

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することにより、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した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。

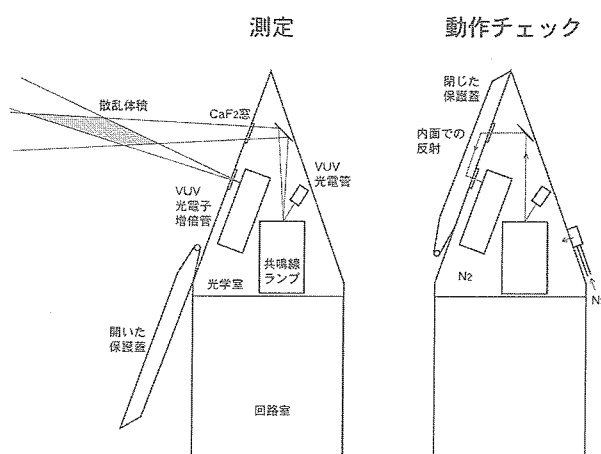


図1 酸素原子測定器の構成と動作状況。左は蓋の開いた測定状態、右は蓋を閉じた室内動作チェック状態。130nm光は空気中を透過しないので、チェック時には光学室内をN₂でパージする。

3.2 較正

前回と同じく宇宙科学研究本部の小型真空チェ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。

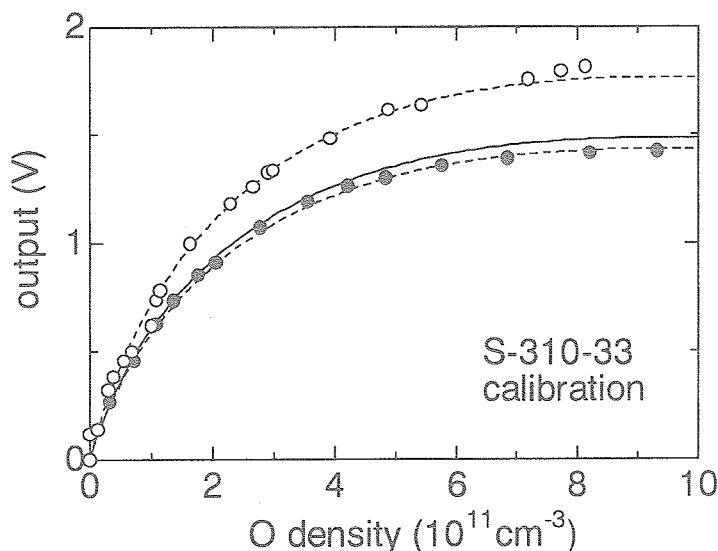


図2 滴定法による較正結果（レゾナンス社による）。白丸はランプ窓清掃直後、黒丸は汚染の進んだ状態。実験時の状態は実曲線。

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。

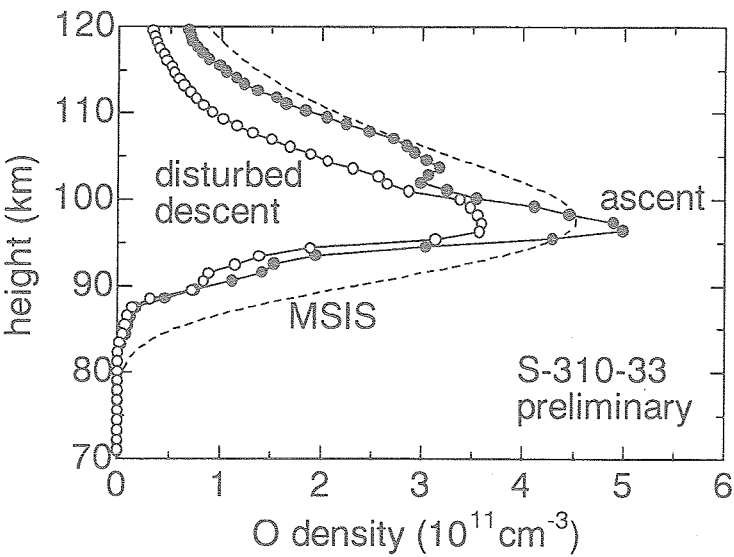


図3 スピン平均酸素原子密度分布（上昇時●，下降時○）とMSIS-E-90モデル（破線）の比較．下降時は各種擾乱をより強く受けており，上昇時に比べ真実から遠い．大気光放射率データより，上昇時・下降時の密度はほぼ同じだったと推定される．

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)帯のスピン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。

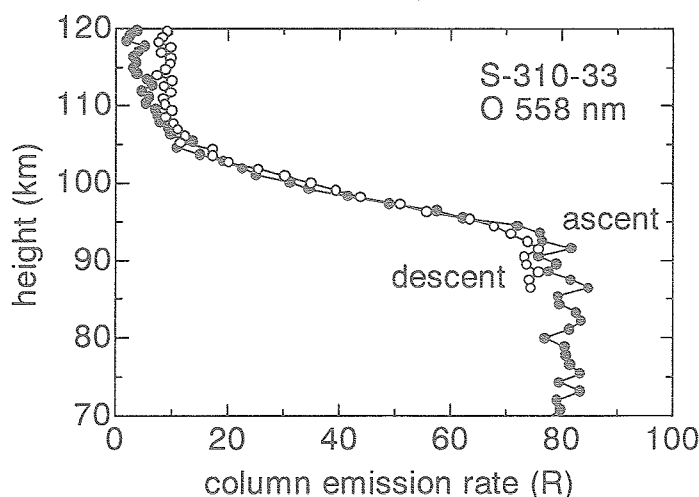


図4a 酸素原子558nm線スピン平均コラム放射率（上昇時●，下降時○）。

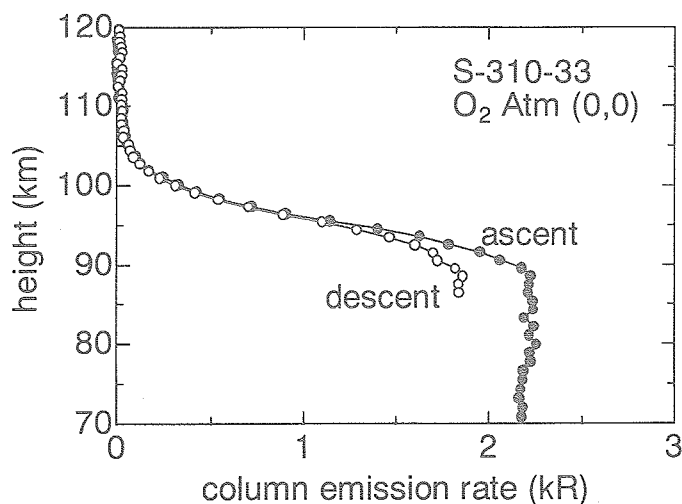


図4b 酸素分子Atmospheric (0,0) 帯スピン平均コラム放射率（上昇時●，下降時○）。

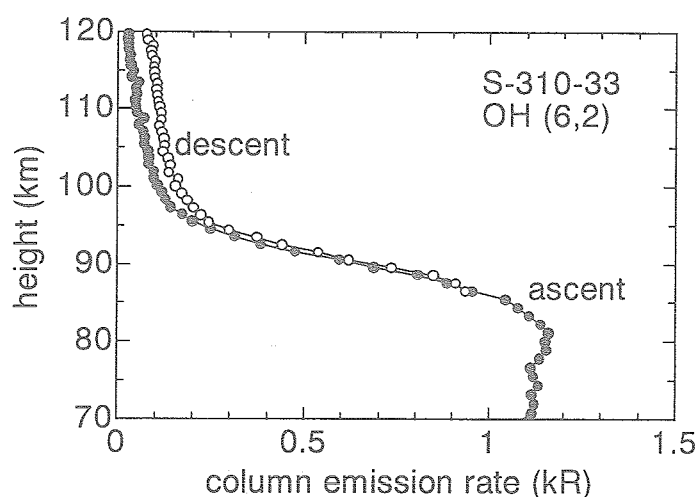


図4c OH(6,2) 帯スピン平均コラム放射率 (上昇時●, 下降時○).

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。

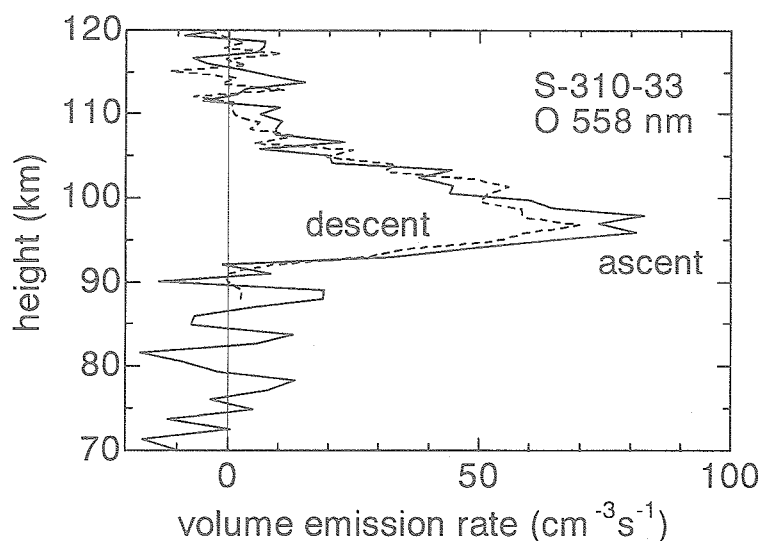


図5a 酸素原子558nm線体積放射率 (上昇時実線, 下降時破線).

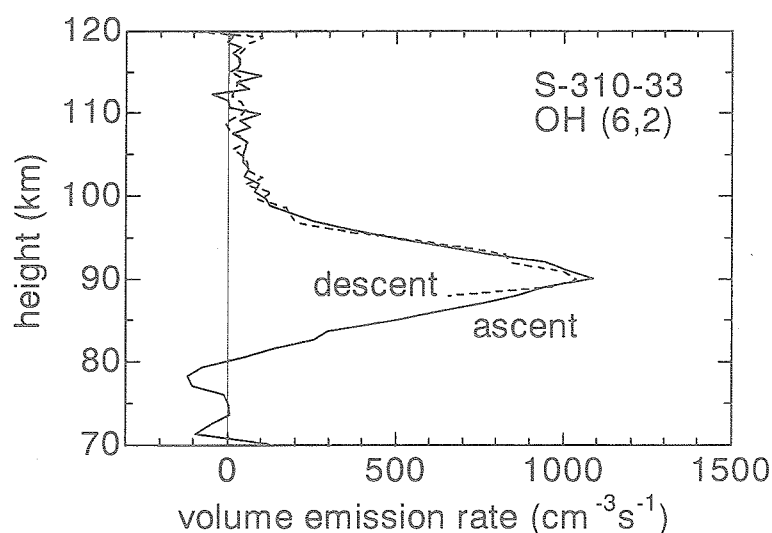


図5b 酸素分子Atmospheric (0,0) 帯体積放射率（上昇時実線，下降時破線）。

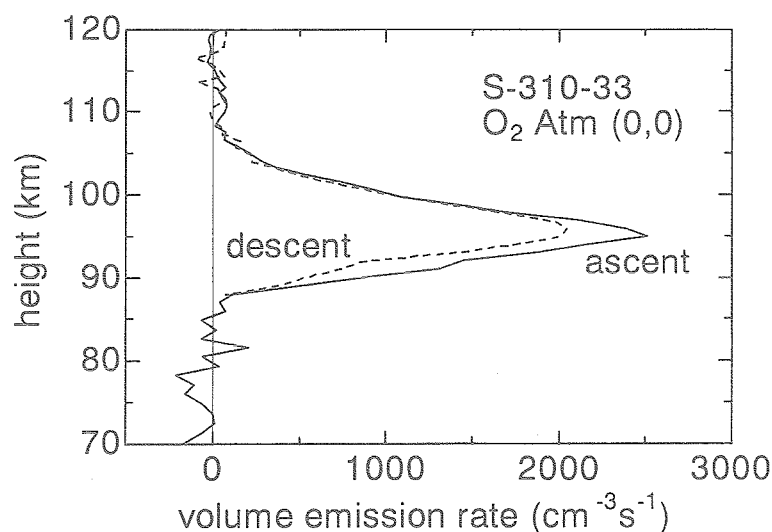


図5c OH(6,2) 帯体積放射率（上昇時実線，下降時破線）。

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．

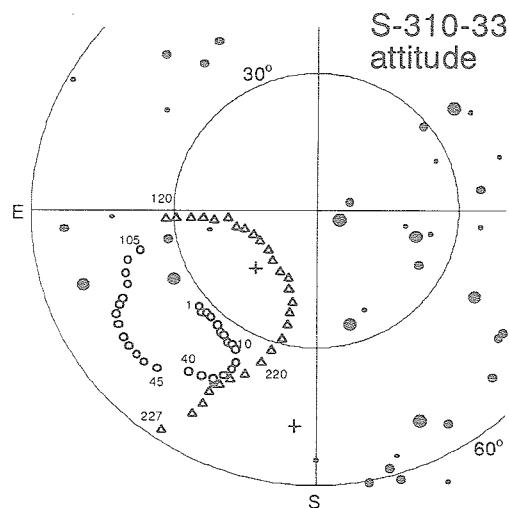


図6 最高高度点付近（185秒）における地平座標にプロットした星とスピン軸方向（上昇時○，下降時△）．図中の数字はスピン番号（定義は本文参照）．

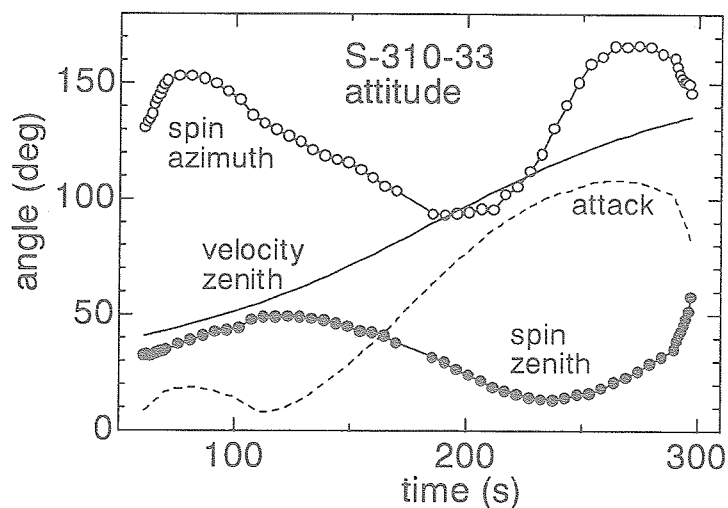


図7 スピン軸天頂角（●）・方位角（○：北より東まわり），速度ベクトル天頂角（実線）およびアタック角（破線：速度ベクトルとスピン軸のなす角）の時間変化．速度ベクトル方位角は飛翔中ほぼ一定127-129度．

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動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.