

渦相関法による森林生態系純生産量の測定

蒲 生 稔

1. はじめに

森林生態系純生産量 NEP は光合成により植物が吸収する総生産 GPP から植物の呼吸量 R_a と土壌中の有機物分解により生ずる炭素 R_h を差し引いた量である。NEP は群落外からみたときの正味の炭素量の増減を示す。それ故、NEP が正ならば、その群落は炭素を吸収（シンク）し、負ならば炭素を排出（ソース）している。このため、NEP は地球温暖化に直接関係する量である。

1990 年代から渦相関法（eddy correlation method）による炭素収支観測が世界各地の森林で行われ始めて、現在も観測サイトが増加している。大気の乱れは様々な大きさの渦(eddy)の寄り集まったものとして表現できる。鉛直方向の風の乱れと物質変動との相関 correlation は、その測定高度面における鉛直方向の物質の移動量(輸送量, フラックス)に等しい。京都議定書により、温室効果ガスの削減に、森林生態系による吸収も考慮されることになり、森林の持つ炭素固定能力の定量的評価が問われている。森林の炭素固定量は、一般には、後述するように、植生現存量調査や光合成測定によって推定されている。ここでは、炭素固定能力を非破壊的に、長期継続観測できる渦相関法の原理、解析方法について記し、著者が携わっている熱帯森林での観測例について紹介したい。

2. 渦相関法の原理

一般に植物群落内の空気中の温度や CO_2 濃度は、蒸散や光合成と呼吸によって、外部大気より昼間は低く、夜間に高くなる。これによって、群落内外の空気に温度や濃度の傾斜ができる。その結果生ずる群落内外への空気の移動量と

Minoru Gamo : Measurements of Net Ecosystem Production by Eddy Correlation Method

(独)産業技術総合研究所

CO₂濃度変化から炭素固定量を推定する方法である。空気の動きを詳しく説明すると以下ようになる。風の鉛直成分 w を、平均 $\overline{w}$ と乱れ w' に分解すると $w = \overline{w} + w'$ となる(ここで、上線付き記号は時間平均を示す)。また、二酸化炭素CO₂も平均と変動成分に分けると $CO_2 = \overline{CO_2} + CO_2'$ となる。

物理量や物質に鉛直勾配のあるとき物理量や物質の鉛直輸送が生じるが、変動成分の相関、ここでは $\overline{w'CO_2'}$ 求めれば、CO₂の単位面積、単位間当りの鉛直輸送量が求められる。渦相関法による観測は応答の速い風速計(超音波風速計)と赤外線二酸化炭素分析計が開発されて可能になった。

3. 生態系純生産量 NEP, 炭素輸送量 F_c, 生態系純交換量 NEE の関係

森林生態系における炭素循環は図1に示すように、 $GPP - R_{ec} = NEP$ (第1式)で表現される。ここで、生態系呼吸量 R_{ec} は、植物呼吸量 R_a と非植物呼吸量 R_h の和である。一次の純生産量は $NPP = GPP - R_a$ であるから、第1式は、 $NPP - R_h = NEP$ (第2式)と表現できる。NPP は $NPP = \Delta B + L + C$ (第3式)とも表される。ここで ΔB はバイオマス増加量、 L はリターフォール(落葉落枝や枯死、根の分解を含む)、 C は被食で失われた量である。渦相関法で求められる炭素輸送量 $\overline{w'CO_2'}$ を F_c (上向きを正とする)とすると、群落系内に入ってきた炭素 ($-F_c + R_h$) は一次の純生産量 NPP として植物体に取り込まれるか、群落大気中に滞留する(図2)。炭素貯留量の時間増加率を S_c とすると、 $-F_c +$

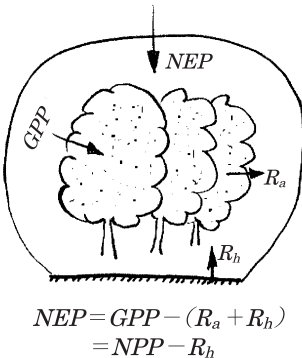


図1 群落の炭素収支の概念図
NEP: 生態系純生産量, GPP: 群落総生産, R_a : 植物呼吸量, R_h : 非植物呼吸量, NPP: 一次の純生産量

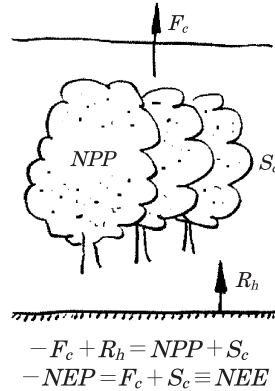


図2 生態系純交換量 NEE の定義
 F_c : 炭素輸送量 (CO₂フラックス),
 S_c : 炭素貯留量の時間増加率

$R^h = NPP + S_c$ となる。この式を書き換えると $F_c + S_c = -NPP + R^h$ (第4式) となる。 S_c は CO_2 の鉛直分布の時間変化から求めることができる。観測で求まる $F_c + S_c$ を生態系純交換量 NEE という。第2式と第3式から $F_c + S_c = -NEP$ (第5式) が求まる。 NEE と NEP の違いを考えてみる。 NEP は系が閉じているばあいの概念である。一方、 NEE は観測で求まる値で、系が閉じていなくても(横方向に CO_2 が逃げ出しても)、かまわない。水平に一樣な理想的な場でのみ、第5式が成立する。 S_c は一般に、夜間貯留増加したもののが、日出時に上方へ開放される日周期をしているから、一日以上の期間で積算するとゼロになる。よって、系が閉じている場合には $F_c = -NEP$ (第6式) となり、渦相関法により観測される炭素輸送量から生態系純生産量が求まることになる。 F_c 、 S_c 、 NEE の日変化のモデル図を図3a-cに示す。日出直後の大きな F_c は夜間林冠内に貯留した CO_2 が日射による対流により上方へ拡散されることを示す。そのとき、 S_c は急激に減少する。光合成のない夜間は $NEE = R_{ec}$ が成立する。中緯度・高緯度地方など温度の年間変動が大きいところでは気温 T と R_{ec} の関係式 $R_{ec}(T)$ が求まる。この関係式が日中にも成立すると考える

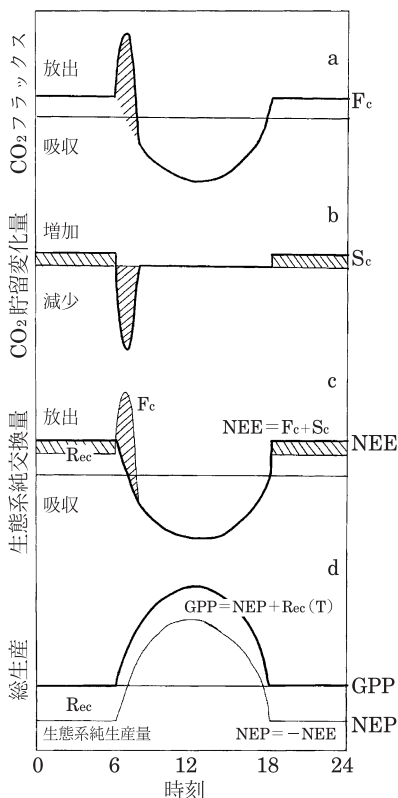


図3 炭素収支の日変化モデル図

3-a: 炭素輸送量 F_c の日変化

日の出後の大きな炭素フラックス(斜線部分)は朝の日射による対流で林冠上方への炭酸ガスの拡散を示す。

3-b: 群落内の炭素貯留量の時間増加率 S_c の日変化

日積算値はゼロ

3-c: 生態系純交換量 NEE の日変化

$R_{ec} = R_a + R_h (= NEE)$ は夜間の生態系呼吸量

3-d: 群落総生産 GPP と生態系純生産量 NEP の日変化

$NEP = -NEE$ (図3-c) の場合、各記号は図1参照

と、 $GPP = -NEE + R_{ec}(T)$ (第7式) から GPP を算定できる (図 3-d)。図では、 R_{ec} に日変化がないケースを示した。 R_{ec} は、だいたい、気温が 10 度上昇すれば、2-3 倍大きくなる。熱帯多雨林帯では、夜間の気温の年間の変動幅が 5 度にも満たないから、 R_{ec} と気温の間には有意な関係を見つけるのは困難である。さらに、土壤の乾燥度が R_a あるいは R_h を律速する熱帯季節林では、この方法で GPP まで求めることは難しいであろう。熱帯で GPP をどう求めるかは今後研究課題である。

以上の原理に基づいて、NEE を測定するわけであるが、実際には各種の補正が必要である。それらは大別して、測定機器の性質に起因する補正、空気密度やエネルギー収支など物理的原理からの補正、測定地の地形などによる偏った空気の流れ (移流など) に対する補正、とくに森林生態系では傾斜地であることが多いので、この補正は重要である。さらに、365 日 24 時間すべての計測器が作動することは希であるので、欠測値の補正などがある。これらの補正することによりいかに正確な値を求めるかが、研究者の腕の見せ所であるが、専門的になりすぎるので、ここでは省略する。詳しくは文字 (2003)、Saigusa 他 (2002) などを参照されたし。

4. 熱帯森林における渦相関法測定の実際

現在東アジアの熱帯では以下の 6 箇所で渦相関法による二酸化炭素収支観測が継続的に行われている。開始時期が古い順に以下に示すと、1) メクロン (タイ)、2) ブキット・スハルト (インドネシア)、3) サケラート (タイ)、4) ランビルヒルズ (マレーシア) (斉藤他, 2002)、5) パランカラヤ (インドネシア) (平野他, 2002)、6) パソ (マレーシア) (谷と小杉, 2003) である。(一部を除いて、AsiaFlux ネットワークのホームページにも紹介されている。) このうち、この文の筆者が関係している 1) ~ 3) のサイトについて、観測の現状を紹介し、問題点をみでみる。

1) 熱帯多雨林帯の成長過程にある二次林

インドネシアの東カリマンタン、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 (JICA プロジェクトにより設立) を利用して、二次林の成長過程における二酸化炭素収支を測定している。このサイトでは 1983 年のエルニーニョで火災消失してから成長した高さ 15-20m の *Macaranga* 属が卓越する二次林が 1998 年のエルニーニョによる異常乾燥で再び消失した (森他, 1998)。消失後、材質の脆い *Macaranga* 属

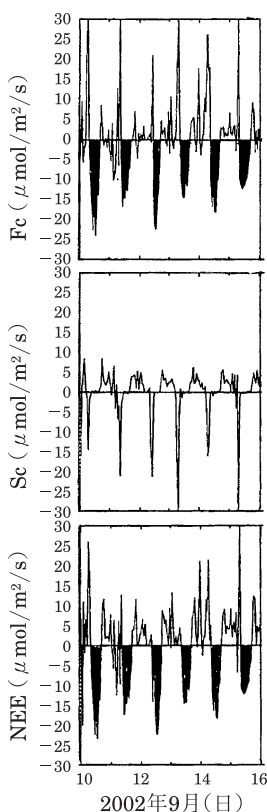


図 4 若齢 2 次林の F_c , S_c , NEE の日変化

補正係数 u_* との関係のみてみた。すると u_* が大きいほど (風速が強いほどに相当) NEE は直線的に大きくなっている (図 7)。これは、風が強いと、林間に貯留した CO_2 が鉛直方向に掻き混ぜられて、測定高度まで拡散されるが、風の弱いときは、林間の CO_2 は水平方向に流れ出している可能性を示している。雨季と乾季にわけて、弱風時の夜間にも、 NEE は、この u_* の大きいときの値をとるものとする、4ton C/ha/yr ほどまでに減少する。これなどは今後の検討課題である。

3) タイの混合落葉林

混合落葉林での観測はタイ中西部のメクロン流域研究ステーション内の 45

はすべて倒木となったが、1年半後から *Macaranga* 属の稚樹が卓越し始め、消失後 4 年にして、高度 10m 近くまで復活してきている。この塔の周辺では、1988 年から樹木調査が継続的にこなわれている (Toma 他, 2000)。

このサイトの F_c , S_c , NEE の日変化の例を図 4 に示す。図 3 のモデル図に近い傾向を示す。2001 年度は、雨の多い、通常の熱帯多雨林気候で、年内変化は小さく、 NEE の年積算値は 7ton C/ha/yr であった (図 5)。一方、2002 年はエルニーニョによる乾燥期が 6 月から 10 月まで、断続的にあり、年積算値は 5.3 トン ton C/ha/yr であった。

2) タイの常緑乾燥林

タイの熱帯季節林は混合落葉林、乾燥フタバガキ林、常緑乾燥林に分類される。このうち、常緑乾燥林での観測をタイ国中部のサケラート環境研究センターの 47m の塔において行っている。 NEE の季節変化 (図 6) をみると、常緑とはいいながら、やはり、乾季雨季の影響を受けている。年間の NEE は 10ton C/ha/yr と大きい値になった。サケラートでは樹木調査が 1985 年より行われており (Kanzaki 他, 1995)、ほぼ成熟林であるという。成熟林にしては大きい NEE になったことから、夜間の移流を疑い、 NEE と移流に関わる

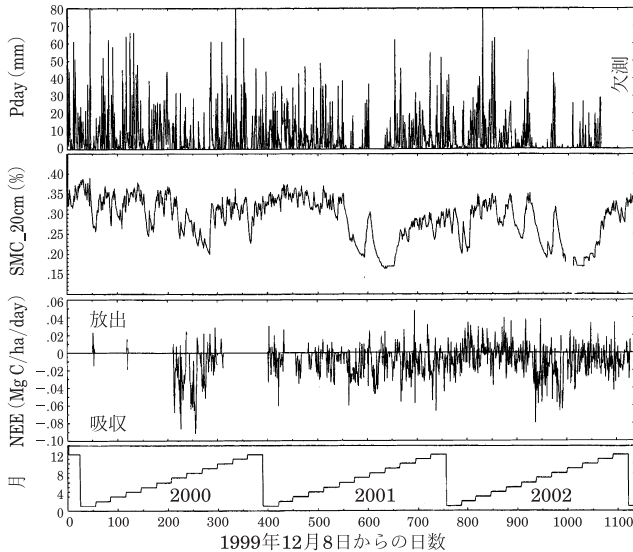


図 5 若齢 2 次林の日降水量 (P_{day}), 深さ 20 cm の土壤水分量 ($SMC_{20\text{cm}}$), 及び NEE の日積算値 (蒲生他, 2003)

m 塔 (旧科技庁プロジェクトにより建立) で行っている。乾季雨季の季節パターンが葉面積指数 LAI や NEE に明確に現れている (図 8)。ここでは年間の NEE は 3.7ton C/ha/yr である。ここは、竹が多く、2001 後半に竹が枯死したことで、近くの樹木が倒れてギャップができたため、葉面積指数が小さくなってしまっている。ここは地形も複雑で解析のなかなか困難なサイトである。

5. 渦相関法と他の炭素収支測定手法との関係

渦相関法は現存量調査、光合成調査と並んで、群落の炭素固定量を評価できる方法である。しかし、いずれも一長一短がある。炭素収支の機構をより詳細に理解するには、相互比較や共同観測が望まれる。

1) 植生現存量調査と渦相関法

樹木調査による積み上げ法で求められた結果との相互チェックにより、炭素分配の精度が確かめられる。植生現存量調査では、しばしば地上部のみの現存量 (バイオマス) 増加量が求められる。このとき、渦相関法と組み合わせれば群落における炭素収支の分配の仕方がより明らかになる。各地の森林の幹枝、葉、根、土壌などへの炭素分配率を比較することにより、その森林の特徴が明

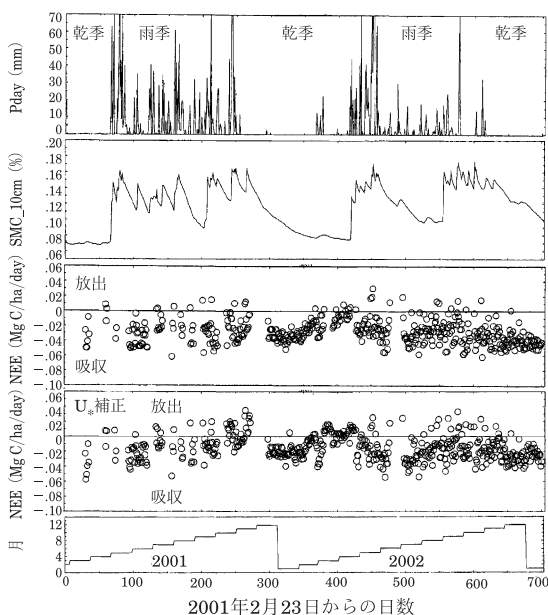


図 6 常緑乾燥林の日降水量 (P_{day}), 深さ 10 cm の土壌水分 ($SMC_{10\text{cm}}$), NEE の日積算値 (上段), 及び u_s 補正後の NEE 日積算値 (蒲生他, 2003)

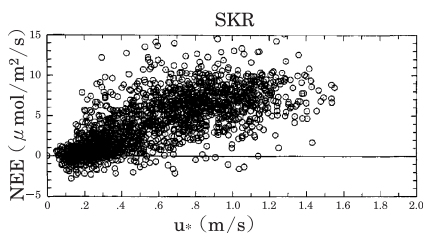


図 7 夜間の NEE ($=R_{\text{ec}}$) の u_s 依存性

らかになる。また、長期間観測により群落構成要素毎の気候変化に対する敏感度あるいは鈍感度が明らかになり、温暖化の進行に対する森林の応答特性が明らかになる可能性が期待される。

2) 個葉による生理生態機能観測と渦相関法

個葉の光合成観測からも、群落の二酸化炭素収支を推定することができる。個葉調査では、対象となるのは、主に日のあたる葉（陽葉）と日陰の陰葉だけである。一方、渦相関では、群落が対象となるから、相互にデータを持ち寄れば、今後、いろいろな研究対象が見つかると思われる。個葉では、日出後早い時期に最大値をとり、光合成速度の日中低下（光合成の強光阻害）が知られているが (Ishida 他, 1999), 渦相関では NEE は、南中時刻ころピークがくる。

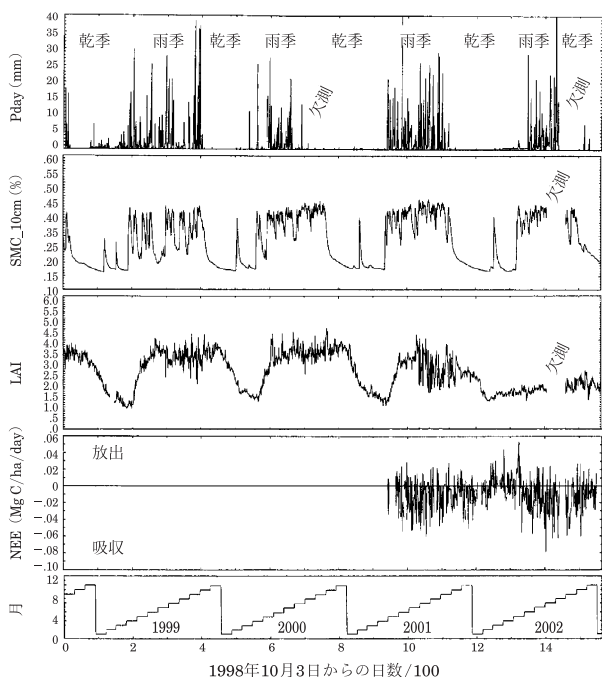


図 8 混合落葉林の日降水量 (P_{day}), 深さ 10 cm の土壌水分量 (SMC_10 cm), 葉面積指数 (LAI), 及び NEE の日積算値 (蒲生他, 2003)

なぜであろうか。

3) 土壌呼吸測定と渦相関法

土壌呼吸は非植物呼吸と根呼吸の和で、両者を分離するには工夫がいる。土壌呼吸は土壌温度や土壌水分と関係するが、定量的には不明なことが多く、共同観測がますます重要になってきている。

4) 炭素収支分配の解析例

異なる手法を組み合わせれば、比較的容易な観測から、対象とする群落の炭素循環が推定できる。ブキットスハルトの炭素分配例を図9に示す（詳しくは蒲生のホームページ参照）。3章で示した第2式と第3式から $NPP = NEP + R_h$ $= \Delta B + L + C$ が得られる。被食 C が無視できるとき、リターフォール L の分解が早い熱帯では、1年単位でみれば、 $L = R_h$ (非植物呼吸) が考えられる。そのときは、 $NEP = \Delta B$ (バイオマス増加量) となる。新植林・再植林 CDM (クリー

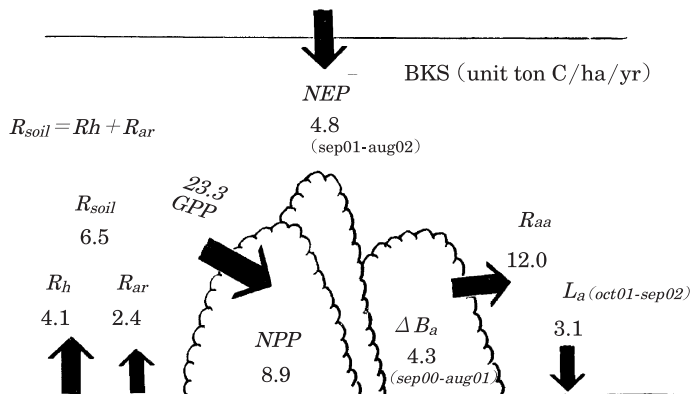


図 9 若齢2次林での炭素循環モデル

観測値は ① NEP (= -NEE), ② ΔB_a (地上部バイオマス増加量), 藤間 (2003) による, ③ L_a (地上部リターフォール), ④ R_{soil} (土壌呼吸), $R_{soil} = R_h$ (非植物呼吸) + R_{ar} (地下部植物呼吸) である。地下部 (根) と地上部のバイオマスの比は森林形態に拘わらず 0.2 ほどであるので, バイオマス増加量 ΔB , リターフォール L , 植物呼吸 R_a の地下部と地上部の比も以下のように 0.2 と仮定をした。① $\Delta B_t / \Delta B_a = 0.2$, ② $L_t / L_a = 0.2$, ③ $R_{ar} / R_{aa} = 0.2$ 。また, 第3式で被食 C はないと仮定した。(蒲生他, 2003)

ン開発メカニズム) の場合の対照植生ベースラインともなる ΔB が渦相関法で測定できるということになる。図9は, その仮定を支持しているが, ブキットスハルトでのバイオマス調査でも, これを否定しないデータが得られている (森川, 2002)。

6. おわりに

渦相関法は基本的には無人の自動観測で時々刻々の生態系純生産量 NEP が推定できる。しかし, この渦相関法は問題点も多い。特に熱帯では, 完全に確立した手法とはいいがたく, 改良を重ねる必要がある。今後, 地球温暖化を阻止するための根拠になる信頼できるデータを提供できればよいが, 最悪でも, 世界に張りめぐらされた CO_2 フラックスサイトは, 地球温暖化の進行を見守ることになるであろう。

謝辞: 三枝信子さん, 藤間剛さん, 石田厚さんにいろいろ教えて戴きました。

〔文献〕 1) Ishida A. *et al.* (1999) Leaf gas exchange and chlorophyll fluorescence in relation to leaf angle, azimuth, and canopy position in the tropical pioneer tree,

Macaranga conifera. Tree Physiology 19:117-124. 2) Kanzaki M. *et al.* (1995) Mosaic structure and tree growth pattern in a monodominant tropical seasonal evergreen forest in Thailand. Vegetation Science in Forestry, 495-513. 3) Saigusa N. *et al.* (2002) Gross primary production and net ecosystem exchange of a cool-temperate deciduous forest estimated by the eddy covariance method. Agricultural and Forest Meteorology 112: 203-215. 4) 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, 107-119. 5) AsiaFlux ネットワーク <http://www-cger.nies.go.jp/~moni/flux/asia-flux/> 6) 蒲生稔, 前田高尚, 藤間剛, 林正康, 石田厚, Samreong Panuthai, Deddy Hadriyanto (2003) 熱帯林生態系における渦相関法による生態系純交換量 NEE の測定. 日本気象学会 2003 年度春季大会. 7) 蒲生稔 <http://staff.aist.go.jp/old-gamo/> 8) 平野高司他 (2002) インドネシアの熱帯泥炭林における CO₂ フラックスの長期観測. 日本気象学会 2002 年度秋期大会予稿集 P307. 9) 森川靖 (2002) 植林活動による炭素固定と CDM. 環境技術 31: 18-23. 10) 森徳典, 藤間剛, 楨原寛 (1998) 東カリマンタンの異常乾燥大森林火災 熱帯林業 43: 2-13. 11) 文字信貴 (2003) 植物と微気象 大阪公立大学共同出版会. 12) 斉藤琢他 (2002) マレーシア, ボルネオ島, 熱帯雨林における CO₂, H₂O フラックスの長期観測, 日本気象学会 2002 年度春期大会予稿集 P237. 13) 谷誠, 小杉緑子 (2003) Asia Flux Newsletter 2003 年 3 月号 14) 藤間剛 (2003) 私信

熱帯林業関係テキスト

国際緑化推進センター刊行

- 1: 熱帯の造林技術 浅川澄彦著 1999 年改訂 117 p.
- 2: 実践的アグロフォレストリ・システム 内村悦三著 2000 年改訂 116 p.
- 3: 熱帯地域における育苗の実務 山手廣太著 1994 年補訂 130 p.
- 4: 熱帯の土壌—その保全と再生を目的として— 八木久義著 1994 160 p.
- 5: 熱帯の非木材産物 渡辺弘之著 1994 109 p.
- 6: 熱帯の森林病害 小林亨夫著 1994 166 p.
- 7: 熱帯の森林害虫 野淵 輝著 1995 263 p.
- 8: 熱帯樹種の造林特性 1~3 巻 森 徳典ほか編 1996/97 255~300 p.
- 9: マングローブ植林のための基礎知識 馬場繁幸・北村昌三著 1999 139 p.
- 10: 社会林業—理論と実践— 野田直人著 2001 126 p.
- 11: みんなに知ってほしい 地球環境と森林 浅川澄彦・森 徳典著 2002 29 p.
- 12: Handbook for Reafforestation in the Tropics Sumihiko Asakawa 著 (テキスト 1 の英語版) 1998. 119 p.
- 13: Diagnostic Manual for Tree Diseases in the Tropics Takao Kobayashi 著 2001. 178 p. 病徴カラー写真: 426 枚