

—報告—  
Report

## 1997年春季に南極昭和基地において発現した地上オゾン急減現象

江崎雄治<sup>1\*</sup>・平沢尚彦<sup>2,3</sup>・林 政彦<sup>4</sup>・山内 恭<sup>2,3</sup>

Surface ozone depletion at Syowa Station, Antarctica in 1997 spring season

Yuji Esaki<sup>1\*</sup>, Naohiko Hirasawa<sup>2,3</sup>, Masahiko Hayashi<sup>4</sup>  
and Takashi Yamanouchi<sup>2,3</sup>

(2010年2月19日受付; 2010年4月8日受理)

**Abstract:** Surface ozone concentration decreased dramatically from 28 to 29 August 1997 at Syowa Station, Antarctica. Aerosol concentrations with diameters of 0.01–5.0  $\mu\text{m}$  increased to several times as much as background concentrations, accompanied with the surface ozone depletion. Air mass above Syowa Station in SOD events had high humidity and low ozone concentration. The SOD also accompanied change of wind direction, and the results of backward trajectory analysis suggested that this air mass was transported from the westerly sea ice area of a cold front within several days. These results suggested that the SOD on 28/29 August 1997 at Syowa Station occurred by transport of the air mass.

**要旨:** 1997年8月に南極昭和基地において発現した地上オゾン急減現象(以下, SOD)は約1日継続した。地上オゾン濃度は, SODの前後では30 ppbv程度であったものが, SOD期間中には3 ppbvから0.1 ppbvにまで減少した。オゾン濃度が低下している間は, 地上付近のエアロゾルの全ての粒径(0.01  $\mu\text{m}$ 以上~5.0  $\mu\text{m}$ 以上)において, 数濃度が一桁程度高い状態が維持されていた。SODの開始と終了時期のオゾン濃度とエアロゾル濃度の時間変化は急激で, SODに関連した気団の境界が明瞭であったと考えられる。SOD期間の昭和基地上空では, 3000 m付近まで湿度の高い層が観測された。SOD終了直後に実施したオゾンゾンデ観測では, 高度3000 m付近までオゾン濃度の低い空気層が観測された。SODは, トラフに伴う前線が昭和基地を通過後に発現した。米国NOAAの衛星雲画像及び空気塊のバックワードトラジェクト

<sup>1</sup> 気象庁, Japan Meteorological Agency, Otemachi 1-chome, Chiyoda-ku, Tokyo 100-8122.

<sup>2</sup> 情報・システム研究機構国立極地研究所, National Institute of Polar Research, Research Organization of Information and Systems, Midori-cho 10-3, Tachikawa, Tokyo 190-8518.

<sup>3</sup> 総合研究大学院大学複合科学研究所極域科学専攻, Department of Polar Science, School of Multidisciplinary Sciences, The Graduate University for Advanced Studies (SOKENDAI), Midori-cho 10-3, Tachikawa, Tokyo 190-8518.

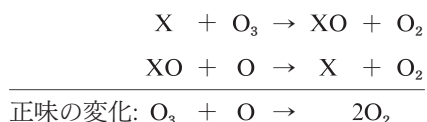
<sup>4</sup> 福岡大学理学部地球圏科学科, Department of Earth System Science, Faculty of Science, Fukuoka University, 8-19-1 Nanakuma, Jonan-ku, Fukuoka 814-0180.

\* Corresponding author. E-mail: yesaki@met.kishou.go.jp

リー解析の結果、SOD をもたらした大気は、ウェッデル海域の地上付近の大気が東方へ輸送され、前線の西側に位置していたものと考えられる。1997-2008 年の 12 年間に発現した 28 回の SOD を抽出して比較した結果、本稿で対象とした 1997 年 8 月 28-29 日の SOD が、1997-2008 年の内で、その継続期間及び期間中のオゾン最低濃度において、他の SOD と比較して最も顕著なものであったことがわかった。

## 1. はじめに

南極・北極の高緯度地域では、極夜が明けた春季（7-10 月）に地上付近のオゾン濃度が減少し、低オゾン濃度の状態が数日間継続することがある。オゾン濃度の減少が急激であることから、地上オゾン急減現象（SOD）と呼ばれる。北極において実施された Polar Sunrise Experiment 1992 (Barrie *et al.*, 1994) の解析からは、この現象は海塩起源の物質とオゾンが光化学反応することにより起こると議論されている。また、大気中に存在する微量の活性種が関与して起こるオゾンの分解反応があり、次のような触媒反応サイクルによってオゾンが連鎖的に破壊される。



ここで、X は H, OH, NO, Cl 又は Br である。

この内、臭素酸化物 (BrOx と総称。Br 及び BrO) による触媒反応サイクルは BrOx サイクルと呼ばれ、極域の境界層におけるオゾン分解に中心的な役割を担っている。臭素の光化学反応、臭素の発生源や輸送について、Simpson *et al.* (2007) が詳しく報告している。Jones *et al.* (2009) によれば、2007 年 10 月 9-10 日に南極 Halley 基地で発現した SOD は、ウェッデル海上の境界層大気中での Br から BrO への触媒反応によりオゾンが消失し、その大気が総観規模擾乱に伴って基地まで輸送されたことが原因であるとしている。昭和基地 (69.0°S, 39.6°E) や Neumayer 基地 (70.7°S, 08.3°W) においても、極夜明けの春季に SOD が起こっていることが報告されている (Wessel *et al.*, 1998a; 青木, 1997; 江崎ほか, 2000)。昭和基地の SOD について、エアロゾル観測値との比較や、総観規模大気循環による SOD をもたらした大気の輸送に関する議論はほとんどない。そこで本研究では、1997 年 8 月 28-29 日にかけて昭和基地において発現した SOD について、エアロゾル観測から得られた特徴を明らかにし、高層気象観測データ、トラジェクトリー解析等を用いて総観規模大気循環と SOD をもたらした大気の輸送を議論した。本報告では、その主要な論点をまとめるとともに、1997-2008 年に昭和基地で発現した SOD の継続期間と最低濃度の特徴を明らかにする。

## 2. 観 測

図1に、昭和基地の位置と各観測装置の配置を示す。昭和基地(69.0°S, 39.6°E)は、リュツォ・ホルム湾内の南極大陸から約4 km離れた東オングル島に位置している。地上オゾン濃度観測は1988年2月から図1①の地点で、地上エアロゾル濃度観測は1996年2月から図1②の地点でそれぞれ実施している。地上付近のオゾン濃度及びエアロゾル濃度の各観測装置の位置関係は、地上付近のオゾン濃度を観測している地点(①)から見て、エアロゾル濃度の観測地点(②)は南東方向、直線距離で約300 mである。建物の配置から、風向が北東の場合には、汚染のないバックグラウンドレベルの大气試料の測定が可能である。なお、昭和基地ではカタバ風の影響で北東風が卓越している。地上気象観測、高層気象観測及びオゾンゾンデ観測は図1③の地点において実施している。

昭和基地時間(LT: Local Time)と世界標準時(UT)との時差は、+3時間であり(LT=UT+3h)、本報告では昭和基地時間と世界標準時を併記する。

表1に、地上オゾン濃度とエアロゾル濃度の連続観測に用いた観測装置の仕様を示す。オゾン濃度は、紫外線吸収方式のオゾン濃度計により12秒ごとの瞬時値を計測した。

大気取り入れ口はステンレス製で、観測装置を設置した建物の北東側の屋根から1 m 上の位置(地上約5 m)になるよう設置した。サンプルエアは、取り入れ口から長さ3 mのテフロンチューブ(内径6 mm, 外径8 mm)で室内のドレインポットに導き、そこからオゾン濃度計までは、中間に除塵用のテフロンコーティングされたフィルター(外径47 mm, 0.3 μm メッシュ)を入れて約1 mのテフロンチューブ(内径4 mm, 外径6 mm)で導入した。観測に使用したオゾン濃度計は、1年間の連続使用の前後に日本国内で検定を行い、こ

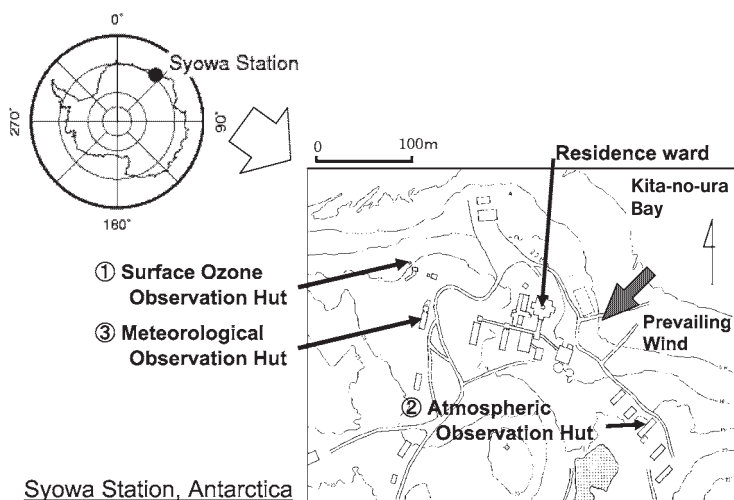


図1 昭和基地の位置と昭和基地地域における観測装置の配置  
Fig. 1. Location of instruments in the area of Syowa Station.

表 1 各観測装置の主な仕様  
Table 1. Specifications of instruments.

測定項目	オゾン濃度	エアロゾル濃度	
測定原理	紫外線吸収式 Dasibi type	光散乱式粒子計数計 パーティクルカウンター	凝結核数測定装置
装置形式	MODEL 1100 Dylec Co., Ltd.	TD100, TD500S Sigma Tech Co., Ltd.	Model 3010 TSI Co., Ltd.
測定範囲	0-200 ppbv	TD100: 直径>0.3, 0.5, 1.0, 2.0, 3.0, 5.0 $\mu\text{m}$ TD500S: 直径>0.07, 0.10, 0.15, 0.20, 0.25, 0.30 $\mu\text{m}$ 屈折率 ( $m=1.59$ ), 球形粒子を仮定して求めた 光学的等価粒径	直径>0.01 $\mu\text{m}$
サンプル流量	1.5 L/min	TD100: 1 L/min TD500S: 0.5 L/min	1 L/min
設置場所	旧水素ガス発生器室 (第1図①)	観測棟 (第1図②)	
大気取入れ口	地上約 5 m	地上約 5 m	

の結果に基づき観測値のドリフト補正を行った。オゾン濃度の1分値の作成にあたっては、過去10分間のオゾン濃度の標準偏差を計算し、標準偏差が0.5 ppbvを超えるデータを基地活動等による汚染データとして排除した。

直径0.01  $\mu\text{m}$ 以上の総粒子数濃度は、凝結核数測定装置により1分積算値として計測した。また、粒径分布を2種類の光散乱式粒子計数装置(パーティクルカウンター)により0.07  $\mu\text{m}$ から5.0  $\mu\text{m}$ まで12の閾粒径に対する1分積算値として計測した。大気取り入れ口は観測棟の北西側壁面の北寄りに、壁から50 cm離して地上約5 mの高さに設置した。サンプルエアは、取り入れ口から長さ3 mのユニチューブ(内径6 mm, 外径12 mm)で観測棟内に導き、約1 mのユニチューブで分岐してそれぞれのカウンターに導入した。エアロゾル濃度1分値は、過去10分間のエアロゾル濃度の変動係数を計算し、変動計数が10%を超えるデータを汚染データとして除外した。なお、エアロゾル以外の主なデータは気象庁(1998)にまとめられている。

### 3. 昭和基地における地上オゾン濃度の特徴と地上オゾン濃度急減現象

図2に、昭和基地における1997年の地上オゾン濃度日平均値の年変化を示す。8月末に見られる地上オゾンの低濃度は、本報告で対象とするSODに関連する。

昭和基地における地上オゾン濃度は、夏季に濃度が小さく、冬季に大きくなる(例えば、青木(1997))。Murayama *et al.* (1992)はこの季節変動について、中緯度から対流圏上層を通過して運ばれる成層圏起源のオゾンの影響を指摘している。年間の最大値と最小値の差(1997年の月平均値で約17 ppbv)は、日本国内の気象庁観測所(綾里: 岩手県大船渡市, 2007年の月平均値で約22 ppbv; 南鳥島: 東京都小笠原村, 同約33 ppbv; 与那国島: 沖縄県八重山

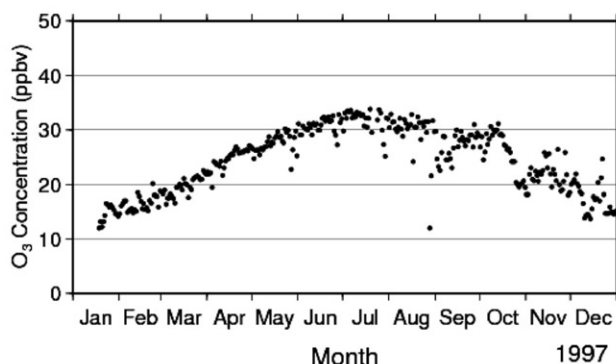


図2 昭和基地における1997年の地上オゾン濃度日平均値の季節変化

Fig. 2. Seasonal variation of daily mean surface ozone concentration at Syowa Station in 1997.

郡与那国島町, 同約 32 ppbv) におけるどの値よりも小さい (気象庁, 2009)。また, 青木 (1997) は日々の濃度のばらつきについて, 2-6 月にかけての濃度上昇期と比較して 10-1 月までの濃度下降期の方がばらつきが大きいことを指摘している。昭和基地の地上オゾン濃度の 1 時間平均値のばらつきは, 南極の各基地 (Halley, McMurdo, Neumeyer, Sanae, South Pole) と比較して大きいと報告されている (Helmig *et al.* (2007))。

#### 4. 地上オゾン急減現象前後の地上付近のオゾン濃度とエアロゾル濃度の関係

図3に, 1997年8月27-30日の地上付近のオゾン濃度とエアロゾル濃度の経時変化を示す。8月30日 1056 LT (0756 UT)~2016 LT (1716 UT) のエアロゾルデータ欠損は, 航空機によるエアロゾル濃度の鉛直分布観測 (Yamanouchi *et al.*, 1999) のために観測装置を使用したことによる。8月28日の 0722 LT (0422 UT) に約 32 ppbv であったオゾン濃度は, 0729 LT (0429 UT) までの約 7 分で 3 ppbv 以下に減少し, 29日の 0548 LT (0248 LT)~0709 LT (0409 UT) の約 80 分で約 28 ppbv にまで回復した。これを SOD 期間(約 22 時間 30 分)とする。回復後も 25 ppbv 程度を中心とした変動が観測され, 29日 2100 LT (1800 UT) 頃には 30 ppbv 以上の状態に戻った。

オゾン濃度が低下している間は, 全ての粒径 (0.01  $\mu\text{m}$  以上~5.0  $\mu\text{m}$  以上) において, 数濃度が一桁程度高い状態が維持されていた。そして, オゾン濃度が通常値に戻るのとほぼ同期してエアロゾル濃度も減少した。

なお, SOD 発現時のエアロゾル濃度は, 風の変化による基地汚染を受けた空気を計測したことにより異常値となり, 削除されている。また, オゾン濃度については観測地点の違いにより, この時刻には汚染の影響を受けていない。

SOD 期間中のエアロゾル濃度は, 時間変動が小さく徐々に減少した。

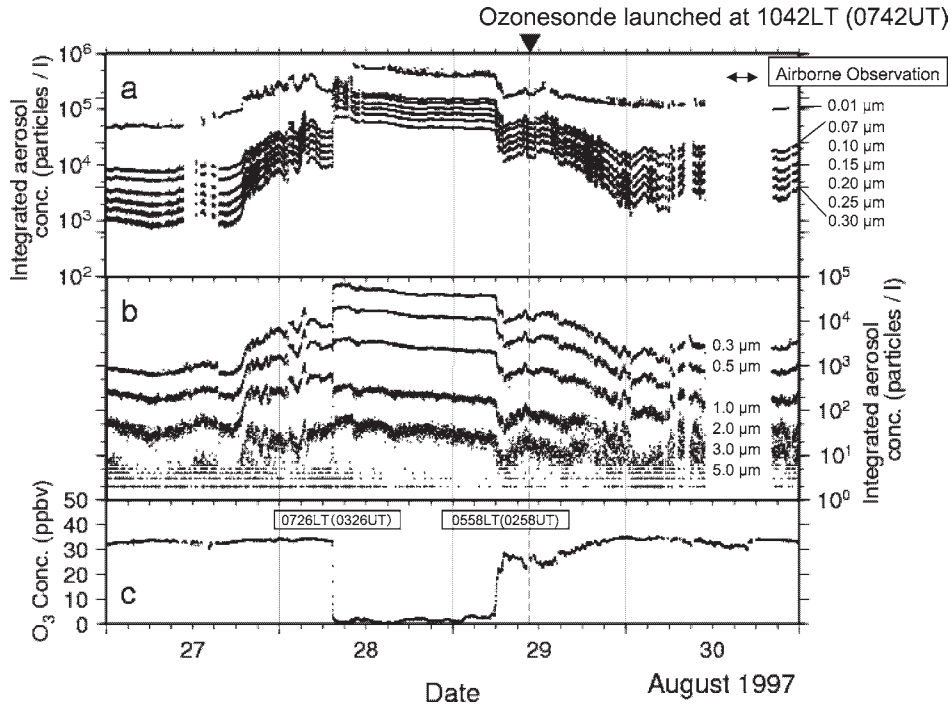


図3 昭和基地における地上オゾン急減現象時のエアロゾル濃度の経時変化 (エアロゾル濃度 1 分値 ((a) 直径:  $0.01 \mu\text{m}$  以上 $\sim 0.30 \mu\text{m}$  以上, (b) 直径:  $0.3 \mu\text{m}$  以上 $\sim 5.0 \mu\text{m}$  以上) 及び (c) 地上オゾン濃度 1 分値). 黒三角印はオゾンゾンデ観測実施時期を示す. 両矢印は航空機によるエアロゾル観測実施時期を示す.

Fig. 3. Time series of number concentration of surface aerosol (a) in the ranges from larger than  $0.01 \mu\text{m}$  in the diameter to more than  $0.3 \mu\text{m}$ , and (b) in those from  $0.3 \mu\text{m}$  in the diameter to larger than  $5.0 \mu\text{m}$ ; and (c) time series of surface ozone concentration (ppbv) during and around the SOD event at Syowa Station.

### 5. 地上オゾン急減現象時の気象の変化とオゾンゾンデ観測結果

図4に, 8月27-30日の地上気象の時系列をオゾン濃度の時系列とともに示す. 27-28日にかけて昭和基地付近は東進するトラフの影響を受け, 地上気圧は下がった. 地上風が北東から北西に変化し, 風速も  $10 \text{ m/s}$  以下に弱まった28日0726 LT (0426 UT) にSODが発現し, その後29日0600 LT (0300 UT) 前に約  $2 \text{ m/s}$  であった北東風が  $5 \text{ m/s}$  を越えて強まるにつれて, オゾンの濃度は徐々に増加していった. また, SOD発現・終了時において, 気温の低下は急であり, これに対して上昇は緩やかであった.

図5aにSOD終了直後の8月29日の1042 LT (0742 UT) に行った, オゾンゾンデ観測によるオゾン濃度 (体積混合比による) と, 8月の平年値 (1971-2000年) の鉛直分布を示す. 最下端は地上オゾン濃度の観測結果を用いている. SOD期間の日中は, 前半に弱い雪が降っており (0740 LT (0440 UT) $\sim$ 1740 LT (1440 UT)), その後も曇天であったため, 昭和基地で使っていたKC96型オゾンゾンデ (明星電気製) の観測値の補正に必要な, オゾ

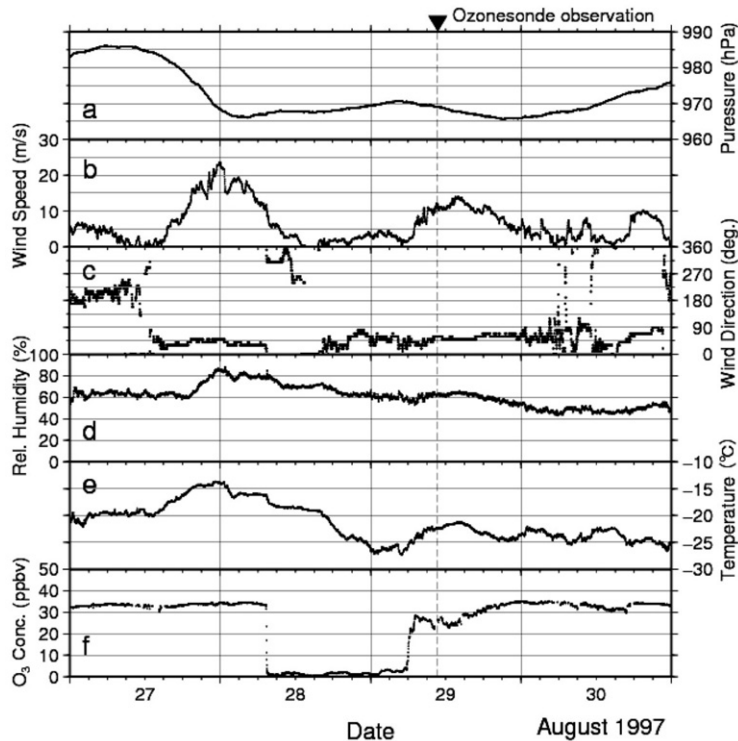


図4 昭和基地における地上オゾン急減現象時の地上気象1分値データ((a) 気圧, (b) 風速, (c) 風向, (d) 相対湿度及び (e) 気温)と (f) 地上オゾン濃度1分値データの変化。黒三角印はオゾンゾンデ観測実施時期を示す。

Fig. 4. Time series of (a) sea level pressure (hPa), (b) wind speed (m/s), (c) wind direction (degree), (d) relative humidity (%), (e) temperature ( $^{\circ}$ C), and (f) surface ozone concentration (ppbv) during and around the SOD event at Syowa Station.

ン全量観測ができなかった。8月29日には地上から約1100 m (約830 hPa) の高度までオゾン濃度は減少し、そこで極小となった。この高度では、平年値(約50 ppbv)よりも大きく低下していた(5.7 ppbv)。SODが終了した後も、オゾン濃度の少ない空気塊が昭和基地上空に存在していたことがわかる。約7000 m (約350 hPa) 以下の高度まで、オゾン濃度は平年値より少なかった。江崎ほか(2007)が2003年8月に昭和基地で行ったSOD期間中のオゾンゾンデ観測の結果によると、地上からオゾンの濃度は増加を続け、約1500 m (約800 hPa) の高度で平年値とほぼ一致している。この違いは、1997年がSODの終了後のオゾンゾンデ観測であったこと、2003年がオゾン濃度の減少量・継続時間共に小規模であったことによると考えられている。Wessel *et al.* (1998b) が解析したNeumayer基地におけるSOD期間中のオゾンゾンデ観測結果によれば、オゾンの減少層の上端(約1300 m及び約2500 m)で気温の逆転が見られ、オゾンの減少層の相対湿度は60-70%と高いことが多いと報告されている。

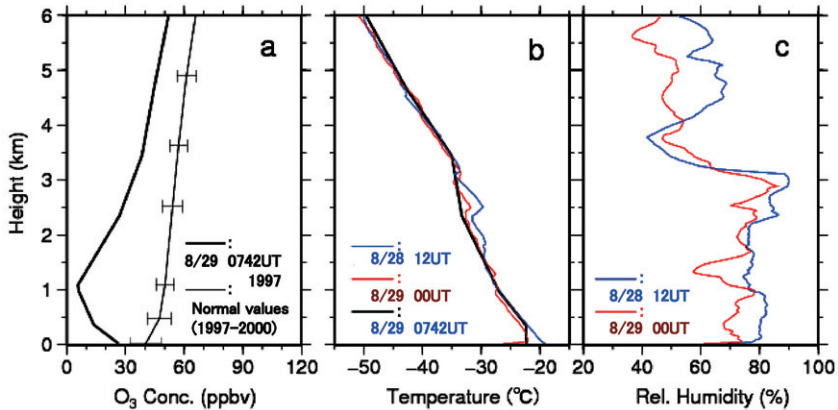


図5 昭和基地における地上オゾン急減現象の終了直後に実施したオゾンゾンデ観測による (a) オゾン濃度の高度分布及び地上オゾン急減現象期間における高層気象観測結果 ((b) 気温及び (c) 相対湿度). 図5aにおいて, 黒太実線が8月29日1042 LT (0742 UT) 飛揚オゾンゾンデ観測データ, 黒細実線がオゾンゾンデ観測平年値 (1971-2000年), 横線がその標準偏差をそれぞれ示す. 図5b及び図5cにおいて, 黒太実線が8月29日1042 LT (0742 UT) 飛揚オゾンゾンデ観測データ(気温のみ), 青細実線が28日15 LT (12 UT), 赤細実線が29日03 LT (00 UT) の高層気象観測結果を示す.

Fig. 5. Vertical profiles of (a) ozone concentration (ppbv) obtained ozonesonde observations, (b) upper air temperature, and (c) relative humidity around the time of SOD event at Syowa Station.

一方, SODによるオゾン濃度減少が「各高度のオゾン濃度平年値の標準偏差の3倍以上オゾン濃度が低い場合」と定義すると, オゾンが減少した空気層の上端高度は約3500 mとなり, Neumayer基地における結果よりもやや高度が高い結果となった.

図5b(気温)及び図5c(相対湿度)にSOD期間中の28日1500 LT (1200 UT)及び29日0300 LT (0000 UT)に実施したレーウィンゾンデ, 及び29日1042 LT (0742 UT)に実施したオゾンゾンデ観測による気温観測結果をそれぞれ示す. 高度3000 m付近(約640 hPa)を境に気温減率が異なり, 下層側では相対湿度が高い. 高度約2300 m(約700 hPa)と約3000 mに気温逆転層が観測されていることから, この付近に前線面があったと考えられる. SODをもたらした大気は寒冷前線の西側にあつて, 高度約3000 mより下層の大気であったと考えている. 高度約3000 mで気温減率の異なる特徴は, SOD回復後の29日1042 LT (0742 UT)でも残っていた.

## 6. SODに関連した大気の総観規模大気循環による輸送

図6に, 8月27日1200 UT~29日1200 UTの500 hPa高度場を示す. 27日1200 UTに経度0度付近にあったトラフ(図中のT1:ここではトラフ-T1と記す.)が東進し, SODの開始時期(28日0426 UT)を挟む28日0000 UTと1200 UTの間に昭和基地付近(図中の●)を通過した. 前章で示した, 昭和基地の地上気象に見られた風速増加, 風向の転向, 気温



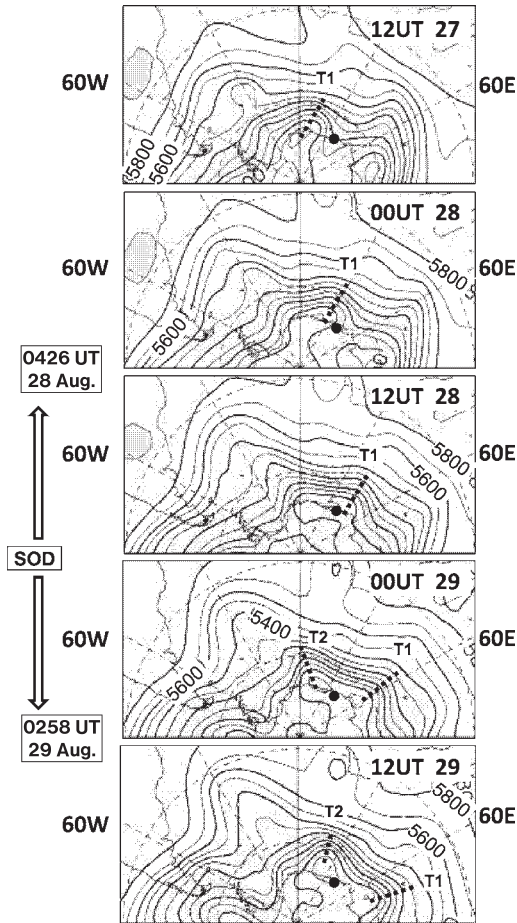


図6 1997年8月27日12 UT~29日12 UTの12時間ごとの昭和基地周辺の500 hPa高度場 (ECMWF (European Center for Middle-range Weather Forecast) の40年再解析データ (緯度・経度2.5度格子))。東進するトラフの位置をT1及びT2で示す。昭和基地付近を黒丸で示す。

Fig. 6. Distributions of geopotential height on 500 hPa from 27th till 29th August 1997 around Syowa Station, derived from ERA-40 (ECMWF 40-year reanalysis, coordinated by every 2.5 degrees in latitude and longitude). T1 and T2 indicate locations of eastward propagating trough lines. A black closed circle indicates the location of Syowa Station.

降下は、トラフ-T1の通過と対応していたと考えられる。SODはこれらの地上気象の変化と同時に開始していた。

29日0000 UTには、トラフ-T1とトラフ-T2の間のリッジが昭和基地に接近し、29日1200 UTには昭和基地の東方に抜けていた。SODが回復した29日0249 UTはこの間であり、SODをもたらしした総観規模の寒気域が昭和基地の東方に抜けきった時期と対応している。

SOD をもたらした大気の由来を考察するために、SOD 発現前から発現後を含めて昭和基地付近に到達する大気の輸送経路を、3次元のバックワードトラジェクトリーモデル (Tomikawa and Sato, 2005) により解析した。用いたデータは緯度・経度 2.5 度格子で表現された ERA-40 の風速 3 成分 (東西成分, 南北成分, 鉛直 P 速度) である。なお、客観解析データが表現できる大陸の縁辺部の地形を考慮し、トラジェクトリーの起点を実際の昭和基地の緯度・経度から北西方向に最も近い ( $37.5^{\circ}\text{E}$ ,  $67.5^{\circ}\text{E}$ ) とした (当客観解析データでは昭和基地の位置は標高約 700 m, 今回の基点は標高約 80 m に相当する)。

図 7 に、SOD 期間中とその前後に  $37.5^{\circ}\text{E}$ ,  $67.5^{\circ}\text{E}$  (図中の□) の高度 500 m に到達する大気の水平経路を示す。SOD 前 (27 日 1800 UT) の大気は数日前から昭和基地の北西域の高度 500 m 以下にあって、上昇しながら南東に移動してきた。それに対して、SOD 期間中 (28 日 1500 UT) の大気はウェッデル海付近から東進してきた。ウェッデル海域では高度 100 m 以下と解析されており、この海域の海面近くの大気が多く混合されていたと考えられる。およそ  $30^{\circ}\text{E}$  以西では風速 15-20 m/s 程度で比較的速い速度で輸送された。この速い風速は、海洋・海氷面から大気へのエアロゾル等の物質の供給を促進させただろう。

SOD 回復後の 29 日 1200 UT の大気は、SOD 期間中とは異なり北東方向から到達しているが、その起源は SOD 期間中の大気と同様に、西方のウェッデル海方面から輸送されてきた。30 日 0000 UT の大気は、それまでとは全く異なり、南極大陸上を通過して東方から輸送されていた。

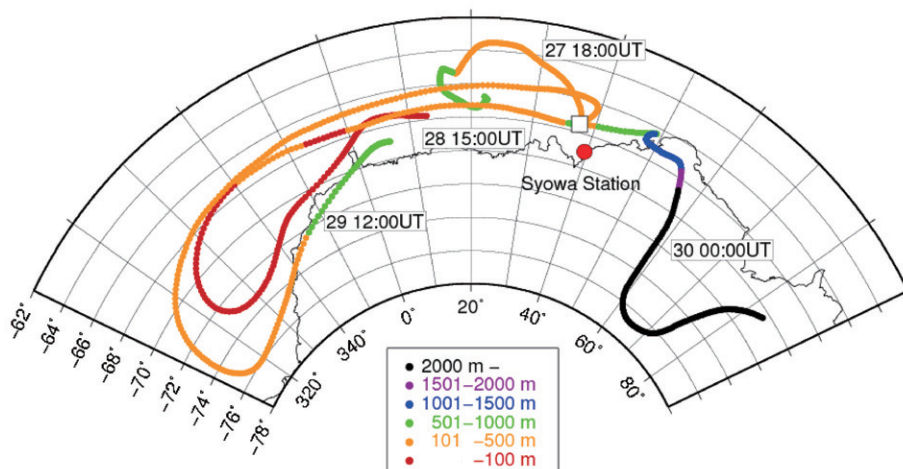


図 7 SOD 前後に  $37.5^{\circ}\text{E}$ ,  $67.5^{\circ}\text{E}$  (□) の高度 500 m に到達する大気のバックワードトラジェクトリー解析結果。赤丸は昭和基地の位置を示す。

Fig. 7. Backward trajectories from  $37.5^{\circ}\text{E}$ ,  $67.5^{\circ}\text{E}$  and 500 m height above sea level (a.s.l.) around the time of SOD event. A red closed circle indicates the location of Syowa Station.

上記の各大気の輸送経路と、総観規模の大気循環システムとの関係を明らかにするため、図8にNOAA衛星の赤外画像上にトラジェクトリー解析により求めた大気の位置を重ねて示す。27日1416 UTの赤外画像で昭和基地付近に南北に伸びる雲域は、トラフ-T1に関連した前線に伴って形成されていた。SOD期間中の大気は、この雲域の西側の寒気域に対応する。SOD前の大気はこの雲域付近にあって、ERA-40(全球客観解析データ)では表せない前線に伴う、小さなスケールの流れの影響をそこで強く受けたことを示唆しており、移動する前線周辺の寒気と暖気との混合した大気が昭和基地に達したと考えられる。

SOD回復直後(29日1200 UTと同日1800 UT)の大気は、SOD期間中の大気を追ってウェッデル海付近にあった。SOD回復後のオゾンゾンデやYamanouchi *et al.* (1999)で観測された上空の低オゾン濃度の大气層は、高度500 m程度以上の上空に引き続き輸送されていた、このウェッデル海付近からのオゾン消失を受けた大気であった可能性がある。これより後(30日0000 UT)の大気は、南極大陸上を通過して昭和基地付近に到達した。

本章の解析から、SODをもたらした大気が前線の西側の寒気とともに移動したことがわかった。昭和基地付近に到達する前には流水帯上空の低高度を通過しており、海塩粒子の供給やSOD原因物質として注目されるBrOの供給などにとって、都合のよい条件であった。衛星ERS2に搭載されたセンサーGOME(Global Ozone Monitoring Experiment)の解析

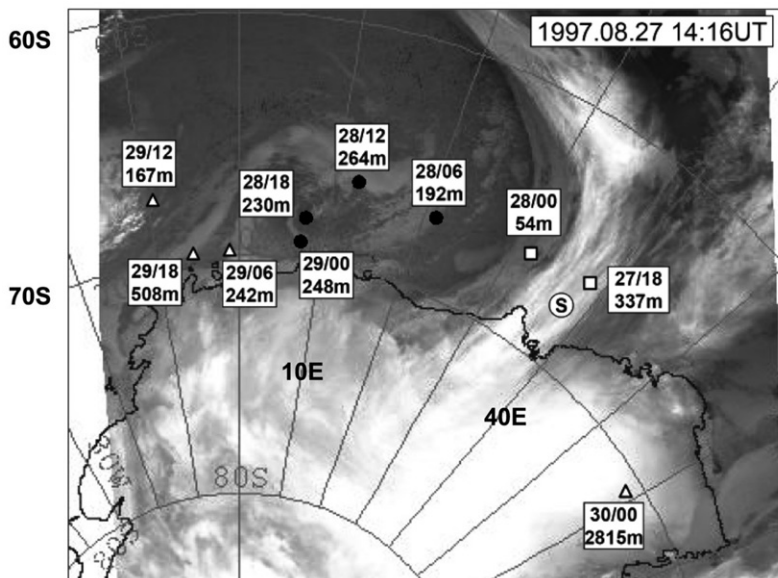


図8 SOD前後に37.5°E, 67.5°E(Ⓢ)にあった空気塊が、NOAA衛星の赤外輝度温度(AVHRR)のCH<sub>4</sub>分布観測時(27日1416 UT)にあった位置と高度。

Fig. 8. Position of air masses, where were the point (37.5°E, 67.5°E) around the time of SOD event, shows on the satellite image (AVHRR CH<sub>4</sub>, NOAA) at 1416 UT 27th August 1997.

(<http://www.oma.be/BIRA-IASB/Molecules/BrO/level3.php>)では、8月26-29日にかけて、ウェッデル海から昭和基地沖にかけて BrO の気柱総量の比較的大きな領域の東進が捉えられている。BrO を多く含む地上付近の大気が総観規模傾圧性擾乱の寒気域で取り込まれ、BrO と Br 原子とが関与したオゾン分解反応サイクルによりオゾン分解が進み、昭和基地付近を通過したと考えられる。

## 7. 1997-2008 年の SOD について

昭和基地の 1997-2008 年の春季 (7-10 月) における、地上オゾン濃度のすべての 1 時間平均値の時系列を図 9 に示す。地上オゾン濃度の減少は規模や継続時間の差はあるが、毎年観測される。ここでは、下記の基準で局所汚染データを含むすべての観測データから SOD のデータを抽出した。

- ① 1997-2008 年の期間について、地上オゾン濃度 1 時間平均値から、通年の月平均値及び標準偏差 ( $\sigma$ ) を 7-10 月の各月について求める。
- ② 個々の 1 時間平均値データの内、その濃度値が①で求めた通年の月平均値の標準偏差の  $-3\sigma$  未満となるデータのみを選別する。  
(選別されたオゾン 1 時間平均値) < (該当する月のオゾン濃度月平均値)  $-3\sigma$
- ③ ②で選別された 1 時間平均値データの内、1 時間平均値を求めた際の標準偏差が 1.0 ppbv 未満である時、SOD であるとする。なお、この閾値については、統計期間における 1 時間平均値の変化傾向を見て、SOD と考えられる現象と汚染データの出現傾向を比較勘案して決定した。

上記の基準により求めた昭和基地の SOD の発現回数は、1997-2008 年の期間で合計 28 回であった (表 2)。7-10 月の SOD 発現頻度は、8 月が最も多く全体の 39% であり、次いで 9 月が全体の 32% であった。昭和基地における SOD 現象の継続期間と、期間中の最低濃度の関係を図 10 に示す。本稿で報告した 1997 年 8 月の SOD は、オゾン低濃度期間が長期にわたって継続する U 字型の形状をしており、1997-2008 年の内で、SOD の継続期間及び期間中のオゾン最低濃度において、他の SOD と比較して最も顕著なものであったといえる。

## 8. まとめと今後の課題

第 38 次日本南極地域観測隊 (1997 年 2 月~1998 年 1 月) の越冬観測期間中の 1997 年 8 月 28-29 日に観測された地上オゾン急減現象 (SOD) に関する解析結果を記載した。SOD 開始時のオゾン濃度の減少 (30 ppbv から 3 ppbv) に要した時間が約 7 分、回復時の増加 (4 ppbv から 28 ppbv) には約 80 分かかっており、濃度の減少は非常に急であり、これに対して増加の速度は緩やかであった。この SOD は、東進した前線の西側の下層 (高度約 3000 m)

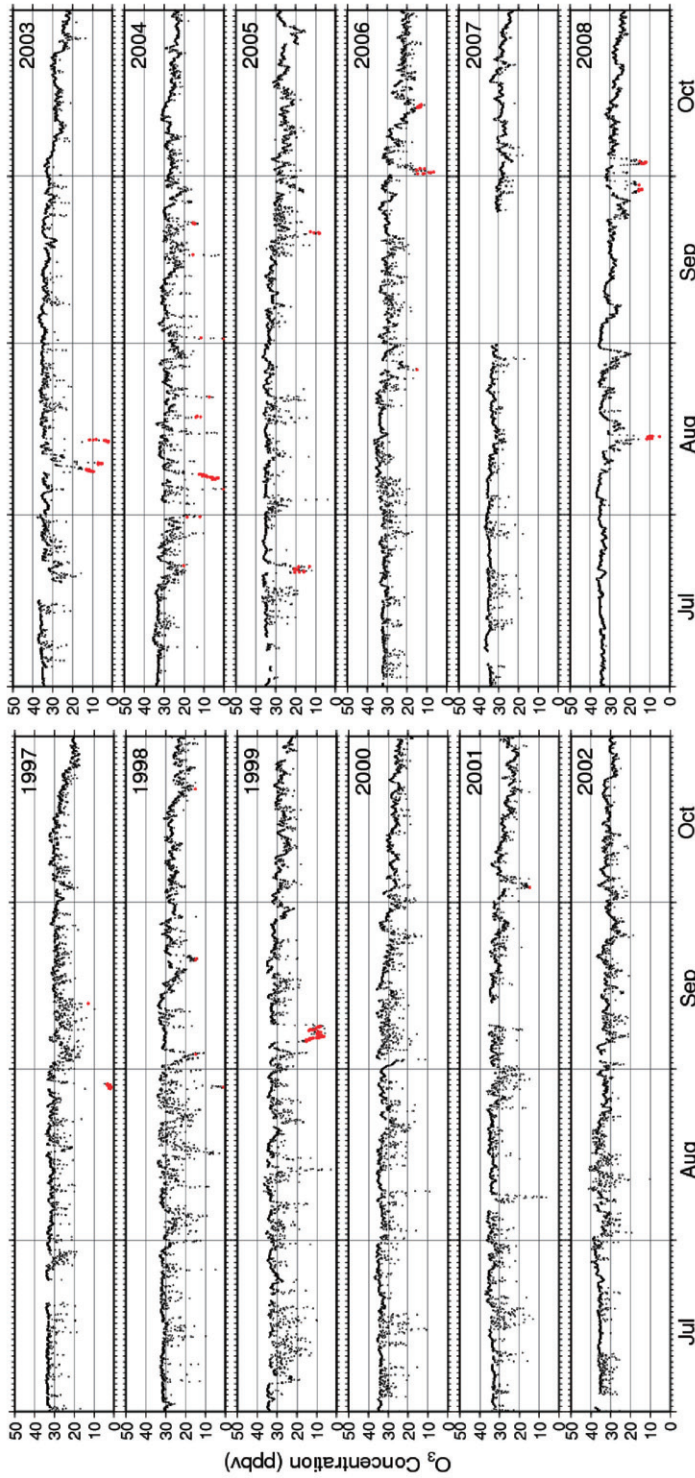


図9 昭和基地の1997-2008年の春季(7-10月)の地上オゾン濃度の1時間平均値の変化。本稿の定義によりSODと認定した期間を赤色で示す。2007年9月のデータの欠測期間は、観測装置不具合による欠測期間を示す。

Fig. 9. Variations of surface ozone concentration (ppbv) observed at Syowa Station in each spring season (July-October) from 1997 to 2008. Red dots show SOD event defined in this report.

表2 昭和基地の春季(7-10月)における地上オゾン急減現象の発現回数(1997-2008年)。本稿で報告するSODは、網がけした欄に相当。

Table 2. The number of surface ozone depletion (SOD) events in each spring season (July-October) from 1997 to 2008 at Syowa Station.

年	SOD 発現回数				合計
	7月	8月	9月	10月	
1997	0	1	0	0	1
1998	0	1	2	1	4
1999	0	0	1	0	1
2000	0	0	0	0	0
2001	0	0	0	1	1
2002	0	0	0	0	0
2003	0	3	0	0	3
2004	2	4	3	0	9
2005	1	0	1	0	2
2006	0	1	0	2	3
2007	0	0	0	0	0
2008	0	1	2	1	4
合計	3	11	9	5	28

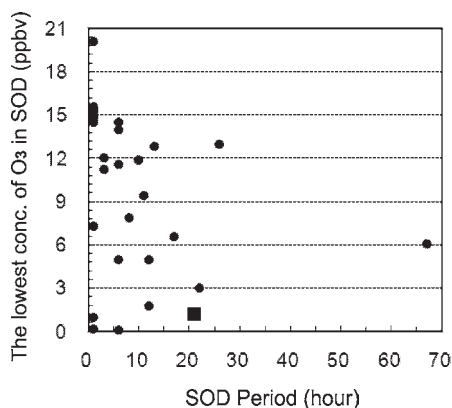


図10 昭和基地の春季(7-10月)における地上オゾン急減現象の継続期間と期間中のオゾン最低濃度の関係(1997-2008年)。黒四角は、本報告におけるSODを示す。

Fig. 10. Relations between the period of time for SOD event and surface ozone minimum concentration in spring season (July-October) from 1997 to 2008 at Syowa Station.

の寒気が昭和基地上空に到達した時に起きた。米国 NOAA の衛星雲画像及びバックワードトラジェクトリー解析によると、この大気は2日前にはウェッデル海域の地表面近くにあつて、高度 500 m 以下を通過して昭和基地付近に到達していた。1997-2008 年の 12 年間に発現した 28 回の SOD を抽出し比較した結果、本稿で対象とした 1997 年 8 月 28-29 日の SOD が、継続期間の長さとおゾン最低濃度の低さにおいて特徴的であった。

極域での地上付近のおゾン濃度が急減する現象は、通常、雪面や氷面上でのおゾン破壊は少ないため、この原因として、通常の地表面との接触によるおゾン破壊とは異なったメ

カニズムが考えられる。北極域では、成層圏オゾン破壊メカニズムと同様の、臭素化合物が引き起こすオゾン破壊による地上オゾンの低濃度現象がしばしば観測されている (e.g., Barrie *et al.*, 1988; Haussmann and Platt, 1994)。熱帯海洋域では、波のしぶきから海水中の臭素が放出されることが知られているが、極域での臭素の起源は不明であった。近年、極域でのガス状臭素の起源として氷の上の霜華 (Frost flowers: 一年氷の上に成長するポップコーン大の氷の結晶) の結晶成長の際に形成される、濃縮された海水からの放出や (Kaleschke *et al.*, 2004; von Glasow, 2008)、霜華から放出される海塩エアロゾルからの放出 (Kalnajs and Avallone, 2006) の可能性が指摘されている。今回観測された SOD 期間 (8月28-29日) 中は、ガス状無機臭素化合物、無機塩素化合物の濃度が他の日と比較してやや高かった (原ほか, 1998)。また、昭和基地の地上で観測されるエアロゾル中の海塩成分の組成比は、一般に、海水中の組成比より塩化物イオン濃度に対するナトリウムイオンや硫酸イオン濃度が低い (長田ほか, 1998)。さらに、Hara *et al.* (2004) が示したものと同じように、硫酸イオン濃度はナトリウムイオンの濃度に対して欠乏が大きく、ミラピライト ( $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ ) の析出を経た後の濃縮海水 (ブライン) から発生した海塩エアロゾルである可能性を示唆している。これらの事実は、臭素化合物発生機構を説明するものではないが、今回の SOD が結晶析出を起こした低温濃縮海水の形成となんらかの関係があったことを強く示唆している。

今後、地上付近のオゾンがどこでどのように破壊されるかを解明するためには、オゾン急減現象期間中の各種大気微量成分やエアロゾル粒子の化学分析を行い、バックワードトラジェクトリー解析等により、その大気の輸送経路を明らかにする必要がある。また、海氷上における SOD 空気塊の存在を、航空機観測などによって実際に確認することも必要であろう。

## 謝 辞

この報告をまとめるにあたり、第38次日本南極地域観測隊で越冬した定常気象観測部門の各位及び気水圏系研究部門の深津隊員、設営部門の各位並びに気象庁観測部南極観測事務室の皆様へ感謝します。有益な助言を頂いた名古屋大学大学院環境学研究科の長田和雄准教授に感謝します。バックワードトラジェクトリーの計算、及び気象データの描画には、欧州中期予報センター (ECMWF) による ERA-40 長期再解析データ、国立極地研究所粒跡線モデル及び気象データ表示システム (<http://firp-nitram.nipr.ac.jp>) を用いた。

## 文 献

- 青木周司 (1997): 昭和基地および「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.
- Barrie, L.A., Bottenheim, J.W., Schnell, R.C., Crutzen, P.J. and Rasmussen, R.A. (1988): Ozone

- destruction and photochemical reactions at polar sunrise in the lower Arctic atmosphere. *Nature*, **334**, 138-141.
- Barrie, L.A., Bottenheim, J.W. and Hart, W.R. (1994): Polar Sunrise Experiment 1992 (PSE 1992): preface. *J. Geophys. Res.*, **99** (D12), 25313-25314.
- 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.
- 江崎雄治・杉田興正・鳥井克彦・高橋 武・安達正樹 (2007): 第 44 次南極地域観測隊気象部門報告 2003. *南極資料*, **51**, 129-208.
- von Glasow, R. (2008): Recent developments in tropospheric halogen chemistry. *IGAC Newsl.*, **39**, 2-10.
- 原圭一郎・長田和雄・林 政彦・木戸瑞佳・松永捷司・岩坂泰信・山内 恭・深津 徹 (1998): 昭和基地における酸性ガス・大気エアロゾル成分—38 次南極観測隊での観測—。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, 1998-11, 国立極地研究所, 97-98.
- Hara, K., Osada, K., Kido, M., Hayashi, M., Matsunaga, K., Iwasaka, Y., Yamanouchi, T., Hashida, G. and Fukatsu, T. (2004): Chemistry of sea-salt particles and inorganic halogen species in Antarctic regions: compositional differences between coastal and inland stations. *J. Geophys. Res.*, **109**, D20208, Doi:10.1029/2004JD004713.
- Hausmann, M. and Platt, U. (1994): Spectroscopic measurement of bromine oxide and ozone in the high Arctic during Polar Sunrise Experiment 1992. *J. Geophys. Res.*, **99** (D12), 25399-25413.
- Helmig, D., Oltmans, S.J., Carlson, D., Lamarque, J., Jones, A., Labuschagne, C., Anlauf, K. and Hayden, K. (2007): A review of surface ozone in the polar regions. *Atmos Environ*, **41**, 5138-5161.
- Jones, A.E., Anderson, P.S., Begoin, M., Brough, N., Hutterli, M.A., Marshall, G.J., Richter, A., Roscoe, H.K. and Wolff, E.W. (2009): BrO, blizzards, and drivers of polar tropospheric ozone depletion events. *Atmos. Chem. Phys.*, **9**, 4639-4652.
- Kaleschke, L., Richter, A., Burrows, J., Afe, O., Heygster, G., Notholt, J., Rankin, A.M., Roscoe, H.K., Hollwedel, J., Wagner, T. and Jacobi, H.-W. (2004): Frost flowers on sea ice as a source of sea salt and their influence on tropospheric halogen chemistry. *Geophys. Res. Lett.*, **31**, L16114, doi:10.1029/2004GL020655.
- Kalnajs, L.E. and Avallone, L.M. (2006): Frost flower influence on springtime boundary-layer ozone depletion events and atmospheric bromine levels. *Geophys. Res. Lett.*, **33**, L10810, doi: 10.1029/2006GL025809.
- 気象庁 (1998): 南極気象資料 1997 年—第 38 次日本南極地域観測隊: 昭和基地及びドームふじ観測拠点—。東京 (CD-ROM)。
- 気象庁 (2009): 大気・海洋環境観測報告, **9**, —2007 年観測成果—。 <<http://www.data.kishou.go.jp/obs-env/cdrom/report2007k.html>>.
- Murayama S, Nakazawa, T, Tanaka, M., Aoki, S. and Kawaguchi, S. (1992): Variations of tropospheric ozone concentration over Syowa Station, Antarctica. *Tellus* **44B**, 262-272.
- 長田和雄・原圭一郎・木戸瑞佳・林 政彦・山内 恭・深津 徹・宇井啓高・松永捷司・岩坂泰信 (1998): 南極・昭和基地の大気エアロゾルに含まれる水溶性イオン濃度 II —第 38 次日本南極地域観測隊における観測—。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, 1998-11, 国立極地研究所, 99-100.
- Simpson, W.R., von Glasow, R., Riedel, K., Anderson, P., Ariya, P., Bottenheim, J., Burrows, J., Carpenter, L.J., Frieß, U., Goodsite, M.E., Heard, D., Hutterli, M., Jacobi, H.-W., Kaleschke, L., Neff, B., Plane, J., Platt, U., Richter, A., Roscoe, H., Sander, R., Shepson, P., Sodeau, J., Steffen, A., Wagner, T. and Wolff, E. (2007): Halogens and their role in polar boundary-layer ozone depletion. *Atmos. Chem. Phys.*, **7**, 4375-4418.
- Tomikawa, Y. and Sato, K. (2005): Design of the NIPR trajectory model. *Polar Meteorol. Glaciol.*, **19**, 120-137.
- Wessel, S., Aoki, S., Winkler, P., Weller, R., Herber, A., Gernandt, H. and Schrems, O. (1998a): Tropospheric ozone depletion in polar regions: a comparison of observations in the Arctic and Antarctic, *Tellus*, **50B**, 34-50.



- Wessel, S., Herber, A., Gernandt, H., Aoki, S., Winkler, P., Weller, R. and Schrems, O. (1998b): Irregular ozone depletion events in the Antarctic troposphere recorded at Neumayer Station in 1992 and 1993. *Mem. Natl Inst. Polar Res.*, **52**, 89-101.
- Yamanouchi, T., Wada, M., Fukatsu, T., Hayashi, M., Osada, K., Nagatani, M., Nakada, A. and Iwasaka, Y. (1999): Airborne observation of water vapor and aerosols along Mizuho route, Antarctica. *Polar Meteorol. Glaciol.*, **13**, 22-37.