

マレーシア・サラワク州・バカムにおける生態系修復を目指した試験造林

櫻井克年
(高知大学農学部)

Experimental rehabilitation of the ecosystem at Bakam Forest Reserve, Sarawak, Malaysia

Katsutoshi SAKURAI

Faculty of Agriculture, Kochi University

摘 要

さまざまな要因によって荒廃した熱帯生態系の修復は危急の課題である。しかし、熱帯地域においても、単なる商業造林ではなく、植林による生態系修復を行う際に考慮に入れるべき点が、必ずしも明確にされていない。特に、土壌生態系は、生態系全体を支える重要な環境要因の一つであるが、十分に理解されているとはいえない。筆者は現在、マレーシア・サラワク州・バカムにおいて、多くの研究者とともに熱帯荒廃地生態系の修復というプロジェクトに取り組んでいる。本稿では、はじめに熱帯の土壌条件について概説し、調査の過程で浮き彫りとなった熱帯荒廃地生態系の修復を目指す場合の問題点をまとめた。

キーワード：生態系修復、土壌荒廃、試験造林、土壌生態環境、サラワク州

1. やせ地とは

熱帯の土壌の特徴を簡潔に表現すると、「やせ地」である。ただし、新しい母材である有色鉱物に富む火山灰が堆積する地域はこの限りではない。

やせ地を化学的な側面から捉えると、土壌中に含まれる養分元素の量が少なく、植物に養分を潤沢に供給することのできない土地である。物理的に捉えると、粘土含量が低く養分保持能力が低いのか、逆に、粘土含量が高すぎて排水性が不良であるか、レキが多く植物根が十分に成長できないような土地である。熱帯にはこのやせ地の分布が広

い。やせ地が熱帯に多い理由は、高温・多雨の気象条件下で土壌が激しく風化することにある。まず、土壌中のカルシウム、マグネシウム、カリウムなどの塩基類が流亡すると同時に、相対的に流亡しにくいアルミニウムが富化され強い酸性を発現するようになる。また、それらを保持することのできる有機物も土壌に多量にとどまることなく分解する。このようにして生成した土壌をFAO-UNESCOの分類¹⁾ではアクリソルとよぶ。ここまでは、時間をかければ暖温帯地方でも起こりうることであるが、熱帯の条件下で風化がさらに進行すると、土壌中のもっとも細かい無機画

表1 世界の「酸性土壌」の分布面積 (×10⁴ ha)

土壌単位・亜単位	北米	中米	南米	ヨーロッパ	アフリカ	南アジア	極東・シベリア	東南アジア	オーストラリア	世界	(A)*	(B)**
フェラルソル	0	65	61,943	0	41,998	28	0	1,485	1,337	106,856	23.3	9.7
アクリソル	11,763	2,131	19,421	417	8,622	5,626	13,798	19,733	2,327	83,838	18.3	7.6
ポドソル	23,920	0	154	20,442	232	0	1,951	599	867	48,165	10.5	4.4
「酸性」ヒストソル	8,652	249	358	3,033	51	39	6,665	1,713	93	20,853	4.5	1.9
チオニックフルビソル	0	0	18	0	509	194	0	446	0	1,167	0.3	0.1
「酸性」アンドソル	1,759	1,833	2,004	291	200	0	1,653	798	465	9,003	2.0	0.8
アレノソル	0	0	7,409	262	40,528	6,757	221	860	12,598	68,635	15.0	6.2
問題の少ない酸性土壌	26,094	1,689	16,146	10,892	31,717	7,104	10,805	5,261	10,552	120,261	26.2	11.0

* 各「酸性」土壌の「酸性」土壌全面積に対する割合 (%)

** 各「酸性」土壌の農業利用可能陸地面積に対する割合 (%)

分である粘土までもが崩壊する。すなわち、粘土を構成する粘土鉱物から脱ケイ酸が起こり、粘土鉱物の基本骨格が小さくなる。その結果、土壌中には鉄やアルミニウムが重合した酸化物が濃縮されて残る。このような土壌はFAO-UNESCOの分類ではフェラルソルに相当する。別名、Skeletal soil、つまり骸骨のような土壌と呼ばれる。このアクリソル、フェラルソルはいずれも、“強い酸性”土壌、に分類される。表1に酸性土壌ごとの世界における地域別分布面積を示した²⁾。アフリカや南米ではフェラルソルが、ヨーロッパ、アフリカを除く全ての地域でアクリソルの分布が大きいことが分かる。

その他のやせ地土壌の代表的なものに、FAO-UNESCOの分類ではアレノソルとよばれるものがある(表1)。この土壌は石英を主成分とした砂を母材とする層位発達の弱い土壌で、養分元素に乏しく、陽イオン交換容量(陽イオンの保持力の目安)が極めて低い。しかし、この土壌はむしろ水不足が制限因子となることが多い。いわゆる砂漠、サバンナ、サヘルなどに広く分布する土壌である。また、実際の分布面積は小さいが、東南アジア、南アジア、アフリカ地域にのみ分布が集中しているものにチオニックフルピソルがある。熱帯マングローブ植生をもつ地域に集中しており、農林業への利用のために行われる排水にともない、土壌中に蓄積されていたパイライトが酸化されて硫酸を多量に生成するため、酸性硫酸塩土壌とよばれる。

これらの地域の土壌生態環境を考えるには酸性の問題が非常に重要な側面となることは明らかである。酸性土壌の作物生育への阻害要因としては次のようなものがある³⁾。以下に原文のまま引用する。

- (a) 低pHそのものの害作用
- (b) 土壌のpHが低い場合可溶化する高濃度のアルミニウム(時にはマンガン)の害作用
- (c) リン酸の不足
- (d) 塩基類(特に、カリウム、マグネシウムなど)の不足
- (e) 微量要素(亜鉛、ホウ素、銅など、時にはイオウ)の不足
- (f) 微生物活性(硝酸化成、窒素固定作用など)の不良

これらの項目の作物生育阻害の相対的強度は土壌ごとに異なり、各項目は相互に関連しており、さらに各項目に対する耐性には作物種間・品種間に差があり、与えられた条件下でそれぞれの項目のうち、どれが実際の生育阻害要因として働くか

は極めて複雑で、それぞれの項目について土壌学的または作物栄養学的に正確な理解を深めておくことが必要である、とされている。

このように、酸性の強い土壌であるからといっても、酸性による生育阻害は簡単に特定できないのが実状であり、これらの土壌の農林業利用は慎重な検討を要する。田中³⁾のまとめにはpH、養分元素、微生物活性といった化学的・微生物学的要素があげられているが、“森を作る”というテーマを取り扱う場合、気象や地質・地形(微地形を含む)を詳細に検討しておかなければならない。

2. 熱帯林の修復・再生・創成

人間にとって“必要な”木材資源を確保する目的で木を植えるというのは、従来の造林学の得意とする分野である。これまでの農林業の諸分野では、栽培する作物の生産性を高め品質を向上させるための努力が営々と続けられてきた。人口増加にともなう食糧危機といった全地球的な大問題を解決するためには、現在でも非常に重要な検討課題であることはまちがいない。各種の工業も同様である。例えば、自動車を作るために“必要な”様々な技術開発が行われ、効率よく安価に生産することが追求されてきた。しかし、それを熱帯林、あるいは熱帯林生態系全体の保全と修復ということに当てはめて考えた場合、この“必要な”ということに相当する概念そのものがきわめて不明瞭である。その理由のひとつには、熱帯林生態系の保全や修復に関する研究が進んでおらず、何をどのように取り扱えば保全と修復が達成されたと評価して良いのか分からないという点にあると思う。

これまでの試みは、緑化や保存といった視点からの生態系の人為的な創成を目指したものであったといえるだろう。たとえば、大島造園土木(株)では、1977年に、森の中の工場を作ろうというコンセプトで臨海埋立地の緑化を試みている。工場の立地する埋め立て地に外国産の早生樹や日本の針葉樹、広葉樹などの様々な樹種を植林し、現在では成林するに至っている。この場合、成林することがひとつの成果となる。

一方、1989年に開園した千葉県立中央博物館の「生態園」は、植物群落園、ため池(舟田池)、植物分類園・生態実験園、小動物展示室、オリエンテーションハウスから成っている。生態系そのものの研究から保護・保全や復元、管理、そしてさらに自然教育・環境教育といった一連の流れが取り込まれている。自然誌博物館をめざしたこの

取り組みは、博物館では資料の収集やその分類、記載、因果解析などを行い、他方では生態園を核としつつ身近な環境から地球環境までの自然環境の保全、人間と自然の共存・共生につながる諸研究を行う研究博物館を目指したものである⁴⁾。「生態園」では、自然生態系をできるだけそっくりそのまま移転するという試みが行われている。数十年の後にも、安定した生態系が維持されていることを切望して止まない。それと同時に、熱帯においても、このような取り組みを通じて、生態系の諸分野の研究が進められることの意義は大きいと思う。

筆者はタイ国において荒廃地の再生と利用を目指した植林プロジェクトに携わってきた。荒廃地の中には、スズ鉱山跡地、石礫がケイ素・鉄・アルミニウムによって固結するラテライト性土壌、焼き畑跡地で貧栄養の砂地のためにまともな農林業が不可能になった土地などが含まれている⁵⁾。スズ鉱山跡地やラテライト性土壌などのように荒廃の程度がひどい場合には、現状の植生には重きを置かず、同一樹種あるいは数種の樹木を造林し、それらが成林することによって緑化をはかることが第一の目標であった。また、酸性以外に大きな生育障害要因がない焼き畑跡地の場合には、土壌の酸性矯正を行いつつ作物や樹木全般の生産性を高め、持続可能なシステムを作るために、アグロフォレストリーを導入することが必要であり、かつ、それが可能であった。荒廃地もまた、重要な土地資源であり、その生物生産性の回復を図るためには、状況に応じた農林業生態系を創成するという姿勢が必要であることを実感したプロジェクトであった。

“やせ地に森を作る”というのは、究極的には生態系の創成を目指している。その第一歩が生態系の修復である。生態系の修復に取り組むためには、どのような経緯で修復の必要な状態になったか、気候・気象・地質・地形・土壌などの立地環境、現存する植生などの詳細を把握したうえで、どのような方策を採るかを決定しなければならない。生態系の修復には自然による修復と、人為による修復の2通りあると考える。自然によるものはただ放置することで気長にその再生を待つよりよい。一方、人為による修復は、あくまで人間が行う行為であるので、いろいろな工夫が必要となる。

ここでは、数十～数百ha規模の広い範囲の土地の生態系修復を目的とした場合について考えてみる。作業の手間も考えると樹木を積極的に導入するのが適切であろう。まず、導入予定の樹木の

基礎的な生態生理を的確に把握する必要がある。修復に要する年数を算定するためにも、その樹木の幼木から成木に至るまでの樹齢のものについて、荒廃した森林から自然状態を残した森林までの様々な生態系の中での生態生理を評価するべきである。これらの基礎的なデータは、修復を目的とする土地の状況を大きく改変せずに、導入する樹種がそこに適応できるかどうかの判断に役立つ。次に、目的とする土地の現存植生の評価が必要である。導入樹種との相互作用についても予測可能になるとなおのこと良い。役に立たないあるいは導入樹種の生育の妨げになると思われている雑木や雑草が、実際には生育を促進するかもしれないという可能性を見過ごしてはいけない。したがって、現存植生と導入樹種、両方についての生態生理を調べることが必要である。自然植生下の地形や土壌環境の初期状態も評価し、荒廃地での植生と土壌の相互作用の解析に備える必要がある。

現在、文部省科学研究費補助金（創成的基礎研究費）「東アジアにおける地域の環境に調和した持続的生物生産技術開発のための基盤研究」の補助を受けたプロジェクトの一環として、サラワク州ミリ市郊外のランビル国立公園(Lambir Hills National Park)において大規模な調査研究が行われている⁶⁾。熱帯丘陵林における生態系のメカニズムの解明が主要な研究課題である。52haという大規模な植生プロットでは、直径1cm以上の樹木すべてがマーキングされ、その胸高直径が測定されている。およそ5年ごとに再測定が行われ、森林生態系のダイナミズムを解明しようというものである^{7),8)}。現在、2回目の測定および樹木の同定が進行中である。また、8haプロットにはツリータワー・ウォークウェイシステムが設置され、これまではほとんど知られていなかった林冠での植物-動物相互作用系の解析が進行中である。1996年の一斉開花の時期には、生態系の地上部から林冠までの総合的な研究にこのシステムが大いに活用された。また、自然植生下の土壌と植物の分布に関する検討や、地形と植物の分布に関する検討なども行われている。熱帯丘陵林生態系そのものの研究となると、どこまで解析可能なかわからないが、これらの調査研究によって少しずつではあるがその実体が明らかになりつつある⁶⁾⁻¹³⁾。熱帯林生態系の修復は、これらの成果を活用することなしに、実現できるものではない。

熱帯林生態系の修復が達成されたときにきわめて重要な側面となるのは、生物資源の探査(bio-prospecting)である。そのためにも自然生態系の中の生物相そのものの研究が初めに行われて

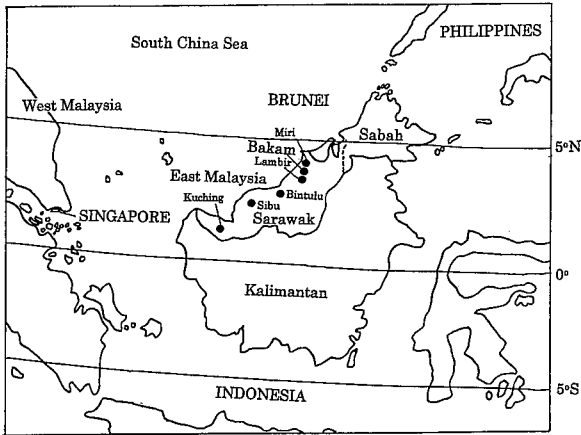


図1 バカム森林保護区の位置図

おり、どのような生態系が維持されているかを知っておく必要がある。Bio-prospectingは自然生態系の内部においてのみ可能であるとすると、現存する生態系の保全を第一の目標に掲げなければならないが、修復された、あるいはその途上にある生態系の中でも、破壊されていない自然生態系と同様の資源が得られるかもしれない。あるいは、修復の過程で発揮される生態系の自然治癒力によって、もっと新しい資源が産み出される可能性もあるはずである。

これらのことを考慮に入れて、われわれは実際にやせ地に森を作るというテーマ、つまり、荒廃地生態系の植林による修復に取り組んでいる。その詳細については、次の節で述べる。

3. やせ地で森を作る～マレーシア、サラワク州、バカムにおける試験造林～

3.1 バカム造林試験区の概要

サラワク州森林局との交渉の結果、1995年の終わり頃にミリ市郊外にあるバカム森林保護区というフィールドが提供されることになった。サラワク州では、1958年の航空写真を基に未利用地と判定された森林を州政府管轄の保護区とした。同一区域内にあっても、当時利用されていた土地についてはその使用権が認められ、森林保護区からは除外されている。その後40年が経過し、森林保護区の一部は地域住民によって違法に開墾され、焼き畑などの農業活動が行われてきた。バカム森林保護区も同様の過程を経ており、焼き畑として利用されていたものが近年再収監され、森林局側は植林地としての再生を目指している。利用者から、補償問題等のクレームが起こされたが、利用の履歴は1958年に森林保護区として指定された後であるため、法的には利用を主張する根拠はないというはなしである。

この地点はミリ市中心部から車でミリ・ピンツル道路を約16km南へ走り、そこから7.5kmほど西側の山側に入った丘陵地にある(図1)。所要時間は車で約40分程度である。森林保護区の総面積は243.9haである。そのうち、21.4haが日本チームとの共同研究の場として確保された。この21.4haの土地を、以後、バカム試験造林区とよぶ。

地質学的には新生代第三紀新第三紀の中新世および中新世～鮮新世の堆積物よりなっており、北から西に続くボルネオ地向斜によって特徴づけられる。いずれの堆積物も砂岩を主としており、頁岩や頁岩の粘土化したものと互層をなしている¹⁴⁾。褶曲作用の影響で背斜地形が形成されると同時に、それが断層によって分断されているため、現在の地表面には砂岩の部分が現れる場合と、頁岩やその粘土化したものが地表に現れる場合とがある。バカム試験造林区では、主に砂岩の風化物が地表に現れている。自然状態の森林としては、ケイ酸質の砂を主体とする養分に乏しい土地に成立する樹高の低い林、いわゆる“ケランガス林”しか成立しない土壤である。マレーシアの土壤分類ではRed Yellow Podzolic Soils (RYP)とされている。FAO-UNESCOの分類ではアクリソル(表1)、アメリカ農務省(USDA)の分類ではTropudaultsにあたる。強酸性土壤のひとつである。サラワク州におけるRYPの分布は極めて広範囲であり、正確な数字は現在手元にないが、土壤図によればおよそ8割近い面積をしめる。しかし、RYPの分布域内でも、ケランガス林のみられるSkeletal Soilsの様相を兼ね備えるものは海岸近くの丘陵部に分布する。これはFAO-UNESCOの分類ではアレノソル、アメリカ農務省(USDA)の分類ではDistropeptsにあたる。バカム試験造林区内には、アクリソルとアレノソルの混ざった土壤が分布する。いずれにせよ、酸性が強く、ケイ酸質の砂の多い、極めて貧栄養の土壤ということになる。丘陵地の土壤としてはもっとも化学的な条件の悪い土壤である。

また、バカム試験造林区は傾斜が非常に急である(図2)。傾斜が10度以下のところはほとんどなく、急なところでは35～40度近くのところもある。中央部に谷筋が走っており、雨期には一部で滞水する。周縁部は急傾斜であるため、全体的にはるつぼ状をなしている。バカム造林試験区の土壤は砂地の部分(アレノソル)と粘土集積がみられる部分(アクリソル)が不規則に分布するため、人為による攪乱を受けて地表が露出すると、豪雨によって激しい土壤侵食と小規模の地滑りが多発

表2 硫酸酸性を示す頁岩風化物の性質

試料	pH	EC mS m ⁻¹	水溶性イオン (mg L ⁻¹)			
			CL ⁻	NO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	NH ₄ ⁺
3-B	2.99	70.4	1.2	0	173.8	0.21
(処理後*)	2.46	183	9.8	0.4	163.1	6.15
6-B	2.54	378	22.3	n.d.	164.4	0.15
(処理後)	1.73	1021	31.5	n.d.	1987.4	0.36
9-B	3.40	54.8	12.5	n.d.	174.6	0.14
(処理後)	2.83	104.1	14.4	n.d.	132.7	1.45
10-B	6.05	50	4.7	n.d.	129.5	0.30
(処理後)	3.87	233	54.3	n.d.	648.8	0.30
11-B	2.43	412	41.2	n.d.	2096.3	0.71
(処理後)	1.82	765	52.0	n.d.	1521.8	2.24
レンガ	3.32	218	27.2	n.d.	837.1	0.34
(処理後)	1.94	692	27.0	n.d.	1479.5	3.1

* 30% H₂O₂液(土:液比=1:5)で4時間煮沸処理
備考) H₂PO₄⁻は検出されなかった。
n. d.: not detectable

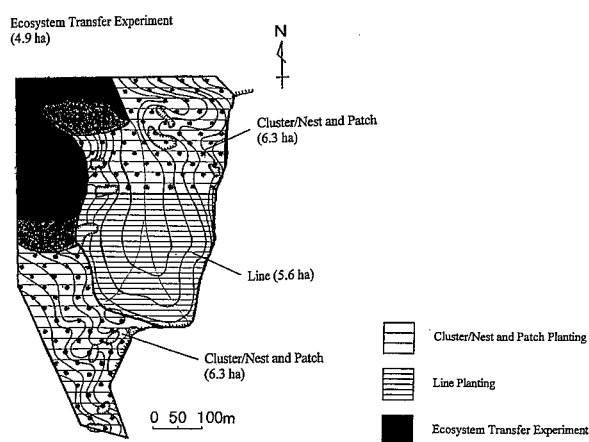


図2 バカム試験造林区の配置図

する。焼き畑圃場として用いられたのであるが、樹木はほとんど植えられておらず、わずかに、Pararubber (ゴム) とタマリンドの木が残っているのみである。周囲の焼き畑農園では、コショウやドリアン、ランブータン、マンゴスチンなどの果樹が導入されていることから考えると、バカム森林保護区内の焼き畑ではそれらが導入できなかったようである。地味の悪い土地では焼き畑民も過度の投資はしない。

また、森林保護区内の一部には、頁岩の風化物が地中浅く(10-20cm)に出てくる場所もある。先に強い酸性土壌についての概説を行ったが、森林保護区内においても粘土化した頁岩の一部に、風化すると強い硫酸酸性を発現するものがみられる。

この黒みを帯びた頁岩風化土壌は、レンガ作りの材料として用いられている。ただし、幸いなことに、その分布は丘陵地の中でも高度の低いところに限られており、われわれの試験造林区内にはみられない。表2にバカム森林保護区内およびその周辺で採取した頁岩風化物のpHと電気伝導度の値を示した。そのまま水にけん濁した状態でも非常に酸性が強いが、過酸化水素を用いて強制的に酸化した場合には極めて強い酸性を示すようになる。

バカム試験造林区は化学的のみならず物理的にも脆弱な土壌のうえにあり、傾斜もきつく、やせ地の代表のようなどころである。

3.2 やせ地を改善する

根本的な大規模土壌改良が効果を上げることは自明であるが、それに要する労力やコスト、またサラワク州ではやせ地の分布がきわめて広いということ考慮に入れると、普遍的な技術として成り立たない。むしろやせ地の改善には植物や微生物の力を借りる(助けてもらう)ことが最も現実的な方策であろう。植被で地表を覆うことは土壌侵食の防止にとってもっとも有効な方策である。一見むだにみえるカヤツリクサ、チガヤ、シダ、ワラビなどの繁茂も土壌侵食の防止には一役かっている。それらの根系は地表近くの土壌中に張りめぐらされており、表層土をしっかりと捕まえているのである。また、根からは様々な有機酸が分泌されるうえ、根そのものが枯れて腐って土壌有機物の一部になることによって肥沃度や物理性の改善につながる。しかし、植林木が導入されたときには、水や養分を巡る競合が起こるため、雑草の根系は邪魔者になる。したがって、雑草の繁茂が良しとされるのは、荒廃したやせ地が自己回復する数年間のみということになる。植林木と雑草などの草本植生との相互作用は今後検討すべき重要なテーマであると考えている。その際に、植林木の根系をより強くしてやるという工夫が必要になる。関西総合研究センター・生物環境研究所のチームがインドネシアで実践しているのは、植林木に菌根菌とその住みかとしてのモミガラ燻炭をつけて植林する方式である¹⁵⁾。これはコストもかからず簡単に実施できる方策の一つである。ただし、ある地域で開発された手法が、他の地域でも有効に機能するという保証はない。生態系の修復を目指す場合には、植林地に導入した菌根菌がいかに伝播し、生態系全体に広がっていくか、そしてそれがどのような効果をもたらすのかなどについて幅広く検討する必要がある。菌根菌の苗畑技術としての利用については後述する。

また、やせ地全体を改善することは実際的でないとすると、植林木の周辺のみを施肥法の工夫によって改善することを目指すという方針も重要である。これまでのサラワク州の植林地では、植林木1本あたりひとつかみの化学肥料が施用されてきた。しかし、植林は雨の多くなる時期におこなわれるため、熱帯雨林気候下の激しい降雨によって化学肥料は容易に溶解し植物に有効に利用されることなく系外に流出してしまう。環境への肥料成分の負荷増大にもつながるが、同時にこれは経費の流出でもある。これまではコスト高が問題となってサラワク森林局内ではその使用が認められなかった緩効性被覆肥料の導入を積極的に検討する必要がある。しかも、苗畑における育苗期間中に施用したものをそのまま植林木につけたまま植林し、植林苗の活着（定着）と初期生育に寄与できるというシステムがもっとも施肥効率や経済効率を高めることにつながるだろう。

3.3 何をどのように植えたらよいのか

木材やパルプチップの採取を目的とした商業造林の場合には、広葉樹でも育苗技術が既に開発されている外国産の早生樹種が導入されてきた。現在サラワク州で成林している樹種の主なものは *Acacia mangium*、*Eucalyptus camaldulensis*、*Azadirachta indica* などである。しかし、これらの早生樹種は、初期生育はきわめて良いが、15年もすると成長がとまり枯死するものも出始める。また、筆者は実際にタイにおいて経験したことだが、*A. indica* の心材部分が一斉に虫に食い荒らされ、植林地内の全ての樹木がその材としての価値を失うといった問題が起こる危険性もある。ただし、サラワクの熱帯林には存在しない種であるという理由から、生態系修復という目的には外国産の早生樹は向かない。

サラワク州にある最古の植林地は州都クチン郊外の *Semengoh Forest Reserve* にある。1926年に国産樹である *Shorea splendida* の植林を皮切りに、数ヘクタール規模で1975年頃まで *Shorea macrophylla* 主体の実験的な植林が行われた。例えば、1968年に植林された *S. macrophylla* とマレー鉄木 (*Eusideroxylon zwageri*) の混植区は現在ではみごとに成林している。*S. macrophylla* は *Illipe nuts* を生産する木であり、種からとれる油はサラワク州の重要な特産物の一つである。木の生育も比較的早い。一方、マレー鉄木はその材が水に沈むほど比重が大きく、建築用資材として重要な樹種である。しかし、木の生育はきわめて遅い。過去10年間にサラワク州森林局が積極的に植林を進めてきた国産の樹種は、このフタバガキ科の *S. mac-*

rophylla である。また、近年の植林には、*Dryobalanops aromatica* や *D. lanceolata* などの別のフタバガキ科の樹種も導入され始めた。サラワク州ではこれらを筋植え (Line planting) 方式によって植林している。列間10m、苗間5mというのが通常採用される植栽密度 (200本/ha) である。これは日本のスギやヒノキ造林と比べるとかなりの疎植である。また、ひとつの植林区には単一樹種のみを植栽するのがふつうである。

これまでの植林は主に成林後の利用、それも材の収穫というよりは先の *Illipe nuts* の生産を目指していたことから、さまざまな種類の国産樹の苗を育てるという試み自体がなされてこなかった。言い換えれば、積極的に植林をしなくとも、そこに豊かな森林が存在し、択伐すれば良かったのである。しかし、大がかりな伐採が可能になるにつれて、樹木を搬出する際に多くの木をなぎ倒すことになる。一方では、林道が整備されることによって人々の進入が可能になり、択伐跡地は焼き畑農地に変わりやすくなる。その結果、択伐が行われていながら、大規模な自然林の荒廃が進むという深刻な事態を迎えるに至った。サラワク州にとって自然林の荒廃は、経済基盤を揺るがす一大事である。

このような経緯から、自然資源そのものの回復が重要な国策の一つになってきている。自然資源を回復するという作業はつまり生態系の修復である。そのためには外国産の樹木ではなく、豊かな自然生態系から採取された国産樹の種や実生を利用する必要がある。サラワク森林局でも母樹となりそうなものについてのマーキングを行い、定期的に母樹のフェノロジーを調べ始めた。昨年の一斉開花にともなう種子採取とそれにとまなう育苗

表3 1996年度に植栽した苗の枯死率と根際直径、苗高

樹種	生存苗数	枯死苗数	枯死率 (%)	根際直径 (mm)	苗高 (cm)
<i>Shorea macrophylla</i>					
植栽時	1,166	0	0	11.31	104.33
3ヶ月	1,096	70	6.0	12.28	100.08
6ヶ月	985	181	15.5	12.69	80.49
12ヶ月	898	268	23.0	14.24	71.29
<i>Dryobalanops aromatica</i>					
植栽時	1,294	0	0	4.71	54.46
3ヶ月	1,200	90	7.3	6.23	57.26
6ヶ月	957	337	26.0	5.52	59.26
12ヶ月	775	519	40.1	6.67	76.09

という、われわれ日本チームとの共同プロジェクトにも積極的に取り組む姿勢が強く感じられた。

3.4 試験造林プロジェクト (1996年)

生態系の修復を目指したわれわれの試験造林は、上記のサラワク州の技術を検証するところから始めることになった。1996年7、8月にサラワク州森林局のリー・ファセン次官、ジョセフ・ジャワ・ケンダワン長官補（森林修復と造林担当部長）と協議を重ね、現地スタッフの参加、3,600本の*S. macrophylla*と2,400本の*D. aromatica*の苗の提供、現地にアクセスできる自動車の提供という形で協力が得られることになった。日本チームは実際の植林に関わる行程および経費のすべてを主体的に運営する責任をもつこととなった。

初年度の1996年のバカム試験造林には、サラワク州の実践しているLine planting方式を採用した。変更点は列間5mに苗間2mにすることによってやや密植状態（1,000本/ha）を作ることと、造林区に2種の苗を導入することである。2種の苗は、植物生態生理の特性を考慮に入れ、*S. macrophylla*は谷筋および斜面下部に、*D. aromatica*は斜面中腹および上部に配置した。また、一部のラインには2種を交互に植栽し、地形への適合試験を行うこととした。植え筋を十分確保するために伐開幅は3mとしたため、初年度は列間10mとせざるを得ず、2年目にその間を伐開して列間5mを達成することとなった。筋刈りは11月初旬に着手し、24条のラインを伐開すると同時に、11月下旬からは植え付けを開始し、12月中旬に全植林行程を完了した。5.2haに植林した苗の本数は、*S. macrophylla*が1,166本、*D. aromatica*が1,294本、合計2,460本であった（表3）。植え付け後、全植栽

苗をナンバリングし、植栽時の苗高と根元直径を測定した。また、一部については枝数、SPAD値（光合成に必要な葉緑素量の指標）を測定した。植栽に供した樹種の苗木15本ずつについて、幹、枝、葉、根の乾重、枝数、葉数、葉面積、根長を測定し、相対生長関係を調べた。全ラインを4グループに分け、緩効性被覆肥料施肥、化学肥料施肥、無処理、植栽時遮光処理の試験区とした。施肥は1997年5月に行った。植え付け後3ヶ月ごとに全苗を調査し、成育過程、活着率を継続的に記録することにした。1997年3月の時点では、*S. macrophylla*が94.0%、*D. aromatica*が92.7%の活着率であったのに対し、1997年6月の時点では*S. macrophylla*が84.5%、*D. aromatica*が74.0%であった。先にも述べたとおり、バカム試験造林区の土壌条件はきわめて悪いことを勘案すると、6ヶ月後の活着率は良好であると判断できる。その後、1997年8月から11月までカリマンタンにおける森林火災によってもたらされた煙霧（ヘイズ）により日照量が大きく低下し、その間ほとんど降雨がなかったことによって異常乾燥状態が続いた。その結果、植林後1年が経過した1997年12月の生残率は*S. macrophylla*が77.0%、*D. aromatica*が59.9%になってしまった。このような基礎的なデータは今後の植林にとって極めて重要な知見である。

3.5 試験造林プロジェクト (1997年)

1996年には2度のピークを持つ一斉開花が起こった。一斉開花に対応して開花前後の樹木の生態生理やシュートの伸長と開花の関係、開花と種個体群に関する調査などが重点的に行われると同時に、サラワク森林局の協力のもと、できるだけ多種、多量の種子を採取し、育苗体制を整えるための協議を行った。1996年8月から、日本側の把握している種子の結実、落下状況などの情報を定期的に森林局に提供し、森林局のニア苗畑のスタッフと現地に滞在する学生によって種子収集班が組織され、随時種子採取・育苗を行った。種子の結実は1996年9月頃から1997年3月頃まで2回に分けて断続的に続き、集めた種子は数十種にのぼる。とにかくポットに植えるという作業が続けられ、育苗が行われた。参考までに2回目の開花・結実の結果集められた種子の種類と量を、1997年2月現在のデータとして示しておく（表4）。

1997年8月にサラワク森林局において1997年度の植林計画を協議した。一斉開花にともなって育苗が行われた樹種8種と、山引き苗1種、それぞれ約1,000本、合計9,000本に加え、1996年度の筋植えを完成するための2種の苗2,500本を使用す

表4 ランビル調査区周辺で収集した種子量(1997年2月現在)

樹種	採取量 (kg)	一粒 (g/fruit)	育苗数
<i>Shorea macrophylla</i>	529.8	50	10,596
<i>Dryobalanops aromatica</i>	100.5	6	16,750
<i>Dryobalanops lanceolata</i>	221.8	6	36,967
<i>Shorea agamii</i>	13.7	3	4,567
<i>Shorea argentifolia</i>	5.5	5	1,100
<i>Shorea beccariana</i>	43.3	20	2,165
<i>Shorea ferruginea</i>	1.0	2	500
<i>Shorea rebella</i>	0.1	1	100
<i>Shorea scaberima</i>	0.6	1	600
<i>Shorea spp.</i>	12.2	5	2,440
Total	928.5		75,784

表5 1997年度試験造林用苗の種子採取時期と確保した苗の本数および植栽本数

樹種	種子採取時期	確保苗本数	植栽本数
<i>Shorea macrophylla</i>	'97年2月	1,000(+1,250)	639(+1,140)
<i>Dryobalanops aromatica</i>	'97年2月	1,000(+1,250)	868(+1,374)
<i>Dryobalanops lanceolata</i>	'97年2月	1,000	848
<i>Shorea argentifolia</i>	'97年2月	1,000	819
<i>Shorea beccariana</i>	'96年9月	1,000	784
<i>Parashorea smythesii</i>	'96年10月	1,000	737
<i>Dipterocarpus tempehes</i>	'96年9月	1,000	996
<i>Koompassia malaccensis</i>	'96年9月	1,000	831
<i>Callophyllum sp.</i>	実生を採取	1,000	661

種子の採取場所はランビル国立公園内。
植栽本数はPatch & Nest planting用。
() の数値はLine planting用。

ることになった(表5)。1997年に新たに導入した植栽計画は高密度植栽試験である。サラワク森林局の用いている筋植えの植栽密度が200本/haであるのに対し、本プロジェクトで採用した筋植えではおよそ1,000本/haである。広葉樹造林においても高密度植栽が初期定着に有効であるといわれていることから、さらに高密度を用いる植林計画2つを立案し、筋植えと比較することとした。図2に全体の配置を示す。ひとつめは寄せ植え(Patch planting)である。12m四方のブロックを刈り払い、苗間隔1.5mで7行7列に配列する(図3)。個体あたりの専有面積は2.25m²、平均植栽密度は4,444本/haとなる。一つのブロックには同一樹種を植え付ける。ふたつめは巣植え(Nest planting or cluster planting)である。巣植えは対角線を1mとする正方形の穴を掘り、四角に4本の苗を植える。苗の専有面積は0.5m²で、平均植栽密度は20,000本/haになる。一つの植え穴には同一樹種を植え、植え穴中心の間隔は5mとする。バカム試験造林区の北東部6.3ha、南西部6.3haを寄せ植え・巣植え区とした。急傾斜地や崩壊地が含まれるので、実面積は合計8ha程度になる見込みである。東西の植え列は約27列、寄せ植えブロック数は99、巣植え穴数は573となった。寄せ植え・巣植え区には7,183本、筋植え区には2,514本、合計9,697本を植栽した。植栽直後から非常にきびしいヘイズに見舞われ、1998年4月現在の枯死率は非常に高いものとなってしまった。しかし、初めて植林に用いる樹種が6種も含まれている上、他の3種もきちんとした生育データがほとんど取られておらず、厳しい環境下における植林のパフォーマンスが検証できると考えて

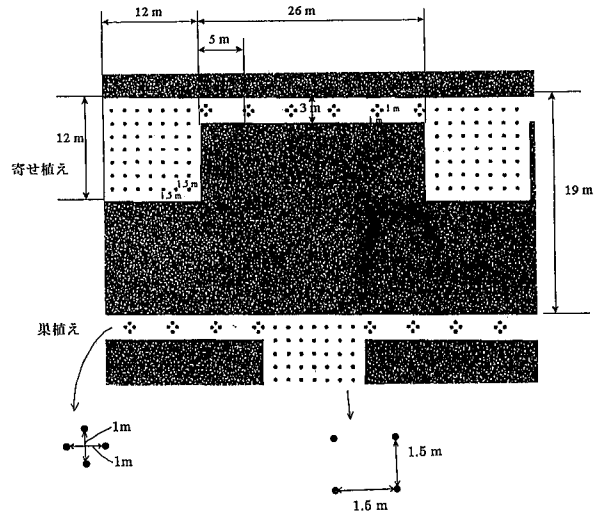


図3 寄せ植え(Patch planting)と巣植え(Nest planting)の配置図

いる。

このようにして、バカム試験造林区全体が、大規模の植栽密度試験区となった。熱帯雨林気候下のやせ地土壌からなる丘陵地での植林にとって、いずれのスタイルが有効な方策であるかを検証できるフィールドとなるだろう。しかし、成林したら成功というわけにはいかない。植林初期から成林に至るまではもちろんのこと、その後の土壌-植物相互作用の解析も必要である。この植栽計画に関連して行われる調査は、生態系修復実験における樹木のストレス耐性、栄養生理などに関するものがある。植物の光合成は光、温度、栄養ストレスを端的に反映する。天然生林の調査においても水分欠乏と強光が光合成の阻害要因となることが分かっている。樹高の高い木も少なく、強光条件にさらされるバカム試験造林区において、植栽された樹木の活力を光合成能をとおして評価すると同時に、樹体内の植物養分を分析し、苗木の成育予測を試みることになっている。また、これらの植林にともなう土壌中の養水分のモニタリング、菌根菌を含めた微生物相の変異、表層土の硬さの変化、などの立地環境のモニタリングも同時に行う。これらのデータは、植林にともなう生態系がどのように変化し、実際に修復が達成されたかどうかを判断する際の尺度として重要なものとなると考えている。

西側尾根の両側、東西斜面に残った残存林は、生態系移転実験用地である。残存林は周囲の荒廃にともなう影響を多分に受けている可能性はあるものの、その周辺部における修復が計画されている。それにともなう、実験に供試する樹種の生態特性の把握や二次林の回復過程の追跡が行われ

る予定である。

3.6 その他の検討事項

苗畑技術の改善はやせ地に森を作るうえで最も重要な側面の一つである。森で種を集めてポットや苗床に植える、あるいは山で引いてきた苗を直接植える、そして、それらを一定の大きさになるまで育てる、一見単純に見えるこれらの行程には、実はまだまだ検討すべき問題点がたくさん残っている。種子採取の時期、集めた種子の貯蔵、種子の消毒、播種時の種の状態（発根直前、発根直後）、育苗用培地としての土壌あるいは砂の種類や組成、施肥法、水やり、被陰、苗の養生、殺虫剤の使用、数え上げたらきりが無いほどである。その中でも特に重要であると考えている項目は、育苗用土の検討、緩効性被覆肥料の利用、菌根菌の利用である。

育苗用土については、土壌、砂、モミガラを混合割合、土壌の酸性矯正のために有効な石灰岩の削りかすの添加、リン酸に富む有機物資材であるグァノの添加を考えている。石灰岩とグァノについては施肥という側面もあるが、土壌や砂、モミガラと混合して処方する育苗用土の一部と位置づけたほうが良いと考えている。同時にコストの計算も必要になってくる。ここに挙げた資材の中では砂が最も高くつく。砂は大量に必要なうえ、砂の購入代金そのものよりも輸送にコストがかかる。一方石灰岩の削りかすやグァノ、モミガラは苗畑に近いところで手にはいるため利用しやすい資材である。

緩効性被覆肥料については先にも少し述べたが、溶出期間の長いものと短いものを組み合わせることにより効果的な育苗ができると考えている。播種時にはほとんど溶出せず根に対する濃度障害が出ないように処方し、1～2ヶ月程度は種の発根・発芽・初期生育能力に委ねる。その後は溶出期間の相対的に短い（10ヶ月程度）緩効性被覆肥料から溶出した養分が初期生育を助ける。その後は、溶出期間1～2年ときわめて長い肥料からの養分が少しずつ供給されるという方式である。しかも、苗畑での毎日の水やりや、現地に定植されてから遭遇する激しい降雨によって施肥した養分がむだに流れないうへ、環境汚染につながらないという大きなメリットがある。播種からの2年間に、苗畑で2～3回、植林地で年1回計2回施肥すると考えると、緩効性被覆肥料の価格が成分量ベースで一般の即効性化学肥料の2倍程度（日本と同様）に抑えられれば、労賃を払って何度も即効性化学肥料を施用するよりもコスト面でも安価になる。現在、緩効性被覆肥料や化学肥料などの

適正な施用方法を検討中である。

生態系における菌根菌の役割は、まだまだ未知の分野である。何種類くらいの菌根菌が自然林の中に見られるのかをまず調べ、次に、育苗したい樹木ごとに生育促進効果の期待できる菌根菌の種の特定を試みる必要がある。また、菌根菌を接種することで生育が抑制されるものがないかどうかについても検証しておかねばならない。苗木の生育を全般的に促進するような菌根菌を、いかにして苗畑全体に広げるかについても要検討事項の一つである。

苗畑技術と同様、苗の輸送方法も要検討課題である。輸送距離が100km程度の時であれば、数百kmにも及ぶことがある。苗畑そのものの数がサラワク州の全地域を包括するのに十分ではないことが原因のひとつではあるが、植林の必要な地区が苗畑から遠く離れた奥地にあることもしばしばである。輸送中の苗の傷みは植林そのものの成否を左右するため、労力がかからずかつ適切な輸送方法を考えなければならない。ポットに入ったものをそのまま輸送するのが一般的な方法であるが、輸送中にポットから離れた根がポットとの摩擦で傷んだり、ポットの中の土壌が輸送中に動くことで根が切れてしまったり、葉が擦れ合って傷んでしまうなどの問題点がある。大きくなった苗ではことのほか苗傷みの影響は甚大になる。

そこで、1997年1月に*S. macrophylla*と*D. aromatica*の2種の苗を用いて、輸送のための苗の処理方法を検討した。a. ポットから取り出し土を落とす、b. さらに摘葉する、c. さらに根をつめる、d. さらに幹をつめる、e. ポットのまま運ぶの5処理である。各20個体を処理した。輸送中に根が乾燥するのを防ぐために、十分に湿らせた新聞紙で根をくるんだ。苗畑から約100km離れた位置にある、植林地に近い仮の苗畑に通常の輸送方法（トラックの荷台に積み、幌をかける）によって搬送後、再びポットに植え付けた。根の取り出しが容易なようにポットの用土として川砂を用いた。1, 2, 3, 4ヶ月後に各処理5個体をポットから取り出し、苗の成育状況と、新しい根の発生状況を調べた。4ヶ月後に生存率の高かったものは*S. macrophylla*、*D. aromatica*いずれも上記のbの処理、すなわちポットから取り出して根から土を落とし、摘葉したものであった。しかし、バカムの試験造林区に各処理10個体ずつを植えた結果をみると、4ヶ月後に生存していたものはいずれの種もeの無処理の苗のみであった。現地に移植後の雨が少なかったことも原因の一つかもしれないが、ポット試験の成績の良かったbの処理

苗も現地では活着できなかった。今回は輸送距離が100kmと比較的短かったが、今後は、もっと長距離の輸送に耐えるかどうか、その際に適切な輸送方法は何かについても検討する必要がある。また、今回用いた2種の苗以外についても検証する必要がある。現在のところ、1997年12月の造林に際しては、従来からの輸送方法を採用することとした。

3.7 どういう姿勢で植えるか

焼き畑は現地住民（バカム周辺はイバン）の生業である。1年限りの焼き畑そのものによって土壌の荒廃がおこることはほとんどない。コショウなどの商品作物栽培の目的で継続的に利用されることによる土壌侵食の増加¹⁶⁾や土壌肥沃度の枯渇¹⁷⁾がその後の森林再生を妨げると考えられる。また、バカム森林保護区のように侵食の激しいところでは土壌物理性の悪化も生態系の修復にとっては致命的な痛手になる。したがって、焼き畑によって開かれた森林の修復再生を目指す場合、利用年数が浅いほど、修復が容易であり、長く利用されているほどむずかしくなる、ということを考慮に入れた技術化を考えなければならない。

森林局によって森林保護区とされている地域で焼き畑農耕をすることは、州の規則に違反する行為であるという点において問題である。バカム森林保護区でも森林局が1995年にそれらの人々に退去を命ずると同時に、使用していた人すべてを特定する調査を行った。バカム森林保護区を違法に使用していた人の数は130人にのぼる。これは、森林局のあるスタッフに聞いた話であるが、近くの村からきている人ももちろんいたが、森林保護区から十数km離れたミリの町から来ている人たちもあり、その多くは公務員であったという。1958年に森林保護区が定められ、バカム周辺がそれにあたることを知っていながら、自分たちの利益を求めて焼き畑を繰り返してきた。しかも、やせ地においてである。土壌および植生の荒廃は、明らかに人為によるものであり、立地環境が悪いことによって他の地区よりもさらに荒廃の程度がひどくなる、という結果を生んでしまった。この土地が、われわれの熱帯林修復の実証試験地として与えられているのである。何時、かつての利用者の反逆にあつて植林木が荒らされるかもしれないという不安は拭いきれない。火を放たれるかもしれない。それらに穏便かつ有効に対処するためには、このバカム森林保護区において非常に重要な研究が行われていること、森林局を含めてサラワク州全体が強い関心をもって監視していることを広くアピールする必要があるだろう。そのために、

1997年12月4日に植林セレモニーを行った。サラワク州森林局からは当時長官代理のリー・フアセン氏と森林修復と造林関係のスタッフ、ニア育苗試験場のスタッフ、ミリ行政区の森林局の責任者などが参加した。日本チームからはプロジェクトの代表者である、愛媛大学・農学部（現在滋賀県立大学・環境科学部）教授・萩野和彦先生をはじめ、筆者も含めて20名程度が参加した。また、当時インドネシアに滞在中の、JICA専門家・平川幸子氏、朝日新聞ジャカルタ支局長の吉村文成氏なども参加して下さった。セレモニーには現地の新聞記者等も多数参加し、翌朝の新聞の一面を飾った。

4. おわりに

熱帯諸国では日本より農耕活動が重要な産業であることが多い。熱帯林生態系の修復は、周囲の農耕地生態系とのバランスをも同時に考慮すべきであるということ常を忘れてはならない。熱帯林生態系の修復はまた、現場型の技術である必要がある。技術の策定には、樹木のフェノロジーに始まり、種集め、播種、育苗、移送、移植、管理、などの一連の流れとして諸項目を検討することが必要となる。開発された技術の実施にともなう経済性も重要な項目の一つである。熱帯林生態系の修復を行う際に、経済効率を最優先するわけにはいかないが、実施可能なレベルである必要はある。そのためには当該地域の自然・社会環境を十分に把握しておくこと、地域の要請を知ること、そのうえで住民の生態系保全意識の高揚が可能になるような対応策を練ることが必要になるのは必ずと明らかであろう。

熱帯林の修復とは地域研究として実践すべき課題であり、単なる自然科学からのアプローチでは不十分であるということ最後に記して、本稿を閉じることにする。

謝 辞

本稿には、文部省科学研究費補助金（創成的基礎研究費「東アジアにおける地域の環境に調和した持続的生物生産技術開発のための基盤研究」、課題番号07NP1201、08NP0901、09NP0901）の助成を受けて遂行された研究成果の一部を含んでいる。また、愛媛大学教授萩野和彦先生、大阪市立大学理学部教授山倉拓夫先生、マレーシア・サラワク州森林局次官Lee Hua Seng氏、長官補Joseph Jawa Kendawang氏他、同研究プロジェクトを通して多くの方のご助言を賜った。記して厚くお礼を述べる。

文 献

- 1) FAO-UNESCO (1974) Volume 1. Legend, Soil map of the World. Paris. 59p.
- 2) 岡川長郎 (1984) 第2章世界における酸性土壌の分布と利用状態. 日本土壌肥料学会監修, 田中明編, 酸性土壌とその農業利用—特に熱帯における現状と将来—, 博友社, 21-49.
- 3) 田中明 (1984) 第1章序章. 日本土壌肥料学会監修, 田中明編, 酸性土壌とその農業利用—特に熱帯における現状と将来—. 博友社, 7-20.
- 4) 沼田眞 (1997) 1.1 自然誌博物館と生態園. 沼田眞監修, 中村俊彦・長谷川雅美編, 都市につくる自然—生態園の自然復元と管理運営—. 信山社, 3-6.
- 5) Sakurai, K., S. Araki, T. Naganawa, G. Iwatsubo, T. Attanandana, and B. Prachaiyo (1989) Improvement of biological productivity in degraded lands in Thailand. I. Site and profile descriptions of the experimental sites. *Pedologist*, 33, 17-29.
- 6) 荻野和彦 (1997) 2. 熱帯雨林丘陵林地帯. 文部省科学研究費補助金 (創成的基礎研究費) 東南アジアにおける地域の環境に調和した持続的生物生産技術開発のための基盤研究, ニューズレター第3号, 18-25.
- 7) Yamakura, T., I. Yamada, T. Inoue, and K. Ogino (1995) A long-term and large-scale research of the Lambir rain forest in Sarawak: Progress and conceptual background of Japanese activities. *Tropics*, 4, 259-276.
- 8) Itoh, A., T. Yamakura, K. Ogino, H. S. Lee, and P. S. Ashton (1995) Population structure and canopy dominance of two emergent dipterocarp species in a tropical rain forest of Sarawak, *East Malaysia*. *Tropics*, 4, 127-141.
- 9) Ninomiya, I. (1995) Photosynthesis of canopy tree species in a Sarawak rain forest. *Tropics*, 4, 297-306.
- 10) Yumoto, T. and T. Inoue (1995) Canopy biology program in Sarawak - Long-term study of plant phenology and plant-animal interactions in a mixed dipterocarp forest. *Tropics*, 4, 307-315.
- 11) Yamakura, T., M. Kanzaki, A. Itoh, T. Ohkubo, K. Ogino, O. K. Earnest Chai, H. S. Lee, and P. S. Ashton (1996) Forest structure of a tropical rain forest at Lambir, Sarawak with special reference to the dependency of its physiognomic dimensions on topography. *Tropics*, 6, 1-18.
- 12) Breulmann, G., I. Ninomiya, and K. Ogino (1996) Distribution characteristics of mineral elements in tree leaves of a mixed dipterocarp forest in Sarawak, Malaysia. *Tropics*, 6, 29-38.
- 13) Hirai, H., H. Matsumura, H. Hirotsu, K. Sakurai, K. Ogino, and H. S. Lee (1997) Soils and the distribution of *Dryobalanops aromatica* and *D. lanceolata* in mixed dipterocarp forest. - A case study at Lambir Hills National Park, Sarawak, Malaysia. *Tropics*, 7, 21-33.
- 14) Watson, H. (1985) Lambir hills national park: Resource inventory with management recommendations. Forest Department, Sarawak, Malaysia. 193p.
- 15) Mori, S., and Marjenah (1993) Effect of wood charcoal and charcoaled rice husk on the growth of Dipterocarpaceae trees with special reference to ectomycorrhiza formation in East Kalimantan., *Proc. Inter. Workshop BIO-REFOR, Yogyakarta*, 1993. 194-195.
- 16) Teng, C.S. (1993) Shifting cultivation of hill padi - A traditional method of utilizing and managing natural soil fertility for rice production in Sarawak. Department of Agriculture, Sarawak, Malaysia, Technical Paper 9, 20p.
- 17) Funakawa, S., S. Tanaka, H. Shinjyo, T. Kaewkhongkha, and T. Hattori (1997) Ecological study on the dynamics of soil organic matter and its related properties in shifting cultivation systems of northern Thailand. *Soil Sci. Plant Nutr.*, 43, 681-693.