

1997年春季に南極昭和基地において発現した 地上オゾン消失現象

江崎 雄 治*1・平 沢 尚 彦*2・林 政 彦*3・山 内 恭*2

要 旨

1997年8月28~29日に南極昭和基地で発現した地上オゾン消失現象(SOD)は、現象前後の約30 ppbv に対して3 ppbv 以下の低濃度が22時間継続した。オゾン濃度の減少は地上付近だけでなく高度3200 m 以下の対流圏下層に及んでいたことが推定された。この層は気温逆転を伴う安定で、相対湿度80%程度の湿潤な領域であり、他の南極域のSOD時の特徴と一致する。このSODをもたらした空気塊はウェッデル海域の海表面上から大気境界層を通過して昭和基地周辺に輸送されたことがトラジェクトリー解析により推定された。地上付近のエアロゾル数濃度は、粒径0.01 μm 以上から5.0 μm 以上を12階級に分けた全ての観測値で、SOD期間中には一桁程度高い状態が継続した。この事実は、これまでの北極域のSODの研究から認識されていた、SODに際して0.07~0.2 μm (蓄積モード)の粒径領域の濃度が低下するという特徴が、南極域のSODには必ずしも当てはまらないことを示す。

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(南極では7月から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、地上オゾン消失現象(Surface ozone depletion, 以下、SOD)と呼ばれる。南極においては、昭和基地(69.0°S, 39.6°E)、Neumayer基地(70.7°S, 8.3°W; ドイツ)、Halley基地(75.6°S, 26.6°W; 英国)で、SODの発現が報告されている(Wessel *et al.* 1998a; 青木 1997)。

北極において実施されたPolar Sunrise Experiment 1992 (Barrie *et al.* 1994)の解析をはじめとして、オゾンの消失した大気は、海塩エアロゾルなどから放出された臭素化合物(Br及びBrO)とオゾンが

光化学反応することにより形成されると考えられている(Kalnajs and Avallone 2006; Fan and Jacob 1992)。地上風速が弱い期間に多く観測されるSODの発現時には共通して境界層の大気安定度が比較的強く(Wessel *et al.* 1998a, b等)、このことはオゾンの消失した大気が対流圏下層に捕捉されたまま観測地点まで輸送されるのに有利であると考えられている(Jones *et al.* 2009, 2010; Simpson *et al.* 2007)。

オゾン消失にエアロゾルがどう関与するかを観測が直接捉えたことはないが、Staebler *et al.* (1994)は北極のAlert基地(82.5°N, 62.3°W; カナダ)でのSOD発現時のエアロゾル数濃度(以下、濃度)変化に特徴を見出した。それによると、蓄積モードの粒子径(0.07 μm ~0.2 μm)の濃度は減少し、それより大きい粒子径(0.7 μm ~1.0 μm 及び6 μm ~12 μm)では増加した。この変化は、普段基地がユーラシア大陸などからの汚染大気(硫酸塩などのエアロゾル)に覆われる中で、SOD発現時には北極海からの自然起源のエアロゾル(海塩粒子主体)を含んだ大気に覆われることを反映したものと考えられている(Simpson *et al.* 2007)。

*1 気象庁高層気象台。yesaki@met.kishou.go.jp

*2 情報・システム研究機構国立極地研究所。

*3 福岡大学理学部地球圏科学科。

—2012年10月9日受領—

—2012年11月30日受理—

江崎ほか (2010) は、1997年8月28日から29日に昭和基地で発現した SOD は、オゾン濃度の低さ及び継続時間の長さがこれまでの観測の中でも顕著であることを示すとともに本事例の概要を報告した。本研究ではこの事例解析を通して、南極の他の基地や北極 Alert 基地の観測で示された SOD 時の境界層の安定度などの大気構造の特徴や SOD 時のエアロゾル濃度の変化の特徴が昭和基地ではどのように現れたのかを調べることを目的とする。また、SOD を発現させた空気塊がどのような経路を経て昭和基地にもたらされたのかをバックワードトラジェクトリー解析を用いて明らかにする。

2. 観測

地上オゾン濃度観測には紫外線吸収式オゾン濃度計 (MODEL1100, ダイレック(株)製) を、高層気象観測には RS-91型レーウィンゾンデ (明星電気(株)製) を、オゾンゾンデ観測には KC96型オゾンゾンデ (明星電気(株)製) を、エアロゾル濃度観測には光散乱式粒子計数計 (TD100及び TD500S, シグマテック(株)製) 及び凝結核数測定装置 (Model 3010, TSI Inc.

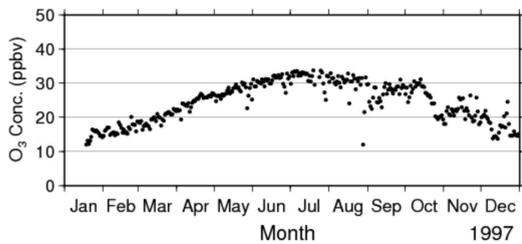
製) を用いた。

昭和基地時間は、世界標準時 (UTC) に対して3時間先行する。本稿では世界標準時を使用する。

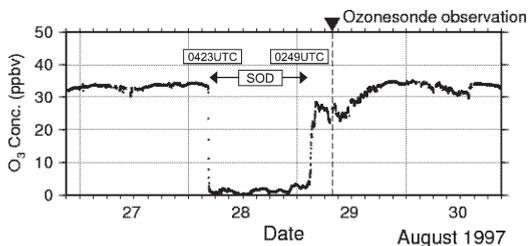
3. 地上オゾン濃度の季節変化と SOD 発現時の特徴

第1図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。昭和基地の地上オゾン濃度は、夏季に低く冬季に高い季節変化を示す (青木 1997; Murayama *et al.* 1992)。8月末に見られる低濃度 (12.0 ppbv) は、本稿で対象とする SOD を反映している。

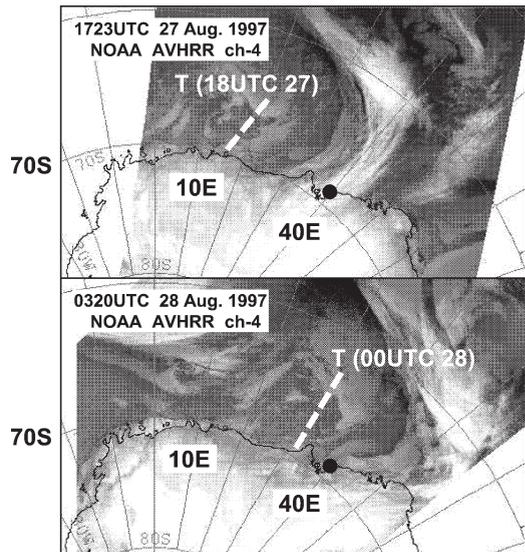
第2図に SOD 期間を含む8月27日から30日の地上オゾン濃度1分平均値の経時変化を示す。28日0422 UTC に約32 ppbv であったオゾン濃度は、約7分で3 ppbv 以下に減少し、29日0248 UTC から約80分かけて約28 ppbv まで回復した。オゾン濃度1分値の変化に着目して求めた SOD 継続時間は約22時間30分 (28日0423 UTC~29日0249 UTC) であった。回復後も25 ppbv 程度と SOD 発現前と比較して低濃度の状態が続き、29日1800 UTC 以降に SOD 前と同程度の



第1図 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。



第2図 昭和基地における1997年8月26日21 UTC から30日21 UTC までの SOD 期間を含む地上オゾン濃度1分平均値の経時変化。▼はオゾンゾンデ観測実施時期を示す。



第3図 昭和基地における SOD 発現前日の1997年8月27日1723 UTC と直前の28日0320 UTC での NOAA 衛星の赤外輝度温度分布 (AVHRR のチャンネル4)。太点線は1997年8月27日18 UTC と28日00 UTC の500 hPa トラフ (T) の位置である。昭和基地を●で示す。

30 ppbv 以上を示すようになった。

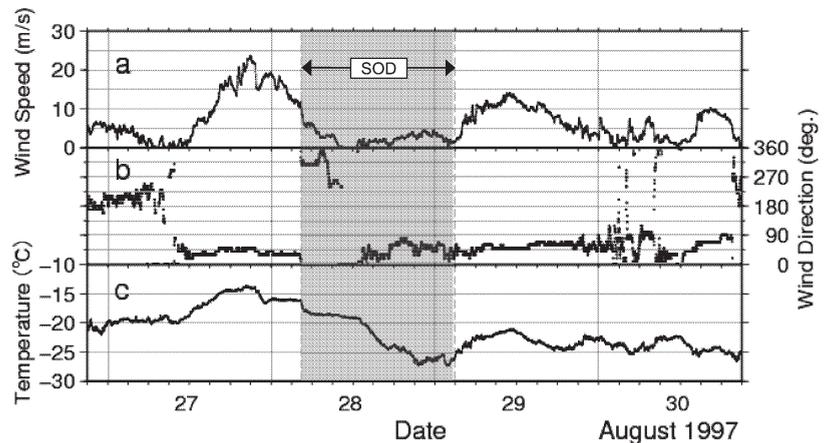
4. SOD をもたらした大気鉛直構造と気象の特徴

第3図に SOD 発現前と直前の NOAA 衛星の赤外画像を500 hPa のトラフ (T) の位置とともに示す。第4図に SOD 期間を含む 8月27日から30日の地上気象 (風向・風速, 気温) の時系列を示す。SOD 発現の11時間前の27日1723 UTC (第3図上) には東進するトラフ前面の明瞭な雲帯が昭和基地にかかり, 昭和基地はブリザードとなった。SOD 発現の約1時間前の28日0320 UTC (第3図下) には, 昭和基地東方に移動した雲帯から南西に延びる雲域が南極大陸縁辺域から昭和基地付近を覆っていた。SOD が開始した0420 UTC 頃に気温の降下と風速の弱い北西風への変化 (第4図) が観測されており, 昭和基地は前線の西側の寒気に覆われたと考えられる。SOD の回復は, 500 hPa のリッジが通過する頃に起こり, 北東風の強まりと地上気温の上昇 (第4図) を伴った。

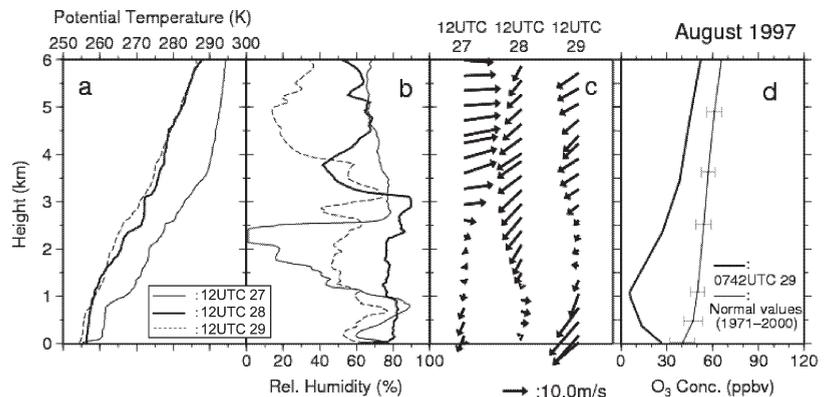
SOD 期間を含む高層気象観測結果, 及び SOD 終了直後の29日0742 UTC に行ったオゾンゾンデ観測によるオゾン濃度の鉛直分布を第5図に示す。昭和基地上空の相当温位 (第5図 a) は, SOD 発現前 (27日12 UTC) から SOD 期間 (28日12 UTC) にかけて著しく下がった (高度約2000 m (約740 hPa) で気温が約9°C低下)。SOD にほぼ対応する期間には高度約1000 m (約850 hPa) から約3200 m (約620 hPa) にかけて比較的強い安定層が形成され, 気温逆転層が

観測されることがあった。この安定層上端から地上までは相対湿度が60~80%と比較的高い状態が維持された (第5図 b)。上空の風 (第5図 c) は, SOD 期間の高度1 km 以下で5 m/s 以下と一様に風が弱かった。これらの大気鉛直構造は, Wessel *et al.* (1998 a, b) が示した Neumayer 基地や, Jones *et al.* (2009, 2010) が示した Halley 基地での SOD 期間の特徴と共通する。

SOD 終了直後のオゾン濃度の鉛直分布 (第5図 d) は全般に平年値よりも低い。高度約1100 m (約830 hPa) で極小 (5.7 ppbv) となった。第5図 a の温位プロファイルに現れている比較的強い安定層の上



第4図 昭和基地における1997年8月26日21 UTCから30日21 UTCまでの地上気象1分値データ ((a)風速, (b)風向及び(c)気温)の時系列。グレーの網がけは SOD 期間を示す。



第5図 昭和基地における SOD 期間を含む高層気象観測結果 ((a)温位, (b)相対湿度及び(c)風向・風速), 及び SOD 終了直後の(d)オゾン濃度の鉛直分布 (細実線はオゾン濃度鉛直分布平年値 (1971~2000年), 横線はその標準偏差)。

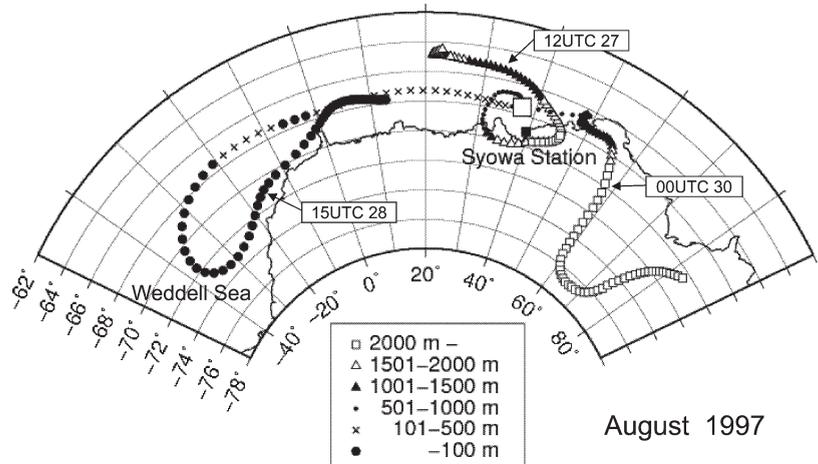
限が、オゾン濃度の平年値からの低下が比較的大きくなる600 hPa (約3400 m) とほぼ一致しており、SODに関連した大気層の高度の上端と考えられる。ここではSOD期間中の安定層等の状況から、SOD期間中も同様のオゾン濃度の鉛直構造をもっていたと考えられる。

5. バックワードトラジェクトリー解析

SODに関わる大気がどのような経路を通して輸送されてきたか、バックワードトラジェクトリーモデル

(Tomikawa and Sato 2005) を用いて考察する。ECMWF (ヨーロッパ中期予報センター) の緯度・経度2.5度格子の40年再解析データ (以下、ERA-40) の風速3成分 (東西成分, 南北成分, 鉛直 P 速度) を用い、5日前までさかのぼって計算した。トラジェクトリーの起点を昭和基地 (69.0°S, 39.6°E) の位置から最も近い格子点 (67.5°S, 37.5°E) とした。なお、ERA-40のこの地点が昭和基地付近の対流圏下層の大気の時間変化傾向を良く再現していることは確認した。

第6図にSOD期間を含む時期に67.5°S, 37.5°E (図中の□) の高度500 mにあった大気の水平経路を高度の階級とともに示す。SOD発現前 (27日12 UTC) の大気は昭和基地の北西域の高度2000 m付近にあって、下降しながら移動してきた。それに対して、SOD期間中 (28日15 UTC) 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以下と解析された。特に30°E以西では風速が15~20 m/s程度に達するなど、海面に比較的近い層を高速で吹走しており、SOD発生プロセスとして考えられている海洋表層と大気との物質交換の条件を備えていた。SOD期間中の別の時刻の大気も同様の特徴であった。SOD終了後 (30日00 UTC) の大気は昭和基地東方の高度3500 mあたりから南極大陸上を下降しながら輸送されており、SOD期間とは明らかに起源の異なる大気であったことが分かった。



第6図 SOD発現前 (27日12 UTC), SOD期間 (28日15 UTC) 及びSOD回復後 (30日00 UTC) に67.5°S, 37.5°E (図中の□) の高度500 mに到達する大気の水平経路とその高度別階級 (プロット間隔は90分毎)。昭和基地を■で示す。

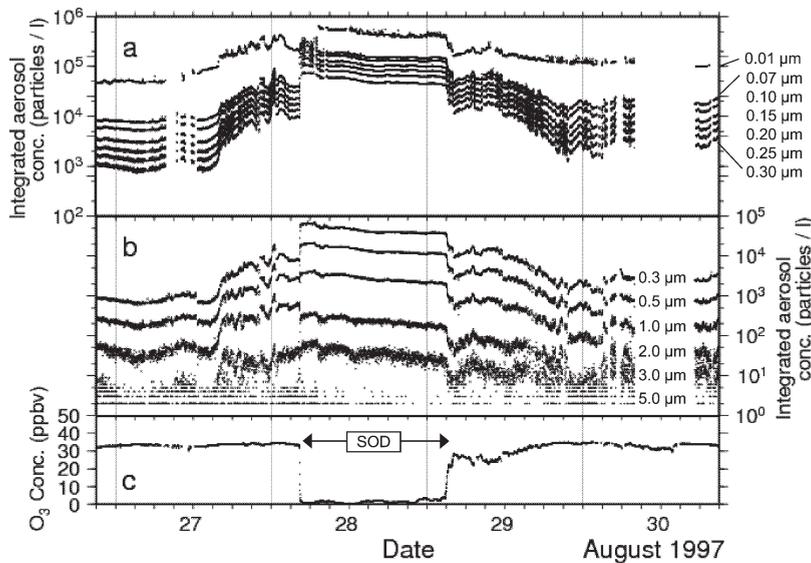
以上のことから、SODをもたらした大気は、昭和基地付近に到達する前には海水帯上空の低高度を通っており、海塩粒子を含むエアロゾル粒子が供給されて、オゾンを消失させる臭素化合物 (BrO など) の発生に都合のよい条件であることが分かった。

6. 極域におけるSOD時のオゾンとエアロゾルの関係

第7図にSOD期間を含む8月27日から30日の地上オゾン濃度とエアロゾル濃度の1分値の経時変化を示す。30日のエアロゾルデータの欠測は、航空機観測 (Yamanouchi *et al.* 1999) のために観測装置を外したことによる。エアロゾル濃度は光散乱式粒子数計 (2台) 及び凝結核数測定装置の測定結果を合わせて示している。

エアロゾル濃度は、粒径0.01 μm 以上から5.0 μm 以上を12階級に分けた全ての観測値で、SODと同期して一桁程度高くなった。これまでの北極域のSODの研究からは、SODに際して蓄積モード (0.07~0.2 μm) の粒径領域の濃度が低下すると認識されていたが、この特徴は本事例のSODには当てはまらない。粒径-濃度分布 (図略) では、蓄積モードに近い粒径0.1~0.3 μm に濃度の中心があった。

Staebler *et al.* (1994) によれば、北極 Alert 基地のSOD開始に際して蓄積モードのエアロゾル濃度が約150000個/Lから約68000個/Lへと減少した。昭和



第7図 昭和基地におけるSOD期間を含むエアロゾル濃度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)と(c)地上オゾン濃度1分値の経時変化。30日の欠測は、航空機によるエアロゾル観測実施のために機器を外していたことによる。

基地の本事例では、約5900個/L (27日0000 UTC) から約72000個/L (28日1500 UTC) へと増加した。変化は逆であるが、SOD期間中のエアロゾル濃度値は北極と南極とで同程度になった。他の粒径領域では測定領域の違いから数的比較はできないものの、エアロゾル濃度増加は北極と南極とで共通した。SODを発現させる大気のエアロゾル濃度の特性は両極で共通する。そうなると、SOD発現に際するエアロゾル濃度変化における両極の違いはSODを発現させる大気にあるのではなく、むしろ普段の大気のエアロゾルの特性が両極で異なることに起因していると考えられる。すなわち、北極ではユーラシア大陸などからの汚染大気に覆われ蓄積モードの濃度がより高いが、南極では普段から蓄積モードの濃度がより低い自然起源の大気に覆われていることが両極の違いを作り得る。

7. まとめと今後の課題

1997年8月28日から29日に昭和基地で観測された地上オゾン消失現象(SOD)の解析を行った。SODは寒冷前線の西側の寒気団の中で発現した。SODをもたらしたオゾン濃度の低い大気は高度約3200 m (約620 hPa)以下の対流圏下層に広がっており、そこでは大気安定度が比較的強く相対湿度が60%~80%程度

に高い状態が維持されていた。この大気の鉛直構造は、南極のNeumayer基地やHalley基地でのSOD期間の特徴と共通することが確かめられた。ただし、オゾン濃度が低い大気層の上端高度はNeumayer基地で約1300 m及び約2500 mであり、昭和基地の本事例では3400 mと違いが見られた。

SOD期間中の昭和基地付近上空の空気塊は、南極大陸縁辺のウェッデル海上から大気境界層付近を通して輸送され、海洋表層との物質交換が活発だったことが示唆された。昭和基地の他のSOD事例の大気輸送については今後の課題である。

北極と南極とでSODを発現させる大気のエアロゾル濃度の特徴が共通することが分かった。北極では蓄積モードの濃度がより高い汚染大気にSODを発現させる自然起源の大気が入れ替わり、南極では蓄積モードの濃度がより低い自然大気にSODを発現させる自然起源の大気が入れ替わるという両極のエアロゾル濃度の基本場の違いが明瞭に示された。

謝辞

第38次日本南極地域観測隊の定常気象観測隊員及び気水圏系研究部門の深津隊員並びに設営部門の各位に感謝します。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、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://www.firp-nitram.nipr.ac.jp> (2012.11.30閲覧))を用いた。

参考文献

- 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., J. W. Bottenheim and W. R. Hart, 1994: Polar Sunrise Experiment 1992 (PSE 1992): Preface. J. Geophys. Res., 99D, 25313-25314.
- 江崎雄治, 平沢尚彦, 林政彦, 山内恭, 2010: 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. 南極資料, **54**, 623-639.
- Fan, S.-M. and D. J. Jacob, 1992 : Surface ozone depletion in Arctic spring sustained by bromine reactions on aerosols. *Nature*, **359**, 522-524.
- Jones, A. E., P. S. Anderson, M. Begoin, N. Brough, M. A. Hutterli, G. J. Marshall, A. Richter, H. K. Roscoe and E. W. Wolff, 2009 : BrO, blizzards, and drivers of polar tropospheric ozone depletion events. *Atmos. Chem. Phys.*, **9**, 4639-4652.
- Jones, A. E., P. S. Anderson, E. W. Wolff, H. K. Roscoe, G. J. Marshall, A. Richter, N. Brough and S. R. Colwell, 2010 : Vertical structure of Antarctic tropospheric ozone depletion events : characteristics and broader implications. *Atmos. Chem. Phys.*, **10**, 7775-7794.
- Kalnajs, L. E. and L. M. Avallone, 2006 : Frost flower influence on springtime boundary-layer ozone depletion events and atmospheric bromine levels. *Geophys. Res. Lett.*, **33**, L10810, doi:10.1029/2006GL025809.
- Murayama, S., T. Nakazawa, M. Tanaka, S. Aoki and S. Kawaguchi, 1992 : Variations of tropospheric ozone concentration over Syowa Station, Antarctica. *Tellus*, **44B**, 262-272.
- Simpson, W. R., R. von Glasow, K. Riedel, P. Anderson, P. Ariya, J. Bottenheim, J. Burrows, L. J. Carpenter, U. Frieß, M. E. Goodsite, D. Heard, M. Hutterli, H.-W. Jacobi, L. Kaleschke, B. Neff, J. Plane, U. Platt, A. Richter, H. Roscoe, R. Sander, P. Shepson, J. Sodeau, A. Steffen, T. Wagner and E. Wolff, 2007 : Halogens and their role in polar boundary-layer ozone depletion. *Atmos. Chem. Phys.*, **7**, 4375-4418.
- Staebler, R. M., G. den Hartog, B. Georgi and T. Düsterdiek, 1994 : Aerosol size distributions in Arctic haze during the Polar Sunrise Experiment 1992. *J. Geophys. Res.*, **99D**, 25429-25437.
- Tomikawa, Y. and K. Sato, 2005 : Design of the NIPR trajectory model. *Polar Meteor. Glaciol.*, **19**, 120-137.
- Wessel, S., S. Aoki, P. Winkler, R. Weller, A. Herber, H. Gernandt and O. Schrems, 1998a : Tropospheric ozone depletion in polar regions. A comparison of observations in the Arctic and Antarctic. *Tellus*, **50B**, 34-50.
- Wessel, S., A. Herber, H. Gernandt, S. Aoki, P. Winkler, R. Weller and O. Schrems, 1998b : Irregular ozone depletion events in the Antarctic troposphere recorded at Neumayer Station in 1992 and 1993. *Mem. Natl. Inst. Polar Res., Spec. Issue*, (52), 89-101.
- Yamanouchi, T., M. Wada, T. Fukatsu, M. Hayashi, K. Osada, M. Nagatani, A. Nakada and Y. Iwasaka, 1999 : Airborne observation of water vapor and aerosols along Mizuho route, Antarctica. *Polar Meteor. Glaciol.*, **13**, 22-37.

Surface Ozone Depletion at Syowa Station, Antarctica in 1997 Spring Season

Yuji ESAKI*¹, Naohiko HIRASAWA*², Masahiko HAYASHI*³
and Takashi YAMANOUCHI*²

*¹ (Corresponding author) *Aerological Observatory, Japan Meteorological Agency, Nagamine 1-2, Tsukuba-shi, Ibaraki-ken 305-0052, Japan.*

*² *National Institute of Polar Research.*

*³ *Department of Science, Fukuoka University.*

(Received 9 October 2012 ; Accepted 30 November 2012)
