

S-520-4号機による  
中間紫外大気散乱光観測とオゾン密度\*

鈴木勝久\*\*・小川利紘\*\*\*

(1982年7月22日受理)

Spectroscopic Observation of the Middle Ultraviolet  
Earth Albedo by S-520-4 Rocket  
and Mesospheric Ozone Density Profile

By

Katsuhisa SUZUKI and Toshihiro OGAWA

**Abstract:** The ozone Hartley absorption band in the middle ultraviolet range is commonly adopted for the ozone measurement by rocket and satellite observations. In Japan, since 1965 the ozone absorption in the solar ultraviolet radiation has been observed by rocket-borne uv photometers. On the other hand the spectroscopic measurements of the scattered solar ultraviolet radiation from the terrestrial atmosphere will be performed by the EXOS-C satellite which will be launched in 1984. We tested the spectrometer for this satellite experiment by S-520-4 rocket launched on 5 September 1981. This instrument observed the scattered radiation of 2500 Å~3300 Å and the visible earth albedo of 4030 Å. The spectrometer is consisted of a concave grating and has about 10 Å wavelength resolution. A photomultiplier having a Cs-Te photocathode is used as a uv detector. The visible albedo is measured by a photometer consisting of an interference filter and a phototube.

We estimated the atmospheric ozone profile, comparing the uv

---

\* 宇宙科学研究所特別事業費による論文

\*\* 東京大学理学部地球物理研究施設

\*\*\* 宇宙科学研究所惑星研究系客員部門助教授

spectrum obtained by this experiment with the model calculations. The estimated ozone density profile higher than 30 km altitude has good agreement with the profile obtained by the previous uv photometer experiments at Uchinoura. There are differences between the observed spectrum and the calculated one in  $\leq 2600 \text{ \AA}$  and  $\geq 3100 \text{ \AA}$ . We can explain them by the effect of Mie scattering and the uv stray light. In the present experiment we could successfully test the functions of the instrument in the space.

rocket, spectrometer, solar ultraviolet radiation, earth albedo, ozone

### 概 要

中間紫外域に存在するオゾンハートレー吸収帯を利用したオゾンの定量はロケット・衛星観測で広く行なわれている。我国においても1965年以来、この波長域の太陽光のオゾンによる吸収をロケットに搭載した光電受光器で観測している。一方1984年打ち上げが予定されているEXOS-Cに分光器を搭載して、この波長域の地球大気散乱光を分光観測することが計画されている。1981年9月5日S-520-4号機により、衛星搭載用の分光器の試験を行なった。この装置で $2500 \text{ \AA} \sim 3300 \text{ \AA}$ の太陽紫外光の地球大気による散乱光と $4030 \text{ \AA}$ の可視散乱光を測定した。分光器は凹面回折格子を用い、波長分解能は約 $10 \text{ \AA}$ である。検出器にはC<sub>s</sub>-T<sub>1</sub>光電面の光電子増倍管を用いた。一方可視散乱光は干渉フィルターと光電管を用いて測定した。

得られた紫外光のスペクトルとモデル計算による値を比較し、オゾン密度の定量を行なった。今回得られた散乱光の強度から推定されるオゾン密度分布は高度30 km以上で、従来内之浦で行なわれた光電受光器による観測結果とほぼ一致した。スペクトル強度について、 $2600 \text{ \AA}$ 以下と $3100 \text{ \AA}$ 以上で実測値と計算値に違いが見られた。これはミー散乱及び紫外光の迷光の影響と考えると説明できる。今回の実験で飛行時における分光器及び検出器の性能が確認できた。

### 1. はじめに

中間紫外域に存在するオゾンハートレー吸収帯( $2300 \text{ \AA} \sim 3000 \text{ \AA}$ )を利用したオゾンの定量はロケット・衛星観測で広く行なわれている。我国においては1965年以来、この波長域の太陽光のオゾンによる吸収をロケットに搭載した光電受光器で観測し、これにより高度35 km以上のオゾン密度分布を求めている[1]。

一方分光器を用い大気圏外から、この波長域の大気アルベドを観測し、オゾン全量と高

度分布を求める手法が有り、米国の NIMBUS 衛星で観測が実施されている[2]。我国においても1975年に打ち上げられた「太陽」による光電受光器の観測[3]、[4]をふまえ、1984年に打ち上げが予定されている EXOS-C において、分光器を搭載して観測を行なうことが計画されている。

分光器を用いた観測の特徴は、光電受光器に比較し、多くの波長情報を得ることができると共に、観測に際して迷光となる可視光の影響を除却するのに有利である点である。地球アルベド中の可視光の強度は2500Å付近のその10<sup>4</sup>程度大きいので、精密なオゾン定量にとって迷光の除去は重要な問題である。

この衛星搭載用の分光器の性能テストのため、1981年9月5日、S-520-4号機により実験を行ない、地球大気散乱光のスペクトルを得た。以下この観測とデータ解析について報告する。

## 2. 観測装置

### 2.1. 紫外分光器

観測装置の光学系を図1に示す。回折格子には凹面のホログラフィックグレーティングを用いた。このためコリメーター・カメラ鏡がいらす、機器の軽量・小型化が可能となった。この分光器の仕様について表1に示す。光軸はロケット軸から100°でとり付けられている。波長掃引は回折格子の支持台に固定してあるレバーをカム機構を用いて、周期的に振り回折格子を約6°回転させることにより行なう。周期は約1.2秒である。

### 2.2. 検出器及び電気回路

紫外線検出器にはCs-T<sub>e</sub>光電面の光電子増倍管を用い、出力をA/D変換し、8bit・256データとしてメモリーに記録する。1回の波長掃引が終了すると順次読み出され、テレメーターで伝送される。1回の観測及びデータ伝送に用する時間は約2.6秒である。

### 2.3. 可視光用光電受光器

紫外散乱光のスペクトルを分光器で得ると同時に、干渉フィルターと光電管を用いた

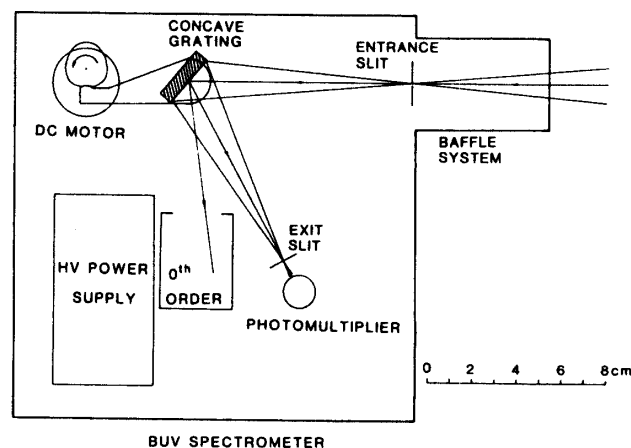


図1 分光器の光学系

光電受光器でアルベドの観測を行なった。これは分光器の光軸と同一方向の光軸を持ち、視野もほぼ同じにしてある。可視地球アルベドを測定することにより、雲などによるアルベド強度の変化をモニターし、紫外スペクトル観測にどのように影響するかを調べることを目的としている。またこのデータから分光器の視線方向が地球上をどのようによぎるか求めることができる。今回の観測ではこれがロケットの姿勢を推定するうえでも有効であった。光電受光器の仕様については表1に示す。装置の外観とロケットに組み込まれたところを写真1, 2で示す。

この観測装置で得られた水銀放電管及び重水素放電管のスペクトルが図2である。重水素の連続光・水銀のラインスペクトルがそれぞれ観測されている。分解能は約  $10 \text{ \AA}$  である。光学系及び検出器の絶対波長感度については、放射束の絶対値が較正されている重水素ランプ (Optronic Laboratories, Model UV-40) を用いて行なった。

表 1

紫外分光器	
回折格子：25mm×25mm, 1200本/mm	分散： $80 \text{ \AA}/\text{mm}$
スリット：60 $\mu$ ×10mm	視野：11.5×11.5°
検出器：R427	
可視光電受光器	
干渉フィルター： $\lambda_0 = 4030 \text{ \AA}$ $\Delta\lambda = 170 \text{ \AA}$ $T_{\max} = 35\%$	視野レンズ：f = 27.0mm 受光面積：5 mm $\phi$ 視野：12.5°(全角) 検出器：R414

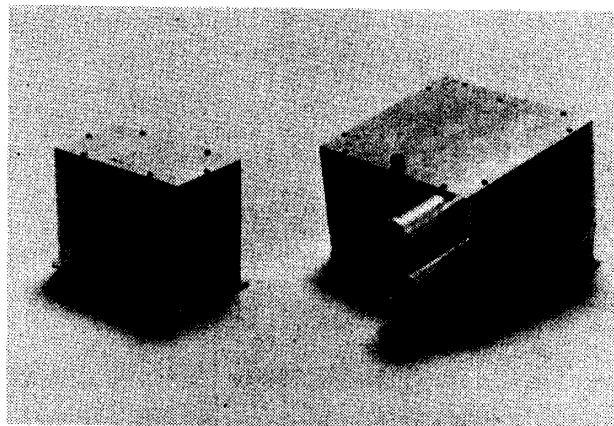


写真1 分光器及び光電受光器の外観(右)  
2本のフードは上が光電受光器用、下が分光器用  
左は電気部

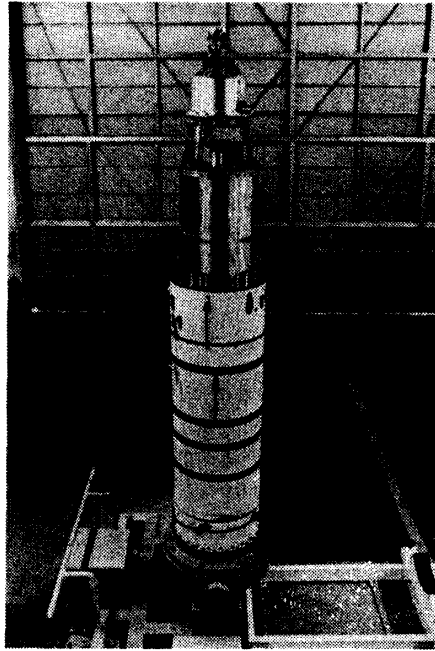


写真2 ロケットに組みこまれたところ  
プロテクター板に窓をあけ、光を取り入れている

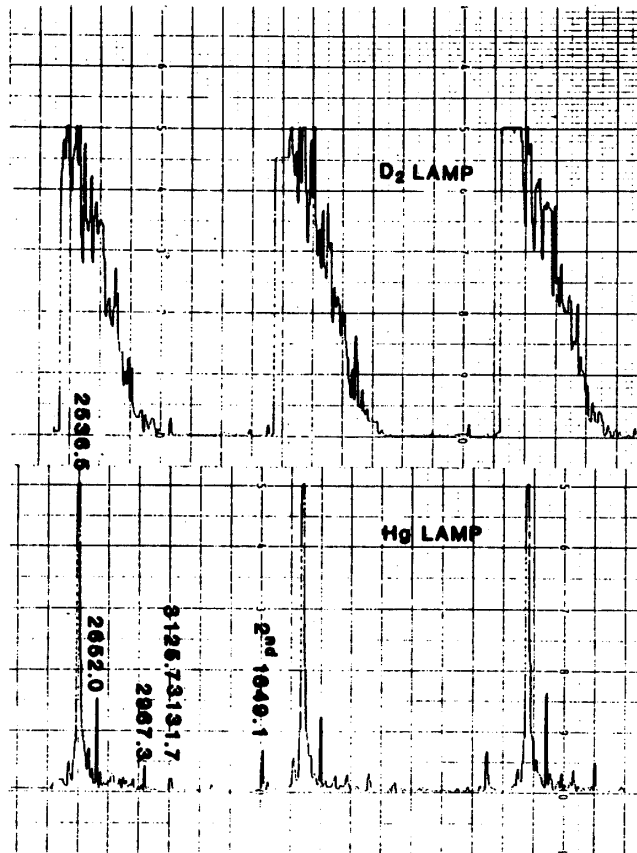


図2 観測器で得られたスペクトルの例

### 3. 観 測

S-520-4号機は1981年9月5日10:00(JST)に打ち上げられた。打ち上げ後58秒で光電子増倍管に高電圧を印加した。以後分光器及び光電受光器は正常に動作し、着水までデータを得た。得られた生データの一部を図3に示す。分光器の波長掃引の周期はロケットスピンと非同期のため、掃引中に常に分光器の視野に地球が入っているとは限らない。光電受光器の出力との対応から、個々の観測にあたって、ある波長の出力が地球方向のどの部分のものであるかが分る。後に述べるように、解析に用いたスペクトルは分光器の視野が地球中心方向にもっとも近い時刻に対応する波長のデータを集め、合成して作った。一方EXOS-C衛星はノンスピンタイプで、分光器のとりつけられている面は常に太陽と反対方向を向いている。このため分光器が地表からの散乱光を観測中(1回の波長掃引時間は約1秒)、視線方向の変化は無視でき1回の波長掃引で同一方向からのスペクトルを得ることができる。

### 4. ロケット姿勢

通常地磁気センサーと太陽センサーにより、基準方向(磁力線と太陽方向)とロケット軸の角度が求まりロケットの姿勢が決定される。しかし今回太陽センサーの出力が得られ

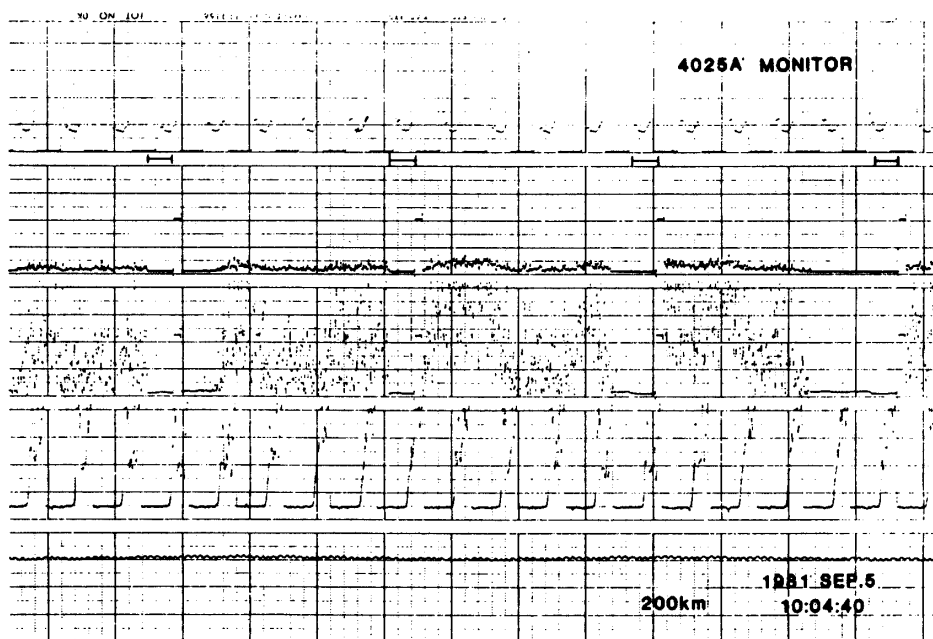


図3 生データの一部

最上段：可視光電受光器の出力、地表面と宇宙空間(0レベル)  
を交互に見ていることが分る

二段目：紫外スペクトルのローゲイン出力

三段目：同ハイゲイン出力

光電受光器出力の下の横線は分光器の観測中を示す

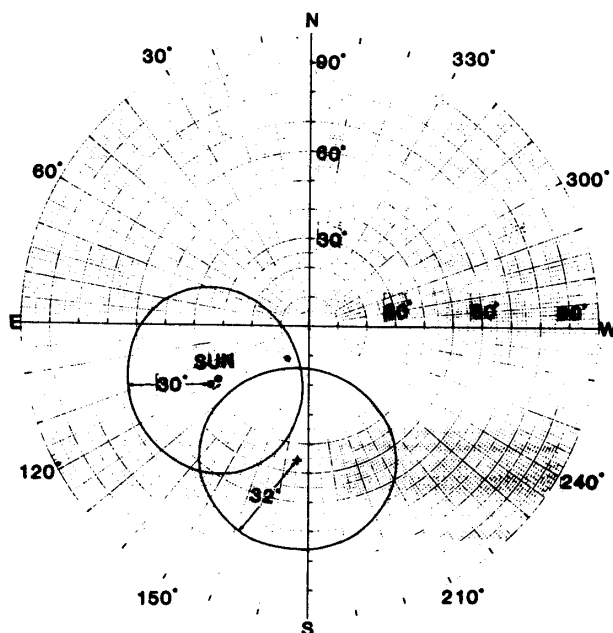


図4 ロケット姿勢解析図

- ：発射時のロケット軸方向
- ＋：磁力線方向

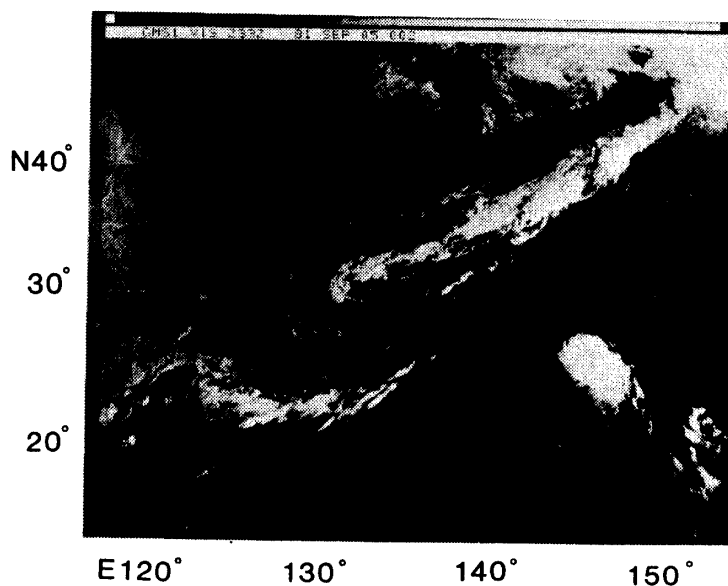


写真3 打ち上げ当日、9:00 JST の日本付近の「ひまわり」による可視画像  
写真中央の白線はロケットの軌跡

ず、太陽角が求められなかった。今回の太陽センサーの光軸はロケット軸から  $90^\circ$  方向を向いており、視野が光軸から  $\pm 60^\circ$  となっているため、ロケット軸から  $30^\circ$  の円錐内がセンサーの死角となる。太陽がこの円錐内に入っていたと考えられる。この状況を示したのが図4である。地磁気とスピン軸のなす角はロケット飛翔中平均  $32^\circ$  でプリセッションは  $\pm 3^\circ$  で姿勢は安定していた。地磁気方向から  $32^\circ$  の円周上で、太陽から  $30^\circ$  の円内の部分のどこかにスピン軸があることが分るがそれ以上のことは決定できない。そこで光電受光器の出力を見ると細かい構造があり、雲の反射光を検出していることが分る(図3)。気象衛星「ひまわり」の当日の可視画像(写真3)から雲の位置を求め、光電受光器の出力パターンとその視線方向が地表付近をよぎる時に雲があった場合に予想されるパターンと比較し、ロケット飛翔時を通じもつとも矛盾のないようにロケットの姿勢を推定した。これによるとスピン軸は地心座標で  $(\theta_z = 20^\circ \sim 30^\circ, AZ = 145^\circ \sim 140^\circ)$  の範囲にあると推定される。

### 5. データ解析

地球大気に入射してくる太陽紫外光は、大気分子のレーリー散乱により上方に再放射されるが、その際大気中に存在するオゾンにより吸収を受ける。これらの諸量について図5に示す。単散乱を仮定すると上方に放射される太陽光の強度は次のように書ける。

$$I(\lambda) = \frac{3}{16\pi} (1 + \cos^2 \theta) \int_0^\infty k_R(\lambda) F_0(\lambda) e^{-\tau} dz \sec \theta \quad (1)$$

$$\tau = \int_z^\infty k(\sec \chi + \sec \theta) dz \quad (2)$$

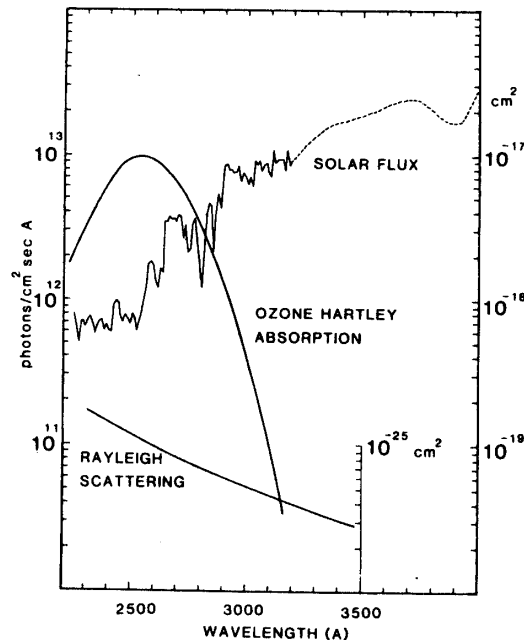


図5 モデル計算に用いた数値

レーリー散乱の断面積は  $10^{-25} \text{cm}^2$  のスケール



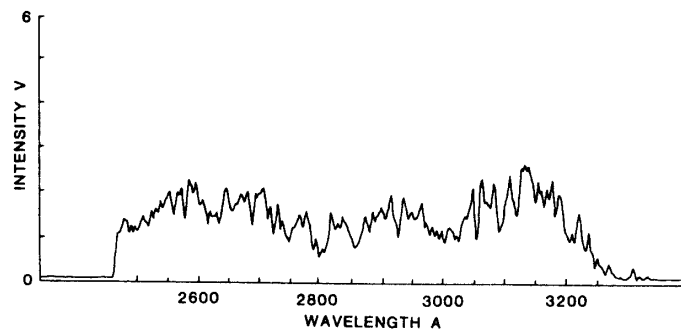


図6 観測された散乱光のスペクトル

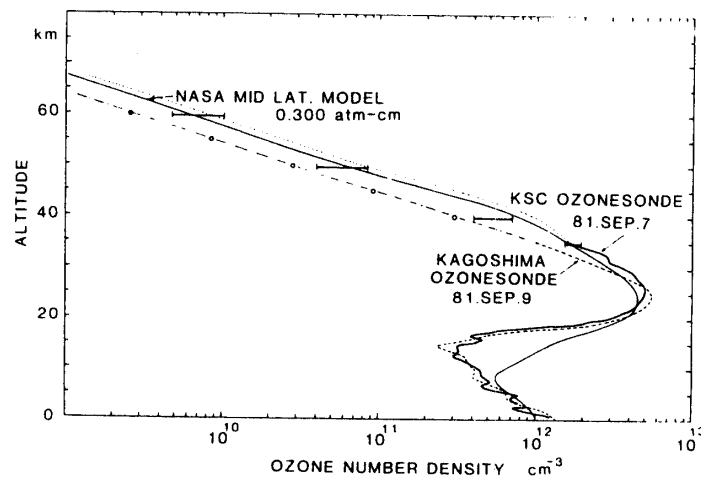


図7 計算に用いたオゾン密度分布

横線は内之浦でのロケット観測によるデータの範囲を示す  
オゾンゾンデによる観測は35 km 以下

$F_0$ : 太陽輻射束,  $\Theta$ : 入射光と散乱光のなす角,  $\chi$ : 太陽天頂角,  $\theta$ : 視線方向の天頂距離,  $k_R$ : レーリー散乱係数,  $k$ : オゾン吸収係数 +  $k_R$

ここではエアロゾルの散乱は無視する。(1)式を計算するに当たって, 大気密度分布及びオゾン密度分布が必要である。今回の計算には US 標準大気を用いた。また太陽紫外線輻射については, Broadfoot による実測値を用いた[5]。

観測の項で述べたように, 今回の実験では同一方向からの散乱光のスペクトルを1回の掃引で得ることができない。そこで観測波長域を三つに分け, もっとも地球中心に近い方向を向いた時に観測した各波長域のデータを集め全波長域のスペクトルを作った。得られたスペクトルを図6に示す。データは15個のデータの平均値である。厳密には三分割した波長域内でも視線方向は若干異なっていることに注意しなければならない。

観測値と比較するためのモデル計算では次の三つのオゾンモデルを仮定した(図7)。

- (1) NASA 中緯度モデル (全量 0.300 atm-cm)。

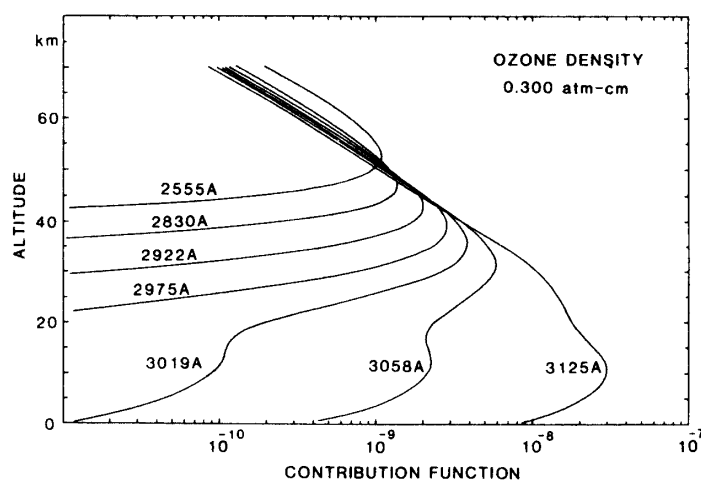


図8 被積分関数の高度プロファイル  
オゾンモデルは NASA のモデルを用いた

- (2) UCHINOURA モデル：高度 35 km までは 1981 年 9 月 7 日の内之浦でのオゾンゾンデの実測値。35 km 以上では NASA モデルの 30% 増。
- (3) KAGOSHIMA モデル：1981 年 9 月 9 日の鹿児島でのオゾンゾンデの実測値。35 km 以上では NASA モデルと同じスケールハイトで外挿した値。NASA モデルのほぼ 1/3。

内之浦での従来のロケット観測による観測値の範囲を同じく図7に横線で示した。これによると今回のモデル(1)(2)は高度 40 km 付近で内之浦のロケット観測の値より大きい、その他の高度では実測値の範囲に入っている。

通常は(1)式の被積分関数は図8のようになり、波長により積分に寄与する高度が異なる。このことを利用してオゾン吸収帯のいくつかの波長で散乱光を測定することによりオゾン密度の高度分布を求めることができる。このようにオゾン密度を未知量として、散乱光の強度からオゾン密度を求める方法が開発されている[6]。今回の解析ではオゾン密度を仮定して計算を行ない、予想される値と実測値の比較からオゾン密度を推定した。

## 6. 討論と結論

各々のオゾン密度モデルを用いて計算した散乱光の強度を図9に示す。計算値では実測値の単位に合わせるため、観測器の絶対波長感度で補正し、さらに分光器の波長分解能に合わせてある。ロケットの姿勢については、天頂角が 20° と 30° の場合について計算した。図8から分るように、今回の測定した波長域の散乱光の強度変化については、高度 30 km 付近から上のオゾン密度の変化にセンシティブである。このため計算値と実測値を比較する方法では、この高度のオゾン密度が精度よく求められるものと考えられる。実測値と比較してみるとモデル(3)とは大きくく違っているが、モデル(1)の 30° とモデル(2)の 20° の値と全体的な一致はよい。この結果、高度 30 km 以上では、観測当日のオゾン密度分布としてほぼ内之浦の実測値の上限に近い分布であったと考えられる。

しかし 2600 Å 以下と 3100 Å 以上ではこの計算値が2倍程度大きくなっている。長波長側の相違については、計算値が2次以上の散乱の効果及びミー散乱による効果を考慮に入れなかったことで定性的に説明できる。この効果は散乱光強度を大きくし、特に長波長側で大きい。しかし短波長側についてはこれでは説明できない。可能性があるのは迷光であり、それが短波長側で影響を与えたということである。しかし地上試験の時、可視光の迷

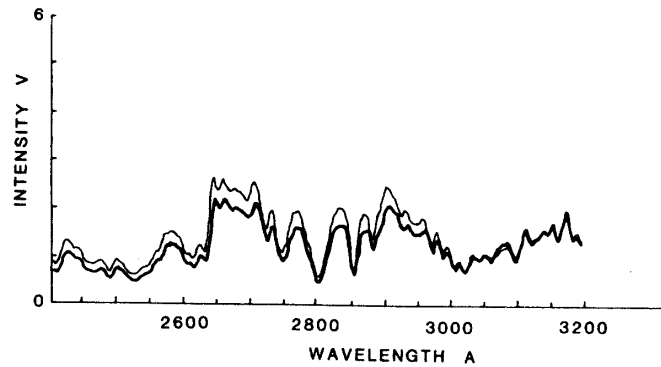


図9(a) 図7のオゾンモデル(1)を用いて計算したスペクトル強度  
太線はロケット姿勢 30°, 細線は 20° を仮定した値

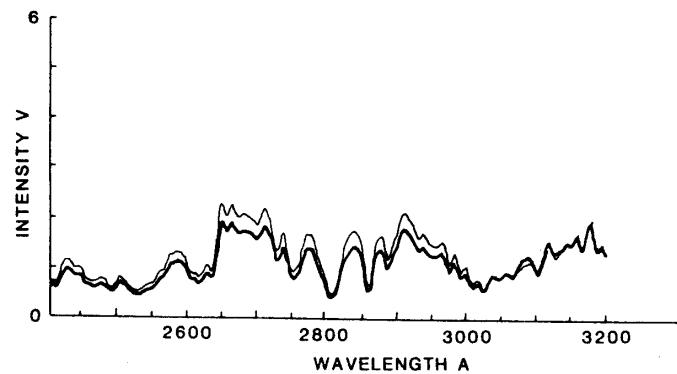


図9(b) オゾンモデル(2)による

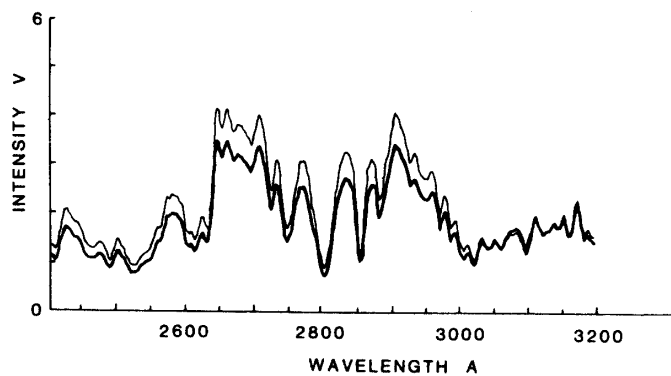


図9(c) オゾンモデル(3)による

光のチェックを行ない、ほとんど影響のないことが確認されている。また可視光電受光器が雲からの反射と思われる、強い光を観測した時でもスペクトルにはそのような強度変化が見られず、可視迷光ではないと思われる。そのため 3000 Å 以下の紫外の迷光の寄与であることが考えられる。

今回のロケット実験で以下のことが結論される。

- (1) ロケット飛翔中での分光器及び検出器の機能が、地上試験の結果と変わらないことが、確認できた。
- (2) 得られたスペクトルから、高度 30~60 km のオゾン密度の推定を行なったところ、従来之内浦でロケット観測で求めた値とほぼ一致した。
- (3) 2600 Å 以下で迷光と思われる影響があらわれた。衛星搭載用にはさらに迷光の除去の徹底について考慮する必要がある。

## 7. 謝 辞

データ解析に際して、郵政省電波研究所有賀規氏には NASA のオゾンモデルをデータを、また名古屋大学空電研究所近藤豊氏には内之浦でのオゾンゾンデのデータを提供していただきました。ここで感謝の意を表します。

## 参 考 文 献

- [ 1 ] T. Watanabe and T. Tohmatsu, Rep. Ionos. Space Res. Japan, **30**, 47, 1976.
- [ 2 ] D. F. Heath, C. L. Mateer and A. J. Krueger, Pure and Appl. Geophys., **106-108**, 1238, 1973.
- [ 3 ] T. Tohmatsu, K. Suzuki and T. Ogawa, J. Geomag. Geoelectr., **27**, 295, 1975.
- [ 4 ] 田中基彦, 鈴木勝久, 小川利紘, 東京大学宇宙航空研究所報告, **14**, 887, 1978.
- [ 5 ] A. L. Broadfoot, Astrophys. J. **173**, 681, 1972.
- [ 6 ] T. Aruga and T. Igarashi, Appl. Opt., **15**, 261, 1976.