



ISSN 1349-113X
JAXA-SP-04-007

宇宙航空研究開発機構特別資料

JAXA Special Publication

S-310-33号機観測ロケット研究報告

2005年 3月

宇宙航空研究開発機構
Japan Aerospace Exploration Agency

目 次

序 文	岩上 直幹・阿部 琢美
大気光波状構造キャンペーン2004における酸素原子密度・大気光放射率のロケット観測および姿勢解析	岩上 直幹・阿子島匡史・大月 祥子 ……1
FLP(Fast Langmuir Probe)による電子温度と密度の観測	阿部 琢美・小山孝一郎 ……13
WAVE2004キャンペーンにおけるフォイル・チャフによる中性風測定と電子密度測定との比較	小泉 宜子・村山 泰啓・川村 誠治 阿部 琢美・小山孝一郎 ……19
中波帯電波受信機(MFR)による電子密度推定	芦原 佑樹・石坂 圭吾・岡田 敏美 三宅 壮聡・村山 泰啓 ……27
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・村山 泰啓・川村 誠治 五十嵐喜良・亘 慎一・吉村 玲子 西牟田一三・塩川 和夫・大塚 雄一 長澤 親生・阿保 真・内海 通弘 山本 博聖・関口 宏之・山本 衛 中村 卓司・岩上 直幹・小山孝一郎 阿部 琢美 ……35
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	川村 誠治・村山 泰啓・久保田 実 ……45
WAVE2004キャンペーン期間中に山川及び八王子で観測されたNa層変動の初期解析結果	吉村 玲子・阿保 真・柴田 泰邦 長澤 親生・村山 泰啓・川村 誠治 五十嵐喜良 ……51

序 文

大気光にはしばしば顕著な波状構造が見られる。地球大気中において、多様な運動量・エネルギー輸送を司るといわれる大気重力波による変調がその原因と考えられている。つまり、「下層大気中で生成され、上方伝播してきた大気重力波が大気光発光層に達し、それを揺ることによって波状構造を生じる」というシナリオが一般には漠然と信じられている。しかし、地上観測データのみに基づいた議論では大気光のエネルギー源である酸素原子の状態は考慮されておらず、その化学過程までを含めて上記のシナリオが本当に成り立つのだろうか？という疑問が残されていた。

これに答えようとする試みが2000年に行われたwave2000 (S-310-29号機)そして今回のwave2004 (S-310-33号機) キャンペーンである。いずれもロケットによる酸素原子密度・大気光放射率などの局所測定と、地上からの撮像・レーダーなどの遠隔測定を組み合わせることにより、大気光波状構造生成過程の舞台裏を暴こうとするもので、wave2000で明らかになった欠点を補填したwave2004キャンペーンは、2004年1月18日之内浦宇宙空間観測所とその周辺で行われた。この特集号に掲載された論文は実験後1年間の解析結果であり、必ずしも最終結果ではないが、今後の検討進展を期待してここにまとめる。

実験遂行のため努力された加藤学実験主任はじめ多くの方々に感謝いたします。

実験提案者代表・岩上直幹
世話人・阿部琢美

大気光波状構造キャンペーン2004における 酸素原子密度・大気光放射率のロケット観測および姿勢解析

岩上直幹¹・阿子島匡史¹・大月祥子¹

Rocket Measurement of Atomic Oxygen Density and Airglow Emission Rate, and Attitude Analysis in the WAVE2004 Campaign

By

Naomoto IWAGAMI¹, Masashi AKOJIMA¹ and Shoko OHTSUKI¹

Abstract: A coordinated rocket and ground-based measurement campaign WAVE2004 was carried out in January 2004 to investigate the formation process of the waves in airglow structures. Atomic oxygen density and airglow emission rate distributions obtained on board the sounding rocket S-310-33 and the analysis of rocket attitude are presented.

概 要

大気光波状構造の生成過程解明を目的とし、2004年1月に行われたロケット・地上観測キャンペーンWAVE2004において、S-310-33号機によって得られた酸素原子密度・大気光放射率高度分布および姿勢の解析結果を述べる。前回のキャンペーンWAVE2000では、酸素原子密度高度分布が鉛直波長10 kmの大気波動によって著しく変調されていたため、通常とは異なる状況下で実験が行われたが、今回得られた酸素原子密度高度分布は高度97 km付近に単独ピークを示し、各大気光放射率高度分布も典型に近かった。地上観測および前回の情報との比較により、波状構造生成過程の本質に迫ることができると期待される。

重要語: 大気光、波状構造、大気重力波、酸素原子、ロケット観測

1. 序

中間圏界面付近（高度約90 km）で発光する大気光を全天カメラで撮像すると、しばしば顕著な波状構造が見られることは1970年代から知られていた（Peterson and Kieffaber, 1973; Sugiyama 他, 1973）。その後、中層大気力学における重力波の重要性が理解されるにつれ、この波状構造は重力波の状況を地上からモニターできる便利な手段として認識され、CCDなど固体撮像素子やパーソナルコンピュータの進化・普及も追い風となり、盛んに観測されるようになった。一般的描像としては、重力波は下層大気中で例えば山岳によりあるいは高低気圧に伴って生成され、振幅を増大させながら中層大気中を上方伝播し、中間圏界面付近に達して酸素原子層を揺らすことにより、再結合反応速度を変調して波状構造を形成すると考えられている。ところで、大気光発光エネルギーを担っている

¹東京大学

のは、昼間の太陽紫外光により生成された酸素原子であり、この領域の大気光発光はすべてその再結合過程の一形態と考えられる。つまり、酸素原子密度分布は大気波動の挙動と共に大気光波状構造を制御する主要要素となっている。ところが、これまでの地上大気光撮像とレーダーによる風測定を組み合わせた総合観測（例えば Taylor他, 1995; Takahashi他, 1999など）では大気光発光層高には典型値が用いられ、酸素原子密度分布にも実測値は使われず、MSIS経験モデルのような平均的描像が用いられてきた。その理由は主に大気光層高や酸素原子密度の遠隔測定困難さにあるが、それらが予想から異なった場合には最終的解釈を誤る可能性がある。

そこで立案されたのが、前回のキャンペーンWAVE2000だった（岩上他, 2001; Iwagami 他, 2002）。つまり、ロケットで酸素原子密度分布・大気光放射率を測定し、地上観測から得られる大気波動パラメタと比較することにより、最重要パラメタである酸素原子密度分布を把握しつつ、力学・化学の両面において上記の描像が本当に成り立っているのかどうかの検証を試みた。しかし、WAVE2000ではこれらの課題をすべて解決することはできず、波状構造形成過程に関する滑らかで明快なイメージを描くことはできなかった。一言で言えば、自然は我々の想像を超えていたということなのだが、具体的原因としてはつぎのことが挙げられる。

1. 地上撮像で見えていた水平波長30 kmの波に対応する鉛直構造が同定できなかった。これはチャフとMFレーダーの風測定が整合せず、鉛直波長を絞れなかったことに主因がある。
2. ロケット実験に先立つ地上観測時間が短かったため、長波長波が捕らえられなかった。
3. 鉛直波長10 kmの波動による変調が大きく、他の波動が隠されてしまった。
4. ロケットデータが曙光の影響を受けて高雑音だった。

さらに、ロケット観測が一瞬であり、波動を捉えるには向いていないという本質的弱点もあった。これらの点を考慮してWAVE2004では以下の改良を加えて実験に臨んだ。

1. 長周期の波動にも対処するため、ロケット発射前の地上観測時間を最短2時間とする。
2. 地上観測にNaライダーを加え、大気光発光層を変調する波動の時間変化を追跡する。

この報告では主に、ロケットでの酸素原子密度・大気光放射率の測定およびロケット姿勢解析について述べる。なお、前回WAVE2000の酸素原子・大気光測定に関する大気光励起過程の検討はIwagami 他(2003)を参照されたい。

2. ロケット実験

S-310-33号機は2004年1月18日00:30 JSTに内之浦宇宙空間観測所（31.25度N, 131.08度E）より東南方向へ発射され、60秒後に高度68 kmで開頭して観測を開始し、186秒後に最高高度141 kmに達し、277秒後に高度96kmでチャフを放出した後に海上に落下した。航空管制からの制限などにより、発射高度角が72度と小さかったため、最高高度が141 kmと他のS-310に比べて低い。このことは最大関心事である高度95 km付近の観測時間を増やしたが、ロケットが通常に比べ寝た姿勢で飛んだため姿勢もS-310としては最悪に近く、観測データ特に酸素原子密度測定に空力的擾乱を多く与えてしまった。発射時・発射点における太陽天頂角は169.5度、太陽活動度は中程度 ($F_{10.7}=117.1$)、地磁気活動は静穏 ($A_p=18.4$) だった。

3. 酸素原子密度測定

3.1 測定原理と測器構成

測定原理は共鳴線ランプ法に基づいている。酸素原子の130.2・130.5・130.6 nm三重共鳴線のみを放射する特殊なランプによって周囲の大気を照射し、大気中の酸素原子による共鳴散乱光強度を測定することにより密度を定量する。これは極めて直截な方法で、中間圏・熱圏下部では最適の方法とされており（Gumbel他, 1998）、ここではさらにランプを128 Hzで点滅させ、背景光の混入を防いでいる。しかし、ロケットが必要なこと、共鳴線ランプの供給源が限られていることなどにより測定例は少ない。しかも、過去の測定は衝撃波による擾乱やドップ

ラーシフトによる測定誤差に対する配慮を欠いたものも多く、酸素原子の測定法は世界的には未だ標準化がなされていない状況にあるといえる。ここで用いている測器はそのような標準化を念頭において開発・改良を加えつつ現在に至ったもので、前回のWAVE2000でほぼ完成したと考えている。

図1左に酸素原子測定器の動作状況を示す。より詳しい説明は岩上他(2001)あるいはIwagami他(2003)を参照願いたい。この測器は楔形形状により衝撃波体積を最小に抑え、かつ散乱体積をその外側に設定することにより空力的擾乱を回避している。また、ロケット速度に起因する輝線波長ドップラーシフトの影響を避けるため、ランプビームをスピン軸と直角方向へ出している。高度100 kmにおけるロケット速度は酸素原子熱速度の2倍程度あるため、速度ベクトルがスピン軸方向から外れると誤差を生ずる。この方向差(アタック角)は上昇時の120 km以下においては5-18度と下降時に比べて小さく、上昇時出力のスピン変調が最大20%pp程度だったことから、スピン平均前の酸素原子密度に含まれる空力・ドップラー誤差もその程度と考えられる。スピン平均後にはこの誤差は半分の10%程度となる。上昇時を過ぎるとアタック角は単調増加し、下降時120 km(254秒)では100度程度となるため、下降時の測定結果は衝撃波・陰(wake)効果およびドップラーシフトの影響を強く受けてしまい、定量精度は低い(下降時出力のスピン変調は80%pp)。図1右に実験室内での動作チェック状況を示す。気密光学室内をN₂で満たすことにより、真空紫外光での動作を可能にし、かつ汚染による感度劣化を2系統でモニターしている。ひとつはランプ近くに置いたUVU光電管で、最も光エネルギー密度の高い(つまり強く汚染される)ランプ窓透過率をチェックする。もうひとつは保護蓋内面の反射光を用い、汚染される可能性の高い外壁窓の透過率をチェックする。前者は全系のチェックになっていないが、汚染の下限(ランプ窓以外の汚染もあるため)を与え、後者は定量性は低いが生きていることを確認し、かつ汚染の上限(測定には無関係の蓋内面汚染を含むため)を与える。

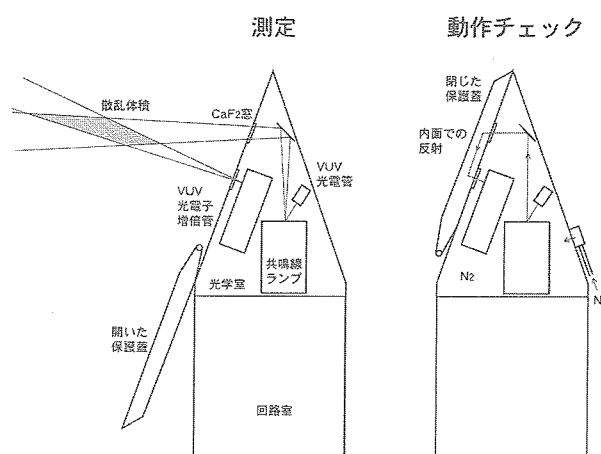


図1 酸素原子測定器の構成と動作状況。左は蓋の開いた測定状態、右は蓋を閉じた室内動作チェック状態。130nm光は空気中を透過しないので、チェック時には光学室内をN₂でパージする。

3.2 較正

前回と同じく宇宙科学研究本部の小型真空チャンバーを用いて吸収法で較正を行い、測器製作者であるレゾナンス社による較正との二重チェックとする予定だった。しかし、測器の到着が遅れたため宇宙研での作業をあきらめ、レゾナンス社での較正結果をそのまま使うこととした。図2に較正曲線をしめす。白丸はランプ窓清掃直後のもの(モニター出力0.828V)黒丸は汚染の進んだ時点のもの(同0.670V)で、発射時には後者に近い状態(同0.695V)だった(両者の中間の実曲線)。較正方法は二酸化窒素の化学蛍光を用いた滴定法。WAVE2000では、

我々が宇宙研において吸収法で較正を行い、レゾナンス社による滴定法結果と比較したところ、差異は10%程度だった。

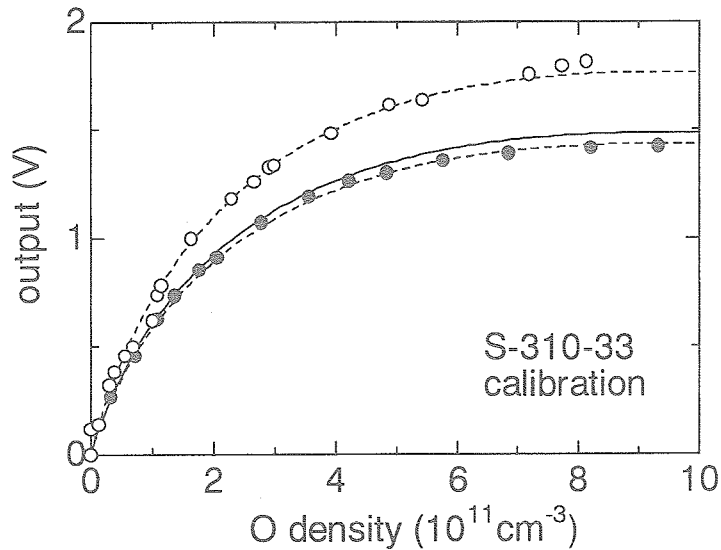


図2 滴定法による較正結果（レゾナンス社による）。白丸はランプ窓清掃直後、黒丸は汚染の進んだ状態。実験時の状態は実曲線。

3.3 測定結果

図3に上昇時および下降時に測定された酸素原子密度分布スピン平均をMSIS-E-90モデル（18日00:30 JST, 31度N, 131度E）と比較して示す。上昇時・下降時の値が異なるが、測定は上昇時に最適化されており、下降時のものは空力効果やドップラーシフトによる擾乱を上昇時より強くうけて正しい値を示していない。後述する大気光データより、下降時の酸素原子密度分布は上昇時に類似し、絶対値は10%程度小さかったと推定される。また、上昇時の密度分布には大気波動の影響と思われる構造がみられ、ピークが91km, 97km, 103kmと6km毎にあるように見える。この6km構造は山川NaライダーによるNa原子密度分布にも類似のものが見えている。前回WAVE2000の酸素原子密度分布は極端なダブルピークだったが、今回はほぼ単一ピークで、ピーク高度も97kmと典型値に近かった。上昇時ピーク密度の $5 \times 10^{11} \text{cm}^{-3}$ は前回の $6 \times 10^{11} \text{cm}^{-3}$ よりやや小さく、後述する前回より小さな大気光放射率と整合している。上昇時のランダム誤差は $0.1 \times 10^{11} \text{cm}^{-3}$ 程度、系統誤差は主に較正誤差で20%程度、上述の空力・ドップラー誤差が10%程度と推定される。この他の過去の観測例としては我々のS-310-21号機による $4 \times 10^{11} \text{cm}^{-3}$ (Kita他, 1996), Gumbel他 (1998) による $2 \times 10^{11} \text{cm}^{-3}$, Greer他 (1986) の $6 \times 10^{11} \text{cm}^{-3}$ などがあるが、太陽活動度との相関を含め制御要因は明瞭ではない。対応する時刻・位置におけるMSIS経験モデルの与えるものはピーク密度値が $4.5 \times 10^{11} \text{cm}^{-3}$ と今回の観測値に比べ10%程度小さいが、半値層厚は20kmと観測値の15 kmに比べ30%程度大きい。特に層下面での密度が小さく、層重心が高いことに特徴があり、後述の大気光発光層高度に反映している。

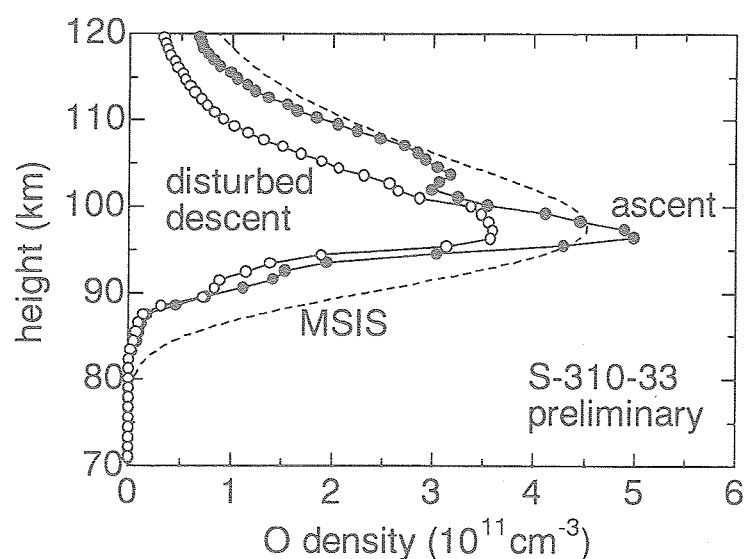


図3 スピン平均酸素原子密度分布（上昇時●，下降時○）とMSIS-E-90モデル（破線）の比較。下降時は各種擾乱をより強く受けており，上昇時に比べ真実から遠い。大気光放射率データより，上昇時・下降時の密度はほぼ同じだったと推定される。

4. 大気光放射率測定

4.1 測器構成

光学系はいずれも干渉フィルター・集光レンズ・視野しぼり・光電子増倍管よりなる標準的なもので，表1に特性を示す。視野はすべて全角6度円形，地上での撮像（酸素原子558nm線，酸素分子 Atmospheric (0,1) 864nm帯，OH帯広域 680-900nm・864nmにノッチ）にあわせて酸素原子558nm線，酸素分子 Atmospheric(0,0) 762nm帯，OH(6,2) 836nm帯および818nm背景光を測定した。前回は赤外の3測光器を30度斜め下向きに設定したが，街明かりと思われるものが星と同等に邪魔なことが分かり，今回はすべて従来通りの30度斜め上向きに設定した。このような斜め方向の測光は，ロケット搭載時の空間効率の向上が主目的だが，ロケットグローなどの光学的擾乱に対処しやすいという特徴もある。測器感度絶対値の較正には国立極地研究所の積分球を用いた。地上観測用測器の較正にも同積分球が用いられている。

表1 大気光測器の光学パラメタ

対象	フィルタ 中心波長 (nm)	フィルタ 半値全幅 (nm)	光電子増倍管・光電面
酸素原子558nm線	558.21	3.44	浜松H6780・マルチアルカリ
酸素分子Atm (0,0) 762nm帯	762.49	6.50	浜松R636・GaAs
背景光817nm	817.39	7.74	浜松R636・GaAs
OH(6,2) 836nm帯	835.02	10.34	浜松R636・GaAs

4.2 測定結果

図4a-4cに酸素原子558nm線，酸素分子Atmospheric(0,0)帯，OH(6,2)帯のスピ平均コラム放射率を示す。前回 WAVE2000では発射時刻が朝方に近すぎ，曙光の混入によって多くの情報が失われたが，今回は良好なデータが

得られた。上昇時の発光層下におけるコラム放射率はそれぞれ80R, 2.2kR, 1.1kRで、これらは少なめの酸素原子密度を反映して前回（それぞれ90R, 6kR, 1.5kR）より小さく、典型値（それぞれ100R, 7kR, 1.7kR程度：McDade, 1998）に比べても特にAtmospheric帯が小さい。これはMSISに較べて層下面が削れたような今回の酸素原子密度分布（図3）と関係していそうだが、励起機構の議論をふくむ放射率の詳細検討は別報告を予定している。558nm線およびAtmospheric帯では下降時の放射率が上昇時に比べそれぞれ10%および20%程度小さい。しかし、これらがそれぞれ酸素原子密度の3乗および2乗に略比例する（Shepherd他,2004）ことから、図3にみられる大きな差異には関わらず、酸素原子密度分布は上昇時・下降時でほぼ同じだったと考えられる。558nm線およびOH帯の100km以上において、下降時の放射率が上昇時に比べて大きいのが、これはロケットの航跡中での発光（いわゆるロケットグロー）を見たためと思われる。スピン軸から30度傾けた視線方向設定のため、下降時には航跡方向を見やすい状況となっており、同様の現象は過去の大気光測定でもしばしば経験されてきた。このロケットグロー分も考慮すると下降時の大気光放射率は上昇時に比べていずれの大気光においても20%程度小さく、酸素原子密度は10%程度小さかったと推定される。

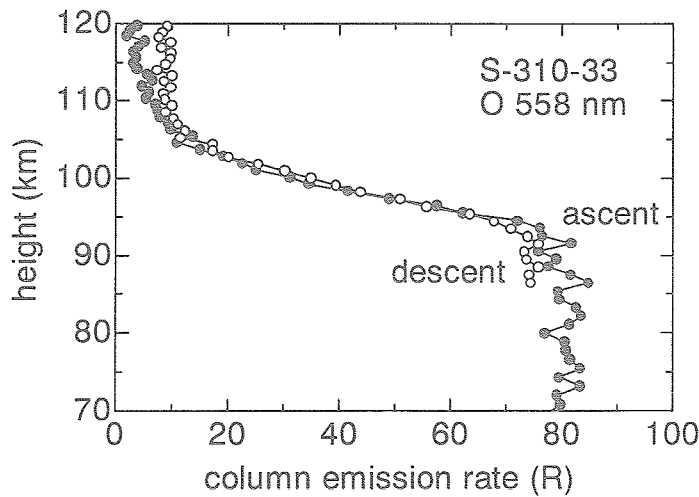


図4a 酸素原子558nm線スピン平均コラム放射率（上昇時●，下降時○）。

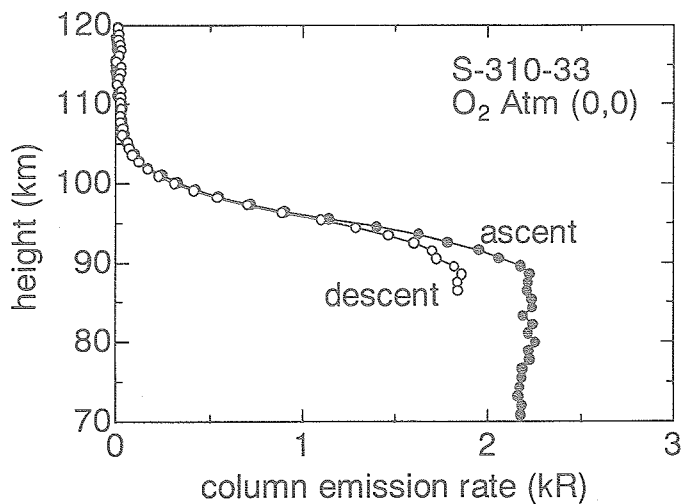


図4b 酸素分子Atmospheric (0,0) 帯スピン平均コラム放射率（上昇時●，下降時○）。

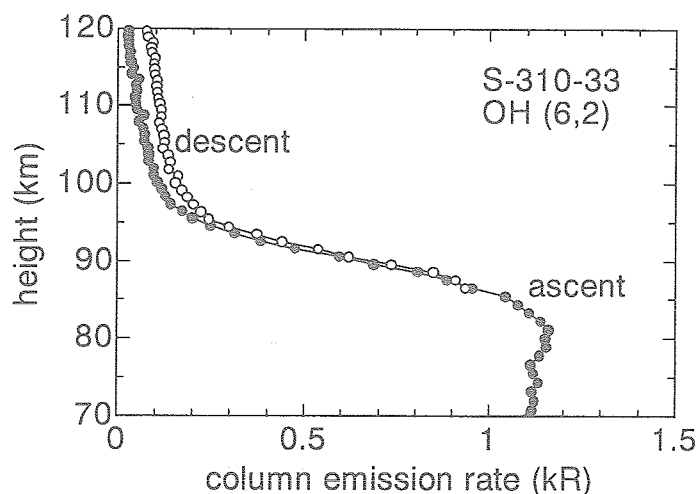


図4c OH(6,2) 帯スピン平均コラム放射率 (上昇時●, 下降時○).

図5a-5cに図4a-4cのコラム放射率から求めた体積放射率を示す。変換方法は単純な差分計算で、特別な方法は用いていない。つまり、スピン平均コラム放射率差を高度差で除したものを中心高度における体積放射率としている。高度95 kmではロケット上昇速度は0.917 km, 1スピン周期1.045秒であり、3スピンの差を使うと高度分解能は2.87 kmとなる(高度80kmでは3.32 km, 110 kmでは2.38 km)。酸素原子密度分布が比較的単純な形だったことを反映し、各大気光体積放射率分布も前回のような複雑なものではなく、ピーク高度も558 nm線・Atmospheric(0,0)帯・OH(6,2)帯でそれぞれ、97 km・95 km・90 kmと典型値(Taylor, 1995によれば、それぞれ96km・94km・87km)に近かった。前回は曙光の混入により、データ質の低かったOH帯も、今回は上昇時・下降時とも発光層を確定できている。前回WAVE2000では慣性重力波による変調(吉村他, 2001; Yoshimura他, 2003)により、酸素原子密度分布がダブルピークになっていた異常な状況を反映し、各大気光体積放射率も典型的描像とは著しく異なる分布を示していた。今回、得られた典型に近い分布の場合と比較することにより、大気光励起過程に関する様々な知見が得られると期待される。

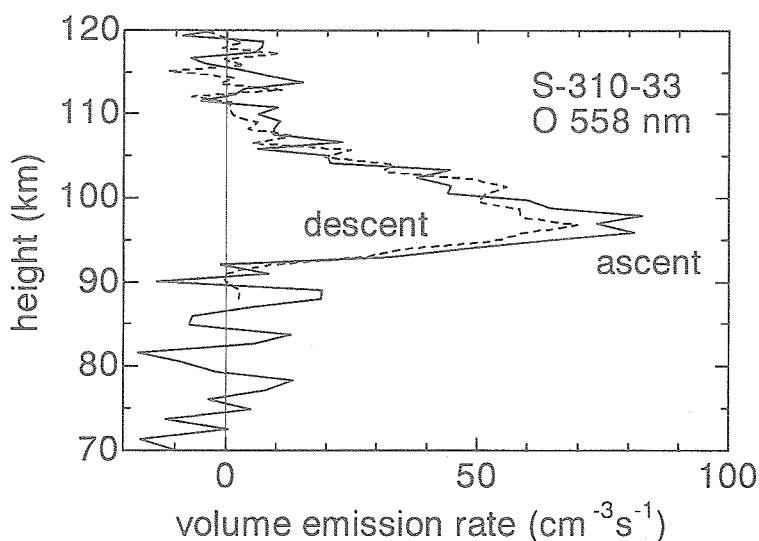


図5a 酸素原子558nm線体積放射率 (上昇時実線, 下降時破線).

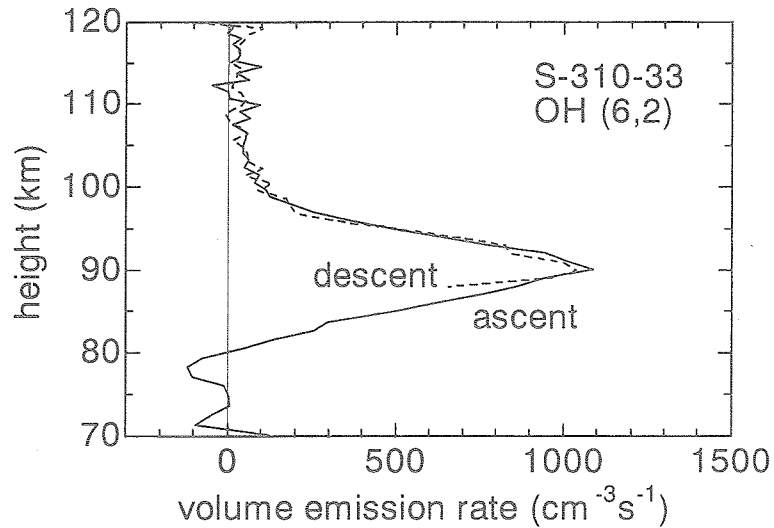


図5b 酸素分子Atmospheric (0,0) 帯体積放射率 (上昇時実線, 下降時破線).

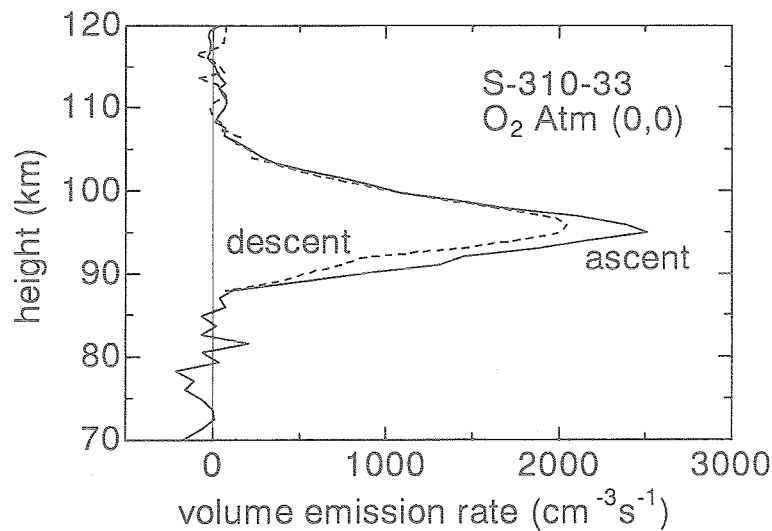


図5c OH (6,2) 帯体積放射率 (上昇時実線, 下降時破線).

5. 姿勢解析

5.1 測器

測器はWAVE2000時のN字スリット付単眼測光器から1次元8眼撮像器へと進化した。この結果、解析作業が簡潔となり、精度向上につながった。測器光学系は有効径28mm焦点距離50 mmのレンズ、小型機密容器に収めた1次元マルチアノード光電子増倍管R5900U-00-16Lよりなり、視野ピッチ1.14度、8眼あわせて9.15度の視野幅を持つ。光軸をスピン軸より30度傾けて設置するため、スピン周期約1秒で内径25.4度・外径34.6度のドーナツ状の星野を得ることができる。視野に偶然入ってくる3等星以上の星のパターンよりロケットの姿勢を決定する。この撮像姿勢計は他の測器からの情報なしに、単独で絶対姿勢を決定できる点が優れているが、解析にパターン認識を必要とするため自動化しにくいところに欠点がある。SEEK2キャンペーンのS-310-31・32号機における精度は、高度

90km以上の定常才差運動時において，単独スピンドで ± 1 度程度，上昇時の90km以下で ± 2 度程度だった．複数スピンのデータを用いて統計処理すれば，さらに高精度が期待できる．33号機実験時には冬の数多くの一等星に加え，木星・土星も視野に入ったため，解析は比較的容易で，開頭直後から下降時の姿勢劣化（90km付近）までの絶対姿勢を決定できた．

5.2 結果

図6に最高高度点付近（185秒）における地平座標にプロットした星とスピン軸方向解析結果を示す．1スピン中の全データを用いて1方向を決定している（○が上昇時，△が下降時）．図中の数字はスピン番号（第0スピン周期中心59.945秒，第240スピン周期中心310.733秒，平均スピン周期1.04495秒）．一般に5スピン毎に示してあるが，第1-10および第220-227は1スピン毎に示す．第105と120の間は適当な星が入らなかったため解が得られず，第40と45の間は原因不明の不自然な跳びがある．図7にスピン軸天頂角・方位角，速度ベクトル天頂角およびアタック角（スピン軸と速度ベクトルのなす角）の時間プロットを示す．この結果は大気光放射率のスピン変調斜め効果補正に使われている．また，この図からスピン軸方向は常に速度ベクトルよりは上にあったことが解る．アタック角は酸素原子密度分布の空力効果補正に必要となる．

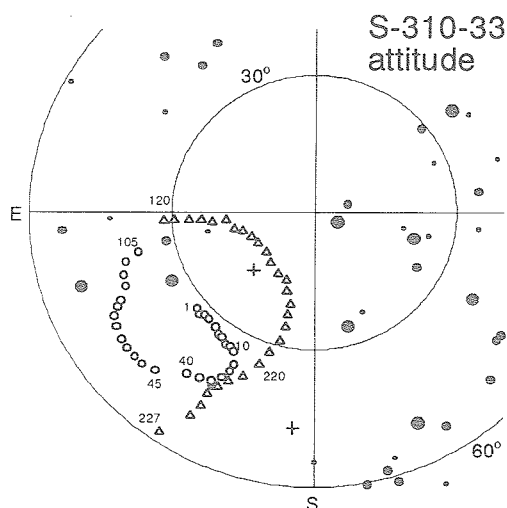


図6 最高高度点付近（185秒）における地平座標にプロットした星とスピン軸方向（上昇時○，下降時△）．図中の数字はスピン番号（定義は本文参照）．

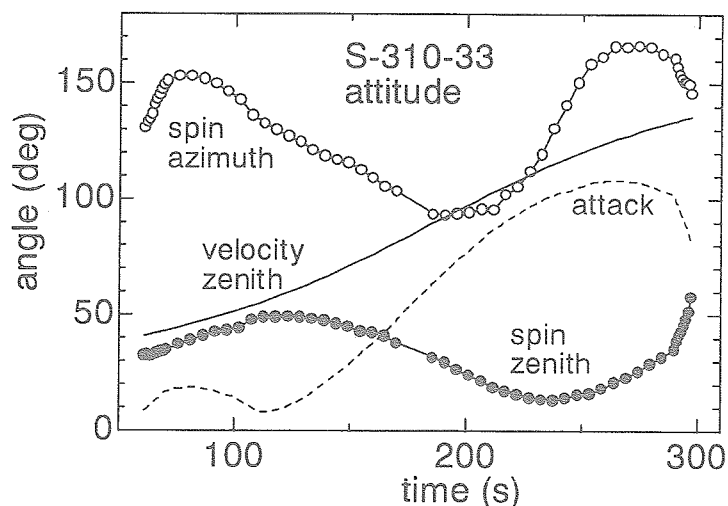


図7 スピン軸天頂角（●）・方位角（○：北より東まわり），速度ベクトル天頂角（実線）およびアタック角（破線：速度ベクトルとスピン軸のなす角）の時間変化．速度ベクトル方位角は飛翔中ほぼ一定127-129度．

データ点は多数得られ、上質の解析結果とはなっているが、姿勢自体はS-310としては最悪に近い。才差円直径が35度もあり、定常才差中のスピンの軸天頂角最大値は49度にも達している。大気光測光はスピン軸からさらに30度傾いているので斜め効果が著しく、解析の難しいデータセットとなった。過去のS-310の姿勢を調べると、一般に高高度角で発射して高高度に達したものの姿勢が良いのだが、今回は航空管制からの制約などのため、72度という低い角度で発射した。

6. 結 語

ロケット・地上観測を総合し、大気光波状構造生成過程の解明を目指した2回目のキャンペーンWAVE2004において、ロケット観測により酸素原子密度・大気光放射率の高度分布を定量することができた。特異的な分布だった前回に比べ、今回得られた分布は典型に近く、酸素原子密度分布のピークは97km、酸素原子558nm線、酸素分子Atmospheric(0,0)762nm帯、OH(6,2)836nm帯体積放射率のピークはそれぞれ97, 95, 90kmだった。前回と異なる酸素原子密度分布のもとでのデータが得られたことは、大気光励起過程および波状構造形成過程の考察において複数の視点を得たこととなり、議論の深化が期待できる。さらに、本稿では触れないが、今回のキャンペーンでは山川に新たにNaライダーを配置したこと、地上観測時間を充分にとったことにより、大気波動による大気光変調を議論するに十分な情報を得ることができた。

7. 謝 辞

ロケット実験を成功裏に遂行された実験主任・加藤学教授はじめ宇宙科学研究本部ロケットチームのみなさんに感謝いたします。また航空局との交渉において、よりよい実験時間帯の獲得に努力された石井信明助教授に感謝いたします。

参 考 文 献

- [1] Greer, R.G.H., D.P. Murtagh, I.C. McDade, P.H.G. Dickinson, L. Thomas, D.B. Jenkins, J. Stegman, E.L. Llewellyn, G. Witt, D.J. Mackinnon and E.R. Williams, ETON1: A data base pertinent to the study of energy transfer in the oxygen nightglow, Planet. Space Sci. 34, 771-788, 1986.
- [2] Gumbel, J., D.P. Murtagh, P.J. Espy and G. Witt, Odd oxygen measurement during the Noctilucent Cloud 93 rocket campaign, J. Geophys. Res. 103, 23399-23414, 1998.
- [3] 岩上直幹, 柴木友和, 鈴木利和, 関口宏之, 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
- [4] Iwagami, N., T. Shibaki, T. Suzuki, Y. Yamada, H. Onishi, 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. Atm. Solar-Terr. Phys. 64, 1095-1104, 2002.
- [5] Iwagami, N., T. Shibaki, T. Suzuki, H. Sekiguchi and N. Takegawa, Rocket observation of atomic oxygen density and airglow emission rate in the WAVE2000 campaign, J. Atm. Solar-Terr. Phys. 65, 1349-1360, 2003.
- [6] Kita, K., T. Imamura, N. Iwagami, W.H. Morrow and T. Ogawa, Rocket observation of atomic oxygen and night airglow: Measurement of concentration with an improved resonance fluorescence technique, Ann. Geophys. 14, 227-237, 1996.
- [7] McDade, I.C., The photochemistry of the MLT oxygen airglow emissions and the expected influences of tidal perturbations, Adv. Space Res. 21(6), 787-794, 1998.
- [8] MSIS, <http://nssdc.gsfc.nasa.gov/space/model/models/msis.html>

- [9] Peterson, A.W. and L.M. Kieffaber, Infrared photography of OH airglow structure, *Nature* 242, 321-322, 1973.
- [10] Shepherd G.G., J. Stegman, W. Singer and R.G. Roble, Equinox transition in wind and airglow observations, *J. Atm. Solar Terr. Phys.* 66, 481-491, 2004.
- [11] Sugiyama, T., T. Maihara and H. Okuda, Balloon-borne infrared observation of the OH airglow irregularities, *Nature Phys. Sci.* 246, 57-59, 1973.
- [12] Takahashi, H., P.P. Batista, R.A. Buriti, D. Gobbi, T. Nakamura, T. Tsuda and S. Fukao, Response of the airglow OH emission, temperature and mesopause wind to the atmospheric wave propagation over Shigaraki, Japan, *Earth, Planets and Space* 51, 863-875, 1999.
- [13] 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 emission during the ALOHA-93 campaign, *Geophys. Res. Lett.* 22, 2833-2836, 1995.
- [14] 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
- [15] Yoshimura, R., N. Iwagami and K.-I. Oyama, Rocket measurement of electron density and atomic oxygen density modulated by atmospheric gravity waves, *Adv. Space Res.* 32(5), 837-842, 2003.

FLP (Fast Langmuir Probe) による電子温度と密度の観測

阿部 琢美¹・小山 孝一郎¹

Observations of the electron temperature and density in the low ionosphere by Fast Langmuir Probe

By

Takumi ABE¹ and Koh-ichiro OYAMA¹

Abstract: "S-310-33" sounding rocket was launched from Uchinoura Space Center in Kagoshima on Jan 18th, 2004. The Fast Langmuir Probe (FLP) onboard the rocket was developed to measure the electron temperature and number density above 80 km altitude in the ionospheric D and E regions. These data are used to investigate the generation mechanism of wavy airglow structure which is a main scientific topic in the present sounding rocket experiment, together with the atomic oxygen density and the neutral wind simultaneously measured on the rocket. The FLP can provide a spatial distribution of the electron temperature and density along the rocket trajectory, which will also be used to discuss the dynamics and energetic in the lower thermosphere.

During the rocket flight, the FLP successfully measured the voltage versus current relationship of the probe, from which the electron temperature and density can be estimated, despite a minor problem with the electronic circuit. Both the electron temperature and density indicate a spatial structure which suggests a possible existence of the dynamical process. It is noticeable that the FLP observed very steep gradient of the electron density at 89 km altitude.

概 要

S-310-33号機は大気光縞々構造の生成メカニズムの解明を主目的として2004年1月18日0時30分に鹿児島県内之浦宇宙空間観測所から打ち上げられた。本ロケットに搭載されたFLP（高速ラングミュアプローブ）は高度約80 km以上での電子温度、電子密度を測定するために開発された。これらのデータは同時に測定される酸素原子密度や中性大気の流れとともに議論に用いられ、特に熱圏下部における中性大気と電離大気間の熱エネルギー収支と力学、運動量輸送に関する総合的な研究が行なわれる。

ロケットの飛行時にはFLPは一部不具合があったものの、良好なデータを取得して電子温度と電子密度を算出することが可能であった。観測データからは局所的な温度構造、密度構造が

¹宇宙航空研究開発機構 宇宙科学研究本部

得られた他、飛翔時に高度89km付近に著しく密度勾配が急な領域が存在したことを明らかにしている。

1. 測定器

本観測に用いられたプローブはステンレス製の円筒（直径3mm×長さ約20cm）形状でロケットの機体から垂直に伸展した状態で測定を行う。プローブには振幅4.0V、周期200msの三角波を印加し、流れ込んだ電子電流、イオン電流をアンプで増幅した後テレメータ出力する仕組みになっている。こうして得られた電流・電圧特性（ラングミュアカーブ）に適切な数値処理を施し電子温度、密度を推定する。

正確な電子温度測定を妨げるプローブの電極表面の不純物による影響を避けられるよう、次のような手法でプローブを真空ガラス封じ（Oyama and Hirao, 1976）とした。

- 1) ステンレス製プローブをやすりで磨いた後、アルコールで洗浄。
- 2) 直径10mmのガラス管にステンレスプローブを封入した。
- 3) 温度100℃以上で24時間熱しながら真空引きを行い、表面の汚染物質を除去する。
- 4) この高真空で排気した状態でガラス管を封じる。

ロケットに搭載されたガラス封じプローブは、ロケット打ち上げから61秒後の高度約68km付近でタイマーによりガラス管が割られた。打上げ時、機軸に平行だったプローブはその2秒後に垂直方向になるようバネの力により展開を行なった。ガラス管はロケットのスピンのよる遠心力のため、外側に放り出される。

電子密度の変化に対応して広いダイナミックレンジをもてるようプローブに流れ込むことによる電流はlowとhighのゲインの異なる2つのアンプにより増幅される。ゲインは次のように調整された。

観測モード	Full scale	
	Low Gainチャンネル	High Gainチャンネル
Gain Low mode (高度125km以上)	1.0 μA	0.02 μA
Gain High mode (高度125km以下)	0.5 μA	0.005 μA

イオン電流を含む電圧、電流特性をみるために、これらのアンプは+1Vのオフセット電圧をもっている。測定器の較正は30秒に1回、40 M Ω の抵抗にプローブをつなぎ替えることによって行った。

今回の実験においては、三角波スイープ電圧を印加するプローブ（スイープバイアスプローブ、以下FLPと呼ぶ）に加えて、電子密度の時間的変化をより高速でモニターするために固定バイアスのプローブ（CLP）を用意した。CLPに印加する電圧は+5V、ゲインはlowとhighの2種類を設けた。サンプリング間隔はlowゲインが10msec、highゲインが2.5msecである。2つのプローブは写真1のように機体上の同一面内に取り付けられ、同時に垂直方向に展開された。

2. 観測データと電子温度の導出

図1に打上げから80～122秒後（高度89～122 km）にFLPが測定した電流電圧特性の幾つかを示す。これらは後述するように、電子温度や密度が極小、あるいは極大となっている時間帯のものである。図は左から1と2列目および3と4列目の2つで特定の時間に取得された1組のデータを示しており、左側の図はプローブ電流を直接表示した（縦軸は任意スケール）ものでイオン電流と考えられる部分に直線でフィッティングを行なっている。右側の図は左側に示したプローブ電流からフィッティングによって近似したイオン電流を差し引き、電子電流を対数目盛りで表わしたものである。この図において直線部分にフィッティングした時の傾き（図に直線で表示）から電子温度（この場合約500～700 K）が求められる。

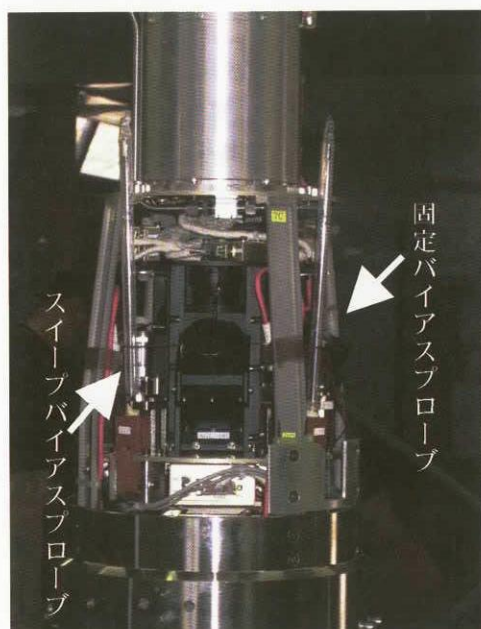


写真1 ロケット頭胴部に取り付けられたスweepバイアスプローブと固定バイアスプローブ

わかった。ここに述べた結果はこのような理由によって印加電圧が変わったことを考慮して行った解析によるものである。

電子密度に関しては、電子密度の飽和電流付近にフィッティングした直線と電子温度を求める際にフィッティングした直線との交点における電流値から求めるといった方法を用いた。これらの直線が各々の図に描かれている。

3. 観測結果

1. 印加電圧の異常

本来FLPに印加する三角波スweepの周期は上り100msec下り100msecの計200msecになるはずであった。ところが実際の観測データでは上りの周期が2割弱短めに、下りの周期が2割長めになっていることがわかった。また、較正データからプローブに印加された電圧の振幅が4Vではなく約5Vである事が推定されている。さらに、プローブの出力電圧に対して周波数約200Hzの小振幅交流成分が重畳していることも見出された。その後の検討の結果、これらの予期しなかった一連の現象は集中電源から供給される-18Vの電圧を-12VにするFLPの電子回路部内のレギュレータが不具合を生じ、-18Vの電圧で回路に入力される時に生じることが

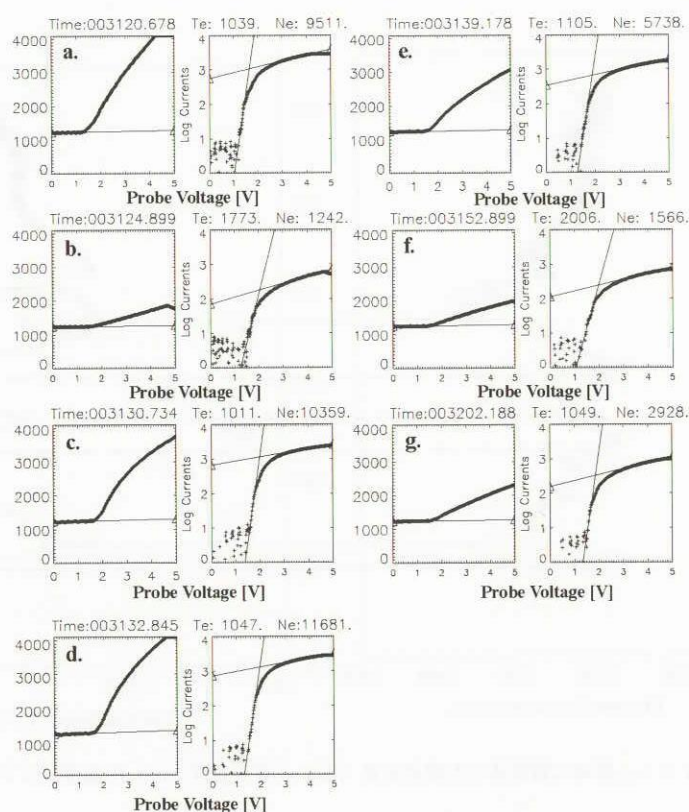


図1 FLPによって得られた電流電圧特性

(1, 3列目: リニアスケール。イオン電流に直線でフィッティング。数字は時刻。2, 4列目: イオン電流をプローブ電流から差し引いたものを縦軸対数スケールで表示、直線部分にフィッティングして求めた電子温度を上部に記した)

2. 電子温度・電子密度プロファイル

FLPが測定した電流電圧特性に対するフィッティングにより得られた電子温度と電子密度を図2（上昇時）と図3（下降時）に示す。ここでは約200msec毎に得られる電子温度の5点毎の移動平均を求め、高度を縦軸にとり表示を行っている。なお、電流電圧特性に対して適当なフィッティングが出来ないデータは除外して平均を求めた。電子温度は概ね800K～1700Kの範囲に存在し、局所的な温度構造をもっている事がわかる。

今回のロケット飛翔時には、高度約89km付近(a)に電子密度の急峻な勾配が存在したのが大きな特徴である。図2、図3では高度89km以上にのみデータが存在しているがこれ以下の高度においては電子密度が低すぎるため、温度密度ともに算出できなかった。この高度における密度の急激な変化については後に議論を行う。高度89km以上では総じて予想外に電子密度が高く、このためFLPのLow gainチャンネルのデータにおいても飽和電子電流部分がオーバーレンジになっているデータが得られている（高度102～105 km, 108～113 km）。このような場合、飽和電子電流に対するフィッティングが出来ないため電子密度は算出することが出来ない。

2つのプロファイルと比較すると、高度90(A1), 103(A2), 111km(A3)においては電子温度が極小で電子密度が極大、高度92(B1), 107(B2), 118km(B3)においては温度が極大で密度が極小という逆相関の変化が特に低高度において明らかである。このような傾向は極大と極小の高度に違いはあるが、ロケットの下降時にも観測されている。電離圏E領域の電子密度の局所的な増大に関してはWind Shear理論（Whitehead, 1989, 1990）のように狭い高度領域に逆方向の中性風が存在する時に $V \times B$ ドリフトによってプラズマがはき集められるという考え方がある。しかし、電子密度と同時に電子温度にも変化が認められることは、この領域の電子が単なる力学的効果だけでなく、加熱等のエネルギーの授受を伴う過程に影響を受けていることを示唆しているのかもしれない。

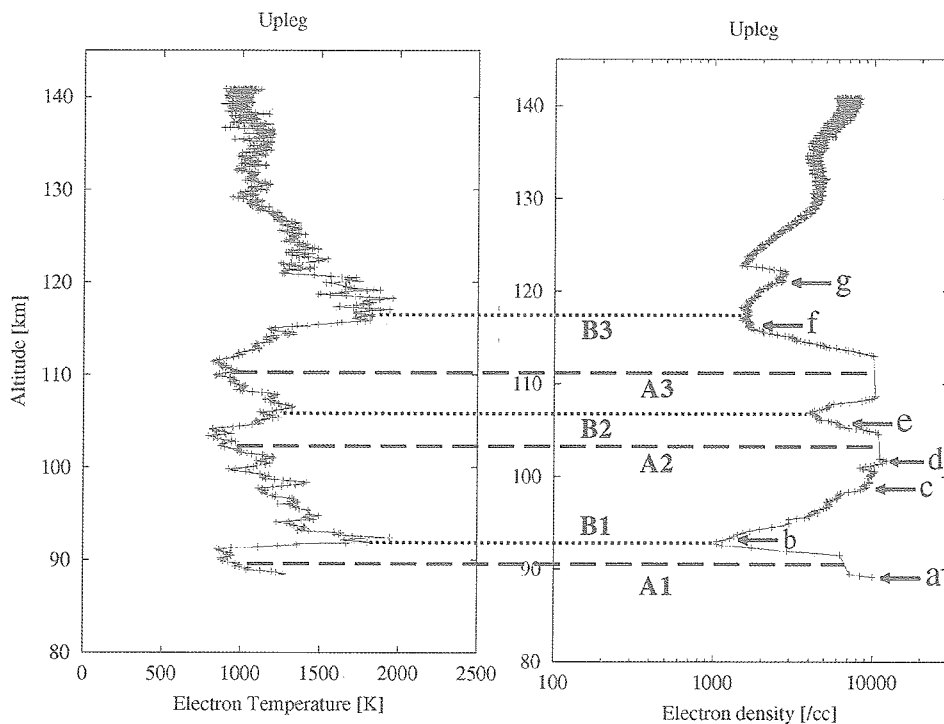


図2 ロケット上昇時に観測された電子温度（左）と電子密度（右）の高度プロファイル

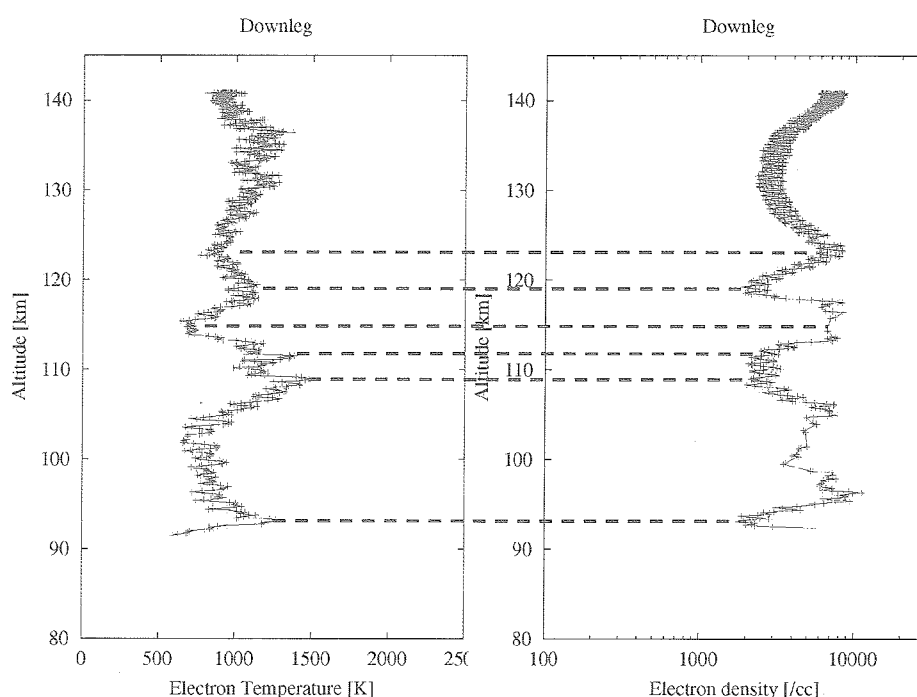


図3 ロケット下降時に観測された電子温度（左）と電子密度（右）の高度プロファイル

3. 2つのプローブによる観測値の比較

CLPは+5Vの電圧を印加した場合の飽和電子電流を測定しているが、この電流値は電子温度と電子密度の関数として与えられることが知られている。ここでは、FLPから求めた電子温度の値とCLPで測定された電流値を用いて電子密度の算出を行い、この値とFLPから求めた電子密度の比較を行う。高度88～93 kmで得られたデータに関して、この手法で得た2つの電子密度を示したものが図4である。CLPには2種類の電流利得が設けられているので、High gainとLow gainの両者を示しているがHigh gainチャンネルは88.36 km以上で電流値が飽和しているため一定値になっている。Low gainチャンネルに関しては88.39～91.60 kmにおいて電流が飽和しており、同様に正確な値が得られていない。91.7 km以上の高度においてLow gainチャンネルの電流は飽和せず、電子密度を算出すると $0.8\sim 6.0 \times 10^3 / \text{cm}^3$ の値となる。この電子密度がFLPから求めた値に近いことは2つの測定方法の信頼性を相互に支持するものである。なお、CLPから算出された電子密度がFLPに比べてより細かな空間構造を示しているのは、前者のサンプリング周期（10msec）が後者（約100msec）よりもはるかに短いことによる。

4. 高度89kmにおける電子密度勾配

前に述べたようにこのロケット飛行時の観測データの特徴として、高度89km付近の狭い領域で電子密度が急激に増加していることがあげられる。図5にこの遷移領域である88.3～88.5 kmの高度においてCLPから得られた電子密度を示した。High gainチャンネルのデータは88.36 km以下で有意なデータを取得、Low gainチャンネルは88.36～88.39 kmにおいて有意なデータを得ている。両者を考慮すると電子密度は高度88.36 kmでは $3.66 \times 10^1 \text{ cm}^{-3}$ 、88.39 kmでは $6.72 \times 10^3 \text{ cm}^{-3}$ となって、僅かに高度30mの範囲内で2桁以上も電子密度が異なっていることとなる。電離圏D領域の電子密度に関しては観測ロケットS-310-30号機に搭載されたCLPが高度85 km、90 km付近に急な勾配を観測した。しかし、これらは数倍から10倍程度の密度差であり遷移の高度幅も今回の現象に比べて広がった。このような著しい密度勾配が本当に存在したのか（測定上の問題点は無いか）、存在したとすればどのようなプロセスにより作り出されるのかについては今後解明を進めていく必要がある。

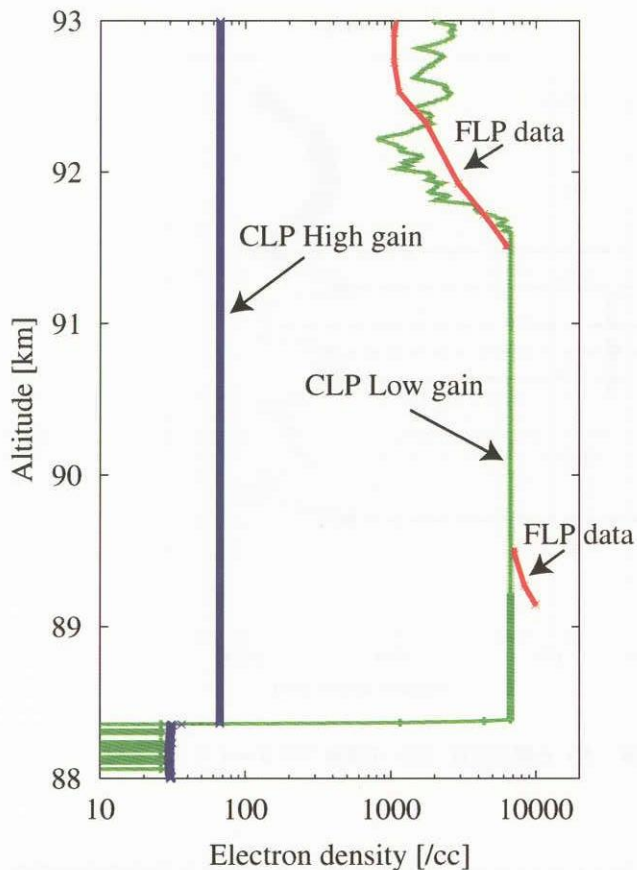


図4 高度88kmから93kmにおける電子密度。CLPとFLPから求めた値を比較している。

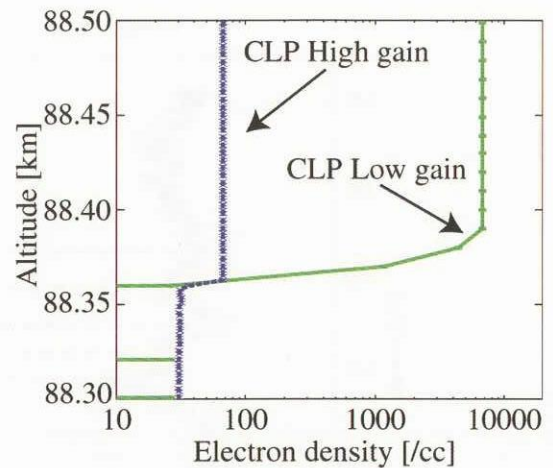


図5 高度88.3kmから88.5kmにおける電子密度。CLPから求めた値のみ表示。

4. 謝 辞

FLP電子回路部とプローブ展開機構部の製作は株式会社エーディーによって行われました。ここに感謝の意を表します。

真空ガラス封じプローブの製作にあたっては大阪市立大学工学部の南繁行先生にお世話になりました。この場を借りてお礼を申し上げます。

参 考 文 献

- [1] Oyama, K.I. and K. Hirao, Application of a glass-sealed Langmuir probe to ionosphere, Rev. Sci. Instrum., 47, 101-107, 1976.
- [2] Whitehead, J.D., Recent work on midlatitude and equatorial sporadic-E, J. Atmos. Terr. Phys., 51, No.5, 401-424, 1989.
- [3] Whitehead, J.D., Sporadic E layers - History and recent observations, Adv. Space Res., 10, No.10, 85-91, 1990.

WAVE2004キャンペーンにおけるフォイル・チャフによる 中性風測定と電子密度測定との比較

小泉 宜子¹・村山 泰啓²・川村 誠治²
阿部 琢美³・小山 孝一郎³

Neutral wind measurement from foil chaff experiment during WAVE 2004 campaign

By

Yoshiko KOIZUMI¹, Yasuhiro MURAYAMA², Seiji KAWAMURA²,
Takumi ABE³, Koh-ichiro OYAMA³

Abstract: Foil chaff experiment using a sounding rocket S-310-33 was carried out during the WAVE 2004 campaign. This is a campaign to study the formation process of the waves in the airglow structures. S-310-33 was launched at 0:30JST on the 18th January 2004, from Uchinoura, Japan and about 20,000 foils were successfully ejected and tracked by primary radar. The velocity vector of the neutral wind was obtained in the height range of 96-85km. The results indicate a very strong northward wind above 89 km and an eastward wind below. Preliminary results of Fast Langmuir Probe (FLP) and Medium Frequency Receiver (MFR) show that electron density has a significant increase at about 89 km. This density variation is analyzed based on wind shear theory using the neutral wind observation.

概 要

大気光波状構造形成過程の解明を目的とするWAVE2004キャンペーンの一環として、観測ロケットS-310-33号機ロケット実験が行われた。本ロケット実験では、酸素原子密度・電子密度・大気光発光強度の鉛直分布を観測したほか、微細な大気波動の特性を解明するため中間圏・下部熱圏での風系を高精度で直接測定できるフォイル・チャフを用いた観測を行った。測定は高度96-85kmの領域で行われ、高度89km以上では非常に強い北向きの風が、それ以下では東向き風が卓越していたことが分かった。また同じくS-310-33号機に搭載されたラングミュアプローブ (FLP) および中波帯電波受信機 (MFR) の観測から、高度89km付近において急激な電子密度の変動があったとされている。本研究では、この89km付近にみられる電子密度の変動と中性風との関係について、Wind shear理論で説明できるか検証を行った。

¹東京大学大学院 理学系研究科

²情報通信研究機構

³宇宙航空研究開発機構 宇宙科学研究本部

1. はじめに

2004年1月に行われたロケット・地上総合観測「大気光波状構造 (WAVE2004) キャンペーン」は、大気光の波状構造の理解を目的としており、その主要因と考えられている大気波動の観測は特に重要となる。S-310-33号機ロケット実験では、酸素原子密度・大気光発光強度の観測の他に、中性風や電子密度の測定も行われた。本稿では、同ロケットに搭載されたフォイル・チャフ (以下、チャフ) による中間圏・下部熱圏高度の中性風測定の結果と、風向が変化する高度とほぼ同高度で見られる電子密度の急激な変動との関係について報告する。

2. フォイル・チャフによる中性風測定

チャフによる中性風の測定はドイツのMax-Planck研究所のH.-U. Widdel氏が開発した手法で、ヨーロッパを中心に測定が行われており [Widdel, 1985]、日本では1997年に最初の実験が行われている [Murayama et al., 1999a,b]。さらに、2000年には観測ロケット搭載用チャフ放出機構を開発し測定に成功した [Koizumi et al., 2004]。これにより複数の測定器と同時の直接測定が可能となった。

チャフとは両面にアルミを蒸着した短冊状のプラスチック箔のことで、1枚の大きさは約5mm×25mm、厚さ1 μ mである。数千～数万枚のチャフを高度100km付近で放出し、チャフが電波を反射する性質を利用してレーダーで追尾を行い、その軌跡から風向・風速を算出する。

S-310-33号機は内之浦宇宙空間観測所 (USC) から2004年1月18日0時30分JSTに南東方向に打ち上げられ、打ち上げ277秒後のロケット下降時の高度約103kmで約20,000枚のチャフを放出した。放出したチャフは、打ち上げ後289.4秒に新精測レーダーで捕捉し、約13分間にわたって追尾が行われた。同時にチャフからの反射の受信強度を示すビデオ波形も取得した。また打ち上げ後413.9～555.0秒については、旧精測レーダーでも追尾に成功し、新精測の結果とほぼ一致していることが確かめられた。

3. 観測結果

図1は、チャフの水平面上での軌跡と高度変化である。チャフは高度96～84kmの間を大気による減速を受けて緩やかに落下しながら北向きに流された後、東に方向を変えて流されている。この軌跡から高度分解能500mで算出した水平風速および落下速度を図2に示す。東西風速は、高度89km以上で西向きの風が吹いており、それより下では高度が下がるにつれ東向きの風が強くなっている。南北風速は、高度94kmで140m/sという非常に強い北向きの風が観測され、それより下では弱まって高度88km付近でほぼゼロになっている。このように高度約89kmを境に、上部では非常に強い北向きの風が、下部では東向きの風が卓越していることが分かった。

今回の実験では、情報通信研究機構の山川MFレーダーでも中性風・電子密度の同時観測が行われている [川村他, 2005]。図2の破線はMFレーダーで観測された水平風速で、チャフの測定時刻 (0:34-0:49 JST) に近い0:30JSTの30分平均値を使用している。東西成分については、どの高度でも東向きの風で10 m/s程度で、チャフに見られる風向の変化は観測されていない。南北成分では北向きの風が観測されており風向についてはチャフと一致するが、100m/sを超えるような強い風は観測されていない。

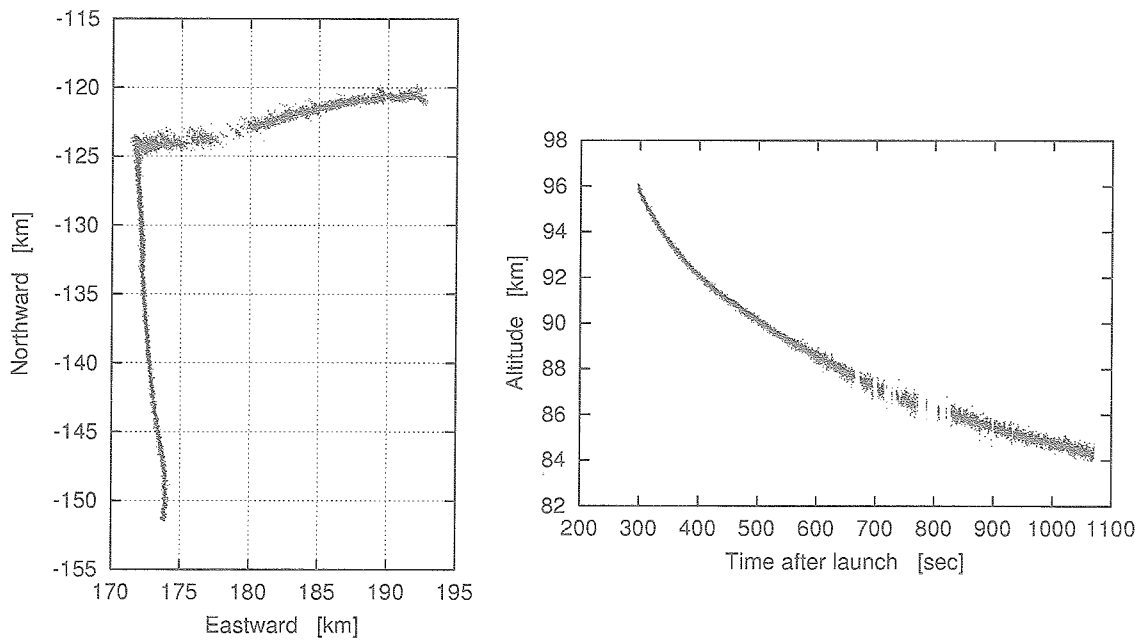


図1 放出したチャフの水平面上での軌跡 (左) と高度変化 (右)

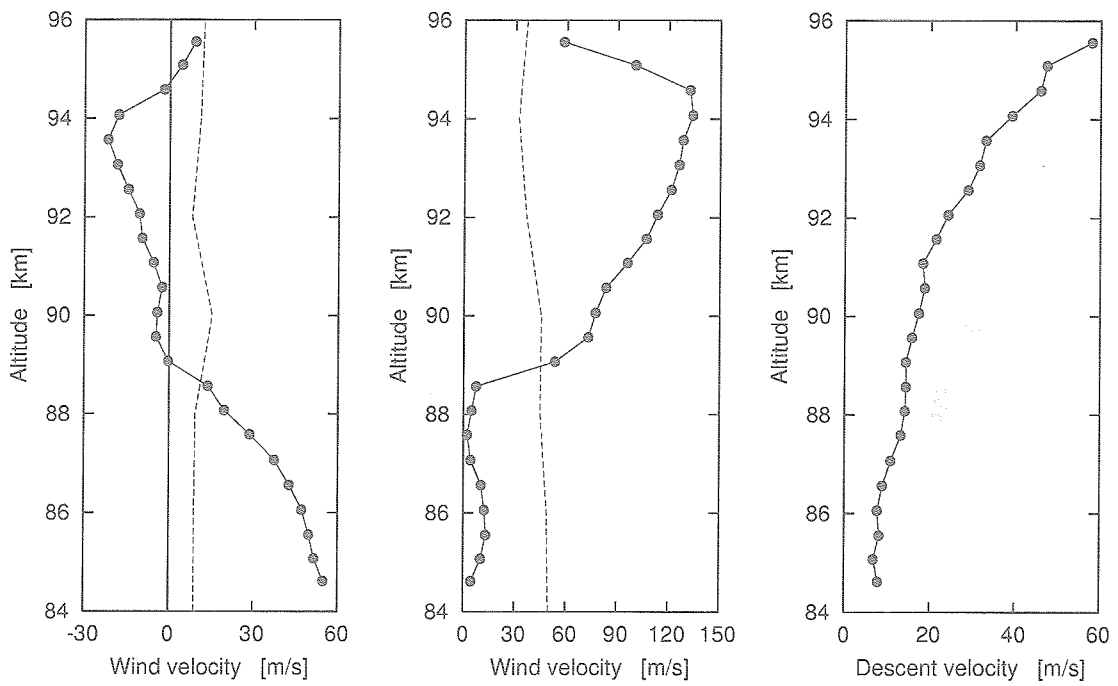


図2 チャフ・MFレーダーで観測された東西風速 (左), 南北風速 (中), 落下速度 (右). 実線がチャフ, 破線がMFレーダー.

4. ラングミュアプローブによる電子密度測定

S-310-33号機には電子温度・密度観測を目的として、二つのラングミュアプローブ（FLP）が搭載されている [阿部他, 2005]。ひとつは電圧固定プローブ（CLP）で、円筒プローブに一定電圧の+5Vを印加したもので、プローブに流れる電流値から電子密度を算出できる。もうひとつは電圧スイーププローブ（SWP）で、振幅4V・周期200msの三角波電圧を印加したものである。今回の電圧スイーププローブによる観測では、プローブに流れる電流の出力の一部が飽和していて電子密度の算出が困難なため、プローブ電流値が電子密度にほぼ比例することを利用して、三角波電圧の上り2Vを印加したときのプローブ電流値を電子密度として使用した。

図3は、ラングミュアプローブで観測された電子密度である。左がロケット上昇時、右が下降時で、各グラフの左側が固定プローブから、右側がスイーププローブから求められた電子密度である。固定プローブでは高度89kmのところでは上昇時・下降時ともに電子密度が急激に上昇し、それより上の高度ではほとんど出力が飽和している。高度89km以上で固定プローブのlowゲインで飽和していない部分については、スイーププローブの電流値が低くなっている高度と対応している。固定プローブの結果から、高度89km付近では最低でも二桁程度の変化が見られることが分かった。またこの現象は同じロケットに搭載されていた中波電波帯受信機（MFR）でも観測されている。 [芦原他, 2005]

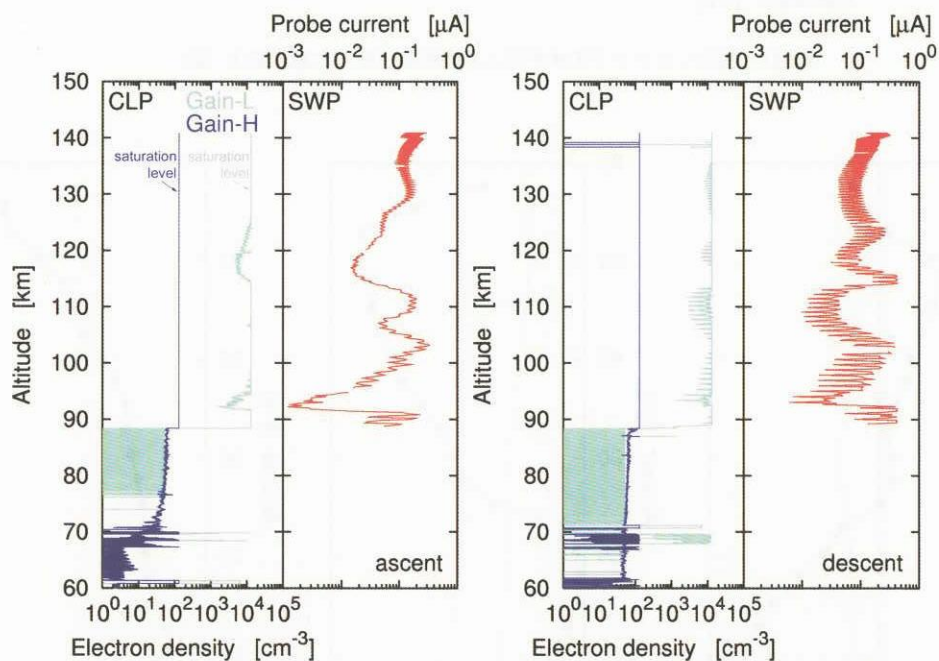


図3 ラングミュアプローブで観測された電子密度。左がロケット上昇時、右が下降時で、各グラフの左側が固定プローブ（CLP）、右側がスイーププローブ（SWP）から求められた電子密度と電流値。

5. 考 察

これらの観測結果から、ほぼ同じ高度で中性風の風向の変化と電子密度の急激な変動が存在していることがわかった。そこで電子密度と中性風の整合性について、Wind shear理論を仮定し定量的な見積もりを行ってみた。

Wind shear 理論とは、中性風にある高度の上側で西向き、下側で東向きのシアアがあるとき、その高度に $v \times B$ ドリフトによってイオンと電子が集積して密度の高い薄い層が形成されるという理論である [Whitehead, 1961]。

イオンの運動は式 (1) で表される。ここで ν_{in} はイオン-中性大気衝突周波数, \mathbf{u} は中性風水平成分, \mathbf{B} は磁場, \mathbf{E} は電場, P_i はイオンの分圧, \mathbf{g} は重力加速度である。電場と重力の寄与を無視すると, 定常状態のイオンの鉛直速度 w は式 (2) となり, 東西風および南北風によるドリフト成分と拡散項の三つから成り立っている。 I は磁場伏角, n_i はイオン密度, r は ν_{in}/ω_i (ω_i :イオンジャイロ周波数) である。

$$m_i \left(\frac{\partial}{\partial t} + \mathbf{v}_i \cdot \nabla \right) \mathbf{v}_i = m_i e (\mathbf{E} + \mathbf{v}_i \times \mathbf{B}) - m_i \nu_{in} (\mathbf{v}_i - \mathbf{u}) - \nabla \frac{P_i}{n_i} + m_i \mathbf{g} \quad (1)$$

$$w = \frac{1}{1+r^2} (rU \cos I - V \sin I \cos I) - D_{iz} \frac{1}{n_i} \frac{\partial n_i}{\partial z} \quad (2)$$

$$D_{iz} = \frac{\sin^2 I + r^2}{1+r^2} \frac{k_B T_i}{m_i \nu_{in}}$$

イオンの運動は拡散よりも中性風の効果のほうが大きいとすると, 式 (2) のうち拡散項が無視できるので, $U \cdot V$ それぞれにチャプで観測された東西・南北風速を代入すると鉛直ドリフト速度 w が求まる。この w の鉛直分布からイオンの収束領域を推定することができる。算出した鉛直ドリフト速度が図4である。 dw/dz が負となる領域がイオンの収束領域となり, 特に $w=0$ の高度でイオンがもっとも効果的に溜まるので, 電子密度のピークの位置と推測される。図4から dw/dz が負となる領域は高度86-94kmであり, $w=0$ となる高度は89kmで電子密度が急激に増加している高度と一致するが, 観測された電子密度ピークの立ち上がりの高度と比べると中性風から推定されるイオンの収束領域は高度幅が広く形状が異なっている。

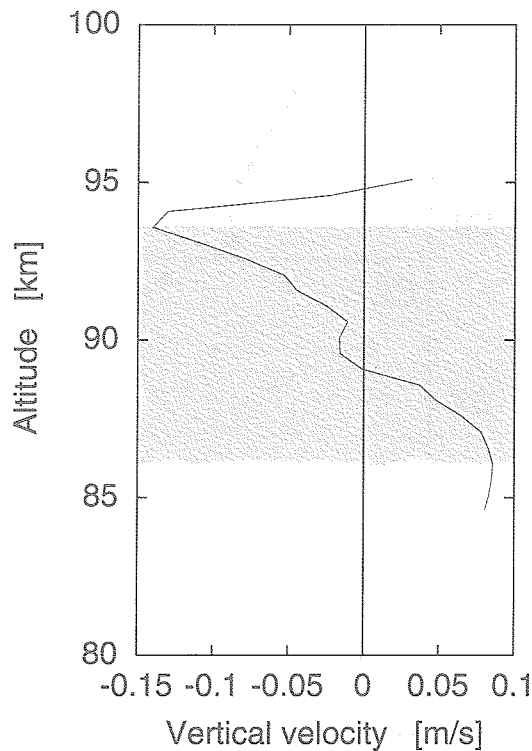


図4 Wind shear 理論から推定した鉛直ドリフト速度, dw/dz が負となる領域をグレーで示す。

今度は先ほど無視していた拡散を考慮し、電子密度から中性風の推定を行った。鉛直ドリフト速度がゼロとなる平衡状態を仮定すると式 (2) から次式のように与えられる。

$$\frac{1}{1+r^2} (rU \cos I - V \sin I \cos I) = D_{iz} \frac{1}{n_i} \frac{\partial n_i}{\partial z}$$

r は高度120kmではほぼ1であり、それより下の高度では r を含む東西風によるドリフトが効き、南北風によるドリフトは無視することができる。電気的中性条件から電子密度はイオン密度と同程度と考えられるので、観測された電子密度プロファイルを代入することで、電子密度の鉛直勾配から東西風速 U を推定できる。図5は推定した東西風速である。赤がロケット上昇時、青が下降時の風速であり、黒はチャフの観測結果である。風速の値が不連続になっているが、これは電子密度について中央の線を境に上部でスイーププローブ、下部で固定プローブのデータを用いたためである。上昇・下降時ともに高度93km付近で西向きにピークをもち、チャフの結果と一致しているが、それより下の高度ではチャフに見られる東向きの風速とは一致していない。

以上から今回観測された中性風と電子密度について、Wind shear理論だけでは説明ができないことがわかった。したがってこの電子密度の急激な変動について、今回仮定したような定常状態ではないイオンの運動やwind shearの他に大気波動などを考慮する必要がある。

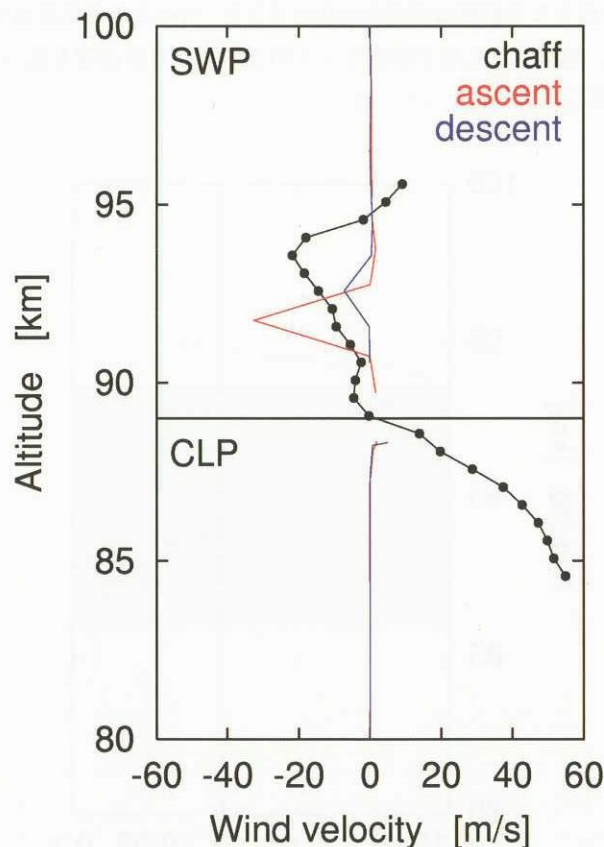


図5 Wind shear 理論から推定した東西風速。電子密度については、中央の線を境に、上部ではスイーププローブのデータ、下部では固定プローブのデータを使用している。赤が算出した東西風速のロケット上昇時、青が下降時、黒がチャフの結果である。

6. まとめ

S-310-33号機ロケット実験で行われた中性風測定の観測結果やMFレーダーとの比較を議論するとともに、高度89km付近でみられる電子密度の急激な変動について中性風との関係をWind shear理論で説明できるか検証した。

チャフによる測定から、高度約89kmを境に、上部では非常に強い北向きの風が、下部では東向きの風が卓越していることが分かった。MFレーダーでは東西・南北成分ともに風向がほとんど変化せず、南北成分については風向についてはチャフと一致するが、100m/sを超えるような強い風は観測されていない。

Wind shear理論による電子密度の推定から、ロケット飛翔時の高度86-94kmの領域ではイオンが収束する領域であり、高度89km付近でロケットの上昇・下降時ともに電子密度のピークをもつことがわかった。これはロケットで観測された電子密度の急激な変化と一致しているが、電子密度のピーク構造とは形状が異なる。また東西風速の推定を行ったところ、チャフの観測値と西向きの構造は一致するがそれより下部では一致しなかった。したがって、今回観測された電子密度の変動について、wind shearの他に何らかの効果が存在している可能性が考えられる。またラングミュアプローブで測られた電子密度の信頼性についても問題が残っており、何らかの原因で実際の電子密度の変動よりも大きく観測された可能性もある。今後は、wind shear以外の効果や測定自体の検証が必要である。

謝 辞

本研究を進めるにあたりご協力頂いた、観測ロケット実験班および所外関連機関の皆様にお礼申し上げます。放出機構の設計・製作は株式会社エーディーによるものです。

参 考 文 献

- [1] 阿部琢美 他, "FLP (Fast Langmuir Probe) による電子温度と密度の観測", 本研究報告, 2005
- [2] 川村誠治 他, "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
- [3] Koizumi Y., M. Shimoyama, K-I. Oyama, Y. Murayama, T. Tsuda, and T. Nakamura, Foil chaff ejection systems for rocket-borne measurement of neutral winds in the mesosphere and lower thermosphere, *Rev. Sci. Instrum.*, 75 (7), 2346-2350, 2004.
- [4] Murayama, Y., K. Igarashi, I. Nishimuta, R. Yamazaki, K-I. Oyama, T. Tsuda, T. Nakamura, S. Fukao, H-U. Widdel, and K. Schlegl, Cooperative wind observation in the upper mesosphere and lower thermosphere with foil chaff technique, the MU radar, and Yamagawa MF radar, *Earth, Planets and Space*, 51, 719-729, 1999a.
- [5] Murayama, Y., K. Igarashi, I. Nishimuta, R. Yamazaki, K-I. Oyama, T. Tsuda, T. Nakamura, S. Fukao, H-U. Widdel, and K. Schlegl, Wind observations in the MLT region over southern Japan, by using foil chaff technique, Yamagawa MF radar and the MU radar, *Adv. Space Res.*, 24, 575-578, 1999b.
- [6] 芦原佑樹 他, "中波帯電波受信機 (MFR) による電子密度推定", 本研究報告, 2005
- [7] Whitehead, J. D., The formation of the sporadic-E layer in the temperate zones, *J. Atmos. Terr. Phys.*, 20, 49-58, 1961.
- [8] Widdel, H-U., Foil clouds as a tool for measuring wind structure and irregularities in the lower thermosphere (92-50 km), *Radio Sci.*, 20, 803-812, 1985.

中波帯電波受信機 (MFR) による電子密度推定

芦原 佑樹¹・石坂 圭吾¹・岡田 敏美¹
三宅 壮聡¹・村山 泰啓²

Estimation of electron density with MF radio receiver (MFR)

By

Y. ASHIHARA¹, K. ISHISAKA¹, T. OKADA¹, T. MIYAKE¹, Y. MURAYAMA²

Abstract: The S-310-33 rocket was launched at 0:30 JST on 18th January, 2004. Our purpose of the rocket experiment is the investigation of electron density profile in mid-latitude D-region ionosphere during the nighttime. The Medium Frequency Receiver (MFR) was installed on the rocket to estimate the D-region electron density by the MF radio wave absorption method. The MFR measured the intensities of radio waves 238 kHz and 873 kHz transmitted from the ground stations. The electron density profile was estimated from absorption of these radio waves. It is found that there was a thin layer of high electron density of $2.4 \times 10^3 \text{ cm}^{-3}$ at the altitude of 89 km. The thickness of its layer is about 0.9 ~ 1.0 km.

概 要

2004年1月18日0時30分 (JST) にS-310-33号観測ロケットが宇宙科学研究本部・内之浦宇宙空間観測所 (USC) より打ち上げられた。ロケット観測における我々の目的は、夜間中緯度電離層D領域の電子密度分布を調査することである。電子密度の推定はロケットに搭載された電波受信機により観測された電波の受信強度の減衰特性を用いて行う。そのため、ロケットに中波帯電波受信機 (MFR) を搭載し、地上から送信される238 kHzおよび873 kHzの電波を受信する。受信された238 kHzおよび873 kHz電波強度は、ロケット上昇時・下降時とも高度約89 kmにおいて急激に減少した。観測された電波受信強度とFull Wave計算を用いて電離層下部領域の電子密度を推定したところ、高度89 kmに周辺の電子密度よりも1桁程度増加した層が存在し、その電子密度は約 $2.4 \times 10^3 \text{ cm}^{-3}$ 、厚さは0.9 ~ 1.0 kmであると推定された。

重要語：中波帯電波観測，電離層下部領域，電子密度，電波吸収法，Full Wave計算

¹富山県立大学

²情報通信研究機構

1. はじめに

電離層下部に見られる大気発光の波状構造の解明を主目的としたS-310-33号観測ロケットが、宇宙科学研究本部・内之浦宇宙空間観測所（USC）より2004年1月18日0時30分（JST）、上下角72度で打ち上げられた。ロケットの飛翔および搭載された機器の動作は全て順調で、打ち上げ60秒後にノーズコーンが開頭された。ロケットは発射後186秒に最高高度141 kmに達し、内之浦南東海上に落下した。

本ロケット実験において、筆者らは中波帯電波の伝搬特性を用いた電子密度分布の測定を担当した。ロケットに搭載された中波帯電波受信機（MFR）は、熊本県熊本市から送信されているNHK熊本第2放送873 kHz（500 kW）の電波および鹿児島県鹿屋市からの鹿屋航空基地無線航行用ビーコン238 kHz（100 W）の電波を観測した。図1にS-310-33号観測ロケットの軌道と受信した地上局電波の通路を示す。ここで、本ロケット実験で観測される873 kHz電波は、過去のロケット実験において観測され、873 kHz電波の受信強度分布とFull Wave計算を用いて中緯度電離層の電子密度分布が推定されている（長野他，1989；長野他，1990；満保他，1997）。さらにVLF帯の電波を用いて電子密度が推定され、873 kHz電波による電子密度推定結果とのクロスチェックを行っている。本ロケット実験においても異なる周波数の電波を観測し、比較する必要がある。しかし、これまでのロケット実験で観測されたVLF電波発信局はすでに廃局となっており、本ロケット実験では使用できない。そのため電波発信源がUSCに近く、できるだけ低い周波数を調査した結果、鹿児島県鹿屋市から発信されている238 kHz電波を使用することにした。これにより、873 kHz電波と238 kHz電波を用いたクロスチェックが可能である。なお、238 kHz電波は過去のロケット実験では計測されておらず、本ロケット実験が初めてである。

本報告ではS-310-33号観測ロケットで得られた238 kHzおよび873 kHz電波の受信強度分布を示し、これらの受信強度分布を用いた電子密度推定結果について述べる。

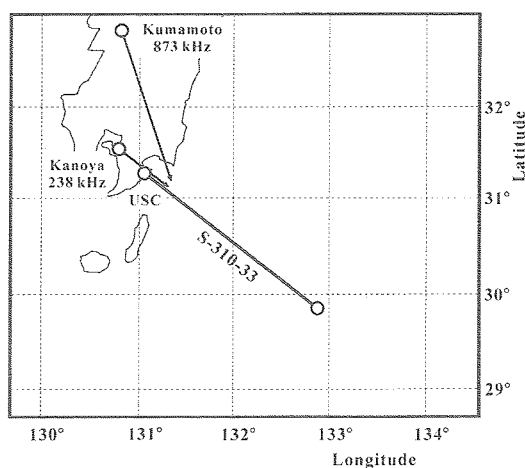


図1 S-310-33号観測ロケットの軌道とロケットで受信した地上局の電波通路

2. 中波帯電波受信機（MFR）

S-310-33号観測ロケットに搭載されたMFRはループアンテナ、プリアンプおよび238 kHz、873 kHzの各周波数の検波部で構成される。MFRのブロック図および外観図を図2、図3に示す。受信機のセンサは、15回巻きの台形ループアンテナ（上底30 cm、下底10 cm、高さ15 cm）である。ループアンテナはロケット打ち上げ後61秒で展開する。メインエレクトロニクスである検波部では、スーパーヘテロダイン方式を採用し、受信された238 kHz電

波および873 kHz電波は455 kHzの中間周波数に変換された後、検波される。検波部の周波数帯域幅は2 kHzである。検波部はHigh-gain, Low-gainの2つの検波出力をもつ。なお、High-gain出力電圧はLow-gain出力電圧に比べ20 dB増幅されている。これによって、2出力を持つ受信機のダイナミックレンジは1出力のものに比べ拡大される。MFRの最小感度・ダイナミックレンジはそれぞれ、238 kHzが $-20 \text{ dB } \mu\text{A/m} \cdot 60 \text{ dB}$ 、873 kHzが $-8 \text{ dB } \mu\text{A/m} \cdot 70 \text{ dB}$ である。

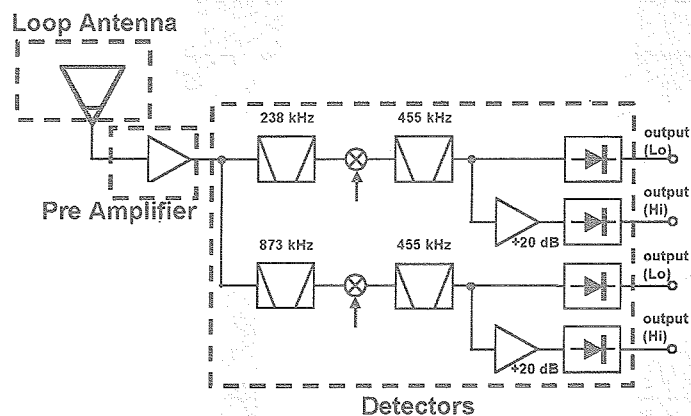


図2 S-310-33号観測ロケット搭載中波帯電波受信機のブロック図

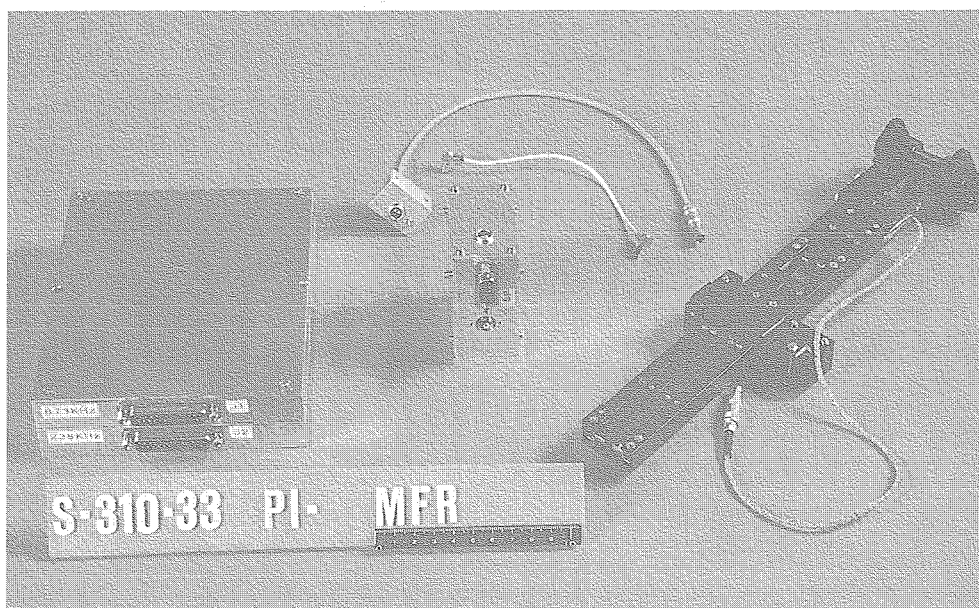


図3 中波帯電波受信機外観図

3. ロケットによる中波帯電波の受信強度観測結果

図4, 図5はMFRにより観測されたロケット上昇時・下降時の238 kHzおよび873 kHz電波の受信強度分布である。縦軸は高度、横軸は電波受信強度である。また、観測結果に見られる細かい振幅の変化はロケットのスピンの影響である。図4のロケット上昇時において高度68 kmで2つの電波の受信強度が急激に増加しているのはループアンテナが展開されたためである。高度68 kmから高度89 kmまでの領域では238 kHz、873 kHz電波の受信強度は減衰していないが、高度89 kmで873 kHz電波の受信強度は約20 dB $\mu\text{A/m}$ 減衰している。しかし、238 kHz電波の受信強度は高度89 kmで約5 dB $\mu\text{A/m}$ 減衰し、高度105 kmで受信機のノイズレベルに埋もれるまで緩やかに減

衰している。図5のロケット下降時における観測結果をみると、高度約89 kmにおいて238 kHz、873 kHzそれぞれの電波受信強度が急激に減少している。特に238 kHz電波はロケット上昇時に見られた緩やかな変化ではなく、急激な変化が見られる。

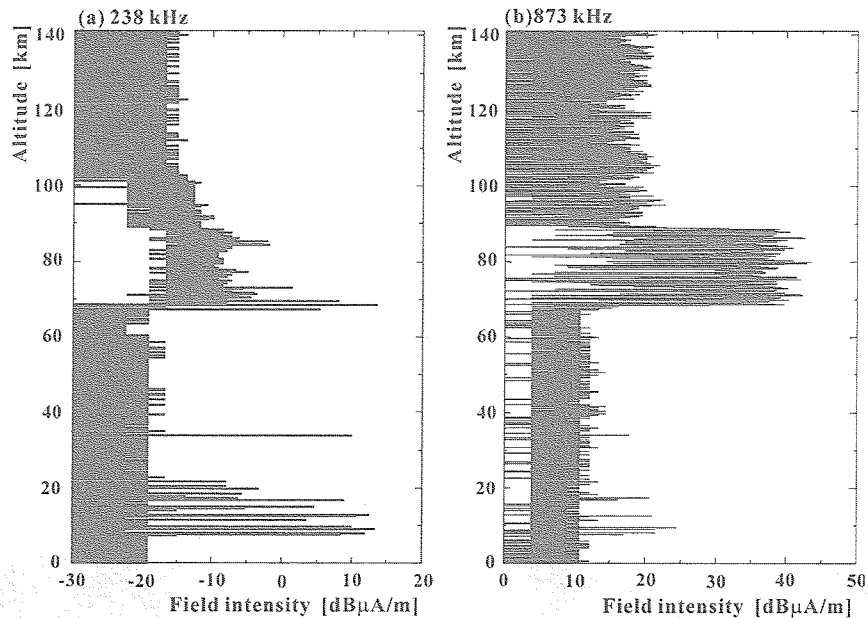


図4 ロケット上昇時に観測された(a) 238 kHz電波および(b) 873 kHz電波の受信強度分布

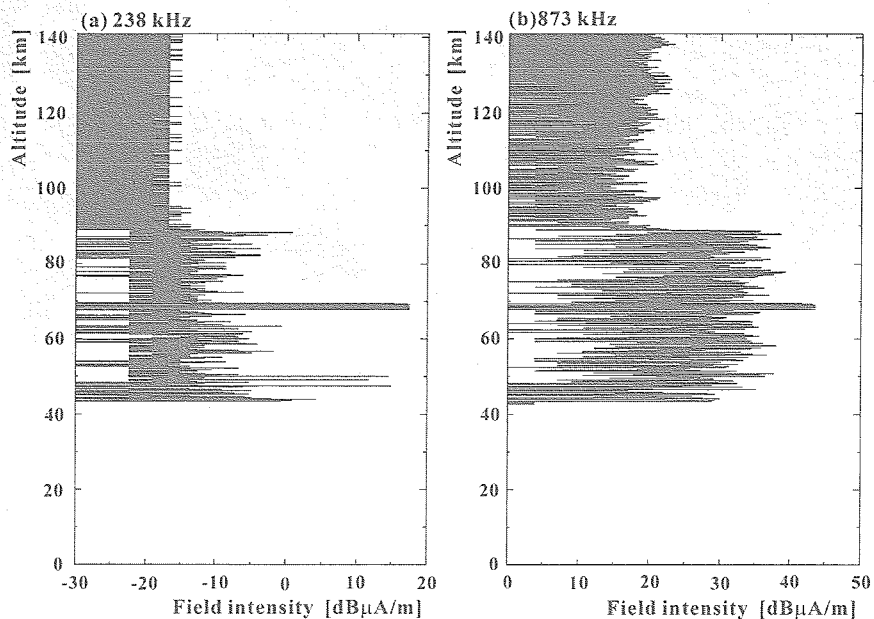


図5 ロケット下降時に観測された(a) 238 kHz電波および(b) 873 kHz電波の受信強度分布

4. 電波受信強度を用いた電子密度推定

ロケット観測された電波受信強度プロファイルに電波吸収法を用いることによって、電子密度を推定する。電波吸収法とは、ロケット搭載電波受信機によって観測した電波受信強度と電子密度や衝突を考慮したFull Wave計

算値より導いた電波受信強度の比較を行い、それらが一致するように電子密度を修正することにより、電子密度を推定する手法である（長野，1997）。

4.1 ロケット上昇時の電子密度推定

図4より、高度89 kmにおいて873 kHz電波は急激に減衰していることから、高度89 kmの位置での電子密度が急激に増加していると推定される。一方、238 kHz電波は、高度89 kmにおいて約5 dB μ A/m減衰しているが、高度105 kmまで緩やかに減衰している。ここで、ロケット上昇時において、238 kHz電波の波長は約1.26 km、高度89 kmにおける電離層に対する238 kHz電波の入射角は43.7°、一方873 kHz電波の場合、波長は約0.34 km、入射角は69.0°である。電波の波長と電離層に対する電波の入射角を考慮し、電子密度が増加していると思われる領域の厚みを推定すると、0.12 ~ 0.9 kmとなる。これらの推測を元に初期電子密度分布を仮定し、Full Wave計算を行い、観測された電波受信強度とFull Wave計算値が一致するまで電子密度分布を修正した結果、図6(a)に示す電子密度分布が得られた。図6(a)の電子密度分布より、高度89 kmにおいて電子密度が $2.4 \times 10^3 \text{ cm}^{-3}$ まで増加している領域が存在し、その厚さは約0.9 kmであるということが分かった。ここで、図6(b)、(c)は図6(a)の電子密度分布を用いてFull Wave計算した電波受信強度と観測値を比較したものである。計算値と観測値が一致していることがわかる。特に高度80 kmから高度105 kmの領域において両者の受信強度の減衰特性がよく一致している。

4.2 ロケット下降時の電子密度推定

ここで、ロケット下降時において高度89 kmの位置での電波の入射角はそれぞれ、238 kHz電波の入射角は71.3°、873 kHz電波は77.3°となる。ロケット上昇時と同じように電子密度を推定した結果、図7(a)のような電子密度分布が得られた。図7(a)の電子密度分布を見ると、高度89 kmに電子密度が $7.5 \times 10^2 \text{ cm}^{-3}$ まで増加している領域があり、その厚さは約0.9 kmであった。図7(a)の電子密度分布を用いてFull Wave計算を行った結果、図7(b)、(c)に示すように238 kHz、873 kHz電波とも観測値と計算値がほぼ一致した。

ロケット上昇時・下降時における電子密度推定結果から、ロケット観測時において高度89 km付近の領域では図8に示すように、電子密度が $7.5 \times 10^2 \text{ cm}^{-3} \sim 2.4 \times 10^3 \text{ cm}^{-3}$ 、厚さ約0.9 kmの層が存在していると推定した。ここで、1992年に打ち上げられたS-310-21号ロケット観測において推定された電子密度分布を見てみると、高度89 kmの位置で電子密度が $1.7 \times 10^3 \text{ cm}^{-3}$ 、層の厚さが約1.0 kmの領域が存在していると報告されている（Okada et al., 1997, Nagano and Okada, 2000）。これより、冬季夜間の中緯度電離層において、高度89 kmに電子密度が約 10^3 cm^{-3} 、厚さが約1.0 kmの層が存在することが示された。

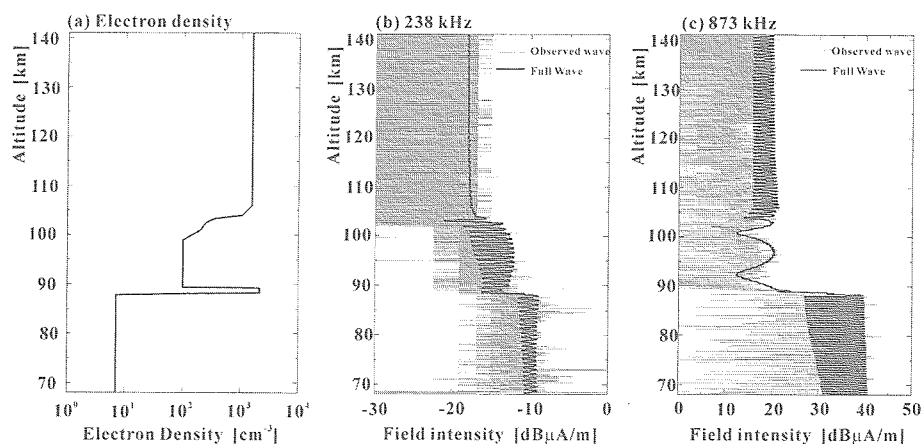


図6 ロケット上昇時において(a)推定された電子密度分布、(b) 238 kHz電波受信強度のFull Wave計算値と観測値の比較、(c) 873 kHz電波受信強度のFull Wave計算値と観測値の比較

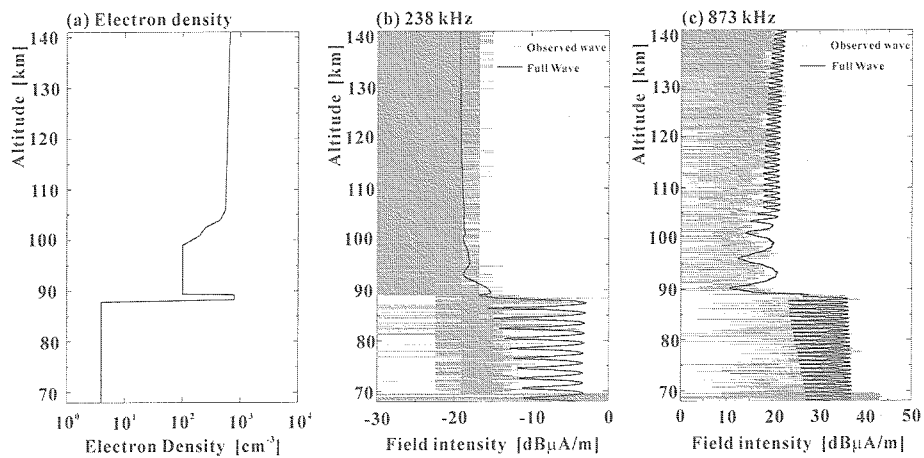


図7 ロケット下降時において(a)推定された電子密度分布, (b) 238 kHz電波受信強度のFull Wave計算値と観測値の比較, (c) 873 kHz電波受信強度のFull Wave計算値と観測値の比較

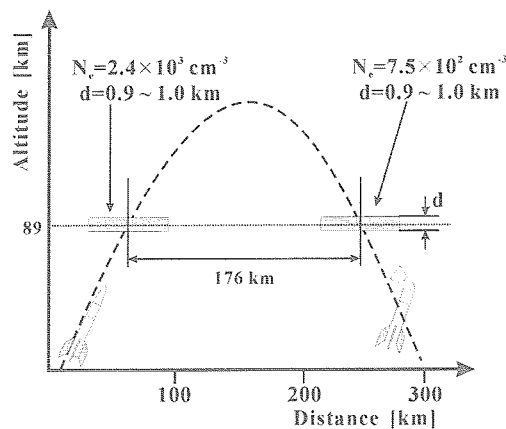


図8 ロケット観測時に推定される高度89 km付近の電子密度分布

5. まとめ

S-310-33号観測ロケット搭載中波帯電波受信機によって中緯度夜間電離層中の238 kHzおよび873 kHz電波の受信強度観測を行った。その結果、ロケット上昇時において873 kHz電波は高度89 kmで受信強度が急激に減衰したが、238 kHz電波は高度89 kmから高度105 kmにかけて緩やかに減衰した。一方ロケット下降時では高度89 kmで238 kHzおよび873 kHz電波の受信強度は急激に減衰した。電波受信強度の観測結果およびFull Wave計算から電子密度分布を推定したところ、高度89 kmで電子密度が増加している領域が存在し、その厚さが約0.9 kmであることが示された。また、高度89 kmの位置に存在すると推定された電子密度の増加している層は、ロケットに搭載された高速ラングミュアプローブ (FLP) 観測によっても観測されている (小泉他, 2004)。また、高度89 kmの位置に電子密度の高い層が存在したことは1992年のS-310-21号ロケット実験でも観測されている。なお、今回のロケット実験においては、情報通信研究機構 (NICT) の山川電波観測所において、MFレーダ観測、イオノグラム観測が行われたが、これらの地上観測では高度89 kmでの電子密度の増加している層は観測されなかった (川村, 2004)。

謝 辞

本ロケット実験は、宇宙開発機構宇宙科学研究本部のご協力により行われたものであり、実験主任加藤学教授

には大変お世話になりました。ここに感謝の意を表します。電波吸収法を用いた電子密度推定を行うにあたり、Full Wave計算についてご指導いただいた金沢大学長野勇教授、石川工業高等専門学校深見哲男教授に深く感謝いたします。

ロケット搭載機器は、明和システム株式会社の製作であり、特に高野博氏に負うところが大きく、ここに深く感謝いたします。

参 考 文 献

- [1] 川村 誠治, 山川MFレーダで観測された電子密度変動と風速変動, NICT大気光ワークショップ, 2004.
- [2] 小泉 宜子, 村山 泰啓, 阿部 琢美, 小山 孝一郎, S-310-33号機で観測された中性風と電子密度の鉛直構造の関係, 第116回地球電磁気・地球惑星圏学会講演会, B22-04, 2004.
- [3] 満保 正喜, 深見 哲男, 岡田 敏美, 長野 勇, 木村 磐根, MFおよびVLF電波のロケット観測による夜間の下部電離層の電子密度測定, 電子情報通信学会論文誌B-II, **80-B-II**, 416-423, 1997.
- [4] 長野 勇, 岡田 敏美, 井上 良彦, 牧野 将美, 森田 慎一郎, 満保 正喜, S-310-18号機による中波強度の高度分布からD層電子密度分布の推定, 宇宙科学研究所報告, 特集 第23号, 221-232, 1989.
- [5] 長野 勇, 岡田 敏美, 井上 良彦, 牧野 将美, 満保 正喜, 電波吸収法による電子温度と中性大気温度比及びD層電子密度の測定, 宇宙科学研究所報告, 特集 第26号, 49-62, 1990.
- [6] 長野 勇, 不均質媒質中の電磁波伝播—ロケット・衛星観測による宇宙空間の電波伝播—, 朋友印刷, 1997.
- [7] Nagano, I. and T. Okada, Electron density profile in the ionospheric D-region estimated from MF radio wave absorption, *Adv. Space Res.*, **25**, 33-42, 2000.
- [8] Okada, T., M. Mambo, T. Fukami, I. Nagano, and K. Okumura, Multiple thin layers of enhanced ionization in the ionospheric E-region derived from VLF wave measurements, *J. Geomag. Geoelectr.*, **49**, 69-76, 1997.

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

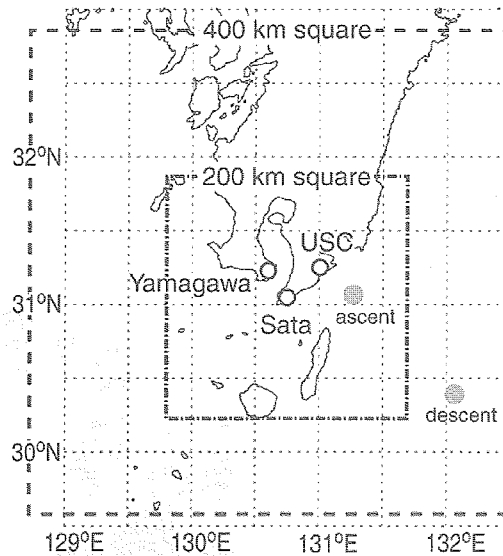


図1 WAVE2004の地上観測点位置 (USC, Yamagawa, Sata). 破線, 一点破線の四角形は大気光発光高度を100キロメートルと仮定したときの, Yamagawa, Sataからの観測視野の目安を示す. ロケットの大気光発光高度通過時の水平位置の目安が斜線部で示されている.

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。

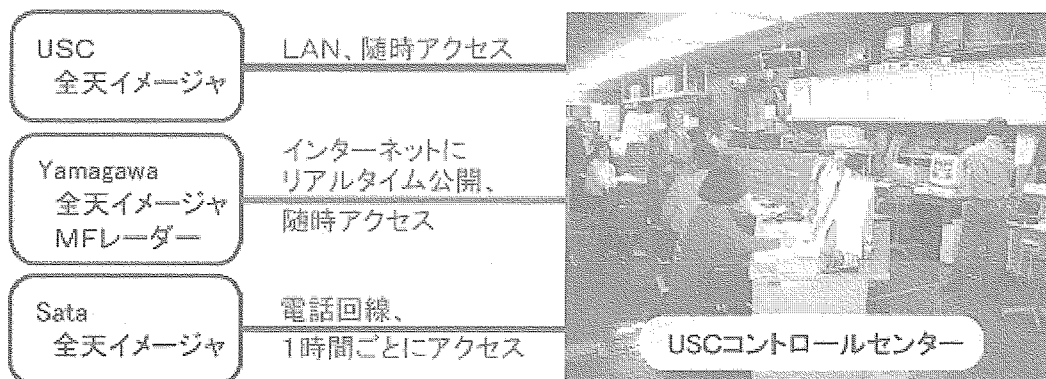


図2 地上観測点（USC, Yamagawa, Sata）と、USCコントロールセンターとのネットワーク接続

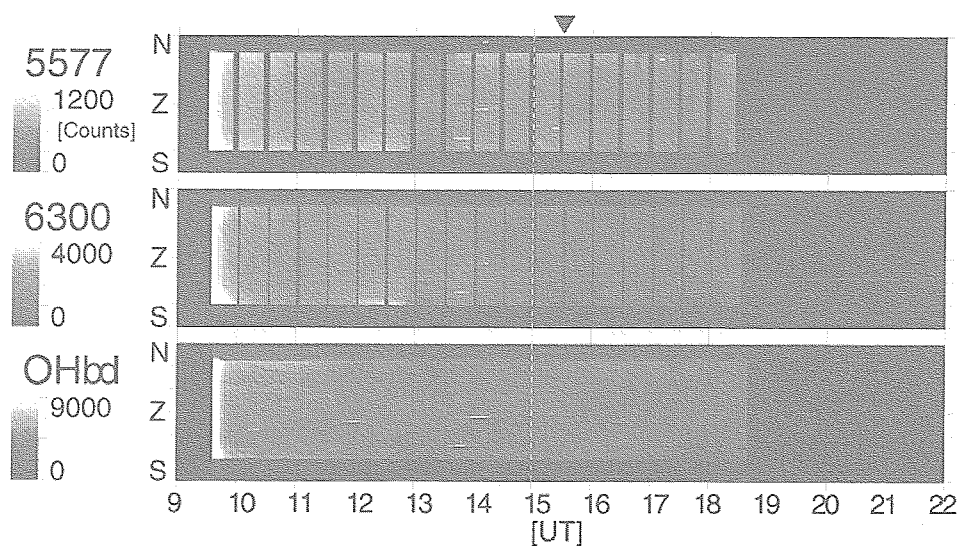


図3 SataのASI観測データから作成したOI（上段）、酸素原子630.0-nm線（中段）、OH（下段）の南北時間断面図。白い破線は地方時における真夜中を、▼印はロケット打ち上げ時刻を表す。13時-13時30分（UT）と17時（UT）以降は、上空を雲が通過したため、他の時刻に比べて暗くなっているように見える。

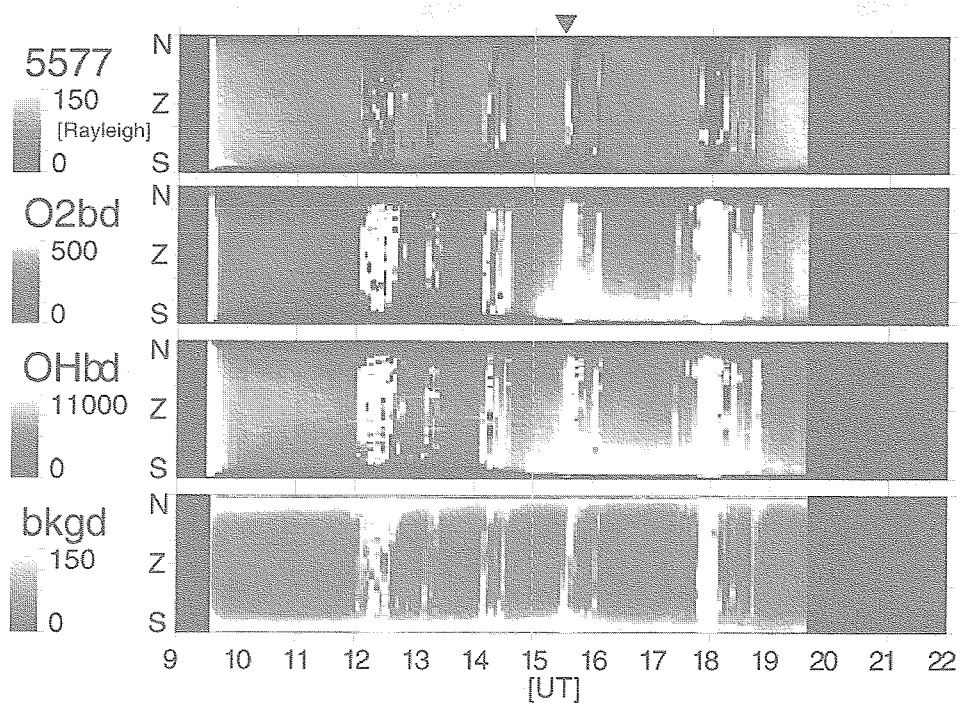


図4 YamagawaのASI観測データから作成したOI（最上段）、O2（第2段）、OH（第3段）、背景光（最下段）の南北時間断面図。白い破線は地方時における真夜中を、▼印はロケット打ち上げ時刻を表す。12時（UT）以降たびたび上空を雲が通過し、その部分は他の時刻に比べて明るく見える。

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。

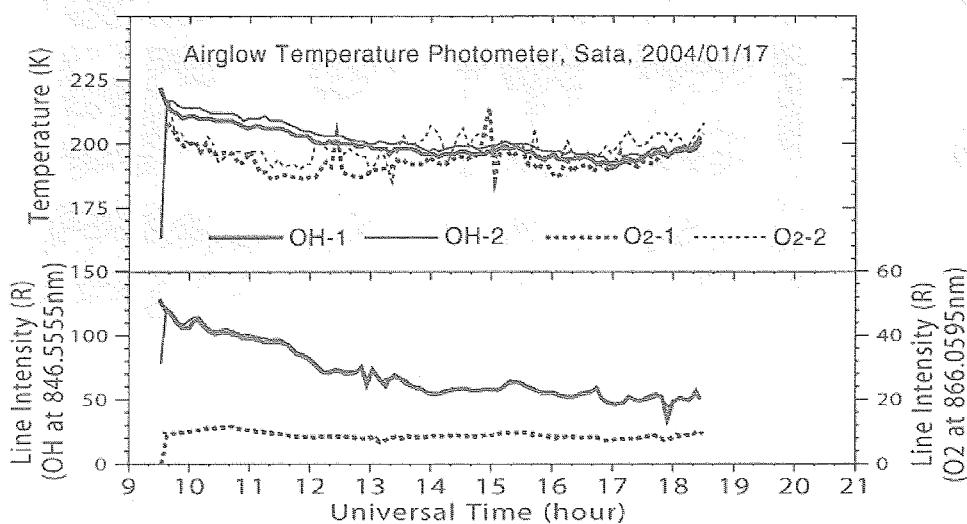


図5 大気分光温度フォトメータで観測されたSata上空のOH、O₂回転温度と大気光輝度の時間変化。

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。

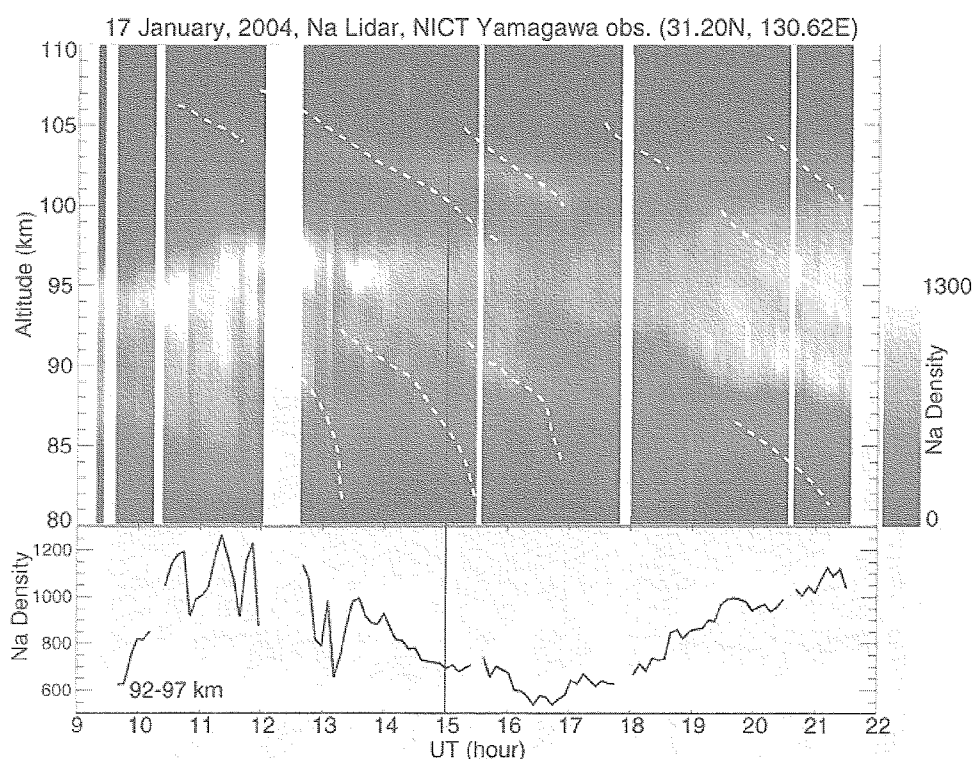


図6 (上段) ナトリウムライダーで観測されたYamagawa上空のナトリウム原子密度の高度時間断面図と、(下段) 高度92-97キロメートルにおけるナトリウム原子密度の時間変化。密度の単位は任意(装置固有)カウント数。白の破線は下方伝播する大気波動の波面を示す。

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。

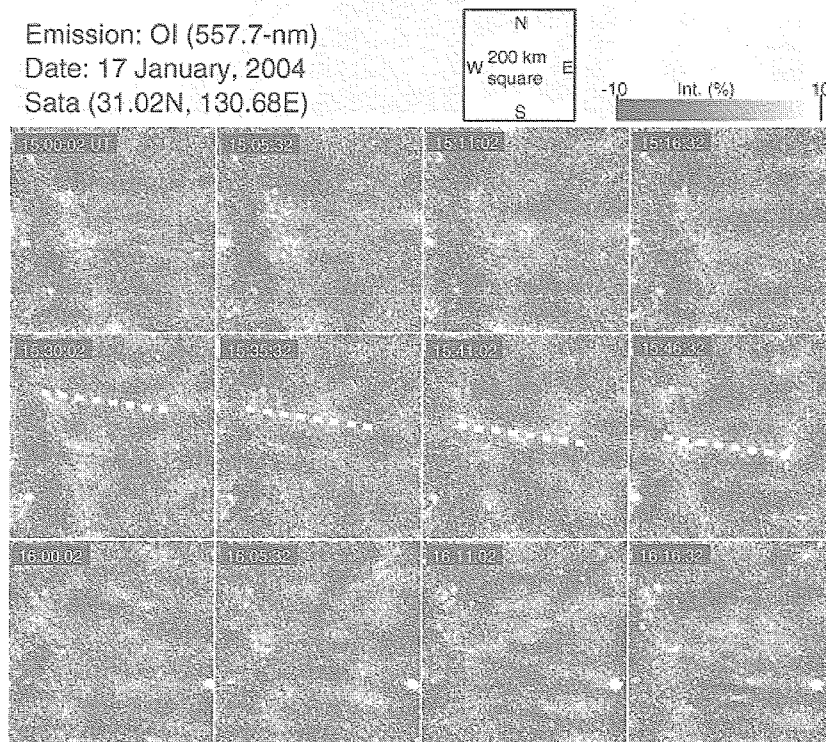


図7 Sataで観測されたロケット打ち上げ前後のOI大気光強度2次元分布。大気光強度の値は、それぞれの画像内の平均強度からの変動率を表している。白の破線はほぼ南方に伝播する大気波動の波面を示す。縦の縞状構造も見えるが、これは天の川によるものと思われる。

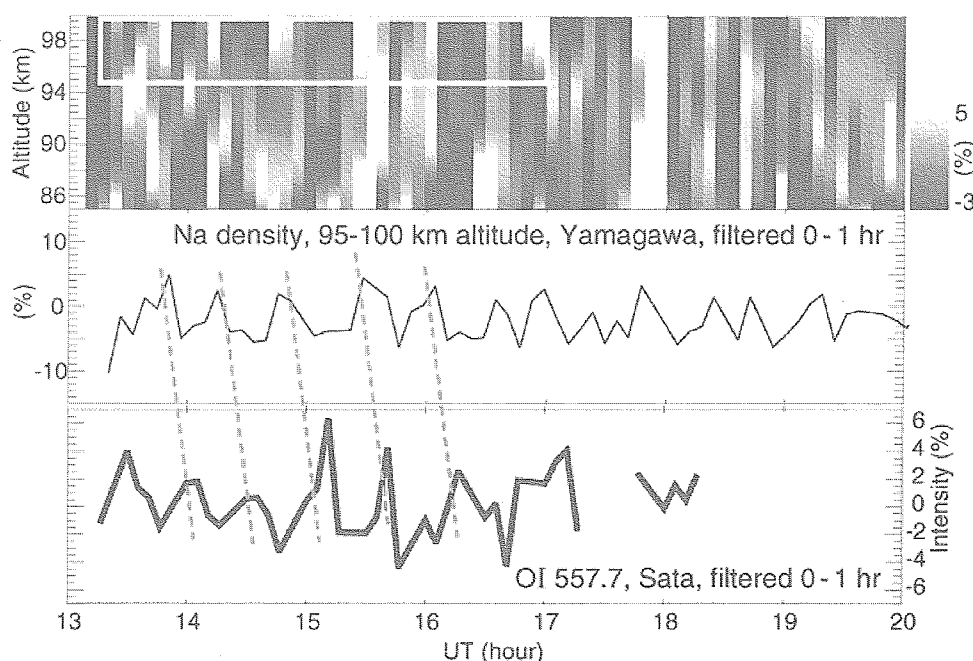


図8 ナトリウム原子密度時間変動とOI大気光強度変動の比較。(上段) ナトリウム原子密度の高度時間断面図。時間方向に1時間のハイパスフィルターかけ、高度方向に10キロメートルの移動平均を取っている。(中段) 高度94-100キロメートルにおけるナトリウム原子密度の時間変化。時間方向に1時間のハイパスフィルターがかけられている。(下段) SataのASI観測データから得られたSata上空のOI発光強度の時間変化。

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.

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

川村 誠治・村山 泰啓・久保田 実

Wind and electron density observed with the Yamagawa MF radar during the wave 2004 campaign

By

Seiji KAWAMURA, Yasuhiro MURAYAMA, and Minoru KUBOTA

Abstract: Mesospheric and lower thermospheric winds and electron densities observed by the Yamagawa MF radar during the wave 2004 campaign are shown. During this campaign, the diurnal tide with downward phase progression is dominant in both eastward and northward wind velocities. The S310-33 rocket, which was launched at 15:30UT on 17 January, 2004, goes through the period in which the westward tidal component is maximum and the northward tidal component is growing. The height profile of the electron density observed at the launch time shows steep increase above 90 km altitude, though the height itself might be affected by the group retardation of the MF radio waves.

概 要

WAVE2004キャンペーンにおけるS310-33ロケット発射時刻（2004年1月17日15:30UT）前後の山川MFレーダーの水平風速・電子密度観測結果を報告する。本キャンペーン期間中の水平風速には、東西成分・南北成分ともに位相が下方へ伝播する1日潮汐が顕著に見られていた。ロケットは、東西風の1日潮汐が西向きに最大で南北風の1日潮汐が北向きに強まっていく時間帯に打ち上げられたことになる。電子密度はロケット打ち上げ時に高度90kmを超えてから急上昇している。ただし中波帯の電波は群遅延の影響を受けるため、MFレーダーで見られている電子密度上昇開始高度は真の高度より高い可能性がある。

1. はじめに

WAVE2004キャンペーンでは、夜間大気光に見られる縞状構造の生成メカニズム解明を目的とし、内之浦宇宙空間観測所（USC; 31.25° N, 131.08° E）からロケット（S310-33号機）を打ち上げると共に、その周辺に光学カメラ・各種レーダー・Naライダーなど様々な地上観測測器を集めて多角的な観測が実施された。本稿では、ロケット発射前後の山川MFレーダー観測データを用い、本キャンペーン期間中の水平風について、主として背景場を理解するという立場から報告する。また、差分吸収法を用いてMFレーダー観測から推定された電子密度についても報告する。

2. 山川MFレーダー観測

山川MF（中波）レーダーは、情報通信研究機構（旧通信総合研究所）山川電波観測施設（鹿児島県指宿郡山川町; 31.20° N, 130.62° E）に設置されているバイスタティック・パルス・レーダーである [Igarashi et al., 1996; Murayama et al., 2000]. 図1に山川MFレーダーの送受信アンテナの配置図を、表1に主要諸元を示す. 3基の受信アンテナはそれぞれワイヤーを張って作られたエレメント長77mのクロスダイポールであり、一辺約185mの正三角形を形成するように配置されている. この正三角形の外側に、一辺約78mの正方形形状に4つの送信ダイポールアンテナが配置されている. 送信アンテナから発射されたMF帯（中波帯; 中心周波数1.9550 MHz）の電波は中間圏・下部熱圏（電離圏D領域）高度約60–100kmにおいて分反射され、その反射波は3基の受信アンテナで受信される. 3つの受信信号に相関法（FCA; Full Correlation Analysis [e.g., Briggs, 1984]）を適用することにより水平風速が得られる. また、偏波の異なる2種の電波（OモードとXモード）を交互に送信し、偏波による電波吸収量の違いを利用する差分吸収法（DAE; Differential Absorption Experiment [e.g., Manson, 1984]）によって電離圏D領域の電子密度が推定される. 山川MFレーダーでは、FCAによる水平風観測を1994年9月から、DAEによる電子密度観測を1998年9月から継続的に実施している. 現在はそれぞれ2分ずつの観測を交互に繰り返して時間分解能4分で水平風速・電子密度を得ている. 半値幅48 μ sの送信パルスを用いているため、高度分解能は約7kmである.

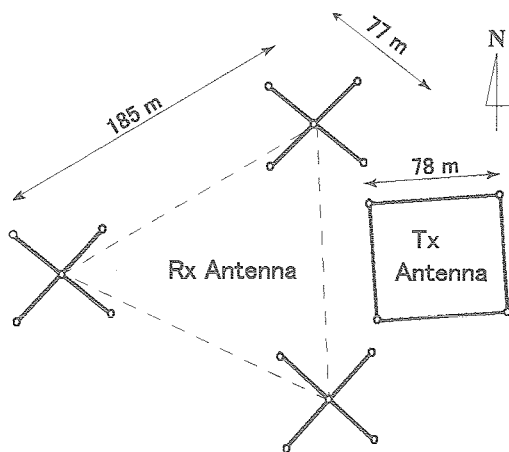


図1 山川MFレーダーの送受信アンテナ配置図.

表1 山川MFレーダーの主要諸元

(緯度, 経度)	(31.20N, 130.62W)
中心周波数	1.9550MHz
周波数帯域幅	60kHz
尖頭電力	50kW
パルス長	48 μ s
時間分解能	2分
サンプリング間隔	2km

3. 観測結果

図2に山川MFレーダーで得られたロケット発射前後5日間の電子密度・東西風（東向き正）・南北風（北向き正）を示す. 2004年1月15日0UTから20日0UTまでの30分平均値である. 図中の赤い縦線がロケット発射時刻（2004年1月17日15:30UT）を表している.

水平風は、東西風・南北風ともに高度約78km以上でほぼ連続的にデータが得られている. 高度100kmまで観測データが得られるが、MFレーダーのFCA法で得られる高度約90kmを超える水平風速は過小推定されているという議論があるため [Cervera and Reid, 1995], 本稿では水平風速の表示を高度94kmまでに留めてある. 東西風・南北風ともに潮汐と思われる1日周期成分が顕著に見られている. ロケット発射時は東西風の大きさが数m/sと小さく、南北風が北向き約40m/sほどであったことが分かる. 潮汐やロケット発射時の水平風の詳細は、3.1節で議論する.

電子密度は昼と夜で観測される高度範囲が大きく異なっている. 昼間は高度約80km以下で、夜間は主に高度約

80km以上で電子密度が得られている。電離圏D領域の電子密度は、太陽水素ライマンアルファ（1216 Å）・宇宙線・X線などを電離源とし、水和クラスターイオンや負イオンを含んだ複雑なイオン化学過程に支配されている。この領域のイオン化学過程には未解明の部分が多いが、昼間の電子は主に太陽水素ライマンアルファによるNOの電離で生成されることが知られている。MFレーダーでは偏波による電波吸収量の違いを利用して電子密度を推定しているが、電波吸収が強くなり過ぎるとSN比が低下し電子密度推定が困難になる。昼間は高度60-80kmといった低高度でもある程度電子密度が、高度80km以上になると（特にXモードの）電波吸収が強くなり過ぎて、電子密度推定が困難になっていると考えられる。一方夜間は主要電離源である太陽水素ライマンアルファがなく電子密度が低いために、高度80km以下では分反射エコーのSN比が小さい。ある程度電子密度が高くなる高度80kmより上でのみ電子密度が得られている。

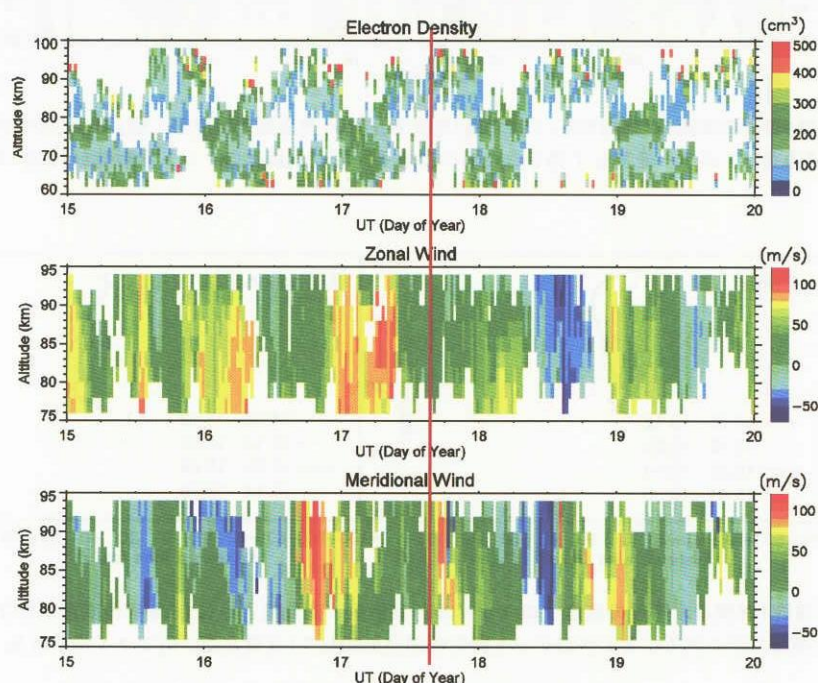


図2 山川MFレーダーで観測されたロケット発射前後5日間の電子密度・東西風（東向き正）・南北風（北向き正）。2004年1月15日0UTから20日0UTまでの30分平均値を示している。赤い縦線がロケット発射時刻（2004年1月17日15:30UT）を表している。

3.1 水平風速

ロケット発射前後5日間の東西風・南北風の1日周期変動成分を図3に示す。図2で示した30分平均観測値に20-28時間の帯域通過フィルターを施して得られたものである。東西風では4UT、南北風では22UT付近に最大となる1日潮汐波が顕著に見られて、その位相は時間とともに下方へ伝搬している。ロケット発射時（図中の赤い縦線）は東西風の1日潮汐が西向きに最大で、南北風の1日潮汐が北向きに強まっていく時間帯に相当している。

図4にロケット発射前後約1時間の水平風の高度プロファイル変化を示す。東西風・南北風ともに16分平均高度プロファイルを4つずつ重ねて表示しており、太実線で示されているのがロケット発射時刻（15:30 UT）を含んだプロファイルである。この1時間に東西風は、高度76kmから95kmの範囲において約0-20m/sの風速を示しており、高度方向の変化は小さい。一方南北風は高度85km以下では時間方向の変化は小さいが、高度が上がるにつれて風速が強まる傾向が見られる。高度85km以上は時間変化も大きく、ロケット発射前30分で高度92kmの風速は約40m/sも変化している。ロケット発射時の南北風は高度82kmで約54m/sの風速を示すのをピークに、その上下の高度で風速が減少しており、高度76kmでは約28m/s、高度94kmでは約34m/sの値を取っている。

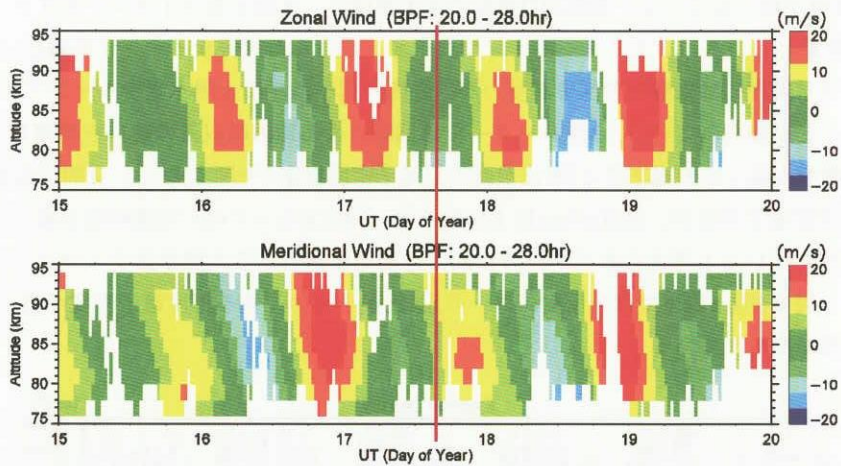


図3 ロケット発射前後5日間の東西風(東向き正)・南北風(北向き正)の1日周期変動成分. 図2で示した水平風速30分平均観測値に20-28時間の帯域通過フィルターを施して得られたものである. 赤い縦線はロケット発射時刻(2004年1月17日15:30UT)を表している.

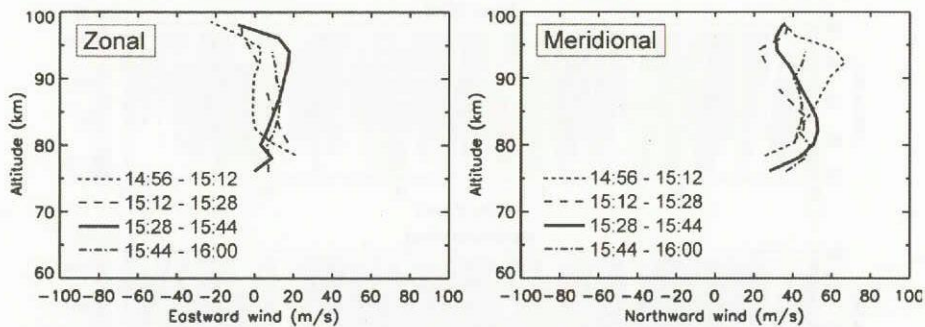


図4 ロケット発射前後約1時間の水平風の高度プロファイル. 東西風・南北風ともに16分平均高度プロファイルを4つずつ重ねて表示しており, 太実線で示されているのがロケット発射時刻(15:30 UT)を含んだプロファイルである.

3.2 電子密度

図5に示すのはMFレーダーで推定された電子密度の1時間平均高度プロファイルである. ロケット発射前後8時間分を示している. 点線はIRI90モデル [Bilitza, 1990] で得られた電子密度である. 1時間平均しているにもかかわらず, 推定された高度プロファイルには欠損値が多い. 図2の電子密度と水平風のデータ量を見ても分かるように, MFレーダーによる電子密度推定は水平風推定よりも難しい. その原因の一つに, 電子密度がXモード・Oモードの受信信号振幅比の高度微分という誤差を含みやすい量から推定されることが挙げられる. さらにMFレーダーによる電子密度推定では, その推定方法に未だ検討課題が多い. 例えば電子と中性大気の衝突周波数にはCIRA-86[Fleming et al., 1990]の大気圧を用いて仮定した値を用いているが, この値が変動すれば推定される電子密度も大きく変化する. そのため, 得られる電子密度の絶対値を議論することはMFレーダーでは困難であり, ここでは得られた推定値の相対的変化のみに注目する.

ロケット打ち上げ1時間前の14:30UTに比べ, 打ち上げ時の15:30UTでは高度94km以上で電子密度の急激な増加が見られている. この高度94km以上での電子密度の上昇はロケット発射1時間後の16:30UTでもまだ見られており, 少なくとも数時間の時間スケールを持っていたと考えられる.

図6に示すのはロケット発射時のXモードとOモードの受信信号振幅比 (A_{xo}) と反射係数比 (R_{xo}) の高度プロファイル (1時間平均値) である. A_{xo} が観測値であり, R_{xo} は様々な仮定のもとにAppleton-Hartreeの式 [Sen

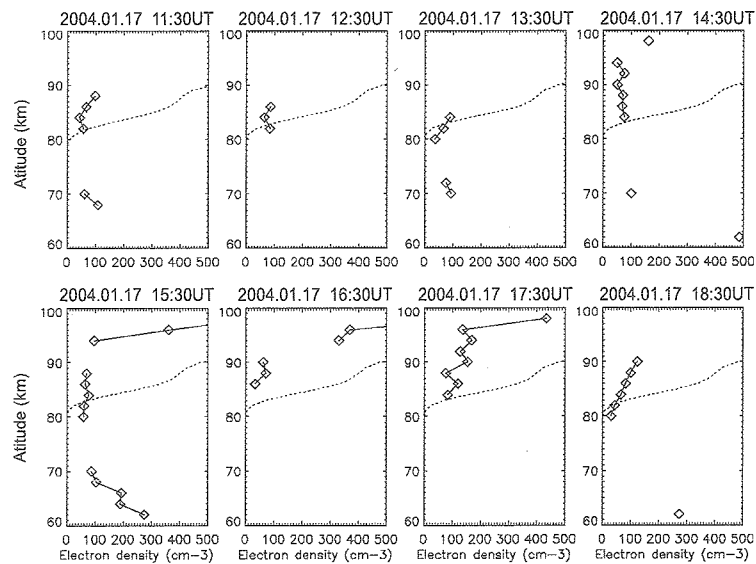


図5 山川MFレーダーで推定された電子密度の1時間平均高度プロファイル，ロケット発射前後8時間分を示している．点線はIRI90モデル [Bilitza, 1990] で得られた電子密度である．

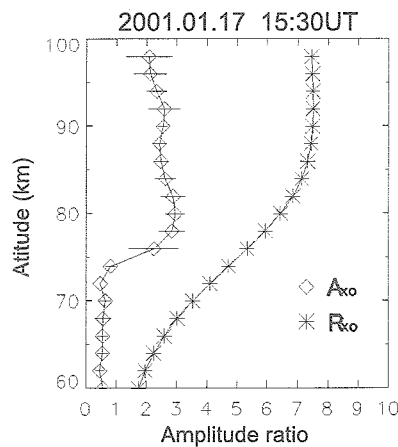


図6 ロケット発射時のXモードとOモードの受信信号振幅比 (A_{xo}) と反射係数比 (R_{xo}) の高度プロファイル．1時間平均値を示している．

and Wyller, 1960] から計算される値である．電子密度はこれら A_{xo} や R_{xo} の高度微分を用いて計算される．図6において，高度92km以上で A_{xo} が減少に転じており，これはXモードの受信信号がOモードに比べてより減衰していること示している．Xモードは電子密度が上昇すると減衰を受ける特徴を持つことから，高度92km以上で電子密度が上昇していることがこのデータからも分かる．

4. 議 論

水平風は，ロケット (フォイル・チャフ観測) や信楽MUレーダー (流星観測) でも同時に観測されている．フォイル・チャフによる水平風との比較は，小泉他 [2005] で行われているため本稿では省略する．信楽MUレーダーの流星観測は本キャンペーン期間中流星高度の決定精度が悪かったため，水平風の高度方向の議論は困難であるが，今後MFレーダーと比較することで高度90km付近の風速の水平構造を調べることは可能と考えられる．

MFレーダーで観測された電子密度は，ロケット発射時に高度94kmから上で急激な上昇を示している (図5)．様々な仮定を用いた電子密度推定過程を経る前の，観測生データに近い A_{xo} の高度プロファイル (図6) でも高度

92km以上で電子密度の上昇が示唆されている（2kmの高度差は、MFレーダーの高度方向のサンプリング分解能が2kmであり、電子密度がAxoの高度微分から推定されるということから理解できる）。よって絶対値の議論は難しいまでも、高度90kmを超えたあたりから電子密度が上昇していたのは観測事実と考えられる。

一方ロケット観測による電子密度は高度88kmあたりで急上昇を示しており、MFレーダーの観測結果と高度方向にずれがある。中波帯の電波は電子密度の高い空間を伝播する際に群遅延を受ける。レーダーは送信パルスと受信パルスの時間差から高度を求めているため、MFレーダーの電波が群遅延を受けると見かけの高度が高くなる。MFレーダーによる電子密度上昇開始高度がロケットによる高度よりも高い原因の1つとして、このMFレーダー電波の群遅延が考えられる。

また、MFレーダーとロケットでは高度分解能や観測対象空間が大きく異なる。MFレーダーのビーム幅は半値全幅で30-50度と広いため、例えば高度80kmにおける観測視野は水平方向に40-80km程度の広がりを持つ。得られたデータをロケット観測データと比較する際には、高度分解能の違いや見ている空間の違いにも注意が必要である。

5. まとめ

WAVE2004キャンペーンにおけるS310-33ロケット発射時刻（2004年1月17日15:30UT）前後の山川MFレーダーの水平風速・電子密度観測結果を報告した。

水平風速は、東西成分・南北成分ともに位相が下方へ伝播する1日潮汐成分が顕著に見られていた。ロケットは、東西風の1日潮汐が西向き最大で南北風の1日潮汐が北向きに強まっていく時間帯に打ち上げられたことになる。電子密度はロケット打ち上げ時に高度94km以上で急上昇を示している。XモードとOモードの受信信号強度比でも高度92km以上での電子密度上昇が示唆されており、絶対値の議論は難しいものの、この電子密度上昇は観測事実と考えられる。ただし、電子密度が高くなると中波帯の電波は群遅延の影響を受けるため、MFレーダーで見られている電子密度上昇開始高度は真の高度より高い可能性がある。

参考文献

- [1] Bilitza, D. (Ed.), International reference ionosphere 1990, Rep. NSSDC 90-22, Greenbelt, Maryland, 1990.
- [2] Briggs, B. H., The analysis of spaced sensor records by correlation techniques, MAP handbook, 13, 166-186, 1984.
- [3] Cervera, M. A., and I. M. Reid, Comparison of simultaneous wind measurements using collocated VHF meteor radar and MF space antenna radar systems, Radio Sci., 30, 1245-1261, 1995
- [4] Fleming, E. L., S. Chandra, J. J. Barnett, and M. Corney, Zonal mean temperature, pressure, zonal wind and geopotential height as functions of latitude, Adv. Space Res., 10, 11-59, 1990.
- [5] Igarashi, K., I. Nishimuta, Y. Murayama, T. Tsuda, T. Nakamura, and M. Tsutsumi, Comparison of wind measurements between Yamagawa MF radar and the MU radar, Geophys. Res. Lett., 23, 3341, 1996.
- [6] 小泉 宜子, 村山 泰啓, 川村誠治, 阿部 琢美, 小山 孝一郎, WAVE2004キャンペーンにおけるフォイル・チャップによる中性風測定と電子密度測定との比較, 本研究報告, 2005.
- [7] Manson, M. A., and C. E. Meek, Partial reflection D-region electron densities, MAP handbook, 13, 113-123, 1984.
- [8] Murayama, Y., K. Igarashi, D. Rice, B. Watkins, R. Collins, K. Mizutani, Y. Saito, and S. Kainuma, Medium frequency radars in Japan and Alaska, for upper atmosphere observations, IEICE Trans., E83-B, 1996-2003, 2000.
- [9] Sen, H. K., and A. A. Wyller, On the generalization of the Appleton-Hartree magnetoionic formulas, J. Geophys. Res., 65, 3931-3950, 1960.

WAVE2004キャンペーン期間中に山川及び八王子で観測された Na層変動の初期解析結果

吉村玲子¹・阿保真²・柴田泰邦²・長澤親生²
村山泰啓¹・川村誠治¹・五十嵐喜良¹

Simultaneous observations of sodium layer over Yamagawa and Hachioji using lidar system during WAVE2004 campaign: initial results

By

R. YOSHIMURA¹, M. ABO², Y. SHIBATA², C. NAGASAWA²,
Y. MURAYAMA¹, S. KAWAMURA¹, and K. IGARASHI¹

Abstract: Sodium layer was observed simultaneously at Yamagawa and Hachioji using a lidar system during WAVE2004 campaign. The observed sodium layer profiles were processed with the band pass filters of several altitude bandwidths. The results showed large day-by-day variations and suggested existence of multiple waves. The rocket experiment was carried out on January 18, on which sodium layers showed particularly complex behavior. Neutral winds were also observed by MF radar during the campaign. The diurnal component of the neutral wind supported the steadily downward propagation of sodium layers seen during the nights of day 14 and 19. The neutral wind behavior also showed complicated appearance around the time of the rocket launch.

概 要

WAVE2004キャンペーン期間中、山川及び八王子にてライダーシステムによるナトリウム層観測を行い、ナトリウム層鉛直構造の時間変化について解析を行った。観測は2004年1月14, 17, 19日3日間の夕方から翌日明け方にかけて行われた。観測結果に鉛直方向のバンドパスフィルタを施して解釈した結果、3日とも全く異なる様相を呈し、冬季中間圏・熱圏下部付近における波動場の日日変動は大きく、14日及び19日の夜間には定常的に下方伝播するピーク構造が現れているのに対し、ロケット実験が行われた17日の夜間は周期の短い波動が頻発し、非常に複雑な波動場であったことが窺えた。また、山川MFレーダ観測による中性風の24時間周期成分にも同様の構造が見られた。

1. 序 論

ナトリウムは中間圏界面付近 (90 ~ 100 km) における大気構成粒子の微量成分であり、通常高度90 km付近で最大密度1000 ~ 2000個 cm⁻³程度となるゆるやかなピーク構造を持ち、その鉛直構造の時間変化を追うことによ

¹情報通信研究機構, 184-8795 東京都小金井市貫井北町4-2-1

¹National Institute of Information and Communications Technology, 4-2-1 Nukuikita-machi Koganei, 184-8795 Tokyo Japan

²東京都立大学 192-8654 東京都八王子市南大沢1-1

²Tokyo Metropolitan University, 1-1 Minamiosawa Hachioji, 192-8654 Tokyo Japan

って中間圏・下部熱圏領域での大気波動の挙動を間接的に捉えることができる (e.g., Gardner and Shelton, 1985; Hecht et al., 1993). WAVE2004キャンペーンは2000年に行われたWAVE2000キャンペーン (Iwagami et al., 2002) の続編にあたるロケット・地上総合観測であり, WAVE2000では得られなかったパラメータである大気波動鉛直構造の時間変化を高分解能で捉えることを目的として, ライダーシステムを用いたナトリウム層観測を行った.

2. 観測概要

ライダー観測は山川 (31.2 N, 130.6 E) 及び八王子 (35.6 N, 139.4 E) で行われた. 観測ロケットは2004年1月18日0:30JSTに内之浦宇宙空間観測所 (31.3 N, 131.1 E) より打ち上げられたが, ライダー観測はロケット打ち上げ前後及び当日の2004年1月14 - 15日, 17 - 18日, 19 - 20日の3晩に行われた. 14 - 15日及び19 - 20日は山川と八王子で同時観測が行われたが, ロケット打ち上げのあった17 - 18日は天候不良のため八王子での観測は見送られた. また同期間には山川にてMFレーダによる中性風の観測も行われた (川村他, 本特集). 観測点の位置関係を図1に示す.

観測に用いた測定器は東京都立大学のライダーシステムで, 送信系 (Nd: YAGレーザ), 受信系 (Schmidt-Cassegrain式望遠鏡, 光電子増倍管), 制御系から成る (Nagasawa and Abo, 1995). 山川, 八王子それぞれの測定系のスペック及び観測期間を表1に示す.

3. 観測結果

Na密度高度分布の観測結果を図2に示す. 上から2004年1月14 - 15日, 17 - 18日, 19 - 20日における, 八王子 (左) 及び山川 (右) での観測結果であり, 横軸には観測開始日を基準とした地方時をとる. つまり, 例えば25時とは観測開始日翌日の午前1時のことである. またNa密度は時間軸の1目盛を 1000 cm^{-3} として示した.

2004年1月14 - 15日 (図2上) において, 八王子では20:00頃から, 高度98 km付近に現れた密度ピークが発達しながら約10時間かけて高度90 km付近まで下降してくる様子が見られる. 山川では21:00 - 24:00頃までデータ欠損があるが, 観測開始時 (18:00頃) より八王子同様高度98 km付近にピーク構造が現れ, 24:00頃には下降して来たと思われるピークが92 km付近に見られる. 他, 八王子で20:00 - 22:00頃高度90 - 82 km付近に下方伝播する鉛直波長5 km程度の波状構造や, 八王子, 山川で28:00 - 30:00頃高度90 km - 100 km付近に上方伝播する鉛直波長5 km程度の波状構造などが見られる.

2004年1月17 - 18日 (図2中) は, 八王子では天候不良により観測を行わなかった. 山川では, 前後の観測日 (14, 19日) と比較して全体的に複雑な構造を示している. 19:00頃 (観測開始時) から95 km付近に小ピークが現れ, 幅広になりながら2時間程の間に5 kmほど高度上昇を見せ, 22:00過ぎからゆるやかに下降した後25:00頃には95 km付近で拡散する. 22:00過ぎには102 km付近にも小さいピークが現れ, 26:00頃まで下降を続け, 拡散する. 他, 23:00 - 24:00 (90 - 82 km), 25:00 - 26:00 (90 - 85 km), 27:00 - 30:00 (94 - 88 km) など, ピーク密度の小さい複数の波動が短時間に異なる位相速度で異なる高度領域に現われた. なお, 観測ロケットは24:30に内之浦より打ち上げられた.

2004年1月19 - 20日においては, 八王子, 山川とも, 18:00頃 (観測開始時) より95 km, 90 km, 82 km付近に小さなピークが現れ, 22:00頃にかけてほぼ同じ高度に停滞している様子が見られる. 八王子ではその後95 km付近のピークが発達しながら26:00頃まで下降し, 92 km付近で拡散する. また, 八王子では観測開始から25:00頃にかけて層の厚みが減少し (半値幅最小5 km程度), その後高度100 km付近の密度が増すことによって層の厚みが回復している (半値幅10 km以上).

4. フィルタ解析

各観測結果に鉛直方向のバンドパスフィルタを施し, それぞれの特徴について評価を行った. 図3 - 5 は, 各観

測日におけるフィルタ処理後の結果で、上からフィルタのバンド幅 (A) 2 - 5 km, (B) 5 - 15 km, (C) 10 - 20 km であり、左図が八王子、右図が山川のものである。また、図6に、山川MFレーダによって観測された東西及び南北風の30分値における潮汐の24時間周期成分を示す。時間はいずれも地方時である。

4.1 200年1月14 - 15日 (図3)

バンド幅2 - 5 km, 5 - 15 km, 10 - 20 kmすべての帯域で、山川、八王子とも90 km付近から下方伝播するピーク構造が卓越している。山川では若干の位相の遅れが見られ、例えば (C) (バンド幅10 - 20 km) で20:00頃から30:00にかけて下方伝播するピークの場合、山川では八王子の結果に対して1/5 ~ 2/5波長程度遅れている。風速の24時間周期成分は14日から15日にかけて強く、山川・八王子の両地点で見られる90 ~ 80 km付近を下降するピークは南北成分のシア領域にほぼ一致する。

4.2 2004年1月17 - 18日 (図4) (山川のみ)

他の2日間の観測と比較して特長的な点は、観測時間を通して下方伝播するような構造が見られないことである。バンド幅2 - 5 km 及び 5 - 15 km では、1 ~ 数時間程度でピーク構造が現れ、消散している様子が見られる。バンド幅10 - 20 km では、19:00頃からピーク構造が現れるが、23:00付近で振幅は小さくなり、その後より早い位相速度を持つ下方伝播する構造が見られる。中性風の24時間周期成分は、東西風でほとんど位相伝播がなく、南北風は24:00頃高度90 km付近で北向き成分が弱まり、その後下降しながら再び強まるような様子を呈している。また、24:00以降は高度90 km付近のシアを境に上下で風速場が異なっている。なお、18日00:30に観測ロケットS-310-31号機が打ち上げられている。

4.3 2004年1月19 - 20日 (図5)

14 - 15日のデータに見られるような、高度90 kmから89 km付近まで下降するピーク構造が、八王子の5 - 15 km, 10 - 20 km フィルタ、及び山川の10 - 20 km フィルタを施した結果に見られる。山川での振幅は小さく、八王子でも26:00以降は小さくなっている。中性風の24時間周期成分は、東西風は位相の鉛直伝播がほとんど見られず、南北風は24:00付近で振幅がほぼ0になっている。また、バンド幅2 - 5 kmの結果は山川・八王子とも卓越するピーク構造がなく、比較的穏やかな波動場であったことがうかがえる。

5. まとめ

以上の結果を見比べると、観測の行われた3日間はそれぞれ異なる様相を呈し、特にロケット実験の行われた17 - 18日の夜は、中性風観測結果で見られる潮汐場が他の観測日で得られたものと比べて著しく異なったパターンを見せており、周期の短い複数の波動が重畳していたと推測される。ロケット打ち上げ前後の14 - 15日及び19 - 20日の観測では、MFレーダによって観測された風速場の24時間周期成分と対応する構造が見られた。ただし、Naライダーの高度分解能が75 m (八王子) 及び150 m (山川) であるのに対しMFレーダは7 kmであるため、鉛直方向に7 km以下の構造は比較できない。ライダーシステムによるNa密度変動観測によって、大気波動鉛直構造の微細変化を間接的に捉えることができたといえる。また本観測によって、WAVE2000キャンペーンでは観測することができなかった、大気光波状構造の生成要因であると思われる大気重力波の鉛直成分を得ることができた (久保田他, 本特集)。天候に左右されるという欠点はあるが、ライダーによるNa密度観測は大気波動の間接的な観測手法として非常に有用であることがここでも示された。

表1 3.0 μ m フィルムの引っ張り試験特性

	山川 (130.6E, 31.2N)	八王子 (139.4E, 35.6N)
観測器 スペック	レーザー出力：100 mJ / pulse レーザー線幅：1.5 μ m 望遠鏡口径：35 cm 高度分解能：150 m 時間分解能：145 sec	レーザー出力：60 mJ / pulse レーザー線幅：2.5 μ m 望遠鏡口径：60 cm 高度分解能：75 m 時間分解能：95 sec
観測日時	2004/01/14 18:08 - 28:52	2004/01/14 17:16 - 30:27
	2004/01/17 18:19 - 30:39 (24:30ロケット打ち上げ)	2004/01/17 観測なし
	2004/01/19 18:24 - 29:00	2004/01/19 17:33 - 30:23

参考文献

- [1] Gardner, C. S., and J. D. Shelton, Density response of neutral atmospheric layers to gravity wave perturbations, J. Geophys. Res., 90, 1745-1754, 1985.
- [2] Hecht, J. H., T. J. Kane, R. L. Walterscheid, C. S. Gardner, and C. A. Tepley, Simultaneous nightglow and Na lidar observations at Arecibo during AIDA-89 campaign, J. Atmos. Terr. Phys., 55, 409-423, 1993.
- [3] 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. Atmos. Sol. Terr. Phys., 64, 1095-1104, 2002.
- [4] Nagasawa, C., and M. Abo, Lidar observations of a lot of sporadic sodium layers in mid-latitude, Geophys. Res. Lett., 22, 263-266, 1995.

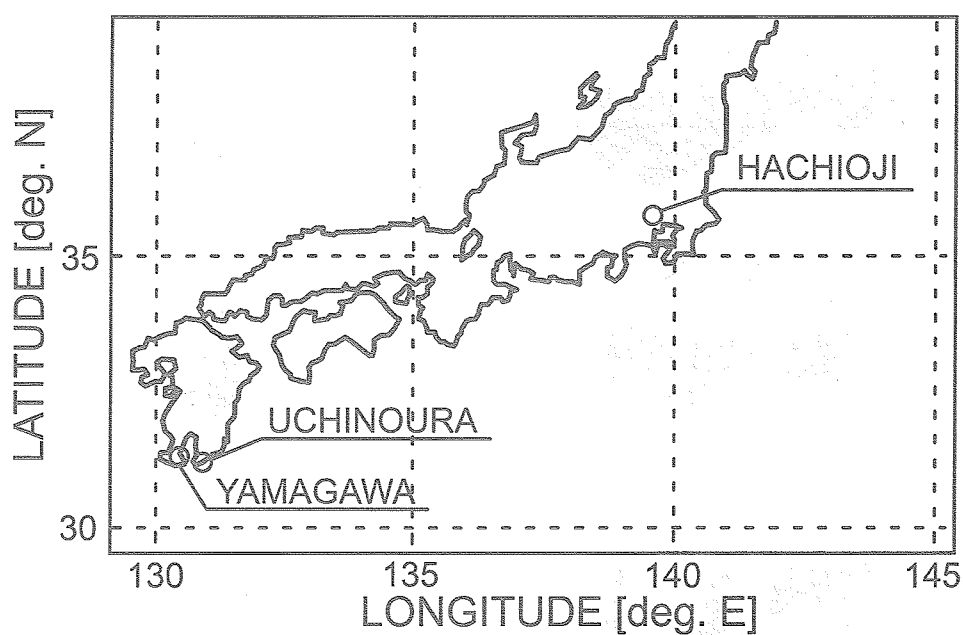


図1 観測地点の位置関係。山川 (31.2 N, 130.6 E) ではNaライダー及びMFレーダ観測，八王子 (35.6 N, 139.4 E) ではNaライダー観測が行われた。また観測ロケットは内之浦 (31.3 N, 131.1 E) より南東に向けて発射された。

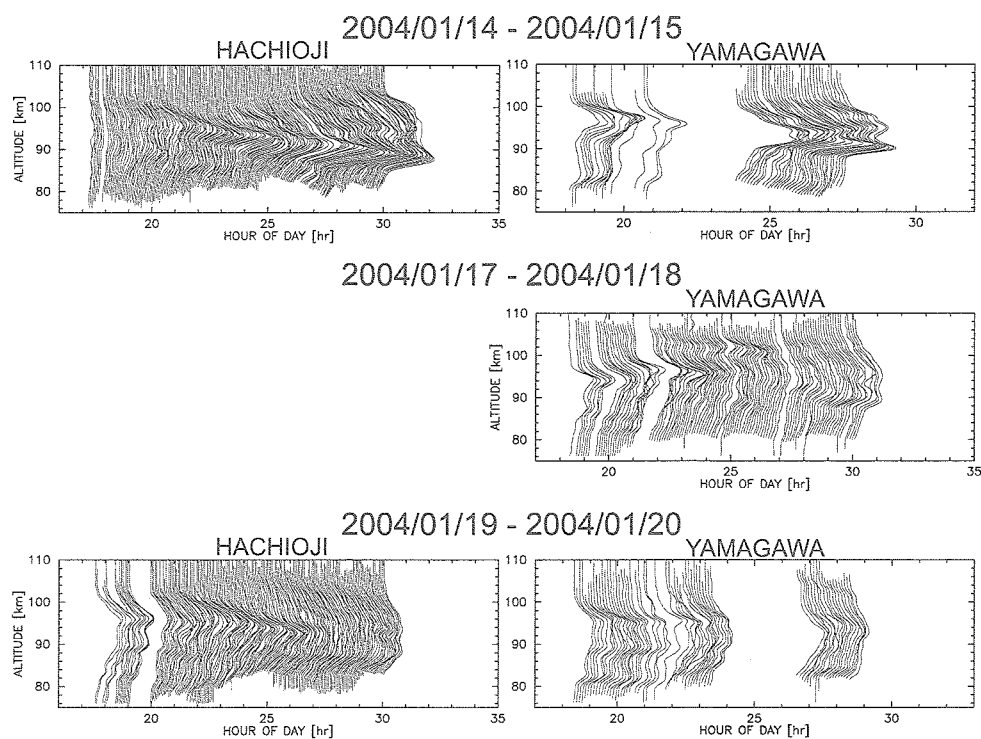


図2 ライダーシステムによるNa密度高度分布の時間変化。上から2004年1月14 - 15日，17 - 18日，19 - 20日で，左図が八王子，右図が山川の観測結果である。縦軸が高度，横軸が観測開始日を基準とした地方時である。Na密度は1目盛り 1000 cm^{-3} となっている。17 - 18日の八王子は天候不良のため観測を行っていない。

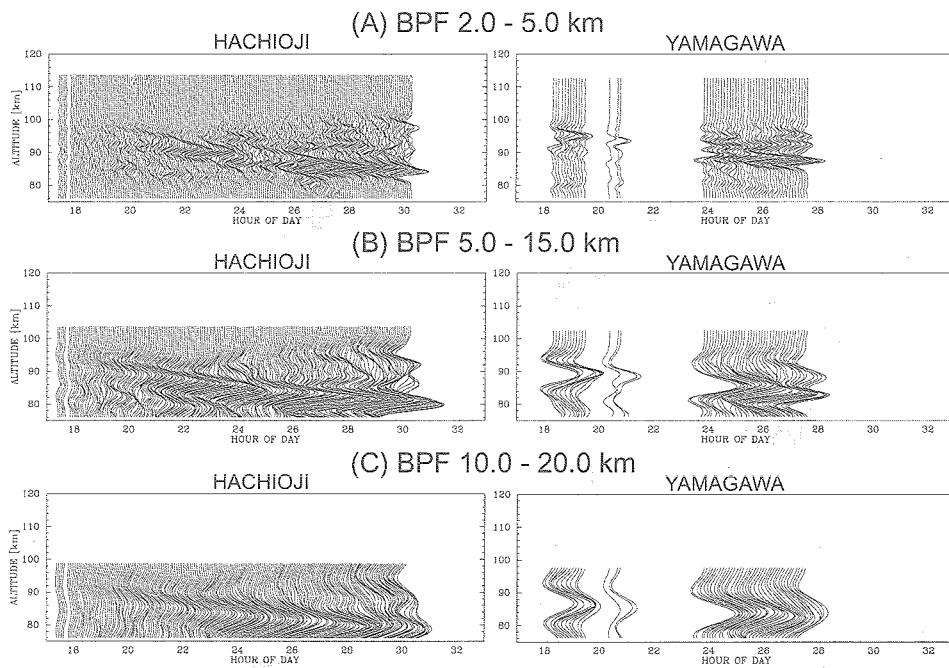


図3 2004年1月14 - 15日の観測結果に鉛直方向のバンドパスフィルタを施したもの。上からバンド幅2.0 - 5.0 km, 5.0 - 15.0 km, 10.0 - 20.0 kmで、左図が八王子、右図が山川である。

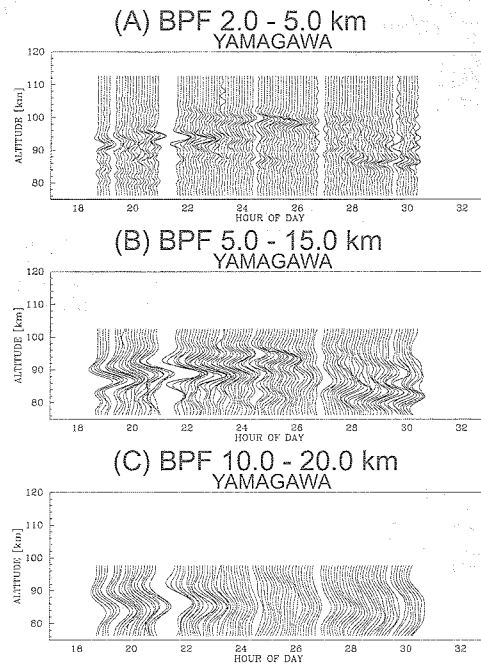


図4 2004年1月17 - 18日の観測結果に鉛直方向のバンドパスフィルタを施したもの。上からバンド幅2.0 - 5.0 km, 5.0 - 15.0 km, 10.0 - 20.0 kmで、山川のデータのみである

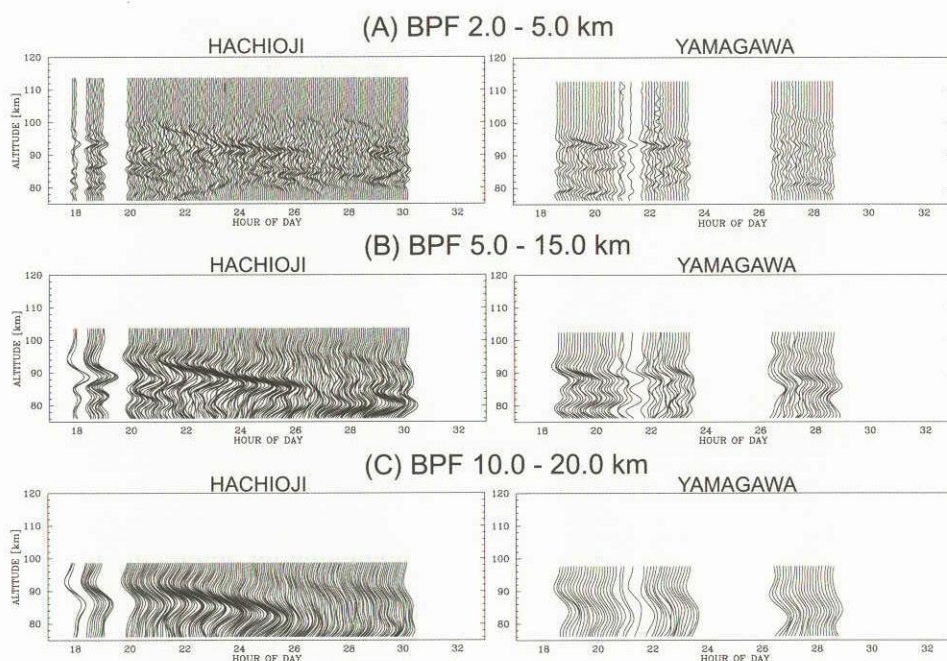


図5 004年1月19 - 20日の観測結果に鉛直方向のバンドパスフィルタを施したもの。上からバンド幅2.0 - 5.0 km, 5.0 - 15.0 km, 10.0 - 20.0 kmで、左図が八王子、右図が山川である。

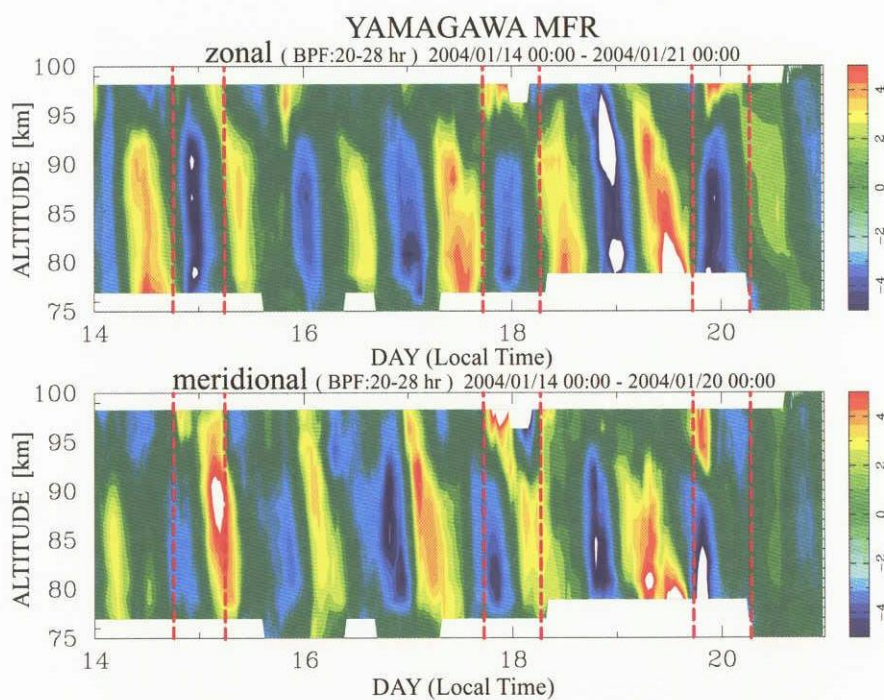
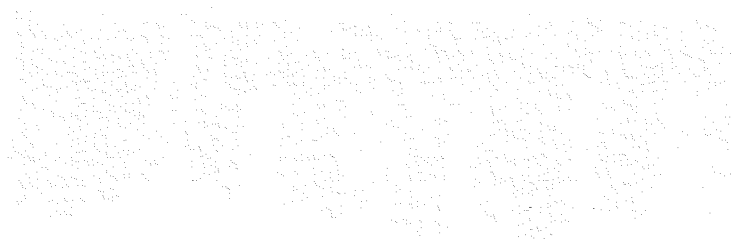


図6 山川のMFレーダで観測された中性風の鉛直分布に時間方向のバンドパスフィルタを施して得られた24時間周期成分（バンド幅20 - 28時間）。上が東西風（西向き正）、下が南北風（北向き正）であり、縦軸に高度、横軸に日にち（地方時）をとっている。赤の点線で区切られた領域はNa密度観測を行った時間帯である。



宇宙航空研究開発機構特別資料

JAXA-SP-04-007

発行日 2005年3月31日
編集・発行 独立行政法人 宇宙航空研究開発機構
〒182-8522
東京都調布市深大寺東町七丁目44番地1
TEL 0422-40-3000(代表)
印刷所 株式会社 ワークワン
神奈川県相模原市田名塩田1-14-2

©2005 JAXA

※本書(誌)の一部または全部を著作権法の定める範囲を超え、無断で複写、複製、転載、テープ化およびファイル化することを禁じます。

※本書(誌)からの複写、転載等を希望される場合は、下記にご連絡ください。

※本書(誌)中、本文については再生紙を使用しております。

<本資料に関するお問い合わせ先>

独立行政法人 宇宙航空研究開発機構 情報化推進部 宇宙航空文献資料センター



宇宙航空研究開発機構
Japan Aerospace Exploration Agency