

途上国森づくり事業
(開発地植生回復支援)

平成 25 年度報告書

平成 26 年 3 月

公益財団法人 国際緑化推進センター

まえがき

過去数十年間にわたり、発展途上国を中心として森林の劣化・減少が続いている。FAO 統計によれば、2000 年～2010 年の 10 年間にわたり毎年 1,300 万ヘクタールの森林が土地利用転換や山火事等の自然災害等によって減少したと報告されている。一方、植林や天然力により、毎年約 780 万 ha の森林が復旧されているが、毎年約 520 万 ha の森林が純減少しているのが現状である。

森林が農地へ転換された後、適切に農地として持続的に利用管理されれば問題は少ないが、森林が失われた後に問題土壌が発生し、耕作不可能地となってしまう、放置され荒廃地化する場合もある。また、乾燥気候下で森林が失われ、農業や牧畜業が行われると、土地の生産性が低下し、放置され荒廃地化する場合もある。一方、鉱業によって消失する森林が大きな問題となっている。鉱物採掘跡地では、強酸性や重金属過多の問題土壌が生成され、森林回復が困難を極める場合がある。発展途上国、特にインドネシアでは、近年の需要増により鉱物の採掘が急激に進み、また増大する人口圧による非持続的な農地開発等の結果、荒廃地が急増し生物多様性の喪失や洪水多発等災害の危険性が急激に高まっている。このような荒廃地において、いかにして森林を復旧するかが途上国のみならず地球規模での喫緊の課題となっている。

この課題に対処するために、開発地における植生回復・森林回復支援事業が平成 23 年度から 4 年間で実施されることとなった。本事業では、こうした森林回復が困難な地域において、その環境条件、特に土壌条件に着目し、現地調査やモデル林造成等の実証活動を通して、自然科学的なデータを踏まえた上での適切な樹種選択や植栽方法を開発することを目的としている。そして、開発した技術を普及するために、現場で簡易に使用可能なレベルにまとめた技術指針を作成する。

さらに、こうした開発跡地の植生回復・森林回復ならびに造成された森林の保全・持続的利用管理には周辺に住む地域住民の継続的な協力が不可欠である。そこで本事業では、地域住民の生計向上にも寄与するよう、木材生産のみならず、非木材林産物（NTFP）を収穫できる樹種についても検討をおこなう。

本事業を進めるにあたり、林野庁森林整備部計画課海外林業協力室の赤堀聡之室長、杉崎浩史課長補佐、川原聡国際森林減少対策調整官にご指導を頂いた。また調査の企画実行にご指導いただいた本部会委員長小島克己氏をはじめとする委員各位ならびに現地調査等に協力を頂いたインドネシア林業省をはじめ現地関係者の皆様に厚く御礼申し上げる。

平成 26 年 3 月

公益財団法人国際緑化推進センター

理事長 佐々木 恵彦

目 次

第 1 章 事業の概要	1
1. 1 事業目的	1
1. 2 事業の実施手法と結果.....	1
1. 3 委員会、部会の構成および開催記録	7
1. 4 現地調査の実施記録	9
第 2 章 開発地における森林回復モデル林造成実証活動	11
2. 1 森林回復モデル林造成実証活動の実施体制および概要	11
2. 2 石炭採掘跡地における森林回復モデル林（南カリマンタン州）	12
2. 3 農業跡地における森林回復モデル林（東ヌサテンガラ州）	22
第 3 章 現地調査・実証活動	30
3. 1 モデル林植栽木の生育調査（生存率、樹高等）	30
3. 2 土壌モニタリング	49
3. 3 南カリマンタン州石炭採掘跡地の植栽木の養分状態	81
3. 4 熱帯における造林苗木の短期的湛水による気孔コンダクタンスの変化	88
3. 5 植え穴客土および土嚢造林試験	106
3. 6 東ヌサテンガラ州クバン県シル村社会経済調査	112
第 4 章 森林回復技術ワークショップ	122
4. 1 目的・概要.....	122
4. 2 結果概要およびディスカッションの内容	123
4. 3 「森林回復技術指針（素案）」についての提言	126
4. 4 ワークショップ写真	127
第 5 章 森林回復技術指針（素案）	128
5. 1 石炭採掘跡地における森林回復技術指針（素案）	128
5. 2 半乾燥地における森林回復技術指針（素案）	129
第 6 章 開発地の植生回復・森林回復について資料収集分析	130
6. 1 インドネシアの石炭に関する最新情報.....	130
6. 2 インドネシアにおける鉱山跡地の森林回復事業に関する法令	133
6. 3 植生回復・森林回復に適用可能な森林施業技術	134
6. 4 石炭採掘跡地における森林回復先進事業地の視察結果	140
6. 5 ACID SULFATE SOIL FIELD pH TESTS	144
参考資料	153
1. 開発地植生回復支援部会 第 1 回議事抄録.....	153
2. 開発地植生回復支援部会 第 2 回議事抄録.....	157
3. 開発地植生回復支援部会 第 3 回議事抄録.....	163

第1章 事業の概要

1. 1 事業目的

鉱物採掘跡の放棄地(写真 1-1)や半乾燥気候条件下における過剰農牧利用跡地(写真 1-2)では、極端な酸性土壌やアルカリ性土壌などの問題土壌が発生しやすく、通常の植林樹種や植栽方法では活着率や成育状況が悪く、森林・植生が十分に回復せず、荒廃地化している場合が多い。そこで本事業では、こうした開発地（森林回復困難地）の環境条件、特に土壌条件に着目し、現地調査やモデル林造成等の実証活動を通して、自然科学的なデータを踏まえた上での適切な樹種選択や植栽方法についての植生回復・森林回復技術を確立することを目的とする。確立した技術は植生回復・森林回復技術指針として取りまとめる。



写真 1-1. 石炭採掘跡の放棄地
(インドネシア東カリマンタン)



写真 1-2. 農牧利用跡地
(インドネシア東ヌサテンガラ)

1. 2 事業の実施手法と結果

(1) 本事業の全体計画

本事業の目的を達成するために、ア) 資料収集分析、イ) 現地調査・実証活動、ウ) ワークショップの開催、エ) 技術指針作成を実施する(図 1-1)。

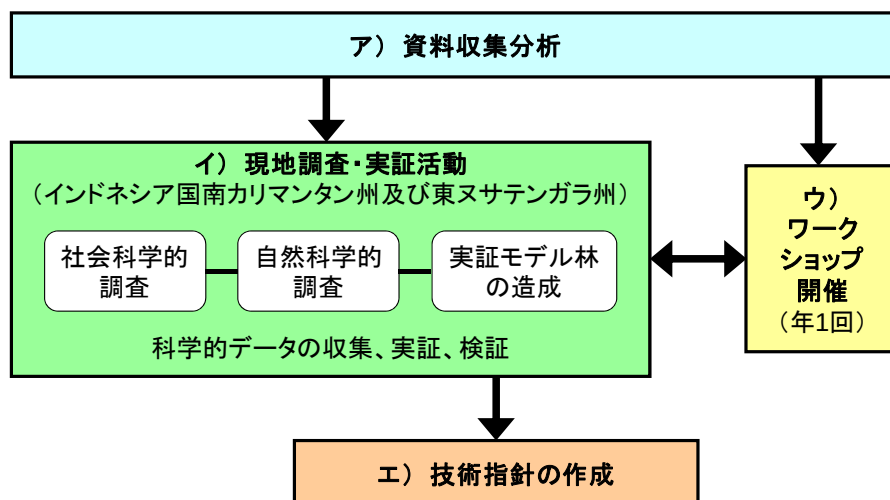


図 1-1. 開発地植生回復支援事業の進め方

(2) 資料収集分析

i) 開発地における土壌の分類・類型化

平成 23～24 年度は、開発地における問題土壌として、石炭採掘跡地の酸性硫酸塩土壌ならびに農業開発跡地のアルカリ性土壌を分類・類型化し、その特性（物理性・化学性）を把握するための資料を収集分析した。平成 25 年度は、現場レベルで土壌の潜在酸性を簡易に評価するための資料を収集分析した。

ii) 植生回復・森林回復に適用可能と考えられる森林施業技術

平成 23～24 年度は、東南アジアの開発地における植生回復・森林回復に関する既存の文献・資料を収集分析した。平成 25 年度は、インドネシア国政府や国際 NGO が実施している研修の内容について情報を収集分析するとともに、現地インドネシアの石炭採掘事業地における植生回復・森林回復の先進事業地を視察した。

iii) 開発地の植生回復・森林回復に関するインドネシア国内の法令など

平成 23～24 年度は、インドネシアにおける石炭採掘事業に関する法令（許認可手続き、採掘後の植生回復・森林回復の技術指針および評価指針）について情報を収集分析した。平成 25 年度は、それらの追加情報を収集し法令一覧を作成した。

(3) 現地調査・実証活動

本事業の現地調査・実証活動の対象地として、インドネシアにおいて問題となっている石炭採掘跡地（南カリマンタン州）と半乾燥地域の農業跡地（東ヌサテンガラ州）を選定した。インドネシア林業省の流域管理・社会林業総局をカウンターパートとして、現地調査・実証活動を実施した。また、現地調査にあたっては、南カリマンタン州では、ランボン・マンクラット大学および林業省の研究開発局バンジャルバルー支所、東ヌサテンガラ州では、研究開発局クパン支所の協力を得た。

i) 開発地における森林回復モデル林の造成実証活動

南カリマンタン州の石炭採掘跡地においては、平成 23 年度に計 8.5ha（8 樹種、AGM 社：5.0ha、TAJ 社 3.5ha）、平成 24 年度に 5.0ha（12 樹種、AGM 社）、そして平成 25 年度には、6.0ha（18 樹種、AGM 社）の森林回復モデル林を造成した。

東ヌサテンガラ州の農業跡地においては、平成 24 年度に計 8.0ha（8 樹種、Nekbaun 村：4.0ha、Penfui Timur 村：4.0ha）、そして平成 25 年度には、5.0ha（16 樹種、Silu 村）の森林回復モデル林を造成した。

ii) モデル林植栽木の生育調査

上記の実証モデル林造成地において、植栽木の生存率および成長を継続的に調査し、

各樹種の生存や成長の特性、ならびに、地ごしらえ（客土、リッピング等）、土壤改良（堆肥、保水剤）や施肥等の効果について考察した。

iii) 土壤モニタリング調査

南カリマンタン州の石炭採掘跡地のモデル林造成地（酸性土壤）では、局所的に強酸性土壤が出現しており、植生回復・森林回復の障害の一つとなっている。採掘跡の埋め戻し材料中には、海成堆積物であるパイライト（Pyrite : FeS_2 —黄鉄鉱）が含まれ、これが時間の経過と共に徐々に酸化することで生成する硫酸に起因する酸性硫酸塩土壤（Acid Sulphate Soil）が今後も継続して形成される可能性が高い。そこで石炭採掘跡地における土壤の酸性化の進行速度を把握することを目的として、平成 24 年度から土壤 pH のサンプル調査を定期的の実施した（写真 1-3）。

南カリマンタン州の石炭採掘跡地のモデル林造成地（酸性土壤）では、採掘原材料を用いて埋め戻し、重機で填圧して地拵えが行われるため、極めて緻密で硬質な土壤となっており、植栽を行う際の植え穴掘りや植栽木の根の伸張に困難が生じる。さらに、緻密な土壤のため透水性が著しく悪く排水不良で植栽木が過湿害によって枯死する事例も多い。

そこで、本造林試験では、土壤表面のリッピング（掻き起こし）や森林土壤を材料とした客土を実施して土壤改良を図っている。また、こうした堅密な土層は乾燥・湿潤の繰り返しや植生の根の発達に伴って徐々に膨軟な土層へと変化して行くと予想されるがその実態は不明である。このため平成 24 年度から土壤の土壤理学生モニタリングを開始し本年度もこれを継続した（写真 1-4）。



写真 1-3. 土壤 pH の測定



写真 1-4. 土壤理学生測定用の試料採取

iv) 植栽木の養分状態

石炭採掘跡地に植えられた植栽木の養分状態を知るために、葉の元素濃度を測定した。葉のカルシウム濃度は成長がよくない処理区で低い傾向にあったが、リン、カリウム、マグネシウム、亜鉛ではそのような傾向は見られなかった。また、樹種によっては、高

濃度のアルミニウムとマンガンを葉に含有していた。以上の結果から、カルシウムの欠乏、アルミニウムやマンガンの過剰害が石炭採掘跡地で植栽木の生育を阻害している植物栄養学的要因の候補として考えられた。

v) 熱帯における造林苗木の短期的湛水による気孔コンダクタンスの変化

石炭採掘跡地では、土壌の排水不良により、部分的な水たまりとして観察される不均一な湛水環境が散見されている。本研究では、インドネシアの南カリマンタンにおいて一般的な造林樹種を用いて、短期的な湛水が気孔反応に及ぼす影響を調べた。実験 1 では 3 日間の湛水処理期間を設けたところ、気孔コンダクタンスが低下したのは、*E. zwageri*、*Nyaway*、*S. smithiana* の 3 種のみであった。実験 2 では 6 日間の湛水処理期間を設けたところ、4 日目から 6 日目に *S. macrophylla* 以外の種で気孔コンダクタンスの低下が見られた。これらのことから、石炭採掘地において湛水環境が、1 週間を超えて続くようであれば、苗木の生育に影響すると考えられた。

vi) 土嚢および植え鉢造林試験

南カリマンタン州の対象地では、石炭採掘跡地において、採掘残渣に含まれる潜在酸性物質が酸化されることで、局所的に強酸性土壌が形成されている。通常の植栽方法では、生存・成長ともに困難である。そこで、森林土壌を詰めた土嚢および植え穴に森林土壌を客土した植え鉢方式による植栽試験を実施し、通常の植栽方法と生存・成長を比較・検討した。

vii) 社会経済調査

開発跡地の森林回復ならびに森林の保全・持続的利用管理には周辺に住む地域住民の継続的な協力が必要不可欠である。そこで、平成 24 年度ならびに 25 年度は、東ヌサテンガラ州の農牧開発地のモデル林造成地周辺の地域住民を対象として、当該地域の経済状況、土地権利、森林減少の経緯等について社会経済調査を実施した。

(4) ワークショップの開催

これまでの本事業の現地調査・実証活動および技術指針の素案を検討することを目的としたワークショップを 2014 年 3 月 4 日にジャカルタにて開催した（写真 7、8）。現地の関係諸機関（林業省、鉱業エネルギー省、大学、鉱山会社や NGO 等）から約 50 名が参加した。本ワークショップでは、本事業の現地調査・実証活動の成果である「採掘残渣の潜在酸性簡易評価法」および「酸性や半乾燥に適応可能な樹種選定」に注目が集まった。また、本事業の成果は、インドネシア林業省および鉱業エネルギー省の既存の森林回復ガイドラインを補完・補強するものとして高い評価を得た。



写真 1-5. 開会挨拶(JIFPRO・林業省)



写真 1-6. 南カリマンタン事業活動の報告

(5) 技術指針の作成

平成 23～24 年度は、インドネシアにおける代表的な植林樹種の特徴、半乾燥地等における造林技術や土壌モニタリングマニュアルについてとりまとめ、平成 25 年度は、これまでの資料収集分析、現地調査結果を基に、自然科学及び社会科学的データに裏打ちされ、かつ現場で簡便に使用可能な「荒廃地における森林回復のための技術指針（下記エ）」の素案として基本的な考え方の整理を行った。

なお、最終年度である平成 26 年度は、上述の基本的な考え方の素案に従って、具体的な内容からなる技術指針（下記 3 項目）を作成するとともに、普及用資料を作成する。

● 荒廃地における森林回復技術指針

開発跡地における問題土壌特性の簡易判定手法
気候・土壌特性に応じた適切な地ごしらえ・土壌改良方法
気候・土壌特性に応じた適切な樹種選定・植栽方法

(6) 本事業の実施計画（年度単位）

平成 23～25 年度に実施済みの項目（●）および平成 26 年度に実施予定の計画（○）を以下に示す（表 1-1）。

表 1-1. 開発地植生回復支援事業の実施計画（年度単位）

項 目	23 年度	24 年度	25 年度	26 年度
ア) 資料収集分析	●	●	●	○
イ) 現地調査・実証活動				
土壌調査	●	●	●	○
植生調査	—	●	●	—
共生微生物調査	—	●	—	—
社会経済調査	●	●	●	—
モデル林の造成	●	●	●	○
モデル林の保育	—	●	●	○
生育データ収集	●	●	●	○
ウ) ワークショップ開催	●	●	●	○
エ) 技術指針の作成	作成準備	作成準備	素案	最終版

(7) 開発地植生回復支援事業の成果とその効果や活用方法

本事業の成果については、当センターのホームページや技術情報誌で一般公開するとともに、セミナーや個別相談等を通して、民間企業や NGO 等への技術指導についても積極的に対応していきたい（図 1-3）。

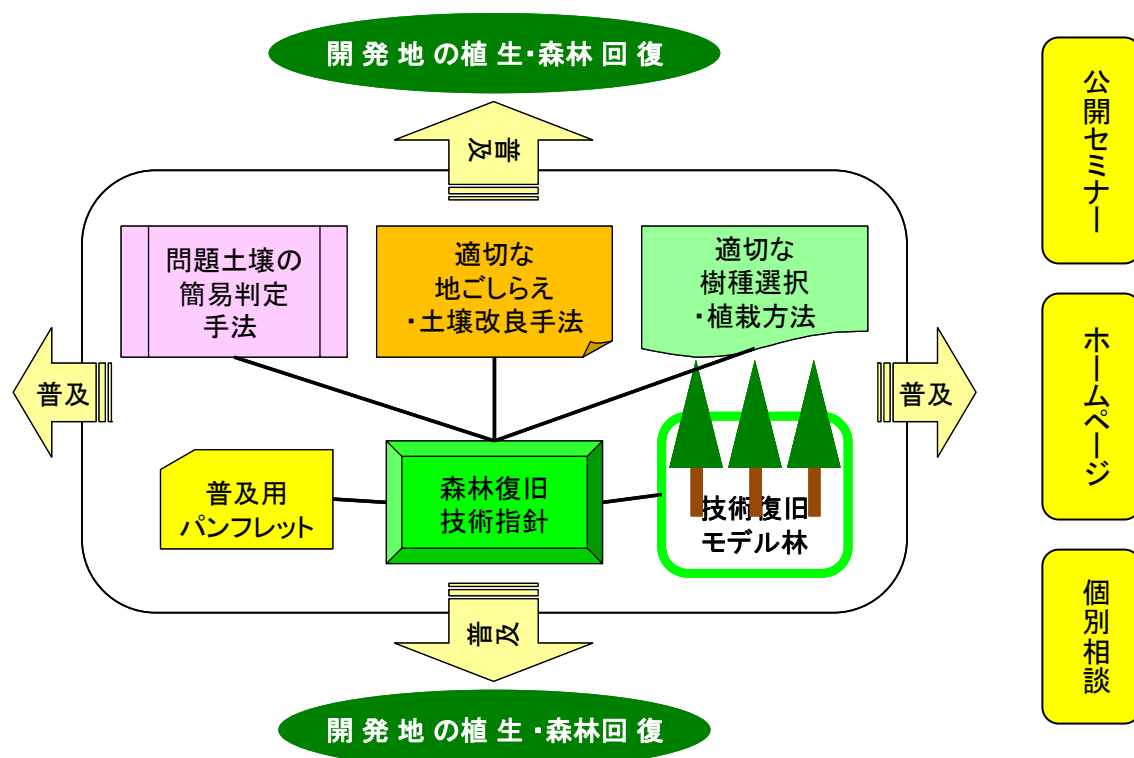


図 1-2. 事業の成果とその効果や活用方法のイメージ

1. 3 委員会、部会の構成および開催記録

国際林業協力・地球温暖化防止・NGO 等の森林保全活動に関する有識者で構成する途上国森づくり事業委員会を設置するとともに、より専門性の高い有識者で構成する開発地植生回復支援部会を設置し、委員会、部会を開催した。以下にその開催記録および巻末の参考資料に議事抄録を記載する。

(1) 委員会

委員会は、年 1 回開催し、途上国森づくり事業全体における実施の方針、事業の実施計画、各部会の連携、事業の成果等の基本的事項について検討した。

i) 委員会の構成

名称：途上国森づくり事業委員会

委員長	森川 靖	早稲田大学 人間科学学術院 教授
委員	岡本 敏樹	緑のサヘル 代表理事
委員	古賀 剛志	特定非営利活動法人 エコデザイン推進機構 理事
委員	小島 克己	東京大学 アジア生物資源環境研究センター 教授
委員	土屋 利昭	技術士

(あいうえお順)

ii) 委員会の開催記録

● 第 1 回 途上国森づくり委員会

日時：25 年 7 月 5 日（金）14:00~16:00

場所：林友ビル 6 階 日本森林林業振興会 中会議室

議題：

①平成 24 年度の事業実行結果について

海外森林保全参加支援事業
貧困削減のための森づくり支援事業
開発地植生回復支援事業

②平成 25 年度の事業実施要領案について

③平成 25 年度の事業実施計画案について

海外森林保全参加支援事業
貧困削減のための森づくり支援事業
開発地植生回復支援事業

④その他

(2) 部会

部会は、年3回開催し、担当する業務の効率的な手法や具体的実施方法等を検討・審査を実施し、それらの具体的な課題を解決した。

i) 部会の構成

名称：開発地植生回復支援部会

部会長 小島 克己 東京大学 アジア生物資源環境研究センター 教授

委員 井上 真 東京大学大学院 農学生命科学研究科 教授

委員 岡部 宏秋 森林総合研究所 森林微生物研究領域 研究員

委員 加藤 健次 新日鉄住金エンジニアリング株式会社 技術本部

技術開発第二研究所 石炭技術開発室 室長

委員 坂井 睦哉 コマツマーケティング&サポートインドネシア 取締役

委員 砂入 道夫 日本大学 生物資源科学部 教授

委員 田原 恒 森林総合研究所 生物工学研究領域 主任研究員

(あいうえお順)

ii) 部会の開催記録

● 第1回 開発地植生回復支援部会

日時：25年8月1日（木）10:00~12:00

場所：林友ビル6階 日本森林林業振興会 中会議室

議題：

①平成24年度の事業実施結果について

- ・事業実施結果の概要
- ・森林回復モデル林の造成状況
- ・土壌モニタリング調査（pH、土色等）
- ・土壌水ポテンシャルおよび植栽木の気孔コンダクタンス
- ・土嚢造林試験

②平成25年度の事業実施計画について

- ・課題提案書の概要
- ・事業実施スケジュール

③開発地における森林回復技術指針（素案）の検討

● 第2回 開発地植生回復支援部会

日時：25年12月17日（火）10:00~12:00

場所：林友ビル6階 日本森林林業振興会 中会議室

議題：

①事業の実施状況について

- ・事業進捗状況の概要
- ・森林回復モデル林の植栽木生育状況（樹種別の生存率、樹高等）
- ・土壌モニタリング調査（潜在酸性簡易調査手法等）
- ・植栽候補樹種の生理特性（気孔コンダクタンス等）

②事業実施計画について

- ・事業実施計画の概要
- ・森林回復モデル林の植栽計画（樹種、土壌改良、植栽方法等）

③開発地における森林回復技術指針（素案）の検討

- ・石炭採掘跡地における緑化技術ガイドライン（素案）
- ・半乾燥荒廃地における緑化技術ガイドライン（素案）

● 第3回 開発地植生回復支援部会

日時：26年3月19日（火）14:00~16:00

場所：林友ビル6階 日本森林林業振興会 中会議室

議題：

①事業の実施状況について

- ・事業進捗状況の概要
- ・現地調査・実証活動の進捗状況
 - 森林回復モデル林の植栽木生育状況（樹種別の生存率、樹高等）
 - 植栽木の養分状態
 - 土壌モニタリング調査
- ・ジャカルタにおけるワークショップの開催結果
- ・石炭採掘跡地における森林回復の先進事業地視察結果

②開発地における森林回復技術指針（素案）の検討

- ・石炭採掘跡地における緑化技術ガイドライン（素案）
- ・半乾燥荒廃地における緑化技術ガイドライン（素案）
- ・インドネシアにおける代表的な植林樹種の造林特性（一覧表）

③今年度の報告書案について

1. 4 現地調査の実施記録

平成25年度は、インドネシアへの現地調査を計5回実施した。以下にその実施記録を記載する。

平成 25 年度インドネシア現地調査の実施記録

回	時期	調査者	地域	主な実施項目
第一回	2013 年 7 月中旬	太田 ¹ 仲摩 ¹ 田中 ²	南カリ・ 東ヌサ	・ H25 現地調査計画の策定 ・ H23~24 モデル林：生育状況の確認、植栽木の気孔コンダクタンス調査 ・ H25 モデル林：植栽計画作成・候補樹種選定、植栽候補地の視察
			南カリ	・ H23 モデル林：土壌 pH 定点モニタリグ ・ 石炭採掘跡の土壌潜在酸性予備調査
			東ヌサ	・ H25 モデル林：簡易土壌調査
			JKT	・ インドネシア林業省担当部局との打合せ
第二回	2013 年 9 月中旬	太田 ¹ 仲摩 ¹ 田中 ²	南カリ・ 東ヌサ	・ H23~24 モデル林：生育状況の確認 ・ H25 モデル林：植栽用苗木の生産状況の確認
			南カリ	・ H23~24 モデル林：天然更新植生調査 ・ 石炭採掘跡の土壌潜在酸性調査 ・ 苗畑苗木の気孔コンダクタンス調査
第三回	2013 年 11 月中旬	太田 ¹ 仲摩 ¹ 田中 ²	南カリ・ 東ヌサ	・ H23~24 モデル林：生育状況の確認 ・ H25 モデル林：地ごしらえ状況の確認、植栽用の苗木生産状況の確認
			南カリ	・ H24 モデル林：土壌 pH 定点モニタリグ ・ H23~24 モデル林：土壌物理性・化学性調査 ・ 苗畑苗木の気孔コンダクタンス調査
			東ヌサ	・ H24 モデル林：火災被害地の再植林計画作成
			JKT	・ インドネシア林業省担当部局との打合せ
第四回	2014 年 1 月中旬	仲摩 ¹	南カリ・ 東ヌサ	・ H23~24 モデル林：生育状況の確認、植栽木の測樹調査 ・ H25 モデル林：植栽状況の確認
第五回	2014 年 2 月下旬～ 3 月上旬	佐々木 ¹ 仲摩 ¹ 田原 ³	南カリ・ 東ヌサ	・ H23~24 モデル林：生育状況の確認 ・ H25 モデル林：植栽状況の確認
			南カリ	・ 植栽木の葉のサンプリング（養分分析）
			東カリ	・ 石炭採掘跡地森林回復先進事業地視察
			JKT	・ 森林回復技術指針についてワークショップ

南カリ…南カリマンタン州、東ヌサ…東ヌサテンガラ州、東カリ…東カリマンタン州

JKT…ジャカルタ

¹ 国際緑化推進センター、² 早稲田大学、³ 森林総合研究所

第2章 開発地における森林回復モデル林造成実証活動

2. 1 森林回復モデル林造成実証活動の実施体制および概要

国際緑化推進センター 仲摩栄一郎、太田誠一

(1) 対象地と実施体制

森林回復モデル林造成実証活動の対象地として、インドネシアにおいて喫緊の課題となっている石炭採掘跡地(南カリマンタン州)と半乾燥地域の農業跡地(東ヌサテングラ州)を選定した。インドネシア林業省の流域管理・社会林業総局とモデル林造成に係る合意書を締結し、地方では、その地方出先機関である流域管理署をカウンターパートとして、現地調査・実証活動を実施した(図2-1)。

南カリマンタン州では、鉱山会社2社の協力を得てその石炭採掘跡地、東ヌサテングラ州では3つの村落の協力を得てその農業跡地において、森林回復モデル林を造成することとした。

また、現地調査にあたっては、南カリマンタン州では、ランボン・マンクラット国立大学および林業省の研究開発局バンジャルパルー支所、東ヌサテングラ州では、研究開発局クパン支所の協力を得た。

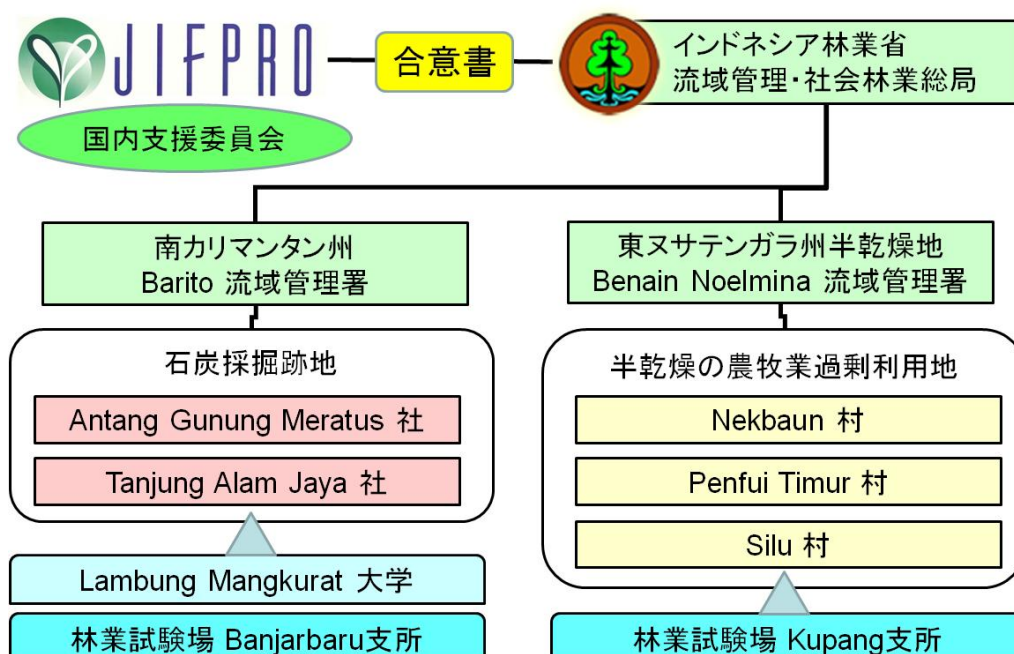


図2-1. 南カリマンタン州及び東ヌサテングラ州における造林試験の実施体制

(2) 植栽実績

i) 南カリマンタン州の石炭採掘跡地

森林回復モデル林の造成を目的として、平成 23 年度に、鉱山会社 2 社 (AGM 社 5.0ha、TAJ 社 3.5ha) の石炭採掘跡地において、現地で代表的な造林樹種を 8 種リストアップし、客土・リッピング・施肥等の植栽試験を実施した。平成 24 年度は、AGM 社の石炭採掘跡地 5.0ha において、適用可能な新たな造林樹種を 12 種リストアップし、同様の植栽試験を実施した。そして平成 25 年度は、AGM 社の石炭採掘跡地 5.0ha において、適用可能な新たな造林樹種および指標となる代表的な造林樹種を 18 種リストアップし、客土・リッピングの試験を実施した (表 2-1)。

表 2-1. 南カリマンタン州における森林回復モデル林の植栽実績 (年度別植栽面積)

対象地 (州別)	平成 23 年度	平成 24 年度	平成 25 年度	計
南カリマンタン州	8.5 ha	5.0 ha	6.0 ha	19.5 ha
AGM 社	5.0 ha	5.0 ha	6.0 ha	16.0 ha
TAJ 社	3.5 ha	-	-	3.5 ha

ii) 東ヌサテンガラ州の農業跡地

森林回復モデル林の造成を目的として、平成 24 年度に、クバン県の 2 つの村落 (Nekbaun 村 4.0ha、Penfui Timur 村 4.0ha、合計 8.0ha) の農業跡地において、現地で代表的な造林樹種を 8 種リストアップし、化成肥料、堆肥および土壌改良材 (木炭) 施用等の植栽試験を実施した。そして平成 25 年度は、Silu 村の農業跡地 5.0ha において、新たに代表的な造林樹種および指標となる代表的な造林樹種を 15 種リストアップし、堆肥、土壌改良材 (木炭、保水剤) 施用等の試験を実施した (表 2-1)。なお、Nekbaun 村においては、平成 24 年度の植栽地が火災被害を受けたため、平成 25 年度に全面改植を行った。

表 2-2. 東ヌサテンガラ州における森林回復モデル林の植栽実績 (年度別植栽面積)

対象地 (州別)	平成 23 年度	平成 24 年度	平成 25 年度	計
東ヌサテンガラ州	-	8.0 ha	8.0 ha	16.0 ha
Nekbaun 村	-	4.0 ha	4.0 ha(改植)	8.0 ha
Penfui Timur 村	-	4.0 ha	-	4.0 ha
Silu 村	-	-	4.0 ha	4.0 ha

2. 2 石炭採掘跡地における森林回復モデル林 (南カリマンタン州)

国際緑化推進センター 仲摩栄一郎、太田誠一
インドネシア林業省 Barito 流域管理署 Mr. Nolianto Ananda, Mr. Hendry Ramadani

(1) 背景・目的

近年、新興国での石炭需要の増加および日本への輸出増等により、インドネシアの石炭生産量が急増している（2010年時点で1990年比約27倍）。

インドネシアの石炭鉱山は主に露天掘りで、採掘跡の埋戻し地や土捨て地では、政府の法令により植生回復・森林回復が義務付けられている。しかしながら、石炭採掘時に随伴して掘削された残渣中にはパイライト（黄鉄鉱： FeS_2 ）が含まれており、それが酸化することで酸性硫酸塩土壌が生成される。そのほかにも重機の踏圧による土壌の固結や貧栄養等、植生回復・森林回復の阻害要因が存在している。

そこで、本事業では、こうした石炭採掘跡の埋戻し地および土捨て地において、森林回復モデル林の造成を通して、適切な植生回復・森林回復技術（整地・地ごしらえ、土壌改良（客土・施肥）、樹種選定等）を実証的に検討することを目的とした。

(2) 対象地と方法

i) 対象地の概要

南カリマンタン州では、7～9月に月間降水量100mmを下回る乾期が存在するが、その他の9ヶ月間は月間降水量100mm以上の雨期である。森林回復モデル林の造成対象地は、鉱山会社2社の石炭露天掘り後の埋戻し地（AGM社）および土捨て地（TAJ社）である（図2-2）。



埋め戻し用土および捨て土は、主に石炭採掘時に随伴して掘削された残渣であり、岩石層（海成堆積物）であることから、土壌の物理性、化学性ともに劣悪である。

通常、埋め戻し時や土捨て時には、土壌流亡を防止するために重機で転圧される。このため、土壌が固く締め固められ、土壌の物理性に関しては、通気性・排水性ともに不良となる。

土壌の化学性に関しては、採掘残渣中にはミネラルは多く含まれるが、腐植有機物がほとんど存在しないので貧栄養である。また、AGM社およびTAJ社ともに、採掘残渣中にパイライトが含まれており、それが酸化されることで、強酸性の酸性硫酸塩土壌が局所的に生成されている。

図2-2. 南カリマンタン州におけるモデル林造成地

ii) 植栽樹種、植栽方法（試験処理）

AGM 社および TAJ 社の石炭採掘跡地において、森林回復モデル林を造成することを目的として、次の通り植栽樹種を選定し、適用可能と考えられる植栽技術試験を実施した。植栽後は、土壌のモニタリング（物理性・化学性）を実施するとともに、植栽木の生育状況（生存率、樹高および幹直径(地際径および胸高直径))を測定した。

K-1. PT. Antang Gunung Meratus (AGM) 社石炭採掘跡地（図 2-3）

K-1-1. 平成 23 年度 AGM01 : 5.0ha

2010 年に石炭を露天掘りで採掘し、2012 年にその跡地を採掘残渣で埋戻した土地 5.0ha（写真 2-1）を平成 23 年度における AGM 社の森林回復モデル林の造成対象地とした。現地で代表的な造林樹種を 8 種選定し、2012 年 3 月に植栽した。植栽間隔は 3m × 3m で、試験プロットの最小単位は、同一樹種 5 本 × 5 本とした。試験処理は、採掘残渣で埋め戻した区をコントロールとし、そこに森林土壌を約 30cm - 50cm 被覆した全面客土区、施肥区およびマルチング区の組み合わせで 5 つの処理区を設定した。試験プロットは処理区順に規則的に配置し、それぞれ 5 回の繰り返し区を設けた（図 2-4）。

K-1-2. 平成 24 年度 AGM02 : 5.0ha

上記と同年に採掘され、同年に埋め戻された隣接地 5.0ha（写真 2-2）を平成 24 年度の AGM 社における森林回復モデル林の造成対象地とした。石炭採掘跡地の土壌条件に適応できると考えられる新規樹種を中心に 12 樹種を選定し、2013 年 3 月に植栽した。植栽間隔は 3m × 3m で、試験プロットの最小単位は、同一樹種 4 本 × 4 本とした。試験処理は、平成 23 年度と同様であるが、それら全ての処理の組み合わせで合計 8 つの処理区を設定した。試験プロットは処理区順に規則的に配置し、それぞれ 3～4 回の繰り返し区を設けた（図 2-5）。



写真 2-1. AGM 社平成 23 年度対象地



写真 2-2. AGM 社平成 24 年度対象地

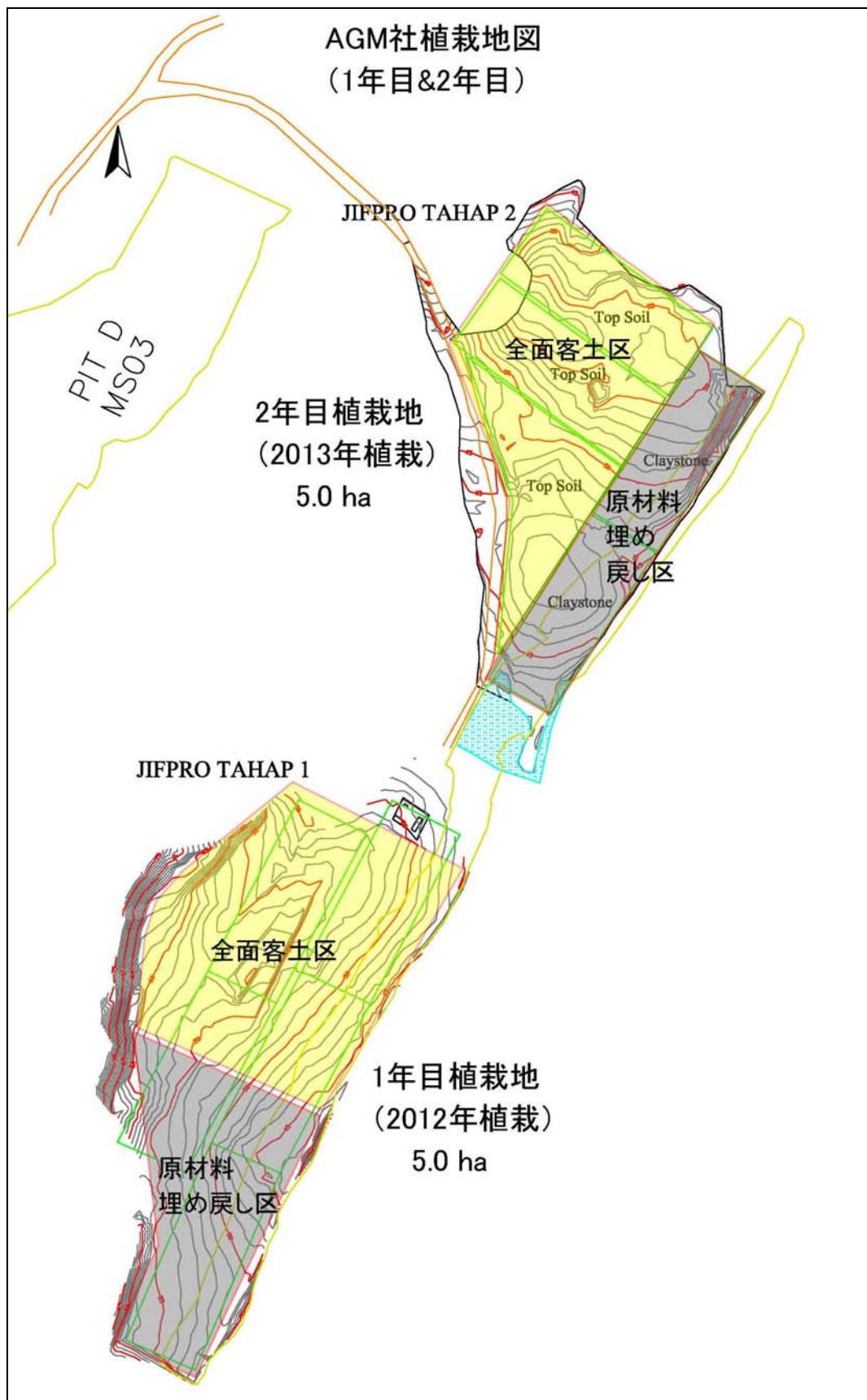
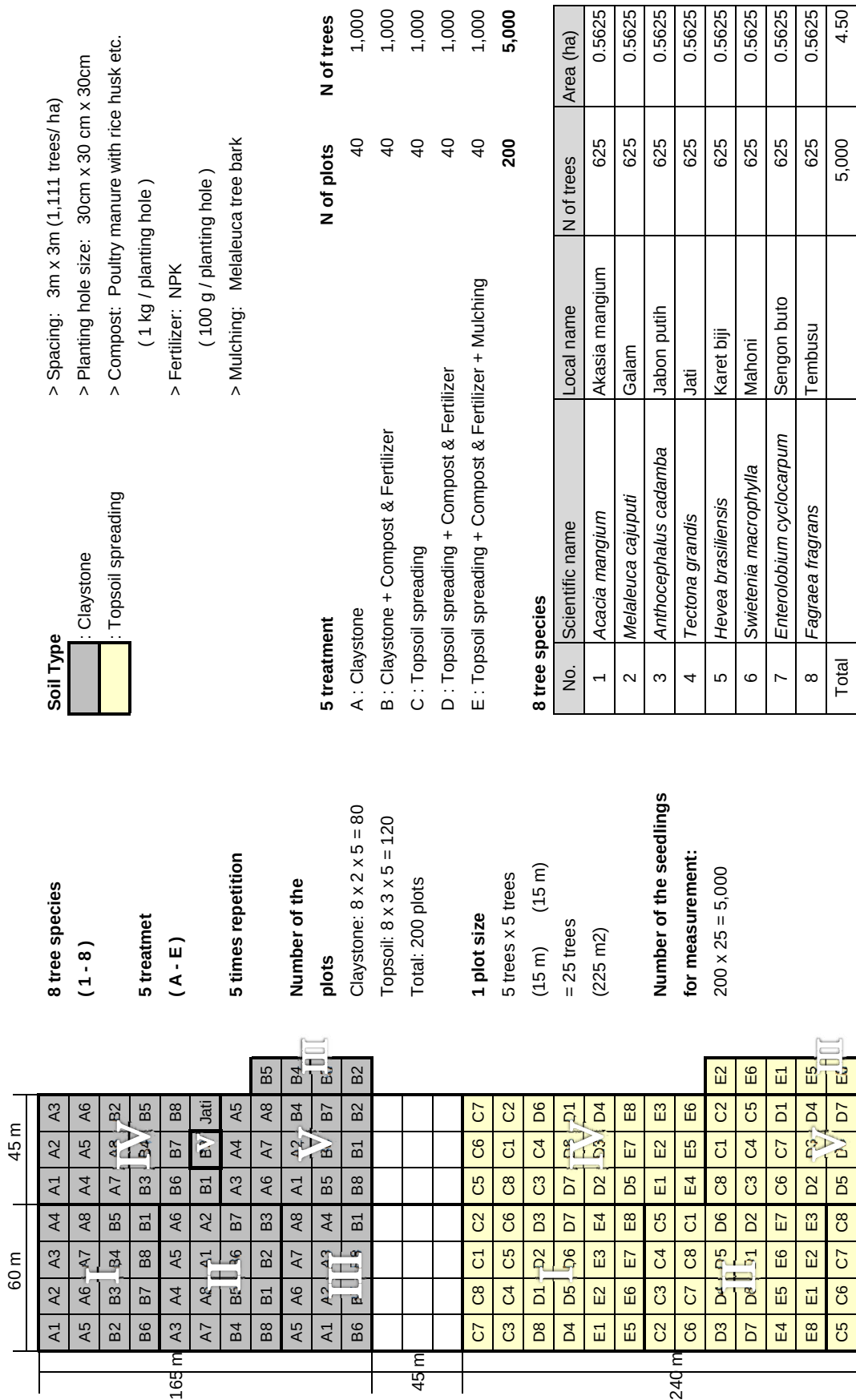
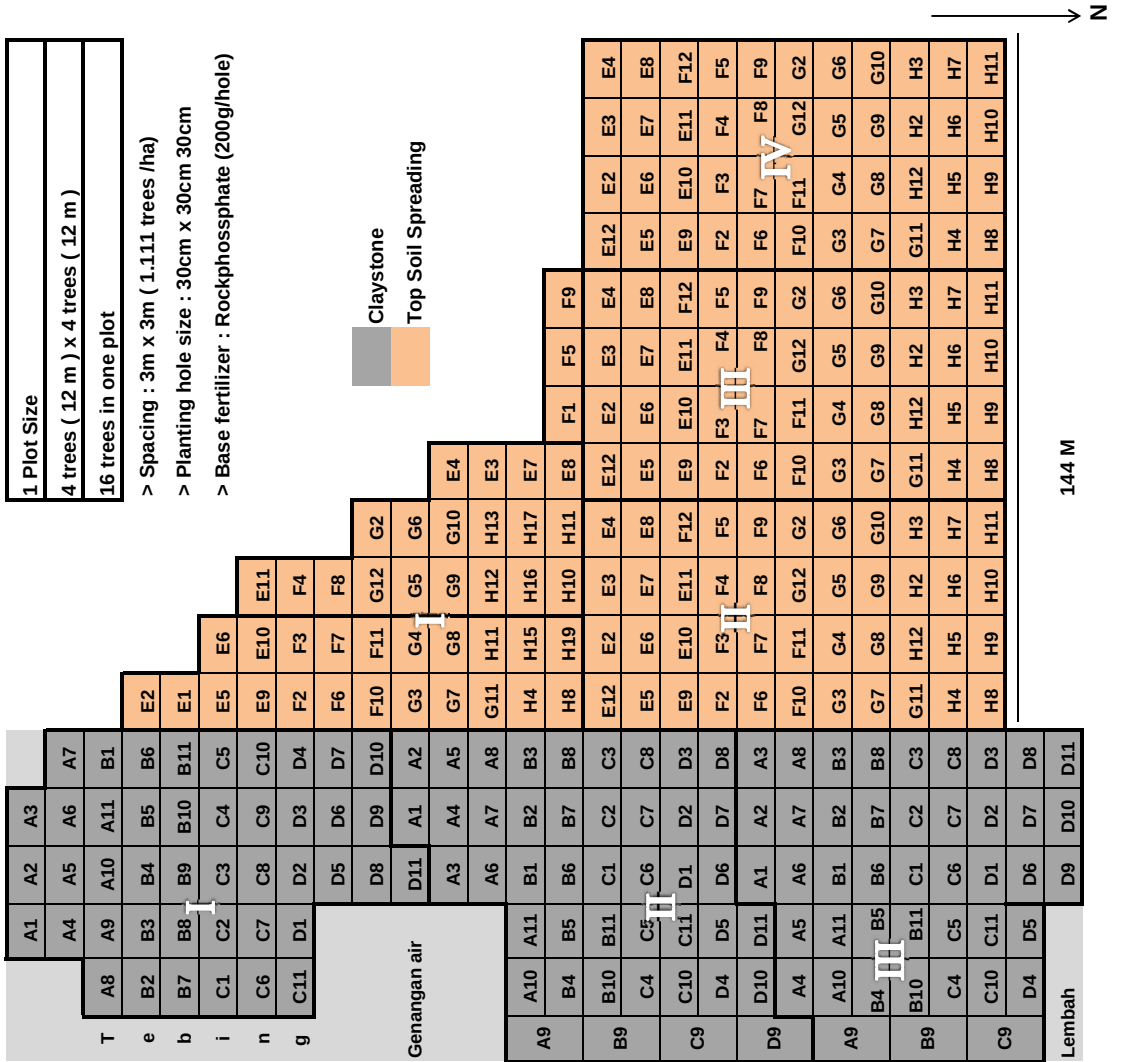


図 2-3. AGM 社石炭採掘跡地の植栽試験位置図（平成 23 年度(1 年目)、24 年度(2 年目)）

JIFPRO Rehabilitation at ex-coal mining area: Planting Design for PT. AGM 2012
Location: A-1. PT. Antang Gunung Meratus, South Kalimantan, Indonesia (5.0 ha)



JIFPRO Rehabilitation at ex-coal mining area: Planting Design for PT. AGM 2013
Location: A-1. PT. Antang Gunung Meratus, South Kalimantan, Indonesia (5.0 ha)



8 Treatment (A - H)	
A : Claystone	
B : Claystone + Fertilizer	
C : Claystone + Mulching	
D : Claystone + Fertilizer + Mulching	
E : Top Soil Spreading	
F : Top Soil Spreading + Fertilizer	
G : Top Soil Spreading + Mulching	
H : Top Soil Spreading + Fertilizer + Mulching	

No	Scientific Name	Local Name	Number	Area (ha)
1	<i>Azadirachta indica</i>	Mimba	240	0.22
2	<i>Aleurites moluccana</i>	Kemiri	448	0.40
3	<i>Anthocephalus macrophyllus</i>	Jabon Merah	448	0.40
4	<i>Dyera costulata</i>	Jelutung	448	0.40
5	<i>Melaleuca leucadendron</i>	Kayu Putih	448	0.40
6	<i>Acasia mangium</i>	Akasia	448	0.40
7	<i>Mangifera casturi</i>	Kasturi	448	0.40
8	<i>Paraserianthes falcataria</i>	Sengon Laut	448	0.40
9	<i>Peronema canescens</i>	Sungkai	448	0.40
10	<i>Samanea saman</i>	Trembesi	448	0.40
11	<i>Terminalia catapa</i>	Ketapang	448	0.40
12	<i>Shorea balangeran</i>	Belangeran	208	0.19
Total			4,928	4.44

K-1-3. 平成 25 年度 AGM03 : 6.0ha (図 2-6)

2010 年に石炭を露天掘りで採掘し、2013 年～2014 年にその跡地を採掘残渣で埋戻した土地 6.0ha (写真 2-1) を平成 25 年度の森林回復モデル林の造成対象地とした。石炭採掘跡地の土壌条件に適応できると考えられる新規樹種ならびに指標となる代表的な造林樹種を 18 種選定し、2014 年 3 月に 6.0ha 植栽した。植栽間隔は 3m×3m で、試験プロットの最小単位は、同一樹種 4 本×4 本とした。試験処理は、採掘残渣区をコントロールとし、全面客土およびリッピング処理を実施し、その組み合わせで合計 4 処理区を設定した (写真 2-3、2-4)。試験プロットは処理区順に規則的に配置し、それぞれ 3～4 回の繰り返し区を設けた (図 2-7)。



写真 2-3. AGM 社平成 25 年度対象地
全面客土区 (左側)



写真 2-4. AGM 社平成 25 年度対象地
採掘残渣区 (右側)

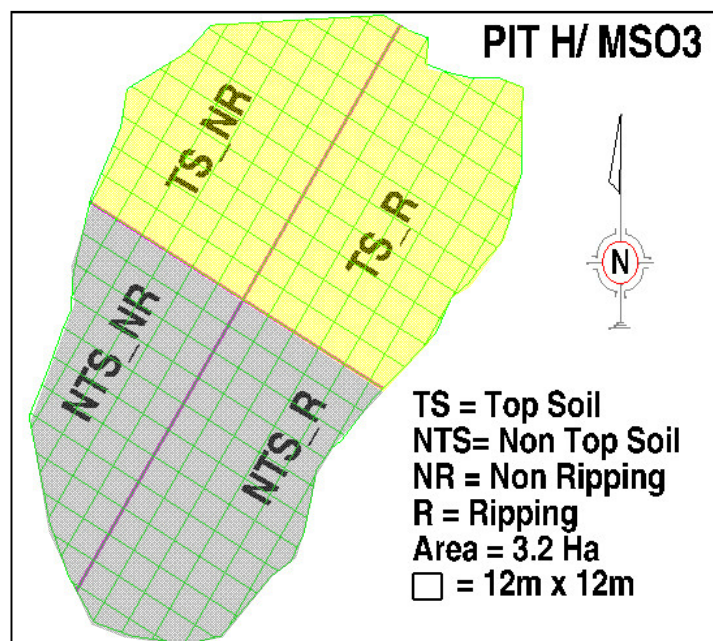


図 2-6. AGM 社石炭採掘跡地の植栽試験図 (平成 25 年度のうち 3.2ha 分)

Rehabilitation of ex-coal mining area: Planting Design for JIFPRO III at PT. AGM 2013-2014 (+- 6.0 ha)

Location: Kandangan, Hulu Sungai Selatan, South Kalimantan, Indonesia

Soil Treatment

	: Topsoil spreading
	: Claystone

- > Spacing: 3m x 3m (1,111 trees/ ha)
- > Planting hole size: 30cm x 30 cm x 30cm
- > Fertilizer: NPK (60g / tree) just after planting and every 3 month, 15cm round the tree

Ripping Treatment

	: Ripping treatment
	: Non-Ripping

1 plot size: 4 trees (12 m) x 4 trees (12 m) = 16 trees (144 m²)

Ex-pit MS04-G (+- 3.0 ha)

60 m												60 m												60 m																																																																																																																																																																															
C1	C2	C3	C4	C5	D1	D2	D3	D4	D5	C6	C7	C8	C9	C10	D6	D7	D8	D9	D10	C10	C1	C2	C3	C4	D10	D1	D2	D3	D4	C5	C6	C7	C8	C9	D5	D6	D7	D8	D9	C9	C10	C1	C2	C3	D9	D10	D1	D2	D3	C4	C5	C6	C7	C8	D4	D5	D6	D7	D8	C8	C9	C10	C1	C2	D8	D9	D10	D1	D2	C3	C4	C5	C6	D7	D3	D4	D5	D6	D7	C7	C8	C9	C10	C1	D7	D8	D9	D10	D1	C2	C3	C4	C5	C6	D2	D3	D4	D5	D6	A1	A2	A3	A4	A5	B1	B2	B3	B4	B5	A6	A7	A8	A9	A10	B6	B7	B8	B9	B10	A10	A1	A2	A3	A4	B10	B1	B2	B3	B4	A5	A6	A7	A8	A9	B5	B6	B7	B8	B9	A9	A10	A1	A2	A3	B9	B10	B1	B2	B3	A4	A5	A6	A7	A8	B4	B5	B6	B7	B8	A8	A9	A10	A1	A2	B8	B9	B10	B1	B2	A3	A4	A5	A6	A7	B3	B4	B5	B6	B7	A7	A8	A9	A10	A1	B7	B8	B9	B10	B1	A2	A3	A4	A5	A6	B2	B3	B4	B5	B6

Ex-pit MS03-H (3.2 ha)

C1	C2	C3	C4	C5	D1	D2	D3	D4	D5	C6	C7	C8	C9	C10	D6	D7	D8	D9	D10	C10	C1	C2	C3	C4	C5	D6	D7	D8	D9	C5	C6	C7	C8	C9	D5	D6	D7	D8	D9	C9	C10	C1	C2	C3	D9	D10	D1	D2	D3	C4	C5	C6	C7	C8	D3	D4	D5	D6	D7	C7	C8	C9	C10	C1	D7	D8	D9	D10	D1	C2	C3	C4	C5	C6	D2	D3	D4	D5	D6	A1	A2	A3	A4	A5	B1	B2	B3	B4	B5	A6	A7	A8	A9	A10	B6	B7	B8	B9	B10	A10	A1	A2	A3	A4	B0	B1	B2	B3	B4	A5	A6	A7	A8	A9	B5	B6	B7	B8	B9	A9	A10	A1	A2	A3	B9	B10	B1	B2	B3	A4	A5	A6	A7	A8	B8	B9	B10	B1	B2	A3	A4	A5	A6	A7	B3	B4	B5	B6	B7	A7	A8	A9	A10	A1	B7	B8	B9	B10	B1	A2	A3	A4	A5	A6	B2	B3	B4	B5	B6
----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	-----	----	----	----	----	-----	-----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	-----	----	----	----	----	-----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	-----	----	----	----	----	-----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	-----	----	----	----	----	-----	-----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	-----	----	----	----	----	-----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	-----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	-----	----	----	----	----	-----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----

Ex-pit MS03-H (3.2 ha)

4 treatment (A - D)	area (ha)	N of species	repetition (times)	N of plots	N of trees /plot	N of trees
A : Claystone	0.72	10	5	50	16	800
B : Claystone + Ripping	0.72	10	5	50	16	800
C : Topsoil spreading	0.72	10	5	50	16	800
D : Topsoil spreading + Ripping	0.72	10	5	50	16	800
	2.88			200		3,200

Ex-pit MS04-G (+- 3.0 ha)

4 treatment (A - D)	area (ha)	N of species	repetition (times)	N of plots	N of trees /plot	N of trees
A : Claystone	0.72	10	5	50	16	800
B : Claystone + Ripping	0.72	10	5	50	16	800
C : Topsoil spreading	0.72	10	5	50	16	800
D : Topsoil spreading + Ripping	0.72	10	5	50	16	800
	2.88			200		3,200

K-2. PT. Tanjung Alam Jaya (TAJ) 社石炭採掘跡地：3.5ha

2004年に石炭を露天掘りで採掘し、2011年にその採掘残渣を捨て土として積み上げた土捨て地 3.5ha（写真 2-5～2-8）を平成 23 年度の TAJ 社における森林回復モデル林の造成対象地とした。平成 23 年度の AGM 社と同じく現地で代表的な造林樹種 8 樹種を選定し、2012 年 3 月に植栽した。植栽間隔は 3m×3m で、試験プロットの最小単位は、同一樹種 4 本×4 本とした。試験処理は、採掘残渣で埋め戻した区をコントロールとし、そこに重機で地表掻き起こしを行ったリッピング区、植え穴に森林の表土を客土した植え穴客土区、植え穴に牛糞堆肥を施した堆肥区とし、それらの全ての組み合わせで 8 つの処理区を設定した。試験プロットは処理区順に規則的に配置し、それぞれ 2～3 回の繰り返し区を設けた（図 2-8）。



写真 2-5. TAJ 社石炭露天掘り捨て土地(1)



写真 2-6. TAJ 社石炭露天掘り捨て土地(2)



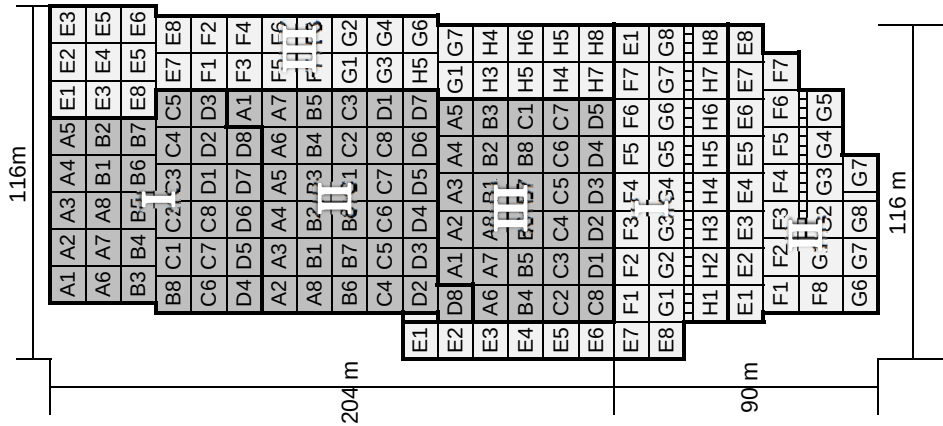
写真 2-7. TAJ 社植え穴 (1)



写真 2-8. TAJ 社植え穴 (2)

JIFPRO RHL at ex-coal mining area: planting design

Location: PT. Tanjung Alam Jaya, South Kalimantan, Indonesia (3.5 ha)



8 tree species

(1 - 8)

8 treatment

(A - H)

3 times repetition

(I - III)

Number of the plots

Without: 8 sps x 4 trt x 3 times = 96

Rippig: 8 sps x 4 trt x 3 times = 96

Total: 192 plots

+ 4 plots = 196 plots

1 plot size

4 trees x 4 trees

(12 m) (12 m)

= 16 trees

(144 m²)

Number of the seedlings

for measurement:

185 x 16 = 2,960

Land preparation

> Ripping (1.6 ha)

> Without Ripping (1.6 ha)

> Spacing: 3m x 3m

(1,111 trees/ ha)

> Planting hole size:

30cm x 30 cm x 30cm

> Compost: Cow manure

Urea, Lime, Leaf of Grilicidia etc.

(2 kg / planting hole)

8 treatment

A : Ripping

B : Ripping + Topsoil potting

C : Ripping + Compost

D : Ripping + Topsoil potting + Compost

E : Without Ripping

F : Without Ripping + Topsoil potting

G : Without Ripping + Compost

H : Without Ripping + Topsoil potting + Compost

N of plots

24

24

24

21

28

23

24

17

185

N of trees

384

600

600

525

700

575

600

425

4,409

8 tree species

No.	Scientific name	Local name	N of trees	Area (ha)
1	<i>Acacia mangium</i>	Akasia mangium	384	0.3456
2	<i>Melaleuca cajuputi</i>	Kayu putih	384	0.3456
3	<i>Anthocephalus cadamba</i>	Jabon putih	384	0.3456
4	<i>Tectona grandis</i>	Jati	384	0.3456
5	<i>Hevea brasiliensis</i>	Karet biji	384	0.3456
6	<i>Swietenia macrophylla</i>	Mahoni	384	0.3456
7	<i>Enterobium cyclocarpum</i>	Sengon buto	384	0.3456
8	<i>Fagraea fragrans</i>	Tembusu	384	0.3456
Total			3,072	2.76

2. 3 農業跡地における森林回復モデル林（東ヌサテンガラ州）

国際緑化推進センター 仲摩栄一郎、太田誠一
インドネシア林業省 Benain Noelmina 流域管理署 Mr. Djoko, Mr. Widodo

(1) 背景・目的

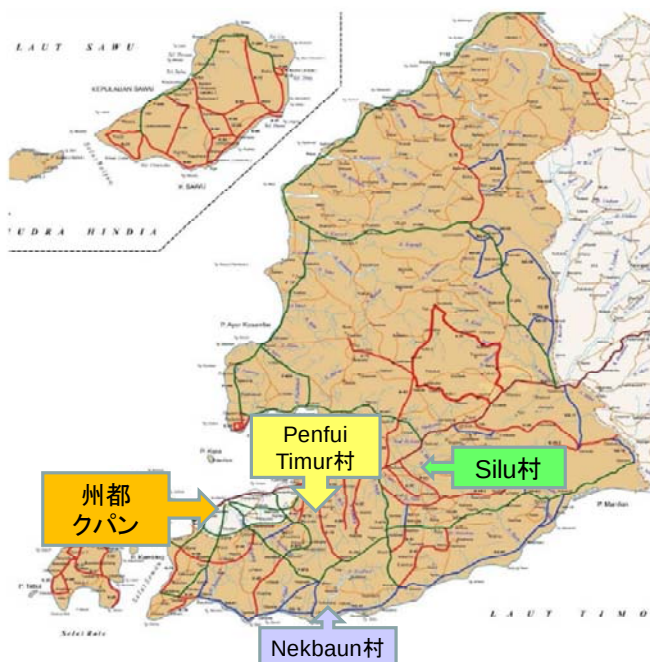
乾期の長いモンスーン地帯や半乾燥地では、伐採、農業、牧畜業や火災等により一度森林が失われると、通常の地域に比べて森林回復は困難である。そこで、本事業では、こうした半乾燥地における農業や牧畜業跡地において、適用可能な植生回復・森林回復技術（土壌改良、施肥、樹種選定等）を試験的に実施し、森林回復モデル林の造成を通して適切な森林回復技術を実証的に検討することを目的とした。

(2) 対象地と方法

i) 対象地の概要

熱帯モンスーン地帯である東ヌサテンガラ州では、気候的には、4～10月の7ヶ月間が月間降水量 50mm を下回り、ほとんど雨の降らない乾期である。過去は森林であったが、伐採、農業、牧畜業や火災等によって草地化した場所が多く見られ、比較的乾燥に強い樹種であるモクマオウやヤシ類が一部散在している。

森林回復モデル林造成対象地として、東ヌサテンガラ州の荒廃地における代表的・特徴的な以下の3つの土壌が分布する村落を対象とした（図 2-9）。



平成 24 年度は、①Alfisols に分類される膨潤性粘土が分布する Nekbaun 村 4.0ha（写真 2-9）ならびに②Inceptisols に分類される石灰岩母材土壌が分布する Penfui Timur 村、4.0ha（写真 2-10）を森林回復モデル林の造成対象地とした。

また、平成 25 年度は、石灰岩母材で、③Entisols/Leptosols に分類される土壌が分布し、岩石が散在する Silu 村 5.0ha（写真 2-11、2-12）をモデル林の造成体調地とした。

図 2-9. 東ヌサテンガラ州におけるモデル林造成地

ii) 植栽樹種、植栽方法（試験処理）

東ヌサテンガラ州の農業跡地において、森林回復モデル林を造成することを目的として、次の通り植栽樹種を選定し、適用可能と考えられる植栽技術試験を実施した。植栽後は、植栽木の生育状況（生存率、樹高および幹直径(地際径および胸高直径)）を測定した。

N-1. Nekbaun 村農業跡地：4.0ha

Nekbaun 村の農業跡放棄地 4.0ha（写真 2-9）を平成 24 年度における森林回復モデル林の造成対象地とした。現地で代表的な造林樹種を 8 種選定し、2013 年 2 月に植栽した。植栽樹種を選定にあたっては、現地で一般的に用いられている造林樹種のうち、乾燥ストレスや粘土質土壤に耐性があると考えられる樹種、また、地域住民の意向を考慮して、木材生産や非木材林産物が生産可能な樹種を植栽木として選定した。植栽間隔は 3m×3m で、試験プロットの最小単位は、同一樹種 5 本×5 本とした。

Nekbaun 村の Alfisols は、膨潤性粘土に富むため、乾期には乾燥して体積が収縮し深い亀裂（クラック）が発生する一方、雨期には体積が膨張して通気性・排水性不良となる（写真 2-10）。そこで、試験処理は、①無処理区をコントロールとし、土壤物理性の改善を目的として、植え穴への②堆肥施用区、③木炭施用区、および、②と③の同時施用区という 4 つの処理区を設定した。試験プロットは処理区順に規則的に配置し、それぞれ 4 回の繰り返し区を設けた（図 2-10）。



写真 2-9. Nekbaun 村モデル林造成対象地



写真 2-10. Nekbaun 村の膨潤性粘土土壤

N-2. Penfui Timur 村農業跡地：4.0ha

Penfui Timur 村の農業跡放棄地 4.0ha（写真 2-11）を平成 24 年度における森林回復モデル林の造成対象地とした。Nekbaun 村と同様に現地で代表的な造林樹種を 8 種選定し、2013 年 2 月に植栽した。植栽間隔は 3m×3m で、試験プロットの最小単位は、Nekbaun 村と同様に、同一樹種 5 本×5 本とした。

Penfui Timur 村の Inceptisols は、石灰岩母材であるため水が抜けやすく、乾期に乾燥

し易い特徴がある（写真 2-12）。そこで、試験処理は、土壌物理性の改善を目的として、Nekbaun 村と同様の処理区とした（図 2-11）。



写真 2-11. Penfui Timur 村対象地(4.0ha)



写真 2-12. Penfui Timur 村の土壌

N-3. Silu 村農業跡地

Silu 村の農業跡放棄地 5.0ha（写真 2-13）を平成 25 年度における森林回復モデル林の造成対象地とした。現地で適応可能な造林樹種を 15 種選定し、2014 年 2 月に植栽した。植栽間隔は 3m×3m で、試験プロットの最小単位は同一樹種 5 本×5 本とした。

Silu 村の Entisols/Leptosols は、石灰岩母材であり、表土が極めて薄く、石灰岩が散在している。水が非常に抜けやすく、乾期に乾燥し易い特徴がある（写真 2-14）。そこで、試験処理は、試験処理は、①無処理区をコントロールとし、土壌物理性の改善を目的として、植え穴への②堆肥施用区、③木炭施用区、および、保水剤として高分子吸収剤を植え穴当たり④1 リットル施用区と⑤2 リットル施用区という 5 つの処理区を設定した。試験プロットは処理区順に規則的に配置し、それぞれ 4 回の繰り返し区を設けた（図 2-12）。



写真 2-13. Silu 村対象地(5.0ha)



写真 2-14. Silu 村対象地(5.0ha)

N-1-R. Nekbaun 村農業跡地の改植：4.0ha

2013 年 11 月、隣接する地域住民が農業利用を目的として実施した火入れが Nekbaun 村の植栽地に延焼し、約 9 割が火災被害を受けた（写真 2-15、2-16）。そこで、平成 25 年度に全面改植を行った。現地で代表的な造林樹種を 10 種選定し、2014 年 2 月に植栽した（写真 2-17、2-18）。植栽間隔は改植前と同様に 3m×3m で、試験プロットの最小単位は、同一樹種 5 本×5 本とした。試験処理は、①無処理区をコントロールとし、土壌物理性の改善を目的として、植え穴への②堆肥施用区、③木炭施用区、および植栽後の早期の成長を目的として、化成肥料（NPK）処理区という 4 つの処理区を設定した。試験プロットは処理区順に規則的に配置し、それぞれ 3～4 回の繰り返し区を設けた（図 2-13）。



写真 2-15. Nekbaun 村植栽地火災被害 (1)



写真 2-16. Nekbaun 村植栽地火災被害 (2)

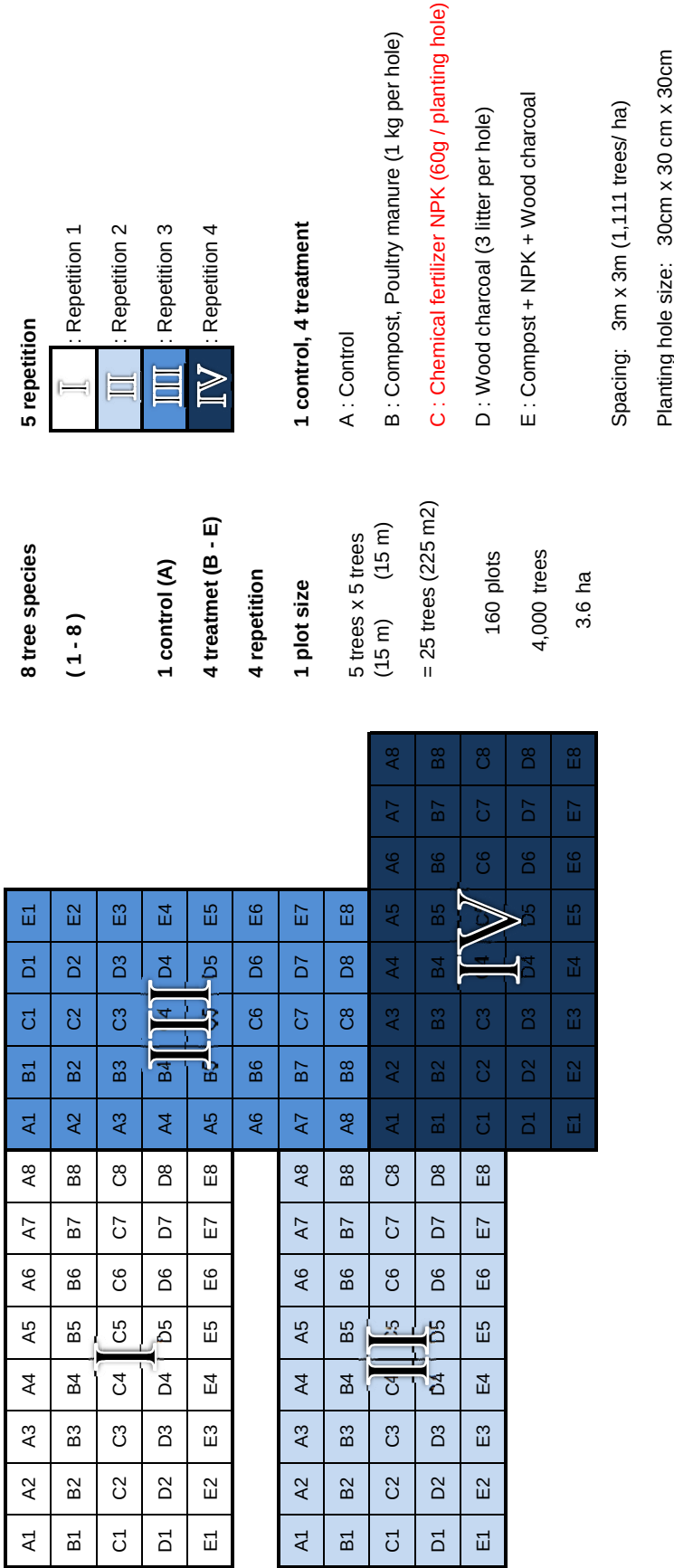


写真 2-15. Nekbaun 村改植(1)



写真 2-16. Nekbaun 村改植(2)

JIFPRO Rehabilitation at dry and degraded area: Planting Design for Nekbaun village 2012
Location: B-1. Nekbaun Village, Kupang, East Nusa Tenggara, Indonesia (4.0 ha)



JIFPRO Rehabilitation at dry and degraded area: Planting Design for Penfui Timur village 2012
Location: B-2. Penfui Timur Village, Kupang, East Nusa Tenggara, Indonesia (4.0 ha)

A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8
B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7	B8
C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8
D1	D2	D3	D4	D5	D6	D7	D8
E1	E2	E3	E4	E5	E6	E7	E8
A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8
B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7	B8
C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8
D1	D2	D3	D4	D5	D6	D7	D8
E1	E2	E3	E4	E5	E6	E7	E8
A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8
B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7	B8
C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8
D1	D2	D3	D4	D5	D6	D7	D8
E1	E2	E3	E4	E5	E6	E7	E8
A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8
B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7	B8
C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8
D1	D2	D3	D4	D5	D6	D7	D8
E1	E2	E3	E4	E5	E6	E7	E8

8 tree species

(1 - 8)

1 control (A)

4 treatment (B - E)

4 repetition

1 plot size

5 trees x 5 trees
(15 m) (15 m)
= 25 trees (225 m2)

160 plots

4,000 trees

3.6 ha

5 repetition

I	: Repetition 1
II	: Repetition 2
III	: Repetition 3
IV	: Repetition 4

Spacing: 3m x 3m (1,111 trees/ ha)

Planting hole size: 30cm x 30 cm x 30cm

1 control, 4 treatment

A : Control

B : Compost, Poultry manure (1 kg per hole)

C : Chemical fertilizer NPK (60g / planting hole)

D : Wood charcoal (3 litter per hole)

E : Compost + NPK + Wood charcoal

No.	Scientific name	Local name	N of trees	Area (ha)
1	<i>Swietenia macrophylla</i>	Mahoni	400	0.36
2	<i>Artocarpus heterophyllus</i>	Nangka	400	0.36
3	<i>Toona sureni</i>	Suren	400	0.36
4	<i>Pterocarpus indicus</i>	Kayu Merah	400	0.36
5	<i>Casuarina junghuhniana</i>	Kasuari	400	0.36
6	<i>Syzygium cumini</i>	Jambu hutan	400	0.36
7	<i>Gmelina arborea</i>	Gmelina	400	0.36
8	<i>Tectona grandis</i>	Jati	400	0.36
Total			3,200	2.88

Rehabilitation of dry degraded area: Planting Design for JIFPRO I at Silu Village 2013-2014 (+- 5.5 ha)
Location: Silu Village, Fatuleu, Kupang, East Nusa Tenggara, Indonesia

Repetition 1														
A1	E2	D3	C4	B5	A6	E7	D8	C9	B10	A11	E12	D13	C14	B15
B1	A2	E3	D4	C5	B6	A7	E8	D9	C10	B11	A12	E13	D14	C15
C1	B2	A3	E4	D5	C6	B7	A8	E9	D10	C11	B12	A13	E14	D15
D1	C2	B3	A4	E5	D6	C7	B8	A9	E10	D11	C12	B13	A14	E15
E1	D2	C3	B4	A5	E6	D7	C8	B9	A10	E11	D12	C13	B14	A15

Repetition 2														
A1	E2	D3	C4	B5	A6	E7	D8	C9	B10	A11	E12	D13	C14	B15
B1	A2	E3	D4	C5	B6	A7	E8	D9	C10	B11	A12	E13	D14	C15
C1	B2	A3	E4	D5	C6	B7	A8	E9	D10	C11	B12	A13	E14	D15
D1	C2	B3	A4	E5	D6	C7	B8	A9	E10	D11	C12	B13	A14	E15
E1	D2	C3	B4	A5	E6	D7	C8	B9	A10	E11	D12	C13	B14	A15

Repetition 3														
A1	E2	D3	C4	B5	A6	E7	D8	C9	B10	A11	E12	D13	C14	B15
B1	A2	E3	D4	C5	B6	A7	E8	D9	C10	B11	A12	E13	D14	C15
C1	B2	A3	E4	D5	C6	B7	A8	E9	D10	C11	B12	A13	E14	D15
D1	C2	B3	A4	E5	D6	C7	B8	A9	E10	D11	C12	B13	A14	E15
E1	D2	C3	B4	A5	E6	D7	C8	B9	A10	E11	D12	C13	B14	A15

Repetition 4														
A1	E2	D3	C4	B5	A6	E7	D8	C9	B10	A11	E12	D13	C14	B15
B1	A2	E3	D4	C5	B6	A7	E8	D9	C10	B11	A12	E13	D14	C15
C1	B2	A3	E4	D5	C6	B7	A8	E9	D10	C11	B12	A13	E14	D15
D1	C2	B3	A4	E5	D6	C7	B8	A9	E10	D11	C12	B13	A14	E15
E1	D2	C3	B4	A5	E6	D7	C8	B9	A10	E11	D12	C13	B14	A15

Repetition 5														
A1	E2	D3	C4	B5	A6	E7	D8	C9	B10	A11	E12	D13	C14	B15
B1	A2	E3	D4	C5	B6	A7	E8	D9	C10	B11	A12	E13	D14	C15
C1	B2	A3	E4	D5	C6	B7	A8	E9	D10	C11	B12	A13	E14	D15
D1	C2	B3	A4	E5	D6	C7	B8	A9	E10	D11	C12	B13	A14	E15
E1	D2	C3	B4	A5	E6	D7	C8	B9	A10	E11	D12	C13	B14	A15

No.	Planting tree species	N of trees	Area (ha)
1	Mahoni (<i>Swietenia macrophylla</i>)	400	0.36
2	Gmelina (<i>Gmelina arborea</i>)	400	0.36
3	Johar (<i>Cassia siamea</i>)	400	0.36
4	Kesambi (<i>Schleiera oleosa</i>)	400	0.36
5	Asam (<i>Tamarindus indica</i>)	400	0.36
6	Kemiri (<i>Aleurites moluccana</i>)	400	0.36
7	Mente (<i>Anacardium occidentale</i>)	400	0.36
8	Jambu mente (<i>Anacardium occidentale</i>)	400	0.36
9	Cemara (<i>Casuarina equisetifolia</i>)	400	0.36
10	Eucalyptus (<i>Eucalyptus urophylla</i>)	400	0.36
11	Akasia (<i>Acacia auriculiformis</i>)	400	0.36
12	Sawo (<i>Manilkara zapota</i>)	400	0.36
13	Kayu merah (<i>Pterocarpus indicus</i>)	400	0.36
14	Sonokeling (<i>Dalbergia latifolia</i>)	400	0.36
15	Nitas (<i>Sterculia foetida</i>)	400	0.36
Total		6,000	5.40

	Treatment (soil of the planting holes)
A	Control
B	Compost (1kg/hole)
C	Wood charcoal (2 litter/hole)
D	Hydrogel (0.05kg/hole)
E	Hydrogel (0.10kg/hole)

Spacing of planting : 3m x3m

Number of trees : 4 trees x 4 trees = 16 trees/plot with 375 plots = 6000 trees

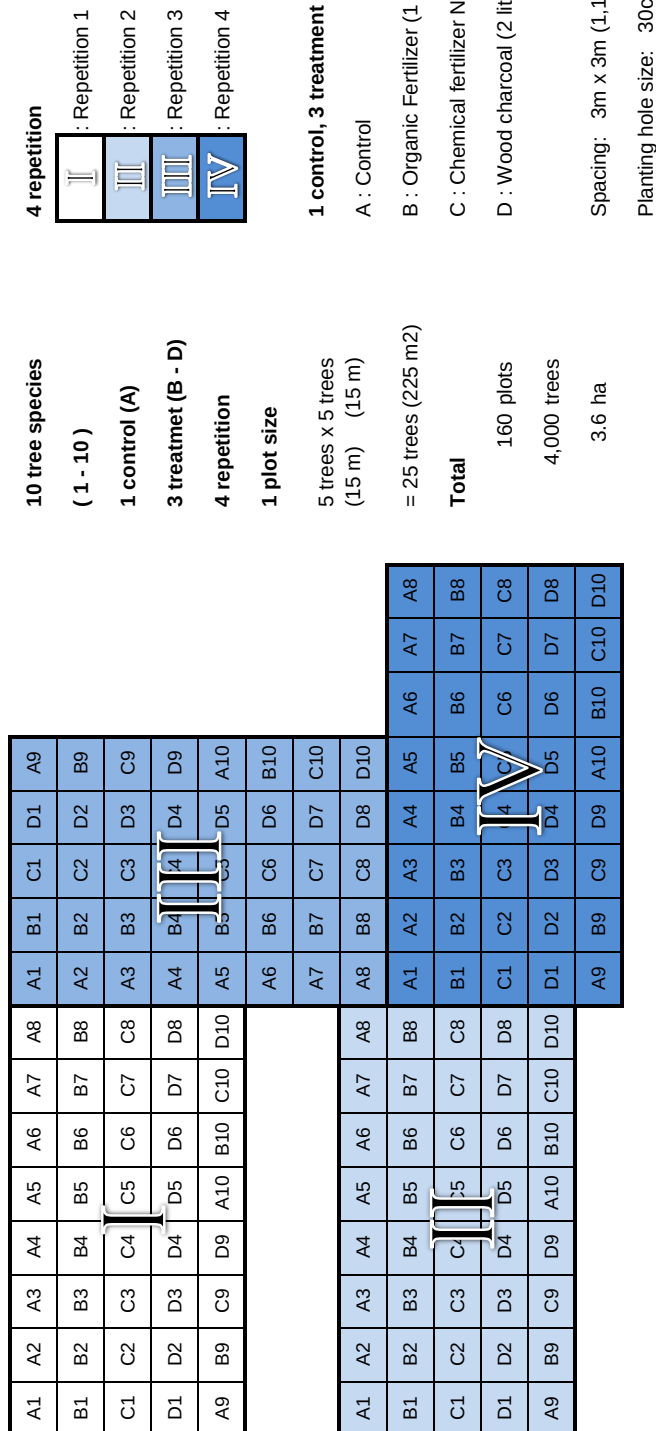
Size of plots : 12m x 12m = 144 m2/plot with 375 plots
375x144 = 54000 m2 = 5,4 Ha

Planting hole size : 30cm x 30cm x 30cm

Chemical fertilizer NPK : 0.06 kg/trees --> just after planting and every 3 month

Rehabilitation of dry degraded area: Replanting Design for JIFPRO at Nekbaun Village 2013-2014 (+- 4.0 ha)

Location: Nekbaun Village, Amarasi Barat, Kupang, East Nusa Tenggara, Indonesia



No	Planting tree species		N of trees /plot	N of treatment	Repetition (times)	N of plot	N of trees	Area (ha)
	Scientific name	Local name						
1	<i>Swietenia macrophylla</i>	Mahoni	25	4	4	16	400	0.36
2	<i>Gmelina arborea</i>	Gmelina	25	4	4	16	400	0.36
3	<i>Samanea saman</i>	Trembesi	25	4	4	16	400	0.36
4	<i>Sterculia foetida</i>	Nitas	25	4	4	16	400	0.36
5	<i>Pterocarpus indicus</i>	Kayu merah	25	4	4	16	400	0.36
6	<i>Casuarina junghuhniana</i>	Kasuari	25	4	4	16	400	0.36
7	<i>Tamarindus indica</i>	Asam	25	4	4	16	400	0.36
8	<i>Aleurites moluccana</i>	Kemiri	25	4	4	16	400	0.36
9	<i>Tectona grandis</i>	Jati	25	4	4	16	400	0.36
10	<i>Eucalyptus urophylla</i>	Ampupu	25	4	4	16	400	0.36
Total						160	4,000	3.60

第3章 現地調査・実証活動

3. 1 モデル林植栽木の生育調査（生存率、樹高等）

国際緑化推進センター 仲摩栄一郎、太田誠一
Lambubg Mangkrat 大学 Dr. Mahrus Aryadi, Mr. Hamdani Fauzi
林業省研究開発局 Kupang 支所 Mr. Dani pamungkas

(1) 南カリマンタン州石炭採掘跡地のモデル林試験植栽結果

K-1. PT. Antang Gunung Meratus (AGM) 社石炭採掘跡地

K-1-1. AGM01 (0.5ha) : 2012 年 3 月植栽（植栽 15 ヶ月後の生存率、樹高）

- ✓ 樹種間で成長差が明確
 - 外来の早成樹であるアカシアマンガウムやセンゴンの成長が良い。
- ✓ 全面客土により、生存率・成長ともに若干向上。
- ✓ 施肥により成長促進効果あり
 - 特に、全面客土区でその効果が顕著。
- ✓ 施肥処理区（B、C、D）で生存率が低い
 - 肥料焼けが原因と考えられる。
- ✓ 降雨により客土が流され、切り土が露出した場所の一部に強酸性土壌が発生。植栽木が枯死。
- ✓ 土壌 pH と植栽木の生存率には明確な関係は見られない。

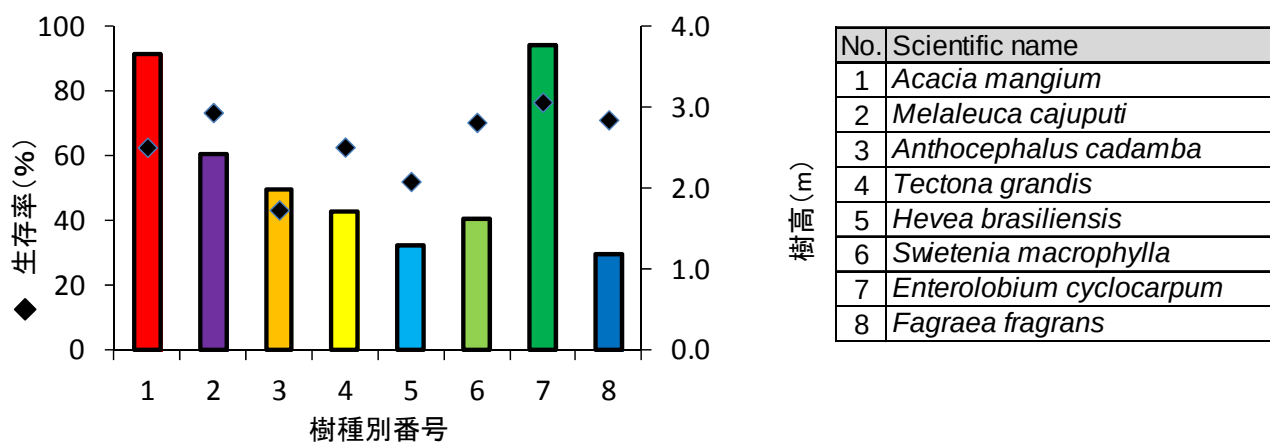


図 3-1-1. AGM01 樹種別のプロット生存率の平均値（左軸）および樹高の平均値（右軸）

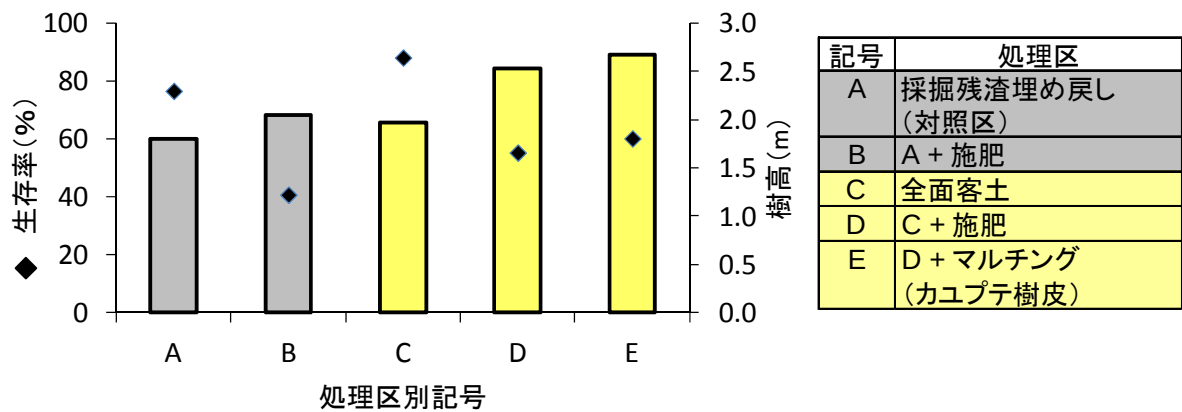


図 3-1-2. AGM01 処理区別のプロット生存率の平均値 (左軸) および樹高の平均値 (右軸)

表 3-1-2. AGM01 樹種別および処理区別のプロット生存率の平均値 (%)

	1	2	3	4	5	6	7	8	平均
A	78	88	63	90	57	78	82	75	77
B	38	74	19	35	12	47	62	40	41
C	83	83	83	90	88	93	94	90	88
D	51	62	26	42	59	59	75	68	55
E	63	61	25	62	45	74	69	83	60
平均	63	73	43	64	52	70	77	71	64

K-1-2. AGM02 (5.0ha) : 2013 年 3 月植栽 (植栽 10 ヶ月後の生存率)

- ✓ 樹種間で成長差が明確
 - 外来の早成樹であるアカシア、センゴンの成長が良い。
 - 在来種である *Dyera* と *Peronema* は生存・成長ともに悪い。
- ✓ 全面客土区よりも採掘残渣埋め戻し区の方が生存・成長ともに良い。
 - 全面客土区では、降雨により客土が流され切り土(下層土)が露出したこと、ならびに雑草木との競合による生育不良が原因と考えられる。
- ✓ 施肥やマルチングにより明確な成長促進効果は見られない。
- ✓ 切り土が露出した場所で暗黒色の強酸性土壌層が生成。
 - 植栽木が枯死。
- ✓ 土壌 pH と植栽木の生存率には明確な関係は見られない。

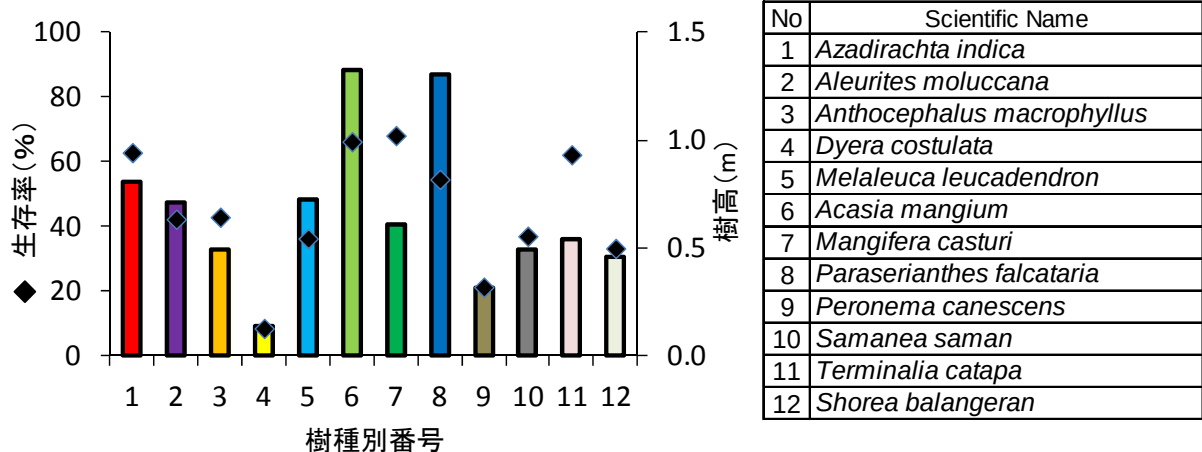


図 3-1-3. AGM02 樹種別のプロット生存率の平均値（左軸）および樹高の平均値（右軸）

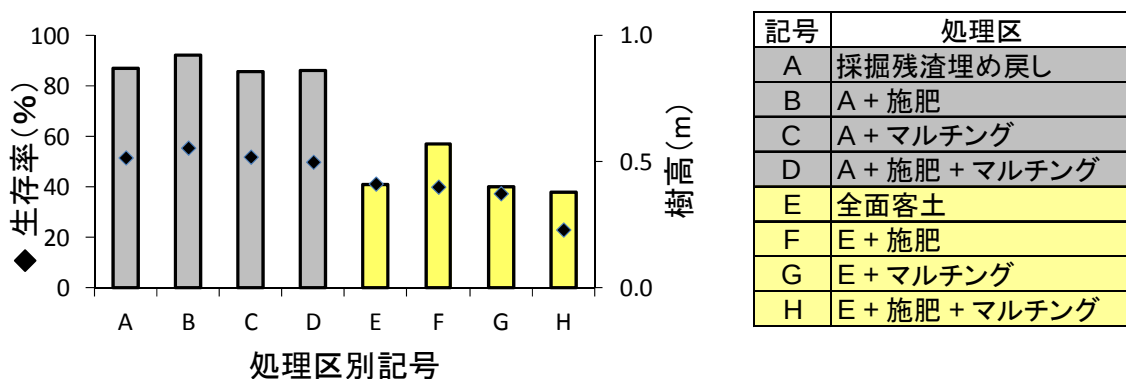


図 3-1-4. AGM02 処理区別のプロット生存率の平均値（左軸）および樹高の平均値（右軸）

表 3-1-2. AGM02 樹種別および処理区別のプロット生存率の平均値（%）

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	平均
A	47	58	63	8	54	90	71	58	26	42	53	-	56
B	78	52	42	10	54	98	71	75	52	27	52	-	60
C	58	51	50	4	44	80	70	66	16	60	72	-	53
D	63	75	29	15	33	56	83	55	8	58	73	-	51
E	-	17	42	13	19	56	67	58	35	19	92	36	39
F	44	33	42	4	34	73	81	52	6	31	56	20	45
G	81	47	47	8	38	48	31	31	13	25	58	81	41
H	-	10	23	0	3	9	72	34	9	31	31	25	22
平均	62	43	42	8	35	64	68	54	21	37	61	40	47

K-2. PT. Tanjung Alam Jaya (TAJ) 社石炭採掘跡地 (3.5ha) :

2012 年 3 月植栽 (植栽 15 ヶ月後の生存率、樹高)

- ✓ 樹種間で成長差が明確
 - アカシア、センゴンの早成樹が大きく成長。
- ✓ 樹種間で生存率にも差があり
 - ゴム (*Hevea brasiliensis*) とマホガニー (*Swietenia macrophylla*) は生存率が低く、成長も遅い。
- ✓ 試験処理 (リッピング、堆肥、マルチング) により明確な生存率の向上や成長促進効果は見られない。
- ✓ 処理区 H (ノンリッピング、植え穴客土、牛糞堆肥区) の成長が遅いが、試験処理によるものではなく、別の要因と考えられる。
- ✓ 埋め戻し用土／捨て土 (採掘残渣) 中に、潜在酸性変化 (PAF) 物質が混在していたため、強酸性土壌がパッチ状に生成
 - 植栽木が枯死。
- ✓ 処理区の差よりも、極めて強い酸性や停滞水のような局所的な立地・土壌条件の差により、植栽木の生存率および成長が決定されていると考えられた。
- ✓ ただし、土壌 pH と植栽木の生存率に正の相関関係が見られる樹種と見られない樹種がある。種特性の差なのか、植栽した場所の環境要因に起因するものなのか、さらなる調査が必要。

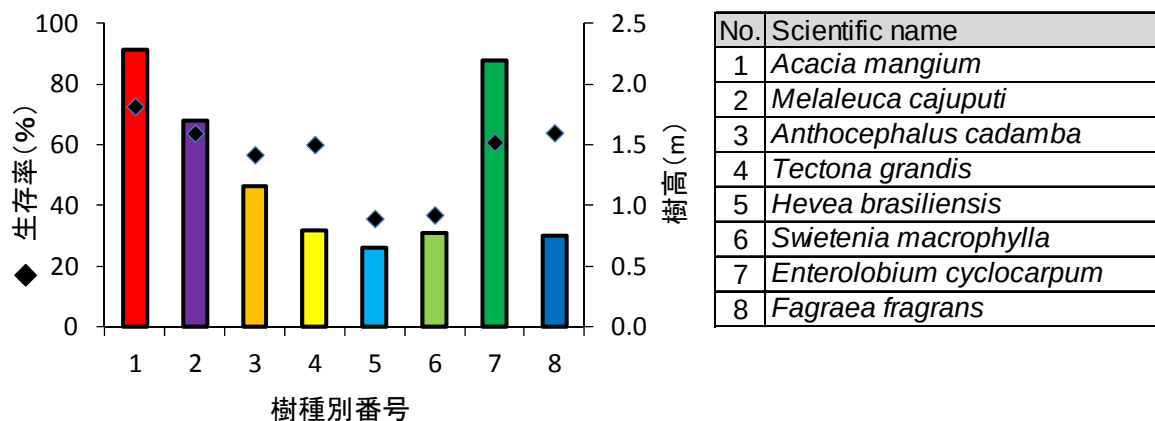


図 3-1-5. TAJ 樹種別のプロット生存率の平均値 (左軸) および樹高の平均値 (右軸)

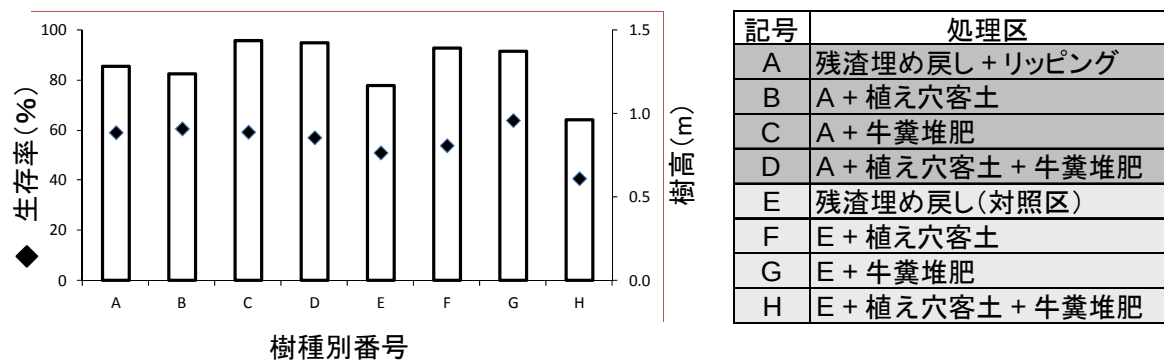


図 3-1-6. TAJ 処理区別のプロット生存率の平均値（左軸）および樹高の平均値（右軸）

表 3-1-3. TAJ 樹種別および処理区別のプロット生存率の平均値（％）

	1	2	3	4	5	6	7	8	平均
A	81	65	70	85	44	29	52	48	59
B	81	69	77	56	54	25	50	73	61
C	92	63	40	58	46	48	67	63	59
D	79	79	46	54	33	34	63	66	57
E	42	54	42	46	30	52	60	84	51
F	69	60	53	71	35	33	67	38	53
G	84	62	69	56	13	44	80	81	61
H	31	50	66	54	28	25	34	44	42
平均	70	63	58	60	35	36	59	62	55

(2) 南カリマンタン州石炭採掘跡地のモデル林植栽試験における土壌 pH と植栽木の生存および成長

AGM 社の 1 年目植栽地(AGM01)、2 年目植栽地(AGM02)ならびに TAJ 社植栽地において、各プロットの中央付近において土壌 pH を測定した。測定した土壌 pH と植栽木の生存および成長の関係を散布図に示す（図 3-1-7～図 3-1-16）。

石炭採掘跡地では、採掘残渣中に含まれるパイライトが酸化されることで、強酸性の硫酸酸性土壌が形成される。本事業のモデル林植栽試験地では、強酸性土壌が局所的に発生しており、pH が 3 以下の強酸性土壌については、植栽木が枯死することが確認された。土壌 pH が 3～4 付近では、樹種によって生存率が低下する樹種もあれば、比較的高い生存率を維持している樹種もあり、強酸性土壌に対する耐性／適応の種間差によるものと考えられた。

なお、AGM 社の 1 年目植栽地(AGM01)については、上述の通り、肥料焼けによる枯死（生存率の低下）が観察されたため、①全処理区（図 3-1-7、図 3-1-8）、②施肥区（図 3-1-9、図 3-1-10）、③無施肥区（図 3-1-11、図 3-1-12）に分けて散布図を作成した。

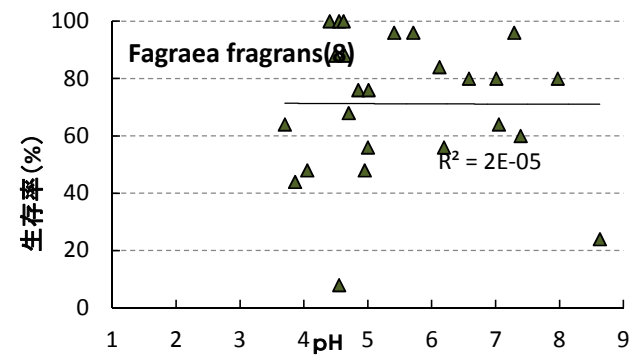
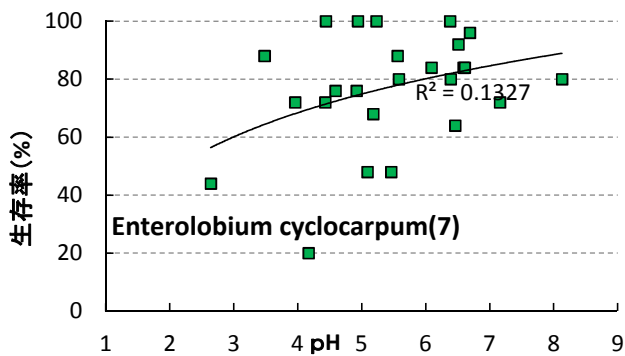
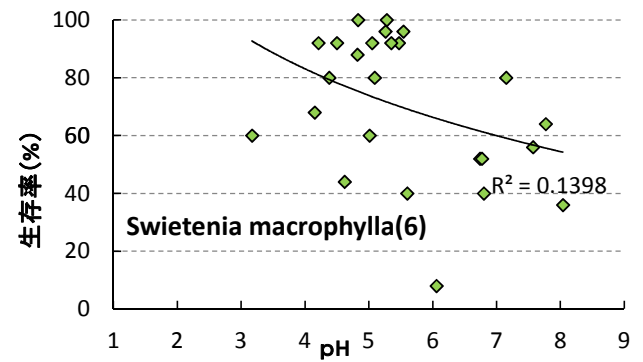
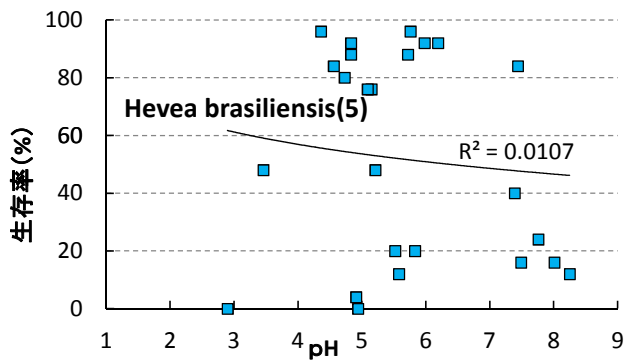
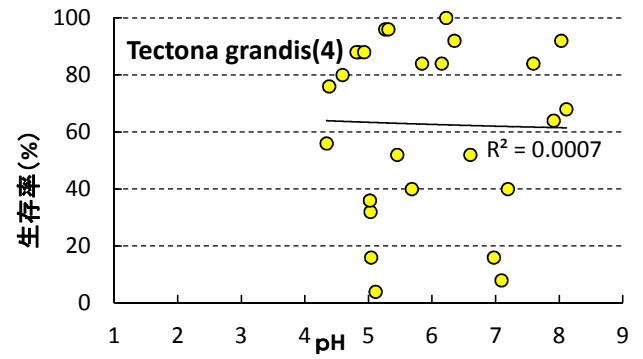
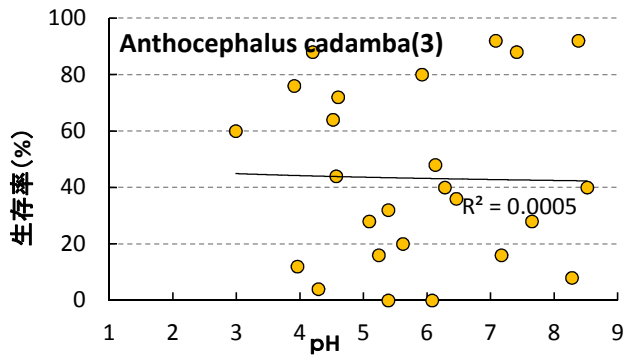
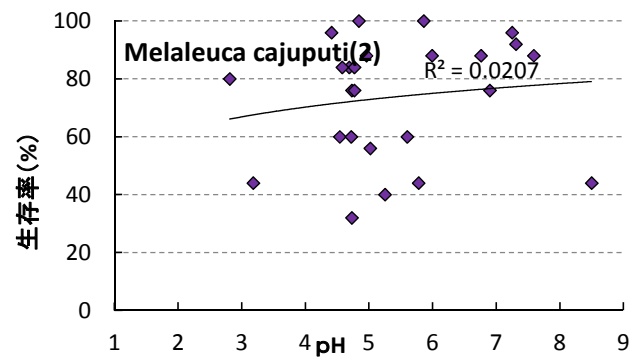
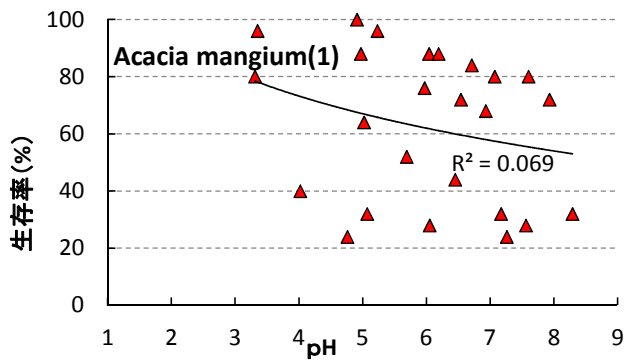


図3-1-7. AGM社1年目植栽地(AGM01)における樹種ごとのpHと生存率の関係(全処理区)

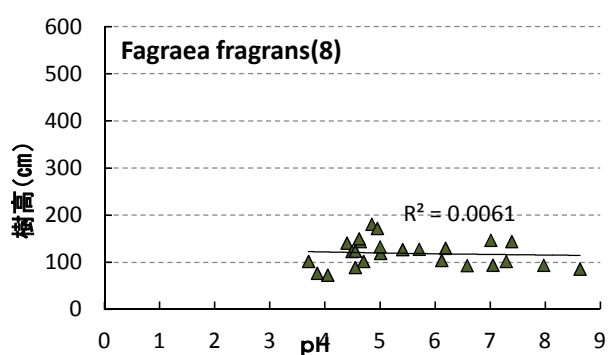
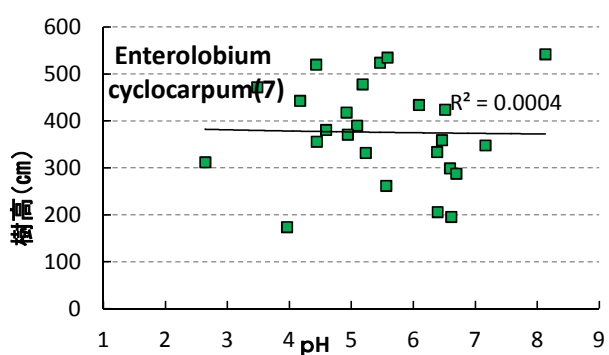
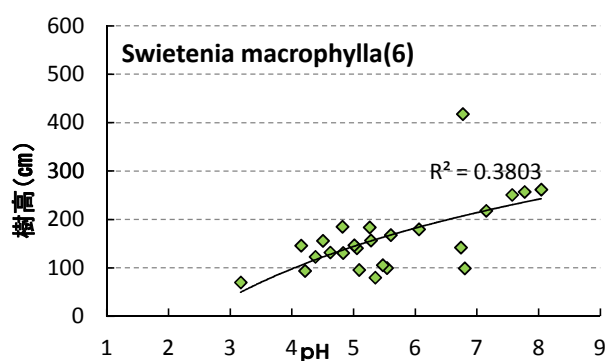
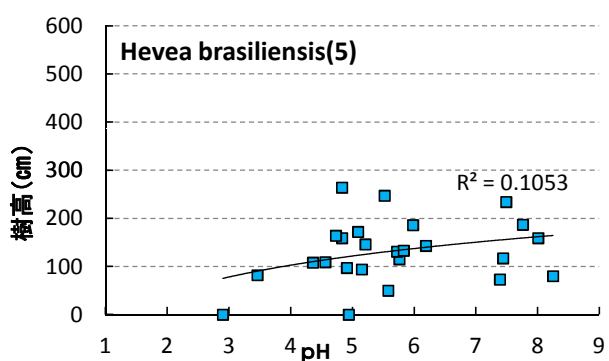
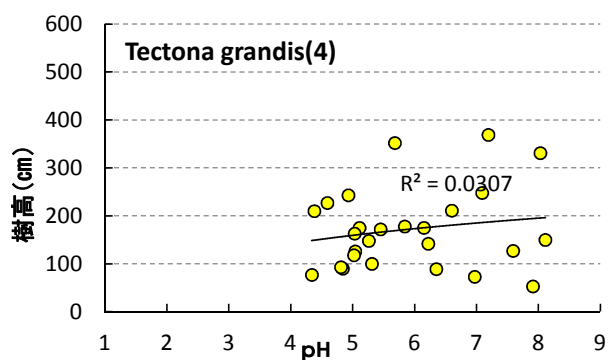
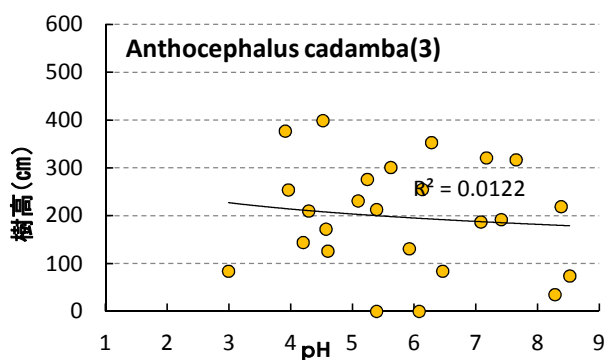
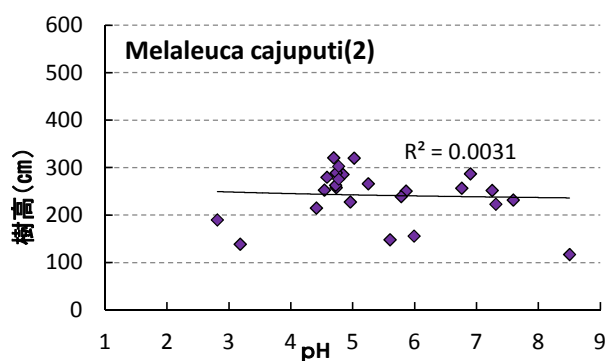
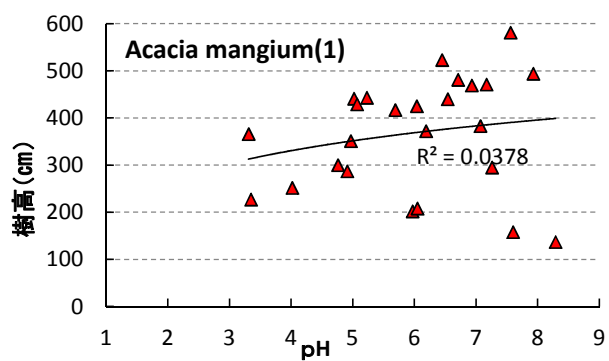


図3-1-8. AGM社1年目植栽地(AGM01)における樹種ごとのpHと樹高の関係(全処理区)

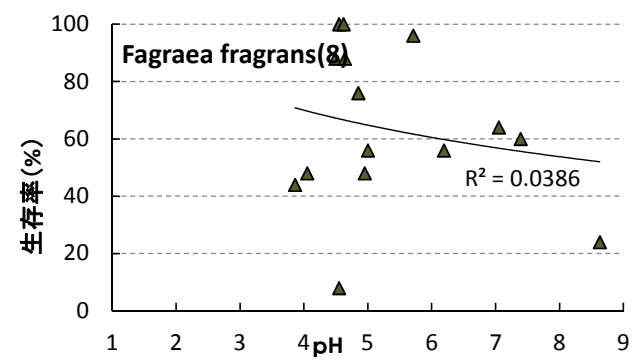
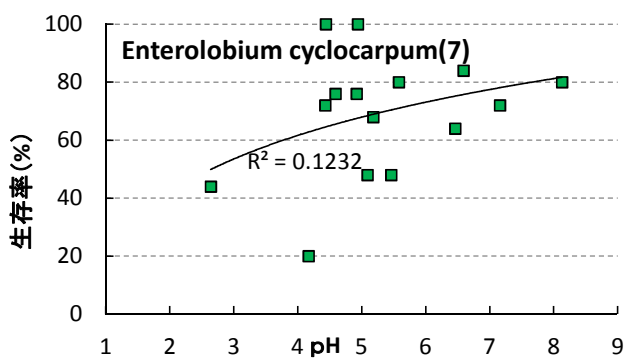
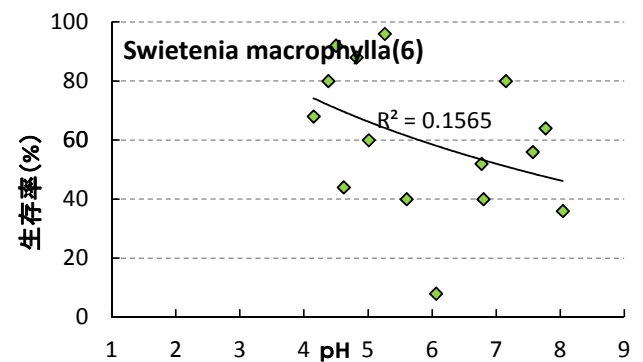
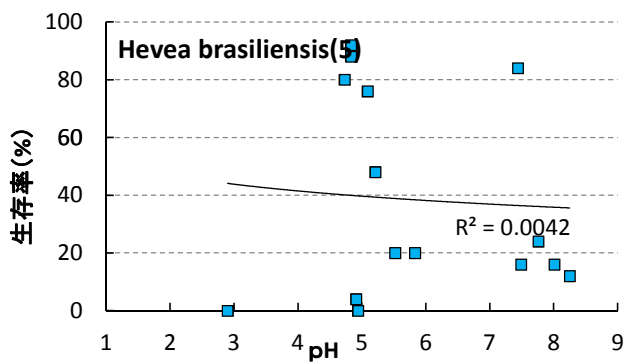
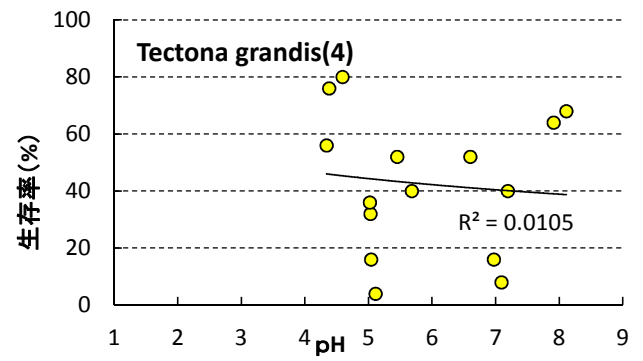
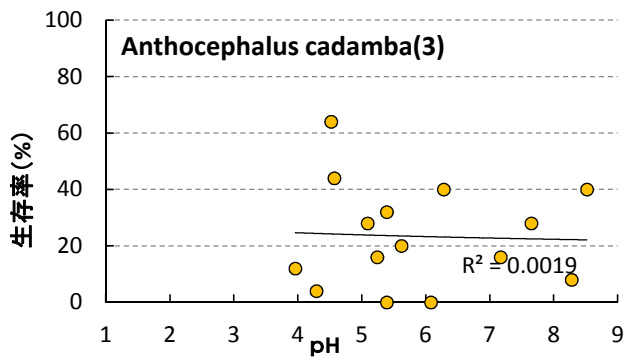
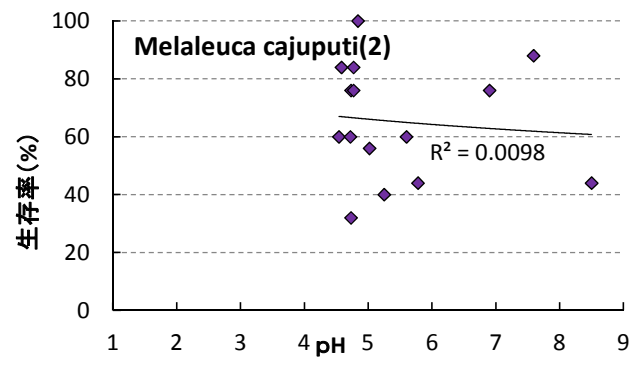
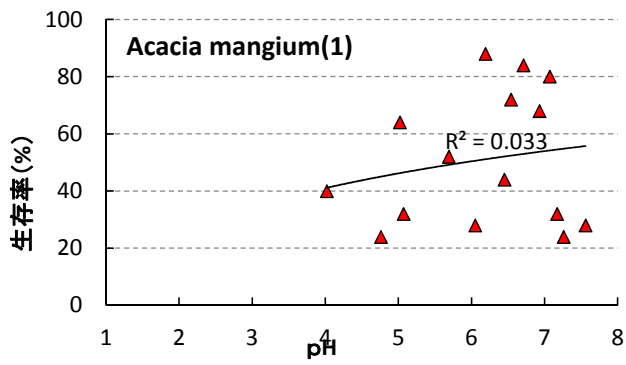


図3-1-9. AGM社1年目植栽地(AGM01)における樹種ごとのpHと生存率の関係(施肥あり(B+D+E))

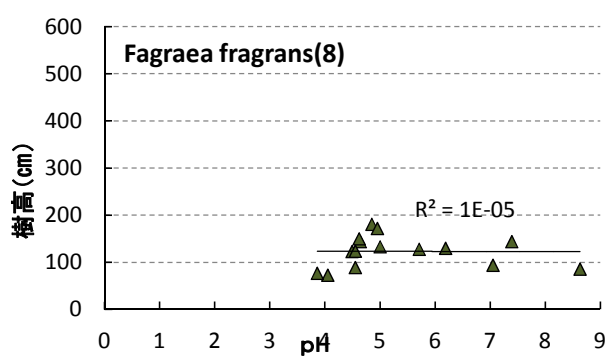
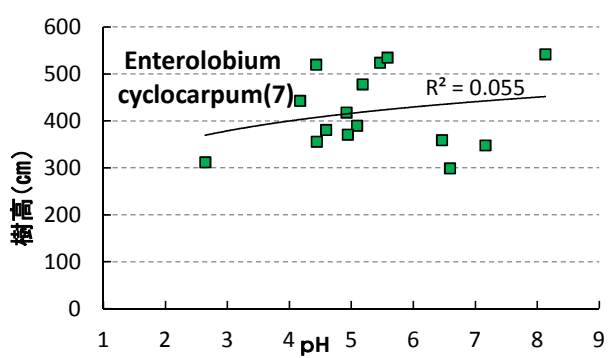
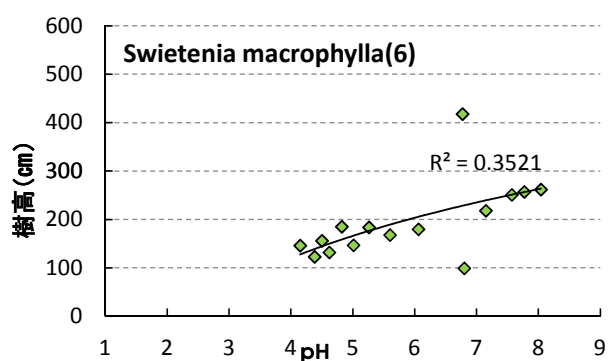
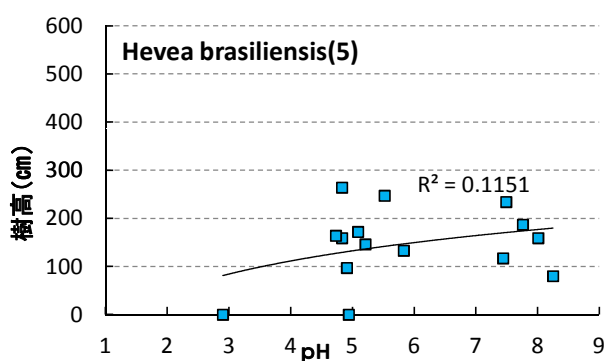
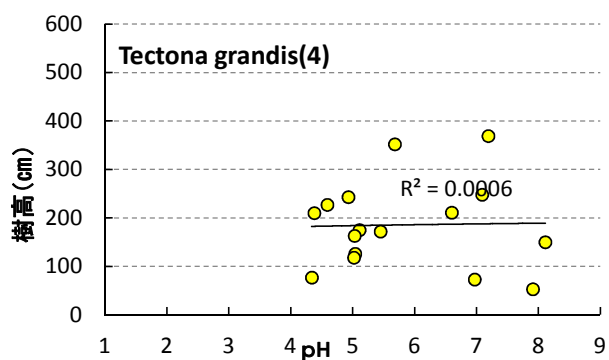
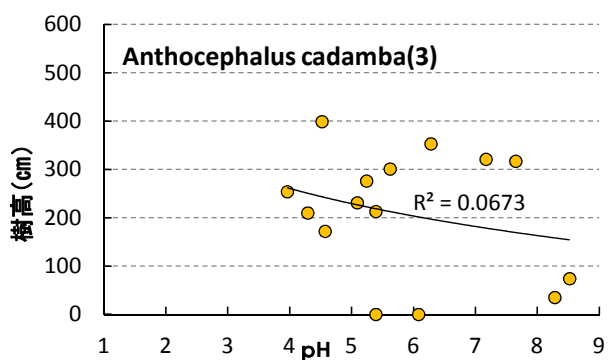
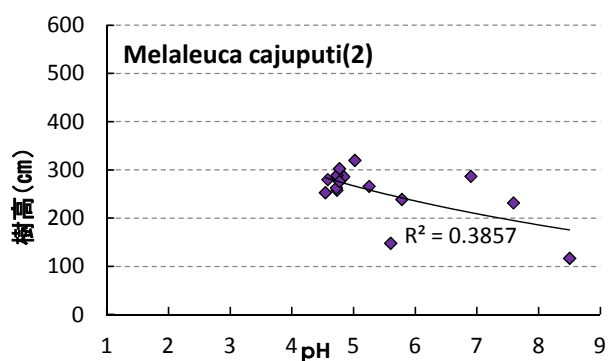
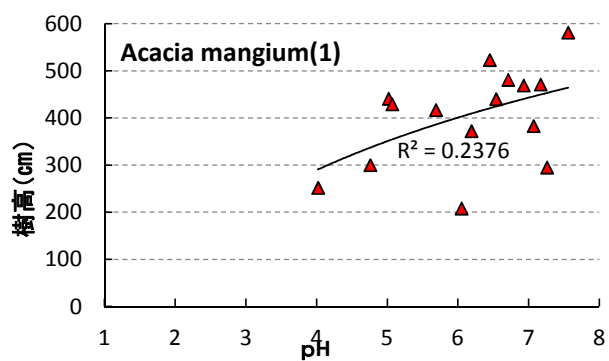


図3-1-10. AGM社1年目植栽地(AGM01)における樹種ごとのpHと樹高の関係(施肥あり(B+D+E))

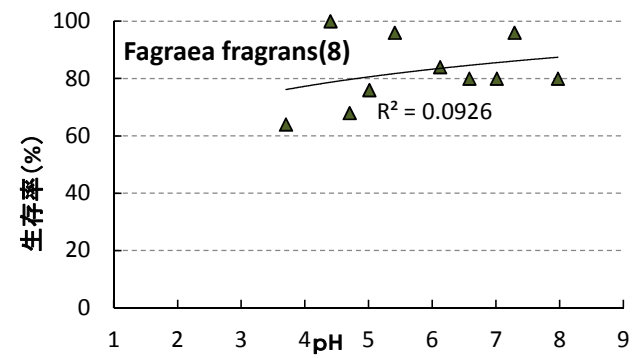
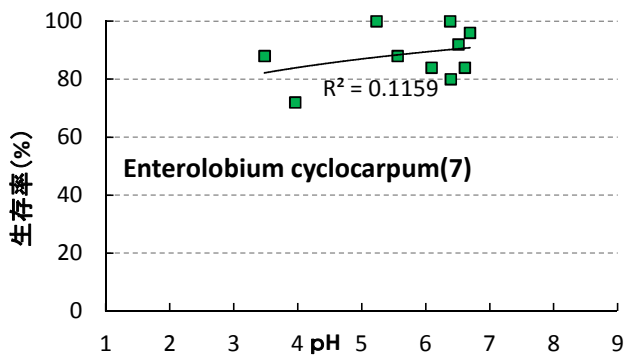
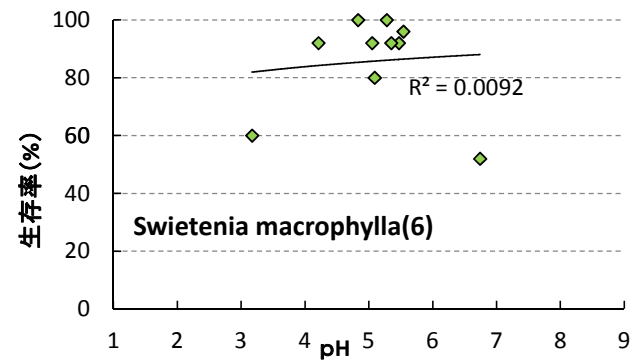
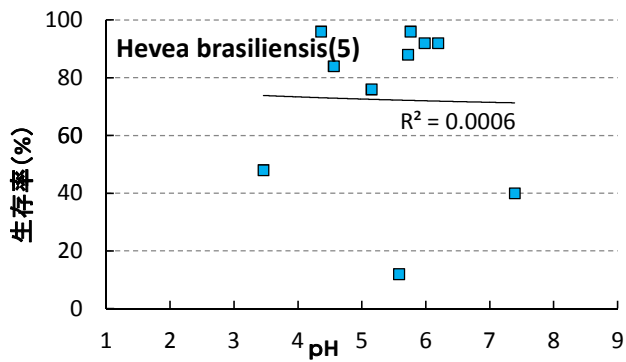
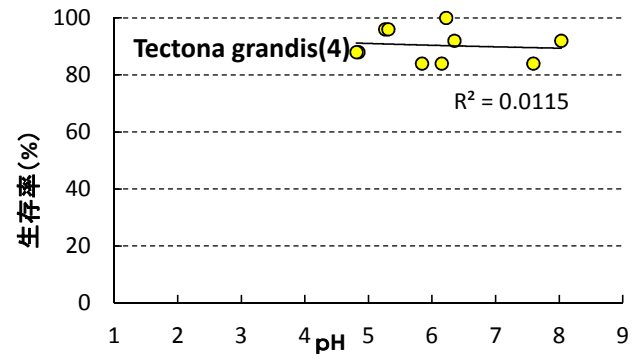
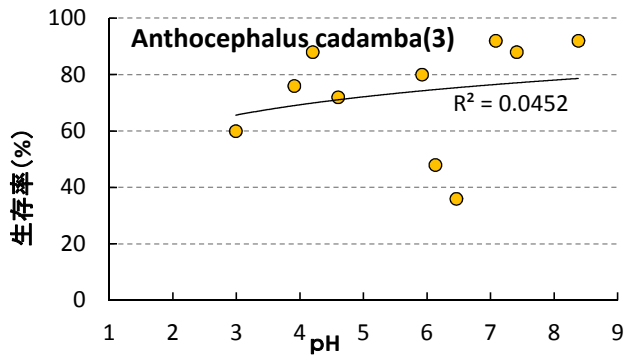
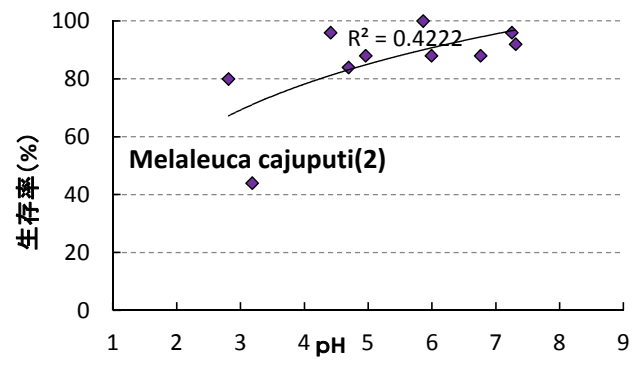
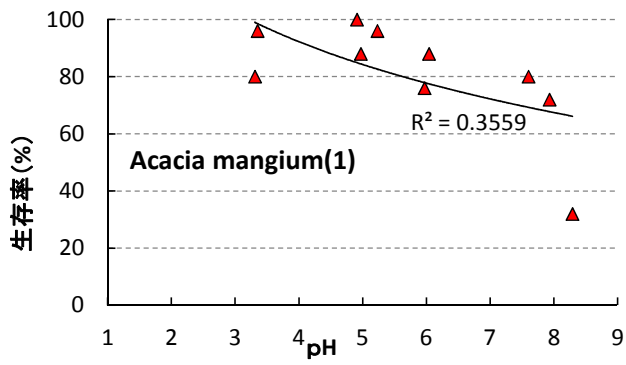


図3-1-11. AGM社1年目植栽地(AGM01)における樹種ごとのpHと生存率の関係(施肥なし(A+C))

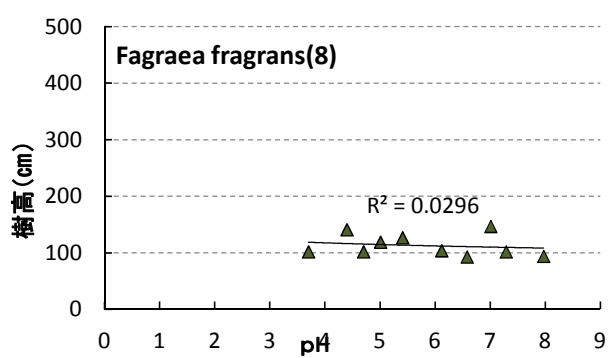
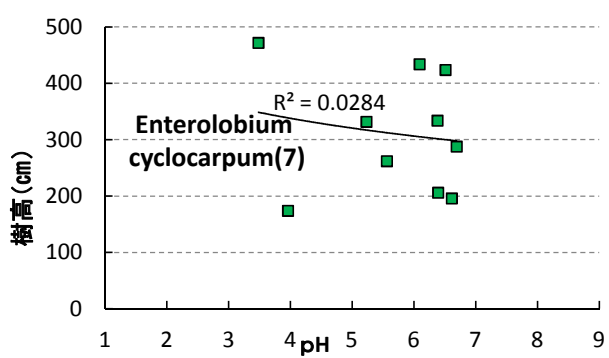
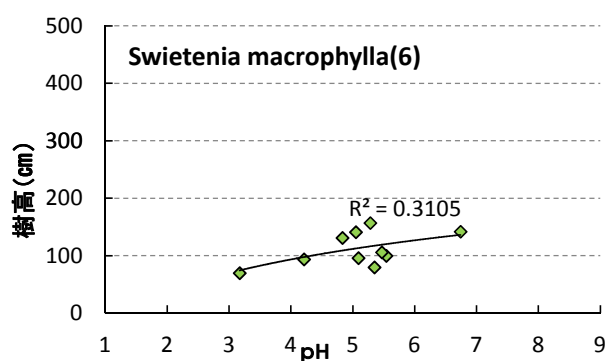
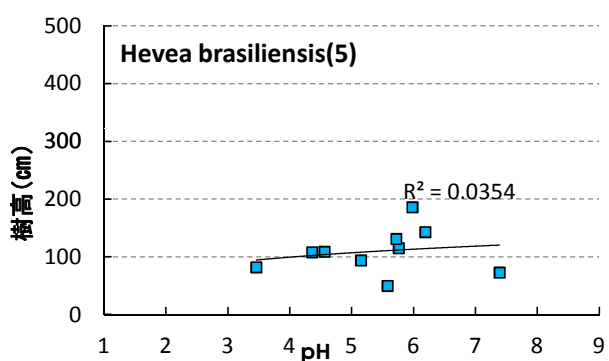
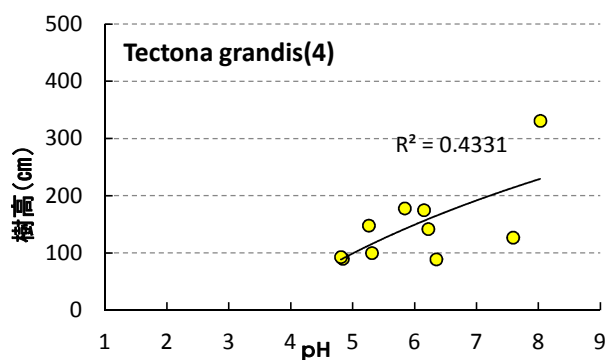
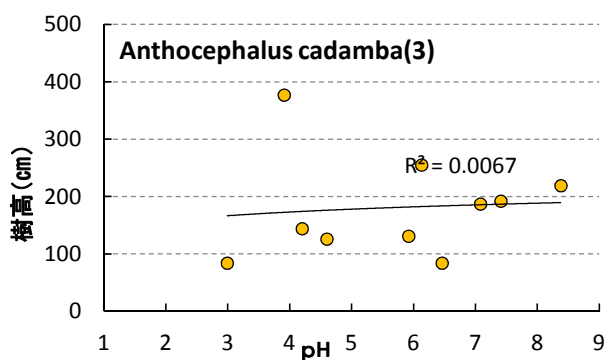
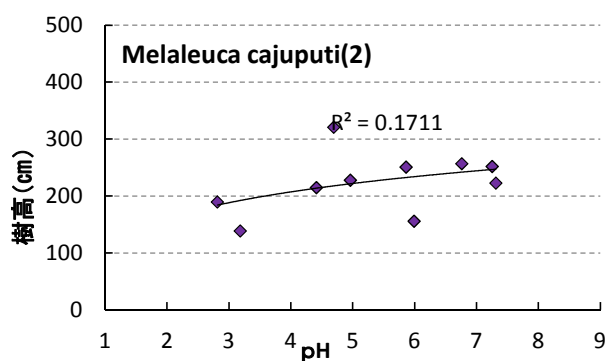
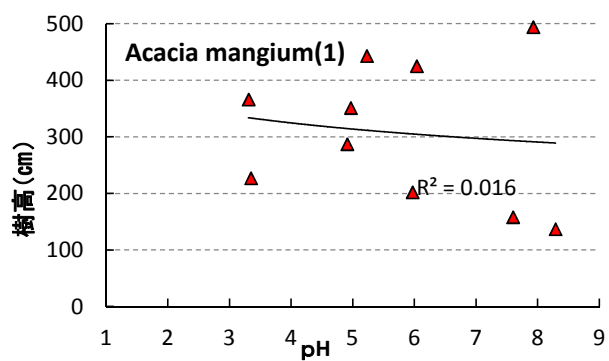


図3-1-12. AGM社1年目植栽地(AGM01)における樹種ごとのpHと樹高の関係(施肥なし(A+C))

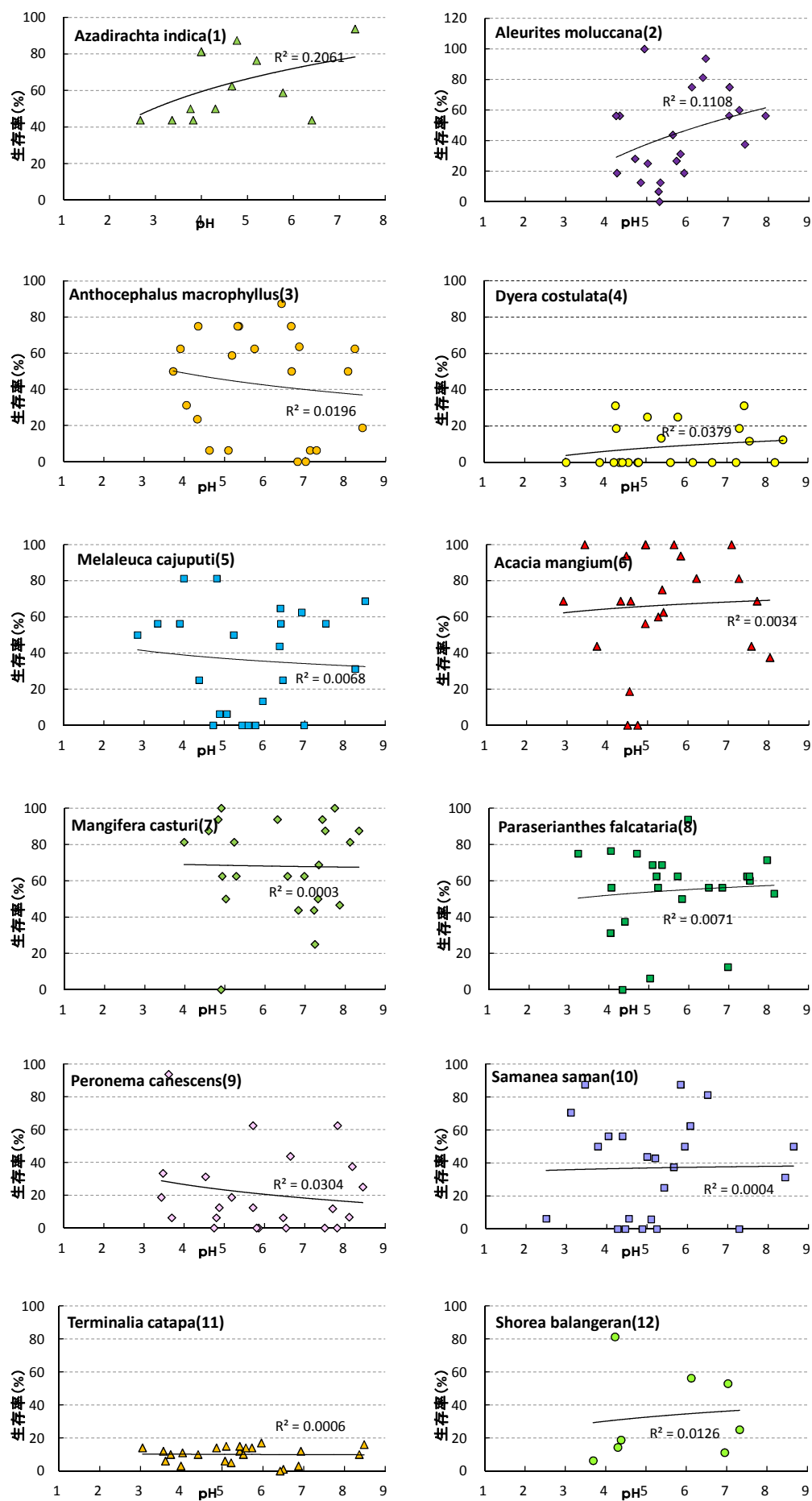


図3-1-13. AGM社2年目植栽地(AGM02)における樹種ごとのpHと生存率の関係(全処理区)

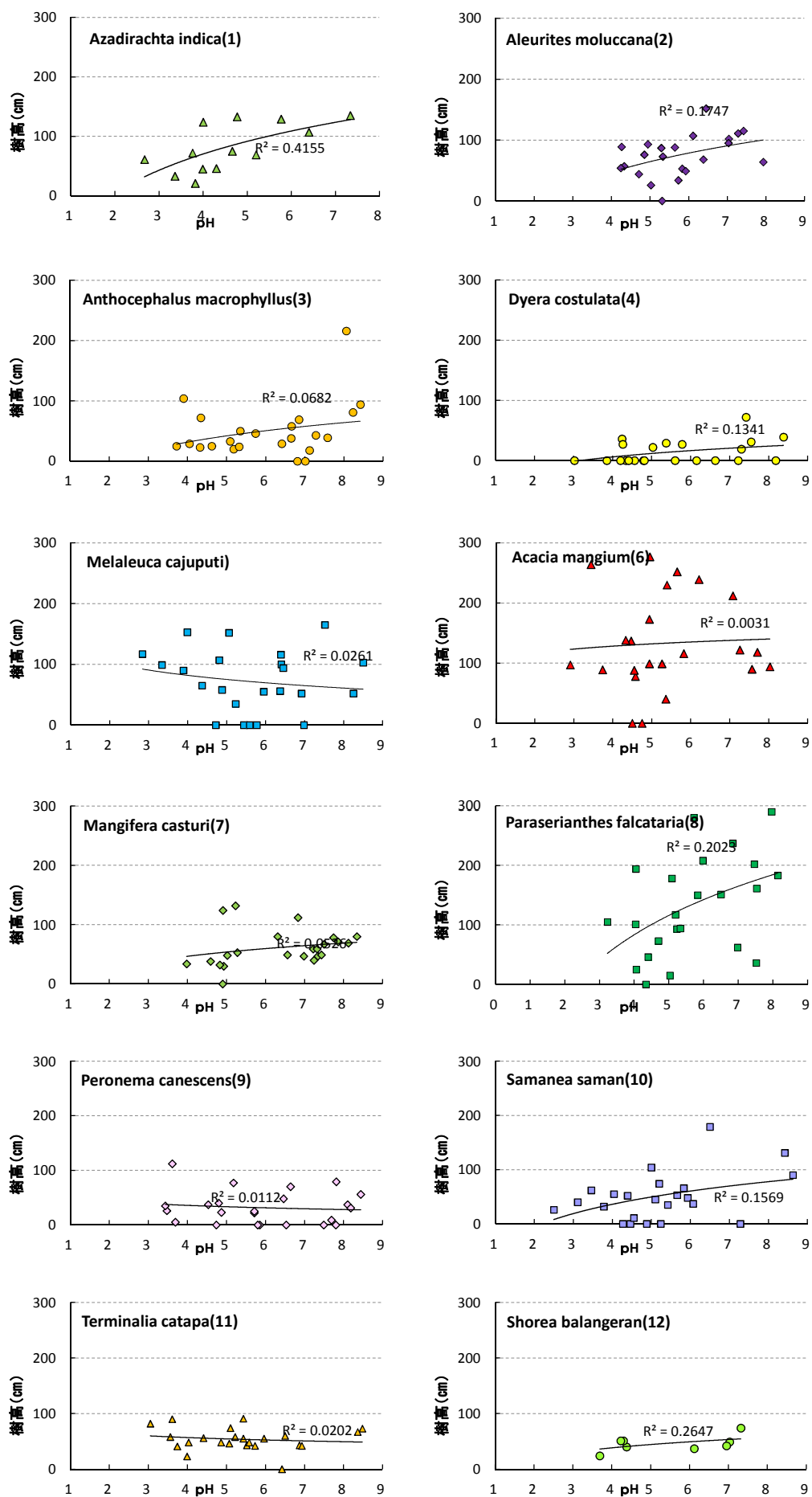


図3-1-14. AGM社2年目植栽地(AGM02)における樹種ごとのpHと樹高の関係(全処理区)

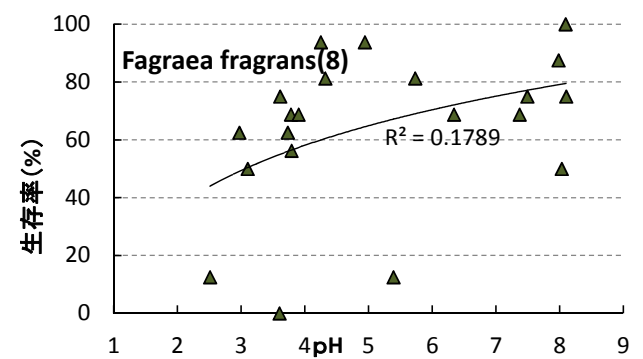
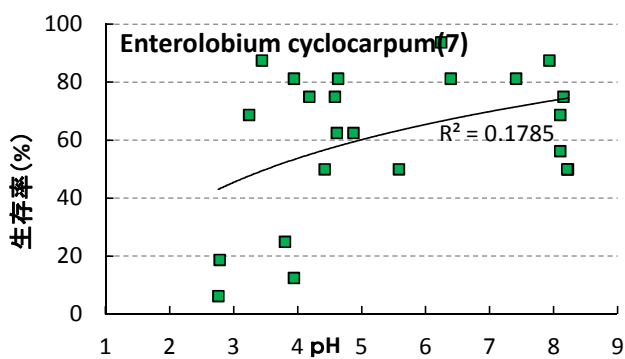
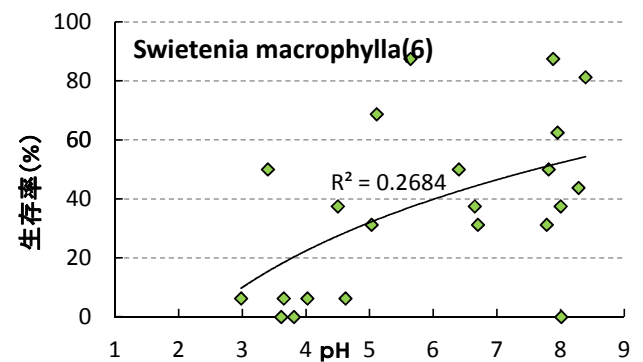
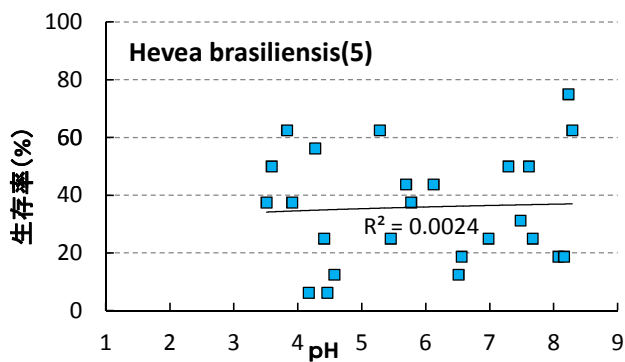
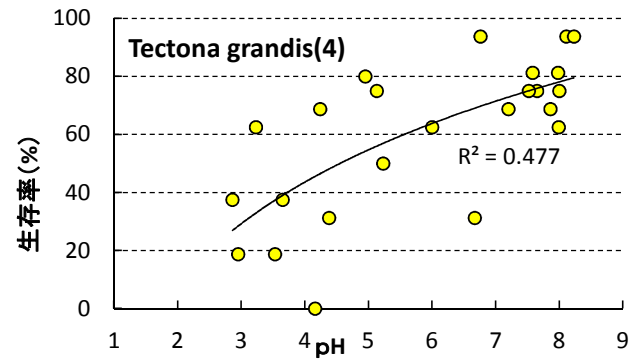
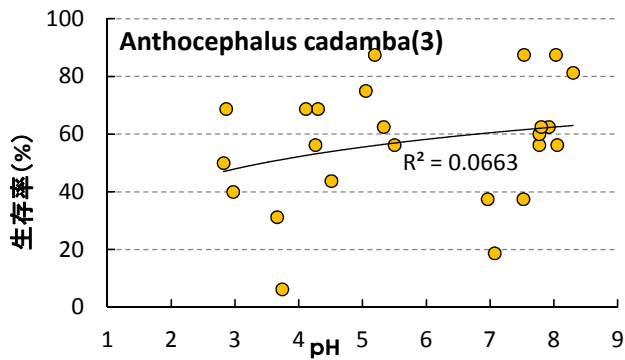
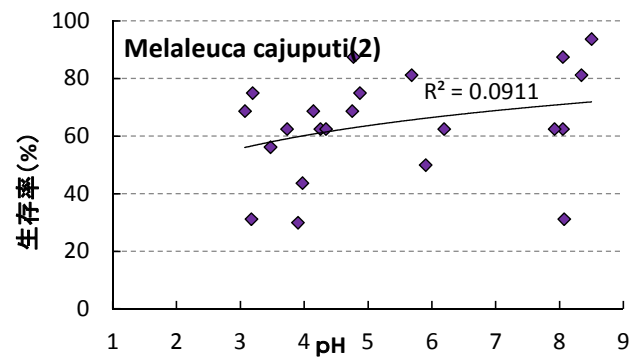
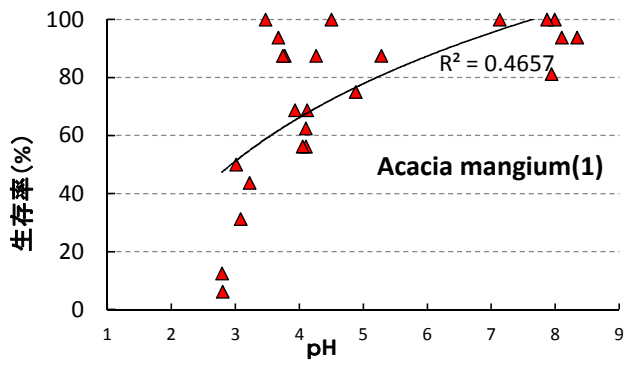


図3-1-15. TAJ社における樹種ごとのpHと生存率の関係(全処理区)

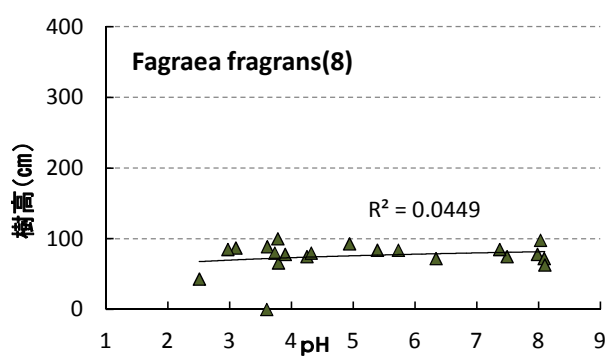
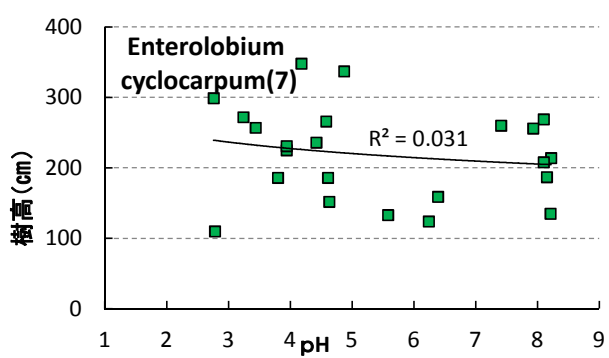
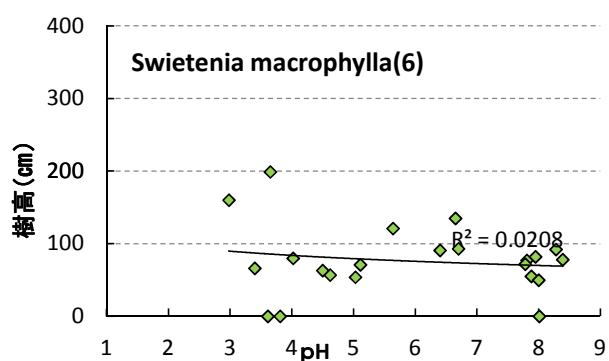
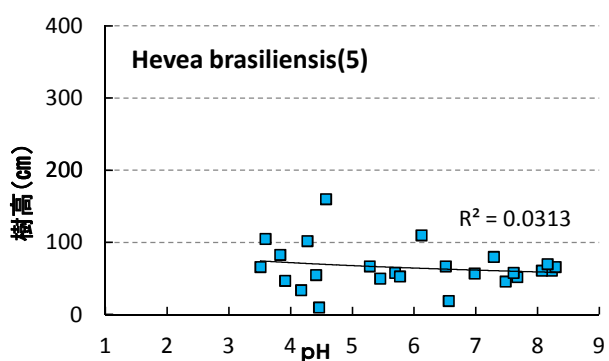
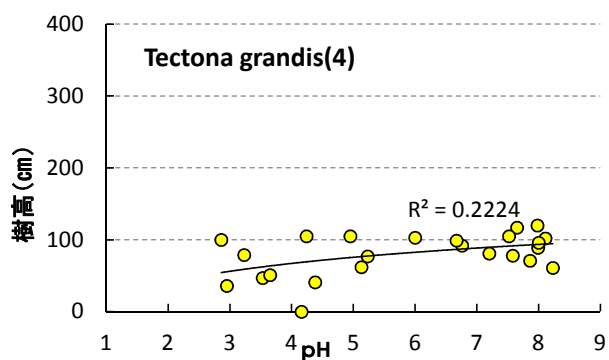
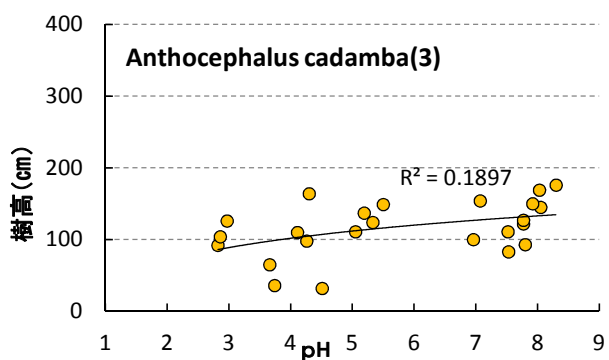
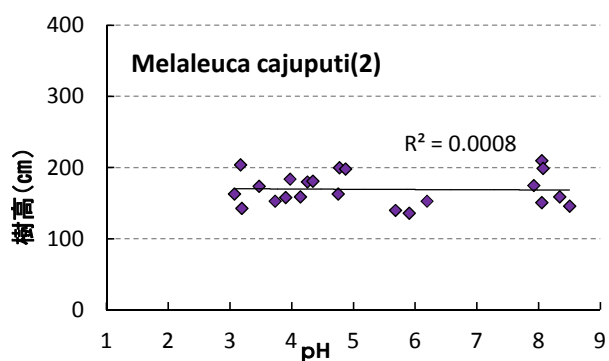
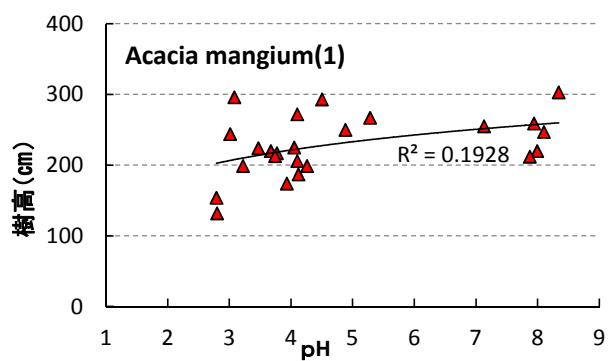


図3-1-16. TAJ社における樹種ごとのpHと樹高の関係(全処理区)

(3) 南カリマンタン州石炭採掘跡地のモデル林植栽試験の考察

AGM 社 1 年目植栽地(AGM01)では、全面客土に加えて施肥をした場合に限り、植栽木の成長促進が確認された。客土処理は、インドネシア林業省の既存の森林回復ガイドラインにも示されており、他の先進事業地でも実施されているので、植栽木の成長にとって有効であると考えられる。ただし、現地で一般的に客土する土は、**Top Soil** と呼ばれているものの、正確には、森林の表土 (A 層) ではなく、地表下数 m までの黄土色の土 (B 層) である。したがって、客土に用いる場合、その土壌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。

AGM 社 1 年目植栽地(AGM02)では、施肥の有無にかかわらず、非客土区に比べて、客土区の植栽木の成長が悪い結果が出た。これは、客土が不十分であったため降雨により流亡したか、もしくは、客土区において繁茂した雑草が植栽木の成長を阻害した可能性がある。今後、その原因をさらに詳細調査したい。

現地においては、森林土壌を大量に調達することが困難な地域もある。今後、客土が困難な場合を想定して、石炭採掘跡地に特有の強酸性・貧栄養・緻密な土壌に耐性・適応能力を持つ一次緑化用樹種の導入を検討する。

これまで、アカシアやセンゴン等のマメ科樹種が生存率および成長ともに良い傾向が観察された。マメ科樹種は、根に共生する根粒菌が窒素を固定するので貧栄養地においても生育・成長が可能であり、耐性／適応力が高いといえ、一次緑化樹種として有力な候補となりえる。また、生存率の高いメラルーカ (*Melaleuca cajuputi*) や成長の早いジャボン (*Anthocephalus cadamba*) も、一次緑化の候補樹種となりえる。

TAJ 社植栽地では、土壌 pH と植栽木の生存率に正の相関がある樹種が確認された。強酸性土壌により植栽木が枯死した可能性が示唆された。今後、AGM 社および TAJ 社ともに、時間の経過とともに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 年後に突然枯死する現象も報告されている。今後も、土壌の酸性度やち密土度の変化、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。



写真 3-1-1. AGM アカシア植栽木



写真 3-1-2. TAJ センゴン植栽木



写真 3-1-3. AGM メラルーカ植栽木



写真 3-1-4. TAJ ジャボン植栽木



写真 3-1-5. AGM 樹高の測定
チーク (*Tectona grandis*)



写真 3-1-6. AGM 胸高直径の測定
チーク (*Tectona grandis*)

(4) 東ヌサテンガラ州 過剰農牧利用跡地

N-1. Nekbaun 村 (4.0ha) 2013 年 3 月植栽

- ✓ 下図 3-1-7 の樹高データは、植栽 1 ヶ月後のデータなので、植栽時の苗木の大きさであると考えて良い。
- ✓ メリナ (*Gmelina arborea*) とセンゴン (*Entroobium cyclocarpum*) およびクミリ (*Aleurites moluccana*) が他と比較して大苗を使用していたことがわかる。
- ✓ ただし、その他の樹種も、インドセンダン (*Azadirachta indica*) を除いて、生存率は 60%以上を維持している。
- ✓ インドセンダンは、苗木の平均樹高が 10cm 未満と非常に小さく未熟であったこと、ならびに、カタツムリによる樹皮の食害を受けたことが生存率低下の要因として考えられる。
- ✓ 植栽木の活着や成長および試験処理の効果が判明するまでには時間が必要であり、継続したモニタリングが必要である。

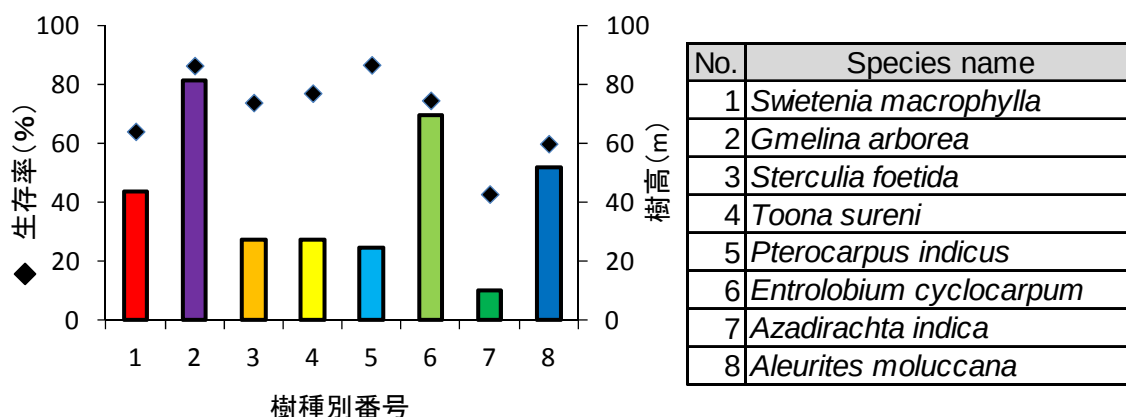


図 3-1-17. Nekbaun 樹種別のプロット生存率平均値 (左軸) および樹高の平均値 (右軸)
(植栽 5 ヶ月後の生存率と植栽 1 ヶ月後の樹高)

N-2. Penfui Timur 村 (4.0ha) 2013 年 3 月植栽

- ✓ 下図 3-1-8 の生存率データおよび樹高データともに、植栽 1 ヶ月後のデータなので、生存率については、ほとんどの樹種が 80%以上を維持しており、樹高については植栽時の苗木の大きさであると考えて良い。
- ✓ メリナ (*Gmelina arborea*) が他と比較して大苗を使用していたことがわかる。
- ✓ チーク (*Tectona grandis*) は、苗木の平均樹高が 10cm 未満と非常に小さいが、生存率が高い。
- ✓ 植栽木の活着や成長および試験処理の効果が判明するまでには時間が必要であり、

継続したモニタリングが必要である。

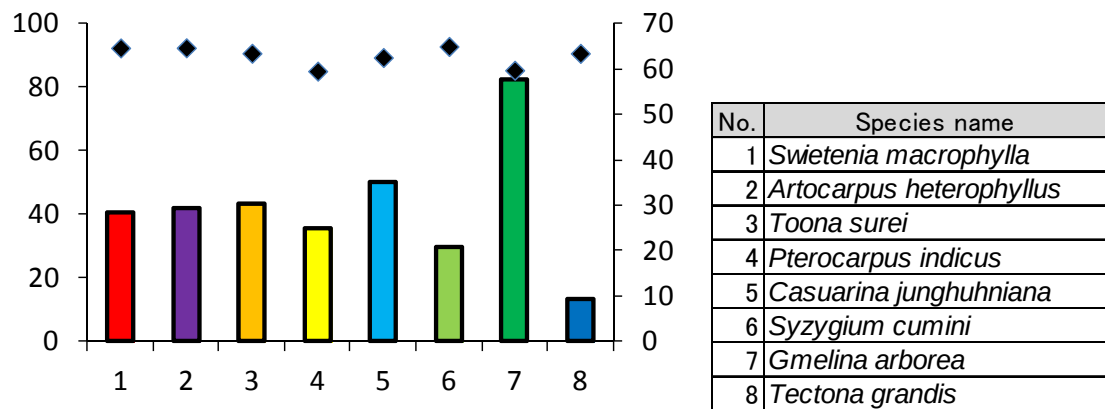


図 3-1-18. Penfui 樹種別のプロット生存率の平均値（左軸）および樹高の平均値（右軸）
（植栽 1 ヶ月後の生存率と樹高）



写真 3-1-7. Nekbaun メリナ植栽木



写真 3-1-8. Nekbaun アンサーナ植栽木



写真 3-1-9. Penfui スレン植栽木



写真 3-1-10. Penfui マホガニー植栽木

3. 2 土壌モニタリング

国際緑化推進センター 太田誠一・仲摩栄一郎

Lambubg Mangkrat 大学 Dr. Fakhur Razie

1) 石炭採掘跡地に出現する問題土壌の特性と変化

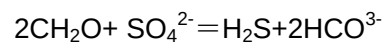
i) 硫酸酸性塩土壌の出現と土壌の堅密化

近年インドネシア各地で露天掘りによる石炭採掘が様々な規模で進行し、その跡地に森林回復が困難な酸性土壌もしくは潜在的酸性土壌地帯が出現している。同国の南カリマンタン州にあっても同州の Barito 川沿いに南北に連なる丘陵地帯に炭田が分布しており、この地域で行われた石炭採掘の結果、大小の荒廃地が出現するに至っている。このため本事業では、石炭採掘跡の荒廃地を対象とした森林回復技術の開発を目的として、南カリマンタン州の Banjar 県に位置する PT. Tanjung Alam Jaya 炭鉱ならびに Hulu Sungai Selatan 県に位置する PT. Antang Gunung Meratus 炭鉱の採掘跡に試験地を設けて、モデル林造成を実施している。

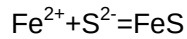
石炭採掘跡地における森林再生を困難なものにしている主要な原因はその特殊な土壌環境であることが多い。特に石炭採掘時に随伴して掘り出される堆積物中にパイライトが含まれる場合には、土壌が時間と共に著しく強い酸性を呈する硫酸酸性塩土壌が出現するに到り、あらゆる植生の活着・生存が困難となる。加えて、石炭採掘跡地において緑化を行う場合、採炭跡のピットを掘削残さで埋め戻して地拵えを行うが、その際の土工は大型の重機を用いて行われるため、著しい土壌の堅密化が進行し植生の定着を阻害する。さらに堅密化した表土は雨水の浸透能が極めて小さいために、雨水の多くが表面流去水として流去する際に激しい表土流亡を随伴し、更に植生の定着を阻害することとなる。

a) パイライトの生成

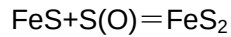
パイライトは、海水ないし汽水による SO_4^{2-} の供給と有機物の供給が同時に起こるような環境下で生成することが知られている。例えば、海水ないし汽水環境下に成立するマングローブはこの2つの条件を備えている。海水中には 2.65 g L^{-1} の SO_4^{2-} が存在し、供給された有機物の分解に伴う酸素消費によって形成された嫌気環境下で、この SO_4^{2-} は還元され原子価 2 のイオウ (S(-II)) 化合物である H_2S が生成する。



この硫酸還元反応は一群の絶対的嫌気性菌に属する従属栄養細菌によって、無酸素条件下 (Eh -120 — -180mV) でのみ進行する。こうして生成した S(-II)は、硫酸還元よりも高い Eh ($+180$ — $+150\text{mV}$) ですでに生成している Fe^{2+} と反応し、常温で準安定な黒色の硫化鉄 (FeS) が沈殿する。



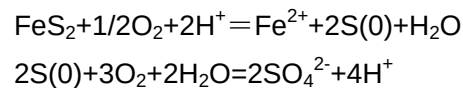
FeS は、S(-II)の酸化や SO_4^{2-} が還元される際の間産物として生成して海底堆積物中にかなり普遍的に存在すると考えられる原子状硫黄 (S(0)) と反応してパイライト (FeS_2) が生成する。



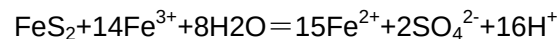
このように、海水中に豊富に含まれる SO_4^{2-} は、有機物の供給によって形成される嫌気環境下で硫酸還元反応によって S(-II)に形を変え、最終的にはパイライト (FeS_2) として安定化し堆積物中に蓄積される。

b) 硫酸酸性塩土壌の生成と酸化生成物の行方

海底堆積物中に蓄積したパイライトは、堆積物が陸化し脱水されると、酸素の存在下で下記の反応が進行する。

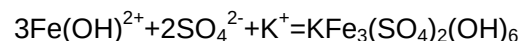


しかし、これらの反応はいずれも純化学的には極めて緩慢にしか進まない一方、微生物が仲介すると極めて速やかに進行することが知られ、鉄バクテリア、硫黄バクテリアと呼ばれる微生物群がそれぞれ関与する。このようなプロセスでパイライトの初期酸化が進むと生成した硫酸によって媒質は急激に酸性化し、pH が 3 以下になると溶液中に Fe^{3+} が溶存し、次には Fe^{3+} を酸化剤としてパイライトの酸化が進行する。



この反応の半減期は 20－1000 分であり、極めて速やかなパイライトの酸化が進行し、しかもこの反応は酸素を必要としない。ここで生成した Fe^{2+} は鉄バクテリアに再び Fe^{3+} に酸化され、更なるパイライトの酸化にあずかる。

生成した酸が溶脱したり中和されたりして媒質の pH が >3 となると、生成された Fe^{3+} は加水分解を受け褐色－黄橙色の加水酸化鉄として沈殿する。しかし pH 3－4 程度の中度の酸性条件下では、 Fe^{3+} が部分的な加水分解を受けて生じた Fe(OH)_2^+ から次の反応によってジャロサイト (jarosite) が生成する。



ジャロサイトは淡黄色を呈し糸根状、管状、膜状の斑紋として出現し、その特徴的な色は、硫酸酸性塩土壌あるいはキャットクレイ（ジャロサイト斑紋をもつ粘土質堆積物）の存在を現場で識別するのに役立つ。ジャロサイトは $\text{pH} > 4$ で加水分解を受け硫酸と黄橙色ゲータイト（ FeOOH ）を生じる。

一方、パイライトの酸化によっていったん生成した大量の硫酸のうちの多くは下方への浸透水や地表流去水と共に徐々に失われてゆくと考えられるが、残りは土壌中の塩基性物質と反応して中和される。最も有効にこの酸を中和するのは堆積物に含まれる CaCO_3 であり、また易風化性の一次鉱物（造岩鉱物）や二次鉱物（粘土鉱物）も硫酸によって破壊され Ca 、 Mg 、 K 、 Na などの塩基性カチオンを開放し硫酸を中和する。

このようにパイライトの酸化は大量の硫酸の生成を伴うが、先に述べたようにその酸化プロセスは必ずしも常に迅速に進行するわけではなく、生物学的関与に限られる初期の酸化条件下ではむしろ酸の生成は極めて緩慢に進行する。更に、生成した硫酸は堆積物中に共存する塩基性のカチオンによって中和されるため、堆積物中に多くの塩基性物質が共存する場合には生成した酸は直ちに中和され、土壌の急激な酸性化は進行せず中性－アルカリ性を示すにすぎない。しかし、時間の経過と共にパイライト酸化に微生物が参加し大量の硫酸が急激に解放され、加えて酸の中和に与る塩基性物質が堆積物中にあまり含まれていない、あるいはすでに中和反応によって消費されていると、土壌は著しく強い酸性を示すことになると考えられる。

このようにパイライトを含む堆積物を原材料とする土壌の酸性の強さは、堆積物が含むパイライトの量、その酸化のスピード、堆積物が持つ硫酸中和のキャパシティー、硫酸が浸透水や表面流去水によって除去されるスピード等、複数の関連する要因のバランスとして決まることになる。しかし、石炭採掘の際に共に掘削されたパイライトを含む堆積物を地表に露出した場合、こうした関連プロセスがどのような強度とスピードで進行するかは明らかでなく、石炭採掘跡地における緑化・植生回復を行う際の重要な不確定要因の一つとなっており、これらプロセスの実態を堆積物の特徴との関連の下に明らかにすることが必要とされる。

c) 各試験地の造成に用いられた堆積物（土壌母材）の特徴

① PT. Antang Gunung Meratus (AGM) 試験地

PT. Antang Gunung Meratus は Hulu Sungai Selatan 県、Kandangan 市の南に位置し、試験地は 2012 年の初めに採炭時に同時に掘削した堆積物を用いて、採炭ピットを埋め戻して造成された。本試験地には掘削堆積物を用いた埋め戻し区に加えて、採炭前に剥離し別の場所に保管してあった森林土壌を材料とした表土被覆区が設定されている。下で述べるように表土被覆区の用いた土壌は Acrisols に分類される。



写真 3-2-1 AGM における試験地造成の様子。

黒灰色の堆積物を用いて採掘ピットの埋め戻しと試験区の造成が行われた。奥のノリ面には褐色の森林土壌が見え、同様の材料を用い表土被覆処理が行われた。

② PT. Tanjung Alam Jaya (TAJ) 試験地

PT. Tanjung Alam Jaya 予定地は数年前に採炭が行われ、掘削された後放置されていた堆積物を用いて埋め戻しが行われ、写真のような平坦な試験地が造成された。



写真 3-2-2 TAJ 試験地造成時の様子。

全体に黒－黒灰色部分が多いが部分的に黄褐色部分が混在。

本試験地は埋め戻しに用いられた材料が不均一であり、中性－アルカリ性を示す黒灰－黒色の材料が最も広く分布したが、掘削後放置されていた期間に堆積物の一部ですでに酸化が進行した結果、酸性で黄褐色を呈するも部分も混在分布していた。本試験地では表土被覆は行わず、埋め戻し作業時に重機によって填圧・堅密化した土壌の物理性や排水を改善する目的で、重機を用いリッピング処理区が設定された。写真 3-2-3 は造成時の土壌断面写真であるが、土色を問わず、極めて緻密に細粒土壌物質と石礫が圧密された状態で表層土壌を形作っていることが観察される。



写真 3-2-3 AGM、TAJ 試験地の土壌断面。

右は AGM 地区に広く分布する黒－黒灰色の材料、左は数年に及ぶ放置期間中に酸化プロセスが進み黄褐色を呈する TAJ の材料。いずれも造成時に重機によって著しい堅密化が進み石礫の間を細粒物質が密に充填している。

③ 周辺地域の自然土壌の特徴

試験地周辺の地帯は熱帯雨林気候下にあり、FAO の Soil of the World (FAO-UNESCO, 1975)によれば、強い風化の結果としての酸化鉄が卓越する **ferric Acrisols** が主要な土壌であり、これに随伴して河川沿いや排水が劣る場所には次表層－下層土に灰色－灰青色の還元斑を持つ **gleyic Acrisols** が、また高標高の中央山地域には多めの腐植を表層に含む **humic Acrisols** が分布するとされる。

AGM 試験地において表土被覆処理に用いられた材料はこの地域に最も広く分布する **ferric Acrisols** もしくはその近縁の土壌であると考えられる。

なお、**Acrisols** は土壌断面中での粘土粒子の洗脱と集積によって形成された砂質な表層と埴質な下層土を最大の特徴とする湿潤熱帯の代表的土壌であり、熱帯アジアの陸域の約 60%をこの土壌が被覆すると推定され、アジア低地熱帯雨林の大部分がこの土壌の分布域と重なっている。砂質な表層のために土壌浸食が起こり易く、特に傾斜地で植被が失われると激しい表土の流亡が起こることが知られている。また **Acrisols** は高温・多湿な環境の下で強度に風化・溶脱が進んだ結果 **Ca**、**Mg**、**K** などのミネラルに乏しく酸性が強く、粘土はカオリナイトなどの低活性粘土で占められるため養分の保持能力も小さい特徴を持っている。なお、FAO－UNESCO による **Acrisols** は U.S. Soil Taxonomy の **Ultisols**、World Reference Base for Soil Resources (WRB)の **Acrisols** に対応した分類群である。

ii) 土壌モニタリングの方法

a) 土壌 pH と土色のモニタリング

露天掘りで採炭された後のピットは速やかに埋め戻し、再緑化することが義務づけられ

ているが、上で述べたように石炭と随伴して掘削された埋め戻し材料にパイライトが含まれることが少なくなく、その酸化によって生成した硫酸による土壌の著しい酸性化が緑化の障害になる事例がある。しかしパイライトを原因物質とする土壌酸性化の様相やスピードやその変化は不明な点が多く、使用する樹種や採用すべき土壌管理方策を含む具体的な緑化計画の立案と実施の障害となっている。このため本事業では、石炭採掘跡地を対象とした緑化技術体系の構築に貢献することを目標に、石炭採掘跡地で埋め戻しによって造成した試験地において土壌酸性のモニタリングを実施している。なお、本モニタリングについては下で述べる土壌理化学性モニタリングや潜在酸性評価法の開発も含め、研究的要素を持つため、南カリマンタン州の国立大学 **Lambung Mangkrat** 大学農学部土壌学研究室の **Dr. Fakhur Razie** の参画を得て実施している。

① 土壌 pH・土色の調査地点・タイミング・方法

AGM 試験地では「原材料区」と「表土被覆区」の処理毎に 10 点の計 20 点の、TAJ 試験地では「原材料区」「リッピング区」の各 5 点に加え「植穴処理区」に 14 点の計 24 点の定点を設けてモニタリングを行っている。なお、TAJ 試験地の「植え穴処理区」については、初年度の pH 測定の結果、処理の内容を反映していないことが明らかになったため、2013 年 7 月以降はモニタリングを中止し、代わりに「原材料区」「リッピング区」の測定点をそれぞれ 5 点増やし、各処理につき 10 点の定点を設けてモニタリングを実施している。

pH 測定はこれまで、2012 年 5 月、2012 年 9 月、2013 年 2 月、2013 年 7 月、2013 年 11 月の 5 回を実施している。上記各地点においてソイルオガーを用いて、0-10cm、10-20cm 及び 20-30cm の 3 深度の試料をプラスチック袋に採取して実験室に持ち帰り、湿潤試料 10g に対して蒸留水 25cc を加え攪拌後ガラス電極法によって pH を測定した。ただし 2013 年 7 月までの結果を解析したところ、20-30 cm 深土壌の pH はそれよりも浅い土層と大きく変わることはないことが判明したため、2013 年 11 月からは 0-10 cm 0-20 cm のみを測定対象としたモニタリングを行っている。

パイライトを多く含む堆積物は一般に暗色を少ししか含まないものは淡色を呈し、一方酸化の進んだ材料は鉄酸化物や水酸化物によって黄-褐-赤色を示すことが知られている。このため、本試験においても、土色が pH の高低やその変化を反映する可能性が想定されたことから、pH 測定した試料について同じタイミング、深度で土色の測定を行ってきた。土色の記載は新鮮試料についてマンセル土色帖を行った。ただし 2013 年 7 月までの結果を解析したところ、土色と pH の間に一貫した明瞭な関連を見出すことはできなかったため、2013 年 11 月のモニタリングでは土色の測定を実施しなかった。

b) 土壌物理性のモニタリング

露天掘り炭鉱では植生の復元を行う際、採炭後速やかにピットの埋め戻し（バックフィリング）と整地が行われるが、通常、度重なる大型ダンプカーによる埋め戻し材料の搬入

と大型ブルドーザによる平準化作業によって、土壌は填圧され極めて堅密な土壌が形成されることとなる。このように堅密化した土壌は植物根の伸長・展開を物理的に阻害するのに加え、空隙に乏しく通気・透水が制限されることから、排水不良に起因する過湿障害によって植栽樹木の生存・生長が著しく制限される可能性が高い。また、堅密で透水性の低い土壌では雨水の下方への浸透が妨げられる結果、下部斜面方向へ土壌表面を流化するいわゆる表面流去水が増加することで、激しい土壌浸食を引き起こす危険性が著しく高くなる。そのため本事業においては、採炭後の埋め戻し造成地土壌がどのような理学的特性を持つのか、更に堅密化した土壌が植栽木の成長や地表の暴露時間の経過と共に、その理学的性質をどの様に変化させてゆくかを明らかにすることを目的にモニタリングを実施している。同時に、通気・透水性、排水を改善し、植栽木の生存及び成長を補助する効果を期待して、TAJ 試験地ではリッピング処理を行った試験地を設け、その理学的性とその変化についても同様にモニタリングを行っている。

① 土壌理学的性の調査地点・タイミング・方法

理学的性モニタリングは、AGM 試験地では「原材料区」と「表土被覆区」の処理毎に 5 点の計 10 点、TAJ 試験地では「原材料区」と「リッピング区」に各 5 点計 10 点を設定した。これらのモニタリング地点は対応する土壌 pH モニタリングプロットに隣接する地点において土壌 pH モニタリングに影響を及ぼさないよう配慮しつつ試料採取を行っている。土壌理学的性の変化は緩やかであろうと予想されたことからモニタリングは年 1 回の頻度で実施している。

土壌理学的性の測定には 100cc の土壌採取円筒を用い、pH と同様に 0-10cm、10-20cm 及び 20-30cm の各層の中央部分から円筒 2 もしくは 3 個分の非攪乱試料を採取して解析を行っている。また理学的性分析用の試料採取時にプシュコーン型の山中式硬度計を用いて各深度の土壌硬度を測定した（10 回繰り返す）。

採取した非攪乱円筒試料を用いた理学的性の分析は、実験室で行う必要があり時間も要することから、作成したマニュアルに従って Lambung Mangkrat 大学農学部土壌学研究室において行っている。分析は、①細土容積重、②孔隙率、③石礫量である。詳細は土壌モニタリングマニュアルに示した（2012 年度報告書に掲載）。

iii) 土壌モニタリングの結果

a) 土壌 pH の特徴と変化

AGM、TAJ における 2012 年の 5 月、9 月ならびに 2013 年の 2 月、7 月、11 月の計 5 回分の pH(H₂O)測定結果（平均値と標準誤差線）を図 3-2-1 に示した。

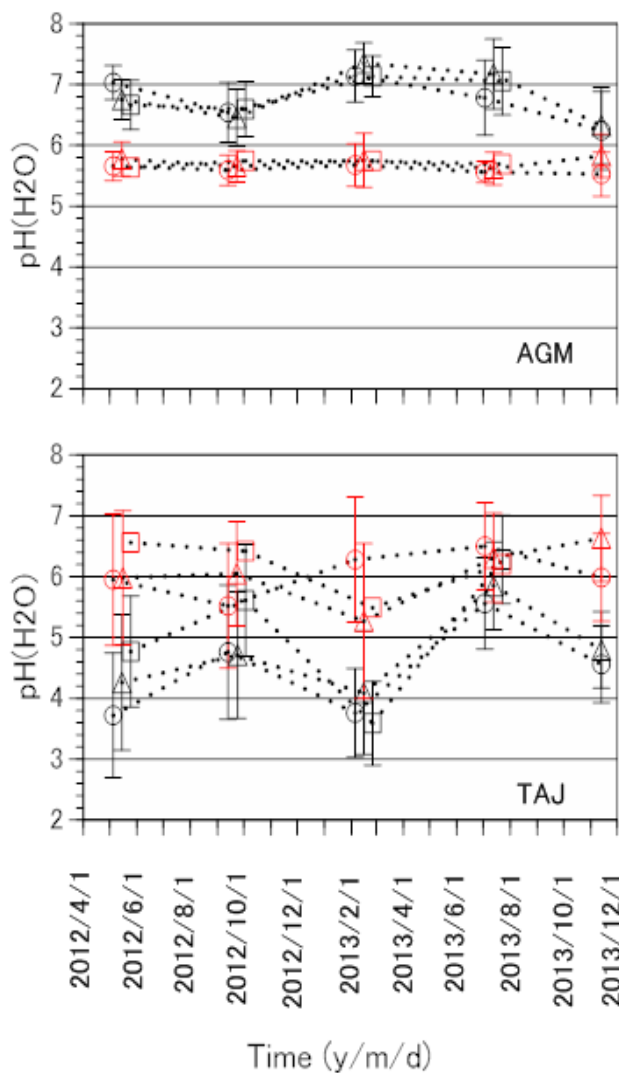


図 3-2-1 土壌 pH(H₂O) の AGM (上図) と TAJ (下図) における変化。測定は/9/23 2012 年の 5 月、9 月ならびに 2013 年の 2 月、7 月、11 月の計 5 回。黒ならびに赤色は対照区と処理区 (AGM は客土、TAJ はリッピング) 。"○, 0-10 cm; △, 10-20 cm; □, 20-30

特性を反映したものであると考えられた。また客土区 pH の標準誤差は小さく、用いられた客土材料が均質であったことが示唆された。

一方、時間を経過した材料 (2003 年採掘物) を用いて埋め戻し・整地が行われた TAJ 試験地対照区の pH は多くが 3.6-6.5 の範囲にあり、AGM 原材料区に比べると相対的に酸性化が進行しているものの、周辺自然土壌に比べれば pH は高く、全般的に未だ酸性化が進行しつつある段階にあると考えられた。また、時間経過に伴う一貫した pH 変化は認められなかった。

AGM 試験地 (上図) の新鮮な埋め戻し材料からなる対照区 (黒印) 土壌の土壌 pH(H₂O)の多くが第一回目測定時に 6.5-7.0 を示したが、その後 9-14 ヶ月後にかけて新鮮堆積物中に含まれる塩基類の風化に伴う解放により pH7.0 前後までやや上昇した後、18 か月後には 6.2 程度までやや低下し、緩やかなアルカリ化に引き続く酸性化傾向が示唆された。しかし周辺地域の Acrisols を中心とする森林土壌の pH が 4.0-5.0 程度であるのと比べ、試験地の新鮮材料区の pH は測定期間を通じて一貫して明らかに高く、酸性化プロセスは全体として緩やかに進行することが示された。採取深さ 0-10、10-20、20-30cm による pH の差は小さく、その差が時間経過と共に一貫して変化する傾向も認められなかった。また誤差線の長さからわかるとおり、新鮮材料区の測定地点による pH 変動は大きく、材料中に含まれる塩基類とパイライトの量が空間的に不均一に分布していることが示唆された。

一方、森林土壌を用いた AGM の客土区の pH は 5.7-5.8 で測定期間を通じて安定しており、深さによる違いも小さく、客土に用いられた周辺土壌の

一方 TAJ 試験地のリッピング区の土壌 pH は 5.5–6.8 の範囲で変動し、全般に対照区よりも高い pH を示した。このため当初、リッピングにより透水性が改善されたことによって材料中に含まれたパイライトの酸化により生成した硫酸の洗脱が促進され、土壌の中性化が進行した可能性を考えた。しかしながら、2012 年 11 月に TAJ の全プロットの表層 pH を測定して解析した結果、対照区とリッピング区の表層 pH の平均（標準誤差）はそれぞれ 5.49 (2.06)、5.32 (2.09) で両者間に有意差 (5%レベル) が認められなかった。このことから、リッピング区で観測された相対的に高い pH は、リッピング区に設けたモニタリング地点が、偶然にパイライト含量が相対的に少ない地点と重なったためと解釈され、リッピング処理が酸性化を緩和した可能性は小さいと考えられた。また、対照区、リッピング共に、図中の長い誤差線が示すように地点による pH 変動が大きく、これもパイライト濃度の異なる材料が不均一に分布していることの反映と考えられた。また対照区、リッピング区共に深さによる一貫した pH の違いは認められなかった。

以上 AGM と TAJ の pH モニタリング結果から、埋め戻しに用いた堆積物は自然状態での風化に伴い徐々に塩基類を解放しその pH を低下させるが、周辺の森林土壌と同程度の pH まで低下するには少なくとも 10 年以上期間を要すること、一方パイライトを多く含む材料は条件が整えば比較的速やかにパイライトの酸化と土壌の酸性化が進行することが予想された。

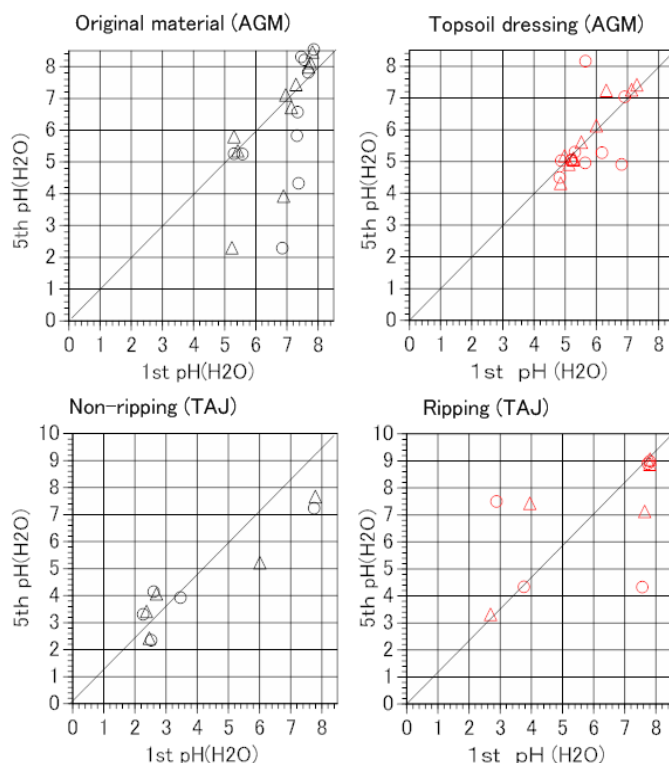


図 3-2-2 各処理区における 1 回目（2012 年 5 月）と 5 回目（2013 年 11 月）測定 pH の関係。 ○, 0-10 cm; Δ, 10-20 cm

このため、更に、18 か月間の pH 変化をモニタリング地点毎に明らかにするため、図 3-2-2 に 1 回目と 5 回目測定のパHをプロットした。

AGM 試験地の原材料区では全 20 試料のうち多くが 1 : 1 の線付近に分布しパイライトを含まない材料の塩基解放による pH 低下は 1 年半程度では進行しない一方で、4 試料で明瞭な酸性化を認め、これらの試料では 1 回目 pH が 5–7.5 程度であったのに対し 5 回目には全て 4.2 以下、2 試料については約 pH2 程度まで酸性化が進行しており、パイライトの酸化とそれによる土壌酸性化は比較的速やかに進行することが明らかであった。一方客土区の pH 変化はいずれの地点でも小さく著しい酸性化は観察されなかった。

また、深さによる一貫した pH 変化傾向は認められなかった。

一方 TAJ 試験地では 全体（対照区、リッピング区）に多くの試料が 1 : 1 の線付近に分布しその pH 域が幅広い（pH2.0－pH9.0）ことから、試験地造成時点で、本来パイライト含量が多い材料はすでに多くが酸化・酸性化していたこと、パイライトを含まない材料は風化による塩基の解放が終了しておらず風化途上にあったこと、が示唆された。一方で 1 回目から 5 回目測定時にかけて、1 試料で著しい酸性化（pH7.5 から 4.2 へ低下）が、2 試料で pH の上昇（pH3.0－4.5 が 7.5 程度に上昇）が観察され、一部の材料は掘削された 2003 年から造成時に至る期間長期にわたってパイライトが酸化を免れて保存され、造成に伴う露出と共に酸化・酸性化が進行した可能性が、また一部材料では酸性化した材料と塩基を含む材料が造成時に混和され、酸性環境下で塩基の解放が促進され土壌酸性の中和とアルカリ化が進行した可能性が示唆された。ただし、pH のモニタリングは同一地点で行うものの、毎回採取する位置は少しずつ移動し毎回試料は同一ではないことから、地点近傍の小範囲でパイライトの含量などを異にする材料が不均一に分布している場合は、1 回目と 5 回目に見られる pH の差は時間経過に伴う変化を反映しておらず、単に材料の分布の不均一性の表れである可能性もあり、今後のデータ蓄積と解析が必要である。

b) 土壌養分の特徴

AGM、TAJ 両試験地の表層土壌（0-10cm）における N、P 含量を 2013 年 11 月に測定し、図 3-2-3 に示した。図中にはカリマンタン島の典型的な森林土壌と考えられる東カリマンタンの低地フタバガキ科林表層土壌のデータを比較のため併せてプロットした。

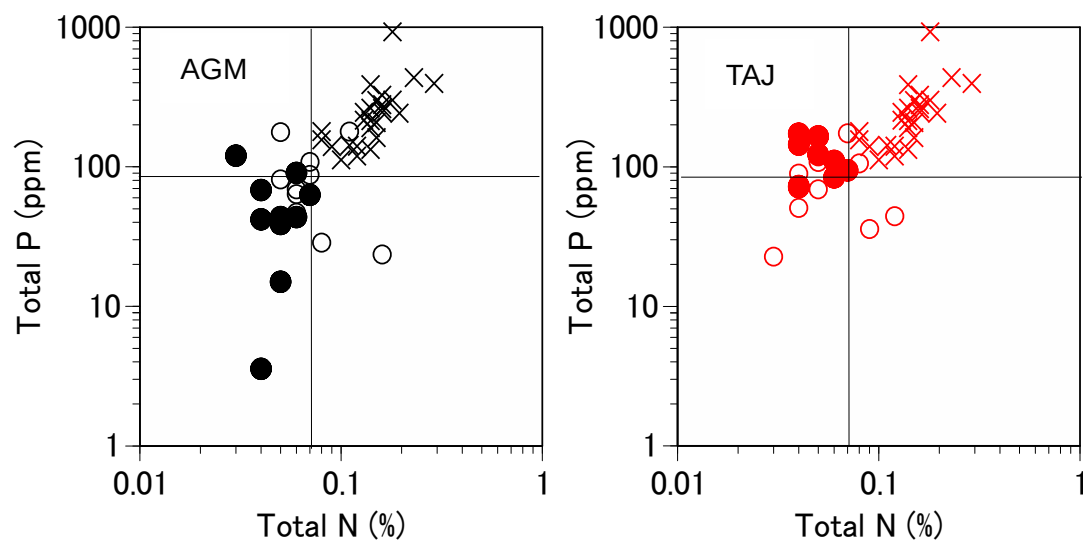


図 3-2-3 AGM、TAJ における無処理区（原土区）、処理区（表層土客土区（AGM）もしくはリッピング区（TAJ））ならびに天然林表層土壌の全窒素と全リン含量（○，原土区；●，処理区；×，ブキットスハルト天然林表層土）

AGM 原材料区表層土の全窒素含量は 0.06%を上回ることではなく、また全リン含量はすべて百数十 ppm を下回り、中には 10ppm 以下の試料も含まれていた。これら両元素の含量は自然林表層土壌では窒素 0.07%以上、全リン 100ppm 以上でありこれに比べ、調査地土壌では明らかに低く、強い養分制限を受けていると考えられた。全リンについてはその一部だけが可給態であり、これをもって直ちにリン肥沃度を表すことはできないが、全体のリンプール量の小ささは、相対的なリン肥沃度の低さを表すことには違いがないといえよう。

TAJ 試験地の土壌も AGM 同様に窒素含量は極めて低くいずれも 0.08%以下であった。土壌中の窒素は一部大気からの投入があるのを除けば、多くはマメ科植物などが微生物との共生を通じ大気中から固定した窒素、あるいは一群の窒素固定土壌微生物群が固定したものであり、植物の存在が土壌窒素プールの拡大と維持を保証している。このため採掘後時間を経ない AGM の材料は無論、採掘後時間を経た TAJ の材料にあっても植生の定着が行われることなく保存されていた場合には土壌窒素プールの拡大は望めないものと考えられる。TAJ 試験地土壌の全リン含量は AGM に比較すればややレベルが高く、天然林表層土のうちリンレベルの低い試料と同程度であった。

c) 土色の特徴と変化

AGM、TAJ 地区の土壌土色をマンセル測色系によって 2012 年 5 月、2012 年 9 月、2013 年 2 月、2013 年 7 月の 4 回にわたって記載し、L*、a*、b*測色系に換算した。L* は明度を表し値が小さいほど黒味が強く、a*は赤－緑の強さを表し値が大きい程赤味が強く、b*は黄－青の強さを表し値が大きい程黄味が強いことを意味している。図 3-2-4 にそれぞれの土色パラメータの経時的変化を示した。

AGM 試験地の多くの土壌試料で L*の経時変化は比較的小さい一方、原材料区は客土区に比べ全体に黒味が強く 14 カ月後にはその差が拡大する傾向を示した。本来未酸化で暗色の原材料区で特に激しい表土流亡が進行した結果、より未酸化の下層が露出した結果 L*の低下が起こった可能性が疑われた。一方、原材料区は客土区より一貫して赤味 (a*) が弱く鉄の酸化が未進行であることがその原因と考えられた。a*は 1 回目から 3 回目にかけていったん上昇傾向を示したのち 4 回目にかけて急激に低下したことから、地拵え後 1 年程度は鉄の酸化物の生成や酸化物の形態変化によって赤味の増大が起こったが、時間経過と共に土壌侵食によって鉄酸化物を含む細粒物質の流亡が進行し赤味の消失が進んだと推定された。黄味 (b*) もまた赤味と同じく、一貫して客土区よりも原材料区で弱く、相対的に未酸化で鉄酸化物の量が少ない原材料の特性を反映したものであった。また黄味は観察期間中、客土区、原材料区共に一貫して低下を続け、観察期間前半 (1-3 回目) には鉄酸化物が黄色系から赤色系の化合物へ形態変化した可能性が、後半 (3-4 回目) には酸化物に富む細粒物質の土壌流亡による損失が起こった可能性が、それぞれ示唆された。

TAJ 地区の無処理区、リッピング区の L*は観測期間中に比較的大きな変動を示し、1-2 回目、3-4 回目には上昇、2-3 回目には低下した一方、当初ならびに 14 カ月後には処

理区にかかわらずほぼ同程度の L^* となった。一方、TAJ 地区土壌の赤味 (a^*)、黄味 (b^*) は共に AGM 地区より全体に弱く、赤味は大部分の地点・深度で大きな経時変化を示さなかった。黄味はリッピング区では 1-3 回目まではほぼ一定であったが 4 回目にかけて急激に低下する一方、無処理区では一貫して低下を続け、両区共 14 ヶ月後には全ての試料で極めて低い値まで低下した。こうした赤味、黄味が弱くしかも時間と共に更に減少するのは、地拵えの時点で既に土壌細粒物質がかなりの程度失われていた、もしくは材料が元来砂質で鉄の存在量が少なかったこと、さらに地拵え後にあっては土壌侵食による細粒画分の流亡が起こったためと考えられた。また、リッピング区で当初 (1-3 回目)、黄味が維持されたことから、リッピングによる排水の改善により一時的に土壌流亡が抑制された可能性が示唆された。

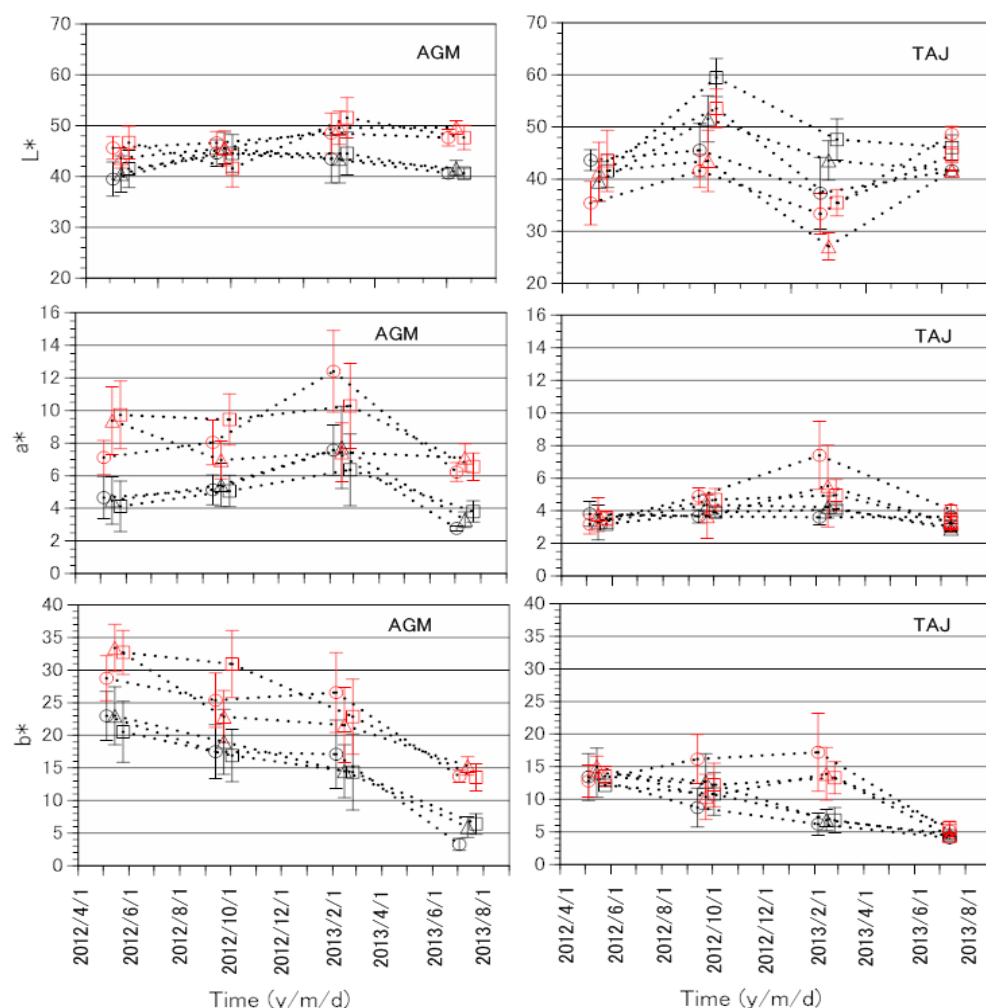


図 3-2-4 AGM、TAJ 地区における土色 (マンセル土色を L^* 、 a^* 、 b^* に換算表示) の変化 (2012 年 5 月、2012 年 9 月、2013 年 2 月、2013 年 7 月の 4 回)。黒と赤はそれぞれ対照区と処理区 (AGM は客土、TAJ はリッピング)。○, 0-10cm ; △, 10-20cm ; □, 20-30cm)

d) 土壌理化学性の特徴と変化

図 3-2-5 に 2012 年 11 月ならびに 2013 年 11 月に測定した容積重（細土容積重）と孔隙率（全孔隙率）を示した。2012 年 11 月時点で、AGM 試験地土壌のほぼ全ての試料で、深さに関わらず、容積重は 1.5Mg/m^3 を超え、周辺地域の森林土壌の容積重は多くが 1.0 内外であるのに比べ極めて堅密な土層を形成していることが明らかであった。また処理区間で明瞭な違いはなく、客土区の表層も著しく堅密化していた。孔隙率もいずれの試料でも 40%を超えず、自然土壌ではほとんどの場合 40%を下回ることにはないのに比べ極めて低い値を示した。このように、AGM 土壌は当初、大型ダンプによるピット埋設材料の搬入と重機による整地が行われた結果、土壌は堅密化し通気透水性は極めて劣悪となり、植物根の発達・伸長が強く制限されると共に、雨水の下方浸透の制限による表面流去水の増加によって表土流亡が加速されたと推定された。

一方 TAJ 試験地の土壌は AGM 試験地に比べ、全体に容積重は低く、 $1-1.5\text{ Mg/m}^3$ の範囲に多くの試料が分布するが、一部に 1.5Mg/m^3 を超えるものが含まれた。また、リッピング区の表層（0-10cm、10-20cm）は相対的に容積重が小さい傾向（ $1.0-1.3\text{Mg/m}^3$ の範囲）があり、当初はリッピングによって理化学性が若干改善された可能性が示唆された。また、孔隙率は何れの処理区でも 40%を超えず、特に対照区（非リッピング）には極めて低孔隙率（<20%）の試料が含まれていた。

1 回目の 2012 年から 1 年後に測定した理化学特性は大きく変化しており、特に容積重の顕著な低下が特徴的であった。

AGM 試験地の 2 回目（2013 年 11 月）測定の容積重は $0.7-1.5\text{ Mg/m}^3$ の範囲にあり、いずれの処理区でも少なくとも細土画分に着目すれば堅密度は減少しており、特に原材料区に比べ客土区での容積重低下が顕著であった。一方、全孔隙率はいずれの処理区でも 1 回目測定値から 12-28%程度の範囲にまで減少し、特に原材料区でその傾向が大きかった。

また、TAJ 試験地においても AJM 試験地同様に、1 回目測定時から 2 回目測定時にかけて容積重の低下と孔隙率の減少が並行して進行したが、AGM に比較すれば全体に容積重が小さく孔隙率が低い傾向を認めた。また処理区間で比較すれば、リッピング区での孔隙率の減少程度が非リッピング区よりも小さい傾向が認められ、リッピングによる物理性改善効果が比較的長期にわたって持続する可能性が示唆された。

一方で、容積重（細土容積重：（細土画分の重量）/（細土画分の占める容積））が低下すれば（軽しょうになれば）、並行して孔隙率（採土円筒容積に占める全孔隙%）も上昇するのが一般的であるが、本事業試験地においてはいずれも容積重が低下しているにも関わらず孔隙率は低下する傾向にあり、「土壌が粗しょうとなり孔隙が増加する」といった一般的な物理性変化とは異なる現象が 1 年間の間に進行したことがう窺われた。

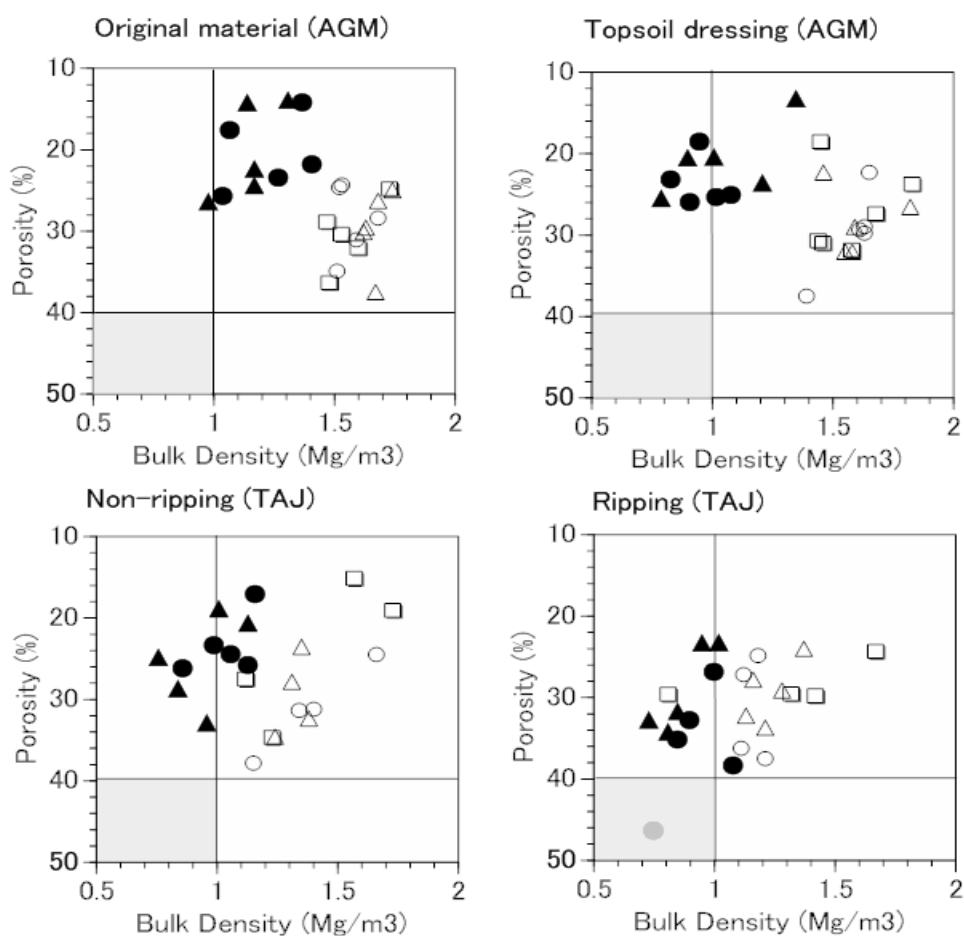


図 3-2-5 AGM、TAJ 試験地土壌の容積重と孔隙率とその 1 年間の変化
白抜、2012 年 11 月測定；黒抜、2013 年 11 月測定

このため、土壌採取円筒によって採取された試料中に占める細土、礫、孔隙の体積割合を算出して図 3-2-6 に示した。その結果、AGM 試験地の第 1 回目測定時の採土円筒試料の多くはほとんど礫を含まず、細土容積が 60–80%、孔隙が 20–40%を占めていた。一方 2 回目測定時には細土容積が急減し 15–40%に、孔隙は大きく変化せず 20–40%を維持したが、礫体積は 30–70%にまで顕著に増加していた。

また TAJ 試験地では、埋め戻しに用いた材料が本来礫質であったか堆積保管中に細粒物質を多く失ったことで、多くの試料が当初から 0–50%の礫を含む一方細土体積は 30–80%、孔隙量は概ね 20–40%の範囲にあったが、1 年後には、すべての試料が多量の礫を含み (30–70%)、それと並行して全容積に占める細土の体積割合は著しく低下 (15–20%) したことが明らかであった。

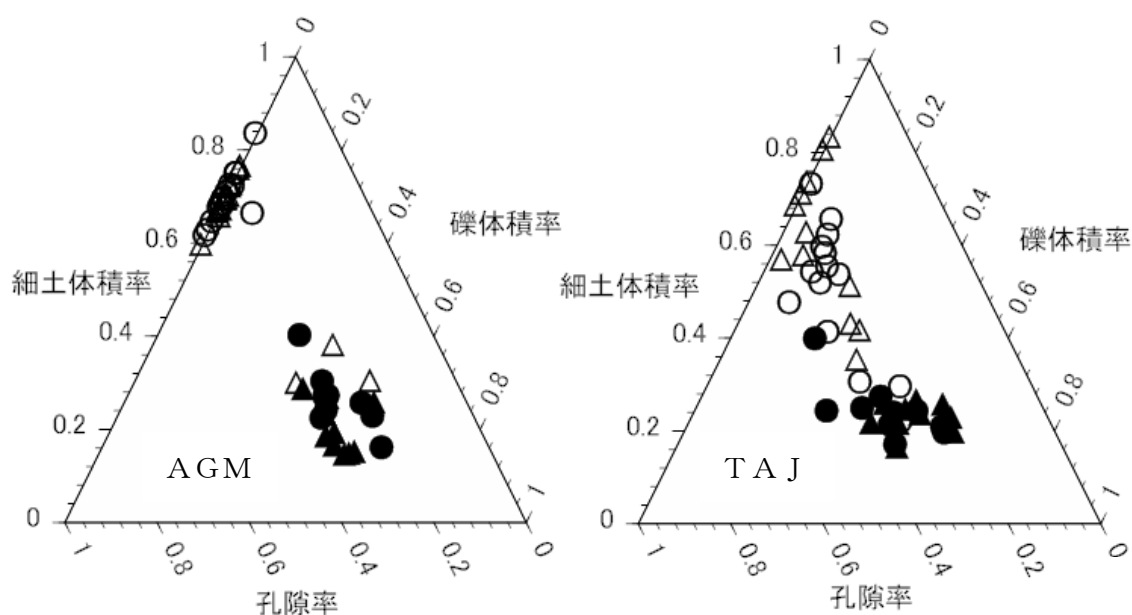


図 3-2-6 細土、礫、空隙割合と1年間の変化。(白抜は1回目；黒抜は2回目の測定結果：△は対照区、○は処理区)

以上の結果から、両試験地の土壌は当初、大型ダンプによる埋め戻し材料の搬入と重機による整地作業に伴って土壌は著しく堅密化し、細粒物質・礫等の土壌物質が極めて密に充填され孔隙に乏しい土壌環境が形成されていたと考えられた。こうした劣悪な理学的で特徴づけられる土壌環境下にあつて、雨水の土壌深部への下方浸透が妨げられることで表面流去水が著しく増大し、加えて植生による土壌被覆のない条件と降雨強度の大きな湿潤熱帯の降雨が相まって、表層土壌は激しい侵食に曝されたと考えられる。その結果、時間と共に表層土壌中の細粒土壌物質は流亡し、土壌空間の極めて大きな割合を石礫が占めるに到ったと推定された。1回目と2回目調査時の土壌断面の形態的特徴にみられた変化もこうした仮説を支持するものであった。

上記のように土壌理学的変化は激しい土壌流亡がその一因であると考えられたが、現地調査においても、写真 3-2-4~7 に示したように、AGM 試験地全域で激しいシート、リル、ガリーエローションの発生が観察され、地拵え斜度が 3-5° とやや急であったことが土壌浸食を加速させた原因の一つと考えられた。一方で AGM の客土処理区では、客土中に含まれていた埋土種子から *Trema* 等のパイオニア種が急速に発芽・定着したことで比較的速やかに土壌表面が被覆された箇所もあり、そうした場所での土壌流亡は相対的に少なく、迅速な土壌被覆が重要であることが明らかであった。一方で、埋土種子を含まない原材料区(対照区)では植生の再生はなく激しい土壌流亡が進行したが、表土の流亡に伴って地表に露出する石礫の占める面積が徐々に増加するに伴い、少なくとも雨滴衝撃が緩和



写真 3-2-4 AGM 試験地原材料区で観察されたガリーエロージョン。



写真 3-2-5 AGM 試験地原材料区における激しい表土流亡。遺棄されたプラスチックポットの下に 10cm 程度の土中



写真 3-2-6 AGM 原材料区の地表は、細粒物質が流亡した結果、著量の石礫が地表を覆っている。



写真 3-2-7 TAJ リッピング区では凸部の細粒物質が凹部へ再堆積し、雨水は凹部沿いに緩やかに排水される。

され浸食の進行速度が緩和されたことが現地観察結果から推定された。

一方 TAJ 試験地は AGM 試験地に比べて地盤傾斜が緩やかで (1° 内外)、土壌細粒物質の輸送エネルギーは小さく土壌流亡強度は相対的に低いと考えられた。また、リッピング区では凸部の細粒物質が洗脱され凹部に再堆積すると共に、雨水は凹部を伝い緩やかに排水が進行することが観察された。

以上の観察結果から、地盤傾斜は細粒物質の輸送エネルギーを小さくするため、ごく緩やかに設定する必要があること、リッピングによって透水性改善と緩やかな排水の確保を図ること効果的であること、カバークロップ等による早急な土壌被覆が不可欠であること、雨滴衝撃の緩和には石礫を用いた地表被覆も効果を発揮する可能性があること、等が指摘された。

2) 潜在酸性判定手法の開発

i) 簡易な潜在酸性評価手法の必要性について

上で述べたように、石炭採掘と同時に掘り出された堆積物がパイライトを含んでいると、地表に露出し酸化環境下に置かれた際にパイライトが時間と共に微生物プロセスを経て酸化され硫酸が生成し、土壌の顕著な酸性化を引き起こすことがある。一般に、パイライトを含む堆積物を原材料とする土壌の酸性の強さは、大きくは堆積物が含むパイライトの量と堆積物が持つ硫酸中和のキャパシティー等の要因間のバランスとして決まる。パイライト含量が高く中和キャパシティーの小さい材料の場合、極端な例では土壌の水懸濁試料について測定した土壌 pH(H_2O)の値が 3 を下回り 1 に近いレベルまで時間と共に酸性化が進行することもあり、こうした材料は強い潜在的酸性を有しているといえることができる。強い酸性が発現した土壌条件下での植生復旧は極めて困難とならざるを得ない。このため、石炭採掘跡のピットを埋め戻して植生の復旧を目指す際には、パイライトを含まず潜在酸性を有しない堆積物を選んで埋め戻し材料とすることが一義的に重要であり、堆積物の潜在酸性をあらかじめ判定することが必要となる。

潜在酸性を推定するには大きくは、パイライトに含まれる硫黄を分別抽出して酸性の発現に関与する硫黄を直接定量し潜在酸性を推定する方法と、試料を過酸化水素水によって化学的に酸化し生成する水素イオン量を滴定し潜在酸性を推定する方法の二つがある。しかしながら、これらの推定法はいずれも実験室での分析を基礎とし高度な専門的知識を要することから、採掘ピットから産出する数多くの種類の堆積物を、随時、個々に分析するのはコストや手間を考えると現実的ではない。このため本事業では今年度、現場で簡易に潜在酸性を推定するための方法の開発を試みた。

ii) 簡易潜在酸性評価法に関するマニュアルの策定

潜在酸性評価法は豪州クイーンズランド州による「“ASS laboratory methods guidelines” by QASSIT, Qld NRM&E, SCU, NatCASS, QSAAMAC & ASSMAC」のうち、野外判定法 (Field pH test) に準じ一部改定してマニュアルを策定した (巻末試料として添付)。ま

た、実験室的手法のうち相対的に容易と考えられる、酸度を滴定によって塩基による中和キャパシティーを原子吸光法で測定する方法についても上記出典に準じて英文マニュアルを作成した（巻末資料として添付）。

野外において潜在酸性を簡易に判定するには、野外 pH (pH_F) ならびに試料を過酸化水素で強制酸化した後の pH (pH_{ox}) を測定することで行う。ここで述べる方法は最小限のコストと器具により簡便かつ迅速に潜在酸性を評価できる方法であり、顕在酸性と潜在酸性のレベルを定性的に指標することが可能である。

a) 測定法

野外 pH の測定は試料採取現場で行うことが望ましいが、それが困難な場合でも試料採取後遅くとも 24 時間以内に行う。方法概要は下記のとおり。

① 野外 pH (pH_F) の測定

- ✓ pH メーターのスイッチを入れ校正を行う。
- ✓ ガラス製試験管（直径 20 mm 長さ 200mm 程度のもの）を金属製試験管ラックに用意する。 pH_{ox} 測定時の激しい反応によるコンタミネーションを防ぐため、試験管立ては pH_F 用と pH_{ox} 用を別々に用意する。
- ✓ 茶さじ一杯程度の試料を分け取り、その半分の pH_F 用試験管に残りの半分の pH_{ox} 用の試験管に入れる。これら二つのサブサンプルは同一の敵対的特徴を同じくする堆積物に由来するものであることが重要である。例えば、一方は灰褐色であるがもう一方には黄色の斑紋がみられるといった試料を用いると誤った結果を導くことになる。
- ✓ pH_F 用の試験管に蒸留水もしくは脱イオン水（水道水やミネラルウォーターなどを用いてはいけない）を深さ 3cm ほど入れ、プラスチック製の攪拌棒（長さ 30cm 程度のものが使いやすい）を用い、試料中の塊が無くなり泥状になるまで攪拌する。
- ✓ 直ちに pH メーターの電極を試験管に入れ読みが安定するまで待って pH_F を測定し、測定値を記録する。

② 強制酸化 pH (pH_{ox}) の測定

- ✓ 30% の過酸化水素水を用意し、現地に出掛ける前にその pH を 4.5-5.5 に調整しておく。pH の調整は pH メーターでモニターしながら稀 NaOH 溶液を数滴ずつ加え目標の pH レンジに合わせる。一旦 pH 調整した過酸化水素水を 15 分間放置した後、再度 pH をチェックしておく。pH 調整する過酸化水素水は概ね 1 カ月で使い終わる量とし、冷蔵庫に保存する。さらに、現場へ出かける日の朝、過酸化水素の pH が調整したレンジにあるか再度チェックする。
- ✓ 電源の入っている pH メーターの校正を行う。
- ✓ ガラス製の試験管を金属製の試験管ラックに用意する。試料に硫化物や有機物が含ま

れる場合、過酸化水素による酸化反応でかなりの発泡が起こるため、試験管は広口で背の高いもの（直径 20mm 長さ 200mm 程度）が望ましい。

- ✓ pH_F の測定に用いた試料の残り茶さじ半分量の試料を pHox 用の試験管に入れる。
- ✓ 30%の過酸化水素水（pH 4.5–5.5 に調整したもの）を 1-2ml 程度（試料が過酸化水素水に浸る程）加え、試験管を軽く振って内容物を撹拌する。

過酸化水素水と試料の反応物が試験管から溢れないよう、一度に数 ml 以上を加えてはいけない。

- ✓ 試料と過酸化水素水との反応強度を下の表 3-2-1 に従い X–XXXX スケールでレーティングし記録する。
- ✓ すべての反応が終了するまで約 15 分間放置する。試料が硫化物を多いと、ほぼ即座に激しい反応が起こりその場合は試料を撹拌する必要はない。もし反応が激しく試料と過酸化水素水の混合物が試験管から飛び出したり溢れ出したりする場合は、洗瓶か駒込ピペットで少量の蒸留水（あるいは脱イオン水）を加え冷却して反応を静めてもよい。通常はこれによってオーバーフローを防ぐことができる。ただし、あまり多量の蒸留水を加えると希釈されて pH が変わるため、反応を静める最小限の蒸留水を加えることが重要である。
- ✓ 試料 - 過酸化水素水の反応が緩やかになるまで、上記の 5–7 番目の操作を繰り返す。
この操作によって大部分の硫化物を反応させることができる。実験室では完全に反応が起こらなくなるまでこの操作を繰り返すが、野外では通常に 1–2 回余分に数 ml の過酸化水素水を加えれば十分である。
- ✓ もし反応が開始しない場合は、試料 - 過酸化水素混合物をのこった試験管を直射日光に当て初期反応の開始を助ける。試料が発泡を開始したら直ちに試験管ラックに戻す。
- ✓ 試料 - 過酸化水素混合物を放冷する（最長 10 分ほどを要する）。
- ✓ pH メーターの電極を試験管に入れ読みが安定するまで待って pHox を測定し、測定値を記録する。

③ 過酸化水素による酸化反応のレーティング

酸化反応の強さは一般に含まれる硫化物量と比例するが、一方で土性や他の含有物の種類や量によっても異なる。例外はあるものの、ごく少量の硫化物を含む試料の場合は「X」に、一方で硫化物含量の高い試料の場合は「XXXX」にレーティングされることが多いと予想される。しかしマンガンや有機酸を含むその他の要因が反応を進めるため、本レーティングのみで潜在酸性の有無とその強さを予想してはならない。ちなみに、有機物との反応ではより多くの発泡が見られ、硫化物との反応に見られる激しい発熱は見られないことが多い。またマンガンの反応は極めて激しいが pH を低下させる傾向はない。下の表 3-2-1 に pHox テストのレーティング法を下に示した。ただし、過酸化水素との反応の強さは有用な指標となるが単独で用いることはできない。有機物やマンガンも激しい反応を起こすため、とくに有機物を多く含む試料は注意が必要である。

表 3-2-1 pHOX テストにおける反応レーティング

反応スケール	反応レーティング
X	微弱
XX	中程度
XXX	激しい
XXXX	極めて激しく、ガスの発生、発熱（一般に >80° C）

④ 野外 pH テストの解釈

下記の 3 つの要因を組み合わせ、野外で硫化物の有無を判定することになる。

- (i) 過酸化水素との反応の激しさ
- (ii) pH OX が pH F の違い、および
- (iii) 実際の pH OX 値

- ✓ pHox と pHF の差（ $\Delta\text{pH} : \text{pH}_F - \text{pHox}$ ）は未酸化の硫化物の量が多いほど大きくなる
と考えられ、潜在的酸性硫酸塩土壌/堆積物（PASS）の存在を示す指標となる。pHox
が pHF よりなくとも 1.0 低いと、潜在的な酸性硫酸塩堆積物（あるいは土壌）であ
る可能性がある。ただし下記の pHox 自体の値が低いとさらにその可能性が高い。
- ✓ pHox が 3 未満で、他の二つの条件を満たせば、硫化物の存在が強く疑われる。更に、
3 以下への pH 低下量が多いほど硫化物の存在の可能性がより高くなる。pHOX が
3-4 の場合は多量の硫化物が含まれている可能性はより低くなるが、正確な評価は実
験室での分析が必要である。
- ✓ pHOX が 4-5 の場合は硫化物が存在するとも存在しないとも断言できない。少量の
硫化物が存在する可能性や、多量の炭酸塩を含むために生成された酸が中和された可
能性も否定できない。また有機酸の生成も pH 低下をもたらすため、正確な評価のた
めには酸化可能な硫化物量を実験室で定量する必要がある。
- ✓ pHOX が 5 よりも高く、過酸化水素酸化による pH 低下がほとんどないか僅かである
場合は酸性化の可能性はほとんどないと考えられる。

iii) 潜在酸性簡易判定手法の開発

a) 試料とその形態的特徴

① 試料

潜在酸性簡易判定は石炭採掘ピットの埋め戻しに用いる材料からパイライトを含み潜
在酸性を持つ堆積物を選別しこれが埋め戻し時に地表に露出することを防ぐことがその
主な目的となる。このため、多様な堆積物を対象として行うことが想定され、本手法開発

においても、採掘跡ピットの壁面に観察される累層の多様な堆積物を対象として実施することとした。

AGM 社の採掘跡ピットにおいて、ピット壁面下部を徒歩で移動しながら、壁面を斜行して累積する異なる堆積層を対象として、粒度等の形態的特徴の記載、土色計による色の測定、潜在酸性（pHox）の測定に用いるための試料の採取を行った（写真 3-2-8）。

また、堆積物の形態や色などの変異と潜在酸性の強弱との間に関連性が存在するか、また関連性があるとすればどのように定式化することが可能かなどを明らかにするため、できるだけ多数の試料を扱うことが必要と考え、AGM 社の 2 つの異なる採掘跡ピットにおいて幅広い形態的特徴を持つ約 100 の堆積層を対象として観察ならびに試料採取を行った。



写真 3-2-8 採掘跡のピットの壁面に露出する多様な堆積物を対象に形態観察ならびに試料採取を行った。

②粒度

採取した試料はごく砂質なものから極めて埴質な堆積物まで幅広い変異を含んでいた（写真 3-2-9）。一般に砂質な堆積物は固結しているのに対し、埴質な堆積物は湿潤な状態では相対的に柔らかくチーズを切るようにナイフで切ることができる。指の触感によって粒度を判定し野外土性を記録した。

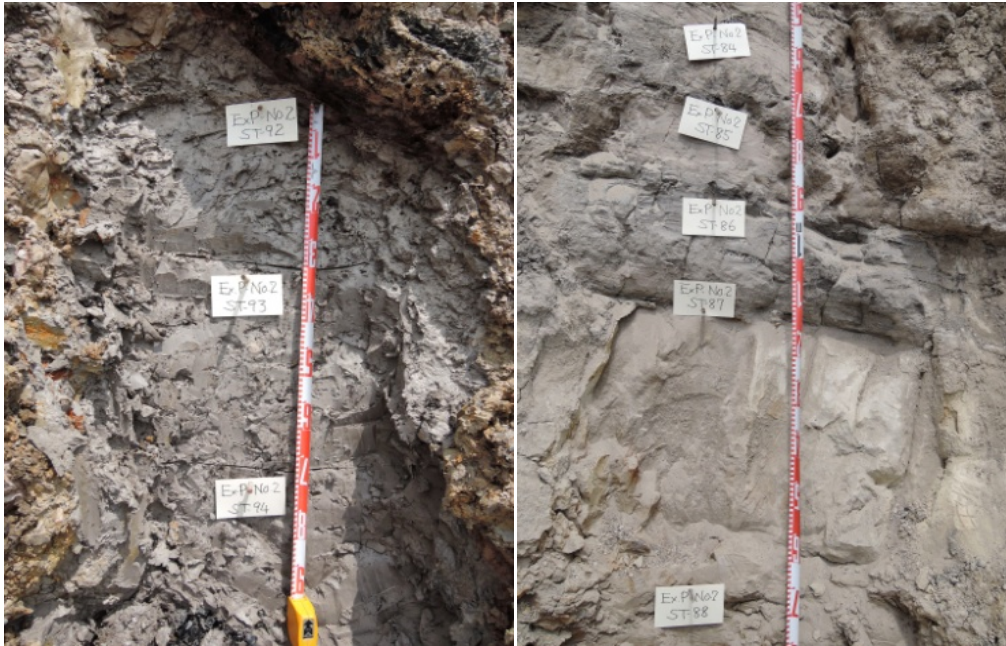


写真 3-2-9 堆積物の粒度は極めて粘土質なもの（左写真）なものから極砂質なもの（右写真）まで幅広い変異が観察される。

③マトリクス色

マトリクス色には幅広い変異が観察され、淡灰色・灰色・暗灰色・黒褐色まで幅広い変異が観察された（写真 3-2-10）。一般に砂質な堆積物の多くが灰色－灰色を呈する一方、粘土質な堆積物には灰色－暗灰色－黒褐色まで幅広い色の変異が見られるのが特徴であった。



写真 3-2-10 堆積物は淡灰色（左写真）から暗褐色（右写真）まで幅広い変異が

④ラミナ構造

堆積物の中にはマトリクス中に相対的により多くの有機物を含む暗褐色のラミナ状構造を持つ物と持たないものが観察されたため、その有無を記録した（写真 3-2-11）。

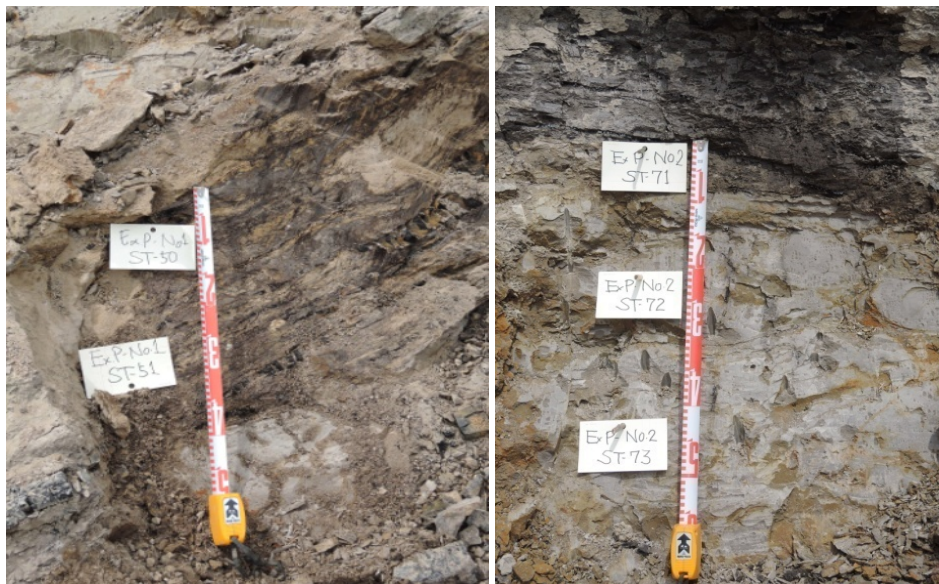


写真 3-2-11 堆積物中にラミナ構造を持つもの（左）と持たないもの（右）があ

ラミナ構造の有無は堆積物の色や粒度と明確な関連は認められず、淡灰色の砂質な堆積物中に暗灰色のラミナ構造が、褐色の粘土質の堆積物中により暗褐色のラミナ構造が観察されることもあった。

b) 土色計を用いた現地にける土色の測定

上で述べたように堆積物は色において極めて多様であり、一般にパイライトは暗灰色を呈することから、色によってパイライトの有無を判定できる可能性がある。このため、現地採掘ピット壁面において、対象とする堆積物の色を、土色計（コニカミノルタ社製 SPAD-503）を用いて測定し、 $L^*a^*b^*$ 色空間座標で結果を表した。

堆積物表面は採掘時から長時間を露出しているため、写真 3-2-12（左）のように表面は酸化鉄の被膜によっておおわれていることが少なくない。このため、色を測定する際には、対象とする堆積層の表面をナイフで削り取り未酸化の新鮮な堆積物に平滑面を作成し、これに土色計を押し当てて色の測定を行った。また、堆積層の色は必ずしも完全に均一でなく、多くの場合同一の堆積層にあっても若干の色の変異を含んでいる。このため、対象とする堆積層の色を代表する数値を得る目的で、1つの堆積層について 10 回の測定を行い、得られた L^* 、 a^* 、 b^* それぞれについて平均値を算出し、当該試料の色とした。測定は湿潤な状態の試料について行った。



写真 3-2-12 時間を経た堆積層の表面は酸化鉄の被膜によって覆われているため（左）、ナイフで表面の酸化した部分をはぎ取って新鮮な材料を露出させた後に、土色計を用いて色の測定を行った(右)。1つの層に対して 10 回測定を繰り返し、平均値を算出した。

c) 過酸化酸素酸化前後の pH

対象とした堆積層からそれぞれ約 100g 程度の試料を採取しジッパー付きプラスチック袋に入れて密封した。密封した試料は半日以内に現地事務所に持ち帰り、酸化反応を抑制するために直ちに冷蔵庫に保存した。（可能であれば、試料採取後直ちに現場で冷剤を入れたクーラーボックスに保存し酸化を抑制することが望ましい。）

現地事務所持ち帰った試料について、上で述べた潜在酸性の測定法に従って、酸化前の pH (pH_F) と過酸化水素によって酸化した後の pH (pH_{Hox}) を測定した。また、酸化反応の強さを上記の方法に従ってレーティングを行った（写真 3-2-13）。



写真 3-2-13 現地事務所での過酸化酸素による酸化と pH_{Hox} の測定。試料によって、激しい発泡、発熱がみられる。

d) 現場で測定された潜在酸性と土色、ならびに両者の関係

図 3-2-7 に過酸化水素による酸化前の pH(H₂O)と酸化後の pH_{ox} をプロットした。酸化前の pH は 3–8 の広い範囲に分布したが、酸化することで多くの試料の pH は低下し、半数以上の試料で pH3 以下、低いものは pH1 台の極めて強い酸性を呈するに至った。また pH の低下量は一様でなく変動が大きい試料では 4 ユニットもの低下が観察された。これらの結果から、AGM 社の採掘ピットから採取した試料の多くがパイライトを含む可能性が高い一方、その含有量は試料で大きく異なることが示唆された。一方で、一部試料の pH は過酸化水素による酸化の後明瞭に上昇し、高いものは 8 に達した試料も見られ、酸化反応のプロセスで多量の塩基類（おそらく炭酸カルシウム由来の Ca が主体か？）が解放されたものと考えられた。なお、明瞭な pH 変化が見られない試料は一部に限られた。

反応のレーティングと酸化後 pH_{ox} の間、あるいは酸化による pH 低下量の間には一貫した関連は見られず、潜在酸性の判定に反応強度を参考にすることは実際上困難であると考えられた。

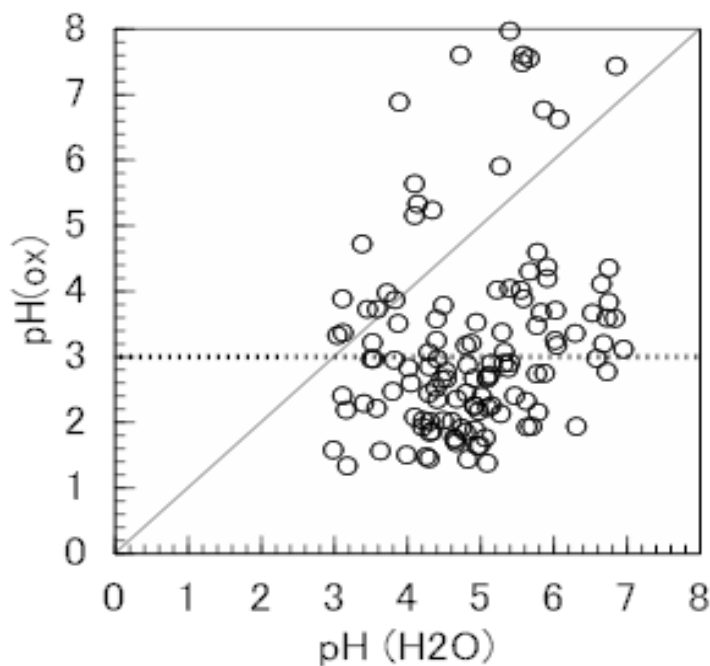


図 3-2-7 過酸化水素による酸化前ならびに酸化後の pH

パイライトを含む堆積物の多くが暗灰色を呈することから、堆積物の色を指標にして潜在酸性を判定する可能性について検討した。土色は上で述べたように L*a*b* 色空間座標で表現され、L*は明度を示し値が大きいほど明るく（白く）、小さいほど暗い（黒く）ことを意味する。また a*と b*はそれぞれ赤－緑の強さと黄－青の強さを表し、それぞれの値が大きい程赤味が強く黄味が強いことを意味する。

これら 3 つの色を表す指標と過酸化酸素酸化後の pH_{ox} の関連について検討した結果、

a*、b*と pHox の間にはいずれも明瞭で一貫した関係性は認められなかったが、L*については pHox と明瞭な関係をもつことが示された。

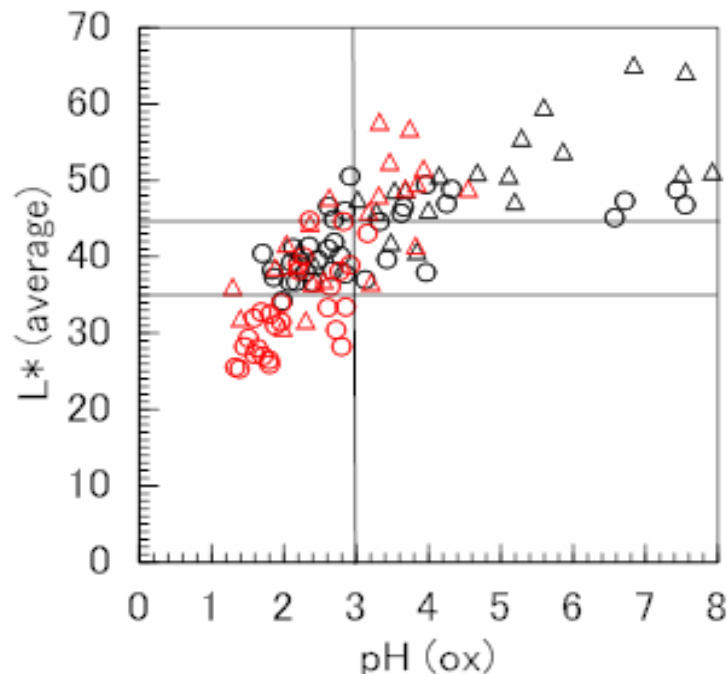


図 3-2-8 L*(明るさの指標)と潜在酸性 (pHox) の関係

(○、粘土質・ラミナなし；○、粘土質ラミナあり；△、砂質ラミナなし；△、砂質ラミナあり)

図 3-2-8 に L*と pHox の関係を示した。酸化後の pHox は 1–8 の範囲に広く分布し、試料によってパイライトの含量が大きく変異する可能性が示唆された。また L*も 25–65 の範囲に広く分布し幅広い明度の試料が含まれていることがわかる。更に、pHox と L*の間にはグラフに見えるような明瞭な正の相関関係が認められ、L*の低下（黒味の増大）と共に過酸化水素による酸化後の pHox も低下することが明らかであった。

特に、L*が 35 以下の暗色を呈する試料は全て pHox が 3 以下の領域に、また L*が 35–45 の範囲の試料の多くも pHox が 3 以下を示した。一方で L*が 45 より大きい試料は一部を除けばほとんどが pHox は 3 以上であり、L*の増大と共に更に pHox が上昇する傾向が認められた。なお、本事業のモデル林造成の結果によれば pH3 以下の領域はほとんどの植栽樹種の生存にとってクリティカルなレベルであると考えられる。

更に、粒度やラミナ構造の有無等の特徴と pHox の関連に着目すれば、L* < 35 で pHox < 3 の試料のほぼすべてがラミナ構造を持つ堆積層由来の試料であり、更に多くが粘土質で占められていた。一方で、L* > 45 で pHox > 3 の試料は一部の粘土質土壌を除けば大部分が砂質に区分された試料であり中にはラミナ構造を含むものも含まれていた。また、同じ

領域に分布する粘土質な試料は全てラミナ構造を持たないものであった。

また強い潜在酸性を示す堆積層と石炭層の位置関係については、必ずしも石炭層の近傍の層位で強い潜在酸性を示すことはなく、層序の位置関係からパイライトの有無や量を判定することは難しいと考えられた。

e) 色と過酸化酸素酸化 pH を指標とした潜在酸性判定法試案

上で得られた結果に基づき、堆積物の色、特に明るさを表わす L^* と過酸化水素による酸化後の pH である pHox を組み合わせて潜在酸性の程度を判定する試案を下記のとおり考案した。ここでは仮に pHox が 3 を下回った堆積物を埋め戻し材料として用いると強酸性化するリスクが大きいと仮定して判定基準試案を設定した。

- ① $L^* < 35$ の堆積物は酸性化リスクが極めて高い。緑化、植生復旧の地盤造成に用いではならず、酸化が進まないよう地下深く（10m以深に）埋設・隔離することが必要。
- ② L^* が 35－45 の堆積物の多くは高リスクに区分され、上記の $L^* < 35$ の堆積物と同様の取り扱いが必要である。しかしこの領域に属する一部堆積物はややリスクの低いものも含むため、これを選別して植生基盤の材料として用いようとする場合は、過酸化水素による強制酸化による潜在酸性を判定することが必要。
- ③ $L^* > 45$ の堆積物、特に砂質でラミナ構造を持たないものはリスクが低い。ただし、一部の堆積物、特に粘土質でラミナ構造を持つ堆積物は 3 弱の潜在酸性を示す場合もあることから、この種の形態的特徴を有する場合は pHox による判定が必要。

ただし、ここで得られた L^* と pHox の関係性は、AGM 社の 2 つの採掘跡ピットから得た限定された試料について得られた結果に基づいていることから、他の地域の他の堆積物についても同じ判定基準が適用可能かどうかは今のところ不明である。しかしながら、他地域にあっても堆積物の色（特に L^* ）と過酸化水素酸化後の pHox の間には、ここで得られたのと同様の関係性が存在する可能性が高いと予想されるため、それぞれの地域・堆積物について同様の検討を行い、両パラメータの間の関係性を検証し独自の判定基準を設定することが必要と考えられる。

3) 半乾燥気候下に出現する問題土壌の特徴

i) アルカリ性土壌地域－西チモールの自然環境

a) 気候

一般に森林回復が困難とされる半乾燥気候下の中性－アルカリ性土壌地帯における荒廃地を対象とした植林技術を開発することを目的として、インドネシア国東及び西ヌサテンガラ州（西チモール）に広く分布する、過度の農牧利用の結果荒廃地化した地域でモデル林造成を実施している。

西チモール地域の年降水量は 1000mm 弱で、降水は 12 月から 3 月の雨季に集中しこの間の月降水量は 100mm を超えることが多いが、7 月から 10 月までの 4 ヶ月は乾季で月降水量は 20－30mm を超えない。また、それ以外の雨季と乾季の間の月は 50mm 程度の降水がある。年平均気温は約 27℃でケッペンの気候区分では熱帯サバンナ気候（Aw）に区分される。土壌気候のうち水分環境は「土壌の一部がほとんどの年に年間の積算で 90 日以上乾となるが、積算 180 日以上は湿な状態にあり、かつ少なくとも 90 日間は引き続き湿であるような水分レジーム」と定義される ustic 水分レジームに区分され、地温に着目すれば「年平均土壌温度が 22℃以上で夏季と冬季の平均土壌温度の差が 6℃未満」と定義される isohyperthermic 地帯に属する。

b) 地形及び地質

チモール島にはスンダ諸島の他の島と異なり火山島ではなく隆起によって形成された島であるため、地質学的には大部分が隆起珊瑚礁、一部に海成の堆積岩で構成される。隆起珊瑚は炭酸カルシウムによって構成され、この熱帯サバンナ気候下風化生成物は極めてカルシウムに富む。

地形的には島の中央部に比較的高標高の山地が分布し国立公園に指定されているが、周辺は低－中標高の比較的なだらかな丘陵や台地地形が主体を成し、こうした地域では収奪的な農牧利用が長年にわたって継続されてきた。丘陵地の斜面地形での長年にわたる農牧利用は、特に凸型斜面において激しい土壌浸食をもたらし、現在では荒廃地として放置もしくは弱度の農牧利用が行われているに過ぎない場所が広く分布する。一方で、凸地形斜面を縁取るように分布する凹地形には浸食によって移動した土壌物質が比較的厚く堆積した結果、相対的肥沃でありこうした場所は集約的な農牧利用が行われている。

c) 土壌

西チモール・クパン地区の米国 Soil Taxonomy によって作成された土壌図（図 3-2-9）によれば本地域には各種の土壌の分布が予想される。面積的に最も大きな土壌タイプは図 3-2-9 中で薄水色に塗られた 20 番の土壌であり、この地域には Entisols と Mollisols が混在分布している。次に面積が大きな土壌地帯は白色の 12 番で、ここには Alfisols と Inceptisols が混在分布するとされる。図 3-2-9 中に青色で示された（15 番）Inceptisols と Entisols の混在分布域も比較的広範囲に分布する。また一部には Vertisols が Entisols も

しくは Inceptisols を随伴して分布する地域も見られる（土壌図中の 16、17 番）。

なお、上記の出現が予想される土壌の特徴と WRB（世界土壌資源照合基準：World Reference Base for Soil Resources）との関連は下の通りである。

- ✓ Entisols：土壌発達が極めて制限された、もしくは岩盤上または非固結の極めて礫質な物質よりなる非常に浅い土壌。いわゆる未熟土。WRB の Regosols と Leptosols の一部に相当。
- ✓ Mollisols：有機物に富む暗褐色の厚い表土と石灰質または石膏質の下層土を持つ土壌。WRB の Kastanozems に相違する。
- ✓ Alfisols：高活性粘土が集積した次表層を持ち陽イオン交換容量（CEC）と塩基飽和度が共に高い肥沃な土壌。WRB の Luvisols に同じ。
- ✓ Inceptisols：弱度ないし中程度に発達した土壌で極めて多くの変異を持つ。WRB の Cambisols に同じ。
- ✓ Vertisols：膨潤性粘土を含み暗色で、乾燥に伴い土壌中に多くの割れ目が発達する。WRB の Vertisols に同じ。

チモール島クパン地区で見られる上記土壌の組み合わせはいずれも、Mollisols や Alfisols、Vertisols など、相対的に土層が厚くよく発達した土壌と、土壌発達が制限された未熟土である Entisols や発達程度が弱い Inceptisols が混在して同一地域に分布することを示している。こうした同一地帯において「発達した土壌」と「未発達の土壌」が 1 セットで混在分布する現象には、地域内における地形の変異が関係している可能性が高い。上でもののべたように相対的に面積の大きな凸型の浸食斜面では、長年にわたる農牧利用によって表土が継続的に流亡し、結果として未発達もしくは未熟な Entisols や Inceptisols が分布するに至ったと考えられた。これと対照的に、隣接する緩傾斜の凹地や窪地などの堆積地形には、上部斜面から土壌浸食によって運ばれた土壌が長年にわたって堆積し、土層が厚く発達した Mollisols や Alfisols、Vertisols などの土壌がその場に固有の母材や土壌生成作用に応じて生成・分布するに至ったものと推定された。

こうした、厚く発達した土壌の分布域は同時に集水地形でもあり土壌は相対的に湿潤に保たれ、少ない雨量と長い乾季で特徴づけられる同地域の気候下にあつて、重要な農耕対象地として利用されている。一方で、薄い土壌しか分布しない凸型斜面は排水地形であり少ない保水容量と相まって土壌の乾燥も進みやすい。こうした地域は、粗放な放牧や弱度の農業利用が行われるのみで多くが半荒廃地化しており、緑化・植林を行うことによって土壌を被覆し有機物を供給することで土壌保全ならびに土壌発達の促進を図ることが必要と考えられた。

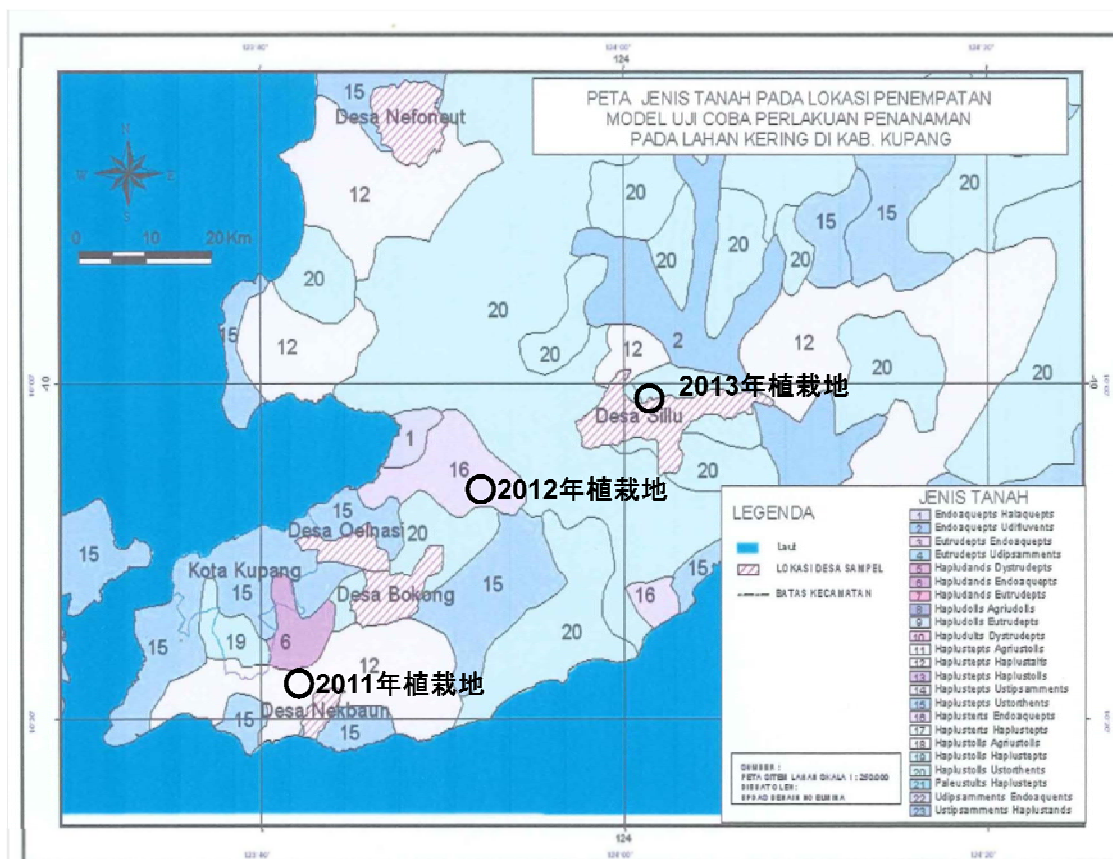


図 3-2-9 チモール島クパン地区の土壤分布図と本事業モデル林造成

ii) モデル林造成地の土壤

a) 2011 年度、2012 年度植栽地の土壤

2011 年植栽地の土壤は石灰岩もしくは類似の塩基性岩を母材とする、膨潤－収縮性粘土（2：1 型粘土）を含む Alfisols でありアルカリ性を示す。また膨潤－収縮性粘土の存在によって **vertic** な特徴も示し、乾季には乾燥によってクラックが形成され、植栽苗木の根が切断されることが植生復元の制限になる場合があるのに加え、雨期には土壤が膨潤することで土壤中の孔隙が失われることで土壤の内部排水が極めて不良となることで根の発達を阻害し過湿害が発現する恐れもある。このように本土壤は重大な物理的欠陥を有する一方で、CEC と塩基飽和度は双方共に高く化学的な肥沃度は一般に高いと考えられる。

2012 年植栽地の土壤は、隆起珊瑚礁石灰岩を母材とする **Inceptisols** と判断され、土壤発達程度は相対的に強くなく pH は 7－8 台のアルカリ性を示す一方で土色は強い赤色を呈する。ほぼ平坦な地形面に分布していることから、土壤の浸食・流亡強度は相対的に小さく、土層は比較的厚く発達している（数 10cm－100cm 程度）。これらの特徴から本土壤は域内では相対的に問題の少ない土壤と考えられるが、石灰岩を母材とするため粘土鉱物の骨格を形作るケイ素の供給が少なく通常のケイ酸粘土鉱物の生成が順調に進まず、土

壤の細粒画分の多くが酸化鉄からなる疑似砂状の微細団粒を形成していれると推定された。こうした鉄鉱物の微細な団粒中の孔隙は一般に孔径が極めて小さく高張力で水を保持するため、植物が利用可能ないわゆる有効水の保水能力は大きくなく、対象地の土壤にあっても乾燥が植物生育の制限要因となる可能性が指摘された。

b) 2013 年度植栽地の土壤の特徴

2012 年植栽地は、図 3-2-9 の土壤分布図によれば西チモール・クパン地区で最も大きな面積を占める Entisols と Mollisols の混在分布地帯に位置しており、本試験地は東ヌサテンガラ地域における荒廃地復旧植林の主要ターゲットの 1 つを代表している。本土壤の組み合わせはからなる土壤地帯では、上で述べたように凸緩斜面には未熟土である Entisols が広く分布している。こうした場所では、長年にわたる農業・牧畜利用による土壤流亡のために細粒の土壤物質が失われた結果、有効土層は極めて薄く、また、地表には多くの石灰岩が露出しており（写真 3-2-14（左））、土壤は石灰岩の巨礫にすこぶる富んでいる（写真 3-2-14（右））。土壤母材は隆起珊瑚礁石灰岩でありアルカリ性を呈し簡易測定による土壤 pH は 7-8 の範囲にある。対象地の土壤はこのように、隆起珊瑚礁石灰岩地帯における農牧利用を原因とする荒廃地の典型的 1 つであり、アルカリ性に加え、極めて浅い有効土層と高い石礫含量のため、有効土壤体積・保水量は極めて小さいことが予想される。



図 3-2-14 2013 年度植栽地の土壤。表土は薄く石灰岩の礫にすこぶる富み、礫間を少しの細粒土壤物質が埋めているような構造。植え穴は鉄バールで礫の少ないところを少しずつ掘削して掘ることになる。

このため、こうした土壌の分布する半乾燥気候下の荒廃地にあっては、樹木の活着・生育にとっての最大に障害は乾期における乾燥となることが予想され、このため **2013** 年度植



栽にあたっては、樹種の探索に加えて、土壌の保水力を高めるための処理試験が有効と考え、木炭、高分子吸水材による土壌改良試験を組み込んだ植栽試験を開始したところである。

図 3-2-15 2013 年度植栽地の地表には極めて多くの石灰岩の巨礫が露出している。

3. 3 南カリマンタン州石炭採掘跡地の植栽木の養分状態

森林総合研究所 田原 恒
国際緑化推進センター 仲摩 栄一郎

1) 背景と目的

石炭採掘跡地は、植生が完全に失われた裸地になっており、埋め戻しに使った材料によって、水や養分の欠乏、有害金属の過剰、強光、高温などの様々な要因が複合的に植栽木の生育を阻害していると考えられる。特に、石炭層に付随して存在するパイライトを含む材料を埋め戻しに使った場合は、極めて酸性な土壌である酸性硫酸塩土壌が生成し、土壌の酸性が問題となる可能性が高い。一般的に、酸性土壌では、リン、カリウム、カルシウム、マグネシウム、亜鉛など植物の生育に必要な必須元素の欠乏が問題となる（但野・安藤 1984）。さらに、鉄、マンガン、アルミニウムなどが土壌鉱物から溶け出してきて過剰害を引き起こす（但野・安藤 1984）。本報告では、石炭採掘跡地に植えられた植栽木の葉の元素濃度を測定し、植栽木の養分状態を知ることを目的とする。葉の各元素の濃度と、その植栽土壌条件による違いから、どのような元素の欠乏や過剰が石炭採掘跡地で植栽木の成長を阻害する要因となっているのか推測した。

2) 材料と方法

インドネシア国南カリマンタン州の石炭採掘跡地（鉱山会社 PT. Antang Gunung Meratus）に平成 23 年度に造成した技術開発モデル林で試料を採取した。植栽後約 2 年たった植栽木から 2014 年 2 月 25 日に試料として葉を採取した。試料の葉は、採掘残渣を埋め戻した対照区（採掘残渣区）、森林土壌を全面客土した処理区（客土区）、客土に加えて施肥とマルチングを行なった処理区（客土＋施肥＋マルチング区）の 3 処理区から採取した。植栽されている 8 樹種のうち、*Acacia mangium*（マンギウム）、*Melaleuca cajuputi*（カユプテ）、*Anthocephalus cadamba*（ジャボン）、*Swietenia macrophylla*（マホガニー）の 4 樹種（写真 3-3-1）から葉を採取した。マンギウムとカユプテは、採掘残渣区でも生存率が高く、成長もよい樹種である。一方、ジャボンとマホガニーは、採掘残渣区では生存率が低く、成長もよくないが、客土区あるいは客土＋施肥＋マルチング区では成長がよい樹種である（図 3-3-1）。3 処理区、4 樹種の計 12 プロット（採掘残渣区 I-A1、A2、A3、A6；客土区 II-C1、C2、C3、C6；客土＋施肥＋マルチング区 II-E1、E2、E3、E6）において、それぞれ 6 本の植栽木から十分に展開した葉のうち最も若い葉を 1 枚ずつ採取した。

採取した葉は、80℃で 2 日間乾燥させ、Quadir et al. (2011)の方法で湿式灰化した。葉（約 100 mg 乾燥重量）をポリプロピレン製分解チューブ（DigiTUBEs、ジーエルサイエンス）に量り取り、68%硝酸（TAMAPURE-AA-、多摩化学工業）を 2 mL 加えて一晩置いた。ヒートブロック（DigiPREP、ジーエルサイエンス）を用いて 110℃で硝酸がほぼなくなるまで加熱したのち、35%過酸化水素水（TAMAPURE-AA-）を 0.5 mL 加え、さらに 110℃

で液体がほぼなくなるまで加熱した。1%硝酸で定容したのち、フィルター（DigiFILTER、ジーエルサイエンス）で濾過した。試料溶液中のリン、カリウム、カルシウム、マグネシウム、亜鉛、鉄、マンガン、アルミニウム、ナトリウムの濃度を誘導結合プラズマ質量分析計（ICP-MS；7700x、アジレントテクノロジー）で測定した。

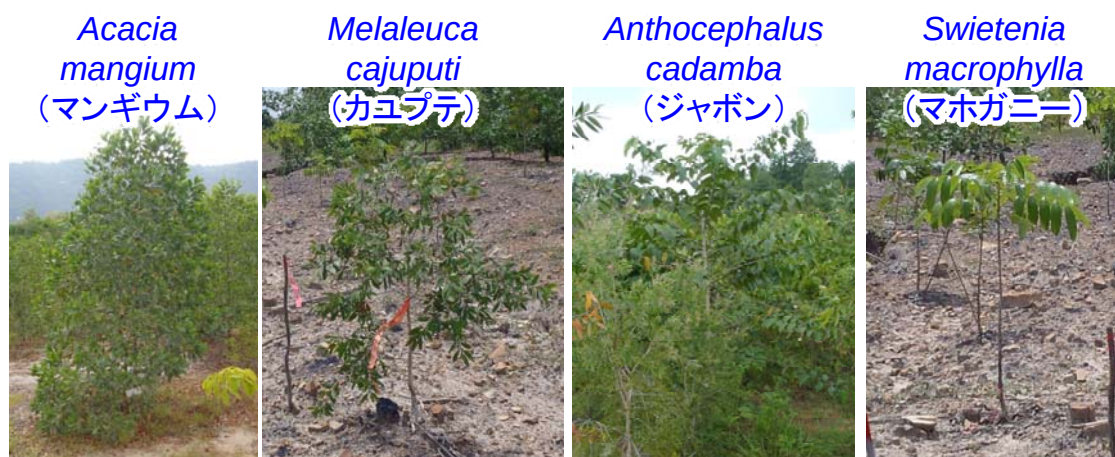


写真 3-3-1 葉の元素濃度を測定した 4 樹種

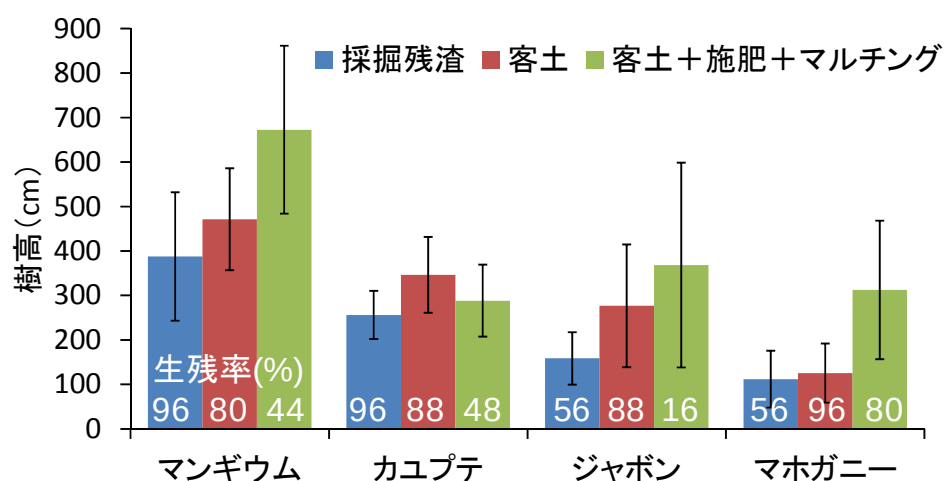


図 3-3-1 葉を採取したプロットの植栽木の樹高と生残率（2014 年 1 月測定）値は平均±標準偏差（ $n=4-24$ ）である。

3) 結果と考察

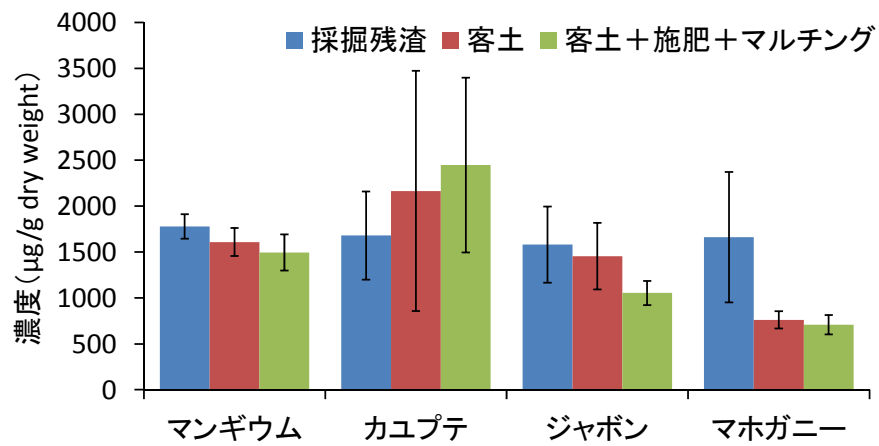
リン、カリウム、マグネシウム、カルシウム、亜鉛は、植物の生育に必要な必須元素である。植栽木の葉のリン、カリウム、マグネシウムの濃度は、成長が相対的に悪い採掘残渣区で他の処理区と比べて低くなく、むしろ成長のよい客土区や客土+施肥+マルチング区のほうが低い傾向にあった（図 3-3-2）。このことから、これらの元素の欠乏は、採掘残渣区で植栽木の成長を制限する主要因にはなっていないと考えられた。客土区や客土+施肥+マルチング区で濃度が低いことに対する説明としては、成長がよいことによる希釈効

果が考えられる。一方、カルシウム濃度は、成長の悪い採掘残渣区で成長がよい他の処理区よりも低い傾向にあった（図 3-3-3）。カルシウムの欠乏が採掘残渣区で植栽木の成長を制限する要因の一つになっている可能性がある。亜鉛濃度は、処理区による違いは認められなかった（図 3-3-3）。亜鉛の必要量は、15-20 $\mu\text{g}/(\text{g dry weight})$ 未満と言われており（Marschner 2012）、いずれの樹種も十分な亜鉛を含有していると思われる。

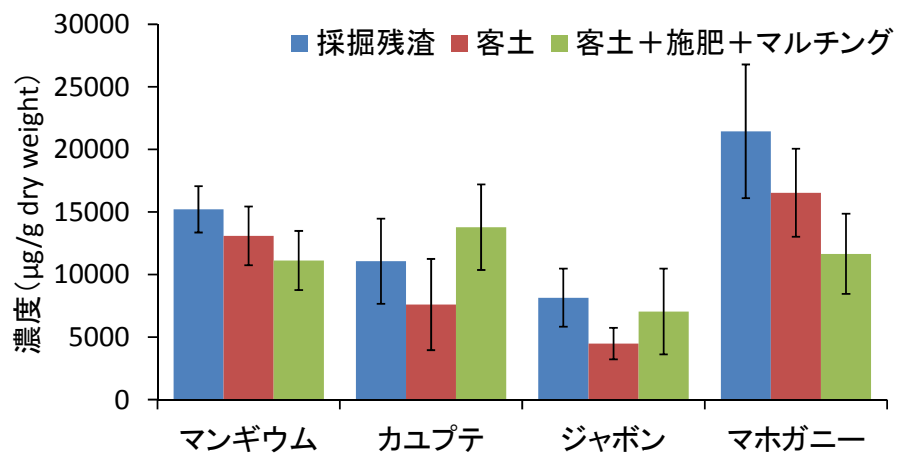
鉄とマンガンは、植物の必須元素であると同時に、酸性土壌で可溶性が増すと過剰害を引き起こす場合がある。植物が健全に成長するために必要な鉄の濃度は 50-150 $\mu\text{g}/(\text{g dry weight})$ 程度で、500 $\mu\text{g}/(\text{g dry weight})$ を超すと過剰害を引き起こす場合があるという（Marschner 2012）。植栽木の葉の鉄濃度は、いずれの樹種も 100 $\mu\text{g}/(\text{g dry weight})$ 程度だったことから（図 3-3-3）、鉄の過剰害は起きていないと考えられた。一方、マンガンの必要量は、10-20 $\mu\text{g}/(\text{g dry weight})$ 程度と言われており（Marschner 2012）、いずれの樹種も十分なマンガンを含有していると考えられた（図 3-3-4）。植物種によっては 200 $\mu\text{g}/(\text{g dry weight})$ を超えると、マンガン過剰害が引き起こされるとの報告があり（Marschner 2012）、マンガン濃度の高いジャボンではマンガンの過剰害が起きている可能性がある。土壌 pH が低いほどマンガンの可溶化が進んでいると予想していたが、土壌 pH と葉のマンガン濃度の間に特に関係は認められなかった。

アルミニウムは根に蓄積すると過剰害を引き起こす元素であり、その過剰害は酸性土壌における植物の生育上、最も深刻な問題と言われている（三枝 1994）。pH 3 台の強酸性土壌では、植物の生育に悪影響を与えるほどの高濃度のアルミニウムが溶け出してくる（Tahara et al. 2008）。実際に植栽木の葉でもアルミニウムが検出され（図 3-3-4）、アルミニウム過剰害が現れる根でも相当量のアルミニウムが蓄積していると予想される。ただし、マンガンと同様に、土壌 pH と葉のアルミニウム濃度の間に関係は認められなかった。今回、植栽木の養分状態を分析した結果、カルシウム欠乏やアルミニウム過剰害が石炭採掘跡地で植栽木の生育を阻害している要因の候補として考えられた。阻害要因を確定するには、土壌の化学性や施肥試験、生理学的実験などの結果と考え合わせる必要がある。今回、分析した元素に関しては、成長の樹種間差を説明できるような元素はなかった。今回は測定対象としなかった多量必須元素の1つである窒素についても分析すると意義深い結果が得られるかもしれない。

P
(リン)



K
(カリウム)



Mg
(マグネシウム)

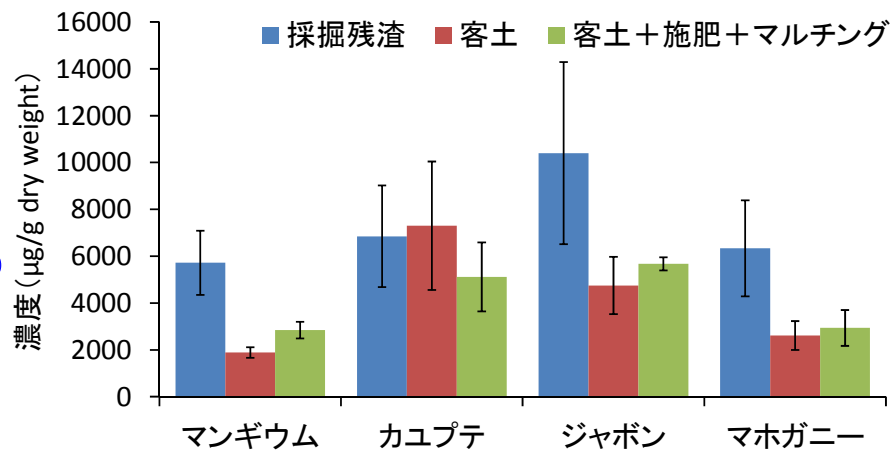
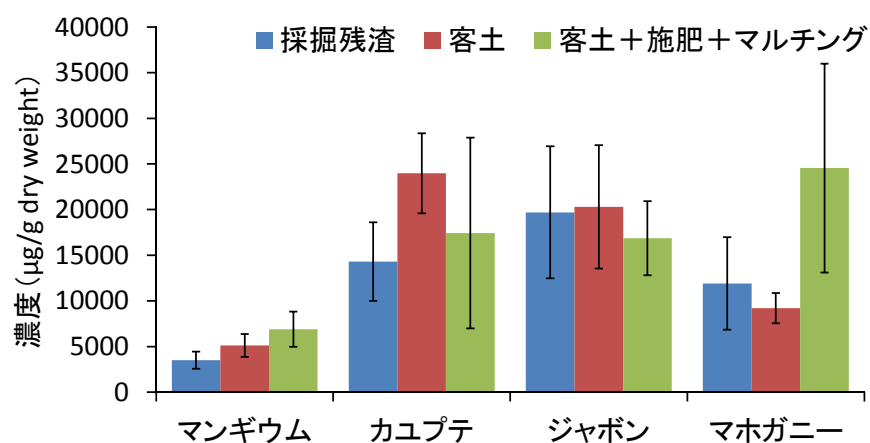
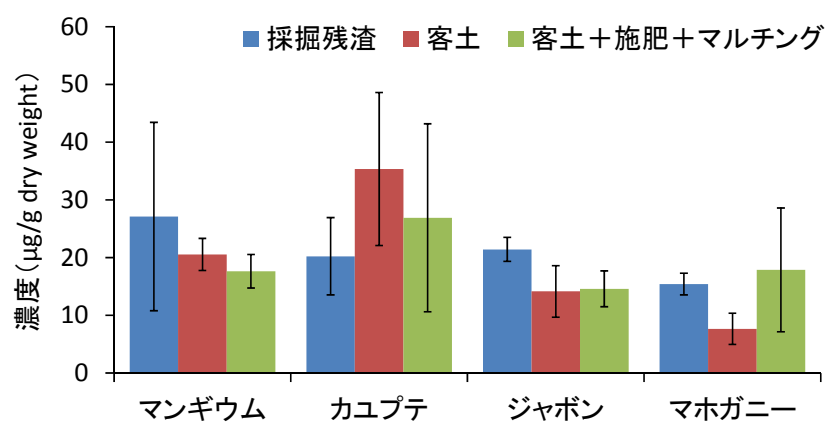


図 3-3-2 植栽木の葉のリン、カリウム、マグネシウム濃度値は平均±標準偏差 (n=6) である。

Ca
(カルシウム)



Zn
(亜鉛)



Fe
(鉄)

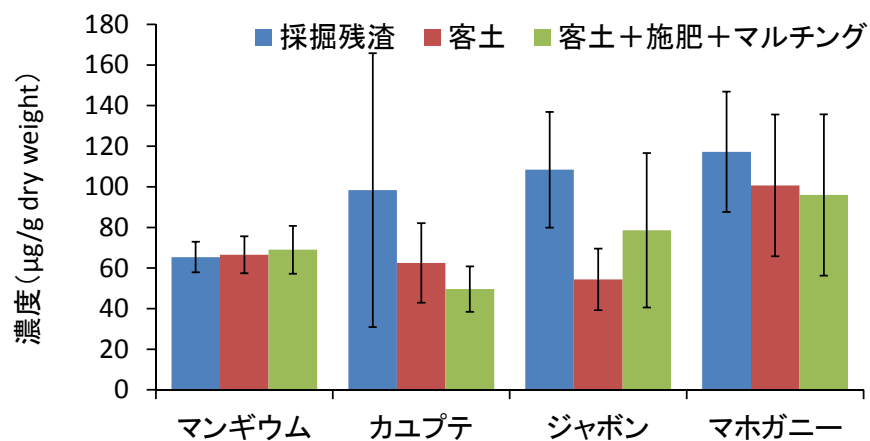


図 3-3-3 植栽木の葉のカルシウム、亜鉛、鉄濃度値は平均±標準偏差 (n=6) である。

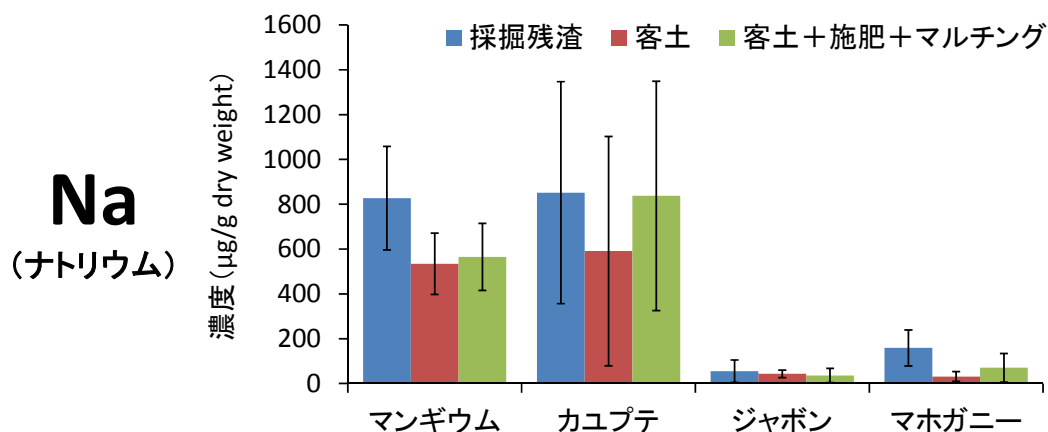
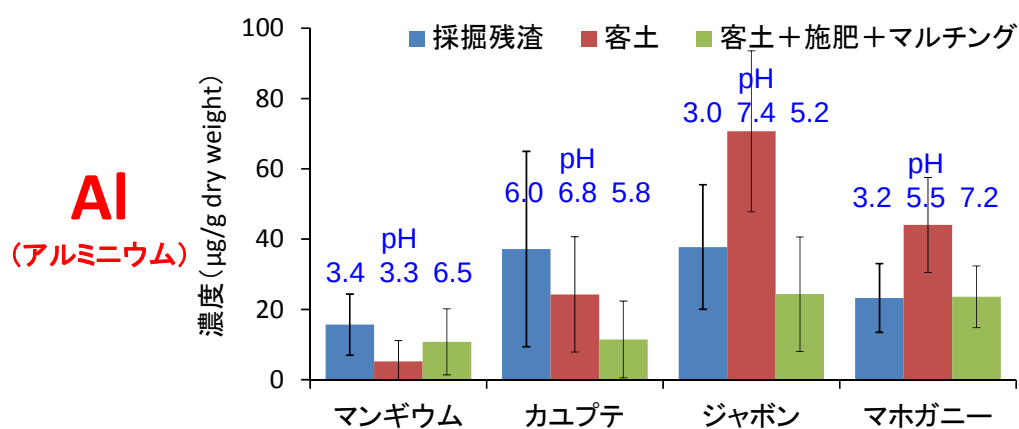
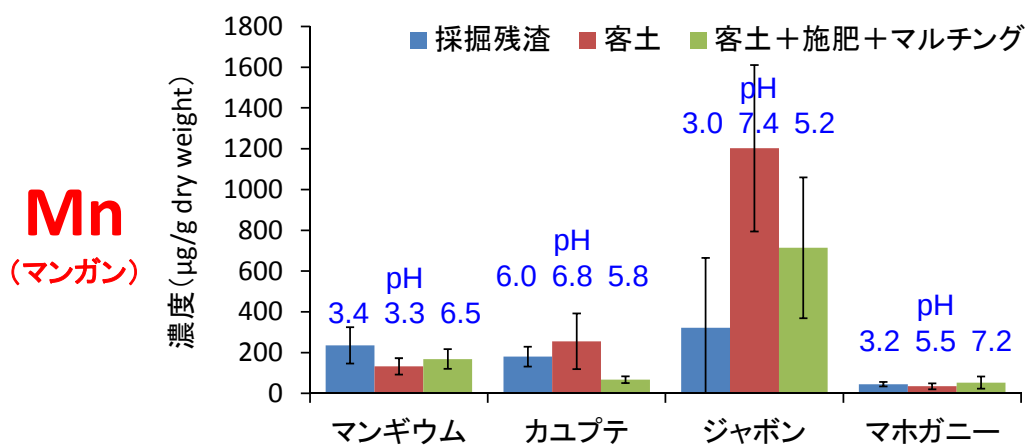


図 3-3-4 植栽木の葉のマンガン、アルミニウム、ナトリウム濃度値は平均±標準偏差($n=6$)である。各棒上の数値は、葉を採取したプロットの土壌 pH を表す。

引用文献

- Marschner P (2012) Marschner's Mineral Nutrition of Higher Plants. Third Edition. Elsevier, Oxford.
- 三枝正彦(1994) 酸性土壌におけるアルミニウムの化学. (低 pH 土壌と植物. 日本土壌肥料学会編, 博友社, 東京) 7-42
- 但野利秋, 安藤忠男(1984) 酸性土壌の作物生育阻害要因とそれらに対する作物の耐性. (酸性土壌とその農業利用. 田中明編, 博友社, 東京) 217-258
- Quadir QF, Watanabe T, Chen Z, Osaki M, Shinano T (2011) Ionic response of *Lotus japonicus* to different root-zone temperatures. Soil Science and Plant Nutrition 57: 221-232
- Tahara K, Imayuki M, Norisada M, Yamanoshita T, Kojima K, Nuyim T, Kang DJ, Vijarnsorn P, Hasegawa I, Sasaki S (2008) Planting performance of tropical trees on acid sulfate soil and their responses to aluminum and low pH stresses. In: Sasaki S (ed.) Development of New Bioremediation Systems of Acid Sulfate Soil for Agriculture and Forestry. Shoukadoh Book Sellers, Kyoto, 37-40

3. 4 熱帯における造林苗木の短期的湛水による気孔コンダクタンスの変化

早稲田大学 人間科学学術院 田中一生、森川靖

1) はじめに

石炭採掘跡地においても土壌の排水不良により、部分的な水たまりとして観察される不均一な湛水環境が生じることが確認されている (図 3-4-1)。不均一な湛水環境が生じる要因として、植栽地造成の際の微地形の疎らさや、重機による踏み固めによる土壌の固結が考えられる。この水たまりは、雨期の数ヶ月間存在するものから、降雨量が多いときに数日間存在するものまで様々である。



図 3-4-1 本プロジェクト調査地において散見される湛水環境 (部分的に生じる水たまり)。リッピングで生じた畝の谷間に水がたまっている(A)。畝が崩壊した箇所では全体に水が広がっている(B)。わずかに凹地になった場所において、水たまりができている(C)。水たまりが生じた箇所において、苗木の枯死が見られる(D)。

湛水環境に陥ると土壌の間隙に水が満たされ、ガス交換速度が低下するため植物に対する酸素の輸送速度が著しく低下する。酸素濃度は、地表と接触している数ミリメートルだけが低い状態が保たれている。さらに、土壌中の微生物や植物根による酸素消費によって、

残された酸素も消費されてしまう。また、湛水は、水が粘土を運び間隙を満たすため、土壌構造も破壊する (Ponnamperuma, 1984)。

湛水環境にさらされることにより多くの被子植物と裸子植物で光合成速度が低下することが報告されている。数時間から数日の非常に短期的な湛水でも光合成が低下することが報告されている (Regehr et al., 1975, Sena Gomes and Kozlowski, 1980, Bazzaz and Peterson, 1984, Pezeshki and Chambers, 1985, Beckman et al., 1992)。例として、*Pseudotsuga menziesii* は、湛水後 5 時間以内に光合成速度がかなり低下することが報告されている (Zaerr, 1983)。

湛水した樹木の光合成速度の低下は、多くの場合において気孔の閉鎖と相関が示唆されている (Pezeshki et al., 1996a)。こうした湛水による気孔の閉鎖の報告は数多い (Kozlowski and Pallardy, 1979, Sena Gomes and Kozlowski, 1980, Newsome et al., 1982, Tang and Kozlowski, 1982, Norby and Kozlowski, 1983, Pezeshki and Chambers, 1985, Sena Gomes and Kozlowski, 1986, Larson et al., 1989, Wazir et al., 1988)。

そこで、本研究では、インドネシアの南カリマンタンで一般的な造林樹種において、湛水による気孔反応を確認するために、勘弁かつ迅速に多くの種の経時的な変化を計測することが可能な測器を用いて、短期的な湛水影響を調べることを目的とした。

2) 方法

i) 実験 1

Banjarbaru Forest Research Institute の苗畑において、湛水区と対照区を設定し、栽培された苗木の葉の裏面の気孔コンダクタンスの測定を行った。ビニール袋にポット苗を入れ、ポットが完全に水に浸かるようにしたものを湛水区 ($n = 1$)とし、この処理を行わないものを対照区 ($n = 2$)とした。2013 年 9 月 17、18、19 日に携帯式リーフポロメータ (SC-1, Decagon device Inc.)を用いて気孔コンダクタンスの測定を行った。測定は健全で十分に展開した葉を対照とした。実験の様子を図 3-4-2 に示す。



図 3-4-2. 湛水处理の様子

2013 年 9 月 17、18、19 日に使用した樹種は、*Eusideroxylon zwageri* (Ulin)、*Anisoptera* spp. (Marsawa)、*Nyaway* (学名不明)、*Shorea albida* (Meranti merah)、*Aquilaria malaccensis* (Gaharu)、*Cratoxylon* spp. (Garungang)、*Shorea leprosula* (Meranti)、*Shorea smithiana*、*Alstonia scholaris*、*Peronema canescens* (Sungkai)、*Neolamarckia cadamba* (Jabon)、*Samanea saman* (Trembesi)、*Swietenia macrophylla* (Mahoni)であった。

ii) 実験 2

実験 1 と同様に湛水区 ($n = 3$)と対照区 ($n = 3$)を設定し、同様の器具を用いて気孔コンダクタンスの測定を行った。2013 年 11 月 11、12、15、17 日に測定した樹種は、*Samanea saman*、*Eusideroxylon zwageri*、*Anisoptera* spp.、*Shorea albida*、*Alstonia scholaris*、*Neolamarckia cadamba*、*Swietenia macrophylla* であった。

3) 供試樹種について

Anisoptera spp.は、現地では Marsawa (Mersawa)と呼ばれている。本実験に使用した苗の種名は不明だが、同属の *Anisoptera costata* は、樹高 67m、胸高直径 152cm に成長し、超高木層を構成する (Ferry, Online)。標高 700m までの半常緑フタバガキ林や常緑フタバガキ林で見られる (Ferry, Online)。川沿いの粘土質土壌や尾根の砂質土壌で生育しており、時に石灰岩地帯でも見られる。湿性地での生育が確認されている種である (Ferry, Online)。

Shorea albida は、フタバガキ科の樹木で現地では Meranti merah と呼ばれている。樹高は 45m、胸高直径は 120cm 以上になるフタバガキ林の林冠構成木である (熱帯植物研究会, 1986)。材は、Light Red Meranti として有名であり非常に有用である。

Eusideroxylon zwageri は、クスノキ科の樹木で現地では Ulin と呼ばれている。樹高は 36m、胸高直径は 95cm 以上になる (Ferry, Online)。標高 600m 周辺までの砂質土壌の丘陵地や沖積平野に成立するフタバガキ混合林に見られる。挿し木で繁殖が可能である (Ferry, Online)。優先林を形成することもあり、二次林では攪乱前の残存木として存在し

ている (Ferry, Online)。材は固く、腐りにくいので、非常に優良であり、高級建築材として用いられている (Ferry, Online)。

Aquilaria malaccensis は、ジンチョウゲ科ジンコウ属の木本植物で現地では **Gaharu** と呼ばれている。樹高は、20-49m、直径は 60cm 程度になる (Ferry, Online)。丘陵の斜面の天然林や二次林で見られる (Ferry, Online)。標高 1500m 程度まで分布しており、片麻岩や変成岩から発達した重粘土を好むが、砂岩から発達した砂質ローム土壌でも育つ (Ferry, Online)。主に河川や小川沿いで生育している。沈水香木の原料として非常に有名である (Ferry, Online)。

Shorea leprosula は、フタバガキ科の木本植物であり、現地では **Meranti** と呼ばれている。樹高は 54m、胸高直径は 161cm まで成長し、超高木層を構成する (Ferry, Online)。標高 700m までの混合フタバガキ林を構成し、山腹や尾根等の比較的乾燥した粘土質や砂質土壌に生育し、石灰岩地帯でも見られる (Ferry, Online)。二次林において、攪乱前から存在する残存木として存在する (Ferry, Online)。材は優良である (Ferry, Online)。

Shorea smithiana は、フタバガキ科の木本植物である。樹高は 66m、胸高直径は 164cm まで成長し、超高木層を構成する (Ferry, Online)。標高 300m までの混合フタバガキ林を構成し、山腹や尾根等の砂質土壌に生育し、石灰岩地帯でも見られる (Ferry, Online)。二次林において、攪乱前から存在する残存木として存在する (Ferry, Online)。材は優良である (Ferry, Online)。

Alstonia scholaris は、キョウチクトウ科の樹木である。樹高は 10-50m、胸高直径は 125cm まで成長し、高木層を構成する (Ferry, Online)。標高 1250m までの二次林でよく見られる (Ferry, Online)。樹皮や樹液は古くから薬効が認められており、様々な症状の緩和をもたらすことが明らかになっている (Ferry, Online)。

Peronema canescens は、クマツヅラ科の木本植物であり、樹高は 45m、胸高直径は 102cm 程になる上層木である (Ferry, Online)。標高 500m までの混合フタバガキ二次林に見られ、沖積地や河川沿いのみならず丘の斜面にも生育する (Ferry, Online)。材は建築や家具の生産に利用される (Ferry, Online)。

Neolamarckia cadamba は、アカネ科の木本植物であり、樹高は 45m、胸高直径は 100-160cm 程になる林冠構成木である (Wikipedia, Online)。標高 500m までの混合フタバガキ二次林に見られ、沖積地や河川沿いのみならず丘の斜面にも生育する (Wikipedia, Onling)。材は建築や家具の生産に利用される (Wikipedia, Onling)。

Samanea saman は、ネムノキ科の樹木であり現地では **Trembesi** と呼ばれている (Ferry, Onling)。西インド諸島や中米が原産である (Ferry, Onling)。樹高は 20-30m まで成長する。建築物の構造材や家具材として用いられる (Ferry, Onling)。

Swietenia macrophylla は、センダン科の樹木である。樹高は 45m、胸高直径は 2m 程になる (熱帯植物研究会, 1986)。原産は南米であるが、現地において、様々な場所に植栽されている一般的な造林木である。有用材であり主に家具などに用いられている (熱帯植物研究会, 1986)。

4) 結果と考察

図 3-4-3 に *E. zwageri* における気孔コンダクタンスの経時変化を示す。湛水区の気孔コンダクタンスは、2 日目の 9 時周辺の計測では対照区と比較して低い傾向が見られた。

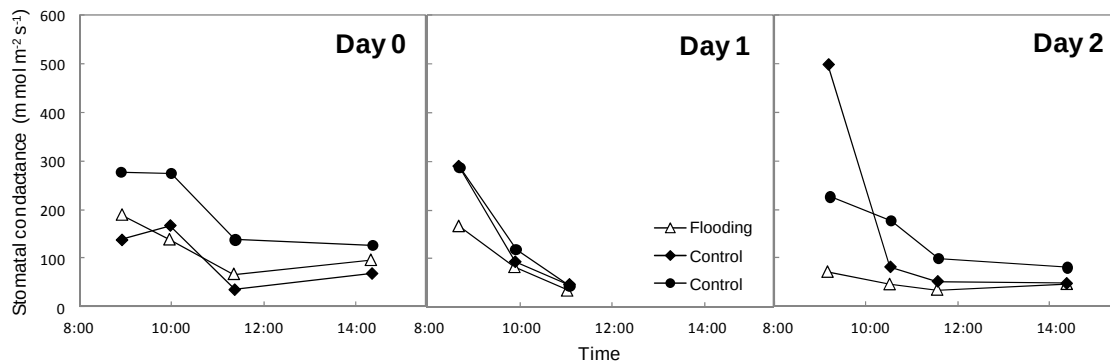


図 3-4-3 *Eusideroxylon zwageri* (Ulin)における気孔コンダクタンスの経時変化

図 3-4-4 に *Anisoptera* spp.における気孔コンダクタンスの経時変化を示す。湛水区の気孔コンダクタンスは、2 日目の 14 時周辺の計測では対照区と比較して高い傾向が見られた。

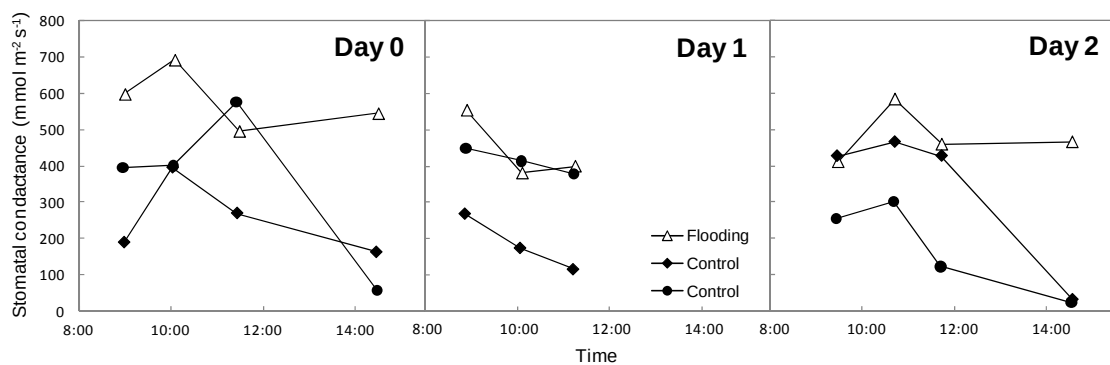


図 3-4-4 *Anisoptera* spp. (Marsawa)における気孔コンダクタンスの経時変化

図 3-4-5 に *Nyaway* における気孔コンダクタンスの経時変化を示す。湛水区の気孔コンダクタンスは、対照区と同様の傾向を示した。

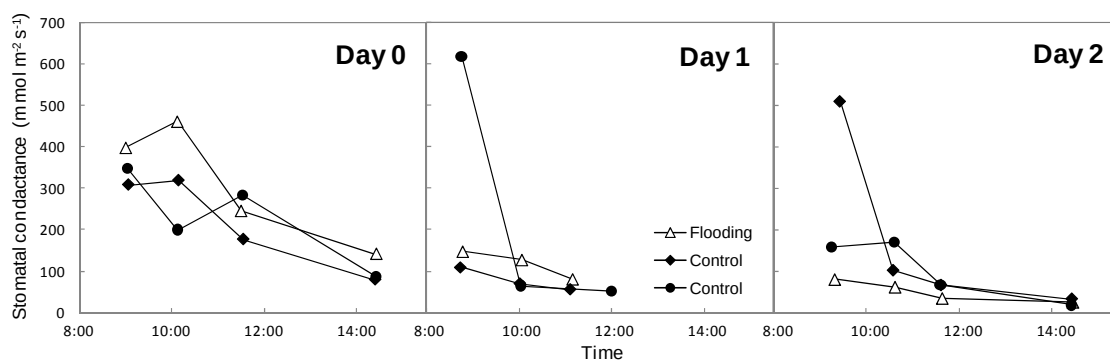


図 3-4-5 *Nyaway* における気孔コンダクタンスの経時変化

図 3-4-6 に *Shorea albida* における気孔コンダクタンスの経時変化を示す。湛水区の気孔コンダクタンスは、1 日目と 2 日目において対照区と比較して高い傾向が見られた。

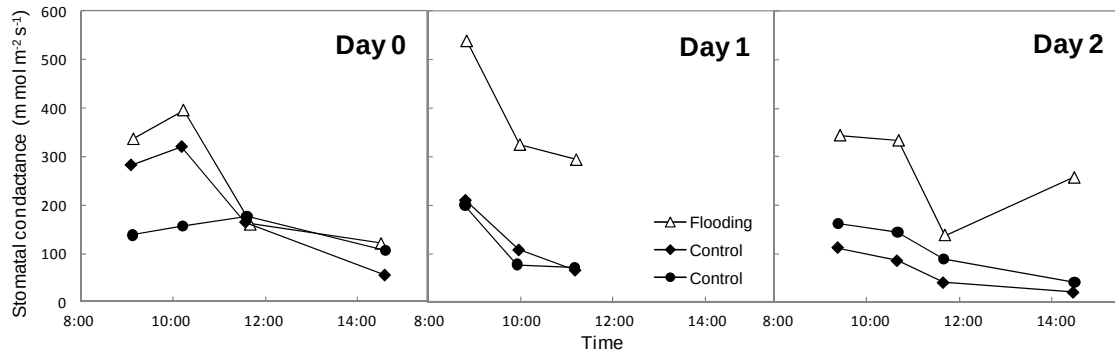


図 3-4-6 *Shorea albida* (Melanti merah)における気孔コンダクタンスの経時変化

図 3-4-7 に *Aquilaria malaccensis* における気孔コンダクタンスの経時変化を示す。湛水区の気孔コンダクタンスは、対照区と同様の傾向を示した。

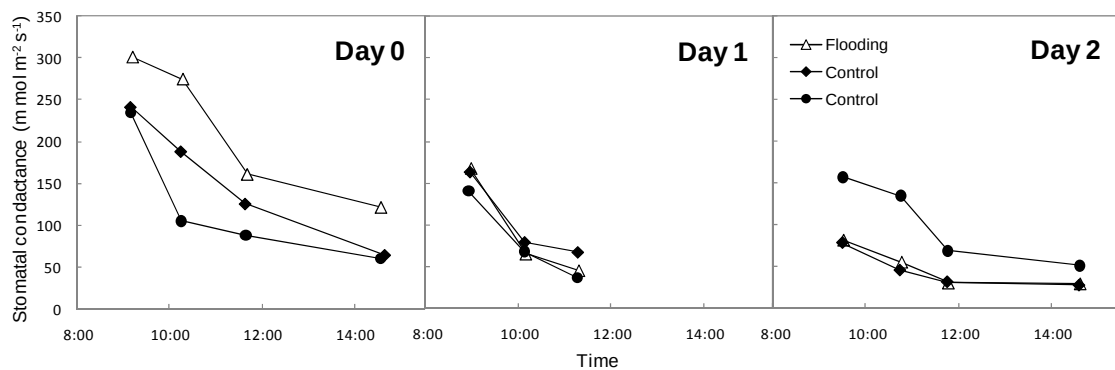


図 3-4-7 *Aquilaria malaccensis* (Gaharu)における気孔コンダクタンスの経時変化

図 3-4-8 に *Cratoxylon* spp. における気孔コンダクタンスの経時変化を示す。湛水区の気孔コンダクタンスは、2 日目に 12 時対照区と同様の傾向を示した。

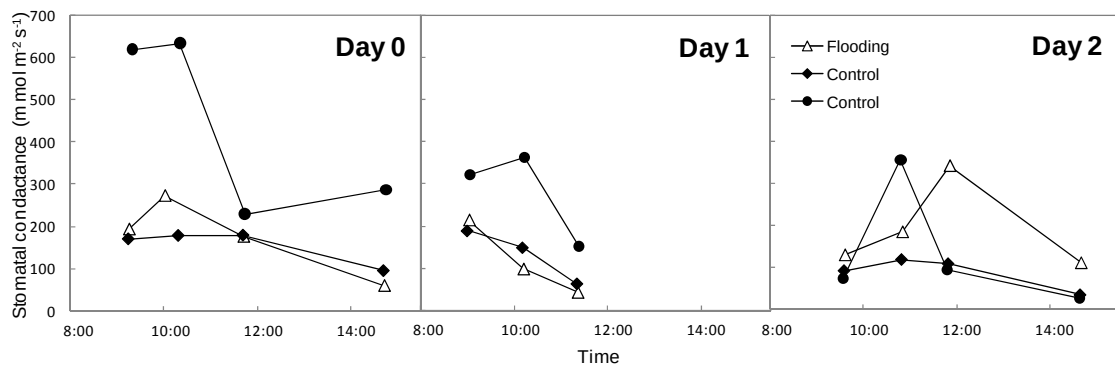


図 3-4-8 *Cratoxylon* spp. (Garungang)における気孔コンダクタンスの経時変化

図 3-4-9 に *Shorea leprosula* における気孔コンダクタンスの経時変化を示す。湛水区の気孔コンダクタンスは、1 日目の 10 時あたりに高くなる傾向が見られたが、2 日目は、対照区と同様の傾向を示した。

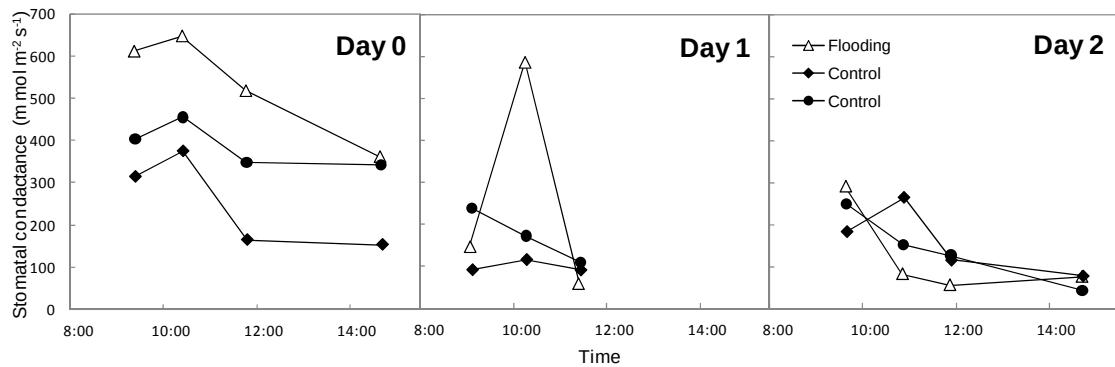


図 3-4-9 *Shorea leprosula* (Meranti)における気孔コンダクタンスの経時変化

図 3-4-10 に *Shorea smithiana* における気孔コンダクタンスの経時変化を示す。湛水区の気孔コンダクタンスは、2 日目の 10 時あたりに低くなる傾向が見られた。

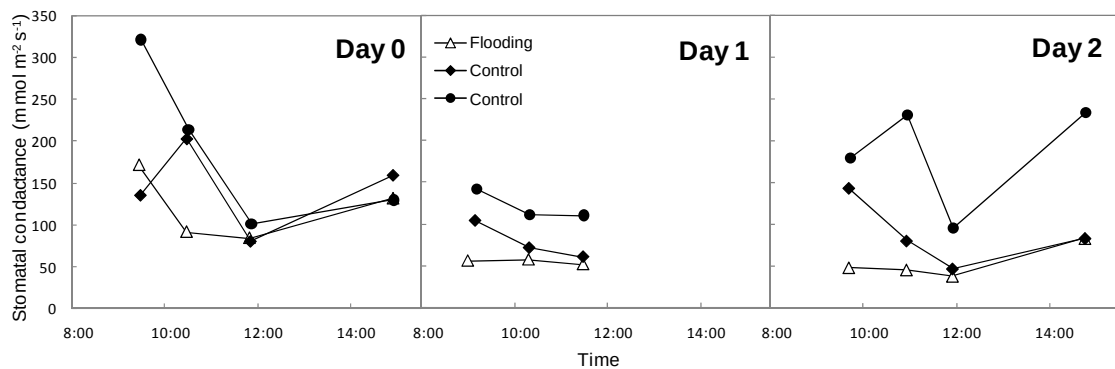


図 3-4-10 *Shorea smithiana* における気孔コンダクタンスの経時変化

図 3-4-11 に *Alstonia scholaris* における気孔コンダクタンスの経時変化を示す。湛水区の気孔コンダクタンスは、1 日目に低くなる傾向が見られたが、2 日目は対照区と同様の傾向を示した。

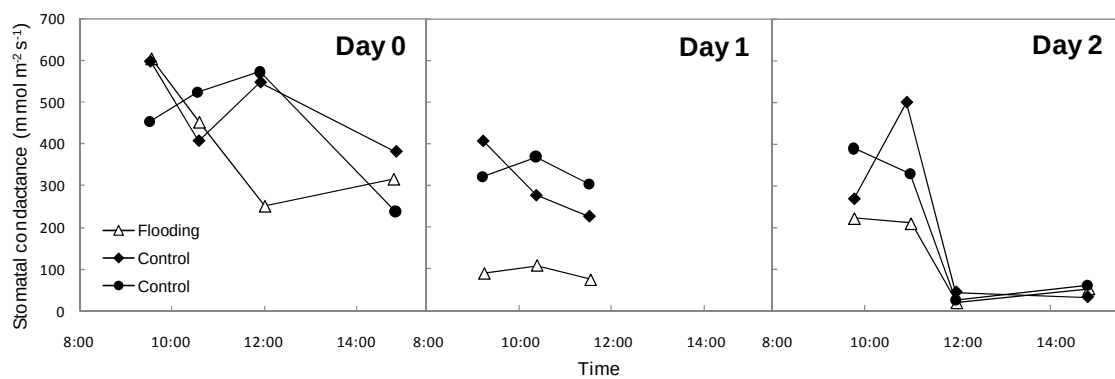


図 3-4-11 *Alstonia scholaris* における気孔コンダクタンスの経時変化

図 3-4-12 に *Peronema canescens* における気孔コンダクタンスの経時変化を示す。湛水区の気孔コンダクタンスは、対照区と同様の傾向を示した。

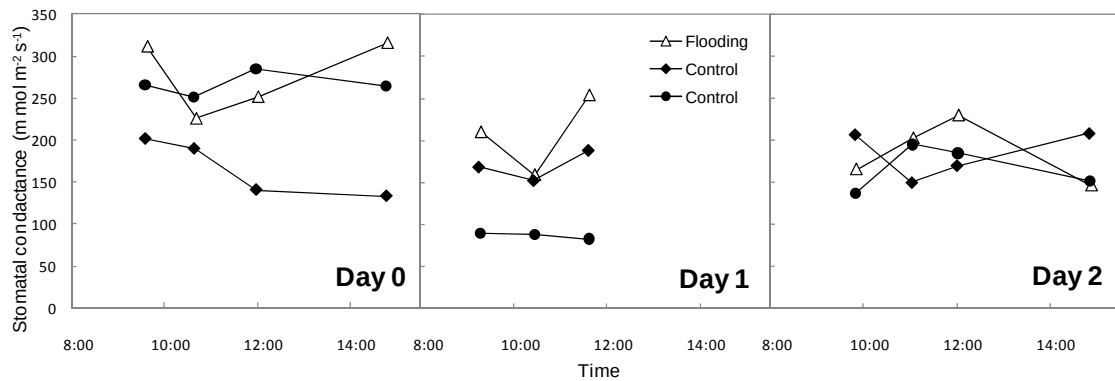


図 3-4-12 *Peronema canescens* (Sungkai) における気孔コンダクタンスの経時変化

図 3-4-13 に *Neolamarckia cadamba* における気孔コンダクタンスの経時変化を示す。湛水区の気孔コンダクタンスは、対照区と同様の傾向を示した。

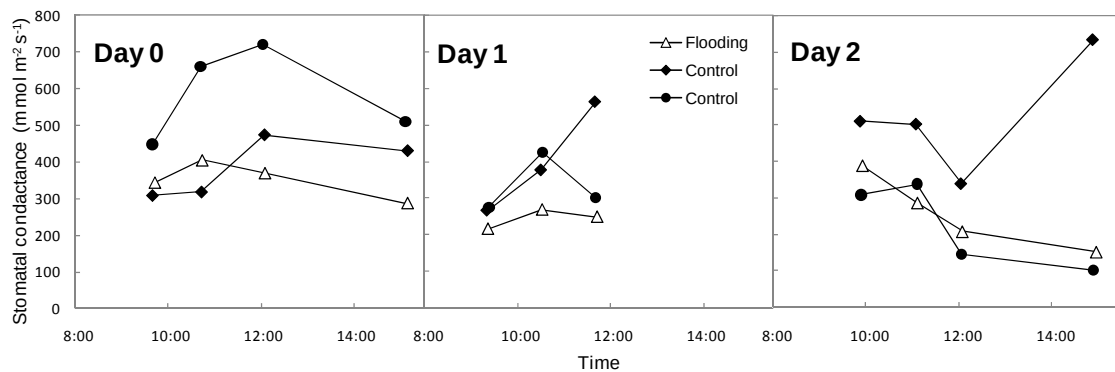


図 3-4-13 *Neolamarckia cadamba* (Jabon) における気孔コンダクタンスの経時変化

図 3-4-14 に *Samanea saman* における気孔コンダクタンスの経時変化を示す。湛水区の気孔コンダクタンスは、対照区と比較して、2 日目に高くなる傾向を示した。

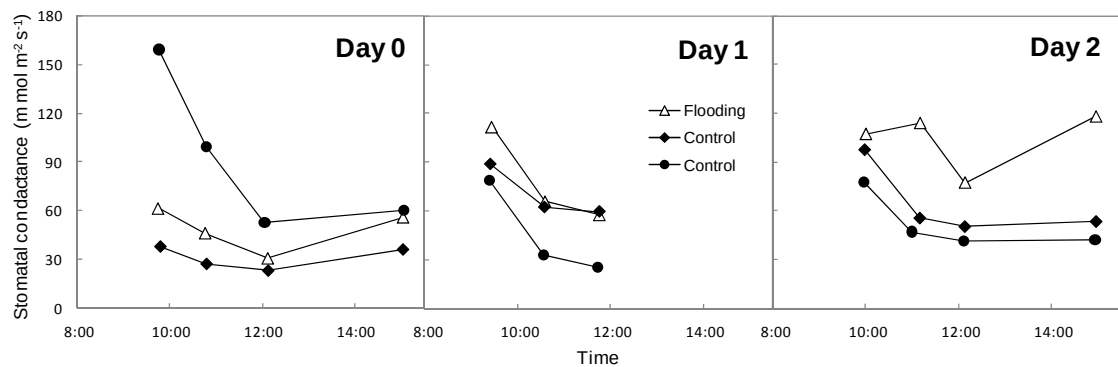


図 3-4-14 *Samanea saman* (Trembesi) における気孔コンダクタンスの経時変化

図 3-4-15 に *Swietenia macrophylla* における気孔コンダクタンスの経時変化を示す。湛水区の気孔コンダクタンスは、対照区と同様の傾向を示した。

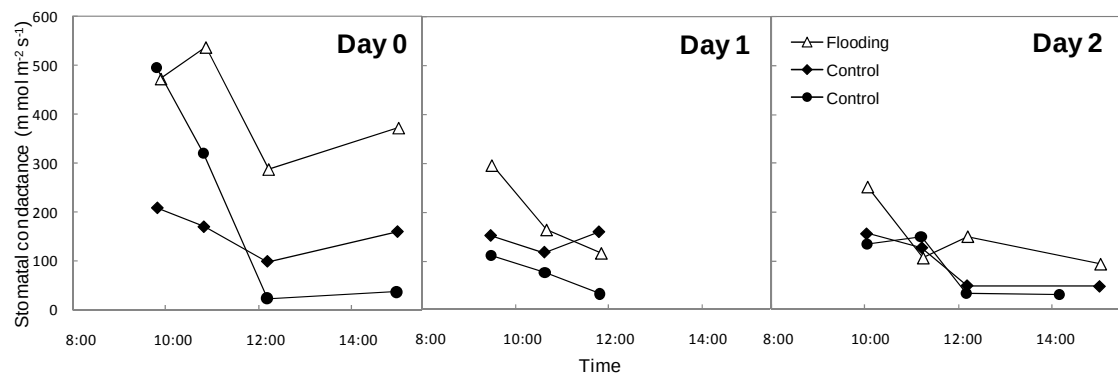


図 3-4-15 *Swietenia macrophylla* (Mahoni) における気孔コンダクタンスの経時変化

Samanea saman の実験終了時の様子 (図 3-4-16A)と気孔コンダクタンスの経時変化 (図 3-4-17)を示す。湛水区の気孔コンダクタンスは、1 日目の 13 時以降そして 4 日目の 14 時以降に对照区より低かった。その後、6 日目では、すべての時刻において对照区より低かった。

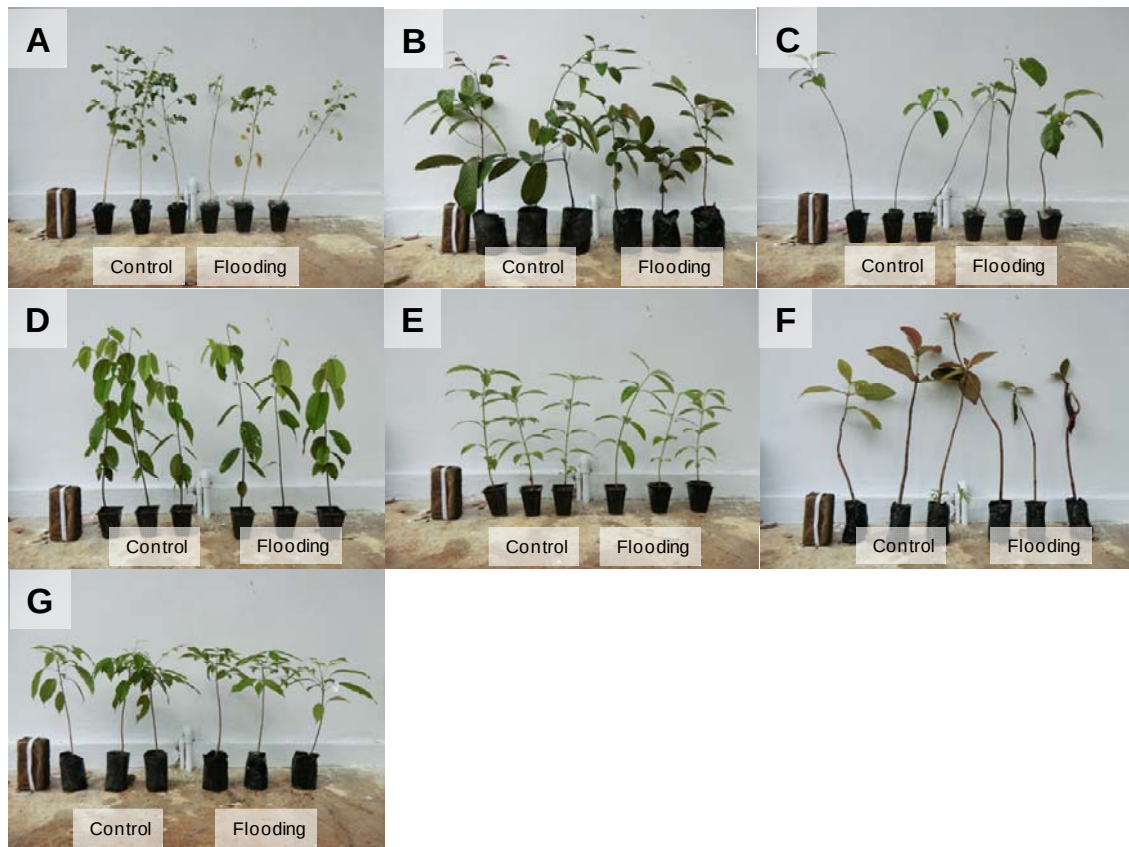


図 3-4-16 実験終了後の苗木の様子

Samanea saman (A)、*Eusideroxylon zwageri* (B)、*Anisoptera* spp. (C)、*Shorea albida* (D)、*Alstonia scholaris* (E)、*Neolamarckia cadamba* (F)、*Swietenia macrophylla* (G)

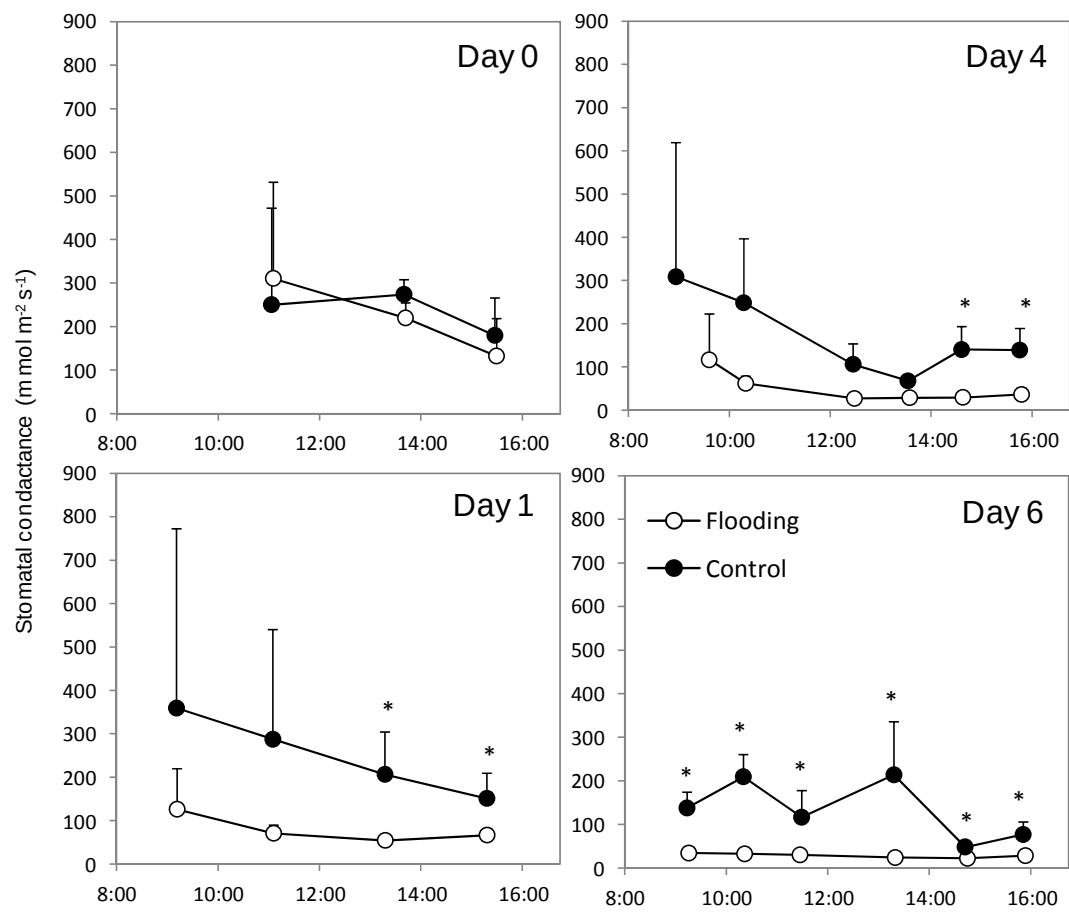


図 3-4-17 *Samanea saman* (Trenbesi)における気孔コンダクタンスの経時変化
誤差棒は標準偏差を示す。* は処理区間で有意差有り (t-test, $p < 0.05$)

Shorea albida の実験終了時の様子 (図 3-4-16B)と気孔コンダクタンスの経時変化 (図 3-4-18)を示す。湛水区の気孔コンダクタンスは、対照区と比較して 6 日目の 9 時から 11 時あたりと 13 時半あたりで高かった。

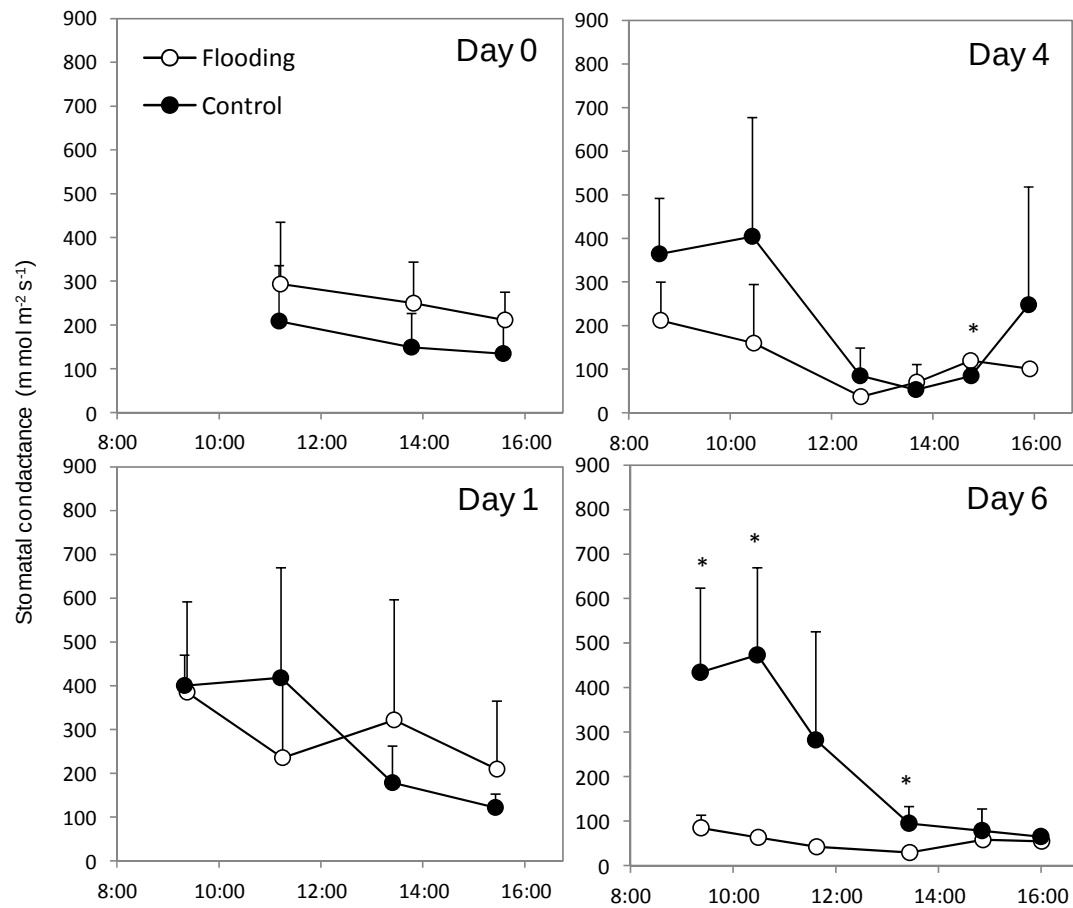


図 3-4-18 *Shorea albida* (Meranti mera)における気孔コンダクタンスの経時変化
誤差棒は標準偏差を示す。* は処理区間で有意差有り (t-test, $p < 0.05$)

Alstonia scholaris の実験終了時の様子 (図 3-4-16C)と気孔コンダクタンスの経時変化 (図 3-4-19)を示す。湛水区の気孔コンダクタンスは、対照区と比較して、1 日目の 13 時以降、4 日目の 8 時から 11 時、6 日目の 9 時から 11 時に低かった。

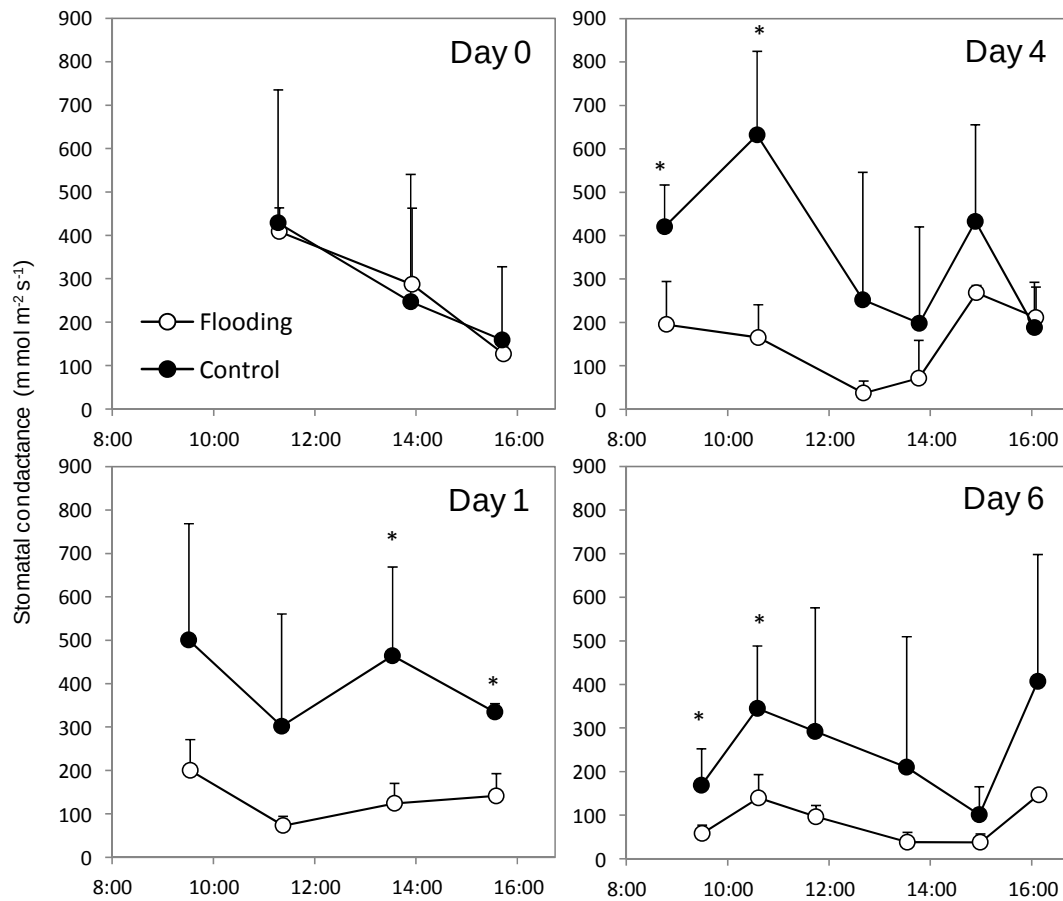


図 3-4-19 *Alstonia scholaris* における気孔コンダクタンスの経時変化

誤差棒は標準偏差を示す。* は処理区間で有意差有り (t-test, p<0.05)

Neolamarckia cadamba の実験終了時の様子 (図 3-4-16D)と気孔コンダクタンスの経時変化 (図 3-4-20)を示す。湛水区において、4 日目に 3 個体中 2 個体が落葉し、6 日目はすべての個体が落葉した。対照区は全く落葉しなかった。

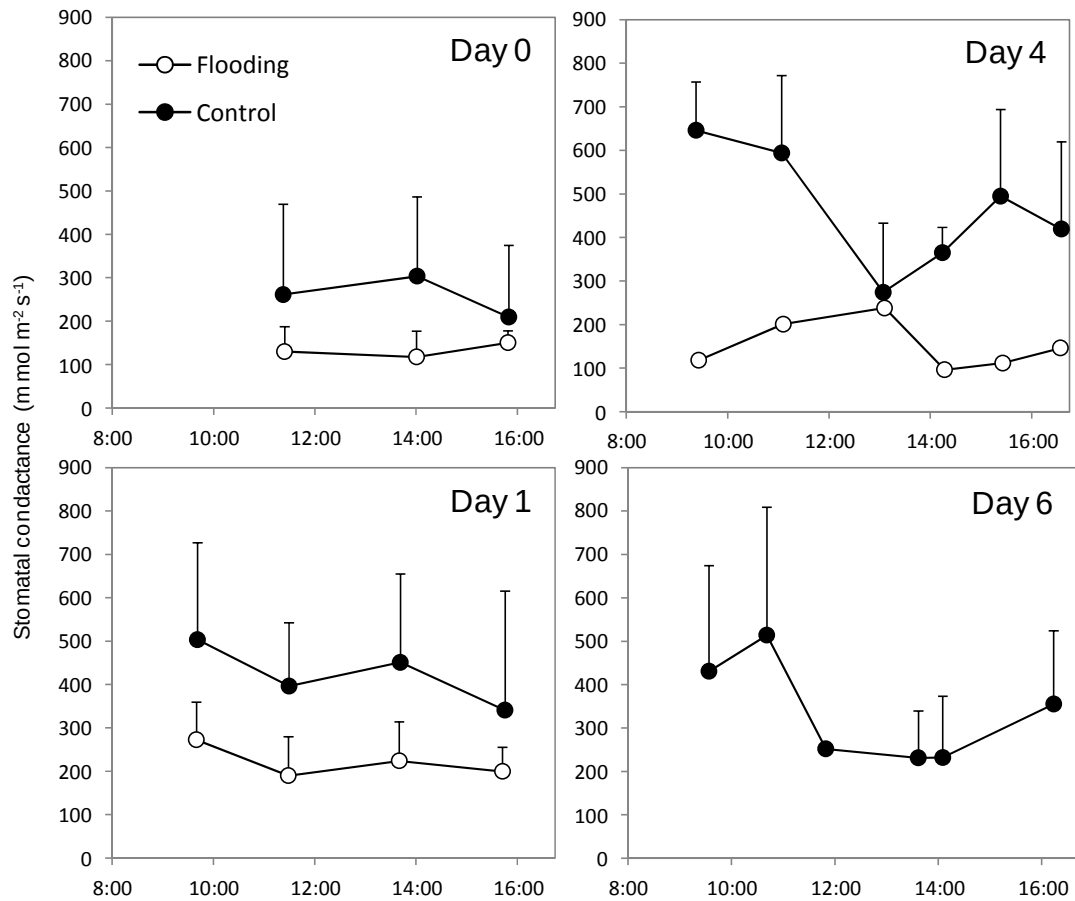


図 3-4-20 *Neolamarckia cadamba*(Jabon)における気孔コンダクタンスの経時変化
誤差棒は標準偏差を示す。* は処理区間で有意差有り (t-test, $p < 0.05$)

Anisoptera spp. の実験終了時の様子 (図 3-4-16E)と気孔コンダクタンスの経時変化(図 3-4-21)を示す。湛水区の気孔コンダクタンスは、対照区と比較して 4 日目の 12 時以降、6 日目の 9 時から 15 時あたりで低下した。

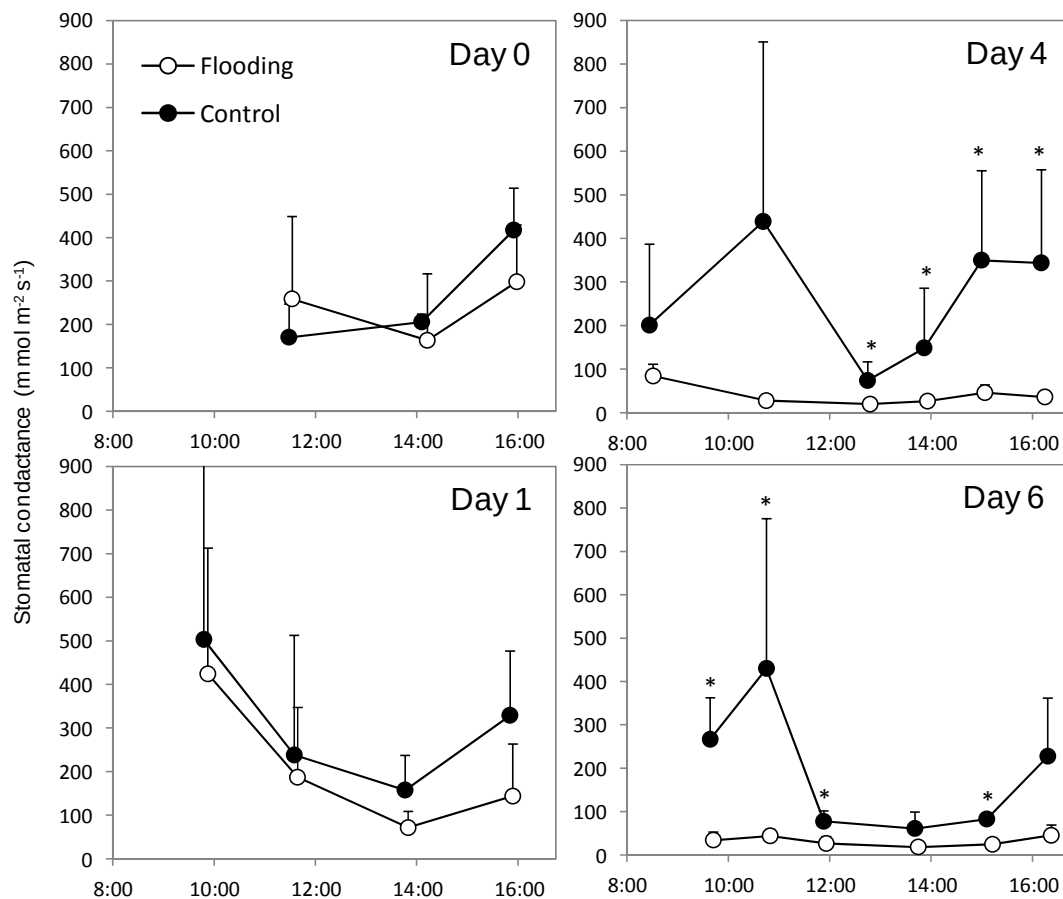


図 3-4-21 *Anisoptera* spp. (Marsawa)における気孔コンダクタンスの経時変化
誤差棒は標準偏差を示す。* は処理区間で有意差有り (t-test, $p < 0.05$)

Swietenia macrophylla の実験終了時の様子 (図 3-4-16F)と気孔コンダクタンスの経時変化(図 3-4-22)を示す。湛水区の気孔コンダクタンスは、6 日目の 11 時あたりに対照区と比較して高かったが、それ以外是对照区と変わらなかった。

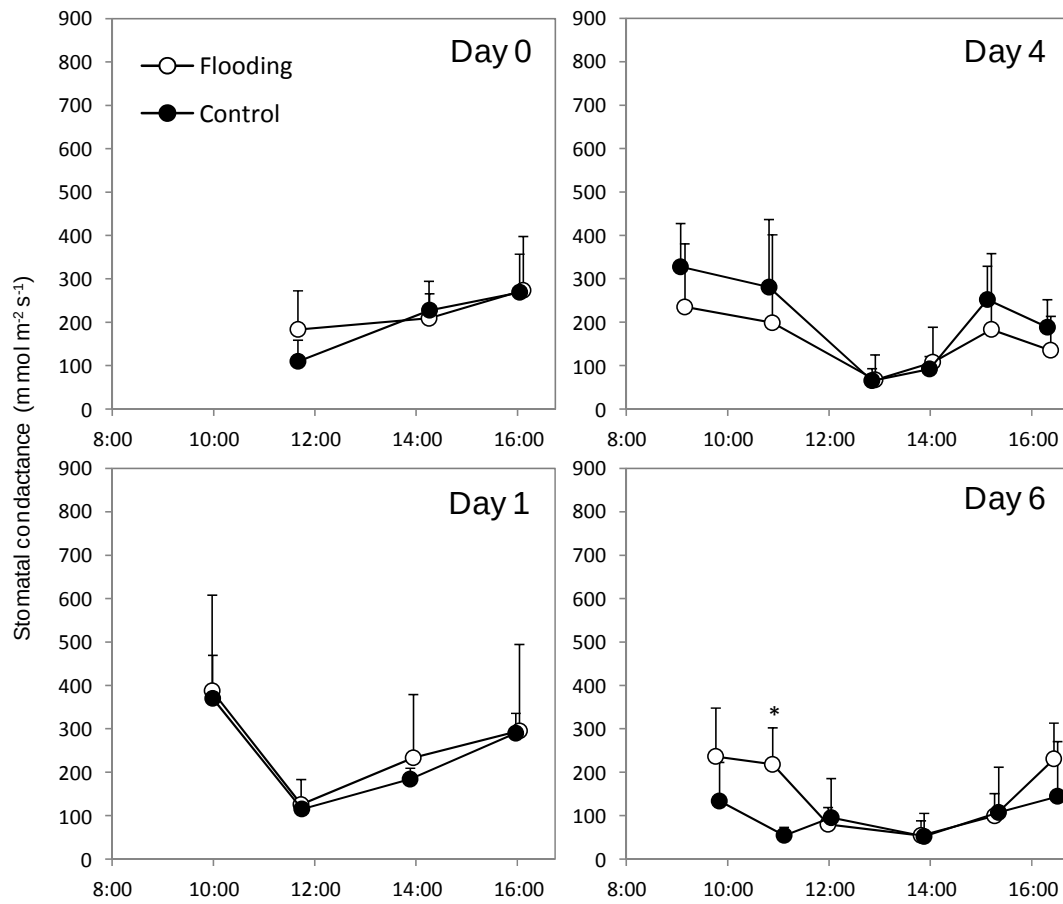


図 3-4-22 *Swietenia macrophylla*(Mahoni)における気孔コンダクタンスの経時変化
誤差棒は標準偏差を示す。* は処理区間で有意差有り (t-test, $p < 0.05$)

Eusideroxylon zwageri の実験終了時の様子 (図 3-4-16G)と気孔コンダクタンスの経時変化(図 3-4-23)を示す。湛水区の気孔コンダクタンスは、対照区と比較して、6 日目の 9 時から 11 時あたりで低下した。

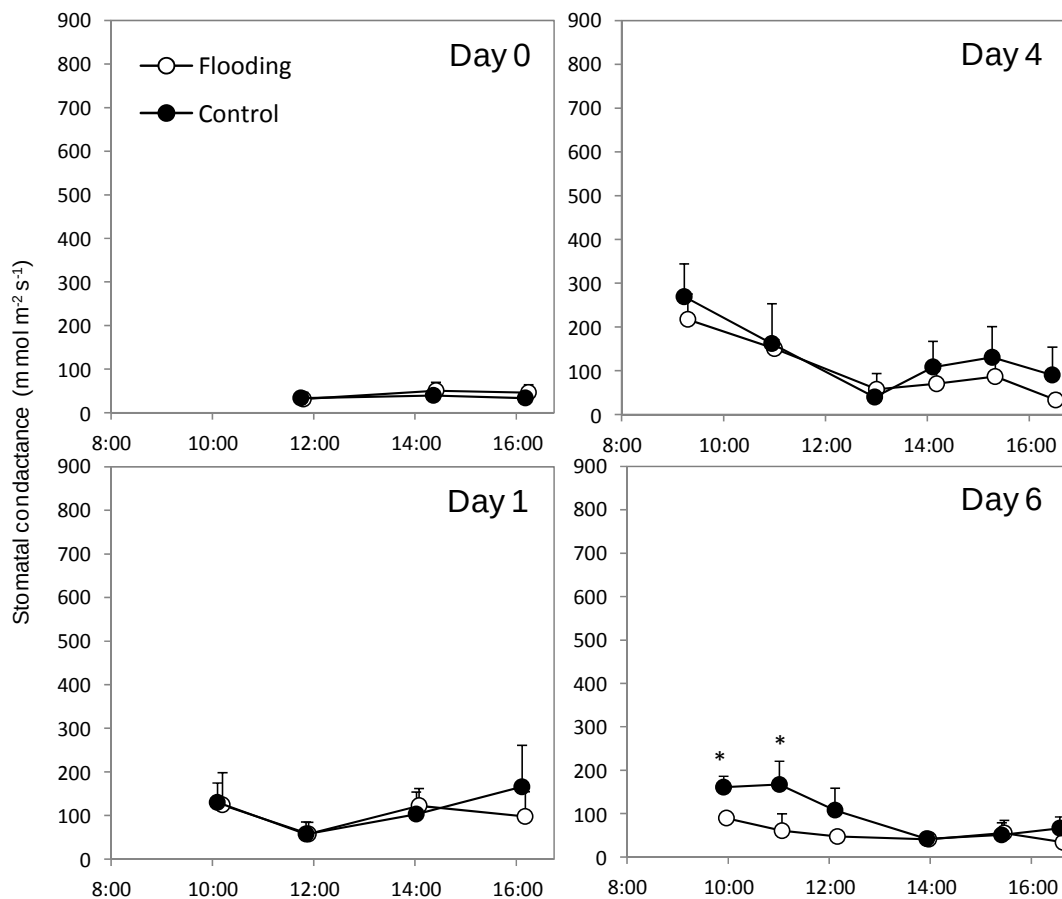


図 3-4-23 *Eusideroxylon zwageri* (Ulin)における気孔コンダクタンスの経時変化
誤差棒は標準偏差を示す。* は処理区間で有意差有り (t-test, $p < 0.05$)

実験 1 では、湛水处理により気孔コンダクタンスが低下した種は、*E. zwageri*、*Nyaway*、*S. smithiana* の 3 種のみであり (図 3-4-2, 4, 9)、他の種では、ほとんど対照区と変わらない傾向が見られた (図 3-4-3, 5, 6, 7, 8, 10, 11, 12, 13, 14)。一方、実験 2 では、*N. cadamba* で落葉がみられ (図 3-4-18)、*S. macrophylla* 以外の種で気孔コンダクタンスの低下が見られた(図 3-4-15, 16, 17, 19, 20, 21)。この低下は主に 6 日目が顕著であった (図 3-4-15, 16, 17, 19, 20, 21)。この結果から、1-2 日程度の湛水では、殆ど湛水による影響は見られないが、約一週間程度以上の湛水環境にさらされた場合は、苗木の生育を阻害することが示唆された。

これらのことから、石炭採掘跡地において生じる部分的な水たまりによる苗木の湛水環境が、1 週間を超えて続くようであれば、苗木の生育に影響する可能性があると言える。この問題に対して、造成の際に排水そのものをより良くすることや、あらかじめ湛水する

地域を確認した上で、湛水耐性が高いことが分かっている樹種(例; *Melaleuca cajuputi*)を
植栽するなどの処置が有効ではないかと考えられる。

【引用文献】

- Bazzaz, F.A. and D.L. Peterson. 1984. Photosynthetic and growth responses of silver maple (*Acer saccharinum* L.) seedlings to flooding. *Am. Midl. Nat.* 112:261-272.
- Beckman, C., R.L. Perry and J.A. Flore. 1992. Short-term flooding affects gas exchange characteristics of containerized sour cherry trees. *Hortscience* 27:1297-1301.
- Kozlowski, T.T. and S.G. Pallardy. 1979. Stomatal responses of *Fraxinus pennsylvanica* seedlings during and after flooding. *Physiol. Plant.* 46:155-158
- Larson, K.D., B. Schaffer and F.S. Davies. 1989. Flooding, leaf gas exchange and growth of mango in containers. *J. Am. Soc. Hortic. Sci.* 116:156-160.
- Newsome, R.D., T.T. Kozlowski and Z.C. Tang. 1982. Responses of *Ulmus americana* seedlings to flooding of soil. *Can. J. Bot.* 60:1688-1695.
- Norby, R.J. and T.T. Kozlowski. 1983. Flooding and SO₂-stress interaction in *Betula papyrifera* and *B. nigra* seedlings. *For. Sci.* 29:739-750.
- Pezeshki, S.R. and J.L. Chambers. 1985. Stomatal and photosynthetic response of sweet gum (*Liquidambar styraciflua*) to flooding. *Can. J. For. Res.* 15:371-375.
- Pezeshki, S.R., J.H. Pardue and R.D. DeLaune. 1996. Leaf gas exchange and growth of flood-tolerant and flood-sensitive tree species under low soil redox conditions. *Tree Physiol.* 16:453-458.
- Ponnamperuma, F.N. 1984. Effects of flooding on soils. In *Flooding and Plant Growth*. Ed. T.T. Kozlowski, Academic Press, Orlando, FL, pp 9-45.
- Regehr, D.L., F.A. Bazzaz and W.R. Boggess. 1975. Photosynthesis, transpiration and leaf conductance in *Populus deltoides* in relation to flooding and drought. *Photosynthetica* 9:52-61.
- Sena Gomes, A.R. and T.T. Kozlowski. 1980. Growth responses and adaptations of *Fraxinus pennsylvanica* seedlings to flooding. *Plant Physiol.* 66:267-271.
- Sena Gomes, A.R. and T.T. Kozlowski. 1986. Effect of flooding on water relations and growth of *Theobroma cacao* var. catongo seedlings. *J. Hortic. Sci.* 61:265-276.
- Slik J.W.F., 2009 onword, Plants of Southeast Asia, <http://www.asianplant.net>, 2014 年 3 月 31 日閲覧
- Tang, Z.C. and T.T. Kozlowski. 1982b. Physiological, morphological, and growth responses of *Platanus occidentalis* seedlings to flooding. *Plant Soil* 66:243-255.
- Wazir, F.K., M.W. Smith and S.W. Akers. 1988. Effects of flooding on phosphorous levels in pecan seedlings. *Hortscience* 23:595-597.
- 熱帯植物研究会, 1986, 熱帯植物要覧, 大日本山林会

3. 5 植え穴客土および土嚢造林試験

国際緑化推進センター 仲摩栄一郎、太田誠一
早稲田大学 田中一生

1) 背景と目的

石炭採掘跡の森林回復の問題点として、採掘残渣中に含まれるパイライト (FeS_2) が参加されることにより、酸性硫酸塩土壌が生成され植栽木の健全な成長を妨げることがある。

こうした生育障害を緩和する手段として、植え穴に森林土壌を客土する方法や森林土壌を入れた土嚢を植栽地に置き、そこに苗や種子を埋め込むことで、植栽初期の生存・成長を促進する土嚢造林が考えられる。

まず、植え穴客土の利点としては、①植え穴内に森林土壌を詰めることにより土壌改良が可能であることがあげられる。次に、土嚢造林の利点としては、①に加えて、②急斜面でも設置が可能であること、③地面のわずかな高低により湛水する箇所ではマウンドとしての機能が付加されること等があげられる。一方、植え穴客土のマイナス面としては、森林土壌の調達と施業コストが高いことが挙げられる。

そこで、本試験では、石炭採掘跡の埋め戻し地において、土嚢造林および植え穴客土の有効性を検証することを目的とした。

2) 対象地と方法

南カリマンタン州バンジャル県の TAJ 社の石炭採掘鉱区において、強酸性土壌が生成され、苗木が枯損した場所を対象にして、2012 年 11 月 28 日に植え穴客土および土嚢造林試験植栽を下記の通り実施した。

供試木は、マホガニー(*Swietenia macrophylla*)とアカシア(*Acacia mangium*)の実生苗を用いた。試験設定は、下記の 3 つの区を設定し、それぞれ約 1m 間隔で植栽し、3 本ひとセットとして取り扱い、各樹種について各処理区それぞれ 20~24 セットを配置し (図 3-5-1) 植栽した (写真 3-5-1)。

- ① コントロール (無処理区) … 採掘残渣区
- ② 30cm×30cm の植え穴に森林土壌を客土 … 植え穴客土区
- ③ 土嚢袋に森林土壌とコンポストを混ぜて詰め、植栽地に置いた後に中央上部に約 15cm×15cm の穴を開け苗木を植え付けた。なお、土嚢の下部には排水用の小さな穴を開けた … 土嚢造林区 (写真 3-5-2)

植栽後、植栽木の第 1 回目の測定として樹高を計測した。また、第 2 回目の樹高を 2013 年 3 月 18 日に測定した。また、それぞれの植栽木の根本の土壌 pH を 2013 年 4 月 1 日に測定した。

			A1C		A1S				A9C		A9S				A17C		A17S
				A1P						A9P						A17P	
M1C		M1S					M9C		M9S				M17C		M17S		
	M1P							M9P						M17P			
			A2C		A2S				A10C		A10S				A18C		A18S
				A2P						A10P						A18P	
M2C		M2S					M10C		M10S				M18C		M18S		
	M2P							M10P						M18P			
			A3C		A3S				A11C		A11S				A19C		A19S
				A3P						A11P						A19P	
M3C		M3S					M11C		M11S				M19C		M19S		
	M3P							M11P						M19P			
			A4C		A4S				A12C		A12S				A20C		A20S
				A4P						A12P						A20P	
M4C		M4S					M12C		M12S				M20C		M20S		
	M4P							M12P						M20P			
			A5C		A5S				A13C		A13S				A21C		A21S
				A5P						A13P						A21P	
M5C		M5S					M13C		M13S				M21C		M21S		
	M5P							M13P						M21P			
			A6C		A6S				A14C		A14S				A22C		A22S
				A6P						A14P						A22P	
M6C		M6S					M14C		M14S				M22C		M22S		
	M6P							M14P						M22P			
			A7C		A7S				A15C		A15S				A23C		A23S
				A7P						A15P						A23P	
M7C		M7S					M15C		M15S				M23C		M23S		
	M7P							M15P						M23P			
			A8C		A8S				A16C		A16S				A24C		A24S
				A8P						A16P						A24P	
M8C		M8S					M16C		M16S				M24C		M24S		
	M8P							M16P						M24P			

M: Mahogani, A: Acacia

C: Control, P: Potting, S: Soil Bag

図 3-5-1. 植え穴客土および土嚢造林試験の植栽木の配置図

(M : *S. macrophylla*, A : *A. mangium*, C : コントロール、P : 植え穴客土、S : 土嚢)



写真 3-5-1. 各試験処理配置（左）と土嚢造林の植栽方法（右）



写真 3-5-2. それぞれの処理区の植栽中の様子（左）と植栽終了後の様子（右）

3) 結果

S. macrophylla と *A. mangium* 植栽木について、植栽後約 4 ヶ月が経過した 2013 年 318 日時点での樹高と 4 月 1 日時点での土壌 pH との関係図を示す（図 3-5-2）。

まず、樹種別の全体の傾向を見てみると、*S. macrophylla* では、植栽木の根元の土壌 pH が 3.0 以下のすべての個体が枯死した（枯死木＝樹高 0）。このことから、*S. macrophylla* の酸性土壌における生存限界は、pH3.0 付近だと考えられる。なお、*S. macrophylla* においては、pH3.0 以上でも枯死している固体が見られるが、これは幹を切断する虫害を受けた影響であると考えられる。

一方、*A. mangium* では、植栽木の根元の土壌 pH が 2.4～3.0 以下の強酸性土壌でも生存している固体が多い。このことから、*S. macrophylla* に比べて、*A. mangium* の方が強酸性土壌に耐性があると考えられる。ただし、土壌 pH が 2.0 付近では、*A. mangium* でも全ての個体が枯死している。このことから、*A. mangium* の酸性土壌における生存限界は、pH2.5 付近だと考えられる。

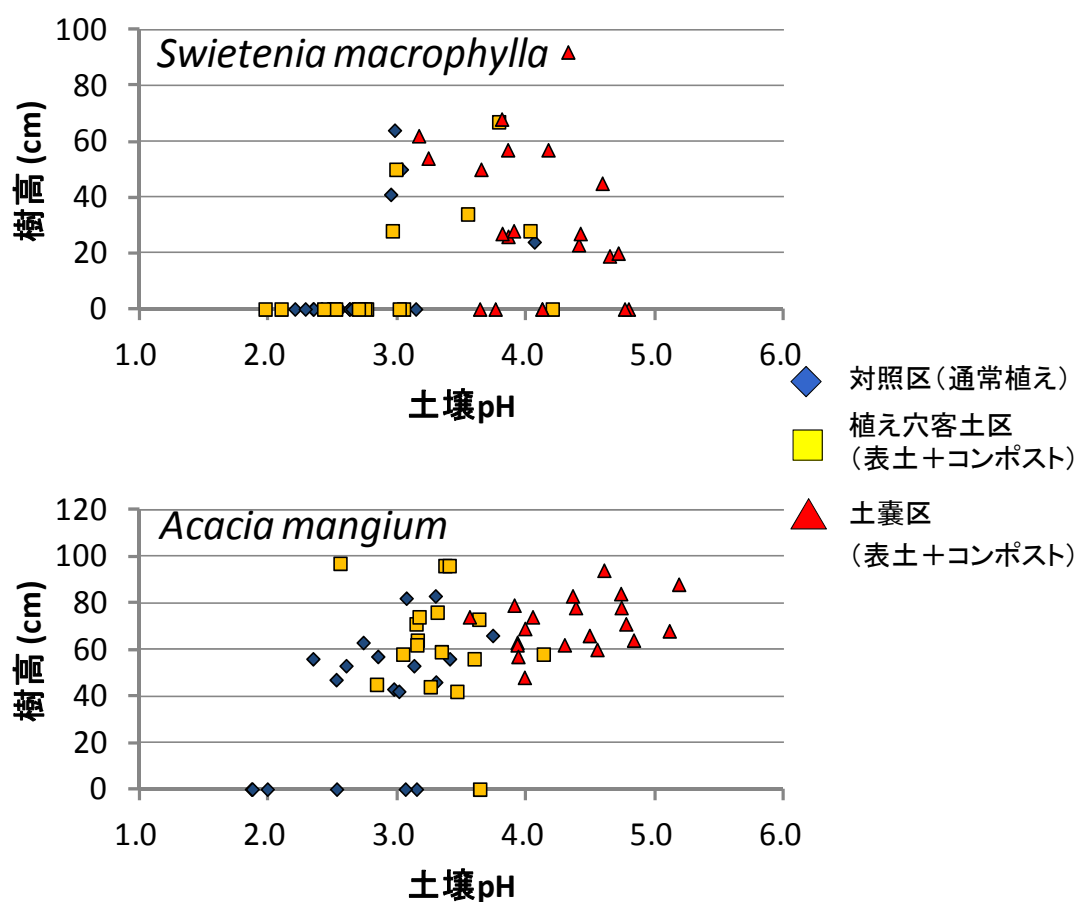


図 3-5-2. *S. macrophylla* (上) と *A. mangium* (下) 植栽木の土壌 pH と樹高の関係図
樹高は 2013 年 3 月、土壌 pH は 2013 年 4 月に測定 (植栽後約 4 ヶ月の時点)

次に、樹種別に処理区間で比較してみると、*S. macrophylla*、*A. mangium* ともに、コントロール区、植え穴客土区に比べて、土嚢区では多くの個体で土壌 pH が 4.0 以上に緩和された。これは土嚢中に森林土壌とコンポストを詰めたためである。植え穴客土区については、土嚢区と同様に土壌 pH が緩和する傾向が見られたが、pH3.5 を中心に *S. macrophylla* では、pH3.5 以下の個体も多数存在した。これは、局所的に硫酸酸性土壌が生成されている場所が比較的高い場所に存在し、そこから降雨時に強酸性の土壌が流亡し、植え穴客土の上に堆積したためであると考えられる (写真 3-5-3)。

なお、無処理のコントロール区の土壌 pH は、pH3.0 を中心に、pH3.0 以下の個体も多数存在することから、本試験の対象地は、局所的な強酸性土壌の影響を強く受けている場所であることが確認された。

植栽木の平均生存率は、*S. macrophylla*、*A. mangium* ともに、それぞれ土壌 pH が緩和された土嚢区が一番高く (65.2%、100%)、次に植え穴客土区 (23.8%、84.2%)、そしてコントロール区の生存率が一番低かった (17.4%、65.0%)。



写真 3-5-3. 植え穴客土区に堆積した
土壌流亡により流されてきた強酸性土壌



写真 3-5-4. 土嚢区の成長良好、植え穴客土
区は生育障害が発生、コントロールは枯死

S. macrophylla 植栽木の平均樹高は、処理区間で有意な差はなかった（図 3-5-3）。それに対して、*A. mangium* 植栽木の平均樹高は、土壌 pH が緩和された土嚢区が一番高く、次に植え穴客土区、そしてコントロール区の順となり、土嚢区はコントロール区に対して有意に高かった（Tukey HSD 法で検定、 $p<0.05$ ）（写真 3-5-4）。

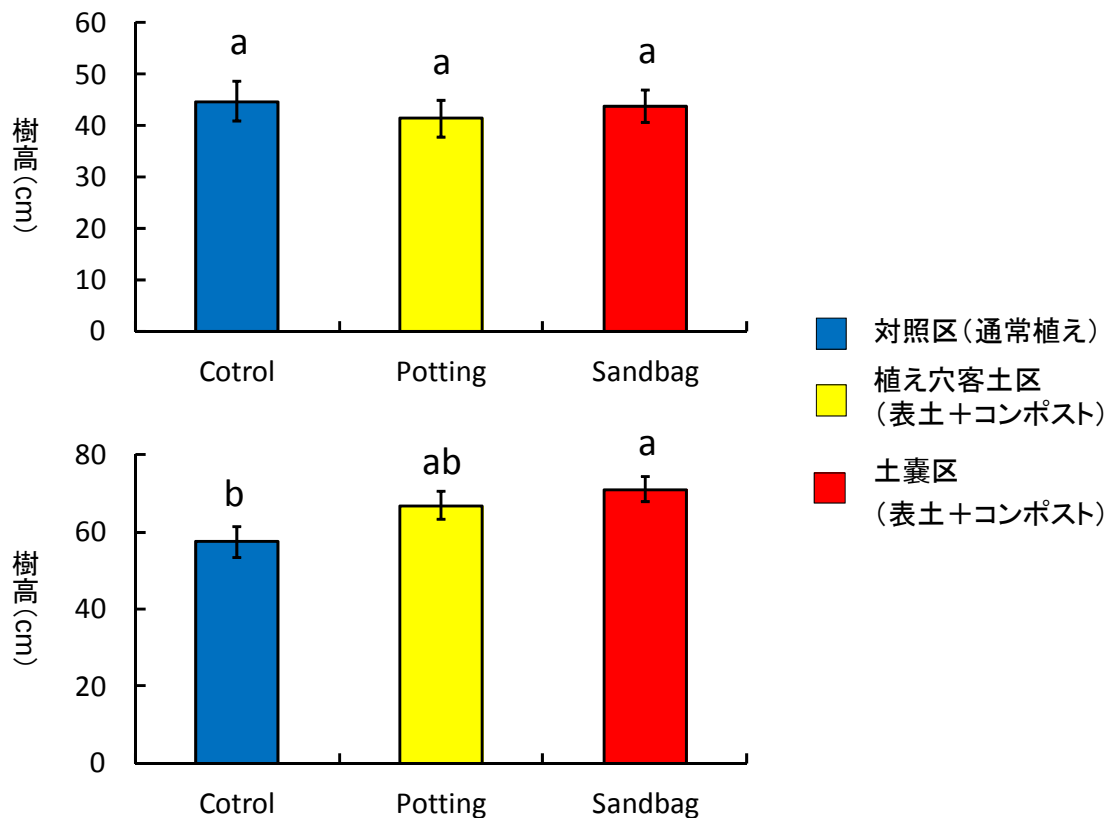


図 3-5-3. *S. macrophylla*（上）と *A. mangium*（下）植栽木の各処理区の平均樹高
2013 年 3 月に測定（植栽後約 4 ヶ月の時点）

3) 考察

本試験結果から、*S. macrophylla* の酸性土壌における生存限界は、pH3.0 付近だと考えられた。それに対して、*A. mangium* の酸性土壌における生存限界は、pH2.5 付近だと考えられた。*A. mangium* の方が *S. macrophylla* よりも酸性土壌に対して耐性が強い、適応力があることが示唆された。

A. mangium 植栽木は、コントロール区に比べて土嚢区では、生存率、樹高ともに改善された。また、植え穴客土についても生存率、樹高ともに改善される傾向があった。強酸性土壌における土嚢処理は、植栽木の生存・成長に良い影響を与えることが示唆された。ただし、植栽木が成長するにつれて、土嚢から根が出ない、いわゆる寝巻きが生じる可能性があることや、根が外に出て強酸性土壌に触れた後はその継続して成長することが困難となることが予想される。その点、植え穴客土区は地表下 30cm まで森林土壌が入っているので、その心配は比較的少ない。植え穴客土区も植栽初期の生存・成長に良い影響を与える傾向がみられている。今後、成林するかどうか、植栽木の生存・成長を継続してモニタリングする必要がある。

S. macrophylla 植栽木については、コントロール区に比べて土嚢区では、生存率が改善される傾向がみられたが、樹高は有意な差がなかった。これは、上述の通り、幹を切断する虫害を受けた影響であると考えられる。

3. 6 東ヌサテンガラ州クパン県シル村社会経済調査

林業省 クパン林業研究所 Eko Pujiono, S.Agung Sri Raharjo, Retno Setyowati

1) 位置と面積

シル村は、ファトゥレウ郡の首都から 11.9km、クパン県の首都から 22.1km 離れており、南中央ティモール県との境にある。その面積は 130.70km² であり、海拔は 510m、傾斜 15-24°の乾燥地帯である（図 3-6-1）。

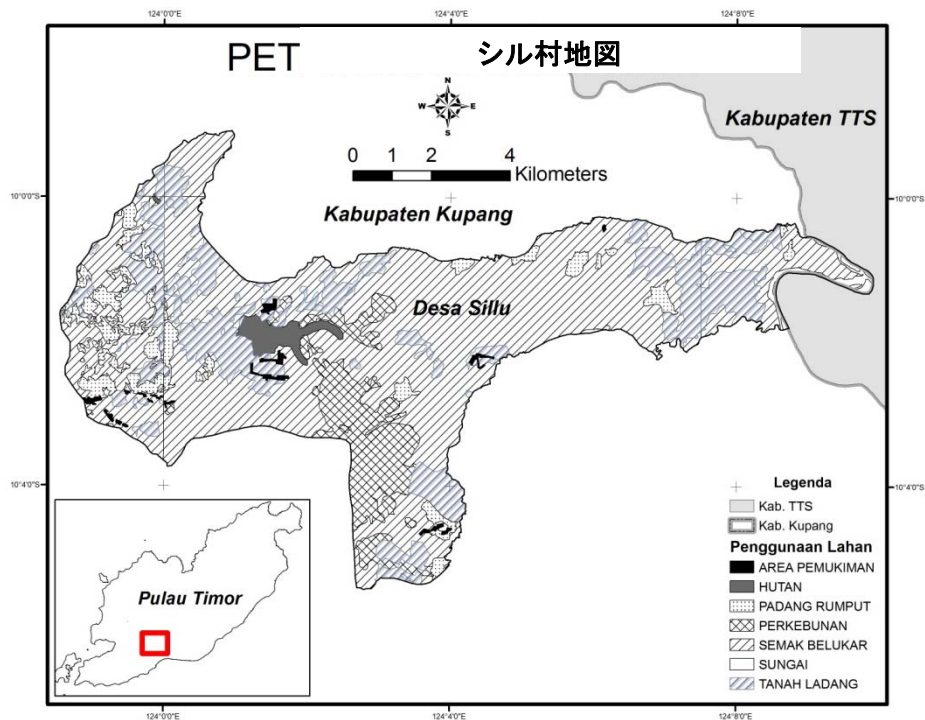


図 3-6-1 シル村土地利用地図

出典：Peta Rupa Bumi Indonesia 縮尺：1: 25.000 (2009 年)

2) 村の歴史

最初の移住グループは、シル村から 10km ほど離れたチャンプロン地方からきた。チャンプロン地方は現在、保安林に設定されている。この移住グループに属する 5 家族のサニ・トブー家、エロ・トブー家、タフィン・タエコー家、ビラ・マナネー家、そしてバイ・マナフー家は、1880 年から森林を開拓して農業や家畜を始めた。二番目の移住グループは 1887 年にきた。このときの家族はバク・カケー家、ラルス・タパタブー家とベタヌー家の 3 家族で、オエル・ナイ・オラ付近に住みついた。続いて 1890 年に三番目の移住グループであるカソ・タノネー家が訪れ、オエル・ラウ・スス付近に住みついた。これら三つの居住グループは、それぞれトゥムクン (temukung) と呼ばれる指導者のもとで地域社会を形成していた。すなわちシルの居住グループはトゥムクン・ムストンに、二番目に来たオエル・ナイ・オラ付近の居住グループはトゥムクン・ラルス・タパタブに、三番目に

来たオエル・ラウ・スス付近の居住グループはトゥムクン・カソ・タノネに率いられた。この三人のトゥムクンはまた、トゥムクンの代表であるフェートル(Fetor)・マンバイトというその地域の首長に率いられていた。それぞれのトゥムクンが率いる三つのグループが森林を開拓したときの土地は、そのまま彼らの領土となっている。

1968 年には政府政策により行政村が設置されることとなり、同年三人のトゥムクンの合意によって行政村シル村が形成された。それ以来 2014 年までに六代の村長が務めている。初代はサムエル・トブ、二代目はニコラス・マナネ、三代目はザカリアス・トブ、四代目はヤコブス・トブ、五代目はアナニ阿斯・タノネ、そして六代目はユリウス・マナネである。

3) 人口

2012 年のシル村人口は 4,241 人 965 世帯である。うち、男性 2,161 人、女性 2,080 人、人口密度は 32/km² 人である。ほとんどが農家である。シル村には大きく分けてトブ、タパタブ、ブイ、ロポ、そしてカケの 6 つの民族がいる。日常生活の中で彼らはダワン語およびインドネシア語を用いてコミュニケーションをはかっている。2011 年から 2013 年までの 3 年間の人口推移を図 3-6-2 に示す。過去 3 年の人口は比較的安定しており、男女比はほぼ 1:1 である。

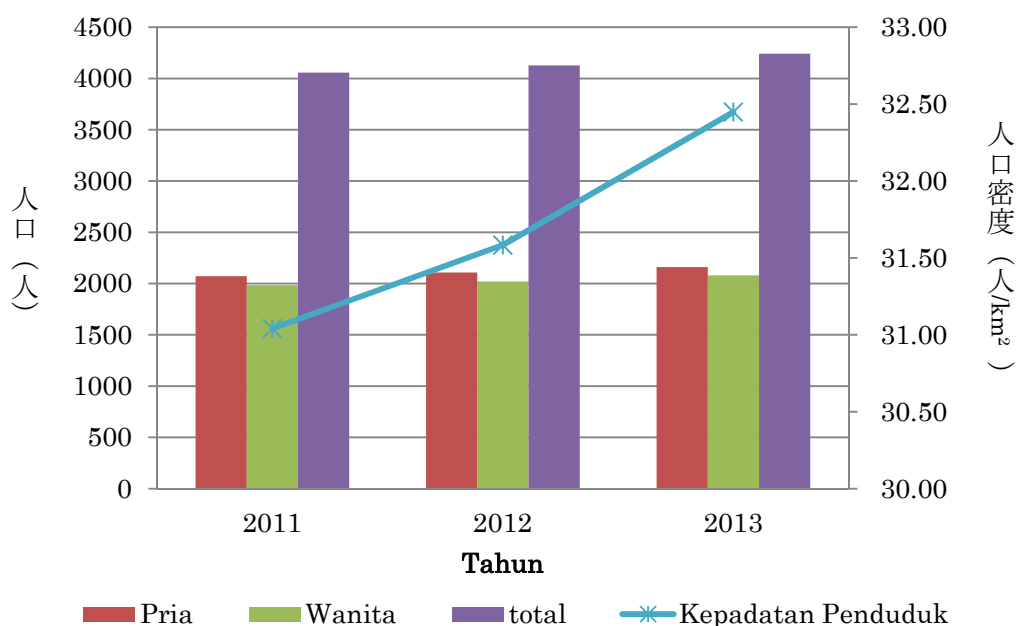


図 3-6-2 シル村過去 3 年の人口推移と合計

4) 経済状況

シル村の経済状況は、ファトゥレウ郡の統計局(BPS)によって算出される国内地域総所得(PDRB)と一人当たりの所得水準データで見ることができる。2009 年から 2011 年のファトゥレウ郡内地域総所得は 700 億ルピアで 4%の経済成長と一人当たりの所得水準は一

年あたり 5、6 百万ルピアであった。

クバン県統計局のデータによれば、2009 から 2011 年の経済構造は、その他のセクターが 44%を占め、次に農業、商業、公共サービスの順になっている(図 3-6-3)。その他のセクターには、採鉱や採石業、加工業、建設業、電気、ガス、水道、運送、通信、そして金融と民間サービスが含まれる。農業セクターにはいくつかの景観用植物栽培や家畜といったサブセクターがある(図 3-6-4)。そのうち、漁業は最も小規模なサブセクターである。

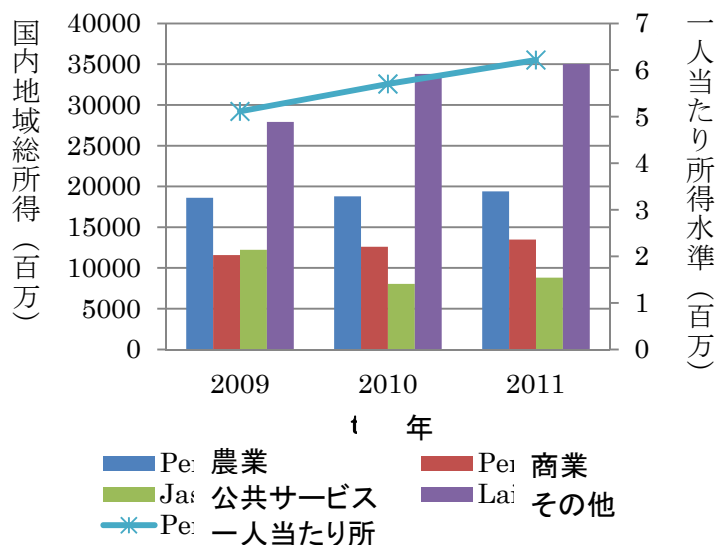


図 3-6-3. ファトゥレウ郡内地域総所得

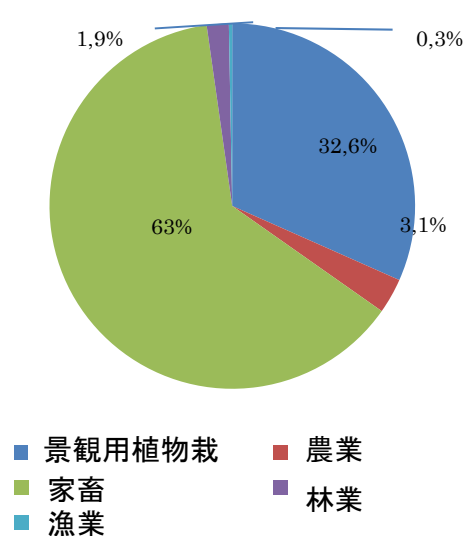


図 3-6-4. ファトゥレウ郡内生計

5) 土地の利用と所有、および天然資源管理

シル村の大半の土地は、先住者グループであるトブやタエコグループの地域住民が占有している。地域住民は伝統的な土地所有形態を続けており、登記済みの土地は全体の 20%で、未登記のことが多い状況である。これは、登記費用が高いためである。登記手順は政府のプログラムである PRONA (農業改革国家行動プログラム) や PRODA (農業改革地域行動プログラム) によるところが多い。PRONA は政府の資金で動いており、登記によって地域住民に土地権を付与するプログラムである。大部分の土地は低所得の地域住民グループが占有している。また、伝統的な土地所有制度であっても、住民間の土地をめぐる対立はめったにない。というのは、谷や支流、林や樹木といった自然物が土地境界の目印とされているが、これらの境界は地域住民に共通認識されているため争いが起こらないということである。

1999 年の森林地図によれば、シル村領域のおよそ 68%は森林地に区分され、うち 44.86%は保安林、23.26%が生産林となっている(表 3-6-1)。

表 3-6-1 シル村の森林地における土地利用

土地利用	森林地			土地面積 (m ²)	合計割合 (%)
	他用途地	保安林	制限生産林		
居住地	335.045,37	141.046,49	117.282,15	593.374,01	0,52%
森林		368.956,19	1.060.943,89	1.429.900,09	1,25%
牧草地	2.092.411,73	605.366,52	2.682.733,39	5.380.511,64	4,72%
耕作地	476.288,72	7.102.698,89	296.987,62	7.875.975,24	6,90%
藪・低木地	29.127.173,25	36.540.253,13	14.255.115,18	79.922.541,57	70,04%
河川	1.238.990,46			1.238.990,46	1,09%
焼畑地	3.105.504,05	6.429.810,41	8.128.520,23	17.663.834,69	15,48%
土地面積 (m ²)	363.75.413,58	51.188.131,64	26.541.582,47	114.105.127,7	
割合 (%)	31,88%	44,86%	23,26%		

出典: Peta Rupa Bumi Indonesia 2009 および Peta Penunjukan Kawasan Hutan 1999 より分析

表 3-6-1 によれば、藪・低木地が 70.04%と土地の大半を占め、次に焼畑地 15.48%が占めている。住民の間には、水田のほかに *mamar* や *lele* と呼ばれる土地管理制度がある。*Mamar* とは、水源地付近の土地管理制度のことで、ココナッツ(*Cocos nucifera*)、ピナン(*Areca catechu*)、クミリ(*Aleurites mollucana*)そしてマンゴー (*Mangifera indica*)のような非木材林産物となる樹種が栽培されている。また、シル村住民は、家屋など建築用材のための伐採を *mamar* によって禁止し、水源地を保全している。木材としてとってよいのは自然に朽ち倒れた木のみである。*Mamar* は、一般に特定の一家族につき一つか二つ所有されている。また、*Mamar* からの収穫物は *mamar* 所有者によって分配されるという規則がある。*Mamar* は登記にかかわらず代々遺産相続されてきた。一方 *lele* とは、乾燥地あるいは焼畑管理制度のことである。乾燥地には、一般にトウモロコシや大豆、緑豆などの二期作が栽培される。水田は、雨水灌漑の湿地管理が行われ、収穫は年一回である。土地利用システムは参加型によってゾーニングシステムが実施され、居住地、生産地/栽培地、管理地および *mamar* 管理地、保護地に区分されている。シル村の栽培植物リストは表 3-6-2 に示される。

表 3-6-2 シル村栽培植物リスト

農作物	耕作物	林産物	
		導入種	自生種
トウモロコシ (<i>Zea mays</i>)	ココナッツ (<i>Cocos nucifera</i>)	チーク (<i>Tectona grandis</i>)	カベサック (<i>Acacia leucophloea</i>)
水稲 (<i>Oryza sativa</i>)	バナナ (<i>Musa Paradisiaca</i>)	マホニー (<i>Swietenia mahagoni</i>)	カユ・メラ (<i>Pterocarpus indicus</i>)
陸稲	カシューナッツ (<i>Anacardium occidentale</i>)	グメリナ (<i>Gmelina arborea</i>)	チュンダナ (<i>Santallum album</i>)
イモ類			
野菜類			
豆類			

ピナン (<i>Areca catechu</i>)
クミリ
(<i>Aleurites mollucana</i>)
ジャンプ・アイル
(<i>Psidium guajava</i>)

出典: 2014 年参与観察および聞き取り

林産物および農作物では、カシューナッツとココナッツが主流である。カシューナッツは 1983 年より緑化プロジェクトとして栽培が始まり、現在は地域社会の重要な換金作物の一つとなっている。一方、クミリやアサムの生産量はあまり多くない。年間を通して生産されているのはココナッツで、一玉 1,000 ルピアで取引される。仲買人などが直接シル村へ買い取りに来るため、市場へ出向く費用がかからない。中にはココナッツを搾油してココナッツオイルを市場で売るものもいる。農作物の販売をするのにもっとも近場にあるのはチャンプロン、オエサオ・パサル、オエカビティ・パサルである。クミリは一般に 2 月に収穫され、皮つきで 1 キロ 3,000 ルピアで販売される。買い取り人はシル村へ来る。住民の現金収入への必要性が高いため、加工せずにそのまま販売して早く現金を取得する。しかし、皮剥きをされたものは 1 キロ 10,000 から 15,000 ルピアで販売される。カシューナッツは 9 月から 10 月にかけて収穫され、皮つきで 1 キロ 7,000 ルピアで販売される。農産物および非木材林産物の季節カレンダーは表 3-6-3 である。

表 3-6-3 シル村農産物および非木材林産物季節カレンダー

農産物名	月												価格
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
カシューナッツ													Rp 7.000,-/kg
ツ													
クミリ													Rp. 3.000,- s/d
(<i>Eleurites</i>													Rp. 15.000,-
<i>mollucana</i>)													
ココナッツ													Rp. 1.000/buah
トウモロコシ													
米													

出典: 2014 年参与観察および聞き取り

地域住民によく利用される林産物はカユ・メラ(*Pterocarpus indicus*) と、ジャンプ・アイル(*Psidium guajava*)である。しかし、カユ・メラはすでに森林にはなく、現在ではほとんど利用されていない。初めての移住者グループがシル村に来た頃には、カユ・メラは家屋の要柱として利用されていた。カユ・メラは硬度クラス I に含まれるほど硬く、建築用材に適している。カユ・メラの採れなくなった現在では、ジャンプ・アイルやココナッツ、チーク、マホニーが

建築用材として利用されている。地域住民の木材需要は森林および **lele** で賄われており、めったに村外へ販売されることはない。

6) 森林減少と土地劣化

初めての移住者グループは天然林内や草原に住みついた。キーインフォーマントの語りによれば、当時の植物は多種多様であり、落葉もしなかったため、長乾季でも気温が涼しく感じられた。現在、多くの天然林はチーク林に転換されたため、長乾季には気温が高くなる。チークは落葉樹であり、そのため他の木々が直射日光に耐えられないのである。ミクロな気候をつくる森林機能は、多種多様な植物があって成り立つのである。一方、シル村の森林は天然林からチーク林へと転換された後の水源地の数に変化はないという。天然林からチーク林への転換は 1975 から 1976 年の造林プロジェクトで実施された。その後、1989 年の産業植林プロジェクトによってチーク、マホニー、ジョハール、そしてアカシアが植林され、1991 から 1992 年のコミュニティー林プロジェクトではジョハールが植林された。

森林減少と土地の劣化は、不明確な森林地の境界でも起きている。地域住民は、1929 年オランダによって引かれた森林地の自然の境界を認識しているが、政府によって引かれた 1982 年の合意に基づく森林利用計画(TGHK)による境界は認識していない。このため住民と政府との間で境界線をめぐる対立が生じたことがあった。しかし現在では、その境界線について再度見直すことで合意が得られている。

境界をめぐる対立や、数々の造林プロジェクトの失敗があったとしても、シル村にある国有林内の森林はいまだ保全されている。その理由は 2 つある。

1. 地域住民および慣習団体全員からの強力な推進がある。
2. 地域住民に森林保全の必要性に対する認識がある。具体的には、造林プログラムあるいは林業局主催の緑化プログラムへの主体的な参加があったり、各水源地にある **mamar** のような、環境保全のための慣習的な規則を持っている。

7) 家畜

ファトゥレウ郡の 2012 年の記録では、シル村でもっとも多く家畜されているのが牛で、1,115 頭であった。大半が放牧であるため、農業用地の荒廃が懸念され、シル村の設立と同時に特定の放牧用地が定められた。これによって、家畜が個人の土地に入った場合には罰金が科される（家畜を屠る）。この規則によって、地域住民の所有する生産的な土地への侵入が最小限に食い止められる。

8) 慣習的な規則と村落規則

シル村には森林および林業に関する規則がある。その一つが上述した **mamar** (水源地付近)での伐採で、自然に朽ち倒れた木以外の採集を禁じ、**mamar** から周囲 200m 離れた場所から伐採が許可される。違法した住民には、その違法行為の度合いに応じて家畜と米の支払いという慣習的な罰金が科せられる。そのほか、森林利用についてはオランダ時代の規則が残っており、国有林における木材やハチミツ、チュンダナの採集が禁じられている。国有林の領域は、

1929 年にオランダが設置した石碑を境界としているが、この境界をめぐる政府と住民との間では対立が起こっている。アナニウス・タノネ氏によれば、ある住民が森林地から木材を採集したところ、林業局担当者に捕まえられたことがあるという。しかし、その木材はオランダ時代の領域である森林地の外でとられたものだったことが分かり、法的手続きを踏むには至らなかったという。

森林および林業に関する規則のほかに、家畜に関する村落規則もある。シル村の大型家畜は、朝晩はつないでおき、管理者のもとで昼のみの放牧とされる。万が一、家畜が **mamar** や **lele**、共有地に侵入して誰かの作物に危害を加えた場合、家畜所有者は罰金を支払わなければならない。罰金の支払いを拒否する場合、その家畜を屠り、家畜所有者と土地所有者で分けて食べる。

表 3-6-4 シル村の慣習的な規則および村落規則

対象分野	慣習的/村落の規則	社会/環境面での影響
林業	- 水源地および mamar での木材伐採禁止	- 土地と水の保全への取り組みを促進する
	- 国有林での木材、ハチミツ、チュンダナの採集禁止	- 持続的な林産物利用の原則を促進する
家畜	- 特定用地のみでの管理放牧	- 生産的な土地の荒廃を最小化する - 作物の荒廃を最小化する

出典: 2014 年参与観察および聞き取り

9) 土地と森林のリハビリテーションプログラム

シル村では土地と森林のリハビリテーションのための取り組みがなされてきた(表 3-6-5)。それらのプログラムは、地域住民や政府、林業分野の海外の団体などがイニシアチブをとって実施されてきた。2004 年には林業省による土地と森林のリハビリテーション活動プロジェクト(**Proyek GERHAN**)が実施された。この活動は成果を上げなかったとみられているが、要因は継続的なモニタリングと整備がなされなかったことにある。キーインフォーマントによれば、林業プロジェクトの成功事例としてカシューナッツの造林開発が上げられる。その成功要因は地域住民に経済的な利益をもたらしたためとされる。地域住民にその成果が感じられることがプロジェクト継続に影響を与える。

表 3-6-5 シル村の土地と森林のリハビリテーションプロジェクト

年	プログラム名	イニシエーター	対象地	成果/進捗	障害/要因
1983	カシューナッツ 植林	クバン県農業局/ 農園局	所有地 (50 ha)	成果あり (最大)	- 住民の希望する作物種を栽培 - 価格要因による促進

2004	土地と森林のリハビリテーション活動 (GERHAN)	クパン県林業局/ ベイン・ノエルミナ流域管理署	国有林	少ない成果	- 継続的なモニタリングと管理不足
2006	アグリビジネス (カシューナッツ植林)	クパン県農業局/ 農園局	所有地	成果あり	- 住民の希望する作物種を栽培
2012/ 2013	チュンダナ植林	州林業局	国有地 (40 ha)	少ない成果	- 住民参加の度合いが低かった - モニタリング不足

出典: 2014 年参与観察および聞き取り

1 0) JIFPRO プロジェクトに対する住民の認識

国際緑化推進センター(JIFPRO)によるプロジェクトでは、地域住民の土地に多種多様な樹種を植林する森林モデルを作った。シル村の住民は、プロジェクトを受入れ、積極的に参加しており、住民はプロジェクトにおける多種多様な作物のモニタリングや収穫の最大化といった活動を実施している。将来はプロジェクトが拡大され、他村や私有地でも実施されていくことを願っている。村長と住民の代表者たちは、JIFPRO の森林モデル活動が住民の植林へのモチベーションを高めるものと期待している。

1 1) まとめ

以上から以下のポイントにまとめることができる。

1. シル村はリハビリテーションやその他の林業活動の対象地となるポテンシャルが高いことが明らかになった。その要因としては、アクセスしやすく、活動を運営する人材があること(地域住民の参加意識が高い)、土地資源の確保が容易であること(居住地域から離れた場所に対象地となりやすい土地が広がっている)、さらには村の規則が整備されている(環境面に関する慣習的な規則および村落規則がある)。
2. 伝統的な土地所有システムと未登記が多い土地所有状況にある。
3. シル村の土地利用計画はすでにゾーニングされており、ゾーニングはそれぞれの土地の機能や住民の合意によって決定されている。
4. 政府政策により天然林が植林に転換されたことが要因で 1975 年頃から森林減少が始まった。そのほかに森林地の境界線が不明確であり、地域住民と政府との間に境界をめぐる対立が生じている。
5. しかしながら、森林減少があるにもかかわらず、シル村近隣の国有林の状態は十分に良好であり、慣習的な規則や村落規則を持ち、森林の重要性を認識している地域住民や慣習組織によって保全されていると言える。
6. 土地のリハビリテーションに関するいくつかのプロジェクトの中には、住民の参加が少なかったことや、継続的なモニタリングと整備が不足していたため期待された成果が上らなかったものもある。

7. JIFPRO の活動成果に関わる情報拡大が住民の植林に対するモチベーションを高めることにつながっている。

【文献一覧】

クパン県統計センター局, 2013, ファトゥレウ郡 2013 年統計, クパン県統計センター局, ク
パン

クパン県統計センター局, 2012, ファトゥレウ郡 2012 年統計, クパン県統計センター局, ク
パン

クパン県統計センター局, 2011, ファトゥレウ郡 2012 年統計, クパン県統計センター局, クパ
ン

活動報告写真



シル村秘書への聞き取りの様子



地域住民の代表者への聞き取りの様子



シル村職員への聞き取りの様子

第4章 森林回復技術ワークショップ

4. 1 目的・概要

本事業成果の効果的な普及や荒廃地における森林回復技術を検討することを目的として、ジャカルタにおいて、「鉱物採掘跡地および半乾燥地における森林回復技術」と題したワークショップを開催した。本事業のこれまでの調査結果の発表を行った後、森林回復技術指針（素案）を示し、ディスカッションを通して意見・情報交換を実施した。

なお、本ワークショップは、現地カウンターパートのインドネシア林業省流域管理・社会林業総局の協力を得て実施した。

(1) 開催日： 平成 26 年 3 月 4 日（火）

(2) 開催場所： インドネシア国ジャカルタ市 Hotel Ciputra 会議室

(3) 発表内容：

国際緑化推進センター佐々木理事長ならびにインドネシア林業省流域管理・社会林業総局 Murdiyono 総務局長が開会挨拶をした。その後、国際緑化推進センターの仲摩主任研究員およびインドネシア側の協力者（大学、民間企業、林業省流域管理署）が発表者を務めた（表 4-1）。

表 4-1. ワークショップの発表タイトルと発表者

Time	Items	Presenter	Moderator
8:30-9:30	Registration	- Organizer(BPDASPS)	-
9:30-10:00	Opening Remarks	- Dr. Sasaki (JIFPRO) - Dr. Murdiyono (BPDASPS)	Ms. Rika (BPDASPS)
10:00-10:20 10:20-10:40 10:40-11:00 11:00-11:20 11:20-12:00	1. Outline of the Project 2. Characteristics of the soil after coal mining 3. Rehabilitation of ex coal mining area at PT. AGM in South Kalimantan 4. Rehabilitation of ex coal mining area at PT. TAJ in South Kalimantan 5. Discussion	- Mr. Nakama (JIFPRO) - Mr. Nakama (JIFPRO) et al. - Mr. Rully (PT. AGM) et al. - Mr. Nakama (JIFPRO) et al.	Dr. Yadi, (IPB)
12:00-13:00	Lunch		
13:00-13:30 14:00-14:30 14:30-15:00	6. Rehabilitation of semi-arid area in Kupang, East Nusa Tenggara 7. Draft Guideline on rehabilitation of degraded area 8. Discussion	- Mr. Djadit (BPDASBN) - Mr. Nakama (JIFPRO)	Dr. Gintings (ex FORDA)
15:00-15:30	Closing Remarks	- Dr. Sasaki (JIFPRO)	-

(4) 参加者：

インドネシア側からは、林業省の流域管理・社会林業総局およびその地方事務所である流域管理署、林業省の研究開発局、鉱物資源エネルギー省関係部局、民間企業（主要鉱山会社）、大学および NGO 等から 50 名の参加者を得た（表 4-2）。また、日本関係者としては、本邦企業のジャカルタ支社および JICA インドネシア技術協力プロジェクトの専門家や現地スタッフ等の参加を得た。

表 4-2. ワークショップ参加者の所属と人数

	所 属	人数
1	林業省流域管理・社会林業総局	11
2	同地方事務所の流域管理署	4
3	林業省研究開発局	3
4	鉱物資源エネルギー省	1
5	民間企業（鉱山会社）	16
6	大学	7
7	NGO	1
8	本邦企業のジャカルタ支社	1
9	JICA プロジェクト関係者	4
10	国際緑化推進センター	2
計		50

4. 2 結果概要およびディスカッションの内容

本ワークショップでは、本事業の現地調査・実証活動の成果である“鉱物採掘残渣の潜在酸性簡易評価法”および“酸性や半乾燥に耐性のある樹種選定”に注目が集まった。インドネシアにおける鉱山跡地復旧の第一人者であるボゴール農科大学教授や鉱業エネルギー省担当者も高い関心を示した。

これまでの本事業の成果および作成中の「技術指針」は、インドネシア林業省および鉱業エネルギー省の既存の鉱山跡地等における森林回復ガイドラインを補完・補強するものとして高い評価を得た。本事業の現地調査や実証活動の成果や作成中の「技術指針」を、上述の既存のガイドラインにいかにして取り込むかについて、今後、インドネシア政府側でも、スモール・ワーキング・グループを設置し検討を進めることについて論議された。

(1) 森林回復の目的について

- 荒廃地の森林回復に当たっては、流域管理の観点から、対象地が上流域（集水域）か下流域に位置するか、台地（鉱質土壌）か湿地（有機質土壌）かをまず把握す

ることが重要。その上で森林造成の目的を定めるべき。

- 対象地の土地利用指定が、「林地」か「他用途」かによって、造成される森林の目的が違ってくる。「多用途」の場合、果樹園やその他開発地としても利用できるが、「林地」の場合は森林再生が主目的である。
- 復旧された森林は、地域住民の便益に寄与するべき。林産物等の直接的利用だけでなく、間接的な公益的機能の発揮等も含めて。

(2) 植栽樹種について

- アカシア、センゴン等の早成樹ではなく、郷土樹種の植栽を進めるべき。インドネシア林業省としても郷土樹種の植栽を推奨している。
- ただし、フタバガキ科等、種によっては初期成長時に全天下の強光条件には耐えられず、被陰を必要とするものもある。その場合、早成樹による一次緑化を実施し、その後に二次植栽として主目的樹種を植える方法が考えられる。
- 多目的樹種として、コーヒーを植えたが、強酸性土壌のため枯れた。

(3) 地ごしらえ、土壌改良、植栽方法について

- 土木技術として、鉱物採掘後、採掘残渣のうち潜在酸性化（Potential Acid Forming : PAF）物質を含むものについては、特殊なシートで覆って地表から 10m 以深に埋めることが必要である。
- その上に、採掘残渣のうち非酸性化（Non Acid Forming : NAF）物質を埋設し、最後に、森林土壌を全面客土することが推奨されている。
- しかし、場所によっては、森林土壌が限られている場合があり、全面客土は困難な場合もある。
- 他の事例でも、JIFPRO プロジェクトと同様に、全面客土が困難な場合には、植鉢、施肥、高分子吸収材施用等の対策を実施し、経過を観察中。

(4) 種子吹き付け工法（hydroseeding）について

- 最近、鉱物採掘跡地の植生回復・森林回復手法として、種子吹き付け工法（hydroseeding）が用いられている。
- 一般的に、種子（草本 10 種、木本 8 種）を培土に混ぜて吹き付けることにより、比較的緑化が困難な岩盤や傾斜地等の法面でも、土壌安定・侵食防止効果が期待され簡易な緑化が可能である。
- 重機を用いて全面客土して苗木を植栽するよりもコストが安い。吹き付け工法のコストは、ha 当たり 50 万円～125 万円程度。それに対して、全面客土は、最低でも ha 当たり約 100 万円で、最高では ha 当たり約 1 千万円かかる。
- 全面客土せずに鉱物採掘残渣に直接吹き付けることも可能である。ただし、比較的酸性に弱い草本の種子が含まれるので、対象地の土壌が pH4.0 以上の場合にし

か吹き付け工法は使用できない。

- 必ず事前に土壌調査を行い、現状の pH や成長を阻害する Al 量のみならず、潜在酸性物質であるパイライトの量を確認することが必要。
- 一般的に、吹き付け工法は、養分を含んだ培地も一緒に吹き付けるため、初期成長は非常に良い。しかし、木本が成長するにつれて、培地から根が出て土中に入り込むと、場合によっては成長が止まり枯死する場合もある。
- したがって、吹き付け工法をコントラクターに委託する場合は、その成否を判断するためには 3 カ月では不十分で、必ず 6 カ月の契約期間とする必要がある。
- 対象地の土壌が pH4.0 未満の場合には、吹き付け工法は不適で、土壌改良を施すとともに酸性に耐性の強い木本を植栽する必要がある。

(5) 林業省、鉱物資源エネルギー省による森林回復ガイドライン、評価について

- 森林地と他用途地では、森林を造成するにも、その目的が違うので、政府は、鉱山跡地における森林回復のガイドラインを森林地と他用途地に分けるべき。
- 林業省令と鉱物資源エネルギー省令との間で、森林回復の成否についての評価基準が若干違う。省庁間の調整により統一されることが望まれる。
- 評価基準として、生存率だけでなく、樹冠面積（樹冠幅）も指標として入れるべき。
- 森林回復の成否についての評価モニタリングは、植栽後 3 年目に実施されることとされている。これは、早成樹種については適切だが、郷土樹種等の遅成樹種については、もっと長いスパンで評価する必要がある。
- また、問題土壌が表面に現れていない場合は、植栽後数年たってから、根が地中の問題土壌に到達して以降、成長不良やダイバックが発生する。モニタリング評価は長期的スパンで実施するべきである。

(6) 森林回復事業への地域住民の参加について

- これまで南カリマンタンでは、参加型森林管理プロジェクトを地元民であるバンジャル人を対象として進めてきたが失敗することが多かった。移民であるジャワ人を対象とした場合には、成功することが多い。森林を造成し、林産物等を得るためには育つまでに長期間が必要である。その間、保育等の努力を継続できるかが森林管理事業の成否を分ける。
- ただし、地元民でも、丁寧に指導すれば成功することができる。そのキーワードは以下の通り。
 - ✓ 十分な事前説明
 - ✓ 適切な代表者（リーダー）による住民の組織化
 - ✓ 地元行政機関（村長）の理解と協力
 - ✓ 県林業部の理解と協力

- ✓ 地元大学による指導、コーディネーション
- ✓ 地元民間企業の技術支援（優良苗木の提供、植栽・保育・収穫技術指導）
- ✓ 国際的な支援と協力（JIFPRO、早稲田大学等）
- ✓ インセンティブとして、ゴムや陸稲、トウガラシ、特用林産物等とのアグロフォレストリー

(7) 本事業の終了後について

- 上述の通り、森林回復の成否は、数年では判断できない場合が多い。事業期間終了後、JIFPRO は継続して現地調査、モニタリングを実施するのか？
- そうでない場合は、誰が後を引き継ぐのか？協力している民間企業か？または林業省の研究開発局か？
- 是非、今後も事業を継続して、州内の別の県にもモデル林を造成して欲しい。

4. 3 「森林回復技術指針（素案）」についての提言

- 現地調査・実証活動の対象地である、鉱山跡地と半乾燥地の条件は大きく異なるので、それぞれについて、別々に技術指針を作成することが望まれる。
- 鉱物採掘には、石炭のほかにも、金、ニッケル、ボーキサイト等がある。今回 JIFPRO が作成する技術指針は、現地調査・実証活動の対象地が石炭採掘跡地であるため、石炭採掘跡地における森林回復に特化した方がよい。
- インドネシア林業省、鉱業エネルギー省それぞれが規定する既存の森林回復ガイドラインおよび評価ガイドラインは、土壌保全等の土木工法についての記述はあるが、強酸性等の問題土壌への対処方法や耐性樹種選択指針についての記述がない。そこで、今回、JIFPRO が作成するガイドラインは、それら現場の問題に対して具体的な対処方法を示した技術指針が必要とされている。

例 1) 鉱山採掘跡地の場合

土壌 pH や土壌中 Al、Mn 濃度がこのくらいの場合には、耐性のあるこの樹種が選択可能である等。

例 2) 半乾燥地の場合

問題土壌の特性（重粘土質、乾燥し易い等）に応じて、耐性のあるこの樹種が選択可能である等。

4. 4 ワークショップ写真



写真 4-1. 開会挨拶



写真 4-2. ワークショップ参加者 (50 名)



写真 4-3. 石炭採掘跡地における森林回復セッション：LM 大学 Mahrus 講師(左) モデレーターの IPB 大学 Yadi 教授(右)



写真 4-4. 半乾燥の農牧業過剰利用地における森林回復セッション：クパン流域管理署の Djadit 署長、モデレータの Ginting 氏(右)



写真 4-5. 現地協力会社 PT. AGM の Rully 氏



写真 4-6. ワークショップ翌日、総務局長との面談

第5章 森林回復技術指針（素案）

5. 1 石炭採掘跡地における森林回復技術指針（素案）

(1) 石炭採掘跡地における森林回復のためのキーワード

i) 埋め戻し材料土壌の酸性評価（本プロジェクトで得られる情報+既存情報）

- ✓ パイライトの有無、多少の簡易判定（簡易潜酸性評価法）
- ✓ 現状土壌 pH ならびに潜酸性評価（簡易・準簡易評価法）

ii) 土壌物理性（既存情報の収集・整理）

- ✓ 土壌堅密度評価（土壌断面調査/簡易フィンガー/貫入抵抗評価法）
- ✓ 土壌物理性の改善方策（リッピング）

iii) 土壌侵食防止（既存情報の収集・整理）

- ✓ 地拵方法
- ✓ 表土被覆方策（カバークロップ他）

iv) 樹種選択と植栽（本プロジェクトで得られる情報+既存情報）

- ✓ 土壌酸度の応じた植栽可能樹種のリスト・特徴
- ✓ 植栽法

(2) 石炭採掘跡地における森林回復のための基本的考え方

石炭採掘跡地における森林回復のための基本的考え方として、様々な現場の条件に対応した技術の選択肢を示すデシジョンツリーを作成した。

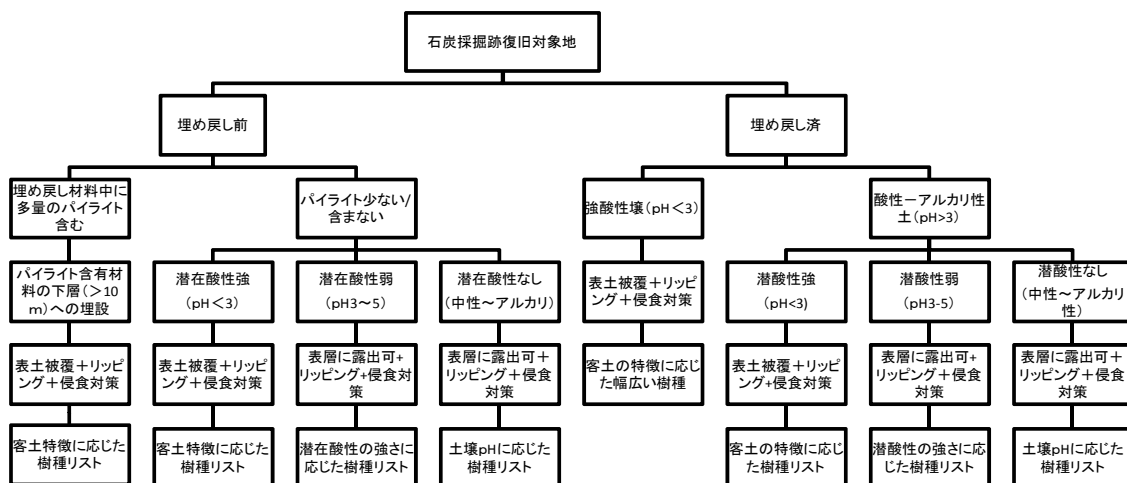


図 5-1. 石炭採掘跡地の森林回復のためのデシジョンツリー

5. 2 半乾燥地における森林回復技術指針（素案）

(1) 半乾燥地における森林回復のためのキーワード

i) 復旧対象地土壌の特徴把握（本プロジェクトで得られる情報＋既存情報）

- ✓ 現状土壌 pH 評価（簡易・準簡易評価法）
- ✓ 膨潤性粘土からなるかどうかの判定（地形/野外土性/乾期におけるクラックの有無・大小/下層土における還元色の有無による判定）
- ✓ 土壌保水能の判定（有効土壌深、石礫含量に基づく簡易評価法）

ii) 土壌物理性改善（本プロジェクトで得られる情報＋既存情報の収集・整理）

- ✓ 膨潤性粘土よりなる土壌の物理性改善方策（改良資材の例と効果）
- ✓ 有効土壌深の浅い未熟土・石礫土の保水性確保方策（改良資材の例と効果）

iii) 樹種選択（本プロジェクトで得られる情報＋既存情報）

- ✓ 乾燥耐性・過湿耐性などに応じた植栽可能樹種のリスト・特徴

(2) 半乾燥地における森林回復のための基本的考え方

半乾燥地における森林回復のための基本的考え方として、様々な現場の条件に対応した技術の選択肢を示すデシジョンツリーを作成した。

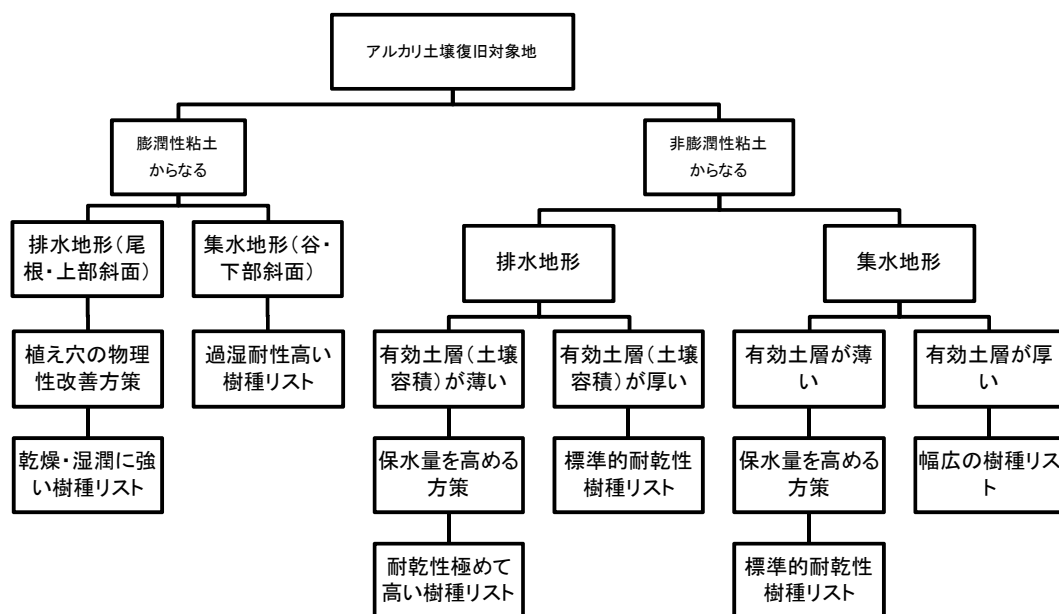


図 5-1. 半乾燥地における森林回復のためのデシジョンツリー

第6章 開発地の植生回復・森林回復について資料収集分析

6. 1 インドネシアの石炭に関する最新情報

(1) インドネシアの石炭についてインドネシアの石炭生産と輸出

インドネシアは世界的にも大規模の石炭生産および輸出国である。2005 年以来オーストラリアに追いついてから火力用石炭の輸出をリードしてきた。輸出用の火力用石炭の品質は中品質タイプ（5100-6100cal/gram）および低品質タイプ（5100cal/gram 以下）があり、中国やインドからの需要が大きい。インドネシアエネルギー省からの情報によれば、現在の生産率を保つ場合、インドネシアの石炭可採年数は 83 年と算出される。また、最新の BP 統計によれば、世界の石炭埋蔵量の中でインドネシアは第 13 位に入り、世界全体の 0.6%を占めている。埋蔵されているインドネシアの石炭の 60%は低品質タイプ（亜歴青炭）で 6100cal/gram 以下である。

石炭埋蔵ポイントはスマトラ島、ジャワ島、カリマンタン島、スラウェシ島、そしてパプア州の至る所にあり、基も大規模な埋蔵地域は、1. 南スマトラ州、2. 南カリマンタン州、3. 東カリマンタン州の 3 州である（図 6-1-1）。



図 6-1-1. インドネシア鉱山地図

出典：PWC Indonesia

インドネシアの石炭産業は断片的で、いくつかの大規模な生産者と多くの小規模生産者がそれぞれの炭鉱と炭鉱コンセッションを持って生産する形で成り立っている（主にスマトラとカリマンタン）。

1990 年代初め、石炭セクターが再び海外投資に開かれ、石炭生産と輸出、そして国内販売は着実に増加した。国内利用量は少ない。インドネシアの石炭輸出は全体生産量の 70～80%を占め、残りが国内市場に回される。生産、輸出、国内販売は今後 5 年間で最低でも平均 10%増加する見込みである（図 6-1-2）。

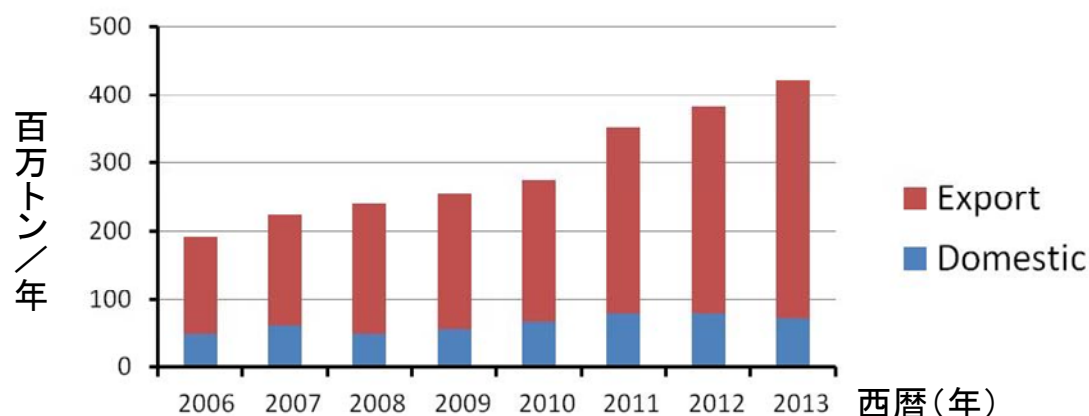


図 6-1-2. インドネシアにおける石炭生産量の推移

出典：インドネシアエネルギー鉱物資源省

(2) 石炭生産と輸出増加の要因

- 石炭は発電部門を独占している。少なくとも世界のエネルギー生産の 27%を占め、石炭火力発電所では全電力の 39%以上を生産している。石炭火力発電所は抽出しやすく低価格で、他のエネルギー源と比較して設備投資が安くすむ。
- インドネシアには中品質および低品質タイプの石炭が豊富に埋蔵されている。これらの品質の石炭は世界市場で価格競争力がある（インドネシアの労働賃金の低さにもかかわる）。
- インドネシアは巨大市場を持つ中国やインドに地理的に近い位置にいる。両国では新たな石炭火力発電所が建設され、低品質タイプの石炭需要が急激に伸びている。世界的な石炭需要は今後 5 年間で石炭生産を上回り価格が上昇するとされている。
- 国内石炭消費は低い。増加する国内生産量と世界の需要により、輸出が増加している。
- インドネシアの石炭の主な輸出先は中国、インド、日本、韓国である。石炭は収益の 85%が商品取引口座として重要な国家歳入となっている。

(3) インドネシアの石炭部門における将来予測

2000 年代商品の急騰が石炭輸出企業に莫大な利益をもたらした。商品価格の急騰は、新たな経済発展の中で経済成長を引き起こした。しかし、このような利益を生み出す状況は 2008 年の世界的な経済危機の勃発による商品価格の急激な下落によって変化した。インドネシアは輸出全体の 50%を占める商品取引口座の輸出という外的要因の影響を受けた（特に石炭とパームオイル）。その間、2009 年の国内総生産の成長は 4.6%（国内消費に多くを支えられている）であった。2009 年後半から 2011 年初めまで世界的な石炭価格

の厳しいデバウンスがあった。しかしながら、世界経済活動の減少は石炭の需要を緩和させ、**2011** 年初めより石炭価格は下降し始めた。

これらのことから、石炭産業からの利益は近い将来限定的になると予測される。しかしながら、長期的な視野を持てば—世界経済活動が再び軌道に乗るとき—中国やインドからの需要が再び石炭ビジネスに大きな利益をもたらすことになるだろう（中国の需要は実際に **2011** 年から **2016** 年の間に **2** 倍の **60** 億トンになると見込まれている）。これらの将来予測が、ここ数年に多くのインドネシア企業が石炭採鉱業を拡大させている理由であり、なかには主要事業として切り替える企業もある。エネルギー価格の高騰とエネルギー源の枯渇を踏まえると、石炭の買い取りは高くなるだろう。このことが多くのインドネシア企業にとっては石炭埋蔵地を確保するインセンティブとなっている。アストラ・インターナショナルやセメン・グレシック（セメント産業）といった数多くの大企業や、国有電力会社—後者 **2** 企業は石炭供給に多くを依存しているが—は、採鉱およびエネルギービジネスにおける全体的な価値連鎖を構築するために、そして将来の供給を確保し、世界的な石炭の価格変動に対抗するために石炭採鉱に投資をしている。

化石燃料の依存を減少させようという世界的な認識があるにもかかわらず、化石燃料（特に石炭）に代わる新しいエネルギー源の開発は姿を見せない。石炭採鉱におけるクリーンな石炭技術はしかしながら営利活動と関連して将来進歩していくことだろう。そしてインドネシアは石炭採鉱セクターにおいて非常に重要な役割を果たす国として注目されている。クリーンな石炭技術は、石炭火力発電によって排出される二酸化炭素の削減に特化しているが、未だ持続的な進歩にはつながっていない。一方で、石炭採鉱につながる上流での活動では、炭層メタン（CBM）貯留槽の開発などが進められており、インドネシアにはその巨大なポテンシャルがあることで注目されている。

インドネシア政府の政策として、エネルギー天然資源省は国内供給の確保のために、一定量の石炭生産を国内消費に回すよう定め、輸出税を課すことで輸出量を制限している。政府は **2025** 年までに国内エネルギー供給の **30%** を石炭で賄う計画を立てている。

また、政府は、鉱山セクターに付加価値を付けるかわりに、石炭以外の全ての原料出荷について制限をかけようとしている。はじめは、**2014** 年以降原料輸出を禁止したが、その後いくつかの輸出品については継続する姿勢も見せている。石炭は **2012** 年のこの輸出禁止政策の対象とはならず、原料のままの輸出が継続されている。

【参考資料】

Indonesia Investments website（2014 年 3 月閲覧）

<http://www.indonesia-investments.com/doing-business/commodities/coal/item236>

PWC Indonesia website: Indonesia Mining Areas Map（2014 年 3 月閲覧）

<http://www.pwc.com/id/en/publications/indonesia-mining-areas-map.jhtml>

6. 2 インドネシアにおける鉱山跡地の森林回復事業に関する法令

インドネシアにおける石炭採掘事業に関する法令（許認可手続き、採掘後の植生回復・森林回復の技術指針および評価指針）について情報を収集分析し、下記の通り、法令一覧を作成した。

(1) 2009 年林業大臣令「森林回復の成功に関する評価指針」(P.60/Menhut-II)

鉱物採掘跡地での森林再生成果評価活動の事例を提供し、適切な森林再生活動がなされるための法令。森林再生成果基準、成果評価方法と手順、評価結果およびその報告についての規則を掲載。

出典： http://www.dephut.go.id/uploads/files/P60_09.pdf

(2) 2011 年林業大臣令「森林回復指針」(P.04/Menhut-II)

鉱物採掘跡地での森林再生活動の事例を提供し、用途に応じた森林機能の復元を目的とする指標と基準にもとづいた森林再生活動がなされるための法令。対象地の調査および選定、活動（5 ヶ年・1 年）計画の作成とその評価、活動の実施、実施団体の結成、技術指導、報告のメカニズム、罰則、閉鉱にあたっての規則を掲載。

出典： <http://ngada.org/bn23-2011.html>

(3) 2012 年森林再生技術の手引き

鉱物採掘跡地等での森林再生技術を掲載した実務用簡易手引書。森林皆伐整備から、土地の決定、浸食と沈殿物の対処、育苗、初めての植林、栽培物の選定までの方法を掲載。

出典：インドネシア林業省より入手

(4) 2008 年鉱物資源エネルギー大臣令 No.18「採鉱地の埋め戻しと再生について」

採鉱地再生と閉鎖についての原則となる法令。原則、実施方法、活動計画の評価と合意、実施と報告、再生と採鉱地閉鎖の保障、行政上の罰則、変更の確定、採鉱地閉鎖の確定についての規則を掲載。

出典： <http://prokum.esdm.go.id/permen/2008/Permen-esdm-18-2008.pdf>

(5) 2010 年インドネシア国政令 No.78「採掘跡地の森林回復について」

採掘跡地の森林回復についての原則となる政令。その原則、実施方法、活動計画の合意、実施と報告、再生と採掘跡地の保障、個人用採掘許可取得者の再生と採掘跡地、再生と採掘跡地用地の譲渡、行政上の罰則、変更の確定、採掘地閉鎖の確定についての規則を掲載。

出典： <http://prokum.esdm.go.id/pp/2010/PP%2078%202010.pdf>

6. 3 植生回復・森林回復に適用可能な森林施業技術

インドネシア国政府や国際 NGO が実施している研修の内容について情報を収集分析した。

(1) インドネシア鉱物資源エネルギー省による研修

インドネシア鉱物資源エネルギー省は、民間企業（鉱山会社）の森林回復担当者等を対象として、採鉱跡地の森林普及に関する技術研修を毎年実施している。以下にその研修内容をまとめた。

i	2012/9/25-27	政府職員のための炭鉱跡地回復関連法令に関するトレーニング
	政令 2010 年 No. 78、および採鉱跡地と再生についての鉱物資源エネルギー大臣令ドラフト	
	採鉱地に生物多様性は存続しているか	
	採鉱によるランドスケープの変化	
	CSR プログラムをデザインする方法とは？ CSR 組織の管理方法とは？ CSR プログラムとしてコミュニティと協働するためには？	
	採鉱跡地リハビリテーションのための在来種特定とその試験	
	採鉱跡地リハビリテーションのための樹種選定	
	土壌改良としての生物有機	
	種子繁殖	

(2) 環境リーダーシップ・トレーニングイニシアチブ (ELTI) の技術研修

環境リーダーシップ・トレーニングイニシアチブ (ELTI) は、イェール大学森林環境学研究科とスミソニアン研究所が立ち上げた共同プロジェクトである。アジアやラテンアメリカの熱帯地域における森林生態系および生物多様性の保全と復元に貢献することを目的としている。

ELTI では、政策立案者、個人の技術者、コミュニティの代表者、先住民の指導者およびその他の関係者を対象にして、関連する知識や方法、スキル、コネクションを伝えていくことで、保護管理システムの促進を目指している。二つのプログラムを実施しており、一つ目はトレーニングプログラムで、ワークショップや現場に応じた研修、ウェブベースでの研修、そして多様な保全のコンセプトや戦略について紹介するための会議の提供をしている。二つ目は、リーダーシッププログラムでは、トレーニングイベント参加者に対し、将来の専門的で個人的な開発の機会や、保全イニシアチブの実施のための技術的、あるいはロジスティカルな支援を提供している。

熱帯アジアにおける研修の開催数は、2009 年から 2014 年の間で 33 件あり、うちイン

ドネシアにおける研修数は 9 件である。以下に各研修内容をまとめた。

番号	日時	研修名
i	2009/10/28-30	REDD トレーニングの紹介
1 日目	導入	科学的背景 国際政策のコンテキスト 炭素市場とその基準 インドネシア国家政策と法的フレームワーク
2 日目	西カリマンタン州における REDD プロジェクト開発の機会	プロジェクト開発のサイクル 炭素計測の紹介（ベースライン、アディショナリティ、リーケージを含む） 現場での炭素計測活動
3 日目	森林減少のドライバーとプロジェクト活動	地域コミュニティと活動する 活動計画
ii	2010/7/19-23	REDD プラス：誇大広告を越えて
		REDD のための準備：アマゾンにおける炭素蓄積と排出の解消 パプアニューギニアにおける地上炭素の階層的ベイズモデリング；選択的収穫およびエル・ニーニョの影響の隔離 REDD プラス：熱帯林保全の次なる特効薬 REDD の実地的なコスト—機会費用の推計から生物多様性ホットスポットの代替費用への理解まで— REDD：環境と開発の需要の見積もり 包括的な REDD プラスモデル：ランドスケープとアクターの恩恵を保全するシナリオ マダガスカル REDD の構成要素としてのコミュニティによる森林管理：コミュニティの生計のためのリスクと機会 コミュニティ経営による REDD プラスデモンストレーション活動の開発—村落林(hutan desa)のデザインと経営から パプアニューギニアの REDD プラス：準備はできているか？

生物多様性と気候変動

生物多様性と REDD

REDD ラベルの保護区はインドネシアの低地林を保護できるか？

スマトラトラを保全するために REDD を抑止する：プロジェクトレベルでの REDD 実施についての最新情報

森林炭素投資から生物多様性の利益を最大化するマルチレベル計画：ブラウ森林炭素プログラム

東カリマンタン州の森林経営の改善：排出削減と生物多様性の保全への機会

炭素増加と生態系の破壊と劣化による炭素排出を削減することによって気候変動が緩和された場合の生物多様性の利益とコスト

森林経営と REDD：伐採後の炭素蓄積を増加させる育林整備の役割

炭素の差し押さえによる森林再生：機会とチャレンジ

iii 2010/7/19-23 自生種による森林再生

亜熱帯及び熱帯環境でのミックス種の群生における主要課題

森林再生のための自生種の利用における知識のギャップを克服する：PROENA からの教訓

東南アジア混合フタバガキ林丘陵地における皆伐および択伐地での森林復元への道

中央アメリカ季節性乾燥熱帯林における森林劣化と復元のプロセス

熱帯林生態系の復元：調査から実践へ

パナマの地域社会における土地所有者の植林と森林保護文化、PROENA の経験から：デザインの実施

西カリマンタン州アラン・アラン草地での森林復元のためのサイト選定アプローチの比較

単一植林地における生態的経済的多様性の復元：スリランカの事例

森林復元のための植林におけるイチジクの木の利用について

埔寨奈じアにおける泥炭湿地林のリハビリテーション

iv 2011/9/12-13 生態系、生物多様性、コミュニティのための森林復元

- 1 日目 基調演説：荒廃丘陵地の再緑化：熱帯林復元の代替手段
天然更新の補助とは？
精製枠組み林業に向けた調査

	自生種を利用した採鉱地の復元 実務者から見たインドネシアにおける生態的なマングローブのリハビリテーション チガヤ草地における生態的アプローチによる森林の創出-東カリマンタン州サンボジャ地域 コミュニティによる森林管理を通じた環境、社会経済的状況の改善-西ロンボク州セサオ インドネシアにおけるランドスケープ復元:コミュニティ主導型アプローチの緊急性 閉会の挨拶と翌日の課題について
2 日目	多様で機能的な生態系への回帰:ロイサー山国立公園セイセルダダン 森林復元:インドネシアパルン国立公園 復元のための森林割り当て:ベトナム Elang Laut Tol Sedyatmo Angke Kapuk プロジェクトエリアにおけるマングローブのリハビリテーション 森林地域としての土地権利の再定義 REDD+、KFCP プロジェクトエリアでの火災管理-中央カリマンタン州カプアス県 復元方法の模索:ロイサー山国立公園における復元プログラムの実行 IUPHHK HA/HPH コンセッションにおける択伐ストライプ施業 (TPTJ) と集約型耕作の必要性 生態的な耕作地のコンセプト編成ーチビノン オランウータンのリリースのための生態系復元コンセッションの紹介 樹木適用プログラム

v	2012/3/6	インドネシアにおける採鉱跡地回復:ランドスケープ復元の主流化
		炭鉱跡地の土地利用 炭鉱地域におけるリハビリテーションへの課題と機会ーオーストラリアクイーンズランド州の事例 採鉱跡地のリハビリテーション:インドネシアにおけるランドスケープの主流化 露天掘りにおける環境指標 PT. Kaltim Prima Coal でのリハビリテーションと回復

PT. Berau Coal での採鉱跡地における生態系復興 採鉱跡地における回復事例 採鉱地の復元：実行 生産的なランドスケープの創出：国の食糧と水の安全保障 東カリマンタン州グリーンプロジェクト (Kaltim Green) と低炭素開発 採鉱跡地の回復における政策 環境サービスと国の安全保障
--

vi	2012/9/25-27	政府職員のための石炭採掘地森林回復に関する政令の研修
		鉱物採掘跡地における植生回復のための郷土樹種の選択 鉱物採掘跡地における植生回復のための苗木生産 苗木生産のための苗畑の設置 鉱物採掘跡地の土壌再生 植栽と保育の技術 エロージョンのコントロール 土壌改良材としての有機物 エロージョンコントロールおよびランドスケープを考慮した種子吹き付け工法 種子吹き付け工法の代替策 成功の指標をクリアするためには 鉱物採掘跡地の再生と森林回復 鉱物採掘跡地におけるエコシステムと生物多様性の保全

vii	2012/12/5-8	実務者のための炭鉱跡地回復に関するトレーニング
		採鉱跡地における植生回復のための自生樹木種の選定 採鉱跡地における植生回復のための種子繁殖 種子繁殖用ナーサリーの設立 採鉱跡地土壌の回復 植林と整備 浸食コントロール ル

土壌改良としての生物有機 浸食コントロールおよびランドスケープのための種子吹き付け テンプロック法（種子吹き付けの代替方法） 成功基準を満たすことについて 採鉱跡地のリハビリテーションと回復 採鉱跡地における生態系保全のための生物学
--

viii	2013/9/10-12	実践者のキャパシティ・ビルディングを通じた採鉱跡地回復技術の改善
労働移住大臣決定 2011 年 No. KEP. 122 林業省社会林業部門森林・土地の再生とリハビリテーション部におけるインドネシア全国職業能力基準計画（RSKKN）から国家職業技能適性基準（SKKNI）への切り替え決定について 森林・土地の再生における人材能力認証スキームの開発 森林・土地の再生における人材能力トレーニングの調査と実行概念 森林・土地の再生における人材能力トレーニング実施のためのカリキュラム編成 オーストラリア採鉱跡地リハビリテーション 森林再生および流域リハビリテーションの植林における政策 数値で見る鉱山閉鎖プログラム 環境管理 採鉱跡地の再生 ビジョンとミッション		

ix	2014/03/24-28	森林復元・回復のための原則、方法、戦略
研修資料未掲載		

【参考文献】

Environmental Leadership & Training Initiative (ELTI) web site
<http://environment.yale.edu/elti/en/>

6. 4 石炭採掘跡地における森林回復先進事業地の視察結果

現地インドネシアの石炭採掘事業地における植生回復・森林回復の先進事業地を視察し、情報を収集分析した。

(3) 東カリマンタン州大規模石炭採掘事業地

iv) 日時：2014年2月28日～3月2日

v) 事業者名： PT. Trubaindo Coal Mining (TCM)

vi) 事業地名： Melak, East Kutai, East Kalimantan, Indonesia

vii) 視察目的：

- 大規模石炭採掘事業地における採掘跡の森林回復状況を視察
- 早成樹のみでなく、郷土樹種および果樹等の植栽状況を視察
- 石炭採掘事業者に義務付けられた天然林保護区の管理状況を視察

viii) 視察結果

- 採掘コンセッション総面積2万3千ヘクタール。2005年から採掘を開始し、現在8年目。今後10年間は年間10 M tonの採掘量を維持し、その後5年で閉山予定。
- コンセッション内には、森林地（借用）および他用途地も含まれる。
- 採掘跡地の植生回復・森林回復について、最大の課題は、強酸性土壌と認識
- 採掘時に、表層土と採掘残渣を分けて保管。採掘残渣については、潜在酸性変化（PAF）物質が多く含まれている場合は、シートで隔離して地中10m以下に埋め戻す。その上に、採掘残渣、そして最後に表層土を被せて埋め戻し終了。
- 森林回復に当たっては、まず①地表面を緑化するためカバークロップ（*Calopogonium Mucunoides* : CM、*Centrosema Pubescens* : CP）を植栽。次に、②先駆樹種として早成樹であるマメ科木本（*Enterolobium cyclocarpum*、*Acacia mangium*）を植えて被陰状態をつくり、微気象を改善する。そして、③その被陰下にフタバガキ科（*Shorea* sp.、*Dryobalanops* sp.）や果樹（マンゴー、ランブータン）等の主要樹種を植える、という段階的な緑化方法を採用している。
- ただし、カバークロップによる植栽木への巻き付き被害が散見される。保育の手間を考えると一長一短か。
- 森林回復対象地の土壌条件に応じて、植栽する樹種の選定をおこなっている。
- 鉱物採掘跡地の森林回復については、省令の下、政府としては、まず緑化ありきである。その後の持続的な森林利用には関心が薄い。企業としては、果樹、陸稻等、地域住民の利用できるものを植えたいと考えている。
- コンセッション保持者には、面積に応じて森林保護区を設定する義務がある。TCM社の場合、100 haの森林保護区を設定する必要があるが、現在は10 haのみで、フタバガキ科やボルネオ鉄木（*Eusideroxylon zwageri*）等のエンリッチメント植栽を実施している。

ix) TCM 社石炭採掘事業地 森林回復事業地 視察写真



写真 6-4-1. 飛行機から見たマハカム川沿いの石炭積み出し港（バージ船によって運搬）



写真 6-4-2. TCM 社幹部、森林回復担当職員との打合せ



写真 6-4-3. 石炭採掘跡地のピット内



写真 6-4-1. 地表を覆うマメ科のカバークロップと早成樹への巻き付き被害



写真 6-4-1. 早成樹の列間に植え込みされた郷土樹種（*Dryobalanops* sp.）



写真 6-4-1. 義務付けられた天然林保護区

(4) 南カリマンタン州小規模石炭採掘事業地

i) 日時：2014 年 2 月 26 日

ii) 事業者名： PT. Tanjung Alam Jaya (TAJ)

iii) 事業地名： Sambung Makmur, Banjar, South Kalimantan, Indonesia

iv) 視察目的：

- 種子吹き付け工法の実施結果の視察
- 不成績造林地の視察
- 苗畑整備状況の視察

v) 視察結果

● 種子吹き付け工法実践地

- ✓ 石炭採掘跡の斜面法面において、吹き付け工法による緑化を实践。
- ✓ 事前に土壌調査を実施し、吹き付け工法に不適とされる土壌 pH4.0 未満の場所には吹き付けしなかったとのこと。このため、土壌が茶~こげ茶~黒色の箇所には植生は回復していない。

● 不成績造林地

- ✓ 石炭採掘跡において、森林土壌を散布（10cm）し、マホガニー（*Swietenia macrophylla*）とアンサーナ（*Pterocarpus indicus*）を植栽。
- ✓ マホガニーの生育が不良。活着はしたが、その後 3 年たっても大きく成長せず、ダイバックを繰り返している。
- ✓ 穴には水がたまり、地表も水田のようで、排水不良みられる。少し成長しダイバックを繰り返す原因は、おそらく比較的浅いところにハードパンと呼ばれる堅密な不透水層が存在し、排水不良で過湿となること、および堅密層によって有効土層が薄く、根量そのものが制限されていることが考えられる。
- ✓ 対応策としては、①リッピングによって物理性の改善と排水確保を行うこと、②材料が新鮮な掘削ばかりで土壌物質がない場合は、少なくとも 30cm できれば 50cm-100cm 程度の客土を実施し有効土層を確保すること、が考えられる。
- ✓ アンサーナは過湿に耐性がある樹種かもしれないが、有効土層が浅いままであれば、将来、成長に伴って必要根量が増加の結果、成長が止まる、もしくはダイバックを起こす可能性も考えられる。

● 苗畑整備状況

- ✓ 苗畑は、寒冷紗で覆われ、苗床は高床式で、発芽・成長・管理ともに良好
- ✓ 育苗技術・経験・実績のある篤農家の息子を苗畑作業員として雇用

vi) TAJ 社植生回復・森林回復事業地 視察写真



写真 6-4-7. 種子吹き付け工法（遠景）
茶色の部分は、土壌 pH4.0 未満のため不適



写真 6-4-8. 種子吹き付け工法（近景）
一部（茶～こげ茶～黒色）は植生が未回復



写真 6-4-9. 不成績造林地
マホガニー(*Swietenia macrophylla*)を植栽
成長停止、ダイバック発生



写真 6-4-10. マホガニー（手前）は生育不良。アンサーナ(*Pterocarpus indicus*)（奥）は比較的生育良好



写真 6-4-11. 地表近くに停滞水が存在
長、ハードパンと呼ばれる不透水層が存在？



写真 6-4-12. 苗畑は、高床式で発芽、成長管理良好。写真はメリナ(*Gmelina arborea*)

6. 5 ACID SULFATE SOIL FIELD pH TESTS

(after “ASS laboratory methods guidelines” by QASSIT, Qld NRM&E, SCU, NatCASS, QSAAMAC & ASSMAC)

Introduction

The field pH (pH_F) and field pH peroxide (pH_{ox}) tests have been developed for a rapid assessment in the field of the likelihood of acid sulfate soils. These tests are easy to conduct, quick, and have a minimum set-up cost. The field tests have been developed to give reasonable prediction for many soils (provided the tests are performed properly) whilst at the same time being relatively easy to perform with a minimal amount of equipment. Soil field pH tests provide a useful indication of the existing and potential acidity levels in the soil. Although these field tests may provide an indication of ASS presence, they are purely qualitative and do not give any quantitative measure of the amount of acid that has been or could be produced through the oxidation process. It is recommended that field tests be conducted on-site, in the field. If the tests can't be performed in the field on-site, tests should be conducted within 24 hours of soil sample collection. Samples suspected of containing monosulfides should undergo field pH testing immediately in the field.

(a) Field pH test (pH_F)

The procedure for the field pH test (pH_F) is outlined below:

- ✓ Calibrate battery powered field pH meter.
- ✓ Prepare the test tubes in the test tube rack. Use of separate racks for the pH_F and pH_{ox} tests is recommended as contamination may occur when the pH_{ox} reactions are violent.
- ✓ Remove approximately 1 teaspoon of soil from the profile. Place approximately ½ teaspoon of that soil into the pH_F test tube and place ½ teaspoon of the soil into the pH_{ox} test tube. It is important that these two sub-samples come from the same depth and that they are similar in characteristics. For example, DO NOT take ½ teaspoon of soil from the 0–0.25m depth that is grey mud, while selecting ½ teaspoon from the same depth that is a yellow mottled sample. These will obviously give different results independent of the type of test conducted.
- ✓ Place enough deionized water (never use tap water) in the pH_F test tube to make a paste similar to ‘white sauce’, stirring the soil:water paste with a skewer to ensure all soil ‘lumps’ are removed. Do not leave the soil samples in the test tubes without water for more than 10 minutes. This will reduce the risk of sulfide oxidation.
- ✓ Immediately place the spear point electrode (preferred method) into the test tube, and measure the pH_F .
- ✓ Wait for the reading to stabilize and record the pH measurement.
- ✓ All measurements should be recorded on a data sheet.

(b) Field peroxide pH test (pH_{ox})

The procedure for the field pH peroxide test (pH_{ox}) is outlined below:

- ✓ Adjust the pH of the hydrogen peroxide to pH 4.5-5.5 before going into the field. This can be done by adding a few drops of dilute NaOH stirring and checking the pH with an electrode regularly until the correct range is reached. Recheck the pH after allowing the peroxide to stand for 15 minutes. Only buffer the amount to be used in the field for about a month. This must be kept in a fridge to ensure the longevity of the peroxide. It is important to check the pH of the peroxide in the morning before departing to the field.

- ✓ Calibrate battery powered pH meter.
- ✓ Prepare the heat-resistant test tubes in the test tube rack as for pH_{ox} test. It is recommended that a tall, wide tube be used for this test as considerable bubbling may occur, particularly on highly sulfidic or organic samples.
- ✓ From the teaspoon of soil previously collected for the pH_F test, place approximately ½ teaspoon of the soil into the pH_{ox} test tube.
- ✓ Add a few mL of 30% H₂O₂ (adjusted to pH 4.5–5.5) to the soil (sufficient to cover the soil with peroxide) and stir the mixture. Do NOT add more than a few mL at a time to prevent overflow and wastage of peroxide.
- ✓ Rate the reaction of soil and peroxide using a XXXX scale (see below and Table 1).
- ✓ Allow approximately 15 minutes for any reactions to occur. If substantial sulfides occur, the reaction will be vigorous and may occur almost instantly. In this case, it may not be necessary to stir the mixture. If the reaction is violent and the soil: peroxide mix is escaping from the test tube, a small amount of deionized water (not tap water) can be added using a wash bottle to cool and calm the reaction. Usually this controls overflow. Do NOT add too much deionised water as this may dilute the mixture and affect the pH value. It is important to only use a small amount of soil otherwise violent reactions will overflow and the sample will be lost.
- ✓ Steps 5 to 7 may be repeated until the soil: peroxide mixture reaction has slowed. This will ensure that most of the sulfides have reacted. In the lab this procedure would be repeated until no further reaction occurs, however in the field, best judgment is recommended. Usually one or two extra additions of a few mL of peroxide are sufficient.
- ✓ If there is no initial reaction, individual test tubes containing the soil: peroxide mixture can be placed in direct sunlight. This will encourage the initial reaction to occur. When the sample starts to ‘bubble’, replace test tube immediately into test tube rack.
- ✓ Wait for the soil: peroxide mixture to cool (may take up to 10 minutes).
- ✓ measure the pH_{ox} using an electronic pH meter.
- ✓ Wait for the reading to stabilize and record the pH_{ox} measurement.
- ✓ All measurements should be recorded on a data sheet.

(c) Rating soil reactions of the pH_{ox} test using the XXXX scale

The rate of the reaction generally indicates the level of sulfides present, but depends also on texture and other soil constituents. A soil containing very little sulfides may only rate an ‘X’ however a soil containing high levels of sulfides (remember the exact level of sulfides cannot be determined using the pH_{ox} test) is more likely to rate a ‘XXXX’ although there are exceptions. This rating scale alone should not be used to identify ASS. It is not a very reliable feature in isolation as there are other factors including manganese and organic acids which may trigger reactions. Reactions with organic matter tend to be more bubbling and don’t tend to generate as much heat as sulfidic reactions. Manganese reactions will be quite extreme, but don’t tend to lower the pH_{FOX}. Table 1 indicates the reaction scale for pH_{FOX} tests.

Table 1. Soil reaction rating scale for the pH_{FOX} test.

Reaction scale	Rate of reaction
X	Slight
XX	Moderate
XXX	High
XXXX	Very rigorous, gas evolution and heat generation commonly >80°C

(d) Interpretation of field pH tests

A combination of three factors is considered in arriving at a ‘positive field sulfide

identification’.

- i) reaction with hydrogen peroxide,
- ii) a much lower pH_{FOX} than field pH_F (ΔpH), and
- iii) actual value of pH_{FOX}

- (i) The strength of the reaction with peroxide is a useful indicator but cannot be used alone. Organic matter and manganese oxides can also cause a reaction. Care must be exercised in interpreting a reaction on soil/mud/marine clay high in organic matter
 - (ii) A pH_{FOX} value at least one unit below field pH_F may indicate a PASS. The greater the difference between (ΔpH), the more indicative the value is of a PASS. The lower the final pH_{FOX} value is, the better the indication of a positive result.
- ✓ If the $\text{pH}_{\text{FOX}} < 3$, and the other two requirements are met, it strongly indicates a PASS. The more the pH_{FOX} drops below 3, the more positive the presence of sulfides.
 - ✓ A pH_{FOX} 3-4 is less positive and laboratory analyses are needed to confirm if sulfides are present. If only low pH peroxide is available, the field test is less discriminatory, particularly for sands because of their low pH buffer capacity.
 - ✓ For pH_{FOX} 4-5 the test is neither positive nor negative. Sulfides may be present either in small quantities and be poorly reactive under quick test field conditions or the sample may contain shell/carbonate, which neutralizes some or all acid produced by oxidation. Equally the pH_{FOX} value may be due to the production of organic acids and there may be no sulfides present in this situation. In such cases, the sulfur trail would be best to check for the presence of oxidizable sulfides.
 - ✓ For $\text{pH}_{\text{FOX}} > 5$ and little or no drop in pH from the field value, little net acidifying ability is indicated.

2. ACID TEST USING DRIED SOIL; SAMPLING, HANDLING, PREPARATION AND STORAGE FOR ANALYSIS (after “ASS laboratory methods guidelines” by QASSIT, Qld NRM&E, SCU, NatCASS, QSAAMAC & ASSMAC)

2.1 SOIL SAMPLING

Samples of soil should be a minimum of 0.2 kg each. Large shells and other large fragments such as wood, charcoal, stones and the like should be noted before being removed from the samples in the field. When taking samples for verification testing (eg. to assess 500 m³ or 1000 m³ of treated soil), several grab samples may be bulked to obtain a more accurate average of the ameliorant content in the soil. Gravels associated with acid sulfate soils from below the watertable have been known to contain sulfides in the weathered rind. Oxidation of sulfidic mud balls or fines coating gravel extracted from a river causes vegetation and fish kills after a rainfall event. It is also possible that sulfides may be a component of the gravel or rock. Yellow jarosite coatings on gravel or rocks can indicate that follow-up laboratory analysis is required. At the time of sampling, soil texture, field pH (pH_F) and field pH after oxidation with 30% hydrogen peroxide (pH_{FOX}) should be determined.

2.2 SAMPLE HANDLING and PREPARATION

Upon collection in the field, soil samples should be immediately placed in sealable plastic bags with air extruded to minimize the sample's contact with air. The samples should be kept cool in the field to reduce the possible oxidation of sulfidic compounds.

On arrival at the laboratory, samples should be dried preferably in a quick-drying, fan-forced, oven at 80–85 degree C for at least 48 h, to kill bacteria and rapidly remove water to minimize oxidation of pyrite. Samples should be spread out in trays to no more than 2–3 cm depth to allow rapid drying. Where possible, cloddy or plastic clay samples should be broken into lumps no more than 1–2 cm in diameter. After drying, any coarse material especially gravel should be picked out. Samples that do not easily break up after oven drying such as some heavy clays, should be crushed/ground to pass through a 2 mm sieve. The dried ground sample should be stored in a cool dry location in an airtight plastic or other inert container for subsequent laboratory use.

2.3 ACIDITY MEASUREMENT

The ‘acid trail’ involves direct determination of acidity by titration.

(a) Potassium chloride pH (pH_{KCl}) and Titratable Actual Acidity (TAA)

Determination of actual acidity is necessary on soil with a laboratory pH_{KCl} of <5.5₁. The pH_{KCl} is measured in the laboratory after 4 h extraction with 1 M KCl (followed by overnight standing). Titratable Actual Acidity₂ is then determined by suspension titration to pH 6.5. The method is as follows.

Reagents:

- ✓ 1 M KCl.
- ✓ Standardized — 0.25 M NaOH (c₁ mol/L)
- ✓ Standardized — 0.05 M NaOH (c₂ mol/L)

Apparatus:

- ✓ Electronic balances (100 - 0.01 g and 100 - 0.0001 g),
- ✓ Sample shaker (able to keep soil particles continuously in suspension),
- ✓ Plastic extraction container with stopper,

- ✓ 2 x 10 mL A-grade 0.02 mL graduated burettes
- ✓ Magnetic stirrer plate and Teflon-coated magnetic stirrer bar
- ✓ Titration vessel (of at least 100 mL capacity).

Procedure:

- ✓ Weigh accurately (to the nearest 0.01 g) between 1.9 g and 2.1 g (**m₁** g) of finely ground oven-dried (80–85 degree C) soil into a suitable extraction container and make a 1:40 suspension with 80 mL 1 M KCl solution. (Include a solution blank in each batch and subject it to the same procedure as the soil.

Note: A larger sample weight can be used, providing the soil solution ratio remains at 1:40. Use the exact mass weighed (**m₁**) in subsequent calculations.

- ✓ Stopper the container and extract soil on a reciprocal or end-over-end shaker for 4 h (+/-0.25 h). Allow bottle and contents to stand overnight (for at least 12 h but no more than 16 h).
- ✓ Re-suspend contents after standing by briefly shaking container (- 5 min) before quantitatively transferring its contents to a separate titration vessel (if not titrating in extraction container using a minimum volume of deionized water).
- ✓ While stirring, measure and record the pH of the suspension (pH_{KCl}) using a pH meter.
- ✓ Perform a titration to pH 6.5 with standardized NaOH solution using appropriately calibrated pH meter and burette. Use the appropriate option below, depending on the measured pH_{KCl}.

- i) If pH_{KCl} is <4.0, titrate the suspension with stirring to pH 6.5 using standardized 0.25 M NaOH (**c₁** mol/L) and record titrated volume (**V₁** mL).
- ii) If pH_{KCl} is ≥4.0 but <6.5, titrate the suspension with stirring to pH 6.5 using standardized 0.05 M NaOH (**c₂** mol/L) and record titre volume (**V₁** mL).
- iii) If pH_{KCl} is ≥6.5, no titration is required and TAA is zero.

- ✓ Titrate a blank sample using 0.05 M NaOH (**c₂** mol/L) and record titrate volume (**V₂** mL) .

Calculations:

Calculate titratable Actual Acidity (TAA) (expressed in mol H⁺/t oven-dry soil).

If 0.25 M NaOH is used:

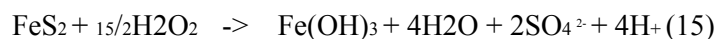
$$\text{TAA (mol H}^+/\text{t)} = (\text{V}_1 \times \text{c}_1 - \text{V}_2 \times \text{c}_2) \times (1000/\text{m}_1)$$

If 0.05 M NaOH is used:

$$\text{TAA (mol H}^+/\text{t)} = [(\text{V}_1 - \text{V}_2) \times \text{c}_1] \times (1000/\text{m}_1) \quad [\text{m}_1 \text{ in g, V}_1 \text{ \& V}_2 \text{ in mL, c}_1 \text{ in mol/L}]$$

(b) Peroxide oxidized pH (pH_{ox}) and Titratable Peroxide Acidity (TPA)

This method involves the use of 30% hydrogen peroxide to oxidise sulfides (usually pyrite) and produce sulfuric acid, as shown below.



Following oxidation pH_{ox} is measured. After peroxide decomposition and addition of KCl, Titratable Peroxide Acidity (TPA) is measured by suspension titration to pH 6.5. Titratable Peroxide Acidity (TPA) represents the amount of acid released from the complete oxidation of sulfides (and organic matter). Method is as follows.

Reagents:

- ✓ – 2.66 M KCl (dissolve 198.81 g KCl in 1L of deionized water)
- ✓ Standardized – 0.25 M NaOH (**c**₁)
- ✓ Standardised – 0.05 M NaOH (**c**₂)
- ✓ Standardised – 0.5 M HCl (**c**₃)
- ✓ 30%w/w hydrogen peroxide (H₂O₂): Determine a blank TPA with each run. Blanks should be low (ie. less than the equivalent of 6 mol H⁺/t).
- ✓ 30%w/w hydrogen peroxide (H₂O₂) (pH adjusted): Adjusted to pH 5.5 with dilute (0.05 M) NaOH solution for use in the ‘final oxidation’ step.
- ✓ 6.30 x 10⁻³ M CuCl₂·2H₂O solution (400 mg Cu/L): Prepare (1 L) by dissolving 1.073 g of copper(II) chloride dihydrate (CuCl₂·2H₂O) in deionised water and dilute to 1000 mL at 20 °C using deionised water.
- ✓ Potassium hydrogen phthalate (C₆H₅O₄K): Dry at 105 degree C for 4 h and store in desiccators prior to use.
- ✓ Sodium tetraborate (Na₂B₄O₇·10H₂O)

Apparatus:

- ✓ Electronic balances (500 - 0.01 g and 100 - 0.0001 g);
- ✓ 250 mL tall-form borosilicate (‘pyrex’) glass
- ✓ Beakers (with 50 mL volume accurately marked)
- ✓ wash bottle for deionised water
- ✓ Electric hotplate or Steam bath (able to keep beaker and contents at 80–90 °C)
- ✓ Fume hood
- ✓ Adjustable dispensing pipette (1-10 mL, or separate 1 mL and 10 mL pipettes)
- ✓ pH meter, magnetic stirrer plate, teflon-coated magnetic stirrer bar
- ✓ 2 x 10 mL 0.02 mL graduated burette
- ✓ Titration vessel (at least 100 mL capacity).

Procedure:

Peroxide digests (oxidation)

- ✓ Weigh accurately between 1.9 and 2.1 g of finely-ground oven-dried (80–85 °C) soil into a 250 mL tall-form borosilicate glass beaker on which the 50 mL level is accurately marked and record soil mass (**m**₂). In each analytical run, perform a minimum of two solution blanks and subject them to the same procedure as the soil. (If one or more samples in the run undergo the carbonate modification, then subject one of the blanks to this procedure).
 - ✓ In a fume hood, add 10 mL 30% hydrogen peroxide (H₂O₂) to each flask and swirl to mix.
 - ✓ If the reaction becomes overly vigorous at this stage and any loss of digest material occurs, the sample must be repeated with greater care and/or with a lesser sample weight (ie. 1 g). For high sulfide content soils, add -10 mL of deionized water to the soil prior to an incremental addition of the 10 mL of H₂O₂.
 - ✓ After 30 min, add deionized water with swirling to make the total volume of suspension in the beaker between 45 and 50 mL. Swirl digest solution to give a homogeneous suspension, then rinse the inside wall of the beaker with deionized water.
- Note: It is important to periodically swirl the sample to prevent soil from settling on and adhering to the bottom of the beaker during the subsequent hotplate heating stages. Rinsing the inside wall of the beaker with small squirts of deionized water also serves to dissolve any salts that may have accumulated there.
- ✓ Place the beaker on a hotplate (or steam bath) for a maximum of 30 min and maintain sample at 80–90 degree C. Swirl samples periodically (eg. every 10 min) and add deionized water as required to maintain volume between 45 and 50 mL, and to wash soil

residue from the inside of the beakers.

- i) If a digest reacts vigorously on the hotplate, temporarily remove it from the hotplate and/or moderate the vigor of the reaction by adding small amounts of deionized water. Replace digest solution on hotplate when reaction has moderated. When the digest solution stops reacting while on the hotplate (eg. typically effervescent bubbling has ceased, soil settles and supernatant clears), remove from hotplate. If the digest solution continues to react whilst on the hotplate, remove after 30 min has elapsed.
- ii) For a digest that reacts only slowly or moderately while on the hotplate, remove only after reaction ceases. If the reaction on the hotplate is continuing after 30 min has elapsed, remove the digest solution from the hotplate.
- iii) For a digest that showed no obvious reaction after peroxide addition prior to being put on the hotplate and that failed to subsequently react while on the hotplate, remove from the hotplate after 30 min has elapsed.
- iv) For a digest that reacts vigorously after initial peroxide addition (before being put on the hotplate), but does not react further whilst on the hotplate for 10 min (indicating that the added peroxide may have already been consumed), remove at this stage.

- ✓ Allow samples to cool to near room temperature.
- ✓ Add a second 10 mL aliquot of H_2O_2 , waiting 10 min before returning flask to the hotplate for a maximum of 30 min, adopting the procedure outlined earlier.
- ✓ Allow samples to cool to room temperature and make volume to 50 mL with deionised water.
- ✓ Measure the pH of the suspension (**pH_{ox}**) while stirring using a pH meter. Use the appropriate option below, depending on the measured pH_{ox}.

- i) If pH_{ox} is ≤ 2 (indicative of high sulfide levels), repeat digest using 1 g of soil
- ii) If pH_{ox} is >2 but ≤ 6.5 , continue from peroxide decomposition step
- iii) If pH_{ox} is >6.5 (meaning that the soil may contain excess carbonates), treat according to carbonate modification before continuing with peroxide decomposition step.

Carbonate modification (HCl titration to pH 4)

- ✓ For soil with pH_{ox} >6.5 , quantitatively transfer suspensions to titration vessels (if not titrating in digest beaker) with deionized water.
- ✓ While stirring perform a slow titration (typically 10–30 min duration) to pH 4 with standardized 0.5 M HCl (c₃).

Note: Do not titrate solution blank with HCl.

Note: This titration with dilute HCl is designed to dissolve excess carbonate, which interferes with the efficiency of peroxide oxidation. It can be used to estimate a net (excess) acid neutralizing capacity of the soil. The reaction between solid carbonate and soil solution as the acid is added is slow. The pH tends to oscillate near the pH 4 end point, so a slow titration is necessary to ensure maximum recovery of carbonate. Addition of a set aliquot of HCl at a fixed time interval may be the best approach to standardizing the titration if titrating manually. If the endpoint (pH 4.0) is slightly overshoot, do not calculate the volume of titrant added to reach the endpoint, instead use the total volume of HCl solution added in subsequent calculations.

- ✓ Record volume and molarity of titrant added (**V₃**, in mL). Calculate HCl-titration (mol H⁺/t).
- ✓ Quantitatively transfer contents of titration vessel to original digestion beaker (if not titrating in digest beaker).
- ✓ Add 25 mL 30% H_2O_2 and place on hotplate. Swirl digest periodically (eg. every 10 min) and then wash the soil residue from the walls of the beaker with a small amount of

deionized water for a maximum of 1 h, following the appropriate option below:

- i) If a digest reacts vigorously after being placed on the hotplate, temporarily remove it from the hotplate and/or moderate the vigour of the reaction by adding small amounts of deionized water. Replace digest solution on hotplate when reaction has moderated. When the digest solution stops reacting while on the hotplate (eg. typically effervescent bubbling has ceased, soil settles and supernatant clears), remove from hotplate. If the digest solution continues to react whilst on the hotplate, remove after 1 h has elapsed.
- ii) For a digest that reacts only slowly or moderately while on the hotplate, remove only after reaction ceases. If the reaction on the hotplate is continuing after 1 h has elapsed, remove the digest solution from the hotplate.
- iii) For a digest that showed no obvious reaction after peroxide addition prior to being put on the hotplate and that failed to subsequently react while on the hotplate, remove from the hotplate after 30 min has elapsed.

Peroxide decomposition

- ✓ Add 1 mL of 6.30×10^{-3} M $\text{CuCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ (400 mg Cu/L) to digest solution to decompose any remaining peroxide.
- ✓ Return digests to hotplate and allow samples to reach between 80 and 90 °C (by which time peroxide decomposition should be occurring). Remove digest from hotplate when peroxide decomposition has ceased (eg. effervescent bubbling has stopped and usually supernatant has cleared. If peroxide decomposition has not ceased after 30 min, then remove digest solutions from hotplate. Maintain digest volume at between 45 and 50 mL during this time (adding deionized water as necessary).
- ✓ Where the volume of the digest is >50 mL after peroxide decomposition (eg. in samples that underwent the carbonate modification), decrease volume to between 45 and 50 mL on the hotplate.
- ✓ When samples have cooled to near room temperature, quantitatively transfer beaker contents to a titration vessel using 30 mL of 2.66 M KCl.
- ✓ Give the digest beaker a final rinse with no more than 5 mL of deionized water (into titration vessel), giving a suspension of approximately 80 mL, 1 M in KCl (ie. for 2 g samples a final soil : solution extraction ratio of 1:40).

Measurement of TPA

All samples with pH <5.5 are first titrated to pH 5.5 with either 0.05 M or 0.25 M NaOH (depending on the initial pH of the suspension – see below). Subsequently all samples are titrated to pH 6.5 using 0.05 M NaOH.

- ✓ Measure and record pH of suspension (TPA pH) using a suitably calibrated pH meter and electrode prior to TPA titration. Use the appropriate option below, depending on the measured TPA pH.
- i) If pH is ≤ 3 , titrate with stirring to pH 5.5 using standardized 0.25 M NaOH (c_1) and record volume of titre (V_4).
 - ii) If pH is >3 but ≤ 5.5 , titrate with stirring to pH 5.5 using standardized 0.05 M NaOH (c_2) and record volume of titre (V_5).
 - iii) If pH is > 5.5 but < 6.5 , go to final oxidation step.
 - iv) If pH is ≥ 6.5 then TPA is zero. Do not perform final oxidation.

- ✓ If the blank has a pH <5.5, titrate it to pH 5.5 using 0.05 M NaOH and record titrated volume (V_7).
- ✓ Perform a 'final oxidation' on all samples where pH is now <6.5 by adding 1 mL of 30% H_2O_2 (that has been adjusted to pH 5.5 with dilute NaOH solution). Allow pH to stabilize

then measure.

Note: The addition of 1 mL of 30% peroxide converts any Fe²⁺ to Fe³⁺ ensuring complete conversion of iron to Fe(OH)₃ during titration.

- ✓ While stirring, titrate those suspensions with pH <6.5 to pH 6.5 using 0.05 M NaOH (c₂). Record morality (c₂) and titrate (V₆ mL) of alkali added to reach pH 6.5. For blanks record corresponding titrate (V₈) and morality (c₂).

Calculation of TPA without carbonate modification

- ✓ Calculate TPA result and express as mol H⁺/t of soil

If 0.25 M and 0.05 M NaOH are used:

$$\text{TPA (mol H}^+/\text{t)} = [(V_4 \times c_1) - (V_7 \times c_2) + (V_6 - V_8) \times c_2] \times (1000/m_2)$$

If only 0.05 M NaOH is used:

$$\text{TPA (mol H}^+/\text{t)} = [(V_5 + V_6 - V_7 - V_8) \times c_2] \times (1000/m_2)$$

Calculation of Excess Acid Neutralizing Capacity (ANC_E) or TPA with carbonate modification

- ✓ For those samples that underwent the carbonate modification to the method, calculate HCl titration (to pH 4) and express as mol H⁺/t.

$$\text{HCl titration (mol H}^+/\text{t)} = V_3 \times c_3 \times (1000/m_2)$$

- ✓ Calculate excess acid neutralizing capacity (a-ANC_E) in mol H⁺/t

$$\text{a-ANC}_E = \text{HCl titration} - \text{TPA titration (in mol H}^+/\text{t)}$$

If 0.25 M and 0.05 M NaOH has been used:

$$\text{a-ANC}_E (\text{mol H}^+/\text{t}) = [V_3 \times c_3 \times (1000/m_2)] - [(V_4 \times c_1) - (V_7 \times c_2) + (V_6 - V_8) \times c_2] \times (1000/m_2)$$

If only 0.05 M NaOH has been used:

$$\text{a-ANC}_E (\text{mol H}^+/\text{t}) = [V_3 \times c_3 \times (1000/m_2)] - [(V_5 + V_6 - V_7 - V_8) \times c_2] \times (1000/m_2)$$

Calculated acidity parameters

Titrateable Sulfidic Acidity (TSA)

Titrateable Sulfidic Acidity is defined as the difference between TPA and TAA.

$$\text{TSA} = \text{TPA} - \text{TAA}$$

For un-oxidized soil material in many situations (with negligible acid-buffering/acid-neutralizing Components) the TSA is comparable to the potential sulfidic acidity.

参考資料

1. 開発地植生回復支援部会 第1回議事抄録

(1) モデル林造成状況について

委員) TAJ 社におけるリッピングや堆肥の効果は？

事務局) リッピングをした方が、生存率が良い結果が表れているが、もともとの植栽場所の土壌の酸性に偏りがあるため、リッピングの効果そのものかどうか断定できない。

林野庁) リッピングの定義は？

事務局) リッピングとは、重機に爪をつけて耕耘し土壌の物理性を改善すること。爪の長さは通常 30cm 程度。

林野庁) 客土について、どこからどういう土を持ってくるのか？

事務局) 客土については、採掘時に、森林土壌の表層度（表層から数メートルの赤茶色の土）を取って置いて、埋め戻すときに表層に積むのが正式な手順。取って置いていない場合は、別の土地から表層土をもってくる場合もあり。客土は最低 30cm～50cm。

委員) 採掘残渣を積んでおく期間は、ピットの大きさや深さにもよるが、1年～数年。

事務局) 表層土壌が薄い地域があり、そのような地域では表層土壌を取って置くのは困難。

事務局) 土壌流亡によりせっかく客土した土が流される問題もある。

委員) 苗の質のばらつきは考慮されているのか？ある種は根巻きがある等不均一？

事務局) ポットのサイズにバラつきあり。Melaleuca と Fagraea は他と比較してサイズの大きいポットを使用していた。

委員) 高分子吸収材について、ジャワの事例では、植え穴の中で偏りがあり、一カ所にかたまって投入されていた。本試験植栽では、さまざまな処理区を設定しているが、どうやって処理し、植栽するかが重要。植栽工程を何度もトレーニングする必要がある。肥料焼けも処理の方法が誤っていた可能性も考えられる。あらかじめ乾期に植え穴を掘って肥料をなじませる等の考慮が必要がある。

事務局) 今後、改善してゆきたい。

(2) 土壌モニタリング関連について

委員) 潜在酸性評価法の調査で、パイライトが含まれているサンプルの割合はどのくらい？

事務局) 事前調査段階では、15 サンプルのうち 2 つくらい。特殊な色をしているわけではない。

事務局) 酸化後の pH はそれほど低くないが、鉄を含んでいるサンプルもあり。一言にパイライトといっても、グレーディングがある。

(3) 土壌水ポテンシャル及び気孔コンダクタンスについて

林野庁) 気孔コンダクタンスとは何か？意義は何か？

委員) ガスの通りやすさ。光合成の活発度合を示す指標のひとつ。ただ、同時に水が失われる作用もある。

委員) 種としての気孔コンダクタンスの値というものはなく、環境条件に対する気孔コンダクタンスの反応性が種の耐性につながる。同じ種でも、処理区によって気孔コンダクタンスの値に違いがあるとすれば意味がある。

委員) 植え穴に対する処理がコントロールできていないのか？科学としてデータを出すためにはコントロールしなくてはいけない。事業として、それが無理なら処理はやめる。例えば、地域住民が肥料代を惜しんで施肥しないというのであれば、施肥は止めて、試験計画を組む必要がある。できるものだけ。

事務局) 今年度は、事業としてコントロールできる処理である全面客土とリッピングのみを予定している。ただし、埋め戻しに使用する採掘残渣にはミネラル分は含まれているが窒素は確実に不足している。したがって、樹種にもよるが、化成肥料で窒素の補給は必要と考えている。このため、現地の鉱山会社や森林研究所が実施している標準的な植え方（基本的ノウハウ）に従って、全ての植栽木に堆肥と化成肥料を施用したい。

委員) 施肥しなくても成長している樹種もあるので必ずしも施肥する必要はない？

事務局) マメ科等の窒素固定樹種は窒素施肥しなくても成長するが、その他の樹種について窒素施肥は必須と考えている。施肥の効果はまだ解析できていない。

(4) 土嚢造林試験について

委員) 土嚢から根が出ている？

事務局) わずかに出ているが、外側が強酸性のため出ていきたくない傾向がある。酸性土壌が流れてきて、植え穴客土したところの表層に堆積したため表層が強酸性を呈している。根は、その表層に分布しておらず、植え穴客土した下層に分布。酸性に強いと言われている *Acacia* でも pH2~3 では、根が嫌って入らない。

(5) 開発跡地における森林回復技術指針（素案）の検討について

林野庁) 鉱山開発は森林減少の要因のひとつ。この事業の成果をどのように活用するか？技術指針の適用範囲は？現地で石炭採掘跡地はどのくらいの問題となっているのか？今後の広がりを考えて、インドネシア大使館、JICA（林野庁出向者）との情報交換や学会発表をこれからもしてほしい。

事務局) 石炭採掘跡地がどのくらいの問題になっているかについては、本事業の 23 年度報告書で分析済み。スマトラ島、東カリマンタンおよび南カリマンタンでは特に開発が進んでおり深刻な問題。適用可能面積は、南カリマンタンだけでも、鉱区の 10 パーセ

ントとしても 10 万ヘクタール。

委員) (一財) 石炭エネルギーセンター (JCOAL) のホームページに詳細なデータがあるかもしれない。

林野庁) 商業的な活動としての石炭採掘の跡地を ODA の予算でやるのは筋が通らない。

技術開発は良いが、その先どのように JICA プロジェクト等に技術開発の成果をつなげていくか考えておく必要。

事務局) 現地の法令でも、採掘した企業がその跡地を埋め戻して緑化する義務がある。ただし、違法や中小の業者が掘り逃げする場合があります、そこが湖になったり、土地が失われたりする問題がある。また、埋め戻しの際、表層に森林土壌を客土することが現地の森林回復ガイドガイドラインに記載されているが、実際にはされていない場合が多い。客土なしでも緑化できる技術指針が必要。

委員) 虫食い状態になっている等まず実態の把握が必要。中国の電力量が急増し、石炭の需要が増加したため、現場ではいろいろなことが起きている。

林野庁) APEC 等で取り上げる等はどうか？そこで議論されるに適切な問題か？

事務局) パイライトによる土壌酸性化自体の話は農業用地でも大問題。農業用地でも、パイライトによる土壌酸性化、そして後に白い砂(ケランガス)になってしまう問題がある。誰かが技術を開発するとともに、実際に森林に戻すこともやらなければならない。

事務局) AGM 社が株式公開したのに伴い、インドそして日本からも資本が入った。実際に AGM 社から日本に石炭を調達しているかどうかは不明。株式公開により情報公開が義務づけられ、環境配慮の観点から、石炭採掘跡地の緑化にもますます力を入れている。我々のプロジェクトにも協力的である。補助事業が終了した後も民間企業から依頼を受けて調査を継続する道もあると考えている。

委員) 世界的にみて荒廃地緑化は始まったばかり。本事業は石炭採掘跡地で発生した問題を取り扱っているが、その他の荒廃地の緑化にも適用できる、汎用性のあるデータ、技術の蓄積ができると思うので、報告書には科学的な記述が求められる。アルカリ土壌については、乾燥という制限要因や有効土壌層の問題もある。またどちらも物理性の問題を抱えている。

事務局) 最近、ニッケルやコバルト、レアアースの採掘も増えており、それにも適用可能と考えている。

事務局) インドネシアのエネルギー鉱物資源省も鉱山跡地の森林回復について毎年セミナーを開催している。インドネシアでは、鉱山跡地において強酸性等の様々な問題が発生し、森林回復ができていない例も多く、森林セクターのみならず、様々なセクターで問題となっている。

林野庁) 石炭採掘のみにテーマを絞ると、商業開発なので、一義的には鉱山会社に緑化責任があり、今後 ODA 事業にはつながりにくい。石炭採掘跡地だけでなく、広い意味で

荒廃地緑化のひとつとして取り組むという方向性はある。

事務局) JICA インドネシアの国立公園内を対象とした「保全地域における生態系保全のための荒廃地回復能力向上プロジェクト」とは現地出張時に情報交換している。国立公園内は郷土樹種しか植えられない。郷土樹種の苗木生産技術に力を入れてガイドラインの整備を進めている。本事業では、石炭採掘跡地や半乾燥地等の極限環境において、適応能力が高く成長も早い外来種を使用しながら緑化をしている。その点で住み分けしている。植えたら育つ場所ではなく、植えても育ちにくい場所、そういったところが荒廃地として残るのだが、そういった極限環境を対象にして森林回復の技術を開発し一般化できれば価値が高いと考えている。

委員) そのためにもベストの苗木で試験するのが重要。もし大きいポットが良いというのであれば、小さいのと大きいのを比較してみる必要がある。

委員) 根巻きを起こさない、自分で伸びる根をつくれれば随分違う。一般的に苗木生産業者はたくさん作ろうとして、小さいポットを使う傾向がある。多少買い取り単価を上げてでも大きいポットを使用して良苗を生産するべき。

委員) 培土等の試験は調整が困難だが、ポットの大きさ試験なら確実にできる。ただし、大きいポットは運ぶのが重い。

事務局) 昨年度までは、いろいろなところから苗木を集めて使用していたが、今年度からは、培土とポットサイズを指定して規格の同じものを試験場の苗畑で作ってもらうことにした。

委員) 苗畑での育苗にあたっては、ポットを地べたに置かないでほしい。根がポットを飛び出して土中に入り込む。高床式苗床だと空中根切りできるので推奨。

委員) 侵食防止について対策は？

事務局) 今年度植栽予定地は平坦なので必要ない。ただし、一般的にはテラス造成等やカバークロープ等の侵食防止対策は必要。既存情報に基づき技術指針のなかに記述が必要と考えている。

委員) これまでに得られた知見を生かして強い苗木の作り方等についての技術指針は？

事務局) 当センターで発行している「熱帯の育苗技術」に関するハンドブックがある。ただし、作成時から 20 年近くが経過しており、最新の技術を盛り込んで改訂の時期。この事業のなかでは改訂することは困難だが、当センター本来のミッションとしてやるべきことだと考えている。

事務局) 7 月出張時に植栽候補樹種は決定済み。種子の入手可能性等を再確認して苗木の生産を開始したい。今年度事業のなかで、採掘残渣の潜在酸性を調査予定。

(6) 平成 25 年度の事業実施計画について

林野庁) ワークショップ開催にあたっては、事前に連絡願いたい。時期にもよるが、他の

業務と兼ねて現地出張し、ワークショップに出席できる可能性がある。

委員) 高分子吸収材中の水は、植物が吸えないという話を聞いたことがあるが?

事務局) 高分子吸収材にもいろいろな種類がある。インドネシアでは、植林用の高分子吸収材が市販されており、産業造林等で割合広く使われている実績がある。乾季に入ったときに植えたいという場合等に使われる。

委員) 成長データの解析を基にして今年の試験計画を立てるのが本筋。データ解析が終了したら今年度の植栽計画および植栽樹種とあわせて委員に送ってアドバイスを貰って下さい。

2. 開発地植生回復支援部会 第2回議事抄録

(1) 森林回復技術開発モデル林の生育状況(植栽樹種の生存率、樹高等)

林野庁) TAJ社のデータでは、一番良いと思われる処理をした、客土および堆肥区の成長が一番悪い。仮定に反する結果が出ているが、何か説明できるのか?

事務局) 試験処理よりも元々の土壌条件、特に強酸性土壌の局所的な存在により強く影響を受けている可能性がある。また、我々のコントロール不足もあり、現地での試験処理に不備があった可能性も否定できない。

林野庁) 技術指針作成にあっては、植栽技術の有効性を見極める必要がある。この技術が有効で、この技術は有効でないと結論付ける際に、強酸性土壌の局所的な存在については注意が必要。

委員) *Fagraea* については、コントロールの生存率が高く、客土区では生存率が低い。たまたま客土区に低 pH のプロットが多かったというのなら説明がつくが。

事務局) *Acacia* の例では、たまたまリッピング処理区に低 pH は存在せず、リッピングしていない区に、低 pH が存在していた。このため、本試験植栽木の生存率は、処理の効果よりも、局所的な低 pH (強酸性土壌) により強く影響を受けたと考えている。

委員) *Fagraea* についても同様に分析して下さい。また、報告書をまとめる際には、一旦、処理区の効果は上手く出せなかった、と断定、結論付けた上で、低 pH について分析して下さい。そうしないと、客土の効果がないと結論付けると具合が悪いので。

委員) 処理の効果に加えて、コスト面からも考察が必要。コストが高いのに、局所的な強酸性に当たった場合は効果がないということであれば、その処理の費用対効果は低いことになる。

林野庁) *Acacia* は、pH7 付近で生存率が一番高く、pH3 付近(強酸性)では生存率が落ちている。他の樹種と比べても、pH3 までは生存率が高い結果が出ており、*Acacia* は非常に良い樹種といえる。また、*Melaleuca* のように、強酸性でもある程度生存率が高

い樹種も候補樹種として考えられる。

委員) 土壌 pH と樹種の生残にはクリティカルな関係があると思う。例えば、pH4 以下なら耐性のある *Melaleuca* を植えて、pH4 以上なら *Acacia* を植える等の指針ができるのではないか。中性域やアルカリ域等に分けても良い。

事務局) ただし、土壌 pH は、時が経つと変化する可能性がある。特に、pH が高い場合は、その後に強酸性化する可能性もある。そこに留意しなければならない。採掘残渣中に潜在酸性物質であるパイライトが含まれていると、酸化する前は pH が高いので注意が必要である。

委員) 本事業では、定期的に土壌 pH を定点モニタリングしているが。

事務局) これまでのところ、1 年間ではそれほど変化していない。5、6 年間かけて下がっていく行く可能性がある。

委員) 初期活着については、今の土壌 pH で判断すれば良いが、成長については、今後の土壌 pH の変化が効いてくる可能性がある。

事務局) TAJ 社では、全面客土はしておらず、植え穴のみの客土処理をしている。植え穴は、20cm×20cm 程度なので、そこから根が出てしまえば悪い土壌に当たり成長が止まる。日本でもそういう事例は観察されている。インドネシアでは、大きい植え穴 (50cm×50cm) を掘り、そこに客土する植栽方法が紹介されている。20cm×20cm の客土処理では小さ過ぎたかもしれない。

委員) リッピングの効果はどう説明されるか？ガーリー侵食が抑制される？

事務局) リッピングにより、排水が促進される。畝上の微地形が出来るので、それに沿って、酸性の水が比較的速やかに除去されるという効果はあると思う。その客観的データはないが、現場での観察による。

委員) そもそも、モデル林対象地として AGM 社と TAJ 社を選んだ理由は、AGM 社がそこそ中規模事業者、TAJ 社が小規模事業者ということだと聞いている。石炭年鑑でみると、AGM 社の年間生産量は 2013 年 340 万トンで、前の年は半分。中国の電力向けの輸出が増えており、生産量も増えていって、採掘跡地も増加している。他方、TAJ 社は去年の輸出量は 0、国内生産量も 10 万トン台程度。また、国営の PTBA やナンバー4 の Adaro 社等は 1 千万トン規模で大きい。その他、100 万トン規模の地元のピットも多数存在する。このように、規模や採掘事業期間が様々な中で、森林回復においても、長期の事業サイトでは、ゆっくり時間をかけて成長する郷土樹種を選択する等の工夫ができるのではないか。TAJ 社については採掘事業が終了予定なので、本事業のサイトは良いモデルとなる。

委員) AGM 社が輸出する石炭の硫黄分は、0.8~0.9 と比較的高い。通常は 0.5 程度。炭鉱ごとにそのデータがあるので、それが森林回復をする際の一つの指標となるのでは？

事務局) たしかに、硫黄分が高いと、パイライトが含まれている可能性が高いので、強酸

性土壌を呈する可能性も高いことになる。その観点から森林回復にあたっての良い判断材料となる。

委員) 処理区の配置が規則的で、ひとところにかたまって配置されているが、ランダムにばらして配置すれば、pH の局所的な偏在もある一定の処理区に偏在することはなかったのでは？

事務局) 1年目にも委員から同様の指摘を頂いたが、現地作業員のキャパシティを考慮して、植え易さの観点から規則的配置とした。今年度からある程度ばらして配置することを検討している。

委員) 例えば、Acacia の pH3 を見ると、生存率が 0% のプロットもあれば、50% のプロットも分布している。その幅が広いので、同じ Acacia 種内でも株によって耐性が違うということは考えられないか？株によって耐性が違うとすれば、強酸性で生存している個体を選抜して増殖すれば、耐性の強いものとして使えるということは考えられないか？

委員) 遺伝効果というのは判別が困難。環境条件の違いが大きすぎて判断がつかない。遺伝的に選抜するためには、対象木を増やす必要があり、全植栽木の土壌 pH を測定した上で選抜する必要がある。現在、遺伝的に成長の早い個体を選抜する精鋭樹の育種で取り組まれており、環境耐性までは手が回っていない状況である。

事務局) Acacia の pH3 付近のプロットによる生存率のばらつきについては現地で確認した。あるプロットでは、プロット (12m×12m) 内の植栽木本数 (4 本×4 本=) 16 本のうち、その半分に強酸性土壌が発生しており植栽木が枯れていた。強酸性でない残り半分では植栽木が生存していた。そのプロットの土壌 pH は中央部の 1 ヶ所で採取しており、pH3 である。また、プロット内の全てが強酸性土壌の場所では、プロット内全ての植栽木が枯死しており、残念ながら耐性のある個体は見つかっていない。そのような状況が、pH3 付近のプロットの生存率のばらつきに表れている。

林野庁) 本事業の最終成果である森林回復技術指針のユーザーは、石炭採掘企業と想定される。石炭採掘企業は、我々とは違ったニーズがあるのでは？例えばコスト面の問題等。もし私が企業の人間なら、生存率・成長ともに良い Acacia mangium で全て緑化するだろう。そして、強酸性土壌で枯れた場所には、耐性の強い樹種を補植する等。実際に事業者側の見解を聞いて技術指針を作成すべき。

事務局) たしかにその通りで、事業者側としては、なるべく森林回復にかかるコストを安くしたいとのこと。例えば、森林土壌の全面客土には莫大な費用がかかるので、企業としては、全面客土せずに緑化、成林する手法がないか探している。また、Acacia mangium は、強いので、これまでかなり緑化樹種として使用されて来っており、増えすぎたため、現在、インドネシア政府としては、緑化樹種として推奨していない。生物多様性にも配慮して、その他、特に郷土樹種の植栽を推奨している。

委員) その観点からも、本事業のターゲットとして、石炭採掘跡地において、適用可能な植栽技術を採用して、多様な樹種を植えるということは現地事業者のニーズにもなっていると考えている。したがって、樹種内の遺伝的差異ではなく、樹種間差の樹種特性を判断して、*Acacia mangium* でも育たない強酸性土壌の場所に生育可能な樹種が見つければ良いのだが。そのひとつとして、*Melaleuca* が候補樹種であるが、再現性のチェックが必要となる。

(2) 土壌モニタリング調査（潜在酸性等）

委員) 潜在酸性をチェックする場合に、試料に過酸化水素水を加えた際に、発泡するものとしがないものがあるとのことだが、その違いとして、試料にマンガンが含まれていないか？

事務局) 試料に、マンガンが含まれているものもあると思う。その場合、マンガンが触媒となり、過酸化水素が分解されていると考えている。

委員) 土壌 pH のモニタリングについて、最初の 3 回は処理区間で差があったのに、4 回目でなくなった理由は？

事務局) 最初の 3 回は、モニタリングポイント数が 5 点であったが、4 回目から倍の 10 点に増やした。サンプル数を増やした結果、処理区間の平均値の差がなくなったので、それが真の値に近いと考えている。最初の 3 回は、サンプル数が少なく、偏った地点のみをモニタリングしていた可能性が高い。

委員) 採掘残渣の潜在酸性評価手法は有効であると思う。試料が、砂質でラミナ構造を持っていないければ、強酸性化の危険性は低いということが判断できる。

事務局) ただし、採掘残渣で埋め戻す際に、潜在酸性物質がどの程度含まれているかが重要で、それが多く含まれていれば、強酸性化する危険性が高い。次は、実際に地ごしらえした際に、どの程度潜在酸性物質が含まれているかを調査して、強酸性化の危険性を評価しなければならない。

委員) 色が薄いと強酸性化しないという結果が出ている。

事務局) そもそも有機物がある環境でパイライトが形成される。パイライトは灰色に近い色をしている。淡い色にはパイライトは含まれていない。

委員) 石炭層との関係は？

事務局) 石炭層に近いところが、潜在酸性の危険性が高いと思ってサンプルを採取してみたが、必ずしもそうではなかった。

林野庁) ラミナ構造は有機物と関係しているのか？

事務局) マングローブのような有機物が堆積してゆく過程で、有機物を含まないものも交互に堆積するようなダイナミックな環境でラミナ構造が形成されると思う。おそらく、河口から土砂が運ばれて来て、その上にマングローブの落葉等により有機物が堆積し、その上に、また土砂が堆積する過程を繰り返して形成されると思う。ラミナ構造が出来ない環境としては、攪乱がなく、有機物を含まないものが静かに堆積した場

合が考えられる。

委員) 土色計を使用して土の色を測定したとのことだが、サンプル土の状態は？日なたや日陰で土の色が変わってくると思うが。

事務局) 土は、湿った状態と乾燥した状態では色が違ってくるので、本調査では、現場でサンプル採取しすぐに、湿った条件で、表面を円滑にして、測定面をセンサーにつけて真っ暗な状態で、光を送って反射光を測定した。

委員) 簡易な潜在酸性の判定手法として利用可能か？どの程度のスケールで判定可能か？

事務局) 本調査では、試料断面を細かく分けて 100 サンプル採集している。実際の採掘残渣では、そこまで細かく分けることはできないので、全体の採掘残渣中に強酸性の危険があるものがどのくらい含まれているか調べる必要がある。ただし、強酸性化の危険性が高いものは層別にかたまっている存在し、また、危険性が低いものも層別にかたまっている存在しているので、ある程度、現場で簡易に識別できるかもしれない。

委員) この簡易な判定法をガイドライン化できれば非常に有効である。採掘残渣のリスクをあらかじめ判定し、リスクの高いものは地中深くに埋め戻し、表層にはリスクの低いものを使用することで、植栽木の生存率が高く確保できたということが証明されれば説得力のある技術指針となる。

事務局) 実際の地ごしらえに適用するためには、実用化までには時間がかかると思う。

委員) 今年度の植栽試験地において、潜在酸性の試験が可能か？

事務局) 既に埋め戻しは終了しているので、対象地の潜在酸性を測定することは可能。

(3) 植栽候補樹種の生理特性（気孔コンダクタンス等）

委員) 植え穴の停滞水というのは、問題であり、東カリマンタンでも同様の実験を実施している。成果が出れば、本部会でも紹介したい。

事務局) 湿地性の樹種が入っていれば停滞水に対して耐性があるのでは？

委員) 湿地性に限らず、低地熱帯林の樹種は、短期的な停滞水に対する耐性があると考えられる。低地熱帯林では、短期的な停滞水はしばしば発生していたと考えている。

林野庁) モデル林試験植栽の樹種とはマッチングしていないのか？

田中) 調査時点で利用可能な樹種を使用したので、モデル林の植栽樹種とは必ずしもマッチングしていない。

事務局) Anthocephalus は酸性に強いが、停滞水には弱い？

委員) 東カリマンタンでは、Anthocephalus は停滞水に強いという結果が出ている。

田中) もしかすると苗木の質等ほかの要素があるかもしれない。

(4) 森林回復技術開発モデル林の植栽計画について

4-1) 南カリマンタン州の石炭採掘跡地について

委員) 今年度の植栽地が 2 ヶ所に分かれるとのことだが、樹種を分けるよりも、同じ場所

で 20 种植栽して、1 ヲ所の繰り返し数を減らした方が良いのでは？

事務局) 先発植栽できる樹種が 10 種程度しかないので、樹種で分けざるを得ない状況。

林野庁) 昨年度と同じ樹種も候補に入っているが、入手可能な樹種を選定したのか、それとも石炭採掘跡地に適応可能性の高い樹種を選定したのか？

事務局) 代表的な指標となる樹種に外さずに残すとともに、新たに適用可能な樹種を苗畑で育苗する等して追加している。今年度は、適用可能性のある樹種を試したい。フタバガキ科については、強光条件下でも育つ *Shorea leprosula* 等の樹種を選んでいる。

委員) 植栽穴は、30cm×30cm とあるが、化成肥料は土に混ぜるのか？また、植栽後に、追肥 60g を植栽木のまわりに施肥するとのことだが、施肥量が多いので、表層土と混ぜてほしい。

事務局) 基本的に肥料焼けの危険性があるので、植え穴には混ぜず、植栽後、土壌表面に散布する。表層土と混ぜてまんべんなく施肥するということで了解した。

委員) 同一プロット内は植栽間隔が 3m で 4 本×4 本 (12m×12m) の予定だが、強酸性が偏在している場合、プロット内でより均一な条件を確保するためには、プロットをもっと小さくした方が良いのではないか？

事務局) サンプル数は 16 本以下に減らすことは適切ではないので、植栽間隔を狭めて、プロットを小さくする方法はあるかと思う。ただし、その場合、モデル林としての面積を稼ぐためには、植栽本数が増え、コストがかかり増しになるという点もある。

事務局) これまで、植栽木である *Swietenia* については、生存・成長に個体差が大きく、その原因はつかめていない。

委員) 個体差の原因を究明するために、一本一本の植栽木の土壌条件を調査することは可能だが、日本人が現地で調査をやらなければならない。相手側に調査を任せられるものではない。

4-2) 東ヌサテンガラ州の農牧業利用跡地（半乾燥地）について

委員) 高分子吸収剤に水を含ませて植え穴に施用する必要があるのか？土壌に乾燥した粉末状のものをよく混ぜた方が良いのでは？

事務局) 両方考え方があるが、あらかじめ水を含ませてやると、既に水を含んでいるので、予期せず 1 週間雨が降らない場合等には、植栽木がその水を利用して生存できる利点がある。また、混ぜる際に、水を含ませて、ある程度ボリュームにして混ぜた方が均質に混ぜることができる。

委員) 苗木のポットのまわり、これから植栽木が水を利用する場所へ高分子吸収剤を施用するべき。

委員) 火災被害を受けたモデル林であるが、意図的なものではないか? 以前、放牧利用していた者等が火をつけたのでは?

事務局) その心配もあり、現地で確認したところ、隣接地で火入れした際に、失火により延焼したことを確認したので、故意ではない。今年度は、延焼を防止する防火帯の設置を徹底したい。

(5) 社会経済調査について

林野庁) 社会経済調査は、全体計画の中でどういった位置付けになるのか?

事務局) 南カリマンタンの石炭採掘跡地については、鉱山会社が土地を確保しており、地域住民が関与する余地は少ない。この社会経済調査は、東ヌサテンガラ州の農牧利用跡地において予定している。農牧利用跡地では、地域住民の同意なしでは、植栽できないような状況であり、土地の権利から、住民の生計状況、ニーズの高い樹種等について事前調査が必須であると考えている。

3. 開発地植生回復支援部会 第3回議事抄録

(1) 森林回復モデル林の生育(樹種別生存率、樹高等)について

委員) 2年目のモデル林試験植栽区では、降雨によって客土が流出したとのことだが、どのくらい流れたのか? 残されているところもあるのか? 客土の厚さはどのくらいだったのか?

事務局) 厚さは30~50cm程度。傾斜があったことが流出の第一要因であると考えられるが、客土の厚さが不十分であった可能性もある。

委員) 30~50cmも土壌が流出して、苗木が残っているのはおかしい。そもそも客土されていなかったのでは? もしくは、植える前に既に客土が流されてしまっていたのではないか?

事務局) 地ごしらえ整地した際に、土壌表面の色を判断し、客土が積まれていることを確認したが、客土の厚さが不十分であった可能性は否定できない。また、地ごしらえ整地をした数か月後に植栽したので、植える前に既に客土が流されていた可能性もある。

委員) 客土の処理区がしっかりできていないのであれば、そこは外したほうがよい。客土した処理区の成長が悪いという結果を公表するのは危険

事務局) もう一度現地で確認してみる。

林野庁) 工程管理をしっかりと確立することが必要

林野庁) 一部の樹種に土壌pH3のデータがないのは何故か?

事務局) 対象地の土壌pHの分布が不均一のため、必ずしも全ての樹種に土壌pH3のデータがあるとは限らない。各プロット中央部の一か所について土壌pHを測り、それをそのプロットのpHの代表としている。

委員) 理想的には、植栽木の植え穴全ての土壌pHを測るべきだが、時間と労力がかかる。

委員) 今回のデータでは、全ての樹種を一括して処理区別に、生存率と樹高の結果を示しているが、樹種毎に反応も違うと思うので樹種毎にデータを示すべき。

委員) 植栽試験の結果を見ると、土壌pHは、生存率や樹高にそれほど影響を及ぼしていないのではないか。他の要因はあるのではないかな？

事務局) 土壌pH3以下のデータがない樹種もあるので相関はでにくい。生存率に関しては、土壌pHが低いデータが取れている樹種について、植栽木の生死の閾値が分かるだけでもよいと考えている。

委員) 肥料やけを除いて、全てのデータを統合するなどして、データ数を増やして、傾向がないか検討してみてください。

(2) 植栽木の養分状態について

委員) 植栽木の養分状態として、窒素を測ってみると面白いのではないかな。施肥が効いていない可能性もある。

委員) 当研究所にある分析装置(ICP-MS)では窒素濃度は測定できない。NCアナライザがあれば測定できるが、当研究所にはない。

事務局) Anthocephalusのマンガン濃度が多樹種と比べて高いが成長は悪くない。

Anthocephalusは、マンガンを隔離して適応しているのかな？

委員) 生育が良い場所からサンプリングしているが、そこはたまたま土壌がよかっただけなのかもしれない。実は害が出ている植栽木は既に枯死して、生き残っていないのではないかな。土壌が悪い場所で死んでしまった植栽木を分析してみると何かわかるかもしれない。

委員) 既に枯死した植栽木は残っておらず分析できないので、活着を制限する要因を養分分析でみるのは難しい。

委員) Acaciaで、土壌pHに関係なく、生存率が低くなっている場所を調べてみると枯死原因がわかるかもしれない。それら限られた場所を除くとAcaciaはほとんど順調に育っている。

委員) 活着と成長を制限する要因は土壌pHだけではないように見えるが、それが何かは更なる分析が必要。

(3) 土壌モニタリングについて

委員) 潜在酸性調査で、色が黒い土が、その後酸性になる可能性が高いという説明があったが、それは、採掘断面の土の色なのか？埋め戻した後の採掘残渣に対しても評価できるのか？

事務局) 今回の潜在酸性調査では、採掘跡ピットの壁面に観察される累層の多様な堆積物をサンプリングの対象としたが、埋め戻した直後であれば、採掘残渣の潜在酸性の指

標になると考えている。

委員) 土壌pHのモニタリング結果をみると、ところどころ土壌pHが下がってきている。

その後、植栽木の生育に影響が出てくる兆候はあるのか？あるいは予測できるのか？

土壌pHだけではなく、その周辺の植栽木をマーキングするなりして、その後の生育への影響をみるとおもしろいのではないか。

事務局) 場所によって、かなり土壌pHが下がっているところもある。特異な酸性化がある場所があるので、それとその場所の植栽木の生存率の推移を考察してもいいかもしれない。

事務局) 植栽木の生育への影響として、マンガン過剰の時の植物の反応がわかり易い。葉の葉脈が緑でそのまわりが白といった現象がみられる。これらの反応を見ることで何が起きたか多少は分かる。

委員) この一年間で、新たに生存率下がったものがあるか？成長は長期的モニタリング必要。土壌pHも今は下がっていてもまた上がるかもしれない。これまで、鉱物採掘跡の森林造成地におけるパイライトの土壌酸性化の過程をモニタリングした例はないと思うので、貴重なデータとなる。

事務局) 極めて礫質になってきたことが、目で見てわかる。これだけ土がなくなったら養分の保持力がなくなる。表土をいかに保護するかは極めて重要であり、マルチまたはカバークロープにより土壌表面を保護することが土壌流出を防止するキーポイントと考える。

事務局) マメ科の成長が良いのは、酸性に強いライゾビウムが共生しているからではないか。根っこには根粒がついていることは確認した。

委員) 海の近くでは、塩に強いライゾビウムがいることが確認されている。そういう意味では、酸性に強いライゾビウムがいる可能性もある。

事務局) 土壌の窒素量は、周辺の森林土壌に比べると極めて少ない。窒素が成長の制限要因になっている可能性が高い。

委員) たしかに、こういうところで、すくすく生えている木は、窒素をうまく取り入れている。ただし、Acacia等のマメ科では、窒素固定にもの凄いエネルギーが必要とされている。それを助けるのがマイコライザであることが室内実験では分かっている。

事務局) 既にマイコライザが共生している根をすりつぶして、苗木の土に混ぜることで感染させることが可能か。

委員) 可能であり、一般的に実施されている。なお、植物の生育に必須な元素のひとつであるリンについては、根粒菌で固定することはできないので、どのようにして調達するかが課題。

(4) 石炭採掘跡地における森林回復の先進事業地（TCM社）視察結果について

委員) こちらの事業地では、つる被害が観察されているようだが、つる植物をカバークロ

ップに選ぶのはよくないと思う。

林野庁) 林業省が森林回復の評価を行うとのことだが、何年後に評価に入るのか？

事務局) 植栽後3年目に生存率で評価する。早成樹なら成否の判断が可能だが、成長の遅い郷土樹種等では、成否の判断をするには早すぎると思う。

委員) TCM社の樹間植栽の写真について、この写真の一次緑化樹種 (*Samanea Saman*) は、この状態になるまでだいたい何年かかるのか？

事務局) 2~4年と聞いている。

委員) この写真のように、まず早成樹で一次緑化できることが証明されれば、そのあとの二次緑化では樹種の選択肢が増える。

事務局) ただし、一次緑化の際には、整地・地ごしらえの段階で、採掘残渣から潜在酸性物質を隔離し除去することは必須。

委員) 本事業でも、一次緑化はできている。1年で一次緑化できればマルチングなしでも大丈夫ではないか？

事務局) 予想以上に表土流出が激しく、まず、整地・地ごしらえ、斜度と排水、土木デザインが重要。その上で、雨滴障害による表層浸食を防止するためにマルチングも必要だと考える。マルチング材料としては、つる植物や草本に加えて、現地に豊富に存在する石によるマルチングも考えられる。

(5) 開発地における森林回復技術指針について

委員) 森林回復の技術指針としては、埋め戻し時の整地・地ごしらえ手法に加えて、浸食対策をどう記載するか？

事務局) カバークロップとして、つる植物でも巻きつかない種を選定してはどうか。ブリジストンのカリマンタンプランテーション社のゴム園では巻きついてない。

事務局) ゴム園では頻繁に人の手が入っているため巻きついていないだけ。現地では、鉱山跡地の緑化にカバークロップを植えるのは一般的。本事業では、時間的制約もありカバークロップの実証試験はできない。したがって、文献や既存情報を基にして、カバークロップの導入方法についても技術指針に盛り込みたい。また、整地・地ごしらえ手法についても、文献や既存情報を基にして、傾斜等の要件を盛り込みたい。

委員) カバークロップはどうやって植える？

事務局) ゴム園では、挿し木によるポット苗を作って植栽する。条件にもよるが、一般的には、1年以内に十分に地表全体を覆う。

委員) 土壌pHごとに候補樹種リストを提示する設計だが、一次緑化の候補樹種リスト、二次緑化のための郷土樹種リスト、多目的樹種リストのように目的別に分類した方がよいのではないか？土壌pHを指標とすると、時間がたつと変化してしまう可能性があるため。他方、東ヌサテンガラ州の農牧業利用跡地の場合は、耐乾性という植物の生理

に即した樹種リストが適切であると思う。

委員) 樹種ごとの特性を示した方が間違いなく、使いやすいと考える。

委員) 住民参加というが、住民の意見をすべて聞く必要はない。ゾーニングして住民の利用を禁ずる保護区を設定することも必要。

委員) 樹種リストがあるが、それらの樹種を住民は知っているのか？

事務局) すべての樹種を知っているわけではない

委員) 先住民の人達は外来樹種を知らない場合が多い。外来樹種を導入する際はその認識が必要で、但し書きが必要。樹種の選択肢を掲げることが必要。

事務局) 技術指針の一つとして、「住民参加型の森林回復手法」を作成する予定であった。

しかしながら、本事業で作成する技術指針は、植栽に関する技術面に特化した方が良いという判断から、住民参加手法については取りやめたい。その代わりに、地域住民にも有用な植栽候補樹種リストを掲げたい。

委員) 樹種の特性は書くときりがないので、どこまで記載するか、ある程度見切りをつける。早急にやるのは一次緑化樹種リストをつくることであろう。外来種である *Acacia* や *Enterolobium* も含めて、フタバガキ科や比較的成長の早い *Anthocephalus* 等の在来種をどう分類するか検討する必要がある。

事務局) *Enterolobium* は生存・成長は良いが、木材としての価値が低い。あくまで一次緑化樹種である。また、インドネシアでは、*Acacia mangium* は一次緑化樹種として好まれない。いたるところで繁茂しており、火災等により天然更新もする。IUCNの侵入性樹種としても登録されている。

委員) 同じマメ科の *Calliandra* は、*Acacia mangium* よりも繁殖力が強く、一斉林化し、排除が困難。これだけは植栽しない方が良いという樹種も分かっておく必要がある。

委員) タイでは *Acacia mangium* も一斉林化し生態系を荒らす事例もある。

事務局) ギンネム(*Leucaena leucocephala*)も同様。

委員) カリマンタンでは、*Acacia mangium* はタイほど問題にはなっていない。

委員) 東ヌサテンガラ州の農牧業利用跡地における乾燥対策として、土壌の保水性改良はどうしているのか。

事務局) 堆肥と木炭ならびに高分子吸収剤の施用試験を実施している。今後、試験結果がでる予定である。

委員) それでは、基本的に、提示して頂いた案の方向で森林回復技術指針を作成するという事でお願いします。