タイの原生泥炭湿地林生態系からの二酸化炭素放出速度

石田 朋 靖・鈴木 寛^{*1}・長野 敏 英^{*2}・大澤 和 敏^{*3}吉 野 邦 彦^{*4}・福 村 一 成・タニツ ヌイム^{*5}宇都宮大学農学部・^{*1} 森林総合研究所・^{*2} 東京農業大学国際食糧情報学部^{*3} 東京大学大学院・^{*4} 筑波大学社会工学系・^{*5} タイ国王立森林局CO₂ Emission Rate from a Primary Peat Swamp Forest Ecosystem in ThailandTomoyasu ISHIDA, Satoru SUZUKI,^{*1} Toshihide NAGANO,^{*2} Kazutoshi OSAWA,^{*3}Kunihiko YOSHINO,^{*4} Kazunari FUKUMURA and Tanit NUYIM^{*5}*Faculty of Agriculture, Utsunomiya University, Utsunomiya 321-8505, Japan*^{*1} *Hokkaido Research Center, Forestry and Forest Products Research Institute, Sapporo 062-8516, Japan*^{*2} *Faculty of International Agricultural and Food Studies, Tokyo University of Agriculture, Setagaya-ku, Tokyo 156-8502, Japan*^{*3} *Graduate School of Science and Technology, The University of Tokyo, Bunkyo-ku, Tokyo 113-8657, Japan*^{*4} *Institute of Policy and Planning Science, University of Tsukuba, Tsukuba 305-8573, Japan*^{*5} *Division of Silviculture, Royal Forest Department, Bangkok 10900, Thailand*

(Received June 19, 2001)

Carbon dioxide (CO₂) emission by peat and litter decomposition and by tree respiration were measured in a primary peat swamp forest of southern Thailand. The obtained emission rates from foliage, branch, stem, peat soil, litter and ponding water surface were integrated to estimate the total CO₂ emission from the forest ecosystem. The open-airflow chamber method with an infrared gas analyzer was employed for all the emission measurements except for litter decomposition. For litter decomposition, the mesh bag method was applied to estimate the emission. Root respiration was estimated from the difference between the CO₂ emission rate of ponding water and peat and litter decomposition. On the basis of unit surface area, the branch had the greatest respiration rate among the aboveground components. However, the foliage had the greatest rate per unit ground surface area. Annual CO₂ emission from the ecosystem was estimated to 8.84 t C ha⁻¹ year⁻¹ on the carbon weight basis. The breakdown of the value to each component was 6, 6, 28, 28, 18 and 14% for stems, branches, foliage, roots, litter and peat, respectively. This indicates that emission from underground plays quite important role to assess the carbon balance of the peat swamp forest.

Keywords: carbon balance, decomposition, peat swamp forest, respiration, tropical peat

2001 年 6 月 19 日受付

緒 言

南アジアの森林地帯には海岸沿いの内陸部に淡水性

の湿地林が大規模に分布しており、そこでの熱収支や CO₂ フラックス観測に基づく炭素吸収量の解明が試みられている (Ishida et al., 1995; Nagano et al., 1996; Suzuki et al., 1997)。その結果、極相林と推定される

Corresponding author: Tomoyasu Ishida, fax: +81-28-649-5499, e-mail: ishida@cc.utsunomiya-u.ac.jp

原生熱帯泥炭湿地林であっても、 $5 \text{ t C ha}^{-1} \text{ year}^{-1}$ 以上の正味の炭素吸収を継続していることが明らかにされた (Suzuki et al., 1999)。森林生態系と大気間の CO_2 交換量として測定した森林による炭素固定量は、植物の光合成によって大気から固定された炭素量から、植物の葉、枝、幹および根などの各器官の呼吸によって大気に放出される炭素量、および落枝落葉や土壌有機物の分解に伴って大気に放出される炭素量を差し引いたものである。依田によれば、樹木各器官の呼吸による炭素の放出総量は光合成による炭素同化量の約 7 割に相当し (Yoda, 1983, 1989)、熱帯泥炭湿地林の炭素収支の機構を解明するためには無視できない要素である。しかし、こうした呼吸や分解による炭素放出量の実態を熱帯林において現地調査から調べた例は極めて少ない。

本研究ではタイ国の原生熱帯泥炭湿地林において幹、枝および葉の呼吸速度を測定し、リターや泥炭の分解速度を併せて解析することによって、森林生態系における年間の CO_2 放出速度を炭素換算値で推定した。

材料および方法

タイ国南部 Narathiwat 県 To Daeng 地区の熱帯泥炭湿地林を対象に観測を行った。当該地区は、同国の森林保存地域に指定されている原生林である。1 月から 4 月にかけて月間雨量が少なく乾燥するが、年間雨量は 2 400 mm 程度あり、Köppen の気候区分において Af あるいは Am に分類される (Fig. 1)。平均的な樹冠表面の高さは 25 m で林床は 1 年を通して湛水していた。その水位は季節的な降雨量の変動によって 0.05 m から 0.9 m の範囲で変動し、pH は 4.0 前後の値をとり、溶存酸素濃度は $125 \mu\text{mol/l}$ (Ueda et al., 2000) で

Fig. 1 Location of research site and its monthly precipitation.

あった。樹木は 17 科 26 属 31 種からなり、中でも *Eugenia tumida* Duth. が個体数の 4 割を占め、森林中層部並びに下層部の優占樹種である (Hara et al., 1995)。

各器官の呼吸速度は、優占樹種の *E. tumida* について、通気式チャンバを用いて通気中の CO_2 濃度増加から求めた。チャンバはアルミ箔を蒸着した 2 mm 厚の発泡スチロールシートで試料を囲ったものであり、それを、① 幹、② 葉の付いた枝、③ 葉を除去した枝に取り付けてそれぞれの呼吸速度を測定した。葉の呼吸速度は葉の付いた枝の呼吸速度から葉を除去して枝のみにした場合の呼吸速度の差 (②-③) として求めた。こうして求められる葉の呼吸速度は暗呼吸によるものであるが、野外観測で明呼吸を測定することは極めて困難であり、暗呼吸の速度を用いて葉からの年間の呼吸速度を見積もった。

チャンバ通過による CO_2 濃度増加は差動型 CO_2 分析計 (ZRF, Fuji Electric Co., Ltd.) を用いて測定した (Fig. 2)。通気式チャンバに導入する外気は地上約 4 m の高さから吸引した。この際、測定器官の入ったチャンバと同容量の空チャンバを用意し、そこに比較用空気を通し、測定用空気と比較用空気が CO_2 分析計に到達する時間をそろえ、外気の CO_2 濃度の時間変動による誤差を最小限におさえた。チャンバ内にはファン (DC12V) を取り付け、空気を攪拌した。チャンバへの外気導入速度は $2 \sim 5 \text{ L min}^{-1}$ に設定し、測定用空気と比較用空気の各々から 0.5 L min^{-1} を取り出し、除湿器で水分を除去した後に CO_2 分析計で濃度差を求めた。チャンバ容積は測定部位により $0.05 \sim 0.15 \text{ m}^3$ とし、測定は 1 秒毎に行い、その 30 分の平均値をデータロガー (CR21X, Campbell Scientific, Inc.) に記録し

Fig. 2 Schematic diagram of an open-airflow chamber system to measure respiration.

た。CO₂分析計のゼロ点校正は手動で1日に3回行った。木部形成層の温度は熱電対を樹皮下に挿入して測定した。

対象地の地表は年間を通して湛水しており、海成粘土の上に最大で3 m程度の泥炭層が堆積している(Vijarnsorn, 1996)。泥炭層上部には新しい落葉や落枝等のバイオマスが堆積し、リター層を形成している。そこで、本論ではリターと泥炭の分解速度を分けて測定し、両者を合わせて土壌有機物分解速度と呼ぶことにする。また、倒木もリターとして一括して扱うことにする。

リターの分解速度はリターバッグ法で測定し、泥炭の分解速度は通気式チャンバを用いて測定した。リターバッグには1 mm方眼のナイロン袋を2重にして用い、観測地付近で採取した新鮮な落葉、落枝と倒木の幹の2種類を試料として現地において水中に沈め、それらの乾物重量変化からリター分解速度を推定した。観測期間は530日間で、この間に落枝と倒木のバッグは4回、落葉のバッグは5回測定した。

泥炭分解速度の測定には、泥炭層表面の新しい落枝、落葉を避け、表面から10 cm程度の深さで採取した泥炭土壌を用いた。生きた根を取り除いた泥炭土壌を直径80 cmの容器に現地の密度に合わせて20 cmの厚さに詰めた後、現地に湛水している水で表面を10 cmの水深に保った。この水面に、底面45 cm×45 cm、高さ15 cmの亚克力製の無底通気式チャンバに発泡スチロールのフロートを付けて浮かべ、現地でCO₂放出速度を測定した。

また、林床の湛水面からのCO₂放出速度は、泥炭分解速度測定と同様のフロート付き無底通気式チャンバを浮かべて測定した。測定時の湛水位は約30 cmであった。林床の湛水面上で測定したCO₂放出速度は、水中に落下したリターと泥炭の分解速度とを合わせた土壌有機物分解速度および植物根の呼吸速度との合計値と考えることができる。そこで、湛水面上で測定したCO₂放出速度から土壌有機物分解速度を差し引いたものを根の呼吸速度とした。

樹木各器官からの総呼吸量を単位地表面積あたりで算出するため、単位地表面積あたりの各器官の表面積を推定した。LAIの推定には林内109地点において魚眼レンズ(Fishieye-Nikkor 16 mm f2.8, Nikon)を用いて撮影した全天空写真をコンピュータに取り込み、群落用画像処理ソフト(Steege, 1994)で解析して求めた。単位地表面積あたりの幹表面積は、Hara et al.

(1995)による調査結果、樹木数719本/ha、平均胸高直径0.25 m、平均樹高17 m、最下枝の平均高さ9 mを用いて以下の方法で推定した。すなわち、枝が生じる平均高さ9 mまでを平均胸高直径に等しい円柱、それより上部が平均胸高直径に等しい底面直径を持つ高さ8 mの円錐であると仮定し幹表面積を求め、単位地表面あたりの樹木本数を掛け合わせて単位地表面積あたりの幹表面積とした。また枝表面積は、樹高4 mの*E. tumida*の新鮮な倒木で実測した枝表面積と幹表面積の比を用いて、幹表面積の推定値から見積もった。

倒木量は林内の60 m×60 m区画で胸高直径10 cm以上の樹木を対象として、1993年(Hara et al., 1995)と1996年に行った毎木調査による測定値を用いた。また、泥炭湿地林に生育する樹木の樹形や根の形態はマングローブ林に近い。そこで、Tamai et al. (1986)によりタイ国南部のマングローブ林で測定されたT/R比、すなわち根系のバイオマスに対する地上部バイオマスの比2.4を用いて根のバイオマス量を推定した。

結果と考察

1. 地上部の呼吸

葉の付いた枝、葉を除去した枝、および幹それぞれの測定部位の呼吸によるCO₂放出速度と形成層温度との関係をFig. 3に示す。ただし、木部組織からの呼吸は形成層温度に対して時間遅れを持つことが知られている(Lavigne, 1996)。本実験においては時間遅れを1時間とした場合に、CO₂放出速度が形成層温度と最も相関が高いことが分かったため、Fig. 3では1時間の時間遅れを加味した結果として表した。ここで、葉

Fig. 3 CO₂ emission from stem (○····), branch with foliage (---◆---), branch without foliage (—◇—), and foliage (—●—). Subtracting branch “without foliage” from “with foliage” gives the emission from foliage.

の付いた枝および葉を除去した枝からの CO_2 放出速度 R_{BL} および R_{B} ($\text{g CO}_2 \text{ s}^{-1}$) と形成層温度 T ($^{\circ}\text{C}$) との回帰式を式 (1) および (2) に示す。

$$R_{\text{BL}} = 2.01 \times 10^{-6} \exp(0.0709 T) \quad (1)$$

$$R_{\text{B}} = 2.33 \times 10^{-7} \exp(0.0904 T) \quad (2)$$

式 (1) と式 (2) の差として求めた近似式 (3) を葉からの CO_2 放出速度 R_{L} ($\text{g CO}_2 \text{ s}^{-1}$) とした。

$$R_{\text{L}} = 1.76 \times 10^{-6} \exp(0.0673 T) \quad (3)$$

また、幹の CO_2 放出速度 R_{S} ($\text{g CO}_2 \text{ s}^{-1}$) は (4) の回帰式で示された。

$$R_{\text{S}} = 5.15 \times 10^{-7} \exp(0.0857 T) \quad (4)$$

一般に、幹や枝といった木部組織の呼吸速度の測定においては、辺材積あたりの呼吸量として解析される (Carey et al., 1996; Edwards and Hanson, 1996; Lavigne, 1996)。しかし、辺材積と表面積のどちらを用いても良好な結果を示したという報告 (Lavigne et al., 1996)、あるいは表面積の方が良好であるとする報告 (Stockfors and Linder, 1998) もある。ここでは野外観測における測定の簡便さと、測定結果を森林生態系レベルに拡張する容易さを考え、各器官の呼吸速度を単位植物器官表面積あたりとして算出する。式 (2)~(4) で示された各器官からの CO_2 放出速度と形成層温度との関係を、測定部位の各器官の表面積で除して単位器官表面積あたりに換算し、式 (5)~(7) を求めた。なお、測定各部位の表面積は幹が 0.55 m^2 、枝が 0.15 m^2 であり、葉では通常の葉面積と同様に片面だけの面積で 0.90 m^2 であった。

$$R_{\text{UB}} = 1.54 \times 10^{-6} \exp(0.0904 T) \quad (5)$$

$$R_{\text{UL}} = 1.95 \times 10^{-6} \exp(0.0673 T) \quad (6)$$

$$R_{\text{US}} = 9.36 \times 10^{-7} \exp(0.0857 T) \quad (7)$$

ここで R_{UB} , R_{UL} , R_{US} はそれぞれ枝、葉、幹に対する器官の単位表面積あたりの呼吸速度 ($\text{g CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) であり、それぞれの計算値を Fig. 4 に示した。木部組織である幹と枝の呼吸速度には差がみられ、枝の呼吸速度は、年平均気温である 27°C 付近で幹の呼吸速度の 1.9 倍程度であった。また、葉の呼吸速度は枝の呼吸速度よりも小さく、幹の呼吸速度に近い値となっていた。

Fig. 4 Relationship between respiration rate per unit organ area and cambium temperature.

Thick solid line, thin solid line and broken line show respiration of foliage, branch and stem, respectively.

コスタリカの熱帯林における 2 樹種の幹呼吸速度として 3.6×10^{-5} および $5.5 \times 10^{-5} \text{ g CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ が報告されている (Ryan et al., 1994)。これらの値は本論の推定値のおよそ 2.1~3.1 倍に相当する。本論における呼吸速度が小さい原因として、有機物の無機化が遅れている熱帯泥炭湿地林の貧栄養状態が主因と推察される。本論の対象地では、P と K の欠乏あるいは Cu, Mn などの微量元素欠乏が樹木の生育の制限因子となっており (Osaki et al., 1995)、その結果、対象地域のバイオマス量 (245 t ha^{-1} ; Hara et al., 1995) は熱帯の典型的な森林のバイオマス量 ($400 \sim 500 \text{ t ha}^{-1}$; Kira, 1981) の 5~6 割にとどまっている。こうした貧栄養条件により生長が制限され、細胞の代謝活性と共に呼吸速度が低くなったものと推察される。

また、温帯から寒帯に分布する針葉樹であるテグマツ、ドイツトウヒ、バルサムモミの維持呼吸速度として、幹で $2.8 \sim 8.1 \times 10^{-5} \text{ g CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ (Lavigne et al., 1996; Maier et al., 1998)、枝で $8.1 \times 10^{-5} \text{ g CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ (Maier et al., 1998)、葉では $5.0 \times 10^{-5} \text{ g CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ (Garmash and Golovko, 1997) という結果が報告されている。枝の呼吸速度は本論とほぼ同程度であったが、幹と葉の値は本論の測定値の 1.6~4.6 倍および 4.1 倍に相当していた。ここで比較に用いた温帯や寒帯の樹木の測定値は維持呼吸のみの測定値である。樹木の生長期間においては生長に伴う生長呼吸が加わり、呼吸量が更に大きくなると考えられる。本論における呼吸量は維持呼吸と生長呼吸の合計値であり、温帯や寒帯における測定値と本論との差はより大きくなる可能性がある。こうした呼吸速度の差は先述した熱帯泥炭湿

地林の貧栄養状態のほか、針葉樹と広葉樹の違いによる各器官の構造や形状の相違も原因であると推測されるが、詳細については不明であった。各器官の Q_{10} 値は枝、葉、幹それぞれ 2.5, 2.0, 2.4 であり、温帯や寒帯の針葉樹と比べても同程度の値であった (Edwards and Hanson, 1996; Garmash and Golovko, 1997)。

先にも述べたように本実験の対象樹種である *E. tumida* は対象の森林における個体数の 4 割を占めている。そこで、この樹種が対象森林の平均的な呼吸特性を持つと仮定し、単位地表面あたりの呼吸速度を求めた。すなわち、Fig. 4 で示した単位器官表面積あたりの呼吸速度に、単位地表面積あたりの各器官の表面積を乗じ、単位地表面積あたりの呼吸速度に変換したものが Fig. 5 である。ここで単位地表面積あたりの各器官の表面積は幹、枝、および葉それぞれが 0.74 ha ha^{-1} , 0.40 ha ha^{-1} , および 2.61 ha ha^{-1} であった。この図を見ると、幹と枝の呼吸速度はほぼ同一の曲線で表された。一方、葉の呼吸速度は年平均気温の 27°C のとき、幹や枝と比較して約 4.5 倍の値となっていた。Fig. 4 で示したように、器官の単位表面積あたりの呼吸速度でみると、葉は枝よりも小さく、幹の値に近かった。しかし、単位地表面積あたりでみると葉の呼吸速度は、枝や幹の 3.7 倍程度の値をとる (Fig. 5)。これは、器官そのものの呼吸量の違いから生じるのではなく、単位地表面積あたりの器官表面積の違いに原因があることが分かった。

幹や枝の形成層温度および葉温は場所によっても異なり、また主要な受熱面である樹冠においては気温と

Fig. 5 Relationship between respiration rate per unit ground area and cambium temperature.

Thick solid line, thin solid line and broken line show respiration of foliage, branch and stem, respectively. Curves for branch and stem respiration are overlapped.

の差も無視できない。しかし、これらの各器官の温度を長期に連続して測定することは困難であった。そこで、ここでは形成層温度と呼吸速度の関係式に現地を観測した 30 分平均の気温変化を代入し、各器官の年間呼吸速度を計算してみた。すなわち、幹の呼吸速度推定には 4.7 m 高さの気温、葉および枝の呼吸速度推定には葉面積や枝の密度が最も大きい 13.6 m 高さの気温を用いた。その結果、各器官の 1995 年 8 月から 1996 年 7 月までの年間呼吸速度を炭素量に換算して表すと、幹、枝、葉それぞれ 0.53 , 0.55 および $2.50 \text{ t C ha}^{-1} \text{ year}^{-1}$ であった (Table 1)。

2. 湛水面下からの CO_2 放出

2.1 湛水面における CO_2 放出

湛水面における CO_2 放出速度の測定は 3 日間行い、平均して $6.10 \pm 0.51 \times 10^{-5} \text{ g CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ の結果を得た。この期間における水温は平均 $26.2 \pm 0.3^\circ\text{C}$ と変化が小さく、温度と CO_2 放出量の関係を明らかにするには至らなかった。一方、本観測地における年平均水温は 25.3°C であり、測定期間中の平均水温との差は 0.9°C でしかなかった。そこで測定した平均値 $6.10 \times 10^{-5} \text{ g CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ を使い年間の CO_2 放出速度を推定することとした。その結果、炭素換算値の放出速度は 1995 年 8 月から 1996 年 7 月の期間において $5.26 \text{ t C ha}^{-1} \text{ year}^{-1}$ であった。ここで、 Q_{10} 値を 2 と仮定し、 0.9°C の違いによる誤差を推定してみると、約 5% の過大見積もりであると予想された。

上田は本研究と同じ泥炭湿地林において、密閉式チャンバを用いて水面からの CO_2 と CH_4 の放出速度を測定している。その結果、湛水位変動に伴う酸化還元条件や水圧の変化により、水面上での CO_2 放出速度が変動することを指摘している (上田からの私信)。こうした点は本論で検討することができなかったが、上田の測定値を基に計算した同期間の CO_2 放出速度は、炭素換算値でおよそ $4.5 \text{ t C ha}^{-1} \text{ year}^{-1}$ であり、本論の推定値よりも 14% 程度小さな値となった。

なお、現地の水面ではリター層や泥炭層から気泡の形で気体が放出されることがある。こうした気泡中には高濃度の CH_4 や CO_2 が含まれていると考えられ、チャンバ内に気泡が取り込まれたかどうかで測定値に影響が生じる可能性がある。本論ではこうした気泡の影響を明らかにすることはできなかったが、3 日間の測定値の標準偏差は平均値の 10% 程度であり、気泡の影響もこの偏差の範囲内であったと予想される。

2.2 湛水下でのリターの分解

湛水中に置いた葉、枝と幹の枯死物の乾物重量減少率を Fig. 6 に示す。どちらも重量減少率は初期に急増するが、約 1 年間経過すると変化は緩やかとなり、葉で 55%, 枝と幹で 10% の重量減少率を示した。これはセルロースのような易分解性の有機物が初期に急速に分解すること、また葉では易分解性の有機物の割合が多いのに対し、枝や幹ではリグニンのような難分解性の有機物が多いためと考えられる。また有機物を湛水中に置いた際には、その一部が有機酸などの形で溶出し水と共に流出する。ここで求めた乾物重量減少率には溶出した有機物の分も含まれることになるが、その量はリター量の 1.5% 以下であり (Suzuki, 1997), 本研究では無視しうると考えた。

ここで、林内に設けられたリタートラップによる落枝量および落葉量の測定値のうち 1995 年 6 月から 1996 年 5 月までの落葉量および落枝量は各々炭素量換算で 2.73 および 0.73 t C ha⁻¹ year⁻¹ であった。また、1993 年 11 月と 1996 年 4 月における毎木調査から測定した倒木量は 0.39 t C ha⁻¹ year⁻¹ であり、Tamai

Fig. 6 Decomposition ratio of dead stem and branch (···■···), and foliage (—◆—) in water. Decomposition ratio is defined as the ratio of dry weight decrement to initial dry weight. Average water temperature during the measurements was 25.3°C. Bars represent SD, $n=3$.

et al. (1986) によるタイのマングローブ林の T/R 比 2.4 を使って、根を含めた倒木量が 0.55 t C ha⁻¹ year⁻¹ となった。これらに落葉、落枝と倒木の重量減少率を各々 55, 10% として乗じて加え合わせることで、落葉、落枝および倒木によるリターの分解速度を炭素換算値で 1.63 t C ha⁻¹ year⁻¹ と推定した (Table 1)。

この推定には落下後 1 年程度の期間での重量減少率を用いているため、推定値には長期にわたる難分解性有機物の分解が含まれていないことになる。しかし、難分解性有機物が泥炭土壌を形成するというものを考慮すれば、その分解は次節に述べる泥炭土壌の分解の中に包含されると考えた。

2.3 泥炭土壌の分解

容器に取り出した泥炭土壌からの CO₂ 放出速度の測定は 3 日間行い、平均して $1.40 \pm 0.22 \times 10^{-5}$ g CO₂ m⁻² s⁻¹, の結果を得た。この期間における水温は平均 $25.8 \pm 0.4^\circ\text{C}$ と変化が小さく、温度と CO₂ 放出量の関係を明らかにすることはできなかった。この平均値を使うと、泥炭土壌の分解による CO₂ 放出速度は、炭素換算値で 1.20 t C ha⁻¹ year⁻¹ であった。

ところで、観測地付近には泥炭が最深部で 3 m 程度まで蓄積しているのに対し、本論では 20 cm の厚さの泥炭層による測定値を使い地表面からの分解速度を予測している。湛水下での泥炭分解は溶存酸素の供給の有利な表層部を中心に行われると考えられるが、より深層での分解が寄与して、ここで予想した値が過小評価となっている可能性は否定できない。一方、攪乱した泥炭土壌を容器に充填して測定したことによる誤差も考えられる。こうした泥炭土壌の分解速度の不確かさについては、更に検討を要する。

2.4 土壌有機物分解速度と根の呼吸速度

2.2 で推定した、新たな落葉、落枝、倒木などのリターの分解速度 1.63 t C ha⁻¹ year⁻¹ と 2.3 で推定した泥炭の分解による CO₂ 放出速度 1.20 t C ha⁻¹ year⁻¹ を加えた 2.83 t C ha⁻¹ year⁻¹ が炭素換算した土壌有機物分解速度として推定された (Table 1)。

Table 1 Annual amount of carbon emission rate (t C ha⁻¹ year⁻¹) from each part of the forest ecosystem.

Respiration				Decomposition		Total emission
Foliage	Branch	Stem	Root	Litter fall	Peat	
2.50 (28)	0.55 (6)	0.53 (6)	2.43 (28)	1.63 (18)	1.20 (14)	8.84 (100)

Numbers in parentheses show the percentage to total emission rate.

更に、湛水面上で測定された CO_2 放出速度の炭素換算値 $5.26 \text{ t C ha}^{-1} \text{ year}^{-1}$ から、上で求めた土壤有機物分解速度を差し引いたものが根の呼吸速度と考えられ、炭素換算値として $2.43 \text{ t C ha}^{-1} \text{ year}^{-1}$ と推定された。

しかし、2.1 で述べたように、湛水面上で測定された CO_2 放出速度は 5~14% 過大評価されている可能性がある。このことを踏まえると、根の呼吸速度はここで推定した値よりも 11~31% 小さくなる可能性がある。

2.5 泥炭の堆積速度

ここで推定された土壤有機物分解速度は、実測値に加えていくつかの仮定のもとに推定された値である。そこで結果の妥当性を検討するため、土壤有機物分解速度を使って泥炭堆積速度を算出し、泥炭の蓄積年代から推定される泥炭堆積速度と比較してみた。

まず、2.2 で述べた落葉、落枝および倒木量の合計値 $4.01 \text{ t C ha}^{-1} \text{ year}^{-1}$ から、2.4 で求めた土壤有機物分解速度 $2.83 \text{ t C ha}^{-1} \text{ year}^{-1}$ を差し引いた $1.18 \text{ t C ha}^{-1} \text{ year}^{-1}$ が 1 年間に泥炭として蓄積された炭素量である。これに対象地の泥炭の乾燥密度 $0.10 \sim 0.32 \text{ g cm}^{-3}$ (Vijarnsorn, 1996) と乾燥泥炭中の炭素量の深さ平均 $0.40 \sim 0.48 \text{ g C/g}$ (Ishida, 未公刊) とを合わせると、泥炭堆積速度はおおよそ $0.8 \sim 2.9 \text{ mm year}^{-1}$ と予想される。

次に、泥炭層の厚さと ^{14}C による蓄積年代から泥炭堆積速度を推定してみる。対象地の泥炭層は粘土層と交互に堆積しており、最上層の泥炭は 1~2 m の厚さがある。この最上層の泥炭の蓄積年代は約 600~1 200 年前と測定されており (Vijarnsorn, 1996)、年間堆積速度は $0.8 \sim 3.3 \text{ mm year}^{-1}$ と推定される。

このように、本論の土壤有機物分解速度から推定した泥炭堆積速度と蓄積年代から推定した泥炭堆積速度がおおむね一致しており、本論における土壤有機物分解速度はほぼ妥当な値であると考えられた。

3. 森林生態系からの CO_2 放出速度

本論で求めた各器官の森林生態系の呼吸速度および土壤有機物分解速度をまとめ Table 1 に示す。植物各器官の呼吸速度に土壤有機物分解速度を加えて計算した森林生態系の CO_2 放出速度は炭素換算値で $8.84 \text{ t C ha}^{-1} \text{ year}^{-1}$ となった。また、このうちで根、泥炭、リターといった湛水面下の寄与率は全体の 60% を占めており、葉、枝、幹を起源とする地上部の呼吸速度以上の値をとった。特に、根の呼吸速度は森林生態系の呼吸速度の 28% を占めていた。土壤有機物分解速度と根

の呼吸速度を自然状態で分離することは困難が多く、地下部の炭素収支を定量的に示した研究は極めて少ない (Nakane, 1980)。しかし、本論で示されたように、根の呼吸量は地上部器官の呼吸量に匹敵しており、森林における炭素収支を明らかにする上で、土壤を含め地下部の炭素動態を定量的に把握することの重要性が示唆される。

また、ここで算出された森林生態系の二酸化炭素の放出速度をフラックス観測に基づいた値と比較してみる。対象とした森林の林冠上方で測定した夜間の CO_2 フラックス (Suzuki et al., 1999) をもとに、1995 年 8 月から 1996 年 7 月までの夜間の二酸化炭素の放出速度を合計すると炭素換算値で $7.41 \text{ t C ha}^{-1} \text{ year}^{-1}$ であった。一方、本論において 18:30 から翌朝 6:30 までは夜間と仮定して、夜間における森林生態系の二酸化炭素放出速度を計算すると炭素換算値で $4.14 \text{ t C ha}^{-1} \text{ year}^{-1}$ と推定され、その値はフラックス測定から求めた値の 56% に相当していた。

摘 要

熱帯泥炭湿地林での炭素収支のなかで大きな部分を占める森林生態系各要素の CO_2 放出速度を調べた。各器官の単位表面積あたりの呼吸速度は、他の熱帯林や温帯・寒帯の針葉樹と比較して低かった。このように、熱帯泥炭湿地林の呼吸速度が低いのは、地盤が貧栄養の泥炭であることが原因と考えられた。1995 年 8 月から 1996 年 7 月までの各器官による年間の呼吸速度を単位地表面積あたり炭素換算値で表すと、幹、枝、葉および根は各々 $0.53, 0.55, 2.50, 2.43 \text{ t C ha}^{-1} \text{ year}^{-1}$ であり、葉と根の呼吸の寄与が顕著であった。また各器官の呼吸速度に土壤有機物分解速度である $2.83 \text{ t C ha}^{-1} \text{ year}^{-1}$ を加え、森林生態系からの総 CO_2 放出速度が炭素換算値で $8.84 \text{ t C ha}^{-1} \text{ year}^{-1}$ と見積もられた。

日本大学生物資源科学部上田信吾講師には貴重なデータの提供と有益な助言をいただいた。ここに記して謝意を表す。本研究は文部省科学研究費補助金(創成的基礎研究費、代表：佐々木恵彦日本大学教授)および日産学術研究助成による成果の一部である。

文 献

- Carey, E. V., DeLucia, E. H., Ball, J. T. 1996. Stem maintenance and construction respiration in *Pinus ponderosa* grown in different concentrations of atmospheric CO_2 . *Tree Physiol.* 16: 125-130.

- Edwards, N. T., Hanson, P. J. 1996. Stem respiration in a closed-canopy upland oak forest. *Tree Physiol.* **16** : 433-439.
- Garmash, E. V., Golovko, T. K. 1997. CO₂ gas exchange and growth in *Rhaponiticum carthamoides* under the conditions of the middle taiga subzone of northeastern Europe : 1. Dependence of photosynthesis and respiration on environmental factors. *Russ. J. Plant Physiol.* **44** : 737-745.
- Hara, K., Suzuki, K., Niyomdham, C., Nuyim, T. 1995. Vegetation structure of a natural peat swamp forest at To-Daeng study site in Narathiwat, Thailand. In "A Tropical Swamp Forest Ecosystem and Its Greenhouse Gas Emission" (ed. by Vijarnsorn, P. et al.). Tokyo Univ. of Agric., Tokyo, p 35-44.
- Ishida, T., Nagano, T., Kitaya, Y., Suzuki, S. 1995. Gas flux measurement using the eddy accumulation method with conditional sampling. (Japanese text with English summary) *Environ. Control in Biol.* **33** : 79-82.
- Kira, T. 1981. Types of forests and biomass. Types of tropical forest (VIII)(森林型と蓄積量 熱帯の森林型(VIII)). (Japanese text) *Trop. Forest. (熱帯林業)* **59** : 43-44.
- Lavigne, M. B. 1996. Comparing stem respiration and growth of jack pine provenances from northern and southern locations. *Tree Physiol.* **16** : 847-852.
- Lavigne, M. B., Franklin, S. E., Hunt Jr., E. R. 1996. Estimating stem maintenance respiration rates of dissimilar balsam fir stands. *Tree Physiol.* **16** : 687-695.
- Maier, C. A., Zarnoch, S. J., Dougherty, P. M. 1998. Effects of temperature and tissue nitrogen on dormant season stem and branch maintenance respiration in a young loblolly pine (*Pinus taeda*) plantation. *Tree Physiol.* **18** : 11-20.
- Nagano, T., Ishida, T., Kitaya, Y., Vijarnsorn, P., Suzuki, S. 1996. Micrometeorological research of peat swamp forests in Narathiwat, Thailand. *Tropics* **6** : 105-115.
- Nakane, K. 1980. Comparative studies of cycling of organic carbon in three primeval moist forests. *Jpn. J. Ecol.* **30** : 155-172.
- Osaki, M., Sitibush, C., Nuyim, T. 1995. Nutritional characteristics of plants grown in peat and acid sulfate soils distributed in Thailand and Malaysia. In "A Tropical Swamp Forest Ecosystem and Its Greenhouse Gas Emission" (ed. by Vijarnsorn, P. et al.). Tokyo Univ. of Agric., Tokyo, p 63-76.
- Ryan, M. G., Hubbard, R. M., Clark, D. A., Sanford, R. L., Jr. 1994. Woody-tissue respiration for *Simarouba amara* and *Minquartia guianensis*, two tropical wet forest trees with different growth habits. *Oecologia* **100** : 213-220.
- Steege, H. ter. 1994. Hemiphoto, a Programme to Analyze Vegetation Indices, Light and Light Quality from Hemispherical Photographs. Tropenbos Documents 3. The Tropenbos Foundation, Wageningen, pp 44.
- Stockfors, J., Linder, L. 1998. Effect of nitrogen on the seasonal course of growth and maintenance respiration in stems of Norway spruce trees. *Tree Physiol.* **18** : 155-166.
- Suzuki, S. 1997. Influences of deforestation on radiation, heat and carbon balances in a tropical peat swamp forest in Thailand. (Japanese text with English summary) PhD thesis. Tokyo Univ. Agric. Tech., Tokyo, pp 123.
- Suzuki, S., Ishida, T., Nagano, T., Matsukawa, S. 1997. Influences of deforestation on radiation and heat balances in tropical peat swamp forest in Thailand. (Japanese text with English summary) *Environ. Control in Biol.* **35** : 277-284.
- Suzuki, S., Ishida, T., Nagano, T., Surin, W. 1999. Influences of deforestation on carbon balance in a natural tropical peat swamp forest in Thailand. *Environ. Control in Biol.* **37** : 115-128.
- Tamai, S., Nakasuga, T., Tabuchi, R., Ogino, K. 1986. Standing biomass of mangrove forests in southern Thailand. *J. Jpn. Forest Soc.* **68** : 384-388.
- Ueda, S., Go, C.S., Yoshioka, T., Yoshida, N., Wada, E., Miyajima, T., Sugimoto, A., Boontanon, N., Vijarnsorn, P., Boonprakub, S. 2000. Dynamics of dissolved O₂, CO₂, CH₄, and N₂O in a tropical coastal swamp in southern Thailand. *Biogeochem.* **49** : 191-215.
- Vijarnsorn, P. 1996. Soil Ecosystem of the Coastal Wetlands in Thailand. NODAI Res. Inst., Tokyo Univ. Agric., Tokyo, pp 208.
- Yoda, K. 1983. Community respiration in a lowland rain forest in Pasoh, Peninsular Malaysia. *Jpn. J. Ecol.* **33** : 183-197.
- Yoda, K. 1989. Productivity of a tropical forest. In "Botany, Agriculture and Forestry in Southeast Asia(東南アジアの植物と農林業)"(ed. by Japan Society for the Promotion of Science). (Japanese text) Japan Society for the Promotion of Science, Tokyo, p 105-114.