

マレーシア・サラワク州における 生態系修復の試み

櫻井克年*1・二宮生夫*2・原田 光*2

1. 背 景

熱帯の森林資源の荒廃による地球環境全体の劣化は、20世紀最大の失敗としてわれわれの眼前に横たわる大問題である。人間生活にとって“必要”であるという理由から、地球上のあらゆる資源が躊躇なく利用されてきた時代ということもできるだろう。21世紀以降も人間が地球上で生存し続けるためには、最優先課題としてこの負の財産を解消しなければならない。なかでも、重要な課題の一つとして熱帯林生態系の修復があげられる。しかし、様々な生物が生息してきた森林生態系の修復は容易ではない。特に、熱帯雨林生態系では、一部の動植物に関する研究結果があるだけで、膨大な未知の構成要素からなる生態系を包括的に理解するためには、まだまだ情報不足である。熱帯雨林生態系は未だ不思議の世界といわざるを得ない。

これらの背景のもと、1990年から1995年にかけて、文部省科学研究費補助金・創成的基礎研究の交付を受けたプロジェクト、「アジア・太平洋地域を中心とする地球環境変動の研究－地球環境科学の総合的展開－（研究代表者：田村三郎）」が実施された。マレーシア・サラワク州・ランビル国立公園内に、「林冠生物学プロット」と「52ha長期生態系観察プロット」が設置され、植物－動物相互作用系や森林生態系そのもののダイナミズムについて、精力的に研究が進められた（Inoue and Hamid, 1994；Lee *et al.* 2002）。その中で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た。これらの研究は、現在も様々な形で継続されており、10数年にわたって膨大な研究成果が蓄積され続けている。これらの研究を通して、サラワク

Katsutoshi Sakurai, Ikuo Ninomiya, and Ko Harada: Rehabilitation of the Tropical Rain Forest in Sarawak, Malaysia

*1 (独)高知大学農学部, *2 (独)愛媛大学農学部

州・森林局との緊密な連携体制が徐々に確立されていった。

2. バカム試験造林区の概要

これらの研究成果や連携をもとに、次のフェイズとして荒廃地の修復プロジェクトが進められた。熱帯林生態系の荒廃は、東南アジアをはじめとする熱帯諸国に共通の大問題である。サラワク州もその例外ではない。1995年から2000年にかけて、文部省科学研究費補助金・創成的基礎研究の交付を受けたプロジェクト、「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（研究代表者：佐々木恵彦）」のサブチームとして、「丘陵性熱帯雨林生態系の生物相互作用の生態生理機構の解明と持続的生物生産技術の開発（リーダー：荻野和彦）」がサラワク州において実施された。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を提供してもらうことができた。この場所は、1958年に森林保護区として囲い込まれた頃は、天然林が存在していたという。その後、違法に伐採・開墾されて焼畑農地として利用されていたが、州政府による植林計

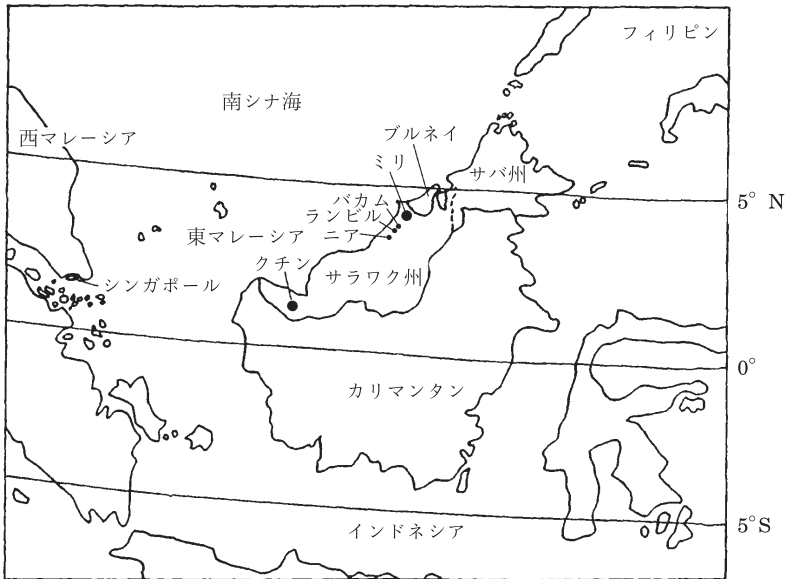


図 1 調査位置図

画の実施のために1995年に再収監された。後に述べるが、まったくの痩せ地であり、1990年頃に実施されたとみられる焼畑当時の名残として現地に残されているゴム林やマメ科樹木の生育もきわめて不良であった。

バカム森林保護区はミリ市中心部から16km南に位置する丘陵地である。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提供された。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付けられる。いずれの堆積物も砂岩を主としており、頁岩やその粘土化したものが地表に現れる場合もある。バカム試験造林区では主に砂岩風化物が地表を覆っている。自然状態の森林としては、ケイ酸質の砂を主体とする貧栄養の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が広がっている。マレーシアの土壤分類ではRed Yellow Podzolic Soils (RYP)、FAO-UNESCOの分類ではアクリソル、アメリカ農務省(USDA)の分類ではTropudultsにあたる。サラワク州におけるRYP土壤の分布面積はおよそ8割を占める。このRYP土壤の分布域内には、ケランガス林の成立するSkeletal Soilsとよばれる貧栄養の土壤が含まれる。このような土壤は、FAO-UNESCOの分類ではアレノソル、USDAの分類ではDistropeptsか、極端に砂礫が多い場合にはPsammentsにあたるものも一部

には認められる。いずれにせよ、酸性が強く、ケイ酸質の砂の多い、きわめて貧栄養の土壤とすることができる。丘陵地の土壤としては最も化学的に劣悪な土壤である。

バカム試験造林区(図2)は傾斜が非常に急である。傾斜が10度以下の場所はほとんどなく、急な部分では35-40度近くのところもある。試験造林を重点的に行った場所は、その中央部に谷筋が走り、雨が多いと滞水する。周縁部は急傾斜であり、全体的にはるつぼ状の地形

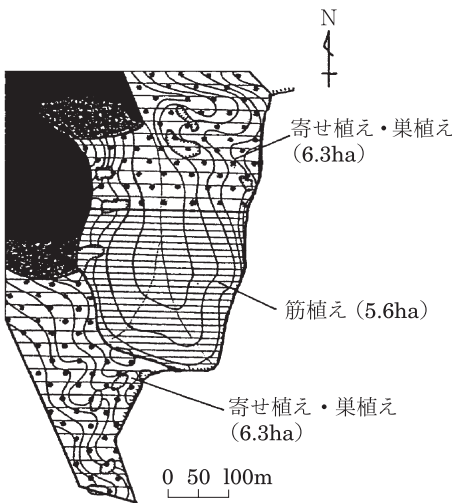


図2 バカム試験造林区の配置図

をなしている。土壌の分布は不規則で、砂地の部分にアレノソルが、粘土のやや多い部分にアクリソルがみられる。地上部の攪乱によって地表が露出すると、豪雨によって激しい土壌侵食と小規模の地滑りが多発する。

このように、バカム試験造林区は化学的に貧弱で、物理的に脆弱な土壌の上部にあり、傾斜もきつく、生態系修復にはもっとも困難な場所といわざるを得ない。

3. バカム試験造林区における植林

1) サラワク州の植林

サラワク州の最古の植林地は州都クチン郊外の Semengoh Forest Reserve にある。1926 年に最初の植林として国産樹である *Shorea splendida* が植栽された。その後、1975 年頃まで *S. macrophylla* 主体の実験的な植林が行われてきた。第 1 次マレーシアプラン (1966-1970 年) によって、外国産の早生樹を用いた造林が進められるようになったが、熱帯の針葉樹はサラワクの条件に適さないという理由から、第 3 次マレーシアプラン (1976-1980 年) では、再森林化を目指して、その他の早生樹や国産の硬木種に関する調査研究が始まった。1979 年にサラワク州森林局は再森林化 (reforestation) プロジェクトの推進を決め、これを受けて、第 4 次マレーシアプラン (1981-1985 年) では、再森林化と修復プログラムが推進されることになった。当初は生育が早いので早生樹のみが植栽されていたが、1993 年からは *S. macrophylla* 主体の国産樹種の植栽が中心となった。森林修復のための植林は、サラワク州全土に及び、*Acacia mangium*, *Gmelina arborea*, *Paraserianthes falcataria* などの外国産早生樹の林や、*S. macrophylla*, *Dryobalanops* spp. や *Swintenia macrophylla*, *Durio zibethinus* などの国産樹種が中心の林など、少しずつ成林してきている。現在では、外国産早生樹の植林は、紙の生産を目的にした *A. mangium* の植林がほとんどである、いわゆる slash & burn によって地拵えをし、3m×3m 程度で密植する。国産樹種の場合は、列状に伐開し火入れを行わずに筋植え (Line planting : 列間 10 m, 苗間 5 m) によって植栽する。2000 年の時点で、23,096 ha, 14 地区に植林地があり、そのうち 72% の 16,751 ha が国産樹種、その約 50% が *S. macrophylla* である。植林の目標は毎年 2,000 ha である。

2) 試験造林プロジェクト

生態系の修復を目指したわれわれの試験造林は、サラワク州の筋植方式の検証から始まった。サラワクの筋植は 200 本/ha と植栽密度が低い。これを列間

5 m, 苗間 2 m とし, 1,000 本/ha の高密度植栽にすることにした。伐開幅を 3 m としたため, 初年度の 1996 年には列間 10 m で伐開し, 2 年目にさらにその間を伐開した。豊富に苗の準備ができていた樹種が当時の植林の主流であった *S. macrophylla* と, 次の候補として育苗されていた *D. aromatica* であったので, 初年度はこの 2 種を用いた。2 年目には *D. aromatica* が大量に入手できなかったため, *D. lanceolata* に変更した。2 種の苗の生態生理特性を考慮に入れ, *S. macrophylla* を谷部から傾斜下部に, *D. aromatica* および *D. lanceolata* を傾斜地中部から上部に植栽した。植筋は現地の地形を考慮して, 東西方向とした。約 6.3 ha に, 2 年間で *S. macrophylla* を 2,217 本, *D. aromatica* と *D. lanceolata* を 2,554 本植栽した。

さらに, 2 年目の 1997 年の植林では, 寄せ植え (patch planting) と巣植え (nest planting) を組み合わせた植栽方法を取り入れた (図 3)。以後, patch & nest planting と略記する。寄せ植えでは 12 m 四方のブロックを刈り払い, 苗間 1.5 m で 7 行 7 列に苗を配列した。固体あたりの占有面積は 2.25 m², 平均

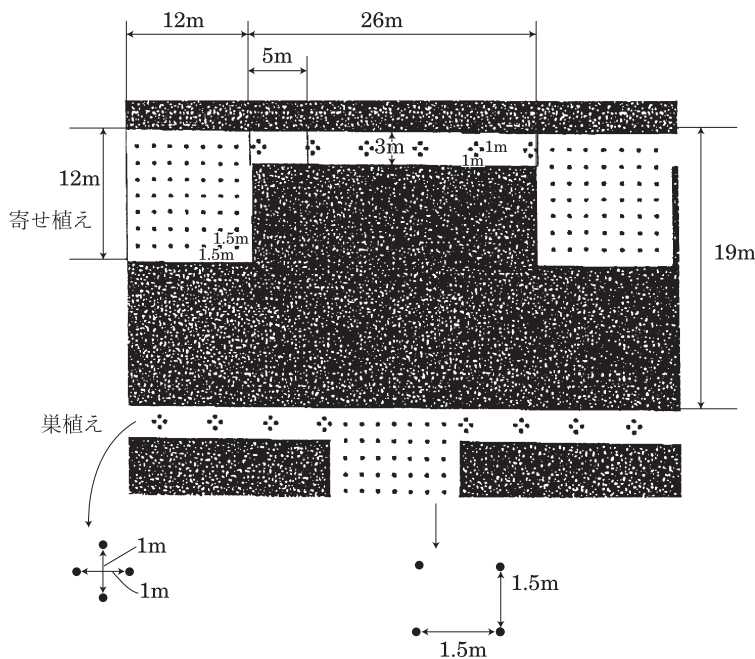


図 3 寄せ植え・巣植え (patch & nest planting) の植栽方法

植栽密度は 4,444 本/ha となる。巢植えは対角線を 1m とする正方形の四角に 4 本の苗を植える。苗の占有面積は 0.5m² で、平均植栽密度は 20,000 本/ha である。植穴中心の間隔は 5m で、patch と patch の間に 6 個の nest を配置した。いずれも、高密度植栽の筋植えよりさらに高密度である。東西の植え列は 27 列、寄せ植えブロック数 99、巢植え穴数 573 となった。実際に植林に用いた面積はおよそ 8 ha である。この patch & nest planting では、9 種、7,183 本の苗を用いた（表 1）。その苗は、われわれにとって非常に幸運なことに、1996 年に 2 度訪れたフタバガキの一斉開花がもたらしてくれた。サラワク州森林局では、これまでに 10 数種に及ぶ苗を大量にナーサリーで育苗した経験はなかった。ちょうど、サラワク州各地で代表的な樹種の定期調査が実施されていたので、開花・結実情報を随時森林局から提供してもらい、日本人学生を隊長とする種子採集部隊を組織して、毎日のようにランビルおよび後述のニア周辺の自然林で種を集めた。フタバガキの種子は保存ができないために、集めた種子を一晩川につけて中に入っている虫の駆除をし、次の日にすべて播種した。この一斉開花がなければ、patch & nest planting の試験は不可能であった。

植栽後毎年 1 回から 2 回、メンテナンスを継続的に行っている。また、2 年間にわたって植栽したすべての苗の枯死率と高さを現在も継続調査中である。

表 1 生態系修復のために用いた植栽苗

植栽方法	植栽年度	植栽樹種	種子採取時期	確保苗本数	植栽本数
Line	'96	<i>Shorea macrophylla</i>	'96 年 2 月	1,250	1,077
		<i>Dryobalanops aromatica</i>	'96 年 2 月	1,250	1,170
Line	'97	<i>Shorea macrophylla</i>	'97 年 2 月	1,250	1,140
		<i>Dryobalanops aromatica</i>	'97 年 2 月	1,500	1,374
		+ <i>D. lanceolata</i>			
Patch & Nest	'97	<i>Shorea macrophylla</i>	'97 年 2 月	1,000	639
		<i>Dryobalanops aromatica</i>	'97 年 2 月	1,000	868
		<i>Dryobalanops lanceolata</i>	'97 年 2 月	1,000	848
		<i>Shorea argenteifolia</i>	'97 年 2 月	1,000	819
		<i>Shorea beccariana</i>	'97 年 9 月	1,000	784
		<i>Parashorea smythesii</i>	'97 年 10 月	1,000	737
		<i>Dipterocarpus tempehes</i>	'96 年 9 月	1,000	996
		<i>Koompasia malaccensis</i>	'96 年 9 月	1,000	831
<i>Callophyllum</i> sp.	実生を採取	1,000	661		

2004年4月の段階で、1996年植栽の筋植えでは、*S. macrophylla*が82%、*D. aromatica*が82%の枯死率である。1997年植栽分は、*S. macrophylla*が84%、*D. lanceolata*が90%の枯死率である。一方、patch & nest plantingでは、樹種によって40数%のものから、90%を超えるものまでである。この高い枯死率の最大の原因は、1998年1月から4月に訪れた異常気象である。すなわち、熱帯雨林気候下でありながら、この4ヶ月間ほとんど雨が降らないという大干ばつに遭遇した。特に2年目の1997年の植林は、1997年12月から1998年2月にかけて行われたので、移植直後に現地カラカラに乾いてしまった。半年後には苗の枯死率が70%から80%に達するという悲惨な結果を招いてしまった。しかし、反面、この大干ばつは植物の乾燥ストレスに対する現場試験と捉えることもできた。樹種ごとに植物の生態生理機能を評価したデータと照らし合わせることによって、今後の植林に関する有益な知見となった(櫻井1998)。

3) 土壤生態系の評価

主として、3つの点について評価を行った。すなわち、(1)地形と土壌の関係の解析、特に土性と土壌硬度に着目、(2)攪乱を受けていない天然林下の土壌と、焼畑等によって大きく攪乱された土地の土壌の比較、(3)土壌化学、土壌物理、土壌微生物の動態解析からの土壌生態系の包括的理解、である。(2)と(3)については、3-2でまとめて簡単に述べることにする。さらに、生態系修復のための植林のパフォーマンスや、フタバガキ苗の外生菌根共生に関する検討も行っているが、これについては、次号以降に譲る。

3-1. 土性と土壌硬度に着目した土壌と地形の関係

調査地域のランビルやバカムは、非常に小規模の起伏の繰り返しからなる地形がほとんどである。そこで、ランビル国立公園内の8haプロット全体の調査対象とし、土性および土壌硬度を10m×20mのグリッド法で測定した。調査地の地形は、(1)急傾斜地、(2)緩傾斜地、(3)尾根筋、の3つに分類できた。急傾斜地では、土壌と植生がしばしば地滑りや土壌侵食の影響を受けていることがわかった。土性はSandy loam, Loamy sand, Loam(砂壤土、壤質砂土、壤土)であった。礫質の層が地中20-40cmにしばしば存在し、根の伸長に対する障害になるものと考えられた。緩傾斜地では、土壌と植生は比較的長期間安定であった。土性はLight clayかHeavy Clay(軽埴土、重埴土)であった。土壌断面内の上部から下部への粘土移動・集積が認められ、現場での風化が安定して進行しているものと考えられた。これらは、緩傾斜という地形要因が大きな

役割を果たしていることの表れでもある。尾根筋では、土壌や植生は安定しているものの、水分条件が大きく変動する。土性は Clay loam か Sandy loam (埴壤土, 砂壤土) であり、急傾斜地と緩傾斜地の中間的な性質を示した。土壌硬度からみた植物根への物理的な障害は認められないが、土壌の乾燥が根の伸長や生育の大きな制約要因となる (Ishizuka *et al.* 1998)。

3-2. ランビルの天然林とバカムの荒廃林における土壌生態系

ランビルの天然林土壌の特徴は、主に次の4つにまとめられる (Ishizuka *et al.* 1999)。すなわち、(1) 表層のみで有機物含量・養分含量が高い、(2) 1年を通して土壌が柔らかい、(3) 土壌溶液及び低分子有機酸の組成が環境要因の変化によって大きく変化する、(4) バクテリアや糸状菌密度は比較的安定しているが、先に述べた異常気象 (4ヶ月間降雨なし) によって、糸状菌が減少したが、降雨が安定したらすぐにもとのレベルに復帰する、などの特徴である。それに対して、土壌環境の劣化したバカムの土壌は、(1) 土壌中の養分含量が低い、(2) 干ばつ時に表層土が固くなる、(3) 土壌水分及び温度の変動が激しい、(4) 土壌溶液中の無機イオン組成、低分子有機酸組成、土壌中の細菌や糸状菌密度の変動がほとんどなかった、などの特徴があった。

これらの事実から、天然林における土壌生態系の環境変化に対する“緩衝力”が、土壌侵食や焼畑などを通して根圏生態系の健全な機能が失われた荒廃地と比べてより高いことが明らかとなった。様々なインパクトが加わった場合、熱帯雨林における土壌生態系は現在の環境状態や生物の活動によって容易に影響を受ける。しかし、それが土壌生態系の緩衝力を超えない場合には、また、速やかにその機能を回復できる。一方、ひとたび天然林から表層土壌が失われてしまうと、それは根圏生態系の消失につながり、その結果、生物の多性に欠ける土壌生態系が残される。そこには、もはや、環境へのインパクトに対してそれを吸収することのできる緩衝力がなくなってしまうのである。

4. おわりに

本研究によって明らかになった自然の森の最も重要な機能的特徴は、土壌生態系をも含んだ森林生態系が大きなインパクトにさらされたとき、一度はダメージを受けるが、インパクトが消失したときに速やかにもとの状態に戻ることである。このことはおそらく、森林植生や動物・微生物の多様性に支えられているのであろう。生態系修復の目指すところは、そのような緩衝力の高い森林を創成することである。

われわれのチームでは、2000年の初めに、バカム森林保護区からさらに100 kmほど南部に位置するニア森林保護区において、“Island & corridor方式”という新しい植栽方法を用いた修復実験を開始した。さらに、2001年から2004年にかけて文部省科学研究費補助金の交付を受けたプロジェクト「熱帯雨林生態系の修復と創成（研究代表者：櫻井克年）」を実施した（Sakurai 2004）。生態系の修復と創成に、これまでに取り組んだ造林手法がどのような効果を発揮するのかについて、土壌—植物—遺伝子の観点から解析を加えた。これらの途中経過および得られた成果については、続報に譲る。

これらの研究が、これからの人口増と現代的な文化の普及にともなって消滅の一途をたどるであろう東南アジア諸地域の焼畑農業とさまざまな原因で荒廃してしまった熱帯雨林、熱帯季節林生態系の修復と創成にとって、貴重な試金石となるものと確信している。今後もしばらくの間、“修復”をキーワードとした研究を様々な方面から展開していくつもりである。

〔参考文献〕 Inoue, T *et al.* (1994) Chapter 2. Construction of a canopy observation system in the tropical rainforest of Sarawak. p. 4-18. In “Plant reproductive systems and animal seasonal dynamics; Long-term study of dipterocarp forests in Sarawak”. Center for Ecological Research, Kyoto University, Kyoto, Japan. Ishizuka, S. *et al.* (1998) Characterization and distribution of soils at Lambir Hills National Park in Sarawak, Malaysia, with special reference to soil hardness and soil texture. *Tropics*, 8, 31-44. Ishizuka, S. *et al.* (1999) Comparative studies of soil properties of an undistributed tropical rain forest and an abandoned shifting cultivation land in Sarawak. In “Proceedings of Workshop on Forest Ecosystem Rehabilitation (Ogino, K., Lee, H.S. and Kendawang, J.J. eds.)”, p. 30-51, Forest Department Sarawak, Kuching. Lee, H.S. *et al.* (2002) Summary Account of the 52-ha forest research plot. P. 6. In “The 52-Hectare Forest Research Plot at Lambir Hills, Sarawak, Malaysia: Tree Distribution Maps, Diameter Tables and Species Documentation” Forest Department Sarawak & The Arnold Arboretum-CTFS Asia Program, Kuching, Sarawak, Malaysia. 櫻井克年 (1998) 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, 地球環境 3: 45-53. Sakurai, K. (2004) 熱帯雨林生態系の修復と創成—Rehabilitation and creation of tropical rain forest ecosystems—(平成13年度から平成15年度・科学研究費補助金・研究成果報告書) 156 p.