

南極域上空における CO₂ 濃度の変化村山 昌平¹・中澤 高 清²・青木 周 司²Concentration Variations of Tropospheric Carbon Dioxide
over the Antarctic RegionShohei MURAYAMA¹, Takakiyo NAKAZAWA² and Shuhji AOKI²

Abstract: Aircraft measurements of the atmospheric CO₂ concentration have been made over Syowa Station, Antarctica since 1983. The minimum concentration of the average seasonal CO₂ cycle appears in March throughout the troposphere, while the maximum concentration occurs in mid-August in the upper troposphere and in late September in the middle and lower troposphere. The peak-to-peak amplitude of the seasonal cycle decreases with height. The CO₂ concentration increases with height during most of the year; however, this height dependency is larger from summer to early winter than in the remaining seasons. The average concentration difference between the upper troposphere and the ground surface is about 0.3 ppmv. From comparisons with the results of the ground-based and aircraft measurements at southern middle and high latitudes and trajectory analysis, it is hypothesized that the seasonal cycle of height-dependent atmospheric transport processes could influence the seasonal cycle and the vertical distribution of the CO₂ concentration over Syowa Station.

要旨: 1983年から南極昭和基地上空においてCO₂濃度の航空機観測が行われてきた。CO₂濃度の平均的な季節変化の最低値は、対流圏各高度で3月に現れた。一方、最高濃度は、上部対流圏と中・下部対流圏でそれぞれ8月中旬及び9月下旬に現れた。季節変化の振幅は、上空ほど小さかった。CO₂濃度は、年間のほとんどの期間、上空ほど高いが、夏から初冬にかけては鉛直濃度勾配は大きく、他の季節には小さかった。地上と上部対流圏との平均的な濃度差は、約0.3 ppmvであった。南半球中高緯度における地上及び航空機観測の結果及び流跡線解析の結果との比較から、昭和基地上空におけるCO₂濃度の季節変化及び鉛直分布は高度に依存した大気輸送過程の季節変化によって生じていることが示唆された。

1. はじめに

米国 Scripps 海洋研究所の C.D. KEELING が国際地球観測年 (IGY) を契機にハワイのマウ

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 Aza Aoba, Aoba-ku, Sendai 980-77.

ナロアと南極点で大気中 CO_2 濃度の系統的観測を始めて以来 (KEELING *et al.*, 1976a, b), 各国の研究機関により全球規模にわたる大気中の CO_2 濃度観測が展開されてきた。これらの多くは、地上に設置されたモニタリングステーションにおける観測,あるいは、船舶を利用した海上における観測である。一方、航空機や気球を用いた対流圏や成層圏における観測例は少なく、現在、日本上空,オーストラリア上空などで行われているにすぎない (PEARMAN and BEARD-SMORE, 1984; TANAKA *et al.*, 1987a; GAMO *et al.*, 1989; NAKAZAWA *et al.*, 1991a, 1993, 1995; MATSUEDA and INOUE, 1996)。しかし、航空機あるいは気球観測では、局地的な放出源や吸収源の影響の少ない空間的に代表性の高いデータを得ることができるため、これらの観測によって得られた各高度におけるデータは、地上観測だけでは把握できない CO_2 濃度の時空間分布の解釈のための多くの情報を提供し、また、各種物質輸送モデルの検証のための有効なデータとして用いられている (FUNG *et al.*, 1983; PEARMAN and HYSON, 1986; HEIMANN *et al.*, 1989; TANS *et al.*, 1989, 1990)。航空機観測結果の例として、図 1 に日本上空の各高度における CO_2 濃度の平均的な季節変化を示す (TANAKA *et al.*, 1987a)。この図から地表で生じた季節変化が、振幅の減少と位相の遅れを伴って上空に伝播していく様子が分かる。夏には、地上付近の濃度が上空より低くなり、初夏と初秋に濃度勾配がなくなり、他の期間は、地上付近の濃度が上空より高くなる。このような変動は、主として、生物活動による CO_2 の放出・吸収の季節変化に起因すると考えられる。また図には示されていないが、年平均濃度は下層ほど高いが、これは

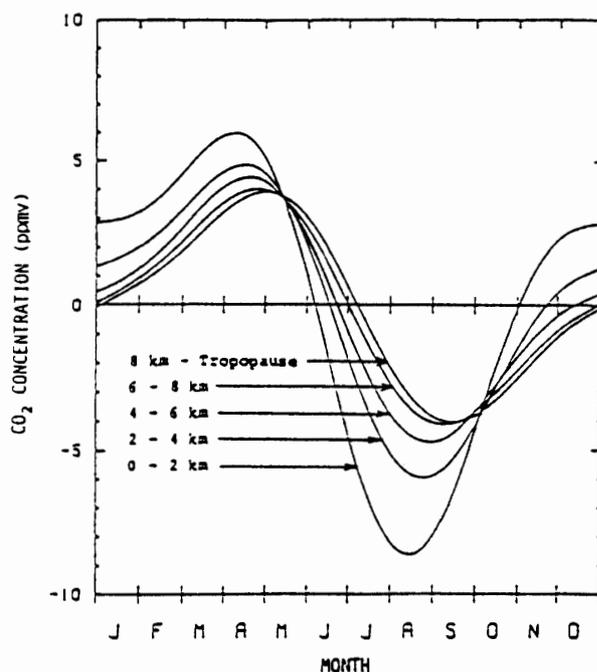


図 1 日本上空における CO_2 濃度の平均的な季節変化 (TANAKA *et al.*, 1987a より)。

Fig. 1. The average seasonal cycles of atmospheric CO_2 concentration at selected height intervals of the troposphere over Japan (after TANAKA *et al.*, 1987a).

地上における人為活動による CO₂ の放出に起因している。この例からも分かるように、地上付近における観測と上空における観測とを結び付けることにより、CO₂ 濃度の変化に関するより詳細な情報を引き出すことができる。

南極域は、その大半が、年間を通して雪氷に覆われる地域であり、植物による光合成及び呼吸活動などの強い CO₂ の放出源や吸収源は、付近には存在しない。また化石燃料消費などの直接的な人為活動の影響も非常に少ない地域である。それにもかかわらず、図2に示されるように、南極域でも北半球と同様に濃度の経年増加傾向がみられ、また、小さい振幅ながら季節変化も見られる (NAKAZAWA *et al.*, 1991b)。それ故、この地域の濃度変化は、他の地域からの大気の輸送によりもたらされたものと推察される。しかし、南半球中高緯度におけるモニタリングステーションの分布は希薄であり、同緯度帯の濃度の時空間変化の振幅はきわめて小さく、さらに、他の緯度帯から南極域への大気の輸送過程についても十分に理解されていないため、南極域における CO₂ 濃度変化についての解釈は、困難なものとなっている。南極昭和基地では、1983年に地上における大気中の CO₂ 濃度の系統的観測が開始されたが (TANAKA *et al.*, 1987b; NAKAZAWA *et al.*, 1991b)、それと時期を同じくして航空機を利用した上空の各高度の

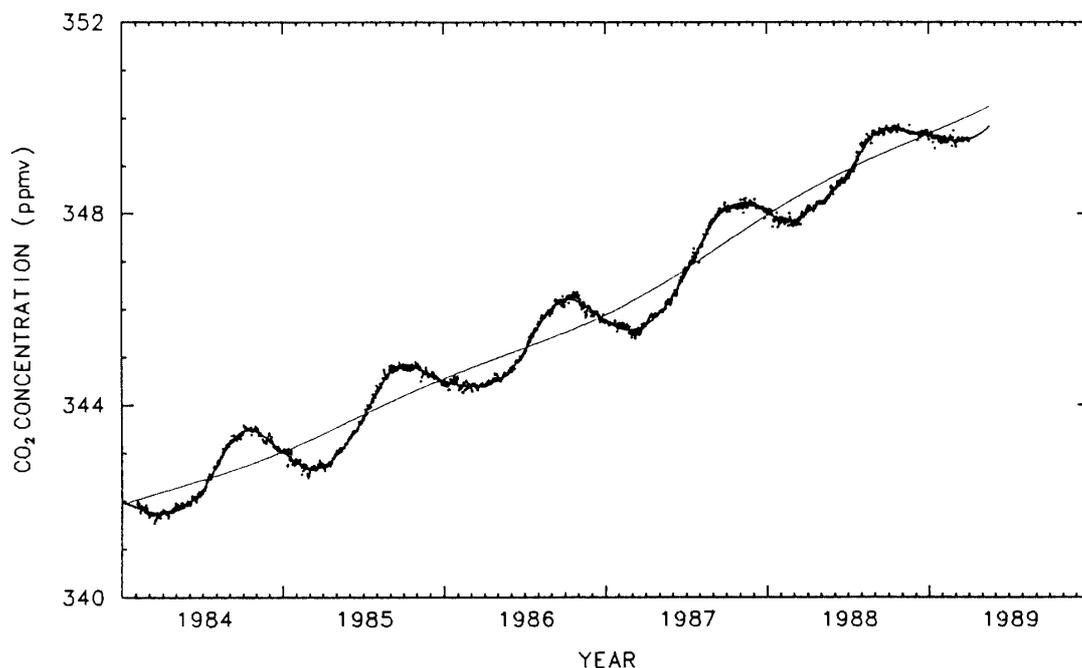


図2 昭和基地における CO₂ 濃度の変化。各点は基地活動によって汚染されたデータを除去して計算された日平均値であり、太い実線は日平均濃度へのベストフィットカーブ、細い実線は経年変化を示す (NAKAZAWA *et al.*, 1991b より)。

Fig. 2. The temporal variation of the atmospheric CO₂ concentration at Syowa Station. Each dot represents the daily mean value calculated after rejecting contaminated data due to station activities. The thick solid line is the best fit curve of the data and the thin solid line the long-term trend (after NAKAZAWA *et al.*, 1991b).

濃度変化の観測が開始され今日に至っている。1985年及び1988年は、昭和基地に航空機がなかったため観測は実施されず、また、自然条件による制約から観測が実施された季節に偏りのある年もあったが、以下に示すように南極域のCO₂濃度の変化を解釈する手がかりとなるいくつかの結果が得られている。本報告では、このようにして得られた航空機観測の結果及びその解釈について述べる。

2. 結果と考察

大気試料の採集は、地上から上空約7 kmまでの範囲で、航空機からの排気ガスの影響を受けないように配慮した上で、パイレックスガラス製の容器に約2気圧に加圧充填する方法で行われた。試料は、国内（東北大学）で非分散型赤外分析計によりCO₂濃度測定が行われ、さらに残った試料を用いて、メタンなどの他の温室効果気体の濃度測定、CO₂中の炭素安定同位体比の測定が行われた。

上記のように観測が行われなかった年や観測実施時期に季節的な偏りのあった年があり、今日までに得られたデータ数はまだ少ないため、これらデータから昭和基地上空の各高度におけるCO₂濃度の経年変化や季節変化の年による違いを議論するのは、困難であると考えられる。このため、本文では観測期間における各高度の平均的季節変化及び鉛直濃度勾配についてのみ議論することにする。この目的のために以下の手順で解析を行った。まず、航空機観測で得られたデータを高度別に2.5 km以下、2.5-5 km、5 km以上に分類し、同一観測日のデータについて各高度間隔毎に平均した。次に、こうして得られた各データより経年変化成分を除去し季節変化成分を求めた。但し、今回のようにデータ数が少なく観測時期に偏りがある場合は、時系列から求められた経年変化の信頼性は高くないと考えられるため、経年変化は1983年の昭和基地の地上におけるグラブサンプリングによる観測結果および1984-1991年の連続観測結果から得られたものを代用した。実際、日本上空における航空機観測の結果(TANAKA *et al.*, 1987a)は、対流圏全体では経年変化に大きな違いはないことを示しており、今回の経年変化の代用は、よい近似であると思われる。なお、このようにして求められた季節変化成分には、地上からの濃度差も含まれている。次に、これらのデータを1年間の時系列に並べかえ、カーブフィッティングを行い、平均的な季節変化を求めた。また、このようにして得られた各高度毎の季節変化から年平均値を求めることによって平均的なCO₂濃度の鉛直分布を求めた。

図3に1983年から1991年の期間における各高度の平均的なCO₂濃度の季節変化を示す。図には、この期間の地上における平均的な季節変化も示されている。またこの図では、鉛直濃度分布の季節変化を容易に理解できるように、各高度の季節変化には、地上からの平均的な濃度差が加算されている。この図から最低濃度は、各高度でいずれも3月に現れていることが分かる。一方、最高濃度は、5 km以上とそれ以下でそれぞれ8月中旬及び9月下旬に現れてお

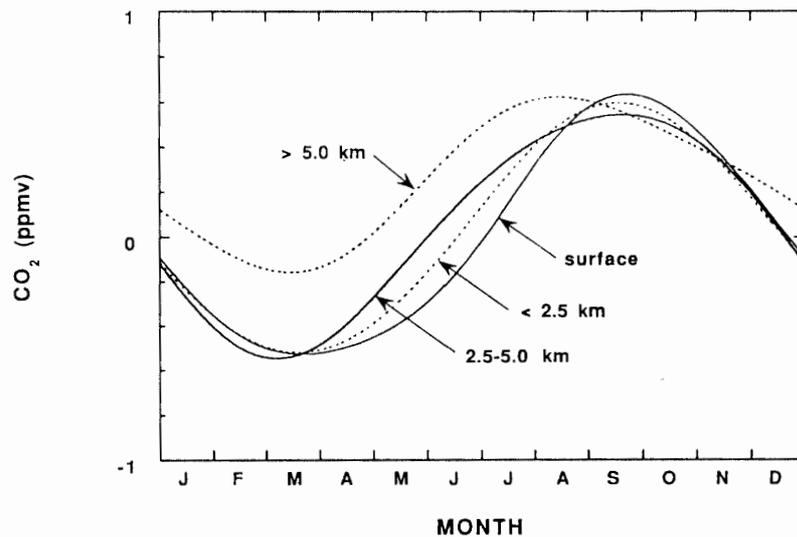


図3 昭和基地上空の各層および昭和基地地上における CO₂ 濃度の平均的な季節変化. 上空各層の季節変化には、昭和基地地上との平均的な濃度差が加算されている (本文参照).

Fig. 3. Average seasonal CO₂ cycles over Syowa Station. Respective values are shown as deviations from the mean value at the surface (see text).

り、5 km 以上では、下層に比べて1カ月以上も位相が早くなっている。季節変化の振幅は、上空ほど小さくなっており、地上と5 km 以上とでは、それぞれ 1.2 ppmv 及び 0.8 ppmv である。CO₂ 濃度は、年間のほとんどの期間、上空ほど高いが、夏から初冬にかけては鉛直濃度勾配は大きく、他の季節には小さくなっている。各高度の CO₂ 濃度の年平均値は、図4に示すように上空ほどわずかに高く、地上と5 km 以上との濃度差は、約 0.3 ppmv である。

このような変化を解釈するために図5に昭和基地、南極点及び南半球中緯度に位置するタスマニア島ケープグリムにおける平均的な CO₂ 濃度の季節変化を示した (NAKAZAWA *et al.*, 1991b; BODEN *et al.*, 1994)。なお、各観測点間の濃度差の季節変化を容易に理解できるように、この図の季節変化には、1984-1990年の期間の昭和基地と各観測点との平均的な濃度差がそれぞれ加算されている。この図から南半球中高緯度の地上付近では、いずれもよく似た季節変化を示しているのが分かる。特に、南極域の2地点では、夏季にわずかに昭和基地の方が南極点より濃度が低いことを除けばお互いの濃度は非常によく一致している。極域と中緯度とを比較すると、年間を通して極域で濃度が高い。さらに、詳しく見てみると、両者の濃度差は、南半球の夏の終わりから冬の初めに小さくなり、最高濃度を示す春に大きくなる。振幅はわずかに極域で大きく、最高濃度が現れる時期は中緯度でやや早い。上で述べたように南極域には、CO₂ の強い放出源や吸収源はないと考えられるため南極域における濃度変化は、他の地域からの大気の輸送 (移流および拡散) によると考えられる。南極域の CO₂ 濃度は、大気の輸送を通して、南半球中緯度の生物活動や大気-海洋間の CO₂ 交換の季節変化及び人為的起源の CO₂ 放

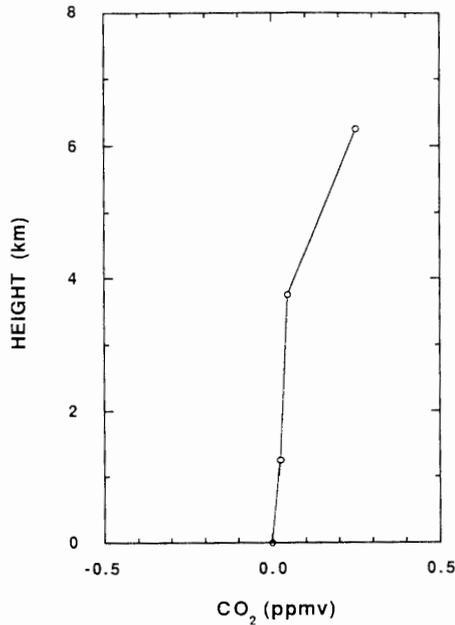


図4 昭和基地上空におけるCO₂濃度の平均的な鉛直分布。昭和基地地上の平均濃度からの偏差で示されている。

Fig. 4. Annual mean vertical profile of the CO₂ concentration over Syowa Station. Respective values are shown as deviations from the mean value at the surface.

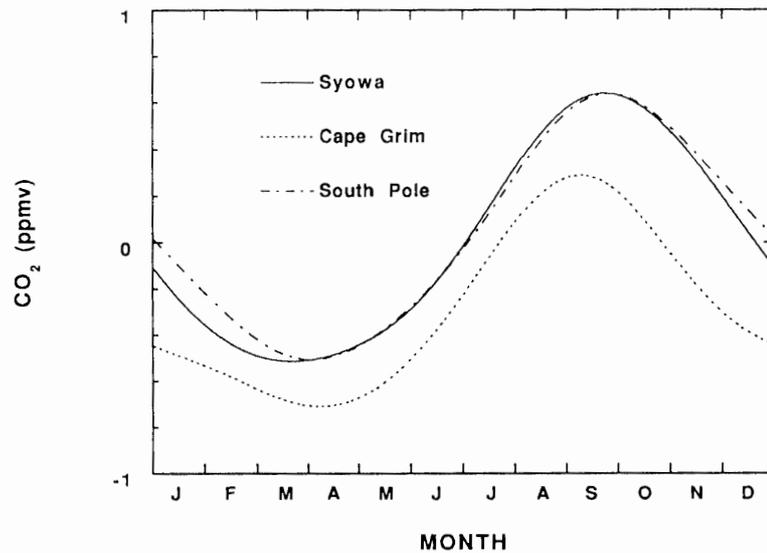


図5 昭和基地 (Syowa), 南極点 (South Pole), タスマニア島ケープグリム (Cape Grim) におけるCO₂濃度の平均的な季節変化。南極点およびケープグリムの季節変化には、1984年から1990年の間の昭和基地との平均的な濃度差が加算されている (本文参照)。

Fig. 5. Average seasonal CO₂ cycles at Syowa Station, the South Pole and Cape Grim, Tasmania. Respective values are shown as deviations from the mean value at Syowa Station during 1984-1990 (see text).

出により生じたCO₂濃度の変化の影響を受けていると考えられる。しかし、これだけでは南極域のCO₂濃度の時空間分布は説明できない。もし、中緯度で生じた濃度変化が、この輸送過程を通して極域に伝播することにより、濃度変化が起こっているならば、極域への輸送の途中に

おける周りの大気との混合により、南極域の季節変化の振幅は、中緯度よりずっと小さくなるはずであり、また、年平均濃度も極域で低くなるはずである。

一方、図6及び図7からも分かるように南半球中緯度では上空ほど季節変化の振幅が大きく、年平均濃度も上空ほど高い。また、対流圏上部と地上付近では季節変化の様相がかなり異なっていることがオーストラリア上空及び日本-オーストラリア間の航空機観測の結果より得られている (PEARMAN and BEARDSMORE, 1984; NAKAZAWA *et al.*, 1991a)。NAKAZAWA *et al.* はこの現象について (1) 南半球では陸地面積がせまく、植物活動に伴う CO₂ 濃度の季節変化が小さいこと、(2) 南半球中緯度の海洋は CO₂ の吸収源になっていること、(3) 南半球の対流圏上部には、5月-11月にかけてモンスーン循環によって、北半球の大気が速やかに輸送されてきていること、などで説明している。

今回の昭和基地上空の観測結果は、北半球からの大気の輸送をさらに南極域にまで延長することによって説明できるかもしれない。しかし、この輸送だけでは上空の振幅が下層より小さいという事実を説明することができない。従って、次のように考えるべきであろう。秋の終わりから冬の終わりにかけては、南半球中緯度の対流圏下部の低濃度の CO₂ をもつ大気の南極域への流入が衰え、北半球起源の高濃度の大気が対流圏上部を通して極域に運ばれさらに下層

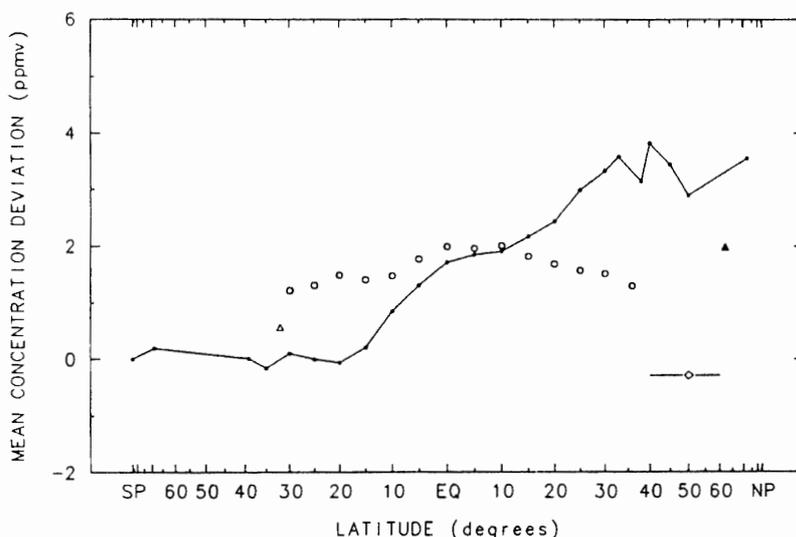


図6 1984-1985年のCO₂濃度の年平均値の緯度分布。白丸、黒丸はそれぞれ対流圏上部、下部を示し、白三角、黒三角はそれぞれシドニー上空及びアンカレッジ上空7.2 km、菱形は成層圏下部の値を示す。各値は南極点からの偏差で示されている (NAKAZAWA *et al.*, 1991aより)。

Fig. 6. Average values of yearly mean CO₂ concentration of 1984 and 1985 in the lower (closed circles with solid line) and upper (open circles) troposphere, at 7.2 km height over Anchorage (closed triangle) and Sydney (open triangle), and in the lower stratosphere (rectangle). Values are represented as a deviation from the South Pole (after NAKAZAWA *et al.*, 1991a).

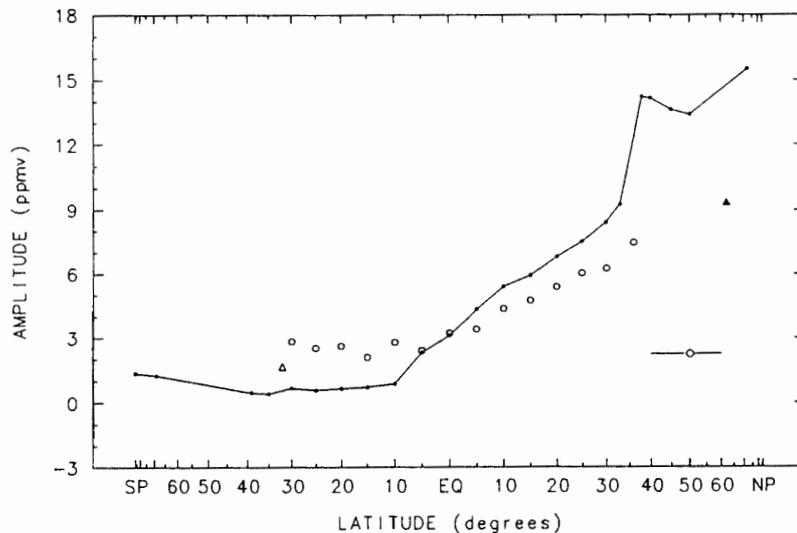


図7 図6に同じ。但し平均的な季節変化の振幅の分布を示す (NAKAZAWA *et al.*, 1991a より)。

Fig. 7. Same as in Fig. 6 but for peak-to-peak amplitudes of the average seasonal CO_2 cycle (after NAKAZAWA *et al.*, 1991a).

に輸送されるので、対流圏全体で濃度が上昇し、濃度の鉛直勾配も小さくなる。春の終わりから秋のはじめにかけては、中緯度の対流圏下部の低濃度の CO_2 をもつ大気が対流圏下部を通して南極域に運ばれ易くなるので、下層の CO_2 濃度は下げられ、中緯度の対流圏下部との濃度差は縮まる。上空の大気もその影響を受け濃度が下がるが、下層から上空への輸送はこの時期緩やかであり、また依然として上空には南半球中緯度の対流圏上部の高濃度の大気が流入しているため、濃度は大きく下げられない。なお、北半球より南極の対流圏上部に輸送されてきた大気自身ももつ季節変化の振幅は、途中で南半球の大気と混ぜられるので、かなり減衰していると考えられる。以上のような過程によって、南極域の対流圏上部では下部と比べて CO_2 濃度の季節変化の振幅が小さくなっていると推察される。

MURAYAMA *et al.* (1995) は、 CO_2 濃度の時空間分布と米国 National Meteorological Center の客観解析データを元に昭和基地上空からの流跡線解析を行い、昭和基地上空各層への CO_2 の輸送過程の季節変化を見積った。その結果によると

(1) 昭和基地上空対流圏下部では、南極域対流圏上部あるいは南半球低緯度対流圏から相対的に高濃度の CO_2 を持った大気が運ばれてくることが分かった。特に秋の終わりから冬にかけては、昭和基地上空とこれらの高濃度域との濃度差が大きくなるため効果的に高濃度の CO_2 が輸送されることが推測された。晩春から初秋にかけては、対流圏上部からの高濃度大気の輸送が弱まり、中緯度対流圏下部から低濃度の CO_2 が運ばれてくるため濃度が下げられると考えられた。

(2) 対流圏上部では、年間を通して中緯度対流圏上部あるいは低緯度対流圏から相対的に高

濃度の CO₂ を持った大気が運ばれ、その一部は北半球低緯度から運ばれてきている可能性が示唆された。晩秋から早春にかけては下部対流圏との鉛直混合が活発であり、対流圏における鉛直濃度勾配は小さくなるが、晩春から夏にかけては鉛直混合が弱まるため、下層で起きている濃度減少の影響が上層には伝わり難く上層では濃度があまり下げられない。その結果、季節変化の振幅は下層と比べて小さくなっていると推察された。

これらの結果は、上で述べた考察を支持するものである。

南極域の CO₂ 濃度の季節変化や鉛直分布を解釈する上で、不確定な要素として、南極域上空の成層圏における CO₂ 濃度および南氷洋における大気—海洋間の正味の CO₂ フラックスが挙げられる。南極域の対流圏 CO₂ 濃度の季節変化や鉛直分布は、成層圏との大気の交換の影響も受けていると考えられる。実際、昭和基地上空の O₃ 濃度の観測結果 (MURAYAMA *et al.*, 1992) や対流圏上部の流跡線解析の結果 (YAMAZAKI *et al.*, 1989) が示すように成層圏起源の大気が対流圏に流入している可能性が極めて高い。しかし、これが南極域上空の対流圏 CO₂ 濃度の変化にどのような影響を及ぼしているかについては、南極域の成層圏の CO₂ 濃度の観測が行われていないので、現段階においては明確なことはいえない。一方、南半球中緯度の海洋は、CO₂ の吸収源になっていると上で述べたが、さらに高緯度側の南極周辺の海域は、CO₂ の吸収源であるのか放出源であるのか、観測データも少なく十分に理解されていない。実際、南半球中緯度から南極大陸沿岸部へかけてわずかに存在する地上観測点の観測結果から、この地域の CO₂ 濃度の緯度分布を調べてみると、ややばらつきが大きく、この現象は、この緯度帯の大気—海洋間の CO₂ フラックスの複雑な空間分布を反映している可能性があるとして指摘されている (PEARMAN and HYSON, 1986; BEARDSMORE and PEARMAN, 1987; CONWAY *et al.*, 1988)。また、大気—海洋間の CO₂ の正味のフラックスは、大気—海洋間の CO₂ 分圧差及び風速等のパラメータにより決定されると考えられているが (TANS *et al.*, 1990; LISS and MERLIVAT, 1986)、この海域は、年間を通して風が強いはずかな分圧差でもフラックスが大きくなると考えられ、特に強風が吹き荒れる冬季は、CO₂ 収支に関して重要な役割を果たしている可能性がある。しかし、現段階では、冬季の観測データは、ほとんどない。

南極域における CO₂ 濃度の変化、物質循環については依然として未知な部分が多い。今後、さらに、南極上空の対流圏における年間を通した航空機観測とともに大気球などを利用した成層圏の観測及び南半球中緯度から南極大陸にいたる緯度帯での大気中及び海水中の CO₂ 濃度の観測の強化が不可欠であり、また、得られたデータについて輸送モデルなどを用いて解釈していくことが重要である。

謝 辞

本研究は、第 24, 25, 27, 28, 30, 31, 32 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

- BEARDSMORE, D.J. and PEARMAN, G.I. (1987): Atmospheric carbon dioxide measurements in the Australian region: Data from surface observation. *Tellus*, **39B**, 42-66.
- BODEN, T.A., KAISER D.P., SEPANSKI, R.J. and STOSS, F.W., ed. (1994): Trends '93: A compendium of data on global change. ORNL/CDIAC-65. Carbon Dioxide Information Analysis Center, Oak Ridge National Laboratory, Oak Ridge, Tennessee, U.S.A.
- CONWAY, T.J., TANS, P.P. WATERMAN, L.S., THONING, K.W., MASARIE, K.A. and GAMMON, R.H. (1988): Atmospheric carbon dioxide measurements in the remote global troposphere, 1981-1984. *Tellus*, **40B**, 81-115.
- FUNG, I., PRENTICE, K., MATTHEWS, E., LERNER, J. and RUSSELL, G. (1983): Three-dimensional tracer model study of atmospheric CO₂: Response to seasonal exchanges with the terrestrial biosphere. *J. Geophys. Res.*, **88**, 1281-1294.
- GAMO, T., TSUTSUMI, M., SAKAI, H., NAKAZAWA, T., TANAKA, M., HONDA, H., KUBO, H. and ITOH, T. (1989): Carbon and oxygen isotopic ratios of carbon dioxide of a stratospheric profile over Japan. *Tellus*, **41B**, 127-133.
- HEIMANN, M., KEELING, C.D. and TUCKER, C.J. (1989): A three dimensional model of atmospheric CO₂ transport based on observed winds. (3) Seasonal cycle and synoptic time scale variations. *Aspects of Climate Variability in the Pacific and the Western Americas*, ed. by D.H. PETERSON. Washington, D.C., Am. Geophys. Union, 277-303 (AGU Monograph 55).
- KEELING, C.D., BACASTOW, R.B., BAINBRIDGE, A.E., EKDAHL, C.A., GUENTHER, P.R., WATERMAN, L.S. and CHIN, J.F.S. (1976a): Atmospheric carbon dioxide variations at Mauna Loa Observatory, Hawaii. *Tellus*, **28**, 538-551.
- KEELING, C.D., ADAMS, J.A., EKDAHL, C.A. and GUENTHAR, P.R. (1976b): Atmospheric carbon dioxide variations at the South Pole. *Tellus*, **28**, 552-564.
- LISS, P.S. and MERLIVAT, L. (1986): Air-sea gas change rates: Introduction and synthesis. *The Role of Air-Sea Exchange in Geochemical Cycling*, ed. by P. BUAT-MENARD. Dordrecht, D. REIDEL, 113-127.
- 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.
- 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.
- 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.
- NAKAZAWA, T., MIYASHITA, K., AOKI, S. and TANAKA, M. (1991a): Temporal and spatial variations of upper tropospheric and lower stratospheric carbon dioxide. *Tellus*, **43B**, 106-117.
- NAKAZAWA, T., AOKI, S., MURAYAMA, S., FUKABORI, M., YAMANOUCHI, T., MURAYAMA, H., SHIOBARA, M., HASHIDA, G., KAWAGUCHI, S. and TANAKA, M. (1991b): The concentration of atmospheric carbon dioxide at Japanese Antarctic Station, Syowa. *Tellus*, **43B**, 126-135.
- NAKAZAWA, T., MORIMOTO, S., AOKI, S. and TANAKA, M. (1993): Time 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 ITOH, T. (1995): Measurements of the stratospheric carbon dioxide concentration over Japan using a balloon-borne cryogenic sampler. *Geophys. Res. Lett.*, **22**, 1229-1232.
- PEARMAN, G.I. and BEARDSMORE, D.J. (1984): Atmospheric carbon dioxide measurements in the Australian region: Ten years of aircraft data. *Tellus*, **36B**, 1-24.
- PEARMAN, G.I. and HYSON, P. (1986): Global transport and inter-reservoir exchange of carbon dioxide with particular reference to stable isotope distributions. *J. Atmos. Chem.*, **4**, 81-124.
- TANAKA, M., NAKAZAWA, T. and AOKI, S. (1987a): Time and space variations of tropospheric carbon dioxide over Japan. *Tellus*, **39B**, 3-12.

- TANAKA, M., NAKAZAWA, T., SHIOBARA, M., OHSHIMA, H., AOKI, S., KAWAGUCHI, S., YAMANOUCHI, T., MAKINO, Y. and MURAYAMA, H. (1987b): Variations of atmospheric carbon dioxide concentration at Syowa Station (69°00'S, 39°35'E), Antarctica. *Tellus*, **39B**, 72-79.
- TANS, P., CONWAY, T. and NAKAZAWA, T. (1989): Latitudinal distribution of the sources and sinks of atmospheric carbon dioxide derived from surface observations and an atmospheric transport model. *J. Geophys. Res.*, **94**, 5151-5172.
- TANS, P., FUNG, I.Y. and TAKAHASHI, T. (1990): Observational constraints on the global atmospheric CO₂ budget. *Science*, **247**, 1431-1438.
- 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**, 889-906.

(1996年9月18日受付; 1996年10月29日受理)