

令和元年6月10日現在

機関番号：82626

研究種目：研究活動スタート支援

研究期間：2017～2018

課題番号：17H07401

研究課題名（和文）東南アジア地域における環境低負荷型の地域発展を目指した資源開発由来の水質汚染対策

研究課題名（英文）Prevention of Water Pollution Caused by Resources Developments in South-east Asian countries, Aimed at Community Development with Low Environmental Impacts

研究代表者

松本 親樹 (Matsumoto, Shinji)

国立研究開発法人産業技術総合研究所・地質調査総合センター・研究員

研究者番号：00803925

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,100,000円

研究成果の概要（和文）：石炭燃焼灰であるFly Ash（以下、FA）とパーム油加工時に加工残滓として発生するEmpty Fruit Bunches（以下、EFB）を覆土工法に適用することで、FAの中和作用とEFBの酸素消費効果により、効果的なAMD（酸性鉱山廃水）対策が可能であることを示した。一方で、土壌へのFA混合による透水性の低下やFAからのAlの溶出等の影響により、覆土層において土壌侵食や植物生育が阻害される可能性が示された。このことから、FAとEFBを覆土層に適用する場合、上述したAMD以外の問題である「覆土層の土壌侵食」と「緑化過程における植物生育への影響」を考慮した計画的な利用が必要不可欠であるといえる。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究は、石炭の燃焼時に生成するFly Ash（石炭燃焼灰、以下、FA）とパーム油加工時に加工残滓として発生するEFBの産業廃棄物を用いて、石炭の開発とともに発生するAMD（酸性鉱山廃水）の問題を効果的に抑制できる可能性を示した。これにより、東南アジア地域における産業廃棄物の再利用と資源開発に伴い発生する環境問題の抑制を同時に達成できると考えられる。

研究成果の概要（英文）：Acid Mine Drainage (AMD) in open-pit coal mines can be effectively prevented by using Fly Ash (FA) and Empty Fruit Bunches (EFB) in cover system due to neutralization effect of FA and oxygen consumption by EFB. However, experimental results showed that the decrease in permeability of soils after mixing FA and dissolution of Al from FA may accelerate soil water erosion and inhibition of plant growth in a cover layer. Thus, soil water erosion and inhibition of plant growth should be considered for cover system with FA and EFB in order to prevent AMD in open-pit coal mine.

研究分野：資源開発

キーワード：東南アジア 石炭灰 有機材料 酸性水 覆土層 土壌侵食 植物生育 金属溶出

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

インドネシアをはじめとする東南アジア諸国では、近年の著しい経済発展の一方で、パーム油加工で発生する加工残滓(Empty Fruit Bunches: 以下、EFB)や石炭燃焼灰(Coal Ash) Bottom Ash や Fly Ash を含む、Fly Ash: 以下、FA)等の産業廃棄物の増加が問題となっている。さらに、国内のエネルギー資源の需要増加とともに、エネルギー資源の開発が拡大し、資源開発に伴う水質汚染等の環境問題の解決が急務となっている。資源開発(特に石炭や金属資源開発)に由来する環境問題の中でも、酸性鉱山廃水(Acid Mine Drainage: 以下、AMD)は硫化鉱物が酸素と水と反応して発生する深刻な水質汚染の問題である。多くの場合、遮水シートによる発生源対策や発生したAMDの中和処理が実施されているが、それらに要するコストや労力は多大なものとなる。そこで、地域の発展に伴い発生するEFBやFAを有効利用することにより、AMDの発生を抑制することができれば、そのような労力やコストを抑えるとともに、産業廃棄物の有効利用と石炭開発におけるAMDの抑制を同時に達成することができ、環境低負荷型の地域発展モデルを形成することができると考えた。

2. 研究の目的

本研究では、上述の背景より、インドネシアにおいて地域の発展に伴い発生するFAとEFBの産業廃棄物を有効利用することにより、石炭開発に起因して発生する水質汚染の問題(AMD)を解決する新たな対策を考案することを目的とした。具体的には、中和作用が期待されるFAと酸素の消費が期待されるEFBを併せて石炭開発現場に適用した時のAMDの抑制メカニズムを検討するとともに、適用時に懸念されるAMD以外の問題についても併せて検討をおこなうことを目指した。さらに、以上の検討により得られた結果に基づき、地域の発展とそのような環境保全の両立を目指した「環境低負荷型の地域発展モデル」を確立する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

本研究では、インドネシアにおける複数の露天掘り石炭鉱山を対象に、フィールド調査を実施することで、鉱山におけるAMD対策の現状とAMDの発生状況を調査した。また、採掘現場において岩石試料を採取するとともに、鉱山周辺の発電所および工場よりFAとEFBを入手した。それらを種々の試料分析と室内実験に使用することで、FAとEFBを利用したAMDの発生を抑制する新たな対策法に関して検討を行った。分析方法に関しては、鉱山で産出する岩石に適用される地化学分析(Net Acid Generating (NAG)試験、Acid Base Accounting (ABA)試験等)と物理試験(Atterberg Limits 試験や粒度分析等)を実施することにより、試料の酸生成能力と中和能力を定量化した。

鉱山現場におけるAMDの発生状況を把握するために、堆積場周辺の排水水質の調査と酸素・水分センサーを使用した堆積場内部の酸素・水分モニタリング調査を実施した。AMDの発生が確認された堆積場において、AMDの発生原因となるPotentially Acid Forming(以下、PAF)とその他の岩石(Non-acid Forming、以下、NAF)からなる地盤に、酸素・水分センサーを設置することで(図1)、堆積場の異なる深度における酸素濃度・水分を連続観測した。酸素・水分センサーはMIJ03とSM150(Delta T Devices)を用いた。

また、本研究では、AMDの発生源対策として広く利用されている「覆土工法」に、FAとEFBを利用することを想定し、それらを模擬したカラム通水試験を実施した。覆土工法とは、図2に示すように、AMDの発生源となるPAFをその他の岩石であるNAFで覆うことにより、「覆土層」と呼ばれる遮蔽壁を構築する対策法である。本試験では、覆土層にFAとEFBを適用することを想定し、カラム下部にPAFを充填した後、その上部にFA、EFBやNAFを覆土した層を構築した。カラム通水試験は、AMIRAの定める“Free Draining Column Leach test”に基づいて実施した。カラムは直径50mm、高さ150mmとした。カラムに試料を充填した後、カラム上部より200mLの脱イオン水を噴霧状で供給し、カラム下部より排水される液体試料を採取した。採取した試料は0.45µmのフィルターで濾過した後、種々の分析に使用した。上述の通水過程の後、カラム内の固体試料を乾燥させるため、人工照明を用いた12時間の乾燥過程を設けた。このとき、日照りによる堆積場の地表面温度を考慮し、試料表面温度が35-40

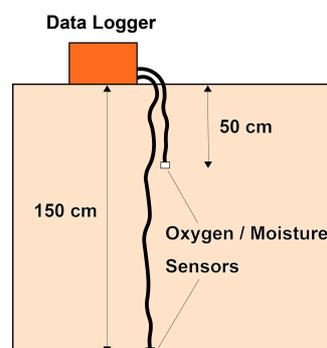


図1 酸素・水分センサーの設置状況

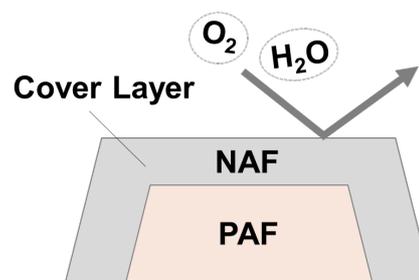


図2 覆土工法の概念図



図3 露天掘り石炭鉱山の堆積場における(左)土壌侵食と(右)AMDの発生により植物が枯死している様子

となるように調整した。この湿潤 - 乾燥過程を 10 回繰り返した。採取した排水試料の水質分析結果に基づき、FA と EFB の覆土層への適用に関して検討をおこなった。各試料の充填割合や充填方法については、4. 研究成果 の表 1 と図 4 に示す。

現場調査の結果、インドネシアの露天掘り炭鉱山の堆積場では、AMD の問題のほかに、熱帯雨林気候特有のスコールによる土壌侵食(図 3 左) 堆積場において発生する酸性の排水や土壌特性に起因する植物の枯死が確認された(図 3 右)。FA を適用した場合、堆積場の土壌特性や排水 pH が変化することが予想され、既往の研究結果より、そのような条件が土壌侵食や植物生育に影響を与えることが予想された。そこで、本研究では、FA を用いて人工降雨試験装置を利用した土壌侵食試験と恒温実験室内における植物生育試験を実施した。人工降雨試験装置の詳細は、5 .[雑誌論文] の に示す。本試験では、高さ 4,500 mm の位置に設置した鉄柱に雨滴発生装置を設置し、その真下の床面に鉄製の枠とプラスチック製の受け台を用いて作製した、傾斜角度の変更が可能な土壌設置台を置き、土壌層容器に充填した供試体をその受け台に設置して人工降雨を与えた。供試体は、現場の土壌物理特性を模擬した調整土壌を使用し、これに FA を 0 - 100% の割合で混合したものをを用いて、模擬土壌とした。このとき、斜面角度は 15 °、25 °、35 ° に調節した。土壌に降雨として供給された降雨水は、表流水と浸透水として採取した。採取した表流水を蒸発させ、残留した土壌試料の重量を測定した。得られた値を 1 時間当たりの流出土壌量とした。この値を下式に代入することで、年間流出土壌量を算出し、各条件で比較した。本試験の詳細は、発表論文の に示す。

$$\text{年間流出土壌量 (cm/year)} = \frac{\text{流出土壌量 (g/hour)} \div \text{土壌の乾燥密度 (g/cm}^3\text{)} \div \text{土壌断面積 (cm}^2\text{)} \times \text{年間降水量 (mm/year)} \div 1 \text{ 時間当たり降水量 (mm/hour)}}{1}$$

また、FA を堆積場に適用した場合に、緑化工程において FA が植物生育に与える影響を検討するために、FA を用いた植物生育試験を実施した。植物生育試験は、インドネシアの対象石炭鉱山が属する熱帯雨林気候を模擬して、気温 30 °、湿度 70% に調整された人工気象室内で実施した。現場の土壌特性を模擬して砂と粘土を混合することで模擬土壌を作製し、それらに 0% から 100% までの混合割合で FA を混合した後、直径 15 cm のプラスチックポットに充填した。そこに、高さ 6 - 8 cm の *Acacia mangium* を植苗した。3 - 4 日毎に各プラスチックポットに 500 mL の灌水をおこない、週 1 回 1,000 倍に希釈した液肥を与えた。試験中には、背丈と茎径を 1 週間(7 日)毎に測定し、19 週目(133 日)まで測定を実施した。なお、1 試験区には各条件下で 5 本の苗を植苗し、それらの背丈と茎径の平均を算出した。また、生育試験後には植物体中の金属濃度を分析するため、酸溶解分析を実施した。各種試験および分析方法の詳細は、後述する雑誌論文 および学会論文 の講演要旨に示す。

4 . 研究成果

(1) 露天掘り石炭鉱山における堆積場の状況

堆積場において AMD の発生が確認された地域と発生が確認されなかった地域において、堆積場内部の酸素・水分モニタリング調査を実施した結果、NAF が埋め戻されている覆土層部分においては、地表から深度 50 cm および 150 cm で酸素濃度が約 13% - 17% を示し、水分は約 0.08 (m³/m³) 前後の値を示した。一方で、AMD 発生の原因となる PAF が埋め戻されている部分では、地表から深度 50 cm および 150 cm で酸素濃度が約 3.2% 前後を示し、水分は約 0.08 - 0.12 (m³/m³) 前後の値を示した。これは、NAF を用いた覆土層の厚さを 150 cm 程度にした場合においても、覆土層以深の PAF に酸素が約 13 - 17% 供給されることを意味し、AMD が効果的に抑制されないことを示唆する。また、覆土層を施工しない場合、PAF が埋め戻された層において地表から深度 150 cm まで、酸素が消費され AMD が発生していることを示す。つまり、AMD の発生を抑制するための覆土層に、酸素消費が期待される EFB を適用することで、PAF への酸素の供給が妨げら

れ、NAF 単体を用いて覆土層を施工した場合よりも、効果的に AMD を抑制できることが期待されるということである。

さらに、EFB と同じく酸素の消費が期待される Dehydrated Sewage Sludge (DSS) と EFB を用いて酸素消費率を比較した結果、60 分後において EFB で酸素濃度が 19.8% から 9.2% まで減少し、DSS では 20.2% から 15.9% まで減少した。これより、EFB は DSS よりも酸素の消費能力が高く、有機成分を含有するため覆土層内部で酸素を長期間消費し、AMD の発生要因となる硫化鉱物への酸素の供給を妨げることが期待される。また、インドネシアの露天掘り石炭鉱山の周辺においても EFB は入手しやすく、運搬も容易であることから、鉱山現場での利用が期待される酸素消費材であるといえる。

(2) FA と EFB を用いたカラム通水試験

表 1 に各カラムへの試料充填割合を、図 4 と図 5 にカラム通水試験の試料充填パターンと通水毎の排水試料の pH 変化を示す。No.1 - No.4 のカラムには、NAF と FA を混合した試料と EFB を層状に覆土して充填した。結果より、FA 単層からの排水試料は pH=8.0 以上のアルカリ性を示し、NAF 単層からの排水試料の pH よりも高い値を示した。しかしながら、FA 単層からの排水試料の pH は、通水毎に NAF 単層からの排水試料の pH に近い値を示した。このことは、FA の中和作用が通水とともに低下していくことを示す。一方で、EFB 単層からの排水試料の pH は、NAF 単層からの排水試料の pH と類似した傾向を示した。このことは、EFB からの排水試料 pH は酸性を示さないということを示す。また、No.1 - No.4 の排水試料 pH を比較した結果、pH の上昇傾向と FA の使用量に良い相関があることが分かった。さらに、図 5 の No.1 と No.2 の pH 変化と No.3 と No.4 の pH 変化に大きな差異がないことから、EFB の使用量によって排水試料の pH は大きく変化しないといえる。しかしながら、4.1. で示した EFB による酸素消費効果を考慮すれば、FA のみを覆土層に使用するよりも、EFB と FA を併せて覆土層に使用する方が、FA の中和作用と EFB の酸素消費効果により効果的な対策が可能となると考えられる。今回は、EFB の使用量の違いにより、排水試料の pH 変化に大きな差異は認められなかったが、本試験よりも長期間のカラム通水試験を実施することにより、EFB の長期にわたる酸素消費効果を確認することができるかもしれない。

上記のカラム通水試験に加えて、FA の長期にわたる中和作用を評価するため、FA のみを PAF の上部に覆土した条件下において、カラム通水試験を実施した。その結果、FA と PAF の接触部において中和反応が生じることにより、FA から溶出する Fe^{3+} や Mg^{2+} 等が沈澱物を生成することが示された。さらに、FA より溶出する高 pH の浸出水が FA 下部にある PAF と接触することにより、湿潤 - 乾燥過程で生ずる PAF の風化が促進されることが確認された。これらの現象により生成した微粒子が土粒子間の閉塞を引き起こし、覆土した層と PAF の接触部において、通水が

表 1 カラム通水試験に使用した試料と充填量

No.	Weight (g)			
	PAF	NAF	FA	EFB
1	90.06	10.09	20.04	6.02
2	90.08	5.02	10.00	12.03
3	90.03	20.03	40.05	12.04
4	90.08	10.08	20.08	24.09
PAF	40.08	-	-	-
NAF	-	40.05	-	-
FA	-	-	40.00	-
EFB	-	-	-	40.04

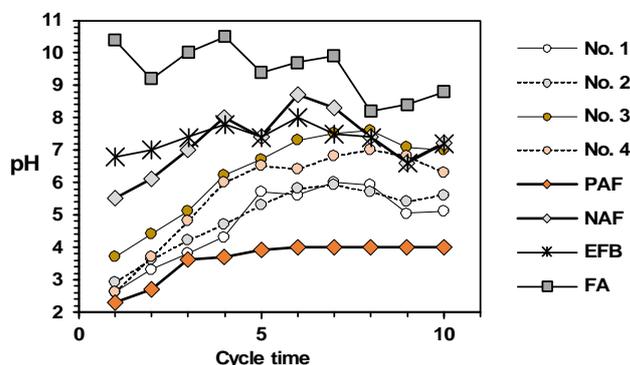
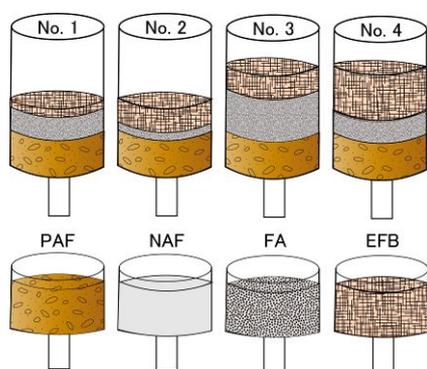


図 4 カラム通水試験の試料充填パターン 図 5 カラム通水試験における pH 変化

遮断される現象が確認された。このことは、EFB と FA を併せて覆土層に使用する場合、FA と PAF の接触部における土粒子間の閉塞による通水の遮断と、EFB による酸素消費効果により、AMD をより効果的に抑制できる可能性を示している。また、AMD の抑制を目的として、FA を覆土材に適用する場合、FA の示すアルカリ性、Fe や Mg 等の含有量を考慮して、使用する FA を選定することが重要であるといえる。

(3) 覆土層に FA を適用した時の土壌侵食に関する検討

表 2 に土壌侵食試験で使用した FA 混合土壌の物理・化学特性を示す。図 6 は FA の各混合割合における土壌侵食量を斜面角度毎に示している。表 1 より、今回使用した FA はおよそ 75% がシルト分で構成されており、これを土壌に混合すると模擬土壌の透水性が低下することがわかる。図 6 より、FA の混合割合が 20% のときは、各斜面角度で土壌侵食量に大きな差異は認められないが、FA をそれ以上の割合で混合すると、斜面角度の増大とともに土壌侵食量が増大することがわかる。これは、FA 混合量の増大とともに、模擬土壌の透水性が低下し、斜面に供給された降雨水の大半が地面に浸透せず、表流水となり、斜面上の土粒子を剥離・運搬することに起因すると考えられる。また、斜面角度が大きくなるほど、降雨水は斜面に沿って流れやすくなり、地面への浸透水量と比較して、表流水の割合が大きくなったことも原因と考えられる。つまり、土壌侵食によって覆土層が剥離されることを防ぐには、FA 中のシルトや粘土等の細粒分を考慮し、FA 混合後の土壌の透水性と斜面角度に留意して FA を適用する必要があるといえる。

表 2 に示す模擬土壌の Paste pH が FA の混合によって変化していることから、実際の現場では FA や PAF の存在により、覆土層部分の土壌 pH が酸性およびアルカリ性になることが想定される。そのため、土壌 pH を調整した条件下における土壌侵食試験も併せておこなった。詳細は、5 .〔雑誌論文〕の に示す。結果より、土壌 pH が酸性側に变化すると、土壌および FA 中の Al が溶出し、土粒子の凝集が生じるとともに、土壌の液性限界が低下して、降雨による土壌侵食量が増大することが示された。一方で、土壌 pH がアルカリ側に变化すると、土粒子が負の電荷を帯び、土粒子間での反発力が増大し、土壌の液性限界が低下するとともに、降雨による土壌侵食量が増大した。以上より、FA の覆土層への適用時には、降雨による土壌侵食を防止する観点から、覆土層部分の土壌 pH にも留意する必要があるといえる。

表 2 土壌侵食試験で使用した FA 混合土壌の物理・化学特性

FA ratio (%)	Soil types	Soil texture (%)			Plasticity index	Permeability (cm/s)	Paste pH
		Sand	Silt	Clay			
0	Clay	51.1	25.2	23.7	10.77	2.94×10^{-4}	5.54
20	Loam	40.3	37.4	22.3	8.76	1.93×10^{-4}	10.49
40	Silty	31.1	48.3	20.6	NP	9.17×10^{-5}	11.08
60		23.1	60.4	16.5	NP	5.33×10^{-5}	11.72
80	Clay	17.9	65.1	17.0	NP	3.78×10^{-5}	11.55
100	Loam	9.0	75.3	15.7	NP	2.52×10^{-5}	11.67

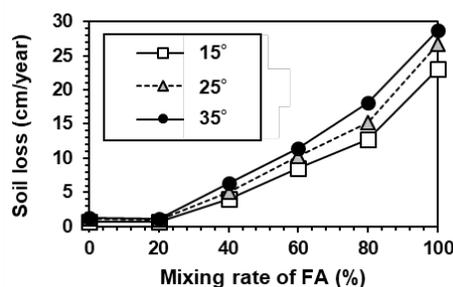


図 6 各斜面角度における FA の混合割合に対する土壌侵食量

(4) 覆土層に FA を適用した時の植物生育に関する検討

図 7 は、植物生育試験における FA 混合割合毎の *Acacia mangium* の背丈変化を示す。図 8 は植物生育試験後における植物体中の Al 濃度を FA 混合割合毎に示している。結果より、100%FA を混合した場合を除き、FA の混合割合の増加に伴い、*Acacia mangium* の成長率は低下した。原因を調査するために実施した植物体中の金属濃度の分析結果より、60 - 80%の混合割合で FA を土壌に混合した場合において、植物体中の Fe および Al の濃度が増大した。特に、Al は植物根の伸長阻害やリン酸欠乏を引き起こすことで知られており、中性付近では Al(OH)₃ として不溶性の状態が存在するが、酸性およびアルカリ性の条件下ではそれぞれ異なる形態で酸性土壌や FA より溶出する。以上より、本試験においては、FA の混合割合の増加に伴い、土壌 pH がアルカリ側に变化するとともに、FA および土壌中から溶出した Al が *Acacia mangium* の生育阻害を引き起こしたと考えられる。つまり、覆土層に FA を適用した後に緑化を実施する場合、混合後の土壌 pH や Al の溶出に留意した緑化計画を立てる必要があるといえる。詳細は、5 .〔学会発表〕の に示す。

(5) FA と EFB の覆土層への適用

以上の結果より、FA と EFB を覆土工法に併用することで、FA の中和作用と EFB の酸素消費効果により、効果的な AMD 対策が可能であると示された。また、EFB が生産されるアブラヤシ農園やパーム油工場は、インドネシアのスマトラ島を中心に国内に広く分布しており、FA が生産される石炭火力発電所は石炭鉱山に併設されている場合が多い。そのため、FA と EFB は、石炭

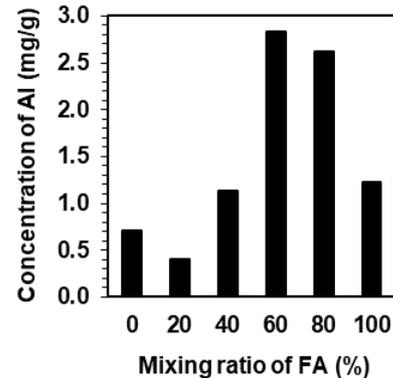
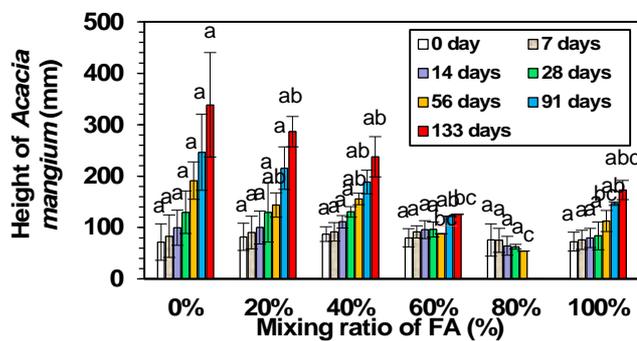


図7 FAの各混合割合に対する *Acacia mangium* の背丈変化 図8 植物体中のAl濃度

鉱山におけるAMD対策のための覆土工法に比較的利用し易い材料であると考えられる。しかしながら、上述したAMD以外の問題である「覆土層の土壌侵食」と「緑化過程における植物生育への影響」を考慮した計画的な利用が必要不可欠であるといえる。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 3件)

S. Matsumoto, H. Shimada, T. Sasaoka, I. Miyajima, G.J. Kusuma, R.S. Gautama: Effects of Acid Soils on Plant Growth and Successful Revegetation in the Case of Mine Site. Soil pH for Nutrient Availability and Crop Performance, 査読有, 2017, pp. 9-27, DOI: 10.5772/intechopen.70928

S. Matsumoto, S. Ogata, H. Shimada, T. Sasaoka, A. Hamanaka, G.J. Kusuma: Effects of pH-induced Changes in Soil Physical Characteristics on the Development of Soil Water Erosion. Geosciences, 査読有, 8(4), 2018, pp. 1-13, DOI: 10.3390/geosciences8040134

S. Matsumoto, H. Ishimatsu, H. Shimada, T. Sasaoka, G.J. Kusuma: Characterization of Mine Waste and Acid Mine Drainage Prediction by Simple Testing Methods in Terms of the Effects of Sulfate-Sulfur and FArbonate Minerals. Minerals, 査読有, 8(9), 2018, pp. 1-13, DOI: 10.3390/min8090403

〔学会発表〕(計 6件)

S. Matsumoto, H. Shimada, T. Sasaoka, G.J. Kusuma: Environmental Issues in Open-FAST Coal Mine: Interrelation of Environmental Problems within a Mine Operation in Indonesia. Coal Mining and Utilization for Sustainable Development International Conference (CM&USD2017), 2017.

S. Matsumoto, S. Dwiki, H. Shimada, T. Sasaoka, G.J. Kusuma: Utilization of Coal Ash for Prevention of Environmental Issues in Mine Sites: Necessity of a Multidisciplinary Approach. International Symposium on Earth Science and Technology 2017, 2017.

村上海人、濱中晃弘、島田英樹、笹岡孝司、松本親樹、加藤正剛、一ノ瀬政友: インドネシア露天掘り鉱山の採掘跡地におけるフライアッシュ混合土壌が植物生育に与える影響。資源・素材学会九州支部 平成 29 年度若手研究者および技術者の研究発表会, 2017.

濱中晃弘、山崎寛人、笹岡孝司、島田英樹、松本親樹: 露天掘り鉱山採掘跡地におけるフライアッシュの酸性土壌への適用が植物生育に与える影響。資源・素材 2018(東京) 平成 30 年度資源・素材関係学協会合同春季大会, 2018.

S. Matsumoto, A. Hamanaka, K. Murakami, H. Shimada, T. Sasaoka: Securing Topsoil for Rehabilitation Using Fly Ash in Open-cast Coal Mines: Effects of Fly Ash on Plant Growth. 22th International Conference on Environment and Mineral Processing, 2018.

S. Matsumoto, K. Murakami, H. Shimada, T. Sasaoka, A. Hamanaka: AppliFAtion of Fly Ash to Mine Soils for Prevention of Soil Water Erosion. The 15th Regional Congress on Geology, Minerals and Energy of Southeast Asia (GEOSEA XV), 2018

6. 研究組織

(1)研究代表者

松本 親樹 (MATSUMOTO, Shinji)

国立研究開発法人産業技術総合研究所・地質調査総合センター・研究員

研究者番号(8桁): 00803925