

発掘時における古墳壁画
の保存環境に関する研究

2010年

李 永輝

目次

第1章 序論.....	1
1.1 研究背景.....	1
1.2 既往の研究.....	2
1.3 研究の目的.....	3
1.4 論文の構成.....	3
第1章の参考文献.....	6
第2章 高松塚古墳の発掘調査と保存対策の概要と温湿度測定値の分析.....	8
2.1 はじめに.....	8
2.2 高松塚古墳の発掘調査と保存対策の概要.....	8
2.2.1 高松塚古墳の概要.....	8
2.2.2 保存対策の経緯.....	9
2.3 高松塚古墳石室の温湿度の測定値の分析.....	11
2.3.1 外気温.....	11
2.3.2 降雨量.....	11
2.3.3 石室内の温湿度.....	11
2.4 第2章のまとめ.....	14
第2章の参考文献.....	15
第3章 石室内温湿度環境が古墳壁画の劣化に与える影響.....	16
3.1 はじめに.....	16
3.2 古墳壁画の劣化と保存環境との関係.....	16
3.3 保存対策の効果の評価について.....	18
3.4 第3章のまとめ.....	18
第3章の参考文献.....	19
第4章 基礎理論と解析方法.....	20
4.1 はじめに.....	20
4.2 基礎方程式.....	20
4.2.1 熱水分同時移動方程式.....	20
4.2.2 仮保護施設及び室内表面における熱水分流.....	21
4.2.3 仮保護施設と石室空間の熱水分収支式.....	22
4.2.4 裸地における地表面境界条件式.....	23
4.3 植生を含めた地表面境界の熱水分移動モデル.....	24
4.3.1 モデルにおける仮定.....	24
4.3.2 植生及び地表面の熱移動.....	25

4.3.3	植生及び地表面の水分移動	26
4.4	基礎方程式の差分化.....	28
4.5	差分化された斜面セルの取扱い方法.....	31
4.6	第4章のまとめ.....	35
	第4章の参考文献.....	35
第5章	解析に用いる外界気象条件と熱水分物性値	38
5.1	はじめに	38
5.2	外界気象条件	38
5.2.1	外界温湿度条件	38
5.2.2	降雨量.....	40
5.2.3	日射量と夜間放射量	42
5.3	熱水分物性値.....	44
5.3.1	Arya-Paris モデルについて	44
5.3.2	凝灰岩の熱水分物性値	48
5.3.3	版築（周囲地盤）の熱水分物性	52
5.3.4	断熱材の熱水分物性	58
5.3.5	仮保護施設躯体の熱水分物性	59
5.3.6	空気側の物性値	60
5.4	第5章のまとめ.....	60
	第5章の参考文献.....	61
第6章	高松塚古墳発掘から保存施設稼働までの保存環境の解析	62
6.1	はじめに.....	62
6.2	計算条件.....	62
6.2.1	発掘時の高松塚古墳の墳丘形状等の変化	62
6.2.2	解析対象のモデル化	64
6.2.3	境界条件	70
6.2.4	計算方法	70
6.2.5	初期条件	72
6.2.6	その他の計算条件	73
6.3	高松塚古墳発掘直後の石室内温湿度の解析値と測定値の比較	75
6.3.1	石室内温湿度の解析値と測定値の比較	75
6.3.2	発掘部位の覆土の厚さが石室内温湿度に及ぼす影響.....	76
6.3.3	仮保護施設と外気との換気回数が石室内温湿度へ与える影響.....	78
6.3.5	6.3節のまとめ	79

6.4	発掘から保存施設稼働までの過程における石室内温湿度性状	80
6.4.1	発掘後の石室内温湿度変化	80
6.4.2	石室内表面の結露発生状況と乾燥発生状況	81
6.4.3	石室内表面の乾燥発生部位と結露発生部位	82
6.4.4	周囲地盤の温度・含水率分布変動	86
6.4.4	6.4 節のまとめ	86
6.5	3次元解析と2次元解析の結果との比較	88
6.5.1	2次元解析の計算条件	88
6.5.2	石室内温湿度の2次元と3次元の解析結果の比較	88
6.5.3	石室内表面の結露性状と乾燥状況の2次元と3次元の解析結果の比較	90
6.5.4	6.5 節のまとめ	91
6.6	第6章のまとめ	92
	第6章の参考文献	93
第7章	古墳の適切な発掘季節の検討	94
7.1	はじめに	94
7.2	解析対象と解析方法	94
7.2.1	解析対象	94
7.2.2	解析方法	96
7.3	解析結果と考察	97
7.3.1	発掘前の石室内温湿度	97
7.3.2	発掘季節の違いによる石室内温度の変化	97
7.3.3	発掘季節の違いによる石室内相対湿度の変化	99
7.3.4	発掘季節の違いによる石室内表面の最低相対湿度の違い	100
7.3.5	発掘季節の違いによる石室内の結露性状の違い	100
7.3.6	換気回数が石室内表面の最低含水率と結露性状に及ぼす影響	102
7.3.7	発掘季節の違いが壁画劣化に与える影響	104
7.4	第7章のまとめ	104
第8章	古墳発掘調査後の応急保存対策の効果	105
8.1	はじめに	105
8.2	解析対象	105
8.3	解析方法	107
8.4	発掘前後の違いの検討	108
8.4.1	発掘前と発掘後の石室内温湿度変化	108
8.4.2	発掘前後の石室内表面の相対湿度分布	109

8.4.3	発掘前後の石室の結露発生状況	110
8.4.4	発掘前後の石室環境の変化が壁画劣化に与える影響	110
8.5	現地での応急保存対策の効果の検討	111
8.5.1	保存対策の解析ケース	111
8.5.2	各種保存対策の石室温湿度への影響	112
8.5.3	各種保存対策の石室内壁相对湿度分布への影響	113
8.5.4	各種保存対策が結露発生に及ぼす影響	115
8.5.5	壁画の劣化に対する保存対策の総合的評価	116
8.6	第8章のまとめ	116
第9章	断熱材料を用いた古墳発掘調査後の保存対策の検討	117
9.1	はじめに	117
9.2	解析方法	117
9.3	断熱材の熱容量の影響	119
9.3.1	解析対象	119
9.3.2	熱容量が石室内温度変動、結露状態へ与える影響	119
9.3.3	断熱材の熱容量が壁画保存へ与える影響	121
9.4	被覆材料の吸放湿性の影響	121
9.4.1	はじめに	121
9.4.2	解析対象	122
9.4.3	石室内温度変動、結露状態と含水率分布変動	122
9.4.4	被覆材料の吸放湿性が壁画保存へ与える影響	124
9.5	被覆材料の設置面積の影響	125
9.5.1	はじめに	125
9.5.2	解析対象	125
9.5.3	鉛直方向の断熱材と覆土の長さの影響	125
9.5.4	水平方向の断熱材と覆土の長さの影響	128
9.6	被覆材料の熱抵抗の影響	130
9.6.1	解析対象	130
9.6.2	石室露出部位への被覆材料の熱抵抗の影響	130
9.7	古墳発掘後の露出部位の保存対策について	132
9.8	第9章のまとめ	133
	第9章の参考文献	133
第10章	結論	134
	本研究に関する論文	138
	謝辞	140

第1章 序論

1.1 研究背景

高松塚古墳は、奈良県明日香村にある古墳であり、1972年に発掘調査が行われた際に石室内の壁画が発見された。古墳は、7世紀末から8世紀初頭に造られたものと推定されており、1973年4月に古墳が国の特別史跡に指定され、1974年4月に壁画が国宝に指定された。この壁画は漆喰を下地として描かれており、発見後、劣化状況が詳細に確認され、現地保存が決定された。発掘直後の1972年4月から、石室内環境維持のため、石室南側に仮保護施設が設置された。1974年から1976年3月にかけて、石室内外の環境を発掘以前の安定した状態に保つことを目的として石室南側に空調設備を備えた保存施設が建設された。この施設の稼働後、1977年から1984年頃にかけて石室内でカビが定期的に発見された。1990年代に少し沈静化したものの、2001年秋には再び大量にカビが発見され、その後もカビの発生が頻発した。2005年6月、このまま壁画を現地で保存し続けることは難しいと判断され、石室を解体し壁画を修理することが決定された。2006年10月から2007年8月にかけて石室の発掘・解体が行われ、石材は全て仮設修理施設に移され、2010年現在、壁画の修復が行われている [1][2]。



図 1-1 奈良の位置

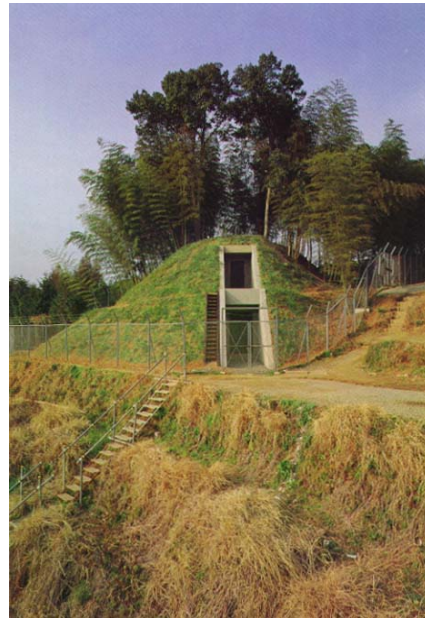


図 1-2 高松塚古墳

古墳壁画の劣化の要因には、カビ等微生物の発生による汚損だけではなく、石室内が乾燥することで起きる漆喰層の剥落や、高松塚古墳では確認されていないが壁画表面における塩の析出などがあり^{注1)}、これらの劣化現象には石室の温湿度環境が大きく影響を与える。カビ等の発生を抑制するには、壁画表面での結露を防ぎ、高湿度環境を避け、温度を低く保つのが望ましい。しかし、相対湿度が低下しすぎてしまうと、脆弱な漆喰層の亀裂、剥落の問題が発生する。古墳壁画を現地で保存するためには、カビ等の発生と壁画剥落を防ぐことが重要であり、石室内の温湿度と壁画の劣化との関係を十分明らかにしておく必要がある。しかし、壁画の発掘から、石室の解体までになされた様々な保存対策や気象条件の変化が、石室温湿度に、どのような影響を与えていたのかは十分に分かっておらず、壁画の劣化と保存環境との関係についても不明確である。これらが明らかとなれば、今後、新たに古墳壁画が発見された場合の発掘と保存を検討する上で非常に有効と考えられる。

1.2 既往の研究

石室を構成する石材やその周囲地盤は、材料の内部に空隙を有する多孔質材料であり、それらの熱水分の移動過程を記述する基礎理論として熱水分同時移動理論が、土壌・建築の分野で既に確立している[3][4][5]。代表的なものとして松本の非可逆過程の熱力学を基礎として材料中の移動を考慮した熱水分同時移動理論があり [6]、本研究では、松本の熱水分同時移動理論に従う。小椋は、松本の熱水分同時移動の理論を用いた地下構造物の熱・湿気性状の予測法を提案し、地盤及び壁体の構成、換気などが温湿度や結露性状に及ぼす影響を明らかにするとともに、熱・湿気環境設計のための簡易予測計算法についての提案を行った [7]。石室は地下構造物ととらえることができ、この手法を石室の温湿度環境を把握するために適応することが可能である。

数値解析によって文化財の保存環境の把握を行い、保存対策の効果を見積もるといった検討は、これまで数多く行われている。石崎、犬塚らは、熊本城の天守閣にある重要文化財「細川家舟屋形」を展示しているケースの中の湿度を安定化させる目的で、展示ケースの壁部分、天井部分などに調湿建材を設置し、建材設置前と後の湿度変化を熱・湿気回路網解析と熱気流解析にて明らかにした[8]。Lacanette らは、フランスのラスコー洞窟内の熱気流解析を、数値流体解析により明らかにした[9]。

古墳の保存環境については、高松塚古墳を対象として、いくつか検討が行われている。石崎らは、高松塚古墳の石室解体前の地盤冷却の予測と制御を行う目的で、2次元の墳丘部を考慮した熱計算プログラムを用いて、冷却管を用いた墳丘部の冷却に対する数値解析を行い、冷却後の地盤及び石室内温度の変動を予測し、解析結果と測定値の比較を行い、良い一致が得られることを示した[10]。小椋らは、高松塚古墳の石室解体時に、発掘により露出した石室の躯体の1次元熱移動を考慮した解析を行い、石室が外気に直接晒された場合の石室内温度・相対湿度の変動、結露性状についての検討を行い、石室周囲に覆屋を設ける必要性を示した[11]。多羅間らは、松本の熱水分同時移動理論を用いて、高松塚古

墳の発掘前の石室及びその周囲地盤の熱水分性状の推定を行った。木下らは、石室解体時の断熱覆屋内の、空調制御について実大実験を行い、数値流体解析によりその性状を予測し、石室解体時における結露や、入室作業に伴う温度むらの抑制について検討を行い、保存対策上とすべき事を明らかにした[11][12]。

多羅間らは、さらに石室解体時の墳丘形状変化や石材取り出しを考慮して、石室内温湿度性状の解析を行い、断熱覆屋の設置以前に墳丘に設置した断熱材が石室内結露の抑制に効果的であったことや、断熱覆屋による石室周囲環境制御が、石室内温湿度の安定化に大きく寄与していたことを明らかにした[13]。また一方で、過去の高松塚古墳の保存施設稼働時の石室内温湿度性状を明らかにするため、劣化に影響を与えたと考えられる石室温度上昇の要因の検討が行われつつある[14][15][16]。これら検討は、主に高松塚古墳の保存施設稼働後や石室解体時に行われた検討であり、重要な知見を与えている。

しかし、以上の研究は、高松塚古墳の石室周辺を空調等により制御することで保存環境の維持を行う場合における検討であり、発掘時の古墳壁画の保存を対象として、発掘時及び発掘直後の空調を用いない応急的な保存対策を行っていた時期における、保存対策の効果に関する検討はこれまで行われていない。

1.3 研究の目的

本研究では、古墳発掘時に注目して、古墳の石室の発掘前から、発掘時期、現地保存、そして保存施設稼働までに行われた保存対策と環境条件の変化が石室内温湿度環境に与えた影響を明らかにする。検討にあたっては、高松塚古墳を対象として、そこでの石室内の温湿度変動の測定値や記録[1][17]などを元に、影響を与える要因を取り上げて、熱水分同時移動理論を基礎とする数値解析によって石室内温湿度環境を推定する。検討にあたってモデル化や境界条件などの設定には、過去の石室周囲の環境や内部作業などに関する測定値、記録を可能な範囲で考慮するが、不明な点は推定を行う。以上を踏まえた検討によって、古墳発掘の適切な季節や古墳発掘時の適切な保存対策の提案を行うことを全体的な目的としている。

1.4 論文の構成

以上の目的と背景を踏まえ、本研究では発掘時における古墳壁画の保存環境に関して、以下の項目について検討を行う。図 1-3 に本論文の構成を示す。

第2章では、本章では、高松塚古墳の発掘調査とその時に行われた保存対策の概要について述べ、石室内温湿度等の測定値について分析を行う。

第3章では、古墳壁画の劣化現象と石室内の温湿度環境との関係について述べ、本研究で用いる保存対策の効果を判断する温湿度等の評価指標について述べる。

第4章では、本研究で用いる熱水分同時移動解析に関する基礎理論と数値解析法について述べる。また、墳丘の表面の覆う植生を含めた地表面境界の熱水分移動に関するモデル

について示し、数値解析において墳丘部及び石室の形状変化を取り扱う手法を示す。

第5章では、解析に用いる外界気象条件と材料の熱水分物性値について述べる。

第6章では、高松塚古墳発掘時の石室内の温湿度変動について述べる。3次元解析によって石室内温湿度環境を推定し、第2章の測定値と比較を行う。次に、高松塚古墳発掘から、保存施設稼働までに行われた保存対策の条件下における石室内温湿度や周辺地盤の熱水分場を明らかにする。また、以後の検討で用いる2次元解析とここで示す3次元解析の結果について比較を行う。

第7章では、高松塚古墳を対象として、異なる発掘季節の石室内温湿度環境について検討を行い、適切な発掘季節の提案を行う。

第8章では、高松塚古墳において、発掘直後に実際に行われた応急的な保存対策の効果について検討を行う。個別の保存対策について解析を行い、それらの結果を比較することで、石室発掘後の際に行われた保存対策の効果を明らかにする。

第9章では、高松塚古墳を対象として、発掘直後の古墳壁画の保護のため、発掘により露出した部位を保護する材料の、熱容量、吸放湿性、熱抵抗が石室内温湿度に与える影響について検討を行う。

第10章では、各章で得られた結果のまとめと、今後の課題について示す。

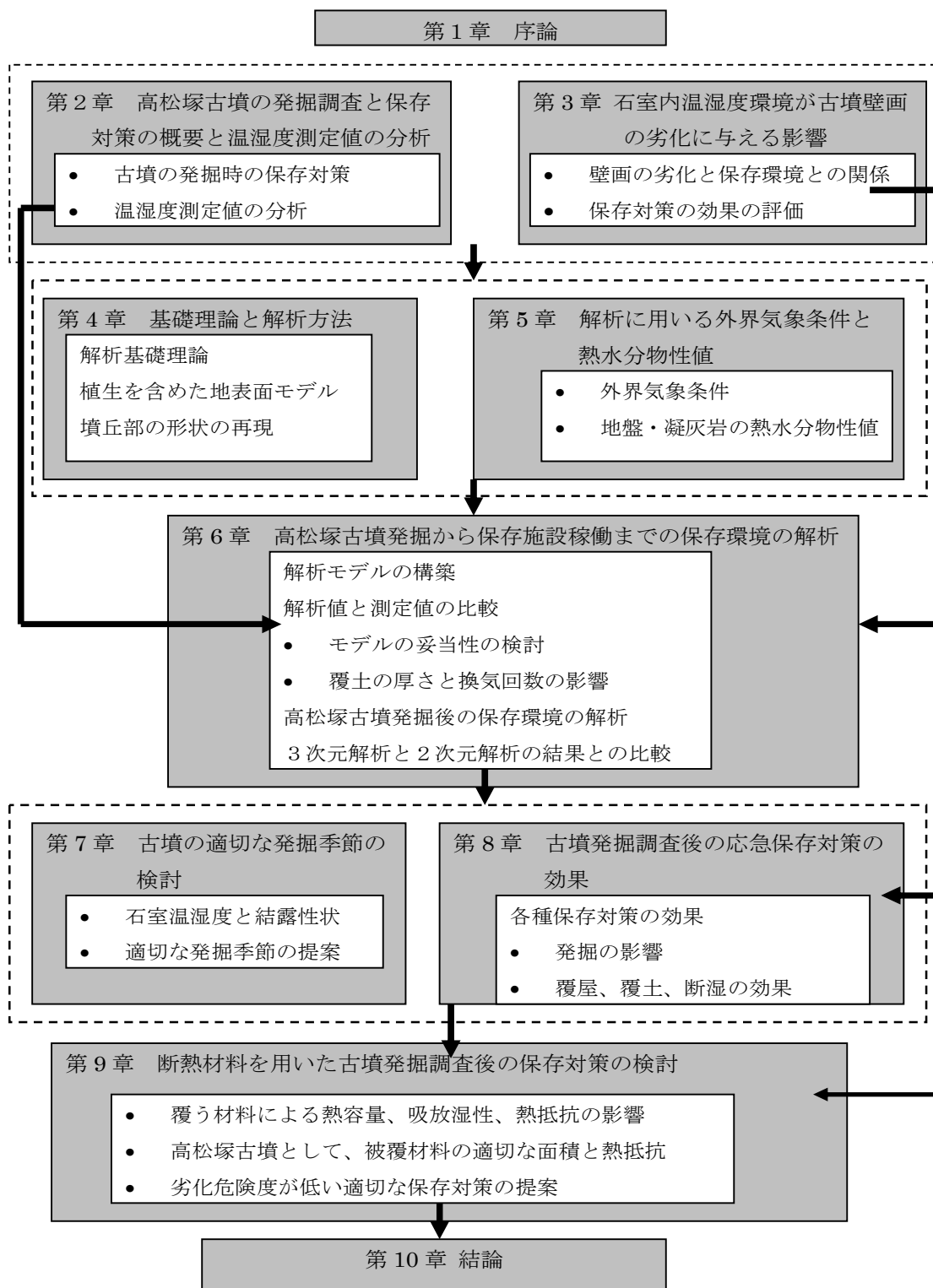


図 1-3 本論文の構成

注 1) 劣化には、過去の修理、カビ処置の後に生じるものもある。過去の修理において、剥落防止のために樹脂注入された部分では、濡れ色に変色している箇所や、漆喰層が硬化している箇所があった。カビ処置については、注入された古い樹脂層が白濁化しつつ剥離している箇所が見受けられたり、処置の後、描線が薄れるものがあった[12]。

第 1 章の参考文献

- [1] 文化庁： 国宝高松塚古墳壁画 一保存と修理一、第一法規出版（1987）
- [2] 文化庁： 国宝高松塚古墳壁画保存管理の経緯（昭和 47 年～平成 18 年 9 月）、文化庁ホームページ(2010 年 4 月 8 日アクセス)
http://www.bunka.go.jp/takamatsu_kitora/hekiga_hozonkanri.html
- [3] Philip, J.R., De Vries, D.A., Moisture Movement in Porous Materials under Temperature Gradient, Trans. Ameri. Geoph. Union, Vol.38,222-232, (1957)
- [4] 松本衛： 建築壁体における熱・水分の同時移動および水分蓄積に関する研究、博士論文（1978）
- [5] 池田哲朗： 結露障害防止に関する基礎的研究、博士論文（1979）
- [6] 松本衛： 新建築学大系 10 環境物理 3. 湿気、彰国社（1984）
- [7] 小椋大輔： 地下構造物の熱・湿気性状に関する研究、博士論文（2000）
- [8] 石崎武志・白石靖幸・肥塚祐美子： 熊本城「細川家舟屋型」の保存環境に関する研究、保存科学、第 44 号、pp.227-249（2006）
- [9] Delphine Lacanette・Philippe Malaurent: The Lascaux cave and the climate change. International Symposium on the Conservation and Restoration of Cultural property, pp141-156(2008)
- [10] 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、第 45 号、pp.59-68（2006）
- [11] 小椋大輔・石崎武志・銚井修一・北原博幸・犬塚将英・多羅間次郎・木下舞子： 高松塚古墳石室解体時の空調方法の検討、保存科学、第 46 号、pp.1-11（2007）
- [12] 小椋大輔・犬塚将英・銚井修一・石崎武志・北原博幸・多羅間次郎： 高松塚古墳石室解体時の壁画保存のための温湿度環境の制御、保存科学、第 47 号、pp.1-9（2008）
- [13] 多羅間次郎： 古墳壁画保存に関する研究 一石室解体時の墳丘部の形状変化が石室の熱水分性状に与える影響一、京都大学大学院工学研究科建築学専攻 修士論文（2008）
- [14] 小椋大輔、銚井修一、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 一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一、保存科学、第 48 号、pp.1-11、2009
- [15] 小椋大輔、銚井修一、李永輝、石崎武志： 過去の高松塚古墳石室内の温湿度変動解析 (2) 墳丘部表面の植生等の変化が石室内温度変動に与える影響、保存科学, No.49, pp.73-85, 2010

- [16] 小椋大輔、銚井修一、李 永輝、石崎武志：過去の高松塚古墳石室内の温湿度変動解析 (3) 吸放熱パネルへの送水温度および入室が石室内温湿度変動に与える影響, 保存科学, No.49, pp.87-96, 2010
- [17] 石崎武志：過去の高松塚古墳石室内の温湿度について、高松塚古墳壁画劣化原因調査検討会、第4回、資料4 (2008)

第2章 高松塚古墳の発掘調査と保存対策の概要と温湿度測定値の分析

2.1 はじめに

本章では、高松塚古墳の概要と、発掘調査とその時に行われた保存対策について述べ、石室内温湿度等の測定値について分析を行う。

2.2 高松塚古墳の発掘調査と保存対策の概要

2.2.1 高松塚古墳の概要

高松塚古墳は、奈良県高市郡明日香村大字平田字高松 444 番地に所在する。図 2-1 に示すように、墳丘の規模・形状は、下段が直径約 23m、上段が直径約 18m の二段築成の円墳であり、周囲には、幅約 2m の周溝が巡る[1]。古墳の築造時期は、出土遺物等から、7 世紀末から 8 世紀初頭と考えられている。石室は、内法で、奥行 266cm、幅 104cm、高さ 113cm であり、石材を切石とし、東西壁各 3 枚、天井 4 枚、床 3 枚、南北壁各 1 枚を使用し、石室を構築している。壁画は、石室を構成する石材の上に数ミリの漆喰を塗り、その上に彩色を施すことで描かれている[2]。

1972 年 3 月に行われた発掘調査で、石室内の壁画が発見され、1973 年 4 月 23 日には古墳全体が特別史跡に、さらに 1974 年 4 月 17 日には壁画（天井・東壁・西壁・北壁の四面）が絵画として国宝に、出土品が考古資料として重要文化財に指定された[2]。

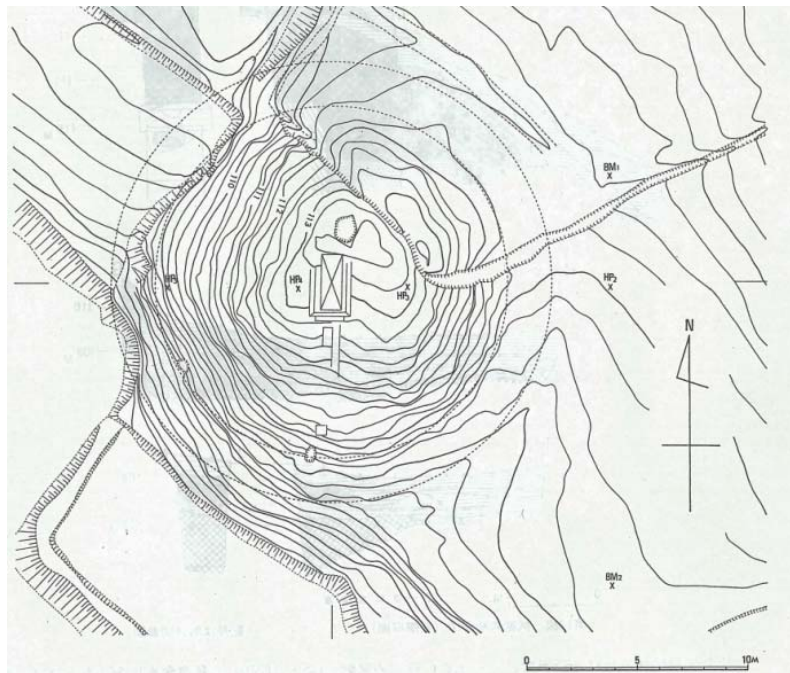


図 2-1 高松塚古墳の墳丘の実測図[図表出典(i)]

2.2.2 保存対策の経緯

壁画の保存対策については、文化庁により設置された「高松塚古墳応急保存対策調査会」（1972年4月～11月）及びそれを発展し引き継いだ「高松塚古墳保存対策調査会」（1972年12月～）により検討が行われた。様々な分野の専門家からなるこれらの調査会で、壁画の保存について多角的に検討された。この中で、遺跡の現地保存を原則とし、既に壁画の保存修理に関する多くの経験を有していたイタリアやフランスの専門家の意見等も参考にされ、昭和48年10月には、壁画修復部会において壁画を現地で保存し修理する方針が固まった。以降、文化庁はこの基本方針に沿い壁画の保存対策を進めてきた。

高松塚古墳の現地保存対策の経緯は以下のとおりである[2]。

(1) 発掘前（1972年3月6日以前）

高松塚古墳壁画は、7世紀末から8世紀初頭に描かれ、昭和47年3月6日の壁画が発見されるまで約1300年の間に図2-2に示すような状態であった。

(2) 発掘時（1972年3月6日から1972年4月1日まで）

昭和47年3月6日、明日香村を事業主体として明日香村教育委員会と奈良県立橿原考古学研究所による古墳の発掘調査が行われた。図2-3 発掘時の墳丘の様子を示す。図2-4に発掘時石室露出した部位の様子を示す。



図 2-2 発掘前[図表出典(ii)]



図 2-3 発掘時[図表出典(ii)]



図 2-4 発掘時の石室の南側露出部位[図表出典(i)]

(3) 発掘調査後から空調設備の完成まで(1972年4月2日から1975年3月29日まで)

1972年4月2日から、石室内の温湿度の調整のために、発掘部位を覆うように石室南側前方に幅2.75m、奥行7.5m、高さ4.5mの合成樹脂波板葺き、片流れ、木骨造の仮保護施設が設置された。石室の露出した部位に覆土を被せた。この覆土の下にポリプロピレン布(断湿)が敷設された。図2-5は発掘終了後の仮保護施設の様子である。

(4) 空調設備がある時期(1975年3月29日から2006年10月まで)

石室内環境を発掘以前の状態に保つために、1974年7月から、保存施設建築工事は開始した。1976年3月29日に、図2-6と図2-7に示すような保存施設が竣工した。保存施設稼働後、1980年にカビの大量発生をみるが、しばらく沈静化し、次にカビの大量発生をみたのは2001年であった。2005年6月、このまま壁画を現地で保存し続けることは難しいと判断され、石室を解体し壁画を修理することが決定された。



図2-5 発掘終了後の仮保護施設の様子
[図表出典(ii)]

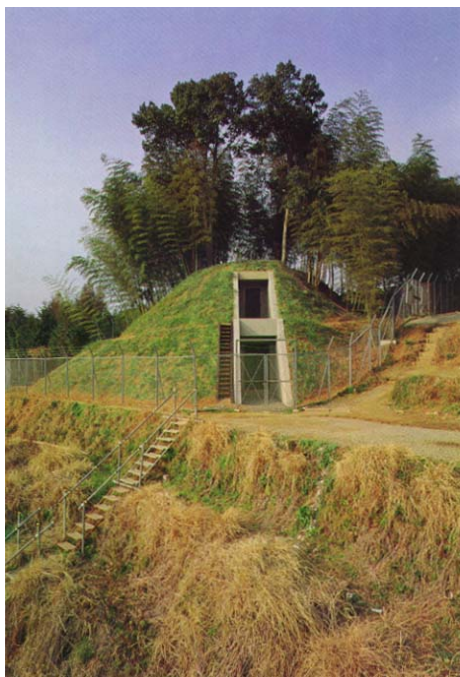


図2-6 保存施設の様子[図表出典(ii)]

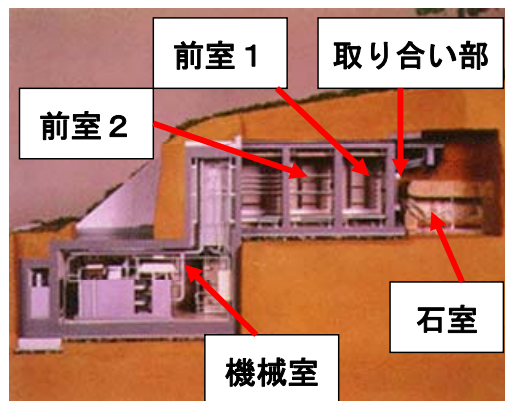


図2-7 保存施設断面 [図表出典(ii)]

(5) 石室の発掘・解体 (2006年10月後)

2006年10月から2007年8月にかけて石室の発掘・解体が行われ、石材は全て仮設修理施設に移され、現在、壁画の修復が行われている。

2.3 高松塚古墳石室の温湿度の測定値の分析

2.3.1 外気温

奈良県内で長期にわたり外気温についての観測記録があるのは奈良地方気象台（奈良県奈良市半田開町7番地）である。奈良地方気象台で測定された1954から2009までの外気温の年平均値を図2-8に示す[4]。これを見ると1955年から1985までは、外気温の年平均値は14℃台に収まっており、年変化は小さい。

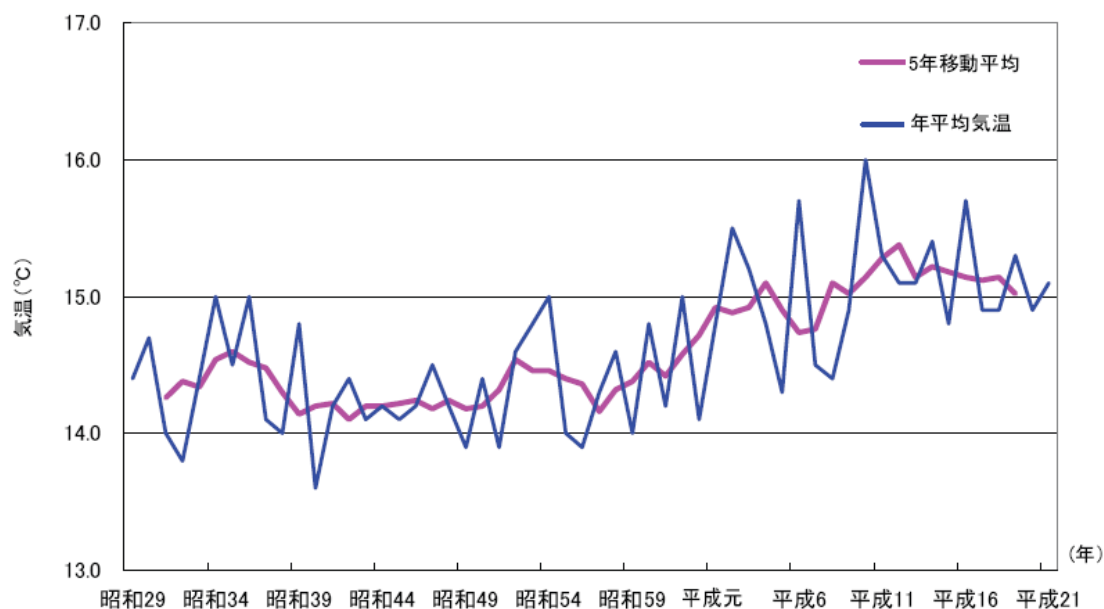


図 2-8 奈良地方気象台における年平均気温とその5年移動平均[図表出典(iii)]

2.3.2 降雨量

奈良地方気象台における1972年以降の降水量の変化を見ると、年間降水量は特に増加していないが、日降水量が10mm以上の日数が、1990年以降、しばしば一年に50日を超えるようになった[4]。

2.3.3 石室内の温湿度

石室内の温度の記録は、以下のような期間についてある。

1972年4月～11月

1973年1月～12月

1978年1月～12月

1979年1月～2005年8月

特に石室内の温度は、保存施設の空調設備設計の重要な要素となるため、1972年から1976年までの約4年間にわたって^{注1)}、ガラス管に封入した温度計を石室床の中央付近に設置して測定を行った。石室前に保存施設が建設された1976年からは、空調点検時に図2-9のように石室内中央部、上中下の位置に設置された温度計（矢印）を用いて温度測定が行われた。図2-10のように1985年1月から1989年12月石室内中央部、上中下の位置に温度変動の比較を示す。図2-9のように、石室内中央部、上中下の位置に室空気の温度差は小さい、 0.2°C 以下になっており、ほぼ一様とみなせる[3]。



図 2-9 石室内に設置された温度計（矢印：温度計位置[図表出典(iii)]

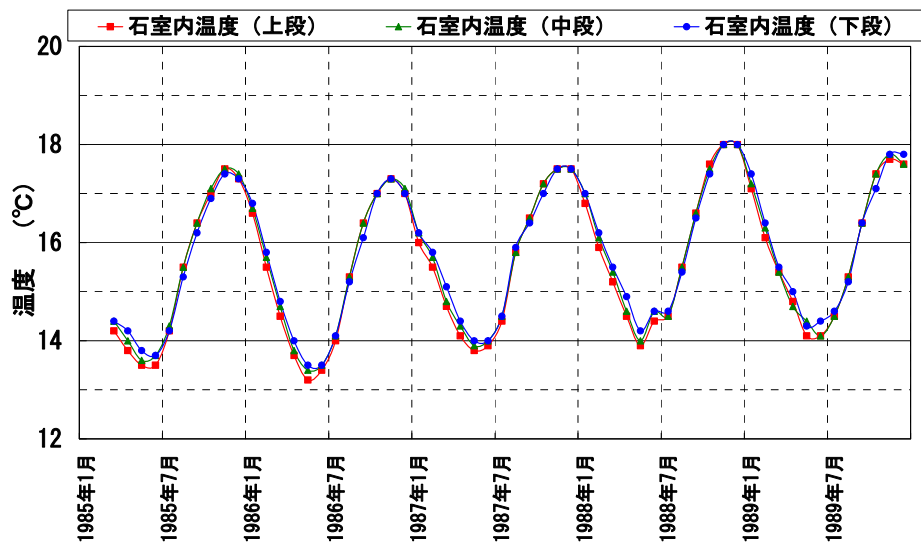


図 2-10 測定高さの違いによる石室内温度変動の比較（1985.1-1989.12）

図 2-11 は 1972 年の石室温度の測定値である。図 2-12 は 1973 年の石室温度の測定値である。これらの測定結果を見ると、1972 年は石室床上で、最低温度は 4 月中旬で 11°C で、最高温度は 10 月中旬で 17°C であった。1973 年には石室内温度は年平均が 13.6°C であり、最低温度は 5 月初めに 10.8°C を、最高温度は 10 月から 11 月初めに 16.4°C であった。また、

4月上旬と10月上旬頃に、外気温と石室内温度がほぼ一致することも、この測定によって明らかとなった。図2-13に、1972年から1973年にかけての石室内温度の測定値を併せて示す。

石室内の相対湿度はほぼ100%であり、石室内に人が立ち入ると90%程度に低下した[3]。

閉鎖中の石室内気温測定値表 (測定時間14:00)

月日	石室外温度℃	石室内温度℃	月日	石室外温度℃	石室内温度℃
4月18日	30.0	11.0	7月2日	33.0	11.7
19日	31.5	10.9	9月4日	33.8	14.7
20日	22.0	11.0	12日	28.0	15.0
22日	19.0	10.6	20日	22.5	15.5
27日	20.5	11.0	26日	23.0	15.9
5月1日	21.5	11.0	27日	24.0	16.2
9日	20.0	11.0	28日	20.0	16.0
12日	31.0	10.8	29日	21.0	15.7
21日	23.0	10.8	10月24日		17.0
6月5日	25.6	11.0	11月10日		16.9
18日	22.5	11.0			

図2-11 1972年の石室温度の測定値[図表出典(ii)]

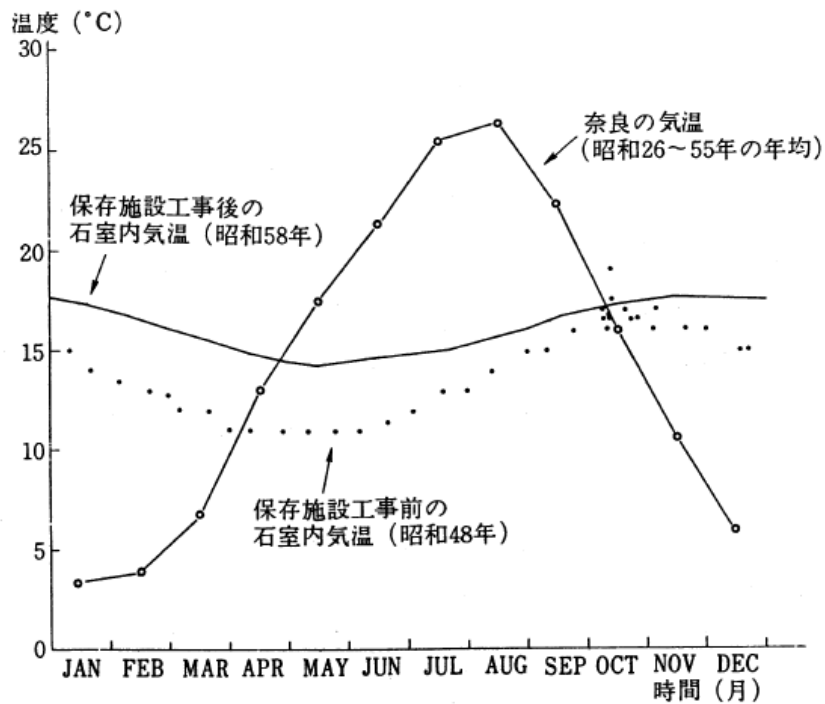


図2-12 1973年の石室温度の測定値[図表出典(ii)]

注 1) 当時、石室内に温度計を設置して測定が行われていたが、保存施設の建設開始から竣工までの間（1974-1976年）、正確な測定データが記録できなかった。

図表出典

(i) 奈良県立橿原考古学研究所編：壁画古墳高松塚中間報告，奈良教育委員会・奈良県明日香村（1972）

(ii) 奈良文化財研究所飛鳥資料館ホームページ（2010年6月16日アクセス）

<http://www.asukanet.gr.jp/ASUKA2/TAKAMATUTUKA/takamatutuka.html>

(iii) 高松塚古墳壁画劣化原因調査検討会：高松塚古墳壁画劣化原因調査報告書（2010）

第2章の参考文献

[1] 奈良県立橿原考古学研究所編：壁画古墳高松塚中間報告，奈良教育委員会・奈良県明日香村（1972）

[2] 文化庁：国宝高松塚古墳壁画 一保存と修理一、第一法規出版（1987）

[3] 高松塚古墳壁画劣化原因調査検討会：高松塚古墳壁画劣化原因調査報告書、38-40（2010）

第3章 石室内温湿度環境が古墳壁画の劣化に与える影響

3.1 はじめに

本章では、石室内温湿度環境が古墳壁画の劣化に与える影響について整理し、古墳壁画の劣化と保存環境との関係を説明し、本論文で用いる評価方法を提示する。

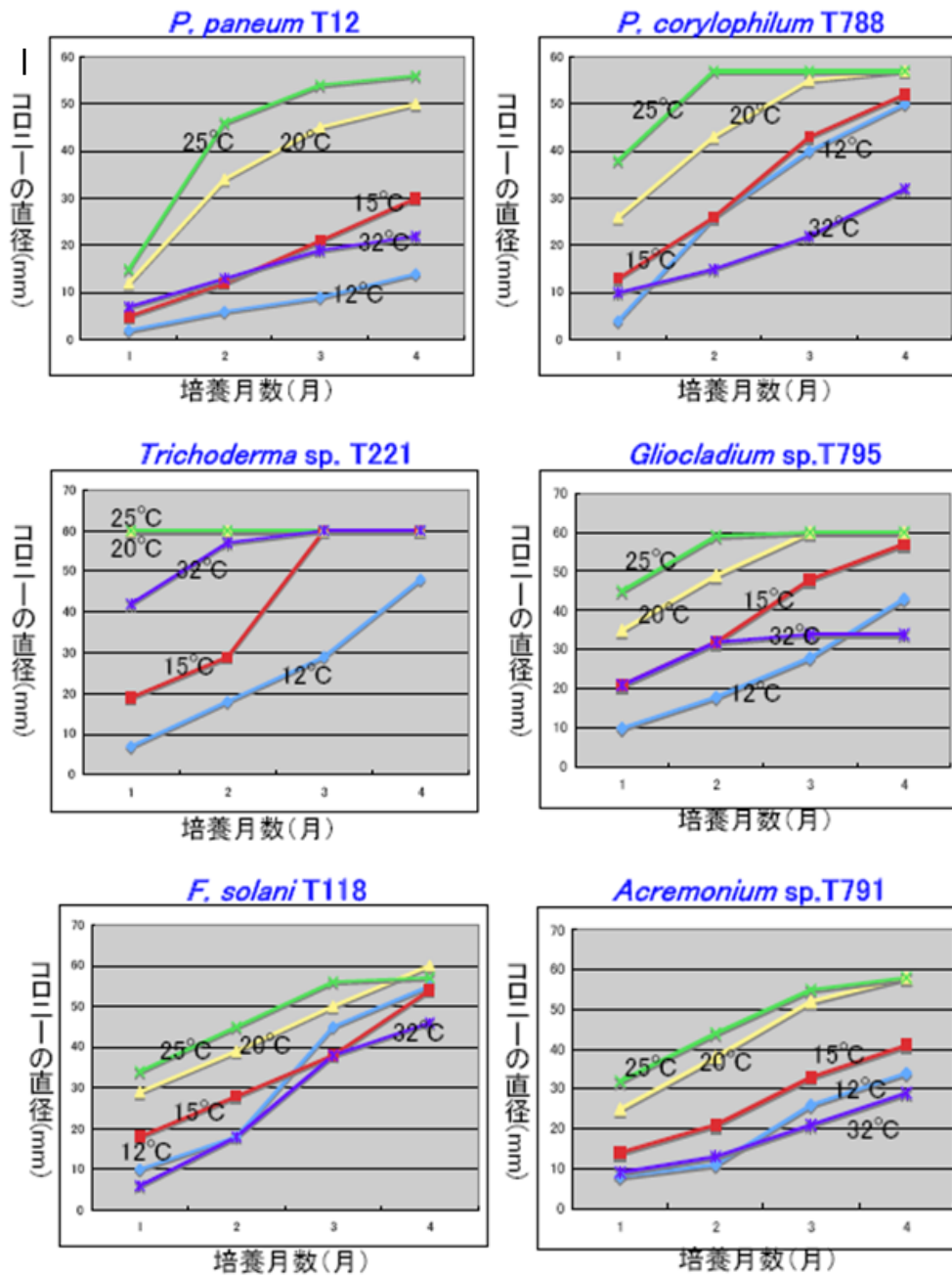
3.2 古墳壁画の劣化と保存環境との関係

古墳壁画の劣化はカビ等の微生物の発生による生物的劣化、壁画の描かれている漆喰層の剥落、壁画表面層の塩類風化などの物理的劣化が考えられる^{註1)}。また、壁画下地の漆喰の炭酸カルシウムが水に溶けて流れ出したり、空気中の二酸化炭素と反応し再形成されるといった化学的劣化がある。

生物的劣化としての、カビの生育には、①栄養、②水分、③酸素、④温度が必要となる。栄養については、有機物全てがカビの栄養分となること、酸素については、石室には隙間があることから、この両者は、完全に除去するのは難しい。図 2-1 に高松塚古墳由来のカビの温度差による試験に発育性の比較を示す[1]。温度については、図 2-1 より、菌の成長速度は温度に正比例の関係となるが、5℃程度でも成長が止められないことが分かっている[2] [3]。すなわち室内温度が低い程、カビの成長速度が遅くなるが、温度を下げることで成長を止めることは難しい。湿度については、室内の相対湿度が高ければ高いほどカビの成長しやすい環境といえる。相対湿度を下げることでカビ成長速度を遅らせることができ、60%RH 以下ではカビは発育しないが、漆喰の剥落等の別の劣化を引き起こす可能性が存在する。また、壁体表面における結露発生は、カビの発育を促進するため、極力避けなくてはならない。

物理的劣化としては、漆喰層の剥落と、壁体表面層に塩が析出されることで起きる塩類風化が考えられる。漆喰層の剥落は、石室内の相対湿度が低下することや乾湿の繰り返しにより発生するが、どの程度の湿度や乾湿の繰り返しでこうした剥離現象が起きるのかは十分に分かっていない。ただし、以下の事実により湿度環境と剥落の危険性の関係が推測される。高松塚古墳の石室内では、入室時でも相対湿度が 90%を下回らないように湿度が管理されてきたが、1972 年 9 月 30 日及び 10 月 1 日に東壁男子群像下方の余白部分の剥落が確認されており、また 2001 年 12 月 19 日から翌 2002 年 1 月 28 日の間に西壁女子青色裳の剥落が生じていることが分かっている[4]。相対湿度が 90%以上の高温な環境であっても剥落が生じる可能性がある。また、高松塚では確認されなかったが、塩類風化は壁画表面近傍において水が蒸発し、塩類がそこに蓄積され結晶化することにより起こる[5]。このような現象を抑えるには、石室内側への水分蒸発を避ける必要がある。

化学的劣化については、長期に亘る漆喰層の脆弱化の要因の一つといえるが、保存においては、二酸化炭素濃度を上げない[6]ことが対策として考えられている。



試験方法
 培養温度：12°C, 15°C, 20°C, 25°C
 培養期間：4ヶ月
 試験項目：集落性状（発育）観察
 培地：ポテトデキストロース寒天平板（直径 60mm）

図 2-1 高松塚古墳由来のカビの温度差による発育性[図表出典(i)]

3.3 保存対策の効果の評価について

今後、上記の劣化現象について、温湿度との関連を明らかにし定量的に扱う必要があるが、ここでは、カビ等微生物の成長、漆喰の剥落等の定性的特徴と温湿度の関係に注目して解析結果の検討を行う。

カビ等生物的劣化の成長を抑制するには、壁画表面での結露を防ぎ、高湿度環境を避け、温度を低く保つのが望ましい。しかし、相対湿度が低下しすぎてしまうと、脆弱な漆喰層の亀裂、剥落の物理的劣化が発生する。これらを考慮して、本論文では、壁画の劣化の程度を評価するために、以下の4つの評価指標を用いる。

- (1) 石室内壁表面の期間^{注2)}最高温度
- (2) 石室内壁表面の期間平均温度
- (3) 石室内壁表面の期間最低相対湿度
- (4) 石室内壁表面の結露発生面積率^{注3)}(期間結露日数)

ここでは、石室内壁表面の期間最高温度、期間平均温度、期間結露発生面積率、期間結露日数が大きい場合、カビ等微生物による生物的劣化に対する危険度が高くなると考える。また、石室内壁表面の年間最低相対湿度が低い場合、乾燥剥離による物理的劣化に対する危険度が高くなると考える。今後、上記の劣化現象について、温湿度との関連を明らかにする必要があるが、ここでは、カビ等微生物の成長、漆喰の剥落等の定性的特徴と4つの評価指標の関係を用いて解析結果の相対的な比較を行うことにより検討を行う。

3.4 第3章のまとめ

本章では、古墳壁画の劣化現象と石室内の温湿度環境との関係について整理し、保存対策の効果を判断する温湿度等の評価指標を提示した。

カビ等生物の成長を抑制するには、壁画表面での結露を防ぎ、高湿度環境を避け、温度を低く保つことが望ましい。しかし、相対湿度が低くすぎると、脆弱な漆喰層の亀裂、剥落という物理的劣化が発生する。

壁画の劣化の程度を評価するために、(1) 石室内壁表面の期間最高温度、(2) 石室内壁表面の期間平均温度、(3) 石室内壁表面の期間最低相対湿度、(4) 石室内壁表面の結露発生面積率(期間結露日数)の4つの評価指標を示した。

これら指標で、石室内壁表面の期間最高温度、期間平均温度、期間結露日数と期間結露発生面積が大きい場合、カビ等微生物による生物的劣化の危険度が高くなると考え、石室内壁表面の年間最低相対湿度が低い場合、乾燥剥離による物理的劣化の危険度が高くなると考え、以後の検討において、この指標を用いて結果の相対的な比較を行うことを述べた。

注

注1) 劣化には、過去の修理、カビ処置の後に生じるものもある。過去の修理において、剥落防止のために樹脂注入された部分では、濡れ色に変色している箇所や、漆喰層が硬化している箇所があった。カビ処置については、注入された古い樹脂層が白濁化しつつ剥離

している箇所が見受けられたり、処置の後、描線が薄れるものがあった[7]。

注 2) 検討期間に併せて変更し、年変動を対象とする場合は年間となる。

注 3) 結露発生の判定は、通常相対湿度 100%で定義されるが、本論では、ほぼ飽和と見なせる水分化学ポテンシャルとして -5J/kg (相対湿度 99.999%)以上で、室内空気から壁表面へ水分が移動する条件とする。前者は、数値計算上の発散を抑えるためであり、後者は、壁体中を水が浸透し室内へ流出する場合は結露といえず、それを除くためである。結露の判定は、飽和を結露とする場合より厳しいものであり、これは結露発生に対して危険側の判定となっている。また結露発生の程度を表す指標として、「結露発生面積率」を定義する。これは、ある時間における室内表面積に対する結露発生部位面積の割合を表す。

図表出典

(i) 高鳥浩介：高松塚古墳石室から分離されたカビの生理試験、高松塚古墳壁画劣化原因調査検討会（第 10 回）資料 5-3 (2009)

第 3 章の参考文献

- [1] 高鳥浩介：高松塚古墳石室から分離されたカビの生理試験、高松塚古墳壁画劣化原因調査検討会（第 10 回）資料 5-3 (2009)
- [2] 高鳥浩介：高松塚古墳から採取されたカビ・酵母の発育温度試験、国宝高松塚壁画恒久対策検討会（第 4 回）資料、資料 2-1 (2005)
- [3] 阿部恵子：高松塚古墳から採取されたカビ・酵母の発育調査、国宝高松塚壁画恒久対策検討会（第 4 回）資料、資料 2-2 (2005)
- [4] 高松塚古墳壁画劣化原因調査検討会：高松塚古墳壁画劣化原因調査報告書、p.28 (2010)
- [5] 石崎武志：文化財を取り巻く環境の温湿度解析、平成 18 年度保存科学部研究会「文化財を取り巻く環境の温湿度解析」 東京文化財研究所、p.1, (2006)
- [6] 文化庁： 国宝高松塚古墳壁画 一保存と修理一、第一法規出版 (1987)
- [7] 高松塚古墳壁画劣化原因調査検討会：高松塚古墳壁画劣化原因調査報告書、pp.38-40 (2010)

第4章 基礎理論と解析方法

4.1 はじめに

本章では、古墳の石室及び周辺地盤の熱水分性状を解析する際の基礎となる地盤、建築壁体及び地下空間の熱水分の収支を記述する基礎方程式を示し、裸地や植生といった墳丘表面の境界条件式や、石室内表面等の境界条件式を示す。次に、これら方程式を基礎とした数値解析手法について述べる。この中で、墳丘部の不整形な形状を取扱う方法について提案を行う。

4.2 基礎方程式

4.2.1 熱水分同時移動方程式

古墳の墳丘を形成する土壌や石室を構成する石は、多孔質材料である。このような多孔質材料中の熱と水分の移動は、蒸発潜熱や含水率に伴う熱物性の変化などの形で相互に影響を及ぼしあう同時移動現象といえる。本論文で用いる、多孔質材料中の熱水分移動に関する支配方程式は、熱水分移動の駆動力として、温度、水分化学ポテンシャルを用いる熱水分同時移動方程式である[1]。水分化学ポテンシャル μ は以下のように定義される。

$$\mu = R_v T \ln(h) \quad \dots (4-1)$$

ここで、 R_v は水蒸気の気体常数 ($R_v = R/M_v$)、 R は一般気体常数 ($\text{Pa} \cdot \text{m}^3 / \text{kmol} \cdot \text{K}$)、 M_v は水蒸気の分子量 (kg / kmol)、 T は絶対温度 (K)、 h は相対湿度 (%) である。

水分化学ポテンシャルは、非平衡熱力学における Gibbs の自由エネルギーに相当し、自由水を基準とした熱力学ポテンシャルである。

また、ここでは以下のような仮定を用いる。

- 1) 多孔質材料内部の気相と液相水分は、局所的には相間で平衡している。
- 2) 材料は均質性、等方性を有する。
- 3) 水分の吸放湿履歴は考慮しない。

以上の仮定から、熱・水分同時移動方程式は以下の式ようになる。

熱収支式は、

$$c\rho \frac{\partial T}{\partial t} = -\nabla \cdot q_s - r\nabla \cdot J_{1w(s)} \quad \dots (4-2)$$

水分収支式は、

$$\rho_w \left(\frac{\partial \psi}{\partial \mu} \right) \frac{\partial \mu}{\partial t} = -\nabla \cdot J_w \quad \dots (4-3)$$

ここで、

$$q_s = -\lambda \nabla T \quad \dots (4-4)$$

$$J_w = J_{1w(s)} + J_{2w(s)} \quad \dots (4-5)$$

$$J_{1w(s)} = -\lambda'_{\mu g} (\nabla \mu - nF_W) - \lambda'_{Tg} \nabla T \quad \dots (4-6)$$

$$J_{2w(s)} = -\lambda'_{\mu l} (\nabla \mu - nF_W) - \lambda'_{Tl} \nabla T \quad \dots (4-7)$$

ここで、 $J_{1w(s)}, J_{2w(s)}$ は、それぞれ地盤内の気相水分流、液相水分流 (kg/m^2s)、 $c\rho$ は材料のみかけの容積比熱 ($J/m^3 \cdot K$)、 q_s は、熱流 (W/m^2)、 ρ_w は液水の密度 (kg/m^3)、 ψ は含水率 (m^3/m^3)、 F_W は水分 1 kg に作用する外力重力 $g (=9.8) (m/s^2)$ 、 $\lambda'_{\mu g}$ は水分化学ポテンシャル勾配に関する気相水分伝導率 ($kg/m \cdot s(J/kg)$)、 λ'_{Tg} 温度勾配に関する気相水分伝導率 ($kg/m \cdot s \cdot K$)、 $\lambda'_{\mu l}$ は水分化学ポテンシャル勾配に関する液相水分伝導率 ($kg/m \cdot s(J/kg)$)、 λ'_{Tl} は温度勾配に関する液相水分伝導率 ($kg/m \cdot s \cdot K$)、 n は鉛直下向きを正とする単位ベクトルである。

また、 J_w は $J_{1w(s)}$ と $J_{2w(s)}$ とを足しあわした全水分流であり、以下のようになる。

$$J_w = -\lambda'_{\mu} (\nabla \mu - nF_W) - \lambda'_{T} \nabla T \quad \dots (4-8)$$

ただし、

$$\lambda'_{\mu} = \lambda'_{\mu g} + \lambda'_{\mu l} \quad , \quad \lambda'_{T} = \lambda'_{Tg} + \lambda'_{Tl} \quad \dots (4-9)$$

4.2.2 仮保護施設及び室内表面における熱水分流

石室の室内側表面における熱水分流も、温度、水分化学ポテンシャルを用いて以下の式で表される。なお式の記号については、本章の最後の記号説明を参照頂きたい。

室内側表面の熱境界条件：

$$(\alpha_r + r\alpha'_T)(T_r - T_s) + r\alpha'_{\mu}(\mu_r - \mu_s) = -\left(\lambda + r\lambda'_{Tg}\right) \frac{\partial T}{\partial n} \Big|_s - r\lambda'_{\mu g} \frac{\partial \mu}{\partial n} \Big|_s \quad (4-10)$$

室内側表面の水分境界条件：

$$\alpha'_{\mu}(\mu_r - \mu_s) + \alpha'_T(T_r - T_s) = -\lambda'_{\mu} \left(\frac{\partial \mu}{\partial n} \Big|_s - g\mathbf{n}_j \right) - \lambda'_T \frac{\partial T}{\partial n} \Big|_s \quad (4-11)$$

仮保護施設壁体の室内外表面の境界における熱流は、以下の式で表される。

仮保護施設内側表面の熱境界条件：

$$\alpha_b (T_b - T^{bi}) = -\lambda_b \frac{\partial T}{\partial x} \quad (4-12)$$

仮保護施設外側表面の熱境界条件：

$$\alpha_o (T_o - T^{bo}) + q_{noc} + q_{sol} = -\lambda_b \frac{\partial T}{\partial x} \quad (4-13)$$

4.2.3 仮保護施設と石室空間の熱水分収支式

本解析では、石室空間の温湿度は1質点として取扱い、周囲の壁体との間での熱水分流の収支と、仮保護施設との換気による熱水分移動、石室内の熱水分発生を考慮する。以上をふまえて石室空間の熱水分収支式は以下の式で表される。

石室の空気については、

$$\text{熱収支式} : c\gamma V_r \frac{\partial T_r}{\partial t} = \sum_{j=1}^{m1} S_j \alpha_r (T_j - T_r) + c\gamma V_r N_r (T_b - T_r) + Q_r \quad (4-14)$$

$$\text{水分収支式は} : c'V_r \frac{\partial p_r}{\partial t} = \sum_{j=1}^{m1} S_j \alpha'_r (p_j - p_r) + c'V_r N_r (p_b - p_r) + J_r \quad (4-15)$$

仮保護施設の空気についても、室空気を1質点で代表させた熱水分収支式を用いる。ただし、仮保護施設覆屋の壁面は断湿とし熱移動のみ考慮する。

$$\begin{aligned} \text{熱収支式} \quad c\gamma V_b \frac{\partial T_b}{\partial t} &= \sum_{j=1}^{m2} S_j^{bs} \alpha_b (T_j^{bs} - T_b) + \sum_{j=1}^{m3} S_j^{bi} \alpha_b (T_j^{bi} - T_b) \\ &+ c\gamma V_b N_b (T_o - T_b) + c\gamma V_b N_r (T_r - T_b) + Q_b \end{aligned} \quad (4-16)$$

$$\begin{aligned} \text{水分収支式} : \quad c'V_b \frac{\partial p_b}{\partial t} &= \sum_{j=1}^{m2} S_j^{bs} \alpha'_b (p_j^{bs} - p_b) + c'V_b N_b (p_o - p_b) \\ &+ c'V_b N_r (p_r - p_b) + J_b \end{aligned} \quad (4-17)$$

4.2.4 裸地における地表面境界条件式

外気と接する墳丘部地盤表面を、裸地（竹林がない）とする場合、外気と接する地盤表面での熱・水分境界条件に関する式は以下に示すとおりである。（境界条件式は第 3 種である。）ただし、外気的水分化学ポテンシャルは、外気温度、相对湿度より式（4-1）を用いて算出する。

外気と接する地盤表面の熱境界条件：

$$\begin{aligned} (\alpha_o + r\alpha'_T)(T_o - T_s) + r\alpha'_\mu(\mu_o - \mu_s) + q_{sol} + q_{noc} \\ = -(\lambda + r\lambda'_{Tg}) \frac{\partial T}{\partial n} \Big|_s - r\lambda'_{\mu g} \frac{\partial \mu}{\partial n} \Big|_s \end{aligned} \quad (4-18)$$

外気と接する地盤表面の水分境界条件：

$$\alpha'_\mu(\mu_o - \mu_s) + \alpha'_T(T_o - T_s) + J_s = -\lambda'_\mu \left(\frac{\partial \mu}{\partial n} \Big|_s - g\mathbf{n}_j \right) - \lambda'_T \frac{\partial T}{\partial n} \Big|_s \quad (4-19)$$

4.3 植生を含めた地表面境界の熱水分移動モデル

外気と接する墳丘部地盤表面には、図 4-1 で示すように竹林がある。文献[3]を参考にし、植生を含めた地表面境界の熱水分移動について、植生の熱・湿気抵抗、日射遮蔽などが考慮可能なモデルを作成した。



図 4-1 植生を含めた墳丘部 (図表出典(i))

4.3.1 モデルにおける仮定

植生のモデル化を行うにあたって、以下の仮定を置く。

1. 植生は、鉛直方向に1次元かつ定常的な熱水分の流れが生じるものとして、熱及び水分の蓄積の効果は考慮しない。
2. 植生及び地表面は、植生頂部と地表面の2質点とする。
3. 蒸散及び降雨時に雨水が植生部分に補足されそこで生じる蒸発（遮断蒸発）は植生頂部で生じる。
4. 入射する日射は一部が植生頂部で吸収され、一部が地表面に到達し吸収され、それ以外は大気中に反射される。
5. 植生の密集度が比較的高いことを想定し、夜間放射は、植生頂部のみ考慮する。
6. 植生の蒸散に用いられる水分は墳丘地盤から一様に吸水される。

上記仮定のもとで、植生を有する地表面の熱流及び水分流を求める。

4.3.2 植生及び地表面の熱移動

図 4-2 に植生を含めた地表面境界層の熱移動の概要を示す。
植生頂部の代表点における熱流 q_t [W/m²] は以下の様に表される。

$$\begin{aligned} q_t &= \alpha_t (T_o - T_t) + J \cdot (1 - a) \cdot A_t - \varepsilon_t \cdot q_{nr} - r \cdot (E_t + E_p) \\ &= \frac{1}{R_t} (T_t - T_g) \end{aligned} \quad (4-20)$$

ここで、 α_t : 植生頂部の総合熱伝達率 [W/m²K]、 J : 日射量 [W/m²]、 a : 植生の日射透過率 [-]、 A_t : 植生の日射吸収率 [-]、 ε_t : 植生の放射率 [-]、 q_{nr} : 夜間放射量 [W/m²]、 r : 蒸発潜熱 [J/kg]、 E_t 、 E_p : それぞれ植生の蒸散量、降雨の遮断蒸発量 [kg/m²s]。

式(4-20)で、 $q_{jqet} = J \cdot (1 - a) \cdot A_t - \varepsilon_t \cdot q_{nr} - r \cdot (E_t + E_p)$ と置き、 T_t を消去すると、

$$\begin{aligned} q_t &= \alpha_t (T_o - T_t) + q_{jqet} \\ q_t &= \frac{1}{R_t} (T_t - T_g) \\ \therefore q_t &= \frac{1}{1/\alpha_t + R_t} \left(T_o + \frac{q_{jqet}}{\alpha_t} - T_g \right) \end{aligned} \quad (4-21)$$

地表面の熱流は下式で表される。

$$\begin{aligned} q_g &= \frac{1}{R_t} (T_t - T_g) + J \cdot a \cdot A_g - r \cdot E_g \\ &= -(\lambda + r\lambda'_{Tg}) \frac{\partial T}{\partial x} - r\lambda'_{\mu g} \frac{\partial \mu}{\partial x} \end{aligned} \quad (4-22)$$

ここで、 R_t : 植生の熱抵抗 [m²K/W]、 A_g : 地表面の日射吸収率 [-]、 E_g : 地表面の蒸発量 [kg/m²s]、 λ : 地盤の熱伝導率 [W/mK]、 λ'_{Tg} : 地盤の温度勾配に関する気相水分伝導率 [kg/msK]、 $\lambda'_{\mu g}$: 地盤の水分化学ポテンシャル勾配に関する気相水分伝導率 [kg/ms(J/kg)]。

式 (4-22) の $\frac{1}{R_t} (T_t - T_g)$ に (4-21) を代入し、 $q_{jqeg} = J \cdot a \cdot A_g - r \cdot E_g$ と置くと、

$$q_g = \frac{1}{1/\alpha_t + R_t} \left(T_o + \frac{q_{jqet}}{\alpha_t} - T_g \right) + q_{jqeg} \quad (4-23)$$

ただし、 E_t 、 E_p 、 E_g はそれぞれ以下の式を用いる。

$$\begin{aligned}
E_t &= \rho \beta C_H U \cdot (\partial s / \partial p) \cdot (p_{sat}(T_t) - p_o) \\
E_p &= (1 - F_r) \cdot J_p \\
E_g &= \frac{1}{1/\alpha'_m + R'_t} \cdot (p_g - p_o)
\end{aligned}
\tag{4-24}$$

ここで、 ρ ：密度[kg/m³]、 β ：蒸発効率 [-]、 C_H ：バルク移動係数 [-]、 U ：風速[m]、 s ：比湿[kg/kg]、 p ：水蒸気圧[Pa]、 p_{sat} ：飽和水蒸気圧[Pa]、 p_o ：外気水蒸気圧[Pa]、 p_g ：地表面の水蒸気圧[Pa]、 F_r ：降雨の植生透過率[-]、 J_p ：降雨量[kg/m²s]、 α'_m ：植生頂部の湿気伝達率[kg/m²sPa]、 R'_t ：植生の湿気抵抗[m²sPa/kg]。

解析では、(4-20)式を、植生を含めた地表面の境界条件として与える。

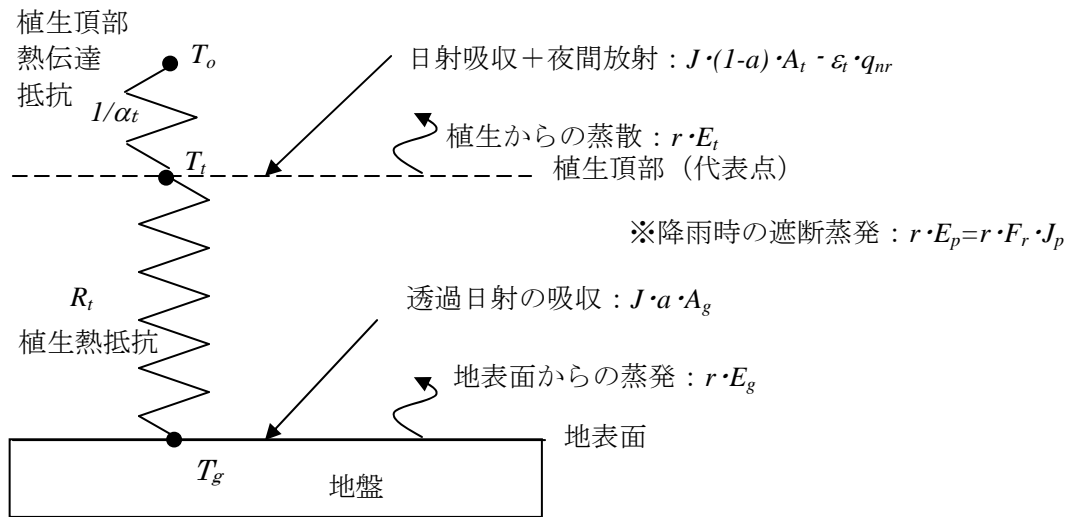


図 4-2 植生を含めた地表面境界層の熱移動の概要

4.3.3 植生及び地表面の水分移動

図 4-3 に植生を含めた地表面境界層の水分移動の概要を示す。

水分流については、地表面境界では植生全体の湿気抵抗と降雨の透過量と地盤への浸透を考慮し、以下の条件式を用いる。

$$\frac{1}{1/\alpha'_m + R'_t} \cdot (p_o - p_g) + F_r \cdot J_p = -\lambda'_\mu \left(\frac{\partial \mu}{\partial x} - g \right) - \lambda'_T \frac{\partial T}{\partial x}
\tag{4-25}$$

解析では、(4-25)式を、植生を含めた地表面の境界条件として与える。

なお植生頂部の蒸散は、墳丘全体で積分し、墳丘地盤から一様に吸水されるものとする。

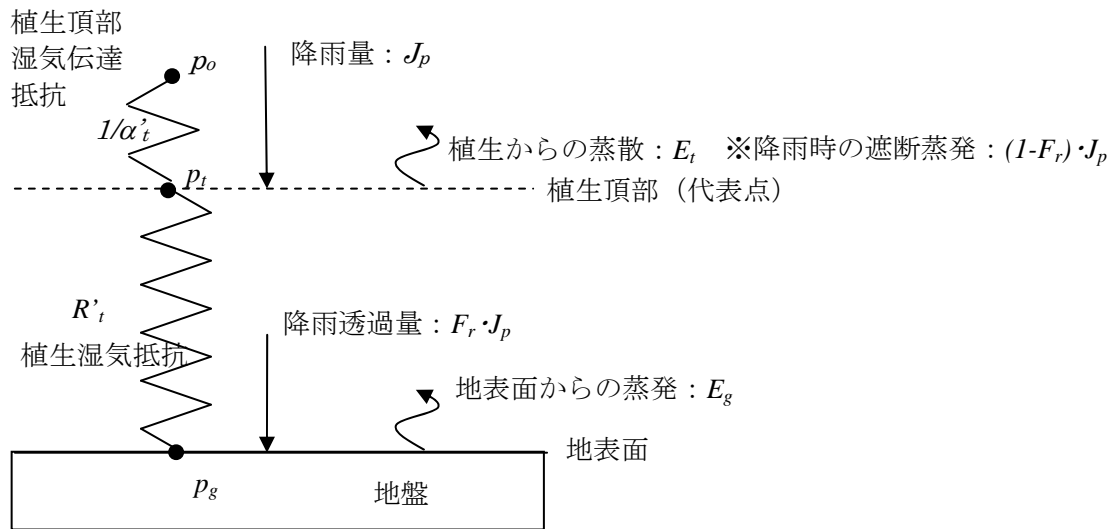


図 4-3 植生を含めた地表面境界層の水分移動の概要

表 4-1 に、文献値[3]を参考に、地盤内年平均温度が測定値と一致するように決定した熱・水分に関する各パラメータに用いた数値を示す。

表 4-1 解析で用いるパラメータと数値

解析で用いるパラメータ	数値
α_t : 植生頂部の総合熱伝達率[W/m ² K]	23.3
a : 植生の日射透過率[-]	0.1
A_t : 植生の日射吸収率[-]	0.9
ε_t : 植生の放射率[-]	0.9
R_t : 植生の熱抵抗[m ² K/W]	0.43
A_g : 地表面の日射吸収率[-]	0.83
ρ : 空気密度[kg/m ³]	1.2
β : 蒸発効率[-] ⁵⁾	0.2
C_H : バルク移動係数 [-] ⁵⁾	0.01
U : 風速[m/s]	1.5 一定
F_r : 降雨の植生透過率[-]	0.7
α'_m : 植生頂部の湿気伝達率[kg/m ² sPa]	1.14e-7
R'_t : 植生の湿気抵抗[m ² sPa/kg]	8.78e+7

4.4 基礎方程式の差分化

数値計算では前進型有限差分法を用いる。本論文では2次元と3次元の解析を行っているが、ここでは、2次元系の基礎方程式の差分化を示す。3次元の差分化については同様の展開を行っているため説明を省略する。

水分及び熱収支式を2次元系で表すと次式となる。

$$\begin{aligned} \rho_w \left(\frac{\partial \psi}{\partial \mu} \right) \frac{\partial \mu}{\partial t} = & \frac{\partial}{\partial x} \left\{ \lambda'_{\mu} \frac{\partial \mu}{\partial x} \right\} + \frac{\partial}{\partial x} \left\{ \lambda'_{T} \frac{\partial T}{\partial x} \right\} \\ & + \frac{\partial}{\partial y} \left\{ \lambda'_{\mu} \left(\frac{\partial \mu}{\partial y} - g \right) \right\} + \frac{\partial}{\partial y} \left\{ \lambda'_{T} \frac{\partial T}{\partial y} \right\} \end{aligned} \quad \dots (4-26)$$

$$\begin{aligned} c\rho \frac{\partial T}{\partial t} = & \frac{\partial}{\partial x} \left\{ (\lambda + r\lambda'_{Tg}) \frac{\partial T}{\partial x} \right\} + \frac{\partial}{\partial x} \left\{ r\lambda'_{\mu g} \frac{\partial \mu}{\partial x} \right\} \\ & + \frac{\partial}{\partial y} \left\{ (\lambda + r\lambda'_{Tg}) \frac{\partial T}{\partial y} \right\} + \frac{\partial}{\partial y} \left\{ r\lambda'_{\mu g} \frac{\partial \mu}{\partial y} \right\} \end{aligned} \quad \dots (4-27)$$

なお、座標軸は、x軸は地盤面に平行の水平方向、y軸は地盤面に垂直な鉛直上向き方向とする。2次元差分式で用いる座標系を図4-4、4-5に示す。ここで、図中の(i,j)は、x,y軸の座標番号を示す。

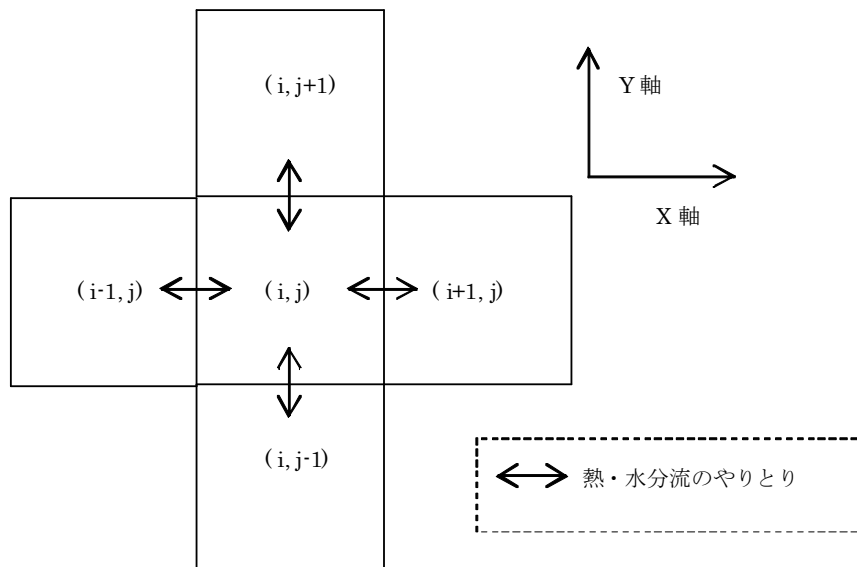


図 4-4 2次元差分の座標系

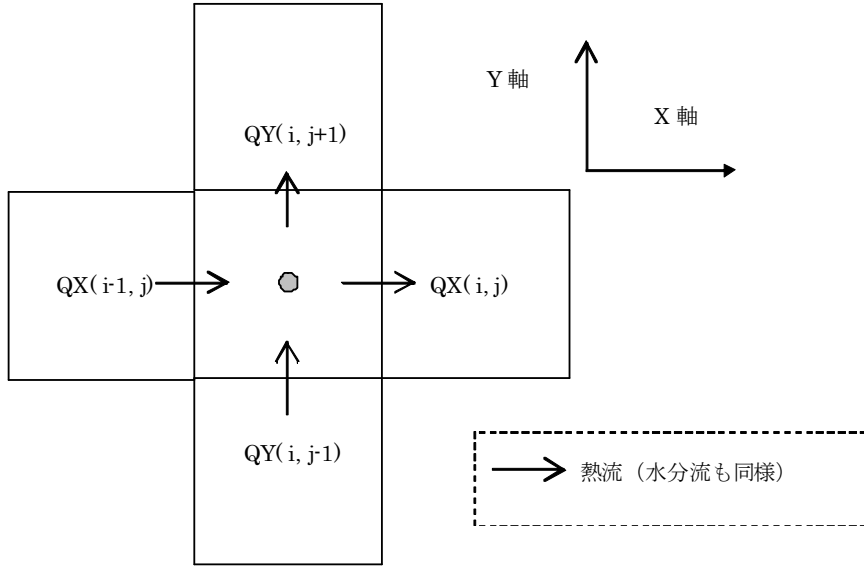


図 4-5 境界部の座標系

熱水分収支式は、前進型有限差分法を用いて以下で表現される。

熱収支式

$$c\rho^n \frac{T_{i,j}^{n+1} - T_{i,j}^n}{\Delta t} \Delta x_i \Delta y_j = (Q_{x_{i-1,j}}^n - Q_{x_{i,j}}^n) \Delta y_j + (Q_{y_{i,j-1}}^n - Q_{y_{i,j}}^n) \Delta x_i \quad \dots (4-28)$$

ただし、 $Q_{x_{i,j}}^n$ $Q_{y_{i,j}}^n$ は下式となる。(図 4-5 に示す座標系を用いる)

$$Q_{x_{i,j}}^n = ({}_{i,j} \lambda_{i+1,j}^m + r {}_{i,j} \lambda_{T_{g_{i+1,j}}}^m) \frac{T_{i,j}^n - T_{i+1,j}^n}{\Delta_i x_{i+1}} + r {}_{i,j} \lambda_{\mu_{g_{i+1,j}}}^m \frac{\mu_{i,j}^n - \mu_{i+1,j}^n}{\Delta_i x_{i+1}} \quad \dots (4-29)$$

$$Q_{y_{i,j}}^n = ({}_{i,j} \lambda_{i,j+1}^m + r {}_{i,j} \lambda_{T_{g_{i,j+1}}}^m) \frac{T_{i,j}^n - T_{i,j+1}^n}{\Delta_j y_{j+1}} + r {}_{i,j} \lambda_{\mu_{g_{i,j+1}}}^m \frac{\mu_{i,j}^n - \mu_{i,j+1}^n}{\Delta_j y_{j+1}} \quad \dots (4-30)$$

ここで、

$$\Delta_i x_{i+1} = (\Delta x_i + \Delta x_{i+1}) / 2 \quad , \quad \Delta_j y_{j+1} = (\Delta y_j + \Delta y_{j+1}) / 2 \quad \dots (4-31)$$

とする。

水分収支式

$$\rho_w \left(\frac{\partial \psi}{\partial \mu} \right)^n \frac{\mu_{i,j}^{n+1} - \mu_{i,j}^n}{\Delta t} \Delta x_i \Delta y_j = (J_{x_{i-1,j}}^n - J_{x_{i,j}}^n) \Delta y_j + (J_{y_{i,j-1}}^n - J_{y_{i,j}}^n) \Delta x_i \quad \dots (4-32)$$

ただし、 $J_{x_i,j}^n$ $J_{y_i,j}^n$ は下式となる。(図 4-5 に示す座標系を用いる)

$$J_{x_i,j}^n = \lambda_{\mu_{i+1,j}}^m \frac{\mu_{i,j}^n - \mu_{i+1,j}^n}{\Delta_i x_{i+1}} + \lambda_{T_{i+1,j}}^m \frac{T_{i,j}^n - T_{i+1,j}^n}{\Delta_i x_{i+1}} \quad \dots (4-33)$$

$$J_{y_i,j}^n = \lambda_{\mu_{i,j+1}}^m \left(\frac{\mu_{i,j}^n - \mu_{i,j+1}^n}{\Delta_j y_{j+1}} - g \right) + \lambda_{T_{i,j+1}}^m \frac{T_{i,j}^n - T_{i,j+1}^n}{\Delta_j y_{j+1}} \quad \dots (4-34)$$

ここで、

$$\Delta_i x_{i+1} = (\Delta x_i + \Delta x_{i+1}) / 2 \quad , \quad \Delta_j y_{j+1} = (\Delta y_j + \Delta y_{j+1}) / 2, \quad \dots (4-35)$$

とする。

また、支配方程式における物性値は状態量依存が大きいため、数値計算において2質点間の境界の物性値は、両質点における値の平均を用いる。同一材料内では算術平均値を用い、異種材料境界では物性値の急激な変化を考慮するため、調和平均値を用いる。[2]

同種材料のとき点(i-1, j)と点(i, j)の間の物性値は以下の式で表せる。

$$\lambda_{i-1,j}^x \lambda_{i,j} = fx(i) \lambda_{i-1,j} + (1 - fx(i)) \lambda_{i,j} \quad \dots (4-36)$$

異種材料のとき点(I-1, j)と点(I, j)の間の物性値は以下の式で表せる。

$$\lambda_{i-1,j}^x \lambda_{i,j} = \frac{\lambda_{i-1,j} \lambda_{i,j}}{fx(i) \lambda_{i-1,j} + (1 - fx(i)) \lambda_{i,j}} \quad \dots (4-37)$$

ただし、

$$fx(i) = \frac{\Delta x_i / 2}{(\Delta x_{i-1} + \Delta x_i) / 2} \quad \dots (4-38)$$

4.5 差分化された斜面セルの取扱い方法

本節では、熱水分同時移動方程式の差分式を用いて計算を行う際の、外気に接する墳丘部の傾斜部のコントロールボリューム（以下 CV）の取扱いについて述べる。本論文では 3次元と 2次元の地盤を考慮した解析を行うが、2次元の座標を例にして説明を行い、3次元の差分化については同様の展開を行っているため説明を省略する。2次元解析の際、図 4-6 に示すように傾斜面は、3 角形の形（種類 A）と不規則な形（種類 B）をした CV をとることにより計算を行う。以下で、これら CV における熱水分収支式について述べる。

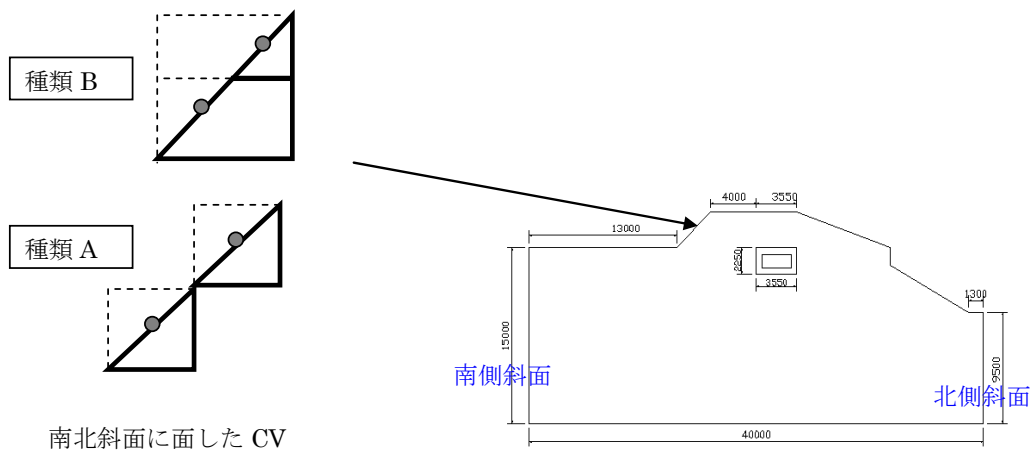


図 4-6 2次元系の墳丘部の形状と傾斜部の CV

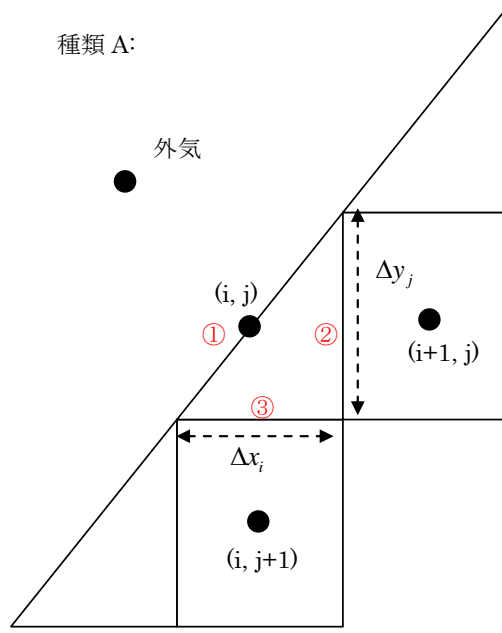


図 4-7 傾斜面の CV の形状 (種類 A)

まず種類 A について述べる。CV は、図 4-7 に示すような三角形の形状となり、そのセル体積は以下の式で表される。(奥行き方向は長さ 1 とする。)

$$V_{i,j} = (\Delta x_i \cdot \Delta y_j) / 2 \quad \dots (4-39)$$

図 4-7 に示す境界面①～③の面積をそれぞれ S_1, S_2, S_3 とすると以下の式で表される。

$$S_1 = \sqrt{\Delta x_i^2 + \Delta y_j^2} \quad S_2 = \Delta y_j \quad S_3 = \Delta x_i \quad \dots (4-40)$$

斜面に入射する熱流 Q_{sur}^n (W/m²) 及び水分流 J_{sur}^n (kg/m²s) はそれぞれ以下の式で表される。

$$Q_{sur}^n = (\alpha + r\alpha'_T)(T_o^n - T_{i,j}^n) + r\alpha'_\mu(\mu_o - \mu_{i,j}^n) + Q_{sol} \quad \dots (4-41)$$

$$J_{sur}^n = \alpha'_T(T_o^n - T_{i,j}^n) + \alpha'_\mu(\mu_o - \mu_{i,j}^n) + J_{rain} \times S_3 / S_1 \quad \dots (4-42)$$

熱収支式は次式で表される。

$$c\rho^n \frac{T_{i,j}^{n+1} - T_{i,j}^n}{\Delta t} V_{i,j} = Q_{sur}^n S_1 + Q_{y_{i,j}}^n S_3 - Q_{x_{i,j}}^n S_2 \quad \dots (4-43)$$

水分収支式は次式で表される。

$$\rho_w \left(\frac{\partial \psi}{\partial \mu} \right)^n \frac{\mu_{i,j}^{n+1} - \mu_{i,j}^n}{\Delta t} V_{i,j} = J_{sur}^n S_1 + J_{y_{i,j}}^n S_3 - J_{x_{i,j}}^n S_2 \quad \dots (4-44)$$

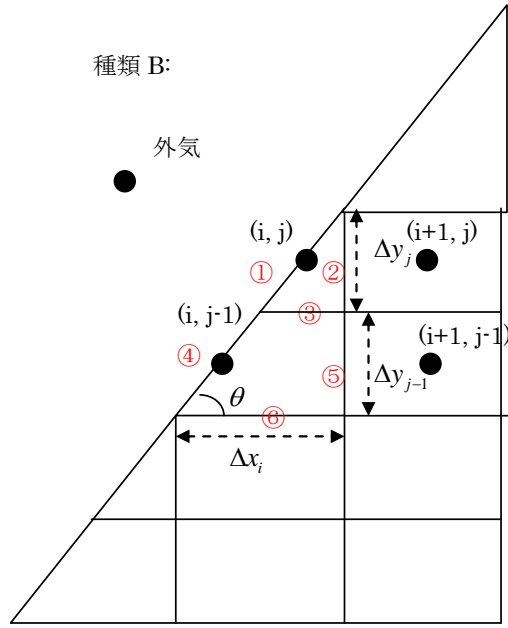


図 4-8 南北斜面に面した CV の形状 (種類 B)

次に種類 B について述べる。図 4-8 に示すように、セルは三角形と台形となる部分に分かれる。図の③の幅は、 $\Delta y_j / \tan \theta$ となるので、(i,j)点と、(i,j-1)点のそれぞれのセル体積は以下の式で表される。(奥行き方向は長さ 1 とする。)

$$V_{i,j} = (\Delta y_i \cdot \Delta y_j) / (2 \times \tan \theta) \quad \dots (4-45)$$

$$V_{i,j-1} = \Delta x_i \cdot \Delta y_{j-1} - (\Delta y_i \cdot \Delta y_j) / (2 \times \tan \theta) \quad \dots (4-46)$$

図 4-8 図 に示す境界面①～⑥の面積はそれぞれ以下の式で表される。

$$S_1 = \Delta y_i / \sin \theta \quad S_2 = \Delta y_j \quad S_3 = \Delta y_i / \tan \theta \quad \dots (4-47)$$

$$S_4 = \Delta y_{i-1} / \sin \theta \quad S_5 = \Delta y_{j-1} \quad S_6 = \Delta x_i \quad \dots (4-48)$$

セル(i,j)の斜面に入射する熱水分流は以下の式で表される。

$$Q_{sur}^n = (\alpha + r\alpha'_T)(T_o^n - T_{i,j}^n) + r\alpha'_\mu(\mu_o - \mu_{i,j}^n) + Q_{sol} \quad \dots (4-49)$$

$$J_{sur}^n = \alpha'_T(T_o^n - T_{i,j}^n) + \alpha'_\mu(\mu_o - \mu_{i,j}^n) + J_{rain} \times \cos \theta \quad \dots (4-50)$$

熱収支式は次式で表される。

$$c\rho^n \frac{T_{i,j}^{n+1} - T_{i,j}^n}{\Delta t} V_{i,j} = Q_{sur}^n S_1 + Q_{y_{i,j-1}}^n S_3 - Q_{x_{i,j}}^n S_2 \quad \dots (4-51)$$

水分収支式は次式で表される。

$$\rho_w \left(\frac{\partial \psi}{\partial \mu} \right)^n \frac{\mu_{i,j}^{n+1} - \mu_{i,j}^n}{\Delta t} V_{i,j} = J_{sur}^n S_1 + J_{y_{i,j-1}}^n S_3 - J_{x_{i,j}}^n S_2 \quad \dots (4-52)$$

セル(i,j-1)の斜面に入射する熱水分流は以下の式で表される。

$$Q_{sur}^n = (\alpha + r\alpha'_T)(T_o^n - T_{i,j-1}^n) + r\alpha'_\mu(\mu_o - \mu_{i,j-1}^n) + Q_{sol} \quad \dots (4-53)$$

$$J_{sur}^n = \alpha'_T(T_o^n - T_{i,j-1}^n) + \alpha'_\mu(\mu_o - \mu_{i,j-1}^n) + J_{rain} \times \cos \theta \quad \dots (4-54)$$

熱収支式は次式で表される。

$$c\rho^n \frac{T_{i,j-1}^{n+1} - T_{i,j-1}^n}{\Delta t} V_{i,j-1} = Q_{sur}^n S_4 + Q_{y_{i,j-2}}^n S_6 - Q_{x_{i,j-1}}^n S_5 - Q_{y_{i,j-1}}^n S_3 \quad \dots (4-55)$$

水分収支式は次式で表される。

$$\rho_w \left(\frac{\partial \psi}{\partial \mu} \right)^n \frac{\mu_{i,j-1}^{n+1} - \mu_{i,j-1}^n}{\Delta t} V_{i,j-1} = J_{sur}^n S_4 + J_{y_{i,j-2}}^n S_6 - J_{x_{i,j-1}}^n S_5 - J_{y_{i,j-1}}^n S_3 \quad \dots (4-56)$$

以上の熱水分収支式で用いた $Q_{x_{i,j}}^n$ $Q_{y_{i,j}}^n$ $J_{x_{i,j}}^n$ $J_{y_{i,j}}^n$ で表される x, y 軸方向の熱流及び x, y 軸方向の水分流は以下の式で通用するに表される。

$$Q_{x_{i,j}}^n = \left({}_{i,j}x \lambda_{i+1,j}^m + r {}_{i,j}x \lambda_{Tg_{i+1,j}}^m \right) \frac{T_{i,j}^n - T_{i+1,j}^n}{\Delta_i x_{i+1}} + r {}_{i,j}x \lambda_{\mu g_{i+1,j}}^m \frac{\mu_{i,j}^n - \mu_{i+1,j}^n}{\Delta_i x_{i+1}} \quad \dots (4-57)$$

$$Q_{y_{i,j}}^n = \left({}_{i,j}y \lambda_{i,j+1}^m + r {}_{i,j}y \lambda_{Tg_{i,j+1}}^m \right) \frac{T_{i,j}^n - T_{i,j+1}^n}{\Delta_j y_{j+1}} + r {}_{i,j}y \lambda_{\mu g_{i,j+1}}^m \frac{\mu_{i,j}^n - \mu_{i,j+1}^n}{\Delta_j y_{j+1}} \quad \dots (4-58)$$

$$J_{x_{i,j}}^n = {}_{i,j}x \lambda_{\mu_{i+1,j}}^m \frac{\mu_{i,j}^n - \mu_{i+1,j}^n}{\Delta_i x_{i+1}} + {}_{i,j}x \lambda_{T_{i+1,j}}^m \frac{T_{i,j}^n - T_{i+1,j}^n}{\Delta_i x_{i+1}} \quad \dots (4-59)$$

$$J_{y,j}^n = \lambda_{\mu_{i,j+1}}^n \left(\frac{\mu_{i,j}^n - \mu_{i,j+1}^n}{\Delta_j y_{j+1}} - g \right) + \lambda_{T_{i,j+1}}^n \frac{T_{i,j}^n - T_{i,j+1}^n}{\Delta_j y_{j+1}} \quad \dots (4-60)$$

ここで、

$$\Delta_i x_{i+1} = (\Delta x_i + \Delta x_{i+1}) / 2 \quad \Delta_j y_{j+1} = (\Delta y_j + \Delta y_{j+1}) / 2 \quad \dots (4-61)$$

4.6 第4章のまとめ

本章では、地下構造物及び周辺地盤の熱水分性状を解析する際の基礎となる地盤、建築壁体、仮保護施設及び地下空間と仮保護施設空間の熱水分の収支を記述する基礎式を提示した。また、外気と接する墳丘部地盤表面に竹林がある時、植生を含めた地表面境界の熱水分移動について、植生の熱・湿気抵抗、日射遮蔽などが考慮可能なモデルを作成した。さらに、この基礎式を用いて解析を行う際、基礎方程式の差分化、墳丘部の不整形な形状を取扱う方法について提案を行った。

図表出典

(i)奈良文化財研究所飛鳥資料館ホームページ

<http://www.asukanet.gr.jp/ASUKA2/TAKAMATUTUKA/takamatutuka.html>

第4章の参考文献

- [1] 松本衛：新建築学大系 10 環境物理 3.湿気、彰国社（1984）
- [2] 小椋大輔：地下構造物の熱・湿気性状に関する研究、博士論文(2000)
- [3] 近藤純正編著：水環境の気象学 一地表面の水収支、熱収支一、朝倉書店、208-239（1996）

記号

c : 空気の比熱[J/kgK]

γ : 空気密度[kg/m³]

c' : 空気の湿気容量[kg/(m³ · Pa)]

$(cp)_{ap}$: 材料の見かけの熱容量[J/(kg · K)]

g : 重力加速度 (=9.8) [m/s²]

J_r : 室内水分発生量[kg/s]

J_s : 降水量[kg/m²s]

M_v : 水蒸気の分子量[kg/kmol]

N_r : 石室内の換気回数[1/s]
 N_b : 仮保護施設内の換気回数[1/s]
 \mathbf{n}_j : 鉛直下向き単位ベクトル[-],鉛直下向きなら 1、水平方向なら 0.
 p : 水蒸気圧[Pa]
 p_{sat} : 飽和水蒸気圧[Pa]
 Q_r : 石室内発熱量[W]
 J_r : 石室内発熱量[Kg/s]
 Q_b : 仮保護施設内発熱量[W]
 J_b : 仮保護施設内発熱量[Kg/s]
 q_{noc} : 夜間放射量[W/m²]
 q_{sol} : 日射量[W/m²]
 R : 気体常数[Pa m³/(kmolK)]
 R_v : 水蒸気の気体常数($R_v=R/M_v$)[Pa m³/(kgK)]
 h : 相対湿度 (%)
 r : 相変化熱[J/kg]
 S : 壁面面積[m²]
 T : 温度[K]
 t : 時間[s]
 V : 室容積[m³]
 V_b : 仮保護施設容積[m³]
 α : 総合熱伝達率[W/(m² · K)]
 α' : 湿気伝達率[kg/(m²s · Pa)]
 α'_T : 温度勾配に関する水分伝達率[kg/(m²s · (J/kg))]
 α'_μ : 水分化学ポテンシャル勾配に関する水分伝達率[kg/(m²s · (J/kg))]
 λ : 熱伝導率[W/(m · K)]
 λ'_T : 温度勾配に関する水分伝導率[kg/(ms · K)]
 λ'_{Tg} : 温度勾配に関する気相水分伝導率[kg/(ms · K)]
 λ'_μ : 水分化学ポテンシャル勾配に関する水分伝導率[kg/(m · s(J/kg))]
 $\lambda'_{\mu g}$: 水分化学ポテンシャル勾配に関する気相水分伝導率[kg/(m · s(J/kg))]
 μ : 水分化学ポテンシャル[J/kg]
 ρ : 空気密度[kg/m³]
 ρ_w : 水密度[kg/m³]
 ψ : 容積基準含水率[m³/m³]

m1 : 石室壁面の分割数

m2 : 仮保護施設内の空気と接する地盤の分割数

m3 : 仮保護施設内側表面の分割数

$\nabla = \mathbf{i} \partial / \partial x + \mathbf{j} \partial / \partial y + \mathbf{k} \partial / \partial z$ ただし、 $\mathbf{i}, \mathbf{j}, \mathbf{k}$ は、それぞれ x, y, z 方向の単位ベクトル

下添字 :

o : 外気

r : 石室内

b : 仮保護施設内

j : j 番目の壁面

l : 液相

g : 気相

s : 空気と接する固体表面

sat : 飽和

上添字 :

bi : 仮保護施設の内側表面、

bo : 仮保護施設の外側表面

bs : 仮保護施設内の空気と接する地盤表面

第5章 解析に用いる外界気象条件と熱水分物性値

5.1 はじめに

本章では、解析に用いる外界気象条件と材料の熱水分物性値について述べる。外界気象条件については、気象台観測値の測定データ間の内挿や積算データから時系列データへの変換方法について述べる。熱水分物性値は、石室を構成する石材、周囲地盤について測定値あるいは文献値を元にした推定値について述べる。

5.2 外界気象条件

外界気象条件は、1972年から1975年の奈良地方気象台観測[1]の気象データを用いた。測定データは外気温（3時間¹⁾）、外気相対湿度（6時間）、全天日射量（日積算値）、降雨量（日積算値）、雲量（6時間）であり、外気温、外気相対湿度は直線内挿し、全天日射量、降雨量は、後述のように日積算量を時系列データとなるように変換を行って、計算に用いた。

5.2.1 外界温湿度条件

図5-1、5-2に発掘の年である1972年の外気温と外気相対湿度を、図5-3、5-4に発掘の翌年から保存施設稼働までの1973～1975年の外気温と外気相対湿度の変動を示す。

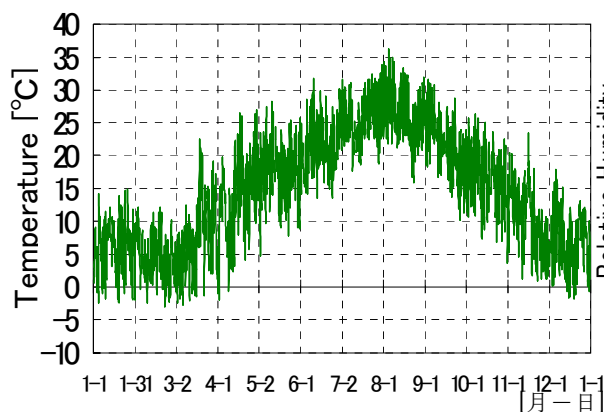


図 5-1 外気温度変動（1972年）

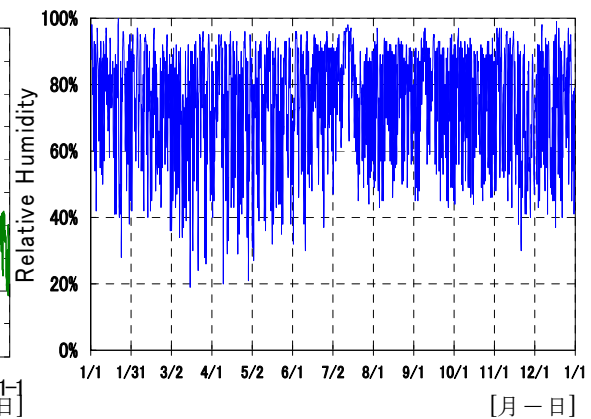


図 5-2 外気相対湿度変動(1972年)

¹⁾括弧内の時間は測定間隔を表す。

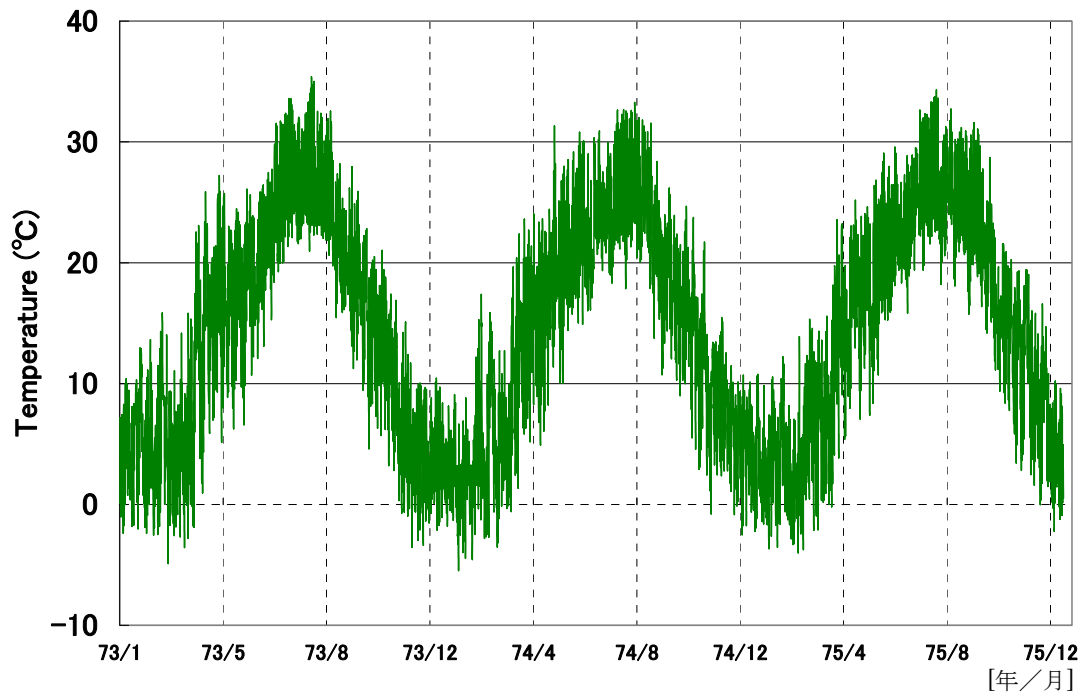


図 5-3 外気温度変動 (1973-1975 年)

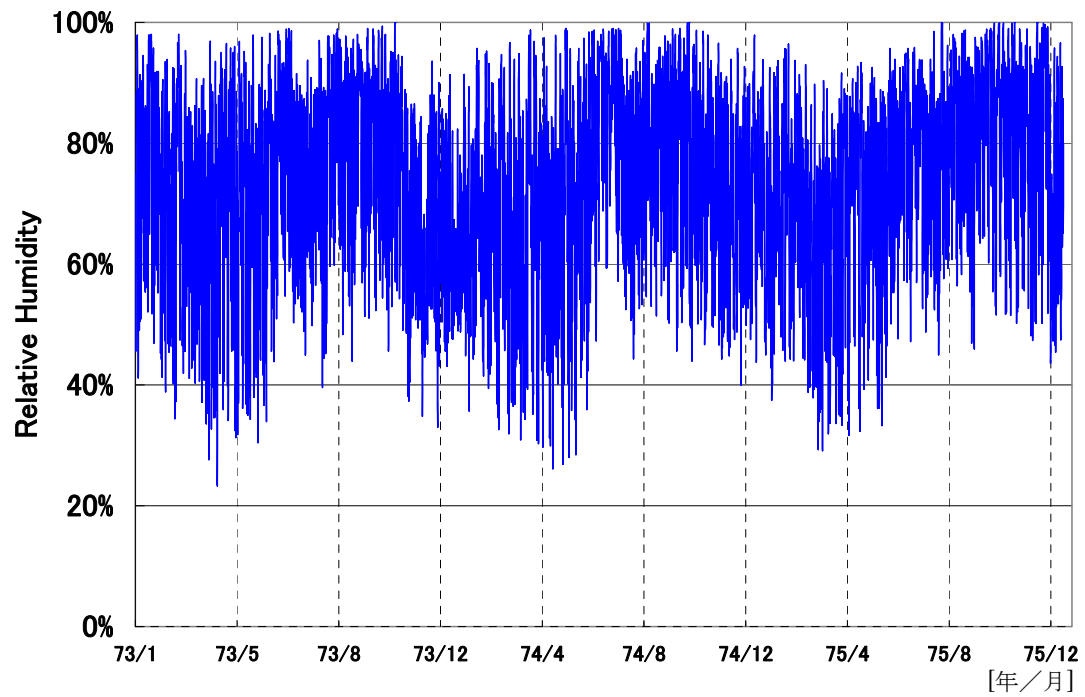


図 5-4 外気相对湿度変動 (1973-1975 年)

5.2.2 降雨量

1972年から1975年に奈良地方気象台で測定された降雨量は日積算値しかない。解析では降雨時間を考慮して与える必要がある。この降雨時間が石室内温湿度に与える影響を明らかにするために、降雨量の日積算値が測定値と一致するように、降雨時間を変えた計算を行った。降雨時間は、以下の3ケースの条件を考える。なお、解析条件の詳細は、第8章を参照いただきたい。

Case 1: 1日中、降雨がある場合
$$J_{rain} = \frac{Rain_d}{24 \times 3600}$$

Case 2: 10時から15時まで5時間の降雨がある場合
$$J_{rain} = \frac{Rain_d}{5 \times 3600}$$

Case 3: 13時から15時まで2時間の降雨がある場合
$$J_{rain} = \frac{Rain_d}{2 \times 3600}$$

ここで、 J_{rain} は降雨時間帯の降雨量[kg/m² s]、 $Rain_d$ は日積算降雨量[kg/m² day]である。図5-5と図5-6に示すように、2時間から24時間まで降雨時間が変化することで、石室内温湿度変動の違いは小さいことが分かる。以上のことから降雨量は、日積算降雨量を24時間平均して与えることとした。図5-7に1972年の降雨量の月積算値を示す。

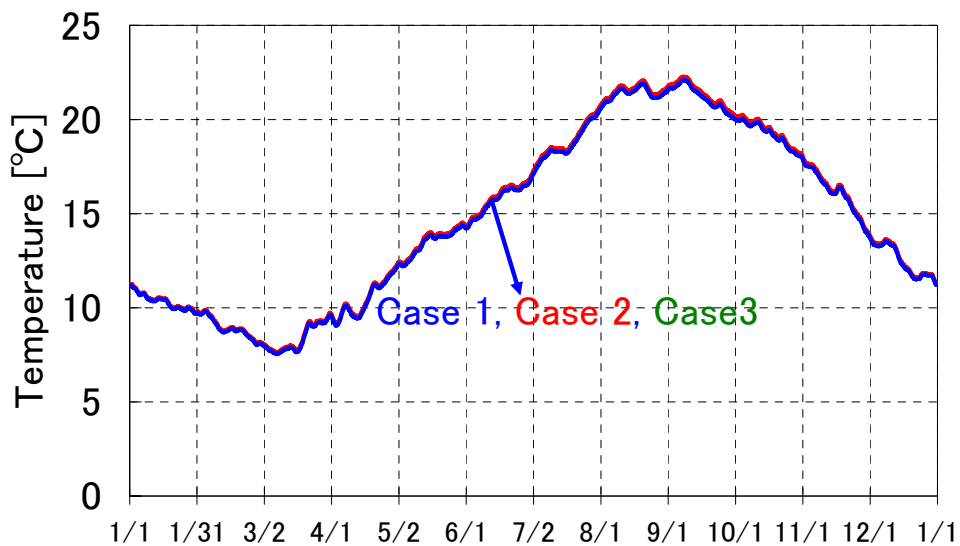


図 5-5 降雨時間の違いによる石室内温度の比較

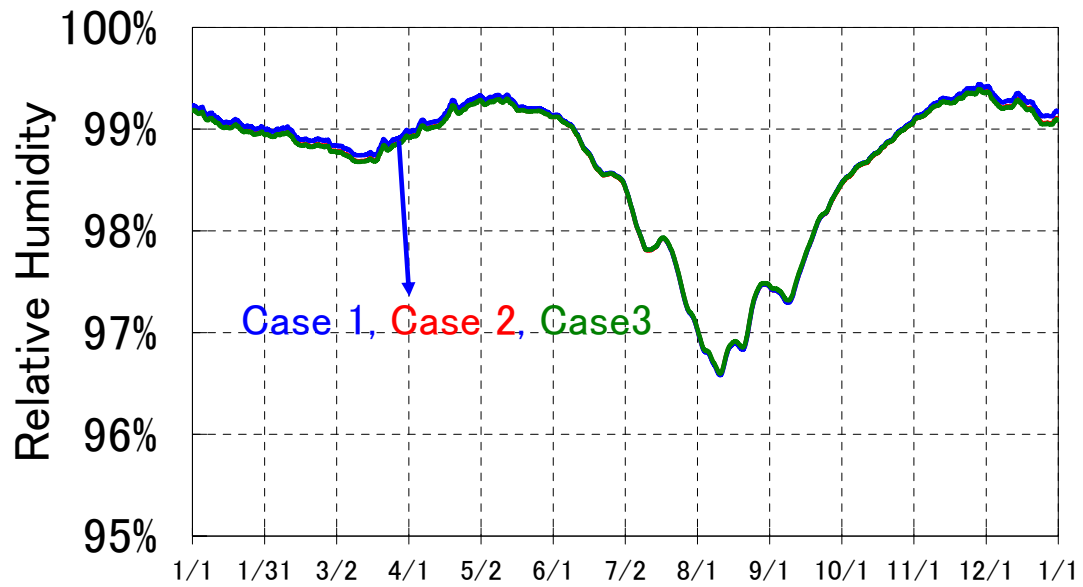


図 5-6 降雨時間の違いによる石室内湿度の比較

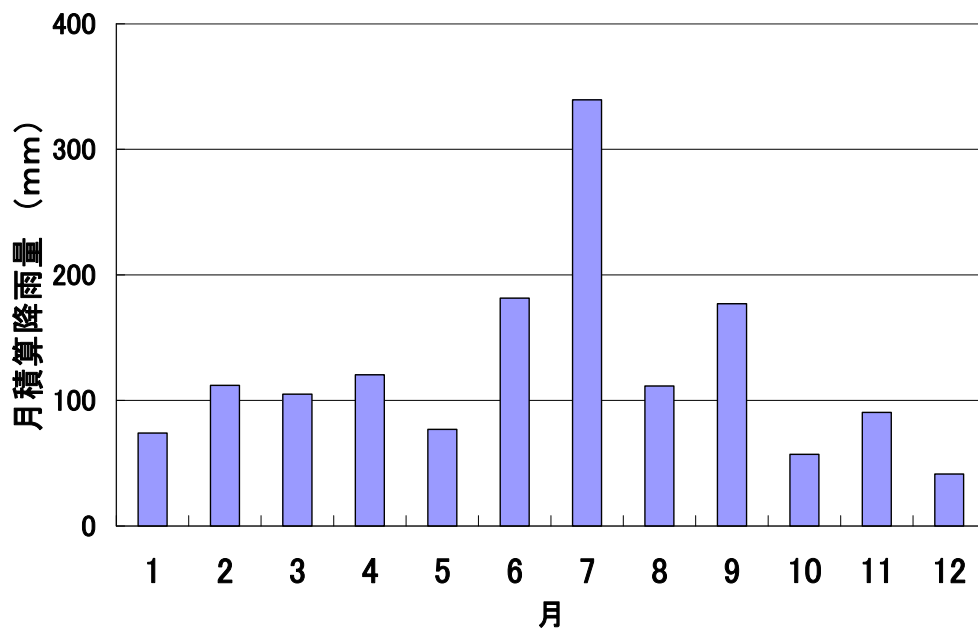


図 5-7 降雨量の月積算値 (1972 年)

5.2.3 日射量と夜間放射量

日射量は、降雨量と同様に測定値が日積算値しかないため、以下の様に時間変化を推定した。水平面全天日射量の時間変化は、直達日射量は Bouguer の式を、天空日射量は Berlage の式を用いて表し、日積算日射量が測定値に一致するように大気透過率を決定した[2]。夜間放射量 J_{eh} (W/m²)は、Brunt の式を用いて以下のように表される[2]。

$$J_{eh} = \sigma T_a^4 (0.474 - 0.076\sqrt{f}) \quad (5-1)$$

σ : Stephan-Boltzman 定数、 T_a : 外気温[°C]、 f : 水蒸気圧[mmHg]

傾斜角 θ の面の夜間放射は下式となる。

$$J_{e\theta} = \left(\frac{1 + \cos(\theta)}{2}\right) J_{eh} \quad (5-2)$$

夜間放射量の雲量による補正には以下の式を用いる。

雲量 c のときの夜間放射 J_{ehc} は

$$J_{ehc} = J_{rh} \left\{ 1 - (1-k) \frac{c}{10} \right\} \quad (5-3)$$

上層雲 $k = 0.8$ 、中層雲 $k = 0.3$ 、下層雲 $k = 0.15$

本論文では、中層雲とし $k = 0.3$ とした。

墳丘の南側、北側、東側、西側の斜面の日射量は、斜面の勾配を考慮して与えた[2]。図 5-8 から 5-13 に、それぞれ各斜面に日射量の年変動を示す。また、図 5-14, 15 に、それぞれ夜間放射と天空放射量の年変動を示す。

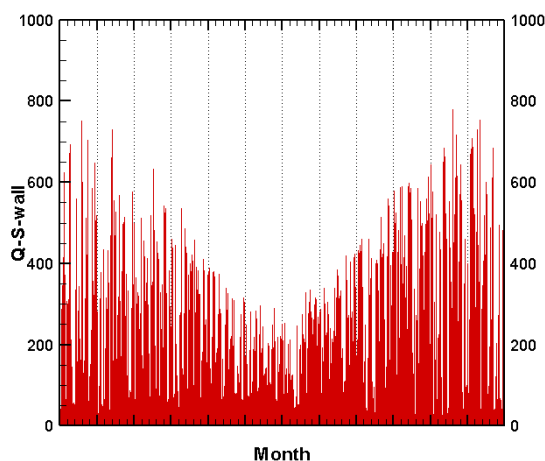


図 5-8 南向き鉛直壁面日射量

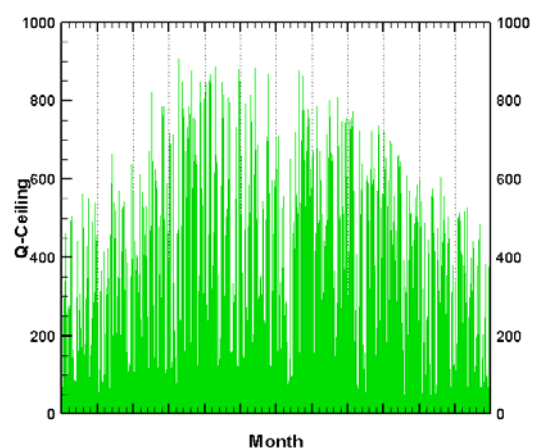


図 5-9 水平面日射量

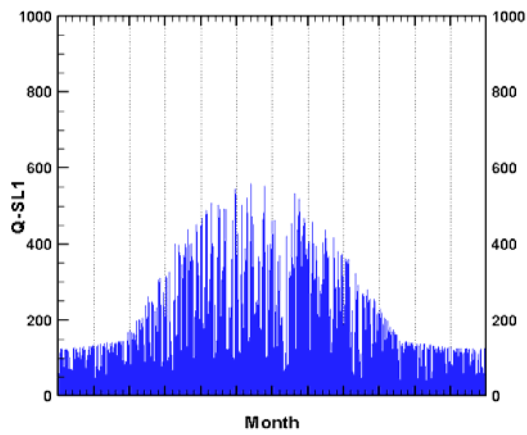


図 5-10 北斜面日射量の年変化
(傾斜角 45 度)

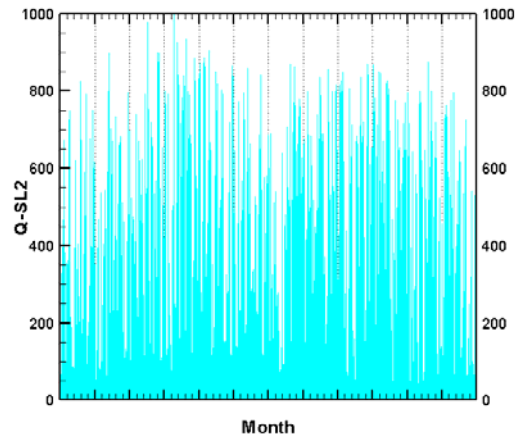


図 5-11 南斜面日射量の年変化
(傾斜角 30 度)

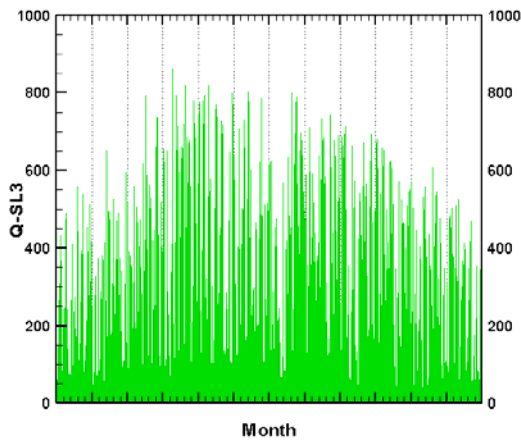


図 5-12 西斜面日射量の年変化
(傾斜角 45 度)

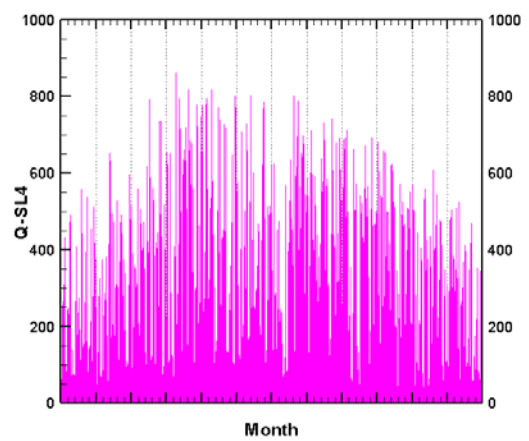


図 5-13 東斜面日射量の年変化
(傾斜角 45 度)

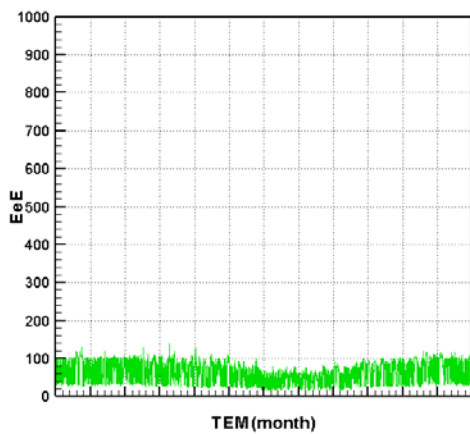


図 5-14 夜間放射の年変化

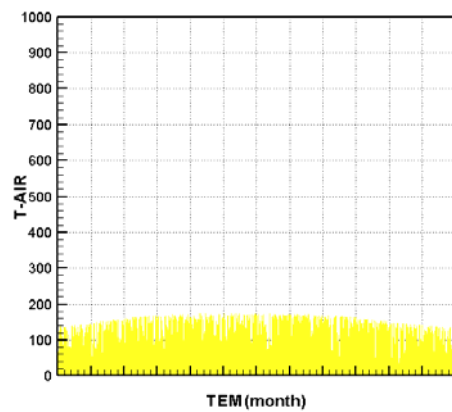


図 5-15 天空放射の年変化

5.3 熱水分物性値

解析には、墳丘部の土壌や、石室を構成する凝灰岩や漆喰の熱水分物性値が必要となるが、これらは、測定値を元に推定した。以下に、本研究で用いた熱水分物性値について述べる。

本研究では、周囲地盤の版築層の熱水分物性値を算出する際に、Arya-Paris らにより提案された、土壌の粒径分布から平衡含水率曲線、透水係数を算出するモデル[3]を用いている。簡単にこのモデルの概要について述べる。

5.3.1 Arya-Paris モデルについて

土壌の粒径分布、乾燥密度から平衡含水率曲線と不飽和透水係数を算出するモデルとして Arya-Paris らによって提案されたモデルがある。最初に、粒径分布より、土壌の粒径分布曲線を粒径の大きさで決定される n 個の区画に分割し、その区画における平均粒子半径 R_i と、重量比率 w_i をそれぞれ求める ($i=1\sim n$)。

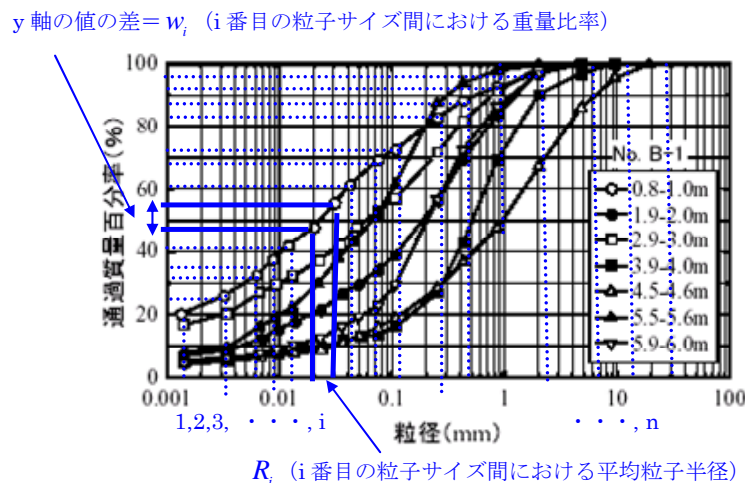


図 5-16 粒径分布曲線における R_i と w_i の値の読み取り方 (図表出典 I)

空隙半径の算出

次に、この平均粒子半径 R_i に対応する空隙半径 r_i の値を算出する。空隙半径 r_i は、次式で計算される。

$$r_i = 0.816R_i \sqrt{en_i^{(1-\alpha_i)}} \quad (5-4)$$

ここで、 R_i は i 番目の粒子サイズにおける平均粒子半径、 e は土壌間隙比、 n_i は i 番目の粒子半径における粒子の数、 α_i は、Arya (1999) らにより定義された補正係数を表す。 α_i は、次式で計算される。

$$\alpha_i = \log N_i / \log n_i \quad (5-5)$$

n_i は半径 R_i の球体粒子における粒子の数を表しており、以下の式で求められる。

$$n_i = 3w_i / 4\pi\rho_s R_i^3 \quad (5-6)$$

また、 N_i は、毛細管の湾曲等を考慮した場合の、半径 R_i の球体粒子における粒子数を表しており、次式で計算される。

$$\log N_i = a + b \log(w_i / R_i^3) \quad (5-7)$$

間隙比 e は以下の式で表される。

$$e = (\rho_s - \rho_b) / \rho_b \quad (5-8)$$

ここで ρ_s 、 ρ_b はそれぞれ、不攪拌の試料における粒子密度とかさ密度を表す。

半径 r_i の空隙の数

半径 r_i の空隙の数 N_{pi} は以下の手順で算出する。ここで、試料の切断面の面積に対する空隙面積の比率が、試料の有効空隙率と等しいという仮定を置く。試料の切断面における空隙の面積の合計 A_{pe} は以下の式で算出される。

$$A_{pe} = \phi_e A_b \quad (5-9)$$

ここで、 A_b は、試料切断面の面積、 ϕ_e は $\phi_e = S_w [1 - (\rho_b / \rho_s)]$ で表される有効空隙率を表す。空隙半径 r_i に対する重量比率 w_i を元にして、空隙半径 r_i における有効な空隙面積 A_{pi} を算出する。

$$A_{pi} = A_{pe} w_i \quad (5-10)$$

切断面にさらされている空隙半径 r_i における空隙の数 N_{pi} は、 A_{pi} を空隙1つの切断面面積である a_{pi} の値で除すことにより得られる。

$$N_{pi} = A_{pi} / a_{pi} \quad (5-11)$$

ここで、 $a_{pi} = \pi r_i^2$ である。

空隙半径 r_i における水分流量

半径 r_i の空隙1個あたりの水分流量は、Hagen-Poiseuilleの式を基にしてArya-Parisらによって提案された次式の計算式により算出する。

$$q_i = c r_i^x \quad (5-12)$$

この式において、 c と x は、未知変数とする。この水分流量を用いて、全ての半径 r_i の空隙における水分流量 Q_j は以下の式により算出できる。

$$Q_i = N_{pi} \cdot q_i \quad (5-13)$$

含水率の算出

空隙半径 $r_1 \sim r_i$ の空隙に水分が満たされている場合の含水率を ψ_i としたとき、 ψ_i は、粒径分布曲線から得られた値、空隙率、測定された含水率の最大値のデータを用いて、次式より算出することができる。

$$\psi_i = (\Phi_0 S_w) \sum_{j=1}^{j=i} w_j \quad i=1,2, \dots, n \quad (5-14)$$

ここで、 Φ_0 は全体の空隙率 (m^3/m^3)、 S_w は全体の空隙率に対する飽和含水率の比率、 w_j は、空隙半径 r_j における粒子の重量比率を表す。

平衡含水率曲線の算出

上で求めた半径 r_i の空隙に対応する水分化学ポテンシャルを次式にて算出する。

$$\mu_i = 2\gamma \cos \Theta / \rho_w r_i \quad (5-15)$$

ここで、 μ_i は半径 r_i の空隙に対応する水分化学ポテンシャル、 γ は水の表面張力、 Θ は水の接触角、 ρ_w は水の密度を表す。ここで算出した μ_i の値と、先ほど求めた含水率 ψ_i の値の対応関係から、平衡含水率曲線を算出することができる。

不飽和透水係数の算出

土壌の不飽和透水係数は、ダルシー則を用いて式(5-16)のように表せる。ここで、空隙体積は、 n 個の空隙半径の区間に分割されており、その内、空隙半径 $r_1 \sim r_i$ の空隙が水分で満たされているものとする。

$$K(\psi_i) = \frac{L}{A_b \Delta H} \sum_{j=1}^{j=i} Q_j \quad i=1,2, \dots, n \quad (5-16)$$

ここで $K(\psi_i)$ は、試料の含水率が ψ_i の場合の透水係数、 L は試料の長さ、 ΔH は流れの方向に対する水頭差を表す。 A_b は試料における切断面の面積、 Q_j は空隙半径 r_j における水分流量を表す。単位勾配を仮定すれば、 $L/\Delta H = 1$ とおくことができる。

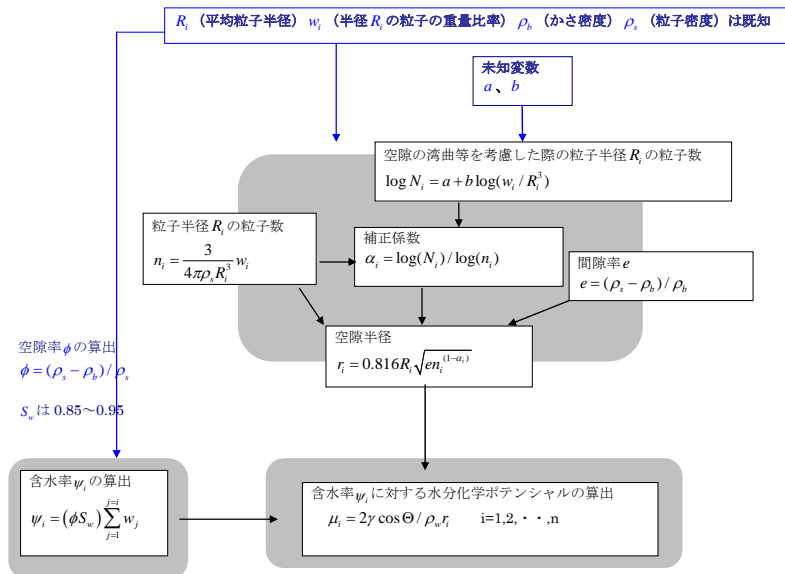


図 5-17 Arya-Paris モデルによる平衡含水率曲線を算出する手順

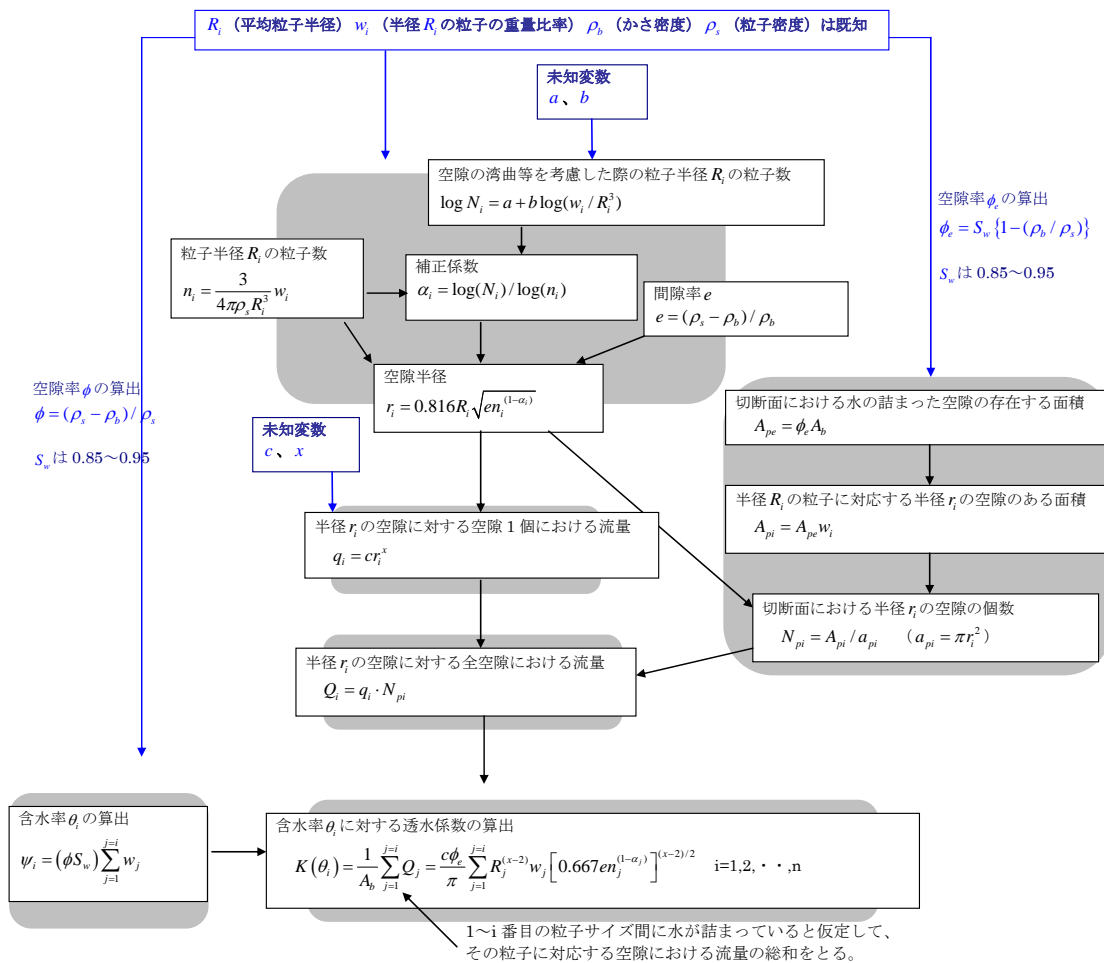


図 5-18 Arya-Paris モデルによる不飽和透水係数を算出する手順

5.3.2 凝灰岩の熱水分物性値

(1) 平衡含水率曲線

平衡含水率曲線は、毛細管径分布のデータ[4]から換算して求めた。

$$-2\sigma / \rho_w r = gH \quad (5-17)$$

ここで、 σ は、水の表面張力 (N/m)、 r は毛細管半径 (m)

g は重力加速度 (m/s^2)、 H は水頭高さ (m) (不飽和時は負の値)

$gH = \mu$ であるから、毛細管半径と相対湿度の関係が導かれる。毛細管半径分布で細い毛細管から順に積算していくと、その毛細管半径まで詰まった水の量がわかり、それを相対湿度に変換すると、相対湿度に対する含水量つまり平衡含水率が求まる。以下にその近似式を示す。

$$\psi = \begin{cases} \frac{-2.03492 \times 10^{-2}}{0.00001 - 1.08823} - 1.86994 \times 10^{-2} & (h \leq 0.00001) \\ \frac{-2.03492 \times 10^{-2}}{h - 1.08823} + 1.86994 \times 10^{-2} & (0.00001 \leq h \leq 0.94589937) \\ \frac{-8.1761 \times 10^{-3}}{h - 1.03612} + 3.36473 \times 10^{-2} & (0.94589937 \leq h) \end{cases} \quad (5-18)$$

ここで、 h は相対湿度 (%) ψ は含水率 [m^3/m^3]。

この近似式で表される曲線を図 5-19 に示す。

(2) 湿気伝導率

水蒸気圧勾配に関する気相水分伝導率 λ'_p は、 $\lambda'_p = 1.2 \times 10^{-11}$ とする。水分化学ポテンシャル勾配に関する気相水分伝導率 λ'_{μ_g} は以下の式で表される。

$$\lambda'_{\mu_g} = \lambda'_p \left(\frac{\partial p}{\partial \mu} \right) \times \frac{\Phi_0 - \psi + 0.001}{\Phi_0} \quad (5-19)$$

温度勾配に関する気相水分伝導率 λ'_{T_g} は以下の式で表される。

$$\lambda'_{T_g} = \lambda'_{\mu_g} \left(\frac{R_v T}{p_{vs}} \cdot \frac{\partial p_{vs}}{\partial T} - \frac{\mu}{T} \right) \quad (5-20)$$

水分化学ポテンシャル勾配に関する水分伝導率 λ'_μ は以下の式で表される。

$$\lambda'_\mu = \lambda'_{\mu_g} + \lambda'_{\mu l} \quad (5-21)$$

温度勾配に関する水分伝導率 λ'_T は以下の式で表される。

$$\lambda'_T = \lambda'_{T_g} \quad (5-22)$$

ここで、 Φ_0 は空隙率[m³/m³] (本解析では $\Phi_0 = 0.26$)。

以上のようにして算出した、水分化学ポテンシャル勾配に関する気相水分伝導率、温度勾配に関する水分伝導率をそれぞれ、図 5-20、図 5-22 に示す。

(3) 水分伝導率

透水係数と水分化学ポテンシャル勾配に関する液相の水分伝導率 λ'_{μ} の関係は以下の式で表される。

$$\lambda'_{\mu} = K(\psi) \frac{\rho_w}{g} \quad (5-23)$$

また、不飽和透水係数 $K(\psi)$ は飽和時の透水係数 K_{sat} を用いて以下の式で表される。

$$K(\psi) = K_{sat} \times (\psi / \psi_{sat})^n \quad (5-24)$$

ここで、 K_{sat} は飽和時の透水係数[m]である。本論文では $K_{sat} = 1.36 \times 10^{-11}$ [m] の値を用いる。この値は、凝灰岩における透水係数の測定に関する文献[6]を参考にして決定した。

ψ_s は飽和含水率[m³/m³]、 n は指数 (近似関数のパラメータ。本解析では $n = 18$)。

この透水係数の値を用いて算出した、水分化学ポテンシャル勾配に関する水分伝導率を図 5-21 に示す。

(4) 熱伝導率

熱伝導率と空隙率との関係[7]から近似曲線化したものを本解析で用いた。

$$\lambda = 0.6237 + 1.7227 \times \psi \quad (5-25)$$

この近似式で表される曲線を図 5-22 に示す。

(5) 比熱

$$c_t \rho_t = 2175600 + \rho_{2w} \psi \times 4186.05 \quad (5-26)$$

凝灰岩のみかけの容積比熱は含有する水分の影響を考慮するため、固体実質部の容積比熱に含水率に応じた水分の容積比熱を加える。

ここで、 $c_t \rho_t$ は凝灰岩のみかけの容積比熱[J/m³K]、 ρ_{2w} は水の密度[kg/m³]

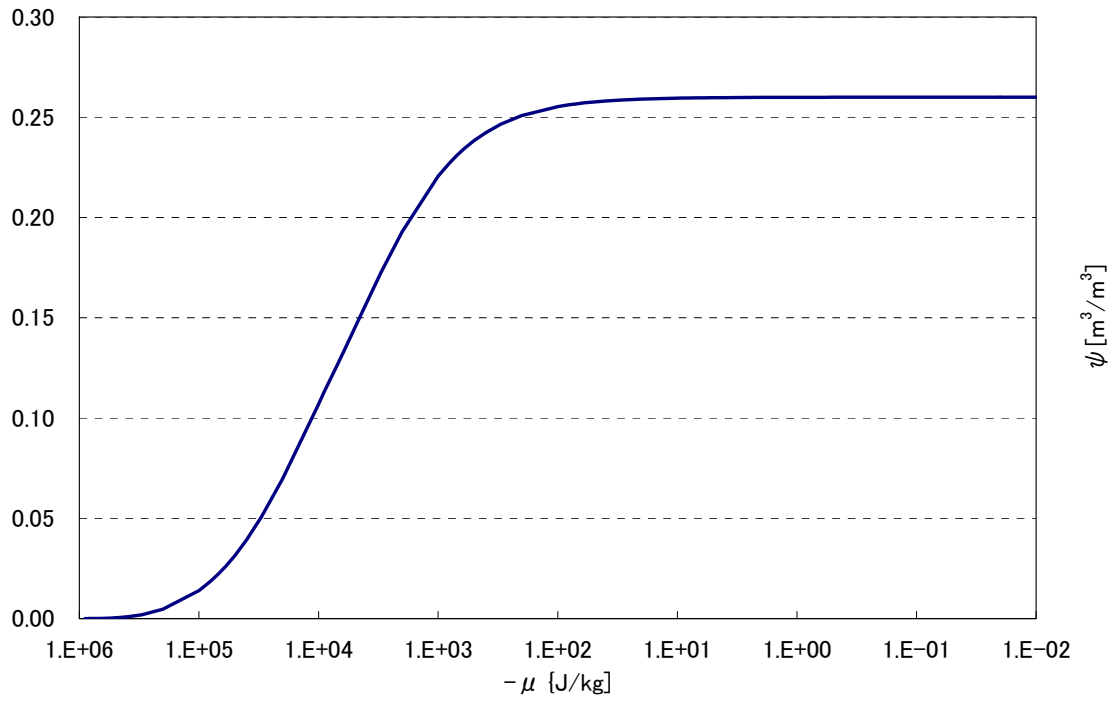


図 5-19 凝灰岩の含水率－水分化学ポテンシャル関係

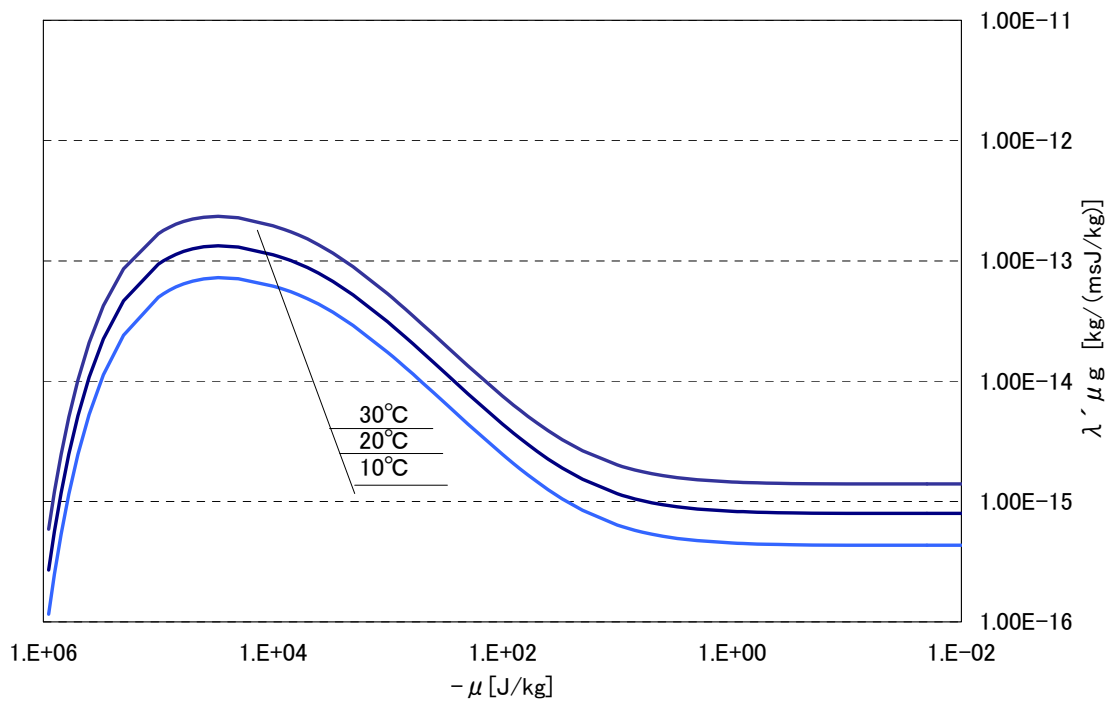


図 5-20 凝灰岩の水分化学ポテンシャル勾配に関する気相水分伝導率

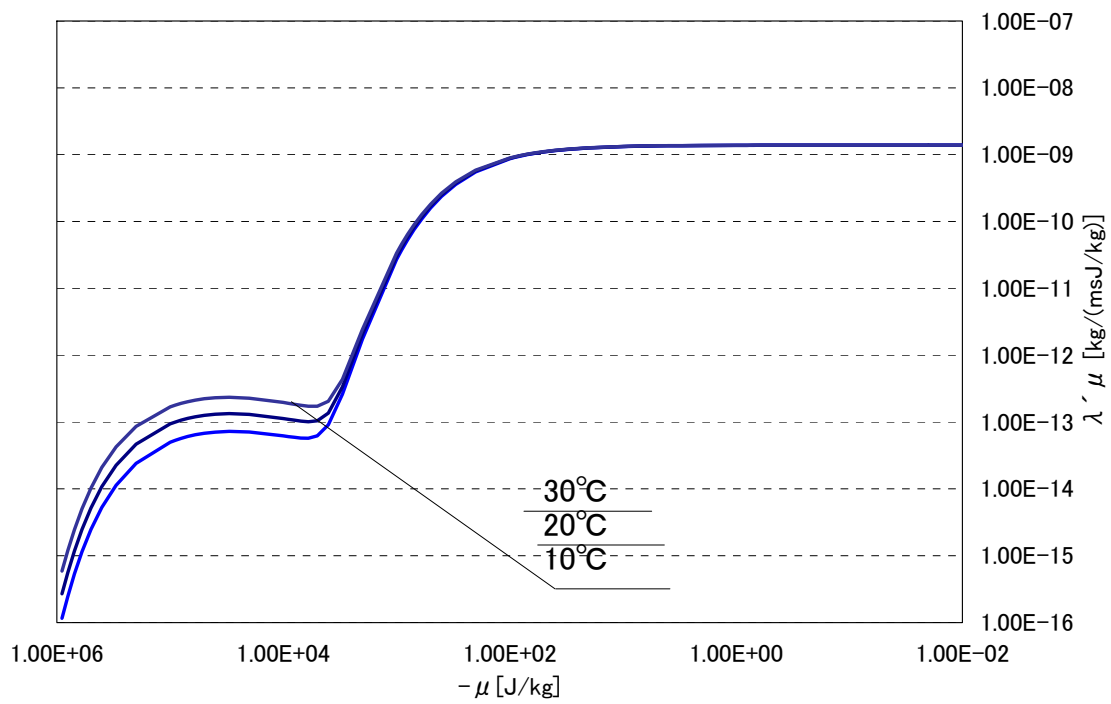


図 5-21 凝灰岩の水分化学ポテンシャル勾配に関する水分伝導率

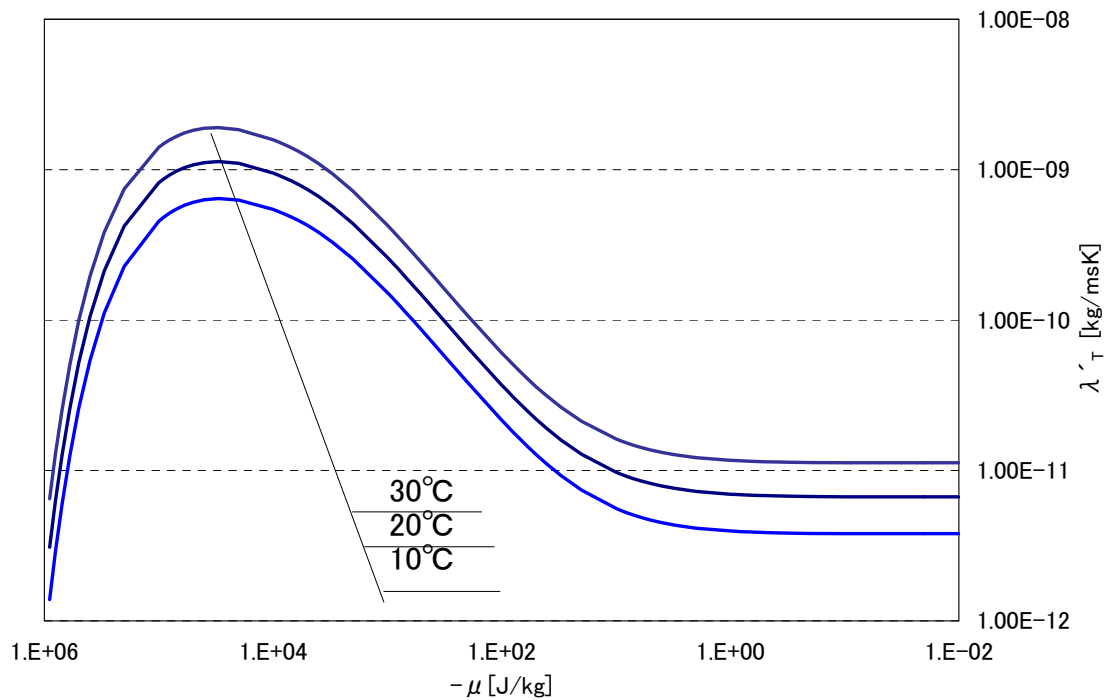


図 5-22 凝灰岩の温度勾配に関する水分伝導率

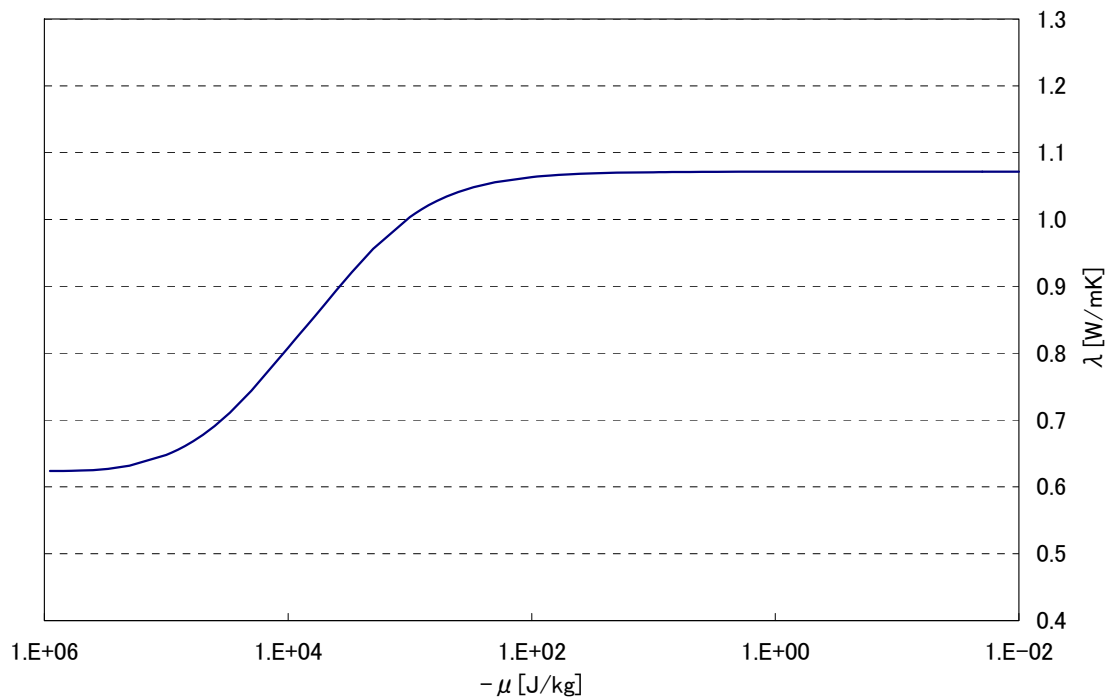


図 5-23 凝灰岩の熱伝導率

5.3.3 版築（周囲地盤）の熱水分物性

凝灰岩を囲む周囲地盤は、版築で一様に構成されるものとする。

(1) 平衡含水率曲線

版築の平衡含水率曲線は、版築土の平衡含水率の測定値[8]について以下の近似式を用いた。

$$\psi = \begin{cases} \frac{-0.1134}{1.9409 + \log_{10}(-\mu)} + 0.5219 & (\log_{10}(-\mu) < 1.4301) \\ \frac{-0.2071}{0.7397 + \log_{10}(-\mu)} & (1.4301 \leq \log_{10}(-\mu)) \end{cases} \quad (5-27)$$

この近似式で表される曲線を図 5-24 に示す。

(2) 湿気伝導率

水蒸気圧勾配に関する気相水分伝導率 λ'_p は、 $\lambda'_p = 3.4722 \times 10^{-15}$ とする[5]。水分化学ポテンシャル勾配に関する気相水分伝導率 $\lambda'_{\mu g}$ は以下の式で表される。

$$\lambda'_{\mu g} = \lambda'_p \left(\frac{\partial p}{\partial \mu} \right) \times \frac{\Phi_0 - \psi}{\Phi_0} \quad (5-28)$$

温度勾配に関する気相水分伝導率 λ'_{Tg} は以下の式で表される。

$$\lambda'_{Tg} = \lambda'_{\mu g} \left(\frac{R_v T}{p_{vs}} \cdot \frac{\partial p_{vs}}{\partial T} - \frac{\mu}{T} \right) \quad (5-29)$$

水分化学ポテンシャル勾配に関する水分伝導率 λ'_μ は以下の式で表される。

$$\lambda'_\mu = \lambda'_{\mu g} + \lambda'_{\mu l} \quad (5-30)$$

温度勾配に関する水分伝導率 λ'_T は以下の式で表される。

$$\lambda'_T = \lambda'_{Tg} \quad (5-31)$$

ここで、 Φ_0 は空隙率（本解析では $\Phi_0 = 0.495805$ ） [8]。

以上のようにして算出した、水分化学ポテンシャル勾配に関する気相水分伝導率、温度勾配に関する水分伝導率をそれぞれ、図 5-25、図 5-27 に示す。

(3) 透水係数

版築の透水係数は、Arya-Paris らにより提案された土壌の粒径分布から不飽和透水係数を導く計算モデルを用いて算出する。粒径分布は、高松塚の周囲地盤でのボーリング調査により採取された試料から得られたデータ [9] を用いた。モデルで使用した未知変数 a, b, c, x は、平衡含水率曲線を算出した際に用いた値を使用した。このモデルを用いて得られた値を近似曲線化し、その近似式を次式にて示す。

$$K(\psi) = \begin{cases} \frac{10^{-0.4192 - (0.3476/\psi)}}{86400} & (\psi < 0.3619) \\ \frac{10^{-1.8041 - (0.068/(\psi - 0.5219))}}{86400} & (0.3619 \leq \psi) \end{cases} \quad (5-32)$$

この透水係数の値を用いて算出した、水分化学ポテンシャル勾配に関する水分伝導率を図 5-26 に示す。

(4) 熱伝導率

版築の熱伝導率は、版築土の試料の含水率に対応する熱伝導率の実験値 [10] を近似曲線化したものを解析に用いた。その近似式を次式にて示す。

$$\lambda = \begin{cases} \frac{9.3324}{62.3073 + S_w} & (S_w < 39.874) \\ \frac{52.2154}{-13.1909 + S_w} & (39.874 \leq S_w) \end{cases} \quad \dots (5-33)$$

この近似式で表される曲線を図 5-28 に示す。

(5) 比熱

版築の固体実質部の容積比熱は、粒径分布[9]を基にして決定した。まず、粒径分布から、細粒分、砂分、礫分の割合を読み取る。(細粒分 65%、砂分 33%、礫分 2%) 細粒分は粘土、砂分・礫分は石英砂と仮定する。(粘土の比熱は 753.49 [J/kgK]、石英砂の比熱は 879.07[J/kgK])。次に、版築の容積比熱をこの粘土と石英砂の混合比熱として算出する。その混合比熱に、密度、比容積を乗ずることで版築の固体実質部の容積比熱を算出した。版築のみかけの容積比熱は含有する水分の影響を考慮するため、固体実質部の容積比熱に含水率に応じた水分の容積比熱を加える。

$$c_t \rho_t = 500179 + \rho_{2w} \psi \times 4186.05 \quad \dots (5-34)$$

表 5-1 版築の固体実質部の容積比熱

	比重 [kg/m ³]	比熱 [J/KgK]	比容積 [m ³ /m ³]	容積比熱 [J/m ³ K]
版築	1253	835.117	0.478	500179

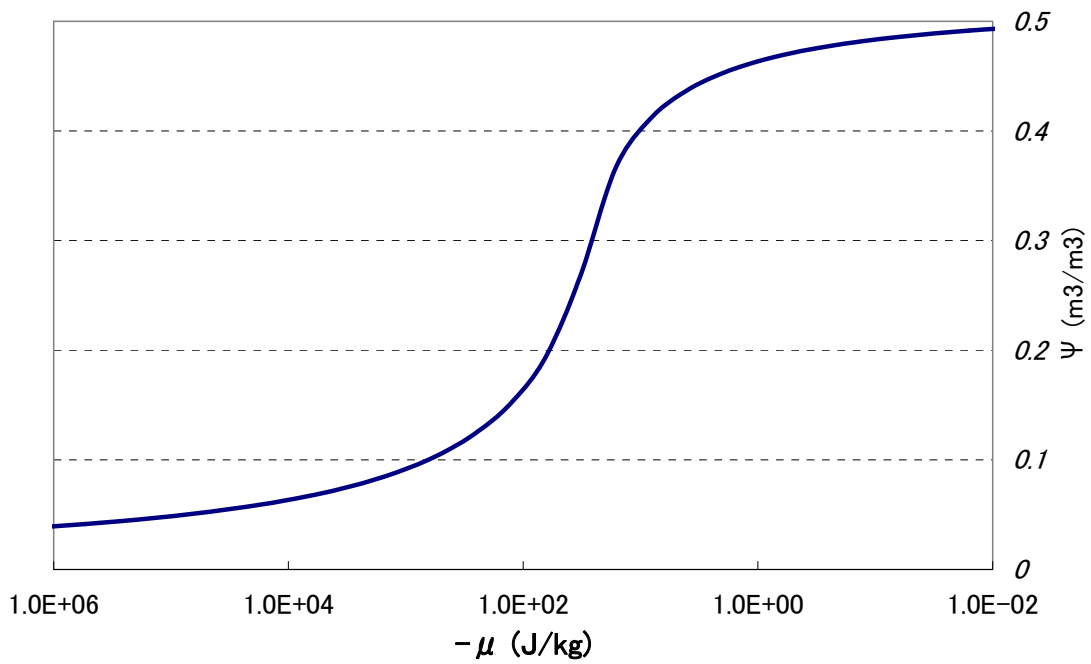


図 5-24 版築の含水率－水分化学ポテンシャル関係

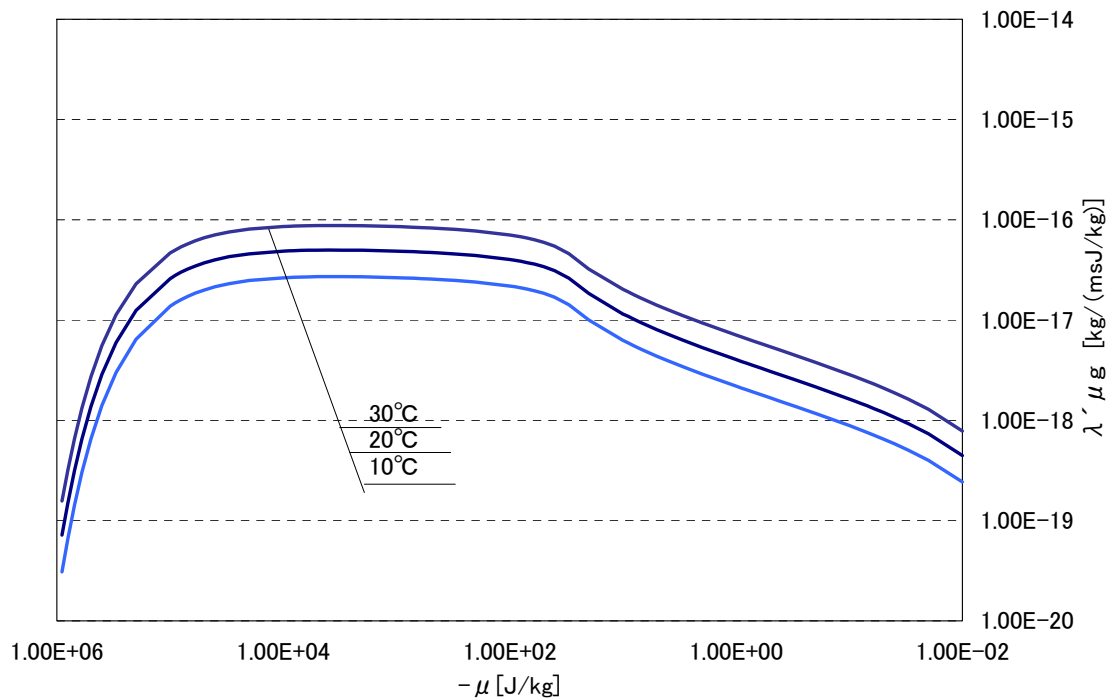


図 5-25 版築の水分化学ポテンシャル勾配に関する気相水分伝導率

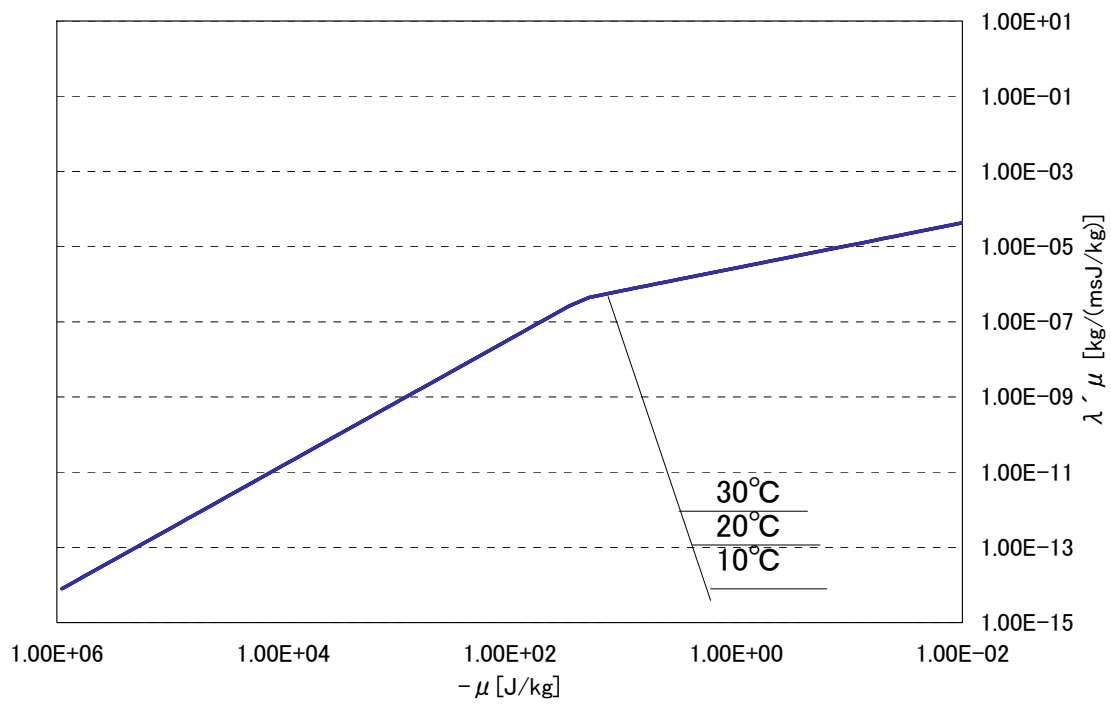


図 5-26 版築の水分化学ポテンシャル勾配に関する水分伝導率

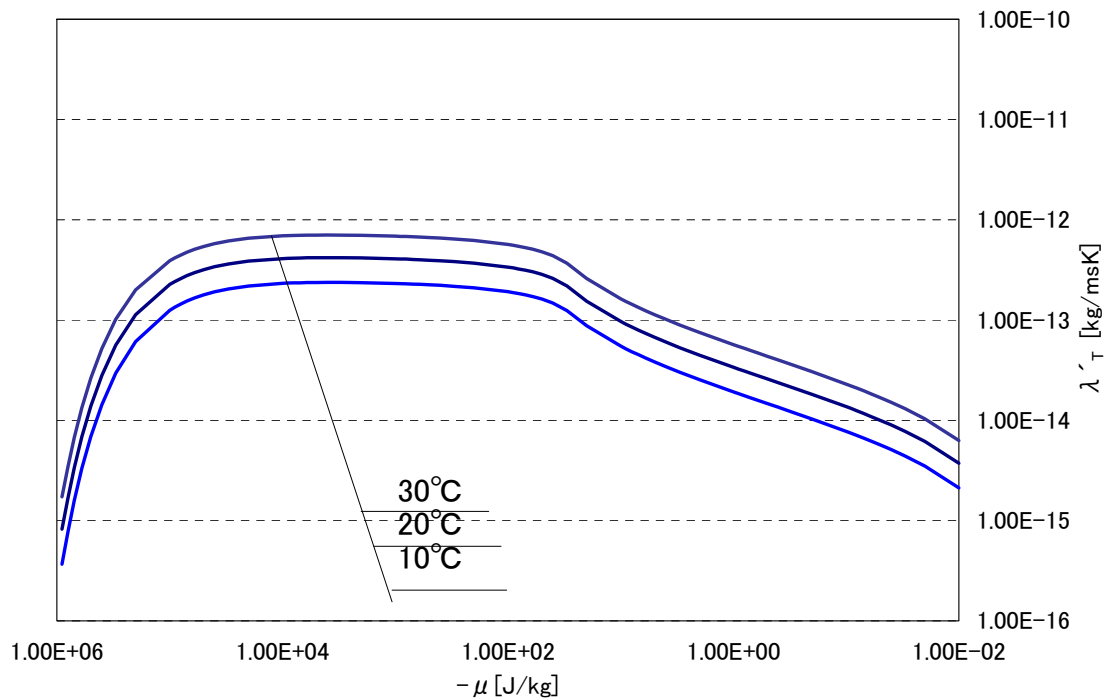


図 5-27 版築の温度勾配に関する水分伝導率

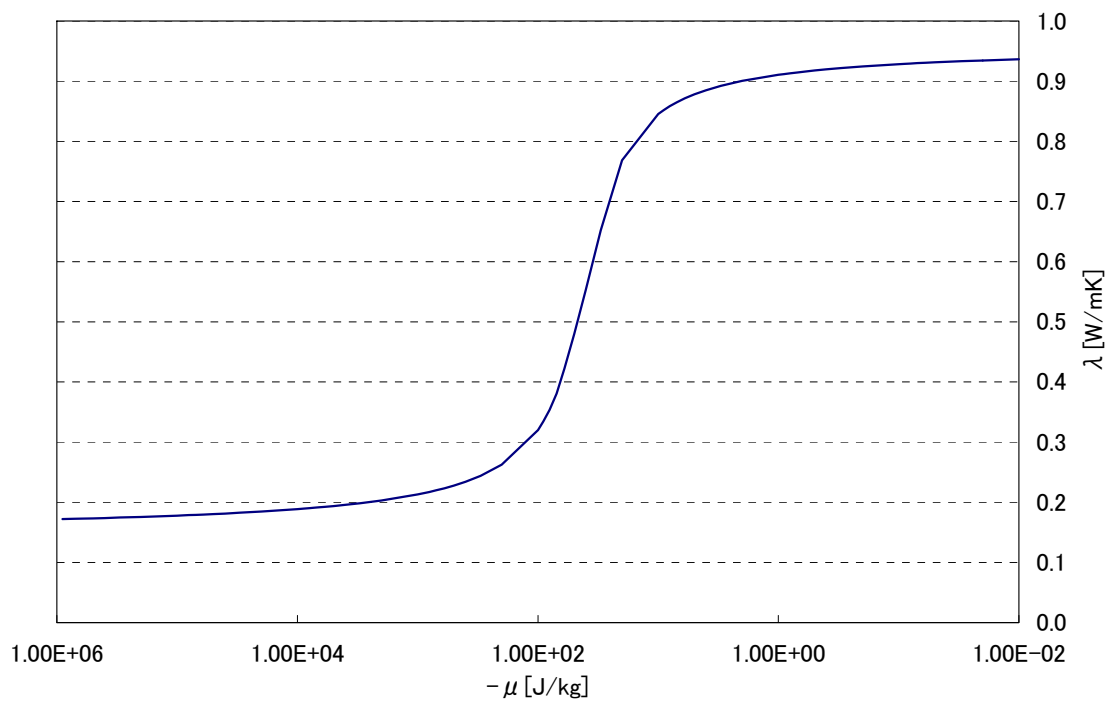


図 5-28 版築の熱伝導率

5.3.4 断熱材の熱水分物性

第9章で発掘部位に断熱材を用いて保護する場合の検討を行う。断熱材を設置する箇所は、図5-29に示すように、発掘により石室が露出した部位の周囲である。検討で用いる断熱材は、吸水性が非常に小さい押出発泡ポリスチレンフォームとし、解析では、断熱材中の水分移動・蓄積は考慮せず、非透湿の材料とみなす。

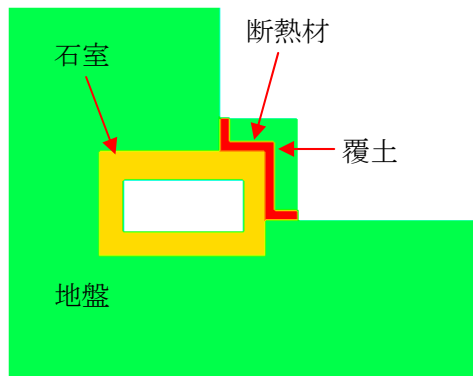


図 5-29 断熱材の物性を用いた部位（赤い線部分）

(1) 押出発泡ポリスチレンフォームの熱伝導率

熱伝導率の値は、文献[11]より測定値の 0.037W/mK を用いる。

(2) 押出発泡ポリスチレンフォームの比熱

比熱の値も同様に、文献[11]より測定値の 1500J/kg K を用いる。

5.3.5 仮保護施設躯体の熱水分物性

高松塚古墳発掘後、発掘部位を覆うように石室南側前方に幅 2.75m、奥行 7.5m、高さ 4.5mの合成樹脂波板葺き、片流れ、木骨造の仮保護施設が設置された。仮保護施設躯体の熱水分物性値を用いる箇所を図 5-30 に示す。解析では、簡単のためパーティクルボードのみで構成されているものとする。また、簡単のため、仮保護施設躯体を通しての水分の移動は考慮しないものとする。

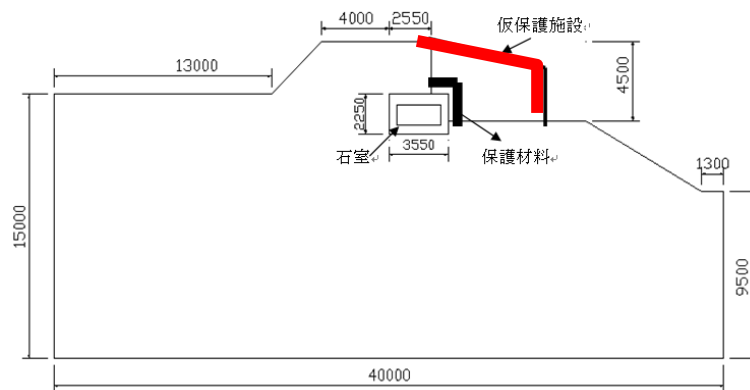


図 5-30 仮保護施設躯体の物性を用いた部位 (赤い線部分)

(1) パーティクルボードの熱伝導率

熱伝導率の値は、文献[11]より測定値の 0.113W/mK を用いる。

(2) パーティクルボードの比熱

比熱の値も同様に、文献[11]より測定値の 1600J/kg K を用いる。

5.3.6 空気側の物性値

本解析では、空気側の物性値として以下のものを用いた。

表 5-2 物性値

項目	(記号)	値 (単位)
地表面及び覆屋外側の熱伝達率	(α_o)	23.3 (W / m ² K)
地表面及び覆屋外側の湿気伝達率	(α'_o)	1.1×10 ⁻⁷ (kg / m ² sPa)
室内側熱伝達率	(α_i)	6.4 (W / m ² K)
室内側湿気伝達率	(α'_i)	2.8×10 ⁻⁸ (kg / m ² sPa)
断熱覆屋内側の総合熱伝達率	(α'_h)	6.4 (W / m ² K)
断熱覆屋内側の湿気伝達率	(α'_h)	2.8×10 ⁻⁸ (kg / m ² sPa)
空気容積比熱	$(c\gamma)$	1255.8 (J / m ³ K)
空気容積比湿	$(c\gamma')$	7.5×10 ⁻⁶ (kg / m ³ Pa)

5.4 第5章のまとめ

本章では、以下の章で行う解析に用いる外界気象条件と、墳丘地盤、凝灰岩、仮設覆屋躯体、断熱材の熱水分物性値を示した。

外界気象条件については、特に日積算値しか得られていない日射量と降雨量の気象データから毎時の値を推定する方法について述べた。

墳丘地盤の熱水分物性値については、現地の版築について測定された平衡含水率、熱伝導率、また平衡含水率と粒径分布の測定値から推定された水分伝導率を示した。

石室を構成する凝灰岩の熱水分物性値については、同種の岩について測定された熱伝導率と、細孔径分布を用いて推定した平衡含水率、透水係数の測定値を元に推定した水分伝導率を示した。

仮設覆屋躯体は熱移動のみ考慮し文献値による材料の熱物性値を、断熱材は、透湿性の低い材料を想定し防湿として取り扱い、同じく文献値による材料の熱物性値を示した。

図表出典

- [I] 文化庁ホームページ、<http://www.bunka.go.jp/> 国宝高松塚古墳壁画恒久対策検討会
(第5回、参考資料) (2005/5/2)

第5章の参考文献

- [1] (財)気象業務支援センター：気象データベース地上観測、CD-ROW (2007)
- [2] 田中俊六、武田仁ほか共著：最新建築環境工学改訂2版、井上書院、91-99 (1999)
- [3] Lalit M. Arya et. al.: Relationship between the Hydraulic Conductivity Function and the Particle-Size Distribution, Soil Science Society of American Journal, 1063-1070 (1999)
- [4] 林為人、高橋学、水銀圧入式ポロシメータおよび岩石内の内部空隙寸法分布の測定への適用、地質ニュース、549、pp.61-68 (2000)
- [5] 多羅間次郎：古墳壁画保存に関する研究－石室解体時の墳丘部の形状変化が石室の熱水分性状に与える影響－、京都大学大学院工学研究科建築学専攻 修士論文 (2008)
- [6] 小鯛桂一、小鯛桂一：岩盤透水性のグラフ表示、地質調査所月報、第35号、第9号、419-434 (1984)
- [7] 北野晃一、新晃一、木下直人、奥野哲夫：高温岩石の力学特性、熱特性に関する文献調査、応用地質、Vol.29、No.3、pp.242-253 (1988)
- [8] Magdi KHALIL and Takeshi ISHIZAKI: Moisture Characteristic Curves of the Soil of Takamatsuzuka Tumulus, 保存科学、46、13-20 (2007)
- [9] 石崎武志、犬塚将英、三村衛：高松塚古墳墳丘部の土質および水分分布調査、保存科学、45、69-76 (2006)
- [10] 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、45、59-68 (2006)
- [11] 日本熱物性学会編：熱物性ハンドブック、養賢堂 (2000)

第6章 高松塚古墳発掘から保存施設稼働までの保存環境の解析

6.1 はじめに

本章では、高松塚古墳発掘時の石室内の温湿度変動について、前章までに示した解析手法と条件を用いて、数値解析によって石室内温湿度環境を推定し、測定値と比較を行う。モデル化や境界条件などの設定には、過去の石室周囲の環境や内部作業などに関する測定値、記録を可能な範囲で考慮するが、不明な点は推定を行う。

ここでは、まず発掘前から発掘後に至る過程における墳丘の形状の変化や保存対策として設置された仮設覆屋を考慮した3次元解析モデルについて説明を行う。次に、計算の境界条件及び初期条件等について述べる。これらの条件で行った解析結果を、測定値と比較し、結果の再現性について検討を行う。さらに、発掘から保存施設稼働までの石室内温湿度性状、結露性状、墳丘熱水分場を明らかにする。最後に、3次元解析による計算負荷を軽減するために墳丘、石室を2次元モデルとした場合の解析結果を3次元モデルの結果と比較し、石室内温湿度、結露の性状の把握の観点から2次元解析の精度の検討を行う。

6.2 計算条件

6.2.1 発掘時の高松塚古墳の墳丘形状等の変化

高松塚古墳の発掘調査は、1972年3月1日から4月5日まで行われた。図6-1～6-3はそれぞれ発掘前、発掘後、発掘後に石室南側に設置された仮保護施設の様子である。発掘直後の2週間程度は石室の開口部は夜間など調査時以外閉じられたが、南側は外気に露出した状態であった[1]。初期の発掘調査終了時には、露出した石室の南側を覆うように、前室を設けた仮保護施設が設置され、石室内部の調査時以外は、石室南側に防湿シートが敷かれ、その上に覆土が行われた[1]。保存施設の建設までの期間における墳丘の状態は、以下の三つの段階に分けられる。

- (1) 発掘前 (1972年3月6日以前)
- (2) 発掘時 (1972年3月6日から1972年4月1日まで)
- (3) 発掘終了後 (1972年4月2日から1975年12月31日まで)



図 6-1 発掘前の墳丘の状況[図表出典(i)]



図 6-2 発掘直後の石室南側が露出された状況[図表出典(i)]



図 6-3 初期の発掘終了時に設けられた仮保護施設[図表出典(i)]

6.2.2 解析対象のモデル化

ここでは、前述の発掘における3つの段階における墳丘の形状の変化等に対して、それぞれ解析対象のモデル化を行う。

(1) 発掘前の解析モデル

発掘前の解析モデルは、墳丘部の形状を再現するために、図6-4に示すような発掘時の墳丘の南北及び東西方向の実測図を基にした。図6-5に、発掘前の解析モデル全体の鳥瞰模式図を、図6-6に、発掘前の解析モデルの断面を示す。図6-6(a)に、モデル化された墳丘の東西方向の断面図を示す。東西の長さは30m、地盤底部から墳頂までの高さは18mとし、東側斜面と西側斜面の傾斜角は45度である。図6-6(b)に、モデル化された墳丘の南北方向の断面図を示す。南北の長さは30m、地盤底部から墳頂までの高さは18mとし、南側斜面の傾斜角は30度、北側斜面の傾斜角は45度である。

発掘前の石室は墳丘部頂上から3.0mの深さの位置にあり、石室の寸法は長軸内法長さ2.6m、短軸内法長さ1.0m、内法高さ1.1mである。石室を構成する石材は、1層の凝灰岩で構成されるとする。周囲地盤の水平方向に対する境界面は石室中心から南方向で15.0m、北方向で15.0m、東方向で19.0m、西方向で11.0mとし、地盤底部境界面は、墳丘部頂上から18m、水平地表面からは13.5mとする。

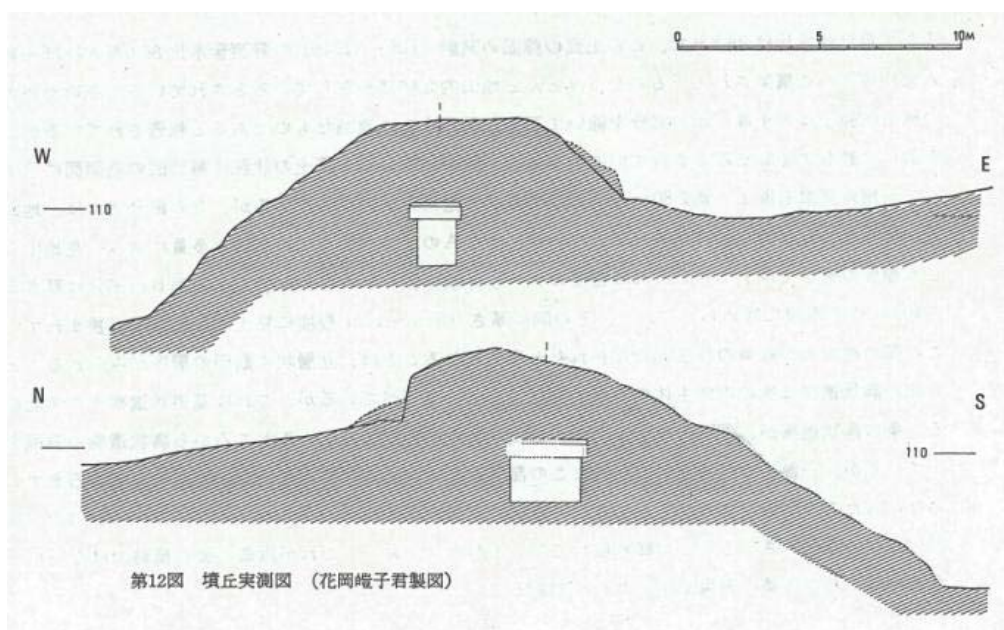


図6-4 発掘前の墳丘実測図[図表出典(ii)]

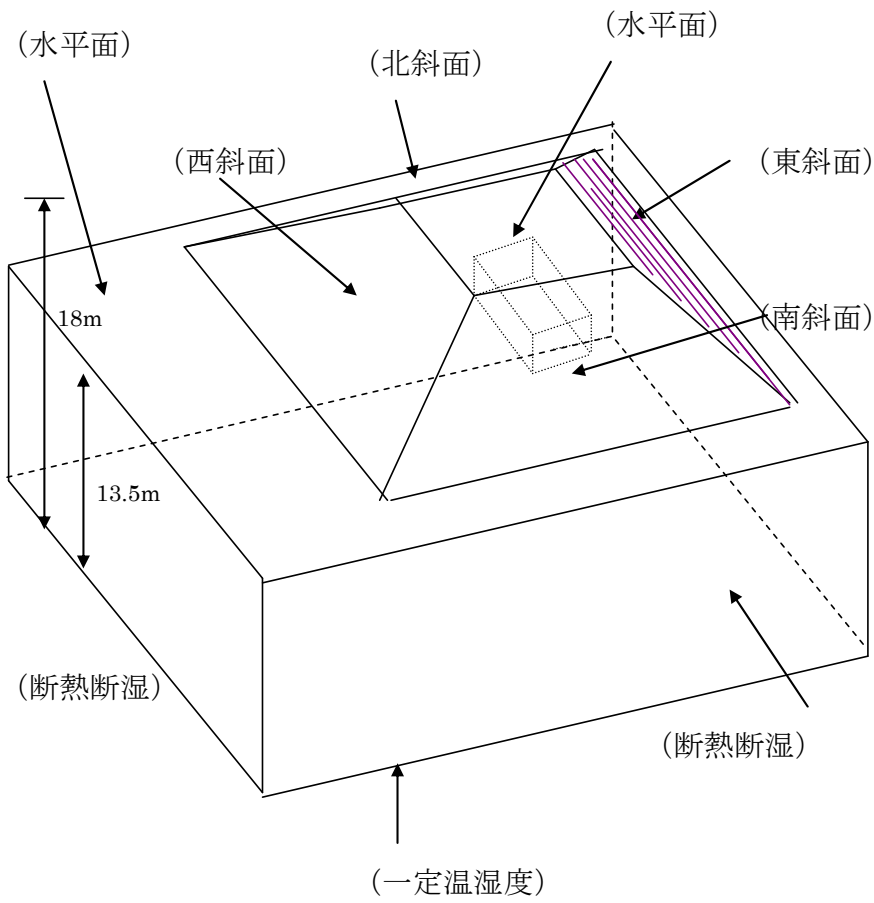


図 6-5 発掘前の解析モデルの鳥瞰模式図

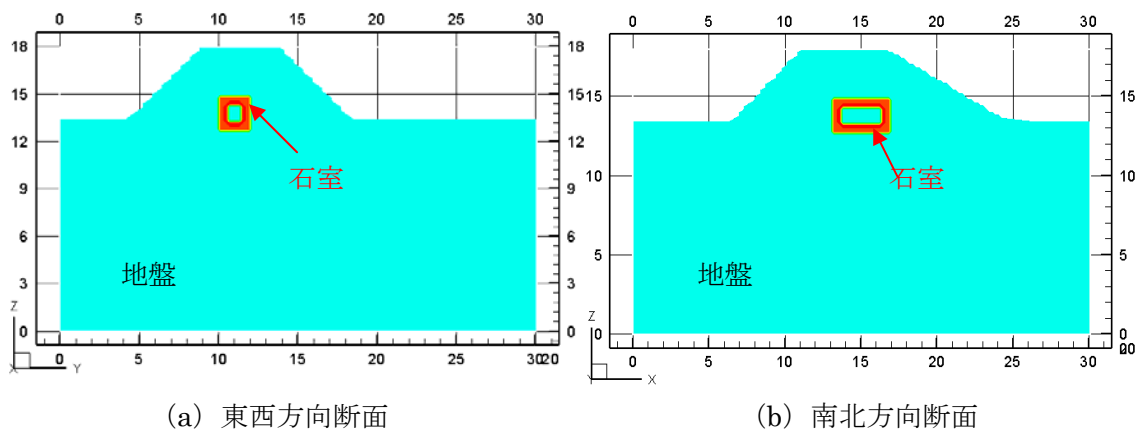


図 6-6 発掘前の解析モデルの断面

(2) 発掘直後の解析モデル

発掘直後の解析モデルは、図 6-2 に示す発掘直後の状況を考慮し、発掘前の墳丘のモデルに発掘面を考慮した。図 6-7 に、発掘直後の解析モデル全体の鳥瞰模式図を、図 6-8 に発掘直後の解析モデルの水平断面、南北断面、東西断面を示す。石室南側で石室を中心に東西方向に 2m の幅で、石室の南端以南かつ石室床面高さ以上の土壌の領域を取り除いている。

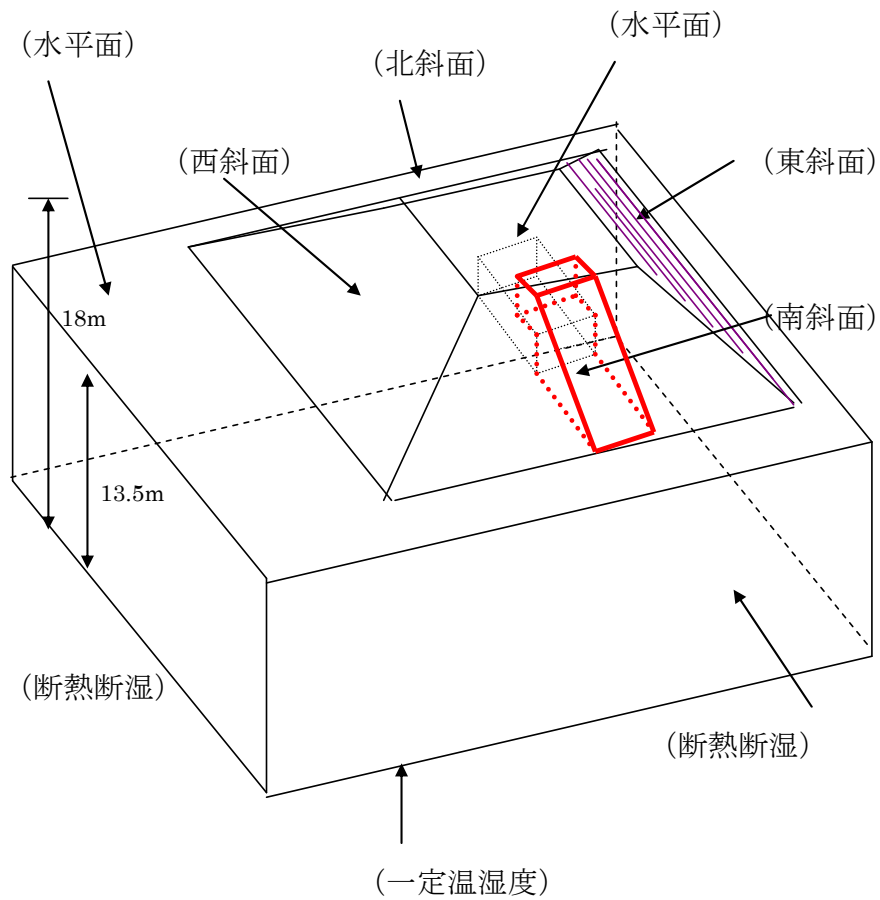
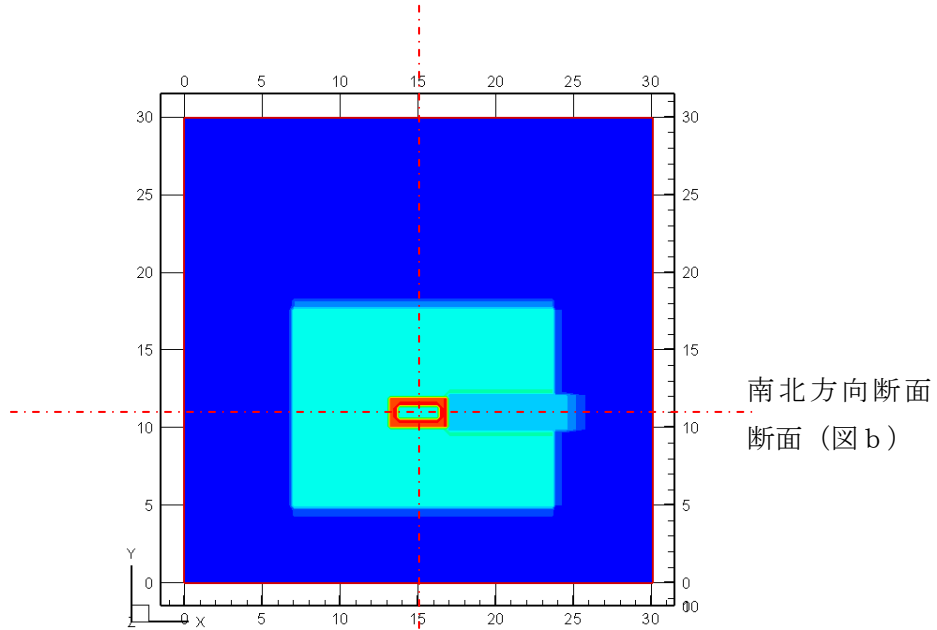
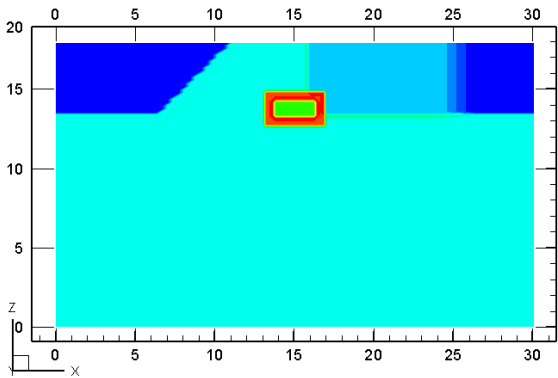


図 6-7 発掘直後の解析モデルの鳥瞰模式図

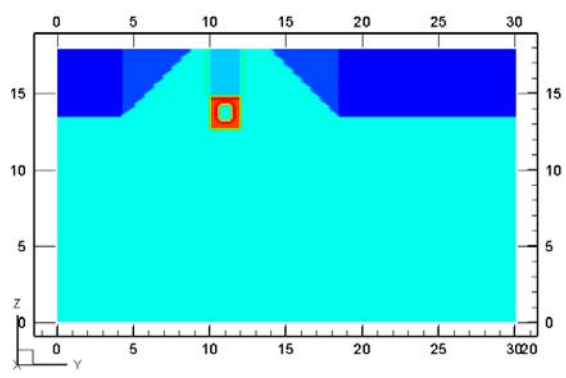
東西方向断面 (図 c)



(a) 水平方向断面



(b) 南北方向断面



(c) 東西方向断面

図 6-8 発掘直後の解析モデルの断面図

(3) 発掘終了の解析モデル

図 6-9 に示すように発掘終了後に、発掘部位を覆うように石室南側前方に幅 2.75m、奥行 7.5m、高さ 4.5mの合成樹脂波板葺き、片流れ、木骨造の仮保護施設が設置された。石室内部の調査時を除いて、石室南側の石材が露出する部位は、蒸発を抑えるために防湿層とその上に覆土が行われた。発掘直後の解析モデルは、図 6-10 に示すように、石室南側に防湿層と覆土を設け、墳丘発掘面を覆うような仮保護施設を設置する。図 6-11 に、発掘直後の仮保護施設が設けられた状態における解析モデル全体の鳥瞰模式図を示す。

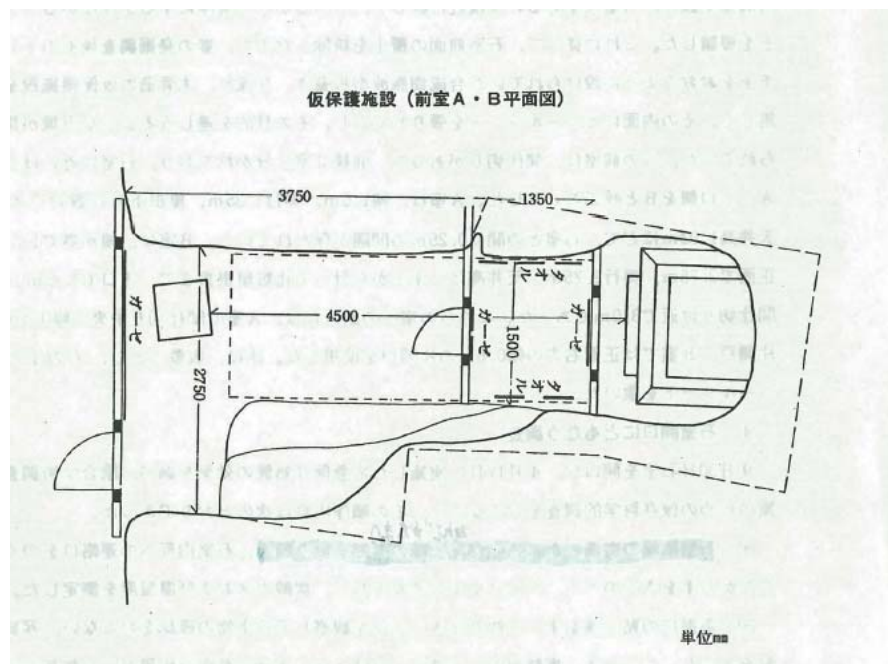
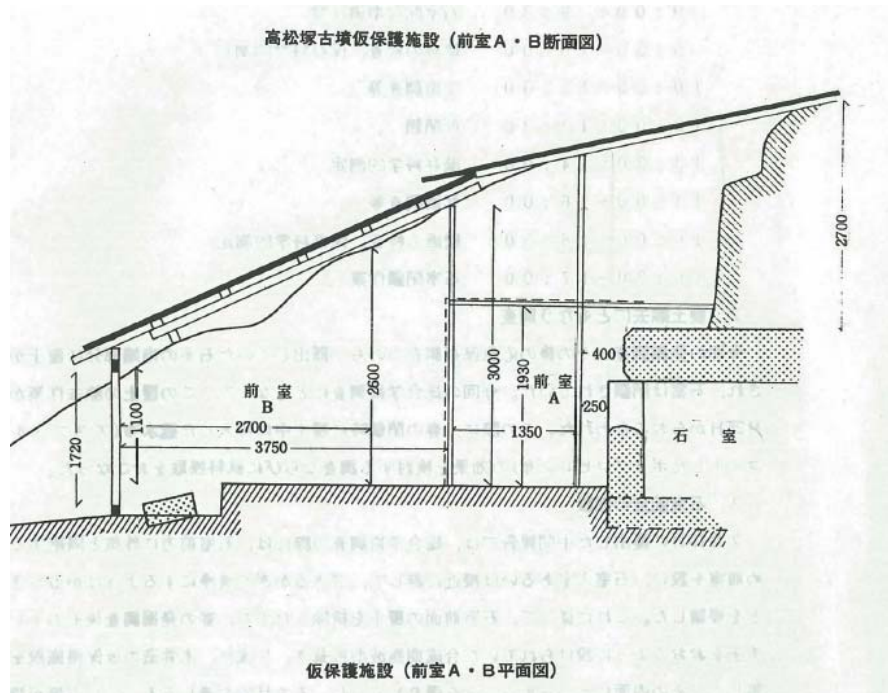


図 6-9 発掘終了後の仮保護施設の断面図[図表出典(iii)]

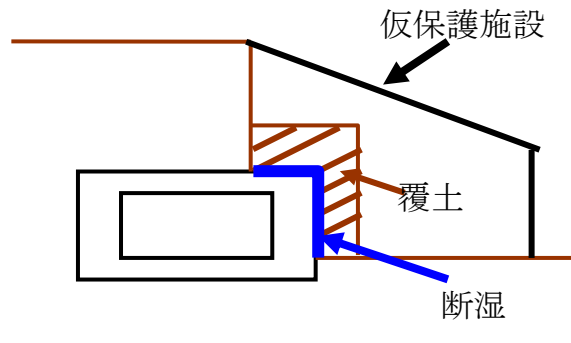


図 6-10 発掘終了後の保存対策（模式図）

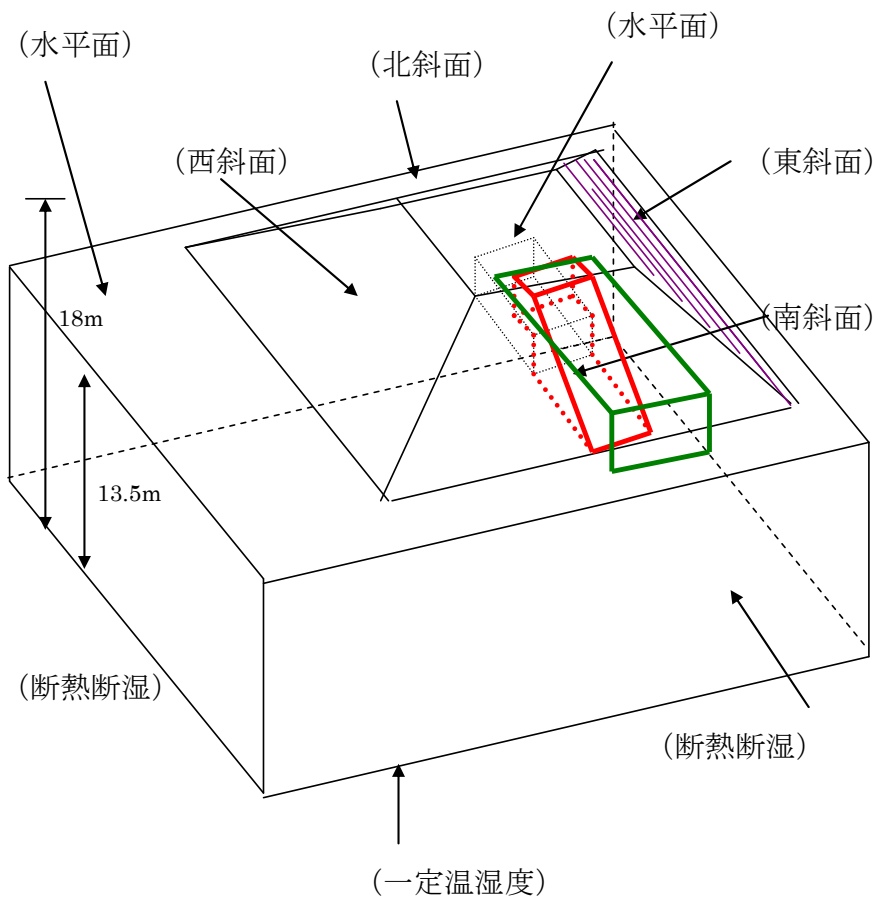


図 6-11 発掘直後の仮保護施設が設けられた状態の解析モデルの鳥瞰模式図

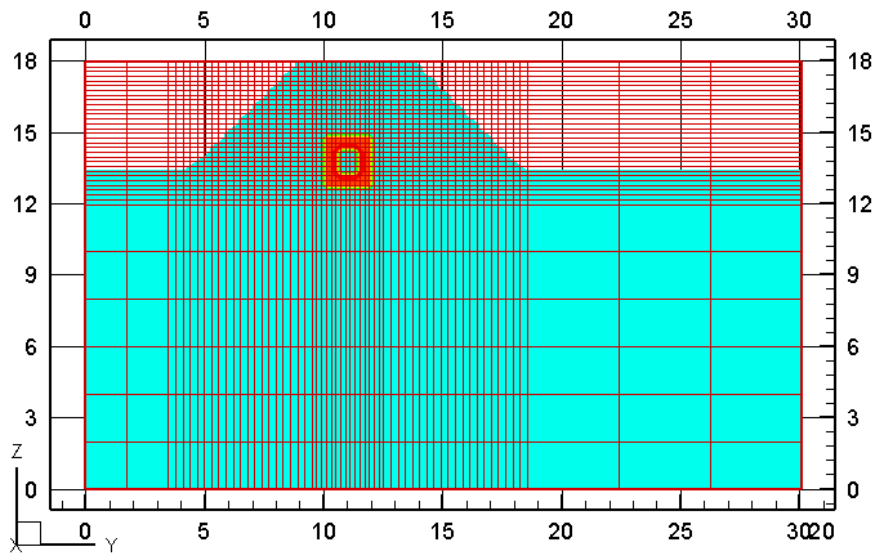
6.2.3 境界条件

3つの時期における境界条件をまとめて説明する。墳丘部を含めた地表面及び石室と覆屋内側表面では第3種境界条件を、地盤底部では第1種境界条件を、また石室から遠方の地盤鉛直面では、断熱・断湿とする第2種境界条件を用いた。地盤底部の境界は、温度 14.52°C、水分化学ポテンシャル -7 J/kg 一定とした。

外界気象条件は、第5章で示したとおり 1972-1975年の奈良地方気象台観測値[2]の外気温、外気相対湿度、全天日射量、降水量、夜間放射を1時間毎の時系列データになるように補完を行って用いた。

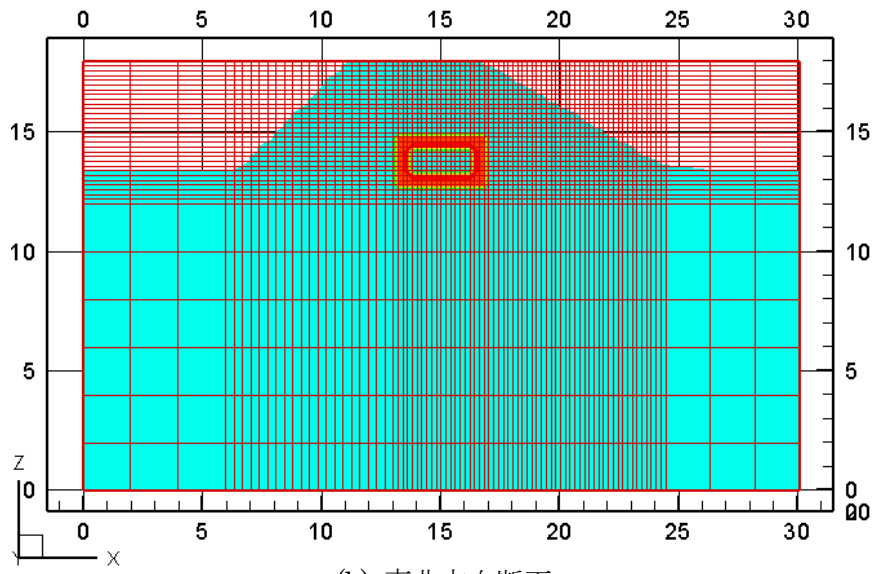
6.2.4 計算方法

計算には、前進型有限差分法を用いた。基礎方程式の差分化は前章に示した通りである。図6-12に各断面における計算刻みを示す。空間刻みは、墳丘部と石室の近くで 0.20m から 0.32m、それ以外では 1.75m から 4m の範囲で変化させた。時間刻みは、60秒とする。また、周囲地盤において、水分化学ポテンシャルが 0以上となる時には飽和状態とし、水分に関して第1種境界条件（地表面では $\mu = -5$ （相対湿度 99.999%）、壁体室内側表面では $\mu = -5$ （相対湿度 99.999%））とする。

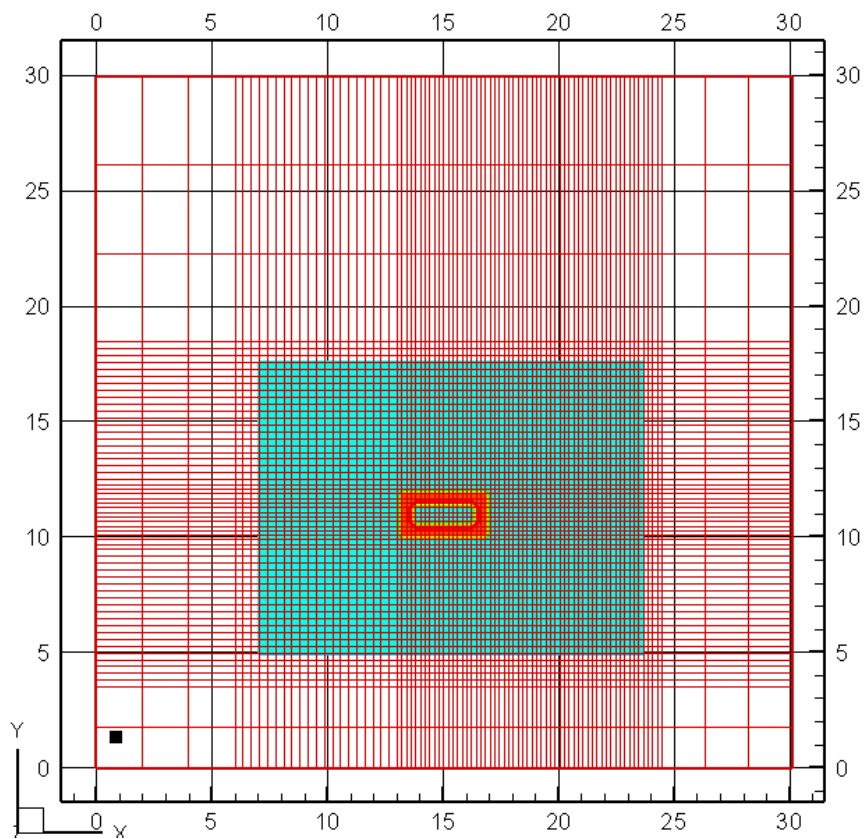


(a) 東西方向断面

図 6-12 (a) 計算メッシュ



(b) 南北方向断面



(c) 水平方向断面(高さ 14.2m)

図 6-12 (b),(c) 計算メッシュ

6.2.5 初期条件

発掘前から発掘後の仮保護施設で保存される過程を時系列に従って解析を行い、温度測定値と比較を行うため、以下に示すような計算を行った。まず 1972 年の気象条件が繰り返されるという条件下での解析を行い、発掘前の周期的定常状態の結果を得た。1972 年の 1 月 1 日から 3 月 5 日までは、図 6-6 の解析モデルにおける周期的状態で得られる結果とする。図 6-13 に発掘後の墳丘の状態の変化に併せた初期条件の与え方を示す。発掘前の解析モデルにおける 3 月 5 日の結果を初期条件として、発掘直後の 3 月 6 日から 4 月 1 日まで、図 6-8 の解析モデルを用いて解析を行う。この計算で得られた 4 月 1 日の結果を初期条件として、4 月 2 日から発掘調査終了後は、図 6-11 の解析モデルを用いて解析を行う。

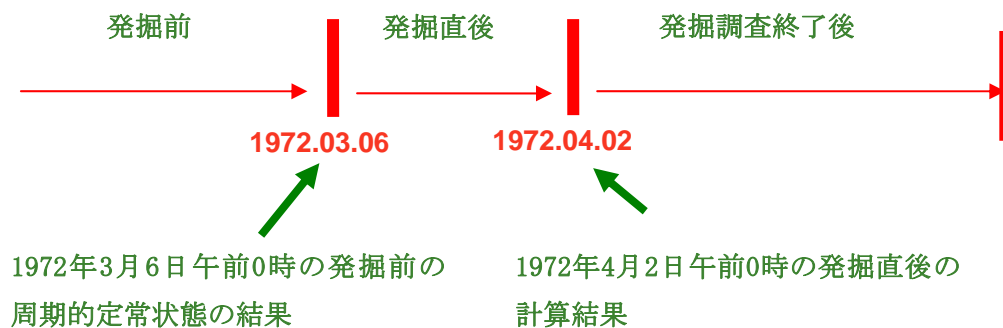


図 6-13 発掘後の初期条件の与え方

6.2.6 その他の計算条件

発掘前と発掘時の、石室と外気の間での換気回数は、それぞれ 0 回/h、2 回/h で一定とする。

表 6-1 に発掘後の仮保護施設内の条件と石室への入室条件を示す。仮保護施設では、以下により内部の熱水分の発生は考慮しない。石室開放と入室が年 2 回程度春と秋にあったが、本研究では、発掘直後の年間変動について注目しており、石室開放と入室が石室内部に与える影響は小さいと判断し、ここではこれを考慮しない。なお、覆土の厚さと仮保護施設と外気の間での換気回数は、それぞれ 6.3.2 節と 6.3.3 節の検討により決定した値を用いる。

表 6-1 発掘後の条件

仮保護施設
<ul style="list-style-type: none">・ 内部での熱水分発生なし・ 石室閉鎖時を考え、石室と仮保護施設の間での換気回数は 0 回/h・ 屋根、壁は 1 次元の熱移動のみ（非透水、非透湿）・ 覆土の初期温度は外気温度が等しい。覆土の相対湿度：90%・ 仮保護施設と外気の間での換気回数は 1 回/h・ 覆土の厚さ 50cm
石室への入室
<ul style="list-style-type: none">・ なし（熱水分発生なし）

以上の条件の下で、図 6-14 に示すような計算手順で計算を行った。

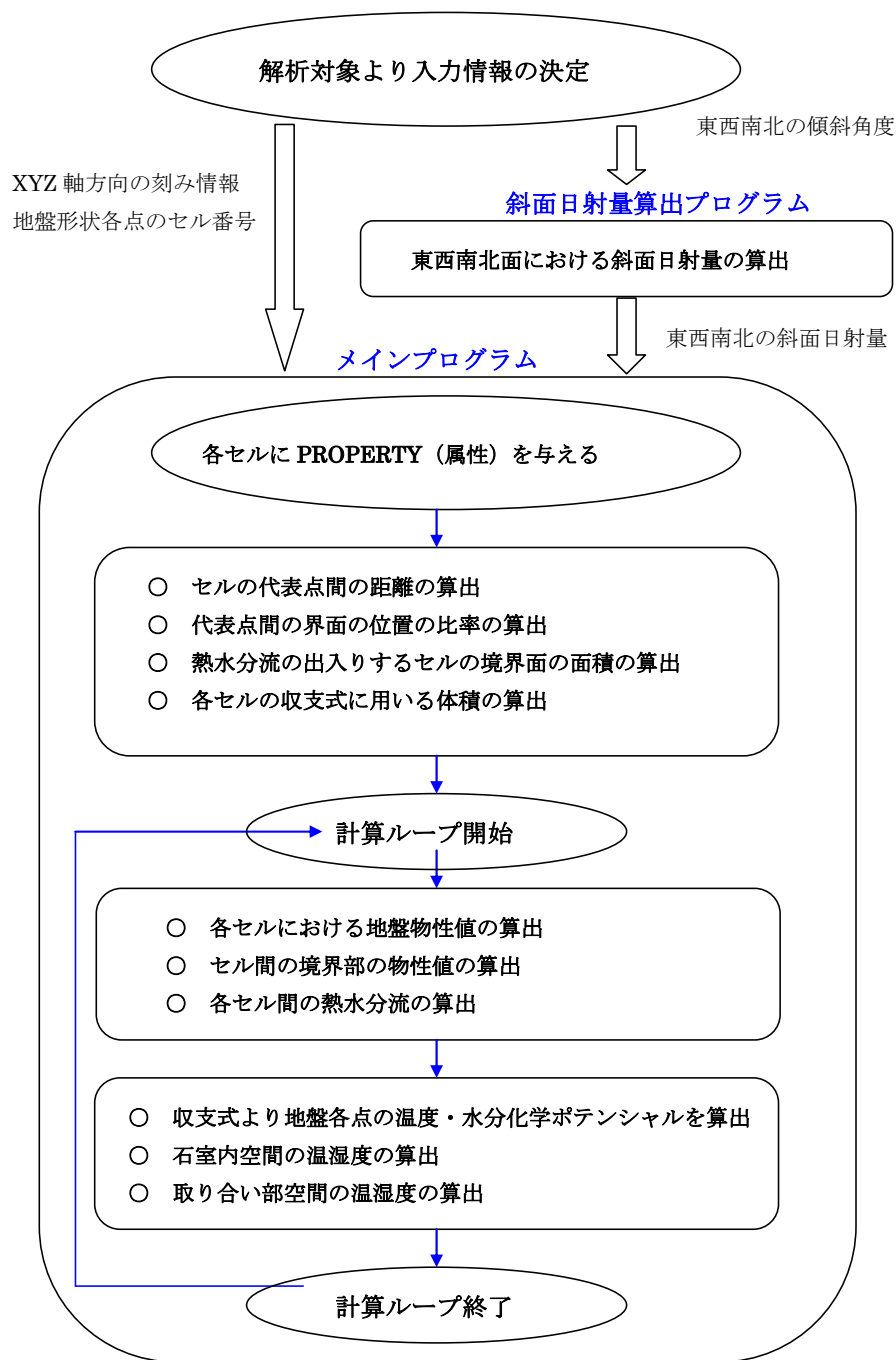


図 6-14 計算の手順

6.3 高松塚古墳発掘直後の石室内温湿度の解析値と測定値の比較

前節まで述べた解析モデルと計算条件を用いて、高松塚古墳発掘後の墳丘の形状の変化や、現地で行われた保存対策を考慮した解析結果を、当時の測定値と比較する。

6.3.1 石室内温湿度の解析値と測定値の比較

図 6-15 に 1972 年から 73 年にかけての石室内温度の解析値を測定値[1]と併せて示す。図より、解析値は、年振幅が若干小さいが、年平均値および位相遅れとともに測定値の変動をよく再現していることが分かる。測定値は $13.6^{\circ}\text{C} \pm 2.8$ (振幅) $^{\circ}\text{C}$ で、4 月から 5 月初めに最低温度を、10 月から 11 月初めに最高温度を示しているのに対して、解析値は $13.5^{\circ}\text{C} \pm 2.5$ (振幅) $^{\circ}\text{C}$ で、4 月から 5 月初めに最低温度を、10 月から 11 月初めに最高温度を示している。

図 6-16 に、1972 年から 73 年にかけての石室内相対湿度の解析値を示す。湿度に関する測定値は、調査時に石室を開口した直後の測定では常に 95%RH 以上の値が保たれていた[1]のに対して、解析値は 99%以上でやや高めだが同様に高い湿度を維持しており、その性状を概ね再現している。

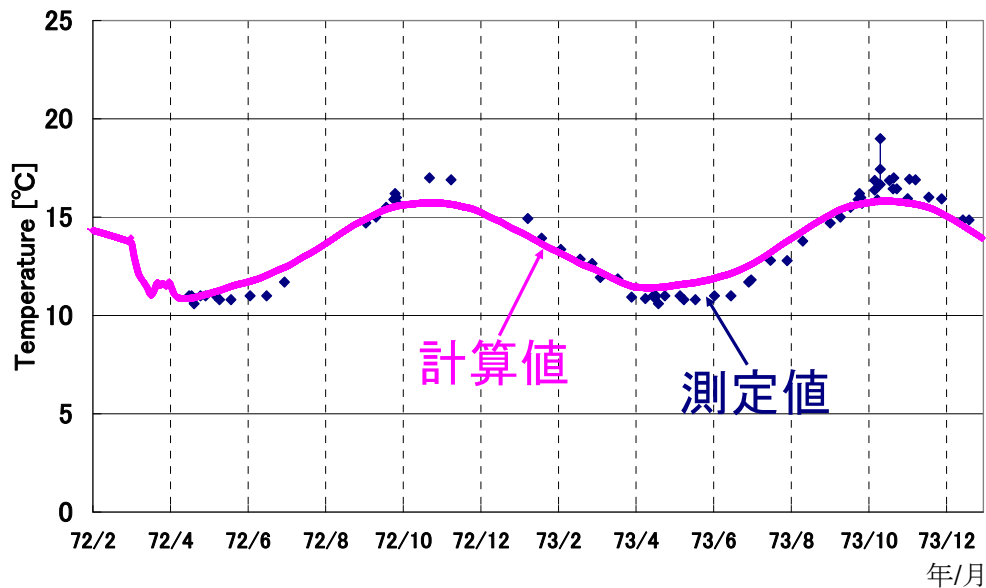


図 6-15 石室内温度の測定値と解析値の比較

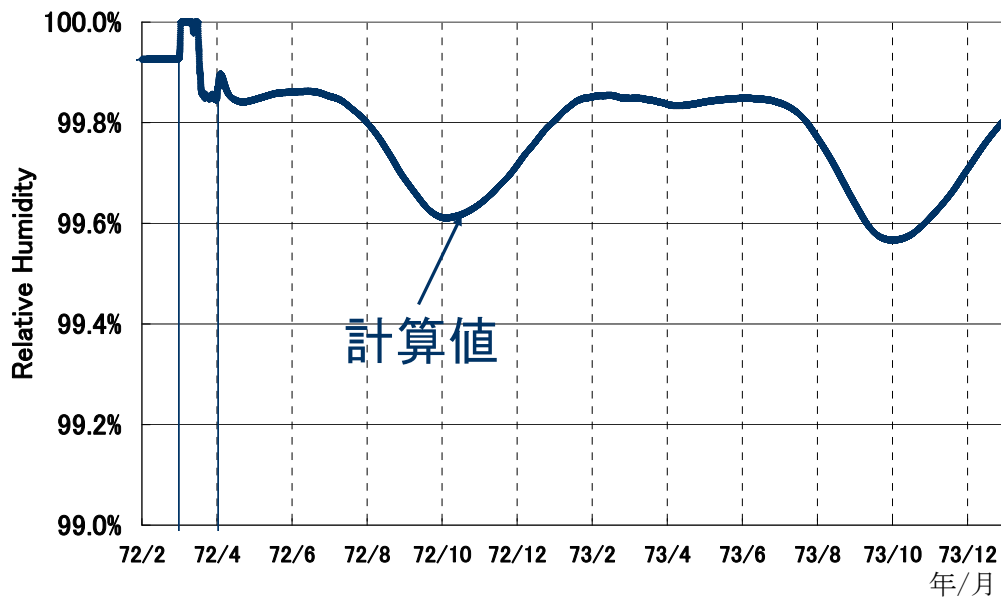


図 6-16 石室内相対湿度の解析値

6.3.2 発掘部位の覆土の厚さが石室内温湿度に及ぼす影響

(1) 目的

発掘終了後の仮保護施設がある時、石室内部の調査時を除いて、石室南側の石材が露出する部位は覆土により行われた。この覆土の厚さについては正確な記録はないため、ここでは、覆土の厚さを 30cm、50cm、70cm と変化させた場合の解析を行う、発掘部位の覆土の厚さが石室内温湿度に与える影響を明らかにする。また、石室内温度の解析値と測定値とを比較し、覆土の厚みを推定する。

(2) 解析結果と考察

図 6-17 に 1972 年から 73 年の石室内温度の解析値を測定値[1]と併せて示す。覆土の厚みが 30cm、50cm、70cm の場合、1973 年の石室内温度は、それぞれ $13.5^{\circ}\text{C} \pm 2.6^{\circ}\text{C}$ 、 $13.5^{\circ}\text{C} \pm 2.3^{\circ}\text{C}$ 、 $13.5^{\circ}\text{C} \pm 2.0^{\circ}\text{C}$ となった。覆土が厚くなると、石室内温度の位相は若干遅れ、年平均値の変化はほとんどないが、年振幅は小さくなる。図 6-18 に石室内相対湿度を示す。覆土の厚くなると、11 月から 6 月までの室内湿度の変化は小さく、7 月から 10 月までの室内湿度は若干上がる。

測定値と解析値を比較すると、覆土厚さが 50cm の場合に、解析値は測定値に最も近くなる。以上から、本研究では、発掘直後に石室南側に埋め戻した覆土厚さを 50cm とする。

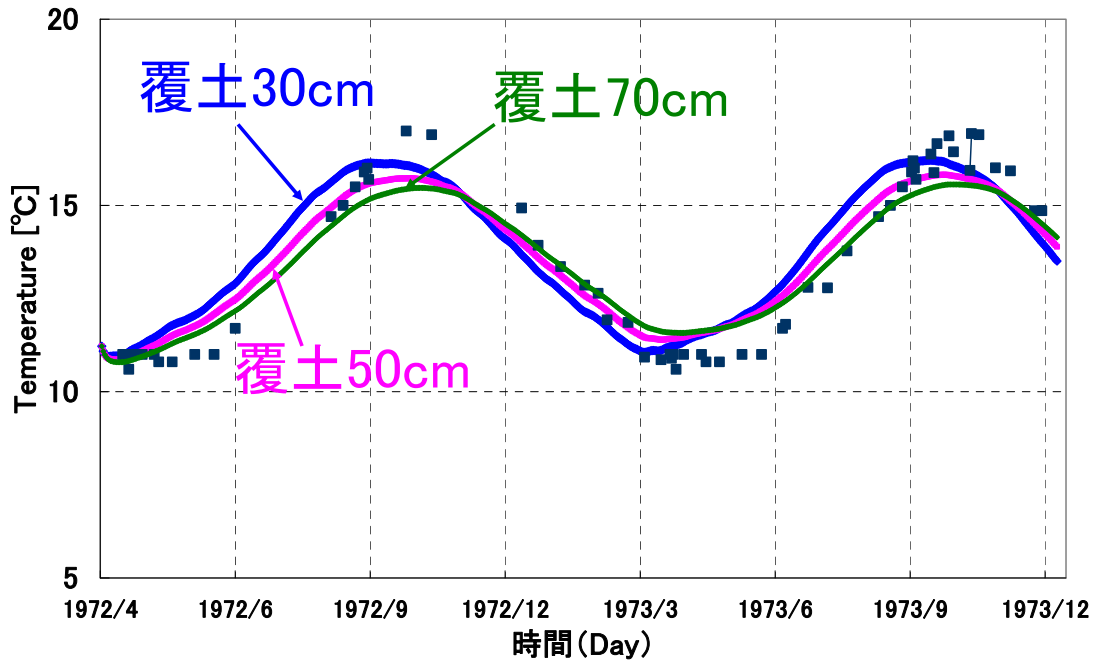


図 6-17 異なる覆土厚さによる石室内温度の比較

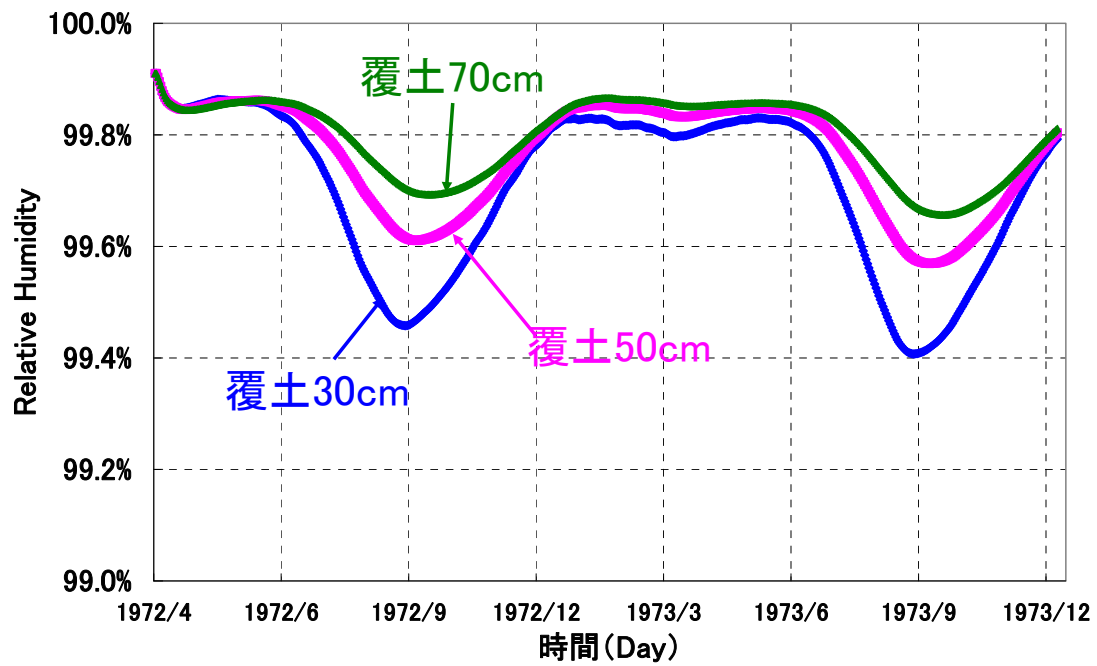


図 6-18 異なる覆土の厚さによる石室内湿度の比較

6.3.3 仮保護施設と外気との換気回数が石室内温湿度へ与える影響

(1) 目的

仮保護施設内と外気の間での換気については、隙間の程度が不明なため、換気回数を0、1、2、5回/h、無限大と変化させた場合の解析を行い、換気回数が石室内温湿度へ与える影響を明らかにする。なお、ここでは換気回数は年間を通じて一定とする。その解析結果を、当時の測定値と比較検討し、仮保護施設の平均換気回数を推定する。

(2) 解析結果と考察

図6-19に、換気回数を変化させた場合の1972年から73年における石室内温度の解析値を測定値と併せて示す。換気回数が0、1、2、5回/h、無限大に対して、石室内温度はそれぞれ $13.8^{\circ}\text{C} \pm 2.3^{\circ}\text{C}$ 、 $13.5^{\circ}\text{C} \pm 2.3^{\circ}\text{C}$ 、 $13.4^{\circ}\text{C} \pm 2.2^{\circ}\text{C}$ 、 $13.2^{\circ}\text{C} \pm 2.2^{\circ}\text{C}$ 、 $13.2^{\circ}\text{C} \pm 2.1^{\circ}\text{C}$ となる。換気回数が0回/hの場合に、石室内温度の年均値と最大値が一番高くなる。換気回数が多くなると、石室内温度の平均値は少し低くなり、年振幅は若干小さくなる。換気回数が5回/h以上では、石室内温度の差がとても小さい。

図6-20に石室内相対湿度の結果を示す。換気回数を0回/hから無限大まで変化させるでも、石室内湿度変化は0.2%以下であり、換気回数が室内湿度に与える影響は小さい。

測定値と解析値を比較すると、換気回数が1~2回/hで、解析値は測定値に最も近くなる。以上から、本研究では、仮保護施設と外気の間での換気回数は1回/hとする。

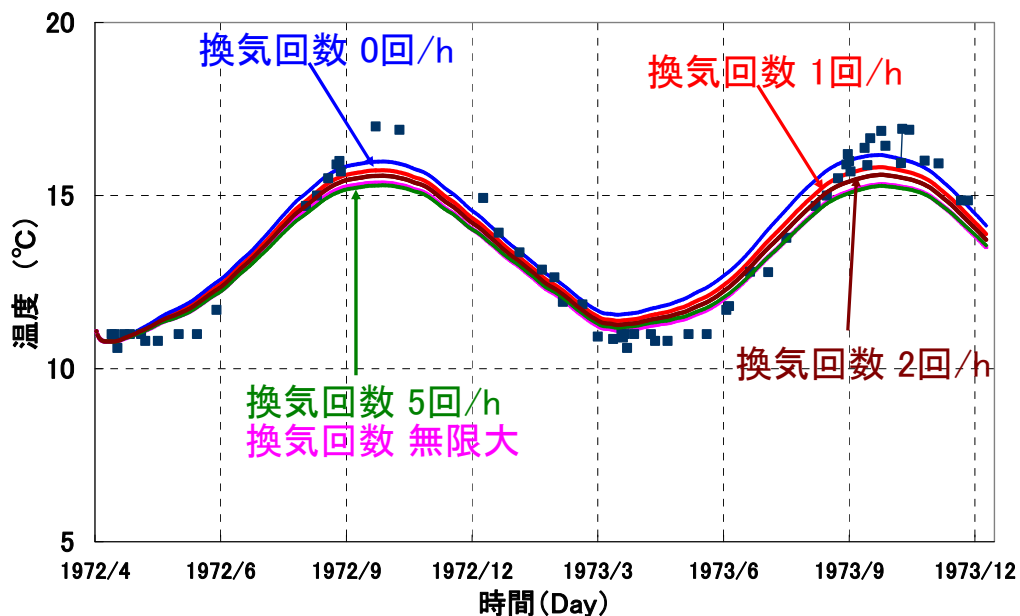


図6-19 仮保護施設と外気の間での換気回数の違いによる石室内温度の比較

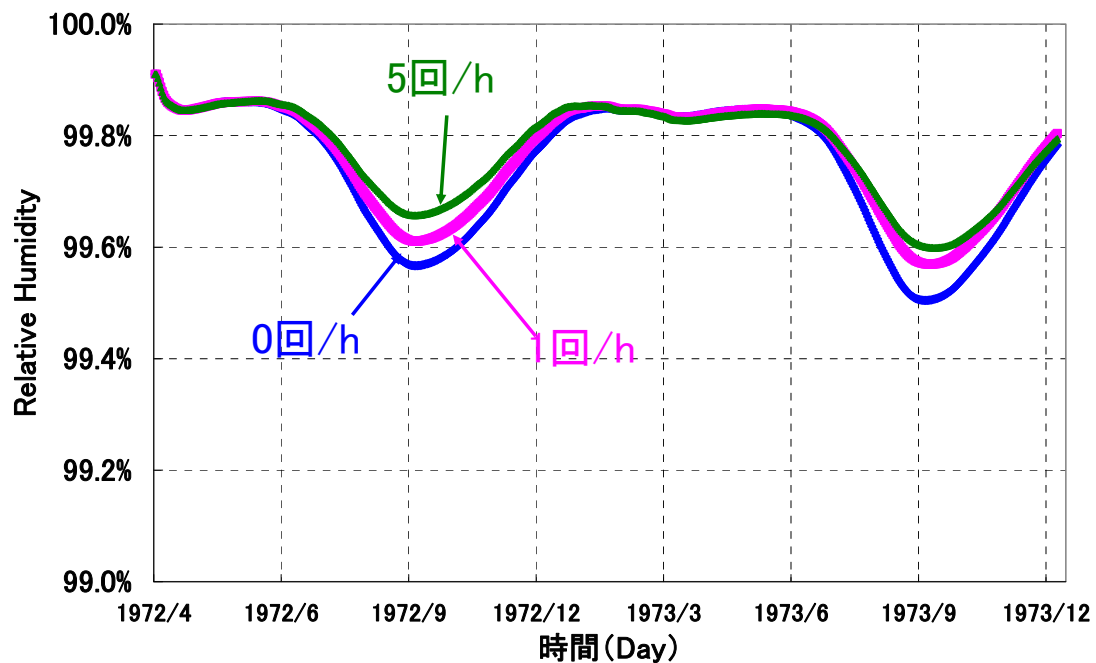


図 6-20 仮保護施設と外気の間での換気回数の違いによる石室内湿度の比較

6.3.5 6.3節のまとめ

本節より、覆土厚さと仮保護施設内と外気の間での換気回数の違いが石室内温湿度に与える影響について明らかにした。覆土の厚さは、石室内温度の位相遅れと振幅に影響を与え、夏期の石室内湿度に若干の影響を与える。換気回数は、石室内温度の年平均値と年振幅に影響を与え、石室内湿度に与える影響は小さい。

6.4 発掘から保存施設稼働までの過程における石室内温湿度性状

前節の解析により、発掘直後の石室内温湿度を、十分な精度で予測することができた。本節では、この解析モデルを用いて、1972年4月から1975年12月までの発掘から保存施設稼働までの期間の石室内温湿度性状を検討する。なお、1973年以降の解析は、仮保護施設が設置し続けられているものとしており、気象条件はその間の値を用いている。

6.4.1 発掘後の石室内温湿度変化

図6-21に、1972年～1975年の石室内温度と相対湿度の解析結果を示す。発掘から保存施設稼働までの石室内温度は $13.5^{\circ}\text{C} \pm 2.7$ (振幅) $^{\circ}\text{C}$ であり、4月から5月初めに最低温度を、10月から11月初めに最高温度を示している。石室内相対湿度は99%以上の高い湿度を維持しているが、8月から12月の間は若干低い値となっている。また最低湿度は僅かだが年々低下している。

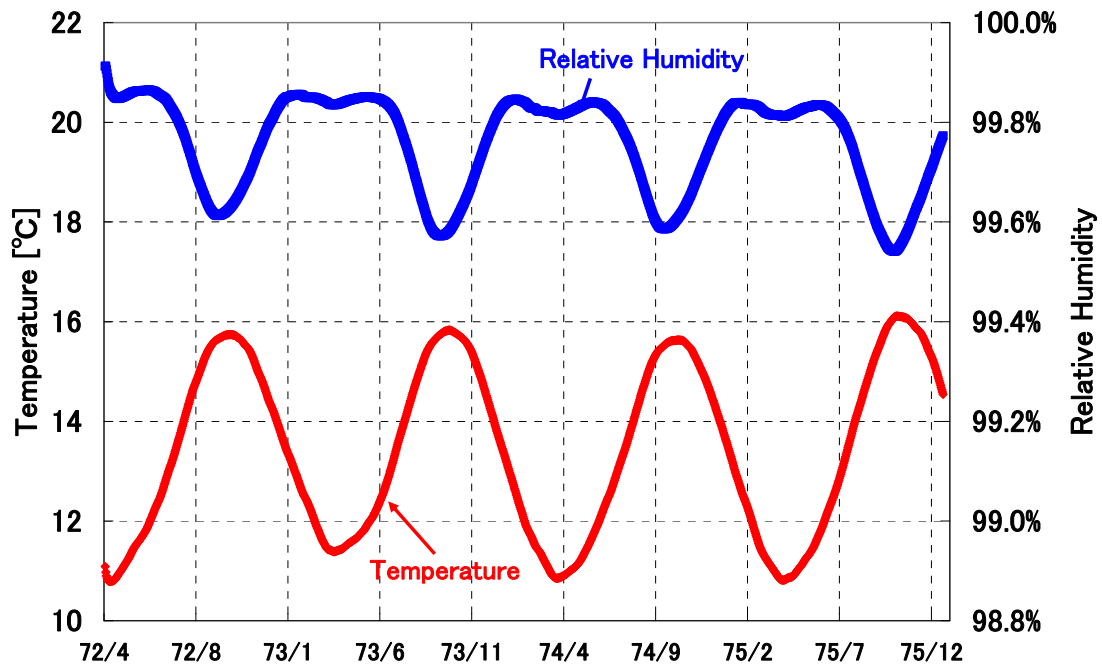


図6-21 1972年4月～1975年12月の石室内温湿度の変化

6.4.2 石室内表面の結露発生状況と乾燥発生状況

図 6-22 に、1972 年～1975 年の石室内表面における結露発生面積率と日最低含水率の変化を示す。ここで結露の発生は以下のように判定した。室内空気から壁表面に水分が移動し、かつ壁表面における水分化学ポテンシャルが -5J/kg 以上である時に、結露が発生していると判定する。結露の判定は、飽和を結露とする場合より厳しいものであり、結露発生に対して危険側の判定となっている。また結露発生の程度を表す指標として、各時刻における「結露発生面積率」を定義する。これは、各時刻における室内表面積に対する結露発生部位面積の割合を表す。

図 6-22 をみると、石室内の結露発生面積率は、6 月中旬～11 月初めに正となり、最大は 24% となっている。結露の発生部位は、次項で説明するように北壁全面とその近くの天井、東西壁面と床面である。石室内表面の含水率は 7 月初めから 12 月初めにかけて $0.13(\text{m}^3/\text{m}^3)$ まで低下し、この時の相対湿度は 96% となる。含水率が低下する部位は、次項で説明するように石室南壁の天井隅角付近である。また、石室内表面の最低含水率が僅かではあるが年々低下してきている。以上から発掘後の状態では、石室南側では乾燥による剥離の危険性が、石室北側では結露発生の危険性があつた可能性と考えられる。

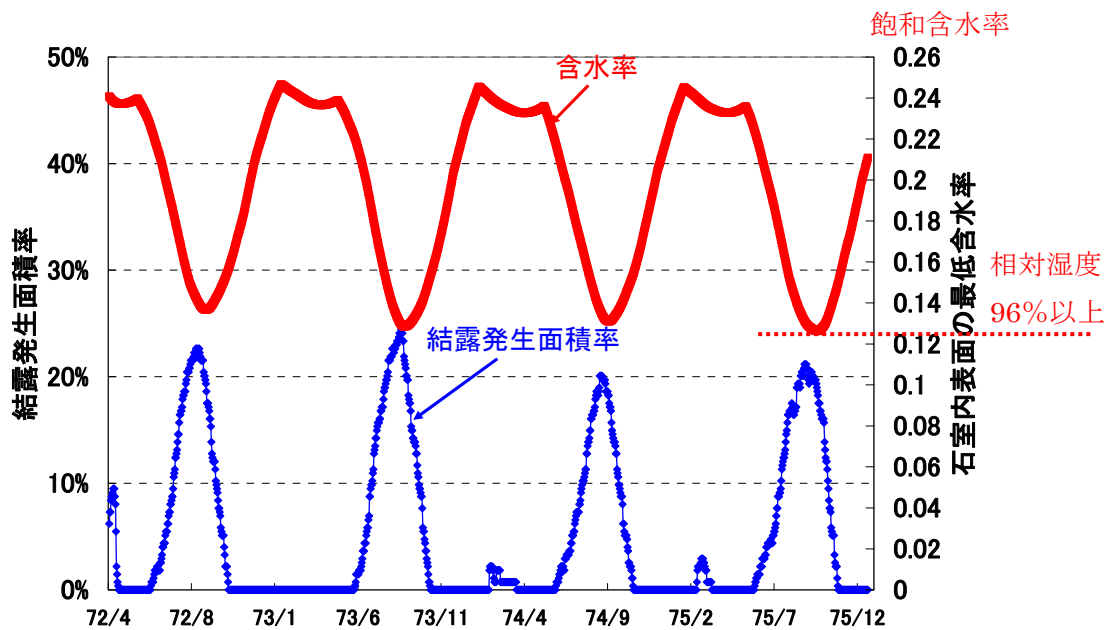


図 6-22 1972 年～1975 年の石室内表面の日最低含水率と結露発生面積率の変化

6.4.3 石室内表面の乾燥発生部位と結露発生部位

図 6-23 に、1973 年 8 月 15 日午前 12 時の石室内表面の温度分布を示す。図より、発掘調査終了後の応急保存対策下では、石室の温度差は 1.5°C 以上もあり大きい。南壁とその近くの天井及び東西壁の温度が高く、北壁とその近く天井及び東西壁と床石の温度が低い。なお、東西壁の等温線が非対称となっているのは、図 6-4 に示すように石室が墳丘の東西方向に対して非対称となっているためである。

図 6-24 に、1973 年 8 月 15 日午前 12 時の石室内表面の含水率分布を示す。図より、発掘調査終了後の応急保存対策下では、石室の南壁とその近くの天井及び東西壁の含水率が低く、 $0.14 (\text{m}^3/\text{m}^3)$ まで低下している。その以外の部分の含水率は $0.25 (\text{m}^3/\text{m}^3)$ 以上になっており、結露が発生し易くなっている。図 6-25 に、1973 年における石室内表面における結露日数分布を示す。北壁とその近くの天井及び東西壁と床石に結露が発生しており、北壁の下部とその近くの床石付近の結露日数が一番多く、年間で 90 日以上ある。この結露に関しては、夏期の温度分布（図 6-23）により、石室南側で放湿し乾燥し、石室北側で吸湿し結露する（図 6-24）の影響が大きい。これにより、石室内表面での部分的な乾燥と結露発生の可能性が高くなり、乾燥による漆喰層の剥離やカビ等微生物の発育の危険性が高くなる。なお、図 6-23～図 6-25 において、各面ごとの分布図の端部が若干ずれているが、これは解析で隅角部に質点を設けていないためである。

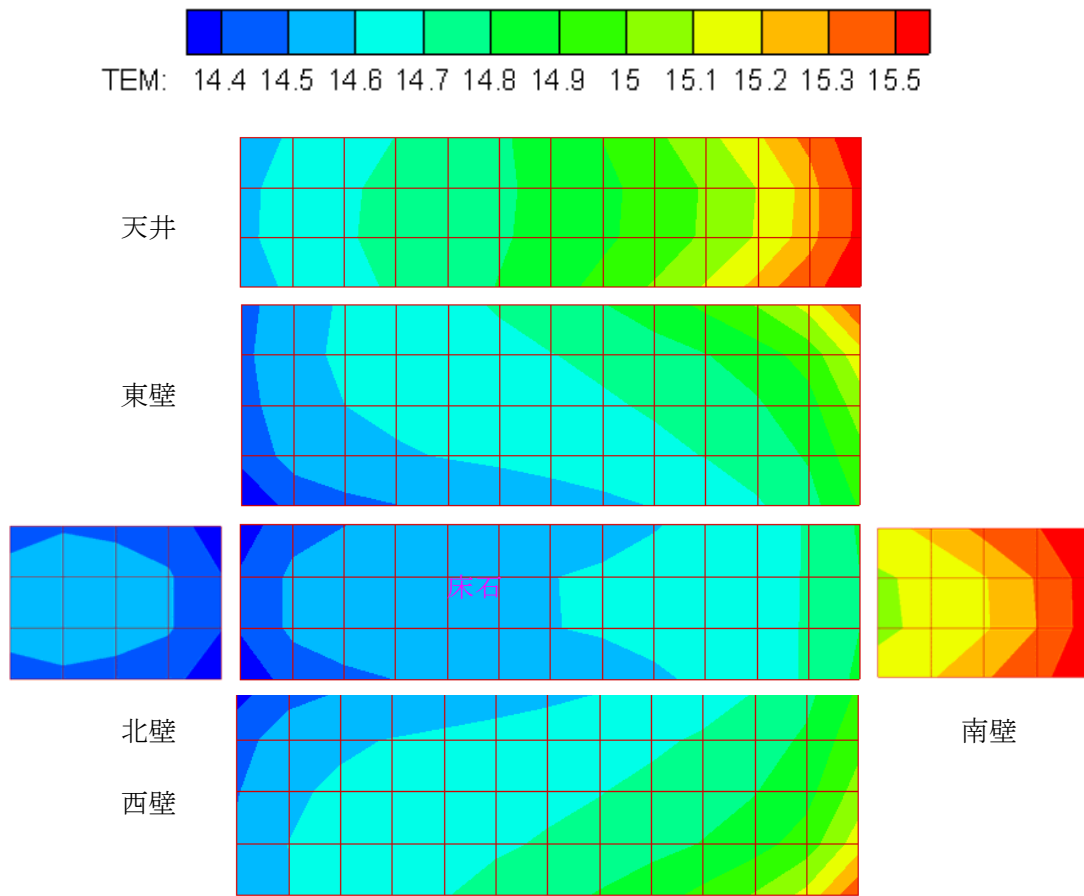


図 6-23 石室内表面の温度分布(1973年8月15日 AM12:00)

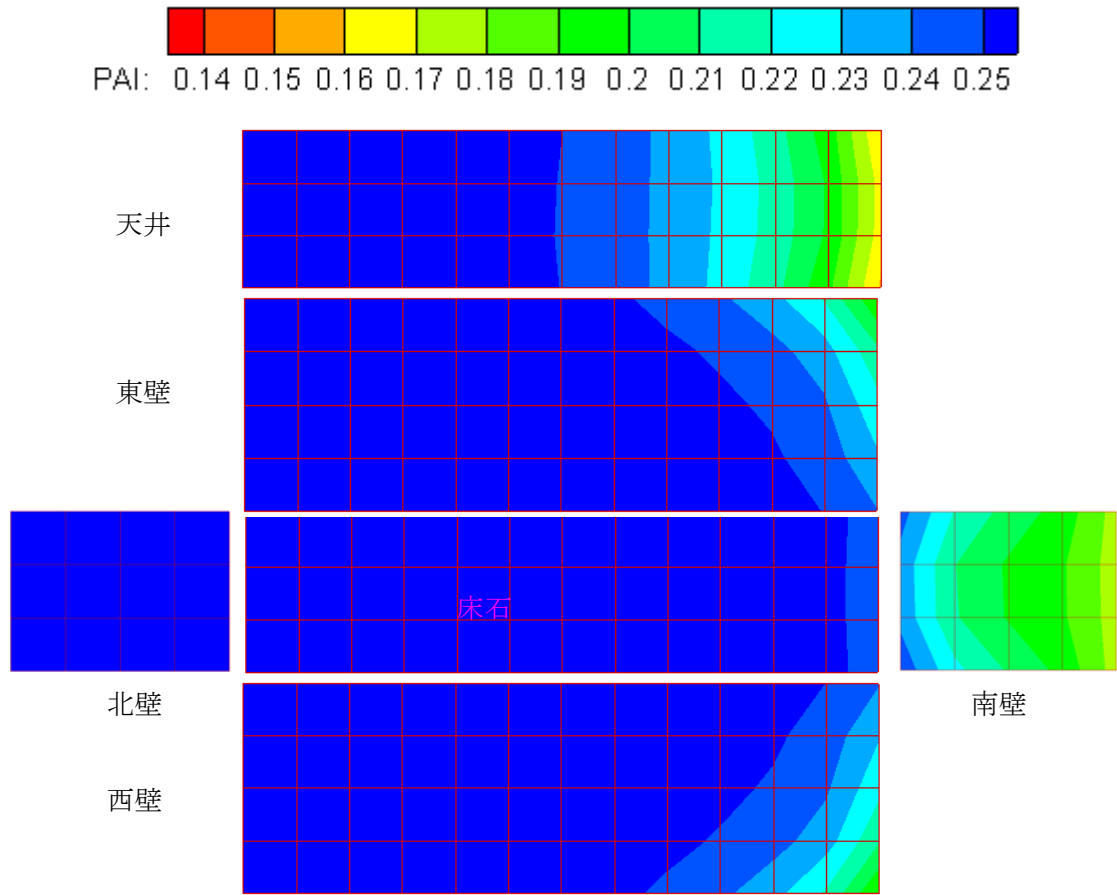


図 6-24 石室内表面の含水率分布 (1973年8月15日 AM12:00)

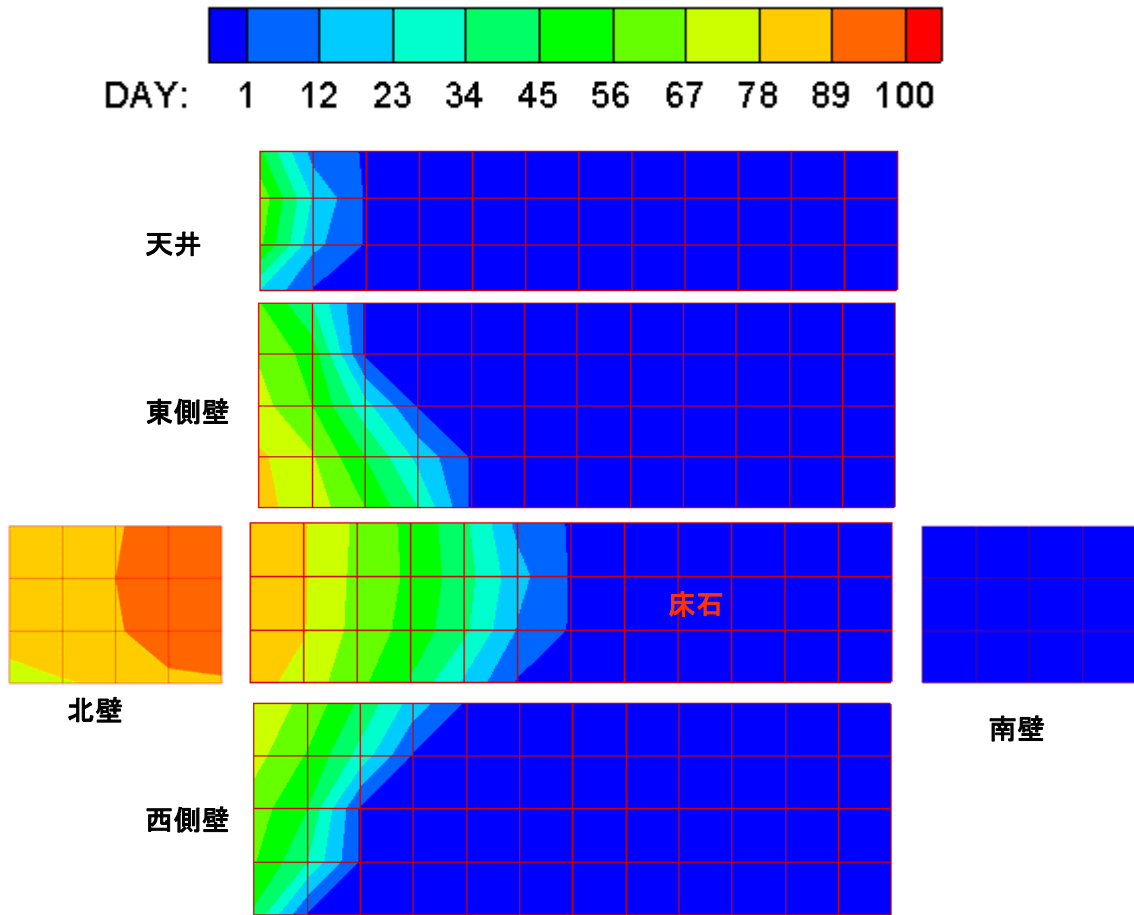


図 6-25 石室内表面の結露日数の分布 (1973 年)

6.4.4 周囲地盤の温度・含水率分布変動

図 6-26 に、発掘前の周期定常状態における 12 月 31 日の南北断面の含水率分布を示す。発掘前の石室北側の含水率は南側より高いが、これは他の時期においても同様であり年間を通じて高い。これは北側斜面の日射量が南側より少なく、水分蒸発が抑制されるためと考えられる。図 6-27、6-28 に、発掘前と発掘終了後の夏期の墳丘の水平断面の温度と含水率分布を示す。図 6-27 より、発掘前の石室周囲の含水率と温度分布の非一様性はとても小さい。また図 6-28 より、発掘後は、石室南側の周囲地盤の含水率と温度の非一様性が大きいことがわかる。保存対策として石室南側の覆土や仮設覆屋の設置が行われているものの、墳丘の一部が取り除かれる影響が大きいことが分かる。

6.4.4 6.4 節のまとめ

本節では、3次元解析モデルを用いて、高松塚古墳発掘から保存施設稼働までに至る期間の石室温湿度性状を明らかにした。石室内温度は $13.5^{\circ}\text{C} \pm 2.7$ (振幅) $^{\circ}\text{C}$ で、最低温度が 4 月から 5 月初めに、最高温度は 10 月から 11 月初めになる。石室内相対湿度は、99% 以上の高い値を維持している。石室南側の周囲地盤の含水率と温度の非一様性が大きい。6 月中旬から 11 月初め、北壁とその近くの天井、東西側壁と床石付近に、結露が起きていた可能性が高く、石室の南壁とその近くの天井と東西壁では乾燥状態が起きていた可能性がある。

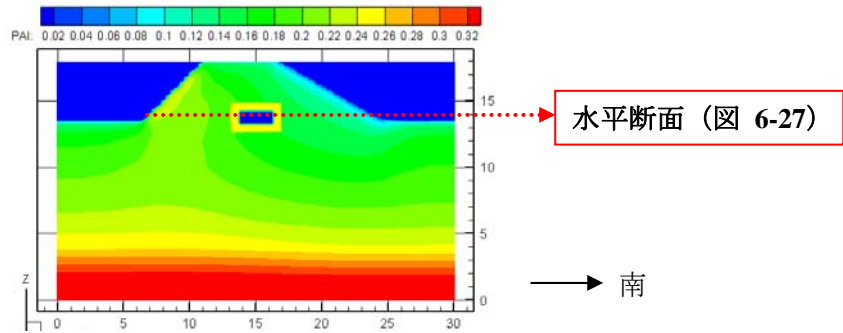


図 6-26 発掘前の東西断面含水率分布
(1972年12月31日の周期定常値 PM12:00)

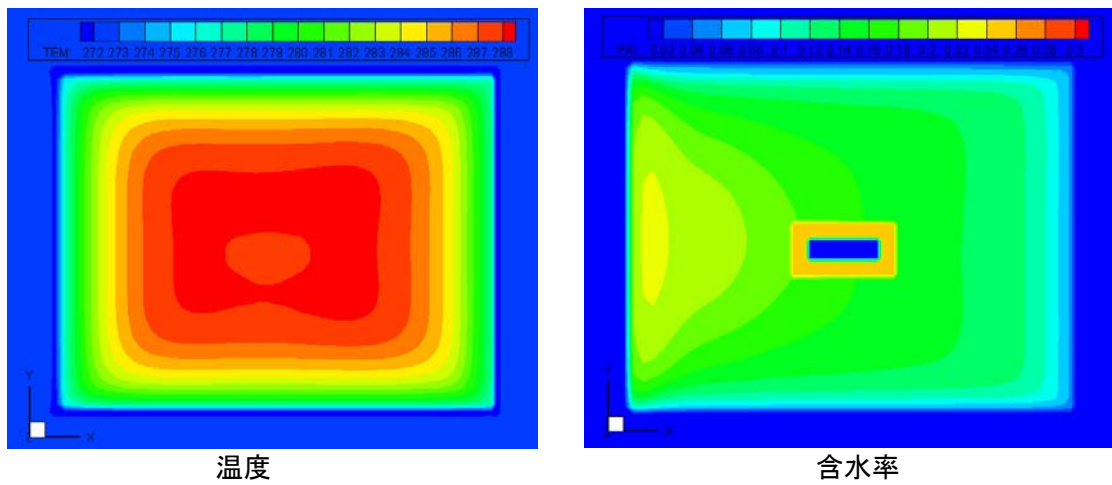


図 6-27 発掘前の水平断面(石室中央高さ)の温度と含水率分布
(1972年12月31日の周期定常値 PM12:00)

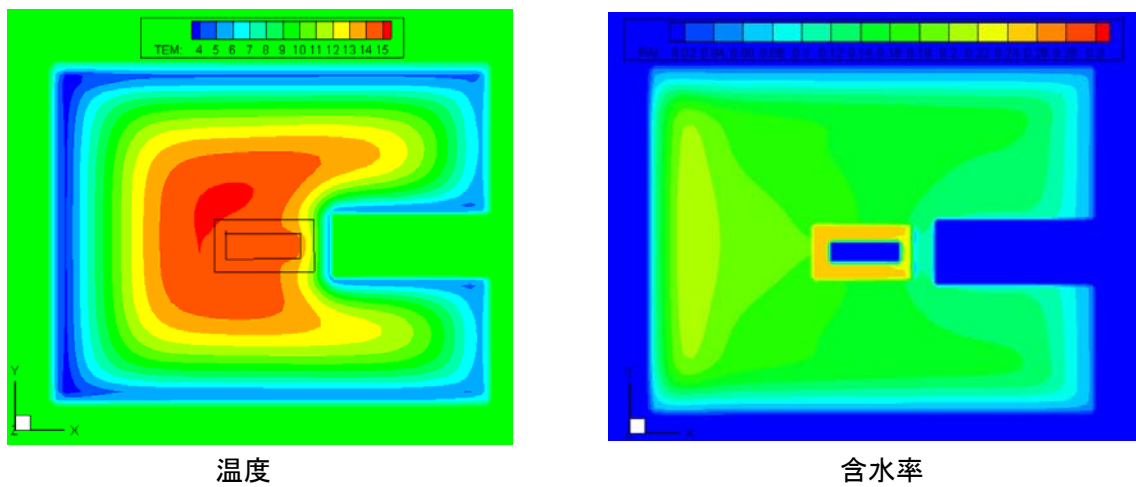


図 6-28 発掘後の水平断面(石室中央高さ)の温度と含水率分布
(1973年12月31日 AM12:00)

6.5 3次元解析と2次元解析の結果との比較

前節までで、3次元解析による結果の妥当性を示した。ただ、3次元解析では質点数が多くなることから、1回の計算に膨大な時間が必要となる。ここでは、3次元解析と2次元解析の比較を行い、2次元モデルの解析で石室内温湿度性状が十分把握可能かどうかについて検討する。

6.5.1 2次元解析の計算条件

3次元解析と比較を行うために、2次元解析における発掘前の12月31日の周期定常値を初期条件として、1月から3月5日までは発掘前の状態（第8章の図8-1(a)）を、3月6日から4月1日までは発掘直後の状態（第8章の図8-1(b)）を、4月2日から発掘調査終了後の状態（第8章の図8-1(c)）とした解析を行う（図6-29）。なお、2次元解析は石室の東西方向の中心位置を南北に切った断面に対して行う。発掘後の仮保護施設内の条件と石室への入室条件は、3次元解析の計算条件と等しくする。

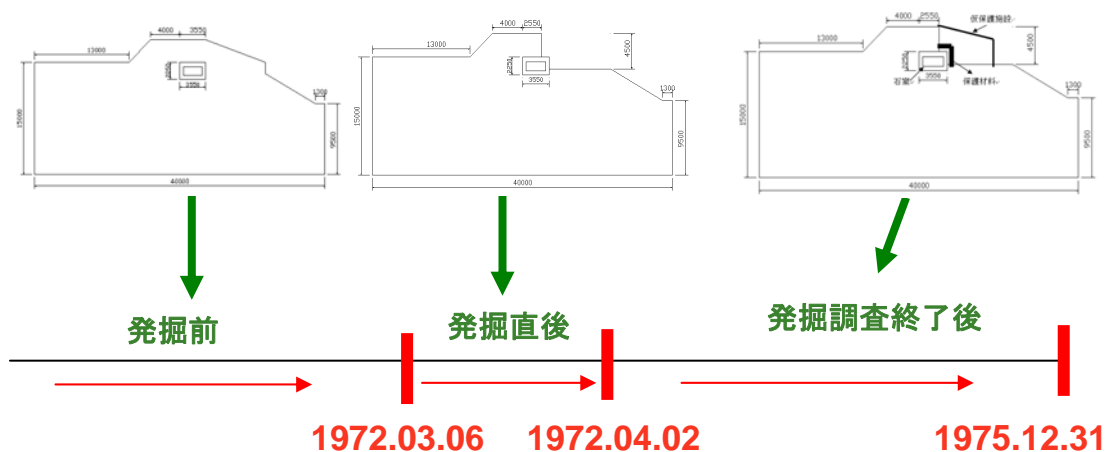


図 6-29 2次元解析による解析過程

6.5.2 石室内温湿度の2次元と3次元の解析結果の比較

図6-30と図6-31に、2次元と3次元の解析モデルによる石室内温湿度を示す。図6-30より、2次元解析の温度は、3次元解析の結果と比して、年平均値の差はほとんどないが、年振幅は約0.5℃高くなり、位相は20日ぐらいに早いことが分かる。図6-31より、2次元解析による室内湿度は、3次元解析の結果より、年最低室内湿度が0.3%低くなり、最低室内湿度の出現時期が20日ぐらいに早いことが分かる。温湿度の位相が早くなる理由としては、3次元解析モデルの発掘では石室南側は石室に近い幅で堀削されているが（図6-8参照）、2次元解析モデルでは石室南側全面が発掘されることになり（図6-2b）、その部分の影響が十分考慮できていないためと考えられる。2次元の解析は、3次元解析より、

温度振幅が若干大きく、最高温度をやや高めに見積もり、湿度振幅も同様に若干大きく、最低湿度をやや低く見積もる。劣化現象に影響を与える温湿度という観点ではやや危険側の結果となっている。

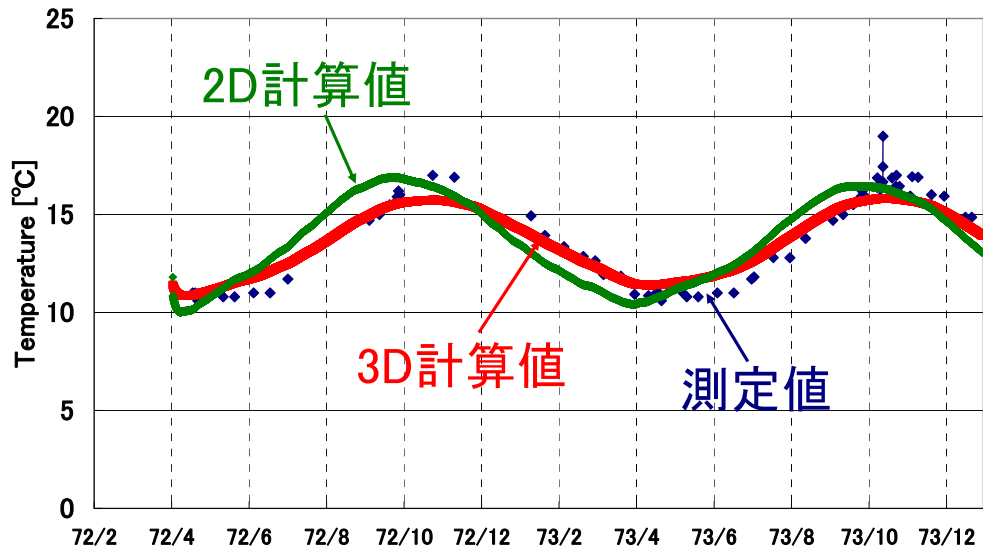


図 6-30 2次元と3次元解析による発掘後の石室内温度の比較

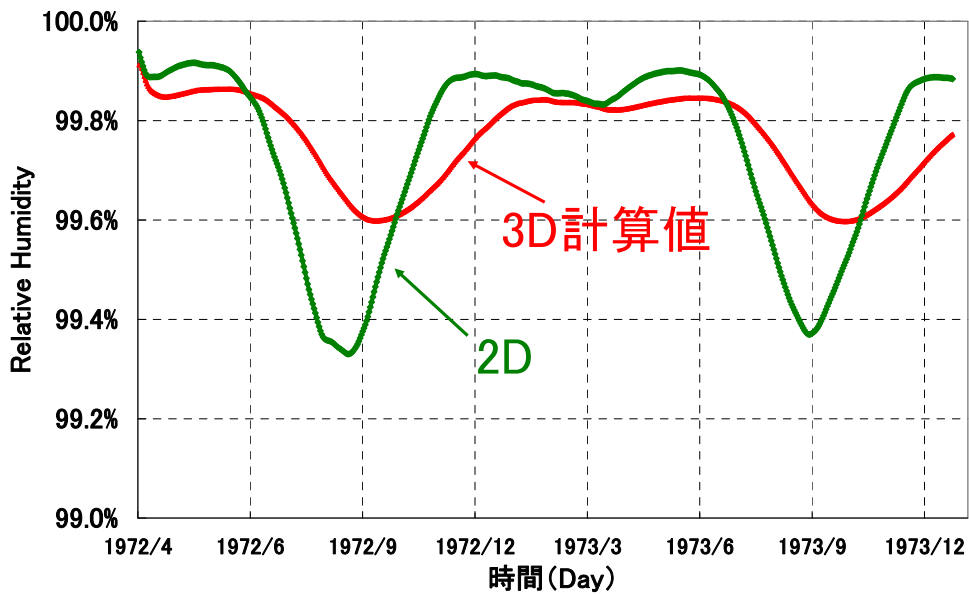


図 6-31 2次元と3次元解析による発掘後の石室内相対湿度の比較

6.5.3 石室内表面の結露性状と乾燥状況の2次元と3次元の解析結果の比較

図 6-32 と図 6-33 に、実際に行われた保存対策を考慮した場合の、2次元と3次元の解析モデルによる石室内表面の日最低含水率と結露発生面積率の変化の比較を示す。図 6-32 より、1973 年の2次元解析モデルによる石室内表面の日最低含水率は、6月中旬から11月中旬まで $0.13 \sim 0.25 \text{ (m}^3/\text{m}^3)$ に変化する。3次元解析モデルでは、7月初めから12月初めにずれるが、変動幅はほぼ等しい。2次元解析モデルによる石室内表面の日最低含水率は、3次元解析結果より、出現時期が20日ぐらいに早くなっている。図 6-33 より、1973 年の2次元解析モデルによる石室内表面の結露発生面積率は、6月初めから10月中旬まで最大は38%であり、3次元の場合の24%より約1.6倍の面積率となることが分る。3次元では、東西壁面を考慮しているため、その影響が現れているといえる。

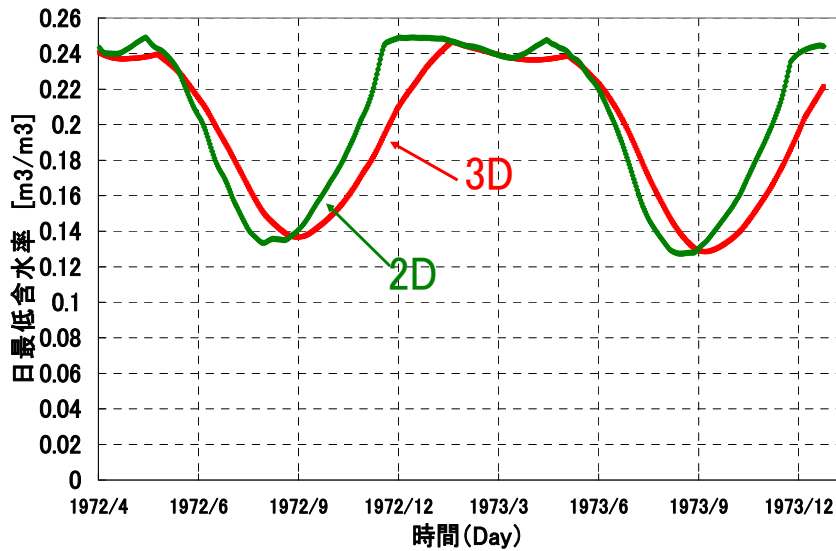


図 6-32 石室内表面の日最低含水率の比較

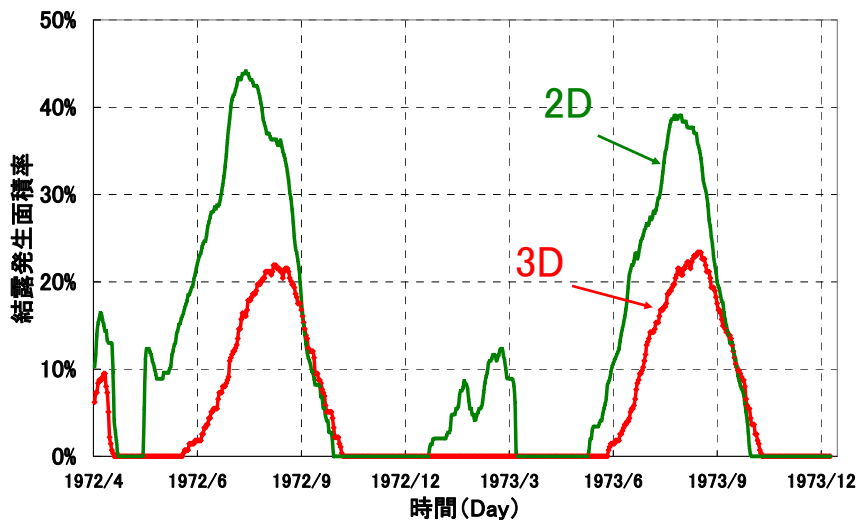


図 6-33 石室内表面の結露発生面積率の比較

6.5.4 6.5 節のまとめ

表 6-2 に 2 次元と 3 次元解析による発掘後解析結果の比較を示す。2 次元解析モデルの結果は、3 次元解析より、石室内最高温度をやや高く、石室内表面湿度をやや低く、石室内表面結露面積をやや大きく見積もっており、劣化危険度から判断するとやや危険側の結果となっている。また、2 次元解析モデルは、3 次元解析モデルより 20 日程度、位相が早い。上記の様な違いがあるものの、石室内温湿度性状、結露性状や乾燥状況を再現できており、石室内温湿度性状、結露性状の把握は十分にできているといえる。従って、2 次元解析モデルは、3 次元解析モデルよりやや危険側の結果となることを踏まえた上で、石室内温湿度性状、結露性状を把握することは十分可能である。

表 6-2 2 次元と 3 次元解析による発掘後解析結果の比較

	3 次元解析結果を基準とした 2 次元解析結果	
	値	位相
石室内温度	年平均はほぼ等しい 年振幅は約 0.5℃高い	20 日程度早い
石室内湿度	年最低室内湿度は 0.3%低い	20 日程度早い
石室内表面最低含水率 (乾燥状態)	年最低含水率はやや低い	20 日程度早い
結露発生面積率 (結露状態)	3 次元解析の 1.6 倍の面積率	20 日程度早い

6.6 第6章のまとめ

本章では、前章までに示した解析手法と条件を用いて、高松塚古墳発掘時の石室内の温湿度変動を計算し、測定値と比較を行った。なお、モデル化や境界条件などの設定には、過去の石室周囲の環境や内部作業などに関する測定値、記録を可能な範囲で考慮したが、不明な点は推定した。次に、この解析結果から、発掘から保存施設稼働までの石室内温湿度性状、結露性状、墳丘熱水分場を明らかにした。さらに、3次元解析による計算負荷を軽減するために墳丘、石室を2次元モデルとした場合の解析結果を3次元モデルの結果と比較し、石室内温湿度、結露の性状の把握の観点から2次元解析の精度の検討を行った。得られた結果は以下の通りである。

- 1) 発掘直後の墳丘の形状や保存対策を考慮した3次元熱水分同時移動モデルを用いた解析により、石室内温湿度の変動を再現できる。
- 2) 保存対策として行った露出する部位を覆う土の厚さの違いは、石室内温度の位相遅れと振幅に影響を与え、夏期の石室内湿度に若干影響を与えるが、年平均値には影響を与えない。仮保護施設内と外気の間での換気回数の違いは、石室内温度の年平均値と年振幅に影響を与えるが、石室内湿度へ与える影響は小さい。
- 3) 発掘直後の露出部位への覆土の厚さは50cm程度、仮保護施設内と外気の間での平均換気回数値は1~2回/h程度であったと推定される。
- 4) 6月中旬から11月初めに、北壁とその近くの天井及び東西側壁と床石付近で、結露が起きていた可能性が高い。7月初めから12月初めには、石室南壁の室内側表面の天井隅角付近では乾燥が生じ、石室内表面の最低含水率は0.13 (m³/m³)まで低下した。
- 5) 石室内温湿度性状、結露性状、乾燥性状について、2次元解析と3次元解析の結果は等しい。ただし、2次元解析は、3次元解析より、石室内最高温度をやや高く、石室内表面湿度をやや低く、石室内表面結露面積をやや大きく見積もり、劣化危険度を評価する上で危険側の結果をあたえる。

図表出典

- (i) 奈良文化財研究所飛鳥資料館ホームページ (2010年6月16日アクセス)
<http://www.asukanet.gr.jp/ASUKA2/TAKAMATUTUKA/takamatutuka.html>
- (ii) 奈良県立橿原考古学研究所編：壁画古墳高松塚中間報告，奈良教育委員会・奈良県明日香村 (1972)
- (iii) 文化庁：国宝高松塚古墳壁画 一保存と修理一、第一法規出版 (1987)

第 6 章の参考文献

- [1] 文化庁： 国宝高松塚古墳壁画 ―保存と修理― 、第一法規出版（1987）
- [2] (財) 気象業務支援センター： 気象データベース地上観測、CD-ROM（2007）

第7章 古墳の適切な発掘季節の検討

7.1 はじめに

古墳の発掘時には、石室が外気に晒されるため、外気が石室に与える影響はとても大きい。高松塚古墳の発掘調査は3月から4月にかけて行われたが、前章で示したように、この時期には石室と外気の温度差は小さく適切な次記に発掘がなされたと考えられた。ただ、発掘季節と、石室内の温湿度との関係は十分に明らかにされていないため、本章では、高松塚古墳を対象として、異なる発掘季節の石室内温湿度環境の検討を行う。本章では、まず解析対象と解析方法を示し、次に種々の発掘季節に対して発掘直後の石室内温湿度変動を調べ、発掘季節の違いが壁画の劣化に与える影響を明らかにするとともに、適切な発掘季節を提案する。

7.2 解析対象と解析方法

7.2.1 解析対象

高松塚古墳の発掘調査は、1972年3月1日から4月2日に行われた。図7-1、7-2はそれぞれ発掘前、発掘直後の様子を示している。解析モデルは、発掘前、発掘直後の墳丘の状況を考え、図7-3に示すよう石室の南北方向の断面を取り出した2次元系とする。図7-3(a)は発掘前の状態であり、図7-3(b)は発掘直後の保存対策が行われていない状態を示している。



図7-1 発掘前



図7-2 発掘直後

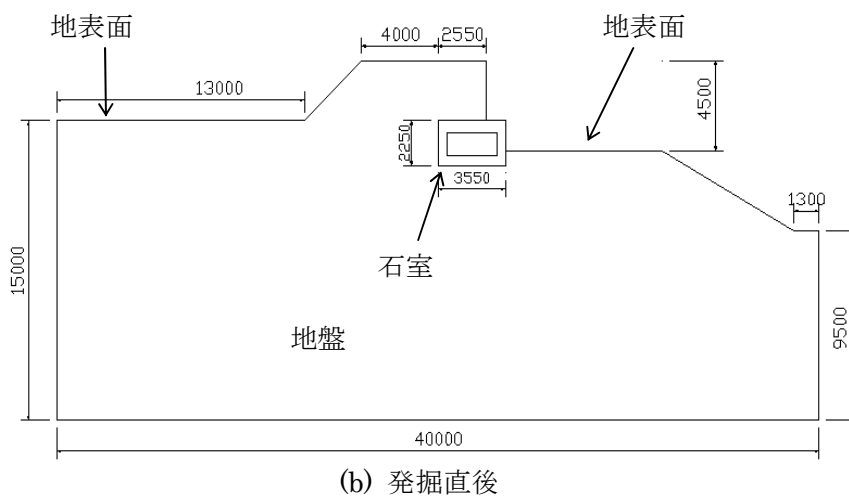
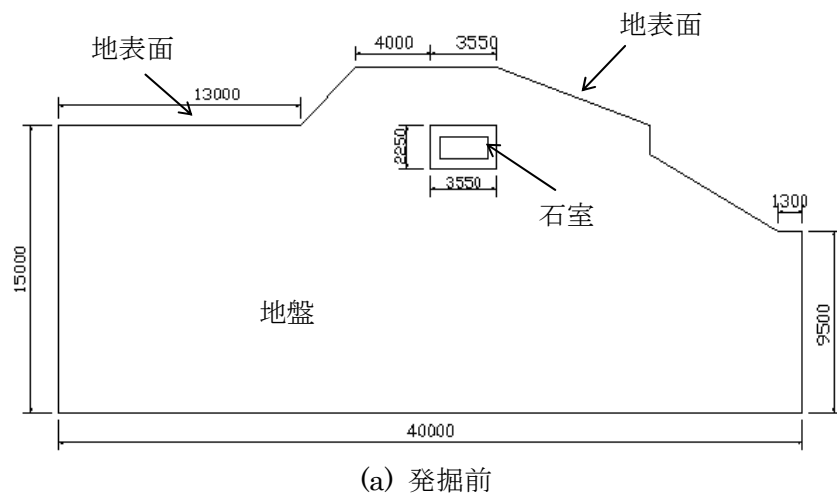


図 7-3 解析対象

高松塚古墳の発掘調査は 1972 年 3 月 1 日から 4 月 2 日まで行われたが、発掘から覆屋及び木扉の完成までの 3 週間程度は、石室の南側は外気に露出した状態であった¹⁾。ここでは、適切な発掘時期を明らかにするために、以下の 12 ケースの発掘時期の場合の石室内温湿度性状を検討する。

- Case 1: 1 月 1 日に発掘を始める
- Case 2: 2 月 1 日に発掘を始める
- Case 3: 3 月 1 日に発掘を始める
- Case 4 以下同様とし、Case 12 まで考える。

7.2.2 解析方法

解析方法は4章で示したものである。まず、図 7-3(a)に示す発掘前の解析対象に対して周期的定常計算を行い、その結果を初期条件として、図 7-3(b)に示す発掘後の解析を 30 日間行う。外界気象条件は、1972 年のものを用いる。表 7-1 に発掘後の石室内の条件と石室への入室条件を示す。石室内調査に伴う石室内への入室は、ここでは考慮しない。

表 7-1 発掘後の条件

- | |
|---|
| <ul style="list-style-type: none">・石室と外気の間には自然換気があり、2 回/h で一定・石室への入室は無し（熱水分発生なし） |
|---|

解析の初期条件は、以下の通りである。

Case 1 の初期条件：発掘前の 12 月 31 日の周期定常値

Case 2 の初期条件：発掘前の 1 月 31 日の周期定常値

Case 3 以下同様とする、 Case 12 まで。

7.3. 解析結果と考察

7.3.1 発掘前の石室内温湿度

図 7-4 に 1972 年の外気温度と発掘前の石室内温湿度変動を示す。外気温度と石室内温度が近い季節は 4 月と 11 月である。これらの季節に発掘を行うと、石室内外の温度差による熱・水分の移動が少なく、発掘直後の壁画等の劣化の進行を遅らせる効果があると考えられる。

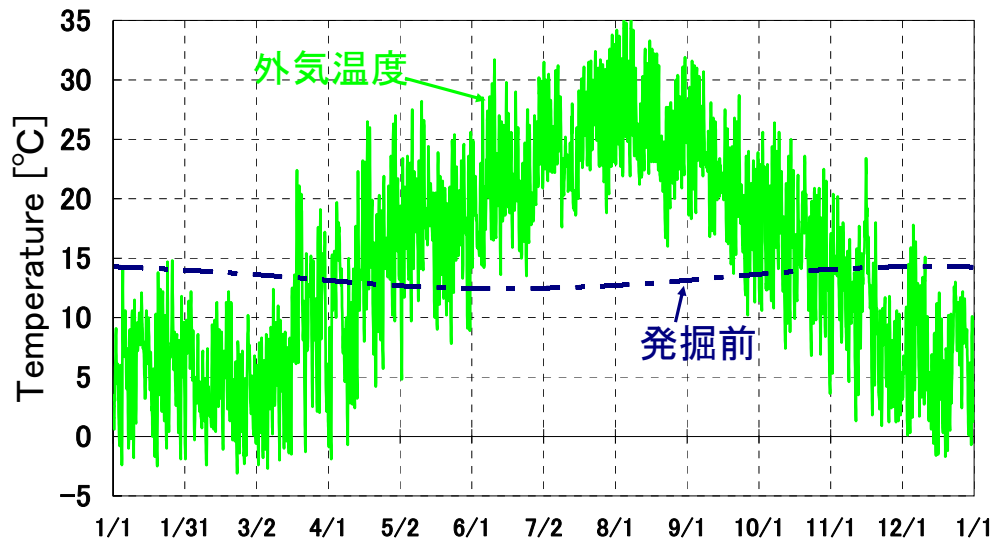


図 7-4 1972 年の外気温度と高松塚古墳の発掘前の石室内温度変動(解析値)の比較

7.3.2 発掘季節の違いによる石室内温度の変化

図 7-5 に、Case 8, 12 の場合の発掘後 30 日間の石室内温度変動の比較を示す。図の横軸は、発掘直後からの時間経過を示している。図より、Case 12 では発掘後 30 日以内での石室内温度は徐々に低下し、Case 8 では徐々に増加している。Case 8 と Case 12 の発掘前の年平均温度値を基準温度とした発掘後 30 日間の室温変化最大値はそれぞれ +7.8°C, -5.8°C である。図 7-6 に、発掘前の年平均温度値を基準温度として、Case 1~12 の発掘後 30 日間の室温変化最大値を示す。石室内温度は、Case 7 では温度が最も大きく 7.9°C であり、Case 2 では温度が最も小さく -7.0°C である。また、Case 1~4 と Case 11~12 では石室内温度は下がるが、Case 5~10 では上がる。発掘季節の違いによる、石室内温度の違いは大きい。温度のみからみたカビ等微生物の発育の抑制の観点から、発掘は 11 月から 4 月までが適しているといえる。

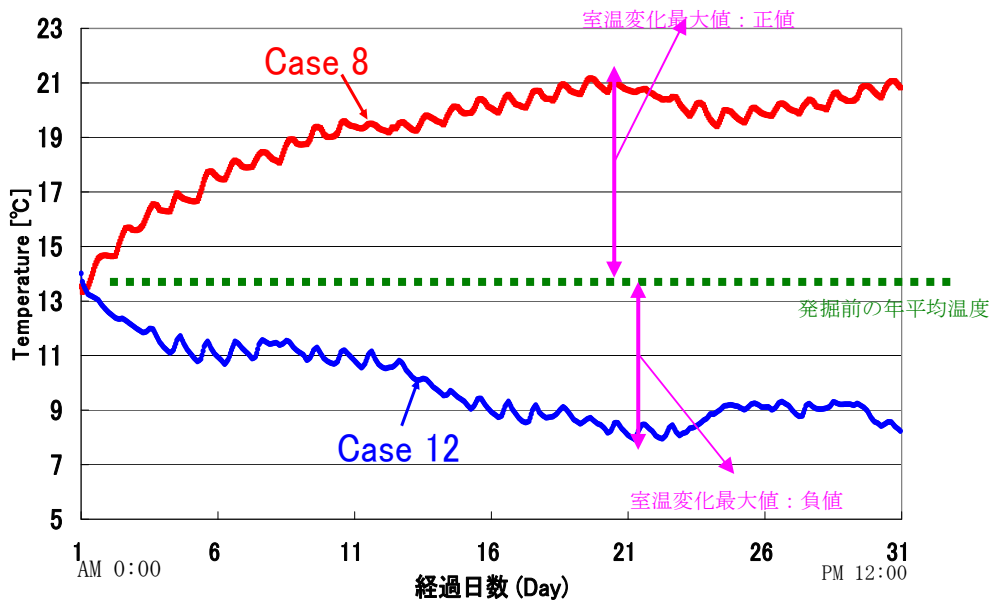


図 7-5 異なる発掘時期の石室内温度変動の比較

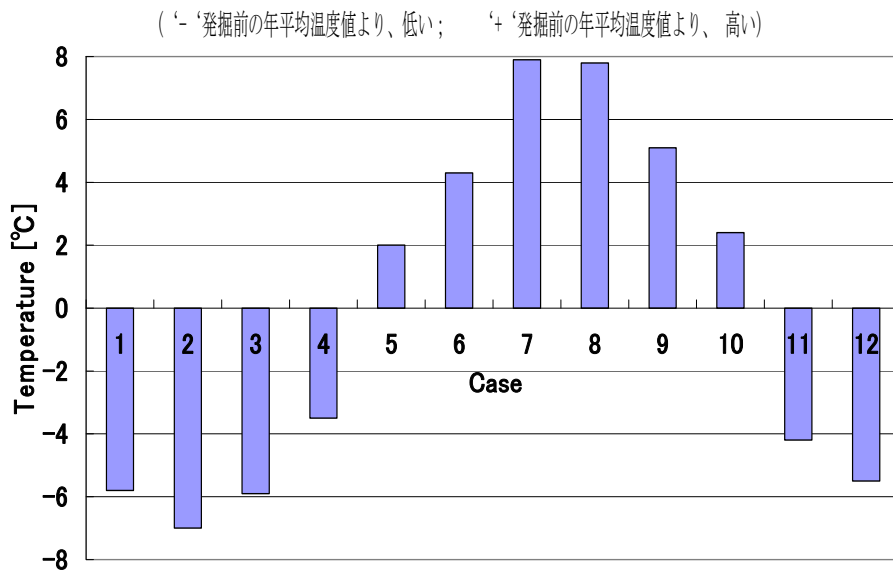


図 7-6 発掘前の年平均温度値を基準温度とした
発掘後 30 日間の室温変化最大値

7.3.3 発掘季節の違いによる石室内相対湿度の変化

図 7-7 に、Case 3, 4, 11 の場合の発掘後 30 日間の石室内相対湿度変動の比較を示す。図より相対湿度が毎日日中に低下している。この理由は以下に示すとおりである。石室内空気は、換気により外気の変動の影響を受け、温度については石室内の日変動が大きくなり、水蒸気圧については外気の日変動が小さいため石室内の日変動は小さくなり、結果として日中に相対湿度が低下するように変動している。Case 3, 4, 11 の室内相対湿度は、それぞれ $98.4\% \pm 4.0\%$ 、 $98.3\% \pm 4.9\%$ と $98.5\% \pm 2.4\%$ である。Case 4 の振幅が一番大きく、Case 11 の振幅が一番小さい。図 7-8 に、Case 1~12 の 30 日間の室内相対湿度の最小値を示す。いずれの発掘季節でも、発掘直後の 30 日間の石室内相対湿度は 93% 以上になっている。

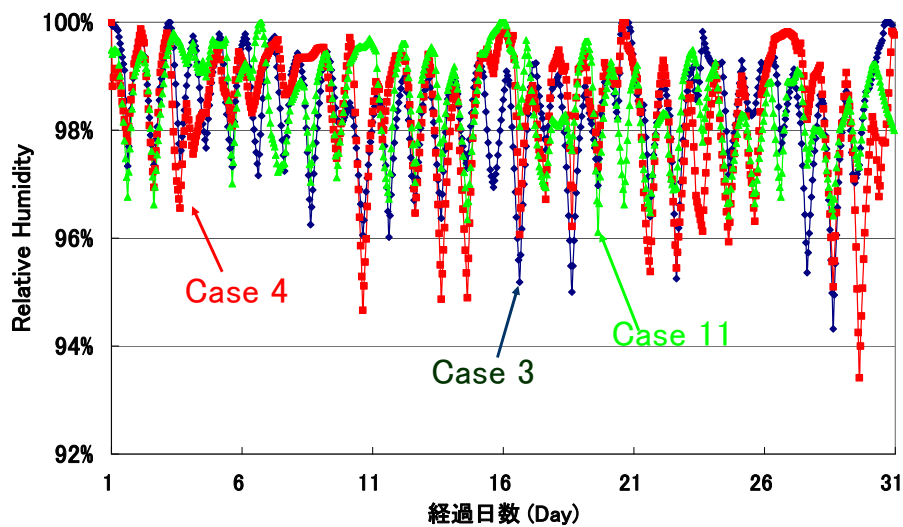


図 7-7 発掘後 30 日間の室内湿度の比較

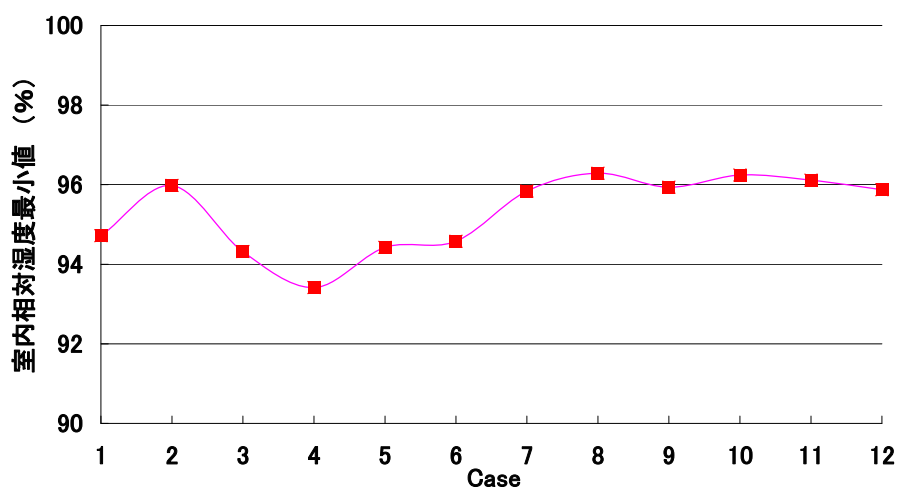


図 7-8 発掘後 30 日間の室内湿度最小値の比較

7.3.4 発掘季節の違いによる石室内表面の最低相対湿度の違い

図 7-9 に、Case 1～12 の 30 日間の石室内表面の最低相対湿度を示す。図より、Case 1, 2, 3, 4, 11, 12 では石室内表面の相対湿度は 99%に近い。Case 5～10 では石室内表面の最低相対湿度は低下し、Case 7, Case 8 では 93%まで低下する。7 月, 8 月に発掘を行う場合、外気温度が 25℃以上になって、外気に面する石室南側が、その影響を受けたためである。石室南側の温度は他の部位より高くなるため石室内に放湿し、石室南側壁面とその近くの天井の湿度が低下し、その表面が乾燥する。壁画の乾燥剥離防止の観点から、発掘季節は 11 月～4 月が適しているといえる。

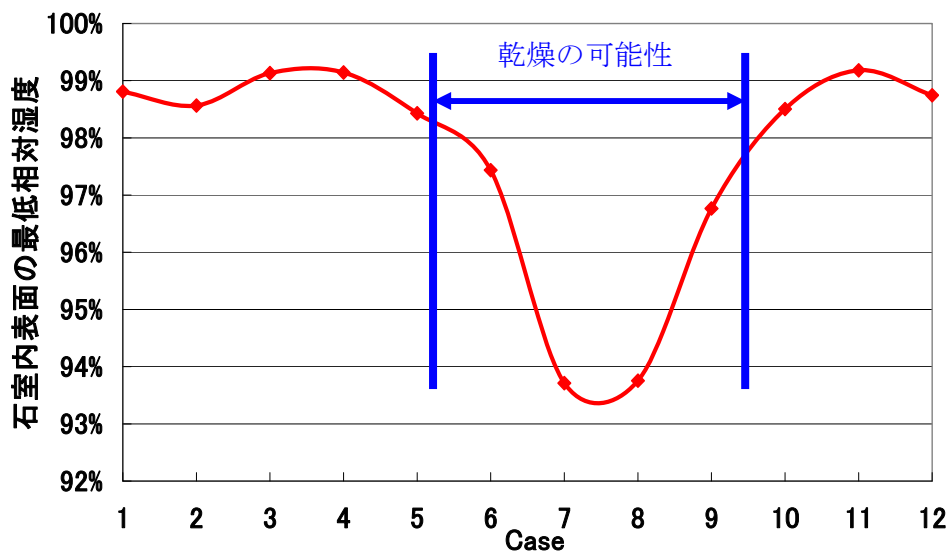


図 7-9 発掘後 30 日間の石室内表面の最低相対湿度の比較

7.3.5 発掘季節の違いによる石室内の結露性状の違い

図 7-10～7-12 に、Case 3, 4, 11 の場合の発掘後 30 日間の石室内表面最高温度、最低温度と石室内空気温度のを示す。図 7-13 に、Case 3, 4, 11 の石室内の結露発生面積率を示す。図 7-10～7-13 から、石室内表面温度と空気温度の差が 2℃以上の時に、石室内表面に結露が発生していることが分かる。Case 3, 4, 11 の室温と石室内壁温の差の最大はそれぞれ 3.2℃、2.5℃、1.9℃である。Case 3 の場合の結露発生面積率が最も大きく、Case 11 の場合には、結露は生じない。図 7-14 に、Case 1～12 の 30 日間の石室内の結露発生時間を示す。石室内での結露発生時間は、11 月は 0 であり、10 月で約 3 日間、4 月で約 5 日間という順番で少ない。それ以外の月では 10 日間以上となり、7 月と 8 月には 30 日間で 29 日間も結露が発生する。7, 8 月では、発掘後、外気温が、石室内表面温度よりかなり高く、外気相対湿度も高いため、外気から石室内に水蒸気が流入し、それが石室内表面に結露する可能性が高くなっているといえる。結露性状のみからみたカビ等の発生抑制の観点からは、発掘季節は、11 月が適しているといえる。

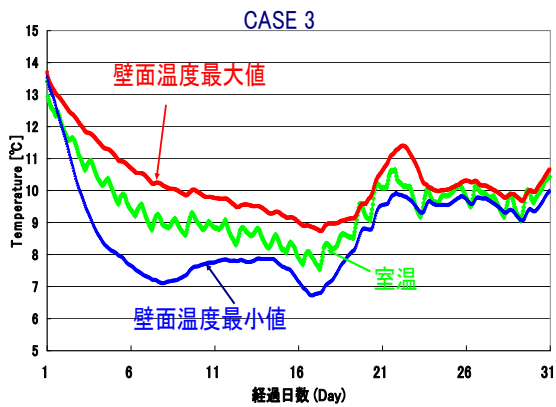


図 7-10 Case 3 の石室内表面
温度のピーク値と室温の比較

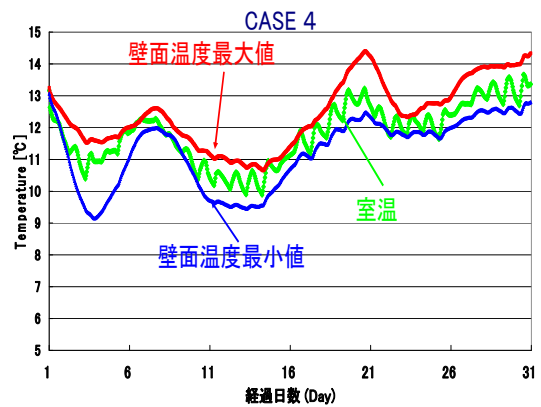


図 7-11 Case 4 の石室内表面
温度のピーク値と室温の比較

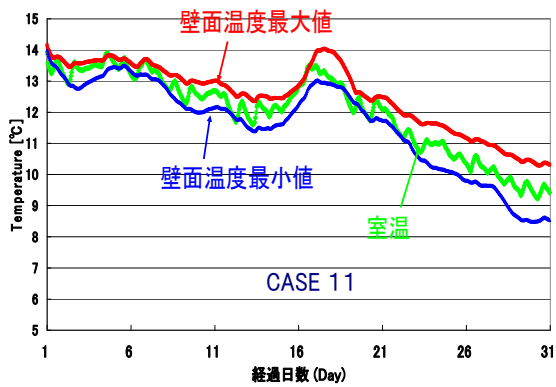


図 7-12 Case 11 の石室内表面
温度のピーク値と室温の比較

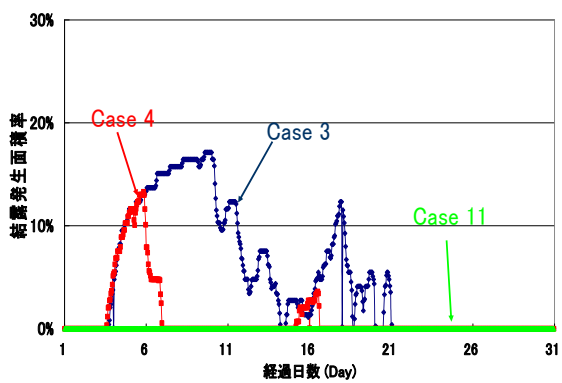


図 7-13 石室内の結露発生面積率の比較

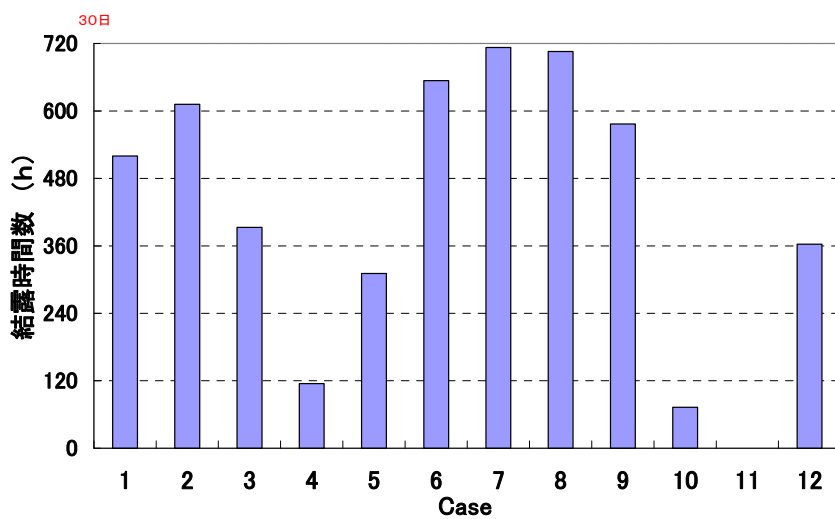


図 7-14 発掘後 30 日間の石室内表面の結露発生時間の比較

7.3.6 換気回数が石室内表面の最低含水率と結露性状に及ぼす影響

図 7-15 に、石室と外気間の換気回数が 0 回/h、2 回/h、10 回/h と無限大の場合の、Case1～12 の結露発生時間数の比較を示す。図 7-15 より、石室と外気の間での換気回数が 0 回/h の場合、石室内表面の結露発生の日数が 30 日間で 25 日間もあるケースが、発掘季節が 10 月、11 月の場合を除いて 10 ケースもある。換気回数が 2 回/h の場合は、前項で述べた通り、石室内での結露発生時間は、11 月ではなくなり、その次に 10 月で約 3 日間、4 月で約 5 日間という順番で少なく、それ以外は 10 日間以上である。換気回数が 10 回/h の場合は、石室内での結露発生時間は、11 月～4 月ではなくなり、その以外に 5 月で約 3 日間、6 月と 9 月で約 10 日間という順番で少なく、7 月と 8 月は 20 日間以上である。換気回数が無限大の場合は、石室内での結露発生時間は、11 月～4 月と 6 月ではなくなり、その以外に 5 月で約半日間、9 月で約 2 日間という順番で少なく、7 月と 8 月は 7 日間以下である。つまり、発掘直後に石室と外気間の換気回数を増すと、石室内の結露発生が減少することが分かる。

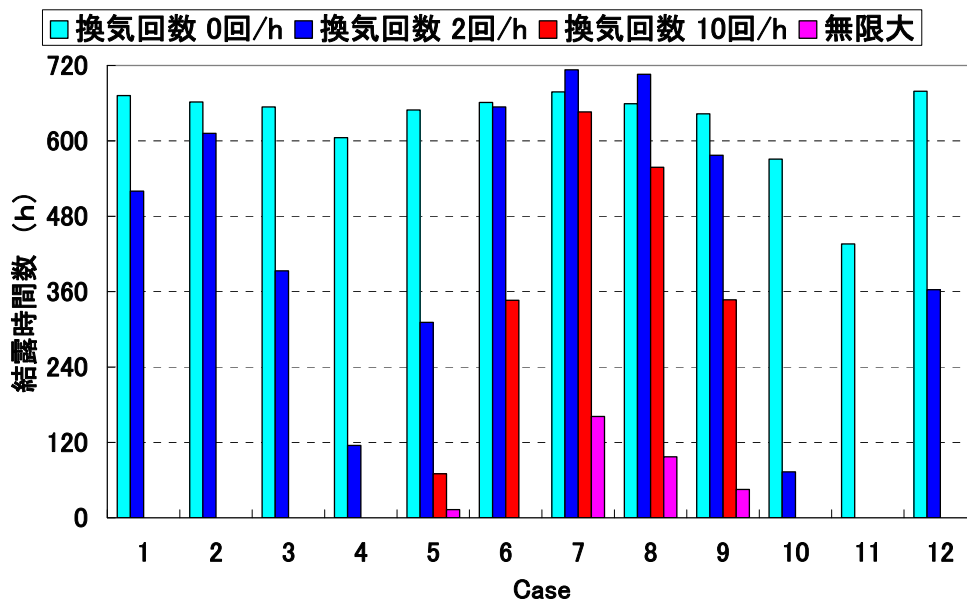


図 7-15 石室と外気間の換気回数の違いによるが石室内表面結露時間数の比較

図 7-16 に、石室と外気間の換気回数が 0 回/h、2 回/h、10 回/h と無限大の場合の、Case1～12 の石室内表面の含水率の比較を示す。図より、6～9 月は、換気回数の増加で、含水率のピークを持つ。11～5 月は、換気回数の増加で、含水率は低下し続ける。換気回数が無限大の場合は、石室内表面の含水率が 0.04[m³/m³]程度に低くなっている。

図 7-17 に、換気回数が 0～50 回/h まで変化する場合に、Case7 (7 月に発掘) の石室内表面の最低含水率の比較を示す。換気回数が 0 回/h から 6 回/h の間では、換気回数の増加により、含水率は増加し続ける。換気回数が 6 回/h 以上では、換気回数の増加により、含水率は低下し続ける。この理由は、6～9 月は、石室内温度が外気温より低いためである。

石室と外気の間での換気回数が大きくなると、この時期の外気水蒸気圧は高いことから、外気から石室内に水分が流入し、石室内水蒸気圧が上昇し外気に近づく。一方で石室内温度も換気回数の増加に併せて上昇する。有る程度の換気回数までは、石室内水蒸気圧の上昇に比べ、石室内温度の上昇は緩やかとなることから、石室内相対湿度は高く維持され、石室内表面の乾燥化が抑制される。さらに換気回数が大きくなると、石室内水蒸気圧の変化は小さいものの石室内温度が上昇し、結果として石室内相対湿度は低下し、石室内表面の乾燥化が促進される。結露抑制と乾燥剥離の両方を抑制する観点からは、石室と外気の間では適当な換気回数があるのが良いといえる。

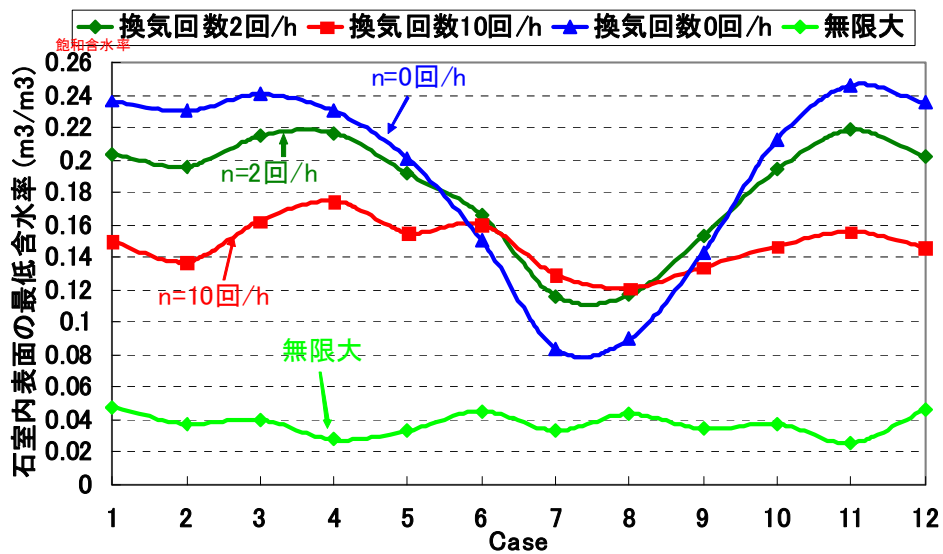


図 7-16 石室と外気間の換気回数の違いによる石室内表面の最低含水率の比較

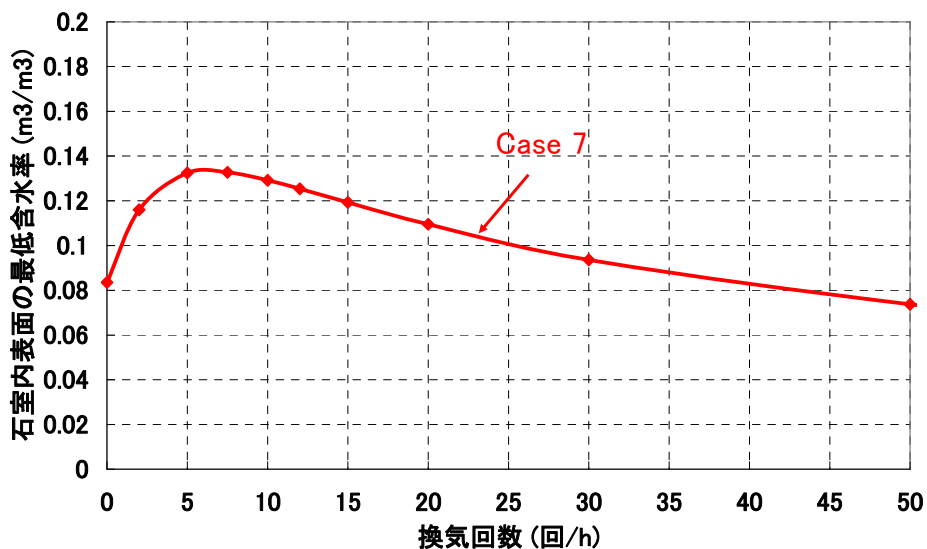


図 7-17 Case7 の石室と外気間の換気回数の違いによる石室内表面の最低含水率の比較

7.3.7 発掘季節の違いが壁画劣化に与える影響

これまでの検討結果から、発掘季節が、6月から10月の場合、石室内温度は上昇し、石室内表面で結露が発生する日が多くなるとともに、乾燥状態になる部位も生じることが分る。石室内温度上昇、高い相対湿度維持、結露発生時間の増大という点から、この季節は、カビ等微生物の発育の危険性が高まり、同時に石室内表面の乾燥により漆喰層の剥落の危険性も高まり、発掘季節に適していないといえる。一方、12月から4月の発掘は、石室内温度は下がるが結露発生日数が多くなり、カビ等微生物の発育の観点からは適さない。発掘季節が11月の場合、石室内温度の上昇は小さく、石室内表面の乾燥や結露発生時間も少なく、石室内相対湿度を高湿に維持できており、壁画のカビ等微生物発育の抑制、乾燥剥落の抑制の観点から一番発掘に適しているといえる。

7.4 第7章のまとめ

本章では、高松塚古墳の石室の発掘季節に着目して、発掘季節の違いが壁画の劣化に与える影響を石室内の温湿度性状、結露性状を検討することにより明らかにし、適切な発掘季節を検討した。得られた結果は以下の通りである。

- 1) 石室内温度が外気温より低くなる季節に発掘すると、石室南側壁面とその近くの天井では乾燥の、石室北側壁面では結露発生の可能性が高まり、劣化危険度が高くなり発掘に適さない。高松塚古墳の場合、5月から10月が上記時期に該当していた。
- 2) 発掘前の年平均温度を基準とすると、発掘後30日間における石室内温度の変化は時期により大きく異なる。高松塚古墳の場合、発掘後に基準温度以上に上昇しないのは11月～4月であった。温度のみからみた壁画のカビ等微生物の発育の抑制の観点から、11月から4月までが発掘季節に適しているといえる。
- 3) 発掘後の石室内表面湿度は、夏期に石室南側で低下しやすい。高松塚古墳の場合、7月、8月に発掘を行うと、表面湿度は大きく低下した。壁画の乾燥剥離防止の観点では、11月から4月までが発掘季節に適しているといえる。
- 4) 発掘後の石室内結露時間は、秋の終わりに最も少なく、結露発生からみた壁画のカビ等微生物の発生の抑制の観点から、適切な発掘季節は、秋の終わりであった。高松塚古墳では、11月が最も劣化危険度が小さい。
- 5) 石室内の温度上昇、結露発生、乾燥剥離を抑制する観点から、一番適切な発掘季節は秋の終わり頃であり、高松塚古墳では、11月であった。
- 6) 発掘直後に石室と外気との間の換気回数が増すと、石室内の結露発生が減り、石室内表面の乾燥化が促進される。結露発生抑制と乾燥剥離の両方を抑制する観点からは、石室と外気との間では適当な換気があるのが良いといえる。

第8章 古墳発掘調査後の応急保存対策の効果

8.1 はじめに

高松塚古墳の発掘調査は、1972年3月1日から開始された。本章では、高松塚古墳として、石室発掘前後の石室内温湿度環境と、その際に行われた保存対策の効果を数値解析により明らかにすることを目的とする。以下では、まず解析対象と解析方法について説明する。次に、発掘に伴う墳丘部の形状の変化を考慮し、発掘前後の石室内温湿度環境の変化について検討を行う。最後に、発掘に伴う墳丘部の形状の変化と施された保存対策を考慮し、発掘直後にとられた仮保護施設や覆土といった保存対策の効果を明らかにする。

8.2 解析対象

第6章の6.2.1でも説明を行ったが、高松塚古墳の発掘調査は、1972年3月1日から4月2日まで行われた。図8-1はそれぞれ発掘前、発掘直後、発掘調査終了後の墳丘の様子である。図にそれぞれの状態の期間も示している。発掘直後は石室の南側は外気に露出した状態であった。その後、露出した石室の南側を覆うように仮保護施設が設置され、石室内部の調査時以外は、石室南側に防湿のシートが敷かれ、その上に覆土が行われた。

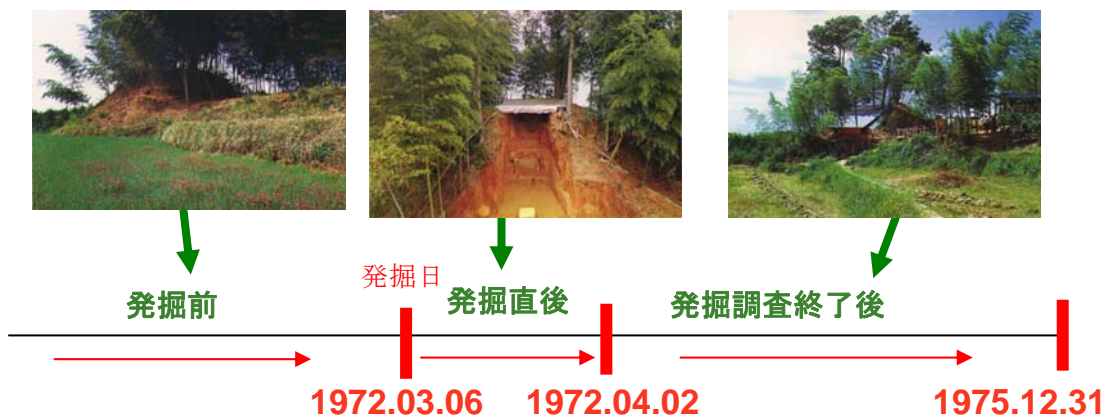
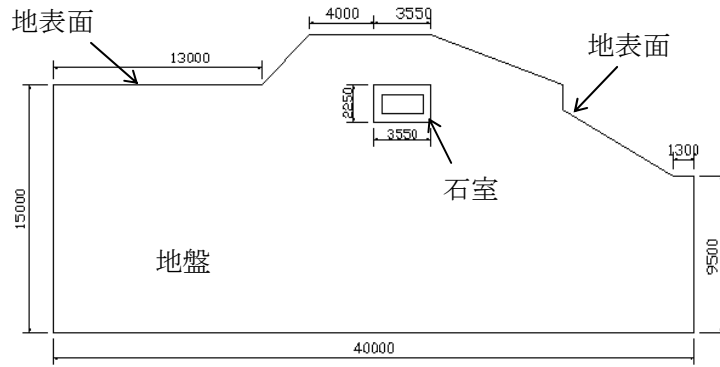
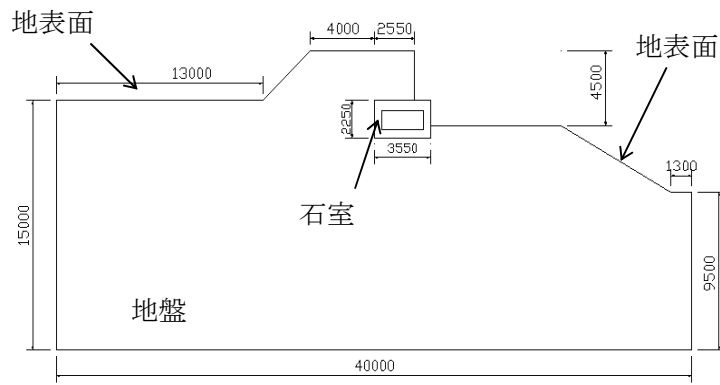


図 8-1 高松塚古墳の発掘過程

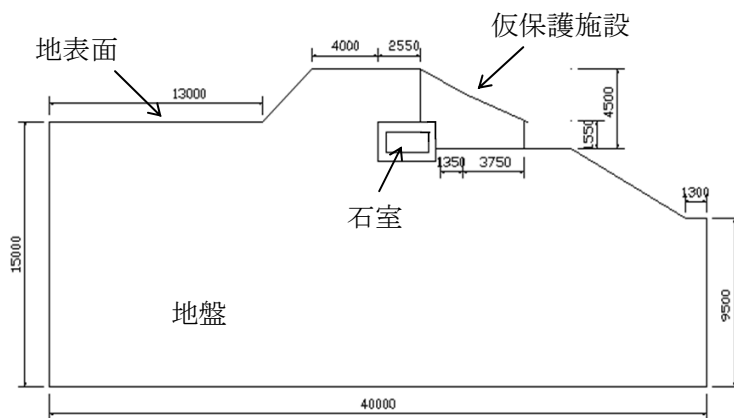
上記を踏まえて、解析モデルは、図8-2に示すように発掘前、発掘後の墳丘の状況を考え、石室の南北方向の断面を取り出した2次元系とする。図8-2(a)は、発掘前の状態であり、図8-2(b)は、発掘直後の保存対策が行われていない状態（以後、Case 0）である。発掘調査終了後の応急保存対策を考慮したケースでは、図8-2(c)のように、石室南側が仮保護施設で覆われた場合（以後、Case 1）、Case1に加えて石室南側が覆土50cmで覆われた場合（以後、Case 2）、Case2に加えて覆土内に防湿層が設けられた場合（以後、Case 3）を考える。Case2において仮保護施設で覆われない場合（以後、Case 4）を考える。実際に行われたのはCase3の場合であり、これらは8.5節で詳しく述べる。



(a) 発掘前



(b) 発掘直後



(c) 仮保護施設の設置後

図 8-2 解析対象

8.3 解析方法

解析方法は4章で示した方法による。外界気象条件は、第5章の1972年の奈良地方気象台観測の外気温、外気相対湿度、全天日射量、降水量、夜間放射を用いた。計算に用いた地盤、石室と仮保護施設の熱・水分物性値については、第5章の物性値を用いる。検討結果は、発掘前の12月31日の周期定常値を初期条件として周期的定常状態とみなせる発掘後の3年目の結果について検討する。表8-3に発掘後の仮保護施設内の条件と石室への入室条件を示す。図8-2に計算領域と境界条件の概要を示す。境界条件は地表面及び石室内側表面では第3種境界条件、地盤底部では第1種境界条件（温度14.6°C、水分化学ポテンシャル7 J/kg）、また石室から遠方の地盤鉛直面では、断熱・断湿とした。

表 8-1 発掘後の条件

仮保護施設
<ul style="list-style-type: none"> ・内部での熱水分発生なし ・石室閉鎖時を考え、石室と仮保護施設の間での換気は0回/h ・仮保護施設と外気の間での換気は1回/h ・屋根、壁は1次元の熱移動のみ（非透水、非透湿）
石室への入室
<ul style="list-style-type: none"> ・なし（熱水分発生なし）

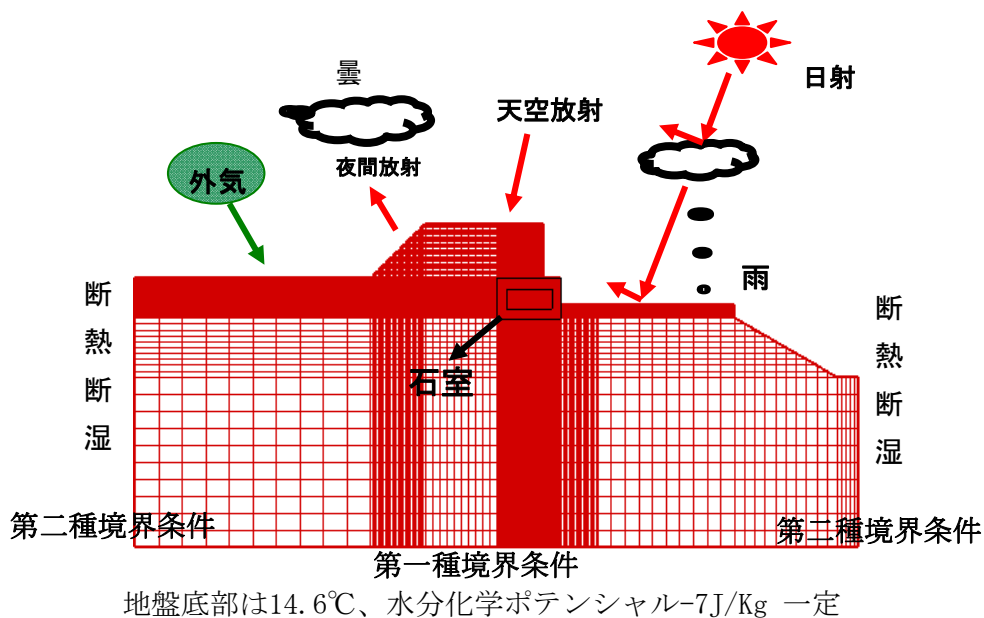


図 8-3 計算領域と境界条件

8.4 発掘前後の違いの検討

発掘前後の石室内湿度性状の違いを検討するために、発掘後に保存対策を全く講じない Case 0 の場合と、発掘前の結果の比較を行う。

8.4.1 発掘前と発掘後の石室内温湿度変化

図 8-4,8-5 に発掘前と発掘後 (Case 0) の石室内温湿度変動の比較を示す。発掘前の石室内温度は $13.4^{\circ}\text{C} \pm 0.9^{\circ}\text{C}$ で、年間変動が小さく安定しているが、発掘後では $14.7 \pm 7.4^{\circ}\text{C}$ であり、年平均値は約 1°C 高く、年間の振幅は大きく、位相は外気に近づいている。石室内湿度については (図 8-5)、発掘前は年中 100% 近くであるが、発掘後には、8,9 月に 96.6% まで低下し、5,12 月には 99.3% まで上昇する。すなわち、発掘により年間を通じて湿度は若干低下し、変動幅は小さいものの特に夏期に低下する。

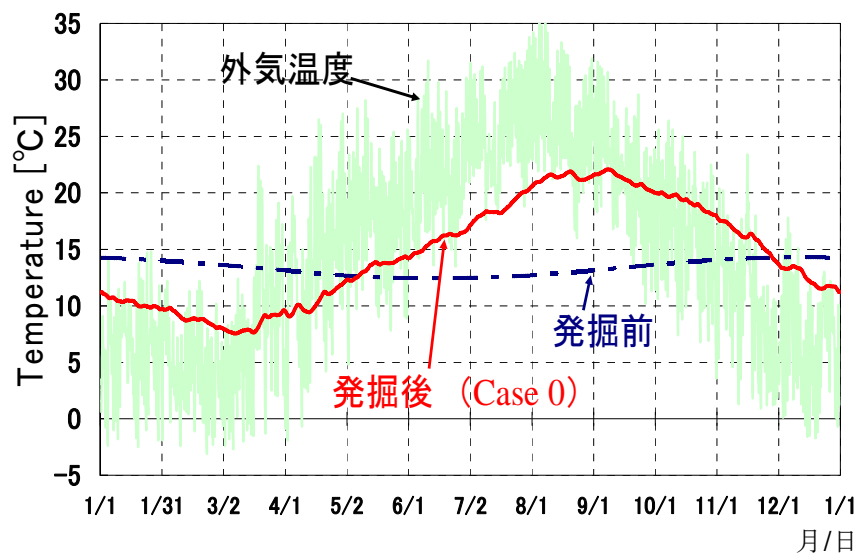


図 8-4 発掘前と発掘後 (Case 0) の石室内温度変動の比較

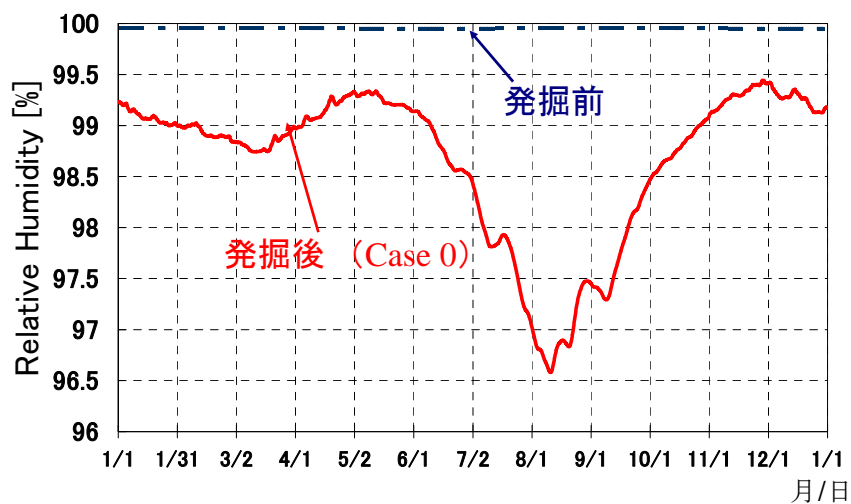


図 8-5 発掘前と発掘後 (Case 0) の石室内湿度変動の比較

8.4.2 発掘前後の石室内表面の相対湿度分布

図 8-7、8-8 にそれぞれ発掘前と発掘後の石室内表面の相対湿度分布を示す。両図は、北側天井隅角を原点として図 8-6 に示すような方向で、石室の室内側表面の分布を示したものである。図 8-7 より、発掘前の石室内表面の相対湿度はいずれの部位、時期においても 100%に近い状態であることが分る。一方、発掘後の湿度は（図 8-8）、冬期から春期にかけては全面で 97%以上であり、南側壁面とその近くの天井付近では 100%近くになるが、夏期には南側壁面とその近くの天井付近の湿度が 84%まで低下している。これは、石室南側が外気に面しており、その影響を受けたためである。すなわち夏期には、石室南側の温度が他の部位より高くなるため石室内に放湿するが、冬期には、同じ部位が他の部位より低温になり、吸湿し高湿となることによる。この部位は年間で乾燥と湿潤を繰り返している。

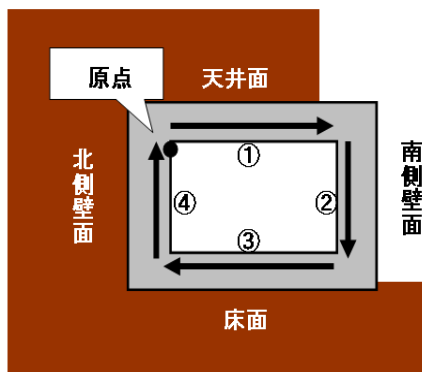


図 8-6 石室内表面の分布図
の補足説明



図 8-7 発掘前の石室内表面の
相対湿度分布

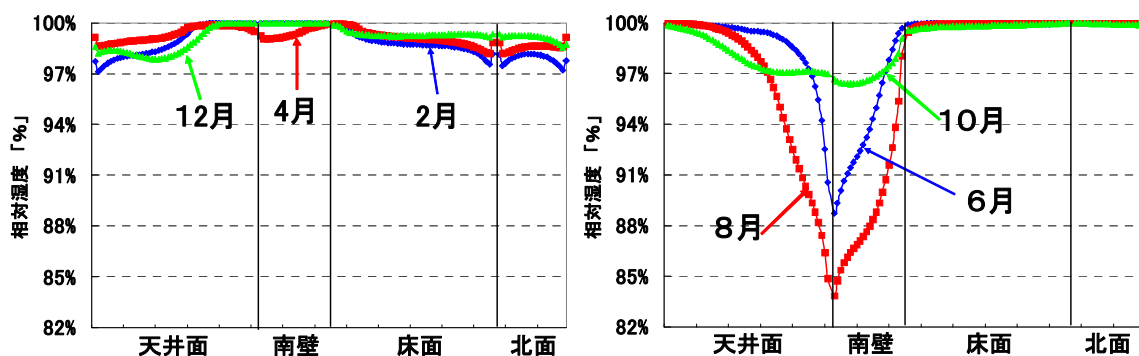


図 8-8 発掘後の石室内表面の相対湿度分布

8.4.3 発掘前後の石室の結露発生状況

図 8-9 にそれぞれ発掘前後の石室内結露発生面積率を示す。発掘前には石室内で結露は発生せず、石室内の結露発生面積率は 0 である。発掘後は、12 月から 3 月中旬の石室内結露発生面積率の最大は 15% であり、6 月中旬から 10 月の結露発生面積率の最大は 27.5% である。結露発生日数は、年間で 199 日である。発掘後には、石室内結露発生日数が多くなり、状況は明らかに悪化している。

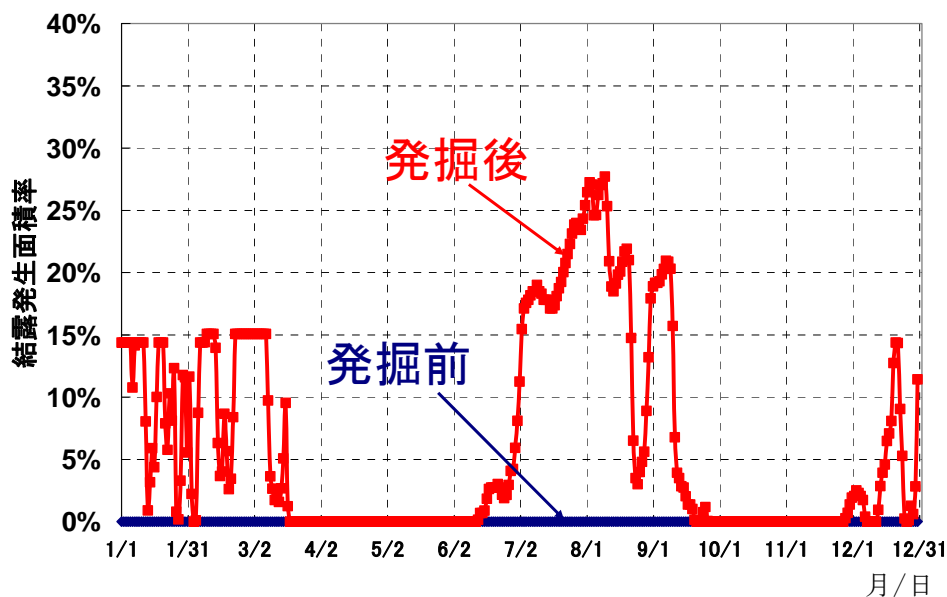


図 8-9 発掘前と発掘後 (Case 0) の石室内
日平均結露発生面積率の比較

8.4.4 発掘前後の石室環境の変化が壁画劣化に与える影響

前節までの結果から、発掘前は、石室内相対湿度は高いが、石室内温度変動は小さく、その分布は一様に近かったため、結露は発生しにくく、また、乾燥状態になることも少なかったと考えられる。具体的には、カビ等微生物の発育は急速ではなく、乾湿の繰り返しによる漆喰層の剥落は抑制されていたと考えられる。

一方、発掘後、何も対策を講じなかったとすれば、夏期には、石室温度が約 22℃まで上昇し、石室内で結露が発生する日が多くなり、南側壁面とその近くの天井付近で湿度が 90%を下回るくらいに乾燥する可能性があったと考えられる。つまり、石室内の温度上昇により、カビ等微生物の発育は発掘前より促進されると同時に、壁面の乾燥と湿潤の繰り返しにより、漆喰層の剥落損傷が発掘前より生じやすくなり、壁画保存に対する環境条件は発掘前に比して悪くなったと考えられる。

8.5 現地での応急保存対策の効果の検討

本節では、発掘調査終了後に行われた応急保存対策の効果を明らかにするために、それらの保存対策を個別に検討する。

8.5.1 保存対策の解析ケース

発掘直後に実際に行われた保存対策の効果を個別に明らかにするために、図 8-10 に示すような、以下の 4 つのケースを検討する。

1) Case 1: 仮保護施設を石室南側に設置する場合

現場では、発掘部位を覆うように石室南側前方に幅 2.75m、奥行 7.5m、高さ 4.5mの合成樹脂波板葺き、片流れ、木骨造の仮保護施設が設置された。計算では天井、壁ともに熱移動のみがあるとしてモデル化する。

2) Case 2: 石室に覆土を被せ、仮保護施設を設置する場合

石室内部の調査時を除いて、石室南側の石材が露出する部位には、覆土が行われた。この覆土の厚さについては正確な記録はないため、ここでは露出した部位に、厚み 50cm の粘土塊を被せることによりモデル化した。

3) Case 3: Case2 の覆土内に防湿層を設置する場合

石室南側に覆土を行う際に、蒸発を抑えるために覆土内部に防湿層が設置された。これも詳細な記録はないため、図 8-9 に示すように防湿層の設置位置を想定した。計算では防湿層の熱抵抗は考えず、水分流を 0 として取り扱った。

4) Case 4: Case2 において仮保護施設がない場合

覆土のみを被せた場合を考える。これにより覆土のみの保存対策の効果を検討する。

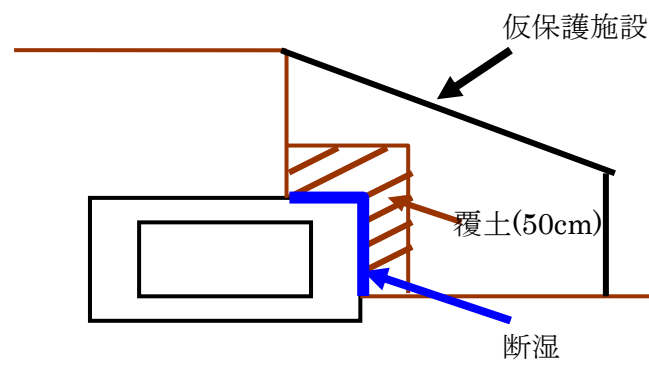


図 8-10 発掘後の保存対策（模式図）

8.5.2 各種保存対策の石室温湿度への影響

図 8-11,8-12 に、4 種の保存対策を講じた場合の、石室内温湿度の年変動を示す。石室内温度は、Case 1 では変動が最も大きく年振幅は 5.8℃であり、Case 2～4 では変動が抑制され、それぞれ年振幅は 2.7℃, 2.7℃, 2.8℃である。最高温度が一番低く、年振幅が最も小さく保たれるのは Case2 と Case3 である。また、Case 2 と Case 3 の比較から、防湿層が温度に与える影響はほとんどないことが分る。Case 1 と Case 4 の比較から、夏期の温度上昇の抑制に効果大きい対策は仮保護施設より覆土を設けることといえる。図 8-12 より、いずれの保存対策においても、石室内湿度は保存対策を施さない場合（Case 0：図 8-5）に比して年変化が小さく、常に 98%以上となっていることが分る。カビ抑制の観点から見た場合、最も有効な保存対策は全ての対策を講じた Case 3 とその対策から防湿層を外した Case2 である。

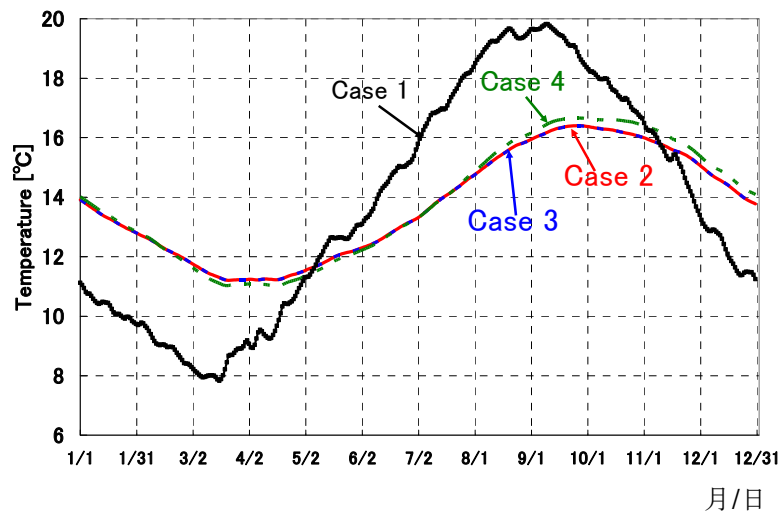


図 8-11 各種保存対策を施した時の石室内温度変動の比較

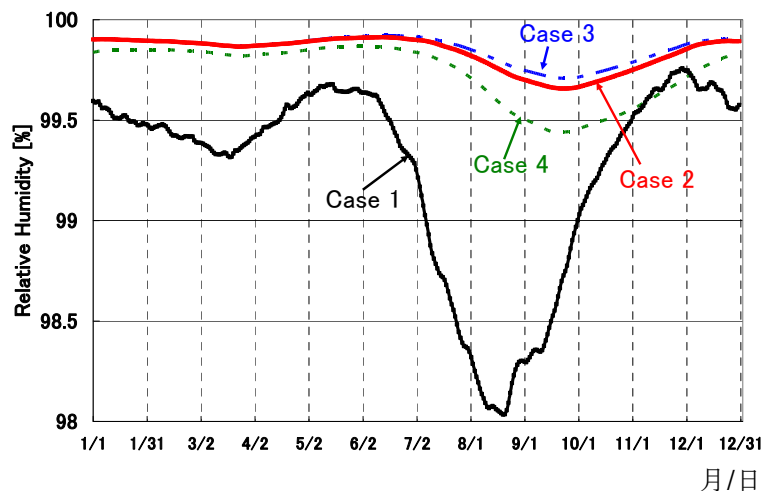


図 8-12 各種保存対策を施した時の石室内湿度変動の比較

8.5.3 各種保存対策の石室内壁相対湿度分布への影響

図 8-13 に、各保存対策を施した場合の石室内表面の相対湿度分布の比較を示す。冬期（左列）には、保存対策の違いが石室内表面の相対湿度に与える影響は小さい。しかし、夏期（右列）には、南側壁面とその近くの天井付近で、保存対策による違いが大きい。Case 1～4 の石室内壁相対湿度の年間最小値は、いずれも夏期の南壁の天井隅角付近で生じ、それぞれ 87.6%、98.0%、98.8%、95.4%である。Case 1～4 の中で、Case 3 が石室内壁含水率と相対湿度年振幅が一番小さい。乾燥剥離防止の観点から、最も有効な保存対策は Case 3 である。また、Case 2 と Case 3 の比較から、防湿層の設置により湿度低下を抑える効果は若干であるが認められる。Case 1 と Case 4 の比較から、Case 4 の方が、湿度低下は抑制されており、湿度低下を抑える効果的な対策は仮保護施設の設置より、覆土を設けることといえる。

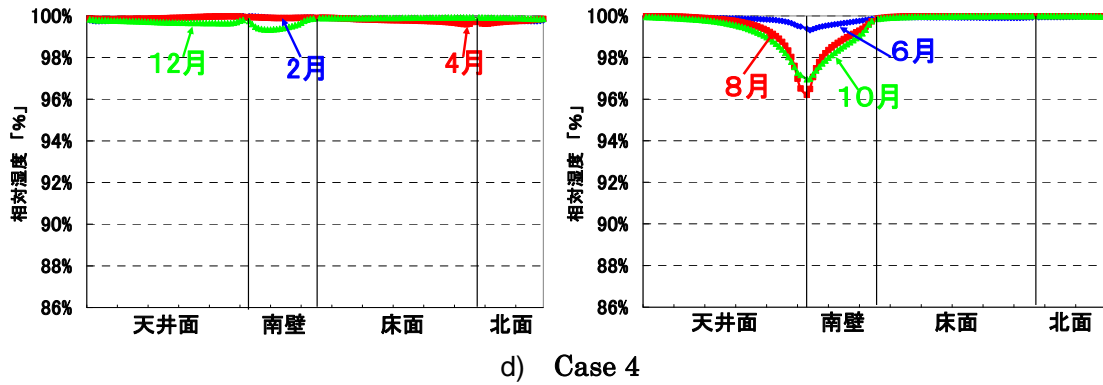
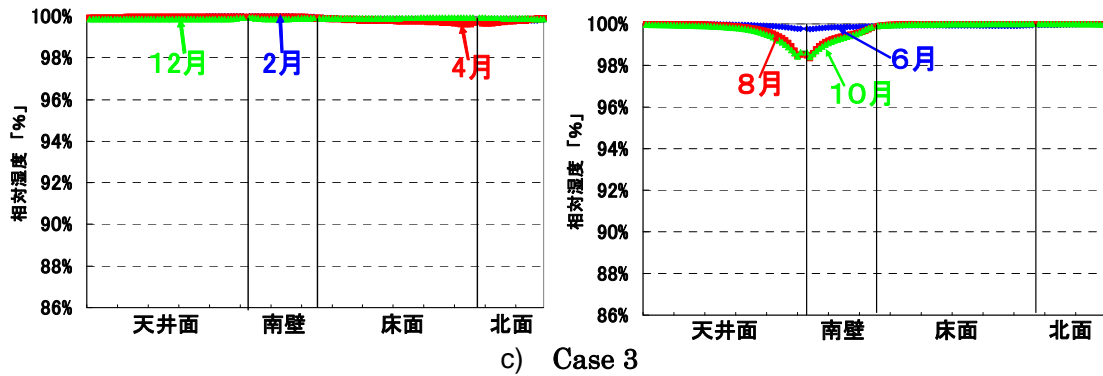
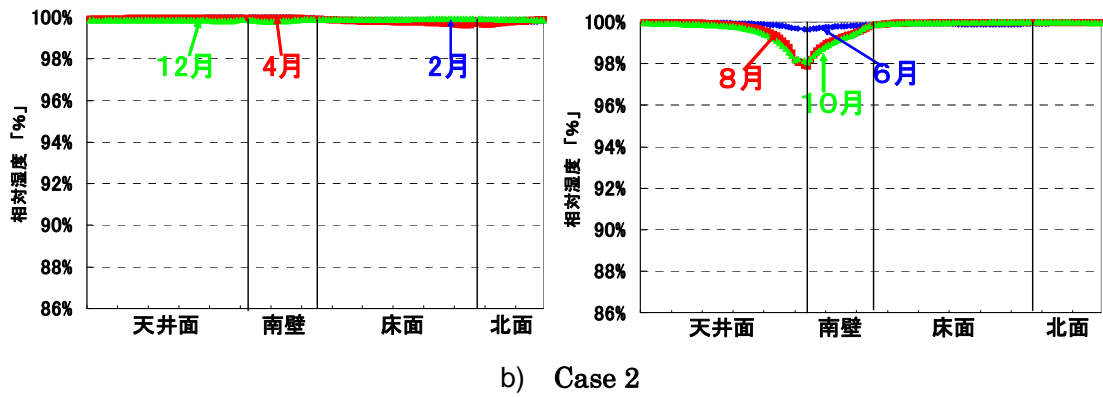
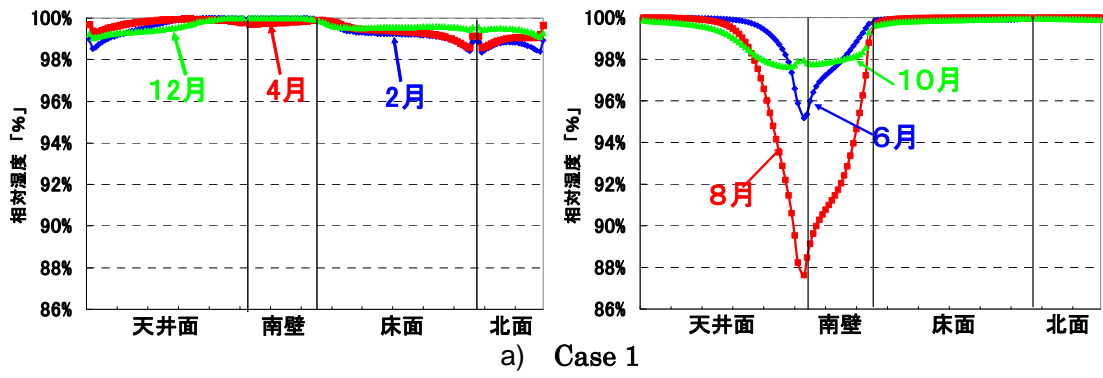


図 8-13 石室内表面の相対湿度分布の比較

8.5.4 各種保存対策が結露発生に及ぼす影響

図 8-14 に各保存対策を施した場合の石室内の結露発生面積率の比較を示す。まず冬期について比較する。冬期は Case 1 の結露発生面積率が最も大きい。仮保護施設がない場合 (Case 0 : 図 8-9) と仮保護施設がある場合 (Case 1) の差は小さく、仮保護施設が結露発生面積率に与える影響は小さいといえる。Case 2~4 では、Case 0,1 より結露発生面積率が減少している。Case 2~4 では全て覆土があるので、覆土が結露抑制に大きく影響していると言える。また、Case 4 と Case 2 の比較から、Case 4 では、Case 2 より結露発生面積率が減少している。この理由は、Case 4 では、Case 2 より覆土及びそれに接する石材の含水率が低くなるためである。これは外気の絶対湿度が、仮保護施設の内部より低く、覆土からの蒸発が大きくなるためである。次に夏期について比較する。Case 1 の結露発生面積率は Case 2~4 より早い時期に大きくなり、その値は若干小さい。いずれのケースにおいても結露が夏期を通じて石室北側で発生しており、ここで検討を行っている保存対策では、夏期の結露を抑えることは困難であるといえる。Case 1~4 の年間結露発生日数は、それぞれ 217、193、200、120 日であった。結露発生抑制の観点から、これら保存対策は不十分と考えられる。

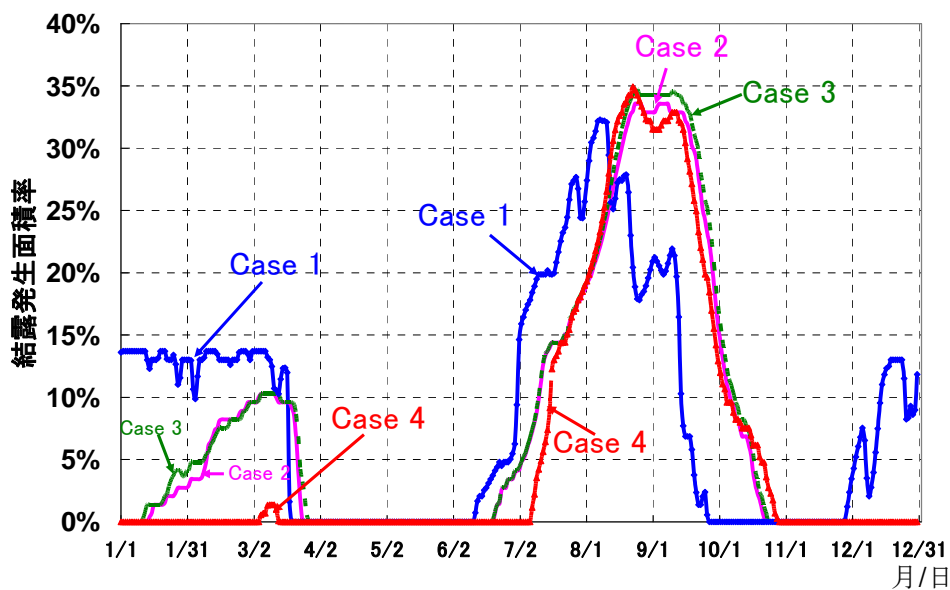


図 8-14 石室内表面の日平均結露発生面積率の比較

8.5.5 壁画の劣化に対する保存対策の総合的評価

ここでは保存対策の効果を総合的に評価する。仮保護施設を石室南側に設置すると（Case1）、対策を講じない場合と比べて、石室内最高温度は1.6℃ぐらい下がるが、壁面の乾燥と結露を抑制する効果は小さい。石室の露出した部位に覆土を被せると、対策を講じない場合（Case 0）と比べて石室内最高温度は5.4℃ぐらい下がり、石室室内側表面で乾燥を抑制する効果が大きい。これに加えて、覆土の下に防湿層を設けると石室内湿度低下を抑制する効果が若干あるものの上記対策とほぼ同等とみなせる。検討を行った保存対策の中では、防湿層の有無に拘わらず、石室の外気に露出された部位に覆土を行い仮保護施設で覆う場合が、石室の最高温度が最も低く、石室室内側表面の湿度低下が最も小さかった。前者は現実に行われた対策に相当し、カビ等微生物の成長抑制と乾燥剥離防止の観点から、最も効果的であったと考えられる。

しかし、ここで検討を行ったいずれの保存対策においても、夏期の北側床面近傍では高湿化が生じ、結露発生の可能性が高く、この抑制のために別な対策の検討が必要であるといえ、第9章ではその検討を行う。

8.6 第8章のまとめ

本章では、高松塚古墳の石室の発掘前後に着目して、墳丘部の形状変化を考慮した二次元モデルにより古墳発掘後の保存対策の効果について検討した。このモデルを用いて、発掘および保存対策を行った場合の石室の温湿度環境の変化を明らかにすることにより、発掘および仮保護施設、覆土、覆土の下の防湿層といった保存対策が、壁画劣化に与える影響を検討した。得られた結果は以下の通りである。

- 1) 発掘前の石室内温度の変動は小さいため、石室内相対湿度は年間を通じて100%近くであるが、結露発生時間は短かったと考えられる。発掘後に比して、発掘前の石室内温湿度環境の方がカビ等微生物の成長や乾燥剥離の危険性は少なかったと考えられる。
- 2) 発掘後に何も保存対策を講じなければ、夏期に石室温度は約22℃まで上昇し、南側壁面とその近くの天井の湿度は90%を下回る程に乾燥し、石室内では年間200日以上結露が発生したと推定される。カビ等微生物の発育抑制と乾燥剥離防止の観点から、壁画保存に対して危険な状況と考えられる。
- 3) 露出された石室に覆土を行う対策が、仮保護施設を設ける対策より、石室内温度上昇の抑制と室内表面の乾燥抑制に対する効果が大きい。
- 4) 石室の外気に露出された部位に断湿と覆土を行い仮保護施設で覆う場合が、石室の最高温度が最も低く、石室室内側表面の湿度低下が最も低かった。これは現実に行われた対策に相当し、カビ等微生物の発育抑制と乾燥剥離防止の観点から、最も効果的であったと考えられる。なお、この対策で防湿層の有無は結果への影響が小さかった。
- 5) 検討を行った保存対策では、夏期の北側床面の高湿化と、結露発生を抑えられない。この時期の結露抑制のために別な対策の検討が必要である。

第9章 断熱材料を用いた古墳発掘調査後の保存対策の検討

9.1 はじめに

高松塚古墳は、1972年の壁画発見の発掘調査後、露出した石室の南側を覆うように、前室を設けた仮保護施設が設置され、石室内部の調査時以外は、石室南側に防湿のシートが敷かれ、その上に覆土が設置された。第8章では、実施されたこれらの保存対策が壁画の劣化の抑制に効果があったと考えられることを示した。また、これらの保存対策では、石室南側が外気に面しているため、夏期にはこの部位の温度が高くなり、石室の北壁とその近くの天井及び東西側壁と床石付近で、結露発生の可能性が高いことを示した。このような非一様な温度分布を抑制するためには、石室の露出部位を断熱するなどの対策が考えられるが、その適切な選択と設置方法は十分に分かっていない。

本章では、このような非一様な温度分布を抑制するために、覆土に加えて断熱材料を用いた場合の適切な保存対策の提案を行うことを目的としている。まず解析対象と解析方法について説明し、発掘調査後の石室の露出部位に用いる断熱材の熱容量と断熱材被覆部の吸放湿性が石室内の温湿度性状に与える影響について検討を行う。次に、発掘調査後の石室の一部が露出した状態における、断熱材の適切な設置面積や熱抵抗の大きさについて検討を行う。

9.2 解析方法

用いる基礎方程式、熱水分物性値、計算方法は第8章と等しい。解析モデルは、図9-1に示すように発掘調査後の墳丘の状況を想定し、露出部位に被覆材料を置き、石室の南北方向の断面を取り出した2次元系とする。検討は発掘前の12月31日の周期定常値を初期条件として周期定常値を得るため2年間の助走計算後の3年目の結果を用いる。表9-1に発掘調査後の仮保護施設や石室入室の条件の概要を示す。仮保護施設は、内部での熱水分の発生は考慮せず、石室内への入室もここでは考慮しない。計算領域と境界条件は第8章8.3節と等しい。境界条件は墳丘部を含めた地表面及び石室内側表面では第3種境界条件、地盤底部では第1種境界条件（温度14.6°C、水分化学ポテンシャル -7 J/kg ）、また石室から遠方の地盤鉛直面では、断熱・断湿とする第2種境界条件とした。

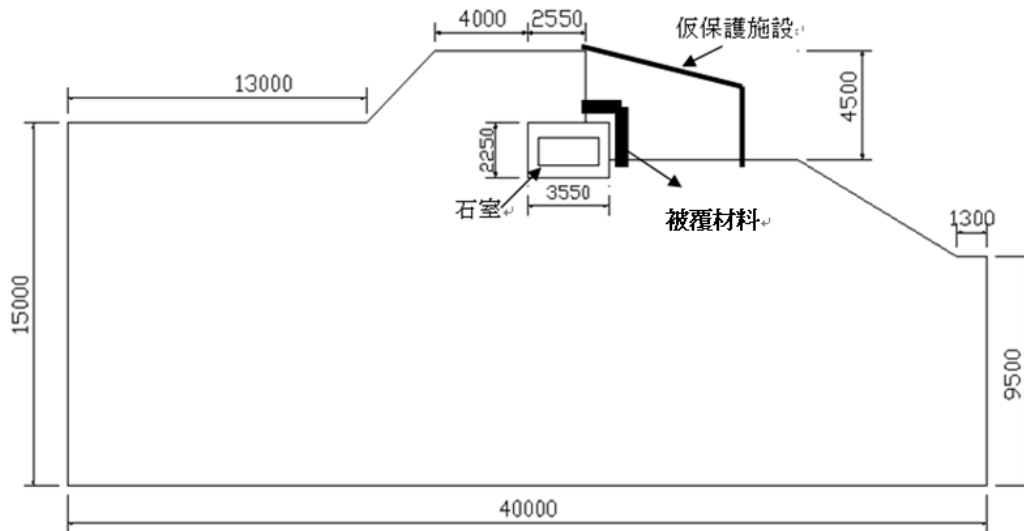


図 9-1 解析対象 (発掘調査後の状態)

表 9-1 発掘調査後の検討の条件

仮保護施設
<ul style="list-style-type: none"> 保存対策：石室南側の発掘部位に断熱材と覆土を設置 上記を覆うように覆屋（仮保護施設）を設置 （覆屋により、発掘部位に、日射と降雨はない） 換気回数：石室と覆屋の間 0 回/h。 外気と覆屋の間は無限大（覆屋内は外気と等しい） 覆屋の屋根、壁：1次元の熱移動のみ（非透水、非透湿）
石室への入室
<ul style="list-style-type: none"> なし（石室内部の熱水分発生なし）

9.3 断熱材の熱容量の影響

9.3.1 解析対象

解析対象については、図 9-2 に示すように、石室南側の石材が露出する部位が、断熱材を被せた。ここで、断熱材料の熱容量の違いが石室内温湿度性状に与える影響を明らかにするために、表 9-2 に断熱材料の熱容量を変化させる場合の 4 つケースの検討を行う。なお、断熱材は、石室内の調査・点検が可能ないように、その厚さは 70cm と固定し、熱伝導率は、0.14[W/mK] 固定し、吸放湿性はないものとする。

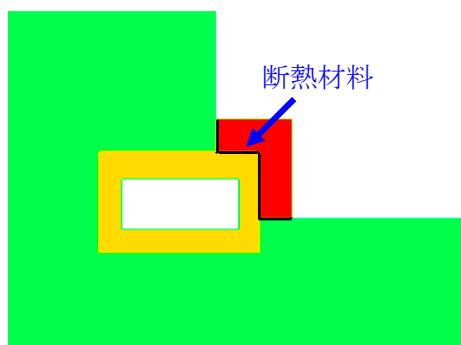


図 9-2 解析対象

表 9-2 検討ケース

ケース	断熱材の容積比熱 (kJ/m ³ K)	断熱材の種類説明[1]
Case 1	70	普通の軽く保温板類 (発泡スチレンなど)
Case 2	700	中等の熱容量の保温材料類 (乾燥した土壌など)
Case 3	1400	高い熱容量の保温材料類 (繊維板など)
Case 4	2100	仮想の保温材料

9.3.2 熱容量が石室内温度変動、結露状態へ与える影響

図 9-3 に、容積比熱を変化させた場合の、石室内温度変動の比較を示す。図より、Case 1~4 では、室内温度の年平均及び年振幅はほぼ等しく、13.7°C±2.0°Cである。Case 1~4 の最高温度が現れる時期はそれぞれ 10 月 10 日、10 月 14 日、10 月 19 日、10 月 24 日であった。図より、断熱材の容積比熱を変化させる場合、室内温度の年平均及び年振幅の変

化は非常に小さいが、室内温度の位相が明らかに遅れていることが分かる。

図 9-4 に、Case 1~4 の石室内表面の結露発生面積率の変動の比較を示す。Case1~4 では、結露発生面積率の年最高値は少し低くなって、変化が小さいこと分かる。断熱材の容積比熱が 70 から 2100[kJ/m³K]まで大きくなるにつれて、結露発生時期が明らかに遅れていることが分かる。

従って、断熱材の容積比熱は、結露発生面積率と石室温度の位相遅れに影響を与えている、その値に影響が小さいといえる。

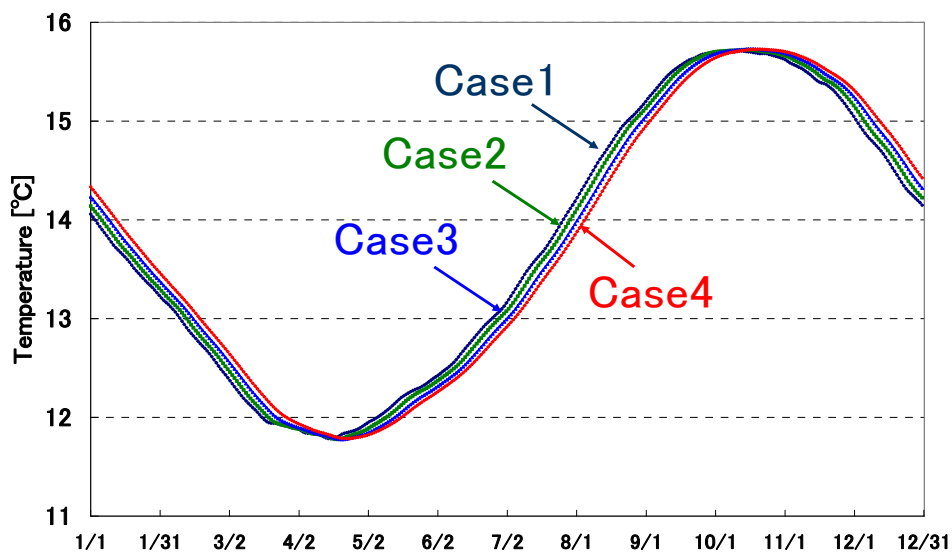


図 9-3 石室内温度変動の比較

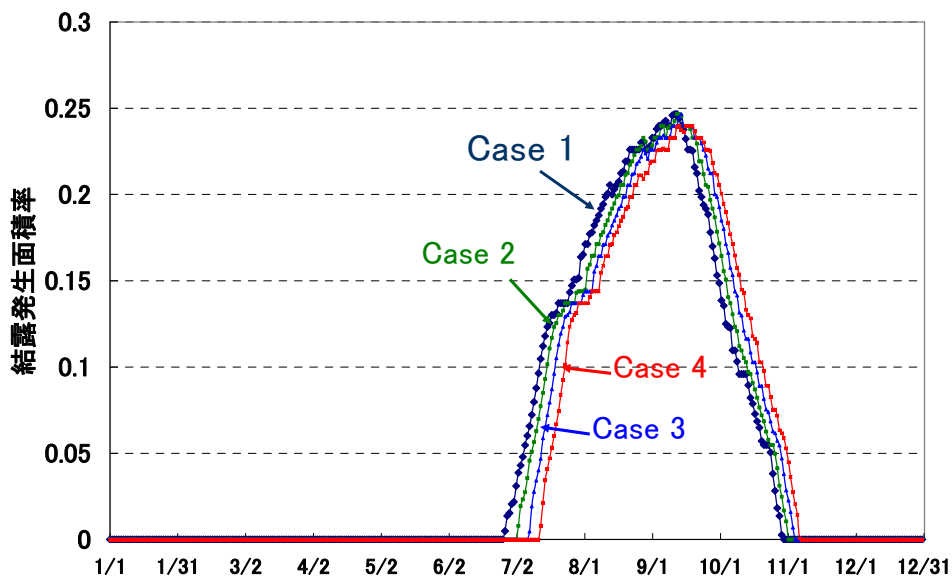


図 9-4 結露発生面積率の比較

9.3.3 断熱材の熱容量が壁面保存へ与える影響

表 9-3 より、断熱材の容積比熱が大きくなると、年間結露発生日数が若干小さくなり、年間最低相対湿度は若干高くなっている。断熱材の熱容量の変化は、石室壁表面の年間最高温度と年平均温度にほとんど影響を与えない。以上から、ここで想定する発掘部位の断熱材の容積比熱の変化は、結露発生日数に与える影響は小さいと考えられる。

表 9-3 断熱材の熱容量による評価パラメータの比較

ケース	結露日数 (Day)	壁温最高値 (°C)	最低相対湿度 (%)	年平均温度 (°C)
Case 1	124	15.95	98.2	13.74
Case 2	120	15.95	98.3	13.74
Case 3	118	15.95	98.4	13.74
Case 4	116	15.95	98.5	13.74

9.4 被覆材料の吸放湿性の影響

9.4.1 はじめに

被覆材料による吸放湿性の影響を明らかにするために、古墳発掘調査後の露出部位を被覆材料として、断熱材と土の二つを取り上げる。断熱材は、熱抵抗が大きい材料であり、土は吸放湿性に富み、熱抵抗が小さい材料である。ここでは、石室保護に用いる断熱材は、透湿性が低い硬質ウレタンフォームを想定し、(熱伝導率：0.037 W・m/K、熱容量 42kJ/(kg・K)) 非透湿として扱い、覆土は、高松塚古墳の周囲の地盤と同様とする。第 5 章に、周辺地盤の土壌と石室石材の熱・水分物性値を示している。図 9-5 に熱伝導率と平衡含水率を示す。材料の厚さは、覆土は 50cm に、断熱材は 20cm に固定する。

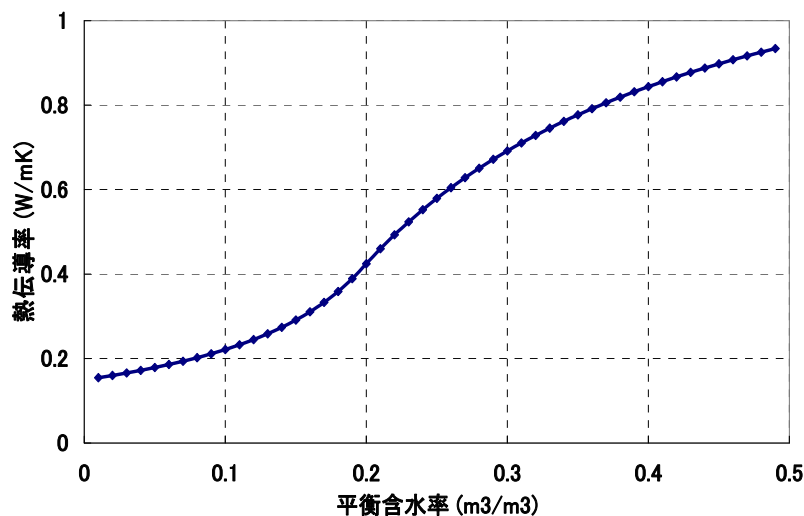


図 9-5 地盤の含水率－熱伝導率の関係

9.4.2 解析対象

被覆材料による吸放湿性の影響を明らかにするために、2ケースの検討を行う。図 9-6 に示すように、Case1 は、発掘部位の石室南側に、断熱材の上に覆土を設置する場合であり、覆土が外気に面している。Case2 は、覆土の上に断熱材を設置する場合であり、覆土は外気に面していない。

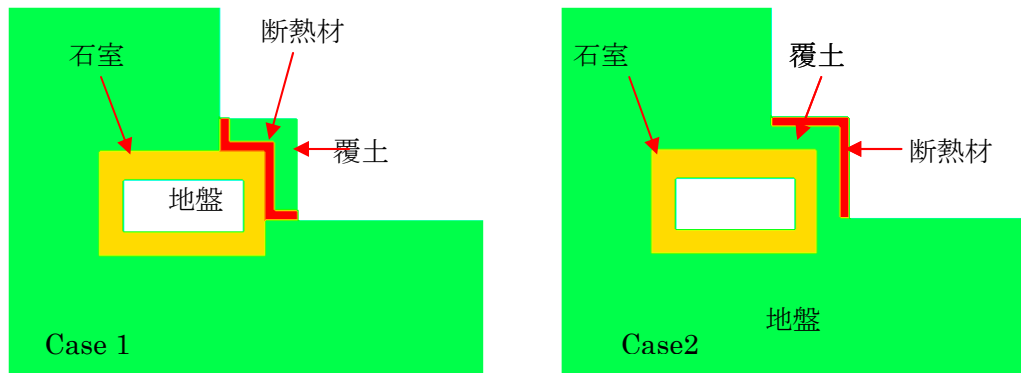


図 9-6 解析ケース

9.4.3 石室内温度変動、結露状態と含水率分布変動

図 9-7 に、Case1 と Case2 の石室内温度変動の比較を示す。断熱材を覆土の下に設置している場合 (Case 1) では、室内温度の年平均及び年振幅はそれぞれ 13.6℃、1.6℃である。断熱材を覆土の上に設置している場合 (Case2)、室内温度の年平均及び年振幅はそれぞれ 13.6℃、1.8℃である。両ケースで、年平均温度は変わらないが、年間の温度振幅は、Case2 より Case 1 の方が小さくなる。年振幅の差の理由は、Case1 の場合が、Case2 の場合より、Case 1 の覆土が外気に面して、覆土が外気に放湿して、覆土の含水率が低く熱伝導率が低くなるためである。図 9-8 に、それぞれの保存対策時の夏期の地盤及び石室の含水率分布を示す。Case1 の覆土の含水率は 0.02~0.04 [m³/m³]であり、この時の覆土の熱伝導率は 0.16 [W/mK]である (図 9-5) 一方、Case2 の覆土の含水率は 0.10 ~0.12 [m³/m³]であり、熱伝導率は 0.24 [W/mK]であり (図 9-5)、Case1 の方が覆土の熱伝導率が小さくなっていることが分かる。図 9-9 に、Case1 と Case2 の石室内表面の結露発生面積率の変動の比較を示す。両ケースの結露発生期間の差は小さいが、結露発生面積率は、Case2 より Case 1 の方が、若干小さくなる。

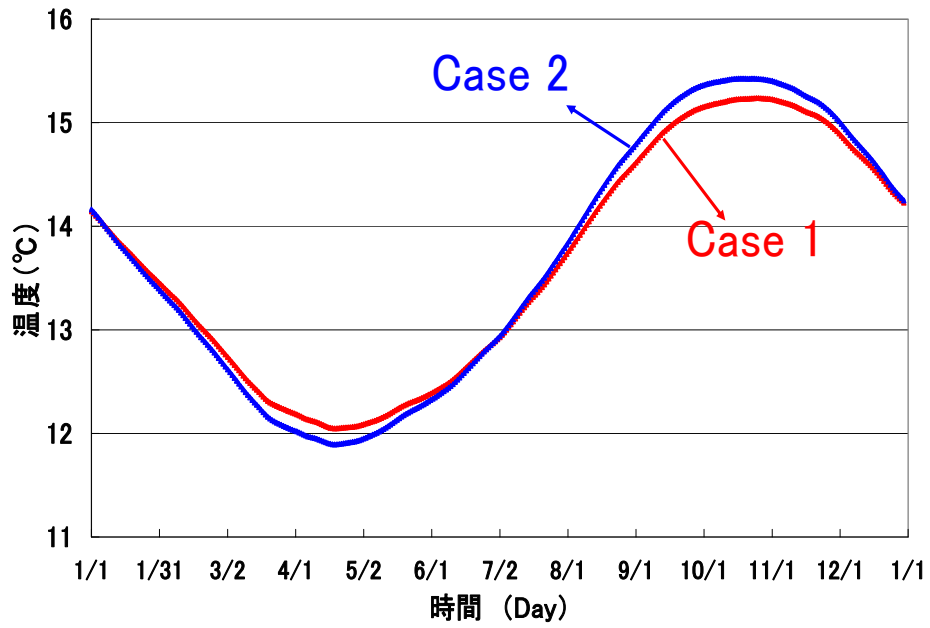


図 9-7 石室内温度変動の比較

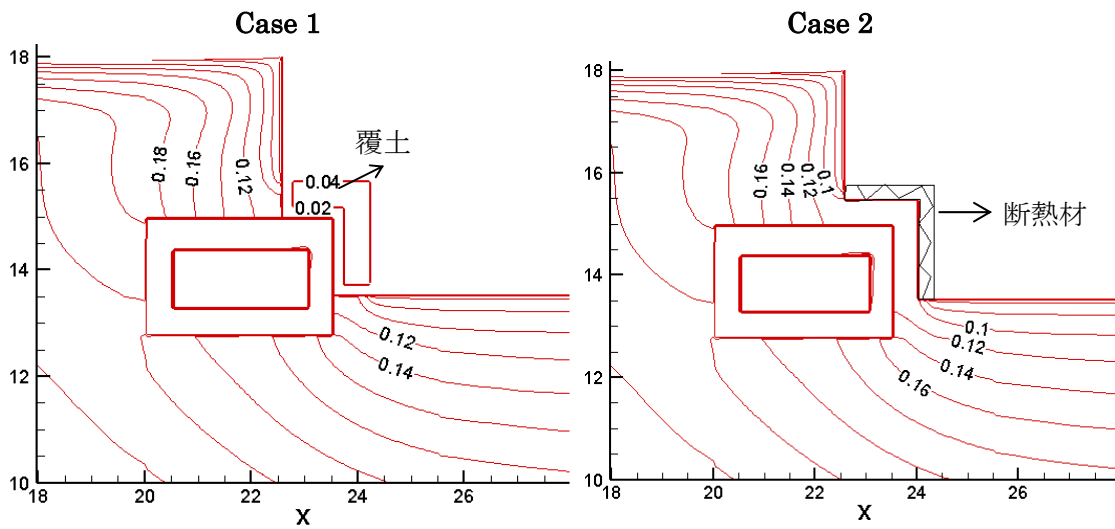


図 9-8 石室周囲の含水率分布(8月15日 PM12:00)

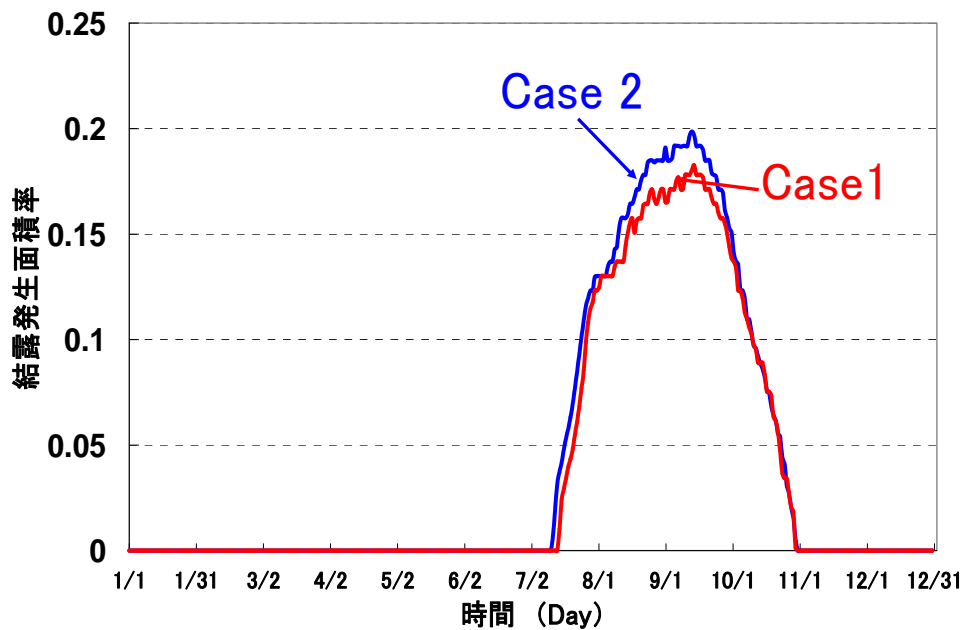


図 9-9 結露発生面積率の比較

9.4.4 被覆材料の吸放湿性が壁画保存へ与える影響

表 9-4 に、Case1 と Case2 の石室内表面の評価指標の結果を示す。年間結露日数、年平均温度と年間壁表面温最高値については Case1 が Case2 より若干低くなる。生物的劣化対策として、断熱材を覆土の下に設置する方法は、断熱材を覆土の上に設置する方法より若干良いといえる。石室内表面の年間最低相対湿度については Case1 が Case2 より高くなる。乾燥対策としても、断熱材を覆土の下に設置する方が若干良い。

従って、両者の差は小さいものの、古墳壁画の劣化対策としては、断熱材を覆土の下に置くの方がよいと考えられる。すなわち、被覆材料として用いる吸放湿性のある材料が乾燥した状態に維持される場合、古墳壁画の劣化対策として有効となると考えられる。

表 9-4 断熱材と覆土の設置順序の違いによる評価指標の比較

ケース	結露日数 (Day)	壁温最高値 (°C)	最低相対湿度 (%)	年平均温度 (°C)
Case 1	107	15.30	99.2	13.63
Case 2	110	15.58	98.4	13.65

9.5 被覆材料の設置面積の影響

9.5.1 はじめに

ここでは、古墳発掘調査後の露出部位の被覆材料として、9.4.1 節の土（50cm）、断熱材（20cm）の二つを用いて、発掘部位の適切な設置面積について検討を行う。

9.5.2 解析対象

適切な断熱材と覆土の設置面積を明らかにするために、図 9-10 に示すように 2 種類のケースを検討する。図 9-10(a)は、発掘部位の鉛直方向に断熱材と覆土を伸ばした場合であり、S1 はその距離を表す時に用いる。図 9-10(b)は、発掘部位の水平方向に断熱材と覆土を伸ばした場合であり、S2 はその距離を表す時に用いる。ここでは、S1 を 0.5、1、1.5、2m と変化させる場合と、S2 を 0.5、1、9m と変化させる場合を、比較検討し、必要な断熱材と覆土の設置面積を明らかにする。なお、S1 を変化させるときは S2 を 0 とし、S2 を変化させるときは S1 を 0 とする。

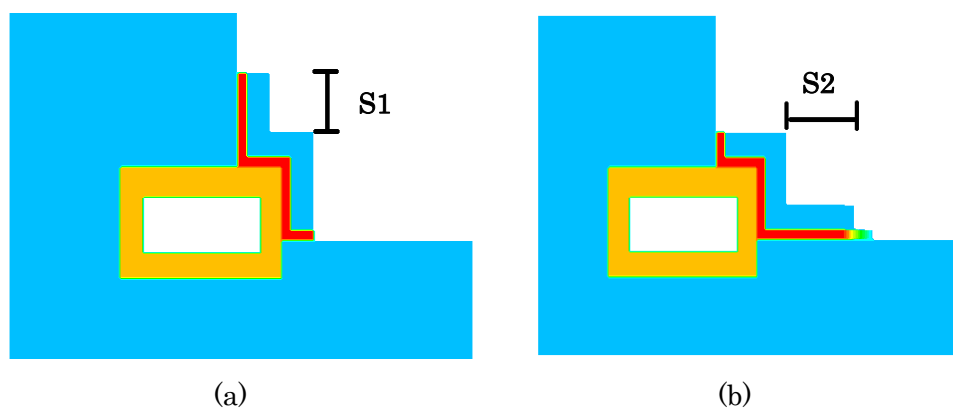


図 9-10 解析対象

9.5.3 鉛直方向の断熱材と覆土の長さの影響

1) 石室内温度変動、結露状態と含水率分布変動

図 9-11 に、S1 を変化させた場合の、石室内温度変動の比較を示す。S1 が 0m の時は 0.5m の時より、石室内温度の年振幅は 0.1℃大きい。S1 が 0.5m から 2m の間の石室内温度の差は非常に小さい。つまり、S1 が 0.5m 以上では、石室内温度の振幅の差はほとんど生じない。図 9-12 に、石室内表面の結露発生面積率変動の比較を、表 9-5 に、評価パラメータの結果を示す。表 9-5 より、年間結露日数は、S1 が 0.5m から大きくなるにつれて、明らかに大きくなっていることが分る。また図 9-12 より、結露発生面積率の年最高値は、S1 が 0.5m と 1.0m で最小になり、2.0m では大きくなることを示している。図 9-13 に、S1 が 0.5m と 2m の時における、夏期の地盤及び石室の含水率分布を示す。S1 が 0.5m 時、

石室の天井上に地盤の含水率は約 $0.12 \sim 0.20 \text{ m}^3/\text{m}^3$ だが、S1 が 2m の時、石室の天井上の地盤の含水率は約 $0.24 \text{ m}^3/\text{m}^3$ と高い。S1 が大きくなると、石室の天井上に水分が蓄積していることが分かる。これは断熱材が防湿層であり、この部位の地盤内水分の乾燥が抑制されるためであり、S1 が大きい時に、石室内表面の年間結露日数が大きくなる原因になっているといえる。

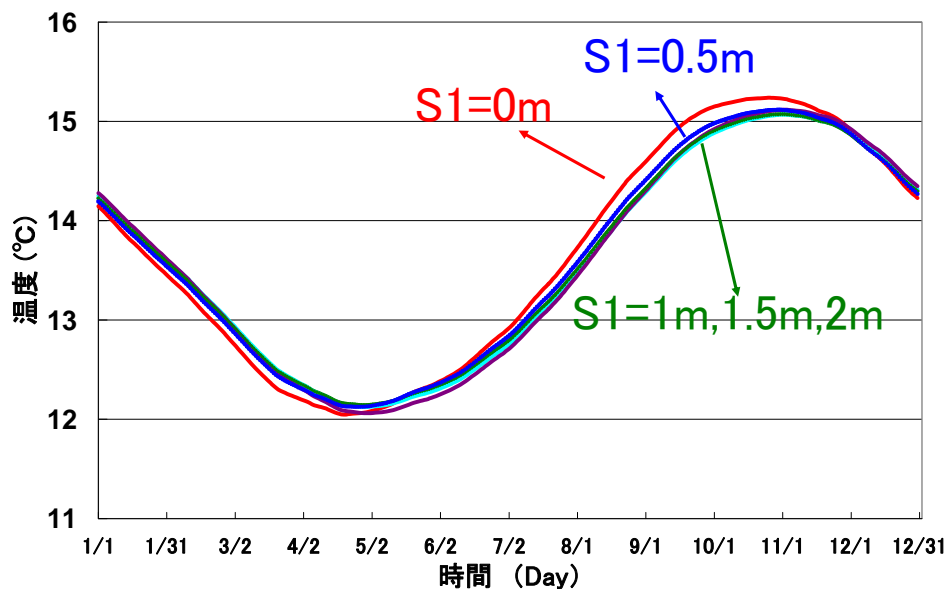


図 9-11 石室内温度変動の比較

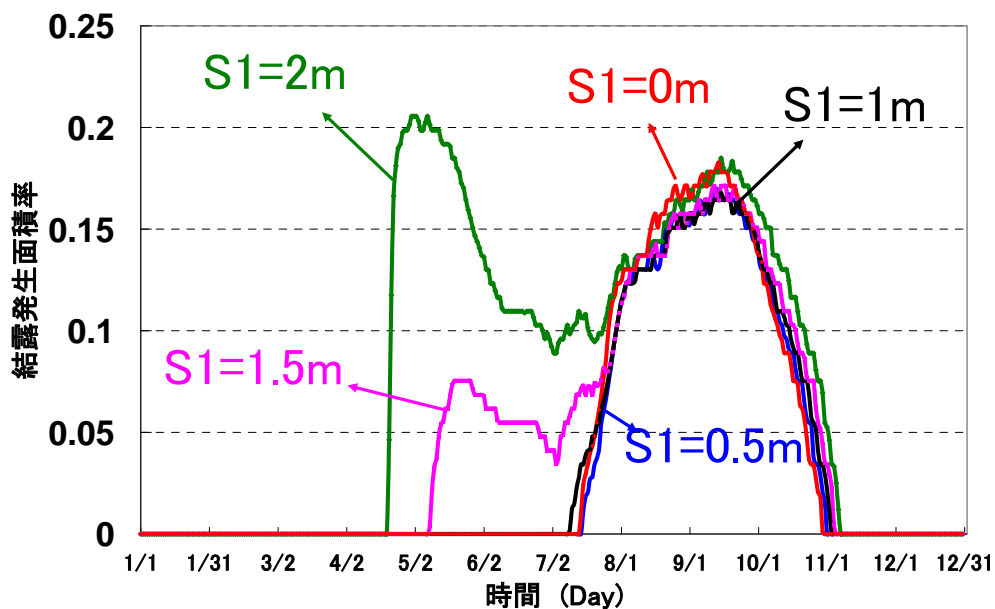


図 9-12 結露発生面積率の比較

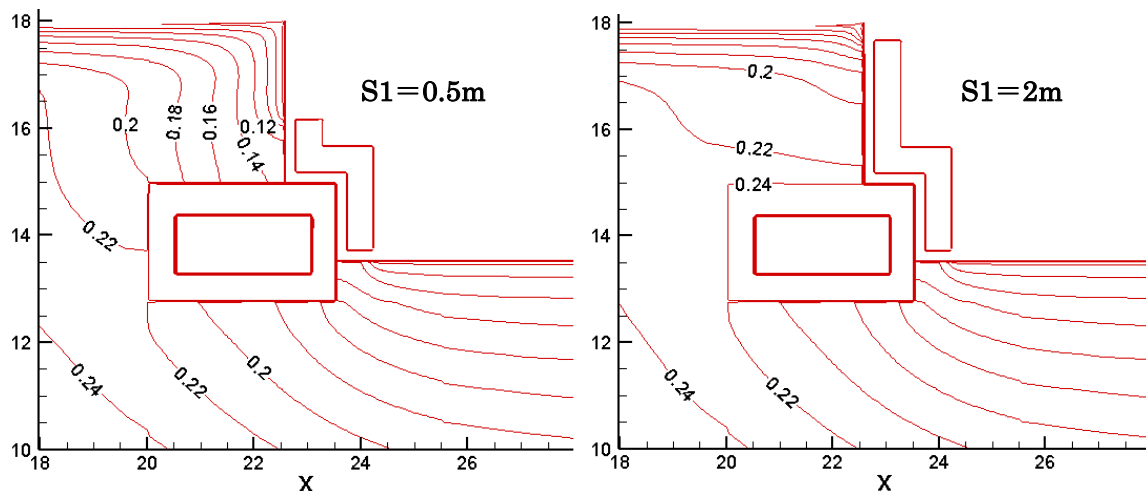


図 9-13 石室周囲の含水率分布(8月15日 PM12:00)

2) 保存対策の効果の検討

表 9-5 に、 S_1 を変化させた場合の石室内表面の評価指標の結果を示す。 S_1 が 0 から 2m の間での年平均温度の変化は小さい。年間結露日数は、 S_1 が 0 か 0.5m の場合が最も少ない。石室壁表面の年間最高温度は、 S_1 が 1.5m の時に最も低いが、0.5~2.0m の間での差は、 0.05°C と小さい。また、 S_1 が 0.5m から大きくなると結露日数、結露蓄積量が大きくなる。石室壁面最低湿度はいずれも 99% 以上である。以上から、結露発生抑制の観点から発掘部位の鉛直方向に延ばす断熱材と覆土は 0.5m 程度あればよいと考えられる。

表 9-5 S_1 の違いによる評価指標の比較

ケース	結露日数 (Day)	壁温最高値 ($^{\circ}\text{C}$)	最低相対湿度 (%)	年平均温度 ($^{\circ}\text{C}$)
$S_1=0\text{m}$	107	15.30	99.2	13.63
$S_1=0.5\text{m}$	107	15.17	99.4	13.60
$S_1=1\text{m}$	115	15.13	99.5	13.59
$S_1=1.5\text{m}$	179	15.12	99.6	13.58
$S_1=2\text{m}$	199	15.17	99.6	13.57

9.5.4 水平方向の断熱材と覆土の長さの影響

1) 石室内温度変動、結露状態と含水率分布変動

図 9-14 に、S2 を変化させた場合の、石室内温度変動の比較を示す。S2 が 0m の時は 1m の時より、石室内温度の年振幅は 0.2°C に大きい。また、S2 が 1m 以上では、石室内温度の年変動の違いは非常に小さい。図 9-15 に、石室内表面の結露発生面積率変動の比較を、表 9-6 に、評価指標の結果を示す。表 9-6 より、年間結露日数は、S2 が 1m の場合に、最低の 98 日であり、1m より増すと増加する。図 9-15 より、S2 が 1m の場合に、結露発生面積率の年最高値は最も小さくなり、1m 以上ではその値の差は小さいことが分る。

図 9-16 に、S2 が 1m と 9m の時の、夏期の地盤及び石室の含水率分布を示す。図より、石室の床面下の地盤の含水率は S2 が 9m の時の方が、S2 が 1m の時より高い。これは S2 が大きい時に、石室内表面の年間結露日数が大きくなることの原因になっているといえる。

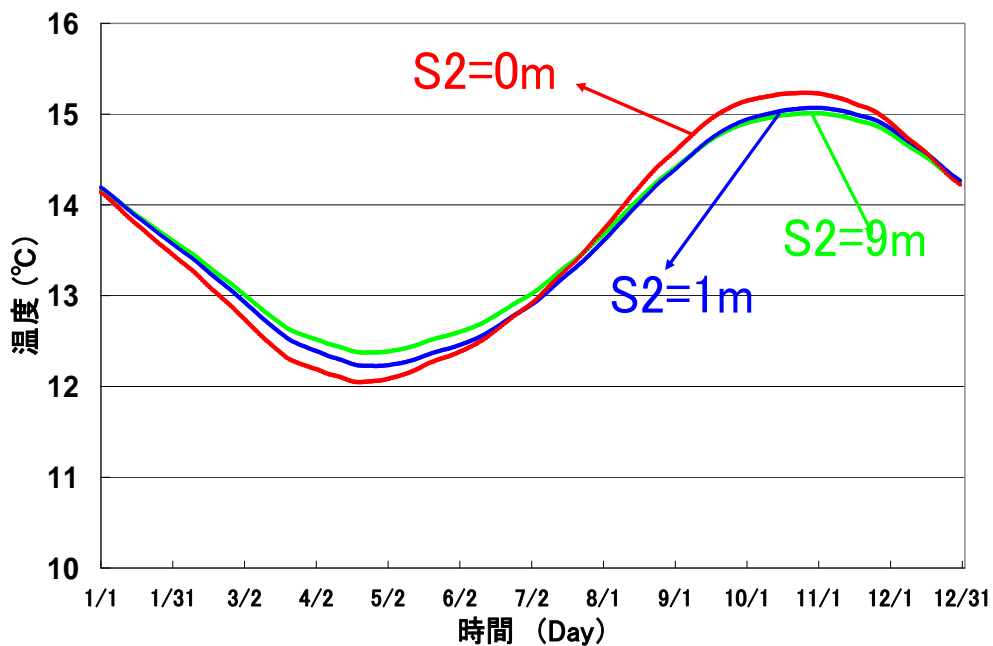


図 9-14 石室内温度変動の比較

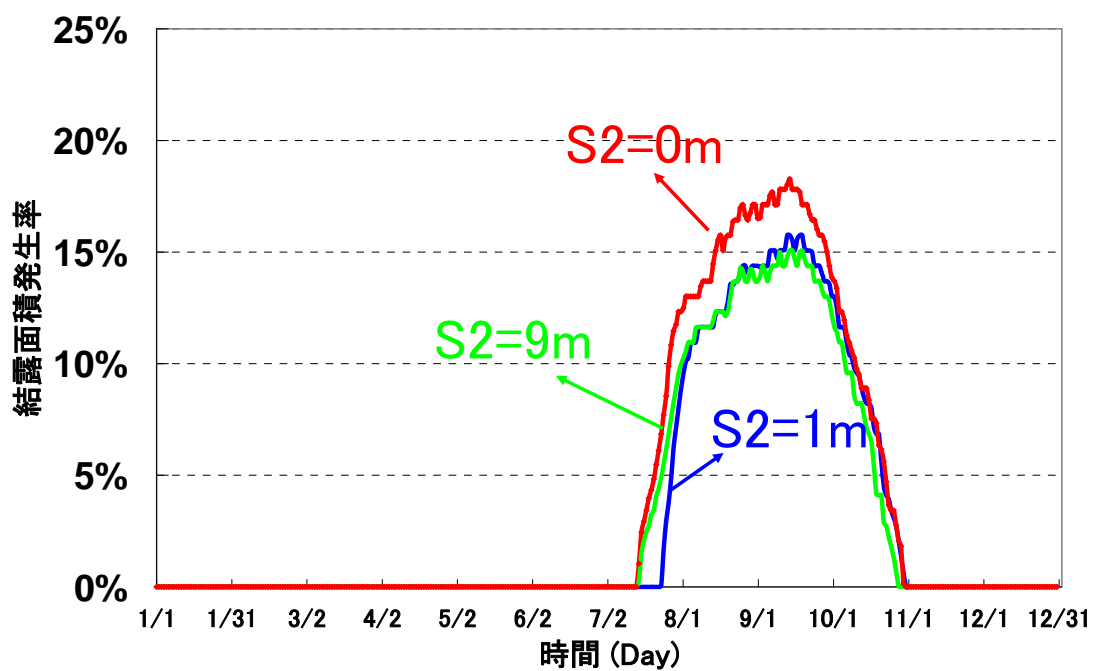


図 9-15 結露発生面積率の比較

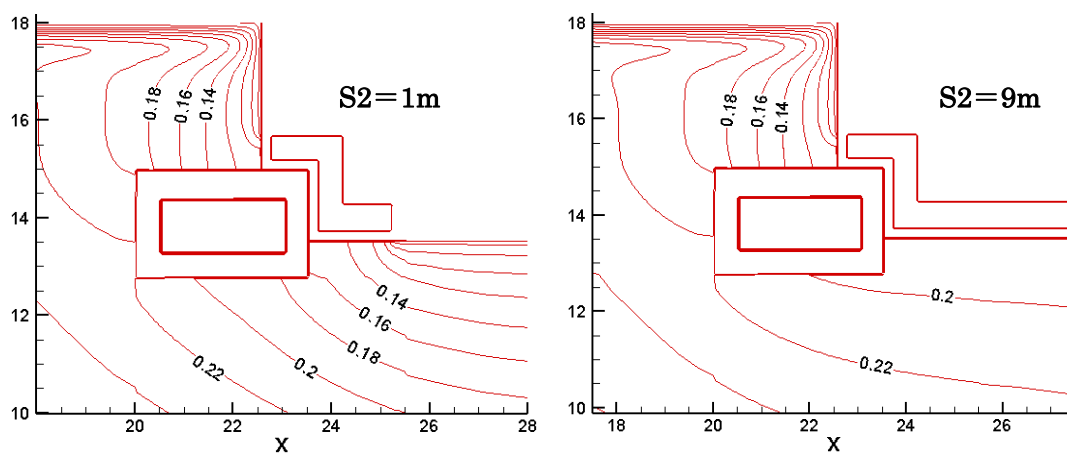


図 9-16 石室周囲の含水率分布(8月15日 PM12:00)

2) 保存対策の効果の検討

表 9-6 より、S2 の違いによる、石室壁表面の年間最低相対湿度と年平均温度の差は小さいが、年間最高温度は、S2 が長くなるにつれて下がること分る。一方、石室壁表面の年間結露日数は、S2 が 1 m の場合に最小値をとる。以上をまとめると、結露発生抑制の観点から、発掘部位の水平面に伸ばす断熱材と覆土の長さは 1m 程度あればよいと考えられる。

表 9-6 評価指標の結果

ケース	結露日数 (Day)	壁温最高値 (°C)	最低相対湿度 (%)	年平均温 度(°C)
S2=0m	107	15.3	99.2	13.63
S2=0.5m	100	15.2	99.2	13.62
S2=1m	98	15.1	99.3	13.63
S2=9m	105	15.1	99.3	13.67

9.6 被覆材料の熱抵抗の影響

9.6.1 解析対象

ここでは、覆土の厚さは一定とし、断熱材の熱抵抗を変化させた検討を行い、露出部位の熱抵抗が評価指標に与える影響を明らかにする。ここで考える露出部位の熱抵抗は、露出部位を覆う土と断熱材を併せた熱伝導抵抗である^{注1)}。前節の結果から、露出部位の覆土の下に断熱材を設置し、鉛直面と水平面に伸ばす断熱材と覆土の長さを S1=0.5m, S2=1m とした場合に対して、断熱材の厚さを変えず、熱伝導率を 0.008~0.18[W/mK]まで変化させることで、熱抵抗を 3.9~27.8^{注2)} [m²K/W]まで変化させた。

9.6.2 石室露出部位への被覆材料の熱抵抗の影響

図 9-17, 9-18 に、露出部位の熱抵抗と評価指標の関係を示す。これらの図より、熱抵抗が大きくなると、年間結露蓄積量、年間結露日数、年間最高温度は小さくなり、年間最低相対湿度は高くなること分かる。壁面のカビ等微生物の発育の抑制、乾燥剥離の抑制の観点から、熱抵抗係数は大きいほど良いといえる。壁表面の結露は、露出部位の熱抵抗が 15[m²K/W]以上では非常に少なく、28[m²K/W]以上になると発生しない。壁表面の湿度低下は、熱抵抗が 10[m²K/W]以上で、0.5%以内に抑えられる。この壁表面結露がなくなる場合の熱抵抗が、発掘前の石室内温湿度変動に近い安定した環境に相当すると考えられる。

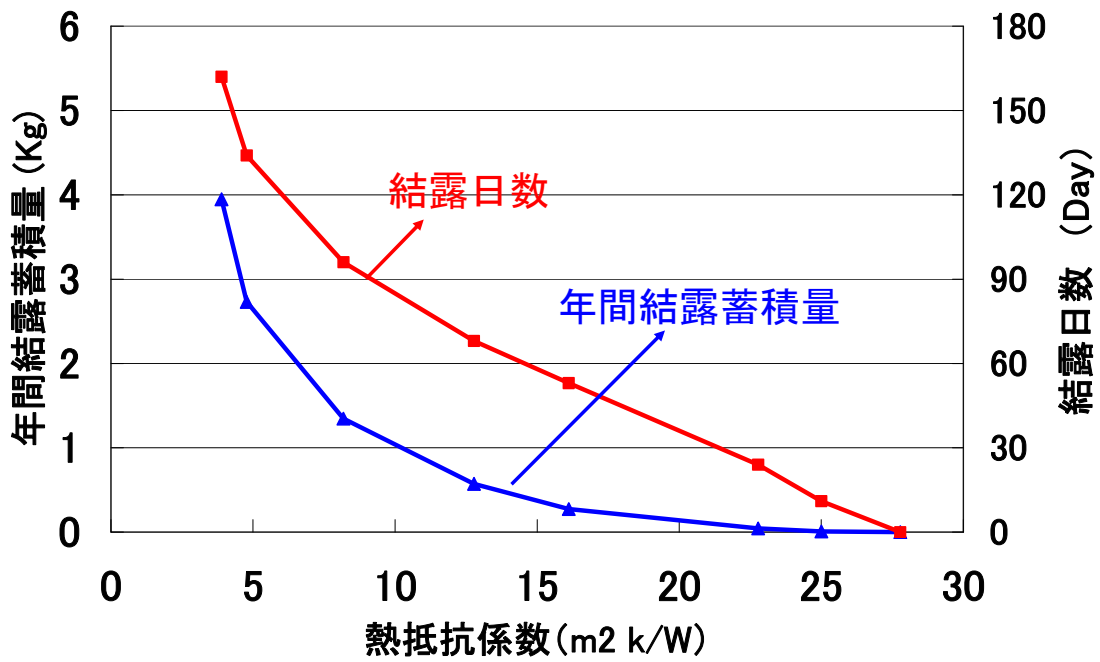


図 9-17 結露日数、年間結露蓄積量と熱抵抗の関係

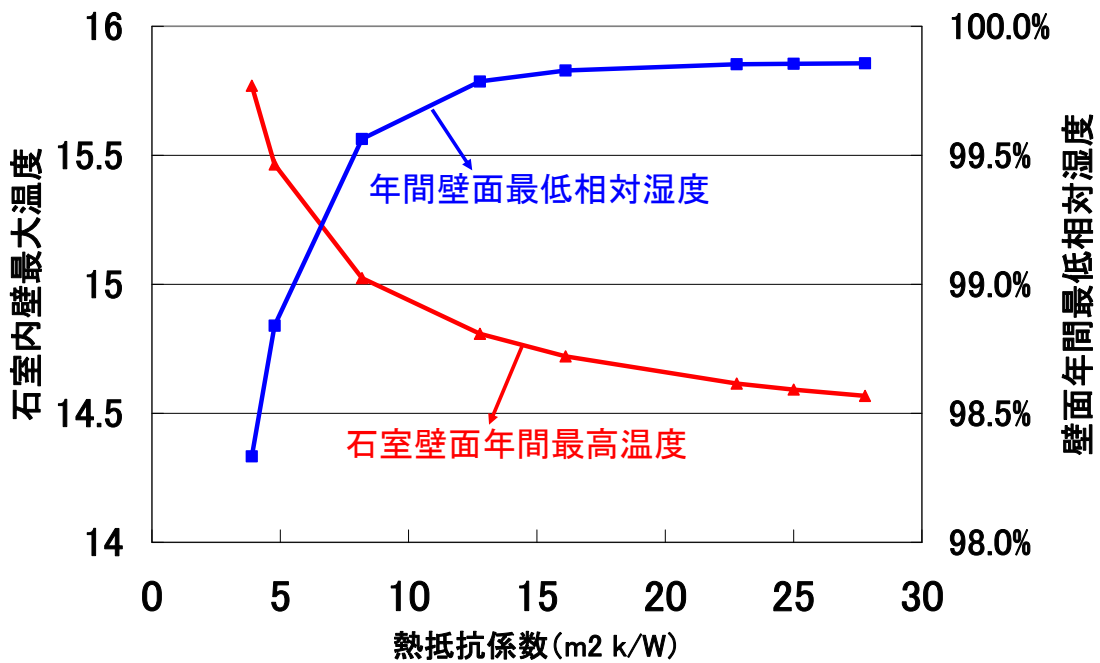


図 9-18 壁面年間最低相対湿度と年間最高温度と熱抵抗の関係

9.7 古墳発掘後の露出部位の保存対策について

以上の検討から、古墳発掘後の露出部位への被覆材料の選択においては、熱抵抗が最も重要な要素といえる。

解析対象とした高松塚古墳の場合、露出部位への被覆材料の発掘部位の鉛直面と水平面に伸ばす被覆材料の適切な長さはそれぞれ 0.5m, 1.0m である。表 9-7 より、発掘の露出部位の被覆材料として硬質ウレタンフォーム保温板（熱伝導係数：0.025 W/(m k)）を用いて、壁表面の結露の抑制のためには、被覆材料の厚さは 0.4m 以上で良いと考えられる。壁表面の湿度低下の抑制のためには、被覆材料の厚さが 0.25m 以上で、0.5%以内に抑えられる。被覆材料として、土壌（熱伝導係数：0.14 W/(m k)、相対湿度：80%）を用いる場合、壁表面の結露の抑制のためには、被覆材料の厚さは 2.1m 以上で良いと考える。壁表面の湿度低下の抑制のためには、被覆材料の厚さが 1.4m 以上で、0.5%以内に抑えられる。

表 9-7 S1 の違いによる評価パラメータの比較

被覆材料	壁表面の結露の抑制の厚さ	壁表面の湿度低下の抑制（0.5%以内）の厚さ
硬質ウレタンフォーム 保温板 (熱伝導率：0.025 W/(m k))	0.4m	0.25m
土壌 (熱伝導率：0.14 W/(m k)、 相対湿度：80%)	2.1m	1.4m

9.8 第9章のまとめ

本章では、発掘調査直後の古墳壁画の保護のため、発掘により露出した部位に断熱材を設置することを想定した場合に、断熱材の被覆部位の吸放湿性、熱容量と熱抵抗が石室湿度に与える影響を、熱水分同時移動解析により検討した。なおここでは仮保護施設がある状態を前提とし壁画劣化抑制の効果を評価するパラメータとしては結露日数、結露蓄積量、壁面温最高値、最低相対湿度を用いた。得られた結果は以下の通りである。

- 1) 断熱材の厚さを、石室内の調査・点検が可能となるように 70cm 程度の厚さに固定することを前提とすると、その熱容量が壁画の劣化に与える影響は小さい。
- 2) 非透湿性の断熱材を透湿性の土で覆う方法が、その逆の設置より、壁画劣化の抑制に効果がある。
- 3) 結露発生抑制の観点から、発掘部位を覆う覆土と防湿層を有する断熱材の面積は適切な大きさがある。ここで検討対象とした高松塚古墳では、発掘部位の鉛直面と水平面に伸ばす覆土と断熱材の適切な長さはそれぞれ 0.5m, 1.0m であった。
- 4) 発掘による露出部位を覆う材料の熱抵抗が大きいほど、壁画劣化の抑制に効果がある。ここで検討対象とした高松塚古墳では、乾燥の抑制に対しては 10[m²K/W]以上、結露発生の抑制に対しては、15[m²K/W]以上の熱抵抗が必要であった。

注 1) ここで扱う熱抵抗は 断熱材の熱抵抗+覆土の熱抵抗である。熱抵抗計算における覆土の熱伝導率は、覆土全体の年間平均値を用いる。

注 2) 高松塚古墳発掘調査後に実施された保存対策の熱抵抗は 3.9[m²K/W]に近い。

第9章の参考文献

- [1] 熱物性学会編：熱物性ハンドブック、pp201,養賢堂(2000)

第10章 結論

本研究では、古墳発掘前後の時期に注目して、石室発掘前から、発掘時期、現地保存、そして保存施設稼働までに行われた保存対策や環境制御及び環境条件の変化が石室内温湿度環境に与えた影響を明らかにすることを目的とした。高松塚古墳を検討対象として、石室内の温湿度測定値や記録などを元に、熱水分同時移動理論を基礎とする数値解析によって石室内温湿度環境を推定する。モデル化や境界条件などの設定には、過去の石室周囲の環境や内部作業などに関する測定値、記録を可能な範囲で考慮するが、不明な点は推定を行う。以上の検討によって、古墳発掘時に適切な保存対策や環境制御方法の提案を行う。

以下に、本研究の成果を要約する。

第1章では、既往の文化財の保存環境に関する研究をレビューし、本研究の研究背景と研究目的を示した。

第2章では、高松塚古墳の概要と、発掘調査とその時に行われた保存対策について述べ、石室内温湿度等の測定値について分析を行った。

外気温度については、1950年代～1987年の年平均値は14℃台に収まっており、年変化は小さい。年間降水量は特に増加していない。古墳の石室内中央部、上中下の位置の室空気の温度差は小さく0.2℃以下になっており、ほぼ一様とみなせる。1972年は石室床上で、最低温度は4月中旬で11℃、最高温度は10月中旬で17℃であった。1973年には石室内温度は 13.6 ± 2.8 で、5月初めに最低温度を、10月から11月初めに最高温度になっている。また石室内の相対湿度は、発掘直後ほぼ100%であり、石室内に人が立ち入ると90%程度に低下した。

第3章では、古墳壁画の劣化現象と石室内の温湿度環境との関係について整理し、保存対策の効果を判断する温湿度等の評価指標を提示した。

微生物の生育に関わる要因には、温度・湿度・酸素濃度・栄養分・PH等々があるが、高松塚古墳壁画の場合、石室内相対湿度がほぼ99%以上の高湿度条件での保存が前提となった。この前提の下で、カビ等生物の成長を抑制するには、壁画表面での結露を防ぎ、高湿度環境を避け、温度を低く保つことが望ましい。しかし、相対湿度が低くすぎると、脆弱な漆喰層の亀裂、剥落という物理的劣化が発生する。本研究では、壁画の劣化の程度を評価するために、以下の4つの評価指標を用いた。

- (1) 石室内壁表面の期間最高温度
- (2) 石室内壁表面の期間平均温度
- (3) 石室内壁表面の期間最低相対湿度

(4) 石室内壁表面の結露発生面積率（期間結露日数）

ここでは、石室内壁表面の期間最高温度、期間平均温度、期間結露日数と期間結露発生面積が大きい場合、カビ等微生物による生物的劣化の危険度が高くなると考える。また、石室内壁表面の年間最低相対湿度が低い場合、乾燥剥離による物理的劣化の危険度が高くなると考える。これらの評価指標は、以後の6章以降の検討に用い、この指標は、解析結果の相対的な比較に用いる。

第4章では、地下構造物及び周辺地盤の熱水分性状を解析する際の基礎となる地盤、建築壁体、仮保護施設及び地下空間と仮保護施設空間の熱水分の収支を記述する基礎式を提示した。また、外気と接する墳丘部地盤表面に竹林がある状況を想定し、植生の熱・湿気抵抗、日射遮蔽などが考慮した地表面境界の熱水分移動モデルを作成した。更に、基礎方程式の差分化、墳丘部の不整形な形状を取扱う数値解法について提案を行った。

第5章では、解析に用いる外界気象条件と、墳丘地盤、凝灰岩、仮設覆屋躯体、断熱材の熱水分物性値を示した。外界気象条件については、特に日積算値しか得られていない日射量と降雨量の気象データから毎時の値を推定する方法について述べた。また、墳丘地盤の熱水分物性値は、現地の版築について測定された平衡含水率、熱伝導率、また平衡含水率と粒径分布の測定値から推定された水分伝導率を示した。石室を構成する凝灰岩の熱水分物性値は、同種の岩について測定された熱伝導率と、細孔径分布を用いて推定した平衡含水率、透水係数の測定値を元に推定した水分伝導率を示した。

第6章では、高松塚古墳発掘時の石室内の温湿度変動について検討した。3次元解析による石室内温湿度環境の推定結果を第2章の測定値と比較し、石室内温湿度の変動を再現できることを示した。次に、高松塚古墳発掘から保存施設稼働の石室内温湿度や周辺地盤の熱水分場を施された種々の保存対策との関連で明らかにした。得られた結果は以下のようによまとめられる。

古墳発掘直後に露出する部位に施された覆土の厚さの違いは、石室内温度の位相遅れと振幅に影響を与えるが、夏期の石室内湿度への影響は小さく、年平均値にはほとんど影響を与えない。仮保護施設と外気との換気回数の違いは、石室内温度の年平均値と年振幅に影響を与えるが、石室内湿度に与える影響は小さい。発掘後露出する部位への覆土の厚さは50cm程度、仮保護施設と外気との換気回数の平均値は1~2回/h程度であったと推定される。

石室内の結露と乾燥については、以下の性状を明らかにした。6月中旬から11月初めにかけて、北壁とその近くの天井及び東西側壁と床石付近に結露が起きていた可能性が高い。7月初めから12月初めにかけて、石室南壁の室内側表面の天井隅角付近では乾燥が生じ、石室内表面の最低含水率が0.13 (m³/m³)まで低下したと推定される。

また、本章では3次元解析による計算負荷を軽減するために墳丘、石室を2次元モデル

とした場合の解析結果を3次元解析モデルの結果と比較し、石室内温湿度、結露の性状の把握の観点から2次元解析の精度の検討を行った。その結果、石室内温湿度性状、結露性状について、2次元解析と3次元解析の結果は等しいことが分かった。ただし、2次元解析は、3次元解析より、石室内最高温度をやや高く、石室内表面湿度をやや低く、石室内表面結露面積をやや大きく見積もり、劣化危険度を評価する上で危険側の結果をあたえることが明らかとなった。以上より、次章以降では、2次元解析による検討を行った。

第7章では、高松塚古墳の石室の発掘季節に着目して、発掘季節の違いが壁画の劣化に与えたであろう影響を石室内の温湿度性状、結露性状の観点より明らかにし、適切な発掘季節を検討した。得られた結果は以下の通りである。

石室内温度が外気温より低くなる季節に発掘すると、石室南側壁面とその近くの天井では乾燥の、石室北側壁面では結露発生の可能性が高まり、劣化危険度が高くなるため、発掘季節に適しない。石室内の温度上昇、結露発生、乾燥剥離を抑制する観点から、一番適切な発掘季節は秋の終わり頃であり、高松塚古墳の場合、11月であった。

発掘時に、石室と外気との間の換気量が大きくなると、石室内表面で結露発生が減り、石室内表面の乾燥化が促進される。結露抑制と乾燥剥離の両方を抑制する観点からは、石室と外気の間では適当な換気があるのが良いといえる。

第8章では、高松塚古墳において、発掘前の石室温湿度性状を明らかにするとともに、発掘直後に施された応急的な保存対策の効果について検討した。個々の保存対策についての解析結果を比較することで、石室発掘後になされた保存対策の効果を明らかにした。

発掘前の石室内温度の変動は小さく、石室内相対湿度は年間を通じて100%近くであるが、結露発生時間は短かったと考えられる。発掘後に比して、発掘前の石室内温湿度環境の方がカビ等微生物の成長や乾燥剥離の危険性は少なかったと考えられる。発掘後に何も保存対策を講じなければ、夏期に石室温度は約22℃まで上昇し、南側壁面とその近くの天井付近の湿度は90%を下回るまで乾燥し、石室内では年間200日以上結露が発生したと推定される。カビ等微生物の成長抑制と乾燥剥離防止の観点から、壁画保存に対して危険な状況と考えられる。

発掘直後に行われた応急的な保存対策の効果については、露出された石室に覆土を行う対策は、仮保護施設を設ける対策より、石室内温度上昇の抑制と室内表面の乾燥抑制に関して有効である。石室の外気に露出された部位に断湿と覆土を行い仮保護施設で覆った場合に、石室の最高温度は最も低く、石室室内側表面の湿度低下は最も低くなった。これは現実に行われた対策に相当し、カビ等微生物の成長抑制と乾燥剥離防止の観点から、最も効果的であったと考えられる。なお、この対策において防湿層の有無の影響は小さかった。しかし、この保存対策でも、夏期の北側床面近傍の高湿化と結露発生を抑えられない。この時期の結露抑制のために別な対策が必要である。

第9章では、第8章で検討した保存対策との関連で、発掘により露出した部位を保護する材料の選択という観点より、吸放湿性、熱容量、熱抵抗が石室内温湿度に与える影響について検討を行った。それによって、古墳発掘後の露出部位の適切な保存対策を検討した。得られた結果は以下のようにまとめられる。

断熱材の厚さを、石室内の調査・点検が可能となるように70cm程度の厚さに固定することを前提とすると、その吸放湿性の有無と熱容量の大きさが壁画の劣化に与える影響は小さく、熱抵抗が最も重要な要素といえる。

本研究で検討対象とした高松塚古墳では、露出部位の被覆材料の効果的な厚み方向の熱抵抗として、乾燥の抑制に対しては $10[\text{m}^2\text{K}/\text{W}]$ 以上、結露発生の抑制に対しては $15[\text{m}^2\text{K}/\text{W}]$ 以上が必要であった。結露発生抑制の観点から、発掘部位を覆う覆土と防湿層を有する断熱材の面積には最適値がある。高松塚古墳では、発掘部位の鉛直面と水平面方向実際に施したより覆土と断熱材の長さをそれぞれ0.5m, 1.0m伸ばすことが適切であると考えられる。発掘の露出部位の被覆材料として硬質ウレタンフォーム保温板（熱伝導係数： $0.025 \text{ W}/(\text{m k})$ ）を用いて、壁表面の結露発生の抑制のためには、被覆材料の厚さは0.4m以上で良いと考えられる。壁表面の湿度低下の抑制のためには、被覆材料の厚さが0.25m以上で、0.5%以内に抑えられる。被覆材料として、土壌（熱伝導係数： $0.14 \text{ W}/(\text{m k})$ 、相対湿度：80%）を用いる場合、壁表面の結露発生の抑制のためには、被覆材料の厚さは2.1m以上で良いと考える。壁表面の湿度低下の抑制のためには、被覆材料の厚さが1.4m以上で、0.5%以内に抑えられる。

以上のように、高松塚古墳を対象として、石室の発掘前、発掘時期、そして保存施設稼働までに行われた保存対策や環境条件の変化が石室内温湿度に与えたであろう影響を明らかにした。また、古墳の壁画保存にとって、適切な発掘季節や、断熱材を用いた保存対策の改善案の提案を行った。

今後の課題としては、ここで提案した保存対策を、規模の違う他の古墳へ応用することが考えられる。また、石室内温湿度がカビ成長と乾燥剥落に与える影響を明らかにし、石室内温湿度環境と壁画劣化との関係の定量化を行う必要がある。

本研究に関する論文

査読付論文

1. 李 永輝、小椋大輔、鉾井修一、石崎武志：高松塚古墳の発掘前後の石室内温湿度環境変化と保存対策の効果の解析，日本建築学会環境系論文集（投稿中）
2. 小椋大輔、鉾井修一、李 永輝、石崎武志：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.1-10，2009
3. 小椋大輔、鉾井修一、李 永輝、石崎武志：過去の高松塚古墳石室内の温湿度変動解析（2）墳丘部表面の植生等の変化が石室内温度変動に与える影響，保存科学，No.49，pp.73-85，2010
4. 小椋大輔、鉾井修一、李 永輝、石崎武志：過去の高松塚古墳石室内の温湿度変動解析（3）吸放熱パネルへの送水温度および入室が石室内温湿度変動に与える影響，保存科学，No.49，pp.87-96，2010

学会論文

1. 李 永輝、小椋大輔、鉾井修一、石崎武志：古墳壁画の保存に関する研究 その5）古墳壁画発見時の熱性状解析，日本建築学会学術講演梗概集，D-2，pp.273-274，Sep，2008
2. Yonghui LI, Daisuke OGURA, Shuichi HOKOI, and Takeshi ISHIZAKI: Numerical analysis of heat behavior of stone chamber after excavation, THE 16TH SEMINAR OF JSPS-MOE CORE UNIVERSITY PROGRAM ON URBAN ENVIRONMENT, Vol.2008, pp.385-392, Oct, 2008
3. 小椋大輔、李 永輝、鉾井修一、石崎武志：保存施設稼働時の高松塚古墳石室内の温湿度変動の解析～気象条件の影響，文化財保存修復学会第31回大会研究発表集，No.31，pp.44-45，Jun，2009
4. 小椋大輔、李 永輝、鉾井修一、石崎武志：発掘直後の高松塚古墳石室内の温湿度変動の解析～仮保護施設と覆土の影響，文化財保存修復学会第31回大会研究発表集，No.31，pp.108-109，Jun，2009
5. 李 永輝、小椋大輔、鉾井修一、石崎武志：古墳壁画の保存に関する研究（その2）発掘直後の仮保護施設の影響，日本建築学会学術講演梗概集，D-2，pp.305-306，Aug，2009

6. 李 永輝、小椋大輔、鉾井修一、石崎武志：古墳壁画の保存環境に関する研究（その2）発掘直後の仮保護施設の影響，日本建築学会近畿支部研究報告集環境系，No.49，pp.209-212，Jun, 2009
7. 李 永輝、小椋大輔、鉾井修一、石崎武志：古墳壁画の保存環境に関する研究（その4）発掘直後の石室の保護材料の設置方法の検討，日本建築学会近畿支部研究報告集環境系，No.50，pp.205-208，Jun, 2010
8. 小椋大輔、李 永輝、鉾井修一、石崎武志：保存施設稼働時の高松塚古墳石室内の温湿度変動の解析～墳丘部表面の植生等の変化が石室内温度変動に与える影響，文化財保存修復学会第32回大会研究発表集，No.32，pp.122-123，Jun, 2010
9. 小椋大輔、李 永輝、鉾井修一、石崎武志：発掘直後の石室壁画保存のための石室保護材料の設置方法の検討，日本文化財科学会第27回大会研究発表集，No.27，pp.298-299 Jun.2010
10. 李 永輝、小椋大輔、鉾井修一、石崎武志：古墳壁画の保存環境に関する研究（その4）発掘直後の石室の保護材料の設置方法の検討，日本建築学会学術講演梗概集，D-2，Sep.2010（印刷中）

謝辞

2007年に中国から日本に来て、京都大学博士課程に入学して以来3年にわたり、終始一貫して懇切かつ丁寧なご指導ご鞭撻を賜りました京都大学大学院工学研究科建築学専攻・銚井修一教授に心より深く感謝と敬意を表します。日本へ来る前から現在に至るまでの間、銚井先生には、日本での生活に対するご配慮、研究に関するご指導、さらには生き方に関する示唆に富んだご指導を頂きました。ご多忙の中、研究への考え方、研究への姿勢など、数多くのご指導を頂きました。また、とらわれない自由な発想で研究に取り組むことの大切さを教えて頂きました。

京都大学大学院工学研究科建築学専攻・小椋大輔助教には、京都大学博士課程に入学して以来、ご多忙の中、日頃から終始熱心で丁寧なご指導を頂きました。小椋先生には、熱環境工学の基礎、研究の進め方、さらには日本語の使い方まで、公私にわたる全ての段階においてご教示を賜りました。心から深く感謝と敬意を表します。

京都大学大学院工学研究科建築学専攻・原田和典教授には、ご多忙の中、本論文の審査を頂きました。原田先生には、大学院ゼミやドクターセミナーなどを通して有益な示唆を頂きました。論文の構成や表現方法そのまとめ方などについてご指導頂きました。ここに深く感謝の意を表します。

京都大学大学院工学研究科建築学専攻・高橋大弐教授には、ご多忙の中、本論文の審査を頂きました。高橋先生には、ドクターセミナーあるいは学会などでご指導を賜りました。ここに深く感謝の意を表します。

東京文化財研究所保存修復科学センター・石崎武志センター長には、高松塚の測定データをご提供頂き、当時の記録、状況の情報提供や、解析に関するご援助、ご助言を頂きました。厚く御礼申し上げます。

京都大学大学院工学研究科建築学専攻・木内隆子技官には、生活や勉強について、たくさんのご助言を頂きました。また、近藤修平氏、多羅間次郎氏、張諾莎氏をはじめ、当時銚井・原田研究室の皆様には、大学院ゼミ、ドクターセミナーや勉強会を通して、公私にわたりご助言を頂きました。厚く御礼申し上げます。

最後に、私事で恐縮ではありますが、留学際に、温かく見守ってくれた両親、兄、妹。そして、特に日本で終始心遣いをしてくれた妻に深く感謝致します。