

B-5 熱帯アジアの土地利用変化が陸域生態系からの温室効果ガスの発生・吸収量に及ぼす影響の評価に関する研究

(2) 熱帯林による二酸化炭素吸収の現地調査とその広域評価

独立行政法人産業技術総合研究所 環境管理部門 大気環境評価研究グループ 域間環境評価研究グループ	蒲生 稔 前田高尚
日本大学生物資源科学部 東京情報大学総合情報学部 (研究協力機関・研究者)	上田真吾 林 正康
Center for International Forestry Research 独立行政法人森林総合研究所 森林環境部 樹木生理研究室	藤間 剛 石田 厚
Mulawarman University, Indonesia Indonesian Institute of Sciences	Deddy Hadriyanto, Mansur Fatawi Ridwan Jacob

平成 11~13 年度合計予算額 22,579 千円
(うち、平成 13 年度予算額 7,182 千円)

[要旨] 熱帯多雨林気候帯での二次林の成長過程における二酸化炭素収支の機構解明のため、インドネシアのカリマンタン島において観測を行った。カリマンタン島ブキットスハルトにある 30m 塔を使用して二次林の成長段階における二酸化炭素収支の観測を行っている。このサイトでは 1998 年のエルニーニョに伴う異常乾燥による火災で高度 15-20m で卓越していた二次林（主に Macaranga 属）が消失し、その後 3 年にして高度 10m 近くまで復活してきている。観測は渦相関法による二酸化炭素収支、熱収支測定と気象観測からなっている。また土壌呼吸をチャンバー法により測定した。当研究期間中は、典型的な熱帯多雨林気候下での観測であった。年変化より日変化の方が大きいという熱帯多雨林気候のため、データの年内変動が小さい。観測された CO₂ フラックス値を気象データでパラメータ化して、年単位の生態系純生産量 NEP (あるいは生態系純交換量 NEE) を概算した。また、毎木調査から求まる森林バイオマスの増加量から 1 次の純生産量 NPP を求めた。さらに土壌呼吸量も考慮して、総生産 GPP や全呼吸量など、この群落における炭素循環の構成パラメータ量も推定した。それによると、NEE は NPP と GPP とともに年々増加傾向にある。熱帯アジアにおける二酸化炭素濃度の季節的変動、大規模森林火災の影響、土地利用変化の影響を調べるため、インドネシアのスマトラ島ブキット・コタ・タバンにある国連環境計画 (UNEP) の地球大気監視 (GAW) 局で二酸化炭素濃度の自動連続測定を行った。

スマトラ島ジャンビ州パシルマヤン試験地において定期的に土壌を採取し、土壌有機物の質的变化を調査した。CO₂ の土壌放出フラックス、土壌中全糖含有量、土壌呼吸速度との比較から、土壌有機物の窒素安定同位体比 ($\delta^{15}\text{N}$) が易分解性有機物 (EDOM) の量的指標として有効と結論した。パシルマヤン地域で得た $\delta^{15}\text{N}$ と EDOM の関係が他地域にあてはまるか検討するため、広域で採取した土壌中有機物の $\delta^{15}\text{N}$ と CO₂ 放出フラックスの関係を解析した。その結果、CO₂ 放出フラックスの地点間変動は、表層土壌有機物の無機速度ではなくリターの分解速度に依存すると推定された。

キーワード 二酸化炭素収支 熱帯二次林 渦相関法 土壌有機物 窒素・炭素安定同位体比

1. はじめに

熱帯多雨林気候帯では多くの森林が火入れののちプランテーションの林に変化したり、火入れ後の数年間の食料生産ののち放置されたり、エルニーニョによる森林火災ののち、二次林になったりして、熱帯多雨林帯では二次林の卓越する割合は大きい。インドネシアの東カリマンタン、サマリダ周辺のムラワルマン大学熱帯降雨林研究センターのブキットスハルト演習林内にある30m塔(南緯0度50分、東経117度3分、高度約20m)を使用して二次林の成長段階における二酸化炭素収支の観測を行った(図1)。このサイトでは1983年のエルニーニョに伴う異常乾燥により森林が火災消失し、その後二次林のMacaranga属を主にした二次林が卓越していたが、1998年のエルニーニョによる異常乾燥で、再び消失した(図1)。消失後、材質の脆いMacaranga属はすべて倒木となり、始め林床は藪状態で、何回か優占種が交替したが、1年半後Macaranga属の稚樹が卓越し始め、消失後4年にして高度10m近くまで復活している。火災後の地面の乾燥により枯死したフタバガキ科の高木がまだ倒れずに立木のままになっている。サイトは緩い傾斜した地形上にある。

エルニーニョによる乾燥期には全球的に二酸化炭素が増加することが知ら

れている(図2)。この原因の1つとして、熱帯多雨林域での乾燥によるCO₂吸収の減少、火災によるCO₂の排出が考えられている。火災後の二次林の成長による森林の復活も含めた、熱帯多雨林地域での森林成長と消失のサイクルと二酸化炭素吸収・放出(シンクとソース)の年々変化は全球的CO₂量に大きく寄与しているものと考えられる。

世界気象機構は地球大気の微量成分の変動を地球大気監視局で推進している。インドネシア共和国スマトラ島のブキティンギ市郊外のブキット・コタ・タバパンに南アジアのGAWが設置してある。位置は南緯0.125度、統計100.19度、標高864.6mの平坦な丘陵上にある。地球大気監視局GAW局の周辺は熱帯雨林の天然林であり、擾乱を受けた二次林(サイト①)に対して、基準となる観測となる。土地利用変化やエルニーニョなどの地球規模変動による二酸化炭素濃度の長期トレンドを調べるため、WMOの規格に準じた長期にわたる観測を行った。

土壌面から放出される二酸化炭素は、植物根の呼吸と土壌有機物の無機化に由来する。後者に

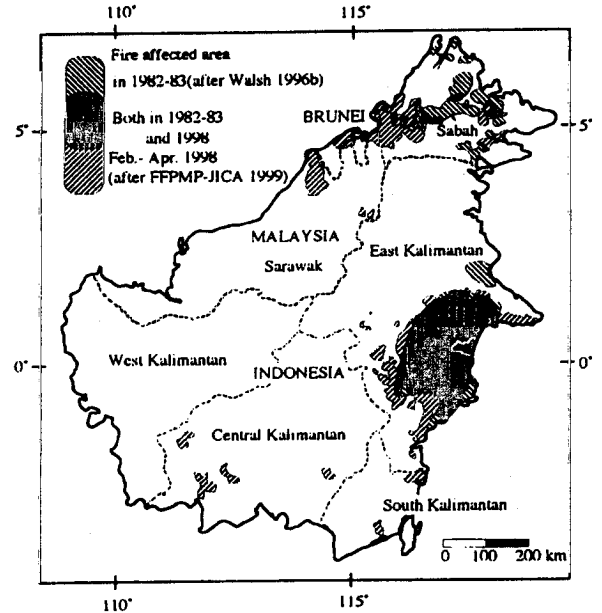


図1 観測サイト ●印 図には1982-83と1998年のエルニーニョに伴う異常乾燥で火災を受けた地域も示す(藤間¹⁾による)

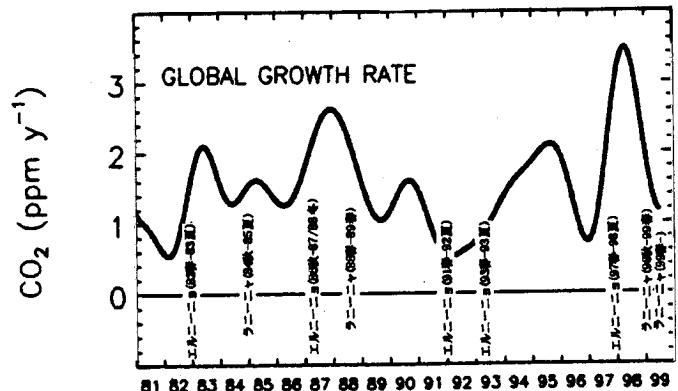


図2 二酸化炭素濃度の年増加率 (NOAA/CMDL) とエルニーニョ、ラニーニャ (気象庁) の関係

よる放出は、土壌中の易分解性有機物 (EDOM) の量を反映すると考えられる。土壌の窒素安定同位体比と土壌呼吸速度の関係に基づき、土壌からの二酸化炭素放出を支配する主な要因である易分解性有機物の量的指標として窒素安定同位体比が有効性を調べる。併せて、熱帯アジア地域では初めて土壌空気に含まれる亜酸化窒素の窒素と酸素の安定同位体比を測定した。今後データを集積することにより土地利用変化と土壌有機物の無機化による二酸化炭素の排出と亜酸化窒素の生成機構の変化との対応についての解析が可能となる

2. 研究目的

二酸化炭素の吸収と放出が平衡状態にあると考えられる熱帯雨林の天然林での観測例は若干ある。この研究では、いまだ観測例のない、熱帯二次林の生成消失のサイクルでの群落上での二酸化炭素の固定過程を明らかにして、二酸化炭素の原単位データを提供する。二酸化炭素の吸収・排出 (シンク・ソース) を表わす生態系純生産量 NEP (あるいは生態系純交換量 NEE) を見積もる他に群落生態系の物質循環に関係する総生産、一次の純生産量、植物呼吸量、土壌呼吸量などの生産消費量を求めて、二次林の二酸化炭素収支機構を明らかにする。さらにこれら物質生産量と気温、湿度、降水量、光量子量、土壌水分量など気象データとの関係を明らかにして、生態系モデル作成の基本データを得る。この炭素量の気象値によるパラメタライゼーションは、CO₂ フラックスの欠測時に気象値で補間する方法を提供する。パラメタライゼーションは、今後、広域の気象分布や衛星画像との組み合わせから二酸化炭素収支の広域評価を行うための理論的根拠を伴う道具となる。このサイトは Asia Flux network に参加している。

大気中の二酸化炭素は、年々増大している。この増大の主な原因は化石燃料の消費量の増大であるが、土地利用変化に起因した増大も見逃せない。地球表面から大気への二酸化炭素のフラックスは地球表面の植生の変化、森林から農耕地、農耕地から居住・工業用地への変化に従って増大する。フラックスの変化は最終的には大気中の二酸化炭素濃度の増大として検出される。地球規模での二酸化炭素濃度はバックグランド濃度として人里はなれた地域で測定している。世界気象気候 (WMO) は大気の微量成分のバックグランド濃度の測定を地球大気監視 (GAW) 局で実施している。東南アジアにおける GAW 測定局はインドネシア共和国スマトラ島のプキティンギ市郊外のプキット・コトタバン (東経 100.19 度、南緯 0.125 度、標高 864.5 米) に設置してある。周辺の植生は典型的な熱帯高地林である。このサイトで二酸化炭素濃度の測定を開始した。土壌の窒素安定同位体比と土壌呼吸速度の関係に基づき、土壌からの二酸化炭素放出を支配する主な要因である易分解性有機物の量的指標として窒素安定同位体比が有効性を確かめる。併せて、熱帯アジア地域では初めて土壌空気に含まれる亜酸化窒素の窒素と酸素の安定同位体比を測定した。

3. 研究方法

(1) 群落の炭素循環パラメータ間の関係

森林樹冠上の CO₂・水蒸気・顕熱フラックスを、渦相関法により連続観測している。同時に、気象要素も測定して、葉面積指数、土壌水分量、飽差、群落樹冠温度など光合成に関係深い気象要素と関連づける。

二酸化炭素収支に関わる物質循環を考えると図 3 から

$$GPP - R_{aa} - (R_{ar} + R_h) = NEE \quad (1)$$

である。よって

$$NEE = GPP - (R_{aa} + R_{ar}) - R_h = NPP - R_h \quad (2)$$

となる。NEE は渦相関法で、 $R_{soil} (=R_h + R_{ar})$ はチャンバー法で測定している。NPP は $NPP = \Delta B + L + C = (\Delta B_a + \Delta B_r) + L + C \quad (3)$

でも表現される。

タワー周辺で年 1 回、毎木調査を行なって地上部のバイオマス増加量 ΔB_a を求めている。

ここでバイオマス量の地下部 B_r と地上部 B_a の比率を α とすると $\Delta B_r / \Delta B_a = \alpha$ とおくことは許されるだろう。また $L / \Delta B_a = \beta$ と置き、被食量 C が無視できるものとする

$$NPP = (1 + \alpha + \beta) \Delta B_a \quad (4) \text{ となる。}$$

α は樹木に拘わらず一般に 0.2 くらいと言われているので、ここでは α を 0.2 と置いてみる。また、確実性が低いが、当サイトでの観測例 (Toma 他²⁾) の結果と比べて、ここでは $\beta = 1$ と置いてみる。なお、 L の観測は 2001 年 10 月から開始した。

(2) 生態系純交換量 NEE の求め方

二酸化炭素の変動と鉛直風の乱れとの相関から CO_2 フラックスを求める渦相関法により NEE を求める。 CO_2 は Licor6262 によりクローズド・パス法で、風の乱れは超音波風速計 (Gill 社) によりサンプリング周波数は 5 Hz で測定している。ある期間での積分値が正ならば対象とする群落が CO_2 を吸収 (シンク) しており、負ならば CO_2 を排出 (ソース) していることになる。NEE は理想的には NEP に相当するが、移流などがあるため、エネルギー収支が閉じなくて、物質循環からみた NEP に等しくないとのことで最近では渦相関で得られた値を NEE という。

(3) 土壌呼吸量 R_{soil} の求め方

R_{soil} はチャンバー法 (測定器とチャンバー内の空気を循環させるクローズド方式) で週一回、朝夕を含めては月 1 回測定している。チャンバーに蓋をしてから、おおよそ 2-5 分間二酸化炭素濃度は線形に増加するので、その傾きから R_{soil} を求める。観測点は 6 サイトで、うち 2 サイトは Macaranga の倒木に設置している。 R_{soil} は根の呼吸 R_{ar} と土壌有機物など非植物の分解呼吸など (R_h) の和である。夜間には $GPP = 0$ であるから式 1 から NEE と R_{soil} から R_{aa} が求まる。

(4) 一次の純生産量 NPP の求め方

タワー周辺で年 1 回、毎木調査を行なっている。胸高直径 10cm 以上の樹木個体の樹種および胸高直径の調査、刈り取り調査 (直径、樹高測定、器官 (枝、幹、葉) 別重量測定) を実施し、直径と樹高の関係および直径および樹高と個体重の関係を決定する。これにより地上部のバイオマス増加量 ΔB_a が求まる。

(5) 気象値による CO_2 フラックス量のパラメータ化

二酸化炭素収支と気象要素との関係を明らかにするために、気象要素の連続測定を行っている。生態系純生産量など物質統計量を光合成量と関係の深い光量子量、飽差、樹冠部表面温度、土壌水分量などと関係づけられれば、欠測値の補間および理論的な広域評価が可能となる。

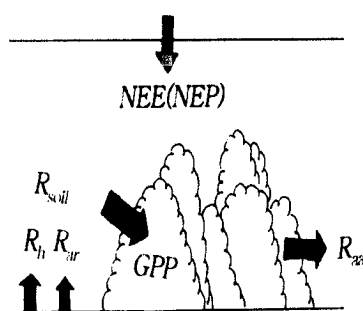


図 3 群落の炭素循環の模式図

- NEP 生態系純生産量
- NEE 生態系純交換量
- GPP 総生産
- Ra 植物呼吸量
- Rsoil 土壌呼吸量
- Rh 非植物呼吸量
- NPP 一次の純生産量
- B バイオマス
- ΔB バイオマス増加量
- L 落葉落枝量
- C 被食量
- 添え字 a 地上部
- r 地下部 (根部)

(6) 二酸化炭素濃度の測定方法

二酸化炭素濃度は通常の非分散型赤外線吸収分析計（富士電機 ZRF 型）で測定する。水蒸気は 2 段階で除去する。1 段階目は電子冷却器（小松）で、2 段階目はパーミュエーション・チューブによる除湿である。分析計への試料大気の導入は毎分 500ml で自動制御している。

(7) 土壌 CO₂ フラックスの指標としての土壌有機物の安定同位体比

土壌面から放出される CO₂ は、植物根の呼吸と土壌有機物の無機化に由来する。後者による放出は、土壌中の易分解性有機物（EDOM）の量を反映すると考えられる。そこで、土壌中の EDOM の量的指標として土壌有機物の安定同位体比に着目し、土地被覆の異なる地点で採取した土壌試料の安定同位体比を測定し、土壌有機物の CN 比、糖濃度、呼吸速度、土壌 CO₂ フラックスとの対応を調べた。

4. 結果・考察

(1) 気象

気象観測は 1999 年 12 月に始まった。2000 年度に CO₂ フラックスが観測できた日数は 95 日で取得率は 26% と低い値であった。これは、太陽電池の必要量を少なく見積もってしまったこと、高温対策、防水対策の不備などによる測器の故障などが原因である。これらの原因を取り除いて、2001 年では取得率 75% になった。一方気象観測は連続測定されている。このサイトの気象気候の特徴をみると、ここ 2 年半は降水がほとんど切れ目なくあり（図 4）、典型的な熱帯多雨林の気候条件を示している。詳しくみると土壌水分量からも窺えるように 2001 年 7-9 月に短期間の乾季が認められる。この短期間の乾季に注目してみると、優占種の *Macaranga* 属の下葉が枯れて落ち、葉面積指数が若干小さくなり、受光量 APAR と CO₂ フラックスの比例係数は小さくなるなどして、図 4 にみられるように、日中の NEE は土壌が乾燥しているほど、小さくなっているのが読みとれる。このプロジェクト期間中はエルニーニョには遭遇せず、長期間の乾燥状態は起こらなかったが、この群落の光合成活動が乾燥により大きな影響を受ける、すなわち、この群落が乾燥に弱いことが示されている。

このプロジェクト期間は典型的な湿潤な熱帯降雨林気候にあったとして、解析を進める。よく知られているように、熱帯多雨林気候帯では、気温の年変動（ここでは日平均値にして 25-27° C）より日変動（22-33° C）の方が大きい。他の気象値も日変動に比較して、年変動が小さい。卓越風向は日中と夜間で異なるが、それぞれ、年間を通してほぼ同方位となっている。また、光合成活動に影響の大きいパラメータである、受光量 APAR、土壌水分（土壌呼吸量に関する深さ 10cm

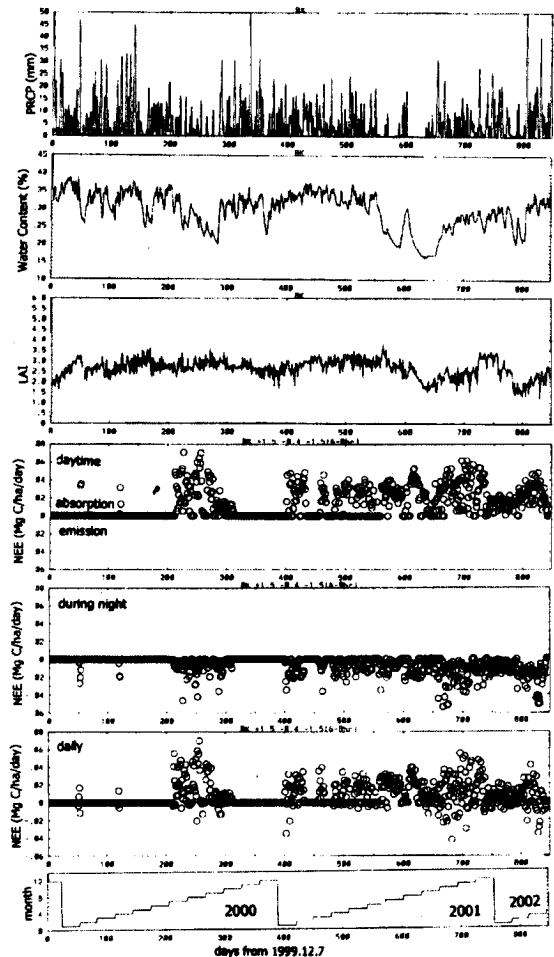


図 4 降水量、土壌水分量(深さ 10cm)、葉面積指数、NEE (日中)、NEE (夜間)、NEE(全日)の日々変化

と根部の水分量と関係がある 50cm での値)、飽差 VPD、群落樹冠表面温度など (図 5) は、年内変化が小さい。そのためか、CO₂ のフラックスの日変化もこれといった年変化が認められない。また、エネルギー収支や炭素収支の年内変化も小さい。そこで、欠測が多いが、気象場はかなり単純であることを考慮して、気象値により CO₂ フラックス量 (NEE) をパラメタ化して、群落内の炭素循環に関わる物質量の年積算値を概算してみた。ただし、年内変化は小さいが、年々変化は、2001 年の降水量は 2000 年の 2/3 であることや、二次林の成長過程の違いなどで異なってくるようである。

(2) CO₂

CO₂ 濃度の日変化は図 6 によると、日出時 600ppm 近くまで増加し、日出後熱対流による鉛直拡散により急激に減少するのがこのサイトの特徴である。これは日出直後 CO₂ フラックスが上向きである (図 7、図では吸収がプラス、放出がマイナスで表示) ことから示されている。エネルギー収支は顕熱輸送量+潜熱輸送量+地中熱伝導量が純放射量の 85% で閉じていない (図 8)。このため得られる CO₂ フラックス量は 15% 過小評価されている可能性がある。年間を通して顕熱/潜熱輸送量 (ボーエン比) は 0.5 と一定であり (図 9)、また CO₂ フラックス/潜熱輸送量は比例関係 (図 10) にあり一定 (水ストレスが小さいと考えられる) であるなど年間を通してエネルギー収支や炭素収支の機構が均質であることが示されている。

(3) 土壌呼吸

土壌呼吸 R_{soil} は根の呼吸 R_{ar} と土壌有機物など非植物の分解呼吸など (R_h) の和で表わされて分離できない。一般に R_{soil} は主

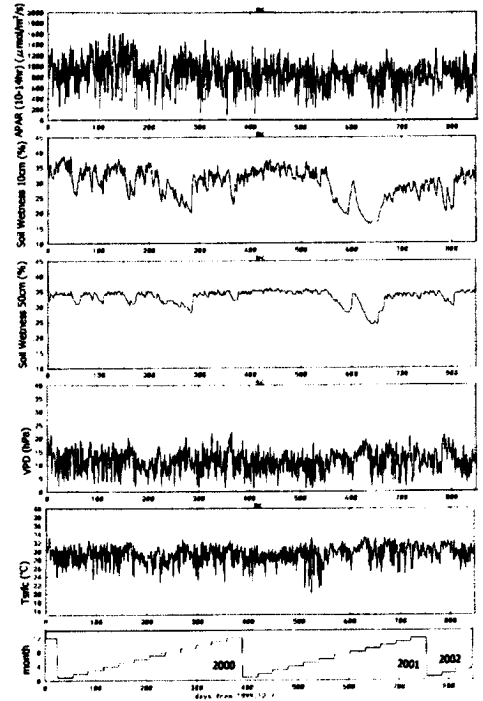


図 5 受光量、土壌水分 (深さ 10cm)、土壌水分 (深さ 50cm)、飽差、樹冠表面温度の日々変化、

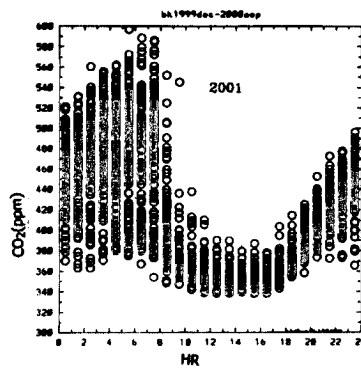


図 6 CO₂ 濃度の日変化

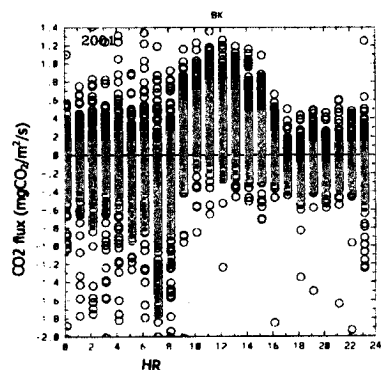


図 7 CO₂ フラックスの日変化

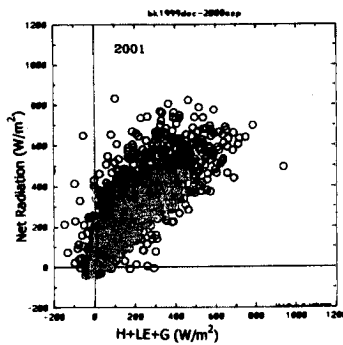


図 8 熱収支の閉じ具合

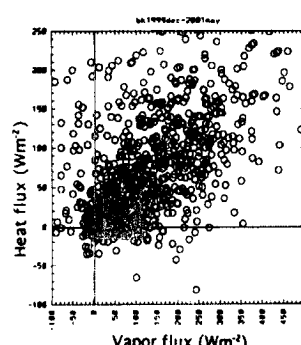


図 9 顕熱と潜熱輸送量

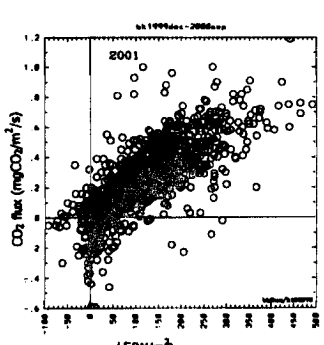


図 10 CO₂ flux と蒸散量の

に土壤温度とともに増加し、従として、土壤水分量が増加するに従い、増加一飽和一減少すると考えられている。

観測によれば R_{soil} は 2000 年度には地面温度(深さ 1 cm) と比例し、2001 年度には土壤水分量(深さ 10cm) と比例関係にある(図 11)。2000 年度には土壤水分量は高低 2 グループに分けられ、低グループは高地温群にわけられるので、土壤呼吸が水分量に反比例するとは必ずしもいえない。しかし、2001 年度には R_{soil} は地温に無関係で、水分量に比例して増加している。2000 年度に比較して、2001 年度の方が乾燥したケースが多い。2001 年度は、乾燥から湿潤まで広い範囲の観測例があったため、 R_{soil} と土壤水分量の関係が顕在化したと考えられる。

2001 年から始まった Macaranga の倒木の呼吸量は土壤の 4 倍ほど大きく、これも土壤水分量に比例して増加している。倒木の量が多く、炭酸ガスの排出源として無視できないかもしれない

(4) 毎木調査

2000 年および 2001 年 8 月の毎木調査では蓄

積速度は乾重量で、それぞれ 6.26, 8.75 ton /ha/year であった。炭素含有率を文献より 49.2% とすると、両年の炭素換算の地上部のバイオマス増加量 ΔB_g は、それぞれ 3.1, 4.6 ton C/ha/year となり、年々増加している。一次の純生産量 NPP を(4)式から求めると、2000 年、2001 年でそれぞれ、7.3, 10.2 ton C/ha/year となる。

(5) 炭素循環構成要素量の推定

光合成量は光量子量が決定要素である。飽差 VPD、群落樹冠温度 T_s 、土の含水率などが二次的な決定要素である。時間ごとの CO_2 フラックスと受光量 APAR との関係を年ごとに図 12 に示す。APAR が $1000 \mu mol/m^2/s$ 以下では比例関係、以上では飽和状態が認められる。そこで、放物線で近

似して、日中の CO_2 フラックスを APAR でパラメータ化してみた。一方夜間は図 12 に見られる日没時(APAR=0)での CO_2 フラックスの値を夜間の値(一定)と仮定した (R_n , R_h が気温のみの関数と

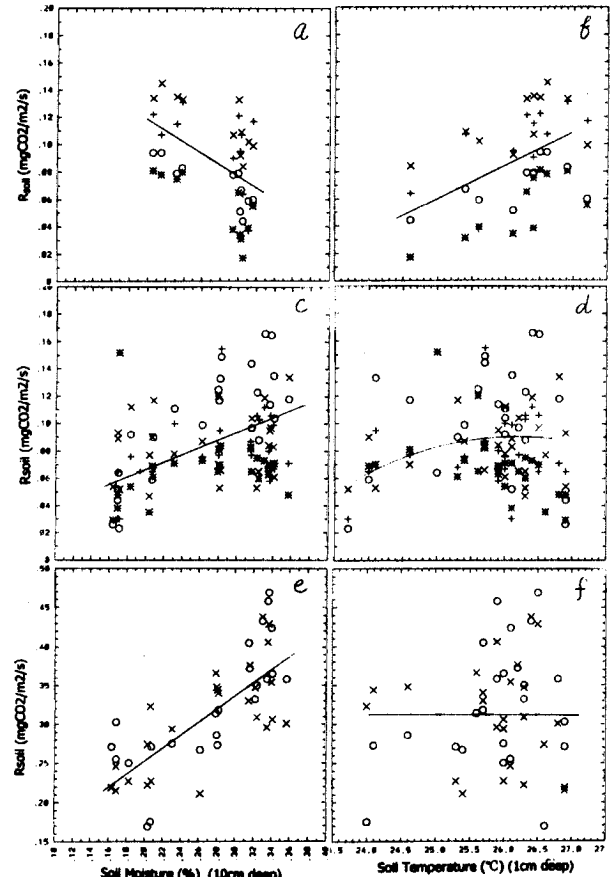


図 11 左図 土壤呼吸と土壤水分(深さ 10cm)の関係

右図 土壤呼吸と土壤温度(深さ 1cm)の関係

上図 2000 年,中段 2001 年,下段 (枯死木,2001 年)

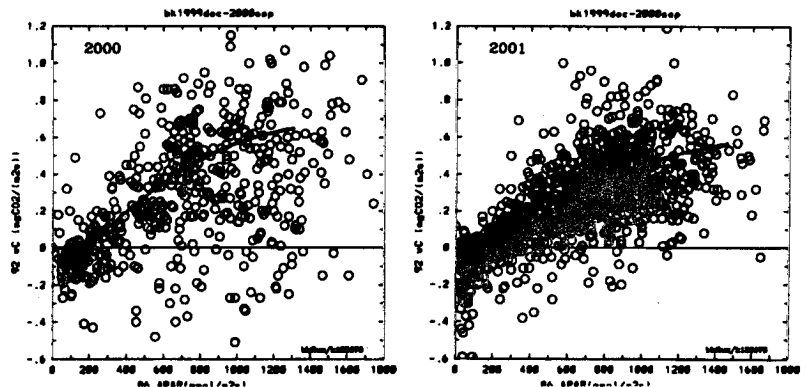


図 12 2000 年と 2001 年の CO_2 フラックスと受光量 APAR との関係

仮定できるとすると、日没から日出までの夜間の気温差は2-3℃と小さいので)。日中夜間を通したNEPの年積算値は2000年が3.1, 2001年が4.6MgC/ha/yearとなり、この群落が二酸化炭素の大きなシンクであることが示された。さらに、式(2)を使って、日没時(GPP=0)のNEEと R_{soil} の観測値から、夜間の地上部の植物呼吸量 R_{aa} を推定した。日中の R_{aa} は観測および推定の難しい量であるが、 R_{aa} , R_{soil} が気温のみの関数として、夜間での R_{aa}/R_{soil} 比が日中でも同じと仮定して、日中の R_{soil} の観測値から R_{aa} を推定した。この群落の炭素交換量の年々変化を表に示す。

表1 生態系物質質量 (単位:ton C/ha/year)

Year	NEP	R_{soil}	R_h	R_{ar}	R_{aa}	R_a	R	ΔB_a	NPP	GPP	R_h/R_{soil}	R_{ar}/R_{aa}
2000	3.4	6.5	3.9	2.6	6.5	9.0	12.9	3.1	7.3	16.3	0.60	0.28
2001	4.6	6.5	5.6	0.9	6.5	7.4	12.9	4.6	10.2	17.5	0.86	0.12

他の地域での観測例と比較をしてみると、生態系純生産量 (NEP あるいは NEE) は熱帯域と温帯域で、ほぼ同量である。熱帯二次林での全呼吸量Rと総生産GPPは、熱帯天然林と温帯林の間ほどの値となっている。

表2 異なる森林生態系での炭素収支に関する測定結果の比較 (単位 ton C/ha/year)

森林の形態	観測場所	NEP	R	GPP	文献
熱帯多雨林帯(天然林)	Brazil	1.0	23.4	24.4	Grace et al. ³⁾
熱帯多雨林帯(天然林)	Brazil	5.9	24.5	30.4	Malhi et al. ⁴⁾
熱帯多雨林帯(二次林)	Bukit Soeharto	3.4	12.9	16.3	2000年、本研究
熱帯多雨林帯(二次林)	Bukit Soeharto	4.6	12.9	17.5	2001年、本研究
冷温帯広葉樹林	飛騨高山	1.8	6.2	8.0	Yamamoto et al. ⁵⁾
冷温帯広葉樹林	USA	3.7	7.4	11.1	Wofsy et al. ⁶⁾
温帯広葉樹林	Italy	4.7	5.4	10.1	Valentini et al. ⁷⁾
北方林	Canada	1.3	8.9	10.2	Black et al. ⁸⁾

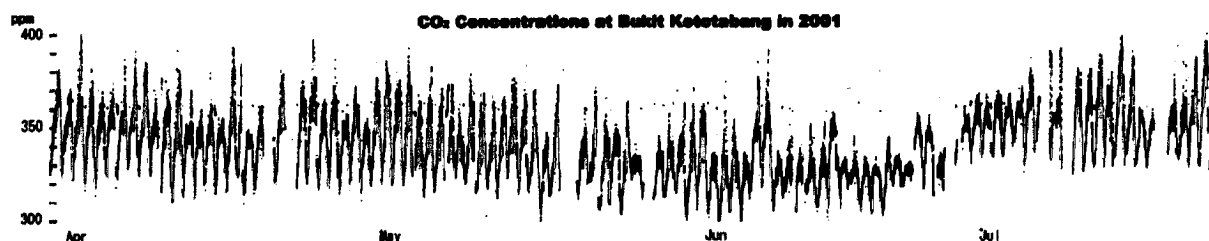


図13 CO2濃度の経時変化

(6) 地球大気監視局 (GAW) におけるCO₂測定

標準ガスによる校正頻度は1日に4回(午前2回、午後2回)とした。初期には校正ガスは手で分析系に導入したが、2002年2月より校正は自動化して、夜間の校正も可能としたが、標準ガスの供給が間に合わず、頻度は1日4回、6時間間隔である。分析計の出力を30秒毎に手のひら電腦(東芝リブレット)に取り込んでいる。スパイク状のノイズはソフト的に除去して10分平均をもとめ、次に1時間平均値を計算している。2001年4月からの測定で7月までの結果を

図 13 に示す。日平均値からみると、4月-5月の 350ppm から6月の 330ppm と減少し、7月には 360ppm と増加している。この年内変動は局所的なものか、大規模な気候パターンの影響をうけたものかを明らかにするためには、今後、広域の気象場の解析が必要となる。9月から 2002 年1月まではデータ収録系に障害が発生したが、2月以降は順調にデータを取得している。

(7) 土壌有機物の質的経時変化

① 試料と方法

ジャンビ州パシルマヤンの長期観測点の土地被覆とその履歴を表 3 に、同地域で典型的な土地利用変化における各観測地点の位置付けを図 14 に整理した(サブ課題(1), (3)参照)。L1 は調査開始当初は択伐林だったが(図 14 上), 1997 年 8 月に樹木の皆伐が開始, 1998 年 3 月に焼却が実施され, 2001 年現在では 1997 年当時の OP の土地被覆に相当する(図 14 下)。1997 年には苗木が植栽されたものの裸地面が大部分を占めていた OP は, 2001 年現在では樹木が 3-4 m に成長していた。以上を整理すると, 2001 年現在の調査点は, P1 : 原生林, L2 : 択伐後放置林, L1 : 植林直後, OP : 若齢植林地, RB : 成熟ゴム林と整理される。

表 3 試験地一覧

地点	カテゴリー	経緯
P1	一次林/保護林	原植生
L1	二次林/植林	択伐→皆伐→放置→焼却(98年)→植林
L2	二次林/放置林	択伐→放置
OP	二次林/植林	択伐→皆伐→放置→焼却(96年)→植林
RB	二次林/植林	択伐→皆伐→放置→焼却(95年)→植林

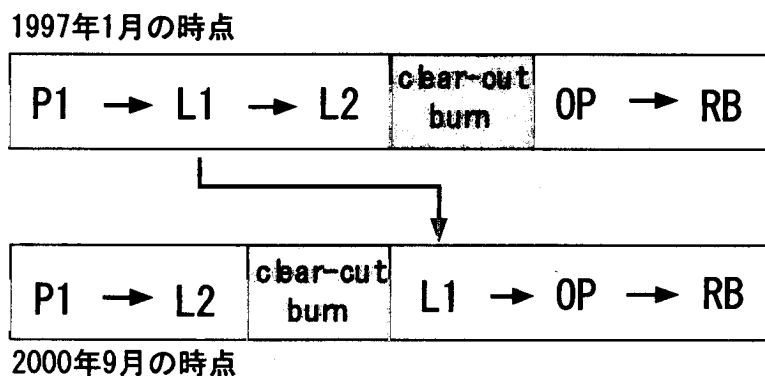


図 14 パシルマヤン試験地の土地被覆の変化

L1 の焼却以降の 1999 年 10 月, 2000 年 3 月, 6 月, 9 月に, 表 3 の各地点で 0-5, 5-10, 10-15cm の深さ別に土壌を採取し, 安定同位体比を測定した。また, パシルマヤン地域で得た知見が, 他の地域にあてはまるかを検討する目的で, 2001 年 9 月にジャンビ州内の天然林, 択伐林, ゴム林, 油ヤシ林, キャッサバ畑, 草地を含む合計 27 地点(サブ課題(1), (3)参照)で表層土壌試料を採取し, 安定同位体比を測定した。

土壌試料は, 風乾, 脱灰, 粉碎の後に元素分析計に注入し, 有機態の炭素と窒素をそれぞれ C

O₂とN₂に変換した。元素分析計からの流出成分を質量分析計に導入し、安定同位体比を測定した。安定同位体比は、対照試料の比からの千分偏差であるδ（デルタ）値として表した： $\delta\text{‰} = (R_{\text{未知試料}}/R_{\text{対照試料}} - 1) \times 1000$ 。Rは炭素では¹³C/¹²C、窒素では¹⁵N/¹⁴Nである。δ¹³C測定ではv-PDBを基準に値付けした高純度CO₂を、δ¹⁵Nでは大気中のN₂を基準として値付けした高純度N₂をワーキングスタンダードとした。測定値の再現性は±0.2‰以内であった。

②結果と考察

ア パシルマヤン調査地点

(ア) 分解に伴う土壤有機物の質的变化

光合成産物の分解で生成するδ¹³Cの低いCO₂が植生に再固定されるため、深い層ほど土壤有機物のδ¹³Cが高くなる傾向が認められた（図15）。δ¹³CはRBで最も高く、1999年10月の例を除き深さ別の差は小さかった。RBでδ¹³Cが高かったのは、林床にC₄植物のアランーアラン（-14‰）が生えていたためである。δ¹⁵Nについては地点間の差は明瞭でなかったが、どの

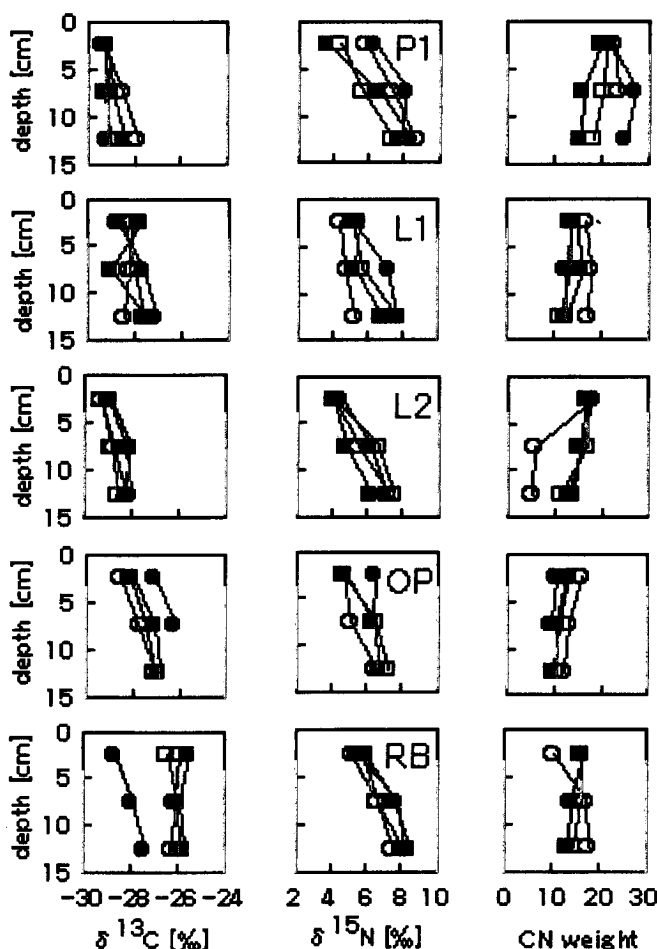


図15 パシルマヤン調査地点における土壤有機物の窒素安定同位体比の鉛直変化

● : 1999年10月, ○ : 2000年3月, ■ : 2000年6月, □ : 2000年9月

地点でも深さに伴い $\delta^{15}\text{N}$ が高くなる傾向が認められた。この傾向は、P1で1mの深さまで作成した $\delta^{15}\text{N}$ の鉛直変化と一致し、有機態窒素の分解、植物や土壌微生物による取り込み、硝化-脱窒における同位体効果により ^{14}N が選択的に土壌から失われることを反映したものと考えられた。

L1に着目した場合、97年8月伐採開始と98年3月の焼却に

より土壌有機物の $\delta^{13}\text{C}$ が低下したことが判る (図16)。最も変化が著しかったのはCN比であった。2000年3月には $\delta^{15}\text{N}$ が大きく低下していたが、2000年9月の鉛直変化は焼却前の鉛直変化に類似した。このことは、伐採-焼却により土壌に加わった有機物が半年後に消失したことを示唆している。

パシルマヤン試験地で採取した土壌とリターのCN比と $\delta^{15}\text{N}$ の関係を図17に示した。植物が生産した新鮮な有機物 ($\delta^{15}\text{N}$: -3~+4‰) が落葉落枝として土壌面に落下してリター ($\delta^{15}\text{N}$: 0~+4‰) となり、さらに表層土壌に混入し深い層に移動する過程において、CN比が低下し $\delta^{15}\text{N}$ が上昇する傾向が認められた。 $\delta^{15}\text{N}$ の上昇傾向はCN比が20を下回ると特に顕著となることが判った。

以上の関係に基づき、土壌有機物分解のダイナミクスを包括的に示す指標としては $\delta^{15}\text{N}$ の方が $\delta^{13}\text{C}$ よりも有効と判断した。

(1) 易分解性有機物の量的指標としての $\delta^{15}\text{N}$

土壌中の易分解性有機物 (EDOM) の量的指標としての $\delta^{15}\text{N}$ の有効性を、従来から有機物分解の指標として用いられているCN比と比較することで検討した。まず

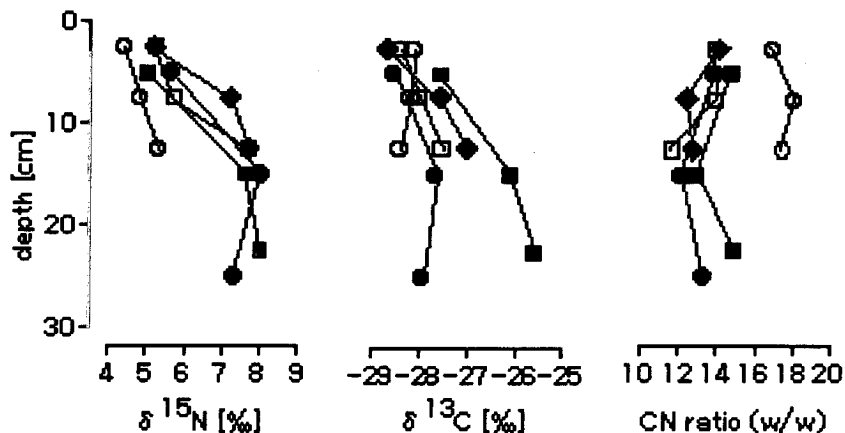


図16 土壌プロファイル：L1の経時変化

■：1997年9月，●：1998年10月，◆：1999年10月，
○：2000年3月，□：2000年9月

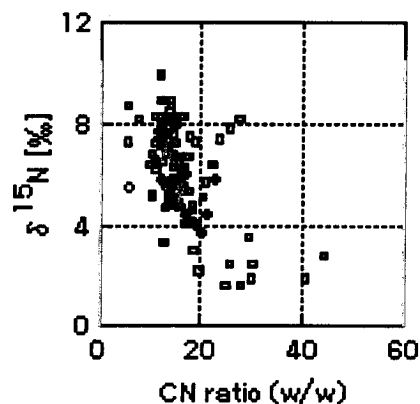


図17 パシルマヤン地域のリターと土壌有機物の窒素安定同位体比とCN質量比

○：土壌有機物 (5-10cm)，●：土壌有機物 (0-5cm)，□：リター

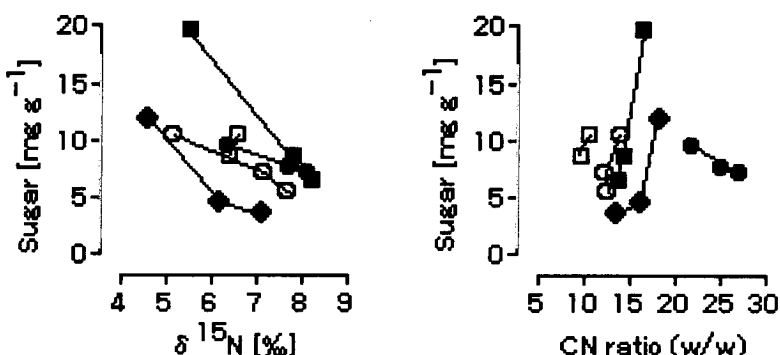


図18 土壌の糖含有量と $\delta^{15}\text{N}$ および CN 質量比との関係

●：P1，○：L1，◆：L1，□：OP，■：RB

EDOMの存在量に関係の深い有機物画分として森林総合研究所で測定した全糖類濃度(サブ課題(3)参照)との関係を検討したところ、糖濃度の低下に応じて $\delta^{15}\text{N}$ は直線的に高くなり、一方C/N比は急激に低下した(図18)。測定の精度を考えると、 $\delta^{15}\text{N}$ の方がC/N比よりも分解能に優れていると結論することができる。

次に、土壌呼吸速度との対応を検討した。図19は深さに伴い $\delta^{15}\text{N}$ が上昇する度合いを、0-5cm層の土壌と10-15cm層の土壌の $\delta^{15}\text{N}$ の差($\Delta\delta^{15}\text{N}$)として、0-15cm層の土壌呼吸速度との関係を示している。両者には良好な直線関係が認められた。これにより、土壌中の従属栄養微生物が選択的に利用すると考えられるEDOMの量的指標として $\delta^{15}\text{N}$ が有効であることが支持された。

$\Delta\delta^{15}\text{N}$ と呼吸速度の回帰式からパシルマヤン地区の各地点の土壌呼吸速度を求め、土壌面からの CO_2 放出フラックスとの対応を調べた(図20)。L2を除いた調査地点に関しては、 CO_2 放出フラックスの約6割が0-15cmの土壌呼吸に由来すると考えられた。L2について割合が小さかったのは、リターの量が特に多かったからと考えられた。L2地点を除いた地点については、 CO_2 放出フラックスと土壌の最表層土壌(0-5cm)の $\delta^{15}\text{N}$ には明瞭ではなかったが負の相関関係が認められた(図21)。回帰式の決定係数から、 CO_2 放出フラックスの変動の65%が最表層の土壌有機物の $\delta^{15}\text{N}$ の違いにより説明された。

イ 広域調査地点

広域調査で採取された土壌のC/N比と $\delta^{15}\text{N}$ の関係を図22に示した。C/N比は11-18の範囲で、 $\delta^{15}\text{N}$ は2.5-7.3‰の範囲で変動し、プロットの分布はパシルマヤン地区の最表層土壌(0-5cm)と重なった。このことは、広域調査を実施した地域とパシルマヤン地区とで、土壌のEDOM含有量に大差がないことを間接的に示唆している。一方、 CO_2 放出フラックスと土壌有機物の $\delta^{15}\text{N}$ の間には相関関係が認められなかった(図23)。広域調査地点の CO_2

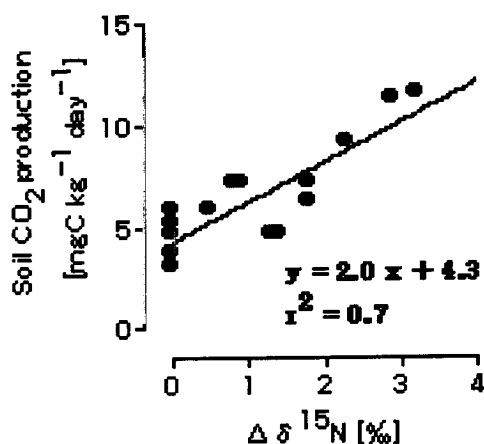


図19 土壌の $\Delta\delta^{15}\text{N}$ と土壌呼吸速度の関係

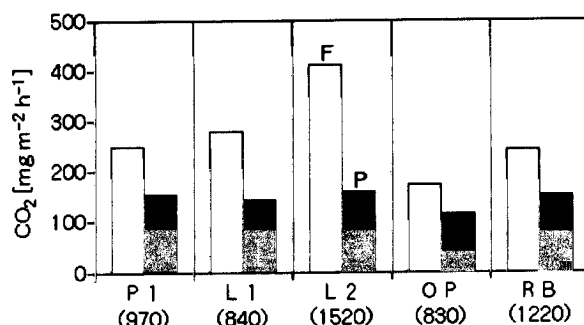


図20 $\Delta\delta^{15}\text{N}$ から推定した土壌呼吸による CO_2 生成速度(P)と土壌面からの CO_2 放出フラックス(F)との関係(カッコ内はリター量： g m^{-2})

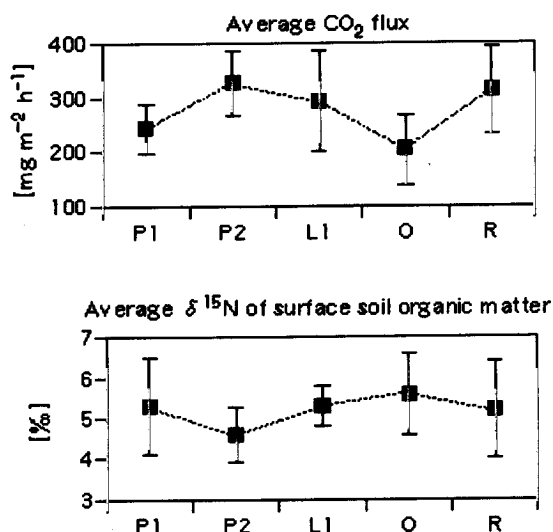


図21 CO_2 放出フラックスと土壌有機物の $\delta^{15}\text{N}$

放出フラックスは $300\sim 800 \text{ mg m}^{-2} \text{ hr}^{-1}$ の範囲にあり、パシルマヤン地区 ($400 \text{ mg m}^{-2} \text{ hr}^{-1}$ 以下; 図 21) と比べて大きかった。これらのことから、パシルマヤン地区を除いた地点では、土壌 CO_2 フラックスに対する土壌有機物の無機化過程の寄与が小さいことが予想される。広域調査地点のリター集積量がパシルマヤン地区よりも少なかった (サブ課題 (3) 参照) のは、広域調査地点ではリターの分解速度が大きいためと考えられ、土壌有機物の $\delta^{15}\text{N}$ から得られた知見はこれと矛盾しない。

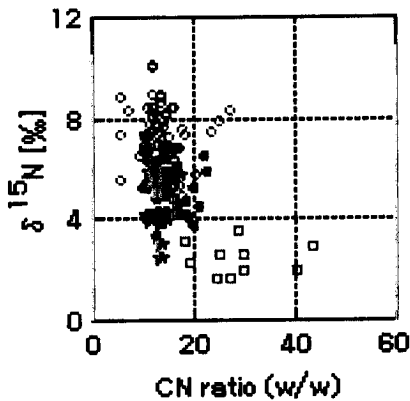


図 22 $\delta^{15}\text{N}$ と CN 重量比

★ 広域調査地点土壌, □ パシルマヤン
リター, ● パシルマヤン土壌 (<5cm),
○ パシルマヤン土壌 (>5cm)

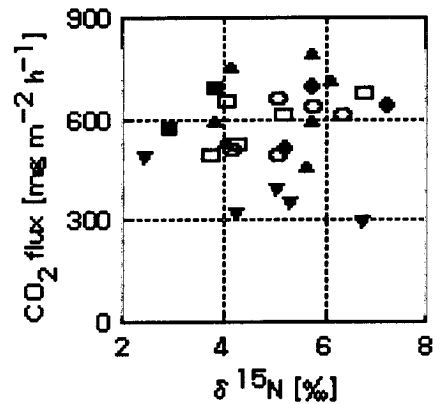


図 23 $\delta^{15}\text{N}$ と土壌 CO_2 フラックス

■ 一次林, □ 択伐林, ▲ ゴム林, ▼ 油ヤシ
◆ シナモン畑, ○ 草地 (アラン-アラン)

5. 本研究により得られた成果

インドネシアの東カリマンタン島で、二次林の成長段階における二酸化炭素収支の観測を行った。現地では渦相関法により群落上の二酸化炭素吸収量 (生態系純生産量) を求めるとともに、チャンバー法により土壌呼吸量の測定、また樹木調査によりバイオマス量を測定した。生態系純生産量、土壌呼吸量、バイオマス量の観測値から、群落の炭素循環の要素である光合成量、植物呼吸量、非植物呼吸量、一次の純生産量 (NPP) の年積算値も概算し、このサイトの炭素循環構造を調べた。生態系純生産量からこのサイトは大きな炭素の吸収源 (シンク) を示し、年々増加していることが明らかになった。この増加傾向はバイオマスの増加傾向とよく対応していた。

東南アジアにおける地球大気監視 (GAW) 測定局であるインドネシア共和国スマトラ島のブキティンギ市郊外のブキット・コトタバんで、二酸化炭素濃度を測定した。これまでの解析では、濃度の季節変化が捉えられた。これは、今後、データの空白域である東南アジアの貴重な原単位データになることが期待される。

土壌有機物の $\delta^{15}\text{N}$ は、土壌呼吸速度の規定要因である易分解性土壌有機物の量的指標であり、土壌 CO_2 放出量の定点観測結果を広域に適用する際に必要となる土壌区分のための指標として有効なことが判った。広域調査の結果は、調査地域における土壌 CO_2 放出量に占める土壌呼吸の割合は小さく、リター層での有機物分解の割合が大きいと推定された。これらのことは、土壌有機

物の $\delta^{15}\text{N}$ から推定した土壌呼吸量と、リターの分解量を組み合わせることにより、広域からの CO_2 の放出量が推定可能であることを示唆する。

6. 引用文献

- 1) 藤間 剛, 1999: ボルネオ島東部の異常乾燥と森林火災, *Tropics*, (9), 55-72.
- 2) Toma, T. et al., 2000: Dynamics of burned lowland Dipterocarp forest stands in Bukit Soeharto, East Kalimantan: Rainforest Ecosystems of East Kalimantan, *Ecological Studies*. 140, Springer-Verlag, 107-119.
- 3) Grace, J. et al., 1995: Carbon dioxide uptake by an undisturbed tropical rain forest in Southwest Amazonia, 1992 to 1993. *Science*, 270, 778-780.
- 4) Malhi, Y. et al., 1998: Carbon dioxide transfer over a Central Amazonian rain forest, *J. Geophysical Research* 103, D24, 31,593-31, 612.
- 5) Yamamoto, S. et al., 1999: Seasonal and inter-annual variation of CO_2 flux between a temperate forest and the atmosphere in Japan, *Tellus* 51B, 402-413.
- 7) Valentini, R., De Angelis, P., Matteucci, G., Monaco, R., Dore, S. and Mugnozza, G.E.S. 1996: Seasonal net carbon dioxide exchange of a beech forest with the atmosphere, *Global Change Biology*, 2, 199-207.
- 8) Black, T. A., Hartog, G. D., Neumann, H. H., Blanken, P. D., Yang, P. C., Russell, C., Nezcic, Z., Chen, S. G., Staebler, R. and Novak, M.D. 1996: Annual cycle of water vapor and carbon dioxide fluxes in and above a boreal aspen forest, *Global Change Biology*, 2, 219-229.

[国際共同研究等の状況]

IGBP のコアプロジェクトである IGAC の一環として実施している。インドネシア科学院の承認を得て観測を実施している。観測にあたってムラワルマン大学熱帯降雨林研究センターおよびインドネシア科学院と共同研究体制をとっている。地球大気監視局 GAW での観測はバダグン気象地球物理局と共同研究体制をとっている。

[研究成果の発表状況]

(1) 誌上発表 (学術雑誌)

- ① A. Ishida, T. Toma, Marjenah : *Tree Physiology* 19: 467-473 (1999)
“imitation of leaf carbon gain by stomatal and photochemical processes in the top of *Macaranga conifera*, a tropical pioneer tree”
- ② A. Ishida, T. Toma, S. Mori, and Marjenah : *Biotropica* 32: 351-358 (2000)
“Effects of foliar nitrogen and a short-term drought on the carbon economy of *Shorea smithiana* Sym. Seedlings”
- ③ S. Ueda, S. Ishizuka, H. Tsuruta, and D. Murdiyarso : *Proceedings of International Workshop on “The Impacts of Land-use/cover Change on Greenhouse Gas Emissions in Tropical Asia”* (D. Murdiyarso and H. Tsuruta, eds.), 25-30 (2000)

“Nitrogen isotopic characterization of soil organics: Possible implication for variation in CO₂ emission under different land use”

④N. Boontanon, S. Ueda, P. Kanatharana, and E. Wada : *Naturwissenschaften*, 87: 188-192 (2000)

“Intermolecular stable isotope ratios of N₂O in the tropical swamp forest in Thailand”

⑤ S. Ueda., C.-S. U. Go, T. Yoshioka, N. Yoshida, E. Wada., T. Miyajima, A. Sugimoto, N. Boontanon, P. Vijarnsorn. and S. Booprakub : *Biogeochemistry*, 49: 191-215 (2000)

“Dynamics of dissolved O₂, CO₂, CH₄, and N₂O in a tropical swamp in southern Thailand”

⑥石田厚、藤間剛 : *静電気学会誌* 25: 192-201(2001)

「熱帯雨林の減少と森林再生へのチャレンジ」

⑦石田厚 : *熱帯林業* 第 53 号 PP.12-21(2002)

「熱帯樹種の強光と高温に対する防御機構」

(2) 口頭発表

① 蒲生 稔, 林正康, 前田高尚, 藤間剛, 岩渕晴行, Mansur Fatawi, Deddy Hadriyanto: 日本気象学会春季大会(1999)

「熱帯多雨林の二次林における二酸化炭素収支観測」

② S. Ueda, S. Ishizuka, H. Tsuruta, H., and D. Murdiyarso : International Workshop on “The Impacts of Land-use/cover Change on Greenhouse Gas Emissions in Tropical Asia”, Bogor, Indonesia(1999)

“Nitrogen isotopic characterization of soil organics: Possible implication for variation in CO₂ emission under different land use”

③ 蒲生 稔, 林正康, 前田高尚, 藤間剛, 岩渕晴行, Mansur Fatawi, Deddy Hadriyanto: 日本気象学会秋季大会(2000)

「熱帯多雨林の二次林における二酸化炭素収支観測 (その2)」

④ Hayashi, M. Gamo, S. Songtam, and S. Panuthai : Proc. International Workshop for Advanced flux network and flux evaluation, Sapporo(2000)

“CO₂ balance at tropical seasonal forest, MaeKlong Watershed Research Station, Thailand”

⑤ 蒲生 稔, 林正康, 前田高尚, 藤間剛, 岩渕晴行, Mansur Fatawi, Deddy Hadriyanto: 日本気象学会春季大会(2001)

「熱帯多雨林の二次林における二酸化炭素収支観測 (その3)」

⑥ M. Hayashi, M. Gamo, S. Songtam, and S. Panuthai: Proc. 6th International CO₂ Conference, Sendai, (2001)

“CO₂ concentration trend at tropical seasonal forest, MaeKlong watershed Research Station, Thailand”

⑦ 蒲生 稔, 前田高尚, 林正康, 藤間剛, Deddy Hadriyanto, Mansur Fatawi, Warsudi: 日本気象学会春季大会(2002)

「熱帯多雨林の二次林における二酸化炭素収支観測 (その4)」

⑧ M. Gamo, M. Hayashi, T. Toma, Deddy Hadriyanto, Mansur Fatawi, Warsudi, T. Sawamoto, and H. Tsuruta : Workshop on Land-use Change and Greenhouse Gases, Soil C and Nutrient Cycling in the Tropics, Tsukuba. (2002)

“Carbon dioxide balance observation in the secondary forest in the tropical rain forest climate”

⑨M. Hayashi : Workshop on Land-use Change and Greenhouse Gases, Soil C and Nutrient Cycling in the Tropics, Tsukuba. (2002)

“CO₂ measurement at GAW station, Bukit Kototabang, Sumatra, Indonesia”

⑩S. Ueda, S. Ishizuka, C. S Go, H. Tsuruta, iswandi, and D. Murdiarso : Workshop on Land-use Change and Greenhouse Gases, Soil C and Nutrient Cycling in the Tropics, Tsukuba. (2002)

“ $\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{15}\text{N}$ characterization of soil organic matters: Possible parameters for nutrient and gas dynamics”

⑪T. Toma, A. Ishida, P. Matius, and Hastaniah : Workshop on Land-use Change and Greenhouse Gases, Soil C and Nutrient Cycling in the Tropics, Tsukuba. (2002)

“Changes in aboveground biomass of a lowland dipterocarp forest following the 1982-83 fires in East Kalimantan, Indonesia”

(3) 出願特許

なし

(4) 受賞等

なし

(5) 一般への公表・報道等

1) “Annual report on meteorological and biological influence on the carbon dioxide concentration and fluxes in the tropical secondary forest” 蒲生稔、藤間剛、Deddy Hadriyanto, Mansur Fatawi, LIPI, Indonesia (2001)

2) <http://staff.aist.go.jp/old-gamo/>

(6) その他成果の普及、政策的な寄与・貢献について

なし