

中間圏オゾンの観測*

小川利紘**・等 松隆夫**

概 要

K-10C-1号機によって、太陽紫外線の吸収を利用して上部成層圏および中間圏のオゾン密度分布を求める観測を行なった。この観測ではロケットの全飛しょう中のデータが得られたので、ロケットのプレセッションによって生じる見かけ上の太陽ふく射強度の変化は測光器の測定域 (2500 Å バンド, 2900 Å バンド, 4500 Å バンド) で異なっていることがわかった。データ解析に際してはこの効果も含めて、プレセッションの影響を補正し、オゾン密度分布を求めた。また K-9M-21号機のデータをこの方法で再解析した結果から、高度 60~65 km に存在すると指摘されていたオゾン密度の「第2のピーク」はその存在が疑わしいことになった。

1. は じ め に

太陽紫外線吸収による中間圏のオゾン密度の定量は数年前から試みられ、K-9M-16, L-3H-2, K-9M-21などのロケットによる結果が報告されている[1]。それによれば高度 60~65 km にオゾン密度の「第2のピーク」が存在することが示されており、このことは中間圏オゾン層の生成の問題（特に、光化学反応と酸素原子の熱圏下部からの拡散）とからみ合っていて興味を持たれていた。最近 L. G. Smith はわれわれと全く同じ方法で一連の測定を行なったが[2]、それによるとオゾン層の「第2のピーク」は見出されず、その存在に疑問が持たれ始めた。

K-10C-1号機 (1969年1月12日, 1410 JST 打上げ, 太陽高度 31.3°) による観測は特に「第2のピーク」の存在の検証を重点にし、従来のようにオゾン層通過直後に観測をやめて他の観測に切り替えるようなことをせず、ロケットの全飛しょう中観測を続けることにした。

また K-9M-24号機 (1969年1月19日, 2100 JST 打上げ) では夜間の紫外大気光 (O_2 Herzberg band system) の分布および、この大気光の吸収から夜間のオゾン密度分布を求めることを目的とした。K-9M-24号機は頭初、月から太陽紫外線の反射を利用して夜間のオゾン密度を測定する計画であったが、打上げ日時の都合で月を見ることができなくなり、紫外大気光を利用する方法に急拠計画を変更したものである。紫外大気光を利用する場合、大気光強度のスペクトル分布がまだよくわかっていないことと、面光源であることから、デー

* 宇宙研特別事業費による研究論文

** 東大理学部地球物理研究施設

タの解析は非常にむずかしく、目下検討中であるが、夜間の熱圏下部・中間圏の構造を知るうえで重要な手がかりが得られるものと期待される。

2. オゾン密度の解析方法

波長 $2,000 \sim 3,000 \text{ \AA}$ の太陽紫外線は大気中のオゾンによって吸収を受ける。高度 $z \text{ km}$ における波長 $\lambda \text{ \AA}$ の太陽紫外線の flux $F(\lambda, z)$ は、Lambert-Beer の法則に従うものとする

$$F(\lambda, z) = F_0(\lambda) \exp[-\sigma(\lambda)N^*(O_3, z)] \quad (1)$$

ここで $F_0(\lambda)$ は大気に入射する太陽紫外線の flux, $\sigma(\lambda)$ はオゾンの吸収断面積, $N^*(O_3, z)$ は太陽光の通過する path に沿ってオゾンの数密度を積分したもので、オゾンが plane parallel に分布している場合は、

$$N^*(O_3, z) \equiv \int_{\text{path}} n(O_3, s) ds \doteq \sec \theta \int_z^\infty n(O_3, z) dz \equiv \sec \theta \cdot N(O_3, z) \quad (2)$$

と書ける。ここで $n(O_3, z)$ はオゾンの数密度, $N(O_3, z)$ は column density である。 θ は太陽の天頂離角であって、 $\theta > 60^\circ$ ならば、実際の地球大気の場合 plane parallel の近似は非常によい。

ある波長 λ で、ロケットの上昇中太陽紫外線強度の変化を測定して $F(\lambda, z)/F_0(\lambda)$ の高度変化を得ることができれば、(1)(2)より

$$n(O_3, z) = -\frac{dN(O_3, z)}{dz} = \frac{\cos \theta}{\sigma(\lambda)} \frac{d}{dz} \ln[F(\lambda, z)/F_0(\lambda)] \quad (3)$$

の関係が得られるので、実験室で得られた $\sigma(\lambda)$ のデータ [3] を用いて、オゾン密度の高度分布がただちに求まる。 $F(\lambda, z)$ の測定に際しては、絶対値を求める必要がない $F_0(\lambda)$ はオゾン層を出たときの $F(\lambda, z)$ の値であるので、絶対測定につきものの困難さを避けることができ、そのため精度よくオゾン密度を測定できる。

太陽紫外線測光器として分光器を用い、波長に対する単色性をあげた測定をすれば (3) の関係を使ってただちにオゾン密度分布を求めることが可能である。しかしロケット搭載用としては小型・軽量化が要求され、分光器は重量、容積がかさむので、波長の単色性は犠牲にして干渉フィルタと小型の光電管 (Cs-Te を photocathode に用いたもので可視光にはほとんど感度を持たない) を組合わせた測光器を用いる [4]。この場合、フィルタの透過波長域にわたって測光をすることになるので、測定量は、

$$\begin{aligned} I(z) &= \int T(\lambda) S(\lambda) F(\lambda, z) d\lambda \\ &= \int T(\lambda) S(\lambda) F_0(\lambda) \exp[-\sigma(\lambda)N(O_3, z) \sec \theta] d\lambda \end{aligned} \quad (4)$$

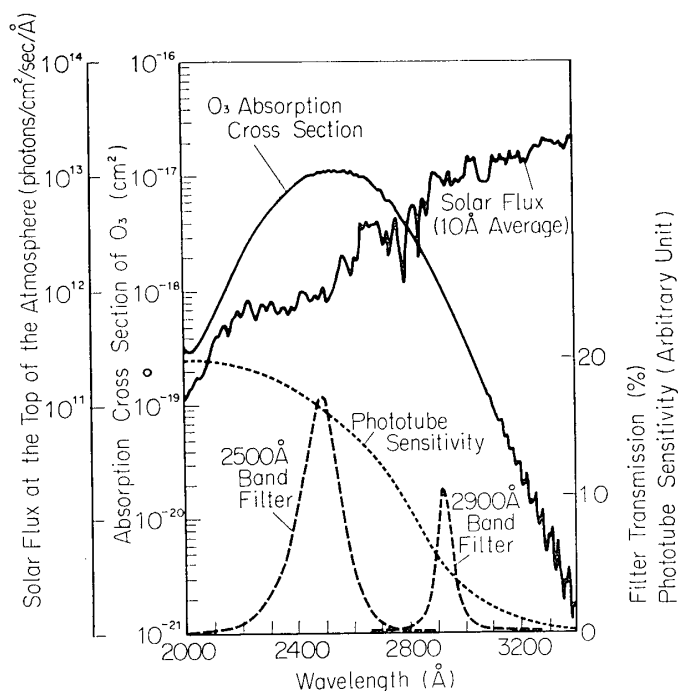
となる。ここで $T(\lambda)$ は干渉フィルタの透過率, $S(\lambda)$ は光電管の感度で、積分はフィルタの透過波長域にわたって行なう。フィルタの透過率の幅が十分狭くて、この区間では $S(\lambda)$, $F_0(\lambda)$, $\sigma(\lambda)$ がほとんど変化しなければ (4) 式は前述の場合と同じ形になるのは当然である。しかしわれわれが用いるフィルタは半値幅が 150 \AA 程度のものなのでこのような簡単

化をすると誤差が大きくなる．そこで一つ一つの測光器について (4) 式から計算して $N(O_3, z)$ に対する $I(z)$ の曲線をあらかじめ作っておくことにする．実際にはオゾン層を出た吸収のない所の値に対する相対値

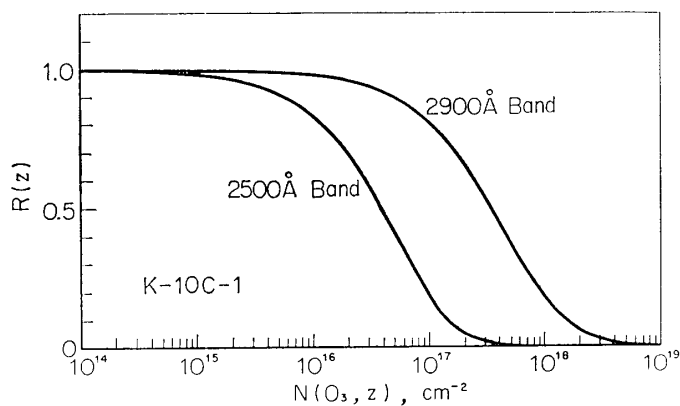
$$R(z) = I(z)/I(\infty)$$

$$= \int T(\lambda) S(\lambda) F_0(\lambda) \exp[-\sigma(\lambda) N(O_3, z) \sec \theta] / \int T(\lambda) S(\lambda) F_0(\lambda) d\lambda \quad (4)'$$

を計算して, $N(O_3, z)$ 対 $R(z)$ の曲線を求める．ここで, $T(\lambda)$, $S(\lambda)$ は各測光器について測定しておくべき量であり, また $F_0(\lambda)$, $\sigma(\lambda)$ 多くの人によってすでに測定がなされている量である [3][5]．(第 1 図参照)． $N(O_3, z)$ 対 $R(z)$ の曲線の一例を第 2 図に示す．この曲



第 1 図 干渉フィルタ透過率, 光電管感度, オゾン吸収断面積および太陽 flux の波長分布を示す図



第 2 図 オゾンの column density に対する太陽ふく射強度の相対的变化

線から $R(z)$ の測定値に対応する $N(O_3, z)$ の値を読み取り

$$n(O_3, z) = -\frac{dN(O_3, z)}{dz}$$

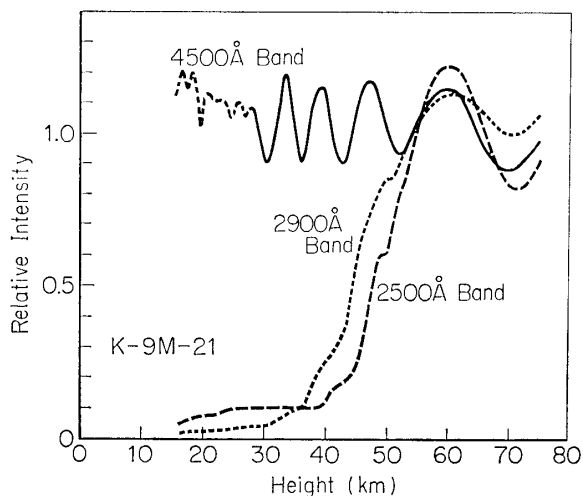
から $n(O_3, z)$ を計算してオゾン密度分布を求める.

測定する波長域を決定するに当っては, オゾンの吸収断面積を考慮して, 吸収のピークのある $2,500 \text{ \AA}$ 付近のバンドと, 吸収の比較的小さい $2,900 \text{ \AA}$ 付近のバンドを選定する. 定量できるオゾン量は太陽天頂離角によって変わるが, K-10 C-1 の場合 ($\theta = 58.7^\circ$) では, $2,500 \text{ \AA}$ バンドで, column density にして $2 \times 10^{15} \sim 2 \times 10^{17} \text{ cm}^{-2}$ のオゾン量を, $2,900 \text{ \AA}$ バンドでは $2 \times 10^{16} \sim 2 \times 10^{18} \text{ cm}^{-2}$ のオゾン量の定量が可能であり, 両者あわせて $2 \times 10^{15} \sim 2 \times 10^{18} \text{ cm}^{-2}$, 高度に直すと $30 \text{ km} \sim 70 \text{ km}$ の間のオゾン量の定量がカバーできる (第 2 図参照).

3. プレセッション効果の補正

以上述べたように, オゾン密度分布の解析方法は簡単なものであるが, 実際の解析に当たっては次のような問題がある.

われわれの太陽測光器はサン・フォロワーを用いない代わりに視野を広くとって (約 60°), ロケットのプレセッションが相当大きくても 1 回のスピングごとに一度は必ず太陽を捕える



第 3 図 ふく射強度の高度変化 (K-9 M-21 号機によるなまのデータ)

ように設計されている. したがってスピンの周期に同期した周期的な信号が得られる. 各周期のピーク値を読み取ってプロットした一例を第 3 図に示す. この値は太陽が測定器, 垂直に近い角度で入射した際の値と考えるとよい. しかし第 3 図から明らかなように, 高度が増すにつれて測定値が増加し高度 $60 \sim 70 \text{ km}$ で飽和している傾向があり, これに周期的な modulation が重畳している. この modulation はロケットのプレセッションのため測光器から見た太陽の方向が一定していないことによる. 実際, 第 3 図の modulation の周期は地磁気姿勢計のデ

ータとよく一致する. この影響は入射光の測光器に入る入射角度の変化によって光電管の感度 (光電子生成率) および干渉フィルタの透過率が変化することによって生じるものと考えられる. この影響を排除するための対策として, オゾンの吸収のない可視部の波長域, $4,500 \text{ \AA}$ バンドで太陽光の入射角度のモニタをすることが考えられた. 第 3 図の $4,500 \text{ \AA}$ バンドのデータはこれに当る.

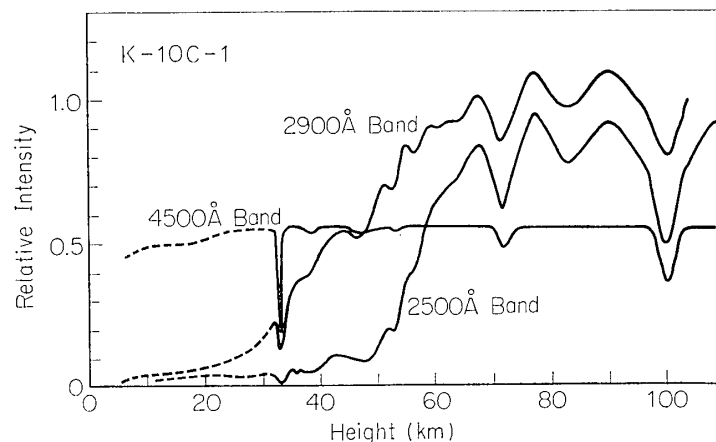
$4,500 \text{ \AA}$ バンドと $2,500 \text{ \AA}$ および $2,900 \text{ \AA}$ バンドの測定値が比例関係を持って変化する

ならば、 $2,500\text{ \AA}$ および $2,900\text{ \AA}$ バンドの値を $4,500\text{ \AA}$ バンドの値で割るという補正をしてやれば、プレセッションによる影響は取除けるはずである。従来のデータ解析はこのようにして行なわれてきたのであるが、補正した $R(z)$ の測定曲線を見るとまだ補正が十分ではないことが明らかであった。これは、

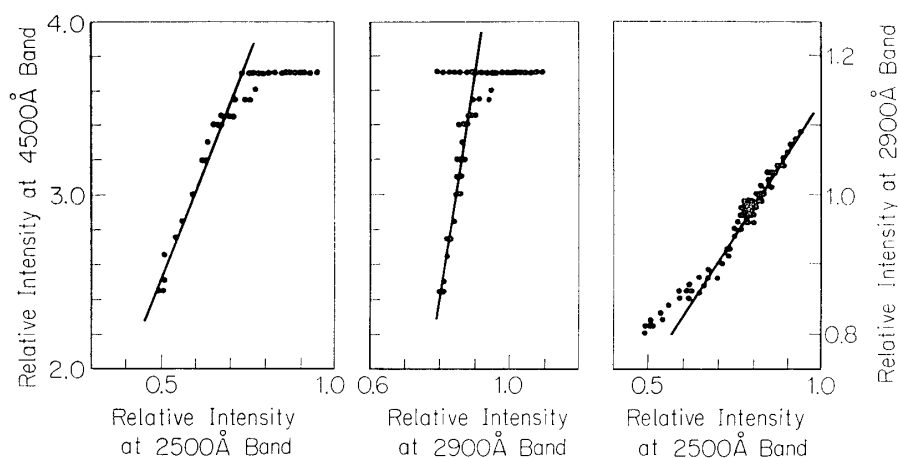
- (1) 三つの測光器はロケット胴部の壁に密着して装てんされ、ロケット軸に垂直な方向に並べて配置されたために、三つの測光器の視野の中心が同一方向に向けられていない。このため三つの測光器からの信号の変化には時間的ずれがあること。また1スピンの間のスピン軸の変動が無視できない場合はさらにこの影響も加わってくることと、
 - (2) 測光器の、入射光の入射角度に対する感度特性は光電管の光電面の性質によって違いがあり、三つの測光器の特性がそろっていないこと、
- によるものと考えられる。

以前の観測ではオゾン層を出てからすぐ他の観測に切替えていたために、オゾンの吸収のない場合の三つの測光器の信号変化、すなわち純粋にプレセッションの効果だけが入っているデータの量が少ないこともあって、この2点ははっきりとは意識されず、実験計画に生かしきれなかった。このため以前の解析結果については、不十分な補正でかなり無理をしている点がある（補正しきれずに残ったプレセッションの影響を取除くためにデータの平滑化を行なっているが、それでもなお不十分である）ので、この点から言っても出された結果の、高度 $55\sim 70\text{ km}$ の部分の値については精度のよいものではないはずである（factor 5 程度の ambiguity は考えねばなるまい）。

K-10C-1 号機では全飛しょう中、三つの測定器による観測ができた、オゾン層から出たところでの、純粋に入射光の入射角度による変化だけの現われているデータが得られたので、三つの測光器で測られた強度変化（入射角の変化による見かけの変化）の関係をくわしく調べることができた。第4図は三つの測光器で測定した太陽ふく射強度のなまのデータである。80 km 以上の高度ではオゾンによる吸収は大きな安全度を持って無視できるので、高度 80 km 以上でのデータを採って、各測定器の間の測定値の関係をプロットしたのが第5



第4図 K-10C-4 号機による太陽ふく射強度変化（補正をしないデータ）



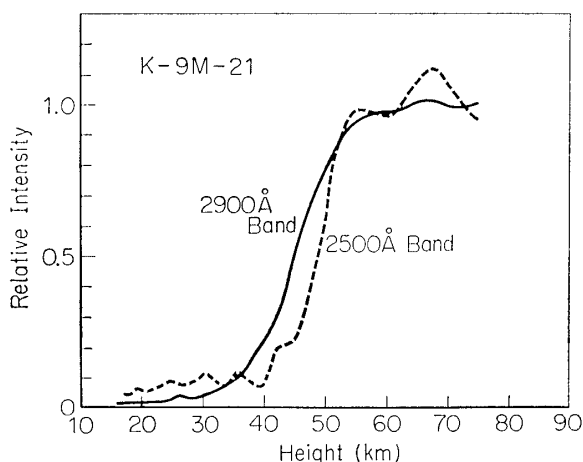
第 5 図 オゾン層を通過した後の各バンドの相対強度の関係 (K-10C-1 号機)

図である。この図から、各バンドの測定値の間にはほぼ linear な関係があることがわかる。ただし第 4 図で示されているように、4,500 Å バンドについて、2,500 Å および 2,900 Å の値が増加する phase に対応する変化が見られない。これは測定器の特性と太陽入射角の geometry の関係とが原因となっていると思われるが、この点が後の補正をするさいの難点となっている。

4,500 Å バンドのデータの質がよくないので十分な補正ができる保証はないが、第 5 図に示された 4,500 Å バンドと 2,500 Å および 2,900 Å バンドの強度の関係をを用い、また 2,900 Å バンドと 2,500 Å バンドの関係を 60 km から上の高度で補助的に用いて (高度 60 km 以上では 2,900 Å バンドにおけるオゾンの吸収は無視してよいと考えられるので) 補正を行なうことにする。こうして補正をした値から第 2 図の曲線を用いて $N(O_3, z)$ を求

め、これを高度について微分して $n(O_3, z)$ を求めた。column density $n(O_3, z)$ から number density $n(O_3, z)$ を求めるさいには $n(O_3, z)$ の曲線をスムーズ・アップした。したがって最終的な $n(O_3, z)$ の値の信頼性としては、明確な根拠があるわけではないが factor 2 程度のものと考えられる。

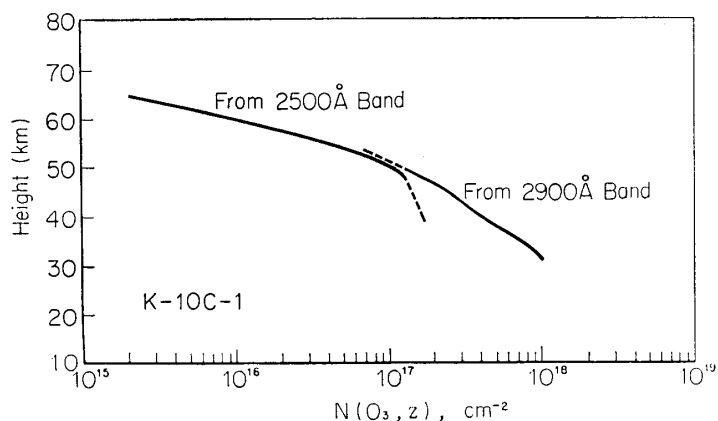
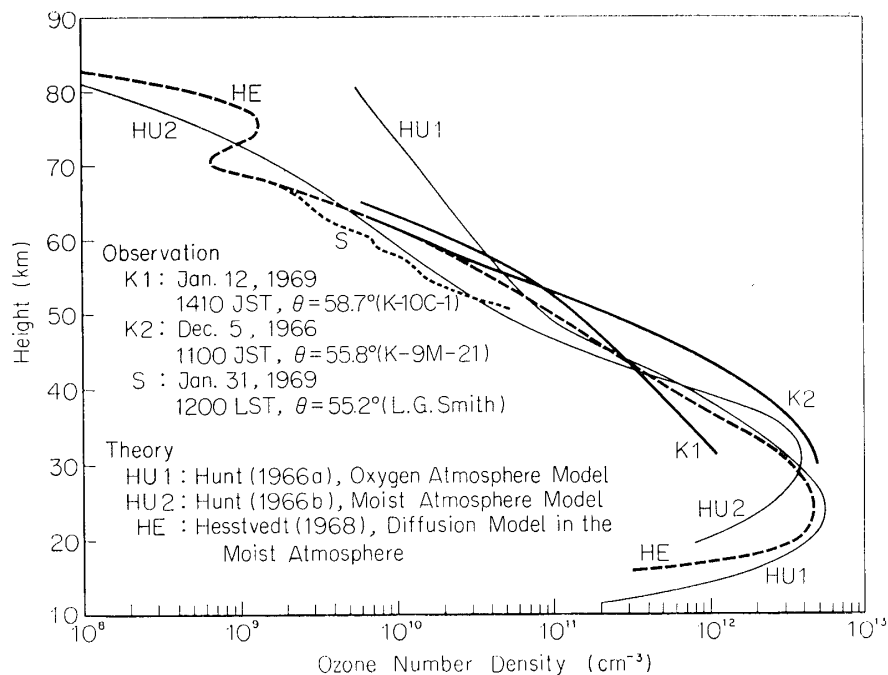
第 6 図には補正した $R(z)$ の測定値の一例を、第 7 図にはそれから求めた $N(O_3, z)$ の値の一例を示した。



第 6 図 第 3 図の値を補正したもの。2500 Å バンドは測光器の感度が低かったのでデータの誤差が大きく、補正は十分でない。

4. 解析結果と検討

K-10C-1 号機の データ 解析の最終結

第 7 図 K-10C-1 のデータから求めた $N(O_3, Z)$ の値

第 8 図 オゾン密度分布

果は第 8 図に示してある。この最終結果は、2,500 Å バンドおよび 2,900 Å バンドの両者から求めた $N(O_3, z)$ の値をスムーズ・アップして一つの曲線を作り、これから number density を計算したものである。2,500 Å, 2,900 Å 両者のバンドから得た $N(O_3, z)$ の値は実際には必ずしも一致しない。とくに、第 7 図でみると 50 km 以下で大きく食い違っているが、これは 2,500 Å バンドのデータの精度がよくないためであろう。2,500 Å バンドと 2,900 Å バンドの結果が一致しないのは、データの精度が悪いことによるのはもちろん、アレセション効果の補正が不十分であることによる。さらに、エアロゾルや水蒸気による吸

収の影響や、測定器が可視部の太陽光を拾ってしまうこと（太陽ふく射は紫外部に比べて可視部ではけた違いに強いので、フィルタの透過率のスソの方から拾ってしまう）も原因として考えられ、これらの原因に対する対策は技術的に非常にむずかしい。

第 8 図には同じ方法で再解析した K-9M-21 号機の結果も示してある。これは、 $2,500 \text{ \AA}$ バンドの方の精度がよくないのでおもに $2,900 \text{ \AA}$ バンドのデータを基にしている。

二例の解析結果と、データの補正など最終結果に導くまでの過程を通して考えてみると、over all のデータの精度は factor 2 程度というところである。高度 30 km 以下、65 km 以上では精度はずっと悪くなるので第 8 図には記入していない。したがって以前出された結果のなかで、高度 65 km 以上、30 km 以下の値については信頼性が低く、高度 60~65 km の「第 2 ピーク」の存在は大いに疑わしい。

第 8 図には K-10C-1 号機の観測とほとんど同様の条件で行なった L. G. Smith [2] の測定値も比較のためにプロットしておいた。

オゾン層生成の理論との比較のため Hunt [6] の二つの計算値と Hesstvedt [7] の計算値をもあわせて第 8 図に示してある。酸素原子が熱圏下部から拡散することによる影響は 70 km よりうえの高度で現われるので、今までの観測データから Hesstvedt の diffusion theory の可否を決めることはできないが、酸素元素だけを考えた光化学反応と、水素元素まで含めて考えた光化学反応のどちらをとるかとなると、水素元素を含めた光化学反応の方に軍配が上がりそうである。両者の違いは高度 60 km 以上で顕著であり、60 km 付近の様相から以上のような判断が下せる。しかしこれはあくまでも Hunt, Hesstvedt の計算値を基に言っているわけで、計算の方も採用するパラメータの値でかなり結果に変化をきたすので現段階で結論を下すことはむずかしい面もある。

本稿を終るに当たって、ロケット打上げの実験を各部署で担当された宇宙研のスタッフの方々、ならびにメーカーの方々に感謝の意を表わします。

1970 年 1 月 9 日

参 考 文 献

- [1] T. Nagata, T. Tohatsu, and H. Tsuruta: Space Research VIII, 639 (1968).
- [2] L. G. Smith: Presented at COSPAR XII, Prague (1969).
- [3] Ny Tsi-Ze, and Choong Shin-Piaw: Chin. J. Phys., **1**, 38 (1933); A. Vassy, Ann. Phys., **16**, 145 (1941); Y. Tanaka, E. C. Y. Inn, and K. Watanabe, J. Chem. Phys., **21**, 1951 (1953); E. C. Y. Inn, and Y. Tanaka, J. Opt. Soc. Am., **43**, 870 (1953); E. Vigroux, Ann. Phys., **8**, 709 (1953); E. Vigroux, Ann. Géophys., **25**, 169 (1969).
- [4] T. Tohatsu: Geophysics Research Laboratory, University of Tokyo, Technical Report No. 5 (1968).
- [5] N. L. Wilson, R. Tousey, J. D. Purcell, F. S. Johnson, and C. E. Moore: Astrophys. J., **119**, 590 (1954); H. H. Maliston, J. D. Purcell, R. Tousey, and C. E. Moore, Astrophys. J., **132**

- 746 (1960) ; C. R. Detwiler, D. L. Garrett, J. D. Purcell, and R. Tousey, *Ann. Géophys.*, **17**, 263 (1961) ; V. P. Kachalov, and A. V. Yakovleva, *Izv. Krimskoy Astro. Obs.*, **27**, 5 (1962) ; R. Tousey, *Space Sci. Rev.*, **2**, 3 (1963) ; L. Dunkelman, and R. Scolnik, *J. Opt. Soc. Am.*, **49**, 356 (1959) ; R. T. Brinkmann, A. E. S. Green, and C. A. Barth, Jet Propulsion Laboratory, California Institute of Technology, Technical Report No. 32-951 (1966).
- [6] B. G. Hunt: *J. Atm. Sci.*, **23**, 88(1966 a) ; B. G. Hunt, *J. Geophys. Res.*, **71**, 1385(1966b)
- [7] E. Hesstvedt: *Geofis. Publ.*, **27**, No. 4 and No. 5 (1968).