

インドネシア南カリマンタン州における 石炭採掘跡地の森林回復技術

仲摩栄一郎¹・田中一生²・ファクルール ラジエ³・マハルス アルヤデイ³・
ハムダニ ファウジ³・ムルディヨノ⁴・太田誠一¹・大角泰夫¹・佐々木恵彦¹

1. 背景と目的

1-1. インドネシアにおける石炭採掘の現状

インドネシアでは、1990年代初頭に石炭セクターへの海外投資が解禁された後、石炭生産量が急増している。インドネシアの2012年の石炭生産量は約4億4千万トンと世界第4位であり、1990年比約43倍となっている¹⁾。そのうち約3億8千万トン(約86%)は、中国やインド等の新興国および日本や韓国等へ主に石炭火力発電用として輸出されている(1990年比約82倍)。一方、2012年の国内消費量は約6千万トン(約14%)と少ない。しかしながら、インドネシアのエネルギー鉱物資源省は、今後急速に増加すると見込まれる自国内の石炭火力発電用の需要を確保するため、「国内供給義務に関する省令(2009年34号)」を交付し、採炭企業に地元消費量を割り当てる等して輸出量を制限する保護主義的な政策を取りはじめている²⁾。

インドネシアの石炭埋蔵量は世界第13位であり、大規模な埋蔵地域は、東カリマンタン州・南カリマンタン州・南スマトラ州の3州である。2012年の石炭生産量・輸出量ともに東カリマンタン州と南カリマンタン州で9割以上を占める。インドネシアでは、2009年1月に「鉱物石炭鉱業法(2009年法律第4号、以下「新鉱業法」)」が公布された。これに

伴い、これまでインドネシアの鉱業事業形態として、外国投資に活用されてきた契約方式(Contract of Work : COW)制度は廃止され、鉱業権はライセンス方式(鉱業事業許可制度)に一本化された。事業面積が数万ヘクタールの大規模事業社上位10社で、全石炭生産量・輸出量の約60%を占めている³⁾。残りの40%のなかには、中小規模事業者も数多く含まれており、その総数は千社に上る。

1-2. 石炭採掘跡地に対するインドネシア政府の政策

インドネシアの石炭採掘は主に露天掘りで行われるため、森林・植生喪失のみならず大規模な地形の改変を伴い景観や環境に大きな影響を与える(図1)。

このため、石炭採掘跡地の取り扱いは、「新鉱業法」の細則である「採掘跡地の処理や再生(政令2010年第78号)」で規制されている。鉱業事業者は、事業開始前に跡地処理・利用計画を政府に提出し承認を受け、採掘後にはその計画に応じて跡地を処理・利用または採掘前の土地利用へ回復することが義務付けられている。特に、採掘予定地の土地利用が森林地の場合は、管轄するインドネシア林業省から借用許可を得なければならない。インドネシアの森林地のうち、鉱物の採掘が許可されているのは、「生産林(坑道掘りおよび露天掘りも可)」と「保安林(坑道掘りのみ可、露天掘りは不可)」であり、

Nakama, Eiichiro, Kazuo Tanaka, Fakhur Razie, Mahrus Aryadi, Hamdani Fauzi, Murdiyono, Seiichi Ohta, Yasuo Osumi, and Satohiko Sasaki. Development of Forest Rehabilitation Techniques on Ex-coal Mining Area, South Kalimantan, Indonesia

¹公益財団法人国際緑化推進センター, ²早稲田大学環境総合研究センター, ³ランボン・マンクラット大学, ⁴インドネシア林業省流域管理・社会林業総局



図 1 東カリマンタン州の大規模石炭採掘地

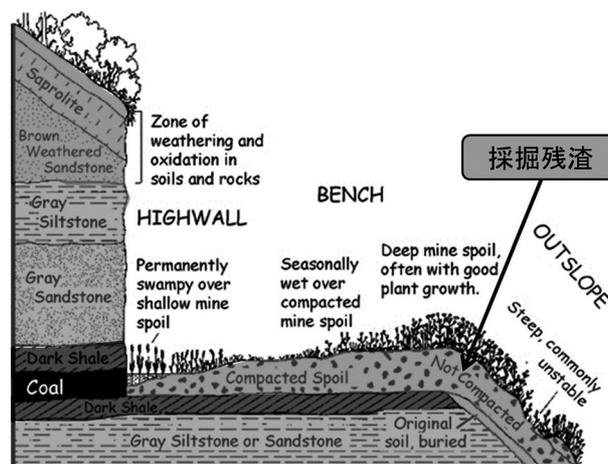


図 2 石炭露天掘りにより形成される地形（模式図）

「保全林」における鉱物の採掘は禁止されている。森林地を借用する場合、採掘後は埋め戻しを実施したうえで森林を再生して返却することが義務付けられている（「森林地の利用（政令 2010 年第 24 号）」や「森林の再生や回復（政令 2008 年第 76 号）」）。インドネシア林業省は、近年増え続ける石炭採掘跡地における森林再生を重要課題のひとつとして位置づけ、「森林再生指針（2011 年林業大臣令第 4 号）」や「森林再生の成功評価指針（2009 年林業大臣令第 60 号）」等を公布して、石炭をはじめとする鉱物採掘跡地の森林再生を推進しようとしている。

1-3. 石炭採掘跡地における森林再生の阻害要因

しかしながら、鉱物の採掘跡地では、さまざまな森林再生の阻害要因が存在している。

石炭採掘跡地における森林再生を困難なものにしている主要な原因は、その特殊な土壤環境であることが多い。一般的に、採掘前の自然状態の地層では、風化を経て鉄の酸化によって褐色～黄色を呈するに至った土壤層（表層土+下層土）、その下には風化の初期段階にあるが酸化は進んでいない灰色の基岩層、さらにその下には暗色～灰色の堆積岩層と黒い石炭層が存在している（図 2）⁴⁾。露天掘りでは、これら石炭層の上に堆積した基岩層や土壤層を取り除いて石炭を採掘する。

採掘時に随伴して掘り出されるこれら堆積物（掘



図 3 石炭採掘跡地を整地・地拵えした様子

削残渣、英語では overburden と呼ばれる）は廃棄物として土捨て場に捨てられるか、露天掘り跡の穴を埋め戻す際に利用される（図 3）。採掘残渣中の多くを占める未風化で灰色の採掘残渣は、一般に礫質で、細粒化した物は貧栄養である。それに加えて、土捨てや埋め戻しの際の整地・地ごしらえでは、崩壊を防止するため大型の重機を用いた締め固めが行われるため、著しい土壤の堅密化が進行し植生の定着を阻害する。堅密化した表土は雨水の浸透能が極めて小さいために、雨水の多くが表面流去水として流去する。その際に激しい表土流亡を随伴し、更に

植生の定着を阻害することとなる。

さらに、採掘残渣中に潜在酸性物質であるパイライトが含まれる場合には、時間の経過と共に、著しく強い酸性を呈する酸性硫酸塩土壌（Acid Sulfate Soil：ASS）が出現するに到り、あらゆる植生の活着・生存が困難となる（図4）。

このような問題に対処するため、上述のインドネシア林業省の「森林再生指針」には以下の手順が示されている。

- ① 露天掘りを行う際には、風化した褐色～黄色の土壌と未風化で灰色の採掘残渣を分けて保管しておく。
- ② 採掘残渣を捨てる場合やそれを用いて跡地を埋め戻す場合の整地・地ごしらえでは、まず灰色の採掘残渣を下に敷き、その上に褐色～



図4 酸性硫酸塩土壌による植栽木の枯死

黄色の土壌を全面客土する。

しかしながら現地においては、褐色～黄色の土壌層が薄く、全面客土用に保管・調達することが困難な地域もあり、灰色の採掘残渣を整地・地ごしらえに用いざるを得ない場合もある。こうした採掘残渣中に上述のパイライトが含まれている場合は、土壌が強酸性を呈し、森林再生の障害となる。このため、東カリマンタン州や南カリマンタン州では、露天掘り跡地が放棄される例も散見され、石炭採掘跡の荒廃地が増加している。生物多様性の喪失や洪水などの自然災害の危険性も指摘されており、インドネシア国内の環境NGOから構成される石炭問題連絡協議会は批判を強めている⁵⁾。

そこで本調査では、こうした石炭採掘跡地において、植林試験を実施することにより、適切な森林再生手法（整地・地ごしらえ、客土、施肥、樹種選定等）を実証的に検証することを目的とした。

2. 対象地と方法

インドネシア南カリマンタン州で操業中の鉱山会社2社（AGM社、TAJ社）において、石炭採掘後地を調査対象地とし、2012年3月に、それぞれ5.0ha、3.5haの植林試験を行った。植栽樹種は、試験開始時点で入手可能な造林樹種8種を選定した（表1）。試験処理として、TAJ社では、採掘残渣のうち、灰色の採掘残渣のみを用いて埋め戻し整地・地拵えを行い（「対照区」）、そこに重機で耕耘した「リッピング区」、植え穴のみに褐色～黄色の土壌を客土

表1 植林試験に用いた樹種と生存率（植栽15ヵ月後）

	学名	和名・商業名	用途	起源	生存率 (%)
1	<i>Acacia mangium</i>	アカシヤマンガム	用材	外来種	73.4
2	<i>Enterolobium cyclocarpum</i>	ゾウノミミ	用材	外来種	64.4
3	<i>Melaleuca cajuputi</i>	カユプテ	用材、薬用油	在来種	65.5
4	<i>Anthocephalus cadamba</i>	ジャボン	用材	在来種	57.6
5	<i>Tectona grandis</i>	チーク	用材	外来種	63.2
6	<i>Swietenia macrophylla</i>	オオバマホガニー	用材	外来種	37.8
7	<i>Fagraea fragrans</i>	テンブス	用材	在来種	70.8
8	<i>Hevea brasiliensis</i>	パラゴムノキ	用材、樹液	外来種	44.3

した「植穴客土区」および「堆肥区」を設定した。AGM社では、灰色の採掘残渣で埋め戻した区（「対照区」）、その上に褐色～黄色の土壌を用いて約30～50cm客土した「全面客土区」、「施肥・堆肥区」および「マルチング区」を設定した。植栽間隔は3m×3mで、試験プロットの最小単位は、TAJ社では4本×4本（12m×12m）、AGM社では同一樹種5本×5本（15m×15m）とした。試験プロットは植栽樹種・処理区順に規則的に配置し、2回～5回の繰り返しを設けた。植栽後は、植栽木の生育（生存率、樹高および地際径）を経時的に測定した。また、土壌の理学性（細土容積重、孔隙率、石礫量）、化学性（土壌pH、全窒素）および土色を経時的に定点調査した。

3. 結果と考察

3-1. TAJ社における植栽試験結果と考察

TAJ社の植林試験地では、pH7.3～8台のアルカリ性土壌ならびにpH2台の強酸性土壌が局所的に分布しており、土壌が極めて不均一であることが明らかとなった（図5）。これは、埋め戻しに用いられた灰色の採掘残渣中に、累積する様々な堆積層が混在し、アルカリ鉱物を含む層や、パイライトを含む層が無秩序に埋め戻されたためであると考えられる。

このTAJ社における植林試験の結果、リッピング・植穴客土や堆肥処理の有無にかかわらず、強酸性土壌の分布に対応して植栽木が枯死した（図6）。

このことから、石炭採掘跡地の緑化に際しては、採掘残渣を用いて埋め戻す際に、強酸性化の可能性がある潜在酸性物質を含む堆積層は下層に隔離埋設し、表層には潜在酸性物質を含まない堆積層を埋め戻すことが重要であることが示唆された。

3-2. AGM社における植栽試験結果と考察

AGM社の植林試験地の土壌pHは、灰色の「採掘残渣区」ではアルカリ鉱物を多く含むためpH7台と高く、褐色～黄色の「全面客土区」では通常の森林土と同じくpH5台が中心であった。一方、細土容積重や全窒素含有量については、「採掘残渣区」と「全面客土区」の間に有意な差は確認されなかつ

8.0	8.3	8.3	8.1	8.2	3.0	8.1	7.0	
8.4	8.2	7.5	7.9	5.7	2.8	3.7	4.2	
7.5	8.2	5.3	5.1	6.2	4.3	5.7	8.0	
3.1	8.3	3.2	4.3	6.8	3.8	3.9	7.4	
4.0	3.2	8.0	5.3	4.8	7.1	7.1	7.9	
3.5	6.1	6.7	4.6	3.7	4.9	3.7	4.2	
4.0	3.0	8.0	8.1	8.0	8.1	4.3	3.7	
3.8	4.1	8.1	8.0	5.1	8.3	4.6	3.0	
3.0	2.8	3.6	4.5	8.1	6.7	4.1	3.9	
4.4	3.4	4.9	5.7	4.9	8.1	2.9	3.2	
3.2	6.0	7.7	7.8	5.0	4.4	3.9	3.6	8.0
4.3	4.1	3.1	3.7	5.2	5.0	3.5	3.7	6.4
4.5	4.6	3.8	3.6	4.3	4.3	5.5	5.3	7.9
8.0	4.2	3.9	3.8	8.2	4.3	7.9	5.5	6.4
7.6	4.1	3.7	5.2	7.3	5.6	8.1	8.0	7.0
7.9	3.8	4.1	3.2	7.9	7.6	7.5	8.2	8.2
3.4	8.1	3.7	4.3	7.2	5.8	8.3	7.9	3.9
8.0	3.5	6.2	5.1	4.4	4.5	7.8	7.4	4.9
3.1	5.9	4.1	3.0	6.5	3.6	2.8	5.4	
2.8	4.8	7.5	2.9	6.6	6.7	3.9	8.1	
2.8	3.5	7.8	7.7	4.6	7.8	5.6		
2.5	3.8	8.5	7.8	7.5	8.2			
4.5	4.2	6.3	4.6					

図5 石炭採掘跡の埋め戻し地における土壌pHの分布

た。細土容積重（深度0-10cm）の全平均値は1.5±0.2（g/cc）であった。一般的に、同地域の森林表層土壌の細土容積重は0.7-1.0（g/cc）程度で、下層土でも1.4（g/cc）を超えることは稀であることから、「採掘残渣区」と「全面客土区」ともに表層の土壌でも非常に緻密度が高いことが判明した。全窒素含有量の全平均値は0.07±0.02%（深度0-10cm）で、「採掘残渣区」と「全面客土区」ともに表

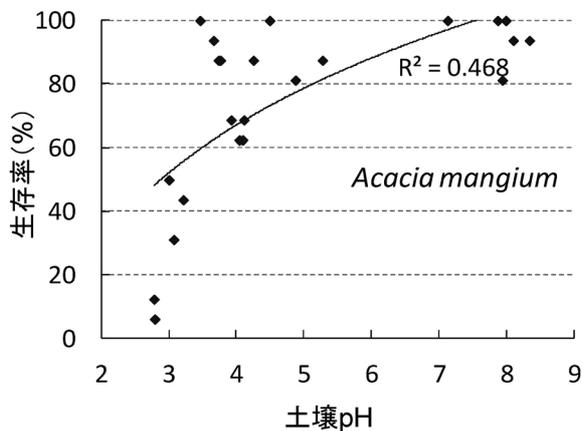


図 6 TAJ 社における土壌 pH と *A. mangium* 植栽木の生存率（植栽 15 ヶ月後、各プロット n=16）

層の窒素成分が不足していることが確認された。

AGM 社の植林試験地では、全面客土により、樹種によって違いはあるが、植栽木の生存・成長が促進される傾向が見られた。また、施肥・堆肥により植栽木の成長が促進される傾向も確認された。なお、「採掘残渣区」では草本等の侵入もほとんど見られない裸地が継続しているのに対して、「全面客土区」では先駆樹種 (*Trema orientalis* 等) の天然更新が観察されており、植栽木と共存すれば早期の緑化・森林再生に寄与すると考えられた。

ただし、現地で一般的に全面客土に用いる土は、Top Soil と呼ばれてはいるものの、実際は森林の表土のみではなく、地表下数 m にわたる風化した褐色～黄色の下層土も含まれている。それらを客土に用いる場合には、土壤養分等も事前に確認し、貧栄養の場合は施肥等を検討する必要があると考えられる。これまでの試験結果から、灰色の採掘残渣区においても、*A. mangium* (図 7 上) や *E. cyclocarpum* (図 7 下) 等のマメ科樹種が生存率および成長ともに良い傾向が確認された (図 8)。一般に、マメ科樹種は、共生根粒菌の窒素固定によって貧栄養土壌においても生育・成長が可能である。また、フトモモ科の *M. cajuputi* やアカネ科の *A. cadamba* も比較的成長が早く生存率も高かった。石炭採掘跡地の緑化に際しては、これら灰色の採掘残渣にも耐性・



図 7 *A. mangium* (上) と *E. cyclocarpum* (下) の植栽 15 ヶ月後の様子

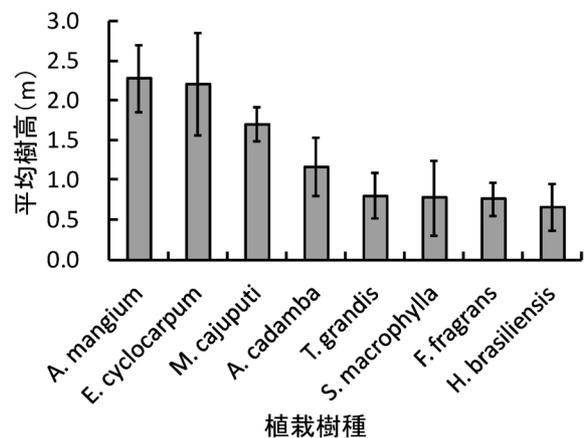


図 8 TAJ 社における植栽木の平均樹高と生存率（植栽 15 ヶ月後、各樹種 n=300 程度）

適応能力を持つ早成樹種を用いて早期に森林を再生すること（一次緑化）が、土壌流亡防止の観点からも重要であると考えられた。

4. 今後の課題

今後、AGM社およびTAJ社ともに、時間の経過とともに土壌流亡や土壌の酸化がさらに進む可能性もある。一度活着したと思われた植栽木が2～3年後に成長を停止したり、幹や枝の先から枯れ下がるダイバックまたは樹体が完全に枯死したりする現象も観察されている。今後も、土壌の酸性度や緻密度の変化、植栽木の成長経過、根系の発達状況等について調査を継続する必要がある。また、既に酸性化が進んだ場所については、土壌改良ならびに強酸性土壌に耐性・適応能力を持つ植栽樹種の導入や共生する微生物や菌根菌等の活用も検討する必要がある。さらに、それらの共生関係について、強酸性土壌への耐性・適応機構を解明することは科学的にも重要で興味深い課題であろう。

日本国において石炭火力発電所の増設が進められている現在、今後はさらにインドネシアからの石炭輸入が増加することが見込まれる。そのため、資源の安定確保・安定調達のためにも、長期的な視野に立って、鉱物採掘跡地の適切な処理も含めて環境影響に十分配慮した資源調達を行う必要がある。

5. 謝辞

本調査は林野庁補助事業「途上国森づくり事業（開発地植生回復支援）」の一環として実施した。

技術支援部会では、部会長である東京大学の小島克己教授をはじめ委員の皆様にご指導を頂いた。また、本森づくりプロジェクトは、インドネシア林業省流域管理・社会林業総局が管轄する二国間国際協力プロジェクトとして正式に登録されている。本調査を実施するにあたり、総局の地方出先機関であるバリト流域管理署に協力を頂くとともに、現地鉱山会社（AGM社およびTAJ社）には植林試験地の提供など便宜を供与して頂いた。この場を借りて御礼申し上げる。

〔引用文献〕 1) IEA. 2013. Coal Information 2013. 2) 手打晋二郎. 2013. インドネシア石炭事情. JCOAL Journal, Vol. 26, p12-15. 3) (独)石油天然ガス・金属鉱物資源機構. 2014. インドネシア石炭鉱業事情. http://coal.jogmec.go.jp/result/docs/140611_07.pdf. 4) Jaringan Adovaksi Tambang. 2010. Deadly Coal Extraction and Borneo Dark Generation. <http://english.jatam.org/index.php>. 5) W. Lee Daniels and C.E. Zipper. 2010. Creation and Management of Productive Minesoils. Communications and Marketing, College of Agriculture and Life Sciences, Virginia Polytechnic Institute and State University.