

## オゾン観測の概要

松原 廣司\*

Ozone Observations by the Japanese Antarctic  
Research Expedition (JARE)

Kouji MATSUBARA\*

**Abstract:** Ozone observations by the Japanese Antarctic Research Expedition (JARE) have been carried out since 1961. In the period of the Antarctic Climate Research Project (ACR) new observations were carried out in addition to historical observations using instruments such as Dobson spectrophotometer and ozonesonde. The new observations were as follows: 1) At Syowa Station surface ozone, UV-B radiation, columnar NO<sub>2</sub> and O<sub>3</sub>, total ozone and aerosol determined using a Dasibi ozone meter, Brewer spectrophotometer, visible spectrometer, and Polar Patrol Balloon (PPB), respectively, 2) Columnar and vertical ozone amount from the equatorial region to Antarctica on board the research vessel SHIRASE.

**要旨:** 昭和基地におけるオゾン観測は、1961年に開始された。南極変動研究 (ACR) 期間では従来から行われていたオゾン分光光度計およびオゾンゾンデによる観測に加えて、地上オゾン濃度観測、航空機によるオゾン濃度鉛直分布観測、紫外域日射観測、可視分光計による成層圏 NO<sub>2</sub>、O<sub>3</sub> 分光観測が実施され、また、「しらせ」船上においては赤道域から昭和基地までのオゾンゾンデ・オゾン全量観測、が実施された。このうち、地上オゾン濃度観測、紫外域日射観測、可視分光光度計による観測は現在も引き続き行われている。本稿では、観測方法、観測結果等の概要について観測開始以来の歴史的経過も含め報告する。

## 1. はじめに

南極地域観測隊によるオゾン観測は、1960年(昭和35年)に出発した第5次隊によって開始された。国内の定常的なオゾン観測が開始されてから6年後であった。その後、昭和基地再開後の第7次隊の研究観測を契機に以降ほぼ連続して観測が行われている。

ACR期間中のオゾン観測は、山内(1990)の報告にあるように、計画案作成当時は大気微量成分モニタリングのなかで、主にドブソンオゾン分光光度計およびオゾンゾンデを用いた定常観測を引き続き実施する計画であった。しかし、計画スタート後にCFCsによるオゾン破壊問題やCO<sub>2</sub>やメタンによる地球温暖化問題が世界的に注目され、タイミング良く観測の充実が

\* 仙台管区气象台. Sendai District Meteorological Observatory, 3-15, Gorin 1-chome, Miyagino-ku, Sendai 983.

図られた。

従って、本報告では ACR 以前の活動も含め、ACR 期間中のオゾン研究について紹介を行う。

### 2. 昭和基地におけるオゾン観測

表 1 は、南極におけるオゾン観測所のオゾンデータ取得状況を年ごとに追ったものである。南極でオゾン観測を行っているあるいは行ったことのある基地は、1950 年代前半から 1960 年代初頭に開始した基地と 1980 年代後半に開始した基地の二つに大別できる。昭和基地でのオゾン観測は 1961 年の第 5 次隊に始まり、その後第 7 次隊より本格的に観測を行ってきている。観測開始時期に若干の差異があるものの、英、米の基地と比肩できるデータを蓄積している。特に昭和基地におけるオゾンゾンデ観測データは、南極オゾンホールメカニズムを知る上で貴重なデータを提供したが、データ量、継続性において昭和基地のデータは大きな評価を受けている。

表 1 南極域におけるオゾン観測データの蓄積状況

気象庁オゾン層解析室のデータ蓄積状況等から作成。観測種別の「total」はオゾン全量、「ozonesonde」はオゾンゾンデ、「Umkehr」はオゾン反転観測を表す。なお、Amundsen-Scott 基地では近年も NOAA により観測が行われ、また Halley Bay 基地でも行われているがカナダのオゾンデータセンターにデータが送られていない。気象庁では、英国極地研究所との相互データ交換により Halley Bay 基地のデータを得ている。

Table 1. List of ozone observation stations and catalogue of ozone data.

国名	観測所名	観測種別	YEAR																																					
			56	57	58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71	72	73	74	75	76	77	78	79	80	81	82	83	84	85	86	87	88	89	90	91		
日本	SYOWA	total																																						
		umkehr																																						
		ozonesonde																																						
アメリカ	BYRD	total																																						
		umkehr																																						
		ozonesonde																																						
	AMUNDSEN-SCOTT	total																																						
イギリス	ARGENTINE ISLANDS	total																																						
		umkehr																																						
	HALLEY BAY	total																																						
		umkehr																																						
	KING EDWARD POINT	total																																						
		umkehr																																						
ニュージーランド	SCOTT BASE	total																																						
	ARRIVAL HEIGHTS	total																																						
ドイツ	FOSTER/NEUMAYER	total																																						
		ozonesonde																																						
アルゼンチン	MARAMBIO	total																																						
ロシア	MIRNY	total																																						

### 3. 南極上空のオゾン変化

南極の春に上空のオゾンが著しく減少するいわゆるオゾンホールと呼ばれる現象は 1970 年代末より顕著になった。この現象の端的な例として 10 月にオゾン全量が過去の観測結果と比較して異常に少ないことを世界に先駆け発見したのは、中層大気観測計画 (MAP) 期間中の 1982 年に第 23 次南極地域観測隊員として越冬した CHUBACHI (1984) である。オゾンホールの

強さまたは規模を定量的に表現するための世界的に統一した尺度はない。図1は、気象庁で解説の便を考慮して、45°S以南におけるオゾンホール状況を表す三つの要素を定義し、人工衛星による観測資料を用いて規模を評価している。オゾンホールの面積はオゾンホール発生以前には観測されなかったとされる 220 m atm-cm 以下の領域の面積 (km<sup>2</sup>)、最低オゾン全量は、オゾンホール内におけるオゾン全の最低値、オゾン破壊量はオゾンホール内のオゾン全量を 300

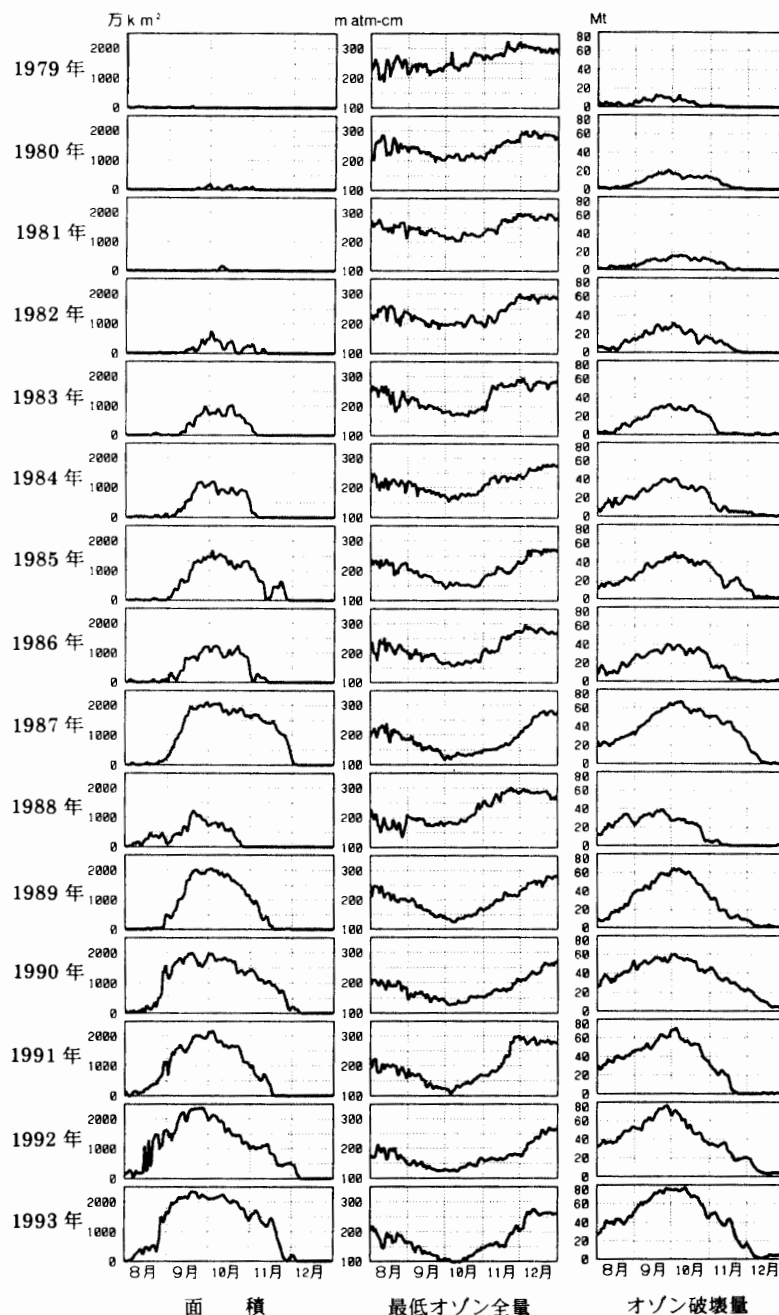


図1 1979-1993年の8月-12月のオゾンホールの3要素(左から面積、最低オゾン全量、オゾン破壊量)の日々の変化(気象庁編, 1994)。

Fig. 1. Day to day variation of the scale of the Antarctic ozone hole.

m atm-cm (オゾン全の全球平均) に回復させるために必要なオゾンの質量 (万 km<sup>2</sup>) をそれぞれ表す。CHUBACHI が越冬した 1982 年は、図 1 からわかるようにオゾンホールによるオゾンの減少がやや顕著になってきた年である。月平均値だけからみると 1982 年のデータを過去の資料と比較しても春季のオゾンが減少していることを明瞭に示すことが難しいことが図 2 からわかる。CHUBACHI はこれを日々のデータを過去の daily 値と比較することにより、春季のオゾン減少を明示した (図 3)。この図から過去のデータ蓄積の重みができる。特に、CHUBACHI に先立つこと 16 年前、極夜の時期に微弱な月光を用いて観測を行い通年観測を実施した SHIMIZU (1969) の貢献が大きい。その後 FARMAN *et al.* (1985) により、1957 年から 1984 年までのオゾン全量データに顕著な減少傾向があり、その減少傾向が CFCs の増加に対応するという著名な論文が発表された。この論文で扱われた最新データは、1984 年までのデータであり、

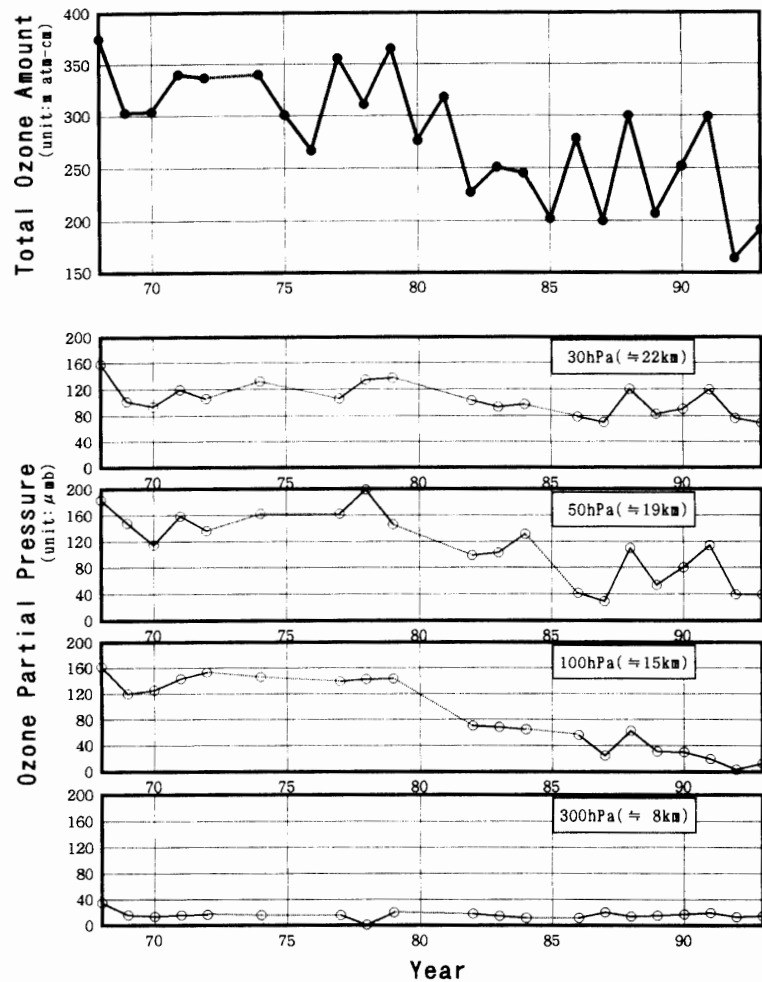


図 2 昭和基地におけるオゾン全量とオゾン分圧の 10 月月平均値の経年変化。オゾン分圧は、上から 30, 50, 100, 300 hPa 面。各気圧面の右の ( ) 内の値は各気圧面のおおよその高度を示す。

Fig. 2. The monthly mean total ozone amount and ozone partial pressure for October at Syowa Station.

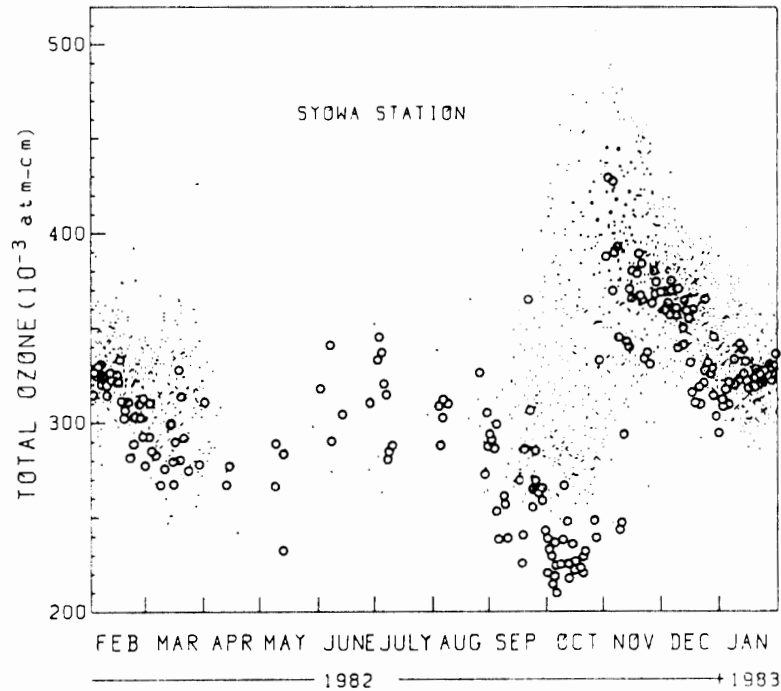


図3 昭和基地で観測された1982年2月-1983年1月の日々のオゾン全量(白丸)と1966年-1980年に得られた全データ(黒丸)との比較(CHUBACHI, 1984)

Fig. 3. Day to day variation of total ozone amount from February 1982 to January 1983 at Syowa Station.

減少傾向がより顕著になっている。

南極上空のオゾン破壊がオゾン層のどの高さに起こっているかを明示した IWASAKA and KONDO (1987) の解析結果が得られた。また、南極のオゾン減少そのものを観測したものではないが、大気微量成分の観測が中層大気観測計画 (MAP) 期間 (1982-1985) に行われ、南極オゾン層に関する多くの情報を得ることができた (例えば、IWASAKA, 1986; IWASAKA *et al.*, 1986; SHIBASAKI *et al.*, 1986)。

#### 4. ACR 期間

##### 4.1. 昭和基地におけるオゾン観測

昭和基地におけるオゾン観測の概要は以下の通りである。

- (a) オゾン全量: ドブソンオゾン分光光度計による; 1961-1962, 1966-
- (b) オゾン垂直分布: オゾンゾンデ (電気化学法; 気象庁タイプ), 反転法; 1966-
- (c) 地上オゾン: ダシビ (Dasibi) オゾン計; 1978, 1981 および 1989-

ACR 期間 (1987-1991) の観測も、上記のこれまでの観測の一環として行われた。また、1991年からはこれらの観測に加えて、有害紫外線 (UV-B) の観測を開始し、オゾン減少とそれに伴う紫外線量の変化の特徴を定量的に把握できるようになった。

観測によって得られた昭和基地におけるオゾン全量と 30 hPa, 50 hPa, 100 hPa, 300 hPa の 4 指定面におけるオゾン分圧の 10 月平均値の年々変動は図 3 に示すごとくである。図 3 から、オゾン全量データは 1970 年代後半よりほぼ 2 年周期で高低を繰り返しながら減少を続けていることを示し、オゾン分圧のデータは、50 hPa (高度約 19 km) および 100 hPa (高度約 15 km) 面でのオゾン減少が顕著であり、南極上空のオゾン減少は下部成層圏のオゾン減少により起きていることを示している。

昭和基地での春季のオゾン全量は、他の南極基地や極軌道衛星ニンバス 7 に搭載された TOMS データに見られると同様に 1987 年 (KANETO *et al.*, 1989) および 1989 年に過去の最低値を記録した。

前記 2 年の間の 1988 年には、1988 年の冬季後半に北半球の冬期に発生するものに時期および規模が匹敵する大昇温が発生した (KANZAWA and KAWAGUCHI, 1990)。突然昇温の力学的な現象に伴いオゾン全量の急激な増加が起こった。突然昇温は、図 4 に見られるごとく、春季のオゾン全量を増加させる。

SHIBATA and MORIMOTO (1992) は昭和基地の 1990 年 8 月と 9 月のオゾン全量の月平均値が過去の最低値を更新したことを報告するとともに、極成層圏雲 (PSCs) が昭和基地でも観測されたことを初めて報告している。

オゾン定常観測以外に、ACR 期間中にスタートあるいは実施した観測について、ほぼ年代順に示すと表 2 のようになる。以下ではこのうち船上オゾンゾンデ観測の概要とその結果について報告する。

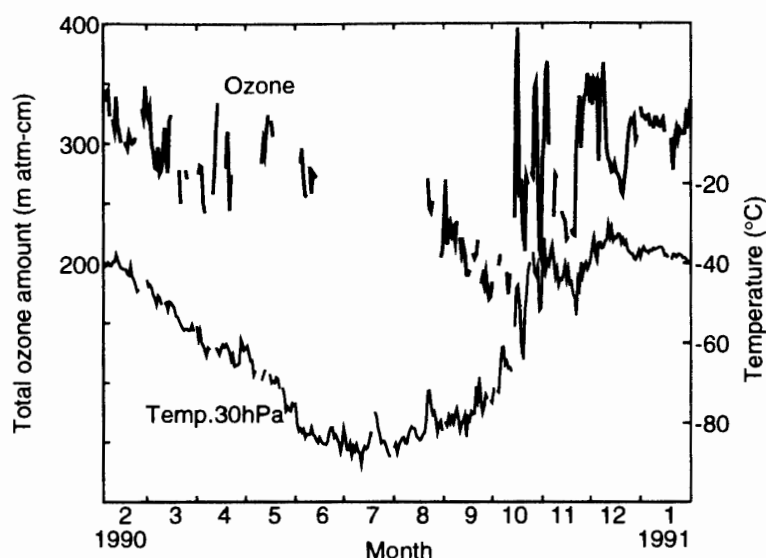


図 4 成層圏突然昇温時のオゾン全量の増加の例 (SHIBATA and MORIMOTO, 1992)

Fig. 4. An example of the increase of total ozone in the period of stratospheric warming in 1990.

表2 ACR 期間中に実施した観測と外国基地との情報交換状況 (定常観測を除く)  
 Table 2. List of ozone observations and data exchange with other stations in the ACR period.

項目	1987年 (28次)	1988年 (29次)	1989年 (30次)	1990年 (31次)	1991年 (32次)
他の南極基地との ワシントン共同観 測・データ交換等	ダクシガント トリ基地	マジョーシナヤ, ダクシガント リ, ケオルク・フォル スタ-各基地	マジョーシナヤ, ダクシガント リ, ケオルク・フォル スタ-各基地	マジョーシナヤ, ケオルク・フォル スタ-, マトリ各基 地	マジョーシナヤ, マトリ各基地
船上ワシントン観 測	-	-	-	-	
地上ワシントン濃 度観測 (ダシビ (Dasibi) ワシントン計による)					
ワシントン濃 度鉛直分布 観測 (航空機による)					
紫外域日射観測 (ブリューワ-分光光度 計等を用いたUV-B の観測)					
成層圏NO <sub>2</sub> 、O <sub>3</sub> 分 光観測 (可視分光 計による)					

4.2. 南極観測船「しらせ」船上でのオゾン観測

観測船「しらせ」船上での観測は以下の通りである。

- (a) 季節: 11月中旬～12月中旬
- (b) 緯度: 北緯 30 度～南緯 70 度 (東京～昭和基地)
- (c) 経度: 東経 30 度～東経 120 度 (東京～昭和基地); 主にインド洋上
- (d) 年 : 1987, 1988, 1989, 1990
- (e) 観測項目:
  - ・オゾン全量: ブリューワオゾン分光光度計; 毎日 (緯度で約 5 度ごと)

- ・オゾン垂直分布: オゾンゾンデ (電気化学式; 気象庁タイプ);  
18 観測 (1987), 19 観測 (1988), 14 観測 (1989), 15 観測 (1990)
- ・地上オゾン: ダシビオゾン計, 連続

得られたデータは地上オゾンを除き, 気象庁発行 (JAPAN METEOROLOGICAL AGENCY, 1963-1992) の「南極気象資料 (Antarctic Meteorological Data)」の Vol. 29 から Vol. 32 に掲載されている。1987 年の解析結果は MATSUBARA *et al.* (1990) により報告されている。

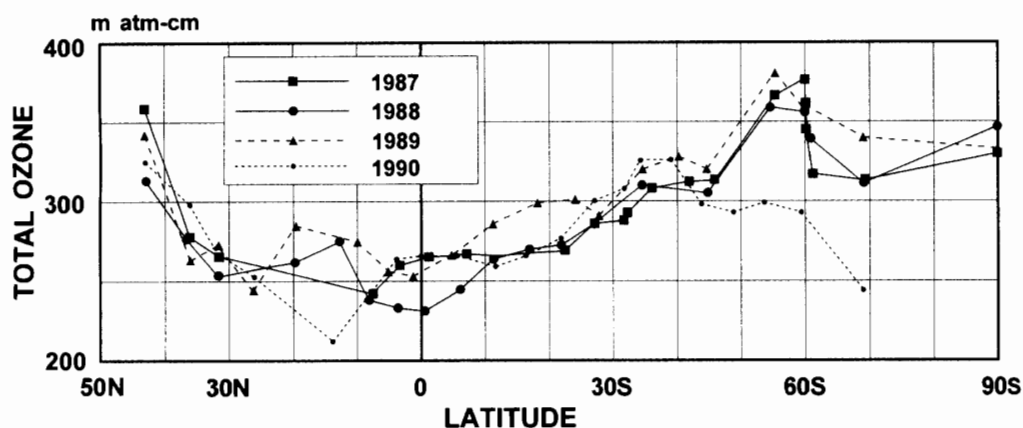


図 5a 「しらせ」船上観測によって得られたオゾン全量の緯度変化。ただし、北緯 26 度以北の値は、気象庁の札幌、つくば、鹿児島、那覇の「しらせ」出航日の 11 月 14 日の値を 14 日または値が得られていない場合には 14 日以降直近のデータを使用した。南緯 69 度の昭和基地及び南緯 90 度の南極点の値 (KOMHYR *et al.*, 1988, 1989, 1990) も同様  
Fig. 5a. Latitudinal variation of total ozone amount from 40° N to the Antarctic region.

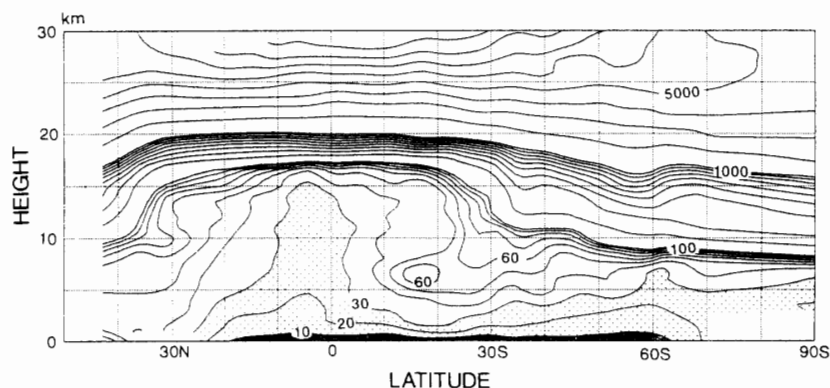


図 5b 「しらせ」船上観測によって得られたオゾン混合比 (ppbv) の緯度別鉛直分布。各年のデータについて緯度 1 度、高度 1 km の値を内挿して求めた。各グリッドの 4 年間で平均した。グリッドデータの平滑を行いコンターを引いた。1991 年の極点のデータが得られなかったため、南緯 70 度以南は 3 年のみの平均。影を施した部分は 30 ppbv 以下を示す。データの選択方法は図 5a と同様  
Fig. 5b. Latitude-height cross section of ozone mixing ratio in units of ppbv from 40° N to the Antarctic region.



図 5a, b は 1987 年, 1988 年, 1989 年, 1990 年の 4 年間のオゾン全量とオゾンゾンデ観測の結果について示す。図 5b は, 4 年間のデータより得られたオゾン混合比の緯度-高度断面図を示す。赤道域では, 塔状にオゾンの少ない領域が広がっており, この領域では対流活動が活発であり, 下部対流圏のオゾンの少ない空気が活発な対流によって上方へ輸送されていることが推定される。また, 南緯 30 度付近での高度 6-8 km 付近の高い濃度は, 成層圏のオゾンが対流圏界面を通じて対流圏に注入されている可能性を示している。

## 5. 1991 年のポーラーパトロールバルーン (PPB) による 南極オゾンホールの観測

ポーラーパトロールバルーン計画は, 自動的にバラストをコントロールできるゼロ気圧気球を使用し成層圏のほぼ同一気圧面を長期にわたって周回する気球実験である。PPB 計画は, 宇宙科学研究所 (ISAS) と国立極地研究所 (NIPR) の協力の元に実施された。オゾンホールの PPB 観測実験は極周回 (PPB) 計画の元に計画された。PPB を用いたオゾンホール観測の計画は, 国立極地研究所に設置されている宙空専門委員会の PPB 作業グループ (議長: 矢島, 宇宙科学研究所, 副議長: 江尻, 国立極地研究所), 近藤 (名古屋大学) と神沢 (国立極地研究所) はオゾンホール観測の研究代表者である。最終計画は KANZAWA and KONDO (1991) により紹介されている。

極周回気球 (PPB) 実験では, オゾンとエアロゾルを観測するための B<sub>5</sub> サイズ (約 5000 m<sup>3</sup>) 気球が 1991 年 9 月 23 日の 0755 UT に昭和基地から飛揚された。PPB は極渦の内部, すなわち南極オゾンホールの内部の下部成層圏の 80 hPa 面 (高度約 16 km) を東に 5 日間周回し, 9 月 28 日 02 UT 頃 80°S, 200°E (110°W) 付近に達し, 9 月 28 日 20 UT 頃 85°S, 200°E (160°W) 付近の地上の氷上に落下した。PPB の航跡は KANZAWA (1992) によって報告されている。PPB 観測は Lagrangian タイプの観測であり, すなわち, オゾンが最も破壊されるほぼ 80 hPa 面の空気塊の動きに従う変化を追跡できる観測である。観測によって得られたデータは, 昭和基地, ニンバス 7 の TOMS のオゾンデータ, JMA 客観解析によるデータと共に現在解析中である。

オゾン, エアロゾル粒径分布, 気温等が気球の飛行中に同時に観測された。観測に使用された装置は, 次の通り: オゾン測器はダシビオゾン計の改造, すなわちハートレイ吸収帯の紫外線の吸収が大きい 253.65 nm の吸収によるオゾン濃度を決定する紫外光度計; 2850 K の黒体放射をするタングステンランプを用いてミー散乱を測定することによってエアロゾルの粒径分布を測定するエアロゾル測定器, この装置によりエアロゾルの粒径に依存した散乱光のパルスの輝度が増加することを利用し, 直径 0.4-10 μm を 0.4 μm 以上, 0.5, 0.6, 0.8, 2.0, 4.0 の 6 段階で測定する; 気温はサーミスタ温度計によって測定する。データの取得と気球の位置測定は ARGOS システムを利用した。

## 6. おわりに

南極気候変動 (ACR) 期間中の研究・観測活動について第5次隊より続けられているオゾン定常観測の概要も含めて記述した。オゾン定常観測は現在も気象観測隊員によって継続され、ACR 期間中に開始され、あるいは定常化された地上オゾン濃度観測、ブリューワー分光光度計等を用いた紫外域日射観測、可視分光計による成層圏 NO<sub>2</sub>、O<sub>3</sub> 分光観測は現在も精力的に行われている。また、第29次隊より開始されたメタン等の温室効果ガスの観測も引き続き強化継続されており、地球環境のモニタリング基地としての昭和基地の観測態勢は大幅に強化された。これらの観測によって得られたデータが、オゾン層や地球温暖化の解明に多大な貢献をすることが期待される。

## 謝 辞

本稿をまとめるにあたって、気象庁観測部の赤木万哲氏には多くの図を作成頂いた。ここに記して感謝の意を表します。

## 文 献

- CHUBACHI, S. (1984): Preliminary result of ozone observation at Syowa Station from February 1982 to January 1983. Mem. Natl Inst. Polar Res., Spec. Issue, **34**, 13-19.
- FARMAN, J.C., GARDINER, B.G. and SHANKLIN, J. D. (1985): Large losses of total ozone in Antarctica reveal seasonal ClO<sub>x</sub>/NO<sub>x</sub> interaction. Nature, **315**, 207-210.
- IWASAKA, Y. (1986): Non-spherical particles in the Antarctic polar stratosphere-increase in particulate content and stratospheric water vapor budget. Tellus, **38B**, 364-374.
- IWASAKA, Y. and KONDO, K. (1987): Depletion of Antarctic ozone: Height of ozone loss region and its temporal changes. Geophys. Res. Lett., **14**, 87-90.
- IWASAKA, Y., ONO, T. and NOMURA, A. (1986): Changes in aerosol content and temperature in the Antarctic spring stratosphere: Lidar measurement at Syowa Station (69°00', 39°35'E) in 1983, 1984 and 1985. Geophys. Res. Lett., **13**, 1407-1410.
- JAPAN METEOROLOGICAL AGENCY (1963-1992): Antarctic Meteorological Data, **1-31**; Spec. Vol., **1-4**. (注: Vols. 28, 29, 30, 31 は ACR 期間に得られたデータについて記述している)
- 気象庁編 (1994): オゾン層観測報告: 1993. 東京.
- KANETO, S., YAMAMOTO, A., OGIHARA, H., SUGAWARA, H. and YAMANOUCHI, T. (1989): Ozone observations at Syowa Station from February 1987 to January 1988. Proc. NIPR Symp. Polar Meteorol. Glaciol., **3**, 1-14.
- KANZAWA, H. (1992): Polar Patrol Balloon (PPB) launched for observation of the Antarctic ozone hole of 1991. SCAR Newsletter-Solar Terrestrial and Astrophysical Research and Physics and Chemistry of the Atmosphere-, **No. 2** (Feb. 1992), 14-15.
- KANZAWA, H. and KAWAGUCHI, S. (1990): Large stratospheric sudden warming in Antarctic late winter and shallow ozone hole in 1988. Geophys. Res. Lett., **17**, 77-80.
- KANZAWA, H. and KONDO, Y. (1991): A plan for observation of the Antarctic ozone hole in 1991 under the Polar Patrol Balloon (PPB) project. Nankyoku Shiryô (Antarct. Rec.), **35**, 227-237.
- KOMHYR, W.D., FRANCHIOS, P.R., KUESTER, S.E., REITELBACH, P.J. and FANNING, M.L. (1988): ECC ozonesonde observations at South Pole, Antarctica, during 1988. NOAA Data Report ERL ARL-15, Air Resources Laboratory, Silver Spring MD, 319 p.

- KOMHYR, W.D., LATHROP, J.A., POSTON R.W. and MULLEN, T.O. (1989): ECC ozonesonde observations at South Pole, Antarctica, during 1989. NOAA Data Report ERL ARL-18, Air Resources Laboratory, Silver Spring MD, 277 p.
- KOMHYR, W.D., LATHROP, J.A., POSTON R.W. and MULLEN, T.O. (1990): ECC ozonesonde observations at South Pole, Antarctica, during 1989. NOAA Data Report ERL CMDL-5, Air Resources Laboratory, Silver Spring MD, 247 p.
- MATSUBARA, K., DOI, M., UEKUBO, T., OKADA, K., AOKI, S. and KAWAGUCHI, S. (1990): Preliminary results of ozone observation from the equatorial region to Antarctica in 1987. Proc. NIPR Symp. Polar Meteorol. Glaciol., **4**, 1-11.
- SHIBASAKI, K., IWAGAMI, N. and OGAWA, T. (1986): Stratospheric nitrogen dioxide observed by ground-based and balloon-borne techniques at Syowa Station (69.0°S, 39.6°E). Geophys. Res. Lett., **13**, 1268-1271.
- SHIBATA, S. and MORIMOTO, M. (1992): Results of ozonesonde observation at Syowa Station in 1990. Proc. NIPR Symp. Polar Meteorol. Glaciol., **6**, 46-52.
- SHIMIZU, M. (1969): Vertical ozone distribution at Syowa Station, Antarctica in 1966. JARE Sci. Rep., Ser. B (Meteorology), **1**, 38 p.
- 山内 恭 (1990): 「南極域における気候変動に関する総合研究 (ACR)」経過報告. 天気, **37**, 641-657.

(1994年11月4日受付; 1997年1月16日改訂稿受理)