

昭和基地上空における対流圏オゾン濃度と大気の輸送

村山 昌平¹・青木 周司²・中澤 高清²

The Relationship between Tropospheric Ozone Concentration and Atmospheric Transport over Syowa Station, Antarctica

Shohei MURAYAMA¹, Shuhji AOKI² and Takakiyo NAKAZAWA²

Abstract: Aircraft measurements of the tropospheric O₃ concentration were made over Syowa Station, Antarctica from May 1989 to January 1990, except during the polar night months of June and July. The O₃ concentration increased with height for the whole period of the measurements. Lower tropospheric O₃ concentration showed a prominent seasonal variation with maximum concentration in winter and minimum in summer, which is very close to the result of continuous O₃ measurements at Syowa Station. In the upper troposphere, the concentration reached high values in winter, decreased gradually from September to early November and then increased again. As a result, the height-dependent difference of the concentration was reduced from late fall to early spring and enhanced in the remaining seasons of the year. From these results, it is hypothesized that the seasonal variation of height-dependent atmospheric transport processes could influence that of the tropospheric O₃ concentration over Syowa Station.

要旨: 1989年5月から1990年1月にかけての極夜を除く期間に南極昭和基地において対流圏O₃濃度の航空機観測が行われた。観測期間中、上空ほどO₃濃度は高かった。対流圏下部のO₃濃度の変化は地上O₃濃度とよく似ており、冬に最高値、夏に最低値が現われる顕著な季節変化を示した。一方、対流圏上部では冬に高濃度が現われた後、9月-11月上旬にかけて徐々に減少し、その後再び増加した。結果として、鉛直方向の濃度差は晩秋～早春に縮小し、他の季節には増大した。これらの結果から、高度によって異なる大気輸送過程の季節変化が昭和基地上空における対流圏O₃濃度の季節変化に影響を及ぼしていることが示唆された。

1. はじめに

対流圏オゾン (O₃) は、それ自身温室効果気体として重要であり、その濃度変化は、地球上の放射収支に影響を及ぼす。さらに、対流圏の光化学反応系で極めて重要な役割を果たしており、温室効果気体であるメタン (CH₄) や一酸化炭素 (CO) 等の大気中の寿命にも影響を及ぼ

¹ 資源環境技術総合研究所. National Institute for Resources and Environment, 16-3, Onogawa, Tsukuba 305.

² 東北大学理学部大気海洋変動観測研究センター. Center for Atmospheric and Oceanic Studies, Faculty of Science, Tohoku University, Aramaki Aoba, Aoba-ku, Sendai 980-77.

している。

対流圏の O_3 濃度の変化は様々な要因により生ずる。成層圏の O_3 濃度は対流圏と比べて非常に高濃度であり、成層圏—対流圏間の大気の交換により対流圏に O_3 が供給される。一方、地表面付近で O_3 は消滅する。この結果、一般に清浄大気中では、対流圏において上層ほど濃度が高い鉛直分布が形成される。対流圏の O_3 濃度変化は、このような一連の輸送・消滅過程によって支配されていると考えられてきた。ところが、光化学スモッグに代表されるような対流圏における光化学反応による O_3 の生成・消滅過程が 1970 年代よりクローズアップされるようになり、現在では、対流圏の O_3 濃度の変化の重要な要因と考えられている。しかし、南極域は、人間活動の影響の最も少ない地域であり、オゾンの前駆気体である酸化窒素類や炭化水素類の濃度は非常に低いと考えられる。このため、南極域では後者の過程による O_3 の生成は起こっている可能性は小さく対流圏 O_3 の起源はほぼ成層圏にあると推察される。

一方、南半球中高緯度における大気の循環過程は、北半球と比べて気象観測網が希薄であるため十分に理解されていない。南極域は、成層圏における赤道域から極方向への重要な大気の流れと考えられているブリューワー・ドブソン循環の終着点であり、南極上空は、赤道域で成層圏に流入した大気が対流圏に戻ってくるルートの一つと考えられている。YAMAZAKI *et al.* (1989) は、昭和基地上空の対流圏上部で採取された El Chichon 山の噴火に伴うものと考えられる火山性エアロゾル粒子の起源を調べるために実測された風のデータを元にしたトラジェクトリー解析（流跡線解析）を行い、その多くが、南極上空の成層圏を通して運ばれてきたことを証明している。KIDA (1983) は、大気大循環モデルを用いたトラジェクトリー解析を行い、極域で成層圏から対流圏に運ばれる粒子は他の緯度帯に比べて成層圏に滞留した時間の長いものが多いということ述べている。また、KOMHYR *et al.* (1988) は、南極域におけるオゾンホール形成期には対流圏—成層圏間の大気の交換との因果関係を示唆しており、オゾンホール形成期には対流圏—成層圏間の交換が活発化し、その結果、成層圏下部の O_3 濃度が減少し、対流圏上部の濃度が上昇する、と述べている。このように南極域上空の大気の循環は、全球規模の気候システムやオゾンホールの形成過程などを理解する上で極めて重要であるにも関わらず未知な部分が多い。

上で述べたように南極域における対流圏 O_3 の起源は、成層圏である可能性が高いため、その濃度変化を詳しく調べることにより、成層圏—対流圏間の大気の交換過程を始めとする南極域における大気循環に関する情報が得られることが期待される。この目的のために ACR 期間中の 1988 年 2 月より昭和基地において地上 O_3 濃度の連続観測が開始されたが、さらに南極上空における対流圏の O_3 濃度の詳細を調べるために極夜期を除く 1989 年 5 月から 1990 年 1 月にかけて、昭和基地上空において航空機を用いた対流圏 O_3 濃度の鉛直分布観測が行われた。

鉛直分布の観測には、ゴム気球にセンサーをつけて飛揚するオゾンゾンデがしばしば用いられ、地上から成層圏までの O_3 濃度の分布に関して情報を与えてくれる。しかし、オゾンゾン

デは毎分約 300 m の速さで上昇するために、航空機観測のように一定高度で何度も測定することができない。また、オゾンゾンデは広い濃度範囲での測定が可能であるが、対流圏ではオゾン濃度が低く、また他の妨害気体成分および粒子状成分の影響を受け易いため、測定値の誤差が大きくなると考えられる。対流圏のオゾン濃度の細かい構造を見るためには、経済的なことを考えなければ、航空機による低濃度用 O_3 計を用いた観測が適当であると考えられる。このため、本報告で述べる航空機観測では地上 O_3 濃度の連続観測に使用している O_3 濃度計 (ダシビー紫外線吸収型オゾン) (青木, 1997) が使用された。

本報告では、得られた観測結果を示し、その結果から推察された昭和基地上空における大気の輸送について述べる。

2. 結果と考察

図 1 に昭和基地上空の O_3 濃度の鉛直分布の例を示す。図 1a に示した鉛直分布は晩秋～初春に典型的に観測される分布である。後述するように、一年のうちのこの時期は、対流圏下部の O_3 濃度が高いため、濃度の鉛直勾配は緩やかである。一方、対流圏上部で高濃度、対流圏下部で低濃度を示す晩春～夏には、下層では高度とともに徐々に濃度が上昇し、濃度の鉛直勾

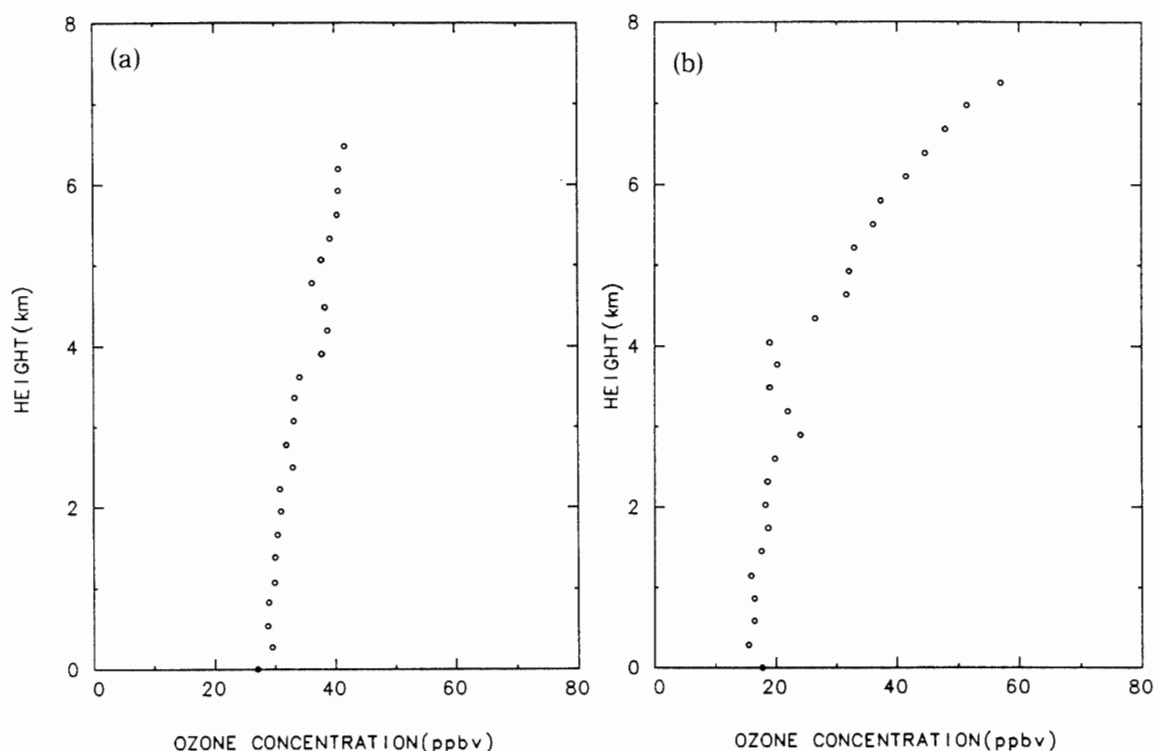


図 1 昭和基地上空における O_3 濃度の鉛直分布の例。(a) は、1989 年 5 月 6 日のもの、(b) は、1989 年 12 月 23 日のものである (MURAYAMA *et al.*, 1992 より)。

Fig. 1. Vertical profiles of the O_3 concentration over Syowa Station on (a) 6 May 1989 and (b) 23 December 1989 (after MURAYAMA *et al.*, 1992).

配は緩やかであるが、高度 4 km 以上では濃度が急増する (図 1b)。

昭和基地上空の高層気象データの解析に照らした結果、本観測で得られたデータはすべて対流圏より得られたことが分かったので、データを 0-2.0 km, 2.0-4.0 km, 4.0-6.0 km, 6.0-6.5 km, 6.5 km 以上の 5 つの高度に分類し、各高度間隔ごとの平均値を求めた。図 2 にこのようにして得られた O₃ 濃度の変化を示す。この図には 1989 年 2 月-1990 年 1 月の地上 O₃ 連続観測の結果 (AOKI and YAMANOUCI, 1994) も示されている。地上 O₃ 濃度の日変化は地上観測の結果から非常に小さいことが分かっており、航空機観測から得られた O₃ 濃度は観測が行われた時刻に依存しないと推察される。ごくわずかな例を除き、観測が行われた全期間にわたって上空ほど O₃ 濃度は高くなっており、上述した上空より O₃ 供給、下層で消滅という関係が成り立っていると考えられる。対流圏下部の O₃ 濃度の変化は地上 O₃ 濃度とよく似ており、冬に最高値、夏に最低値が現われる顕著な季節変化を示している。一方、対流圏上部では冬に高濃度が現われた後、9 月-11 月上旬にかけて徐々に減少し、その後再び増加している。結果として、鉛直方向の濃度差は晩秋～早春に縮小し、他の季節には増大する。4.0-6.0 km における季節変化は対流圏下部の変化の位相とよく一致しているが、それより上層と下層でそれぞれ濃度の増加と

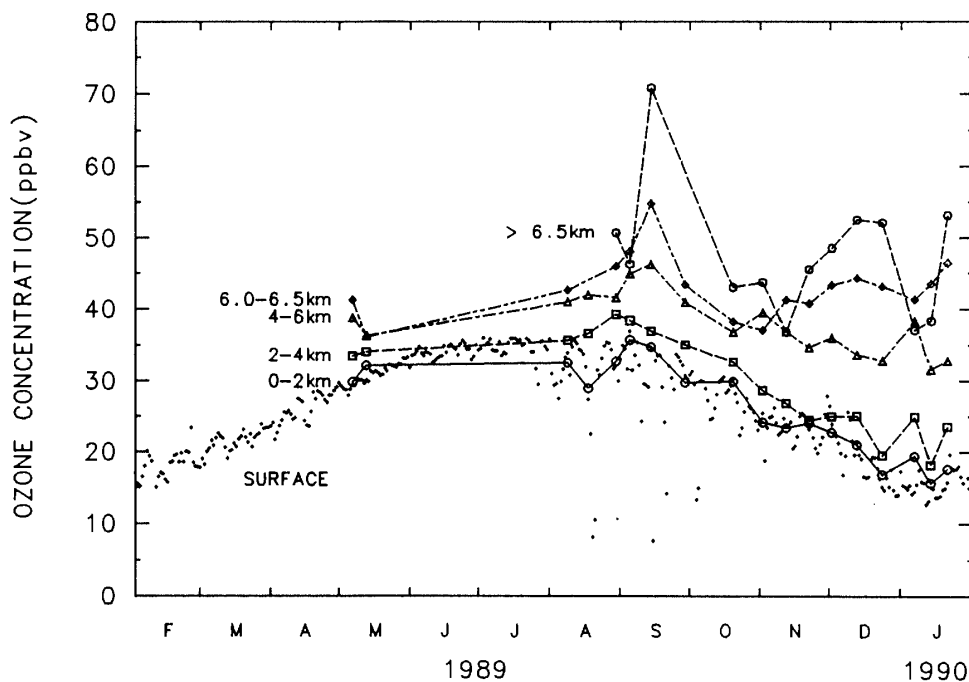


図 2 航空機観測によって得られた 1989 年 5 月から 1990 年 1 月の昭和基地上空対流圏各層における O₃ 濃度の変化 (MURAYAMA *et al.*, 1992 より)。参考のために 1989 年 2 月から 1990 年 1 月の昭和基地地上 O₃ 濃度の日平均値 (AOKI and YAMANOUCI, 1994) も示されている。

Fig. 2. Variations of the tropospheric O₃ concentration obtained by aircraft measurements over Syowa Station from May 1989 to January 1990 and daily mean values of surface O₃ concentration at Syowa Station from February 1989 to January 1990 by AOKI and YAMANOUCI (1994) (after MURAYAMA *et al.*, 1992).

減少が起こっている春～夏には濃度はあまり変化していない。従って、この高度では季節変化の振幅が他の高度と比べて小さくなっており、対流圏中部の O_3 の変化は対流圏上部および下部の両者の変化の影響をかなり受けていると考えられる。また、図2より、対流圏上部で O_3 濃度の不規則変化が大きいことが分かる。

図3は、本航空機観測および定常気象観測によって実施されたオゾンゾンデの結果を用いて作成した昭和基地上空8 kmまでの O_3 濃度の時間空間分布を示したものである。上述したような対流圏 O_3 の特徴がこの図からも読みとれる。また、6.0 km以上の高度で著しい高濃度が時々現われていることが分かる。これらの事実から、昭和基地上空の O_3 濃度の時間的空間的变化は、季節や高度によって異なる過程が引き起こしているとは推定できる。対流圏下部の O_3 濃度の変化については青木 (1997) により詳しく述べられているので、以下では主に対流圏上部の変化について考察する。

図4に1989年1月-1990年1月の昭和基地上空における圏界面の高さの変化を示す。一般に、第1圏界面の高さは中緯度とは逆の振舞いをし、夏から秋に低く、冬から春に高い。圏界面は、特に夏の終わりから秋には時々7.5 km以下まで降下することがある。それ故、この時期

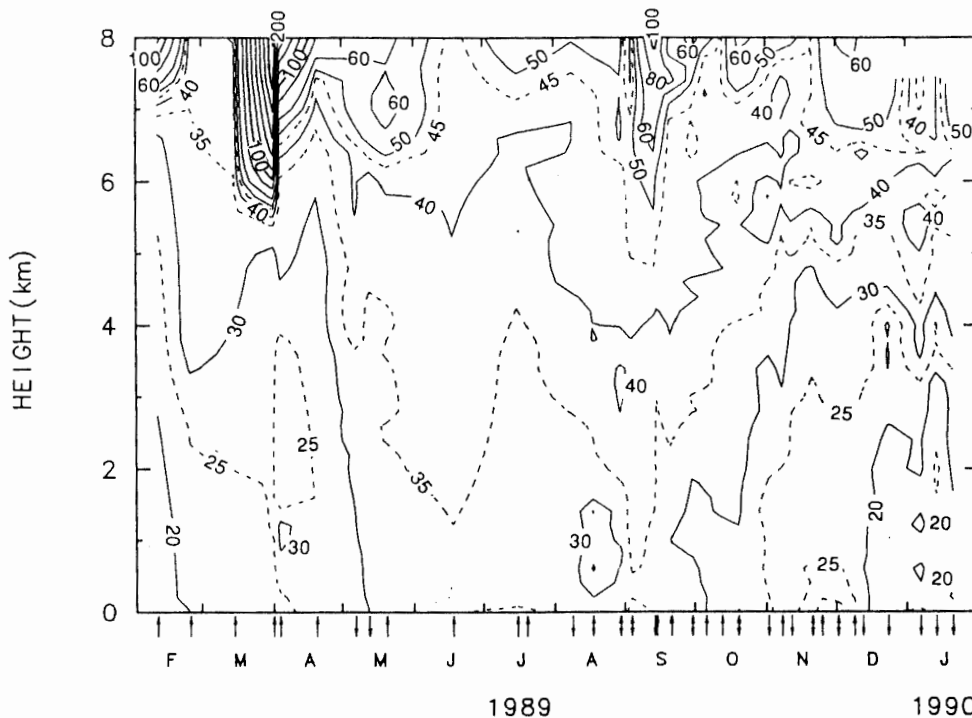


図3 航空機観測 (↓) とオゾンゾンデ観測 (↑) から得られた昭和基地上空における O_3 濃度の変化 (単位 ppbv) (MURAYAMA *et al.*, 1992 より)。

Fig. 3. Distribution of the O_3 concentration (ppbv) over Syowa Station from aircraft measurements and ozonesonde observations. The dates when ozonesonde observations and aircraft measurements were made are indicated by upward and downward arrows, respectively (after MURAYAMA *et al.*, 1992).

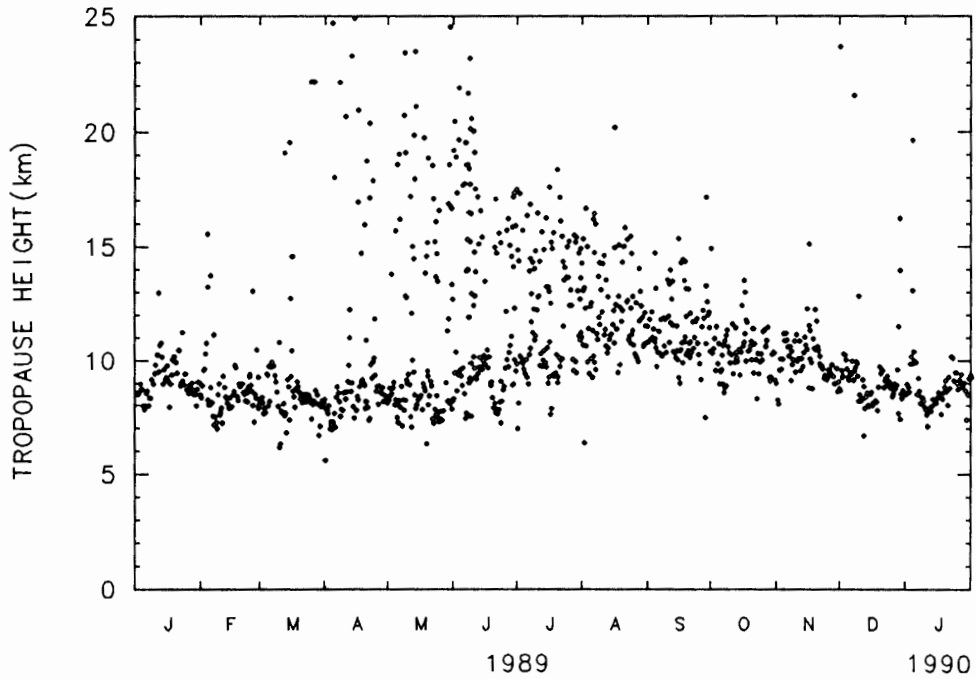


図4 昭和基地上空における圏界面高度の変化 (MURAYAMA *et al.*, 1992 より).

Fig. 4. Variations of tropopause heights over Syowa Station (after MURAYAMA *et al.*, 1992).

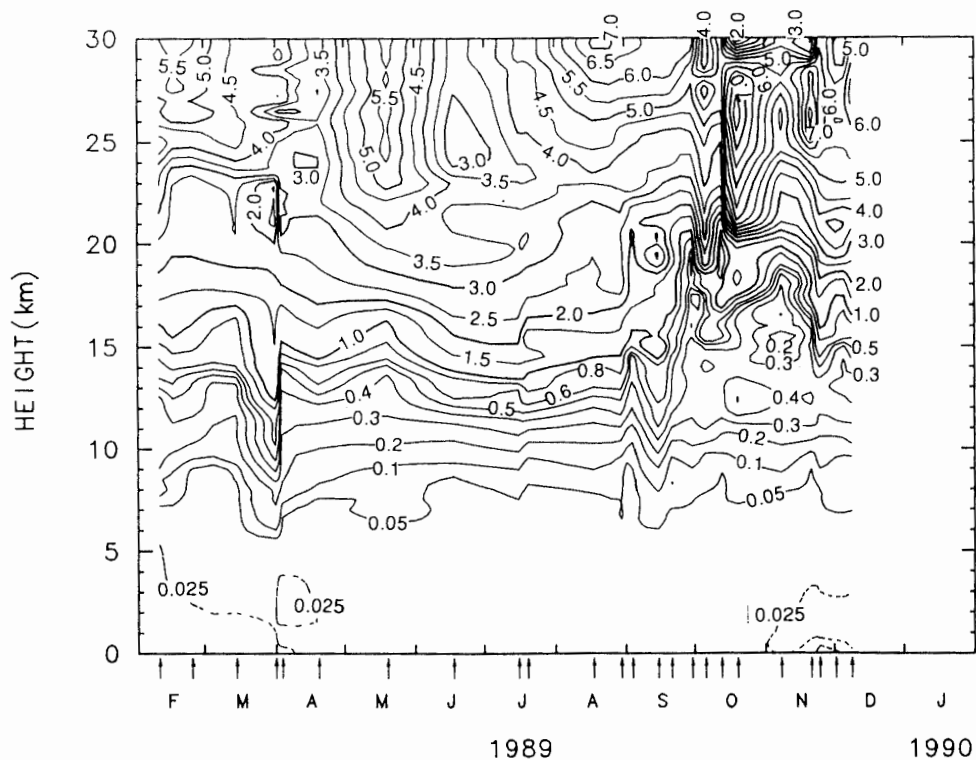


図5 図3と同じ。但し、上空30 kmまでの分布 (単位 ppmv) (MURAYAMA *et al.*, 1992 より)。
Fig. 5. Same as in Fig. 3 but for up to 30 km. The concentration is expressed in ppmv (after MURAYAMA *et al.*, 1992).

に高度 6.0 km 以上でみられる高濃度は、この高度が O_3 濃度の高い成層圏に入ったため、あるいは、圏界面の低下により成層圏大気の影響を強く受けたためと考えることができる。実際、図 3 に見られるように、1989 年の 2 月 9 日、3 月 31 日および 4 月 3 日に上層で著しい高濃度が現れているが、これらの日の圏界面高度は 7.6, 5.6, 7.2 km と低くなっている。一方、6.0 km 以上で高濃度がみられない 1989 年の 2 月 23 日や 3 月 1 日には、圏界面高度は 8 km 以上である。

他の季節には 7.5 km 以下までに圏界面が低下することはほとんどない。それにもかかわらず、例えば 1989 年の 9 月中旬のように、圏界面が 8.5 km 以上に位置しているときでも、上部対流圏で O_3 の高濃度がみられることがあった。従って、冬から初夏の対流圏上部の O_3 の変化には他の過程が関与していると考えられる。図 5 に定常気象によるオゾンゾンデ観測によって得られた昭和基地上空の 30 km までの O_3 濃度の時間空間分布を示した。上空 10-20 km においては、9 月中旬に下層で一時的な O_3 濃度の増加が見られるが、その後、0.4 ppmv 以上の等濃度線が上層へ移動し 11 月下旬に再び下層へ移動してくるまで、低濃度層を形成している。こういった成層圏下部の濃度変化は、定常気象によりドブソン分光光度計を用いて観測された昭和基地上空の O_3 全量の変化 (図 6) とよく対応している。

冬から初夏の O_3 全量の変化をさらに詳しくみるために人工衛星ニンバス 7 号に搭載されている TOMS (Total Ozone Mapping Spectrometer) の観測データを調べてみた。その結果、昭和基地がオゾンホールの中に位置しているときは O_3 全量が減少し、春の終わりになっ

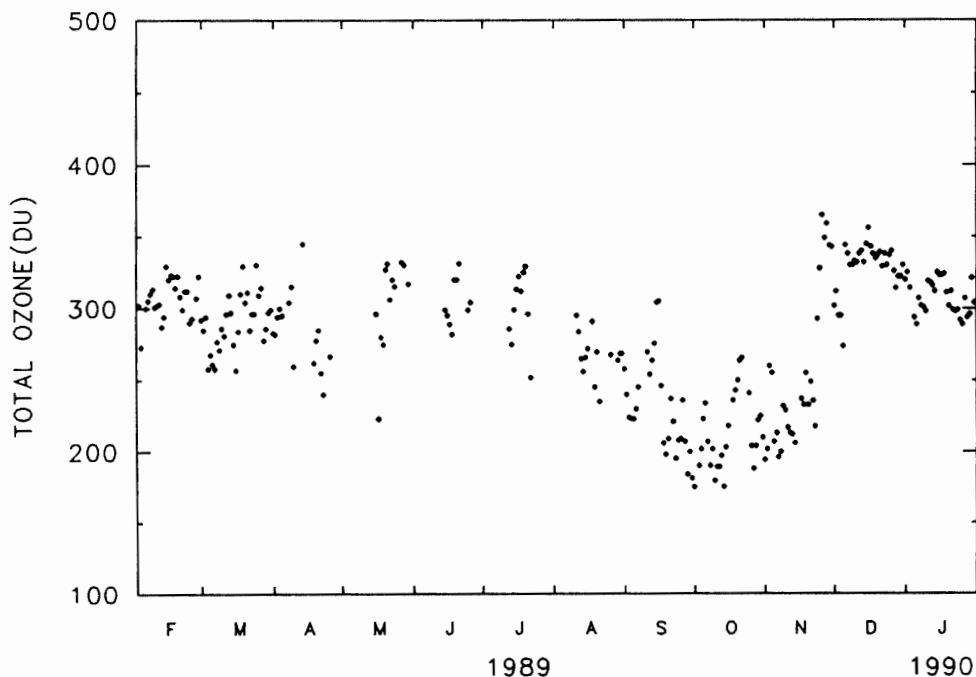


図 6 昭和基地上空の O_3 全量の変化 (MURAYAMA *et al.*, 1992 より)。

Fig. 6. Variations of the total amount of O_3 over Syowa Station measured by the Dobson spectrophotometer. The amount of O_3 is expressed in Dobson Units (after MURAYAMA *et al.*, 1992).

てオゾンホールが消滅すると O_3 全量が急激に増加することが分かった。通常は11月の初めにオゾンホールは弱まり、昭和基地はその外側に位置するが、1989年には11月中旬までオゾンホールの中にあった。このように成層圏下部の O_3 濃度や O_3 全量の変化は対流圏上部の O_3 濃度の変化とよく一致しており、昭和基地上空においては、成層圏下部の O_3 濃度の変化が対流圏上部の O_3 濃度の変化に大きな影響を及ぼしていると考えられる。さらに、TOMS データの解析から、9月中旬の昭和基地でみられた O_3 全量の増加はオゾンホールが一時的に南下し、昭和基地がその周縁部に位置したためということが分かった。図7によると、1989年9月11日には昭和基地は 300 DU 以下の O_3 全量の低い領域にあったが、9月14日には、オゾンホール周縁部の一時的な南下に伴い昭和基地の O_3 全量は 300 DU 近くまで上昇し、成層圏下部および対流圏上部の O_3 濃度も増加した。9月17日にはオゾンホールは深まり、昭和基地の O_3 全量は 200 DU 以下にまで減少している。このように短い時間スケールについても上記関係が当てはまっていることから、少なくとも昭和基地上空においては、圏界面を通した成層圏 O_3 の対流圏上部への輸送がかなり速やかに行なわれていると考えられる。但し、直上の成層圏からの輸送以外に、他の南極域または南極周辺域で対流圏へ侵入した成層圏 O_3 が水平方向に輸送され、昭和基地上空における対流圏上部の O_3 濃度の変化に影響を及ぼしている可能性も考えられる。実際、9月14日に昭和基地上空の対流圏上部に到達した気塊についてトラジェクトリー解析を行ってみると、かなり多くの粒子が南極大陸の内陸上空で成層圏から対流圏に流入した後、対流圏上部を通過して昭和基地上空に運ばれてきているという結果が得られており(村山ら, 1993)、この時の O_3 濃度の急増については、直上の成層圏下部の O_3 濃度の急増および成層圏起源の大気の輸送が主な原因と考えられる。このように、対流圏上部の O_3 濃度の変化は、主として成層圏下部からの O_3 の輸送により引き起こされていると考えられるが、その過程については、成層圏下部の O_3 濃度の変化以外に大気の輸送過程の変化も重要であると考えられる。

以上の結果と、青木(1997)の対流圏下部の結果とを比較してまとめると南極域の対流圏の O_3 濃度の季節変化は次のような過程により引き起こされていると推察される。対流圏上部では、年間を通して成層圏下部との交換過程により O_3 が供給される。その結果、成層圏下部の O_3 濃度とよく似た季節変化を示す。すなわち、冬から晩春にかけて徐々に減少し、その後再び増加する。一方、対流圏下部では、春から初秋にかけては、南半球の低緯度側からの低濃度の O_3 を持った大気の流入および光化学反応による O_3 の分解により、濃度は減少する。他の季節には、低緯度側からの大気の流入や光化学反応による O_3 の分解は弱まり上空からの O_3 の供給がそれらより卓越するため、下層の O_3 濃度は増加する。その結果、対流圏におけるオゾン濃度の鉛直勾配は晩秋から初春にかけて緩やかであり、晩秋から夏にかけて急になる。このような大気輸送の季節変化は、昭和基地上空の CO_2 濃度の航空機観測の結果から推察された輸送過程と矛盾しない(MURAYAMA *et al.*, 1995)。春から初秋にかけての濃度減少については、昭

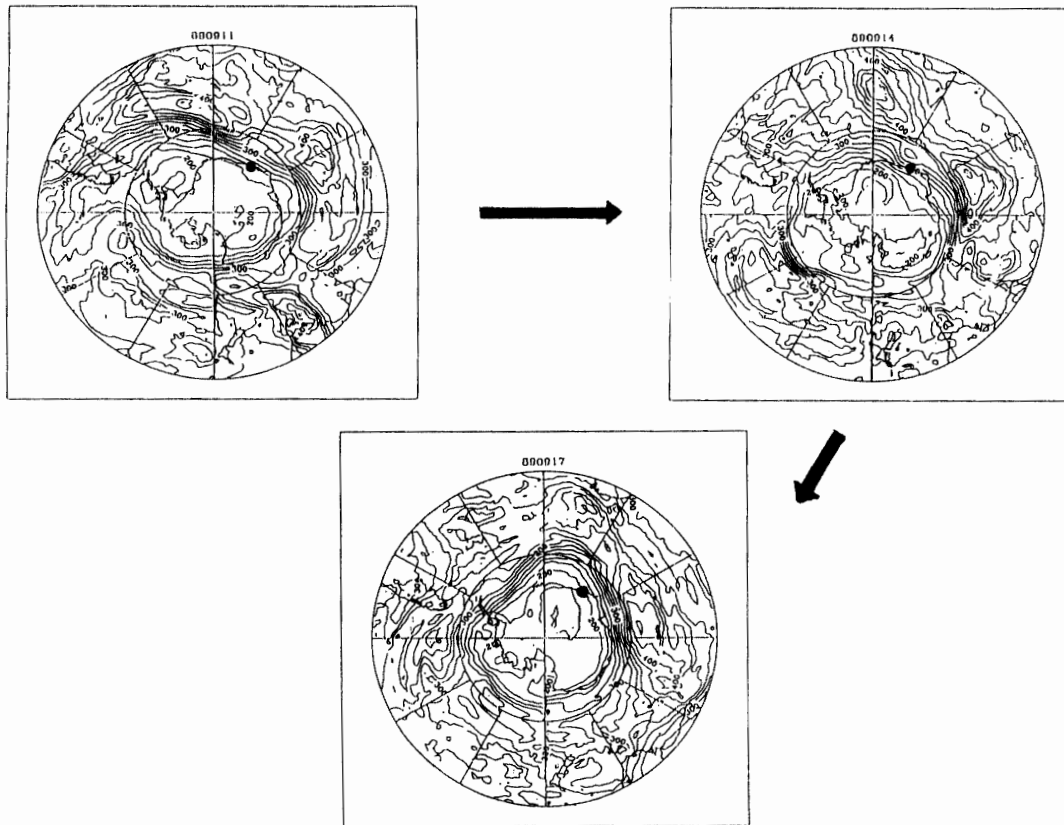


図7 TOMS データによる 1989 年 9 月中旬の南極域上空における O₃ 全量分布の変化 (ドブソン単位)。図中の ● 印は、昭和基地の場所を示す。

Fig. 7. Variations of the total O₃ distribution over the Antarctic region in mid-September 1989 drawn from the TOMS data. The amount of O₃ is expressed in Dobson units. The closed circle shows the location of Syowa Station.

和基地付近では、この時期、雪氷より O₃ の分解効率が大きい露岩が現れ (GALBALLY and ROY, 1980), 地表面における分解が盛んになるためとも考えられるが、濃度が減少し始める時期と露岩出現時期は一致しておらず、また、基地から離れた定着氷上において夏に観測された O₃ 濃度と同時期に昭和基地で観測された濃度値はよく一致しているため、この効果による影響は、小さいものと考えられる。

南極域における対流圏 O₃ 濃度の季節変化を説明し得る他の O₃ の輸送過程として、OLTMANS and KOMHYR (1976, 1986), OLTMANS (1981) および KOMHYR *et al.* (1988) は、南半球中緯度では、成層圏下部の O₃ 濃度の季節変化と地上における季節変化の位相が比較的よく一致していることから、南半球中緯度の圏界面ギャップから対流圏に入った成層圏 O₃ が対流圏上部を通過して南極域に達するという過程を推察しており、この効果の方が南極域の成層圏から対流圏に運ばれる効果より大きいとしている。南極域における対流圏 O₃ は、本文はじめに述べたように成層圏—対流圏間の交換過程をはじめとする南極域における大気循環の有効なトレー

サーとなりうると考えられるが、上の例のようにその濃度変化の解釈には、依然として不確定な部分が多い。今後、南極域の対流圏 O₃ の時間空間変化に関して一層の理解を深めるためには、南半球中高緯度において地上 O₃ 濃度の連続観測に加え、航空機やオゾンゾンデによる通年観測や MATSUBARA *et al.* (1991) によって実施されたような O₃ 濃度の高度-緯度分布観測が有効であり、得られた観測データをトラジェクトリー解析などにより大気輸送過程と結び付けて行くことが必要である。一方、このようなオゾン濃度の変化を用いた南極域における大気輸送過程の推定をより確かなものにするためには、同地域の大気中における光化学反応過程についても正しく理解していくことが必要であろう。

謝 辞

本研究は、第 30 次日本南極地域観測隊の隊員の協力の下に行われた。ここに記して謝意を表したい。

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.
- AOKI, S. and YAMANOUCHI, T. (1994): Variations of tropospheric ozone at Syowa Station, Antarctica. Proceedings of 8th CACGP/2nd IGAC Symposium Fuji-Yoshida, Japan 5-9 September 1994, 23.
- GALBALLY, I.E. and ROY, C.R. (1980): Destruction of ozone at the earth's surface. Q. J. R. Meteorol. Soc., **106**, 599-620.
- KIDA, H. (1983): General circulation of air parcels and transport characteristics derived from a hemispheric GCM. Part 2. Very long-term motions of air parcels in the troposphere and stratosphere. J. Meteorol. Soc. Jpn., **61**, 510-523.
- KOMHYR, W.D., OLTMANS, S.J. and GRASS, R.D. (1988): Atmospheric ozone at South Pole, Antarctica, in 1986. J. Geophys. Res., **93**, 5167-5184.
- OLTMANS, S.J. (1981): Surface ozone measurements in clean air. J. Geophys. Res., **86**, 1174-1180.
- OLTMANS, S.J. and KOMHYR, W.D. (1976): Surface ozone in Antarctica. J. Geophys. Res., **81**, 5359-5364.
- OLTMANS, S.J. and KOMHYR, W.D. (1986): Surface ozone distributions and variations from 1973-1984 measurements at NOAA Geophysical Monitoring for Climate Change Baseline observatories. J. Geophys. Res., **91**, 5229-5236.
- MATSUBARA, K., DOI, M., UEKUBO, T., OKADA, K., AOKI, S. and KAWAGUCHI, S. (1991): Results of ozone observation from the equatorial region to Antarctica in 1987. Proc. NIPR Symp. Polar Meteorol. Glaciol., **4**, 1-11.
- 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.
- 村山昌平・山崎孝治・中澤高清・青木周司 (1993): 昭和基地上空における対流圏オゾン濃度と大気輸送過程の変動。日本気象学会 1993 年春季大会講演予稿集, 111.
- MURAYAMA, S., NAKAZAWA, T., YAMAZAKI, K., AOKI, S., MAKINO, Y., SHIOBARA, M., FUKABORI, M., YAMANOUCHI, T., SHIMIZU, A., HAYASHI, M., KAWAGUCHI, S. and TANAKA, M. (1995): Concentration variations of atmospheric CO₂ over Syowa Station, Antarctica and their interpretation. Tellus, **47B**, 375-390.
- YAMAZAKI, K., OKADA, K. and IWASAKA, Y. (1989): Where do aerosol particles in the Antarctic upper troposphere come from? — A case study in January 1983—. J. Meteorol. Soc. Jpn., **67**, 889-905.

(1996 年 9 月 18 日受付; 1996 年 10 月 29 日受理)