

夜光 OH, O₂ の近赤外域での測定*

牧野忠男**, 関口宏之**, 山本博聖**

Nightglow Measurements of the OH and O₂ Bands in the Near Infrared Region

By

T. MAKINO, H. SEKIGUCHI and H. YAMAMOTO

Abstract: The nightglow emissions of OH and O₂ have been observed in the near infrared region (1-2 μ) by balloons and rockets. The data show that the height of the maximum emission rate and the effective thickness of emission layer for OH are 85-90 km and 10 km respectively, and for O₂, 90 km and 10 km respectively. The intensities of OH (3-1,4-2) and (6-4,7-5) bands show a steady decrease during the night; the OH intensity at 04:00 JST is about 30 % of that at 23:00 JST; 6 hours after local ground sunset.

概 要

我々は近年 Balloon, Rocket を用いて近赤外域 (1~2 μ) で夜間大気光 OH, O₂ を PbS により観測している。我々のデータによると OH の近赤外域での発生高度は 85~90 km にピークをもち厚さは 10 km, O₂ (1.27 μ) もピークは ~90 km で厚さは 10 km である。日没後の時間変化は OH (3-1, 4-2) (6-4, 7-5) とともに夜間は一定の割合で減少し続け、J. S. T., 04:00 の強度は地上での日没 6 時間後 (J S T 23:00) の約 30 % であった。

1. 序 文

夜間大気光はその発生高度がほぼ中間圏上部に集中している。そのうち OH 大気光は 5500A ~ 4.4 μ に多数の振動帯をもち放出エネルギーは数 $\text{erg} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{column}^{-1} \cdot \text{sec}^{-1}$ に達する最大のものである。主としてこの OH 発光を対象とする 1~2 μ 領域の観測は Vallance Jones and Gush ('53) [1] Gush and Vallance Jones ('55) [2] に始まりその後 Balloon による Gush and Buijs ('64) [3] の観測によって OH の振動回転スペクトルが詳しく得られた。彼らの測定で同時に夜間の O₂ (¹ $\Delta_g - ^3\Sigma_g^-$) (0-0) 1.27 μ が始めて得られ Bishop et al. [4] Evans et al., [5] は Rocket 実験でその発生高度を得ている。一方 OH 夜光の発生高度は ~1.2 μ までは Packer [6] をはじめ多くの観測があって [7] は 80~90 km に集中しているが 1.5~2.0 μ 領域はこれまで報告されている例は少ない。[8] 我々はここ数年 Balloon, Rocket を用いて 1~2 μ 領域の夜間大気光の測定を行ってき

* 宇宙研特別事業費による研究論文

** 立教大学理学部

ていて種々の結果を得ているのでこれまでの data と比較してOH, O₂ の生成機構・高度分布・時間変化等について報告する。

2. 測 定

測定方法は図1に示す光学系を基本としている。即ち入射光は集光レンズで焦点に置かれたPbS素子に集まる。波長弁別はPbS前方の干渉フィルターで行い chopper を用いて同期検出法により S/N を改良して直流シグナルとしてとり出す。

表1にここで報告する実験に関する諸量を示す。Balloon実験では上空での低温が問題となる。図2にB₅-52で測定した高さとの関係を示す。27 kmの高さでは直接外気にふれているところは夜間は-50℃まで下がることがわかる。一方スチールフォームで保温されているところは-15℃程度に保たれている。実験室では装置全体を恒温槽に入れ-25℃までテストした。その際に内部に calibration light としてタングステンの豆ランプを用いた低温特性が得られている。この結果波長により多少違いはあるが図3に示すように-15℃を超えると感度は室温の約2~2.5倍で一定になっている。一般にPbS素子で低温用の

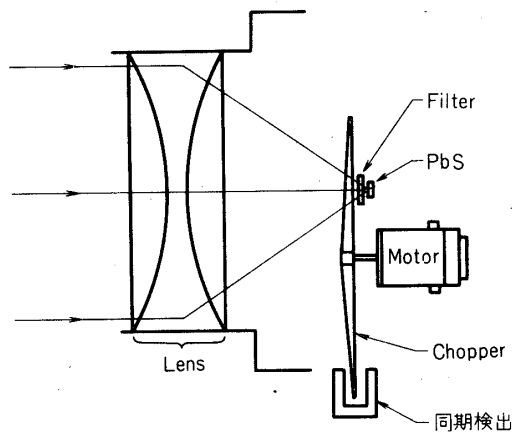


図1 Optical System

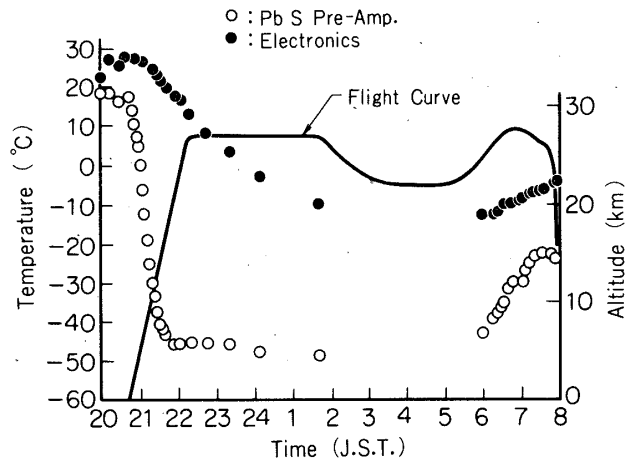


図2 Temperature Variation

表 1

Vehicle	Place	Date	Altitude	Lens		Angular Resolution	Wavelength [FWHM]	OH Bands Included	O ₂ (1.27μ)
				D [cm]	F [cm]				
Rocket K-10-5	134°04 E 31°15 N	'69, Sept.6 20:30	km 60-130	9	7	8°	1.50-2.00	(3-1)(4-2)(5-3) (6-4)(7-5)	
Rocket K-10-7	134°04 E 31°15 N	'71, Aug.20 21:10	60-130	10	7	4°	1.00-1.35 1.55-1.70 1.70-1.95	(9-5)(4-1)(5-2) (6-3)(7-4)(8-5) (4-2)(5-3) (6-4)(7-5)	Included
Balloon B ₂ -29	141°49 E 39°09 N	'72, Sept.10-11 21:00-06:30	24	5	5	11°	1.27-1.31 1.50-1.65 1.75-1.95	(8-5) (3-1)(4-2) (6-4)(7-5)	Included
Balloon B ₅ -52	141°49 E 39°09 N	'73, Oct.1-2 20:45-07:30	27 & 23	10	10	5.5°	1.48-1.61 1.94-2.16	(3-1)(4-2) (8-6)(9-7)	

ものは常温では暗抵抗が低くなるようにつくられており常温用はそれが高い。それ故常温用のPbS素子を低温で使用しても感度上昇はほぼ -20°C まででS/Nの改善は2~3程度にしかならず Balloon 高度で使用するときは低抵抗のものを選んだ方が好結果を得られる。また夜光の絶対強度は実験室での黒体炉による校正曲線をもとにしている。Balloon 実験ではモーターを用いて天頂角方向にサーベイを行った。なお周期は約10分である。

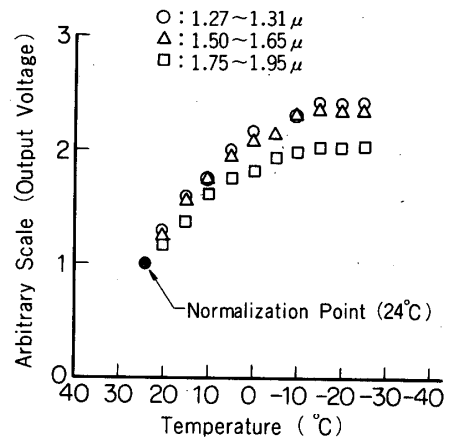


図3 Temperature Dependence of Output Signals

3. 結 果

3.1 OH(1.5~2.1 μ) emission

夜間のOH発光層の測定はPacker [6]をはじめとして数回行われていてピークはほぼ80-90 kmにあることが確認されているがいずれも $\sim 1\mu$ までのもので $1.5\sim 2.0\mu$ の dataはあまりない。なおこの波長域で薄明時の測定が名古屋グループ [9] によって行われている。我々の結果をPacker と並べて図4

に示すが、ほぼ一致している。測定波長が長くなるに従って発光層の厚さが薄くなってゆく傾向にあるが

[10] OH(6-4)(7-5) $\sim 1.8\mu$ の測定は一転して厚さが30 kmと厚く注目されるがこの領域のS/Nの点から余り信頼はおけない。ここではOH $1.5\sim 2.0\mu$ の発光層は85~90 kmにピークを持ち厚さは10 kmと報告する。

Balloon測定によってOH emissionの時間変動をとらえた。これは図5に示すように一定の割合で減少していつている。Balloon は岩手県三陸 Balloon 基地で放球され測定当日

(’72. 9. 10) の日没はJST 18:00で dataは日没後5時間から plot している。Gush and Buijs [3] の干渉計による測定結果の各バンド間の相対強度を仮定して絶対強度を求めているがOH(4-2)はJST 23:00には $\sim 130\text{ kR}$ のものがJST 04:00にはほぼ1/3

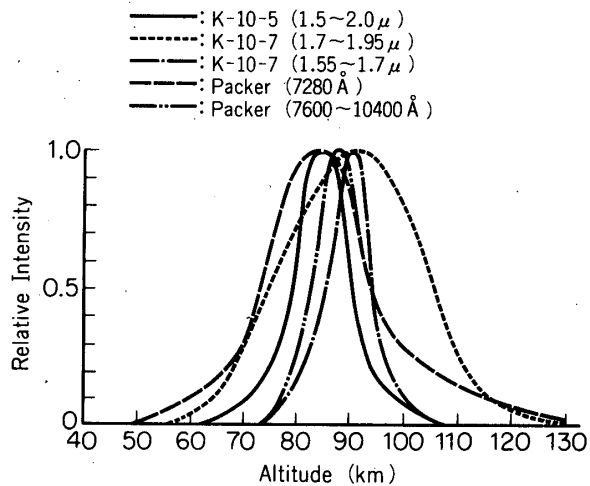


図4 Altitude Distribution of OH Emission

の45 kRにまで減少しOH(6-4)は同じく120 kRから50 kRへと減少している。なお9月11日の日の出はJST 5時であった。

'73. 10. 1のBalloon実験では上昇中に高度と強度の関係が得られた。図6に示すように $\sim 1.5\mu$, $\sim 2.0\mu$ ともにほぼ一定になっている。このプラトー部を平均して天頂角分布を求めてみると図7のようになっている。いずれもVan Rhijn Curveによく一致している。天頂角分布については'72. 9. 10のBalloonでも得られているがこの結果を図8に示す。

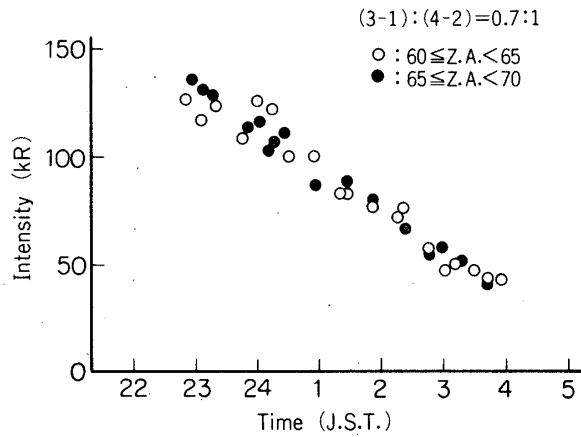


図5(a) Time Variation of OH(3-1) and (4-2) bands

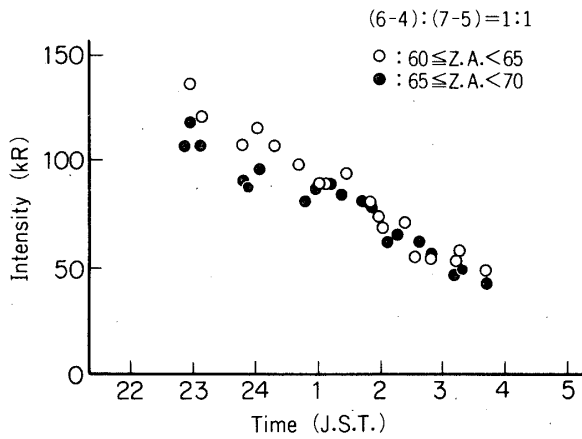


図5(b) Time Variation of OH(6-4) and (7-5) bands

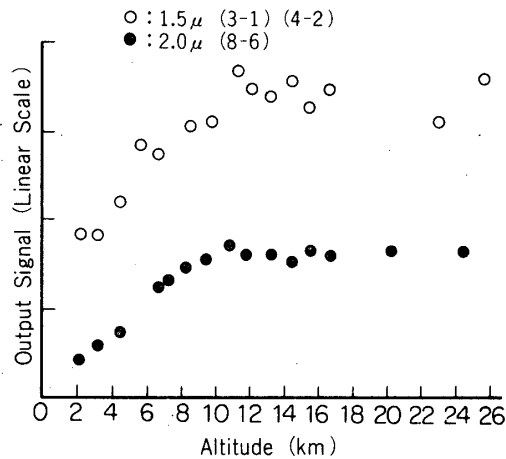


図6 Altitude Dependence of Signals

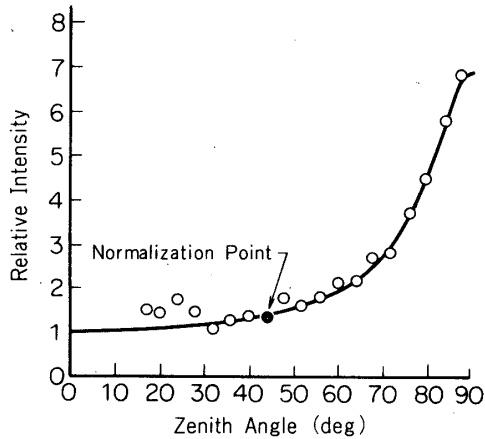


図7(a) Zenith Angle Distribution (3-1) and (4-2) bands $\sim 1.5\mu$

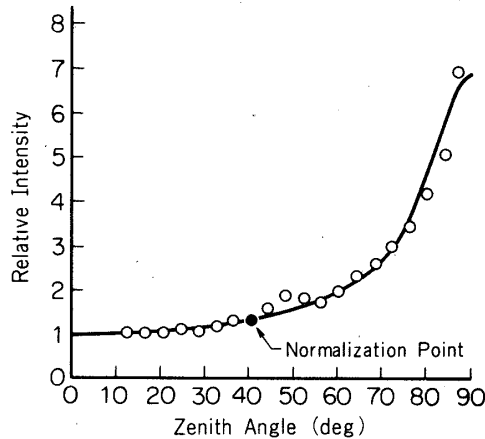


図7(b) Zenith Angle Distribution (8-6) band $\sim 2.0\mu$

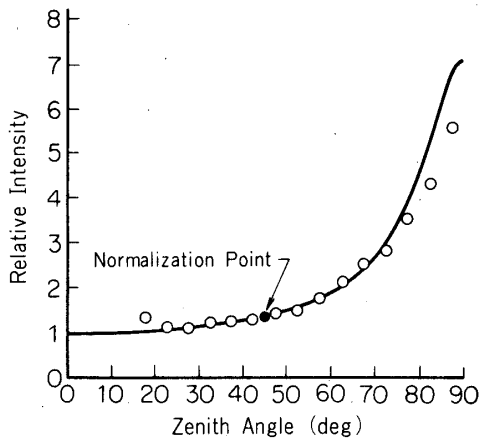


図8(a) Zenith Angle Distribution of OH(3-1) and (4-2) bands

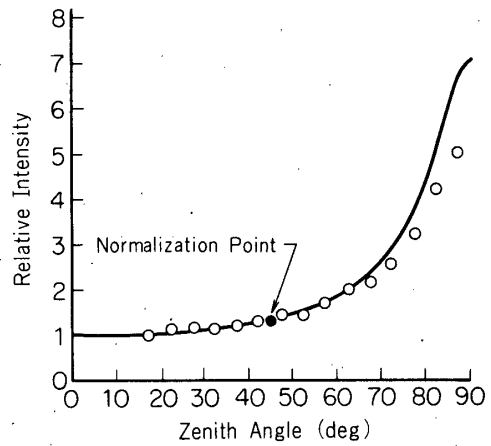


図8(b) Zenith Angle Distribution of OH(6-4) and (7-5) bands

図7と図8では天頂角が大きいところでくい違いが見えている。

3.2 O₂ (1.27μ) emission

夜間O₂(1.27μ)の発光層はRocket K-10-7号機で得られている。これに使用したフィルターはバンド巾が広く(1.0~1.35μ)O₂の他にOHの(6-3),(7-4),(8-5)バンドが含まれているがOH層は図4に示す如く90kmにpeakをもち厚さ10kmにあり、かつこのフィルターに入射する強度比はGush and Buijs [3]によるとO₂:OH=1:0.8を考慮するとO₂層の高度分布も図9に示す我々の1~1.35μのdataとほぼ等しいと考えられる。比較のためにこれまでのdataを図に示しておく。

図10は'73.9のBalloonで得られたO₂(1.27μ)の時間変化であるがS/Nが悪いためかなりバラついていてやや強度が減少している傾向が見える程度である。同じBalloonで得られた天頂角分布を図11に示しておく。実線は発光層が90kmとしたときに期待される天頂角分布であるがOHに比べるとその差が非常に大きい。この理由は途中での吸収によるものと思われる。これについては4で討論する。

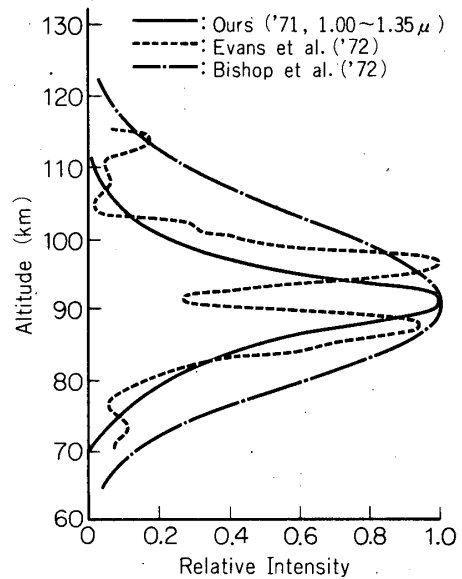
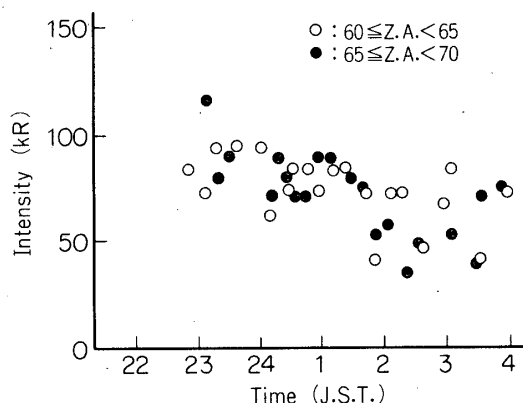
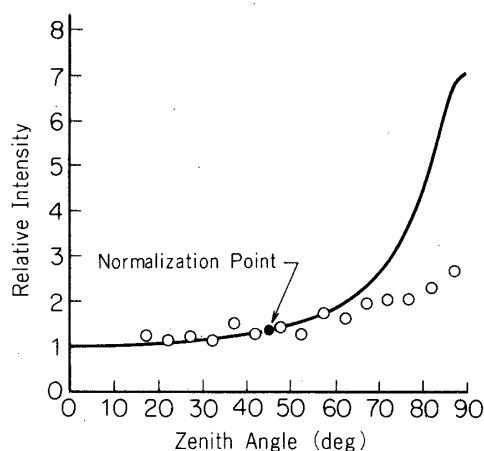


図9 Altitude Distribution

図10 Time Variation of $O_2(1.27\mu)$ 図11 Zenith Angle Distribution of $O_2(1.27\mu)$

4. 討 論

4.1 OH emission

4.1.1. 時間変化

OHの夜間における変化においてはGattiger [11] Shimazaki and Laird [12] のモデルによると twilight での増加の後に日の出まで減少することが言われている。我々の data も図5に示すようにその傾向としては一致している。一方その変化の大きさについては夜間の5時間を比べると我々の data は約30%に減少しているが、Shimazaki and Laird [12] では70~80%, Gattiger [11] は twilight enhancement がおさまるとあとはほとんど一定であってこの点ではかなりくい違ふ。両者とも OH^* の生成機構は $O_3 + H \rightarrow OH^* + O_2$ が main であるとしている。また光電管領域ではあるが Nakamura [13] によると我々のような単調減少が見られるのは夏期では25%の頻度である。我々の傾向が偶然見られたのかあるいはつねに一定減少を見せるのかをチェックする必要がある。但し大気のエディ拡散を考慮しない Hunt [14] の計算によるとこの変化は単調減少でかつ強度も40~50%に減ることが期待される。

4.1.2. 高度分布

Gattinifer [11] Shimazaki and Laird [12] とともにOH層の高さはピーク80~85km 厚さ10~20kmを出している。我々の data は図4のようにピーク85~90km 厚さ10kmであって model 計算に比べてやや高いあたりに出ている。この違いが OH^* の発生機構が O_3 説ではなく $O_2^* + H \rightarrow OH^* + O$ (Krassovsky [15]) によるものと言われているが、一方 Hess tvedt [16] の計算では OH^* は $O_3 + H \rightarrow OH^* + O_2$ が99%を占めていて高さは88km 厚さ7kmを出しており我々と一致する。

4.1.3. 絶対強度

実験室での黒体炉による較正曲線をもとに絶対強度を求めた。この値を図5の縦軸に示した。Balloonを用いたOHの data としては Gush and Buijs [3] があるが彼らは夜間(23:15~4:00)を平均しておりOH(4-2)を70kRと仮定して他の強度を出している。同

時刻を比べると(7-5, 6-4)/(4-2, 3-1)の値が彼らは1.33我々は1.01である。参考のために各強度をあげておくと我々は(4-2)が78kR(6-4)が80kRで彼らはそれぞれ70kR, 80kRである。

4.1.4. 高度変化

測定高度と強度の関係(図6)によると高度10kmまでは一定の割合でSignalが増し10kmを超えると一定になっている。まず考えられる原因はBalloon上昇に伴うPbS部の冷却による感度上昇である。10kmは図2からPbS温度が約 -20°C であって図3の低温特性を考慮すれば10km以上が一定になることは理解できる。ところが図3にある様にその感度上昇は2~2.5倍であって図6に見られる変化はそれより大きい。これは $\leq 10\text{km}$ の 1.8μ 附近の H_2O の吸収帯によると考えられる。

4.2 $\text{O}_2(1.27\mu)$ emission

4.2.1. 高度分布

夜間の高度測定はEvans et al., [5]の報告している87kmと96kmの2層構造とBishop et al., [4]の90km厚さ26km(但しオーロラが混入している可能性あり)がある。我々のdataはOHが一部入っている難点はあるが90km厚さ10kmである。また薄明光としては例えば名古屋グループ[9]の測定が報告されている。計算ではGattinger [11]が $\text{O} + \text{O} + \text{M} \rightarrow \text{O}_2^* + \text{M}$ がきいているとして高さ約90kmを出している。2層構造を報告しているEvans et al., は上層は上で述べた三体衝突により下層は構造が OH^* を酷似しているため OH^* と同じ機構でつくられると言っている。Gattingerの結果が90kmに出ているのでEvans et al., の2つの層が発生機構の違いを示すものかはわからない。

4.2.2. 吸収

$\text{O}_2(1.27\mu)$ はBalloon高度でもかなり吸収をうける[17]我々はBalloon実験で天頂角分布を得ているので(図11)発生層が90kmとしてその間の吸収を求めてみた。Evans et al., によると高度24kmでの天頂方向の透過度は74%天頂角 45° では60%なのでこの値を仮定して天頂角に対する透過度を求めて図12に示す。実線は $\text{O}_2(1.27\mu)$ を単一のバンドとして発光層との間にある大気量のみに吸収の大きさが依存するとして求めたものである。この曲線とは 70° を超えるところからくい違っているがこれは $\text{O}_2(1.27\mu)$ の共鳴散乱(吸収)を考慮しなければならず、このくい違いについては今後更に検討する。

4.2.3. 絶対強度

絶対強度は各グループ間に相違がある。Balloon高度でも吸収が残っているのでBalloonとRocket間に値が異なることは当然であるが表2に示すように必ずしもそれが原因ではなさそうだ。前節で述べ

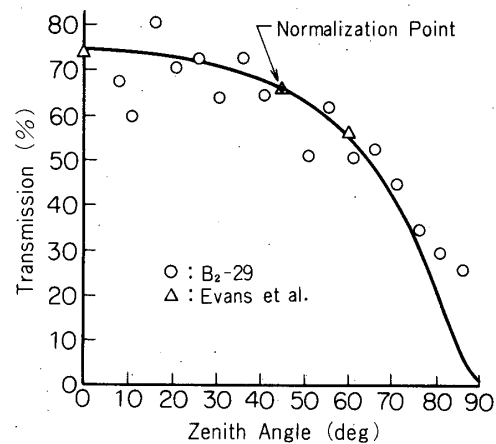


図12 $\text{O}_2(1.27\mu)$ at Balloon Altitude(24 km)

表2. Absolute Intensity of $O_2(1.27\mu)$ in the Night Airglow

Group	Vehicles	Altitude	Intensity	Reference
Bishop et al	Rocket		180 kR	[4]
Evans et al	Rocket		63	[5]
Gush & Buijs	Balloon	24 km	70	[3]
Ours	Balloon	24 km	70	

た吸収を考慮するとGush, Oursとも100 kR近くになりEvansとの差は大きい。Rocket観測は時定数が小さいためS/Nが悪く強度についてはBalloon dataが信用度が高いが吸収・時間変化を考えれば全て許容範囲にあるとも考えられる。また我々のdataはやや減少を示し夜間の5時間の減少が20~30%になっているがこれはGattinger [11]の計算では逆に20%の増加と報告されており違いが大きい。

5. 結 論

OHについてその発生層はこれまでの $\lesssim 1\mu$ の測定と同じく85~90 kmにピークを持つ。これは O_3 説をもとにしたモデル計算よりやや高いが我々の時間変化の様子が O_3 説と傾向が一致するためこの高さの違い及び時間変化の大きさの違いは計算での拡散係数や境界条件の設定及び観測の精度に起因するものと思われる。また夜間の時間変化は一定の割合で減少し続け夜間の5時間で約30%に強度が下がった。測定高度との関係は10 kmを超えるとほとんど吸収がなく、PbS感度の温度特性を考えれば地上からも波長領域が 1.4μ と 1.8μ の H_2O 吸収帯にはさまれたOH(4-2)ふきんは観測可能である。

$O_2(1.27\mu)$ はOHと同じく90 kmに発生層のピークがあり構造もOHとほぼ等しい。この時間変化はOHに比べると小さいが存在する。Balloon高度での強度は平均70 kRでここでの吸収がかなり存在することが天頂角分布の測定から得られた。

6. 謝 辞

Rocket及びBalloon実験でお世話になりました東京大学宇宙航空研究所の方々へ感謝いたします。

1974年7月30日

参 考 文 献

- [1] A. Vallance Jones and H. P. Gush; Nature, 172 496 (1953)
- [2] H. P. Gush and A. Vallance Jones; J. Atmos. Terr. Phys. 7 285 (1955)
- [3] H. P. Gush and H. L. Buijs; Can. J. Phys. 42 1037 (1964)
- [4] R. H. Bishop, K. D. Baker and R. Y. Han; J. Atmos. Terr. Phys. 34 1477 (1972)
- [5] W. F. J. Evans, E. J. Llewellyn and A. Vallance Jones; J. Geophys. Res. 77 4899 (1972)
- [6] D. M. Packer; Ann. Geophys. 17 67 (1961)
- [7] A. Vallance Jones; Sp. Sci. Rev. 15 355 (1973)
- [8] 牧野忠男, 萩原雄介; 宇宙研究所報告 第7巻 130 (1971)

- [9] S. Hayakawa, K. Ito, T. Matsumoto, and T. Nishimura: *J. Geomag. Geoelectr.* 25 281 (1973)
- [10] 萩原雄介; 立教大学修士論文 (1970)
- [11] R. L. Gattinger; *The Radiating Atmosphere*. 51 (1971) Reidel, Dordrecht, Holland.
- [12] T. Shimazaki and A. R. Laird; *J. Geophys. Res.* 75 3221 (1970)
- [13] M. Nakamura; *Rep. Ionosp. Sp. Res.* 15 346 (1961)
- [14] B. G. Hunt; *J. Geophys. Res.* 71 1385 (1966)
- [15] V. I. Krassovsky; *Ann. Geophys.* 14 395 (1958)
- [16] E. Hesstvedt; *Geophys. Norv.* 27 1 (1968)
- [17] W. F. J. Evans, H. C. Wood, and E. J. Llewellyn; *Can. J. Phys.* 48 747 (1970)