

## 高高度気球搭載光学センサーによる成層圏オゾンの観測

岡林 昌宏<sup>\*1</sup>・田口 真<sup>\*1</sup>・岡野 章一<sup>\*1</sup>・福西 浩<sup>\*1</sup>

### Observation of Upper Stratospheric Ozone by Balloon-Borne Optical Ozonesondes

By

Masahiro OKABAYASHI, Makoto TAGUCHI, Shoichi OKANO and Hiroshi FUKUNISHI

**Abstract:** Measurements of ozone in the upper stratosphere are essential to understand the photochemical processes leading to ozone destruction and the dependence of stratospheric ozone concentration on solar activity. We have developed optical ozonesondes to observe ozone vertical profiles up to an altitude of ~40 km where conventional electrochemical ozonesondes do not function. The optical ozonesondes observe the vertical profiles of solar UV radiation intensities at 296 nm and 305 nm in the ozone Hartley band. The experiment was performed with a light-weight, 5000 m<sup>3</sup> balloon launched on June 9, 1993 at Sanriku Balloon Center. A vertical distribution of ozone in the altitude range from 13 to 40 km was obtained by differentiating the measured UV intensity profiles after some corrections.

#### 概 要

オゾン量の長期変動を理解するためには、光化学反応が支配的な上部成層圏でオゾンを詳しく観測することが必要であるが、これまで行われている通常の電気化学方式のオゾンゾンデでは、上部成層圏のオゾン観測には限界がある。最近、高度40km以上まで上昇可能な小型の高高度気球が開発された。我々は、この高高度気球に搭載し、成層圏オゾン高度分布を観測するための光学センサーを開発した。この光学センサーを使用して1993年6月9日に三陸大気球観測所において観測を実施し、オゾン・ハートレー帯中の太陽紫外線の強度の高度分布を得た。オゾン高度分布は、測定された太陽紫外線強度の高度分布を微分することによって得られる。

#### 1. はじめに

成層圏オゾン総量の大部分を占める下部成層圏においては、オゾンの分布は大気ダイナミクスに支配されており、短期的な変動が大きい。そこで、塩素系の微量気体によるオゾンの光化学的消滅過程や太陽活動周期変動等によるオゾン量の長期変動を理解するためには、光化学反応が支配的な上部成層圏でオゾンを詳しく観測することが必要である。しかし、これまでに行われている通常の電気化学方式のオゾンゾンデでは、高高度で大気圧が数 hPa より低くなると、反応管へ空気を導入するためのポンプの効率が低下するために、上部成層圏オゾ

---

<sup>\*1</sup> 東北大学 理学部

ンの高精度観測には限界がある。

最近、高度40km以上まで上昇可能な小型の高高度ポリエチレン気球が宇宙科学研究所により開発された[1]。小型の気球による観測の利点は、大かがりな施設を必要とせず経費も高まないことから、任意の観測点から多数回観測することが可能となることである。

この高高度気球を用いた上部成層圏オゾン観測は現在までに、宇宙科学研究所三陸大気球観測所において、1991年8月30日に宇宙科学研究所のグループによって[2]、翌1992年の5月28日には名古屋大学と東北大学の共同グループによって[3]行われた。両者とも、電気化学方式のオゾンゾンデが使用された。それらの観測結果を図1に示す。

両観測の結果を比較すると1992年5月の観測の方が高度32km以上で少なく、高度35kmで26%、40kmで56%少なかった。また、1992年5月に観測された気圧3hPa(40km)高度のオゾン分圧は、Umkehr法によって過去34年間に5月に札幌・館野で観測されたオゾン分圧平均値の約70%であった。

しかし、電気化学方式のオゾンゾンデには上述のような問題があり、この観測結果が実際のオゾン量の年々変動や季節変動によるものであるかどうかは断定し難い。そこで我々は、上部成層圏においても高い精度でオゾン高度分布を観測するために、全く新しい原理に基づいた小型で軽量な光学オゾンゾンデを開発した。

## 2. 観測器

光学オゾンゾンデを搭載する気球は、厚さ6 $\mu$ mという非常に薄いポリエチレンフィルムで作られていることが大きな特徴である(図2)。これは従来の気球の3分の1以下の厚さである。このため気球の重量が11kgと非常に軽くなり、高高度まで到達することが可能となる。気球の大きさは、最大に膨らんだ状態で直径20m、体積5,000m<sup>3</sup>である。重量2kgのゴンドラを搭載して高度42kmまで上昇できる能力がある。

光学オゾンゾンデの原理は次の通りである。オゾンハートレー吸収帯によって生じる太陽紫外線強度の高度による変化を測定し、それを微分することによりオゾンの高度分布を求める。光学オゾンゾンデの紫外線輻射計部の断面図を図3に示す。太陽光をテフロン製拡散板で拡散させ一様面光源とし、その光を干渉フィルターを通してレンズで集光しフォトダイオードで検出する。観測可能な高度範囲を広げるために、296nmと305nmの二波長の太陽紫外線強度を測定する。使用した紫外用干渉フィルターの分光透過率を図4に示す。また、オゾンによ

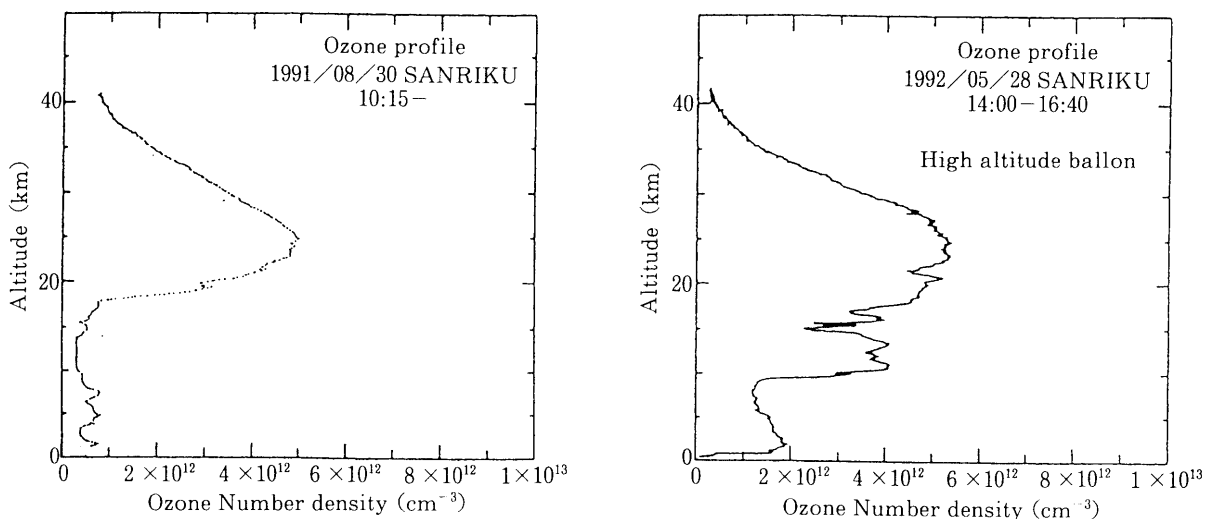


図1 1991年および1992年に三陸において電気化学方式のオゾンゾンデを用いて観測された大気オゾン高度分布

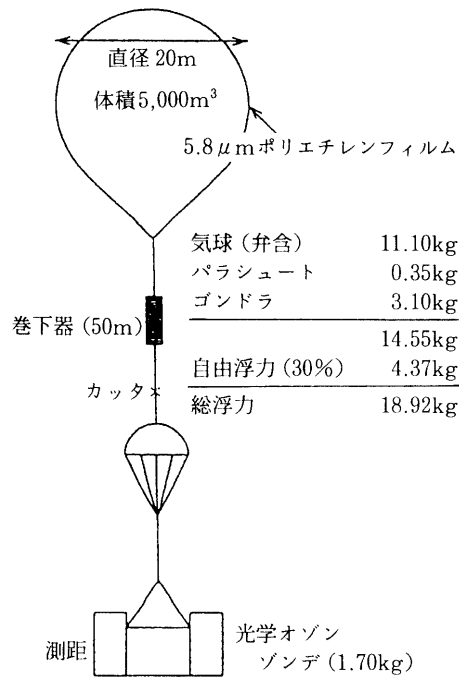


図 2 高高度気球搭載光学オゾンゾンデの荷姿

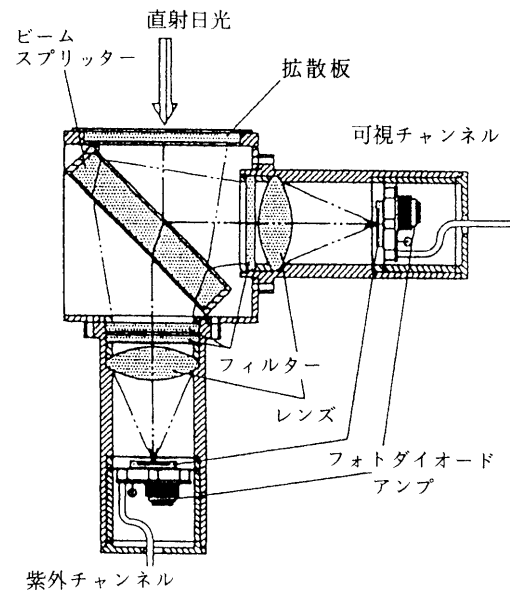


図 3 光学オゾンゾンデの紫外線輻射計部の断面図

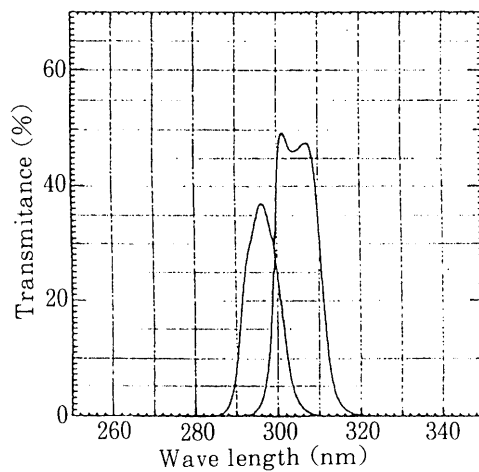


図 4 紫外用干渉フィルターの分光透過率

る吸収をほとんど受けない波長の太陽光強度をリファレンスとして同時に観測し、気球の姿勢変化による光量の変動を補正する。その他に、気温、気圧、装置温度も同時に測定する。光学オゾンゾンデの全重量は1.7kgである。表1に開発した光学オゾンゾンデの仕様を示す。

### 3. 観 測

上記の観測装置を用いて、1993年 6月 9日に岩手県気仙郡三陸町、宇宙科学研究所三陸大気球観測所で観測を実施した。気球は午前 9時43分に放球され、12時00分に最高高度40.6km に到達、その後下降を始め12時47分に太平洋上に着水し観測を終了した (図5, 図6)。この観測で得られた太陽紫外線強度の高度分布を図7に示す。

表 1 光学オゾンゾンデ仕様諸元

項目	仕様
気圧計	ダイレクト型気圧計 計測範囲：1040～5hPa
温度計	サーミスタ温度計 計測範囲：-90℃～+40℃
紫外線放射計	<ul style="list-style-type: none"> <li>・紫外用干渉フィルター：日本真空光学 DIF-BPF-3 高高度用：中心波長296nm, 半値幅10nm 低高度用：中心波長305nm, 半値幅10nm</li> <li>・可視用干渉フィルター：日本真空光学 MIF-UW 中心波長420nm, 半値幅15nm</li> <li>・ディテクター シリコンフォトダイオード：浜松ホトニクス S1227-1010BQ</li> </ul>
搬送周波数	1680MHz±4MHz
空中線電力	0.4W 以上
電波の形式	A1D
変調形式	ベース変調
変調周波数	120～1380Hz
パルス幅	150～250μs
切換時間	2秒±20%/要素
測定周期	A サイクル：HR-296-LR-305-T-296-P-305 B サイクル：HR-296-LR-305-TI-0V-P-10V  A サイクル…連続8サイクル B サイクル…最終サイクル 1 サイクル約16秒×9サイクル  ただし HR ハイレハレンス      0V 標準0V 信号 LR ローレハレンス      10V 標準10V 信号 296 296nm 紫外線信号    T 気温信号 305 305nm 紫外線信号    TI 装置温度信号 P 気圧信号
筐体	発泡スチロール製 寸法：230×155×340 (±10mm) 総重量：1.7kg 以下
電池	マンガン電池 継続時間：180分

波長296nmの紫外線は、高度24km以上からオゾンによる吸収が減り、紫外線強度が増加を始めた。305nmの紫外線は、対流圏では大気分子の散乱による減光の効果による高度変化が大きく、成層圏ではオゾンの吸収による紫外線強度の高度変化があらわれている。

同じ日の13時55分～16時55分に名古屋大学太陽地球環境研究所の近藤らによって電気化学方式のオゾンゾンデを用いて大気オゾンの高度分布が観測されている(図8)。そこで、このデータを用いて紫外線強度の高度分布をシミュレーションし、その結果を光学オゾンゾンデの結果と比較した(図9)。両者はほぼ一致しており、太陽紫外線強度高度分布の観測が正常に行われたことが分かる。

#### 4. 解析

得られた太陽紫外線強度の高度分布からのオゾン高度分布の導出は、以下の解析手法によって行う。

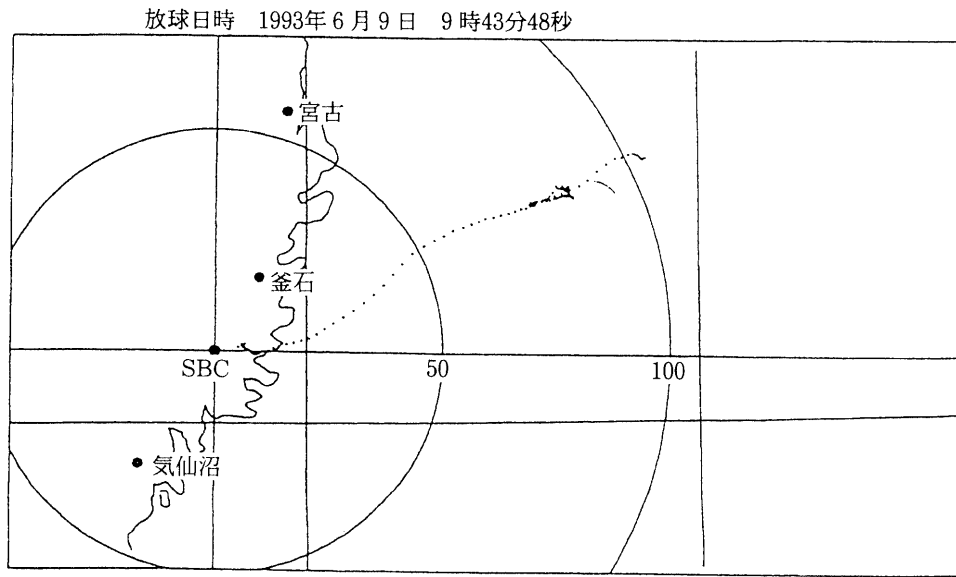


図 5 観測時の気球の航跡

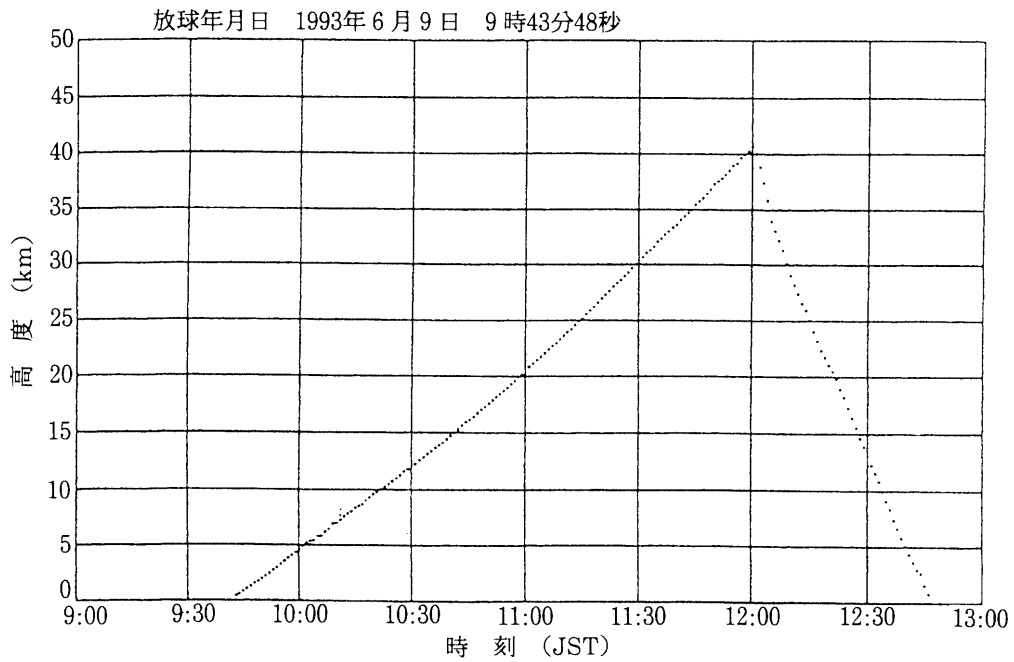


図 6 観測時の気球の高度曲線

高度  $z$  において太陽紫外線の強度  $I(z)$  は、大気圏外での強度を  $I_0$  とすると

$$I(z) = I_0 e^{-\tau(z)} \tag{1}$$

となる。ここで、 $\tau(z)$  は高度  $z$  より上の大気柱の光学的厚さで、

$$\tau(z) = \sigma \int_z^{\infty} n(z) dz \cdot \sec \theta \tag{2}$$

である。 $n(z)$  は高度  $z$  におけるオゾン数密度、 $\theta$  は太陽天頂角である。紫外線を、透過帯の幅のあるフィルターを用いて観測しているため、オゾンの吸収断面積  $\sigma$  には

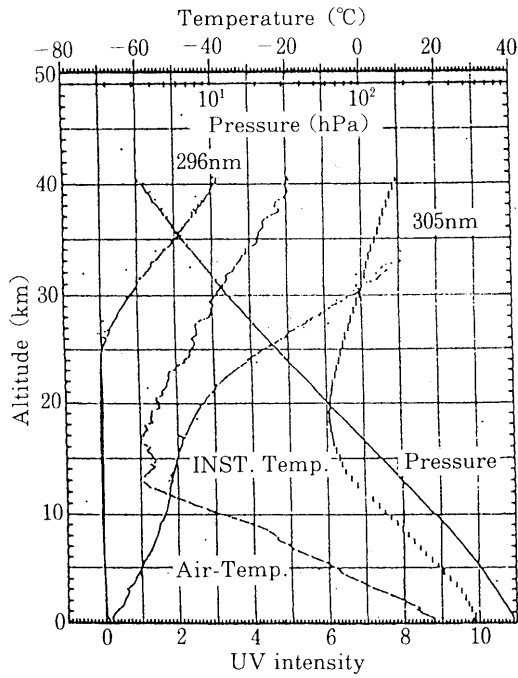


図 7 1993年6月9日三陸上空で観測された紫外線強度、気圧、気温、装置温度の高度分布

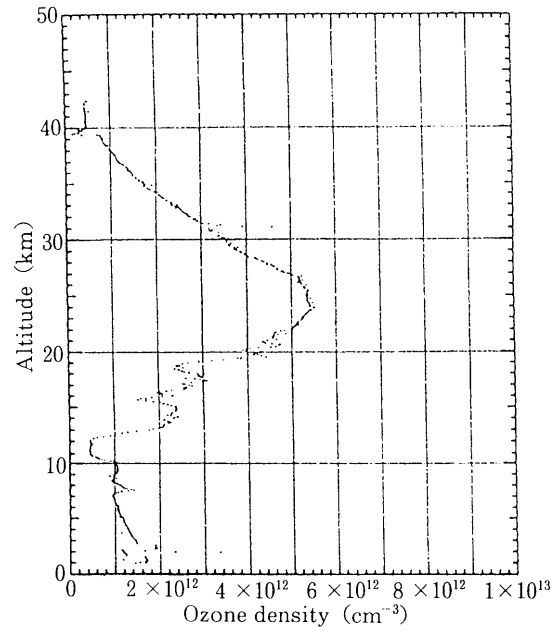


図 8 1993年6月9日三陸で電気化学方式のオゾンゾンデによって観測された大気オゾン高度分布

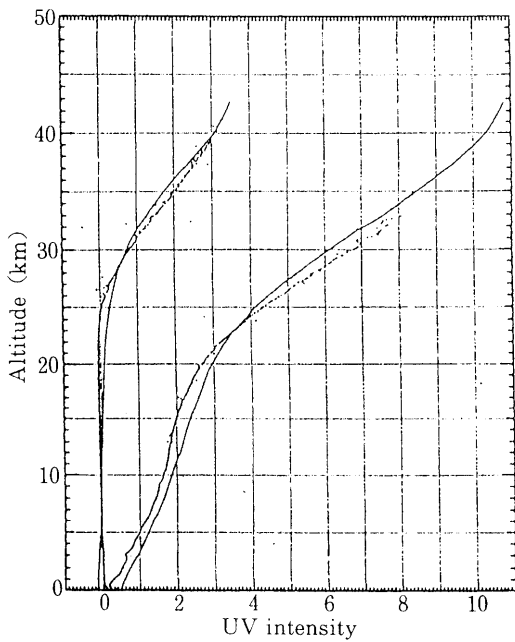


図 9 観測された紫外線強度高度分布とシミュレーションで得られた紫外線強度高度分布の比較 (点：観測，線：シミュレーション)

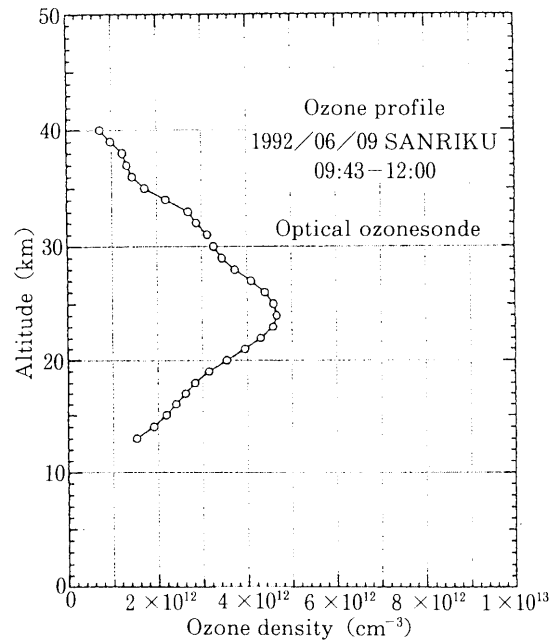


図 10 光学オゾンゾンデによる観測から導出された大気オゾン数密度高度分布

$$\sigma = \frac{\int T(\lambda)\sigma(\lambda)d\lambda}{\int T(\lambda)d\lambda} \tag{3}$$

を用いた。 $T(\lambda)$  は紫外用干渉フィルターの分光透過率 (図4),  $\sigma(\lambda)$  はオゾンの紫外線吸収断面積スペクトル

[4]である。(1), (2) 式より, 観測された  $I(z)$  の対数をとって微分することによって  $n(z)$  が求められることがわかる。ただし気球到達最高高度より上のオゾン分布は仮定する必要がある。

## 5. 考 察

こうして導出されたオゾン数密度  $n(z)$  の高度分布は図10のようになった。ただし, ここに示した高度分布はまだ解析の初期段階に得られたものであり, 正確なオゾン数密度を導出するためには, 約2時間にわたる観測時間の間に太陽天頂角が変化することに対する補正と, 観測装置の温度ドリフトの補正を加える必要がある。

上で導出したオゾン数密度高度分布を, 同日に観測された電気化学方式のオゾンゾンデによる観測結果(図8)と比較すると, オゾン数密度が最も高い高度20~30km で前者の方が少ない値になっており, 高度24km で15%少ない。これは, 光学オゾンゾンデ観測からのオゾン数密度導出の過程で, 上記の補正を現段階においては行っていないことが主な原因である。

今後, これらの補正を行い正確なオゾン高度分布を導出する手法を確立する。また同時に, より高精度で省コストな観測器を開発する。

## 謝 辞

宇宙科学研究所の矢島教授をはじめとするスタッフの皆様には, 気球実験に際し多大なご助力をいただきましたことを感謝いたします。また電気化学方式のオゾンゾンデのデータを提供していただいた名古屋大学太陽地球環境研究所の近藤教授他の皆様に感謝いたします。

## 参 考 文 献

- [1] 松坂幸彦, 山上隆正, 矢島信之, 太田茂雄, 秋山弘光, 並木道義, 岡部選司, 本田秀之, 鳥海道彦, 1992: 超薄型高高度気球, 平成4年度大気球シンポジウム, 17-23.
- [2] 岡部選司, 矢島信之, 山上隆正, 1991: 薄型高高度気球によるオゾン観測. 平成3年度大気球シンポジウム, 89-96.
- [3] 岡野章一, 田口 真, 岡林昌宏, 福西 浩, 1992: 高高度ポリエチレン気球によるオゾン高度分布観測, 平成4年度大気球シンポジウム, 111-113.
- [4] Molina, L. T. and Molina, M. J., 1986: Absolute Absorption Cross Section of Ozone in the 185- to 350-nm Wavelength Range, *J. Geophys. Res.*, **91**, 14501-14508.