

令和 2 年 7 月 14 日現在

機関番号：84602

研究種目：挑戦的研究（萌芽）

研究期間：2017～2019

課題番号：17K18521

研究課題名（和文）原子核乾板を用いたミュオントモグラフィー技術による古墳墳丘内部の3次元画像化

研究課題名（英文）3D imaging of chambers in tumulus by muon tomography using nuclear emulsion detector

研究代表者

石黒 勝己 (ishiguro, katsumi)

奈良県立橿原考古学研究所・その他部局等・特別研究員

研究者番号：60766377

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,600,000円

研究成果の概要（和文）：

宇宙線ミュオンによる墳丘内部の計測をすることで春日古墳の内部3D画像を作成、内部埋葬施設の検出や構造の解析をした。さらに結果を用いて周辺に存在する藤ノ木古墳と比較研究を行った。西乗鞍古墳では作成した画像を電磁探査による探査結果とも比較して埋葬施設位置の特定に役立てた。これらの測定は検出器である原子核乾板の弱点であった熱に弱く夏季の使用が難しいという点を技術開発によって克服したうえで行った。さらに改善点を生かしてこれまでに箸墓古墳及び日本の古い塑像の計測データも取得することが出来た。

研究成果の学術的意義や社会的意義

重要な日本の古墳の多くは発掘や立ち入りが難しいがミュオンによる墳丘外からの計測による三次元画像化を考古学研究に生かした。原子核乾板はミュオンの角度計測を最も高い精度で行えるため検出器として最適である。一方で生産や取り扱いが難しいため熟練者は世界でも限られていた。今回、温度耐性を大きく上げる改良や生産性の向上に成功したため活躍の場面がかなり広がるだろう。西乗鞍古墳ではミュオン計測と電磁探査を組み合わせて研究を行った。お互いの弱点を補う運用が出来、今後のスタンダードな手法になっていくだろう。

研究成果の概要（英文）： We made an internal 3D image of the Kasuga Tumulus by measuring the inside of the mound with cosmic ray muons, detected internal burial facilities and analyzed the structure, and conducted a comparative study with the surrounding Fujinoki Tumulus. At the Norikura Kofun, the images created were compared with the results of electromagnetic surveys to help identify the location of the burial facility. These measurements were carried out after study to remove the weak point of the nuclear emulsion film of heat and difficulty to use in summer. By making use of this, we have been able to obtain the measurement data of the Hashihaka tumulus and old large Japanese statues.

研究分野：考古学、素粒子物理学

キーワード：大和の考古学 古墳時代 ミュオンラジオグラフィー 三次元計測 宇宙線物理学 固体検出器 埋葬施設 非破壊検査

1. 研究開始当初の背景

考古学における地下遺構の探査には超音波や電気を地下に送り、その抵抗を記録するために探査したい場所に探査機材の設置が必要であった。その点、宇宙線ミュオンによる内部探査は記録を取りたい場所に機材の設置をしなくても行えるため、非常に有効な探査手段といえる。特に盛土の中に石室などの埋葬施設を設けた古墳の調査には有効であると考えられた。我々は発掘済みで埋葬施設が既知であった石上古墳(奈良県吉野郡大淀町)において試験を行い内部空洞を検出することが2014年に出来ていた。一方で多くの人が理解できるような画像化をできるほどの分解能は達成できておらず、三次元的な構造解析もできていなかった。

2. 研究の目的

古墳時代研究において古墳の埋葬施設の構造、規模、方向の決定は非常に重要な研究要素である。しかし最も重要な大規模古墳の多くは立ち入り及び発掘調査を実施することが難しい。そのため我々は宇宙線ミュオンという素粒子を用いて古墳の内部三次元画像を作成したい(ミュオントモグラフィ)。古墳外部からの非破壊検査なので古墳を保護しながら埋葬施設の構造研究を行える。本研究では古墳内部の密度情報を反映した画像を作成し、最終的に三次元画像の作成を行う。これによって埋葬施設の構造を把握し考古学研究に生かしたい。さらに電磁探査などの従来の探査方法と組み合わせた手法の開拓も行う。

3. 研究の方法

ミュオンラジオグラフィはX線によるレントゲン検査を発展させた手法と考えると理解しやすい。レントゲン検査では人工的に作ったX線を人体等に照射し、背後に置いたX線フィルムの感光度合の差を調べる。肉に比べて骨など密度の高い部分の方がX線が静止しやすいため内部の状態を知ることが出来る。古墳のように大きなものはX線では透過できないがミュオンの透過率の異方性を調べることで画像化可能である(図1)。ミュオンは電子に似た性質の素粒子だが質量が大きく透過力が高い。土砂中を直進しながら次第にエネルギーを失い最終的に止められるが土による遮蔽が500mあっても0.1%程度は貫通してきて透視に利用可能である。古墳の埋葬施設による空洞中では静止しにくいいためその方向からのミュオン数は多く検出される。またミュオンは宇宙線として空から常時地表に降り注いでいて(手のひらに毎秒1個程度)これを用いることが出来る。

ミュオンの検出器として我々は原子核乾板を用いる。これは通常の写真乾板の銀塩の結晶サイズや形状を最適化することで高感度化し、ミュオンにも感度を持たせたものである。フィルム現像後に自動読み取り顕微鏡ステージでフィルムをスキャンし、ミュオンの飛跡の飛来方向を一本一本得ることでその異方性を画像化する。

原子核乾板を奈良県の春日古墳、西乗鞍古墳、箸墓古墳の複数個所に設置して画像化を試みた。また日本の古い大型の塑像に対する試験も行った。当初は原子核乾板は夏の高温に弱いことから冬季の計測に限られるという大きな弱点があったのでこれの改善にも取り組んだ。

4. 研究成果

技術開発

まず技術開発として検出器の改善をした。原子核乾板の問題点として温度耐性に問題がありフィルムが経時的に黒化して性能が悪化、最終的に用いれなくなる点があった。この原因がフィルムの遮光パッキング材から発生するガスにあることを発見したためその心配の無い無添加ビニール素材によってパッキング袋を作成した(図2)。その結果、性能の経時劣化が起こらなくなりこれまでは難しかった夏季の計測ができるようになった。その他以下1~4の技術開発も行った。

1. フィルムの乳剤への添加薬品を研究し高感度化した。

2. フィルムの設置台を設計して作成し、野外での計測が安定してできるようになった(図3)。

3. ミューオン計測のシミュレーターを開発をした。これは計測計画や三次元解析に利用できる。

4. フィルムを効率よく生産できる乳剤塗布装置を開発した。これによって従来の約4倍のスピードでフィルムを作成できるようになり複数箇所からの計測が容易になった。それまではフィルム生産に時間がかかることがネックの一つであった。

計測結果

これらを用いた計測成果として第一に春日古墳の3D画像化を行った。春日古墳(奈良県斑鳩町)は、古墳時代後期の豪華な馬具や未盗掘の石棺の発見で著名な藤ノ木古墳に近接する直径約30mの円墳である。位置的にも時期的にも隣接する藤ノ木古墳との比較に興味を持たれているが、これまで発掘が行われていないことから埋葬施設に関して不明であった。春日古墳において計測を行い石室によるものと思われる内部空洞を検出(図4,図5)。さらに解析をすすめて3D画像化を行った(図6,図7)。これはいろいろな向きや形状の空洞を古墳内に仮定した上でミューオン計測のシミュレーションを行い、実際のデータと比較してより近いものを選択するという過程を繰り返すことによって行った。得た結果を周辺の藤ノ木古墳とも比較した。藤ノ木古墳の埋葬施設は、南東から中心方向に横穴式石室が作られている(図8)。先行研究では春日古墳と藤ノ木古墳に深い関係があった場合、両者で違うタイプの埋葬施設が作られている可能性があると指摘されているが1)、本研究では空洞の方向に違いが見られたものの明らかな石室タイプの違いは検出されなかった2)

第二に西乗鞍古墳(奈良県天理市)の計測を行った3)。古墳の全長は118m、二段構成の後円部は径66m、高さ18mを測る前方後円墳である(図9)。東乗鞍古墳や小墓古墳等と合わせて杣之内古墳群を形成する。築造時期は5世紀後葉と出土物から考えられているが埋葬施設の位置や形式がこの地域において変化する時期であり埋葬施設の検出による解明が課題であったので測定を行った。結果として図10のような内部画像が得られ埋葬施設が後円部二段目にあり、横穴式石室の可能性のある大きな空洞があることがわかった。この結果は他のグループによる別の物理探査の結果とも比較して互いに無矛盾な結果を得た。さらに電磁探査では難しい空洞の高さ等の情報も得ることができている。また探査結果及び天理市による規模把握のための発掘調査を合わせて古墳の重要度の理解が進んだため当古墳の史跡化が行われた。開発による破壊の危れが高まっていた当古墳の保護に役立つ結果にもなり非破壊検査としてのミューオントモグラフィーの長所を生かすことが出来た。

また、展望として計測対象の外形を精密に測定してミューオン計測結果との比較を正確に行うという課題があるが、最終年度には以下の対象でもミューオンの計測データを得ることが出来た(図11,図12)。

1. 箸墓古墳
2. 日本の古い大型の塑像

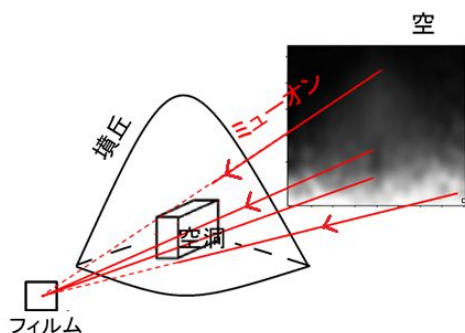


図1. ミューオンによる探査のイメージ



図2. パッキングしてアルミ板に張り付けたフィルム



図3 春日古墳脇に設置した検出器

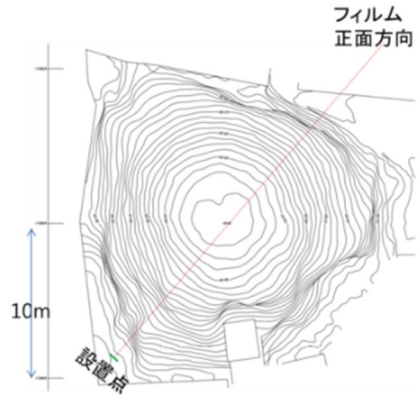


図4.春日古墳への設置箇所



図5.春日古墳

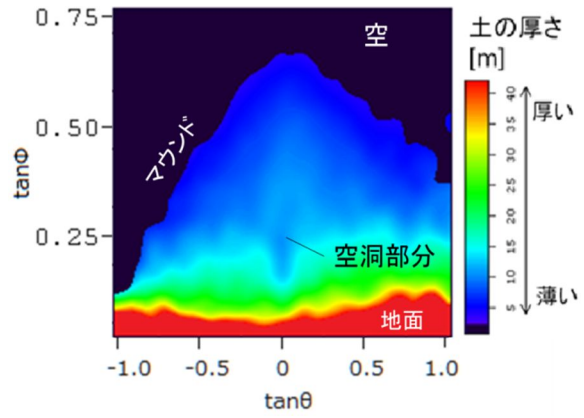


図6.春日古墳の内部イメージ

(X軸は方位角 $\tan\theta$,Y軸は仰角 $\tan\phi$)

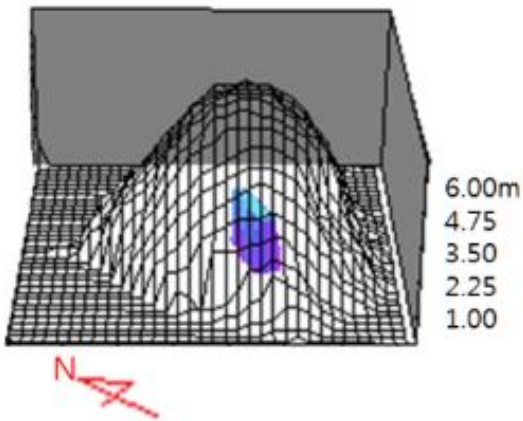


図7.立体図化した内部空間と墳丘

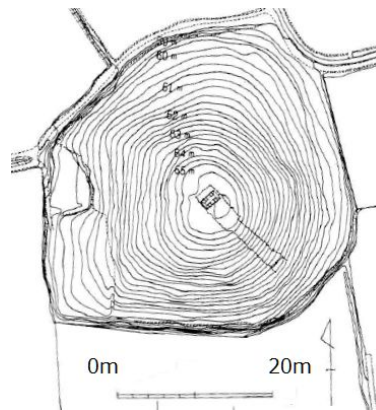


図8.藤ノ木古墳の横穴式石室



図9 .西乗鞍古墳

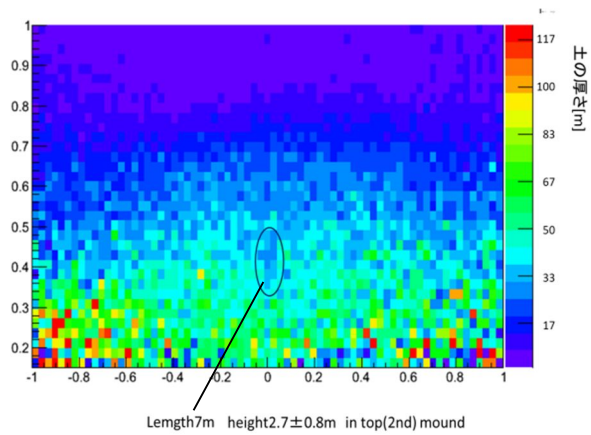


図10.西乗鞍古墳において検出した内部空洞とそのサイズ

(X軸は方位角 tan ,Y軸は仰角 tan)



図11 箸墓古墳脇の畑からの計測



図12.箸墓古墳脇の民家の塀から計測

参考文献

- 1)奈良県立橿原考古学研究所 『斑鳩町の古墳』斑鳩町教育委員会, 1990
- 2)石黒勝己 西藤清秀 「ミュオンラジオグラフィーによる日本の古墳研究」『日本写真学会誌 巻81-3』2018
- 3)Ishiguro katsumi Saito Kiyohide 「Study of cultural properties by the technique of cosmic ray physics 」 『IcMass2019 abstracts 』 Oct 2019

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計13件（うち査読付論文 6件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 13件）

1. 著者名 石黒勝己 他	4. 巻 35
2. 論文標題 ミュオンラジオグラフィーによる春日古墳墳丘内部画像の作成	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 日本文化財科学会35回大会研究発表要旨集	6. 最初と最後の頁 10-11
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 オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -
1. 著者名 石黒勝己 他	4. 巻 81-2
2. 論文標題 ミュオンラジオグラフィーによる春日古墳墳丘内部画像の作成	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 日本写真学会要旨集	6. 最初と最後の頁 25-26
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 オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -
1. 著者名 石黒勝己 西藤清秀	4. 巻 716
2. 論文標題 宇宙線ミュオンを利用した日本古墳の内部画像化による研究	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 考古学ジャーナル	6. 最初と最後の頁 34-37
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 オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -
1. 著者名 石黒勝己 西藤清秀	4. 巻 81-3
2. 論文標題 ミュオンラジオグラフィーによる日本の古墳研究	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 日本写真学会誌	6. 最初と最後の頁 258-262
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 オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 石黒勝己	4. 巻 1
2. 論文標題 ミューオンによる遺跡探査	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 檀考研の研究成果八十選	6. 最初と最後の頁 114-115
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 オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 石黒勝己 西藤清秀 平田政彦 中村光廣 森島邦博 西尾晃	4. 巻 81
2. 論文標題 ミューオンラジオグラフィーによる春日古墳墳丘内部画像の作成	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 日本写真学会誌	6. 最初と最後の頁 -
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 オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Katsumi Ishiguro, Kiyohide Saito, Mitsuhiro Nakamura	4. 巻 -
2. 論文標題 Recent study of muonradiography for Japanese tumulus	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 ICMaSS2017 abstracts	6. 最初と最後の頁 -
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 オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 石黒勝己	4. 巻 58
2. 論文標題 宇宙線ミューオンで明らかにする古墳埋葬施設	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 全国公立埋蔵文化財センター連絡協議会公立埋文協会報	6. 最初と最後の頁 -
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 オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 T.Fukuda S.Aoki...K.Ishiguro(アルファベット順11番目)et.al	4. 巻 6
2. 論文標題 First neutrino event detection with nuclear emulsion at J-PARC neutrino beamline	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 PTEP	6. 最初と最後の頁 -
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 オープンアクセスとしている(また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 K.Yamada S.Aoki ...K.Ishiguro(アルファベット順12番目)et.al	4. 巻 6
2. 論文標題 First demonstration of emulsion multistage shifter for accelerator neutrino experiment in JPARC T60	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 PTEP	6. 最初と最後の頁 -
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 オープンアクセスとしている(また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 石黒勝己 西藤清秀	4. 巻 10
2. 論文標題 日本の古墳のミュオンラジオグラフィーによる考古学的研究	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Isotope News	6. 最初と最後の頁 -
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 オープンアクセスとしている(また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 K.Ishiguro S.Kiyohide	4. 巻 2
2. 論文標題 Study of cultural properties by the technique of cosmic ray physics	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 IcMass abstracts	6. 最初と最後の頁 -
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 オープンアクセスとしている(また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 石黒勝己 長縄直崇 西藤清秀	4. 巻 36
2. 論文標題 古代社会コミュニケーションの出土土器量をもとにした評価	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 日本文化財科学会研究成果概要集	6. 最初と最後の頁 -
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 オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

〔学会発表〕 計6件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 2件)

1. 発表者名 石黒勝己 他
2. 発表標題 ミュオンラジオグラフィーによる春日古墳墳丘内部画像の作成
3. 学会等名 日本文化財科学会35回大会
4. 発表年 2018年～2019年

1. 発表者名 石黒勝己 他
2. 発表標題 ミュオンラジオグラフィーによる春日古墳墳丘内部画像の作成
3. 学会等名 日本写真学会
4. 発表年 2018年～2019年

1. 発表者名 石黒勝己
2. 発表標題 文化財を対象としたミュオンラジオグラフィーの最近の結果
3. 学会等名 橿原考古学研究所研究集会
4. 発表年 2018年～2019年

1. 発表者名 Katsumi Ishiguro, Kiyohide Saito, Mitsuhiro Nakamura
2. 発表標題 Recent study of muonradiography for Japanese tumulus
3. 学会等名 ICMaSS2017 (国際学会)
4. 発表年 2017年～2018年

1. 発表者名 石黒勝己 長縄直崇 西藤清秀
2. 発表標題 古代社会コミュニケーションの出土土器量をもとにした評価
3. 学会等名 日本文化財科学会
4. 発表年 2019年～2020年

1. 発表者名 K. Ishiguro S. Kiyohide
2. 発表標題 Study of cultural properties by the technique of cosmic ray physics
3. 学会等名 IcMass2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年～2020年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

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
---------	---------------------------	-----------------------	----