

覆土を用いた古墳石室内の環境保全 — 墳丘が石室の室温変化と結露に与える影響 —

澤田 茉伊¹・三村 衛²

¹正会員 京都大学大学院助教 工学研究科都市社会工学専攻
(〒615-8540 京都市西京区京都大学桂C1-2)
E-mail: sawada.mai.6c@kyoto-u.ac.jp

²フェロー会員 京都大学大学院教授 工学研究科都市社会工学専攻
(〒615-8540 京都市西京区京都大学桂C1-2)
E-mail: mimura.mamoru.3r@kyoto-u.ac.jp

内部の石室に装飾が施された古墳では、石室の室温変化やそれに伴う水分移動に由来した石材や装飾の劣化が問題となっている。こうした劣化を抑制する方法として、覆土を施して石室を断熱する方法が有効と考えられるが、覆土の仕様を決定する上で、周囲の土が石室環境にどのように影響するか明らかにする必要がある。そこで、本稿では、墳丘の層厚、乾燥密度、飽和度が石室環境に与える影響を調べた。一次元熱伝導方程式を解き、石室の温度と結露を評価したところ、石室環境は層厚に敏感である一方、乾燥密度や飽和度には実質的にあまり影響を受けないことがわかった。したがって、石室の温度環境が重視される古墳に覆土する場合、最も重要なパラメータは層厚であり、他のパラメータについては、力学的安定性や雨水浸透の観点から決定するのが適当である。

Key Words : thermal insulation, thermal conductivity, dew condensation, equation of heat conduction, tumulus

1. はじめに

石材を用いて造った埋葬空間（石室）を締め固めた土が覆う古墳は、わが国最古の地盤構造物である。三世紀中頃から七世紀にかけて築造され、全国に十万基近く現存するとも言われているが、降雨や地震などの自然作用や、盗掘、削平といった人為的な破壊により、著しく損傷しているものが多い。損傷を抑制しながら次世代に保存することは我々の使命であり、加えて適切に公開し、国民がその価値を共有できるよう活用することが求められている。これらを実現するためには、地盤の強度・変形、浸透、熱伝導といった工学的観点から、古墳の損傷メカニズムを解明し、これに基づいた修復・保存方法を検討する必要があると考えられる。しかし、古墳は従来、地盤構造物よりはむしろ史跡として管理されてきた経緯から、工学的な視点を欠いた不適切な修復が施され、損傷の再発や悪化を招いている場合が見受けられる。

こうした事態を改善すべく、著者らは、地盤工学に軸足を置いて、古墳の修復・保存技術の検討に取り組んできた^(例えは①)~④)。これまでの調査によると古墳の損傷形態は、

I. 墳丘の損失、II. 墳丘内部への水分移動、III. 石室石材や装飾の劣化、に分類することができ、修復・保存においては、これらに対応した三つの課題が重要と考える。Iは、降雨や地震に伴う崩壊や人為的な削剥によるもので、失われた墳丘を修復する際には、墳丘の力学的安定性を確保することが基本となる。IIIは、雨水や、立地条件によっては地下水が墳丘内部に浸入して、墳丘の力学的安定性の低下や、石室の漏水や水分環境の変化をもたらす場合である。墳丘が適度な含水状態を維持するために水分供給が必要であるが、過度な水分は抑制しなければならない。IIIは、石材や壁画にかび・藻類の繁茂や塩類の析出が生じたり、乾湿繰り返しにより破損したりする場合である。汚損や破損の要因の多くは、石室の温度変化や水分環境と密接に関係しているため、これらの損傷を根本的に解決するには、石室の温湿度環境を制御する技術が必要となる。さらに、以上の三種類の損傷は互いに独立ではないため、複合的な損傷が生じた場合の対処も求められる。例えば、大分県日田市のガランドヤー号墳^{⑤)}では、墳丘が完全に失われ（IIに分類）、露出した石室に雨水が浸入していた（IIIに分類）。墳丘を失ったために

外気の影響を受けやすくなった石室では、結露による湿潤と乾燥の繰返しにより、彩色壁画の風化が進んだ（Ⅲに分類）。このような複合的な損傷が生じる場合には三つの課題をバランスよく達成する最適解が必要とされる。

本稿では、三種類の損傷のうち、特にⅢに着目する。

表-1は、Ⅲをさらに4つに分類して、要因と抑制原理をまとめたものである⁹⁾。損傷は物理、化学、生物的なものがあり、多様であるが、いずれも石室内の室温変化と水分移動・状態変化が一因となっている。石材の亀裂、浮き、剥落といった破損は、石材の含水状態や温度変化による体積変化に伴って発生する応力に起因する。また、間隙中の水分の凍結・融解、土や石材中の塩類が溶解した間隙水が蒸発する際の塩類析出によって間隙に応力が作用することによっても生じる。かび・藻類の繁茂も石室の温度や水分環境と密接に関係している。奈良県の高松塚古墳は、女子群像などの国宝に指定される彩色壁画で知られるが、1972年の発見以降、作業員の入室や温暖化により室温が上昇し⁷⁾、また室内に侵入した虫類の死骸が栄養分として供給された結果、壁画にかびが大量発生した⁸⁾。周囲を土に覆われた石室は高湿で、かびや藻類が生育しやすい環境にある。また、わずかな室温変化でも結露が発生しやすく、壁画に付着した結露水が流下し、顔料が流出することも問題となっている。

表-1の抑制原理に共通する項目から、これらの損傷に対しては、外気の侵入と室内の温度変化を抑制して、結露・乾燥を防ぐことが有効であることがわかる。すなわち、石室は密閉、断熱され、安定した温度、水分環境が保たれていなければならない。このうち、石室の断熱に

ついては、主に図-1にイメージ図を示す二通りの方法が考えられる。方法1は、古墳全体を断熱性の高い構造物で覆う方法である。覆屋内では必要に応じて空調を適用することも可能であり、また屋内保存をすることで、見学施設としての機能を持たせることもできる。ただし、構造物で雨水が完全に遮断されるため、長期間保存するうちに墳丘が乾燥し、亀裂や崩壊が生じる危険性がある。さらに、構造物の経年的な劣化に対する維持管理も必要である。方法2は、墳丘に覆土を施す方法である。本来、石室は十分な厚みを持つ墳丘で断熱されていたが、崩壊や削平による墳丘の損失が石室の温湿度環境の変化の一因になっていると考えられる。したがって、覆土を施すことで本来の環境に近づけることができるはずである。この方法は、墳丘や石室が覆土の荷重に耐えること、また石室内の見学が不可能になるのを許容することが条件となるが、断熱性に優れた地盤材料を主な使用材料とするため、特別な維持管理を必要としない利点がある。

以上の二つの方法は、古墳の保存条件によって使い分けられるが、ここでは、後者について検討する。この方法の技術的な課題は、石室が適切な温湿度環境となるよう、覆土の仕様を決定する点にある。石室の環境評価に関する先行研究においては、例えば、小椋ら⁹⁾やLi et al.¹⁰⁾は、水分と熱の移動を考慮した数値解析により、過去から現在までの石室内の温湿度環境を詳細に再現・評価することにより、高松塚古墳壁画の劣化メカニズムの解明に取り組んでいる。しかし、墳丘の土質、粒度、密度、含水比、形状等が石室環境にどのように寄与するかは、これまで系統的に調べられていない。そこで、本稿では、一次元熱伝導方程式を用いて、墳丘の熱物性値に影響を及ぼすと考えられるもののうち、層厚、飽和度、乾燥密度が石室内の室温変化と結露量に与える影響を評価し、覆土の仕様検討に役立てることを目的とする。

表-1 装飾の損傷の種類とその要因、抑制原理⁹⁾

損傷	要因	抑制原理
亀裂、浮き、剥離	湿潤膨張・乾燥収縮、 塩類析出、 熱膨張・収縮、 凍結・融解	結露・乾燥抑制、 温度変動抑制、 零下を避ける、 外気の侵入抑制
塩類析出による汚損	塩類、水分、 湿潤・乾燥	結露・乾燥抑制、 温度変動抑制、 外気の侵入抑制
カビ等の微生物による汚損	適温、高湿、水分、 栄養（虫等の死骸、 有機物の汚れ等）、 外部からの持ち込み	結露・乾燥抑制、 外気の侵入抑制、 栄養を持ち込まない、 カビの適温を避ける
顔料の流出	水分の流下・落下	結露・乾燥抑制、 外気の侵入抑制

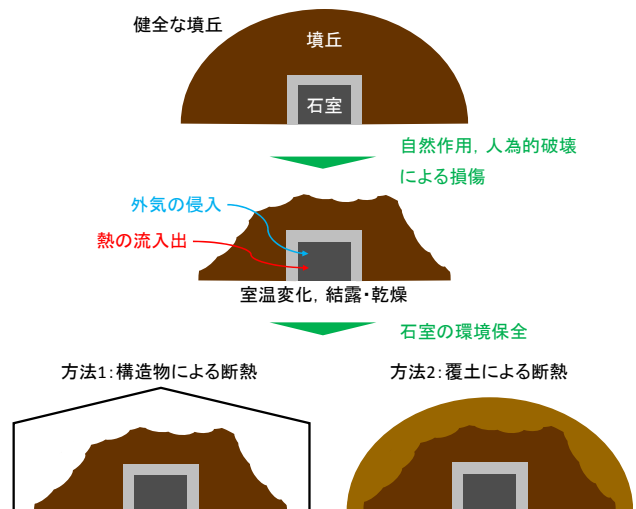


図-1 石室の環境保全のための二通りの断熱方法

2. 墳丘の熱物性値の評価

(1) シリンダー法による土の熱物性値の評価

土中の熱伝導が熱伝導方程式(式(1))と、フーリエの法則(式(2))に従うとき、これらを適切な境界条件のもとで解き、墳丘内の熱伝導を評価するためには、まず土の熱物性値の評価が必要となる。ここに、 θ は温度、 q は熱流、 λ は熱伝導率、 a は熱拡散係数を表す。また、 λ と a の間には式(3)が成り立ち、 C は体積熱容量を表す。 λ , a ,

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = a \frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} \quad (1)$$

$$q = -\lambda \frac{\partial \theta}{\partial x} \quad (2)$$

$$a = \lambda / C \quad (3)$$

$$C = c_s \rho_d + c_w \rho_w \theta_w \quad (4)$$

C はそれぞれ、熱の伝わりやすさ、単位体積の物体を単位温度上げるのに必要な熱量、温度変化のしやすさを表す量である。このうち体積熱容量は、土の乾燥密度 ρ_d や体積含水率 θ_w がわかれば、土粒子と水の比熱の慣用値 c_s , c_w を用いて式(4)で評価できる¹¹⁾。なお、空気は体積熱容量への寄与は、土粒子や水に比べて無視しうるほど小さいため、通常考慮されない。

体積熱容量を式(4)から求めると、熱伝導率か熱拡散係数のどちらかを測定すれば、残りの一つも求められるが、一般に、熱伝導率をプローブ法と呼ばれる方法で測定することが多い。これは、線熱源と温度センサを内蔵した円筒状のプローブを試料に差し込んで、瞬間的もしくは周期的に加熱し、無限長の線熱源の熱伝導方程式の解析解を利用して、温度の測定データから熱伝導率を評価する方法である。これを応用して、測定精度向上のため、熱伝導率が既知の基準試料と比較測定する双子型のプローブ法¹²⁾や、パルス熱を与えることで、熱拡散係数や体積熱容量も同時に測定できるデュアルプローブ法¹³⁾などが開発されている。しかし、これらはいずれも熱源から供給する熱量の制御が必要であるため、測定装置の製作

が難しく、またこれらの測定原理に基づいた市販の熱伝導率センサ¹⁴⁾は一般に高価である。

そこで、本研究ではシリンダー法¹⁵⁾、¹⁶⁾と呼ばれる比較的簡易な方法を用いて、熱拡散係数を測定することにした。シリンダー法は、アルミニウム製の円筒形容器に詰めた試料を恒温水槽に入れ、無限長の円筒の熱伝導方程式の解析解を利用して、試料中心部の温度の測定データから熱拡散係数を評価する方法である。図-2に試験装置の概要を示す。試料容器(外径55mm, 内径51mm, 肉厚2mm, 長さ331mm)は、両端面からの熱伝導が無視できる程度の長さが必要であるが、ここでは既往の研究¹⁶⁾に倣った。容器の片端は開放されており、ゴム栓で密閉することができる。供試体(直径51mm, 長さ300mm)は、まず所定の密度で長さ150mmになるよう容器内に締め固め、熱電対を試料中心に設置した後、残りの半分を同様に作製し、栓をする。そして、ヒーターを用いて常時約30°Cになるよう調整した恒温水槽に供試体を水浸させ、中心部の温度を測定間隔10秒で30分程度測定する。

無限長の円筒形の物体の熱伝導方程式は式(5)で表される¹⁷⁾。ここに、 a , θ , r , t はそれぞれ熱拡散係数、温度、円筒中心からの距離、時刻を表す。これを供試体周囲の温度(水温) θ_0 が一定の境界条件下で解き、測定データが解を説明するように熱拡散係数を同定する。これの具体的な方法として、登尾ら¹⁶⁾は、式(5)の解を供試体の初期温度に対する相対温度と熱拡散係数の関係として整理したものを用いて、直線回帰によって熱拡散係数を同定する方法を提案し、プローブ法を用いた測定値と比較して遜色ない結果が得られることを確認している。

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = a \left(\frac{\partial^2 \theta}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \theta}{\partial r} \right) \quad (5)$$

(2) 牽牛子塚古墳墳丘の試験結果

シリンダー法を用いて、牽牛子塚(けんごしづか)古墳墳丘の熱拡散係数を測定した。牽牛子塚古墳は、奈良県高市郡明日香村に位置する、7世紀後半に築造された対

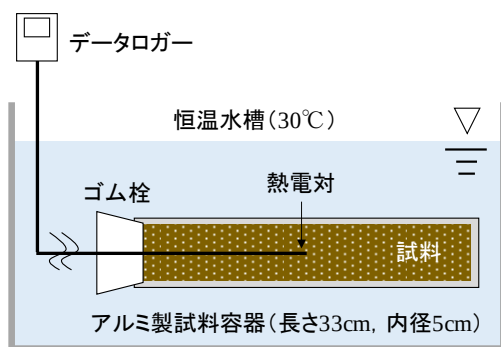


図-2 熱拡散係数を測定するシリンダー法の試験装置

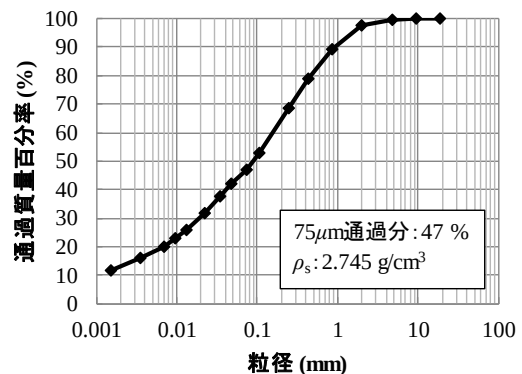


図-3 牽牛子塚古墳墳丘の粒径加積曲線

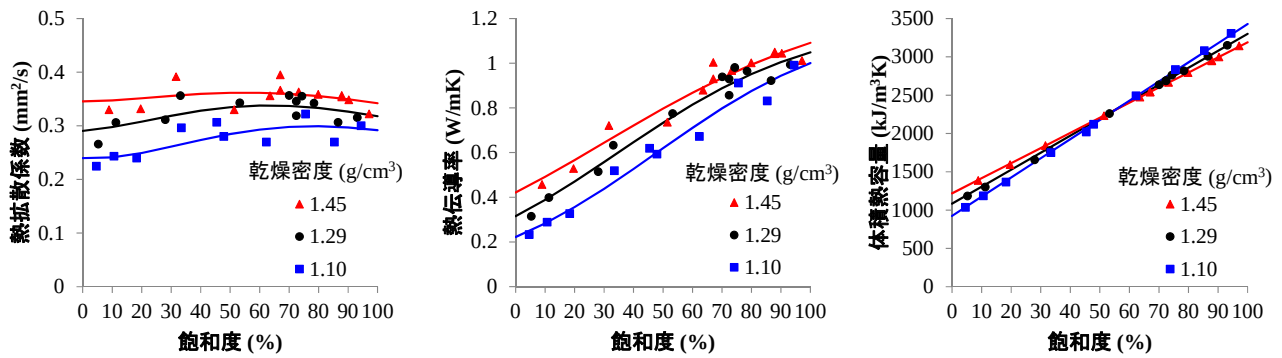


図-4 室内試験で評価した填丘の熱物性値 (a)熱拡散係数, (b)熱伝導率, (c)体積熱容量)

表-2 試料の諸量と同定した実験式のパラメータ

含水比 (%)	飽和度 (%)	乾燥 密度 (g/cm³)	実験式		
			$\lambda_{\max}$	C_1	C_2
29.00	70.58	1.29	1.20	2.81	0.0297
29.00	53.23	1.10	1.20	4.42	0.0310
29.00	89.13	1.45	1.30	2.09	0.0239

角22m, 高さ4.5mの八角墳である¹⁸⁾. 図-3に墳丘の粒径加積曲線を示すが, この地域一帯に広がる花崗岩や花崗閃緑岩を起源とするマサ土が使われている. 細粒分を多く含み ($F_c=47\%$), 工学的分類では細粒分質砂 (SF) に分類される.

試験は, 自然含水状態において, 表-2に示す含水比, 飽和度を持つ供試体を用いた. 乾燥密度は, 1.10, 1.29, 1.45g/cm³の三種類とし, 各乾燥密度の場合に, 飽和度を変えて試験を行った. 図-4に示す各プロットは, 乾燥密度, 飽和度の異なる各供試体を用いて得られた試験結果を表す. ここでは, 上述の手順で求められる熱拡散係数に加えて, 熱伝導率と体積熱容量も評価した. 体積熱容量は, 各供試体の乾燥密度 ρ_d と体積含水率 θ_w の実測値と, 土粒子と水の比熱の慣用値 c_s , c_w を用いて, 式(4)から計算した. 土粒子の比熱 c_s は, 泥炭土などの特殊な土を除いて, 0.84kJ/kgKが慣用値として用いられており, ここでもこれを採用した¹¹⁾. また, 水の比熱 c_w は4.18kJ/kgKとした¹¹⁾. 熱伝導率は, このようにして求めた体積熱容量と, 熱拡散係数の測定値, 式(3)の関係をj用いて計算した. 各図の実線は, 実験で得られたプロットを補完したものである. 松本・大久保¹⁹⁾は, 式(6)で表す熱伝導率 λ と飽和度 S_r の関係を表す実験式を提案しており, ここではこれを利用した. 式中の $\lambda_{\max}$ は熱伝導率の最大値, C_1 と C_2 は定数で, これらのパラメータは試験結果との誤差が最小となるよう同定し, 表-2に示す値に決定した. 熱拡散係数と飽和度の関係に対する補完曲線については, 式(3)に従い, 式(6)を体積熱容量と飽和度の関係に対する補完曲

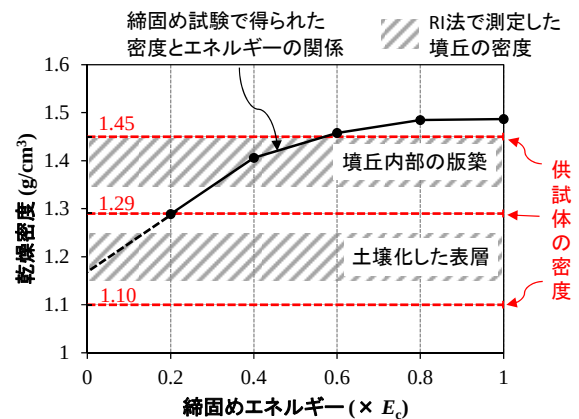


図-5 墳丘の乾燥密度と締固めエネルギーレベルの評価

線で除すことにより得られる. なお, 体積熱容量と飽和度の関係に対する補完曲線については, 三種類の各乾燥密度における式(4)を, 比熱に慣用値を適用して描いたものとした.

$$\lambda = \frac{\lambda_{\max}}{1 + C_1 \exp(-C_2 S_r)} \quad (6)$$

なお, 三種類の乾燥密度のうち, 最も低い1.10g/cm³は, 全く締め固めずに容器に試料を投入した場合に相当し, また最も高い1.45g/cm³は, 手作業で締め固められる限界値である. そして, 1.29g/cm³は, 牽牛子塚古墳墳丘の乾燥密度の代表値である. 図-5は自然含水比 ($w_n=29\%$) における墳丘の締固めエネルギーと乾燥密度の関係を表したものである. ここに $E_c(=550\text{kJ/m}^3)$ は標準プロクター (A法に相当) を表し, 締固め回数を変えて締固め試験を行うことにより図-5の関係が得られる. ただし, $0.2 \times E_c$ 以下の領域については, 締固め回数が極端に少なく, 均等に締め固められないため, 試験を行わず, 外挿している. また, 図中には墳丘の表層および掘削面で, 表面型RI密度水分計を用いて得られた, 乾燥密度の範囲を併記する. 牽牛子塚古墳は, 層厚が薄く密な締固め層を重ねた版築 (はんちく) と呼ばれる方法で造られているが, 表層の50~100cmの領域は土壌化し, 表層部は1.2g/cm³前後, 以

深は 1.4g/cm^3 前後と明確な違いが見られる²⁾。そこで、填丘の表層部と版築を維持する内部の中間をとり、 1.29g/cm^3 を填丘の乾燥密度の代表値とする。これは、締め固めエネルギーでは、 $0.2 \times E_d$ に相当する密度であり、同様の方法で、エネルギーを指標に評価した填丘の密度と同等である¹⁾。

(3) 熱物性値の飽和度、乾燥密度に対する依存性

土は比熱と熱伝導率が互いに異なる土粒子、水、空気の混合物と捉え、図-4の試験結果に見られる熱物性値の飽和度、乾燥密度に対する依存性を考察する。

まず、飽和度に対する依存性について考える。乾燥密度が異なる三種類のいずれの供試体でも、飽和度に対して熱伝導率と体積熱容量は単調に増加している。熱伝導率の増加は、飽和度の上昇に伴って、間隙中の空気がより熱伝導率の大きい水に置換されることによるものである。土粒子（石英）、水、空気の熱伝導率はそれぞれ、 $8.5, 0.59, 0.026\text{W/mK}$ である²⁰⁾。また、体積熱容量の増加は、空気と水の比熱の差によるものである。このとき、熱拡散係数は低飽和度領域で増加が見られるが、以降はほぼ横ばいである。これは、熱伝導率と体積熱容量の量の比である熱拡散係数は、両者の飽和度上昇に対する増加の程度によって増減するが、本試験結果では、両者が同等であるためである。

次に、乾燥密度に対する依存性について考える。飽和度によらず、乾燥密度が高いほど熱伝導率が高い傾向を示している。これは、土粒子の熱伝導率は、水や空気よりも高いためである。なお、体積熱容量は乾燥密度が高いほど、低飽和度領域では大きく、高飽和度領域では小

さくなり、飽和度領域によって大小関係が変化しているが、これは土粒子の比熱が水よりも小さく、空気よりも大きいためである。

3. 填丘の熱伝導と石室の室温評価

(1) 応答係数法による壁体の一次元熱伝導の評価

外気温の変化に伴う填丘・石材中の熱伝導と石室の室温変化を、一次元熱伝導方程式を用いて評価する。ここでは、外気―填丘―石材間の熱伝導を、空気、土、岩石からなる多層壁内の熱伝導と見なし、壁体の一次元の非定常熱伝導の評価法のひとつである応答係数法²¹⁾を適用する。

図-6に応答係数法の概要を示す。いま、非定常の温度変化がある外気に接する壁を介して、室に貫流する熱流を評価する場合を考える。応答係数法では、外気温を三角波で近似し、予め評価しておいた単位三角波の温度変化を受けた場合に室に貫流する熱流（貫流応答係数）をもとに、重ね合わせの原理を用いて非定常の温度変化を受けたときの貫流熱を計算する。このとき、時刻 t における熱流 $q(t)$ は、式(7)で表される。ここに、 $f(t-j\Delta t)$ は時刻 t から $j\Delta t$ 前に発生した三角波の高さ、 $\varphi_T(j\Delta t)$ は発生後 $j\Delta t$ 経過した単位三角波により生じる熱流を表す。すなわち、時刻 t における熱流は、過去に発生した三角波によって生じた熱流すべてを重ね合わせたものとして評価する。なお、 $\varphi_T(j\Delta t)$ は、応答係数と呼ばれ、具体的には式(8)で表される。係数 A_0, A_k, α_k は、外気側が 1°C 、室側が 0°C の一定温度に保たれた壁の室への貫流熱 $\varphi_U(t)$ を式(9)で表したときの係数に相当する。

$$q(t) = \sum_{j=0}^{\infty} f(t-j\Delta t) \varphi_T(j\Delta t) \quad (7)$$

$$\begin{cases} \varphi_T(j\Delta t) = A_0 + \sum_k \frac{A_k}{\alpha_k \Delta t} (1 - e^{-\alpha_k \Delta t}) & (j=0) \\ \varphi_T(j\Delta t) = -\sum_k \frac{A_k}{\alpha_k \Delta t} (1 - e^{-\alpha_k \Delta t})^2 e^{-\alpha_k (j-1)\Delta t} & (j \geq 1) \end{cases} \quad (8)$$

$$\varphi_U(t) = A_0 + A_1 e^{-\alpha_1 t} + A_2 e^{-\alpha_2 t} + \dots \quad (9)$$

以上で、非定常の外気温変化があるときの室への貫流熱の評価方法を述べたが、同様の手順で、室温変化があるときに壁に吸収される熱流も計算できる。以上、一枚の壁を伝わる熱について説明したが、室は6枚の壁に囲まれた空間を考えると、外気と室の間の熱移動を三次元的に評価できる。外気温が既知で、室温が未知のとき、壁を通して室に流入する熱量と流出する熱量が常に平衡状態にあるとすると、室温を求めることができる。ここでは、室内に置かれた物体の吸熱や、換気による熱の流出がないものとし、室からの流出熱として壁の吸熱を考

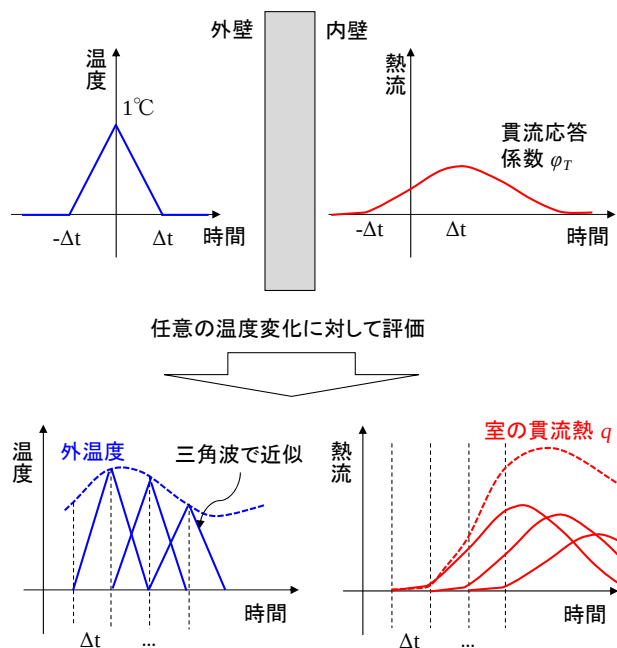


図-6 応答係数法の概要²⁰⁾

える。また、室内の空気の吸熱は壁に比べると微小であるため、無視する。室の基準温度を θ_d として、外気温との差によって時刻 t に流入する熱量 $Q_T(t)$ は式(10)で、またこれによって θ_d から $\Delta\theta$ の室温変化が生じた場合の壁の吸熱 $Q_A(t)$ は式(11)で表される。ここに、 $\varphi_A(j\Delta t)$ は吸熱応答係数（室で単位三角波の温度変化があるときの壁が吸熱する熱流）である。室（構成する壁の総面積 A_w ）の熱の流入出が釣り合うとすると（式(12)）、未知数である室温の変化量 $\Delta\theta$ を式(13)で求めることができ、 $\theta_d + \Delta\theta$ が室温となる。なお、熱の移動は、温度の差分を駆動力としているため、室の基準温度 θ_d は解には影響しない。

$$Q_T(t) = \sum_{j=0}^{\infty} (f(t-j\Delta t) - \theta_d) \varphi_T(j\Delta t) \quad (10)$$

$$Q_A(t) = \sum_{j=0}^{\infty} \Delta\theta(t-j\Delta t) \varphi_A(j\Delta t) \quad (11)$$

$$A_w Q_T(t) = A_w \Delta\theta(t) \varphi_{A0}(j\Delta t) + A_w \sum_{j=1}^{\infty} \Delta\theta(t-j\Delta t) \varphi_A(j\Delta t) \quad (12)$$

$$\Delta\theta(t) = \frac{Q_T(t) - \sum_{j=1}^{\infty} \Delta\theta(t-j\Delta t) \varphi_A(j\Delta t)}{\varphi_{A0}(j\Delta t)} \quad (13)$$

(2) 石室の室温評価法の適用性

a) 検討対象

前節で説明した評価法の適用性を確認するため、高松塚古墳を対象に、石室室温の測定値と計算値を比較する。

高松塚古墳は、7世紀末から8世紀初めに造られた直径20mの円墳で、牽牛子塚古墳と同じ村内に位置する。1972年の発掘当初から剥離等の損傷が見られた壁画を原位置で修復・保存するため、空調設備を導入して石室の温湿度を管理してきた⁹⁾。しかし、かびによる汚損が悪化したため、2007年に石室を解体して壁画は墳丘から取り出されている³⁾。石室の温湿度は、発掘以降、モニタリングが継続されていたが、ここでは空調が導入される以前の1973年の測定結果²²⁾を解析対象とする。1973

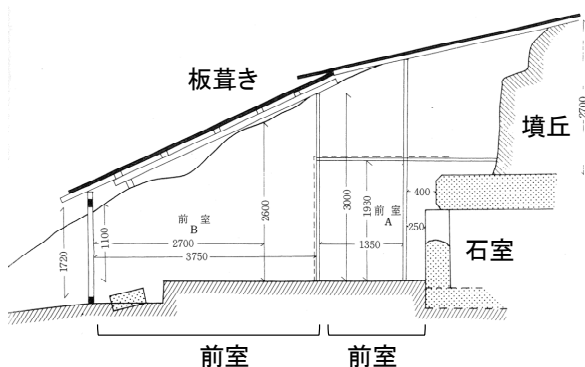


図-7 発掘当初の墳丘南側の断面²²⁾

年時点の墳丘南側の断面図を図-7に示す。当時は断続的に発掘調査が行われており、墳丘南側は石室入口まで幅1.5mのトレンチが掘られているが、外気の侵入を抑制するため、トレンチを覆うように合成樹脂製の板葺きをして2つの前室を設け、さらに石室入口は粘土で塞いでいた。

b) 解析条件

墳丘および石室を図-8のようにモデル化し、石室室温を評価する。板状の凝灰岩を組み合わせて造られた石室の寸法は、幅1.04m、奥行2.66m、高さ1.13mで、石材の厚さは天井で0.6m、側壁および床では0.5mである²²⁾。石室底面は地表面に一致し、外気と接する地上部の5面で墳丘を介した熱の流入出がある。墳丘表面と外気の間、また石材と室内の空気の間では、対流（空気の循環による熱移動）と放射（周囲の物体からの電磁波による熱移動）によって熱が伝達される。これを表現するため、本解析では、空気と接する面に熱伝達層を設ける。熱伝達層は、熱容量がゼロで、空気の温度と石材表面の温度の差に比例した量の熱を伝達する。その比例定数は、外気側（風速3m/s）で23W/m²K、室内側で9W/m²Kが一般的な実用値として用いられており²⁴⁾、本検討もこれに倣う。墳丘表面の熱伝達層の温度は、外気温とするが、高松塚古墳周辺では外気温が観測されていないため、奈良気象台の1964～1973年までの10年間の観測値²¹⁾を正弦波で近似（14.3±11.8℃）し、これが周期的に繰り返されているものとする（図-9）。

一方、地下10mに位置するモデル底面は、地温の観測値がないため、ここでは年平均気温と等しいものとする。一般に地下10～16m以深は、年間を通じて地温変化がない不易層と呼ばれ、概ね年平均気温と一致することが多

表-3 高松塚古墳墳丘と石材の熱物性値²⁴⁾

	S_r (%)	λ (W/mK)	C (kJ/m ³ K)	a (mm ² /s)
墳丘	51	0.64	2350	0.27
石材	100	2.56	2900	0.88

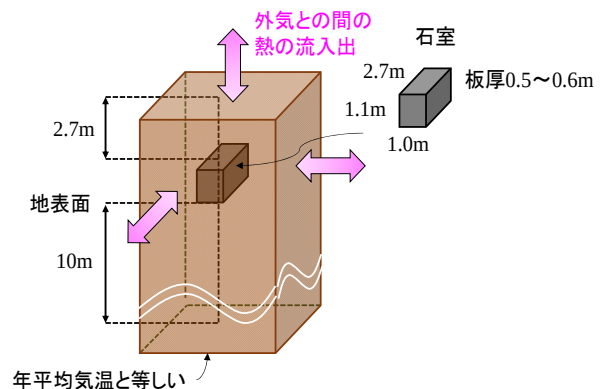


図-8 墳丘に覆われた石室の解析モデル

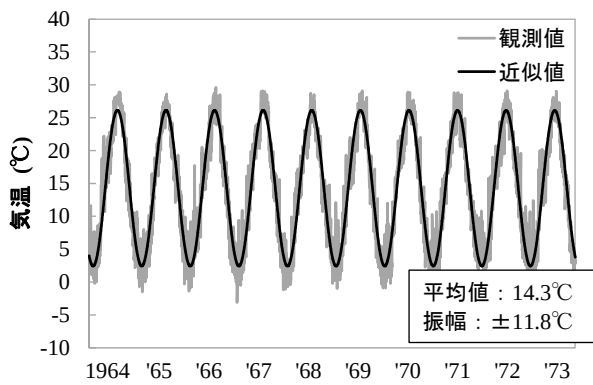


図-9 奈良市の気温 (1964年-1973年)

い²⁴⁾ ²⁵⁾。これは、地盤の熱伝達に関わる外気温以外の要因である、日射、夜間放射、蒸発潜熱による熱移動の年収支が概ね相殺するためと考えられる。なお、解析の初期は、墳丘、石室、地盤の温度をすべて基準温度(=14.3°C)とするが、周期定常状態の解が得られるまで、十分長い助走計算をするため、初期条件は解に影響しない。

墳丘と石材の熱物性値は、試料が入手できないため、ここでは石崎ら²⁶⁾がプローブ法を用いて測定した表-3の値を適用する。高松塚古墳と牽牛子塚古墳は、同地域で産出するマサ土が用いられており、両者の粒度分布が類似している。熱物性値を比較すると、表-3の値は、概ね図-4に示す飽和度と熱物性値の関係上にプロットされ、熱物性値についても同等と考えられる。また、計算結果には直接関係しないが、土に覆われた石室の湿度はほぼ100%で²⁹⁾、室内のわずかな温度むらで容易に結露することから、石材の間隙が飽和状態にあると考え、石材の飽和度は100%と仮定した。

墳丘の層厚は、上面はほぼ均等で2.7mであるが、古墳の形状がドーム状であるため、側面の層厚は底部ほど厚く、上部に向かって薄くなる。発掘調査報告²²⁾によると、墳丘側面の土の厚さは2.5~5mである。また、石室入口を塞いでいた覆土についても、上部が0.2~0.3m、底部は1mであり、厚さは均等ではない²⁷⁾。ここでは図-8のように墳丘側面を厚さが均等な壁としてモデル化するため、墳丘側面は、南側以外は2.5~5mの範囲、南側は1m以下の範囲で変化させた条件で石室室温を評価し、実測値と比較した。

c) 解析結果

墳丘側面の厚さが異なる条件下での石室室温の計算結果のうち、実測値を最もよく表す結果(南側以外3m厚、南側0.5m厚)を図-10に示す。また、この計算結果を選出した根拠を示すため、層厚の条件が異なる他の計算結果も合わせて図-11に示す。図-11では、室温を振幅と外気温との位相差の二つの指標で表し、これらの各層厚条件での結果を表しているが、層厚が厚くなるほど室温は

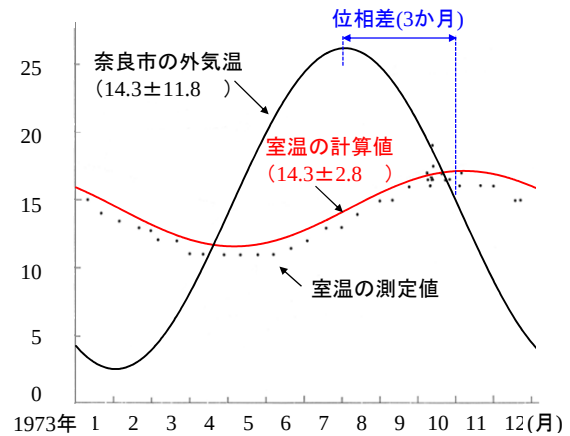


図-10 石室室温の計算値と測定値の比較 (南側以外3m厚、南側0.5m厚の場合)

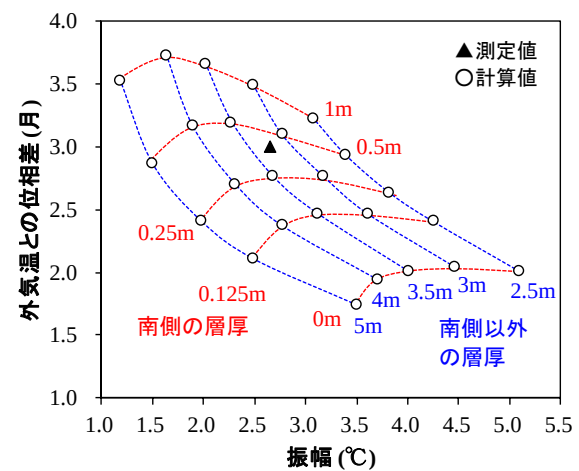


図-11 墳丘層厚を変化させた石室室温の計算結果

外気温の影響を受けにくくなるため、振幅が小さく、また位相遅れが大きくなる傾向が見られる。図中には、図-10の測定値(振幅2.65°C、位相差3か月)を併記するが、墳丘の南側以外が3~3.5m厚、南側が0.25~0.5m厚の範囲にある場合に、振幅、位相差ともに測定値に近い値を示し、最も近い計算結果は、墳丘の南側以外が3m厚、南側が0.5m厚の場合である。これは、概ね上部と底部の平均厚に相当する。このように、室温を最もよく再現するときの墳丘の層厚が妥当な値をとるため、本計算手法は、適切に室温を評価できていると考えられる。なお、日射、夜間放射、蒸発は陽に扱わず、これらに起因する室温振幅を墳丘側面の層厚で調整することにより、室温の測定値を再現しているが、最適解が得られるときの層厚が妥当であることを鑑みると、日射、夜間放射、蒸発潜熱による熱移動が室温に与える影響は大きくないと考えられる。

室温の年平均値については、計算値は測定値よりも1°C程度高い値を示している。この原因として、実際に

は、不易層での地温が年平均気温とずれていた可能性や、石室入口部分の前室の温度と外気温に差異があった可能性が挙げられる。また、高松塚古墳の現地の気温をやや高く見積もっている可能性がある。本計算では1973年時点で、気温観測を行っていた気象台のうち、最も高松塚古墳に近い奈良気象台の観測値を参照したが、古墳周辺ではこれよりも低温であった可能性が示唆される。より古墳に近い位置にある南部の三つの気象台(針, 大宇陀, 五條)では、1979年以降に観測が開始されたが、観測開始から10年間の観測値の平均値を調べると、気温の振幅は奈良とほぼ同等であるが、平均値は奈良よりもやや低い傾向にある。奈良が 14.3°C に対して、針は 11.2°C 、大宇陀は 12.4°C 、五條は 14.2°C であった。

(3) 墳丘の層厚が石室の室温に与える影響

上記の手法を用いて、墳丘の層厚が石室の室温に与える影響を評価する。解析モデルは図-8と同じく、地下10mまでの領域を対象とするが、ここでは、高松塚古墳や牽牛子塚古墳などの古墳時代終末期に見られる比較的小型の古墳を想定して、墳丘の層厚は1~5mの範囲で、上面と側面で等しい場合について検討する。また、石室の寸法は、幅1m、奥行2m、高さ1mで、石材の厚さはすべて0.5mとする。墳丘の熱物性値は、前章でシリンダー法を用いて評価した牽牛子塚古墳のうち、乾燥密度が $1.29\text{g}/\text{cm}^3$ で自然含水比($w=29\%$, $S_r=70.58\%$)のものを適用する。石材については、表-3に示す高松塚古墳のものを参照する²⁶⁾。表-4に墳丘と石室の熱物性値を示す。なお、外気温の条件については、前節と同様に、奈良市

表-4 墳丘と石材の熱物性値

	ρ_d (g/cm^3)	S_r (%)	λ (W/mK)	C ($\text{kJ}/\text{m}^3\text{K}$)	a (mm^2/s)
墳丘	1.29	70.58	0.89	2647	0.34
石材	—	100	2.56	2900	0.88

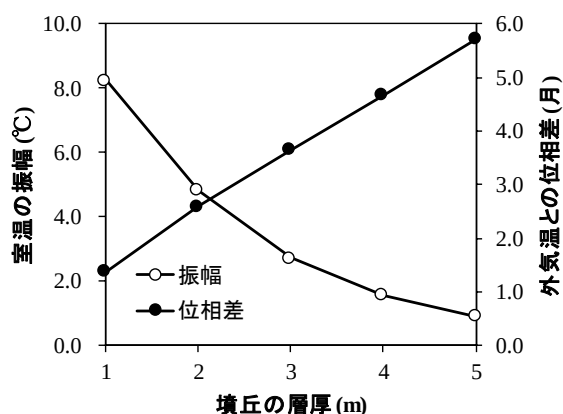


図-12 墳丘の層厚と室温の振幅、外気温との位相差の関係

の観測値($14.3\pm 11.8^{\circ}\text{C}$)を想定する。

石室の室温と墳丘の層厚の関係を図-12に示す。層厚に比例して、墳丘の体積熱容量が増加するため、室温の振幅は小さく、また墳丘内の熱伝導に時間を要して、外気温との位相差が大きくなる。概ね層厚が1m増すごとに、振幅は40%減り、位相は1か月遅れている。

次に、墳丘上面の層厚が相対的に薄い場合について同様の検討をする。このような場合には、相対的に層厚が薄い面からの熱の流入出が室温に大きく影響すると予想される。墳丘上面を1m厚に固定し、側面を1~5mの範囲で変化させたときの結果を図-13に示す。先述の層厚が均等な場合と比べると、側面の層厚が同等であっても、室温の振幅が大きく、また外気温との位相差が小さい。すなわち、熱の流入出が容易な箇所があると、周囲の墳丘を厚くして室温変動の抑制を図っても、その効果が薄れることがわかる。なお、外気温との位相差には、極大値が見られ、層厚が均等な場合とは異なる傾向を示しているが、これは側面の層厚の増加に伴って、上面からの熱の流入が側面からのものより支配的になることに起因する。側面が厚くなるにつれて、側面では、墳丘内を伝わる過程で位相が遅れ、減衰した熱流が室に流入する。一方、相対的に薄い上面では、室内の温度勾配が大きくなり、位相遅れの小さい熱流がより多く室に流入する。すなわち、側面からの熱流が室への熱流全体に占める割合が大きい場合は、側面の厚さに応じた位相遅れが反映されるが、側面の厚さが増すにつれて、位相遅れの小さい上面からの熱流の影響が強く表れる結果、室への熱流と対応関係にある室温は、図-13のような極大値を持つと考えられる。

(4) 墳丘の乾燥密度が石室の室温に与える影響

次に、墳丘の締固めの程度が石室の室温に与える影響を評価する。ここでは、墳丘の含水比が自然含水比($w=29\%$)のとき、乾燥密度を1.10, 1.29, $1.45\text{g}/\text{cm}^3$ の

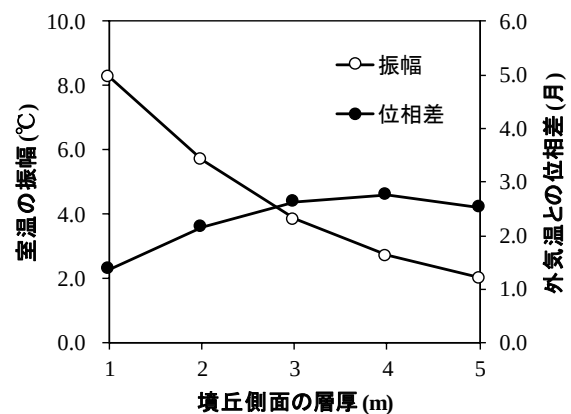


図-13 墳丘の層厚と室温の関係(墳丘上面が1m厚の場合)

三種類に変化させて室温への影響を調べる。墳丘の層厚は、室温の変動幅が大きいほうが乾燥密度の違いによる室温の違いを捉えやすいため、すべての面の層厚が 1m の場合を考える。墳丘の熱物性値は、図-4 の実験結果をもとに表-5 のように設定した。その他、石材や外気温の条件は前節までと共通とする。

図-14 に石室室温と墳丘の乾燥密度の関係を示す。乾燥密度の増加に伴って、室温の振幅は増加、外気温との位相差は減少傾向を示している。これは、乾燥密度の増加に伴って、熱伝導率と体積熱容量はともに増加するが、ここでは前者の影響が勝るためと考えられる。ほとんど締め固めない場合 (1.10g/cm^3) と人力で締め固められる限界の場合 (1.45g/cm^3) では、振幅は 10%強、位相差は 0.23 か月 (1 週間程度) 差があり、密に締め固めるほど、室温は外気温の影響を受けやすくなる。つまり、室温変動を抑制するための覆土は、緩く締め固めた方が効果は高い。ただし、覆土の力学的な安定性の確保と雨水の浸透・浸食抑制の観点からは、密な締め固めが推奨されるため、両者はトレードオフの関係にある点に留意する必要がある。

(5) 墳丘の飽和度が石室の室温に与える影響

次に、墳丘の含水状態が石室の室温に与える影響を評価する。ここでは、墳丘のすべての面の層厚が 1m で、乾燥密度が 1.29g/cm^3 のとき、飽和度を 0, 30, 70.58, 100% の四種類に変化させて室温への影響を調べる。墳丘の熱

物性値は、図-4 の実験結果をもとに表-6 のように設定した。その他、石材や外気温の条件は前節までと共通とする。

図-15 に石室室温と墳丘の飽和度の関係を示す。飽和度の増加に伴う熱伝導率の増加によって、室温の振幅は増加、外気温との位相差は減少している。乾燥状態と飽和状態では、振幅には 60%強、位相差には 0.62 か月 (3 週間程度) の差があり、墳丘が湿潤であるほど、室温は外気温の影響を受けやすいことを表している。したがって、室温変動を抑制するための覆土は、乾燥している方が効果は高いが、屋外環境下の墳丘の含水状態を制御することは不可能である。墳丘表面は、晴天時と雨天時で大幅に含水状態が変化するが、墳丘全体の平均的な含水状態は、概ね自然含水状態から飽和状態までの領域で推移していると推測される。室温は、高飽和度領域になるほど飽和度に対して鈍感な傾向にあり、自然含水状態 ($S_r=70.58\%$) と飽和状態を比較すると、室温の振幅、位相差ともに差は 5%程度である。このことから、屋外環境下にある墳丘の飽和度の可変領域を加味すると、墳丘の含水状態が室温に与える影響は大きくないと言える。

4. 石室内の結露量の評価

(1) 結露量の評価方法

前章の石室室温の計算結果をもとに、室内の結露量を

表-6 墳丘と石材の熱物性値 (飽和度の違い)

	ρ_d (g/cm^3)	S_r (%)	λ (W/mK)	C ($\text{kJ/m}^3\text{K}$)	a (mm^2/s)
墳丘	1.29	0	0.30	1084	0.28
	1.29	30	0.55	1748	0.32
	1.29	70.58	0.94	2647	0.36
	1.29	100	1.15	3299	0.35
	1.29	100	2.56	2900	0.88
石材	—	100	2.56	2900	0.88

表-5 墳丘と石材の熱物性値 (乾燥密度の違い)

	ρ_d (g/cm^3)	S_r (%)	λ (W/mK)	C ($\text{kJ/m}^3\text{K}$)	a (mm^2/s)
墳丘	1.10	53.23	0.65	2257	0.29
	1.29	70.58	0.89	2647	0.34
	1.45	89.13	1.04	2976	0.35
	1.45	89.13	2.56	2900	0.88
石材	—	100	2.56	2900	0.88

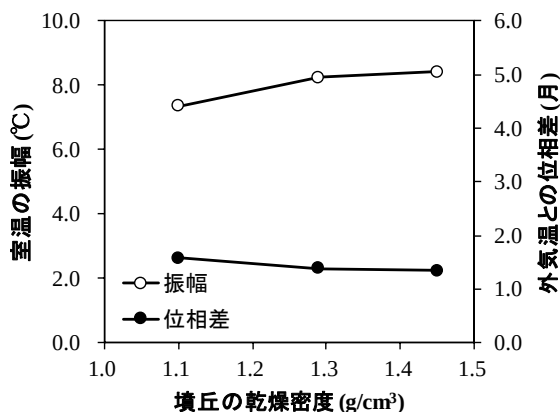


図-14 墳丘の乾燥密度と室温の関係 (層厚 1m の場合)

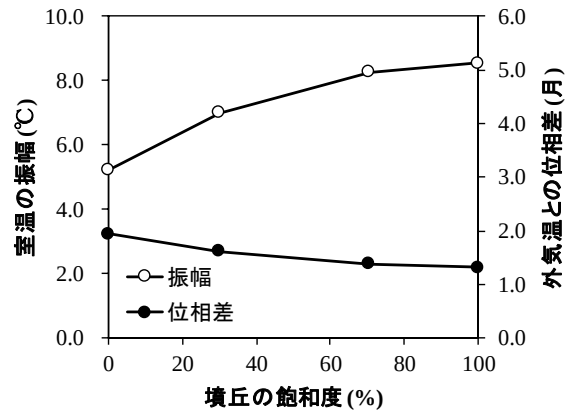


図-15 墳丘の飽和度と室温の関係 (層厚 1m の場合)

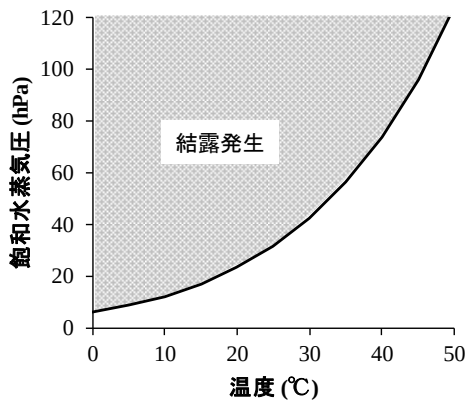


図-16 温度と飽和水蒸気圧の関係

評価する。結露は、気中の水蒸気が飽和に達し、一部が凝縮したものである。図-16は、気中に存在できる水蒸気の分圧（飽和水蒸気圧）を表した実験公式であるが²²⁾、温度に依存し、高温であるほどより多くの水蒸気が気中に存在できることを表している。室内の相対的に温度が高い箇所では、水分の蒸発によって水蒸気圧が高まり、低温部への水蒸気の移動が生じ、やがて低温部の水蒸気圧が飽和に達すると結露が生じる。

一般に土に覆われた石室の湿度はほぼ100%で、室内のわずかな温度むらでも結露が生じる^{9)・9)}。ここでは、室内の湿度が常に100%として、結露量を計算する。室内の空気と石材表面の間の湿気の伝達は、両者の水蒸気圧の勾配を駆動力とする。室から石材表面に向かう水蒸気流 q_v [kg/m²h]は、式(12)で表され、 α' 、 f_r 、 f_w 、はそれぞれ湿気伝達率、室の水蒸気圧、石材表面の水蒸気圧を表す²⁴⁾。湿気伝達率は、ここでは慣用値を適用し、16.7g/m²hmmHgとする²⁴⁾。室内の湿度が100%の場合は、 f_r と f_w はそれぞれの温度に対応する値を図-16から読み取ることができ、室温よりも低温な壁面に向かって、水蒸気圧の差 $f_r - f_w$ に応じた水蒸気が移動し、すべて壁面で凝縮する。すなわち、ここでは水蒸気流 q_v は結露量と等価である。石材の表面温度は、外気温、室温、モデル底面の温度が既知であれば、熱伝導方程式を解くことにより内挿できる。なお、実際には、各石材の表面付近では蒸発・凝縮に伴う熱移動が生じ、これらは結露の発生を抑制する方向にはたらくが、本検討で用いる応答係数法は、室内の空気を1質点で表現するため、局所的な熱移動は考慮しない。

$$q_v = \alpha' (f_r - f_w) \quad (14)$$

(2) 墳丘の層厚が石室の結露量に与える影響

3章(3)のそれぞれの条件下で、石室の結露量を計算した。墳丘のすべての面の層厚が1mであるときの石室内壁の表面温度の年変化を図-17に示す。微小な差ではあるが、

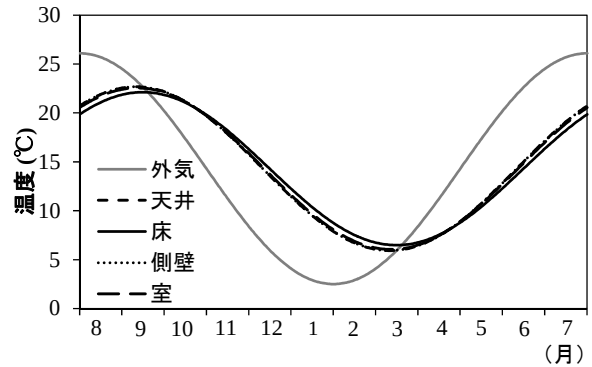


図-17 石材の表面温度（層厚1mの場合）

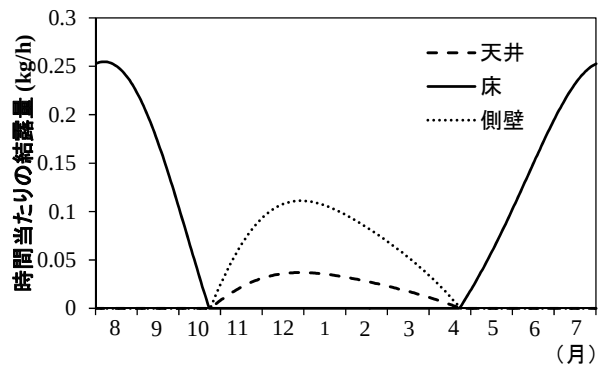


図-18 石材表面の結露量（層厚1mの場合）

外気から供給された熱を室に伝える天井と側壁の表面温度は、室温と比べて若干振幅が大きく、位相が早い。一方、室温変化に伴って温度変化が生じる床面では、室温よりも振幅は小さく、位相が遅い。これらの石材表面の温度を用いて、前節の方法で算定した結露量の年変化を図-18に示す。天井、側壁（全4面の合計）、床の面積はそれぞれ2m²、6m²、2m²で、各面の単位時間当たりの結露量を重量で表している。夏季は、相対的に低温となる床面で結露し、冬季はこれが入替わり、天井と側壁で結露している。ただし、結露していない石材表面では、墳丘から供給される水分が蒸発しており、石室内の年間の水収支は平衡状態にある。床面は他の面に比べて結露量が突出しているが、これは結露時の室温と床面との温度差が他の面との差異よりも大きく、また高温時に結露が生じるためである。図-16に示すように、飽和水蒸気圧は温度に対して非線形で、高温側では単位温度差によって生じる結露量が多くなる。なお、石材が不飽和の場合は、間隙が結露で満たされた後に表面に結露が現れるが、本検討では、石材は飽和状態にあると仮定しているため（表-3）、発生した結露は即座に石材表面に現れ、天井や側壁では、落下・流下し、地盤に浸透する。

石室内の各面の年間の結露の総量を、図-18の横軸と曲線に囲まれた領域を積分して求め、年間の結露量と墳丘層厚の関係を評価した（図-19）。いずれの面でも層厚の

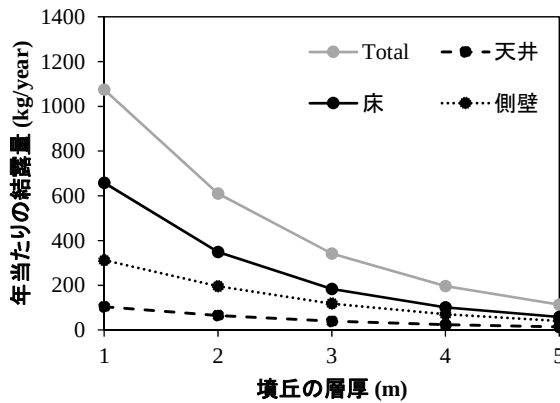


図-19 填丘の層厚と結露量の関係

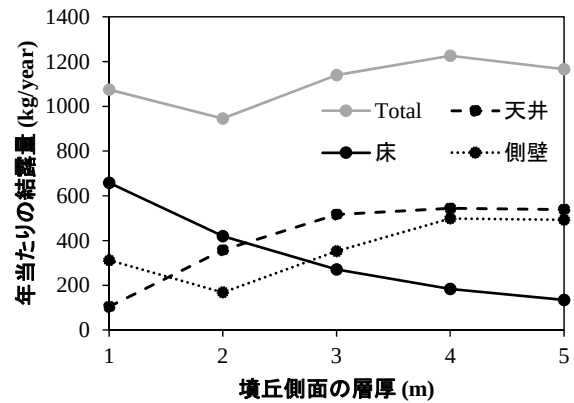


図-21 填丘の層厚と結露量の関係 (填丘上面が1m厚の場合)

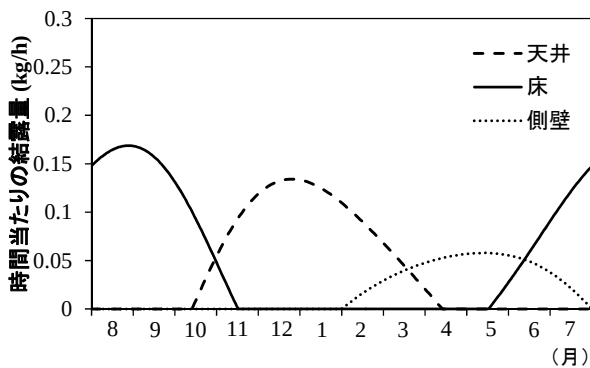


図-20 石材表面の結露量 (上面1m厚, 側面2m厚の場合)

増加に伴って、室温変化が小さくなるとともに、石材表面の温度変化、また室温との差異も小さくなるため、結露量は減少する。層厚が1m増すごとに、結露量は概ね40%抑制されている。なお、各面の結露の発生時期は、層厚を増やすことにより、図-12に示す外気温との位相差に見られる差に相当する遅れが生じる。

上面を1mに固定して、側面の層厚を変化させた場合についても結露量を算定した。図-20は、側面の層厚を2mとした場合の結露量の年変化である。側面の層厚が1mの場合(図-18)と比べて、側壁の結露発生時期が天井より遅れ、年間を通して、天井、側壁、床のうち、室温よりも低温となる1面もしくは2面で結露が生じている。また、結露量は、床と側壁では減少している一方、天井では増加している。

年間の結露量と側方の層厚の関係を評価した結果を図-21に示す。填丘の層厚が均等な場合とは異なり、結露量と層厚の関係は面ごとに異なる傾向を示している。層厚の増加に対して、天井では増加、床では減少、側壁では層厚が2mの時に極小値を示している。これは、側面の層厚の増加に伴って、各面の表面温度の室温に対する寄与の程度が変化することによるものである。側面の層厚を厚くするに従って、石室を構成する計6面のうち、相対的

に層厚が薄い面と厚い面は、5面:1面の状態から、1面:5面の状態に推移する。これにより、周囲の石材の表面温度の中間の値を示す室温は、側面の層厚が薄いときは天井の表面温度に近い値を、厚いときは床の表面温度に近い値を示す。各面の結露量は、式(12)に示すように、室温と石材の表面温度の差に依存するため、層厚の増加に伴って室温との差異が大きくなる天井では結露量が増し、逆に差異が小さくなる床では結露量が減る。また、側壁では、層厚の増加に伴い、表面温度が、天井に近い温度から床に近い温度に推移するが、その過程で、層厚が2mの時に最も室温に近づき、結露量は極小値を示している。石室内の各面で、以上のような変化を示す結露量は、総量としては、側面の層厚の増加に対して単調な増加もしくは減少を示さず、あまり大きな変化はない。なお、各面の結露の発生時期は、天井と床ではあまり変化は見られないが、側壁は填丘の層厚の増加に伴って遅れ、側面を5mとした場合には1mの場合(図-18)より4か月程度遅れる。

このことから、石室を覆う填丘の一部に熱の流入出が容易な箇所がある場合、周囲を増し厚すると、石室の室温変化はある程度抑制されるが、結露に関しては、要因である室内の温度むらが解消されないため、ほとんど抑制効果は期待できず、かえって結露しやすくなることがわかる。したがって、工学的もしくは考古学的な事情により填丘の層厚を均等にできない場合や、また扉等を設置して石室への入室が可能な構造とする場合、壁面を展示するために一部をガラス張りとする場合もこの範疇に入るが、こうした場合に石室の結露の抑制を図るには、断熱材を用いるなどして、石室周囲の断熱性が同等となるように配慮する必要がある。

(3) 填丘の乾燥密度が石室の結露量に与える影響

3章(4)について、石室の結露量を計算した。年間の結露量と填丘の乾燥密度の関係を図-22に示す。図-14に見られる室温と密度の関係と対応して、いずれの面でも結

露量は密度に対して増加傾向を示しており、ここで検討範囲とする密度領域においては、最大と最小で約2～3割の差が生じている。なお、結露の発生時期は、室温と外気温の位相差(図-14)に対応したずれが生じる。

以上の結果から、覆土は室温変動と結露の発生を抑制するよう緩く締め固めた方が良いが、覆土の締め固めに関しては、石室環境以外にも考慮すべき事項がある。まず、力学的安定性の確保と雨水の浸透抑制が満足されることが前提となる。そして、締め固め機械は、墳丘上で施工可能な軽量のプレートタンパーなどに限られる。これらの要件によって、乾燥密度の上下限が自ずと決まり、設定可能な範囲はかなり狭まる。よって、これらの乾燥密度と関係するいくつかの制約条件を加味すると、実際には石室環境が乾燥密度を決定する主要な条件になる場合は少ない。

(4) 墳丘の飽和度が石室の結露量に与える影響

3章(5)について、石室の結露量を計算した。年間の結露量と墳丘の飽和度の関係を図-23に示す。室温(図-15)とともに石材の表面温度は、飽和度の増加に伴って増加し、結露量も大幅に増加するが、前章で述べた飽和度の

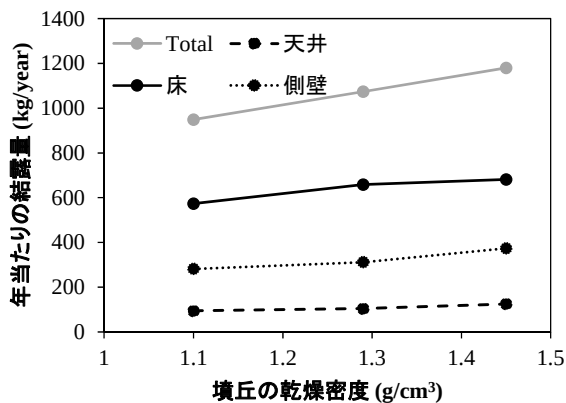


図-22 墳丘の乾燥密度と結露量の関係(層厚 1m の場合)

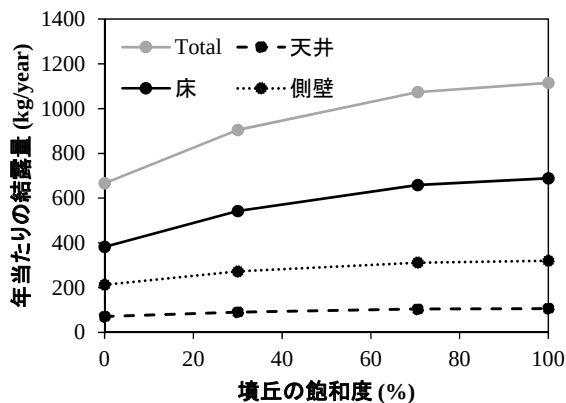


図-23 墳丘の飽和度と結露量の関係(層厚 1m の場合)

可変領域(自然含水状態, $S_r=70.58\%$ ～飽和状態)内では、最大と最小で約10%の差である。

この結果から、覆土の含水状態については、施工時に目標とする乾燥密度が達成されるように締め固め特性に基づいて調整した後は、屋外環境にゆだねられるが、想定される含水状態の範囲内では、石室の温度や結露は、墳丘の湿潤・乾燥に対して鈍感と言える。

5. 結論

古墳石室内の温度変化やそれに伴う水分移動に起因する装飾の損傷を抑制するための方法のひとつとして、覆土を施して石室を断熱する方法が有効と考えられる。そこで、本稿では、覆土の仕様検討の道筋をつけるべく、墳丘が石室環境に与える影響を検討した。室内試験で墳丘土の熱物性値を評価し、これを用いて一次元熱伝導方程式を解くことにより、石室内の温度と結露を定量的に評価し、墳丘の熱物性値と関係するもののうち、層厚、乾燥密度、飽和度の影響について調べた。

墳丘土の熱物性値は、比較的容易に熱拡散係数を測定できるシリンダー法を用いて評価した。試験は、乾燥密度と飽和度を変えた条件で行い、熱物性値が乾燥密度と飽和度に依存することを確認し、またこれを土粒子、水、空気の熱物性値の違いで説明した。そして、石室室温は、一次元熱伝導方程式を用いた手法を適用したが、手法の適用性の確認のため、発掘当初の高松塚古墳を対象に再現計算をしたところ、室温の観測値を良好に再現できた。

以上を踏まえて、墳丘の層厚、乾燥密度、飽和度を変化させた場合の石室室温と、さらに室温をもとに室内が飽和している条件での結露量を評価した。層厚については、1～5mの範囲で検討したが、石室周囲の層厚が均等な場合は、層厚を厚くすることにより室温変化と結露を効果的に抑制できることがわかった。層厚が1m増すごとに、概ね室温の振幅は40%減り、ほぼ同等の割合で年当たりの結露量も抑制される。ただし、層厚が薄く、熱の流入出が容易な箇所がある場合には、抑制効果が低減する。特に、結露に関しては、層厚が薄い箇所があれば、周囲の層厚を厚くしても、室内の温度むらは解消されないため、ほとんど効果がないだけでなく、かえって結露しやすくなることに注意が必要である。

乾燥密度については、緩いほど室温変化と結露の抑制効果は高いことがわかった。層厚が1mのときに、全く締め固めない場合と人力でよく締め固めた場合を比較すると、室温の振幅には10%強の差があり、年当たりの結露量には20～30%程度の差がある。しかし、力学的安定性の確保と雨水の浸透抑制が満足する必要があるため、また適用可能な締め固め機械に制約がある。これらの要件を満たすようにすると、概ね取りうる乾燥密度が決定されるた

め、実際には石室環境が乾燥密度を決定する主要な要件になる場合は少ない。

飽和度については、乾燥しているほど、室温変化と結露の抑制効果は高いことがわかった。層厚が1mのときに、乾燥状態と飽和状態を比較すると、室温の振幅には60%強もの差があり、ほぼ同等の割合で年当たりの結露量にも差がある。ただし、自然含水状態から飽和状態の範囲では、室の温度や結露は、墳丘の湿潤・乾燥に対して鈍感であり、この範囲内でとりうる室温の振幅の最大・最小の差は5%、年当たりの結露量の差は10%程度である。

以上より、石室の温度環境が重視される古墳で、覆土を用いて修復する場合、最も支配的なパラメータは覆土の層厚である。一方、乾燥密度や飽和度については、温度環境に与える影響は小さいため、これらのパラメータについては、石室環境よりも力学的安定性や雨水浸透の観点から決定するべきである。

謝辞:本研究では、石室の室温と結露量の評価にあたり、京都大学大学院・小椋大輔教授に適切な助言を賜った。また、高松塚古墳の発掘当初の墳丘の状態に関して、特定非営利活動法人文化財保存支援機構・三輪嘉六氏ならびに公益財団法人文化財虫菌害研究所・三浦定俊氏に貴重な情報を提供いただいた。記して深甚の謝意を表するものである。

参考文献

- 1) 三村衛, 吉村貢, 寺尾庸孝, 豊田富士人, 中井正幸: 史跡 昼飯大塚古墳墳丘の復元と整備に関する地盤工学的検討, 地盤工学ジャーナル, Vol. 6, No. 2, pp. 141-155, 2011.
- 2) 澤田茉伊, 三村衛, 吉村貢: 地盤工学に基づく降雨時の古墳墳丘斜面の安定性評価に関する検討, 自然災害科学, Vol. 33, 特別号, pp. 87-99, 2014.
- 3) 三村衛, 吉村貢: 高松塚古墳石室解体に伴う石室石材および墳丘版築地盤の安定性評価について, 土木学会論文集C, Vol. 65, No. 3, pp. 597-608, 2009.
- 4) 澤田茉伊, 三村衛, 吉村貢: キャピラリーバリアを用いた古墳の雨水の浸透抑制に関する研究—キャピラリーバリアのメカニズムに関する実験および解析的検討—, 土木学会論文集C, Vol. 72, No. 2, pp. 101-116, 2016.
- 5) 脇谷草一郎: 史跡ガランドヤ1号墳の保存に関する研究, 奈良文化財研究所保存科学研究集会発表資料, 2014.
- 6) 文化庁: 古墳壁画の保存活用に関する検討会装飾古墳ワーキンググループ報告書, http://www.bunka.go.jp/takamatsu_kitora/kentokaito/kofun_wg/pdf/houkokusyo.pdf, 2014.
- 7) 三浦定俊, 石崎武志, 赤松俊祐: 高松塚古墳における30年間の気温変動, 保存科学, No. 44, pp. 141-148, 2005.

- 8) 木川りか, 佐野千絵, 石崎武志, 三浦定俊: 高松塚古墳の微生物対策の経緯と現状, 保存科学, No. 45, pp. 33-58, 2006.
- 9) 小椋大輔, 鉾井修一, 李永輝, 石崎武志, 三浦定俊: 過去の高松塚古墳石室内の温湿度変動解析—保存施設稼働時の気象条件の影響と、発掘直後の仮保護施設の影響—, 保存科学, No. 48, pp. 1-11, 2009.
- 10) Li, Y., Ogura, D., Hokoi, S., Wang, J. and Ishizaki, T.: Predicting hygrothermal behavior of an underground stone chamber with 3-D modeling to restrain water-related damage to mural paintings, *Journal of Asian Architecture and Building Engineering*, Vol. 13, No. 2, pp. 499-506, 2014.
- 11) 日本熱物性学会: 新編 熱物性ハンドブック, pp. 578-580, 養賢堂, 2008.
- 12) 粕淵辰昭: 土壌の熱伝導に関する研究, 農業技術研究所報告B, No. 33, pp. 1-54, 1982.
- 13) 登尾浩助: サーモ TDR プローブによる不飽和土壌中の有機汚染物質濃度の測定, 土木学会論文集, No. 783, pp. 33-38, 2005.
- 14) 望月秀俊, 坂口巖, 井上光弘: 土壌の熱伝導率測定法の比較, 土壌の物理性, No. 93, pp. 47-50, 2003.
- 15) Parikh, R. J. Havens, J. A. and Scott, H. D.: Thermal diffusivity and conductivity of moist porous media, *Soil Society of America Journal*, Vol. 43, No. 5, pp. 1050-1052, 1979.
- 16) 登尾浩助, 徳本家康, 向井田善朗: シリンダーに充填した土壌の熱拡散係数を簡易に推定する方法, 土壌の物理性, No. 101, pp. 5-10, 2005.
- 17) Carslaw, H. S. and Jaeger, J. C.: *Conduction of Heat in Solids*, 2nd ed., Oxford University Press, New York, pp. 188-207, 1959.
- 18) 明日香村教育委員会: 牽牛子塚古墳発掘調査報告書, 2013.
- 19) 松本順一郎, 大久保俊治: 土の伝熱特性に関する実験的研究, 土木学会論文報告集, No. 257, pp. 53-60, 1977.
- 20) ウィリアム・ジョリー, ロバートホートン著, 取出伸夫監訳: 土壌物理学, 築地書店, pp. 180-183, 2006.
- 21) 中村泰人, 松尾陽, 松本衛, 土屋喬雄, 橘秀樹, 宮田紀元: 新建築学大系 10 環境物理, 彰国社, pp. 31-103, 1984.
- 22) 文化庁: 国宝 高松塚古墳壁画—保存と修理—, 第一法規出版, 1987.
- 23) 気象庁: 過去の気象データ検索, 気象庁ホームページ, [http://www.data.jma.go.jp/obd/stats/etrn/index.php?prec_no=64&block_no=0631&year=2012&month=06&day=&view=](http://www.data.jma.go.jp/obd/stats/etrn/index.php?prec_no=64&block_no=0631&year=2012&month=06&day=&view=,), (2016/6/3 アクセス)
- 24) 鉾井修一, 池田哲郎, 新田勝通: エース建築環境工学II—熱・湿気・換気—, 朝倉書店, 2002.
- 25) 宮崎毅, 長谷川周一, 粕淵辰昭: 土壌物理学, 朝倉書店, 2005.
- 26) 石崎武志, 三浦定俊, 犬塚将英, カリル・マグディ: 高松塚古墳墳丘部の生物対策としての冷却方法の検討, 保存科学, No. 45, pp. 59-68, 2006.
- 27) 三輪嘉六, 私信, 2016.

(2017. 5. 12 受付)

ENVIRONMENT CONTROL IN A BURIAL CHAMBER
BY COVERING WITH AN EARTH MOUND—EVALUATION OF
TEMPERATURE AND DEW CONDENSATION IN A BURIAL CHAMBER
ASSOCIATED WITH THE OVERLYING TUMULUS MOUND—

Mai SAWADA and Mamoru MIMURA

The decorated burial chambers in tumuli have been deteriorated due to temperature change and moisture movement in the burial chambers. Heat insulation of a burial chamber by covering with an earth mound is one of feasible means to control the damage. In the present paper, the temperature and dew condensation in a burial chamber was evaluated by one dimensional equation of heat conduction to investigate the influence of the thickness, degree of saturation and dry density of the mound on the chamber environment. The calculated performance suggested that the thickness of the mound has larger influence on the environment in the burial chamber than other factors. Therefore, the thickness of the mound is a key factor for designing an earth mound storing a decorated chamber which requires hydrothermal environment control for preservation. On the other hand, the degree of saturation and dry density of the earth mound with less influence on chamber environment should be decided considering the mechanical stability and water infiltration of the mound.