

熱帯荒廃地の環境造林

則定真利子・山ノ下卓・小島克己

1. はじめに

熱帯地域では、生物生産性が低く農林業の土地利用がほとんど行われないう荒廃地が拡大している。近年の農業開発は乾燥地や湿地などの農業限界地を対象としているため、土地環境条件の認識の誤りや投入資本の不足、選択した技術の不適合、社会経済条件の認識の誤りなどにより開発に失敗すると、もともと問題がある農業限界地の環境条件により、生物生産性の低い草地や裸地といった荒廃地となって放棄される。開発による農業生産力の向上を期待していた地域住民にとって、農業収入が得られない荒廃地の拡大は極めて深刻な問題である。それだけではなく、従来動植物を採取利用してきた森林などの自然植生を農業開発のために失っており、市場経済外の資源利用の便益も得られないため、開発前よりも貧困の程度が大きくなることもある。また荒廃地の拡大は、河川水質の悪化や土壌侵食、野火の危険度の増加等により地域環境に負の影響を及ぼす可能性がある上に、生物多様性の減少や二酸化炭素の放出等により地球環境にも負の影響を及ぼす。荒廃地の今後の取扱いは、地域の社会経済および環境の面から重要な課題となっている。荒廃地に森林を造り、それにより環境を修復し、また失われた便益を一部でも回復させることが期待されている。

現在アジアの熱帯地域でこのような問題となっている荒廃地のほとんどが、塩類集積土壌、酸性硫酸塩土壌、泥炭土壌といった問題土壌 (problem soil) が分布する場所である。熱帯アジアの泥炭土壌の自然植生は泥炭湿地林であり、一次生産力が高いが、森林破壊後の天然更新が困難である。これに対し、塩類集積土壌や酸性硫酸塩土壌は人為により新たに生成した問題土壌であり、生育

Mariko Norisada, Takashi Yamanoshita, Katsumi Kojima : Environmental Re-forestation of Degraded Lands in the Tropics.

東京大学アジア生物資源環境研究センター

できる植物種は限られ、裸地化する場合もある。このような問題土壌の荒廃地では、土壌に起因するストレスにより植物の生育や遷移が制限されており、極相林構成樹種を植栽して森林を造るという手法は失敗することが多く、また、人為の影響を排除して放置しても、土壌条件が改善され植生が回復するには膨大な時間が必要である。熱帯の荒廃地は林業生産の適地ではなく、産業造林の技術をそのまま用いることができない。森林という地域環境、地球環境の保全に資する公共財を造成する「環境造林」の技術を新たに確立する必要がある。

私たちの研究グループは、タイ国南部低湿地域の荒廃地を対象として、環境造林の方法を確立するため、その基礎となる候補樹種の環境ストレス耐性機構および森林再生による環境修復に関する研究を行ってきた^{1,2)}。この地域には、泥炭土壌、酸性硫酸塩土壌、砂質未熟土壌という熱帯アジアの低湿地で広く見られる3種類の問題土壌があり、それぞれの問題土壌に起因する苛酷な環境ストレスのために放棄された荒廃地がある。ここではまず環境造林の概念を整理した上、砂質未熟土壌の荒廃地を例として環境造林技術について私たちが得たこれまでの知見を解説する。

2. 環境造林

「環境造林」の概念を構築したのは佐々木恵彦氏（日本大学教授、東京大学名誉教授）である。佐々木氏は、『沈黙する熱帯林—現地からの報告』の「序」³⁾で、環境造林について以下のように述べている。「農業開発失敗地や過度の焼き畑耕作の跡地などの荒廃地では、裸地化し、何も生えていないところも多い。このような荒廃地を修復し、森林にするためには、瘠悪地に耐える樹種を選定しなければならない。乾燥地ではアカシア、ユーギニアなどが候補になり、湿地ではメラルーカが有力な候補である。しかし、これらの樹種がどうして劣悪な環境に耐えるのか、耐性の生理を研究することが今後の課題である。いずれにせよ、荒廃地での造林では、植栽木が生存し、成林することが目的となり、高成長を期待することはできない。したがって、このような造林は非経済的な環境造林であり、利潤を目的とした産業造林とは異なるはずである。

これまでの造林はつねに経済的な枠組みのなかで計画されてきたため、荒廃地の造林においても、投資効果が求められる。しかし、成長しないような造林地には誰も投資しない。また、先進国の経済・技術援助によって、荒廃地の造林を進めたとしても、やはり、経済的な枠組みの中にあるため、現地政府の資金負担は大きい。こうした状況では、熱帯の荒廃地の修復は進まず、地球環境

をさらに悪化させることになる。今必要なのは、先進国を中心にして、環境改善のための予算枠組みをつくり、環境造林を無償で行うことである」。ここでの論点は、1) 技術的な課題、すなわち荒廃地に森林を再生するためには、劣悪な環境に耐える樹種を選抜し、耐性の生理を解明し、造林技術を確立する必要があるということと、2) 社会経済的な課題、すなわち荒廃地造林では植栽木の活着と成長が悪く産業造林が成り立たないため、公共財としての森林を再生、管理する新たな制度的枠組みを構築する必要があるという2点である。

後者の社会経済的な課題については、佐々木氏の提言に基づいて日本の政府開発援助の林業協力分野で環境造林が位置付けられ、現在では自然環境保全分野での無償資金協力が行われている。これには森林の公益的機能の解明と啓蒙によって、公共財としての森林の認識が深まったことが大きく貢献している。

吉良竜夫氏（大阪市立大学名誉教授）は、『熱帯雨林を考える』の「はじめに一誤解をとく」⁴⁾で、熱帯雨林の公益的機能の意義を述べ、「植林」（産業造林）の限界を述べた上で、熱帯雨林の再生について次のように述べている。「熱帯雨林の面積を『ふやす』ためには、植林以外の方法をさがさねばなるまい。その第一は、いま草原や貧弱な二次林となっているところに、自然の力をかりて森林を復活させることであろう。人間による利用一少なくとも火入れと放牧一をとめるだけで、自然の変化は確実に森林再生の方向に切りかわる。それではあまりにも時間がかかりすぎるとすれば、そこに材の生産を目的としない木を植えてやればよい。土地を肥やす性質をもったマメ科の木、あるいは、やせ地でもそだつ木ならなんでもよい。いわば『捨て植え』で、あとの手入れは必要ないだろう。植えた木の何割かが点々と生き残れば、その木のまわりでは、落ち葉が土を改良し日陰ができて、風や動物がはこんできた樹木の種がすみつく足がかりとなる。その効果は非常に大きいもので森林の復活はいちじるしく促進されるだろう。最初に植えた木は、やがて地ならしの役割を終えて枯れ、しだいに多様な生物相をもつ自然林におきかえられてゆく。こういう自然林回復のための植林は、『環境造林』とよべばよいだろうか。

現地の事情に応じて環境造林と経済造林の間にはいろいろな中間段階があってよいが、いずれにせよ、比較的技術も資本も少なくともすむ環境造林を取り入れることによって、熱帯での大規模な森林回復の可能性を高めることができよう」。吉良氏の言う「環境造林」は、林業を目的としない森林再生のための造林を意味している点で、佐々木氏の言う環境造林と同じである。しかし、その技術的な課題の認識、あるいは環境造林を行うべき立地の認識に大きな違い

がある。荒廃地の環境は植栽木に大きなストレスを与えるため造林が非常に困難であり、環境造林は「比較的技術も資本も少なくすむ」ことが希だろう。

この技術的な課題については、個別の荒廃地の環境の解析と適合樹種の選抜、耐性機構の解明が進められている段階であり、それを踏まえた環境造林技術の確立が求められている。環境造林の目的は環境修復にあり、その技術は低エネルギー投入、低環境負荷でなければならない。そのためには、吉良氏の言うように自然の力、樹木の持つ力を発揮させる必要がある。これには樹木生理学の研究成果を蓄積しなければならない。我が国においても砂防造林学や緑化工学の分野を中心に乾燥地の環境造林技術の開発が進んでいる。しかし、熱帯の荒廃地では多くの場合、土壤に起因する環境ストレスが植物の生育を阻害しており、またその環境ストレスは多岐に渡っているため、土壌学、植物栄養学、樹木生理学等の広範な成果を適用して開発を進める必要があり、環境造林技術の開発が遅れている。樹木生理学を基盤とし、土壌学や植物栄養学の素養を持った造林学研究者の育成が、熱帯の環境造林技術の開発のために強く望まれる。

3. 砂質未熟土壤における環境ストレス

タイ国南部ナラティワートの低湿地をフィールドとして、問題土壤の農業生産性の向上を目指したタイと日本の共同研究が1983年から進められてきた。1990年からは農学的視点だけでなく、環境科学的視点を加え、流域全体の生物生産性の向上と環境修復管理に関する国際共同研究が開始された^{5,6)}。私たちは1994年からこの国際共同研究プロジェクトに参加し、荒廃地の環境造林に関する基礎研究を続けている。本稿では、これまでに得られた成果のうち、砂質未熟土壤地での環境造林に的を絞って概説する。

ここでいう砂質未熟土壤は、ボルネオ島、スマトラ島、マレー半島東海岸、カンボジアなどの泥炭湿地周辺部に分布する珪砂質の土壤を指す。表層に薄い堆積有機物層や泥炭層を持つが、人為により消失していることも多い。厚い珪砂層の下層にしばしば腐植と鉄が集積した盤層を伴うことから、溶脱層と集積層で特徴づけられる Spodosols に分類されることがあるが、その生成過程はまだ不明である。自然植生は熱帯ヒース林であり、サラワクなどでは kerangas と呼ばれる。半島マレーシアに12万 ha⁷⁾、タイに9万 ha⁸⁾の砂質未熟土壤が分布するという報告があり、これらの地域の問題土壤の一つである^{7,8)}。砂質未熟土壤は、貧栄養や乾燥などのために農業生産性が上がらずに放棄されること

が多く、放棄後、遷移が進まず、植生が疎らで広い範囲で土壌が白く顕わになっている光景が広がっている(写真1)。

砂質未熟土壌の荒廃地の造林では、植栽木に負荷される主な環境ストレスとして、強い直射光による大気の乾燥、苗木や土壌の高温・乾燥、および未熟土の貧栄養などが挙げられる(図1)。いずれも太陽放射の遮蔽あるいは物質循環の機能を担っていた植生が喪失したために顕在化したものであるといえる。これらに加えて、土壌の浅いところに盤層が分布する場所では、土壌の物理性も植栽木の活着、生育を阻害する要因になる。

林内に比べて裸地では、日中、湿度が低い。そのため、裸地では葉からの蒸散によって水分が失われやすく、それに見合った水分を根から吸収できない場合には、葉の水分が不足することによって気孔が閉じる。また、葉の水分が維持されている場合でも、乾燥した空気に触れることで気孔が閉じがちになる。このように裸地では林内に比べて気孔が閉じやすいため、二酸化炭素が葉に取り込まれにくく、光合成の阻害要因となる。

裸地では太陽放射を遮蔽するものがないために植栽木の地上部の温度が林内



写真1 タイ国ナラティワートの砂質未熟土壌の荒廃地

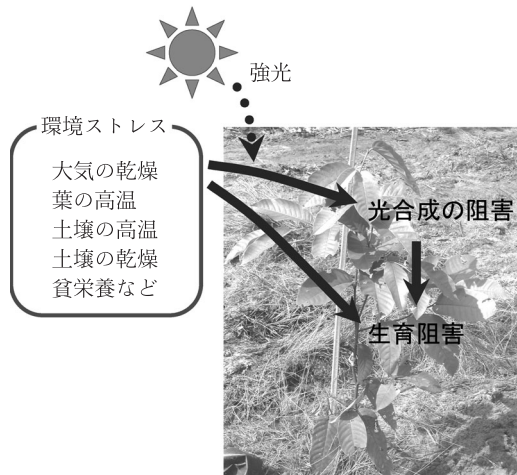


図1 砂質未熟土壌の荒廃地の環境ストレス

に比べて上がりやすい。晴れた日には、日中、葉の温度が 35°C 以上になる。蒸散が盛んな葉では、蒸散に伴う気化熱により葉の温度の上昇がいくらか抑えられるが⁹⁾、土壌や葉の周りの空気が乾燥しているために気孔が閉じて蒸散量が少ない状況では、葉の温度が 40°C を越えることもある。葉の高温が光合成を阻害し、植栽木の成長の抑制をもたらすことになる。

高温は、葉だけでなく根にも影響を与える。裸地では土壌表面の被覆がないために土壌温度

が上がりやすく、特に表層ではそれが著しい。土壌が乾燥していると比熱が小さくなるために、温度がより上がりやすくなる。ナラティワートの試験地で土壌温度を継続的に測定したところ、表層 5 cm までは温度が 40°C に達し、表層 1 cm では時に 50°C 近くまで上昇することがわかった (図 2)。深いところほど日中の温度の上昇は小さいが、それでも深さ 20 cm で日中 35°C 以上に上昇することがある。根が高温に曝されると通水性の低下や生体膜の機能損傷が起こり、養水分の吸収が低下して植栽木の生育が阻害される。

砂質未熟土壌の荒廃地では、土壌が砂質なために元来水分保持力が弱い上に、植生による被覆がないために土壌表面から蒸発しやすく、植栽木に土壌乾燥ストレスがかかりやすい。水分保持力が弱いということは、水分が不足しやすいだけでなく、養分の吸収の上でも障害となる。また、珪砂は塩基の吸着力が弱いため、土壌水中の養分が流亡しやすい。砂質未熟土壌にかつて成立していた森林では、リターや雨水によって供給された養分が速やかに根から吸収されることでバイオマスが維持されていたのであろうが、農業開発によって裸地化して養分循環が断ち切られた上に降雨による流亡が続き、養分が全般的に極めて乏しい土壌環境になってしまっている¹⁰⁾。

光は光合成に不可欠なものであるが、光合成で使われる以上の量を葉が吸収すると、クロロフィルの過剰励起が原因で起こる光合成系の障害 (光阻害) が

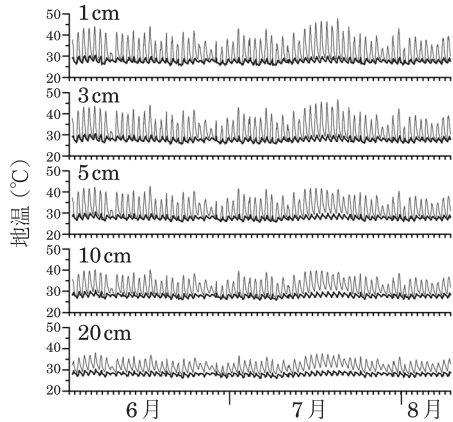


図 2 砂質未熟土壌の荒廃地の土壌温度
細線は裸地、太線は植栽 45 ヶ月後の *Acacia mangium* 林内。(Norisada et al. 2005¹⁰⁾ より改変)

引き起こされやすくなる。光合成を阻害する乾燥や貧栄養などの環境ストレスが存在する状況では、光合成での光エネルギーの消費が少ないため、光阻害が起こりやすい。荒廃した砂質未熟土壌では、上述のようにさまざまな環境ストレスがあり、光阻害が植栽木の生育にとって大きな問題になる。

4. 裸地化した砂質未熟土壌における環境造林の方法

4.1 樹種選抜

「適地適木」が造林の基本である。産業造林では目的樹種に適した場所を探すのに対して、環境造林では対象地に適した樹種を探す。環境修復とはすなわち生態系の機能の再生であり、これを目的とする以上、なるべく早く成林させることを念頭において種を選択すべきである。生態系の機能として期待されるものには、物質循環や環境緩衝能、炭素固定、生物多様性保全、生物資源利用などがあるが、これらの機能を調和的に発揮する森林を最終的には目指すのが望ましいであろう。具体的にどのような森林を造るべきか、その答えを科学的根拠に基づいて示すのはなかなか難しいが、なるべくバイオマスの大きな森林を造ればよいであろうと考えている。環境造林は利潤追求を目的としないが、造成された森林を維持していく上では、地域住民にとっての便益が重要な鍵となってくる。その点を考慮して目指すべき森林の有りようを地域住民の視点に立って考え、種の選定を進めていくことが望ましい。

上記の観点からナラティワートのフィールドにおいて環境造林試験を進めてきた。これまでに植栽試験をした種の中で、マメ科の早成樹である *Acacia mangium* は活着率が高い上に成長も早く、砂質未熟土壌の荒廃地で環境造林を進めていく上で鍵となる種であることがわかった¹⁰⁾。*A. mangium* は、オーストラリアを中心に分布する外来種であるが、これまでも東南アジアの荒廃地での造林に *Acacia auriculiformis* と共によく用いられてきた種である¹¹⁾。在来種では、フトモモ科とフタバガキ科を中心に植栽試験を行ってきた。その中で、フタバガキ科の *Dipterocarpus obtusifolius* は活着率が高く成長もよいので有力な候補樹種である。

4.2 育苗

樹種選抜が荒廃地の苛酷な環境に適応する潜在的能力の探索であるとするならば、育苗方法はその潜在的能力を最大限に発揮させるための工夫であるといえよう。育苗をする上での留意点は、基本的には通常の造林となんら変わるところはない。根張りのよい丈夫な苗を作るということに限る。実際に、根が大

きい苗の方が活着がよいという結果がフタバガキ科の苗を用いた植栽試験から得られている。苗が丈夫であるというのは、植栽という環境の激変に対して既存の器官が耐えられるということと、新しく器官を発達させることができるということの2つの点にまとめられる。既存の器官の環境への適応性は、育苗環境の制御によってある程度強化することができる。

たとえば、通常、熱帯の苗畑では苗を寒冷紗などの庇陰の下で育てるが、植栽前に苗を全天光に曝して光硬化処理をすることによって、全天光に適応した葉や器官配分を備えた苗に仕立てることができる。実際、私たちの植栽試験地でも、光硬化処理によってフタバガキ科の苗の活着が改善されるという結果を得ている。荒廃地では、その環境の厳しさから、しばしば植栽後に既存の器官の一部が枯死してしまう。私たちの植栽試験地でも枯れ下がった植栽木をよく目にする。地下部についても地上部と同様に植栽後に細根が枯死しているのではないだろうか。枯死した器官に替わる新たな器官を発達させるのに十分なストックを持つ苗を作ることが活着率の向上の鍵となることも多いと思われる。

4.3 植栽

育苗方法が植栽木を植栽地の環境に合わせるための工夫であるのに対して、植栽方法は環境を植物に合わせるための工夫であるといえよう。植栽木が活着、成長しやすい環境を調えることが植栽の鍵となる。環境造林は低エネルギー投入、低環境負荷の方法が望ましい。そこに「先行造林」という、森林による環境改善効果を取り入れた植栽方法の発想の源がある。砂質未熟土壌の荒廃地のように裸地化したところでは植栽可能な種は限られてくる。最終的には在来の極相林構成樹種によるバイオマスの大きな森林の成立を目指すとしても、初めから目的とする種を植えてもうまくいかない。まずは、そのような厳しい環境でも植わる種を植えて成林させることによって、目的とする種が植わるような環境への改善を図り、その後、目的とする種を植える方法が先行造林である。

砂質未熟土壌の荒廃地に森林が成立することによって温度や湿度などの環境が改善されることを *A. mangium* の植栽試験によって確認した¹¹⁾。特に土壌の温度環境の改善が著しい(図2)。私たちの植栽試験地ではまだ確認できていないが、長期的には物質循環の回復による養分環境の改善も期待される。実際に、成林させた *A. mangium* の林内に植栽すると、裸地に植栽した場合よりも活着率が高いことを14種の在来種について確認した。先行造林によって植栽可能な種を選択肢が増えるため、様々なタイプの森林を荒廃地に造成することが可

能になるだろう。

5. おわりに

裸地化した砂質未熟土壌の荒廃地で進めてきた環境造林試験の結果を紹介しながら、環境造林の方法について考察した。今後、環境造林技術の確立を図る上で取り組むべき課題として以下の3点が挙げられる。一つ目は、種の特性の把握である。特に熱帯荒廃地で問題となる土壌環境ストレスに対する応答性については、樹木ではほとんど調べられていないのが実状である。二つ目は、情報の共有化である。学術研究の成果は論文により公開されるが、事業として行われたものの成果の公開性が低い。学術論文になりにくい事業の成果の中にも貴重な情報が数多く含まれている。三つ目は、植物と環境の双方の基礎を備えて環境造林に取り組むことの出来る人材の育成である。いずれも時間の掛かる課題であるが、乗り越えられない壁ではないであろう。

〔引用文献〕 1) 小島克己・鈴木邦雄 (2004) 熱帯林の再生・修復 (熱帯生態学, 長野敏英編, 朝倉書店, 東京, 177 pp). 102-127. 2) 小島克己 (2004) 熱帯樹木の環境ストレス応答. 日本林学会誌 86 : 61-68. 3) 佐々木恵彦 (1992) 序 (沈黙する熱帯林—現地からの報告. 小林繁男編, 東洋書店, 東京, 395 pp). 4) 吉良竜夫 (1992) はじめに一誤解をとく (熱帯雨林を考える. 四手井綱英・吉良竜夫監修, 山田 勇・山倉拓夫編, 人文書院, 京都, 368 pp). 11-25. 5) 田村三郎 (1998) 地球環境再生への試み. 研成社, 東京, 212 pp. 6) 高井康雄 (1998) 熱帯泥炭湿地生態系の特性と荒廃地の修復. 東京農業大学国際交流センター, 東京, 106 pp. 7) Mitchell, B.A. (1963) Forestry and tanah beris. Malay. For. 26 : 160-170. 8) Panichapong, S. (1982) Problem Soils of Thailand : Their Characteristics, Distribution and Utilization. Ph. D thesis, The University of Tokyo, Tokyo, Japan. 9) Norisada, M., Kojima, K. (2005) Photosynthetic characteristics of dipterocarp species planted on degraded sandy soils in southern Thailand. Photosynthetica 43 : 491-499. 10) Norisada, M., Hitsuma, G., Kuroda, K., Yamanoshita, T., Masumori, M., Tange, T., Yagi, H., Nuyim, T., Sasaki, S., Kojima, K. (2005) *Acacia mangium*, a nurse-tree candidate for reforestation on degraded sandy soils in the Malay Peninsula. For. Sci. 51 : 498-510. 11) Pinyopusarerk, K., Liang, S.B., Gunn, B.V. (1993) Taxonomy, distribution, biology, and use as an exotic. (*Acacia mangium* : Growing and Utilization. MPTS Monograph Series No. 3. Awang, K., and D. Taylor (eds.), Winrock International and FAO, Bangkok, Thailand, 280pp). 1-19.