

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町田 敏暢¹・Shamil Maksyutov^{1*}・菅原 敏²・森本 真司³Airborne observation of CO₂ mixing ratio in the Arctic troposphere
and lower stratosphereToshinobu Machida¹, Shamil Maksyutov^{1*}, Satoshi Sugawara²
and Shinji Morimoto³

Abstract: Tropospheric and lower stratospheric CO₂ mixing ratios were measured onboard an aircraft in the Arctic Airborne Measurement Program 1998. Steep vertical gradients in CO₂ mixing ratio were observed in the lower stratosphere. Small gradients were seen in the troposphere, reflecting weak sources and sinks for CO₂ in winter. A significant increase in CO₂ mixing ratio was found during level flight in the lower stratosphere. Back trajectory analysis indicated that rapid upward transport brought high CO₂ to the observation area. Spatial variations of CO₂ mixing ratio were highly correlated with O₃ mixing ratio. It is suggested that CO₂ distribution was produced mainly by air transport and mixing.

要旨: 1998年の3月に実施された北極圏航空機観測計画 (Arctic Airborne Measurement Program 1998; AAMP 98) において航空機にCO₂濃度連続観測装置を搭載し、北極域対流圏及び下部成層圏におけるCO₂濃度の空間分布を観測した。CO₂濃度は下部成層圏において高度と共に急激に減少する鉛直勾配が存在しているが対流圏においては鉛直方向の濃度勾配は非常に小さかった。下部成層圏における水平分布においては緯度方向にCO₂濃度の系統的な勾配は見られなかったが、78°-80°Nにおいて水平飛行中に極めて高濃度のCO₂が観測された。このことから、等圧面上であってもCO₂濃度の分布が水平方向に大きく異なる場合のあることが明らかになった。本観測で得られたCO₂濃度とO₃濃度は非常に良い負の相関を示す。これは濃度の空間分布が主に空気塊の混合に支配されていることを表している。

¹ 国立環境研究所, National Institute for Environmental Studies, Onogawa 16-2, Tsukuba 305-8506.

² 宮城教育大学, Institute of Earth Science, Miyagi University of Education, Sendai 980-0845.

³ 国立極地研究所, National Institute of Polar Research, Kaga 1-chome, Itabashi-ku, Tokyo 173-8515.

*Present address: 地球フロンティア研究システム, Frontier Research System for Global Change, Harumi 1-8-10, Chuo-ku, Tokyo 104-6023.

1. はじめに

地球表層の炭素循環を解明する目的で世界の多くの観測点において大気中の二酸化炭素 (CO_2) 濃度が系統的に計測されているが、そのほとんどは地表付近の混合層内で行われており (例えば, Conway *et al.*, 1994; Keeling *et al.*, 1995; Francy *et al.*, 1995; Nakazawa *et al.*, 1997), 自由対流圏における系統的観測は極めて例が少ない (Nakazawa *et al.*, 1991, 1993, Matsueda and Inoue, 1996; Francy *et al.*, 1999; Machida *et al.*, 2000). 自由対流圏における CO_2 濃度の観測は、大気輸送を 3 次元的に扱った炭素循環モデル (フォワードモデル) にとっては制約条件として、3 次元モデルを逆演算して使うインバースモデルにとっては入力データとしてその必要性が近年高まっている。

一方、 CO_2 はその化学的に安定な性質から大気中の消滅反応によって濃度が減少することはほとんどない。また、大気中のメタンや非メタン炭化水素等の酸化反応によって一酸化炭素の形態を経て生成される CO_2 の量は大気中濃度の時間的・空間的変動に比べると十分小さい。即ち大気中の CO_2 濃度は地表付近の強い放出源・吸収源の影響で大きく変動する以外は、自由対流圏や成層圏において極めて安定であると言える。従って CO_2 を大気のトレーサーとして利用することが可能となり、対流圏や成層圏の大気輸送や大気の構造について多くの知見が得られている (例えば, Boering *et al.*, 1996; Hintsa *et al.*, 1998; Machida *et al.*, 2002)。

北極域での大気微量成分の 3 次元分布の観測を通して極渦の崩壊期における大気の輸送・変質の物理・化学過程を調べる目的で 1998 年の 3 月に北極圏航空機観測計画 (Arctic Airborne Measurement Program 1998; AAMP98) が実施された (Shiobara *et al.*, 1999)。本観測飛行において観測機に CO_2 濃度連続測定装置を搭載し、北極域における CO_2 濃度の対流圏から下部成層圏にかけての鉛直分布や下部成層圏における緯度分布を観測した。本稿では得られた結果を示すと共に CO_2 濃度の空間分布から予想される大気の輸送について考察する。

2. 観測方法

観測機は 1998 年 3 月 5 日に名古屋を出発し、ロシアのペトロパブロフスク、アラスカのアンカレッジ、バロー、北極点を経てスバルバル諸島のロングイヤービンに達し、同様のルートを経て 3 月 14 日に名古屋に戻った (図 1)。途中の各寄港地とスバルバル諸島周辺の 3 地点で CO_2 濃度の鉛直分布を、各寄港地間の移動の際に下部成層圏での CO_2 濃度の水平分布を観測した。

航空機搭載型 CO_2 濃度連続測定装置の概略を図 2 に示す。観測機の空気取入口から引き込まれた大気試料はダイアフラムポンプによって加圧され、Nafion ドライヤーと過塩素酸マグネシウムで除湿された後に NDIR (LI-COR, LI-6262) に導入される。NDIR の空気出口に接続したバッファー容器には内部の絶対圧力を一定に保つ装置が備えられているので、飛行高度の

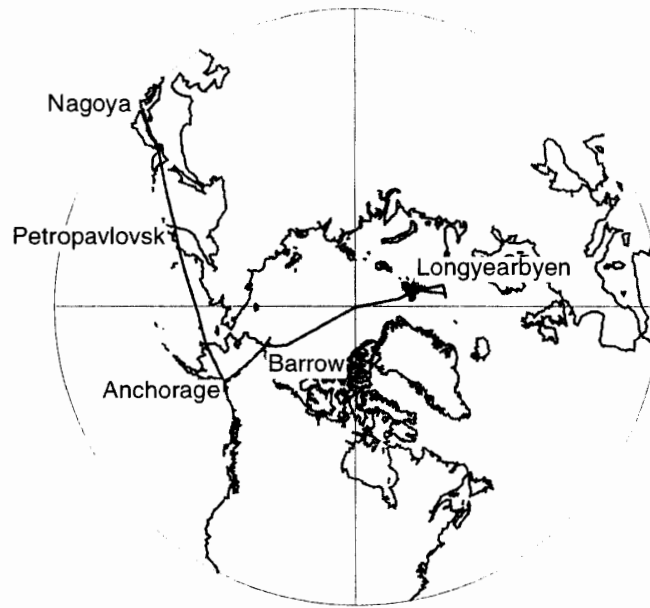


図1 北極圏航空機観測の飛行経路

Fig. 1. Flight tracks during the AAMP 98 campaign.

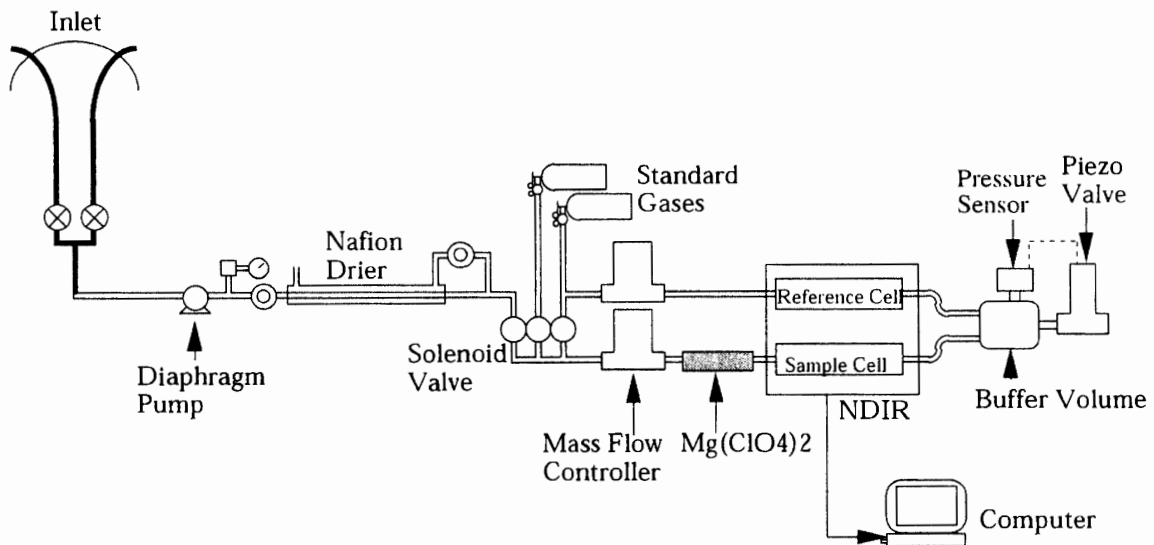


図2 航空機搭載型 CO₂ 濃度連続測定装置の概略

Fig. 2. Schematic diagram of the CO₂ measurement system.

変化に伴うキャビン圧の変動に対して NDIR の出力が影響を受けない仕組みになっている。観測中は CO₂ 濃度既知の標準ガスと試料空気を交互に NDIR に導入することによって試料空気中の CO₂ 濃度を標準ガスの濃度に対して決定した。本装置の応答速度は約 6 秒、CO₂ 濃度の測定精度は ±0.1 ppmv 以内と見積もられている (Machida *et al.*, 2002)。データ取得頻度は 1 秒である。

3. 結果と考察

3.1. 鉛直分布

AAMP 98 観測で得られた北半球中緯度から北極圏上空における CO₂ 濃度の鉛直分布を図 3 に示す。図 3 に矢印で示される対流圏界面より上部の下部成層圏では高度と共に CO₂ 濃度が急激に減少している。圏界面高度は本観測で得られた気温の鉛直分布より決定した。一方対流圏においては比較的小さな濃度勾配が存在し、その傾きは低緯度ほど大きくなっている。

下部成層圏における CO₂ 濃度が対流圏に比べて低い理由は、1) 中高緯度帯の成層圏大気は対流圏大気に比べて年代が古く (Nakazawa *et al.*, 1995)、大気中 CO₂ 濃度の経年増加分だけ低濃度になること、及び 2) 下部成層圏における CO₂ 濃度の季節変動は北半球中高緯度の上部対流圏に比べて非常に小さい (Nakazawa *et al.*, 1991) うえに本観測が行われた 3 月は北半球中高緯度の CO₂ 濃度が季節的に極大に近い (Nakazawa *et al.*, 1991, 1993) ことの 2 点が考えられる。

下部成層圏において CO₂ 濃度に急激な濃度勾配が存在することは、大気球を使った成層圏大気のサンプリング実験で得られた結果と整合している (Schmidt and Khedim, 1991; Nakazawa *et al.*, 1995; 青木ら, 2000)。図 4 は 1997 年 2 月と 3 月にスウェーデン、キルナ上空において大気球を使ったクライオジェニックサンプリングによって得られた CO₂ 濃度 (青木ら, 2000) と 1 年後に本観測で得られたニーオルスン上空の CO₂ 濃度を北半球高緯度における冬季の鉛直分布としてまとめたものである。成層圏における CO₂ 濃度は年に約 1.5 ppm の割合で増加している (Nakazawa *et al.*, 1995)、キルナ上空の結果には 1.5 ppm を加えてある。図 4 では両観測で得られた CO₂ 濃度が高度方向に連続しており、それぞれの観測の妥当性を裏付ける結果となっている。また、図 4 より冬季の北半球高緯度における下部対流圏から中部成層圏にかけての CO₂ 濃度の鉛直分布が、下部対流圏にのみに大きな勾配を持ち、その上下の中部成層圏と対流圏においてはほぼ一定の構造であることがわかる。これまでの気球観測では成層圏下端における CO₂ 濃度の観測例は少なかったが、本研究の結果はこの領域を補うデータとなっている。

名古屋上空における低高度の非常に高い CO₂ 濃度 (図 3a) は主に化石燃料起源のものであると考えられるが、高濃度層が 4 km にまで達していることから、その発生源は名古屋付近のみとは考えにくい。おそらく中国大陸から季節風に乗って輸送されてくる高濃度の CO₂ を持った空気塊もこれらの高濃度層を形成する要因となっているであろう。高度 4 km 以上でも名古屋上空の CO₂ 濃度は他の観測地点で見られるような等濃度の層が存在せず、高度と共に濃度が減少している。名古屋上空では高度 4-5 km で下層の高濃度の影響を、高度 5 km 以上では成層圏の影響をそれぞれ受けていて、鉛直方向の混合が進んでいないと考えられる。ペトロパブロフスク上空においては高度 3 km 以下に CO₂ 濃度の高い層が観測されている。これも東

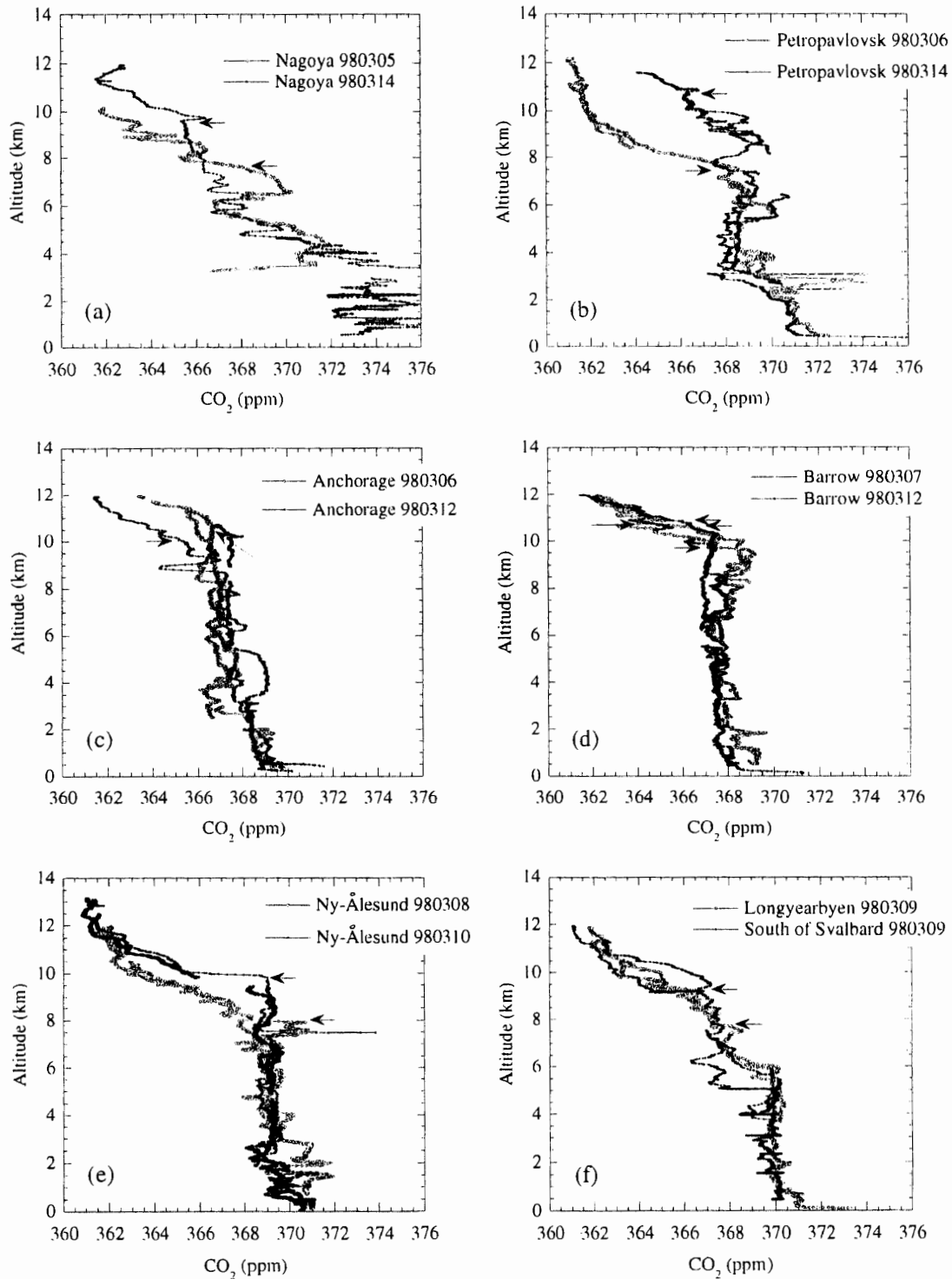


図3 名古屋 (a), ペトロボプロフスク (b), アンカレッジ (c), バロー (d), ニーオルスン (e), ロングイヤービン及びスバルバル南部の海上 (f) 上空における CO₂ 濃度の鉛直分布。矢印は圏界面の高度を表す。

Fig. 3. Vertical distributions of the CO₂ mixing ratio over Nagoya (a), Petropavlovsk (b), Anchorage (c), Barrow (d), Ny-Ålesund (e), Longyearbyen (f) and south of Svalbard (f). Arrows denote the tropopause heights.

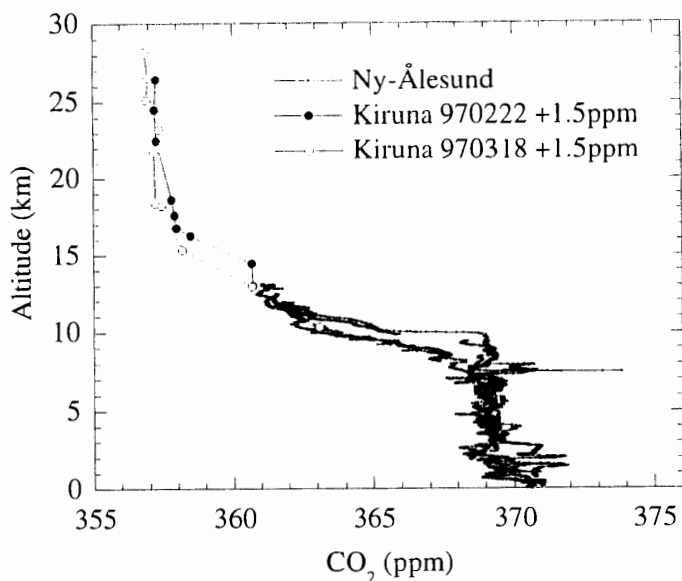


図4 北半球高緯度における冬季の対流圏から中部成層圏にかけてのCO₂濃度の鉛直分布。小さな黒丸が本観測のニーオルスン上空の結果。大きな白丸と黒丸が大気球観測の結果(青木ら, 2000)。

Fig. 4. Vertical distributions of the CO₂ mixing ratio from the troposphere to the mid-stratosphere at northern high-latitudes in winter. Small solid circles represent data obtained by this study. Large solid and open circles represent data obtained by balloon sampling (Aoki et al., 2000).

アジア又はロシア極東からの輸送によるものと考えられるが、その濃度は名古屋上空に比べて低く、高濃度が及んでいる高度も低い。高度3 km以上の対流圏の濃度には勾配はほとんど見られず、368-370 ppm 低濃度である。大陸の直接的な影響はこれらの高度にまでは及んでいないと考えられる。アンカレッジ、パロー及びスバルバルといった北極域上空では空港付近の局所的な高濃度を除いて下部対流圏に高濃度層は存在していない。これらの地域はユーラシア大陸や北米大陸の人間活動の影響を受けた空気塊が直接輸送されにくい場所に位置しているためであると考えられる。また、北極域では対流圏全体にわたって高度方向の濃度勾配が非常に小さい。

上部対流圏において圏界面の直下に低濃度のCO₂がしばしば観測されている。これらには圏界面を通して成層圏から対流圏に輸送されたものと、圏界面高度が短時間のうちに上昇してしまいそれまで成層圏であった層が対流圏に取り残されてしまったものが存在すると考えられる。

図5は各観測地点における自由対流圏の等濃度層のCO₂濃度を比較したものである。自由対流圏のCO₂濃度はスバルバル諸島周辺よりもアラスカの方が2 ppmほど低くなっている。3次元炭素循環モデルを使った解析によるとスバルバル諸島周辺の自由対流圏においては冬季のヨーロッパからの化石燃料起源CO₂の影響が有意に存在するが、アラスカ域の自由

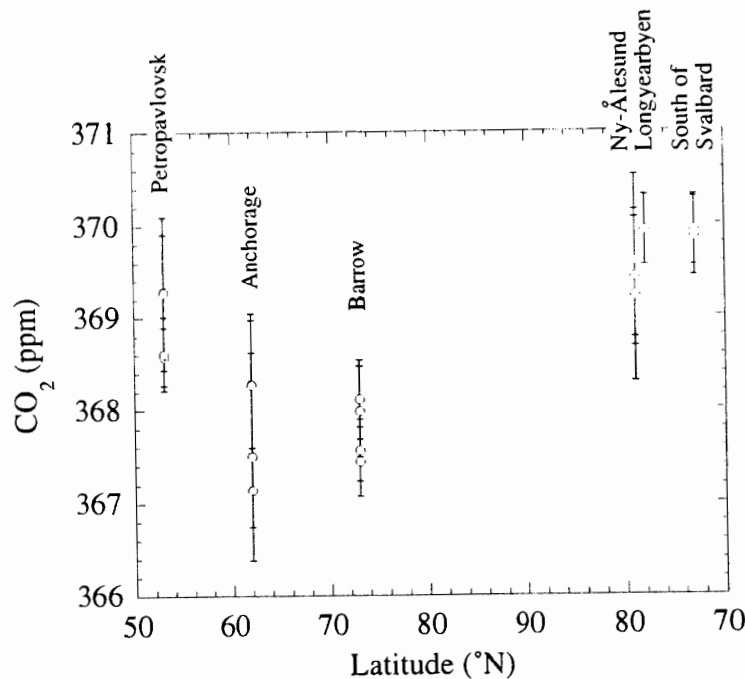


図5 各観測地点における自由対流圏の等濃度層のCO₂濃度。白丸は平均値を、エラーバーは標準偏差を表す。

Fig. 5. Averaged CO₂ mixing ratios in the free troposphere. Open circles and error bars represent average values and standard deviations, respectively.

対流圏においては太平洋の影響を受けやすいためCO₂濃度がそれほど高くない (S. Maksyutov, 私信)。スバルバル諸島周辺もアラスカ域も地表付近に見られるような人為起源CO₂の直接的な影響は観測されていないが、より大規模な大気循環によって人為起源CO₂の影響に差が生じているらしい。ペトロパブロフスクはアラスカと同じ北太平洋域にあるが、アラスカに比べてユーラシア大陸の影響を受けやすいので自由対流圏のCO₂濃度がやや高めになっていると考えられる。

3.2. 緯度分布

本観測の各寄港地間におけるフェリーフライトの際に高高度で得られたCO₂濃度の緯度分布を図6に示す。これらの高度は離陸時及び着陸時に確認された圏界面高度より高いこと及び、CO₂濃度が対流圏に比べて低くO₃が100 ppb以上の高濃度であることから、すべてのデータが下部成層圏のものであると考えられる。

下部成層圏におけるCO₂濃度は緯度方向に系統的な勾配は見られないが、同じ高度を飛行していても緯度方向に濃度が大きく変化している空域のあることがわかる。CO₂の絶対濃度は低高度を飛行した場合は系統的に高い傾向がある。

同一高度におけるCO₂濃度の緯度分布を考察するために、高度11.8 km付近の水平飛行で

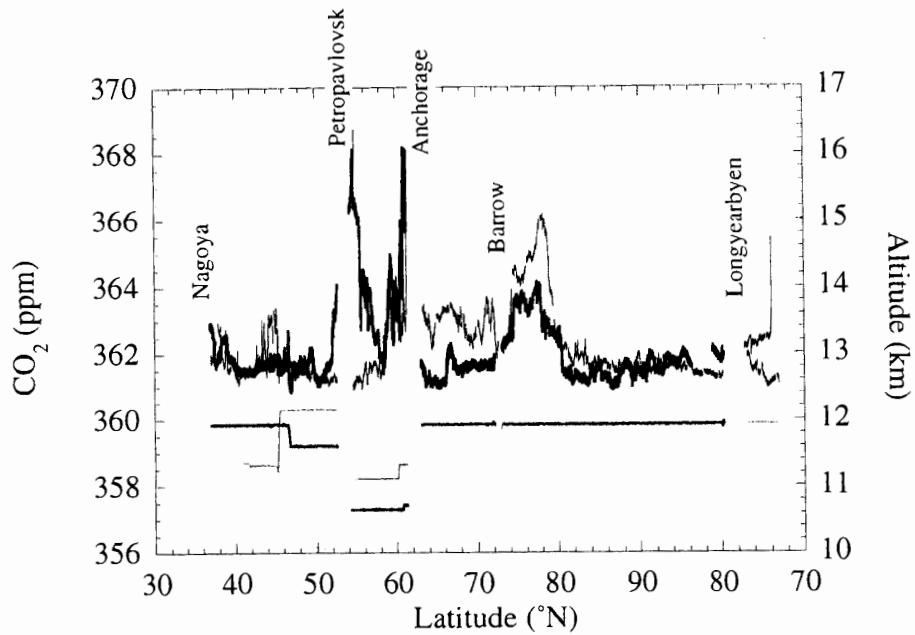


図6 下部成層圏におけるCO₂濃度と飛行高度の緯度分布. 細線が往路, 太線が復路を表す.
 Fig. 6. Meridional distributions of the CO₂ mixing ratio and flight altitudes in the lower stratosphere. Thin lines and thick lines represent outward and inward flights, respectively.

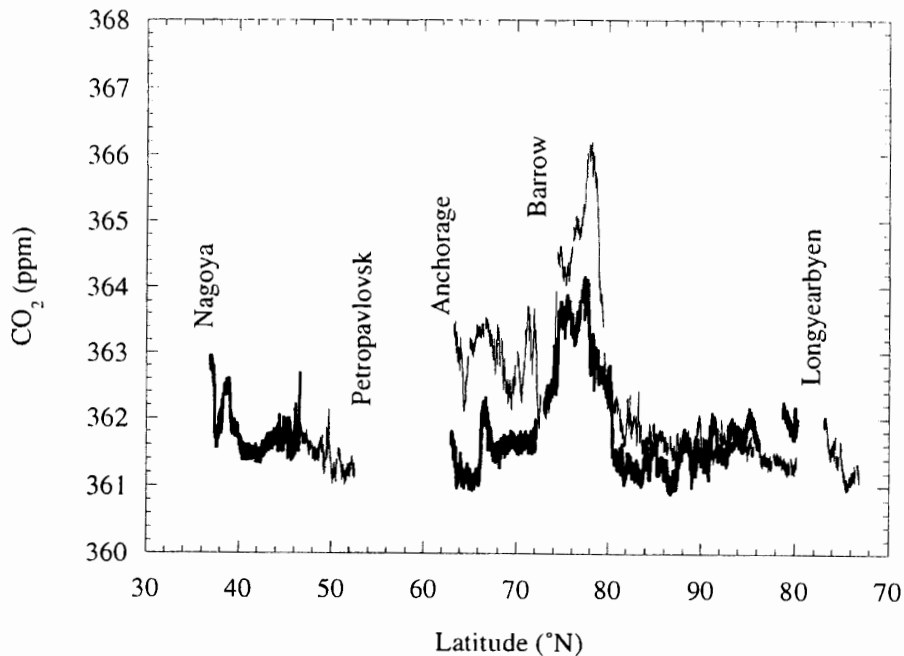


図7 高度11.8 km付近の水平飛行で得られた下部成層圏におけるCO₂濃度の緯度分布. 細線が往路, 太線が復路を表す.
 Fig. 7. Meridional distributions of the CO₂ mixing ratio at 11.8 km altitude. Thin lines and thick lines represent outward and inward flights, respectively.

得られた結果だけを抜き出したものが図7である。CO₂濃度はバローと北極点の間の78°-80°N以外では約362 ppmでほぼ一定であるが、この緯度帯だけは363-366 ppmと明らかに高い濃度を示した。この高濃度は往路、復路共に観測されている。これらの緯度帯では同時に観測されたO₃濃度がその南北より低いので(森本, 2002), より低高度の空気の影響を受けている可能性がある。

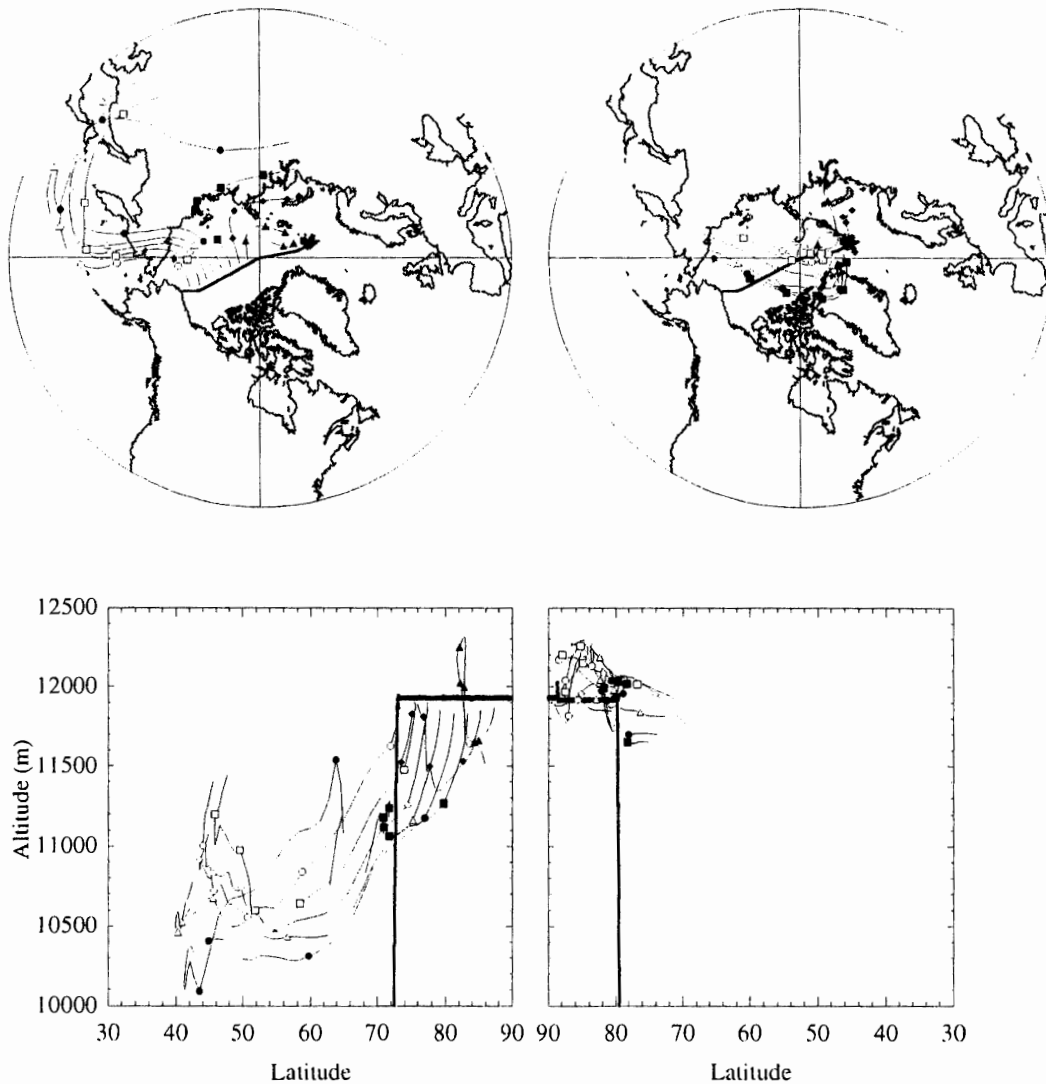


図8 1998年3月7日のバローとロングイヤービン間の飛行経路に到達した空気塊の5日間のバックトラジェクトリー解析。左図はバロー・北極点間の、右図は北極点・ロングイヤービン間の飛行経路での結果を表す。太線は飛行経路を、細線は空気塊の軌跡を、各記号は24時間ごとの空気塊の位置をそれぞれ表す。

Fig. 8. Five-day back trajectory analysis between Barrow and Longyearbyen on March 7, 1998. Left figures show the results for the flight between Barrow and the North Pole, and right figures between the North Pole and Longyearbyen. Thick lines, thin lines and symbols represent flight tracks, airmass trajectories and airmass positions at every 24 hours, respectively.

図8はバローとロングイヤービン間の飛行経路に到達した空気塊の5日間のバックトラジェクトリー解析の結果である。解析はECMWFの客観解析データを用いて等温位面での輸送を仮定した。78°-80°Nの飛行経路に到達した空気塊はいずれも観測点よりも低高度でしかも低緯度から来ていることがわかる。これに対してバロー側の80°Nから北極点を経てロングイヤービン側の80°Nにかけては空気塊は北極付近の高緯度帯でしかも同じ高度付近を漂っている。さらに、高濃度が観測された地点の温位は325-332 Kである。成層圏において中緯度から高緯度にかけての温位380 K以下の高度帯は“Mid world”と呼ばれ、中緯度付近の等温位面に沿って対流圏との物質交換が比較的起きやすいとされている(Holton *et al.*, 1995)。従ってより低高度で低緯度から輸送されてきた空気塊は対流圏の影響をより強く受けていた可能性が高く、その結果として高濃度のCO₂が同緯度帯で観測されたと考えられる。以上のように下部成層圏では低高度低緯度からの輸送があれば等圧面上であってもCO₂やO₃等の微量気体濃度の分布が水平方向に大きく異なる場合のあることが明らかになった。

3.3. O₃濃度との相関

本観測で得られたCO₂濃度とO₃濃度は図9に見られるように主に成層圏において非常に良い負の相関を示す。これは両気体が下部成層圏において化学反応に対して比較的安定であるために濃度の空間分布が主に空気塊の混合に支配されている結果であることを表している。し

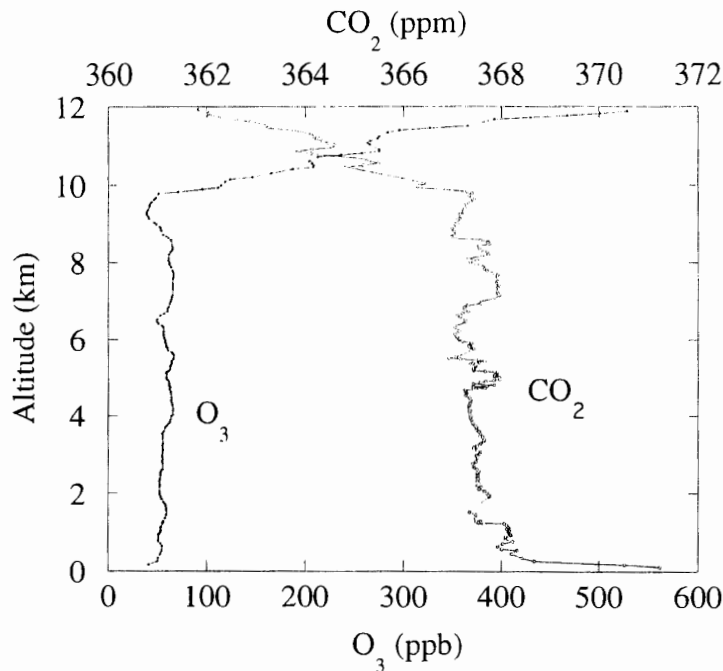


図9 1998年3月12日にバロー上空で観測されたCO₂濃度とO₃濃度の鉛直分布
 Fig. 9. Vertical distributions of the CO₂ and O₃ mixing ratio over Barrow on March 12, 1998.

かしながら、CO₂濃度とO₃濃度の相関は図10に示すとおり、明瞭な1対1対応にはなっていないが、その傾きは高高度(CO₂濃度が低くO₃濃度が高い部分)で大きく高度が低くなるに従って小さくなっている。これは下部成層圏においてCO₂は極めて安定であるのに対してO₃が厳密な意味では安定ではなく、空気塊が混合される時間スケールでは反応によって消滅する量が無視できないためであると考えられる。

本観測で得られた下部成層圏におけるCO₂濃度とO₃濃度の関係はすべてのフライトにおいて図10と同様の曲線上に乗っていた。このことからそれぞれの観測域におけるCO₂とO₃の供給源やO₃の消滅過程がお互いに大きく違っていないと考えることができる。3.2節で述べたバローと北極点の間の78°-80°Nにおいて観測された高濃度のCO₂を持った空気塊においてもCO₂に対するO₃濃度は図10の同様の曲線状に位置する。このことはこの濃度変動が特別な放出源・吸収源の影響を受けたものではなく、単純な輸送、混合に起因しているという3.2節の推測を支持する結果となっている。

一方対流圏においては成層圏ほど明瞭ではないがCO₂濃度とO₃濃度との間に負の相関が存在する(図11)。このことから、対流圏における鉛直方向のわずかなCO₂濃度の分布も空気塊の混合に依るところが大きいと考えることができる。CO₂濃度に対するO₃濃度の傾きが図12に見られるように下部成層圏よりも明らかに小さいのは対流圏におけるO₃が供給源であ

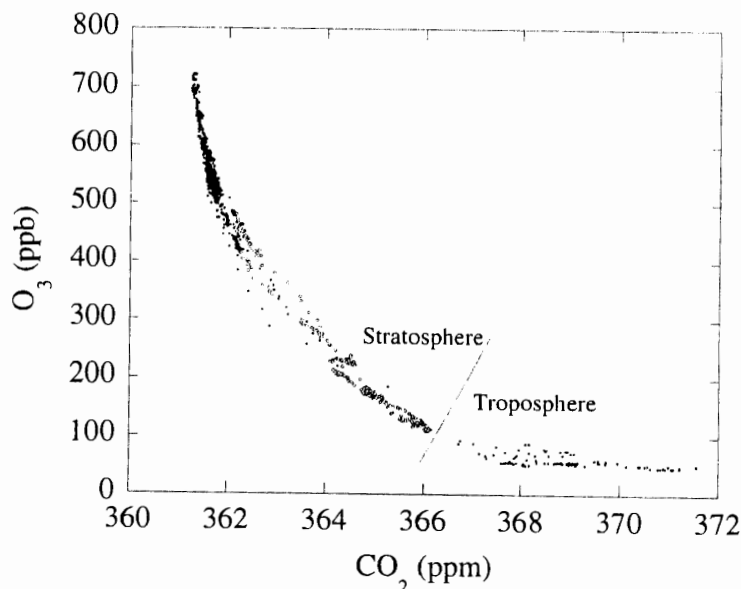


図10 1998年3月7日にバローとロングイヤービン間の飛行において観測されたCO₂濃度とO₃濃度の相関。バローと北極点の間の78°-80°Nで観測された高濃度のCO₂のデータは白丸で、その他の上昇時、下降時、水平飛行時のデータは黒丸で表されている。

Fig. 10. Correlation plot between CO₂ and O₃ observed between Barrow and Longyearbyen on March 7, 1998. The data of high CO₂ mixing ratios obtained in 78°-80°N are shown by open circles. Other data are shown by solid circles.

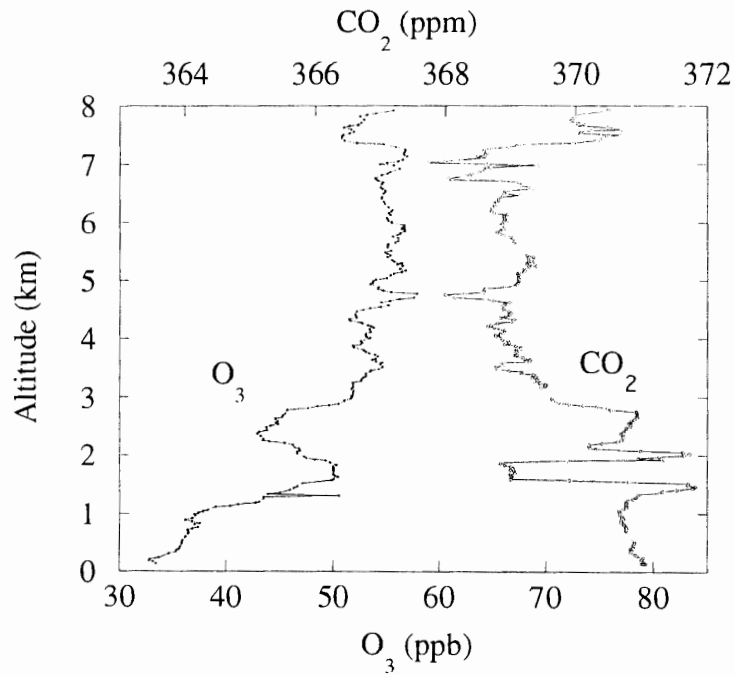


図 11 1998 年 3 月 8 日にニーオルスン上空の対流圏で観測された CO₂ 濃度と O₃ 濃度の鉛直分布

Fig. 11. Vertical distributions of the CO₂ and O₃ mixing ratio in the troposphere over Ny-Ålesund on March 8, 1998.

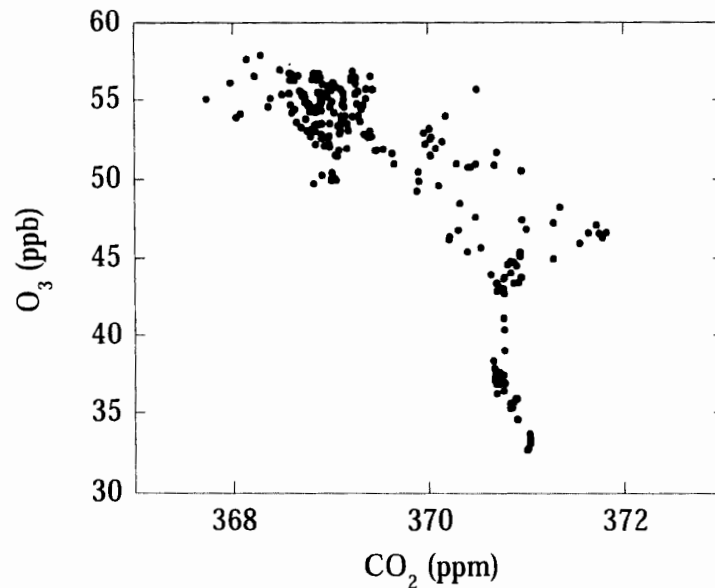


図 12 1998 年 3 月 8 日にニーオルスン上空の対流圏で観測された CO₂ 濃度と O₃ 濃度の相関

Fig. 12. Correlation plot between CO₂ and O₃ observed in the troposphere over Ny-Ålesund on March 8, 1998.

る成層圏大気と隔絶されてからの滞留時間が長いためであると考えられる。

謝 辞

成層圏の物質輸送について有益なアドバイスをいただいた国立環境研究所の中根英昭・中島英彰の各氏に感謝いたします。

文 献

- 青木周司・中澤高清・本田秀之・矢島信之・町田敏暢・菅原 敏・川村賢二・吉村 悟・巻出義紘・白井知子 (2000): スカンジナビア北部の成層圏における温室効果気体の鉛直分布. 宇宙科学研究所報告, 特集, **40**, 55-66.
- Boering, K.A., Wofsy, S.C., Daube, B.C., Schneider, H.R., Lowenstein, M., Podolske, J.R. and Conway, T.J. (1996): Stratospheric mean ages and transport rates from observations of carbon dioxide and nitrous oxide. *Science*, **274**, 1340-1343.
- Conway, T.J., Tans, P.P., Waterman, L.S., Thoning, K.W., Kitzis, D.R., Masarie, K.A. and Zhang, N. (1994): Evidence for interannual variability of the carbon cycle from the National Oceanic and Atmospheric Administration/Climate Monitoring and Diagnostics Laboratory Global Air Sampling Network. *J. Geophys. Res.*, **99**, 22831-22855.
- Francey, R.J., Tans, P.P., Allison, C.E., Enting, I.G., White, J.W.C. and Trolier, M. (1995): Changes in oceanic and terrestrial carbon uptake since 1982. *Nature*, **373**, 326-330.
- Francey, R.J., Steele, L.P., Langenfelds, R.L. and Pak, B.C. (1999): High precision long-term monitoring of radiatively active and related trace gases at surface site and from aircraft in the Southern Hemisphere atmosphere. *J. Atmos. Sci.*, **56**, 279-285.
- Hints, E.J., Boering, K.A., Weinstock, E.M., Anderson, J.G., Gary, B.L., Pfister, L., Daube, B.C., Wofsy, S.C., Loewenstein, M., Podolske, J.R., Margitan, J.J. and Bui, T.P. (1998): Troposphere-to stratosphere transport in the lowermost stratosphere from measurements of H₂O, CO₂, N₂O and O₃. *Geophys. Res. Lett.*, **25**, 2655-2658.
- Holton, J.R., Haynes, P.H., McIntyre, M.E., Douglass, A.R., Rood R.B. and Pfister, L. (1995): Stratosphere-troposphere exchange. *Rev. Geophys.*, **33**, 403-439.
- Keeling, C.D., Whorf, T.P., Wahlen M. and van der Plicht, J. (1995): Interannual extremes in the rate of atmospheric carbon dioxide since 1980. *Nature*, **375**, 666-670.
- Machida, T., Nakazawa, T., Inoue, G., Maksyutov, S., Vinnichenko, N., Panchenko, M., Arshinov, M. and Fedoseev, N. (2000): Variations of atmospheric CO₂ concentration over Siberia. *Proceedings of the Eighth Symposium on the Joint Siberian Permafrost Studies between Japan and Russia in 1999*. 294-299.
- Machida, T., Kita, K., Kondo, Y., Blake, D., Kawakami, S., Inoue, G. and Ogawa, T. (2002): Vertical and meridional distributions of atmospheric CO₂ mixing ratio between northern mid latitudes and southern subtropics. *J. Geophys. Res.* in press.
- Matsueda, H. and Inoue, H.Y. (1996): Measurements of atmospheric CO₂ and CH₄ using a commercial airliner from 1993 to 1994. *Atmos. Environ.*, **30**, 1647-1655.
- 森本真司 (2002): 北極圏航空機観測 (AAMP 98) におけるオゾン濃度連続観測. 南極資料, **46 (1A)**, 139-146.
- Nakazawa, T., Miyashita, K., Aoki, S. and Tanaka, M. (1991): Temporal and spatial variations of upper tropospheric and lower stratospheric carbon dioxide. *Tellus*, **43B**, 106-117.
- Nakazawa, T., Morimoto, S., Aoki, S. and Tanaka, M. (1993): Temporal and space variations of the carbon isotopic ratio of tropospheric carbon dioxide over Japan. *Tellus*, **45B**, 258-274.
- Nakazawa, T., Machida, T., Sugawara, S., Murayama, S., Morimoto, S., Hashida, G., Honda, H. and Ito, T. (1995): Measurements of the stratospheric carbon dioxide concentration over Japan using a balloon-borne cryogenic sampler. *Geophys. Res. Lett.*, **22**, 1229-1232.

- Nakazawa, T., Morimoto, S., Aoki, S. and Tanaka, M. (1997): Temporal and spatial variations of the carbon isotopic ratio of tropospheric carbon dioxide in the western Pacific region. *J. Geophys. Res.*, **102**, 1271-1285.
- Schmidt, U. and Khedim, A. (1991): *In situ* measurements of carbon dioxide in the winter arctic vortex and at midlatitudes: an indicator of the 'age' of stratospheric air. *Geophys. Res. Lett.*, **18**, 763-766.
- 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.

(2001年8月15日受付; 2002年1月22日受理)