

ロケット搭載フォトメータによる夜間連続大気光の 4波長帯同時測定

高野元春*・渡辺隆**・中村正年***

(1996年7月26日受理)

Rocket Measurement of Continuum in the Night Airglow

By

Motoharu TAKANO*, Takashi WATANABE** and Masatoshi NAKAMURA***

Abstract: The continuum in the night airglow has been observed at four wavelength regions by a rocket-borne photometer in the middle-latitude on February 1, 1986. The peak emission of the continuum was found at the altitude of 90km. The spectrum of the continuum agrees with the NO₂ spectrum obtained in the laboratory measurement. The airglow spectrum and the emission altitude obtained in this work strongly indicate that the most of the continuum airglows are the emissions from the excited NO₂ molecules.

概 要

ロケット搭載フォトメータにより夜間連続大気光を異なる4波長域で同時測定することに初めて成功した。可視域から近赤外域における連続大気光のスペクトルと発光層の高度分布が同時に得られ、連続大気光に関する次のような詳細な事実が明らかになった。(1)天頂積分強度は1.1R/nm (0.50 μ m), 3.5R/nm (0.61 μ m), 3.4R/nm (0.71 μ m), 2.8R/nm (0.82 μ m)である。(2)測定されたスペクトルは室内実験で得られた励起状態のNO₂からの連続発光スペクトルに一致する。(3)4波長帯で測定した連続大気光の高度分布は一致し、発光層のピーク高度は90 \pm 1kmである。(4)NO+O+M \rightarrow NO₂*+Mの三体反応を仮定する励起機構は測定結果を良く説明する。

重要語: 連続大気光, 三体反応, NO₂ スペクトル

1. はじめに

夜間、熱圏下部の大気中に可視域から近赤外域の微弱な連続光の発光が存在する。この夜間連続大気光は1951年に Barbier [3] によって最初に見いだされ、Krassovsky [22] はこれがNOとOの反応で生成されるNO₂*

* 筑波大学 (現在 拓殖大学)

** 筑波大学 (現在 筑波技術短期大学)

*** 筑波大学

からの Chemiluminescence (化学発光) であるとの仮説をたてた。可視域の地上観測連続大気光のスペクトル [11] [38] は室内実験による NO_2 発光スペクトル [10] [39] に似ており、このことは連続大気光が $\text{NO} + \text{O}$ Chemiluminescence 反応であることを示唆する。しかし初期の地上観測 [4] [23] には可視域から近赤外域にかけて発光強度が増大しているものがあり、これは室内実験 NO_2 スペクトルに一致しない。このことから $\text{NO} + \text{O}_3$ 反応 [8] による近赤外域の連続大気光が存在するという考えが示された。Noxon [31] は地上観測より近赤外域と可視域の発光強度が同程度であることを指摘している。近年 Johnston and Broadfoot [16] が地上観測で得た近紫外から近赤外域の大気光スペクトルには、近赤外域の連続大気光の発光強度増加は認められない。

これまでのロケットによる連続大気光の観測は主に O_I green line (557.7 nm) のバックグラウンド測定を目的としており、540 nm 近傍での測定が多い [2] [12] [14] [27] [28] [48] [49]。同時に二波長以上で連続大気光を測定した観測例は無いが、Greer et al. [13] による ETON campaign 実験では短時間の間に異なる二波長域 (540, 714 nm) で測定がなされ、双方の発光層のピーク高度がほとんど等しい結果が得られている。過去のロケット観測で得られた発光層のピーク高度はおよそ 90 km から 100 km の間に分散しているが、連続大気光の発光層高度が変動しているためか実験誤差によるものかは不明である。また発光層高度が 90 数 km 以下では $\text{NO} + \text{O} + \text{M}$ の三体反応が主要な励起機構であり、90 数 km より上層では $\text{NO} + \text{O}$ の二体反応の寄与が増大するという計算例もある [27] [28]。したがって発光層高度を正確に求めることは励起機構を明かにする上で重要である。

波長スペクトル測定のための技術的問題として、連続大気光は発光強度が可視域で 1~5 R/nm 程度と弱い上に、これに比較すると強度の大きい星野光や他の大気光が混在するので、地上観測から連続大気光の正確なスペクトルを求めるのは非常に難しい。特に星野光は広い波長にわたって発光強度の大きい連続スペクトルなので、連続大気光成分を正確に分離測定することは地上観測からは不可能に近い。それに対してロケット実験では発光層より上層で星野光のみの測定ができるので、背景光が大気光強度より大きくても正確な測定が可能である。このようにロケット観測による連続大気光のスペクトルと発光層高度の同時測定は大きな知見をもたらす。

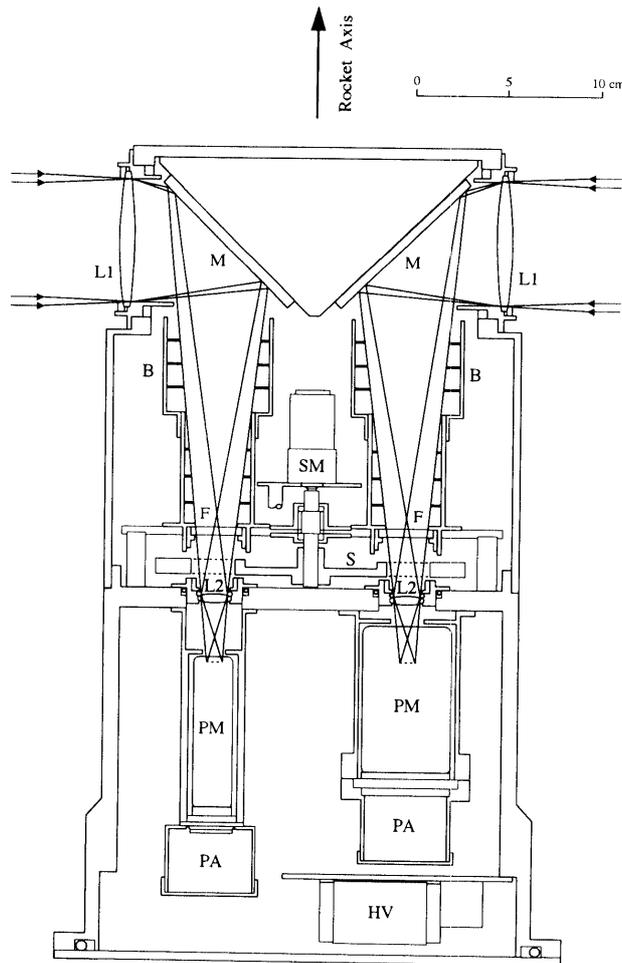
2. 測定概要

2.1. 測定装置

夜間連続大気光の測定には4色のフィルターフォトメータが用いられ、異なる4波長域で独立に発光強度の測定がなされた。測定装置の大きさは220 mm ϕ 、高さ453 mm、重量19 kgで4つの独立したフォトメータから成り立ち、光学系の基本構造はレンズ L_1 (70 mm ϕ , f 250 mm)、レンズ L_2 (28 mm ϕ , f 50 mm) と干渉フィルタ (30 mm ϕ) の構成である (図1) [41] [45]。今回の測定では視線方向をロケットスピンの軸に対して垂直に設定した。これはフォトメータが発光層をほぼ水平に見るので van Rhijn 効果により S/N を向上させることとロケットグローの影響を避けるためである。検出器と電気系の変動を測定中常時チェックするために、シャッターホイールが間欠的に回転し同時に蛍光試料が結像レンズ L_2 前を通過する。今回の測定では光電子増倍管の量子効率と大気光の発光強度の組み合わせが最適になるように CH 1, 2 には Multi-alkali 光電面、CH 3, 4 には GaAs 光電面を持つ光電子増倍管をそれぞれ用いた。さらに微弱光測定を行うため、計測には光子計数法を用いた。各フォトメータの視野角は 4° で、測定中のロケットスピンは約 1.2 Hz である。光子計測におけるゲートタイムは 2.5 ms に設定されており、これにより空間角度分解能は 1.1° になり、視野角 4° に比べ十分小さい。光子計測器の直線性性能は観測前の実験で入射光量と出力カウントは 1500 counts/2.5 ms まで比例関係にあることが確認されている。今回の観測では最大出力は 1200 counts/2.5 ms 以下であったので光子計測の直線性の問題は生じなかった。

2.2. フォトメータ感度の特性

干渉フィルタの透過率の波長特性は Czerny-Turner 型ダブルモノクロメータを用いて測定された (図2)。CH 1, 3 の干渉フィルタにはサブピークが現れるが透過率が 0.1% 以下であり、他の大気光の混入を遮蔽するには十



L1, L2: Lens M: Mirror F: Filter B: Buffer
 S: Shutter Wheel SM: Shutter Motor
 PM: Photomultiplier PA: Pre-Amplifier
 HV: High-Voltage Power Supply

図1. S310.16号機に搭載されたフォトメータの断面図

4組の光学系-検出系で構成されており、異なる4波長域を同時に測定できる。視野方向はロケットスピン軸に対して垂直。高電圧の放電を防止するため光検出部は1気圧封印されている。シャッターと蛍光試料が間欠的に光軸を横切ることにより出力の零点校正および電気系の動作チェックがなされる。

分の性能を持つ。同図において透過率の曲線が書かれていない波長域では各フィルタの透過率は0.002%以下である。干渉フィルタ面の異なる場所を選んだ同測定の繰り返しにより、ピンホールなどの欠損が無いことを確認した。光電子増倍管の相対的量子効率はタングステンランプを光源としてダブルモノクロメータの出力を熱電対と光電子増倍管で交互に測定し、その出力の比較から得られた。

フォトメータの絶対感度校正は70mmφのOpal glass面光源を持つ低輝度標準光源タングステンランプを使用して行った[39][41]。この標準光源のスペクトルはブラックボディー(IRA社製)とダブルモノクロメータを用いて再校正を行い、スペクトルの経年変化が無いことを確認している。この結果各チャンネルにおいてホワイトスペクトルを仮定すると1カウントは0.058R/nm(CH1), 0.149R/nm(CH2), 0.263R/nm(CH3), 0.381R/nm(CH4)に相当する。フォトメータ絶対感度校正の精度は±10%程度と見積もられる(詳細はAppendix 7.2を参照)。

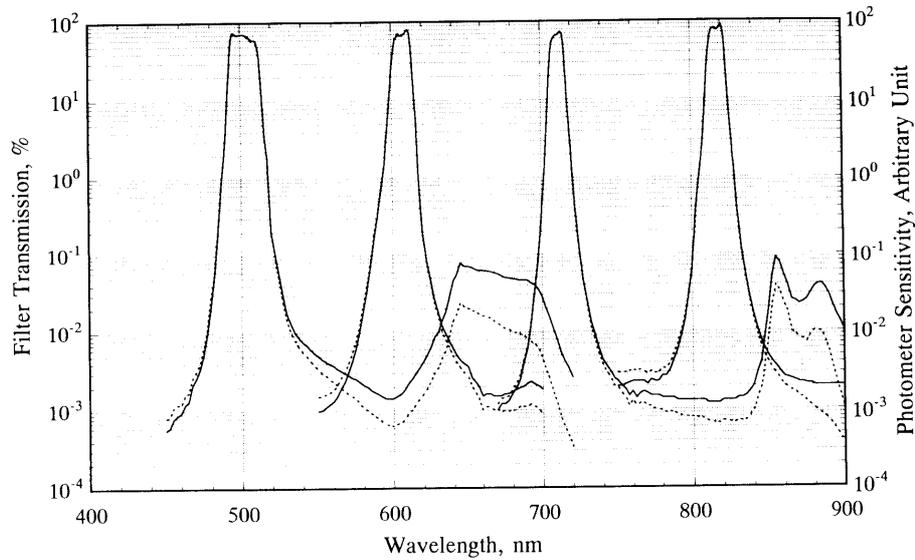


図2. 実験に用いたバンドパスフィルタの透過率とフォトメータの波長感度特性
 実線はフィルタの透過率、破線はフォトメータの感度特性を表す。各干渉フィルタの中心波長と半値幅は連続大気光以外の大気光、主としてOH Meinel bandとO₂A-bandが存在しない波長域を考慮して決めた。フォトメータの感度特性はフィルタの透過率とフィルタの中心波長で規格化した光電子増倍管の相対量子効率の積。

表1. ロケット実験とフォトメータ構成の概要

ロケットは内之浦の実験場から1986年2月1日に打ち上げられた。フォトメータには4つの分光器が組み込まれており、連続大気光のスペクトルを4波長域で測定する。

Flight number	S310.16				
Launch site	Uchinoura, Japan				
Latitude	31° 15' N				
Longitude	131° 05' E				
Launch date	February 1, 1986				
Launch time	22 : 40 JST				
Launch direction	136° from North				
Spin cycle	1.17 Hz (90 km)				
Apogee	200.6 km (223 s after launch)				
Photometers	side-looking				
F _{10.7} (10 ⁻²² W m ⁻² Hz ⁻¹)	88				
Channel	Center wavelength	Bandwidth (FWHM)	Equivalent width	Photomultiplier	Field of view
1	502.3 nm	13.9 nm	13.5 nm	R1878 (multi-alkali)	4°
2	607.5 nm	9.8 nm	9.5 nm	R1878 (multi-alkali)	4°
3	712.1 nm	7.1 nm	6.9 nm	R943-02 (GaAs)	4°
4	817.6 nm	9.7 nm	9.3 nm	R943-02 (GaAs)	4°

3. 測定結果

実験概要を表1に示す。すべてのフォトメータはロケットが着水時まで正常に動作した。ロケット上昇時は正常にデータが得られたが、ロケット下降時は姿勢が乱れたためか出力は不規則で解析に使用できなかった。上昇時においてロケットグロウの影響は出力には全く見られなかった（詳細は Appendix 7.1 を参照）。これはフォト

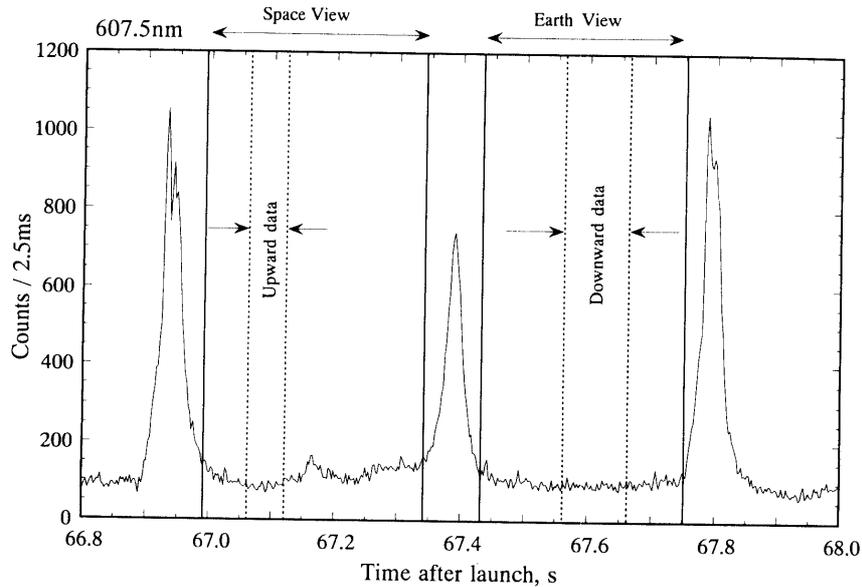


図3. ロケット1スピン間のCH2の出力

発光層の中心高度付近における出力。出力の大きなピークはフォトメータが発光層を平行に見ることで入射強度が増大してできたものであり、大きなピークに重なって現れる鋭いピークは明るい星が視野に入ったため現れたものである。Earth Viewはフォトメータの視線が地表方向であり、この間の出力には空間的な強度変化がほとんどない。Space Viewは視線方向が宇宙空間であり、出力に見られる強度変化は星野光の空間的構造を反映している。解析に使用したデータ(Upward & Downward data)は星野光強度が弱く変動が小さい部分を選んだ。

メータの視線方向がロケットスピン軸に垂直であったためと思われる。ロケット姿勢は搭載された2成分地磁気姿勢計のデータを用いて計算したが、ロケット軸の天頂角については1スピン間に測定された大気光強度の強度変化がvan Rhijn効果によるとして計算した[26]。上昇時85km~110kmではロケット軸の天頂角は $39^{\circ} \pm 4^{\circ}$ でほぼ一定である。図3はロケット1スピン間のCH2の出力で、2つのピークは視線方向が発光層と平行状態になったときvan Rhijn効果で生じたものである。これをvan Rhijn peakと記す。また出力の大きい方をFirst peak、小さい方をSecond peakと記す。ロケット上昇時のvan Rhijn peakには明るい星が偶然重なったため、ピークに構造が現れている。矢印で示した、背景光強度が最も小さい時間帯の、出力の平均値を強度のデータとした。Upwardは視線方向が水平より上を向いている状態、Downwardは視線方向が水平より下を向いている状態を意味している。図4はロケット上昇時高度82-100km間の各チャンネルの出力である。CH1においてFirst peakの値が高度92kmを境に大きく変化するのは背景光の明るい星が視野に入っているかどうかの違いによる。ロケットのスピン周期は打ち上げ44秒以後は落下時まで安定しており、その周期は約1.2Hzであった。図5はスピン毎にフォトメータの出力を平均して求めた強度の高度変化を表したものである。図より連続大気光の発光層は85~95kmにあり、Upwardの場合、高度85km以下で得られた強度は連続大気光成分と背景光成分の和であるのに対し、高度95km以上の強度は背景光成分のみである。Downwardの場合、高度95km以上の強度は連続大気光成分と背景光成分の和であるのに対し、高度85km以下の強度は背景光成分のみである。図6は表2に示した各波長域の積分強度を波長を横軸にして表したものである。誤差棒は天頂角に依存する成分を除いた誤差を表す。

3.1. 天頂積分強度とスペクトル

各フォトメータの出力に対する絶対値換算を行い図4および5より絶対強度を求め、それを表2に示す。各フォトメータの出力には連続大気光以外にフィルタの裾で拾う他の大気光輝線成分が僅かに含まれるので、その寄与を見積もり(表3)、補正した連続大気光成分のみの発光強度を表2に示した(詳細はAppendix 7.2を参

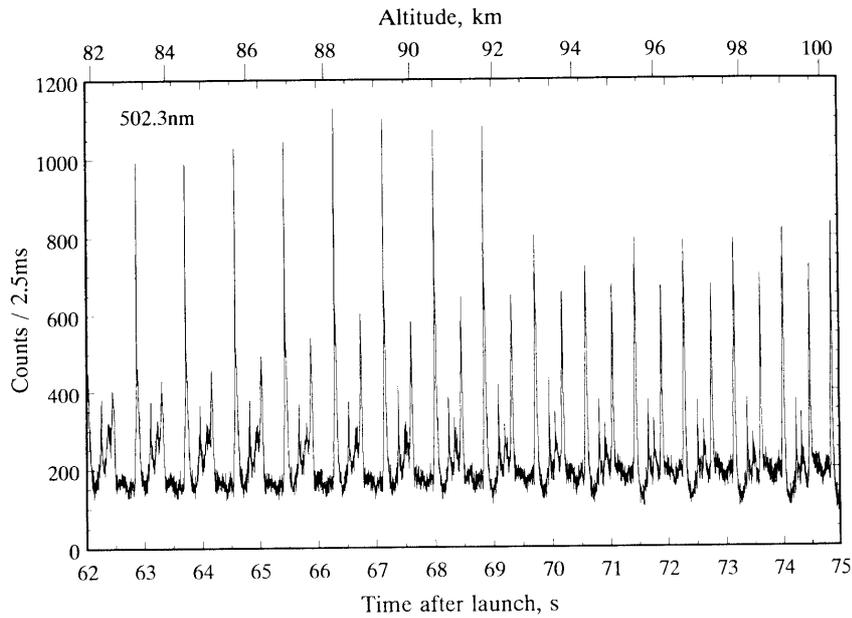


図 4 a.

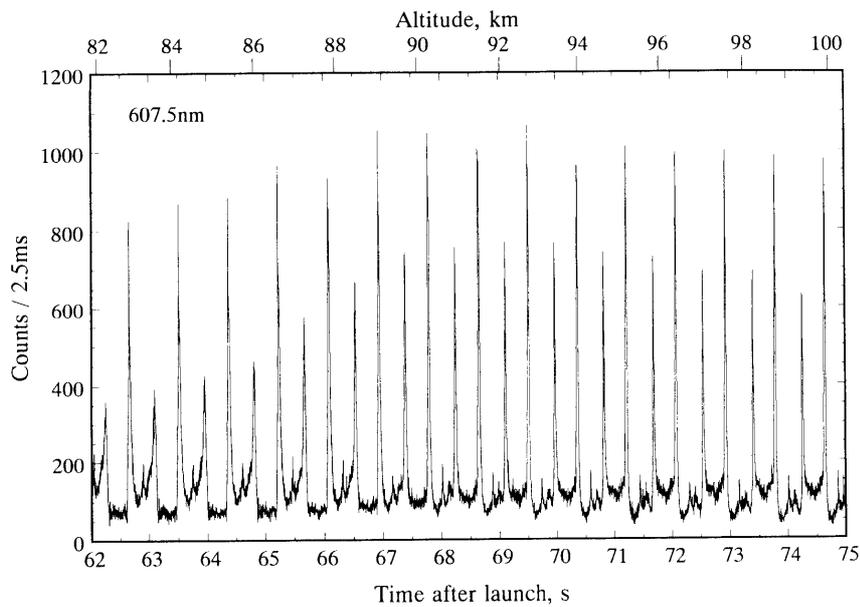


図 4 b.

図 4. 各波長域におけるフォトメータの出力

縦軸は積算時間2.5ms当たりのフォトメータ出力であり、横軸はロケット打ち上げ時からの時間を表す。また上部の横軸はロケット高度を表す。(a), (b), (c), (d)は順にバンドパスフィルタの中心波長が502.3nm, 607.5nm, 712.1nm, 817.6nmの場合である。約0.43s毎の周期的パルスは視線方向をスピン軸に対し垂直に向けたフォトメータが地球大気周辺部を1スピンに2回横切ることによる増強された大気光に星野光成分を含んだものである。飛翔中のロケット姿勢の変化によって星野光成分が変動するため、周期的パルスの大きさは一定にはならない。

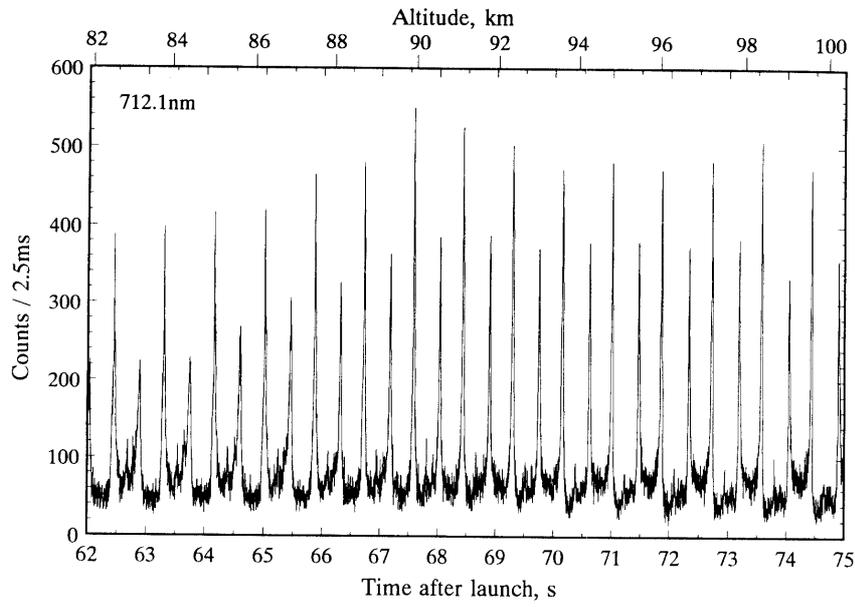


図 4 c.

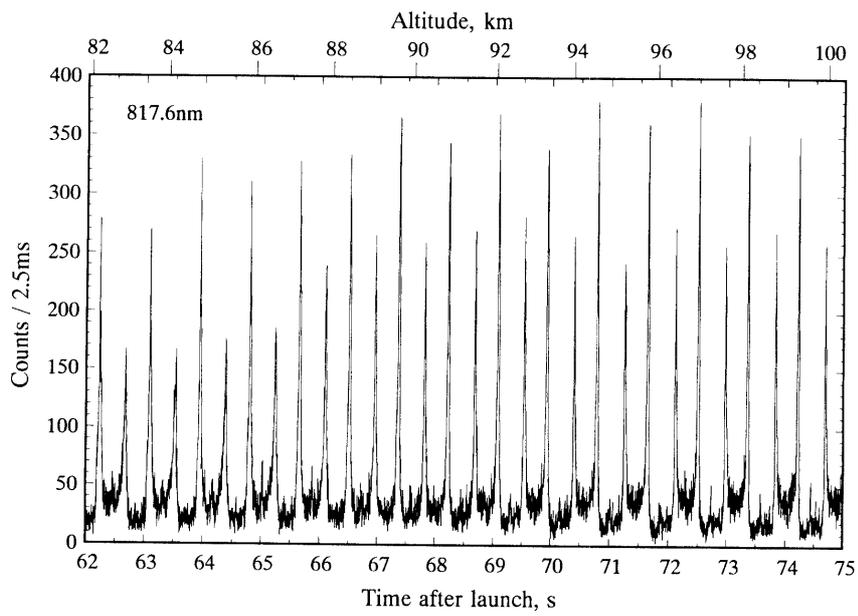


図 4 d.

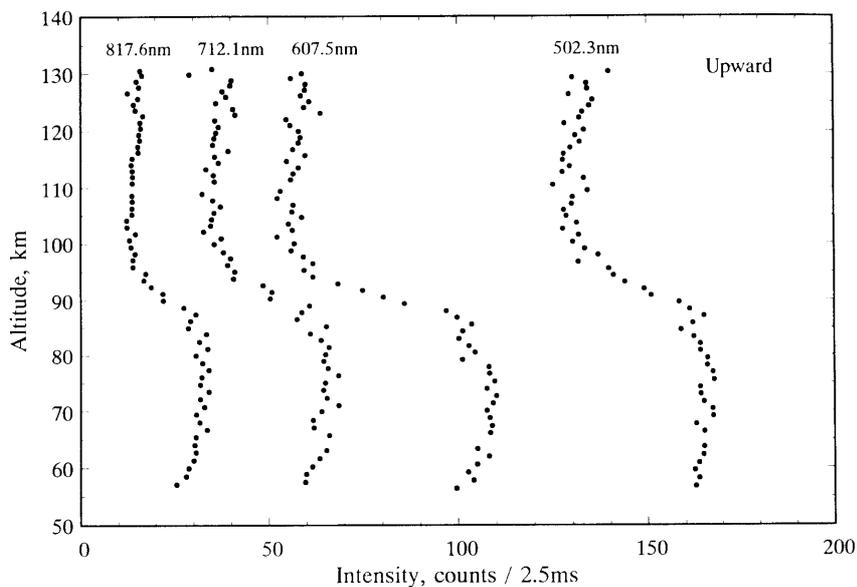


図5 a.

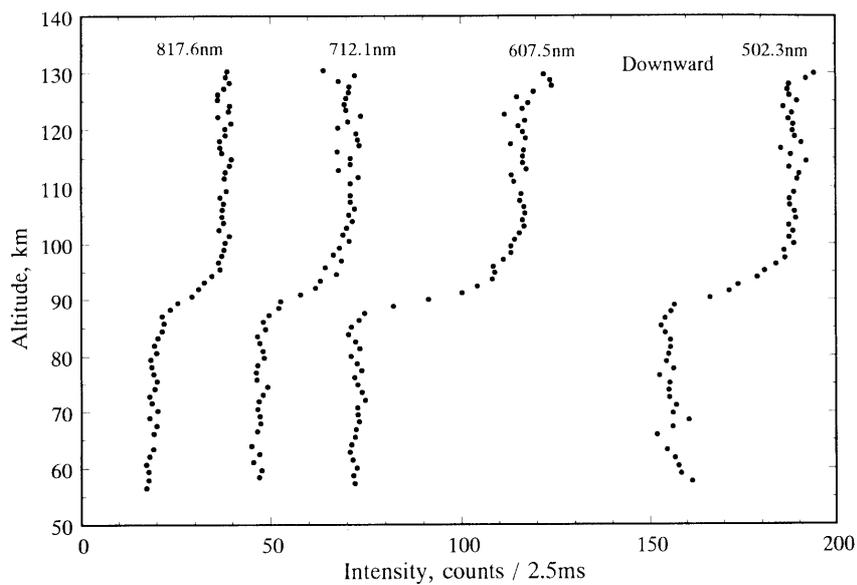


図5 b.

図5. 夜間連続大気光の積分強度の高度変化

縦軸はロケット高度、横軸は図4で示した時間帯の出力の平均値である。(a)はUpward dataの場合で、発光層高度を越えた高度の出力は星野光による。(b)はDownward dataの場合で、高度85km以下の出力は大気光と星野光が下層大気の下層で散乱されたものである。(a),(b)のグラフより発光層が高度85-95kmにあることが分かる。

表 2. 夜間連続大気光の天頂積分強度, van Rhijn peak, 室内実験値の比較

括弧内の値は 607.5 nm の値に対する相対強度を表す。室内実験, NO₂ スペクトルの相対強度は Sutoh et al. [39] の値を用いた。各波長域において Upward, Downward, First peak, Second peak の相対強度はよく一致する。室内実験と連続大気光を比べると 600 nm より長波長域のスペクトルは良く合う。

Wavelength (nm)	Zenith Intensity (R/nm)			Slant Column Intensity (R/nm)		Laboratory NO ₂ spectrum
	Upward	Downward	Mean	First peak	Second peak	
502.3	1.0 ± 0.2 (0.31 ± 0.06)*	1.1 ± 0.2 (0.29 ± 0.06)	1.1 ± 0.2 (0.31 ± 0.06)	29 ± 6 (0.27 ± 0.06)	26 ± 6 (0.29 ± 0.06)	(0.52 ± 0.08)
607.5	3.2 ± 0.6 (1.00 ± 0.19)	3.8 ± 0.8 (1.00 ± 0.18)	3.5 ± 0.7 (1.00 ± 0.19)	106 ± 22 (1.00 ± 0.20)	89 ± 19 (1.00 ± 0.21)	(1.00 ± 0.07)
712.1	3.2 ± 0.6 (1.00 ± 0.19)	3.7 ± 0.7 (0.97 ± 0.19)	3.4 ± 0.7 (0.97 ± 0.19)	99 ± 21 (0.93 ± 0.20)	85 ± 18 (0.96 ± 0.20)	(0.92 ± 0.04)
817.6	2.4 ± 0.7 (0.75 ± 0.23)	3.2 ± 1.0 (0.84 ± 0.26)	2.8 ± 0.9 (0.80 ± 0.25)	83 ± 27 (0.78 ± 0.25)	68 ± 22 (0.76 ± 0.24)	(0.72 ± 0.04)

* Numbers with parenthesis are relative values.

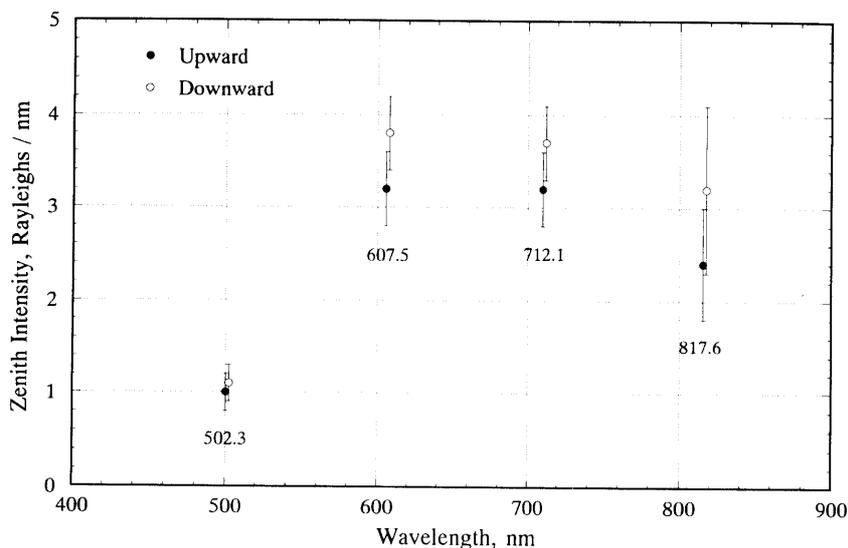


図 6. 4 波長域で得られた夜間連続大気光のスペクトル

縦軸は nm 当たりの天頂積分強度, 横軸は波長を表す。Upward と Downward のスペクトルを表す。817.6 nm の誤差が大きいのは表 3 に示すように OH Meinel band の混入による。

照)。van Rhijn peak の評価では明るい星の寄与の補正を行い, その結果 First peak の強度は天頂強度のおよそ 30 倍になった。表 2 で見られるように Upward, Downward 双方の天頂強度は誤差内で一致する。

3. 2. 体積発光率の高度プロファイル

図 4 の生データからロケットが上昇するに従って Upward の出力は減少し, Downward の出力は増大するのが判る。双方の出力の大きさは高度 90 km でほぼ等しくなる。このことは発光層の中心が高度 90 km にあることを示す。図 5 の積分強度の高度分布より発光層が高度 85–95 km に存在することは明らかである。図 5 の積分強度より Appendix 7.3 に述べた解析方法を用いて体積発光率の高度分布を求めた。それを図 7 に示す。発光率高度分布は全ての波長域において類似しており, さらに Upward, Downward の高度分布の間に差はほとんど無い。今回の測定では発光層のピーク高度は全ての波長域において 90 ± 1 km であった。S 310. 10 号機および K 9 M. 75 号機による OH Meinel band と O₂ atmospheric (0–0) band (O₂A-band) の発光層の中心高度はそれ

表 3. 夜間連続大気光以外の夜間大気光がフォトメータの出力に混入する強度の推定値

図2に示される干渉フィルタの透過率と使用した光電子増倍管の量子効率を考慮に入れて計算した。OH Meinel bandの発光強度はLlewellyn et al. [24]の計算値、O₂A-bandの発光強度はTakano et al. [41]の測定値、Na-D line, O_I green lineの発光強度は地上観測値 [4] [16]を使用した。各チャンネルの混入光の比率は計算された大気光のフィルタ透過強度とフォトメータの出力(括弧内の値)との比から、8%(CH1), 5%(CH2), 3%(CH3), 25%(CH4)と見積られる。

Airglows	Wavelength (nm)	Intensity (R)	Transmitted Intensity (R)			
			CH1	CH2	CH3	CH4
OH(8-1)	490.3	4.3	1.31	—	—	—
O _I (¹ S ₀)	557.7	320	0.009	0.007	—	—
OH(8-2)	588.6	15	—	0.24	—	—
Na-D	589.0,6	25	—	0.06	—	—
OH(5-0)	616.9	37	—	1.51	—	—
OH(9-3)	625.6	63	—	0.011	—	—
OH(6-1)	649.7	30	0.006	—	—	—
OH(7-2)	686.1	91	0.009	—	0.10	—
OH(8-3)	727.3	281	—	—	0.15	—
O ₂ (0-0)	761.9	10k	0.008	0.03	0.16	0.31
OH(9-4)	774.6	573	—	—	0.006	0.016
OH(5-1)	791.1	291	—	—	—	7.14
OH(6-2)	834.2	730	—	—	0.007	1.08
O ₂ (0-1)	864.5	600	—	—	0.12	0.011
OH(7-3)	882.3	1440	—	—	0.19	0.016
			Total~1.35	~1.85	~0.74	~8.57
			(16.2)*	(35.2)	(24.8)	(34.6)

* Numbers with parenthesis are photometer output intensities.

それ 88 ± 1 km, 94 ± 1 km [41][45] であり発光層高度が異なることから、これらの大気光の混入が少ないことは明らかである。図5より高度100kmを越えると積分強度の増減はほとんど無いので、発光層が存在する上層高度は100kmである。連続大気光の発光層の半値幅は約8kmであり、OH Meinel band, O₂A-band, O_I green lineの半値幅にほぼ一致する [13][19][20][32][41][42][45][48]。

3. 3. 積分強度の背景光

図5より Upward データには星野光が背景光として含まれることがわかるが、同様に Downward データにも同程度の背景光が含まれていることがわかる。この Downward の背景光の大部分は大気光と星野光が、実験当日打ち上げ場である内之浦および南九州全体が雲に覆われていたため雲および下層大気によって散乱された光である。Downward データに星野光の空間構造が現れないことも雲による散乱光と考えると理解できる。他方 Upward の背景光は星野光が主なので、空間構造が見られる。この違いのため図8の Upward, Downward 双方の背景光のスペクトル間に若干の差が現れる。曲線は背景光のスペクトルが Downward の場合絶対温度6000K (G0), Upward の場合6600K (F5)に相当する黒体放射であることを仮定して強度を測定値に合わせたものである。この黒体放射のスペクトルと測定値は誤差内で一致しており、このことから、Upward データの背景光が星野光であることと、Downward データの背景光が下層大気から上方に散乱された星野光であることが確認された。またこのことから逆に各チャンネルの感度較正が正しく行われたことが判る。もし実験が快晴時に行われれば Downward の背景光は今回の測定で得られたものよりかなり少なくなると考えられる。

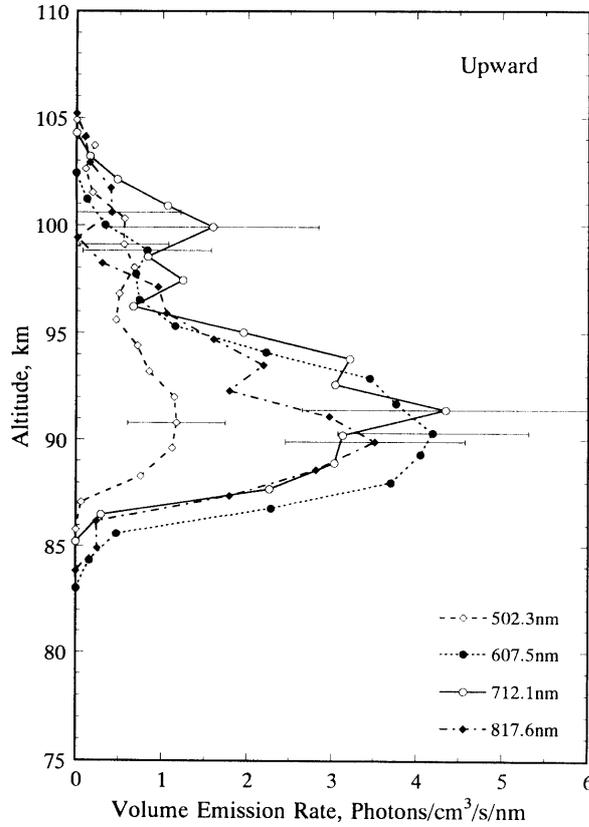


図7 a.

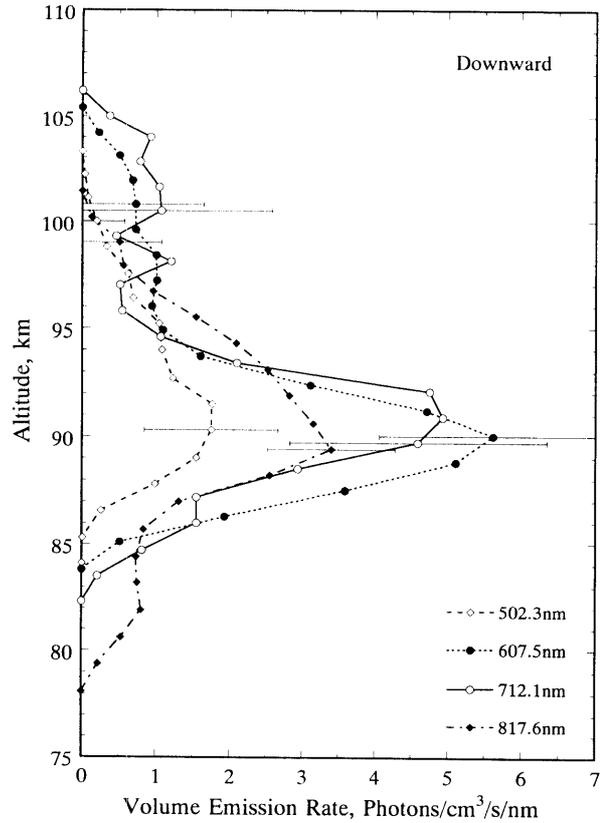


図7 b.

図7. 夜間連続大気光の体積発光率高度分布

(a)はUpward, (b)はDownwardの場合. 縦軸はロケット高度, 横軸は体積発光率を表す. 図5の連続する5つのデータについて最小自乗法により一次式を当てはめ, その勾配を slant emission rate とし, さらに天頂角補正を行った. (a), (b)より Upward, Downward とも4波長域すべてにおいて発光率の最大高度は 90 ± 1 km, 発光層の半値幅は約8 km に一致している.

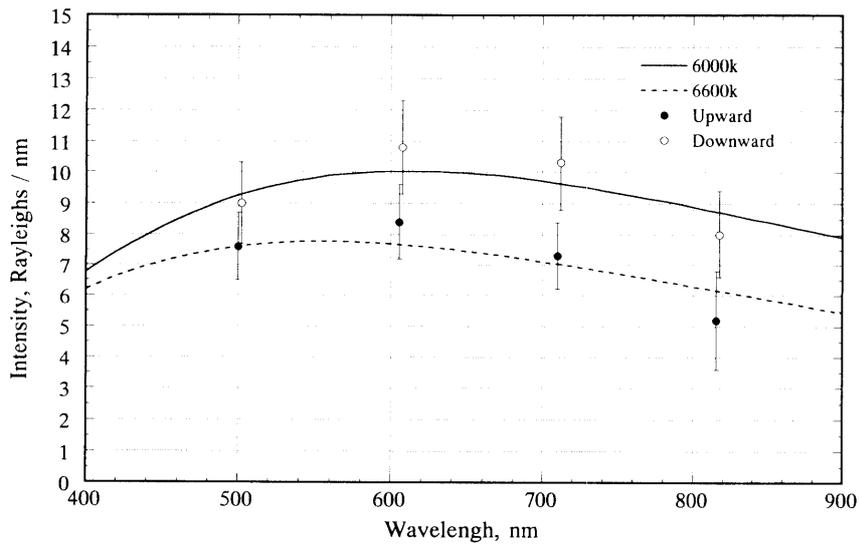


図8. 積分強度の背景光のスペクトル

縦軸は図5より求めた背景光の強度, 横軸は波長を表す. Downward の強度は全天の大気光と星野光の平均強度と下層大気雲のアルベドとの積になる. Upward は星野光が最も弱い空間を選んだので Downward の強度と異なる. 曲線は星野光のスペクトルとして黒体放射を仮定し相対スペクトルを測定値にフィットさせたものである.

4. 議 論

4. 1. 天頂積分強度とスペクトル

今回測定された天頂積分強度は S 310. 10 号機のとときの 2.3R/nm (715nm) [41] に比べやや大きいが誤差内で一致する。他のロケット観測の値は 2R/nm (530nm) [19], $\leq 4\text{R/nm}$ (566.4nm) [42], 2.5R/nm (532nm) [27], 3.4R/nm (540nm), 4.2R/nm (540nm), 5.7R/nm (714nm) [13] と我々の測定値にほぼ一致する。今回の近赤外域 (817.6nm) の測定値は地上観測で得られた発光強度 $10\sim 20\text{R/nm}$ [16][31][37][38] に比べると数分の一以下であり、地上観測で指摘された近赤外域の発光強度の増加は観測されなかった。近赤外地上観測スペクトルは強度測定誤差が大きいものと思われる。一方、可視域 (607.5nm) の観測値は 3.5R/nm であり、地上観測の値 $3\sim 5\text{R/nm}$ [11][38] と一致する。可視域に限定すると地上観測は図6のスペクトルとほぼ一致する。図7の発光率高度分布においても波長による違いはなく、発光のピーク高度はすべての波長域において等しく $90\pm 1\text{km}$ である。よって観測された連続大気光は4波長共に同一の生成消滅反応を有していると推定される。図9に見られるように室内実験 NO_2 スペクトルと連続大気光スペクトルは良く一致しており、このことは連続大気光が NO_2^* の発光であることを直接証明する。室内実験で得られた NO_2 スペクトル [10][39] と今回のロケット観測で得られた各波長域の平均発光強度から $0.4\sim 1.4\mu\text{m}$ 波長域の積算夜間連続大気光強度を求めると $1700\pm 400\text{R}$ になる。S 310. 10 号機の測定結果を用いると $1200\pm 700\text{R}$ である。

NO_2 の発光は、 $\text{NO}-\text{O}$ 反応で生成された NO_2^* の遷移に伴うものであるが、 600nm より長波長では NO_2 の $^2\text{B}_2$ および $^2\text{A}_1$ ステート、短波長では主に $^2\text{B}_1$ および $^2\text{B}_2$ ステートからの発光と考えられている [9]。各ステートの生成率はそれぞれ異なった温度、圧力依存性を示すと考えられる。図9より、 502.3nm 波長域の観測値は室内実験 NO_2 スペクトルに比べ相対強度が小さい。これは NO_2 スペクトルの温度依存性が現れたと考えられる。Sharp [35] の論文の図2を用いて、今回の測定で得られた結果から発光層の大気温度を推定してみた。 $I(607.5\text{nm})/I(502.3\text{nm}) = 3.2\pm 0.5$ を満たす温度を計算すると $T = 150\pm 30\text{K}$ となる。冬季の OH Meinel band の回転温度は筑波大学構内 ($36^\circ 06' \text{N}$, $140^\circ 06' \text{E}$) における観測からは $180\sim 250\text{K}$ 、東京 (36°N , 140°E) における観測 [51] からは $160\sim 200\text{K}$ が得られている。よって計算で得られた温度 150K は冬季の中緯度熱圏下部温度

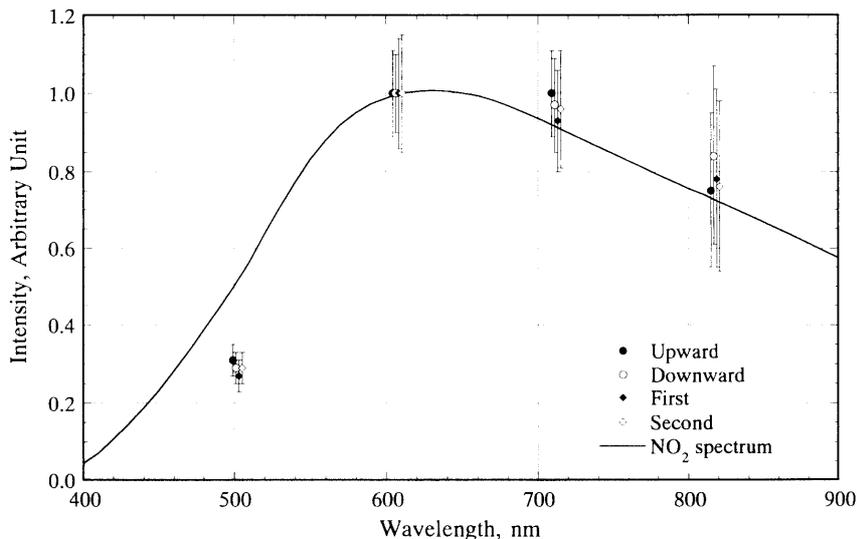


図9. 607.5nm の強度を1に規格化した Upward, Downward, van Rhijn peak のスペクトル
 曲線は室内実験 NO_2 スペクトル [39] であり同じく 607.5nm で規格化されている。今回の実験で得られた夜間連続大気光と室内実験 NO_2 スペクトルは良く一致しており、このことは夜間連続大気光が NO_2^* の発光であることを示している。

としては多少低い誤差 $\pm 30\text{K}$ を考慮すると妥当な値であると考えられる。600nmより長波長域において連続大気光と室内実験の相対強度がほぼ一致することから、この波長域の NO_2 スペクトルは温度および圧力に強く依存しないようである。

4.2. 発光率高度分布と励起機構

夜間連続大気光が NO_2^* の発光であることは図9より明らかであるが、 NO_2^* 生成メカニズムには以下に述べるように、二体反応または三体反応が候補にあがっている。放射結合を仮定する二体反応は次の反応式で表わされる。



この場合、消光の寄与は無視できるので体積発光率 $V_{2\text{-body}}$ は放射寿命に関係なく、

$$V_{2\text{-body}} = k_1 [\text{NO}][\text{O}]$$

になる。

三体反応は次の反応式であり、第三体が余剰エネルギーを輸送することで結合が起こる。



三体反応の体積発光率 $V_{3\text{-body}}$ はMによる消光の影響を受けるため、

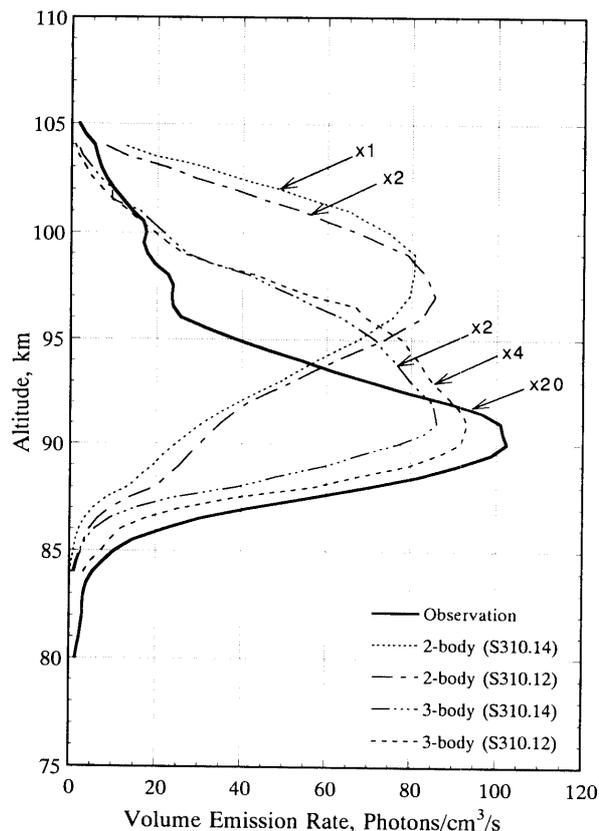


図10. 夜間連続大気光の体積発光率高度分布のモデル計算と観測の比較

NO と O の大気密度は内之浦でのロケット観測で得られた値を用いた。異なる NO の密度分布[15]に対して二体反応と三体反応による発光率の高度分布を計算した。2-bodyは二体反応、3-bodyは三体反応を表しており、括弧内の数字は NO 密度を測定したロケット番号である。 $\times 2$ は横軸スケールを2倍したものを絶対値としていることを示す。

$$V_{3\text{-body}} = A_2 k_2 [\text{NO}][\text{O}][\text{M}] / (A_2 + k_3 [\text{M}])$$

となる。

この二体反応および三体反応による体積発光率のモデル計算を行い、結果を図10に示す。大気モデルは標準大気モデル [43]、内之浦におけるロケット観測によるNO [15]、O [41]の測定値を用いた。二回のロケット観測で得られた異なるNOの大気密度を用いて、各励起機構による発光率の高度プロファイルを計算した。励起機構が同じ場合、発光率の絶対強度は異なるが発光層のピーク高度、プロファイルは良く一致する。発光層のピーク高度は三体反応で91km、二体反応で98kmになり、励起機構が異なると発光層高度に明確な差が生じる。発光層の半値幅は4つのプロファイルとも約9kmである。 k_1 の値はBecker et al. [5]、 k_2 の値はWhytock and Payne [46]、 k_3 、 A_2 の値はDonnelly and Kaufman [9]の実験値をそれぞれ用いた。計算に使用した k_2 の温度依存性が比較的大きく、発光層プロファイルの形に与える影響が大きいため、大気温度分布はMAP/WINE campaign 実験で得られた温度分布（冬季観測で熱圏下部の最低温度が160K）[33]を参考にして、標準大気モデルの温度分布を高度90kmにおいて150Kの温度極小を持つように修正したものを使用した。標準大気モデルでは高度90kmの温度が190Kであるのに対し、今回NO₂スペクトルから得られた大気温度が150Kになるからである。図10に今回の観測で得られた全データの平均プロファイルを実線で示した。発光層のピーク高度は90kmで三体反応を仮定した計算結果に符合する。発光層のプロファイルは多少異なるが、これは計算に用いられるNO、Oの密度の変動性が現れたものであろう。二体反応による計算結果からは高度98kmに発光のピークが現れるが、今回のロケット観測では測定誤差を考慮すると体積発光率が実質的に零とみなせる高度である。発光率のプロファイルは今回の観測結果と全く異なることから、二体反応はNO₂*の発光に重要でないことは明らかである。以上のことからNO₂*の励起機構はNO+O+Mの三体反応であると推論される。発光強度は実測値とモデル計算値の間に約一桁の差がある。発光強度を決める要因は反応係数、消光係数、遷移確率、NO、Oの大気密度、大気温度である。各因子はファクタ程度の変動性または不確定性を持っているものと推測されるので、これらが実測値とモデル計算値の間の差を説明するものと考えられる。その中でもNO、Oの大気密度は高度90kmより下層大気において時間的変動性が高い上、ロケット観測による測定の絶対精度が劣悪になる。このことが実測値と計算値の差を生じさせていると思われる。

S 310. 10号機(715nm)とK 9 M. 75号機(713nm)による観測でも発光層のピーク高度は93±3kmであった [30] [41]。また天頂積分強度の高度分布は今回得られた結果とほぼ同じであった。今回の実験を含めた3回のロケット観測は連続大気光の発光層のピーク高度が測定誤差内で一致することを示している。さらにロケット観測とモデル計算の発光層高度が一致することから、連続大気光の発光層高度は他の大気光と同程度に安定していると考えられる。

5. ま と め

(1) 中心波長が異なる4つのバンドパスフィルタを用いたロケット分光観測により、夜間連続大気光のスペクトル強度を4つの波長域で正確に測定することに成功した。これまでのロケットによる連続大気光の観測は1波長域のみであって、4波長域を同時に測定するのは今回が世界初の観測である。(2) 連続大気光のスペクトルおよび発光率高度分布の同時測定から0.5~0.8μm波長域の連続大気光はNO₂の発光であることを確認した。室内実験NO₂スペクトルを用いて各波長の発光強度を外捜すると連続大気光の全発光強度は1700Rとなる。(3) 発光層のピーク高度は4波長域共に90kmであり、高度プロファイルはNO+O+Mの三体反応を仮定したモデル計算のプロファイルと良く一致する。このことは連続大気光の励起機構が三体反応であることを示している。(4) 連続大気光の発光層高度は今回を含めた3回のロケット観測において誤差内で一致し、モデル大気を用いたシミュレーションとも良く合う。このことからすくなくとも中緯度地域においては、連続大気光の発光層のピーク高度は90-93kmにあるものと思われる。

6. 謝 辞

ロケット姿勢解析の計算結果を提供していただいた立教大学の牧野教授にお礼申し上げます。またロケット実験に際しては宇宙科学研究所ロケット実験班各位の全面的な御協力を得ました。ここに感謝の意を表します。

7. Appendix

7. 1. Rocket glow

S 310. 10号機の実験ではロケット降時に夜間連続大気光, OH Meinel band, O₂ A-band, Or green line, O₂ Herzberg 1 band 測定の写真メータの出力に Rocket glow が見られた。これは高度 110 km あたりから出現し、高度 102 km で発光強度が最大になった。この実験における写真メータの視線方向はロケットスピン軸から 30° である。同様の現象は他のロケット実験でも観測されている [19][20][25]。特に連続大気光は発光強度が弱いため、積分強度に異常が見られる場合、写真メータの出力は Rocket glow だけを検出している可能性がある [36][50]。今回の実験でもロケット下降時の写真メータの出力が不規則だったのはこのためと思われる。Rocket glow は NO + O + M 反応で励起された NO₂ 発光の臨界波長 (387.5 nm) より短波長域の O₂ Herzberg 1 band にも現れること、視野にロケット軌跡が入ると強度が極めて強くなること、O 原子密度が増加する高度で強くなること、O₂ A-band, OH Meinel band, Or green line, O₂ Herzberg 1 band および連続大気光の測定された全ての大気光に現象が起こることなどからロケットによる大気の圧縮加熱により大気光自身の発光強度が増大したものと推定される [21]。だが発光層高度より遥か上空でも観測される場合もあってその反応については不明な点が多い。何れの場合においても視線方向がロケット軌跡以外を向いているときは Rocket glow の影響は小さい。今回の観測では視線方向がロケットスピン軸と垂直なので Rocket glow の影響は最小限であり、図 3, 4 の生データにはその兆候は見られなかった。図 5 の積分強度の高度分布において、高度 100–110 km 間に強度変化が無いことも Rocket glow の影響が無いことを示している。

Shuttle glow は大気粒子と Shuttle との衝突反応によって形成された NO₂* の大気発光現象である [17][29][40][52][53]。高速 O 原子衝突反応の室内実験は Shuttle glow を再現するが、これらの NO₂ スペクトルは NO + O + M 反応によるものと明らかに異なっている [1][6]。NO + O₃* → NO₂* + O₂ 反応の Orange emission は Shuttle glow に良く似ていることから、Shuttle glow と関連する反応であると思われる [18]。さらにこの反応の発光強度は [NO][O₂(A, A')] にほぼ比例するので、発光層高度はおおよそ 100 km になり今回の観測結果に合わない (O₂(A, A') は O₂(A³Σ_u⁺) と O₂(A'³Δ_u) の混成状態)。よって今回測定された連続大気光はこの Shuttle glow とは明らかに異なる。

7. 2. 誤差評価

誤差の要因は次の (1) 他の大気光の混入, (2) 星野光の空間的不均一性, (3) 絶対測光の精度, (4) ロケットスピン軸の天頂角の決定精度, (5) 検出器ノイズ, (6) 解析誤差の 6 つであると考え各々について個別に検討してみた。

(1) 表 3 は各チャンネルの出力に混入する他の大気光強度の値であり、集光に伴う短波長へのズレを考慮した干渉フィルタの透過率、光電子増倍管の量子効率と発光強度の大きさから次の様に求めた。線スペクトルの強度は $I_i(\lambda_k)F_i(\lambda_k)PM_i(\lambda_k)$ (i =channel number) と各チャンネル毎に計算される。ここで $F_i(\lambda)$ はフィルタの透過率、 $PM_i(\lambda)$ は各チャンネルの中心波長で規格化された光電子増倍管の量子効率である。一方連続大気光の強度はバンドパスフィルタの半値幅が十分に狭いので $\int I_i(\lambda)F_i(\lambda)PM_i(\lambda)d\lambda \approx I_i(\lambda_i)PM_i(\lambda_i)\int F_i(\lambda)d\lambda = I_i(\lambda_i)W_i$ と計算される。ここで $PM_i(\lambda_i)=1$, $W_i = \int F_i(\lambda)d\lambda$ であり、各チャンネルの W_i (Equivalent width) の値を表 1 に記載した。混入光は OH Meinel band が主であり O₂ A-band の影響はほとんど無く Or green line は全く無視できる。OH Meinel band の発光強度は S 310. 10号機および K 9 M. 75号機における測定値 [41] に良く一致する Llewellyn et al. [24] の計算値を用いた。O₂ A-band の発光強度は K 9 M. 75号機での測定値を用い、

また $O_2(0-1)$ band の発光強度は O_2A -band の発光強度の $1/17$ とした [44]. Na-D line, Oi green line の発光強度は地上観測で得られた値を用いた [4][16]. 400nm より短波長域の干渉フィルタの透過率は極めて小さいので近紫外域の大気光は排除される. OH Meinel band, O_2A -band の波長は band origin の値 [23] であり, OH の回転温度は 200k であるとした. 各チャンネルにおけるこの観測で得られた入射光強度に対する混入光の強度比は CH 1 で 8%, CH 2 で 5%, CH 3 で 3%, CH 4 で 25% になる. OH Meinel band の夜間発光強度の変動は 2 倍程度 [6][51] なので他の大気光混入に伴って発生する相対誤差は混入比程度と思われる. この値を σ_1 とおく.

(2) ロケットスピン軸の移動に伴い van Rhijn 効果で積分強度が変化する. ロケット上昇時高度が 60–130 km において, 発光層以外の高度では積分強度は線形的に変化しているので, 直線近似でこの変動を取り除いた. その結果星野光の空間的不均一性が残り, これは出力の揺らぎになる (図5).

(3) キャリブレーションの際に生じる誤差. 使用した標準光源は標準電池, 標準抵抗から構成されておりブラックボディで較正されている. これまでの実験結果から推定するとキャリブレーションによる相対誤差は 10% 程度と思われる. この値を σ_2 とおく.

(4) ロケットスピン軸の天頂角は 1 スピン間の絶対強度変化が van Rhijn 効果から求められた. ロケットスピン軸の天頂角は高度 90km の発光層において $39 \pm 4^\circ$ である [26]. この天頂角の誤差から生じる積分強度の相対誤差は 15% 程度である. この値を σ_3 とおく.

(5) 光電子増倍管のノイズはパルスハイトに対して閾値を調整することで $1 \sim 2$ counts/2.5ms 程度になった. これは入射光子数に対し 0.5% (CH 1), 0.5% (CH 2), 7% (CH 3), 9% (CH 4) であるが, データは平均値を用いているので最終的にはこれをサンプル数 N の平方根 \sqrt{N} で割った値になる. N の値は Upward で 24, Downward で 40 である.

(6) 体積発光率は天頂積分強度を高度で微分することで求まる. 最小自乗法を用いて積分強度に最適する関数を求めた. この関数が一次式の場合傾きが体積発光率になるが, 積分強度が誤差を含むので重み付きの計算になる. 積分強度は図3の矢印で示されている Upward data における 24 点, Downward data における 40 点の出力の平均値である. この出力の平均誤差と検出器のノイズとの和をデータ誤差 Δx とし, 各データの値との比を σ_4 とする. また最小自乗法によって得られた直線の傾きを a , 傾きの絶対誤差を Δa とおく.

天頂積分強度における相対誤差は各相対誤差の自乗和の平方根, $\sigma = \{(\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2 + \sigma_4^2)\}^{1/2}$ とした. van Rhijn 効果による積分強度の増加率は全てのチャンネルで等しいので, 天頂角の誤差は系統誤差になる. よってスペクトルの相対誤差においては系統誤差である σ_3 は除いた. 体積発光率の絶対誤差 Δ_{VER} は $k \{(\Delta a)^2 + (a\sigma)^2\}^{1/2}$ であるとした (k は絶対強度換算係数).

7. 3. 解析方法

体積発光率は天頂積分強度のデータに最適する一次式を連続する最小自乗法を用いて求め, その傾きから得た. 5つの連続するデータに対して一次式を当てはめる操作を繰り返し行った. 各データは誤差 Δx を持つので重み付きの最小自乗法を用いた. 直線の傾きすなわち体積発光率はほぼ Δx に比例する誤差を持って定まる. ロケットスピン軸の天頂角とスピン軸の回りのロケット回転軸より視線方向の天頂角を求め, 天頂角補正を行い天頂積分強度を求めた.

参 考 文 献

- [1] Arnold, G. S. and D. J. Coleman, Surface mediated radical recombination luminescence : $O+NO+Ni$, *J. Chem. Phys.*, **88**, 7147-7156, 1988.
- [2] Baker, D. J. and R. O. Waddoups, Correction of paper by D. Baker and R. Waddoups, 'Rocket measurement of midlatitude night airglow emissions', *J. Geophys. Res.*, **73**, 2546-2547, 1968.
- [3] Barbier, D., J. Dufay and D. Williams, Recherches sur l'émission de la raie verte de la lumière du ciel nocturne,

- Ann. Astropys.*, **14**, 399-437, 1951.
- [4] Broadfoot, A. L. and K. R. Kendall, The airglow spectrum, 3100–10,000 Å, *J. Geophys. Res.*, **74**, 426-428, 1968.
- [5] Becker, K., W. Groth and D. Thran, The mechanism of the air-afterglow $\text{NO} + \text{O} \rightarrow \text{NO}_2 + h\nu$, *Chem. Phys. Letts.*, **15**, 215-220, 1972.
- [6] Caledonia, G. E., K. W. Holtzclaw, R. H. Krech, D. M. Sonnenfroh, A. Leone and W. A. M. Blumberg, Mechanistic investigations of shuttle glow, *J. Geophys. Res.*, **98**, 3725-3730, 1993.
- [7] Clemesha, B. R., H. Takahashi, P. P. Batista, Y. Sahai and D. M. Simonich, The temperature dependence of airglow emissions from the upper mesosphere and lower thermosphere, *Planet. Space Sci.*, **39**, 1397-1404, 1991.
- [8] Clough, P. N. and B. A. Thrush, Mechanism of chemiluminescent reaction between nitric oxide and ozone, *Faraday Soc.*, **63**, 915-925, 1967.
- [9] Donnelly, V. M. and F. Kaufman, Fluorescence lifetime studies of NO_2 . 1. Excitation of the perturbed ${}^2\text{B}_2$ state near 600nm, *J. Chem. Phys.*, **66**, 4100-4110, 1977.
- [10] Fontijn, A., C. B. Meyer and H. I. Schiff, Absolute quantum yield measurements of the $\text{NO}-\text{O}$ reaction and its use as a standard for chemiluminescent reactions, *J. Chem. Phys.*, **40**, 64-70, 1964.
- [11] Gadsden, M. and E. Marovich, The nightglow continuum, *J. Atmos. Terr. Phys.*, **35**, 1601-1614, 1973.
- [12] Greer, R. G. H. and G. T. Best, A rocket-borne photometric investigation of the oxygen lines at 5577 Å and 6300 Å, the sodium D-lines and the continuum at 5300 Å in the night airglow, *Planet. Space Sci.*, **15**, 1857-1881, 1967.
- [13] Greer, R. G. H., D. P. Murtagh, I. C. Mcdade, P. H. G. Dickinson, L. Thomas, D. B. Jenkins, J. Stegman, E. J. Llewellyn, G. Witt, D. J. Mackinnon and E. R. Williams, ETON 1 : A data base pertinent to the study of energy transfer in the oxygen nightglow, *Planet. Space Sci.*, **34**, 771-788, 1986.
- [14] Huruwata, M., T. Nakamura and W. R. Steiger, A rocket observation of [OI] 5577A emission and continuum at 5300 Å in night airglow, *Rep. Iono. Space Res., Japan*, **21**, 229-232, 1967.
- [15] Iwagami, N. and T. Ogawa, Thermospheric NO profiles observed at the diminishing phase of solar cycle 21, *Planet. Space Sci.*, **35**, 191-198, 1987.
- [16] Johnston, J. E. and A. L. Broadfoot, Midlatitude observations of the night airglow : Implications to quenching near the mesopause, *J. Geophys. Res.*, **98**, 21593-21603, 1993.
- [17] Kahler, C. C. and M. Kowalczyk, A new threshold energy for $\text{NO} + \text{O}_3 \rightarrow \text{NO}_2^* + \text{O}_2$, *J. Chem. Phys.*, **84**, 1946-1948, 1986.
- [18] Kenner, R. D. and E. A. Ogryzlo, Orange chemiluminescence from NO_2 , *J. Chem. Phys.*, **80**, 1-6, 1984.
- [19] Kita, K., N. Iwagami, T. Ogawa, A. Miyashita and H. Tanabe, Height distributions of the night airglow emissions in the O_2 Herzberg I system and oxygen green line from a simultaneous rocket observation, *J. Geomag. Geoelectr.*, **40**, 1067-1084, 1988.
- [20] Kita, K., N. Iwagami and T. Ogawa, Rocket observations of oxygen night airglows : Excitation mechanisms and oxygen atom concentration, *Planet. Space Sci.*, **40**, 1269-1288, 1992.
- [21] Kita, K., Private communication, 1994.
- [22] Krassovsky, V. I., Influence of water vapour, carbon oxides and nitrogen on the luminescence of the night sky, *Dokl. Akad. Nauk. S. S. S. R.*, **78**, 669, 1951.
- [23] Krassovsky, V. I., N. N. Shefov and V. I. Yarin, Atlas of the airglow spectrum 3000–12400 Å, *Planet. Space Sci.*, **9**, 883-915, 1962.
- [24] Llewellyn, E. J., B. H. Long and B. H. Soulheim, The quenching of OH^* in the atmosphere, *Planet. Space Sci.*, **26**, 525-531, 1978.
- [25] Lopez-Moreno, J. J., R. Rodrigo and S. Vidal, Radiative contamination in rocket-borne infrared photometric measurements, *J. Geophys. Res.*, **90**, 6617-6621, 1985.
- [26] Makino, T., Private communication, 1988.
- [27] Mcdade, I. C., R. G. H. Greer and D. P. Murtagh, Thermospheric nitric oxide concentrations derived from a measurement of the altitude profile of the green nightglow continuum, *Ann. Geophys.*, **2**, 487-494, 1984.
- [28] Mcdade, I. C., E. J. Llewellyn, R. G. H. Greer and D. P. Murtagh, ETON 3 : Altitude profiles of the nightglow continuum at green and near infrared wavelengths, *Planet. Space Sci.*, **34**, 801-810, 1986.
- [29] Mende, S. B., P. M. Banks, R. Nobles, O. K. Garriott and J. Hoffman, Photographic observations of earth's airglow from space, *Geophys. Res. Lett.*, **10**, 1108-1111, 1983.

- [30] Nakamura, M. and M. Takano, Measurement of O₂, OH airglow by S310. 10, *Uchu Kansoku Symposium*, 283-292, 1982.
- [31] Noxon, J. F., The near infrared nightglow continuum, *Planet. Space Sci.*, **26**, 191-192, 1977.
- [32] Ogawa, T., N. Iwagami, M. Nakamura, M. Takano, H. Tanabe, A. Takechi, A. Miyashita and K. Suzuki, A simultaneous observation of the height profiles of the night airglow OI 5577 Å, Herzberg and atmospheric bands, *J. Geomag. Geoelectr.*, **39**, 211-228, 1987.
- [33] Ratkowski, A. J., R. H. Picard, J. R. Winick, K. U. Grossmann, D. Homann, J. C. Ulwick and A. J. Paboojian, Lower-thermospheric infra-red emissions from minor species during high-latitude twilight —B. Analysis of 15 μm emission and comparison with non-LTE models, *J. atmos. terr. Phys.*, **56**, 1899-1914, 1994.
- [34] Schwartz, S. E. and H. S. Johnston, Kinetics of nitrogen dioxide fluorescence, *J. Chem. Phys.*, **51**, 1286-1302, 1969.
- [35] Sharp, W. E., On the temperature dependence of the reaction O+NO→NO₂^{*}, *Planet. Space Sci.*, **32**, 257-260, 1984.
- [36] Siskind, D. E. and W. E. Sharp, A comparison of measurements of the oxygen nightglow and atomic oxygen in the lower thermosphere, *Planet. Space Sci.*, **39**, 627-639, 1991.
- [37] Sobolev, V. G., Continuum in night airglow between 8000 and 11,000 Å, *Planet. Space Sci.*, **26**, 703-704, 1978.
- [38] Sternberg, J. R. and M. F. Ingham, Observations of the airglow continuum, *Mon. Not. R. Astr. Soc. London*, **159**, 1-20, 1972.
- [39] Sutoh, M., Y. Morioka and M. Nakamura, Absolute rate constant for the chemiluminescent reaction of atomic oxygen with nitric oxide, *J. Chem. Phys.*, **72**, 20-24, 1980.
- [40] Swenson, G. R., S. B. Mende and K. S. Clifton, Ram vehicle glow spectrum ; Implication of NO₂ recombination continuum, *Geophys. Res. Lett.*, **12**, 97-100, 1985.
- [41] Takano, M., T. Watanabe and M. Nakamura, Rocket measurements of O₂ atmospheric (0-0) and OH Meinel bands in the night airglow, *J. Geomag. Geoelectr.*, **42**, 1193-1208, 1990.
- [42] Thomas, R. J. and R. A. Young, Measurement of atomic oxygen and related airglows in the lower thermosphere, *J. Geophys. Res.*, **86**, 7389-7393, 1981.
- [43] U. S. Standard Atmosphere, 1976., National Oceanic and Atmospheric Administration, NOAA-S/T 76-1562m Washington.
- [44] Wallace, L. and D. M. Hunten, Dayglow of the oxygen A band, *J. Geophys. Res.*, **73**, 4813-4834, 1968.
- [45] Watanabe, T., M. Nakamura and T. Ogawa, Rocket measurements of O₂ atmospheric and OH Meinel bands in the airglow, *J. Geophys. Res.*, **86**, 5768-5774, 1981.
- [46] Whytock, D. A., J. V. Michael and W. A. Payne, Absolute rate constants for O+NO+N₂→NO₂+N₂ from 217-500 K, *Chem. Phys. Lett.*, **42**, 466-471, 1976.
- [47] William, E. S., The measurement of atomic oxygen in the mesosphere and lower thermosphere, *Planet. Space Sci.*, **39**, 617-626, 1991.
- [48] Witt, G., J. Stegman, B. H. Solheim and E. J. Llewellyn, A measurement of the O₂(b¹Σ_g⁺ - X³Σ_g⁻) atmospheric band and the OI(¹S) green line in the nightglow, *Planet. Space Sci.*, **27**, 341-350, 1979.
- [49] Witt, G., J. Rose and E. J. Llewellyn, The airglow continuum at high latitudes-an estimate of the NO concentration, *J. Geophys. Res.*, **86**, 623-628, 1981.
- [50] Witt, G., J. Stegman, D. P. Murtagh, I. C. Mcdade, R. G. H. Greer, P. H. G. Dickinson and D. B. Jenkins, Collisional energy transfer and the excitation of O₂(b¹Σ_g⁺) in the atmosphere, *J. Photochem.*, **25**, 365-378, 1984.
- [51] Yamamoto, H., T. Kawakami, H. Sekiguchi and T. Makino, Ground-based measurement system of the OH rotational temperature, *J. Geomag. Geoelectr.*, **47**, 361-376, 1995.
- [52] Yee, J. H. and V. J. Abreu, Visible glow induced by spacecraft-environment interaction, *Geophys. Res. Lett.*, **10**, 126-129, 1983.
- [53] Zahn, U. and E. Murad, Nitrogen dioxide emitted from space shuttle surfaces and shuttle glow, *Nature*, **321**, 147-148, 1986.