

## 大気境界層の高頻度観測による 大陸上 CO<sub>2</sub> の挙動と輸送に関する研究

独立行政法人国立環境研究所

地球環境研究センター 大気・海洋モニタリング推進室

町田敏暢

地球環境研究センター 炭素循環研究室

高橋善幸・下山 宏

|                   |            |
|-------------------|------------|
| 平成 16～18 年度合計予算額  | 51,750 千円  |
| (うち、平成 18 年度当初予算額 | 15,525 千円) |

### [要旨]

シベリアを代表する 2 つの森林地帯上空における CO<sub>2</sub> 濃度の変動を定性的に明らかにするために、ロシア共和国西シベリアのベレゾレチカ村上空および東シベリアのヤクーツク上空において、小型航空機を用いて下部対流圏の CO<sub>2</sub> 濃度季節変化の高頻度観測および日変動キャンペーン観測と CO<sub>2</sub> の同位体比の試験観測を行った。ベレゾレチカ上空での高頻度観測における定期飛行は 2004 年 4 月から 2007 年 4 月までの間に 145 日分の飛行を行い、7 度の欠測を除くと 138 日分のデータ取得に成功した。世界でもまれな高頻度観測データを得ることができた。

ベレゾレチカ上空の大気境界層内と自由対流圏で観測された CO<sub>2</sub> 濃度の季節変動を全球 3 次元輸送モデルでシミュレートされた CO<sub>2</sub> 濃度の変動と比較し、モデルが季節変動の形や総観規模の変動に伴う CO<sub>2</sub> 濃度の変化を良く表現していることを確認するとともに、生態系モデルによっては実際の CO<sub>2</sub> フラックスを表現できていないものもあることが指摘できた。またモデルと観測の比較を行うことによって、大気境界層上端における物質輸送をモデルのパラメータを通して評価することができた。

大気境界層の構造および発達過程に伴う CO<sub>2</sub> 濃度変動の実態を詳細に調べるため、CO<sub>2</sub> 濃度鉛直プロファイル日変動のキャンペーン観測を行い、計 17 日間の日変動データの取得に成功した。自由対流圏からの輸送量を大気境界層の発達によって取り込まれた量のみとして推定した値の評価から、雲層による大気境界層と自由対流圏の大気の混合を促進するプロセスの存在が明らかになった。

ヤクーツク上空で観察された大気境界層内と自由対流圏の CO<sub>2</sub> 濃度とその安定同位体比から計算された正味の同位体効果  $\delta_{net}$  には顕著な季節性が存在し、その季節性は植物による CO<sub>2</sub> 交換の季節的な変化と、人為起源 CO<sub>2</sub> の寄与率の変化を反映したものであることが明らかになった。

[キーワード] CO<sub>2</sub>、大気境界層、航空機観測、同位体、物質輸送

### 1. はじめに

大陸上の CO<sub>2</sub> 収支を観測するにはそのスケールに応じて、森林上の CO<sub>2</sub> フラックスを直接測定し、それを積算する方法と、大気中 CO<sub>2</sub> 濃度の観測と輸送モデルとから推定する方法がある。

渦相関法に代表される森林上の CO<sub>2</sub> フラックス観測は炭素収支と気候要因、生態系活動との関係を導き出すためには非常に有効な手段であるが、その代表的空間スケールが数百メートルほどであり、大陸規模の CO<sub>2</sub> 交換の全体像を把握するためには他のアプローチが必要である。

大気中 CO<sub>2</sub> 濃度の観測と全球大気輸送モデルを用いて CO<sub>2</sub> 収支の分布を推定する方法は亜大陸規模の平均像を知る有効な手段として現在広く使われている。しかしながら、得られる結果には依然として多くの不確定さが存在している。最も新しい世界の 15 の大気輸送モデルを使用した CO<sub>2</sub> 収支の比較実験によればユーラシア大陸の炭素吸収量はモデルによって 0.4GtC/yr から 0.7GtC/yr の開きが存在している。これらの違いを生じさせている最も大きな原因の 1 つがモデル内の鉛直輸送の取扱い、とりわけ大気境界層と自由対流圏の間の輸送を表現しきれていないことにあると言われている。

しかしながら、大気境界層上端を通した物質の輸送を力学的に表現することは非常に困難な上に、輸送結果を検証するための大気境界層内外における CO<sub>2</sub> 濃度の観測結果はほとんど存在していないのが現状である。

## 2. 研究の目的

本研究では比較的平坦で植生の均一なシベリアの森林地帯上空において小型航空機を用いて CO<sub>2</sub> 濃度と CO<sub>2</sub> の炭素安定同位体比 ( $\delta^{13}\text{C}$ ) の鉛直分布観測を高頻度かつ長期的に行い、大気境界層内とその直上の自由対流圏における CO<sub>2</sub> 濃度と  $\delta^{13}\text{C}$  の詳細な季節変動を明らかにすることを目的としている。これらの観測は 2 つの大きな意義を持っている。

1 つは、陸域生態系モデルと大気輸送モデルをカップリングしたモデルにおける大気境界層を通した CO<sub>2</sub> の輸送プロセスを再評価することである。大気境界層輸送プロセスの解明は大気循環モデルと陸上生態系モデルを結合するうえでのボトルネックとなっており、これについて観測事実を蓄積することが急務となっている<sup>1)</sup>。大気境界層を通した CO<sub>2</sub> の輸送プロセスの観測と同時に、 $\delta^{13}\text{C}$  の高度分布を観測する試みは近年キャンペーン的にいくつかのサイトで実施されてきた<sup>22) 23)</sup> などが、これを定期的かつ中長期に観測した例はほとんどない。本研究で高頻度の観測を通年で実施することができれば、季節的な大気境界層ダイナミクスの変動の影響を評価することができるようになる。

もう 1 つの意義は  $\delta^{13}\text{C}$  の持つ情報を用いて陸上生態系による CO<sub>2</sub> の正味の交換量を呼吸・光合成に分離評価することである。航空機を用いた大気境界層とその上部の自由対流圏の大気 CO<sub>2</sub> 濃度とその安定同位体比の差を直接観測することで、その地域の大気境界層から自由対流圏に輸送される CO<sub>2</sub> の正味の同位体比 (後述する  $\delta_{\text{net}}$ ) を経験的に決定することが可能となる。また、この観測から経験的に得られる大気境界層から自由対流圏に輸送される CO<sub>2</sub> の正味の同位体組成 ( $\delta_{\text{net}}$ ) が、広いスケールで起こっている大気・陸域生態系間の CO<sub>2</sub> 交換量について呼吸と光合成を分離するための指標として利用できる可能性がある。

大気境界層と自由対流圏の間の物質交換は日中の地表面の加熱による大気境界層の発達過程とそれに伴う自由対流圏大気との混合が大きな役割を担っている。CO<sub>2</sub> 濃度鉛直分布の日変動観測は、日中の境界層を通した CO<sub>2</sub> 輸送の理解には不可欠である。また、CO<sub>2</sub> 濃度鉛直分布の日変動観測から数 10km～数 100km の領域規模での地表面 CO<sub>2</sub> フラックスを導出することも可能であり、他の方法によって求められたフラックスとの比較により様々なスケールでの地表面 CO<sub>2</sub> フラックスを評価することができるため、スケールアップを理解する 1 つの手段として期待される。

### 3. 研究方法

シベリアを代表する2つの森林地帯上空におけるCO<sub>2</sub>濃度の変動を定性的に明らかにするために、ロシア共和国西シベリアのベレゾレチカ村(56° N, 84° E)周辺と、東シベリアのヤクーツク(62° N, 130° E)郊外上空において小型航空機を用いて下部対流圏のCO<sub>2</sub>濃度とその同位体比の高頻度観測を行う(図1)。観測は以下の3課題に細別される。

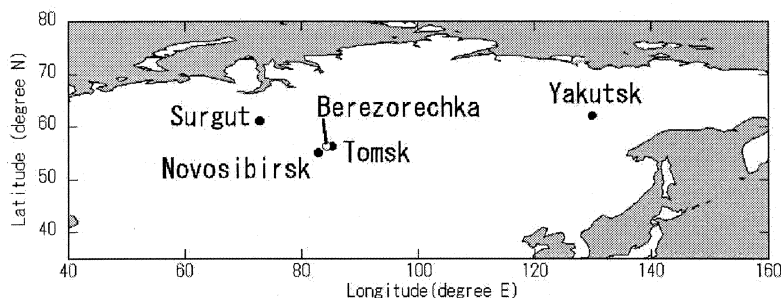


図1 本研究の観測地点

#### (1) 定期飛行による季節変動観測

小型航空機に小型連続CO<sub>2</sub>測定装置を搭載して1週間から2週間に1回の頻度で観測地点上空のCO<sub>2</sub>濃度高度分布を得る。大陸上はCO<sub>2</sub>濃度の日日変動が大きいので代表的な結果を得るためには高頻度観測が極めて有効である。この観測を1年を通じて行い、大気境界層内とその上部のCO<sub>2</sub>濃度の詳細な季節変動特性を明らかにすることによって炭素収支評価方法の確立に貢献する。

ベレゾレチカおよびヤクーツク上空の観測に使用している航空機用CO<sub>2</sub>濃度観測装置は、シングルセル型の非分散型赤外分析計(NDIRと略す; LI-COR, LI-800)に小型の流量調整装置と圧力調整装置を組み込んだもので(図2)、ポンプやデータロガーを合わせて約3kgと軽量で取扱いを容易にしている。電源投入後の動作は自動であり、5分に1回の頻度で濃度340ppmと390ppmの2本の標準ガス(NIES95 scale)がNDIRに導入される。測定システムの応答時間は約10秒、ノイズレベルは2秒平均値を利用した場合±0.3ppm、10秒平均値を利用した場合±0.15ppmである。

観測に使用した航空機は小型の複翼機(An-2機)であり、2枚の左翼間のステーに空気取入口と温度計、湿度計を設置している。装置の小型化と自動化によって現地ではパイロットとメカニックのみで観測飛行を行うことが可能になり、高頻度の観測を実現可能にした。

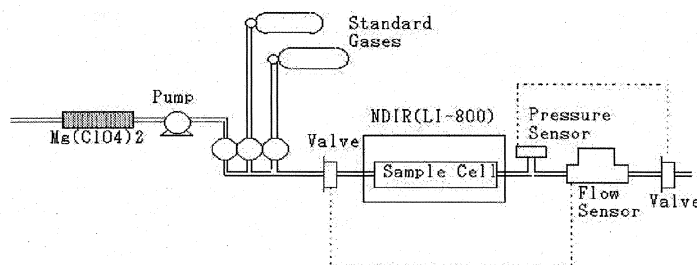


図2 航空機搭載用CO<sub>2</sub>濃度観測装置の概略図

観測飛行の際、航空機は飛行場を離陸後、観測空域上空の最高観測高度をめざして上昇する。航空機用CO<sub>2</sub>濃度観測装置の暖機運転は航空機の上昇中に完了することになっている。ベレゾ

レチカでは最高高度は通常 2km であるが、夏季には混合層の発達高度が高くなるために 3km まで観測を行っている。ヤクーツクでは 1 年を通じて高度 3km まで飛行を行っている。観測空域ではスパイラル飛行を行いながら高度 0.15km 又はそれ以下まで観測を継続する。

ベレゾレチカの地上では航空機観測との比較のためにタワーを使った CO<sub>2</sub> 濃度の連続観測を実施している。タワー観測は 80m、40m、20m、5m の 4 高度に約 5m のアームを取り付け、アームの先端付近に空気採取口や気象測器を設置している。ヤクーツクの地上でも 2005 年 6 月よりタワー CO<sub>2</sub> 観測を開始した。空気採取高度は 77m と 11m の 2 高度である。

## (2) 短期集中飛行による日変動観測

定期飛行と同様な観測飛行を日の出から日没まで 2 時間毎に行い、大気境界層の発達過程に伴う境界層内の CO<sub>2</sub> 濃度の日変動を詳細に解明する。日変動観測は季節を変えて年に数回行い、境界層上端を通じた CO<sub>2</sub> 交換過程とその季節による違いを明らかにする。観測に使用した航空機と CO<sub>2</sub> 濃度観測装置は定期飛行に使用しているものと同じである。

本年度は夏季の日変動観測に加え、積雪期の陸上生態系からの CO<sub>2</sub> フラックスが小さい季節にも日変動観測を実施した。

## (3) CO<sub>2</sub> 同位体比の高頻度観測

小型航空機に自動大気サンプリング装置を搭載し、CO<sub>2</sub> の同位体観測を高頻度で行う。同位体比観測の結果は光合成・呼吸フラックスの分離を通じて将来の CO<sub>2</sub> 濃度変動予測の精度向上に貢献するとともに、大気境界層内における大気・陸上生態系間の CO<sub>2</sub> 交換プロセスの解明を通じて同位体比と大気輸送モデルを使った CO<sub>2</sub> 収支推定を可能にする。飛行空域の自由度の高い小型航空機を使用することで、陸域植物の CO<sub>2</sub> 交換の影響を強く受けた低高度 (100–150m) の大気を採取できるため、中・大型の航空機を用いる場合と比べて、森林の同位体分別効果に関してより直接的なシグナルを観察できる。

δ<sup>13</sup>C の観測は対象となる高度において代表性のある大気試料をサンプリングする必要があるため、航空機が連続して高度を変えたのでは一定高度のデータを得ることができない。本研究における δ<sup>13</sup>C 観測のための大気試料サンプリング時には、指定高度において十分な水平飛行時間を確保した形態で飛行を行った。

採取した大気試料は日本に返送され、国立環境研究所内で、CO<sub>2</sub> 濃度とその他の微量ガス成分 (メタン、亜酸化窒素、一酸化炭素、水素、六フッ化硫黄) を測定したのち、専用のガラス製真空ラインを用いてガラスフラスコ内の大気から CO<sub>2</sub> のみを分離抽出・精製し、これを同位体質量分析計に導入して安定同位体比を決定した。

本研究で用いた分析手法においては、CO<sub>2</sub> の抽出・精製プロセスも含めた測定の繰り返し精度は 0.01‰ 以下であることが予備実験により確認されており、これは世界的にみても高い水準にあると言える。

## 4. 結果と考察

### (1) 定期飛行による季節変動観測

#### ① 観測の概要

西シベリアのベレゾレチカ上空における定期観測飛行は、2004年4月から2007年3月の研究実施期間中に、ロシアの観測許可問題や燃料の高騰問題などいくつかの困難に直面したものの、各年度40回以上のCO<sub>2</sub>濃度鉛直分布データを取得することが出来た。3年度の合計では、145日分の飛行を行い、データの不具合等による7度の欠測を除くと138日分のデータ取得に成功した。

東シベリアのヤクーツクの森林地帯上空で、ベレゾレチカと同様の連続観測を行うために、平成16年度に開発したCO<sub>2</sub>濃度観測装置を現地に持ち込んで、小型観測機（An-2機）に搭載した。ベレゾレチカのAn-2とは機体の仕様が異なっていたが、左翼の中程に空気採取口と温度計を取り付けることができた。観測装置の設置は2005年6月に実施したが、ロシア政府の査察を受ける必要があったために観測ができたのは2005年の9月であった。観測結果の日本への送付にもロシア政府の許可が必要であり、限られたデータの送付が済んでいる。

### ②ベレゾレチカ上空におけるCO<sub>2</sub>濃度の鉛直分布と季節変動、および経年変動

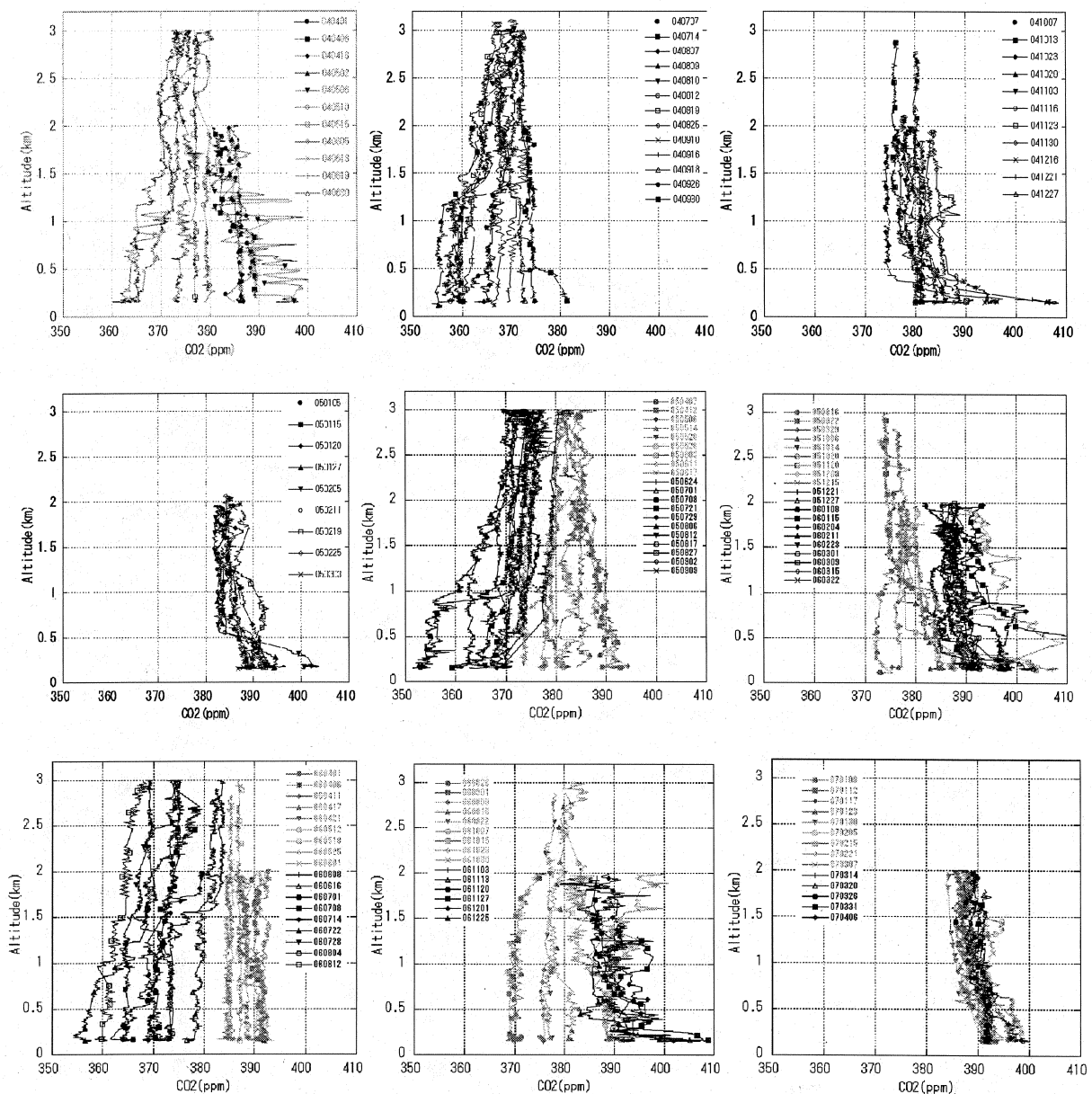


図3. ベレゾレチカ上空で2004年4月から2007年4月までの研究期間中に観測された全てのCO<sub>2</sub>濃度の鉛直分布

2004年4月から2007年4月までに得られたベレズレチカ上空におけるCO<sub>2</sub>濃度の鉛直プロファイルを図3に示す。ベレズレチカ上空では2005年11月から12月にかけて、急激な濃度増加がすべての高度において観測されている。2006年の夏季は大気鉛直混合が盛んで、低濃度のCO<sub>2</sub>がしばしば高度3km付近まで輸送されている。ベレズレチカ上空のCO<sub>2</sub>濃度は3年間を通して、陸上生態系の活動が盛んな夏季には鉛直構造や絶対濃度の日々の変動が非常に大きかった。これに対して冬季から春季にかけての濃度は鉛直勾配も含めて良く安定している。また、秋季の濃度は春季と同程度であるが、夏季に次いで変動が大きくなっている。大陸内部におけるCO<sub>2</sub>濃度の鉛直構造には陸上生態系の呼吸量の季節的な違いが影響を及ぼしている可能性がある。

高度0.5km毎に平均したCO<sub>2</sub>濃度の2002年1月から2007年4月までの長期変動をプロットしたものが図4である。実線は調和関数とReinchタイプのスプライン関数によって季節変動と経年変動を表現したフィッティングカーブである。高頻度観測を行った結果、非常に詳細な時間変動を観測できていることがわかる。2006年夏季は他の年の夏に比べてCO<sub>2</sub>濃度の日々のばらつきが大きくなっている。濃度はベレズレチカ上空の全ての高度において明瞭な季節変化が見られるとともに経年的な濃度の増加も観測されている。

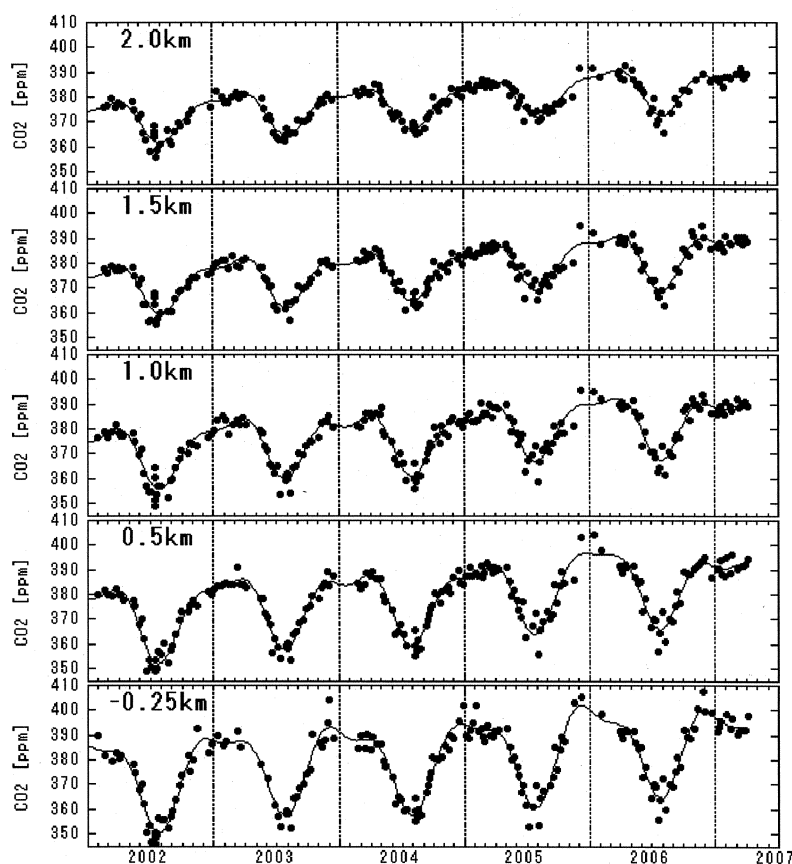


図4. ベレズレチカ上空におけるCO<sub>2</sub>濃度の高度別時系列  
黒丸が各高度帯の平均値を、実線がフィッティングカーブを表す。

季節変動の高度による違いを比較するために、フィッティングカーブの調和関数をプロットしたものが図5である。冬季の変動を見やすくするために2年分の季節変動を示した。5年間の平均的なCO<sub>2</sub>濃度の振幅は高度0.25km以下では36.4ppmと、同じ緯度帯の沿岸域で観測される季節振幅である15ppmの2倍以上になっている。振幅は上空に行くほど小さくなり、高度0.5kmでは29.6ppm、1.0kmでは24.8ppm、1.5kmでは20.4ppm、そして通年観測データが存在する最高高度である2.0kmでは17.1ppmである。自由対流圏の振幅が海洋性大気の観測値の季節振幅に近くなっていることがわかる。

夏季の最低濃度の出現日は上空に行くほど位相の遅れが認められており、高度0.25km以下と2.0kmとで約10日の違いがある。この遅れは地表付近で形成された季節変動が情報に伝搬しているために認められるものである。冬季には11月の終わりから12月初めにかけての時季と、3月から4月にかけての時季の、2度の極大が存在しており、春の極大値に方がやや高いことがわかる。この形は高度0.25km以下を除いて良く似ており、春の極大には低高度から高高度にかけての位相の遅れも確認できる。高度0.25km以下では11月-12月の極大が非常に大きくなっており、これが季節振幅を大きく見せている一つの要因となっている。西シベリアはこの時季にしばしば安定した高気圧が停滞することがある。このような気象条件下では日中になっても大気の鉛直混合が著しく妨げられ、わずかに放出されたCO<sub>2</sub>が地表付近に蓄積することがあり、高いCO<sub>2</sub>濃度が観測されると考えられている。このような濃度変動は地球環境研究総合推進費S-1で実施されているタワー観測ネットワークによるデータにも見られており、ベレゾレチカだけでなく西シベリアに広く認められる現象であることがわかっている。

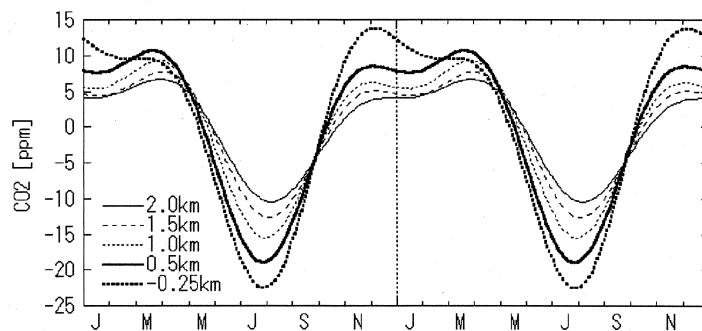


図5. ベレゾレチカ上空におけるCO<sub>2</sub>濃度の平均的な季節変動

図4のフィッティングカーブから経年変動成分を抜き出してプロットしたものが図6である。CO<sub>2</sub>濃度の経年増加は年による違いが大きく、2002年から2003年にかけての濃度増加に比べて2003年から2004年にかけての変動量が小さくなっている。この差は低高度ほど顕著に表れており、この差を作り出しているのは主に夏季の濃度であることが図3からわかる。2004年の濃度増加率の低下は2003年の全球的なCO<sub>2</sub>の高濃度と関係している可能性が高い。2003年の高濃度は夏季に猛暑を記録したヨーロッパ周辺の陸上生態系から放出されたCO<sub>2</sub>の寄与が大きいことがヨーロッパグループの大気モデルと植生モデルの2つの独立した解析結果から確かめられている<sup>2)</sup>。2004年から2005年にかけての経年増加はこの反動で非常に大きくなっている。また、2006年以降は増加率が急激に減少していることがわかる。

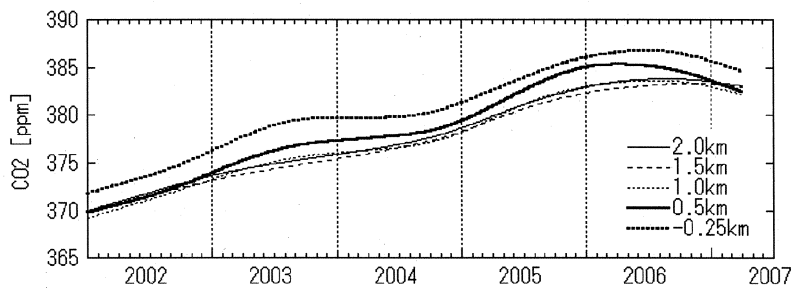


図6. ベレゾレチカ上空におけるCO<sub>2</sub>濃度の高度別経年変動

CO<sub>2</sub>濃度の年平均値を鉛直分布にしたものが図7である。どの年も最も濃度が高い高度は地表付近の0.25km以下の層であることがわかる。これは地表付近がCO<sub>2</sub>の放出源になっていることだけが原因ではなく、CO<sub>2</sub>を放出する冬季に大気鉛直混合が抑制される、いわゆる”rectifier effect”に起因するところが大きいと考えられる。特に前節で述べた、シベリアのような大陸内部に特有の高気圧の停滞に伴う地表付近におけるCO<sub>2</sub>の蓄積が低高度の年平均値を押し上げている原因の1つとなっている。

年平均値を鉛直分布に見られるもう1つの特徴は、高度1.5kmの平均濃度が常に2.0kmの値より低いことである。高度1km以下は上述のrectifier effectの影響を受けて低高度ほど高濃度になりやすいが、大気境界層の影響が少ない高々度になると地表付近の収支の影響が見やすい傾向がある。すなわち、高度1.5kmの低濃度はベレゾレチカ付近の陸上生態系が1年を通じたときに、正味でCO<sub>2</sub>を吸収している可能性を示唆するものである。

また、この図から2004年から2005年にかけての急激な濃度増加が全ての高度において表れていることが明確に確認できる。

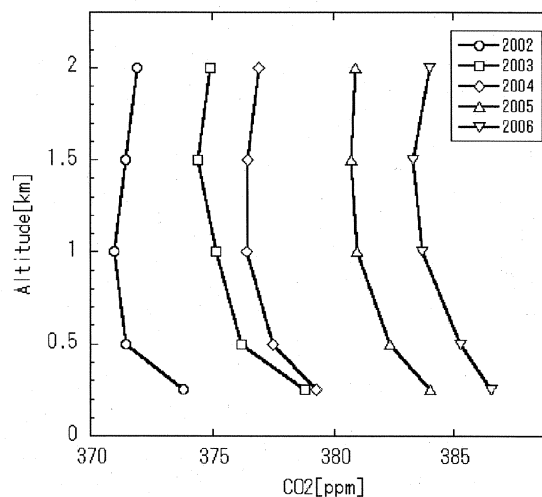


図7. ベレゾレチカ上空におけるCO<sub>2</sub>濃度年平均値の高度分布

### ③大気境界層内と自由対流圏におけるCO<sub>2</sub>濃度

大気境界層内(PBL)と自由対流圏(FT)におけるCO<sub>2</sub>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、CO<sub>2</sub>濃度の鉛直分布から境界層上端高度を決定した。一般に境界層



の上端は気温の逆転が見られ、境界層内では温位が高度方向にほぼ一定である。地表面の影響を直接受ける大気境界層内のCO<sub>2</sub>濃度は、自由対流圏の濃度と明瞭な差が見られることが多い。本解析では大気境界層から自由対流圏にかけての遷移領域である、CO<sub>2</sub>濃度や気温に鉛直勾配が存在する高度のデータは除外し、明らかに大気境界層内と自由対流圏の空気塊と見なされたCO<sub>2</sub>濃度だけを抽出して平均化した。

図8は自由対流圏と大気境界層内のCO<sub>2</sub>濃度の変動を比較したものである。自由対流圏のCO<sub>2</sub>濃度は大気境界層の濃度に比べて夏季に高く、冬季に低い。両者の平均的な季節変動を図9に示す。夏季の最低値を示す時期は自由対流圏の変動に半月からひと月の遅れが認められる。冬季の濃度差は初冬に大きく、晩冬になるに従って小さくなっている。これは1つには大気境界層内の濃度は大気の安定度が増す初冬において高濃度を示しやすいことが理由である。もう1つは自由対流圏の濃度変動はよりバックグラウンド濃度の変動に近く、初冬には大気全体のCO<sub>2</sub>蓄積量は少なく、光合成の始まる春先にかけて徐々に上昇していくといった季節変動になっていることが原因である。季節変動の振幅は自由対流圏では16.0ppmであるのに対して、境界層内では35.5ppmと2倍以上になっている。

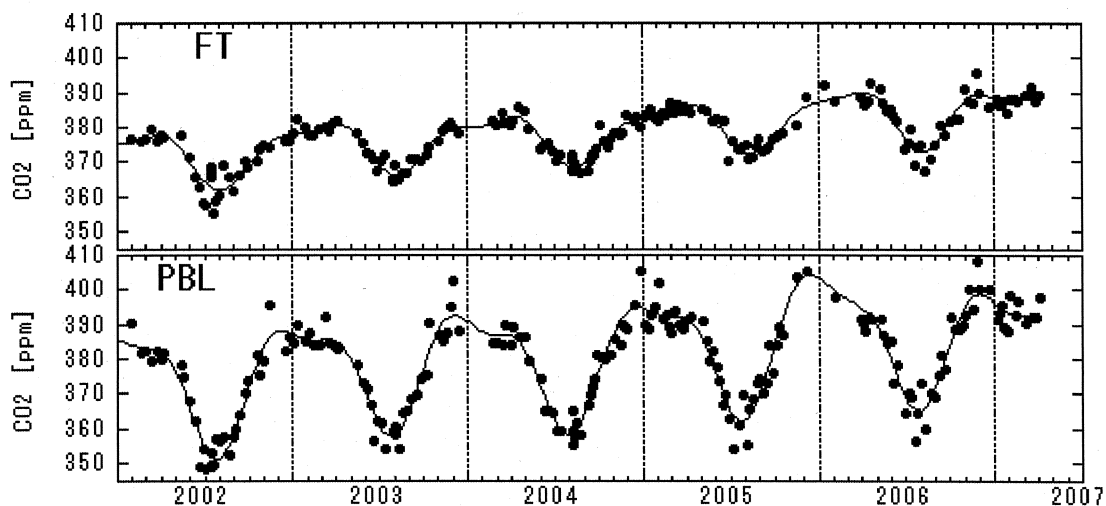


図8. 大気境界層内(PBL)と自由対流圏(FT)におけるCO<sub>2</sub>濃度の変動  
フィッティング方法は図4と同じ。

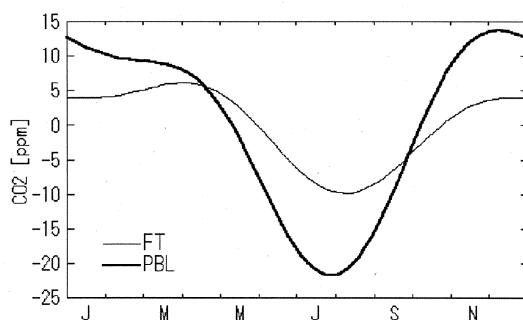


図9. 大気境界層内(PBL)と自由対流圏(FT)におけるCO<sub>2</sub>濃度の平均的な季節変動

本研究の目的の1つは大気境界層を通じた物質輸送を、3次元輸送モデルを通して評価することである。そこで、ベレゾレチカ上空の大気境界層内と自由対流圏で観測された非常に精度の高いCO<sub>2</sub>濃度の季節変動を全球3次元輸送モデルでシミュレートされたCO<sub>2</sub>濃度の変動と比較し、輸送モデルに組み込まれている境界層輸送のパラメータリゼーションの評価を行った(図10)。

初めに使ったモデルは大気輸送にNIES05モデルの1度グリッドのバージョンを、陸上生態系のCO<sub>2</sub>フラックスにはSib2モデルを用いた。モデルは大気境界層内においても自由対流圏においても季節変動の形を非常に良く再現していると共に総観規模の大気の入替わりに伴うCO<sub>2</sub>濃度の変動も観測と一致していた。しかしながらモデルで計算されたCO<sub>2</sub>濃度の季節振幅は明らかに観測値より大きく、境界層内において約1.9倍、自由対流圏でも約1.9倍であった。モデル内でCO<sub>2</sub>濃度の季節変動を駆動しているのは地表面にある陸上生態系の活動(生態系モデル)であるので、大気輸送モデルの大気境界層上端における交換が現実の大気より不十分であれば、生態系モデルは大気境界層内のCO<sub>2</sub>濃度を現実より強く駆動するので、上記の季節振幅の比は大気境界層内で大きく、自由対流圏で比較的小さくなるはずである。逆に大気輸送モデルの鉛直輸送が実大気より効率が良く大気の混合が進んでしまうので、季節振幅の比は大気境界層内で小さく、自由対流圏で大きくなる傾向にあると予想される。NIES05モデルでは上述のように季節振幅の比が大気境界層内と自由対流圏で一致しているので、大気境界層上端における物質輸送が実大気に近いと言えることができる。また、モデルの振幅が観測より全体的に大きくなった原因はSib2モデルのフラックスが西シベリア域におけるCO<sub>2</sub>フラックスの現実を表現できていないためであると考えられる。

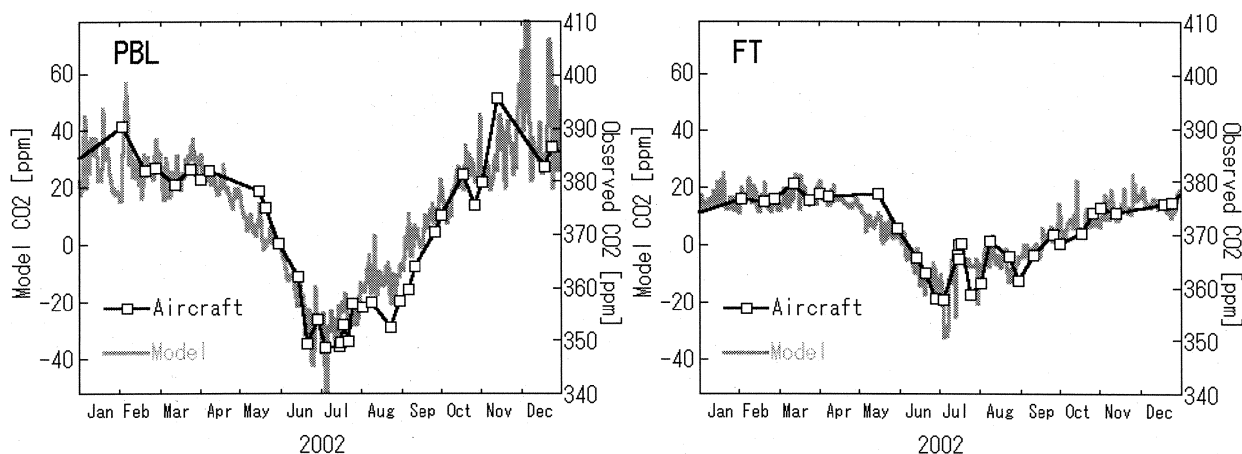


図10. NIES05モデルでシミュレートされた大気境界層内(PBL)と自由対流圏(FT)におけるCO<sub>2</sub>濃度季節変動の観測との比較

次に3次元輸送モデルにNICAMモデル<sup>18)</sup>を用いた比較を行った。NICAMモデルは正十二面体を分割していった面を全球に投影したグリッドを採用しているので、高解像度化が容易であるほか、質量保存性に優れているというメリットを有している。図11は輸送場にNICAMモデルを、陸上生態系のフラックスにCASAモデルを用いた計算結果を、ベレゾレチカ上空の観測値と比較したものである<sup>24)</sup>。モデルの季節振幅は境界層内、自由対流圏のいずれにおいても観測値よりも明らかに小さくなっている。

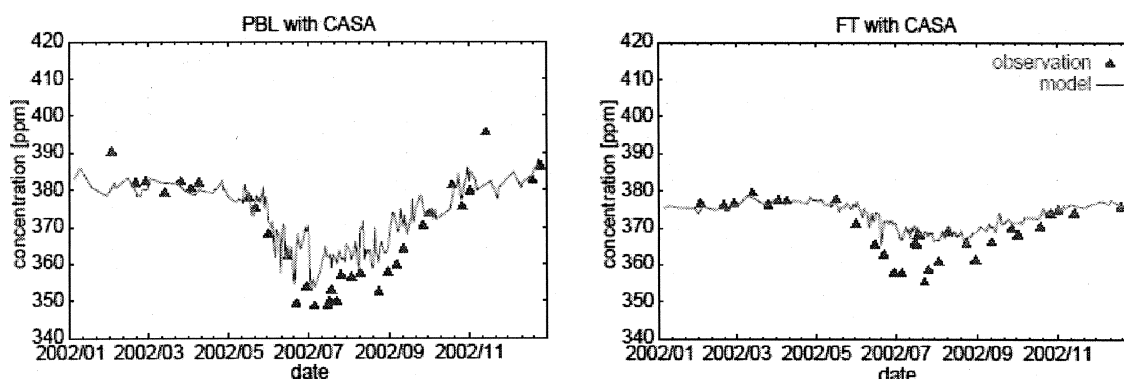


図 1 1. NICAMモデルでシミュレートされた大気境界層内(PBL)と自由対流圏(FT)におけるCO<sub>2</sub>濃度季節変動の観測との比較。陸上生態系フラックスにCASAモデルを使用した結果。

図12は同じNICAMモデルの輸送場にSibモデルのCO<sub>2</sub>フラックスを組み合わせた計算結果と観測値の比較である。本計算結果は境界層内、自由対流圏共に季節変動の振幅ばかりでなく総観規模の気象場の変動に伴うCO<sub>2</sub>濃度の短期的な変動を非常に正確に再現している。以上の結果から、今回使用したNICAMモデルは大気境界層を通じた物質の輸送を現実的に表現できていることが確かめられた。

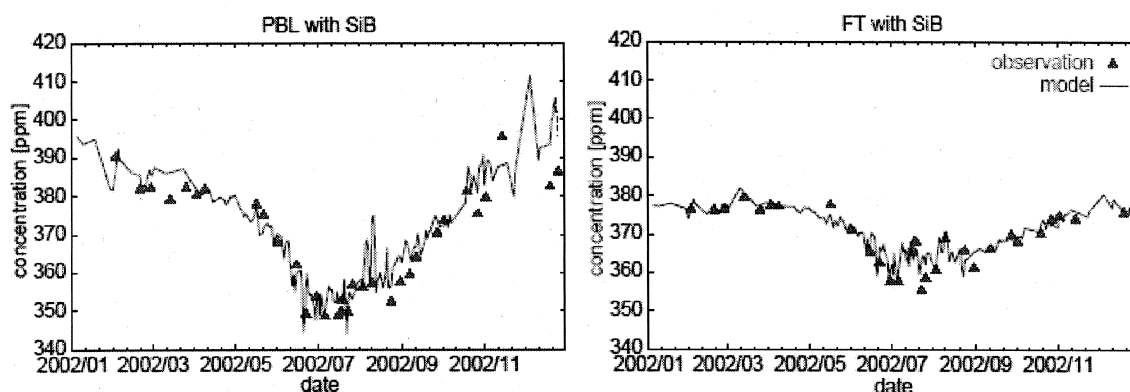


図 1 2. 図 1 1 と同じ。ただし、陸上生態系フラックスにSibモデルを使用した結果。

以上のように本研究の目的の1つである炭素循環モデルの大気境界層輸送過程を、CO<sub>2</sub>濃度の高頻度観測データを使って評価することができた。今回比較に用いた2つのモデルは非常によく鉛直輸送を表現できていることが確かめられた。今後このデータを広く世界の研究者に利用を促すことによって輸送モデルの検証に役立てる予定である。

#### ④ヤクーツクにおけるCO<sub>2</sub>濃度連続観測の結果

ヤクーツク上空での2度目の観測である2005年10月21日の飛行で得られたCO<sub>2</sub>計の生出力、CO<sub>2</sub>濃度、装置のガス流量、セルの絶対圧力、高度および外気温の時系列を図13に示す。航空機の上昇中は装置の暖気時間に充てているので、観測は下降中に行っている。図13上段の図のCO<sub>2</sub>生出力から、下降中に4度の標準ガス導入があり、2本のガスで定期的に校正が行われていることがわかる。また、標準ガスの毎回の出力が安定していることからCO<sub>2</sub>計出力が観測を通じて比較的安定し

ていたことが確認できる。この要因として、図13中段に見られる、流量とセル圧力の安定が挙げられる。高度の変動による周囲圧力の変化にもかかわらず、装置が設計通りの性能を示していることが確認できた。

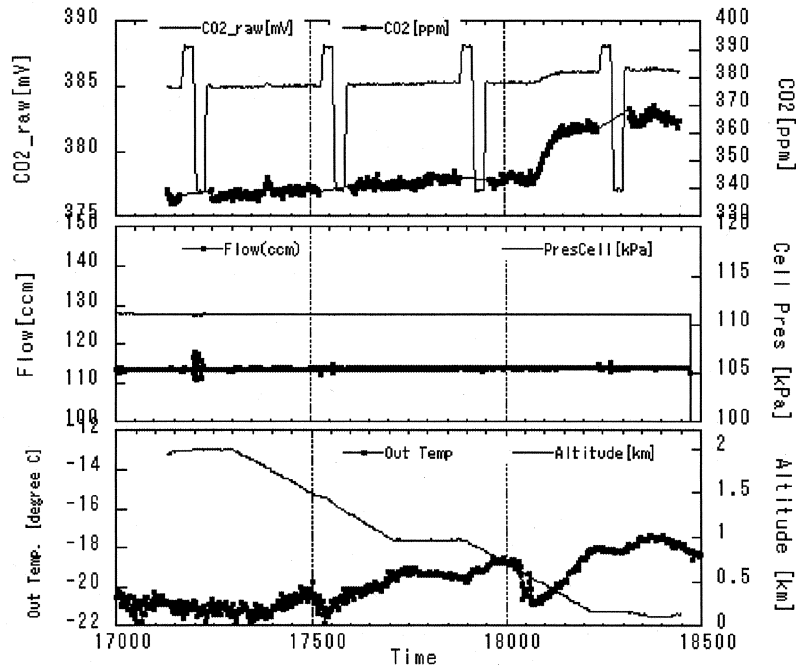


図13. 2005年10月21日の観測飛行で得られたCO<sub>2</sub>の生出力、CO<sub>2</sub>濃度、流量、セル圧力、高度および外気温の時系列

ヤクーツク上空で観測されたCO<sub>2</sub>濃度の鉛直分布を図14に示す。図14の横軸は図3と同じ範囲に設定してある。この図からヤクーツクで使用しているCO<sub>2</sub>連続測定装置のノイズが小さく良質のデータが得られていること、およびヤクーツク上空の大気に層構造が少なく、比較的広い高度範囲の中で混合が進んでいることが読み取れる。

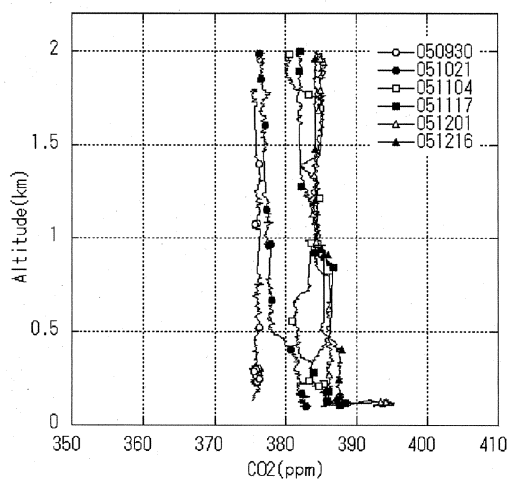


図14. ヤクーツク上空で2005年9月から2005年12月までに観測されたCO<sub>2</sub>濃度の鉛直分布

ヤクーツク上空におけるCO<sub>2</sub>濃度の時間変動を、ベレゾレチカ上空における観測値と比較したも

のが図15である。ここでは最高高度である2.0kmと最低高度である0.25km以下のデータのみの比較とした。自由対流圏の2.0kmでは両観測地点における濃度差は非常に小さい。ヤクーツクの観測値はフィッティングカーブより低めにプロットされているが、フィッティングカーブは2005年12月のベレゾレチカにおける高濃度CO<sub>2</sub>の影響で高めになっているものであり、12月の2点を除いた個々の観測値とは近い濃度になっている。これに対して最下層の0.25km以下ではヤクーツクの観測値がベレゾレチカにおけるCO<sub>2</sub>濃度より全体的に明らかに低くなっている。これは両観測点近傍の地表からのCO<sub>2</sub>フラックスも影響しているはずであるが、この季節の陸上生態系の活動がそれほど盛んでないことを考えると、大気の安定度や鉛直輸送が両地点で違っているためであると考えられる。今後データを蓄積することによって、他の季節や2006年冬季における濃度差について定性的な傾向を把握していく必要がある。

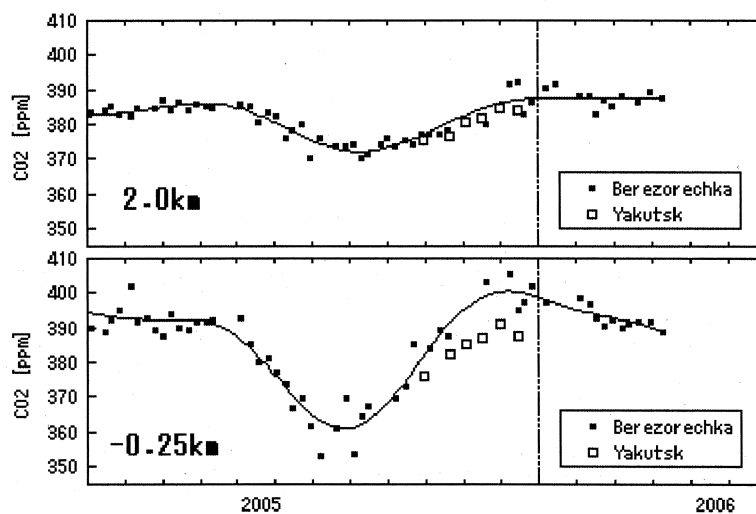


図 15. ヤクーツク上空とベレゾレチカ上空の高度2.0kmと0.25km以下におけるCO<sub>2</sub>濃度時系列の比較  
フィッティングカーブはベレゾレチカの観測値に対して引いたもの。

## (2) CO<sub>2</sub>濃度鉛直分布の日変動

### ①観測概要

大気境界層内のCO<sub>2</sub>濃度が、その鉛直構造の発達過程とともにどのように変化するか、あるいは、大気境界層上層の下部自由対流圏におけるCO<sub>2</sub>濃度とどのように関連するかを詳細に調べるため、早朝から夕方にかけて、大気境界層濃度鉛直プロファイルの日変動観測を行った。観測は地表面における入力エネルギーが大きく、陸域生態系の最も活発な時期である7~8月を中心に行った。2002年から2006年に行った日変動観測の詳細を表1に示す。フライトは早朝(6~7時)から2、3時間毎に日没前(19時前後)まで行った。各フライトの時間がこれに当てはまらない条件では、雲や霧の存在といった天候上の理由で観測飛行が実施できなかった場合である。従って、1日の取得データは、4~8データとなっている。日変動データが得られたのは合計17日間であり、15日が夏季のデータで、秋季、冬季(積雪期)のデータが各1日である。

表 1. 日変動観測内容の詳細

| Flight No. | 日付/時刻 | F1     | F2    | F3      | F4    | F5    | F6    | F7    | F8    | 観測高度      |
|------------|-------|--------|-------|---------|-------|-------|-------|-------|-------|-----------|
| 2002年      |       |        |       |         |       |       |       |       |       |           |
| 1          | 7月18日 | 6:00   | 8:00  | 10:00   | 12:00 | 14:00 | 16:00 | 18:00 | 19:30 | 150-2000m |
| 2          | 7月19日 | 6:00   | 8:00  | 10:00   | 12:00 | 14:00 | 16:00 | 18:00 | 19:30 | 150-2000m |
| 3          | 7月23日 | 6:00   | 8:00  | 10:00   | 12:00 | 14:00 | 16:00 | 18:00 | 19:30 | 150-2000m |
| 4          | 7月26日 | 6:00   | 8:00  | 10:00   | 12:00 | 14:00 | 16:00 | 18:00 | 19:30 | 150-2000m |
| 5          | 9月12日 | 7:30   | 9:30  | 11:30   | 13:30 | 15:30 | 17:30 | —     | —     | 150-2000m |
| 2003年      |       |        |       |         |       |       |       |       |       |           |
| 6          | 7月8日  | 7:00   | 9:30  | 12:00   | 14:30 | 17:00 | 19:00 | —     | —     | 150-3000m |
| 7          | 7月15日 | 7:00   | 9:00  | 12:00   | 14:30 | 17:00 | 19:30 | —     | —     | 150-3000m |
| 8          | 8月1日  | 8:00   | 10:00 | 13:00   | 19:30 | —     | —     | —     | —     | 100-3000m |
| 9          | 8月3日  | 9:30   | 12:00 | 14:30   | 17:00 | —     | —     | —     | —     | 100-3000m |
| 10         | 8月4日  | 7:00   | 10:00 | 13:00   | 16:00 | 19:00 | —     | —     | —     | 100-3000m |
| 11         | 8月5日  | 7:00   | 10:00 | 13:00   | 16:00 | —     | —     | —     | —     | 100-3000m |
| 2004年      |       |        |       |         |       |       |       |       |       |           |
| 12         | 8月9日  | (7:00) | 10:00 | 13:00   | 16:00 | 19:00 | —     | —     | —     | 100-3000m |
| 13         | 8月10日 | 7:00   | 10:00 | 13:00   | 16:00 | 19:00 | —     | —     | —     | 100-3000m |
| 14         | 8月12日 | 7:00   | 10:00 | 13:00   | 16:00 | 19:00 | —     | —     | —     | 100-3000m |
| 2005年      |       |        |       |         |       |       |       |       |       |           |
| 15         | 7月13日 | (7:00) | 9:00  | 11:00   | 13:00 | 15:00 | 17:00 | 19:00 | —     | 100-3000m |
| 16         | 7月21日 | (7:00) | 9:00  | 11:00   | 13:00 | 15:00 | 17:00 | 19:00 | —     | 100-3000m |
| 2006年      |       |        |       |         |       |       |       |       |       |           |
| 17         | 3月27日 | 8:30   | 10:00 | (11:20) | 16:00 | 17:30 | —     | —     | —     | 150-2000m |

## ②観測データの時間代表性

鉛直プロファイルデータは、高度 2000 ないしは 3000m から地表面付近まで、20～30 分程度で観測したものをを用いる。大気境界層スケールでの変動を考えると、このような観測時間内で、それ程大きくその構造が変化することはなく、プロファイル観測開始から終了までの時間変動分を考慮する必要はない。一方で、大気境界層内に存在する様々なスケールの渦により、大気境界層内の濃度には空間的な分布が存在するため、スナップショット的に取得する鉛直分布が、時間・空間的に代表制を持つものかを検討する必要がある。

このため、通常は1フライトで1つの鉛直プロファイルを取得するところを、連続して3回の鉛直分布を観測する実験を行った。この結果を図16に示す。3つのプロファイルの測定は、まず、ルーチン観測で行われるフライト同様に、飛行場を離陸後、観測地点のベレゾレチカ村上空3000mに到達し、そこから高度100mまでスパイラル飛行で降下中に第一プロファイルを測定。次に100mから3000mまで同様にスパイラル飛行で上昇中に第二プロファイル測定、さらに、再び3000mから100mまで降下中に第三プロファイルを測定した。得られたプロファイルの結果からわかるように、CO<sub>2</sub>濃度鉛直構造の特徴や、細かなばらつきを除いた平均的な濃度は、3回のプロファイルでほぼ完全に一致した。従って本観測システムにおける1回のプロファイル測定は大気のCO<sub>2</sub>濃度鉛直分布に対し、十分に時間および空間代表性が確保されていることが確認された。

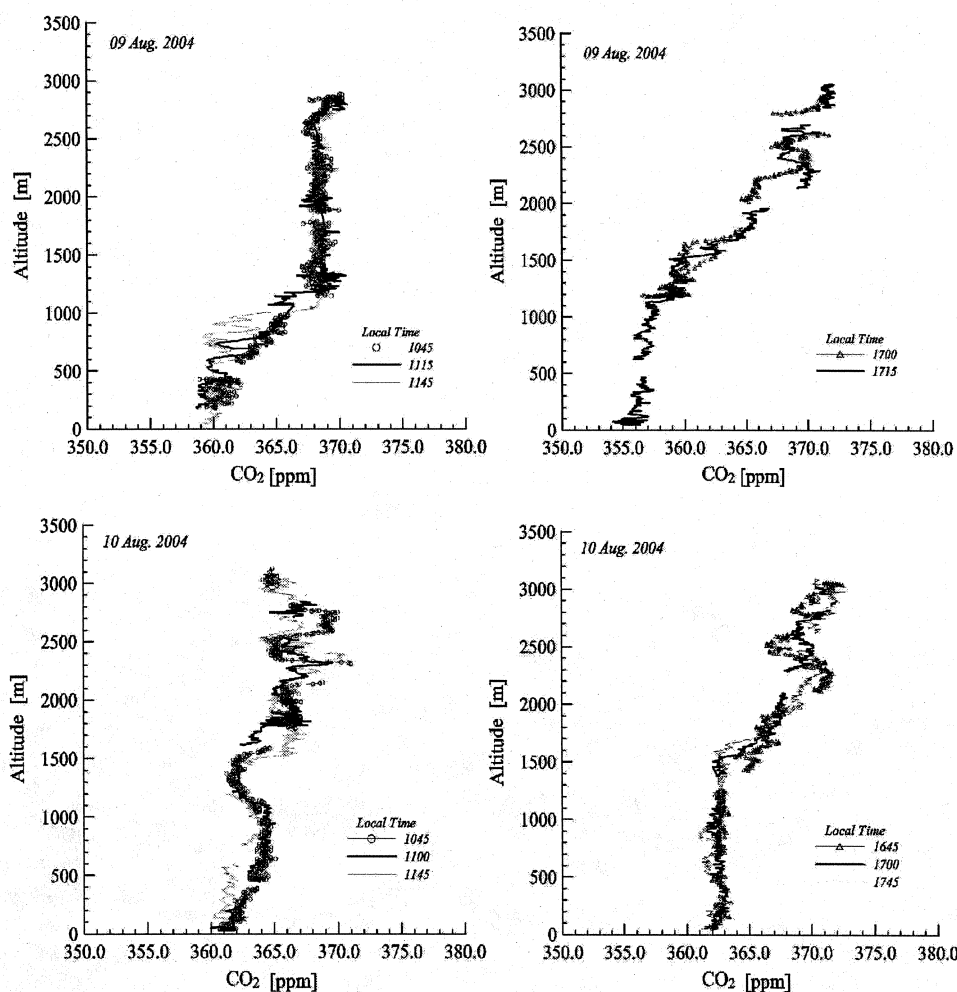


図16. 同一時間帯において測定されたCO<sub>2</sub>濃度プロファイルの比較。プロファイルの測定は3000m~100m、100m~3000m、3000m~100m、の順番で測定。観測時刻は下層大気の測定時間を示す。上図左：8月9日午前、同右図：8月9日午後、下図左：8月10日午前、同右図：8月10日午後の結果。

### ③大気境界層構造

一般的には大気境界層は、日の出とともに、地表面が加熱され、熱的滞留混合が生じる。これが、早朝地表面付近に存在する安定成層（安定境界層、夜間境界層などとも呼ぶ）を壊して、鉛直混合が活発な大気境界層（混合層とも呼ぶ）を形成する。そして、日中の加熱と共に徐々に鉛直混合の及ぶ高度が上昇し、発達する。図17に大気境界層高度の日変動の結果を示す。大気境界層は、CO<sub>2</sub>日の出後3~5時間で形成され、6~9時間後の間で急激に発達する。観測は何れも晴天日に行われたが、その高度は同じ夏季であっても日によって大きく異なる事がわかる。また、図18のように、大気境界層高度が、日射量によって一意的に決まるものでもない。日射量は大気境界層形成の主要なエネルギーであるが、両者に明確な関係が見られないことから、大気境界層の発達には複雑な大気の物理プロセスが存在する事が指摘される。また、大気境界層の構造と大気境界層内のCO<sub>2</sub>濃度変動が単純な関係ではない事も、図19の結果から明らかである。そこで、大気境界層構造とCO<sub>2</sub>濃度変動の関連性について、各観測事例を詳細に調べた。

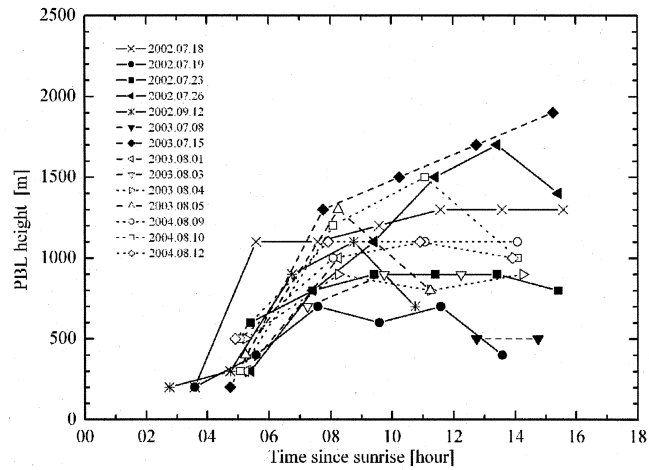


図 17. 大気境界層高度の日変化、大気境界層高度の変化を日の出からの時間に対して図示する。

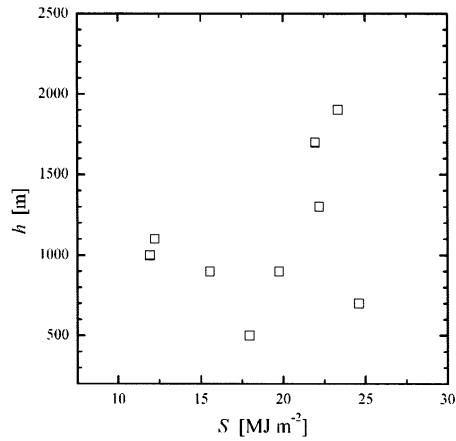


図 18. 積算日射量 ( $S$ ) と大気境界層高度 ( $h$ ) の関係。

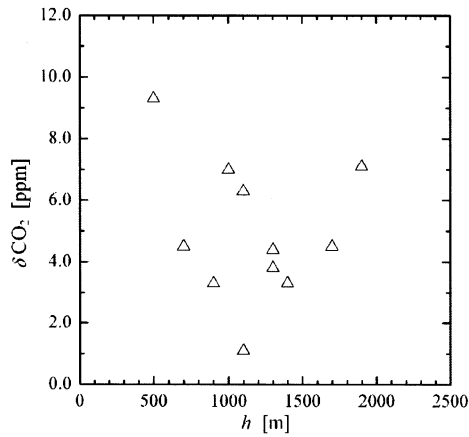


図 19. 大気境界層高度 ( $h$ ) と大気境界層内における  $\text{CO}_2$  濃度低下量 ( $\delta \text{CO}_2$ ) の関係。

#### ④ $\text{CO}_2$ 濃度鉛直プロファイル日変動の特徴

得られた観測結果を詳細に見た結果、幾つかの典型的なパターンが存在する事がわかった。図 20 に特徴的な鉛直プロファイル日変動観測結果の例を示す。



#### ア. 大気境界層の発達と大気境界層内 CO<sub>2</sub> 濃度の低下

早朝 7:45 の観測では 200m 以下の地表面付近の温位が低い安定層が存在しており、対応して非常に高い CO<sub>2</sub> 濃度が観測されている (図 20)。これは夜間の生態系の呼吸活動によって放出された CO<sub>2</sub> が地表面の安定成層内に蓄積されたためである。その後、地表面の加熱により、対流混合が生じ、温位が一定の大気境界層が発達する。この層内では CO<sub>2</sub> 濃度も鉛直方向に一定となる。そして、時間と共に大気境界層高度は徐々に高くなり、夕方 19:45 では高度 1900m にも達している。大気境界層内の CO<sub>2</sub> 濃度は日中徐々に低下し、19:45 に最も低い濃度となった。大気境界層の濃度は日中低下するが、自由対流圏の濃度はバックグラウンドの大気を反映し一定である。そして、自由対流圏の CO<sub>2</sub> 濃度は大気境界層よりも高い。従ってこの場合は、自由対流圏から大気境界層内に取り込まれる CO<sub>2</sub> よりも、地表面で吸収される CO<sub>2</sub> が多い。つまり、観測地域が大気 CO<sub>2</sub> のシンクとなっている。

大気を 1 次元的に見た場合、地表面が CO<sub>2</sub> の吸収源であれば、晴天日日中の CO<sub>2</sub> 濃度鉛直プロファイルはここで示された特徴をもった日変動をする。しかしながら、実際の観測ではこのようなパターンが観測されたのは、観測事例中半分以下で、わずかに 6 日間のみであった。

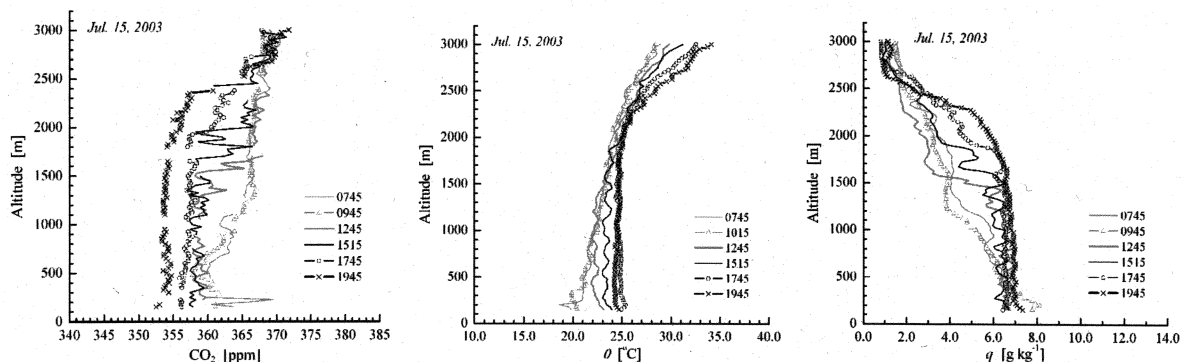


図 20. CO<sub>2</sub>、温位、比湿の鉛直分布日変動の結果

図は左から CO<sub>2</sub>、温位、比湿を示す。2003 年 7 月 15 日の事例。大気境界層の発達と、大気境界層内の CO<sub>2</sub> 濃度の低下が明確に見られる。

#### イ. 日中の積雲発達と対流性降雨がある場合

大気境界層が発達すると、地表面付近に存在した水蒸気を含む空気塊が上昇し、持ち上げ凝結高度に達して雲が生じる。夏季のシベリアでは、晴天日の日中に積雲が発達し、対流性の降雨が観測される事が頻繁にある。図 21 は、日中对流性の降雨が観測された事例である。早朝 8:45 に地表面に存在する安定成層が、10:45 にかけて消滅し、高度 500m 程度の大気境界層が形成された。大気境界層はその後 13:45 には 1300m まで発達した。この間、地表面における光合成活動が活発に行われ、約 10ppm もの CO<sub>2</sub> 濃度の低下が観測された。一方、同時刻において、観測地点周辺には、発達した積雲が大気境界層上層に存在していた。この積雲はさらに発達し、13:45 以降、観測地点周辺では激しい雷雨が観測された。20:15 は降雨後、観測地点周辺が再び晴天になった時の観測結果である。高度 2000m 以下で、CO<sub>2</sub> 濃度が顕著に上昇している事がわかる。温位や比湿の鉛直分布は降雨後、大気境界層上端で見られたギャップが消滅し、連続的な変化を示している。このような結果は降雨によって積雲層から大気境界層まで大気が激しく混合され、大気境界層上層の高い CO<sub>2</sub> 濃度の大気が地表面付近まで輸送された事を示している。

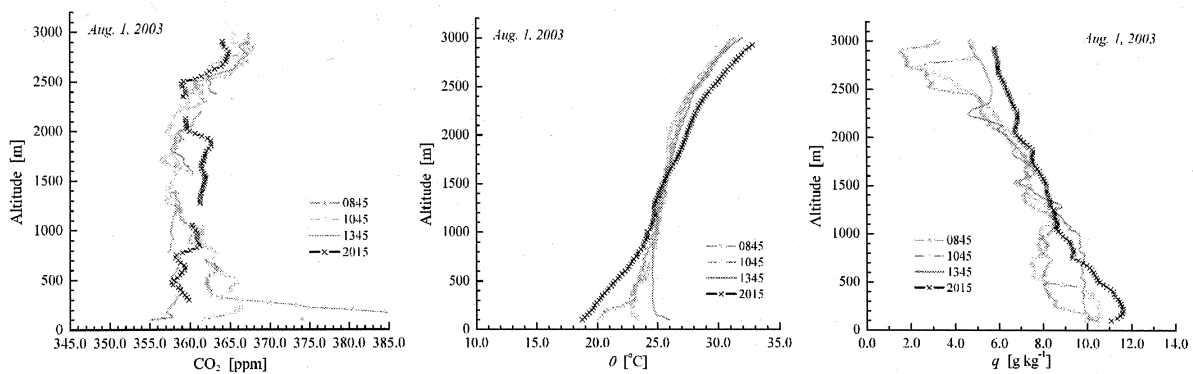


図 2 1. CO<sub>2</sub>、温位、比湿の鉛直分布日変動の結果

図は左から CO<sub>2</sub>、温位、比湿を示す。2003 年 8 月 1 日の事例。積雲による対流性降雨が 13 : 45 以降にあり、20 : 15 には快晴であった。

#### ウ. 降雨を伴わない積雲発達がある場合

積雲は存在したが、降雨イベントが観測されなかった日の事例を図 22 に示す。ここでは、変化の特徴を明確に示すために、昼間の時間帯のみ取り出した結果を図示する。大気境界層は 13 : 45 には高度約 900m であり、積雲層はこのとき既に大気境界層上端から高度 2500m 付近まで存在した。積雲による日射量の低下により、大気境界層高度は 16 : 45 にかけてほとんど変化しなかった。注目すべきは、積雲が存在した 1000~2500m の CO<sub>2</sub> 濃度である。この層内で大きな濃度変化が存在することが明確に捉えられる。つまり、積雲が存在する層では、大気境界層内の空気と、自由対流圏の空気の混合がおきていることを示している。即ち、積雲が存在することによって、地表面の影響を受けた大気が、大気境界層よりもはるかに高い高度まで、非常に短い時間スケールで輸送される、といったプロセスの存在が観測事例から明らかになった。

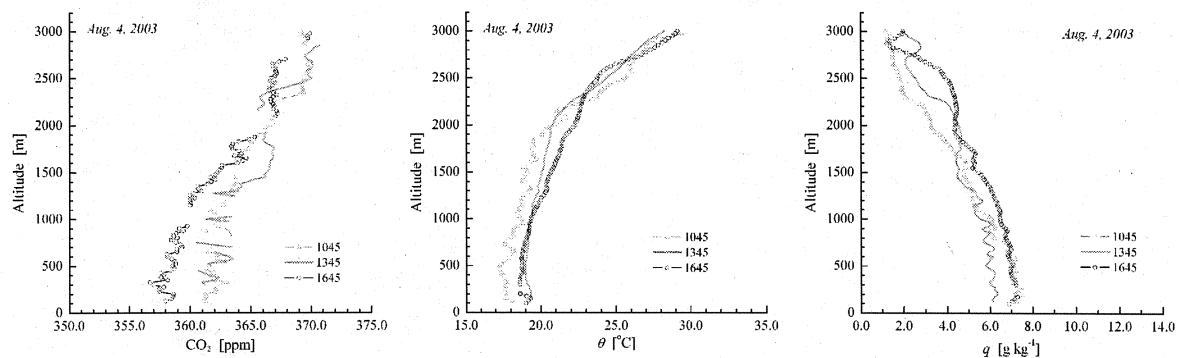


図 2 2. CO<sub>2</sub>、温位、比湿の鉛直分布日変動の結果

図は左から CO<sub>2</sub>、温位、比湿を示す。2003 年 8 月 4 日の事例。日中、大気境界層上層に積雲が存在したが、降雨が観測されなかった。

#### エ. 高気圧性沈降流の影響がある場合

大気境界層は、地表面の加熱による熱的対流混合によって発達するものであり、多くの事例では、日中時間とともにその高度が上昇する。しかしながら、このような知見とは全く逆の事例が観測された (図 23)。この日の大気境界層は非常に低く、12 : 45 においても高さ約 700m

であった。この後、積雲の発達も無く快晴状態が続き、地表面における日射量は十分にあった。それにも関わらず、18:45の大気境界層高度は発達するどころか、400mにまで低下した。さらに、大気境界層内のCO<sub>2</sub>濃度は、14:45に最も低い濃度が観測された後、今度は逆に増加に転じた。前述のように、この日は一日を通じて快晴であり、14:45以降も十分な光合成活動が行われていたはずであった。この日の大気境界層構造の特徴と、気圧配置を考慮すると、この日は高気圧性の沈降流が存在した事が推察される。また、この日の自由対流圏のCO<sub>2</sub>濃度を見ると、大気境界層よりも20ppm近く高い濃度であった。つまり、非常に高いCO<sub>2</sub>濃度の自由対流圏の大気が、沈降流の影響で大気境界層内に輸送された事、さらに、非常に低い大気境界層が、これらの影響をより大きく反映した事によって、日中のCO<sub>2</sub>濃度が上昇するという結果が観測されたものと考えられる。

ここで示した事例と同様の結果は、いずれも複数日観測された。従って、夏季晴天日という入力エネルギー、植物活動が類似した条件であっても、大規模な大気場によって形成される大気条件の違いが、異なる日変動パターンをもたらすという事がわかった。これらの結果から、大気境界層におけるCO<sub>2</sub>濃度変動の理解には、地表面の熱・CO<sub>2</sub>収支の影響だけではなく、大気境界層鉛直構造の正確な理解が必要不可欠であることが示唆された。

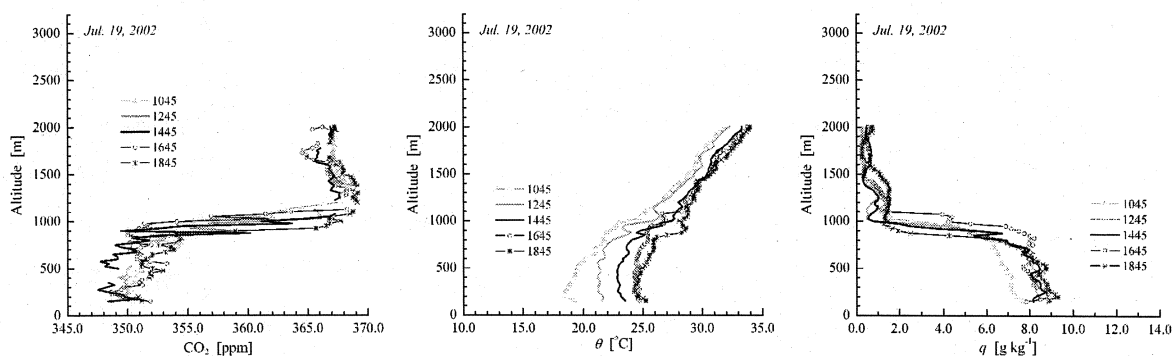


図 2.3. CO<sub>2</sub>、温位、比湿の鉛直分布日変動の結果

図は左からCO<sub>2</sub>、温位、比湿を示す。2002年7月19日の事例。上層の高気圧性沈降流の影響で、大気境界層高度が非常に低く、かつ日中徐々に低下した。

#### ⑤CO<sub>2</sub>濃度鉛直プロファイル日変動から推定する地表面CO<sub>2</sub>フラックス

大気境界層内のCO<sub>2</sub>濃度は、およそ数100～数1000kmオーダーの地表面における影響を反映している。大気境界層内CO<sub>2</sub>濃度の変動は、地表面における吸収・放出過程、自由対流圏からの輸送、水平移流量、の収支によって支配される。これまでに、大気を箱に見立ててその鉛直構造の変動から地域スケールでの地表面のCO<sub>2</sub>収支量を推定する試みが行われてきた。Denmead et al., (1996), Culf et al., (1997)は以下のような収支式から地表面フラックスを求めた。

$$\rho_b(h_2C_{b2} - h_1C_{b1}) = F_c\Delta t + \rho_f C_f(h_2 - h_1) \quad (1)$$

ここで、 $\rho$ は大気密度、 $h$ は大気境界層高度、 $C$ はCO<sub>2</sub>濃度、 $F_c$ は地表面CO<sub>2</sub>フラックスで、添え字  $b$ ,  $f$ はそれぞれ大気境界層、自由対流圏における値、1, 2は時刻  $t = 1, 2$  ( $t_2 > t_1$ )にお

ける値、そして  $\Delta t$  は  $t=1\sim 2$  における時間を示す。左辺第 1 項は、大気境界層内における  $\text{CO}_2$  貯留量の変化、右辺第 1 項は、地表面における  $\text{CO}_2$  収支量、右辺第 2 項は大気境界層高度の発達に伴い、自由対流圏の大気を取り込む際に輸送される量を示している。

Denmead et al., (1996), Culf et al., (1997) は、 $C_b$  をタワーでの観測値、 $C_f$  を海洋上の  $\text{CO}_2$  濃度観測値、 $h$  をゾンデ観測値、として用いることによって  $F_c$  を求めた。海洋上の観測値はバックグラウンドの性質をもつ大気であり、海洋に近い地域であれば、自由対流圏  $\text{CO}_2$  濃度として近似的に用いる事ができる。しかしながら、内陸であればこのような仮定は成立しない。また、これまでに得られた日変動の結果から、自由対流圏の  $\text{CO}_2$  濃度は大気境界層の  $\text{CO}_2$  濃度変動に非常に重要であることが示されている。従って、計算に用いる値と、実際の大気境界層上層の濃度との間に誤差がある場合には、地表面フラックスの推定結果に対する信頼性は低い。本研究では大気の鉛直構造を連続的に測定しているため、計算には実測に基づく値を用いる事ができる。そこで、計算に用いる自由対流圏の  $\text{CO}_2$  濃度  $C_f$  は、式 1 の構想に基づき、 $t=1$  における  $h_2$  から  $h_1$  の平均  $\text{CO}_2$  濃度を用いた。

一方、本観測結果からも明らかのように、大気境界層上に積雲層などが発達した場合、地表面の影響を受けた大気が大気境界層上層へ輸送されている。このため、自由対流圏からの  $\text{CO}_2$  の輸送は、式 1 で表されるような大気境界層高度の上昇に伴って取り込まれるものだけではなく、別の輸送混合プロセス含めたものとして収支式を検討する必要がある。

例えば、混合が生じる雲層も大気境界層の一部として考慮することも構想的には適切であるが、雲頂高度を厳密に決定することは観測データからは難しい。そこで、収支をバルク的に取り扱うことで、こういった複雑なプロセスすべて含めた形で、地表面フラックスを推定することにした。

$$F_c \Delta t = \int_0^z \rho_{a2}(z) C_2(z) dz - \int_0^z \rho_{a1}(z) C_1(z) dz \quad (2)$$

つまり、観測高度内全層における  $\text{CO}_2$  カラム量の変化が、地表面からの収支量に起因すると仮定し、観測域全体における収支を簡潔に取り扱ったものである。この方法は、大気の鉛直構造を詳細に観測している本研究であるからこそ行えるものである。従って、大気  $\text{CO}_2$  濃度の連続的なプロファイル構造の観測が行えない場合は、式 1 を用いて地表面フラックスを推定せざるを得ない。

式 1、式 2 をそれぞれ用いた場合の地表面  $\text{CO}_2$  フラックス推定値の結果を表 2 に示す。ここに示した  $\text{CO}_2$  フラックスは、大気境界層の存在が明確な時間帯における平均値である。この結果に直接対応する検証データは存在しないが、既存の研究によると、中央シベリアの pine forest では日中の  $\text{CO}_2$  フラックスは、 $\sim -14 \mu\text{mol}^{-2} \text{s}^{-1}$ 、betura forest では、 $\sim -16 \mu\text{mol}^{-2} \text{s}^{-1}$  であり、西シベリア湿原では、 $\sim -7 \mu\text{mol}^{-2} \text{s}^{-1}$ 、中央シベリア湿原では、 $\sim -6 \mu\text{mol}^{-2} \text{s}^{-1}$  である。これらの値を考慮すると、式 1 を用いて計算した結果 ( $F_{c1}$ ) は明らかに不自然であるケースが多く見られる。一方、式 2 を用いて計算した結果 ( $F_{c2}$ ) は、森林における  $\text{CO}_2$  フラックスの影響を大きく反映した結果として矛盾が無い。計算された地表面フラックスをさらに検討するために、計算を行った時間帯における積算日射量  $S$  と、 $F_{c2}$  の関係を図 6 に示す。日射量の

増加とともに吸収量が増加しており、 $F_{c2}$  が森林の光合成活動を大きく受けた  $\text{CO}_2$  フラックスであることがわかる。

式 2 を用いた地表面フラックスの推定精度が高いという結果は、自由対流圏から大気境界層への  $\text{CO}_2$  の輸送混合過程が、単純に大気境界層の発達によるものだけではない事を示している。例えば、積雲の存在が確認された 2003 年 8 月 4 日では、 $F_{c1}$  よりも  $F_{c2}$  の方が吸収量を小さく見積もっている。つまり、自由対流圏の高い  $\text{CO}_2$  濃度の大気がより多く大気境界層内へ輸送されている、という事実を明確に示唆している。

しかしながら、例えば 2002 年 7 月 19 日を見ると、 $0.5 \mu\text{mol}^{-2} \text{s}^{-1}$  の放出という、他の事例とは全く異なるフラックスを示した。7 月 19 日は高気圧性沈降流が存在していた日であった。今回の解析では、このような大規模な鉛直流による、自由対流圏からの輸送量は考慮されていない。つまり、このような推定誤差が生じた理由は、大気  $\text{CO}_2$  濃度変動に対して鉛直移流による影響が大きかった、という事が考えられる。2002 年 7 月 19 日は特に強い沈降流が観測された事例であったが、沈降流は高気圧性の大気場では一般的に存在する。また、航空機観測の実施される条件は、晴天日に限定されている。従って、今後は平均鉛直流による自由対流圏と大気境界層の間の輸送過程を明らかにしていく必要がある。

表 2.  $\text{CO}_2$  濃度鉛直分布変動から求めた地表面  $\text{CO}_2$  フラックス。式 1 を用いた場合 ( $F_{c1}$ ) と式 2 を用いた場合 ( $F_{c2}$ ) の結果を示す。あわせてフラックス計算時間内の積算日射量 ( $S$ ) を示す。

| Day        | $S$ [ $\text{MJ m}^{-2}$ ] | $F_{c1}$ [ $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ] | $F_{c2}$ [ $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ] |
|------------|----------------------------|---|---|
| 2002.07.18 | 22.2                       | —   | —   |
| 2002.07.19 | 24.6                       | -11.7   | 0.5   |
| 2002.07.23 | 19.8                       | -13.5   | -5.3  |
| 2002.07.26 | 21.9                       | —   | —   |
| 2002.09.12 | 12.2                       | -8.6  | -2.0  |
| 2003.07.08 | 18.0                       | —   | —   |
| 2003.07.15 | 23.4                       | -29.2   | -12.9   |
| 2003.08.01 | 11.9                       | —   | —   |
| 2003.08.03 | 15.6                       | -4.4  | -2.5  |
| 2003.08.04 | —                          | -9.1  | -6.2  |
| 2003.08.05 | —                          | —   | —   |
| 2004.08.09 | —                          | -27.9   | -12.9   |
| 2004.08.10 | —                          | -12.5   | -8.4  |
| 2004.08.12 | —                          | -26.1   | -7.7  |
| 2005.07.13 | 24.9                       | -42.3   | -11.9   |
| 2005.07.21 | 20.7                       | -16.2   | -6.6  |

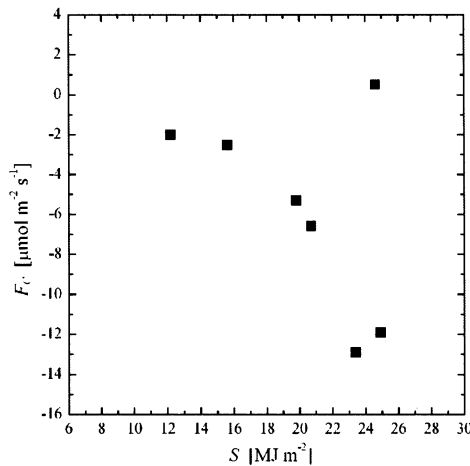


図 24 日射量 ( $S$ ) と地表面フラックス ( $F_s$ ) の関係  
日射量が増加に対し  $\text{CO}_2$  の吸収量が増加していることが分かる。

### (3) $\text{CO}_2$ 同位体比の高頻度観測

#### ① Equilibrium Boundary Layer のコンセプトによる $\text{CO}_2$ 収支推定

全球平均として見た場合、大気境界層内の大気はほぼ4日間で自由対流圏大気と置換することが示されており<sup>9)</sup>、このような長い時間スケールの平均的な現象の結果として大気境界層内の観測データをみなす場合には、鉛直方向の動きに対して水平方向の移流による影響は小さいものと予想される。

水平移流の影響を無視できる仮定した場合、大気境界層が発達するに伴って、上部の自由対流圏から大気境界層に空気を取り込まれていく際の収支式は以下のように表される。

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho z C_m) = F_{NEE} + \rho \left( \frac{\partial z}{\partial t} \right) C_t - \rho \overline{\omega_+} (C_t - C_m) \quad (3)$$

ここで、 $\rho$  は空気の密度、 $z$  は大気境界層の高度、 $C_m$  は大気境界層内の大気平均  $\text{CO}_2$  濃度、 $C_t$  は自由対流圏大気の  $\text{CO}_2$  濃度、 $F_{NEE}$  は陸域生態系による正味の  $\text{CO}_2$  交換量（光合成と呼吸の

効果を合わせた物、 $\overline{\omega_+}$  は平均沈降速度 (Subsiding mean rate) を示している。

空気密度の時間変化の項が無視できるものと仮定すると以下の式が得られる。

$$\rho z \frac{\partial C_m}{\partial t} = F_{NEE} - \rho \overline{\omega_+} (C_t - C_m) \quad (4)$$

ここで  $\overline{\omega_+}$  は大気境界層の Entrainment 速度であり、 $\overline{\omega_+} = \left( \frac{\partial z}{\partial t} \right) - \overline{\omega_+}$  である。

自由対流圏と大気境界層が平衡にある条件においては  $\frac{\partial C_m}{\partial t} = \frac{\partial z}{\partial t} = 0$  となり、以下の式が得られる。

$$F_{NEE} = \rho\omega (C_t - C_m) \quad (5)$$

CO<sub>2</sub>に関する収支式(4)と同様に水蒸気の収支式を表すと以下のようになる。

$$\rho z \frac{\partial q_m}{\partial t} = F_q - \rho\omega (q_t - q_m) \quad (6)$$

$$F_q = \rho\omega (q_t - q_m) \quad (7)$$

ここで、F<sub>q</sub> は地表面からの水蒸気フラックス、q<sub>m</sub> は大気境界層内の水蒸気濃度、q<sub>t</sub> は自由対流圏大気の水蒸気濃度である。式(5)と式(7)によれば、ρ<sub>ω</sub>を決定することができれば、大気境界層内とその上部の自由対流圏でのCO<sub>2</sub>および水蒸気の濃度の差の観測事実から大気境界層から自由対流圏に輸送されるCO<sub>2</sub>および水蒸気のフラックスを計算することができることになる。しかしながら、ρ<sub>ω</sub>を直接観測することはできないので、これをなんらかの形で決定する必要がある。

そこで、境界層内での混合により内部の情報の積算・平均化する時間スケールが長い状況に

おいては、大気境界層内大気のコ<sub>2</sub>濃度および水蒸気濃度の時間変化率( $\frac{\partial C_m}{\partial t}$ と $\frac{\partial q_m}{\partial t}$ )の項はフラックスの項に比べて小さくなることに注目する<sup>22)</sup>。CO<sub>2</sub>と水蒸気の輸送の相似性を仮定すると、F<sub>q</sub>と(q<sub>t</sub>・q<sub>m</sub>)の観測値を長期間平均化した値と式(5)によりρ<sub>ω</sub>を導出することができ、このρ<sub>ω</sub>を大気境界層と自由対流圏の間のコ<sub>2</sub>濃度差の観測値とともに式(3)に当てはめることで、この境界層スケールの空間を代表するF<sub>NEE</sub>が計算できることになる。つまり、CO<sub>2</sub>に比較して濃度やフラックスの観測やモデルによる推定が容易である水蒸気のスカラー量の時間的空間的な分布をまず観測結果から与えて、これをCO<sub>2</sub>のフラックスに置き換えるというのが、Equilibrium Boundary LayerでのCO<sub>2</sub>収支推定手法の基本的な考え方である。

このコンセプトは降雨の直後などCO<sub>2</sub>と水蒸気の輸送の相似性を仮定することができない条件では適用できないほか、計算のインプットデータとなるF<sub>q</sub>、q<sub>t</sub>、C<sub>t</sub>の実際の観測データの集積が現時点では十分ではないなどの問題点が存在するが、今後、本研究課題のような定期的な航空機観測などの手段により観測データの集積が進めば、その有効性について、より詳細な議論が可能となると予想される。また、現実の観測データからは大きな時空間変動を持つ情報のスナップショットしか得られないので、この情報から、Equilibrium Boundary Layerのコンセプトを用いた解析を行う上では、観測を長期的集積することによって、統計的にデータの代表性を高めることが重要となる。この点においても、本課題で実施される長期に渡る継続観測は、これまでにもあまり例をみない貴重なものである。

## ②境界層スケールでの同位体比情報の利用による呼吸・光合成分離評価

大気と陸域生態系のCO<sub>2</sub>交換に関して、呼吸・光合成のそれぞれのフラックスの同位体効果は支配要因が異なるため、CO<sub>2</sub>濃度の変動に対するその安定同位体比(δ<sup>13</sup>C, δ<sup>18</sup>O)の変動の関係は呼吸と光合成で異なる。このため、安定同位体比はCO<sub>2</sub>収支を計算する上で、独立した変数として扱うことができることになる。CO<sub>2</sub>の濃度変動とともに安定同位体比の変動を観察する

ことで、独立した収支式を導入することができ、これを用いて大気と陸域生態系間の正味の CO<sub>2</sub> 交換量を呼吸・光合成に分離評価するという試みが行われている。これは同位体マスバランスアプローチと呼ばれており、これを上述した Equilibrium Boundary Layer のコンセプトと組み合わせることで、境界スケールでの大気・陸域生態系間の CO<sub>2</sub> 交換量を呼吸・光合成に分離評価に利用しようという試みがある<sup>23)</sup>。

大気と陸域生態系の正味の CO<sub>2</sub> 交換量は以下のように表すことができる。

$$F_{NEE} = F_p + F_r \quad (8)$$

ここで、F<sub>p</sub> と F<sub>r</sub> はそれぞれ、光合成と呼吸に対応するグロスフラックスである。タワーを用いた渦相関法によるフラックス観測においては、そのフットプリントが小さいため、人為起源 CO<sub>2</sub> の影響を考慮する必要がないが、境界層スケールでの観測データについては非常に大きなフットプリントを持っているため、多くの場合で人為起源 CO<sub>2</sub> の影響が無視できない。そのため、境界層スケールでの観測において、F<sub>r</sub> は陸域生態系の呼吸だけでなく、人為起源 CO<sub>2</sub> の放出も含んだ、地表からの CO<sub>2</sub> 放出の総量として考えることになる。

式(5)と式(8)から以下の関係が成り立つ。

$$F_{NEE} = \rho\omega (C_t - C_m) = F_p + F_r \quad (9)$$

CO<sub>2</sub> 濃度と同時に安定同位体比(δ<sup>13</sup>C, δ<sup>18</sup>O)を測定すると、以下の独立した式が得られる。

$$F_{NEE} \delta_{net} = \rho\omega (C_t \delta_t - C_m \delta_m) \quad (10)$$

$$F_{NEE} \delta_{net} = F_p \delta_p + F_r \delta_r \quad (11)$$

ここで、δは同位体比を示す尺度であり、同位体比は質量数の小さな同位体(<sup>12</sup>C あるいは <sup>16</sup>O)に対する質量数の大きな同位体(<sup>13</sup>C あるいは <sup>18</sup>O)の比率を、標準物質の比率に対する偏差として以下のように表したものである。

$$\delta = \left( \frac{R_{sample}}{R_{standard}} - 1 \right) \times 1000 \quad (12)$$

R は同位体のモル比(<sup>13</sup>C/<sup>12</sup>C あるいは <sup>18</sup>O/<sup>16</sup>O)を示す。

ここで式(5)、式(10)と式(11)からδ<sub>net</sub> を以下のように表すことができることになる。

$$\delta_{net} = \frac{(C_t \delta_t - C_m \delta_m)}{(C_t - C_m)} \quad (13)$$

この式はδ<sub>net</sub> が大気境界層とその上部の自由対流圏の大気の CO<sub>2</sub> 濃度と同位体比から計算できることを示している。

次に式(11)と式(8)から、以下の式が得られる。



$$\delta_{net} = \frac{F_p \delta_p + F_r \delta_r}{F_p + F_r} \quad (14)$$

さらに、見かけ上の光合成と呼吸の比  $\gamma$  ( $\gamma = F_p/F_r$ ) を式(12)に導入すると以下の式が得られる。

$$\delta_{net} = \frac{\delta_r}{1+\gamma} + \frac{\delta_p \gamma}{1+\gamma} \quad (15)$$

$\delta_{net}$  は式(13)で示したように、大気境界層とその上部の自由対流圏の大気の  $\text{CO}_2$  濃度と同位体比から得られる。 $\delta_r$  は夜間の光合成が無視できる時間帯の  $\text{CO}_2$  濃度と安定同位体比の変動の関係から2成分の単純混合モデル (Keeling Plot) を用いて観測値から推定することができ、 $\delta_p$  はモデルを用いて計算することができる。これにより、式(15)の中で  $\gamma$  以外の変数をすべて観測データとモデル推定から与えることができるので、結果として光合成と呼吸の見かけの比率 ( $\gamma$ ) を決定することができることになる。境界層スケールでの  $F_{NEE}$  を求めることができれば、最終的に  $F_p$  と  $F_r$  が得られることになる。

今回の研究計画においては、航空機観測による大気境界層の大気  $\text{CO}_2$  および安定同位体比の観測を主たる目的としており、最終的な  $F_p$  と  $F_r$  を計算するために必要な  $F_{NEE}$  についてはこれを決定するための十分なデータを揃えることができないため、今回は光合成・呼吸比( $\gamma$ )についてのみ議論を行うこととした。

### ③ $\text{CO}_2$ 濃度とその炭素安定同位体比の時間変動

ベレゾレチカでの観測については2004年の8月にテスト観測を実施したが、その後の定常的な大気試料のサンプリングに関してはロシア当局からの許可がおりなかったため、実施が不可能であった。ヤクーツクに関しては、本課題が開始される以前からの継続的観測の実施の実績があったために研究期間を通じて定期観測を行うことができたが、一部の期間において、試料大気の輸出入許可や観測飛行許可の都合上、観測ができなかった時期がある。

図 25 にヤクーツク上空での定期サンプリングから得られた結果のうち、高度 3000m, 2000m, 100m の各高度での  $\text{CO}_2$  濃度、 $\delta^{13}\text{C}$  の時系列を示す。ヤクーツクにおいては、気候的な特徴により夏季の大気境界層の発達が著しく、2000m を越えて良く混合した層が発達することが観察されている。このため、式(1)以降で用いられる自由対流圏大気の  $\text{CO}_2$  濃度 ( $C_t$ ) については観測高度の上限である 3000m のものを用いることが好ましいと考えられる。ただし、航空機の運用上の制約から一部の期間においては、飛行高度の上限が 2000m となっており、この場合は、この高度での値を  $C_t$  として扱うこととした。この図から、 $\text{CO}_2$  濃度は規則的な季節変化を示しながら、徐々に上昇していることがわかる。これは、人為起源  $\text{CO}_2$  の影響によるバックグラウンド大気中の  $\text{CO}_2$  濃度の変化が反映されたものである。大気  $\text{CO}_2$  の季節的変動の支配的な要因が陸域生態系による  $\text{CO}_2$  交換量の季節変動によっている。 $\delta^{13}\text{C}$  の時系列は、 $\text{CO}_2$  濃度とほぼ対照的な外観を示す。これは、大気と陸域生態系の  $\text{CO}_2$  交換の際に大きな同位体分別が生じるからである。光合成により  $\text{CO}_2$  が生態系に固定される際には、より軽い分子が優先的に移動していくため、大気  $\text{CO}_2$  の濃度が減少するとともに、大気中に残った  $\text{CO}_2$  の中には重い分子の割合が大きくなる。このため、大気と陸域生態系の  $\text{CO}_2$  交換においては、大気  $\text{CO}_2$  の濃度と

安定同位体比の関係には逆相関が見られることになる。

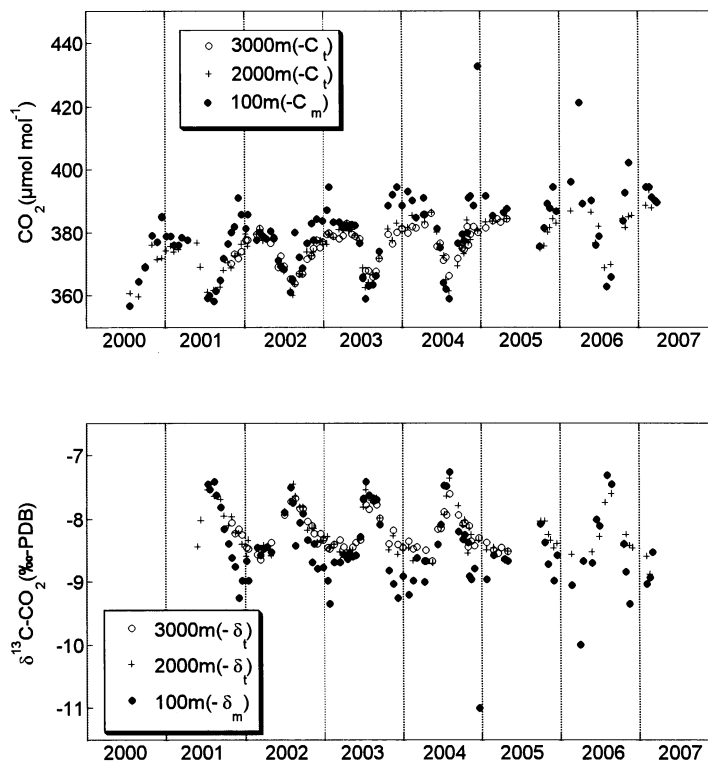


図 25. ヤクーツク上空で観測された  $\text{CO}_2$  濃度と炭素安定同位体比の時系列

図 26 に、大気境界層内の大気(100m で観測されたもの)とその上部の自由対流圏の大気(3000m および 2000m で観測されたもの) の  $\text{CO}_2$  の濃度差の時系列を示した。マイナス側の値になる場合、自由対流圏よりも大気境界層内での  $\text{CO}_2$  濃度が低いことを示す。全体的な傾向として、夏場にはマイナスの値が出現する割合が高いが、プラスの値が発生しているケースも見られる。このようなケースの一部は東シベリアで頻発している森林火災の影響によるものである。

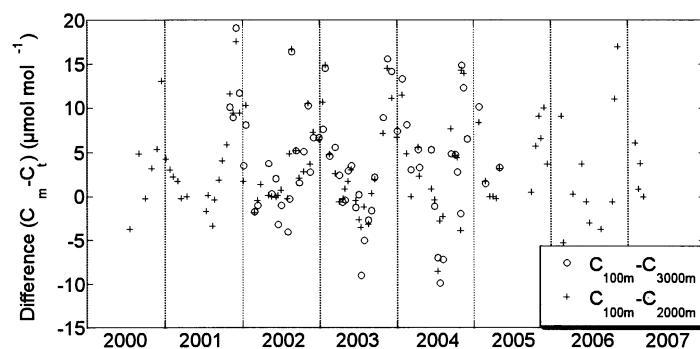


図 26. 自由対流圏と大気境界層の  $\text{CO}_2$  濃度の差の時系列

④大気境界層と自由対流圏の  $\text{CO}_2$  輸送における正味の同位体効果( $\delta_{\text{net}}$ )

ヤクーツク上空で航空機により観測された  $\text{CO}_2$  濃度とその炭素安定同位体比の関係から大気

と陸域生態系の  $\text{CO}_2$  交換によって生じた正味の同位体効果を 2 成分系単純混合モデルを用いて計算した。これは式(13)に定義された  $\delta_{\text{net}}$  に対応する。式(13)においては、自由対流圏の大気と良く混合された大気境界層内の大気を代表する数値データを用いて  $\delta_{\text{net}}$  を計算しているが、今回の計算では、実際の観測において大気境界層内の大気がかならずしも均一に混合されていない状況が多く観察されたため、100m から 3000m の間で観測されたすべてのデータを用いて計算を行った。これについて、ほぼすべてのプロファイルにおいて、 $\text{CO}_2$  濃度とその炭素安定同位体比の関係は直線的であるため、鉛直方向の  $\text{CO}_2$  濃度と炭素安定同位体比の分布は、自由対流圏大気起源と陸域生態系起源の 2 つの成分の単純な混合とみなすことができるので、実行上は式(13)に定義されるものと見なしても同じ意味をもつものと判断した。

得られた  $\delta_{\text{net}}$  の時系列を図 27 に示した。全体的に  $\delta_{\text{net}}$  の値には季節的な変動性があり、夏場に観測される  $\delta_{\text{net}}$  は冬場に観測される値に比べて高い。観測を行った期間について、人為起源  $\text{CO}_2$  による大気  $\text{CO}_2$  濃度および大気  $\text{CO}_2$  の炭素安定同位体比の経年的変動の大きさ (およそ 0.1%) が、 $\delta_{\text{net}}$  の推定誤差に対して十分に小さいため、その影響が無視できるものと仮定して、観測されたすべての  $\delta_{\text{net}}$  の季節性を 1 年間をフルスケールとしてプロットしたものが図 28 である。 $\text{CO}_2$  濃度および炭素安定同位体比の鉛直分布の変動幅が小さい場合には  $\delta_{\text{net}}$  を精度良く計算することができないので、観測された鉛直分布における  $\text{CO}_2$  の濃度が  $1\mu\text{mol mol}^{-1}$  未満であったケースは除外した。

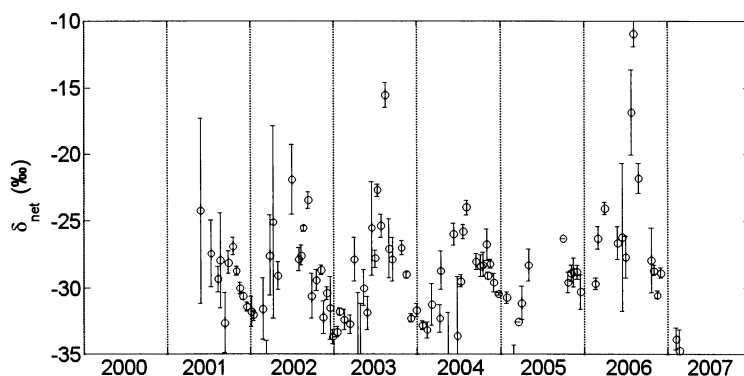


図 27. ヤクーツク上空で観測された  $\delta_{\text{net}}$  の時系列

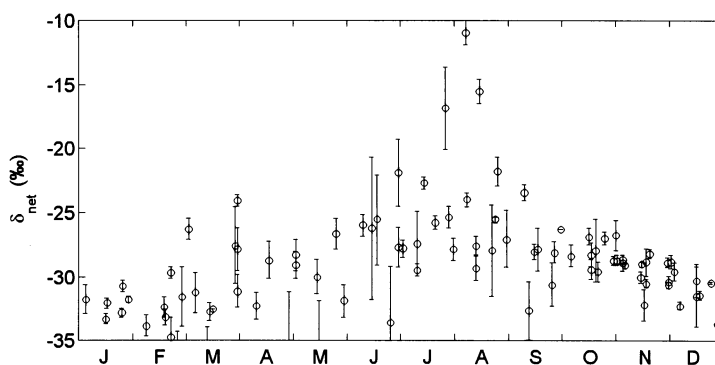


図 28. ヤクーツク上空で観測された  $\delta_{\text{net}}$  の季節変動

$\delta_{net}$  の変動には明らかな季節性があり、秋から春にかけての低温期には低い値をとり、夏季に高い値が出現することがわかる。高い $\delta_{net}$  が観察される期間は6月下旬から9月上旬となっており、この期間は、この地域の代表的植生である落葉性針葉樹林（カラマツ林）の着葉している期間に対応する<sup>13)</sup>。なお、この植生では落葉の終わる9月下旬から展葉の始まる翌年の6月上旬までは光合成活動が起こらないものと考えられる。

また、冬季の値が比較的小さなレンジに収まるのに比較して、夏季の値は大きな幅を持っている。これは、降水量の変動などによる水分条件の違いやフェノロジーに由来する陸域生態系の同位体分別係数の変動と、呼吸・光合成比の変動の両者が影響しているものと推定している。また、落葉後の10月以降は、 $\delta_{net}$  が連続的に低下していく傾向が観察された。この時期には、光合成の活性はないため、生態系からは呼吸による放出のみが起こっている。冬季に見られる値は生態系起源の炭素の同位体比に比べ明らかに低く、人為起源  $CO_2$  の影響があると推測される。落葉後の秋から冬にかけて観察される連続的な見かけ上の同位体効果の低下傾向は、地表からの  $CO_2$  放出に占める生態系起源成分と人為起源成分の割合がシフトしていく過程を反映していると予想している。

このような $\delta_{net}$  の時間的変動を長期間にわたって直接観測した例は極めてまれであり、この $\delta_{net}$  の値は、将来的に大気輸送モデルに炭素安定同位体比の情報を利用する場合には、非常に重要な検証データになると期待できる。

#### ⑤ 光合成呼吸比の推定

観測された鉛直分布の中から夏季の光合成による  $CO_2$  濃度の変化が境界層内に顕著に観察された3例を抽出し、これに関して光合成と呼吸の比率を推定してみる。対象となった3回の観測例での  $CO_2$  濃度および炭素安定同位体比の鉛直分布とともにそれぞれに対して計算された $\delta_{net}$  を図29に示す。式(15)を変形すると光合成と呼吸の比率 ( $\gamma = F_p/F_r$ ) に関して以下のような式が得られる。

$$\gamma = \frac{\delta_r - \delta_{net}}{\delta_{net} - \delta_p} \quad (16)$$

これは、 $\delta_{net}$ 、 $\delta_r$ 、 $\delta_p$  が与えられたときに光合成と呼吸の比率が計算できることを示している。ここで、 $\delta_{net}$  については航空機観測の結果から直接的に決定されている。 $\delta_r$  については、今回の観測結果からは直接的には見積もることができないため、ヤクーツク近郊の森林について、Lloyd ら<sup>7)</sup> が推測した-27‰PDB という値を用いることにする。次に植物に取り込まれる  $CO_2$  の安定同位体比 $\delta_p$ については、<sup>17)</sup> がこの地域で行った樹木の年輪セルロースの同位体比を概算値(-25.5‰)として与えることとした。現実的には植物の同位体分別係数は、水分条件や日射など短期的な環境因子の変動に応答して変化すると考えられるが、これをモデル計算するために必要なデータが、現時点では十分にそろっていないため、この値を長期平均値としてみなすことにした。

その結果、Case-1 から Case-3 のそれぞれについて光合成・呼吸比 ( $\gamma$ ) は-1.5、4.0、-2.0 となった。呼吸と光合成が釣り合っている状態では  $\gamma$  は-1 となり、光合成が卓越するとこの値はよりマイナス側となるはずである。Case-1 で計算された  $\gamma = -1.5$  については、光合成のフ

ラックスは呼吸フラックスに人為起源 CO<sub>2</sub> の効果を加味した放出量の 1.5 倍の大きさを持っているということを意味することになる。しかし、式の意味を考えれば  $\gamma$  がプラスの値を持つことは無いので、Case-2 について計算された  $\gamma=4.0$  という値は、理論上は起こりえない値ということになる。このような異常な計算結果がもたらされる原因として、特に大きな影響を持つのは  $\delta_p$  の見積もりである。まず 1 つの原因として、この計算では  $\delta_p = -25.5\text{‰PDB}$  という値を用いたが、これに対して Case-2 では  $\delta_{net} = -25.8\text{‰}$  であるため式 (14) の分母が 0 に近づくことになり、これが大きな誤差を与えたものと考えられる。

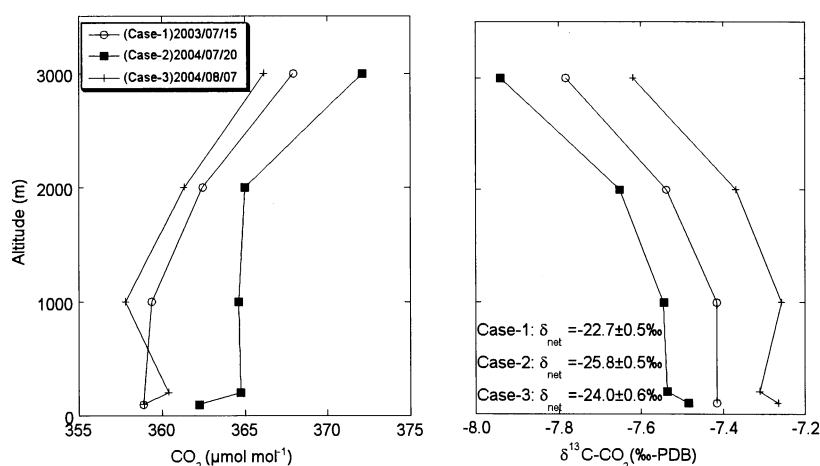


図 29. ヤクーツクでの観測結果のうち、夏期の光合成による CO<sub>2</sub> 吸収の影響が自由対流圏と大気境界層の CO<sub>2</sub> 濃度と炭素安定同位体比に顕著にあらわれた例。左は CO<sub>2</sub> 濃度の鉛直分布、右は炭素安定同位体比 ( $\delta^{13}\text{C}$ ) の鉛直分布。右図の中に、それぞれの観測データから計算された  $\delta_{net}$  の値も示した。

また、これに加えて上述したように、本来  $\delta_p$  は環境因子の変動に応答した変動性を持つので、実際の  $\delta_p$  が今回用いた  $\delta_p$  とはかなり異なるものであった可能性がある。航空機観測の時間空間スケールに対応した  $\delta_p$  を適切に推定するためには、陸上でのタワー観測などによる気象要素の連続観測を連携させることが好ましい。今回の課題の中ではこのような連携は行っていないが、国内国外の観測グループがヤクーツク周辺の森林でタワーによる H<sub>2</sub>O、CO<sub>2</sub> のフラックスを含む気象要素の観測を実施しているため、将来的にはその観測データを利用することで、解析の信頼性は向上できるものと期待できる。また、 $\delta_p$  を決定する支配プロセスである光合成時の同位体分別係数のモデル計算については、従来はその実験的な検証が困難であったが、分光学的手法による CO<sub>2</sub> 安定同位体比の現場での連続観測が可能となりつつあるため、これを実観測データにより高度に検証できるようになると期待されている。これにより、将来的には  $\delta_p$  のモデル推定に含まれる不確かさは大幅に軽減される見込みがある。計算に用いられる周辺情報がアップデートされれば、今回の研究課題で集積された  $\delta_{net}$  の実観測データから計算される光合成呼吸比の推定値の信頼性は向上するものと考えられる。

## 5. 本研究により得られた成果

シベリアを代表する 2 つの森林地帯上空における CO<sub>2</sub> 濃度の変動を定性的に明らかにするた

めに、ロシア共和国西シベリアのベレゾレチカ村上空および東シベリアのヤクーツク上空において小型航空機を用いて下部対流圏の CO<sub>2</sub> 濃度の高頻度観測および日変動観測と CO<sub>2</sub> の同位体比の試験観測を行った。研究実施期間中に得られた主たる成果は以下の通りである。

- ・ ベレゾレチカ上空での定期観測飛行は 2004 年 4 月から 2007 年 4 月までの間に 145 日分の飛行を行い、7 度の欠測を除くと 138 日分のデータ取得に成功した。世界でもまれな高頻度観測データを得ることができた。
- ・ ヤクーツク上空で高頻度観測を行うために平成 16 年度に開発した CO<sub>2</sub> 濃度観測装置を現地に持ち込んで、小型観測機 (An-2 機) に搭載し、ロシア政府からの許可取得に成功し、観測を開始し、ヤクーツク上空では非常に良質のデータを取得することができた。
- ・ CO<sub>2</sub> 濃度の年平均値の鉛直分布から、rectifier effect に起因して地表付近の年平均値が毎年高い値になっていること、高度 1.5km の平均濃度が常に 2km の値より低いことから、ベレゾレチカ付近の陸上生態系が 1 年間を通じたときの正味で CO<sub>2</sub> を吸収している可能性のあることがわかった。
- ・ ベレゾレチカ上空の自由対流圏と境界層内とで観測された CO<sub>2</sub> 濃度の季節変動を全球 3 次元輸送モデルでシミュレートされた CO<sub>2</sub> 濃度の変動と比較し、NIES05 モデルと NICAM モデルが季節変動の形や総観規模の変動に伴う CO<sub>2</sub> 濃度の変化を良く表現していることが確認された。また CASA モデルが実際の CO<sub>2</sub> フラックスを表現できていないことも指摘できた。
- ・ 境界層内と自由対流圏におけるモデルと観測から得られた CO<sub>2</sub> 季節振幅の比をくらべることによって NIES05 モデルと NICAM モデルの大気境界層上端における物質輸送が実大気に近いことを確認した。このように炭素循環モデルの大気境界層輸送過程を、CO<sub>2</sub> 濃度の高頻度観測データを使って評価できたことにより、本研究の目的の 1 つは達成できた。今後さらに本研究の観測成果を他のモデルの評価に役立てていく予定である。
- ・ 大気境界層の構造および発達過程に伴う CO<sub>2</sub> 濃度変動の実態を詳細に調べるため、CO<sub>2</sub> 濃度鉛直プロファイル日変動のキャンペーン観測を行い、計 17 日間の日変動データの取得に成功した。大気境界層の構造および CO<sub>2</sub> 濃度変化は、夏季晴天日であっても多様であり、主に 4 つのパターンに分類できることがわかった。
- ・ CO<sub>2</sub> 濃度鉛直プロファイル変化から地表面 CO<sub>2</sub> フラックスを算出した結果、大気境界層から雲層までの含めた大気柱の濃度変化を考慮することで、地表面フラックスの良い推定値が得られた。
- ・ 自由対流圏からの輸送量を大気境界層の発達によって取り込まれた量のみとして推定した値の評価から、雲層による大気境界層と自由対流圏の大気の混合を促進するプロセスの存在が明らかになった。
- ・ 航空機観測領域での CO<sub>2</sub> フラックスを理解するために簡易な航空機分散法による観測システムを開発し、タワーによる観測値と比較したところ良い精度で一致していた。この観測とタワー観測を組み合わせることによって CO<sub>2</sub> フラックス観測の面的な広がり期待できる。
- ・ ヤクーツクにおける  $\delta^{13}\text{C}$  の観測結果から、夏場の光合成による地表面付近での CO<sub>2</sub> の吸収と  $\delta^{13}\text{C}$  の分別の効果はヤクーツク周辺では他の地域に比べて高い高度まで伝搬しやすいことがわかった。

- ・ 夏季と冬季の正味の同位体効果を比較した場合、夏季の値がより高く、冬季の値が低くなる傾向が観察された。これまでの観測報告によれば、ヤクーツク付近の森林の樹木の $\delta^{13}\text{C}$ は-26から-27‰PDB前後とされており、今回観察された同位体効果の変動幅はこれに比べて大きなものである。これは水分条件の変化など不規則な環境因子の変動による植物の気孔コンダクタンスの変化を反映したものである可能性が高い。
- ・ ヤクーツク上空で観察された大気境界層内と自由対流圏の $\text{CO}_2$ 濃度とその安定同位体比から計算された正味の同位体効果 $\delta_{\text{net}}$ には顕著な季節性が存在し、その季節性は植物による $\text{CO}_2$ 交換の季節的な変化と、人為起源 $\text{CO}_2$ の寄与率の変化を反映したものであることが明らかになった。

## 6. 引用文献

- 1) Keeling, C. D., The concentration and isotopic abundances of atmospheric carbon dioxide in rural areas. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 13, 322-334, 1958.
- 2) Wyngaard, J. C., O. R. Coté and Y. Izumi, Local free convection, similarity, and the budgets of shear stress and heat flux, *J. Atmos. Sci.*, 28, 1171-1182, 1971.
- 3) Raupach, M.R., Denmead, O.T., and Dunin, F.X. (1992) Challenges in linking atmospheric  $\text{CO}_2$  concentrations to fluxes at local and regional scales, *Australian Journal of Botany*, 40, 697-716, 1992.
- 4) Tans, P.P., Keeling, R.F., Berry, J.A. , Oceanic  $^{13}\text{C}$  data. A new window on  $\text{CO}_2$  uptake by the oceans, *Global Biogeochem. Cycles*, 7, 353-368, 1993
- 5) Katul, G., S. M. Goltz, C. I. Hsieh, Y. Cheng, F. Mowry, and J. Sigmon, Estimation of surface heat and momentum fluxes using the flux-variance method above uniform and non-uniform terrain, *Boundary-Layer Meteorol.*, 74, 237-260, 1995.
- 6) Cotton, W.R., Alexander, G.D., Hertenstein, R., Walko, R.L., McAnelly, R.L. and Nicholls, M. , Cloud venting- a review and some new global annual estimates, *Earth-Science Reviews*, 39, 169-206, 1995.
- 7) Lloyd, J., Kruijt, B., Hollinger, D.Y., Grace, J., Francey, R.J., Wong, S.-C., Kelliher, F.M., Miranda, A.C., Farquahr, G.D., Gash, J.H.C., Vygodskaya ,N.N., Wright, I.R., Miranda, H.S., Schulze, E.-D. Vegetation effects on the isotopic composition of atmospheric  $\text{CO}_2$  at local and regional scales: theoretical aspects and a comparison between rain forest in Amazonia and a boreal forest in Siberia. *Australian Journal of Plant Physiology*, 23, 371-399, 1996.
- 8) Denmead, O. T., M. R. Raupach, F. X. Dunin, H. A. Cleugh, and R. Leuning, Boundary layer budgets for regional estimates of scalar fluxes, *Global Change Biology*, 2, 255-264, 1996.
- 9) Culf, A. D., G. Fisch, Y. Malhi, and C. A. Nobre. , The influence of the atmospheric boundary layer on carbon dioxide concentrations over a tropical forest, *Agricultural and Forest Meteorology*, 85, 149-158, 1997.
- 10) Fung, I., Field, C.B., Berry, J.A., Thompson, M.V., Randerson, J.T., Malmström, C.M., Vitousek, P.M., James Collatz, G., Sellers, P.J., Randall, D.A., Denning, A.S., Badeck, F., and John, J., Carbon 13 exchanges between the atmosphere and biosphere, *Global Biogeochem.*

- Cycles.*, 11, 507-533,1997.
- 11) Yakir, D., and L.D.L. Sternberg, The use of stable isotopes to study ecosystem gas exchange, *Oecologia*, 123, 297-311, 2000.
  - 12) Betts, A.K., Idealized model for equilibrium boundary layer over land, *Journal of Hydrometeorology*, 1, 507-523,2000.
  - 13) Ohta, T., Hiyama, T., Tanaka, H., Kuwada, T., Maximov, T., Ohata, T. and Fukushima, Y., Seasonal Variation in the Energy and Water Exchanges above and below a Larch Forest in Eastern Siberia. *Hydrological Processes*, 15(8), 1459-1476,2001.
  - 14) Bowling, D.R., N.G. McDowell, B.J. Bond, B.E. Law, J.R. Ehleringer, C-13 content of ecosystem respiration is linked to precipitation and vapor pressure deficit, *Oecologia*, 131, 113-124, 2002.
  - 15) öser, C., L. Montagnani, E. -D. Schulze, D. Mollicone, O. Kolle, M. Meroni, D. Papale, L. B. Marchesini, S. Federici, and R. Valentini, Net CO<sub>2</sub> exchange rates in three different successional stages of the “Dark Taiga” of central Siberia, *Tellus*, 54B, 642-654, 2002.
  - 16) Ogee, J., P. Peylin, P. Ciais, T. Bariac, Y. Brunet, P. Berbigier, C. Roche, P. Richard, G. Bardoux, and J.-M. Bonnefond, Partitioning net ecosystem carbon exchange into net assimilation and respiration using <sup>13</sup>CO<sub>2</sub> measurements: A cost-effective sampling strategy, *Global Biogeochem. Cycles*, 17, NO. 2, 1070, doi:10.1029/2002GB001995, 2003.
  - 17) Kagawa, A., Naito, D., Sugimoto, A., and Maximov, T. C., Effects of spatial and temporal variability in soil moisture on widths and delta13C values of Eastern Siberian tree rings. *Journal of Geophysical Research*, doi:10.1029/2002JD003019,2003.
  - 18) Tomita, H., and M. Satoh , A new dynamical framework of nonhydrostatic global model using the icosahedral grid, *Fluid Dyn. Res.*, 34, 357- 400,2004.
  - 19) Bakwin, P.S., Davis, K.J., Yi, C., Wofsy, S.C., Munger, J.W., Haszpra, L. and Barcza, Z., Regional carbon dioxide fluxes from mixing ratio data, *Tellus*, 56B, 301-311,2004.
  - 20) Betts, A.K., Helliker, B.R., and Berry, J.A. , Coupling between CO<sub>2</sub>, water vapor, temperature and radon and their fluxes in an equilibrium boundary layer over land. *Journal of Geophysical Research*,109, D18103, doi:10.1029/2003JD004420,2004.
  - 21) Helliker, B.R., Berry, J.A., Betts, A.K., Davis, K., Miller, J.B., Denning, A.S., Bakwin, P.S., Ehleringer, J.R., Butler, M.P. and Ricciuto, D.M., Estimates of net CO<sub>2</sub> flux by application of equilibrium boundary layer concepts to CO<sub>2</sub> and water vapor measurements from a tall tower, *Journal of Geophysical Research*, 109, D20106, doi:10.1029/2004JD004532,2004.
  - 22) Helliker, B.R., Berry, J.A., Betts, A.K., Davis, K., Miller, J.B., Denning, A.S., Bakwin, P.S., Ehleringer, J.R., Butler, M.P. and Ricciuto, D.M. , Regional-scale estimates of forest CO<sub>2</sub> and isotope flux based on monthly CO<sub>2</sub> budgets of the atmospheric boundary layer, in *The Carbon Balance of Forest Biomes (Edited by H. Griffiths and P.G. Jarvis)*, Taylor and Francis Group, Oxon, UK, 2005.
  - 23) Ciais P et al., Europe-wide reduction in primary productivity caused by the heat and drought in 2003, *Nature*, 437,529-533, 2005.



- 24) 丹羽洋介、「CO<sub>2</sub> ソース・シンク逆解析のための大気物質輸送シミュレーション」、東京大学大学院理学研究科修士論文、2007.

[研究成果の発表状況]

(1) 誌上発表 (学術誌・書籍)

- ① T. Watai, T. Machida, N. Ishizaki and G. Inoue: *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, Vol.23, No.5, 700-710(2006) "A lightweight observation system for atmospheric carbon dioxide concentration using a small unmanned aerial vehicle"

(2) 口頭発表

- ① T. Machida, O. Krasnov, T. Watai, K. Shimoyama J. Moriizumi and G. Inoue: NOAA/CMDL Annual Meeting, Boulder, USA, 2004, "Measurements of CO<sub>2</sub> mixing ratio in and above PBL over the forest area in Siberia"
- ② Maksyutov S., T. Machida, M. Ishizawa, S. Venevsky, G. Inoue: 6th APGC Symposium, Tsukuba, 2004 "Synoptic scale variations of atmospheric CO<sub>2</sub> over Siberia: modeling and observations"
- ③ Takahashi, Y., Watai, T., Machida, T., and Fedoseev, N.: SIBAE-BASIN Conference, Partitioning of fluxes between the biosphere across spatial scales, Interlaken, Switzerland, 2004 "Aircraft monitoring of vertical profiles of <sup>13</sup>C/<sup>12</sup>C ratio in atmospheric CO<sub>2</sub> over a forest in East Siberia: Seasonal variability of source isotope signature."
- ④ Maksyutov, S., T. Machida, M. Ishizawa, S. Venevsky, G. Inoue: AGU Fall 2004 San-Francisco, 2004 "Modeling and observations of atmospheric CO<sub>2</sub> in PBL over Siberia"
- ⑤ Takahashi, T., T. Machida, T. Watai, G. Inoue, T. Nakazawa, T. Inagaki, K. Yazawa, N. Fedseev, M. Panchenko, M. Arshinov, N. Vinnichenko: Seventh International Carbon Dioxide Conference, Boulder, Colorado, USA, 2005 "Long-term observation of vertical profiles of <sup>13</sup>C/<sup>12</sup>C ratio of atmospheric CO<sub>2</sub> over Siberia and Japan"
- ⑥ T. Machida, K. Shimoyama, O. Krasnov, T. Watai and G. Inoue: Seventh International Carbon Dioxide Conference, Boulder, Colorado, USA, 2005 "Measurements of CO<sub>2</sub> mixing ratio in and above PBL over the forest area in Siberia"
- ⑦ T. Machida, O. Krasnov, H. Matsueda, Y. Nakagawa, M. Tomosawa, K. Ishikawa, T. Nakazawa, T. Ogawa T. Suenaga and G. Inoue: 13<sup>th</sup> CO<sub>2</sub> Experts Meeting, Boulder, USA, 2005 "New CO<sub>2</sub> measurement Systems Using Aircraft"
- ⑧ 町田敏暢・S. Maksyutov・高橋善幸・中澤高清・M. Arshinov、N. Vinnichenko、B. Belan、N. Fedoseev: 第12回大気化学討論会 (2006) 「シベリア上空における温室効果気体およびその関連気体の年々変動」

- ⑨ Maksyutov S., T.Machida, K. Shimoyama, C.Carouge, A.Peregon, P. Patra, M. Arshinov, O. Krasnov, B.Belan, N.Fedoseev, A. Shvidenko, G.Inoue: AGU Fall meeting, San-Francisco, 2006” Top-down approach to West Siberian regional carbon budget: combination of the CO<sub>2</sub> observations and inverse modelling”

(3) 出願特許

なし

(4) 受賞等

なし

(5) 一般への公表・報道等

- ① 国立環境研究所公開シンポジウム2005、ポスター発表「航空機とタワーで探るシベリアの二酸化炭素」(平成17年6月)
- ② 朝日新聞(2006年10月4日、全国版、「北極異変：温暖化対策待ったなし」：シベリア航空機観測の成果が引用された。)

(6) その他成果の普及、政策的な寄与・貢献について

**【成果の普及】**

本研究の観測データは既に多くのモデル研究者から問い合わせがあり、共同研究として内外の研究者に提供している。

今後WDCGGやGlobalviewなどのデータベースに観測結果を提供し、広く成果の普及に努める。

**【政策的な貢献】**

平成18年度より第3期科学技術基本計画が始動している。平成19年3月22日に総合科学技術会議が決定した「分野別推進戦略」のIII環境分野では、国際協力・分担により二酸化炭素収支観測の全球カバーを目指して進め、人為起源二酸化炭素の地球各圏への分配を把握することを推進している。本研究は観測の空白域であるシベリア域において質が高く頻度も高い有用な観測を推進していることに加えて、モデルの改善を通じてCO<sub>2</sub>収支量の推定誤差低減にも貢献している。