

B-3 アジアフラックスネットワークの確立による東アジア生態系の炭素固定量把握に関する研究

(2) 生態系における安定同位体比の測定による物質フローの解明に関する研究

独立行政法人産業技術総合研究所

環境管理研究部門 大気環境評価研究グループ 村山昌平・近藤裕昭・三枝信子

環境管理研究部門 副部門長 山本晋

独立行政法人国立環境研究所

大気圏環境研究領域大気動態研究室 高橋善幸

地球環境研究センター 中台利江

独立行政法人農業環境技術研究所

地球環境部 食料生産予測チーム 谷山一郎

岐阜大学流域環境研究センター 小泉博・近藤美由紀・秋山侃

京都大学大学院農学研究科地域環境科学専攻 大手信人

〈研究協力者〉 筑波大学 地球科学系 濱田洋平・田瀬則雄

京都大学生態学研究センター 杉本 敦子

平成12~14年度合計予算額 55,198千円

(うち、平成14年度予算額 18,439千円)

〔要旨〕濃度測定やフラックス測定では、炭素循環の各素過程の総和である正味の炭素交換量しか見ることができない。本研究では、安定同位体比測定手法を用いて、陸上生態系における炭素循環の素過程の解明を図る。そのために異なる植生からなる生態系において、大気-森林間及び森林-土壌間の炭素収支、森林内の炭素循環、森林流域における水文過程による炭素流出、水田における炭素固定量等を調べ、これら変動要因を明らかにする。以下に各研究成果の概要を示す。

(1) CO<sub>2</sub>濃度及び安定同位体比測定による落葉広葉樹林における炭素循環の解明(産総研)

落葉広葉樹林観測サイト(岐阜県高山市)において大気中及び土壌空気中のCO<sub>2</sub>濃度及びCO<sub>2</sub>の安定同位体観測を行った。大気中CO<sub>2</sub>濃度の春の濃度減少開始時期の年々の違いには、春季の気温や融雪時期との関連性が見られた。CO<sub>2</sub>濃度の鉛直分布の日内変化およびその季節変化の解析、土壌呼吸フラックスと夜間のNEEの比較から、樹木、林床、土壌の生物活動の生態系内炭素循環への寄与の季節変動を定性的に明らかにすることができた。暖候期、大気中CO<sub>2</sub>濃度とCO<sub>2</sub>の $\delta^{13}\text{C}$ および $\delta^{18}\text{O}$ の日内変動間には、それぞれ生物活動の日内変動を反映した明瞭な負の相関が見られた。大気中CO<sub>2</sub>濃度とCO<sub>2</sub>の $\delta^{13}\text{C}$ の季節変動間にも生物活動の季節変動を反映した明瞭な負の相関が見られたが、CO<sub>2</sub>濃度と $\delta^{18}\text{O}$ には、明瞭な相関が見られなかった。

(2) カラマツ林生態系における大気二酸化炭素安定同位体比と土壌呼吸速度の変動要因の解明(国環研)

北海道の落葉針葉樹林(カラマツ林)に大気試料自動採取装置を設置し、一定の時間間隔で大気試料を採取し、CO<sub>2</sub>濃度とその炭素安定同位体比( $\delta^{13}\text{C}$ )の日変動を観察した。この観測をおよそ1ヶ月毎に行った。森林内で観測されたCO<sub>2</sub>濃度と同位体比の夜間の時間変動から二成分系単純

混合モデルを用いてこの生態系内で呼吸により放出されたCO<sub>2</sub>の $\delta^{13}\text{C}$ を推定した。2000年7月から2002年10月までの観測データから、呼吸起源CO<sub>2</sub>の $\delta^{13}\text{C}$ は2‰以上の幅で有意な時間的変動性を持つことが明らかとなった。観測を行った期間のうち植物の活動の盛んな時期の平均値としておよそ-28.0‰という値が得られた。これは、北米やヨーロッパ域の森林に多くみられる常緑針葉樹林で観測されている値に比べ低く、夏季に降水量が多い東アジアの気候的な特徴やカラマツが持つ生理機能的な特徴を反映したものと推測される。

高頻度の観測の結果から呼吸起源CO<sub>2</sub>の $\delta^{13}\text{C}$ の時間的な変動は数日前の水分条件とよく対応していることが明らかとなった。森林内の相対湿度の変化は植物の気孔コンダクタンスの変化を通じて光合成時の同位体分別効果に反映されることを考えると、森林生態系内で呼吸により放出されるCO<sub>2</sub>の $\delta^{13}\text{C}$ は光合成により吸収されるCO<sub>2</sub>の $\delta^{13}\text{C}$ と短い時間スケールでリンクしているものと推測される。

植物体や土壌の有機物の同位体測定から、森林生態系を構成する有機物の $\delta^{13}\text{C}$ が空間的に著しく不均一であることが示されたが、どの場所においても分解の進んだ有機物ほど $\delta^{13}\text{C}$ が高くなるという共通した傾向が確認された。土壌から放出される微生物呼吸起源のCO<sub>2</sub>成分の $\delta^{13}\text{C}$ の時間的変動の観測においても季節が進むにつれて、 $\delta^{13}\text{C}$ の値が高くなる傾向が確認された。

#### (3) 水田における安定同位体比の測定による物質フローの解明 (農環研)

我が国を代表する耕地生態系の一つである水田において、水収支観測に重点を置いた炭素収支の実態把握を行った。炭素の流入として最も大きかったのは光合成によるCO<sub>2</sub>の取り込みであり、このうちの6割強が収穫によって持ち出された。溶存炭素の流入は全体の5~9%を占めたが、多くの場合無機態である炭酸(溶存CO<sub>2</sub>+重炭酸イオン)の濃度が有機炭素の濃度を上回った。炭酸濃度はイネの成長や温度上昇に伴う生物代謝の増加に対応し、耕作期間を通じて各水体で一様に上昇した。この炭酸の起源として大気CO<sub>2</sub>および生物代謝の2つを想定し、炭素同位体比を用いて両者の寄与率を比較したところ、大気CO<sub>2</sub>の寄与は田面水においても最大で10%程度となり、生物活動によって高い炭酸濃度が維持されていることが同位体比からも示された。なお、調査水田における年間の全炭素収支は、2000-2001年で54gC m<sup>-2</sup>の吸収、2001-2002年で106gC m<sup>-2</sup>の放出であった。本研究で得られた、溶存炭素フラックスにおける炭酸の寄与ならびに同位体比を用いた起源の推定については過去の事例がほとんどなく、水田の炭素循環に関する重要な知見を提供するものである。

#### (4) 安定同位体比の測定による森林内炭素サイクルの解明 (岐阜大学)

炭素安定同位体比を指標にして、森林生態系内での炭素動態のメカニズムを明らかにした。調査は、2001~2002年の夏と秋(落葉後)に岐阜大学流域圏科学研究センター高山試験地の冷温帯落葉広葉樹林で行った。得られた成果は以下の通りである。

①土壌呼吸量は、地温の上昇とともに夏期に向かって増加(491~907 mgCO<sub>2</sub> m<sup>-2</sup> h<sup>-1</sup>)し、8月に最大(926 mgCO<sub>2</sub> m<sup>-2</sup> h<sup>-1</sup>)となり、その後気温の低下とともに減少(317 mgCO<sub>2</sub> m<sup>-2</sup> h<sup>-1</sup>)した。また、各月とも、地点間での土壌呼吸量のばらつき(変動係数24~37%)が見られた。

②光-光合成曲線、光-気孔コンダクタンス曲線および葉内二酸化炭素濃度-光合成曲線は当年葉と1年葉で大きな違いは認められなかった。また、飽和光合成速度は約10 μmol m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup>で林床植物としては比較的高い値を示した。得られた光-光合成曲線と光環境を用いて、一日当たりのクマイザサ群落の炭素固定量を推定したところ、8月には200 m mol m<sup>-2</sup> day<sup>-1</sup>、10月には400 m mol m<sup>-2</sup> day<sup>-1</sup>

の値を示した。

③ササの葉の $\delta^{13}\text{C}$ は  $-28\sim-30\%$ 程度であった。大気サンプリングシステムおよび大気精製ラインを用いて、サンプリング後の大気の $\text{CO}_2$ の精製と $\delta^{13}\text{C}$ の分析の結果、土壌呼吸起源 $\text{CO}_2$ の吸収率は林冠木で0%、クマイザサでは夏期に10%程度、秋期に2%程度であると推定された。

#### (5) 暖温帯森林生態系における炭素の循環と流出プロセスに関する研究 (京都大学)

暖温帯森林生態系における炭素の循環と流出プロセスを明らかにすることを目的とし、滋賀県南部に森林試験流域を設定して、水文観測をベースとして、種々の水と炭素の安定同位体比測定を含む生物地球化学的な調査を行った。水文観測と水の同位体比測定を用いて求めた土壌水の平均滞留時間は2週間から4ヶ月程度であった。また、この浸透過程における溶存有機態炭素(DOC)や無機炭素(DIC)の濃度変動を測定し、土壌中における形態別の炭素移動量の推定を行った。林床A0層で形成されたDOCは表層30cmまでに大半が土壌に吸着され、100cm以下では微生物による分解によって濃度減少が生じることが明らかになった。また、こうした可溶で移動可能な有機態炭素と相互に作用する土壌有機態炭素(SOC)の炭素安定同位体比( $\delta^{13}\text{C}$ )を同じサイトで測定した。炭素含量は表層近くで急激に減少し、それに呼応して $\delta^{13}\text{C}$ は減少した。しかし、炭素含量の減少が鈍る硬質土層以下では、有機態炭素量の減少に対して $\delta^{13}\text{C}$ が徐々に増加した。このことは、表層でのリターの分解と、下層へのDOCの輸送、鉛直輸送過程での吸着という上記のメカニズムにそって、移動している炭素の形態が変動していることを反映しているものと考えられた。さらに、土壌への供給有機物としての樹木葉の炭素安定同位体比の季節変動を測定した。樹木葉の炭素安定同位体比は、葉の $\text{CO}_2$ と水蒸気の交換に対する気孔のコントロールを反映するが、同時にモニターした、チャンパーによる個葉のガス交換測定から得られる細胞間隙 $\text{CO}_2$ 濃度と大気の $\text{CO}_2$ 濃度との比

( $C_i/C_a$ )の変動の幅が大きいのに対して $\delta^{13}\text{C}$ から得られる $C_i/C_a$ は季節を通じて大きな変動はなかった。 $\delta^{13}\text{C}$ は樹冠の上部で大きく、下部で小さい明瞭な差が見られ、光環境の差異が光合成に伴う気孔開閉の特徴に強く影響していることがわかった。リターの $\delta^{13}\text{C}$ は、これらの変動幅の中間の値であった。

[キーワード]  $\text{CO}_2$ 、安定同位体比、土壌呼吸、水文過程、炭素循環

#### 1. はじめに

濃度測定やフラックス測定では、炭素循環の素過程の総和である正味の炭素交換量しか見ることができず、各素過程を分離して把握することは困難である。一方、大気、植物体、土壌、溶存有機体、雨水、土壌水等の間で、炭素、酸素、水素の安定同位体比はそれぞれ異なる値を示し、また、物質が各素過程で移動する際に異なる同位体比変化(同位体分別効果)を伴う。このことを利用することにより、陸上生態系における炭素循環を素過程に分離して、定量的に評価することが可能になる。また、同位体比測定や他の測定法を元に見積もられる各素過程の炭素収支を積み上げて、サブテマ1のフラックス観測で取得される大気-生態系間 $\text{CO}_2$ 交換を別アプローチで求めることにより、フラックス観測との相互検証が可能になる。これらの目的のために、本研究では、同位体比測定やその他の手法により、冷温帯落葉樹林、暖温帯林、亜寒帯林、水田等の異なる植生からなる生態系において、森林大気、土壌空気、土壌水、降水、植物体、土壌有機物、水田水等の同位体比や $\text{CO}_2$ 、溶存無機・有機炭素濃度等を測定し、森林生態系における炭素循環の素過程、森林流域における水文過程による炭素流出および水田における炭素固定量等を調べ、これら変動要因を明らかにする。各サイトで得られた結果を相互に比較し、それぞれの生態系におけ

る炭素収支の特徴を把握し、東アジア陸上生態系における炭素収支解明のための基礎資料とする。各サイトにおける研究結果と成果は、以下の通りである。

## 2. 各サイトにおける研究結果と成果

### (1) CO<sub>2</sub>濃度及び安定同位体比測定による落葉広葉樹林における炭素循環の解明（産総研）

#### ①研究目的

将来の気候変動を予測するためには、全球規模の炭素循環の解明が不可欠である。近年、北半球中高緯度の陸上生物圏が、炭素循環における重要な吸収源であることが指摘されている<sup>1)</sup>。また、COP3以降、植林等の森林生態系のCO<sub>2</sub>吸収能を利用したCO<sub>2</sub>削減技術が注目されてきている。しかし、その科学的根拠は乏しく、森林生態系の吸収能の定量的な見積もりには不確定性が大きい。これまでのグローバルな炭素収支の見積もりには、主としてバックグラウンドステーションのデータが用いられてきたが、森林生態系の役割を詳細に明らかにするためには、森林生態系の影響を強く受けた観測地における大気中CO<sub>2</sub>濃度観測や大気－森林間のCO<sub>2</sub>フラックスの直接観測が不可欠である。一方、CO<sub>2</sub>の炭素・酸素安定同位体比は、大気・海洋・陸上生物圏間で異なる値を持ち、また、CO<sub>2</sub>の各リザーバー間の交換において、固有の同位体分別が起きる。このことを利用して、CO<sub>2</sub>濃度観測だけでは得られない、大気－海洋間および大気－陸上生物圏間のCO<sub>2</sub>交換量の分離が可能になる。さらに、森林生態系を構成する各コンパートメントが持つ同位体比の違いや、各コンパートメント間の交換過程における同位体分別効果を利用して、濃度測定やフラックス観測だけでは得ることができない森林生態系における炭素循環に関する詳細な情報が得られることが期待される。しかし、森林生態系におけるCO<sub>2</sub>濃度や同位体比の観測例は少なく、それらの時間変動の実態やその変動要因について十分に理解されていない。

本研究では、CO<sub>2</sub>濃度の測定及び同位体比測定により、落葉広葉樹林における大気中CO<sub>2</sub>濃度及び大気－森林生態系間の炭素収支の季節変動、年々変動の要因について、光合成、土壌呼吸、地上部呼吸等の各過程の変動の寄与を明らかにし、気象要素等との関係を調べることを目的とする。

#### ②研究方法

観測は、岐阜県高山市の冷温帯落葉広葉樹林（36° 08' N, 137° 25' E, 標高は1,420 m）において行われた。年平均気温と年降水量はそれぞれ7.3℃と2,382 mm（1980～1994年）であり、積雪期は通常12月から4月中旬の間である。植生は、ミズナラ、ダケカンバ、シラカンバを主体とする樹齢50年程度の落葉広葉樹の二次林で、林床はクマイザサにほぼ一面覆われている。平均的な樹高は15-20 mである（詳細は、サブテーマ1の高山サイトの部分を参照）。現地において、タワーを用いた大気中CO<sub>2</sub>濃度および各種気象要素の通年連続観測を行った。試料空気は、27、18、8.8、2.0 m（1999年3月までは2.0mの代わりに5.8mで採取）の高さから採取され、エアロゾルや水蒸気が取り除かれた後、1時間に各高度2回ずつ、非分散型赤外CO<sub>2</sub>分析計（NDIR）に導入され、濃度が測定された。なお、上記4高度中、2高度が林冠上、2高度が林内である。また月1回2-3時間の間隔で丸1日程度、ステンレス製フラスコを用いて大気採取を行った。さらに高頻度の同位体比測定を目的として、大気試料自動採取装置を設置して約10日毎に大気試料の採取を行った。また、月1回クロードチャンバーを用いて地表面から大気へ放出されるCO<sub>2</sub>のフラックスおよびその同位体比測定用試料の採取を約5～10分間隔で5回行った。大気試料については、実験室において、NDIRによりCO<sub>2</sub>濃度が、ガスクロマトグラフィーにより他の温室効果気体成分濃度が測定された後、昇華点の違いを利用した精製装置を用いて試料からCO<sub>2</sub>の抽出が行われた。土壌空気試料について

は、凝縮気化法（マンOMETリック法）によりCO<sub>2</sub>濃度が決定され、同時にCO<sub>2</sub>の抽出が行われた。地表から大気へ放出されるCO<sub>2</sub>のフラックスは、CO<sub>2</sub>の時間あたりの濃度増加率から計算された。精製装置により抽出されたCO<sub>2</sub>試料は、質量分析計による同位体比分析に供された。さらに2002年10月よりCO<sub>2</sub>の酸素同位体比の変動要因を明らかにするために、一降水毎の降水の採取および月1回現地訪問時に大気中水蒸気の採取を開始した。

### ③結果・考察

#### ア. 落葉広葉樹林における大気中CO<sub>2</sub>濃度の変動

これまでに得られた大気中CO<sub>2</sub>濃度データを解析し、林内及び森林直上における季節毎の平均的な鉛直分布の日内変化を調べた。図1に3時間毎のCO<sub>2</sub>濃度の鉛直分布を示す。図では、各プロファイル毎に27mにおける濃度を1ppmずつシフトさせ、27mの濃度からの偏差で分布が示されている。1月は、生物活動が非常に弱いことを反映して、一日中鉛直方向に濃度がほぼ一様であることが分かる。わずかに地上付近で濃度が高くなっているが、積雪期にもわずかに積雪を通して土壌からのCO<sub>2</sub>放出があることを反映していると考えられる。4月も1月と似た変化を示しているが、日中地上付近でわずかに濃度が減少している。4月は、樹木の展葉は始まっておらず、樹木による光合成によるCO<sub>2</sub>吸収の影響とは考えにくい。一方、この時期には地表の雪は融け、樹木による遮光が少なく、林床部のササの光合成が活発化していると考えられ、地上付近の濃度減少はこれを反映しているものと推察される。ちなみに落葉後、積雪前の11月にも同様の鉛直分布の日内変動が見られたが、落葉に伴う地上付近の日射の入射量の増加によるササのCO<sub>2</sub>吸収が寄与していると考え

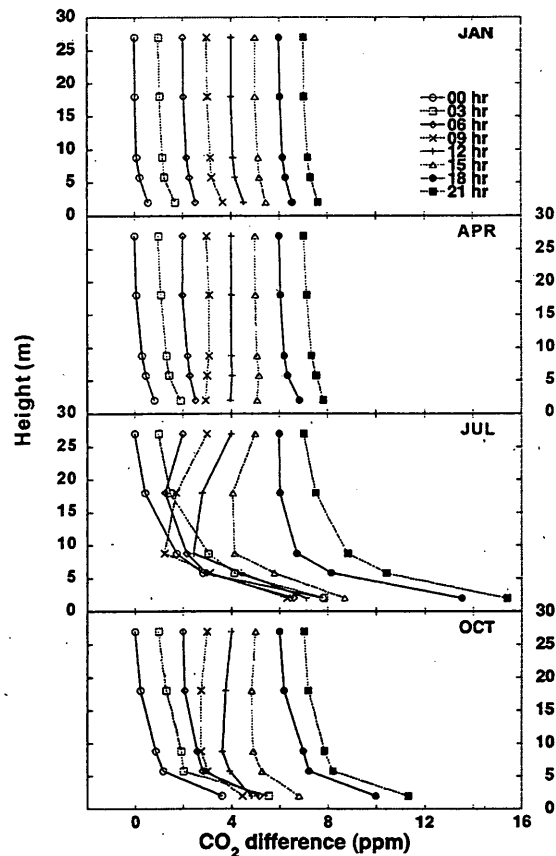


図1. 各月の平均的なCO<sub>2</sub>濃度の鉛直分布の日内変動。

られる。7月には日中、樹木の光合成が活発化し、林内中層において顕著な濃度減少が見られる。一方、地上付近では地温の上昇に伴う、土壌呼吸・分解の活発化を反映して、昼夜を通して高濃度を示しており、特に夜間は大気の安定化により、上層と比べて著しい高濃度を示している。10月も7月と同様の変化を示しているが、気温・地温の低下に伴う生物活動の不活発化を反映して、鉛直濃度差は小さくなっている。なお、当観測地におけるCO<sub>2</sub>濃度の日内変動の振幅は、他の森林における観測結果よりも小さかった。これは観測サイトの植生や気候の違いを反映していると考えられるが、それ以外に当観測地においては、夜間に下降流により上層から低濃度大気が流入し、夜間の濃度上昇が抑えられることも寄与していると推察された。

図2に27mの高さで測定されたCO<sub>2</sub>濃度の日平均値（全日平均）の時間変動を示す。図中のベストフィットカーブおよび経年増加成分はNakazawa et al. (1997)<sup>2)</sup>の手法による。データにバラツキが見られ、特に夏季にバラツキが大きくなっているものの、生物活動の季節変動を反映した顕著なCO<sub>2</sub>濃度の季節変動が見て取れる。季節変動の最高値、最低値はそれぞれ4月および8月中旬から9月中旬に現れ、ベストフィットカーブから求めた平均的な季節変動の振幅は約9ppmであった。年々の季節変動を比較してみると、春季の気温が低く融雪時期が遅かった1996年は、CO<sub>2</sub>濃度の減少開始時期が遅く、季節変化が経年増加成分を横切る（ゼロクロッシング）時期も遅かった。一方、春季の気温が高く融雪時期の早かった1998年は、濃度減少開始時期及びゼロクロッシングの出現期が早かった。同様の現象は、北半球のバックグラウンドステーションのPoint Barrow（アラスカ）やAlert（カナダ）でも観測されており、北半球中高緯度全体の平均的な春季の気温も、両年において同様な変化を示していた。観測サイトで観測されたこのような年々変動が、ローカルな大気-森林生態系間の炭素収支の年々変化によるものなのか、半球規模の変化の影響を受けているのか、今後、詳細な検討が必要である。この期間の平均的な年増加率は、約1.8ppm yr<sup>-1</sup>であり、バックグラウンドステーションにおける年増加率と同程度の値を示した。また、エルニーニョ現象と関連して全球規模でCO<sub>2</sub>濃度増加率が増大した1998年には、当サイトにおいても増加率の増大が見られた。

図3に日中および全日データから求めた日平均値に対するベストフィットカーブを示す。また図中には、平均的な37° N付近の洋上大気(MBL)のCO<sub>2</sub>濃度データに対するベストフィットカーブも示されている。日中および全日データを比較すると、冬季の値は両者でほぼ一致しているが、夏季には日中のデータの方が低い値を示す。これは、境界層の高さや植物活動の日内変動を反映したもので、全日データが日中データと比較して、夜間の低い高さを持った境界層に放出された生物呼吸によるCO<sub>2</sub>の影響を強く受けているためである。その結果、平均的な季節変動の振幅は、日中データが全日データに比べて約6ppm大きくなっている。また、平均濃度について比べてみると、全日データは日中データより約2.8ppm高かった。春先の濃度減少の開始時期は、日中データが全日データと比べて2週間程度早くなっているが、この時期に活発化する日中のササによる光合成を反映したものと推察される。MBLのデータと比較すると、冬季の濃度は高山サイトの方が約3ppm高くなっているが、植物の成長期には1996年を除き、日中データがわずかに低く、全日データは高くなっている。日中データと比べると、最高濃度の出現期は、MBLで約1ヶ月遅くなっており、季節変動の振幅は約5ppm小さい。これらの現象は、高山サイトではMBLに比べて、非常に強く陸上生物活動の影響を受けているためと考えられる。1994-1997年の期間の平均濃度を比較すると、全日データはMBLと比べて2.5ppm高いが、日中データはMBLとほぼ等しかった。

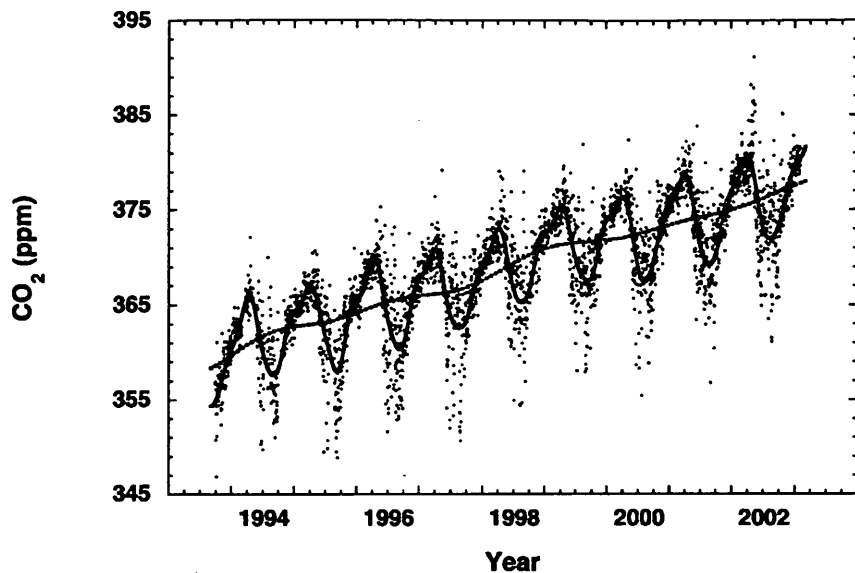


図2. 高さ27mにおいて測定されたCO<sub>2</sub>濃度の日平均値（全日平均）の時間変動（点）とそれに対するベストフィットカーブ（実線）および経年増加成分（破線）。

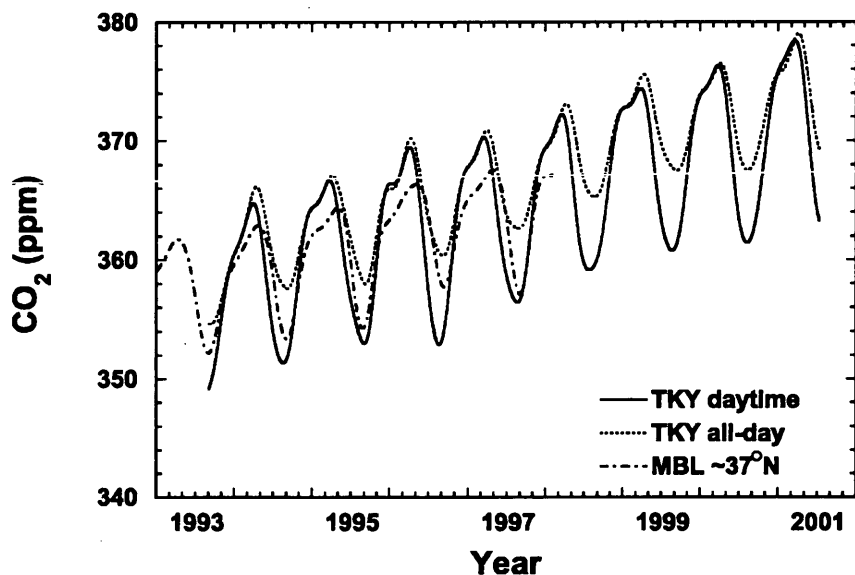


図3. 高さ27mにおける日中（11-17時：実線）および全日（点線）のデータから求められた日平均CO<sub>2</sub>濃度値および全球バックグラウンド観測から求められた平均的な37° N付近の洋上大気のCO<sub>2</sub>濃度データ（一点鎖線）に対するベストフィットカーブ。

図4に27mにおける全日日平均濃度の図2に示したフィッティングカーブからの偏差を示す。図から、春から夏の成長期に偏差が大きく、変動も大きくなっているのが分かる。このような変動は、境界層の高さの変動と生物起源のCO<sub>2</sub>の放出・吸収の相互関係が関係していると考えられるが、境界層の高さの変動は主として1日スケールの変動なので、10日以上スケールでは、生物起源のCO<sub>2</sub>放出・吸収源が寄与していると考えられる。そこで、図4に示された偏差の10日間の標準偏差と、生物起源のCO<sub>2</sub>放出・吸収を表す指標との比較を行った。図5に高山サイトにおける渦相関法による

フラックス観測から得られた正味の大気-森林間の夜間のCO<sub>2</sub>交換量 (NEE)の10日間平均値と全日平均濃度のベストフィットカーブからの10日毎の標準偏差との相関を示す。ここでは、積雪のない期間のデータのみがプロットされており、また夜間のNEEについては、キャノピー内におけるCO<sub>2</sub>貯留の影響が少ないと考えられる摩擦速度( $u^*$ )が $0.2\text{ m s}^{-1}$ 以上の条件を満たすデータのみを使って10日間平均値が求められている。この図から、両者の間に正の相関がみられ、その相関は、95%以上の信頼度で統計的に有意なものだった。一方、上記CO<sub>2</sub>濃度の標準偏差と日中のNEEの10日間平均値との関係や光合成の活発度の指標になると考えられる日射量の10日平均値との相関を調べたが、有意な相関は見られなかった。以上から、10日間以上の時間スケールにおいて、CO<sub>2</sub>濃度の変動は夜間のNEEすなわち生態系呼吸の影響を強く受けていることが推察される。

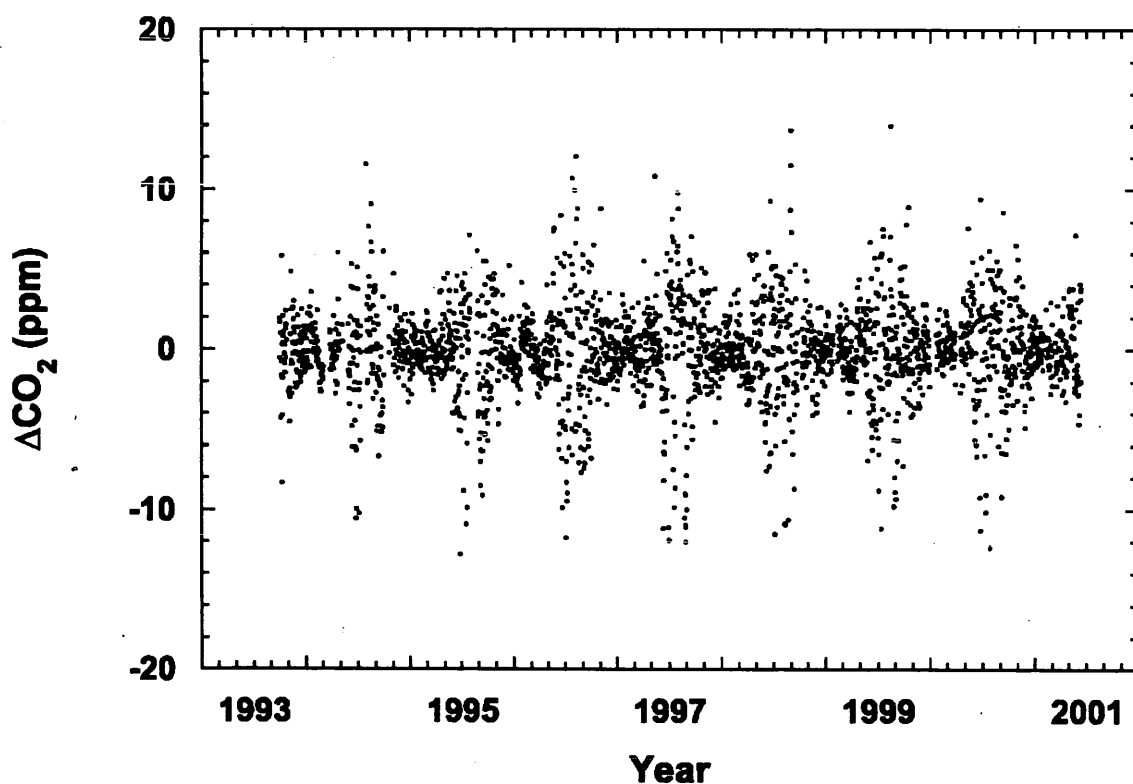


図4. 27mにおける全日平均CO<sub>2</sub>濃度の図2に示したフィッティングカーブからの偏差。



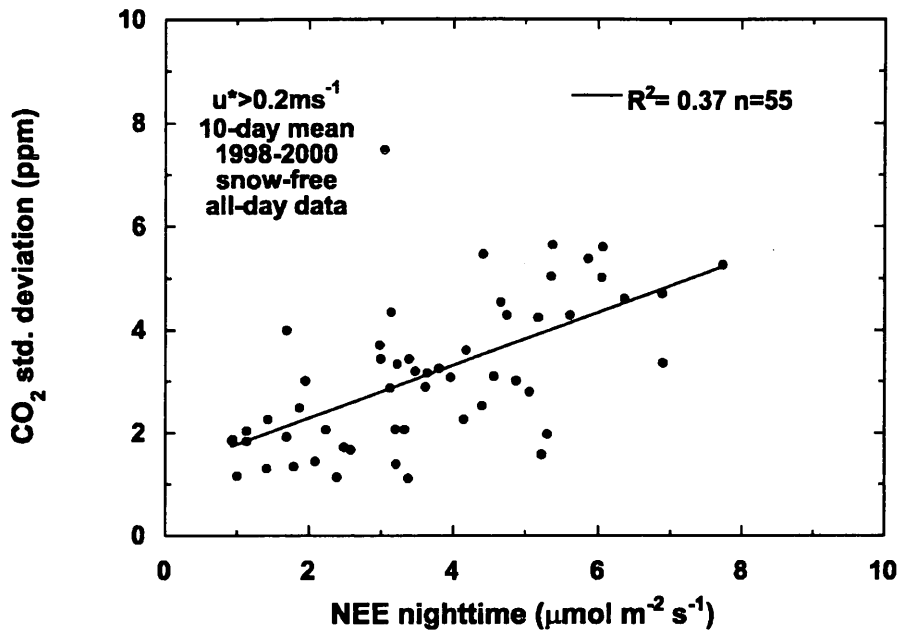


図5. 27mにおける全日平均CO<sub>2</sub>濃度のベストフィットカーブからの10日間の標準偏差と夜間のNEEの10日平均値との関係。無積雪期のデータのみがプロットされている。夜間のNEEは、 $u^* > 0.2 \text{ m s}^{-1}$ の条件を満たすデータのみを用いて平均している。

#### イ. 生態系呼吸速度の季節変動

上記解析で生態系呼吸が、10日間以上のスケールでCO<sub>2</sub>濃度変動に対して強い影響を及ぼしており、成長期にその影響が増大することを明らかにした。ここでは、更に生態系呼吸の変動要因について調べるために、クローズドチャンバー法により、これまでに得られた土壌呼吸フラックスのデータを解析し、地温との関係を調べ、同様に渦相関法による夜間のNEEの見積もりと比較を行った。図6に土壌呼吸フラックスおよび夜間のNEE（10日間平均）と地中10cmの地温（土壌呼吸については測定時、夜間のNEEについては10日間平均）との相関を、春から夏、夏から秋に分けてプロットしたものを示す。いずれのフラックスも地温の指数関数として表現される。しかし、地温の高い領域では、フラックスと地温との相関が悪くバラツキが大きくなっている。土壌呼吸フラックスと地温との相関関係には、季節間の有意な違いは見られないが、夜間のNEEと地温間では、春から夏にかけての方が夏から秋にかけてよりも同じ地温でもフラックスが大きくなっている。このように夜間のNEEは、春から夏にかけては夏から秋にかけてよりも地温依存性が強く、夏季の高温時には地温との相関が明瞭でなくなるといった地温との相関の季節依存性を示した。さらに夏季について詳しく調べてみると、7~9月にかけてほぼ同じ地温でも、季節の経過に伴い、NEEが減少していく傾向が見られた。この結果、春から夏の地温の高い領域で夜間のNEEの土壌呼吸以外の呼吸すなわち地上部の呼吸の占める割合が大きくなっていることが示唆された。これは、成長が盛んで光合成が活発な春から夏にかけての方が夏から秋にかけてよりも地上部の呼吸活動が活発になることを反映しているものと推察されるが、今後詳細な検討が必要である。

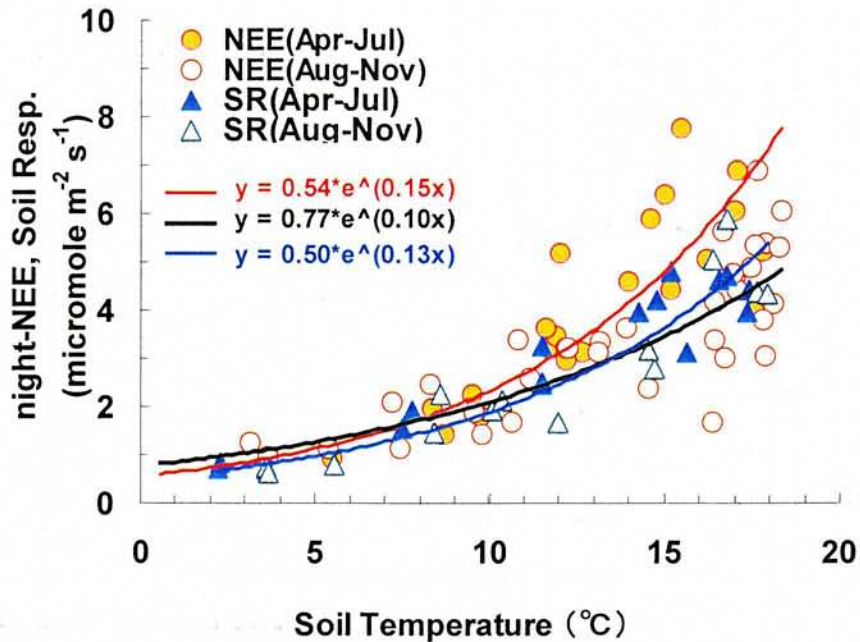


図6. 土壌呼吸フラックス (SR) および夜間のNEEと地中10cmの地温との相関。SRと地温の相関はそれぞれ測定時の値を用い、NEEと地温の相関はそれぞれ10日平均値を用いている。図には、無積雪期間のデータのみが示されており、4月-7月、8月-11月の期間で区別してプロットされている。夜間のNEEについては、4月-7月（赤線）、8月-11月（黒線）で統計的に有意な違いが見られたので近似式は区別して示されているが、SRについては期間別で有意な相関の違いが見られなかったため、4月-11月について1つの近似式（青線）で示されている。

#### ウ. 大気中CO<sub>2</sub>の炭素・酸素安定同位体比の時間変動

林冠直上18mで採取された大気試料について、大気中CO<sub>2</sub>濃度とその炭素( $\delta^{13}\text{C}$ )および酸素( $\delta^{18}\text{O}$ )同位体比の日内変動を調べたところ、夏季の変動の大きいときにそれぞれ明瞭な負の相関を示した。これは、CO<sub>2</sub>濃度と $\delta^{13}\text{C}$ の関係においては、日中光合成により植物が大気中CO<sub>2</sub>を取り込む際に、同位体分別効果が生じて、優先的に<sup>13</sup>Cを含んだCO<sub>2</sub>より<sup>12</sup>Cを取り込みやすいため、大気中のCO<sub>2</sub>濃度は減少し $\delta^{13}\text{C}$ は高くなるが、夜間、光合成活動が無くなり、呼吸・分解により大気中にCO<sub>2</sub>が放出される際には、植物や有機物の低い $\delta^{13}\text{C}$ を持ったCO<sub>2</sub>が放出されるため大気中のCO<sub>2</sub>濃度は上昇し $\delta^{13}\text{C}$ は減少することに起因する。実際、CO<sub>2</sub>濃度変化に対する $\delta^{13}\text{C}$ の変化の比は、約-0.05‰/ppmとなり、従来報告されている大気-C3植物間の交換過程の値<sup>3)</sup>と同程度であった。 $\delta^{18}\text{O}$ については、日中光合成が盛んなときに、気孔内の葉水の $\delta^{18}\text{O}$ は蒸散に伴う同位体分別により高くなっており、気孔内に取り込まれたCO<sub>2</sub>は葉水の酸素原子との間で酵素の働きにより速やかに交換が起こり、そのうち半分以上のCO<sub>2</sub>が植物体内に吸収されず大気中に戻るため、大気中CO<sub>2</sub>の $\delta^{18}\text{O}$ は上昇する。一方、呼吸活動においては、 $\delta^{18}\text{O}$ 値が低い土壌水とほぼ平衡な同位体比を持ったCO<sub>2</sub>が大気中に放出されるため、大気中のCO<sub>2</sub>濃度上昇に伴い、 $\delta^{18}\text{O}$ は減少すると考えられる。冬季は、それぞれの振幅が小さくなり、そのため相関がやや悪くなった。また、 $\delta^{13}\text{C}$ と比較して $\delta^{18}\text{O}$ とCO<sub>2</sub>濃度の相関はやや悪か

ったが、CO<sub>2</sub>のδ<sup>18</sup>Oの変動には、土壌水・降水・水蒸気のδ<sup>18</sup>Oや気孔コンダクタンスの変動等の様々な要因が関係しているためと考えられる。同様にCO<sub>2</sub>濃度とδ<sup>13</sup>Cおよびδ<sup>18</sup>Oの季節変動の相関も調べた。図7にその結果を示す。図中には、経年変化成分を除去した季節変動成分のみをプロットしている。図より濃度とδ<sup>13</sup>C間においては、季節変動成分についても明瞭な負の相関が見られ、日内変動と同様、約-0.05‰/ppmvで変化した。一方、濃度とδ<sup>18</sup>O間においては、弱い正の相関が見られるが、明瞭な相関ではない。これは、上記したようにδ<sup>18</sup>Oの変動には様々な要因が関係しているためと考えられ、CO<sub>2</sub>濃度変動とδ<sup>18</sup>Oの変動要因とが異なる位相で季節変動しているためと推察される。大気中CO<sub>2</sub>のδ<sup>18</sup>Oの変動要因を調べるために、大気中水蒸気と土壌水のδ<sup>18</sup>Oと密接な関係がある降水のδ<sup>18</sup>Oの測定を開始した。図8にその結果を示す。まだ観測期間が短いが、データを蓄積して、δ<sup>18</sup>Oを用いた当サイトにおける炭素循環の定量化に利用する予定である。

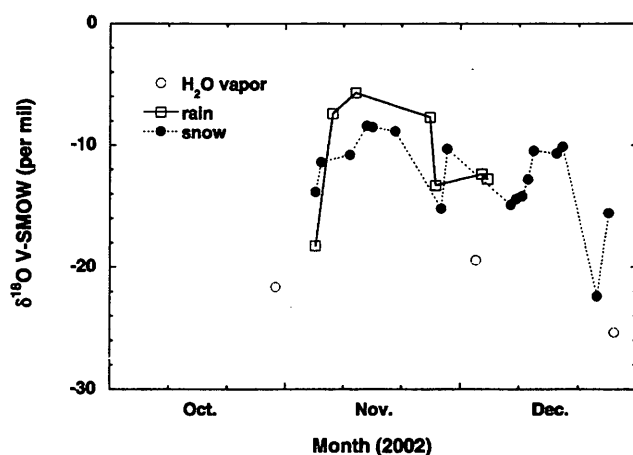
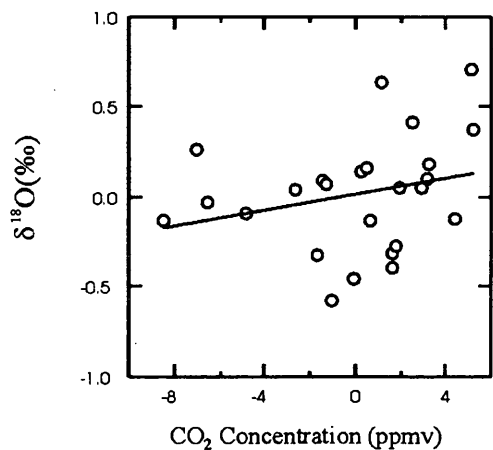
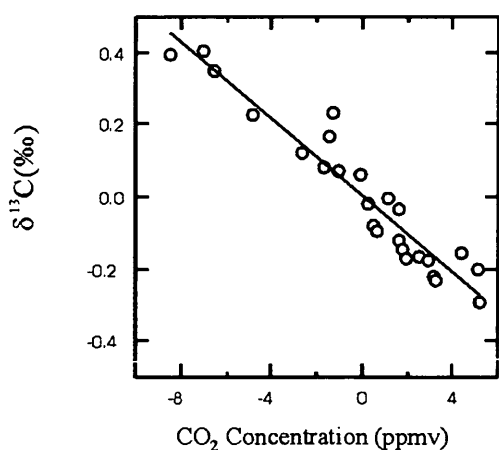


図8. 降水（雨および雪）および水蒸気の酸素同位体比の変動。

図7. 18mにおいて観測されたCO<sub>2</sub>濃度およびその同位体比の季節変化成分の相関。

#### ④本研究により得られた成果

落葉広葉樹林におけるCO<sub>2</sub>濃度の長期連続観測から様々な時間スケールの森林大気の濃度変動の特徴が明らかになった。春の濃度減少開始時期の年々の違いには、春季の気温や融雪時期との関連性が見られた。10日間以上の時間スケールの濃度変動の標準偏差の変動と夜間のNEEとの間には、統計的に有意な正の相関が見られ、この濃度変動には森林生態系の呼吸活動が寄与していることが示唆された。CO<sub>2</sub>濃度の鉛直分布の日内変化およびその季節変化の解析、土壌呼吸フラックスと夜間のNEEの比較から、樹木、林床、土壌の生物活動の生態系内炭素循環への寄与の季節変化を定性的に明らかにすることができた。また、当森林における夜間のNEEと地温との相関には、季節依存性があり、少なくとも当森林の炭素循環の詳細な解析を行うためには、夜間のNEEや生態系呼吸速度を従来広く行われているように年間を通して1つの温度の指数関数を用いて表現するのでは、不十分であることが示唆された。暖候期、大気中CO<sub>2</sub>濃度とCO<sub>2</sub>の $\delta^{13}\text{C}$ および $\delta^{18}\text{O}$ の日内変動間には、それぞれ生物活動の日内変動を反映した明瞭な負の相関が見られた。大気中CO<sub>2</sub>濃度とCO<sub>2</sub>の $\delta^{13}\text{C}$ の季節変動間にも生物活動の季節変動を反映した明瞭な負の相関が見られたが、CO<sub>2</sub>濃度と $\delta^{18}\text{O}$ には、明瞭な相関が見られなかった。これは、 $\delta^{18}\text{O}$ の季節変動には位相が異なる様々な要因が関連していることを示唆している。今後は、さらに同位体比観測を進め、今回得られた結果と比較して、各素過程の定量化を図り、フラックスデータとの比較検証を行うとともに、同位体を含めた森林生態系モデルの構築を図りたい。

#### ⑤引用文献

- 1) IPCC (2001) Climate Change 2001: The Scientific Basis, 881pp.
- 2) T. Nakazawa, M. Ishizawa, K. Higuchi and N. B. A. Trivett (1997) Two curve fitting methods applied to CO<sub>2</sub> flask data. *Environmetrics*, 8, 187-218.
- 3) T. Nakazawa, S. Morimoto, S. Aoki and M. Tanaka (1993) Time and space variations of the carbon isotopic ratio of tropospheric carbon dioxide over Japan. *Tellus* 45B, 258-274.

#### ⑥国際共同研究等の状況

国際共同研究計画名:BERMS (Boreal Ecosystem Research Monitoring Sites)におけるフラックスおよび同位体観測

カナダMeteorological Service of Canada (MSC)のK. Higuchi氏およびA. Barr氏等と共同でBERMSプロジェクトのサイトの一つであるカナダサスカチュワン州幼齢Jack Pineにおいてフラックスおよび同位体の共同観測を実施している。同地での観測結果は、BERMSプロジェクトの異なる樹種や樹齢を持った他の森林サイトの結果と比較されるとともに、本研究による冷温帯落葉広葉樹林の結果とも比較される。また、MSCの研究者等によって開発中の同位体を含んだ生態系モデルによるシミュレーション結果と本研究による観測結果を比較してモデルの改良を図り、同モデルを用いた森林生態系における炭素循環の素過程の定量化を予定している。

### (2) カラマツ林生態系における大気二酸化炭素安定同位体比と土壌呼吸速度の変動要因の解明 (国環研)

#### ①研究目的

大気二酸化炭素(CO<sub>2</sub>)の炭素安定同位体比( $\delta^{13}\text{C}$ )はこれまで、海洋と陸域生態系の正味のCO<sub>2</sub>吸収源としての寄与率を評価するための有効な手段として用いられてきた。このアプローチによる

推定は大気と陸域生態系間のCO<sub>2</sub>交換において生じる同位体分別効果に大きく左右される。従来  
の手法においては、陸上生態系の同位体分別効果を一つの値で代表させているが、植物生理学的  
にこの値は大きな変動幅をもっていることが予想されている。全球規模の炭素循環研究の進展の  
ために、陸域生態系の同位体分別効果の時間的空間的変動性についての研究は不可欠である。

また、安定同位体は生態系内の物質の循環を推測するために有効なツールとして利用されてき  
ている。近年の研究では、生態系内のCO<sub>2</sub>の同位体比の観測から呼吸・光合成フラックスを分割す  
る試みなども提唱されている。しかしながら、現在のところ生態系スケールでの同位体の分配・  
輸送プロセスには未解明な部分も多く、同位体の持つ情報を生態系内での物質循環の解明に活用  
するための基礎的な研究の進展が望まれている。

本研究では、森林内において、生態系と大気とのCO<sub>2</sub>交換における同位体分別の大きさを評価す  
るため生態系呼吸起源のCO<sub>2</sub>の安定同位体比を観測データから計算し、その時間的変動性と環境要  
因の変動との関連を明らかにする。土壌呼吸成分、特に微生物呼吸により放出されるCO<sub>2</sub>の同位体  
比の季節的な変動を観測し、リターの集積・分解に伴う季節性との関連を明らかにする。また、  
土壌や植物体の有機物の同位体比を測定し、生態系内で呼吸により放出されるCO<sub>2</sub>との関連を明ら  
かにする。

## ②研究方法

試料採取の効率化を目的として、大気試料を自動的に採取する装置を作成した(図9)。装置全  
体はパーソナルコンピュータを用いて制御され、あらかじめ設定されたスケジュールにしたがっ  
て、無人で大気試料を採取した。この装置では、高精度の分析を目的として試料採取後の試料大  
気中の成分組成および同位体組成の変化を最小限に抑えるために、試料採取時に装置およびボト  
ル内部を大気圧+0.7気圧程度の加圧状態に保ちながら各試料1つにつきおよそ20分間、試料大  
気をボトル内に流した後、両端のコックを同時に閉じることでボトル内に試料を密封した。この  
操作により、試料採取時から分析開始時まで、試料大気とガラス壁面が吸脱着に関して平衡  
に近い状態に保たれるため、試料の成分組成の保存性が高まることが予備的な実験により確認さ  
れている。また、試料ボトル内の水分との同位体交換によるCO<sub>2</sub>の酸素同位体比( $\delta^{18}\text{O}$ )測定への  
影響を除くため、エアコンプレッサ上流に電気冷却器(-40度)を用いたガラス製の除湿トラップ  
を設置し、試料大気内の水蒸気を取り除いた。コンプレッサの上流で水蒸気を除去することで、  
コンプレッサ内部での空気の圧縮により結露が生じることによる試料大気の組成への影響を避け  
ることが出来る。2000年7月にこの装置を北海道のカラマツ林内に設置し、CO<sub>2</sub>の濃度とその安定  
同位体比の日変動を観測する目的で、植物の活動期には月に2回程度、非活動期には1~2ヶ月に1  
度の頻度で、2~3時間おきに主に森林内の地上6mの高度から大気を採取した。

次に、土壌から大気に放出されるCO<sub>2</sub>の同位体比を推定するため、大型の自動土壌呼吸測定チャ  
ンバーシステム(内容積400L)を利用して空気試料を採取する装置を作成した(図10)。この装  
置はチャンバー内の気圧の変化による影響を極力排除するために、サンプリング装置の下流に排  
出される試料空気をチャンバーに還流する構造にするとともに、各ボトルと平行にバイパスバル  
ブを設けることによりサンプリング装置の上流側と下流側に常に一定の流量で定常的に空気が流  
れるようにした。根呼吸の影響を取り除くため物理的障壁により根を排除したチャンバーと通常  
のチャンバーの2種類にこの装置を接続し、2002年の7月からおよそ月に一度の頻度で観測を開始  
した。

採取した空気試料について、国立環境研究所の実験室で非分散赤外吸収スペクトル法を用いた分析計 (Li-COR社 LI-6262) を用いてCO<sub>2</sub>濃度を決定したあと、ガラス製の真空装置を用いてCO<sub>2</sub>を抽出・精製し、同位体質量分析計 (Thermo-Finnigan社 Delta-PLUS) にVariable Volume-Dual Inletを用いて導入し、同位体比を決定した。

本研究中で二酸化炭素中の炭素および酸素の安定同位体比の尺度として用いたδ値は質量数の異なる分子の存在比を用いて以下のように定義され、千分率 (‰) で示した。

$$\delta^{13}\text{C} \equiv \left\{ \frac{(^{13}\text{C}/^{12}\text{C})_{\text{Sample}}}{(^{13}\text{C}/^{12}\text{C})_{\text{Standard}}} - 1 \right\} \times 1000 \quad (1)$$

$$\delta^{18}\text{O} \equiv \left\{ \frac{(^{18}\text{O}/^{16}\text{O})_{\text{Sample}}}{(^{18}\text{O}/^{16}\text{O})_{\text{Standard}}} - 1 \right\} \times 1000 \quad (2)$$

ここで、添え字*Sample*は試料を示し、*Standard*は国際的に認知されている標準試料の値を示す。本研究では、PDBと呼ばれる標準試料を基準としたスケールを用いた。抽出・精製過程を含めた同位体分析の繰り返し精度は炭素安定同位体比(δ<sup>13</sup>C)については0.02‰、酸素安定同位体比(δ<sup>18</sup>O)については0.04‰である。

呼吸起源CO<sub>2</sub>の同位体比については、得られたCO<sub>2</sub>濃度とその安定同位体比の関係から二成分混合モデル<sup>4)</sup>を用いて見積もった。これによれば、光合成の影響の無い夜間の森林内の大気中のCO<sub>2</sub>の濃度とその同位体比の変動は、以下の式により表すことが出来る。

$$\delta_f = \frac{[\text{CO}_2]_b}{[\text{CO}_2]_f} (\delta_a - \delta_r) + \delta_r \quad (3)$$

ここで、添え字*f*は森林内の大気中の値、添え字*a*は森林上空の大気中の値、添え字*r*は呼吸起源の成分、δは同位体比、[CO<sub>2</sub>]はCO<sub>2</sub>濃度を示す。このモデルを用いて、森林内の大気中のCO<sub>2</sub>濃度とその同位体比の変動は森林上空に起源をもつバックグラウンドの成分と生態系の呼吸起源の成分の二つの成分の組成の変化に由来するものと仮定すると、x軸にCO<sub>2</sub>濃度の逆数、y軸に同位体比としてデータをプロットして得られる回帰直線のy切片が呼吸起源成分の同位体比を示すことになる。このプロットはKeeling Plotと呼ばれている。

このような森林内の大気あるいは、土壌から放出されるCO<sub>2</sub>の同位体比の観測と同時に、植物体や土壌の有機物のδ<sup>13</sup>Cを測定する目的で、観測サイト内の複数種の植物の葉を採取するとともに、林内の25ヶ所で表層土壌のサンプリングを行い、その構成成分 (新鮮な根、リター、土壌有機物) 毎にδ<sup>13</sup>Cを測定した。

### ③結果・考察

#### ア. CO<sub>2</sub>濃度とその炭素安定同位体比、酸素安定同位体比の日変動

夏季に観測された森林内大気中のCO<sub>2</sub>濃度とそのδ<sup>13</sup>Cの日変動の例を図11に示した。夏季の森林内でのCO<sub>2</sub>濃度が日中に低下し夜間に上昇するのに対して、δ<sup>13</sup>C及びδ<sup>18</sup>Oは日中に上昇し夜間に低下する様子が観測された。これは、夜間は地表付近に逆転層と呼ばれる層状の安定な大気構造が形成され、その下層に呼吸により放出された大気よりも低い同位体比を持つCO<sub>2</sub>が蓄積することにより生じるためと考えられる。また、日中は光合成活動によるCO<sub>2</sub>の吸収が呼吸による放出に卓越し、

植物体により低い同位体比を持つCO<sub>2</sub>が固定されるので、大気中に残ったCO<sub>2</sub>の同位体比は高くなる。日中の濃度の低下とその同位体比の上昇は対流による大気の上下混合による希釈の効果も大きく関与している。一方、呼吸においては光合成により生態系内に移行した同位体比の低い炭素がほぼそのままの組成で放出されるため、そのCO<sub>2</sub>の同位体比は大気よりも低い。

#### イ. CO<sub>2</sub>濃度とその炭素安定同位体比、酸素安定同位体比の間の相関

森林内で観測されたCO<sub>2</sub>濃度と同位体比の日変化を図12に示した。CO<sub>2</sub>の $\delta^{13}\text{C}$ については観測期間を通じて、CO<sub>2</sub>濃度との間に明瞭な逆相関が存在し、相関図の上での勾配や切片はほぼ一定である。一方、CO<sub>2</sub>の $\delta^{18}\text{O}$ については、CO<sub>2</sub>濃度との間に逆相関が観察されることが多いが、相関図の上での勾配や切片は時期によって大きく異なる。また、CO<sub>2</sub>濃度と $\delta^{13}\text{C}$ の相関が昼夜を通してほぼ共通な関係を持っているのに対して、CO<sub>2</sub>濃度と $\delta^{18}\text{O}$ の関係は昼と夜で異なる場合が多い。 $\delta^{13}\text{C}$ は主に大気と植物体炭素の二つのリザーバー間での気体交換によって変動しているのに対して、CO<sub>2</sub>の $\delta^{18}\text{O}$ は大気-生態系間の気体交換だけでなく、植物体や土壌内で水と同位体交換を起こすことにより変動することが分かっている。植物体内の葉に近い部分の水の同位体比は日中の蒸散によって時間的に大きく変動し、植物から放出されるCO<sub>2</sub>の $\delta^{18}\text{O}$ にも反映される。このことが、CO<sub>2</sub>濃度とその $\delta^{18}\text{O}$ の関係が夜間と日中で異なること的主要原因であると推測される。

#### ウ. 生態系の呼吸起源CO<sub>2</sub>の安定同位体比の変動

観測されたCO<sub>2</sub>濃度とその安定同位体比の日変動から上述したKeeling Plotを作成し(図13)、生態系の呼吸起源CO<sub>2</sub>の安定同位体比を推定した。推定値の誤差の大きさは主に測定精度と変動幅に左右される。植物の光合成・呼吸活動が盛んな時期にはCO<sub>2</sub>濃度と安定同位体比の日変動が大きいため良い精度で推定が可能であったのに比べ、光合成・呼吸活動の弱い秋から春にかけては、日変動の幅も小さく推定の誤差は大きくなった。また、この季節には落葉によりキャノピーの遮蔽効果が小さくなることに加え風速も大きいので、林内のCO<sub>2</sub>の濃度変動に対する呼吸起源CO<sub>2</sub>の寄与は著しく小さくなり、Keeling Plotから生態系呼吸起源CO<sub>2</sub>の $\delta^{13}\text{C}$ を精度良く推定することは困難であった。したがって、ここでは生態系呼吸起源CO<sub>2</sub>の $\delta^{13}\text{C}$ については植物の光合成・呼吸活動が盛んな6~9月の時期に注目して解析を行うこととした。Keeling Plotにより推定した生態系呼吸起源CO<sub>2</sub>の炭素安定同位体比( $\delta^{13}\text{C}_r$ )の時間変動を観測年毎に図14に示した。

光合成・呼吸活動の盛んな6月~9月までの期間に注目すると、以下のような特徴があることが分かった。

- この生態系において夏季に観測された $\delta^{13}\text{C}_r$ は2‰以上の幅を持って有意な時間的変動性を持っている。
- この時間的変動はかなり不規則なものである。
- 6~9月の $\delta^{13}\text{C}_r$ の平均値は $-28.0 \pm 0.1_{\text{SEM}} \text{‰PDB}(n=19)$ であり、これは北米などで観測された値に比べて有意に低い。
- 2000年の $\delta^{13}\text{C}_r$ の平均値は $-27.6 \pm 0.2_{\text{SEM}} \text{‰PDB}(n=5)$ であり、2001年 ( $-28.0 \pm 0.2_{\text{SEM}} \text{‰PDB}(n=6)$ ) や2002年 ( $-28.1 \pm 0.3_{\text{SEM}} \text{‰PDB}(n=8)$ ) に比べて高い値である。

近年の研究から、生態系が呼吸により放出するCO<sub>2</sub>の大部分は直前に光合成により生態系に移行した炭素を用いたものである可能性が指摘されている(Ekblad and Hogberg, 2001<sup>5)</sup>; Bowling et al.,

2002<sup>6)</sup> 他)。植物が光合成による大気CO<sub>2</sub>の固定を行う際には大きな同位体分別効果を伴うことが知られているが、この同位体分別効果の大きさは植物の気孔の抵抗によるCO<sub>2</sub>交換の制限に強く影響される。単葉レベルでの実験的研究から、光や水分などの環境要因の変動は気孔の開閉度や葉内の酵素による炭素固定速度の変化を通じて、同位体分別効果に迅速に反映されることが分かっている。しかしながら、生態系内部での炭素の循環の時間スケールが数ヶ月あるいはそれ以上の長いものであるならば、こうした光合成の際の炭素安定同位体に対する分別効果の環境要因の変化に対応した迅速な変動は平均化されてしまうことになるので、呼吸により放出されるCO<sub>2</sub>の同位体比の時間的な変動性は乏しくなるはずである。観測された $\delta^{13}\text{C}_r$ の短い時間スケールでの顕著な時間的な変動性は、環境要因の変化による光合成時の同位体分別効果の変動が植物の呼吸により放出されるCO<sub>2</sub>に迅速に反映されたものである可能性が高い。

光合成の際の炭素安定同位体比に対する同位体分別効果は以下のような式で近似的に表現できている<sup>7)</sup>。

$$\Delta = a + (b - a) \frac{C_i}{C_a} \quad (4)$$

ここで、 $\Delta$ は光合成の際の同位体分別効果、 $a$ は気孔を通したCO<sub>2</sub>の拡散に関する分別(4.4‰<sup>7)</sup>)、 $b$ は酵素による炭素固定に関する分別(27‰<sup>8)</sup>)を示す。 $C_i$ は気孔内部のCO<sub>2</sub>濃度、 $C_a$ は気孔外部の大気のCO<sub>2</sub>濃度を表し、その比である $C_i/C_a$ は0から1の間で変化し得る。 $C_i/C_a$ が1に近づけば、 $\Delta$ は $b$ (=27‰)に近づくことになりより大きな値をとり、逆に $C_i/C_a$ が0に近づけば $\Delta$ は $a$ (=4.4‰)に近づくのでより小さな値をとることになる。

$C_i/C_a$ と環境要因への対応に注目すると、水分が十分にある環境では植物は気孔を開き、気孔内外の濃度の差は少なくなるため $C_i/C_a$ はより大きな値をとるため $\Delta$ は大きくなる。逆に、乾燥した環境では植物は水分の損失を防ぐために気孔を閉じるので $C_i/C_a$ はより小さな値をとり $\Delta$ は小さくなる。また、光合成に必要な光が十分にある条件では、気孔内での炭素固定速度が大きくなるため $C_i/C_a$ はより小さくなるので $\Delta$ は小さくなる。逆に、光が不十分ならば気孔内部での炭素固定速度が小さいため $C_i/C_a$ は1に近づくことになり $\Delta$ は大きくなることになる。つまり、湿った日や曇った日には光合成時の同位体分別効果は大きくなり、生態系に取り込まれるCO<sub>2</sub>の $\delta^{13}\text{C}$ はより低くなり、逆に乾燥した日や晴天の日に生態系に取り込まれるCO<sub>2</sub>の $\delta^{13}\text{C}$ はより高くなる。

2000年と2001、2002年の $\delta^{13}\text{C}_r$ の違いと環境要因の関連について調べてみた。最寄の気象観測所の統計によれば2001年および2002年の7~8月は例年に比べて悪天候の日が多く、日照時間が著しく短かったことが分かっている。ここでは、森林内の水分条件の指標としてVPD(Vapor Pressure Deficit; 大気中の水蒸気圧の飽和水蒸気圧に対する不足分)、光条件の指標としてPPFD(Photosynthetic Photon Flux Density; 光合成有効光量子束密度)を用いた。比較の例として2000年8月と2002年8月のVPDとPPFDの時系列を図15に示した。2000年は晴天の日が多く、林内はより乾燥した条件にあったためVPDは大きくなり、日中のPPFDもほとんどの日で飽和点を超えていた。このような環境では、上述した $C_i/C_a$ は小さくなるため $\Delta$ は小さくなっていたはずである。一方、2002年については晴天の日は少なく林内の大気は湿った状態が続いたためVPDは小さく、日中もPPFDが飽和点に達しない日が多くあったことが分かる。こうした環境では、 $C_i/C_a$ は1に近づくため $\Delta$ は相対的に大きくなっていたものと予想される。植物の呼吸のような生態系内で炭素の滞留時間が



短い成分が総呼吸に占める割合が大きい場合、 $\Delta$ が大きな期間には $\delta^{13}\text{C}_r$ は低くなり、 $\Delta$ が小さな期間には $\delta^{13}\text{C}_r$ は高くなるはずである。3年間の $\delta^{13}\text{C}_r$ の間の違いはVPDやPPFDから推測される $\Delta$ の違いに対応しており、このことは生態系内の呼吸に占める植物体の呼吸の割合が大きく、生態系全体の $\delta^{13}\text{C}_r$ が短期的な気候変動を反映して変化している可能性が高いことを示している。

次に、本研究で植物の活動期に観測された $\delta^{13}\text{C}_r$ の平均値 $-28.0\text{‰}$ という値を、同様の観測による他の生態系での観測値と比較してみた。これまで、Keeling Plotを用いた生態系の $\delta^{13}\text{C}_r$ の研究は主に北米の常緑針葉樹林での観測を基づいて行われてきた(Flanagan et al., 1996<sup>9)</sup>; Bowling et al., 2002<sup>6)</sup>など)。本研究で得られた値はこれらのほとんどの観測値に比べ低いものとなっており、その原因の一つとして降水量と降水パターンの影響が考えられる。上述したように水蒸気量が多い環境においては植物の気孔の開度が大きいため光合成時の同位体分別効果が大きくなり、その結果 $\delta^{13}\text{C}_r$ が低くなることになる。今回の観測を行ったアジア東部では、モンスーンの影響により植物の活動期にあたる夏季に多くの降水があるという特徴がある。これまでに観測例のある北米の森林では夏季に降水量が少ない場合が多く(Bowling et al., 2002<sup>6)</sup>など)、降水パターンに関しては対照的となっている。このような違いが、夏季に光合成により生態系に移行する $\delta^{13}\text{C}$ の違いにつながり、結果として $\delta^{13}\text{C}_r$ の違いとして反映されたものと推測できる。

$\delta^{13}\text{C}_r$ の短いタイムスケールでの時間変動について、Bowling et al.(2002)<sup>6)</sup>は北米の常緑針葉樹林での観測に基づいて、光合成の際の同位体分別効果に最も大きな影響を持つパラメータであるVPDとの間のラグ相関解析によりこの変動が数日前の環境要因と強く関係していることを指摘している。本研究で得られた $\delta^{13}\text{C}_r$ のうち6~9月の19のデータを用いて同じ解析を行ってみた。まず、日中(南中時間を中心として日の出と日没までの時間の90%にあたる時間帯と定義した)のVPDの平均値を求め、これを1~3日の間の一定の日数分平均したものを計算し、観測日から1日ずつ遡りながら $\delta^{13}\text{C}_r$ との相関係数を計算した(図16)。その結果、平均化を行った期間(1~3日)に関わらず、 $\delta^{13}\text{C}_r$ は観測日から5~6日前のVPDともっとも強く相関していることが明らかとなった(図17)。この結果は生態系が呼吸により大気に放出する $\text{CO}_2$ の大部分はその数日前に光合成により取り込まれた炭素であるという仮説の妥当性を支持するものといえる。個別の生態系でのラグ相関に用いたデータ数に関しては、本研究はこれまで報告例のあるどのデータセットよりも多く、統計的にも信頼性が高いということが出来る。また、このような光合成と呼吸の間の数日間のタイムラグを伴った迅速なリンケージについては、トレーサー実験などからも同様な結果が得られており、生態系内での炭素循環について解析を行ううえで重要な知見になるものと期待できる。

## エ. 土壌呼吸 $\text{CO}_2$ 成分の炭素安定同位体比

土壌チャンバーを用いて観測された土壌呼吸起源の $\text{CO}_2$ 成分の炭素安定同位体比の結果を図18に示した。この結果から以下のような特徴が得られた。

- 根の除去を行った場所についても $\delta^{13}\text{C}_r$ の有意な時間的変動が見られる。季節が進むにつれ、 $\delta^{13}\text{C}_r$ の値が高くなる傾向が見られる。
- 根の除去を行った場所と行っていない場所から得られた $\delta^{13}\text{C}_r$ の相対的な関係には時間的な変化が見られる。
- チャンバーを用いたサンプリングから得られた土壌呼吸成分の $\delta^{13}\text{C}_r$ は生態系全体の呼吸の $\delta^{13}\text{C}_r$ と異なる。

このうち、最初の特徴については、この $\delta^{13}\text{C}_r$ の変動は微生物が消費する有機物の同位体組成の変化を反映したものである可能性が考えられる。根の除去を行った場所については、植物体の呼吸の影響を無視できるので、ここで観察される呼吸の成分はリターなどの有機物を微生物が消費することにより生じたものであるはずである。この呼吸成分は一般にHeterotrophic Respiration（従属栄養生物による呼吸、 $H_R$ と略される）と呼ばれる。一般に生物が呼吸により有機物を $\text{CO}_2$ にする場合には、同位体分別は起こらないものと考えられている（Lin and Ehleringer, 1997<sup>10</sup>など）。しかしながら、リターに含まれる有機物の内容はリグニン、セルロース等いくつかの異なる成分に分けることが出来、成分の違いにより微生物が消費しやすい（分解速度が速い）ものと消費しにくいもの（分解速度が遅い）が存在する。このため、リターの集積・分解の季節的なサイクルに伴い微生物が消費する有機物の成分構成は変動するはずである。最近の研究から、生態系内の有機物成分毎に同位体比の有意な違いが存在していることが明らかになっている<sup>11</sup>。有機物の $\delta^{13}\text{C}$ が成分によって異なっているならば、リターの集積・分解の季節的なサイクルに伴って、分解される有機物の成分組成が変化し、これに対応した $\delta^{13}\text{C}$ の変化が呼吸により放出される $\text{CO}_2$ 成分（ $H_R$ ）に現れることは十分に考えられる。

二番目に挙げた特徴については、根呼吸成分と微生物呼吸成分の $\delta^{13}\text{C}$ の間に違いがあり、季節的な根呼吸と微生物呼吸のフラックスの寄与率の変化が土壌呼吸全体の $\delta^{13}\text{C}_r$ の変化として現れた可能性がある。根呼吸と微生物呼吸は、それぞれ環境要因（土壌温度、土壌水分など）への応答が異なるので、その土壌呼吸全体に占めるそれぞれの比率は季節的な環境要因の変化に伴い変化するはずである。また、根呼吸と微生物呼吸のそれぞれの成分が異なる時間的な変動性をもっていることも影響していると考えられる。

上記の三番目の特徴については、森林生態系の空間的な不均一性が強く影響しているものと考えている。生態系を構成する有機物成分は植物の光合成活動により固定されたものであるが、上述したように植物の光合成の際の同位体分別の大きさは単葉レベルでの環境の違いに強く影響される。そのため、同じ種の植物であっても個体ごとに光や水の環境が異なれば、植物体内に取り込まれる炭素の同位体比には違いが生じ、これは植物体から呼吸により放出される $\text{CO}_2$ の $\delta^{13}\text{C}$ や、土壌にリターとして供給される有機物の $\delta^{13}\text{C}$ にも反映される。チャンパーを用いたサンプリングのように小さな空間スケールの観察においては、その呼吸の基質として用いられる有機物の空間的な不均一性に強く影響を受けることになる。したがって、少数のチャンパーを用いたサンプリングから得られる値から、絶対値として森林内大気のある程度の空間を平均化した $\delta^{13}\text{C}_r$ を直接的に得ることは困難であると考えられる。

#### オ. 植物および土壌有機物の同位体比

植物および土壌有機物の同位体測定からは以下のような結果が得られた。

- 植物葉の $\delta^{13}\text{C}$ 値は広葉樹類 -31.5‰、カラマツ -29.7‰、オシダ -28.2‰の値を示した。
- 表層土壌の $\delta^{13}\text{C}$ 値は25地点で大きなバラツキがみられた（-29～-27‰）。
- 各地点ごとに値を比べると根、リター、土壌の順に（新鮮な植物体から分解が進むにつれて） $\delta^{13}\text{C}$ 値は高くなった。

植物種による葉の同位体比の違いは、植物の持つ水利用効率などの生理的な特性の違いが光合成時の同位体分別の差として現れたものと考えられるとともに、それぞれの植物種が生育する環

境の違いにより光や水の条件が異なることも影響しているものと考えられる。

表層土壌の有機物の $\delta^{13}\text{C}$ の空間的なばらつきは、上述したようにリターとして土壌に供給される有機物の同位体組成が空間的に非常に不均一であることと、場所による土壌温度や水分含量などの差により生じる有機物の分解速度の違いが影響しているものと考えられる。

各地点ごとに、新鮮な植物体から分解が進むにつれて $\delta^{13}\text{C}$ の値が高くなる傾向は、上述したような有機物の構成成分ごとの同位体比の違いが分解の進行に伴う成分組成の変遷によって有機物全体の同位体比の変化として現れたものと考えられる。このように、分解が進むにつれて有機物の $\delta^{13}\text{C}$ が高くなることは、根の除去を行ったチャンバーにおいて観測された微生物呼吸起源の $\text{CO}_2$ の $\delta^{13}\text{C}$ が季節が進むにつれて高くなる傾向と整合性がある。このような、有機物の分解によって土壌有機物の $\delta^{13}\text{C}$ が高くなることは土壌有機物の $\delta^{13}\text{C}$ の鉛直分布などからも明らかとなっている。

(Ehleringer et al., 2000<sup>12</sup>); Bowling et al., 2002<sup>6</sup>)など)。

#### ④本研究により得られた成果

本研究により、生態系が呼吸により放出する $\text{CO}_2$ の同位体比が有意な時間変動性を持つことが観測から確認された。また、この変動は長期短期の気候的要因の変動に対応したものである可能性が高いことが示され、大気 $\text{CO}_2$ の安定同位体を用いた吸収源の寄与率の推定を行う上で、陸域生態系の同位体分別効果の変動性を適切に考慮することが重要であることが明らかになった。

また、高頻度の観測により呼吸起源 $\text{CO}_2$ の同位体比の時間変動は数日前の水分条件と強く関連していることが明らかとなった。これは、水分条件の違いによる光合成時の同位体分別の大きさの違いが、数日という短いタイムラグで植物の呼吸により放出される炭素安定同位体比に反映されたものだと推測される。このような、光合成で植物に取り込まれる炭素と呼吸により大気に放出される炭素が数日という短いタイムスケールでリンクしているという結果は、北米の常緑針葉樹林などでの同様の呼吸起源 $\text{CO}_2$ の同位体比の観測や最近のトレーサーを用いた実験などからも得られている。この結果は、植物の呼吸に用いられている炭素の植物体内での滞留時間が極めて短いものであることを示唆し、光合成時の環境要因の変動の影響が植物体の呼吸量に迅速に反映される可能性を示している。これは、生態系の呼吸量のパラメータ化を進める上で重要な情報となるものと期待できる。

植物体や土壌の有機物の同位体分析から、森林生態系での有機物の炭素安定同位体比は空間的に極めて不均一であるものの、どの場所においても分解が進むに連れて炭素安定同位体比が高くなるという共通の傾向があることが明らかになった。根の除去を行った土壌チャンバーを用いたサンプリングにおいても、季節が進むに連れてこの場所から放出される微生物呼吸起源の $\text{CO}_2$ の炭素安定同位体比が高くなる傾向が観察されており、この二つの結果は整合性があると言える。カラマツ林のような落葉性の森林においてはリターの集積・分解について明瞭な季節性があり、この季節サイクルは潜在的に呼吸により大気に放出される $\text{CO}_2$ の同位体比の変動に影響している可能性が示されたことになる。これは、大気と森林間の $\text{CO}_2$ 交換における同位体分別効果のモデル化を行う上で重要な知見になるものと期待できる。

#### ⑤引用文献

4) Keeling CD (1958) The concentration and isotopic abundances of atmospheric carbon dioxide in rural

areas. *Geochim. Cosmochim. Acta* 13:322-334

- 5) Ekblad A, Högberg P., 2001. Natural abundance of  $^{13}\text{C}$  in  $\text{CO}_2$  respired from forest soils reveals speed of link between tree photosynthesis and root respiration, *Oecologia* 127:305-308
- 6) Bowling, D.R., N.G. McDowell, B.J. Bond, B.E. Law, and J.R. Ehleringer. 2002.  $^{13}\text{C}$  content of ecosystem respiration is linked to precipitation and vapor pressure deficit. *Oecologia* 131:113-124.
- 7) Farquhar, G.D., Ehleringer, J.R., Hubick, K.T., 1989. Carbon isotope discrimination and photosynthesis. *Annu. Rev. Physiol. Plant Mol. Biol.* 40, 503-537.
- 8) O'Leary, M.H, Reife, J.E. and Slater, J.D., 1981. Kinetic and isotope effect studies of maize phosphoenolpyruvate carboxylase, *Biochemistry*, 20, 7308-7314.
- 9) Flanagan, L.B., J.R. Brooks, G.T. Varney, S.C. Berry, and J.R. Ehleringer. 1996. Carbon isotope discrimination during photosynthesis and the isotope ratio of respired  $\text{CO}_2$  in boreal ecosystems. *Global Biogeochemical Cycles* 10:629-640.
- 10) Lin, G., and J.R. Ehleringer. 1997. Carbon isotopic fractionation does not occur during dark respiration in  $\text{C}_3$  and  $\text{C}_4$  plants. *Plant Physiol.* 114:391-394.
- 11) Gleixner, G., Scrimgeour, C., Schmidt, H.-L., Viola, R., 1998. Stable isotope distribution in the major metabolites of source and sink organs of *Solanum tuberosum* L.: a powerful tool in the study of metabolic partitioning in intact plants. *Planta* 207, 241-245.
- 12) Ehleringer, J.R., Buchmann, N., Flanagan, L.B., 2000. Carbon isotope ratios in belowground carbon cycle processes. *Ecol. Appl.* 10, 412-422.

#### ⑥国際共同研究等の状況

IGBP-GCTEにおいて、Biosphere-Atmosphere Stable Isotope Network (BASIN)という共同研究体が活動を開始した。その重点課題が大気・陸域生態系間の $\text{CO}_2$ 交換における同位体分別効果の空間的・時間的変動の解明であり、本研究の内容と合致している。本研究の結果を平成14年5月にカナダで行われたBASIN国際ワークショップで発表し、関連研究者と解析手法と結果についての情報を交換した。また、将来的なデータベースへのデータの提供・共有についての検討を行っている。現在、本研究と同様の観測が北米を中心に始まっており、全球的な観測網の展開が望まれている。東アジア域の気候的な特徴、北東ユーラシア大陸を代表するカラマツ林という植生上での特徴という二つの点において、本研究は他にない知見を提供し得る。

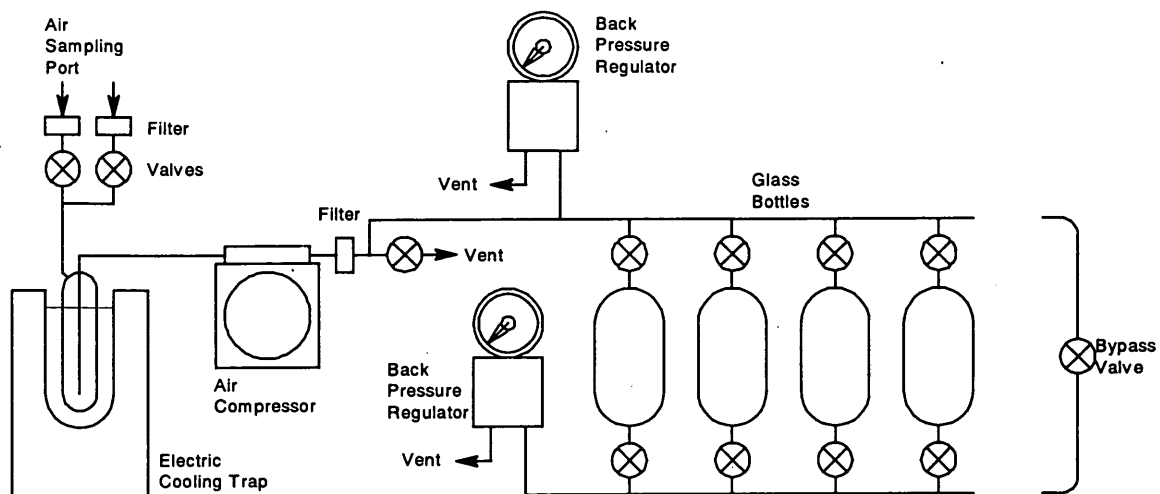


図9 大気試料自動採取装置の概略図

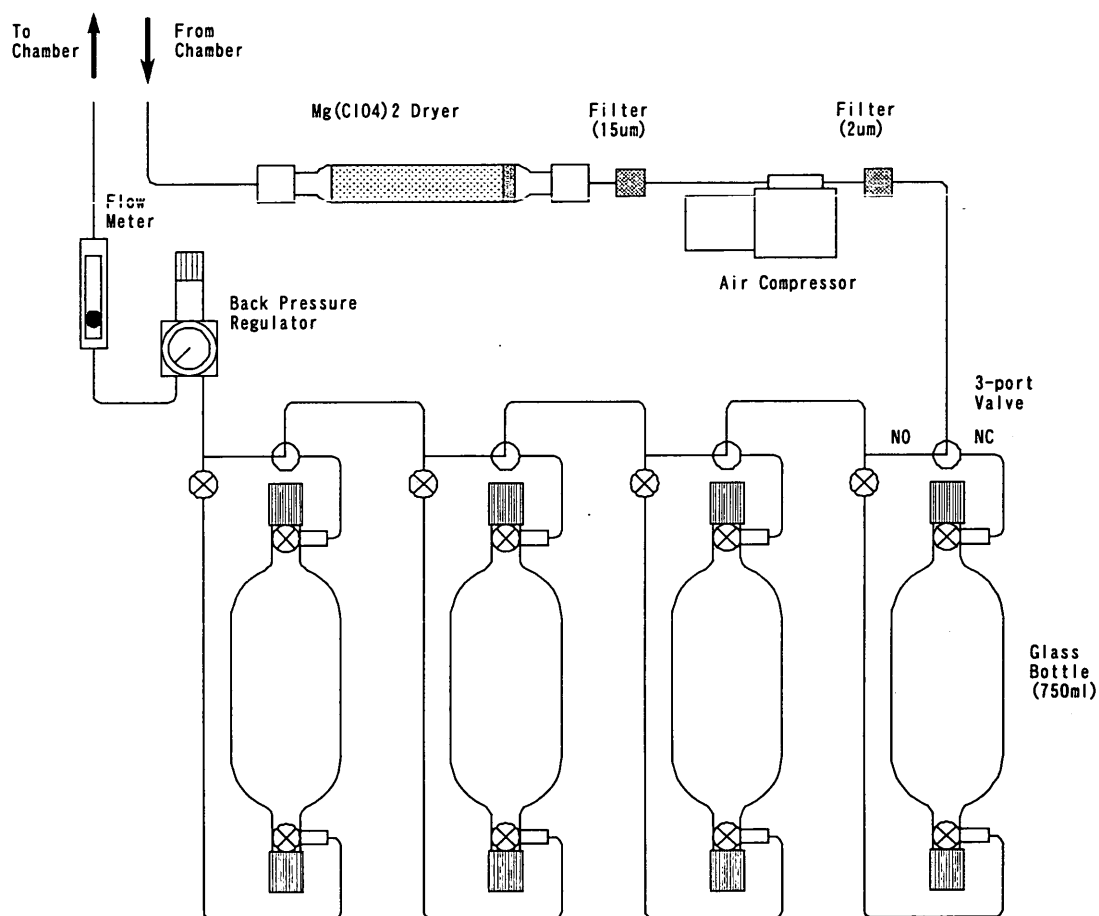


図10 土壌チャンバー用サンプリングシステム

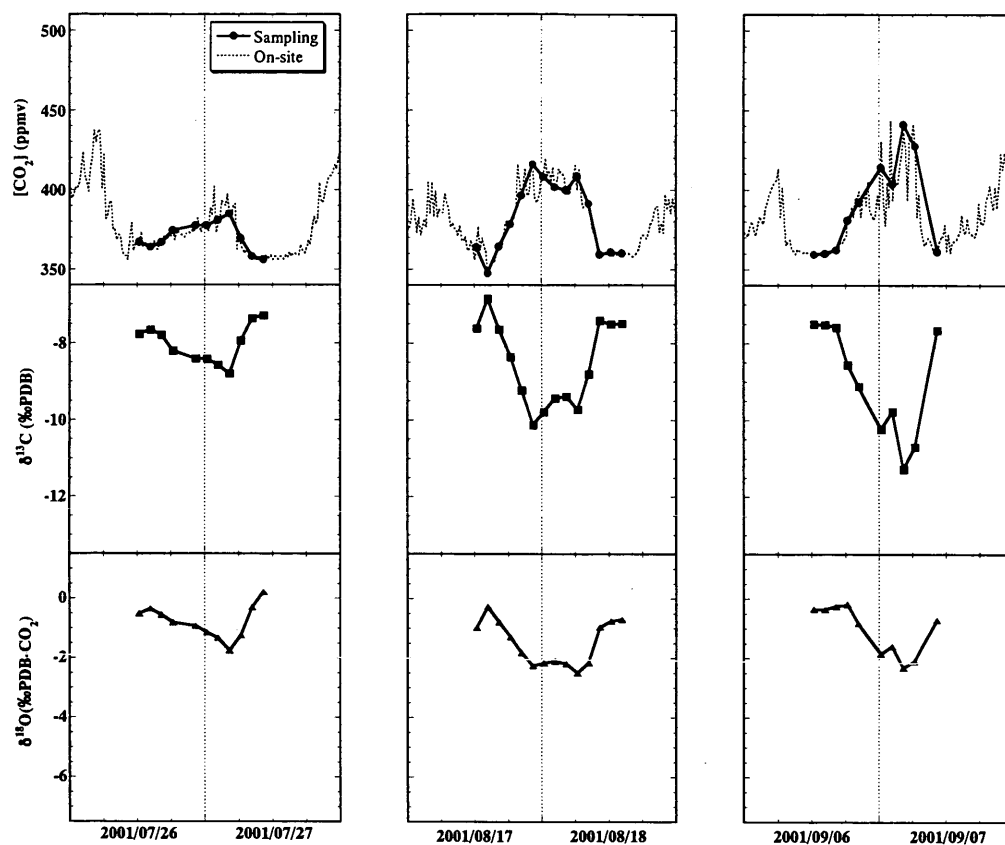


図11 夏季に観測されたCO<sub>2</sub>濃度（上段）、CO<sub>2</sub>の炭素安定同位体比（中段）および酸素安定同位体比（下段）の例。上段の点線は現場で連続観測されたCO<sub>2</sub>濃度の時間変動。

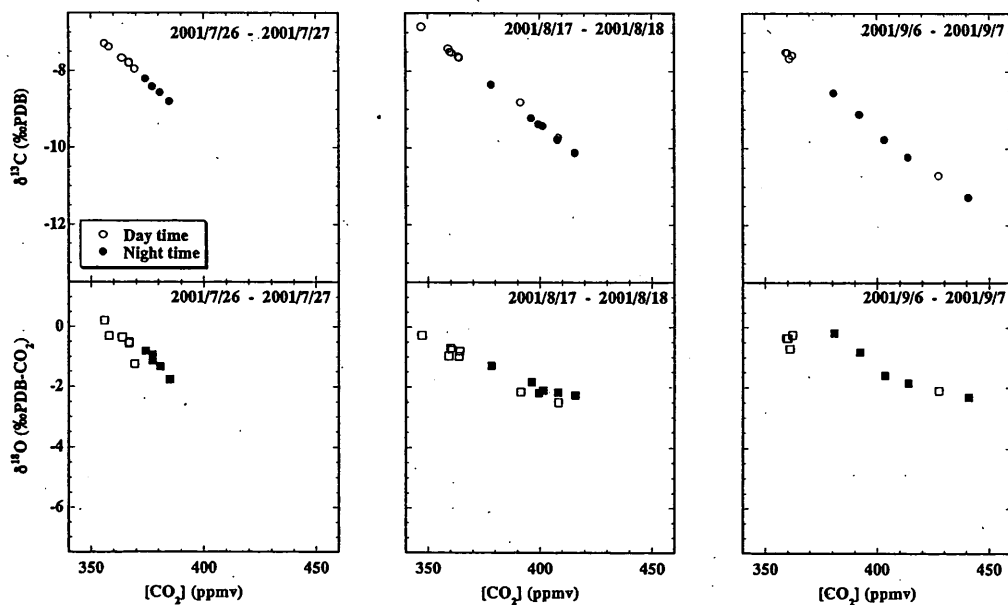


図12 夏季に観測された日変化の中でのCO<sub>2</sub>濃度とその炭素安定同位体比（ $\delta^{13}\text{C}$ ；上段）および酸素安定同位体比（ $\delta^{18}\text{O}$ ；下段）の相関。

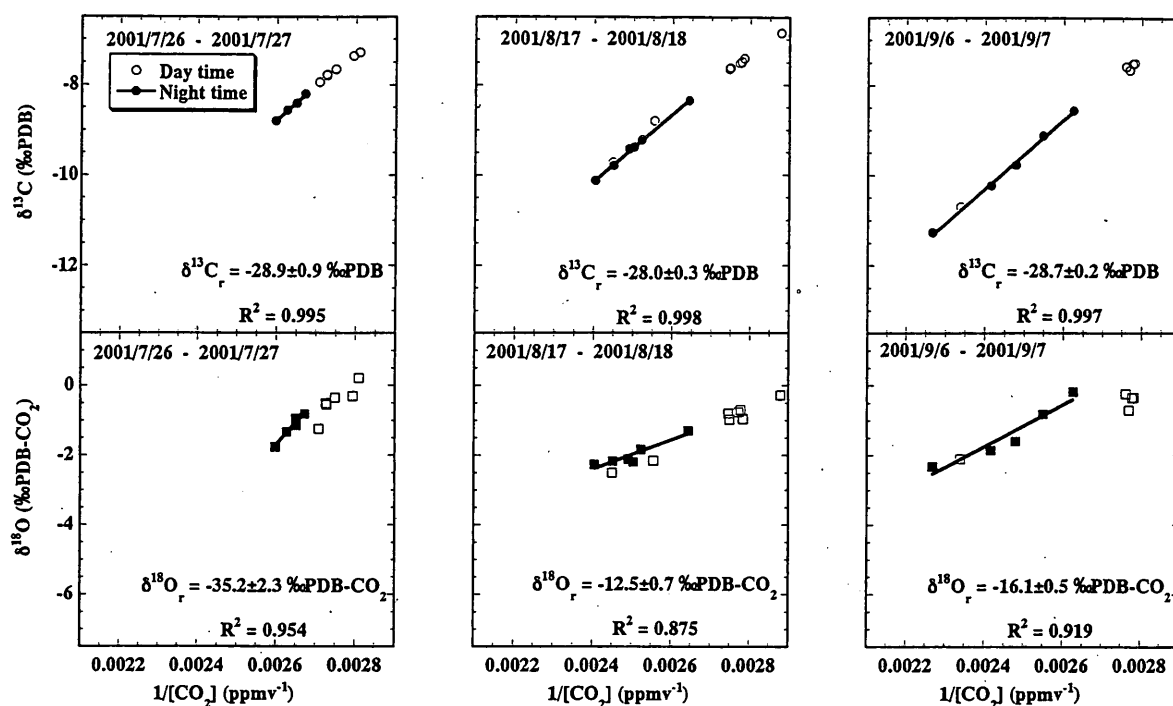


図13 夏季に観測された日変化の中でのCO<sub>2</sub>濃度の逆数と炭素安定同位体比 ( $\delta^{13}\text{C}$ ; 上段) および酸素安定同位体比 ( $\delta^{18}\text{O}$ ; 下段) の関係 (Keeling Plot)。黒いシンボルは夜間のデータを示し、白抜きシンボルは昼間のデータを示す。回帰直線の決定は夜間のデータのみを用いて行った。図中の $\delta^{13}\text{C}_r$ と $\delta^{18}\text{O}_r$ は回帰直線の切片として得られた呼吸起源成分の炭素および酸素安定同位体比の値を示す。誤差は標準誤差を示している。

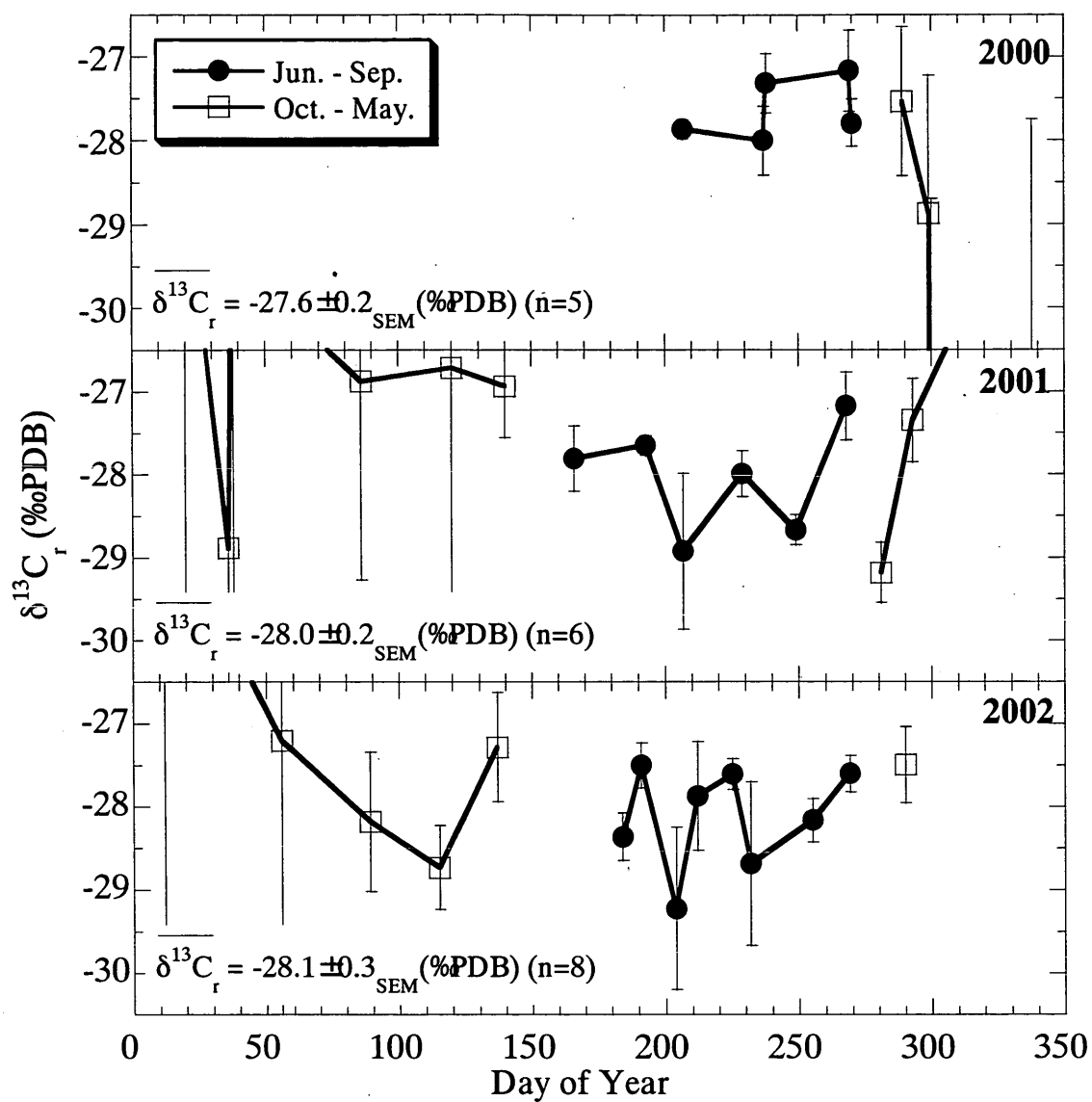


図14 森林内大気の観測から推定された生態系の呼吸起源CO<sub>2</sub>の炭素安定同位体比 ( $\delta^{13}C_r$ ) の時間的変動。黒い丸シンボルは植物の活動の盛んな6月～9月の観測によるもの、白抜き四角シンボルはそれ以外の時期の観測によるものを示す。それぞれのグラフの左下に6月～9月に得られた値の平均値とその標準誤差を示した。



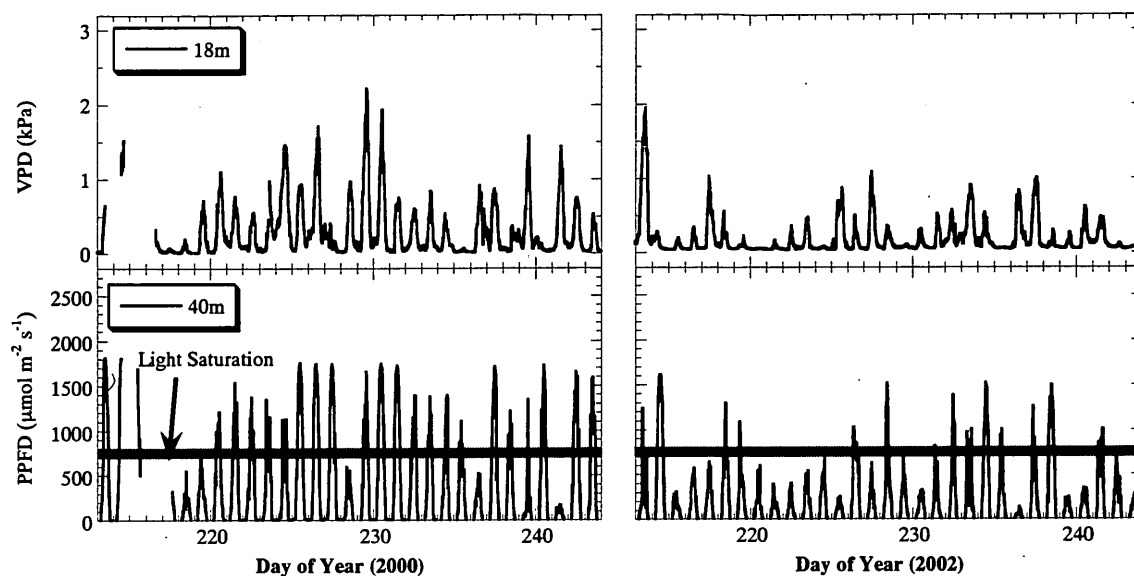


図15 2000年8月（左）と2002年8月（右）に観測されたVPD（上段）とPPFD（下段）の時間変化。最寄の気象観測所の統計によれば2001年と2002年の7～8月の日照時間は例年に比べて著しく短いことが分かっており、これがPPFDの観測結果にも現れている。

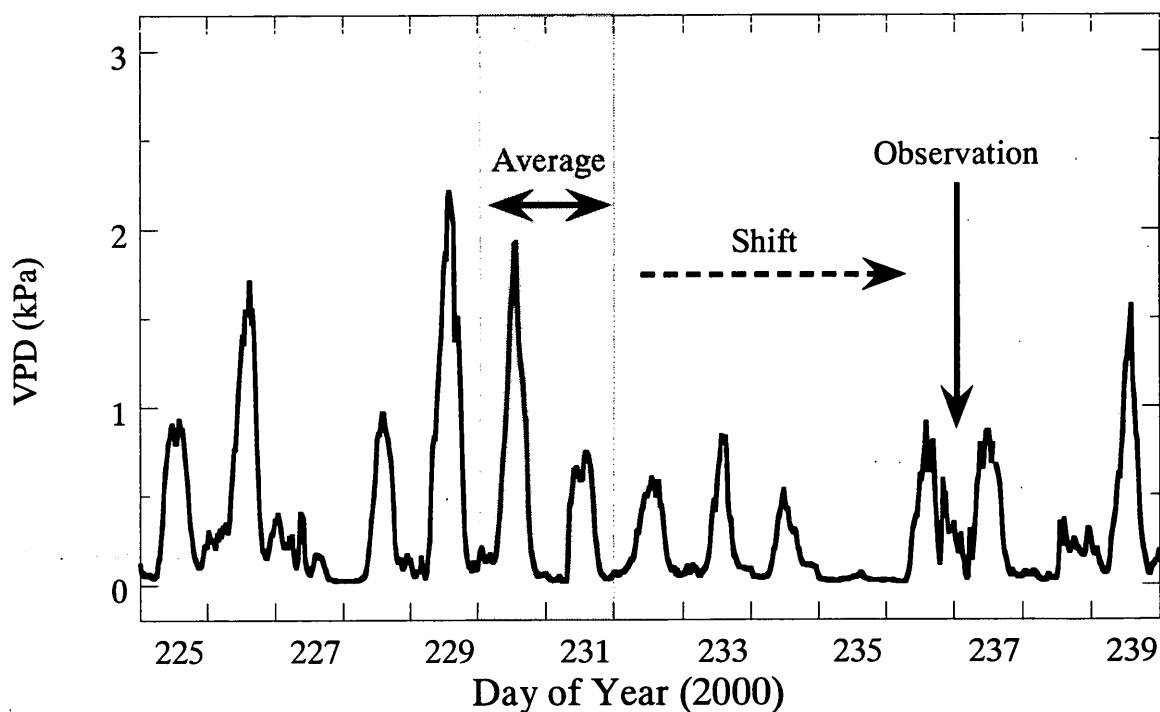


図16 観測日の10日前までに観測された30分毎の気象データから計算されたVPDの時系列。Bowling et al.(2002)の用いたラグ相関解析を適用する際、影付きの部分は2日間の平均を取り、観測日から5日間さかのぼった場合に対応する。

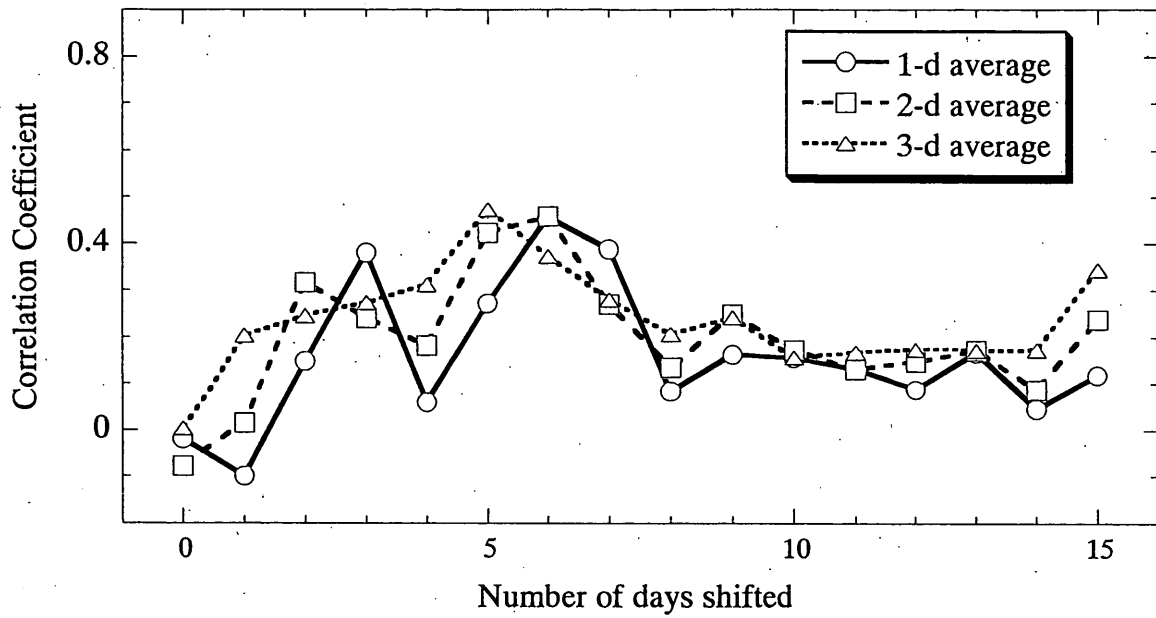


図17 ラグ相関解析の結果。丸シンボル、四角シンボル、三角シンボルはそれぞれ1日平均値、2日平均値、3日平均値を用いて得られた結果を示す。どの値を用いた場合も、相関のピークは観測前5~6日の場所に現れる。これは、 $\delta^{13}C_r$ がその5~6日前の環境要因に最も大きく影響を受けていることを示唆している。

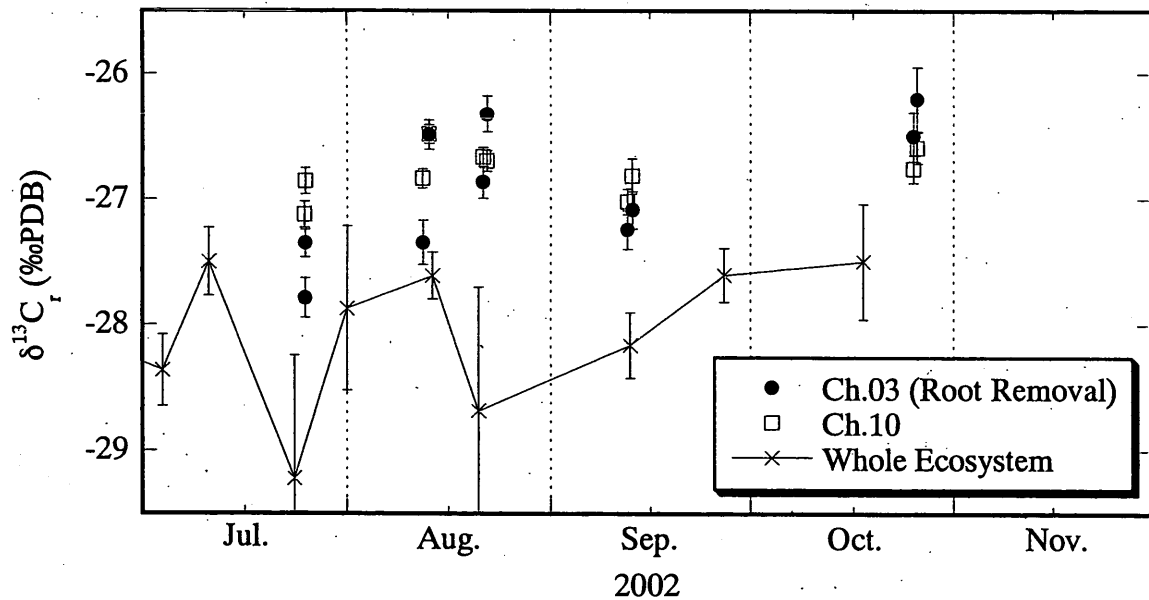


図18 土壌呼吸チャンパーを用いて観測された土壌呼吸 $CO_2$ 成分の $\delta^{13}C$ の値の時間変動。黒丸シンボルは根の除去を行った場所に設置したチャンパーによるもの、白抜き四角シンボルは根の除去を行っていない場所に設置したチャンパーによるもの、Xシンボルは森林内大気の観測から得られた生態系全体の値を示す。

### (3) 水田における安定同位体比の測定による物質フローの解明 (農環研)

#### ①研究目的

水田は、わが国をはじめとするアジアモンスーン地域に特徴的に見られる耕作形態であり、湛水あるいは極めて飽和に近い条件下における還元的雰囲気や、灌漑および排水に伴う溶存態での物質輸送の大きさなどを特色とする。その還元的環境から、水田は天然の湿地と並んで、CO<sub>2</sub>の20倍の温室効果をもつメタンの主要な発生源となっており、これらガス態の炭素の大気とのやり取りは、地球温暖化の観点から従来より注目されてきている。他方、溶存態の炭素の流入出は一般にガス態よりも小さいとされており、詳細に検討された事例は少ない。しかし、水田生態系が炭素の正味のソースであるかシンクであるかという問題に答えるためには、溶存態を含めたすべての炭素フラックスをより正確に把握する必要がある。ここ数回の気候変動枠組条約締約国会議(COP)において、農耕地を含めた生態系の炭素固定能の大きさが評価されている昨今、この問題は火急の課題と言える。

炭素のような生体軽元素の動態に着目する際、その安定同位体組成から有益な情報が得られる場合が多い。炭素の同位体比は、様々な物理化学過程においてそれぞれ特徴的な同位体効果を受けて変動するため、異なるプロセスを経て形成された炭素のリザーバーは多くの場合異なる同位体比を持つ。このため、通常のフラックス観測がバルクでの炭素収支を把握できるのみであるのに対して、同位体比を用いることにより、ある系から流出する炭素の起源や系の内部で生じているプロセスを推定できる可能性がある。これらの情報は、その系のモデル化やそれを用いた将来予測などにおいて極めて重要なものであり、近年では多くの陸域生態系において炭素安定同位体比の詳細な観測が行われている。しかしながら、水田生態系において重要な溶存態炭素の同位体比についてはその知見は皆無に等しく、試料の回収および分析の手法から検討しなければならないのが現状である。

このような状況を踏まえ、本研究では具体的な目標として以下の2点を掲げた。

- 1) 溶存態炭素の濃度およびフラックスを観測してその季節変化の特徴を把握し、ガス態を含めた全炭素フラックスへの寄与を評価する。
- 2) 水田における溶存態炭素の炭素安定同位体比の測定法を開発し、各水体に含まれる炭素の起源を同定する。

#### ②調査地域の概要

##### ア. 調査対象水田の概要

調査対象とした水田は、茨城県つくば市の西端に沿って流れる小貝川の左岸に隣接した、真瀬と呼ばれる地区の中ほどに位置する水田1区画である(図19、以降「調査水田」と呼ぶ)。面積は100m×54mの0.54haであり、北西-南東方向に長い長方形である(図20)。舗装された農道のある北西側に灌漑給水栓が2ヶ所、排水路に面した南東側に排水口が2ヶ所ある。南西側および北東側では畦を挟んで別の水田区画に隣接しており、小貝川に近い南西側の水田の標高は調査水田より相対的に高く、用水路に近い北東側の水田は相対的に低くなっている。

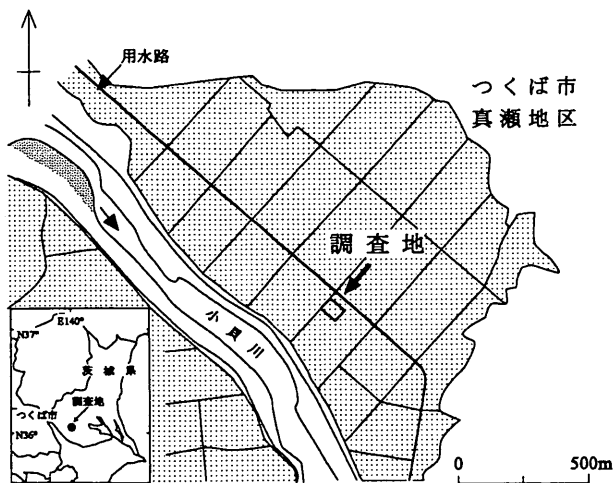


図19 調査地域の概要<sup>13)</sup>

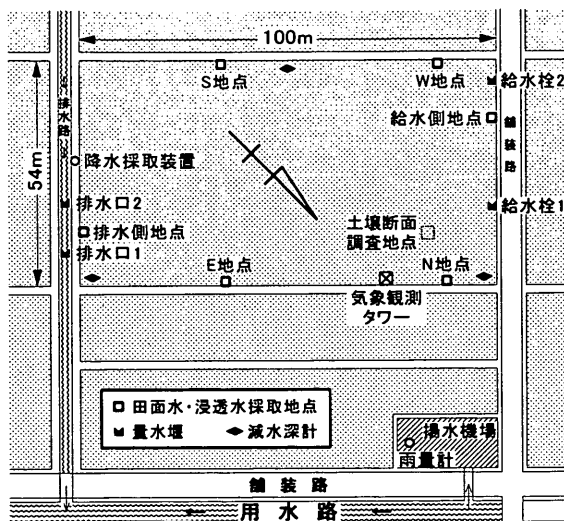


図20 調査水田における測器の設置状況

表1 土壌断面の記載

層位	深度 (cm)	土色	土性	構造	飽和透水係数 (cm/s)	固相率 (%)	飽和度 (%)	全炭素 (gC/kg)	全窒素 (gN/kg)
Ap	0	10YR 3/4	CL	粒状	1.30E-02	15.7	49.2	23.0	2.02
Ag	16	2.5YR 3/2	CL	亜角塊状, 中	—	—	68.4	20.3	1.74
Bg1	19	10YR 3/2	CL	亜角塊状, 弱	2.40E-05	52.4	79.5	18.9	1.82
Bg2	42	2.5Y 3/2	LiC	亜角塊状, 弱	3.20E-05	30.9	87.5	22.1	1.88
Bg3	70	2.5Y 3/1	LiC	亜角塊状, 弱	9.30E-04	35.5	81.1	18.9	1.44
Cg	108	5GY 2/1	S	単粒状	1.60E-02	51.0	53.3	1.8	0.13
Gr	120	5Y 3/1	LiC	壁状	2.70E-06	29.2	53.1	22.6	1.49
	130+								

#### イ. 灌漑システム

この地区の水田灌漑に利用される水は上流側で小貝川より取水され、地区の中央部を通る用水路を流下した後、下流側で再び小貝川に排水されている。この用水路沿いに揚水機場が数ヶ所設けられており、そこでポンプアップされた水が各水田区画の給水栓から灌水される。水田からの排水は再び用水路に流れ込み、下流側の水田で再度揚水されて灌漑に利用されるという反復灌漑となっている。実際の水田区画への灌水は各農家によって慣行的な方法で行われており、主に朝に給水栓を開けて日中の間灌水を行い、夕方に栓を閉める<sup>13)</sup>。また、板などを用いて排水口での水位を調節することで、水田の湛水状況を管理している。

#### ウ. 土壌断面

水および炭素収支の観測に先立つ2000年2月に、図20に示す地点において土壌断面調査を行った。小型のショベルカーを用いて深度1.3mまでの土壌断面を掘削し、その層位および特徴を記載したほか、層位ごとに攪乱試料および100mLの不攪乱土壌コアを採取し、その物理化学特性について試験を行った。その結果を表1に示す。調査水田の土壌は細粒質灰色化低地水田土に分類され、作土に相当するA層が約20cm、粘土質のB層が90cmあり、その下には砂の層が見られた。この地域の土壌は小貝川氾濫原の後背湿地に形成された洪水堆積物を母材としており、調査水田の土壌層位は

氾濫の状況に応じて砂あるいは粘土・シルトが堆積した結果であると考えられる。

#### エ. 耕作に伴う作業

調査水田は一般の兼業農家の所有であり、調査期間中も例年同様水稻（コシヒカリ）の単作が行われた。耕作に伴う作業の概要は以下の通りである。まず、4月上旬に耕起および施肥を行った後に灌水を開始し、4月下旬に代かき、5月初めに田植えを行う。灌水は、6月下旬～7月上旬および7月末～8月初めの2度の落水・中干し期間を挟んで8月中旬まで続けられ、この期間中に追肥や農薬の散布が適宜行われる。収穫は9月上旬に行われ、10～11月に秋耕が行われる。なお、調査期間における作業日程の詳細は文献<sup>13, 14)</sup>に詳しい。

### ③方法

#### ア. 調査水田の炭素収支

ある系における炭素の収支は次式で表される。

$$\text{系への炭素の流入} - \text{系からの炭素の流出} = \text{系内の炭素貯留量の変化} \quad (5)$$

調査水田の場合、流入・流出する炭素の形態は主として溶存態・ガス態・耕作作業に伴う人為的なものの3つに大別される。溶存態炭素のフラックスは、調査水田について流入・流出する水のフラックスに、各水体中の溶存炭素濃度を乗じて求められる。ガス態の炭素フラックスは、その多くが光合成および呼吸に伴うCO<sub>2</sub>によるものであり、また水田特有の要素としてメタンの放出がある。人為的な炭素の出入りとしては、田植えや収穫のほか、厩肥など有機質資材の施用などが含まれる。以下、これらの炭素フラックスの測定あるいは推定の方法について順次述べる。なお、調査水田における観測は、耕作期間を中心として2001年～2002年にかけて行った。

##### (ア) 水のフラックス

耕作中の水田における水収支を構成する主な要素には、水田への流入として降水と農業用水の灌漑、水田からの流出として表面排水と作土から心土への浸透、および蒸発散がある。

- a. 降水…降水量は、調査水田の北側近傍の揚水機場に設置された溢水式雨雪量計を用いて0.1mm単位で自動測定を行った。なお、2001年7月はデータ不良のため、最寄りのAMeDAS観測地点であるつくば市長峰の雨量データで補完した。
- b. 灌漑水…灌漑水量は、北西側の畦に2ヶ所ある給水栓にそれぞれノッチ角60°の三角堰を設置し、その水位を10分間隔で記録した。水位センサーとして、圧力式水位センサー（CRK-940、Unidata）および静電容量式水位センサー（Model6521、Unidata）を使用した。記録された水位は、あらかじめ作成しておいた水位流量曲線を用いて流量に換算した。
- c. 排水…排水量は、南東側の畦に2ヶ所ある排水口の下にそれぞれノッチ角60°の三角堰を設置し、その水位を10分間隔で記録した。水位センサーとして圧力式水位センサー（CRK-940、Unidata）を使用し、灌漑水量と同様に記録された水位を水位流量曲線を用いて流量に換算した。
- d. 浸透…浸透水量は、図20に示した水田内の3ヶ所に東大式N型減水深測定器（DIK-4300、大起理化）を設置し、数日おきに観測した。測定器は土壌表面に5cmほど押し込み、測定器内の水位の計測にはフックゲージ（DIK-4210、大起理化）を使用した。測定器内にはイネを入れず、また水位計測時以外は蓋を被せておくことによって、降水および蒸発散の影響を少なくした。なお、非湛水期間には減水深は測定できないため、この期間の浸透水量は水収支式を用いて補完した。

⑤蒸発散…蒸発散量は、気象観測タワー（高さ約5m）の高度2.9mに設置された3次元超音波風速温度計およびオープンパス赤外線吸収計を用いて観測された。観測値の補正ならびに詳細な解析結果については文献<sup>15)</sup>に詳述されている。

また、これ以外の要素として隣接した水田間の畦畔浸透が考えられるが、南西側の畦からは目立った漏水は見られず、また北東側の畦には予備観測を行った2000年の時点で数ヶ所に漏水が認められたため、2001年の耕作期から畦の全面にビニールシートを被せて漏水を防止した。これらの状況から、水収支に占める畦畔浸透の割合は小さく無視できるものとした。

#### （イ）溶存炭素濃度

溶存態の炭素は、溶存CO<sub>2</sub>や重炭酸イオンとして存在する無機炭酸（Dissolved Inorganic Carbon ; DIC）と水溶性の有機物質（Dissolved Organic Carbon ; DOC）からなり、両者の和が全溶存炭素（Total Carbon ; TC）である。DICおよびDOC濃度の分析のための試料採取は、降水・灌漑水・田面水・浸透水・排水の各水体について2～3週間程度の間隔で行った。試料水は15ないし20mLのバイアルを満水にして採取し、採取後すみやかに農業環境技術研究所の全有機炭素分析計（TOC-5000、島津製作所）を用いてDICおよびDOC濃度を測定した。DOCはすべてNPOC（Non Purgeable Organic Carbon、不揮発性有機炭素）として測定した。採取直後の分析ができない場合は試料を冷蔵庫で保存し、有機物の分解をできるだけ抑制した。

- a. 降水…降水は、排水側の畦の中ほど（図20）にロート（ポリプロピレン製・φ15cm）とポリタンクを設置して採取した。採取された水の蒸発と異物の混入を防ぐために、ロートとタンク間にピンポン玉を入れたガラス管を取り付け、また毎降雨後にすみやかに試料の回収を行った。
- b. 灌漑水および排水…灌漑水は、2ヶ所ある給水栓のうち実際に灌漑が行われているものについて、灌漑水量観測用の三角堰から流出する水を直接採取した。排水も同様に、2ヶ所ある排水口のうち実際に排水があるものについて、排水口から流出する水を直接採取した。
- c. 田面水…田面水は調査水田の湛水期間について、2001年はN・E・W・Sの4地点で、2002年はそれに給水側・排水側の2地点を加えた計6地点で採取した（図20）。巻き上げた土粒子や藻類などができるだけ入らないよう、注意して採水を行った。
- d. 浸透水…浸透水の採取は、田面水と同じ地点にポーラスセラミックフィルター式の土壤水採水装置（SK-5218、サンケイ理化）を埋設して行った。土壤断面調査（表1）の結果から、作土層は表層20cm程度とみなされるため、作土層を通過した水を採取する目的で深度30cmに各地点1本ずつ採水装置を埋設した。採水には容量60mLのストッパーつきシリンジ（DIK8390-07、大起理化）を使用し、原則としてシリンジが満水になるのを待って試料水を回収した。

浸透水の採取に、一般に不飽和土壤水の採取に用いられている装置を使用したのは、非湛水期間における採水を容易にする目的のほか、懸濁した粘土粒子等の混入を防ぐためである。その反面、通常のスクリーンを備えたピエゾメーター等に比べて採水に時間がかかり、また使用するフィルターの孔径によっては比較的分子量の大きい溶存有機物が通過できない可能性が予想された。このため調査水田での採水に先立ち、異なるタイプのフィルターを備えた採水装置について、採水に要する時間および採水された水のDOC濃度について比較を行った。

比較を行った採水装置はそれぞれ、ポーラスセラミック（上述）、ホウ珪酸ガラス（FV-443、藤原製作所）、石英（FV-453、藤原製作所）、ステンレス焼結（DIK-5210、大起理化）およびステンレス金網（SK-6018、サンケイ理化）製のフィルターを有する。なお、後者の2つは本来土壤

空気の採取に使用されるものであるが、湛水下では水が採取され、フィルターの孔径も大きいので今回候補に挙げた。採水時間の比較には調査水田で使用したのと同じタイプのシリンジを使用し、ピーカー内の蒸留水を30mL吸引する時間と、調査水田から採取した表土と蒸留水を混合して湛水条件にしたバケツ内の土壌水を10mL吸引する時間とを測定した。バケツ内の土壌の不均一性を考慮し、1回吸引するごとに採水装置の場所を入れ換えて4~5回吸引を行った。また、採取された土壌水のDOC濃度を調査水田の試料水の場合と同一の装置および手法で測定した。

採水時間の比較結果を図21に示す。蒸留水30mLの採水時間は、すべてのフィルターで10分以内と短くばらつきも小さいが、土壌水10mLの採水時間は長いもので3時間を超え、また採水を繰り返すにつれて次第に目詰まりを起こす傾向が認められた。この傾向はステンレス焼結フィルターで特に顕著に見られ、そのため平均採水時間を計算すると60±60分となった。蒸留水と土壌水の採水時間を比較すると、例えばポーラスセラミックの場合、蒸留水に8分以上かかる一方で土壌水は20分以内で採取できるというように、蒸留水の採取時間が短いほど土壌水の採取にかかる傾向が示された。石英フィルターは破損してしまったため、土壌水の採水時間は得られていないが、蒸留水で約1分半であったことから、図21に示された傾向から50分前後であると予想される。

DOC濃度の比較結果を図22に示す。石英フィルターについては破損のため1点のみ、それ以外は4~5点の試料を分析した。理由は不明であるが、ステンレス金網フィルターのみがやや低い濃度を示し、それ以外の4つについては有意な差は見られなかった。土壌空気採取に使用される目の粗いステンレス焼結フィルターに比べて、土壌水採水用の3つのフィルターのDOC濃度が低下していないことから、これらのフィルターによる溶存有機物の分別は生じないものと判断した。これらのことから、土壌水の採水時間がもっとも短いポーラスセラミックフィルター式の採水装置を調査水田の採水に適用した次第である。

#### (ウ) CO<sub>2</sub>収支およびメタンフラックス

光合成に伴うCO<sub>2</sub>の取り込みおよび呼吸によるCO<sub>2</sub>の放出は、気象観測タワーに設置された測器を用いて、大気力学的手法により観測された。実際には光合成量と呼吸量とを別個に測定することはできず、その差分である正味のCO<sub>2</sub>フラックスが得られるのみであり、この値をもってNEP (Net Ecosystem Production、生態系純生産)とした。また、耕作期間を中心としてタワー近傍においてチャンバー法によるメタン放出量の測定が行われた。これらの観測結果についての詳細な解析

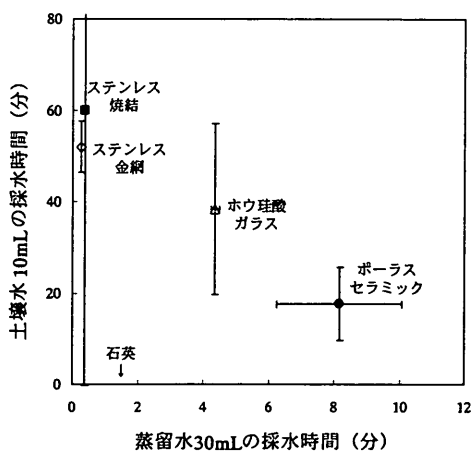


図21 フィルターによる採水時間の比較

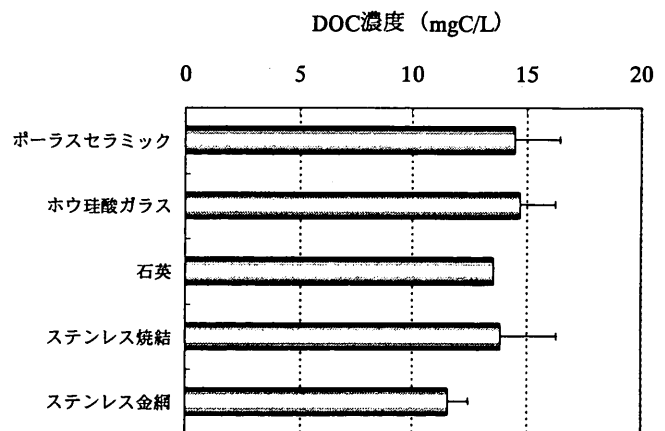


図22 フィルターによるDOC濃度の比較

は文献<sup>15)</sup>を参照されたい。

#### (エ) 人為的な炭素の出入り

収穫に伴う炭素の持ち出しはイネの生長解析に基づいて推定を行った。生長解析では、月に1~2回数本のイネをサンプリングしてその乾燥重量を測定し、経験的な係数である0.38を乗じてイネ体中の炭素貯流量としており、収穫直前の炭素量から収穫後の残滓の炭素量を差し引いたものを収穫による水田からの炭素の持ち出しとした。化成肥料および農薬の散布については、炭素量としては小さいため無視できるものとした。ただし、2001年の耕作開始前には厩肥として牛ふんの施用が行われた。これは年間の炭素収支の計算に影響するため、この際の炭素の持ち込み量を厩肥の施肥量に厩肥中の炭素含有率を乗じて計算した<sup>13)</sup>。

#### イ. 溶存態炭素の安定同位体比

##### (ア) 試料水の採取

溶存態炭素の安定同位体比測定のための試料水は、灌漑水・排水・田面水・浸透水の各水体について、2002年の耕作期間中にDIC・DOC濃度測定用の採水地点と同じ場所で採取した。灌漑水・排水・田面水については、懸濁物質を除くためにNo.1あるいはNo.131の濾紙とロートを用いて現場で濾過を行い、ポリプロピレン製のキャップとシールリングを持つ1Lのねじ口びん（柴田科学製）2本に採取し、それぞれ無機および有機炭素用とした。溶存CO<sub>2</sub>の脱気を防ぐため、ロートにはホースを取り付けて足を伸ばし、びん内で泡が立たないようにした。

浸透水については、分析に必要な多量の水を迅速に採取するため、N・E・W・Sの各地点の深度30cmに、図23に示した自作の浸透水採取装置を埋設し採水を行った。採水時には、2本のチューブのうち長い方から通常のシリンジで吸引すると、短い方のチューブを通して空気が流入するため、装置内に貯留された水をすみやかに採取することができる。逆に湛水時以外は使用できないこと、また流入した空気が影響がなくなるまで、および装置内に再度水が溜まるまでにある程度時間がかかることが欠点である。採取した水は、シリンジから250mLの同タイプのねじ口びん1本に静かに移し、無機炭素の分析に供した。採水装置の容量の関係上、浸透水中の有機炭素については分析を行わなかった。

##### (イ) 試料水からの粉末試料の回収

無機炭素については現場において採水直後に、試料水1Lに対して水酸化ナトリウム飽和溶液5mL、塩化バリウム飽和溶液20mLを加えた。この操作によって、アルカリ条件下において塩化バリウムと溶存炭酸種との反応が生じ、炭酸バリウムとして沈殿する。びんを密閉して実験室に持ち帰り、冷暗所で2~3日静置した後に上澄みを捨て、残液をCO<sub>2</sub>フリーの雰囲気下でφ47mm・孔径0.45μmのメンブランフィルターで濾過した。濾過の終了後直ちにフィルターをシャーレに入れ、オーブンで60℃前後で乾燥させ、フィルター上面に残った粉末を試料として回収した。

有機炭素については、まず試料水を実験室に持ち帰り、エアーポンプを用いて5分間通気して溶存炭酸種を脱気した。その後、びんの上部1/4程度に空気がある状態で密閉し、暗所・室温で2週

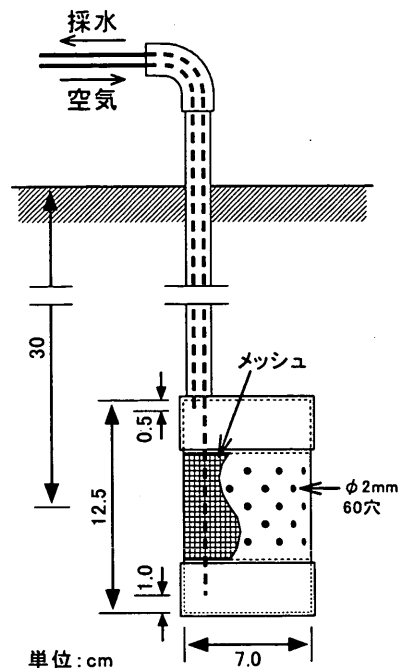


図23 浸透水採取装置  
(大量・迅速採取消用)



間程度静置してから、無機炭素の場合と同様の沈殿の生成および回収操作を行った。静置している期間中、びん内ではある程度酸素のある条件下で易分解性有機物の無機化が進むと考えられ、またCO<sub>2</sub>への分解過程における炭素の同位体分別は一般に小さいとされているため、このようにして得られた粉末試料の炭素同位体比は易分解性の溶存有機物の同位体比を反映しているものとみなした。

#### (ウ) 同位体比の分析

回収した粉末試料中の炭素の安定同位体比を、以下の手順で分析した。

まず、粉末試料60～70mgと100%リン酸溶液約4mLを二又試験管の中に別々に入れ、油拡散ポンプを備えた真空ラインにつなげて3～4時間排気した。排気終了後、真空になった二又試験管内のリン酸と粉末試料を混合し、炭酸バリウム中のCO<sub>2</sub>をガス化させた後、25℃の恒温水槽中で一晩振盪した。翌日、二又試験管を再度真空ラインにつなぎ、まず液体窒素(-196℃)を用いて発生したガスをトラップし、次に、-100℃前後に調整した液体窒素アルコールを用いてCO<sub>2</sub>と同時に発生した水を除き、真空コックを備えたガラス管にCO<sub>2</sub>のみを捕集した。

捕集されたCO<sub>2</sub>を、筑波大学の同位体比質量分析計(MAT-252、サーモクエスト)に導入し、炭素安定同位体比を測定した。標準ガスとして、あらかじめNBS-18および19を用いて同位体比を決定しておいたワーキングスタンダード(炭酸カルシウム特級試薬)を、試料と同様の手順でガス化して使用した。

#### (エ) 粉末試料の強熱処理

回収された粉末試料中には、目的とする炭酸バリウムのほかに、現場で濾過できなかった懸濁粒子中の炭酸塩鉱物や、メンブランフィルター上に残った粗大な溶存有機物などの炭素が含まれている可能性がある。これらの物質は、炭酸バリウム中のCO<sub>2</sub>をガス化する際に同時にガス化し、測定値に影響を及ぼすことが考えられる。この手法を適用した過去の事例<sup>16)</sup>のように、地下水や湧水などの清浄かつ重炭酸イオン濃度の高い水についてはこの影響は小さいが、本研究における試料水中には懸濁粒子や溶存有機物の絶対量が多い上に、大気と接しており溶存CO<sub>2</sub>濃度が低いいため、回収できる炭酸バリウムに対するその他の不純物中の炭素が相対的に極めて多くなり、その影響の有無を考慮する必要がある。

不純物を除く方法としては、無機および有機炭素についてそれぞれ個別に対処法が考案されている。有機物試料中に混入した無機炭酸塩を除去する手法としては、薄い塩酸やリン酸で洗浄することで除くことができる<sup>17, 18)</sup>。有機炭素については、排気しながら380℃で1時間焼く<sup>17)</sup>、5%の次亜塩素酸ナトリウム溶液に一晩浸す<sup>19)</sup>などの方法がある。しかし、本研究で必要とされる、炭酸塩鉱物と溶存有機物という無機・有機両方の不純物を同時に除く手法は開発されていない。

検討の結果、回収した粉末試料を900℃に強熱する手法を考案した。炭酸バリウムが1450℃まで安定であるのに対し、多くの有機物は700～800℃、炭酸カルシウムは850℃、炭酸マグネシウムは540℃で分解されるため、目的とする炭酸バリウムのみを回収することができる。ただし、炭酸ナトリウムや炭酸カリウムは900℃では分解されないため、これらの成分が不純物に含まれている場合にはその影響を除くことはできない。実際の処理としては、粉末試料を金属あるいは磁性るつぼに入れ、マッフル炉中で900℃で2時間強熱した。回収量の多かった試料については2つに分け、片方の試料のみを強熱し、強熱しなかった試料との間に同位体比の測定値の違いが生じるかを検証した。

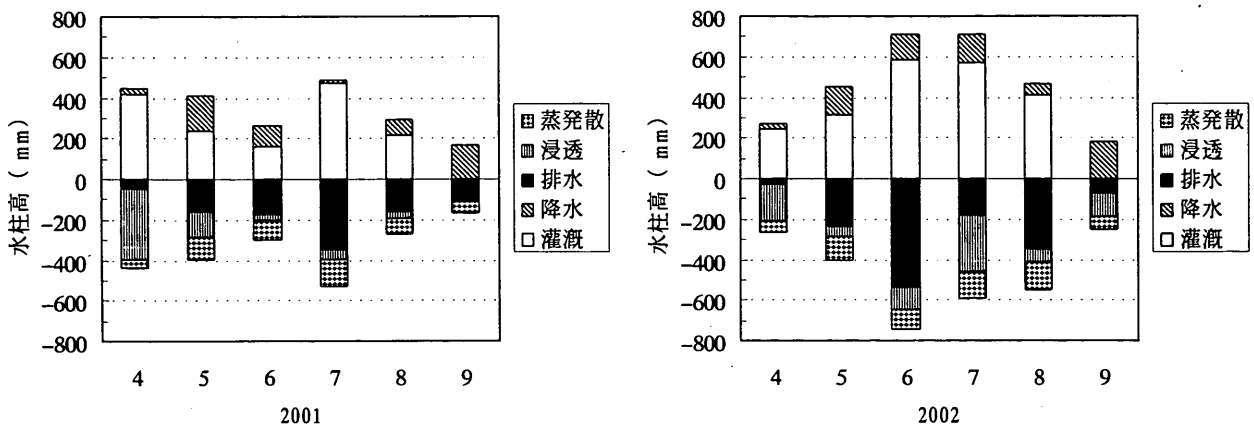


図24 耕作期間における月別水収支 (4/19～9/30)

#### (オ) 土壌有機物中の同位体比

調査水田の土壌に含まれる有機物の炭素安定同位体比について、分析を行った。分析した試料は、2000年2月の土壌断面調査時に層位別に採取した試料7点と、2002年7月の落水時に田面水・浸透水採取地点で採取した表土試料6点の合わせて13点である。土壌有機物の特性を把握するため、炭素および窒素の含有量、ならびに窒素の安定同位体比についても分析した。

#### ④結果および考察

##### ア. 耕作期間における水収支

調査水田における2001年および2002年の耕作期間の月別水収支を図24に示す。両年とも4月19日より灌水が開始されているため、4月については19～30日の値を示してある。便宜上水田への流入をプラス、水田からの流出をマイナスとし、水柱高でプロットした。

水の総流入・流出量およびその季節変化のいずれについても、2001年と2002年には大きな違いが見られた。図24に示した期間における、調査水田についての水の流入量および流出量はそれぞれ、2001年が2069mmおよび2101mm、2002年が2782mmおよび2805mmとなり、流入出のいずれも2002年が2001年を700mm以上上回った。特に6月および8月の灌漑水量がそれぞれ3.6倍、1.9倍と大きく増加しており、これが水収支の季節変化が大きく異なる主な原因である。降水量および蒸発散量も2002年の方が多いが、その差は耕作期間累計で100mmに達せず、灌漑水の増加分は排水量および浸透量の増加によって相殺された。

一方で、流入および流出に占める各水体の割合は両年でそれほど差がなく、流入のおよそ3/4が灌漑水によるもの、1/4が降水によるものであり、流出に占める排水・浸透・蒸発散の割合はおおむね5:3:2であった。これらの値は、水田生態系の水収支に及ぼす人間による水管理の影響の大きさと、表面流出による溶存態炭素をはじめとする物質輸送の重要性を示すものである。

##### イ. 溶存態炭素濃度の季節変化

調査水田における各水体中のDICおよびDOC濃度の季節変化を図25に示す。両者を比較すると、すべての水体においてほとんどの場合DIC濃度がDOC濃度を上回り、前者が20～40mgC/Lに達したのに対し、後者は最高でも15mgC/Lを超えることはなかった。水体間の濃度を比べると、DICでは大気と遮断されている浸透水で、大気と接している他の水体よりも高い場合が多かった。一方のDOC

は、灌漑水<田面水<排水と表面流出の経路に沿って増加する傾向を示し、水田がDOCの排出源となる可能性が示唆された。浸透水中のDOCは概して低濃度で推移した。従来の研究では溶存態炭素の流出としてDOCのみを扱ったものが多く、この結果は水田の全炭素収支におけるDICの重要性を示している。

季節変化の傾向を見ると、DIC濃度は耕作期間を通じてほぼ一様に上昇し、またサンプル数は少ないが8月以降にやや低下する傾向を示した。これは、イネの生育に伴う根系の呼吸量の増加、また気温の上昇による土壌呼吸速度の増加によって説明できる。灌漑水中の濃度も上昇しているのは、反復灌漑によって上流側の水田の田面水および排水

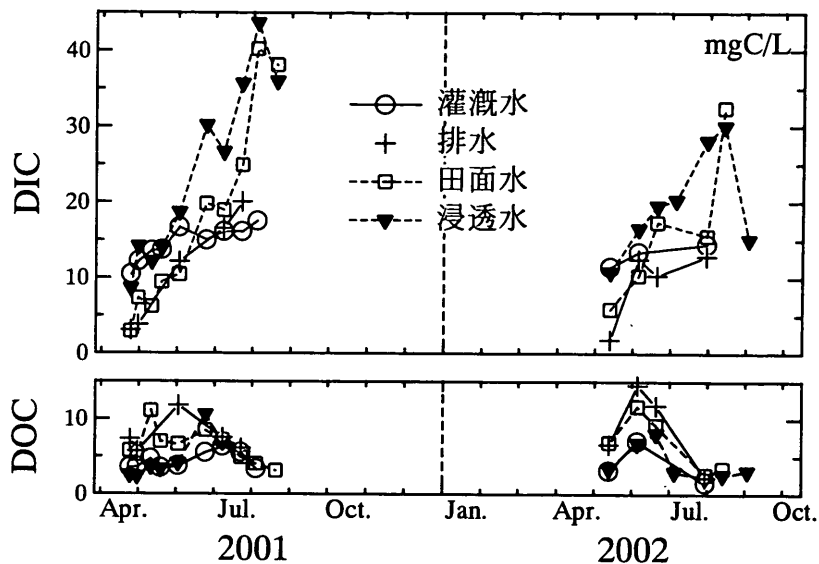


図25 溶存炭素濃度の季節変化

中のDICの増加が反映されたためである。8月以降の低下は、落水に伴う溶存CO<sub>2</sub>の大気への放出や

表2 調査水田における年間の炭素収支

項目	2000-2001			2001-2002		
	炭素量 (gC/m <sup>2</sup> )	流入に占める 割合 (%)	流出に占める 割合 (%)	炭素量 (gC/m <sup>2</sup> )	流入に占める 割合 (%)	流出に占める 割合 (%)
降水中	1.6	0.3		1.8	0.4	
溶存態						
灌漑水中	28	4.7		36	8.4	
排水中	-18		3.3	-25		4.7
浸透水中	-19		3.5	-17		3.2
収支	-7.1			-4.7		
NEP						
ガス						
耕作期間	432	74.4		395	91.2	
非耕作期間	-207		39.3	-238		44.1
メタン	-5.0		0.9	-6.2		1.2
収支	220			151		
人為作業						
収穫	-279		52.9	-252		46.8
厩肥の施肥	120	20.6		0	—	
収支	-159			-252		
全体						
流入	582	100		433	100	
流出	-528		100	-539		100
収支	54			-106		
貯留						
植物残滓	332			438		
作土中土壌有機物	3800			—		

イネの成熟による代謝速度の低下が反映されたと考えられる。

DOC濃度はDICほど顕著な季節変化を示さなかったが、5～6月にかけて一時的な上昇がみられた。この濃度上昇は田面水で生じた後、少し遅れて排水・浸透水でも生じており、水の流れによって波及していく様子を示した。この時期の一時的なDOC増加の理由としては、藻類等による有機物生産などが考えられるが、人為的な影響として除草剤の散布も考えられる。2002年には5月21日に除草剤の散布が行われているが、同年6月上旬のDOC濃度は5月中旬の値から大きく増加している。2001年については正確な記録は残っていないが、ほぼ同じ時期に散布されている可能性が高い。除草剤によって雑草が枯死し、その遺骸の分解が進むと考えられるほか、除草剤自体も有機物質であることから、除草剤の散布がDOC濃度を上昇させる要因の一つである可能性は十分にあると思われる。しかしながら、除草剤散布直後におけるDOC濃度の低下を報告している事例<sup>20)</sup>もあり、より詳細には分画手法などを用いた有機物の起源の特定や、より短い間隔での採水が必要となろう。

#### ウ. 年間の炭素収支

調査水田における単位面積当たりの炭素収支を表2に示す。水収支の場合と同様、水田への持ち込み・流入をプラス、水田からの持ち出し・流出をマイナスとした。水田が炭素に関して正味の吸収源か放出源かを評価するため、灌水開始からイネの収穫までを耕作期間、それに先立つ前年の収穫から灌水開始前までの期間を非耕作期間とし、年間での炭素収支を集計した。非耕作期間および耕作期間はそれぞれ、2000-2001年は2000年8月28日～2001年4月18日（234日）および2001年4月19日～9月2日（137日）、2001-2002年は2001年9月3日～2002年4月18日（228日）および2002年4月19日～9月18日（153日）であった。

集計は日単位を基本とした。溶存態炭素のフラックスは各水体の日積算流量に溶存炭素濃度を乗じて求めた。毎日の溶存炭素濃度は、採水日から次の採水日まで直線的に変化しているとして補間し、期間の最初の採水日以前および最後の採水日以降の濃度はそれぞれ最初と最後の採水日の濃度に等しいとした。降水中の濃度については、2001年の耕作期間に得られた結果の平均値を用いた。ガス態のフラックスについては、光合成および呼吸に伴うCO<sub>2</sub>フラックスは通年のデータが得られているが、メタンフラックスについては年によって観測期間が一致していないため、ここでは2001年および2002年の両年とも観測が行われている5月8日～9月24日（140日）のデータを集計した。収穫量については、生長解析から求められた結果の妥当性を検証するため、農家への聞き取り調査に基づく推定を行ったところ、2001年および2002年の収穫量はそれぞれ234および278gC/m<sup>2</sup>であった（宮田氏の推定による）。この値を基準とすると、生長解析に基づく値は2001年で45gC/m<sup>2</sup>の過大評価、2002年で26gC/m<sup>2</sup>の過小評価となり、

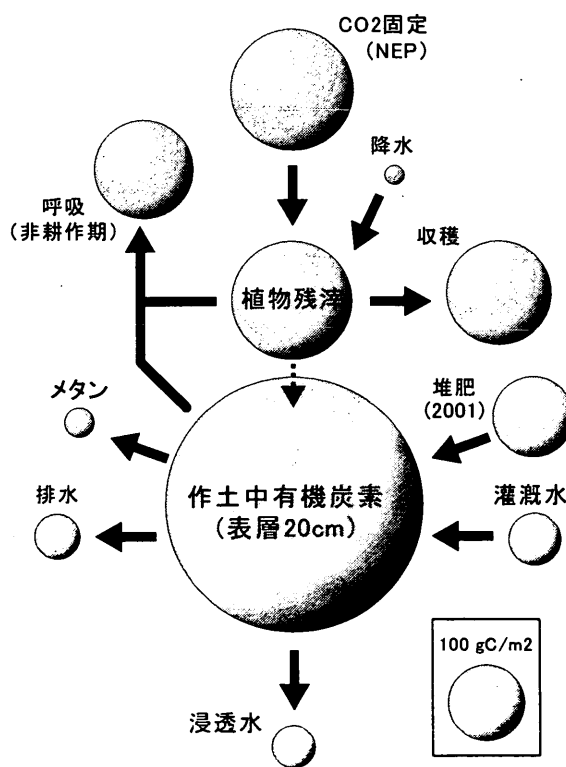


図26 年間の炭素収支の概要

現状では収穫量についてこの程度の測定誤差を考慮する必要がある。2001年の耕作期間に先立つ厩肥の施肥に伴う炭素の持ち込みは、文献<sup>13)</sup>の推定値を引用した。また、表層20cmの作土中の土壤有機物による炭素貯流量を、耕作期間中の作土の乾燥密度を0.856g/cm<sup>3</sup>、有機炭素含有率を2.22%として見積もった。なお、乾燥密度は2002年7月の落水時における表土の土壤コア試料についての測定結果、炭素含有率については表土コア試料および土壤断面調査の結果、ならびに調査水田内6地点における検土杖を用いて採取した土壤試料についての分析結果<sup>1)</sup>を平均したものである。

溶存態炭素の流入は灌漑水によるものが主体であり、降水の寄与は小さかった。流出では排水と浸透水がおおむね同程度であるが、灌漑水量の多かった2002年では排水の方が大きくなった。溶存態での炭素の流入出は全体の5%以上、多い場合で9%近くに及んだ。溶存態のみでの収支は、絶対値としては小さいが両期間ともマイナスとなり、水田がその下流域の炭素の供給源となっていることが示された。耕作期間中のCO<sub>2</sub>の取り込みは、期間の長さが1.5~1.7倍ある非耕作期間中のCO<sub>2</sub>放出の2倍前後となった。全炭素流入の中でも最も多く、厩肥が施肥された2000-2001年においても約3/4を占め、2001-2002年には9割を超えた。メタンの放出は全炭素流出の1%前後であり、炭素収支への寄与は小さかった。耕作期間中に取り込まれた炭素のうち64~65%が収穫として水田から持ち出され、残された植物残滓は次の非耕作期間中のCO<sub>2</sub>放出源となる。植物残滓は秋耕によって作土中に鋤き込まれるが、これに伴って土壤有機物が順次入れ替わると仮定すると、作土中土壤有機物の平均滞留時間は8~12年と概算される。これら炭素の流入・流出・貯留の各項の大きさを球の体積として視覚的に表すと図26のようになる。最終的に得られた全炭素収支は、2000-2001年で54gC/m<sup>2</sup>の吸収、2001-2002年で106gC/m<sup>2</sup>の放出となった。

#### エ. 溶存態炭素の安定同位体比

現時点で得られている、溶存無機炭酸および易分解性溶存有機物の炭素安定同位体比を表3に示す。強熱処理の効果を検証するため、無機炭素濃度が高く比較的多量の沈殿が回収できた8月の試料を優先して分析に供した。表3にはまた、同位体比から推定された各水体中の溶存炭酸のうち、大気中のCO<sub>2</sub>が混合した割合を概算した値を示した。これは、溶存炭酸の起源を大気中のCO<sub>2</sub>およびイネの根の呼吸や土壤有機物の分解による生物由来のCO<sub>2</sub>の2つのみとし、前者および後者の炭素同位体比をそれぞれ-8%および-25.5%としてその割合を計算したものである。生物由来の同位体比は、表4に示した土壤有機物中の同位体比の分析結果を元に決定した。イネ生体中の同位体比は測定していないが、調査水田では長年に渡り耕作が行われてきており、また表4に示した値がC3植物に見られる一般的な値であることから、土壤有機物の同位体比とほぼ同様と考えて差し支えないと判

表3 溶存態炭素の安定同位体比

地 点	採水日 (2002年)	$\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$ (‰)		大気CO <sub>2</sub> の割合 (%)	
		強熱なし	強熱あり	強熱なし	強熱あり
溶存無機炭素					
給水栓1	8/1	-12.8	-24.9	72.7	3.7
給水栓2	"	-12.9	-25.8	72.0	<0
排水口1	"	-10.6	-23.5	85.3	11.4
排水口2	"	-12.5	-24.9	74.2	3.4
田面水-S	8/3	-15.2	-23.5	59.1	11.7
浸透水-N	8/3	-21.5	-25.8	22.9	<0
" -E	8/16	-20.1	—	30.9	—
" -W	8/3	-20.8	-24.5	27.1	5.5
"	8/16	-20.8	-24.7	26.8	4.4
" -S	8/3	-20.3	-25.4	29.9	0.6
"	8/16	-20.0	-24.8	31.2	4.3
溶存有機炭素 (易分解性)					
給水栓1	8/1	-11.9	-23.6	(77.4)	(11.0)
排水口1	"	-11.6	-23.6	(79.6)	(10.9)
排水口2	"	-12.3	-23.5	(75.5)	(11.5)
田面水-S	8/3	-12.8	-25.4	(72.3)	(0.9)

断した。

強熱処理の影響は極めて大きく、浸透水で5%程度、有機炭素を含めたそれ以外の水体で10%を超える同位体比の変化が生じた。強熱しない試料の場合、浸透水で-20~-21%、それ以外で-10~-15%の値が得られたのに対して、強熱した場合は-23~-26%という、土壌有機物中の値とほぼ同様の値まで減少している。この理由として、一般に0%前後の重い値を持つ炭酸塩鉱物が除かれたことが考えられる。溶存有機物についても、その全組成についてはイネや土壌とほぼ同じ同位体比を持つと予想されるが、100%リン酸で酸化される際に分解される部分とされない部分との間で同位体分別が生じる可能性も考えられ、これが強熱によって除去されたことによる効果もあると思われる。

強熱処理を行った試料について溶存炭酸の起源を推定した結果、そのほとんどが生物起源であり、大気CO<sub>2</sub>の混入は田面水においても最大10%程度ときわめて小さい。これは、田面水中の溶存炭酸が根呼吸や有機物分解によって常に供給されていることを意味しており、高温のためCO<sub>2</sub>の溶解度が低下するはずの夏季においても高いDIC濃度が維持されるのはこの供給によるためである。なお、強熱していない試料についての推定値を見ると、大気CO<sub>2</sub>の混合率が浸透水（30%）<それ以外の水体（70~80%）となっており一見妥当に見えるが、これは浸透水の採取量が他の水体の1/4と少なく不純物による影響が小さかったためであろう。

水田の各水体中の溶存炭酸の起源を炭素安定同位体比を用いて推定した例は過去に無く、表3に示した結果は大気中へ放出されるCO<sub>2</sub>の起源の推定やモデル化などに有用な知見である。本研究において開発した前処理法は、理論上は目的とする炭酸バリウムに影響を及ぼすことなく主要な炭酸塩鉱物や溶存有機物などの不純物を除去することが可能である。他方、現実の試料中には様々な物質が含まれており、900℃という高熱の条件下で想定しえない反応が生じて同位体比に影響を及ぼす可能性が完全には否定できないことも事実であり、今後多くの水田生態系における手法の検証も含めた溶存炭素の同位体測定が望まれる。

#### ⑤本研究により得られた成果

我が国を代表する耕地生態系の一つである水田において、水収支観測に重点を置いた炭素収支の実態把握を行った。得られた主な成果は以下のとおりである。

- 1) 耕作期間における水収支は、流入のおよそ3/4が灌漑水によるもの、1/4が降水によるものであり、流出に占める排水・浸透・蒸発散の割合はおおむね5:3:2であった。これらの結果は、水田の水収支に関して人間による水管理の影響が大きいこと、また表面流出による物質輸送の重要性を示すものである。
- 2) 溶存炭素の濃度はDICがDOCを上回り、前者が20~40mgC/Lに達したのに対して後者は最高で

表4 土壌有機物中の炭素・窒素の含有率および安定同位体比

試料	$\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$ (‰)	$\delta^{15}\text{N}_{\text{Air}}$ (‰)	TOC (wt%)	TON (wt%)	C/N
層位別					
Ap	-25.9	3.8	1.88	0.17	11.1
Ag	-25.7	3.7	2.16	0.20	10.8
Bg1	-25.5	4.1	1.72	0.16	10.8
Bg2	-25.3	4.6	2.04	0.18	11.3
Bg3	-23.3	5.5	1.83	0.14	13.1
Cg	—	—	0.12	0.01	12.0
Gr	-23.9	4.5	2.09	0.15	13.9
地点別（表土）					
給水側	-25.2	4.6	3.32	0.30	11.1
排水側	-24.8	4.4	1.89	0.16	11.8
N	-25.9	4.2	1.83	0.16	11.4
E	-25.6	4.0	1.80	0.16	11.3
W	-25.6	4.7	3.07	0.28	11.0
S	-24.8	4.0	1.95	0.17	11.5

も15mgC/L未満だった。DIC濃度は耕作期間を通じてほぼ一様に上昇した。DOC濃度は表面流出の経路に沿って増加し、水田がDOCの排出源となる可能性が示唆された。既往の研究では溶存態炭素の流出としてDOCのみを扱ったものが多いが、本研究の結果から水田の溶存炭素の動態はDICを含めて扱う必要があるといえる。

- 3) 溶存態炭素の流入は灌漑水によるものが主体であり、降水の寄与は小さかった。流出では排水と浸透水がおおむね同程度であるが、灌漑水量の多い年では排水の方が大きくなった。溶存態での炭素の流入出は全体の5~9%であった。溶存態のみでの収支はマイナスとなり、水田がその下流域の炭素の供給源となっていることが示された。
- 4) 炭素の流入として最も大きかったのは光合成によるCO<sub>2</sub>の取り込みであり、このうちの6割強が収穫によって持ち出された。メタンの放出は全炭素流出の1%前後であり、炭素収支への寄与は小さかった。鋤き込まれた植物残滓によって作土中の有機物が順次入れ替わるとした場合、その平均滞留時間は8~12年と概算された。最終的に得られた全炭素収支は、2000-2001年で54gC/m<sup>2</sup>の吸収、2001-2002年で106gC/m<sup>2</sup>の放出となった。
- 5) 水田の各水体中の溶存炭酸の起源を、大気CO<sub>2</sub>および生物代謝の2つとして寄与率を推定した結果、その多くが生物起源であり、大気CO<sub>2</sub>の混入は田面水においても最大10%程度と小さかった。これによって、耕作期間を通じて上昇する高DIC濃度が生物代謝によって維持されていることが、同位体比からも示された。水田におけるこのような推定事例は過去に無く、本研究で得られた知見は大気中へ放出されるCO<sub>2</sub>の起源の推定やモデル化などに有用である。

#### ⑥引用文献

- 13) 大津正一 (2002) : つくば地域の水田における炭素の動態と収支. 筑波大学大学院環境科学研究科修士論文, 85p.
- 14) 長谷哲也 (2003) : つくば地域の水田における除草剤の動態と流出量の評価. 筑波大学大学院環境科学研究科修士論文, 97p.
- 15) 宮田明 (2003) : 各種生態系における大気とのCO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, エネルギー交換量の解明に関する研究. 地球環境研究総合推進費平成14年度研究成果, (印刷中)
- 16) 鈴木秀和・田瀬則雄 (1999) : 浅間山周辺における湧水中の溶存炭酸の炭素同位体比—火山性CO<sub>2</sub>ガスの寄与率の推定. 日本地下水学会1999年度秋季講演会講演要旨, 52-55.
- 17) Boutton, T. W. (1991): Stable carbon isotope ratios of natural materials: I. Sample preparation and mass spectrometric analysis. In: Coleman, D. C. and Fry, B. eds. 'Carbon Isotope Techniques', Academic Press, 155-171.
- 18) Showers, W. J. and Angle, D. G. (1986): Stable isotope characterization of organic carbon accumulation on the Amazon continental shelf. *Cont. Shelf Res.*, 6, 227-244.
- 19) Grossman, E. L. and Ku, T. (1986): Oxygen and carbon isotope fractionation in biogenic aragonite: Temperature effect. *Chem. Geol. (Isotope Geoscience Section)*, 59, 59-74.
- 20) 宇土顕彦・竺 文彦・大久保卓也・中村正久 (2000) : 灌漑期の水田における水量収支と栄養塩収支. 水環境学会誌, 23, 298-304.

#### ⑦国際共同研究等の状況

なし

#### (4) 安定同位体比の測定による森林内炭素サイクルの解明 (岐阜大学)

##### ① 研究目的

森林をはじめとする陸域生態系のCO<sub>2</sub>の吸収能を評価する事を目的として、これまでに炭素収支の研究が世界各地で盛んに行われてきている。生態系のCO<sub>2</sub>の吸収能の評価は、それぞれの生態系を構成する植物のバイオマスの計測や推定によって進められてきた。最近では渦相関法など微気象学的手法を用い、大気と生態系間のCO<sub>2</sub>フラックス(交換量)から生態系の炭素収支を日、季節、年単位で推定出来るようになった<sup>21),22),23)</sup>。生態系レベルでの炭素循環は、植物の光合成による吸収と、植物や土壌微生物の呼吸による放出の大きく2つの経路からなる。これまで進められてきた炭素収支の評価の多くが、光合成によるCO<sub>2</sub>の吸収量と呼吸による放出量の年単位での総計に注目したものである。これはバイオマスの増加を元にした評価方法が主なものであり、生態系レベルでの炭素収支が対象となっていたためである。しかし、生態系レベルでの炭素循環を明らかにするためには、系内外での炭素収支だけでなく、生態系の炭素収支に関わる森林生態系内での炭素動態を知ることが重要である。

本研究では、森林生態系内における炭素循環の中で呼吸起源CO<sub>2</sub>の再吸収過程に注目し、呼吸起源のCO<sub>2</sub>の行方を微気象測定、光合成および土壌呼吸の測定、炭素安定同位体分析によって調べることを目的とした。本研究ではまず炭素安定同位体分析にむけた実験ラインの確立および構築を行った。次にこの実験ラインを用いて、森林内における大気CO<sub>2</sub>、植物体、土壌の炭素安定同位体比( $\delta^{13}C$ )を測定し、呼吸起源CO<sub>2</sub>の $\delta^{13}C$ の推定を行った。これらの値とSternberg(1989)<sup>24)</sup>の理論式を用いて森林内を構成するミズナラ(*Quercus cripula* Blume)やダケカンバ(*Betula ermanii* Cham)および林床に優占するクマイザサ(*Sasa senanensis* Rehder)による呼吸起源のCO<sub>2</sub>の再吸収率を推定した。また森林内の大気CO<sub>2</sub>の濃度や $\delta^{13}C$ は、微気象的な要因、光合成・呼吸などの生物的な要因によって常に変化していると考えられる。そこで環境要因としてCO<sub>2</sub>濃度、光量子束密度、気温および土壌温度を、また生物的な要因として林床に優占するクマイザサの光合成特性および土壌呼吸速度の測定を行い、これらが森林内の大気CO<sub>2</sub>の濃度や $\delta^{13}C$ 、および森林内を構成する植物における呼吸起源のCO<sub>2</sub>の再吸収率に与える影響を検討した。また再吸収率の推定にはいくつかの問題点が上げられており、この問題に関しての検討を行った。

##### ② 調査地の概要

調査は、乗鞍岳南西斜面の冷温帯落葉広葉樹林(36° 08' N、137° 25' E)に設置されている岐阜大学流域圏科学研究センター高山試験地の1haの永久調査区内で行った。調査地の標高は約1420m、冬季の最大積雪深は1mを越える。この森林は、ミズナラ(*Quercus cripula* Blume)、ダケカンバ(*Betula ermanii* Cham)、シラカンバ(*Betula platyphylla* Sukatachev var *japonica* Hara)が優占する50年生の2次林である。中・低木層には、ホオノキ(*Magnolia obovata* Thunb.)、ウリハダカエデ(*Acer rufinerve* Sieb. et Zucc.)、オオヤマザクラ(*Prunus sargentii* Regder)、コハウチワカエデ(*Acer sieboldianum* Miq.)、ノリウツギ(*Hydrangea paniculata* Sieb. et Zucc.)、オオカメノキ(*Viburnum furcatum* Blume ex Maxim.)が見られる。林床には、常緑のクマイザサ(*Sasa senanensis* Rehder)が優占している。

岐阜大学流域圏科学研究センター高山試験地では、総合気象観測システムにより1時間ごとの気温・地温・相対湿度・日射量および降水量を測定している。2001年の年平均気温は7.1℃、年降



水量は1,651mmであった。2002年の年平均気温は7.2℃、年降水量は1,911mmであった。

### ③研究方法

2001年と2002年の8月（林冠成長期）と10月（林冠落葉後）に、森林内の大気、林冠木およびクマイザサの葉、リターおよび土壌のサンプリングを行い、炭素安定同位体比（ $\delta^{13}\text{C}$ ）を測定した。また2002年8月および10月のサンプリング時には、 $\text{CO}_2$ 濃度、光量子束密度、気温および土壌温度の測定も行った。2001年には、大気のサンプリングを同試験地内の尾根部、谷部および中間部の3地点において、ササ群落直上（地表から2m）、ササ群落内（地表から1m）、地表面（地表から0.1m）の3層で行った。また、大気のサンプリングを行った3地点において、クマイザサの当年葉と越年葉、リターおよびリター直下の土壌を採取した。さらに、2002年には、大気のサンプリングを高さ18mの林冠観測タワーおよび周囲の林床において、地表から0.1, 2.0, 10.0, 14.0, 18.0mの5カ所で行った。また、大気のサンプリングを行った14mおよび10m地点の林冠木のミズナラとダケカンバの葉、林床のクマイザサの当年葉と越年葉、リターおよびリター直下の土壌を採取した。

土壌呼吸速度の測定には、携帯型光合成測定装置（LI-6400、Li-Cor）に土壌呼吸チャンバー（LI-6400-09、Li-Cor）を取り付けたものを使用した。試験地内に10m×10mのコドラートを設置し、さらに2m×2mのサブコドラート25地点に分け、各サブコドラート内で土壌呼吸速度の測定を行った。測定は、2001年6月から10月まで、約1ヶ月毎に行った。

土壌呼吸速度の測定と同時に、環境要因として土壌温度（地表面下1cmと5cm）および土壌含水率の測定を行った。土壌温度の測定にはLI-6400付属の土壌温度計（Soil Temperature Probe; Type E、Li-Cor）を、土壌水分の測定にはポータブル水分計（TRIME-FM2 / P2 Probe、IMKO）を用いた。2001年9月11日、11月17日および2002年10月12日（林冠木の落葉直後）にクマイザサの光-光合成曲線を測定した。測定には携帯型光合成測定装置（LI-6400、Li-Cor）を用いた。人工光源を用いて、光量子束密度を1000, 1500, 1000, 500, 300, 150, 100, 50, 30, 10, 0  $\mu\text{mol photons m}^{-2} \text{s}^{-1}$ の順に変化させて光合成速度および暗呼吸速度を測定した。チャンバーに送る空気の $\text{CO}_2$ 濃度を370ppm、相対湿度を60~70%に制御した。チャンバー内の気温は、2001年9月の測定では20℃、2001年11月と2002年10月は10℃に設定した。測定には当年葉および越年葉（展葉後1年目を経過した葉）を各3枚用いた。2002年10月の越年葉については、1枚の葉についてのみ測定を行った。

### ④結果・考察

#### ア. 土壌呼吸速度

2001年に測定した土壌温度と土壌水分および土壌呼吸速度の季節変化を図27に示す。土壌温度（地表面、地表面下5cm）は夏期に向かって上昇し、その後低下した。この森林内における土壌呼吸速度は、6月には約491  $\text{mg CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ hr}^{-1}$ だったのが、8月に最大（926  $\text{mg CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ hr}^{-1}$ ）となり、その後は10月には317  $\text{mg CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ hr}^{-1}$ まで減少した。土壌呼吸速度は土壌温度の上昇とともに指数関数的に増加する傾向を示した。しかし土壌呼吸速度と土壌水分との間には明瞭な関係が見られなかった。

土壌呼吸速度と土壌温度（地表面下5cm）の指数回帰式( $y=111.4\exp0.1211x$ )と、地表面下5cmにおける1時間ごとの土壌温度のデータから、大気サンプリングを行った2002年8月5日と10月25日の土壌呼吸速度の日変化を推定した（図28）。土壌呼吸速度は、土壌温度の上昇に伴い、昼過

ぎ（15:00～16:00）に最大となり、早朝（4:00～5:00）に最低になると推定された。その傾向は8月と10月で変わらないものの、土壌温度の差によって土壌呼吸速度の値は大きく異なっていた。それぞれの日の土壌温度（地表面下5cm）の平均値は、8月は17.8℃、10月は8.0℃であった。8月の土壌呼吸速度は日中に1145 mg CO<sub>2</sub> m<sup>-2</sup> hr<sup>-1</sup>に達し、日没後も土壌温度は低くならず夜間も土壌呼吸速度は高いままであった。一方、10月になると土壌呼吸速度は最大値373 mg CO<sub>2</sub> m<sup>-2</sup> hr<sup>-1</sup>となり、8月の1/3程度だった。

以上の計算結果から1日の土壌呼吸量は、8月には26.7 g CO<sub>2</sub> m<sup>-2</sup> day<sup>-1</sup>、10月には7.32 g CO<sub>2</sub> m<sup>-2</sup> day<sup>-1</sup>と推定された。

#### イ. クマイザサの光合成特性

2001年の9月、11月および2002年の10月（落葉直後）に測定したクマイザサの光-光合成曲線および気孔コンダクタンスを図29に示す。2001年9月のクマイザサの最大光合成速度は、当年葉は9.11±0.45 μmol m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup>、越年葉は10.23±0.78 μmol m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup>であった。2002年10月のクマイザサの最大光合成速度は当年葉で10.14±0.76 μmol m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup>、越年葉では6.3 μmol m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup>であった（図29）。越年葉の値はやや低いものの、9月の値と変わらない値を示した。

2001年9月および2002年10月の測定から得られたクマイザサの個葉の光-光合成曲線と、クマイザサ群落直上（2m）で測定した光量子束密度のデータに基づき、大気サンプリング時のクマイザサの個葉の光合成速度の日変化を推定した（図30）。8月の大気サンプリング日のクマイザサの光合成速度は、日の出から午前中まで低いままであったが、正午過ぎ急激に増加し、8.9 mol m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup>まで達し、その後減少した。10月は、日の出とともにクマイザサの光合成速度は増加し、日中（10:00～15:00）において7.5 μmol m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup>と高い値を維持した。

以上の計算結果から、クマイザサの当年葉と越年葉の平均の葉面積あたりの日積算光合成量は、夏期は約87 mmol m<sup>-2</sup> day<sup>-1</sup>、秋期には約180 mmol m<sup>-2</sup> day<sup>-1</sup>と推定された。

#### ウ. 植物体の葉の炭素安定同位体比 ( $\delta^{13}\text{C}_{\text{leaf}}$ )

ミズナラ、ダケカンバおよびクマイザサの葉の炭素安定同位体比 ( $\delta^{13}\text{C}_{\text{leaf}}$ ) を表5に示す。ミズナラおよびダケカンバの $\delta^{13}\text{C}_{\text{leaf}}$ は、2002年8月と10月で異なる値を示した。8月には、ミズナラとダケカンバの $\delta^{13}\text{C}_{\text{leaf}}$ はそれぞれ-26.24±0.26‰、-27.36±0.66‰と近い値を示した。一方、10月になるとダケカンバの $\delta^{13}\text{C}_{\text{leaf}}$ は-25.80±0.61‰と8月の値よりも低くなった。10月のミズナラの $\delta^{13}\text{C}_{\text{leaf}}$ は8月の値に近い-27.09±0.44‰であり、ダケカンバの $\delta^{13}\text{C}_{\text{leaf}}$ のような季節変化は見られなかった。

クマイザサの $\delta^{13}\text{C}_{\text{leaf}}$ は、林冠のミズナラやダケカンバに比べて低い値を示した。またクマイザサの $\delta^{13}\text{C}_{\text{leaf}}$ は2001年と2002年で異なった傾向を示した。2001年8月には、当年葉の $\delta^{13}\text{C}_{\text{leaf}}$ は-30.03±0.29‰、越年葉は-28.41±0.55‰であり、越年葉の $\delta^{13}\text{C}_{\text{leaf}}$ が当年葉に比べ高かった。10月の $\delta^{13}\text{C}_{\text{leaf}}$ は当年葉は-30.99±0.96‰、越年葉は-29.43±0.06‰と、ともに8月 $\delta^{13}\text{C}$ よりも低い値を示した。2002年8月には、当年葉の $\delta^{13}\text{C}_{\text{leaf}}$ は-27.75±0.17‰、越年葉は-30.35±0.47‰となり、当年葉の $\delta^{13}\text{C}_{\text{leaf}}$ が越年葉よりも高い値を示した。しかし10月になると当年葉の $\delta^{13}\text{C}_{\text{leaf}}$ は-29.80±0.30‰まで低下し、越年葉の-29.56±0.42‰とほぼ同じ値を示した。

#### エ. 森林内の大気CO<sub>2</sub>の炭素安定同位体比 ( $\delta^{13}\text{C}_{\text{canopy}}$ )

森林内におけるCO<sub>2</sub>濃度 ( $[CO_2]_{canopy}$ ) および炭素安定同位体比 ( $\delta^{13}C_{canopy}$ ) には明瞭な鉛直勾配がみられた (図31)。林冠に比べて林床のCO<sub>2</sub>の濃度は高く、 $\delta^{13}C$ は低くなっていた。最もCO<sub>2</sub>濃度が高く、 $\delta^{13}C$ が低くなっていたのは朝の0.1m地点であり、 $[CO_2]_{canopy}$ は465.8ppm、 $\delta^{13}C_{canopy}$ は-12.51%であった。朝、昼、夜の測定によって $[CO_2]_{canopy}$ および $\delta^{13}C_{canopy}$ の鉛直勾配が最も顕著に見られたのは朝であった。林冠上部から地表面までの $[CO_2]_{canopy}$ の差は、朝は88.8ppm、昼は40.7ppm、夜は59.4ppmであり、 $\delta^{13}C_{canopy}$ の差は朝は4.1%、昼は2.9%、夜は3.9%であった。森林内の大気CO<sub>2</sub>濃度は朝にもっとも高く、 $\delta^{13}C$ は朝に最も低いことがわかった。

地表から18~2mの範囲では $[CO_2]_{canopy}$ および $\delta^{13}C_{canopy}$ はほとんど変わらなかったが、地表から2m以下では急激な変化を示した。地表から18~2mの $[CO_2]_{canopy}$ の差は、朝は7.7ppm、昼は5.3ppm、夜は11.5ppmと小さく、 $\delta^{13}C_{canopy}$ の変動も0.12~0.75%程度であった。しかし、地表から2m以下での $[CO_2]_{canopy}$ および $\delta^{13}C_{canopy}$ の変動幅は、朝はそれぞれ81ppmと3.94%、昼は34ppmと2.41%、夜は48ppmと3.19%で、地表から2m以上での変動に比べて大きかった。

林床 (2m以下) における $[CO_2]_{canopy}$ および $\delta^{13}C_{canopy}$ の値を2001年8月と10月で比較してみると、 $[CO_2]_{canopy}$ と $\delta^{13}C_{canopy}$ の鉛直勾配の時空間的变化が異なっていた (図31)。2001年8月、10月ともに地表面に近いほど $[CO_2]_{canopy}$ は高く、 $\delta^{13}C_{canopy}$ は低くなっていた。8月のクマイザサ群落直上 (地表から2m) から地表面 (0.1m) にかけての $[CO_2]_{canopy}$ および $\delta^{13}C_{canopy}$ の差は、それぞれ朝は83ppmと1.50%、昼は101ppmと3.66%、夜は107ppmと3.25%であった。しかし、10月になると、8月に見られたような $[CO_2]_{canopy}$ と $\delta^{13}C_{canopy}$ の大きな鉛直勾配が見られたのは早朝のみであった (それぞれ82ppmと2.85%)。2001年10月は、朝の0.1m地点の $[CO_2]_{canopy}$ は468ppmと高く、 $\delta^{13}C_{canopy}$ も-11.64%であった。しかし、昼間になるとクマイザサ群落直上から地表面の間の $[CO_2]_{canopy}$ と $\delta^{13}C_{canopy}$ は変わらず、その差はそれぞれ2ppm、0.2%と小さかった。また、夜間におけるクマイザサ群落直上から地表近くまでの $[CO_2]_{canopy}$ と $\delta^{13}C_{canopy}$ の差はそれぞれ29ppmと1.45%であり、朝ほど大きな差は見られなかった。

#### オ. 呼吸起源CO<sub>2</sub>の炭素安定同位体比 ( $\delta^{13}C_r$ ) の推定

2001年10月と2002年8月の早朝および夜間に採取した森林内の大気CO<sub>2</sub>の濃度の逆数 ( $1/[CO_2]_{canopy}$ ) と $\delta^{13}C_{canopy}$ について直線回帰を行った ( $r^2 = 0.99$ ,  $P < 0.0001$ )。2001年8月のデータについては、大気サンプリング時に測定したCO<sub>2</sub>濃度と、 $\delta^{13}C_{canopy}$ を測定したサンプリングボトル内のCO<sub>2</sub>の濃度とが一致していない可能性があったため回帰分析には用いなかった。

2002年に採取したリターの $\delta^{13}C$ は8月には $-27.61 \pm 0.03\%$ 、10月には $-28.20 \pm 0.07\%$ であり、季節間での大きな違いは見られなかった。また、2001年10月と2002年10月の値を比べてみると、それぞれ $-28.93\%$  (統計処理における切片誤差: 0.10) と $-28.20\%$  (統計処理における切片誤差: 0.07) で、ほぼ同じ値を示した。これらの値はミズナラ、ダケカンバ、クマイザサなど森林内に優占する植物の葉の $\delta^{13}C$ と近い値であった。土壌有機物の $\delta^{13}C$ は2001年に $-28.93 \pm 0.10\%$ 、2002年に $-27.61 \pm 0.03\%$ と、2001年、2002年ともに変動は見られなかった。また推定された $\delta^{13}C$ は2001年10月は $-24.02 \pm 0.32\%$ 、2002年8月は $-29.99 \pm 0.63\%$ であり、同時期の森林内に優占する植物の葉の $\delta^{13}C$ やリターおよび土壌有機物の $\delta^{13}C$ に近い値を示した。

#### カ. 呼吸起源CO<sub>2</sub>の再吸収率 ( $\phi$ ) の推定

日中の大気サンプリングから得られた森林内のCO<sub>2</sub>濃度 ( $[CO_2]_{canopy}$ ) および $\delta^{13}C_{canopy}$ 、林冠木や

クマイザサの葉の $\delta^{13}\text{C}_{\text{leaf}}$ 、推定された呼吸起源 $\text{CO}_2$ の $\delta^{13}\text{C}_r$ とSternberg (1989)<sup>24)</sup>の理論式から、林冠木(ミズナラやダケカンバ)およびクマイザサによる呼吸起源 $\text{CO}_2$ の再吸収率を求めた(表6)。2002年8月には、林冠木のミズナラやダケカンバの再吸収率は負の値を取り、14m、10mともに0%と推定した。一方、林床のクマイザサ(当年葉)の呼吸起源 $\text{CO}_2$ の再吸収率は2.0mでは0%であったが、0.1mでは9.4%と推定された。また、クマイザサ(越年葉)による再吸収率は2.0mで62%、0.1mでは0%と推定された。しかし、樹木の落葉後の10月になるとクマイザサによる再吸収率は低くなり、約0.3~4%程度となった。

#### ⑤ 引用文献

- 21) Baldocchi, D.D., Hicks, B.B. and Meyers, T.P. 1988. Measuring biosphere-atmosphere exchanges of biologically related gases with micrometeorological methods. *Ecology*, 69: 1331-1340
- 22) Wofsy, S. C. Harriss, R. C. and Kaplan, W. A. 1988. Carbon dioxide in the atmosphere over the Amazon basin. *Journal of Geophysical Research*, 93: 1377-1387
- 23) Andrews, J. A., Matamala, R., Westover, K.M. and Schlesinger, W.H. 2000. Temperature effects on the diversity of soil heterotrophs and the  $\delta^{13}\text{C}$  of soil respired  $\text{CO}_2$ . *Soil Biology and Biochemistry*, 32: 699-706
- 24) Sternberg, L. 1989. A model to estimate carbon dioxide recycling in forests using  $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$  ratios and concentrations of ambient carbon dioxide. *Agricultural and Forest Meteorology*, 48: 163-173

#### ⑥ 国際共同研究等の状況

なし

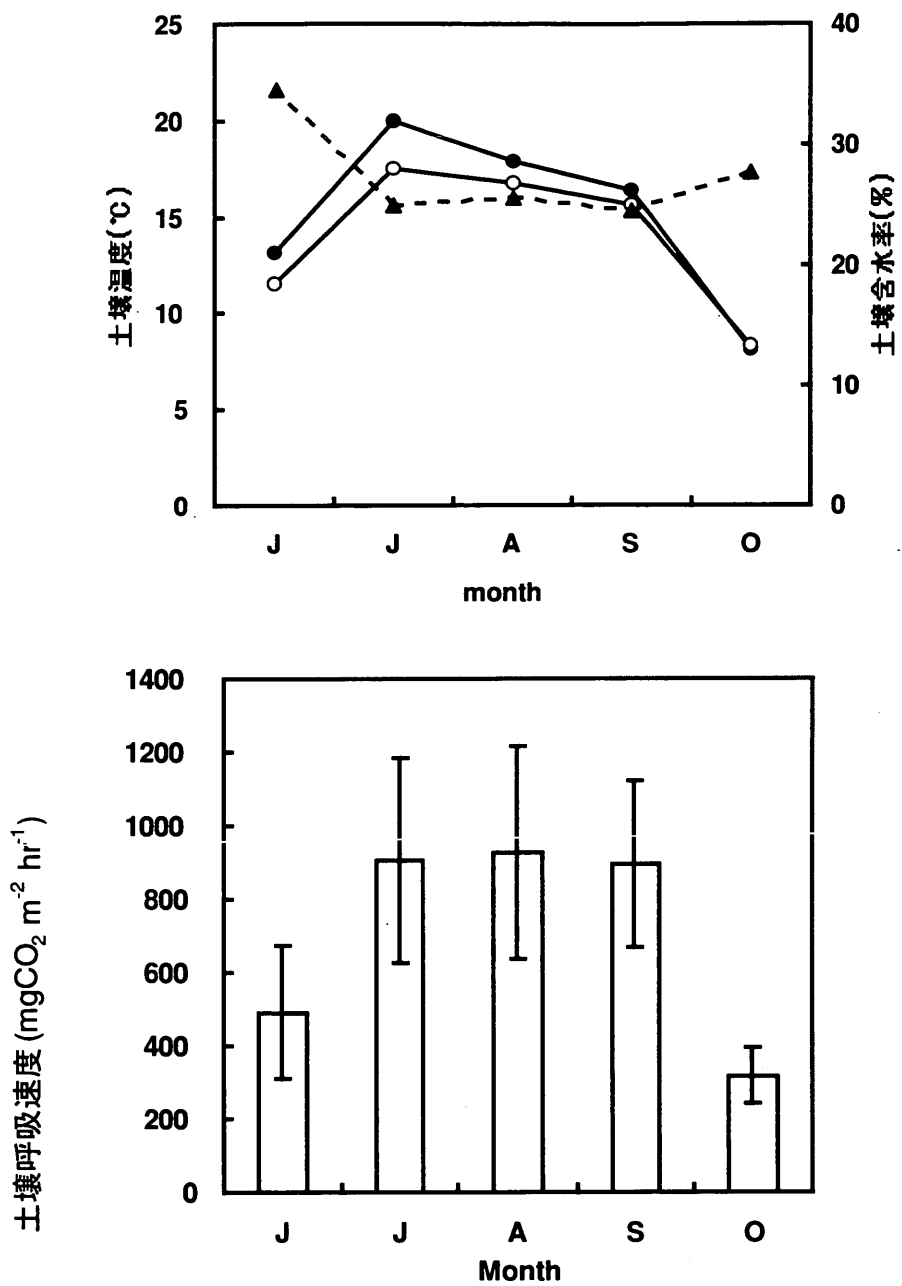


図27. 2001年に測定した土壤温度と土壤含水率および土壤呼吸速度の季節変化。

上図: ●地表面下1cm土壤温度、○地表面下5cm土壤温度、▲土壤水分。

下図: 25地点での測定における土壤呼吸速度の月平均値と標準偏差。

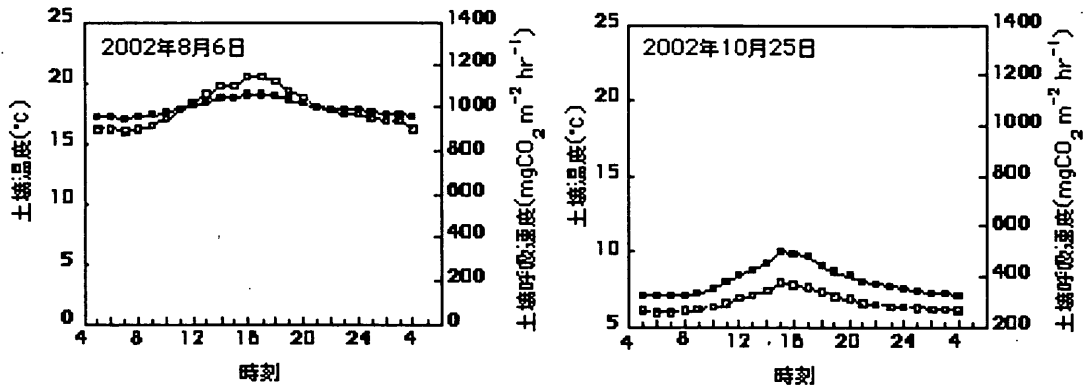


図28. 土壌呼吸速度と土壌温度の関係式および深さ5cmにおける土壌呼吸温度から推定した2002年の大気サンプリング時の土壌呼吸速度の日変化。●:地表面下5cmの土壌温度、□:土壌呼吸速度。

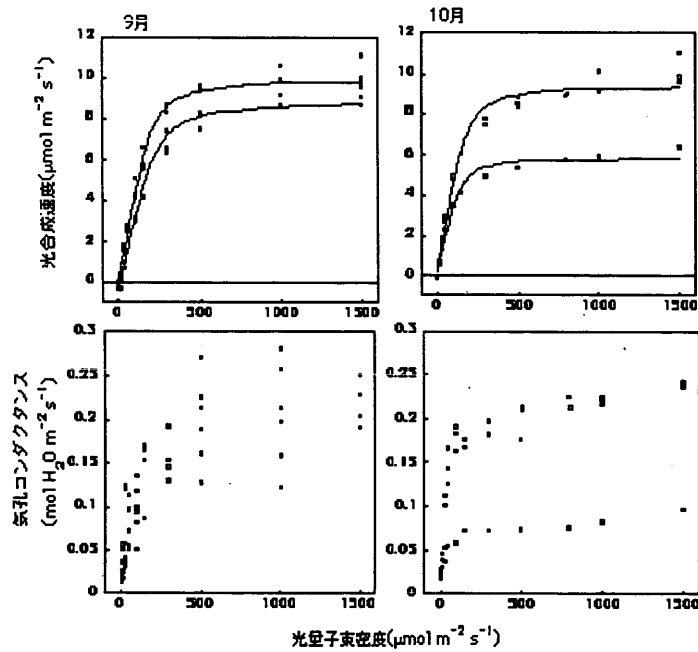


図29. 2001年9月、2002年10月に測定したクマイザサの個葉の光合成速度および気孔コンダクタンス。左図:9月測定、右図:10月測定、○:当年葉、●:越冬葉。

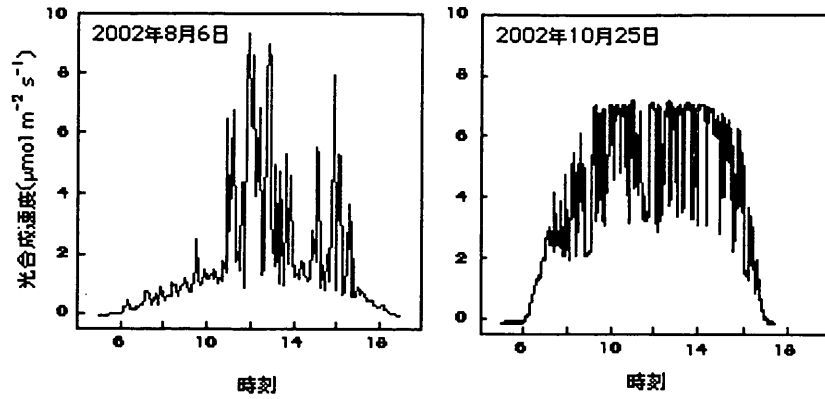


図30. 光-光合成曲線および群落上における光量子密度の測定データから推定された2002年8月および10月の大気サンプリング時におけるクマイザサの個葉の光合成速度（当年葉と越年葉の平均値）の日変化。左図：2001年9月の光-光合成曲線使用、右図：2002年10月の光-光合成曲線使用。

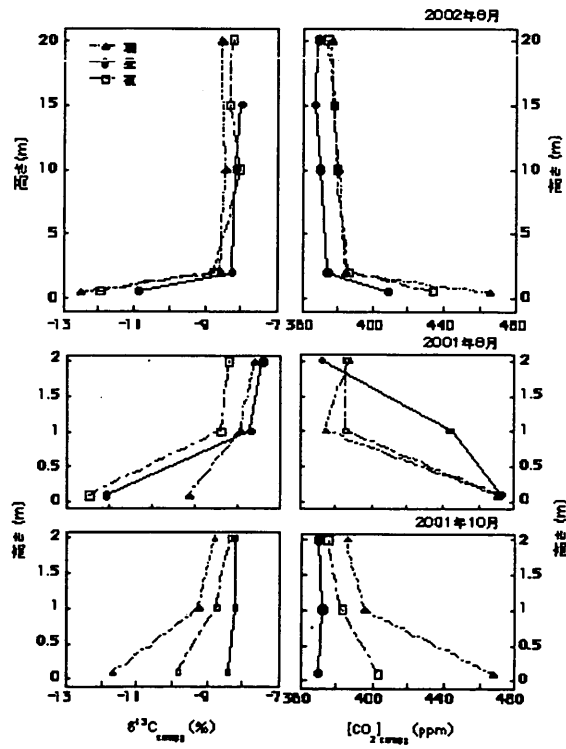


図31. 2001年8月と10月および2002年8月の $\delta^{13}\text{C}_{\text{canopy}}$ と $[\text{CO}_2]_{\text{canopy}}$ の鉛直勾配の日変化。上図：2002年8月、中図：2001年8月、下図：2001年10月。

表5. 林冠木およびクマイザサの $\delta^{13}\text{C}$

	2001年8月		2001年10月		2002年8月		2002年10月	
	mean $\pm$ SD (%)	n	mean $\pm$ SD (%)	n	mean $\pm$ SD (%)	n	mean $\pm$ SD (%)	n
15m ミズナラ	-		-		-26.24 $\pm$ 0.26	5	-27.09 $\pm$ 0.44	4
ダケカンバ	-		-		-27.36 $\pm$ 0.66	3	-25.80 $\pm$ 0.61	3
10m ダケカンバ	-		-		-28.80 $\pm$ 0.66	3	-	
2m クマイザサ								
(当年葉)	-30.03 $\pm$ 0.29	3	-30.99 $\pm$ 0.96	3	-27.75 $\pm$ 0.17	5	-29.80 $\pm$ 0.30	4
(越年葉)	-28.41 $\pm$ 0.55	3	-29.43 $\pm$ 0.06	3	-30.35 $\pm$ 0.47	4	-29.80 $\pm$ 0.42	4

表6. 林冠木およびクマイザサによる呼吸起源 $\text{CO}_2$ の吸収率 (%)

高さ		2001年10月	2002年8月
14.0m	ミズナラ	-	0.0
	ダケカンバ	-	0.0
2.0m	ササ (当年葉)	2.5	0.0
	(越年葉)	3.2	62.0
1.0m	ササ (当年葉)	3.9	-
	(越年葉)	5.0	-
0.1m	ササ (当年葉)	0.3	9.4
	(越年葉)	0.4	0.0

※ 2001年10月は14mの $\delta^{13}\text{C}_{\text{leaf}}$ ,  $\delta^{13}\text{C}_{\text{leaf}}$ が無い場合推定値なし

2002年8月は1.0mの $\delta^{13}\text{C}_{\text{atm}}$ が無い場合推定値なし

## (5) 暖温帯森林生態系における炭素の循環と流出プロセスに関する研究 (京都大学)

### ① 研究目的

森林流域内の種々の水文素過程が物質フローに及ぼす影響を評価することは、集水域全体の物質循環を考える上で重要な課題である。水の滞留は生物地球化学反応の進行をコントロールするので、流域内の各部位での水の平均滞留時間はシンク/ソースの強度を解釈するために不可欠な指標である。A<sub>0</sub>層で形成されるDOCは土壌水が浸透流下する過程で一般に減少し、残余が溪流に流出する。流出炭素の量としては、無機態炭素のそれに匹敵し、その役割は水域生態系のエネルギー源として重要な意味を持つ。このDOCの濃度形成機構は、流下過程の上記の水文条件に大きく左右



される。こうした水系を経た炭素流出のメカニズムの解明にはトレーサーとして水や炭素の安定同位体が有用なことが多い<sup>25)・26)</sup>。

滋賀県南部に位置する桐生試験流域では、これまで、森林生態系内の種々の水文過程に関する観測や、それぞれの水文素過程における水の安定同位体比の測定が進められてきており、森林からの炭素流出のメカニズムを明らかにするためのケーススタディを進めるために有用な条件が整っていた。

本研究では森林生態系から水系を通じて流出していく有機態炭素の生成、輸送のプロセスを明らかにするため、上記の試験流域を対象として、水の安定同位体比をトレーサーとして用いた水文過程の観測をベースとして、土壌中の溶存有機態炭素(DOC)、土壌有機態炭素量(SOC)の把握、土壌有機態炭素の安定同位体比の測定などを行った。水の安定同位体比は、土壌中での炭素の形態変化を考える上で重要な情報となる土壌水の滞留時間を推定するために用いた。DOCやSOCの形成過程を検討するには、土壌における水の浸透プロセスに沿った濃度変動が重要な情報となるので、これが明らかになるようにそれぞれの土壌中でのプロファイルを測定した。

また、土壌への供給有機物としての樹木葉の炭素安定同位体比を継続的に測定した。これは、観測タワーにおいて、乱流変動法を用いて観測されている樹冠レベルのCO<sub>2</sub>フラックスの時間変動と連動し、単葉レベルのガス交換のレスポンスと炭素安定同位体比に記録された長期平均的なガス交換特性を比較する目的も含んでいた。

## ②研究方法

### ア. 調査・観測サイト

図32に観測サイトの位置、図33に対象流域の地形や観測設備(井戸、ライシメータ、量水堰など)を示す。対象流域は滋賀県南東部に位置する桐生水文試験地内の源頭部の森林流域(マツ沢、0.68ha)である。草津川水系に属し、北緯34°58' 東経136°00' に位置する。基岩地質は花崗岩で、風化花崗岩を母材とする褐色森林土が土壌層を形成している。植生は流域下流部分が約50年生のヒノキ人工林、上流部分は天然性の落葉広葉樹、アカマツの混交林である。年降水量は1672mm、年平均気温は13.8℃である<sup>27)</sup>。バックグラウンドの水文・水質観測として降水量、流出量、地下水位、土壌水分量等の水文諸量、降水、土壌水、地下水、湧水、渓流水の溶存物質濃度(無機イオン、SiO<sub>2</sub>、DOC、DIC、DON)を継続的に測定している。

### イ. 測定項目・測定手法

#### (ア) 流域内の各水文素過程における水の安定同位体比( $\delta D$ , $\delta^{18}O$ )

降水(林内雨)、土壌水、地下水、湧水、渓流水の各水文素過程における水をサンプリングした。サンプルは京大生態学研究センターにおいて水の $\delta D$ 、 $\delta^{18}O$ を、水平衡装置付き質量分析計(サーモフィニガン、MAT-252)を用いて測定した。

#### (イ) 流域内の各水文素過程における溶存有機態炭素(DOC)の生成、消失

土壌中での炭素の蓄積、形態変化、移動を考える上で重要な情報となるDOCの濃度形成機構を検討するため、土壌水中のDOCの鉛直分布と地下水、流出水のDOC濃度をモニターした。また、土壌表層で生成されるDOCが消失するメカニズムを明らかにするために、DOCの溶液を用いた土壌との吸着・脱着実験を行った。さらに、こうしたDOCの濃度減少過程でどのような形態のDOCが土壌に

吸着されやすいか、あるいは分解されやすいかを検討するために樹脂分画法を用いてDOCの分画を行った。

これらに加えて、土壌水中のDOC観測のポイントと対応する地点で、土壌有機物の炭素安定同位体比の測定を行った。土壌は、表層のリター、0-2cm, 2-4cm, 4-6cm, 6-10cm, 10cm以深は10cmごとに80cmまで、オーガー（直径15mm）で採取した。採取した土壌は直径約2mmのふるいで大型の有機物や石、植物の根を除いたのち十分に混ぜて、一部をボールミルにかけて粉碎した。これをスズ箔に秤量して包み取り、京都大学生態学研究センターのコンフロシステム（元素分析計-質量分析計オンライン分析システム、ファイソンスEA1106にサーモフィニガンdeltaSを接続）により分析を行った。

#### （ウ） 樹冠形成樹種であるヒノキ（高木層）の葉の炭素安定同位体比（ $\delta^{13}\text{C}$ ）の季節変動

観測タワーにおいて、乱流変動法を用いて観測されている樹冠レベルの $\text{CO}_2$ フラックスの時間変動と、単葉レベルのガス交換のレスポンスとを比較するために、葉の長期平均的な $\text{C}_1/\text{C}_a$ が算出できる $\delta^{13}\text{C}$ の季節変化を測定した。サンプルは、同試験地内にある樹冠アクセスタワーで、高さ13, 15, 17mにおいて採取された。それぞれ樹冠下部、中部、上部に対応する。サンプルは、風乾した後、ボールミルにかけて粉碎した。これをスズ箔に秤量して包み取り、京都大学生態学研究センターのコンフロシステム（元素分析計-質量分析計オンライン分析システム、ファイソンスEA1106にサーモフィニガンdeltaSを接続）により分析を行った。

### ウ. 解析項目・解析手法

#### （ア） 各水文素過程における水の平均滞留時間の推定

$\delta\text{D}$ 、 $\delta^{18}\text{O}$ の観測値から求められる $d$ 値にみられる季節変動の振幅の減衰から、流域内各部位での水の滞留時間を求めた。 $d$ 値はdeuterium excess valueの略号で、降水の場合、元の水蒸気が海面で蒸発したときの海面温度などの蒸発条件に左右されて変動する。

水の平均滞留時間は以下の方法で計算した。まず、 $d = \delta\text{D} - 8\delta^{18}\text{O}$ から $d$ 値を求めた。

流域内のある地点の時刻 $t$ における水の $d$ 値 $d_{out}(t)$ は、それ以前に降った何回かの雨がその地点に到達する間に通ったメディア内で混合することによって決まると仮定すると、それらの雨水の同位体比を用いて、次式によってモデル化することができる。

$$d_{out}(t) = \int_0^{\infty} g(t') d_{in}(t-t') dt' \quad (6)$$

ここで、 $d_{in}$ ：降水の $d$ 値（‰）、 $t'$ ：その降雨が降ってから現在までの経過時間である。関数 $g(t)$ はweighting functionと呼ばれ、流域内の土壌浸透中に、いつの降水がどのような割合で混合しているかをモデル化したものである。ここでは、Stewart and Mc Donnell(1991)<sup>28)</sup>が用いているExponential model (EM)を用いた。EMでは $g(t)$ は次式で表される。

$$g(t) = \frac{1}{\tau} e^{-t/\tau} \quad (7)$$

ここで、 $\tau$ は平均滞留時間である。 $\tau$ は、降水の $d$ 値の季節変動をサインカーブでフィッティングして(6)式におけるinputとし、地下水、湧水、渓流水の実測値の変化が最もよく再現できるように関数 $g(t)$ を最適化することによって求められる。

#### (イ) 各水文素過程における溶存炭素フラックスの推定

降水、林内雨、土壌水、地下水、湧水、渓流水のDOC・DIC濃度と各部位での水のフラックスを用いて、流域内部でのDOC・DICのフラックス、各部位でのそれぞれの生成量、消費（消失）量を求めた。さらにこれを、樹冠上で観測されている $\text{CO}_2$ 交換量から求められるNEPや、土壌中の炭素現存量等と比較した。また、(ア)で求められた各部位での水の平均滞留時間との関係を調べた。

土壌有機物中の炭素安定同位体比は、同じポイントにおける有機物中の炭素含量と同時に測定され、両者のプロファイルが比較された。

#### (ウ) 主要樹冠構成樹種の炭素安定同位体比と水利用効率、ガス交換特性の把握

当該試験地で主要な樹冠を形成しているヒノキについて樹冠上層、中層、下層の3高度で採取した葉の $\delta^{13}\text{C}$ を測定し、その値から細胞間隙 $\text{CO}_2$ 濃度と大気 $\text{CO}_2$ 濃度の比、 $C_i/C_a$ を求めた。この指標は樹種ごとの水欠損に対する気孔のコントロールに関する特徴を表しており、intrinsic water-use efficiency（固有の水利用効率）とも呼ばれる。これと、個葉に対する蒸散量と光合成量の測定の結果得られる瞬時的 $C_i/C_a$ とを季節変動のパターンなどで比較し、 $\delta^{13}\text{C}$ から得られる長期のガス交換の影響を受けた $C_i/C_a$ の持つ情報を検討した。 $\delta^{13}\text{C}$ から $C_i/C_a$ を求めるために用いた関係式は、Farquhar et al. (1989)<sup>29)</sup>によって提示された以下のようなものである。

$$C_i / C_a = \frac{\Delta - a}{b} \quad (8)$$

$$\Delta = \frac{\delta^{13}\text{C}_{\text{air}} - \delta^{13}\text{C}_{\text{plant}}}{1 + \frac{\delta^{13}\text{C}_{\text{plant}}}{1000}} \quad (9)$$

$a$ は気孔通過における同位体分別係数で4.4%、 $b$ はルビスコによる $\text{CO}_2$ 同化における分別係数で27%である。

### ③結果と考察

#### ア. 各水文素過程における水の平均滞留時間

降水の $d$ 値は5~28%の範囲で変化し、冬季に高く、夏季に低い年周期を示すと同時に、年々の減少傾向が見られた（図34）。図35に各地下水、渓流水の $d$ 値とEMの適用によって得られた変動の計算値、求められた $\tau$ を示す。地下水の中では土層深の浅いGBの $d$ 値の変化は大きく、 $\tau$ が短かったのに対して、同程度の深さであるG1の地下水の $\tau$ はこれより長かった。また、上流部で土層深の深いGFではGB、G1に比べて $\tau$ が大幅に長いことが判った。3種類の地下水は全て、同じアキファから

採取されているにもかかわらず、 $\tau$ に大きな違いが見られたことは、そのアキファが異なる長さの浸透を経た水の供給によって形成されていることを物語っている。下流に位置するG1の地下水は $\tau$ が長いGFの地下水と短いGBの地下水の混合によって形成されていると見ることができる。

本観測のように1ha未満の源頭部森林流域で、高々2m深の地下水でも20ヶ月程度の滞留が生じ得ることは、有機態・無機態炭素の流出をモデル化する上で、水の滞留時間情報の考慮が不可欠であることを示すものである。

## イ. 土壌中の水移動・滞留とDOCのダイナミクスについて

### (ア) 土壌水の平均滞留時間

林内雨水の $d$ 値も5~28%の範囲で変化し、冬季に高く、夏季に低い年周期を示すと同時に、年々の減少傾向が見られた(図36)。土壌水の $d$ 値の変化をそれぞれ図37に示す。土壌水の $d$ 値は、林内雨に見られた周期的な変化を示すと共に、林内雨に比べて振幅の減少が見られた。図中の曲線は平均滞留時間を15~120日とした時に計算される曲線であり、土壌水が概ねこの範囲の滞留時間を持っていたことがわかる。

### (イ) 降水から流出までのDOCの移動量

図38に求められたDOC濃度プロファイルと水フラックスから求められたDOCの移動量を示す。土壌層を通過するDOCの大部分は $A_0$ 層で生成され、深さ30cmまでに80%以上は溶液中から除去される。これは、土壌鉱物から溶解したAlやFeとキレートを形成して沈殿したり、粘土鉱物に吸着されたりすることによる。土壌固相への吸着は年間約270kg程度であると見積もられた。吸着による除去がないと見られる深層や、地下水流動中のDOC濃度の減少には微生物による分解が寄与しているものと考えられる。

土壌水の平均滞留時間は2週間から4ヶ月程度であったが、この部分での水移動に伴うDOCの移動・土壌固相への吸着は、土層以下の炭素移動量の中でも大きなウエイトを占める。本流域では大気 $CO_2$ の純固定量が2~5t/ha/yrと見積もられているので、年間これの数%から十数%の炭素が土壌有機物として固定されているものと考えられる。

### (ウ) 土壌有機物の炭素安定同位体比の鉛直分布について

図39にG34における土壌有機物の炭素含量と $\delta^{13}C$ の鉛直分布を示す。No.1~3はG34周辺の異なる3地点を示す。土壌有機物中の炭素含量は場所により大きな違いが見られ、0-2cmの深度では45%、18%、3%であったが、どの場所でも深度とともに減少し、6cm、30cm、2cmで炭素含量が1%以下となった。図40は図39と同じデータで、それぞれ炭素含量の図を拡大して見たものである。炭素安定同位体比も同様に場所により異なる値を示し、リター層の $\delta^{13}C$ はNo.1-3でそれぞれ、-26.0、-27.1、-25.5‰であったが、どの場所においても、リターの $\delta^{13}C$ は直下の0-2cmの土壌有機物より約1%高い同位体比を示した。土壌中では深度とともに $\delta^{13}C$ は再び上昇し、70-80cm深では、上部のリターと同程度の値となっている(図39)。ただし、No.1の場所では10-20cmと40-60cmで高く、それらの深度の直下で低い値となっており、単純に上昇しているわけではない。

土壌有機物の炭素含量と $\delta^{13}C$ の関係を見ると、炭素含量が上昇するにつれ $\delta^{13}C$ はいったん低下し、表層の付近の土壌またはリター層で再び上昇していることがわかる(図41a)。炭素含量1%以下の

部分を拡大して見ても、炭素含量が低いほど $\delta^{13}\text{C}$ は高いという関係が見られる（図41b）。

鉛直方向の $\delta^{13}\text{C}$ の変化が単純でなかったNo. 1の場所のデータを図39で詳しく見ると、 $\delta^{13}\text{C}$ が下がる20-30, 60-70cmでは炭素含量に極大値が見られる。No. 3の場所でも30-40cmは $\delta^{13}\text{C}$ が低くなり炭素含量が極大値を示している（図40）。これらのことは、No. 1と3の $\delta^{13}\text{C}$ に見られるばらつきの原因は、単純な深度方向への上昇に加え、 $\delta^{13}\text{C}$ の低い有機物が加わることによりもたらされていることを示唆している。植生の変化や異なる植生の根の進入などにより、 $\delta^{13}\text{C}$ の異なる有機物が後から付加された結果と考えられる。

#### （エ）主要樹冠構成樹種の葉の炭素同位体比について

図42aは、測定された樹木葉の $\delta^{13}\text{C}$ から求められた $C_i/C_a$ の季節変動を示している。図42bはこれに対応する時期に原位置において、光飽和条件で測定された個葉の光合成量、蒸散量から求められた $C_i/C_a$ を示している。後者が瞬時値で変動の幅が大きいのに対して $\delta^{13}\text{C}$ から求められた $C_i/C_a$ は季節を通じて大きな変動はなかった。 $C_i/C_a$ は樹冠の上部で小さく、下部で大きい明瞭な差が見られ、光環境の差異が光合成に伴う気孔開閉の特徴に強く影響していることがわかった。図43はこれら樹冠構成樹種の葉の炭素同位体比と、 $A_0$ 層、A-B層における土壤有機物の炭素安定同位体比を示している。リターとして供給された有機物の $\delta^{13}\text{C}$ は、 $A_0$ 層ではこれらの葉の値の変動幅の中間にプロットされ、優先樹種であるヒノキのそれに幾分近い値であった。このことは、土壤表層でのリターの分解過程では、有機物の物理的な混合も生じ、同位体比の変動幅が小さくなることを物語っている。

#### ④本研究により得られた成果

水文過程についての物理的な観測と水の同位体比測定を用いた地中水流動のパスウェイと滞留時間の推定を行った。この結果1ha未満の源頭部森林流域で、高々2m深の地下水でも20ヶ月程度の滞留が生じ得ることが推定された。同様に求めた土壤水の平均滞留時間は2週間から4ヶ月程度であった。この土壤層での浸透過程におけるDOCの生成、流下のプロセスは以下のものであった。林床 $A_0$ 層で形成されたDOCは表層30cmまでに大半が土壤に吸着され、100cm以下では微生物による分解によって濃度減少が生じることが明らかになった。また、こうした可溶で移動可能な有機態炭素と相互に作用する土壤有機態炭素（SOC）の $\delta^{13}\text{C}$ は、炭素含量が表層近くで急激に減少することに呼応して減少した。しかし、炭素含量の減少が鈍る硬質土層以下では、有機態炭素量の減少に対して $\delta^{13}\text{C}$ が徐々に増加した。このことは、表層でのリターの分解と、下層へのDOCの輸送、鉛直輸送過程での吸着という上記のメカニズムにそって、移動している炭素の形態が変動していることを反映しているものと考えられた。さらに、土壤への供給有機物としての樹木葉の炭素安定同位体比は、葉の $\text{CO}_2$ と水蒸気の交換に対する気孔のコントロールを反映するが、同時にモニターした、チャンパーによる個葉のガス交換測定から得られる $C_i/C_a$ の変動の幅が大きいのに対して $\delta^{13}\text{C}$ から得られる $C_i/C_a$ は季節を通じて大きな変動はなかった。 $\delta^{13}\text{C}$ は樹冠の上部で大きく、下部で小さい明瞭な差が見られ、光環境の差異が光合成に伴う気孔開閉の特徴に強く影響していることがわかった。リターの $\delta^{13}\text{C}$ は、これら変動幅の中間の値であった。

以上の観測・調査結果から、暖温帯森林流域における水系を通じた炭素の流出の実態が明らかになった。流出の季節変動に関しては、水文過程の季節変動の影響を考慮して今後モデルの構築

を通した解析が必要となるが、その作業に資する基礎データを整備することができた。

#### ⑤引用文献

- 25) Buttle, J.M. (1998): Fundamentals of small catchment hydrology, in Isotope Tracers in Catchment Hydrology, edited by C. Kendall and J.J. McDonnell, pp.1-49, Elsevier Sci., New York.
- 26) Wang, Y., et al. (1998): Carbon cycling in terrestrial environments, in Isotope Tracers in Catchment Hydrology, edited by C. Kendall and J.J. McDonnell, pp.577-610, Elsevier Sci., New York.
- 27) Fukushima, Y. (1988): A model of river flow forecasting for a small forested mountain catchment. Hydrological Processes 2: 167-185.
- 28) Stewart, M.K. and McDonnell, J.J., (1991): Modeling base flow soil water residence times from deuterium concentrations. Water Resour. Res., 27: 2681-2693.
- 29) Farquhar, G.D., Ehleringer, J.R. and Hubick, K.T. (1989): Carbon isotope discrimination and photosynthesis, Annu. Rev. Plant Physiol. Plant Mol. Biol., 40: 503-537.
- 30) Ohte, N., Tokuchi, N., Katsuyama, M., Hobara, S., Asano, Y. and Koba, K. (2003): Episodic increases in nitrate concentrations in streamwater due to the partial dieback of a pine forest in Japan: Runoff generation processes control seasonality. Hydrological Processes 17, 237-249.

#### ⑥国際共同研究等の状況

国際共同研究計画： 安定同位体を用いた森林流域における炭素・窒素流出プロセスの解明に関する比較研究

協力案件： 日米の森林流域における比較研究

カウンターパート： キャロル・ケンドール(Carol Kendall), U.S. Geological Survey, アメリカ合衆国

本研究で得られた成果と、平行して進めてきた窒素循環に関する研究とを統合して、森林小流域スケールの物質循環についての日米間比較を行う計画を進めている。カウンターパートのケンドールは、アメリカ合衆国の同位体を用いた水文学・生物地球科学的研究において指導的立場にあり、USGSが統括している小流域ネットワークを用いて、上記比較研究を進める。京都大学の大手が、現在USGSに客員として滞在し、計画具体化に向けて活動を始めている。

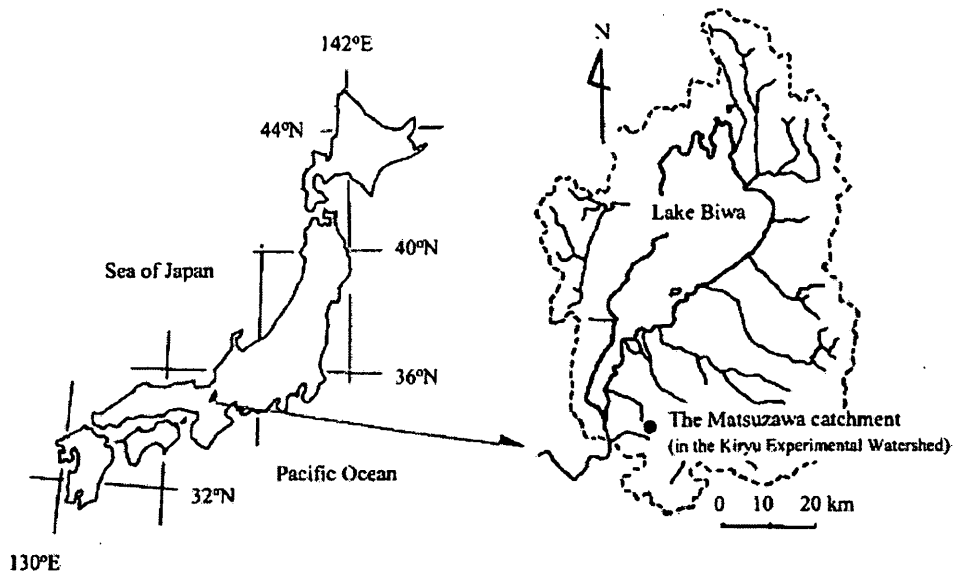


図32. 観測サイト。桐生試験地と対象流域のマツ沢。

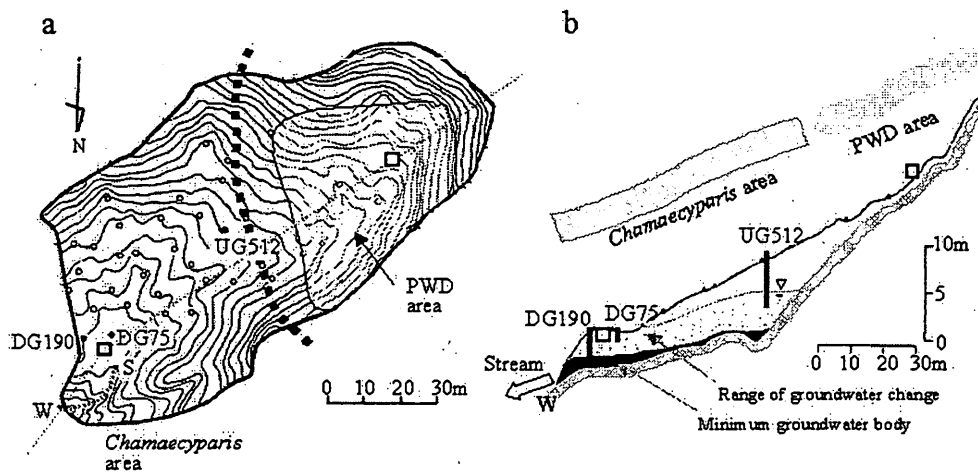


図33. a) 観測流域の表面地形、観測井戸の位置。UG512は地下水体の上部に設置された観測井戸 DG75、DG190は下部に設置された観測井戸を示す。□は土壌水の調査が行われたプロットで、マツ枯れの生じた領域(PWD area)と下流側のヒノキ人工林でカバーされた領域(*Chamaecyparis* area)に一箇所ずつ設定された。○はその他の観測井戸を示す。Sは湧水点、Wは流出量の観測サイトである。b) a)に示された点線に沿う縦断面図で、土壌と地下水の深さを概念的に示している<sup>30)</sup>。

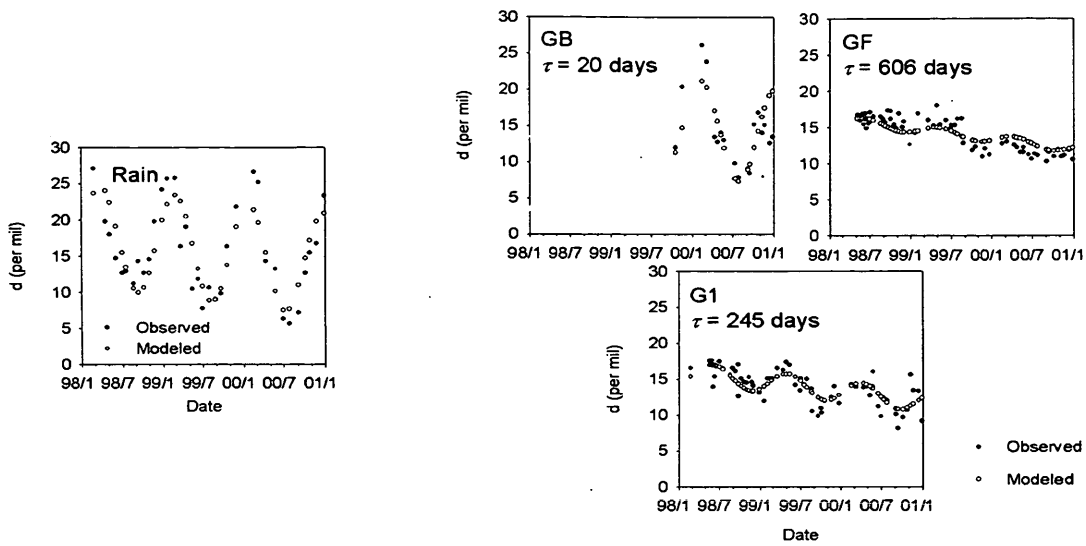


図34. 降水中の  $d$  値の変動。 図35. 上流部地下水GB、GFと下流部地下水G1の  $d$  値の変動。

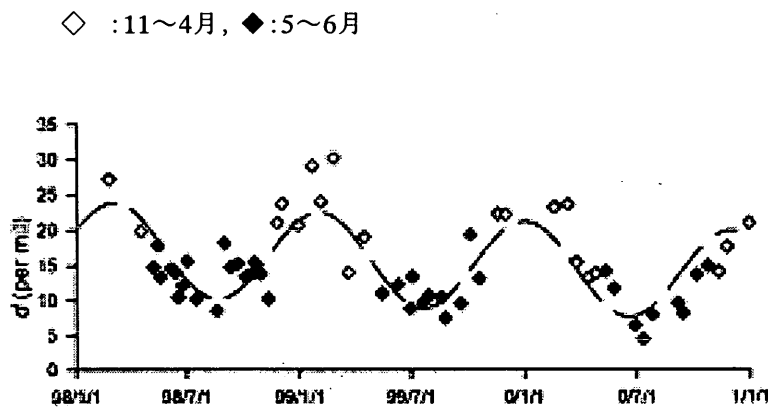


図36. 林内雨水の  $d$  値の経時変動。

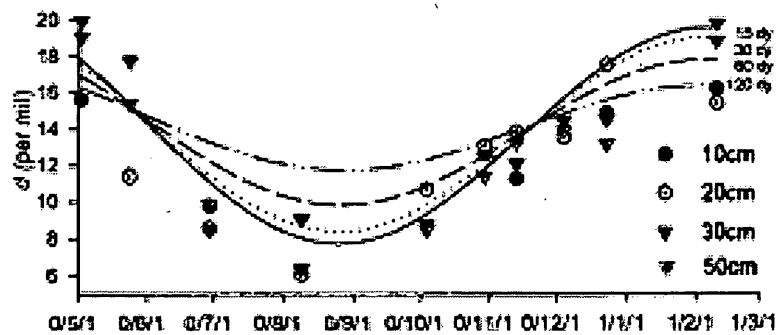


図37. 土壌水の  $d$  値の経時変動。曲線は滞留時間を15, 20, 60, 120日として計算した場合の  $d$  値の計算値を示している。



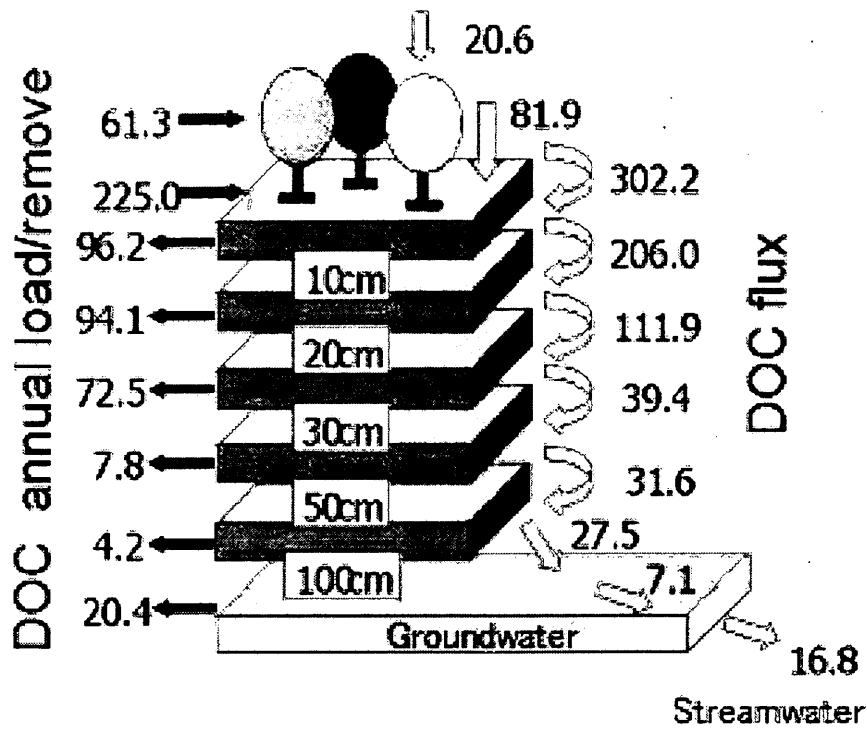


図38. 土壌層の浸透過程、地下水流出過程におけるDOCの負荷量、除去量、フラックス。単位は kg/ha/yr。

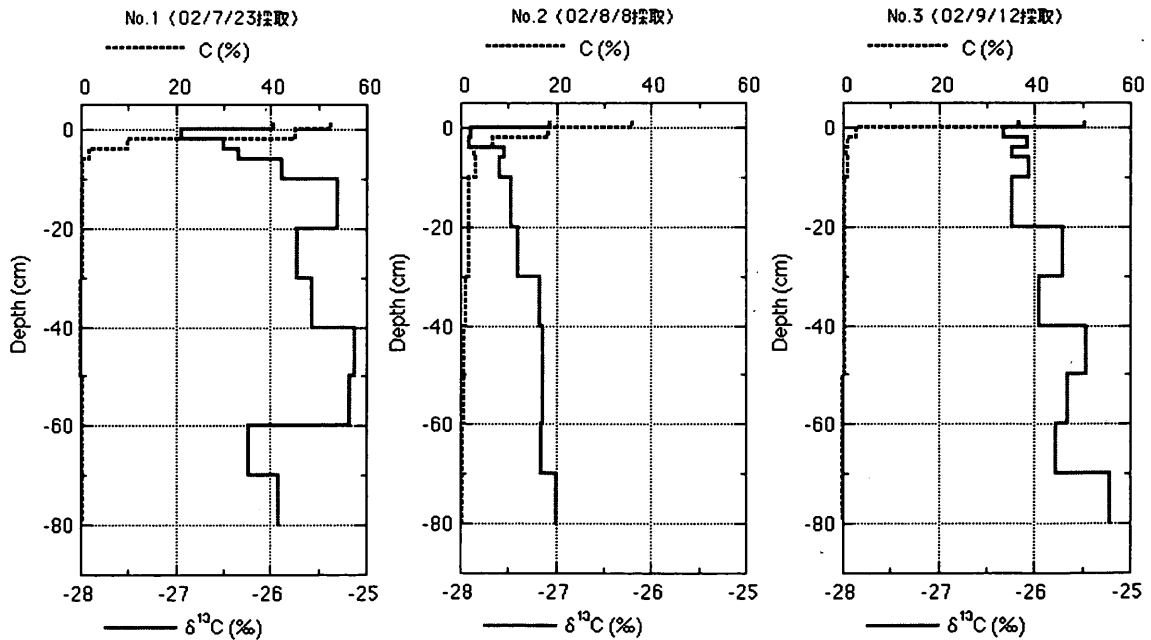


図39. 土壌有機物の炭素含量と $\delta^{13}C$ の鉛直分布。No. 1~3はG34 周辺の異なる3地点を示す。

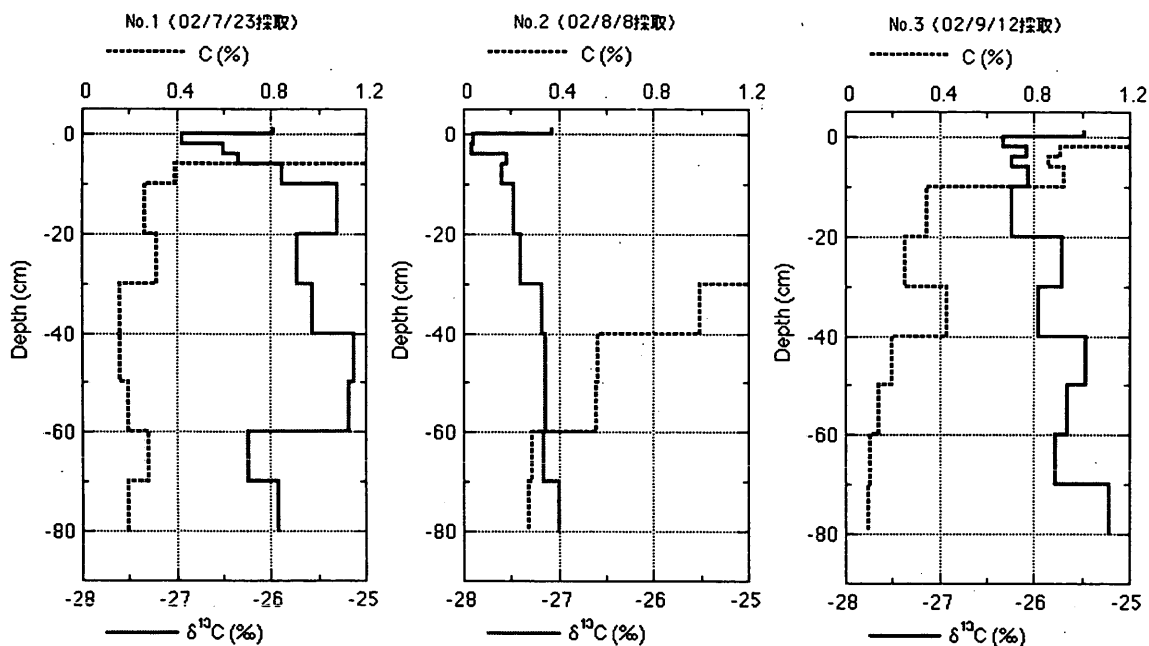


図40. 土壤有機物の炭素含量と $\delta^{13}\text{C}$ の鉛直分布。図37で示した分布の炭素含量の変動を拡大表示したもの。No. 1~3はG34 周辺の異なる3地点を示す。

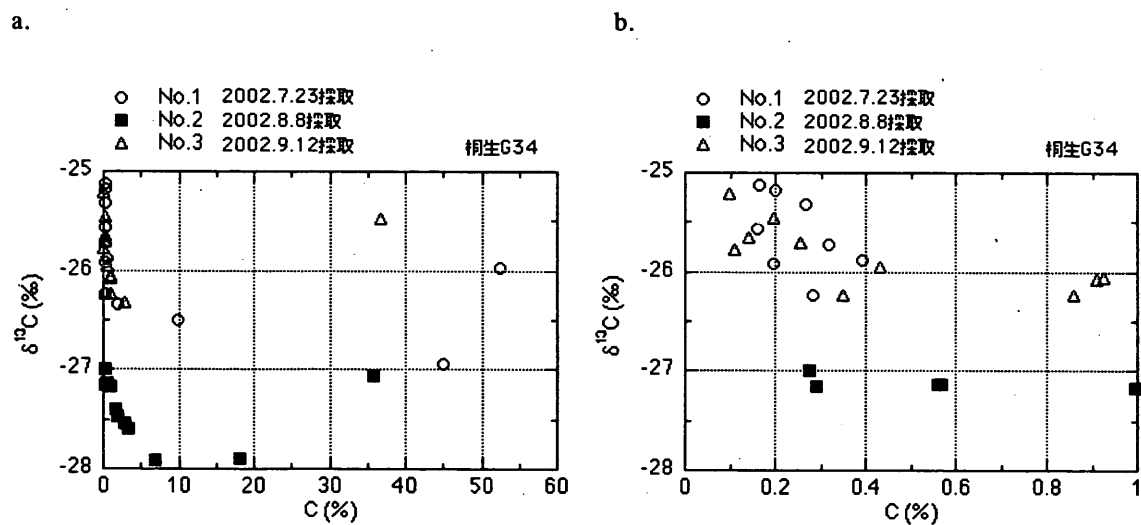


図41. 土壤有機物の炭素含量と $\delta^{13}\text{C}$ の関係。a : 炭素含量が60%までの範囲、b : 炭素含量が1%までの範囲を拡大表示したもの。

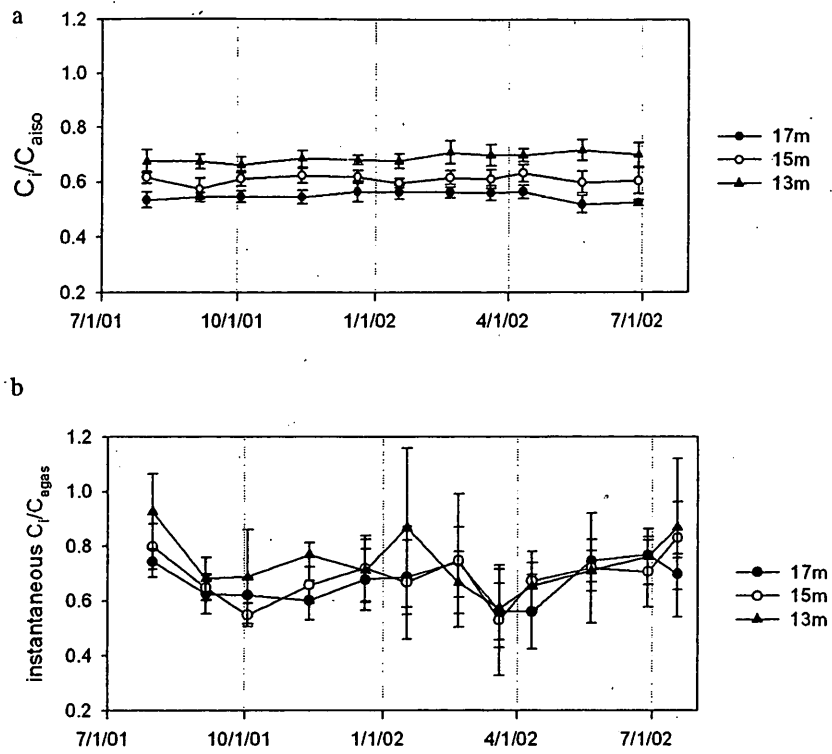


図42. a)葉の $\delta^{13}C$ から求めた $C_i/C_a$ の季節変化、b)個葉の光合成・蒸散量観測をもとに求められた $C_i/C_a$ の季節変化。

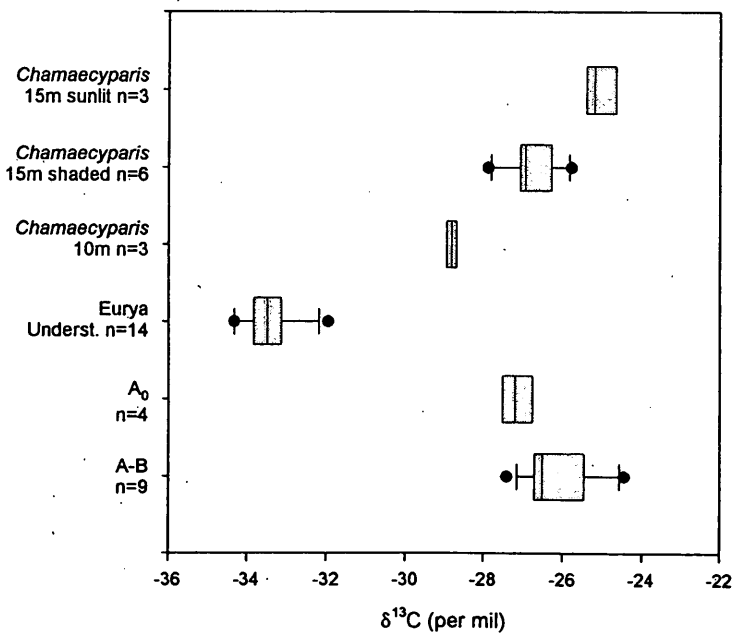


図43. 樹冠構成樹種の葉とA0層、A-B層の土壌有機物の炭素安定同位体比。

### 3. 研究成果の発表状況

#### (1) 誌上発表 (学術誌・書籍)

<学術誌 (査読あり)>

①H. Koizumi and S. Mariko: *New Phytologist*, 150, 231-240 (2001)

“Effect of Free-Air CO<sub>2</sub> Enrichment (FACE) on CO<sub>2</sub> exchange between the water surface and the atmosphere in a rice paddy field.”

②H. Muraoka, H. Hirota, J. Matsumoto, S. Nishimura, Y. Tang, H. Koizumi and I. Washitani: *Functional Ecology*, 15, 798-803 (2001)

“On the convertibility of different microsite light availability indices, relative illuminance and relative photon flux density.”

③T. Nakadai, M. Yokozawa, H. Ikeda and H. Koizumi: *Applied Soil Ecology*, 19, 161-171 (2002)

“Diurnal changes of carbon dioxide flux from bare soil in agricultural field in Japan.”

④S. Jia, T. Akiyama and H. Koizumi: *J. JASS.*, 18 (1), 26-35 (2002)

“Study on the carbon dynamics and rhizosphere in a cool-temperate climate forest. 1. Relation between topography, vegetation and soil type distribution.”

⑤S. Jia, T. Akiyama and H. Koizumi: *J. JASS.*, 18 (2), 142-151 (2002)

“Study on the carbon dynamics and rhizosphere in a cool-temperate climate forest. 2. Estimation of carbon storage in ecosystem based on precise field measurements.”

⑥M. Lee, K. Nakane, T. Nakatsubo and H. Koizumi: *Ecological Research*, 17, 401-409 (2002)

“Effect of rainfall events on soil CO<sub>2</sub> flux in a cool temperate deciduous broad-leaved forest.”

⑦川崎雅俊、大手信人、南部 桂、保原 達、岡崎亮太、勝山正則、金 秀珍: *陸水学雑誌*、63, 31-45 (2002)

「森林流域の水文過程における溶存有機態炭素の動態」

⑧川崎雅俊、大手信人、浅野友子、内田太郎: *日本生態学会誌*、52, 119-123 (2002)

「森林小流域の降水浸透過程における溶存有機態炭素の動態」

⑨大手信人、徳地直子: *日本生態学会誌*、52, 131-137 (2002)

「森林生態系の物質循環を理解するための流域研究に向けて -流出窒素の動態が示唆すること-」

⑩S. Murayama, N. Saigusa, D. Chan, S. Yamamoto, H. Kondo and Y. Eguchi: *Tellus*, 55B, 232-243 (2003)

“Temporal variations of atmospheric CO<sub>2</sub> concentration in a temperate deciduous forest in central Japan.”

⑪N. Tokuchi, N. Ohte, S. Kim, M. Katsuyama and S. Hobara: *Hydrological Processes* (in press) (2003)

“Changes in biogeochemical cycling following forest defoliation by pine wilt disease in Kiryu experimental catchment in Japan.”

<学術誌 (査読なし)>

①小泉博: *環境*、30, 34-37 (2001)

「冷温帯落葉広葉樹林における炭素循環 -高山試験地を例にして-」

- ② S. Murayama, S. Yamamoto, N. Saigusa, H. Kondo and Y. Eguchi: Proceedings of 6<sup>th</sup> International Carbon dioxide Conference, 400-403 (2001)

“Temporal variation of the CO<sub>2</sub> concentration in a temperate deciduous forest in the central part of Japan.”

- ③ Y. Takahashi, Y. Tohjima, T. Machida, Y. Fujinuma and G. Inoue: Comparative Biochemistry and Physiology, Vol.134A, No.3, SEB 2003 Abstracts, S179 (2003)

“Temporal variation in <sup>13</sup>C/<sup>12</sup>C ratio of respired CO<sub>2</sub> and its relation with vapor pressure deficit in deciduous needle-leaf forest ecosystem in east Asia”

<書籍>

- ① H. Koizumi: (2001) Carbon cycling in croplands. In *Structure and Function in Agroecosystem Design and Management*, edited by Shiyomi M. and Koizumi H., CRC Press, pp 207-226.

<報告書類等>

- ① 大津正一 (2002) : つくば地域の水田における炭素の動態と収支. 筑波大学大学院環境科学研究科修士論文, 85p.

- ② 長谷哲也 (2003) : つくば地域の水田における除草剤の動態と流出量の評価. 筑波大学大学院環境科学研究科修士論文, 97p.

(2) 口頭発表

- ① 村山昌平、山本晋、三枝信子、近藤裕昭、江口陽三: 日本気象学会2000年秋季大会 (2000) 「冷温帯落葉広葉樹林における大気中CO<sub>2</sub>濃度の長期観測」

- ② S. Murayama, S. Yamamoto, N. Saigusa, H. Kondo and Y. Eguchi: The 6<sup>th</sup> International Carbon Dioxide Conference, Sendai, Japan (2001)

“Temporal variation of the CO<sub>2</sub> concentration in a temperate deciduous forest in the central part of Japan.”

- ③ 高橋善幸、遠嶋康徳、町田敏暢、藤沼康実: 2001年度日本地球化学会年会 (2001)

「苫小牧フラックスリサーチサイトにおいて観測された森林内の大気二酸化炭素安定同位体比の時間変動」

- ④ 壁谷直記、大手信人、勝山正則、杉本敦子: 水文・水資源学会2001年研究発表会 (2001)

「山地源頭部小流域における地下水の平均滞留時間の推定—水の安定同位体比を用いて—」

- ⑤ 川崎雅俊、大手信人、岡崎亮太、勝山正則: 日本陸水学会第66回大会 (2001)

「森林流域から流す溶存有機態炭素の季節変化」

- ⑥ Y. Takahashi, Y. Tohjima, T. Machida and Y. Fujinuma: The 2nd International Workshop of Advanced Flux Network and Flux Evaluation (Kickoff of KoFlux in AsiaFlux), Jeju, Korea (2002) “Temporal Variations in Stable Isotope Ratios of Respired CO<sub>2</sub> in Japanese Larch Forest Ecosystem”

- ⑦ T. Nakadai, Y. Yamagata, Y. Fujinuma, M. Hiroki and K. Uragawa: The 2nd International Workshop of Advanced Flux Network and Flux Evaluation (Kickoff of KoFlux in AsiaFlux), Jeju, Korea (2002)

“Spatial Variation of Soil CO<sub>2</sub> Flux and Soil Microbial Biomass in Larch Forest”

- ⑧ Y. Takahashi, Y. Tohjima, T. Machida, Y. Fujinuma and G. Inoue: “Biological controls

on the stable isotope composition of atmospheric carbon dioxide, methane and nitrous oxide: processes and applications” international workshop, Banff, Alberta, Canada (2002)  
“Temporal Variations in Stable Isotope Ratios of Respired CO<sub>2</sub> Observed in Deciduous Needleleaf Forest Ecosystem in East Asia”

⑨高橋善幸、遠嶋康徳、町田敏暢、藤沼康実、井上元：2002年度日本地球化学会年会 (2002)

「カラマツ林生態系における呼吸起源二酸化炭素安定同位体比の時間変動と環境要因への対応」

⑩高橋善幸、遠嶋康徳、町田敏暢、藤沼康実、井上元：2002年度CGERフラックスリサーチミーティング (2002)

「カラマツ林生態系の呼吸起源CO<sub>2</sub>の炭素安定同位体比の時間変動 ～光合成で固定される炭素と呼吸で消費される炭素の迅速なリンケージの可能性～」

⑪高橋善幸、梁乃申、藤沼康実、井上元：2002年度CGERフラックスリサーチミーティング(2002)

「土壌チャンバーを用いた土壌呼吸CO<sub>2</sub>の炭素安定同位体比の定期観測 ～根呼吸の有無が同位体比に与える影響について～」

⑫壁谷直記、大手信人、勝山正則、川崎雅俊、杉本敦子：第113回日本林学会大会 (2002)

「山地源頭部小流域における土壌水の平均滞留時間の推定」

⑬高橋善幸、町田敏暢、遠嶋康徳、藤沼康実、井上元：第50回日本生態学会大会 (2003)

「カラマツ林生態系における呼吸起源二酸化炭素の炭素安定同位体比の変動」

⑭Y. Takahashi, Y. Tohjima, T. Machida, Y. Fujinuma and G. Inoue: Society of Experimental Biology, Annual Main Meeting, Southampton, UK (2003)

“Temporal variation in <sup>13</sup>C/<sup>12</sup>C ratio of respired CO<sub>2</sub> and its relation with vapor pressure deficit in deciduous needle-leaf forest ecosystem in east Asia”

(Comparative Biochemistry and Physiology, Vol. 134A, No. 3, SEB 2003 Abstracts, S179)

⑮高村近子、村山昌平、三枝信子、山本晋、近藤裕昭：日本気象学会2003年春季大会 (2003)

「冷温帯落葉広葉樹林における土壌呼吸と夜間の正味生態系交換量との関係」

(3) 出願特許

なし

(4) 受賞等

なし

(5) 一般への公表・報道等

なし

4. 成果の政策的な寄与・貢献について

今後、学術誌や一般誌等の出版物、データ公開、学会やシンポジウム等での講演等を通じて成果の広報・普及に努める。