

## B-51 温室効果ガスの人為的な排出源・吸収源に関する研究

### (1) CO<sub>2</sub>の排出・吸収に関する研究

#### ①土地利用変化に伴うCO<sub>2</sub>収支に関する現地調査

研究代表者 資源環境技術総合研究所環境影響予測部 林 正康

通商産業省資源環境技術総合研究所

環境影響予測部広域域間環境研究室 蒲生 稔

大気圏環境保全部大気計測研究室 上田真吾

平成8～10年度合計予算額 25,217千円

(平成10年度予算額 8,061千円)

#### [要旨]

熱帯アジア地域においては森林の大規模な伐採により土地利用形態が大きく変動している。伐採後の放置、農耕地化、商業作物のプランテーション等の土地被覆状態の変化による温室効果ガス、特に二酸化炭素の放出・吸収の変化を現地観測により調べる。

この場合の二酸化炭素の収支の主なる吸収・放出源は土壌と植生である。土壌から大気への二酸化炭素の放出はチャンバ法で、植生と大気間の収支は植生の上空で二酸化炭素のフラックスを渦相関法で測定する。調査対象地域のスマトラ島ジャンビ県パシルマヤン試験林にチャンバを設置し放出速度を求めた。渦相関法による測定は調査地域としてボルネオ島東カリマンタン県ブキット・スハルトのムラワルマン大学の演習林を候補地とし、二酸化炭素濃度の観測を平成9年2月から現地担当者の協力を得て実施した。

土壌からの二酸化炭素の放出速度は乾季で小さく雨季で大きい。この傾向は4地域について同様に見られる。皆伐焼却地は土壌が乾燥しやすいためか乾季における放出速度は他に比較して小さい。放出速度は乾季・雨季についてそれぞれ従来調査で得られた値、熱帯湿地林、乾燥林より小さめの値である。土壌有機物のCN比と窒素安定同位体比( $\delta^{15}\text{N}$ )を測定し、土壌面からの二酸化炭素の放出速度との対応を調べた。土壌有機物の集積は表層部に限られ、土壌有機物の無機化作用が非常に活発で、土壌有機物の $\delta^{15}\text{N}$ とCN比の間には負の相関が認められ、分解の進んだ土壌有機物の $\delta^{15}\text{N}$ は高く、新鮮で易分解性画分に富む土壌有機物の $\delta^{15}\text{N}$ は低いことが判った。土地利用/被覆が異なる土壌面からのCO<sub>2</sub>放出速度は、土壌有機物の $\delta^{15}\text{N}$ に対応した。このことは、土壌面からのCO<sub>2</sub>放出速度が易分解性画分に富む土壌で高く、その指標として土壌有機物の $\delta^{15}\text{N}$ を利用できることを示すものと考えられる。

植生上での二酸化炭素濃度の挙動には顕著な日変動が見られる。1998年2月から1年間の現地での測定では二酸化炭素濃度に季節的な変化は見られなかった。これは熱帯雨林の特徴であるとも言えるが、人工衛星から測定した無次元化植生指数には乾季と雨季では相違があり、それとの対応には更に継続した測定が必要である。

[キーワード] 土地利用／被覆変化，二酸化炭素放出速度、土壌有機物、窒素安定同位体比，二酸化炭素濃度

## 1. 序

熱帯アジア地域においては森林の大規模な伐採により土地利用形態が大きく変動している。伐採後の放置、農耕地化、商業作物のプランテーション等の土地被覆状態の変化による温室効果気体、特に二酸化炭素の放出・吸収の変化を精度良く算出することは、大気中の二酸化炭素の濃度を予測する上で不可欠である。しかし、熱帯林が大気 CO<sub>2</sub> の吸収源として作用しているか否かについては未解決のままである。すでに熱帯林は大規模に伐採されたが、食料需要の増加を補うため林地の農地化は今後も進むものと考えられる。したがって、このような土地利用変化が森林地域の炭素動態にどのような影響を及ぼすのかを定量的に評価する必要がある。

## 2. 研究目的

この場合の二酸化炭素の収支の主なる吸収・放出源は土壌と植生である。土壌から大気への二酸化炭素の放出はチャンバを用いて測定する。植生と大気間の収支は植生の上空で二酸化炭素の放出速度を渦相関法で測定する。平成8年度に相手国側のカウンターパート、BIOTROPと協議し、調査対象地域をスマトラ島ジャンビ県パシルマヤンを選定した。調査区として、保全地域の天然林(P地点)、過去に択伐が実施された後放置されている二次林(S地点)、皆伐焼却直後の跡地(O地点)、および皆伐焼却後のゴム植林地(R地点)を設定し、チャンバを3箇所ずつ設置し、30分毎に試料大気を採取し、研究室で計測した濃度の時間変化から放出速度を求めた。

森林土壌からのCO<sub>2</sub>の大部分は、植物の根の呼吸によるものと土壌有機物の微生物分解による。森林地域の開発はこれらの過程でのCO<sub>2</sub>の生産量を変化させるとともに、土壌有機物の量的質的な変化をもたらすと考えられる。本研究では、土壌有機物の質的变化を把握するための指標として窒素安定同位体比( $\delta^{15}\text{N}$ )を取り上げ、その有効性を検討した。また、土地利用／被覆変化の結果として生じる土壌有機物の $\delta^{15}\text{N}$ の変動と土壌からのCO<sub>2</sub>放出量との関係を解析した。これらの解析結果に基づき、CO<sub>2</sub>放出量の測定結果を広域に外挿する際の指標として、土壌有機物の $\delta^{15}\text{N}$ を利用する可能性について考察した。

渦相関法による測定は観測機器を現地に設置し長期間継続する必要があるが、現地側から警備上、実施は困難であるとの指摘があり再検討し、平成9年度に調査地域としてボルネオ島東カリマンタン県ブキット・スハルトのムラワルマン大学の演習林を候補地とした。しかし、インドネシアへの観測機材の正規の持ち込みは困難で、携行機材による二酸化炭素濃度の観測を平成9年2月から現地担当者の協力を得て実施した。

調査地点について図1に示す。

### 3. 研究方法

#### (1) 土壌面からの CO<sub>2</sub> 放出量の測定

土壌面をチャンバーで覆った後、予め真空中に排気したガラスバイアルにチャンバー内の空気を経時的に採取し、CO<sub>2</sub> 濃度の変化から単位面積当たりの CO<sub>2</sub> 放出量を推定した。空気試料はすべて日本に輸送し、熱伝導度検出器付きのガスクロマトグラフをにより CO<sub>2</sub> 濃度を測定した。

#### (2) 土壌有機物の窒素安定同位体比

CO<sub>2</sub> 放出量を測定した場所の付近で 1997 年 7 月と 9 月に土壌を採取した。土壌は風乾の後、ふるいを通して調整した。試料の一部は CHN コーダーで全炭素と全窒素濃度の測定に用いた。安定同位体比測定では、稀塩酸処理により無機態の炭素と窒素を除去し、60℃で乾燥させた後に乳ばちで混合した試料を用いた。試料中の全窒素は真空下で酸化分解することで窒素ガスに変換した<sup>1)</sup>。窒素ガスを液体窒素温度で精製した、質量分析計 (MAT 252) に注入して窒素安定同位体比を測定した。窒素安定同位体比は標準物質からの偏差の千分率である δ 値として、以下の式に従って表わした。

$$\delta^{15}\text{N} = (\text{R 未知試料} / \text{R 対照試料} - 1) \times 1000 \quad (\text{‰})$$

ここで R = <sup>15</sup>N / <sup>14</sup>N, 対照試料には大気中の窒素ガスを 0‰として予め値付けした純窒素ガスを使用した。測定精度は±0.1‰以内であった。

### 4. 結果と考察

#### (1) 二酸化炭素の放出速度

土壌からの二酸化炭素の放出速度は現地担当者の協力により 1997 年 9 月より月毎に試料空気の採取を継続し、日本へ送付して分析している。分析結果によれば、図 2 に示すように、二酸化炭素の放出速度は乾季 (4 月 - 11 月) で小さく、雨季 (12 月 - 3 月) で大きい。この傾向は 4 調査区について同様に見られ、放出速度の大きな土壌では易分解性画分に富み土壌有機物の窒素安定同位体が高い。皆伐焼却地は土壌が乾燥しやすいため乾季における放出速度は他に比較して小さい。放出速度は乾季・雨季についてそれぞれ従来の調査結果をまとめた値 (Raich and Schlesinger, 1992)、熱帯湿地林の 527 mg CO<sub>2</sub> / m<sup>2</sup> / h r、熱帯乾燥林の 282 mg CO<sub>2</sub> / m<sup>2</sup> / h r より小さめの値である。年間の積算値を求めるには今後のデータの蓄積が必要である。

#### (2) 異なる森林における土壌有機物の δ<sup>15</sup>N

P 地点における土壌有機物の δ<sup>15</sup>N の鉛直変化をタイの自然林で得た結果と比較した (図 3)。鉛直変化は次の 2 通りに分類することができた。第一は泥炭湿地林とマングローブ林の例で、これらは δ<sup>15</sup>N の鉛直変化が小さいことが特徴であった。第二は高地林のグループで、δ<sup>15</sup>N が鉛直方向に特徴的に変化した。第二グループでは森林毎に δ<sup>15</sup>N の差が認められたが、鉛直変化には次のような共通性が見いだされた。すなわち、土壌有機物の δ<sup>15</sup>N は表層 0 ~ 10 cm で最も低く、10 ~ 30 cm の層で極大

となり、30 cm 以深での変化は小さかった。

上記第一グループでは、冠水条件下で有機物分解が抑制されることにより土壌有機物が蓄積している。一方、第二グループでは、土壌有機物の集積は表層に限定され、土壌-植物系における窒素の内部循環が活発であることを裏付けている。これらの比較から、土壌有機物の  $\delta^{15}\text{N}$  に認められた鉛直変化は土壌有機物の分解の程度に対応している可能性がある。深層で  $\delta^{15}\text{N}$  が高くなるのは、窒素の内部循環の際の脱窒で  $\delta^{15}\text{N}$  の低い窒素が選択的に利用される結果、残存窒素の  $\delta^{15}\text{N}$  が高まるものと考えられる。

### (3) 天然林と二次林の土壌有機物の $\delta^{15}\text{N}$

S 地点の土壌有機物の  $\delta^{15}\text{N}$  は P 地点と比較してどの深さでも低かった (図4)。これは、天然林と二次林とでは土壌有機物の化学特性が異なることを示唆している。両地点ともに、土壌有機物の  $\delta^{15}\text{N}$  と CN 比との間には負の相関が認められた (図5)。一般に、土壌有機物の分解が進むと CN 比が高くなることから、高い  $\delta^{15}\text{N}$  を示す土壌有機物は分解を受けたものと考えることができる。従って、S 地点の方が土壌有機物の  $\delta^{15}\text{N}$  が高かったのは、S 地点の方が P 地点よりも新鮮な有機物に富むものと判断できる。おそらく、選伐の際に土壌に還元された地上および地下のバイオマスが比較的新鮮な有機物の起源と考えられる。以上の結果から、S 地点の土壌は P 地点よりも新鮮な有機物に富む、言い替えると P 地点の土壌有機物は S 地点のそれよりも難分解性であると推測される。

### (4) 土地利用/被覆変化と $\delta^{15}\text{N}$ 変動

土地利用変化 (P → S → O → R) に伴う土壌有機物の  $\delta^{15}\text{N}$  の変動を図6に示した。土地利用が改変することによる  $\delta^{15}\text{N}$  の変動を要約すると次の通りである。

①天然林の択伐 (P → S に対応) : 既に述べた様に、択伐によりバイオマスが土壌還元されるため、土壌有機物の  $\delta^{15}\text{N}$  は表層 (< 10 cm) 下層 (> 10 cm) とともに低下する。

②皆伐焼却 (S → O に対応) : 土壌有機物の  $\delta^{15}\text{N}$  は表層、下層ともに高くなる。この変化は次のように解釈することができる。調査地域では降雨強度が強いため、皆伐焼却により樹冠が無くなると表層土壌の著しい浸食が起こり、その結果下部土壌が表面に露出する。この時点では植被が極めて貧弱なため、 $\delta^{15}\text{N}$  の低いバイオマスの土壌還元は小さい。これらを反映して、O 地点では表層と下部の  $\delta^{15}\text{N}$  の違いが不明瞭である。

③ゴム植林 (O → R に対応) : 下部土壌の  $\delta^{15}\text{N}$  は P 地点よりもやや高いが、表層土壌の  $\delta^{15}\text{N}$  は S 地点と同程度に低い。表層土壌有機物が地上バイオマスと同程度の  $\delta^{15}\text{N}$  を示すことから、バイオマスの土壌還元が表層土壌有機物の  $\delta^{15}\text{N}$  を低下させたものと判断できる。

以上のことから、土地利用/被覆の異なる地点間で認められた土壌有機物の  $\delta^{15}\text{N}$  の違いは、地上植生に由来する  $\delta^{15}\text{N}$  の低い有機物の土壌還元率の違いを反映したものと考えられる。従って、土壌有機物に占める易分解性画分の割合は S 地点 > P 地点 > R 地点 > O 地点の順に高いものと推察される。

#### (5) 土壌有機物の $\delta^{15}\text{N}$ と $\text{CO}_2$ 放出量

乾季の  $\text{CO}_2$  放出量は S 地点 > P 地点 > R 地点 > O 地点の順に大きく (図 7), この順序は  $\delta^{15}\text{N}$  から予測される土壌有機物に占める易分解性画分の割合に対応した。従って、土地利用/被覆変化にともなう  $\text{CO}_2$  放出量の変動に関する指標として土壌有機物の  $\delta^{15}\text{N}$  を利用できる可能性を示唆している。雨季については、 $\text{CO}_2$  放出量と土壌有機物に占める易分解性画分の割合とは対応を示さなかった。このことは、易分解性画分以外の要因、例えば植物根の呼吸により雨季の  $\text{CO}_2$  放出量が規定されていることを意味する。

#### (6) 植生上の二酸化炭素測定

植生上での二酸化炭素濃度の挙動には 図 8 に示すように、顕著な日変動が見られる。すなわち、日中での植物の光合成による二酸化炭素濃度の減少と夜間での呼吸作用による濃度の上昇である。濃度の日較差は 1 次的には植生の光合成活動を反映しているが、図 9 に示す 1998 年 2 月から 1 年間の日平均濃度の測定 (黒丸) と濃度の日変化の指標としての日最大値 ( $\blacktriangle$ ) と最小値 ( $\blacktriangledown$ ) の幅では季節的な変化は見られなかった。これは気温や降雨量に季節的な変動が少ない熱帯雨林の特徴であるとも言えるが、人工衛星から測定した無次元化植生指数には乾季と雨季では相違があり、それとの対応には更に継続した測定が必要である。1997 年はエルニーニョによりインドネシア諸島が乾燥し、森林火災が各地で発生し、必ずしも代表的な測定結果が得られている保証は無い。また、気温や雨量等の基本的な気象要素の測定が無いので今後の測定の充実を計る必要がある。

### 5. まとめと今後の課題

本調査研究により熱帯降雨林地帯を中心として土地利用形態が変化しつつある地域での土壌からの二酸化炭素の放出速度が季節的に変動することが判った。土地利用/被覆変化にともなう  $\text{CO}_2$  放出量の変化を考える際、測定結果の解析するための一般的な気象条件の測定、特に気温、降水量、土壌温度、土壌水分量の測定は不可欠である。更に土壌有機物の  $\delta^{15}\text{N}$  が有効な指標となる可能性を示すことができた。すなわち、限られた地点での  $\text{CO}_2$  放出量の測定結果を広域に外挿する際、地域の区分指標として土壌有機物の  $\delta^{15}\text{N}$  は有用である。その際、 $\delta^{15}\text{N}$  がどの程度の面積を代表するのかを予め検討することが必要である。

### 6. 参考文献

- 1) Minagawa M., Winter D.A. and Kaplan I.R. (1985) Comparison of Kjeldahl and combustion methods for measurement of nitrogen isotope ratios in organic matter. *Anal. Chem.* 56, 1859-1861.
- 2) Raich J.W. and W.H. Schlesinger (1992) The global carbon dioxide flux in soil respiration and its relationship to vegetation and climate, *Tellus* 44B, 81-99.

#### [国際共同研究の状況]

バシルマヤンにおける測定では BIOTROP と、プセルフトでの測定ではムラワルマン大学熱帯林研究センターと協力して調査を進めている。更にデータを蓄積するためには

両相手研究機関と更なる緊密な協力関係を築く必要がある。

[研究発表]

(1) 口頭発表

・ S. Ueda, C.-S. U. Go, Y. Suwa, Y. Matsui, F. Yamaguchi, T. Shoji, K. Noto, T. Sumino, A. Tanaka, and Y. Matsufuji, Stable isotope fingerprint of N<sub>2</sub>O produced by ammonium oxidation under laboratory and field conditions, International Workshop on the Atmospheric N<sub>2</sub>O Budget: An analysis of the state of our understanding of sources and sinks of atmospheric N<sub>2</sub>O, Tsukuba, 23-25 March, 1999.

(2) 論文発表

○・ S. Ueda, C.-S. Go, T. Yoshioka, N. Yoshida, E. Wada, T. Miyajima, A. Sugimoto, N. Boontanon, P. Vijarnsorn, and S. Boonprakub: Dynamics of dissolved O<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, and N<sub>2</sub>O in a tropical coastal swamp in southern Thailand, Biogeochemistry (submitted).

(3) 出願特許, 受賞等

なし



図1 観測地点 (●)。

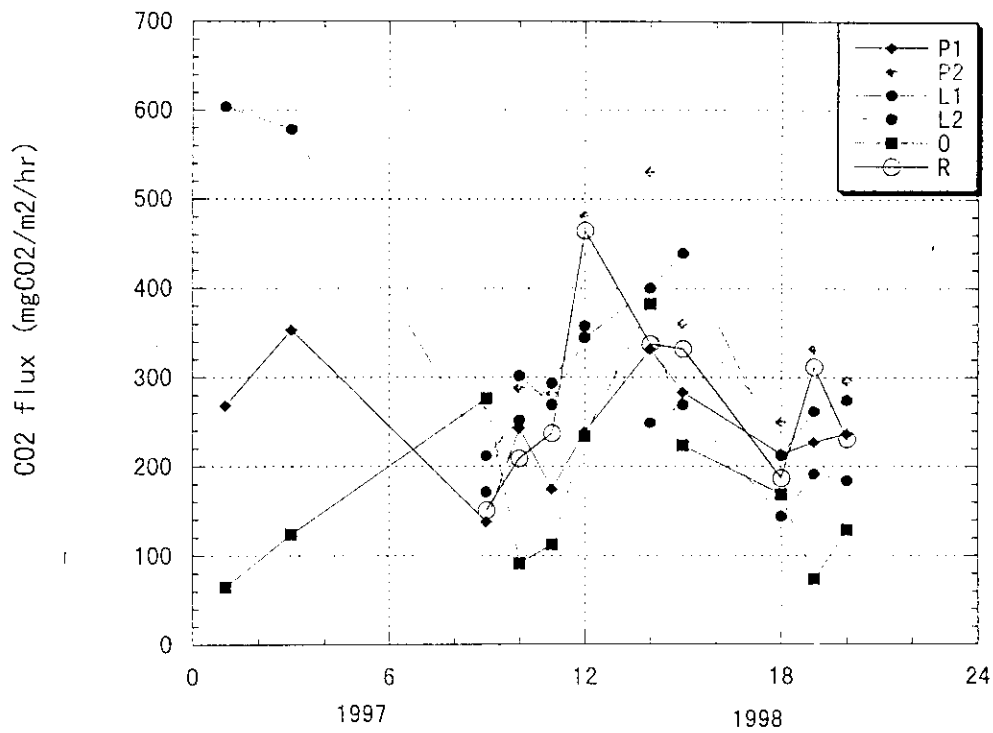


図2 土壤から大気への二酸化炭素放出速度。  
P1, P2 : 天然林、L1, L2 : 択伐2次林、O : 皆伐後焼却地、R : ゴム園

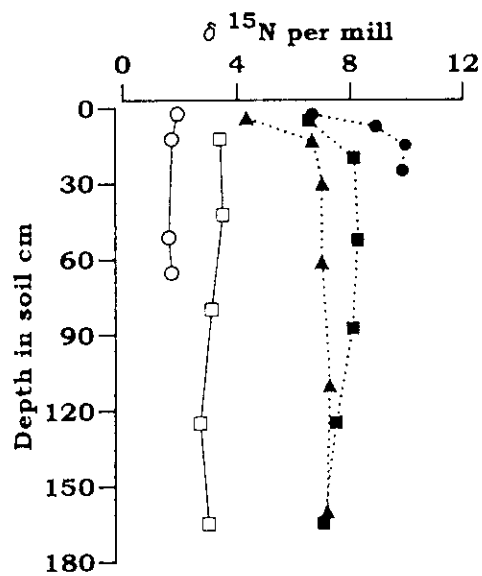


図3 熱帯林における土壤有機物の  $\delta^{15}N$  の鉛直変化  
○ : 泥炭湿地林 (タイ南部ナラチワ)、□ : マングローブ林 (タイ南部パンガ)、  
■ : 高地季節林 (タイ中部カンチャナブリ)、▲ : 高地常緑林 (タイ北部チェンマイ)、● : 低地常緑林 (インドネシア・スマトラ島ジャンビ、本研究)

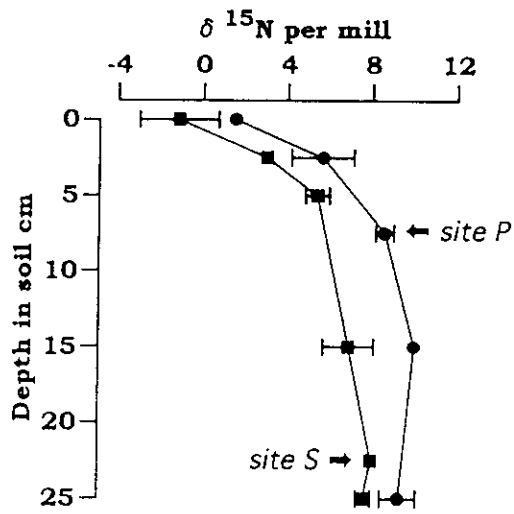


図4 天然林（P地点）と択伐2次林（S地点）における土壌有機物の $\delta^{15}\text{N}$   
 0 cmは植物葉または地上リターの測定値。誤差線は標準偏差。

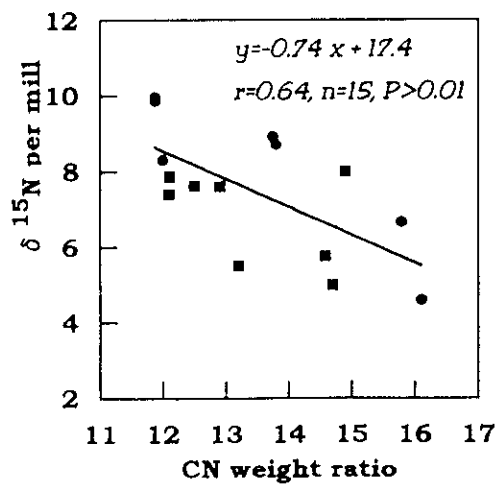


図5 土壌有機物のCN比（重量）と $\delta^{15}\text{N}$   
 ●：P地点、■：S地点



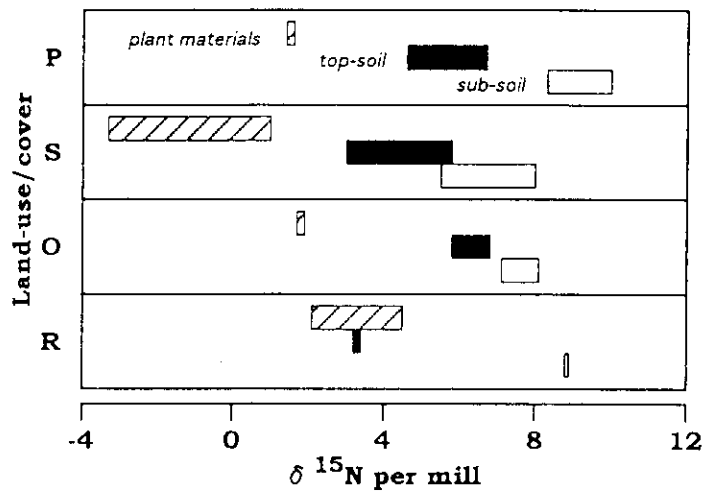


図6 土地利用／被覆の違いと植物葉、地上リター及び土壌有機物の  $\delta^{15}\text{N}$   
top soil は10cm以浅、sub soil は10cm以深。典型的な土地利用は、天然林(P)  
→択伐2次林(S) →皆伐焼却地域(O) →ゴム植林地(R)の順に変化する。

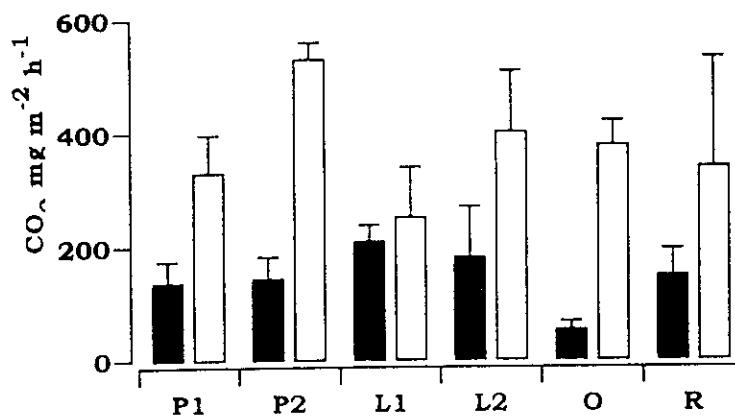


図7 土地利用／被覆の異なる地点における土壌面からのCO<sub>2</sub>放出速度  
隣接する3地点で実施した測定値の平均値と標準偏差で表示。黒塗りは1997年  
9月(乾季)、白抜きは1998年2月(雨季)の測定結果。

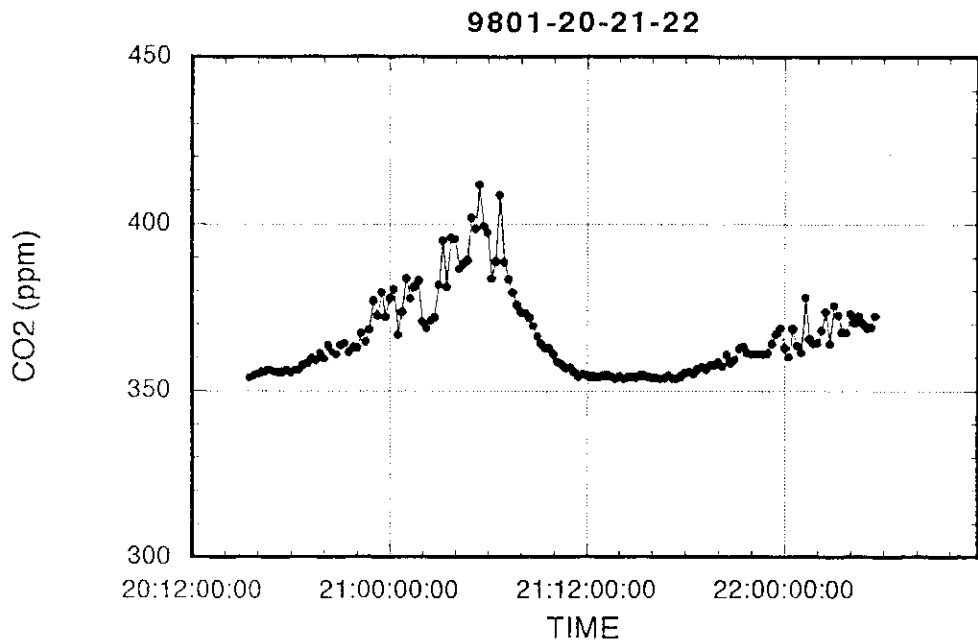


図8 森林植生上における二酸化炭素濃度の日変化の典型的例

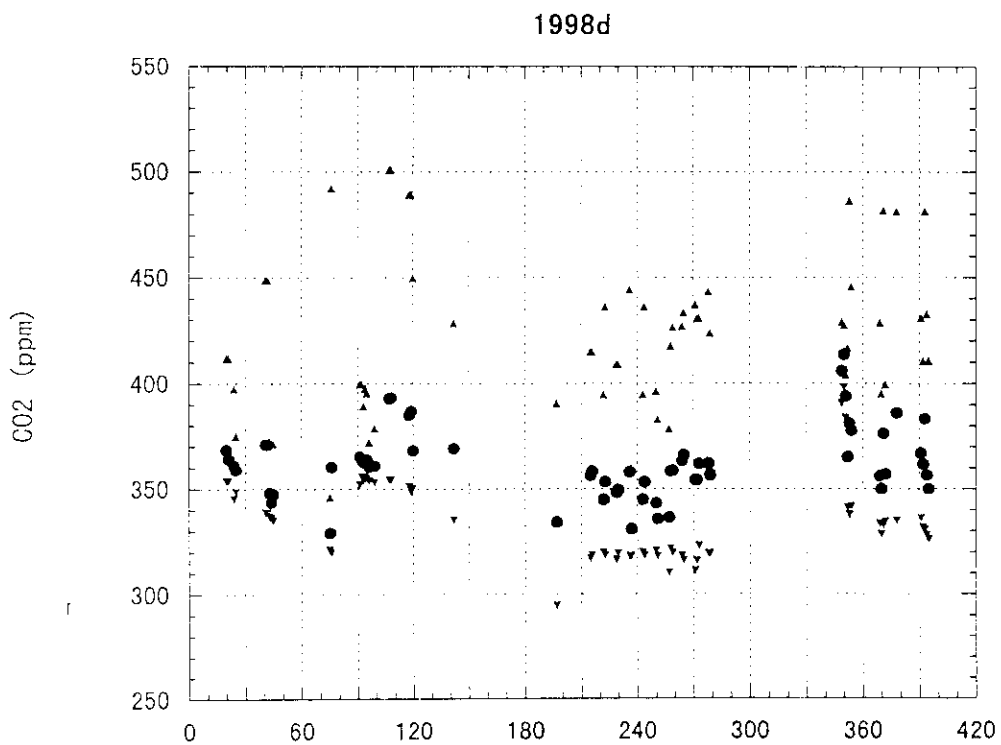


図9 熱帯降雨林上における二酸化炭素濃度の季節的変化

横軸は1998年1月1日からの日数、●は日平均濃度、▲は日最高濃度、▼は日最低濃度。