

第40次南極地域観測隊気象部門報告 1999

東島圭志郎・佐藤 健・安ヶ平一也・村方栄真・河原恭一*

Meteorological observations at Syowa Station in 1999
by the 40th Japanese Antarctic Research ExpeditionKeishiro Higashijima, Tatsuru Sato, Kazuya Yasugahira, Eishin Murakata
and Kyouichi Kawahara*

(2003年5月6日受付; 2003年5月26日受理)

Abstract: This report presents the results of meteorological observations at Syowa Station from February 1, 1999 through January 31, 2000, carried out by the 40th Japanese Antarctic Research Expedition (JARE-40). The meteorological observation method, measuring instruments, means to compile statistics, and other aspects of the work were almost the same as those used by the 39th Japanese Antarctic Research Expedition.

Remarkable weather phenomena during the wintering period are as follows:

- 1) In the surface weather observations, in July, December and January, the atmospheric temperature was significantly lower recorded compared to normal average years, and also the atmospheric pressure was significantly lower in May, October, December and January. The lowest sea level pressure, 932.1 hPa was recorded during a severe blizzard on October 5 for the JARE-40 period (the 2nd lowest in history). There were 25-blizzards of which 4 were class A, 10 class B, and 11 class C, the same level as in a normal year.
- 2) As a result of total ozone observation, the large-scale ozone hole was observed, as in the previous year, and the monthly average amount of total ozone in November recorded the lowest ever. Then, the ozone hole disappeared in mid-December, however, the recovery of the total amount of ozone was the slowest in years.
- 3) Because, the temperature rise for the stratosphere was delayed, record-low monthly average temperature was observed in the lower stratosphere in springtime.
- 4) By observing with an aerosol sonde, we observed cloud particles of polar stratospheric cloud (PSCs), which are thought to be the most important cause of ozone holes formed in the Antarctic lower stratosphere in springtime.
- 5) In observation of surface ozone concentration, the rapid decrease of surface ozone concentration has been observed continuously, since JARE-38 started this observation.

要旨: これは、第40次南極地域観測隊気象部門が、1999年2月1日から2000年1月31日まで、南極昭和基地において気象観測を行った結果の報告である。気象観測の方法、測器、統計方法等は、第39次隊とほぼ同様である。

越冬期間中、特記される気象現象として、次のものがあげられる。

- 1) 地上気象観測において、7月、12月、1月の気温、5月、10月、12月、1月の

* 気象庁. Janan Meteorological Agency, Otemachi 1-chome, Chiyoda-ku, Tokyo 100-8122.

気圧が平年に比べ著しく低かった。10月5日に最低海面気圧 932.1 hPa（歴代2位）を記録した。ブリザードは、A級が4回、B級が10回、C級が11回の計25回あり、平年並みであった。

2) オゾン全量観測において、昨年に引き続き大規模なオゾンホールを観測し、11月の月平均オゾン全量は過去最低を記録した。その後、12月中旬にオゾンホールは消滅したが、オゾン全量値の回復は過去一番遅かった。

3) それに伴い、成層圏の昇温が遅れ、春季に下部成層圏で記録的に低い月平均気温を観測した。

4) エアロゾルゾンデ観測において、春期南極上空で形成されるオゾンホールの重要要因となっていると思われる極成層圏雲（PSCs）の雲粒子の分布状況を観測した。

5) 地上オゾン濃度観測において、観測を始めた第38次隊以来連続して地上オゾン濃度急減現象を観測した。

1. はじめに

日本の南極地域における気象観測は、昭和32（1957）年に実施された国際的な学術調査、IGY（第2回国際地球観測年）を契機として、第1次隊（昭和31年）が昭和32年1月、前人未踏の地に昭和基地を開設して以来、一時閉鎖した期間（昭和36-39年）を除き、昭和基地を中心に行ってきた。第40次南極地域観測隊気象部門は、昭和基地において1999年2月1日に第39次観測隊より定常気象観測業務を引き継ぎ、2000年1月31日までの1年間越冬観測を行った。

昭和基地における定常気象観測は、地上気象観測、高層気象観測、オゾン観測、地上日射放射観測、特殊ゾンデ観測等である。これらの観測は表1にあるような、それぞれの規定に従って観測を行っている。

地上気象観測において、第40次隊は、第39次隊が更新した総合気象観測装置に新たに視程計を取り付け正式に運用を開始すると共に、第39次隊に引き続き新旧観測装置の比較観測を行った。

地上日射放射観測において、第39、40次隊の2年計画でBSRNの基準に適合するように整備を行った。第39次隊では上向き、第40次隊では下向きの直達日射、全天日射、紫外域日射、散乱日射、赤外放射、地表反射放射の各観測の毎秒サンプリングシステムを導入し、極域の数少ないBSRN観測点として、精度の良い観測を開始した。

特殊ゾンデ観測において、オゾンゾンデ観測は、ほぼ毎週1回、計54台を飛揚した。また、第40次隊から定常観測となったエアロゾルゾンデ観測は、季節変動を把握するため計8台飛揚した。

地上オゾン濃度観測において、データセレクションを新たに見直した。

その他、海氷上に設置した雪尺による積雪深観測、S16に設置された気象ロボットによる気象観測、内陸旅行時の地上気象及び大気混濁度観測、「しらせ」船上における大気混濁度観測を行った。また、気水圏研究グループ並びに国立環境研究所との協力観測として、ILAS-II

表 1 昭和基地における気象観測の国際的位置付け

Table 1. International positioning of meteorological observations in Syowa Station.

観測種別		基準となる規定				通報及び報告		
						形態	時期	報告場所
地上気象	高層気象	WMO	GOS	GCOS		SYNOP CLIMAT	リアルタイム	GTS (WRMC)
				GCOS	GUAN	TEMP CLIMAT TEMP	リアルタイム	
日射放射	WCRP		GEWEX	BSRN			越冬後	(WRMC)
				AREP		GAW		
オゾン	地上オゾン						越冬後	(WDCGG)
	オゾン全量 オゾンゾンデ					電子メール	準リアルタイム	WMO事務局 (WOUDC)

() はノンリアル

- AREP : 大気調査・環境計画 (Atmospheric Research and Environmental Programme)
- BSRN : 基準地上放射観測網 (Baseline Surface Radiation Network)
- GAW : 全球大気監視計画 (Global Atmosphere Watch)
- GEWEX : 全球エネルギー・水循環研究計画 (Global Energy and Water Cycle Experiment)
- GOS : 全球観測システム (Global Observing System)
- GCOS : 全球気候観測システム (Global Climate Observing System)
- GTS : 全球気象通信網 (Global Telecommunication System)
- GUAN : 高層気象ネットワーク (GCOS Upper Air Network)
- WCRP : 世界気候研究計画 (World Climate Research Programme)
- WDCGG : 世界温暖化ガスデータセンター (World Data Center for Greenhouse Gases)
- WMO : 世界気象機関 (World Meteorological Organization)
- WOUDC : 世界オゾン・紫外線データセンター (World Ozone and Ultraviolet Radiation Data Center)
- WRMC : 世界放射モニタリングセンター (World Radiation Monitoring Center)

(Improved Limb Atmospheric Spectrometer) の基礎データ取得等を目的とした 24 回のオゾンゾンデ観測, 気水圏部門と共同して大気微量成分観測及びエアサンプリングを実施した。

これらの観測から得られたデータは Antarctic Meteorological Data, Vol. 40 (Japan Meteorological Agency, 2000) として CD-ROM で発表した。

ここでは, 観測の経過と結果の概要を述べる。

なお, 本報告中の 1999 年 1 月のデータは第 39 次観測隊の観測による。

2. 地上気象観測

2.1. 観測方法と測器

観測は地上気象観測指針（気象庁，1993a）及び世界気象機関（WMO）の技術基準に基づいて行い，統計処理については，地上気象観測統計指針（気象庁，1990a）に基づき行った。

観測結果は国際気象通報式（気象庁，1990b）の SYNOP 及び CLIMAT 形式で，気象衛星通報局装置（以下「DCP 装置」という）によって，ヨーロッパの静止気象衛星 METEOSAT 経由でドイツのダルムシュタット地上局へ送信され，そこからさらに全球気象通信網 GTS（Global Telecommunication System）回線を経由して直ちに世界の気象機関へ通報される。

観測項目と使用測器等を表 2 に示す。

(1) 総合自動気象観測装置による自動観測

気圧，気温，湿度，風向・風速，全天日射量，日照時間，積雪深及び視程については，総合自動気象観測装置（地上系）により連続観測及び毎正時の観測を行った。なお，視程計（現象判別付）及び降雨強度計付視程計（WIVIS）は目視観測の補助測器として運用した。測器感部の設置位置を図 1 に示す。

第 39 次隊まで使用していた AMOS-2（地上系）は引き続き運用し，総合自動気象観測装置（地上系）との比較データを取得した。その結果については，別に報告する。

(2) 目視観測

雲，視程については，目視により 1 日 8 回（00，03，06，09，12，15，18，21 UTC）の観測を行った。また，大気現象については，随時観測を行った。

(3) 海氷上積雪深観測

北の浦の海氷上に 20m 四方，10m 間隔に 9 本の竹竿を利用した雪尺を立て，週 1 回の割合で雪尺の雪面上の長さを測定し，前観測との差を 9 本平均して前回の積雪深に加算したものを積雪深観測値とした。なお，積雪深は雪尺設置時点を 0cm として起算する。

2.2. 観測経過

総合自動気象観測装置（地上系）系統の各測器は，概ね順調に作動した。

同装置は 1999 年 2 月 1 日に正式運用を開始し，国内の保守要領に準じて保守・点検を実施した。

時刻差は±3 秒以内に保ち，これを越えたときに時刻規正を実施したが，この際にシステム障害が発生することが時々あった。この障害のため，1999 年 3 月 25 日には 1 分間のデータの欠落が発生し，1999 年 11 月 7 日及び 2000 年 1 月 26 日には日照，日射などの積算カウンタが異常となった。ただし，手計算によってデータを補う等の処置を施し，いずれも欠測には至らなかった。

表2 昭和基地における地上気象観測使用測器等一覧表 (1999年2月~2000年1月)
 Table 2. Observation elements, frequency, minimum unit, instruments at Syowa Station (Feb. 1999–Jan. 2000).

観測種目	観測時刻	観測最小単位	使用測器等	型式	備考
現地気圧	連続・毎正時	0.1 hPa	電気式気圧計 (静電容量型)	PTB220	フォルトン型水銀気圧計により比較点検 (毎日)
	毎正時		フォルトン型水銀気圧計		
海面気圧	同上	0.1 hPa	—		気温・現地気圧から算出
気圧変化量・気圧変化型	毎正時	0.1 hPa	—		現地気圧から算出, 決定
気温	連続・毎正時	0.1 °C	電気式温度計	P1100	アスマン通風乾湿計により比較点検 (週1回)
			アスマン通風乾湿計		
湿度	同上	1 %	電気式湿度計 (静電容量型)	HMP233LJM	アスマン通風乾湿計により比較点検 (週1回)
			アスマン通風乾湿計		
蒸気圧	同上	0.1 hPa	—		気温・湿度観測値から算出
露点温度	同上	0.1 °C	—		気温・湿度観測値から算出
風向	同上	1 °	風車型風向風速計	FF-11	測風塔 (10.1 m) 上に設置
風速	同上	0.1 m/s			
全天日射量	同上	0.01 MJ/m	全天電気式日射計	MS-62F	2000年1月1日, 前室屋上から旗台地に移設
日照時間	同上	0.1 h	太陽追尾式日照計	MS-101D	2000年1月1日, 前室屋上から旗台地に移設
積雪深	同上	1 cm	超音波式積雪計	CF-212	観測棟下海側斜面で観測
雲量・雲形・向き・高さ	定時		目視		
視程	定時 (目視)	10 m (目視)	目視		
			視程計 (現象判別付)	TZE-6P	参考測器
			視程計	WIVIS	参考測器 (第37次隊で設置)
大気現象	常時		目視		
			視程計 (現象判別付)	TZE-6P	参考測器
			視程計	WIVIS	参考測器 (第37次隊で設置)

※観測時刻の「定時」は00, 03, 06, 09, 12, 15, 18, 21UTCの8回

越冬中, 計画停電及び事故停電が数回あり, 積雪計はUPSによる給電を行っていないため, その都度欠測した。また, 2000年1月14日にはUPSのバックアップ時間を超えたために, 全要素のデータが1分間欠落した。

装置には自己診断用の基準信号発生部 (CHECKER 基板) が実装されており, 1時間に1回, 気温, 湿度, 風向・風速, 日照, 日射の各要素の基準信号を発生して, データ変換部 (CONV. 基板) の点検を自動的に行う。通常, 湿度の基準信号は0%, 50%, 100%に対して±2%以内を許容範囲として設定するが, 第39次隊の試験運用期間中に, この範囲を超える

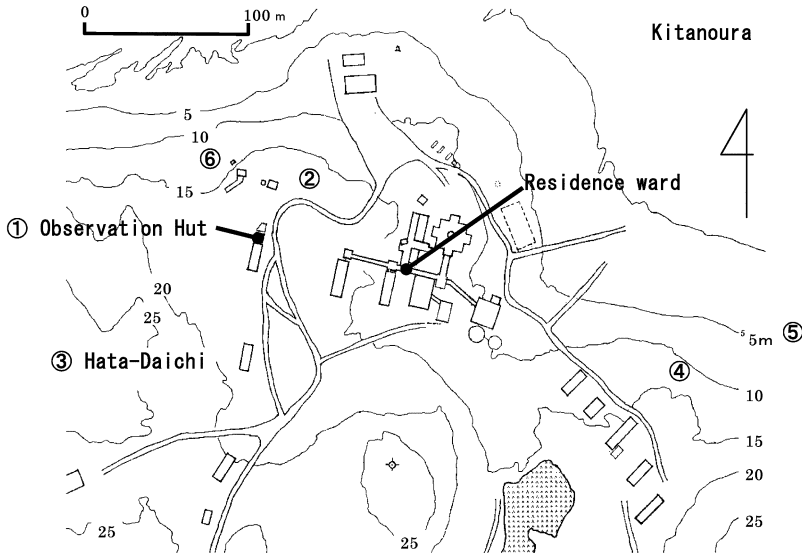


図1 昭和基地主要部と測器感部の配置（国立極地研究所（1998）に加筆）

- ① 地上気象観測: 気圧計, 日照計, 日射計
オゾン観測: ドブソン分光光度計
日射放射観測: ブリュウワ分光光度計, 下向き日射・放射
- ② 地上気象観測: 風向風速計, 温度計, 湿度計, 視程計
- ③ 地上気象観測: 日照計, 日射計
- ④ 地上気象観測: 積雪計
- ⑤ 日射放射観測: 上向き反射・放射
- ⑥ オゾン観測: 地上オゾンモニター

Fig. 1. Location of surface meteorological instruments in main part of Syowa Station.

ことがしばしばあったため、許容範囲を $\pm 2.1\%$ として運用し、第40次隊でCONV.基板の予備を持ち込んだ。第40次隊越冬開始後も許容範囲 $\pm 2.1\%$ での運用を継続したが、実際の点検値は $\pm 2\%$ の範囲内に収まっていたため、基板交換等を行わなかった。しかし、2000年1月3日に自己診断異常（湿度基準信号100%に対して変換基板出力97.8%）が発生し、特別値の欠測を生じた。CHECKER基板の調整を実施したが自己診断異常は回復しなかったため、CONV.基板の異常と判断して基板を交換し、その後は通常の許容範囲内で経過した。

風向風速変換部（J1基板）は、第41次隊が風向監視器付の新型を持ち込み、2000年1月8日に交換した。

観測装置処理部の処理ソフト（SOPS, Surface Observation Data Processing System）は、第41次隊が最新バージョンを持ち込み、2000年1月8日にインストールを行ったが、SYNOFの時刻設定等に一部不具合があったため旧バージョンに戻した。その後、1月28日にメーカーから気象庁経由でメールにより送られたモジュールをインストールし、良好に動作した。

(1) 気圧

気象棟観測室内に設置した電気式気圧計により通年観測した。測器の精度監視と器差補正值算出のために、基準器であるフォルタン型水銀気圧計との比較観測を毎日09LTに行った。比較観測では、器差が ± 0.2 hPa以内であることを確認するとともに、1カ月間の器差の平均を翌月の電気式気圧計の補正值とした。補正值は、4月が $+0.3$ hPaであったほかは、年間を通じて $+0.1$ - $+0.2$ hPaであり、動作状況は良好であった。

(2) 気温, 湿度

両測器とも百葉箱(強制通風式)内に置いて通年観測した。ブリザードの際には、百葉箱内に雪が詰まることがしばしばあり、その都度除雪を行った。

比較観測はアスマン通風乾湿計により週1回行い、アスマンの観測値を基準として、観測装置の値が気温においては $\pm 0.4^{\circ}\text{C}$ 、湿度は $\pm 4\%$ の許容範囲内にあることを確認した。比較結果は概ね良好であったが、アスマンによる湿度観測値の誤差は、気温 -10°C 以下では $\pm 5\%$ を超える(気象庁, 1993a)ため、観測装置の値が許容範囲外となることもあった。比較結果が許容範囲外の場合は、その結果は記録に残した上で、改めて条件の良いときに比較観測を実施した。

(3) 風向, 風速

風車型風向風速計を測風塔上に設置し通年観測した。

1999年2月に感部設置方位が、CW方向に 5° ずれていることが分かり、2月23日に修正した。2月1-23日の風向の時別値及び日最大風速と日最大瞬間風速の風向は、処理部に保存されている10秒生データを補正して再計算した。

1999年8月14-15日のブリザード時に高温で湿った雪が付着し、その後の気温低下により風向感部が凍結したため、8月17-18日の2日間にわたって断続的に欠測したが、感部の交換により復旧した。また、除雪中の事故で感部ケーブルの風向信号線が損傷し、12月17-21日の5日間、風向を欠測した。12月21日にケーブルの断線箇所を修復して復旧したが、この作業のために12月21日は風速も欠測した。

感部の塗装は、国内仕様よりも厚めとしたが、低温と強風により、部分的にひび割れや剝離を生じた。メーカーからの指示により、瞬間接着剤で応急的に補修し、観測には影響なかった。

(4) 日照時間, 全天日射量

感部は気象棟前室屋上に設置し、日照時間は太陽追尾式日照計で、全天日射量は全天電気式日射計で通年観測した。

1999年2月2日に追尾装置の不具合が発生し、両要素が欠測となったが、追尾装置及び感部を交換して復旧した。不具合の発生した追尾装置は、ノイズ等により追尾プログラムの学習機能が誤動作していたことが判明したため、保守プログラムによって学習機能をリセット

したところ正常に動作した。

1999年12月31日に測器感部を気象棟前室屋上から旗台地へ移設したが、この際、感部定数の設定ミスにより、全天日射量を欠測した。移設直後の自己診断異常で設定ミスに気づき修正したため、欠測は12月31日の1日のみであった。

(5) 積雪深

超音波式積雪計を観測棟北側の北の浦に下る斜面に設置し、通年観測した。

超音波式積雪計は、地面に向けた送受波器から超音波のパルスを発射し、雪面で反射したパルスを受信するまでの時間から、感部と雪面との距離を計測する測器である。新積雪が深くかつ低温の場合や、ふぶきの場合などに受信波のレベルが低下して測定不能となることが度々あり、特別値で約370個、日最深積雪で1999年7月18日と9月6-8日の計4日間欠測した。1999年1月、高周波ケーブルにシールドを実施し、さらに、7月以降は感部取り付け向きの調整、変換部アースの変更、感部の交換等を実施したが、顕著な改善は見られなかった。積雪計の設置位置は、北側に向かって傾斜しており、このことも受信波のレベル低下をもたらす一因となっていると考えられる。このようなことから、今後の運用にあたっては、感部設置位置の整地等も含めて、受信波レベルの向上とノイズの低減のための対策を検討する必要がある。

(6) 視程（視程計による参考記録）

1999年1月に総合自動気象観測装置（地上系）の感部の一つとして、視程計（現象判別付）を管制棟裏に設置した。

目視による観測値との対応は良く、参考測器として通年運用し、視程障害時の目視観測の補助や、大気現象発現時刻の決定等に利用した。

投受光部は主風向側に、基線が主風向と直交するように設置したが、ブリザードの際には雪が詰まって測定不能となることもあった。投受光部フードのヒーターは、感部への結氷を助長する恐れがあることから、使用しなかった。

(7) 海氷上の積雪深観測

第39次隊まで観測を行った場所が、夏期氷上輸送中にできたドリフトによって観測に不適切となったため雪尺の設置位置を北東に約100m移動し、海氷上での行動が解禁された3月下旬から観測を行った。

1999年12月までは、9本の雪尺は全て良好な状態であったが、2000年1月に入ると海氷の表面が緩み、4本程度が大きく傾いて測定不能となった。このため、その後1月末までは直立した雪尺のみを選択して観測を継続した。

2.3. 観測結果

月別気象表を表3に、年間の海面気圧、気温、風速、雲量、日照時間の旬毎の経過を図2

表3 昭和基地における地上気象観測月別気象表
Table 3. Monthly summaries of surface observations at Syowa Station.

年	1999												2000											
月	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
平均海面気圧 hPa	988.2	988.8	984.8	979.6	980.2	995.7	985.3	988	989.4	974.9	984.4	981	985	982.5	982.4	982.4	982.4	982.4	982.4	982.4	982.4	982.4	982.4	982.4
最低海面気圧 hPa	-	967.6	968.4	961.7	941	-	953.4	965.4	-	932.1	967.3	960.6	8	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11
平均気温 ℃	-1.2	-3.8	-7.5	-11	-12.7	-13.8	-21.1	-21.2	-19.4	-14.6	-7.4	-3.5	-2.3	-2.3	-2.3	-2.3	-2.3	-2.3	-2.3	-2.3	-2.3	-2.3	-2.3	
最高気温の平均 ℃	1	-1.2	-5	-8.8	-9.7	-10.6	-17.5	-17.2	-16	-11.8	-4.5	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	
最低気温の平均 ℃	-3.5	-6.7	-10.2	-13.6	-16.2	-17.3	-25	-25.2	-23.5	-19	-6.7	-5.6	-5.6	-5.6	-5.6	-5.6	-5.6	-5.6	-5.6	-5.6	-5.6	-5.6	-5.6	
最高気温 起日	6.3	2.1	2	-4.5	-2.5	-3.1	-6	-4.8	-6.4	-5	0.8	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	
最低気温 起日	15	17	4	1	23	25	1	14	17	17	7	17	19	19	19	19	19	19	19	19	19	19	19	
最低気温 起日	-7.1	-13.5	-25	-26	-27.2	-27.1	-37.7	-36.1	-35.8	-25.7	-22	-9.9	-11.9	-11.9	-11.9	-11.9	-11.9	-11.9	-11.9	-11.9	-11.9	-11.9	-11.9	
最低気温 起日	24	4	27	26	15	5	19	22	8	17	1	27	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	
最低気温 0℃以上の日数	7	-	2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
平均気温 0℃以上の日数	24	8	4	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
最高気温 -10℃以上の日数	31	28	27	22	17	15	6	6	4	11	29	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	
最低気温 -20℃未満の日数	-	-	3	2	7	8	22	24	21	14	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
平均気温 -20℃未満の日数	-	-	1	1	1	5	18	19	12	2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
最高気温 -20℃未満の日数	4	-	-	-	1	1	11	11	8	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
平均蒸気圧 hPa	4.1	2.9	2.6	2.1	1.9	1.6	1	1	1	1.3	2.5	3.1	2.1	3.6	3.6	3.6	3.6	3.6	3.6	3.6	3.6	3.6	3.6	
平均相対湿度 %	72	62	67	75	76	67	69	68	66	65	68	66	68	70	70	70	70	70	70	70	70	70	70	
平均風速 m/s	7.7	7.1	8.6	10.1	8.3	8.8	6.5	5.4	5.6	5.5	5.5	5.1	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	
最多風向 16方位	NE	ENE	ENE	ENE	NE	NE	NE	NE	NE	ENE	NE	NE	NE	NE	NE	NE	NE	NE	NE	NE	NE	NE	NE	
最大風速 m/s	29.9	26.4	38	29.9	40.3	41.1	38.8	32.4	22.4	36.2	26.8	21.4	41.1	26.1	26.1	26.1	26.1	26.1	26.1	26.1	26.1	26.1	26.1	
風向 起日	NE 28	E 25	ENE 5	ENE 20	ENE 23	NE 25	NE 2	NE 14	NE 27	ENE 5	NE 3	ENE 8	ENE 10	ENE 10	ENE 10	ENE 10	ENE 10	ENE 10	ENE 10	ENE 10	ENE 10	ENE 10	ENE 10	
最大瞬間風速 m/s	37.5	34.2	48.4	38.2	50.3	54.6	51.8	40.9	30.6	46.7	34.4	28.4	54.6	33.7	33.7	33.7	33.7	33.7	33.7	33.7	33.7	33.7	33.7	
風向 起日	ENE 28	ENE 25	ENE 5	NE 20	E 23	NE 25	NE 2	NE 30	NE 11	ENE 5	NE 3	ENE 9	ENE 10	ENE 10	ENE 10	ENE 10	ENE 10	ENE 10	ENE 10	ENE 10	ENE 10	ENE 10	ENE 10	
最大風速 10.0m/s以上の日数	21	17	25	21	19	19	17	14	16	15	15	13	213	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	
15.0m/s以上の日数	12	8	15	15	12	13	9	6	11	12	7	4	124	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	
30.0m/s以上の日数	-	-	1	-	2	2	2	2	2	1	-	-	10	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
日照時間 h	262	210.4	122.7	40.6	10.5	-	3	62.2	135.6	208.6	266.6	450.5	1772.7	404.7	404.7	404.7	404.7	404.7	404.7	404.7	404.7	404.7	404.7	
日照率 %	37	45	31	16	9	-	6	29	40	44	42	61	57	57	57	57	57	57	57	57	57	57	57	
平均全日射量 MJ/m ²	24.9	17.1	8.1	2.4	0.3	0	0.1	1.5	6.4	15	24.5	32.1	111	27.8	27.8	27.8	27.8	27.8	27.8	27.8	27.8	27.8	27.8	
日照日数	3	7	6	18	25	30	28	11	7	7	6	3	151	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	
平均雲量	7.3	6.8	7.7	9	8.6	7.8	6.2	6.9	7.7	7.9	7.2	6.9	7.5	5.9	5.9	5.9	5.9	5.9	5.9	5.9	5.9	5.9	5.9	
平均雲量 1.5未満の日数	4	4	2	-	1	-	6	3	2	2	2	3	3	29	29	29	29	29	29	29	29	29	29	
平均雲量 8.5以上の日数	19	16	19	24	22	18	13	14	16	20	15	15	211	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	
曇日数	20	10	19	22	23	15	16	17	16	19	13	10	200	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	
霧日数	1	-	1	-	-	-	-	-	3	2	-	-	7	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
ブリザード日数	2	0	0	7	9	7	9	5	4	4	3	0	50	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	

1)統計方法は「地上気象観測統計指針」(気象庁)による。
 2)5月29日から7月14日までは、計算上太陽中心は地平線上に現れない。日照日数はこの期間の日数(47日)を含む。
 3)「r」の値は、期間中に20%以下の欠測があったことを示す。
 4)ブリザードの基準については、本文「ブリザード統計」を参照。

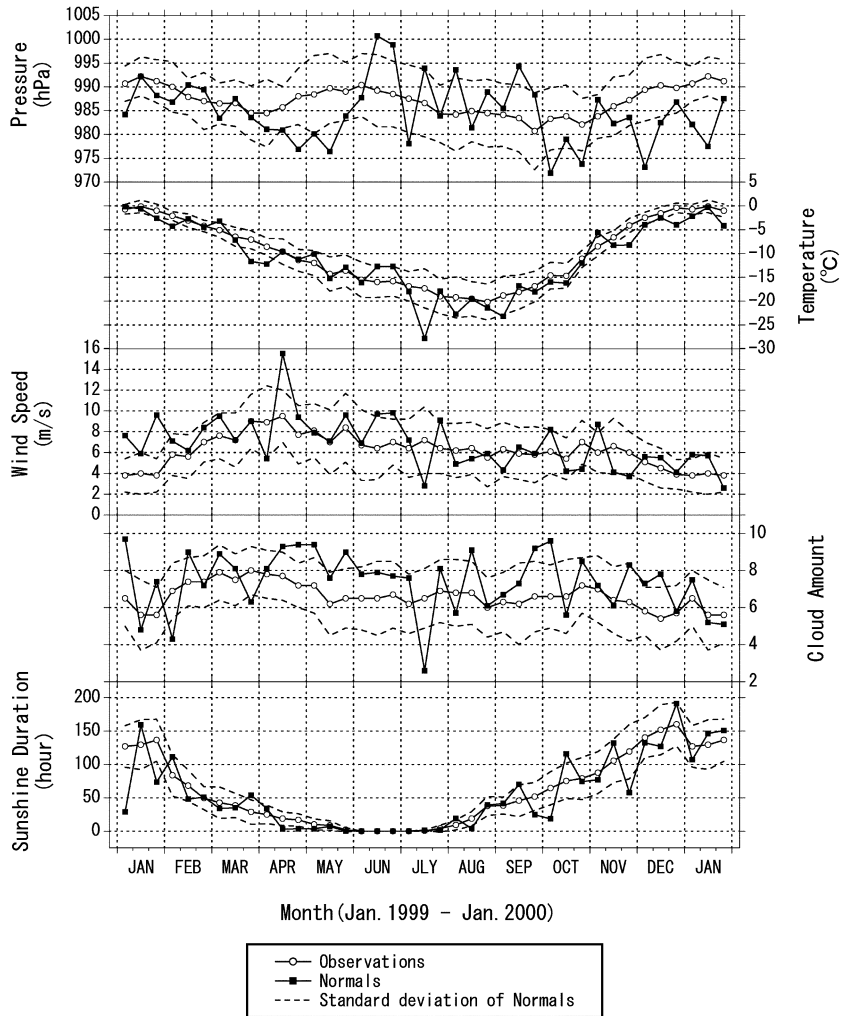


図2 昭和基地における地上気象旬別経過図 (1999年1月~2000年1月)

Fig. 2. Time series of ten-day mean surface meteorological data at Syowa Station (Jan. 1999–Jan. 2000).

に、海氷上の積雪深の経過及び、1974年7月~1999年1月の月最深積雪から求めた月別累年平均値とその標準偏差、最大・最小値を図3に示す。また、極値・順位値の更新記録を表4に、各月のブリザードの内容を表5に示す。

図2で見ると、4月上旬までは各要素とも変動はあるが平年値との差は概ね標準偏差の範囲内となっている。4月中旬から7月上旬にかけての旬平均雲量は、平年よりも多目で経過しており、この期間にブリザードが頻繁に来襲したことに対応している。特に4月中旬にはブリザードが3回来襲し、その合計時間が100時間を超えたことにより、旬平均風速の大きさが突出している。7月中旬は一転して好天となり、旬平均気温、旬平均風速、旬平均雲量が

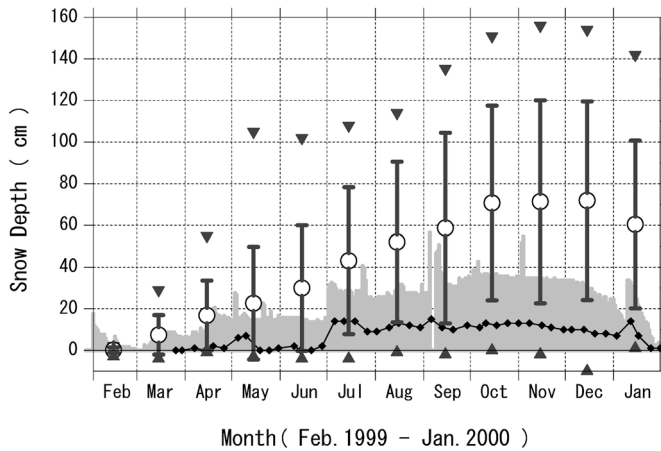


図3 海氷上(雪尺)と昭和基地内(積雪計)の積雪深観測値の比較(1999年2月~2000年1月)
昭和基地:(積雪深計)

- ◆— 積雪深(1999年2月~2000年1月)
- 海氷上:(雪尺)
- 積雪深(1999年2月~2000年1月)
- 月最深積雪から求めた月別累年平均値とその標準偏差(1974年7月~1999年1月)
- ▼, ▲ 月最深積雪から求めた月別累年値の最大, 最小値(1974年7月~1999年1月)

Fig. 3. Comparison of snow cover between sea ice and Syowa Station (Feb. 1999-Jan. 2000).

ともに小さい値となっている。7月下旬以降は各要素とも変動を繰り返しながら経過したが、越冬前半に比べて気圧の変動が大きく、長波の谷が周期的に昭和基地に接近したことを示している。

図3から、第40次隊越冬期間中を通じて、海氷上の積雪深は非常に小さく経過していたことがわかる。7月になってようやく14cm程度の積雪が定着したが、その後の増大はほとんどなく、平年の1/3-1/5程度の状態が夏まで続いた。比較のために残した第39次隊設置の雪尺(2本)による観測値も同程度であったことから、積雪深が小さく経過したことは、設置位置の変更による影響ではない。

天気概況の詳細は、表6に述べる。また、1999年10月5日1658LTに昭和基地で観測開始以来、歴代第2位の最低海面気圧932.1hPaをもたらした低気圧について第9章で報告する。

3. 高層気象観測

3.1. 観測方法及び測器

高層気象観測指針(気象庁, 1995)に基づき、毎日00, 12 UTCの2回、RS2-91型レーウィンゾンデをヘリウムガス充填の自由気球に吊り下げて飛揚し、気球が破裂する上空約30kmまでの気圧、気温、風向・風速及び気温が-40°Cに達するまでの相対湿度を観測した。

ゾンデ信号の受信と測角には自動追跡型方向探知機(モノパルス方式MOR-22型)を用

表4 昭和基地における地上気象観測極値・順位更新記録(1999年2月~2000年1月)
 Table 4. Updated records of surface meteorological extreme and ranking at Syowa Station
 (Feb. 1999-Jan. 2000).

年	月	月別値			旬別値		
		項目	値	順位	項目	値	順位
1999	2	月平均蒸気圧	2.9 hPa	1位(低)	旬平均気温(上旬)	-4.3℃	2位(低)
					旬平均雲量(上旬)	4.3	2位(少)
					旬平均気温(下旬)	-11.7℃	1位(低)
	3	月最低気温	-25.0℃	1位(低)			
		月最大風速	38.0 m/s	1位(大)			
		月最大瞬間風速	48.4 m/s	2位(大)			
	4	月最高気温	-4.5℃	1位(低)	旬平均海面気圧(下旬)	976.9 hPa	2位(低)
		月平均雲量	9.0	1位(多)	旬平均気温(上旬)	-12.2℃	1位(低)
	5				旬平均雲量(下旬)	9.4	2位(多)
					旬平均風速(中旬)	15.5 m/s	2位(大)
					日照時間旬合計(中旬)	3.1 h	1位(少)
		月平均現地気圧	977.6 hPa	2位(低)	旬平均海面気圧(中旬)	976.4 hPa	3位(低)
		月平均海面気圧	980.2 hPa	2位(低)	旬平均雲量(上旬)	9.4	1位(多)
		月最低海面気圧	941.0 hPa	1位(低)	旬平均雲量(下旬)	9.0	2位(多)
		月平均相対湿度	76.0%	1位(高)	日照時間旬合計(下旬)	0.0 h	1位(少)
		月平均雲量	8.6	1位(多)			
		月最大風速	40.3 m/s	3位(大)			
		月最大瞬間風速	50.3 m/s	3位(大)			
	6	月平均現地気圧	993.0 hPa	3位(高)	旬平均風速(下旬)	9.8 m/s	1位(大)
		月平均風速	8.8 m/s	3位(大)			
月最大瞬間風速		54.6 m/s	2位(大)				
7	月平均気温	-21.1℃	3位(低)	旬平均気温(中旬)	-27.8℃	1位(低)	
	最高気温月平均	-17.5℃	3位(低)	旬平均雲量(中旬)	2.6	1位(少)	
	月最大瞬間風速	51.8 m/s	1位(大)	旬平均風速(中旬)	2.8 m/s	3位(小)	
8				旬平均雲量(中旬)	9.1	1位(多)	
				日照時間旬合計(中旬)	4.0 h	3位(少)	
9	月平均現地気圧	986.6 hPa	3位(高)	旬平均雲量(下旬)	9.2	2位(多)	
	月最大風速	22.4 m/s	2位(小)				
10	月平均現地気圧	972.2 hPa	1位(低)	旬平均海面気圧(上旬)	971.9 hPa	2位(低)	
	月平均海面気圧	974.9 hPa	1位(低)	旬平均雲量(上旬)	9.6	1位(多)	
	月最低海面気圧	932.1 hPa	1位(低)	日照時間旬合計(上旬)	18.3 h	1位(少)	
	月平均蒸気圧	1.3 hPa	3位(低)	日照時間旬合計(中旬)	116.1 h	3位(多)	
	月平均雲量	7.9	3位(多)				
	月最大風速	36.2 m/s	3位(大)				
	月最大瞬間風速	46.7 m/s	3位(大)				
11				旬平均気温(上旬)	-5.6℃	2位(高)	
				旬平均気温(下旬)	-8.2℃	2位(低)	
				旬平均風速(下旬)	3.7 m/s	3位(小)	
				日照時間旬合計(下旬)	57.5 h	3位(少)	
12	月平均現地気圧	978.4 hPa	1位(低)	旬平均海面気圧(上旬)	973.1 hPa	1位(低)	
	月平均海面気圧	981.0 hPa	1位(低)	旬平均気温(下旬)	-4.0℃	1位(低)	
	月最低海面気圧	960.6 hPa	2位(低)				
	月平均気温	-3.5℃	1位(低)				
	最高気温月平均	-0.7℃	1位(低)				
	最低気温月平均	-6.7℃	2位(低)				
	月最高気温	3.0℃	3位(低)				
	月平均蒸気圧	3.1 hPa	2位(低)				
2000	1	月平均現地気圧	980.0 hPa	2位(低)	旬平均海面気圧(上旬)	982.1 hPa	2位(低)
		月平均海面気圧	982.5 hPa	1位(低)	旬平均海面気圧(中旬)	977.5 hPa	1位(低)
		月平均気温	-2.3℃	1位(低)	旬平均気温(下旬)	-4.2℃	1位(低)
		最低気温月平均	-5.6℃	2位(低)			
		月最低気温	-11.9℃	3位(低)			

表5 昭和基地におけるブリザードの概要 (1999年2月~2000年1月)
 Table 5. Summaries of heavy snowstorms (blizzards) at Syowa Station (Feb. 1999-Jan. 2000).

通番	開始		終了		継続時間	階級	最大風速(m/s)		最大瞬間風速(m/s)		最低海面気圧(hPa)	中 断	
	年	月 日 時 分	年	月 日 時 分			風向	起時	風向	起時			
1	1999	4 12 7 0	1999	4 13 15 40	32時間40分	B	25.5	ENE	1000(13)	30.9	ENE	0957(13)	
2	1999	4 15 7 5	1999	4 17 23 40	60時間40分	B	25.5	NE	1520(16)	33.8	NE	1518(16)	1502(15)-1527(15) 0620(17)-0950(17)
3	1999	4 20 9 40	1999	4 21 15 40	30時間0分	B	29.9	ENE	1840(20)	38.2	NE	1834(20)	
4	1999	5 2 21 20	1999	5 3 8 40	11時間20分	C	28.5	NE	0140(3)	37.7	NE	0132(3)	
5	1999	5 4 12 20	1999	5 4 21 20	9時間0分	C	28.2	ENE	1650(4)	32.6	ENE	1514(4)	
6	1999	5 16 16 30	1999	5 17 11 40	19時間10分	B	30.7	E	0400(17)	39.2	E	0111(17)	
7	1999	5 22 17 40	1999	5 24 16 20	45時間40分	A	40.3	ENE	0820(23)	50.3	E	0801(23)	1820(23)-1920(23)
8	1999	5 26 8 30	1999	5 26 15 28	6時間58分	C	20.8	NE	1130(26)	27.7	NE	1154(26)	
9	1999	6 7 13 40	1999	6 8 10 10	18時間50分	C	23.8	ENE	1450(7)	29.9	NE	1444(7)	2110(7)-2250(7)
10	1999	6 11 10 20	1999	6 12 17 20	31時間0分	B	29.6	ENE	1440(11)	39.9	ENE	1400(11)	
11	1999	6 25 9 40	1999	6 26 19 30	33時間50分	A	41.1	NE	2140(25)	54.6	NE	2039(25)	
12	1999	6 30 15 40	1999	7 1 1 30	9時間50分	C	28.3	ENE	1710(30)	35.5	NE	2156(30)	
13	1999	7 1 21 30	1999	7 2 13 10	15時間40分	B	38.8	NE	0630(2)	51.8	NE	0551(2)	
14	1999	7 5 12 40	1999	7 5 22 50	10時間10分	C	21.5	NE	1550(5)	28.9	NE	1545(5)	
15	1999	7 23 7 30	1999	7 24 3 10	19時間40分	B	32.0	NE	1910(23)	42.5	NE	1902(23)	
16	1999	7 25 8 10	1999	7 26 10 10	26時間0分	B	28.1	E	2350(25)	35.2	E	2345(25)	
17	1999	7 28 18 24	1999	7 29 20 24	26時間0分	C	20.8	NE	0900(29)	26.2	NE	0914(29)	
18	1999	8 8 9 50	1999	8 8 17 23	7時間33分	C	22.0	NE	1150(8)	32.5	NNE	1309(8)	
19	1999	8 14 12 6	1999	8 15 8 39	20時間33分	A	32.4	NE	1450(14)	40.9	NE	1346(14)	
20	1999	8 30 17 40	1999	8 31 8 10	14時間30分	B	31.1	NE	2210(30)	40.9	NE	2203(30)	
21	1999	9 4 19 17	1999	9 5 7 40	12時間23分	C	20.5	NNE	0110(5)	29.4	NNE	0100(5)	
22	1999	9 26 12 50	1999	9 27 22 20	33時間30分	B	22.4	NE	0630(27)	29.7	NE	1342(27)	
23	1999	10 2 5 55	1999	10 3 2 19	20時間24分	C	24.7	NE	1850(2)	32.5	NE	1829(2)	
24	1999	10 5 11 21	1999	10 6 11 20	23時間59分	A	36.2	ENE	1710(5)	46.7	ENE	1657(5)	
25	1999	11 3 10 40	1999	11 5 0 30	22時間0分	C	26.8	NE	1530(3)	34.4	NE	1733(3)	2140(3)-1330(4)

注1. 階級区分は次による。

A : 半径100m未満かつ風速25m/s以上で継続時間が6時間以上

B : 半径1km未満かつ風速15m/s以上で継続時間が12時間以上

C : 半径1km未満かつ風速10m/s以上で継続時間が6時間以上

2. 極値については、それぞれのブリザードをもたらしした擾乱の影響を受けている期間内で求めた。

3. 最低海面気圧は970hPa以下の場合のみ記録してある。

4. 起日の「*」は、ブリザード日数対象外の日に発現したことを示す。

表6 昭和基地の天気概況
Table 6. Weather summaries at

年・月	天気概況	
1999年 2月		月の初めと終わりは極冠高気圧の張り出しで乾燥寒冷な気団の支配を受けたことや、北からの気圧の峰の伸張により晴天で日照時間が多かった。また、放射冷却により気温が低かった。一方、中旬は大陸周辺を次々と通過した気圧の谷の影響を受けるようになり、曇天で経過した。10日頃と25日頃には発達した低気圧が近傍を通過し強風となったが、降雪は弱く、ブリザードとはならなかった。
	上旬	晴天で日照時間が多く、平均雲量は2月上旬としては少ない方から累年の第2位となった。平均気温が2月上旬としては低い方からの累年の第2位となったのは、寒冷な気団の支配に加えて夜間の放射冷却量が大きかったことに起因する。
	中旬	上旬とは一変して曇天が続く、平均雲量は2月中旬としては多い方からの累年の第4位となった。
1999年 3月	下旬	中旬から引き続き曇天が続いたが、旬の後半は再び晴天となった。25日は発達した低気圧が昭和基地の近傍を通過し、最低海面気圧は967.6hPa、伴う風は最大風速26.4m/sを記録した。
		南緯60度以南を通過した低気圧の影響で、曇天の日が多く日照時間は少なかった。しかし、月の終わりには大陸の強い寒気域が拡大し高気圧が張り出したため、晴天で気温の低い日が続いた。月の初め、低気圧の接近通過に伴う記録的な強風が基地施設に被害を及ぼしたが、ブリザードにはならなかった。
	上旬	昭和基地北方を次々に通過した低気圧の影響で曇天やふぶきの日が多かった。特に4～6日にかけて通過した低気圧に伴う5日の日最大風速38.0m/sは、3月としては累年の極値を更新した。
1999年 4月	中旬	天気は周期的に変化した。20日にはやや強い降雪があった。
	下旬	旬の前半は低気圧が次々に通過したため曇天や雪の日が多く、後半は大陸の高気圧の張り出しを受け晴天が続いた。また後半は、強い寒気に覆われたため気温が低く、27日の日最低気温-25.0℃は3月としては累年の極値、旬平均気温は3月下旬としては低い方からの累年の極値をそれぞれ更新した。
		低気圧が南極大陸沿岸のごく近くを通過したため、悪天ないしは曇天の日が多かった。月平均雲量の9.0は、4月としては多い方からの累年の極値を更新した。特に中旬は上空の気圧の谷が深まったことにより、低気圧が大きく発達し、加えて動きが遅かったためブリザードが続いた。ブリザードはB級が3回であった。
1999年 5月	上旬	1日にふぶきとなった他は晴天の日もあり、天気は比較的穏やかであった一方、気温が低く経過した。1日に記録した月最高気温-4.5℃は、4月としては低い方から累年の極値、旬平均気温-12.2℃も4月としては低い方からの累年の極値をそれぞれ更新した。
	中旬	全般的に悪天に支配されたため、旬合計日照時間3.1時間は4月中旬としては低い方からの累年の極値を更新した。12～13日は越冬開始後のブリザード(B級)となり、それ以降15～18日、20～21日に相次いで低級ブリザードとなった。
	下旬	初めブリザードの影響が残った他は曇天で経過し、中旬に引き続き晴天はほとんどなかった。旬平均雲量9.4は、4月下旬としては多い方からの累年の第2位の値となった。
1999年 6月		極循環が東経40度付近において概ね谷場ないしは西谷となって停滞したことや、地上では極冠高気圧の張り出しが弱かったことにより、低気圧が南東進して昭和基地近傍を通過することが多かった。このため曇天や悪天が多く、晴天は長続きしなかった。月平均雲量8.6、月平均相対湿度76%は5月としての高い方からの累年の極値を更新。月平均現地気圧977.6hPa、月平均海面気圧980.2hPaは5月としては低い方からの累年の第2位の値となった。特に中、下旬には非常に発達した低気圧が近傍を通過し、強いブリザードに見舞われた。ブリザードはA級1回、B級1回、C級3回。
	上旬	曇天や雪の日が多く、風が強まって度々ふぶきとなった。旬別平均雲量9.4は5月上旬としては多い方から累年の極値を更新した。気温はやや高めに経過した。
	中旬	16～17日にかけて通過した低気圧によりB級ブリザードとなったものの、5月の中では比較的晴天も多く、15日には快晴弱風となって気温が急速に低下した。
1999年 7月	下旬	東経40度付近の谷場が持続し、旬の前半は悪天に支配された。旬別平均雲量9.0は5月下旬としては多い方からの累年の第2位の値であった。特に23日に近傍を通過した低気圧の発達は大きく、A級ブリザードとなった。月最低海面気圧941.0hPa(23日)は5月としては累年の極値を更新した。月最大風速40.3m/s(ENE 23日)、月最大瞬間風速50.3m/s(E 23日)は共に5月としては第3位の記録となった。一方、旬の後半は雪の日も多かったが比較的穏やかに経過した。
		7日頃から東経0°付近に進んだ上層谷の動きが遅く、その前面に暖気が入りやすいパターンが持続した。そのため、気温は高く曇天ないしは悪天が続く、断続的にブリザードとなった。その他は、天気は周期的に変化した。ブリザードはA級1回、B級1回、C級2回の計4回であった。
	上旬	旬の中ごろ、昭和基地付近は大陸上で発達した寒気に被われ、晴天で気温が低かった。
1999年 8月	中旬	17、18日に晴天だった他は、旬を通じて曇天や雪の日が多く断続的にブリザードとなった。
	下旬	天気は周期的に変化した。25～26日にかけて発達した低気圧が昭和基地の近傍を通過したため、強い暖気が入り込みA級ブリザードとなった。最大瞬間風速は6月としては第2位の54.6m/sを記録した。
		極循環の谷がゆっくりと移動し、昭和基地周辺は中旬に谷後面の領域に入って大規模循環場で西南西流が卓越した。このため南極大陸北東部で発達した強い寒気域に対応する地上高気圧に覆われ晴天が持続し、この期間の気温は極めて低く経過した。中旬の低温の影響で月平均気温-21.1℃、最高気温月平均-17.5℃はともに7月としては低い方からの累年の第3位の値となっている。一方、月の初めと終わりには西北西流場となって暖気が入り込んだため低気圧が基地付近に接近して通過し、たびたび雪やふぶきとなった。ブリザードはB級3回、C級2回であった。
1999年 9月	上旬	気圧の谷の通過に伴い雪やふぶきの日が多かった。2日に基地近傍を発達しながら通過した低気圧に伴う最大瞬間風速51.8m/s(NE 2日)は7月としては累年の極値を更新した。旬の終わりには気圧の谷が東に移動し天気は回復した。
	中旬	高気圧に覆われ穏やかな晴天と強い低温が持続した。旬別平均雲量2.6は7月中旬としては少ない方からの累年の極値、旬別平均気温-27.8℃は7月中旬としては低い方からの極値をそれぞれ更新し、旬別平均風速2.8m/sは7月中旬としては小さい方からの累年の第3位の記録となった。
	下旬	再び気圧の谷の通過で概ね曇天ないし悪天で経過した。この期間、3回のブリザードは継続時間が長かった。

(1999年2月～2000年1月)

Syowa Station (Feb. 1999–Jan. 2000).

		極循環の流れの位相が遅いながらも順調に動き、天気は概ね周期的に変化した。特筆すべき月の極値の更新はない。また、ブリザード来襲は3回だが最大風速15m/s以上の強風日数は年よりも少なく、比較的穏やかであった。ブリザードは、A級1回、B級1回、C級1回であった。
1999年 8月	上旬	旬の終わりにブリザードとなった他は晴天が多く、気温も低めに経過した。
	中旬	曇や悪天の日が多く、旬平均雲量9.1は8月中旬としては多い方からの累年の極値を更新した。特に14～15日にかけては、東経0度付近で気圧の谷が大きく深まったために東経40度付近では強い暖気移流領域に入り、極めて急速にA級ブリザードへと天候が悪化した。
	下旬	前半晴れ、後半曇天や雪の日となった。30日のB級ブリザードは中旬と同様のパターンによるものであった。
1999年 9月		低気圧が南極大陸沿岸から離れて通過する事が多く、その影響を受ける事が少なかったため気圧も高めに推移した。月平均現地気圧986.6hPaは9月としては高い方からの累年の第3位の値であった。下旬は、昭和基地を含む大陸沿岸部で上層の低圧場が持続し、悪天の日が多かった。ブリザードはB級1回、C級1回であった。
	上旬	4～5日にかけて低気圧の通過に伴いC級ブリザードとなった他は、概ね晴天で気温は低めであった。
	中旬	旬の初めはふぶきとなったが、その他は概ね晴天で経過した。
1999年 10月		9月に引き続き、昭和基地を含む大陸沿岸部は上層の低圧場が持続した。地上は中旬を除き低圧帯に入り、その中を2、3日周期で低気圧が通過し、悪天の日が多く気圧は低めに経過した。月平均海面気圧974.9hPaは10月としては低い方からの累年の極値を更新した。ブリザードはA級が1回、C級が1回であった。
	上旬	周期的に通過した低気圧の影響で曇天や雪の日が多く、日照時間が少なかった。旬別平均雲量9.6は10月上旬としては多い方からの累年の極値。旬別合計日照時間18.3時間は10月上旬としては少ない方からの累年の極値をそれぞれ更新した。5～7日前半にかけて発達した低気圧が昭和基地の近傍を通過し、A級ブリザードとなった。このA級ブリザードにより、10月としては累年の第2位の月最低海面気圧932.1hPa、累年の第3位の最大瞬間風速46.7m/sを記録した。
	中旬	13日までは、低気圧の影響で雪が降ったが、その後大陸の高気圧の張り出しが強まり、晴天が多く日照時間が多かった。旬別合計日照時間116.1時間は、10月としては多い方からの累年の第3位の値であった。
1999年 11月		月初めと終わりに昭和基地付近に低気圧が接近し悪天となった他は、大陸高気圧が張り出し晴天の日が多かった。ブリザードはC級が1回であった。
	上旬	3～5日にかけて発達した低気圧が昭和基地の近傍を通過したため、C級ブリザードとなった。この低気圧に吹き込む暖気により、気温は高めに経過した。旬別平均気温-5.6℃は、11月上旬としては高い方からの第2位の値であった。その後大陸の高気圧の勢力が強まり晴天となった。
	中旬	昭和基地付近は大陸高気圧が張りだし、低気圧が北海上を通過したがそれ以上の南下は見られず、概ね晴天で経過した。
1999年 12月		前半大陸高気圧の縁辺にあたり曇天が多かったが、後半は大陸高気圧に覆われる事が多く、夏らしい穏やかな天気となった。気圧、気温は年より低かった。月平均海面気圧981.0hPa、月平均気温-3.5℃はいずれも12月としては低い方からの累年の極値を更新した。ブリザードは1回も無かった。
	上旬	曇天の日が多く、気圧は低めに経過した。旬別月平均海面気圧973.1hPaは、12月上旬としては低い方からの累年の極値を更新した。8日には大陸高気圧の勢力が強まり、北海上の低気圧との間の気圧傾度が大きくなり風が強かった。
	中旬	12～14日にかけて発達した低気圧が昭和基地に接近したため、風が強くなり雪となった。14、15日には暖気が入り雪あられも観測された。その後は、大陸高気圧に覆われるようになり、晴天の日が多かった。
2000年 1月		大陸高気圧に覆われる事が多く、晴天の日が多かった。気圧、気温は年より低かった。月平均海面気圧982.5hPa、月平均気温-2.3℃は1月としては低い方からの累年の極値を更新、最低気温月平均-5.6℃は1月としては低い方からの累年の第2位の値であった。ブリザードは1回も無かった。
	上旬	大陸高気圧の縁辺にあたり曇天や雪の日が多かった。9～11日は、低気圧が昭和基地に接近しふぶきとなった。旬を通じて気圧は低めに経過し、旬別月平均海面気圧982.1hPaは1月上旬としては低い方からの累年の第2位の値であった。
	中旬	12日まで低気圧の影響で雪が降ったが、その後は大陸高気圧が張り出し晴天または薄曇りとなった。上旬と同じく旬を通じて気圧は低めに経過し、旬別月平均海面気圧977.5hPaは1月中旬としては低い方からの累年の極値を更新した。
	下旬	28、29日は大陸高気圧の勢力が弱まり、雪が降った他は晴天の日が多かった。気温は低めに経過し旬平均気温-4.2℃は1月下旬としては低い方からの累年の極値を更新した。また、24、25日は放射冷却に伴う霧が朝方発生した。

い、計算処理、作表、気象電報作成等は高層気象観測装置データ処理部により自動的に行った。

観測結果は、国際気象通報式(気象庁、1990b)の地上高層実況通報式(TEMP)に変換して、地上気象観測と同様に気象衛星通報局装置(DCP)を用いて、静止気象衛星(METEOSAT)経由で世界気象通信網(GTS)に通報した。

観測器材を表7に示す。

表7 高層気象観測器材

Table 7. Sensors and instruments for aerological observations at Syowa Station.

使用機器等		測定範囲	観測精度	備考	
RS2-91型レーダーゾンデ	センサ	気圧 鉄ニッケル合金空ごう (静電容量変化式)	1050 ~ 5 hPa	±1 hPa	減圧点検, 飛揚前点検で精度確認
		気温 ビード型ガラスコート サーミスタ (アルミ蒸着加工)	+40 ~ -90 °C	±0.5 °C	飛揚前点検で精度確認
		湿度 高分子膜 (静電容量変化式)	0 ~ 100 %	±7 % (10~95 %) ±10 % (上記以外)	飛揚前点検で精度確認
		風向 風速 ゾンデ観測による 高度計算値と 自動追跡型方向探知機の 測角値から算出			経緯儀による測角比較観測 (極夜期を除く毎月, 目視可能時)
電池	B91RS型注水電池			立ち上げ機により 規定電圧を確認後飛揚	
充填ガス	ヘリウムガス			標準浮力錘浮力1900g, 強風・降雪等状況により増量	
気球	600gゴム気球			飛揚前に加温保存, 冬期間低温時は油漬け処理を実施	
懸垂紐	白色クレモナ糸			全長15m, 強風時は気象観測用巻下器に替える	
その他	強風時	気象観測用巻下器		飛揚後に懸垂紐が15mに伸長	
	暗夜時	PA72型追跡補助電灯		注水電池により起電発光	

表8 高層気象観測状況

Table 8. Number of observations and attained height of aerological observations.

		2000											合計 (平均)		
		2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月		1月	
飛揚回数		57	62	66	64	68	63	67	62	65	63	62	62	761	
定時観測回数		56	62	60	62	59	62	62	60	62	60	62	62	729	
特別観測回数		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
再観測回数		1	0	6	2	9	1	5	2	3	3	0	0	32	
資料欠如回数		0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	2	
欠測回数		0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	
到達高度	平均	気圧 (hPa)	11.5	7.9	16.4	15.5	10.1	9.6	9.1	12.6	12.7	10.1	9.0	9.5	(11.2)
		高度 (km)	31.6	32.4	28.7	27.3	28.8	28.1	28.3	27.6	28.1	30.3	32.0	32.3	(29.6)
	最高	気圧 (hPa)	6.5	6.0	5.3	6.8	5.6	6.2	5.7	6.6	7.2	6.5	6.8	7.1	
		高度 (km)	34.2	34.3	33.7	31.1	31.8	30.5	31.3	30.8	31.7	33.3	34.2	34.3	

(注) ・6/25 12UTCは強風のため欠測。平均到達高度の計算からは除外した。

・回数, 到達高度共に00UTCと12UTCの両方の観測を含む。

3.2. 観測経過

観測状況を表8に示す。

第40次隊として1999年2月1日00 UTCより2000年1月31日12 UTCまでの観測を

行った。この期間中、強風のため気球の放球が成功せず飛揚作業を取り止めた欠測が1回(1999年6月25日12 UTC)、100 hPa面の風資料を得られる高度まで到達せずに観測中止となった資料欠如が2回であった。

冬期間の下部成層圏の低温によりゴム気球が硬化して到達高度が低下するのを防ぐため、4月28日12 UTCから11月12日00 UTCまで、原則として気球の油漬け処理を行うこととした。油漬けの実施期間は成層圏の気温が概ね -70°C を下回る時期を目安としたが、この期間の始まり頃と終わり頃は気球の破裂高度が低い傾向にあった。

第37次隊から導入した全自動式気圧点検システムが9月頃不調となった。点検終了気圧が規定の8 hPaに到達せずに終了することがあることから、気密漏れを調査していたが、数日後システムのバルブ制御装置が動作しなくなり、同装置の故障であることが分かった。故障箇所は電磁弁で、パソコンによる吸・排気弁の開閉が不能となっていた。この部分は修理不能箇所のためバルブ制御装置を取外して持ち帰り修理とし、第41次隊が代替品を持込んで交換するまでは、第36次隊以前のマニュアル式の点検方法で気圧計点検を実施した。その他、真空ポンプの真空オイルや劣化したゴムホースの交換を実施した。

4月初めから11月初めにかけて、デジタイザの信号分離不良がたびたび発生した。ほとんどの場合、アンテナのヒーターを切ると復旧することから、ヒーターによるノイズの混入が原因と考えられた。しかし、低温下でアンテナを駆動するためには保温が必要なことからデジタイザの信号分離が不能となるまではヒーターを入れ、不能となった時点でヒーターを切ることで対処した。

モノバルス式方向探知機(MOR-22)の探知精度を検査するために、極夜期を除き月1回以上、測風経緯儀による比較観測を実施した。結果は概ね良好であったが、方位による高度角差の偏りが僅かに見られることから、空中線の水平を調整した。ずれはごく僅かであったが、空中線は気象棟の屋根に設置されており基盤が強固ではないことから、年に数回程度の点検が必要である。その他、高層気象観測装置の総合的な動作点検を毎月1回実施し、性能に劣化の無いことを確認した。

第40次隊はゾンデ発信器を800台持ち込み、その内気圧計点検やベースライン点検で不良と判定されたものが3台、点検時は合格したが飛揚直前に気圧計が不良になったものが1台、飛揚直後に気圧計が不良となったものが1台であった。これら5台の不良部位は全て気圧計であった。

3.3. 観測結果

1999年1月～2000年1月までの主な指定気圧面の高度、気温、風速の月平均指定気圧面観測値(00 UTCの観測値による統計)を表9に示す。また、1999年1月～2000年1月までの00 UTCの上層気温断面図を図4に示す。この図をみると、下部成層圏において7-8月に非

表9 月別指定気圧面観測値

Table 9. Monthly summaries of the aerological observations (00 UTC).

	指定面 (hPa)	1999												1999	2000
		1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月	全年	1月
高度 (m)	850	1185	1179	1139	1085	1085	1201	1094	1122	1137	1034	1130	1112	1125	1135
	700	2662	2651	2598	2533	2530	2645	2507	2553	2568	2463	2578	2577	2572	2608
	500	5116	5107	5010	4914	4918	5042	4860	4941	4952	4849	4988	5006	4975	5042
	300	8572	8570	8412	8261	8258	8392	8166	8283	8290	8195	8367	8407	8348	8462
	200	11203	11207	11046	10836	10789	10859	10621	10721	10731	10653	10845	10899	10868	11098
	150	13094	13107	12941	12683	12594	12584	12323	12394	12407	12352	12563	12657	12642	12999
	100	15776	15793	15603	15266	15106	14986	14674	14717	14746	14717	14957	15149	15124	15695
	50	20426	20408	20125	19609	19277	18963	18579	18596	18726	18751	19112	19587	19347	20371
	30	23916	23831	23442	22771	22282	21832	21397	21420	21708	21827	22379	23092	22491	23876
気温 (°C)	850	-9.0	-10.2	-12.8	-14.5	-15.5	-15.9	-22.0	-19.5	-19.2	-19.1	-14.1	-10.9	-15.2	-8.9
	700	-17.9	-18.0	-20.6	-23.2	-23.1	-22.4	-27.3	-24.0	-24.1	-24.9	-22.4	-19.7	-22.3	-19.1
	500	-30.8	-30.3	-35.9	-39.3	-38.5	-37.5	-41.7	-37.7	-38.5	-38.0	-35.5	-33.6	-36.4	-33.2
	300	-51.8	-51.7	-53.9	-57.7	-59.3	-60.2	-61.5	-61.1	-60.7	-60.2	-58.5	-57.9	-57.9	-53.8
	200	-49.6	-48.0	-47.9	-53.8	-58.5	-68.0	-69.6	-72.8	-72.6	-70.1	-68.0	-64.8	-62.0	-48.1
	150	-47.9	-47.2	-48.2	-54.2	-59.6	-68.6	-72.7	-75.8	-75.0	-72.4	-70.3	-64.1	-63.0	-46.8
	100	-46.4	-46.6	-49.3	-57.0	-63.6	-73.4	-77.5	-79.2	-77.1	-75.1	-71.9	-61.5	-64.9	-45.0
	50	-41.8	-45.0	-50.9	-61.0	-70.5	-79.9	-83.3	-84.2	-76.1	-71.9	-62.1	-45.5	-64.4	-40.2
	30	-37.6	-43.2	-51.4	-62.7	-73.5	-82.1	-85.2	-84.3	-70.5	-61.5	-46.9	-32.8	-61.0	-37.3
風速 (m/s)	850	9.6	7.7	10.0	10.9	10.5	12.6	9.0	8.0	8.2	8.5	5.8	7.2	9.0	5.6
	700	9.0	6.3	8.0	7.9	8.5	9.0	7.3	8.2	9.3	6.6	7.0	6.3	7.8	5.5
	500	9.7	7.5	8.8	9.4	8.8	10.5	9.3	14.8	13.6	8.2	9.0	8.1	9.8	6.7
	300	15.5	12.6	14.4	14.1	13.5	19.1	13.9	19.5	16.5	14.7	17.0	13.5	15.4	10.1
	200	10.6	10.2	10.7	14.4	14.6	15.2	13.2	20.2	16.5	15.3	14.7	11.2	13.9	8.4
	150	9.3	9.6	11.3	15.6	17.0	14.7	14.5	21.0	16.7	16.3	13.8	9.7	14.1	8.8
	100	7.6	7.8	10.6	18.0	21.7	17.3	20.1	25.6	20.5	20.6	15.9	11.4	16.4	10.1
	50	4.6	4.9	10.5	22.0	30.2	27.4	31.5	35.2	35.7	32.4	24.9	15.5	22.9	8.0
	30	5.0	3.7	11.1	25.3	35.4	34.0	40.1	41.6	51.3	41.9	30.0	16.7	28.0	5.7

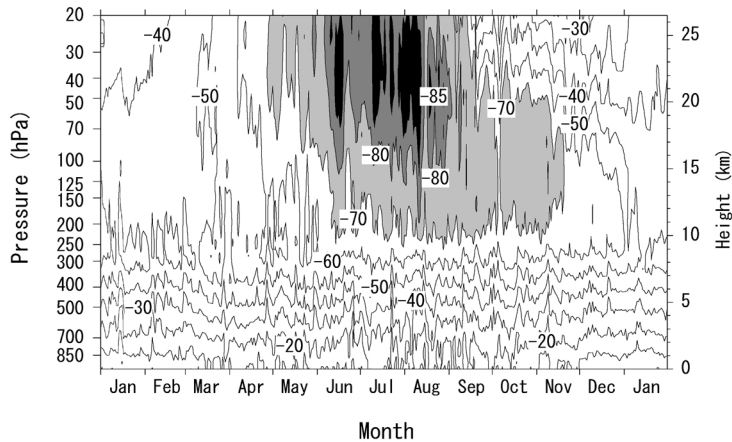


図4 上層気温の時間断面図 (1999年1月~2000年1月)

Fig. 4. Time-height cross section of upper-air temperature (Jan. 1999-Jan. 2000).

常に気温の低い時期があり、その後10-12月には突然昇温等により気温が上昇していることがわかる。これらの現象については6章、10章に詳しく述べるが、PSCsの発現高度、オゾン破壊及び極渦との関連による。

高層気象観測は1969年から開始され00 UTCの観測データは1998年までに30年間の継続資料が蓄積された。そこで、1999年の月別統計値と、30年間(1969-1998年)の月別統計値(以下、平年値として扱う)を比較する。図5には1999年の指定気圧面月平均気温、風の東西成分、及び南北成分風の変化と、その累年平均気温からの偏差を示し、図6には1999年の指定気圧面月平均気温が過去30年の極値(タイ記録を含む)を更新した様子を見るために、極値となった指定気圧面にマークを表示した。図5から対流圏における気温偏差が大きいのは、4月と7月の低温、8-9月の高温であったことが分かる。

図7、8に、500hPa、30hPa面の月平均高度を示す。500hPa面月平均高度(気象庁、1999)では、2月には大陸上に夏期の昇温による高圧部が存在し、昭和基地は極冠高気圧の正偏差域内であった。その一方で70S、60E周辺には低圧部が発生しており、やや西に移動しながら次第に谷を深めたため、4月には昭和基地付近が大きな谷場となった。このため、昭和基地は3-5月に低温(負偏差)域に入り、この低圧部に対応して次々に発生した地上低気圧の影響で度々ブリザードを観測するようになった(表5)。南極大陸上では、特に4月には大陸の冷却が急速に進んだとみられ、大陸全体が一気に負偏差域となり、昭和质量地上空500hPa面付近においては低温の極値を記録した(図6)。また、7月は極夜の冷却によって大陸上に発達した優勢な地上高気圧に覆われ、放射冷却が加わった効果で対流圏下層から地上にかけて低温偏差が大きい。

対流圏における風は、6月に東成分と北成分の強まりが著しかった。これは、500hPaの月平均高度場で昭和基地の西が深い気圧の谷、東が気圧の峰となっていたことから、北東からの暖気が流入し易かったためで、気温も6月の対流圏においては正偏差である。その一方で、8月に南成分および西成分の強まりが顕著なのは、昭和基地の西に気圧の峰が北から延び、東に気圧の谷が形成されたことの反映であるが、気圧の峰の勢力が強かったため、昭和基地は8-9月の対流圏の気温も正偏差である。

下部成層圏において最も特徴的なのは、10月以降に負の気温偏差が極めて大きくなったことと、11月以降に西成分風が著しく強まったことである(図5)。特に、11-12月に下部成層圏の月平均気温が1969年以降における低温の極値となったことは特筆すべきことである(図6)。1999年の極夜期に形成された極渦は当初、6-7月の30hPa面高度場(図8)(気象庁、1999)をみても平年に比較して特に強くはなかった。しかし、極夜が明けた8月には、南極大陸を取り巻く帯状の高度負偏差域が出現し始め、高い高度では強い極渦が維持されていたとみられる。10月には南極大陸全体が高度負偏差域に覆われ、11-12月には南極大陸上空の高度負偏差が最も大きくなった。図6に示したように、12月の20-30hPa面の気温が過去最

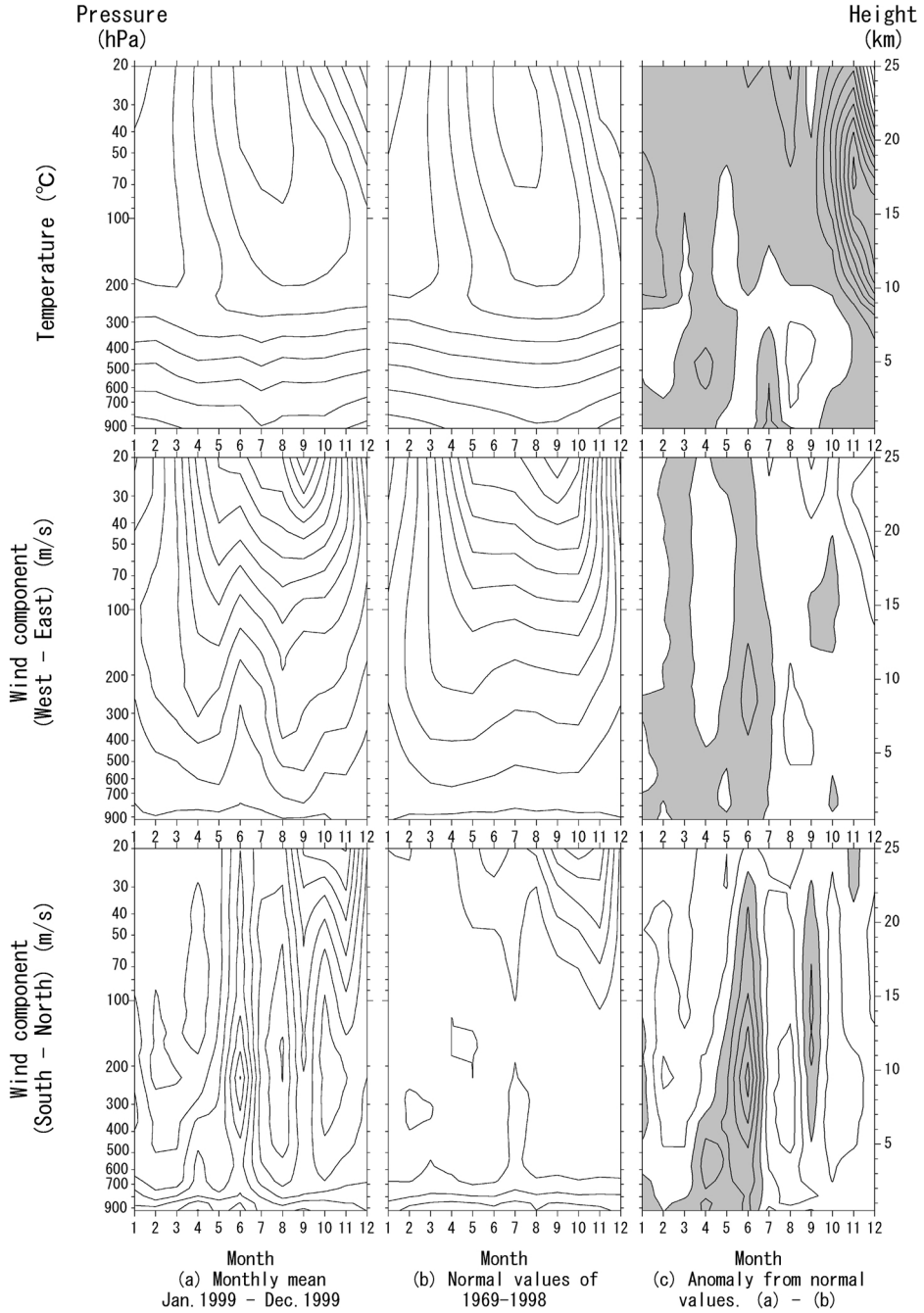


図5 月平均値, 累年平均値 (1969-1998年), 及び偏差の年変化
 (a) 1999年の月平均値, (b) 30年間平均値(1969-1998), (c) 偏差((a)-(b))

Fig. 5. Annual variations in upper air temperature (°C) and upper wind components (m/s) (a), normal values (1969-1998) (b), and deviations (c).

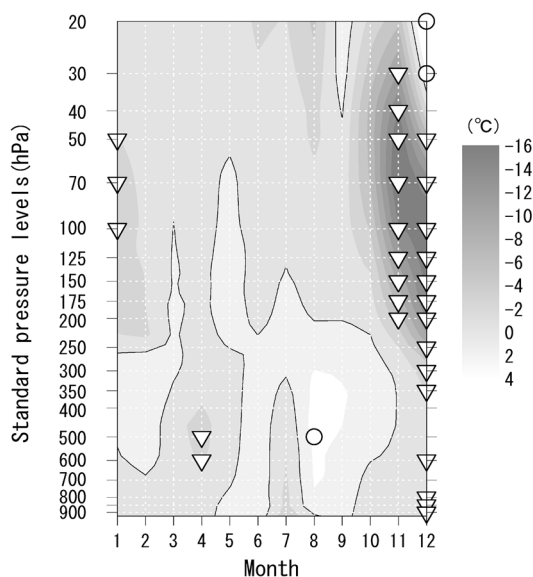


図6 1999年に更新された月平均気温の極値分布（○は高温，▽は低温の極値）

Fig. 6. Distribution of updated maxima and minima of monthly average temperatures in 1999.

高気温となっていたにも関わらずこの層の高度が負偏差であったのは、これより下層側でオゾン減少による気温低下で層厚が縮小したためである。廣岡ら（2000）は、北半球成層圏オゾンの減少に伴う西風ジェット（極渦）の強化について観測結果とモデル実験で示しているが、このような温度風の関係は大局的には南半球にも適用できるものである。つまり、極域成層圏オゾンの減少によって日射吸収の小さくなった成層圏は寒冷化して周囲との温度傾度が大きくなり極渦が強化される。このとき、極渦内部では気柱の層厚が小さくなるため、高度は負偏差となると考えられる。よって、この時期に高度負偏差が大きかったことは、成層圏の昇温が著しく遅延し極渦が平年より強い状態で維持されたことを示している。

昭和基地上空の気温の負偏差が最も大きかった高度は、通常昭和基地上空でオゾン分圧が極大となる 100 hPa（高度約 15 km）から 50 hPa（高度約 19 km）であった。この高度での気温負偏差は、成層圏における主な熱源であるオゾン量の減少と密接な関係があり、極夜期に極寒冷となった成層圏大気が極夜明けにオゾンの発熱で昇温する過程が阻害された結果である。また、特に 11-12 月の下部成層圏において平年より西成分風が強かったことは、成層圏の昇温遅延による極渦の維持とも調和する（廣岡ら、2000）。ここで、図 5、6 に示したように、12 月の 20-30 hPa の気温が平年より高く過去最高気温となっていたにも関わらず、西成分風が平年よりも強かったのは、温度風の関係から一見矛盾するようであるが、これも下層側で発生したオゾン減少によって層厚が縮小したことに起因すると考えられる。ここで述べた成層圏の昇温遅延と 12 月の 20 hPa 付近での高温については、オゾン観測の結果とあわせ

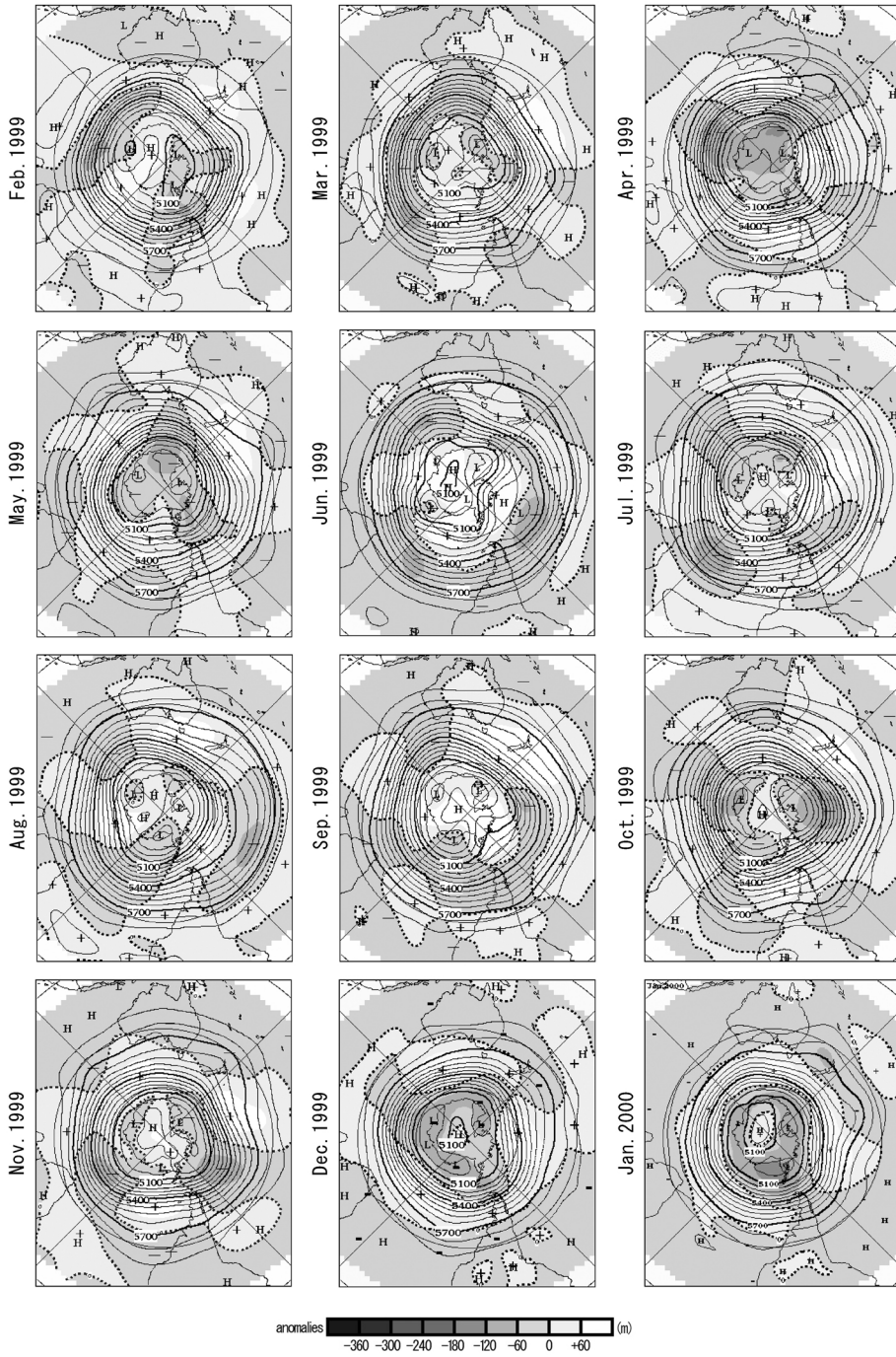


図7 南半球月平均 500 hPa 高度及び平年偏差 (1999年2月~2000年1月)
 Fig. 7. Monthly mean weather chart on 500 hPa (Feb. 1999-Jan. 2000).

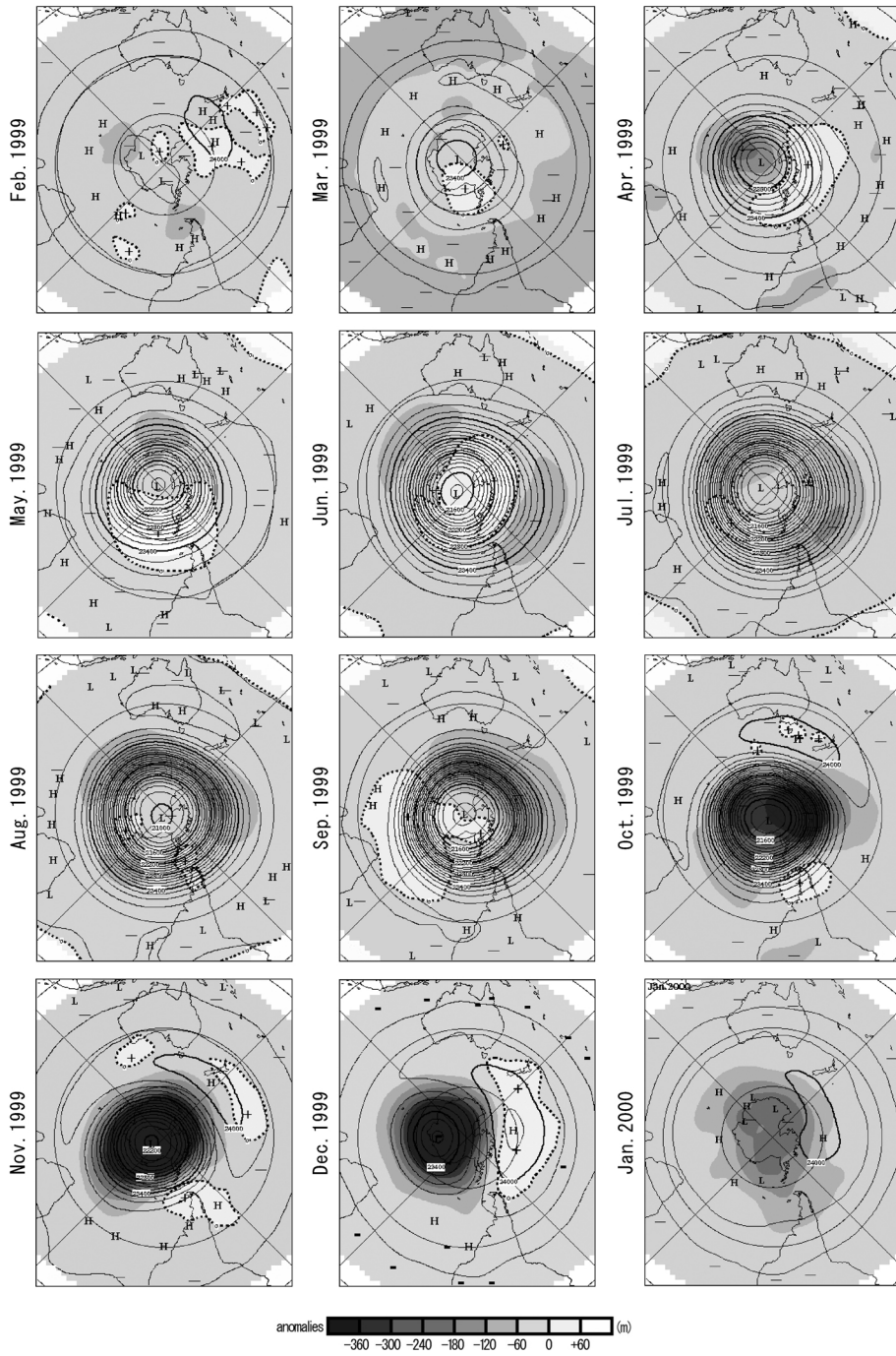


図 8 南半球月平均 30 hPa 高度及び平年偏差 (1999 年 2 月～2000 年 1 月)

Fig. 8. Monthly mean weather chart on 30 hPa (Feb. 1999-Jan. 2000).

て第 10 章にて詳しく考察する.

4. オゾン観測

4.1. 観測方法と測器

オゾン観測は、ドブソン分光光度計 (Beck-119) を用いた全量・反転 (高度分布) 観測, RS 2-KC96 型オゾンゾンデ (明星電気製) を用いたオゾン高度分布観測, 及び地上オゾン濃度観測装置を用いた地上オゾンの連続観測を行った.

全量・反転観測とオゾンゾンデ観測結果は, 電子メールで毎月 (オゾンホール生成から消滅期間においては, WMO 事務局の要請により毎週, 途中 8 月以降は毎週 2 回 (月曜日及び木曜日)) 気象庁経由 WMO へ報告し, その結果は, WMO OZONE BULLITEN として世界の関係機関に配布された. また, これらの観測データは気象庁から WMO 世界オゾン紫外線データセンター (カナダ) に送られた.

地球観測プラットフォーム技術衛星 (ADEOS) に搭載された改良型大気周縁赤外分光計 (ILAS) の基礎データ取得のため, 国立環境研究所 ILAS プロジェクト, 国立極地研究所気水圏研究グループ, 気象庁観測部南極観測事務室による共同研究としてオゾンゾンデ観測を行った (以下, ILAS データ検証観測 8.5 関連). 取得したデータは, 直ちに解析し, 暫定値として気象庁観測部南極観測事務室経由で電子メールにより各関係機関に報告した.

観測機材を表 10 に示す.

表 10 オゾン観測器材

Table 10. Sensors for ozone observations at Syowa Station.

観測項目	使用測器等	型式及び測器番号	単位及び測定範囲	構成	備考
オゾン全量・反転観測	オゾン分光光度計	Beck No. 119	m atm-cm		石英プリズムを使って太陽光をスペクトルに分け, 測定しやすい2種の波長の光を取り出し強度比を測定する
オゾンゾンデ観測	オゾンゾンデ	RS2-KC96	hPa	気圧	ニッケルスパン製43mmφ 空ごう気圧計 (静電容量変化式)
			℃	気温	ビート製 ガラスコートサーミスター (アルミ蒸着加工)
			mPa	オゾン計測部	ピストンポンプ (吸気および導気管: ポリエチレン製) 反応管 (アクリル樹脂製単管) 反応液 (沃度カリ水溶液)
				電池	B96KC型注水電池
				気球	2000g気球 ※標準浮力: 3200g
				その他	オゾンゾンデ巻下器
地上オゾン観測	オゾン濃度計	Dylec MODEL1100	0 ~ 200 ppmb	観測装置	赤外線吸収法, 最小感度0.1ppmb, 12秒サンプリング
	空気精製器	Dylec MODEL1400		検定装置	原料ガス (空気) を乾燥後, 含まれるオゾン分解, N ₂ を除去し精製空気にする
	オゾン発生器	Dylec MODEL1410	0 ~ 1000 ppmb		UVランプによる紫外線照射

4.1.1. オゾン全量観測

オゾン観測指針（気象庁，1991）に準じ，ドブソン分光光度計を用いて太陽直射光及び天頂散乱光の観測を行った．ドブソン分光光度計は器械内部に取り入れた紫外線光について，指定された2つの波長をそれぞれ取り出し，その強度比を測定することでオゾン全量を観測する器械である．太陽光ではAD波長組（A波長組：平均波長305.5 nmと325.0 nm，D波長組：平均波長317.5 nmと339.9 nm）を用いた観測を，太陽の北中時及び午前，午後の大気路程 $\mu=1.5, 2.5, 3.5$ （ μ ：オゾン層を通過する光線の垂直路程に対する相対的な路程）の時刻に行った．また，観測期間を延ばすため太陽高度が低くなる時期についてはCD波長組（C波長組：平均波長311.5 nmと332.4 nm，D波長組：平均波長317.5 nmと339.9 nm）を用いた観測を，大気路程 $\mu=3.5, 4.5, 5.5, 6.5$ の時刻に行った．さらに太陽高度が低い（ $\mu>6.5$ ）場合には，測器の限界となるため観測は行わなかった．太陽光による観測ができない冬季には，月光によるAD波長組による観測を行った．

4.1.2. オゾン反転観測

反転観測は，オゾン観測指針（気象庁，1991）に準じ，ドブソン分光光度計を用いて日中の晴天天頂散乱光を連続観測し，オゾンの高度分布を得るための観測で，太陽天頂角が80–90度の範囲のショート反転観測と，60–90度の範囲のロング反転観測を天頂晴天時の午前又は午後可能な限り行った．

4.1.3. オゾンゾンデ観測

オゾン観測指針（気象庁，1997）に準じて，RS2-KC96型オゾンゾンデをゴム気球に吊り下げ，上空約35 kmまでのオゾン分圧，気圧，気温及び風向・風速の高度分布を観測した．オゾンゾンデはポンプで大気を吸入し，大気中のオゾンと反応液（臭化カリウム）との化学反応の際に生ずるオゾン量に比例した反応電流を計ることによりオゾン量を求めている．

オゾンゾンデの信号受信等の地上施設は，高層気象観測施設と同じものを使用した．オゾンゾンデ飛揚前の校正には，オゾン発生器及びオゾンゾンデ試験器を用いた．ゴム気球は2000 gを使用し，ヘリウムガスを充填して浮力錘浮力3200 gとした．また，高層気象観測同様5–10月の到達高度が低くなる時は，気球の油漬け処理を行った．さらに，上空で温度が極端に低くなることによるポンプの動作不良等を防ぐために，オゾンゾンデ内に収納されている注水電池とポンプ及び反応管との間の仕切りを薄くする処理を行い，注水電池の発熱を利用した．飛揚は原則として週1回行ったが，ILASのための基礎データ取得時期は3日に1回の飛揚周期（5月～7月中旬）とし，その後は週2回（7月下旬～10月上旬）とした．

観測は高層気象観測を行っていない風の弱い晴天の日を選んで行い，データの解析は観測終了後直ちに行った．極夜期でドブソン分光光度計によるオゾン全量観測値が得られない場合を除き，飛揚時刻に近いオゾン全量観測値を用いて補正を行った．

4.1.4. 地上オゾン観測

第 38 次隊より開始した地上オゾン観測を第 40 次隊も引き続き行った。観測は地上付近の大気に含まれる微量のオゾン濃度を、紫外線吸収方式のオゾン濃度計 (Dylec, MODEL 1100) で 12 秒毎に行い、データはノート PC 内の HDD 及び MO に収録するとともに自記記録した。観測装置は放球棟横の旧水素ガス発生器室内に設置し (図 1), 大気取り入れ口は同建物主風向側 (北東側) 地上から 5m の高さに設置した。地上オゾン観測の系統図を図 9 に示す。

オゾン濃度計は 3 台で運用しており、昭和基地に現用器, 予備器の 2 台, 残りの 1 台は帰国する隊が 1 年間観測に使用したものを持ち帰りオーバーホール後, 再び次の隊が昭和基地

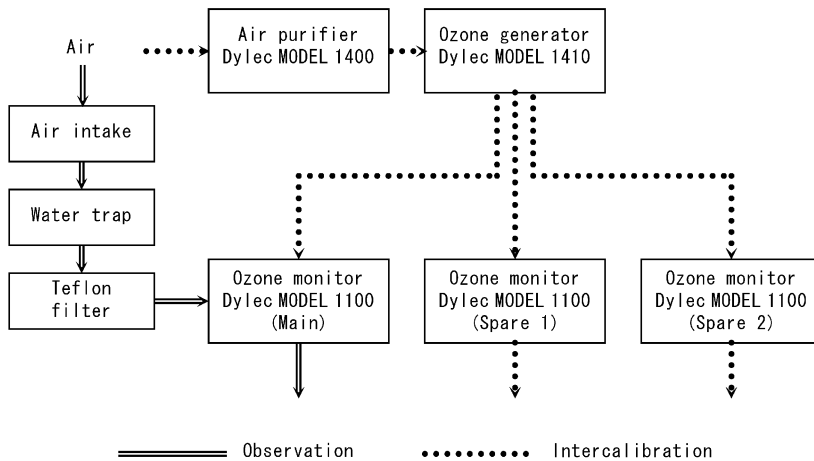


図 9 地上オゾン濃度観測装置系統図

Fig. 9. Schematic diagram of surface ozone concentration measurement system.

表 11 オゾン濃度計検定及び観測使用履歴

Table 11. Official approval of ozone monitor and history of use for observation.

検定日時	検定種別	検定場所	検定履歴			観測使用期間		
			101B	101A	A166	101B	101A	A166
1996/10/07	101B使用前検定	国立極地研究所						
1997/01/18	相互比較検定	昭和基地						
1997/07/25	相互比較検定	昭和基地				1997/01/18		
1997/10/14	A166使用前検定	国立極地研究所				↓		
1998/01/10	相互比較検定	昭和基地				1998/01/31		
1998/05/12	101B使用後検定	国立極地研究所						
1998/10/12	101B使用前検定	国立極地研究所				↓		
1999/01/20	相互比較検定	昭和基地				1999/01/20		
1999/05/18	101A使用後検定	南極観測事務室						1999/01/20
1999/07/21	相互比較検定	昭和基地						↓
2000/01/08	相互比較検定	昭和基地						2000/01/31
2000/07/04	A166使用後検定	南極観測事務室						

: 検定に関係したオゾン濃度計
 : 再計算に使用した検定

に持ち込む運用を行っている。詳細は表11による。第40次隊では、第38次隊が越冬中1年間観測に使用し国内に持ち帰ったオゾン濃度計101Bをオーバーホールし、気象庁観測部南極観測事務室及び国立極地研究所の検定装置（気相滴定法（GPT））により使用前検定を行った上で、昭和基地に持ち込み第40次隊観測予備器とした。第40次隊の観測には第39次隊が持ち込み観測予備器としていたオゾン濃度計A166を使用した。

オゾン濃度計交換時及び越冬中半年毎に、現用器と予備器との相互比較検定を行い測器の精度確認を行った。第40次隊で1年間使用したオゾン濃度計A166は日本に持ち帰り、気象庁観測部南極観測事務室で使用後検定（同方法）を行い、検定結果を元に観測値の補正を行った。また、第38次隊からの3年間のデータにより、データセレクションを見直した。詳細については4.3.5節で述べる。

4.2. 観測経過

4.2.1. オゾン全量観測

越冬期間を通じて大きなトラブルもなく、順調に観測を行った。表12に、月別オゾン全量観測及びオゾン反転観測日数を示す。また、観測に使用した光源の内訳も示す。4-8月は太陽高度角が低いため観測可能日数が少ない。5-7月は極夜期のため月光による観測のみを行ったが、観測に必要な光の強度は満月に近い月齢の時にしか得られないため、晴天が続いても観測可能な日数は月に1週間程度しかない。

4.2.2. オゾン反転観測

第35次観測隊より測器が自動化になり、より効率的にデータを取得できるようになった。第40次隊でも平年並の観測データを取得する事ができた。太陽高度角が低い、又は太陽が昇らない4-8月及び太陽が沈まない12月は、データ処理に必要なデータセットが得られないため観測日数が少ない。

4.2.3. オゾンゾンデ観測

表12 月別オゾン全量観測およびオゾン反転観測日数

Table 12. Observation days of total ozone observations and ozone Umkehr observations with the Dobson spectrometer at Syowa Station.

	1999												2000	合計
	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月	1月		
全量観測日数	23	24	15	4	7	4	13	25	27	28	30	29	229	
内訳	直射光 AD	16	17	5				15	20	23	29	27	152	
	" CD		1				6	4					11	
	天頂光 AD	7	6	3				6	7	5	1	2	37	
	" CD		1	6				5					12	
月光				4	7	4	2						17	
反転観測日数	12	4	2				1	9	7	10	1	14	60	
内訳	ロング	10	1					1	5	9	1	13	40	
	ショート	2	3	2			1	8	2	1		1	20	

第40次観測隊では、定常気象観測用のオゾンゾンデを54台、ILAS検証用を24台、計78台を持ち込んだ。78台のうち2台は、飛揚前の点検において不良箇所が見つかり国内へ持ち帰った。結果として第40次観測隊では、76台を飛揚した。ILAS検証用オゾンゾンデは、第38次観測隊で衛星(ADEOS)が故障したため、基礎データの取得として1999年5-8月までの期間で、3日に1回飛揚した。

飛揚状況を表13に示す。このうち4回はオゾン計測部のポンプ停止及び反応管内での気泡詰まりが原因と思われるオゾン反応管の反応不良によりデータが取得できなかった。また、ドブソン分光光度計のオゾン全量値による補正係数(ドブソン比)が得られなかった観測が35回あった。このうち26回(ILAS検証用24回)は、極夜期のため月光によるオゾン全量観測もできなかったものであり、残りはオゾンゾンデ観測最終高度が30hPaに達しなかったものである。

4.2.4. 地上オゾン観測

1999年1月20日、第39次隊現用器(101A)と予備器(166A)及び第40次隊持ち込みのオゾン濃度計(101B)の相互比較検定を行い測器の精度確認を行うとともに、第39次隊予備

表13 オゾンゾンデ観測回数
Table 13. Number of ozonesonde observations.

年		1999													
月		2月		3月		4月		5月		6月		7月			
日	到達 気圧 (hPa)	3	5.5	3	53.3 *1	7	---	*3	5	8.0 *2	3	110.4 *1	2	6.2 *2	
		11	4.5	10	13.0	19	13.4	10	13.6 *2	6	---	*2,3	4	7.4 *2	
		18	5.5	18	6.1	23	3.1	13	18.2 *2	9	362.4 *1,2	6	4.5 *2		
		26	4.1	26	9.2	30	14.8 *2	16	7.7 *2	13	5.1 *2	9	22.3 *2		
				31	---	*3			19	8.3 *2	16	6.0 *2	12	5.0 *2	
								22	6.3 *2	18	17.8 *2	15	12.6 *2		
								25	62.7 *1,2	21	10.7 *2	18	8.1 *2		
								28	9.5 *2	27	5.5	21	6.9		
								31	8.6 *2	29	18.2	24	6.0 *2		
												28	27.0		
												31	6.3		
		年		1999							2000				
月		8月		9月		10月		11月		12月		1月			
日	到達 気圧 (hPa)	4	5.2 *2	2	10.5	4	6.9	6	---	*3	2	4.7	6	5.3	
		7	6.3 *2	4	8.0	9	5.8	10	6.2	9	7.6	14	5.4		
		11	6.9 *2	8	13.4	13	10.2	17	4.0	15	4.9	19	4.8		
		14	4.9 *2	12	12.2	20	4.7	25	19.3	22	6.3	26	---	*3	
		18	10.8 *2	16	8.3	27	13.9			29	5.4				
		21	15.5	19	14.6										
		25	8.0	25	10.8										
		28	10.2	29	21.2										

*1 : 気球破裂・オゾン反応不良などにより最終高度が30hPaに達せず、ドブソン比(補正係数)なし。

*2 : 極夜期で月光によるオゾン全量観測ができなかったため、ドブソン比なし。

*3 : オゾン反応不良などによりデータ取得できず。

5月10日~7月18日まではILAS検証報告をおこなった観測

器を現用器、第40次隊持ち込みのオゾン濃度計を予備器として観測を開始した。越冬中1999年7月21日に第40次隊現用器(166A)と予備器(101B)、越冬交替時2000年1月8日には第40次隊現用器(166A)と予備器(101B)及び第41次隊持ち込みのオゾン濃度計(101A)の相互比較検定を行い測器の精度確認を行った。その後、2月1日の越冬交代時に第40次隊予備器を第41次隊現用器、第41次隊持ち込みのオゾン濃度計を第41次隊予備器とした。第40次隊が1年間観測に使用したオゾン濃度計(166A)は国内に持ち帰り、気象庁観測部南極観測事務室で使用後検定を行った。

ブリザード時に大気取り入れ口が雪詰まりして、大気サンプル流量が落ちることがあった他は、1年間を通して概ね順調に観測を行うことができた。

4.3. 観測結果

4.3.1. オゾン全量観測

図10に1999年1月～2000年1月のオゾン全量観測結果を示す。日代表値オゾン全量(○)は、8月下旬から11月中旬までオゾンホールが目安となる220 m atm-cmを継続して下回った。11月下旬から12月中旬にかけて、極渦の変動に伴ってオゾン全量は大きく変動し、220 m atm-cm前後の値で推移した。12月25日には、過去最も遅い220 m atm-cmを観測した。また、11、12月には、観測開始以来その月としての最小値を観測した。これは、昭和基地上空のオゾンホールが例年より長い間存在していたことによるものと考えられる。これについてはさらに第10章において、詳しく考察する。

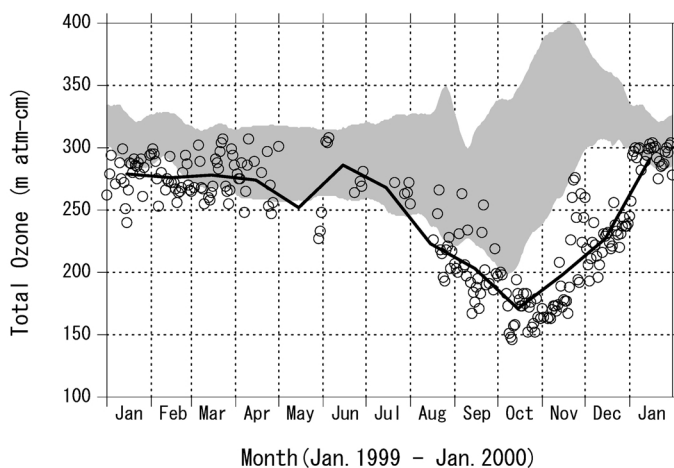


図10 オゾン全量の年変化(1999年1月～2000年1月)

○: 日代表値, —: 月平均値

■: 平年値からの標準偏差(上限・下限)

Fig. 10. Annual variations in total ozone at Syowa Station (Jan. 1999–Jan. 2000).

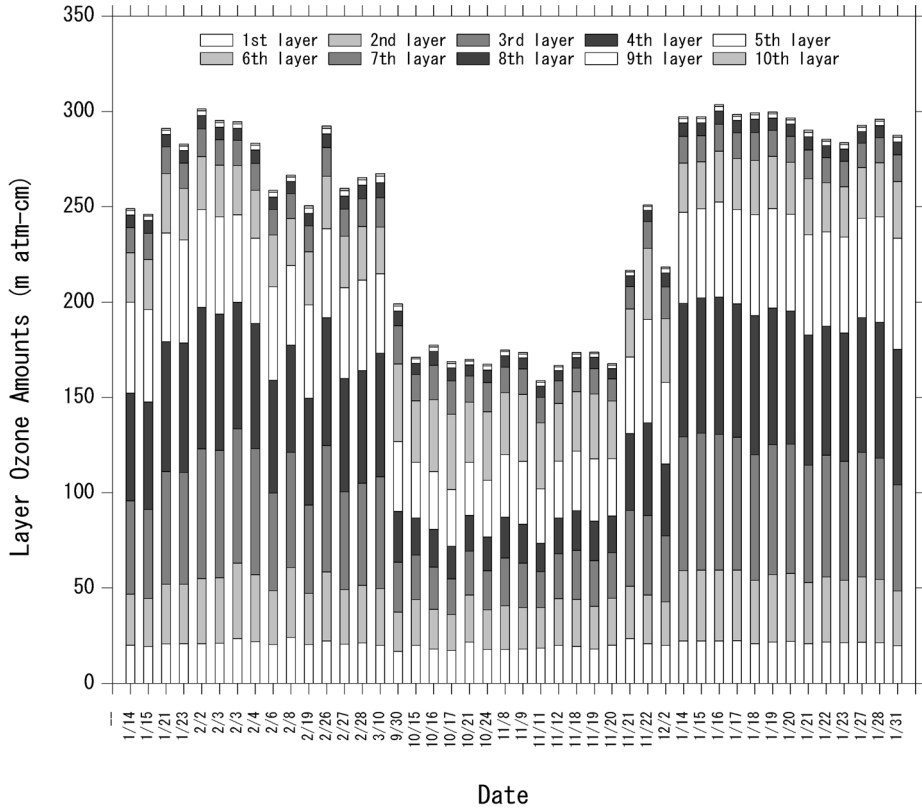


図 11 反転観測による気層別オゾン量 (1999 年 1 月～2000 年 1 月)
 Fig. 11. Layer amount of ozone by Umkehr observations (Jan. 1999–Jan. 2000).

4.3.2. オゾン反転観測

図 11 にオゾン反転観測による層別オゾン量の高度分布を示す。1999 年 4–8 月はロング反転観測データが得られなかったため表示していない。1999 年 1–3 月及び 2000 年 1 月中旬以降に、通常オゾン層のピークが見られる第 4 層 (63.3–31.7 hPa) に同様なピークが見られる (2/3, 2/4, 2/8 は第 3 層 (12.6–63.3 hPa) にピークが見られる)。9–11 月上旬は第 3, 4 層を中心に大きく減少しており、第 39 次観測隊の観測結果より減少期間が長くなっている。そのため、9–11 月上旬におけるオゾン層のピークは第 5 層 (31.7–15.8 hPa)、第 6 層 (15.8–7.9 hPa) となっている。第 3, 4 層が通常の状態へ回復したのは、2000 年 1 月中旬以降であった。これらの結果は、オゾンゾンデによる観測結果とほぼ一致している。

4.3.3. オゾンゾンデ観測

図 12 に、1999 年 1 月～2000 年 1 月のオゾン分圧 (mPa) の時間高度断面を示す。8 月以降、オゾンホールの影響を受けて 100 hPa (高度 15 km) 付近のオゾン分圧は大幅に減少した。また、9–12 月にかけてオゾン分圧が 3 mPa 以下の極小域が現れている。10 月には 100–45 hPa

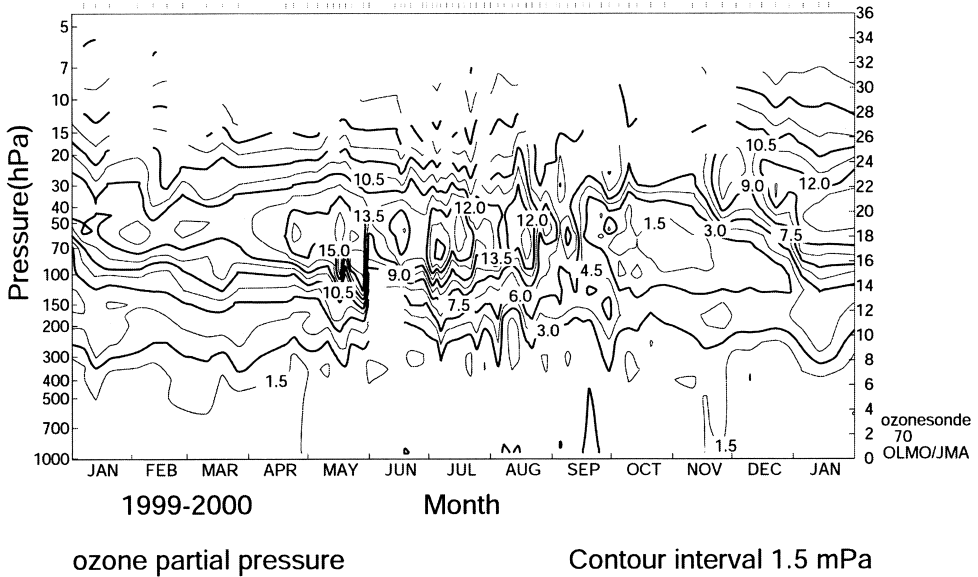


図12 オゾンゾンデ観測によるオゾン分圧特別高度断面図 (1999年1月~2000年1月)
 Fig. 12. Time-height cross section of ozone partial pressure (mPa) by ozonesonde observations (Jan. 1999–Jan. 2000).

(高度 15–20 km) の高度域でオゾンがほとんど完全になくなった状態が観測された。オゾン分圧は 11 月以降、上層より回復し始め、オゾンホールは解消に向かったが、12 月においても 100 hPa (高度 15 km) 付近を中心としてオゾン分圧が 3 mPa 以下の領域が継続して現れている。オゾンホールについては第 10 章において、詳しく考察する。

4.3.4. 衛星搭載の TOMS データによる考察

図 13 にアースプローブ衛星搭載 TOMS (Total Ozone Mapping Spectrometer) による 1999 年 9–12 月の月平均オゾン全量の南半球分布を示す。なお、この図は気象庁オゾン層情報センターが TOMS のデータを基に作成したものである。

9–10 月には 220 m atm-cm 以下の領域は、東経 45 度付近から東経 180 度付近の南極大陸縁辺部を除く大陸の大部分を覆い、10 月の南極点付近には 130 m atm-cm 以下の領域も見られる。その後オゾンホールは縮小へ向かい、11 月には 220 m atm-cm 以下の領域は 9 月及び 10 月に比べて大幅に減少している。12 月の月平均分布図では 220 m atm-cm 以下の領域は見えなくなったが、250 m atm-cm 以下の極小域は東経 40 度南緯 70 度付近 (昭和基地付近) に移動している。(気象庁, 1999)

4.3.5. 地上オゾン観測

第 40 次隊では、データセレクションを見直すとともに、第 38 次隊から観測された地上オゾン濃度データの再計算を行った。

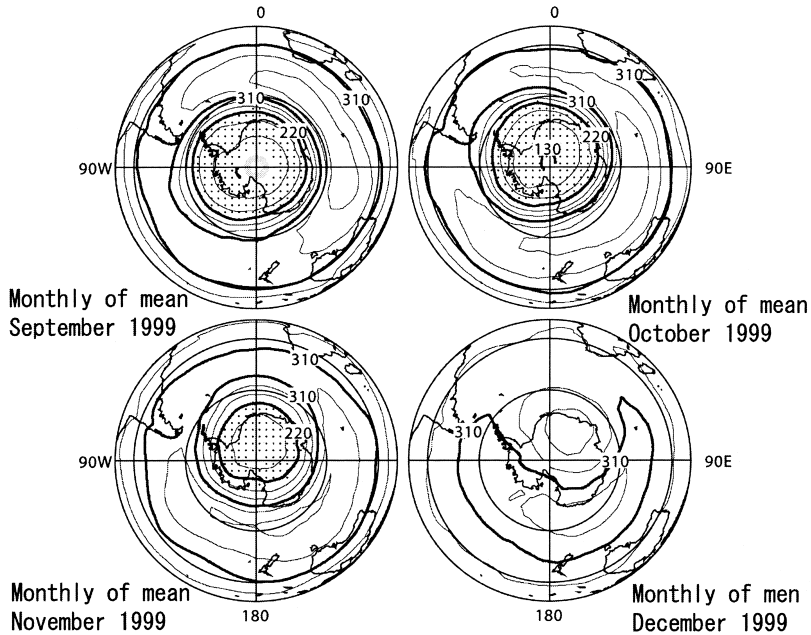


図 13 TOMS による月平均オゾン全量の南半球分布図 (1999 年 9–12 月)

Fig. 13. Distribution of monthly means of total ozone over the Southern Hemisphere by TOMS (Sep. 1999–Dec. 1999).

(1) 観測データの再計算の必要性とその方法

オゾン濃度計は、感部出力値と濃度値との関係が測定範囲においてはリニアであるため、出力値と濃度値との関係を示す直線の傾き（スパン値）と切片（ゼロ値）で値付けされている。スパン値とゼロ値は使用前検定時に値付けされるが、オゾン濃度計に使用している紫外線ランプの経年変化等によりそれらの値は一定ではない。そのため使用后検定時に再び値付けを行い、最終的に観測期間中の地上オゾン濃度値は、使用前後の検定期間内で時間按分したスパン値とゼロ値を元に、出力値から再計算されることになる。

本来ならば再計算は使用前及び使用后検定の値を元に行われるべきである。しかし、第 38 次隊から第 40 次隊まで各隊がオゾン濃度計を値付けするために使用した前後検定の検定装置が異なり（表 11）、この結果を元に観測値の再計算を行うと、オゾン濃度計交換時前後で地上オゾン濃度観測値の差が大きく整合がとり難い。そのために、第 40 次隊持ち帰り検定及び昭和基地でオゾン濃度計交換時に行った相互比較検定を元に、第 38 次隊からの観測データの再計算を行った。

再計算に使用した検定は表 11 で示すように、1998 年 1 月、1999 年 1 月、2000 年 1 月の相互比較検定及び 2000 年 7 月に行われた使用后検定である。再計算の順序としては、まずオゾン濃度計 A166 の使用后検定によりスパン値、ゼロ値を決め、オゾン濃度計 A166 のデータ

を再計算する。その後、オゾン濃度計 A166 を基準として各相互比較検定でオゾン濃度計 101 A 及び 101B の値付けを行った。オゾン濃度計 101A は、観測期間を挟み込む 1998 年 1 月、1999 年 1 月に行ったオゾン濃度計 A166 との相互比較検定で、使用前後のスパン値、ゼロ値の値付けを行い、観測期間中の観測データは前後のスパン値、ゼロ値を時間按分して再計算を行った。また、オゾン濃度計 101B については、観測使用前にオゾン濃度計 A166 と相互比較検定を行っていないため、観測使用後の 1998 年 1 月に行った相互比較検定でスパン値、ゼロ値を決め、その値のみ使用して再計算を行った。

(2) データセレクションの見直し

地上オゾンデータの時間平均値（以下、時別値）や月平均値（以下、月別値）を生データ（12 秒値）から計算する場合、そのまま計算すると汚染されたデータ等が含まれ、バックグラウンドデータとはいえない。そこで、汚染されたデータを除去するため、時別値や月別値を求める時は何らかの方法でデータにフィルターを掛ける必要がある。その方法は、時別値を求める場合には、一般的に 1 時間分の生データ（12 秒値）の標準偏差閾値を用いて判別を行っている。ここで標準偏差閾値というのは、その標準偏差以下の全てを含むことである（例えば、時別値標準偏差閾値が 0.3 ppbv の場合、時別値標準偏差が 0.3 ppbv 以下の時別値をバックグラウンドデータとして採用し、その採用された時別値から月別値などを計算する）。この標準偏差の閾値は、地域特性などから、観測所毎に決められている。昭和基地では観測データが蓄積されデータセレクションが決定できるようになるまでは、大気環境基準観測所である南鳥島の、生データ（12 秒値）が 1 時間観測回数（150 個）の半分（75 個）以上あり、かつ標準偏差閾値が 1.5 ppbv を使用していた。

今回は、汚染されていない大気中の地上オゾン濃度分布は正規分布に従う事を元にして、時別値を求める場合の標準偏差閾値を見直した。方法として、最初に全ての時別値について 1 時間内の生データについて正規分布への適合度検定を有意水準 5% で行い、合格した時別値から月別値を計算する。次に、時別値標準偏差閾値を 0.1 ppbv づつ換えて月別値を計算し、先ほど求めた月別値に近い値となる時別値標準偏差閾値を求めた。使用したデータは第 38 次隊が観測を開始した 1997 年 2 月から、40 次隊観測終了の 2000 年 1 月までの 3 年分のデータである。正規分布検定の条件として、ある程度データ数がないと適正な検定が出来ないため、時別値の生データ（12 秒値）数が全データ（ $12 \times 60 = 300$ 個）の半分（150 個）以上ある場合とした。

まず標準偏差毎に、その標準偏差に適合する時別値の中で正規分布検定に合格した時別値の割合及び、その標準偏差に適合する時別値の時別値総数に対する割合を調べてみた。図 14 に 0.1 ppbv から 1.5 ppbv までの各標準偏差毎に正規分布検定に合格した時別値の割合と、各標準偏差毎の時別値数の時別値総数に対する割合を示す。この図を見ると、標準偏差が大きくなるに従い、各標準偏差において正規分布検定に合格した時別値の割合が低くなるととも

に、時別値総数に対する割合も減っているのが分かる。

次に、時別値標準偏差毎の観測生データ 1 時間毎の分布を詳細に調べるために、データ分布の対称性を調べた。方法として、時別値標準偏差が 0.1 ppbv から 1.5 ppbv までのデータにおいて、1 時間毎に 1 時間平均と生データの偏差の 2 乗を計算し、1 時間平均値からの正負を

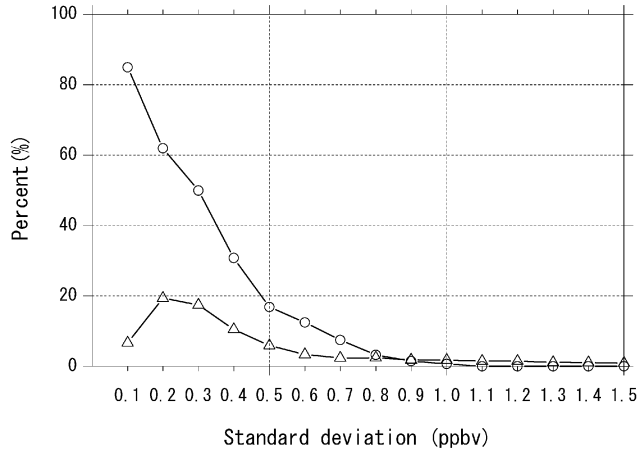


図 14 正規分布検定に適合した地上オゾン濃度時別値の割合及び時別値総数に対する割合
 -△-: 各標準偏差において正規分布検定に合格した割合
 -○-: 各標準偏差に適合する時別値の時別値総数に対する割合

Fig. 14. Ratio of hourly mean surface ozone concentration which fits a normal distribution, and ratio to all hourly mean surface ozone concentration.

-△-: Ratio of hourly mean surface ozone concentration which fit a normal distribution.
 -○-: Ratio to all hourly mean surface ozone concentration.

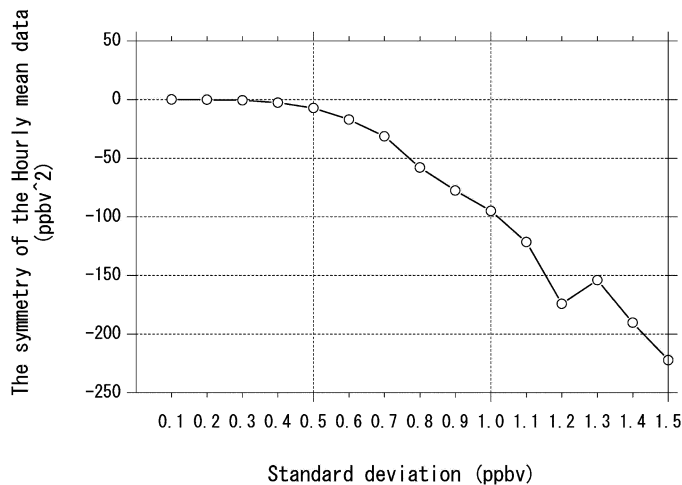


図 15 時別値データの対称性

Fig. 15. Symmetry of data for hourly means.

区別して積算を求めた。その後、3年間の平均を取るため、時別値を3年分各標準偏差毎に積算後、それぞれの3年分の総数で割った。その結果を図15に示す。この計算を行うことにより、生データの分布が時間平均値から正・負のいずれかに偏っている事が分かる。濃度の分布が正規分布に従うような場合は、この値はゼロに近くなる。図を見ると、標準偏差が0.3 ppbv より大きい場合は、標準偏差が大きくなるに従い時間平均値より負の偏差となり対称でなくなっている。このようなことから、地上オゾン濃度は標準偏差が大きくなる、すなわち汚染が大きくなるような場合にはオゾン濃度分布の対称性がマイナスの方に崩れ、正規分布に従わないものが多くなる。このことは、地上オゾン濃度は汚染されると分解され、その時の時別値は汚染されていないものより濃度値が低くなるためと考えられる。

そこで、汚染された場合に、どの程度正規分布に合格した時別値から計算した月別値より低い値になるのかを見積もって見た。地上オゾン濃度は季節変化しているため、3年間各月(1-12月まで)毎に偏差の計算を行い、3年間の平均を求めた。図16に0.1 ppbv から1.5 ppbv までの標準偏差閾値毎及び各標準偏差毎に計算した月別値と、正規分布検定に合格した時別値から計算した月別値との偏差を示す。この図をみると、標準偏差が大きくなるに従い、標準偏差毎に計算した月別値と、正規分布に合格したものから求めた月別値との偏差が、負の方向に大きくなっている。このことは、従来使用していた標準偏差閾値1.5 ppbv では、正規

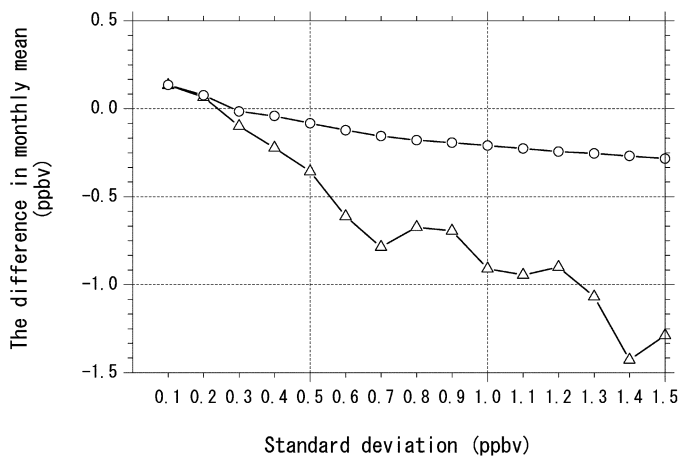


図16 月別値の偏差。○: B-A; △: C-A
 A: 正規分布検定に合格した時別値から計算した月別値
 B: 各標準偏差閾値から計算した月別値
 C: 各標準偏差毎の時別値から計算した月別値

Fig. 16. Deviations of monthly means.

A: The monthly mean calculated by the hourly mean which fit a normal distribution.

B: The monthly mean calculated by the hourly mean which fit a each standard deviation therehole value.

C: The monthly mean calculated by the hourly mean for each standard deviation.

分布に従うものより低い、かなり汚染された特別値を含んで（標準偏差 1.5 で -1.3 ppbv 程度）いたことになる。しかし、標準偏差が大きくなるに従い、図 14 にも示したようにデータ数の割合が小さくなるので、実際に標準偏差閾値を 1.5 ppbv とした場合にはそれらは平均され、影響としては正規分布に従うものから求めたものより 0.3 ppbv 程度低くなる。

以上のことから、1 時間当たりのオゾン濃度の対称性を示す図 15、及び標準偏差閾値を 0.1 ppbv から 1.5 ppbv まで変化させ月別値を比較した図 16 より、適正な標準偏差閾値は 0.3 ppbv である。

(3) データセレクションの見直しによる再計算の結果

図 17 に新しく見直した特別値標準偏差閾値で計算した月別値、及び従来のデータセレクションで求めた月別値及びその偏差を、図 18 には新しいデータセレクションで求めた特別値を示している。これを見ると昭和基地における地上オゾン濃度は、夏期にオゾン濃度が小さく、冬期に大きくなるという季節変化を繰返し、極夜明けから春期にかけての変動が大きいことが分かる。データセレクションを見直したことで、月により変動はあるが、月別値が平均して 0.2 ppbv 程度高くなった。特に、冬季から春季にかけての差が大きくなっている。

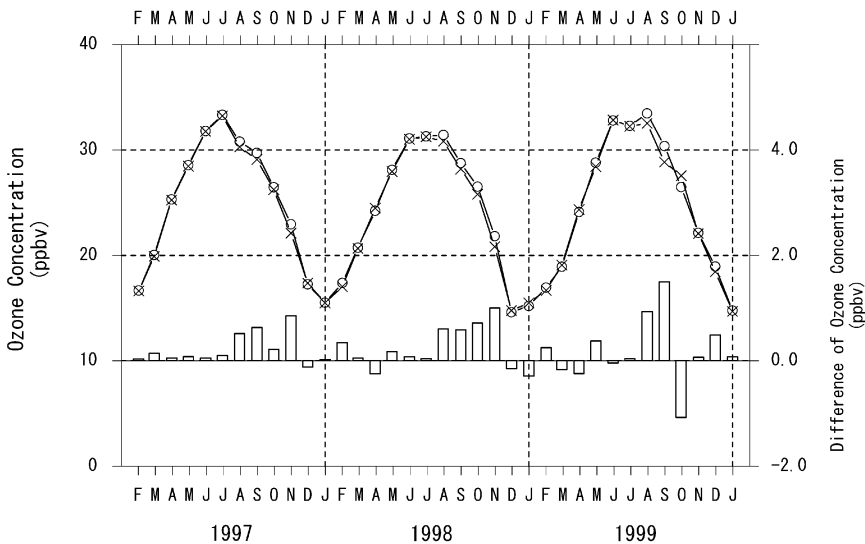


図 17 新旧データセレクションによる月別値の経年変化と偏差（1997年2月～2000年1月）

- ×—: 旧データセレクション
- : 新データセレクション
- : データセレクションによる偏差

Fig. 17. Time series of monthly means with new and old data selection, and those deviation (Feb. 1997-Jan. 2000).

- ×—: Old data selection.
- : New data selection.
- : The deviation by the data selection.

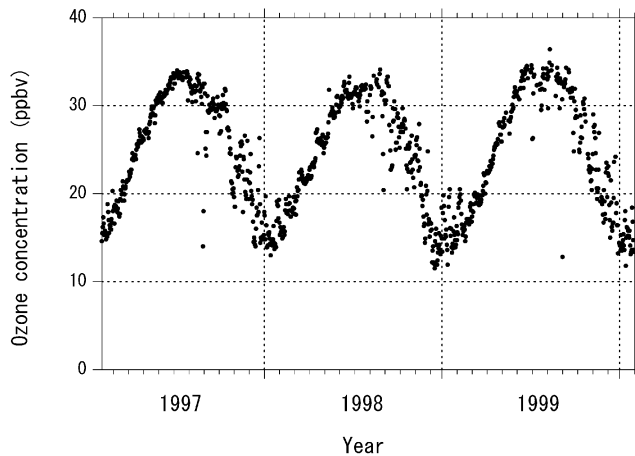


図18 地上オゾン時別値 (1997年2月~2000年1月)

Fig. 18. Hourly means of surface ozone concentration (Feb. 1997-Jan. 2000).

今回第38次隊からの3年分の観測データを元に、正規分布検定を用いてデータセレクションの見直しを行ったが、今後のデータ蓄積に伴い、数年後に再びこの値を再検証する必要がある。また、オゾン濃度計が更新された場合にも、同様に再検証する必要がある。

(4) 春期の地上オゾンの低濃度現象

南極・北極の高緯度地域では、極夜が明けた春期に地上付近のオゾンが大気中の海塩粒子や、積雪・海中の海塩成分から放出された海塩起源の物質と反応することにより、オゾンが分解され濃度が減少し、ほとんどゼロになる現象があることが知られている(青木, 1997; 江崎ら, 1998)。この現象は、第40次隊でも第38, 39次隊同様にこのような現象を観測した。地上オゾン破壊時の状況を見るために、図19に第38-40次隊で観測された極夜が明けた春期(8, 9月)の地上オゾン濃度データと、その時の地上気温及び上空(700 hPa, 850 hPa)と地上の風の南北成分(南向きが正)を示す。この図を見て分かるように、第40次隊ではオゾン破壊現象は観測されたものの、第38次隊の時のように地上オゾン濃度が完全にゼロに近い値とはならず、第39次隊と同じように何回かに分けて地上オゾン濃度が低い状態があったことが分かる。また、地上オゾン濃度が低くなる時は、上空(700 hPa, 850 hPa)と地上風の南北成分が負(北風)となり、地上気温も上昇している。このことはオゾン濃度の低い気団が南極大陸の内陸部ではなく、暖かい北の方から運ばれたものであることを示唆している。

5. 地上日射・放射観測

5.1. 観測方法と測器

地上日射放射観測は全球ベースライン地上日射放射観測網 BSRN (Baseline Surface Radia-

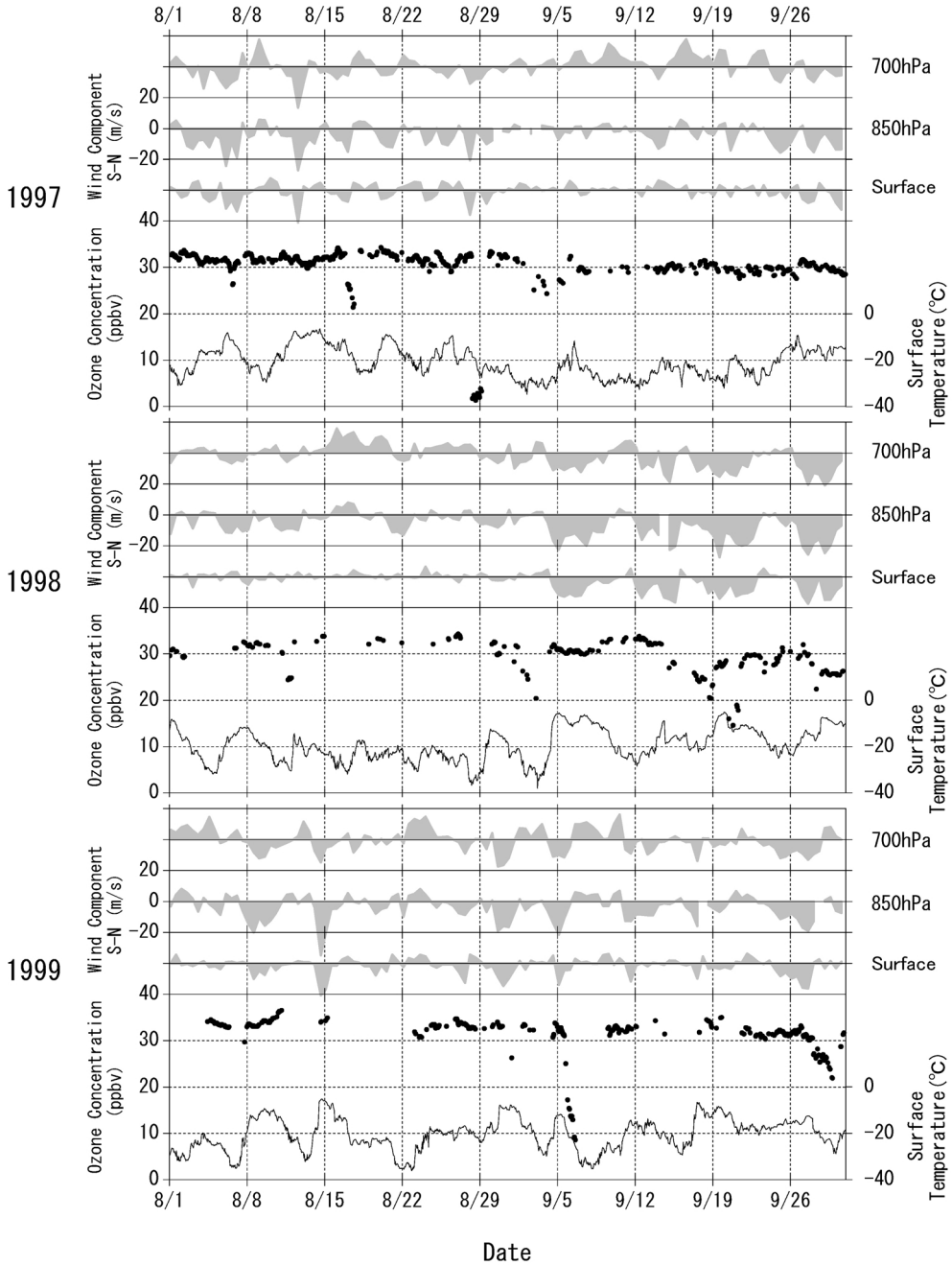


図 19 地上オゾン急減現象時の気象データ（地上気温，地上，850 hPa，700 hPa 風の南北成分）
 Fig. 19. Meteorological data during a sudden decrease in surface ozone concentration (surface air temperature, and north-south component wind on surface, 850 hPa and 700 hPa).

tion Network) の観測点としての条件を満たすために、第39次隊で新たに上向き放射放射観測を開始(岸ら, 2002)したのに続き、第40次隊では従来から観測していた下向きの直達日射、全天日射、散乱日射、紫外域日射、赤外放射の各要素について、データのサンプリングを従来の5秒から毎秒に変更して観測を行った。これらのデータは、基地内LANを利用して一括処理できるようになった。また、波長別紫外域日射観測、大気混濁度観測については、従来の観測システムで引き続き観測を行った。

観測の種類と使用した測器を表14に示す。

5.1.1. 下向き日射放射観測

データのサンプリングを従来の5秒から毎秒に変更し、気象棟前室屋上に設置した測器からの感部出力をデータロガーで収集後処理した。

新システムは従来のシステムと比較して、

- ① サンプリング間隔が5秒から1秒に短縮された。
- ② 収録したデータは基地内LANを介して翌日にはデータ処理用のパソコンに移し、グラ

表14 地上日射・放射観測の種類と使用測器

Table 14. Instruments for surface radiation observations at Syowa Station.

観測項目	使用測器	感部型式	測定範囲	測器番号	観測最小単位	サンプリング間隔	
下向き放射	全天日射量	精密全天日射計 (器温センサー付)	KIPP&ZONEN CM21T	305-2800 nm	980520	0.01 MJ/m ²	1秒
	直達日射量 (大気混濁度)	直達日射計 (器温センサー付) 太陽追尾装置	EKO MS-53F	300-2800 nm	P92009	0.01 kW/m ²	1秒
	散乱日射量	精密全天日射計 太陽追尾装置 遮蔽ディスク	EKO MS-801	300-2800 nm	F95046	0.01 MJ/m ²	1秒
	B領域紫外線量	紫外域日射計	EKO MS-210W	280-315 nm	S90091.02	0.01 MJ/m ²	1秒
	長波長放射量	精密赤外放射計 (ドーム温度付, 器温センサー付)	EPPLEY PIR	4-50 μm	30431F3	0.01 MJ/m ²	1秒
上向き放射	反射量	精密全天日射計 遮蔽バンド	KIPP&ZONEN CM21	305-2800 nm	970397	0.01 MJ/m ²	1秒
	長波長放射量	精密赤外放射計 (ドーム温度, 器温センサー付)	EPPLEY PIR	4-50 μm	32032F3	0.01 MJ/m ²	1秒
その他	大気混濁度	サンフォトメータ 太陽追尾装置	EKO MS-110	368 500 675 778 nm	ES94121.02		1分
			EKO MS-120 (携帯用)	368 500 675 778 862 nm			
	波長別 紫外域日射量	プリューワ 分光光度計	SCI-TEC BREWER	290-325	#034	0.01 kJ/m ²	1時間

フ表示により各要素の1秒値の品質管理ができる。

③ データ処理用のパソコンでは、品質管理済みの1秒値から各要素の統計処理及び合成を行うことができる。

④ データロガーは高性能、多チャンネル化され拡張性に優れる。

などの特徴がある。

観測項目は以下の通り。

(1) 全天日射量

器温センサー付精密全天日射計を用いた。

(2) 直達日射量

器温センサー付直達日射計を用いた。感部は太陽追尾装置 (INTRA) に搭載した。

また、オゾン全量観測時刻で、太陽面に雲がかかっている時を選び、ホイスター・デュボアの混濁係数を求めた。

(3) 散乱日射量

太陽追尾装置 (INTRA) に搭載した精密全天日射計により観測した。遮蔽ディスクは、直達日射計の開口角と同等の視直径を持ち、太陽追尾装置に連動して、太陽からの直射光を遮るように設定されている。

(4) B 領域紫外線量

全天型紫外域日射計を用いて B 領域紫外線全量を観測した。測器定数は、ブリューワ分光光度計による UV-B 量観測値との比較により月毎に求めた。

(5) 長波長放射量

ドーム温度、器温センサー付の精密赤外放射計により観測した。

5.1.2. 上向き反射放射観測

海氷上に設置した観測鉄塔のアームに測器を取り付けた (図 1)。データは下向き放射同様、1秒毎にデータロガーで収集した後に処理した。

周辺からの散乱光を除去するために、感部の周囲に遮蔽バンドを取り付けて観測を行った。

(1) 反射日射量

精密全天日射計により観測した。

(2) 長波長放射観測

ドーム温度、器温センサー付の精密赤外放射計により観測した。

5.1.3. 波長別紫外域日射観測

ブリューワ分光光度計 (SCI-TEC #034) を使用して、波長別 (290-325 nm で 0.5 nm 刻み) 紫外線量を紫外域日射観測指針 (気象庁, 1993b) に基づき毎正時 (24 LT を除く) に観測を実施した。測器は、第 39 次隊まで設置されていた気象棟前室屋上に設置した。

5.1.4. 大気混濁観測

波長別直達光強度 (368, 500, 675, 778, 862, 938 nm の 6 波長) を毎分データに収録し、オゾン全量観測時刻で太陽面に雲が無い時を選び、波長別のエアロゾルの光学的厚さ (Aerosol Optical Depth, 以下 AOD) を求めた。また、368-862 nm の 5 波長の AOD より、オングストロームの波長指数 (Angstrom A) 及び混濁係数 (Angstrom B) を求めた。

5.2. 観測経過

5.2.1. 下向き日射放射観測

毎秒サンプリングへ切り替え、1999年2月5日からデータ収録を開始した。

旧システムでは、太陽追尾装置 (INTRA) に搭載した全天日射計 (散乱日射量観測用) の出力信号にノイズが多かったため、第39次隊で信号経路の変更等の対策を施していた。しかし、毎秒サンプリングの開始に伴い、再び同様のノイズが発生することが多くなり、同時に、太陽追尾装置搭載の直達日射計及び追尾装置に搭載していない全天日射計の出力にもノイズが乗るようになった。

データロガー入力端子への高周波フィルターの実装、信号線の敷設経路の変更等によりノイズの除去を試みたが、第40次隊の越冬中には原因の特定には至らず、ノイズを完全に除去するまでには至らなかった。また、精密赤外放射計の出力にも大きなノイズが時々乗っていたが、3月13日に信号線の接続を変更することによって解消した。これらノイズの乗ったデータは、処理の段階で削除した。

1999年5月2日のブリザード来襲時に飛来物が太陽追尾装置 (INTRA) に衝突した事で追尾動作が異常となった。それ以降は太陽位置を自動的に追尾するサンセンサーが動作している場合は問題ないが、太陽面に上層の薄い雲がかかった場合など、サンセンサーが動作しないような時にスポットが外れることがしばしばあった。地上気象観測装置の直達日射計のデータとの比較により、追尾動作に異常があったと思われる時間帯は、直達日射量及び散乱日射量のデータを削除した。

太陽追尾装置 (INTRA) ファームウェアの2000年対応 (Y2K) のため、1999年12月に太陽追尾装置 (INTRA) の ROM の書き換え作業を実施したが、装置と制御用パソコンとの通信に障害が発生し、12月30日～1月12日の間、追尾装置に搭載した直達日射計、散乱日射計及びサンフォトメーターのデータに欠測を生じた。

5.2.2. 上向き反射放射観測

第39次隊から引継ぎ、概ね順調に観測を継続した。

5.2.3. 波長別紫外域日射観測

第39次隊まで使用していたブリューワ分光光度計 (SCI-TEC #91) が故障により、国内持ち帰り修理となったため、第40次隊でブリューワ分光光度計 (SCI-TEC #034) を持ち込

んだ。第 39 次隊まで設置されていた気象棟前室屋上に設置、調整を行い、1999 年 2 月 15 日より観測を開始した。観測は、おおむね順調に経過した。

ブリザード等の強風時には、測器保護ため受光部に保護具を取り付け、観測を中断した。測器の光学系全体の波長感度を監視するための外部ランプ点検を、原則として週 1 回実施した。波長別感度は、年間を通じて大きな変化はなく安定していた。

5.2.4. 大気混濁度観測

サンフォトメーターによる波長別大気混濁度観測では、第 39 次が使用していた測器に不具合が発生したため、1999 年 1 月 13 日に現用の測器と交換した。

1999 年 5 月 2 日のブリザード来襲時、飛来物衝突による衝撃で測器内の 2 つあるヒーターの 1 つが故障したため、測器の内部温度が外気温に影響されるようになり、設定温度 (25°C) よりかなり低くなったが、AOD を求める際には温度補正を施しているので実質的な影響はない。

また、サンフォトメーターは太陽追尾装置 (INTRA) に設置されていたため太陽追尾異常 (5.2.1.) の問題もあり、データの取り扱いについてはサンセンサーが動作している時のみとした。太陽が出ない、または太陽高度角が低い 5 月 31 日～7 月 13 日は、サンフォトメーターを屋内に収容し観測を休止した。

12 月上旬から、サンフォトメーター収録用パソコンのハードディスクから異音が発生したため、12 月 12 日に収録用パソコンを交換した。この作業の間、欠測が生じた。

さらに、太陽追尾装置 (INTRA) の 2000 年対応 (Y2K, 5.2.1.) のため、12 月 30 日～1 月 12 日の間は欠測となった。

5.3. 観測結果

5.3.1. 下向き日射放射観測

図 20 に下向き日射・放射量日積算値の年変化を示す。

図 21 は、全天型紫外域日射計及びブリューワ分光光度計による UV-B 日積算値の年変化である。

全天型紫外域日射計については、測器感度の波長依存性や、波長に依存した測器感度の経時変化が指摘されている (宮本ら, 1996; 柴田ら, 2000)。このため第 40 次隊では、全天型紫外域日射計の測器定数算出には、柴田ら (2000) の用いた、全天型紫外域日射計出力電圧の日積算値とブリューワ分光光度計による日積算 UV-B 量との直線回帰により、月毎の換算係数を求める手法を採用した。両測器による UV-B 日積算値の差は $-4.68 \sim +2.93 \text{ kJ/m}^2$ で、日積算値が 7 kJ/m^2 以上の時には、概ね 10% 以内であった。従来、全天型紫外域日射計の測器定数算出には、1 年間 (または越冬前・後期各期間) のブリューワ分光光度計による観測値との比較により求めていた。定数の算出は、太陽高度角 25° 以上の毎正時のブリューワ分光光

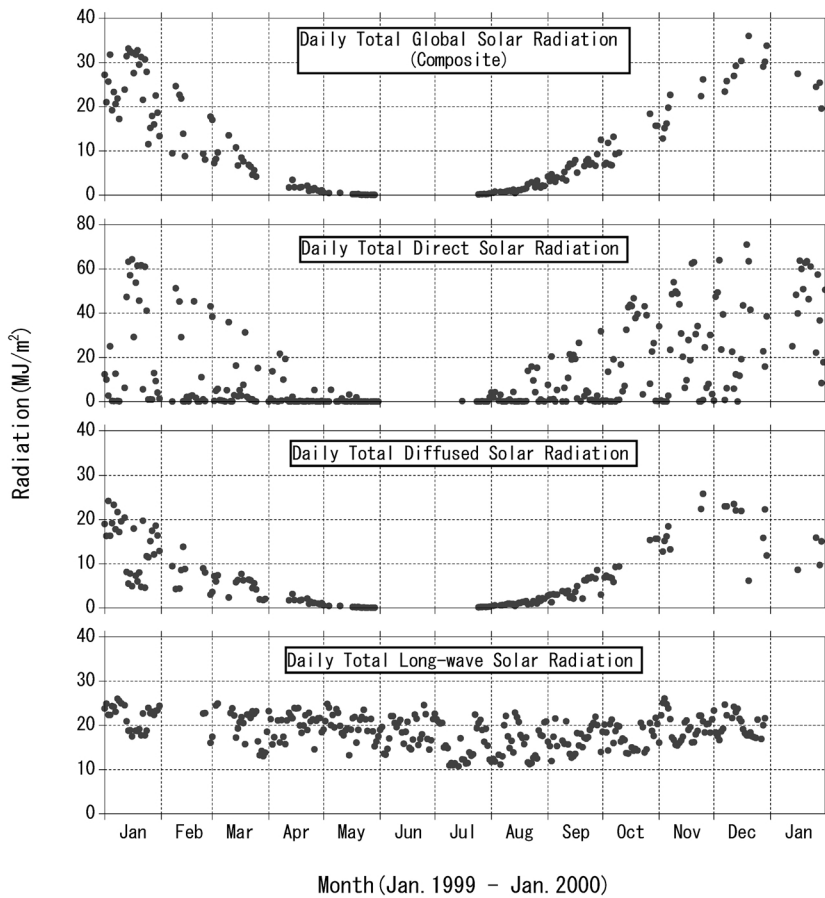


図 20 下向き日射・放射量日積算値の年変化 (1999 年 1 月～2000 年 1 月)

Fig. 20. Annual variations in daily integrated values of downward radiation components (Jan. 1999–Jan. 2000).

度計による UV-B 観測値と、当該時刻の全天型紫外域日射計出力の平均値 (正時を挟む 9 分間の平均) との関係を示す。従来方式の測器定数により計算した全天型紫外域日射計による UV-B 観測値と、新方式による観測値との比較を図 22 に示す。横軸は日付、縦軸はブリューワ分光光度計による UV-B 日積算値に対する全天型紫外域日射計による観測値の比である。前述のとおり、柴田らの方式による観測値は、ブリューワ分光光度計による観測値に対して概ね $\pm 10\%$ の範囲に分布し、1 年間を通してほぼ一定に経過している。これに対し、従来方式によって算出した観測値は明らかに季節変化を示しており、ブリューワ分光光度計による観測値に対し、 $\pm 15\%$ 程度の間で変動している。このことから、月別の換算係数を用いることは、全天型紫外域日射計の観測値を校正する上で有効であることが分かる。従来方式の換算によって求めた観測値を使用する際には、注意が必要である。

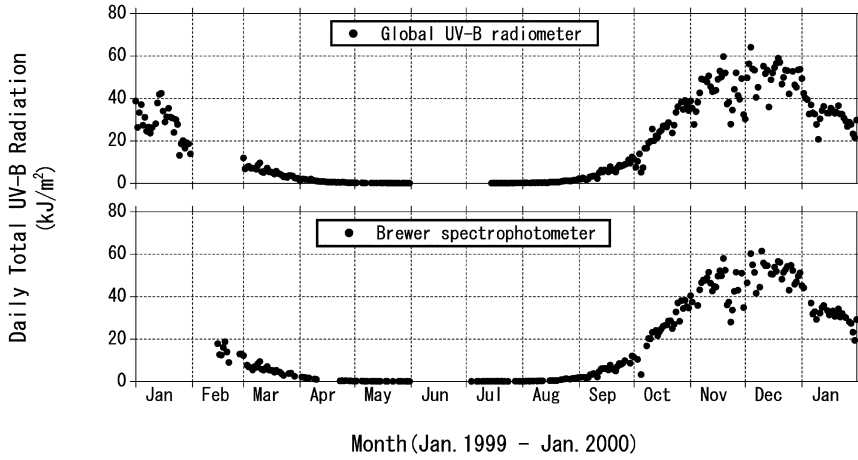


図 21 B 領域紫外域日射日積算値の年変化 (1999 年 1 月～2000 年 1 月)

Fig. 21. Annual variations in daily integrated values for UV-B (Jan. 1999–Jan. 2000).

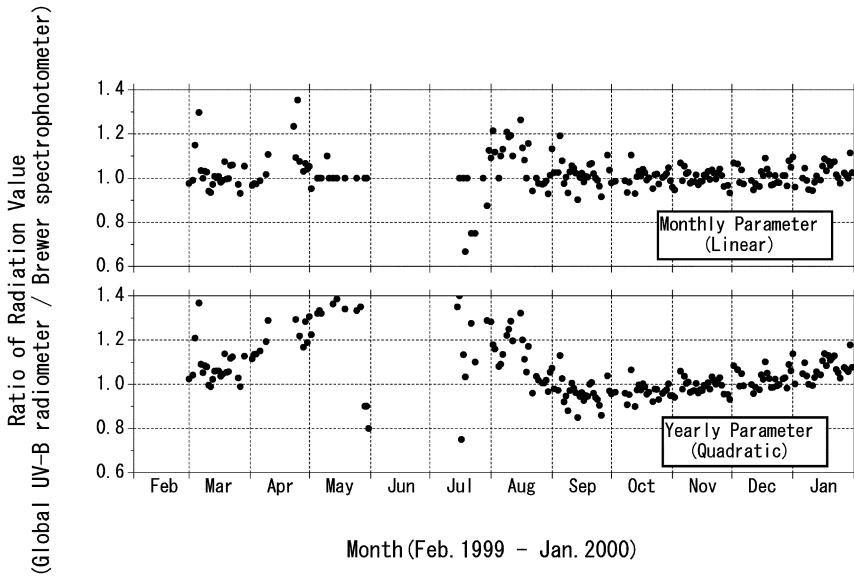


図 22 日積算 UV-B 量の比の年変化 (1999 年 2 月～2000 年 1 月)

Fig. 22. Annual variations in the ratio of daily integrated UV-B (Feb. 1999–Jan. 2000).

5.3.2. 上向き反射放射観測

図 23 に上向き反射・放射量日積算値の年変化を示す。

上向き反射・放射の測器感部設置場所は通年積雪に覆われているため、長波放射の日積算値は、季節変化が小さく、日々のばらつきは、接地逆転の強さの変化が大きい冬期間に大きくなっている。

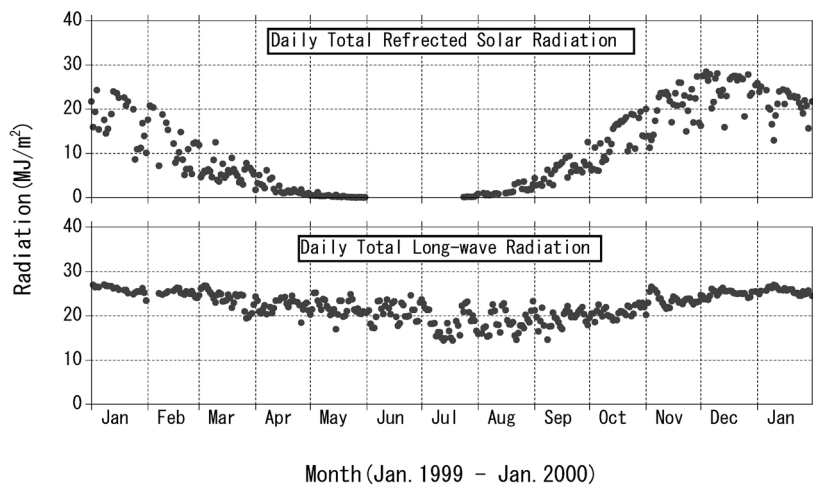


図 23 上向き反射・放射量日積算値の年変化（1999 年 1 月～2000 年 1 月）

Fig. 23. Annual variations in daily integrated values of surface upward radiation components (Jan. 1999–Jan. 2000).

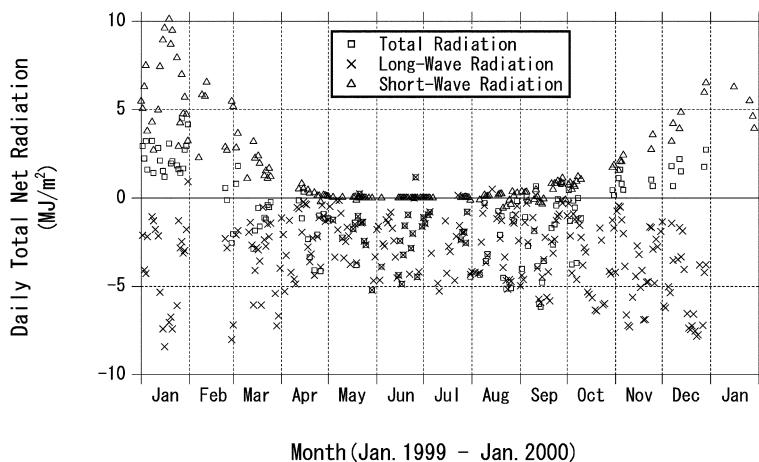


図 24 短波、長波及び全波長の正味放射量日積算値の年変化（1999 年 1 月～2000 年 1 月）

Fig. 24. Annual variations in daily integrated net radiation of short wavelengths, long wavelengths, and all wavelengths (Jan. 1999–Jan. 2000).

図 24 は短波、長波及び全波長の正味放射量日積算値の年変化である。

長波の放射量は、年間を通じて上向きが卓越し、正味放射量（×）はほとんど負値となっている。全波長の正味放射量（□）は、短波の日射・反射量が小さい冬期間は長波の放射収支に依存し、短波が大きくなる夏場には、短波による収支（△）を強く反映している。

第 40 次隊では、下向き日射・放射の観測データにノイズが乗ることが多く、日積算値が欠

測となる日が多かった。ノイズ対策が進み、年間を通して良好なデータが取得できるようになれば、放射収支に関する精密なデータを蓄積していくことができると考える。

5.3.3. 波長別紫外域日射観測

図 25 に波長 5 nm 毎に積算したブリューワ分光光度計による紫外域日射量を示す。オゾンによる吸収をほとんど受けない UV-A 領域に近い 310–315 nm の日積算値は、太陽高度角の増減に従いながら推移し夏至付近で最大値を観測している。一方、波長が短くなるにつれてオゾンによる吸収の影響で変動は大きくなっている。中でも 290–300 nm の波長帯では 11 月中旬に極大値となっている。これは太陽高度が十分高い条件の中で昭和基地がオゾンホールの中に入る位置関係となったことが原因である。その後オゾンホールの解消に伴い、12 月中旬から下旬にはこの波長帯の紫外線量は 1/10 程度となった。

図 26 にオゾン全量と紫外域日射計による UV-B 強度及び大気路程 μ の関係を示す。データは、大気路程 μ が 1.5, 2.5, 3.5, 4.5, 5.5 のそれぞれ ± 0.03 の範囲にあり、全雲量が 5 割以下のものを使用した。オゾン全量の観測には通常 3 分弱かかるため、UV-B 強度にはオゾン全量観測時刻 ± 1 分の 3 分間のデータを平均して用いた。いずれの大気路程 μ についてもオゾン全量が減少するにつれ UV-B 強度は指数関数的に増加している。オゾン全量を 300 から 297 m atm-cm へ 1% 減少した場合、大気路程 μ が 2.5 と 4.5 における B 領域紫外域日射強度はそれぞれ 1.7 と 2.3% 増加し、オゾン全量を 300 から 150 m atm-cm へ半減した場合には、 μ が 2.5 と 4.5 における B 領域紫外域日射強度はそれぞれ、2.3 倍と 3.2 倍に増加するという結果になった。これは、これまでの第 35 次(稲川ら, 1997)と第 36 次(佐藤ら, 1999)及び第 38 次(江崎ら, 2000)と比べると若干高い値となっているが、概ね一致する結果が得られた。オゾン全量及び成層圏気温と UV-B 強度の関係については第 10 章にて詳しく考察する。

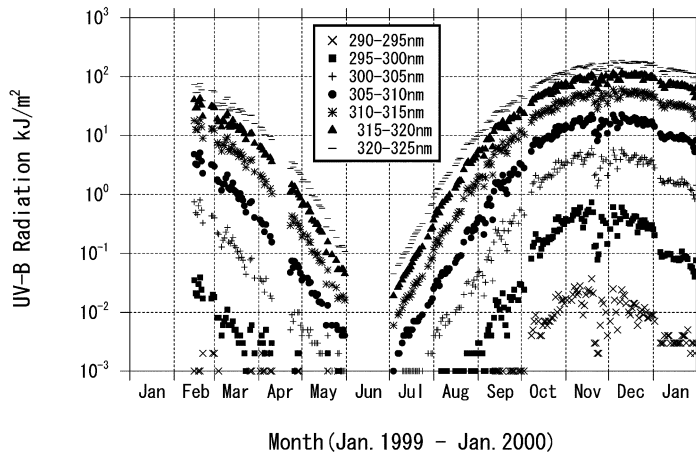


図 25 紫外域日射波長積分日積算値 (1999 年 1 月～2000 年 1 月)
Fig. 25. Daily integrated ultraviolet radiation wavelength (Jan. 1999–Jan. 2000).

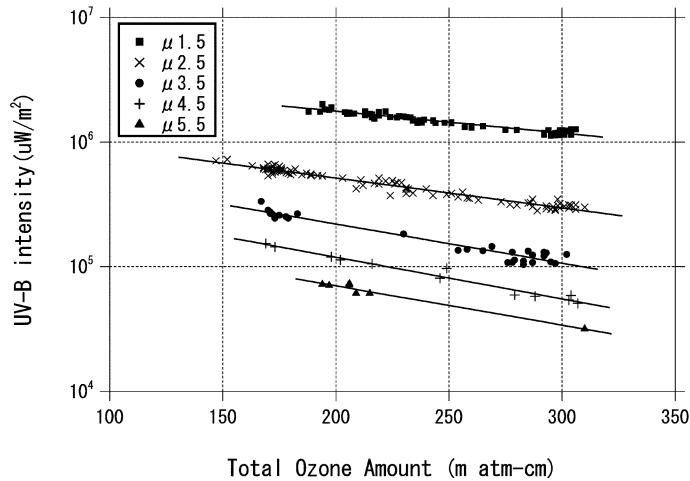


図 26 オゾン全量と UV-B 強度との関係 (1999 年 2 月～2000 年 1 月)
 大気路程 (μ) が 1.5, 2.5, 3.5, 4.5, 5.5 の時のデータを使用。
 図中の直線は最小二乗法による対数近似。

Fig. 26. Relations between total ozone and UV-B intensity (Feb. 1999-Jan. 2000).

5.3.4. 大気混濁度観測

大気混濁度は、直達日射計及びサンフォトメーターの観測により求められる。直達日射計で求められる直達日射量は全波長（通常は 300–4000 nm の範囲の積算値）成分を含むのに対し、サンフォトメーターでは波長別（368, 500, 675, 778, 862, 938 nm の 6 波長）の直達光強度を測定することにより、波長別のエアロゾルの光学的厚さ（AOD）を求めることができる。6 波長の中で 938 nm は大気中の水蒸気による吸収を受けるため、水蒸気の光学的厚さを推定するための波長として利用されている。また、残り 5 波長（368–862 nm）の AOD から、オングストロームの波長指数（Angstrom A）及び混濁係数（Angstrom B）が求められる。

(1) サンフォトメーター観測におけるレーリー散乱係数の変更

太陽放射が地上に到達するまでに受ける減衰（光学的厚さ τ ）は、Beer-Bouguer-Lambert の法則に従い次の式により求められる。

$$\tau = (1/m) \cdot \ln \{E_0 / (E \cdot S)\}, \tag{1}$$

ここで、 E_0 は測器常数、 E は出力値、 S は地球—太陽間の距離補正係数、 m は大気路程である。

この τ は主に次の 3 つの成分に分けられる。

$$\tau = \tau_R + \tau_O + \tau_M. \tag{2}$$

τ_R : 空気分子の散乱（レーリー散乱）の光学的厚さ

τ_O : オゾンの吸収の光学的厚さ

τ_M : エアロゾルの光学的厚さ（AOD）

したがって AOD は式 (1) と (2) から

$$\tau_M = (1/m) \cdot \ln \{E_0 / (E \cdot S)\} - (\tau_R + \tau_O) \quad (3)$$

である。

オゾンの影響を受ける波長が 500 nm と 675 nm であるため、オゾンの吸収の光学的厚さは、それぞれ、オゾン全量値を T_0 (atm-cm) として以下の式で計算される。

$$\begin{aligned} \tau_O(500 \text{ nm}) &= 0.0328 \cdot T_0 \\ \tau_O(675 \text{ nm}) &= 0.0415 \cdot T_0 \end{aligned} \quad (4)$$

レーリー散乱の光学的厚さは波長を λ (μm)、気圧を P (hPa) として次の式で計算される (Young, 1981)。

$$\tau_R = 0.00864 \cdot (P/1013.26) \cdot \lambda^{-(3.916+0.074 \cdot \lambda+0.05/\lambda)} \quad (5)$$

従来の昭和基地の観測では、この式の中の定数 0.00864 を 0.00838 としてレーリー散乱の光学的厚さを計算していたが、第 40 次隊より気象庁の大気バックグラウンド汚染観測と基準を合わせるために式 (5) を用いて計算することとした。

この定数の変更による影響をみるために、気圧 985.0 hPa (1999 年の昭和基地の平均海面気圧) の場合のレーリー散乱の光学的厚を表 15 に示す。この表には、オゾン全量値 0.245 atm-cm (1999 年の昭和基地の平均オゾン全量) の場合の、オゾンの吸収の光学的厚さも合わせて示してある。式 (5) の定数を 0.00838 から 0.00864 に変更したことにより、レーリー散乱の光学的厚さが大きくなっている。このため各波長で AOD が減少し、この影響は波長の短いものほど大きい。昭和基地における各波長の AOD は通常 0.1 以下であるが、368 nm で 0.015 程度の影響を受けることになる。このため、過去のデータと比較する場合には十分注意が必要である。

また、エアロゾルの光学的厚さの波長特性を示すオングストロームの波長指数 (Angstrom A) と混濁係数 (Angstrom B) にも影響が見られる。これらは、 $\tau_M(\lambda)$ を各波長 λ (μm) における AOD の関数として次の式で近似する。

$$\tau_M(\lambda) = B \cdot \lambda^{-A}, \quad (6)$$

ここで、A がオングストロームの波長指数 (Angstrom A)、B が混濁係数 (Angstrom B) で

表 15 レーリー散乱及びオゾン吸収の光学的厚さ
Table 15. Optical depths of Rayleigh scattering and ozone absorption.

波長 (nm)	係数	368	500	675	778	862	938
レーリー散乱による	0.00838	0.46910	0.13213	0.03917	0.02216	0.01471	0.01051
大気混濁度	0.00864	0.48366	0.13623	0.04038	0.02284	0.01517	0.01083
オゾンの吸収による		0.00000	0.00804	0.01017	0.00000	0.00000	0.00000
大気混濁度							

平均気圧 : 985 hPa
平均オゾン量 : 245 m atm-cm

ある。この式より

$$\ln(\tau_M(\lambda)) = -A \cdot \ln\lambda + \ln B, \tag{7}$$

が導かれる。このため、短波長側の AOD が長波長側より小さくなると、直線の傾きにあたるオングストロームの波長指数 (Angstrom A) は負となる。また、直線の切片にあたる混濁係数 (Angstrom B) は波長 λ が $1\mu\text{m}$ のときの AOD であるが、観測範囲の波長では $\ln\lambda$ が負の値であるため、短波長側の AOD が小さくなると大きくなる。一例として 1998 年 2 月の計算結果を図 27 に示す。レーリー散乱の計算式定数の変更によりオングストロームの波長指数 (Angstrom A) は小さく、混濁係数 (Angstrom B) は大きくなっている。

これまで、オングストローム波長指数 (Angstrom A) が負のデータは削除していたが、第 40 次隊からレーリー散乱の計算式定数を 0.00864 で計算することとしたことに伴い、負のデータも採用することにした。今後は、さらにデータを蓄積して、オングストローム波長指数 (Angstrom A) の適切な範囲を検討する必要がある。

(2) 1999 年の観測結果

図 28 に直達日射量から求めたホイスナー・デュボアの混濁係数を、図 29 にはサンフォトメーターによる 6 波長 (368, 500, 675, 778, 862, 938 nm) の各 AOD, 及び 368-862 nm の 5 波長の AOD から求めたオングストロームの波長指数 (Angstrom A) と混濁係数 (Angstrom B) を示す。これらの図をみると、4 月までは 368-862 nm の AOD は同じように推移し

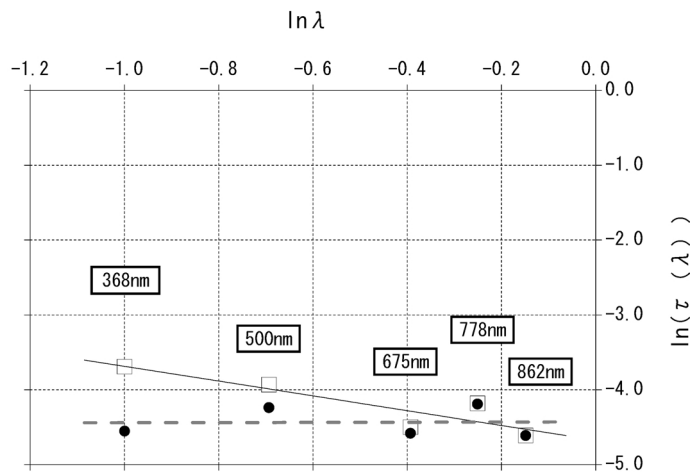


図 27 レーリー散乱に使用する定数の違いによる、オングストローム波長指数 (Angstrom A) と混濁係数 (Angstrom B) の計算例 (1998 年 2 月)
 □: レーリー散乱に使用する定数が 0.00838 の時
 ●: レーリー散乱に使用する定数が 0.00864 の時

Fig. 27. Sample calculation of the angstrom wavelength index (Angstrom A) and turbidity coefficient (Angstrom B) via differences in constants used in Rayleigh scattering (Feb. 1998).

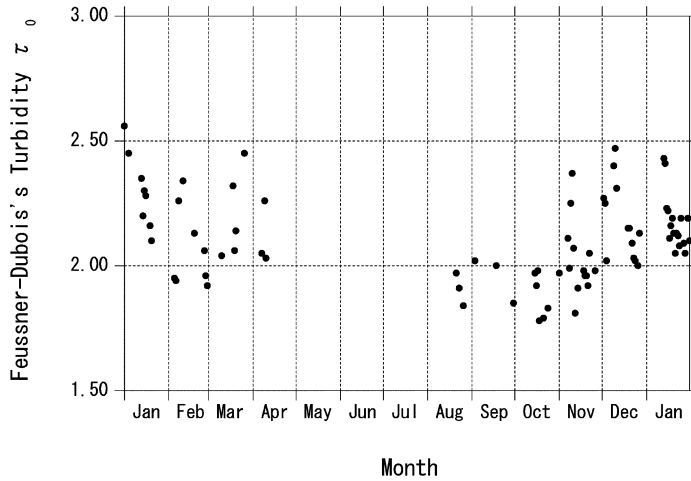


図 28 直達日射計によるホイスナー・デュボアの混濁整数の年変化 (1999 年 1 月～2000 年 1 月)
 Fig. 28. Annual variations in Feussner-Dubois's turbidity integers by pyrhelimeter
 (Jan. 1999-Jan. 2000).

ているが、8 月以降は 368 nm の AOD の変動が大きくなっている。また、938 nm は大気中の水蒸気の影響を受けるため、他の波長の推移とは異なり春と夏季に AOD が大きく、秋と冬季は小さくなっている。直達日射量から求めたホイスナー・デュボアの混濁係数は、938 nm と同じように大気中の水蒸気の影響を受ける波長も含むため、春と夏季に大きく秋と冬季は小さくなっている。

(3) 大気混濁度の経年変化

図 30 にはサンフォトメーターで大気混濁度の観測を開始した 1980 年からの各波長 (368, 500, 675, 778, 862 nm) の AOD, 及び 368-862 nm の 5 波長の AOD から求めたオングストロームの波長指数 (Angstrom A) と混濁係数 (Angstrom B) の経年変化を示す。昭和基地では、従来レーリー散乱の計算式定数の値は 0.00838 を使用していたため、1999 年もこの定数を使用した。この図をみると 1980 年以降全球的に噴出物が拡散したとされる火山噴火 (1982 年 4 月: エル・チヨン (17.20N, 93.12W), 1991 年 6 月: ピナツボ (15.08N, 120.21E)) の時に AOD は大きく増加し、その後数年かけて平年値に戻っている。なお、北半球で起きた火山噴火の影響が全球的に拡散するには、ある程度時間を要し、ピナツボ火山噴火の場合、その影響は 1991 年末時点では衛星観測 (Herber *et al.*, 1996) から南緯 20 度程度までとされており、1991 年に昭和基地で観測された短波長での AOD のピークは、1991 年 8 月に起きたチリにあるハドソン火山噴火 (45.54S, 72.58W) の影響とみられる。その後の 1992-1993 年にかけての AOD の増加は、ピナツボの全球的な拡散によるものと考えられる (金戸, 1997)。1999 年の値は、波長 368 nm で AOD が 8 月からここ数年の値より増加している他

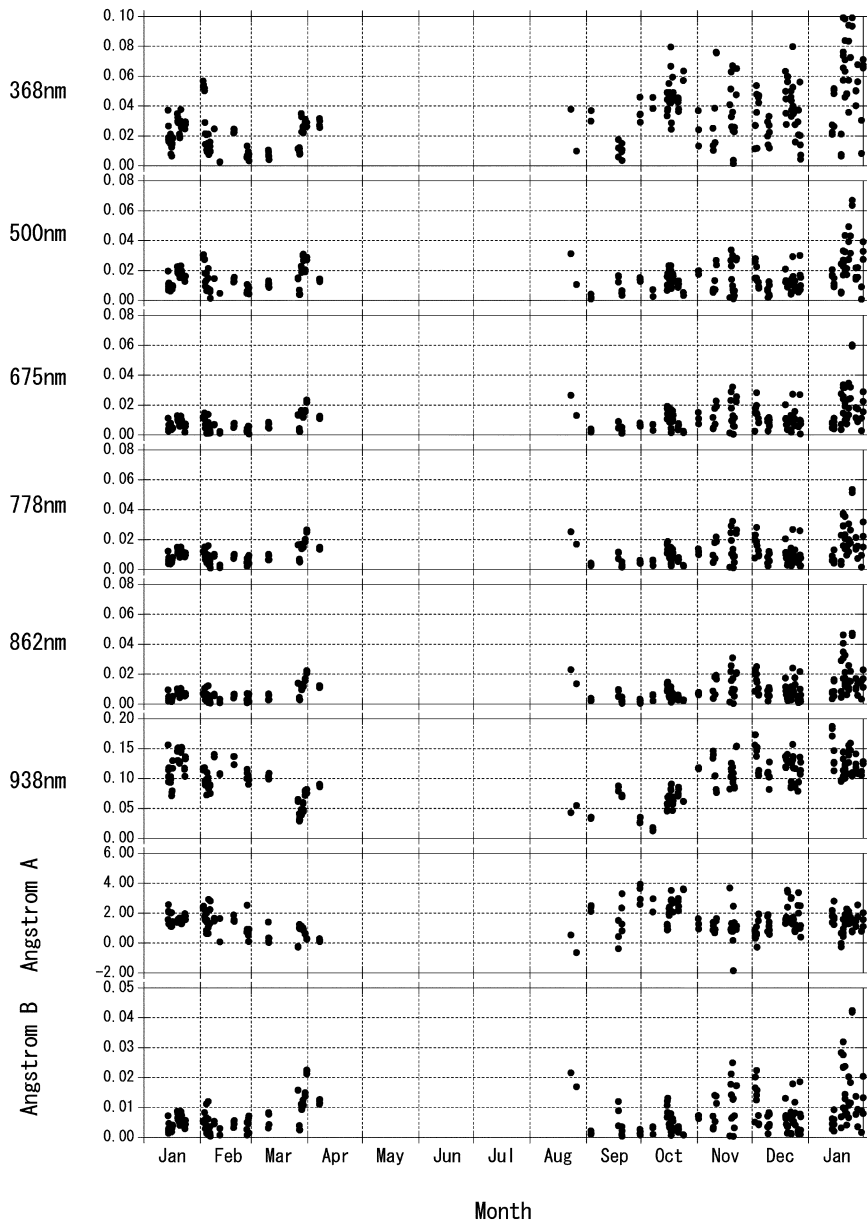


図 29 波長別エアロゾルの光学的厚さの年変化 (1999 年 1 月～2000 年 1 月)

Fig. 29. Annual variations in aerosol optical depth by wavelength (Jan. 1999–Jan. 2000).

は、ほぼ平年並みとなっている。なお、参考のために 1997 年以降、レーリー散乱の計算式定数に 0.00864 を使用した値も示してある。

図 31 には直達日射量から求めたホイスナー・デュボアの混濁係数の経年変化を示す。サ

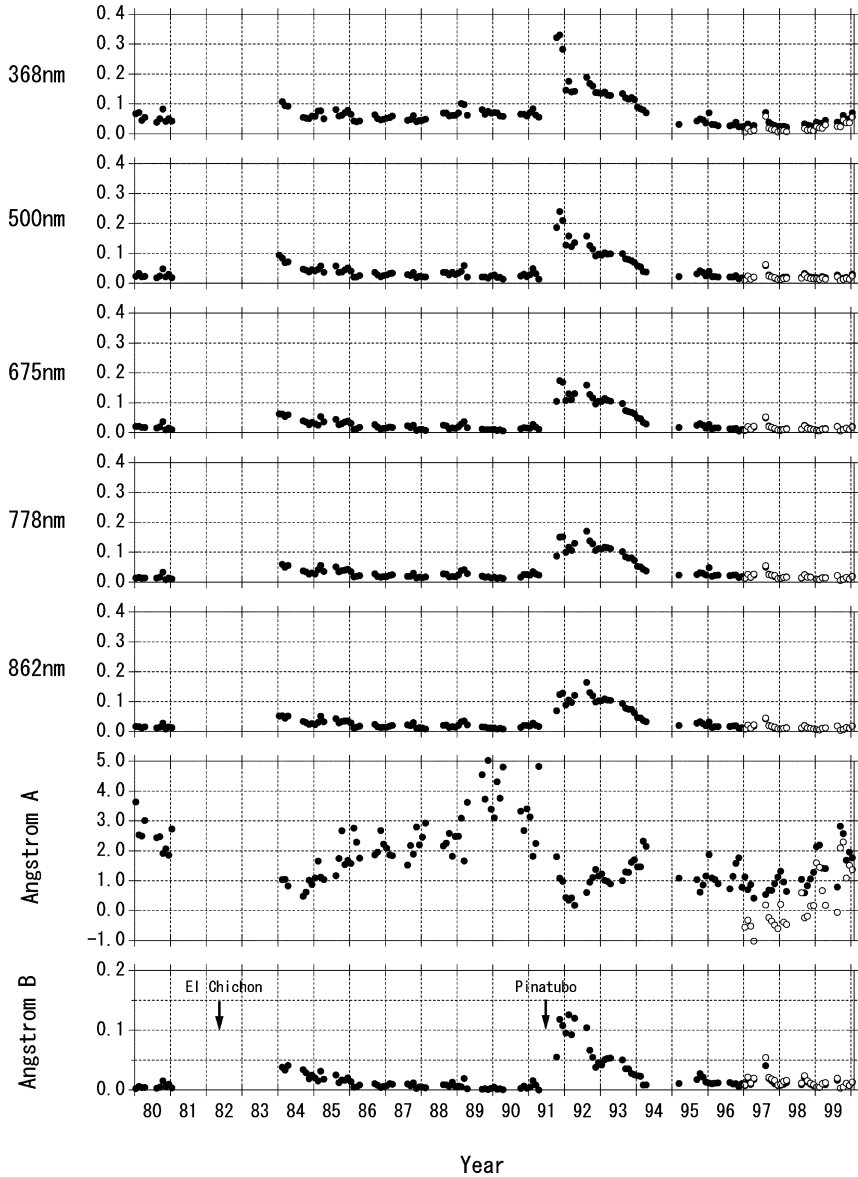


図 30 昭和基地上空の大気混濁度経年変化 (1980-1999 年)

●: レーリー散乱使用係数 0.00838

○: レーリー散乱使用係数 0.00864

Fig. 30. Time series of atmospheric turbidity above Syowa Station (1980-1999).

ンフォトメーターで観測した場合と同様、1982、1991年に全球的な火山噴火の影響を受けており、その後数年かけて平均値に戻っていることが分かる。また、春から夏季にかけて増加し、秋から冬季にかけて減少する季節変化をしていることが分かる。1999年の値は、ほぼ

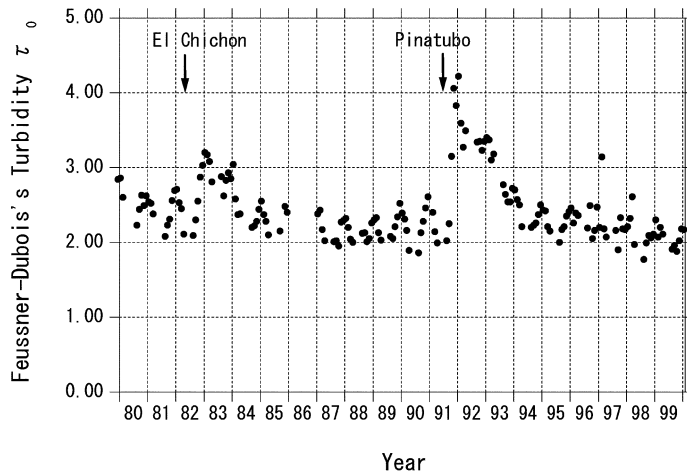


図 31 直達日射量から求めたホイスナー・デュボアの混濁係数の経年変化 (1980年2月～2000年1月)

Fig. 31. Time series of Feussner-Dubois's turbidity coefficient by pyrliometer (Feb. 1980-Jan. 2000).

平年並みであった。

6. 特殊ゾンデ観測

第40次隊より定常気象観測の特殊ゾンデ観測としてエアロゾルゾンデ観測を加え、気水圏部門と共同で実施した。この観測は第38次隊から始まった気水圏系プロジェクト研究観測の「南極大気・物質循環観測」で計画されて以降、飛揚までの作業手順やデータ処理の技術的検討を行っていたものである。

6.1. 観測目的

成層圏オゾンは紫外域日射を吸収することにより成層圏の大気を暖め、大気循環や気温の鉛直構造を作る熱源となっている。冬期、極夜を迎える南極下部成層圏ではオゾンによる発熱が無いために長波放射によって冷却し、著しい低温となる。この低温下において、硝酸 (HNO_3) や氷晶 (H_2O) などを主成分とした極域成層圏雲 (Polar Stratospheric Clouds; 以下 PSCs と記す) が発現し、その関与によってオゾンが急速に破壊されると考えられている。

エアロゾルゾンデ観測の目的は、オゾンホール的重要な要因と考えられている PSCs の観測を行うと共に、エアロゾル鉛直分布の季節変化を明らかにすることである。

6.2. 観測方法及び測器

エアロゾルゾンデ観測の器材を表 16 に示す。

(1) エアロゾルゾンデの構成

エアロゾルゾンデの構成図を図 32 に、OPC (Optical Particle Counter; 光散乱方式パーティクルカウンタ) の概要を図 33 に示す。

観測に用いたエアロゾルゾンデは、粒子検出・計数・制御を行う OPC と、気象要素の感部・電波発信器であるレーウィンゾンデを連結したものであり、連結した状態のものをエアロゾルゾンデと呼ぶ。両者の連結には長さ約 1.5m の細い竹の棒を用いた。エアロゾルゾンデ内部からの空気漏洩による観測への汚染を防止するため、ゾンデの組立て後、発泡スチロール筐体の隙間をフィラメントテープで塞ぎ、連結に使用した紐や竹の要所もテープでコーティングした。

エアロゾルゾンデを飛揚するために 3000 g ゴム気球に浮力錘浮力 6600 g のヘリウムガスを充填し、概ね毎分 300m の上昇速度を得た。気球口管部には口管接続部品を取り付け、口管部にかかる負担を軽減した。また、従来はゾンデの駆動電源として NiCd 充電電池を使用してきたが、充放電作業に時間を要することから、第 40 次隊からは取扱いが容易で軽量の Li 乾電池パックの使用に切り替え、約 800 g 軽量化できた。レーウィンゾンデの電源も OPC 内

表 16 エアロゾルゾンデ観測器材

Table 16. Specifications of balloon-borne aerosol sondes.

98型5ch エアロゾルゾンデ (ADS-98-5N)	気象要素の感部 ・電波発信器	RS2-91型 レーウィンゾンデ	高層気象観測用と同等、 但し、要素切り替え周期は0.5秒
	粒子計測部 (Optical Particle Counter)	エアサンプリング	ポンプ : アルミギアポンプ 気圧変化に応じ吸込み容量をプログラム制御 サンプルエア流量 : 毎分約3000cm ³ シースエア流量 : 毎分約500cm ³
		粒子検出方式	光源 : レーザーダイオード (波長810nm) 散乱角 : 前方散乱方式 検出素子 : シリコンフォトダイオード 粒子は電圧のパルスとして検出され、 パルス数から粒子数を、 パルス電圧から粒径を計測する
	粒子検出チャンネル (半径>0.15μm)	5チャンネル並行計測 粒子半径>0.15μm (エイトケン核) >0.25μm, >0.4μm, >0.6μm (大核) >1.8μm (巨大核)	
気球	天然ゴム製 3000g	ヘリウムガス充填、浮力錘浮力6600g 口管部補強のため 合成樹脂製の口管接続部品を取付ける 成層圏低温時は気球への油漬け処理を実施	
吊紐	ポリエステル製編紐 50m	強風時は巻下器に替えることができるが、 第40次隊では使用しなかった	
パラシュート	不織布、大型	気球破裂後の降下時にも可能な限り電波を受信する	
駆動電池	NiCd充電電池、	第1回目の飛揚のみNiCd充電電池使用	
	Li乾電池	第2回目以後Li乾電池パックを使用	

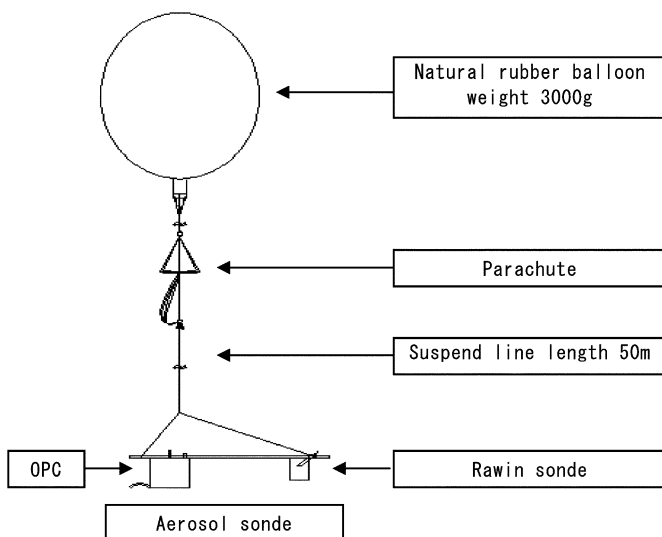


図 32 エアロゾルゾンデ構成図
 Fig. 32. Aerosol sonde configuration.

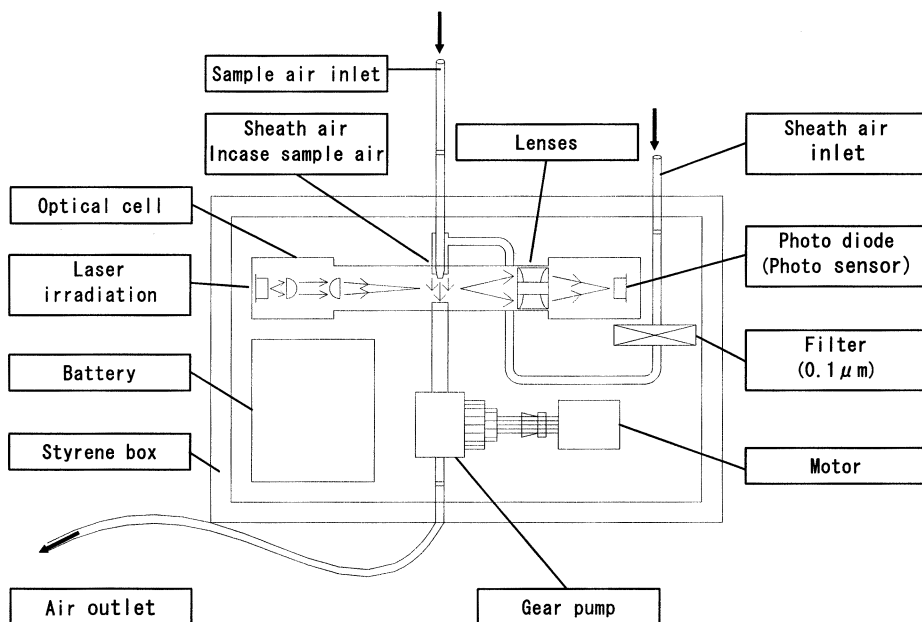


図 33 OPC の概要図
 Fig. 33. OPC (Optical Particle Counter) overview.

に搭載した電池から電圧調整して得ている。OPC とレーウィンゾンデは相互に信号ケーブルで接続し、OPC は粒子計数データ、ポンプ流量などのコンディションデータと共に、レーウィンゾンデのセンサーから得た信号を合成し、規定の周期と配列でレーウィンゾンデの送信部に送出する。レーウィンゾンデ発振器部では 1680 MHz の搬送波を OPC から送出された信号によって変調し、ダイポールアンテナから発信する。

OPC の粒径計測部に取り込むサンプルエアは、モーター駆動のギアポンプによって毎分約 3000 cm³ 吸引される。気圧変化によってポンプ流量が著しく低下することのないようモーターに与えられる電圧は大気圧に応じて調整するようにプログラムされている。

サンプルエアに含まれる粒子（エアロゾル）の検出には半導体レーザを用い、光学セルに導かれたサンプルエアにレーザ光を照射して散乱光をフォトダイオードで検出する。粒子による前方散乱光は電圧のパルスとして取り出され、パルス数から粒子の個数を、パルス電圧から粒径を検出している。半径 0.15 μm より大きな粒子を検出可能で、半径 >0.15 μm, >0.25 μm, >0.4 μm, >0.6 μm, >1.8 μm の 5 チャンネルで並行計測している。なお、サンプルエアによる光学セル自体の汚染を防ぐため、フィルターによって半径 0.1 μm 以上の粒子を除去したシースエアを毎分約 500 cm³ 吸引し、光学セル内でサンプルエアを包み込むように流している。計測済みのサンプルエアはシースエアと共にアウトレットから排出する。粒子の計測は 20 秒間区切りで繰り返される。

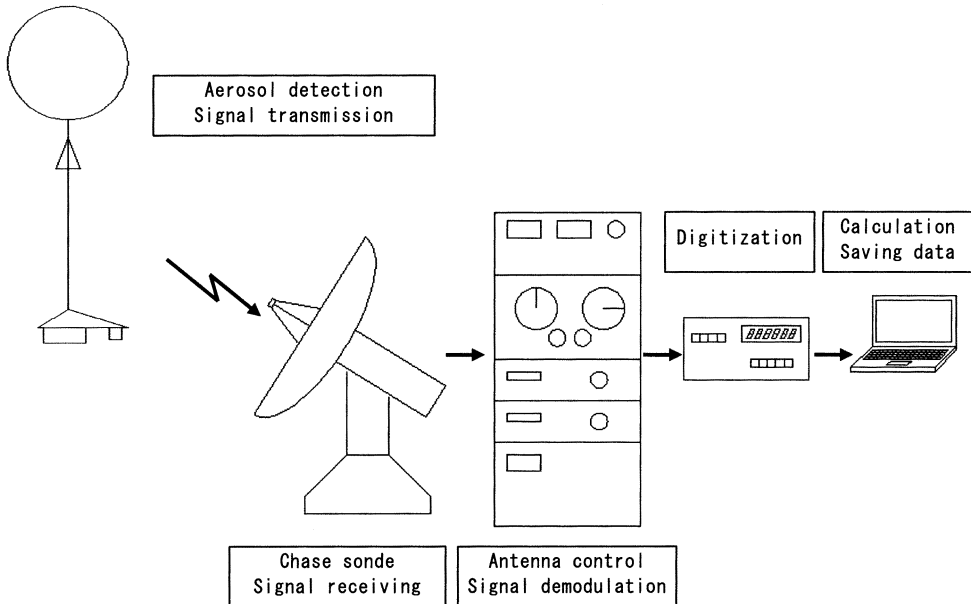


図 34 エアロゾルゾンデ観測システム構成図
Fig. 34. Configuration of aerosol sonde observing system.

(2) 観測システム構成

観測システムの構成図を図 34 に示す。地上受信施設は高層気象観測用の MOR-22 型モノパルス式方向探知機を用い、ゾンデ航跡を追跡しながら信号を受信する。受信したゾンデ信号はデジタル化装置（デジタイザ）で要素の切り替え周期に同期した信号の分離と周波数のデジタル化を行った後、データ処理用のノートパソコンに送出し、データの蓄積と観測処理を行う。

しかし、第40次隊ではエアロゾルゾンデとデジタイザ同期の不具合で信号の分離ができないことがわかり、デジタイザの同期を必要としない保守用データ出力から未加工の復調周波数データを収録する方法で観測を実施した。これは、観測終了まで収録した復調周波数データを、本来デジタイザから出力されるべきだったフォーマットのファイルに中間プログラムによって変換し、観測プログラムのデータ再処理モードにかけて物理値を得る手順である。

6.3. 観測経過

第40次隊では、主に南極下部成層圏に存在するエアロゾルの季節変化と共に、特に極夜期の PSCs 粒子を捉えることに重点をおき、国内と連絡をとりながら表 17 に示す観測を行った。気水圏部門3台、定常気象部門6台の計9台を持ち込み、飛揚前の点検で正常が確認された8台を観測に使用した。

6.4. 観測結果

大気中のエアロゾル濃度を空気 1cm^3 あたりの粒子個数（以下、個数密度（個/ cm^3 ）と記す）

表 17 昭和基地におけるエアロゾルゾンデ飛揚状況
Table 17. Summary of aerosol sonde observations at Syowa Station.

回数	飛揚時刻 (LT)	飛揚目的	到達高度	
			気圧 (hPa)	高度 (km)
1	1999年02月02日 19時07分	夏期の観測 第39次隊からの引継ぎ	6	36
2	1999年04月26日 18時10分	秋期の観測 信号同期不良対策確立、リチウム電池化試行	17	26
3	1999年06月18日 18時27分	PSCs捕捉 (第1回目)	45	20
4	1999年06月29日 10時26分	PSCs捕捉 (第2回目)	6	34
5	1999年07月11日 18時05分	PSCs捕捉 (第3回目)	7	29
6	1999年09月08日 22時04分	PSCs捕捉 (第4回目)	7	30
7	1999年10月27日 17時40分	成層圏オゾン減少期・PSCs消滅後の観測	8	31
8	2000年01月22日 17時59分	夏期の観測 第41次隊への引継ぎ	18	28

で表し考察する。

6.4.1. 第40次隊が観測した冬期のPSCs

第38次隊から3年間にわたる観測の結果、冬期の成層圏には毎年PSCsとみられるエアロゾルの急増が観測されている。第40次隊では、PSCsの捕捉を目的とする観測を4回実施し、そのいずれにおいてもPSCsとみられる粒子を捕捉した。

第40次隊で実施したエアロゾルゾンデ観測結果を図35に示し、5月から9月にかけての成層圏気温の推移を図36に示す。図36上部の日付は、エアロゾルゾンデ観測実施日である。

表18に、冬期に実施した個々の観測事例と特徴を示す。これら4回の観測における下部成層圏での粒子個数密度極大層には、半径 $>0.15\mu\text{m}$ の小径粒子が卓越している層、半径 $>0.6\mu\text{m}$ の大径粒子が卓越している層、小径粒子から大径粒子まで増加している層がある。これらの層が同時に複数共存している観測例があり、例えば、1999年7月11日の観測では⑥の極大層の下層には、④や⑤の大径粒子が卓越した極大層が存在している。低温によって凝結したPSCs粒子は次第に成長し粒子の大きさも増していくと推測できるが、小径粒子が特に増加していないのに大径粒子が増加している層が存在するのは、大きく成長した粒子が落下している層を捉えたのではないかと考えられる。この日の観測では大径粒子の増加が卓越している層が④、⑤と2層存在しており、PSCs粒子の成長過程や輸送などを考える上で興味深い。このように特徴の異なる複数の層を捉えた例として、カナダ北極圏のユーレカにおいて気球搭載型OPCと地上からのレーザーレーダー観測を行ったものがある。この観測では両者を照合した結果、PSCsの出現が観測された高度範囲の上層と下層では粒径の分布や粒子の非球形度などの特徴が異なっていたことが報告されている（藤原ら、1999）。

このように、規模の変動はあるが6-9月にかけての長期間にわたってPSCsが存在していたことが確認された。このことは、PSCs粒子表面における不均一反応によって塩素分子が下部成層圏に高濃度で蓄積され、極夜明けに光解離してオゾンを破壊した可能性を示唆している。第10章では冬期のPSCs発現と春期の成層圏オゾン減少を関連させて考察する。

6.4.2. 第38次隊～第40次隊の観測結果から見たエアロゾルの季節的特徴

エアロゾルゾンデ観測は1997年4月から2000年1月までに延べ18回実施された。図37に粒径別高度別エアロゾル個数密度の経年変化を示す。これらの観測は、6.1節で述べた観測目的のために次のような時期を選んで実施された。

- | | |
|--------------------------------------|----|
| ・秋期（4月から5月頃） PSCsが形成される前の時期 | 4回 |
| ・冬期（6月から9月頃） PSCsが形成される時期 | 8回 |
| ・春期（9月から10月頃） PSCsが解消しオゾンホールが形成される時期 | 3回 |
| ・夏期（1月から2月頃） オゾンホールが発現していない時期 | 3回 |

対流圏では半径 $>0.15\mu\text{m}$ の小径粒子から半径 $>1.8\mu\text{m}$ の巨大粒子が地表付近ほど多数存在する。雲の存在や逆転層による対流の変化などの影響を受けて個数密度の変化も大きい

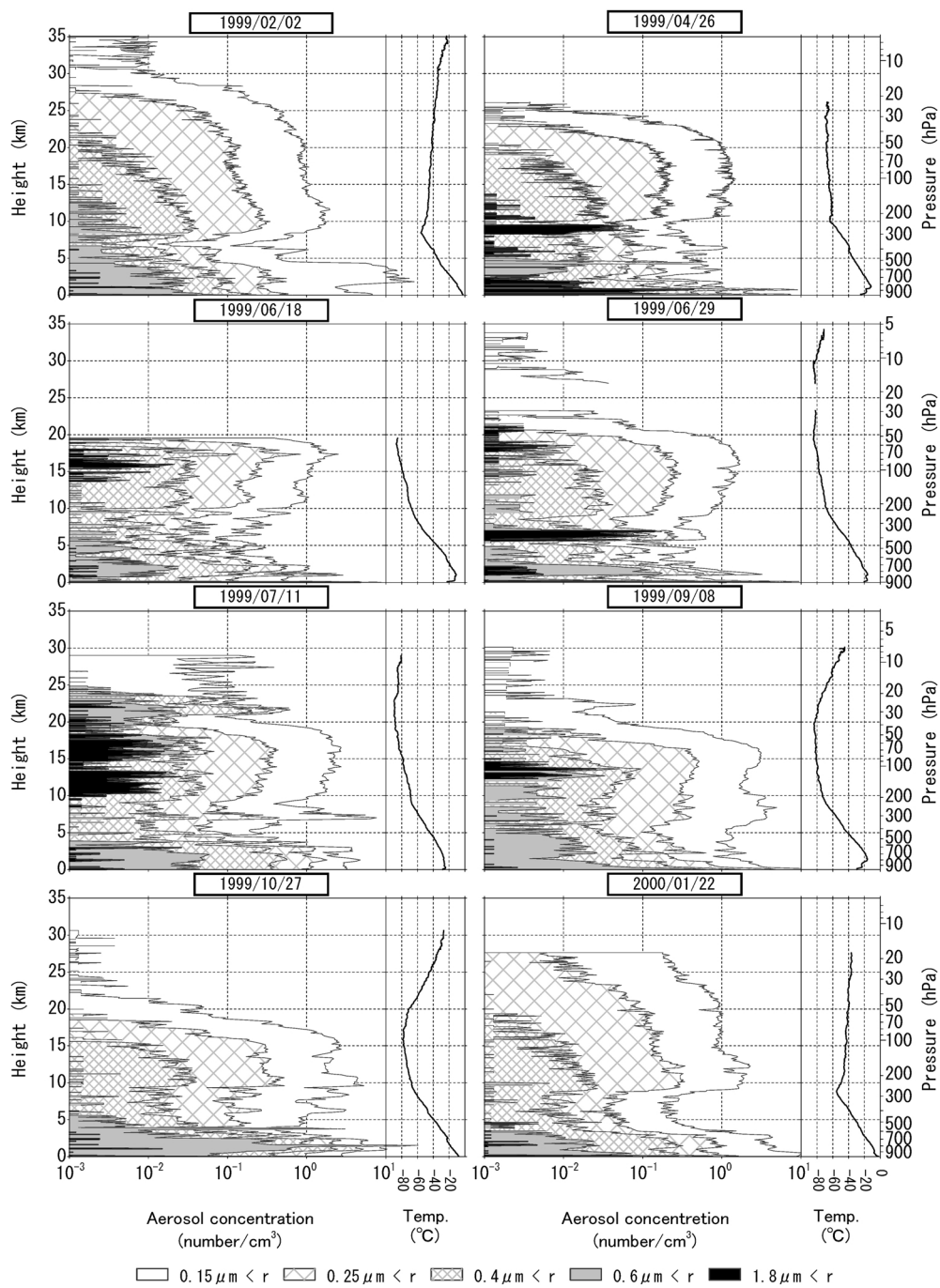


図 35 エアロゾルゾンデ観測結果 (1999-2000 年)

Fig. 35. Results of aerosol sonde observations (1999-2000).

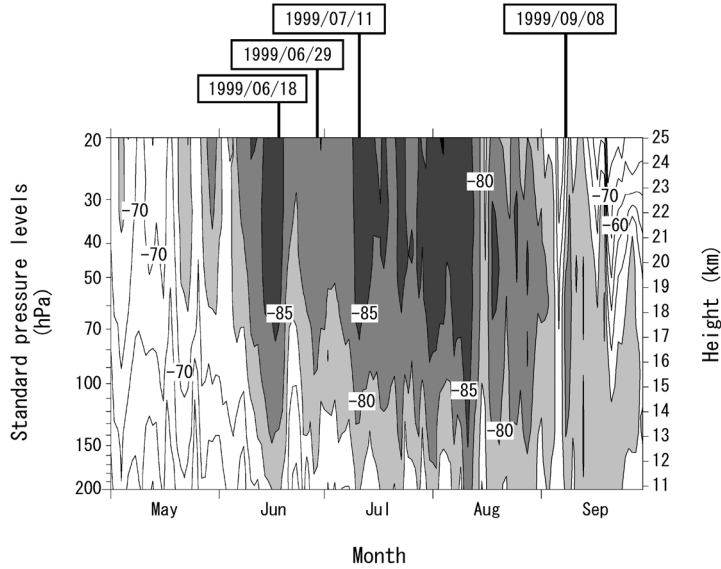


図 36 成層圏気温の推移 (上部の日付はエアロゾルゾンデ観測実施日)

Fig. 36. Temporal variations of stratospheric air temperatures (the date at the top is the date aerosol sonde observation was performed).

表 18 冬期に実施したエアロゾルゾンデ観測の事例と特徴 (1999 年)

Table 18. Character of aerosol sonde observations in winter (1999).

番号	観測日	極大の高度 (km)	気温範囲 (°C)	粒子の大きさ (μm)	備考
①	6月8日	13.8 ~ 16.8	-83 ~ -76	$r > 0.6$	
②		16.9 ~ 18.4	-86 ~ -83	$r > 0.15$	
③	6月29日	17.9 ~ 19.0	-83 ~ -81	$r > 0.4$	高度23~27kmは欠測
④	7月11日	10.4 ~ 13.2	-76 ~ -69	$r > 0.4$	成層圏でほとんど観測されない 半径 $>0.6\mu\text{m}$ の粒子が 非常に多く検出された
⑤		14.8 ~ 18.3	-86 ~ -78	$r > 0.4$	
⑥		20.8 ~ 23.7	-90 ~ -86	$r > 0.15$	
⑦	9月8日	12.3 ~ 15.1	-81 ~ -78	$r > 0.6$	
⑧		17.8 ~ 19.0	-84 ~ -81	$r > 0.25$	
⑨		21.7 ~ 23.2	-79 ~ -74	$0.25 \geq r > 0.15$	

が、それ以外は高度が増すほど個数密度が低下する傾向がある。但し、季節による明瞭な変化は認められない。

一方、成層圏ではゾンデの上昇過程で高度 10km 付近の対流圏界面を境にエアロゾルの分布に明瞭な不連続がみられ、成層圏におけるエアロゾル個数密度の鉛直分布は対流圏とは明らかに異なっている。観測結果にみられる成層圏エアロゾルの特徴は次のとおりである。

- ・春期, 夏期, 秋期には半径 $>0.6\mu\text{m}$ の大きな粒子がほとんど存在しない。
- ・冬期の PSCs 形成時には個数密度の極大層が複数存在し、冬期以外の季節にはほとんど存在していなかった半径 $>0.6\mu\text{m}$ の大きな粒子も観測されている。

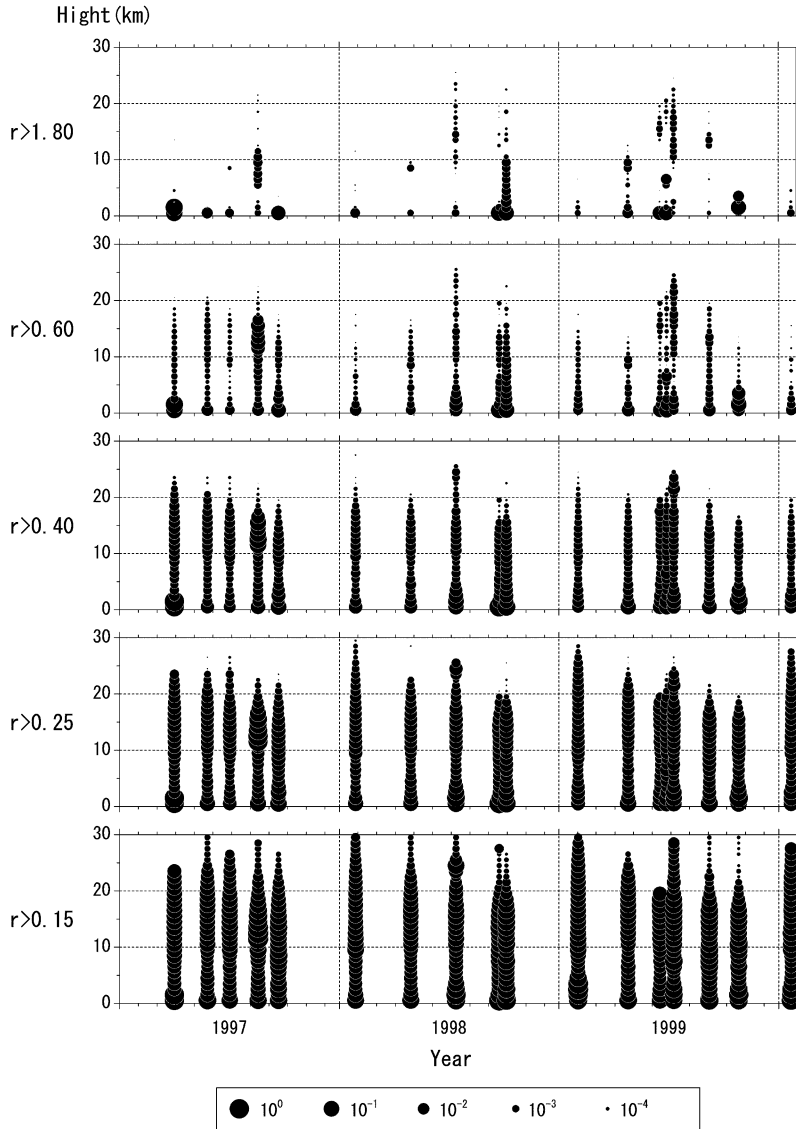


図 37 粒径別高度別エアロゾル個数密度の経年変化 (高度間隔 1 km, 単位: 個/cm³)

Fig. 37. Temporal variations of the aerosol number density and particle diameter by altitude (vertical interval of 1 km, unit: particles/cm³)

- ・全粒子 (半径 $> 0.15 \mu\text{m}$) の個数密度が極大となる層は, 対流圏界面にはほぼ接する高度 10 km 付近, 及び対流圏界面よりも 5 km 程度高い高度 15 km 付近に見られる. これらの極大層は概して通年で存在するものの, 高度 10 km 付近の極大は特に春期と夏期に明瞭であり, 高度 15 km 付近の極大は秋期, 冬期, 春期に明瞭である.
- ・全粒子 (半径 $> 0.15 \mu\text{m}$) の個数密度は高度 20 km 付近から上層側では高度と共に急速に

減少するが、夏期には高度に対する減少の程度が緩やかであり、高い高度でも個数密度が比較的大きい。また、夏期以外の季節で高度 15 km 付近に現れていた個数密度極大層は、夏期にはきわめて緩やかではあるが 20 km 付近に存在しているように見える。

- ・個数密度が増大している層の中では、粒径の大きなものほどやや低高度側にピークが現れる。

以上の下部成層圏における特徴を考察すると、エアロゾル個数密度の鉛直分布には気温の鉛直変化による大気の力学的構造が関係していると考えられる。全粒子（半径 $>0.15\mu\text{m}$ ）について成層圏最下層（高度 10 km 付近）に現れる個数密度の極大は沈降流の卓越によって粒子が下層に貯留されていることを伺わせ、気温の逆転が大きくなる高い高度ではエアロゾル濃度が急速に減少している。成層圏の気温が高くなる夏期は他の季節に比べても高い高度までエアロゾルが存在し、あたかも高い高度までエアロゾルが拡散したかのように個数密度の減少が緩やかである。また、半径 $>0.15\mu\text{m}$ の個数密度ピークに対し、粒径の大きなものほどピークがやや低高度側に現れているのは、粒径が大きく質量の大きな粒子には落下の効果も加わっているためと考えられる。南極成層圏で沈降する大気はオゾンと同様に子午面循環によって低緯度側から輸送されるが、大粒子は輸送途中で降下し易いため、ほとんど極域に到達することができない。その一方で、成層圏が極めて低い気温となる冬期の観測では PSCs の発現によって半径 $>1.8\mu\text{m}$ の巨大粒子を含む個数密度の極大層を複数観測している。それら各層に含まれる粒径のバランスを考察すると、小さな粒子が卓越した層や大きく成長した粒子が卓越した層など、やや性質の異なった層が含まれていると考えられる。

7. 天気解析

無線 FAX 受画装置及びインマルサット FAX より受画した各種天気実況図、予想図、気象衛星から送られてくる雲写真、毎日の地上観測、高層気象観測から得られたデータ及び南極各基地のデータを参考に、低気圧、前線の移動を把握して天気解析を行い、気象観測に資するとともに隊のオペレーション活動を行う際の気象情報を提供した。

7.1. 利用した資料

昭和基地で観測した地上及び高層気象観測資料の他に、次の資料を利用した。

(1) FAX 放送天気図

キャンベラ放送の 00, 12 UTC の南半球 500 hPa 面解析図と地上及び 500 hPa 面 48 時間予想図、同放送の 00, 12 UTC のインド洋地上実況図、プレトリア（南アフリカ）地上天気図（06, 12, 18 UTC）。

(2) 気象庁配信天気図

インマルサット FAX により気象庁（JMA）解析資料の提供を受けた。内容は南半球の地

上, 高層実況天気図及び予想天気図.

(3) 極軌道気象衛星雲写真

NOAA-12, 14, 15 号の赤外及び可視画像 1 日 5-10 枚.

(4) 静止気象衛星 METEOSAT からの気象資料放送

極軌道気象衛星 NOAA の軌道情報及び静止気象衛星の雲画像等.

南極各基地の SYNOP, TEMP 及び気候電報.

(5) ロボット気象計

S16 (昭和基地の東方向, 標高約 500 m, 海岸から約 10 km) 地点のロボット気象計による気温, 気圧及び風向・風速.

7.2. 解析結果とその利用

昭和基地周辺の低気圧, 前線の位置・移動状況を把握して気象観測に備えた. また, 毎夕食後のミーティング時に担当気象隊員により天気解析結果及び予想が伝えられ, 昭和基地の屋外作業や野外オペレーション活動の参考とされた. また, 越冬中の 12 月に東南極国際航空網の空路開拓を目的に飛来したオーストラリア機にも, これらの資料を提供した.

8. その他の観測

8.1. 大気中の微量成分観測

第 40 次観測隊では, 第 39 次隊に引き続きモニタリング研究観測のうち二酸化炭素濃度, メタン濃度, 地上オゾン濃度観測及び維持作業を気水圏系隊員と定常気象隊員との共同で実施した. 取得したデータ及びサンプルは各研究機関及び大学に送られ解析される. 気象庁はその結果を WDCGG に報告している.

8.2. 船上での大気混濁度観測

8.2.1. 観測方法と測器

表 14 に記載されている携帯型サンフォトメーター (MS-120S) を使用し, 「しらせ」が 1998 年 11 月 14 日に東京晴海を出港してから, 1998 年 12 月 22 日に昭和基地へ移動するまでの間, 「しらせ」船上において大気混濁度の観測を行った. この期間中に数回の連続観測を行い, 測器常数を決めた.

8.2.2. 観測結果

図 38 に各波長 (368, 500, 675, 778, 862 nm) におけるエアロゾルの光学的厚さ (AOD) の緯度分布を示す. AOD の計算には, レーリー散乱係数 0.00864 を使用した. 赤道～南緯 15 度, 南緯 40-50 度付近は天候が悪く観測を行えなかった. 赤道, 南緯 20, 50, 70 度付近で AOD が他と比べ高い値を示している.

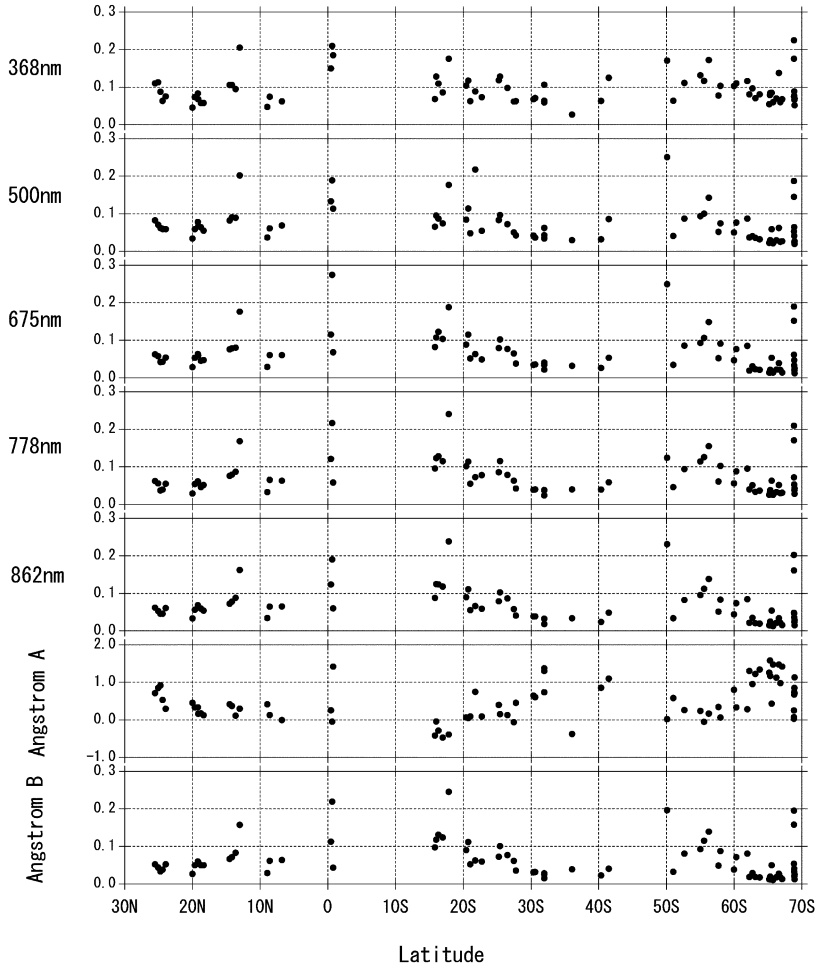


図 38 「しらせ」船上におけるエアロゾルの光学的厚さの緯度分布 (1998 年 11 月 16 日~12 月 17 日)
 Fig. 38. Latitude distribution of Aerosol Optical Depths on the R/V Shirase (16 Nov.-17 Dec. 1998).

図 39 には 1991 年 (第 33 次隊) から 1998 年 (第 40 次隊) までの、各年の緯度 10 度毎の平均 AOD を示す。AOD の計算には、経年変化をみるために期間を通じて以前から使用していたレーリー散乱係数 0.00838 を使用した。この図をみると、1991 年はすべての波長において AOD が増加している。これは、5.3.4 節でも述べたように 1991 年 6 月のピナツボ、同 8 月のハドソン火山噴火の影響である。この年行われた内陸旅行の観測結果によると、この影響は南緯 73 度付近まで及んでいる (松原ら, 1995)。この後 1993 年まで、ピナツボの全球的な拡散の影響で全波長において AOD が増加している (金戸, 1997)。また、1997 年の赤道付近で観測された高い AOD は、この年発生したインドネシアの森林火災の影響と思われる (岸ら, 2002)。1998 年の観測結果は、南緯 60-70 度において、各波長の AOD がここ数年の減少

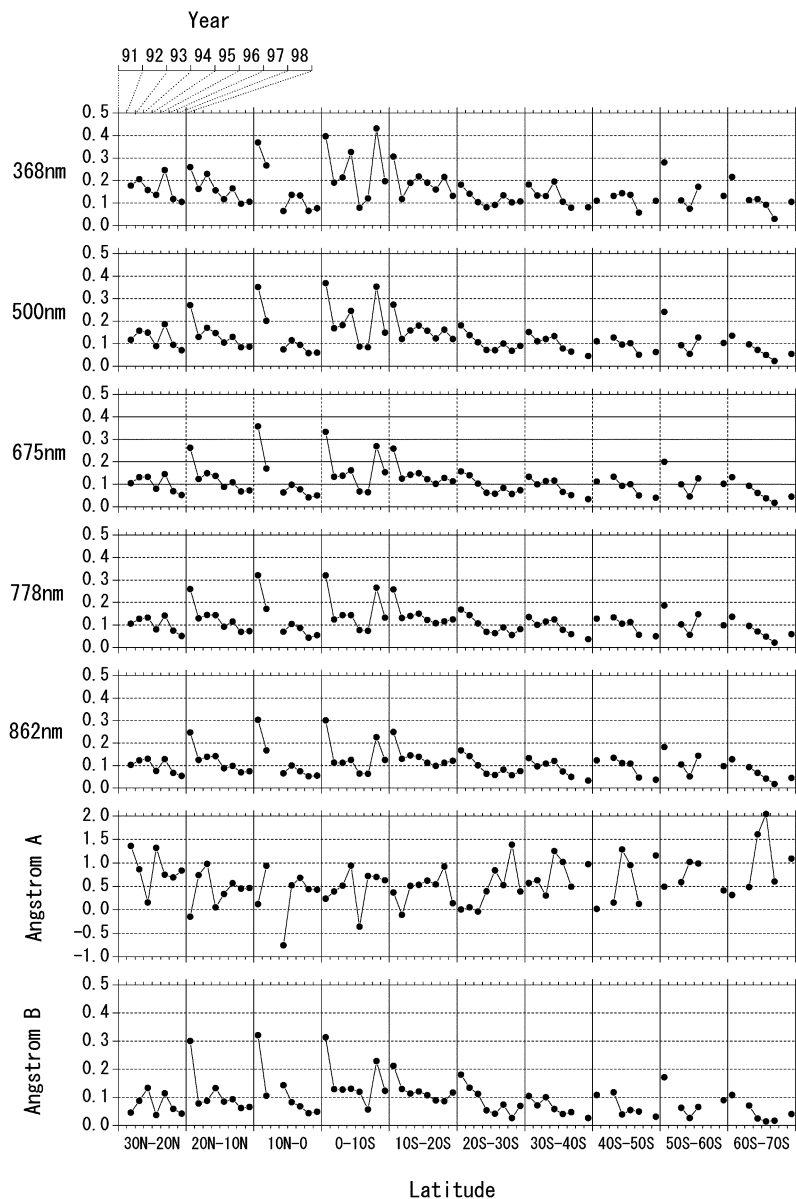


図 39 「しらせ」船上におけるエアロゾルの光学的厚さ (AOD) の緯度 10 度ごとの平均 (1991-1998 年)

Fig. 39. Latitudinal distribution of Aerosol Optical Depths on the R/V Shirase (1991-1998) (average every 10 degrees of latitude).

傾向から増加に転じている他は、概ね平年並みである。

8.3. 南極大陸旅行中の気象観測

第40次観測隊気象部門は、みずほ基地補給旅行（1999年8月23日～9月13日）及び春期ドームふじ燃料補給旅行（1999年11月1日～2000年2月11日）に参加した。

旅行ルートを図40に示す。みずほ基地補給旅行は、昭和基地とみずほ基地間の往復である。春期ドームふじ燃料補給旅行では、昭和基地、みずほ基地、ドームふじ観測拠点、みずほ基地、YM154、YM50、CFルート（新規設定ルート）、みずほ基地、S16を順次通過した。

8.3.1. 観測方法

南極大陸旅行中の観測項目及び気象観測測器を表19に示す。みずほ基地補給旅行、春期ドーム旅行共に使用した測器は同じである。

旅行中の気象観測は、基本的に移動気象観測装置（以下、観測装置という）を用いて行い、旅行日程の都合で観測装置を展開できない場合及び障害時には、旅行隊装備品である携帯用測器を用いて観測を実施した。観測装置による観測は、気圧、気温、風速のセンサーデータを10分間隔でデータロガーに収集し、パソコンへ取込んで物理値化を行った。

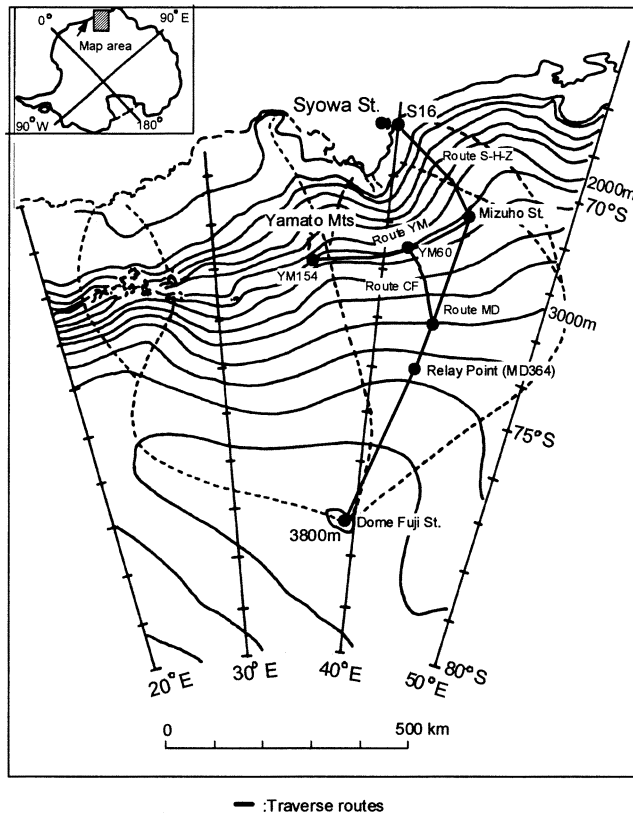


図40 昭和基地からみずほ基地およびドームふじ観測拠点への経路
 Fig. 40. Traverse routes from Syowa Station to Mizuho Station and Dome Fuji Station.

表 19 気象観測測器及び観測精度
Table 19. Instruments and accuracy of meteorological observations.

観測項目	単位	主	副	測器名	測定精度
気圧	hPa	●		電気式アネロイド型気圧計	± 0.1 hPa
気圧	hPa		●	携帯用アネロイド型気圧計	± 1 hPa
気温	℃	●		電気式白金抵抗温度計	± 0.1 ℃
気温	℃		●	スリング式ガラス製温度計	± 0.5 ℃
風向	16方位			ハンドベアリングコンパス	± 5 °
風速	m/s	●		風程式3杯型風速計	± 0.1 m/s
風速	m/s		●	携帯用発電式3杯型風速計	± 0.5 m/s
視程	km			目視	
雲	10分量・雲形			目視	
天気				目視	

8.3.2. 観測経過

みずほ旅行（1999年8月23日～9月13日）においては、目視観測を含む観測は基本的に往路において09, 15, 21LT、復路では08, 15, 21LTに行った。また、作業の進行状況によっては、適宜時間を考慮しながら観測を行った。

春期ドーム旅行（1999年11月1日～2000年2月11日）においては、目視観測を含む観測は、基本的に08, 15, 21LTに行った。

キャンプ地で就寝中は雪上車のインバータを停止させるため、気圧は欠測、気温は強制通風を停止させた状態ではあるが、データロガーの電源は電池であるため10分間隔でデータ収集を継続し03LTの気温と風速の観測値を得た。また、キャンプ地での最低気温もデータロガーの値から得て、雪上車運行の判断材料とした。

8.3.3. 観測結果

(1) みずほ旅行

旅行中における気象観測結果を図41に示し、旅行隊行動中に実施した15LTの観測結果から旅行中の気象概況を述べる。旅行期間の中で視程が1km以下となったのは8日間あり、全行程から見ると悪天の日が多かった。これは、旅行隊の行動スケジュールが遅れる原因の一つとなっている。視程が1km以下の日を見ると、いずれも風速が10m/sを越えており、ほとんどが地ふぶきによる視程障害であった。また、みずほ基地に滞在した9月2-5日の4日間は、滞在全期間が悪天であった。気温-40℃以下、風速10m/s以上という気象条件は、野外での活動を過酷なものにした。特に、滞在最終日の9月5日の視程は50m、風速12m/sであった。

旅行期間における快晴または晴の日は5日間であり、うす曇または曇りの日は7日間であった。その他の8日間は、雪または地ふぶきの天気であった。また、風速が5m/s以下の日は4日間であり、その時の天気はほとんどがうす曇であった。

(2) 春期ドーム旅行

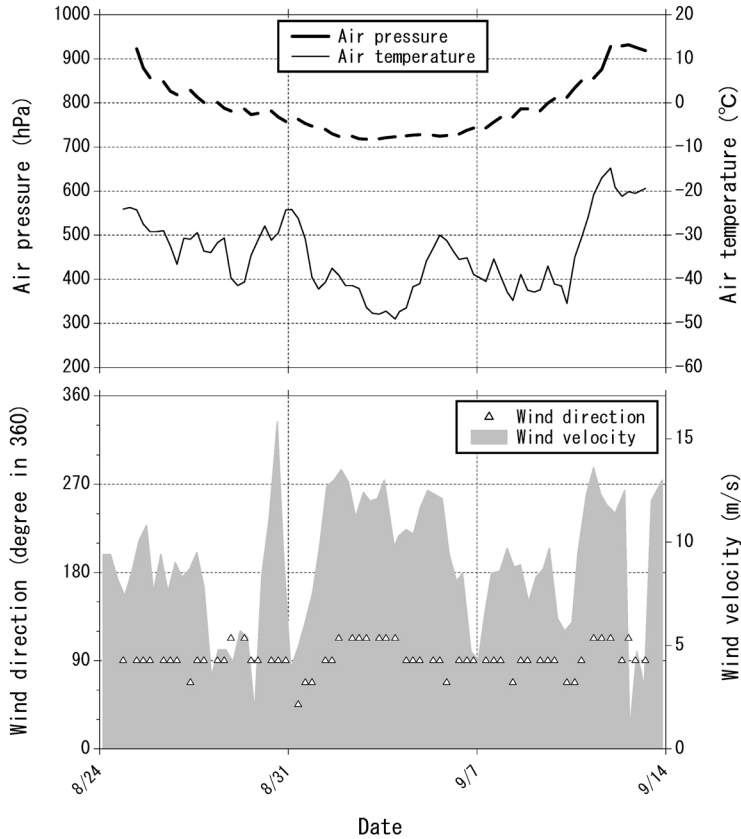


図 41 冬期みずほ旅行中の気象観測データ (1999年8月24日～9月13日)

Fig. 41. Surface meteorological observation data during the traverse to Mizuho Station in winter (Aug. 24–Sep. 13, 1999).

旅行中における気象観測結果を図 42 に示し、旅行隊行動中に実施した 15 LT の観測結果から旅行中の気象概況を述べる。旅行期間 103 日間のうち、概ね 2/3 の期間は行動に支障のない気象状態だった。視程がルート旗の間隔である 2km を下回った日は 30 日間、目標物が見えず行動に支障を感じるようになる 500m 未満の日は 13 日間だった。風速が 10 m/s を超えると視程は 1km 以下となることが多かった。15 LT において気温が約 -30°C 以下、かつ、風速 5 m/s 以上だった日は 10 日間程度であったが、これらが観測されたのはいずれも標高 3000m 以上の高地である。この高度の気圧はほぼ 650 hPa 以下に対応し、車外での作業には厳しい条件であった。

この旅行中に、3度のまとまったブリザードに遭遇した。出発直後からみずほ基地までの約一週間、やまと山脈を目前にした YM154 付近での約一週間、旅行終盤の Z ルートから S16 へ到着するまでの約一週間である。この 3回のブリザードの他はホワイトアウトがあったものの、標高が高くなるにつれ晴またはうす曇の日が多くなり、概ね穏やかな気象状態で

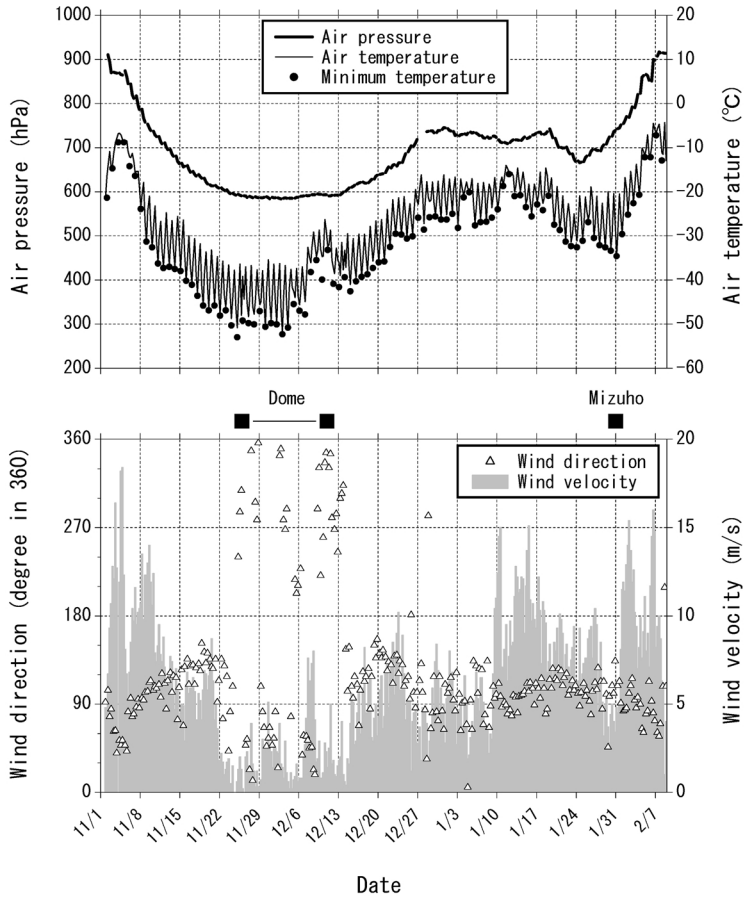


図42 春期ドーム旅行中の気象観測データ（1999年11月1日～2000年2月9日）

Fig. 42. Surface meteorological observation data during the traverse to Dome Fuji Station in spring (Nov. 1, 1999–Feb. 9, 2000).

経過した。

8.4. ロボット気象計

ロボット気象計は、昭和基地周辺の気象状況を把握することにより、観測隊の野外活動等を支援することを目的として、各隊次の判断により運用している。

隊次によっては、大陸沿岸の数箇所に設置して運用したこともあったが、現在は、S16の1箇所のみでの運用となっている。

8.4.1. 観測方法

ロボット気象計（以下「ロボット」という）による観測は、高層気象観測用のゾンデを遠隔地に設置し、高層気象観測用パラボラアンテナで信号を受信することにより、行っている。

観測項目は、9月までは気温及び風向・風速で、10月に発信器及び気温センサーの交換、

並びに気圧センサーの追加を行い、以後は現地気圧も観測項目に追加した。

観測は、毎日2回(00, 12 UTC)、高層気象観測の前に実施した。また、野外行動出発時や空輸実施時など適宜観測し、さらにブリザードが予測される場合にも観測した。

8.4.2. 観測経過

S16のロボットを第39次観測隊から引き継ぎ、9月中旬から10月上旬にかけて発信器交換調整のために運用を休止した他は通年観測した。

越冬期間中、3回のバッテリー交換(5, 9, 12月)を実施した。この内12月の交換時には、第41次観測隊との引き継ぎを兼ねて発信器の調整を行った。

8.4.3. 発信器の変更

ロボットの発信器部には、従来RS2-80型レーウィンゾンデ(以下「80型」という)を改造して使用してきた。

しかし、高層気象観測用のゾンデが、1995年からRS2-91型レーウィンゾンデ(以下「91型」という)に変更となり、80型の入手が次第に難しくなったことから、ロボットの発信器を80型から91型に変更して10月から運用した。

91型を用いたロボットの構成とデータ処理方法を、表20に示す。

91型では、約1秒ごとに各観測要素の変調信号を切り替えて送出している。受信側の復調装置でも、これに同期して要素信号を分離するために、91型から送られるレファレンス信号(4kHz)を参照している。このため、風速の風程接点信号が、弱風時に長時間出たままになってしまうこと、風速25m/sの時には、4秒周期で接点信号が送られるため、特定の要素信号

表20 ロボット気象計で使用する感部と処理方法
Table 20. Instruments and data processing for meteorological telemetry system.

観測要素	感部	発信器での処理	受信処理
風向	矢羽根型風向計	湿度測定用のRC回路で、静電容量式湿度計の代わりにコンデンサーを取り付け、定抵抗と並列に風向計を接続してある。	分離された変調周波数を抵抗値に戻し、さらに風向値に変換する。
	(ポテンショメータ式)	これにより、風向計の抵抗値を、1.5kHz~2.7kHzの変調周波数に変換する。	
	風向に対応して10kΩ~20kΩの抵抗値を出力する。	信号は、本来の湿度信号を送出するタイミングで送られる。	
風速	風程式三杯型風速計	接点が出力されるたび、4秒周期の要素信号切り替えとは無関係に、4.8kHzの変調信号を送出する。	4.8kHzの信号を受信した時間間隔(1秒単位)から、風速を求める。
	風程100m毎に1接点を出力する	強風時、接点信号が十分な長さになるよう、リレー回路を介して、ディレイを設けてある。	
気温	サーミスタ	RS2-91型レーウィンゾンデ及びJMA-91型高層気象観測装置での処理と同じ。	

と接点信号が同期してしまい、要素信号が分離できなくなるなどにより、データが取得不能になるという欠点がある。

8.4.4. 観測結果及びデータの利用

ロボット気象計は、第40次隊越冬期間中に延べ127時間運用し、この内の、56時間が野外行動支援のための臨時観測であった。受信時間に対するデータ取得率は、80型発信器使用時に気温96%、風向・風速86%、91型発信器使用時に、気温、風向、気圧で90%程度、風速は85%程度である。

8.5. ILAS データ検証のための昭和基地におけるオゾンゾンデ観測

第39次隊に引き続き、ILAS データ検証のためオゾンゾンデRS2-KC96を24台昭和基地へ持ち込み観測を行った。1996年8月に打ち上げられた地球観測プラットフォーム技術衛星(ADEOS)に搭載された改良型大気周縁赤外分光計(ILAS)で得られたオゾンデータ検証のため、ILASと独立的なオゾンデータの取得を目的としていた。しかし、1997年6月30日にADEOSが運用断念となったため、ILAS・ILAS IIで得られるオゾンデータを解釈するための基礎データの取得、及び南極上空のオゾン層の実態を把握する事を目的として、国立環境研究所ILASプロジェクト、国立極地研究所気水圏研究グループ、気象庁観測部による共同観測として実施した。

9. 発達した低気圧に関する事例解析

発達した低気圧が昭和基地の北の海上を東進した1999年10月5-6日、昭和基地ではA級ブリザードとなり、10月5日1658LTに昭和基地で観測開始以来、歴代第2位の最低海面気圧932.1hPaを記録した。

この記録的な最低海面気圧をもたらした低気圧について解析し、歴代第1位を記録した事例と比較しながら報告する。

9.1. 総観場の状況

気象庁の客観解析資料により、総観場の状況を概観する。

(1) 地上低気圧の動き

9月下旬から10月上旬にかけては、低気圧が周期的に昭和基地に接近し、9月26-27日にB級、10月2-3日にC級のブリザードを観測している(表5)。

10月5-6日のブリザードをもたらした低気圧は、図43に示したとおり、10月3日15LTには60S、0Eにあり、10月4日15LTには北上して55S、10Eに達し中心付近の気圧は960hPaであった。その後500hPa面の気圧の谷の南下に対応して中心を南に移し、10月5日15LTには936hPaと急激に発達して、10月6日15LTにかけて昭和基地の北側63S、30Eから

65S, 40E 付近に停滞した. なお 10 月 5 日 15 LT に, 低気圧の中心から約 800 km 離れた昭和基地では, 海面気圧 937.4 hPa を観測していることから, 実際の中心気圧は客観解析の値よりもさらに低かったと考えられる. その後, 低気圧自体は勢力を弱めたが, 大陸内の高気圧が強まり 10 月 6 日 12 LT の時点でも昭和基地付近は気圧傾度が大きく強風が持続した.

10 月 3-6 日の NOAA の赤外画像を図 44 に示す. 10 月 4 日 17 LT で低気圧に伴う雲域は, はっきりした渦状の構造を持ち, 半径 1000 km を超えている.

(2) 上層の谷の動き

100 hPa 面では 9 月 27 日頃から極渦の蛇行が見られ, 40-60W 付近で超長波の谷が発達し始めた. この谷は 10 月 10 日頃にかけて 40E までゆっくりと東進し, この間昭和基地付近は超長波の西谷の場にあった.

500 hPa 面では, 9 月 25-27 日, 10 月 2-3 日, 10 月 5-6 日と短い周期で気圧の谷が昭和基地付近に接近し, 前述のとおりそれぞれが地上低気圧を伴って昭和基地にブリザードをもたらしたが, 9 月 28 日~10 月 2 日頃にかけては昭和基地の西側 10E 付近に大陸内部にまで伸びる気圧の尾根が形成されて谷の東進を抑え, 一時的に好天となった. 10 月 2 日の気圧の谷は, 9 月 27 日頃に昭和基地付近を通過して一旦 60E 以東にまで進んだ低圧部が, 大陸沿岸を西進する形で昭和基地に再接近したものである.

本事例の低気圧に対応する 500 hPa 面の谷は, 10 月 4 日 15 LT の時点では 55S, 10E 付近

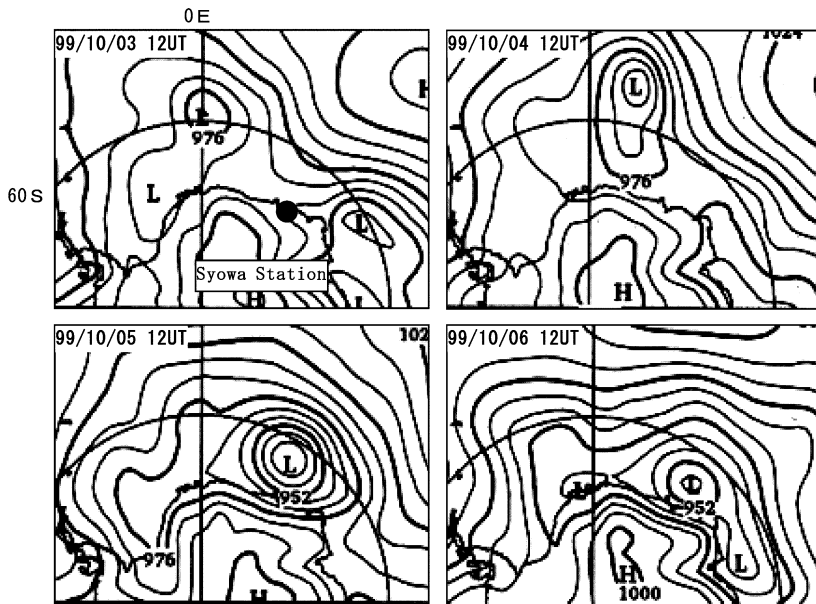


図 43 1999 年 10 月 3-6 日の地上天気図

Fig. 43. Surface weather charts (Oct. 3-6, 1999).

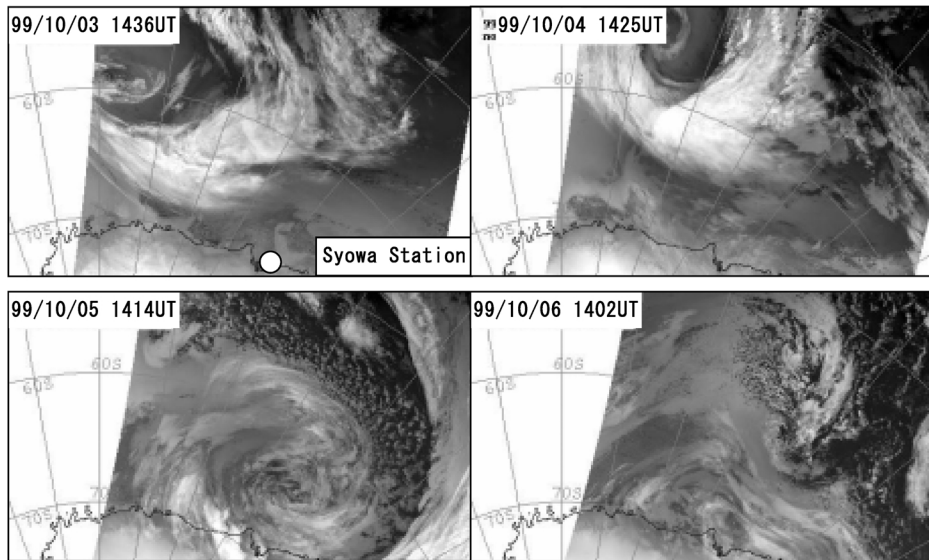


図44 1999年10月3-6日のNOAAの赤外画像
 Fig. 44. NOAA/AVHRR infrared images (Oct. 3-6, 1999).

に中心を持つと思われたが、10月5日の15LTにかけて中心を急激に南に移し、65S, 30E付近に低圧部としてまとまった。

9.2. 高層大気の状態

(1) 各層の気温と高度の経過

図45に850hPa, 700hPa, 500hPa, 300hPa, 100hPa及び50hPa面の高度と気温の経過を示す。

300hPa以下の気圧面では、10月5日の03-15LTの間に高度場が著しく低下し、その後10月7日にかけてゆっくりと上昇している。これに対し100hPa面では10月6日15LTまで高度場の低下が続き、その後の高度の上昇もほとんどない。さらにその上の50hPa面では10月5日15LTが最も高く、その後下降に転じている。

気温の上昇は300hPaのピークが10月5日03LTで最も早く、続いて500hPa面で同日03-15LTにかけてなだらかなピークを持っている。100hPa面と850hPa面で同日15LT, 700hPaでは10月6日03LTにピークとなっている。高度場と同様、50hPaでは位相が遅れており10月6日の03LTにピークとなっている。特に、300hPaのピークは顕著で、この層で急激な暖気の移流があったことを示している。また、700hPa面では他の気圧面の気温が下降に転じた後にピークを迎えており、この高度で暖気が持続的に流入していたと考えられる。50hPa面の気温ピークの遅れは、超長波の谷の位相が遅れていることに対応している。

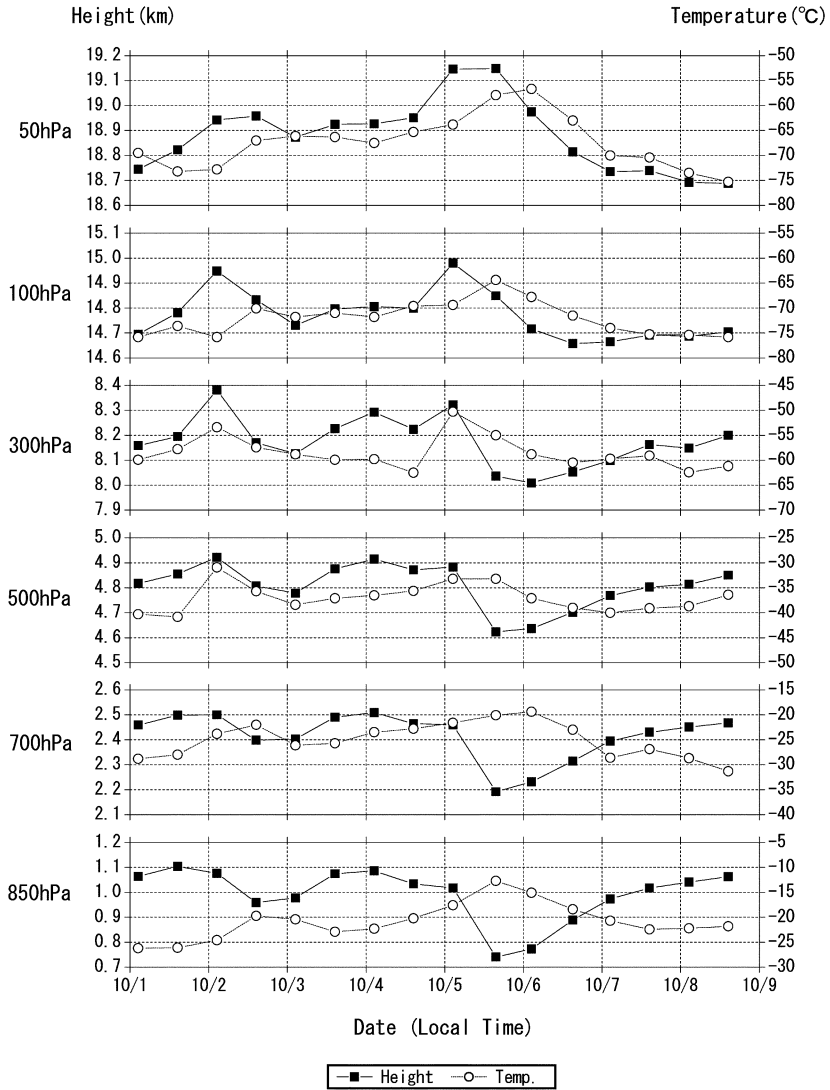


図 45 1999 年 10 月 1-8 日の等圧面高度と気温の経過

Fig. 45. Variations of the height of the isobaric surface and air temperature (Oct. 1-8, 1999).

(2) 温位と風向風速の経過

図 46 に温位と風向風速の時間断面図を示す.

10 月 2 日の擾乱では, 03LT に 600-300 hPa の層でやや北分を持った強風が吹いており, これに伴って, この層での暖気移流が顕著となっている. 擾乱通過後は上層ほど暖気が抜けるのが早く, 600 hPa より下層では高温状態が持続している. これに対して 10 月 5 日は前日に 300 hPa よりも上層で一旦寒気が入ったことから, この層での昇温が顕著である. また,

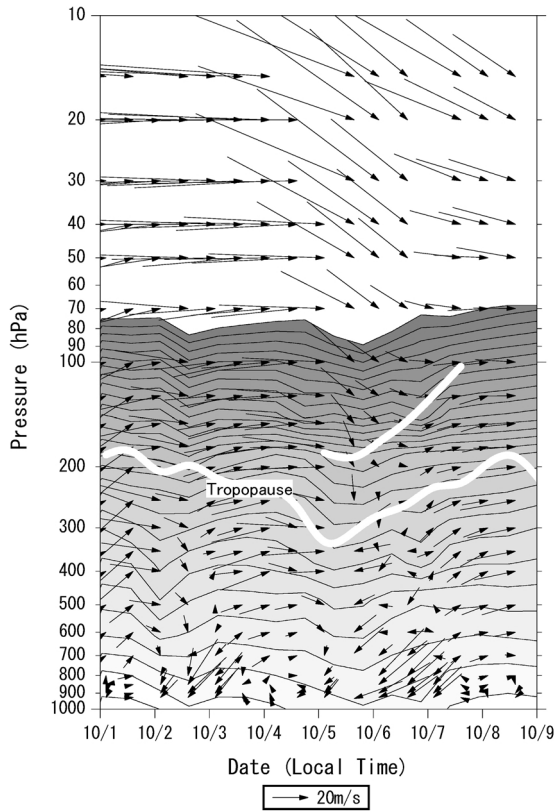


図46 1999年10月1-8日の温位と風向風速の鉛直時間断面図

Fig. 46. Vertical time cross-section of potential temperature and wind speed/direction (Oct. 1-8, 1999).

700 hPa より下層でも暖気の移流が顕著であるが、10月2日と同様に下層ほど高温状態が長時間持続している。また、10月5日は300 hPa面の気温の上昇に伴って、圏界面高度が下がり、さらに10月7日にかけて第2圏界面も出現している。成層圏では10月5日03 LTまで西風が卓越していたが、同日15 LTには北～北西の風に変化しており、上層の谷の接近に対応している。この西谷傾向は、10月8日まで持続している。地上から300 hPa付近までは、10月5日15 LTの時点で風向がそらい、対流圏内で気圧の谷の軸が完全に立っていたことを示している。

(3) 相当温位のプロファイル

図47に、10月5日03 LT～6日15 LTにおける昭和基地上空の相当温位鉛直分布を示す。10月5日03-15 LTにかけては800 hPaより下層で、混合と暖気移流によって安定層が壊され、中立な状態に変化した様子がわかる。その後10月6日03 LTにかけては、下層の状態はあまり変化がないが、700 hPa面直下の昇温と、その上の層の降温により800 hPaより上の層

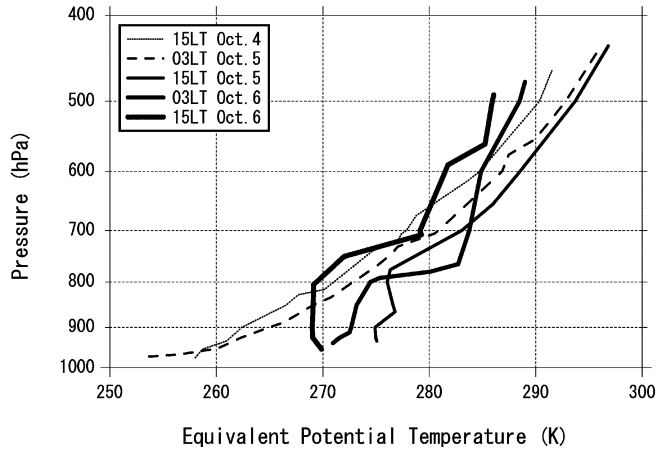


図 47 1999 年 10 月 4-6 日の相当温位の鉛直分布

Fig. 47. Vertical distribution of equivalent potential temperature (Oct. 4-6, 1999).

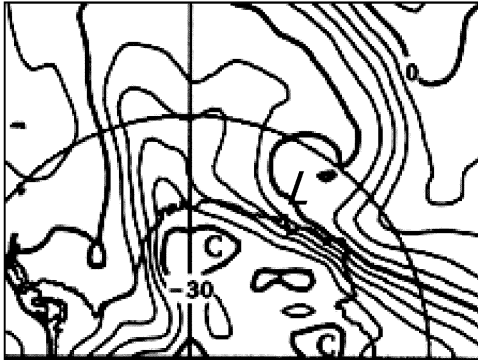


図 48 1999 年 10 月 5 日 12 UT の 700 hPa 面の温度場

L: 同時刻の地上低気圧の位置

Fig. 48. 700 hPa level temperature field on October 5, 1999 12 UT.

でも成層が中立化している。しかし、800 hPa 面を境に上下の層は 10K 程度の温位差があり、800 hPa 付近には顕著な安定層が形成されているため、上下の層は分断されている。この状態は、低気圧が閉塞して、中心付近の上空に暖気を取り残された様子を示していると考えられる。

図 48 に、10 月 5 日 15 LT の 700 hPa 面の温度場を示す。低気圧の前面から流入した暖気が、南側から後面に回りこみ、完全に低気圧の循環内に取り込まれている様子がわかる。

9.3. 地上の気象状態

図 49 に示した 10 月 4 日 12 LT ~ 7 日 18 LT の地上要素の特別 (天気と視程は 3 時間毎) の経過と、図 50 に示した各要素の 1 分値の経過から、地上状態の特徴を述べる。

気圧は 10 月 5 日 00 LT 頃から下降が始まり、時間の経過とともに下降速度も大きくなっ

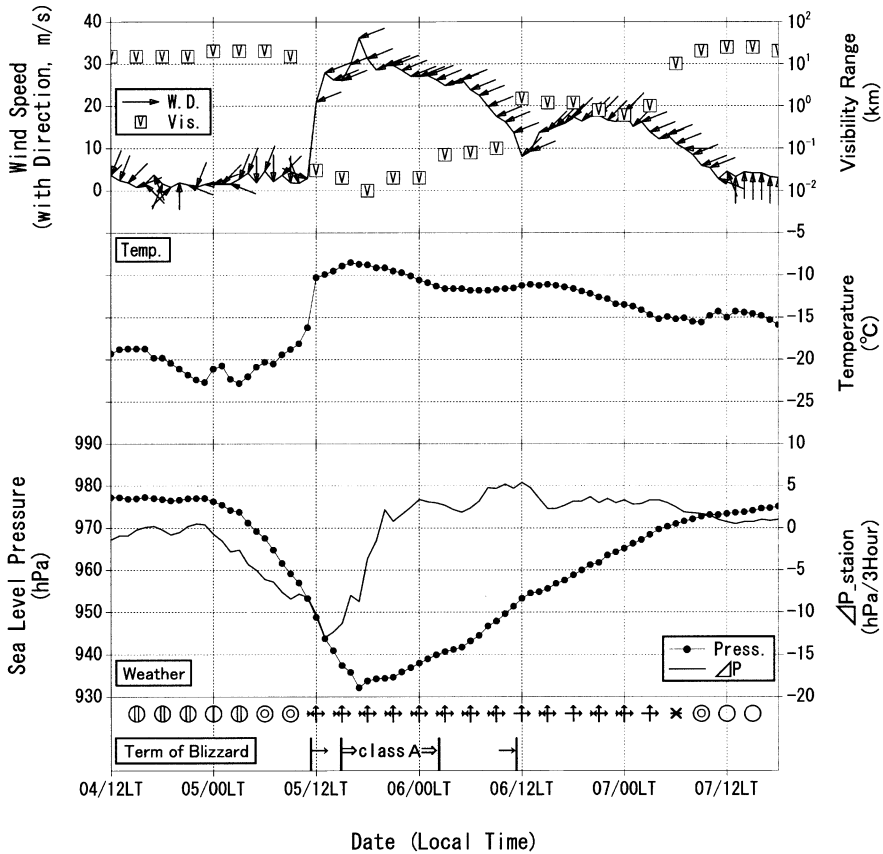


図 49 1999 年 10 月 5-6 日の昭和基地の地上要素経過

Fig. 49. Variations of surface meteorological data at Syowa Station (Oct. 5-6, 1999).

た。10月5日の13LTには前3時間の気圧の下降量が最も大きく $-13.0 \text{ hPa}/3 \text{ hr}$ であった。また、10月4日17LT~5日17LTの24時間では、 44.9 hPa の下降量であった。10月5日1658LTに最低海面気圧 932.1 hPa を記録した後は緩やかに上昇したが、1分値で見ると1918LT(図中⑦)に再度下降して極小値を観測している。

気温と風速は、10月5日12LT頃にほぼ同時に急上昇した。一般に昭和基地の場合、夏季を除き放射冷却による接地逆転層が形成されており、低気圧の接近で風が強まると、この逆転層が破壊され気温が急上昇する(国立極地研究所編, 1988)。

1分値で見ると、気温は風速に対応して①から急上昇し、②以降も緩やかに上昇を続けて④で最高気温を記録した。その後は緩下降に転じている。

風速は10月6日12LT頃に一旦 10 m/s 未満に弱まり、ブリザードも終了したが、同14LT頃には再び強まって、7日未明まで 15 m/s 前後の風速が続いた。視程も風速の増大とともに悪化し、5日18LTには 10 m にまで落ちた。

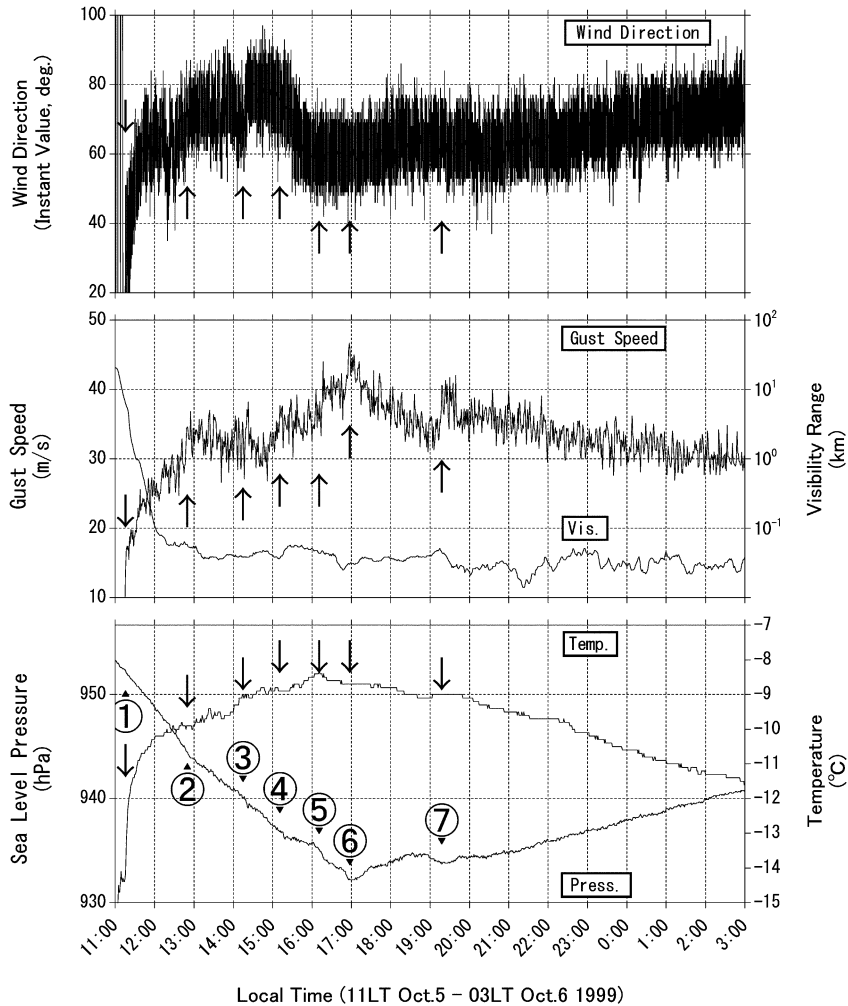


図 50 昭和基地の地上要素 1 分値時別値の経過 (1999 年 10 月 5 日 11LT—6 日 03LT)
 Fig. 50. Surface meteorological data at 1-minute intervals at Syowa Station
 (Oct. 5, 11LT—Oct. 6, 03LT, 1999).

1 分値で見ると、① (1250LT) まで急速に増大した風速は、その後⑤ (1611LT) までの間はほぼ一定で経過した。⑤～⑥の間でさらに強まり、最低気圧を記録したのと同様 1657 LT に最大瞬間風速を観測した。その後は漸減に転じたが、⑦で一時的に強まっている。

風向は、風速の増大とともに、徐々に時計回りで変化し、④ (1511LT) 頃には 70–80° であった。その後、⑤にかけては反時計回りに変化して 60° となり、⑥にかけてはほぼ一定で経過した。⑥以降は、再度緩やかに時計回りの変化をしている。

①～④の風向の変化は、低気圧が南東進して昭和基地に接近したことに伴うものと考えられる。その後の④～⑤の風向変化と気温の極大の発現は、昭和基地付近を閉塞前線が通過し

たためではないかと推測される。図には示さなかったが、S16の気象ロボットによる観測でも、10月5日1400LT頃に100-108°であった風向が2030LT頃には84-94°に変化していることも、前線の通過を示唆している。なお、④~⑤の風向の変化が約1時間を要していることから、昭和基地付近では閉塞前線が南西~北東方向の走向をもって通過して行ったのではないかと考えられる。

⑥の最低海面気圧及び最大瞬間風速は、閉塞前線内側の低気圧のごく近傍で観測された。⑦の気圧の下降と強風は、小規模な擾乱の通過に伴うものと考えられる。

9.4. ブリザードの概要

10月5日は、1100LTから降雪を観測したが、この時点で平均風速はWNW2.9m/sと弱かった。その後、風向は時計回りに変化して風速が急速に大きくなり(図50中①)、1121LT以降は平均風速で10m/s以上となった。風速の増大により、地ふぶきを伴って視程は急速に悪化し、1120LTには1km未満、1130LTには500m未満、降り始めから40分後の1140LTには100m未満となって、この状態は翌6日0710LTまで続いた(図49)。

ブリザード期間は、10月5日1121LT~6日1120LTで、この間の10月5日1453LT~6日0218LTにA級ブリザードの基準を満たしている(図49)。また、期間中の最大風速36.2m/s(ENE)及び最大瞬間風速46.7m/s(ENE)は、10月としては、いずれも歴代第4位の記録となった。

9.5. 歴代第1位の最低海面気圧を記録した事例との比較

昭和基地における最低海面気圧の累年の極値は、1969年9月8日の03LT頃に観測された931.3hPaである。

図51に、1969年9月6日18LT~9日24LTの地上要素の経過を示す(図49関連)。データは3時間ごと(天気と夜間の視程は6時間毎)だが、8日0143LTのラジオゾンデ飛揚時の地上データも加えてある。

1969年の事例では、9月7日12LTから気圧の下降が始まり、8日03LTまでの15時間で41.0hPaの下降量であった。1999年の擾乱では、10月5日17LTまでの15時間で42.0hPaの気圧の下降を観測しており、両者は気圧の下降速度及び下降量において、ほぼ同程度の規模であった。

ただ相違点としては、1969年の場合は最低海面気圧発現後に気圧が急上昇しており、また気温に関しても急激に下降して、ともに3-6時間程度で擾乱の影響を受ける前の状態に回復している。また、地上風は最大風速が23.9m/s(NNE)、最大瞬間風速が29.8m/s(NNE)で、1999年の事例に比べてかなり弱かった。

また、1969年の事例では、気温の上昇が風速の増大よりも1時間30分以上先行して、風向

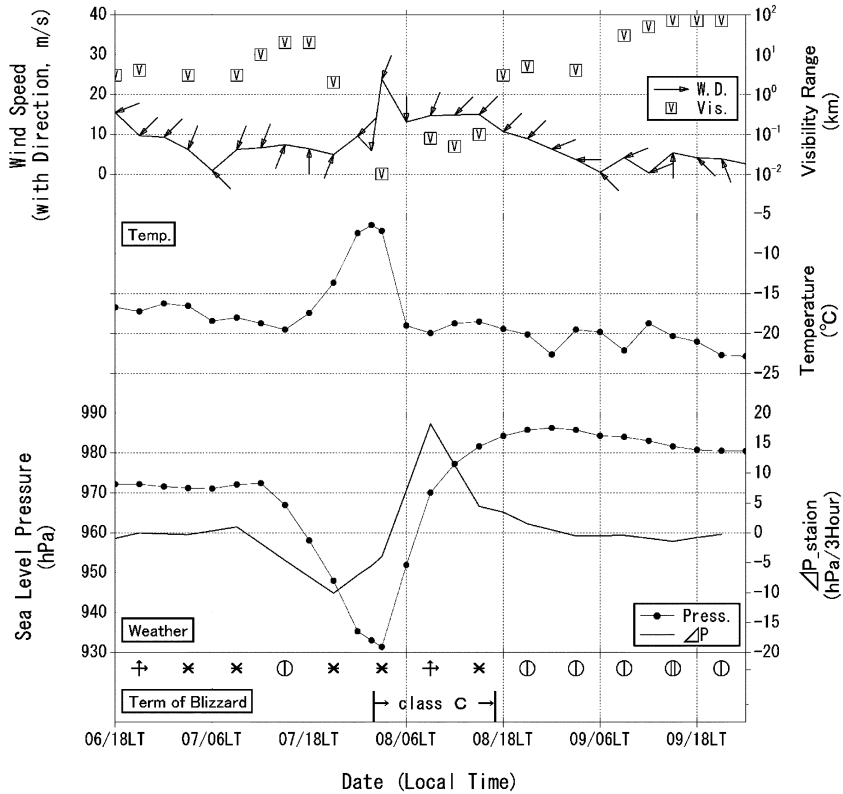


図 51 昭和基地の地上要素経過 (1969年9月6日18LT~9日24LT)

Fig. 51. Variations of surface meteorological data at Syowa Station (Sep. 6, 18LT~9, 24LT, 1969).

の変化に対応していた。図示した期間には含まれていないが、1969年は8月の下旬以降、1-2日の非常に短い周期で10 m/s以上の強風を伴った降雪が観測されており、小低気圧が次々に昭和基地付近を通過して行ったものと思われる。このことは、大陸沿岸に南極前線が形成されていたことを示唆しており、上述の風向変化に対応した昇温は、前線の南下によるものではないかと推測される。

1969年は1月の高温が顕著で、その後も6月まで気温が高めに経過したために、初冬にオングル海峡の海水が成長せず、全面結水したのは5月に入ってからであった(石田ら, 1971)との報告があることから、9月の時点でも昭和基地付近の海水縁は、大陸沿岸からそれほど沖合まで張り出してはなかった可能性も考えられる。開水面が昭和基地の近傍にあったとすれば、前線帯の形成や擾乱の発達過程に影響を与えた可能性がある。

図 52 に、1969年と1999年における最低海面気圧発現時刻の直近の気温と風、及び850, 700, 500, 300, 100, 30 hPaの各気圧面間の温度風鉛直分布を示す。1999年10月5日15LTの観測では、925-700 hPa間で風の資料が欠測となっているため、この層については参考の

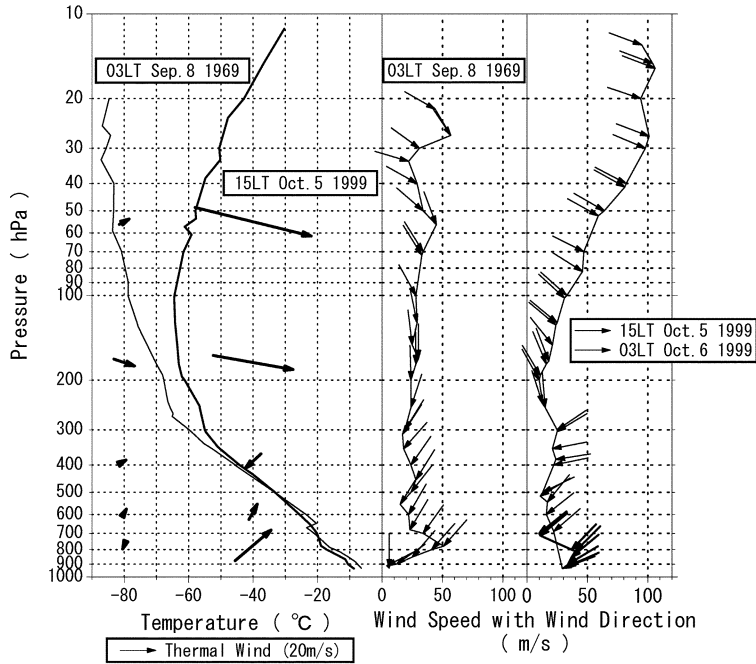


図 52 最低海面気圧発現時の気温，風及び温度風の鉛直分布

Fig. 52. Vertical profiles of temperature, wind, thermal wind during minimum sea level pressure.

ために 10 月 6 日 03 LT のデータをプロットした。

1969 年の事例は、800 hPa より下層で風速が非常に小さくなっているが、これは 9 月 8 日 03 LT の観測開始時刻が、0143 LT と早かったため擾乱の影響を受ける直前の値であることによる。

300 hPa より下の層では両者の気温差はほとんどないが、300 hPa より上層では高度とともに気温差が大きくなり、100 hPa では 15°C、20 hPa では 40°C も 1969 年の方が低温となっている。このことは 2 つの事例に関する擾乱の構造が、大きく異なっていたことを示唆している。

1969 年の場合は、上層で低温であった分だけ昭和基地上空の気柱に含まれる大気の種類は 1999 年の場合に比べて大きかったはずである。それにも関わらず地上において 1999 年における事例並みの気圧の下降が観測されたのは、大気中のいずれかの層で強い発散があったためと考えられる。

また、風速についても 2 つの事例では上層ほど差が大きい。1999 年は 200 hPa 面から上で高度とともに風速が増大し、30 hPa 面より上層では 100 m/s もの強風となっているのに対し、1969 年の事例では高々 30-50 m/s 程度であり高度とともに強まる傾向もない。気温の鉛直分布と併せて考えると、1999 年は昭和基地付近が極渦の縁辺に当たっており、南北の温度勾配が大きかったのに対し、1969 年の事例では昭和基地は極渦の内側にあったと推測され

る。このことは、同図に示した温度風の大きさが、300hPa面より上層で1999年の方がかなり大きくなっていることにも表れている。

このような成層圏の状況の差異は、両事例の発現時期が1カ月程度異なっており、季節の進行による成層圏気温の変化を反映していたと考えられる。

図53に各気圧面の高度と気温の経過を(図45関連)、図54には温位と風向風速の時間断面図(図46関連)、図55には相当温位の鉛直分布を示す(図47関連)。

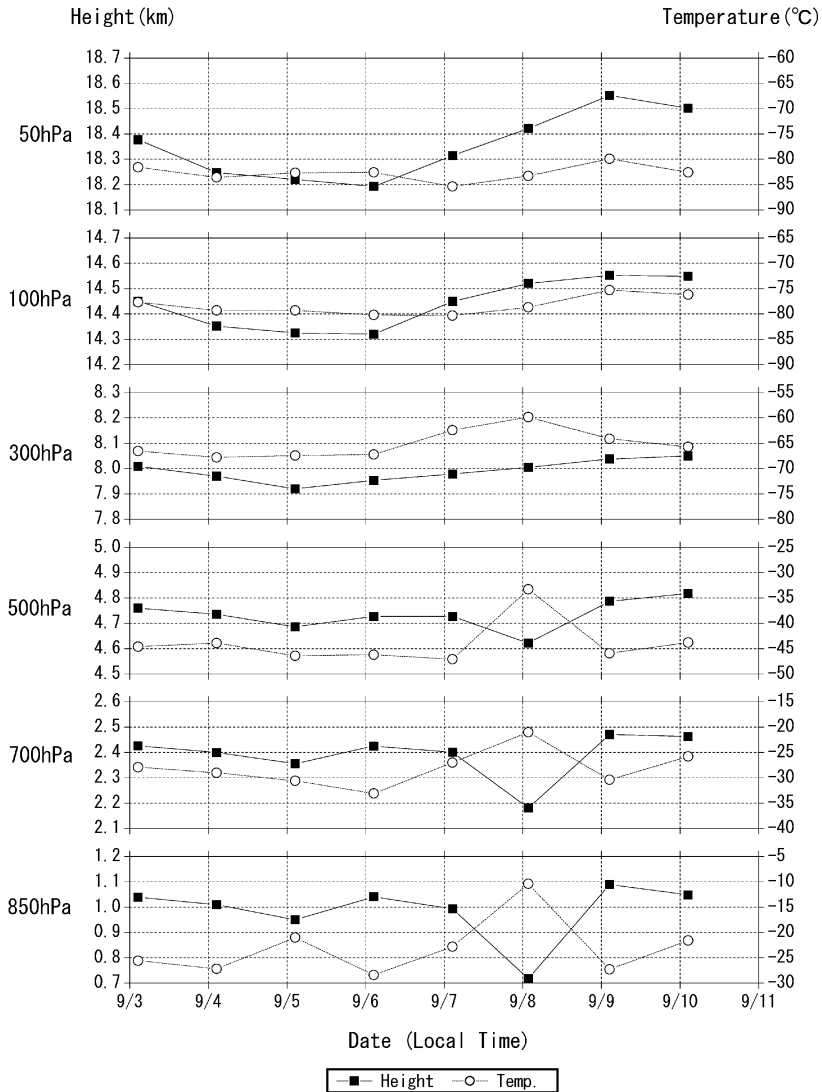


図53 1969年9月3-10日の等圧面高度と気温の経過

Fig. 53. Variations of the height of the isobaric surface and air temperature (Sep. 3-10, 1969).

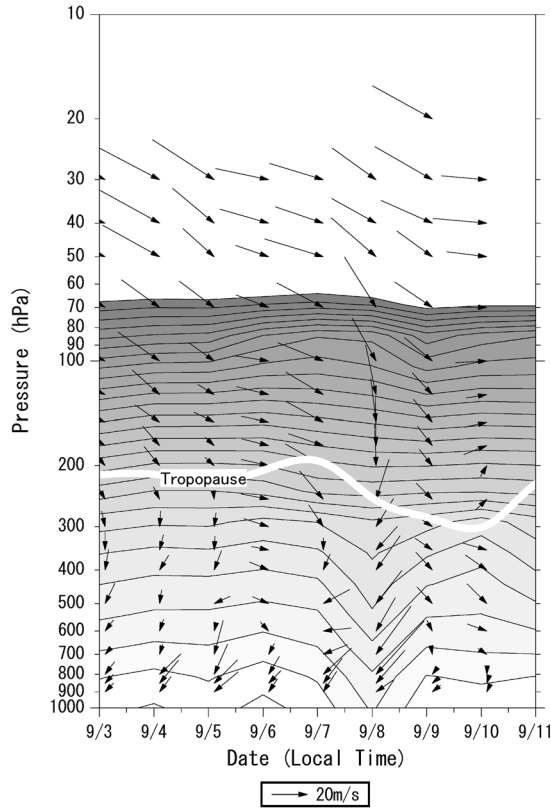


図 54 1969 年 9 月 3-10 日の温位と風向風速の鉛直時間断面図
 Fig. 54. Vertical time cross-section of potential temperature and wind speed/direction (Sep. 3-10, 1969).

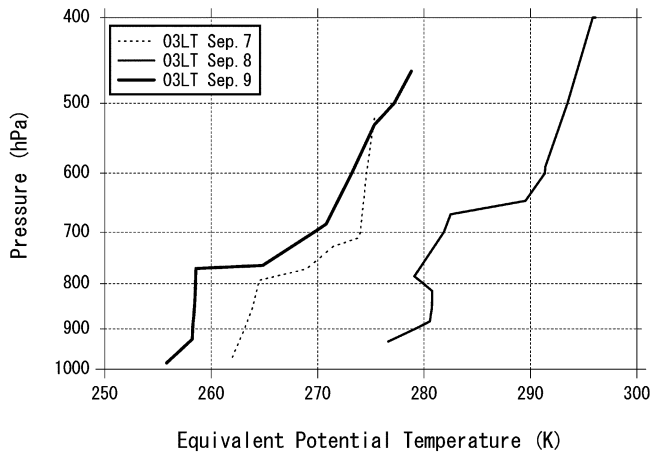


図 55 1969 年 9 月 7-9 日の相当温位の鉛直分布
 Fig. 55. Vertical distribution of equivalent potential temperature (Sep. 7-9, 1969).

図 53 では前述したとおり、100 hPa 及び 50 hPa 面の気温が 1999 年よりもかなり低く経過していたことがわかる。一方、300 hPa 面より下の層では、擾乱に対応した暖気移流が認められるが、等圧面高度の下降は 500 hPa 面以下の層にのみ見られ、700 hPa より下層で顕著である。さらに、300 hPa 面から上では、高度場は上昇傾向にあり、前述した発散場がこの付近にあったものと考えられる。また、地上要素の経過と同様、気温、高度場ともに擾乱通過後の回復が極めて早かった。

図 54 でもこれらの特徴は顕著に現れており、9 月 8 日の温位の上昇は 300 hPa 面よりも下層に限られ、それも 9 月 9 日までには完全に寒気と入れ替わっている。また、成層圏の風はやや北分をもっており極渦が真円からずれていたことを示唆しているが、期間中大きな変化はない。9 月 8 日に圏界面高度が下降した部分については、北風が入っているが 9 日までには北西に変化して上層まで一定した風向となっている。

短い時間にシビアな擾乱が通過していった様子は、図 55 に示した下層の相当温位の鉛直分布にも現れており、9 月 8 日 03 LT の相当温位は 500 hPa より下の全層にわたって前後の観測よりも 20K 程度高くなっている。また、地上要素の経過でも述べたとおり 9 月 8 日以前にも短い周期で擾乱が通過しており、強風による大気の影響が盛んで、9 月 8 日の擾乱の影響を受ける前から昭和基地付近に前線帯が存在し、相当温位の鉛直分布は中立の状態となっていたと考えられる。ただ、1999 年の事例と同様、800–650 hPa 付近に安定層があり、その上下で 10K 程度の温位差がある。

9.6. まとめ

1999 年 10 月の擾乱は、

- ① 一旦は北上した低気圧が、上層の北西流によって急速に発達しながら南東進して昭和基地に接近した。
- ② 昭和基地近傍に達した時点で、低気圧は既に閉塞状態であり、対流圏内で気圧の谷の軸が立っていたために中心気圧が極小となっていた。

さらに、

- ③ 成層圏の超長波の谷が後面から接近し、衰弱期に入った対流圏の擾乱を強化する働きをした。

などの結果から、最低海面気圧が歴代第 2 位となるまでに発達したと考えられる。

1969 年の事例と 1999 年の事例の特徴を対比させると表 21 のようになる。

10. 1999 年の成層圏オゾン減少と低温

南極の極夜が明け、春を迎える頃に南極上空の広範囲でオゾンが急速に減少する現象、いわゆるオゾンホールは、人類の生産活動が、自然な気候システムに深刻な影響を及ぼしつつ

表 21 1969 年と 1999 年との低気圧の事例比較

Table 21. Comparison of the analysis case of depression in 1969 and 1999.

要素		1969年の事例	1999年の事例
発生年月日		1969年9月8日 ~	1999年10月5日 ~
最低海面気圧		931.3 hPa (9月8日03LT頃, 1位)	932.1 hPa (10月5日1658LT, 2位)
気圧降下量		-39.9 hPa (9月7日03LT - 8日03LT)	-44.9 hPa (10月4日17LT - 5日17LT)
気圧上昇量		+54.4 hPa (9月8日03LT - 9日03LT)	+25.4 hPa (10月5日17LT - 6日17LT)
最大風速 (風向)		23.9 m/s (NNE)	36.2 m/s (ENE)
最大瞬間風速 (風向)		29.8 m/s (NNE)	46.7 m/s (ENE)
気温上昇		風向変化 → 気温上昇 → 風速増大	風速増大 → 気温上昇
ブリザードの 特徴	期間	9月8日02LT - 17LT	10月5日1121LT - 6日1120LT
	継続時間	15時間	23時間59分
	階級	C	A
低気圧の 特徴	進路	昭和基地付近にかかる南極前線を東進 した可能性がある	北上した低気圧が、上層の北西流によっ て南東進して昭和基地に接近
	発達要素	超長波の影響も受けておらず、回復は早 かった	700hPaを中心とした強力な暖気移流によ り発達、閉塞後も超長波のトラフの接近 により強化された
	水平スケール	不明 (比較的小さかった)	1000 km以上 (衛星画像より)
	鉛直スケール	8.5 km程度	同左
極渦との関係		昭和基地は成層圏極渦の内側	昭和基地は成層圏極渦の縁辺

ある例として大きな注目を集めてきた。

1999 年はオゾンホールが解消が遅れ、昭和基地での観測によると、昭和基地がオゾンホール下にあった最後の日が 12 月 25 日と過去最も遅かった。また、これに関連して 11-12 月に下部成層圏で低温の極値を更新した (3.3 節)。この章ではこれまでに行われてきた昭和基地での観測結果等から、経年的な成層圏オゾンの減少傾向と春期の昇温遅延及びこれらの現象に関連すると考えられている極域成層圏雲 (Polar Stratospheric Clouds; 以下 PSCs と記す) の影響を紹介し、1999 年の成層圏オゾン減少と低温について考察する。

10.1. オゾン層破壊過程の概要

オゾン破壊とは、オゾン (O_3) が活性な触媒物質の作用により、次々と酸素分子 (O_2) に変化させられることである。この触媒物質の役割を果たす物質には窒素酸化物 (NO_x ; 主に NO と NO_2) や塩素酸化物 (ClO_x ; 主に Cl と ClO) などがある。このうち塩素原子 (Cl) は人為起源のガスであるフロン等に含まれて大気中に放出され成層圏にまで達するが、下部成層圏においては塩化水素 (HCl) や硝酸塩素 ($ClONO_2$) などの一成分として存在することが多い。

本来、硝酸塩素は活性な一酸化塩素 (ClO) と二酸化窒素 (NO_2) が反応してできたもので不活性である。しかし、反応場に PSCs 粒子が存在するような特殊な場合は、その粒子表面において不均一反応と呼ばれる、異なる相の物質間の化学反応が発生する。不均一反応の結果、窒素酸化物 (NO_2) の部分は PSCs 粒子内に硝酸 (HNO_3) の一成分として取り込まれる。その一方で、塩素ガス (Cl_2) が下部成層圏に放出され蓄積される。塩素ガスは極夜明けに照射する太陽光によって光解離 ($\text{Cl}_2 \rightarrow \text{Cl} + \text{Cl}$) し、触媒となってオゾンと反応する ($\text{Cl} + \text{O}_3 \rightarrow \text{O}_2 + \text{ClO}$, $\text{ClO} + \text{O} \rightarrow \text{O}_2 + \text{Cl}$)。結果的に塩素原子は 1 個のオゾン分子と 1 個の酸素原子を 2 個の酸素分子に変換するが、塩素原子自体は安定な分子にとどまることなく反応を繰り返す。これがオゾンの破壊サイクルである。

一方、PSCs に取り込まれた窒素酸化物 (NO_x) は PSCs が融解するまでは硝酸の一成分として取り込まれたままであるから、一酸化塩素 (ClO) と反応することがない。その上、PSCs に取り込まれたまま成層圏から落下する場合 (脱室作用) もあるため、活性な塩素原子はほとんど減少しない。このような反応が繰り返されてオゾンが急速に減少すると考えられており、南極下部成層圏の特殊な条件下で発生する大規模なオゾン破壊サイクルとして注目されている (気象庁, 1999)。

10.2. オゾンホール面積の経過

衛星搭載の TOMS (Total Ozone Mapping Spectrometer) データによる南半球のオゾン全量分布において、オゾンホールと呼ばれる 220 m atm-cm 以下の領域は観測開始直後の 1979 年には現れていなかった (図 56)。しかし、1980 年代に急激に規模を拡大しており、1992 年以降は継続して大規模となっている (気象庁, 1999)。また、オゾンホールの解消も遅れる傾向

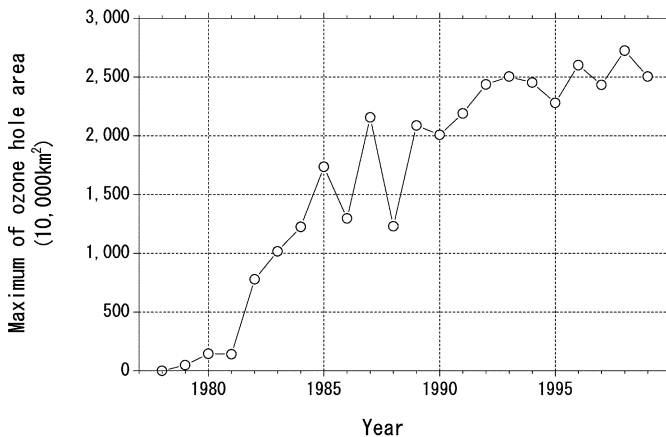


図 56 オゾンホール面積最大値の年変化 (1978-1999 年)

Fig. 56. Time series of maximum values of ozone hole area (1978-1999).

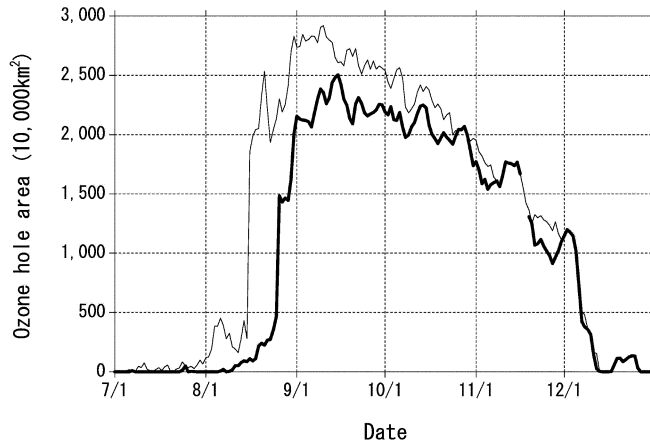


図 57 1999 年および過去最大の日々のオゾンホール面積 (1978-1999 年)
 —: 過去最大の日々のオゾンホール面積
 —: 1999 年の日々のオゾンホール面積

Fig. 57. Ozone hole area in 1999, and maximum of ozone hole area (1978-1999).

で、図 57 に示すように 12 月の日別最大面積の大部分を 1999 年に更新している。

1999 年のオゾンホール面積の経過を見ると、オゾンホールの目安である 220 m atm-cm 以下の領域は 8 月下旬から急速に発達し 9 月 15 日に 2504 万 km² を記録した (これは過去 3 番目に広い)。その後、その領域は徐々に縮小し、12 月の上旬にはさらに急激に縮小した。14 日には一旦見られなくなったオゾンホールは 17 日に再度出現し、26 日まで継続して存在していた (気象庁, 1999)。4.3.1 節でも述べたように、昭和基地のオゾン全量日代表値が 220 m atm-cm となった最後の日は、12 月 25 日と過去最も遅かった (図 10)。

10.3. 昭和基地での観測

10.3.1. オゾン全量減少の経過

昭和基地におけるオゾン全量は経年的に減少傾向であり、図 58 に示した 1969 年から 1999 年までの期間における月平均オゾン全量の推移を見ると「10 年で 27 m atm-cm の減少傾向」(フィット直線)である。

表 22 は季節的なオゾン全量減少の特徴をみるために、昭和基地においてオゾン全量観測値が極夜期も含めて連続的に得られている 1982 年から 1999 年までの 18 年間のデータを用いて、各月別の増減の傾向を求めたものである。結果は各月とも減少傾向であったが、3 月から 7 月にかけての減少傾向は有意ではなかった (有意水準 95%, 以下同じ)。図 59 には、特に減少傾向が大きい 8 月から 12 月までの月別の平均オゾン全量の経過を示す。この時期はオゾンホールの形成期から消滅期にあたるが、この図からも明らかなように期間を通じて昭和基地上空はオゾン全量の減少が進行していることが分かる。中でもオゾン全量の回復期に

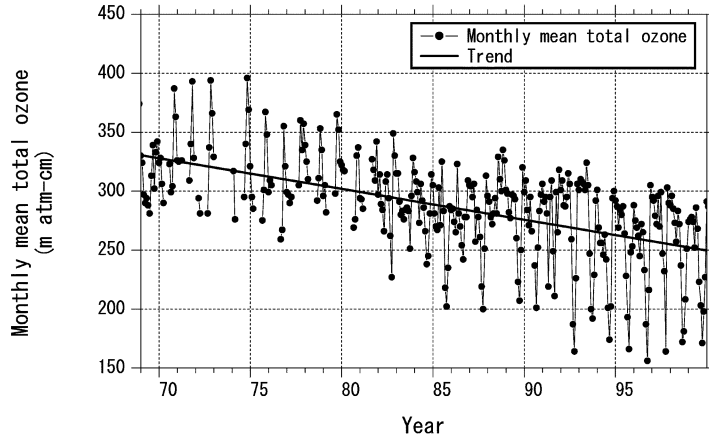


図 58 昭和基地における月平均オゾン全量値の経過 (1969–1999 年)

Fig. 58. Time series of monthly means of total ozone at Syowa Station (1969–1999).

表 22 昭和基地におけるオゾン全量トレンド (1982–1999 年)

Table 22. Trend of total ozone at Syowa Station (1982–1999).

月	1月	2月	3月	4月	5月	6月
トレンド (m atm-cm/year)	-1.22	-1.36	-0.71	-0.32	-1.90	-0.41
相関係数	-0.63	-0.51	-0.30	-0.13	-0.37	-0.13
月	7月	8月	9月	10月	11月	12月
トレンド (m atm-cm/year)	-1.63	-3.92	-4.63	-5.34	-4.54	-3.93
相関係数	-0.41	-0.71	-0.67	-0.61	-0.57	-0.74

あたる11月は、1998年から1999年にかけてオゾンホールが目安とされている220 m atm-cmを月平均値でも下回ってきていることから、昭和基地がオゾンホールから脱する時期が遅れる傾向にあると言える。

昭和基地上空のオゾンホール出現、消滅時期の傾向を見るため、図60に1982年からの月別オゾン全量平均値を示し、その上に各年において初めてオゾンホールが目安となる220 m atm-cm以下の全量値を観測した日を、最後に観測した日を▽として示した。図中の直線は、それぞれのフィット直線であるが、この直線の間隔が開く傾向にあることから、1980年代初頭に出現したオゾン全量の急減期間は1999年にいたるまで消長を繰り返しながらも拡大の傾向にあることが分かる。また、出現の変動に比べ消滅の変動が大きいことも分かる。原因としては、極渦の発達や突然昇温などが考えられる。

10.3.2. 成層圏のオゾン減少と気温の経過

(1) オゾン減少と成層圏気温の関連

成層圏においては、オゾンの紫外線吸収による発熱が熱源となっていることが知られてい

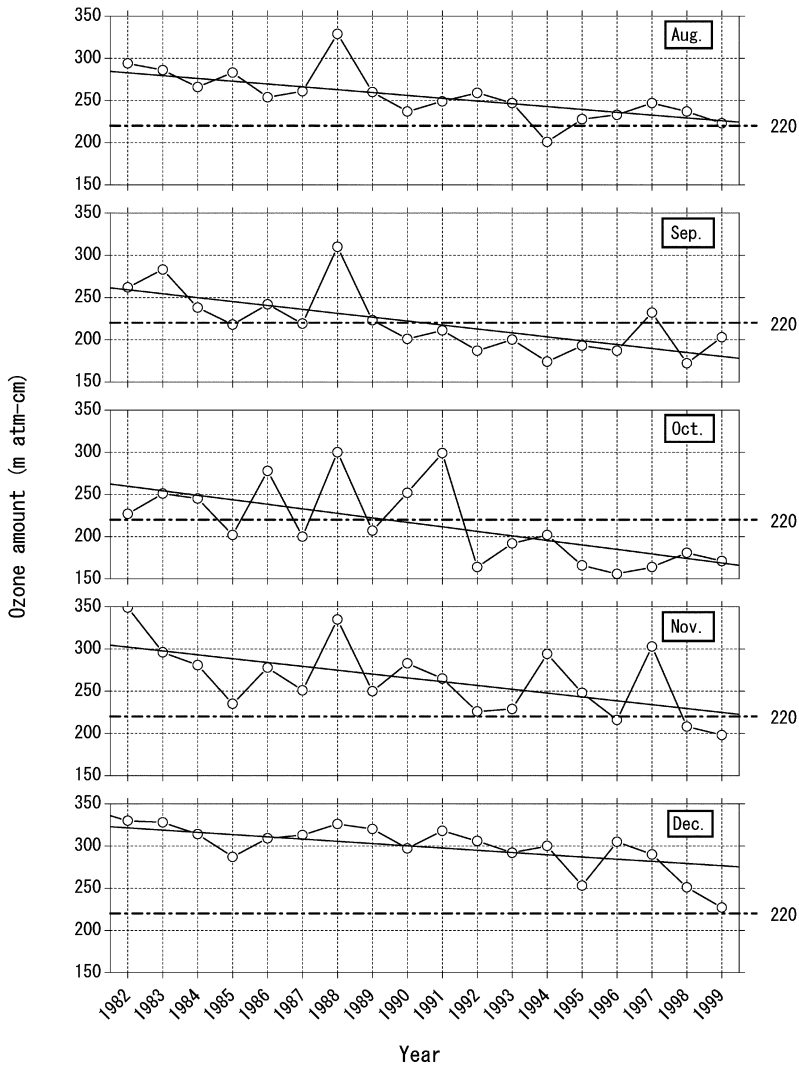


図 59 昭和基地上空における月別オゾン全量平均値の変化 (1982-1999年)

Fig. 59. Seasonal variations of monthly mean of total ozone above Syowa Station (1982-1999).

る。そのため、成層圏におけるオゾンの増減は、上層の気温に影響を与えることが考えられる (気象庁, 1999)。

オゾンゾンデの連続したデータが得られている 1987 年から 1999 年までの 13 年間について、それらの相関を調べた。図 61 に下部成層圏 (30, 50, 70, 100 hPa) におけるオゾン分圧と気温の変動を期間累年平均値からの偏差の 13 カ月移動平均で示した。下部成層圏において両者の変動は経年的にほぼ一致している。

期間中のオゾン分圧、気温の増減傾向を月別・高度別に示した図 62 では、オゾン分圧、気

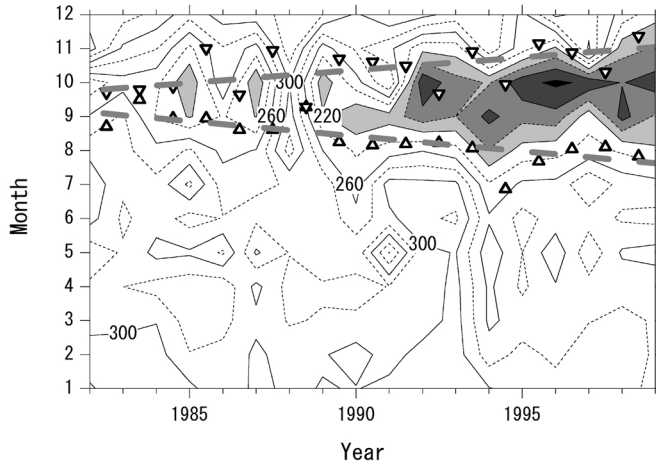


図 60 昭和基地における月別オゾン全量平均値のコンターグラフ (1982-1999 年)
 △: 初めてオゾンホールを目安となる 220 m atm-cm 以下の全量値を観測した日
 ▽: 最後に 220 m atm-cm 以下の全量値を観測した日

Fig. 60. Contour graph for monthly means of total ozone at Syowa Station (1982-1999).

温とも 9-12 月の下部成層圏においてマイナスのトレンドが共通している。さらに、オゾン分圧と気温の増減傾向の相関を月別、指定気圧面別に比較するために、それぞれの累年平均値からの偏差の変化傾向を求め、その相関係数 0.7 以上を図 63 に示す。季節的には 9-12 月の下部成層圏において、オゾンと気温の変動には強い正の相関があり、オゾン分圧低下と気温低下の時期・高度はほぼ一致している。このことは、オゾンの減少が気温の低下をもたらしていることを示唆している。9-12 月は極夜明けの昇温期にあたるため、この時期の成層圏気温のマイナストrendは昇温の遅延傾向を意味する。

(2) オゾン減少と 12 月 20 hPa 付近の高温

詳細についてさらに検討が必要ではあるが、オゾン全量の経年変化と関連すると考えられる 20 hPa 付近の気温の経年変化について報告する。

10.3.1. では、オゾン全量の減少に伴って 11-12 月の 50-100 hPa を中心として気温低下傾向であることを述べたが、12 月の 20 hPa 付近の気温は低下しておらず、図 6 に示すように 1999 年には 20-30 hPa の気温が過去最高となった。

図 64 は、12 月の月平均値が連続的に得られている 1968-1999 年の月平均オゾン全量と 20 hPa の月平均気温の経年変化である。この期間、12 月のオゾン全量は経年的に減少傾向である。20 hPa の気温は 1983 年頃までオゾン全量と同様に低下傾向であったが、1984 年以降に低下傾向は無い。そこで、12 月のオゾン全量と 20 hPa の気温の相関を、1983 年以前、1984 年以後について調べたのが図 65 である。相関係数は、1983 年以前が正の相関で 0.69、1984 年以後が負の相関で 0.74 と両者とも比較的高い相関があり有意であった。特に 1984 年以後に

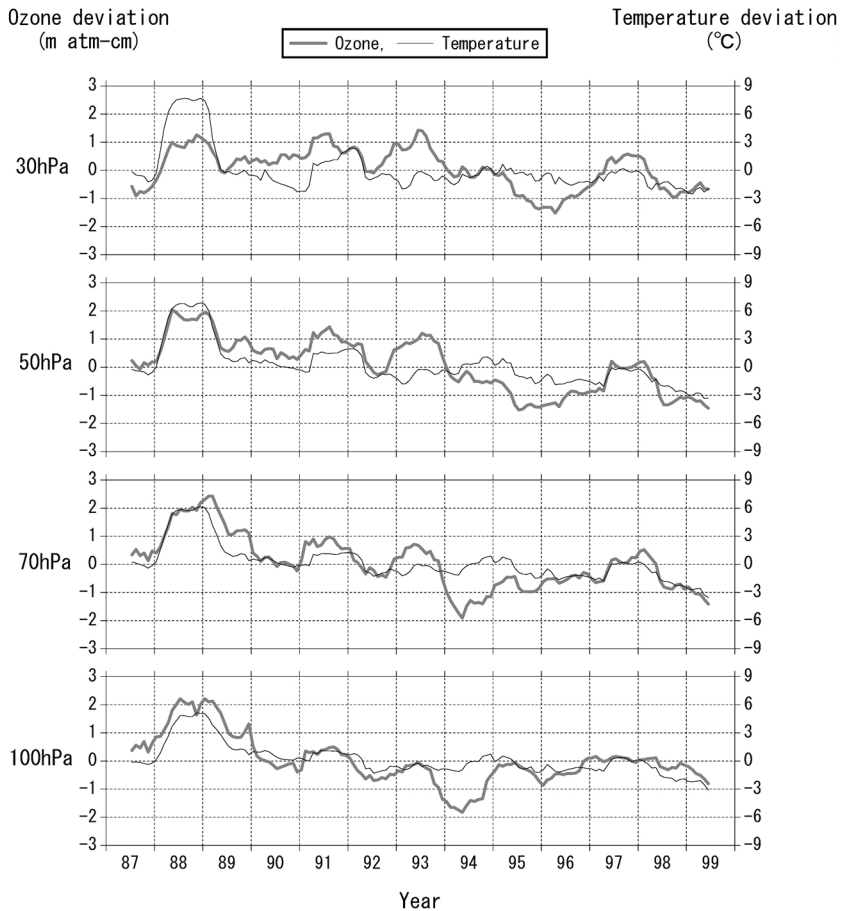


図 61 オゾン分圧及び気温偏差の経年変化 (13 カ月移動平均)

Fig. 61. Time series of ozone partial pressure and air temperature at 30, 50, 70, and 100 hPa, and deviations (13-month moving average).

見られる両者の年々変化は良く対応しており、何らかの因果関係があるように見える。

20 hPa 付近の気温を決定する主な要因としては、南北方向の水平温度移流、オゾンによる発熱の有無、鉛直流による断熱変化などが考えられる。1987 年以降の 20 hPa におけるオゾン分圧と気温には 0.36 と弱い正の相関はあるが有意ではなく、1999 年 12 月の 20 hPa におけるオゾン分圧も気温の高さに見合うほど高い値ではなかった。また、南北成分風には経年的な変化傾向は見られない (図 5)。

12 月の 20 hPa の高度はオゾン全量の減少に伴う低温によって気柱の層厚が減じたため低下傾向である。1984 年以降の 12 月の 20 hPa 高度と気温の回帰分析によれば、高度に対する気温の経年的な変化率は -9.2 K/km である。この変化率は乾燥断熱減率に近く、20 hPa より高い層からの下降流が存在すれば断熱昇温として説明できる。廣岡ら (2000) は、北半球成

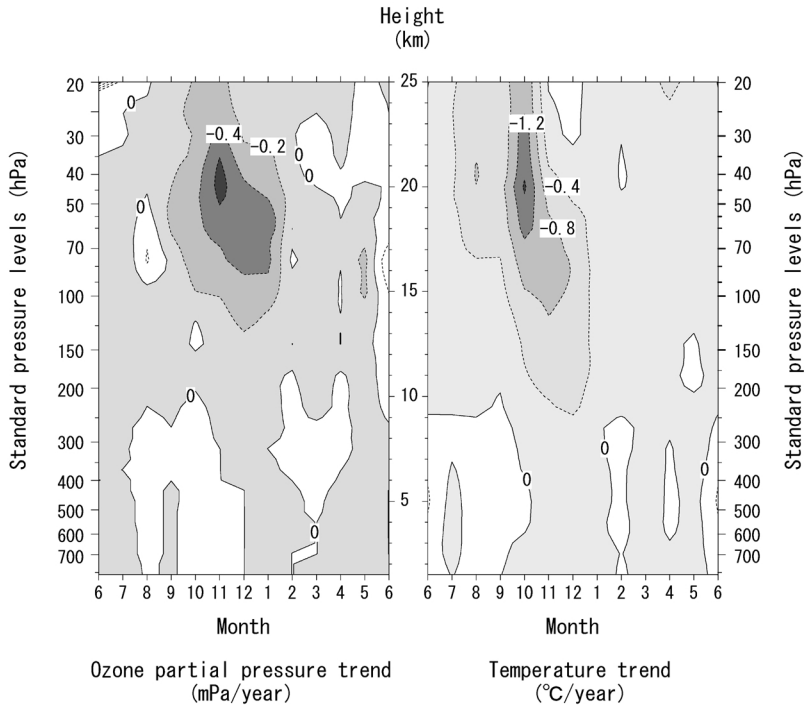


図 62 オゾン分圧及び気温のトレンド
 Fig. 62. Trends of ozone partial pressure and air temperature.

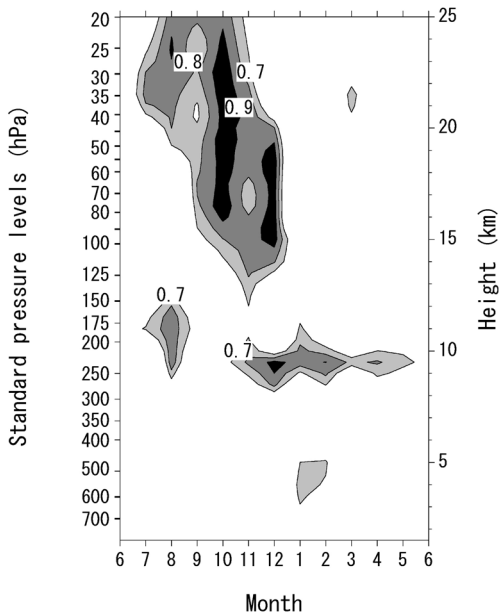


図 63 オゾン分圧及び気温変動の相関関係 (相関係数 0.7 以上)
 Fig. 63. Correlation between ozone partial pressure and air temperature fluctuations (correlation coefficient of more than 0.7).

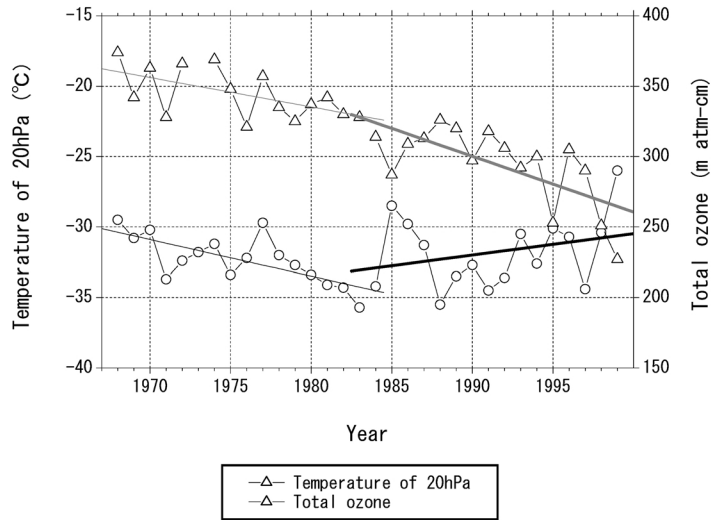


図 64 12月の月平均オゾン全量と20hPa月平均気温の経年変化
 —△—: 20hPa 気温の近似直線 (1968-1983年)
 —○—: 20hPa 気温の近似直線 (1984-1999年)
 —△—: 12月の月平均オゾン全量の近似直線 (1968-1983年)
 —○—: 12月の月平均オゾン全量の近似直線 (1984-1999年)

Fig. 64. Time series of monthly mean total ozone and monthly mean air temperature at 20 hPa for December.

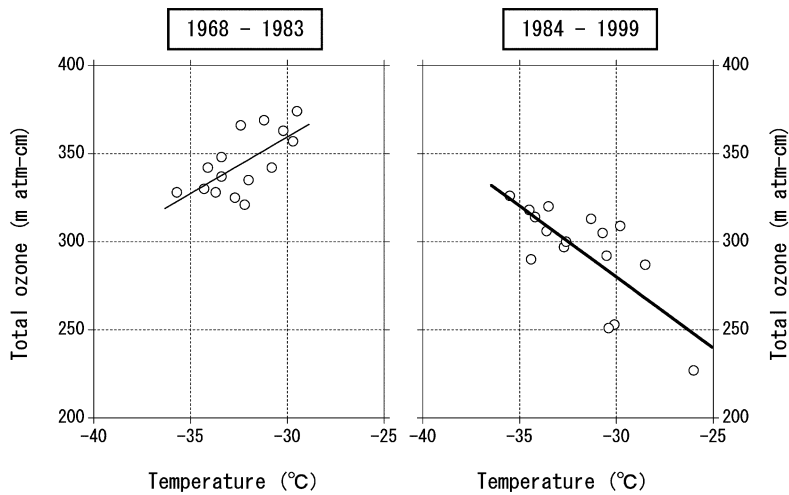


図 65 12月の月平均オゾン全量と20hPa月平均気温の相関
 —○—: 近似直線 (1968-1983年)
 —△—: 近似直線 (1984-1999年)

Fig. 65. Correlation between the monthly mean total ozone and monthly mean temperature at 20 hPa for December.

層圏オゾンの減少に伴い低温化する層がある一方で、その上層では強制下降流によって昇温する層があることを数値実験で示しているが、このように、オゾンの減少によって発生する力学的な変化は南半球においても概ね同様と考えられる。気象庁(1999)の1999年12月の南半球高度・緯度断面図によれば、南緯60度以南の下部成層圏50hPa以下では著しい気温負偏差となっている一方で、30hPa以上の高い層では著しい気温正偏差となっており、成層圏における温度の逆転が非常に大きくなっていった。下部成層圏において低温傾向が大きいのは100-70hPa付近の高度であり、1987年以降の20hPaのオゾン分圧には明瞭な増減の傾向は見られない。よって、1984年以降の20hPaの気温とオゾン全量との負相関は、オゾンホール発現以降の下部成層圏低温化とそれより上層側で生じた下降流による断熱昇温との関係を示すものではないかと考えられる。ここで述べたようなオゾン全量と気温の負相関や、経年的な高度に対する気温の変化率が負となる関係は1984年以降の15-30hPaに見られる。一方、オゾン全量が比較的多かった1983年以前にはこのような関係は見られなかった。また、オゾンの減少傾向が顕著な50-100hPaにおいては高度に対する気温の変化率が正となっており、気温の変化は主にオゾン分圧の変化に支配されている。

10.3.3. 成層圏突然昇温と極渦の経過

近年昭和基地上空100hPaでは極夜明けの昇温遅延が明瞭であり、極渦が遅い時期まで安定して存続していることの現れであることが指摘されている(気象庁, 1999)。図66は成層

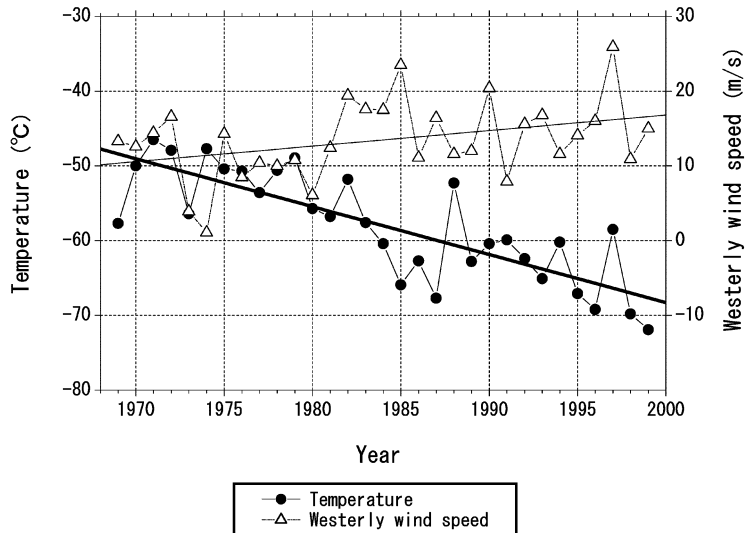


図 66 昭和基地上空100hPaにおける気温と西成分風の経年変化

—●—: 100hPa 気温の近似直線

—△—: 100hPa 西成分風の近似直線

Fig. 66. Time series of air temperature and westward component of wind at 100 hPa above Syowa Station.

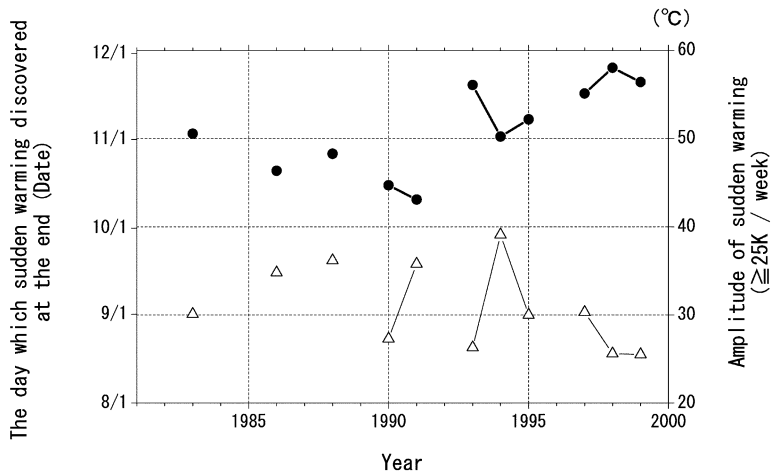


図 67 50 hPa 面における突然昇温 (≥25 度/一週間) の発生状況

- : 突然昇温の起日
- △—: 突然昇温の昇温量 (≥25 度/一週間)

Fig. 67. Occurrence of sudden warming (rising more than 25 degrees for a week) at 50 hPa.

圏の昇温時期にあたる 11 月の昭和基地上空 100 hPa における気温と西成分風の経年変化を示している。気温は低温化が明瞭であり、西成分風は強まる傾向が見られる。これは、成層圏における昇温の遅延と、それに伴って極渦（西風ジェット）が維持されていることの現れである。

昇温現象の中でも、特に極渦の崩壊に関連する現象として成層圏突然昇温があり、極域成層圏の大気循環に劇的な変化をもたらすことが知られている。昭和基地上空における 1982 年以降の突然昇温発生状況を、WMO の定める成層圏突然昇温警報（ストラトアラート）の通報基準「1 週間に 25 度以上の昇温」を目安に、50 hPa 面について調べたのが図 67 である。図には昇温量が通報基準を満たした各年について、最後に発現した突然昇温のデータをプロットしている。年々変動は大きいものの、発現が遅い時期にずれ込み、昇温量も小さくなる傾向が見られる。

10.3.4. エアロゾルゾンデ観測

南極成層圏におけるオゾン破壊メカニズムに大きく関与すると言われており、PSCs について、第 40 次隊の観測結果から考察する。

オゾンホール発現に関与する PSCs の観測を目的としたエアロゾルゾンデ観測を 6-9 月にかけて 4 回実施した（表 17）。このうち 6-7 月の極夜期には、ほぼ 10 日おきに 3 回の観測を行った。いずれの観測においても PSCs と考えられる粒子（半径 > 1.8 μm）の増加を検出している。この頃、地平線近くの空が異常に赤く染まる現象が連続しており、白く輝くほどのものは見られなかったがベール状、或いは筋状のような PSCs を毎日のように目視した。

図 36 にも示したように下部成層圏においては 6 月 6 日頃の高度 24 km 付近から気温 -80°C 以下の層が出現し始めていた。この低温層は下層まで日を追って拡大し、6 月 18 日には高度 15 km 以上の層で気温 -80°C 以下、高度 19 km 以上の層で気温 -85°C 以下となるなど冷却が進んでいた。その後、気温 -85°C 以下の層は 8 月下旬まで、 -80°C 以下の層は 9 月中旬まで下部成層圏に存在した。この期間中に実施した 4 回のエアロゾルゾンデ観測では、図 35 に示すとおりいずれの観測においても半径 $>1.8\mu\text{m}$ の巨大粒子を観測した。成層圏においてこのような巨大粒子が観測されることは、他の季節にはなかったことであり、PSCs の粒子を捉えたものと考えられる。巨大粒子が存在した高度範囲は 1–24 km、気温は概ね -75°C 以下であった。但し、最も多くの巨大粒子を観測した 7 月 11 日だけは対流圏界面付近の高度約 10 km、約 -68°C と気温の高い層でも巨大粒子が観測されており、6.4.1 節で述べたように成長して落下した粒子が対流圏界面付近に滞留していたのではないかと考えられる。また、冬期のエアロゾルゾンデ観測では、大径粒子が卓越した層や小径粒子が卓越した層が同時に複数観測されており、粒子の存在高度や発達程度は変化していた。この時期上空のオゾン、はまだ減少していない (図 12)。また、冬期のエアロゾルゾンデ観測によって 6–9 月の長期にわたって、PSCs と考えられる巨大粒子が成層圏に存在していたこともわかった (図 35)。

10.1 節で述べたとおり、極夜が終わり下部成層圏に蓄積された塩素分子に太陽光が照射されるようになると、光解離して塩素原子を発生し、その関与によりオゾン破壊が進むようになる。1999 年の極夜明けにおいて、オゾン全量の日代表値がオゾンホール目安である 220 m atm-cm 以下となった初日の 8 月 22 日を挟むオゾンゾンデ観測、8 月 21 日と 25 日のオゾン分圧を図 68 に示す。8 月 25 日のオゾン分圧は 21 日に比べ、明らかに下部成層圏で大きく低下していることが分かる。図 12 のオゾン分圧を見ると、8 月 25 日以後下部成層圏のオゾン

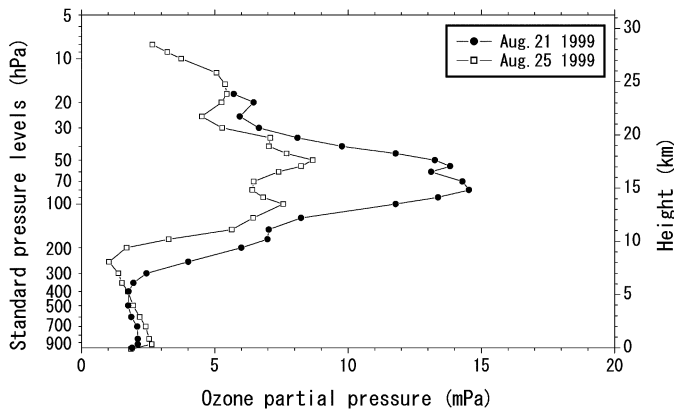


図 68 昭和基地における 1999 年 8 月 21 日と 8 月 25 日のオゾン分圧
Fig. 68. Ozone partial pressure on Aug. 21 and 25, 1999 at Syowa Station.

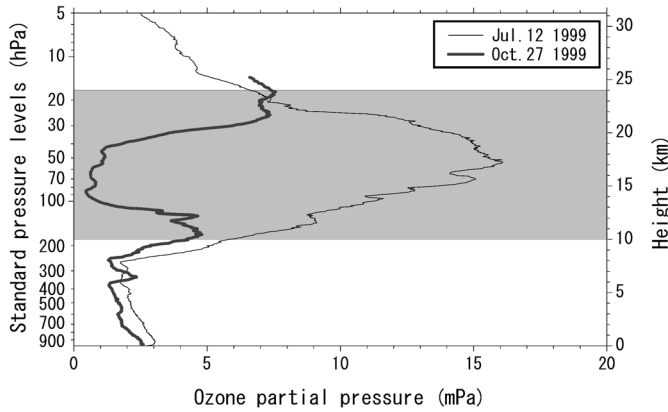


図 69 昭和基地における 1999 年 7 月 12 日と 10 月 27 日のオゾン分圧

■: 1999 年 7 月 11 日のエアロゾルゾンデ観測により PSCs の粒子が観測された高度

Fig. 69. Ozone partial pressure on July 12 and Oct. 25, 1999 at Syowa Station.

分圧は低下を続け、10月初めから11月初めまではオゾン分圧がおおむね 3 mPa 以下のきわめて低い値が、100 hPa 付近から 40 hPa 付近の広範な高度で継続して観測された。この高度範囲ではオゾンがほとんど破壊されていたと考えられる。

図 69 は、PSCs がオゾン破壊に関与する前後の上空のオゾン状態を調べるために、エアロゾルゾンデ観測によって大規模な PSCs (半径 $>1.8\mu\text{m}$) が観測された翌日の 7 月 12 日と、オゾンの破壊が進んだ 10 月 27 日のオゾン分圧を示している。図 12 によると、この時点ではオゾン分圧が低下するような変化はまだみられず、その後 8 月 21 日までオゾン分圧の低下は観測されなかった。これに対し 10 月 27 日の観測結果では、下部成層圏のオゾン分圧が激減している。これは、極夜期に PSCs 粒子表面の不均一反応で放出された塩素分子などが、極夜明けに光解離して活性化しオゾンを破壊するというシナリオに調和する結果である。ハッチングの部分は 7 月 11 日のエアロゾルゾンデ観測で PSCs とみられる粒子 (半径 $>1.8\mu\text{m}$) の増加が観測された高度範囲であるが、この範囲においてオゾン分圧の減少がみられ、PSCs の影響を間接的にうかがわせる。特に高度 15 km から 20 km での減少が著しく、ほぼ完全にオゾンが破壊されていたと考えられる。

10.3.5. オゾンホールと UV-B

5.3.3 節でオゾン全量と UV-B 強度との間には、高い相関があることを述べた。ここでは、オゾンホールの動向と UV-B 強度の関係を、上層大気の状態を含めて考察する。

図 70 に 1999 年 9 月～2000 年 1 月までの全天日射量、UV-B 強度、オゾン全量値及び 30、50 hPa の気温を示す。昭和基地は位置的にオゾンホールの周辺部にあたるため、オゾンホールの形状の影響を受けやすい。1999 年は 11 月上旬までオゾンホール内に昭和基地が位置していたため、図 70 の 30 hPa、50 hPa の気温及びオゾン全量は、低い値で推移している。その

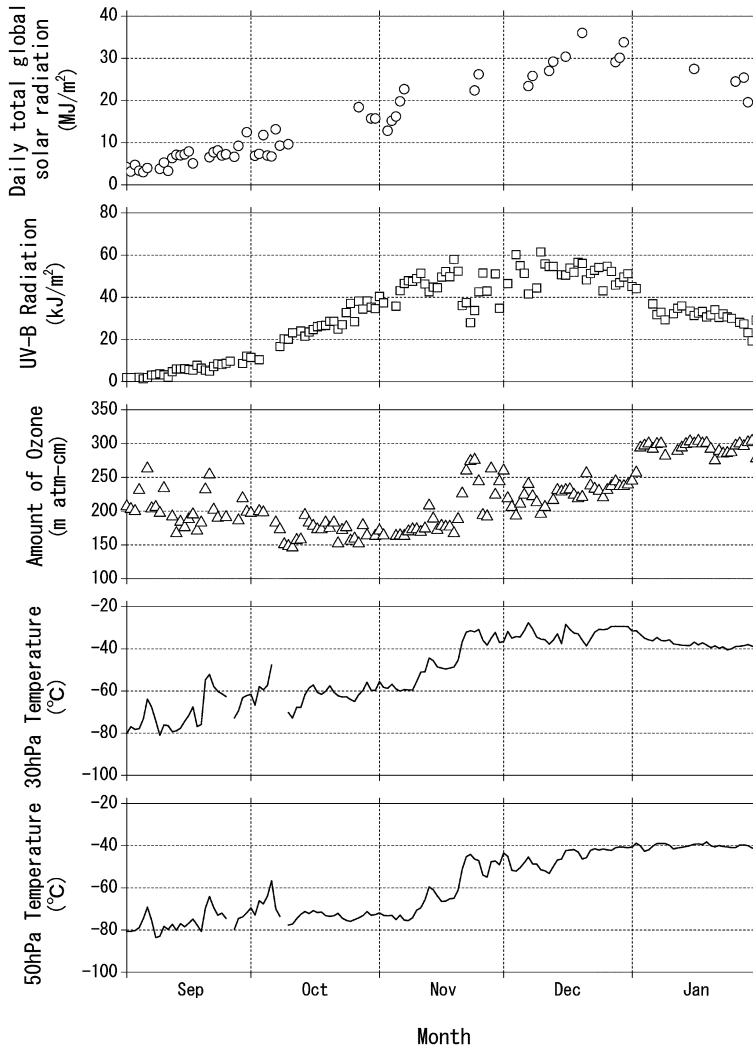


図 70 全日射量, UV-B 強度, オゾン全量と 30・50 hPa の気温との関係 (1999 年 9 月～2000 年 1 月)

Fig. 70. Time series of the amount of global solar radiation, UV-B strength, total ozone, 30 and 50 hPa air temperature (Sep. 1999-Jan. 2000).

後オゾンホールが解消に向かい, 11 月下旬から気温の上昇, オゾン全量値の上昇, 紫外線量の急減と大きな変動が見られた。この大きな日々変動の始まりとなったのは 11 月 21 日頃をピークとして発現した成層圏突然昇温である。図 4, 12 でもこの頃から 20-50 hPa で気温とオゾン分圧に上昇が見られる。特に 12 月に入ってから, オゾン量の回復に伴って UV-B は夏至を待たずに減少傾向に転じている。しかし, その後, 30 hPa, 50 hPa の気温はほぼ変らぬ値で推移し, オゾン全量値と紫外線量は一旦減少・増加の傾向を見せ, そのままの状態に 12

月下旬まで推移している。これは、昭和基地上空が再びオゾンホール周辺の周辺部に入ったためである。

10.4. 1999年の成層圏オゾン減少と低温について

(1) 1999年の特徴

1999年に第40次隊が観測した以下の事実は、ここまで述べた成層圏オゾン減少と昇温遅延の関係を強く反映した結果であると考えられる。

- ・3.3節で述べたように、11-12月の50-100hPaを中心とした下部成層圏における月平均気温が過去最も低かった。
- ・11-12月の下部成層圏における月平均西成分風が平年より明らかに強まっており(図5)、極渦の維持を示唆している。夏期の極域成層圏ではオゾンの発熱によって高温域となり東西成分風は負(東風)であることが知られている。昭和基地における1969年以降の累年月統計(03LT)によれば12月の昭和基地上空20hPaでも月平均東西成分風は東成分が卓越してきた。しかし、1977年頃から経年的に東成分風が弱まる傾向があり、1998年からは遂に西成分風が卓越して1999年も継続していることが分かった。

(2) まとめ

昭和基地上空におけるオゾン減少と下部成層圏低温化の関連について述べ、いずれも回復時期が遅れる傾向にあることを示した。問題はこれらの循環関係である。

南極上空のオゾン減少は、人類起源の塩素含有ガスが地球規模の大気の循環で極域に集められ、極夜期に南極下部成層圏において、極渦などの影響により低温となった時に形成されるPSCsの関与により塩素ガスが放出、蓄積され、それが極夜明けに太陽光の照射により光解離し、触媒となってオゾンを連続的に破壊する現象である。ひとたびオゾンが大量に破壊されると、主たる熱源を失った下部成層圏では極夜明けの昇温が遅れ、低温の大気が強い極渦を維持することによって、結果的に低緯度側からのオゾン輸送が妨げられる負のフィードバック効果が考えられる。

経年的にオゾン全量と下部成層圏の気温に高い相関があることを述べたが、少なくとも第40次隊では春の下部成層圏で記録的に低い月平均気温を観測していた。この低温層では本来豊富に存在していたはずのオゾン分圧が激減しており、その高度範囲は極夜期にPSCsと考えられる巨大粒子が観測されていた高度であったことが分かった。これらの観測結果は、これまでに蓄積されたデータによって明らかになったオゾンホールの長期化や、下部成層圏の経年的な昇温遅延傾向を裏付けるものである。昇温の遅延によってオゾンホールを取り囲む極渦が維持され、極渦の崩壊と関係する成層圏突然昇温はピークの発現が11月21日頃と遅く小規模であった。また、12月のオゾンホール日別最大面積はほとんどが1999年に更新され、昭和基地がオゾンホールから脱した日は過去最も遅かった。これらは、全てオゾンの減

少に始まる一連の循環関係に繋がる、或いは派生した現象である。

これまで述べた循環関係が今後どのように変化し、大気にどのような力学的変化を与えるのか、観測の継続と分析が必要である。

謝 辞

第40次観測隊の気象定常観測を遂行するにあたり、観測上の技術的援助・助言をいただいた国立極地研究所の白石和行観測隊長ほか第40次観測隊員の皆様、南極観測事務室、高層気象台ほか気象庁の皆様、並びに船上観測でご支援をいただいた南極観測船「しらせ」の方々に感謝いたします。また、地上気象観測に関して金戸進東京航空地方気象台観測課長、日射・放射観測資料をまとめるにあたり、助言・ご指導をいただいた高層気象台の廣瀬保雄主任研究官、柴田誠司研究官、内陸旅行での技術的指導及びルート図を気象部門報告用として作成いただいた国立極地研究所の古川晶雄氏にお礼申し上げます。

この報告をまとめるにあたり、気象庁の野村保夫南極観測事務室長、第39次観測隊気象部門の方にご指導をいただき、厚くお礼を申し上げます。

文 献

- 青木周司(1997): 昭和基地及び「しらせ」船上における地上オゾン濃度の連続観測. 南極資料, **41**, 231-247.
- 江崎雄治・林 政彦・山内 恭(1998): 昭和基地における地上オゾン急減現象(SOD)とそのバックトラジェクトリー解析—1997年8月28-29日のSODの事例解析—. 第21回極域気水圏シンポジウムプログラム・講演要旨. 東京, 国立極地研究所, 129-130.
- 江崎雄治・栗田邦明・松島 功・木津暢彦・中嶋哲二・金戸 進(2000): 第38次南極地域観測隊気象部門報告 1997. 南極資料, **44**, 125-204.
- 藤原玄夫・林 政彦・安井元昭(1999): バルーンを用いた成層圏エーロゾルの観測研究. 科学技術振興調整費「成層圏の変動とその気候に及ぼす影響に関する国際共同研究」第I期平成7年度～平成9年度成果報告書, 科学技術庁研究開発局.
- Herber, A., Thomason, L.W., Dethloff, K., Viterbo, P., Radionov, V.F. and Leiterer, U. (1996): Volcanic perturbation of the atmosphere in both polar region: 1991-1994. *J. Geophys. Res.*, **101**, 3921-3928.
- 廣岡俊彦・伊藤久徳・三好勉信・川平浩二(2000): 成層圏オゾンと大気大循環の変動に関する研究. 科学研究費補助金「特定領域研究B」成層圏力学過程とオゾンの変動およびその気候への影響.
- 稲川 譲・山本義勝・田口雄二・阿保敏広・居島 修(1997): 第35次南極地域観測隊気象部門報告 1994. 南極資料, **41**, 549-588.
- 石田恭市・鈴木剛彦・酒井重典(1971): 第10次南極地域観測隊気象部門報告. 南極資料, **39**, 19-31.
- Japan Meteorological Agency (2000): Antarctic Meteorological Data, **40** (CD-ROM).
- 金戸 進(1997): ピナツポ噴火と昭和の気候. 南極資料, **41**, 285-290.
- 気象庁(1990a): 地上気象観測統計指針. 東京, 124 p.
- 気象庁(1990b): 国際気象通報式(第8版). 東京, 1-65, 497.
- 気象庁(1991): オゾン観測指針. オゾン全量反転観測編. 東京, 91 p.
- 気象庁(1993a): 地上気象観測指針. 東京, 167 p.
- 気象庁(1993b): 紫外域日射観測指針. 東京, 83 p.
- 気象庁(1995): 高層気象観測指針. 東京, 5-3, 5-6, 128.
- 気象庁(1997): オゾン観測指針. オゾンゾンデ観測編. 東京, 60 p.
- 気象庁(1999): 近年における世界の異常気象と気候変動～その実態と見通し～(IV)(各論). 東京, 92-106, 219-230.

- 岸 隆幸・安田毅彦・吹田俊明・堀川和久・大河原望 (2002): 第 39 次南極地域観測隊気象部門報告 1998. 南極資料, **46**, 318–376.
- 国立極地研究所編 (1988): 南極の科学 3. 気象. 東京, 古今書院, 109–119.
- 松原和正・小城良友・岸 隆幸・五十嵐寛・東島圭志郎 (1995): 第 33 次南極地域観測隊気象部門報告 1992. 南極資料, **39**, 264–302.
- 宮本仁美・中村雅道・成田 修・横田 歩・森永裕幸 (1999): 第 37 次南極地域観測隊気象部門報告 1996. 南極資料, **43**, 477–533.
- 佐藤 隆・吉見英史・竹川元章・宮内誠司・中村辰男 (1998): 第 36 次南極地域観測隊気象部門報告 1995. 南極資料, **43**, 96–161.
- 柴田誠司・伊藤真人・能登美之・上野丈夫・岡本利次 (2000): 全天型紫外域日射計の感度変化と測定精度. 高層気象台彙報, **60**, 17–24.
- Young, A.T. (1981): On the Raylight-scattering optical depth of atmosphere. *J. Appl. Meteorol.*, **20**, 328–330.