

E-1 熱帯林の持続的管理の最適化に関する研究

(1) 森林の荒廃が生物生産機能及び物質循環系に及ぼす影響

独立行政法人国立環境研究所

生物圏環境研究領域 熱帯生態系保全研究室

奥田敏統・唐艶鴻

星崎和彦 (現秋田県立大学)

西村千・吉田圭一郎・沼田真也

鈴木万里子

岐阜大学流域環境研究センター

小泉博・安立美奈子

生物資源科学部

島根大学農学部

山下多聞

都留文科大学文学部

別宮由紀子

自然環境研究センター

市河三英・佐藤香織

平成 11～13 年度合計予算額 58,892 千円

(うち、平成 13 年度予算額 18,690 千円)

〔要旨〕本研究では熱帯林の炭素吸収能を適切に評価するために、森林生態系全体に吸収された炭素量と生態系全体から放出された炭素量を定量することを目的とした。マレーシア半島部のパソ保護林において人為攪乱を受けていない天然林と択伐後の再生途中にある再生林を選び、両者の炭素循環について調べ、系内に固定された炭素量を比較した。両者の系で共通な炭素循環を表すコンパートメントモデルを構築し、コンパートメント間の炭素フローを表すフラックスを算出した。求めたフラックスから、それぞれの林分の純一次生産量 (Net Primary Production, NPP) と生態系純生産量 (Net Ecosystem Productivity, NEP) を算出した。

天然林と再生林の NEP はそれぞれ、 $-1.29 \text{ MgC}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{yr}^{-1}$ と $1.34 \text{ MgC}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{yr}^{-1}$ でほぼゼロに等しかった。両者の森林の炭素循環で大きく異なっていた点は、天然林では枯死によるバイオマスの損失が大きく、再生林では成長によるバイオマス増加量が大きかったことである。その結果、天然林の NPP ($8.85 \text{ MgC}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{yr}^{-1}$) は再生林 ($11.73 \text{ MgC}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{yr}^{-1}$) の 75%であった。

次の点では両者の森林の炭素循環は似通っていた。すなわち表層のリターから直接発生する二酸化炭素量 ($3.5 \text{ MgC}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{yr}^{-1}$) は、鉱質土から発生する量 ($6.6 \text{ MgC}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{yr}^{-1}$) に比べて小さかった。また、各タイプのリターの中では、葉リターが分解後の土壌有機物増加・大気中二酸化炭素増加の両方に最も大きく貢献した。表層リターから土壌有機物へのフラックスは、表層から大気へのそれらに比べると全般的に小さかった。リターの分解残渣中の炭素量は NPP の 34-88%に相当し、系内で分解中の炭素リザーバーとしての機能を持っていた。

以上のことより、現状では、パソ保護林の天然生林分は二酸化炭素放出源として、再生林分は二酸化炭素吸収源として、それぞれ機能していると考えられるが、その効果は微々たるものと考えられ、これらの林分は景観レベルでの炭素蓄積にとって中立的であると考えた方がよい。

[キーワード] 熱帯林、炭素蓄積機能、現存量、成長量、分解量

1. はじめに

近年、熱帯林保全へ向けた持続的管理の手法が様々な地域で模索されているが、森林減少速度に歯止めがかからない。この原因として、森林の持つ生体的、社会的、文化的なサービス機能・価値が客観的に評価されていないことが指摘されている。その中でも、森林のもつ多面的機能のひとつとしての「二酸化炭素の貯留能力」を正しく評価することは、地球規模の炭素循環に対する陸域の役割を正確に見積もるためにも早急に求められている。

森林は、赤道地域の熱帯降雨林から北方の亜寒帯針葉樹林まで、地上の陸地面積のほぼ3分の1を占め、生物量（地上部現存量）で見れば陸上生態系全体の90%をも占める存在である^{1) 2)}。なかでも低地熱帯林は、陸地面積の約1割を占めているだけだが、生物量では4割を占めている²⁾。したがって低地熱帯林は、その極端に大きなバイオマスゆえ、大気中の二酸化炭素の循環に大きな役割を果たしていると考えられる^{1) 3)}。世界各地の森林減少は大気中の二酸化炭素の循環に影響を及ぼすが、とりわけ熱帯地域で進行中の森林減少は地域レベルのみならず、地球レベルでの二酸化炭素の循環に大きく関与していることがわかってきた³⁾。しかし、東南アジア地域を例にとれば、さまざまな原因による人為的な森林伐採によって、この145年間に合計43.5 Pg (1 Pg = 10^{15} g) の炭素が大気中に放出されてきたと見積もられており⁴⁾、その影響が懸念されている。地球温暖化がすすむにつれ、ますます森林の持つ炭素吸収能力の従量制が増すと考えられる現在、東南アジア地域の熱帯林において二酸化炭素吸収量を適切に定量することの意義は大きい。このような理由から、本研究ではマレーシア半島部のパソ保護林内を対象に、炭素循環推定およびそれに関連する手法の開発のための調査を行った。

2. 研究目的

本研究では、熱帯低地の森林生態系に吸収された炭素量と系から放出された炭素量を定量することを目的とする。これまでの研究から、繰り返し行われた毎木調査データを用いて現存量の変化を計算し、これに分解系のデータを加えれば、系全体(図1)として炭素の収支を計算することが可能であることがわかった⁵⁾。パソ保護林では落葉落枝の分解や土壌呼吸量測定に関する研究も開始され^{6) 7)}、これらを統合してコンパートメントモデルを構築することにより、熱帯地域の森林生態系としての炭素量の動態解明を試みる。また、マレーシア半島部のパソ保護林において、天然林と再生途中の再生林を選び、両者の炭素循環について調べ、系内に固定された炭素量を比較する。また、人為攪乱を受けていない天然生林分を伐採後約45年が経過した再生途上の林分と

比較することで、森林の持つ炭素蓄積機能に対する伐採の影響の解明を試みた。

3. 研究方法

本サブテーマの調査はマレーシア半島部・ネグリセンビラン州のパソ森林保護区内(2°58' N, 102°18' E; 75-150 m a.s.l.)の天然林および、伐採後約 45 年が経過した再生途上の択伐林（以下再生林）にて行った。

(1)地上部バイオマスの推定

パソ保護林では、天然生林分（6 ha）では 1994 年から、再生林分（6 ha）では 1998 年から繰り返し毎木調査が行われている。この毎木調査データに、プロットの上空で航空機から撮影した空中写真判読による同プロットの樹冠高データ、及び同プロット上空で撮影されたランドサット画像データとの関連性について解析を行った。毎木調査から得た直径データと樹冠部の高さデータを対応づけることにより、相対成長式を求め地上部現存量の推定を試みた。

同時に天然林では 1970 年代の国際生物学事業計画（IBP）時の現地測定から得られたアロメトリー式⁸⁾を、再生林では上記航空写真判読により得られたアロメトリー式⁹⁾をそれぞれ適用することにより樹高を推定し、直径と樹高から林分全体の地上部バイオマスを推定した。用いたアロメトリーは次の通りである； D を胸高直径とすれば、樹高 H は

$$\frac{1}{H} = \frac{1}{2.0 D} + \frac{1}{61} \quad (\text{天然林の場合}) \quad [\text{m, cm}] \quad \text{eqn 1}$$

$$\frac{1}{H} = \frac{1}{2.2 D} + \frac{1}{47} \quad (\text{再生林の場合}) \quad [\text{m, cm}] \quad \text{eqn 1-2}$$

で推定できる。この D と H から、幹、枝、葉の乾重（それぞれ M_S , M_B , M_L ）は、

$$M_S = 0.0313 (D^2 H)^{0.9733} \quad [\text{kg}, 10^{-4} \text{ m}^3] \quad \text{eqn 2}$$

$$M_B = 0.136 M_S^{1.070} \quad [\text{kg}, 10^{-4} \text{ m}^3] \quad \text{eqn 3}$$

$$\frac{1}{M_L} = \frac{1}{0.124 M_S^{0.794}} + \frac{1}{125} \quad [\text{kg, kg}] \quad \text{eqn 4}$$

で推定できる⁸⁾。 M_S 、 M_B 、 M_L を合計して個体の地上部バイオマスを計算し、これをプロット内の全木について足しあげて林分の現存量とした。得られた現存量に 0.47（木質部分の乾重あたり

の炭素含有量) をかけて炭素量に変換した。なお、 M_S , M_B , M_L の推定には天然林でも再生林でも同じ式を用いた。

(2) 落葉落枝量

分解過程の基質供給量として、倒木、大型落枝 (直径 5cm 以上)、小型落枝 (直径 5cm 未満)、落葉・繁殖器官の 4 つのカテゴリーを区分し、そのそれぞれの重量を観測した。観測はいずれのカテゴリーでもほぼ 1 ヶ月に一度行った。観測期間と方法はカテゴリーによって異なる。倒木発生については、2000 年 3 月から 2001 年 10 月まで各 6 ha プロット全域で新たに落下した大枝 (直径 5 cm 以上) と新たに発生した倒木のセンサスを行った。その他は各 6 ha プロット内の 2ha の領域に配置したリタートラップ (落枝には面積 3 m²×66 個、落葉・繁殖器官には 0.5 m²×100 個) を用いた。観測期間は、小型落枝 (直径 5 cm 以下) 量についてはどちらのプロットでも 1999 年 12 月から 2001 年 7 月まで、落葉については天然林で 1992 年 6 月から 2000 年 5 月まで、再生林で 1998 年 7 月から 2001 年 7 月までである。

リタートラップ内のサンプルは回収後乾重を測定した。発生した倒木については長さとおさを測定し、上述のアロメトリー式から乾重を推定した。

(3) 分解速度の測定

リターおよび倒木の分解量を推定するためのインキュベーション実験を葉リターと倒木のそれぞれについて行った。葉リターの分解実験には 14 種類の樹木の葉を、倒木の分解実験には 2 種類の丸太 (*Shorea accuminata* および *Neobalanocarps heimii* とともにフタバガキ科) をそれぞれ用いた。

分解による重量減少過程は、分解基質の重量減少が指数的であるとする¹⁰⁾ の式:

$$M_t = M_0 \exp(-kt) \quad \text{eqn 5}$$

にしたがうと仮定した。ここで M_t は時刻 t における分解基質の乾燥重量 ($t > 0$ では分解残渣の乾燥重量) である。インキュベーション実験開始時点の乾重を 100 としたときの各時点での基質の相対乾重を求め、時間に対して種ごとにこの式に回帰させることでそれぞれの基質の k を求めた。葉リターについては、14 種についてそれぞれ k の値を算出した。倒木の分解についても同様に 2 種類の幹に対応する 2 個の k を求め、(5) で述べるスケールアップに利用した。

葉の分解過程については、フタバガキ科、トウダイグサ科、クスノキ科、ウルシ科など本調査地域で普通に見られる科の中から 14 種を選択し、縦横 20cm、網目の大きさが 2 mm のネットの袋に各種毎の落葉を詰めて林床に置き、一定期間ごとに回収した。サンプルは各樹種毎に 15 個用意し、2 ヶ月間隔で一回の回収毎に 1 種につき 5 サンプルずつ回収した。回収したサンプルは乾重を計測後、C/N アナライザー (SIMAZU, Co., C-R6A) により土壌炭素含有率、土壌窒素含有率

について測定を行った。

倒木の分解に関しては 1999 年 10 月に、*S.accuminata* の丸太（平均長 134 cm、平均直径 12.2 cm）23 本および *N.heimii* の丸太（平均長 136 cm、平均直径 14.0 cm）25 本をそれぞれ準備し、パソ保護林の天然林内の 6 か所（うち林冠ギャップ 3 か所を含む）に 3-5 本ずつ（4 本ずつを原則として）設置した。このあと放置して、分解インキュベーション開始から 3 か月後、7 か月後、13 か月後、22 か月後に 1 か所につき丸太を 2 本ずつ回収し（原則として *S.accuminata* と *N.heimii* から 1 本ずつ回収）、泥をよく洗い落として生重量を測定した。設置時と回収時の乾重を推定するために、すべての丸太について、円板サンプルを設置時に 1 枚、回収時に異なる位置から 3 枚採取し、実験室で生重量を測定したのち 60°C で 4-7 日間乾燥させて絶乾させた。各時点での各円板サンプルの重量含水率を丸太ごとに平均し、各時点の丸太の生重量に同時点の含水率をかけて各時点での丸太のバイオマスを算出した。

(4) 土壌呼吸速度の測定

2000 年 9 月から 2001 年 8 月にかけて、天然林で 4 回、再生林で 3 回土壌呼吸速度を測定した。それぞれの林分の閉鎖林冠下と疎開林冠下に 8x8m のコドラートを 1 個設け、各コドラートで 16 地点を選び、表層のリターを取り除いた鉱質土壌からの二酸化炭素発生速度と葉リターから直接放出される二酸化炭素発生速度を Li-6400 (Li-Cor, USA) を用いて直接測定した。

土壌呼吸に関わる環境条件としては地温および土壌含水率が土壌呼吸速度の時間的変動に影響を与えると考えられるため、天然林および再生林の閉鎖林冠下と疎開林冠下において、温度ロガーを用いて 1 時間ごとの地温（5cm、1cm）の連続測定をおこなった。土壌含水率については 12 時間ごとに、天然林では 2001 年 2 月から、再生林では 2000 年 3 月から連続測定を行った。

(5) 林分レベルへのスケールアップと平均化

それぞれの観測および実験をもとに、個々の炭素フラックスについて年あたりヘクタールあたりの値を求めた。この項では、その際に行ったスケールアップあるいは平均化の方法について詳しく述べることにする。全体に適用した原則として、計算にあたっては観測期間のインターバルが最も長いデータを用いることにした。

地上部バイオマスの増加にともなう炭素固定量については、天然林で 6 年分（毎木調査 3 回分）、再生林で 2 年分（毎木調査 2 回分）、それぞれ 6 ha のデータがあった。各林分で最長期間の現存量（炭素量換算）の変化量を計算し、これをプロット面積とその期間の年数で除して年あたりヘクタールあたりの値を求めた。

分解基質の供給量についても同様に、各カテゴリーで最長の観測期間のデータを用いて 1 年あたりの平均値を算出した。

土壌呼吸量の年間積算値は、瞬間値に土壌含水率への依存性が認められたため、土壌水分の 1 年間の変動パターンを考慮に入れてスケールアップした。まず、2000 年 5 月から 2001 年 10 月ま

で4回にわたる土壤呼吸速度と土壤含水率を測定結果に基づいて土壤含水率から土壤呼吸速度（瞬間値）を推定する回帰式を得た。次に、土壤水分を12時間ごとに1年間観測し、このデータに今述べた回帰式を適用して12時間ごとの土壤呼吸量を推定した。最後にこれを365日積算して年間の土壤呼吸量を求めた。

落葉の分解過程については、実験に用いた14種類のkのばらつきの範囲内では、分解量はkの違いよりも落葉供給量の多少に強く影響されることから、14種のkを単純に平均して得た値を林分全体の葉のkと見なした。1年間の基質内炭素の減少量は、月ごとに供給された落葉は一定の速度で分解すると仮定し、ある月tに供給された落葉からの毎月の炭素放出量を算出してすべての月についてこれを求め、その和をその期間からの炭素放出量とした。

落枝および倒木分解のスケールアップについては、まず、木材には朽ちやすい種類から腐りにくい種類まで非常に幅広く存在していることが経験的に知られているので、木質リター（小型落枝、大型落枝、倒木）の分解のkのばらつきは非常に大きいと考えられる。また実験に用いた樹種も少ないため、落葉のような単純化は謝った結果を導きかねないと考えられた。そこで、文献調査を行ってkの例数を補完し、以下に示すような手順で分解基質の質とその基質の林分内の優占度を加味した重み付平均によって林分レベルのkを求めた。

まず、熱帯での材の分解に関する文献と材密度に関するを集めた。材分解については東南アジア熱帯からのみでは十分な数の文献を集めることが出来なかったため、中南米での研究例も含めて検索した。材密度については、マレーシア産木材の材密度に関する一覧^{11) 12) 13)}からデータを集めた。

次に、文献調査によって得られた情報に本研究の2種類を加えた17の（材密度、分解係数）の組から、両者の間の回帰式を求めた。このとき、材密度、分解係数ともに科ごとに平均値を計算し、これをその科の代表値と見なした。ただし、フタバガキ科については材密度も分解係数も研究例が多かったため、属ごとに平均値を計算し、これをその属の代表値と見なした。得られた回帰式をパソ保護林に出現する各科に当てはめることにより、パソ保護林に出現する各科の材の分解係数の代表値を推定した。なお、各科の分解係数の推定には材密度は科ごとの平均値を用いた。

フタバガキ科各属の相対優占度（胸高直径5cm以上の生木）を胸高断面積ベースで計算し、この相対優占度で重み付けして平均したkの値を、フタバガキ科の（平均的な）kとした。同様に、kの平均値がわかっている各科（フタバガキ科を含む）について生木の相対優占度による重み付け平均をとった値を、求めるべき林分レベルのkとした。

(7)分解系の炭素フラックス

分解過程の炭素の動態について各フラックスを次のように定義すれば、分解残渣と各フラックスの関係は以下のように理解できる。すなわち、

Flux_{+SOM} : リターが分解して新たな土壤有機物となる炭素のフラックス

FL: リターから直接放出される二酸化炭素の炭素フラックス

Flux_{-SOM}: SOM から直接放出される二酸化炭素の炭素フラックス

とおき、eqn 5 の M_t に相当する炭素量を $(M_t)_C$ とおけば、どのタイプの分解基質でも

$$(M_0 - M_t)_C = \text{Flux}_{+SOM} + \text{FL} \quad \text{eqn 6}$$

と表すことができる (図 1)。ここで、Flux_{+SOM} は未知のフラックスで直接測定が難しい。

土壌呼吸の測定方法の項で述べたように、葉リターについては FL が直接測定されている。また eqn 6 の左辺は分解実験から計算可能である。そこで、まず葉の分解について FL/ $(M_0 - M_t)_C$ 比を天然林と再生林での実測値から求めたところ、天然林で 0.85、再生林で 0.89 という値を得た。これらを eqn 6 に代入して、天然林と再生林それぞれの Flux_{+SOM} を求めた。FL の実測値のない木質リターについては、これを葉リターと同じ値であると仮定して FL/ $(M_0 - M_t)_C$ 比を算出した。

なお、乾重あたりの炭素含有率は葉および繁殖器官については乾重の 49%、木質部分は 47% とし (山下ら、未発表; 別宮ら、未発表)、天然林と再生林で共通とした。

(8) 純一次生産と生態系純生産量

以上で得られた各フラックス値を次式に代入して、それぞれのプロットでの純一次生産量 (Net Primary Production, NPP) と生態系純生産量 (Net Ecosystem Productivity, NEP) を算出した。

$$\text{NPP} = \text{Tree growth} + \text{Fine litter (+ Root growth)} \quad \text{eqn 7}$$

ここで Tree growth は炭素換算した地上部バイオマスの増加量、Fine litter は期間中の葉リターの合計 (炭素量換算) である。Root growth については不明な点が多く、今回の計算ではこれを 0 と仮定した (この点については考察も参照されたい)。なお各値の単位はいずれも $\text{MgC} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{yr}^{-1}$ に標準化した。次に NEP は、

$$\text{EP} = \text{NPP} - \text{CO}_{2_surface} - \text{CO}_{2_SOM} \quad \text{eqn 8}$$

で求めることができる。ここで、CO₂_{surface} は表層のリター (葉リターと木質リターの合計) から単位時間あたりに大気中に放出された二酸化炭素の量 (すべてのカテゴリーの FL の合計に等しい)、CO₂_{SOM} は SOM から単位時間あたりに大気中に放出された二酸化炭素の量をそれぞれ表す。計算にあたっては NPP と同様に、各フラックス値の単位を $\text{MgC} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{yr}^{-1}$ とした。NPP は森林樹木が過去の長い時間のなかで固定してきた炭素量をあらわす有用な指標であるが¹⁴⁾、生態系としての森林の最近の炭素吸収量を評価するには、リターおよび土壌の分解系を加味した NEP によって

評価するのがふさわしい (図 1、²⁾)。

4. 結果・考察

(1) 写真判読による地上部現存量の推定

空中写真から判読した樹冠高と地上踏査で得られた胸高直径のデータを関連づけることにより相対成長式を天然林、再生林別々に作成した。それらに基づいて地上部現存量を推定したところ、天然林 310Mg/ha、再生林 302Mg/ha であった。これらの値はパソ保護林の皆伐調査から得られた相対成長式 (Kato 他 1978) に基づいて推定した値 353Mg/ha、333Mg/ha よりも若干過小評価されるものの、ほぼ 10% 程度の誤差で地上部の現存量が林冠高データから広範囲に推定できることを示している。さらに、空中写真からデジタル化した林冠高の平均値のデータと一定エリア内での地上部現存量との関係について解析を行ったところ、両者の間に有意な相関関係が見られることがわかった。このことは林冠面の高さを衛星画像をもとに推定できればより広域レベルでの地上部の現存量やその変化が推定可能になるということを示唆したが、実際にランドサット TM データと単位面積あたりの現存量との関係を解析した限りでは有意な相関は見られなかった。また天然林内での現存量は 215Mg/ha~402Mg/ha のばらつきがあり、地形や土壌要因と密接な関係があることが示唆された。

(2) 地上部現存量の変化

地上部現存量の最近の変化の傾向は、天然林と再生林でかなり異なっていた。まず天然林では、1994 年の時点の地上部現存量は 201.2 MgC/ha (バイオマス量としては 427.8 Mg/ha)、2000 年には 188.4 MgC/ha (バイオマス量では 400.6 Mg/ha) で、6 年間に 12.8 MgC/ha (バイオマス量にして 27.2 Mg/ha) が減少した (表 1)。これを 1 年あたりに換算すれば、地上部現存量の変化の速度は $-2.13 \text{ MgC}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{yr}^{-1}$ (同じく $-4.53 \text{ Mg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{yr}^{-1}$) となる (表 2)。その内訳をみると、個体の成長によって $3.01 \text{ MgC}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{yr}^{-1}$ の炭素が新たに固定され、 $5.55 \text{ MgC}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{yr}^{-1}$ が死亡によって分解系に供給され、新規加入分が $0.41 \text{ MgC}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{yr}^{-1}$ であった (表 2)。

一方再生林では、現存量の値自体は天然林の約 72% (2000 年時点の比較) であるが、1998 年から 2 年間に地上部現存量が 6.9 MgC/ha (バイオマス量にして 14.5 Mg/ha) 増加した (表 1)。一年あたりに換算して $3.41 \text{ MgC}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{yr}^{-1}$ (同 $7.26 \text{ Mg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{yr}^{-1}$) の増加であり、天然林と対照的であった。内訳をみると、個体の成長によって $5.4 \text{ MgC}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{yr}^{-1}$ の炭素が新たに固定され、 $2.3 \text{ MgC}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{yr}^{-1}$ が死亡によって分解系に供給され、新規加入分が $0.26 \text{ MgC}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{yr}^{-1}$ であった (表 2)。このように、天然林では現存量が減少し、再生林では増加している傾向が顕著であった。

倒木の発生量も林分間でかなり異なっていた。再生林では $1.69 \text{ MgC}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{yr}^{-1}$ (重量ベースでは $3.60 \text{ Mg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{yr}^{-1}$) であった。一方、天然林では $6.02 \text{ MgC}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{yr}^{-1}$ (重量ベースでは $12.8 \text{ Mg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{yr}^{-1}$) にもおよぶ倒木発生が観測され、この値は再生林の 374%にあたる。一方、大型落枝に関しては天然林 ($0.66 \text{ MgC}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{yr}^{-1}$) と再生林 ($0.71 \text{ MgC}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{yr}^{-1}$) ではほとんど変わらず、天然林は再生

林の97%であった(表3)。

(3) 落葉落枝量

落葉量の年平均値は、天然林で $3.17 \text{ MgC}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{yr}^{-1}$ 、再生林で $3.18 \text{ MgC}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{yr}^{-1}$ であった。落葉量の変動は、1998年に全期間を通じての平均値の64%、一斉開花現象と重なった1996年に同78%にそれぞれ減少していた以外は観測期間を通じてそれほど大きくなかった。小型落枝量の全期間の年平均値は天然林 $2.12 \text{ MgC}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{yr}^{-1}$ 、再生林 $2.63 \text{ MgC}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{yr}^{-1}$ であった。ただし小型落枝の発生量は、観測期間は短いが落葉量よりも月別の変動が大きい傾向があり、これは倒木および大型落枝の発生量の傾向と似ていた。このように年あたりで見れば、落葉落枝量は林分間で大きな違いはなかった。

(4) 葉リターの分解および木質リターの分解

14種類の葉の分解実験の結果、これらの分解係数 k の値は 0.48 yr^{-1} から 3.48 yr^{-1} の範囲にあることが明らかになった。そして、平均的な分解係数として 1.68 yr^{-1} を得た(表4)。樹種の落葉分解速度の比較を行ったところ、樹種ごとに分解速度が異なり、分解速度は初期のセルロース含有量および全窒素濃度により規定されていることが明らかになった。分解速度の速い樹種は、初期のセルロース含有量が少なく、初期の全窒素濃度が高かった。

倒木分解実験の結果(図2)、2樹種から k の値 (0.39 yr^{-1} 、 0.07 yr^{-1}) を得た。一方、分解係数に関する文献調査から基質に関する k の値と材密度 D が明らかな16組(材密度、分解係数)に本件研究から得られた結果を加えた合計17組(表5)を回帰分析にかけた結果、材密度 D と分解係数 k の間に有意な回帰式が得られた。(図3; $n = 17$, $r^2 = 0.47$, $P = 0.02$)

$$k = 1.03 - 1.13 D \quad [\text{yr}^{-1}, \text{g/cm}^3] \quad \text{eqn 9}$$

この式に天然林と再生林に存在する各分類群(フタバガキ科の各属とその他の科)の平均的な材密度をあてはめてそれぞれの分類群について k の値を推定した(表6)。各分類群の生木の優占度で重み付けして推定した分解係数(すなわち林分レベルの材の分解係数)は天然林で 0.23 yr^{-1} であり、再生林では 0.25 yr^{-1} であった。

(5) 土壌呼吸

土壌呼吸速度の平均値は、天然林、再生林においてそれぞれ $4.8 \mu \text{ molCO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ (CV=41%) と $4.5 \mu \text{ molCO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ (CV=43%) で、有意な差は見られなかった。また、両林分ともに、土壌呼吸速度の空間的不均一性が大きく、この分散の20~50%は細根量と土壌水分によって説明された。一方、土壌呼吸速度の時間的な変化およびその要因であるが、天然林および再生林において、周期

的ではないが季節変化が見られた。また、無降雨期間に、乾燥による土壌含水率の低下にともなう土壌呼吸の変化を測定した結果、多くの土壌において、土壌水分の減少に伴い土壌呼吸速度は直線的に増加した。

土壌水分の年間の変動パターンと測定結果から得られた回帰式から、林分全体の土壌呼吸量(鉱質土層および細根からの二酸化炭素放出量の合計)として、天然林 $18 \text{ MgC}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{yr}^{-1}$ 、再生林 $19 \text{ MgC}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{yr}^{-1}$ という値が得られた。次に、鉱質土層から放出される二酸化炭素量に対して細根呼吸量が占める割合を求めたところ、天然林で 67%、再生林で 63%であった。以上の値から、 $\text{CO}_2\text{-SOM}$ として天然林 $6.7 \text{ MgC}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{yr}^{-1}$ 、再生林 $6.6 \text{ MgC}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{yr}^{-1}$ が得られた。

(6)NPP、NEP および炭素循環

ここまでに求めた値を用い、すべての炭素フラックス値を算出し、天然林、再生林のそれぞれで炭素循環モデルを得た(図 4)。

NEP は天然林で $-1.29 \text{ MgC}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{yr}^{-1}$ 、再生林で $1.34 \text{ MgC}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{yr}^{-1}$ であった。これらの値は、若干であるが天然林が大気中二酸化炭素の放出源、再生林が吸収源として機能している可能性を示唆している。ただし NEP の値は 0 (平衡状態) にかなり近いことから、その効果はあまり大きくないと考えられる。天然林と再生林それぞれの炭素循環モデルの際だった違いは、1) 天然林では死亡によるバイオマスの損失が再生林よりもかなり大きいこと(表 1, 図 4)、2) 再生林では成長によって固定された炭素の量が天然林よりも大きい(表 2, 図 4) ことであった。その結果として NPP は天然林で小さく、再生林 ($11.73 \text{ MgC}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{yr}^{-1}$) の約 75%にあたる $8.85 \text{ MgC}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{yr}^{-1}$ であった。森林動態分野の研究から、成熟した森林は部分的な破壊と再生が同時並行的に起こる動的平衡状態にあることが分かってきた¹⁵⁾。現状では、パソ保護林の天然林ではこのバランスは破壊の方向にやや進みつつあると考えられる⁵⁾。本研究の天然林調査地はパソ保護林の他の天然林分と比べても、地上部現存量が多く⁹⁾、もともと成熟した林分であると考えられる。実際、近くにある別の天然林調査区では現存量が増加中であることから、現存量の減少はこの調査地でとくに大きいものと考えられる。また、パソ保護林全体には、天然林分と同様に再生林分もかなりの割合で存在していることから、現在の状況に限って言えば、パソ保護林は景観スケールの炭素収支では中立的な役割をもつのではないかと考えられる。また、パソ保護林の周囲を取り巻くアブラヤシのプランテーション(ヤシ園)を対象に作成された炭素循環モデル¹⁸⁾に、本研究で独自に測定したパソ森林保護区周辺部のヤシ園における土壌呼吸速度、分解速度、地上部現存量のデータを組み込み、成熟したヤシ園における NEP を算出したところ、その値は $-0.01 \text{ MgC}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{yr}^{-1}$ となり、ごく僅かではあるが二酸化炭素の放出源となっていることが明らかになった。

天然林と再生林の炭素循環モデルではいくつか似通った特徴もあった。①まず、林床のリターから放出される二酸化炭素量(約 $3.5 \text{ MgC}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{yr}^{-1}$) は、SOM からの放出量(約 $6.6 \text{ MgC}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{yr}^{-1}$) に比べてかなり小さかった。次に、各種リターからの炭素フラックスのうちで葉リターの寄与は

非常に大きかった。たとえば、②葉リターから SOM へのフラックス (0.32 および $0.45 \text{ MgC}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{yr}^{-1}$) はリターから SOM へのフラックス合計の 70.3% (天然林) および 72.7% (再生林) を占めた。同様に③リターから大気へのフラックスのうち、葉リターからのフラックスは各種リターから大気へのフラックス合計の 89.5% (天然林) および 86.1% (再生林) を占めていた。そして、④葉リター以外のリターに関しては、表層から SOM への新たな供給は全般に小さかった (0.02 - $0.12 \text{ MgC}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{yr}^{-1}$)。最後の類似点として、⑤リターの分解残渣中の炭素量 (天然林で $7.79 \text{ MgC}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{yr}^{-1}$ 、再生林で $4.08 \text{ MgC}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{yr}^{-1}$) は NPP の 88.0% (天然林) および 34.6% (再生林) に相当し、とくに天然林で系内での炭素の保持に実質的な貢献をしていた。再生林では分解基質の供給は少なめであったが (天然林の 76%)、分解残渣の炭素は毎年 $4 \text{ MgC}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{yr}^{-1}$ (天然林の 52%) 増加している。このようにみると、林床に集積されていく炭素量は林分の成熟度に関係なく多いのかもしれない。炭素循環に分解残渣が果たす役割が天然林調査地のように樹木の生産量の少ない林分で相対的に大きくなるのはそのためであると考えられた。

(7)1970 年代の結果との比較

天然林では、1970 年代に国際生物学事業計画 (IBP) の一環として森林の現存量および一次生産量に関して精力的な研究調査が行われた。ここでは天然林のみの比較になるが、約 25 年前となる当時の結果と今回の結果を比較した (表 7)。IBP 当時と最も大きく異なる点は倒木の発生量で、最近では当時の約 3.8 倍の量の倒木が発生している。NPP の違い (当時は最近の値の 1.4 倍あった) は、倒木発生量の違いをある程度反映しているのだろう。

分解により発生した二酸化炭素量は、現在では当時の 45% に過ぎない。逆に、土壌呼吸のうち SOM の寄与分は、本研究の値は当時の 170% もある。(これらは再生林と比較してもほとんど同じ割合である。) これらの理由として考えられるのは、どちらも推定方法の違いに関するものである。Kira¹⁴⁾ は、材の分解は供給量とバランスしているとされ、葉の分解係数のスケールアップも行われていなかった。一方、土壌呼吸の測定には当時ではアルカリ吸収法が用いられたが¹⁶⁾、この方法は本研究で用いた CO_2 直接測定に比べ土壌呼吸の値が過大になる傾向があるという⁶⁾¹⁷⁾。

NEP の値は IBP 時代でもほぼ 0 であった。これが以上のような違いを反映したものなのか、天然林は短期間には比較的規模の大きい炭素の放出や吸収を繰り返しながらも長期的には安定し中立的である可能性を示しているのかは、本研究からは不明である。

(8)コンパートメントモデルの不確定要素

成長によって固定された炭素量、死亡によって分解系に回った有機物から放出された炭素量、および土壌呼吸によって発生した二酸化炭素量など個々のコンパートメントで構成された詳細な炭素循環モデルを作ることができた。しかし、ここで計算された NEP の値を正しく評価するにあたって、現時点では以下のような制限がある。どれをとってみても克服の非常に困難な問題であるが、本研究で得られた結論や以降の議論には、次の点を念頭に置く必要があることを断っておく。

まず、本研究では地下部の動態に関する測定ができず、そのためコンパートメントモデルに根の動態と密接に関連する要素（根が成長することによって増えた樹体中の炭素量、および根が死亡することで分解系に供給された炭素量）が反映されていない。前者は NPP の増加に寄与し、後者は SOM への供給量となる。今後、根の動態が適切に測定されそれらがコンパートメントモデルに反映できれば、NEP の値が多少変更されると考えられる。

しかしながら、地下部の動態を測定することは非常に難しい。具体的な困難として以下のようなものがある。まず、何らかの方法によってある時点での根の現存量や新生量を推定することは可能であるが、期間あたりの根の死亡量を推定することは非常に難しい。また構造部分（支持根）の成長速度を推定するには一定の精度で現存量を測る必要があるが、十分なデータはまだない。

モデルの二つ目の制約として、観測期間の問題がある。今回のモデルでは最も長い観測期間のデータを用いたが、それぞれのフラックス値の算出に用いたデータは必ずしも同一期間の観測から得られたデータとは限らない。考えられるすべてのフラックスに関して、基準となるデータを同一期間から得るのは非常に難しい。

観測期間が関係する問題はもう一つある。最近では、生態系はもともと時間的にも空間的にも非定常的・異質性が高いという認識が一般的になりつつある¹⁹⁾。実際、パソ保護林の地上部現存量は 1973 年の IBP 時代の推定値、1994 年の本研究の観測開始時、1998 年の時点の順に現存量は一貫して減少傾向にある⁵⁾。しかし 1998 年の現存量は約 403 Mg/ha であった⁵⁾ ことを考えれば、1998 年からの 2 年間ではほとんど変化していない（表 1）。これらのように樹木の変動の大きな動態自体が NPP の計算にとって無視できない可能性がある。

地上部現存量の空間的なばらつきも無視できない。広いスケールで考えれば平均化されるが、パソ保護林では天然林で 1 ha 単位でみれば、非常に現存量の分布に違いがみられる⁹⁾。種の多様性が高く林分の（階層）構造の複雑な熱帯低地ではとくに、適切な空間スケールを設定して林分あたりの現存量を調べる必要がある。

三つ目の制約として計算誤差が考えられる。本研究では、立枯れ木として保持されている炭素量が計上されていない。天然林では特に立枯れの数が多く、そこに含まれる炭素量を推定する必要があるかもしれない。アロメトリー式による推定精度の問題もあるかもしれないが、現状では代替手法はなく、致し方ないと考える。

5. 本研究により得られた成果

樹木の成長によって固定された炭素量、死亡によって分解系に回った有機物から放出された炭素量、および土壌呼吸によって発生した二酸化炭素量など個々のコンパートメントで構成された詳細な炭素循環モデルを作ることができた。これによって、最近の森林の動態から炭素循環を議論することが可能となった⁹⁾。また、天然林と再生林で炭素循環を比較することも試みた。その

結果、現在の状態では、パソ保護林の天然生林分は二酸化炭素放出源として、再生林分は二酸化炭素吸収源としてそれぞれ機能していることが明らかになった。しかし NEP の値から判断すると、その効果は微々たるものであった。よって、現状では、これらの林分は景観レベルでは最近の炭素蓄積の変動に対して中立的な役割を果たしていることが示唆された。

一方で、マレーシアの低地熱帯雨林は 400-470 Mg/ha にもおよぶ巨大な現存量を持つ^{8) 14)}。この事実は、地史的な歴史のなかでは、このタイプの森林が地上の二酸化炭素の吸収源として機能してきたことを示している。最近の大気中の二酸化炭素動態に関して中立的な存在であるとしても、この森林の成立過程において吸収されてきた大量の炭素量はいささかも過小評価されるべきでない。過去を含めた超長期的な炭素吸収能と現在の炭素吸収量（本研究）は別の次元で議論すべきである。

6. 引用文献

- 1) Dixon, R.K., Brwon, R.A., Houghton, R.A., Solomon, A.M., Trexler, M.C. & Wisniewski, J. (1994) Carbon pools and flux of global forest ecosystems. *Science* 263: 185-190.
- 2) 及川武久 (2000) 陸上植生の炭素固定機能. In: 藤森隆郎 (Ed.), 陸上生態系による温暖化防止戦略. 博友社, 東京, pp. 21-34.
- 3) Potter, C.S. (1999) Terrestrial biomass and the effects of deforestation on the global carbon cycle. *BioScience* 49:769-778
- 4) Houghton, R.A. & Hackler, J.L. (1999) Emissions of carbon from forestry and land-use change in tropical Asia. *Global Change Biology* 5: 481-492.
- 5) Hoshizaki, K., Niiyama, K., Kimura, K., Yamashita, T., Bekku, Y., Okuda, T., Takeda, H., Tang, Y., Supardi, NN., Quah, E.S. & Adachi, N. (2000) Recent biomass change in a tropical primary forest in Pasoh: current status for evaluating carbon-sequestering function. In: Okuda, T. (Ed.), Research Report of the NIES/FRIM/UPM Joint Research Project 1999. National Institute for Environmental Studies, Tsukuba, Japan, pp. 2-17.
- 6) Bekku, Y., Koizumi, H., Hoshizaki, K., Yamashita, T., Okuda, T. & WanRasidah, W.A.K. (2000) Spatial and temporal variations in soil respiration rate in a tropical primary forest. In: Okuda, T. (Ed.), Research Report of the NIES/FRIM/UPM Joint Research Project 1999. National Institute for Environmental Studies, Tsukuba, Japan, pp. 18-25.
- 7) Yamashita, T., Hoshizaki, K., Bekku, Y., Okuda, T., Wan Rashidah, K. & Supardi, NN. (2001) Organic matter decomposition rate in a natural forest of Pasoh Forest Reserve. In: Okuda, T. (Ed.), Research Report of the NIES/FRIM/UPM Joint Research Project 2000. National Institute for Environmental Studies, Tsukuba, Japan, pp. 2-9.
- 8) Kato, R., Tadaki, Y. & Ogawa, F. (1978) Plant biomass and growth increment studies in Pasoh forest. *Malayan Nature Journal* 30: 211-224.
- 9) Okuda, T., Suzuki, M., Adachi, N., Manokaran, N., Supardi, N.N. & Awang, M. (2001) Estimation of tree above-ground biomass in a lowland dipterocarprainforest, by 3-d photogrammetric analysis. In:

- Okuda, T. (Ed.), Research Report of the NIES/FRIM/UPM Joint Research Project 2000. National Institute for Environmental Studies, Tsukuba, Japan, pp. 17-28.
- 10) Olson, J.S. (1963) Energy storage and the balance of the producers and decomposers in ecological systems. *Ecology* 44: 327-332.
 - 11) Lee, Y.H., Rahman bin Chick, E.A. & Chu, Y.P. (1979) The strength Properties of Some Malaysian Timbers. Malaysian Timber Industry Board, Kuala Lumpur.
 - 12) Choo, K.T. & Lim, S.C. (1983) Malaysian Timbers - Light Red Meranti. Malaysian Timber Industry Board, Kuala Lumpur.
 - 13) Lopez, D.T. (1983) Malaysian Timbers - Chengal. Malaysian Timber Industry Board, Kuala Lumpur.
 - 14) Kira, T. (1987) Primary production and carbon cycling in a primeval lowland rainforest of Peninsular Malaysia. In: Sethuraj, M.R. & Rghavendra, A.S. (Eds.), *Tree Crop Physiology*. Elsevier Science, Amsterdam, pp. 99-119.
 - 15) Pickett, S.T.A. & White, P.S.(eds.). (1985) *Natural disturbance and patch dynamics*. Academic Press, New York.
 - 16) Kirita, H. (1971) Re-examination of the absorption method of measuring soil respiration under field conditions. IV. An improved absorption method using a disc of plastic sponge as absorbent holder. *Japanese Journal of Ecology* 21: 119-127.
 - 17) Bekku, Y., Koizumi, H., Oikawa, T. & Iwaki, H. (1997) Examination of four methods for measuring soil respiration. *Applied Soil Ecology* 5: 247-254.
 - 18) Henson, I.E. (1999) Comparative eco physiology of oil palm and tropical rain forest. In: pp. 9-39, *Oil Palm and the Environment* (eds. Singh, G; Huan, LK; Leng, T; Kow, DL). Malaysian Oil Palm Growers' Council
 - 19) Hubbell, S.P. & Forster, R.B. (1986) Canopy gaps and the dynamics of a neotropical forest. In: Crawley, M.J. (Ed.), *Plant Ecology*. Blackwell Scientific Publications, Oxford, pp. 77-96.
 - 20) Harmon, M.E., Whigham, D.F., Sexton, J. & Olmsted, I. (1995) Decomposition and mass of woody detritus in the dry tropical forests of the northeastern Yucatan Peninsula, Mexico. *Biotropica* 27: 305-316.
 - 21) Takamura, K. (2001) Effects of termite exclusion on decay of heavy and light hardwood in a tropical rain forest of Peninsular Malaysia. *Journal of Tropical Ecology* 17: 541-548.
 - 22) Abe, T. (1980) Studies on the distribution and ecological role of termites in a lowland rain forest of West Malyasia. *Revue d'Ecologie et de Biologie du Sol* 17: 23-40.
 - 23) Yonededa, T., Yoda, K. & Kira, T. (1977) Accumulation and decomposition of big wood litter in Pasoh forest, west Malaysia. *Japanese Journal of Ecology* 27: 53-60.
 - 24) Takamura, K. & Kirton, L.G. (1999) Effects of termite exclusion on decay of a high-density wood in tropical rain forests of Peninsular Malaysia. *Pedobiologia* 43: 289-296.
 - 25) Choo, K.T. & Lim, S.C. (1983) Malaysian Timbers - Light Red Meranti. Malaysian Timber Industry Board, Kuala Lumpur.
 - 26) Lee, Y.H., Rahman bin Chick, E.A. & Chu, Y.P. (1979) The strength Properties of Some Malaysian Timbers. Malaysian Timber Industry Board, Kuala Lumpur.

[国際共同研究等の状況]

カウンターパート：Wan Rasidah Wan Abdul Kadir, Nur Supardi Md. Noor（以上マレーシア森林研究所）、Muhamad Awang（マレーシアプトラ大学）、Mazlan Hashim（マレーシア工科大学）

[研究成果の発表状況]

(1) 誌上発表（学術誌・書籍）

- ① Numata, S., Kachi, N., Okuda, T. and Manokaran, N.: Tropics. 9: 237-243. (2000) “Leaf damage and traits of dipterocarp seedlings in a lowland rain forest in peninsular Malaysia”
- ② Yamada T., Okuda T., Abdullah M., Awang M. & Furukawa A. (2000) The leaf development process and its significance for reducing self-shading of a tropical pioneer tree species. *Oecologia*, 125, 476-482
- ③ Yamada, T., Okuda, T., Abdullah, M., Awang, M., Furukawa, A: *Oecologia* 125: 476-482 (2000) Leaf developmental process and crown structure of a tropical pioneer tree, *Macaranga gigantea* in Peninsular Malaysia.
- ④ Kouma, A., Tsumura, Y., Lee, C.T., Lee, S.L., and OKUDA T. (2000). Estimation of gene flow in the tropical rain forest tree: *Neobalanocarpus heimii* (Dipterocarpaceae) inferred from paternity analysis. *Molecular Ecology* 9: 1843-1852.
- ⑤ Liang N., Tang Y. and Okuda, T. (2001) Is elevation of CO₂ concentration beneficial to seedling photosynthesis in the understory of tropical rain forests? *Tree Physiology* 21:1047-1055
- ⑥ Okuda, T. (2001) Pasoh Forest, The Site for FRIM-NIES-UPM Collaborative Research. FRIM in Focus, August 2001 p 6-7.
- ⑦ Okuda, T., Nor Azman, H., N. Manokaran, L. Q. Saw, Amir, H.M. S., and P. S. Ashton. (2001). Local Variation of Canopy Structure in Relation to Soils and Topography and the Implications for Species Diversity in a Rain forest of Peninsular Malaysia. In (eds.) E. Losos et al, R. Condit, J. Lafrankie. *Forest Diversity and Dynamism: Results from the global network of large-scale demographic plots.*, Univ. Chicago Press (in press).
- ⑧ Okuda T., Adachi N., Suzuki M., Quah E.S. & Manokaran N. (2002) Effect of selective logging on canopy and stand structure in a lowland dipterocarp forest in Peninsular Malaysia. (In press). *Forest Ecology and Management*
- ⑨ Okuda, T., In Suzuki et al (ed.) Proceedings for “Value of the Forest”: United Nation University, Tokyo (in press) “Logging impacts on a lowland rainforest in Peninsular Malaysia -Implication for the sustainable management of natural resources and the landscapes”

(2) 口頭発表

- ① 奥田敏統 日本生態学会第46回大会 東広島 (2000) 「パソの森林について-林冠構造、組成は

択伐によってどう変わったか シンポジウム「熱帯林で木を切ると。択伐40年後の森の姿と生き物たち」

- ② 奥田敏統 ヒコピア第50周年記念シンポジウム、東広島(2000) 熱帯林の多様性保全へ向けて。
- ③ Okuda, T., Adachi, N. Suzuki, M., Quah, E.S. And Manokaran, N.: CTFS meeting, Singapore. (2000) “Changes in Canopy, Stand Structure, and Tree Species Composition in a Malaysian Lowland Dipterocarp Forest 40 Years After Selective Logging”
- ④ Okuda, T., In Suzuki et al “Value of the Forest”, Tokyo (2000) “Logging impacts on a lowland rainforest in Peninsular Malaysia -Implication for the sustainable management of natural resources and the landscapes”
- ⑤ Numata, S., KACHI, N., OKUDA, T. and MANOKARAN, N.: XXI IUFRO meeting, Kuala Lumpur. (2000). “Leaf dynamics of dipterocarp seedlings in a primary and secondary forest in relation to the effects of leaf herbivores and light conditions”
- ⑥ Tang, Y., Okuda, T., Manokaran, N. And A.N. Rahim.:XXI IUFRO meeting, Kuala Lumpur. (2000). “Photosynthetic characteristics of tropical trees and their ecological significance in climate changes”
- ⑦ Adachi, N., Okuda, T. And Manokaran, N.: XXI IUFRO meeting, Kuala Lumpur. (2000) “Comparison of canopy gap dynamics between unlogged and selective logged forests”
- ⑧ Okuda, T., Adachi, N. Suzuki, M., Quah, E.S. And Manokaran, N.: XXI IUFRO meeting, Kuala Lumpur. (2000) “Effect of Selective Logging on Canopy Structure and Tree Species Diversity in a Lowland Dipterocarp Forest in Peninsular Malaysia”
- ⑨ Ohtani, Y., Yasuda, Y., Watanabe, T., Okano, M., Tang, Y, Liang, N., Yokota T., Rahim, N.A., Yusop, Z., Tani, M., And Okuda, T.: XXI IUFRO meeting, Kuala Lumpur. (2000) “Monitoring of CO₂ Flux above Pasoh Forest”
- ⑩ 奥田敏統・鈴木万里子、足立直樹、Manokaran, N. 日本生態学会第47回大会、熊本。(2001)。「空中写真判読による低地熱帯雨林の地上部現存量推定の試み」
- ⑪ 安立美奈子、別宮有紀子、奥田敏統、小泉 博、日本生態学会第47回大会 熊本。(2001)「熱帯林における土壌呼吸速度の空間的ばらつき」
- ⑫ 星崎和彦、新山 馨、木村勝彦、山下多聞、別宮有紀子、奥田敏統、Quah, E.S.、Supardi, N. 日本生態学会第47回大会、熊本(2001)「マレーシア半島部低地熱帯林の林分動態と最近のバイオマス変動」
- ⑬ 奥田敏統 熱帯生態学会 11回大会公開シンポジウム八王子(2001)「熱帯林のエコロジカルサービスを探るーエコロジカルサービスとは」
- ⑭ 小泉博、安立美奈子、別宮有紀子 熱帯生態学会 11回大会公開シンポジウム八王子(2001)「熱帯林のエコロジカルサービスを探るー最近の研究から見てきた熱帯林の炭素循環像」
- ⑮ 山下多聞、武田博清 日本熱帯生態学会第11回大会 八王子(2001)「土壌動物の除去が落葉分解における繊維組成の変化に及ぼす影響」

- ⑩ 星崎和彦、新山馨、木村勝彦、山下多聞、別宮有紀子、奥田敏統、E.S. Quah、N. Supardi Noor : 第 48 回日本生態学会大会 (2001) 「マレーシア半島部低地熱帯林の林分動態と最近のバイオマス変動」
- ⑪ 小泉博、安立美奈子、別宮有紀子 : 第 11 回日本熱帯生態学会 (2001) 「最近の研究から見えてきた熱帯林の炭素循環像」
- ⑫ T. Yamashita, K. Wan Rasidah, M. N. Nur Supardi, K. Hoshizaki, E. S. Quah, & T. Okuda.: The 15th Annual Meeting of Society for Tropical Ecology, University of Göttingen, Göttingen (2002) Carbon fraction dynamics in relation to leaf litter decomposition in a dipterocarp forest of Peninsular Malaysia.
- ⑬ 安立美奈子、別宮有紀子 W. Rashida, 奥田敏統、小泉博 (2002) マレーシア天然林、二次林、ヤシ園における土壌呼吸速度の季節変化. 日本生態学会第 49 会大会、仙台

(3) 特許 なし

(4) 受賞等 なし

(5) 一般への公表・報道等

- ① 地球カルテ (2000 年、青春出版社)
- ② 保険展望 (2000 年 7 月号、8 月号、簡易保険加入者協会)
- ③ ニュートン (2001 年 7 月号、ニュートンプレス)
- ④ 環境儀 (2002 年 4 号、独立行政法人国立環境研究所)

(6) その他成果の普及、政策的な寄与・貢献について

IPCC (気候変動に関する政府間パネル) において、森林における炭素蓄積量推定法における技術的な情報寄与を行っている。

本研究結果を礎に、今後同様の調査を様々な土地利用形態に展開することで、特定地域全体の炭素蓄積機能を明らかにすることが可能であり、またこうして得られた資料を GIS 化することにより、対象地域における土地利用形態の移り変わりに伴う地域全体の炭素蓄積量の変化をシミュレーションすることが可能となる。地球温暖化にともない炭素蓄積量が貨幣換算される現在、土地利用の選択肢のひとつとして炭素蓄積を目的とした土地利用が注目を集めつつあるが、このような時代背景の中で本研究の成果は、行政や地域住民が特定地域において単位面積当たりの経済価値の最適化を検討し、今後の土地利用の指針を決定する際の有効なツールとなりえる。今後は、マレーシア森林研究所をはじめとした関係機関を通じ、成果の広報・普及に努める。

表 1. パシ天然林および再生林における地上部各器官の現存量と炭素蓄積量の変化

Tree organ	Primary stand				Regenerating stand			
	Biomass		Carbon mass		Biomass		Carbon mass	
	(Mg/ha)	(MgC/ha)	(Mg/ha)	(MgC/ha)	(Mg/ha)	(MgC/ha)	(Mg/ha)	(MgC/ha)
	1994	2000	1994	2000	1998	2000	1998	2000
Stems	341.0	319.6	160.3	150.2	220.6	232.2	103.7	109.2
Branches	79.8	74.1	37.5	34.8	46.6	49.3	21.9	23.2
Leaves	7.0	6.8	3.4	3.4	7.0	7.2	3.4	3.5
Total	427.8	400.6	201.2	188.4	274.2	288.7	129.0	135.9

表 2. パシ天然林と再生林における、地上部現存量および炭素蓄積量の最近の動態

	Primary stand	Regenerating stand
Dry-weight based values (Mg/ha/yr)		
Gain by tree growth	6.40	11.53
Recruitment	0.87	0.56
Tree deaths	11.80	4.83
Gain subtotal	7.27	12.09
Net gain	-4.53	7.26
Carbon-based values (MgC/ha/yr)		
Gain by tree growth	3.01	5.42
Recruitment	0.41	0.26
Tree deaths	5.55	2.27
Gain subtotal	3.42	5.68
Net gain	-2.13	3.41

表 3. パソ天然林と再生林における倒木と大きな落枝の年間発生量

	Treefalls		Large branch-falls	
	Mg/ha/yr	MgC/ha/yr	Mg/ha/yr	MgC/ha/yr
Primary stand	12.80	6.02	1.41	0.66
Regenerating stand	3.60	1.69	1.51	0.71

表 4. 分解系において観察された各パラメータの値

Parameter, unit	Primary stand	Regenerating stand
Litter decomposition		
k for fine litter, yr^{-1}	1.68	no data
k for <u>S. acuminata</u> wood, yr^{-1}	0.39	no data
k for <u>N. heimij</u> wood, yr^{-1}	0.07	no data
Soil respiration		
Bulk rate, MgC/ha/yr	18	19
Rr/Sr ratio*, dimensionless	0.67	0.63

*; Rr , fine-root respiration; Sr , bulk rate of soil respiration. (both fluxes in MgC/ha/yr)

表5 パソ森林保護区に分布する種、またはパソ森林保護区に分布する種と同じ科に属する熱帯樹種の材の分解係数(k)と材密度(D、平均値)。引用文献は本文参照。

Family	Species	k (yr ⁻¹)	Range of k	Wood density, D (g/cm ³)	Reference for k	Reference for D
BURSERACEAE	Bursera simaruba	0.49	0.369-0.615	0.61	20)	20)
DIPTEROCARPACEAE	Neobalanocarpus heimii	0.05		0.85	21)	13)
DIPTEROCARPACEAE	Neobalanocarpus heimii	0.07		0.85	This study	13)
DIPTEROCARPACEAE	Shorea accuminata	0.38		0.71	This study	25)
DIPTEROCARPACEAE	Shorea macroptera	0.49		0.53	21)	25)
DIPTEROCARPACEAE	Shorea parvifolia	0.61		0.54	22)	25)
EBENACEAE	Diospyros sp.	0.19		0.70	23)	26)
EUPHORBIACEAE	Gymnanthes lucida	0.20	0.199-0.623	0.62	20)	26)
LAURACEAE	Cinnamomum sp.	0.25		0.50	23)	26)
LAURACEAE	Lauraceae spp.	0.45		0.66	23)	26)
MORACEAE	Brosimum alicastrum	0.17	0.107-0.458	0.56	20)	20)
MORACEAE	Cecropia peltata	0.64		0.56	20)	26)
MYRTACEAE	Myrcianthes fragrans	0.05		0.73	20)	26)
PALMAE	Coccothrinax readii	0.49		0.59	20)	20)
SAPINDACEAE	Paranephelium macrophyllum	0.45	0.37-0.62	1.04	24)	26)
SAPINDACEAE	Blomia cupanioides	0.10	0.024-0.381	0.79	20)	20)
SAPINDACEAE	Talisia olivaeformis	0.12	0.030-0.414	0.79	20)	20)
SAPOTACEAE	Manilkara zapota	0.16	0.008-0.343	0.74	20)	20)

表 6. パソ森林保護区内に分布する各科の優占度(胸高断面積合計)と回帰式より推定した各科の分解係数(k)の代表値。林分レベルの k 値(0.23)は分解基質の質と、気質の林分内での優占度を加味した重み付け平均より求めた。(詳細は本文参照)

FAMILY	Basal area (m ² /ha)	Estimated average-k (yr ⁻¹)
ANACARDIACEAE	0.81	0.31
ANNONACEAE	0.83	0.29
APOCYNACEAE	0.10	0.56
BOMBACACEAE	0.17	0.44
BURSERACEAE	2.05	0.34
CELASTRACEAE	0.10	0.24
CORNACEAE	0.01	0.31
DILLENIACEAE	0.03	0.18
DIPTEROCARPACEAE	10.06	0.22
EBENACEAE	0.36	0.19
ELAEOCARPACEAE	0.06	0.45
EUPHORBIACEAE	3.09	0.33
FAGACEAE	0.29	0.12
FLACOURTIACEAE	0.43	0.01
GUTTIFERAE	0.37	0.24
ICACINACEAE	0.02	0.01
LAURACEAE	0.37	0.43
LECYTHIDACEAE	0.05	0.29
LEGUMINOSAE	2.16	0.17
LINACEAE	0.07	0.01
MELIACEAE	0.37	0.32
MORACEAE	0.51	0.40
MYRISTICACEAE	0.64	0.29
MYRTACEAE	0.48	0.21
OLACACEAE	0.35	0.05
RHIZOPHORACEAE	0.16	0.18
RUBIACEAE	0.30	0.52
SAPINDACEAE	0.28	0.14
SAPOTACEAE	1.10	0.19
STERCULIACEAE	0.74	0.34
THEACEAE	0.02	0.28
TILIACEAE	0.14	0.34
VERBENACEAE	0.05	0.32
Subtotal	26.55	0.23
Other families	3.10	

表 7. 本研究と 1970 年代の炭素収支の比較

Carbon pathways (Mg/ha/yr)	This study		IBP study ¹⁴⁾
	Primary stand	Regenerating stand	Primary stand
	1992-2001	1998-2001	1971-1973
NEP	-1.29	1.34	0.3
NPP	8.85	11.73	12.1
Fallen trees	6.02	1.69	1.6
Litterfalls	5.95	6.52	5.4
CO ₂ from litter	3.54	3.69	7.9
CO ₂ from SOM	6.60	6.70	3.9

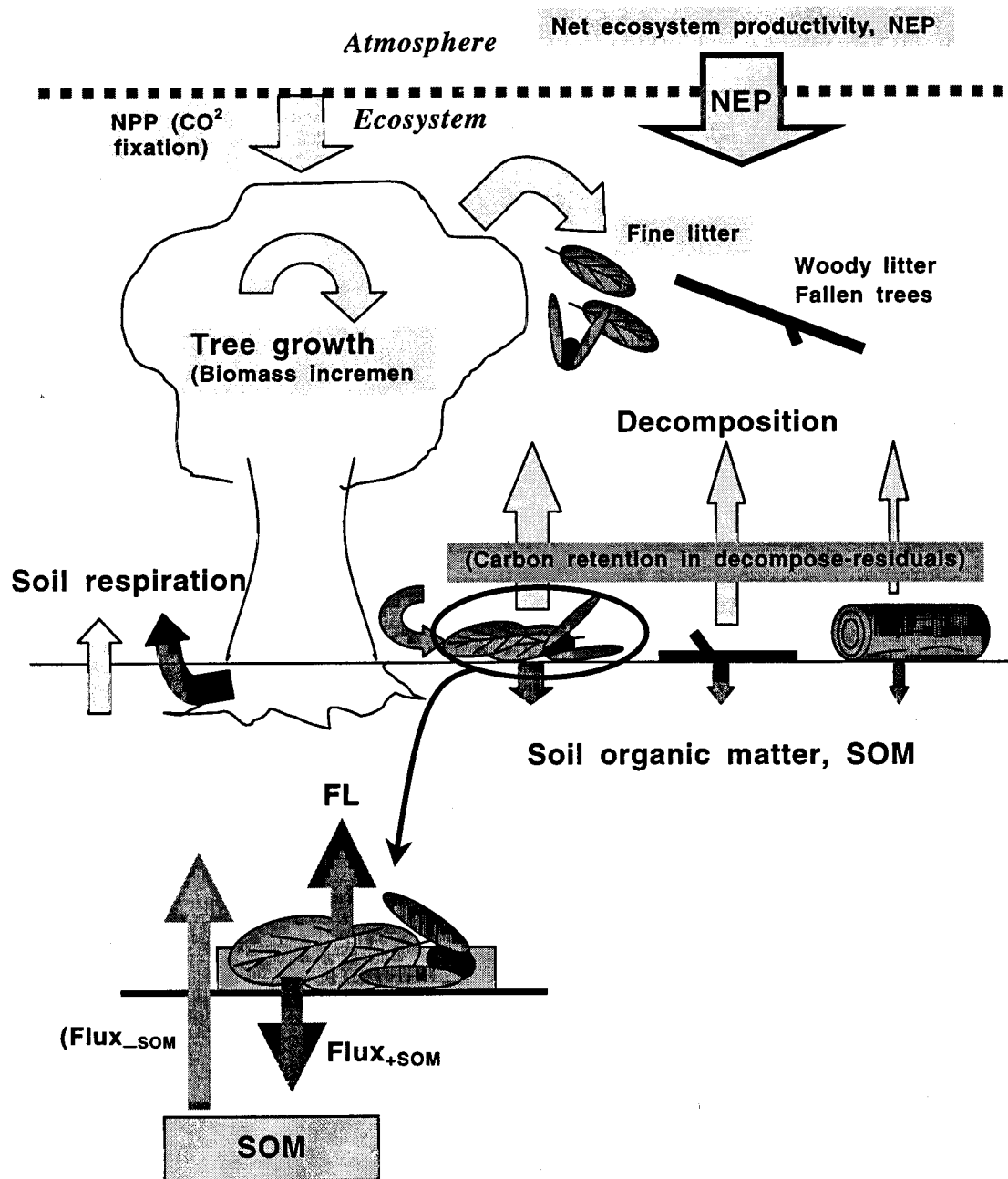


図1 森林生態系での炭素循環の概念的モデル。図中の各要素を観測または推定し、差し引きして生態系に吸収された炭素量（生態系純生産量、NEP）を計算する。森林樹木が固定した炭素量（純一次生産量、NPP）との違いを理解することが重要である。

土壌呼吸の測定に関連する各フラックスの関係は、FLがリターから直接放出される炭素フラックス、SOMが土壌中の有機物の炭素量をそれぞれ表す。Flux+SOMは直接測定が難しく、リター分解実験の結果とあわせて推定する必要がある。詳しくは本文を参照のこと。

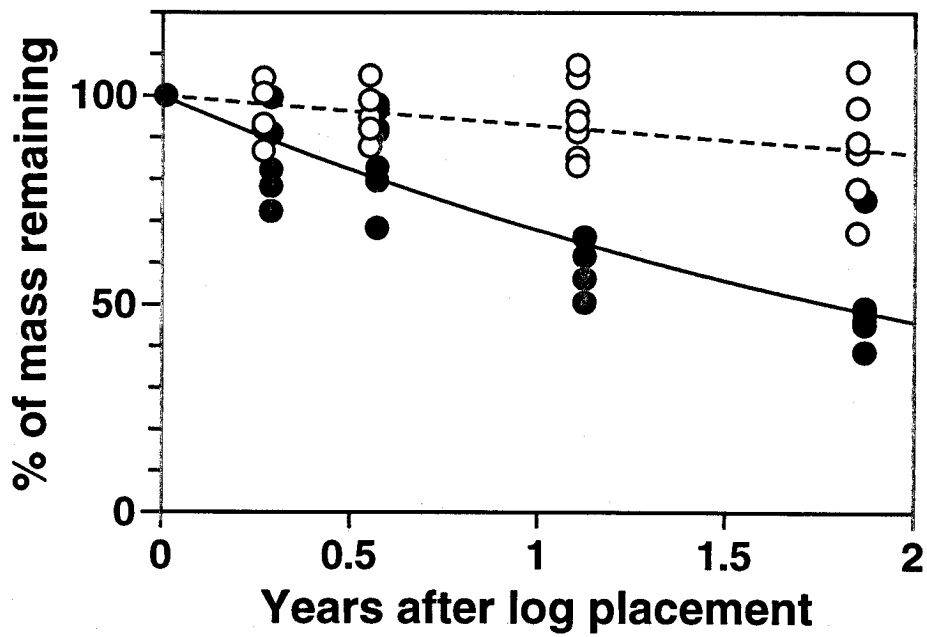


図2 倒木分解実験で測定された材の重量の経時変化。黒丸が *S. accuminata*、白丸が *N. heimii* をそれぞれ表す。実験開始時の各丸太の乾重（推定値）を100として表した。回帰分析により兩種で得られた有意な曲線を図中に示してある。

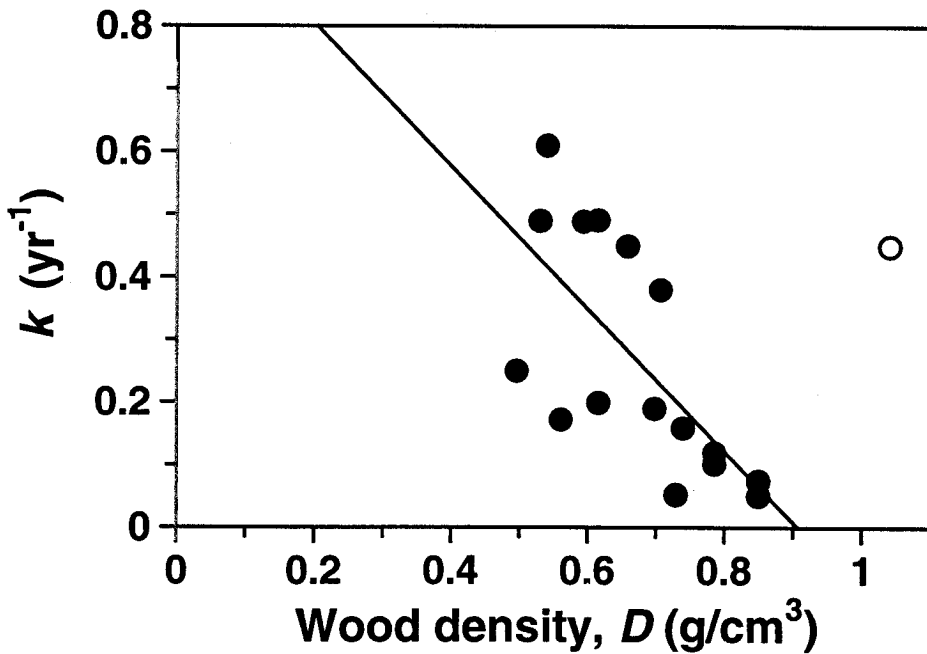


図3 16の種または属の気質に対する分解係数 k と材密度から求めた回帰式。
 $k = 1.03 - 1.13 D$ [yr^{-1} , g/cm^3], $n = 17$, $r^2 = 0.47$, $P = 0.02$ (白丸はパソ森林保護区にほとんど出現しない科に属しているためはずれ値とみなす)。

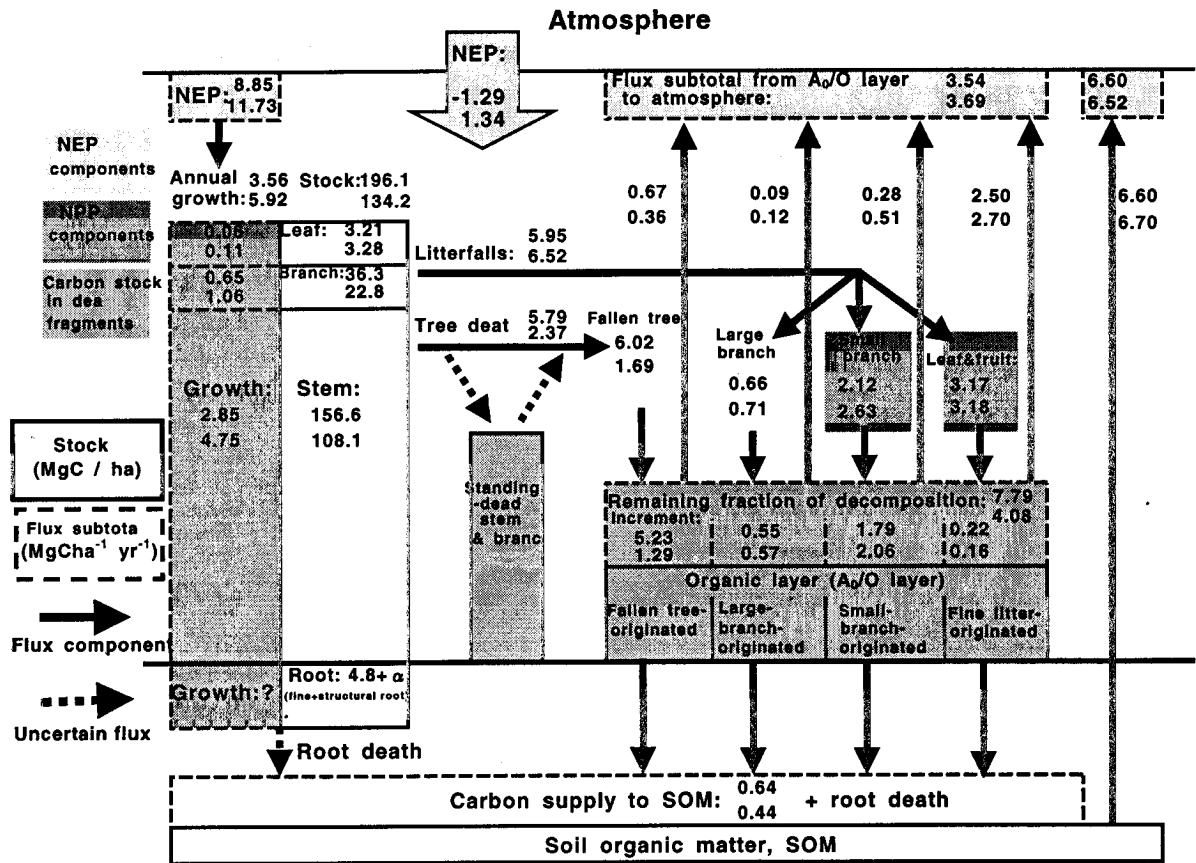


図4 パツ保護林の天然林と再生林の炭素循環モデル。各コンパートメント内の上段、下段に示す値は、それぞれ天然林および再生林の現存炭素量または炭素フラックスを表す。生態系に吸収された炭素量はNEPで表される。実線の箱の中で示された数値は現存炭素量を、矢印に添えられた数値は炭素フラックスをそれぞれ表す。行き先が同一のフラックス値の小計は点線の箱中に示した。立枯れ木の現存量、根の成長と死亡による炭素フラックスは推定できなかった。