

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 27 年 4 月 20 日現在

機関番号：17102

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2013～2014

課題番号：25820431

研究課題名(和文)カーボンニュートラルを目指した環境低負荷型-低品位石炭資源開発システムの確立

研究課題名(英文)Development of Low Environmental Impact and Low Rank Coal Mining System for Carbon Neutral

研究代表者

笹岡 孝司(Sasaoka, Takashi)

九州大学・工学(系)研究科(研究院)・助教

研究者番号：20444862

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円

研究成果の概要(和文)：地下に埋蔵されている低品位石炭資源を、周辺環境への影響を最小限に抑制しつつ、安全・低コスト・高能率な採掘を可能にする「環境低負荷型-低品位石炭資源開発システム」を確立するため、まず採掘対象となる低品位石炭資源の地質・炭層条件等の各種データを収集し、データベースを構築した。次に、調査から得られた地質・炭層条件を基に、低品位石炭資源採掘システムの確立に必要な採掘方法およびその設計指針を検討した。その際、採掘に伴う周辺軟弱地山の挙動特性を考慮した。さらに、採掘された低品位炭に対するカーボンニュートラルを可能とする採掘跡地の環境修復工法についても検討した。

研究成果の概要(英文)：As to develop the low rank coal mining system with the low environmental impact, data about geological conditions of low rank coal seams, conventional-state of the art mining systems, etc were collected and the database for low rank coal was developed. Appropriate mining system was proposed and the suitable mining design was investigated by field investigation and a series of numerical analysis. Moreover, the rehabilitation program at the mined out area were also discussed in terms of the suitable soil conditions and species of plants.

研究分野：岩盤工学，資源開発，環境修復

キーワード：低品位炭 坑内採掘システム 地表沈下 斜面の安定性 採掘実収率 環境修復 緑化

## 1. 研究開始当初の背景

近年、アジアの石炭消費量が増加し、石炭の需要供給が逼迫する中で、発熱量の高い良質な石炭（高品位炭：無煙炭・瀝青炭）の埋蔵量が減少し、その確保が徐々に困難になってきている。一方で、今後も石炭資源の利用は増加し続けると予想され、増加する石炭需要を満たすためには、未採掘石炭資源の開発が不可欠である。そこで近年、全世界の石炭埋蔵量の約 50% を占め、これまで殆ど利用されず未だ膨大な埋蔵量を有する低品位炭（褐炭・亜瀝青炭）の利用が検討されてきた。低品位炭改質技術（UBC: Upgrading of Brown Coal）の開発により、低品位炭の商業ベースでの利用性が高まってきた。しかしながら、低品位炭を含有する地層は比較的年代が新しく、非常に軟弱な場合が多いため、既往の採掘法および地山制御技術では採掘および採掘作業自体の危険性が高いだけでなく、大規模な地盤沈下の発生等、周辺環境に大きな影響を与える可能性も高い。その上、低品位炭の価格相当の低採掘コストも重要な要素となる。従って、膨大な未採掘低品位炭を有効利用するためには、採掘に伴う周辺環境への影響を最小限に抑制し、安全かつ経済的なコストで低品位石炭資源の採掘が可能な新しい採掘システムが必要となる。

## 2. 研究の目的

全世界の石炭埋蔵量の約 50% を占める低品位炭は、炭化度が低く、低発熱量、高水分で自然発火性があるため殆ど利用されていなかった。しかしながら、世界の石炭需要が増加傾向にある中、高品位炭の埋蔵量の減少および低品位炭改質技術の進歩に伴い、膨大な埋蔵量を有する低品位炭の利用に注目が集まっている。そこで本研究では、低コスト、安全な採掘作業環境の確保、採掘に伴う周辺環境への影響を最小限に抑制するとともに、採掘後の環境修復による CO<sub>2</sub> 固定（カーボンオフセット）を可能とする「カーボンニュートラルを目指した環境低負荷型-低品位石炭資源開発システム」の確立のための種々の知見を得ることを目的とした。

## 3. 研究の方法

地下に埋蔵されている低品位石炭資源を、周辺環境への影響を最小限に抑制しつつ、安全・低コスト・高能率な採掘を可能にする「カーボンニュートラルを目指した環境低負荷型-低品位石炭資源開発システム」を確立するため、まず採掘対象となる低品位石炭資源の地質・炭層条件等の各種データを収集し、データベースを構築した。次に、調査から得られた地質・炭層条件を基に、低品位石炭資源採掘システムに必要となる採掘方法およびその設計指針を検討した。その際、低品位炭を含む地山は地質生成年代が若く軟弱地山が多いことから、採掘に伴う周辺地山の挙動特性を考慮した。さらに、採掘された低品

位炭に対するカーボンニュートラルを可能とする採掘跡地の環境修復工法についても検討した。

## 4. 研究成果

### 4.1 周辺地山の挙動抑制を考慮した採掘方法に関する検討

本研究では、低品位な褐炭を採掘しているタイの大規模露天掘り石炭鉱山である Mae Moh 炭鉱を対象として、本炭鉱の炭層を露天掘り最終残壁から安全かつ効率的に採掘する新たな坑内採掘システムとして Punch Mining System の適用を提案し、本採掘法の適用可否ならびに最終残壁の安定性および地表面沈下の抑制を考慮した設計指針について種々検討した。

#### 4.1 Punch Mining System

露天掘り石炭鉱山の最終残壁周辺に残存する石炭資源の回収に用いられる主要な採炭法として Highwall mining system が挙げられる。しかしながら、通常の Highwall Mining System では、最終残壁の安定性維持のため、多くの保安炭柱を残さなければならず、またそのシステム上、最終残壁からの採掘可能深度に制限があるため、実収率が低いという問題がある。そこで、従来の坑内採掘法を本システムに導入したのが Punch mining system である。Punch mining system のなかで、長壁式採掘法を導入したものが Punch longwall mining system である。本システムの概要図を図 1 に示す。本システムは、最終残壁から沿層坑道を掘進し、その後従来の後退式長壁式採掘法により採炭を行う方法である。本システムは、主要坑道や、運搬坑道、通気坑道を必要とせず、速く、安く、簡単な構造から、高い採掘効率を実現可能なシステムである。本システムは、オーストラリアで導入され高い採掘効率を実現している。

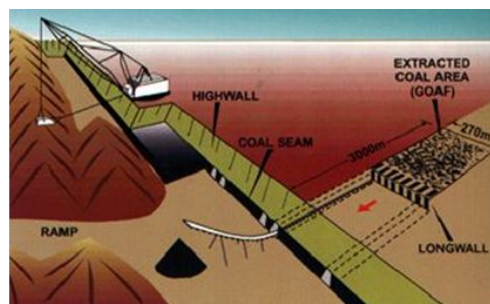


図 1 Punch longwall mining system

#### 4.1.2 研究対象鉱山の概要

##### (1) 地質状況

Mae Moh 炭鉱周辺の代表的な地質柱状図を図 2 に示す。地表に最も近い Red Bed と呼ばれる層は赤い色を帯びた土のことで、非常に軟弱な地盤となっている。その土被りの下に J 層、K 層、Q 層、R 層、S 層という 5 つの炭層が存在している。これら 5 つの炭層のうち採掘対象となる炭層は K 層、Q 層のみで、他の炭層は経済的な問題や石炭品位の観点か

ら採掘対象外となっている。K層とQ層は厚さが20mを超える厚層となっている。また、Mae Moh 炭鉱の鉱区内では断層が多く存在しており、この断層の存在が本鉱山の開発に多大な影響を与え、斜面崩壊や地すべりなどの問題の原因となっている。Mae Moh 鉱山から産出される石炭は褐炭で品位が低く、低発熱量、高水分、高灰分、高硫黄分の褐炭となっている。特に硫黄分は平均2~3%、多い場合には8%に達するものまで存在する。

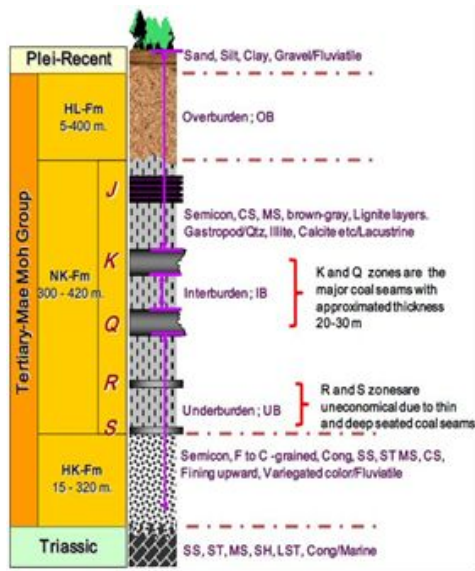


図2 地質柱状図

(3)採掘計画および坑内採掘への展開

Mae Moh 炭鉱では、今後採掘箇所の深部化に伴い、採掘深度が地表から500mに達する2047年に露天採掘による採炭を終了する予定である。図3に2047年の終掘時の採掘ピットの詳細図を示す。そこで、2047年以降引き続き鉱区内の火力発電所を最大限に利用するため、露天掘り採掘ピットの最終残壁深部に残存する大量の褐炭資源を採掘深度400m-600mで坑内掘りによる採掘の可否について、採掘方法およびコストを含めた総合的な検討が行われている。そこで本研究では、図3に示すように鉱区南部に位置する1億6,000万トンの褐炭資源が存在する区域を研究対象として、本区域における褐炭資源を安全に最大限採掘するための採掘方法および実収率について検討を行った。

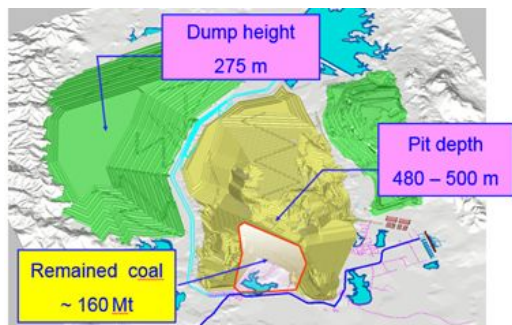


図3 採掘ピット図(露天採掘終掘時)

4.1.3 数値解析による検討

(1)数値解析手法

本研究では、図4に示すような解析モデルを設定し、三次元有限差分法解析プログラムFLAC3Dを用いてその安定性解析を行った。なお、本モデルは研究対象区域の地質状態を模したものである。研究対象区域には、採掘対象となる2つの炭層(K層、Q層)が存在し、各炭層の厚さはそれぞれ20mであり、K層の深度は地表から500mである。破壊条件にはMohr-Coulombの破壊基準を適用した。表1に解析に用いた地山の各種力学的特性値を示す。解析では、採掘パネルの数、大きさ、そしてピラーの幅等を変化させた場合の掘跡及び最終残壁周辺地山の挙動とその安定性について検討した。

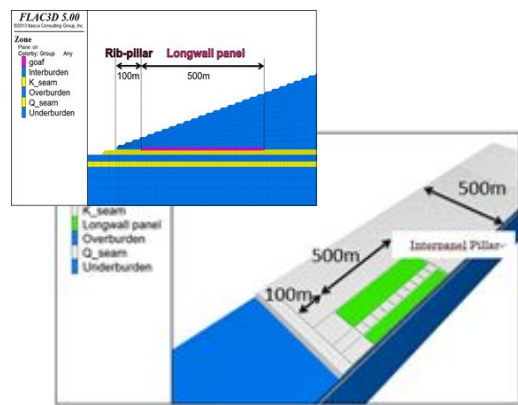


図4 解析モデル

表1 解析に用いた各種力学的パラメータ

	Density (MN/m <sup>3</sup> )	Young's modulus (MPa)	Poisson's ratio (-)	Tensile strength (MPa)	Angle of internal friction (deg.)	Cohesion (MPa)
Claystone	0.0195	10,000	0.25	1.0	20	1.75
Coal	0.0143	500	0.28	0.5	22.3	0.5

4.1.4 結果および考察

解析結果の一例として、図5(a), (b)に、切羽長100m、片盤長500m、高さ4mの採掘パネルを3枚採掘した場合の、最終残壁周辺地山の安全率および沈下量分布をそれぞれ示す。なお、最終残壁法尻から採掘パネル間に残す保安鉱柱の幅を100mとし、採掘パネル間に残す保安鉱柱の幅を40m, 60m, 100mと変化させた。この結果から、隣接する採掘パネル間の保安炭柱の寸法を増大することで、最終残壁周辺地山の安定性が著しく改善され、本採掘パネル寸法では採掘パネル間に100m程度、つまり採掘パネルの切羽長程度の幅の保安炭柱を残すことで、保安炭柱の破壊が抑制され最終残壁の安定性の維持が可能になることが明らかとなった。

次に、上述した採掘パネルの切羽長と保安鉱柱幅の比が1:1で、採掘パネルの切羽長と保安鉱柱幅をそれぞれ100mから50mに小さくした場合の、最終残壁周辺地山の安全率分布および沈下量を図6(a), (b)にそれぞれ示す。この結果から、採掘パネルの切羽長と保安鉱

柱幅の比が一定でも、それぞれの寸法を小さくすることで、採掘実収率を減少させることなく、保安鉱柱の安定性が改善され最終残壁の安定性の更なる改善が可能になることが明らかとなった。

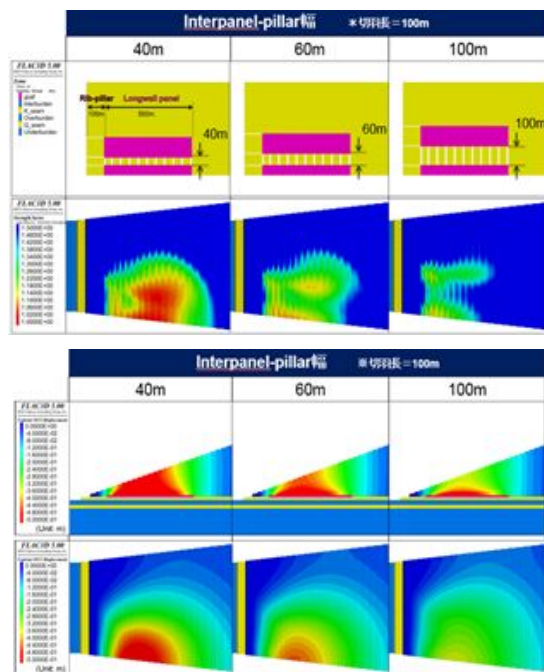


図5 最終残壁周辺地山の安全率(上図)および沈下量分布(下図) (採掘パネル寸法: 切羽長100m, 片盤長500m, 高さ4m)

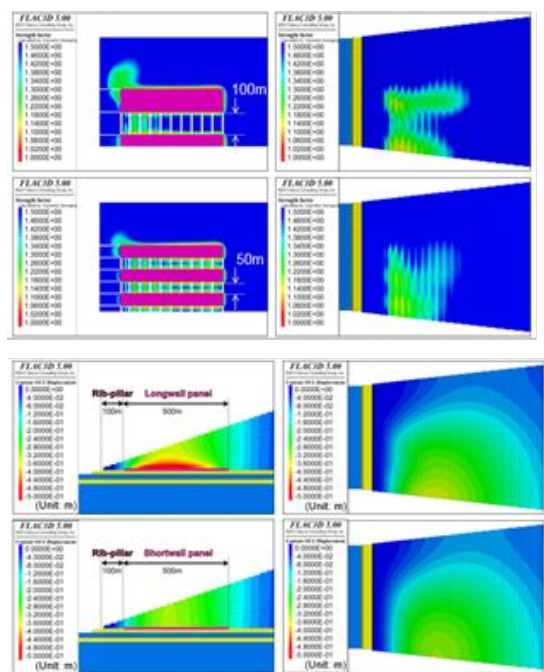


図6 最終残壁周辺地山の安全率および沈下量分布 (採掘パネル寸法: 切羽長100mおよび50m, 片盤長500m, 高さ4m)

#### 4.2 採掘跡地の環境修復に関する検討

石炭鉱山の採掘跡地では、採掘に伴い大規模な荒廃した土地が採掘跡地として形成され、深刻な環境問題が引き起こされるため、

環境修復に向けた採掘跡地の再緑化が重要な課題となっている。本来、採掘跡地の再緑化の目的は、採掘跡地を自立した土地として再生することであった。しかし、現在では単なる植生の回復だけでなく、農作物の栽培や乳牛および肉牛の放牧、観光施設の建設など産業用途のための採掘跡地利用も検討されるようになってきた。そこで、本研究では良質な繊維資源として有効利用が期待されるカジノキ(図7)に着目し、採掘跡地の産業用途への適用性について検討した。

カジノキはクワ科コウゾ属の落葉高木で、雌雄異株、直径約1cmの集合果は赤熟し直径2mmほどの種子を多数着ける。本種の樹皮は良質な繊維資源であり、古くから東南アジア諸国だけでなく我が国においても和紙や織物の原料として活用されてきており、幹を伐採しても萌芽枝が伸長するため、継続的な繊維資源の回収が可能であるため、それを利用した地域特産物の開発など新たな産業の確立にもつながると思われる。

そこで、カジノキの実生を用いて現場生育試験を行うとともに、カジノキの生育に適した土壌を特定し、緑化を効率的に進めるための土壌条件を検討するために、砂と粘土をさまざまな比率で混合した人工培土でカジノキ実生を栽培し最適な培土を検討した。



図7 カジノキとその果実

#### 4.2.1. 試験概要

##### (1)採掘跡地におけるカジノキの生育試験

インドネシア最大の露天掘り石炭鉱山であるKPC(Kaltim Prima Coal)鉱山の採掘跡地において、播種1カ月後の苗、播種2カ月後の苗、播種3カ月後の苗、播種6カ月後の苗をそれぞれ10m x 5mの試験区に株間2m、畝間1.5mで14本ずつ植え付けた。試験区は石炭採掘前の表土を厚さ約1.0m埋め戻しており、土壌のpHは4.0であった。植え付け時および植え付け3ヶ月後に固形肥料(NPK 16-16-16)を300kg/haの割合で与えた。植え付け後2週間毎に樹高を測定した。

##### (2)人工気象室内生育試験

砂(ふるい分けした真砂土)と粘土(九州ベントナイト)を種々の割合で混合した7種類の土壌(表2)を用いて、九州大学生物環境利用推進センターファイトロンガラス室G-9(室温30℃, 相対湿度70%)の人工気象室内で生育試験を行った。

直径15cmのプラスチックポットに土壌試料を充填したのち、高さ約4cmのカジノキ実

生を植え付けて試験を開始した。3~4日おきに1ポットあたり500mL灌水し、週1回1,000倍に希釈した液肥(HYPONeX®, NPK 6-10-5)を与えた。植え付け後8週目まで1週間毎に樹高と茎径を調査し、生育試験終了後に地上部と地下部(根系)の乾燥重量を測定した。

1 土壌試験区あたり5本のカジノキ苗木を用いるとともに、各土壌に対しコンシステンシー試験、変水位透水試験、土の陽イオン交換容量(Cation Exchange Capacity, 以下CEC)試験を実施し、生育試験土壌の基礎特性の把握を行った。

表2 生育試験土壌の組成および基礎特性

土壌試料	砂 (%)	粘土 (%)	飽和透水係数 (cm/sec)	CEC (cmol/kg)
土壌1	100	0	$8.770 \times 10^{-4}$	10.55
土壌2	85	15	$3.491 \times 10^{-4}$	11.12
土壌3	75	25	$2.431 \times 10^{-4}$	13.07
土壌4	65	35	$1.443 \times 10^{-4}$	15.42
土壌5	55	45	$8.250 \times 10^{-5}$	16.48
土壌6	40	60	$3.450 \times 10^{-6}$	20.70
土壌7	0	100	$1.000 \times 10^{-7}$	26.39

### 3. 結果および考察

#### 3-1 カジノキの現場適応性

採掘跡地へ植え付けた実生はその後ほとんどが良好な生育を示したことから、インドネシアの露天掘り石炭鉱山の採掘跡地においてカジノキの生育が可能であることが示された(図8)。また、採掘跡地への植え付け後8ヵ月目までは、カジノキの苗木は播種1ヵ月後に採掘跡地へ植え付けたものが最も高い樹高となり、苗圃で6ヵ月間管理したのちに植え付けられた苗木の高さと比較して顕著な有意差が認められた。これは、苗圃での育苗がポットを用いて行われたことから、育苗期間が長くなるにつれてポットの中でルーピングといわれる根がうずまく現象が生じ、植え付け後の根の活着や生長が阻害されたためと考えられる。このことより、カジノキの実生の圃場における育苗期間は現行の期間(約6ヵ月)から短縮することが可能であり、その結果、苗圃における実生管理期間の短縮による管理の手間と経費の節約のみならず、植え付け後の成長促進も可能と考えられる。

しかしながら、植え付け後8ヵ月目以降は播種6ヵ月後に採掘跡地に植え付けたもの以外で、樹高の成長が停滞していることが分かる。これは、Cover cropによる苗木の生育阻害が原因であると考えられる。KPC鉱山では採掘跡地の再緑化を行う際に、まず土壌侵食の防止や土地の安定化のために、Cover cropと呼ばれるマメ科の植物などの、成長が早く、

樹高が低い草木類を採掘跡地に植えている。しかし、Cover cropの中には、植え付け後の苗木の樹幹を覆って光合成を妨げ、苗木の枝枯れなどを引き起こす種があることが知られている。そのため、カジノキを採掘跡地で栽培するためには植物生育を阻害しない適切なCover crop種の選定や定期的な管理を行う必要があると考えられる。

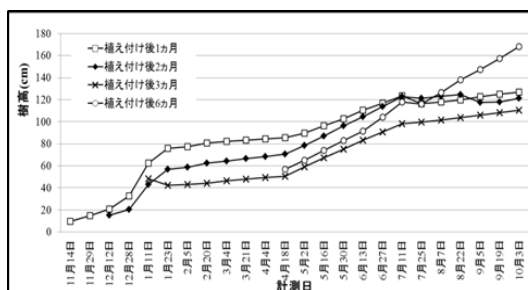


図8 生育試験でのカジノキの樹高

#### 3-2 カジノキの生育に適した土壌の検討

生育試験土壌の基礎特性の把握のために行った各種試験の結果、粘土が高い割合で含まれる土壌ほど保水性は高く、逆に砂の割合が高いほど透水性は高くなった(表2)。実験開始から8週目のカジノキ実生の樹高は土壌4と土壌5の土壌において高く、土壌1の砂のみ、および土壌7の粘土のみの土壌において低くなる傾向を示した(表3)。また、地上部の乾燥重は土壌5において高く、土壌3および土壌7において低く、根の乾燥重は土壌1の砂のみにて高く、土壌6および土壌7において低い値を示した(表4)。

表3 カジノキの樹高(mm)

土壌試料	植え付け1週間後	植え付け4週間後	植え付け8週間後
土壌1	68.6±8.4 a	177.0±24.8 b	405.0±41.2 b
土壌2	63.8±6.7 a	197.0±16.0 ab	455.0±28.9 ab
土壌3	67.8±11.1 a	177.0±11.7 b	472.5±35.6 ab
土壌4	75.0±16.5 a	193.0±15.4 ab	487.0±33.6 a
土壌5	88.3±10.2 a	226.0±22.4 a	522.5±16.4 a
土壌6	74.4±14.6 a	174.0±27.3 b	483.8±26.8 ab
土壌7	78.8±5.3 a	178.0±20.1b	357.0±48.1 b

さらに、砂のみの土壌(土壌1)ではカジノキの実生は垂直方向へ生長したのに対し、粘土のみの土壌(土壌7)では水平方向へ広がるような生長が確認された。植物は生育基盤である用土の透水性や保肥性といった土壌特性の違いによって、生育形態も変化するものと思われる。植物の良好な生育には垂直方向への成長だけでなく、全体として受け取る光量の増加をもたらす成長も必要であるため、植物は垂直方向へ高く、水平方向に広く成長する生育形態が望ましいと考えられ

る。

表 4 カジノキの地上部と地下部の乾燥重 (g)

土壌試料	地上部	根
土壌 1	5.37±0.66 ab	7.94±0.66 a
土壌 2	5.91±0.72 ab	6.25±1.50 ab
土壌 3	4.57±1.44 b	5.99±1.14 ab
土壌 4	5.82±0.36 ab	5.07±1.43 ab
土壌 5	7.20±0.34 a	6.16±0.21 ab
土壌 6	6.77±0.94 ab	3.80±0.75 b
土壌 7	3.92±0.78 b	2.94±1.49 b

- それぞれの土壌につき 5 本の実生を調査して得られた値を平均値±標準誤差で表す。
- 同一列の異なるアルファベット間は Tukey の多重検定による 5%水準で有意差ありを示す。

本試験では、砂と粘土が 55:45 の割合で混合された土壌 5 の土壌においてカジノキの樹高・茎径・地上部の乾重量がもっとも高かったことから、この土壌においてカジノキがもっとも良好な生育をしたと考えられ、この用土が繊維資源としてのカジノキの生育にとって最適な植栽基盤としての特性を有すると言える。

露天掘り鉱山の採掘跡地に埋め戻された土壌は様でなく、攪乱や廃石の混入により土性が多様化していることが報告されている。したがって、カジノキ栽培を前提とした採掘跡地へ埋め戻す用土は、砂と粘土とがほぼ 1:1 の割合で混合されていることが重要であり、埋め戻し施工時に利用される現場表土や有機肥料等と併せて総合的に考慮される必要がある。

#### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

#### 〔雑誌論文〕(計 3 件)

Hamanaka, N.Inoue, H.Shimada, T.Sasaoka, K.Matsui, I.Miyajima: Study on Backfilling of Soil for Revegetation at the Rehabilitation Area in Indonesian Coal Mine, Proc. of the 22<sup>nd</sup> Mine Planning and Equipment Selection, 査読有, 2013, CD  
S.Shibata, N.Z.Lin, H.Shimada, A.Hamanaka, T.Sasaoka, K.Matsui, P.Laowattanabandit: Preliminary Study on Design of Longwall Mining from Final Highwall at Mae Moh Lignite Mine in Thailand, Proc. of the 22<sup>nd</sup> Mine Planning and Equipment Selection, 査読有, 2013,

CD

T.Sasaoka, H.Takamoto, H.Shimada, J.Oya, A.Hamanaka, K.Matsui: Study on Surface Subsidence due to Longwall Mining Operation under Weak Geological Condition in Indonesia, Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 査読有, 2015, DOI:10.1016/j.jrmge.2015.01.007

#### 〔学会発表〕(計 4 件)

S.Shibata, N.Z.Lin, H.Shimada, A.Hamanaka, T.Sasaoka, K.Matsui, P.Laowattanabandit: Three Dimensional Numerical Modeling of Underground Mining Method at Mae Moh Lignite Mine in Thailand, 7<sup>th</sup> International Conference on Earth Resources Technology, 2013 年 11 月, タイ・チェンマイ

N.Inoue, A.Hamanaka, H.Shimada, T.Sasaoka, K.Matsui, I.Miyajima: Effect of Soil Composition on Growth of Paper Mullberry at post Mine Surface in Open Pit Coal Mine, 7<sup>th</sup> International Conference on Earth Resources Technology, 2013 年 11 月, タイ・チェンマイ

笹岡孝司, 島田英樹, 濱中晃弘, 松井紀久男, 一ノ瀬政友, Budi Sulistianto: 東南アジアの露天掘り石炭鉱山におけるパンチマイニングシステムの適用について, 資源・素材関係学合同秋季大会 資源・素材 2015 (熊本)-, 2014 年 9 月, 熊本

H.Takamoto, T.Sasaoka, H.Shimada, J.Oya, A.Hamanaka, K.Matsui: Study on Surface Subsidence due to Longwall Mining Operation under Weak Geological Conditions in Indonesia, International Conference on Ground Control in Mining China 2014, 2014 年 10 月, 中国・北京

#### 〔その他〕

ホームページ等

<http://rock.mine.kyushu-u.ac.jp/>

#### 6. 研究組織

##### (1) 研究代表者

笹岡 孝司 (SASAOKA, Takashi)

九州大学・大学院工学研究院・助教授

研究者番号: 20444862