

大気光波状構造キャンペーン2004における地上観測の概要 ならびに観測初期結果

久保田 実¹・村 山 泰 啓¹・川 村 誠 治¹・五十嵐 喜 良¹
亘 慎一¹・吉 村 玲 子¹・西牟田 一 三²・塩 川 和 夫³
大 塚 雄 一³・長 澤 親 生⁴・阿保 真⁴・内 海 通 弘⁵
山 本 博 聖⁶・関 口 宏 之⁶・山本 衛⁷・中 村 卓 司⁷
岩 上 直 幹⁸・小 山 孝一郎⁹・阿 部 琢 美⁹

Overview and initial results of ground-based observations in the WAVE2004 campaign

By

Minoru KUBOTA¹, Yasuhiro MURAYAMA¹, Seiji KAWAMURA¹, Kiyoshi IGARASHI¹,
Shinichi WATARI¹, Reiko YOSHIMURA¹, Ichizo NISHIMUTA², Kazuo SHIOKAWA³,
Yuichi OTSUKA³, Chikao NAGASAWA⁴, Makoto ABO⁴, Michihiro UTSUMI⁵,
Hiromasa YAMAMOTO⁶, Hiroyuki SEKIGUCHI⁶, Mamoru YAMAMOTO⁷, Takuji NAKAMURA⁷,
Naomoto IWAGAMI⁸, Koh-ichiro OYAMA⁹, Takumi ABE⁹

Abstract: We will report an overview and initial results of ground-based observations in the WAVES in airglow campaign in 2004 (WAVE2004). When the S-310-33 rocket was launched in the night of 17 January 2004, there existed three kinds of atmospheric waves in the mesopause region; 1) O₂ rotational temperature by a spectrophotometer and horizontal wind by an MF radar show cyclic variations which have periods of 6, 12, and 24 hours. 2) Sodium density profile measured by a sodium lidar shows a downward propagating wave with a period and vertical wavelength of 1.5-2 hours and 7 km, respectively. 3) In OI 557.7-nm airglow images by all-sky imagers, there exist a gravity wave structure propagating southward with a velocity of 40 m/s.

¹ NICT

² 電波技術協会

³ 名大STE

⁴ 都立大

⁵ 有明高専

⁶ 立教大

⁷ 京大RISH

⁸ 東大

⁹ JAXA

概 要

大気光波状構造キャンペーン2004 (WAVE2004) における地上観測の概要および初期結果について報告する。S-310-33号機ロケットが打ち上げられた2004年1月17日の晩、地上観測によって中間圏界面領域に以下の3種類の大気波動が存在することが確認された。1) O_2 回転温度やMFレーダーによる水平風速には6時間、12時間、24時間周期の変動が見られた。2) ナトリウムライダーによるナトリウム原子密度データ中には、1.5-2時間ほどの周期をもつ、鉛直波長約7キロメートルで下方に伝播する大気波動が見られた。3) ナトリウムライダーデータ、ならびに大気光イメージデータ中には、周期約30分、水平位相速度秒速約40メートルで南に伝播する弱い大気重力波が観測された。

1. 序

高度85から100キロメートル程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 (以下OI)、酸素分子Atmospheric帯 (以下 O_2)、OH Meinel帯 (以下OH) など数種類の大気発光層が存在する。また、ナトリウム、鉄などの金属原子を多く含む層もこの高度に存在する [Taylor et al., 1995]。これらの大気発光層や金属原子層はこの領域を伝播する大気波動に揺すられて変動する。逆に言えば、大気発光や金属原子密度の変動を観測すれば、この領域を伝播する大気波動に関する情報が得られることになる。

大気光波状構造キャンペーン2004 (以下WAVE2004) は、ロケットによる大気波動鉛直構造の直接観測と、地上からの大気波動鉛直・水平構造の遠隔観測を同時に行い、大気波動現象の立体的な描像を捉えることを目的としている。本報告では、WAVE2004における地上観測の概要ならびに観測結果について報告する。

2. 観測概要

2.1 地上観測体制

2000年1月に同様の目的で実施された大気光波状構造キャンペーン2000 (以下WAVE2000) においては、天候の関係でロケット打ち上げ前後30分ほどの間しか晴れ間がなく、地上からは30分以下の周期の大気光変動しか観測できなかった [久保田 他, 2000]。この経験を生かし、我々はより精度の高い観測データを得るためにロケット打ち上げ条件の見直しを行った。また、地上からも大気波動の鉛直構造や鉛直伝播を測る手段として、ナトリウムライダーを新たに導入し、さらに多面的な観測が行える体制でロケット打ち上げに臨んだ。

表1にWAVE2004における地上観測のラインナップを示す。大気波動水平構造を観測するための全天イメージャ (以下ASI) は鹿児島県内の次の3地点に設置した：内之浦宇宙空間観測所 (以下USC)、山川電波観測所 (以下Yamagawa)、佐多観測所 (以下Sata)。それぞれの観測地間の距離は24~46キロメートルであり、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の導出が可能である。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100キロメートルと仮定したときのASIの視野の目安を示す。図中の破線、一点破線の四角形はYamagawa、Sataからの観測視野の目安を示し、ASI設置場所が立ち木で囲まれているSataの観測視野が、Yamagawaに比べて狭くなっている。それぞれの観測点におけるASIの観測モードは以下のとおり。

USC : OI, OH, ナトリウム大気光と背景光 (572nm) を約5分の時間分解能で撮像。

Yamagawa : OI, OH, O_2 と背景光 (572nm) を4分の時間分解能で撮像。

Sata : OI, 酸素原子630.0-nm線, OHを5.5分の時間分解能で、また O_2 と背景光 (572nm) を30分ごとに撮像。

これらの3地点におけるASI観測は基本的に無人で実施された。但し、Yamagawaにおいてはナトリウムライダー

表1 WAVE2004における地上観測装置

観測地 [緯度、経度]		
観測装置	取得データ	担当
宇宙航空研究開発機構内之浦宇宙空間観測所 (USC) [北緯31.25°、東経131.08°]		
地上近赤外線大気光観測装置	OH回転温度	立教大
全天イメージャ	大気光イメージ (5波長)	NICT
情報通信研究機構山川電波観測所 (Yamagawa) [北緯31.20°、東経130.62°]		
ナトリウムライダー	Na密度プロファイル・鉛直波動	都立大・NICT 九州有明高専
全天イメージャ	大気光イメージ (5波長)	NICT
MFレーダー	風速 (高度60-90km)	NICT
イオノグラム	電離層	NICT
名古屋大学太陽地球環境研究所佐多観測所 (Sata) [北緯31.02°、東経130.68°]		
全天イメージャ	大気光イメージ (5波長)	名大STEL
大気光分光温度フォトメータ	OH, O ₂ 回転温度・大気光輝度 (6波長)	名大STEL
信楽MU観測所 (MU) [北緯34.85°、東経136.11°]		
MUレーダー流星モード	風速75-95km	京大RISH
全天イメージャ	大気光イメージ	名大STEL
SATI	OH, O ₂ 回転温度	名大STEL

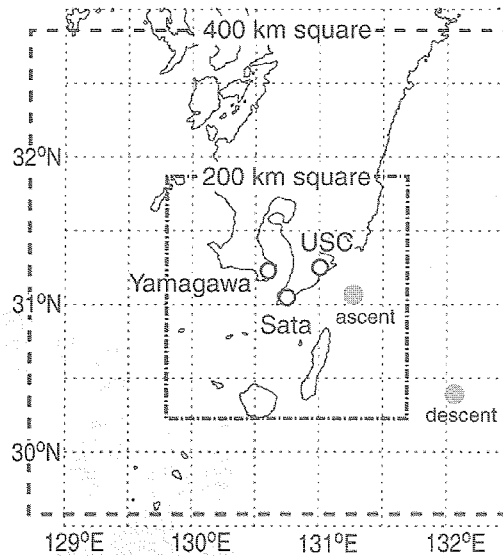


図1 WAVE2004の地上観測点位置 (USC, Yamagawa, Sata). 破線, 一点破線の四角形は大気光発光高度を100キロメートルと仮定したときの, Yamagawa, Sataからの観測視野の目安を示す. ロケットの大気光発光高度通過時の水平位置の目安が斜線部で示されている.

一観測を、また信楽MU観測所（以下MU）においてはMUレーダー流星モード観測をそれぞれ有人で実施した。

2.2 ロケット打ち上げタイミングの決定

通常ロケット打ち上げタイミングは、地上の気象状況、観測対象の出現状況などを総合的に判断して決定する。WAVE2004においては過去の実験の経験に基づき、大気光変動に関して地上から十分なデータが得られるように、以下のような地上観測からの打ち上げ判断基準を設定した。

- ・ USC, Yamagawa, Sataの内、少なくとも2地点がロケット打ち上げの時点で快晴であること。
- ・ USC, Yamagawa, Sataの内、少なくとも1地点がロケット打ち上げの時点まで2時間以上連続して快晴であること。
- ・ 大気光イメージ中に波状構造が出現していること。

USC, Yamagawa, Sataでのこのような観測状況を、USCコントロールセンターにおいてリアルタイムで把握するため、LAN、インターネット、電話回線を用いて観測データ（大気光イメージ）を随時転送し、各観測点の天候や波状構造の出現状況をモニターした（図2）。また、WAVE2004参加者間で情報を共有するためにインターネット上に情報公開用Webサイトや掲示板（「WAVE2004臨時掲示板」）を設け、他観測点の待機者などは、観測点間の電話連絡の他に、この掲示板を利用して状況報告、状況把握に努めた。このWebサイトはインターネットに公開されたため、ロケット打ち上げを取材する報道記者などもここから情報を得られるなどの副産物的な効果もあった。

WAVE2004のS-310-33号機ロケットは、2004年1月17日15時30分（世界標準時（以下 UT））にUSCから打ち上げられ、酸素原子密度、電子密度、大気光発光強度、水平風速などの鉛直分布を観測した。この晩のSata, YamagawaのASI観測データから作成した南北時間断面図を図3、図4にそれぞれ示す。Sataはこの晩おむね快晴であったが、13時-13時30分（UT）と17時（UT）以降の時間帯にのみ上空が曇った様子が見て取れる。一方Yamagawaは、周期的に上空に雲が差し掛かる天気であった。Yamagawaは観測点が市街地にあるため、雲が市街光を反射する。このためSataとは雲による影響の仕方が異なる。残念ながら、USCに設置したASIは装置の不調のためこの日は観測ができなかった。1月17日15時30分（UT）、Sataにおいて快晴状態の継続時間が13時30分（UT）から2時間に達し、またYamagawaも晴れていて（その直後に曇った）、尚且つ大気光イメージ中の波状構造がモニター上で確認された（第3節を参照）。これによって、上記のロケット打ち上げ判断基準が満たされることとなり、S-310-33号機ロケットは打ち上げられた。

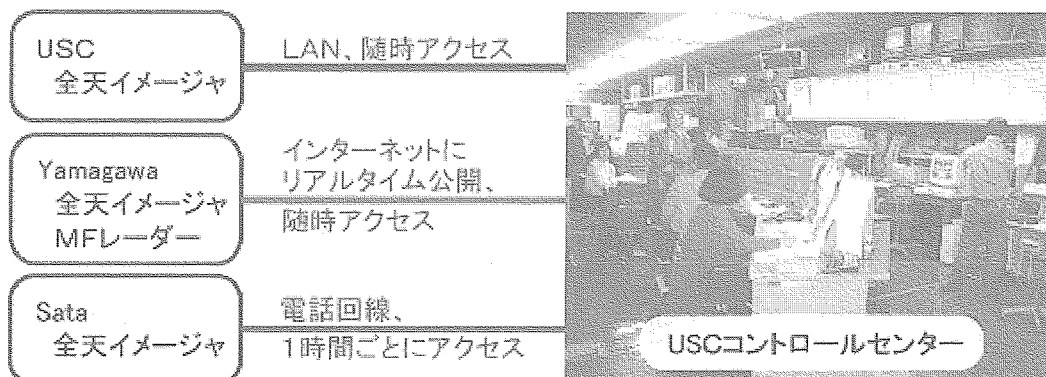


図2 地上観測点（USC, Yamagawa, Sata）と、USCコントロールセンターとのネットワーク接続

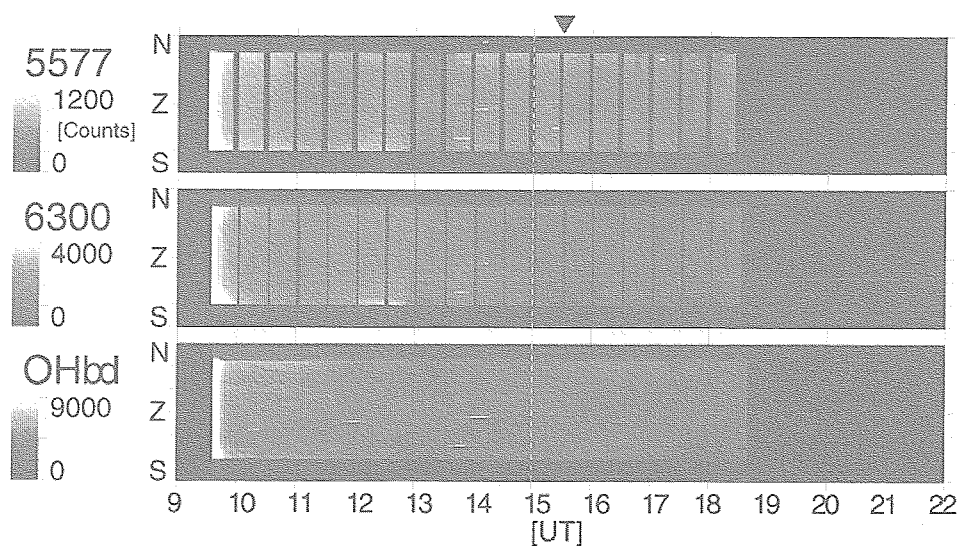


図3 SataのASI観測データから作成したOI（上段）、酸素原子630.0-nm線（中段）、OH（下段）の南北時間断面図。白い破線は地方時における真夜中を、▼印はロケット打ち上げ時刻を表す。13時-13時30分（UT）と17時（UT）以降は、上空を雲が通過したため、他の時刻に比べて暗くなっているように見える。

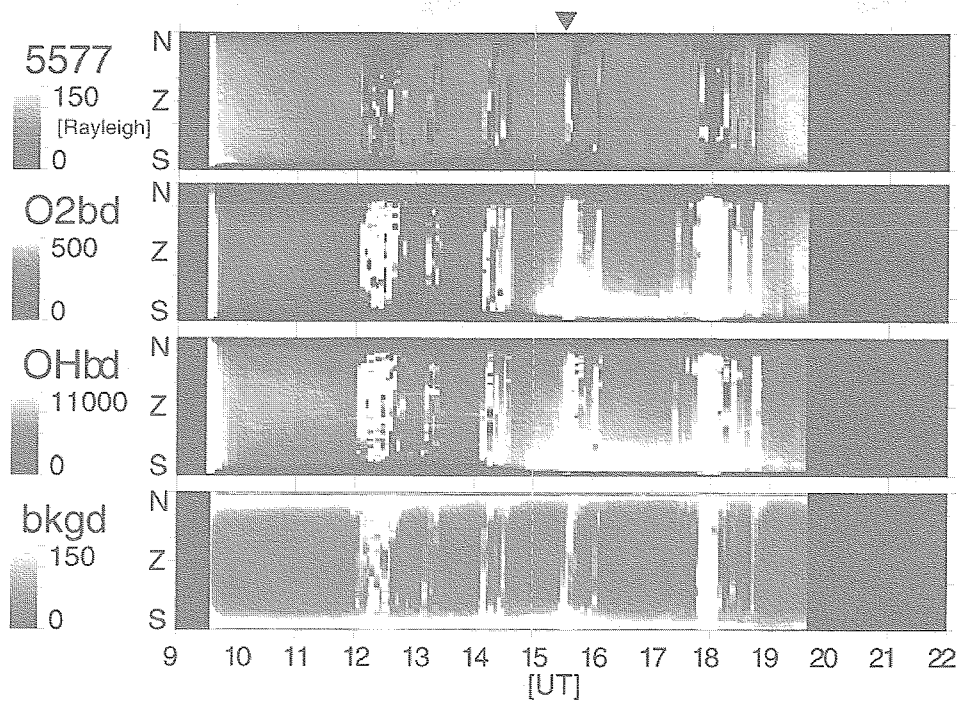


図4 YamagawaのASI観測データから作成したOI（最上段）、O₂（第2段）、OH（第3段）、背景光（最下段）の南北時間断面図。白い破線は地方時における真夜中を、▼印はロケット打ち上げ時刻を表す。12時（UT）以降たびたび上空を雲が通過し、その部分は他の時刻に比べて明るく見える。

3. 観測結果と考察

WAVE2004の地上観測で得られた大気光強度、分子回転温度、風速、ナトリウム原子密度データの中には、様々な周期の変動現象が見られた。この節では、これらの変動現象を、長周期（6時間より長い周期）、中間周期（1.5-2時間周期）、短周期（30分周期）の3種類に整理して3.1節から3.3節に示す。また3.4節において、WAVE2000の観測結果との比較について示す。

3.1 6時間より長い周期の変動

図5にSataにおいて大気光分光温度フォトメータで観測されたOH、O₂回転温度と大気光輝度の時間変化を示す。この図からはこれらの物理量が6時間程度の周期およびこの日の観測時間である8時間より長い周期で変動している様子が見て取れる。6時間周期の変動は特にO₂回転温度で顕著である。

川村 他 [2004] によると、1月17日前後の数日間にYamagawaのMFレーダーで観測された高度60-90キロメートルの風速において、24時間周期と12時間周期の変動が顕著であった。これら変動は数日連続して現れていることから大気潮汐波と考えられる。

図6にYamagawaのナトリウムライダーで観測されたナトリウム原子密度の時間変化を示す。この晩の、Yamagawaにおけるナトリウムライダー観測は9時30分（UT）頃から21時30分（UT）まで行われ、観測の時間分解能は約6分であった。データが抜ける時間帯が散見されるが、これは上空の雲によって観測のS/Nが悪化したため、ナトリウムライダーはASIに比べればある程度雲の影響を受けにくく、ASIデータに比べればデータ欠損は少ない。この晩のナトリウム原子密度は、大まかに見ると、観測開始直後の11時（UT）頃に極大を、夜半を過ぎた16時30分（UT）に極小を示し、その後再び明け方の観測終了時まで増大するという約12時間周期の変動を示している。MFレーダーの観測結果は、このナトリウム原子密度変動が半日潮汐波である可能性を示唆する。

この晩のナトリウム原子密度12時間変動に関しては上下方向への伝播は確認できず、どちらかという、ナトリウム層全体の密度が増減しているように見える。このことは、この12時間周期の波の鉛直波長がナトリウム層の厚さに比べてかなり長いことを示唆する。この鉛直波長が長いという推察が正しければ、ロケットで観測される酸素原子密度や大気光強度の高度プロファイル中に、この12時間周期の波による変動は見られないはずである。

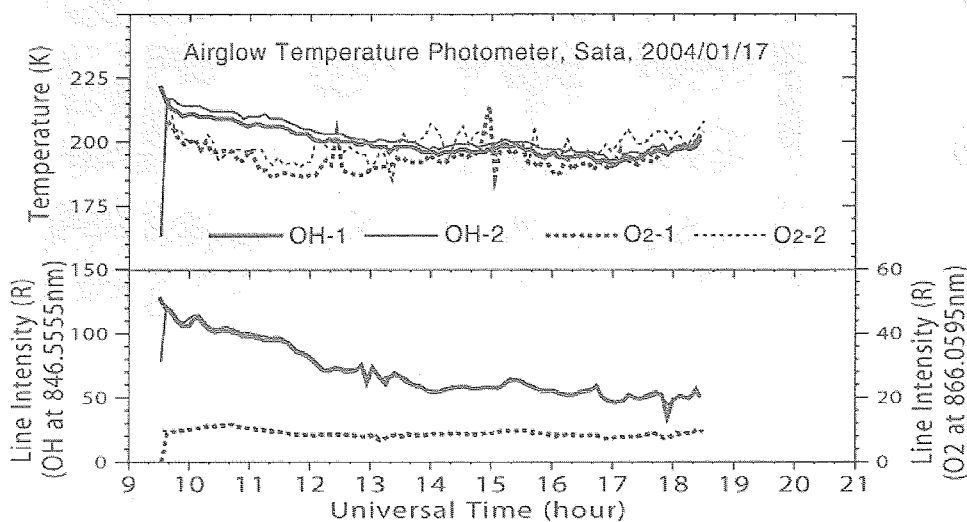


図5 大気光分光温度フォトメータで観測されたSata上空のOH、O₂回転温度と大気光輝度の時間変化。

3.2 1.5-2時間周期の変動

図6のナトリウム原子密度の時間変化には、先述の約12時間周期変動に他に、図中に白の破線で示すような非常に顕著な周期変動が見られる。その周期は1.5-2時間ほどであり、位相は下方に伝播し、また鉛直波長は、高度によって変化するが、95キロメートルより上ではほぼ一定で7キロメートルほどである。高度95キロメートル付近を境に、この波動の下方伝播の連続性が途切れているように見えるが、この高度がナトリウム原子密度高度プロファイルのピーク高度であることを考えると、これは奇異なことではない。

この1.5-2時間周期の波に伴うナトリウム原子密度の変動率は、概算で30パーセントほどに達する。この変動が、ロケットで観測される酸素原子密度や大気光強度の高度プロファイル中に、鉛直波長7キロメートルの変動を生じさせることは十分に考えられる。

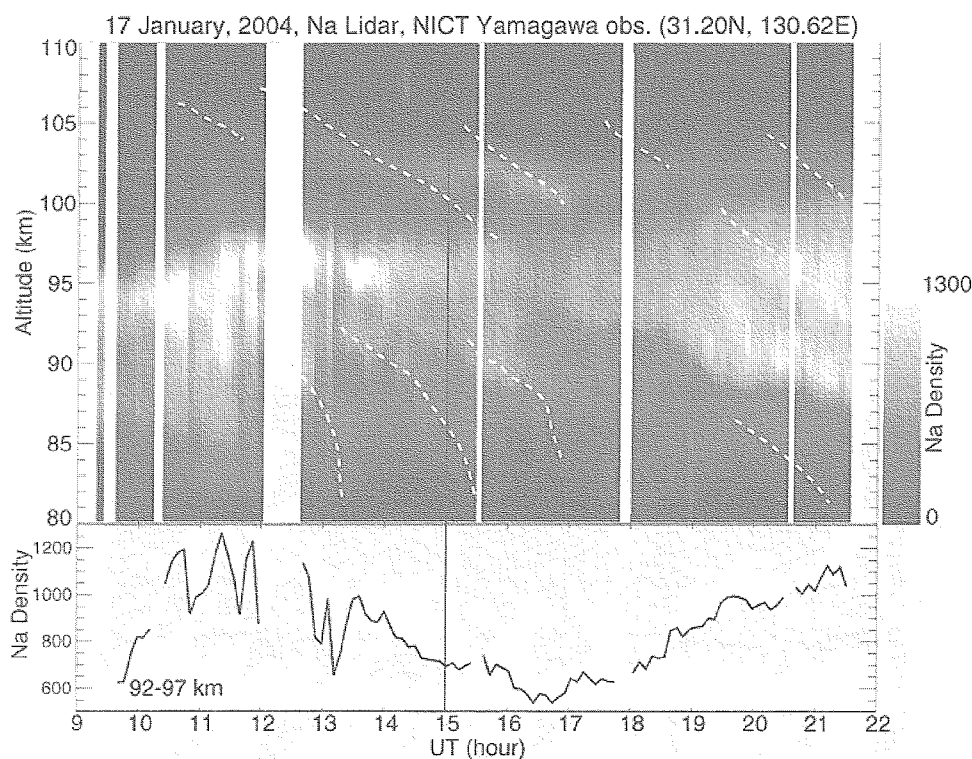


図6 (上段) ナトリウムライダーで観測されたYamagawa上空のナトリウム原子密度の高度時間断面図と、(下段) 高度92-97キロメートルにおけるナトリウム原子密度の時間変化。密度の単位は任意(装置固有)カウント数。白の破線は下方伝播する大気波動の波面を示す。

3.3 30分周期の変動

図7はSataで観測されたロケット打ち上げ前後のOI大気光強度二次元分布である。15時00分(UT)から16時16分32秒(UT)にかけてのほぼ5.5分おきのデータが示されている。それぞれの画像は、全天画像を観測点からの距離と方位をリニアに表す座標(地理座標)に投影し、観測点を中心とする200キロメートル四方の領域を切り出して描画されている。図中に白の破線で示したほぼ東西に伸びる波面が南方に伝播する様子が見て取れる。この波面の伝播速度は南に秒速約40メートルである。この波状構造は大気重力波によるものと思われる。川村 他 [2004]によると、MFレーダーで測られたロケット打ち上げ時刻における高度95キロメートル付近の子午線風速は、北向きに秒速30メートルであった。したがって、この波動の固有位相速度は秒速約70メートルと推定される。この大気重力波による波状構造は、Yamagawaで観測されたOI大気光イメージ中にも見られた。一方、OIよりも

低い高度で発光するOH大気光イメージ中には顕著ではなかった。

図8はナトリウム原子密度時間変動とOI大気光強度変動を比較するための図である。上段のパネルは高度85-100キロメートルのナトリウム原子密度変動で、時間軸方向に1時間のハイパスフィルターをかけ、高度方向に10キロメートルの移動平均を取っている。典型的なOI発光層高度である高度94-100キロメートルにおいて、13時 (UT) から17時 (UT) にかけて (白い長方形で囲った部分)、ナトリウム原子密度が周期的に変動している様子が見て取れる。この高度範囲のナトリウム原子密度変動を切り出しプロットしたのが中段のパネルである。ナトリウム原子密度は約30分の周期で変動しており、変動率は±5パーセント程である。一方、下段のパネルはSataの天頂におけるOI大気光強度の時間変動のプロットであるが、こちらにも13時から16時にかけての、全天イメージ中に波状構造が現れた時間帯において、約30分の周期変動が見られる。図中の破線は、ナトリウム原子密度時間とOI大気光強度のこの30分周期変動のピークを大まかに結んだ目安であり、両者が同じ大気波動のよるものであることを示唆する。

分散関係式を用いて算出されるこの大気重力波 (固有水平位相速度秒速70メートル、周期30分、ブラントパイサ周期は280秒、スケールハイトは6キロメートルとする) の鉛直波長は、約20キロメートルと長く、また変動率も小さいことから、ロケットで観測される酸素原子密度や大気光強度の高度プロファイル中に、この大気重力波による変動が確認される可能性は低い。

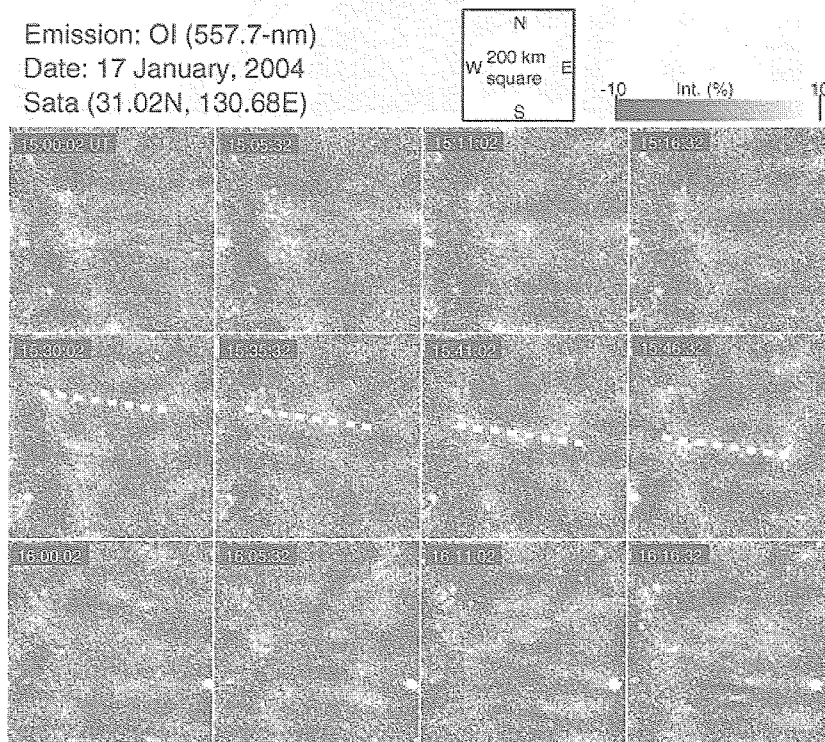


図7 Sataで観測されたロケット打ち上げ前後のOI大気光強度2次元分布。大気光強度の値は、それぞれの画像内の平均強度からの変動率を表している。白の破線はほぼ南方に伝播する大気波動の波面を示す。縦の縞状構造も見えるが、これは天の川によるものと思われる。

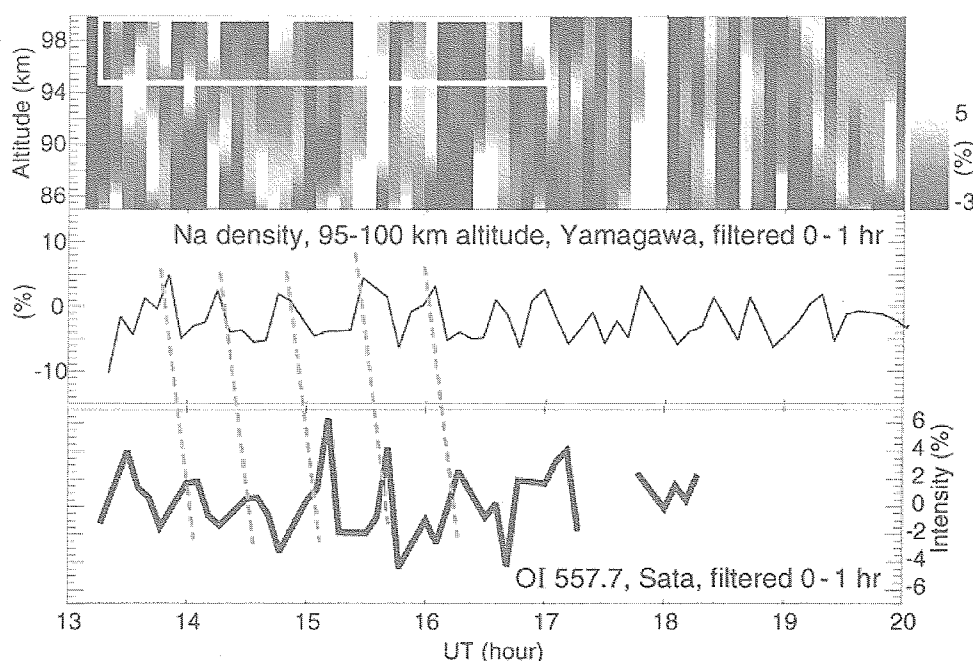


図8 ナトリウム原子密度時間変動とOI大気光強度変動の比較。(上段)ナトリウム原子密度の高度時間断面図。時間方向に1時間のハイパスフィルターかけ、高度方向に10キロメートルの移動平均を取っている。(中段)高度94-100キロメートルにおけるナトリウム原子密度の時間変化。時間方向に1時間のハイパスフィルターがかけられている。(下段)SataのASI観測データから得られたSata上空のOI発光強度の時間変化。

3.4 WAVE2000の観測結果との比較

WAVE2000においては、MFレーダーやMUレーダーの観測結果からロケット打ち上げ日の前後で大気潮汐と考えられる1日周期の変動が卓越していたことが分かっている [村山 他, 2001]。大気潮汐の卓越という点では、WAVE2004も似た状況にあると言える。

また、WAVE2000の大気光観測においては水平波長33キロメートル程の波状構造がOI、O₂、OHの各大気光中で観測されている [久保田 他, 2001]。しかしながら、この変動を引き起こしている大気重力波が、ロケットで観測された酸素原子密度・大気光強度・電子密度鉛直プロファイル中のダブルピーク構造を形成し得るとは考えにくいというのがWAVE2000での結論であった [岩上 他, 2001; 吉村 他, 2001]。つまり、WAVE2000では鉛直プロファイル中の波状構造の原因と考えられる大気波動を地上観測、特に大気光イメージング観測、から同定することができなかった。この原因としては、ロケット打ち上げ前後に30分間しか晴れ間が無く、地上の光学観測データからはこれより長い周期の変動の解析ができなかった事が大きい。

この反省からWAVE2004においては、ロケット打ち上げ前に少なくとも2時間以上の晴れ間があること、という条件を課し、また地上観測装置ラインナップの見直しも行った。その結果、新たに加わったナトリウムライダーによって周期1.5-2時間の大気波動検出に成功した。今後この大気波動が大気光イメージングデータ中にどのように現れているかを詳しく解析し、この大気波動の水平構造を得ることができれば、本キャンペーンの目的の一つである大気波動現象の立体的な描像の獲得に大きく前進することができる。

4. まとめ

S-310-33号機ロケットが打ち上げられた2004年1月17日の晩、地上観測によって中間圏界面領域に以下の3種類の大気波動が存在することが確認された。1) O₂回転温度やMFレーダーによる水平風速には6時間より長い周期の変動が見られた。2) ナトリウムライダーによるナトリウム原子密度データ中には、1.5-2時間ほどの周期をもつ、

鉛直波長約7キロメートルで下方に伝播する大気波動が見られた。3) ナトリウムライダーデータ, ならびに大気光イメージデータ中には, 周期約30分, 水平位相速度秒速約40メートルで南に伝播する弱い大気重力波が観測された。このうち2番目の大気波動がロケット観測による酸素原子密度や大気光の鉛直プロファイル中にも現れる可能性がある。今後の解析によって, WAVE2004で観測された大気波動のより詳しい描像の解明が期待される。

参 考 文 献

- [1] Taylor, M. J., M. B. Bishop, 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.
- [2] 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, 宇宙科学研究所報告 特集, 第42号, 1-12, 2001年3月.
- [3] 久保田実, 村山泰啓, 石井守, 山田嘉典, 大西久永, 福西浩, 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, 宇宙科学研究所報告 特集, 第42号, 13-21, 2001年3月.
- [4] 川村誠治, 村山泰啓, 久保田実, WAVE2004キャンペーン時の山川MFレーダーによる風速・電子密度観測, 本研究報告, 2005.
- [5] 村山泰啓, 五十嵐喜良, 小泉宜子, 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S-310-29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, 宇宙科学研究所報告 特集, 第42号, 37-46, 2001年3月.
- [6] 吉村玲子, 今村剛, 小山孝一郎, WAVE2000キャンペーンにおける電子密度・電子温度のロケット観測, 宇宙科学研究所報告 特集, 第42号, 23-35, 2001年3月.