

## B-6 陸上生態系における炭素循環機構の解明に関する研究

### (2) 自然陸域生態系における炭素循環系の定量的解析に関する研究

環境庁国立環境研究所

地球環境研究グループ 温暖化現象解明研究チーム 竹中明夫

平成2-4年度 合計予算額 26,441千円

[要旨] 日本の冷温帯林の炭素循環システムの定量的なデータを得るため、栃木県奥日光地域のミズナラ、イタヤカエデ、オヒョウなどの優占する落葉広葉樹林に面積 1,400m<sup>2</sup>の調査地を設定し、1991年から1992年の2年間にわたり、現地調査を行った。測定項目は、土壌表面及び土壌中の植物遺体の量、ササの地上部および地下部現存量、土壌有機物量などさまざまな形で有機炭素の蓄積量と、高木および林床のササからの落葉・落枝の供給速度、地表面での落葉・落枝の分解速度、土壌表面からのCO<sub>2</sub>発生速度などの炭素のフラックスの大きさである。また、土壌中での有機物分解速度と密接に関連することが知られている土壌含水量および土壌温度の長期連続測定も行った。

測定の結果、生きた植物体中に含まれる部分をのぞいた有機炭素のうち、90%以上は土壌有機物の形で存在していること、植物遺体に含まれる有機炭素のうち、倒木の形のものが80%近くを占めることが明らかになった。また、1992年の8月から11月にかけて土壌からのCO<sub>2</sub>放出速度の測定を行った結果、放出速度は気温に追従した時間変化を示すこと、ただし、その温度依存性は季節により変化すること、さらに、近接した地点間でも2倍近い放出速度の変動が見られることが明らかになった。

[キーワード] 炭素循環、冷温帯、落葉広葉樹林、森林生態系、土壌からのCO<sub>2</sub>放出

#### 1. 序

人間活動にともなう多量の二酸化炭素(CO<sub>2</sub>)の放出は、近年問題となっている地球温暖化現象の主要な原因のひとつである。温暖化現象の実態を把握するとともに将来にわたる予測を行ううえで、CO<sub>2</sub>の大気中濃度が今後どのように推移していくかを予想することが必要になるが、地球レベルの炭素循環のメカニズムを定量的に把握することができれば、将来のCO<sub>2</sub>濃度の予測をより確かなものに行うことができる。

植物と土壌を中心とする陸上生態系では、植物の光合成作用による大気中のCO<sub>2</sub>の吸収・固定、植物の呼吸、植物遺体の動物や微生物による分解にともなうCO<sub>2</sub>放出などのプロセスを含む炭素の循環過程がダイナミックに展開されている。地球上の炭素循環システムの中で、陸上生態系が果たす役割は大きい。一方、陸上生態系はきわめて不均一な系である。全地球レベルでの

気候帯間の違いはもちろんのこと、環境要因の空間・時間変動との相互作用を通じ、さまざまなスケールの不均一性が生じる。炭素循環の面に限ってみても、気候に応じた森林タイプによる違いのほか、林齢、微地形などに対応した変動が見いだされる。また、季節的な気候の変動も炭素循環系を支配する重要な要因である。こうした不均一性は、大気圏や水圏と比べても際だったものであり、陸上生態系が地球規模の物質循環系のなかで果たしている役割を定量的に解明することを難しくしている。

このような研究対象に対して取り得るアプローチのひとつは、対象をいくつかに分類し、それぞれのクラスから代表的な例を抽出して解析を行って、これにもとづいて全体を推定することである。しかしながら、適切なクラス分けを行うこと、また、それぞれのクラスのなかでの不均一性のパターンを把握して代表的なサンプルを抽出すること自体、決して容易なことではない。そうした作業を行うためには、まずは定量的なデータの蓄積から始めなくてはならない。

温暖化現象の解明という目的のためにはきわめて精度の高いデータが必要とされることなどを考えると、陸上生態系の炭素循環の研究の現状は、そのような基礎データの蓄積を進めている段階であると言わざるをえないだろう。本研究も、そのようなデータの蓄積に貢献することを目的としている。

## 2. 目的

本研究課題の目的は、日本の冷温帯に分布する落葉広葉樹林の炭素循環システムの定量的なデータを得ることである。植物体の現存量、植物遺体の量、土壌有機物量などの炭素のリザーバーの大きさと、系内部の炭素のフラックスの大きさを定量的に調べる。特に、有機炭素の大きなリザーバーである土壌中からの $\text{CO}_2$ 放出速度の測定を行い、その時間・空間変動の実態を把握する。さらに、有機物の分解速度と密接な関係にあることが知られている土壌温度との関連を調べる。このようなデータを集積することで、冷温帯林の炭素循環の全体像がしだいに定量化されていくはずである。

## 3. 方法

栃木県日光市大字日光字奥日光にある、国立環境研究所奥日光環境観測所に隣接する落葉広葉樹林を調査場所に選定した。調査地の標高は約1500m、年平均気温は6.2°C(1989年)で冷涼な気候である。奥日光環境観測所では、気温、湿度、降水量、日射量、風向風速などの基本的な環境要因の計測が1年を通じて行われている。また、電源の供給が可能である。

傾斜が約30°の南向き斜面の中～下部に、面積1400m<sup>2</sup>の調査区を設定した。おもな林冠構成樹種はミズナラ、イタヤカエデ、オヒョウなどの落葉広葉樹で、樹高はおよそ20m程度である。胸高直径が1mを越える大径木が多く、成熟した林分である。斜面上部の土壌が薄いところではウラジロモミも出現する。林床には高さ1～2mのクマイザサが優占し、それ以外の低木、草本の被度はきわめて低い。クマイザサの被度はおおむね90～100%に達するが、場所によっては10～30%程度の部分もある。また、高木が死亡したあとの林冠の空隙＝林冠ギャップの下のササは、閉鎖林冠の下と同じ100%の被度でも、桿の密度や着葉量のはるかに大きく、ほとんど歩行ができないような部分も多い。

生態系の炭素循環を解析するためには、系をいくつかの構成部分に分けて考えると便利である。一般に、このようなモデルをコンパートメントモデル、構成部分をコンパートメントと呼ぶ。本研究では、図1に示したようなコンパートメントモデルにもとづいて解析を行った。ササと高木とでは炭素循環系のなかで果している役割が多少とも異なっていると考え、これらを別のコンパートメントとした。ササ型の林床は、わが国の森林においてはごく一般的に見られる。森林の炭素循環系のなかでのササ層の定量的な位置づけができれば、多くの地域の森林で応用可能なデータを提供することになる。

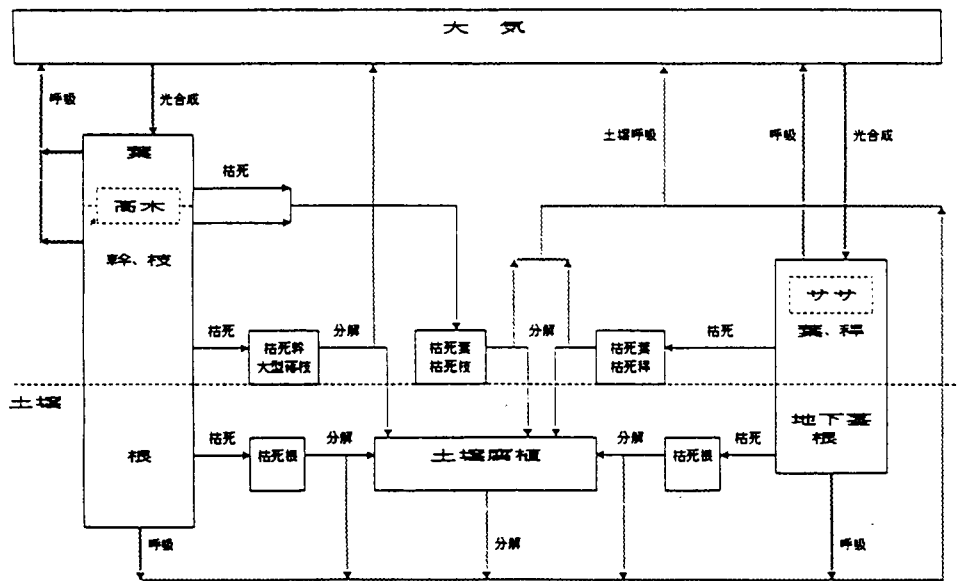


図1. ササ型の林床を持つ森林における炭素循環系のコンパートメントモデル

以下に、測定を行った項目と測定方法を示す。

(1) 調査区の植生の調査

1991年の春に、調査区内の高木すべてに標識を付して地図上に記録し、その種名および胸高直径を測定した。

(2) 植物遺体の存在量、供給速度および分解速度の測定

高木の落葉・落枝の速度を求めるため、1991年6月に、開口面積 $0.5\text{ m}^2$ のネット（リタートラップ）を作成して調査区内の10点に配置した。また、ササの落葉速度を求めるため、10地点に面積 $0.5\text{ m}^2$ の方形区を設定した。設置時から1992年秋の落葉終了時までのあいだ、これらのトラップおよび方形区内の落葉・落枝を定期的に回収した。回収した試料は、葉、枝、その他の部分に仕分けし、それぞれの乾燥重量を測定した。また、1991年回収分の試料については炭素含有率の測定をおこなった。炭素含有率の測定には、住化製元素分析計スミグラフNC-90を用いた。

1991年の10月に、調査区の一部（面積 $300\text{ m}^2$ ）で、太さ $1\text{ cm}$ 以上のすべての中型落枝を回収し、その乾燥重量の測定と炭素含有率の分析を行った。1年後の1992年の10月に再び同じ区画で落枝量を調べ、1年間にあらたに供給された中型落枝の量を求めた。

調査区の林床にある倒木すべてに標識を付して地図上に記録した。これらの倒木の太さおよび長さを測定し、およその体積を見積もった。

土壌表面での植物遺体の分解速度を推定するため、1991年11月に、乾燥重量10gの高木由来の新鮮な落葉、ササの枯死葉、および枯死桿をナイロンメッシュのバッグに詰めて、林床の4ヶ所に設置した。1992年の11月にこれらを回収し、乾燥重量と炭素含有率の測定をおこなった。

### (3) 土壌の物理環境の測定

1991年7月から1992年11月まで、調査区内の4地点で、有機物の分解速度と密接な関係にある土壌中の温度(地中5, 15, 30, 60cm)の連続測定を行った。測定には銅-コンスタンタン熱電対を用い、データ記録装置に測定データを取り込んで、適宜データの回収を行った。また、同地点で、1991年7月から同年11月まで、ヒートプローブ方式土壌水分計を使用して土壌含水率の連続測定を行った。

### (4) 土壌有機物量等の測定

1992年7月に、調査区内およびその近傍の5地点において、地上のササ、地表面のリター、地中の太さ1cm以上の根とササの地下茎、および深さ5cmごとの土壌サンプルを採取し、炭素含有率の分析と、植物体の乾燥重量の測定を行った。

### (5) 土壌からのCO<sub>2</sub>放出速度の測定

土壌表面からは、植物遺体および土壌有機物の分解、根の呼吸などに由来するCO<sub>2</sub>が放出されている。土壌呼吸の測定方法には、1) 土壌表面に密閉容器を設置し、ここから試料空気を抜き取ってCO<sub>2</sub>濃度を計測し、その時間変化からCO<sub>2</sub>発生量を求める方法(密閉法)、2) 同じく密閉容器を設置し、このなかにアルカリ溶液を入れ、そのCO<sub>2</sub>吸収量を計測する方法(アルカリ吸収法)、3) 土壌表面に設置した容器に空気を流し、容器に入る前の空気と流出した空気とのCO<sub>2</sub>濃度の差を計測する方法(通気法)、などがある。これらの方法で得られる測定値は必ずしも一致せず、それぞれの方法の妥当性についてはいまだ議論がなされている段階である。本研究では、温度条件とCO<sub>2</sub>放出速度との関係を詳細に解析するため、瞬間的な値を連続して測定することができる通気法を用いることにした。4地点でのCO<sub>2</sub>放出速度を連続測定するシステムを作成し、1992年の8月から11月にかけて、毎月3~4日間にわたり、調査区内の4地点で測定を行った。空気中のCO<sub>2</sub>濃度の測定には赤外線ガス分析装置を用いた。

## 5. 結果および考察

### (1) 調査区の植生の調査

表1に、調査区内に出現した高木の種、本数、合計胸高断面積を示した。すべての種の胸高断面積の合計は地表面積のほぼ1%であった。胸高断面積のうちの大部分はミズナラ、イタヤカエデ、オヒョウの3種で占められた。

### (2) 植物遺体の存在量、供給速度および分解速度の測定

高木の落葉・落枝は、10月から11月半ばに集中していた。10個のリタートラップを比較すると、トラップ間の変動はあまり大きくなかったが、一部のトラップで数10%程度高めの値が得られた。1991年の結果を図2に示す。高い値が得られたのは林冠ギャップの縁に近いトラップであった。ギャップの縁では低木やつる性植物の繁茂、高木の側枝の活発な伸長・展開な

どがみられ、高い落葉・落枝速度はこのような葉群密度の高さを反映したものであろう。

表1 面積1400m<sup>2</sup>の調査区内に出現した高木の本数と胸高断面積

種	本数	胸高断面積 (m <sup>2</sup> )
ミズナラ	5	5.54
イタヤカエデ	6	5.37
オショウ	6	2.42
コハウチワカエデ	1	0.10
サルナシ	7	0.85
アオダモ	9	0.82
ヤマブドウ	3	0.20
マユミ	2	0.01
シナノキ	1	0.01
合計	40	13.63

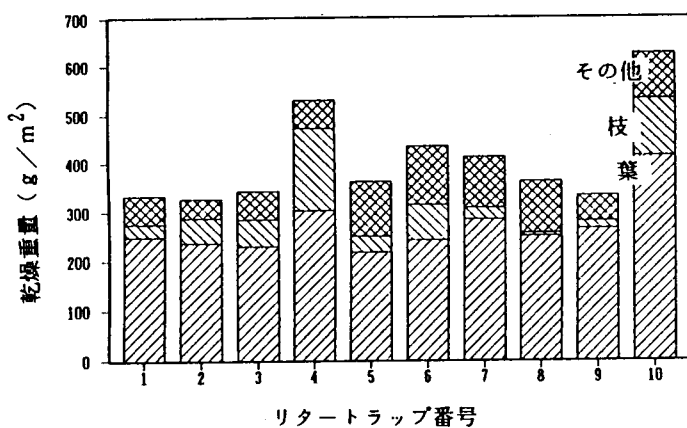


図2 リタートラップ（落葉・落枝を捕集するネット）で回収した高木の落葉・落枝量の年間積算量。10個のリタートラップそれぞれの値を示した。

2年間の測定結果を比較してみると、乾燥重量にして1991年には406g/m<sup>2</sup>、1992年には428g/m<sup>2</sup>で、ごく近い値がえられた。林冠木が展開する葉の量は、それほどおおきな年変動を示すとは考えにくく、この結果は合理的なものといえる。

ササに由来する植物遺体量は、ササの分布の不均一性をそのまま反映して、地点間でかなり大きな変動を示した（図3）。全地点の平均的な有機炭素供給速度は、高木由来の落葉・落枝による供給の1割にも達しなかった（表2）。

落葉・落枝の炭素含有率を分析した結果、高木由来の落葉は46%、落枝は49%であったのに対し、クマイザサでは落葉で38%、枯死桿で46%と、とくに葉で低い値を示した。これは、ササが多量のケイ酸を含むためであろう。

太さ1cm以上の中型落枝の供給速度は、リタートラップで測定した落葉・落枝速度の5%強に過ぎなかった(表2)。1991年の時点で林床にあった中型落枝の乾燥重量と炭素含有率を測定したところ、材の密度には試料間でおおきな変動が見られたが、炭素含有率はほぼ一定の値(50%弱)を示した。密度の違いは、樹種による材の違いのほか、分解過程の進行の度合いの違いを反映したものであろう。

林床には、分解過程にある倒木が多数見られた(図4)。現在の高木がとほぼ同じ程度の本数の倒木があることから、倒木が完全に分解までに要する時間は、高木の寿命と同程度であろうと推察される。

表2 冷温帯林で測定した有機炭素蓄積量および土壌への供給速度

有機炭素蓄積量	
倒木	1,190 (gC/m <sup>2</sup> )
中型落枝(直径1cm以上)	48
ササ地上部	142
植物体地下部	308
土壌中の植物遺体	33
A0層(地表面の植物遺体)	177
土壌有機物	16,700
土壌への有機炭素供給量	
高木の落葉、落枝(除中型落枝)	198 (g/m <sup>2</sup> /y)
高木からの中型落枝	11
ササの落葉、枯死桿	16

長さとおさから推定した倒木の材積量に、中型落枝で求めた平均的な材密度と炭素含有率をかけて、倒木の形で存在する有機炭素量のおよその推定を行った(表2)。その結果をみると、1m<sup>2</sup>あたり約1.2kgの有機炭素が倒木の形で林床に存在している。これは、A0層(地表面に堆積している落葉、落枝層)と中型落枝に含まれる有機炭素量の約5倍に達する値である。倒木の分布は不均一であり、またその供給は時間的にきわめて不均一に起こる。したがって、その存在量と供給速度の見積もりを精度よく行うには十分な面積ないしは期間の調査が必要と思われるが、森林生態系の炭素循環を解析するうえで、重要な要素のひとつである。

ナイロンメッシュのバッグに入れて林床に放置した植物遺体の1年間の乾燥重量減少率、落葉広葉樹の葉で29%、クマイザサの葉で10%と同じ葉でもササのほうが広葉樹よりも分解しにくかった。またササの桿では、1年間で4%しか分解せず、非常に難分解性であった。すでに述べたように、落葉・落枝の供給速度に関してはササ層の貢献度は小さい。しかし、このように難

分解性であれば、林床に存在する植物遺体のなかでササ由来のものが占める比率は、供給速度から推定されるよりもかなり大きいものになるだろうと考えられる。

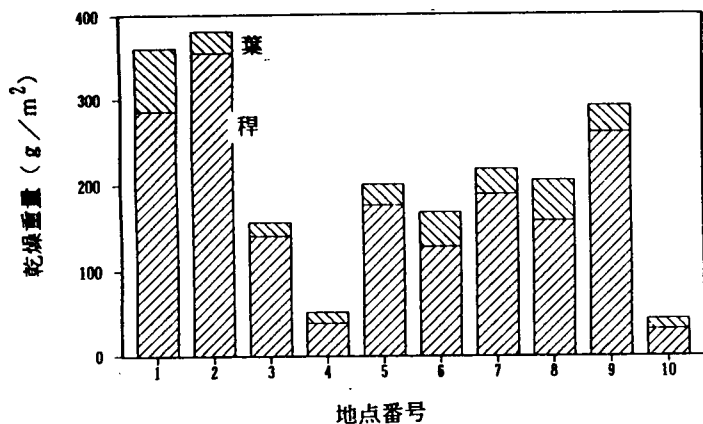


図3 調査区内の10地点における、クマイザサ由来のリター（植物遺体）量。

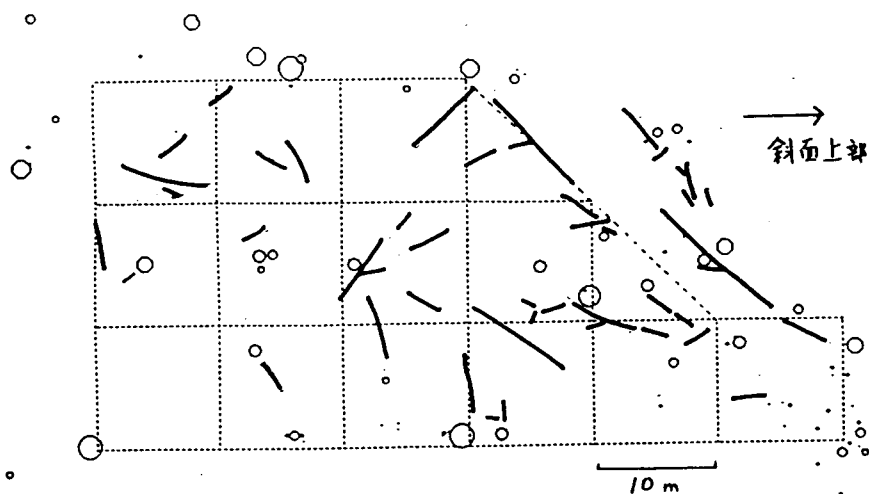


図4 調査区での立木と倒木の分布。太い実線は倒木，縁は立木の樹幹をあらわす。縁の面積は，立木の胸高断面積に比例している。

### (3) 土壌の物理環境の測定

高木層が鬱閉した状態では、土壌はほぼつねに湿潤な状態にあった。降雨中のみ含水量の多少の増加が見られたが、その後数時間程度で降雨前の状態に復帰し、そのまま安定する、というのが各地点での共通した傾向であった。土壌での有機物の分解が乾燥によって抑えられることはほとんどないだろうと推察される。

図5に、土壌温度の変動パターンの典型的な例を示した。地中温度の日変動は、深度が深くなるにつれて気温の変動から位相が遅れていき、かつ振幅が小さくなっていくことが分かる。土壌中での有機物の分解速度は温度と密接に関連していることが知られているが、気温と有機物分解

速度との関係を定量化しようとする場合には、土壌内の温度環境が深度によってこのように大きく異なる点に注意する必要がある。

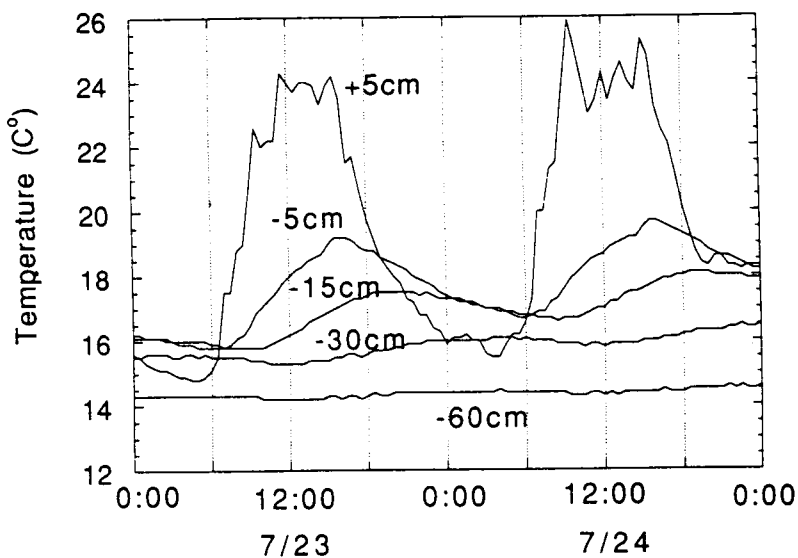


図5 土壌中温度の時間変動。1992年の7月23日から24日にかけての測定例。

#### (4) 土壌有機物量等の測定

土壌中の植物体、植物遺体、および土壌中の有機炭素はいずれも土壌表面近くに集中して分布しており、深さ60～80cm以深の土壌に含まれる有機炭素はわずかであった。それぞれの面積あたりの値を表2に示した。土壌有機物のかたちでの炭素蓄積量は他に比べて非常に大きく、生きた植物体をのぞいた有機炭素の90%以上を占めた。A0層の有機炭素量は、中・大型落枝をのぞく落葉・落枝が1年間に供給される速度よりもやや小さい値を示した。調査時期が7月で、前年の落葉から9ヶ月経過していることから、A0層の平均滞留時間はおよそ1年あまりであろうと推測される。

#### (5) 土壌からのCO<sub>2</sub>放出速度の測定

1992年の10月21日から23日にかけてのCO<sub>2</sub>放出速度の測定結果を、測定容器内の気温とともに図6に示す。CO<sub>2</sub>放出速度は、温度とほぼ同調して、おおきな日内変動を示した。土壌表面から放出されるCO<sub>2</sub>、土壌中での微生物による有機物分解および植物の地下部による呼吸に由来する。これらの過程はいずれも温度に敏感に反応するものと考えられる。すでに示したように(図5)、地中温度の日変動は、深度が深くなるにつれて気温の変動から位相が遅れていき、かつ振幅が小さくなっていく。にもかかわらず土壌表面からのCO<sub>2</sub>放出速度が時間的にずれることなく地表面温度とよく対応した変動を示したことは、CO<sub>2</sub>生成過程がおもに土壌表面近くで行われていることを示唆しているとも考えられる。とはいえ、土壌各層でのCO<sub>2</sub>発生と地表面からの放出量との対応関係には、土壌内の気体の拡散速度なども関連しており、簡単には結論できない。

CO<sub>2</sub>放出速度の温度依存性はつねに一定ではなく、季節によって変化した。図7に示すように、8月から11月にかけて、しだいに同じ気温でもCO<sub>2</sub>放出速度は低いレベルにとどまるよ



うになった。この理由としては、土壌表面の温度が同じであっても、内部の温度は夏から初冬にかけてしだいに低下していること、植物遺体の化学組成が分解過程を経て変化すること、土壌微生物の組成や活性が変化すること、などさまざまな可能性が考えられ、原因の特定のためには、解析的なアプローチによる研究が必要である。地表面温度から一意的にCO<sub>2</sub>放出速度が決定されないということは、年間のCO<sub>2</sub>発生量を見積もる場合や、温度環境の変動の効果을推定するさいに考慮しなくてはならないだろう。

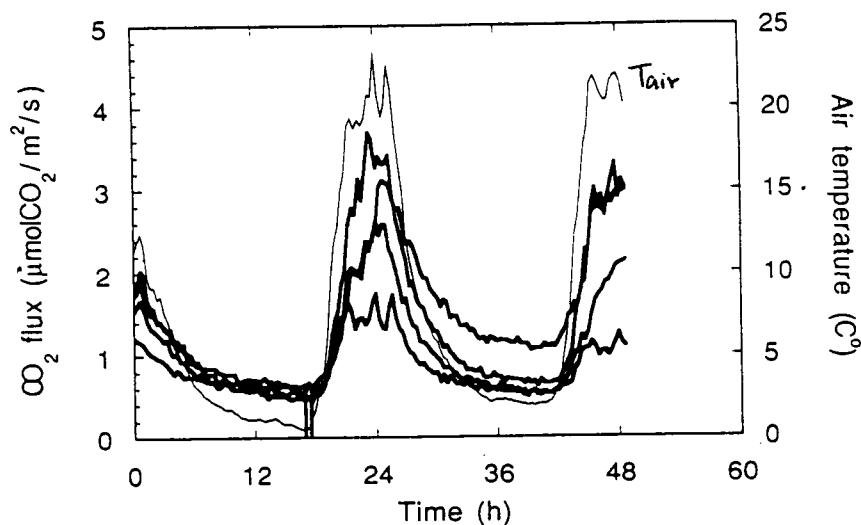


図6 落葉広葉樹林林床の4地点の土壌からのCO<sub>2</sub>放出速度および地表面付近の気温の変動。1992年10月21日から23日にかけての測定例。

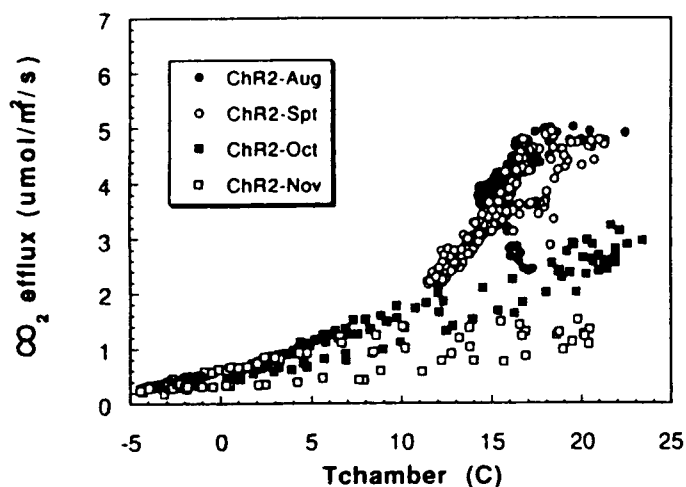


図7 林床の土壌からのCO<sub>2</sub>出速度の温度依存性。同一地点での、8、9、10月および11月の測定結果をあわせてプロットしてある。各点は、ある瞬間の測定容器内の気温とCO<sub>2</sub>放出速度の関係を示す。

4 地点の測定結果をあわせて示した図6から明らかなように、土壌からのCO<sub>2</sub>出速度は、空間的にも大きな変動を示した。近接した測定点間でも、最大2倍前後の違いが見られた。これは、土壌有機物の量、植物体の地下部の量、土壌内の気体の流れやすさなど、さまざまな要素の不均一性の反映であろう。

## 6. まとめ

図1のコンパートメントモデルに示した有機炭素のストックおよびその間の動きのうち、生きた植物と大気との炭素のやりとり、植物の地下部の死亡率、高木の現存量についてはまったく測定できなかった。また、土壌からのCO<sub>2</sub>放出については、植物の根の呼吸に由来する部分とそれ以外の部分に分離することはできなかった。さらに、季節変動が大きく、温度との関係も単純ではないことから、年間をとうしての放出量の見積りはできなかった。これらについて、すでに測定されたデータを使って一応の推定をすることは可能であろうが、こうした項目の測定にはいずれも方法論的なむずかしさがあって、信頼できるデータは多くはない。また、基礎的な一次データの蓄積に貢献する、という本研究課題の目的とは離れてしまうので、不十分な形ではあるが、直接測定できたデータを報告するにとどめる。

序において述べたように、陸上生態系はさまざまなスケールの不均一性を持っている。今回の調査区内でも、土壌からのCO<sub>2</sub>放出におおきな地点間の差が見られたし、落葉供給量にも林冠の状態に応じた変動があった。また、植物遺体の形で存在している有機炭素のうち80%近くは、低い頻度で供給され、不均一に分布する倒木に含まれるものであった。さらに、調査区自体、明らかに存在する地形的な不均一さのなかの一部を切りとったものにすぎない。森林生態系全体の炭素収支を明らかにすることを目的とするのであれば、系統だった調査地の選定と多量の人手の投入が不可欠だろう。

[国際共同研究等の状況]      なし

[研究発表の状況]              なし