ミュオグラフィを用いた古墳の内部調査 一高槻市今城塚古墳の透視実験—

林 武文 角谷賢二 (関西大学)

Internal investigation of burial mounds using muography
- Fluoroscopic experiment at Takatsuki Imashirozuka Burial Mound in Osaka, Japan -

Takefumi Hayashi & Kenji Sumiya (Kansai University)

Muography is a technique for seeing through the crust and large structures using muons in cosmic rays. By using the third generation muography equipment with high resolution and short mesurement times, we have started an internal survey of Kofun in the Kinki area. This report presents the results of the fluoroscopic experiment of the Imashirozuka Burial Mound conducted from October 2019 to February 2020. The imaging results showed the internal dislocations created by past big earth quaqes, which showed the good agreement with the geological investigations performed so far. We confirmed that the muography measurement is very effective and will be applicable for the ancheology and history research as well.

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, 非破壊探査 (Muography, Cosmic ray fluoroscopy, Muon, Ancient burial mound, Internal survey, Nondestructive investigation)

1. はじめに

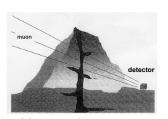
ミュオグラフィは、地上に降り注ぐ宇宙線の中のミュー粒子(ミュオン)を用いて地殻や大型の構造物を透視する技術である. 1970年代に写真乾板によりミュオンの透過率を計測する(第1世代)方式が開発されて以来、地球物理学を中心に地殻内部の探査に利用されてきた(1).

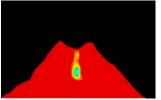
近年、分解能の向上と計測時間の短縮を目的に、新しい検出技術に基づく計測装置が開発されている。東京大学地震研究所では、ミュオンの透過により発光するプラスチックシンチレータ(第2世代)により、火山のマグマの活動を計測し、噴火予知への適用可能性を示した(図1)⁽²⁾. また、2018年には、小型・軽量化と高分解能を併せもつ多線比例計数管(MWPC: Multi-Wire-Proportional-Chamber)(第3世代)方式を開発し、桜島をはじめ国内外の火山の計測に適用している⁽³⁾.

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.

ミュオグラフィによる古代遺跡の調査は、最近では、エジプトのピラミッド内部の空間の発見®や奈良県の未盗掘古墳の調査⁽⁹⁾などで成果を挙げている。しかし、これらに用いられる第1世代の方式は、大型の構造物に適用するためには、計測対象の広範囲に多数の写真乾板を設置する必要があり、大掛かりな計測が長期に及ぶ上に、データの解析も容易ではない。

本報告では、第3世代の計測装置を用いて2019年10月~2020年2月に実施した高槻市今城塚古墳を対象とした計測実験(10)の詳細について述べ、考古学や歴史研究におけるミュオグラフィを用いた非侵襲の内部調査の有効性について考察する.





(a)ミュオグラフィの原理

(b)火山のマグマの計測結果

図1 ミュオグラフィの仕組み (2)

Fig. 1. Measurement principle of muography. (2)

2. 古墳の計測実験

<2・1>今城塚古墳 今回の計測実験は、計測の有効性を確認することに主眼を置き、①発掘調査等により内部の構造が既知である、②古墳の管理機関の許諾と地域からの協力が得られる、③地形的に計測装置の設置が容易、④数か月の計測期間中の装置の設置が可能、という条件の下に計測対象を検討した。その結果、大学キャンパス所在地の大阪府高槻市にある今城塚古墳(11)を選定した。

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2).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.現在では、高槻市が管理する今城塚古墳公園として、市民に開放されており、墳丘にも自由に立ち入ることが可能である.また、古墳の調査結果や出土品は公園に隣接する高槻市立今城塚博物館に展示されている.



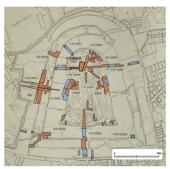


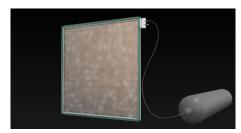
図 2 今城塚古墳の現状(左)と発掘調査の箇所(右)⁽¹²⁾ Fig. 2. Measurement principle of muography. ⁽¹²⁾

〈2・2〉 古墳の内部調査の状況 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(12)(13)。図2 (右図)に発掘が行われた箇所を示す。

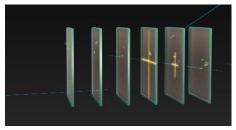
これらの調査結果からは、今城塚古墳の主体部が横穴式石室であり、1596年の伏見地震以前に石室が開口され、解体されていたことが結論づけられている。すなわち、古墳内部には石室の空間は残されていないとされている。

〈2·3〉計測装置 計測装置は、東京大学国際ミュオグ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、

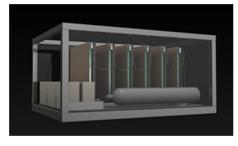
計測対象の方向から到達するミュオンのみを検出可能とする。各 MWPC ユニットの内部は $Ar-CO_2$ ガスで満たされており、入射したミュオンによって周囲の気体が電離され、最終的には、縦横にグリッド状に張られたワイヤに流れる電流パルスとして検出される。ワイヤは縦横それぞれ 64 本張られており、最大 64×64 画素のイメージング装置として機能する。ワイヤ距離は MWPC 検出器で 12m であり、位置分解能は約 1.5m である。



(a)Ar-CO₂ ガスで充満された MWPC ユニット



(b)6層のMWPCユニットによるミュオンの検出



(C)装置の内部

図3 MWPC 方式の計測原理

Fig.3 Principle of the imaging.



図 4 古墳内における装置の設置の様子 Fig.4 Equipment set in the tomb.

検出器のアクティブ領域のサイズは 80×80 cm であり、6層の MWCP ユニットを全て通過するミュオンを捕獲できる装置の視野角は $500 \, \mathrm{mrad}$ (28.6°) であるが、周辺

部での誤差が大きいため、400 mrad(22.9°)内のデータのみを使用した. すなわち、イメージング装置としての有効解像度は 51×51 画素に相当する.

図 4 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、 $W2.33m \times D1.64m \times H1.49m$ 、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、装置の設置位置を調整した。

装置の総電力消費量は 30W であるが、設置場所に電源が無いために、6個のリチウムイオンバッテリーを用い、2~3日毎に交換と充電を繰り返すことで、連続計測を可能とした. MWPC ユニット内の Ar- CO_2 混合ガス $(Ar:80\%,CO_2:20\%)$ の流量は $1\sim2$ L/h で、標準的な 40L タイプのガスボンベ (6000L のガスの充填が可能) で 3 ヶ月の連続運転が可能であった.

〈2・3〉設置場所と計測範囲 計測装置の設置場所は,図5に示す 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

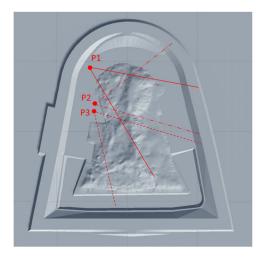


図 5 計測装置の設置地点と計測範囲 Fig.5 Location and scope of measurement equipment.





(計測地点 P1)

(計測地点 P2)

(計測地点 P3)

図 6 各計測地点の状況

Fig.6 Scene view at each measuring point.

〈2・4〉計測手順 計測データは各 MWPC ユニットの全グリッドポイント (64×64) のミュオンのカウント数が 1 時間毎にログファイルとして装置内に保存される. $2 \sim 3$ 日に一度行うバッテリー交換の際に、持参したノート PC を装置にWiFi 接続して、蓄積されたログファイルを吸い上げた.

3. 計測結果

〈3·1〉 計測結果 図に第1次計測地点より得られた計測結果の画像(文献(10)の Fig.3 を引用)を示す.水平方向と垂直方向の座標位置(単位は rad)における到達ミュオンの相対強度を示している.色が濃い部分は強度が高く,密度が低い物体が存在することを示す.なお,物体が存在しない背景の空の部分は,最大強度となるが,ここでは除かれて白に設定されている.

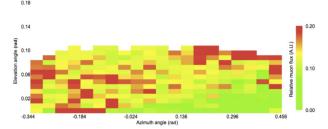


図 7 計測結果 (文献(10)の Fig.3 を引用)

Fig. 7 Result of measurement from view point 1 [Fig3. in Reference (10)].



(a) 第1次計測地点



(b) 第2次計測地点



(c) 第3次計測地点 図8輝度の平滑化を施した計測結果

Fig.8 Result of measurement from each view point.

図7の画像から対象物内部の構造を分析するために, 弛緩法に基づく輝度の平滑化処理を行った結果を図8に示す. これにより, 内部の密度変化の様子の理解が容易となる. 図 中に破線で示した古墳の輪郭線近くの密度が低い部分は,墳丘部が陥没して窪地となっている場所に対応している.

図 8(a)と(b)は後円部を異なる方向から計測しているため,墳丘の窪みの部分が捉えられ,図 8(b)には内部に密度が異なる部分が点在することが分かる.

<3・2> 画像の解釈 最終的には、図8の画像の輝度値に対する HSV 変換を施し、カラーリングを施した画像を対象に、これまでの発掘調査結果との対応付けを行った。図9にその結果を示す。

図9は、高槻市の発掘調査によって得られた内部の推定 図と比較した結果、図中に示す通り、慶長伏見地震による地 盤の滑りの跡や、古墳の基礎である下部盛り土と上部盛り 土の境界が記録されていることが明らかになった.

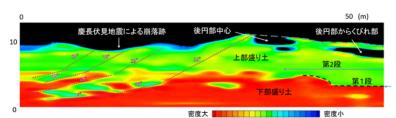


図 9 カラーリングを施し注釈を入れた最終結果 Fig. 9 Final result with coloring and annotation.

5. 考察

計測の結果,古墳内部に新たな空間や埋蔵物は発見されなかったものの,1596年の慶長伏見地震によって崩れた下部盛土,上部盛土などに相当する地滑りの全体像を得ることが出来た.得られた結果を,高槻市教育委員会による発掘調査の結果と比較検証することにより,地質学的,歴史学的な検証(10)が可能となった.

これまでに行われた発掘調査では、図2(右図)に示すように、部分的なボーリングにより、内部の状況を推定するが、ミュオグラフィでは全体像が得られるため、調査前にボーリングの箇所を決める事前検討にも有効である.

今回の計測実験により、新たな石室や埋蔵物の検知を伴う考古学や歴史学分野での新発見は得られなかったが、これまでに例のない、墳長 180m を超える大型の前方後円墳にミュオグラフィ計測を適用したという点において、今回の計測実験の意義は大きいと考えられる.

6. 情報発信

我々の MUOGRAPHY ART プロジェクトは、ミュオグラフィのアウトリーチ活動を基盤としており、本計測実験に関してもその対象としている. 特に、今城塚古墳公園内に大型の計測装置を設置して実験を行ったため、地域や近隣の住民に対する情報発信は不可欠であった.

計測実験中の 2020 年 11 月 19 日に、古墳公園で毎年開

催される市民向けイベント「古墳フェスはにコット」 (14)が 開催され、多数の市民が参加したため、そこで計測装置の公 開を行った. 計測装置には、各 MWPC ユニットでのミュオンの検出状態を示す LED が設置されているため、来訪者はミュオンの透過を実際に見ることが出来た. それと同時に、2020 年 11 月 17 日から 12 月 19 日の間、古墳公園に隣接する高槻市立今城塚古代歴史館のロビーにおいて、ミュオグラフィの計測原理を説明する CG 映像(図 3)、VR コンテンツ、プロジェクションマッピング、サイエンスアート作品などの展示を行った.

「古墳フェスはにコット」には30,000人を超える来場者があり、本イベントでの装置の公開と展示は、ミュオグラフィのアウトリーチ活動の点でも有効なものであった。また、本計測実験は、ハンガリー外交関係開設150周年事業に「関西大学古墳ミュオグラフィプロジェクト」として登録され、ハンガリー領事館を通じて関係者に広報されるとともに、新聞等のメディアにも取り上げらた(14)。

今後は、今回得られた計測データを基にしたコンテンツ 開発を行い、最新の情報技術を用いた展示や情報発信を行っていく予定である.



図 10 計測装置の一般公開 Fig.10 Public exhibition of measuring equipment



図 11 古墳博物館ロビーにおける展示 Fig.11 Exhibition in the lobby of the Kofun Museum.

7. おわりに

本研究では、第3世代のミュオグラフィ計測装置による 古墳計測の有効性に関して、高槻市今城塚古墳の透視実験 を通して検証することが出来た.現在は、本計測を未盗掘・ 未発掘の古墳に適用して新たな知見を得ることを目的に計 測実験を進めている.また、この結果を学術分野あるいは一 般市民に向け情報発信していく予定である.

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の内部調査は、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.

謝辞

本研究は東京大学地震研究所共同利用(2020-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所 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る.

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) K. Morishima, et al.: Discovery of big void in Khufu's Pyramid by observation of conmic-ray muons, Nature Epub 2017, 552 (7685), pp.386-390 (2017).
- (9) 石黒勝己: 古墳の中を宇宙線ミューオンで見る, 奈良県立橿原考古学研究所 橿考通信, Vol.6, pp.5-6 (2019).
- (10) H.K.M. Tanaka1, K. Sumiya, László Oláh: Muography as a new tool to study the historic earthquakes recorded in ancient burial mounds, Geoscientific Instrument Methods and Data System, 9, pp.357–364 (2020).
- (11)今城塚古墳(高槻市ホームページ)
- (参照 2020-9-17).
- (12) 高槻市教育委員会:古墳 一平成 18 年度・第 10 次規模確認調査一,高 槻市教育委員会 文化財課パンフレット (2008).
- (13) 釜井俊孝,寒川旭,守隨治雄:1596年慶長伏見自身による古墳の地すべり、応用地質、Vol.46、No.6、pp.285-298 (2008).
- (14) 古墳ふぇす「はにこっと」ホームページ http://hanicotto.com/ (参照 2020-09-17).
- (15) ハイテクが開く古代研究(中)「宇宙線・AI 謎に迫る -古墳内部を透視/空撮画像の解析も-」日本経済新聞文化面(2020-04・21)

電気学会研究会資料

The Papers of Technical Meeting on "Perception Information", IEE Japan

知覚情報研究会

PI-20-049~055

2020年10月9日

一般社団法人電気学会
The Institute of Electrical Engineers of Japan
東京都千代田区五番町 6-2