

E-1 熱帯林の持続的管理の最適化に関する研究
(4) 熱帯域のランドスケープ管理・保全に関する研究

独立行政法人森林総合研究所

海外森林研究領域	海外森林資源保全研究室	松本陽介
植物生態研究領域	樹木生理研究室	石田 厚・上村 章・原山尚徳
北海道支所	植物土壌系研究グループ	丸山 温・北尾光俊・飛田博順
水土保持研究領域	水保全チーム	坪山良夫
立地環境研究領域	土壌資源評価研究室	大貫靖浩
森林植生研究領域	植生管理研究室	奥田史郎
気象環境研究領域	気象研究室	大谷義一・渡辺 力・安田幸生

独立行政法人国際農林水産業研究センター

林業部	野口正二
-----	------

東京大学

アジア生物資源環境研究センター	小島克己・則定真利子・山ノ下卓 八木久義・益守眞也・丹下 健
-----------------	-----------------------------------

京都大学大学院

農学研究科	谷 誠
-------	-----

平成 11-13 年度合計予算額 70,562 千円
(うち、平成 13 年度予算額 22,367 千円)

〔要旨〕本研究は、熱帯林の持続的管理を行うための基礎として4つの分野で構成される。実証的な緑の回廊造成試験を含む「緑の回廊造成のための造林技術開発」および「問題土壌地の造林技術開発」によって緑の回廊造成の造林技術の向上を図り、「熱帯林伐採前後の土壌水貯留と侵食の変化」および「熱帯林の蒸発散量の長期推定」によって熱帯林の水収支および森林伐採の影響を明らかにすることを目的とする。

「緑の回廊造成のための造林技術開発」では初期植栽樹種は、クロロフィルの蛍光反応特性や光合成・蒸散特性による評価・診断を行った。極相林を構成できる熱帯郷土樹種においては、*Shorea platyclados* および *Dipterocarpus oblongifolius* が植栽後の高温・強光耐性が高く有望であること、および、触媒効果が期待できる食餌木樹種では *Ficus* spp.(現地名:ARA)が有望であることを明らかにした。実際の緑の回廊植栽試験においては、バックホーなどの機械を用いることによって元肥を能率よく鋤き込めること、および、*Ficus* spp.(現地名:ARA)が植栽後の成長および生存率が良いことを明らかにした。また、「問題土壌地の造林技術開発」では熱帯アジアの問題土壌である砂質土壌、酸性硫酸塩土壌、泥炭土壌のそれぞれにおいて、植物の成育を制限するストレス要因を見出し適応できる樹種を選抜し造林手法を考案した。「熱帯林伐採前後の土壌水貯留と侵食の変化」では、土壌水貯留量は降水量に対応して季節変動し、土壌深度によっても異なることなどを明らかにし、温帯域の平均的多目的人工ダムより熱帯林のほうが「緑のダム」としての機能が高いことを明らかにした。また、森林伐採による侵食・堆積量は20m幅程度のバッファゾーンでも

斜面上方の伐採地や集材路からの流出土砂を捕捉する効果が高いこと、集材路の侵食量は伐採跡地と比較して非常に多いことを明らかにした。さらに、「熱帯林の蒸発散量の長期推定」によって低地熱帯林における蒸発散量は、降雨量の約 89%の約 1,550mm/年で、アマゾンの熱帯降雨林と同様に純放射エネルギーに強く影響されることを明らかにした。

[キーワード] 半島マレーシア、緑の回廊造成、水文試験、森林伐採、造林樹種特性

1. はじめに

森林の伐採やそれに伴う開発による土地利用形態の変化は急速な森林面積の減少を引き起こしている。近年ではとりわけ熱帯地域での森林面積の減少が顕著になってきており、その結果として残存する天然林の面積は減少し、かつそれぞれが分断化される現象が熱帯の各地で見られる様になっている。一般に熱帯の森林は動植物の種組成が豊富であり多様性に富んでいると言われている。しかしながら、分断化されたそれぞれの森林は面積も小さくなり、たとえば動物にとって個体群を維持するのに面積が充分でなくなることが考えられ、森林の持つ生物の多様性が減少してしまうことが懸念されている。

現状では森林面積の急速な回復が望めないなか、森林の持続的管理の高度化、質の良いエコロジカル・サービスの提供、および生物多様性の減少を回避する方法の一つとして、断片化した森林を緑の回廊（グリーンコリドー）で繋ぎ、主に動物の往来を促進し生活環境の改善を図る方法が提唱されている。しかしながら、このような森林の造成は従来の経済目的とした造林手法とは異なるため、造林技術に関する知見の集積が求められている。

人為等によって荒廃した場合に自然の力による植生の回復が困難な場所として、次の3つの問題土壌が島嶼東南アジアで知られている。それは、砂質土壌、酸性硫酸塩土壌、泥炭土壌で、これらの土壌にできた荒廃地は、環境ストレスが非常に大きく、通常の造林法では緑化することができない。東南アジアには島嶼部を中心に 2,000 万ヘクタールの泥炭湿地が存在しており、最後に残された農業開発対象地として注目を浴びている。しかし、泥炭土壌は作物栽培上の問題の大きい土壌で、排水による地盤の沈下や貧栄養等が原因で持続的に収量を確保することが難しく、放棄される場合が多い。また、最近の大規模な森林火災によって湿地林が消失し、荒廃地となっている場所も多い。泥炭層を分解させずに維持するためには湛水させておくのが良いが、この場合、低酸素による根の傷害が問題となる。また、泥炭湿地の水には腐植物質が多量に含まれており、金属イオンがキレートとして固定され、植物は栄養欠乏に陥ることがある。このような問題土壌における森林回復の技術開発が求められている。

また、熱帯林の伐採などの攪乱が、その地域の土砂流亡や水資源に深刻な影響を及ぼすことが懸念され、森林の持続的管理のため略奪的ではない森林伐採の方法が求められている。このような問題に対処するために、実際に水文観測を実施し、熱帯林の水保全機能を定量的に評価することや森林伐採による水・土砂流出特性の変化およびそのプロセスを明らかにしておく必要がある。半島マレーシアは熱帯林の水文研究が活発に展開されつつある地域の一つであり、択伐による水流出量¹⁾や浮遊土砂流出の変化²⁾や天然二次林を対象とした養分循環¹³⁾など、詳細な観測データが蓄積されている⁹⁾¹⁰⁾。

2. 研究目的

(1) 緑の回廊造成のための造林技術開発

① 緑の回廊造成のための植栽樹種特性の解明

種多様性の高い緑の回廊を造成する際には、すべての樹種を植え込むのではなく、触媒効果の高い樹種を積極的に初期導入することが合理的である。初期導入樹種としては、鳥や小動物などの食餌となる葉や果実を実らせる樹木（以下、食餌木）を用いることが、他所からの種子を散布する効果、すなわち触媒効果が期待できる。しかしながら、植栽樹種の造林特性の知見が乏しいため、低地熱帯林の代表的なエマージェント樹種および食餌木樹種を対象に、高温阻害、強光阻害、光合成能力などの生理特性を解明する。

② 緑の回廊造成試験

想定される回廊造林の設定場所は、劣化した二次林や耕作放棄地など強光かつ乾燥しやすい開放地であるので、導入樹種に関してはこのような条件下での活着や成長が重要であると考えられる。また、通常の造林手法と異なり目的樹種のみを成立させるのではなく、侵入植生との共存も必要となりうる。本研究では回廊林造成の前段として、食餌木のうち数樹種の開放地への試験植栽を行い、活着や樹高成長量の測定、ガス交換特性の測定などを通してそれぞれの樹種の成長特性を明らかにするとともに、回廊造林を成立させるのに必要な条件を解明する。

(2) 問題土地の造林技術開発

問題土地が分布する荒廃地の環境修復を目的とした造林（環境造林）を進めるに当たっては、投入するエネルギーをなるべく低く抑えることが実現性や持続性、また造林に伴う環境負荷の観点から望ましい。本研究では、樹木の生育を制限する環境ストレスを明らかにし、環境ストレスに対する樹木の反応を調べ適切な造林木を選択し、環境ストレスを緩和する造林方法を考案するという基礎研究を行い、投入エネルギーを低く抑え、しかも効果のある熱帯荒廃地造林技術の確立を目指す。

(3) 熱帯林伐採前後の土壌水貯留と浸食の変化

森林は緑のダムと言われるが、それは雨水を土壌中に一時貯留する機能に負うところが多い。しかし、熱帯林における緑のダムとしての能力については、十分に明らかになっていない。本研究は、熱帯林における調査・観測によって土壌の保水特性および土壌水の貯留量の変動を明らかにすることを目的とした。さらに、森林伐採による浸食量および河道の両端に設けられたバッファゾーンの土砂流入機能について明らかにする。

(4) 熱帯雨林蒸発散量の長期推定

マレーシア森林研究所のPasoh森林保護区にある観測タワーで1995年以来行っている気象観測データから長期蒸発散量を推定するため、林内雨量の観測を行うとともに、乱流変動法の短期観測を行って、雨水の樹冠貯留特性や空気力学特性を調べた。この観測結果を基にPenman-Monteith-Rutter(PMR)モデルのパラメータを推定して、熱帯低地林の蒸発散量の長期連続推定を行う。

3. 研究方法

(1) 緑の回廊造成のための造林技術開発

①熱帯林再生のための植林樹種特性の解明

ア フタバガキ科樹種の高温・強光ストレス診断

マレーシア国ペラ州で行われている JICA 複層林プロジェクト (MSFMP) のチクス苗畑に生育するフタバガキ科樹種の *Shorea platyclados*(Spl)、*S. parvifolia*(Spa)、*S. assamica* (Sa)、*Dipterocarpus oblongifolius*(Do)の 4 樹種を用いた。これらはチクス苗畑の底陰条件下で育てられた 1 年生から 3 年生のポット苗である。これらの苗木を用いて、高温および強光ストレスの受け方を携帯型クロロフィル蛍光測定装置(PAM-2000、Walz、Germany)を用いて、クロロフィルの蛍光反応を調べることによって行った。

実験 1：裸地への植栽を想定した高温ストレス診断では、30～50℃、5℃きざみの温度条件下で葉片に $180 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ の赤色光を 10～20 分照射し、光合成が安定した時点で Fv/Fm の値を測定した。また、35℃と 40℃のもとで葉片に $1,600 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ の光を 2 時間照射した後、Fv/Fm の回復過程を 7 時間にわたって測定した。

実験 2：被陰条件下で育てた苗を裸地に植栽する場合を想定して、被陰下で育ったポット苗を植栽地の条件と同様な全天条件下に置き、成熟葉の蛍光反応を 6 日間測定し、植栽直後の生理的活性の変化を調べた。

イ 食餌木樹種の光合成・蒸散特性診断

植栽試験および測定は半島マレーシアのネグリセンビラン(Negeri Sembilan)州のパソー保護林(Pasoh Forest Reserve)付近のシンパンペルタン(Simpang Pertang)で実施した。食餌木樹種でかつ、マレーシア在来種の樹種の中から *Bouea oppositifolia* (現地名 KUNDANG)、*Parkia speciosa* (現地名 PETAI)、*Pometia pinnata* (現地名 KASAI)、*Ficus* spp. (現地名 ARA) の 4 樹種を選んだ。これら樹種の山出し苗木を育苗業者より購入し、植栽前に各樹種数個体を用いてガス交換特性について携帯式光合成測定装置および蒸散測定装置で光合成速度および蒸散速度の測定を行った。また比較のために、数種の一般用材林樹種についても同様の測定を行った。各樹種とも同じようなサイズの苗木を 5 本づつ用意し、晴天の日を選んで一日測定を続けた。

②緑の回廊造成試験

パソー保護林の北に位置する果樹園放棄地の一部を借上げ、緑の回廊造成試験地(ペランギ川上流)を設けた。植栽試験地はパソー保護林のほぼ北端の林に接する林縁から長さ約 600m に渡った兩岸に、溪流の端から斜面方向に沿って幅約 20m で、蛇行する小川に沿って設置した。一部に低木本の雑草木が繁茂するが、高木性の樹木は存在せず、ほとんど完全な開放地であり、また、かなりの部分は土壌が露出していた。

植栽樹種は、食餌木樹種でかつ、マレーシア在来種の樹種の中から KUNDANG、PETAI、KASAI、ARA の 4 樹種を選んだ。植栽間隔は川に直角な斜面方向に沿っては 2m 間隔で 4 列、川と平行な等高線方向に沿っては 3m 間隔とした。等高線方向に沿って各樹種 10 個体づつを 1 小区画として、斜面上の位置を入れ替えて各樹種とも異なる 4 カ所の位置に植栽されるようにしたブロックを川の片岸に 4 ブロックづつ、全体で兩岸に合計 8 ブロックを設けた。土壌が硬いため、植栽に際しては大型機械で植え穴を掘り、植栽後に灌水を行った。

植栽約 1 年後に、各樹種について生存率と樹高成長の測定を行った。また、携帯式光合成蒸散測定装置を用いて、光合成蒸散速度の測定を試験地で行った。測定は日の出前から約 1 時間おき

に夕方まで連続で行った。各樹種の強光に対する耐性の違いを調べるために、クロロフィル蛍光測定器を用いて蛍光反応について測定した。材料には植栽試験地の個葉を切り取り、Simpang Pertangの実験室に持ち帰ったほか、被陰下で養苗した同齢の苗木の個葉も比較のために用いた。

(2) 問題土地の造林技術開発

本研究では砂質土壌、酸性硫酸塩土壌、泥炭土壌の3つの問題土壌が分布するマレー半島中央部のタイ国ナラチワ県に造林試験地を設置し、環境ストレス耐性を持つ樹種の選抜、環境モニタリング、環境ストレスを緩和する造林方法の試験を行った。また、選抜された環境ストレス耐性種を含む樹木種を環境制御温室で栽培し、環境ストレス応答とその種特性を解析した。

(3) 熱帯林伐採前後の土壌水貯留と浸食の変化

マレーシアの首都クアラルンプールから北に約80kmに位置するBukit Tarek森林水文試験地(以下BT、北緯3°31'、東経101°35')において実施した。BTはC1流域(面積:32.8ha、標高:48-175m)とC2流域(面積:34.3ha、標高:53-213m)で構成される。BTは、1960年代の初めに択伐されたが、自然度の比較的高い熱帯低地二次林である。地質は変成岩で、雲母片岩、千枚岩からなる¹²⁾。1992年から1994年の観測によると、気温は年較差が小さく、19.1~34.9℃の範囲であった。年平均降水量は2,655mmであり、降雨イベントは、降雨強度が高く、継続時間が短い特徴をもつ⁹⁾。

森林伐採試験は、マレーシア森林研究所(FRIM)によって計画され、本研究では、共同研究として実施した。C1流域はコントロール流域として、C2は伐採処理流域として設計されている。伐採(択伐)は1999年11月から実施された。C2において河道両側20mはバッファゾーン(保護樹帯)として残されている。

伐採作業はブルドーザーなどの重機を用いたため集材路や土場の作設は流域へ与える攪乱強度が大きく、伐採流域では、河道中に土砂が堆積し、林道では雨滴による侵食が生じガリの発達を観察され、スコール後の流出時に下流に運ばれていることが観察された。これは、熱帯域での森林伐採に共通した問題である。

① 水文観測

C1流域を対象に水文観測を実施した。降水量はC1堰堤の横で重量秤雨量計および転倒ます式雨量計を用いて測定した。また、C1堰堤から約130m河道上方に試験斜面を設置した。その試験斜面において、エアプール式テンションメーターを埋設し、一日一回(午前9~11時)水銀マノメーターを直読し、土壌水分の測定を行った。テンションメーターの埋設深度は10、20、40、80cmで、合計5ヶ所に設置した。

② 土壌物理特性

試験斜面の尾根頂部(T5)、斜面中腹(T3)および斜面末端(T1)の3箇所において、400cc円筒を用いて深度10、20、40および80cmで土壌サンプルを採取した。FAOの土壌分類⁴⁾によると、調査した土壌断面は、Acrisolsに区分された。

実験室において、これらの土壌サンプルを用いて、低サクション域を砂柱法、高サクション域を加圧法によりサクション(ϕ)と体積含水率(θ)の関係を求めた。得られた θ - ϕ 関係は、van Genuchtenの方程式を用いて解析した。

③ 土壌水貯留量と蒸発散量

試験斜面において観測された土壌水分のサクション (ϕ) は、土壌サンプルから求められた θ - ϕ 関係を用いて体積含水率 (θ) に変換された。T1、T3 および T5 において、その近傍で採取された土壌サンプルを用いて求められた θ - ϕ 関係を使用した。T2 および T4 において、T3 での θ - ϕ 関係を使用した。

④ 森林伐採による浸食・堆積量

BT 内の C 2 流域において、森林伐採後に土壌侵食がどの程度進行するか、また流路沿いに設置された幅 20m のバッファゾーン（保護樹帯）が流出土砂をどの程度捕捉するかを明らかにするために、ステンレス製の侵食ピン（長さ 350mm）を用いて侵食・堆積量を測定した。伐採地（2ヶ所）およびスキッドトレイル終点（2ヶ所）においては、2m のメッシュの交点に侵食ピンを設置し、1ヶ月毎に測定を行った。バッファゾーンにおいては、2ヶ所で 5m メッシュの交点に侵食ピンを設置し、2ヶ月毎に測定を行った。

（４）熱帯雨林蒸発散量の長期推定

① 観測方法

観測タワーは、マレーシア国 Pasoh 森林保護区内に設置されている。周囲の森林は、林冠の高さ約 35m で、エマージェント木は約 45m 高に達し、葉面積指数約 6.5 の低地フタバガキ林である。タワー頂部の高さ 52.6m の位置で、下向き上向き日射量、純放射量、気温、湿度、風速、風向、雨量を 1995 年 3 月以来連続測定を行っている。また、ボーエン比法適用のために、43.6m、52.6m の 2 点に通風乾湿計を置いて、精度の高い温湿度の観測を行っている。

樹冠に付着した雨水の蒸発である遮断蒸発を林内外の降雨量差から水収支式で推定するために、1999 年 7 月 1 日から翌 2000 年 6 月 30 日まで、樹冠通過雨量と樹幹流量を測定した。樹冠通過雨量の観測は、林床に 20 個の直径 21cm のポットを置いて、約 2 週間毎に溜まった雨を測定する方法で行った。また、このプロットの中にある高木 7 本に樹幹流量取水装置を設置して、同じく約 2 週間に 1 回測定した。さらに、長さ 416cm、幅 17.2cm の樋型雨量計を 1 本を置き、転倒ます型雨量計で樹冠通過雨量を自記記録させ、ひと雨単位以下の細かい時間単位での解析に対するデータを得た。この自記記録は、2000 年 1 月 1 日から 3 月 31 日まで行なった。

乱流変動法観測は、1998 年 3 月 9～14 日に、超音波風速温度計（Kaijo DA-600）と赤外線ガス分析計（Licor LI-6262）をタワー頂部に設置して、クローズドパス方式によって実施した。

② 蒸発散推定の手順

蒸発散の推定作業は、Shuttleworth¹¹⁾ に倣い行った。まず、ボーエン比法や乱流変動法の観測を行っている期間について、これらの方法で得られた樹冠が濡れていない場合の蒸発散や運動量フラックスを基にして、Penman-Monteith 式を使って、空気力学的抵抗、群落抵抗を逆算した。一方、樹冠通過雨量、樹幹流量の測定から樹冠における水収支式を用いて、約 2 週間毎の測定期間の遮断蒸発総量を求め、その結果を再現できるように Rutter モデルのパラメータを推定した。こうして得られたパラメータと樹冠上の気象連続観測データを Penman-Monteith-Rutter(PMR)モデルを用いて、樹冠の濡れ、乾燥を通じた蒸発散フラックスを計算した。

4. 結果・考察

① 熱帯林再生のための植林樹種特性の解明

ア フタバガキ科樹種の高温・強光ストレス診断

電子伝達の光量子収量を示す F_v/F_m の値は、クロロフィル内の光化学系Ⅱでの光化学反応の効率を表すパラメータで、光による光合成反応の阻害（光阻害）の程度の評価に用いられる。光照射後の F_v/F_m の低下が植物の受けた光阻害の程度を表し、その後、弱光下においたときの F_v/F_m の上昇が光阻害からの回復を示す。

実験 1：裸地への植栽を想定した高温ストレス診断において、 F_v/F_m の値は *S. platyclados* (Spl) および *D. oblongifolius* (Do) では、35℃と 40℃で同様に高く 45℃でもある程度の活性を維持していた。一方、*S. parvifolia* (Spa) および *S. assamica* (Sa) では 35℃をピークとして、それより高い温度では急激な活性の低下が見られた。35℃において受けた光阻害からの回復と、40℃での光阻害の回復を比較すると、Spa と Sa では 40℃で顕著な回復の遅れが見られた。これらの樹種では Yield で表される光合成活性が 40℃で顕著に低下することから、光合成で消費されない分、結果的に光化学系Ⅱでの余剰の光エネルギーが多くなり、光阻害の影響が顕著に現れたと考えられる。今回の実験で設定した 40℃という温度は、皆伐跡地の植栽木の晴天日の葉温にほぼ相当する。したがって、40℃においても光合成活性が落ちず、光阻害の影響も受けにくい Spl および Do が、高温、強光環境である土地への植栽には適していると考えられる。

実験 2：被陰下で育った苗を植栽地の環境である全天条件下に置いた 6 日間の連続測定の結果、 F_v/F_m は日中に受けた光阻害を夜間に完全に回復できず、6 日間で 4 樹種とも有意に低下した。 F_v/F_m の低下の程度は天候により変動し、前日が雨の場合にはほとんど低下しなかった。積算日射量が多いほど日ほど F_v/F_m の低下率が大きいという傾向はみられなく、むしろ自然光（強光）の連続照射時間が影響していた。

Do と Spl は F_v/F_m の低下が少なく、個体間のばらつきも小さかった。特に Do は個葉間のばらつきもほとんどなく、強光ストレスに対する耐性が高いことが明らかになった。Spa は F_v/F_m が最も低下し、強光ストレス耐性が低いことが示された。Spa は Spl と同じ枝形態を持つが、強光ストレスに対する耐性が比較的弱いと考えられる。しかし、 F_v/F_m がほとんど低下しない個体も認められた。Spa では、処理中に葉の水平からの俯角が大きくなる現象が観察され、葉の下垂による葉表面の受光量減少によって F_v/F_m の低下が抑制されていたと考えられる。また、実験 1 で行った葉に対して直角に光を当てるという実験により、Spa の葉そのものは強光ストレスに対して耐性が低いことが明らかにされている。これらのことから、Spa は直射光が当たりにくいような葉の運動で強光を回避することが明らかになった。

なお、これらのクロロフィル蛍光反応測定によって得られた高温と強光に対する樹木の反応は、生存率や成長量として報告されている裸地への適応性の結果とよく合致するものであり、蛍光反応測定法の緑化適応樹種選抜手法としての有効性が確認された。

イ 食餌木樹種の光合成・蒸散特性診断

Parkia speciosa (PETAI)、*Pometia pinnata* (KASAI)、*Ficus* spp. (ARA) など、後述の緑の回廊造成試験における植栽時に入手できた樹種の苗木の個葉における最大光合成速度(Pn_{max})、最大蒸散速度(Tr_{max})、最大水蒸気拡散コンダクタンス(Gw_{max})、および水利用効率(WUE、 Pn_{max}/Tr_{max} 、単位； $\mu\text{mol}/\text{mmol}$)を表 1 に示す。 Pn_{max} において ARA がほかとくらべて大きかったが、ほかの

表－1 苗木のガス交換速度

樹 種 名	Pn_{max}	Tr_{max}	Gw_{max}	WUE (Pn/Tr)
	$\mu mol m^{-2} s^{-1}$	$mmol m^{-2} s^{-1}$	$mmol m^{-2} s^{-1}$	
ARA	14.1 $\pm$ 3.1	3.33 $\pm$ 0.86	240 $\pm$ 79	4.23
Menkulang gali	2.6 $\pm$ 0.6	0.82 $\pm$ 0.36	58 $\pm$ 28	3.11
Merbau	3.1 $\pm$ 0.8	1.69 $\pm$ 0.42	115 $\pm$ 23	1.86
KASAI	5.3 $\pm$ 1.0	0.91 $\pm$ 0.41	100 $\pm$ 75	5.86
Sepetir	7.2 $\pm$ 1.3	1.00 $\pm$ 0.48	103 $\pm$ 52	7.15
Kembang semangkuk	2.5 $\pm$ 0.4			
PETAI	5.5 $\pm$ 0.3			

樹種はいずれも小さな値を示した。ただしARA以外は一般的な造林樹種と比べた場合に小さいとも言えなかった。 Gw_{max} もARAが他より大きく、WUEでは Pn_{max} ほど大きな差が樹種間では見られなかった。 Tr_{max} の日変化で見ると、ARAが高くまた日中における低下も少ないのに対して、KASAIや他の造林樹種は低下する割合が大きい、もともと低い値を示していた。光合成速度と葉内CO₂濃度(Ci)の関係を検討したところ、ARAだけが大きく他の樹種は平均して大差ない値を示しており、ARAは光合成の能力が大きかった。

② 緑の回廊造成試験

植栽試験地における微気象観測の結果、日中の最高気温は約35℃に達し、相対湿度は40%以下になることが珍しくなく、苗木にとってはかなり乾燥した状態になることが確認された。

表－2 植栽12ヶ月間の苗木の成長量と生存率

樹種名	斜面上の位置	植栽12ヶ月後の樹高 (cm)	植栽12ヶ月間の樹高成長 (cm)	生存率 (%)
ARA	上部	40.5	5.5	90
	中部	75.5	40.5	82
	下部	94	59	60
Kasai	上部	62.3	5.3	35.5
	中部	77.8	19.8	18.6
	下部	145.2	77.2	12.2
Petai	中部	118	90	3.5
Kundang	中部	65	1	0.5

ア 植栽地の植生量および植栽木の成長と生存率

植栽地における雑草木群落は、平均植生高と被度から求めた植生量では、斜面下部、中部、上部の順で少なくなり、特に下部の方は上部に比べて2倍以上の植生量が認められた。

植栽した苗木の生存率と生長量を表-2に示す。ARAが最も生存率が高く一番低い斜面下部でも約60%が生存していた。KASAIはついで高いものの約3割程度で他の2樹種は10%以下で著しく生存率が低かった。ARAとKASAIでは斜面上部から下部へ行くに従って生存率が低くなる傾向があった。樹高成長量は著しく生存率の低かったKUNDANGで小さかった以外は各樹種とも斜面上部の位置により異なっていて、生存率とは逆に斜面上部から下部へ行くに従って大きくなっていった。

イ 植栽木の生理的反応

植栽した苗木の光合成蒸散速度を植栽1年後に測定した結果、植栽直後と同様にARAの Pn_{max} が各樹種の中ではもっとも大きく、KASAI、PETAIと一般造林樹種であるMenkulang Jaliがほぼ同じ値を示しており、KUNDANGのみが小さかった。 Gw_{max} はKASAIのみが他の樹種に比べて大きく、水分利用効率で見たときのWUEではKASAIのみが他の樹種に比べて小さく効率が悪い樹種と考えられた。一日での変化を見たとき、植栽前の状態に比べていずれの樹種とも日中における低下割合は小さいものの、ARAが最も高い値を維持していた。

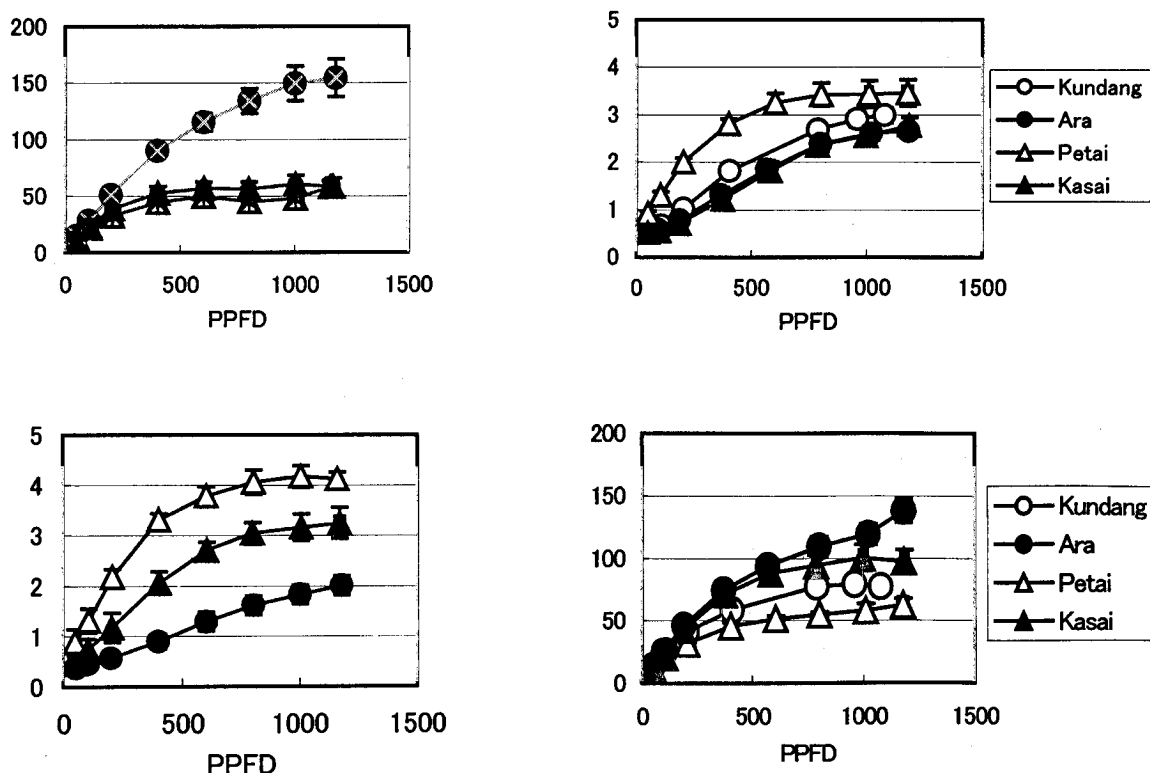


図-1 開放地（左上）と被陰下（右上）における電子伝達速度（ETR）、および開放地（左下）と被陰下（右下）における熱放散（NPQ）

クロロフィル蛍光反応の結果は特に強光条件に対する耐性で樹種間に差がみられた。これらをパラメータ別で見ると、ETR（電子伝達速度）はARAが最も大きくKASAI、Kundang、PETAIの順で小さくなっていた（図－1の左上と右上）。また、開放地と被陰下の葉を比べたとき、ARAでは開放地で値が増大するのに比べて、KASAIでは逆に減少していた（図－1の左下と右下）。PETAIは低い値のまま変化が少なかった。熱放散の割合を示すNPQはARAについては開放地、被陰下のいずれでも低く、開放地の方が被陰下に比べて減少していた。

また、開放地でのKASAIではqPの低下が著しく、強光条件下では光阻害が起こっている可能性が示唆された。さらに、PETAIは強光下でも被陰下でもパラメータの変化が少なく、NPQのみが開放地で増大した。NPQそのものは他の樹種より高く、余剰の光エネルギーを熱として放散する割合が高い樹種と考えられる。

以上のことから、ここで用いた食餌木樹種には回廊林として想定するような開放地に対する適応性に違いがみられた。ARAは生存率も生長量も高く、開放地のような強光条件でさらに有効に光エネルギーを利用できる特性があるため、ここで比較した樹種のなかでは開放地に植栽する樹種として適していることが明らかになった。

試験地内における斜面上の位置の違いによる生存率の違いは、植栽後に侵入してきた雑草木植生との競合が一つの要因と考えられ、今回のように植栽後除草をしていない時、立地条件の良い斜面下部などでは植栽木が競争に負けて生存率が低くなると考えられる。この場合は適度な除草作業が必要となるだろう。

植栽後1年では、まだいずれの樹種も果実を生産するサイズに達しておらず、まだ植栽樹種の”一方、KASAIは被陰下ではNPQが低いものの、開放地ではその値は増大していた。PETAIはもともNPQが高かったが、開放地ではさらに増大する傾向が見られた。Kundangについては、被陰下のみでの測定であったが、ETRはPETAIより高く、NPQはPETAIほど高くなかった。ただし、強光条件へ被爆させた苗木におけるFv/Fmの低下は最も大きく、また回復の遅いことから強光に対する生理的耐性が小さい樹種であることが明らかになった。触媒効果”については確認できていない。新たに侵入してきた植生はほとんどが低木性の木本植物や草本であり、初期段階ではより高い生存率で植栽木により構成される林を維持することが必要である。

③ 熱帯林再生のための低地脊悪地における造林技術の開発

ブルネイ、マレーシアのサラワク州、サバ州、半島マレーシア東海岸、カンボジアなどの泥炭湿地周辺部には砂質で貧栄養な土壌（砂質土壌）が分布する。この砂質土壌の自然植生は tropical heath forest であり、サラワクなどでは kerangus と呼ばれる。この土壌は、しばしば下層に腐植と鉄の集積層（盤層）を伴うことから、spodosols に分類されることがあるが、その生成過程はまだ明らかになっていない。農業開発のため tropical heath forest を伐採すると、表層のリターや泥炭が分解され、真っ白な珪砂が現れる。この砂地は貧栄養、乾燥、高温、湛水などの環境ストレスのため、放置され、草原あるいは疎林となっている場所が多い。

マングローブ林などの土砂の堆積しやすい汽水域ではパイライト（ FeS_2 ）等の硫化鉄鉱物を含む海成粘土層が堆積する。この海成粘土層は、陸化して酸化すると極めて強い酸性を示す酸性硫酸塩土壌となり、作物が育たない荒廃地となる。東南アジアの低湿地、泥炭湿地の下には過去に堆積した海成粘土層が存在する場合が多く、農業開発のため湿地を排水し、泥炭が分解するとこ

の酸性硫酸塩土壌が現れる。メコンデルタやチャオプラヤ・デルタ、タイ南部では酸性硫酸塩土壌によって荒廃地となっている場所がある。酸性硫酸塩土壌で問題となる環境ストレスは、土壌の強酸性化により溶出する金属イオンの過剰害、特にアルミニウム過剰害である。この他、粘土質土壌の物理性の不良や湛水も問題となる。

ア 砂質土壌の造林

問題土壌の1つの貧栄養の砂地は、土壌が乾燥する上に地表面近くの土壌温度がかなり高くなり、雨期には冠水することもあるような厳しい環境である。この砂地の造林に関し、以下のことがわかった。

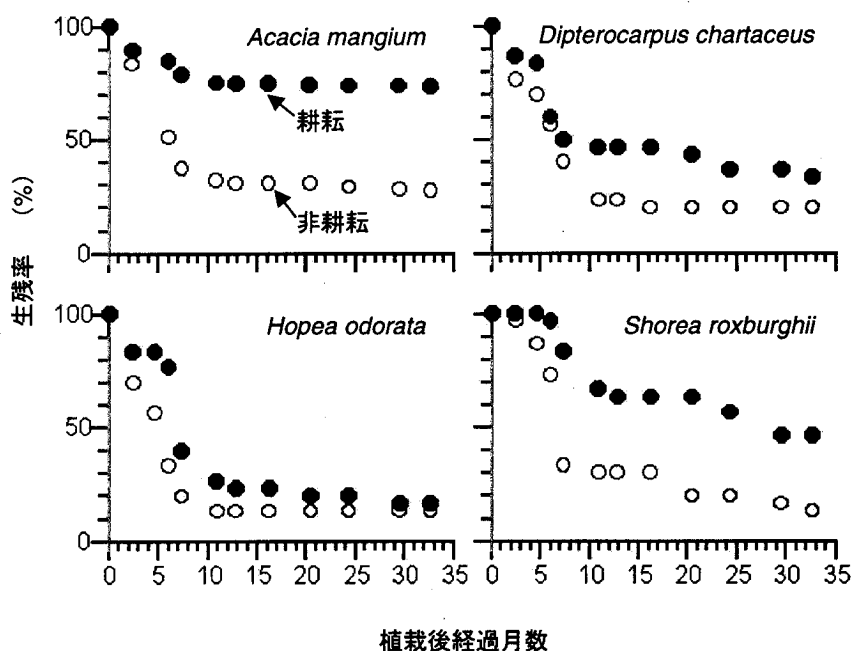


図-2 耕転による植栽木の活着の改善

- 1)育苗ポットの大きさを大きくすると、活着率（生残率）と初期成長速度が高くなった。
- 2)耕転すると活着率が高くなった。（図-2）
- 3)環境ストレス抵抗性種の *Acacia mangium* を先に植え（先行造林）、その樹下にフタバガキ科樹木を植えると、フタバガキ科樹木の活着率と初期成長速度が高くなった。
- 4)寒冷紗による庇陰や草によるマルチングをすると、活着率が高くなった。
- 5)*Dipterocarpus obtusifolius* と *Shorea roxburghii* の裸地での活着率が他の4種（*Dipterocarpus chartaceus*、*Hopea odorata*、*Anisoptera* sp.、*Parashorea* sp.）に比べ高いことがわかった。また、植栽2年後の成長測定の結果、*Dipterocarpus obtusifolius* と *Anisoptera* sp.の成長速度が大きいことがわかった。
- 6)植栽したフタバガキ科樹木3種（*Dipterocarpus obtusifolius*、*Dipterocarpus chartaceus*、*Hopea odorata*）の光合成特性を携帯式の装置を用いて測定した結果、*Dipterocarpus obtusifolius* の光合成能力が高いことがわかった。
- 7)環境制御温室で6種のフタバガキ科樹木の苗を栽培し窒素形態嗜好性を調べたところ、すべて

の種が好アンモニア性植物であった。

Syzygium 属樹木の5種の窒素形態嗜好性を調べた結果、*Syzygium oblatum* 以外の4種は、好アンモニア性植物であった。*D. obtusifolius* と *Shorea* sp. は、アンモニア区で硝酸区に比べて光飽和光合成速度が高かった。これら2種の硝酸区の苗は、葉の気孔コンダクタンスが小さいだけでなく、光合成能力も低かった。また葉のクロロフィル濃度も著しく低かった。*Shorea* sp. は葉の硝酸還元酵素の活性が硝酸区でアンモニア区に比べて高かったが、根の硝酸還元酵素の活性は窒素処理による差がなかった。*D. obtusifolius* では、葉の硝酸還元酵素の活性には窒素処理による違いがなかったが、根の硝酸還元酵素の活性はアンモニア区に比べて硝酸区で高かった。

イ 酸性硫酸塩土壌の造林

酸性硫酸塩土壌では、低pHとアルミニウム過剰害が問題となり、特殊な植物を除き生育が困難になっている。この他、粘土質土壌の物理性の不良や湛水も問題となる。この酸性硫酸塩土壌の造林に関し、以下のことがわかった。

- 1) 造林のための適合樹種を選抜するために、酸性硫酸塩土壌に植栽したマメ科樹木5種 (*Acacia auriculiformis*、*A. mangium*、*Cassia siamea*、*Leucaena leucocephala*、*Paraserianthes falcataria*)、フトモモ科樹木7種 (*Syzygium grande*、*S. oblatum*、*S. pseudosubtilis*、*S. spicatum*、*Eucalyptus alba*、*E. camaldulensis*、*Melaleuca cajuputi*)、フジウツギ科樹木1種 (*Fagraea fragrans*)、フタバガキ科樹木1種 (*Shorea roxburghii*) の活着と成長を調べたところ、*L. leucocephala* を除くすべての種で、マウンドを作って植えたほうが活着が良かった。*M. cajuputi*、*S. oblatum*、*S. pseudosubtilis* は、マウンドを作らずとも半数以上の苗が生き残った。マウンドによる湛水ストレスの回避がこれらの種の活着に影響を与えられとされる。
- 2) 酸性硫酸塩土壌の土壌水のアルミニウム濃度を測定したところ、0.2-7 mM Al だった。酸性硫酸塩土壌では、アルミニウムが植物の成育阻害要因となると考えられた。

Melaleuca cajuputi を含むフトモモ科樹木のアルミニウムに対する耐性を水耕実験で調べたところ、*Melaleuca cajuputi*、*M. glomerata*、*M. leucadendra*、*M. quinquenervia*、*M. viridiflora*、*Eucalyptus camaldulensis*、*E. deglupta*、*E. grandis* は、1 mM のアルミニウムに対して耐性をもつことが分かった。*M. bracteata* は、1 mM のアルミニウムによって根の伸長が90%抑制され、アルミニウムに対する感受性が他の種よりも高かった。これらのフトモモ科樹木について、アルミニウム・ストレスへの耐性機構の1つと考えられる根からの有機酸分泌を調べたが、アルミニウム耐性との関係は明瞭でなかった。これらの樹種では有機酸分泌以外のアルミニウム耐性機構を持つと推定された。

ウ 泥炭土壌の造林

泥炭土壌では、この土壌の持つ強酸性、貧栄養、物理性の不良といった問題のほかに、泥炭の分解による地盤沈下と湛水といった植物生育上の問題が生じる。この泥炭土壌の造林に関し、以下のことがわかった。

- 1) マウンドを作って湛水期間が短くなるようにすると、活着率と初期成長速度が高くなった。
- 2) 湛水に対する成長の応答の種間差を明らかにするため、湿地に生育する樹種 *Syzygium oblatum* と、湿地と非湿地双方に生育する *S. spicatum* の根系を湛水させたところ、*S. oblatum* の成長は湛水条件下で促進され、*S. spicatum* の成長は湛水によって抑制されなかった。両樹種の持つ湛水耐性が湿地環境での生育を可能にしていると考えられる。

同じく湿地に生育する *Melaleuca cajuputi* は、窒素通気による根圏の酸素濃度低下によっても成長と光合成が抑制されなかった。この時、根の糖・デンプン濃度が高かったことから、低酸素濃度条件下で根への呼吸基質の供給を維持ないし増加させる機構があると考えられる。

(3) 熱帯林伐採前後の土壌水貯留と浸食の変化

① 水文観測 (緑のダムとしての熱帯林の機能)

森林土壌は雨水を一時的に蓄え、雨水の流出を遅らせることによって、河川のピーク流量や洪水流量を減少させる機能がある。そのため、森林流域は“緑のダム”と言われる。2年間の水文観測から、深度 0-160cm 間の土壌水貯留量は 488~694mm の範囲 (平均: 565mm) であった。日本の多目的人工ダムにおける、流域内降水の貯留量は平均的に約 160mm と試算されている。この値と比較して、Bukit Tarek 森林水文試験地の“緑のダム”の機能は高いといえる。

また、土壌水貯留量は土壌層上部 (0~80cm) の方が、下部 (80~160cm) より降雨に対して著しく変動し、年間を通じて高い値で変化した。土壌水貯留量は、年間を通じて、8 月で少なかった。本試験地の降水量は 5 月と 10~11 月に多く、1 月と 7~8 月が少ないが、土壌水貯留量は降水量に連動した季節変動を示すことが明らかになった。

② 土壌物理特性

採取した土壌サンプルから求めた θ - ϕ 関係は、van Genuchten の式で良く再現することができた。深度 10cm および 20cm の土壌サンプルにおいて、サクシジョンの値が $-30\text{cmH}_2\text{O}$ 以上で ϕ に対して θ が大きく変化しており、その傾向は深度が増加するにつれて、小さくなる傾向があった。得られたパラメータと van Genuchten の式を用いて Luxmoore の定義⁸⁾におけるマクロポア ($\phi > -3.06\text{ cmH}_2\text{O}$) とメソポア ($-3.06 \geq \phi \geq -306\text{ cmH}_2\text{O}$) の割合を計算した結果、深度が増すとマクロポアとメソポアの割合は小さくなる傾向が見られた。

飽和体積含水率 (θ_s) と残留体積含水率 (θ_r) の差を土壌に雨水が貯留可能な量とすると、深度 160cm までの土壌に貯留可能な量は、420mm であった。本試験流域での土層深の測定結果、最大値で 640cm、平均値で 277cm であった。よって、実際に流域内の土層に貯留可能な量は 420mm より大きいと考えられる。

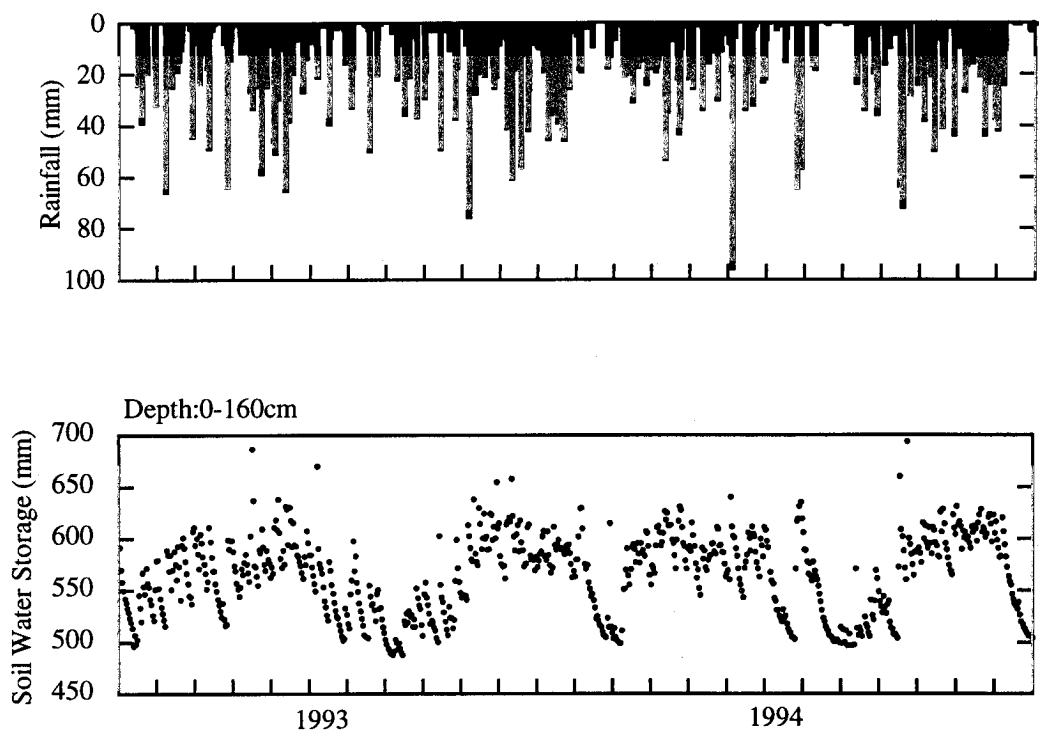
③ 土壌水貯留量変動と蒸発散量の計算

図-3 に 2 年間における土壌水貯留量の変化を示す。土壌水貯留量は、降水量が多い 4-5 月および 10-11 月に高い値で変動し、降水量が少ない 1 月および 7-8 月に小さい値を示した。

深度 0-160cm 間の土壌水貯留量は、488~694mm の範囲 (平均値: 565mm) で変化した。深度 0-160cm 間を上部 (0-80cm) と下部 (80-160cm) にわけて土壌水貯留量を比較すると、それぞれの貯留量の変動範囲および平均値は、248~362mm (平均値: 294mm) および 238~335mm (平均値: 272mm) であった。上部の方が、下部よりも降雨に対して著しく変動し、年間を通じて高い値で変化した。下部の貯留量の変動は、明瞭に土壌の乾燥する時期を示し、年間を通じて 8 月が一番乾燥する。

本試験地は、湿潤熱帯地域に位置し、1993 年および 1994 年の年降水量は、2,978mm および 2,524mm で、明瞭な乾季・雨季がない。しかし月別降水量は、南西モンスーンと北東モンスーンの影響で、5 月と 10-11 月が多く、1 月と 7-8 月が少ないが、土壌水貯留量も同様な季節変動を示すことが明らかになった。

貯留量の変動幅について、Kuraji and Paul⁶⁾はマレーシアでの2つの流域を対象とし、移動水収支法から、206mm および 338mm と求めた。また、アマゾンでは、大気水収支法から 380mm⁹⁾、2m の土壌層における水収支から 154mm⁵⁾ という報告がある。本研究では、1.6m の土壌層における水収支から、206mm であった。Kuraji and Paul⁶⁾は2つの流域間の貯留量の変動幅の差は、基盤地質の違いであると考察している。



図－3 試験斜面における土壌水貯留量の変化

土壌水の貯留量を考慮した水文データにもとづく短期水収支法により求めた月別蒸発散量(Et)は、89.4～147.8mm (平均値：115.1mm)であった。一方、一般気象データを用いてペンマンの方程式から推定した月別可能蒸発量 (Ep) は、54.7～114.7mm (平均値：85.7mm)であった。2 年間に おける Et/Ep の比は、1.03～1.85 (平均値：1.37、標準偏差：0.19)であった。Ep が Et より小さい値を取る理由は、Ep の値には、植物による蒸散と樹冠による遮断降水が含まれていないためと考えられる。

④ 森林伐採による浸食・堆積量

ア バッファゾーンにおける侵食・堆積量

Wプロットにおいては(図－4)、侵食ピン設置後半年(2000年3月～2000年9月)ではほとんどの地点で軽微な侵食が進み、堆積が卓越したのは10地点にすぎなかった。その中で左岸側上流部のW-84、-85地点では堆積量が多かった。侵食ピン設置後10ヶ月(2000年3月～2001年1月)では、堆積が卓越した地点は前回の2倍以上に達し、右岸側・左岸側ともに堆積量の多い

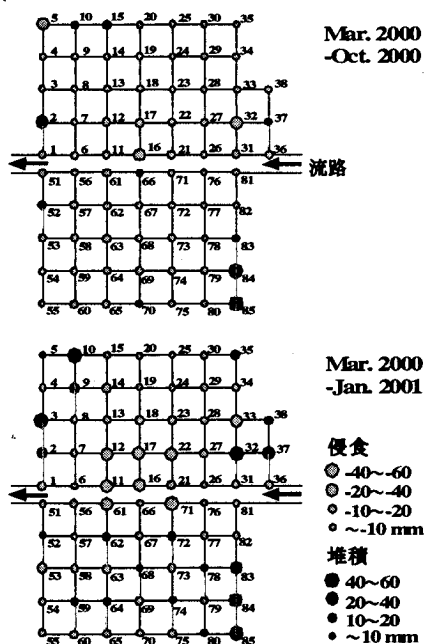


図-4 バッファゾーン内の
侵食・堆積量 (Wプロット)

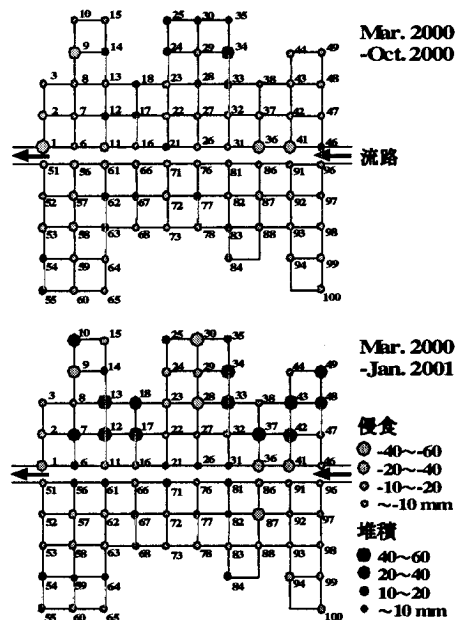


図-5 バッファゾーン内の
侵食・堆積量 (Yプロット)

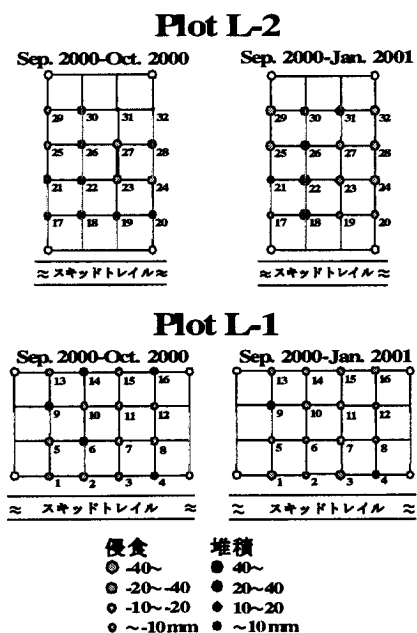


図-6 伐採地における侵食・堆積量

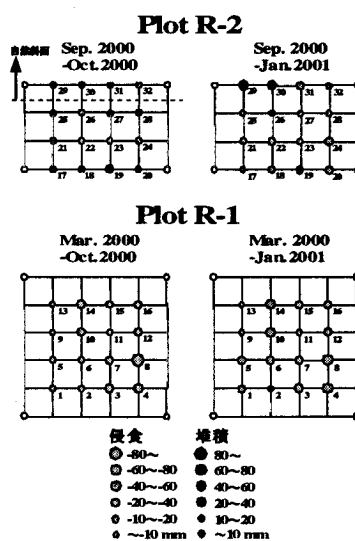


図-7 スキッドトレイル終点の侵食・堆積量

地点が多く認められたが、河道沿いには堆積量の多い地点は認められなかった。

Yプロットにおいては(図-5)、侵食ピン設置後半年(2000年3月～2000年9月)ではWプロット同様ほとんどの地点で軽微な侵食が進んだ。堆積が卓越した地点はWプロットの2倍に達し、特に右岸側のY-34地点で堆積量が多かった。侵食ピン設置後10ヶ月(2000年3月～2001年1月)では、右岸側の約半数の地点で堆積が卓越し、特に斜面上部で堆積量が多かった(Y-10、-13、-18、-33、-34、-43、-48、-49)。これに対し、左岸側では堆積量の多い地点は認められなかった。Wプロット同様、河道沿いには堆積量の多い地点は認められなかった。このように、堆積が進んでいる地点の大部分はバッファゾーン内の斜面上方にあり、流路付近ではほとんど土砂の堆積は起きていないため、バッファゾーンには斜面上方の伐採地や集材路からの流出土砂を捕捉する効果があることが確認された。

イ 伐採地における侵食・堆積量

L-1プロットにおいては(図-6)、侵食ピン設置後1ヶ月(2000年9月～2000年10月)では最大でも10mm以下しか侵食されなかった。侵食ピン設置後4ヶ月(2000年9月～2001年1月)でも、10mm以上侵食されたのは2地点だけだった。L-2プロットにおいては(図-6)、侵食ピン設置後1ヶ月(2000年9月～2000年10月)では、L-1プロット同様侵食量は10mm以下であったが、堆積が卓越していた地点が多かった。侵食ピン設置後4ヶ月(2000年9月～2001年1月)では、堆積・侵食量ともにやや増大した。しかしながら、侵食・堆積量は全体的には小さく、伐採しただけでは、土壤侵食はあまり進まないと考えられた。

ウ スキッドトレイル終点における侵食・堆積量

R-1プロットにおいては(図-7)、侵食ピン設置後7ヶ月(2000年3月～2000年10月)では、最大84mm侵食された地点(R-1-8)もみられるなど、全地点でかなり侵食が進んでいた。侵食ピン設置後10ヶ月(2000年3月～2001年1月)では、侵食量は前回からあまり変化がみられなかった。R-2プロット(R-2-29～R-2-32は自然斜面)においては(図-7)、侵食ピン設置後1ヶ月(2000年9月～2000年10月)では、全体の3分の2の地点で堆積が卓越していた。侵食ピン設置後4ヶ月(2000年9月～2001年1月)では、全体の4分の3の地点で侵食が卓越したが、侵食量は最大でも40mmに満たなかった。R-1プロットとR-2プロットでは侵食量に大きな差がみられたが、これはR-1プロットでは比較的軟らかいB層が露出しているのに対し、R-2プロットでは風化岩が露出しており、双方の地表面は侵食され易さが大きく異なるためと考えられる。

(4) 熱帯雨林上発散量の長期推定

① 遮断蒸発観測結果

1999年7月1日からの1年間、約2週間毎に測定した樹冠通過雨量、樹幹流下量、遮断蒸発量は、降雨量に対してほぼ正比例する関係が得られた。1年間の総計では、降雨量が2,267mmで、樹冠通過雨量、樹幹流下量、遮断蒸発量がそれぞれ1,879mm、7mm、381mmであり、それぞれの降雨量に対する比が、82.9、0.3、16.8%であった。遮断蒸発量の降雨量に対する比は、ポットをランダムに並べ替えてLloydら⁷⁾が測定したアマゾンの11%よりかなり大きい、ビニールシート法を適用したCalderら³⁾のジャワの21%よりは小さく、これら慎重な測定法を採用したものと比べても妥当な範囲とみられる¹⁰⁾。また、樹幹流下量の少なさが目立ち、アマゾンの1.9%よりか

なり小さい。亜高木や低木の樹幹流下量が測定されていないことが過小傾向と関係があるかどうか、検討する必要がある。

② 群落コンダクタンスの推定

Tani ら¹²⁾は群落コンダクタンス g_c の特性を示し、乾季、雨季を通じて、日射と飽差を基にした Jarvis 型のモデルで g_c の変化が説明できることを明らかにしている。しかしながら、この場合は、空気力学的抵抗が風速と気温の鉛直分布から推定された r_{AP} が使われており、一点の高さでの長期蒸発散推定のために推定した r_{AE} や r_{AT} を用いた場合について検討する。

図-8 はその結果を示すが、いずれの場合も推定された g_c は、Jarvis 型の式によく乗っており、空気力学的抵抗の推定方法による違いが群落コンダクタンスの値に及ぼす影響は小さいということがわかる。一般的には、蒸発散量は、空気力学的抵抗と群落抵抗によって変化するわけであるが、これは群落抵抗の変化に主に支配されるのであり、空気力学的抵抗の影響は小さいということになる。

③ 年間蒸発散量の推定

これまでに推定したパラメータの値を PMR モデルに入れて、1995 年から 2000 年 6 月までの蒸発散を連続計算した。月合計量による変化を図-9 に、95-99 年の総量を表-3 に示す。顕熱と温位差から求めた r_{AT} による値が遮断蒸発観測結果をほぼ再現しているため、これを採用したが、渦相関法で得られた摩擦速度から求めた運動量に対する r_{AE} による値も計算して、括弧内に示した。観測期間には、1997 年から 1998 年までのエルニーニョの影響を受けた降雨の少ない期間が含まれるため、純放射量と降雨量の比である放射乾燥度が 1 より小さく、熱帯雨林気候としては、非常に乾燥した気象条件となっている。しかし、1997、98 両年の蒸発散量が降雨量を上回っていて、蒸発散の抑制がないという結果である。蒸発散量の純放射量の比は恒に約 90% を維持している。

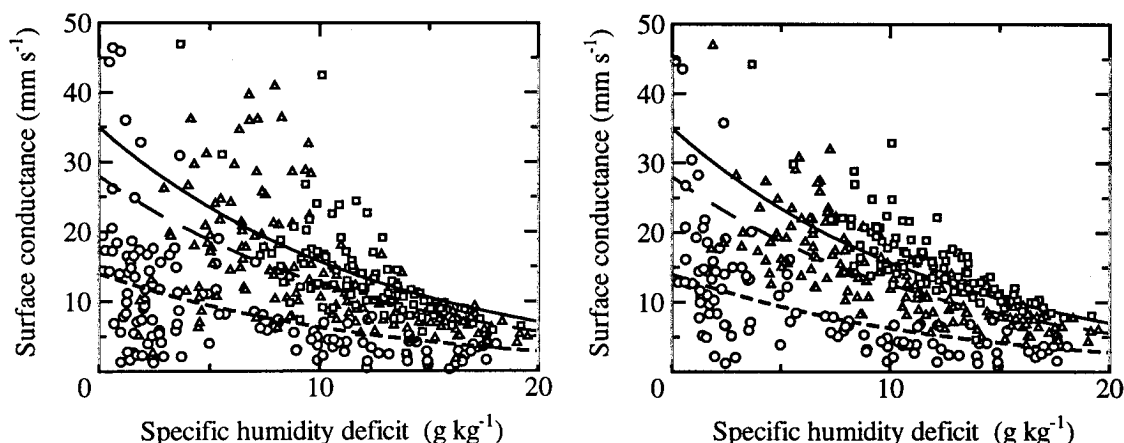


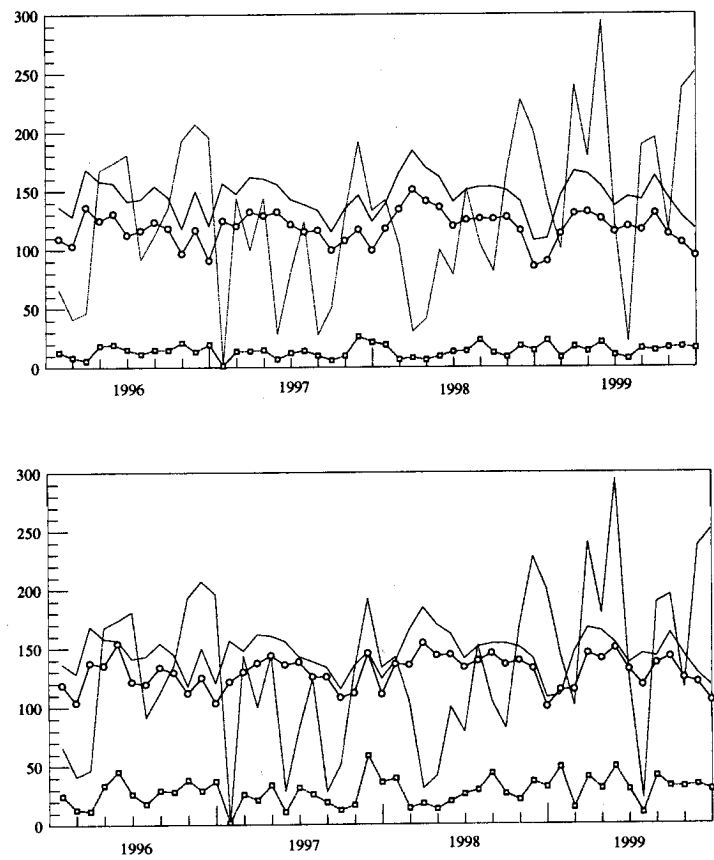
図-8 群落コンダクタンスの飽差に対する関係

左は、渦相関法による摩擦速度から求めた運動量に対する r_{AE} 、右は、顕熱と温位差から求めた r_{AT} を用いた場合の関係。○は日射量 400Wm^{-2} 未満、△は 800Wm^{-2} 未満、□はそれ以上の場合。実線、破線、点線は、(8)式に、それぞれ日射量 S_d の値を 1 、 0.6 、 0.2kWm^{-2} を入れた計算結果を示す。

表－3 気象条件と蒸発散量の年間総量 (mm)

年	降雨	純放射	遮断蒸発	蒸散	総蒸発散	総蒸発散 ／純放射
1996	1610	1721	332 (174)	1162 (1205)	1494 (1379)	87% (80)
1997	1182	1715	292 (151)	1238 (1262)	1530 (1413)	89 (82)
1998	1426	1821	317 (153)	1317 (1350)	1634 (1503)	90 (83)
1999	2065	1717	382 (180)	1155 (1207)	1537 (1387)	90 (81)
平均	1571	1744	331 (165)	1218 (1256)	1549 (1421)	89 (81)

()内は運動量から空気力学的抵抗を求めた場合の計算値



図－9 1996～1999 年の月蒸発散量の推定値

上は、運動量から空気力学的抵抗を求めた場合の計算値、下は顕熱と温位差からの計算値
実線：降雨量、点線：純放射量、□：遮断蒸発量、○：総蒸発散量

この結果は、アマゾンの熱帯雨林での比も 90%である¹¹⁾のと同じでいて、熱帯雨林として同じ特徴がここでも得られたといえる。図-9の季節変化を見ても、蒸発散の変化が純放射に追随している傾向が明らかであって、アマゾンでの傾向と同じといえる。括弧内の運動量から求めた値では、遮断蒸発量が少なくなっており、代わりに蒸散量がやや大きくなっているが、蒸発散総量としては 100mm 以上少ない。

5. 本研究により得られた成果

緑の回廊造成のための初期植栽樹種は、クロロフィルの蛍光反応特性や光合成・蒸散特性による評価・診断によって、極相林を構成できる熱帯郷土樹種においては、*Shorea platyclados* および *Dipterocarpus oblongifolius* が植栽後の高温・強光耐性が高く有望であること、および、触媒効果が期待できる食餌木樹種では *Ficus* spp.(現地名:ARA)が有望であることを明らかにした。

実際の「緑の回廊試験」においては、バックホーなどの機械を用いることによって元肥を能率よく鋤き込めること、および、*Ficus* spp.(現地名:ARA)が植栽後の成長および生存率が良いことを明らかにした。

また、熱帯アジアの荒廃地の問題土壌である砂質土壌、酸性硫酸塩土壌、泥炭土壌のそれぞれにおいて、植物の成育を制限するストレス要因を見出し適応できる樹種を選抜し造林手法を考案した。

熱帯の一集水域において長期観測した土壌水貯留量は、降水量に対応して、季節変動すること、および深度 0-160cm 間の土壌水貯留量の最大値、最小値および平均値は、それぞれ 694、488 および 565mm で、土壌層上部 (0-80cm) の方が、下部 (80-160cm) より降雨に対して著しく変動し、年間を通じて高い値で変化することなどを明らかにした。この結果は、わが国の平均的な多目的人工ダムより大きく、熱帯林の“緑のダム”としての機能が高いことを明らかにした。

侵食ピン法を用いた森林伐採による侵食・堆積量の測定の結果、20m 幅程度のバッファゾーンでも斜面上方の伐採地や集材路からの流出土砂を捕捉する効果はかなりあることが確認された。また、集材路の侵食量は伐採跡地と比較して非常に多いことを明らかにした。

さらに、低地熱帯林における長期気象観測をもとに推定した蒸発散量は、降雨量の約 89% の約 1,550mm であることが明らかになり、アマゾンの熱帯降雨林と同様に純放射に強く影響されていた。

熱帯林の持続的管理の最適化を行う上で、土地利用のシュミレータが有効であるが、そのような道具を開発する際に、緑の回廊造成に関する植林技術や熱帯低地荒廃地の造林技術における成果は役にたつであろう。また、熱帯林における水保全、土砂保全、気候緩和などのエコロジカル・サービス機能を科学的に明らかにしたが、森林を保全する意味や、利用する（伐採する）際の留意点についても明確にできた。

6. 引用文献

- 1) Abdul Rahim, N. and Harding, D. (1992) Effects of selective logging methods on water yield and streamflow parameters in Peninsular Malaysia, J. Trop. For. Sci. 5: 130-154.
- 2) Baharuddin, K. and Abdul Rahim, N. (1994) Suspended sediment yield resulting from selective logging practices in a small watershed in Peninsular Malaysia, J. Trop. For. Sci. 7: 286-295.

- 3)Calder, I.R., Wright, I.R. and Murdiyarso, D.(1986) A study of evaporation from tropical rain forest -West Java. J. Hydrol. 89: 13-31
- 4)FAO, ISRIC and ISSS (1998) World reference base for soil resources. FAO World Soil Res. Rep. 84, pp.1-88. FAO.
- 5)Hodnett, M. G., Pimentel da Silva, L., da Rocha, H. R. and Cruz Senna, R. (1995) Seasonal soil water storage changes beneath central Amazonian rainforest and pasture, J. Hydrol., 170: 233-254.
- 6)Kuraji, K. and Paul, L. L. (1994) Effects of rainfall interception on water balance in two tropical rainforest catchments, Sabah, Malaysia, Proc. Int. Symp. For. Hydrol. Tokyo, Jpn, pp.291-298.
- 7)Lloyd, C.R., Gash, J.H.C. and Shuttleworth, W.J.(1988) The measurement and modeling of rainfall interception by Amazonian rainforest, Agricultural and Forest Meteorology 43, 277-294
- 8)Luxmoore, R. J. (1981) Micro-, meso-, and macroporosity of soil. Sci. Soc. Am. J. 45: 671- 672.
- 9)Matsuyama, H. (1992) The water budget in the Amazon river basin during the FGGE period, J. Meteorol. Soc. Japan, 70: 1071-1084.
- 10)Roberts, J.M., Gash, J.H.C., Tani, M. and Bruijnzeel, L.A.(2002) Controls of evapotranspiration in lowland tropical rainforest, Forest-Water-People in the Humid Tropics
- 11)Shuttleworth, W.J.(1988) Evaporation from Amazonian rainforest. Proc. R. Soc. Lond. B 233: 321-346
- 12)Tani, M. et al.(in press) Characteristics of energy flux and surface conductance estimated from the meteorological monitoring above a tropical rain forest in Peninsular Malaysia. In: Okuda, T.,Niiyama, K., Thomas, S. C., et al. 'Pasoh: Ecology and Natural History of a Lowland Tropical Rain Forest in Southeast Asia., Springer
- 13)Zulkifli, Y. (1996) Nutrient cycling in secondary rain forest catchments of Peninsular Malaysia, Ph. D Thesis, Univ. Manchester, 380pp.

[国際共同研究等の状況]

本研究はマレーシア国を主体とし、一部の研究をタイ国でも行っている。マレーシアではマレーシア森林研究所 (FRIM) との共同研究「Ecosystem management and forest rehabilitation in tropics」として推進している。カウンターパートは、Dr. Abdul Rahim Nik 氏、Dr. Lai Hoe Ang 氏、Baharuddin Kasran 氏、および Azman Hassan 氏である。

また、タイ国では農業協同組合省王室森林局との共同研究により行った。カウンターパートは、王室森林局造林部シリントン王女湿地林研究センターの Tanit Nuyim 氏で、試験地の維持管理を担当した。また、この地域における森林再生研究はタイ国王室の特別プロジェクトになっており、本研究と特別プロジェクトとの調整をタイ王室森林局計画部特別プロジェクトチームの Chavalit Urapeepatanapong 氏が担当した。

[研究成果の発表状況]

(1) 誌上発表

- ① Ishida A., Toma T., and Marjenah : Leaf gas exchange and chlorophyll fluorescence in relation to leaf angle, azimuth, and canopy position in a tropical pioneer tree, *Macaranga conifera*. Tree

Physiology 19:117-124 (1999)

- ② Ishida A., Nakano T., Matsumoto Y., Sakoda M., and Ang L.H. : Diurnal changes in leaf gas exchange and chlorophyll fluorescence in three tropical tree species with contrasted light-requirement. Ecological Research 14: 77-88(1999)
- ③ Ishida A., Uemura A., Koike N., Matsumoto Y., and Ang L.H. : Interactive effects of leaf age and self-shading on leaf structure, photosynthetic capacity and chlorophyll fluorescence in the rain forest tree, *Dryobalanops aromatica*. Tree Physiology 19: 741-747(1999)
- ④ 松本陽介 : 乱高下して高値基調 (森林の環境 100 不思議). 104-105、東京書籍、東京 (1999)
- ⑤ 飛田博順・北尾光俊・丸山 温・齋藤隆実・上村 章・奥田史郎・松本陽介・Lai Hoe Ang : フタバガキ科 4 樹種苗木の強光ストレスに対する光合成反応. 第 110 回日林学術講 : 428(1999)
- ⑥ 上村 章 : 洗濯物の乾きやすさ (森林の環境 100 不思議). 92-93、東京書籍、東京 (1999)
- ⑦ 松本陽介 : 光合成速度 (森林立地調査法、森林立地調査法編集委員会編、284pp.、博友社、東京). 65-67 (1999)
- ⑧ Ishida A., Toma T., and Marjenah : Limitation of leaf carbon gain by stomatal and photochemical processes in the top of *Macaranga conifera*, a tropical pioneer tree. Tree Physiology 19: 467-473 (2000)
- ⑨ Ishida A., Toma T., Mori S., and Marjenah : Effects of foliar nitrogen and a short-term drought on the economy of *Shorea smithiana* Sym. seedlings. Biotropica 32:351-358(2000)
- ⑩ Kitao, M., Lei, T. T., Koike, T., Tobita, H., Maruyama, Y., Matsumoto, Y. and Ang, L.H. Sensitivity to photoinhibition correlated with photosystem II responses to high temperatures in four dipterocarp tree species, Physiologia Plantarum 109:284-290(2000)
- ⑪ 丸山 温 : 熱帯樹種の造林特性(20)ホペア オドラータ. 熱帯林業 49: 85-91(2000)
- ⑫ Maruyama, Y., Matsumoto, Y., Ishida, A., Toma, T., Uemura, A., & Ang, L. H. : Leaf gas exchange characteristics of pioneer and late successional species. Abstracts of XXI IUFRO World Congress 2000, vol.3:479(2000)
- ⑬ 松本陽介・丸山 温・Lai Hoe Ang : 熱帯樹種陽葉における最大ガス交換速度および浸透ポテンシャルのスクリーニング. TROPICS 9(3):195-209(2000)
- ⑭ Miwa, M., Tanaka, R., Shinone, M., Kojima, K., Hogetsu, T. (2000) Development of polymorphic microsatellite makers in a tropical tree species, *Melaleuca cajuputi* (Myrtaceae). Mol. Ecol. 9: 639-640
- ⑮ 野口正二・ズルキフリユソップ・バハルディンカスラン・谷 誠・坪山良夫・三森利昭 : 半島マレーシア・熱帯雨林における土壌水貯留量の季節変動. 水文水資源学会誌 13:206-215(2000)
- ⑯ 谷 誠 : 森林消失の気候に及ぼす影響を展望する、森林科学 28、23-27、2000。
- ⑰ 石田 厚・藤間 剛 : 熱帯雨林の減少と森林再生へのチャレンジ. 静電気学会誌、25巻、192-201 (2001)
- ⑱ 丸山 温 : 熱帯林造林樹種の生理特性. 北海道の林木育種、44巻、36-39 (2001)
- ⑲ 松本陽介 : 森林・林業百科事典 (日本林業技術協会編、共著). 丸善、東京、1,250pp. (2001)

- ⑳ Miwa, M., Tanaka, R., Yamanoshita S., Norisada, M., Kojima, K., Hogetsu, T., Analysis of clonal structures of *Melaleuca cajuputi* (Myrtaceae) at a barren sandy site in Thailand using microsatellite polymorphism. *Trees* 15: 242-248, (2001)
- 21 Nakashizuka, T., Matsumoto, Y., Diversity and Interaction in a Temperature Forest Community: Ogawa Forest Reserve, Japan (series of the Ecological Studies). Springer, Tokyo, 300pp, (2001)
- 22 Noguchi, S.: Ph D. Thesis Kyoto University, "Hydrological characteristics of a small catchment in a tropical rain forest, Peninsular Malaysia", (2001)
- 23 Rahim, N. A., K. Baharuddin, S. Noguchi and M. Tani: Proceedings of the International Symposium. Canopy processes and ecological roles of tropical rain forest. 64-77., "Roles of tropical rain forest in hydrological processes and climatic events in forested catchments, Peninsular", (2001)
- 24 谷 誠 : 熱帯雨林は地球の肺か、科学 71-1、23-27、(2001)
- 25 Yamanoshita, T., Nuyim, T., Masumori, M., Tange, T., Kojima, K., Yagi, H., Sasaki, S., Growth response of *Melaleuca cajuputi* to flooding in a tropical peat swamp. *J. For. Res.* 6: 217-219, (2001)
- 26 北橋善範・丸山 温・市榮智明・小池孝良、熱帯林の樹冠部における水利用特性—マレーシア ランビルヒルズ国立公園の例—、日林北海道支部論文集、50号、20-22、(2002)
- 27 松本陽介 : 熱帯樹種の葉の生理特性(1)光合成. 熱帯林業 53 : 73-80 (2002)
- 28 松本陽介 : 熱帯樹種の葉の生理特性(2)蒸散と水蒸気拡散コンダクタンス. 熱帯林業 54 : 71-76 (2002)
- 29 Tani, M. et al.: Characteristics of energy flux and surface conductance estimated from the meteorological monitoring above a tropical rain forest in Peninsular Malaysia. In: Okuda, T., Niiyama, K., Thomas, S. C., et al. 'Pasoh: Ecology and Natural History of a Lowland Tropical Rain Forest in Southeast Asia.', Springer, (in press)
- 30 Roberts, J.M., Gash, J.H.C., Tani, M. and Bruijnzeel, L.A.: Controls of evapotranspiration in lowland tropical rainforest, *Forest-Water-People in the Humid Tropics*, (in Press)
- 31 Noguchi, S., N. Abdul Rahim and K. Baharuddin: Proceeding of International Conference on Forestry and Forest Products Research, CFFPR 2001, "Function for water conservation in a tropical rain forest at Bukit Tarek in Peninsular Malaysia", (in press)
- 32 Noguchi, S., K. Baharuddin, Y. Zulkifli, T. Sammori and M. Tani: *J. Trop. For. Sci.*, "Depth and physical properties of soil in forest and rubber plantation, Peninsular Malaysia", (in press)

(2) 口頭発表

- ① Noguchi, S., Zulkifli, Y., Baharuddin, K., Tani, M., Tsuboyama, Y., and Sammori, T. : Seasonal soil water storage changes in a tropical rain forest in Peninsular Malaysia. *Proceedings of The International Workshop on "The Responses of Tropical Forest Ecosystem to Long Term Cyclic Climate Changes"*, January, 2000, Kanchanaburi, Thailand, 24-27, (2000)
- ② Noguchi, S., Abdul Rahim, N., Baharuddin, K. : Function for water conservation, Bukit Tarek, in a tropical rain forest. *International Conference of Forestry and Forest Products Research CFFPR*

2001, Kuala Lumpur, Malaysia., (2000)

- ③ 則定真利子・小島克己、フタバガキ科 3 種の窒素形態嗜好性. 第 111 回日本林学会、(2000)
- ④ Norisada, M., Kojima, K., Hitsuma, G., Tange, T., Yamanoshita, T., Masumori, M., Nuyim, T., Yagi, Y., Sasaki, S., Planting trials of indigenous species at sandy soil area in southern Thailand. XXI IUFRO World Congress, 7-12 August 2000, Kuala Lumpur, Malaysia, (2000)
- ⑤ 大石隆也・三輪誠・田中律子・小島克己・宝月岱造、マイクロサテライトマーカーによる *Melaleuca cajuputi* の自家受精率の評価. 第 111 回日本林学会、(2000)
- ⑥ 大石隆也・三輪誠・呉炳雲・則定真利子・小島克己・宝月岱造、タイ国ナラチワ湿地林における *Melaleuca cajuputi* の繁殖特性：マイクロサテライトマーカーを用いた解析. 第 64 回日本植物学会、(2000)
- ⑦ Tani, M. et al.: Micrometeorology of a tropical rain forest at Pasoh, Peninsular Malaysia, XXI IUFRO World Congress, (2000)
- ⑧ Tani, M. et al.: Evaluating evapotranspiration and surface conductance of a tropical rainforest in Peninsular Malaysia, XXI IUFRO World Congress, (2000)
- ⑨ 谷 誠・野口正二・蔵治光一郎：Forest-Water-People in the Humid Tropics の報告.水文水資源学会誌 13：507-509、(2000)
- ⑩ 野口正二、熱帯生態学会十周年記念シンポジウム、「熱帯林の緑のダムとしての機能」、(2001)
- ⑪ 則定真利子・小島克己、荒廃地に植栽した *Dipterocarpus obtusifolius* の光合成. 第 112 回日本林学会、(2001)
- ⑫ 大貫靖浩、野口正二、佐々木尚三、K. Baharuddin：第 112 回日本林学会大会、「マレーシア熱帯林小流域における森林伐採後の土壌侵食（I）ー予報」(2001)
- ⑬ 古川原聡・山ノ下卓・小島克己・則定真利子・益守眞也・八木久義、根圏の酸素濃度を低下させたときのカユプテの根の光合成と糖代謝. 第 113 回日本林学会、(2002)
- ⑭ 小島克己・土田絢子・田原恒・則定真利子・八木久義、熱帯産マメ科樹木のリン酸欠乏に対する反応. 第 113 回日本林学会、(2002)
- ⑮ 則定真利子・田原恒・小島克己、タイ南部の酸性硫酸塩土壌に植栽した樹木の活着と成長. 第 113 回日本林学会、(2002)
- ⑯ 大貫靖浩、野口正二、佐々木尚三、K. Baharuddin：2002 年度日本地形学連合春季大会、「マレーシア・伐採小流域における保護樹帯の土砂流出防止効果」、(2002)
- ⑰ 田原 恒・小島克己・則定真利子・八木久義、*Eucalyptus* 属と *Melaleuca* 属樹木のアルミニウム耐性. 第 113 回日本林学会、(2002)
- ⑱ 谷 誠ほか：マレーシア Pasoh 熱帯雨林における乱流フラックス特性、113 回日本林学会大会学術講演集、150、(2002)
- ⑲ 山ノ下卓・益守眞也・小島克己・八木久義、低酸素濃度条件下におけるカユプテの根のエネルギー代謝. 第 113 回日本林学会、(2002)

(3) 出願特許

なし

(4) 受賞等

野口正二、日本林学会奨励賞（日本林学会）2000

受賞論文：Rainfall-runoff responses and roles of soil moisture variations to
the response in tropical rain forest, Bukit Tarek, Peninsular Malaysia.

(5) 一般への公表・報道等

なし

(6) その他成果の普及、政策的な寄与・貢献について

今後、関係する国内外の学会（日本生態学会、日本林学会、水文水資源学会、熱帯生態学会、
米国地球物理学連合、ユフロなど）を通じ、成果の広報・普及に努める。