

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と計測結果の比較—

稲葉 望 林 武文 角谷賢二 (関西大学)

一色正晴 (愛媛大学)

A study of internal investigation of burial mounds using muography
- Comparison of muon transmission simulation and measurement results -

Nozomi Inaba, Takefumi Hayashi, Kenji Sumiya (Kansai University)
Masaharu Isshiki (Ehime University)

Muography is a technique for seeing through the crust and large structures using elementary particle muons in cosmic rays. We are conducting an internal survey of ancient burial mounds, which are buried cultural properties, as a new field of application of muography. This report describes the results of fluoroscopy experiments and data analysis of ancient burial mounds in Osaka Prefecture conducted from 2019 to 2020. Simulation of muon transmission made it possible to interpret the image of the measurement result.

キーワード : ミュオグラフィ, 宇宙線透視技術, ミュオン, 古墳, 内部調査, ミュオン透過シミュレーション, (muography, cosmic ray fluoroscopy, muon, ancient burial mound, internal survey, simulation of muon transmission)

1. はじめに

ミュオグラフィは、地上に降り注ぐ宇宙線の中のミュー粒子(ミュオン)を用いて地殻や大型の構造物を透視する技術である。1970年代に写真乾板によりミュオンの透過率を計測する(第1世代)方式が開発されて以来、地球物理学を中心に地殻内部の探査に利用されてきた⁽¹⁾。

近年、分解能の向上と計測時間の短縮を目的に、新しい検出技術に基づく計測装置が開発されている。東京大学地震研究所では、ミュオンの透過により発光するプラスチックシンチレータ(第2世代)により、火山のマグマの活動を計測し、噴火予知への適用可能性を示した⁽²⁾。また、2018年には、小型・軽量化と高分解能を実現した多線比例計数管(MWPC: Multi-Wire-Proportional-Chamber)(第3世代)方式を開発し、桜島をはじめ国内外の火山の計測に適用している⁽³⁾。

筆者らは、2017年度より、東京大学地震研究所、との共同事業として、MUOGRAPHY ARTプロジェクト⁽⁴⁾を発足させ、ミュオグラフィ技術のアウトリーチ活動として、情報コンテンツやサイエンスアートによる情報発信を継続して

きた^(5,7)。今回の検討は、その一環として、実際に第3世代の計測装置を近畿地区の大型古墳の調査に適用し、ミュオグラフィの新たな適用分野と可能性を探ることを目的としている。

これまでに、内部の状況が既知の高槻市今城塚古墳の計測を行い、3地点からの透視画像を得た⁽⁶⁾。本報告では、古墳の3Dモデルに基づく透過シミュレーションを行い、結果の解釈を試みた。

2. 古墳の計測実験

<2.1> 今城塚古墳 今城塚古墳は、大阪平野北東部の「三島古墳群」の中央部に位置する前方後円墳で、6世紀前半に建設されている。墳丘は、全長190m、高さ11~12m、周囲を一巡する二重濠と堤を含めた総長は約350mになり、同時期の古墳の規模では、日本最大を誇っている(図1)。被葬者に関しては明らかにされていないが、第26代継体天皇(531年没)の真の陵墓であるという説もある^(9,10)。

今城塚古墳は、1958年に国史跡の指定を受け、その後は高槻市教育委員会によって調査と公開に向けた整備が進められてきた。特に、平成9年(1997)から平成18年(2006)

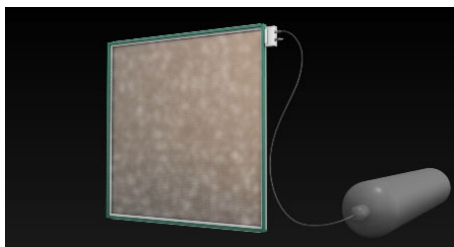
に行われた10回の発掘調査により、墳丘内石積、排水溝、石室基盤工などの内部状態が確認され、文禄5(1596)年の伏見地震による地滑りで、墳丘の盛土の多くが内濠へ滑落したことが判明した⁽¹¹⁾⁽¹²⁾。古墳内部には、石室の空間は残されていない。



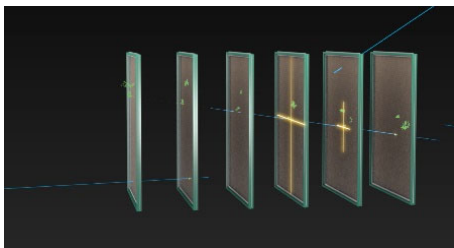
図1 今城塚古墳⁽¹⁰⁾

Fig.1. Imashirozuka ancient burial mound

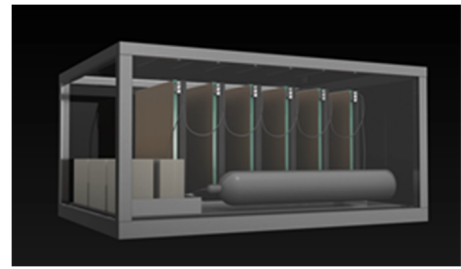
〈2・2〉 計測装置 計測装置は、東京大学国際ミュオンラフィ連携研究機構とハンガリー科学アカデミー・ウィグナー物理学研究センターによって開発された多線比例計数管(MWPC:Multi-Wire-Proportional-Chamber)方式⁽³⁾を用いた。本装置は図3に示すように、6層のMWPCユニットから成り、計測対象の方向から到達するミュオンのみを検出可能とする。各MWPCユニットの内部はAr-CO₂ガスで満たされており、入射したミュオンによって周囲の気体が電離され、最終的には、縦横にグリッド状に張られたワイヤに流れる電流パルスとして検出される。ワイヤは縦横それぞれ64本張られているが、補間計算により、ミュオンの透過位置の分解能を向上させ、128×128画素の撮像装置としてデータ計測を行うことが出来る。



(a) Ar-CO₂ガスで満たされたMWPCユニット



(b) 6層のMWPCユニットによる角度計測



(c) 装置の内部

図2 MWPC方式の計測原理

Fig.2. Principle of the imaging



図3 古墳内における装置の設置の様子

Fig.3. Equipment set in the Kofun.

検出器のアクティブ領域のサイズは80×80cmであり、6層中4層のMWPCユニットを全て通過するミュオンをカウントしており、装置の視野角は水平、垂直方向とも100 mrad (57.3°)である。ミュオンの飛来方向は、地平から天頂までの半球状であり、装置を水平に置いた場合には、正方形の画像の上半分は前方からターゲットを透過して到達する数、下半分は、背面から到達する数が計測されることになる。すなわち、計測結果として、画像の上半分を切り出している。従って、イメージング装置としての最大解像度は128×64画素に相当する。

図3に古墳内における装置の設置の様子を示す。装置キャビネットの寸法は、W2.33m×D1.64m×H1.49m、重量は約1000kgである。ケースの底に取り付けられたキャスターにより、装置を移動して設置位置を調整した。

〈2・3〉 設置場所と計測範囲 計測装置の設置場所は、図4に示す古墳内部のP1~P3の3箇所とした。P1とP2では、石室のあった後円部の墳丘部分を2箇所から計測した。また、P3では、前方部を計測した。1箇所あたり約2か月の間装置を設置した。装置が安定稼働した後、十分なミュオンのカウント数が得られた時点で、計測を終了し、装置を移動した。装置の設置期間は以下の通りであり、計測のデータ採取は1~1.5か月程度である。

P1 : 2019.9.2–2019.11.12
 P2 : 2019.11.12–2020.1.9
 P3 : 2020.1.9–2020.3.4

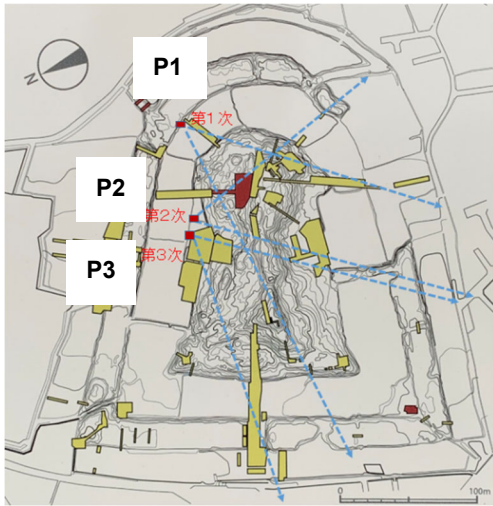


図4 計測装置の設置地点と計測範囲

Fig.4 Location and scope of measurement equipment



(計測地点 P1) (計測地点 P2) (計測地点 P3)

図5 各計測地点の状況

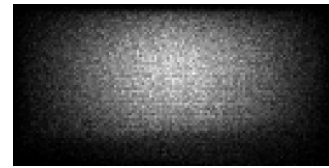
Fig.5 Scene view at each measuring point.

3.計測結果

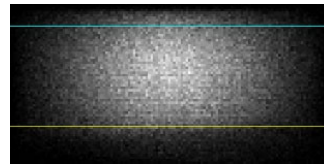
〈3.1〉計測結果 計測結果の透過画像は、ミュオンの飛来方向と積算数を横 128×縦 64 画素のグレースケール画像で表している。すなわち、画像の中心の最下部が前方の仰角ゼロ度、方位角ゼロ度から飛来するミュオン数であり、そこから横方向に方位角 $\pm 28.7^\circ$ と縦方向に仰角 28.7° の範囲の飛来数が記録されている。計測装置の特性上、ミュオンの検出感度は、中心部が高く、周辺にいくに従って計測素子数が少なくなり感度が低下する。

図6に、地点P1における計測データと前処理の結果を示す。図6(a)は計測結果の透過画像で、周辺部の輝度が落ちた画像となる。そのため、障害物の無い空の部分領域(図6(b)の2本の水平線で囲まれた領域)のカウント数を列毎に平均化し、それをを用いて各列の画素値を規格化した。結果を図6(c)に示す。

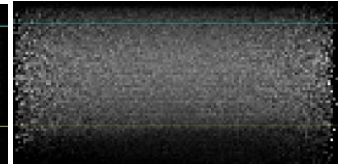
第二次計測地点、第三次計測地点においても同様の処理を施した。それぞれの地点で得られたミュオンの透過画像を図7(a)~(c)に示す。



(a)計測結果



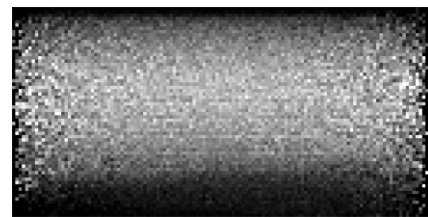
(b)空の領域の決定



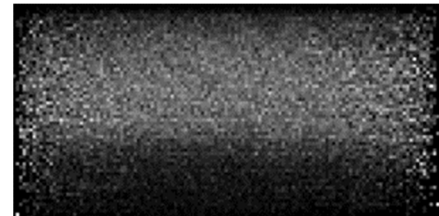
(c)規格化した画像

図6 計測結果の前処理

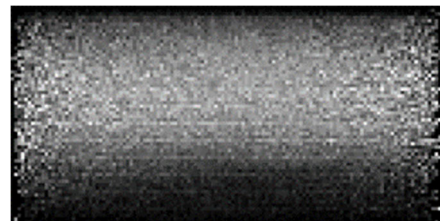
Fig. 6. Result of image processing measurement result



(a) 第1次計測地点の結果



(b) 第2次計測地点の結果



(c) 第3次計測地点の結果

図7 P1~P3 地点での計測結果

Fig. 7. Result of measurement at viewpoints of P1-P3.

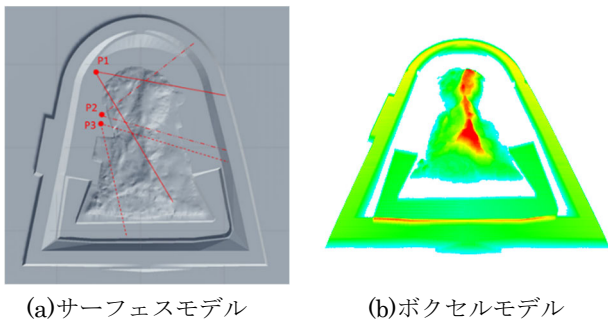
4. ミュオンの透過シミュレーション

〈4.1〉古墳の3次元モデルの作成 古墳の3次元モデルは、高槻市立埋蔵文化財調査センターが制作した今城塚古墳の等高線図(「史跡今城塚古墳」,1997-3)を基に作成した。フォトタッチソフトを用いて、デジタル化した等高線図

から文字や記号情報を削除するとともに、等高線の不連続部分に補正を施した後、ラスタベクター変換を施した。変換には、SoftSoft 社の WinTopo Pro を用いた。

等高線のベクトルデータを 3 次元 CG ソフト Autodesk 3dsmax にインポートして、それぞれに標高値を設定した後、サーフェスツールで表面に三角形メッシュを生成してサーフェスモデル図 8(a)を得た。

次に、このサーフェスモデルを独自開発のツールを用いてボクセル化し、ソリッドモデルに変換した。古墳と周囲の堤の部分までを立方体 1024x1021x48 個のボクセルに分割した。1 ボクセルは、1 辺 0.35m に相当する (図 8(b))。



(a)サーフェスモデル (b)ボクセルモデル
図 8 古墳の 3D モデル
Fig.8 3D model of the Kofun

〈4.2〉計測装置の位置補正 計測装置の設置場所は、古墳の複数箇所の目印からの距離を巻尺で計測し、図面上にプロットした。ただ、装置の姿勢を正確に計測することは困難であるため、計測結果を基に、装置の位置を補正する必要がある。

そこで、図 7 に示した各地点の計測結果に対して、フォトレタッチソフトで平滑化処理 (ガウスフィルタ) を施した後、輪郭のエッジ抽出を行い古墳の輪郭線を求めた。その結果に対し、シミュレーション結果の輪郭線が近づくようにカメラの姿勢を調整し、計測装置の姿勢を求めた。

その結果、それぞれの地点における計測装置の設置誤差は、各軸まわりの回転角度(x,y,z)で表すと、以下の通りであった (単位:°)。

カメラ P1 : (-0.5, -2.0, -4.0)

カメラ P2 : (0, -3.0, 2.0)

カメラ P3 : (-3.0, 3.0, -6.0)

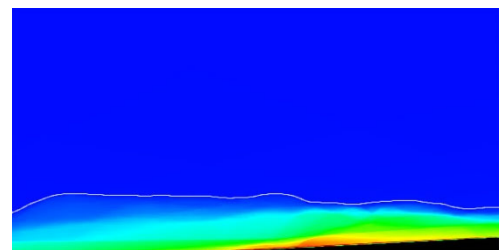
また、カメラ P2 に関しては、z 方向 (後方) に 3 (単位: m) だけ平行移動が必要であった。

〈4.3〉透過シミュレーション 古墳の 3D モデル上の P1 ~ P3 の位置に計測装置と同じ画角のカメラを設定し、位置補正を施した後、レイキャスティングによって透過画像を

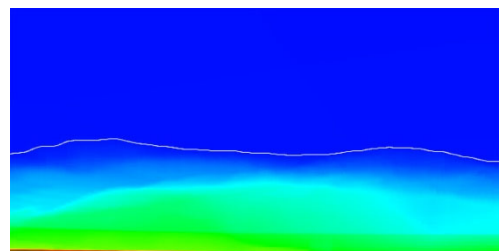
求めた。その際に、レイが通過するボクセル数をカウントし、最大数で規格化することによって、ミュオンの透過長の分布を求めた。シミュレーションソフトの API には、PCL (Point Cloud Library) (13)を用いている。

図 11 に、シミュレーションの結果得られた、各地点の計測装置におけるミュオンの透過長分布の画像を示す。ここでは、透過長が長い順に赤~青の色相値を割り当ててカラーリングを行っている。また、古墳の輪郭線の部分には、レイキャスティングによって求めた二値化画像のエッジを抽出し、重ねて表示している。

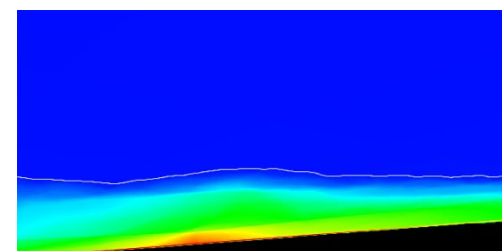
なお、図 11(a)と(c)において、画像の右下にある黒色の部分は、カメラを傾けたために、地面より下の部分が映っていることによる。



(a) 地点 P1 におけるミュオンの透過長分布



(b) 地点 P2 におけるミュオンの透過長分布



(c) 地点 P3 におけるミュオンの透過長分布

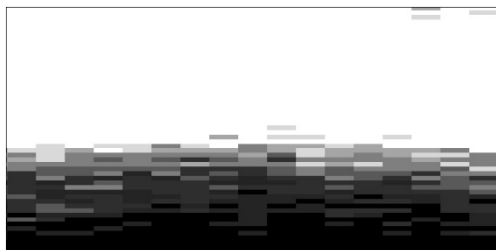
図 11 シミュレーション結果

Fig. 11. Result of simulation from P1-P3 viewpoint

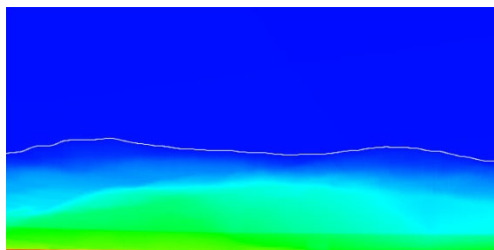
〈4.4〉計測結果との比較 計測地点 P2 における計測結果とシミュレーション結果の比較を図 12 に示す。図 12(a)は、計測結果の画像からノイズの影響を低減するために、横方向に 5 画素ずつ平均化した低解像度画像、図 12(b)は、対応する部分のシミュレーション結果を示す。これらを比較するために、図 12(a)にガウスフィルタによる平滑化処理を

施したものを図 12(b)と重畳させ、図 12(c)の画像を得た。

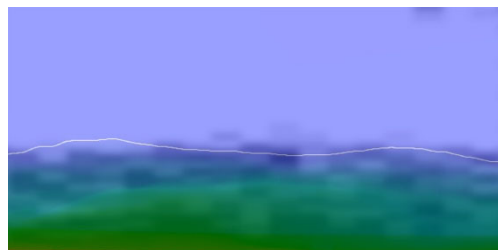
計測結果の画像は、分解能が不足しているものの、各画素の輝度値の変化は、シミュレーションの結果であるミュオンの透過長画像と似た傾向を示していることが分かる。すなわち、ミュオンの透過長の分布と計測結果との対応があることを示している。



(a) 計測結果の低解像処理



(b) シミュレーション結果の対応部分



(c) 重ね合わせた結果

図 12 計測結果とシミュレーション結果の比較

Fig. 12. Comparison of measured and simulated results

5. 考察と今後の方向

今城塚古墳の 3 次元ボクセルデータに基づく、ミュオンの透過長シミュレーションにより、ミュオグラフィの計測データの解釈が可能であることを示した。

今回の比較では、計測画像のノイズ処理を行っていないが、空の部分のノイズ分布をガウス分布とみなすことが出来れば、確率的画像処理を適用したノイズ除去が可能となる⁽¹⁴⁾。また、ノイズを除去した画像に対して、古墳と空の境界線および、透過長画像を元に、超解像処理を行うことも検討する。

今回、透視実験の対象とした今城塚古墳は、内部に空間が

存在しない古墳であったが、今後は、石室が存在する古墳の計測実験を行い、古墳の内部構造の解析に関して検討する。その場合には、透過長シミュレーションにおいて、内部に空洞や異なる密度のオブジェクトの存在を仮定したシミュレーションを行い、計測結果との比較において内部構造を推定する必要がある。

6. おわりに

国内の現存する古墳の中には、未発掘、未盗掘のものが含まれる一方で、発掘調査を行わず未来に残そうとする動きもある。ミュオグラフィを用いた非侵襲的内部調査は、考古学の分野における新しい研究手段としての利用が期待できるものと考えている。

謝辞

本研究は東京大学地震研究所共同利用(2021-H-03)の援助を受けた。

研究の推進において、ミュオグラフィ装置の提供とデータ解析におけるご支援を頂いた東京大学国際ミュオグラフィ連携研究機構・機構長 田中宏幸教授、ハンガリー科学アカデミー・ウィグナー物理学研究センターOláh László 研究員、古墳の計測において貴重なご意見とご協力を頂いた高槻市埋蔵文化財調査センター 鐘ヶ江一朗所長、高槻市今城塚古代歴史館 内田真雄館長、関西大学文学部 米田文孝教授、井上主税准教授、関西大学高槻キャンパス 市原淳 キャンパス事務長に感謝の意を表す。

文 献

- (1) 田中宏幸：ミュオグラフィの現状と将来について、物理探査, Vol. 65, No.1 & 2, pp.93-102 (2012).
- (2) Tanaka, H. K. M., Uchida, T., Tanaka, M., Shiobara, H., & Taira, H.: Cosmic-ray muon imaging of magma in a conduit: degassing process of Satsuma-Iwojima Volcano, Japan, Geophysical Research Letters, Vol. 36, L01304, pp.1-5 (2009).
- (3) L. Olah, S.J. Balogh, A. L. Gera, G. Hamar, G. Nyitrai, H.K.M. Tanaka1, D. Varga : Muography with Multi-Wire-Proportional-Chamber-based Tracking Detectors, 日本写真学会誌, Vol.81, No.3, pp.269-274, (2018).
- (4) MUOTRAPHY ART PROJECT ホームページ (2017-)
< <http://wps.itc.kansai-u.ac.jp/ku-map/> > (参照 2020-9-17).
- (5) 林武文, 堀雅洋, Norman D. Cook, 井浦崇: ミュオグラフィを題材としたメディア・アートコンテンツの開発, 電気学会 知覚情報研究会資料, PI-17-075, pp.19-22 (2017).
- (6) 井浦崇, 林武文: 火山の内部活動をモチーフにしたインスタレーション, 関西大学総合情報学部紀要「情報研究」, Vol.48, pp.73-84 (2018).
- (7) 林武文, 堀雅洋, Norman D. Cook, 井浦崇: アートを適用した新たな科学研究・教育の情報発信に関する研究, 電気学会 知覚情報研究会資料, PI-18-084, pp.19-22 (2018).
- (8) 林武文, 角谷賢二, ミュオグラフィによる古墳の内部調査 - 高槻市今城塚古墳の計測 -, 電気学会 電子・情報・システム部門 知覚情報研究会資料, PI-20-055, pp.33-37 (2020).
- (9) 森田克行: よみがえる大王墓 今城塚古墳 (シリーズ遺跡を学ぶ 077), 新泉社 (2011).

- (10) 今城塚古墳 (高槻市ホームページ)
<http://www.city.takatsuki.osaka.jp/rekishi_kanko> (参照 2021-6-15).
- (11) 高槻市教育委員会：古墳 ー平成 18 年度・第 10 次規模確認調査ー, 高槻市教育委員会 文化財課パンフレット (2008).
- (12) 釜井俊孝, 寒川旭, 守隨治雄：1596 年慶長伏見による古墳の地すべり, 応用地質, Vol.46, No.6, pp.285-298 (2008).
- (13) Radu Bogdan Rusu and Steve Cousins, "3D is here: Point Cloud Library (PCL)", IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2011.
- (14) 安田宗樹：確率的像処理の手引き ーマルコフ確率場モデルと確率伝搬法 ー, MEDICAL IMAGING TECHNOLOGY Vol.32, No.3, pp155-163(2014).