

# インドネシア錫鉱山跡地における 木質系エネルギー作物生産の適地探索法

松原 隆志

中村 奈美  
(ビジネスイノベーション推進室)

## A Method for Exploring Suitable Sites for Growing Wood Energy Crops at Post-Tin Mining Sites in Indonesia

Takashi Matsubara Nami Nakamura

### Abstract

Owing to the increasing interest in renewable energy, we identify methods for exploring suitable sites for growing energy crops at post-mining sites around Southeast Asia to support biomass power generation. The energy crop *Gliricidia* grows well on sandy soils but not on clay soils owing to damage caused by wetness. Furthermore, *Gliricidia* can survive under both wet and dry seasons when the highest annual groundwater level is approximately GL-1m. Therefore, we study how to construct a farm that can fulfill these conditions. First, we estimate the distribution of the highest annual groundwater level based on the distribution of groundwater level obtained from an electrical resistivity survey, considering the yearly fluctuations of groundwater level using a water level gauge, and consulting the elevation data of ground surface using a drone equipped with a light detection and ranging system. Subsequently, we devise a method for digging open ditches measuring GL-1m in sandy and humus soil areas with good water permeability. Based on the results obtained, we establish a method for exploring suitable sites that can ensure the growth of energy crops as well as a business profitability.

### 概要

再生可能エネルギーへの関心が高まる中、バイオマス発電の燃料となるエネルギー作物を安定供給するため、東南アジアに広がる鉱山跡地における生産適地の探索法を検討した。エネルギー作物のグリシディアが好む生育環境を調査したところ、粘性土では湿害による生育不良が生じるが、砂質土では生育可能だと分かった。また、年間最高地下水位がGL-1m程度になる条件で、雨季と乾季の両方に耐えることが分かった。そこで、これらの条件を満たす圃場を造成することを検討した。まず、電気探査で地下水位分布、水位計で地下水位の年変動、ドローンとレーザーライダーで地表面の標高データを取得し、年間最高地下水位の分布を推定した。次に、透水性の良い砂質土等のエリアに絞って、GL-1mの開渠を掘る方法について検討した。これらの検討を通じて、エネルギー作物の生育と事業の採算性を確保できる適地探索法を見出した。

### 1. はじめに

地球温暖化問題の解決策として再生可能エネルギーの開発が急務となっているが、その一つとしてバイオマス発電にも関心が持たれるようになった。一方で、インドネシアをはじめとする東南アジアの国々には、鉱山跡地が多く見られる。これらの鉱山跡地は表層土がはぎ取られたまま放置されており、植生の回復が困難な状態である。また、土壌中には重金属が含まれる場合があり、食料生産に利用されることも少ない。そこで、鉱山跡地でバイオマス発電に使用する木質系エネルギー作物を生産し、鉱山跡地の植生回復にも寄与することを目指した。

エネルギー作物として実績のあるグリシディア（マメ科 *Gliricidia sepium*: Photo 1）には以下のような利点がある。幹を残して枝を収穫すると枝が再生するために植生の回復には最適である。早生樹であるために収穫量も期待出来る。枝の挿し木で簡単に増殖が出来、かつ東南アジア全域でコショウ栽培の添え木などの用木として栽培

されているため、容易に挿し穂が入手できる。そこで、本樹種を第一候補として調査研究を進めることとした。

大林組はインドネシア国ブリトゥン島のリランガン地



Photo 1 グリシディア（マメ科）  
*Gliricidia sepium* (Fabaceae)

区およびシリンスン地区にある錫鉱山跡地に2014年12月にグリシディアを試験的に植えていたが、2015年9月の予備調査で確認をしたところ、植林した場所によって生育状況に大きな違いが生じていることが分かった。そこでまず、両地区の土壌・植生調査を実施してグリシディアが生育可能な条件を確認することとした。さらに、そこで得られた条件が出来るだけ整った適地を探索し、足りない条件を補う圃場の造成法を立案することを目指した。広大なエリアから候補地を選定する手段として、衛星やドローンなどによるリモートセンシング技術を駆使するとともに、地質調査を効率的に行うため農業関連技術としては珍しい電気探査を採用した。これらの調査結果を利用して、エネルギー作物の生育だけでなく事業収支も考慮できる適地探索法の検討を行った。

## 2. 土壌・植生・グリシディア生育調査

### 2.1 調査目的

錫鉱山跡地の土壌がどのような物理特性を持つのかを中心に調査を行い、その環境でグリシディアが生育する条件と生育できない条件を確認した。

### 2.2 調査位置

インドネシア共和国バンカブリトゥン州ブリトゥン島(4,800.6km<sup>2</sup>, 南緯2.83°東経107.916°) 東部のリランガン(Lilangan) 地区およびシリンスン(Silingsing) 地区の錫鉱山跡地を対象に調査を実施した。リランガン地区の鉱山跡地は地元民が小規模に開発した後に放棄されたもので、近くではまだ採掘作業が実施されていた。シリンスン地区の鉱山は半官半民の企業が開発した錫鉱山跡地で、同社が跡地の緑化事業を実施していた。

ブリトゥン島東部の土地利用の状況を、2016年6月2日の衛星データの解析から評価した結果をFig. 1に示す。衛星データにはPALSAR-2の合成開口レーザーを使用した。LANDSATに代表される光学系データとは違い、合成開口レーザーは雲の影響を受けずにデータを取得することが出来る。得られる偏波データの組み合わせを解析して、観測対象の散乱特性を確認することで土地被覆分類をした。島の中央および北部には凡例で[Forest]と区分する森林地帯が残されており、その周辺には[Plantation]と区分する広大な農場が見られた。これらの多くはアブ

ラヤシのプランテーションで、コショウ畑やゴムノキが植林されているエリアもあった。低地の多くは錫鉱山またはその跡地となっており、開発のために土が掘り起こされたところは[Red Soil]と区分し、その中に錫を取り出す作業で生じた砂山は[White Soil]と区分した。リランガン地区は森林地帯が近くにあるのに対し、シリンスン地区は湖が近くに広がるエリアであった。

### 2.3 調査方法と結果

衛星データによる適地の確認および本章での調査結果から、シリンスン地区はグリシディアの生育条件を満たす面積が少ないのに対してリランガン地区は満たす面積が比較的多かったことから、リランガン地区の錫鉱山跡地に絞って記述する。調査対象としたグリシディアは、2014年12月に試験的に植えたものである。植林作業は、親木から採取した枝(長さ1m, 直径3~4cm)を挿し木する方法で実施し、植栽密度は2m×4mに1本で、試験区は砂質土のエリアと粘性土のエリアの2か所に設定した。

**2.3.1 予備調査** 2015年9月に行った調査では、粘性土のエリアに植栽されているグリシディアは、根の伸長がほとんど見られず枯死していた。グリシディアは貧酸素状態の土壌で生育出来ずに湿害を受けると分かった(2.3.4項参照)。

**2.3.2 ドローンによる周辺状況の観測** 2016年7月21日(乾季)に、ドローンで写真撮影を実施した(Photo 2)。錫鉱山跡地には露天掘りによって出来た窪地に雨水が溜まった池と、池の水と一緒にポンプで吸い上げた土

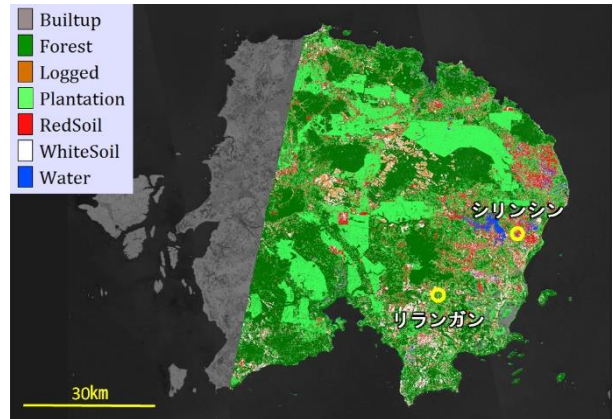


Fig. 1 衛星データによる土地利用解析  
Analysis for Land Use by Satellite Data



Photo 2 ドローンから撮影したリランガンテストサイト周辺  
Lilangan Test Site Area Photographed from Drone



Photo 3 砂質土のリランガンテストサイト  
Sandy Soil at Lilangan Test Site

から錫を分粒する作業によって出来る砂山と粘土の湿地が点在していた。これらの土地は一部を除いて植物の生育に適さないため、ほとんどが荒廃地となっていた。このエリアの自然植生は近くに川が流れる湿地帯で、小高い所には灌木が生育していた。写真に写る緑地の多くはこれらの灌木がそのまま残ったもので、地元民が開発する小規模な鉱山の特徴となっていた。

2.3.1項の予備調査結果から、Photo 3に示す砂質土に設けられたテストサイトに絞り、その中で生育が良好な場所と不良な場所を調査して、生育の違いが生じている理由を確認することとした。Photo 3の左側手前が砂質土の斜面上部で、右側奥が同条件の斜面下部である。斜面上部の生育が良いのが分かった。

**2.3.3 土壌断面調査** 2016年4月13日(雨季)に、テストサイトに植栽されているグリシディアの生育が良好な場所と不良な場所の根圏付近の土壌を縦横50cm、深さ100cm程度掘り、土壌の透水性、粒径組成、地下水水位の確認を行った。透水性および粒径組成は、100mlの試料円筒で土壌を採取して分析を実施した。地下水が得られた場合には、その水質についても確認した。その結果をまとめたものがFig. 2で、上段に水位と透水性に対するグリシディアの生育状況を示す。

斜面上部から斜面下部までの表層部の粒径組成は粗砂と細砂で95%を占めていた。そのため、透水性は確保されていて $1.2\sim 2.7\times 10^{-5}$ m/sであった。雨季での地下水位

はGL<-1m~GL-0.5mで、斜面上部から斜面下部に向けて徐々に浅くなっていった。水位がGL-1mでグリシディアの生育は良好で、GL-0.7mで湿害のために生育が抑制され、GL-0.5mでは枯死していた。一方で、水位がGL<-1mだと乾季の乾燥に耐えられずに枯死していた。

粘性土平坦部の表層部の粒径組成はシルトと粘土で81%を占めていた。そのため、透水性は極めて低くて $2.9\times 10^{-9}$ m/sであった。雨季にほぼ冠水して乾季は表層が乾く状態で、シダ植物は生育可能だが、グリシディアは枯死していた。

水質については、雨水由来の中性に近い水で、上流の森林からの水の流入が影響している可能性があり、グリシディアへの給水に利用できる可能性があった。

**2.3.4 グリシディアの生育できる条件** 調査結果からグリシディアの生育できる条件を確認し、生産に適した圃場の造成法を検討した。

(1) 土壌と生育との関係 粘性土では雨季・乾季にかかわらず透水性が悪くて過湿で貧酸素状態となってしまいうため、生育不良もしくは枯死した状態が観察された。土壌養分も少なく、孔隙が少なく土が固いことも生育の阻害要因と考える。

砂質土では透水性が良いため、雨季と乾季の地下水位のバランスが良いと、生き残る個体が観察された。ただし、土壌養分が少ないため、旺盛な生育は見られず、肥料分の供給が不可欠と考える。

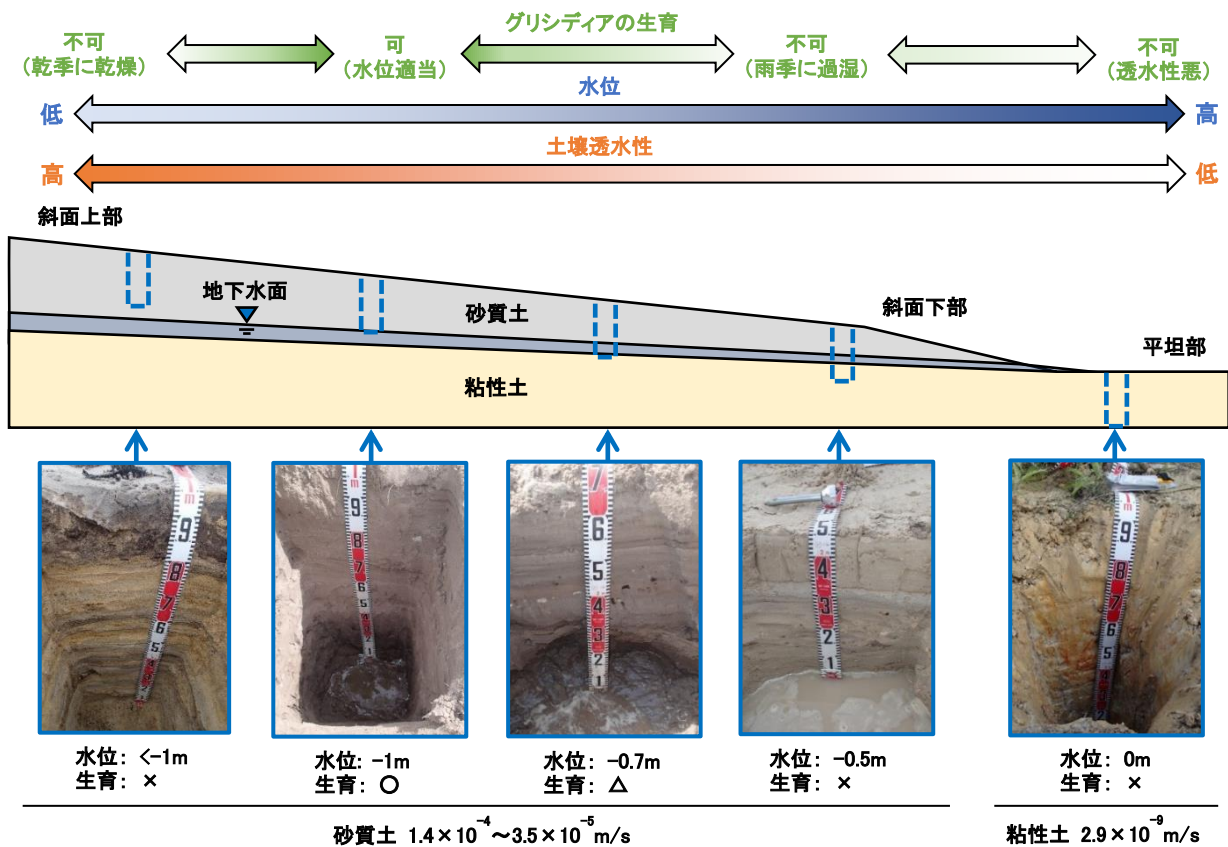


Fig. 2 リランガン地区での土壌断面調査による土壌透水性・地下水位とグリシディアの生育との関係  
Relationship Between Soil Permeability and Groundwater Level and Growth of Gliricidia by Soil Profile Survey at Lilangan

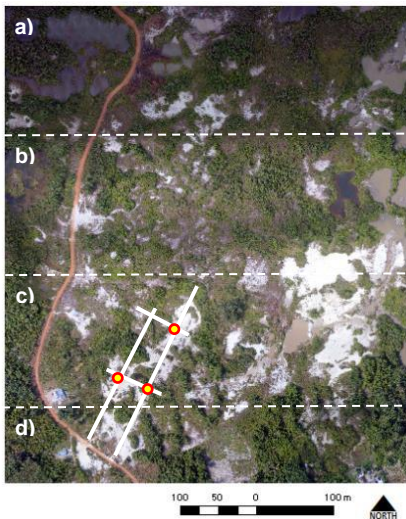


Fig. 3 地表面標高データの取得エリア  
Acquisition Area about Ground Surface  
Elevation Data

(2) 地下水位と生育との関係 砂質土壌において地下水面が高すぎると過湿で枯れてしまい、地下水面が低いと乾期に過乾燥で枯れてしまうと推測する。事実、傾斜のある砂質土壌に植栽されたグリシディアの生育状態を確認すると、地下水の年間最高水位がGL-1m程度になる場所で生き残るグリシディアが観察され、雨季・乾季に土壤水分状態が過湿および過乾燥にならないためと考えられる。

(3) 生育改善の方法 地下水位が高い土地で、地下水の年間最高水位がGL-1m程度にするため、対象エリア全体に透水性の良い砂質土を盛土する案を考えた。

ただし、盛土のための透水性の良い土を十分に確保できない場合、または盛土の造成費用が高額になってしまう場合も考えられる。この場合には、透水性の悪い粘性土壌を避けて圃場の計画地を設定した上で圃場にGL-1mの開渠を掘って排水し、地下水の年間最高水位をGL-1m程度にコントロールする対案を考えた。

いずれの場合にも、乾季の過乾燥による枯死の防止と肥料分を与える目的で、有機質資材の投入を検討する必要がある。

### 3. レーザーライダーによる標高データの測量

#### 3.1 測量目的

2章で調査対象にしたリランガン地区について、レーザーライダーによる標高データの測量を行った。標高データは、4章に示す電気探査および地下水位観測の結果と併せて地下水位の平面分布の推定に使用する。さらに、5章の検討において、地下水の年間最高水位がGL-1m以下になるように造成するのに必要な移動土量の算出にも使用する。

#### 3.2 測量方法

2018年2月6日～9日（雨季）に、リランガン地区の錫鉱山跡地を対象に調査を実施した。5章での検討のため、

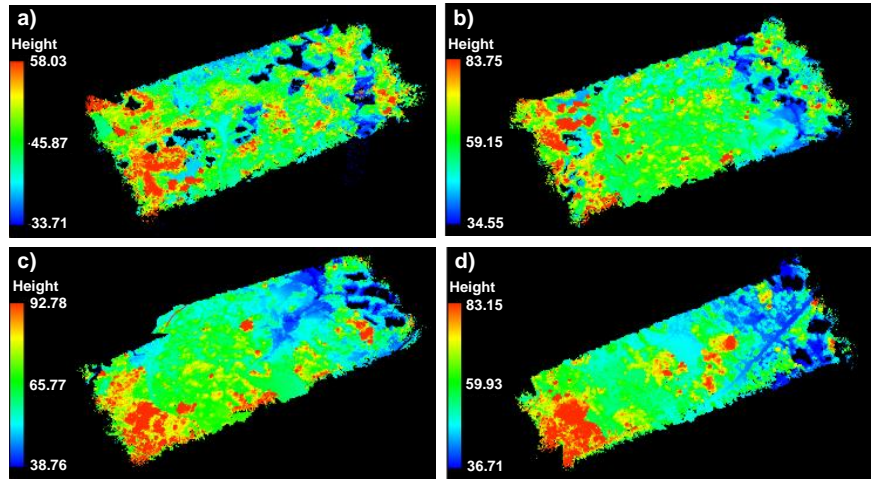


Fig. 4 レーザーライダーで取得した点群データ (Fig. 3 a), b), c), d) に対応)  
Point Cloud Data Taken by LiDAR

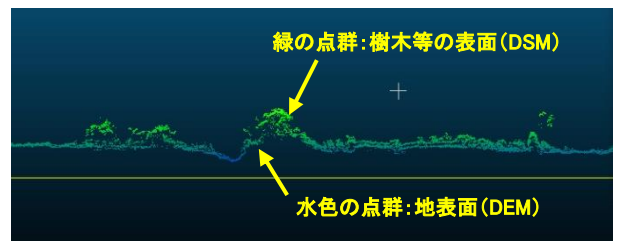


Fig. 5 点群データの断面  
Section of Point Cloud Data

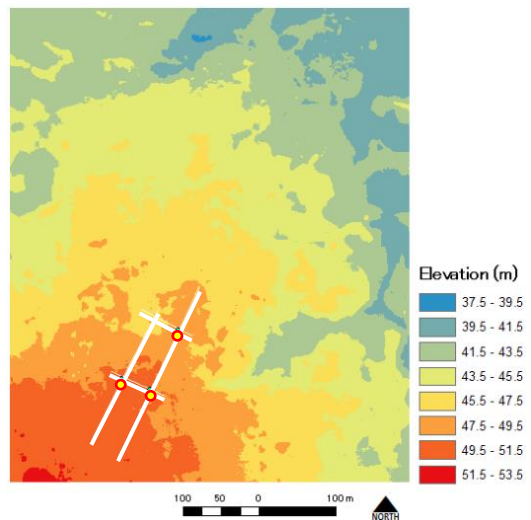


Fig. 6 地表面の標高データ  
Elevation Data of the Ground Surface  
(Max=52.45m, Min=39.06m)

2章の調査対象エリアより拡大したエリアを測量対象とした。広大な圃場が必要なバイオマス発電事業の可能性を評価するため、測量対象面積を出来るだけ広くし、 $621\text{m} \times 523\text{m} = 324,783\text{m}^2 (\approx 0.325\text{km}^2)$ とした。Fig. 3に地表面標高データの取得エリアを示す。4章で実施する井の字状の電気探査測線（白線）および地下水位観測孔（赤丸）は対象エリアの南西に位置する。測量作業には、産業用のドローンにレーザーライダーを搭載して使用した。

### 3.3 測量結果

対象となるエリア全体を4分割し、4回のフライトによって、Fig. 4に示す全ての点群データを得ることが出来た（凡例に示す色の違いで標高を表示）。

Fig. 4で示した点群データの一部の断面をFig. 5に示す。図中の緑の点群データからは樹木等を含む表面の標高データ（DSM）、水色の点群データからは樹木等のデータを取り除いて得られる地表面の標高データ（DEM）がそれぞれ得られた。

4回のデータを結合し、測量対象エリア全体の地表面の標高データを取得したのがFig. 6である。4章で紹介する電気探査および地下水位観測を行った位置は、測量対象エリアの中では比較的標高が高く、北東に行くほど標高が低くなっている。



Fig. 7 電気探査および地下水位調査位置  
Position of Survey using an Electrical Resistivity Survey and a Water Level Gauge

## 4. 電気探査と水位計による地下水位調査

### 4.1 地下水位調査の目的

対象エリアの地下水位（GWL: Groundwater Level）の平面分布を電気探査によって把握することとした。その際、地下水位計を設置することで、電気探査で予測する地下水位の基準にするとともに、地下水位計で得られる季節変動を利用して、地下水位の平面分布の季節変動を予測することとした。

### 4.2 地下水位調査の方法

2018年2月5日～9日（雨季）に、リランガン地区の錫鉱山跡地を対象に調査を実施した。

**4.2.1 電気探査の測定作業** Fig. 7に示すエリアを対象に、2次元電気探査法の2極法配置を採用した。エリアを井の字状に測定して、エリア全体で3次元の数値を算定する。測定は南北方向に250mと200mの測線を約40mの距離をあけて平行に設置した。また東西方向には80mの測線を約90mの距離をあけて平行に設置した。測定には、デジタル電気探査装置と銅製のアース棒を電極として1m間隔で土中に挿して行った。

**4.2.2 地下水位観測孔の設置作業** 水位計の設置は、孔底開口型地下水位観測孔（Fig. 8）を採用した。オーガーを使用して直径8cmの塩ビ管を挿入した。地下水のレベルに達した後も、可能な限り深く塩ビ管を挿入し、乾季にも地下水位が測定できるようにした。塩ビ管挿入後に、水位計および大気圧計を観測孔内に設置した。

Fig. 7に示すように、地下水位観測孔は電気探査測線上にW-1、W-2、W-3の3本を設置した。Fig. 8に示すようにW-1で約2m、W-2で約1.5m、W-3で約3.5mまで塩ビ管を挿入した。

### 4.3 地下水位調査の結果

**4.3.1 電気探査結果** 電気探査によって得られたデータから算定した比抵抗値の断面分布をFig. 9に示す。①-①'断面、②-②'断面、③-③'断面、④-④'断

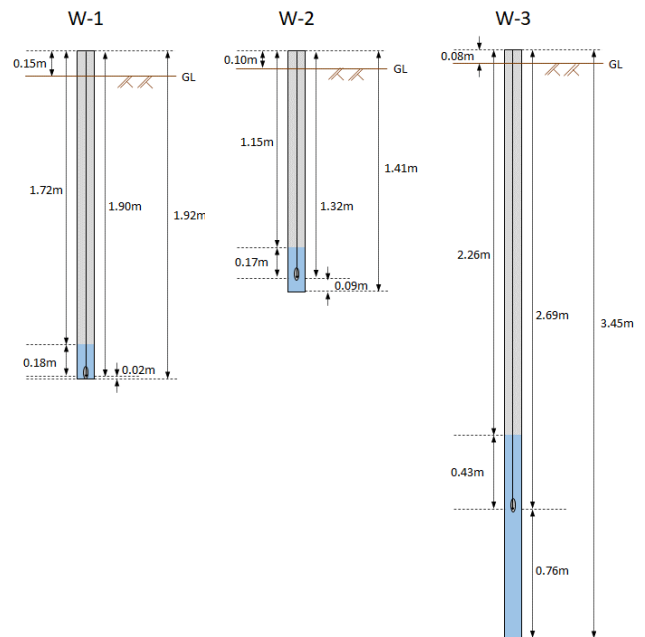


Fig. 8 孔底開口型地下水位観測孔の設置状況  
Setting Conditions of GWL Observation Wells of Hole Bottom Opening Type

面はFig. 7に示した位置関係となっている。

**4.3.2 地下水位観測結果** 観測孔W-1～W-3における地下水位計の観測結果をFig. 10に示す。いずれの観測孔でも、水位計設置後の1ヶ月間に地下水位が急速に上昇し、その後は変動を繰り返しながら3月上旬から7月上旬ぐらいまで水位を維持していた。その間に5月中旬と6月中旬に大きな低下が見られるが、この変動についても全ての観測孔で共通であった。7月の中旬以降は徐々に水位が低下して9月上旬には水位計を設置した当初の2月上旬の水位に近くなっていた。その後のデータ回収は出来なかったが、11月～12月に始まる雨季になるまでは水位はさらに低下したと推測される。水位が最も上がっていたのはW-2で、GL-0.25m程度であった。W-1はGL-0.75m程度、W-3はGL-1m程度で、場所によって水位の最高到達点やその変動程度に違いがあることが分かった。

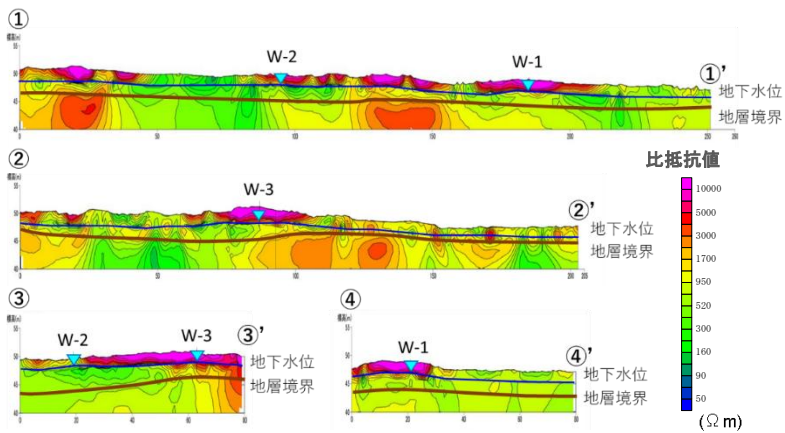


Fig. 9 電気探査による比抵抗値の断面分布，地層境界，地下水位  
Resistivity Cross Section, Bed Boundary and GWL  
Estimated from Electrical Resistivity Survey

#### 4.4 調査結果の解析

4.4.1 電気探査結果の解析 比抵抗値は水分状態が乾燥しているほど大きく，湿潤であるほど小さくなる。また，地質が砂礫になるほど大きく，粘土になるほど小さくなる。Fig. 9に示すように分布が大きく変化するラインが2本あることが分かる。下の茶色の線は基盤と考えられる地層Aと二次堆積物と考えられる地層Bの地層境界と推定した。一方で，上の青色の線は，観測孔W-1～W-3を実測した水位と整合するように，地層Bの中の飽和ゾーンと不飽和ゾーンを分ける地下水位と推定した。

4.4.2 地下水位分布標高データの推定 4.4.1項のFig. 9で推定した各断面の地下水位をFig. 11で井の字状の標高データとして示した(凡例の丸いマーカーの連続)。また，3章のレーザーライダー測量によって得られた地表面の標高データも同時に平面的に表示した(凡例の四角のマーカー)。両方の結果から，標高の違いによる水位の傾向を考慮(3次B-スプライン曲面を使用した推定法<sup>5)</sup>)した上で調査時の地下水の標高データを推定した結果を示した(等高線)。また，白の矢印は地下水の流れる方向を推測したものである。

### 5. 圃場造成の工事量予測

#### 5.1 工事量予測の目的および方法

3章で標高データが得られた範囲(324,783m<sup>2</sup>)を評価対象面積として，2章で検討をした盛土または開渠によって，グリシディアの生育に適した圃場を造成するための工事量の検討を行うこととした。そこで，2章の調査で得られた，グリシディアの生育条件である地下水の年間最高水位をGL-1m以下にすることを実現するために，3章で得られた標高データおよび4章で得られた地下水の水位分布を使って検討を行った。検討にはGISソフトを使用した。なお，本章での検討結果から，盛土による圃場の造成には膨大な工事量が必要で，事業の採算性を確保できる見込みが無かった。そこで，事業の収支に有利な開渠による方法で工事量を算定した結果を記述する。

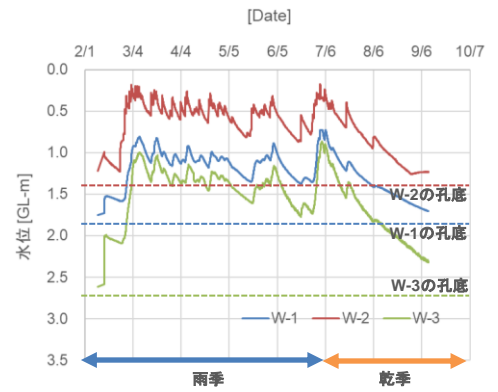


Fig. 10 各観測孔の地下水位変動の比較  
Comparing Between GWL Fluctuations  
at Each Observation Well

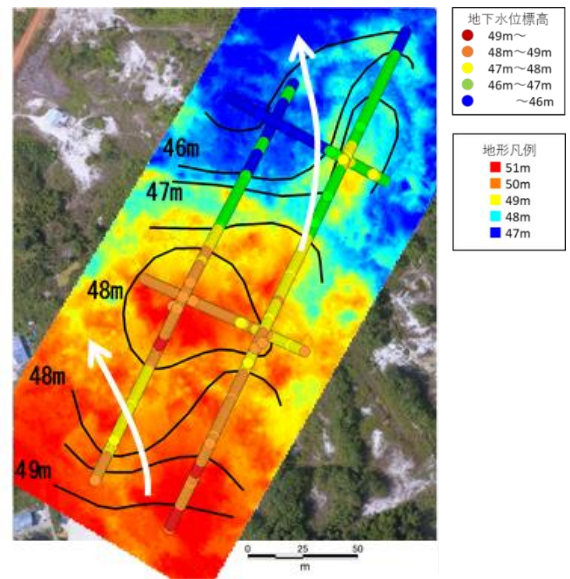


Fig. 11 調査時の地下水位標高データ(等高線)  
GWL Elevation at the Time of Survey (Contour Line)

#### 5.2 地下水年間最高水位の標高データ

レーザーライダーによる「地表面の標高データ」および電気探査等によって得られた「地下水位分布の標高データ」を処理して，地下水の年間最高水位の標高データを作成した。

Fig. 12は，図中の井の字状に配置した測線の電気探査の結果と赤色の○で示した観測孔で計測した水位の結果で井の字状の水位を推定した後に，Fig. 6の地表面の高さとの関係を重回帰分析(線形)でモデル化してエリア全体の地下水位(電気探査計測時)を推定したものである。

Fig. 13は，先ほどの観測孔に水位計を設置して2018年2月～9月(雨季含む)の期間に測量した最高水位を年間最高水位とし，「レーザーライダーで測量した地表面の標高データ」と「地下水位分布の標高データ」の差分と年間最高水位との関係を指数近似でモデル化してエリア全体の地下水の年間最高水位を予測したものである。差分が大きいほど地表面と最高水位面の差が大きく，差分が小さいほど地表面と最高水位面の差が小さくなるよう設定した。

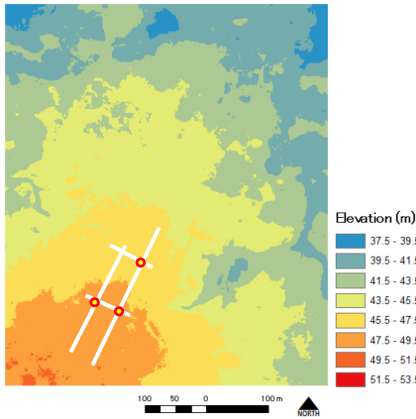


Fig. 12 地下水位の標高データ  
Elevation Data of GWL  
(Max=50.59m, Min=37.82m)

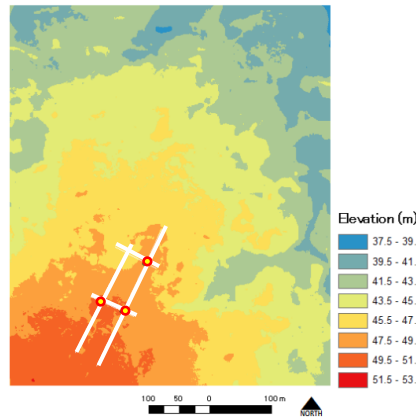


Fig. 13 地下水年間最高水位の標高データ  
Elevation Data of Highest GWL of the Year  
(Max=51.63m, Min=38.87m)

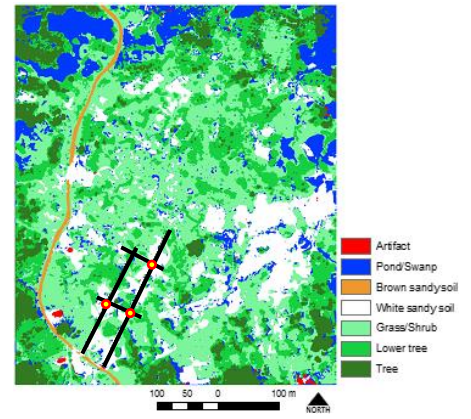


Fig. 14 土地利用図  
Land Use Map

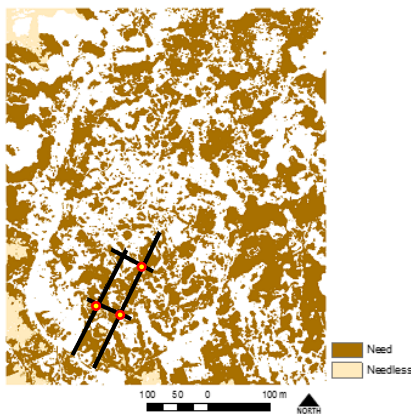


Fig. 15 排水工事の要否を評価  
Evaluating Necessity of Drainage Work

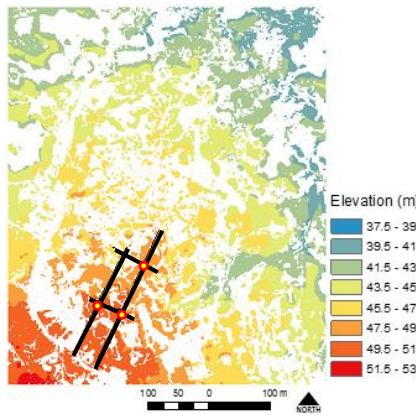


Fig. 16 窪地埋立て後の標高データ  
Elevation Data after Filling Depressions  
(Max=52.45m, Min=39.37m)

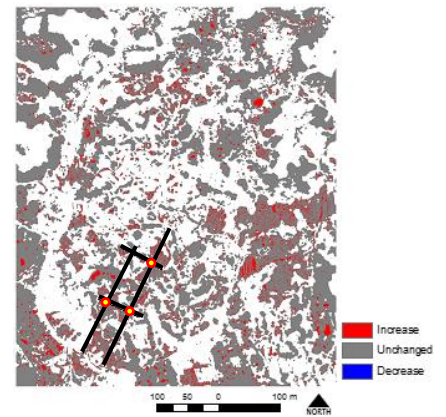


Fig. 17 窪地埋立てに際して土が増加する  
(埋立てる) エリア  
Soil Increase Area after Filling Depressions

### 5.3 容易に造成出来るエリアに絞った検討

透水性の良い砂質土・腐植に富む土のエリアに絞ってGL-1mの開渠を掘ることを検討するため、ドローンで撮影した航空写真を基に土地利用状態を解析した結果を、GISソフトを使用して作図した (Fig. 14)。人工物 [Artifact] は撤去が困難で、溜池および湿地 [Pond/Swamp] は盛土が必要で、道路およびその周辺に広がる茶系の砂質土 [Brown sandy soil] は土壌硬度が高く、草本および低木 [Grass/Shrub] が生育するのは粘性土で、容易にグリンディアの生育に適した環境に造成するのは困難と判断した。一方で、白の砂質土 [White sandy soil]、低木 [Lower tree] と中木 [Tree] の生育する腐植に富む土は、一定間隔で開渠 (幅1m, 深さ1mの溝) を掘って排水工事を行うことで、雨季にも湿害の生じない圃場を造成することが出来ると考えた。

Fig. 15では、圃場として利用可能なエリアの中で、排水工事が必要なエリア [Need] と不要なエリア [Needless] を分けた。具体的には、Fig.14の「工事対象エリア」の中で、Fig.13の「地下水の年間の最高水位」が、GL-1mより高くなってしまふ場所では掘削工事が必要で、低い場所では掘削工事が不要とした。開渠の掘削工事が必要な

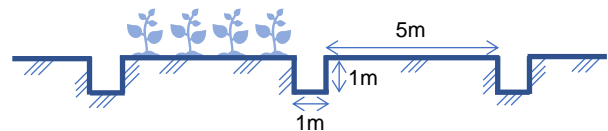


Fig. 18 開渠の断面図  
Cross Section of Open Ditch

エリアの面積は153,317m<sup>2</sup>、不要なエリアの面積は10,193m<sup>2</sup>となった。

5.3.1 窪地を土で埋める作業 容易に造成出来るエリアに絞って圃場造成をする場合に、土地表面の窪地を土で埋めると、その後実施する溝の掘削工事で排水が可能になり (窪地が残ると、その部分は排水できない)、圃場として使用する時の作業性も向上すると考えた。そこでまず、3章でレーザーライダーを使って得た「地表面の標高データ」の中で、圃場に使用可能なエリアだけを抜き出し、窪地を埋める計算を実施してFig. 16を得た。これは、水が流れ込んでもどこにも流出しないような窪地を土で埋めた結果をアウトプットしたものである。

必要な土の移動量を解析すると、Fig. 17の埋め立て時に土が増加するエリア [Increase] には、425m<sup>3</sup>(12,472m<sup>2</sup>: 808ton)の土を加える必要があると分かった。

**5.3.2 排水のための開渠を掘る掘削工事** 5.3.1項で検討した窪地を土で埋める作業を実施した後に、排水のために開渠を掘る掘削工事を計画した。開渠はFig. 18のように、植物を植える場所として5m幅を確保して、幅1m、深さ1mの溝を掘削することを想定した。そのため、掘削工事が必要とした面積 $153,317\text{m}^2$ の $1/6$ が対象となるため、 $153,317\text{m}^2 \times 1/6 \times 1\text{m} \approx 25,553\text{m}^3$ (48,551ton)の土を掘削する必要がある。

**5.3.3 有効面積当たりの移動土量** これまでの結果から、農業生産に有効な土地面積は、掘削工事が必要とした面積 $153,317\text{m}^2$ の $5/6$ の $127,764\text{m}^2$ に、掘削工事が不要とした $10,193\text{m}^2$ を加えて $137,957\text{m}^2$ となった。有効面積当たりの移動土量は、窪地の埋立量と開渠の掘削量を加えたものを有効面積で除し、 $(425\text{m}^3 + 25,553\text{m}^3)/137,957\text{m}^2 \approx 0.188\text{m}^3/\text{m}^2$ となると分かった。事業収支を有利にするためには、この数値を小さくする必要がある。出来るだけ平坦な場所で、地下水位の条件の良い場所を選択することが重要となる。また、容易に造成出来るエリアの比率が高い場所を選択することで、今回の試算では考慮していない長距離の移動土量を省くことが出来る。

## 6. まとめ

著者らは、今回の調査、測量および解析作業を通じて、東南アジアの鉱山跡地でエネルギー作物を生産する際の適地探索法について、一連の手順を見出すことが出来た。実施した作業と確認された知見は以下の通りである。

- 1) 土壌および植生調査 調査の実施により、湿害に弱いグリシディアは粘性土での生育が困難で、透水性の良い砂質土が生育に適していると分かった。また、地下水の年間最高水位がGL-1m程度となる条件が好ましく、雨季に湿害の影響を受けずに乾季の乾燥にも耐えることが分かった。
- 2) グリシディアが生育可能な圃場の検討 調査で得られた知見から、透水性の良い土を盛土する方法か透水性の良い砂質土等のエリアに絞ってGL-1mの開渠を掘る方法で、年間最高地下水位をGL-1mに調整可能と考えた。ただし、肥料分の不足や乾季の乾燥を防ぐ工夫が必要である。
- 3) 地表面の標高と地下水位分布のデータ取得 圃場の造成が実現可能か検討するために、ドローンとレーザーライダーで地表面の標高データを取得した上で、電気探査と水位計のデータと併せて地下水の年間最高水位の分布を得ることが出来た。
- 4) 移動土量の試算 「3」で得られたデータをGISソフトで解析することで、年間最高水位をGL-1m以下にするための土の移動量を試算した。盛土で対象エリア全体をグリシディアの生育に適した圃場にする工事量は、事業全体の採算性を考慮すると現実的でない判断した。容易に造成出来るエリアに絞って開渠を掘る方法では、開渠が収穫

作業時の妨げになるものの、事業の採算が取れる可能性があると考えられた。

今後の課題としては、今回の指針とした地下水の年間最高水位をGL-1m以下に抑えた圃場を、開渠を掘る方法で実際に造成し、グリシディアが健全に生育可能か確認する必要がある。その際に、事業の採算性を確保するためには、安価に肥料分を補う方法および乾季の水分不足に対処する方法を見出す必要がある。

再生可能エネルギーは地球温暖化問題への解決策にとどまらず、エネルギー自給率の低い国々ではエネルギー安全保障の面からも重要性が増して来ている。鉱山跡地の植生回復を実現しながらエネルギー作物を獲得する技術の確立に、今後も取り組んでいきたい。

## 謝辞

本研究は、共同研究先である京都大学東南アジア地域研究研究所 伊藤雅之先生(現兵庫県立大学)、飯塚浩太郎先生(現東京大学)、塩寺さとみ先生(現南山大学)の協力のもとに進めてきました。また、地下水位調査の際には応用地質株式会社の櫻井健氏、中島陽子氏、大橋弘紀氏に多くの知見をご教示頂きました。調査のアレンジ等でカウンターパート現地企業のAANE社のIvan Manalu氏、Mark Dohar氏にお世話になりました。この場を借りて厚くお礼申し上げます。

## 参考文献

- 1) Iizuka, K., Itoh, M., Shiodera, S., Matsubara, T., Dohar, M., and Watanabe, K.: Advantages of unmanned aerial vehicle(UAV) photogrammetry for landscape analysis compared with satellite data: A case study of postmining sites in Indonesia, *Cogent Geoscience*, Vol. 4, No. 1, 1498180. doi:10.1080/23312041.2018.1498180, 2018
- 2) Itoh, M., Matsubara, T., Shiodera, S., Iizuka, K., Sakurai, K., Nakajima, Y., Ohashi, H. and Manalu, I.: Application of electrical resistivity to assess subsurface geological and hydrological conditions at post-tin mining sites in Indonesia, *Land Degrad. Dev.* 31, pp. 1217-1224, doi: 10.1002/ldr.3527, 2020
- 3) Narendra, H.B. and Pratiwi: Adaptability of some legume trees on quartz tailings of a former tin mining area in Bangka Island, Indonesia, Vol. 4, No. 1, pp. 671-674, 2016
- 4) 麻植久史, 宮越昭暢, 富森さとし, 丸井敦尚: 電気探査法と地下水観測による沿岸域の塩淡境界面の季節変動解明, *Journal of MMIJ*, Vol. 125, pp. 363-368, 2009
- 5) 野々垣 進, 升本 眞二, 塩野 清治: 3次B-スプラインを用いた地層境界面の推定, *情報地質*, Vol. 19, No. 2, pp. 61-77, 2008