様　式　Ｃ－１９、Ｆ－１９－１、Ｚ－１９　（共通）

科学研究費助成事業　　研究成果報告書

令和　７ 年　 ６ 月 １６ 日現在

機関番号：３４４１６
研究種目：基盤研究(C)（一般）
研究期間：2021～2024
課題番号：２１Ｋ１２５８９

研究課題名（和文）ミュオグラフィを用いた古墳の内部調査に関する研究

研究課題名（英文）Research on the internal investigation of ancient burial mounds using myography

研究代表者
林　武文（Hayashi, Takefumi）

関西大学・総合情報学部・教授

研究者番号：９０２６８３２６

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費）　　2,500,000円

研究成果の概要（和文）：宇宙線に含まれる素粒子「ミュオン」を用いた透視技術「ミュオグラフィ」により、埋蔵文化財を非破壊・非侵襲で調査する手法の可能性を検討した。未発掘の岡山市造山古墳の後円部を2地点から長期間計測し、ミュオン透過画像を取得した。シミュレーションとの比較から、石室の存在が推定される箇所に内部構造の不均質が確認され、その存在可能性を示唆した。成果は地域の広報誌や展示会を通じて社会に発信した。

研究成果の学術的意義や社会的意義
本研究は、ミュオンを用いた透視技術「ミュオグラフィ」により、未発掘の古墳の内部構造を非破壊・非侵襲で推定できる可能性を示した点で学術的に意義がある。従来の考古学的手法では困難であった埋蔵文化財の内部調査に新たな選択肢を提供し、文化財の保存と研究の両立に貢献する。また、地域社会への成果発信を通じて文化財への理解と関心を高める社会的意義も有する。

研究成果の概要（英文）：This study explored the potential of using Muography, a visualization technique that employs muons, elementary particles contained in cosmic rays, for the non-destructive and non-invasive investigation of buried cultural heritage. Long-term measurements were conducted at two locations on the rear circular portion of the Tsukuriyama Kofun, a large, unexcavated keyhole-shaped burial mound in Okayama City, and muon transmission images were obtained. A comparison with simulation data revealed internal structural inconsistencies in areas presumed to contain a stone chamber, suggesting the possibility of its existence. The research findings were disseminated to the public through local newsletters and exhibitions.

研究分野：情報工学

キーワード：ミュオグラフィ　ミュオン　埋蔵文化財　非破壊調査　古墳　透視技術　アウトリーチ活動

※科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

様　式　C－１９、F－１９－１（共通）

１．研究開始当初の背景

古墳をはじめとする埋蔵文化財の調査は、これまでボーリングと発掘が基本とされてきたが、文化遺産を損なうことなく将来へ継承するという考え方が主流となりつつある。そのため、超音波探査や地中レーダー、ファイバースコープによる観察といった非破壊的な調査手法が併用されているが、地中に埋没した石室や埋蔵品を非接触で解析することは依然として困難である。特に古墳が天皇陵に指定されている場合、敷地内への立ち入り自体が制限されており、これまで内部調査はほとんど実施されてこなかった。このような状況において、遠隔かつ非破壊・非侵襲で内部構造の把握が可能なミュオグラフィは、考古学における新たな調査手法として大きな期待が寄せられている。

ミュオグラフィは、地上に降り注ぐ宇宙線に含まれる素粒子「ミュオン」を線源とし、地殻や火山などの巨大構造物を透過したミュオンのエネルギー分布を計測することで、対象内部の密度分布を推定する技術である。近年、この技術によりエジプトのピラミッド内に未知の空間が発見され、大きな注目を集めた。ただし、当該調査では 1960 年代から用いられている写真乾板方式が採用されており、長期の計測期間を要するうえ、巨大構造物ではデータ解析が複雑化することから、信頼性や精度の面で十分とは言い難い。

日本国内における古墳のミュオグラフィ調査も写真乾板方式によって始められてはいるが、ピラミッドの場合と同様、内部構造の詳細な解析には至っていない。そのため、より解像度が高く、計測が容易な新たな手法の導入が求められている。さらに、得られたミュオン透過像のデータを研究者間で共有し、歴史学や考古学の分野における活用を促進するとともに、一般向けの情報開示や教育的活用も今後の課題である。

２．研究の目的

本研究では、最新のミュオグラフィ技術である MWPC（Multi Wire Proportional Chamber：多線比例計数管）方式の計測を古墳の内部調査に適用し、考古学や歴史学の分野における新しい調査手法として提案することを第一の目的としている。

MWPC 方式は、不活性ガスの雰囲気とワイヤ線のグリッドからなる検出ユニットを用いてミュオンの透過位置に生成される微弱な電場を検出する。現行では、縦横の画角約 60 度、最大 128×128 画素相当の撮像装置として、1 ヶ月程度の設置時間で安定した透視画像を得ることが出来る。計測対象の形状や大きさに応じて写真乾板の配置と枚数を変えて計測を行う従来方式に比べると、装置を設置するのみで透視画像が得られるため、計測とデータ処理に要するコストと信頼性の点で優れている。本方式は、2018 年度に発表されて以来、火山や地殻の計測では国内外で高い評価を得ているが、古墳のような埋蔵文化財の調査に適用されるのは本研究が初である。

本研究では、未発掘の古墳において、石室や埋蔵物を検出するために、画像の超解像処理と内部構造を仮定したシミュレーションに基づく解析技術を開発する。これにより、透視画像だけでは困難な埋蔵文化財の内部構造の解析を試みる。また、結果の直感的な理解を支援するための画像処理と可視化により、考古学や歴史学の研究者を含めたミュオグラフィの非専門家が活用することを可能とする。得られた結果を情報コンテンツとして発信することにより、専門家による学術利用と一般に向けた啓発や教育利用を図る。

３．研究の方法

本研究では、MWPC 方式のミュオグラフィ装置を、未発掘の大型前方後円墳である岡山市造山古墳に設置して、3 年間に渡り計測実験とデータ解析を行った。また、 後述する「(3) 結果の情報発信」に関しては、研究期間を 1 年間延長して実施した。研究の方法を以下に記す。

(1) 内部に石室を有する未発掘の古墳の透視実験

（計測対象）岡山県岡山市北区新庄下の「造山古墳」が測定対象として選定された。全長 350m、高さ 31m で、日本で 4 番目に大きい前方後円墳である。築造年代は 5 世紀初頭と推定されているが、被葬者については判明していない。墳丘は国の史跡に指定されているが、陵墓ではないため一般に公開されており、現在は古墳公園として多くの市民や観光客が訪れている（図 1）。

図 1 造山古墳後円部

図 2 装置の設置位置

図 3 地点 P1 での計測の様子

造山古墳の内部探査は近年まで詳しく行われておらず、「内部に石室があった」という地元の言い伝え以外には記録された資料はほとんどない。造山古墳と同時期に築造された前方後円墳では、石室は竪穴式であり、後円部の深さ 1〜2m 程度の地点に数メートルの立方体空間が形成されている。そこで、ミュオグラフィで後円部を測定することにした。

（計測装置）測定装置は、研究協力者の田中と角谷が 2020 年に高槻市今城塚古墳の測定に使用したものと同じ MWPC システムを使用した。縦 80×横 80×厚さ 6cm の MWPC 検出器が装置内に等間隔に 6 台設置されている。装置の外形寸法は W233×D164×H149cm、総重量 は約 1000kg であった。

6 台の検出器のうち少なくとも 4 台を通過したミュオンを対象にミュオンの飛来方向を算出した。計測範囲は、水平方向と垂直方向に 1000mrad（57.3°）であった。仰角と方位角のカウント値はピクセルの輝度値に変換され、128 x 128 ピクセルのミュオン透過画像として記録された。

（測定ポイントと設置期間）測定器は古墳の敷地内に水平に設置した。設置方向は、図 2 の P1 と P2 の 2 箇所で、後円部の中心に向かって設置した。それぞれの地点の設置期間は、P1：2021.4.24〜2021.11.1、P2：2022.1.29〜2022.6.18 であった。これらの位置は図 1 にも記されている。また、図 3 は P1 における計測の様子を示している。

（2）透視画像の解析と可視化ツールの開発

透視画像の解析を行うために、画像処理とシミュレーションに基づく可視化と解析システムを開発した。埋蔵文化財の計測は、火山や地殻内部の組成変化の検出とは異なり、石室や埋蔵物による不連続な空間を含むことになる。すなわち、内部に未知の構造を検出するための超解像処理と石室や埋蔵物を仮定したミュオンの透過シミュレーションによる内部構造の推定が必須となる。2021 年度は、MWPC ユニット上の古墳の輪郭線を境界条件とした超解像処理画像とミュオンの透過シミュレーション画像を比較して、埋蔵物の形状と姿勢の推定を試みた。

解析のために古墳の 3 次元モデルを構築した。地形形状の計測が困難であったため、岡山市教育委員会が作成した等高線図（2012）から 3 次元表面モデルを作成し、独自に開発した C/C++コードを用いてボクセルモデルに変換した（図 4）。ミュオンの透過長を求めるために、レイキャスティングアルゴリズムを用いて検出器のビューポイントまでの光線に沿ったボクセル数をカウントした。古墳の内部構造と密度分布に関する情報が不足しているため、古墳内部は均質であると仮定した。

この結果を埋蔵物の存在と関連付けて解釈するために、古墳内部の 3 次元表面モデルに石室を設定し、石室の投影画像を得た。石室の大きさと位置は、同時代に築造された古墳を参考にし、後円部天端から長さ 8m、幅 2m、高さ 2m、奥行き 1.5m とした。また、内部には石棺の模型として長さ 2.39m、幅 1.1m、高さ 0.75m の立方体が置かれた。

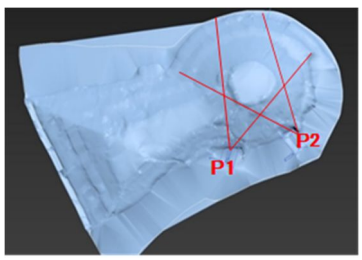

図 4 古墳の 3 次元モデル

（3）結果の情報発信

3 次元 CG や VR など情報技術を用いた情報コンテンツを開発し、歴史学や考古学の分野の専門家および一般人に向け分かり易い情報表現を用いて情報発信を継続して行った。古墳は、地域の象徴的な存在である上に、国内外における関心度も高い。本研究では、地域の芸術家と連携したサイエンスアートによる情報発信の手法を取り入れるなど、特に一般に向けたアウトリーチ活動を実施した。

４．研究成果

（1）ミュオンの透過画像

図 2 および図 4 に示した計測地点 P1 と P2 におけるミュオンの透過像をそれぞれ図 5 と図 6 に示す。測定期間は P1 が 93 日（2021.6.20〜2021.9.20）、P2 が 127 日（2022.1.29〜2022.6.4）であった。装置の出力画像の解像度は 128×128 ピクセルであるが、画像の下半分は背後から到達するミュオンの透過画像であるため、本研究では画像の上半分の墳丘を透過して装置に到達した透過画像（解像度：128×64 ピクセル）を使用した。

各画素の強度値は、 人工物や周囲の地形の影響を受けない空の領域の方位角分布の強度値で正規化されている。調査地点 P1 の標高における墳丘の高さは 21m、P2 では 23m であった。検出器から墳丘頂上までの水平距離は約 100m、墳丘頂上での仰角は 12.4 度（0.22 ラジアン）であっ

た。墳丘のアスペクト比、すなわち幅と高さの比が約 5:1（57.3°:12.4°）と比較的大きかったため、水平方向のみ 5 ピクセル（0.039 ラジアン）でビニングを行った。

透過画像はミュオンカウント数に比例して色相を変化させている。検出器から墳丘の中心までの距離は約 100m で、その地点のビンの大きさは幅 425cm、高さ 85cm に相当する。

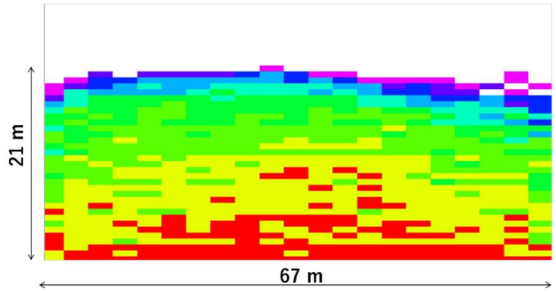

図 5 地点 P1 で取得したミュオンの透過画像

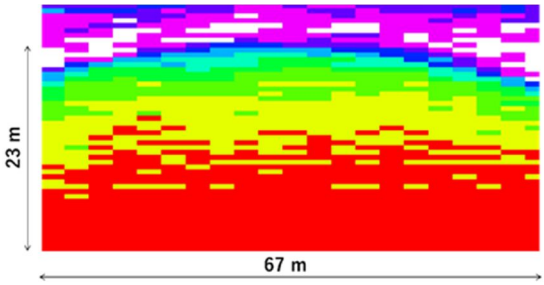

図 6 地点 P2 で取得したミュオンの透過画像

（2）シミュレーションによるミュオン透過像の解釈

図 7 に点 P1 におけるミュオン透過長の分布を示す。ここでは、計算された長さデータを最大長に正規化し、0 から 1 の間の値に対して色相の逆順に着色した。つまり、赤い部分は透過距離が長く、青い部分は透過距離が短いことを示す。このカラーリングの結果は、図 5 に示す測定から得られたミュオンの透過画像と一致している。

この結果を埋蔵物の存在と関連付けて解釈するために、古墳内部に仮想の石室を設定し、石室の投影画像を求めた（図 8）。石室の大きさと位置は、同時代に築造された大型古墳を参考にし、長さ 8m、幅 2m、高さ 2m、後円部頂上の平面（図中の破線部分）から深さ 1.5m の地点とした。また、内部には石棺の模型として長さ 2.39m、幅 1.1m、高さ 0.75m の立方体を設置した。

図 7 と図 8 を重ね合わせたミュオン透過シミュレーション結果と計測結果（図 5 を再掲）との比較を図 9 に示す。この結果から、想定される石室がある中央部に不均質な領域が存在する可能性がある。

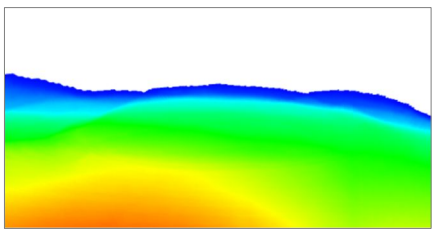

図 7 地点 P1 におけるミュオンの透過長分布

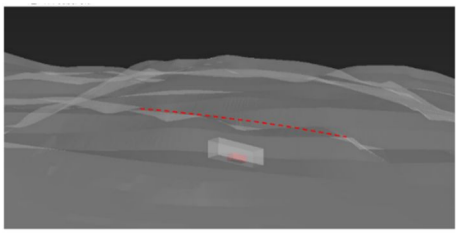

図 8 石室の投影像

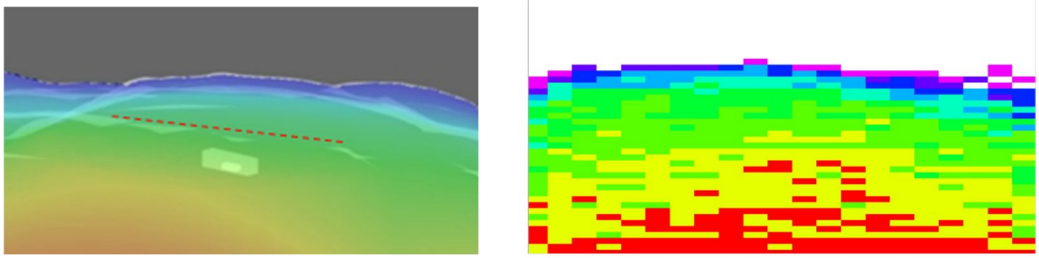

図 9 計測結果とシミュレーションの比較（地点 P1）

（考察）

今回の測定に使用した MWPC 検出器の特徴の一つは、検出器に入射するミュオン束強度をノイズの影響を最小限に抑えたデジタル画像データとして得ることができることである。測定結果とミュオン透過長シミュレーションを組み合わせることで、内部の石室や埋設物を特定できることが期待される。しかし、今回の測定では、装置の解像度や設置場所の制約により、検出する石室と同程度の画素サイズであったため、超解像や確率的ノイズ除去などの画像処理のみで埋設物を特定することは困難であった。

埋設構造物の同定に関して、2 点の計測点の画像からトモグラフィ技術によって内部の 3 次元構造を同定する手法が開発されている。2 地点で計測した粗いミュオグラフィ画像からベイズ推定を用いて逆問題を解き、高い精度で 3 次元構造を再構築が可能となる。また、密度差や空洞も考慮される。本研究では、P1，P2 位置の計測データから、彼らの手法を用いて内部の 3 次元構造を再構成することも検討したが、S/N 比の不足から計算が困難であった。現在、測定結果の S/N

比を改善するために、各 MWPC ユニットの出力信号からミュオンフラックスの信頼性を評価し、ミュオンの通過に関連する信号のみを抽出して解析を継続している。

シミュレーションでは古墳内の密度が均一であると仮定しているが、実際には密度は場所によって異なり、 厳密に言えば、石室の材質や空洞の容積も正確に推定する必要がある。このため、内部が判明している墳丘の測定を検討している。築山古墳の副葬品の一つである千足古墳は、盗掘水による浸食で一部が崩壊し、内部の石室は完全に復元されている。千足古墳の実測結果とシミュレーション結果を比較することで、データ解析手法やデータの信頼性を評価する予定である。

今回の測定実験では、装置の寸法が大きいため、設置場所に制限があった。そこで、より小型・軽量で拡張性の高い装置の開発を計画している。この装置を古墳付近の多くの場所に設置することで、より高い分解能が期待できる。特に、前述の千足古墳のような小さな古墳では、小型・軽量の測定装置が不可欠となる。

ミュオグラフィによる地殻内部調査の場合、内部組成の寸法が大きいため、AI による超解像や多点計測結果に基づく 3 次元処理が用いられる。しかし、古墳の場合、内部構造物の寸法はせいぜい 1〜3m 程度であるため、全体の分解能は不十分である。また、医療分野における X 線 CT 画像のように、深層学習のための学習データが不足している。

（結論）

未発掘の古墳を対象としたミュオグラフィ測定の結果、墳丘内部のミュオン透過画像を得ることに成功した。石室空間の存在を仮定したミュオン透過シミュレーションとの比較から、内部に不均一な領域が存在する可能性が示唆された。本研究の成果は、今後のミュオグラフィを活用した非破壊・非侵襲的な埋蔵文化財調査技術の発展に寄与するものと考えられる。

ただし、石室や埋蔵物をより確実に同定するためには、装置の S/N 比および分解能の向上が不可欠であり、新たな装置開発を含めた技術的検討が今後の課題である。

５．主な発表論文等

〔雑誌論文〕　計3件（うち査読付論文　1件／うち国際共著　1件／うちオープンアクセス　0件）

１．著者名 林武文	４．巻 767
２．論文標題 新世代ミュオグラフィを用いた古墳の内部調査に関する研究	５．発行年 2022年
３．雑誌名 考古学ジャーナル	６．最初と最後の頁 32-34
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 Takefumi Hayashi, Kenji Sumiya, Masaharu Isshiki, Gabor Nyitrai, Laszlo Olah, Hiroyuki K. M. Tanaka	４．巻 134
２．論文標題 Internal explororation of unexcavated ancient burial mounds by muography using MWPC detector	５．発行年 2025年
３．雑誌名 Journal of Geography	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 オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

１．著者名 角谷賢二，中島裕司，林武文，田中宏幸	４．巻 94
２．論文標題 ミュオグラフィとアートをベースとした市民科学活動	５．発行年 2025年
３．雑誌名 応用物理学会誌	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6件（うち招待講演　1件／うち国際学会　2件）

１．発表者名 角谷賢二、林武文、田中宏幸
２．発表標題 ミュオグラフィの最近の動向と造山古墳への応用
３．学会等名 岡山大学シンポジウム「文理融合分析による造山古墳の総合的研究」（招待講演）
４．発表年 2023年

１．発表者名
林武文、角谷賢二、井浦崇、長谷海平、Gabor Nyitrai

２．発表標題
ミュオグラフィによる古墳の内部調査：ノイズを考慮した計測と情報発信

３．学会等名
電気学会 電子・情報・システム部門大会

４．発表年
2024年

１．発表者名
Takefumi Hayashi

２．発表標題
Expression of Muography art with visualization and digital content

３．学会等名
MUOGRAPHERS（国際学会）

４．発表年
2022年

１．発表者名
Kenji Sumiya

２．発表標題
Introducing some of Muoguraphy’s promotion and its art works in Japan

３．学会等名
MUOGRAPHERS（国際学会）

４．発表年
2022年

１．発表者名
稲葉 望，林 武文，一色 正晴，角谷 賢二

２．発表標題
ミュオグラフィによる古墳の内部調査に関する研究　―ミュオンの透過シミュレーションによる内部構造の推定―

３．学会等名
電気学会　電子・情報・システム部門大会2021

４．発表年
2021年

１．発表者名 林武文，堀雅洋，井浦崇，長谷海平，米田文孝，井上主税
２．発表標題 デジタルメディア技術とアートを用いたミュオグラフィの社会実装研究
３．学会等名 電気学会 電子・情報・システム部門　知覚情報研究会
４．発表年 2021年

〔図書〕　計3件

１．著者名 角谷賢二（編）	４．発行年 2023年
２．出版社 関西大学ミュオグラフィアートプロジェクト	５．総ページ数 64
３．書名 MUOGRAPHY ART2023	

１．著者名 角谷賢二、定廣好和、安川満、清家章（編）	４．発行年 2022年
２．出版社 国際美術研究所、造山古墳蘇生会	５．総ページ数 76
３．書名 造山古墳群伝承物語	

１．著者名 林武文（分担執筆）	４．発行年 2022年
２．出版社 技術情報協会	５．総ページ数 575
３．書名 VR/AR/MR技術の最新動向と応用事例（第2章 第6節　古墳VR体験コンテンツの開発）	

〔産業財産権〕

〔その他〕

MUOGRAPHY ART PROJECT
https://wps.itc.kansai-u.ac.jp/ku-map/

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
研究分担者	井浦　崇 (Iura Takashi) (90554519)	関西大学・総合情報学部・教授 (34416)	
研究分担者	長谷　海平 (Hase Kaihei) (20633895)	関西大学・総合情報学部・准教授 (34416)	
研究分担者	一色　正晴 (Issiki Masaharu) (30583687)	愛媛大学・理工学研究科（工学系）・講師 (16301)	

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			
ハンガリー	Wigner Research Centre for Physics			