

E-3 荒廃熱帯林のランドスケープレベルでのリハビリテーションに関する研究

(1) 択伐跡地、二次林、荒廃灌木林など荒廃林地の修復技術の開発と種多様性の評価に関する研究

① 修復技術の開発と生物多様性の評価

独立行政法人 森林総合研究所

| | | |
|----------|-----------------|------|
| 森林植生研究領域 | 群落動態研究室 | 新山 馨 |
| 植物生態研究領域 | 樹木生理研究室 | 石田 厚 |
| 海外研究領域 | 荒廃熱帯林担当チーム | 楨原 寛 |
| 京都大学大学院 | アジア・アフリカ地域研究研究科 | 小林繁男 |

<研究協力者> 国際林業研究センター (CIFOR) 藤間 剛

平成14~16年度合計予算額 24,871 千円
(うち、平成16年度予算額 6,907千円)

[要旨] 荒廃した森林を対象に、樹木の動態と生理特性を解明し荒廃林地修復技術を開発すること、および森林回復過程での生物多様性を甲虫相から評価することを目的とした。荒廃熱帯林を修復には、遷移初期の先駆性樹種を利用する事が重要である。典型的な先駆性樹種であるマカラングの、実生、稚樹、萌芽シュート、成木といった各発達ステージでの光合成や蒸散、窒素利用特性を野外で調べた。成長ステージとともに、窒素資源が体内に蓄積し、窒素利用様式も変化し、稚樹を暗から明条件に移すと、蒸散要求が高まるにも関わらず、どの樹種でも根の通水性が低下した。特に先駆性樹種で根の通水性の低下が大きく、代わりに根を大きく成長させていた。これらの結果から、環境変化に伴う根の増大が、実生の成長や生残の制限要因になっていることがわかった。先駆性樹種は大きな林冠ギャップに適応的であるが、ギャップが再閉鎖しやすい小ギャップでは大きな可塑性がかえって不利になると考えられた。半島マレーシアのパソー保護林で皆伐跡地の二次林の現存量回復を調べたところ、1973-2002年の29年間で未だ48%程度の回復であった。元の現存量に回復するにはさらに40年以上の年月が必要である。荒廃林の生物多様性評価のためにカミキリムシ相の調査と同定を行った。この調査ではアルトカルプス・トラップなどのカミキリムシの採集方法が確立され、またインベントリーのための標本と文献が整備された。結果として、カミキリムシは種数、個体数が多様性評価にとり適度な数で、生物多様性の評価に使いやすいこと、天然林、荒廃林それぞれを指標する種が存在することが明らかになった。基礎的な資料も必要なため、東カリマンタンに生息しているカミキリムシ同定のために必要な文献目録を作成した。

[キーワード] 二次林、先駆性樹種、樹木成長、森林火災、指標性カミキリムシ

1. はじめに

東南アジア熱帯地域では、択伐や山火事により森林のバイオマスや有用樹種が減少した荒廃林

地が多く見られる。こうした荒廃林地を、元の天然林に近い構造と機能を持つよう、より早くより効果的に修復する技術の開発は、熱帯林の持続的利用や熱帯林保全のために急務となっている。現実には、森林の荒廃が進むほど先駆性樹種の割合が高くなる。しかし先駆性植物は、遷移を促進する場合もあれば、地面を覆い隠すことによって遷移を止めてしまう場合もある (Kobayashi et al. 1999)。一方、遷移後期の樹種の稚樹が成長するには、林冠にギャップが開くことが必要であるが、強光ストレスにも弱い (Ishida et al. 2000)。このようなギャップ形成後の稚樹の光や水、窒素資源の利用の仕方は樹種によって異なり、この種間差が多様な樹種の共存を可能にしていると考えられている。したがって、暗条件から明条件へ移行した際の稚樹の馴化特性の仕方を調べることは重要である。しかし今まで、光合成系の光阻害の受けやすさやその阻害からの回復過程には多くの知見が蓄積されつつあるが (Yamashita et al. 2000、Yamashita et al. 2002)、蒸散要求性の増大に対する水利用の馴化に関しての知見は未だ少ない (Maherali et al. 1997、Naidu and DeLucia 1997、Tani et al. 2003)。またギャップ形成後の稚樹の成長は重要であるが、成長段階に伴う光合成の制限要因についても未だ知見が少ない (Bond 2000、Thomas and Winner 2002)。このような観点から、光変化後の資源利用の樹種間および成長に伴う制限要因を解明し、先駆性樹種を適切に管理することによって荒廃熱帯林を、多様性をもった林にすばやく修復することが重要である。

山火事は熱帯林荒廃の大きな原因であるが、その強度や頻度によって、残された森林や更新してきた森林の樹種構成やバイオマスは大きく異なる。このような荒廃程度の多様な森林の生物多様性の回復度合いを指標するには木材を住処とする甲虫類が適している。その理由は採集が比較的容易なことと、種数が膨大ではないため同定が早く進むことである。また標本の保存性がよいことも指標生物として優れている。

2. 研究目的

荒廃した森林を対象に、樹木の動態と生理特性を解明し荒廃林地修復技術を開発すること、および森林回復過程での生物多様性について甲虫相を中心に評価することを目的とした。森林の荒廃が進むほど多くの先駆性樹種が見られ、既存の先駆性樹種を用いた修復は、遷移過程を利用したより自然に近い形での修復が可能になる。先駆性樹種の実生の成長や生残の大きな制限要因を明らかにするため、熱帯荒廃地によく見られる先駆性樹種の、実生、稚樹、萌芽シュート、成木といった各発達ステージでの、光合成や蒸散、窒素利用特性を野外において調べた。また荒廃地の修復過程に重要なギャップサイズと樹種との間の関係を明らかにするため、先駆性樹種と遷移後期樹種のフタバガキ科稚樹を用いて、温室実験により暗条件から明条件へ変えた場合の水利用特性の変化を調べた。主要な先駆性樹種の一つである *Macaranga gigantea* (以後マカランガと略す) の種子から発芽した実生の死亡率は高く、コシダなどによって遷移の進行がしばしば妨げられる。マカランガ実生の成長や生存を制限する要因を明らかにすることは、遷移速度の制御に役立つと考えられる。またマカランガの成木の切り株からの萌芽シュートを使った森林修復も、山火事後の森林再生に重要な技術と考える。そこでマカランガの、実生、稚樹、萌芽シュート、成木といった各発達ステージでの、葉の光合成の制限要因を調べた。

森林の生物多様性評価のためカミキリムシ相の調査を中心に行った。東カリマンタンは1997年から1998年にかけて、極度の乾燥と大規模な森林火災に見舞われた。そのため、良好な森林が荒

廃林となるケースが各地で見られた。これら荒廃林がどの程度まで回復するか、生物多様性評価として、被災程度の異なる森林でカミキリムシ相の変化を見ることにした。また採集では各種トラップを組み合わせて、効率的な調査方法の確立をめざした。また正確な種の同定のため標本と文献を網羅し、カミキリムシ相のインベントリー調査の体制を作ることも目的とした。

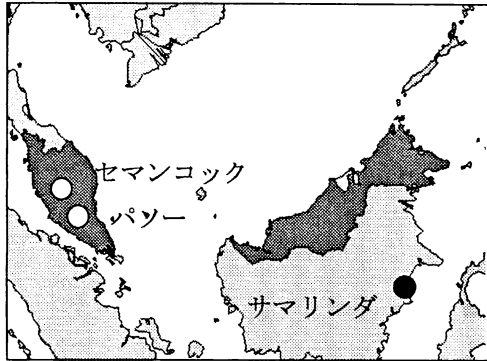


図-1 調査地の概要.

インドネシアでの調査は、サマリンダ近郊の山火事跡地でおこなった.

3. 研究方法

調査地はインドネシア、サマリンダ近郊の山火事跡地に再生した先駆性樹種の優占する二次林である（図-1）。東南アジア地域における典型的な先駆性樹種である *Macaranga gigantea* について、野外で、実生、稚樹、萌芽シュート、成木の異なったステージの個体を選んだ。光による葉の形態的・生理的な特性を除き、個体の発達段階における光合成の制限要因を明らかにするため、各個体から、よく光の当たっている展開終了した葉を、各ステージ6～7枚ずつ選んだ。そしてよく晴れた日に、携帯型光合成測定システム (Li-6400、米国ライカ社製) を用いて葉の光合成速度と気孔コンダクタンスを、携帯型クロロフィル蛍光測定システム (Mini-PAM、独国ワルツ社製) を用いて葉のクロロフィル蛍光を、夜明けから日没まで測定した。その後、葉をサンプリングし個葉の面積を測定した。また葉の一部を取り出し、その一部は乾燥させ葉の窒素濃度を測定した。また一部は固定し切片を作り、葉の厚さや葉の内部構造の違い、また幹の木部構造の違いを光学顕微鏡下で観察した。

また温室実験として、明るく大きなギャップ地に適応した熱帯先駆性樹種2種 (*Trema orientalis*, *M. gigantea*) と、小さなギャップ地に適応した遷移後期樹種フタバガキ科の4種 (*Shorea acuminata*, *S. balangeran*, *S. johorensis*, *S. multiflora*) の稚樹を用い、ギャップがあいた時を想定し暗条件から明条件に変化した際の、生理的・形態的な水利用特性の馴化を比較した。各樹種の、暗条件、明条件、暗から明条件に移した稚樹について、葉面積、根の面積、根の通水性 (L_{pr})、葉の浸透ポテンシャルを測定した。根の通水性は、プレッシャチャンバー内に水に浸けた根系を入れ、茎の切り口から出てくる水から測定した。根の L_{pr} は、根全体の平均値として、単位根面積当たり、単位圧力当たり、単位時間当たりで計算された。最近、細胞膜は単なる半透膜ではなく、細胞膜にあるアクアポリンという水を通すタンパク質によって膜の通水性が制御され、また水銀がアクアポリンの阻害剤であることがわかってきている (Martre et al. 2001, Javo t and Maurel 2002)。そこで塩化水銀を含んだ水と含まない水で L_{pr} を測定することによって、細胞膜を通して移動するアクアポリンの関与した通水 (Cell-to-cell pathway) と、細胞壁を通り細胞膜を経由しない通水 (Apoplastic pathway) とに分けた (Steudle and Frensch 1996, Steudle

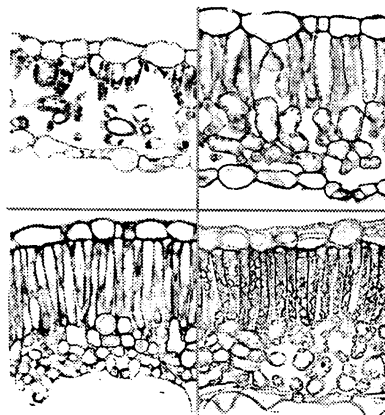
and Peterson 1998)。

マカラングの、実生、稚樹、萌芽シュート、成木の各個体から、十分に展開した葉を、各ステージ6～7枚ずつ選んだ。晴れた日に、携帯型光合成測定システム(Li-6400、米国ライカ社製)を用いて葉の光合成速度と気孔コンダクタンスを、携帯型クロロフィル蛍光測定システム(Mini-PAM、独国ワルツ社製)を用いて葉のクロロフィル蛍光を、夜明けから日没まで測定した。その後、個葉の面積を測定した。また葉の一部を取り出し、窒素濃度を測定した。

半島マレーシアのパソー保護林に6 haの試験地を設定し、胸高直径5 cm以上の全木を1994、1996、1998、2000、2002、2004年に毎木調査した。この試験地の0.2ha (20 m x 100 m) は1973年に現存量測定のために皆伐された。その部分は天然更新した二次林なので、この回復過程を調べた。

カミキリムシ相の調査における試験地は、インドネシア、サマリンダの南方に位置するブキット・スハルトのムラワルマン大学教育実習林、ブキット・バンキライの森林、およびサマリンダの西方に位置するスブルー実験林である。ブキット・スハルト教育実習林は1998年2月27日～3月3日、3月30日～4月6日までの2度、森林火災に見舞われた。この実習林で森林火災直後に焼け焦げた丸太内の穿孔性甲虫類の生存調査を行った。調査樹種はフタバガキ科の*Dipterocarpus cornutus*, *Shorea laevis*, *M. gigantea*, *Ficus* sp. などの10種である。調査は倒木・立枯れ木の長さ、中央径、樹皮厚を測定しながら行った。昆虫の採取および観察は、可能な限り樹皮を剥いで、樹皮のあるものは樹皮下、樹皮のないものは内部の昆虫類の蛹、幼虫、成虫の生死、および表面からの深さなどを測定して行った。得られた昆虫類の科、属、種の同定を行ったが、ここでは穿孔性甲虫類のカミキリムシ科、タマムシ科、クワガタムシ科、クロツヤムシ科についてのみ報告する。

なお、クワガタムシ、クロツヤムシ両科は調査個体数が少なかったため、2科をまとめて整理した。また、調査木の焼け焦げ方については、大：調査木全体の70%以上焼け焦げ、中：全体の約30～70%焼け焦げ、小：全体の約30%未満焼け焦げ、無し：焼け焦げ跡がない、の4段階に分けた。森林火災の被害の大きな林として赤道直下の低地林であるスブルー実験林、被害の小さな林としてブキットスハルト、ムラワルマン大学教育実習林、そして、対照としてブキット・バンキライの天然林を用いた。調査は、マレーズトラップ、吊り下げ式トラップ、およびアルトカルプス・トラップを使用し、この他に定期的ではないがライトトラップも併用した。なお、アルトカルプス・トラップとは*Artocarpus*属の樹木の葉のついた枝を林内に吊し、それに集まるカミキリムシ採取する方法である。



図－2 熱帯先駆性樹種*Macaranga gigantea*の、実生(左上)、稚樹(右上)、萌芽シュート(左下)、成木(右下)陽葉の切片写真。

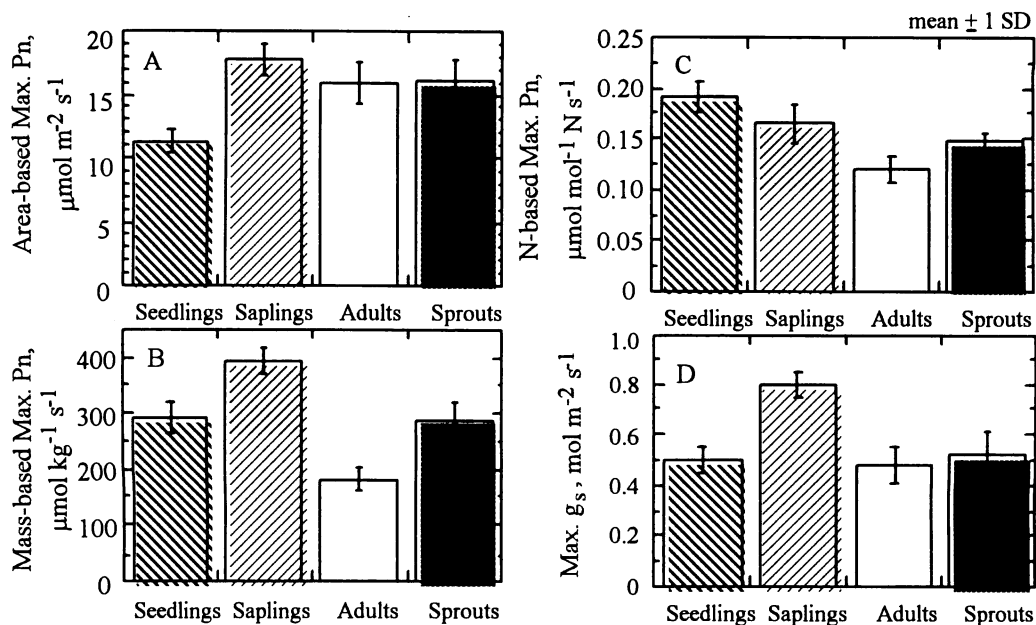


図-3 熱帯先駆性樹種 *Macaranga gigantea* 陽葉の、実生 (Seedlings)、稚樹 (Saplings)、成木 (Adults) 萌芽シュート (Sprouts) における、A) 単位葉面積当たりの光合成速度、B) 単位乾重当たりの光合成速度、C) 単位窒素当たりの光合成速度 (窒素利用効率)、D) 日最大気孔コンダクタンス。

4. 結果・考察

(1) 先駆性樹種の生理特性

野外で生育する先駆性樹種マカラング (*M. gigantea*) は、実生、稚樹、成木、萌芽シュートといった樹木の発達に応じて、葉の生理的・形態的特性における変化が見られた。その光合成を制限する要因は、物理的な環境要因と生物的な要因に分けられ、木の発達段階に応じて要因は変化した。実生の葉は、稚樹、萌芽シュート、成木の葉と比べて小さく、また単位面積当たりの重さも軽かった。葉内の形態的な特徴として、実生の葉は細胞が少なく空間間隙が大きく、稚樹の葉は細胞が大きく、成木の葉は細胞が少なく空間間隙が小さかった (図-2)。葉面積当たりの窒素含量は実生で最も小さく、葉の乾重当たりの窒素濃度は実生と成木で小さかった。また葉の炭素/窒素比は、実生と成木で高かった。

光合成速度に関しては、葉面積あたりでは稚樹の葉で最も低かったが、乾重あたりでは成木の葉で最も低かった。また窒素当たりの光合成速度は、稚樹の葉で最も高く、成木の葉で最も低かった (図-3)。これは稚樹の葉では、窒素をルビスコのような光合成関連のタンパク質に、より分配していることを示す (Field 1983)。しかし稚樹の葉では葉が薄く、葉面積当たりの窒素濃度が低いため、窒素不足により光合成が制限されていると考えられる。従って、実生から稚樹のステージになるまでに、窒素などの資源の蓄積が必要であることがわかった。また成木の葉の高い炭素/窒素比と、窒素当たり、そして乾重当たりの低い光合成速度は、高い被食防衛や風などの高い障害耐性をもたらすものと思われる。どのステージの葉でも、日中、葉と大気の水蒸気圧飽差 (空気の乾燥度の指標) の増加によって、気孔コンダクタンスの低下が見られた (図-4)。

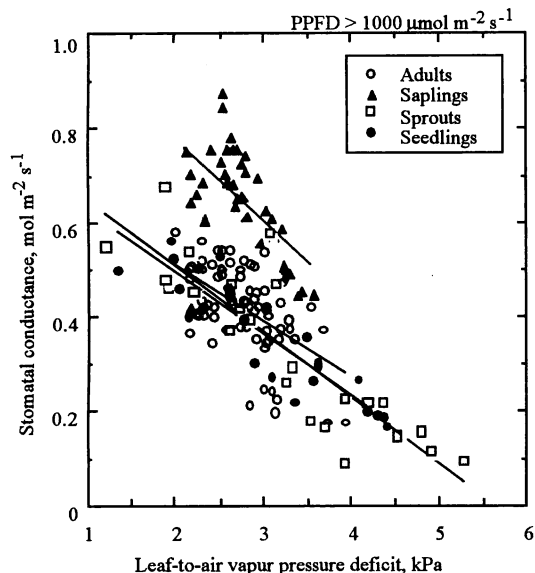


図-4 熱帯先駆性樹種 *Macaranga gigantea* 陽葉の、実生 (Seedlings)、稚樹 (Saplings)、成木 (Adults) 萌芽シュート (Sprouts) における、日中の気孔コンダクタンスと大気と葉の水蒸気圧飽差との関係。

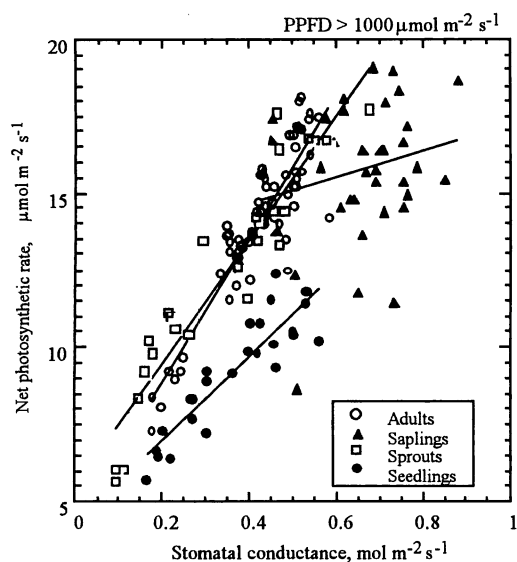


図-5 熱帯先駆性樹種 *Macaranga gigantea* 陽葉の、実生 (Seedlings)、稚樹 (Saplings)、成木 (Adults) 萌芽シュート (Sprouts) における、日中の気孔コンダクタンスと純光合成速度との関係。

同じ水蒸気圧飽差の時、実生の葉で最も気孔コンダクタンスが高く、実生、成木、萌芽シュートの間では有意な差は見られなかった。このことは稚樹でもっとも水分の制限が少ないことを示し、実生から稚樹のステージになるまでに、根などの発達により通水性を上げる必要があることを示唆する。また日中、光強度が高い時、気孔コンダクタンスと光合成速度に高い正の相関が見られた (図-5)。従って日中の光合成速度は、気孔コンダクタンスによって強く制限を受けていることがわかった。また同じ気孔コンダクタンスでも実生の葉の光合成速度は低く、強く窒素が不足している事を示唆する。

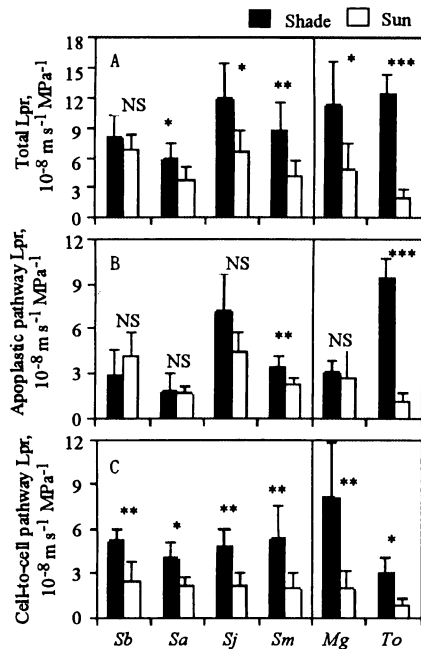


図-6 熱帯先駆性樹種 *Macaranga* (*Mg*) と *Trema* (*To*) とフタバガキ科遷移後期樹種 (*Sb*, *Sa*, *Sj*, *Sm*) の、暗条件の稚樹 (Shade) と暗から明条件に移した稚樹 (Sun) における、A) 根の通水性 (L_{pr})、B) 根の通水性のApoplastic pathwayと、C) 根の通水性のCell-to cell pathway.

これらの結果から、マカラングの実生から稚樹へのステージにおいて、窒素の蓄積と通水システムの構築といった、環境ストレスに耐え高い光合成を達成するための変遷 (transition) があることがわかった。また稚樹から成木のステージの間でも、葉の中の窒素の利用形態や炭素/窒素比に関する変遷 (transition) があることがわかった。すなわち樹木の発達段階において、植物の成長から被食防衛や風などの物理的な障害に対する耐性を強めるようなシフトが見られた (Coley et al. 2002)。このように、実生、稚樹、成木、萌芽といった成長ステージによって光合成の制限要因が変化することが示された。

温室実験で、稚樹を暗条件から明条件に移すことによって、葉や根の生理面、形態面に乾燥に適したような変化が見られた。明条件に移すことによってどの樹種でも、気孔コンダクタンスは増加し、すなわち蒸散要求性は増加した。生理面では、葉の水飽和時での浸透ポテンシャルは低下 (効果的な浸透調節) し、高い蒸散と低い葉の水ポテンシャル下でも、葉の膨圧を維持できるようにしていた。また根の通水性 (L_{pr}) は、明条件に移すことによって蒸散要求性が増加したにも関わらず、すべての樹種で低下した (図-6)。Apoplastic pathwayの L_{pr} は、特に *Trema* では低下したが、他の樹種では明らかな傾向は見られなかった。すなわち、根にカスパー線が存在するにも関わらずApoplastic pathwayでの蒸散流は光環境によらずいつも存在していた。また先駆性樹種 *Trema* のApoplastic pathwayの L_{pr} の低下は、成長に伴った細胞壁のスベリン化によるものと考えられた (Rieger and Litvin 1999, North and Nobel 2000)。一方、Cell-to-cell pathwayの L_{pr} は、どの樹種も明条件に移すことによって低下した。また、Cell-to-cell pathwayの L_{pr} には個体サイズの依存性は見られなかったため、Cell-to-cell pathwayの L_{pr} の低下は光条件の悪化に伴う根細胞のアクアポリン活性の低下によるものと考えられた。すなわち、暗条件下では蒸散流に対するアクアポリンの寄与が大きかったが、明条件下ではApoplastic pathwayの寄与がより重要になった。一方形態面では、暗条件から明条件に移すことによって (細根面積/葉面積) の増加がすべての樹種で見られた。

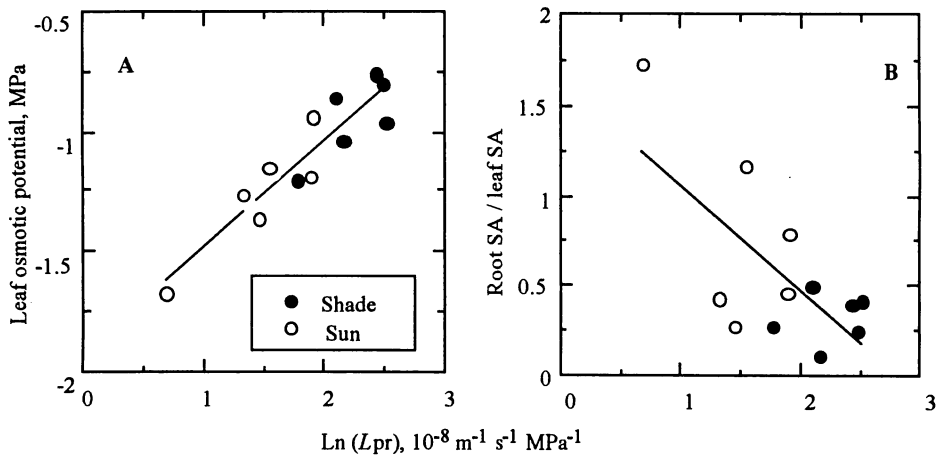


図-7 暗条件の稚樹 (Shade) と暗から明条件に移した稚樹 (Sun) の、A) 根の通水性 (Lpr) と B) 飽和水時の葉の浸透ポテンシャル (Leaf osmotic potential) と根と葉の面積比 (Root SA/leaf SA) .

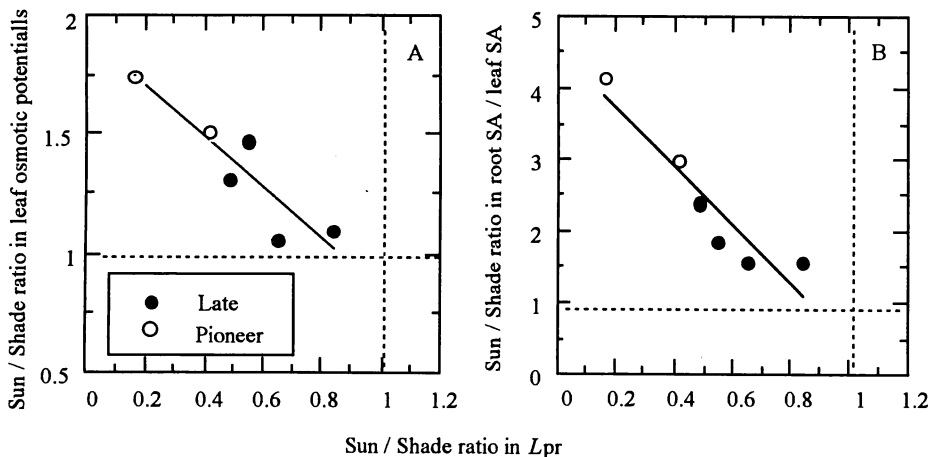


図-8 根の通水性 (Lpr) と、A) 飽和水時の葉の浸透ポテンシャル (Leaf osmotic potential) 暗条件の稚樹 (Shade) と B) 根と葉の面積比 (Root SA/leaf SA) の、暗条件の稚樹と暗から明条件に移した稚樹 (Sun/Shade) の比。
黒丸は遷移後期樹種 4 種 (*Shorea*)、白丸は熱帯先駆性樹種 2 種 (*Trema* と *Macaranga*) のデータ。

根の通水性の低い個体ほど、葉の浸透ポテンシャルは低く、また (細根面積/葉面積) は大きくなった (図-7)。暗条件から明条件に移した時の変化幅 (可塑性) を樹種間で比較してみると、先駆性樹種は遷移後期のフタバガキ科樹種と比べ、根の通水性 (Lpr) や葉の浸透ポテンシャルの低下が著しく、また (細根面積/葉面積) も大きく増加した (図-8)。すなわち先駆性樹種の方が、生理的、形態的な可塑性が大きかった。葉の浸透ポテンシャルは葉が水を吸い上げる力、細

根面積/葉面積は、植物個体の蒸散面に対する吸水面の比にあたることから、植物個体全体の水バランスを維持するために、地上部や地下部器官の間で密接な調節が行われていたことを示唆する。

(細根面積/葉面積)は、下の式1のように、葉の形態(LMA: 葉重/葉面積)、細根の形態(細根面積/根重)、細根と葉との物質分配率(根重/葉重)のパラメータに分解できる。

$$(\text{細根面積/葉面積}) = (\text{葉重/葉面積}) (\text{細根面積/根重}) (\text{根重/葉重}) \quad \text{式1}$$

そこで(細根面積/葉面積)を変化させる為の各パラメータの寄与を調べたところ、葉の形態(LMA: 葉重/葉面積)の寄与が最も大きく、次に物質分配率の寄与が大きかった。従ってLMAは、個体当たりの(細根面積/葉面積)を調節する最も重要なパラメータであることがわかった。

これらの結果は、稚樹の環境が暗条件から明条件に変わることによって、葉や根の生理的・形態的な変化をもたらされることを示す。またその可塑性は、遷移後期のフタバガキ科樹種よりも先駆性樹種で大きかった。このことは、先駆性樹種は大きなギャップ地により適応的であるが、逆にギャップが再閉鎖してしまうような小さなギャップ地では、かえってその大きな可塑性が大きなコストをもたらすため不利であると考えられた。すなわち遷移系列に従った変動環境下での水利用特性の可塑性の違いが、最適なギャップサイズをもたらし、樹種の多様性を維持する機構の1つであることが示唆された。

(2) 熱帯林の動態

伐採後29年たった2002年でも現存量は約48%しか回復していなかった(図-9)。1994年から2002年までの現存量の増加率から推測すると、元の天然林の現存量に回復するのにさらに42年かかることが明らかになった。

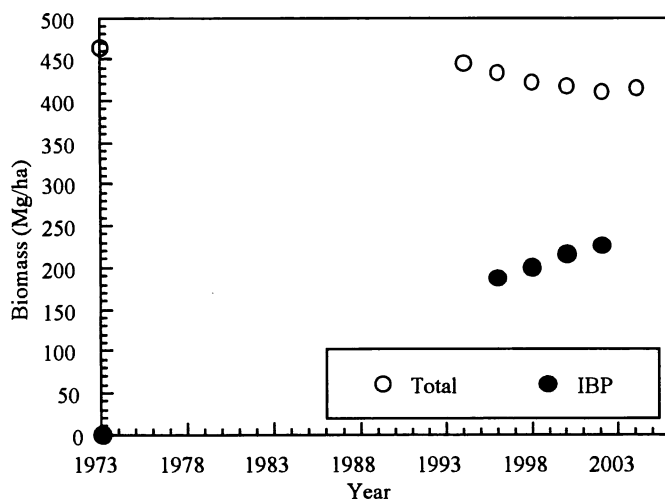


図-9 IBP(国際生物学プログラム)の際に伐採された0.2ha(黒丸)と天然林(白丸)の現存量の比較.

伐採は1973年に行われた.

表-1 天然林、荒廃林を指標するカミキリムシのリスト (個体数の多い種のみ示した)。

| 種名 | 天然林 | 半焼林 | 全焼林 | 計 |
|--|-----|-----|-----|-----|
| 1 <i>Xenolea tomentosa</i> (Pascoe) | 130 | 234 | 316 | 680 |
| 2 <i>Pterolophia melanura</i> Pascoe | 48 | 116 | 70 | 234 |
| 3 <i>Ropica marmorata</i> Breuning | 14 | 36 | 91 | 141 |
| 4 <i>Epepeotes spinosus</i> (Chevrolat) | 70 | 39 | 14 | 123 |
| 5 <i>Epepeotes luscus</i> (Fabricius) | 49 | 25 | 25 | 99 |
| 6 <i>Pterolophia annulitarsis</i> (Pascoe) | 35 | 22 | 31 | 88 |
| 7 <i>Acalolepta rusticatorix</i> (Fabricius) | 31 | 13 | 32 | 76 |
| 8 <i>Ropica sparsepunctata</i> Breuning | 71 | 4 | 0 | 75 |
| 9 <i>Pterolophia crassipes</i> (Wiedman) | 2 | 4 | 69 | 75 |
| 10 <i>Atimura bacillima</i> Pascoe | 6 | 39 | 27 | 72 |
| 11 <i>Gnoma longicollis</i> (Fabricius) | 51 | 13 | 1 | 65 |
| 12 <i>Sybra umbratica</i> Pascoe | 2 | 1 | 52 | 55 |
| 13 <i>Sybra propinqua</i> Breuning | 5 | 8 | 35 | 48 |
| 14 <i>Ropica quadricristata</i> Breuning | 30 | 8 | 0 | 38 |
| 15 <i>Acalolepta dispar</i> (Pascoe) | 30 | 5 | 1 | 36 |
| 16 <i>Parepicedia fimbriata</i> (Chevrolat) | 26 | 3 | 2 | 31 |
| 17 <i>Amechana nobilis</i> Thomson | 26 | 3 | 1 | 30 |
| 18 <i>Cacia</i> (<i>Cacia</i>) <i>confusa</i> (Pascoe) | 6 | 5 | 17 | 28 |
| 19 <i>Nedine adversa</i> (Pascoe) | 1 | 11 | 14 | 26 |
| 20 <i>Acalolepta fluvoscutellata</i> Breuning | 16 | 8 | 1 | 25 |
| 21 <i>Rondibilis spinosula</i> (Pascoe) | 0 | 1 | 24 | 25 |
| 22 <i>Nyctimenius ochraceovittata</i> Aurivillius | 14 | 5 | 2 | 21 |
| 23 <i>Gnoma vittaticollis</i> Aurivillius | 16 | 2 | 1 | 19 |
| 24 <i>Ropica angusticollis</i> Pascoe | 16 | 2 | 0 | 18 |
| 25 <i>Sybra vitticollis</i> Breuning et de Jong | 16 | 0 | 0 | 16 |
| 26 <i>Acalolepta unicolor</i> Fisher | 11 | 2 | 3 | 16 |

(3) 生物多様性の評価手法

焼け焦げ程度が大の丸太に、カミキリムシ科、タマムシ科で生存する個体は全くなかったが、クワガタムシ科、クロツヤムシ科では生存率47.8%と半数近くが生存していた。カミキリムシ、タマムシ科甲虫は腐朽の進まない硬い材を食し孔道を作るため、幼虫は材内を自由に動けない。これに対し、クワガタムシ、クロツヤムシ科甲虫は腐朽の進んだ材を食し材内を自由に動く。そのため、丸太の表面が焦げても、材内深く潜って、生き延びたと推定される。焼け焦げが中程度では、カミキリムシ科は生存率が12.6%、タマムシ科では16%であった。焼け焦げ程度が小で、カミキリムシ科は生存率が7.5%、タマムシ科では90.3%であった。クワガタムシ科、クロツヤムシ科は生存率が40%であった。全く焦げていなかった丸太では、カミキリムシ科は生存率が100%、タマムシ科では生存率は98.2%であった。樹皮厚と生存率の関係は比較した個体数が丸太数、昆虫数ともかなり異なるので、明確なことはいえなかった。しかし、森林火災に見舞われても穿孔性甲虫類はある程度、生存することが明らかになった。

様々なトラップ利用して、被災程度の大きな、荒廃林であるスブルー実験林（調査地面積1,000 ha;調査期間約1年）では142種、被災程度の小さな二次林化したブキット・スハルト教育実習林（1,000 ha;約1年）では540種が採集された。天然林のブキット・バンキライ（300 ha;約2年）では469種が報告された。明らかに被災程度の大きなスブルーだけがカミキリムシの種数が少なかった。各亜科の構成種数は、ハナカミキリ亜科Subfamily Lepturinaeだけが、ブキット・スハルト9種、ブキット・バンキライ12種、スブルー1種とスブルーだけが特に少ない。さらにブキットバンキライは調査面積が狭いのに、ブキット・スハルトよりも種数が多い。これはハナカミキリ亜科の種は湿った環境に棲息し、スブルーのように荒廃すると湿った環境が減少し、生活できないためと推定される。族の構成種数も同様に見ると、Saperdiniがブキット・スハルトで46種、ブキット・バンキライ71種、スブルーで5種とスブルーの種数が特に少ない。これはSaperdiniの種は成虫が木の柔らかい葉を性成熟のために食べる習性があり、天然林のように日陰ができる環境でないとい生活できないグループだからである。このようなことから、ハナカミキリ亜科、Saperdiniに属する種はよい森林環境の指標種と考えられる。

ブキット・バンキライの天然林、半焼林、全焼林での、アルトカルプス・トラップによる捕獲種・個体数は各44種784個体、42種655個体、45種875個体であり、3林分間で差は認められなかった（表-1）。しかし、天然林と全焼林とでは種構成が全く異なっていた。森林火災の被害程度の大きな林の指標カミキリムシは*Sybra umbratica*, *Sybra propinqua*, *Pterolophia crassipes*, *Rondibilis spinosula*である。さらに半焼林、天然林で大半が捕獲されていた種には*Paraleprodera epicedoides*, *Epepeotes spinosus*, *Acalolepta fulvoscutellata*, *Nyctimenius ochraceovittata*があげられる。逆に天然林では殆ど捕獲されず半焼林、全焼林で大半が捕獲される種は荒廃林の指標種とみなすことができる。これらは*Atimura bacillima*, *Ropica marmorata* Breuning, *Nedine adversa*, *Sciades quadriplagiatus*であった。

なお、この研究の過程で東カリマンタンのカミキリムシ類に関連する文献目録、インベントリーを作成した。東カリマンタンのカミキリムシ類の同定に必要なと思われるカリマンタン（ボルネオ）島および、半島マレーシア、大スンダまでの新種記載の掲載誌も含め文献を200点以上集めた。インベントリーとしてこれまでに3つの論文をまとめた（Makihara et al. 2002、2003、2004）。何れも、カミキリムシ成虫が図示されている。文献と併せて、東カリマンタンのカミキリムシ、500種が特定でき、約900種が識別可能となった。

5. 本研究により得られた成果

荒廃熱帯林を早く修復し再生させるために、先駆性樹種の活用が重要である。マカラングは遷移を促進されるのに有効な先駆性樹種であるが、先駆性樹種とはいえ、実生から成長するには多くの制限要因が存在することがわかった。従って多くの種子供給を確保するため、成木や切り株を残すことが重要である。また光や水環境変化に対する反応特性には樹種間差が見られ、樹種間の可塑性の違いが、更新における最適なギャップサイズの違いをもたらしていることが分かった。このことから先駆性樹種の林冠の形成後、それぞれの樹種に適したギャップを形成させることによって、種多様性の高いフタバガキ林の早い回復を図ることが重要である。

森林火災でも穿孔性甲虫類が生き延びているが、森林火災の影響を強く受けた森林ではカミキリムシ相が貧弱になる。森林環境指標種の特定をするための新たな採取法を確立し、東カリマン

タンにおける森林環境指標種を以下のように明らかにした。

天然性の強い森林の指標種：*Sybra vitticollis*, *Ropica sparsepunctata*, *Parepicedia fimbriata*など。

荒廃した森林の指標種：*Sybra umbratica*, *Sybra propinqua*, *Pterolophia crassipes*, *Rondibilis spinosula*, *Atimura bacillima*, *Nedine adversa*など。

一連の研究の過程で、東カリマンタンのカミキリムシ同定のための標本整備と文献目録を作成した。

6. 引用文献

- Bond B. J. (2000) Age-related changes in photosynthesis of woody plants. *Trends Plant Sci.* 5: 349-353.
- Coley P. D., Massa M., Lovelock C. E. and Winter K. (2002) Effects of elevated CO₂ on foliar chemistry of saplings of nine species of tropical tree. *Oecologia* 133: 62-69.
- Field C. B. (1983) Allocating leaf nitrogen for the maximization of carbon gain: leaf age as a control on the allocation program. *Oecologia* 56: 341-347.
- Ishida A., Toma T., Ghozali D. I. and Marjenah (2000) In situ study of the effects of elevated temperature on photoinhibition in climax and pioneer species. In *Rainforest Ecosystems of East Kalimantan*. Ecological Studies 140 (eds E. Guhardja, M. Fatawi, M. Stisna, T. Mori and S. Ohta) Springer, Tokyo.
- Javot H. and Maurel C. (2002) The role of aquaporins in root water uptake. *Ann. Bot.* 90: 301-303.
- Kobayashi S., Sutisuna M., Delmyy A. and Toma T. (1999) Initial phase of secondary succession at the burnt logged-over forest in Bukit Soeharto, East Kalimantan, Indonesia - which vegetation types are facilitation or competition process? In *The international Symposium on Impact of Fire and Human Activities on Forest Ecosystems in the topic, Samarinda, Indonesia* (eds H. Suhartoyo and T. Toma). Pp 324-336. PUSREHUT, Mulawarman University, Samarinda, Indonesia.
- Maherali H., DeLucia E. H. and Sipe T. W. (1997) Hydraulic adjustment of maple saplings to canopy gap formation. *Oecologia* 112: 472-480.
- Makihara, H., Woro A. Noerdjito and Sugiarto (2002) Longicorn beetles from Gunung Halimun National park, West Java, Indonesia from 1997-2002 (Coleoptera, Disteniidae and Cerambycida). *Bull. FFPRI*, 1(3):189-223.
- Makihara, H., Woro A. Nmoerdjito and F. Budi (2003) Actuality of Sebulu Experimental Forest in East Kalimantan -On cerambycid beetles profile in burnt forest from January to February in 2003-. *Rehabilitation of Degraded Tropical Forests, Southeast Asia 2003*: 61-76.
- Makihara, H. and Woro A. Noerdjito (2004) Longicorn beetles of Museum Zoologicum Bogoriense, identified by Dr. E. F. Gilmour, 1963 (Coleoptera: Disteniidae and Cerambycidae). *Bull. FFPRI*, 3(1): 49-98.

- Naidu S.L. and DeLucia E.H. (1997) Growth, allocation and water relations of shade-grown *Quercus rubra* L. saplings exposed to a late-season canopy gap. *Ann. Bot.* 80: 335-344.
- North G.B. and Nobel P.S. (2000) Heterogeneity in water availability alters cellular development and hydraulic conductivity along roots of a desert succulent. *Ann. Bot.* 85: 247-255
- Rieger M. and Litvin P. (1999) Root system hydraulic conductivity in species with contrasting root anatomy. *J. Exp. Bot.* 50: 201-209.
- Stedle E. and Frensch J. (1996) Water transport in plants: Role of the apoplast. *Plant and Soil* 187: 67-79.
- Stedle E. and Peterson C.A. (1998) How does water get through roots? *J. Exp. Bot.* 49: 775-788.
- Tani T., Kudoh H. and Kachi N. (2003) Responses of root length/leaf area ratio and specific root length of an understory herb, *Pteridophyllum racemosum*, to increases in irradiance. *Plant Soil* 255: 227-237.
- Thomas S.C. and Winner W.E. (2002) Photosynthetic differences between saplings and adult trees: an integration of field results by meta-analysis. *Tree Physiol.* 22: 117-127.
- Turner N.C. and Jones M.M. (1980) Turgor maintenance by osmotic adjustment: a review and evaluation. In: *Adaptation of plants to water and high temperature stress* (eds N.C. Turner and P.J. Kramer), pp 87-103. John Wiley & Sons, Inc., USA.
- Yamashita N., Ishida A., Kushima H. and Tanaka N. (2000) Acclimation to sudden increase in light favoring an invasive over native trees in subtropical islands, Japan. *Oecologia* 125:412-419.
- Yamashita N., Koike N. and Ishida A. (2002) Leaf ontogenetic dependence of light acclimation in invasive and native subtropical trees of different successional status. *Plant Cell Environ.* 125: 412-419

7. 国際共同研究等の状況

マレーシア国 : Abd Rahman Kassim (FRIM: Forest Research Institute Malaysia)

タイ国 : Sapit Diloksumpun、Phnumard Ladpala、Duriya Staporn、Samreong Panuthai (タイ、森林局)、Ladawan Puangchit (タイ、カセサート大)

インドネシア国 : Woro A. Noerdjito (LIPI)

参加・連携状況等 : Diloksumpun、Ladpala、Staporn氏は実際に野外でデータを一緒にとり、Panuthai氏は環境測定を担当、Puangchit氏はタイ側の総代表者として許可申請などの事務面を委託。

8. 研究成果の発表状況

(1) 誌上発表

<論文 (査読あり)>

- ① H. Makihara and W.A. Noerdjito : Bull. FFPRI, 1, 3, 189-223 (2002)
 “Longicorn beetles from Gunung Halimun National Park, West Java, Indonesia from 1997 - 2002”
- ② N. Yamashita, N. Koike and A. Ishida: Plant Cell Env., 125, 412-419 (2002)
 “Leaf ontogenetic dependence of light acclimation in invasive and native subtropical trees of different successional status”
- ③ H. Makihara and W.A. Noerdjito : Bull. FFPRI, 3, 1, 49-98 (2004)
 “Longicorn beetles of Museum Zoologicum Bogoriense, identified by Dr. E.F. Gilmour, 1963 (Coleoptera: Disteniidae and Cerambycidae)”
- ④ A. Ishida, T. Toma and Marjenah: JARQ, 39, 57-67 (2005)
 “A comparison of in situ photosynthesis and chlorophyll fluorescence at the top canopies in rainforest adult trees”
- ⑤ T. Toma, A. Ishida and P. Matus: Nut. Cycl. Agroeco., 71, 63-72 (2005)
 “Long-term monitoring of post-fire aboveground biomass recovery in a lowland dipterocarp forest in East Kalimantan”
- ⑥ M. Shimizu, A. Ishida and T. Hogetsu: Oecologia, 143, 189-197 (2005)
 “Root hydraulic conductivity and whole-plant water balance in tropical saplings following a shade-to-sun transfer”
- ⑦ A. Ishida, K. Yazaki and L.H. Ang: Tree Physiol., 25, 513-522 (2005)
 “Ontogenetic transition of leaf physiology and anatomy from seedlings to mature trees of a tropical pioneer tree, *Macaranga gigantea*”
- <その他誌上発表 (査読なし) >
- ① S. Kobayashi, Y. Matsumoto, and E. Ueda (Eds.): Rehabilitation of Degraded Tropical Forests, Southeast Asia 2003, 25-33 (2003)
 “Ontogenetic change in leaf morphological and physiological properties of a tropical pioneer tree, *Macaranga gigantea* (執筆担当 : A. Ishida and K. Yazaki)”
- ② S. Kobayashi, Y. Matsumoto, and E. Ueda (Eds.): Rehabilitation of Degraded Tropical Forests, Southeast Asia 2003, 57-60 (2003)
 “How to find out indicated cerambycid species for forest condition status in case of Gunung Halimun National Park, West Java and Bukit Bangkirai forest, East Kalimantan (執筆担当 : W.A. Noerdjito, H. Makihara and Sugiarto) ”
- ③ S. Kobayashi, Y. Matsumoto, and E. Ueda (Eds.): Rehabilitation of Degraded Tropical Forests, Southeast Asia 2003, 61-76 (2003)
 “Actuality of Sebulu Experimental Forest in East Kalimantan - On cerambycid beetles profile in burnt forest from January to February in 2003- (執筆担当 : H. Makihara, W.A. Nmoerdjito and F. Budi) ”
- ④ T. Okuda, N. Manokaran, Y. Matsumoto, K. Niiyama, S.C. Thomas, and P.S. Ashton (Eds.): Pasoh. Ecology of a Lowland Rain Forest in Southeast Asia, Springer-Tokyo, 225-239 (2003)

- “Leaf physiological adjustments to changing light: partitioning the heterogeneous resources across tree species (執筆担当 : A. Ishida, A. Uemura, N. Yamashita, M. Shimizu, T. Nakano and L.H. Ang)”
- ⑤ T. Okuda, N. Manokaran, Y. Matsumoto, K. Niiyama, S.C. Thomas, and P.S. Ashton (Eds.) : Pasoh. Ecology of a Lowland Rain Forest in Southeast Asia、Springer-Tokyo, 559-568 (2003)
- “Regeneration of a clear-cut plot in a lowland dipterocarp forest in Pasoh Forest Reserve, Peninsular Malaysia (執筆担当 : K. Niiyama, Abd Rahman Kassim, S. Iida, K. Kimura, Azizi Ripin, S. Appanah)”
- ⑥ 槇原 寛 : 熱帯農業事典. 付表(2003)
「カミキリムシ」
- ⑦ 槇原 寛 : 月刊むし、 395, 14-15 (2004)
「インドネシア東カリマンタンにおけるタマムシ2種の生態」
- ⑧ 槇原 寛 : 月刊むし、 397, 14-15 (2004)
「インドネシア、東カリマンタン、カミキリムシ4種の生態的知見」
- ⑨ 槇原 寛 : 月刊むし、 398, 47-48 (2004)
「アルトカルプスの実を食害するカミキリムシ」
- ⑩ 槇原 寛 : 昆虫と自然、 39, 28-31, 1 pl., (2004)
「東カリマンタン低地林に棲息するカミキリムシ - アルトカルプストラップと森林環境指標カミキリムシ-」
- ⑪ Y. Matsumoto, E. Ueda, and S. Kobayashi (Eds.) : Rehabilitation of Degraded Tropical Forests, Southeast Asia 2004, 19-27 (2004)
“Gap adaptation of tropical pioneer and late successional trees in root water permeability and whole plant water balance (執筆担当 : A. Ishida and M. Shimizu)”
- ⑫ Y. Matsumoto, E. Ueda, and S. Kobayashi (Eds.) : Rehabilitation of Degraded Tropical Forests, Southeast Asia 2004, 11-18 (2004)
“Similarity of current species composition between primary and clear-cut plots logged for IBP project in Pasoh Forest Reserve (執筆担当 : K. Niiyama, Abdul Rahman Kassim, S. Iida, K. Kimura, Azizi Ripin)”
- ⑬ Y. Matsumoto, E. Ueda, and S. Kobayashi (Eds.) : Rehabilitation of Degraded Tropical Forests, Southeast Asia 2005, in press (2005)
“Seasonal changes of leaf properties in tropical drought-deciduous and evergreen trees in Thailand (執筆担当 : A. Ishida, D. Stapornand, P. Ladpara, K. Yazaki and S. Diloksumpum)”
- ⑭ Y. Matsumoto, E. Ueda, and S. Kobayashi (Eds.) : Rehabilitation of Degraded Tropical Forests, Southeast Asia 2005, in press (2005)
“Comparison of above ground biomass fluctuation between primary and clear-cut plots logged for IBP project in Pasoh Forest Reserve (執筆担当 : K. Niiyama, T. Satoo, Abdul Rahman Kassim, Nur Supurdi Md. Noor, S. Iida, K. Kimura, Azizi Ripin)”

(2) 口頭発表 (学会)

- ① Abd. Rahman Kassim, K. Niiyama, Shamsudin Ibrahim and Azizi Ripin : The international symposium on Response of Terrestrial Watershed Ecosystems in Monsoon Asia to Global Change, Tokyo. Japan (2002)
“Population structures and dynamics of major tree species in a mixed hill dipterocarp forest of peninsular Malaysia”
- ② K. Niiyama, Azizi Ripin, S. Iida, K. Kimura and Abdul Rahman Kassim: Seminar on Ecological Research in Tropical Rain Forests - A seminar to commemorate over 30 years of research at Pasoh Forest Reserve, Negeri Sembilan- Program & Abstracts p3 (2003)
“Current species composition of clear-cut plots logged for IBP project in Pasoh Forest Reserve”
- ③ M. Shimizu and A. Ishida: International Workshop on Ecophysiology of Ecotones. Yamanashi Institute of Environmental Sciences (2003)
“Effects of shade-to-sun transfer on root water permeability and interaction between root and leaf in tropical tree saplings with contrasting successional stages”
- ④ A. Ishida and K. Yazaki: International Workshop on Ecophysiology of Ecotones. Yamanashi Institute of Environmental Sciences (2003)
“Ontogenetic transition of leaf physiology and anatomy from seedlings to mature trees of a tropical pioneer tree, *Macaranga gigantea*”
- ⑤ M. Gamo, T. Maeda, M. Hayashi, T. Toma, A. Ishida, Samreong Panuthai, and Deddy Hadriyanto : Synthesis Workshop on the Carbon Budget using the Results of Flux Measurement and Ecological Survey in Asian Monitoring Network - Memorial workshop of the tenth anniversary of Takayama site- (2003)
“CO₂ flux observation in the tropical forest”
- ⑥ A. Ishida and M. Shimizu : International Workshop on “The Landscape Level Rehabilitation of Degraded Tropical Forests” , Tsukuba, Japan (2003)
“Gap adaptation of tropical pioneer and late successional trees in root water permeability and a whole plant water balance”
- ⑦ H. Makiyama, W. A. Noerdjito, and F. Budi : International workshop on “The Landscape Level Rehabilitation of Degraded Tropical Forests” , Tsukuba, Japan (2003)
“Actuality of Sebulu Experimental Forest in East Kalimantan where damaged by forest fires on cerambycid profile from January to February in 2003”
- ⑧ W.A. Noerdjito, H. Makiyama, and Sugiarto: International workshop on “The Landscape Level Rehabilitation of Degraded Tropical Forests” , Tsukuba, Japan (2003)
“How to find out indicated cerambycid species for forest condition status in case of Gunung Halimun national Park, West Java and Bukit Bangkirai forest, East Kalimantan”
- ⑨ 榎原寛、Sugiarto、W.A. Noerdjito : 日本甲虫学会2002年次大会(2003)
「インドネシア森林火災4年後のカミキリ相」
- ⑩ 榎原 寛・スギアルト : 日本鞘翅学会講演要旨 (2003)

「東カリマンタン森林火災直後、焼けた倒木内甲虫類の生死」

- ⑪ H. Makihara, and Sugiarto: International workshop on “The Landscape Level Rehabilitation of Degraded Tropical Forests, Tsukuba, Japan (2004)
“Are the beetles alive or dead in burnt snags just after forest fire? – In case of East Kalimantan- ”
- ⑫ W.A. Noerdjito, H. Makihara, and Sugiarto: International workshop on “The Landscape Level Rehabilitation of Degraded Tropical Forests”, Tsukuba, Japan (2004)
“Differences and features of cerambycid fauna with fragment of primary, secondary and degraded forests in landscape affected by human impacts and fire disturbance, East Kalimantan, Indonesia”
- ⑬ H. Makihara, W.A. Noerdjito, and K. Matsune: International workshop on “The Landscape Level Rehabilitation of Degraded Tropical Forests”, Tsukuba, Japan (2004)
“Profile of cerambycid beetles fauna in Sebulu Experimental Forest of East Kalimantan in 2003”
- ⑭ 石田厚、清水美智留: 第1回アクアポリン研究会 (2004)
「熱帯樹種の光環境変動下での根の通水性の変化とその生態的意義」
- ⑮ 清水美智留、石田厚、宝月岱造: 第115回日本林学会 (2004)
「対照的な遷移的地位にある熱帯樹木における、光の増加が根の通水性と個体の水分バランスに及ぼす影響」
- ⑯ 安田雅俊、島田卓哉、石田厚、Mariani Abu Bakar: 第14回日本熱帯生態学会 (2004)
「ラミン (ジンチョウゲ科) の種子散布様式について」
- ⑰ 石田厚、清水美智留: 農業環境工学関連4学会大会 (2004)
「熱帯樹木の根の通水性とその光環境応答」
- ⑱ 石田厚、矢崎健一、石塚森吉、Sapit Diloksumpun, Phanumard Ladpala, Duriya Staporn、Ladawan Puangchit: 第52回日本生態学会 (2005)
「タイ乾燥落葉樹と常緑樹における葉のガス交換特性の季節変化」
- ⑲ A. Ishida, S. Diloksumpun, P. Ladpara, D. Staporn, K. Yazaki and L. Puangchit: 第9回国際生態学会 (INTECOL, CANADA) (2005)
“Contrasting leaf gas exchange and morphology between tropical drought-deciduous and evergreen mature trees in Thailand” (アブストラクト提出済み)
- (3) 出願特許
なし
- (4) シンポジウム、セミナーの開催
なし
- (5) 一般への公表・報道等
榎原寛: 朝日新聞(2004年1月27日、朝刊)
「熱帯のカミキリ、驚異の多様性」

9. 成果の政策的な寄与・貢献について

このサブテーマで得られた荒廃熱帯林の評価法及び修復過程に関わる生理学的・生態学的な研究成果に関し、インドネシア（ボゴール）の国際林業研究センター（CIFOR）と連携し、国際的レベルで、熱帯地域の森林政策に成果を反映させた。