

令和 4 年 9 月 1 日現在

機関番号：55201

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2019～2021

課題番号：19K01131

研究課題名(和文) 鉱山遺跡の3次元点群データに基づいた鉱山坑道開発の歴史の変遷の解明

研究課題名(英文) A study on historical changes for mine tunnels based on three dimensional points-cloud of mine ruins

研究代表者

久間 英樹 (kuma, hideki)

松江工業高等専門学校・電子制御工学科・教授

研究者番号：40259924

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)：これまで、鉱山遺跡の文化的価値を高めるため、人が立ち入ることができない鉱山坑道内の定量データを測定できる遠隔操作型ロボットを開発し、全国各地の鉱山坑道内を調査してきた。この結果、坑道内の断面形状および採掘傾斜と採掘年代にある程度相互関係があることが分かった。本研究ではこの考えに基づいて、空間を3次元点群データとして測定可能な3次元レーザスキャナを用いて、坑道内や坑道が散在する斜面形状を測定し、採掘時の状況を再現する新たな手法を提案した。これにより開発時の鉱山遺跡を再現し、近世に描かれた鉱山絵図と比較することによって鉱山坑道開発の歴史の変遷の解明を行った。

研究成果の学術的意義や社会的意義

日本各地には、古代から近代にいたる鉱山遺跡が多数存在している。しかしながら近世以外の鉱山開発と操業の実態は十分に明らかにされていない。鉱山開発は我が国の政治経済、軍事など社会活動に重要な役割を果たしてきた産業であったが文献史学、鉱山史学の研究に比べて坑道内形状や坑道周辺の定量データからのアプローチがかなり遅れている。このため未解明な点が多く残されており鉱山遺跡全体の把握は進んでいない。日本列島上に展開された金銀銅山を中心とする鉱山遺跡の所在、規模、開発年代等の実態を明らかにし、鉱山開発初期の技術を詳細に解明し紐解くことが、初歩的ではあるがなによりも学術的に重要である。

研究成果の概要(英文)：We have already investigated the internal structure of several mining tunnels remained in Japan using the remote control robots that can perform contactless measurement of them through various sensors. Specifically we have obtained the following data of each mining tunnel: internal images, cross section shapes, mining directions, mining inclination and so on. A comparison between those data and the description in old documents has enabled us to clarify the characteristics of the shape of mining tunnels in terms of mining age. This relationship can be useful for better understandings of the changes for mining method across the ages. But it is usually difficult to investigate the slope surface directly because it is often covered by vegetation such as trees and bushes. This research proposes a novel method to measure the quantitative data of such a slope, on which several mining tunnels exist, using 3D laser scanners.

研究分野：遺跡調査

キーワード：遺跡調査 鉱山遺跡 3次元レーザスキャナ 鉱山絵図

## 様式 C-19、F-19-1、Z-19（共通）

### 1. 研究開始当初の背景

日本各地には、古代から近代にいたる鉱山遺跡が多数存在している。しかしながら近世以外の鉱山開発と操業の実態は十分に明らかにされていない。鉱山開発は我が国の政治経済、軍事など社会活動に重要な役割を果たしてきた産業であったが文献史学、鉱山史学の研究に比べて坑道内形状や坑道周辺の定量データからのアプローチがかなり遅れている。このため未解明な点が多く残されており鉱山遺跡全体の把握は進んでいない。日本列島上に展開された金銀銅山を中心とする鉱山遺跡の所在、規模、開発年代等の実態を明らかにすることが、初歩的ではあるがなによりも学術的に重要である。更に、本研究を開始した後、石見銀山が世界遺産に登録され、佐渡金銀山が国内世界遺産暫定登録リストに記載され、令和4年2月にはユネスコへ世界遺産登録推薦書が提出された。また兵庫県多田銀銅山が国史跡指定された。このように全国に散在する鉱山跡を地域活性化のための起爆剤にしようとする動きが活発である。これら登録の際には、鉱山開発初期の技術を詳細に解明し紐解くことが緊急の課題である。また今後、佐渡金銀山が世界遺産に登録された際には、これまで以上に鉱山遺跡への注目が集まる。このため全国の鉱山遺跡の相互関係を学術的に解明しておくことが重要となる。

### 2. 研究の目的

これまで、鉱山遺跡の文化的価値を高めるため、人が立ち入ることができない鉱山坑道内の定量データを測定できる遠隔操作型ロボットを開発し、全国各地の鉱山坑道内を調査してきた。この結果、坑道内の断面形状および採掘傾斜と採掘年代にある程度相互関係があることが分かった。しかし古文書等に記載されている鉱山絵図等には鉱脈近くの斜面にいくつもの坑道が散在している。そのため坑口付近を広範囲に測定し坑道の相互関係を求めることが近世の採掘方法を理解するうえで重要な要素であると考えている。本研究ではこの考えに基づいて、空間を3次元点群データとして測定可能な3次元レーザスキャナを用いて、坑道内や坑道が散在する斜面形状を測定し、採掘時の状況を再現する新たな手法を提案する。更に、全国各地の坑道内部や坑道周辺の3次元点群データを取得して、提案手法を用いて開発時の鉱山遺跡を再現し、近世に描かれた鉱山絵図と比較することによって鉱山坑道開発の歴史の変遷の解明を行う。

### 3. 研究の方法

鉱山遺跡には多様な構造の坑道や坑道が散在する斜面形状がある。そのため3次元レーザスキャナ(3DRM-Markシリーズ)を企業と共同で開発した。図1に使用用途が異なる2台の外観を示す。レーザ測定部は、2次元レーザ測域センサ(北陽電機製:UTM-30LX-EW)をサーボモータに接続して180deg回転させる構造となっている。測定距離は30m、測定精度±5mmである。Mark1は内部電源内蔵型で重量約1.1kg、Mark2は外部電源使用型で重量約0.7kgである。本スキャナは事前に密度設定値により回転の分解能を設定できる。1回の測定で取得可能な点群データ数は最大約400万点である。これを活用することによって急峻な斜面形状や狭小坑道内も全方位3次元点群データとして表現することが可能となった。また、図2に示す様な坑道内調査には独自に開発したロボットに3次元レーザスキャナを搭載して対応する。多様な坑道に対応可能なロボットの構成方式として、本研究では、ロボットの基本になる動力部分を各坑道に対応させ、その他を組替え可能なパーツとして取り付ける方式を開発した。



図1 小型・軽量・安価な3次元レーザスキャナ

図2 車幅変形型坑道探索ロボット

### 4. 研究成果

#### (1) 測定場所

研究期間内に全国の鉱山遺跡の坑道及び周辺地形を約80か所測定した。本報告では、佐渡金銀山「大切山坑」に関する坑道内および周辺地形の測定結果を示す。

図3に元禄8年(1696)に描かれた『佐州相川惣銀山敷岡高下振矩絵図』((株)ゴールデン佐渡所蔵)の大切山坑付近を拡大した絵図を示す。左側が坑口方向である。これは大切山坑に関する現存する最古の絵図である。主坑道と煙貫が均等な間隔で並列に描かれている。また主坑道と煙貫を繋ぐ枝坑も数か所描かれている。ところどころ枝坑を設けているのは主坑道の空気循環をよくするように配慮したためである。佐渡金銀山遺跡調査報告書18によると、開発当初本坑は「与次右衛門大切山間歩」とも呼ばれていた。開削を始めて着脈に十数年を要した坑道で、本坑

道に並行して通気用の煙貫が掘られていることに大きな特徴がある。『佐渡相川志』によれば本坑は、間ノ山番所より大切山間歩釜ノ口まで7町45間3尺(約846m)の距離があるとされている。開削の開始年代については、『御仕入稼取扱一件』では寛永8(1631)年、『佐渡風土記』では寛永10(1633)年、『佐渡年代記』『佐渡古実略記』では寛永11(1634)年の取明けとして年代にズレがある。『佐渡年代記』では、本坑は山師の味方与次右衛門が自費で採掘を開始し、左右高下を手広く切通し、別に煙貫として二重に切延べて風通しを良くしたことが記述されている。『佐渡風土記』では正保2(1645)年には与次右衛門が資金に困窮し、若鍾が当たった場合は3ヵ年の上納鍾免除を願い出ている。正保4(1647)年には大切山脈に着脈し、御直山となっている。その後、慶安3(1650)年、元禄7(1694)年にも御直山として経営され、安永5(1776)年に自分稼ぎ、文政6(1823)年、嘉永3(1850)年にも御仕入れ稼ぎが行われたと記述がある。『佐渡年代記』では、「けだえ」が多いことが特徴となる間歩で、前述した開削時の「二重に切延べた煙貫」のほかに、寛文3(1663)年の史料では、「けだえ」対策として煙貫を切り3ヵ年で貫き通したこと、この頃の大切山の大工が油煙で顔が染まっていたので「けだえ大工」といわれていた記述がある。文化3(1806)年以降は銅稼ぎの記述も見られる。明治23(1890)年の『御料佐渡鉱山之図』には「大切坑」と表記され、稼働中であったことが描かれている。坑内には、江戸時代の採掘技術のみならず、鉱車用に坑道を拡幅しているほか、シュリンケージ採掘法による切羽などの近代の採掘技術の痕跡も残されている。このように大切山坑は1630年代の開発から近代まで繰り返し再開発が行われた坑道である。しかしながらこれだけたくさんの古文書や絵図が残されているにも関わらず、これまで煙貫口付近の詳細な位置は確認されてこなかった。一説では再開発を繰り返した際に、埋没したのではないかと考えられている。



図3 『佐州相川惣銀山敷岡高下振矩絵図』 元禄8年(1696)作((株)ゴールデン佐渡 所蔵)

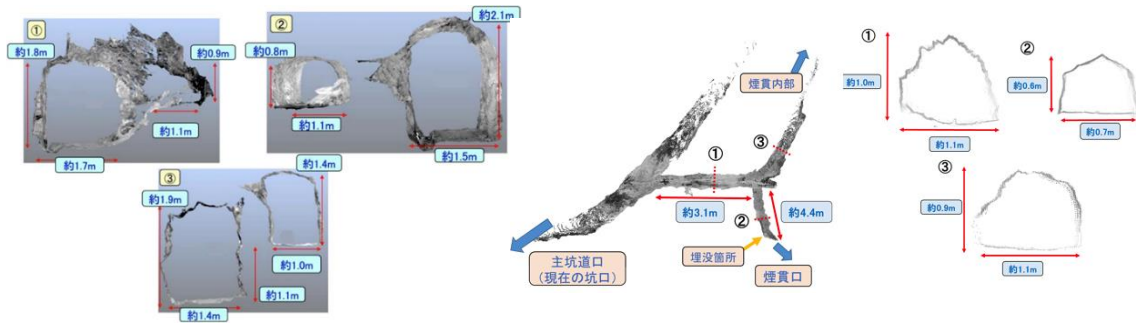
## (2) 坑道内の測定結果

図4に3次元レーザ測定結果を示す。図4(a)に示すように主坑道口から約380mの測定を行った。また坑口から約200m~240mの区間は2つの坑道間に境界が無く一つの坑道となっていた。更に煙貫の採掘方向は約200m~240mの区間以外は蛇行していることが確認できた。概ね絵図と同じ主坑道と煙貫の2重構造であった。しかしこれまで確認されている絵図では、主坑道と煙貫はほぼ並列に描かれていた。今回の測定で煙貫は蛇行して掘削されていることが新たに分かった。図4(b)に示すように主坑道の平均断面形状は縦1.8m×横1.5mであった。煙貫の平均断面形状は縦0.9m×横1.0mであった。また坑口方向に向かって約0.5degの下り勾配になっていることが確認できた。これは坑口に向かって排水が流れるよう考慮したためである。主坑道には、側面に発破のための穴や鉱石を搬出するために用いたトロッコの枕木跡が確認された。これにより明治時代に再開発された際、坑道を大きくしたと推測される。主坑道と煙貫をつなぐ枝坑は矩形形状が小14個、崩落して大きくなった物が6箇所確認された。また枝坑は、ズリ石等を積み上げて、隙間を粘土等で綺麗に覆っていた。これは主坑道の採掘距離が長くなった際の坑内空気循環対策方法である。多数の枝坑が開口したまま残存していると主坑道最深部まで空気が循環しない。このため最深部近傍の枝坑のみ開口して残りは閉口したと考えられる。しかし絵図に記載されているように枝坑の間隔は一定間隔ではなかった。調査の結果、枝坑上部には鉱脈があることを確認した。枝坑は主坑道を採掘している際に鉱脈に沿って一部採掘した場所を再利用したと推測できる。



図4 (a) 上面図および側面図





(b) 主坑道の代表的な断面形状 (c) 煙貫内部から煙貫口方向 上面図と断面形状  
 図4 坑道内3次元レーザ測定結果

次に図4(c)に示すように煙貫内部から煙貫口付近に向かってロボットを用いて測定を行った。図4(c)-②に示すように狭小のかまぼこ型水平坑であった。また図4(c)に示すように②付近の底面は粘土質であった。ロボットが②箇所を約4.4m侵入した位置で坑道は埋没していた。このため煙貫内部から煙貫口は確認できなかった。

### (3) 坑道周辺地表面の測定結果

図5に示すように主坑道周辺地表面の画像データを示す。図5(b)に示すように、主坑道口から上部約16mの位置に近代の排水路の跡が確認できた。しかし煙貫口の痕跡を確認することはできなかった。しかしながら、図3の絵図に代表されるように煙貫口は主坑道口の右側に描かれている。このため、主坑道口右側斜面を排水路付近まで104か所で3次元レーザ測定を行った。



図5 主坑道周辺地表面の様子

図6(a)に主坑道周辺地表面の3次元レーザ測定結果を示す。更に、図6(b)にこの測定データに坑道内の3次元レーザ測定データをパソコン上で重ね合わせた結果を示す。排水路跡までの山腹斜面には最大約35degと急峻な箇所もあった。今回測定した地表面のデータには煙貫口周辺の地表面データを含んでいないことがわかった。そのため、上部付近を再測定した。その結果、排水路跡から約10m上部に図7に示すように狭小立坑口を発見した。絵図等から推定すると煙貫口は水平坑であると考えていた。しかしながら発見した坑口は立坑であった。発見した坑口が探していた煙貫口か確かめるために、排水路跡からこの付近まで3次元レーザ測定を行った。図8にこれまでの3次元レーザ測定結果と重ね合わせたもの示す。側面図から煙貫内部から測定した位置の真上、約32mに今回発見した立坑口が位置している。また、他にこの付近に坑口らしきものは確認できなかった。この結果から今回発見した狭小立坑口が煙貫口と推定できる。また、これまで筆者は絵図が上面方向から描かれているため主坑道口と煙貫口に高低差が有ることに気づかなかった。次に得られたデータを元に主坑道口と煙貫口の採掘当時の状況を再現した。そのために、3次元点群データから樹木等を削除する地面検知処理を行って立体データを求めた。図9に結果を示す。これにより主坑道口と煙貫口の相対的關係を全方向から確認することができる。更に、図10に示すように、坑口付近の3次元レーザ測定と絵図の比較を行った。その結果、坑道口から湾曲部分までの距離や湾曲角度等一致する箇所が数箇所あった。これにより絵図が詳細に描かれていることがわかった。

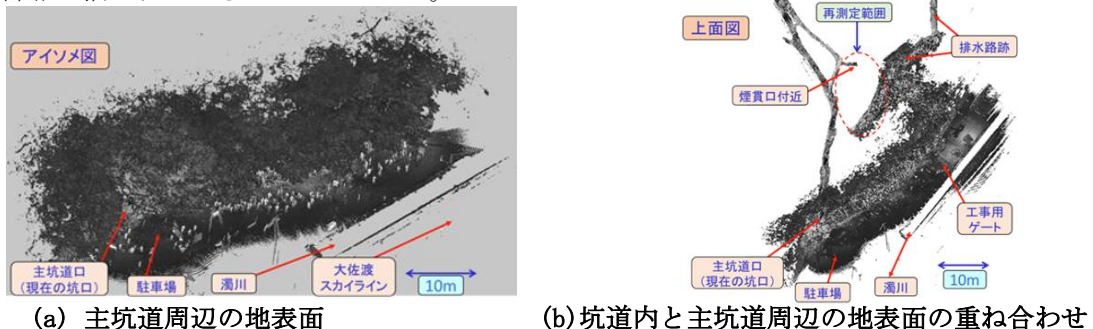


図6 3次元レーザ測定結果



図7 目視で発見した「煙貫口」

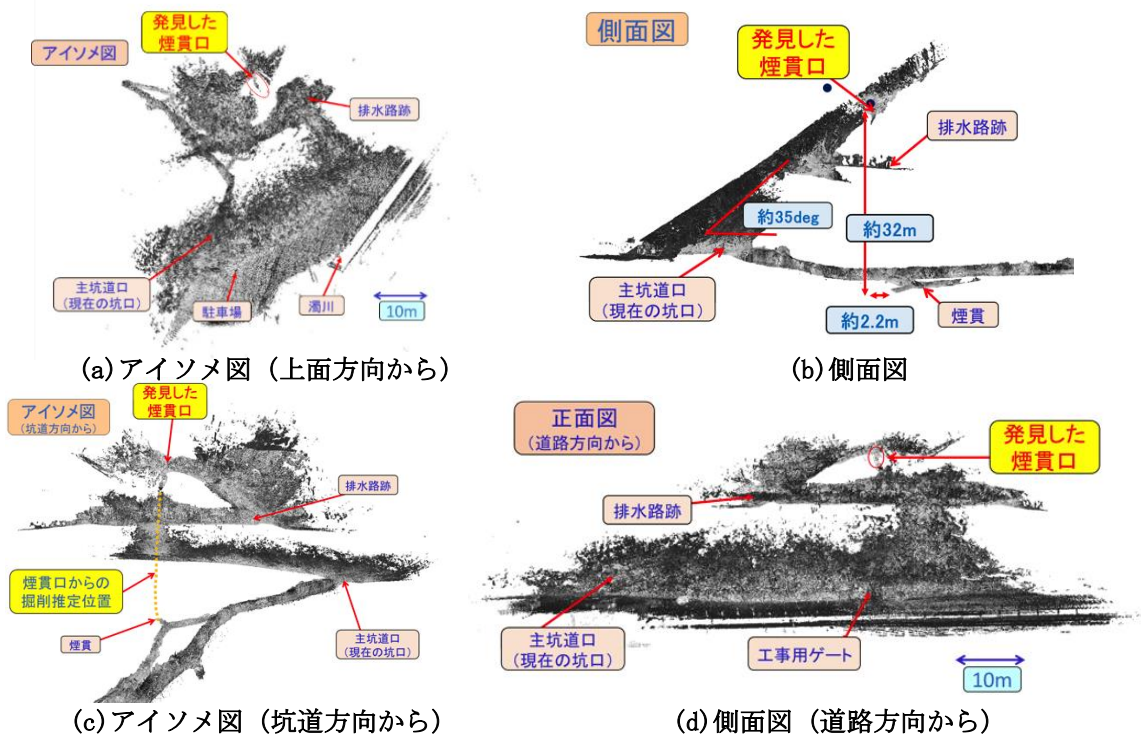


図8 3次元レーザ測定結果

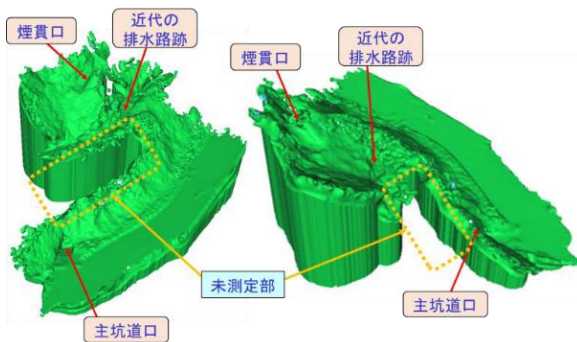


図9 主坑道から煙貫口周辺立体データ

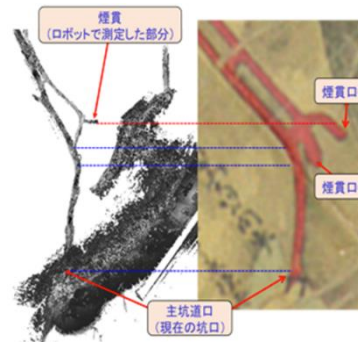


図10 坑口付近の絵図と測定結果の比較

以上まとめると、本研究では大切山坑が絵図等に描かれている構造となっているか検証した。そのために、坑道内と周辺地表面の3次元レーザ測定を行った。その結果、概ね絵図通り坑道内は、主坑道と煙貫の2重構造であった。また測定結果を元に煙貫口位置推定を行った。推定位置を目視で確認したところ煙貫口を発見することができた。主坑道と煙貫口の高度差を3次元レーザ測定結果から算出すると約32mもあることがわかった。このことからこれまで煙貫口が確認されなかったのは、絵図が上面方向から描かれているため主坑道と煙貫口に高低差が有ることに気づけなかったと考えられる。更に、主坑道と煙貫口に高低差がなぜ必要であったか検討した。その結果、温度差と高低差の相乗効果で坑道内の換気量を最大約18倍増加させることがわかった。これより本坑道の採掘を立案・実行した味方氏は、当初から高品位の鉱脈に着脈するには300m近く採掘する必要があると考えたため、煙貫口と主坑道間に約32mもの高低差を設けて坑道内の換気量を多くしたと考えられる。

研究期間内に本手法を用いて、佐渡金銀山内の他坑道、兵庫県多田銀銅山、山梨県湯之奥金山等、全国各地の坑道内部や坑道周辺の3次元点群データを取得して、開発時の鉱山遺跡を再現し鉱山坑道開発の歴史の変遷の解明を行った。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計6件（うち査読付論文 5件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 久間英樹, 福岡久雄, 青木美香	4. 巻 21
2. 論文標題 3次元レーザスキャナと遠隔操作型ロボットを用いた鉱山坑道跡の定量解析	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 技術史教育学会誌	6. 最初と最後の頁 16-22
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 久間英樹, 福岡久雄, 眞部広紀	4. 巻 45
2. 論文標題 3次元レーザスキャナを用いた竜溪洞の形状測定	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 洞窟学雑誌	6. 最初と最後の頁 57-69
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 村上崇史, 石原与四郎, 久間英樹	4. 巻 45
2. 論文標題 国指定特別天然記念物「秋芳洞」で発見された新空間「殊勝殿」の概要	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 洞窟学雑誌	6. 最初と最後の頁 41-55
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 久間英樹, 福岡久雄	4. 巻 21
2. 論文標題 鉱山絵図の検証 ~ 佐渡金銀山大滝間歩および弥吉間歩 ~	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 技術史教育学会誌	6. 最初と最後の頁 7-13
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 H.Kuma ,H.Fukuoka	4. 巻 1
2. 論文標題 Quantitative Analysis for Remains of Mining Tunnels using Remote Control Robot and 3D Laser Scanner	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 International Conference on Mechanical Design and History of Technology 2019	6. 最初と最後の頁 195-200
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 HIFDEKI Kuma,HISAO Fukuoka,MISUZU Komatsu	4. 巻 983
2. 論文標題 A Quantitative Analysis of Mine Mills by 3D Laser Scanner	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Materials Science Forum	6. 最初と最後の頁 73-80
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.4028/www.scientific.net/MSF.983.73	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計11件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件)

1. 発表者名 久間英樹, 福岡久雄, 青木 美香
2. 発表標題 安価な3次元レーザ測定手法を用いた鉱山遺構測定
3. 学会等名 資源・素材学会 令和3年(2021)年度 春季大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 久間英樹, 福岡久雄, 青木 美香
2. 発表標題 鉱山坑道内掘削痕跡「のみ角」の形状解析 ~尾去沢鉱山編~
3. 学会等名 日本技術教育学会2020年度全国大会 (島根・松江)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 眞部広紀, 岡本渉, 久間英樹
2. 発表標題 洞窟計測探査シミュレーションプログラムと UZUME 計画
3. 学会等名 2020年日本洞窟学会大会仙台大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 久間英樹, 眞部広紀, 岡本渉, 村上崇史, 福岡久雄
2. 発表標題 3次元レーザスキャナを用いた洞窟周辺地形の測定
3. 学会等名 第64回宇宙科学技術連合講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 眞部広紀, 久間英樹, 岡本渉
2. 発表標題 洞窟に至る、洞窟に降りる、及び洞窟における3次元計測とSLAMについて
3. 学会等名 第64回宇宙科学技術連合講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 久間英樹, 福岡久雄, 青木美香, 小松美鈴
2. 発表標題 全国鉱山遺跡坑道内「のみ角」の比較
3. 学会等名 資源・素材学会 令和2(2020)年度 秋季大会
4. 発表年 2020年



1. 発表者名 久間英樹, 福岡久雄, 小松 美鈴, 青木 美香
2. 発表標題 尾去沢鉱山坑道内「のみ角」の定量解析
3. 学会等名 資源・素材学会 令和2年(2020)年度 春季大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 久間英樹, 福岡久雄, 青木美香
2. 発表標題 中世の鉱山採掘法 ~ 露頭掘 編 ~
3. 学会等名 日本技術史教育学会2020年度関西支部大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 久間英樹, 本多将和, 福岡久雄
2. 発表標題 松江高専を活用した社会人人材育成事業の変遷および高専教育への展開に関して
3. 学会等名 日本技術教育学会2019年度全国大会(福井・鯖江)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 久間英樹, 福岡久雄
2. 発表標題 3次元レーザスキャナを用いた多田銀銅山内民田地区A群の定量解析
3. 学会等名 資源・素材学会 令和元(2019)年度 秋季大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 久間英樹, 福岡久雄
2. 発表標題 佐渡金銀山内屏風沢間歩群と吉田松陰著「東北遊日記」との関係
3. 学会等名 日本技術史教育学会2019年度総会・研究発表講演会
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

石見銀山探査と久間研究室 <a href="https://kaken.nii.ac.jp/grant/KAKENHI-PROJECT-19K01131/">https://kaken.nii.ac.jp/grant/KAKENHI-PROJECT-19K01131/</a> 石見銀山探査と久間研究室 <a href="http://www2.matsue-ct.ac.jp/control/old/link2/kuma_lab/g-kuma-HP/k-iwami1.html">http://www2.matsue-ct.ac.jp/control/old/link2/kuma_lab/g-kuma-HP/k-iwami1.html</a>
--

6. 研究組織		
氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------