$  *Planet. Space Sci.*, 35, 1029–1038, 1987.
- Lowe, R. P., L. M. LeBlanc and K. L. Gilbert, WINDII/UARS observation of twilight behaviour of the hydroxyl airglow, at mid-latitude equinox, *J. Atmos. Terr. Phys.*, 58, 1863–1869, 1996.
- Taylor, M. J., G. R. Swenson, V. Taylor, Height measurements of OI (557.7nm) gravity wave structure over the Hawaiian Island during ALOHA-93, *Geophys. Res. Lett.*, 22, 2881–2884, 1995.
- Tsunoda, R. T., S. Fukao, and M. Yamamoto, On the origin of quasi-periodic radar backscatter from mid-latitude sporadic E, *Radio Sci.*, 29, 349–365, 1994.
- Woodman, R. F., M. Yamamoto, and S. Fukao, Gravity wave modulations of gradient drift instabilities in mid-latitude sporadic-E irregularities, *Geophys. Res. Lett.*, 18, 1197–1200, 1991.