

昭和基地における大気中の二酸化炭素濃度の連続観測

青木周司*・中澤高清*

Continuous Measurement of Atmospheric CO₂
Concentration at Syowa Station

Shuhji AOKI* and Takakiyo NAKAZAWA*

Abstract: Precise and continuous measurements of atmospheric CO₂ concentration have been continued at Syowa Station (69°00'S, 39°35'E), Antarctica since February 1984. Diurnal CO₂ variation was hardly observable throughout the year. The secular CO₂ trend was variable with time, showing slow increase in 1984, 1986 and 1988 and rapid increase in 1985 and 1987. The annual CO₂ increase was remarkable, especially in 1987, which may have been related to the 1987 ENSO event. The average rate of annual CO₂ increase over the last 5 years was about 1.6 ppmv yr⁻¹. The average seasonal CO₂ cycle showed minimum and maximum concentrations in mid-April and in early October, respectively. Its peak-to-peak amplitude was about 1.1 ppmv for the period 1984-1988. The seasonal cycle was variable from year to year, but there was no indication of long-term amplitude increase. It was found that irregular CO₂ variations with amplitudes of about 0.2 ppmv and with periods of a few tens of days have high correlation with air mass exchange by synoptic scale weather disturbances.

要旨: 南極昭和基地 (69°00'S, 39°35'E) における大気中の CO₂ 濃度の連続観測は 1984 年 2 月に開始された。昭和基地では、CO₂ 濃度の日変化は 1 年を通して全く観測されなかった。CO₂ 濃度の経年増加率は年々変化しており、1984 年、1986 年、1988 年は増加率が低く、1985 年と 1987 年は増加率が高かった。特に、1987 年の増加率は他の年に比べて特に大きく、ENSO イベントがその原因になっているものと推定される。過去 5 年間の CO₂ 濃度の平均増加率は 1.6 ppmv yr⁻¹ あった。CO₂ 濃度は平均的には、4 月中旬に最低濃度が出現し、10 月初旬に最高濃度が出現するような季節変化をしており、そのピーク間振幅は 1.1 ppmv であった。CO₂ 濃度の実際の季節変化は年々少しずつ変化しているが、振幅の長期的な拡大傾向は観測されなかった。CO₂ 濃度には、数日周期で振幅が 0.2 ppmv 程度の不規則な変化も見られるが、その変化は高低気圧などの総観規模現象によって引き起こされる気団の交代を反映していることが観測から明らかになった。

1. はじめに

二酸化炭素 (CO₂) は現在の大気中における存在量が体積比で約 0.035% (= 350 ppm) と非

* 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.

常に少量であるため、微量成分のひとつに数えられている。しかし、CO₂は温室効果気体としての能力が高いため、大気を保温する効果は大気成分の中でも水蒸気に次いで大きなものとなっている。さらに、現在CO₂は人間活動にともなう化石燃料消費によって炭素量に換算して5.6 Gt yr⁻¹ (Gt=1×10¹⁵ g)もの量が大气に放出されており、濃度が急激に上昇しつつある。このため、熱収支のバランスがくずれ、地球の気候を今後ますます温暖化させる可能性が非常に高いことが多くの研究者によって指摘されている。

さて、化石燃料消費によって大気中に放出されたCO₂のゆくえはどうなっているのだろうか。最近の大気中におけるCO₂濃度増加率は1.5 ppm yr⁻¹であるため、3.2 GtCが毎年大気に残留していることになる。したがって、残りの2.4 GtCは海洋と生物圏によって吸収されなければならない。現在の知識によると、1年間に海洋が吸収できるCO₂量は約2 GtCであるため、残りの0.4 GtCは生物圏によって吸収されなければつじつまが合わない。一方、ランドサットなどの人工衛星画像データから、熱帯域の森林地帯が近年の大規模な開発や焼き畑によって広域に破壊されている実態が明らかになり、森林生態学者らは生物圏がCO₂の吸収源ではなく、大きな放出源となっていると主張している。したがって、これまでの知識ではかなりの量のCO₂が行方不明になったままなのである。このため、将来人間活動によってどの程度のCO₂を放出すれば、どのくらい大気中のCO₂濃度上昇が起こるかといった最も基本的な問題にまだ明確な解答を出せないのが現状である。

CO₂のゆくえを明確にするためには、地球規模の炭素循環に関する研究が重要であり、現在世界各国のいろいろな機関によりさまざまな手法を用いた研究観測が精力的に続けられている。その一環として昭和基地におけるCO₂の連続観測が1984年の2月から(TANAKA *et al.*, 1987a; NAKAZAWA *et al.*, 1991a; AOKI *et al.*, 1992)、さらに南極観測船「しらせ」による大気および表層海洋中のCO₂濃度の緯度分布観測が1987年11月から開始された。

大気中のCO₂は化学的に安定な気体であり、対流圏内を輸送される過程で他の物質に変化せず、さらにエアロゾルのように降雨によって大気中から除去されることもない。このため、CO₂は大気循環のトレーサーとしても重要な気体である。このような観点から、CO₂を通して見た南半球高緯度域での大気循環についても考察を行った。

2. 二酸化炭素濃度連続観測装置

昭和基地におけるCO₂濃度連続観測装置は非分散型赤外ガス分析計、ガスハンドリング部およびデータ収録部から構成されている。ガス分析計は堀場製作所のVIA-500型を独自に改良したものであり(TANAKA *et al.*, 1983)、50 ppmv スパンの任意の濃度レンジでの測定精度は±0.01 ppmvである。この分析計は、リファレンスセルに一定濃度のCO₂を含むガスを常時流して比較光束に光学的なバイアスをかける差動型になっている。分析計の出力と濃度の関係は、約50 ppmvの濃度範囲では二次関数で表すことができる。この関係を仮に直線であると見

なした場合に生ずる誤差は最大で0.6 ppmvにも達する。しかもこの誤差は一定ではなく、光源や検知器の劣化度、光学セルの汚れ具合、リファレンスガスの濃度などによって異なるため、後で述べるように標準ガスによる絶対濃度の決定の際にはこれに対する配慮が必要である。

図1にガスハンドリング部の概略図を示す。この流路の材質は水蒸気トラップがパイレックスガラス製であることを除けばすべてステンレススチールが使用されており、圧力変化にともなうCO₂の吸着や放出が起こらぬようになっている。使用しているリファレンスガスの濃度範囲は330-340 ppmvであり、流量は15 ml/min⁻¹になるように調整されている。分析計のサンプルセル側には大気サンプル導入ラインと3本の標準ガスが接続されており、電磁弁により5分ごとに導入ガスの切り換えが行われている。その切り換えは通常、大気CO₂濃度より約10 ppmv高い濃度の標準ガスと約10 ppmv低い濃度の標準ガスをそれぞれ30分に1回ずつ、また大気サンプルは30分に4回分析計に導入するようにコントロールされている。分析計出力のドリフトはおよそ±0.2 ppmv day⁻¹と非常に小さいため、標準ガスによる30分に1回の出力検定で十分な精度が保証できる。それぞれの電磁弁は分析計のサンプルセルのガス交換が終了した後は、ガスの流れを止めて濃度測定を行ういわゆる“スタティック法”が採用されている。スタティック法は、標準ガスの節約のみならず、流量変動によって生ずるセル内でのガス圧変動に起因する誤差が生じないため、大気サンプルと標準ガスの流量を厳密に等しく制御しなくても精度の高い測定ができるという利点がある。

大気サンプルは、このシステムが設置されている昭和基地の観測棟から主風向である北東方

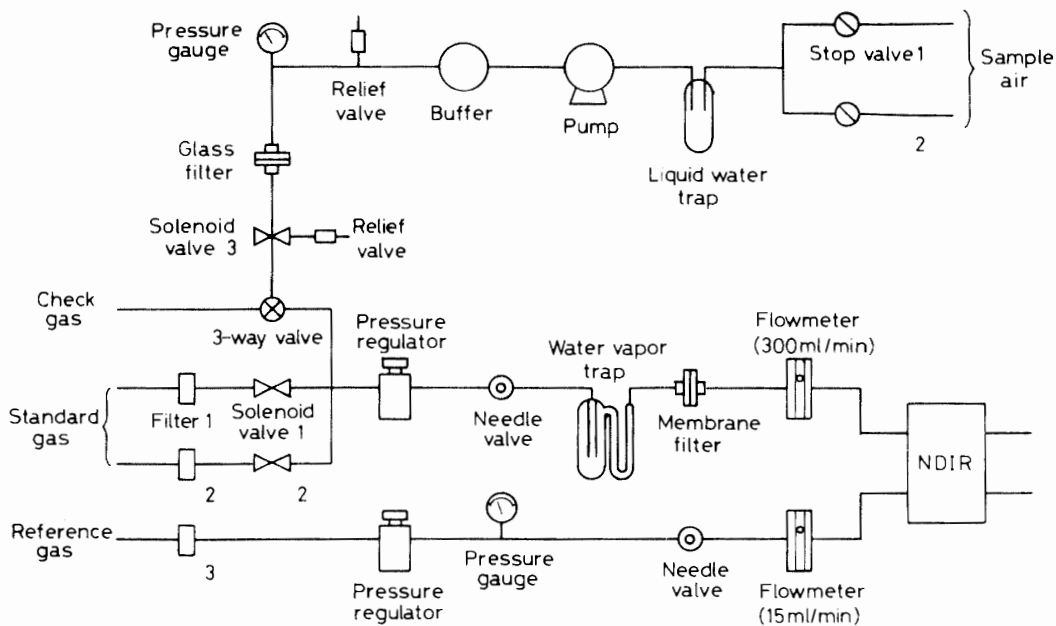


図1 昭和基地におけるCO₂濃度連続観測装置のガスハンドリングシステム

Fig. 1. Schematic diagram of gas flow system for continuous measurements of atmospheric CO₂.

向へ約 30 m 離れた高さ 8 m の空気試料取込口から取り込まれ、ダイヤフラムポンプによって加圧されてガスハンドリングシステムに導入される。試料空気中に含まれる 1 ミクロン以上のエアロゾルは 2 段のフィルターで完全に除去される。また、雪片や雨滴は専用トラップで、水蒸気は -60°C に冷却された専用トラップで除去される。したがって、測定された CO_2 濃度は乾燥空気に対する分圧として表されることになる。この水蒸気除去トラップは大気サンプルを乾燥化させるためだけでなく、大気サンプルと標準ガスを分析計に導入する前にあらかじめ等しい温度に調整する役割も果たしている。また、大気サンプルと標準ガスの流量は、圧力調整器とニードルバルブを共通ラインに設けることにより、等しくなるように設計されている。

分析計の出力は、打点レコーダにアナログ記録され、データレコーダで AD 変換された後、プリンターとカセットテープレコーダにデジタル記録される。大気サンプルの CO_2 濃度は、まず分析計の出力と濃度が直線関係にあると仮定して 2 本の標準ガスにより直線内挿によって求められ、その後非直線性の補正がなされる。分析計の非直線性は、10 日ごとに大気サンプルとほぼ同じ濃度の標準ガス（チェックガス）と通常使用している 2 本の標準ガスを使用することによって求められる。このようにして求められた分析計の非直線性は $-0.07 \sim +0.11$ ppmv の範囲であった (NAKAZAWA *et al.*, 1991a)。

観測データの長期にわたる一貫性を確保するために、東北大では標準ガスは第一次、第二次および作業用にカテゴリー分けされており、系統的な濃度検定がなされている。標準ガスはすべて日本酸素（株）によって製造されたものを使用しており、精製された純空気に CO_2 を混合したものである。第一次標準ガスは 1 mg から 100 kg までのレンジをもった超精密天秤を用いた重量法で製造され、その製造誤差は ± 0.13 ppmv と見積もられている (TANAKA *et al.*, 1983, 1987a)。第一次標準ガスは 1983 年と 1985 年に製造され、お互いの濃度は製造誤差以内で一致しており、誤差評価の正当性および標準ガス濃度の安定性が確認されている。第二次標準ガスは、第一次標準ガスにより年に 2-3 回濃度検定がおこなわれている。その検定の相対精度は ± 0.01 ppmv であり、第一次標準ガスに対する第二次標準ガスの安定性は ± 0.1 ppmv 以内におさまっていることが確認された。作業用標準ガスは南極で使用するために日本から出荷する半年以上前に製造され、1 カ月間エージングした後 5 カ月間にわたって第二次標準ガスを用いて 4-5 回の濃度検定が実施されている。さらに、作業用標準ガスは南極から持ち帰った後、濃度の安定性を調べるために、再度第二次標準ガスを用いた濃度検定がなされている。1984 年から 1988 年までの 5 年間に使用された 87 本の作業用標準ガス濃度の安定性は $-0.10 \sim +0.18$ ppmv の範囲にあり、そのうちの 87% が ± 0.1 ppmv 以内であった (TANAKA *et al.*, 1987a)。

3. 観測結果と考察

南極域は北半球に集中した人為的な CO_2 放出源から遠く離れており、さらに陸上植生もほとんど見られないことから、 CO_2 のバックグラウンドモニタリングステーションとして最適

な場所である。したがって、そこで得られた観測結果から地球規模における CO_2 循環の年々変動を詳細に検出することができるであろうと期待されている。

南極域における系統的な CO_2 濃度観測は 1957 年に南極点で開始された (KEELING *et al.*, 1976)。その後、観測点の数が増やされ、現在では 5 カ所の基地で連続観測あるいはグラブサンプリング法による観測がおこなわれている (KOMHYR *et al.*, 1985; BEARDSMORE and PEARMAN, 1987a; TANAKA *et al.*, 1987a; CONWAY *et al.*, 1988)。昭和基地ではグラブサンプリング法による観測が 1983 年 2 月に、また連続観測が 1984 年 2 月に開始され、現在でも両者による観測が続けられている。ここではより信頼性の高い連続観測による結果について考察を行う。

まず、昭和基地における CO_2 濃度が日変化しているかどうか調べるために、月ごとに 1 時間平均濃度を集計し、その平均値を計算した。夏季の代表例として 1984 年 12 月を、冬季の代表例として 1984 年 7 月を図 2 に示す。図からわかるように、昭和基地における CO_2 濃度は非常に安定しており、夏冬変わらず規則的な日変化はまったく観測されない。本来、 CO_2 濃度が日変化する原因は近傍の植生や人間活動であり、昭和基地で日変化が観測されないということは、観測点付近に CO_2 の強い放出源や吸収源が存在しないことを示している。したがって、昭和基地は大気中の CO_2 濃度をモニタリングする観測地点としてたいへん秀でていと結論することができる。

昭和基地では CO_2 濃度の日変化は見られないが、図 2 には振幅が約 0.5 ppmv 程度の非常に小さな不規則変動は見られる。この不規則変動の原因を探るために、生の時系列データを見て

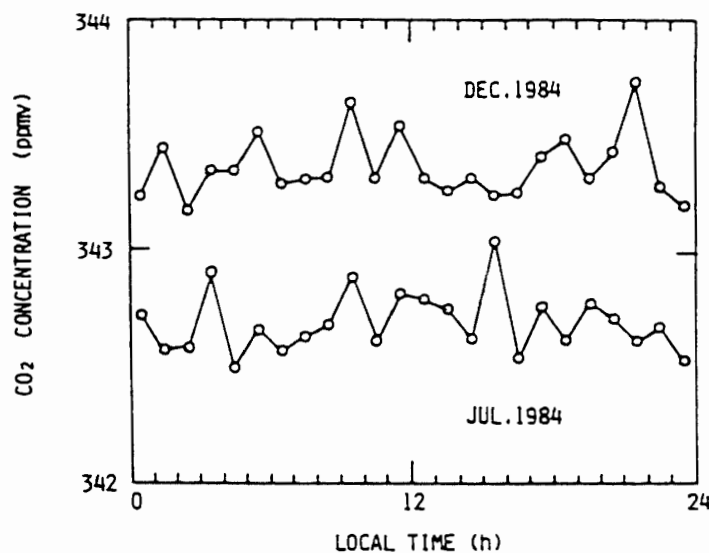


図 2 昭和基地における CO_2 濃度の月平均日変化。得られたすべてのデータを用い、1 時間平均濃度を月ごとに平均して求められたものを夏季の例として 1984 年 12 月を、また冬季の例として 1984 年 7 月を示す。

Fig. 2. Monthly means of hourly mean CO_2 concentrations obtained from all available data for July and December 1984 at Syowa Station.

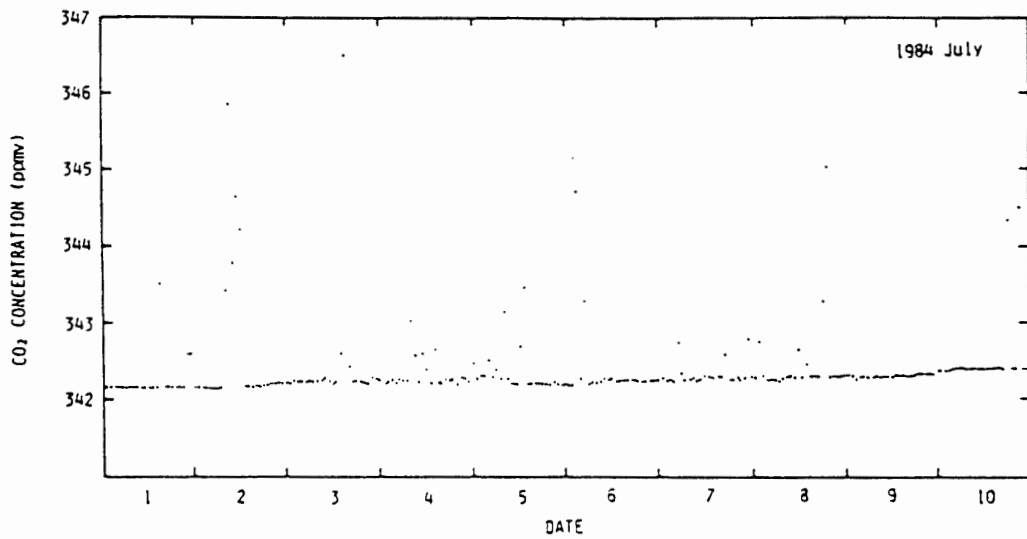


図3 昭和基地における1984年7月1日から7月10日までの1時間平均CO₂濃度の変化
 Fig. 3. Hourly mean CO₂ concentrations for the period 1-10 July 1984 at Syowa Station.

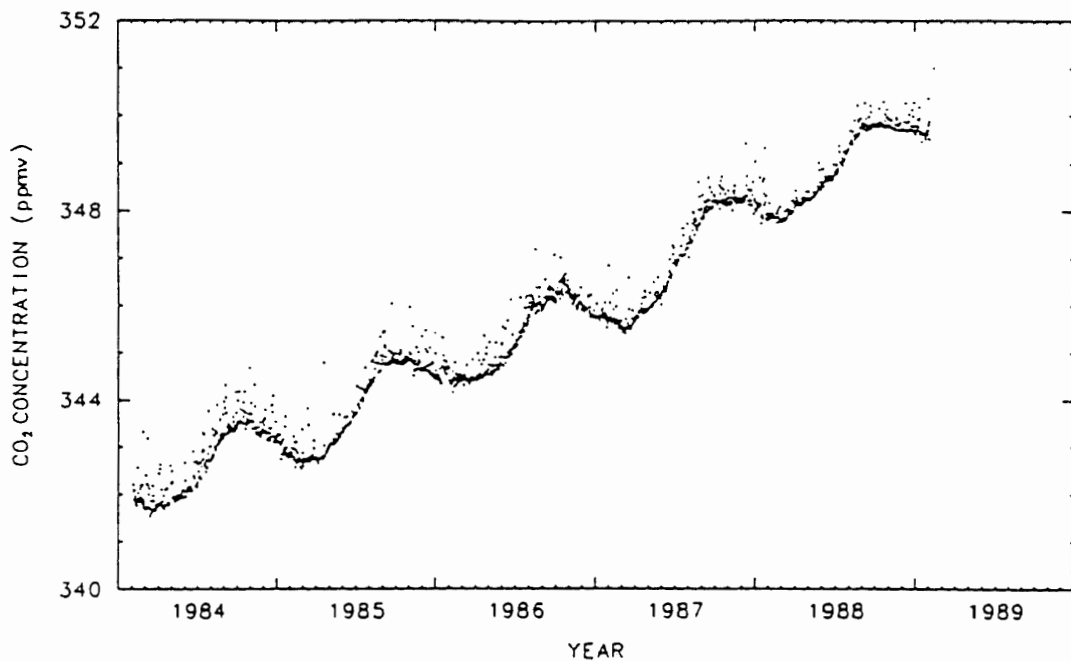


図4 昭和基地における日平均CO₂濃度変化。平均濃度は得られたすべてのデータを用いて計算されている。
 Fig. 4. Daily mean CO₂ concentrations at Syowa Station, calculated from all available data.

みよう。昭和基地で得られた1時間平均濃度データの典型的な時系列例を図3に示す。同基地におけるCO₂観測システムは1時間に8個のオリジナルデータが得られるため、その8データの平均をおこなっている。図に示された1984年7月1日から10日にかけての1時間平均濃

度は大部分が非常に安定している。一方、高濃度でばらつきが大きいデータもところどころに見られる。これらのすべてのデータを用いて単純に計算された日平均 CO₂ 濃度の変動を図 4 に示す。この図から明らかなように、昭和基地で得られた CO₂ 濃度はばらつきが常に高濃度側にあらわれている。このことは、時おり見られる濃度のばらつきが発電棟のディーゼルエンジン、石油暖房器、雪上車からの排気などローカルな基地活動に起因していると推定される。このようなローカルな汚染源の影響を除去するために、次に述べるような統計的手法を使用した。まず、1時間ごとに平均濃度とその標準偏差を計算し、標準偏差が 0.1 ppmv 以下のものを使って仮の日平均濃度を計算する。もう一度オリジナルデータに戻り、仮の日平均濃度から ±0.3 ppmv を越えるデータのみを汚染データとして除去する。その結果、データ除去率は全体の 4.4% となった。このような統計手法を適用した背景には、ローカルな汚染源の影響がない均一な気団内では数時間程度のタイムスケールの CO₂ 濃度変動は非常に小さいという仮定が前提となっている。データ除去率の月による違いを図 5 に示す。さらに同図には昭和基地で観測された弱風の頻度も示されている。データ除去率は夏と冬に高く、春と秋に低くなっており、

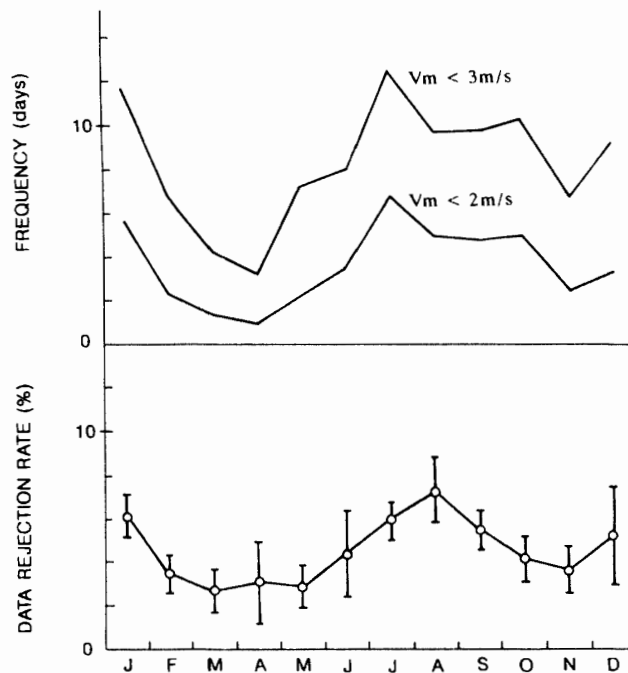


図 5 昭和基地における CO₂ 濃度のデータセレクションにともなうデータ棄却率 (下図), および日平均風速が 3 m s⁻¹ と 2 m s⁻¹ 以下の日数 (上図)。1984 年 2 月から 1989 年 1 月までの期間のデータを月ごとにグループ分けし、平均をおこなった。下図のエラーバーはデータ棄却率の平均値に対する標準偏差を表している。

Fig. 5. Rates of CO₂ data rejected by the data selection (lower panel) and days with daily mean wind velocities less than 3 m s⁻¹ and 2 m s⁻¹ (upper panel) at Syowa Station. Data taken for the period February 1984–January 1989 were grouped into respective months and simply averaged. The error bars in the lower panel represent the standard deviation for average values of the data rejection rate.

弱風の頻度分布と相関がよい。このことは、昭和基地における CO_2 濃度が特に弱風時に基地活動によるローカルな汚染の影響を受けやすいことを示している。しかし、図をよく見ると両者が常に良い相関を持つという単純な関係だけではないことがわかる。したがって、このような汚染の影響は風速のみならず、風向や大気安定度にも関係しているものと思われる。

オリジナルデータから汚染データを除去することによって計算された昭和基地における日平均 CO_2 濃度の変化を図 6 に示す。日平均 CO_2 濃度の標準偏差は最低値が 0.01 ppmv で、最高値が 0.15 ppmv であり、平均値は 0.04 ppmv であった。このことから、昭和基地におけるバックグラウンド CO_2 濃度変動がいかに小さいかわかるであろう。さらにこの図から昭和基地における CO_2 濃度が経年変化と季節変化とそれより短周期の不規則変化から成っていることが明らかである。デジタルフィルターを用いて数学的にこれらの変化成分の分離をおこなった(詳細は NAKAZAWA *et al.*, 1991b 参照)。このように分離された変化成分を足し合わせた滑らかな曲線が図 6 に示されているが、この曲線はデータを忠実に再現していることがわかる。さらに、この図には経年変化成分の曲線も示されている。変化成分を足し合わせた滑らかな曲線と個々のデータとの差の分布を図 7 に示す。この差はゼロを中心として対称なガウス分布をしており、約 88% が ± 0.1 ppmv 以内に含まれる。この分布の裾の広がり、短周期の不規則変化に対応している。

CO_2 濃度の経年増加率を図 8 に示す。1984 年 2 月から 1993 年 1 月までの平均的な CO_2 濃度増加率は $1.54 \text{ ppmv yr}^{-1}$ であった。濃度増加率は年々変化しており、特に 1987 年と 1988 年に非常に大きかった。このような非常に大きな CO_2 濃度増加率の変動は南方振動指数 (the Southern Oscillation Index) と負相関をもっており、ひいてはエルニーニョ現象と関連していることはこれまでに数多く指摘されてきた (BACASTOW, 1976; BACASTOW *et al.*, 1980; BACASTOW and KEELING, 1981; THOMPSON *et al.*, 1986; TANAKA *et al.*, 1987b; CONWAY *et al.*, 1988)。5 カ月の移動平均をとった南方振動指数は 1987 年 5 月に最小値を記録しており (JAPAN METEOROLOGICAL AGENCY, 1983-1989)、昭和基地における CO_2 濃度増加率は 1987 年 11 月に最高値を記録している。したがって、両者間の相関には約 6 カ月のタイムラグが存在している。BACASTOW and KEELING (1981) は南方振動指数と南極点における CO_2 濃度増加率の相関が最高になるタイムラグがやはり 6 カ月であることを見いだしており、昭和基地におけるデータはこれを裏付けている。昭和基地における CO_2 濃度増加率はエルニーニョ現象と関係のない 1985 年および 1990 年にも大きくなっている。さらに、たいへんよく似た CO_2 濃度増加率の変動は、東北大学のグループによる北半球の航空機観測の結果にも見られる。したがって、この変動は地球規模の現象であると推定され、エルニーニョ現象のみならず、そのほかの要因、おそらく異常気象現象や気候変化に関連しているものと推定されている。

昭和基地における CO_2 濃度の季節変化成分を図 9 に示す。平均的な CO_2 濃度の季節変化は最低値が 3 月末に、また最高値が 9 月末に出現し、振幅が 1.18 ppmv である。実測された CO_2

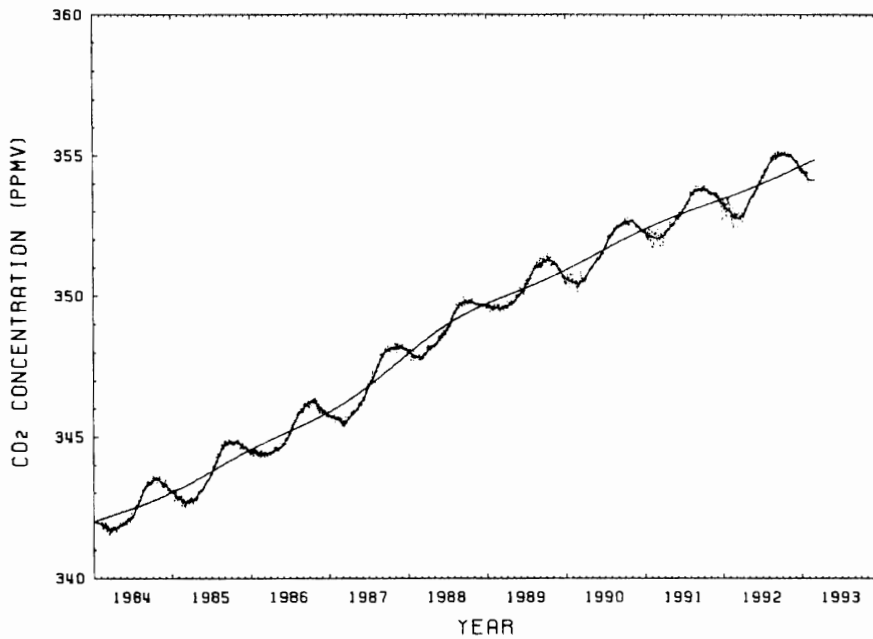


図6 データセレクションにより選択されたデータ (本文参照) から計算された昭和基地における日平均 CO₂ 濃度の変化。図中の太線はデータに対するフィッティング曲線を、細線は CO₂ 濃度の経年変化を示す。

Fig. 6. Daily mean CO₂ concentrations at Syowa Station, calculated from selected data. Thick and thin lines denote the smoothed curve of the data and the secular CO₂ trend, respectively.

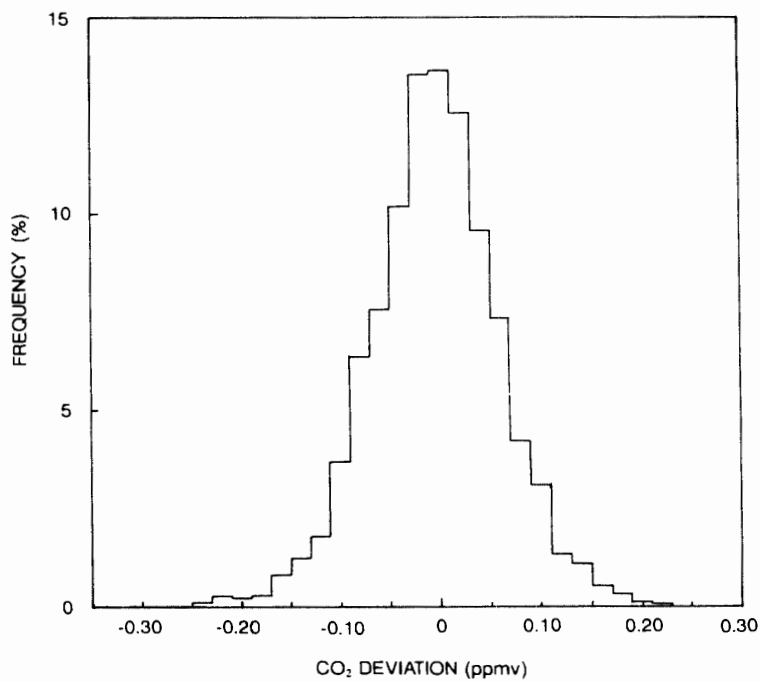


図7 昭和基地における日平均 CO₂ 濃度のフィッティング曲線からの偏差分布

Fig. 7. Deviations of daily mean CO₂ concentrations from their smoothed curve at Syowa Station.

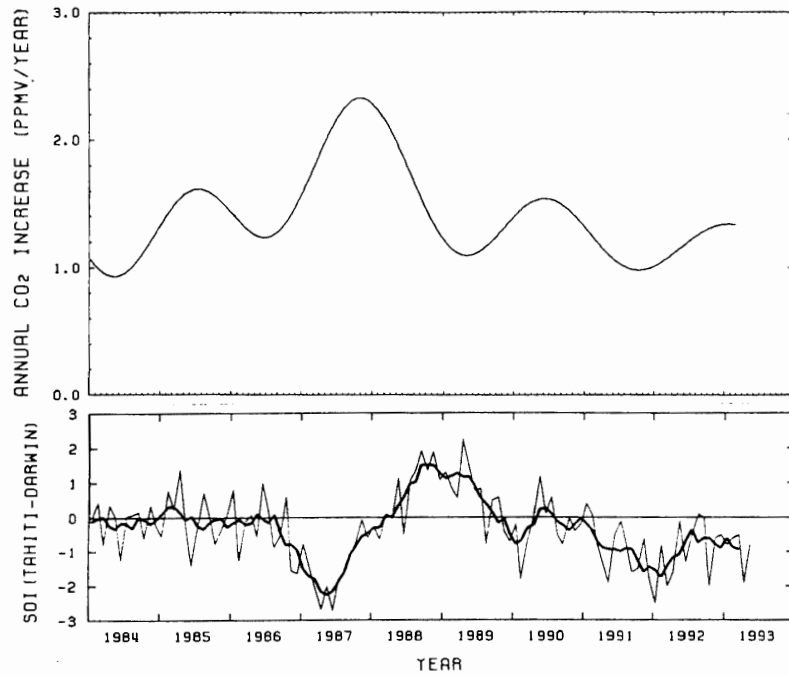


図8 昭和基地におけるCO₂濃度の経年増加率および南方振動指数 (the Southern Oscillation Index). 南方振動指数の細線は月平均値を、太線は5カ月の移動平均を示す。

Fig. 8. Rate of annual increase (solid curve) of CO₂ concentration at Syowa Station (upper panel) and the Southern Oscillation Index (lower panel). Thin and thick lines for SOI denote monthly and 5-month running mean values, respectively.

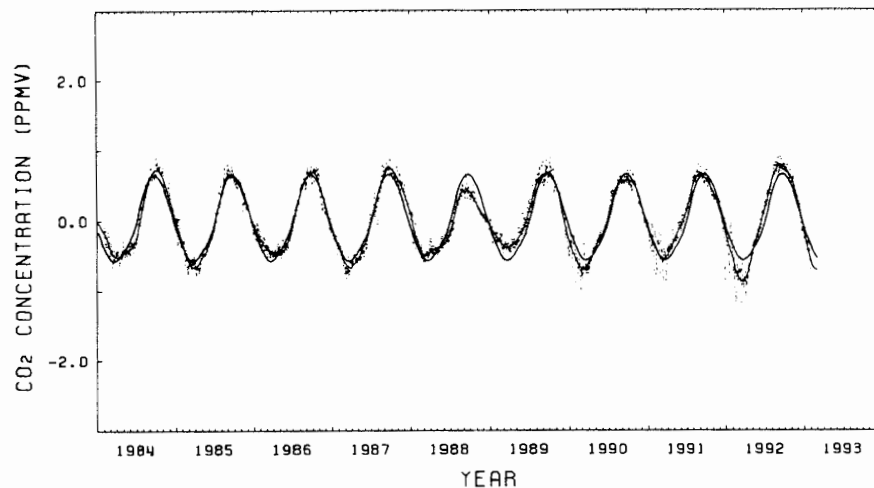


図9 昭和基地におけるCO₂濃度の季節変化成分. 細線は9年間の平均的な季節変化成分を示し、太線は実測された季節変化成分を示す。

Fig. 9. Seasonal cycle of CO₂ concentration observed at Syowa Station. Thin line represents the average seasonal cycle and thick line, the measured cycle, after the secular trend has been subtracted.

の季節変化は位相や振幅が年々変化している。その様子を図 10 に示す。比較的振幅が大きいのは 1985, 1987, 1992 年であり、逆に小さいのは 1986, 1988, 1989 年である。最大振幅は 1992 年に、最小振幅は 1988 年に現れている。しかし、振幅が年々しだいに大きくなったり、逆に小さくなったりする傾向は見られない。位相に注目してみると、最高濃度や最低濃度が出現する時期がしだいに早まっている傾向があり、過去 9 年間に約 20 日から 30 日程度ずれてきている。この現象はおそらく南極域の大気循環が何らかの原因で経年変化してきたことを表しているものと推定される。南極点における総放射照度 (直達光+散乱光) も 1984 年頃以降は顕著な増加傾向を示しており南極域に進入して雲を形成する水蒸気の輸送量が経年的に減少しつつあることを示している。この事実からも南極域の大気循環が経年変化してきたことが推定できる。

昭和基地では CO₂ 濃度の規則的な日変化は全く観測されないが、振幅が高々 0.2 ppmv 程度で周期が数日から数週間程度の不規則な変化は観測される。このような不規則変化を同基地の気温と重ね合わせたものを図 11 に示す。相関関係をより明瞭に示すために、縦軸の気温を逆向

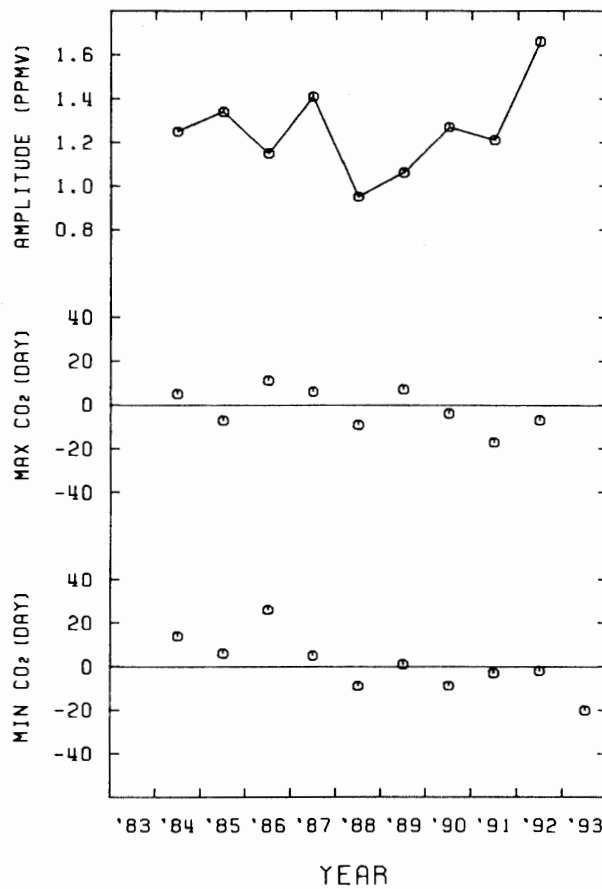


図 10 昭和基地における CO₂ 濃度の季節変化成分の位相と振幅

Fig. 10. Amplitude and phase of seasonal cycle of CO₂ concentration observed at Syowa Station.

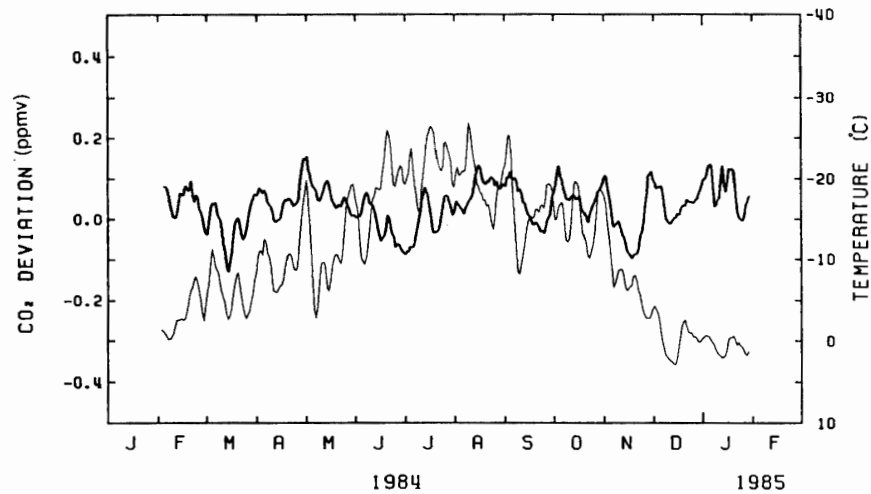


図 11 昭和基地における CO_2 濃度のフィッティング曲線からの偏差の変化 (太線) と気温変化 (細線)。それぞれの曲線は日平均値に 5 日の移動平均を行って平滑化している。

Fig. 11. Irregular variations of CO_2 concentration (thick line) and atmospheric temperature (thin line) at Syowa Station. Daily mean values of CO_2 concentration and temperature were smoothed by 5-day running mean.

きに表示している。この図からほぼ年間を通してこれら 2 つの変数の間に負相関が見られることがわかる。すなわち、気温が高くなると CO_2 濃度が低下し、逆に気温が下がると CO_2 濃度が上昇する傾向が見られる。数日から数週間スケールの気温変化は高低気圧といった総観規模現象に結びついている。したがって、 CO_2 濃度の不規則変化も主に総観規模現象にともなう気団の交換によって引き起こされるのではないかと推定される。さらに、負相関が成り立つことから、昭和基地より低緯度側の気団の方が高緯度側の気団に比べ CO_2 濃度が低いと推定される。

南半球の中緯度から高緯度にかけての CO_2 濃度の分布と変動を調べるために、連続観測を実施しているオーストラリアのタスマニア島にあるケーブグリム ($40^{\circ}41'S, 144^{\circ}41'E$) (BEARDMORE and PEARMAN, 1986, 1987b, 1988, 1989), 昭和基地 ($69^{\circ}00'S, 39^{\circ}35'E$) および南極点 ($90^{\circ}S$) (NICKERSON, 1985; SCHNELL, 1986, 1987) で 1984 年から 1987 年に得られたデータを用いて解析をおこなった。データ解析は月平均値を基本とし、これに前に述べたデジタルフィルターを用いた手法を適用した。得られた年平均 CO_2 濃度を表 1 に示す。ケーブグリムと南極点における CO_2 濃度は 1984 年が WMO X81 スケール (World Meteorological Organization 1981 mole fraction scale), 1985 年以降が WMO X85 スケールにより表記されているが、ここに示された濃度範囲では実質上両者間にはほとんど差がない。昭和基地における濃度スケールは WMO スケールとはまったく独立に我々が確立したものを使用している。それにもかかわらず、昭和基地と南極点における年平均 CO_2 濃度はお互いきわめて良い一致を示しており、平均すれば昭和基地の方が南極点に比べてたかだか 0.1 ppmv 高いだけである。両基地の年平均濃度は特

表 1 昭和基地, 南極点およびケープグリムにおける年平均 CO₂ 濃度. (Data) は実測された月平均値から計算されたものであり, (Fit) はフィッティング曲線から計算されたものである. ただし, 昭和基地と他の 2 地点で得られたデータセットの絶対検定スケールは異なっている (本文参照).

Table 1. Annual mean CO₂ concentrations at Syowa Station, South Pole and Cape Grim. Columns labeled data and fit contain annual means calculated from monthly means and the fitting function, respectively. Annual means for the fitting function are computed from daily values.

	Syowa Station		South Pole		Cape Grim	
	Data	Fit	Data	Fit	Data	Fit
1984	342.55	342.51	342.24	342.25	341.88	341.88
1985	343.76	343.77	343.68	343.70	343.23	343.23
1986	345.22	345.23	345.20	345.21	344.46	344.46
1987	346.86	346.87	346.79	346.80	346.06	346.07

に 1985 年から 1987 年にかけて非常によい一致を示している. 1984 年は昭和基地の方が南極点に比べて 0.3 ppmv 高かった. 一方, ケープグリムにおける年平均 CO₂ 濃度は南極域に比べておよそ 0.6 から 0.7 ppmv 低い. 定量的に同じような結果が, 我々の船舶観測 (TANAKA *et al.*, 1987c) でも見いだされている. さらに, 南極域とケープグリム間の年平均 CO₂ 濃度差は 1984, 1985 年に比べ 1986, 1987 年に一層拡大している.

ケープグリム, 昭和基地および南極点における CO₂ 濃度の季節変化成分を図 12 に示す. 実測された CO₂ の季節変化は振幅や位相が年々変化している. これらは 3 つの基地で独立に変化しているわけではなく, 振幅の大小はお互いよく似ている. すなわち, これらの振幅は 1984 年と 1986 年に小さく, 1985 年と 1987 年に大きくなっている. したがって, CO₂ 季節変化振幅の拡大・縮小は少なくとも南半球中・高緯度で共通に起きていると考えられる. 季節変化の平均的な振幅は上記の順に, 1.11, 1.27, 1.31 ppmv である. さらに, 最低濃度が出現するのは 1 月 1 日を基準として, やはりこの順に, 93, 97, 112 日目であり, 最高濃度が出現するのは, 253, 273, 280 日目である. 位相を見る限り, 季節変化は南に向かうにしたがってしだいに遅れる傾向にある. このことは気団が高緯度方向に運ばれることによって季節変化も高緯度方向に伝わっていることを示している. しかし, 振幅をみると極に向かってしだいに大きくなっている. 極域には CO₂ の強い放出源や吸収源が存在しないため, 振幅の拡大は単純に気団が高緯度方向に運ばれるだけでは説明がつかない.

南極域における大気中の CO₂ 濃度変化を解釈するのは, その変動が小さいために簡単ではないが, 南半球における植物活動や大気と海洋間の CO₂ 交換のみならず, 大気大循環にともなう CO₂ の輸送がこの濃度変化に重要な役割を演じているものと思われる. CO₂ の季節変化が

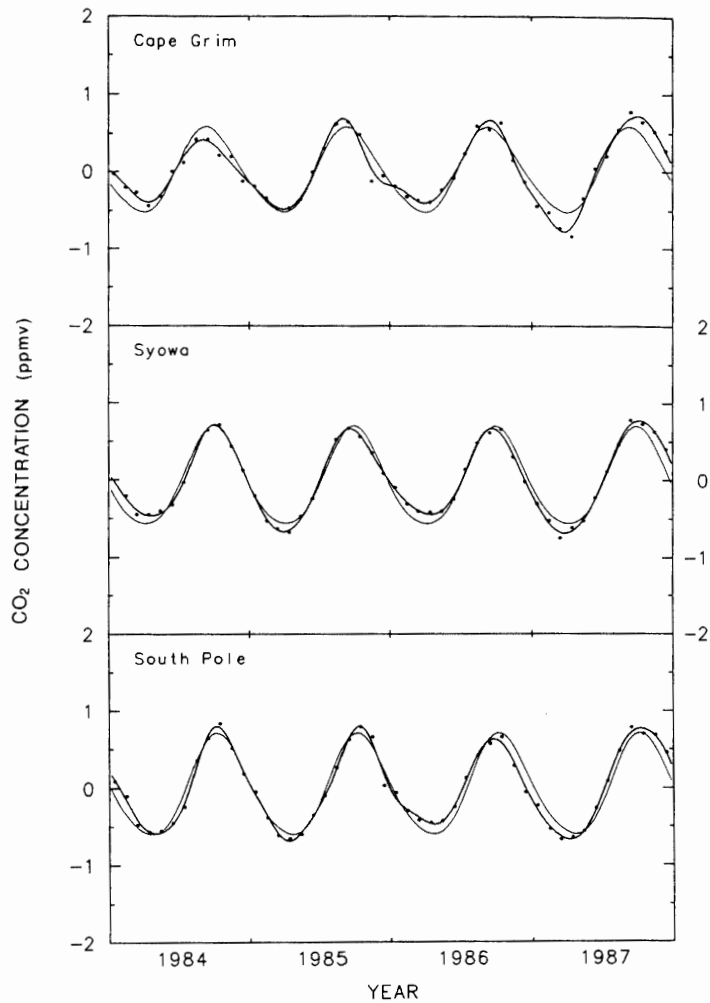


図 12 ケープグリム, 昭和基地および南極点における CO_2 濃度の季節変化成分. 細線は 4 年間の平均的な季節変化成分を示し, 太線は実測された季節変化成分を示す.

Fig. 12. Seasonal variations of CO_2 concentration at Cape Grim ($40^\circ 41' \text{S}$, $144^\circ 41' \text{E}$), Syowa Station ($69^\circ 00' \text{S}$, $39^\circ 35' \text{E}$) and South Pole (90°S). The thick line denotes seasonal variations including the interannual variation component, and the thin line denotes mean seasonal variations.

極に向かって遅れるのは南半球中緯度の空気が対流圏下部を伝わって極域に運ばれることにより部分的に説明できるであろう。しかし、季節変化振幅が極域ほど大きくなることや、年平均濃度が中緯度よりも南極域でより高い事実は、このような輸送だけでは説明できない。この点に関して、北半球の空気が赤道域を通して南半球の対流圏上部に流れ込んでいることが明らかにされている (PEARMAN and BEARDSMORE, 1984; NAKAZAWA *et al.*, 1991b)。このような空気の流れ込みは年中起きているわけではなく、西太平洋域ではモンスーン循環が卓越する 5 月から 11 月に限られている。南半球の上部対流圏に流入した北半球の空気は少なくともオーストラリア大陸上空までは運ばれていることが観測から明らかにされている。この空気が南極域上空まで運ばれ、南極大陸上の大気の沈降流によって地表付近まで降りてくるとすれば、南半球

中高緯度域での CO₂ 濃度変化を説明できるかもしれない。また、南極域における成層圏と対流圏間の空気交換も重要であろう。したがって、地表付近だけではなくデータの空白域となっている南極の対流圏上部から成層圏にかけての観測が強く求められている。

謝 辞

昭和基地において二酸化炭素濃度連続観測装置の維持管理等に努力されました塩原匡貴隊員、村山治太隊員、深堀正志隊員、山内恭隊員、村山昌平隊員、清水明隊員、林政彦隊員、岩井邦中隊員に感謝いたします。

文 献

- AOKI, S., NAKAZAWA, T., MURAYAMA, S., FUKABORI, M., YAMANOUCHI, T., MURAYAMA, H., KAWAGUCHI, S. and TANAKA, M. (1992): Atmospheric carbon dioxide measurements at Syowa Station, Antarctica, 1984-1988. Proc. NIPR Symp. Polar Meteorol. Glaciol., **5**, 66-75.
- BACASTOW, R.B. (1976): Modulation of atmospheric carbon dioxide by the Southern Oscillation. Nature, **216**, 116-118.
- BACASTOW, R.B. and KEELING, C.D. (1981): Atmospheric CO₂ and the Southern Oscillations: Effects associated with recent El Nino events. Proceedings WMO/ICSU/UNEP Scientific Conference on Analysis and Interpretation of Atmospheric CO₂ Data. Bern. WCP 14, Geneva, WMO, 116-118.
- BACASTOW, R.B., ADAMS, J.A., KEELING, C.D., MOSS, D.J. and WHORF, T.D. (1980): Atmospheric carbon dioxide, the Southern Oscillation, and weak 1975 El Nino. Science, **210**, 66-68.
- BEARDSMORE, D.J. and PEARMAN, G.I. (1986): Baseline Atmospheric Program (Australia) 83-84. Department of Science/Bureau of Meteorology in cooperation with CSIRO/Division of Atmospheric Research. Cape Grim BAPS, Tasmania, Australia, 37-38.
- BEARDSMORE, D.J. and PEARMAN, G.I. (1987a): Atmospheric carbon dioxide measurements in the Australian region: Data from surface observations. Tellus, **39B**, 42-66.
- BEARDSMORE, D.J. and PEARMAN, G.I. (1987b): Baseline Atmospheric Program (Australia) 1985. Department of Science/Bureau of Meteorology in cooperation with CSIRO/Division of Atmospheric Research. Cape Grim BAPS, Tasmania, Australia, 41-42.
- BEARDSMORE, D.J. and PEARMAN, G.I. (1988): Baseline Atmospheric Program (Australia) 1986. Department of Administrative Service/Bureau of Meteorology in cooperation with CSIRO/Division of Atmospheric Research. Cape Grim BAPS, Tasmania, Australia, 53-54.
- BEARDSMORE, D.J. and PEARMAN, G.I. (1989): Baseline Atmospheric Program (Australia) 1987. Department of Administrative Service/Bureau of Meteorology in cooperation with CSIRO/ Division of Atmospheric Research. Cape Grim BAPS, Tasmania, Australia, 29 p.
- BODHAINE, B.A., ed. (1988): Geophysical Monitoring for Climatic Change/Summary Report for 1987, **16**, ERL, NOAA, Boulder, Colorado, 30-34.
- CONWAY, T.J., TANS, 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.
- JAPAN METEOROLOGICAL AGENCY (1983-89): Monthly Report on Climate System 1983-1989. Long-range Forecast Division, Forecast Department, J.M.A., Tokyo.
- KEELING, C.D., ADAMS, J.A., Jr., EKDAHL, C.A., Jr. and GUENTHER, P.R. (1976): Atmospheric carbon dioxide variations at the South Pole. Tellus, **28**, 552-564.
- KOMHYR, W.D., GAMMON, R.H., HARRIS, T.B., WATERMAN, L.S., CONWAY, T.J., TAYLER, W.R. and THONING, K.W. (1985): Global atmospheric CO₂ distribution and variations from 1968-1982 NOAA/GMCC CO₂ flask sample data. J. Geophys. Res., **90**, 5567-5596.
- NAKAZAWA, T., AOKI, S., MURAYAMA, S., FUKABORI, M., YAMANOUCHI, T., MURAYAMA, H., SHIOBARA, M.,

- HASHIDA, G., KAWAGUCHI, S. and TANAKA, M. (1991a): The concentration of atmospheric carbon dioxide at the Japanese Antarctic Station, Syowa. *Tellus*, **43B**, 126-135.
- NAKAZAWA, T., MIYASHITA, K., AOKI, S. and TANAKA, M. (1991b): Temporal and spatial variations of upper tropospheric and lower stratospheric carbon dioxide. *Tellus*, **43B**, 106-117.
- NICKERSON, E.C., ed. (1985): Geophysical Monitoring for Climatic Change/Summary Report for 1984, **13**, ERL, NOAA, Boulder, Colorado, 30-50.
- 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.
- SCHNELL, R.C., ed. (1986): Geophysical Monitoring for Climatic Change/Summary Report for 1985, **14**, ERL, NOAA, Boulder, Colorado, 37-46.
- SCHNELL, R.C., ed. (1987): Geophysical Monitoring for Climatic Change/Summary Report for 1986, **15**, ERL, NOAA, Boulder, Colorado, 41-49.
- TANAKA, M., NAKAZAWA, T. and AOKI, S. (1983): High quality measurements of the atmospheric carbon dioxide. *J. Meteorol. Soc. Jpn.*, **61**, 678-685.
- TANAKA, M., NAKAZAWA, T., SHIOBARA, M., OHSHIMA, H., AOKI, S., KAWAGUCHI, S., YAMANOUCHI, T., MAKINO, Y. and MURAYAMA, H. (1987a): Variations of atmospheric carbon dioxide concentration at Syowa Station (69°00'S, 39°35'E), Antarctica. *Tellus*, **39B**, 72-79.
- TANAKA, M., NAKAZAWA, T. and AOKI, S. (1987b): Time and space variations of tropospheric carbon dioxide over Japan. *Tellus*, **39B**, 3-12.
- TANAKA, M., NAKAZAWA, T. and AOKI, S. (1987c): Seasonal and meridional variations of atmospheric carbon dioxide in the lower troposphere of the northern and southern hemispheres. *Tellus*, **39B**, 29-41.
- THOMPSON, M.L., ENTING, I.G., PEARMAN, G.I. and HYSON, P. (1986): Interannual variation of atmospheric CO₂ concentration. *J. Atmos. Chem.*, **4**, 125-155.

(1994年11月11日受付; 1997年1月29日改訂稿受理)