

「たいよう」衛星による中間紫外散乱光の観測*

田中 基彦**・鈴木 勝久**・小川 利紘**

Observation of the Middle Ultraviolet Albedo by the Satellite TAIYO
By
Motohiko TANAKA, Katsuhisa SUZUKI and Toshihiro OGAWA

ABSTRACT: The middle ultraviolet radiation scattered from the upper atmosphere was observed by the satellite TAIYO. The solar middle ultraviolet radiation is absorbed strongly by atmospheric ozone. The observations were performed by the filter photometers at the two wavelength bands (2550Å and 2900Å). Limb brightening features of the middle ultraviolet earth albedo were observed. Also irregular intensity variations were observed occasionally. The observed data make a good agreement with model calculations. The result of the data analysis implies that the zone density at the altitudes of 40~50 km has a seasonal variation and a longitudinal variation whose scale is about 40 degrees.

概 要

「たいよう」衛星により中間紫外散乱光の観測が行われた。そのデータ解析の結果について報告する。地球上層大気によって散乱される太陽中間紫外線は、大気への入射時と散乱時にオゾンにより強い吸収を受ける。この散乱光を衛星から観測中心波長 2550 Å と 2900 Å のフォトメータで観測した。おおむね観測例は地球中心方向の強度が小さく端で大きいリム・ブライティングの様子を示したが、不規則な強度変化を示す観測例も得られた。観測結果は、モデル計算による中間紫外線の強度変化とよい一致を示した。また、この解析から中緯度地方の高度 40 ~ 50 km 付近のオゾン密度に季節変化と経度方向にそって 40 度程度のスケールの変化があることが分かった。

1. はじめに

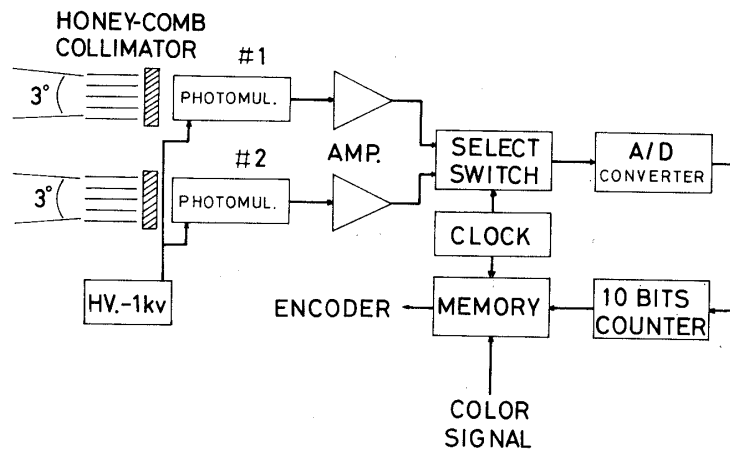
熱圏のエロノミー観測を主目的とする第 3 号科学衛星「たいよう」は 1975 年 2 月 24 日、

* 宇宙航空研究所特別事業費による論文

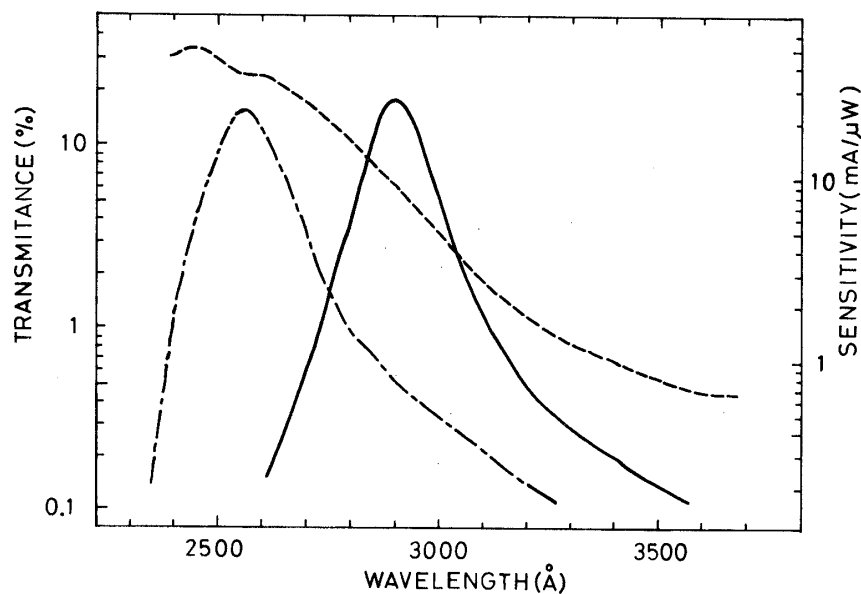
** 東京大学理学部地球物理研究施設

M-3C-2号機によって打ち上げられた。観測項目の一つとして、真空紫外域から中間紫外域にかけて6波長での地球大気からの放射強度を測定するフォトメーターが搭載されている。ここではそのうちの中間紫外散乱光の観測結果について報告する。

太陽の中間紫外放射は、地球大気に入射し散乱される過程で大気中のオゾン層によって強い吸収を受ける。従来もロケット・衛星によりこの吸収量をはかりオゾンの定量を行ってきた。[1], [2] 今回の観測原理はこれと変わらないが、衛星による観測なのでほぼ 31° Sから 31° Nの緯度範囲が観測可能で中低緯度のオゾンに関する情報が得られている。



第1図 中間紫外散乱光測光器のブロック図



第2図 フィルターの透過率と光電子増倍管の感度特性 ・ 透過率は左側の目盛、感度は右側の目盛

2. 観測装置

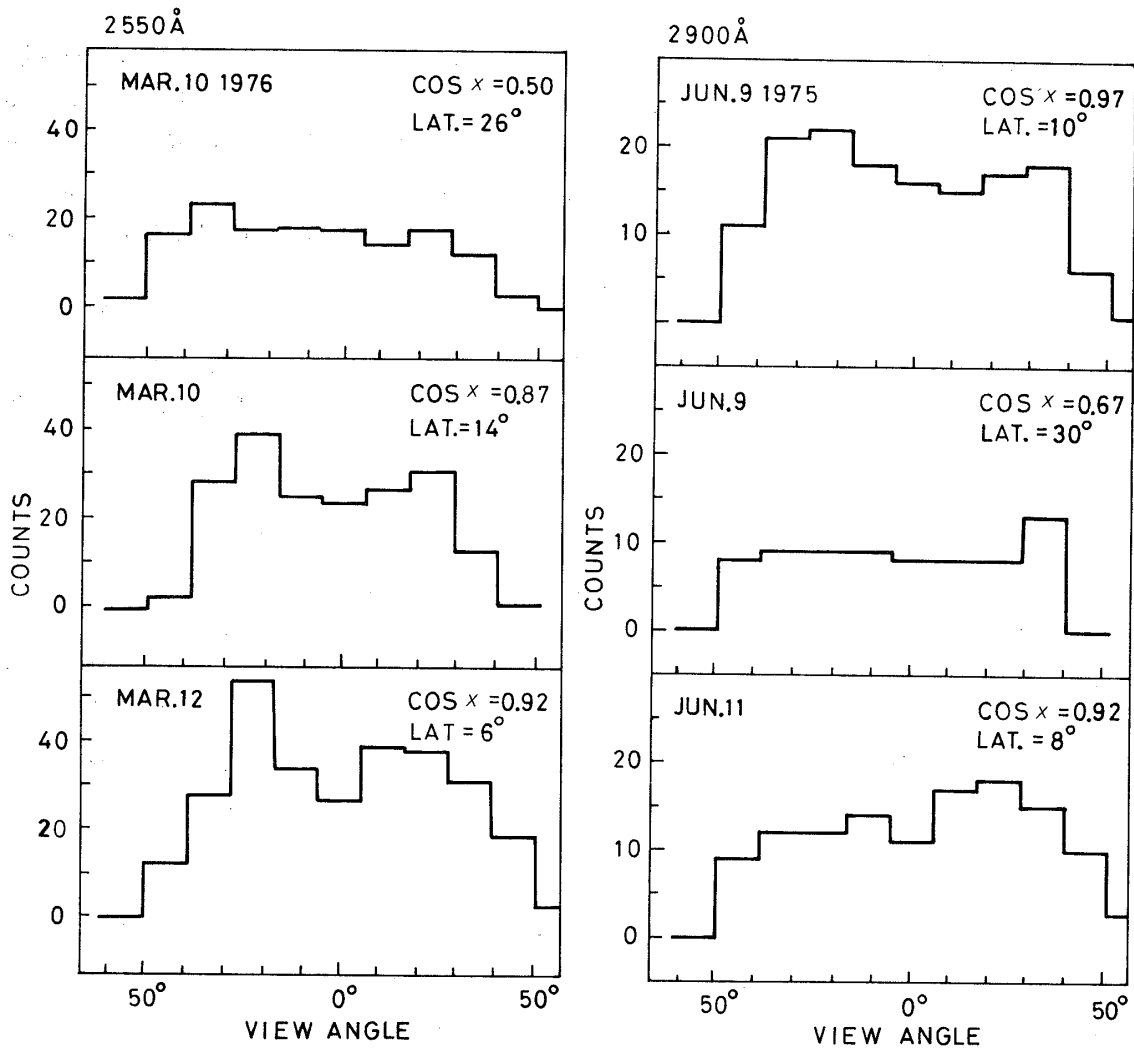
観測器の詳細についてはすでに報告がなされているので、[3]ここでは今回のデータ解析を行った中間紫外線の検出器について簡単に述べる。バンドパス・フィルターとして干渉フィルターを用い、紫外線の検出は紫外用光電子増倍管 (HTV - R 431 S) を用いた。観測器の視野は全角 3° の円形である。観測は2波長について行い、それぞれ中心波長は 2550 \AA および 2900 \AA である。第1図に観測器のブロック図を示した。また、使用した干渉フィルターの透過率及び光電子増倍管の感度を第2図に示した。

打ち上げ後のフォトメーターの感度の経年変化は、太陽の紫外線の輻射を用いて調べることができる。フォトメーターに入射する太陽紫外線の散乱光の強度は、フォトメーターの光軸と太陽方向のなす角に依存する。観測の行われた一年半について、角度変化による太陽散乱光の出力の変化を調べたが、感度の時間的变化は認められなかった。

3. 観測結果

打ち上げ後約1カ月して、観測器の高圧電源を投入し観測態勢に入った。データが得られたのは1975年3月から1976年10月までの期間である。衛星のスピンの軸は、衛星の軌道面に垂直になるように制御されている[4]。また、フォトメーターの光軸は衛星のスピンの軸に直角にとりつけられているので、その結果観測方向は軌道面上にそった大円である。1スピンのうち地球を観測する範囲は衛星の高度によって変化するが、スピンの軸まわりの角度で $90^\circ \sim 140^\circ$ である。データ・サンプリングは1スピンを32分割した32方位について行う。観測されたデータは色信号、方位信号と共に一時衛星に搭載されたメモリーにたくわえられ、1スピンの観測が終了した後、4秒に1方位の割合で伝送される。この観測が順次6波長について行われる。6波長についての観測とデータ伝送に要する時間は約800秒である。

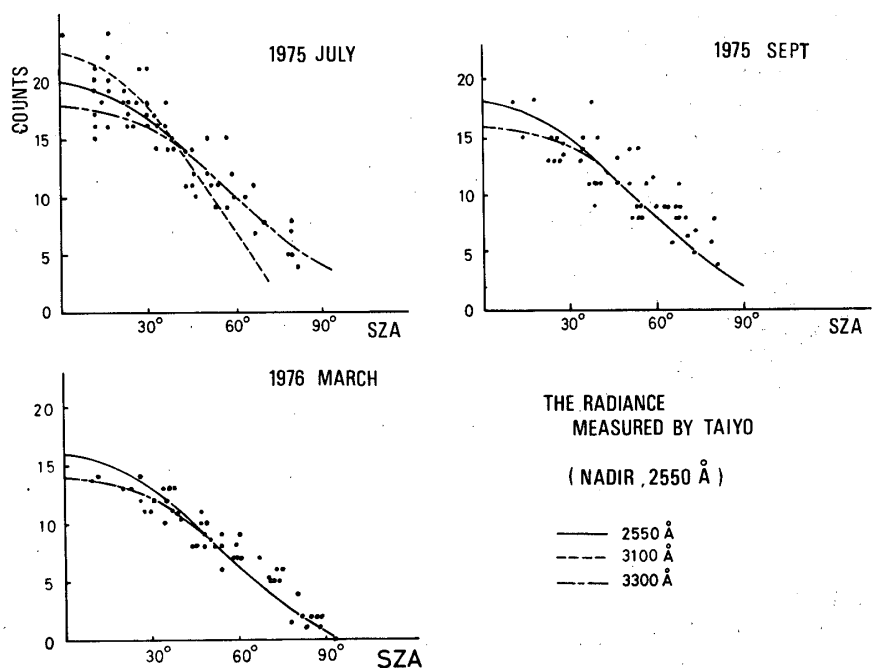
第3図に今回得られた中間紫外散乱光の観測例について示す。横軸は衛星の回転角で 0° は衛星から見た地球中心の方向である。縦軸は散乱光の強度でカウント数で示してある。ゼロがバック・グラウンドのレベルである。1カウントは絶対強度にしてそれぞれ $5.9 \times 10^7 \text{ photons/cm}^2 \text{ sec}$ (2550 \AA)、 $2.4 \times 10^9 \text{ photons/cm}^2 \text{ sec}$ (2900 \AA) に相当する。昼間時には地球の両端で強度が増すリム・ブライティングの現象が見られる。これは端では紫外線の散乱層を斜めに見ることになり、散乱層の厚みが増すことによる。一方地心方向はそれに比べ強度が小さくなっている。しかし、観測例の中には両端以外の部分にも強度の山が見られるような例も得られており、これらの解釈については討論のところで行う。次に地心方向の強度の太陽天頂角依存性について調べた(第4図)。データは比較的観測が集中して行われた3カ月について示した。衛星の軌道の関係のため、観測月により観測地域はほぼ限定される。1975年7月はインドから日本・ハワイに至る緯度 30° に沿った地域、9月は日本および北太平洋、1976年3月は南太平洋から南米大陸にわたる地域である。散乱光の強度は太陽天頂角の増加と共に減少している。これは太陽天頂角の変化に伴う太陽光の入射径路の変化に起因している。7月と3月のデータを見ると7月の方が3割ほど強度が大きく季節による違いが見られる。次に気象衛星 NOAA の可視光での観測と比較してみた。二つの衛星がほぼ同一時間に同じ地域を観測している例は少数であるが、7月25日と



第3図 (a), (b) 大気紫外散乱光の強度分布. x は太陽天頂角. LAT. は衛星の緯度.

26日の例を第5図に示す. 図はこの日「たいよう」が観測した地域の写真で, その地域は日本を中心とする北緯 $10^{\circ} \sim 45^{\circ}$, 東経 $100^{\circ} \sim 160^{\circ}$ の地域である. 左側1/3が中国大陸, 中央上方に日本がある. 白く写っている部分は雲で黒く写っている部分は雲のない海上または陸上で可視光の反射の小さい部分である. 図中に書きこまれた数字は「たいよう」の観測値である. カウント数は雲のあるところで大きく, 雲のないところで小さくなっている.

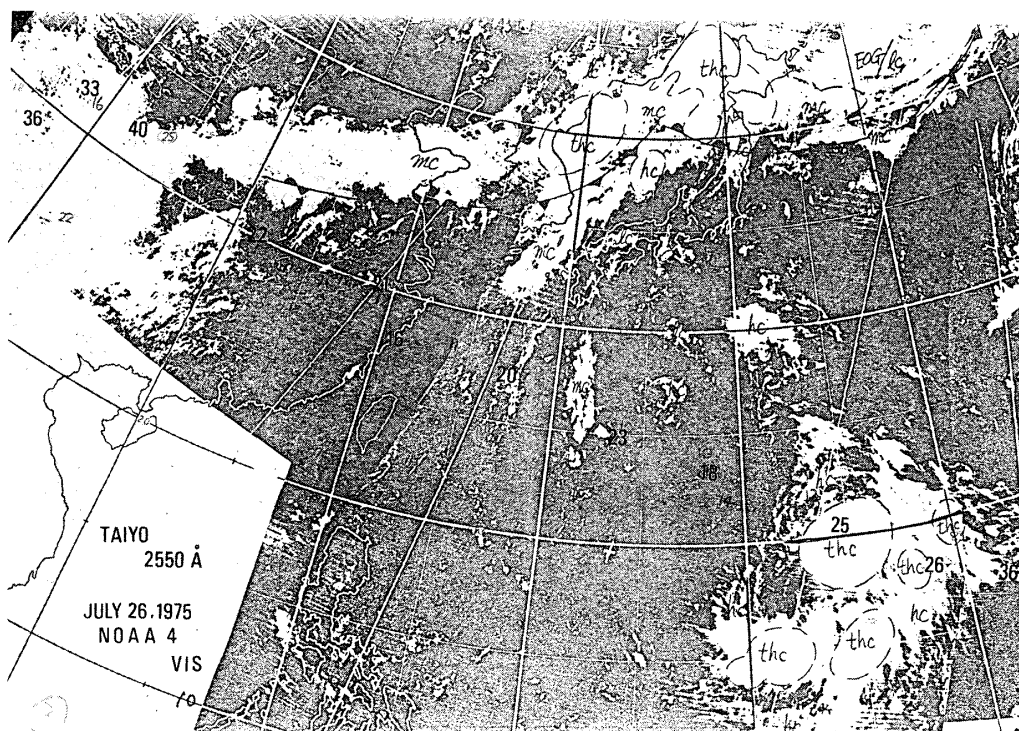
次に, 経度方向にそって散乱強度がどのように変化しているか第6図に示した. 一般に, 個々のデータの観測条件はローカルタイム, 衛星の緯度・経度, 季節などについて異なっている. これらのパラメータの依存性について一つ一つ統計的に解析するほどデータが得られていない. 1975年7月は観測データが比較的多数得られ第6図の結果が得られた. データは地心方向の強度に限定し緯度についてはほぼ同一地域を見ている. 観測値は第4図の結果を用いて太陽天頂角が 0° の場合に引き直してある. これを見るとほぼ同緯度にそって, 経



第4図 散乱光強度の太陽天頂角依存性. 曲線はモデル計算の値.

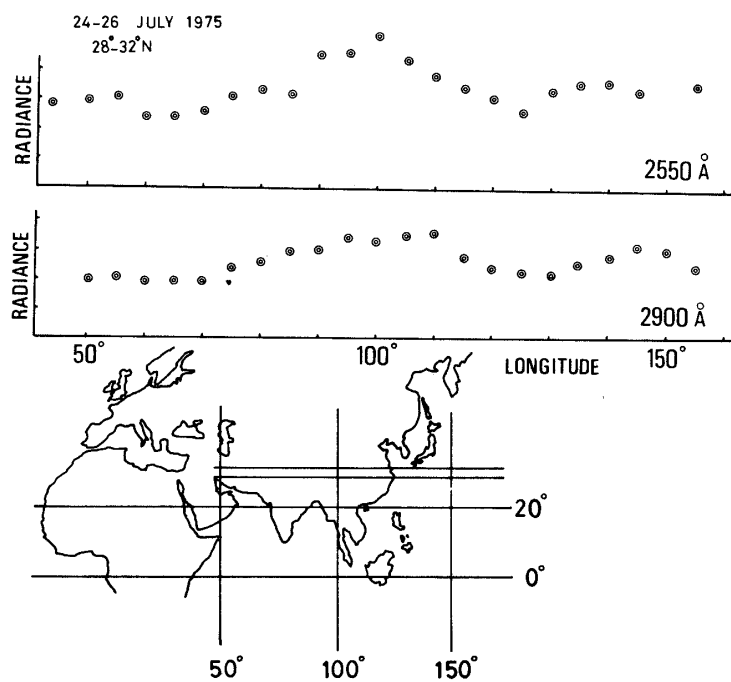


(a)

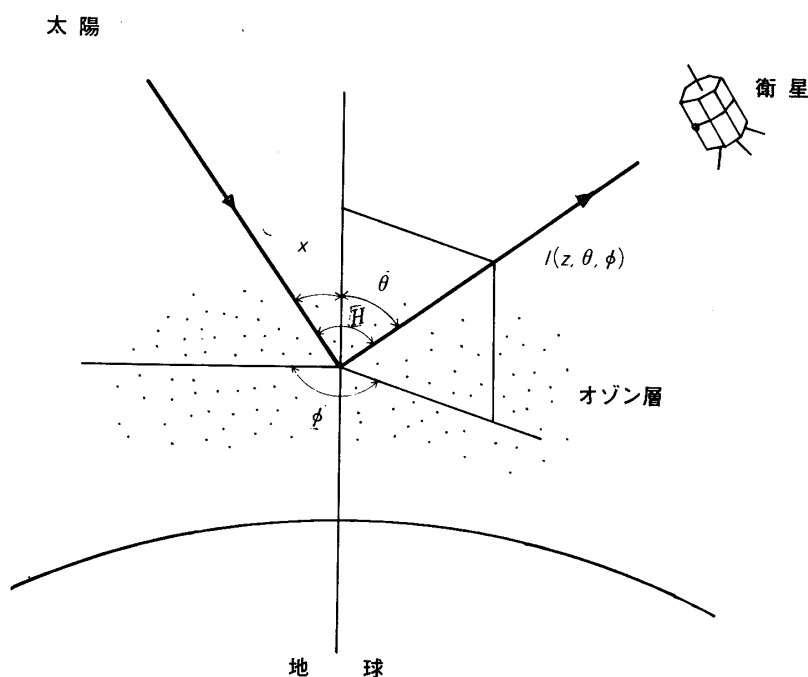


(b)

第5図 (a), (b) NOAAによる衛星写真. 図中の数字はフォトメータで得られた強度



第6図 緯度方向にそった強度変化



第7図

度にして 50° 程度のスケールの変動があるように見える。一方緯度方向についての変化であるが赤道をはさんで南北 30° の範囲に観測地域が限られていることと、短期間では緯度方向にそった観測が衛星の軌道の関係でできないので緯度依存性についてははっきりした傾向は見いだせなかった。

4. 考 論

太陽中間紫外線の放射強度は次の放射伝達の式を満たす

$$\cos\theta \frac{\partial I}{\partial z} = -kI + \int P(\theta) k_R I(z, \theta', \phi') d\Omega' \quad (1)$$

ここで $k = k_R + k_{O_3}$

$k_R = \sigma_R n_M(z)$: Rayleigh 散乱係数

$k_{O_3} = \sigma_{O_3} n_{O_3}(z)$: オゾン解離吸収係数

n_M : 中性大気密度

n_{O_3} : オゾン密度

$P(\theta) = 3(1 + \cos^2\theta)/16\pi$

入射光と散乱光の幾何学的関係は第7図に示した。各波長について(1)式が成立し光学的厚みが薄いと考えられる波長については1回散乱の近似を用いることができる。その結果

衛星高度における上向きの輻射強度は次のように書くことができる。

$$I(z=\infty) = \int_0^{\infty} [3(1+\cos^2\theta)k_R F \cdot e^{-\tau(x, \theta, z)} / 16\pi] dz \cos\theta \quad (2)$$

(1), (2) 式とも波長に関する添字は省略した。

ここで F : 太陽紫外輻射強度

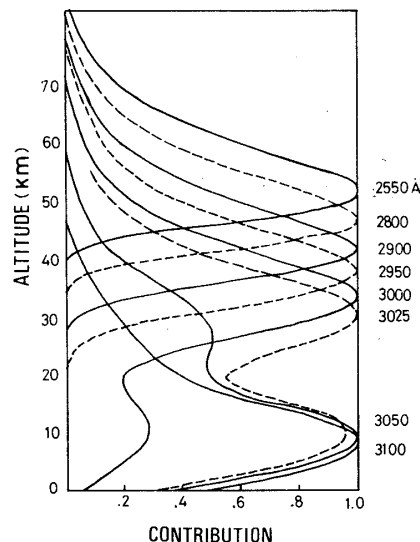
τ : 入射から反射が完了するまでの光路にそった光学的厚み

平行平面近似を用いると $\tau = \int_z^{\infty} k(\sec\chi + \sec\theta) dz$. この近似は波長 3000 Å 以下で良い近似となる. すでに述べた中間紫外線を吸収するオゾンの吸収帯であるハートレー帯はその吸収のピークが 2550 Å 付近にある. そのため波長 3000 Å 以下では大気中のオゾンで完全に吸収を受け地表まで達しない. (2) 式の被積分部分の $k_R e^{-\tau}$ について高度分布を計算してみると第8図のようになる. 積分に最も寄与する高度は 2550 Å と 2900 Å でそれぞれ 55 km, 40 km である. また幅は 20 km 程度である. さらに (2) 式の積分にきいてくる部分で大気密度, オゾン密度は一定のスケールハイトで分布していると近似すると, すなわち

$$n_M(z) = n_M(z_0) \exp\left(\frac{z_0 - z}{H_M}\right)$$

$$n_{O_3}(z) = n_{O_3}(z_0) \exp\left(\frac{z_0 - z}{H_{O_3}}\right)$$

とおくと (2) 式は解析的に積分できて散乱強度は次のように書ける.

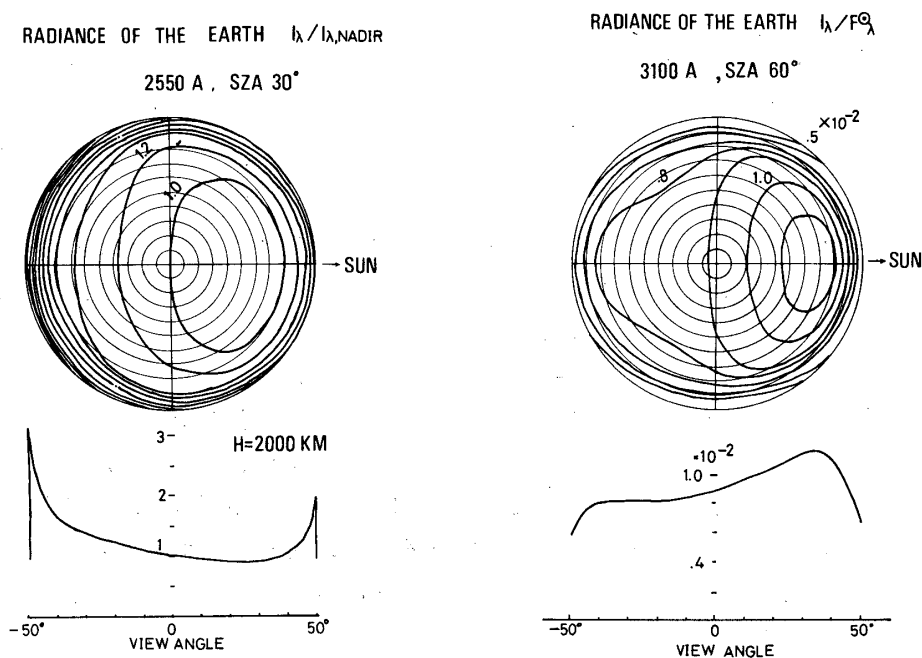


第8図 積分寄与関数の高度分布. ピークの値で規格化してある.

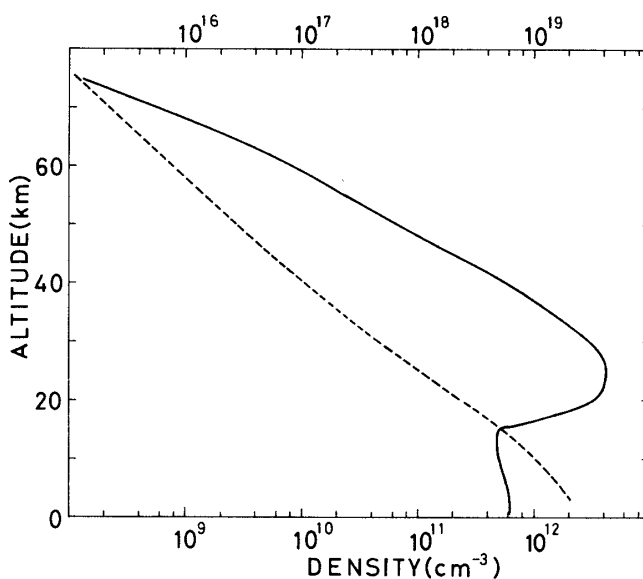
$$I = \frac{3}{16\pi} (1 + \cos^2 \theta) \sigma_{RN} n_M(z_0) F \{ (\sec \chi + \sec \theta) \sigma_{O_3} n_{O_3}(z) H_{O_3} \}^{-r} \Gamma(r) H_{O_3} \sec \theta \quad (3)$$

ここで $r = H_{O_3}/H_M$ である。

(1) 式を用いて $z = \infty$ での輻射強度を計算しそのコンターマップを第9図に示す。計算に用いたオゾン及び大気密度分布は第10図に示す。第9図(a)は波長 2550 Å の計算値で第3図(a)に対応するはずである。両者を比較すると中心部がへこんでいる点はあるが、リムの増加の形が異なっている。観測例では立ち上りが鈍く、計算値では立ち上りが非常に鋭く幅は 5° 以下である。観測器の視野角は 3° でサンプリング間隔は約 11.3° であるのでリムを見るのはたかだか2回である。観測と計算の違いの原因として(1) 視野 3° 外から光を拾っている。(2) 2550 Å 以外の可視光の影響をうけている。第9図(b)でわかるように可視光ではリムの立ち上りが鈍くなっている。フィルターの透過特性と光電子増倍管の量子効率をかけあわせた観測器の感度はフィルターの透過中心波長付近の感度に比較し可視域ではその 10^{-4} 程度に落ちる。一方大気による太陽輻射の散乱光は可視域では中間紫外域に比べ 10^3 程度大きい。このため雲のように可視光を能率よく反射するものがある場合、可視光の影響を無視できないことになる。このことを考えると、NOAA による雲の写真と「たいよう」による観測値に対応があることが説明できる。また、個々のデータの中には第



第9図 (a), (b) 強度分布パターン。下図は太陽、地球中心を結ぶ線にそっての強度変化。



第10図 実線はオゾン密度 (下の目盛). 点線は中性大気密度 (上の目盛) [5].

3 図に示されたような不規則な強度変化が見られるものがあるが, これも観測器の視野内に強く可視光を散乱する領域があったと考えることができる.

地心方向の輻射強度の太陽天頂角依存性について (1) 式を用いて計算した値を観測値と同じ第4図に示した. 波長 2550 \AA と 3300 \AA の計算値はよくデータと一致する.

輻射強度の季節変化からオゾン密度の変化の様子を推定するために (3) 式を用いる. 地心方向からの強度は太陽天頂角が同じであれば $n_M(z_0)n_{O_3}(z_0)^{-r}$ に比例する. 大気密度の変動の方は中緯度のロケット観測がある. (White Sand, 32°N) これによれば 55 km 付近で夏は春に比べ 8% 程度密度が大きい. 夏・春の輻射強度の比を 1.3 としてオゾン密度の変化を求めてみると 0.67 となり夏季にオゾン密度が小さくなる. これは内之浦のロケット観測による 55 km 付近のオゾンの季節変化と同じ傾向を示している.

雲や地表面からの反射光が, 3500 \AA 付近の可視光の除去を十分考慮しないと中間紫外域での測光に悪影響を与えることがあることはすでに述べたが, 逆にこの対流圏をつきぬけてもどってきた反射光を利用することにより, 全オゾン量が $5 \sim 10\%$ の精度で求められることが (1) 式を用いた数値計算で示された [6]. これは, 飛しょう体により 3100 \AA と 3300 \AA 付近の2波長で地球反射光を測光するものである. この反射光の強度に影響を与える中性大気密度, 雲量, 地球の反射率などと, オゾンでは2波長に対する影響の仕方がはっきり異なりオゾンの定量を行うことができる.

5. 結 論

今回の「たいよう」衛星による中間紫外線大気散乱光の観測から以下の点が得られた.

- (1) 統計的なデータ解析の結果はモデル計算の結果と一致した。55 km 付近のオゾン密度の季節変動がとらえられた。
- (2) 個々のデータの中には注目している波長域以外の可視光の影響を受けたものが見られる。散乱光観測によるオゾン密度の測定には可視光の除去に十分考慮をはらわなければならない。
- (3) 中緯度夏季の55 km 付近において経度にしたがってオゾン密度の変動が見られた。変動のスケールは経度にしてほぼ40度である。

おわりに、この観測計画に指導的な役割をはたされた理学部等松隆夫教授が昨年11月突然逝去されました。慎んで博士のご冥福をお祈りします。またこの観測・データ解析に有益な助言をいただいた筑波大渡辺隆氏に感謝します。

1978年6月22日

参 考 文 献

- [1] T.Watanabe and T.Tohatsu, Rep. Ionos. Space Res. Japan, 30, 47, 1976.
- [2] J.London, J. E. Frederick and G. P. Anderson, J. Geophys. Res., 82, 254, 1977.
- [3] T. Tohatsu, K. Suzuki and T. Ogawa, J. Geomag. Geoelectr., 27, 295, 1975.
- [4] 二宮敬虔・広川英治・周東晃四郎・鈴木勝久, 東京大学宇宙航空研究所報告, 12, (1976) 437
- [5] U. S. Standard Atmosphere, 1966
- [6] 田中基彦, 東京大学大学院修士論文, 1978