

平成 27 年 4 月 20 日現在

機関番号：17102

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2012～2014

課題番号：24404025

研究課題名(和文) モンゴルにおける環境低負荷型石炭資源開発および技術協力システムの確立

研究課題名(英文) Development of eco-friendly coal mining system and technical cooperation system in Mongolia

研究代表者

松井 紀久男(Matsui, Kikuo)

九州大学・工学(系)研究科(研究院)・教授

研究者番号：30136535

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 14,000,000円

研究成果の概要(和文)：モンゴルにおいて最高学府であるMUSTの資源工学科及び石油・地質学科に九州大学大学院工学研究院地球資源システム工学部門の教育・研究拠点を設けるために、モンゴルでの露天掘り石炭鉱山の現場調査を行い、必要なデータを収集し、石炭や夾炭層岩石などをサンプリングするとともに、MUST開催された教育・研究ワークショップに出席し、MUSTとの共同研究成果を発表し、研究のシーズやニーズの発掘に努めた。なお、モンゴルには金鉱山やレアメタル等の有効資源が存在するが、本研究では鉱山の中でも申請者らがこれまで最も力点を置いてきた石炭鉱山に着目して種々検討した。

研究成果の概要(英文)：The joint field investigations at coal mines in Mongolian were conducted and the workshops were also held with Mongolian University of Science and Technology (MUST) in order to develop the database of mineral resources, set up the joint education and research center. Based on the joint works, the database of mining industry in Mongolia and good cooperation with Kyushu University and MUST had been developed. Moreover, focused on coalmining industry, the geotechnical issues for current and future development in Mongolian open pit coal mines were discussed and some technical solutions were proposed by field investigations and numerical analysis.

研究分野：岩盤工学、資源開発、環境修復

キーワード：モンゴル 露天掘り石炭鉱山 データベース 資源開発 斜面の安定性 採掘システム

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、石炭市場がタイト化する中で、特に発熱量の高い良質な石炭が不足している。モンゴルは、褐炭から無煙炭まで様々な石炭資源が豊富に存在し、その量は約 1,500 億トンとも言われている。モンゴル国の石炭生産量は約 700 万トン程度と石炭産業としては少規模であるが、うち約 150 万トンが主に中国向けに輸出されており、近年、その数量が急拡大してきている。また、モンゴル政府は、石炭を含む資源産業を国家発展のための基盤産業と位置づけ、資源開発に積極的な政策を取っている。このため、現状では日本への輸入実績はないものの、資源ナショナリズムが台頭している現状から、我が国にとって重要な供給国の一つになると推測されている。

これまでモンゴルの石炭資源は、主として国内の電力用として、首都ウランバートル周辺において開発されてきた。しかしながら、近年では、中国との国境に近い南ゴビ地方での石炭資源探査・開発（タバントルゴイ原料炭プロジェクト他）が活発化してきており、また、2001 年に大規模銅鉱床（オユトルゴイプロジェクト）が発見されたように、同国の資源分布については、まだまだベールに包まれているのが現状である。

2. 研究の目的

モンゴルは、褐炭から無煙炭まで様々な石炭資源が豊富に存在し、その量は約 1,500 億トンとも言われている。また、モンゴルの内需は極めて小さく、現在日本企業数社が生産事業への参画に向けた国際入札に応じたところである。民主化されたモンゴルにおける資源開発は、今後急速に増大するものと予想され、地球環境を考慮した適切な開発を行うための基礎資料として、現在、稼行している露天掘り石炭鉱山のデータを収集し、これをデータベース化することは学術的にもきわめて有意義なことである。また、これらのデータを利用して、資源開発に伴う地球規模の環境破壊を抑制するための対策や鉱山開発手法について検討し、我が国のこれまでの技術をモンゴルに適用するとともに、震災後の我が国の資源の安定確保の一躍を担うことを目的とする。

3. 研究の方法

モンゴルにおいて最高学府である MUST の資源工学科及び石油・地質学科に九州大学大学院工学研究院地球資源システム工学部門の教育・研究拠点を設けるために、モンゴルの露天掘り石炭鉱山の現場調査を行い、必要なデータを収集し、石炭や夾炭層岩石などをサンプリングするとともに、MUST 開催された教育・研究ワークショップに出席し、MUST との共同研究成果を発表し、研究のシーズやニーズの発掘に努めた。なお、モンゴルには金鉱山やレアメタル等の有効資源が存在する

が、本研究では鉱山の中でも申請者がこれまで最も力点を置いてきた石炭鉱山に着目した。

4. 研究成果

4.1 モンゴル露天掘り石炭鉱山の現状と課題

モンゴルは 160 万 km² の国土面積を有する内陸国であり、多くの地域はステップ気候に属する。モンゴルにおける石炭の推定埋蔵量は約 1,520 億トン、うち探査済み埋蔵量が約 223 億トンとされており、近年の急速な炭鉱開発の進展から世界における主要産炭国になる可能性も示唆されている。図 1 にモンゴルにおける炭田分布を示す。モンゴル中央部～東部における石炭層の傾斜は平坦から緩傾斜であるが、褐炭など炭質が低い石炭であるため、主に国内向けの電力用炭として利用されている。一方、モンゴル西部～南部における地域では石炭層が急傾斜であるが、原料炭としても利用可能な良質な石炭が賦存している。

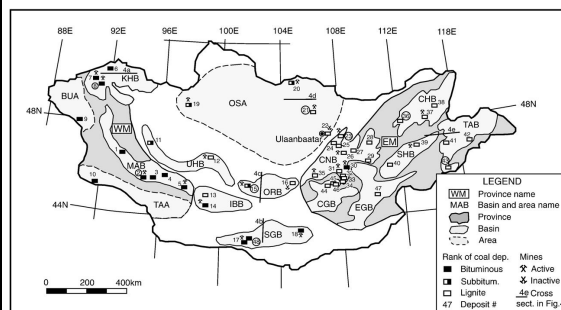


図 1 モンゴルの炭田分布

1960 年に露天掘り鉱山開発による石炭開発プロジェクトが開始されて以来、モンゴル中央部～東部に位置する比較的浅深度に石炭が賦存する地域において探査および開発が行われてきたが、近年、石炭の国際貿易に向けてモンゴル西部～南部に位置する南ゴビ地域における石炭資源開発が活発化してきた。しかし、前述のようにこの地域の石炭層は急傾斜であり、露天掘り鉱山開発では必然的にピットが深部化せざるを得ず、それに伴い同時に発生する大量の剥土される廃石の処分が大きな課題となってきた。すなわち一般に、露天掘り鉱山では剥土された廃石は大型重機によって運搬され、所定のダンピングサイトに堆積、廃棄される。一方、砂漠地域である南部において開発が行われている石炭鉱山での剥土岩石は、粘着力をほとんど有しない礫が混合した砂が多いため、その特性が在来の露天掘り鉱山での剥土岩石の特性とは大きく異なっており、これへの配慮が不足した廃石処分法ではダンピングサイトの大規模崩落が危惧され始めている。モンゴルでは最近まで資源開発の経験が浅いことから、露天掘り石炭鉱山では、ダンピングサイトや採掘斜面の安定性に関する検討が十分なされておらず、図 2 に例示するようなすべりによる斜面崩壊が発生している。したがって、露天掘り鉱山における斜面崩壊は鉱山操業の安全性およびコストに直接影

響を与えることから、斜面設計に関しては最も慎重な検討が必要と思われる。



図2 斜面のすべり崩壊の事例

4.2 研究対象鉱山調査結果

Narynsukhait 石炭鉱山は2007年に操業が開始された国外輸出向けの原料炭を生産する露天掘り石炭鉱山である。図3に示すように、主要炭層は35~40mの厚層であり、平均傾斜は37~45度である。石炭の発熱量は4,100~7,300 kcalの良質な原料炭で、年間生産量は540万トン(2012年)である。現在のピット深度は60~70mであるが、今後の生産量の増大に向けて更なる露天掘り採掘の深部化が予定されている。また、図4に示すように、採掘に伴い発生する廃石はピットに隣接するダンプサイトに堆積、廃棄されているが、鉱区面積の制限によりダンプサイトとして利用できる敷地面積が制限されていること、およびダンプサイトの崩落によりピット内における操業の安全性が危惧されることから、埋戻し廃石堆積容量が大きく、安定性の高いダンプサイトの設計が求められている。しかし、前述のように剥土される廃石は礫が混合した砂が多く賦存しており、一般の露天掘り鉱山での剥土岩石の特性とは大きく異なるため、埋戻される廃石の特性を考慮したダンプサイトの安定設計に関して検討を行う必要がある。

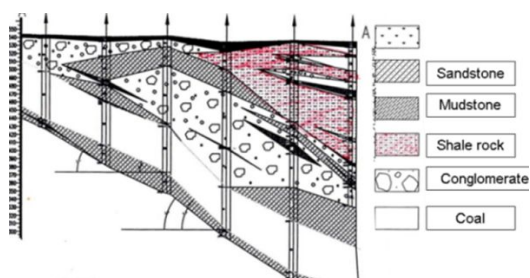


図3 地質断面図

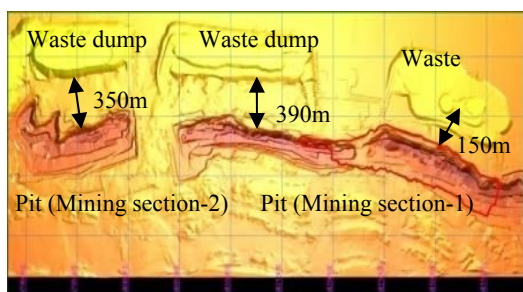


図4 ピット平面図

4.3 廃石(礫質砂)の力学的特性値の把握

ダンプサイトに埋戻された廃石の力学的特性値を評価するために、既存のダンプサイトより廃石試料を採取し、土壌粒度試験や定圧一面せん断試験等を行った。土壌粒度試験の結果を図5に示すが、採取した廃石試料は粒径2mm以上の礫が15%以上含有され、細粒分質礫質砂と分類される。また、本鉱山での年間降水量が100mm以下であることから、乾燥状態の廃石試料を用いて定圧せん断一面試験を行った結果を図6、表1に示す。廃石試料の粘着力が小さいことが明らかであり、この特徴を考慮したダンプサイトの設計の必要性が示唆される。

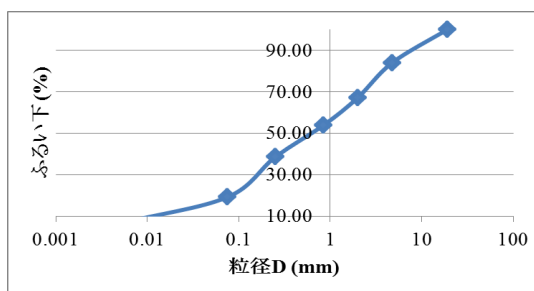


図5 廃石試料の粒度分布

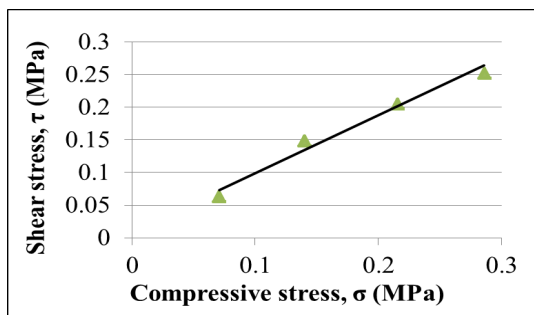


図6 定圧一面せん断試験結果(含水比0%)

表1 廃石試料の力学的特性値

Density (g/cm ³)	2.00
Young's modulus (MPa)	20.0
Poisson's ratio (-)	0.40
Tensile strength (MPa)	0.05
Friction angle (°)	40.6
Cohesion (MPa)	0.0105

4.4 FEMを用いた数値解析によるダンプサイトの安定性評価ならびに安定化対策の提案

粘着力が小さい細粒分質礫質砂をダンプする際の設計指針確立のため、二次元有限要素解析コード Phase² ver7.0 を用いて、Narynsukhait 石炭鉱山におけるダンプサイト斜面の安定性解析を行った。図7に解析モデルを示す。本解析では、現状のダンプサイトの規格である斜面傾斜 36°および一段のベンチ高さ 20 m を基準として、ダンピ

ングサイトの斜面傾斜およびベンチ高さ（段数）を変更することによって、ダンプサイトの安定設計に関して検討を行った。また、実際の操業を模した解析を行うため、ステップ解析を行った。側圧係数は 1.0 とし、Mohr-Coulomb の破壊基準を用いた。廃石の力学的特性値は前章の室内試験より得られた値を入力した。

本解析では、まずダンプサイト斜面の安定性に及ぼすベンチ高さおよび斜面傾斜の影響を把握した後、ダンプサイトの安定設計に関して検討した。次に、鉱区面積の制限によって、ダンプサイトとして利用できる敷地面積が制限されるといった問題を有していることから、限られた敷地面積でダンプ量を増大させる方法に関して検討した。

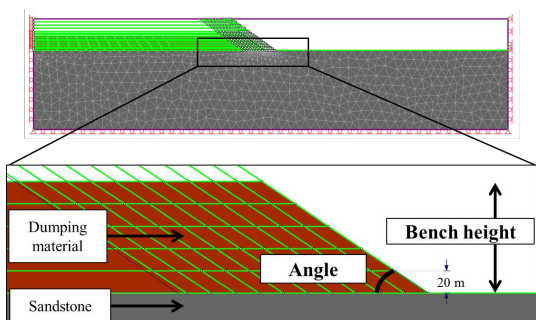
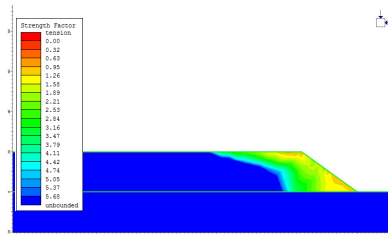


図 7 解析基本モデル

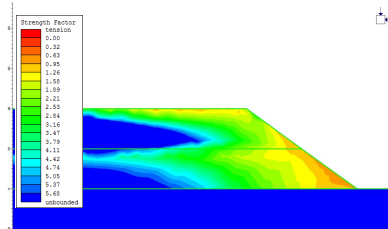
4.4.1 ダンプサイトの安定設計

まず、図 8(a)~(c)にベンチ高さ 20m, 40m, 60m の場合のダンプサイト斜面周辺の安全率分布を示す。これらの図より、現在のダンプサイトの規格である斜面傾斜 36° では、ベンチ高さの増大に従い斜面法尻付近での安全率の低下が認められる。すなわち、ベンチ高さ 40m で既に安全率が 1.0 以下の領域が現れ、60m となると安全率が 1.0 以下の領域が広範囲に及ぶことから、ダンプサイトの崩壊が危惧される。次に、図 9(a)~(c)にベンチ高さ 60m, 斜面傾斜 36° , 30° , 25° の場合のダンプサイト斜面周辺の安全率分布を示す。これらの図より、斜面傾斜を 36° より小さくすることで斜面法尻周辺の安定性が改善され、 25° の場合では高さ 60m であってもダンプが可能であることが判る。

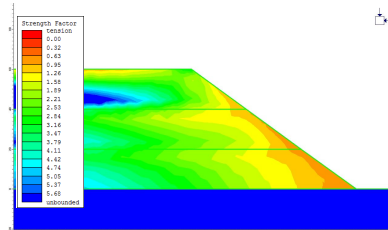
これらの一連の解析結果から得られた斜面傾斜とダンプサイトの安定性が保持されると判断される最大のダンプ高さの関係を図 10 に示す。この図より、粘着力が小さい細粒分質礫質砂をダンプサイトに埋戻す場合であっても、斜面傾斜を小さくすることでダンプ可能な高さを増大させることが可能になることが分かる。しかし、斜面傾斜を小さく採れば同時にダンプサイトに要する敷地面積も増大するため、今後露天掘り採掘の深部化に伴い剥土量も増大することを考慮すると、この方法は敷地面積に制限がある当鉱山では現実的では無いと考えられる。したがって、限られた敷地



(a) ベンチ高さ 20 m

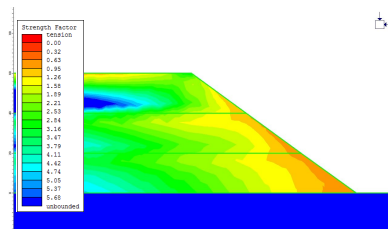


(b) ベンチ高さ 40 m

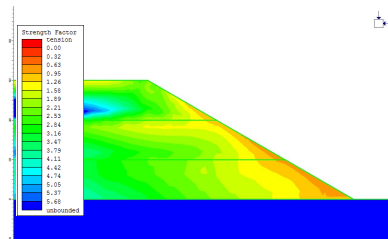


(c) ベンチ高さ 60 m

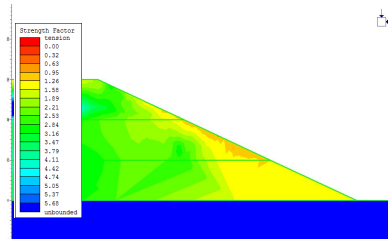
図 8 ベンチ高さによるダンプサイト斜面周辺の安全率分布 (斜面傾斜: 36°)



(a) 斜面傾斜: 36°



(b) 斜面傾斜: 30°



(c) 斜面傾斜: 25°

図 9 斜面傾斜によるダンプサイト斜面周辺の安全率分布 (ベンチ高さ: 60 m)

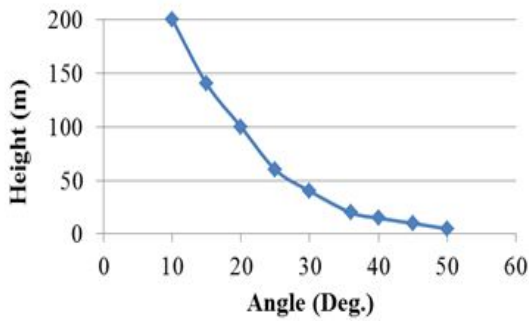


図 10 各斜面傾斜におけるダンピングサイトの安定性が保持されると判断される最大のダンピング高さ

面積でダンピング量を増大させる方法に関して検討を行う必要がある。

4.4.2 ダンピング量の増大に向けた斜面安定化対策

限られた敷地面積かつ現在の斜面規格 36°においてダンピング量を増大する方法を、本鉱山の種々の条件を加味して調査した結果、ダンピングサイト斜面へのカバー層の適用に着目した。カバー層材料としては、鉱区内の粘土岩を破碎することによって得られる粘質土を利用することができ、これをダンピング斜面にダンピングして転圧を施すことによってカバー層を形成させる。図 11 にカバー層の概念図、表 2 に入力したカバー層の力学的特性値を示す。なお、解析においては前述基本モデルの一段のベンチ高さ等を変更している。

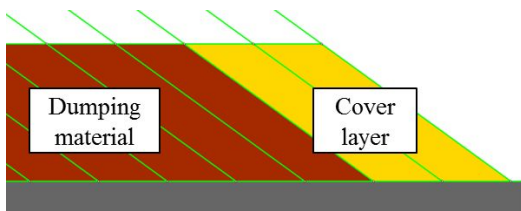
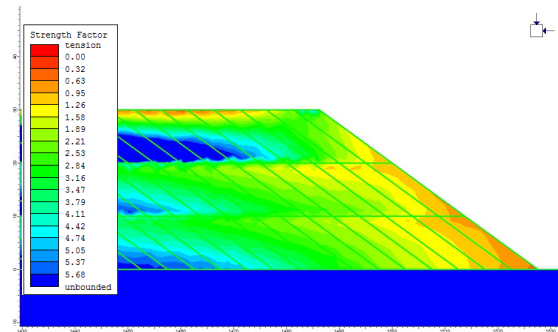


図 11 カバー層の概念図

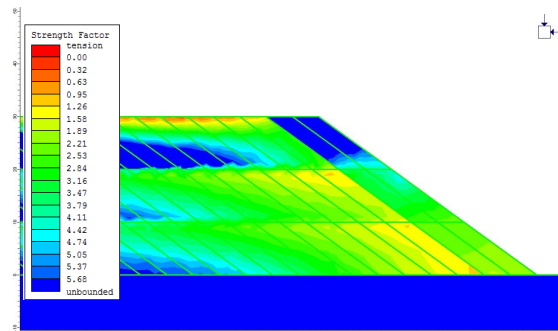
表 2 カバー層の力学的特性値

Density (g/cm ³)	2.00
Young's modulus (MPa)	49.0
Poisson's ratio (-)	0.40
Tensile strength (MPa)	0.13
Friction angle (°)	43.8
Cohesion (MPa)	0.11

図 12 (a), (b)にカバー層の有無によるダンピングサイト斜面周辺の安全率分布の一例を示す。両図より、カバー層を適用することにより斜面尻付近における安全率が顕著に改善されることが分かる。カバー層適用の一連の解析結果から得られた結果を、カバー



(a) カバー層無



(b) カバー層有

図 12 カバー層(層厚:10m)によるダンピングサイト斜面の安定性改善(斜面傾斜 36°, ベンチ高さ 30 m)

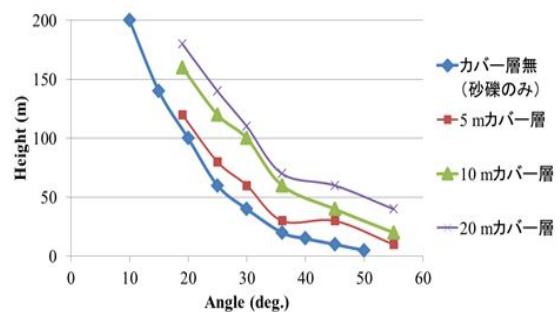


図 13 カバー層適用による斜面傾斜と最大のダンピング高さの関係

層の厚さパラメータとして前節図 10 と同様に表したものが図 13 である。この図より一例を挙げれば、カバー層の厚さ 10m とすれば斜面 36°においても 60m 程度まで安定性が保たれると考えられ、ダンピングサイト斜面にカバー層を形成することで、ダンピングサイトの安定性が改善され、ダンピング可能な高さおよび斜面角度の増大が可能であることが判る。このことは、細粒分質礫質砂のような粘着力が小さい廃石のダンピングサイトであっても、粘着力を有する材料をカバー層として適用できれば、ダンピングサイトの安定性が改善されるだけでなくダンピング量を増大させることが可能であることを現している。当鉱山では幸いに鉱区内から粘質土のような粘着力を有する材料を容易に入手

でき、それによるカバー層の形成も廃石のダンプング工程と同様な工程を取ることができ、有用な方法のひとつと考えられる。

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5件)

K.Matsui, H.Shimada, T.Sasaoka: Coal Mine Development in South Gobi, Mongolia, Proc. of the 21st International Symposium on Mine Planning and Equipment Selection, 査読有, 2012, CD

A.Tsedendorji, R.Yamamoto, A.Hamanaka, D.Qian, T.Sasaoka, H.Shimada, K.Matsui: Geotechnical Issues of Narynsukhait Open Pit Coal Mine, Proc. of International Symposium on Earth Science and Technology 2013, 査読有, 2013, pp.174-179

A.Tsedendorji, A.Hamanaka, H.Shimada, T.Sasaoka, K.Matsui: Study on Exploration and Optimization of Opencast Mining Parameters for Deeper Coal Deposits, Proc. of the 8th International Forum on Strategic Technology 2013, 査読有, 2013, pp.531-533

R.Yamamoto, A.Hamanaka, D.Zhang, T.Sasaoka, H.Shimada, K.Matsui: Study on Formation of Dumping Site at Open Pit Mine in Desert Area, Proc. of the 8th International Forum on Strategic Technology 2013, 査読有, 2013, pp.576-580

A.Hamanaka, A.Tsedendorji, N.Inoue, T.Sasaoka, H.Shimada, K.Matsui: Current Geotechnical Issues in Open Cut Mining of Desert Area in Mongolia, Proc. of the 33rd International Conference on Ground Control in Mining, 査読有, 2014, pp.156-160

〔学会発表〕(計2件)

山口泰介, 笹岡孝司, 島田英樹, ワヒューデイスゲン, 一ノ瀬政友, 井上雅, 久保田士郎: 露天掘り鉱山における発破振動の伝播特性に関する検討, 第34回西日本岩盤工学シンポジウム, 2013年8月, 福岡
坂本聖一, 濱中晃弘, ティセンデンドルジアマル, 笹岡孝司, 島田英樹, 松井紀久男: モンゴル砂漠地域における露天掘り石炭鉱山のダンプングサイトの安定設計に関する研究, 資源・素材学会平成27年度春季大会, 2015年3月, 津田沼

〔その他〕

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

6. 研究組織

(1)研究代表者

松井 紀久男 (MATSUI, Kikuo)

九州大学・大学院工学研究院・教授

研究者番号: 30136535

(2)研究分担者

島田 英樹 (SHIMADA, Hideki)

九州大学・大学院工学研究院・准教授

研究者番号: 70253490

笹岡 孝司 (SASAOKA, Takashi)

九州大学・大学院工学研究院・助教

研究者番号: 20444862