

## 高松塚古墳墳丘部の土質および水分分布調査

石崎 武志・犬塚 将英・三村 衛\*

### 1. はじめに

壁画発見より約30年経過した2002年に壁画近傍に黒色のカビの発生が確認され、壁画への影響が懸念されたため、2003年に緊急保存対策委員会、2004年に恒久保存対策検討委員会が立ち上げられた<sup>1)</sup>。カビの生育には温度と湿度が重要な要因となるが、壁画を描いた石室が墳丘土に覆われており、内部環境には周囲の墳丘地山の特性が大きく影響するため、墳丘内部の状態、特に土中水の状態を把握する必要がある。一方、当然のことながら、特別史跡である古墳は、通常の地盤構造物のように調査のための掘削や大規模な改変はできないという強い制約が課せられており、地盤工学的な調査は今まで行われていない。ところが、カビの繁殖や虫類の侵入によって壁画の保存に関して危急の事態となったため、墳丘内部の状態の把握が不可欠となった。このため、奈良文化財研究所が中心となって実施した発掘調査に併せて、ボーリング、サンプリング、サウンディングといった地盤工学的な調査を平行して実施し、高松塚古墳墳丘土の状態を調査し、緊急および恒久保存対策策定の基礎データを収集することとなった。本稿では、高松塚古墳墳丘を取り巻く環境、とくにカビなどの生物被害に影響する石室周辺地盤の水分分布、版築を中心として墳丘を構成する墳丘地盤の現在の状態と物理特性に関して調査を行ったので以下に報告する。

### 2. 墳丘部の含水率測定

石室周囲の地盤の含水率分布を測定するため、石室から2m東側部分と2m西側部分に、体積含水率測定装置（Easy A G, Sentek Sensor Technologies）を埋設した<sup>2)</sup>。含水率の測定は、それぞれの位置で、20, 60, 100, 140, 190cmの深さの地点で行った（図1）。石室の東側の測定点をW1、西側の測定点をW2で示す。

図2、図3に、平成15年7月から平成17年4月までの石室より2m東側と2m西側の体積含水率変化を示す。遮水シートを設置する平成15年9月までは、雨に対応して、墳丘中の体積含水率の値が大きく変化した。平成15年9月末より、含水率の変動が小さく、徐々に低下しているのが見られる。これは、墳丘部に遮水シートを設置した



図1. 高松塚古墳の平面図と地中水分計測位置（W1、W2）とボーリング位置（B-1、B-2、B-3）

\*京都大学防災研究所

ため、遮水シートにより、墳丘部への上からの雨水の浸透が有効に止められているのが分かる。その後、春から秋にかけて体積含水率が若干上昇し、秋から冬にかけて減少する傾向が見られた。この傾向は、墳丘部全体を覆う仮設覆屋を設置した平成16年9月以降も見られることから季節的な変動と考えられ、この変動は、測定部分の温度変化に対応しているため、測定装置の温度の影響による見かけの変化と考えられる。すなわち、後で示すように(図11~13)、挿入型R I水分計(SRM-1d)の熱中性子検層によると、重量含水比に大きな変化は見られていない。これらの結果より、遮水シート設置後は墳丘部の体積含水率の変化は、小さくなったものと考えられる。

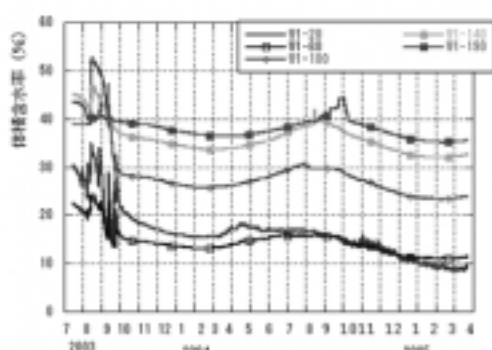


図2. 石室より2m東側の体積含水率変化

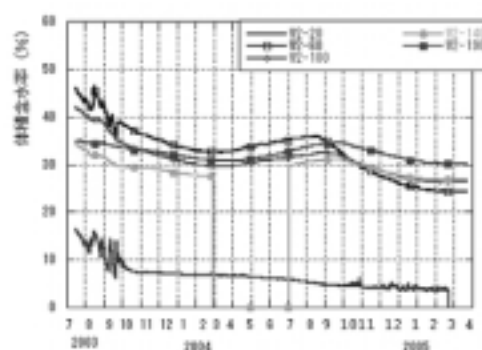


図3. 石室より2m西側の体積含水率変化

### 3. 墳丘部の土質調査

#### 3-1. ボーリングによる土試料採取

ボーリングに際して課せられた、泥水や気泡の不使用や打撃・振動を最小限にするという条件をクリアするため、本調査では「エアーパーリング方式」を採用した。エアーパーリングの主要な仕様は以下のとおりである<sup>2)</sup>。

- (1) 泥水を使用せず、コンプレッサー (3.5m<sup>3</sup>/min) を用いた圧縮空気による削孔を行う。
- (2) ボーリングの原動力として振動の発生しやすいディーゼルエンジンは使用せず、電気モーター (3.7kW200V) を使用する。
- (3) 不攪乱試料採取に使用するサンプラーとして掘削孔径φ105mmのトリプルサンプラーを使用する(インナーチューブにφ75mm透明アクリル管を使用し、サンプラー内は通気を良くするためアウターチューブとの間に適度のクリアランスを確保する)。
- (4) メタルクラウンビットを使用する。

本調査で実施したようなボーリングに対し、送風圧や掘進速度に関するガイドラインは無いため、事前に同地と類似した砂質系地盤において実験を実施し、そのデータに基づいて高松塚古墳墳丘に適用した。平均掘進速度はB-1孔では3.4cm/min、B-2孔では2.0cm/min、B-3孔では2.5cm/minとなっている。また送風管を通しての平均送風圧は、すべての孔で0.15MPaを示した。このような掘進速度および送風圧測定結果から推測すると、斜面下部側の墳丘西側(B-1孔)における掘進速度が北側や東側に比べ速いことから、斜面上部の墳丘部に比べてやや低強度になっている可能性がある。また、掘進速度および送風圧は、ともにばらつきが大きいもの

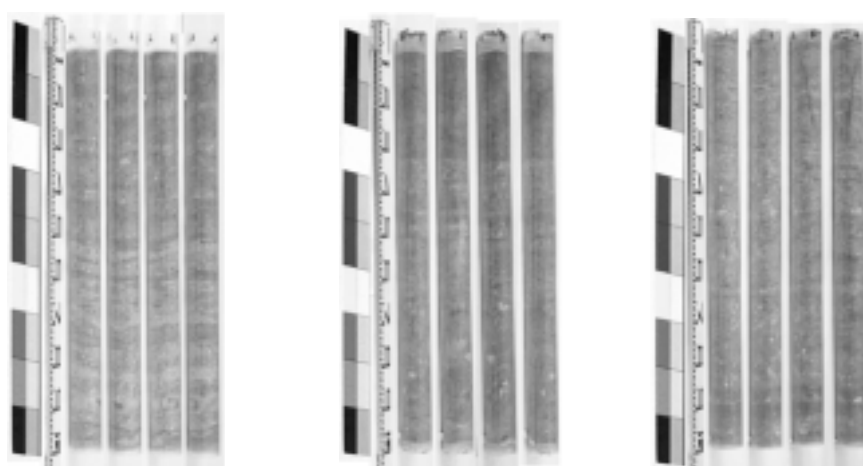
の、深度とともに掘進速度が低下し、逆に送風圧は増加する傾向にあることがわかる。

### 3-2. 採取試料と物理特性

本作業で採用したサンプラーはロータリー式の三重管サンプラーで、一般にサンドサンプラーとして使用されている。ロータリー式の三重管サンプラーは硬質粘土や密な砂に対しても試料が比較的うまく採取できる実績を有しているが、今回のように泥水や気泡を使わず、これに代わる循環流体として圧縮空気を用いた事例は少ない。試料採取は、図1に示すB-1, B-2, B-3の3つの地点で実施した。いずれの地点においても試料の脱落や欠損を被ることなく、100%の回収率であった。

最初のサンプリング(B-3孔の封土部)は破断し難い塩化ビニルのUV管サンプラーを使用し、UV管サンプラーで試料が採取できることを確認した後、以後のすべての試料採取にはφ75mmの透明アクリル管のサンプラーを使用し、採取試料が直ちに目視観察できるようにした。すべての孔で墳丘層の下位に地山(風化花崗岩層)を確認している。地山は北東から南西に傾斜しており、北側のB-2孔では版築層厚が小さく、標高の低い谷側に設置されたB-1孔では墳丘層厚が大きくなっている。各孔から採取した代表的な版築層のコア試料を写真1に示す。3孔ともに、色調の違いが層状に現れており、数cm厚に撒き出した土を突き固めたことによって生じる版築の縞模様が明確に判別できる<sup>3)</sup>。R Iによる密度を測定した結果を図4~6に示す。図4は、B-1地点の版築表面から1.0~1.9mの深さ、図5は、B-2地点の版築表面から1.0~1.9mの深さ、図6は、B-3地点の版築表面から2.0~2.95mの深さの試料である。写真から、色調の違いが層状に現れており、数cm厚に撒きだした土を突き固めたことによって生じる版築の縞模様が明確に判別できる。R I密度測定の結果からも、約5cmごとの密度の変化が深度方向に繰り返し現れていることがわかる。これは、撒きだした土を突き固める際に分級化を起こしたことにより密度差が生じたためと考えられる。一方、版築構築時における突き固めエネルギーの深さ方向への伝搬の不均質の影響も考えられ、今後の検討が必要である

1mごとの採取試料の先端部分の土を用いて土粒子の密度および含水比・粒度試験を実施した。1mごとのB-1孔採取試料の先端部分の土から得られた粒径加積曲線を図7に示す。版築に



(ボーリング孔B-1: G.L. -1.00~1.90m)

(ボーリング孔B-2: G.L. -1.00~1.90m)

(ボーリング孔B-3: G.L. -2.00~2.90m)

写真1. ボーリングにより採取した試料の写真

使用された土は細粒分を多く含み、突き固め、乾燥によって固結度を増して墳丘の安定に寄与しているものと考えられる。いずれの試料も「明瞭な版築」に分類される上部深度から採取されたものに細粒分含有率が多く含まれる傾向があり、 $75\mu\text{m}$ 以下の含有率は20%を超えている。一方深度が増して地山近くなると風化花崗岩系の砂分が卓越する材料になってくることがわかる。

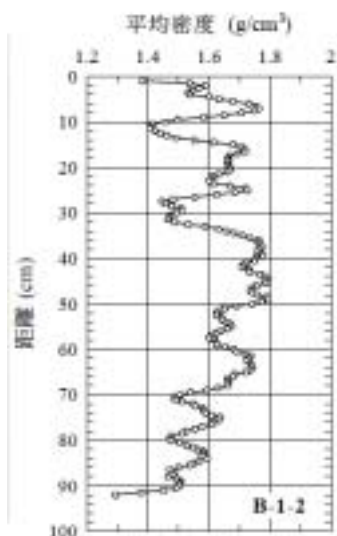


図4. 石室より西側ボーリング孔 (B-1) の版築表面から1.0~1.9mの深さの密度分布

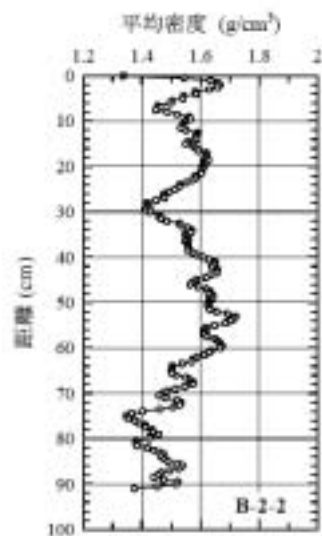


図5. 石室より北側ボーリング孔 (B-2) の版築表面から1.0~1.9mの深さの密度分布

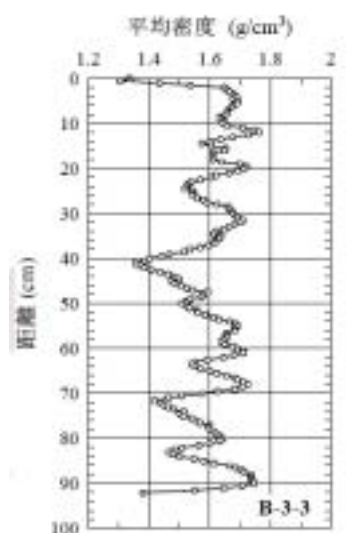


図6. 石室より東側ボーリング孔 (B-3) の版築表面から2.0~2.95mの深さの密度分布

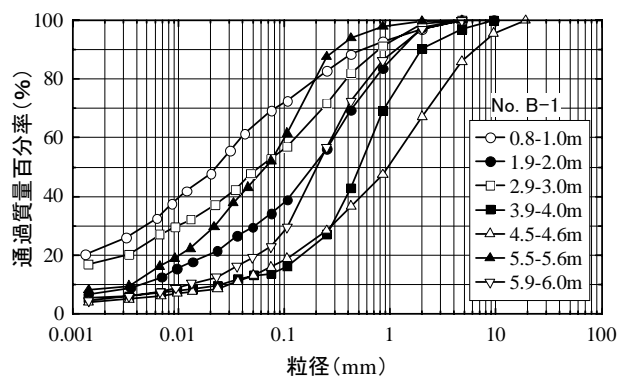


図7. B-3孔採取試料の粒度分布

### 3-3. 採取試料とボーリング孔を用いた含水率分布測定

ボーリングによって得られた一部の試料から墳丘部の体積含水率分布を求めた。石室西側(B-3)の版築表面より1m下部分(標高111m)の版築の、乾燥密度、土粒子密度、間隙率、重量含水比、体積含水率、飽和度はそれぞれ、 $1.253\text{g/cm}^3$ 、 $2.621\text{g/cm}^3$ 、52.2%、21.6%、27.1%、56.7%であった。版築の層は、砂と粘性土の互層となっているため、乾燥密度は場所によって異なるが、ここでは測定された重量含水比と上記試料の乾燥密度を用いて、体積含水率分布を計算した。計算結果を図8~10に示す。石室床面、天井面の標高は、108.3、109.4mであるので、その位置も版築表面の位置と一緒に、図中に示した。

版築土の間隙率は、52.2%であるので、図8~10で示された墳丘部の各点で、土の間隙の約半分は空気では占められる不飽和状態になっていることが分かる。そのため、墳丘部の水分移動の形態としては、水が流れるというより、湿っている部分から、乾燥している部分へ湿り気が移動すると考えた方がよい。

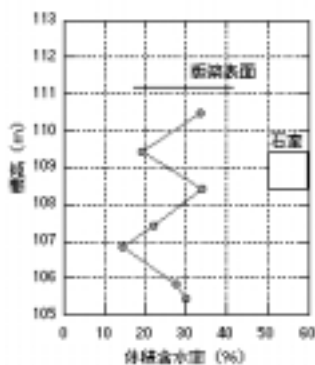


図8. 石室より西側(B-1)地点の体積含水率分布

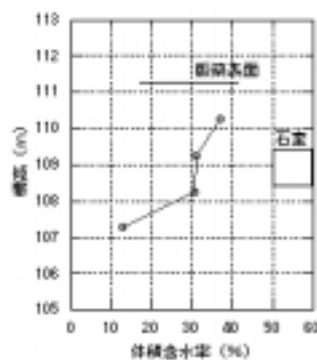


図9. 石室より北側(B-2)地点の体積含水率分布

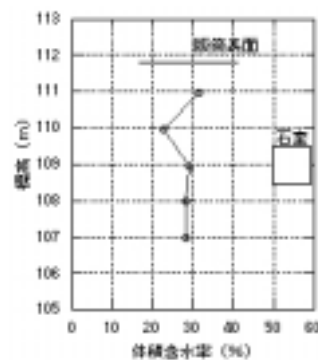


図10. 石室より西側(B-3)地点の体積含水率分布

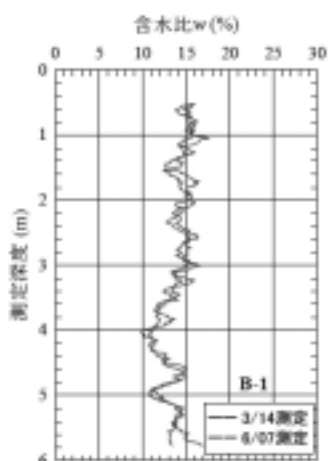


図11. 石室より西側(B-1)地点の重量含水率分布

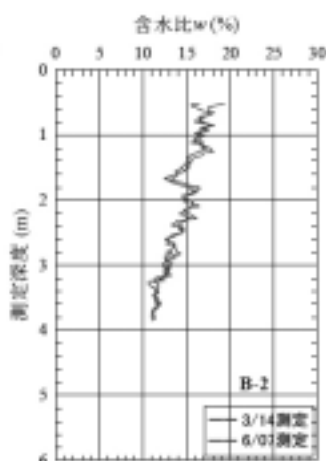


図12. 石室より北側(B-2)地点の重量含水率分布

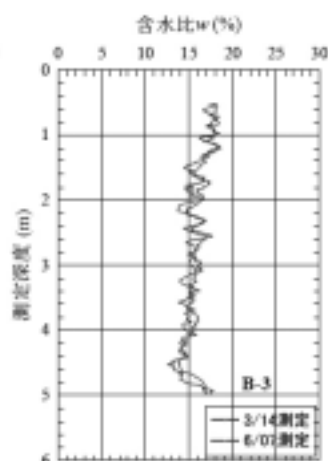


図13. 石室より東側(B-3)地点の重量含水率分布

墳丘土の試料を採取した後、外径114mmのガイドパイプ（塩ビ管VP-100）を利用して、密度及び水分の検層を実施した。検層は、挿入型R I密度計（SRD-1d）の $\gamma$ - $\gamma$ （散乱 $\gamma$ 線）、同BG（ $\gamma$ 線バックグラウンド）検層、挿入型R I水分計（SRM-1d）の熱中性子検層の順に行った。含水率測定結果を図11～13までに示す。図8～10は、体積含水率の値であり、図11～13は、重量含水比を示しているため、値は異なっているが、深さ方向の変化傾向は対応している。

#### 4. まとめ

高松塚古墳の墳丘部の土質や水分分布を、ボーリング調査や地中内の体積含水率の継続測定から、墳丘部分の構造や水分移動に関する特徴を把握することができた。含水率の継続測定とボーリングによる調査から、墳丘部の各点で、土の間隙の約半分は空気で占められる不飽和状態になっていることから、墳丘部の水分移動の形態としては、水が流れるというよりは、湿っている部分から乾燥している部分へ湿り気が移動すると考えた方が良かった。また、R Iによる密度分布の測定から版築構造と対応した密度変化が得られた。これらのデータから地盤工学的な見地から墳丘部の版築構築時の工法についても検討を行っていきたい。現在は、これらの物理的なデータをもとに、墳丘部の冷却を行いカビの発生を抑制すると共に、石室の解体修理の準備を行っている。墳丘部の水分量は、石室内の湿度に影響を与えらるるので、今後とも継続的に観測を行っていく予定である。

#### 参考文献

- 1) 文化庁美術学芸課：高松塚古墳壁画の現状について、国宝高松塚古墳壁画恒久対策検討会資料の理解のために、月刊文化財、平成17年11月号、33-40 (2005)
- 2) 奥田悟、三村衛、石崎武志：エアボーリングによる高松塚古墳墳丘の地盤調査と試料採取、土と基礎、印刷中
- 3) 三村衛、石崎武志：高松塚古墳墳丘の現状とその地盤特性について、地盤工学会電子ジャーナル、印刷中。

キーワード：高松塚古墳(Takamatsuzuka Tumulus)、カビ(fungi)、壁画(mural painting)、保存(conservation) 地盤調査(geotechnical survey)

## Study on Geotechnical Properties and Moisture Regime of Takamatsuzuka Tumulus

Takeshi ISHIZAKI, Masahide INUZUKA and Mamoru MIMURA\*

Because of the high inside humidity of the stone chamber of Takamatsuzuka Tumulus and the high water content of the lime plaster walls, fungi appeared on the walls inside the chamber. In order to develop protective measures against this problem, the moisture regime and thermal regime of the tumulus were studied by installing apparatus to measure water content profiles and temperature profiles of the mound surrounding the stone chamber. Sampling of the mound soil and sounding tests were also carried out to clarify the present condition of the mound. Based on these studies, it was decided to cool the stone chamber to reduce biological activities by installing cooling pipes in the mound surrounding the stone chamber.

---

\*Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University

