

高高度気球搭載光学オゾンゾンデを用いた 成層圏オゾン高度分布の観測

岡 林 昌 宏¹・村 田 功¹・福 西 浩¹

Stratospheric Ozone Profiles Observed by Balloon-borne Optical Ozone Sonde

By

Masahiro OKABAYASHI¹, Isao MURATA¹ and Hiroshi FUKUNISHI¹

Abstract: We developed an optical ozone sonde on board a thin-film high-altitude balloon for an *in situ* measurement of the upper stratospheric ozone in 1993. Since then, observations using developed balloon-borne optical ozone sondes were performed at Sanriku Balloon Center every year until 1999. From 1994 to 1998, observations at Svalbard in the Arctic were also performed. The balloon-borne optical ozone sondes measure the intensity of solar radiation at ozone Hartley band absorption at every 30-40 m in the vertical. Due to a smoothing procedure used for data analysis, the vertical resolution of obtained ozone profiles are limited to 1 km. Before this balloon-borne optical ozone sonde technique was developed, there was no method to obtain a few kilometer scale ozone vertical distribution structure in the altitude range from 30 to 40 km or above.

概 要

上部成層圏オゾンの現場観測を目的として薄型高高度気球搭載用光学オゾンゾンデを1993年に開発した。以来、1999年まで宇宙科学研究所三陸大気球観測所で毎年観測を行ってきた。1994年から1998年にはスヴァールバル諸島に於いても観測を行った。高高度気球搭載光学オゾンゾンデは約1kmの高度方向の分解能を有する。特に上部成層圏の30km以上、気球到達高度42kmまでの高度範囲でこれほど細かい高度分解能でオゾン高度分布を観測する手段はこれまで無かった。これによって、上部成層圏のオゾン高度分布の数kmスケールの構造が観測できるようになった。

重要語：オゾン，成層圏，気球，紫外線

¹ 東北大学大学院理学研究科

1. はじめに

人類活動によって大気中に放出された塩素化合物を中心とする大気微量成分による成層圏オゾンの破壊は、1987年にモントリオール議定書が採択され特定フロン生産・放出の規制が決定されて12年が経過した現在でも進行している。南極で9～10月に現れる南極オゾンホールは1980年代から発生し始め現在まで続いている。また、北半球に於いても北極上空の成層圏オゾンの減少やその影響による中緯度帯におけるオゾンの減少が観測されるなど、北半球中高緯度のオゾンの分布や関連気体との関係を解明することが急務となっている。

クロロフルオロカーボン類(CFCs)はその発明以来地球大気中に放出され続け蓄積された。CFCsの中でも最も広く利用されていたCFC11、CFC12は上部成層圏で特に強く太陽紫外線により光解離される。また上部成層圏はオゾン分布を支配するメカニズムが大気力学よりも光化学によって支配されており、この高度領域ではCFCsのオゾンに対する影響が直接的に現れると考えられている。対流圏に蓄積されたCFCsは成層圏へ供給され続け、あと数十年間は成層圏オゾンに影響を与え続けると言われている。この様に成層圏オゾンの破壊は依然として予断を許さない状況にあり、長期的なモニタリングを続けていかなければならない。

宇宙科学研究所によって開発された薄型高高度気球は上部成層圏の高度40 km以上まで容易に到達することが可能であり、容積5,000 m³のBT5気球の場合は2 kgの観測器を搭載して高度42 kmまで到達することが出来る。これによって、これまで直接観測を行うにはロケットしか手段がなかった上部成層圏オゾンを、より詳細に観測できる手段が提供された。我々はこの高高度気球に搭載する光学オゾンゾンデの開発を1992年より開始し、1993年6月に三陸大気球観測所においてこの高高度気球搭載用光学オゾンゾンデによる初めての観測を行った。その後、1994年から1999年までの毎年、6年連続して8月下旬～9月上旬の期間に三陸に於いて観測を行ってきた。また、1994年から1998年にはスヴァールバル諸島スピッツベルゲン島ニーオルスンに於いても夏季に観測を行った。

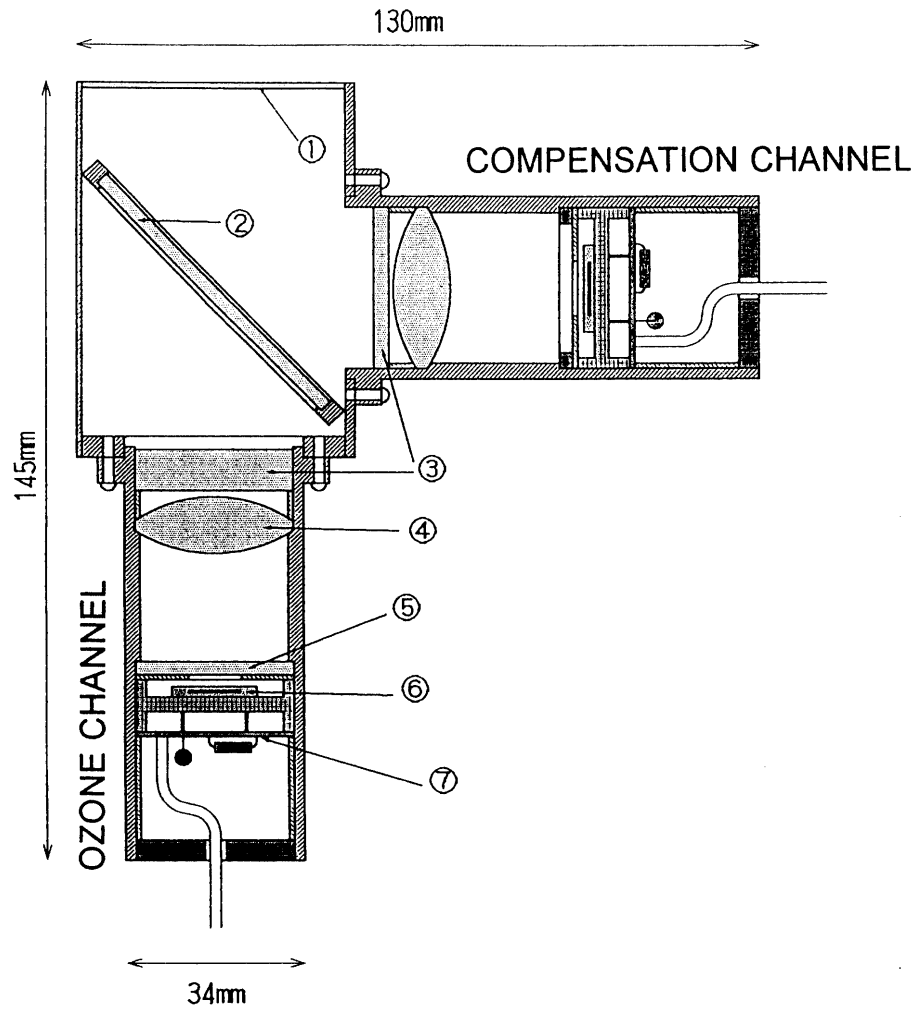
ここでは、高高度気球搭載光学オゾンゾンデのオゾン高度分布測定性能を、ECCオゾンゾンデとの同時観測との比較と、2台の光学オゾンゾンデの同時観測によるセルフチェックによって検証する。

2. 観測器

光学オゾンゾンデは、オゾンハートレー帯吸収によって太陽光の300 nm付近の紫外線の強度が気球の上昇時または下降時に高度に対して変化することからオゾンの鉛直分布を得るという測定原理である。受光面はテフロン製の拡散板になっており、ここに直達太陽光を受ける。これにより太陽の方向を追及しなくても光を観測器内部に取り込むことができる。内部に取り込まれた光は石英製のビームスプリッターによって分けられる。ビームスプリッターを透過した光はオゾンによる吸収を受けた太陽紫外線の強度を測定するフォトメータに入る。ビームスプリッターを反射した光はオゾンの吸収を受けない波長(420 nm)の太陽光強度を測定するフォトメータに入る。このオゾンによる吸収のない太陽光強度の測定は、観測器の揺れによる入射光量の変化を、2つのフォトメータの信号の比をとることによって打ち消すためである。各フォトメータは干渉フィルターによってそれぞれの波長の光を分光する。また、石英製のレンズによって、干渉フィルターへ垂直に入射した光がフォトダイオードに焦点を結ぶようにしてある。光学オゾンゾンデ光学系を図1に示す。

光学オゾンゾンデは太陽光強度の他に、気温、気圧を測定し、また、温度ドリフトの補正のために各フォトメータの温度をモニターしている。これらの測定データは無線で送信され、地上で受信し記録される。

光学オゾンゾンデを搭載する気球はBT5気球を使用した。気球と観測器の間にはカッターとパラシュートと巻き下げ器が取り付けられている。光学オゾンゾンデの上に、気球からの反射光を遮る円盤を設置している(図2)。



No.	Name	Material	Remarks
1	DIFFUSER	Teflon	50 × 70 (mm)
2	BEAM SPLITTER	quartz	60 mm φ
3	INTERFERENCE FILTER		VACUUM OPTICS CORP. OF JAPAN UV : λc 300 nm, FWHM 10 nm VIS. : λc 420 nm, FWHM 15 nm 30 mm φ
4	LENS	quartz	30 mm φ
5	UV TRANSMITTING VISIBLE ABSORBING FILTER		SIGMA KOKI CO. UTVAF-30C-34U
6	PHOTODIODE		HAMAMATSU S1227-1010BQ
7	PRE-AMP		

図1 光学オゾンゾンデ光学系の断面図

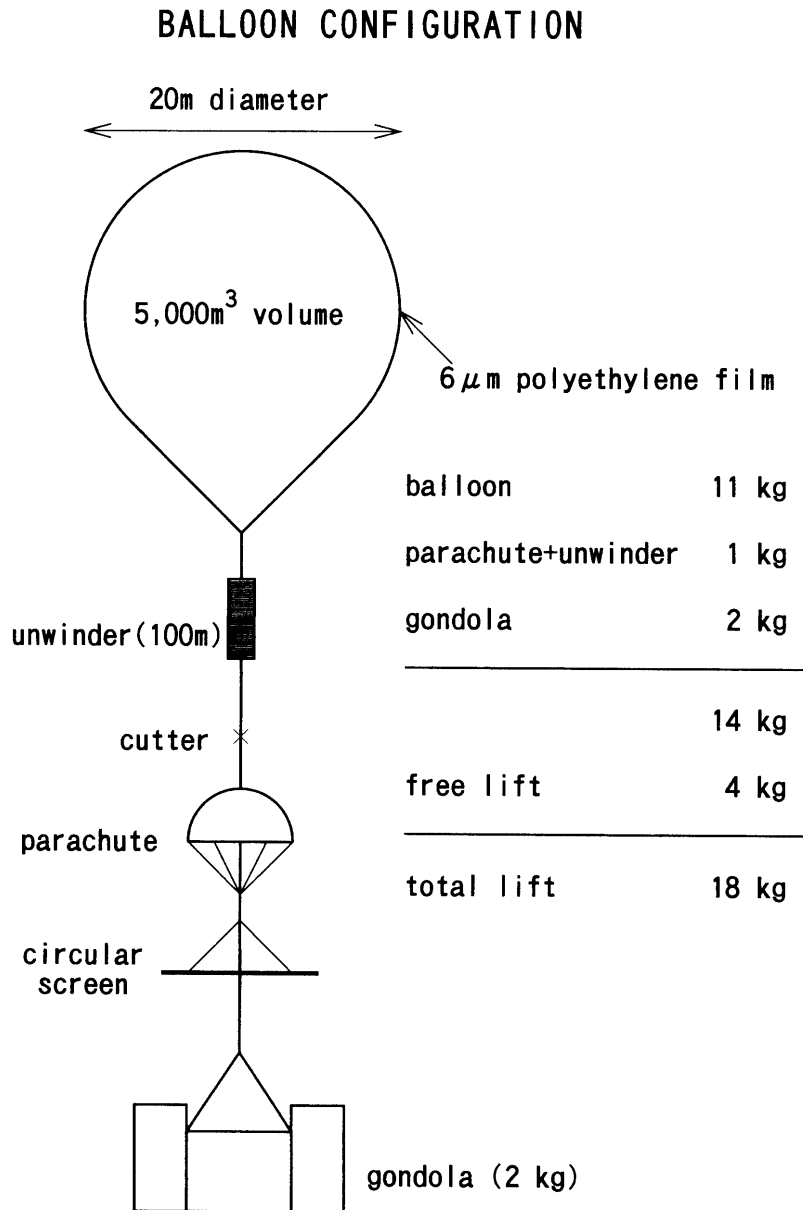


図2 薄型高高度気球搭載光学オゾンゾンデの観測時の荷姿の例

3. 観 測

宇宙科学研究所三陸大気球観測所（北緯 39.09 度，東経 141.49 度）において 1993 年から 1999 年まで光学オゾンゾンデ観測気球実験を行った。1994 年から 1998 年にはスヴァールバル諸島スピッツベルゲン島ニーオルスン（北緯 78.93 度，東経 11.95 度）で光学オゾンゾンデ観測を行った。1998 年 1 月には鹿児島宇宙空間観測所（北緯 31.15 度，東経 131.04 度）でロケットとのキャンペーン観測を行った。観測日，放球時刻等を表 1 に示す。

気球は放球後約 2 時間 30 分で 40 km を越え最高高度に到達する。最高高度に到達した後，カッターによって切り落とし強制的に落下させる。その後，観測器はパラシュートによって減速しながら下降し，30 分～1 時間後に海上に着水し観測を終了する。

表1 高高度気球搭載光学オゾンゾンデ観測地、観測日時

光学オゾンゾンデ観測リスト

年月日	観測地	放球時刻	最高高度	最高高度到達時刻	受光面形状	オゾン波長	同時観測
1993.05.24	三陸	07:09:19 JST	46.0 km	09:26:19 JST	磨硝子+テフロン	296 nm, 305 nm	
1993.06.09	三陸	09:43:48 JST	40.6 km	12:00:48 JST	磨硝子+テフロン	296 nm, 305 nm	ECC(非同時)
1993.09.10	三陸	10:53:24 JST	41.2 km	13:08:24 JST	磨硝子+テフロン	296 nm, 305 nm	
1994.05.29	三陸	10:17:40 JST	41.2 km	12:32:40 JST	テフロン平板	300 nm	
1994.05.30	三陸	09:54:41 JST	43.8 km	12:13:41 JST	テフロン平板	300 nm	
1994.07.23	Ny-Ålesund	10:39:09 UT	45.3 km	14:12:50 UT	テフロン平板	300 nm	ECC同時
1994.07.27	Ny-Ålesund	09:55:56 UT	43.7 km	12:11:34 UT	テフロン平板	300 nm	ECC同時
1994.08.27	三陸	09:57:05 JST	44.3 km	12:22:05 JST	テフロン平板	300 nm	
1995.07.30	Ny-Ålesund	21:00:20 UT	41.7 km	23:11:01 UT	円錐	600 nm	ECC同乗, ECC同時
1995.07.31	Ny-Ålesund	09:52:35 UT	43.5 km	12:03:56 UT	テフロン平板	300 nm	ECC同乗
1995.07.31	Ny-Ålesund	15:19:08 UT	39.8 km	17:37:48 UT	テフロン平板	300 nm	ECC同乗, ECC同時
1995.08.04	Ny-Ålesund	21:20:49 UT	36.5 km	23:18:40 UT	円錐	600 nm	ECC同時
1995.09.02	三陸	10:03:55 JST	42.6 km	12:29:01 JST	テフロン平板	300 nm	
1996.01.27	三陸	11:14:13 JST	23.7 km	13:17:13 JST	テフロン平板	300 nm	
1996.01.28	三陸	07:50:02 JST	41.0 km	10:12:02 JST	テフロン平板	300 nm	
1996.08.18	Ny-Ålesund	21:53:33 UT	40.1 km	24:01:04 UT	テフロン半球	300 nm	ECC同乗, ECC同時
1996.08.24	Ny-Ålesund	10:46:53 UT	38.4 km	13:07:18 UT	テフロン半球	300 nm	ECC同乗, ECC同時
1996.08.24	Ny-Ålesund	21:53:59 UT	40.0 km	24:03:53 UT	円錐	600 nm	ECC同乗
1996.08.27	Ny-Ålesund	19:52:11 UT	44.0 km	22:11:09 UT	円錐	600 nm	ECC(非同時)
1996.09.10	三陸	13:34:49 UT	40.7 km	15:49:49 JST	テフロン半球	300 nm	
1997.07.14	Lindenberg	07:30:36 UT	30.6 km	09:09:51 UT	テフロン半球	300 nm	
1997.08.19	Ny-Ålesund	11:12:00 UT	41.8 km	13:32:57 UT	テフロン半球	300 nm	ECC同時
1997.09.05	三陸	09:54:23 JST	41.4 km	12:17:23 JST	テフロン平板	300 nm	GA
1997.09.09	三陸	10:54:57 JST	43.8 km	13:00:57 JST	テフロン平板	300 nm	酸素原子
1998.01.25	内之浦	12:03:20 JST	41.1 km	14:19:52 JST	テフロン半球	300 nm	KI, ロケット
1998.08.29	Ny-Ålesund	13:08:20 UT	41.8 km	15:41:01 UT	テフロン半球	300 nm	ECC同時
1998.09.04	三陸	10:08:35 JST	41.0 km	12:25:49 JST	テフロン平板	300 nm	BOS同乗
1999.01.25	三陸	09:57:12 JST	40.7 km	12:14:04 JST	テフロン半球	300 nm	
1999.08.31	三陸	09:59:06 JST	41.9 km	12:17:06 JST	テフロン平板	300 nm	

ECC (electrochemical concentration cell): 大気を反応液の入った反応管に取り込み電気化学反応によって大気中のオゾンの量を測定するオゾンゾンデ。
 同時観測: ECC同乗=光学オゾンゾンデと一緒に高高度気球に搭載したECCオゾンゾンデ。ECC同時=別のゴム気球で、高高度気球搭載光学オゾンゾンデと同時に放球したECCオゾンゾンデ。ECC(非同時)=高高度気球搭載光学オゾンゾンデの観測の前12時間以内にゴム気球で観測したECCオゾンゾンデ。GA=相磁気姿勢センサ。KI=日本製電気化学オゾンゾンデ。

4. オゾン数密度の導出法

オゾン量の導出法は Holland *et al.* [1] の方法に基づいて開発した。

受光面に入射する直達太陽光の量はゴンドラの揺れによって変化するが、オゾンチャンネルの光電流値を補正チャンネルの光電流値で除算することにより揺れによる光量変化が補正される (図3)。

オゾンによる波長 λ の太陽光の吸収は、

$$I(\lambda) = I_0(\lambda) \cdot e^{-\sigma(\lambda)u} \quad (1)$$

と表される。 $\sigma(\lambda)$ はオゾンの吸収断面積スペクトル [2], u は光路上のオゾンコラム量である。実際に測定される量は、オゾンに吸収された太陽光強度とフィルター透過率の積を波長で積分した太陽光強度の、大気圏外での値に対する相対値

$$\frac{I}{I_0} = \frac{\int F(\lambda) I_0(\lambda) e^{-\sigma(\lambda)u} d\lambda}{\int F(\lambda) I_0(\lambda) d\lambda} \quad (2)$$

である。 I は気球高度でフィルターを透過して測定される太陽紫外線強度、 I_0 は太陽紫外線が大気圏外でフィルターを透過して測定される強度、 $F(\lambda)$ はフィルターの分光透過率、 $I_0(\lambda)$ は太陽スペクトル [3] である。(2)式を次のような u についての方程式で表し、これを解くことにより光路上のオゾンのコラム量を求める。

$$u = -\frac{1}{\alpha(u)} \ln \frac{I}{I_0} \quad (3)$$

SANRIKU 1998.09.04 10:08:35JST

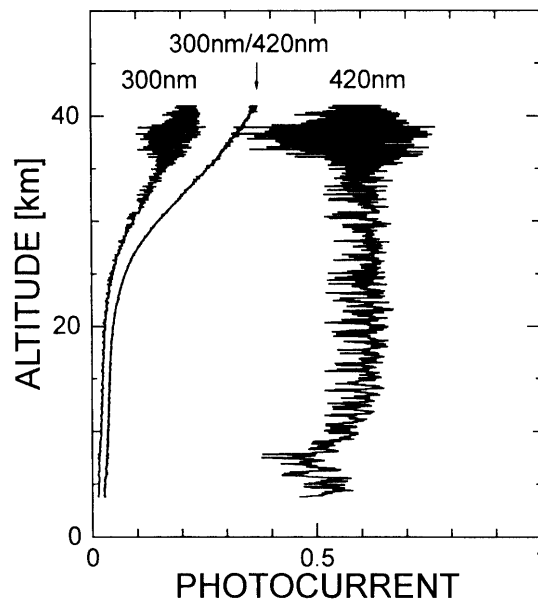


図3 光学オゾンゾンデ観測時の紫外チャンネル (300 nm) 補正チャンネル (420 nm) 各フォトダイオード光電流値とその比 (300 nm/420 nm) の高度変化の例

ただし $\alpha(u)$ は

$$\alpha(u) = -\frac{1}{u} \ln \frac{\int F(\lambda) I_o(\lambda) e^{-\sigma(\lambda)u} d\lambda}{\int F(\lambda) I_o(\lambda) d\lambda} \quad (4)$$

のような u の関数となる。計算の簡略化のため、 α を u の3次多項式で近似し、(3)式を u の4次方程式として計算機で解く。

気球観測では大気圏外へ出ることが出来無いため I_0 を測定することが出来ないので、 I_0 は気球の最高到達高度より上に存在するオゾンのコラム量をモデルより仮定し、

$$I_o = I \cdot e^{\alpha u} \quad (5)$$

によって求める。

5. ECC オゾンゾンデとの同時観測

1995年7月31日にニーオルスンで放球したBT5気球に搭載した光学オゾンゾンデとECCオゾンゾンデ（電気化学式オゾンゾンデ）による同時観測によって得られたオゾンの高度分布を図4に示す。光学オゾンゾンデとECCオゾンゾンデで高度8kmから28kmの範囲でオゾン高度分布の凹凸の構造が良く一致しており、光学オゾ

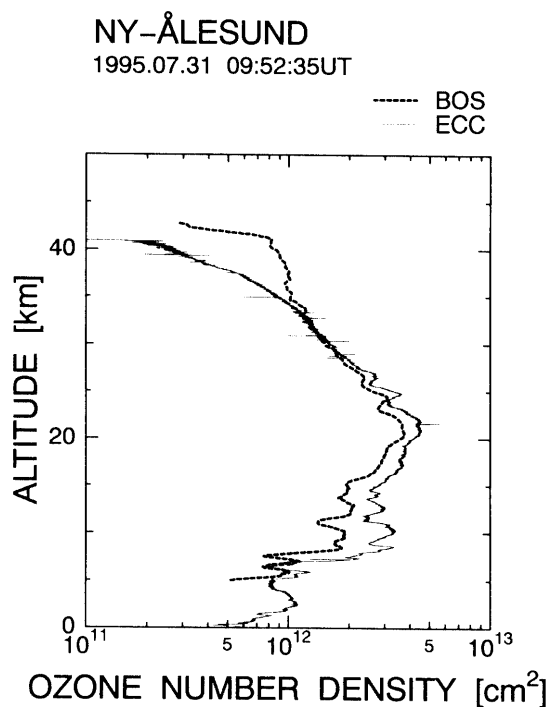


図4 1995年7月31日にニーオルスンで放球したBT5気球に搭載した光学オゾンゾンデとECCオゾンゾンデによる同時観測によって得られたオゾンの高度分布

ンゾンデが1 kmの高度分解能で観測できていることが分かる。一方、絶対値は低高度ほど光学オゾンゾンデが小さい値を示すが、これは光学オゾンゾンデ観測器内の温度変化による出力電圧のドリフトの補正が不十分なためと考えられ、今後の課題である。高度30 km以上では、ECCオゾンゾンデでは気圧が低いことにより反応管に外気を送り込むポンプの効率が落ちてオゾン測定精度が悪くなり、オゾン測定値が小さくなる傾向があるが、これに対し光学オゾンゾンデでは高度40 km以上まで十分な精度で測定できている。内之浦の観測でのロケット観測との比較や、三陸での光学オゾンゾンデ観測に対するつくばでのミリ波観測との比較でも高度30 km以上でそれぞれのオゾン測定値は15%程度で一致しており、この高度領域では光学オゾンゾンデが精度良く観測できていることが確認された。

6. 1つの気球に同時に搭載した2台の光学オゾンゾンデの比較

上部成層圏ではECCオゾンゾンデの精度が不十分になるため、オゾン高度分布の小規模構造を光学オゾンゾンデとECCオゾンゾンデとで比較することが出来ない。そこで、1つの高高度気球に、1台は気球から15 m下方に、もう1台は、間に100 mの巻下器を挟んで気球から115 m下方に、2台の光学オゾンゾンデを同時に搭載して1998年9月4日に三陸で観測を行った。巻下器の上と下の光学オゾンゾンデのそれぞれから導出したオゾン高度分布を比較した(図5)。高度25 km以上では両者のオゾン高度分布の構造も数密度の値も良く一致している。高度25 km以下ではオゾン高度分布の細かい構造が一致していない部分がある。この不一致については以下のような原因が考えられる。光学オゾンゾンデのオゾン数密度導出のS/Nは、高度変化に対して紫外線強度がどれだけ変化するか依存している。ニーオルスンの様な高緯度ではオゾンが下部成層圏にも多く分布しているのに対し、三陸の様な中緯度の場合下部成層圏にはオゾンが少ないため、高度25 km以下では紫外線強度の変化量が小さくS/Nがあまり良くない。高度25 km以上では紫外線強度の変化量が大きく紫外線強度測定ランダムノイズの影響

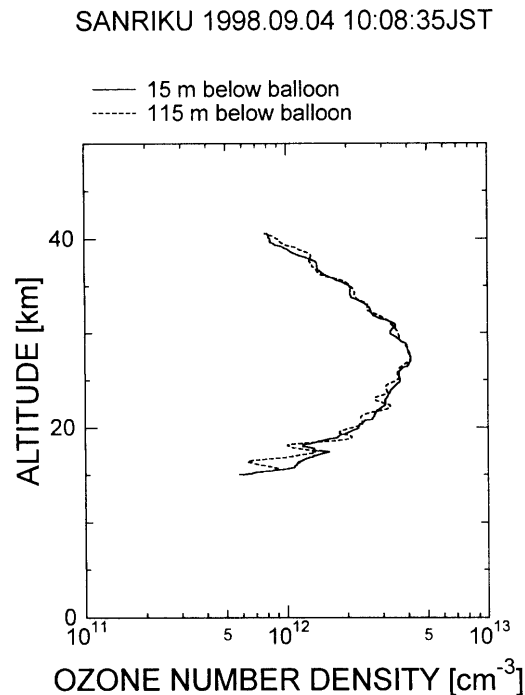


図5 1998年9月4日に三陸で行った2台の光学オゾンゾンデの同時観測で得られたそれぞれのオゾン高度分布

響を受けにくい信頼できる観測が出来ており、高高度気球による上部成層圏オゾンの観測という目的が果たせている。

7. 三陸上空の晩夏季のオゾン高度分布

1994～1998年の各年の8月下旬～9月上旬の高高度気球搭載光学オゾンゾンデから導出された三陸上空の成層圏オゾンの数密度の高度分布を図6に示す。これより、どの高度領域に於いてもオゾン高度分布に数kmスケールの波状構造が見られることがわかる。光学オゾンゾンデのランダム誤差は10%以下であるのに対し、このオゾン高度分布の波状構造の振幅は30%程度であるので、実際にオゾンがこのように分布していると考えられる。絶対量的な観点から各年相互間のオゾン量を比較してみると、高度30km以上においてはこの5年間のオゾン量の各年相互間の変化はこの高度領域で見られるオゾン高度分布の波状構造の振幅以下である。高度25km以下では各年を比較するとオゾンの絶対量に数十%の大きな違いが見られる。しかし、この高度領域ではオゾンの量が力学的に大きく変動を受けるので、現れている各年間の違いは、年々変動ではなく、日々変動のような短期的なものである可能性が大きい。

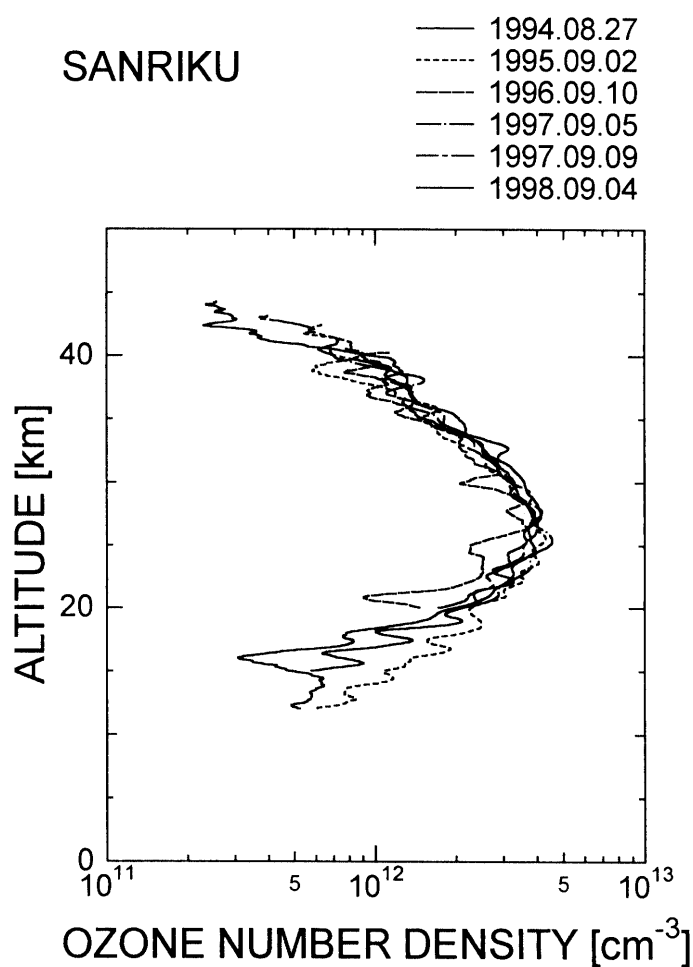


図6 1994～1998年の各年の8月下旬～9月上旬の高高度気球搭載光学オゾンゾンデから導出された三陸上空の成層圏オゾンの数密度の高度分布

8. 結 論

高高度気球搭載光学オゾンゾンデを使用することによって、電気化学オゾンゾンデでは高度分解能が不十分で観測できなかった高度 30 km から 42 km のオゾン高度分布の小規模構造の現場観測が可能となった。ニーオルスンで行った ECC オゾンゾンデとの同時観測で、光学オゾンゾンデはオゾン高度分布を高度分解能 1 km で観測できることが明らかになった。1998 年 9 月に三陸で行った 2 台の光学オゾンゾンデの同時観測により、光学オゾンゾンデは 30 km 以上の上部成層圏でもオゾン高度分布の小規模構造を正しく観測できていることが明らかになった。

謝 辞

光学オゾンゾンデの開発当時には、当時東北大学の岡野章一助教授（当時、現教授）、田口真助手（当時、現国立極地研究所助教授）に多大なご協力を賜りましたことを感謝いたします。宇宙科学研究所の矢島信之教授、山上隆正助教授をはじめ気球工学部門の皆様、及び小山孝一郎教授には、気球実験に際し多大なご助力を賜りましたことを感謝いたします。ニーオルスンに於ける気球実験は、東北大学、国立極地研究所、宇宙科学研究所、アルフレッド・ウェゲナー極地海洋研究所（ドイツ）、ノルウェー極地研究所の協力により行われました。岡野章一教授、田口真助教授、H. ゲルナント博士（アルフレッド・ウェゲナー研究所）にはニーオルスン気球実験の実施から、得られたデータの検討まで、全般にわたってご協力いただきましたことを感謝いたします。

参 考 文 献

- [1] Holland, A. C., R. A. Barnes, and H. S. Lee, 1985 : Improved Rocket Ozonesonde (ROCOZ-A). 1: Demonstration of Precision, *Appl. Opt.*, **24**, 3286–3295.
- [2] Molina, L. T. and M. J. Molina, 1986 : Absorption Cross Section of Ozone in the 185-to 350-nm Wavelength Range, *J. geophys. Res.*, **91**, 14501–14508.
- [3] Mentall, J. E., J. E. Frederick, and J. R. Herman, 1981 : The Solar Irradiance from 200 to 330 nm, *J. geophys. Res.*, **86**, 9881–9884.