

北極圏航空機観測 (AAMP 98) におけるオゾン濃度連続観測

森本真司*

Continuous measurements of the ozone concentration
in the Arctic Airborne Measurement Program 1998 (AAMP 98)

Shinji Morimoto*

Abstract: Continuous measurement of the ozone concentration was carried out on board a jet airplane as a part of the 'Arctic Airborne Measurement Program 1998 (AAMP 98)' from March 6 to 14, 1998. A newly developed ozone measurement system used in AAMP 98 was capable of precise determination of the ozone concentration from ground level to about 13 km height every 12 s. The ozone data obtained by our system over Svalbard, Norway, agreed well with those by routine ozone sondes. The ozone and CO₂ concentration data clearly showed negative correlations at a constant pressure level of 195 hPa between Barrow, U.S. A. and Longyearbyen, Norway. These results suggest that the 'in situ' ozone data obtained on board an airplane provides useful information for exchange processes between the troposphere and stratosphere as a tracer of stratospheric air.

要旨: 航空機搭載用オゾン濃度連続観測システムを開発し、1998年3月に実施された北極圏航空機観測プログラム (AAMP 98) においてオゾン濃度の連続観測を実施した。我々が開発したシステムは、機内が与圧された航空機上で、地上から高度約 13 km まで 12 秒おきにオゾン濃度を観測することが可能である。本システムを用いて得られたスバルバル諸島 (ノルウェー) 上空のオゾン濃度は、オゾンゾンデによる観測値と非常に良く一致した。一方、バロー (アラスカ) からロングイヤービンまでの 195 hPa 等圧面上におけるオゾン濃度は、同時に観測された CO₂ 濃度と明瞭な逆相関を示した。これらのことから、オゾン濃度は成層圏大気のトレーサーとして成層圏-対流圏間の大気輸送過程に関する有効な情報を持つことが明らかになった。

1. はじめに

対流圏・下部成層圏のオゾン濃度は、中上部成層圏において光化学反応によって生成されたオゾンの下方への輸送と、その場での光化学反応による生成・消滅、そして対流圏での鉛直混合の結果、対流圏ではほぼ均一の値を示し、下部成層圏では高度と共に急増することが知られている。そのため、下部成層圏・上部対流圏においてオゾン濃度を精密に観測することによ

*国立極地研究所。National Institute of Polar Research, Kaga 1-chome, Itabashi-ku, Tokyo 173-8515.

て、成層圏—対流圏間の大気の交換過程をはじめとする大気・物質輸送に関する情報が得られると期待される。これまで、オゾン濃度の航空機観測は北半球中緯度や南極域で実施されており、得られたデータは中緯度では対流圏界面ギャップからの成層圏大気の流入の指標として (Browell *et al.*, 1987)、南極域では成層圏から対流圏への沈降流の指標として (Murayama *et al.*, 1992) 用いられていた。

我々は、下部成層圏まで上昇することが可能な航空機に搭載することを目的としたオゾン濃度連続観測システムを新たに開発し、1998年3月6日～14日の期間、北極圏航空機観測プロジェクト (AAMP 98) においてオゾン濃度の連続観測を実施した。AAMP 98では、日本から北極点を越えてノルウェー・ロングイヤービンまでの長距離フライト時には等圧面上オゾン濃度を、その途中の降機地では地上から気圧高度約 200 hPa までのオゾン濃度鉛直分布を観測することに成功した。本報告では、オゾン濃度連続観測システムの概要と、AAMP98 で観測されたオゾン濃度の分布と変動について述べる。

2. オゾン濃度連続観測システム

機内が与圧された航空機に搭載して下部成層圏大気中のオゾン濃度を高精度で測定するために、新たに航空機搭載用オゾン濃度連続観測システムを開発した。本システムは、低圧空気試料昇圧ポンプを含むガスハンドリング部、オゾン計及びデータ収録部で構成されている。本システムの構成部品を表1に、配管・配線図を図1に示す。

本システムには、光学セルに導入された空気試料中のオゾンによる紫外光の吸収量からオゾン濃度を測定する Dasibi タイプのオゾン計 model 1100 (ダイレック製) を使用した。この装置は地上で使用するように設計されているために、内蔵されている試料空気吸引用ダイヤフラムポンプは成層圏の希薄な大気を与圧された航空機キャビンに吸引する能力を持たない。そこで、オゾン計の前段に昇圧用ポンプ (FX7700, エノモトマイクロポンプ) を設けて、まず機外の空気をキャビン圧以上に昇圧してからマニホールド部に供給した。更に、オゾン計内蔵のダイヤフラムポンプで試料空気をマニホールド部から吸引し、オゾン計光学セルに導入した。オゾン計光学セル内の試料空気流量は航空機のキャビン圧力下 (約 850 hPa) で 1.5 l/min であり、データ取得周期は 12 秒であった。オゾンは化学的に活性な気体であり、配管内で分解さ

表1 オゾン濃度連続観測システムの構成

Table 1. Components of the continuous ozone concentration measurement system.

オゾン計	ダイレック model 1100
昇圧用ポンプ	エノモトマイクロポンプ FX7700
気圧計	バイサラ PTB220
温度計	オムロン E5CX
GPS 受信機	ソニー IPS5000
データ収録	極地研 万能コントローラ ver.1.0

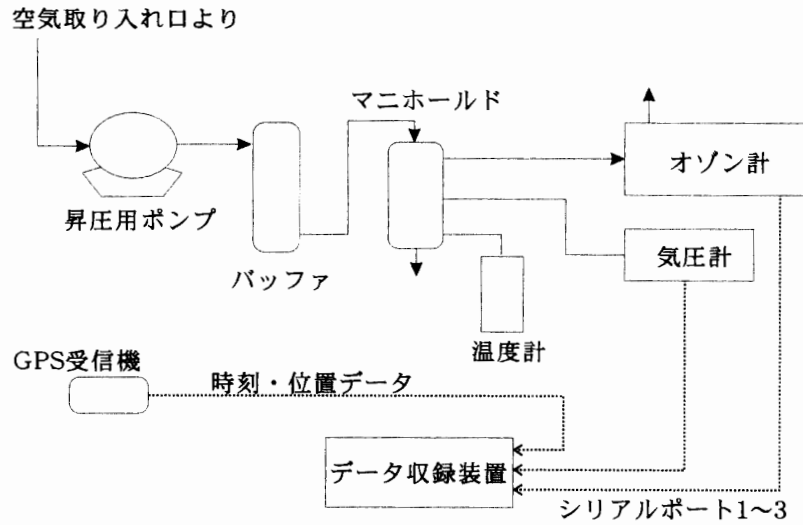


図1 オゾン濃度連続観測システムの概要

Fig. 1. Schematic diagram of the continuous ozone concentration measurement system.

れる可能性がある。これを避けるために機体の空気取り入れ口からオゾン計までの配管はすべてテフロン製とし、昇圧用ポンプの接ガス部分にもテフロンコーティングを施した。オゾン濃度既知の空気をこの配管系に流してオゾン濃度を測定することにより、試料空気が昇圧用ポンプを通過する際にオゾンの分解が起こらないことを確認した。

オゾン計は前述したとおり光学セル内のオゾン分子数に応じた紫外光吸収量を測定するために、オゾン濃度を正確に知るには光学セル内の試料空気の温度・圧力変動を同時に測定する必要がある。本システムでは、熱電対温度計 (オムロン) および PTB220 (バイサラ) を使用して、マニホールド部分の温度・圧力を独立に測定した。しかし、実際の観測飛行中にはマニホールド部分における試料空気温度の変動は 23.5 ± 2.5 度であり、オゾン計光学セル部分での温度変動はこれより更に小さいと考えられることから、オゾン濃度観測データの補正の際には試料圧力の変動のみを考慮することにした。使用したオゾン濃度の補正式は以下の通りである。

$$C_{\text{true}} = C_{\text{app}} \times 1013.15 / P_m, \quad (1)$$

ここで、 C_{true} 、 C_{app} (ppbv) はそれぞれ補正後のオゾン濃度とオゾン計の出力値であり、 P_m (hPa) はマニホールド部の試料空気圧力である。オゾン計本体は、航空機搭載前と使用後に国立極地研究所の気相滴定装置 (青木, 1997) を用いて校正した。オゾン計の相対精度は 1 ppbv 以下、気相滴定装置の検定精度は 2 ppbv 以下 (青木, 1997) であり、圧力計の精度が ± 0.15 hPa であることから、本システムの測定精度は約 2 ppbv と推定される。

データ収録には国立極地研究所で独自に開発したデータロガーを使用した。この装置は航空機の離陸・着陸時などの衝撃に耐えるように設計されており、可動部分を持つ部品は一切使用されていない。データ入出力用に RS232C ポートを 3 チャンネル備え、データは EPROM (読

み出し専用メモリ)に書き込まれた測定シーケンスに従って、内蔵の PCMCIA メモリカードに保存される。本システムでは、チャンネル 1, 2 にそれぞれオゾン濃度データ及びマニホールドの圧力データを入力した。また、チャンネル 3 には小型 GPS 受信機 (IPS5000, ソニー) を接続し、GPS 衛星から送信される正確な時刻データあるいは GPS 受信機の内蔵時計による時刻データを入力した。これらのデータは、オゾン計のデータ出力周期と同期させて 12 秒ごとに PCMCIA メモリカードに保存した。また観測飛行中に、適宜、試料空気温度を熱電対温度計から読みとり記録紙に記録した。

3. 観測結果

北極圏航空機観測プログラム (AAMP 98) では、1998 年 3 月 6 日に名古屋を離陸した後、ペトロパブロフスク (ロシア; 53°N, 158°E), アンカレッジ (アメリカ; 61°N, 150°W), バロー (アメリカ; 71°N, 157°W) を経由してロングイヤービン (ノルウェー; 78°N, 15°E) に達し、ニーオルスン (79°N, 13°E) 上空のプロファイル飛行とスバルバル諸島南方での雲観測を行った。再び 3 月 12 日にロングイヤービンを離陸し、同じルートを飛行して 3 月 14 日に名古屋に帰着した (Shiobara *et al.*, 1999)。オゾン濃度連続観測システムはすべての飛行で良好に動作したが、往路の名古屋—ペトロパブロフスク間のみ観測終了後の停電のためデータが失われた。

以下、オゾン濃度の観測結果の概略について述べる。

図 2 に、1998 年 3 月 8 日 (a) 及び 3 月 10 日 (b) にニーオルスン・ロングイヤービン上空で観測したオゾン濃度の鉛直分布を示す。この両日に、独・アルフレッド・ウェゲナー極地海洋研究所 (AWI) がニーオルスンから放球したオゾンゾンデによる観測値もあわせて示した。この図から明らかなおとおり、我々の観測値は航空機の上昇中及び降下中共にオゾンゾンデによる観測値と非常によい一致を示しており、我々のオゾン濃度連続観測システムの観測データに十分な信頼性があることが分かる。ただし、対流圏下部については、我々のデータとオゾンゾンデデータとの間で多少の違いが見られる。特に図 2b に示す 3 月 10 日の観測結果によると、地上付近でその差が大きい。これは、我々のデータがニーオルスンの南方ほぼ 50 km のロングイヤービン空港から離発着した航空機によって得られたのに対し、オゾンゾンデはニーオルスンから放球されたことから、オゾン濃度の空間的な違いを反映しているものと考えられる。

図 2 によると、オゾン濃度は対流圏でほぼ 30–50 ppbv を示し、対流圏上部から成層圏にかけて急激に上昇している。また、3 月 8 日には気圧高度約 360 hPa からなだらかにオゾン濃度が上昇しているが、3 月 10 日のオゾン濃度は約 280 hPa 以上で急激に上昇していることが分かる。対流圏界面付近のオゾン濃度の変動を調べるために、3 月 7 日から 3 月 12 日にかけて航空機のロングイヤービン空港離着陸時に得られたオゾン濃度の鉛直分布を図 3 に示す。レーウィンゾンデで観測された 3 月 7 日から 11 日までの圏界面高度も図 3 に示した。この図に示すとおり、3 月 7 日から 10 日までは約 280 hPa 付近であった圏界面高度が、11 日には 230 hPa に上

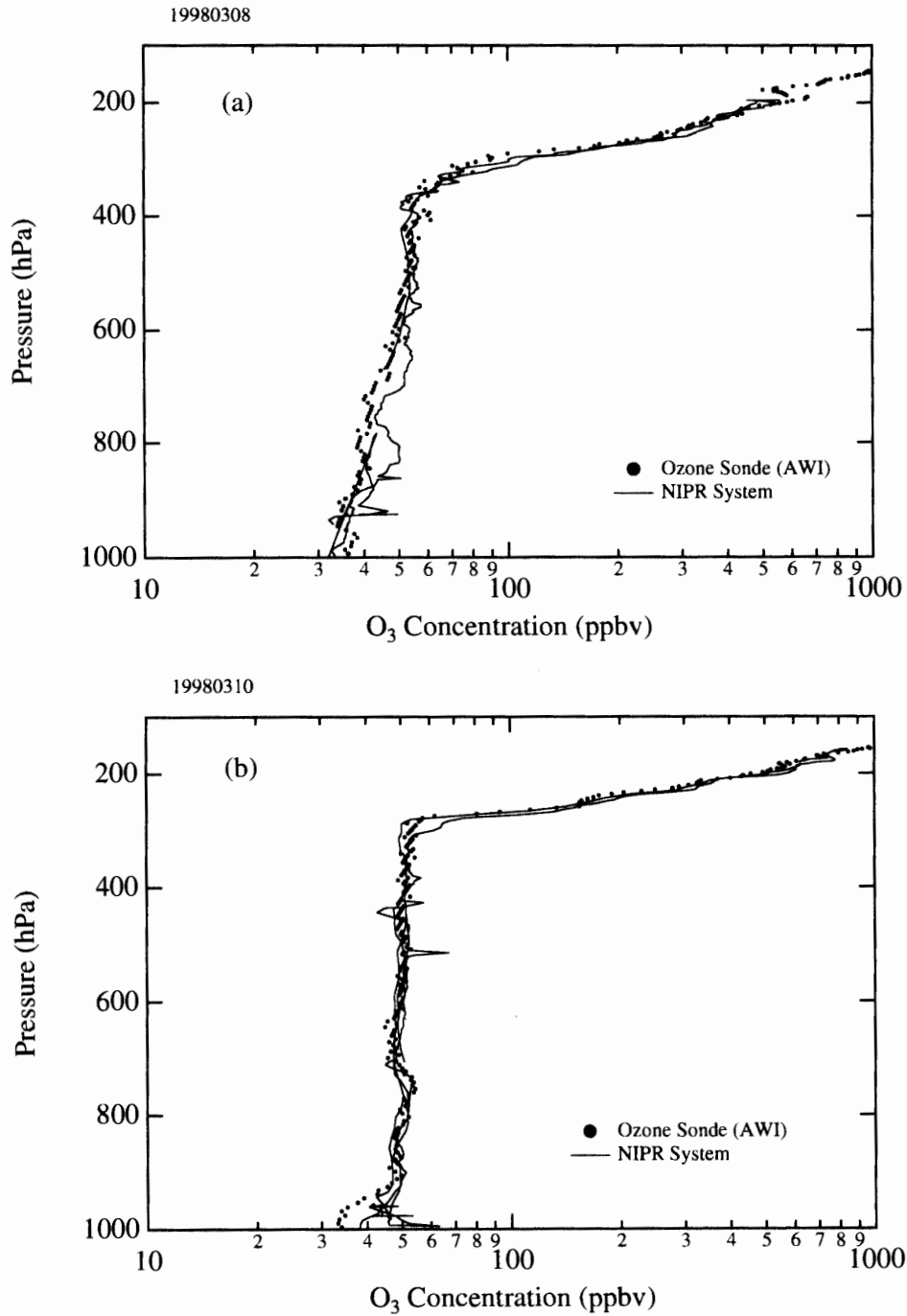


図2 1998年3月8日(a)と10日(b)にスバルバル諸島上空で観測されたオゾン濃度の鉛直分布。実線はAAMP 98航空機観測による結果、黒点はオゾンゾンデによる観測値(独・アルフレッド・ウェゲナー極地海洋研究所提供)。

Fig. 2. Vertical profiles of the ozone concentration observed over Svalbard, Norway, on March 8 (a) and 10 (b), 1998. Solid lines and solid circles represent the ozone data obtained by our continuous system at AAMP 98 and by ozone sondes, respectively. The ozone sonde data were provided by the Alfred Wegener Marine and Polar Institute, Germany.

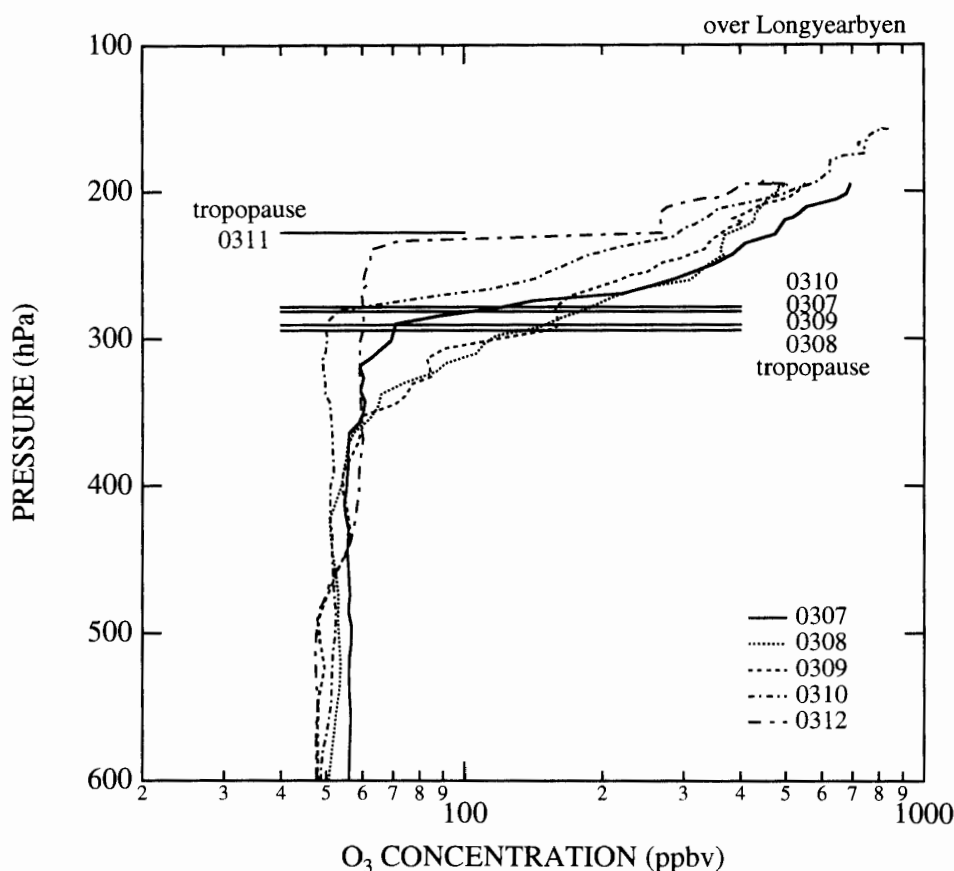


図3 1998年3月7日から12日までスバルバル諸島上空で観測されたオゾン濃度の鉛直分布と対流圏界面高度の変化

Fig. 3. Vertical profiles of the ozone concentration over Svalbard, Norway, from March 7 to 12, 1998. Also shown are tropopause heights.

昇していた(3月12日のレーウィンゾンデ観測は実施されていない)。圏界面高度とオゾン濃度の鉛直分布を比較すると、3月7日と3月10日以降はオゾン濃度が急激に上昇を始める高度と対流圏界面高度が一致しているが、3月8,9日の両日は両者が一致しておらず、およそ350 hPaから対流圏界面まで対流圏(約30-50 ppbv)と比較して明らかに高い濃度が観測されていることが分かる。レーウィンゾンデデータから計算した温位の鉛直分布は、3月8,9日の両日に上部対流圏に温位の高い成層圏大気が下降していたことを示しており、オゾン濃度の増大も成層圏大気が対流圏界面を越えて対流圏上部に流入したことが原因と考えられる。

次に、長距離フライト中に得られたオゾン濃度の分布と変動の一例を示す。図4に、1998年3月7日のバローからロングイヤービン間の長距離フライトにおける飛行高度(気圧高度)(a)と、観測されたオゾン濃度とCO₂濃度(町田ら, 2002)(b)を示した。図4aに示されているとおり、バロー離陸後の73°N付近からロングイヤービン着陸前の80°N付近まで195 hPaの等圧面上の飛行であった。図4bから、等圧面上を飛行中はオゾン濃度とCO₂濃度が明瞭な逆相関を示しながら変動していることが分かる。オゾンの主な生成域は中上部成層圏であること、

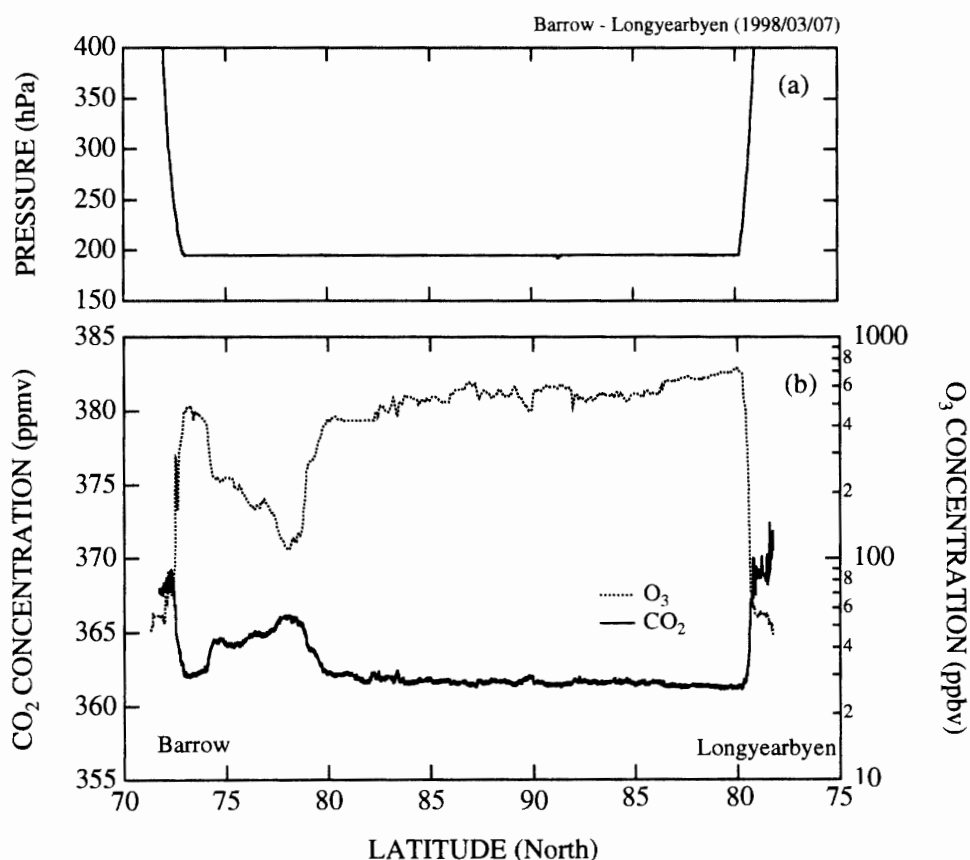


図4 1998年3月7日のバローからロングイヤービン間のフライト時の飛行高度 (a) とオゾン濃度・CO₂濃度の変動 (b)

Fig. 4. Cruising altitude (a) and variations of the ozone and CO₂ concentrations (b) between Barrow and Longyearbyen on March 7, 1998.

一方のCO₂放出源は地上にあることを考慮すると、両者が逆相関を示しながら変動しているということは、観測されたオゾン濃度の変動はその場でのオゾンの生成・消滅を反映しているのではなく、成層圏下部における空気塊の上下方向の動きを反映していると言える。特にアラスカ側の74°Nから80°Nにかけては、オゾン濃度が約500 ppbvから約100 ppbvまで急激に減少した後再び約500 ppbvまで回復しているのに対し、CO₂濃度は約362 ppmvから366 ppmvまで増加してから再度約362 ppmvに低下している。NCEP再解析データによると、3月7日にはアラスカの北方74°Nから82°NまでのAAMP航路上で対流圏界面が上昇していたことが示されており、これはオゾン濃度、CO₂濃度の異常値が観測された場所と一致する。さらに、圏界面高度がこの周辺で極大の230 hPaであった78°Nにおいて、オゾン濃度、CO₂濃度がそれぞれ極小・極大値を示していた。これらの事実から、対流圏起源のCO₂濃度が高くオゾン濃度が低い空気塊が何らかの原因でAAMPの飛行高度である成層圏下部(195 hPa)近くまで持ち上げられ、周りの空気との混合が起こったことが原因と考えられる。

4. ま と め

機内が与圧された航空機に搭載可能な高精度オゾン濃度連続観測システムを開発した。本システムは、高度 13 km 以下 (気圧約 180 hPa 以上) において、12 秒おきに測定精度約 2 ppbv 以下でオゾン濃度を観測することが可能である。1998 年 3 月 6 日から 3 月 14 日に実施された北極圏航空機観測プロジェクトにおいて、本システムをガルフストリーム II 型ジェット機に搭載してオゾン濃度の連続観測を行った。得られたデータから、オゾンは対流圏界面付近から下部成層圏にかけてその濃度が急激に増加するため、大気鉛直方向の輸送・混合を調べる上で非常に適したトレーサーであることが示された。また、地上に起源を持つ安定な気体、たとえば CO₂ を航空機上で同時に測定することにより、観測されたオゾン濃度の変動がその場でのオゾンの生成消滅によるものか大気鉛直輸送によるものかを判断できることも明らかになった。得られたオゾン濃度データは、航空機による温室効果気体やエアロゾルの観測にとって、成層圏大気のトレーサーとして、また、大気鉛直輸送の指標として有効であると考えられる。

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.
- Browell, E.V., Danielsen, E.F., Ismail, S., Gregory, G.L. and Beck, S.M. (1987): Tropopause fold structure determined from airborne lidar and *in situ* measurements. J. Geophys. Res., **92**, 2112-2120.
- Shiobara, M., Fujii, Y., Morimoto, S., Asuma, Y., Yamagata, S., Sugawara, S., Inomata, Y., Watanabe, M. and Machida, T. (1999): An overview and preliminary results from the Arctic Airborne Measurement Program 1998 campaign. Polar Meteorol. Glaciol., **13**, 99-110.
- 町田敏暢・Maksyutov, S.・菅原 敏・森本真司 (2002): 北極域対流圏及び下部成層圏における二酸化炭素濃度の航空機観測。南極資料, **46 (1A)**, 125-138.
- Murayama, S., Nakazawa, T., Tanaka, M., Aoki, S. and Kawaguchi, S. (1992): Variation of tropospheric ozone concentration over Syowa Station, Antarctica. Tellus, **44B**, 262-272.

(2001 年 6 月 12 日受付; 2002 年 1 月 28 日受理)