

大気光波状構造キャンペーン 2000 における 大気光波状構造の地上イメージング観測

久保田 実¹・村山 泰啓¹・石井 守¹・山田 嘉典²・大西 久永²・福西 浩²

Measurements of Nightglow Structures during WAVE2000

By

Minoru KUBOTA¹, Yasuhiro MURAYAMA¹, Mamoru ISHII¹,

Yoshinori YAMADA², Hisanaga OHNISHI² and Hiroshi FUKUNISHI²

Abstract: As part of the Waves in airglow structures experiment over Kagoshima in 2000 (WAVE2000), we have carried out imaging observations of the near infrared OH and O₂ (0,1) bands and the visible wavelength OI 557.7-nm line emission during the new moon periods of 8-15 January, 2000. To determine altitudes of airglow wave structures, three all-sky imagers (ASIs) were set up at the following three separated sites: Kagoshima Space Center (31.25N, 131.08E), Yamagawa (31.20N, 130.62E), and Ohsumi (31.59N, 131.00E). When the S-310-29 rocket was launched at 0550 JST on 10 Jan., 2000, the ASIs observed wave structures which have the horizontal phase velocity and wavelength of 23 m/s and 33 km, respectively. The altitudes of airglow wave structures were estimated as 86, 90, and 92 km for the emissions of OH, O₂, and OI, respectively.

概 要

「大気光波状構造キャンペーン 2000」において我々は OH Meinel 帯, 酸素分子 Atmospheric 帯, 酸素原子 557.7-nm 線のイメージング観測を実施した。大気光波状構造の高度を推定するために, 3 台の全天型イメージャが鹿児島県内の鹿児島宇宙空間観測所 (31.25N, 131.08E), 山川 (31.20N, 130.62E), 大隈 (31.59N, 131.00E) に設置された。S-310-29 号機ロケットが打ち上げられた 2000 年 1 月 10 日の午前 5 時 50 分前後, 上記の 3 種類の大気光中に大気重力波に伴う波状構造が現れ, 水平波長は約 33km, 位相速度は南方に約 23 m/s であった。また, 波状構造高度は OH, O₂, OI 大気光においてそれぞれ 86, 90, 92 km と見積もられた。

重要語: 大気光, 大気動波, イメージング観測

1 通信総合研究所

2 東北大・理

1. は じ め に

高度 85km から 110km にかけての中間圏界面・下部熱圏領域には酸素原子 557.7-nm 線, 酸素分子 Atmospheric 帯, OH Meinel 帯など様々な大気光が生起する。これらの大気光は、大気の組成・密度等から決まるそれぞれ特有の高度で発光しており、地上から大気光イメージャを用いて撮像することができる [Taylor et al., 1987; 1995]。大気光イメージャとは、広角の対物レンズ、狭帯域の光学フィルタ及び高感度の 2 次元受光器で構成された高感度カメラである。

大気光イメージング観測で得られる大気光イメージ中にはしばしばさざなみのような波状構造が現れる。この波状構造は、下層大気から自由伝播してきた、あるいは水平方向からダクト伝播してきた準単色の大気重力波が大気光発光層を揺ることにより生成すると一般的には理解される。中間圏界面・下部熱圏領域のエネルギー収支には大気波動の伝播や砕波によるエネルギーの輸送・放出機構が重要な役割を果たしていると考えられることから、大気光イメージング観測は、直接観測が難しくデータの乏しい中間圏界面・下部熱圏領域の大気ダイナミクスを知るための貴重な手段として期待される。そしてこのような理由から大気光イメージング観測は近年盛んに行われるようになっていく。

このような観点で大気波状構造を研究する場合 2 つの方向性が考えられる。1 つは、継続的にデータを集め観測される大気波状構造を統計的に解析する方法である。発生頻度や伝播方向、波長の季節依存性や時刻依存性などから、エネルギーの総量や波動の発生源に関する情報が得られる。もう 1 つは、ある 1 つの現象についていろいろな角度から観測しその機構を解明する方向である。実際のところ大気波動が伝播すると大気の密度や温度がどの程度変動を受け、それが励起反応にどう影響し、大気発光がどのように変動するのかは、実はまだよく分かっていない。

大気光波状構造キャンペーン 2000 は、主に後者を目的として実施された。地上イメージング観測がターゲットとしたのは水平波長数 km ~ 100km 程度の大気重力波構造で、イメージデータから大気重力波の水平波長や位相速度を得る [大西 他, 2000]。更に複数の観測点から同時観測することにより大気光波状構造高度を推定する [Kubota et al., 1999b]。また、全天型大気光イメージャ (ASI) で大気重力波構造を観測している最中に、観測ロケット S-310-29 号機を打ち上げ、酸素原子密度や大気光発光強度 [岩上 他, 本特集]、風速 [小泉 他, 本特集]、電子密度 [吉村, 2000] の高度プロファイルを直接観測する。ロケット観測の詳細については、岩上 他 [本特集] に示されており、本編においては、地上イメージング観測に主眼をおき報告する。

2. 観 測 概 要

ASI は鹿児島県内の次の 3 地点に設置した：宇宙科学研究所鹿児島宇宙空間観測所（以下 KSC）（北緯 31.25°, 東経 131.08°）、通信総合研究所山川電波観測所（以下 Yamagawa）（北緯 31.20°, 東経 130.62°）、大隈運動公園（以下 Ohsumi）（北緯 31.59°, 東経 131.00°）。それぞれの観測地間の距離は 40 ~ 60km であり、このうち 2 点の同時観測データから大気光波状構造高度が導出できる。観測点を 3 点に増やしたのは、天候に左右されやすい ASI 同時観測成功確率を高めるためである。

図 1 に ASI の設置場所及び大気光発光高度を 100km と仮定したときの ASI の視野を示す。内之浦、山川においては酸素原子 557.7-nm 線（以下 OI）、OH Meinel 帯（以下 OH）、酸素分子 Atmospheric 帯（以下 O₂）の 3 種類の大気光とバックグランド光（732-nm）について同期を取りながら連続観測し、また大隈においては OI 大気光とバックグランド光（608-nm）のみを連続観測した。観測の時間分解能は 5 分である。表 1 にそれぞれの ASI における各チャンネルの透過波長と積算時間等を示す。

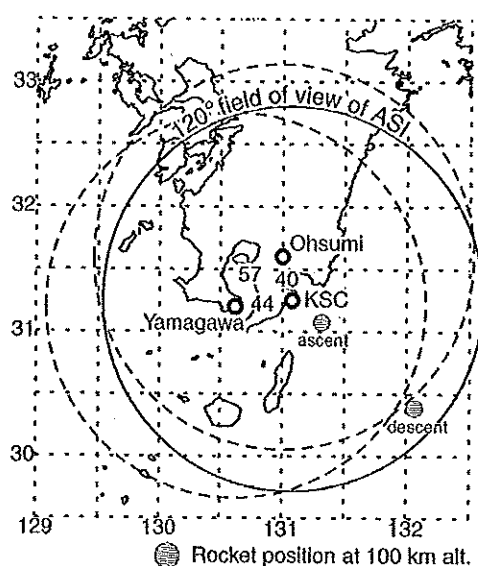


図1 ASI 設置装置 (KSC,Yamagawa,Ohsumi), 及び大気光発光高度を100km, 視野を120° と仮定したときのそれぞれの観測視野. ロケットの大気光発光高度通過時の水平位置が斜線部分で示されている. 各観測間に記された数値は、観測点間の距離 (km).

表1 ASI の観測対象, 使用したフィルムの特性, 及び積算時間

Location	Name of instruments	channel	emission	wavelength (nm)	filter		typical exposure time (sec)
					center wavelength (nm)	FWHM (nm)	
KSC	CRL All-sky Imager (MUSASI*1)	0	—	—	—	—	—
		1	OI	557.7	557.7	2.0	75
		2	OH Meinel bands	red~near infrared	680<**		15
		3	O ₂ (0,1) bands	860 - 870	866.5	9.8	135
		4	Background continuum	—	572.4	1.9	135
Yamagawa	CRL All-sky Imager (MUSASI*2)	0	—	—	—	—	—
		1	OI	557.7	557.7	1.8	75
		2	OH Meinel bands	red~near infrared	680<**		15
		3	O ₂ (0,1) bands	860 - 870	866.0	9.7	135
		4	Background continuum	—	572.6	1.9	135
Ohsumi	Tohoku Univ. All-sky Imager	—	OI	557.7	557.7	5.0	120
		—	Background continuum	—	608.0	2.5	120

* Multi-color System for All-Sky Imaging

** sharp-cut filter with a notch at 865 nm to suppress the O₂ (0-1) emission

3. 装置概要

図2にCRL-ASIのシステム概略図を示す。本装置の光学系や受光系に関する詳細は[久保田他, 1999a]において報告されている。また今回の観測のために、以下のような機能が付加されている。

1. 遠隔地からFTPで送られた観測スケジュールファイルに従い無人観測する機能。
2. 得られた大気光イメージを即座に jpeg 圧縮し、指定された Web サーバーに FTP 送信する機能。jpeg 圧縮により約 600KB のイメージデータサイズを 30KB ほどに縮めることができ、またクイックルックとしては十分に使用可能な画質も得られる。Web サーバーに送られた画像はリアルタイムで世界中どこからでも閲覧可能である。
3. 全天候型ケースにイメージャを収納し、屋外での長期観測を可能にした。ケース内温度は $20 \pm 2^{\circ}\text{C}$ 程度にコントロールされる。

今回のような多点キャンペーン観測においては観測者同士が出来るだけ多くの情報を同時進行的に共有できることが実験をやり易くする上で非常に重要である。そのような考えから、WAVE2000 期間中は KSC と Yamagawa の ASI の観測データを、上記の 2 の機能を用いてリアルタイムで web 公開した。この試みは、多観測点の大気重力波出現状況をロケットコントロールセンターで監視し打ち上げのタイミングを決める上で役に立ったとともに、インターネット（特に Web 機能）が情報共有の手段として非常に簡便かつ有用であることを示した。

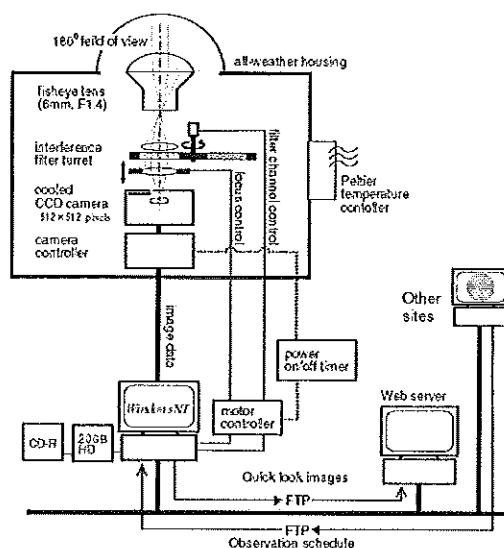


図2 CRL-ASI システム概略図

4. 観測結果

大気光観測ロケットは日本時間 2000 年 1 月 10 日 5 時 50 分頃に打ち上げられた。この時 Yamagawa で観測された大気光イメージを図3に示す。OI, O₂, OH 全ての大気光中には東西にのびる波状構造が現れているのが分かる。図4にはOIのイメージを、天頂を通る南北に輪切りにしたものを示す。この図において縦軸は絶対強度 (Rayleigh 値) に変換してあり、また横軸はイメージ中の位置を pixel で表している。この図からこの時の OI 大気光発光強度が平均して 105 Rayleigh ほどであり、また波状構造に伴う強度変動が 2.4% ほどであることが分かる。大気光強度はおおむね周期的に変化しており、またイメージャの対物レンズである魚眼レンズの特性により

波状構造に伴う周期的変動の波長は天頂から離れるにしたがって見かけ上短くなっている。しかし、120-200 pixel 付近においてはこの変動の周期性が崩れているように見える。

この波状構造は Yamagawa において天候が回復した 10 日 5 時 25 分頃からロケット打ち上げ時まで継続して現れており、その後夜明けの薄明が進むにつれて徐々に淡くなり、6 時 20 分頃に消滅した。この時の大気光イメージから得られた大気光絶対強度、大気光波状構造高度及び波状構造の特性を表 2 に示す。(この特性の導出に関しては久保田 他 [2000], 大西 他 [2000] を参照)。大気光波状構造高度は OI, O₂, OH においてそれぞれ 92km, 90km, 86km と見積もられた。これらの高度は図 1 に示したロケットの ascent 位置付近における値である。水平波長 λ_h , 見かけ上の (背景風を考慮しない) 位相速度, 周期, 伝搬方向はそれぞれ約 33km, 約 23m/s, 約 24min, 北から時計回りに 173 度 (ほぼ南向き) であり、これらの値は大気光の種類によらずほぼ一定である。これらのパラメータから、観測された大気波動は大気重力波と判断される。また、大気光ごとの波状構造の位相差は例えば OI と OH との間では 2.9km ($=0.09 \lambda_h$) であった。

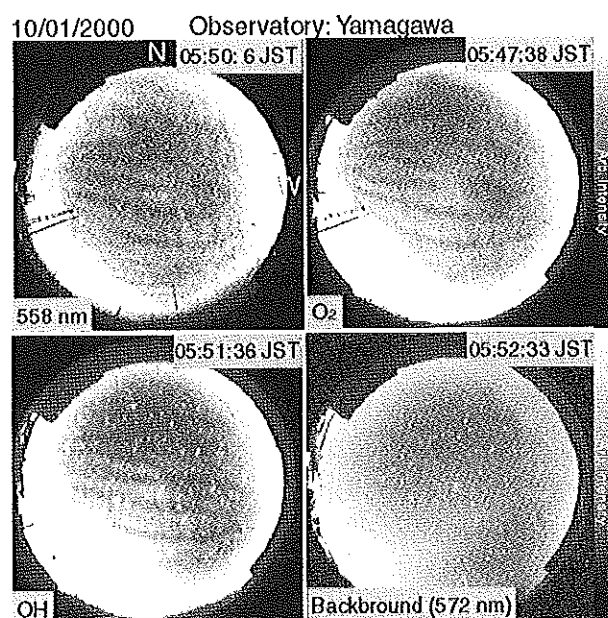


図 3 大気光観測ロケット打ち上げ時付近に Yamagata で観測された大気光イメージ

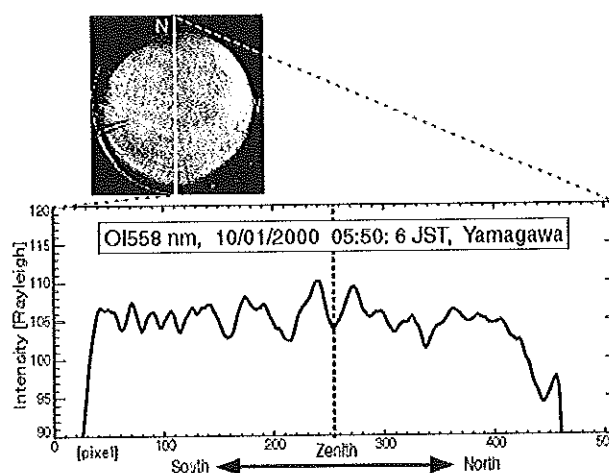


図 4 大気光観測ロケット打ち上げ時に観測された OI 大気光イメージ中の北から南にかけての大気光絶対強度変動。この図において縦軸は絶対強度 (Rayleigh 値) に変換してあり、また横軸はイメージ中の位置を pixel で表している。

表 2 大気光イメージから得られた大気光絶対強度、大気光波状構造高度、及び大気重力波の水平パラメータ。但し OH の絶対強度は Meinel 帯全体の積分値ではなく 680-900nm の範囲の積分値である。大気光絶対強度を導出するための CRL-ASI の感度較正は、国立極地研究所の積分球を用いて行った。

Emission	絶対強度の全天平 均値 (Rayleigh)	波状構造 高度(km)	水平波長 (km)	水平位相速 度(m/s)	周期 (min)	伝搬方向 (度、北から時計回り)
OI	105	92	33.3	22.5	24.7	172.9
O ₂	550	90	34.1	23.2	24.5	173.7
OH	5,000	86	32.6	24.5	22.3	173.5

高度ごとの位相差: [OI-O₂] 0.6 km / [O₂-OH] 1.8 km / [OI-OH] 2.9 km

4. 考 察

4.1 大気光波状構造高度について

表 2 にあるように大気光波状構造高度は OI, O₂, OH においてそれぞれ 92km, 90km, 86km と推定される。大気光イメージャの空間分解能の限界から来る高度導出誤差は ± 2km 程と見積もられる [Kubota et al., 1999b]。この手法には先述の大気光イメージャの空間分解能の限界から来る高度導出誤差以外にも、イメージ中のノイズによる導出誤差等の誤差原因が存在すると思われるが、それらについてまだ議論が進んでおらず注意が必要である。

観測から見積もられた高度は従来考えられてきたそれぞれの大気光発光ピーク高度 (OI: ~ 95km, O₂: ~ 92km, OH: ~ 87km) [Tohmatsu and Ogawa, 1990] をやや下回る値を示している。これは大気重力波による大気発光への影響は大気発光層の下部に効果的に効くとした Swenson and Gardner [1998] の研究結果と整合するようにも思えるが、今回のケースにおいてはむしろ実際の大气光発光ピーク高度の変動が大気光波状構造高度に大きく影響している可能性がある。岩上 他 [本特集] によるロケット観測の結果、OI 大気光発光強度の高度プロファイルは双ピーク構造を示し、そのピーク高度は 91km と 100km であった。また O₂ 大気光は高度 90km に主ピークを、OH 大気光は 88km にピークを持っていた。地上観測から見積もられた OI 及び O₂ 大気光の波状構造高度 (92km, 90km) は、ロケットから得られた OI 大気光発光の下段のピーク高度及び O₂ 大気光発光の主ピーク高度とほぼ一致する。

4.2 大気光ごとの波状構造の位相差による鉛直波長の推定

波状構造の位相差は OI と OH との間では 2.9km (=0.09 λ_h) であった。前節において両者の高度差は 6km と見積もられたので、これらから、大気光イメージャの撮像された大気重力波の鉛直波長 λ_z は 67km (=6/0.09) と推定される。このような長い鉛直波長は大気重力波のダクト伝搬を示唆するが [Isler, 1997], この鉛直波長推定には以下に述べるような問題点があり、早急に結論を出すことはできない。

- 波状構造の位相差を 0.09 λ_h としているが、実はこれが 1.09 λ_h であったという可能性がある (この場合大気重力波の鉛直波長 λ_z は 6km 前後となる)。但し、位相差の解析の際、OI, O₂, OH の 3 つの波長で波構造 (波長のばらつきや、枝分かれ等) がほぼ “合同” なことは目で見て確認しており、それぞれの発光間で位相が 1 波長分ずれることは考えにくい。
- OH 帯大気光は中間生成物オゾンの光化学寿命が 5 分程度と OI の場合に比べて長いので、OH 帯大気光もそれらに比べて遅れることになる [岩上, 2000]。OI と OH の位相差を議論する場合この点を考慮する必要がある。

4.3 背景風を考慮した鉛直波長の推定

大気光中に現れた大気重力波について、以下の分散関係式を用いてその鉛直波長を推定することができる [Hines, 1960; Isler, 1997]。

$$\frac{(2\pi)^2}{\lambda_z^2} \approx \frac{N^2}{V_{int}^2} - \frac{(2\pi)^2}{\lambda_h^2} - \frac{1}{4H^2} \quad (1)$$

ここで N は Brunt-Vaisala 周波数 (~ 3.33 × 2π × 10³ s⁻¹)、λ_h, λ_z は大気重力波の水平、鉛直波長、V_{int} は重力波の固有水平位相速度 (見かけ上の位相速度 - 背景風速)、H はスケールハイト (~ 6km) である。この式を用いて λ_z を推定するためには、背景風速が必要がある。

図 5 にロケット打ち上げ時刻前後に、ロケット搭載のチャフ [小泉 他, 本特集; 下山, 2000], Yamagawa の MF レーダー [村山 他, 本特集], 信楽 (34.85N, 136.11E) の MU レーダーで観測された風速の高度分布を示す。この図において 3 手法で測定された風速の傾向は似通っているといえるが、風速の絶対値に関してはかなり食い

違っている。この違いの原因として考えられるのはまず風速測定的时间・空間分解能の違いである。ここで示されているチャフによる風速測定的时间・高度分解能はそれぞれ 1min, 1km, MF レーダー測定的时间・高度分解能は 120min, 7km, MU レーダー測定的时间・高度分解能は 30min, 2km であり、また MF レーダーや MU レーダーに測定値は水平距離にして直径 100km 以上の範囲の平均値とみなすことができる。従ってチャフに比べて MF レーダーによる風速は変動が鈍って見える可能性がある。また、測定場所の違いも風速の食い違いの原因として考えられる。MF レーダーの測定場所 (Yamagawa 上空) と着目している波状構造の位置 (ロケット ascent 付近) との距離は約 68km, チャフの測定場所 (ロケット descent 付近) とロケット ascent との距離は約 120km であるがそれに対し MU レーダーはロケット ascent から 600km 以上離れている。

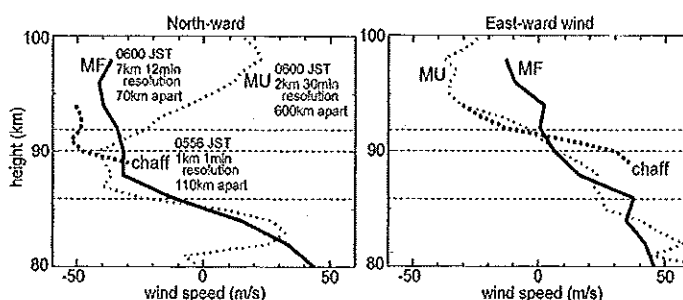


図5 ロケット打ち上げ時に、チャフ(太い破線), Yamagawa の MF レーダー(太い実線), 信楽の MU レーダー(細い実線)で観測された風速の高度プロファイル。[Iwagami et al., 2000b]

これらのことを鑑み、本報告では MF レーダーとチャフによる風速を背景風として採用し、両方の場合について λ_z を推定した。表 3 に MF レーダーとチャフによる背景風速の重力波進行方向成分値、並びにこれらの値を用いて計算した大気重力波の固有水平位相速度 V_{int} , 固有周期 T_{int} , 鉛直波長 λ_z を示す。重力波進行方向とは、大気光イメージから得られた見かけ上の大気重力波の進行方向 (北から時計回りに 173 度の方向) である。これより、背景風として MF レーダーの値を採用した場合鉛直波長が 3km 前後、チャフの値を採用した場合は 8km 前後と推定されることが分かる。また、高度 86km 付近においては固有位相速度及び鉛直波長が 0 に近くなっておりこのあたりの高度では大気重力波が伝搬し得ない (クリティカルレベルである) ことが分かる。

表 3 MF レーダー及びチャフによる背景風速の重力波進行方向成分値、並びに、両者の値を用いて計算した大気重力波の固有水平位相速度 V_{int} , 固有周期 T_{int} , 鉛直波長 λ_z 。

高度 (km)	MF レーダーから 得られた風速の 重力波進行方向 成分 (m/s)	MF レーダー風速を採用した場合の 波動パラメータ			チャフから得られ た風速の重力波 進行方向成分 (m/s)	チャフ風速を採用した場合の 波動パラメータ		
		固有水平位相速度 V_{int} (m/s)	固有周期 T_{int} (min)	鉛直波長 λ_z (km)		固有水平位相速度 V_{int} (m/s)	固有周期 T_{int} (min)	鉛直波長 λ_z (km)
92	33.1	-10.6	52.3	3.2	51.1	-28.6	19.4	8.9
90	31.6	-8.4	67.7	2.5	47.6	-24.4	23.3	7.5
86	24.0	0.5	1887	0.15	—	—	—	—

この (1) 式による λ_z の導出においては N (Brunt-Vaisala 周波数) として一定値を与えている。しかし、村山 他 [本特集] によるとロケット観測時の中間圏界面領域における N^2 は、高度 93km 付近で $10 \times 10^6 \text{ s}^{-2}$ 程で高度が下がるにつれて小さくなり高度 86km 付近で最小値 ($\sim 0 \text{ s}^{-2}$) 程度となっていた可能性がある。一般的には N が小さくなると λ_z は次第に大きくなり、そしてあるところで (1) 式の右辺が負になってしまう。このような条件のもとでは大気重力波はダクト波的な振る舞いをすると思われる [Isler, 1997]。

しかし今回のケースでは、 N が小さくなるとともに、 V_{int} も小さくなってゆく。そのため現時点では、高度 86km 付近において (1) 式の右辺 ($=1/\lambda_z^2$) が大きくなるのか (クリティカルレベル)、小さくなるのか (ダクトモード) 判断ができない。

5. ま と め

2000 年 1 月に実施された大気光波状構造キャンペーン 2000 において我々は地上 3 地点からの大気光イメージ同時観測を行った。その結果、日本時間 2000 年 1 月 10 日 5 時 50 分の大気光観測ロケットの打ち上げ時に OI, O₂, OH 全ての大気光中において東西にのびる波状構造を捉えた。この時の OI 大気光発光強度は平均して 105 Rayleigh ほどであり、また波状構造に伴う強度変動は 2-4% ほどであった。また KSC と Yamagawa のイメージデータより求めた大気光波状構造高度は OI が 92 km, O₂ が 90 km, OH が 86 km であった。これらの高度は従来考えられてきたそれぞれの発光ピーク高度とやや異なっているが、これは今回ロケットで観測された大気光発光ピーク高度がかなり特異であったことと関係していると思われる。

大気光イメージから求めた波状構造の水平波長、見かけ上の (背景風を考慮しない) 位相速度、周期、伝搬方向はそれぞれ約 33km, 約 23m/s, 約 24min, 北から時計回りに 173 度 (ほぼ南向き) であり、これらの値は大気光の種類によらずほぼ一定である。これらのパラメータから、観測された大気波動は大気重力波と判断される。背景風を考慮して推定されるこの大気重力波の鉛直波長は高度 92km 付近では 3-8km 程度である。しかし高度がそれより下がると、固有位相速度と Brunt-Vaisala 周波数がともに小さくなって行くため、現時点では鉛直波長が長くなってゆくのか短くなってゆくのか判断ができず、今後より定量的な調査が必要である。

また、果たしてこのような鉛直構造をもつ大気重力波が地上から縞々として観測されるのか、大気重力波がどれくらいの振幅を持っていれば、地上から 2~4% の大気光水平強度変動として観測されるのか、そして、ロケット観測で得られた酸素原子密度や OI 557.7 nm 大気光のダブルピーク構造 [岩上 他, 本特集] と、大気光イメージャで観測された大気重力波の関係等についての議論は今後の課題である。

謝 辞

良好な観測環境を整えてくださった、宇宙科学研究所鹿児島宇宙空間観測所、通信総合研究所山川電波観測所スタッフの方々、ならびに運動公園の使用を快く承諾してくださった大隈町役場の方々に深く感謝いたします。全天型大気光イメージャの感度較正は国立極地研究所の施設 (積分球及びスペクトロメータ) を用いて実施しました。

文 献

- [1] Hines, C. O.: Internal atmospheric gravity waves at ionospheric heights, Can. J. Phys., 38, p1,441-1,481, 1960.
- [2] Isler, J. R., M. J. Taylor and D. C. Fritts: Observational evidence of wave ducting and evanescence in the mesosphere, J. Geophys. Res., 102, p26,301-26,313, 1997.

- [3] 岩上直幹, 関口宏之, 柴木友和, 鈴木利和, 竹川暢之: 大気光波状構造キャンペーン 2000 における酸素原子密度・大気光放射率のロケット観測, 本特集.
- [4] 岩上直幹, 柴木友和, 内島仁志: WAVE2000 における大気光励起過程, 平成 12 年度名古屋大学太陽地球環境研究所研究集会「中間圏・下部熱圏/電離圏相互作用～大気潮汐波の振る舞い～」収録, 2000a.
- [5] Iwagami, N., T. Shibaki, T. Suzuki, Y. Yamada, H. Ohnishi, Y. Takahashi, H. Yamamoto, H. Sekiguchi, K. Mori, Y. Sano, M. Kubota, Y. Murayama, M. Ishii, K-I. Oyama, R. Yoshimura, M. Shimoyama, Y. Koizumi, K. Shiokawa, N. Takegawa and T. Nakamura: The Wave2000 campaign: Overview and preliminary results, *J. of Atmos. and Solar-Terr. Phys.*, submitted, 2000b.
- [6] 小泉宣子, 下山 学, 小山孝一郎, 村山泰啓, 橋元保雄, 下瀬 滋, 長谷川克也, 鎌田幸男, 阿部琢美: フォイルチャフ放出機構の開発と S-310-29 号機による上部中間圏および下部熱圏の中性風向, 風速測定, 本特集.
- [7] 久保田実, 山田嘉典, 石井 守, 坂野井健, 佐藤光輝, 福西 浩: 新型大気光イメージャの開発及び観測計画, 第 13 回大気圏シンポジウムプロシーディング, p120-123, 1999a.
- [8] Kubota, M., M. Ishii, K. Shiokawa, M. K. Ejiri and T. Ogawa: Height measurements of nightglow structures observed by all-sky imagers, *Adv. Space Res. Vol. 24, No. 5*, p593-596, 1999b.
- [9] 久保田実, 石井 守, 山田嘉典, 大西久永, 福西 浩: WAVE2000 キャンペーンにおける大気光波状構造高度観測の初期結果, 第 14 回大気圏シンポジウムプロシーディング, p107-111, 2000.
- [10] 村山泰啓, 五十嵐喜良, 小泉宣子, 下山 学, 小山孝一郎, 中村卓司, 津田敏隆: WAVE2000 キャンペーン時の S310-29 搭載チャフ・山川 MF レーダー・MU レーダーによる中間圏・下部熱圏中の風速・気温観測, 本特集.
- [11] 大西久永, 山田嘉典, 福西 浩, 久保田実, 石井 守: WAVE2000 キャンペーンにおける大気光波状構造パラメータの初期結果, 第 14 回大気圏シンポジウムプロシーディング, p102-106, 2000.
- [12] 下山 学, 小泉宣子, 小山孝一郎, 村山泰啓, 橋本保雄, 下瀬 滋, 長谷川克也, 喜久里豊: WAVE2000 キャンペーンにおけるチャフ放出実験, 第 14 回大気圏シンポジウムプロシーディング, p91-95, 2000.
- [13] Swenson, G. R., and C. S. Gardner: Analytical models for the responses of the mesospheric OH and Na layers to atmospheric gravity waves, *J. Geophys. Res.*, 103, p6,271-6,294, 1998.
- [14] Taylor, M. J., M. A. Hapgood and P. Rothwell: Observations of gravity wave propagation in the OI (557.7 nm), Na (589.2 nm) and the near infrared OH nightglow emissions, *Planet. Space Sci.*, 35, p413-427, 1987
- [15] Taylor, M. J., M. B. Bishop and V. Taylor: All-sky measurements of short period waves imaged in the OI (557.7 nm), Na (589.2 nm) and near infrared OH and O2(0.1) nightglow emissions during the ALOHA-93 campaign, *Geophys. Res. Lett.*, 22, 92,833-2836, 1995.
- [16] Tohmatsu, T. and T. Ogawa: *Compendium of aeronomy*, p360-368, Terra Scientific Publishing Co., Tokyo, 1990.
- [17] 吉村玲子, 小山孝一郎: WAVE2000 における電子密度測定－初期結果報告－, 第 14 回大気圏シンポジウムプロシーディング, p87-90, 2000.

