

史跡ガランドヤ古墳における水の挙動に関する調査研究

1 はじめに

史跡ガランドヤ古墳群は3基からなる装飾古墳群である。北側を流れる三隈川の河川作用によって形成された平野部に位置しており、南側には急峻な山地が迫っている。このうち1号墳は墳丘の殆どを失っており、内部を保護するために昭和60年以降は露出した石室石材を遮水シートで覆っている。1号墳では装飾が描かれた奥壁をはじめ、石室石材表面は数ミリから数センチの厚さで剥離する箇所が認められ、また一部の箇所では石材表面に白色を呈する析出物も認められた。常時ではないものの、石室石材表面には液状の水が認められ、濡れた状態にある。上記の石材の劣化に対して、水が影響を及ぼしている可能性が示唆されたため、1号墳石室周辺における水の挙動に着目して、環境に関する調査を実施した。

2 土中の水分移動について

一般に地下水面と大気境界の間には、土粒子の間隙中に水と空気が共存しており、この領域を不飽和帯と呼ぶ。不飽和帯の土中に含まれる水（土中水と呼ぶ）は、土の複雑な間隙構造中に毛管力などさまざまな力で保持されており、その存在様式を表現する事は非常に困難である。そこでポテンシャルの概念を導入して、土中水の状態を表現する。そして土中水はこのポテンシャルの勾配にしたがって、ポテンシャルの高いところから低いところへと移動する。土中水のポテンシャルはさまざまなポテンシャルの和で表され、その1つであるマトリックポテンシャルは毛管力や吸着力などによって土粒子表面に保持された水のポテンシャル低下量を表す。したがって通常マトリックポテンシャルは負の値をとり、単位体積あたりのエネルギー ϕ (Pa)、あるいはこれを重力加速度と水の密度で除すことにより圧力水頭(cm H₂O)で表される。

風乾した土が保持する水分は、その土と接する大気の水蒸気と平衡状態にある。ここでも水の移動はポテンシャルの勾配で評価される。平衡状態では土中水の全ポテンシャルと、下記の式(1)で与えられる大気中水蒸気のポテンシャル ϕ_a (Jkg⁻¹)は等しくなる。

$$\phi_a = \frac{RT}{M} \ln \left(\frac{P}{P_o} \right) \quad (1)$$

ここで M は水の分子量 (0.018 kg mol⁻¹)、 P_o は飽和（水蒸気圧）、 P は大気中水蒸気の蒸気圧、すなわち P/P_o は相対湿度を表し、 R は気体定数である。したがって、石室内大気中の水蒸気と、石室周辺土壌、および石材中の水分はそれぞれのポテンシャルがつり合う方向へと移動している。

3 調査方法

1号墳周辺の土層層序と地下水面位置を把握するために、日田市によって1号墳近傍においてボーリング調査が実施されている。調査の結果、石室床面はGL-1.2mであるのに対して、GL-1.6mまでは盛土、その下層には透水性の低い玉石混じり砂層が確認された。さらに下位には砂層、砂礫層が存在し、地下水面はGL-5.2mに確認された。したがって、石室周辺の土は盛土として、以下の調査では盛土について試験をおこなった。

不飽和水分移動特性 土はその種類と構造によって保水性が異なり、その保水性はマトリックポテンシャルと体積含水率の関係を示す水分特性曲線によって表される。ここでは100mL定容試料円筒容器を用いて1号墳石室外から採取した不攪乱試料をもちいて、飽和透水係数の測定をおこなうとともに、マルチステップ法および蒸気圧法により、1号墳周辺盛土の水分特性曲線をもとめ、不飽和水分移動特性の推定をおこなった。

液状水の浸出に関する調査 石室への液状水の浸出には1) 盛土と下位の透水性の低い砂層の境界 (GL-1.6m) で一時的に含水率が増加することによる石室床面からの浸出、2) 側壁石材背後の土が飽和することによる浸出の2つが考えられた。側壁石材中の大きな間隙と、背後の土壌の間隙では水を保持する毛管力に大きな差異がある。したがって、接する土壌中の水が飽和して、マトリックポテンシャルが0となるまでは、土から側壁石材への液状水の移動は生じない。そこで、側壁石材背後のマトリックポテンシャルを測定して、石材背後の土壌が飽和となり、石室へ雨水が浸出することの有無について検討をおこなった。マトリックポテンシャルの測定は側壁内側からの距離が0.75m (φ1) および1.5mで、深さ30cmの箇所とした。側壁からの距離が1.5mの箇所では互い

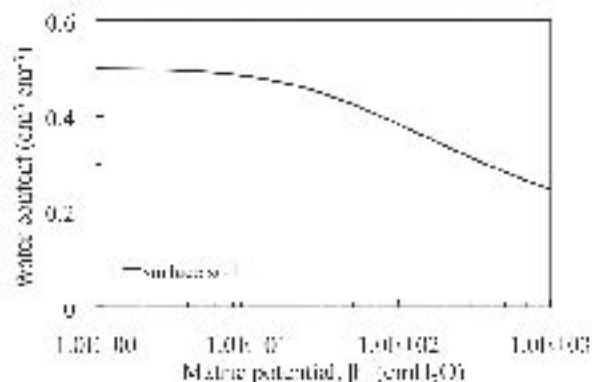


図28 盛土の水分特性曲線

に1 mほど離れた2カ所(φ2、φ3)で測定をおこない、φ2では地表面を覆う遮水シートを除去した。また石室床面および石室外の盛土(遮水シート無し)の土壌含水率を測定して、降雨にともなう床面からの水の浸出について検討をおこなった。

4 調査結果

盛土の水分特性曲線を図28に示す。図28より盛土はやや不明瞭ながら、およそ10–20 cm H₂O付近に空気侵入値を持つことが認められた。すなわち、水分で飽和状態の盛土におよそ10 cm H₂O (0.98kPa)の吸引圧をかけると排水が始まることを意味する。したがって、盛土は比較的保水性に乏しい土であることが示唆された。また飽和透水係数は $2.4 \times 10^{-2} \text{ cm min}^{-1}$ であり、中程度の透水性状であることが示唆された。

図29に降水量と土壌含水率の測定結果を示す。降雨にともなう石室内床面の土壌含水率変化は認められなかった。したがって、GL–1.6mの土層境界で含水率が一時的に増加したとしても、石室床面に水が浸出することはないことが確認された。

側壁石材背後のマトリックポテンシャルを測定した結果を図30に示す。地表面を遮水シートで覆われていないφ2では地表からの蒸発と降雨により、マトリックポテンシャルは大きく変化した。φ1およびφ3では一定値を示し、0を示すことはなかった。したがって、土中水の鉛直方向の移動と比較して、水平方向への移動はわずかで、側壁石材背後の土壌は飽和に達しないことが示唆された。以上の結果から、石室内へ液状水が浸出することは無いものと推察される。

日田市より提供を受けた石室内温湿度の測定結果では、石室内の気温はおよそ10℃から13℃で推移し、相対

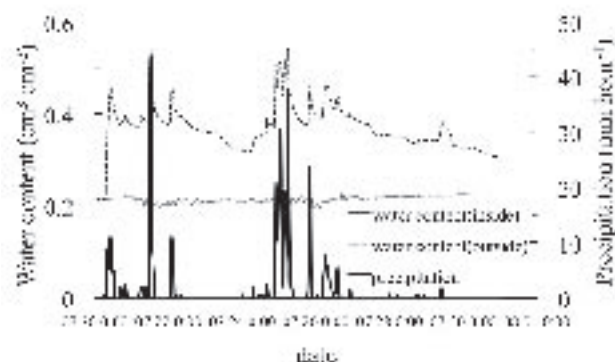


図29 降水量と土壌含水率

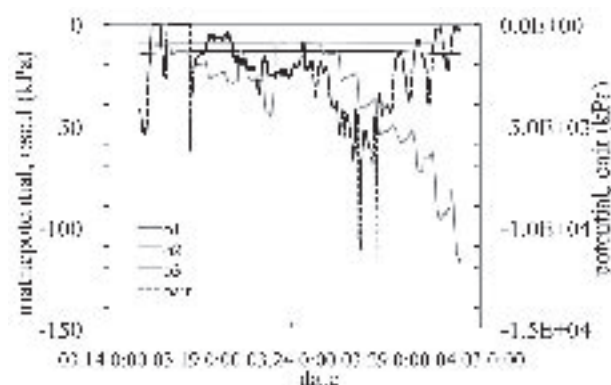


図30 土中水のマトリックポテンシャルと石室内水蒸気のポテンシャル

湿度は概ね98%以上であった。このような非常な高湿度環境下における湿度の測定は困難であり、得られたデータには誤差が含まれていると考えられる。しかし、ここでは土中水のマトリックポテンシャルとの比較のために、水蒸気のポテンシャルを(1)式から算出して図30にあわせて示した。相対湿度が100%では水蒸気のポテンシャルは0 kPaとなるが、わずかに相対湿度が低下するとそのポテンシャルは大きく低下し、土中水のマトリックポテンシャルと比較して2桁ほど低い値を示した。したがって、石室内は非常な高湿度環境ではあるものの、石室内空気と接した土から水は蒸発し続けているため、遮水シートで覆われた石室内の湿度は、常に飽和に近い状態にあるものと推察される。そして明け方など石室石材温度がわずかに低下すると、石材表面において結露が生じるため、石材に濡れが生じるものと推察される。以上の結果から、石室外の土中水に含有される溶質が塩として析出する可能性は低いと考えられる。しかし、濡れによって生じる石材の劣化について、今後検討する必要があると考える。

(脇谷草一郎・高妻洋成)