

B-4 シベリア凍土地帯における温暖化フィードバックの評価に関する研究

(2) 大気中二酸化炭素濃度の測定およびフラックスの測定に関する研究

研究代表者 国立環境研究所 井上 元

環境庁 国立環境研究所

地球環境研究グループ 温暖化現象解明研究チーム 井上 元、町田敏暢、S.マクシュートフ

大気圏環境部 大気動態研究室 泉 克幸、内山政弘、

平成3 - 5年度合計予算額 24,938千円

(平成5年度予算額 14,013千円)

〔要旨〕 地球の大気を構成する温室効果ガスの中で二酸化炭素は、対流圏の水蒸気を除くと最も大きな効果があり、人間活動により毎年約1.8ppm、約0.5%ずつ増加している。その増加の主たる原因は、化石燃料の使用と森林伐採である。人為起源の二酸化炭素（年間70億トン）のうち、大気中に残存している34億トンと、海洋に吸収されると考えられている20億トンとを差し引いた残りの16億トン程度が行方不明 missing sink となっている。その有力な候補の一つがタイガ地帯およびツンドラ地帯での吸収である。日中は光合成による大量の二酸化炭素の吸収、夜間には呼吸により、接地境界層内部の二酸化炭素濃度は大きく変動する。その収支が二酸化炭素の吸収側にあるため、夏期の混合層の内部は二酸化炭素の濃度がバックグラウンド濃度より数十ppmも低くなっている。混合層の低濃度二酸化炭素の空気は強い垂直混合や低気圧による大きな流れにより自由対流圏に輸送され、バックグラウンドでの二酸化炭素濃度を低下させている。この様なメカニズムが航空機観測によって明らかになった。地上での二酸化炭素のモニタリング体制が整い、二酸化炭素濃度の日、季節変動についてのデータが出始めている。

〔キーワード〕 二酸化炭素、地球温暖化、タイガ、航空機観測、炭素循環

1.序

地球の大気を構成する温室効果ガスの中で二酸化炭素は、対流圏の水蒸気を除くと最も大きな効果を有している。対流圏水蒸気に関しては常温では飽和土気圧が存在して凝縮が起こるため、人間活動の直接的な影響としては顕著な濃度変動を示さないと考えられているのに対して、二酸化炭素は近年人間活動の増大に伴い、毎年約1.8ppm、割合にして約0.5%ずつ増加していることが世界中の多くの観測の結果明らかになってきた。1990年に公表された「気候変動に関する政府間パネル」の報告書によれば、1980年代を通して、温室効果（radiation forcing）増加量の55%は二酸化炭素濃度の増加によりもたらされたものであるとされている。これは、他の温室効果ガスの増加に起因する温室効果の増加量、フロン25%、メタンの15%、一酸化二窒素の5%と比較すると格段に大きな寄与をしてきたことになる。

現在問題となっている大気中二酸化炭素濃度の増加の主たる原因が、化石燃料の使用および森林伐採

に代表される人間活動であることは、これまでの多くの研究成果からほぼ確実とされている。例えば、南極やグリーンランドの氷中に泡として閉じ込められた大気中の二酸化炭素の分析によれば、産業革命以前には280ppm程度であったものが、現在は350ppmを越えていることが示されている。地球上での炭素の循環は、大気圏と生物圏および海洋の間で生じているが、この量は炭素にしてほぼ年間2,000億トンであり、人為起源の二酸化炭素は化石燃料起源のものが54億トン、熱帯林等の森林伐採や土地利用の変化に伴うものが16億トンと約3.5%程度の少量に過ぎない。しかしながら、これが微妙なバランスの上に成り立っている地球生態システムに対して甚大な影響を与えつつあるのである。

人為起源の二酸化炭素も、一度大気中に放出されてしまえば他の非人為起源の二酸化炭素と区別できるわけではない。しかし、バランスの取れていた自然の炭素循環に新たに追加された余分の二酸化炭素（年間70億トン）の行方を考えると、大気中に残存している34億トンと海洋に吸収されると考えられている20億トンを差し引いた16億トン程度が行方不明となっている。この不明な二酸化炭素の吸収源（missing sink）としては、陸上の植物や海洋の吸収の過小評価などが考えられ、重要な研究課題となっている。

2.研究目的

Missing Sinkの有力な候補の一つと考えられている北半球の陸生生態系の中で、その空間的な広がりや土壌中に貯留している炭素の量では最も大きいと考えられるタイガ地帯およびツンドラ地帯で、主として大気中二酸化炭素濃度の観測を基にした炭素の循環量の定量的な評価手法を確立する。

特にシベリアは、現在の気候モデルの予測では二酸化炭素増加時に最も気温が上昇する地域の一つとされており、モデルによっては10度以上も上昇するという予測がなされている。このような大幅な気候変動に伴い、現在の植生の変化、永久凍土の融解による森林の現象、湿地化とその後の乾燥化などが予想され、その結果、二酸化炭素の固定量の減少、現在腐植として貯留されている炭素の微生物分解による二酸化炭素の放出が危惧される。このため、炭素循環の長期的なトレンドを見いだすための観測手法の開発も検討されなければならない。

3.研究結果

3-1.二酸化炭素の長期観測体制の整備

森林の光合成と呼吸による二酸化炭素の収支は、それぞれの絶対値の大きさに比べ差は小さいので、容易に測定できない。したがって、第一段階としてはシベリアのタイガ地帯での大気中の二酸化炭素濃度の年変動を把握するととした。濃度変動と気温、地温、降雨などの気象要素とを通年観測し、相互の関連を明かにする必要がある。この目的で1992年3月にサハ州ヤクーツクにある、ロシア科学アカデミー永久凍土研究所との共同研究協定を締結した。これに基づきヤクーツクを中心としたフィールド観測の支援が得られることになった。ヤクーツク市の西方24kmの森林のなかにある電波中継所の構内に、土盛りの上に船舶運搬用のコンテナを置き、二酸化炭素の測定器を設置した。また、高度120mの電波等の77、44、11mの高度から大気を採取する工事を行った。

電波中継所を選定した理由は次の点である。

1.ヤクーツクの風配図によると東風が比較的少なく、ヤクーツク市の排ガスの影響が比較的少ないこと。

図1

- 2.ヤクーツク市からの幹線道路沿いにあり、一年中陸路が確保されているため、メンテナンスがやさしいこと。図2
- 3.比較的良質の電気が供給されており、停電時には自家発電の設備があること。
- 4.高い塔があり、高度分布を測定することが可能であること。

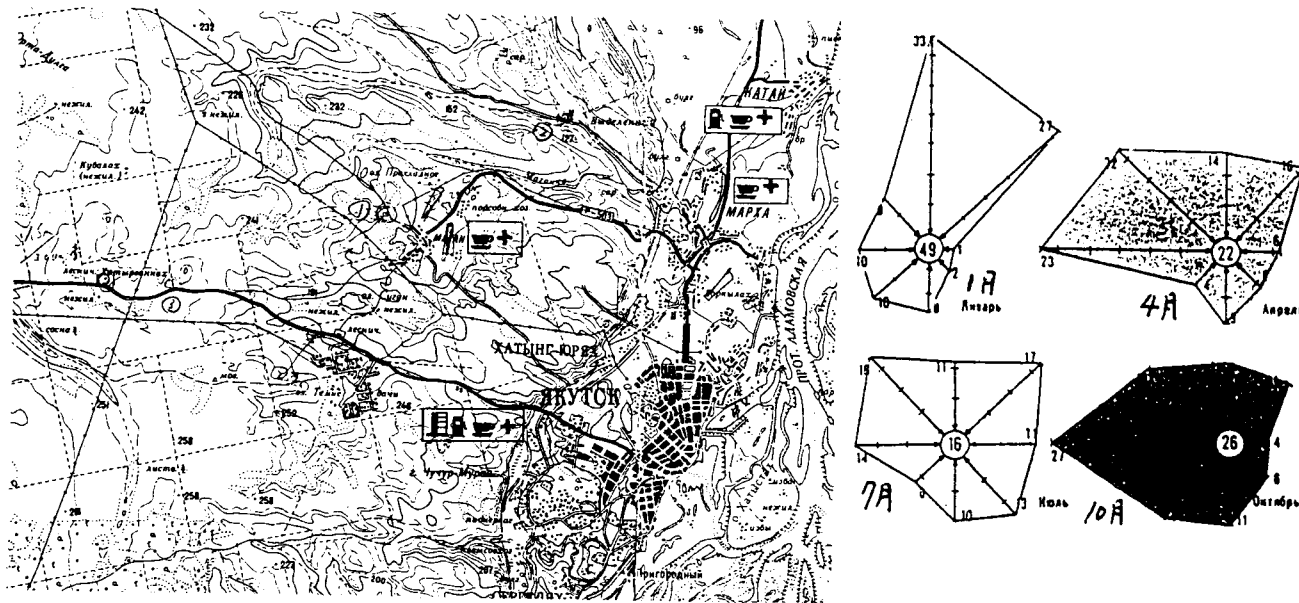


図2 ヤクーツク市の風配図

図1 ヤクーツクのモニタリングステーション（左矢印）とヤクーツク市、右端はレナ河

コンテナは約4m x 12mの大きさであり、永久凍土との断熱のため真さ土を約1m盛り、その上に設置した。電波塔は根本が直径2mの円筒で上部で細くなる構造をしている。高さは120mであるが、電波受信送信の機器類が取り付けられているため、採気管は77mの高度までしか取り付けられなかった。採気口は虫が入り込むのを防ぐため1mmφの多数の穴を開けたステンレス板、ステンレスの網を経て、1/4"の銅管につながる。銅管はタワーの外部に固定しつつ引き降ろし、3mの高度から水平にコンテナラボに引き込まれる。水平距離は約6mである。気象測器は、高度11mの位置で、塔から5m水平に突き出した棒に風向風速計と温度計を、コンテナの上に日射計を、大気の入力口3ヶ所に熱電対温度計をそれぞれ取り付けした。二酸化炭素濃度の測定は通常は非分散赤外吸収法による測定器を用いるが、この測定器は参照ガスとして常に100cm³/min程度を流し続ける必要があるため、標準ガスの使用量も多いため、これらのガスの補給が問題となる。現在のところ、ヤクーツクへの物資の輸送は、携帯荷物として旅客機で一人150kg以下の重量のものを運搬するか、チャーター機で運搬するしか方法がない。従ってこの方法は現実的でない。もう一つの方法は、二酸化炭素と水素ガスをニッケル触媒で還元しメタンとし、FIDで検出する方法で、現地で窒素と水素ガスを生産できれば自立的に運転が可能であるので、この方

法をとることとした。コンテナ内には、オイルフリーの高圧用コンプレッサー（20kg/cm）で加圧した環境大気を酸化触媒で燃焼させることによりメタンや炭化水素を取り除き、加圧吸着法により酸素を除去して窒素を発生させるシステムを置き、ガスクロのキャリアーガスとして使用する。また、触媒で燃焼させた空気はガスクロの助燃ガスとして使用する。FID用の水素はパラジウム電極による水の電気分解で発生させる。試料空気はそれぞれの高度別にダイヤフラムポンプで吸引加圧し、常時は部屋の中に捨てることにより、配管内の滞在時間を短くした。1対6の切り替えバルブで三高度の大気と、メタン、二酸化炭素の空気をベースにした標準ガスを切り替えて測定する。バルブ等の制御はガスクロのインテグレーターで行い、データはパソコンに取り込み日本に送ることとした。

3-2.二酸化炭素濃度の長期観測

図3に93年秋から冬にかけての測定の生のデータを示す。図3-aはこの間の地上での気圧変化、3-bの●はガスクロに現れた二酸化炭素の保持時間（注入から信号の現れるまでの時間）、逆三角は標準ガスのピークの高さ、図3-cは標準ガスのピーク面積である。明かに保持時間は外気圧の影響を受けているが、これはガスクロのキャリアー

ガスの入力側の圧力が圧力調整弁により一定に保たれているのに対し、出口側が大気圧に解放されており、気圧が高くなるとその差が小さくなり、従ってキャリアーガスの流量が小さくなるためである。二酸化炭素の信号も大気圧と正の相関があるが、これはサンプルを採取する定量管を大気圧に解放しているため、採取=注入しているサンプルの量が大気圧に比例するためである。図4に注入試料の量が大気圧に比例するとして圧力補正を施した標準ガスの信号強度を□で示す。圧力の変動効果がかなり無くなってはいるが、まだ若干の正の相関にある。保持時間の変化はガスクロピークの面積には影響を与えないので、これは

FIDの水素炎の状況が変化したためと考えられるが確認はされていない。いずれにせよ標準ガスの測定値はこの1ヶ月の測定期間内では最大2%変動しており、常に標

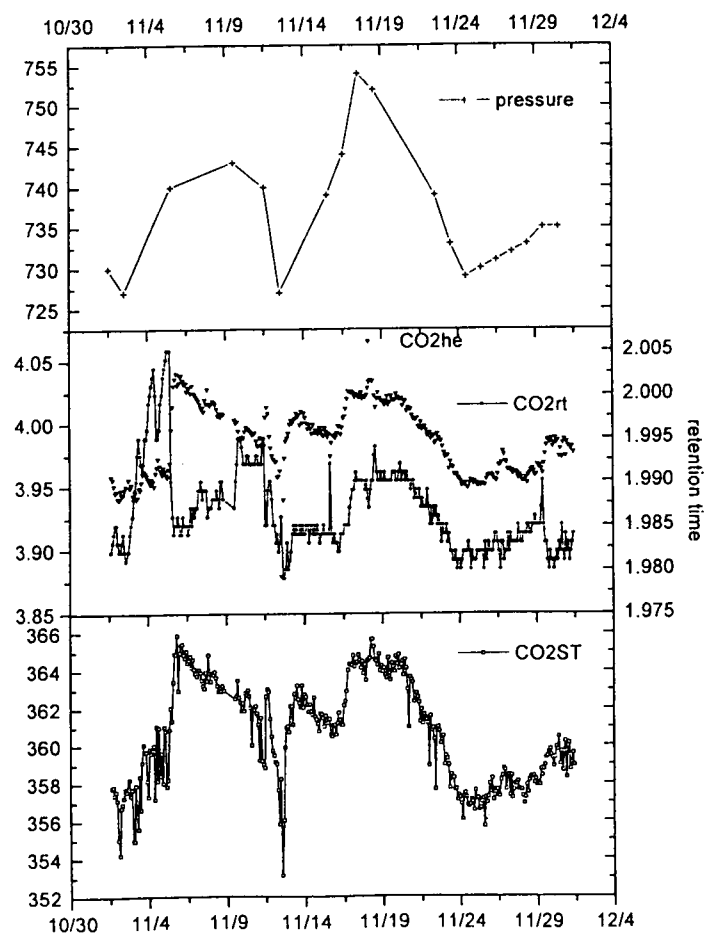


図3 11月にヤクーツクモニタリングステーションで得られた二酸化炭素のデータ。上は気圧(Torr)。中は二酸化炭素の標準ガスの測定生データをピークの高さで測定したもの（逆三角）とガスクロの保持時間（黒丸）。下はガスクロの面積値（標準ガス）。

準ガスで較正する必要があることを示している。

図4の丸、上向き三角、下向き三角は、それぞれ地上11、44、77mの高度で採取した大気中の二酸化炭素濃度を示している。いずれも標準ガスに比べ大きな変動を示している。これらを標準ガスの値で較正した結果を図5に示す。メタンも同様に測定しており、その結果は二酸化炭素に類似している（図3）。

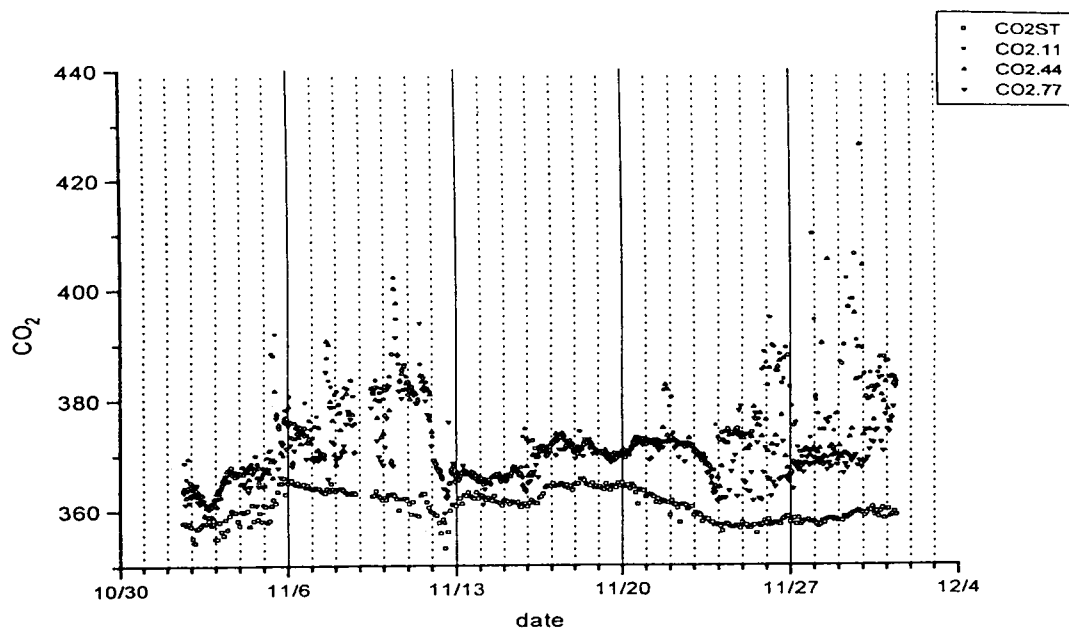


図4 二酸化炭素の標準ガスの値と各高度（11、44、77m）から得られた試料の測定値。大気圧に対して補正してある。

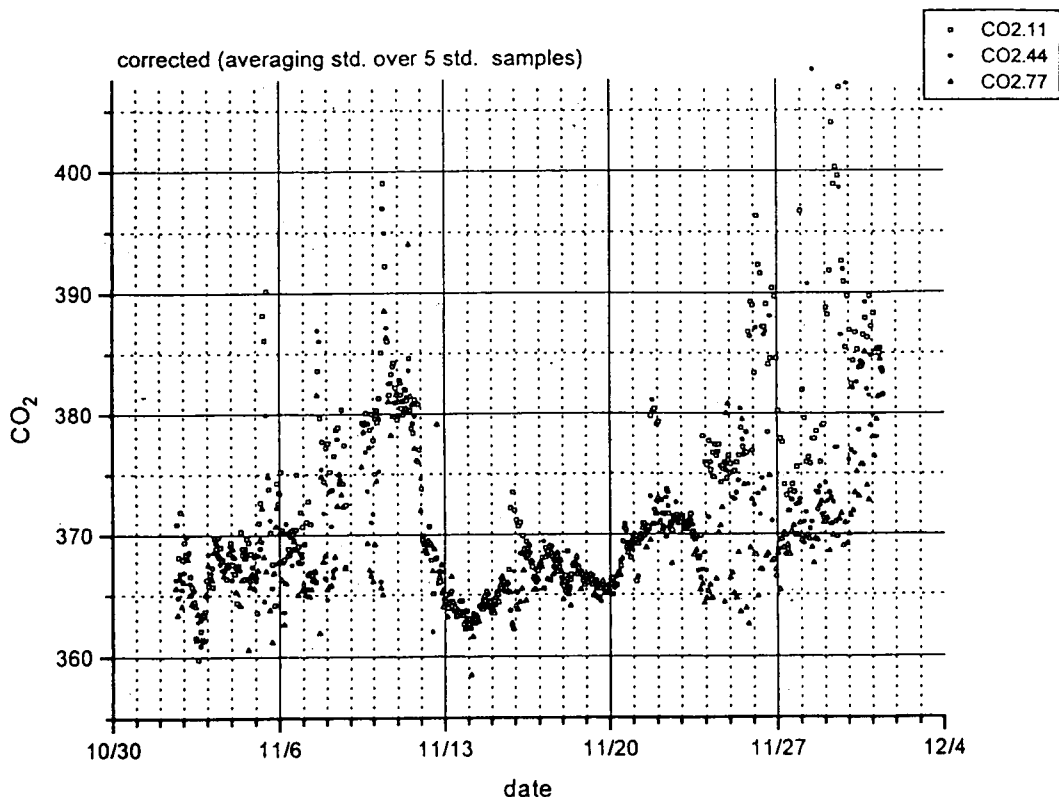


図5 標準ガスで較正した後の測定値。測定の前5点の標準ガスの値を使用して較正した。

3-3.航空機による二酸化炭素の空間分布の測定

植物は日中の光合成で二酸化炭素を吸収し、夜間の呼吸で放出する。その差がバイオマスとして蓄えられる。夏期には光合成が卓越するので大気中の二酸化炭素の濃度は低下する。一方大気の運動は、日中は地表面が温められ不安定となり上昇気流を生じるので上下の混合が強くなり、数百から2,000m付近まで均一な二酸化炭素の濃度が低い状態になる。夜間は放射冷却により地表面温度が下がるので逆転層が形成され、呼吸で放出された二酸化炭素は地表面から100m以下の領域に閉じ込められる。太陽がのぼると逆転層が消え混合が始まると共に、光合成により二酸化炭素の濃度が再び低下する。このようなプロセスを繰り返しつつ、大気中の二酸化炭素濃度は徐々に下がって行く。こうした大気の上下拡散と気圧配置による水平方向の大きな流れが組み合わさる、地表面の二酸化炭素濃度が決定される。

図6に早朝に飛行を開始した場合に得られた二酸化炭素の高度分布を示す。低層の二酸化炭素の濃度が高い領域は、逆転層の中に植物の呼吸や人為的に放出された二酸化炭素が接地逆転層に閉じ込められていることを示す。その上に二酸化炭素の濃度が低い均一の層があるが、これは前日の混合層がそのまま残っていることを示している。その上の自由大気の二酸化炭素濃度はこの時期、この緯度での平均的な値となっている。

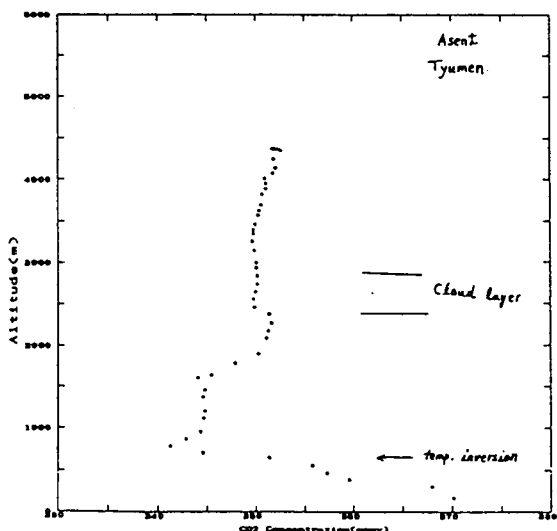


図6 1992年7月20日にチュメニ近くで得られた二酸化炭素の高度分布。早朝の逆転層の中に呼吸によって放出された二酸化炭素が蓄積されている。1,800mまでの二酸化炭素低濃度領域は前日の混合層の高さを反映している。

対流により強く混合される下層の大気（混合層）の上は自由大気と呼ばれる対流圏の大部分を占める大気である。自由大気は、気圧配置により水平方向の運動も加わりつつも、全体としては偏西風により西から東に流されほぼ等緯度で循環している。ここには、低気圧の領域では全体として大きく渦を巻きつつ風速数cmというゆっくりとした速度の上昇流が入り込み、広い領域で下層の大気の影響を受ける。また、強い上昇流が生じ、断熱膨張で雲が生じ、潜熱の放出で更に上昇を続けるという場合には、混合層の大気が自由大気中に突入する。この場合も下層の二酸化炭素の低い空気が入り込む。このような混

合層との相互作用を繰り返しつつ、自由大気も地表面における植物との相互作用の影響を受け、その二酸化炭素濃度を徐々に低下させる。

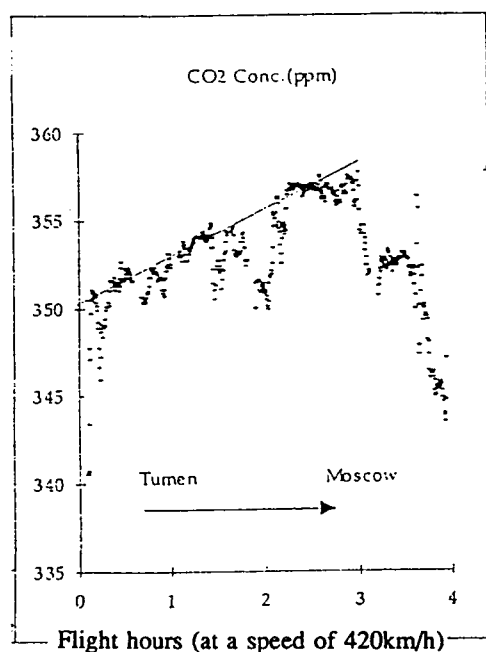


図7 1992年7月26日に7,000mの飛行で得られた自由対流圏の二酸化炭素濃度分布。飛行はチュメンからモスクワに向かってほぼ等緯度を西に向かってしている。西から東に向けて大気中の二酸化炭素の濃度が低下していることが分かる。

図7に航空機で6,00-7,000mの高度をほぼ等緯度で東西に飛行しつつ二酸化炭素を測定した例を示す。飛行機の離着陸時や観測のため高度を下げた場合には、低濃度の二酸化炭素が記録され、また、高高度の飛行を続けている場合にも時々低濃度の空気塊を横切っていることがわかる。しかし全体としては東に行くほど二酸化炭素の濃度は低下し、その傾きは6-2ppb/kmであった。また、低気圧の空域を横切った時には広い範囲で二酸化炭素濃度が数ppm下がっている状態も観測された。

今後、森林のキャノピー内、森林直上から混合層の領域、混合層と自由大気との接点の3領域において、二酸化炭素の分布とその日変動、水平風の影響（気圧配置）などの観測を積み重ね、モデル化を行い、その機構解明を進める必要がある。このような研究を積み重ねることにより生物圏と大気圏の相互作用を明かにすることが可能となろう。

〔国際共同研究等の状況〕

日露環境保護協定 94-95年環境保護協力計画 シベリアにおける温室効果気体の航空機観測
環境庁（国立環境研究所）－ロシア連邦気象観測部（ロシア気象委員会中央大気観測所）

ロシア側参加者 24名

日本側参加者 19名

毎年7-8月に共同観測を行なうほか、研究打ち合せ、研究成果発表のため研究者の派遣、招聘を相互に行なっている。

〔研究発表の状況〕

1)"Airborne Measurement of Greenhouse Effect Gases over Siberia in 1992", Gen Inoue, K.Izumi, M.Uchiyama, S.Maksyutov, N.Vinnichenko, A.Postnov, V.Galaktionov, Global Change and Arctic Terrestrial Ecosystems, Norway, 57, 1993.

2)"Distribution and Emission of CH₄ over the Central West Siberia Lowland--Airborne Measurement of Greenhouse Gases over Siberia III--", Y.Tohjima, H.Wakita, T.Machida, S.Maksyutov, G.Inoue, K.Izumi, eta al., Internal Symposium on Global Cycles of Atmospheric Greenhouse Gases, Sendai, 5-8, 1994

3)"Vertical Turbulent Transport of Methane in the Atmospheric Boundary Layer over the Central Western Siberia -- Airborne Measurements of Greenhouse Gases over Siberia VI--", A.Postnov, E.Stulov, G.Inoue, Y.Tohjima, S.Maksyutov and T.Machida, Internal Symposium on Global Cycles of Atmospheric Greenhouse Gases, Sendai, 30-33, 1994.

4)"Short Term Simulations of Atmospheric Methane Concentration with a Global Tracer Transport Model", S.Maksyutov, Internal Symposium on Global Cycles of Atmospheric Greenhouse Gases, Sendai, Internal Symposium on Global Cycles of Atmospheric Greenhouse Gases, Sendai, 333-336, 1994.