

課題名	大気境界層観測による森林から亜大陸規模の二酸化炭素吸収推定		
担当研究機関	独立行政法人国立環境研究所		
研究期間	平成13-15年度	合計予算額 (当初予算額 ベース)	86,031千円 (うち15年度 26,589千円)

研究体制

独立行政法人国立環境研究所、一部名古屋大学大学院へ研究委託

研究概要

1. 序 (研究背景等)

京都議定書で決められた人為的な森林活動の評価は、植林や伐採の規模が10kmのオーダーなので、二酸化炭素の吸収量を評価するためにはフラックス法、森林統計、遠隔計測などの方法が適用されている。しかしながら、今後の国際交渉の場では、直接の人為活動である植林や伐採だけではなく、森林保全、営林、農牧畜などを含む全炭素の排出・蓄積を評価する方向で検討が進められると予想される。これに対応するために森林(1km)から亜大陸規模(1000km)の炭素収支を評価する方法を開発する事が重要な研究課題となる。

2. 研究目的

亜大陸規模の炭素収支を大気輸送モデルの逆計算を利用して見積もるには、対象地域において、1)出来るだけ多地点で、2)出来るだけ高頻度に、3)地上から自由対流圏にかけての、二酸化炭素濃度を観測するのが理想的である。二酸化炭素濃度を高頻度で観測するためには地上における連続観測が最も有効的であるが、この方法では自由対流圏の濃度を知ることは困難である。一方、二酸化炭素濃度の鉛直方向の濃度分布を知るためには航空機を利用した観測が、必要とされる精度を満たす唯一の方法であるが、観測の高頻度化や多地点化は困難である。

本研究では、地上での二酸化炭素および関連気体の連続観測とその直上の自由対流圏における二酸化炭素濃度の高頻度航空機観測を新たな手法で実施し、両観測の時間・空間的代表性の検討を通して亜大陸規模の炭素収支を評価するための理想的な観測手法の確立基礎を固めることを目的とする。

3. 研究の内容・成果

本研究の観測地点は地形が平坦であり比較的均一な植生を有する西シベリアのベレゾレチカ村(56°10'N, 84°20'E)周辺の森林地帯を選定した(図1)。地上観測にはベレゾレチカ村郊外にあるガスプロム社所有の高さ90mの通信中継タワーを使用した。航空機観測はベレゾレチカタワー上空の高度2kmから0.15kmの鉛直プロファイルを得る形で行われた。

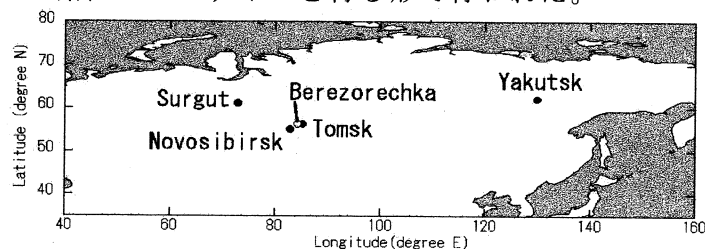


図1 本研究の観測地点

本研究を行うにあたり新たに開発したタワー用二酸化炭素観測装置は標準ガスの使用を極めて少なく保ちながら高い精度で観測を行うことができた。

ベレゾレチカタワーで観測された二酸化炭素濃度(図2)はいずれの季節も日中に低く、夜間から早朝にかけて増加し、日の出とともに減少する日変動を示す。日変動の振幅は冬季に小さく、いずれの高度においても最大で約15ppmであるが、夏季には高度80mで最大60ppm、高度5mでは120ppm

にも達する。2月や3月には振幅は非常に小さいものの、日変動が存在するという事は極低温下のシベリアの冬季であってもベレゾレチカ周辺の生態系を含めた地表面からの二酸化炭素フラックスが存在していることを意味している。

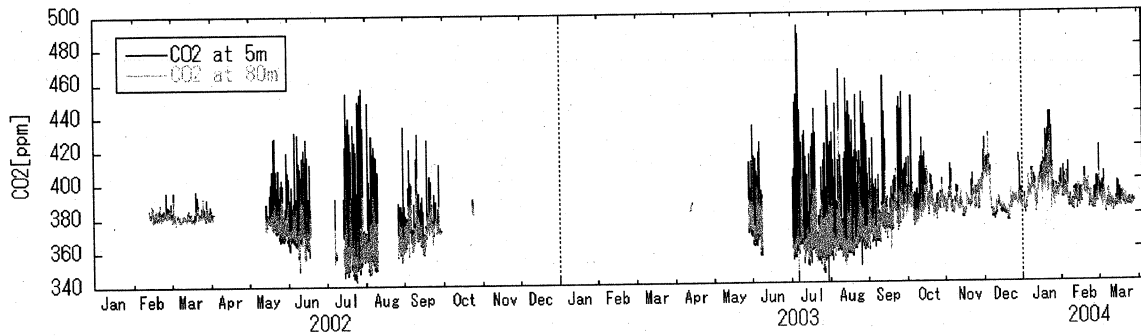


図2 ベレゾレチカタワーで観測された二酸化炭素濃度の変動

ベレゾレチカタワーで観測された二酸化炭素濃度から日中のほぼ最低値を示す現地時間14:00から16:00のデータを抽出したデータは冬季に高く夏季に低い明瞭な季節変動を示している。冬季の最高濃度と夏季の最低濃度との差は30ppmにも達している。これは東シベリアヤクーツク近郊の森林で得られた二酸化炭素の季節振幅の25ppm²⁾より明らかに大きく、ベレゾレチカ村を取り囲む西シベリアの森林地帯の陸上生態系は東シベリアと比較してより多くの二酸化炭素を大気との間で交換していることが示唆される。

ラドン濃度は冬季に最高、春先に最低濃度を持つ季節変動を示した。春先の融雪に伴うフラックスの低下以外は主に大気の混合によって濃度が決定されていることがわかった。ラドン濃度日変動の気温との関係を示したものが図3である。二酸化炭素と同じように気温の逆転層が形成される夜間は地表から放出されたラドンの蓄積効果によって濃度の絶対値が大きくなり、高度方向の濃度差も大きくなっている。しかしながら夏季と冬季のピークの大きさを比較すると、二酸化炭素は生態系の呼吸や土壌有機物の分解によるフラックスの季節変動を反映して夏季に非常に大きな夜間ピークが観測されているが、ラドンでは季節によるピーク高の違いが小さい。これはラドンの地表からのフラックスが融雪期等の一部の季節を除いてほぼ一定であることに起因しており、地上で観測されたラドン濃度の変動が大気の鉛直混合の指標として適していることを意味している。

また、ラドンはその大気中の性質から大気輸送モデルの有効なトレーサーとして利用されているが、現在のモデルでは積雪期のラドンフラックスをゼロと仮定して計算を行っている。本研究で観測された大気中ラドンの変動はこの仮定を明らかに否定するものであり、今後の大気輸送モデルの検証にとって非常に重要な結果であると言える。

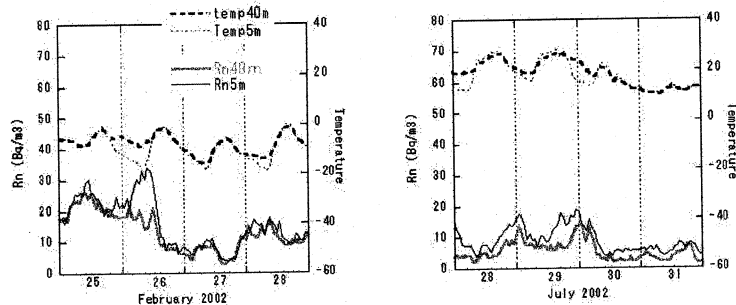


図3 ベレゾレチカタワーで2月末と7月末に観測されたラドン濃度と気温の関係

ベレゾレチカタワーで観測されたオゾン濃度は春に極大、夏に極小を持つ季節変動を示した。タワーにおけるラドン観測は測定装置の応答速度の速さや大気中濃度の変動量の大きさから、短周期での大気混合度の指標として有効な観測項目であることが実証された。

図4に2001年10月から2002年12月までに得られたベレゾレチカ上空における二酸化炭素濃度の鉛直プロファイルを示す。本研究で開発した航空機用二酸化炭素観測装置によって非常に安価に鉛直分布を観測することが可能になり、1年に30回以上の高頻度観測飛行に成功した。二酸化炭素濃度の鉛直勾配は冬季には非常に小さく、高度0.5km以上ではほぼ一定であるが、地表付近でやや高い濃度を示している。2月から5月中旬までは濃度の経時変化はほとんどなかった。5月下旬になると二酸化炭素濃度は全ての高度で減少を始め、6月に入ると濃度勾配が逆転して低高度で低い濃度を示しながら減少を続け、7月中旬にその年の最低濃度を示す。夏季は冬季に比べて鉛直方向の濃度勾配が大きく、高度2kmと0.15kmの差が最大で15ppmにも達した。また、夏季には大気境界層内の乱流による二酸化炭素の輸送状態に大きな空間分布があるために鉛直方向の濃度のば

らつきが大きくなっている。

ベレゾレチカ上空における二酸化炭素濃度の季節変動を同じ西シベリアのノボシビルスク(55°N, 83°E)上空(図1)での航空機サンプリングによる観測結果と比較すると、ベレゾレチカ上空の二酸化炭素濃度の季節変動は高度0.5-1kmの平均であってもノボシビルスク上空0.5kmにおける振幅に比べて明らかに大きく、ベレゾレチカ周辺の陸上生態系の活動がノボシビルスク周辺の生態系に比べてより盛んであることが示唆される。

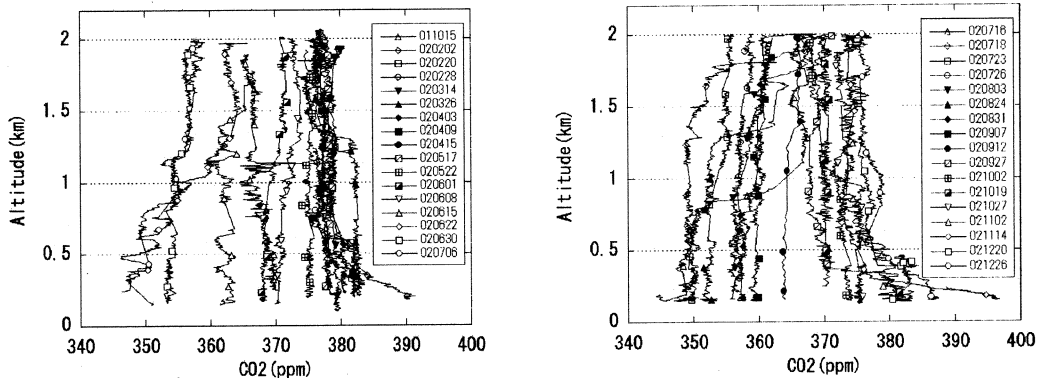


図4 ベレゾレチカ上空で観測された二酸化炭素濃度の鉛直分布

大気境界層内と自由対流圏における二酸化炭素の振る舞いを明らかにするために各フライトで得られた気温、温位、湿度、二酸化炭素濃度の鉛直分布から境界層上端高度を決定した。大気境界層内と自由対流圏の二酸化炭素濃度を平均し、季節変動をプロットしたものが図5である。境界層内の濃度は夏季には自由対流圏より10ppmほど低く、冬季は逆に3-4ppmほど高い。フィッティングカーブから得られた季節振幅は34.4ppm(PBL)と16.4ppm(FT)であり、2倍以上の差が存在している。また、年平均濃度は大気境界層内が自由対流圏より2ppm以上高く、rectifier効果が大いことがわかった。このような高頻度航空機観測によって大気境界層内とその直上の自由対流圏における二酸化炭素の季節変動を比較した例はこれまでなく、信頼度の高いデータの新たな取得方法を提唱できた。

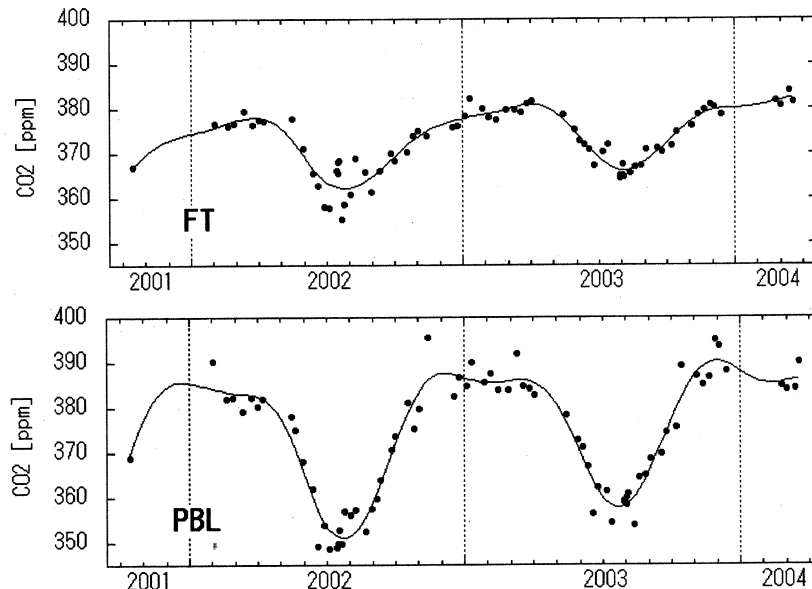


図5 大気境界層内(PBL)と自由対流圏(FT)の二酸化炭素濃度の季節変動。
丸印が各高度帯の平均値を、実線がフィッティングカーブを表す。

航空機を使った二酸化炭素鉛直分布の日変動観測を行い、地表面の加熱に伴う境界層の発達だけではなく、高気圧・低気圧に伴う気塊の移動や積雲対流による混合が境界層内の二酸化炭素濃度の変動に重要な役割を果たしていることが明らかになった。

図6はベレゾレチカタワーで現地時間の14:00から16:00に観測された二酸化炭素濃度とベレゾレチカ上空0.15-0.5kmで航空機によって観測された二酸化炭素濃度を比較したものである。両者の値は冬季にはよく一致している。夏季はタワー観測値の日々変動の中で比較的低濃度のデータが航空機観測値と一致している。これは航空機観測が気象条件の整った日に実施されていることが原因の一つであると考えられる。

このように、我々が通常利用している航空機観測の季節変動はすでに「気象条件」というバイア

スがかかったデータであることを本研究の結果は表しており、二酸化炭素の輸送を扱うモデルにおいてはこの「気象条件バイアス」を考慮に入れてデータを扱うことが極めて重要であると言える。

航空機観測が実施された日のタワー観測濃度と航空機観測で得られた境界層内濃度を比較すると、約3分の2のデータが±2ppm以内で一致していた。ベレゾレチカでは、冬季においては日中に逆転層が存在しないこと、冬季以外の季節では3時間の濃度変動が3ppm以下という条件を満たしていればタワーで観測された日中濃度が航空機観測で得られた境界層濃度と良く一致することがわかった。

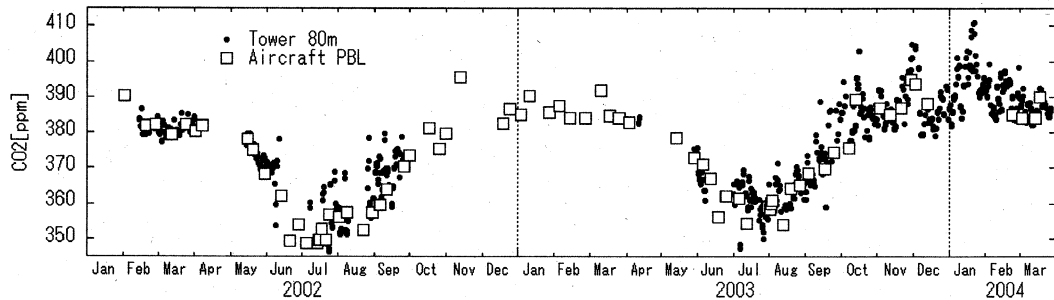


図6 ベレゾレチカタワーで現地時間の日中に観測された二酸化炭素濃度とベレゾレチカ上空の大気境界層内で航空機によって観測された二酸化炭素濃度の比較。

以上のようにある特定の条件を満たせばタワーで観測された濃度であっても大気境界層の濃度を代表できることが本研究の観測結果によって示された。この事実は比較的安価で2次元に展開しやすく、高頻度でデータを取得することが可能なタワー観測だけでも（航空機観測がなくても）大陸上の代表的な二酸化炭素濃度の変動を観測しうることを証明するものである。

3次元炭素循環モデルによってシミュレートされたベレゾレチカの高度80mにおける二酸化炭素濃度の変動を実際に観測された日中濃度と比較したものが図7である。モデルの計算結果は二酸化炭素濃度の季節変動の位相を正しく表現できているが、その振幅は実際の観測結果に比べて約半分と過小評価している。モデルでは大気境界層内の季節変動の形も不完全であり、自由対流圏の影響が少なからず及んでいると考えることができる。一方、モデルによって計算された総観規模の二酸化炭素濃度の変動パターンは観測結果と良く一致しており、高気圧・低気圧に伴う現象は比較的良く再現できているといえる。以上のように3次元炭素循環モデルは水平方向の輸送は地域規模でも比較的よく表現することが可能であるが、鉛直方向、特に大気境界層—自由対流圏間の交換については未だ十分に再現できていないことが本研究で得られた観測結果との比較により明らかになった。

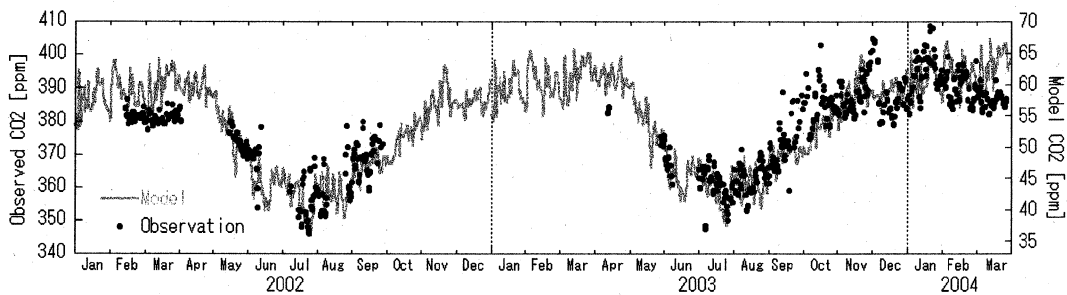


図7 3次元炭素循環モデルによってシミュレートされたベレゾレチカの高度80mにおける二酸化炭素濃度の季節変動の観測結果との比較

4. 考察

本研究では2つの装置の開発を行いその有効性を証明すると共に2年の観測結果から多くの現象が明らかになった。そして目標であったタワー観測と航空機観測の比較とタワー観測の空間代表性にまで言及することができた。ただしこれらはあくまで2002年から2003年における事象にすぎない。今後同じような高い質のデータを積み重ねていくことによってこれらの現象の普遍性を確かめることが極めて重要となる。