

平城宮跡遺構展示館の

露出展示改善に関する検討委員会報告書

平成 29 年 3 月

文化庁文化財部記念物課

目 次

はじめに	1
第1章 平城宮跡遺構展示館の露出展示改善に関する検討委員会の設置	3
第1節 委員会設立に至る経緯	3
第2節 平城宮跡遺構展示館の露出展示改善に関する検討委員会について	4
第2章 平城宮跡遺構展示館の建設経緯	6
第3章 平城宮跡遺構展示館における露出展示遺構の保存環境に関する研究	11
第1節 平城宮跡遺構展示館の地理的環境と概要	11
第2節 遺構展示館における遺構の劣化状態調査	21
第3節 遺構展示館と周辺地盤における環境調査	42
第4節 熱・水分・溶質移動に関する基礎理論と解析方法	86
第5節 温湿度解析モデルによる遺構展示館の室内環境の再現	116
第6節 遺構展示館南棟における水の浸み出しと褐色沈殿物に関する調査	147
第7節 遺構展示館周辺地盤における水分移動の再現と酸化還元環境の解析	156
第8節 温湿度解析モデルによる室内環境設計の検討	172
第9節 遺構展示館環境改善策の効果に関する検証	189
第4章 まとめ	193

はじめに

1960 年代以降、日本では大規模な国土開発がおこなわれ、それにともない遺跡の発掘件数が急増した。とりわけ考古学的に高い価値を有する重要な遺跡では、出土した遺物の保存はもちろんのこと、不動産の遺跡についても保存が図られると同時に、これらを広く公開する取り組みがおこなわれてきた。近年では、平成 19 年に文化庁がこれまでの膨大な件数にのぼる発掘調査によって出土した遺物や遺跡、すなわち埋蔵文化財の保存を図りつつ、その積極的な活用を進めることを提唱したこともあって、全国的に遺跡の整備が活発に進められており、遺跡の整備に対する社会的な需要はこれまで以上に高まっていると言える。その具体的な整備手法としては、住居などの建物を復原して展示する方法や、柱の位置に植樹をおこなって地下の遺構を表示する方法など様々な手法が採られる。なかでも、遺構を公開する“遺構の露出展示”は、遺跡の存在と臨場感、および内容や価値を伝えるのに最も効果的な公開手法の一つと考えられ、横浜市の三殿台遺跡や千葉市の加曽利貝塚など、遺跡整備の初期の段階から実践されてきた。

露出展示される以前の状態、すなわち地盤内部で埋蔵された状態にある遺跡では、温度変化や含水状態変化の日周期あるいは年周期の振幅が比較的小さく、一般に安定した環境にあると考えられる。しかし、露出展示されている遺構では、それを取り巻く環境は埋蔵環境下のものとは大きく異なり、遺構にとっては極めて過酷な環境にあると言って過言ではない。一般に、遺構の露出展示をおこなう場合では、日射や風雨など、外界の気象条件が遺構におよぼす影響を緩和することを目的として、覆屋（おおいや）と呼ばれる保護施設が設けられ、その内部において遺構の保存と公開が図られる。しかし、露出展示によって遺構表面土壌の温度変化や含水状態変化の振幅は極めて大きなものに変化するため、たとえば適度な日射が供給されることで、地衣類、蘚苔類やカビが繁茂した結果、遺構の汚損が進行する例や、過度に土壌の水分量が低下した結果、遺構表面土壌が塑性を失って崩落する例、さらには水分蒸発が卓越するため塩類が析出することで遺構表面の粉状化が進行し、不可逆的な劣化に至る例も少なくない。当然のことながら、遺跡の“保存と活用”においては保存が優先されなければならない、遺跡の保存が担保されない限り、その活用がなされてはならない。したがって、遺跡を露出展示しつつ、安定な状態を維持するためには、遺跡の露出展示を実施した場合に生じる遺構の劣化現象を予測するとともに、劣化の発生、進行を抑制するための対策を予測に基づいて検討することが不可欠と考えられる。そして、そのためには遺跡の劣化が発生、進行する機構（メカニズム）についての十分な理解が求められる。

本研究で調査研究対象とする現在の平城宮跡遺構展示館（以下、遺構展示館と略記する）の遺構展示棟は 2 棟あり、1965 年に北棟が、次いで 1967 年に南棟が開館した。既に露出展示されてから約 50 年の年月が経過した遺構面には、蘚苔類の繁茂による汚損や局所的な塩の析出による磚や石材の劣化が生じている。これらの劣化現象はいずれも

遺構の土壌中、あるいは土壌と大気の間での熱や水分の移動を介して生じる。したがって、遺構周辺地盤や覆屋内の雰囲気といった、遺構展示館の周辺環境中の熱や水分の移動について環境調査をおこない、その環境条件が遺構の劣化現象に対しておよぼす影響について検討することが、遺構展示館で露出展示されている遺構の保存には不可欠と考えられる。そこで、本研究では遺構展示館において遺構に生じる物理的、化学的、生物学的な劣化現象の種類、その発生時期について継続的な目視観察から整理するとともに、外界気象条件と覆屋内の温熱環境、および遺構地盤の熱水分環境について実測調査をおこない、遺構展示館の周辺環境が遺構の劣化におよぼす影響、および劣化の進行を抑制する環境条件について検討した。検討にあたっては、覆屋内温熱環境および遺構地盤の水分環境について熱水分同時移動理論に基づくモデルを作成し、数値解析によって現況の熱水分移動性状の把握をおこない、さらに周辺地盤表面の改良や覆屋の改修を視野に入れ、適切な環境条件を実現し得る改善策の提案を試みた。また、環境条件の改善策の中で幾つかの手法については、遺構展示館現地において一時的な施工や現地試験をおこない、その効果について検証をおこなった。

遺跡はそれらが立地する周辺地形や土層構造、あるいは外界気象条件などの環境条件が各々の遺跡に固有のものである。さらに、遺跡を構成する材料、たとえば土壌や石材などの多孔質材料では、一般に熱や水分の移動性状は各々異なる値をとるため、環境が遺跡の劣化におよぼす影響も各々の遺跡に固有のものである。したがって、博物館内で展示、収蔵される遺物とは異なり、遺跡の保存に関しては残念ながら画一的な保存方法の提言は極めて困難であり、本研究において提言する遺構保存のための環境制御法は、平城宮跡遺構展示館を対象としたものである。しかしながら、それらの提言を得るまでに遺構展示館において実施した、1) 遺構の劣化状態調査、2) 遺構周辺の環境調査、そして、3) 遺構の劣化進行に関する予測と、4) それらの劣化を抑制する環境制御法を検討するために実施した、遺構周辺地盤モデルの熱水分移動計算、これら一連の調査研究の手続きは、遺跡の保存を検討する上で普遍的なものと考えられる。

本研究が平城宮跡遺構展示館において露出展示されている遺構の保存に寄与することはもとより、今後、整備される他の遺跡において、遺構の露出展示保存を検討する際の一助となれば幸いである。

第1章 平城宮跡遺構展示館の露出展示改善に関する検討委員会の設置

第1節 委員会設立に至る経緯

平城宮跡遺構展示館では北棟（建設当時、第1号覆屋）と南棟（同第3号覆屋）において遺構の露出展示が行われている。北棟においては、露出した遺構面の西側と東側で水分の湿潤と乾燥の繰り返し、柱穴側面の崩落、盛土法面でのカビ類や蘚苔類の発生などが見られた。南棟においては、盛土と遺構面の境界への地下水の滲出、遺構面での蘚苔類の発生、長年の清掃による遺構面の土壌部分の削平、塼の劣化などが見られた（図1.1-1から1.1-4）。こうした課題は以前から認識されていたが、大きな問題とはならず、管理されてきた。

平城遷都1300年を翌年度に迎える平成21年度には、露出展示遺構の環境改善を図り、効果的な見せ方を実現するための基礎資料として、地下水の状況の詳細な把握と露出展示遺構への影響を把握することを目的として調査を行った。調査内容は調査ボーリング・現場透水試験・水位観測孔設置・自記水位計設置（各5地点）、室内土質試験・トレーサ試験・とりまとめ等（各1式）であった。

その後、文化庁文化財部記念物課では調査研究について予算化できたことにより、平



図1.1-1 南棟東部の遺構 北西から（1966年度）



図1.1-2 南棟東部の遺構 北西から（2012年）

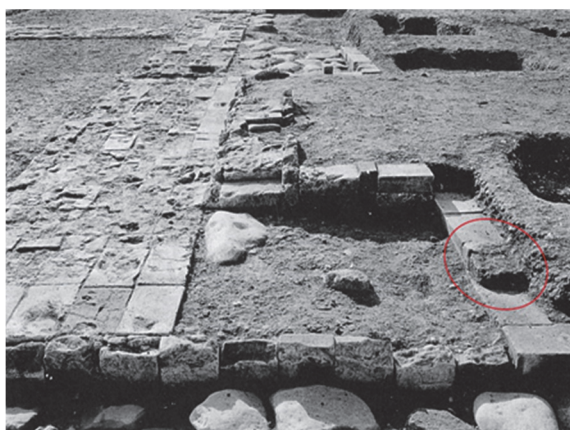


図1.1-3 南棟東部の遺構 北から（1966年度）



図1.1-4 南棟東部の遺構 北から（2012年）

成 23 年度から「平城宮跡遺構展示館の露出展示改善に関する検討委員会」を立ち上げて、事業を実施することとなった。

第 2 節 平城宮跡遺構展示館の露出展示改善に関する検討委員会について

1 設置要項

P 199 参照

2 検討委員会委員（カッコ内は年度）【カッコ内は専門】

舘野 和己	奈良女子大学古代学学術研究センター特任教授 (H23～H28)	【歴史学】
大脇 潔	元近畿大学文芸学部教授 (H23～H28)	【考古学】
鉾井 修一	京都大学名誉教授 (H23～H28)	【建築環境工学】
宮崎 毅	東京大学名誉教授 (H23～H28)	【土壌物理学】
三村 衛	京都大学大学院工学研究科教授 (H23～H28)	【地盤工学】
小野 健吉	和歌山大学観光学部教授 (H23～H25、H28)	【遺跡整備】
高妻 洋成	奈良文化財研究所埋蔵文化財センター保存修復科学研究室長 (H23～H25)	【保存科学】

3 運営体制

事務局は文化庁文化財部記念物課に置いた。（カッコ内は年度）

課長補佐	島崎 正弘 (H24)
	鈴木 修二 (H26～H27)
	田中 康成 (H28)
管理係長 (専門官、係員含む)	鳥居 省司 (H23)
	山崎 康司 (H25～H26)
	田中 康成 (H27)
	安藤 慧 (H28)
係員	甲田 安津子 (H23)
	井上 晶葉 (H24)
	池田 祥子 (H25)
	坂尻 望 (H26)
	沢 陽平 (H27～H28)
文化財調査官（整備部門）	内田 和伸 (H23～H26)
	中井 将胤 (H27～H28)
文化財調査官（史跡部門）	浅野 啓介 (H23～H28)

4 検討会の開催経過（開催回数、開催年月日、開催場所）

第1回	平成24年	2月10日	奈良文化財研究所
第2回	平成24年	6月28日	奈良文化財研究所
第3回	平成25年	11月27日	奈良文化財研究所
第4回	平成26年	6月26日	奈良文化財研究所
第5回	平成28年	1月29日	奈良文化財研究所
第6回	平成28年	6月24日	奈良文化財研究所
第7回	平成29年	1月23日	奈良文化財研究所

5 本報告書の作成

本報告書は、文化庁文化財部記念物課監修の下、奈良文化財研究所で編集をおこなった。執筆分担は以下の通りである。

中井 将胤	(文化庁)	はじめに、第1章 第2節、第4章
内田 和伸	(奈良文化財研究所)	第1章 第1節、第2章
脇谷草一郎	(奈良文化財研究所)	はじめに、第3章、第4章

第2章 平城宮跡遺構展示館の建設経緯

史跡整備では発掘調査の後、検出された遺構は通常埋め戻されるが、遺構そのものの保存を図りつつ展示する整備も行われる。平城宮跡の遺構展示館は奈良文化財研究所が平城宮跡整備主体になる前段階の昭和40年度から42年度に文化庁が設置したもので、遺構展示館としては初期のものである。遺構展示館は第一号覆屋から第三号覆屋、展示棟の四棟からなり、それらは廊下で繋がれている。遺構は発掘調査後に埋め戻され、さらに盛土した上に、これらの建物は建設されている。いずれも鉄骨造で、柱にH型鋼を使用し、壁体はコンクリートブロック積み、屋根はデッキプレートによる緩勾配とし、直線的で簡素なデザインとしている。

第1号覆屋（北棟）は、昭和39年度の第21次調査区、埴積基壇官衙地区北区にあたり、掘立柱建物群が重複して検出されている遺構を露出展示している。建築面積844㎡で、昭和40年度に建設された。内部は南半部を遺構展示、北半部は展示スペースとして復元模型や出土遺物を展示している。遺構露出部分では遺構を間近に観察できるように見学用のデッキを設けている。

第2号覆屋は、昭和39年度の第19次調査区、東大溝SD2700の西側の内裏東外郭北官衙地区にあたり、凝灰岩切石積の東西溝SD2000を展示する施設として建築面積は203㎡で、昭和41年度に建設された。しかしながら湧水が激しく、凝灰岩製の遺構に保存上の問題を生じたことから、昭和44年度までに埋め戻されたものと考えられ、現在は管理事務所、売店として利用している。

第3号覆屋（南棟）は、昭和39年度の第21次調査区、埴積基壇官衙地区南区にあたり、埴積基壇建物SB4900の北側柱と雨落溝を露出展示している。建築面積384㎡で、昭和42年度に建設された。後にコの字形の露出部の中央を南北に見学用ブリッジが架けられており、南面には大きなガラス戸をはめている。

一方、SB4900の南半部は、第3号覆屋の南側で基壇高60cm、埴積みは8段、階段は3級で推定し基壇復元をしている。覆屋室内の床面と復元した基壇上面がそろうように工夫している関係で、この一画の整備地盤は遺構面+80cm程度の周辺の整備地盤よりも高く整備されている。ここにはSB4900の南東にSB4880、南西にSB4890（推定される正殿）の基壇復元等が昭和44年度に奈良県によってなされている。後の昭和59年度にはSB4900の西にSA2940の築地堀の建物復元が奈良国立文化財研究所によってなされた。

展示棟は埴積基壇官衙地区北区にあたり、第1号覆屋と第3号覆屋の間に位置する。建築面積240㎡で、昭和42年度に建設された。埴積基壇官衙地区の遺構模型や復元模型、出土品などを展示している。展示棟西側の中庭部分は掘立柱建物跡が重複して検出されているところであり、生け垣の刈り込みによってそれを表現している。整備は昭和43年度に奈良県によってなされている。

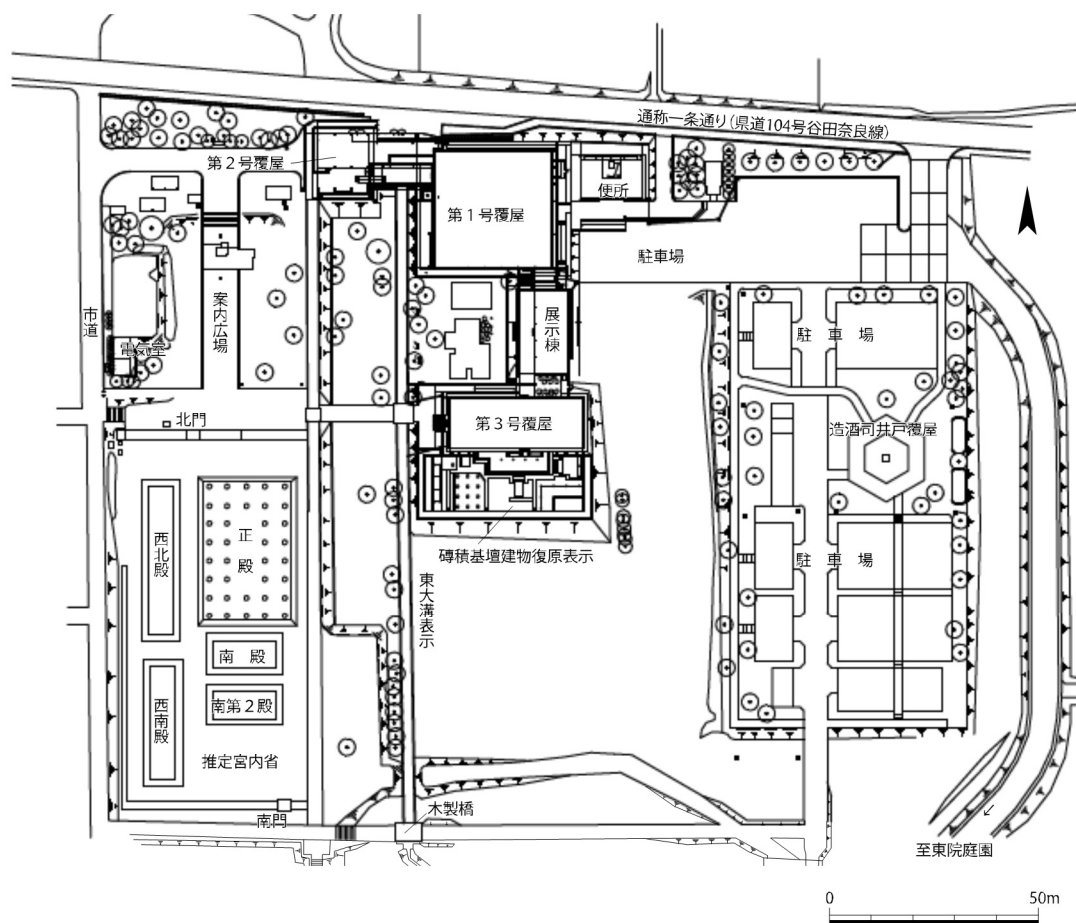


图 2-1 推定宮内庁地区、磚積基壇官衙地区・推定造酒司地区現状図



图 2-2 遺構展示館遠望（南西から 平成 11 年）



図 2-3 第 1 号覆屋の遺構露出展示
(南西から 平成 11 年)



図 2-7 展示棟の外観
(南西から 平成 21 年)

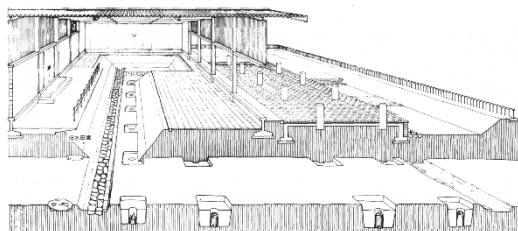


図 2-4 第 3 号覆屋透視図



図 2-8 展示棟の内部 (平成 21 年)



図 2-5 第 3 号覆屋の内部
(西から 昭和 49 年)

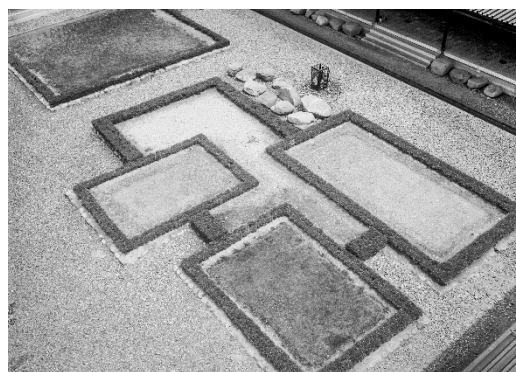


図 2-9 展示棟中庭の建物遺構の表示
(南西から 昭和 54 年)



図 2-6 磚積基壇建物の復原表示
(南東から 昭和 60 年)

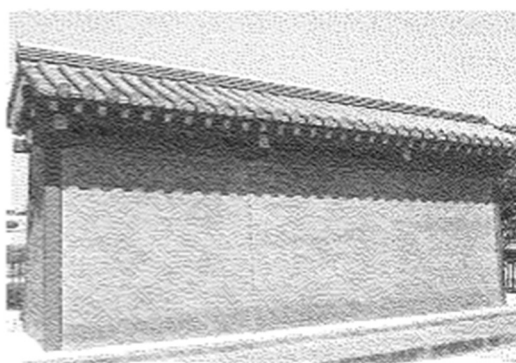


図 2-10 築地塀の SA2940 復原
(南東から 昭和 60 年)

参考文献：『平城宮跡整備報告』奈良文化財研究所 2016

図版出典：遺構展示館周辺現況図 上記参考文献 p. 108

遺構展示館遠望 上記参考文献 p. 108

遺構展示館現況 上記参考文献 p. 109

遺構展示館平面図 出典：『平城宮跡整備報告』2016 p. 110

第3章 平城宮跡遺構展示館における露出展示遺構の保存環境に関する研究

第1節 平城宮跡遺構展示館の地理的環境と概要

1 はじめに

本節では、第3章で記す各節の内容および関連をフローチャート（図 3.1-1）で示すとともに、平城宮跡遺構展示館周辺の地質的、地理的条件、および遺構展示館の概要について述べる。

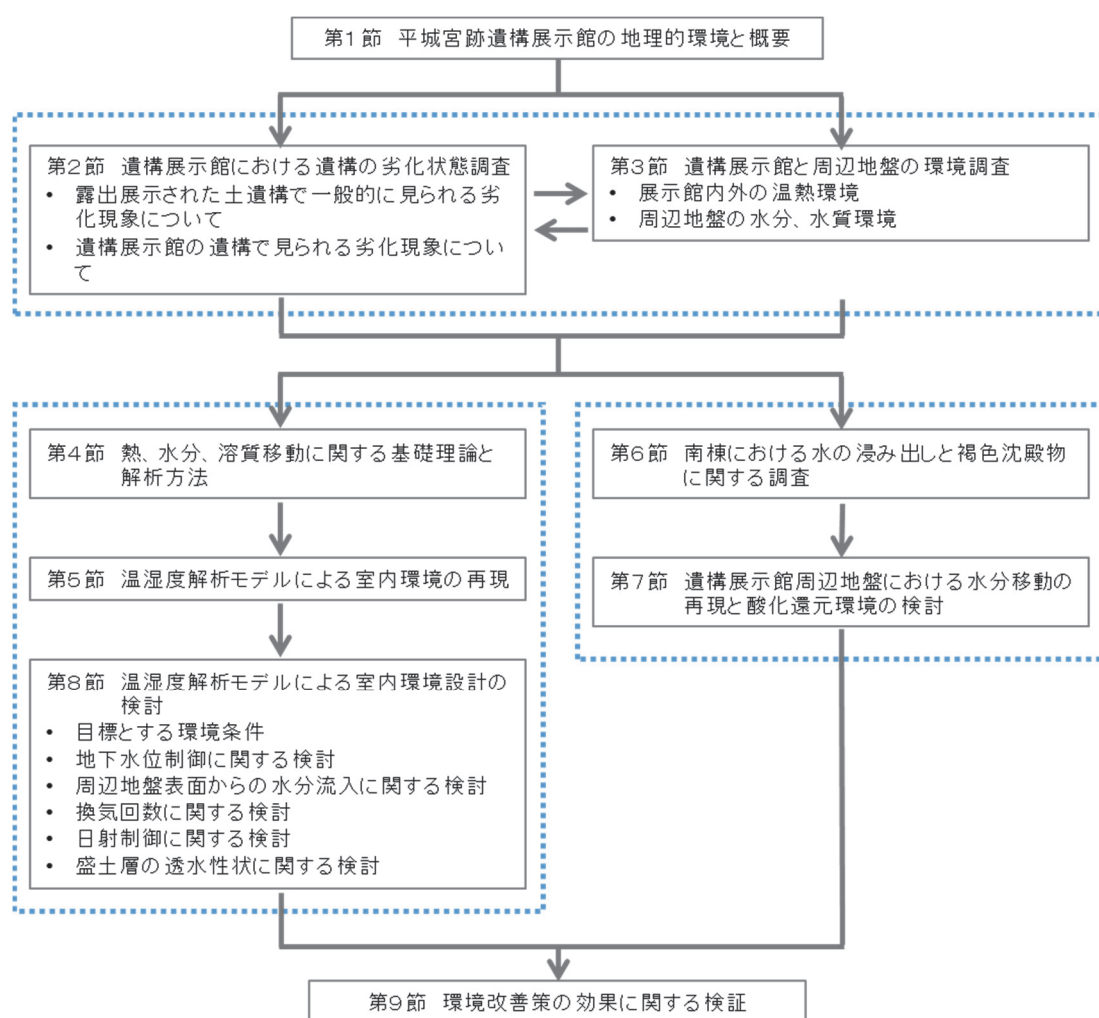


図 3.1-1 第3章の構成

2 地理的条件と気候

(1) 地理的条件

平城京は北を奈良山丘陵、西を西の京丘陵、東を春日山地に囲まれた奈良盆地北部に、

東西 5.85 km、南北 4.79 km の範囲にわたって築かれ¹⁻¹⁾、その中央北端部に平城宮は位置する（図 3.1-2、橙色範囲内）。平城宮周辺の地盤を構成する地質は、中生代白亜紀に属する領家帯花崗岩類を基盤岩として、これを新第三期鮮新世から第四紀更新世（洪積世）の堆積物である大阪層群が厚く覆っている。さらにこれらを第四紀更新世の堆積物である段丘堆積物や、第四紀完新世（沖積世）の完新統（沖積層）が覆っている。大阪層群や段丘堆積物は、粘性土、砂質土、および礫質土の互層によって構成されており、比較的硬質である。完新層（沖積層）は粘性土または砂質土で構成されており、粘性土は柔らかい～中位の硬さであり、砂質土は緩い～中位の締まり具合である。遺構展示館現地では沖積層と段丘堆積物（低位・中位）が確認されている¹⁻²⁾。

平城宮が位置する奈良盆地北端は、奈良山丘陵から続く緩斜面上にあり、北から南に向かって傾斜している。平城宮の大きさは南北方向に約 1 km で、旧地形における平城宮の南北の高低差は約 14 m あった¹⁻¹⁾。また、図 3.1-3 に示したように、第一次大極殿周辺の中央区、遺構展示館の西隣にあたり内裏が位置した東区、および遺構展示館東側の東院地区は、平城宮の北側に位置する奈良山丘陵から伸びる 3 本の支丘の尾根上にあり、旧地形ではほかの部分よりも高い場所に位置している。奈良時代、平城宮の造成の際には丘陵の高い箇所を削平し、谷地を埋め立てるといった大規模な整地がなされており、実際、これらの自然の丘陵のほか、内裏から第二次大極殿にかけて存在していた神明野古墳は平城宮造営時に削平されている。遺構展示館はこれらの南北方向に延びる支丘の尾根地形の間の谷筋を埋める沖積低地との境界部に位置する。

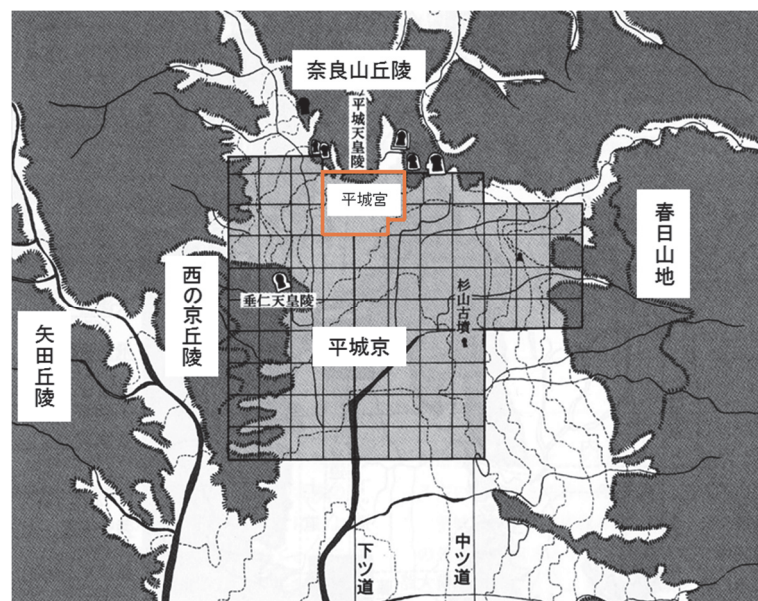


図 3.1-2 奈良盆地北部の地形と平城京、平城宮（平城宮は橙色範囲内）¹⁻¹⁾

平城宮内にはいくつかの池があったことが知られており¹⁻¹⁾、第一次大極殿の西隣に当たる箇所には、現在も佐紀池と呼ばれる池が存在する。また、図 3.1-4 に示すように、遺構展示館の北側、約 240 m の箇所には水上池と呼ばれる広大な池があり、さらに水上池の東側には佐紀盾列古墳群を構成するコナベ古墳、ウワナベ古墳といった巨大な濠を伴う古墳が隣接している。ウワナベ古墳の濠に溜められた水は農業用に取水されるなど、周辺地盤へ水を供給する役割を担っており、地形の勾配に沿って容易に南側の地盤へ水が移動し得ることが示唆される。遺構展示館に最も近い水上池は、農業用水の取水がおこなわれていないことから、常に一定の水位を保っている¹⁻⁴⁾。水上池からの排水

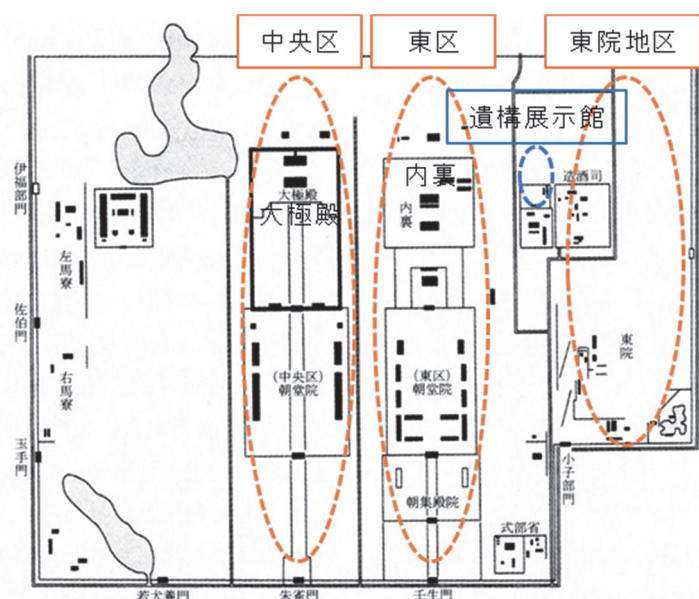


図 3.1-3 平城宮内の区画と奈良山丘陵から伸びる支丘の位置¹⁻¹⁾

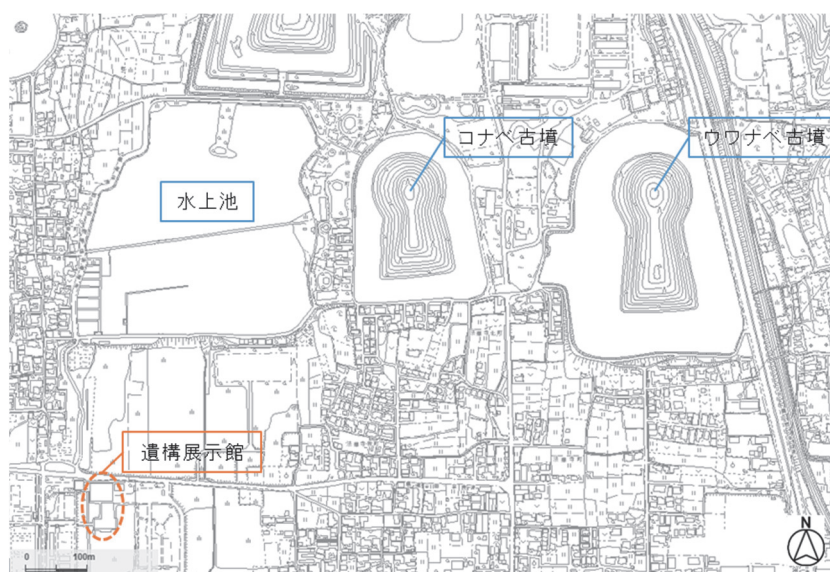


図 3.1-4 遺構展示館周辺の貯水池など¹⁻³⁾

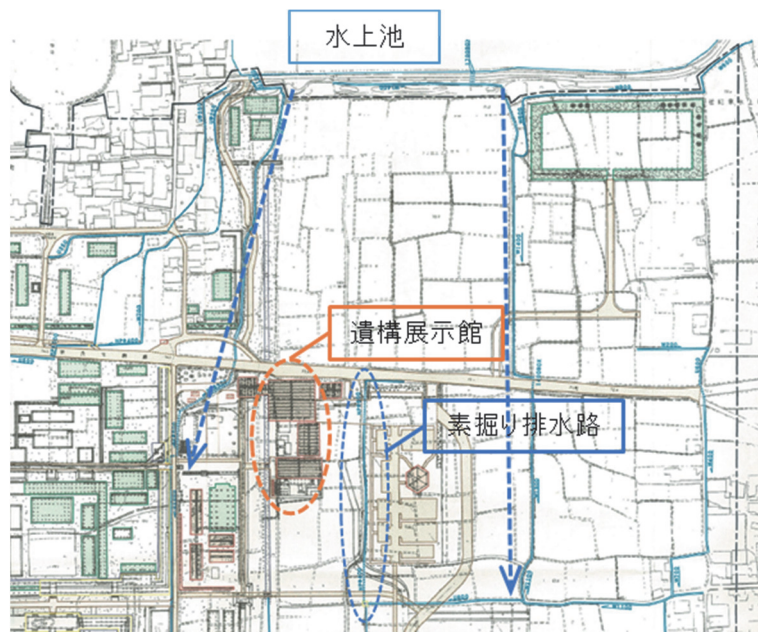


図 3.1-5 水上池水系水路¹⁻⁵⁾

路は図 3.1-5 に示したように、南へ向かうものと、南南西へ向かうものが確認されており、これらは基本的には配水管内を流れている。また、後述するが遺構展示館東側に素掘り排水路があり、概ね常に排水が確認された。この排水の供給源については図面からも、また現地を踏査した結果からも判然としなかったものの、水上池を起源としている可能性も十分に考えられる。このように、遺構展示館周辺地盤においては、水上池を始め、巨大な池や古墳の濠が周辺に存在していることから、池周辺の地盤を通して、あるいは推定の域を出ないものの、排水路からの地盤への浸み出しを通して、遺構展示館の周辺地盤へ緩やかな水分供給が常に生じているものと思われる。

(2) 気候

奈良地方気象台で1981年から2010年までの30年間で観測された最高気温、最低気温、および降水量の月毎の平均値を図3.1-6に示す。気温の日較差や年較差が比較的大きく、典型的な盆地の気候と言える。

3 平城宮跡遺構展示館の概要¹⁻⁷⁾

平城宮跡遺構展示館では、発掘調査で現れた建物跡の遺構そのものを、覆屋（おおいや）と呼ばれる保護施設の中で展示しつつ保存をおこなっている。遺構展示館では一度発掘された遺構を、発掘以前に覆っていた土壌で埋め戻し（以後、埋戻し土と呼ぶ）、その上を保護盛土（以後、盛土と呼ぶ）でさらに覆っている。したがって遺構展示館周辺地盤は3層の土層から構成されており、その上部に覆屋が設けられている。これらは建設当初は第1号覆屋から第3号覆屋の計3棟から構成されており、1965年に第1号覆屋（現在の北棟、以下北棟と表記）が、翌1966年に第2号覆屋が、そして1967年に第3号覆屋（現在の南棟、以下南棟と表記）が造られた。第1号覆屋では掘立柱建物跡を、第2号覆屋では凝灰岩溝を、そして第3号覆屋では磚積基壇建物跡を展示していたが、凝灰岩の保全が困難との理由から第2号覆屋は1987年頃には閉鎖され、遺構は埋め戻された。現在では北棟（第1号覆屋）と南棟（第3号覆屋）の2棟で遺構の露出展示が実施されている（図3.1-7）。

各覆屋は遺構を保護するために、地下に基礎を設けず、埋戻し土層と盛土層合わせて約1 m 厚の土で遺構を養生した上に建設されている（図3.1-8）。開口部以外の壁面はすべてブロック積みで、柱はH型鋼、屋根はデッキプレート、鉄骨はすべてコールドテン鋼でできている。北棟は1984年に、南棟では1982年にそれぞれ最初の改修工事がおこなわれ、その後は両棟とも1994年、次いで2009年に改修工事が実施された。特に2009年の工事では、覆屋の大幅な改修工事がおこなわれ、北棟には空調設備が新設された。

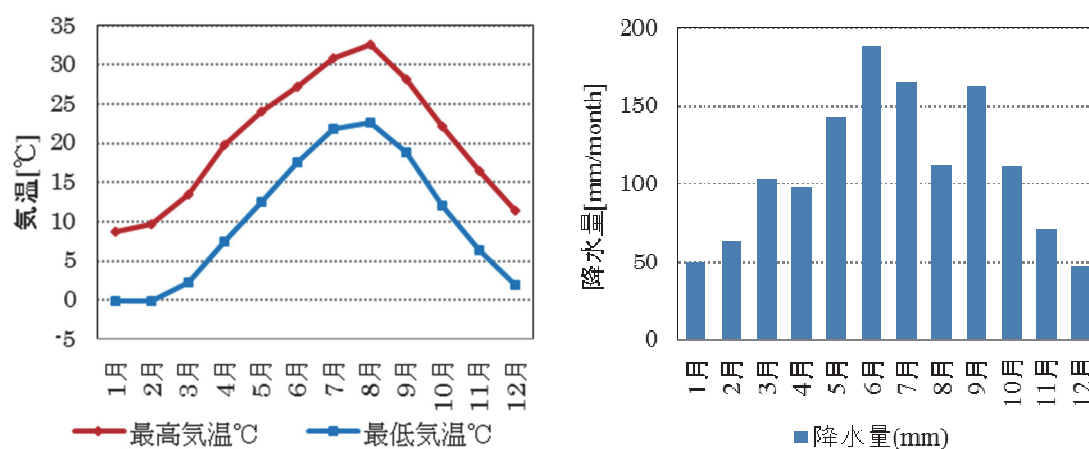


図 3.1-6 奈良市の気候データ（過去 30 年平均）¹⁻⁶⁾

奈良時代当時、平城宮内には南北方向を北から南に向かって流れる 3 本の基幹排水路が存在したことが確認されている¹⁻¹⁾。先述の通り、遺構展示館周辺の旧地形は南北方向に伸びる谷筋にあたることから、基幹排水路の 1 つ、東大溝と呼ばれる排水路が遺構展示館の西隣を北から南へ向かって流れており、径 40 cm ほどの石材で護岸していたことが発掘調査であきらかとなっている。現在は、奈良時代の排水路の上にコンクリート三面張りの排水路が設置され、今でも排水路として利用されている（図 3.1-7、図 3.1-9）。

また、南棟の東側、約 30 m ほどの箇所に、やはり南北方向に北から南へ向かって流れる排水路が存在する（図 3.1-7、図 3.1-10）。この排水路は先述のコンクリートで三面張りされた東大溝とは異なる素掘り溝で、これまでの目視観察の結果では、常に水が流れている状態、あるいは湛水状態のいずれかの状態にあることが確認されている。したがって、常に一定量の水分がここから遺構展示館東側の地盤へと供給されていると考えられる。

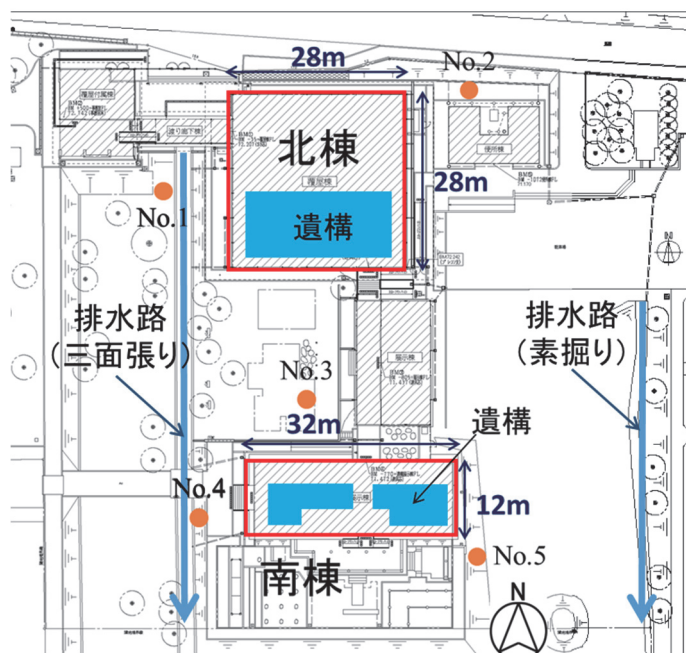


図 3.1-7 南北棟の配置と遺構展示館東西の排水路¹⁻⁸⁾

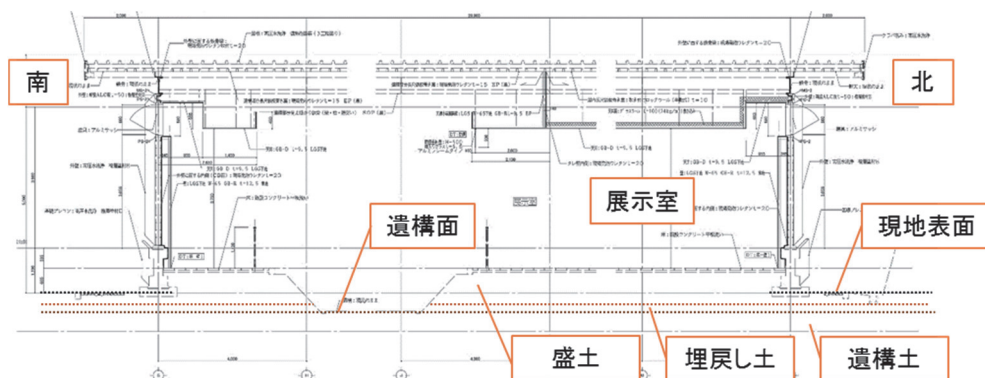


図 3.1-8 遺構展示館北棟立面図¹⁻⁸⁾



図 3.1-9 遺構の上に新設された
東大溝（北から）



図 3.1-10 東側の素掘り排水路（北東から）
手前：排水路、右奥：南棟

（１）北棟

図 3.1-7 に示した通り、北棟では覆屋内の南側半分で掘立柱建物跡の露出展示をおこなっている（図 3.1-11）。建物の西壁北側と、南壁東側に出入口があり、その他には開口部が存在しない（図 3.1-12）。2009 年の改修工事の際に空調設備が備えられ、また館内の照明器具は建設当時の水銀灯からスポット照明に変更された。空調の運用方法については、6 月後半から 9 月にかけては冷房運転を、11 月～3 月は暖房運転が実施されており、いずれも運転時間は 9 時から 16 時 30 分である。

露出展示された土遺構の多くは、遺構表面土壌に何らかの薬剤を散布することで土壌の保存処理がなされているが、遺構展示館で展示している土遺構は、2011 年にシリコーンを用いた処理が実施される以前の約 45 年間は、遺構面土壌に対して一切の処理が施されていない珍しい例である。このとき用いられたシリコーンは土壌の保水性を高めると同時に、黴や地衣類などが土壌中の水分を利用できないようにする効果を有する¹⁻⁹⁾。



図 3.1-11 北棟内観（南西から）

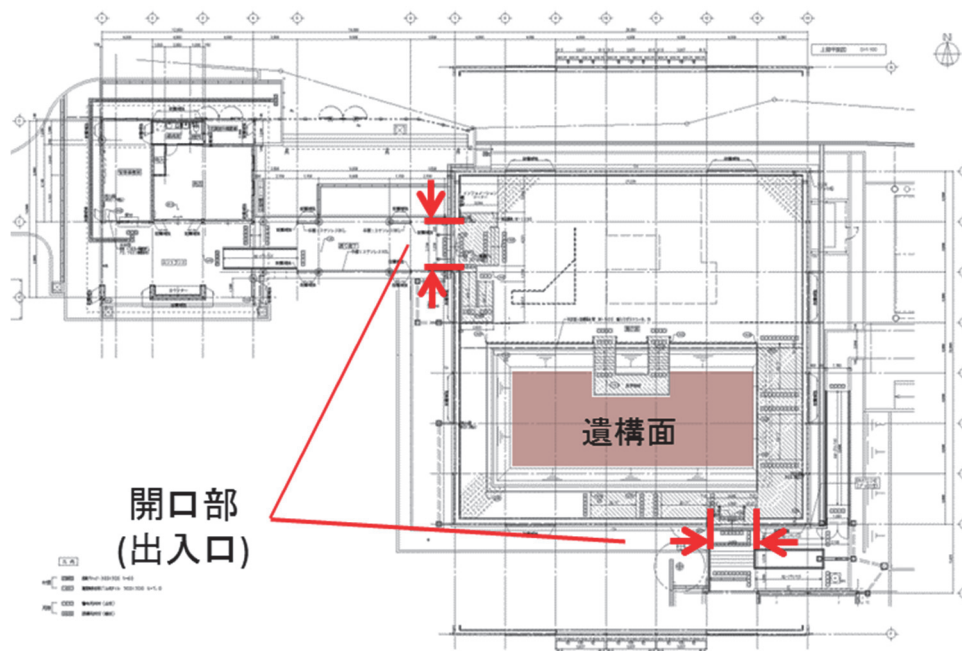


図 3.1-12 北棟平面図¹⁻⁸⁾

(2) 南棟

南棟では平城宮で唯一出土した磚積基壇建物跡の遺構北半分を屋内で露出展示しており (図 3.1-13、図 3.1-14)、基壇の南側半分は覆屋屋外において復元展示されている。館内では石材と磚から構成される東西方向に長い雨落溝が展示されており (図 3.1-15)、1 年を通して概ね湛水状態にある。遺構面に浸み出す水への対策として、館内の遺構面東端において排水会所を設置して、一定量の水がたまると会所の内部に設置された排水ポンプが排水をおこなうよう設計されている (図 3.1-14 破線箇所)。空調設備は有しておらず、覆屋の北側、南側、および西側に出入口が設けられている。また北壁と南壁の上半はルーバー状の開口となっており、常に通気があると考えられる (図 3.1-16、図 3.1-17)。



図 3.1-13 南棟内観 (西から)
(撮影箇所は図 3.1-15 参照)



図 3.1-14 南棟内観 (北から)
(撮影箇所は図 3.1-15 参照)

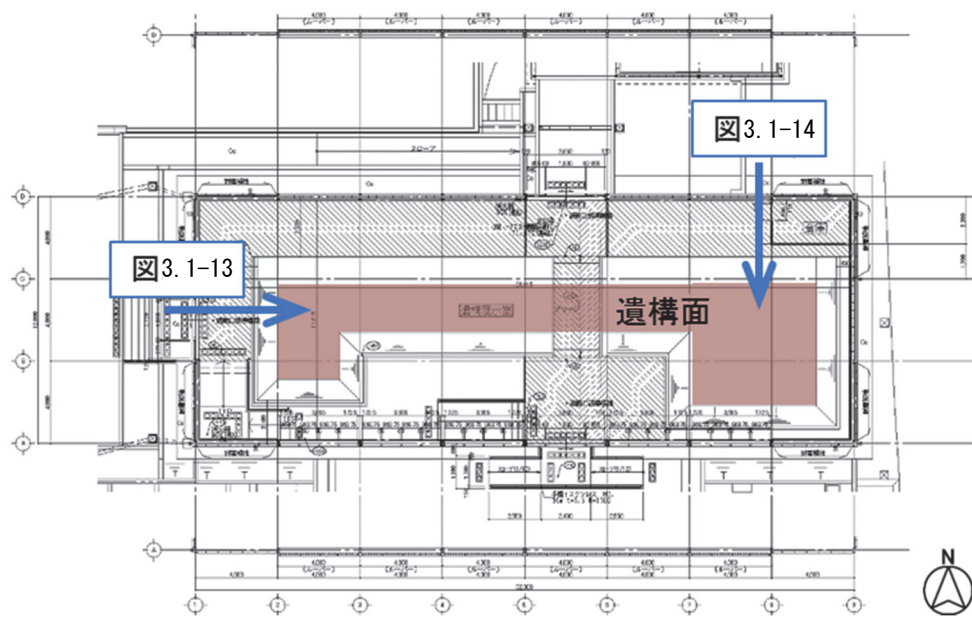


図 3.1-15 南棟平面図 1-8)



図 3.1-16 南棟外観（南西から）

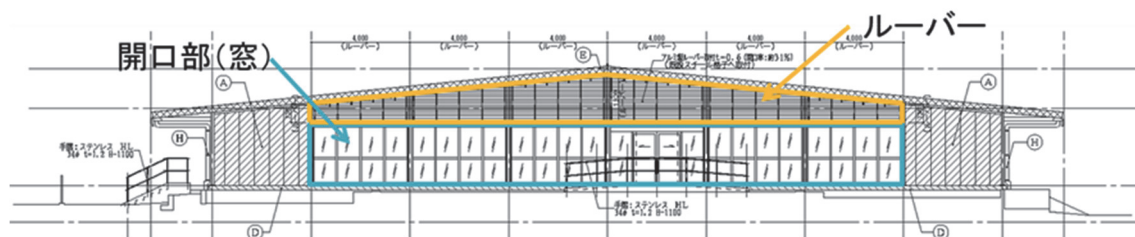


図 3.1-17 南棟立面図（南面） 1-8)

4 第1節のまとめ

本節では平城宮・京の歴史的背景および史跡保存の経緯について概略を述べ、次に研究対象である遺構展示館周辺の地理的条件と奈良市の気候について述べた。特に地理的条件では、平城宮周辺の旧地形が北から南へと緩やかに下る斜面となっていること、そして遺構展示館周辺地域における、水上池からの水系経路について詳述した。また、南北の遺構展示館の概要について述べた。特に、北棟と南棟の覆屋の差異について説明し、北棟は開口部が少なく空調設備を有している一方で、南棟は空調設備が備わっておらず、南北壁上半のルーバー状の開口を通して通気が生じ得ること、また、出入口に加えて、南北壁の開口部が非常に多いことなどについて述べた。

第1節の参考文献

- 1-1) 奈良文化財研究所編：平城京事典、終風舎（2010）
- 1-2) 株式会社トータルメディア開発研究所・応用地質株式会社：平城宮跡内遺構展示館周辺ボーリング調査 報告書（2010）
- 1-3) 奈良市都市計画情報公開システム <http://www.sonicweb-asp.jp/nara/map>
- 1-4) 奈良国道事務所 平城宮跡およびその周辺の水位観測記録（2015）
- 1-5) 文化庁 里道水路調査報告書（2002）
- 1-6) 気象庁ホームページ <http://www.data.jma.go.jp/>（2015）
- 1-7) 文化庁：平城宮跡遺構展示館の露出展示改善に関する検討委員会（第1回）委員会資料（2012）
- 1-8) 特別史跡平城宮跡遺構展示館等その他改修工事 完成図（2010）
- 1-9) シーハウス株式会社ホームページ <http://www.c-house.co.jp/seihin.html>

第2節 遺構展示館における遺構の劣化状態調査

1 はじめに

本節では、遺構展示館でみられる劣化現象について目視観察の結果を整理し、現在の遺構展示館の温熱環境と劣化現象の関係を説明する。

2 露出展示遺構で一般に見られる劣化現象

平城宮跡遺構展示館のように、土や石材などの多孔質材料で構成される遺構の露出展示を実施している遺跡は全国に多数存在する。ここでは、露出展示遺構において一般的に見られる劣化現象について概説する。

(1) 土壌の乾燥による劣化

遺構の露出展示を実施する場合、風雨や日射などの外界気象条件から受ける影響を緩和する目的で、覆屋と呼ばれる保護施設を設置することが一般的である。したがって、覆屋内での遺構地盤表面では水分蒸発が卓越することになる。周辺地盤から遺構面への

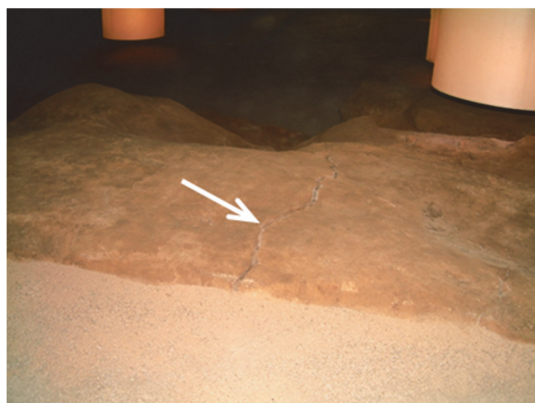


図 3.2-1 土遺構に生じたクラック



図 3.2-2 鉛直面の崩落



図 3.2-3 図 3.2-2 の拡大

雨水の浸透が緩慢な場合や、地下水面が十分に低く遺構地盤への水分供給が緩慢な環境では、乾燥による土壌の収縮と、それにともないクラックが発生する事例が散見される（図 3.2-1）。また、鉛直面などのように構造的に不安定な箇所では、乾燥にともない土壌が塑性を失って崩落する事例も見られる（図 3.2-2、図 3.2-3）。

（２）塩析出による劣化

土壌中の水分にはさまざまな成分が溶存しており、これらが液相の水分移動にともなって多孔質材料表面近傍まで移動し、塩として析出する事例もしばしば見られる（図 3.2-4、図 3.2-5）。これらの多くは白色を呈しており、遺構面の汚損を引き起こすのみならず、時に材料表面の剥離を引き起こしており物理的な劣化にいたる場合が多い。

塩の析出は、その塩の飽和塩溶液が与える相対湿度を雰囲気相対湿度が下回ったときに生じる。また塩の種類によって溶解のエンタルピーの発熱・吸熱、その値の大小が大きく異なるため、溶解度の温度依存性もさまざまである。とりわけ後述する硫酸ナトリウムは 32.4℃以下の環境において、温度の低下とともに溶解度が急激に減少することが知られている²⁻¹⁾。したがって、塩の析出に関しては、多孔質材料の透水性に加え



図 3.2-4 塩析出（土遺構）



図 3.2-5 塩析出（磨崖仏）

表 3.2-1 塩類風化の危険性に関する塩の序列²⁻¹⁾

Pedro (1957a)	Kwaad (1970)	Goudie <i>et al.</i> (1970)	Goudie (1974)	Goudie (1974)	Goudie (1986)	Goudie (1983)	Goudie (1993)
NaNO ₃	Na ₂ SO ₄	Na ₂ SO ₄	Na ₂ SO ₄	Na ₂ SO ₄	Na ₂ CO ₃	NaNO ₃	Na ₂ SO ₄
Na ₂ SO ₄	Na ₂ CO ₃	MgSO ₄	MgSO ₄	Na ₂ CO ₃	MgSO ₄	Na ₂ CO ₃	Na ₂ CO ₃
Mg(NO ₃) ₂	MgSO ₄	CaCl ₂	CaCl ₂	NaNO ₃	Na ₂ SO ₄		NaNO ₃
K ₂ SO ₄	NaCl	Na ₂ CO ₃	Na ₂ CO ₃	CaCl ₂	NaCl		MgSO ₄
KNO ₃	CaSO ₄	NaCl	NaNO ₃	MgSO ₄	NaNO ₃		NaCl
Na ₂ CO ₃				NaCl	CaSO ₄		
K ₂ CO ₃							
MgSO ₄							
CaSO ₄							
Ca(NO ₃) ₂							

て、雰囲気温度、相対湿度が非常に重要である。塩が多孔質材料の空隙壁に対して応力を発生させる要因は

- 1) 塩が析出する際の圧力
- 2) 塩の水和による体積変化
- 3) 熱膨張率の差異による圧力

が考えられており²⁻²⁾、これらの応力が材料の引っ張り強度を上回ることによって材料の破壊が生じる。主に上記3つの要素の挙動が塩によって異なることから、材料の破壊におよぼす影響の程度は塩の種類によって異なる。既往の研究から提案された序列を表3.2-1に記す。表からあきらかに、硫酸ナトリウムあるいは炭酸ナトリウムは多孔質材料の劣化におよぼす影響が大きいと考えられており、一方で、硫酸カルシウムはその影響が比較的軽微と考えられている。

(3) 生物による劣化

遺構地盤への水分供給量が比較的多い遺跡では、生物的な劣化の進行が認められる。露出展示された遺構では、観覧に供する、という目的から開口部を設ける、あるいは照明設備によって遺構面に対して一定の照度を供給している。このような環境下では、遺構面において蘘苔類、藻類、および地衣類が繁茂して遺構の汚損を引き起こしている。劣化速度はきわめて緩慢ではあるものの、地衣類によって岩石の劣化が引き起こされるとも言われ²⁻²⁾ (図3.2-6)、遺構の劣化要因の1つと考えられる。また、主に土壌表面に繁茂するカビについては、遺構の汚損となるだけでなく観覧者への健康被害という観点からも看過されるべきものではない。さらに、巨視的なものでは、樹木によって引き起こされている劣化も挙げられる。樹木が風で揺れるとその振動によって根の周辺の岩石あるいは土壌が崩落する場合などが挙げられる。

屋外に位置するものでは動物によって劣化が引き起こされる例も認められる。この中には、小動物によって穴が穿たれるなどの直接的な破壊や、たとえばコウモリなどの排泄物に由来するイオウやリン酸が塩類として析出し、石材の劣化を引き起こしている事



図 3.2-6 地衣類が原因と推定される石材劣化



図 3.2-7 凍結破砕による石材劣化

例なども報告されている^{2・3)}。

(4) 凍結破砕による劣化

屋外において露出展示されている遺構の場合、寒冷地では冬期の夜間放射によって多孔質材料内部の水分が凍結しつつ、不凍水が供給され続けることで材料内にアイスレンズが成長して多孔質材料の破壊を引き起こす凍結破砕現象が見られる(図 3.2-7)。

3 平城宮跡遺構展示館で見られる劣化状況

遺構展示館で展示されている遺構を構成する材料は土、石、および磚と呼ばれるレンガで、いずれも多孔質材料である。これらの材料中を熱や水分、物質が移動することで様々な劣化が生じると考えられる。

(1) 土壌の崩落、クラックの発生

遺構展示館の土壌表面を目視観察した結果、北棟では柱穴の周縁部で土壌粒子や礫の崩落が生じ(図 3.2-8)、それらが柱穴底部に堆積する様子が観察された(図 3.2-9)。特に北棟西側では崩落した土壌塊が濡れ色を呈していることや、2009 年度に遺構展示館のメンテナンスがおこなわれ、その際に底部を盛土で埋められた柱穴においても底部に土壌粒子が堆積していることから、北棟西側では現在も土壌の崩落が進行していると考えられる。また、北棟の中央部でも柱穴の周縁部において、土壌粒子が崩落して柱穴底部に堆積し、柱穴鉛直面では残存した礫が突出する様子が観察された(図 3.2-10)。しかし、中央部周辺は 2009 年度のメンテナンス作業時にクリーニング作業などが実施されていないこと、そして、中央部周辺は年間を通して遺構面の土壌が濡れ色を呈することなく、恒常的に乾燥した状態にあると推察されることから、これらの箇所における土壌粒子の崩落のほとんどは過去に生じたもので、現在顕著に進行しているものではないと推察される。柱穴周縁部では水平面と比較して水分の蒸発速度が速いこと、鉛直面では構造的に不安定な状態であることから、土壌の乾燥が進行するのにもない、土壌が塑性を失い崩落したものと考えられる。

南棟では、遺構面は年間の大部分の時期において湛水状態にあることから、乾燥にもなう土壌の崩落は認められなかった。一方で、法面上方の盛土層では、乾燥にともない土粒子の崩落が認められた(図 3.2-11、図 3.2-12)。遺構展示館内の地盤中における水分移動の詳細については後述するが、屋外からの雨水の流入は、主に盛土層と埋戻し土の層境界において生じていると推察され、したがって屋内の盛土層は乾燥が進行していると考えられる。

上述の乾燥による土壌粒子の崩落に加え、遺構展示館では土壌表面においてクラックが多数認められた（図 3.2-13、図 3.2-14）。クラックの発生には土壌の乾湿の繰り返しが大きく影響していると考えられ、土壌中の水分が蒸発する際に、その表面張力によって土壌粒子間の間隙が狭められ、巨視的なクラックの発生に至ると考えられる。北棟中央部から東側の遺構面で見られるクラックの発生箇所では、土壌は常に乾燥状態にあると推察され、したがって、現在クラックが認められる箇所では乾燥状態を維持することで、



図 3.2-8 柱穴周縁部の土壌粒子崩落



図 3.2-9 柱穴底部の土壌粒子の堆積



図 3.2-10 突出する礫



図 3.2-11 盛土層での土壌粒子崩落



図 3.2-12 図 3.2-11 の破線箇所拡大

今後拡大する可能性は低いと推察される。また、盛土層は発掘調査後に施工されたもののため、特に屋内の盛土は圧密を受けておらず、遺構土壌と比較して元来空隙率が高い状態にあったと考えられる。したがって、水分蒸発が続いて土壌の含水状態が低下した際に、比較的大きなクラックが大量に発生したと考えられる。一方、北棟でみられる遺構面中央部のクラックは、同様に水分蒸発が卓越したために発生したと考えられるが、不攪乱土壌であるため元来空隙率が盛土と比較して小さく、顕著なクラックの発生には至っていないものと考えられる。



図 3.2-13 遺構面のクラック（平面部）



図 3.2-14 遺構面のクラック（柱穴周縁部）

（２）土壌の侵食

2013 年 9 月に南棟北側法面の盛土層と埋戻し土の境界部において、土壌粒子の流出による法面の侵食が発生した。この時期、台風などの影響により相当量の降雨量が奈良市内において観察されており、8 月 25 日には 70.5 mm/day、9 月 15 日には 98.0



図 3.2-15 南棟法面の侵食

mm/day、そして9月16日には97.5 mm/dayの降水量が記録され²⁻⁴⁾、周辺地盤には積算すると相当量の雨水が涵養されていたと考えられる。そして、台風の際の降雨を契機に、法面表面の土壌が流出して礫が露出し（図3.2-15）、直下の雨落ち溝内には流出した土壌粒子が堆積する様子が観察された。雨水が局所的に流入したことで土壌の侵食が引き起こされたものと考えられる。

（3）蘚苔類等の繁茂

1）北棟における蘚苔類の繁茂状況

遺構面の一部や法面の土層境界部を中心に蘚苔類やカビの生育が認められた。これらは遺構の物理的な劣化を引き起こしているものとは考えにくい、観覧に供するという目的を鑑みると、汚損と考えられる。また、カビについては観覧者の健康被害を考慮すべきと考えられる。そこで、これらが生育している箇所を記録をおこなった。

北棟において蘚苔類の繁茂が認められる箇所を図3.2-16に示す。遺構面南西隅を除いて、北棟では主に法面の盛土と埋戻し土の層境界を中心に蘚苔類の繁茂が見られた。特に、北側および西側法面の土層境界部では白色を呈する析出物も顕著に認められることから（図3.2-17、図3.2-18）、他の箇所と比較して水分蒸発量が多く、土壌の含水状態が高い箇所と考えられる。また、北側法面東側では蘚苔類と合わせて黒色を呈するカビと思われるものも観察された（図3.2-19、図3.2-20）。遺構面南西隅では柱穴の埋土表面に蘚苔類が繁茂している様子が認められ、その分布領域が照明の当たる箇所に限定される様子が認められた（図3.2-21、図3.2-22）。

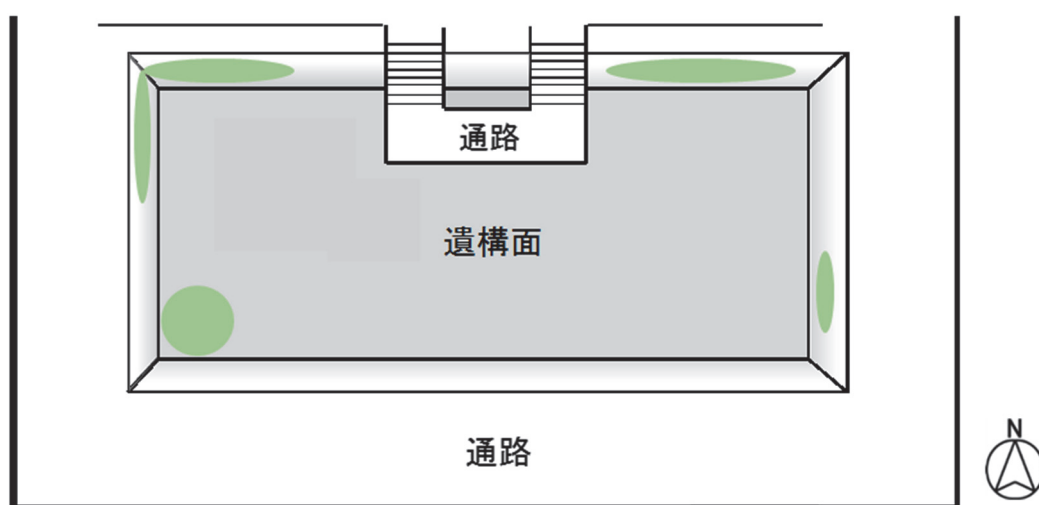


図3.2-16 蘚苔類分布箇所（北棟）



図 3.2-17 蘚苔類（北棟北西隅）

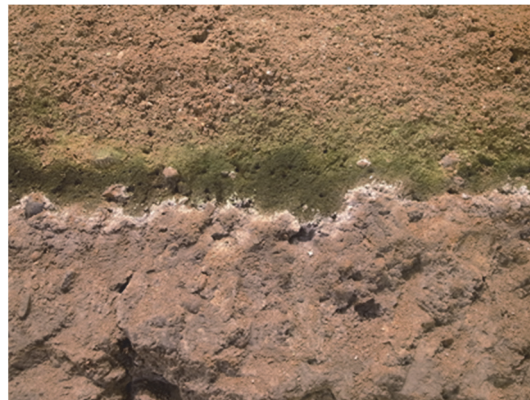


図 3.2-18 蘚苔類（図 3.2-17 拡大）



図 3.2-19 蘚苔類とカビ（北棟北側法面）



図 3.2-20 蘚苔類とカビ（図 3.2-19 拡大）



図 3.2-21 蘚苔類（北棟南西隅柱穴）



図 3.2-22 蘚苔類（図 3.2-21 拡大）

2) 南棟における蘚苔類の繁茂状況

南棟における蘚苔類の分布箇所を図 3.2-23 に示す。南棟では、蘚苔類は遺構面東半の磚敷き面全体、および法面の盛土層と埋戻し土の層境界において顕著に認められた(図 3.2-24 から図 3.2-27)。後述するように、南棟の遺構面は周辺地盤からの地下水および雨水の流入量が多いと考えられ、遺構面土壌は恒常的に高含水状態にあること、そして、南側の開口部から常に一定の照度があることが大きく影響していると考えられる。

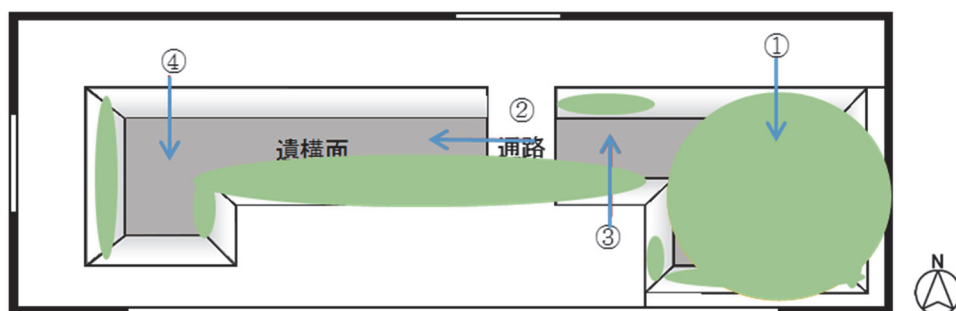


図 3.2-23 蘚苔類分布箇所（南棟）



図 3.2-24 蘚苔類 (図 3.2-23①)



図 3.2-25 蘚苔類 (図 3.2-23②)



図 3.2-26 蘚苔類 (図 3.2-23③)



図 3.2-27 蘚苔類 (図 3.2-23④)

3) 蘚苔類が繁茂する環境条件について

先述したように、遺構面南西隅では柱穴の埋土表面に蘚苔類が繁茂している様子が認められ、その分布領域が照明の当たる箇所限定される様子が認められた(図 3.2-21、図 3.2-22)。小林らは蘚苔類の栽培条件の最適化を検討する上で、灌水頻度と光条件について検討している²⁻⁵⁾ことから、蘚苔類が生育する環境条件としては土壌含水率と照度が大きく影響をおよぼすと考えられる。そこで、上記の北棟柱穴において蘚苔類が生育する箇所と生育していない箇所の両箇所において、土壌含水率と照度を測定し、蘚苔類繁茂の有無を分けた環境の差異を抽出することで、これらの繁茂を抑制し得る環境条件を検討した。土壌含水率の測定は、北棟南西隅の埋め戻された柱穴 2 箇所において、蘚



図 3.2-28 蘚苔類生育条件測定箇所（南から）



図 3.2-29 蘚苔類生育条件測定風景

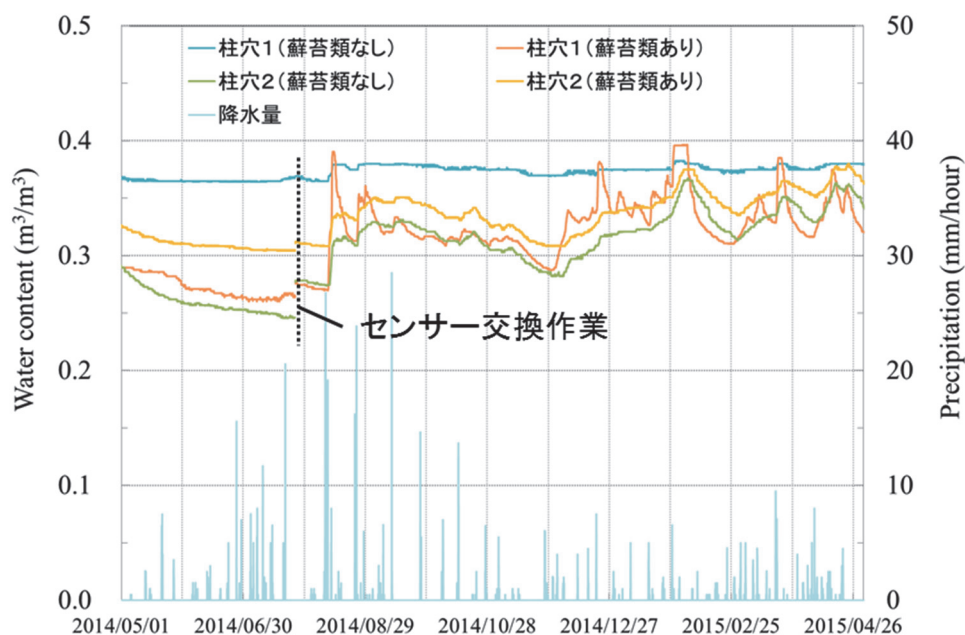


図 3.2-30 柱穴土壌含水率

苔類が繁茂する箇所と繁茂していない箇所でおこない、最も南側の柱穴を柱穴１、その北側に隣接する柱穴を柱穴２とした（図 3.2-28、図 3.2-29）。また、照度の測定は柱穴２において藓苔類が繁茂する箇所と繁茂していない箇所で行った（図 3.2-29）。土壌含水率の測定結果を図 3.2-30 に、照度の測定結果を図 3.2-31 に示す。

図 3.2-30 に示したように、柱穴１（藓苔類なし）では他と比較して常に高い含水状態にあるものの、他の３箇所も比較的高い含水状態を維持しており、これらの３箇所では含水率が概ね同様の変化を示すことがあきらかとなった。したがって、これらの柱穴の藓苔類の有無は、含水状態の差異に起因するものではないことが示唆された。なお、柱穴１（藓苔類なし）において高い含水状態を示した原因は、後述するように埋戻し土と遺構面の層境界からの水分の浸入によるものと考えられる。また、図 3.2-31 に示したように、藓苔類が繁茂する箇所と繁茂していない箇所で行った照度はあきらかに異なっており、それらの照度は概ね一定値を示した。第３章第１節で述べたように、北棟は開口部が少なく、本測定箇所で行われる照度は照明設備に由来するためと考えられる。なお、照度が観測されなかった日は休館日であった。以上の結果から、藓苔類の繁茂においては照度の大小が大きく影響をおよぼしていることがあきらかとなった。したがって、北棟では開口部が少なく、遺構面に供給される照度の多くが照明設備によるものであることから、入館者がいない時間帯では照明を切るなどの運用方法の変更によって、藓苔類の繁茂を現状よりも抑制し得ることが示唆された。

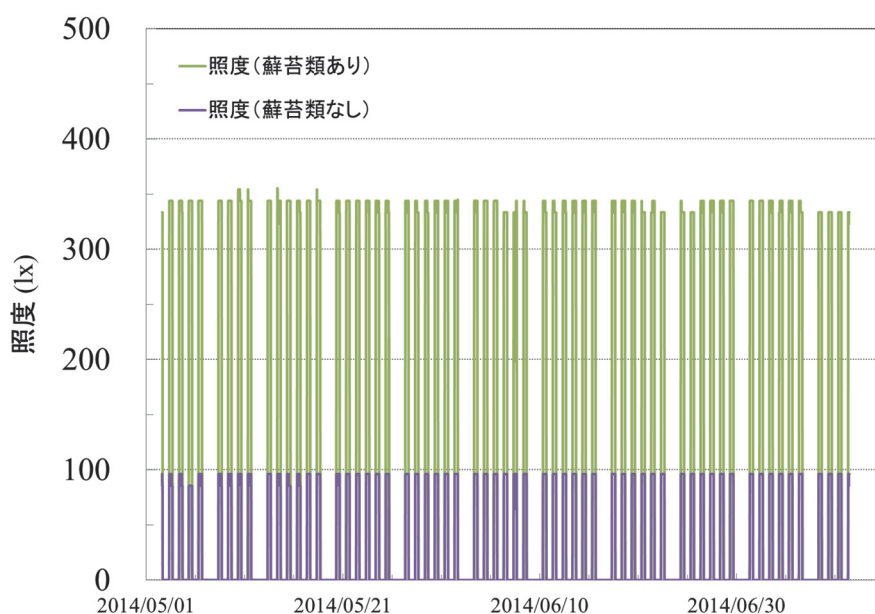


図 3.2-31 柱穴照度

(4) 塩類の析出

1) 目視観察

目視観察の結果、北棟の遺構面周囲の法面では、北東隅と北面西側、および西面北側の盛土と埋戻し土の境界部において（図 3.2-32）、また西面と南面西側の埋戻し土と遺構面境界において（図 3.2-33）、そして遺構面中央付近の柱穴縁部において（図 3.2-34、図 3.2-35）析出物が認められた。

いずれの箇所においても析出物は白色を呈する殻状のもので、目視観察の結果から特定の季節にのみ見られる塩というような、季節性の変化は認められなかった。しかし、夏季の豪雨時などでは、遺構面西側において遺構土壌が濡色を呈する、あるいは柱穴にわずかに水が溜まる様子が観察され、これらの箇所ではその後、析出物がわずかつ増加しているように観察された。2010 年には遺構面を除く周囲の法面部分のクリーニング作業がおこなわれ、その際に表面の析出物は除去されていることから、遺構面中央の柱穴縁部のものを除いて、今回の調査で見られた析出物は、その後に析出したものと考えられる。遺構面中央の柱穴縁部のものについては、今回の調査期間を

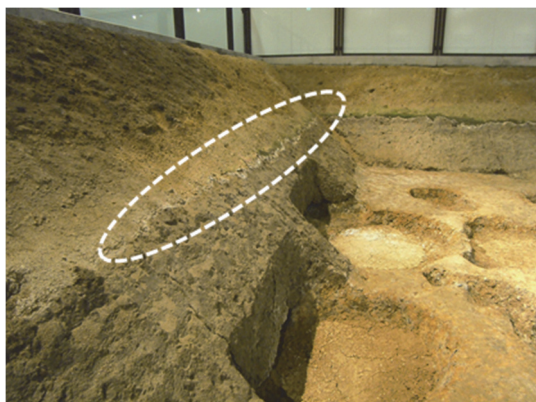


図 3.2-32 北棟、盛土－埋戻し土層境界の析出物（南から撮影、左側は西側法面、奥に見えるのが北側法面）

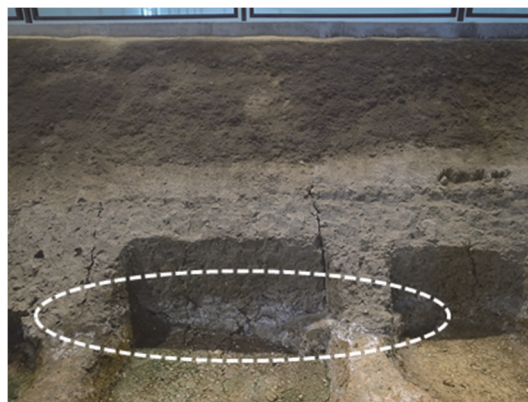


図 3.2-33 北棟、埋戻し土－遺構面層境界の析出物（東から撮影、正面は西側法面）



図 3.2-34 北棟、柱穴縁部の析出物

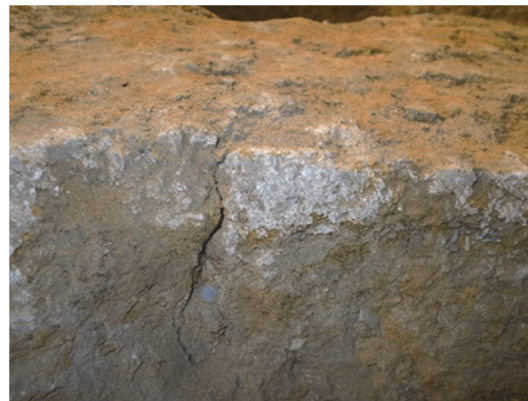


図 3.2-35 北棟、柱穴縁部の析出物（拡大）

通じて目視観察による変化は一切認められなかった。

南棟では、遺構周囲の法面において、北面と南面西側、および西面北側の埋戻し土と遺構面の境界において（図 3.2-36）、そして北面中央部と西面の盛土と埋戻し土の境界において析出物が認められた（図 3.2-37）。これらの箇所では認められた析出物はいずれも白色を呈する殻状のものであった。南棟では土壌表面における蘚苔類の繁茂が顕著であり、上記の各土層境界において析出物が認められた箇所では、蘚苔類の繁茂も顕著であった。また、12月頃から4月頃にかけて、雨落ち溝沿いの一部の磚（図 3.2-38、図 3.2-39）と石材表面、および南側の遺構面土壌において白色を呈する針状の析出物が観察された（図 3.2-40、図 3.2-41）。これらの針状の析出物が認められた磚や一部の石材表面では、材料表面が粉状化し、剥離している様子が観察された。

雨落ち溝に使用されている石材は緻密な安山岩と、やや粗粒の片麻岩ないしは花崗岩で、針状の析出物は片麻岩ないしは花崗岩においてのみ認められた。また、磚についても塩が析出しているものと、析出が認められないものが存在した。一般にレンガは高温で焼成されるほど、平均空隙径が微細となることから、透水性状が低いと考えられる。したがって、磚の透水性に個体差があり、比較的透水性の高い磚においてのみ析出物が観察されたと考えられる。また、針状結晶の析出物が様々な材料表面で見られたことから、その起源は材料内にあるものが溶出したのではなく、地下水中に溶存する成分と考えられる。この析出物が北棟では一切認められず、南棟においてのみ認められたことについては、南北の室内の温熱環境の差異が大きく影響をおよぼしていると考えられる。

以上の目視観察の結果から、北棟では法面の土層境界を中心に析出物がわずかずつ析出し続けているものの、季節変動は認められず、かつ遺構の劣化に与える影響は比較的軽微であると考えられる。一方で、南棟では土層境界では北棟と同様の挙動を示したが、磚や石材、そして一部の土壌表面において季節性の析出物が認められ、それらは材料表面の劣化におよぼす影響が大きなものであると考えられた。



図 3.2-36 南棟、埋戻し土－遺構面層境界の析出物（北側法面）

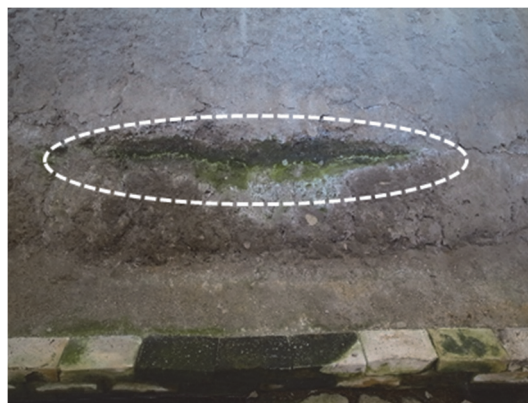


図 3.2-37 南棟、盛土－埋戻し土層境界の析出物（北側法面）



図 3.2-38 南棟、雨落溝沿い磚表面の析出物
(2014/2/26)



図 3.2-39 南棟、磚表面の析出物（拡大）
(2014/2/26)



図 3.2-40 南棟、遺構面表面の析出物
(2014/12/19)



図 3.2-41 南棟、遺構面表面の析出物（拡大）
(2014/12/19)

2) X線回折法による分析方法

遺構展示館南北棟において毎月の塩析出箇所の分布、析出量の変化について目視観察をおこなうとともに、析出物を採取してX線回折分析法によりその同定をおこなった。析出物の採取箇所を図 3.2-42、図 3.2-43 に示す。X線回折分析に用いた装置は Rigaku 社製全自動水平型多目的X線回折装置 SmartLab で、集中ビーム法で測定を実施した。試料はメノウ鉢をもちいて粉末試料として分析に供した。測定条件を表 3.2-2 に示す。

表 3.2-2 X線回折法測定条件

管電圧 [kV]	40
管電流 [mA]	100
ターゲット	Cu
スキャン速度 [$^{\circ}$ /min]	2
測定範囲 [$^{\circ}$]	5 - 80

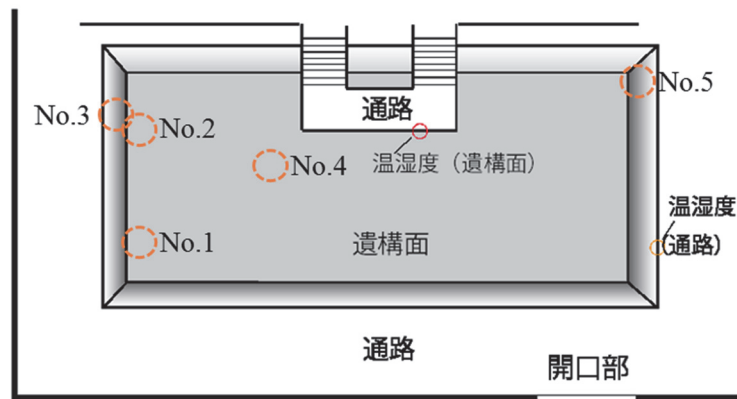


図 3.2-42 北棟、析出物採取箇所

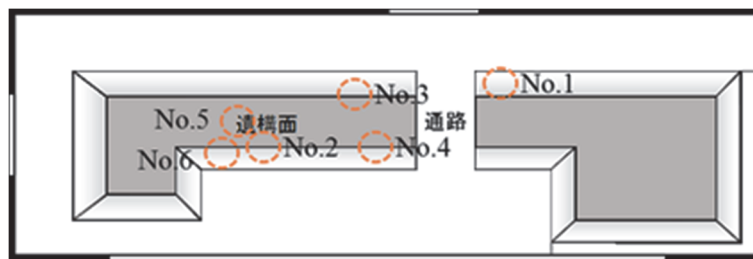


図 3.2-43 南棟、析出物採取箇所

3) X線回折法による分析結果

分析結果を表 3.2-3 に示す。図 3.2-32 から図 3.2-37 に示した塩のように、その消長が季節変動を示さず、材料表面を殻状に覆う析出物は、すべて **Gypsum**（硫酸カルシウム二水和物）と同定された。**Gypsum** は難溶性の塩であるため、その飽和塩溶液はほとんど蒸気圧降下を示さない。したがって、**Gypsum** のみが溶存している場合は、その飽和塩溶液が平衡する空気の相対湿度は常温で 99.96%である²⁻¹⁾。塩化ナトリウムが共存した場合、**Gypsum** の飽和塩溶液と平衡する空気の相対湿度は低下するが²⁻¹⁾、後述するように、遺構展示館周辺の地下水中の塩化物イオン濃度は希薄であることから、**Gypsum** が析出し得る相対湿度に対して、影響をおよぼしていないものと考えられる。したがって、**Gypsum** が析出している箇所は、屋外から水分が流入することで、地表面まで概ね水分飽和した状態にあると推察される。そして、遺構展示館内において水分蒸発が卓越する環境にあるため、**Gypsum** が析出し続けていると考えられる。

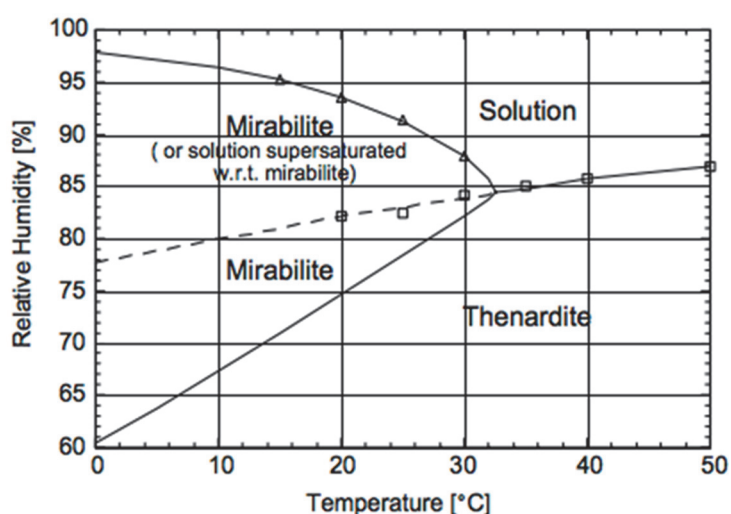
表 3.2-3 析出物分析結果

	北棟					南棟					
	N-01	N-02	N-03	N-04	N-05	S-01	S-02	S-03	S-04	S-05	S-06
2014/7	Gyp	Gyp	Gyp	Gyp	Gyp	Gyp	Gyp	—	n.d.	n.d.	n.d.
2014/8	—	—	—	—	—	—	—	—	n.d.	n.d.	n.d.
2014/9	Gyp	—	Gyp	—	—	Gyp	—	Gyp	Gyp	n.d.	n.d.
2014/10	—	—	—	—	—	—	—	—	—	n.d.	n.d.
2014/11	—	—	—	—	—	—	—	—	—	Th	n.d.
2014/12	—	—	Gyp	—	—	Gyp	Th	Gyp	Th	Th	Th
2015/2	Gyp	—	Gyp	—	—	—	Th	Gyp	Th	Th	Th
2015/3	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—

ただし、Gyp：硫酸カルシウム二水和物、Th：無水硫酸ナトリウム、(—)：採取せず、n.d.：塩検出されず

塩の採取は最小限として、原則季節ごとに実施した（2014年7月、9月、12月、2015年2月）。ただし、目視観察で明らかに変化が認められなかったものについては採取をおこなっていない。

一方、図 3.2-38 から図 3.2-41 に示したように、冬期にのみ析出が確認され、針状の結晶を作る析出物は Thenardite（無水硫酸ナトリウム）と同定された。Thenardite については、磚、石材、および土壌いずれの材料からも析出が認められたことから、塩の起源は材料中に含有されるものではなく、地下水中に溶存している成分と考えられる。硫酸ナトリウムには、本調査で検出された Thenardite（無水物）と Mirabilite（十水和物）の2つの安定相と、七水和物の準安定相が存在することが知られている²⁻⁶⁾。安定相である Thenardite と Mirabilite の相図を図 3.2-44 に示す。

図 3.2-44 硫酸ナトリウムの相図²⁻⁷⁾

雰囲気温度が 32.4℃以上の場合には溶液から前者が、同温度以下の場合には後者が析出する²⁻⁶⁾。また図 3.2-45 に示したように、Thenardite の溶解度温度依存性は負であるのに対して、Mirabilite は著しく正の相関を示し、温度低下にともない急激に溶解度が減少する。磚、石材、および土壌表面では水分蒸発にともない、濃縮による溶質の濃度増加が生じる。そして、冬期の遺構展示館内気温は、先述の通り空調を備えておらず、ルーバーを介して通気している南棟では、外気と概ね同様の変化を示すと推察され、溶解度の温度依存性が大きい硫酸ナトリウムが材料表面に析出したと考えられる。また、空調を有する北棟では冬期の館内気温が外気と比較して有意に高いため、硫酸ナトリウムについて溶解度の減少が緩慢であり、析出には至らなかったと推察される。

図 3.2-44 の相図に示した通り、硫酸ナトリウムは雰囲気温度湿度条件によって Thenardite と Mirabilite の間で相変化を生じる。この際、体積の変化率が 315%に達すること²⁻¹⁾、さらに Thenardite から Mirabilite への相変化は速やかであること²⁻¹⁾から、多孔質材料の破壊に及ぼす影響が最も大きな塩の 1 つと考えられている。本調査では Thenardite のみが検出されたが、これは採取した塩が実験室の温度湿度条件に応じて相変化したためと考えられる。冬期の南棟館内では磚、石材、および土壌表面近傍で相変化を繰り返し生じており、図 3.2-39 に示したように、材料表面の粉状化を引き起こしていると考えられる。

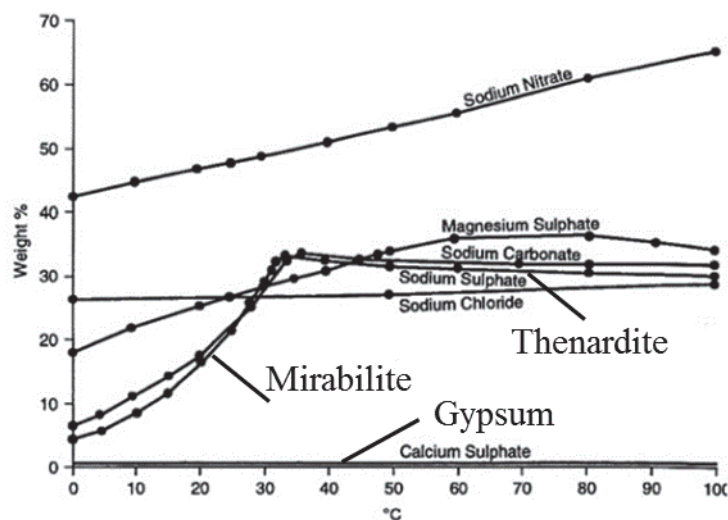


図 3.2-45 主な塩類の溶解度温度依存性²⁻¹⁾

（５）南棟で見られる沈殿物

１）目視観察

南棟の東半および雨落ち溝では、褐色ないしは赤褐色を呈する沈殿物による遺構の汚損が生じている（図 3.2-46、図 3.2-47）。南棟の法面では、盛土層と埋戻し土の層境界と、埋戻し土層と遺構面の層境界の 2 つの境界において、いずれからとも水が浸出する様子が認められた。しかし、褐色の沈殿物は下方の遺構面直上の層境界部からの浸出水においてのみ認められた。したがって、各層境界から浸出する水は起源を異にしていると考えられ、後述する地下水位の観測結果や、土壌含水率の測定結果から、上方の層境界からは主に盛土層を透過した雨水が、下方の層境界からは地下水が浸出していると考えられる。したがって、赤褐色の沈殿物は地下水中に溶存する成分が遺構面に浸出した後に沈殿していると考えられる。これらの挙動については第 3 章第 6 節で詳細を述べる。



図 3.2-46 褐色沈殿物（南棟東側）



図 3.2-47 褐色沈殿物（図 3.2-46 拡大）

２）褐色沈殿物の分析方法

遺構展示館南棟の雨落ち溝から褐色を呈する沈殿物を採取し、実験室内において風乾した。その後、メノウ鉢で粉碎し、蛍光 X 線分析法および X 線回折法による分析に供した。蛍光 X 線分析法による測定条件を表 3.2-4 に示す。X 線回折法による測定条件は表 3.2-1 と同条件である。

表 3.2-4 蛍光 X 線分析法測定条件

管電圧 [kV]	40
管電流 [μ A]	30
ターゲット	Mo
雰囲気	真空

3) 褐色沈殿物の分析結果

沈殿物の蛍光 X 線スペクトルを図 3.2-48 に示す。分析の結果、沈殿物からは鉄が非常に強く検出され、その他にマンガン、ケイ素、およびカルシウムがわずかに検出された。X 線回折スペクトルを図 3.2-49 に示す。得られたスペクトルは非常にブロードではあるものの、針鉄鉱（goethite、 α -FeOOH）のピークに帰属された。したがって、南棟で見られる沈殿物は、やや非晶質な含水酸化鉄であると示唆された。

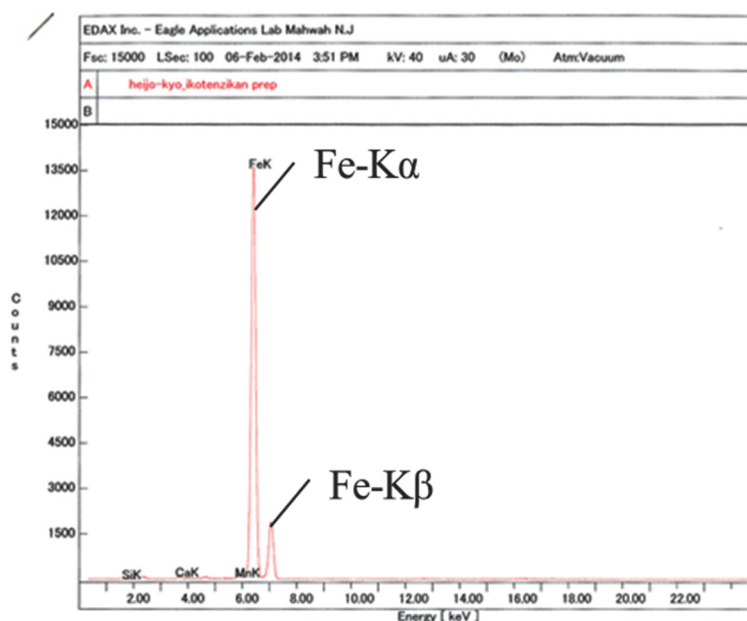


図 3.2-48 褐色沈殿物の蛍光 X 線スペクトル

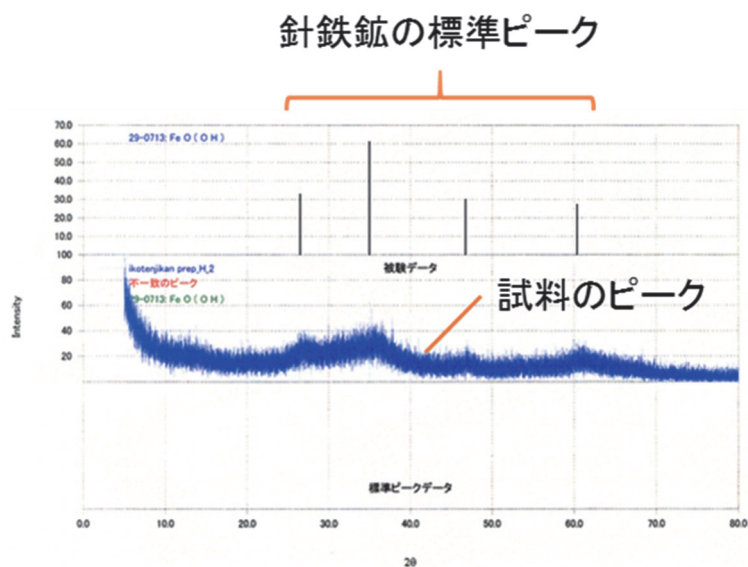


図 3.2-49 褐色沈殿物の X 線回折スペクトル

南棟の汚損を引き起こしている褐色の沈殿物は、埋戻し土と遺構面との境界から浸み出した水の中でのみ観察され、盛土と埋戻し土の境界から浸み出した水では一切認められない。先述の通り、沈殿物が見られる前者の浸出水は、地下水に由来する常に還元的な水と考えられ、一方、後者の浸出水は、南棟展示館周辺の土壌に浸透した雨水に由来する酸化的な水と考えられる。したがって、地下水が還元的な環境下において、多量の鉄が Fe^{2+} の状態で地下水中に溶存しており、これらが南棟遺構面で浸み出すと大気中の酸素が供給されるため酸化沈殿し、褐色を呈する含水酸化鉄を生じていると考えられる。また、鉄と同様にマンガンも酸化還元活性な元素であるため、鉄と同様の挙動を示すことが知られている²⁻⁸⁾。そのため沈殿物中に微量のマンガン酸化物も含まれており、蛍光 X 線分析で微量に検出されたと考えられる。また、同様に蛍光 X 線分析で検出されたケイ素やカルシウムは、沈殿物を採取する際に混入した微量の土壌粒子に由来するものと推察される。

4 第2節のまとめ

本節では、冒頭で露出展示された遺跡で一般的に見られる劣化要因について概説した。次に、本研究の対象である平城宮跡遺構展示館において目視観察によって認められる劣化として、1) 遺構土壌の崩落・クラックの発生、2) 遺構土壌の浸食、3) 蘚苔類の繁茂、4) 塩類の析出、5) 南棟で見られる褐色沈殿物に関して、それぞれの状況について述べた。北棟の柱穴において蘚苔類が繁茂している箇所と繁茂していない箇所において土壌含水率と照度の測定を実施した結果、繁茂の有無に対しては照度が大きく影響をおよぼしていることが示唆された。したがって、北棟では照明の運用方法を変更し、遺構面に供給される照度を減ずることで、現状よりも蘚苔類の繁茂を抑制し得ることが示唆された。また、遺構表面で析出が認められた塩類については X 線回折分析法による同定をおこない、南北両棟において Gypsum が通年析出していること、そして冬期の南棟においてのみ、Thenardite が析出していることを確認した。後者は多くの既往研究において、多孔質材料の破壊におよぼす影響が極めて大きい塩の 1 つであり、実際遺構展示館においても磚や石材、および遺構土壌表面の粉状化が冬期に進行することを確認した。また、南棟の雨落溝で汚損を引き起こしている褐色の沈殿物について、蛍光 X 線分析法、および X 線回折分析法を適用して、化合物の同定をおこなった。その結果、これらの沈殿物はやや非晶質の含水酸化鉄であることがあきらかとなった。含水酸化鉄の起源は遺構面に流入する地下水に溶存する鉄と推察されることから、発生要因として地下水の酸化還元環境が大きく影響をおよぼしていると考えられる。

第 2 節の参考文献

- 2-1) Andrew Goudie and Heather Viles : Salt Weathering Hazards, John Wiley & Sons, Ltd. (1997)
- 2-2) 松倉公憲 : 地形変化の科学 ―風化と侵食―、朝倉書店 (2008)
- 2-3) 内田悦生・小河善則 : 石造文化財の保存 12. アンコール遺跡の石材と劣化、土と基礎、45-8、pp.37-42 (1997)
- 2-4) 気象庁ホームページ <http://www.data.jma.go.jp/> (2013)
- 2-5) 小林恭子・勝野武彦・藤崎健一郎 : コケシートからの 3 種のコケの生育と栽培条件、日本緑化工学会誌、27 (1)、pp.197-200 (2001)
- 2-6) Carlos Rodriguez-Navarro, Eric Doehne and Eduardo Sebastian : How does sodium sulfate crystallize? Implications for the decay and testing of building materials, Cement and Concrete Research, 30, pp.1527-1534 (2000)
- 2-7) Robert J. Flatt : Salt damage in porous materials: how high supersaturations are generated, Journal of Crystal Growth, 242, pp.435-454 (2002)
- 2-8) Werner Stumm and James J. Morgan : Aquatic Chemistry, John Wiley & Sons, Inc. (1996)

第3節 遺構展示館と周辺地盤における環境調査

1 はじめに

本節では、平城宮跡遺構展示館で見られる劣化の要因を推定するとともに、遺構展示館の周辺環境に関する実測調査について説明する。

2 調査方法

(1) 外界気象条件

平城宮跡遺構展示館の北棟と南棟の間に位置する中庭に気象観測装置を2014年7月に設置し、遺構展示館の外界気象条件について実測調査を実施した。測定項目は外気温、相対湿度、大気圧、風向・風速、水平面全天日射量、および降水量で、すべての項目について10秒ごとに測定をおこない、風向を除く項目については10分ごとの平均値を算出してデータログに記録した。風速については平均値に加えて、区間瞬間最大値も記録した。また、後述する数値解析において使用した外界気象条件について、気象観測装置を設置する以前の期間のデータは、奈良地方気象台が提供する観測データをもちいた。

(2) 地下水位観測

先述の通り、平城宮跡遺構展示館で見られる劣化においては、遺構土壌へと浸潤する水分が大きく影響していると考えられる。そこで、遺構展示館北棟の北西側（No.1、排水路対岸）、北東側（No.2）、南北棟の中庭（No.3）、南棟の西側（No.4）、および南東側（No.5）において実施されたボーリング調査の土層観察をおこなうと同時に、ボーリン

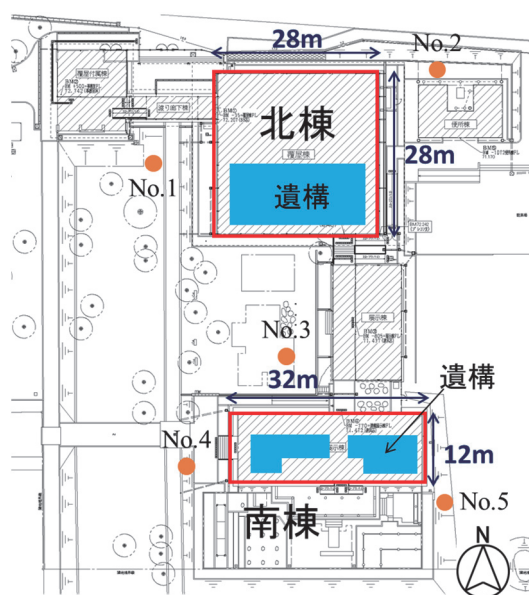


図 3.3-1 地下水位観測孔配置図

グ孔を地下水位観測孔として、各観測孔に水圧式水位計を設置して地下水位の変化について調査を実施した。観測孔の設置場所を図 3.3-1 に示す。また、測定に使用した機器は応用地質社製、S&DL mini である。

(3) 土壌含水率測定

遺構展示館北棟と南棟の法面および北棟の柱穴埋め戻し箇所において、水分化学ポテンシャル計と土壌水分センサーを設置して、水分化学ポテンシャルと土壌含水率の測定を実施した。北棟、南棟の測定箇所をそれぞれ図 3.3-2、図 3.3-3 に示す。測定にもちいたセンサーは Decagon device 社製のそれぞれ WPS-2 と 10HS で、水分化学ポテンシャルセンサーの測定上限値は-10 kPa である。

(4) 地下水溶存酸素濃度測定

南棟では雨落ち溝において褐色を呈する沈殿物が発生することで遺構の汚損が生じている。これらの沈殿物は本来地下水に溶存しているもので、その沈殿には地下水の酸化還元状態が大きく影響をおよぼしていると考えられる。一般的には、酸化還元状態を

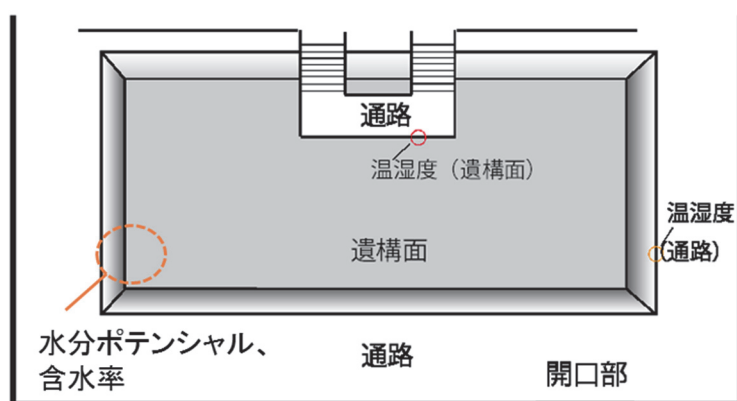


図 3.3-2 土壌含水率、水分化学ポテンシャルおよび温湿度測定箇所（北棟）

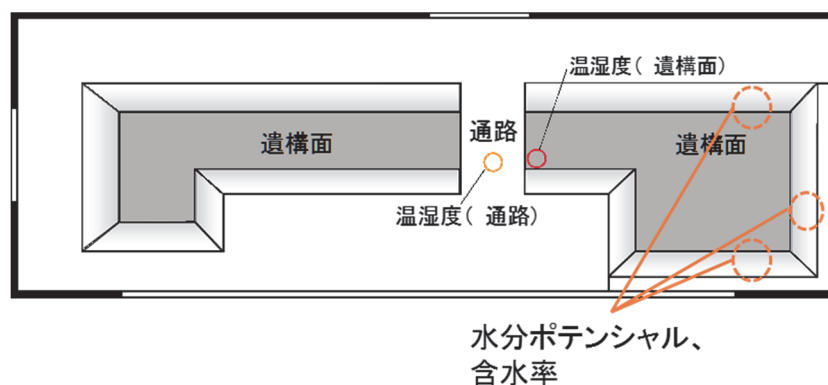


図 3.3-3 土壌含水率、水分化学ポテンシャルおよび温湿度測定箇所（北棟）

定量化するためには、ORP センサーをもちいて酸化還元電位を測定する。しかし、ここでの調査のように、長期の連続測定に使用可能な ORP センサーは希少であること、また一般に天然水の酸化還元状態は溶存酸素濃度によって支配されていること³⁻¹⁾、および溶存酸素濃度計は比較的汎用性の高いセンサーであることから、本調査では地下水の酸化還元状態の調査として、地下水中の溶存酸素濃度を測定した。図 3.3-1 に示した No.3 の観測孔において、GL-約 3.3 m および 4.5 m の位置に溶存酸素濃度計を設置した。測定に使用した機器は Onset 社製、溶存酸素計 HOB0 U26 溶存酸素ログである。

(5) 地下水溶存成分分析

遺構展示館内の土壌、磚や石材表面では析出物が観察される。それらは当初から地下水中に溶存している成分であるのか、あるいは材料中に含まれているものであるのか、その起源について検討するため、地下水中に溶存する成分の分析を実施した。試料水はテフロン製採水容器をもちいて、地下水位観測孔から毎月 1 回採取した。採取した地下水は孔径 0.2 μm のヌクレポアフィルターをもちいて速やかに濾過をおこない懸濁粒子を除去した。その後、ろ液に対して、DIONEX 社製イオンクロマトグラフィ ICS-1000 を用いて、陽イオンでは Li^+ 、 Na^+ 、 NH_4^+ 、 K^+ 、 Mg^{2+} 、 Ca^{2+} について、陰イオンでは F^- 、 Cl^- 、 NO_2^- 、 Br^- 、 NO_3^- 、 PO_4^{3-} 、 SO_4^{2-} について定量分析をおこなった。

(6) 遺構展示館内温熱環境調査

遺構展示館内の温熱環境調査として、北棟、南棟室内の温湿度測定を実施した。測定には、温湿度データログ TandD 社製、TR-72U を使用し、10 分間隔で気温及び相対湿度の測定を実施した。北棟の測定箇所は図 3.3-2 に示した通りで、温湿度データログは、通路、遺構面直上に設置した（図 3.3-4、図 3.3-5）。また北棟では建物内北半の展示室においても高さ約 1 m の箇所に温湿度計を設置して、展示室の温湿度を測定するとともに、天井部に設置された空調設備からの吹き出し箇所に温湿度計を設置して、吹き出し口の空気温度の測定を実施した。

南棟の温湿度測定箇所は図 3.3-3 に示したように、通路下側と遺構面直上とした（図 3.3-6）。



図 3.3-4 北棟通路

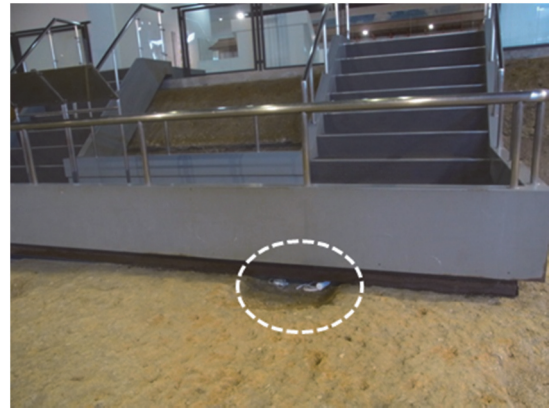


図 3.3-5 北棟遺構面



図 3.3-6 南棟通路（下側）および遺構面

3 調査結果

(1) 地下水位観測

遺構展示館周辺の各観測孔の地下水位の標高と遺構展示館の遺構面標高を示した結果を図 3.3-7 に、各観測孔設置箇所における地表面からの深度で地下水位を表したものを図 3.3-8 に示す。また、各観測孔の地下水位とボーリング柱状図³⁻²⁾を合わせたものを図 3.3-9 から図 3.3-13 に示す。

地下水面変化の挙動は3つに大別される傾向を示した。まず、観測孔 No.1 では降雨強度が強いときを除いて、降雨時に地下水面が変化を示さず、常に低い値を示し続けた。降雨強度が強い際は、地下水面が急激に上昇するものの、その後速やかに低下した。観測孔 No.1 は他の4地点と異なり、遺構展示館西側の排水路の西側に位置しており、排水路の法面に設置されている。したがって、観測孔 No.1 周辺の雨水は、現在の排水路の下方に存在する奈良時代の基幹排水路へと速やかに排水されるため、地下水面の変化が非常に乏しい結果を示したと考えられる。

観測孔 No.4 では、降雨時に地下水面は明確な応答を示し、降雨強度に応じて上昇す

るものの、その後、地下水面はある一定標高までは速やかに低下し、その後は緩やかに低下する傾向を示した。この際、地下水面の低下速度が緩慢なものへと変化する際の標高と、遺構展示館南棟の遺構面標高が概ね一致することから、観測孔 No.4 周辺地盤では、降雨時に地下水面が上昇すると、観測孔の東側に位置する南棟遺構面へ速やかに排

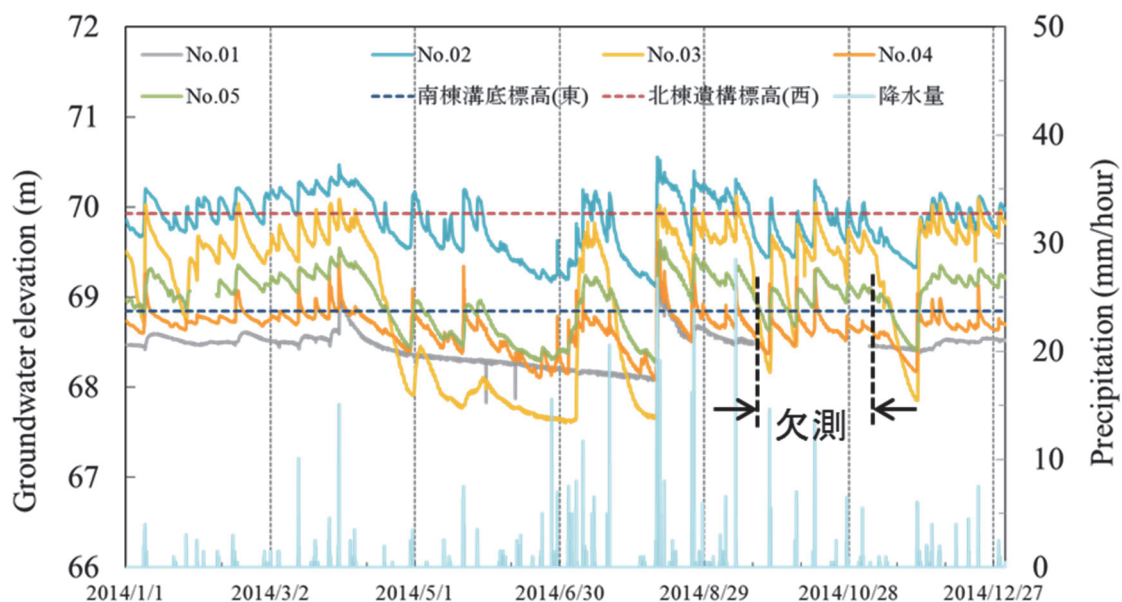


図 3.3-7 観測孔 No.1 から No.5 の地下水位変化（標高）

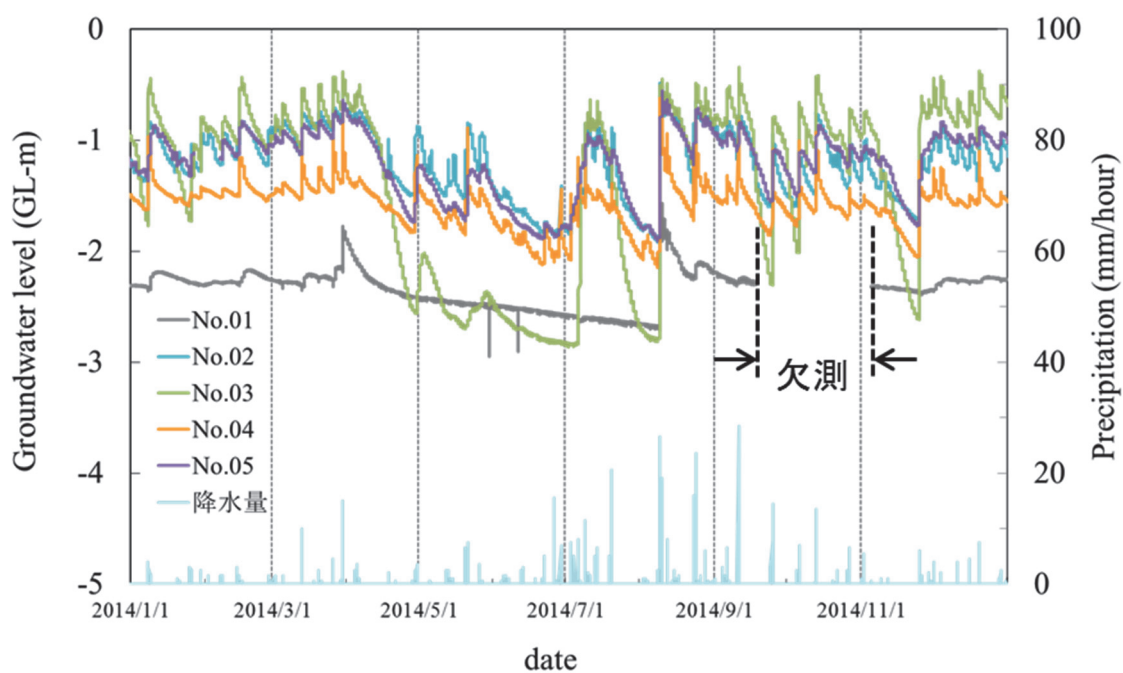


図 3.3-8 観測孔 No.1 から No.5 の地下水位変化（地表面からの深度）

水されていることが示唆された。

観測孔 No.2、3 および 5 では概ね同様の挙動を示した。すなわち、降雨時に地下水面は上昇し、その後は緩やかな低下を示した。観測孔 No.3 については、地下水面が低下した際の水位標高が極めて低い値を示しており、この点については更なる検討を要する。南棟の南東に位置する観測孔 No.5 に着目すると、降雨時に上昇した地下水面は4月下旬から8月上旬までの期間を除いて、概ね南棟遺構面よりも高い位置で、なおかつ、南棟法面の盛土と埋戻し土の境界よりも低い位置で推移することがあきらかとなった。図 3.3-7 の結果から、地下水面は大局的には北から南に向かって下降する勾配を持っていると考えられる。したがって、南棟よりも南側に位置する観測孔 No.5 において、地下水面が南棟の遺構面よりも高かったことから、この期間は常に南棟遺構面の東側へ水分が流入していることが示唆された。一方、観測孔 No.2 は北棟遺構面よりも北側に位置するため、北棟遺構面の直近における地下水位と遺構面の上下関係については推定の域を出ない。目視観察の結果では、南棟では1年の大半の時期において、遺構面が湛水状態にあった。一方で、北棟では遺構面の東西法面の近傍で土壌の含水状態が高い時期が確認されたが、水面が現れるまでには至らなかった。したがって、北棟は地下水位が上昇した時期に水分が流入するものの、その影響は南棟と比較して軽微であるものと推察される。

観測孔 No.4 では、遺構面標高まで地下水面が速やかな低下を示した一方で、観測孔 No.5 では、遺構面標高よりも高い地下水面を維持したことについては、遺構展示館の東西に設けられた排水路が影響していると推察される。先述の通り、西側の排水路はコンクリート三面張りの構造であるため、排水路を流れる水分は観測孔 No.4 周辺地盤へ供給されることが無いものと考えられる。一方、東側の排水路は素掘りのもので、目視観察の結果、概ね年中排水が生じている。したがって、観測孔 No.5 周辺の地盤では地下水の一部は遺構面へ流出する一方で、素掘りの排水路から水分が供給されており、その結果、観測孔 No.4 とは異なり、地下水面の低下が緩慢となっていると推察される。

No.2 および No.3 では地下水面が低下する際に、その低下速度に変曲点が認められた。すなわち、それぞれ標高約 70.0 m (GL-1.0 m)、69.5 m (GL-1.0 m) の標高までは地下水面の低下が緩慢であるが、上記標高を下回ると地下水面の低下は速やかとなった。図 3.3-10、図 3.3-11 に示した通り、ボーリング調査の結果から No.2 では標高 69.96 m より上層は粘性土、標高 69.96 m から 69.86 m の間は砂利・礫混じり粘土、標高 69.86 m より下層には砂礫層が存在し、No.3 では標高 69.66 m より上層は砂質粘土、下層は粘土混じり砂礫層が存在し、いずれの観測孔においても下層と比較して上層は細粒分の多い土層である。一般に、細粒分が多い土壌の方が空隙率は高くなることから、下層と比較して上層の空隙率は高いと推察される。排水のフラックスが、土層によらず一定と仮定すると、空隙率が高い上層では地下水面の低下速度は緩慢で、空隙率が低い下層では、見かけ上地下水面の低下速度は速くなることになる。ボーリング調査の結果

から得られた層境界深度とその粒度組成、および地下水面位置の変化速度が調和的な結果であることから、ここで見られた地下水面の低下速度が一定深度で変化を示した理由は、土層境界を通過したことに起因すると考えられる。

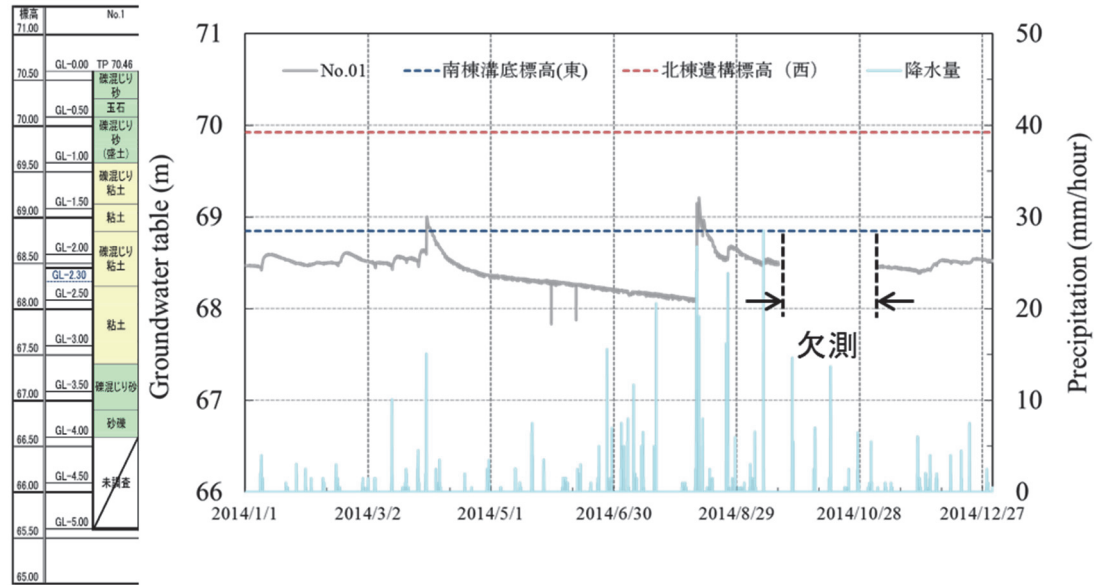


図 3.3-9 観測孔 No.1 の地下水位変化と対応する土層断面図

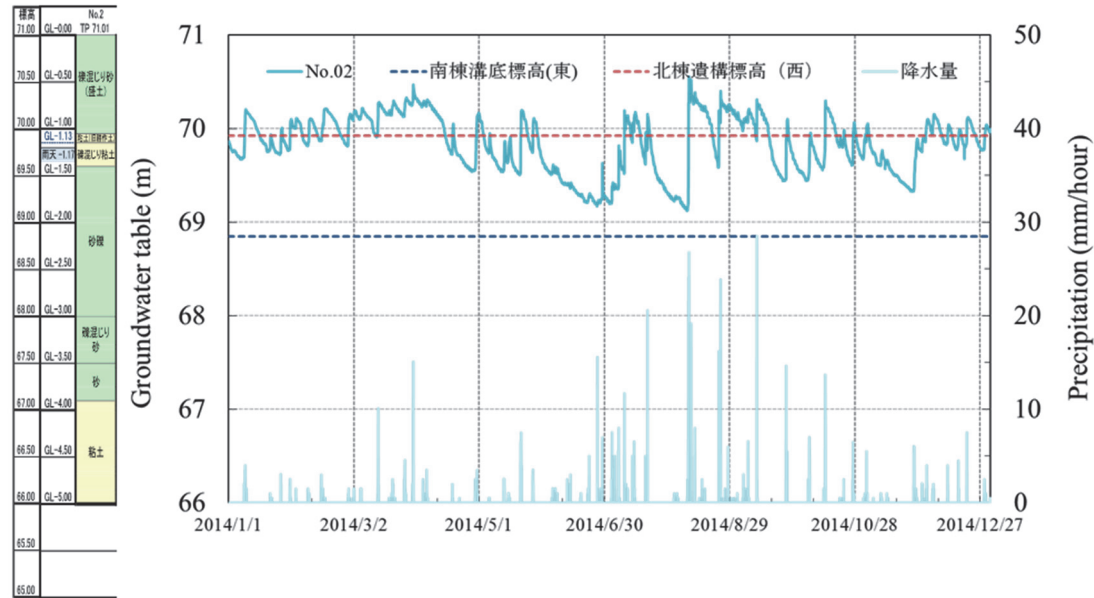


図 3.3-10 観測孔 No.2 の地下水位変化と対応する土層断面図

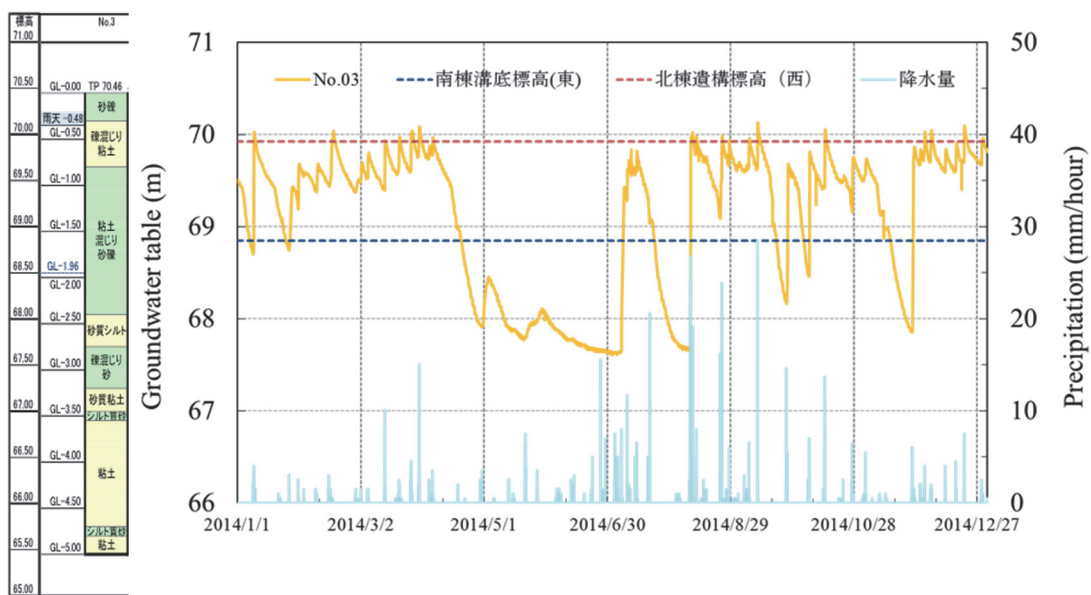


図 3.3-11 観測孔 No.3 の地下水位変化と対応する土層断面図

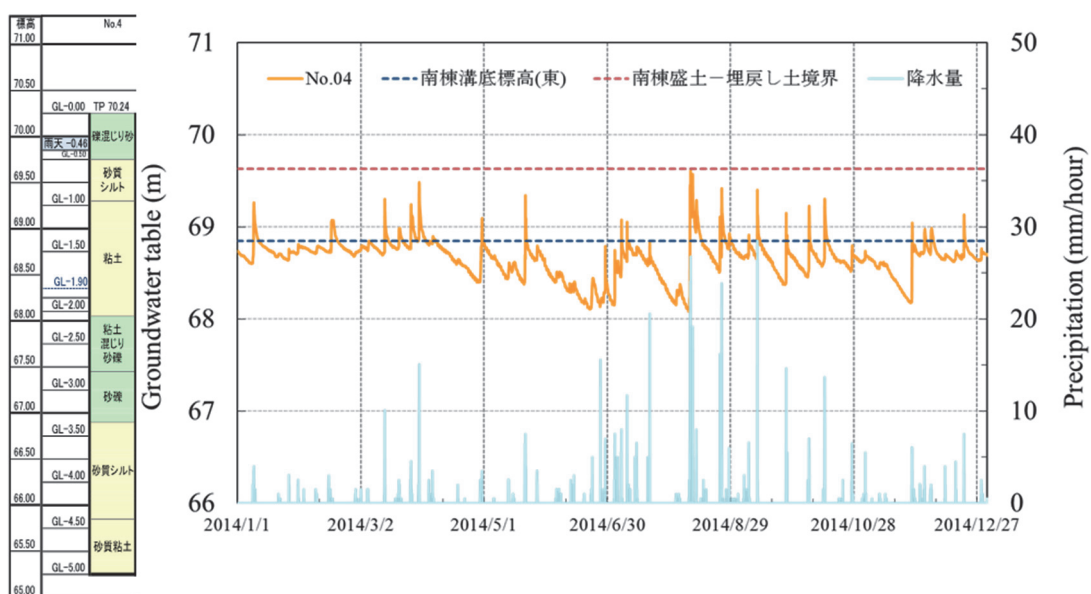


図 3.3-12 観測孔 No.4 の地下水位変化と対応する土層断面図

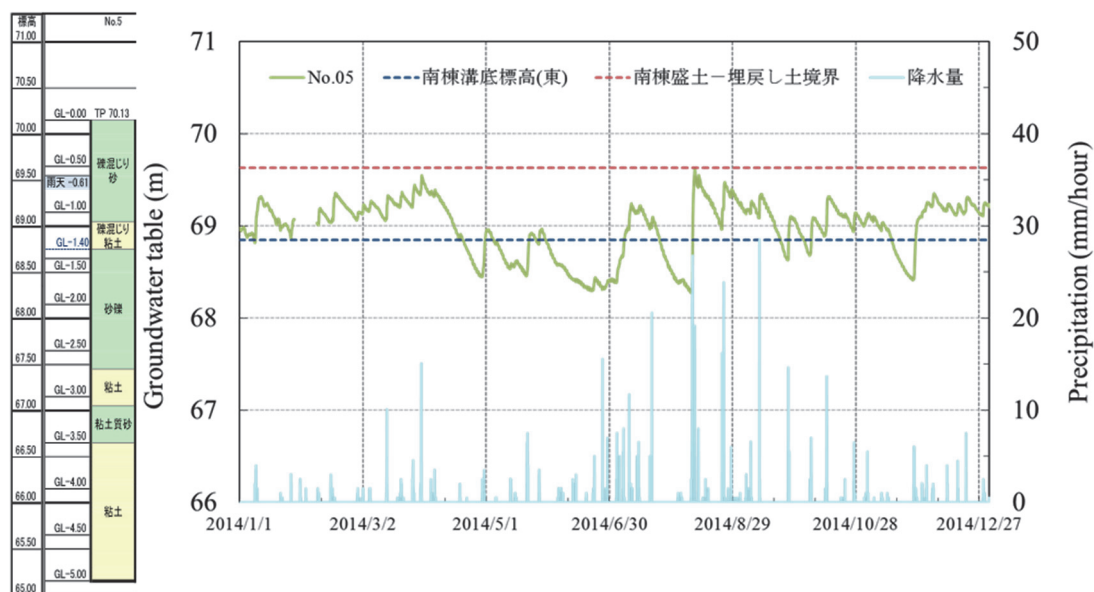


図 3.3-13 観測孔 No.5 の地下水位変化と対応する土層断面図

(2) 土壌含水率測定

北棟南西隅の柱穴と、その西側に位置する法面の盛土と埋戻し土の層境界直上、および埋戻し土と遺構面の層境界直上において土壌含水率を測定した。測定箇所状況を図 3.3-14 に、測定結果を図 3.3-15 に示す。遺構面の柱穴を埋め戻した箇所の測定結果では、降雨後に含水率が速やかに増加し、その後、速やかに減少を示したが、常に高い含水率を示し続けた。含水率が増加して一定値を示している時期では、水分飽和状態に至ったものと考えられ、相当量の水分の流入があったと推察される。しかし、図 3.3-14 に示したように、遺構面における濡れ色の分布は南西隅に限定されている様子が観察されたことから、水分の流入は南西隅からの局所的な水分移動によるものと考えられる。一方で、法面の盛土と埋戻し土の層境界直上および埋戻し土と遺構面の層境界直上では、ある程度の降雨強度に達した場合にはわずかに土壌含水率の増加が認められたが、降雨強度が小さい場合には明確な応答は認められず、わずかな増減を繰り返し示した。また、遺構面柱穴と比較して、含水率は常に低い値を示したことから、測定を実施した西側法面の南側では、盛土と埋戻し土の層境界からの水分の流入量はわずかであることが示唆された。一方で、埋戻し土と遺構面の層境界直上では常に低い含水率を示したものの、その直下の遺構面は濡れ色を呈し、高い含水状態にあったことから、南西隅では埋戻し土と遺構面の層境界から局所的な水分の流入が生じていると考えられる。南西隅では盛土と埋戻し土の層境界に沿った析出物の発生は見られなかったが、後述するように西側法面の北側などでは、盛土と埋戻し土の層境界に沿って析出物が発生している様子が観察された。したがって、これらの箇所では盛土と埋戻し土の層境界においても水分の流入が生じていると推察され、北棟では盛土と埋戻し土の層境界およ



図 3.3-14 北棟南西隅の柱穴と西側法面の含水率測定箇所（写真は西側から撮影、手前が西側法面、右側に見えるのが南側法面）

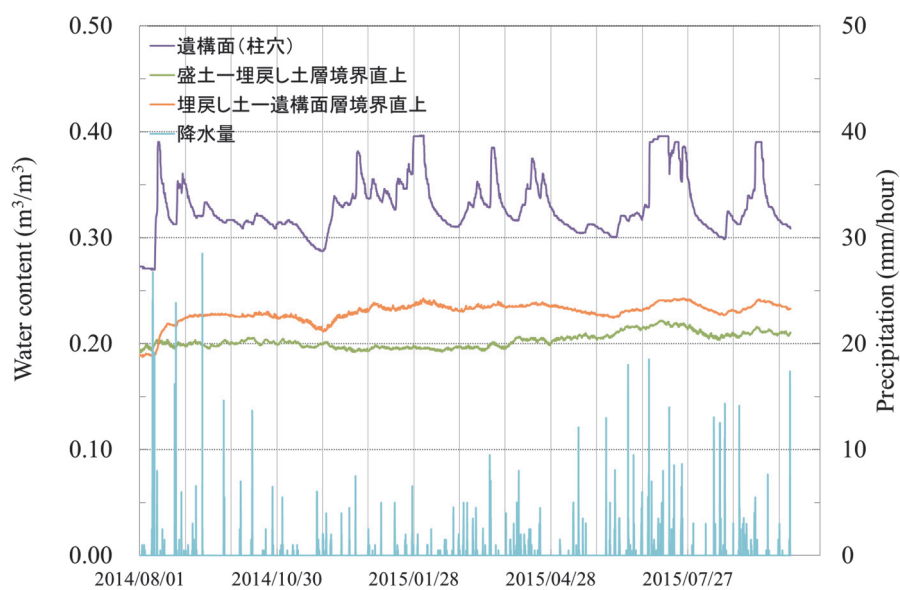


図 3.3-15 北棟西側の遺構面および西側法面の土壌含水率

び埋戻し土と遺構面の層境界に沿って館内に水分が流入しており、なおかつその水分流は特定の箇所から局所的に生じていると考えられる。

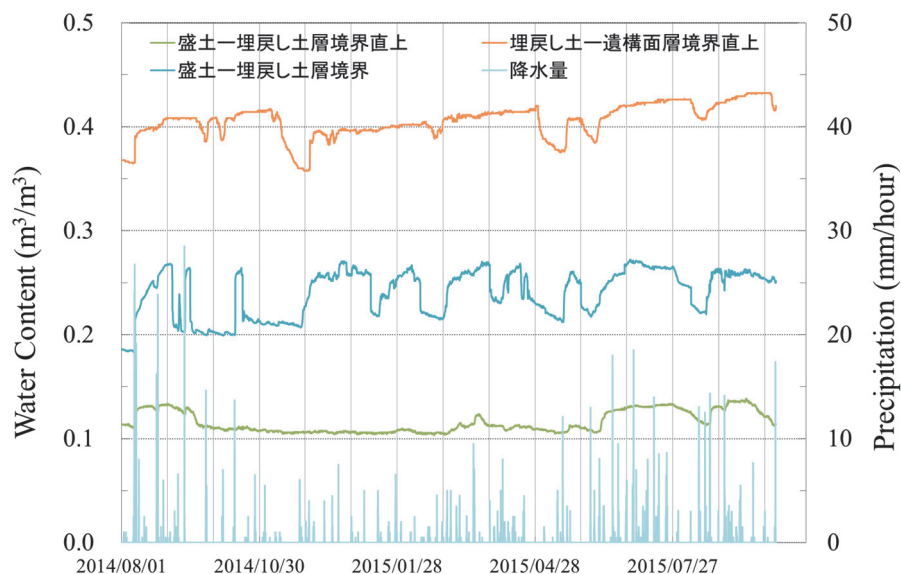


図 3.3-16 南棟東側法面の土壌含水率

南棟の東側法面で土壌含水率を測定した結果を図 3.3-16 に示す。盛土と埋戻し土の層境界直上の土壌含水率は、2014 年 8 月、および 2015 年 6 月に降雨の積算量が増加した際に、わずかに上昇したものの、概ね常に低い値で推移した。一方、盛土と埋戻し土の層境界では直上の結果と比較して常に高い含水率を示し、降雨時に含水率が速やかな増加を示した。埋戻し土と遺構面の層境界直上における含水率は、2014 年 11 月下旬と 2015 年 5 月にわずかに減少したが、その他の期間では常に高い値を示した。

埋戻し土と遺構面の層境界直上の含水率がわずかに減少した 2014 年 11 月下旬では、図 3.3-13 に示したように、東側法面に近接する観測孔 No.5 の地下水面は低下して、南棟遺構面よりも下方に位置している。その他の期間では、地下水面が遺構面よりも上方にあることから、遺構面直上の土壌は水分飽和しており、地下水が遺構面へと浸み出していたと推察される。また、2014 年 11 月下旬に埋戻し土と遺構面の層境界直上の土壌含水率が減少した際に、盛土と埋戻し土の層境界では含水率が増加を示しており、含水率の変化が必ずしも一致しない様子が認められた。さらに、盛土と埋戻し土の層境界の含水率は降雨に対して速やかな応答を示したことから、覆屋屋外で地表に浸透した雨水の一部が、盛土と埋戻し土の層境界に沿って、館内へと浸入していると考えられる。

南棟南側法面の盛土と埋戻し土の層境界直下、および埋戻し土と遺構面の層境界直上において水分化学ポテンシャルおよび土壌含水率を測定した結果を図 3.3-17 に示す。東側法面と同様に、測定を開始した 2014 年 8 月以降、11 月に水分化学ポテンシャルが減少を示した以外では、常にセンサーの測定上限値を示し続けた。また、この期間、土壌含水率は常に高い値を維持したが、降雨時には急激に増加し、その後緩やかに減少を示し続けた。東側法面同様に、目視観察の結果、降雨後では盛土と埋戻し土の層境界からも液水が流下してい

る様子が認められたことから、南側法面においても雨水の一部が法面に直接浸入し得ることが示唆された。

南棟北側法面の盛土と埋戻し土の層境界直上と直下、および埋戻し土と遺構面の層境界直上において土壌含水率を測定した結果を図 3.3-18 に示す。測定を開始した 2014 年 8 月以降、8 月上旬の降雨時にいずれの測定点においても土壌含水率の増加が認められた。特に、盛土と埋戻し土の層境界と埋戻し土と遺構面の層境界直上の 2 点では土壌含水率が緩やかな増加を示したのに対して、盛土と埋戻し土の層境界直上では土壌含水率が急激な増加を示した。しかし、その後はいずれの測定点においても、土壌含水率のわずかな増減は認めら

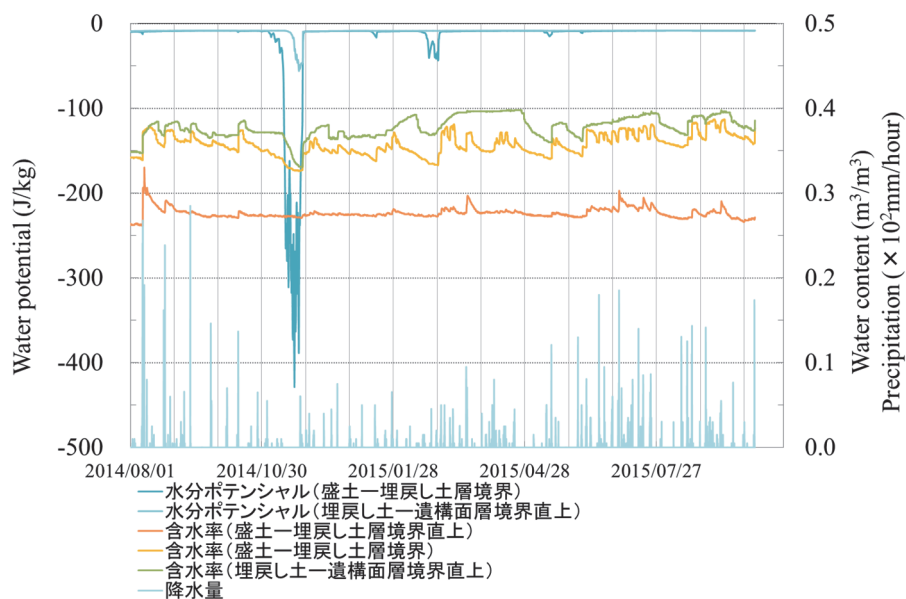


図 3.3-17 南棟南側法面の土壌含水率と水分化学ポテンシャル

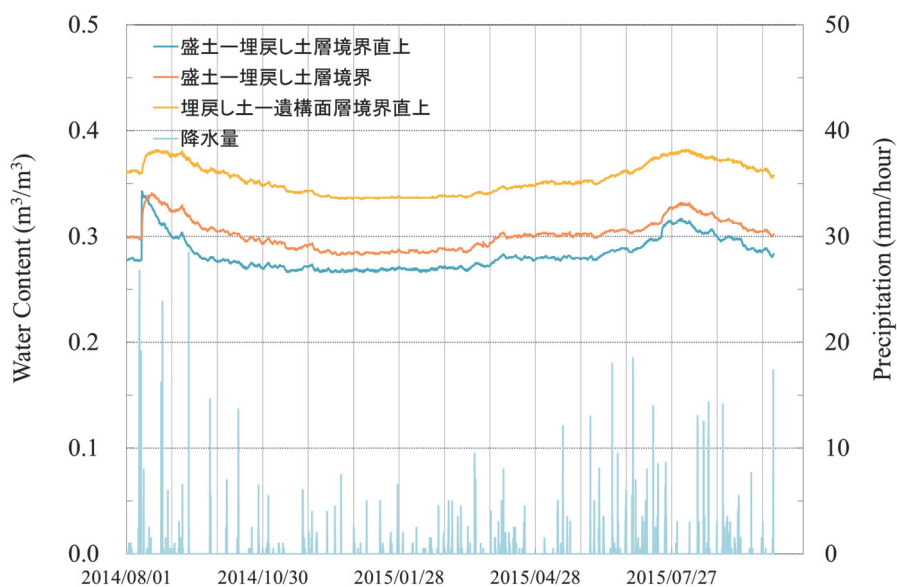


図 3.3-18 南棟北側法面の土壌含水率

れるものの、緩やかに減少し続ける様子が認められた。8月上旬では降雨強度が強かったために、盛土と埋戻し土の層境界において表流水が浸入したと考えられる。一方で、他の2箇所では緩やかな増加を示したことから、雨水が土中を緩やかに浸潤し、遺構展示館内法面まで達したと推察される。またその後は降雨に対して明確な応答が認められないことについては、南棟北側には中庭に面した展示施設が立地することから、地表面に達する雨水が少ないことによると考えられる。また、目視観察の結果からも、北側法面からは液水が流下する様子は、2013年9月に集中豪雨が観測されたときを除いて認められなかった。

以上の結果から、遺構展示館の北棟と南棟では雨水や地下水が流入することで、含水状態が変化することがあきらかとなった。遺構面に流入する水分の経路は図3.3-19に示すように、2つに大別されることが示唆された。1つ目は周辺地盤中の地下水が、水位の上昇時に遺構面直上の層境界から浸み出すもので、これには地表面から浸透した雨水のうち、いったん地下水へと涵養されたものも含まれる。2つ目は、降雨時に盛土と埋戻し土の層境界に沿って、直接館内の法面へと浸入する経路が存在すると推察される。そして、両者の水質は前者が地下水のものであるのに対して、後者は雨水に近いと考えられる。ただし、北棟では南棟と異なり、降雨時に展示館内法面において液水が流下する様子が認められなかったことから、流入量が比較的少ないと考えられる。また、その流入箇所は局在化しており、後述する土層境界の析出物が多い箇所では水分の流入が特に顕著に生じていると考えられる。

(3) 地下水溶存酸素濃度

観測孔 No.3 における溶存酸素濃度 (Dissolved Oxygen、以下 DO と略記する) を飽和度に換算した値と、降水量および地下水面の変化を図3.3-20に示す。なお、データ回収時の地下水の攪乱に起因する DO 濃度の増加を図中破線で示した。これらの変化については検討から除外する。

図3.3-20の結果から、DO濃度変化には明確な年周期の季節変動は認められず、1年を通して増減を繰り返した。DOの減少は、土中の微生物によって有機物が酸化分解される際にDOを消費することによるものと考えられ、比較的速やかにDOが消費されることがあきらかとなった。すなわち、地下水面以深の地盤内部では、通常は還元的な環境にあり、酸

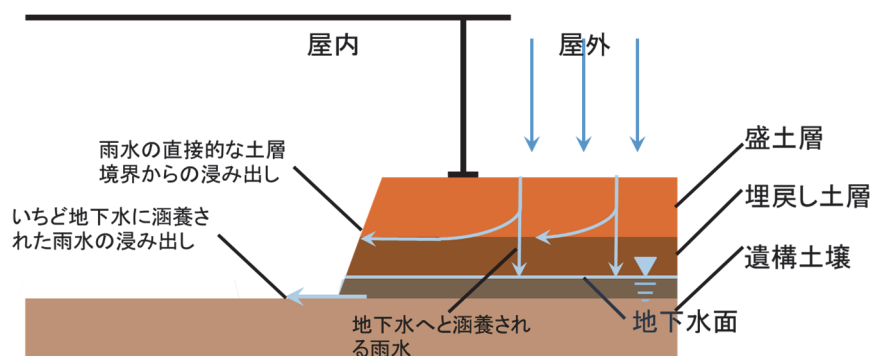


図 3.3-19 南棟周辺地盤における水分移動の模式図

化剤である DO が供給された場合でも、微生物活動によって還元的な環境へ速やかに戻ることが示唆された。

次に、地盤内部への DO の供給について検討する。DO 濃度の増加と、地下水面および降水量の観測結果には大きく 2 通りの相関が認められた。DO 濃度が増加を示す 1 つ目の形態は、地下水面が低下して、約 GL-1 m を下回った際に DO が増加を示すものである。このときの DO 濃度の増加と地下水面の低下を図 3.3-20 中、青矢印で示す。一般に、土層境界の上下では土壌の空隙率が異なることから、地下水から一定量の排水が生じ続けて土層境界を越えた場合、地下水面の低下速度は変化すると考えられる。実際、観測孔 No.3 の地下水面が低下して、約 GL-1 m の深度を下回る際は、いずれの場合も低下速度が増加する傾向が認められ、土層境界の存在を示唆する結果と考えられる。したがって、観測孔 No.3 では、約 GL-1 m は概ね盛土と埋戻し土の層境界に該当する深度と考えられ、詳細は 4 章 7 節で述べるが、この深度で層境界に沿った水平方向の水分移動が生じており、観測孔内にも水分が流入していると考えられる。

地下水面では直上の気相から酸素が地下水へと移動することで DO が供給される一方で、それらの DO は微生物の触媒的な働きを伴う有機物の分解によって、地下水中で速やかに消費される。DO 自身の分子拡散による移動は極めて緩慢であることから^{3-3) 3-4)}、地下水面以深では深度の増加とともに急速に DO 濃度は減少し、還元的な環境へ移行すると考えら

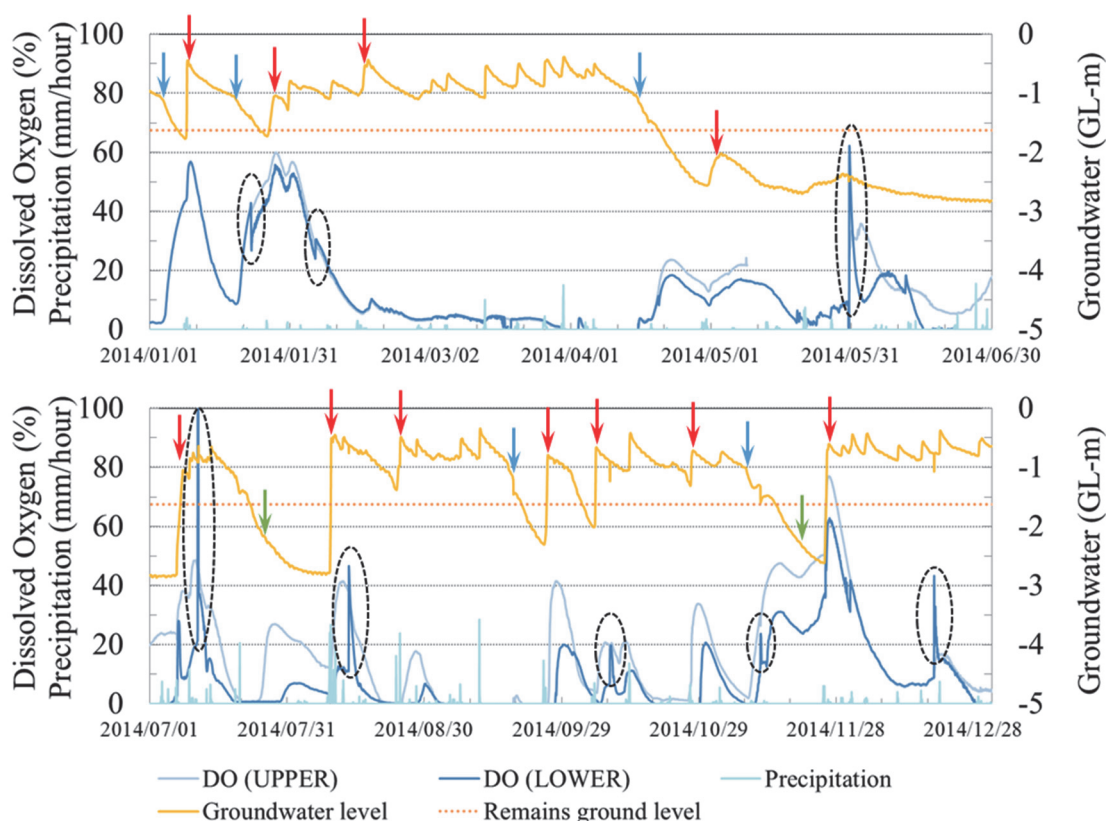


図 3.3-20 観測孔 No.3 における DO 濃度変化

れる。地下水面が GL-1 m、すなわち盛土と埋戻し土の層境界よりも十分上方に位置しているとき（図 3.3-21a）、層境界に沿って観測孔内へ流入する水は、DO に乏しい還元的な地下水と考えられる。したがって、地下水面が GL-1 m よりも上方で推移する間では、観測孔内の地下水の DO 濃度は変化しないと考えられる。一方、地下水面が低下し、層境界近傍に達すると（図 3.3-21b）、この深度の地下水は DO に富んだ酸化的な地下水へと変化すると考えられる。そして、これらが層境界に沿って観測孔内に流入することで、観測孔内の地下水は DO が供給されるだけでなく攪拌されるため、観測孔深部でも DO 濃度が上昇すると考えられる。さらに地下水面が低下すると（図 3.3-21c）、地下水の移動は再び鉛直方向のものが卓越することとなり、地下水面直下では DO 濃度が局所的に増加するものの、観測孔内では鉛直方向の水分移動が生じないために観測孔底部では DO 濃度が変化しないと考えられる。

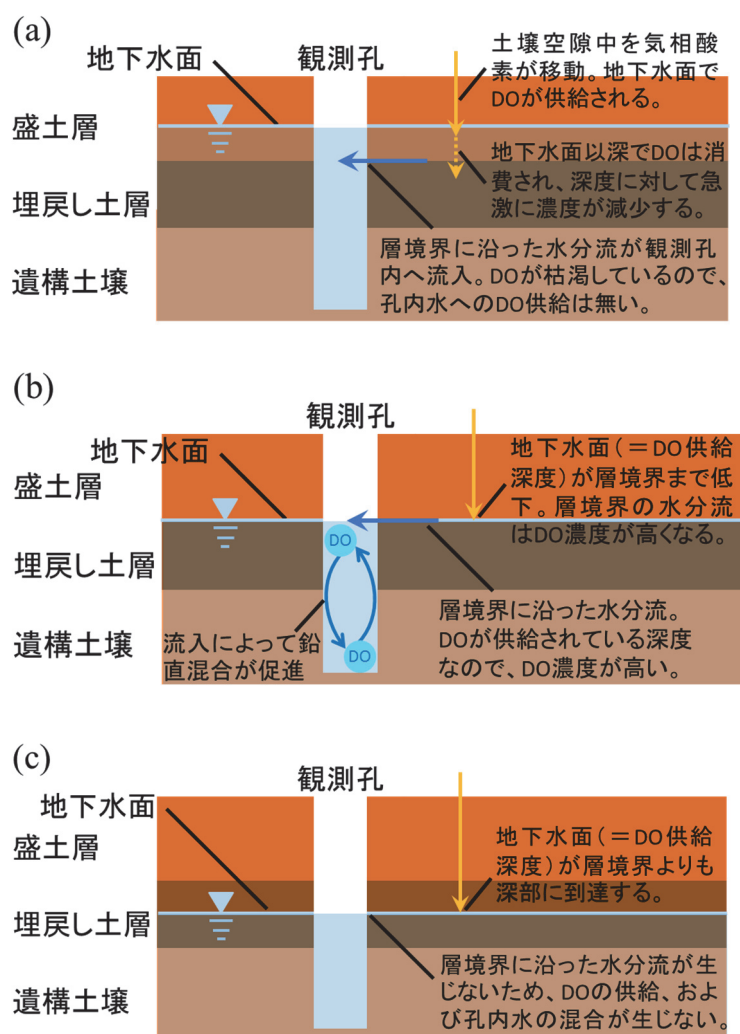


図 3.3-21 観測孔 No.3 における水分、DO 移動模式図

((a) : 地下水面が盛土－埋戻し土の層境界よりも高い場合、(b) : 地下水面が低下して土層境界と同一深度となった場合、(c) : 地下水面が低下して土層境界よりも低い場合)

DO 濃度が増加を示す 2 つ目の形態は、降雨時に地下水面が上昇すると同時に、DO 濃度が増加するもので、このとき地下水面は先述の層境界の深度、すなわち GL-1 m よりも深い位置にある場合に限定される。このときの DO 濃度の増加を図 3.3-20 中、赤矢印で示す。地下水面が層境界深度よりも上方にある場合（図 3.3-22a）、地表面から浸透した雨水は地下水へと涵養されるのみで、図 3.3-22a で示したように層境界を経て地盤から観測孔内へ流入する水は DO に乏しく、したがって観測孔内の地下水の DO 濃度は変化しないと考えられる。実際、2014 年 3 月では断続的な降雨によって地下水面の昇降が繰り返し生じているが、DO 濃度には顕著な変化は認められなかった。

一方、地下水面が層境界深度よりも下方にある場合（図 3.3-22b）、図 3.3-19 に記したように、降雨時に雨水の一部は盛土と埋戻し土の層境界に沿った水分流となって、地下水に涵養されることなく観測孔に流入していると考えられる。このとき、雨水は不飽和状態の盛土層を浸透して観測孔へ到達するため、DO を含有した酸化的な状態を維持していると推察される。したがって、これらが観測孔内へと流入することで、DO の供給と観測孔内の地下水を攪拌することとなり、観測孔底部へ DO を供給し得るものと推察される。また、GL-3.3 m

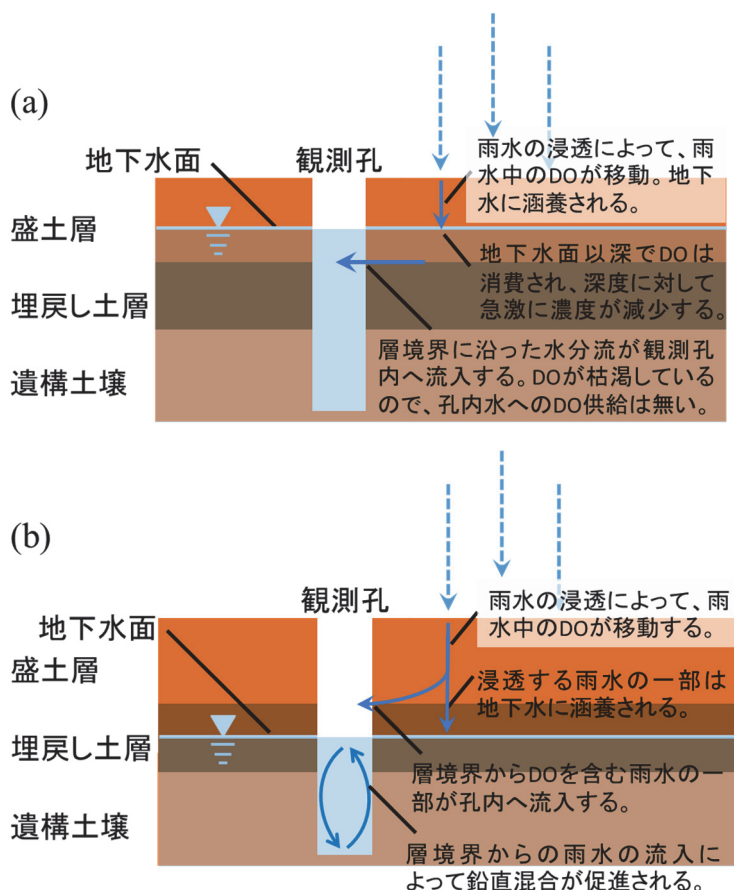


図 3.3-22 観測孔 No.3 における水分、DO 移動模式図（降雨時）

((a)：地下水面が元々盛土－埋戻し土の層境界よりも高い場合、(b)：地下水面が元々土層境界よりも低い場合)

と GL-4.5 m の深度別の DO 濃度を比較すると、夏期と比較して冬期の降雨時では両者の濃度差は小さく、かつ濃度変化に時間差が認められなかった。冬期では冷たい雨水が観測孔上部から供給されることで、観測孔内の地下水が速やかに鉛直混合されたことによると推察される。

図 3.3-20 中、緑色矢印で示したように、2014 年 7 月 24 日および 11 月 20 日に DO 濃度の増加が認められたが、これらは上記の議論のいずれにも合致しない。これらの DO 濃度変化時の共通点は、地下水面が約 GL-2.2 m から -2.4 m 付近まで低下した際に、DO 濃度が増加していることである。したがって、上記の DO 濃度の増加は、GL-2.2 m から -2.4 m 付近にも何らかの局所的な水平方向の水分流が発生し得る層が存在することを示唆するものと考えられる。

以上、観測孔内の地下水について、図 3.3-20 に示した DO 濃度変化が生じる要因について検討をおこなった。これらの議論から、地下水面の位置と降雨の有無によって、各土層境界を流れる水の酸化還元状態を推察することが可能と考えられる。そこで、以下では含水酸化鉄の沈殿が顕著な南棟の南東隅について、直近の観測孔 No.5 における地下水面と降雨の測定結果から、遺構面に浸み出す水の酸化還元状態について検討する。

図 3.3-23 に示した 2014 年の地下水面深度の測定結果では、観測孔 No.5 の地下水面は、盛土と埋戻し土の層境界位置まで上昇することはなかった。したがって、先述の通り、この層境界から浸出する水の水質は雨水に近く、常に DO を含有する酸化的なものと考えられる。一方、遺構面直上の層境界から浸出する水については、4 月下旬から 8 月中旬にかけて、および 11 月下旬に地下水面が大幅に低下する時期に、遺構面が位置する深度を地下水面が通過する際、一時的に酸化的なものになると考えられる。しかし、その他の時期において、地下水面が遺構面よりも上方に位置する期間は、遺構面直上からは常に還元的な地下水が

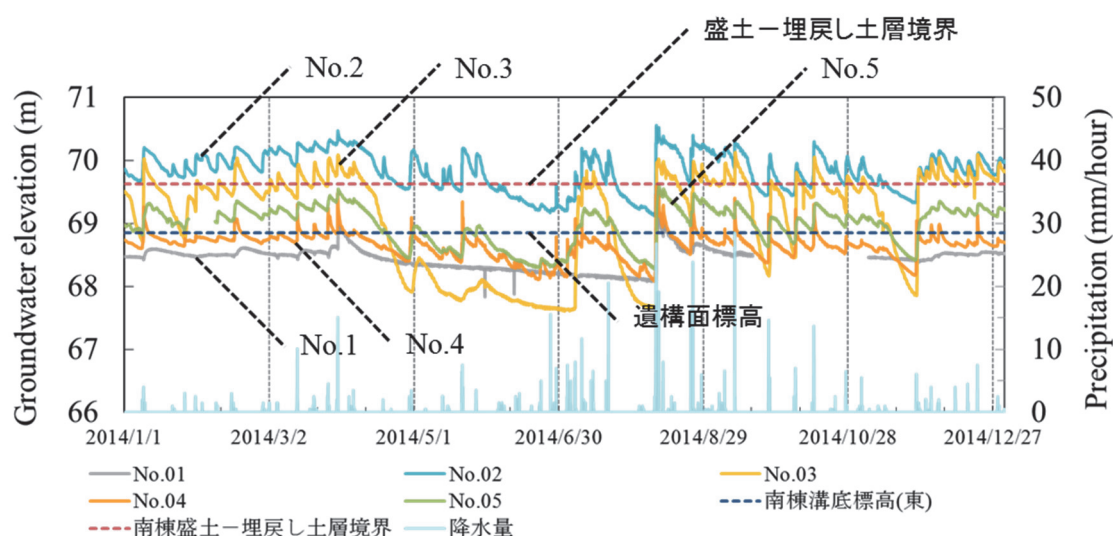


図 3.3-23 2014 年の各観測孔地下水位変化と南棟各土層境界標高の関係

浸出していると推察される。

（４）地下水溶存成分分析

先述の通り、観測孔 No. 1 については地下水位の変動が他の 4 地点と大きく異なることから、地下水溶存成分の調査の対象から除外した。観測孔 No. 2 から 5 の 4 観測孔における地下水に含まれる各陽イオン量を図 3.3-24 から図 3.3-27 に、各陰イオン量を図 3.3-28 から図 3.3-31 に示す。

陽イオンについては、観測孔 No. 3 を除く他の 3 地点ではカルシウムイオン濃度が高く、その他の陽イオンとして、ナトリウムイオン濃度が次いで高い値を示した。観測孔 No. 3 では両イオンは概ね等しい濃度を示した。観測孔 No. 2 においては例外的にマグネシウムイオンがやや高い濃度を示したが、その他の観測孔ではマグネシウムイオン、カリウムイオン、アンモニウムイオン濃度は低い値を示した。また、カルシウムイオン濃度が高い値を示した No. 2、4、5 の 3 地点では、カルシウムイオン、およびナトリウムイオンの濃度変化には、やや不明確ながらもわずかに季節変化が認められ、夏期に極大値を示すことが示唆された。

陰イオンについては、No. 5 ではやや低い濃度を示したものの硫酸イオン濃度が高く他の陰イオンと比較して優勢であることが示唆された。また、観測孔 No. 5 を除く 3 地点では硫酸イオン濃度は夏期に高く、冬期にはやや減少する傾向を示した。観測孔 No. 5 では硫酸イオン濃度の変化に明確な季節変化は認められなかった。いずれの観測孔においても塩化物イオンは濃度が比較的低いながらも常に含まれる一方で、フッ化物イオンは冬期においてのみ濃度が増加を示した。カルシウムイオンや硫酸イオンなど、優勢なイオン種は概ね夏期に極大値を示した一方で、フッ化物イオンは他のイオン種とは異なる濃度変化を示しており、その原因については推定には至っていない。また、本調査では定量分析をおこなっていないが、上記の陰イオンの他に主たるものとして重炭酸イオンが含まれており、電気的中性が維持されていると考えられる。

以上の結果から、遺構展示館周辺の地下水の溶存成分について、陽イオンではカルシウムイオン、次いでナトリウムイオン濃度が高く、陰イオンでは硫酸イオン濃度が高いという傾向を示すことが示唆された。また、その濃度変化は明確な季節変動ではないものの、夏期に高い値を示すことが示唆された。したがって、これらの地下水が遺構展示館内に流入して、磚、石材や土壌などの多孔質材料表面において蒸発する際、地下水中の溶存成分に由来する塩が材料表面で析出し得るものと考えられ、4 章 2 節で述べた析出物の分析結果と調和的な結果を得た。また、硫酸ナトリウムについては冬期の南棟においてのみ析出が確認されたが、ナトリウムイオンおよび硫酸イオンについては、むしろ夏期において濃度が高い傾向を示した。したがって本調査結果からも、硫酸ナトリウムの析出が冬期の南棟に限定される要因としては、換気による南棟の気温の低下が主たるものと推察される。

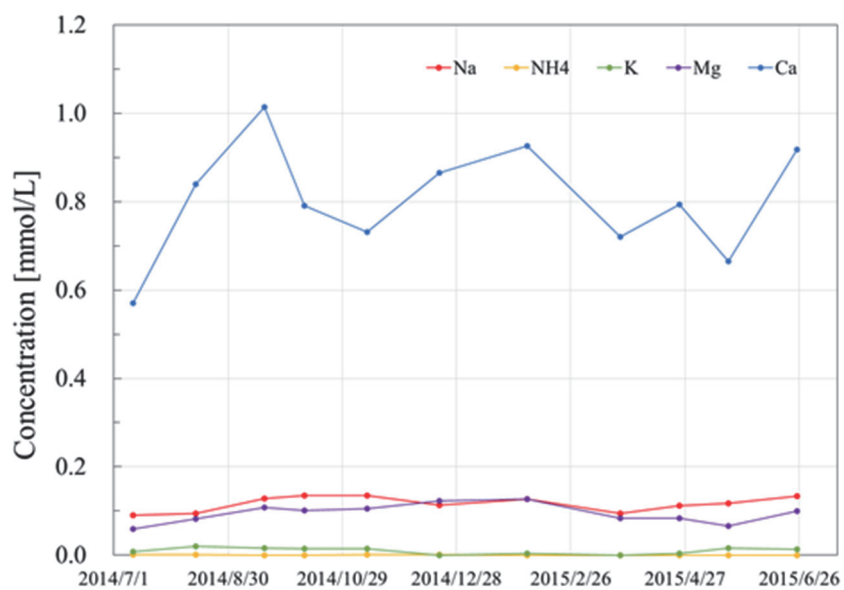


図 3.3-24 地下水中の陽イオン（観測孔 No.2）

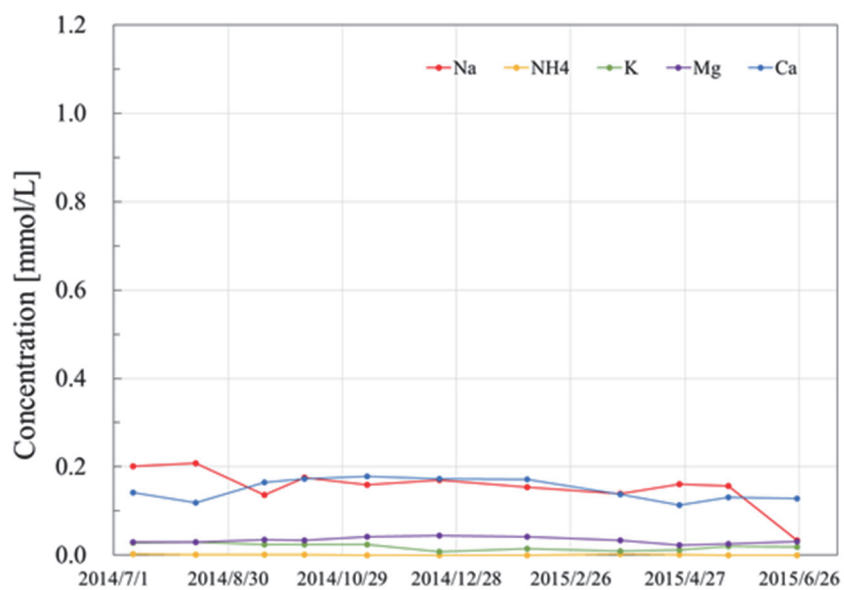


図 3.3-25 地下水中の陽イオン（観測孔 No.3）

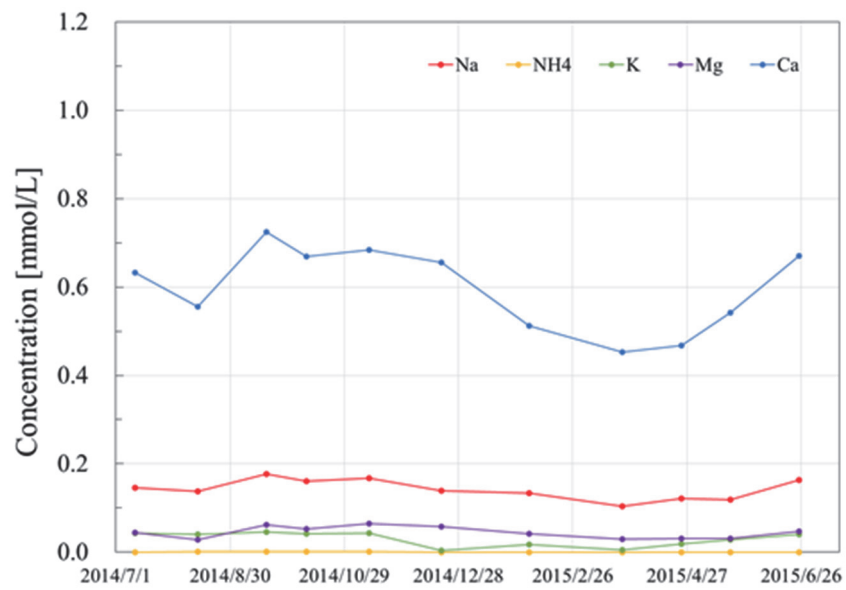


図 3.3-26 地下水中の陽イオン（観測孔 No.4）

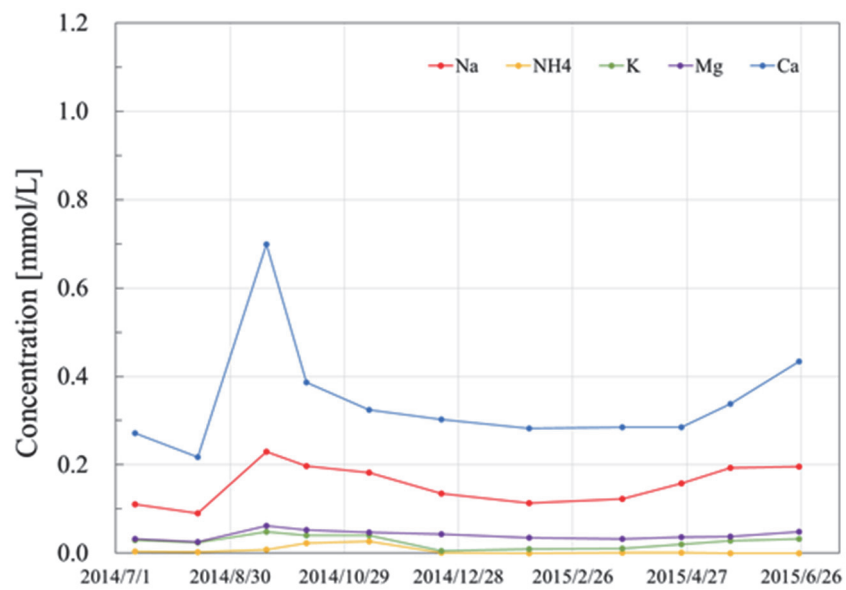


図 3.3-27 地下水中の陽イオン（観測孔 No.5）

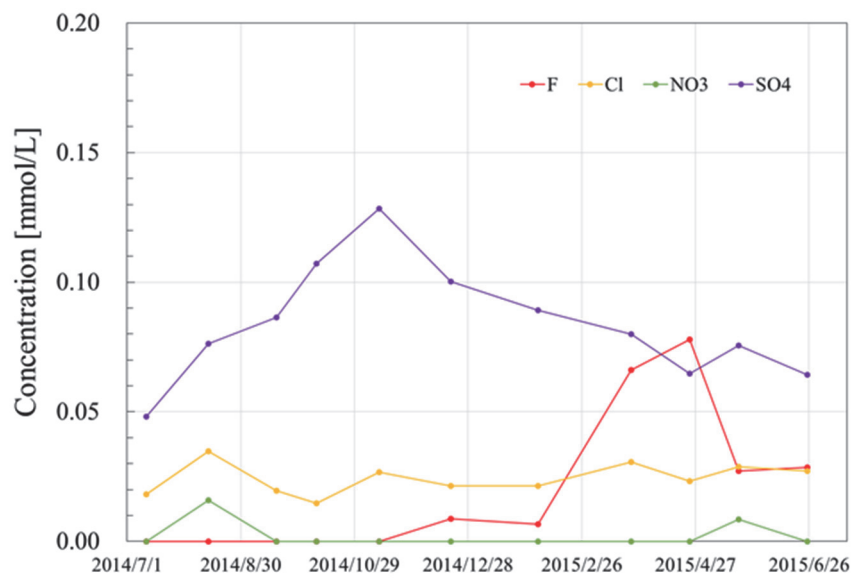


図 3.3-28 地下水中の陰イオン（観測孔 No.2）

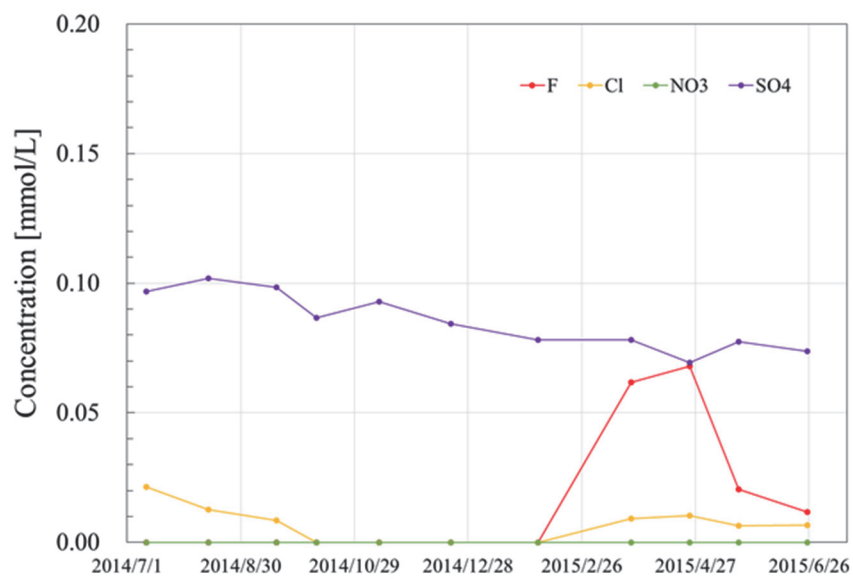


図 3.3-29 地下水中の陰イオン（観測孔 No.3）

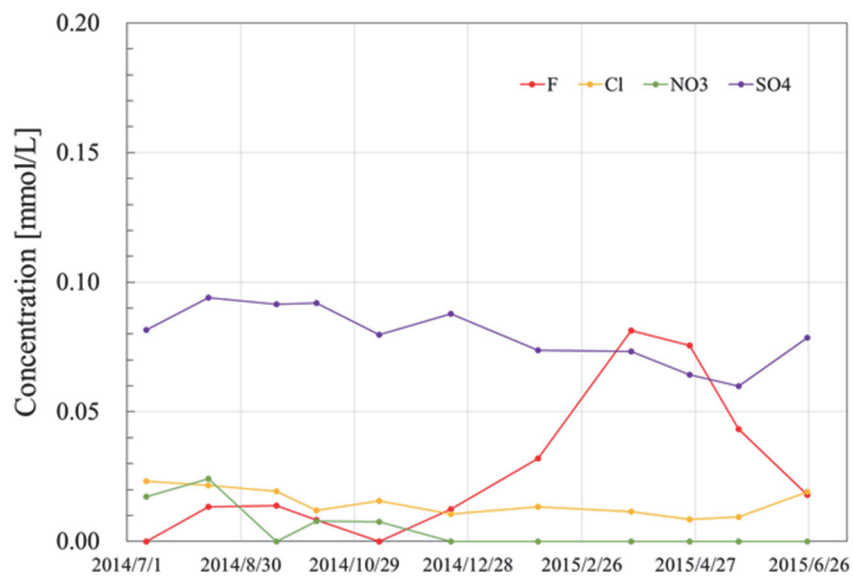


図 3.3-30 地下水中の陰イオン（観測孔 No.4）

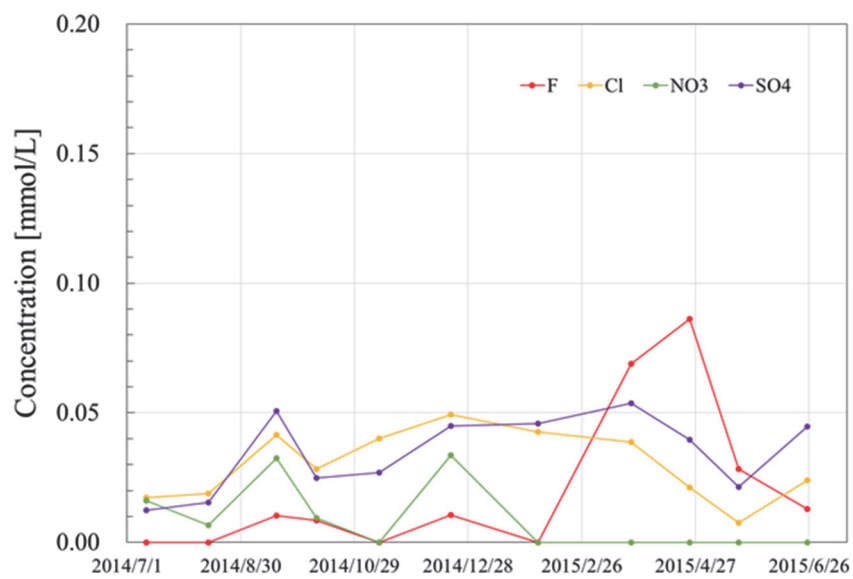


図 3.3-31 地下水中の陰イオン（観測孔 No.5）

(5) 北棟館内温熱環境調査

1) 温湿度測定

① 年間

2012年11月22日～2014年12月19日の期間における、北棟館内の温湿度の測定結果を図3.3-32から図3.3-34に示す。また展示室の値は、測定を開始した2014年2月26日以降の実測値を表している。外気の温湿度、降水量は奈良地方気象台の気象データ³⁻⁵⁾である。

図3.3-32に示した結果から、外気温と比較して館内の気温の変動は小さいことがあきらかとなった。これは、覆屋の熱抵抗と地盤の熱容量、また冷暖房の運転のためと考えられる。また年間を通じて遺構面の温度が通路より低く、絶対湿度は高い傾向にある(図3.3-34)。それに伴い、遺構面の相対湿度は高い傾向にある(図3.3-33)。これらは、遺構面からの水分蒸発による影響と考えられる。

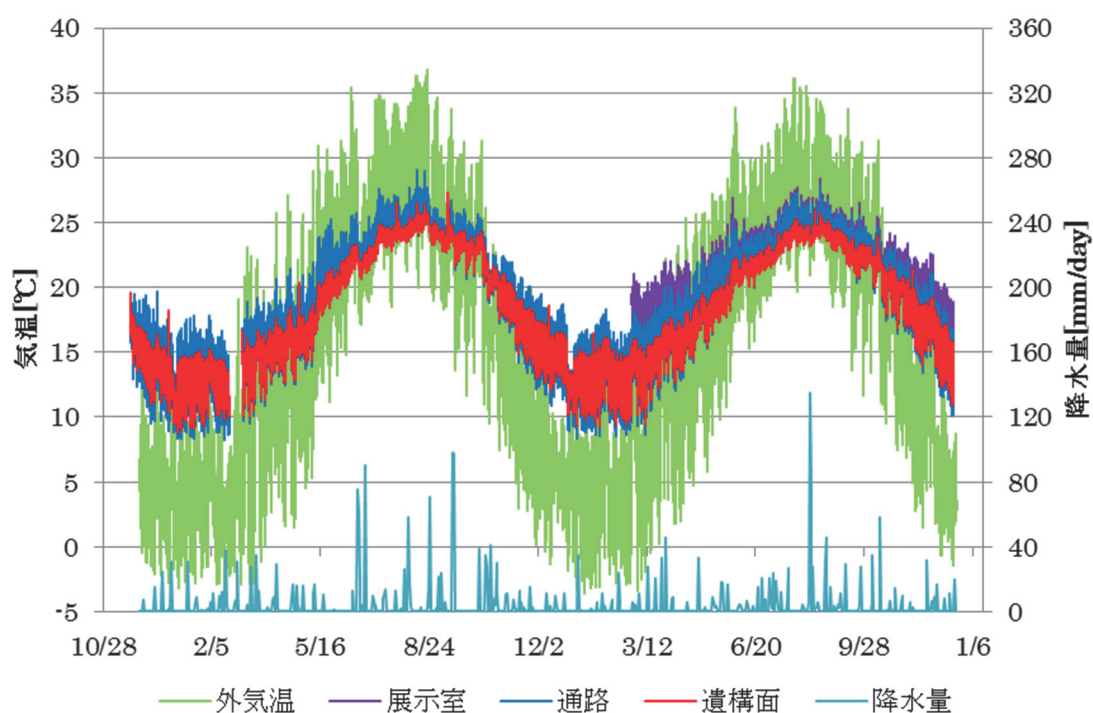


図 3.3-32 気温 (2012～2014 年) : 北棟

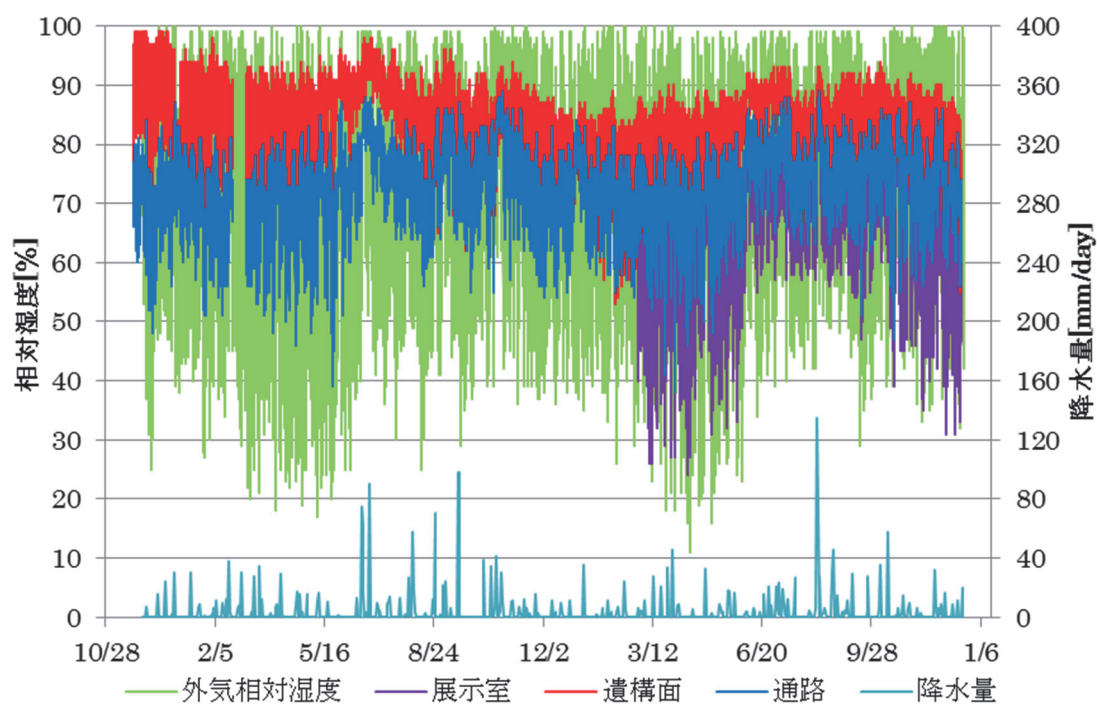


图 3.3-33 相对湿度（2012~2014 年）：北棟

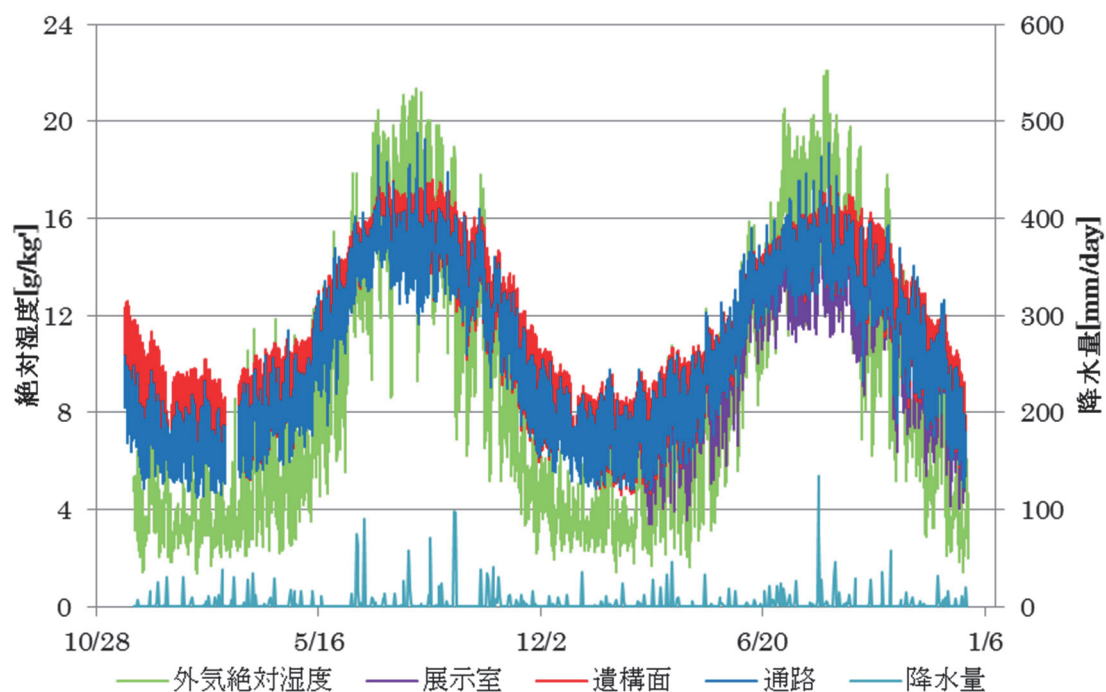


图 3.3-34 绝对湿度（2012~2014 年）：北棟

② 夏期

図 3.3-35 から図 3.3-37 に 2014 年 8 月 14 日～21 日の期間における北棟の温湿度の測定結果を示す。外気の温湿度、降水量は奈良地方気象台の気象データ³⁻⁵⁾である。

図 3.3-35 に気温の推移を示す。日中の館内気温は外気と比較して低く（空調の影響は第 3 章第 3 節 3（5）2）参照）、これは空調運転のためと考えられた。閉館時間になり、空調運転が止まると、通路及び展示室の温度は上昇し、その後、夜間は外気と等しい温度となった。休館日のため空調運転が無かった 8 月 18 日は、日中の気温の上昇が他の日と比較して大きいことがわかる。遺構面の温度は、地盤の影響により、通路や展示室の温度より低く、安定している。通路の温度が展示室の温度よりわずかに小さい値を示した。これは、通路の測定点の方が遺構の地盤面に近いためであると考えられる。

図 3.3-36 に相対湿度の推移を示す。館内の相対湿度は、遺構面、通路、展示室の順に高く、遺構面では、80%～90%で推移した。

図 3.3-37 は、絶対湿度の推移を示したものである。遺構面の絶対湿度は、夜間の閉館時には、約 16g/kg⁶⁾付近で推移したが、開館時には空調の影響で絶対湿度が低下した。一方で、空調運転が無い場合（18 日）には、館内の絶対湿度は上昇し、外気と同様に推移した。

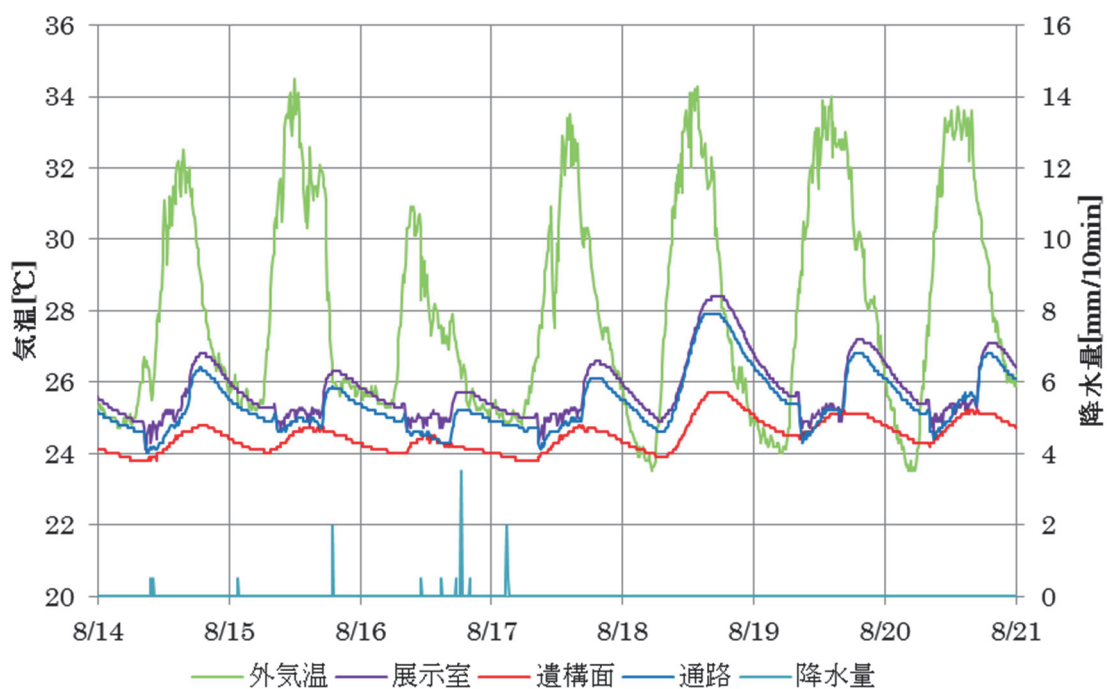


図 3.3-35 気温（夏期）：北棟

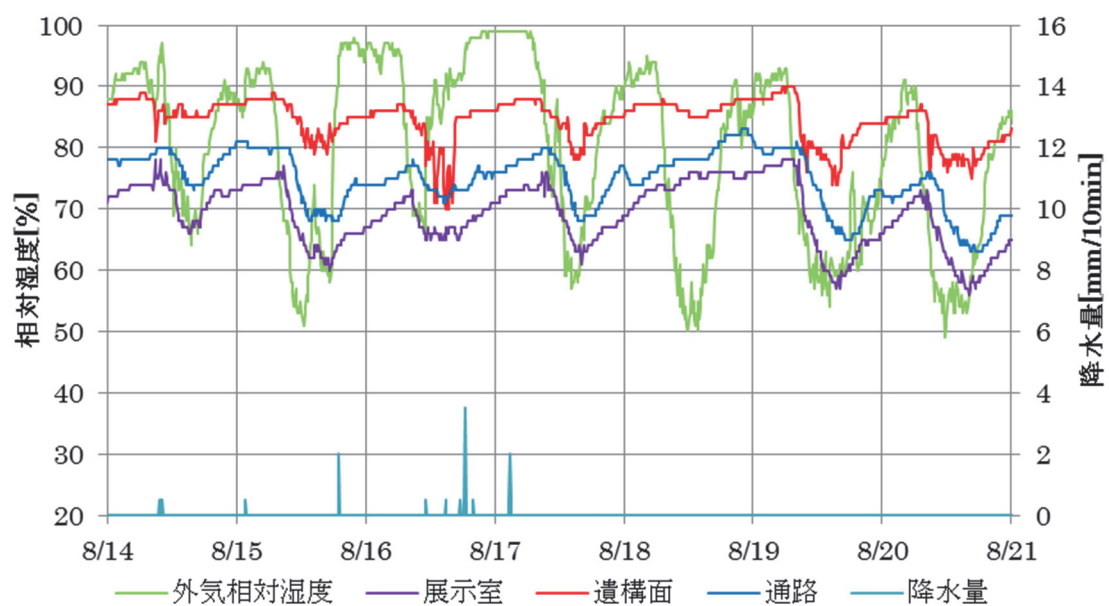


图 3.3-36 相对湿度（夏期）：北棟

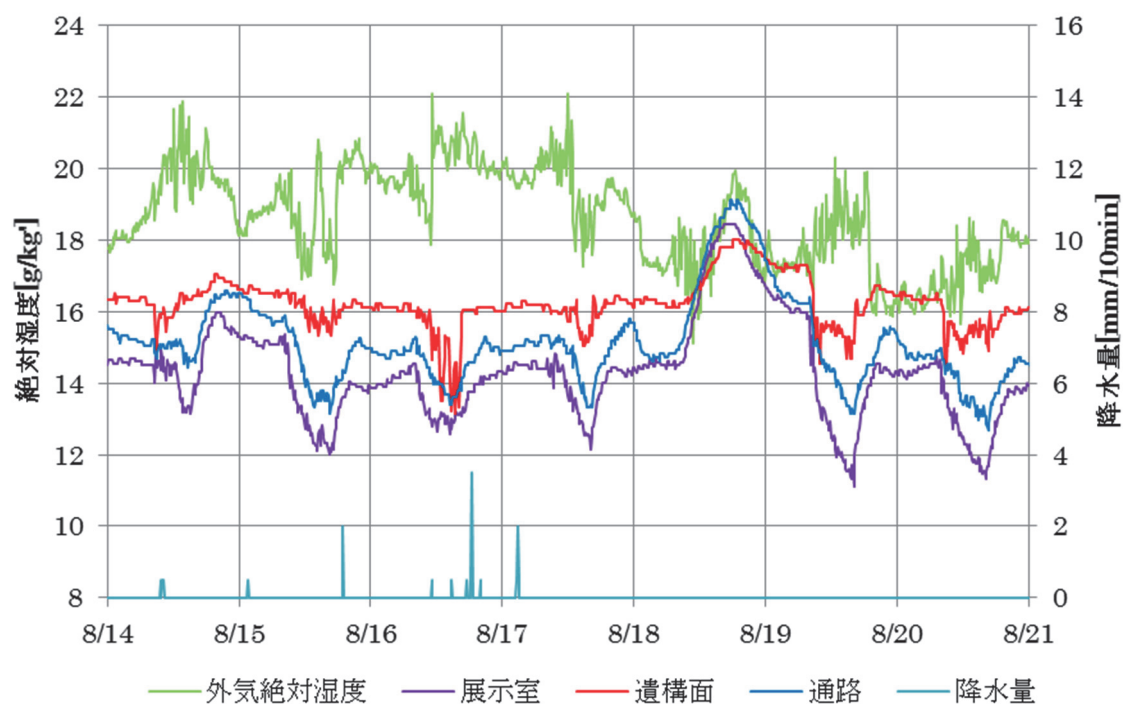


图 3.3-37 絶対湿度（夏期）：北棟

③ 冬期

図 3.3-38 から図 3.3-40 に 2014 年 2 月 14 日～21 日の期間における北棟の温湿度の測定結果を示す。外気の温湿度、降水量は奈良地方気象台の気象データ³⁻⁵⁾である。

気温の推移を図 3.3-38 に示す。日中の館内気温は、外気と比較して高く（空調の影響は第 3 章第 3 節 3（5）2）参照）、これは空調運転の影響によるものと考えられる。また、空調運転がない休館日の 2 月 17 日は、館内の気温上昇は小さい。

図 3.3-39 に相対湿度の推移を示す。開館時間の空調運転により、館内の相対湿度は、急激に上昇し、遺構面では、80%を超えた。閉館時間になると、空調が停止するのに伴い、相対湿度はすみやかに低下した。

図 3.3-40 は、絶対湿度の推移を表したものである。館内の絶対湿度は、外気の絶対湿度より高く、また空調運転に伴い、館内の絶対湿度はいっそう上昇する様子が認められた。

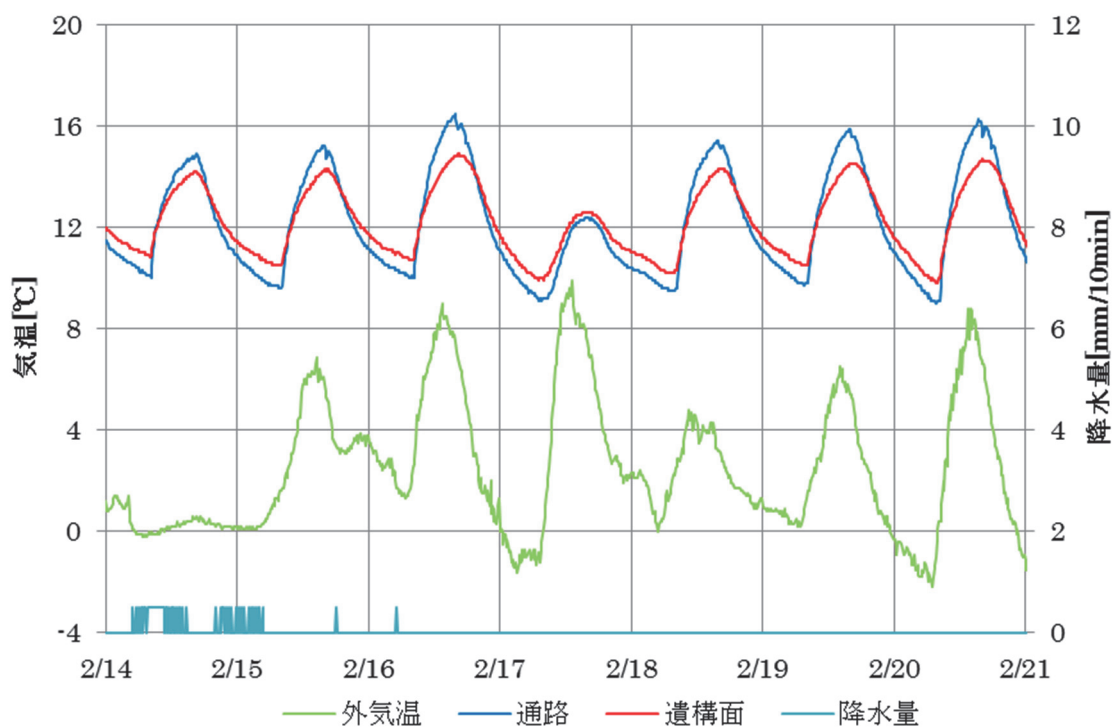


図 3.3-38 気温：北棟（冬期）



图 3.3-39 相对湿度：北棟（冬期）

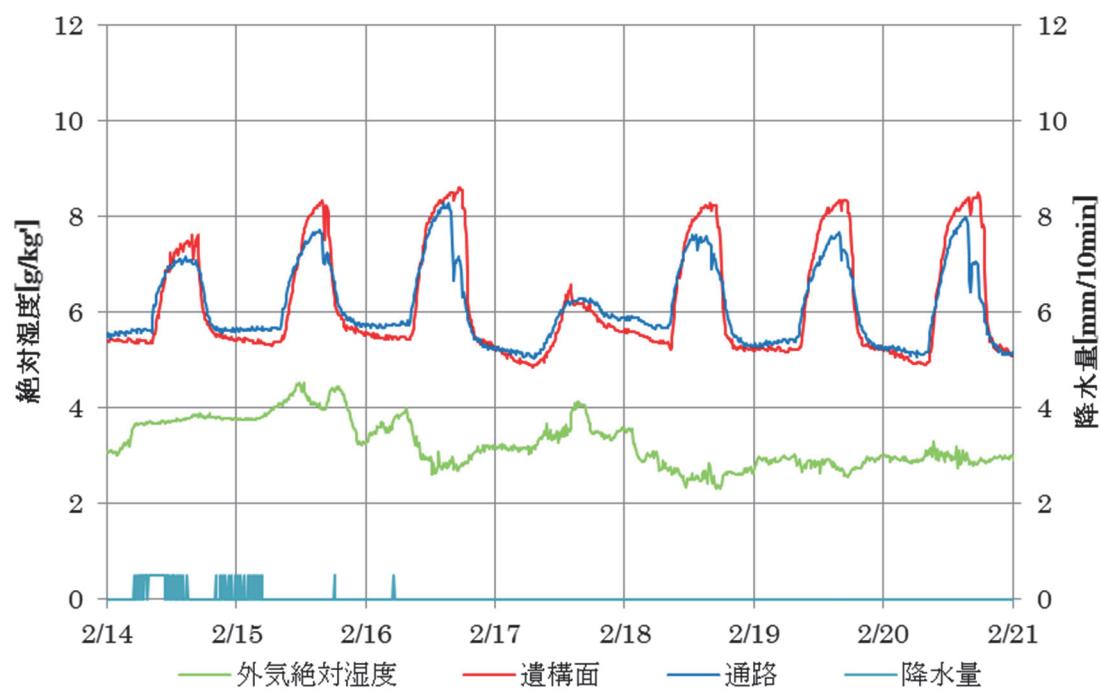


图 3.3-40 绝对湿度：北棟（冬期）

2) 空調吹き出し口測定

北棟の空調は、北側の展示室に設置されたもの（図 3.3-41）と南側の遺構の周囲に設置されたもの（図 3.3-42）の 2 種類があり、それぞれ 8 か所に設置されている（図 3.3-43）。また換気扇が 7 か所に設置されており、開館時間にのみ稼働している。図 3.3-43 に示す空調 1～4 について温湿度計の設置をした。さらに北棟の空調 1（北西）と空調 3（南東）の吹き出し口付近の風速測定をおこなった。なお、吹き出し口面積と風速から、空調の風量を算定し、第 3 章 5 節の解析で使用した。

・測定日時：2014 年 7 月 11 日（金）11：20～

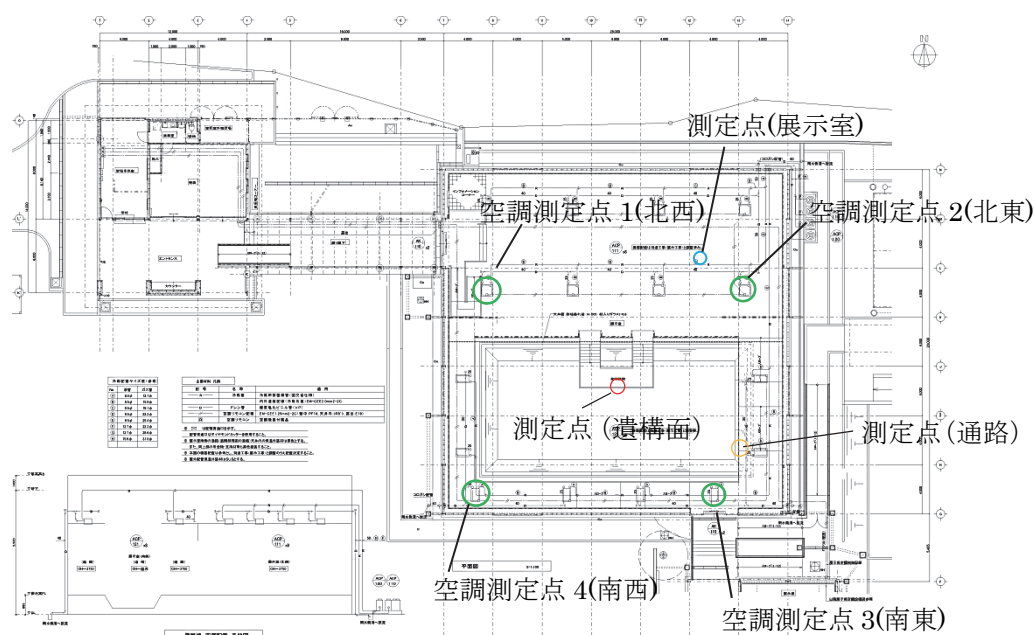


図 3.3-43 空調測定器配置図 3-6)

① 空調 1（北西）と空調 2（北東）：展示室（図 3.3-44a）

空調 1 及び 2 の吹き出し口面積を表 3.3-1 に、風速の測定結果を表 3.3-2 に示す。吹き出し口の風速は、中央部が大きく、端部が小さいことが示唆された。ただし、吹き出し口の風速は常に変動していたため、風速分布を表す他に、測定時刻の違いも影響したと考えられる。

② 空調 3（南東）及び空調 4（南西）：通路上部（図 3.3-44b）

空調 3 及び 4 の吹き出し口の面積を表 3.3-1 に、風速測定結果を表 3.3-3 に示す。風速は、最少で 2.45 m/s、最大で 4.83 m/s であった。ただし、吹き出し口の風速は常に変動していたため、風速分布を表す他に、測定時刻の違いも影響したと考えられる。

表 3.3-1 吹き出し口の形状

空調 1、空調 2 の吹き出し口面積	$50 \times 6 \text{ cm}^2 \times 4 \text{ か所}$
空調 3、空調 4 の吹き出し口面積	$75 \times 5 \text{ cm}^2 \times 2 \text{ か所}$

表 3.3-2 吹き出し口 付近の風速（空調 1 東側吹き出し口）

m/s	測定点 a	測定点 b	測定点 c	測定点 d	測定点 e	測定点 f	測定点 g
風速	0.3	2.7	3.5	3.1	2.02	0.6	0.4

表 3.3-3 吹き出し口 付近の風速（空調 3 東側吹き出し口）

m/s	a	b	c	d	e	f	g	h	i	j	k
風速	3.53	2.45	3.87	3.71	2.58	2.93	4.67	4.83	3.84	4.23	4.57



図 3.3-41 空調 1（北西）測定器設置後



図 3.3-42 空調 3（南東）測定器設置後



図 3.3-44a 空調 1（北西）



図 3.3-44b 温湿度計（通路）及び空調 3（南東）

3) 吹き出し口温湿度測定

① 夏期の冷房運転

冷房運転の設定を表 3.3-4 に示す。冷房は開館時間（9:00～16:30）にのみ運転している。

表 3.3-4 冷房運転の設定

設定温度	26℃
運転時間	9:00～16:30（休館日を除く）

(a) 空調 1（北西）と空調 2（北東）

図 3.3-45 に空調 1 と空調 2 の吹き出し口、展示室及び外気³⁻⁵⁾の 2014 年 8 月 14 日～24 日の期間における温度、相対湿度を示す。開館時間は冷房運転により、空調吹き出し口の温度は局所的に低下し、展示室の温度が 26℃付近で保たれている様子が認められた（8 月 18 日は休館日のため、空調は稼働していない）。また吹き出し口の相対湿度は、温度の低下に伴って上昇した。

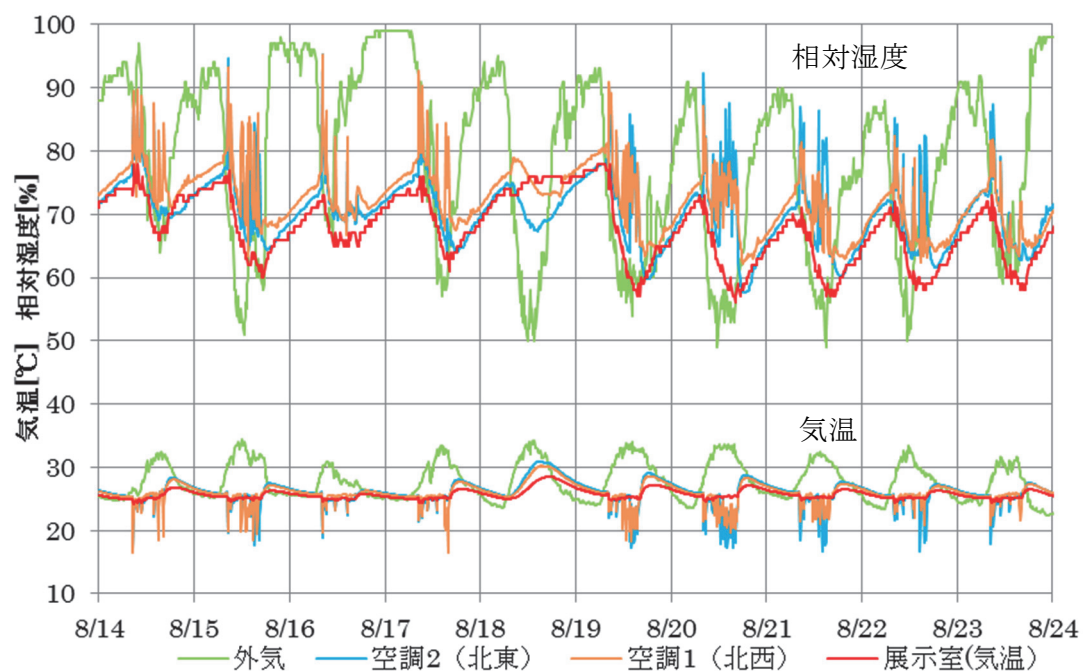


図 3.3-45 吹き出し口の温湿度－展示室との対応－：夏期

図 3.3-46 に空調 1 と空調 2 の吹き出し口、遺構面及び外気³⁻⁵⁾の 2014 年 8 月 14 日～24 日の期間における絶対湿度を示す。吹き出し口の絶対湿度の低下によって遺構面付近の絶対湿度が低下していることがわかる。また遺構面の絶対湿度の方が、空調運転の有無に関わらず、吹き出し口よりも高いことがあきらかとなった。8 月 18 日の休館日の館内の絶対湿度は、外気と同様に推移した。

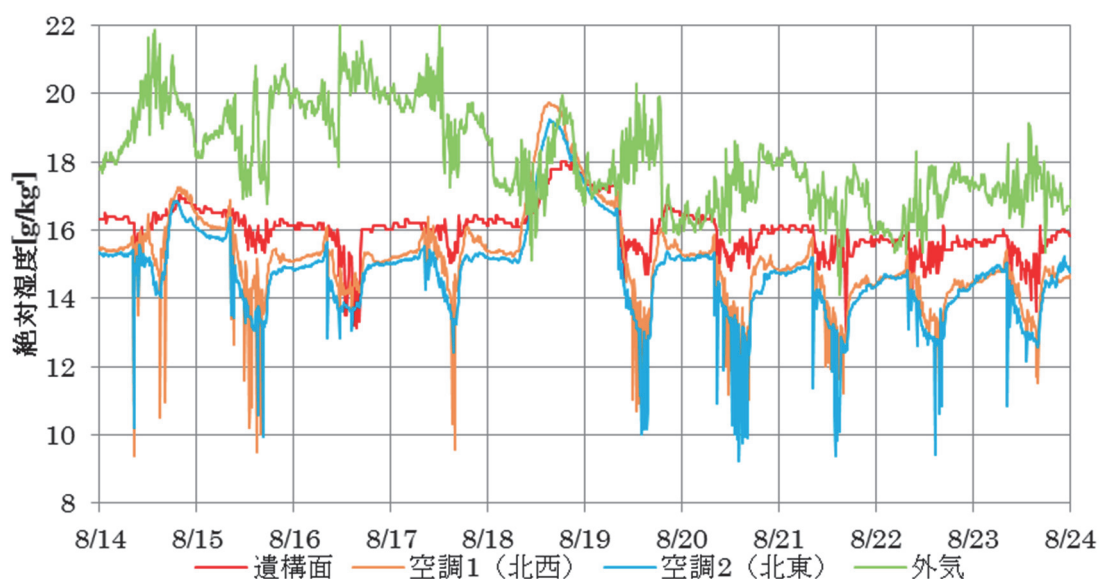


図 3.3-46 吹き出し口の絶対湿度—遺構面との対応—：夏期

(b) 空調 3 (南東) 及び空調 4 (南西)

北棟の空調 3 と空調 4 の吹き出し口、通路および外気³⁻⁵⁾の 2014 年 8 月 14 日～24 日の期間における温度、相対湿度を図 3.3-47 に示す。開館時間は冷房運転により、空調吹き出し口の温度は低下し、相対湿度は上昇する（8 月 18 日は休館日のため、空調は稼働していない）様子が認められた。空調 3 付近の温度は、空調 4 付近の温度より低い値を示した。これは、空調 3 が開口部に近く、外気の影響を受けたためと考えられる（図 3.3-44b）。また通路の温度が吹き出し口付近の温度より低いのは、地盤の影響と考えられる。

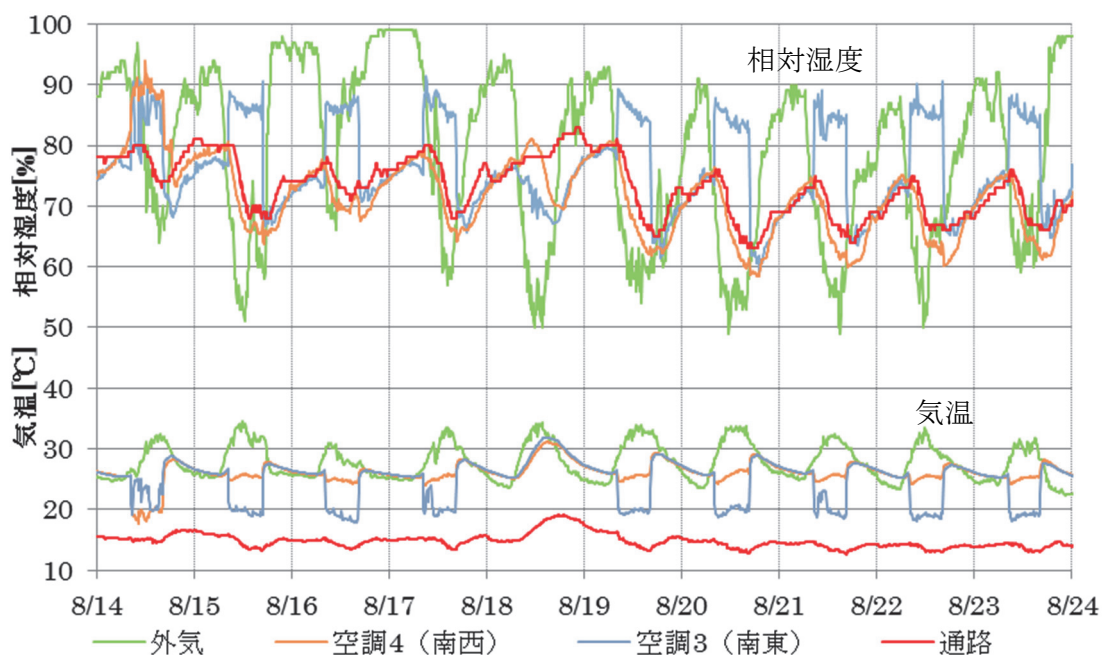


図 3.3-47 吹き出し口の温湿度—通路との対応—：夏期

② 冬期の暖房運転

北棟の空調吹き出し口及び通路、外気^{3・5)}の2014年11月28日～12月7日の期間における温湿度測定結果を図3.3-48から図3.3-50に示す。表3.3-5に暖房運転の設定を示す。

表 3.3-5 暖房運転の設定

設定温度	19℃
運転時間	9:00~16:30（休館日を除く）

(a) 空調1（北西）と空調2（北東）

図3.3-48に空調1と空調2の吹き出し口、展示室及び外気の温度と相対湿度を示す。空調稼働時の吹き出し口の温度は平均して約30℃で、相対湿度は約30%～50%であった。吹き出し口の温度上昇により、相対湿度が低下していることがわかる。展示室は空調運転に伴い、温度は上昇し、一方で相対湿度は低下した。

休館日である12月1日は空調運転がおこなわれておらず、展示室、吹き出し口の温湿度は、ほぼ同じ値で推移した。また相対湿度は約80%で推移した。

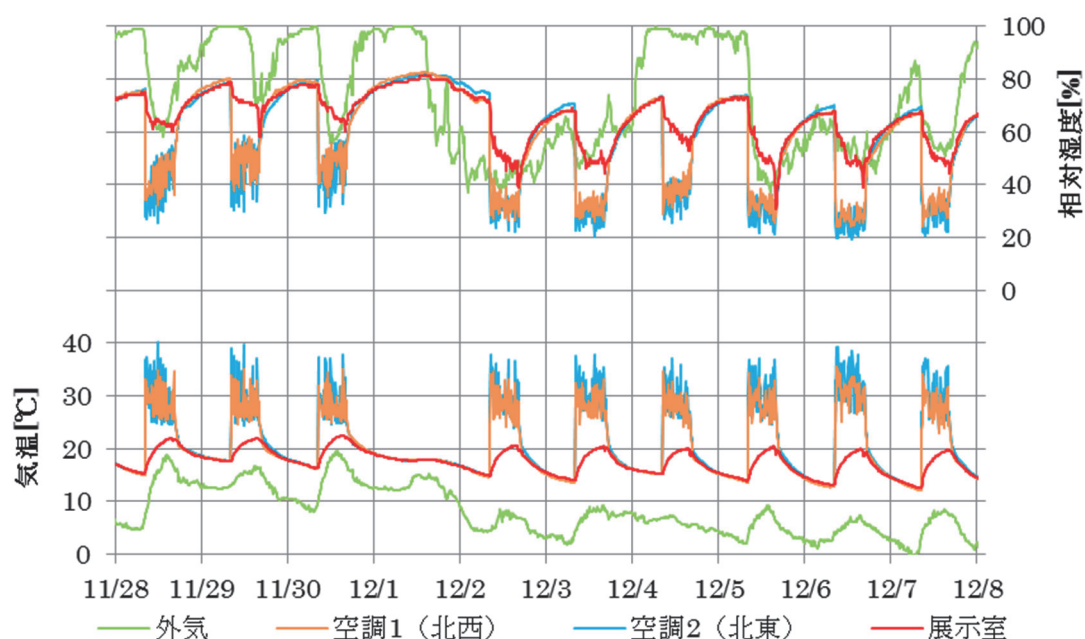


図 3.3-48 吹き出し口の温湿度－展示室との対応－：冬期

図3.3-49に空調吹き出し口、遺構面及び外気の絶対湿度を示す。遺構面の絶対湿度は、空調の影響により上昇しているが、空調運転の停止後も高い値で推移した。また12月2日以降では、遺構面の絶対湿度は、吹き出し口の絶対湿度より高い値を示した。

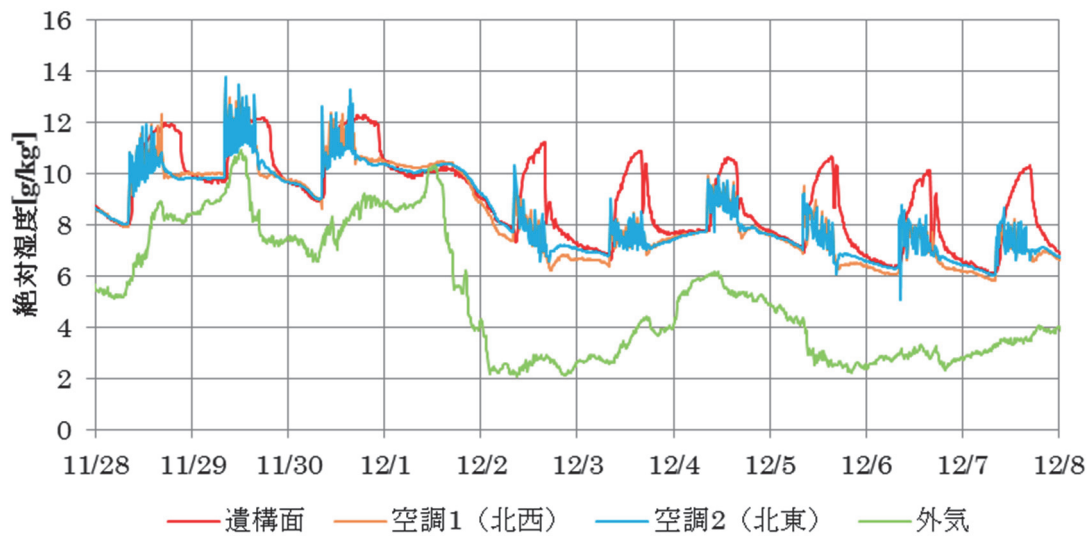


図 3.3-49 吹き出し口の絶対湿度－遺構面との対応－：冬期

(b) 空調 3 (南東) 及び空調 4 (南西)

図 3.3-50 に空調 3 と空調 4 の吹き出し口、通路及び外気の温度と相対湿度を示す。空調稼働時は、吹き出し口の温度が上昇し、相対湿度は低下した。空調 3 の方が、空調 4 に比べて温度上昇が大きいのは、空調 3 が開口部に近く、外気の影響をうけるためと考えられる。

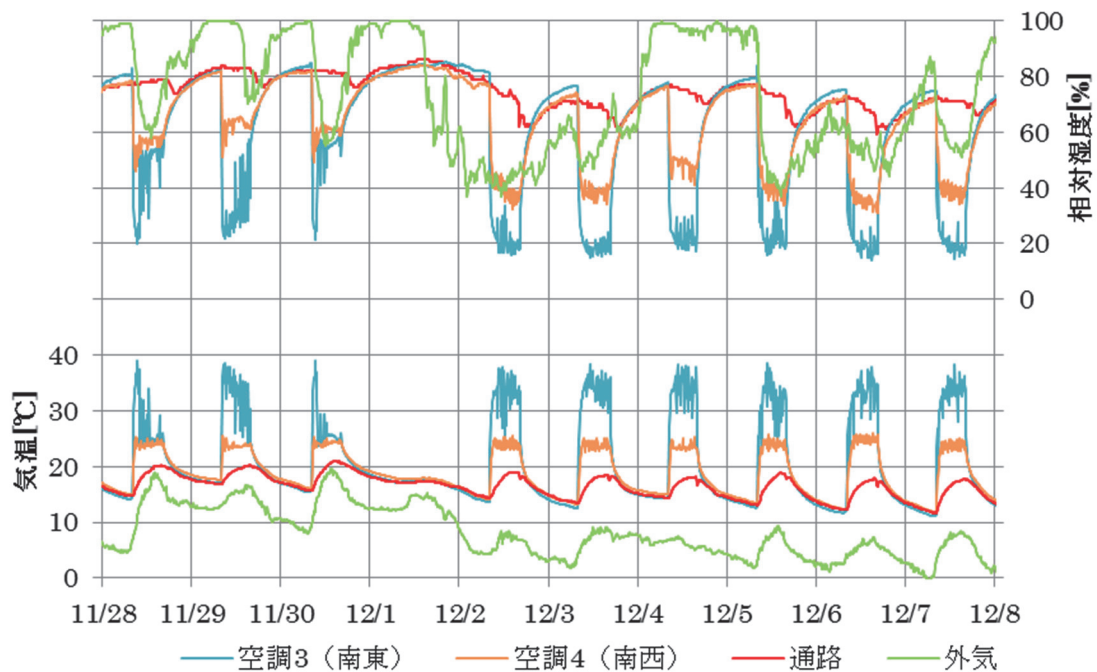


図 3.3-50 吹き出し口の温湿度－通路との対応－：冬期

4) 天井裏の結露調査

図 3.3-51 に示す 2 か所において天井裏の調査をおこなった。中央部の天井裏において、塗装の剥離（図 3.3-52、図 3.3-53 黄丸）が確認できた。また南東部の天井裏では、錆（図 3.3-54 黄丸）、結露跡（図 3.3-55 黄丸）が確認できた。塗装の剥離や錆の原因も結露であると考えられるため、天井面での結露が頻繁に発生していると推察される。

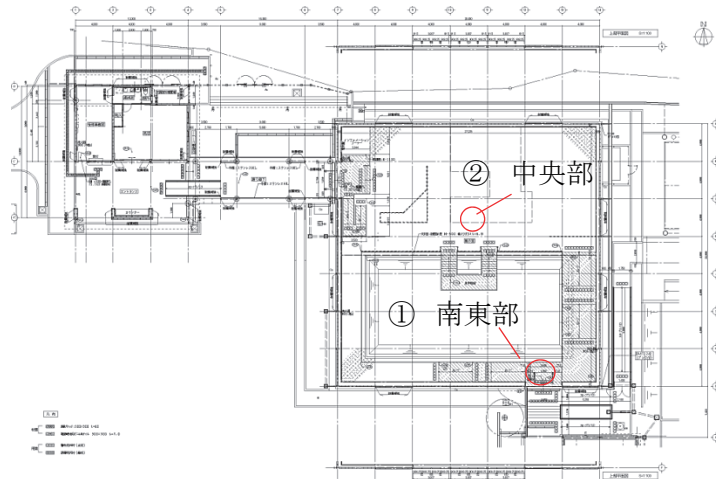


図 3.3-51 北棟平面図³⁻⁶⁾



図 3.3-52 塗装の剥離：①中央部



図 3.3-53 塗装の剥離：①中央部



図 3.3-54 錆：②南東部

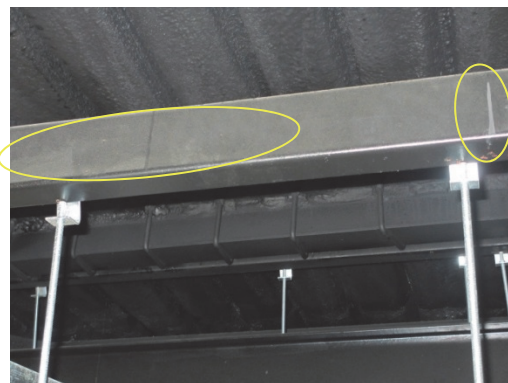


図 3.3-55 結露跡：②南東部

(6) 南棟館内温熱環境調査

1) 温湿度測定

① 年間

2012年11月22日～2014年12月19日の期間における南棟館内の温湿度の測定結果を図3.3-56から図3.3-58に示す。外気の温湿度、降水量は奈良地方気象台の気象データである³⁻⁵⁾。

図3.3-56に気温の推移を示す。南棟館内の気温は、北棟と同様に覆屋の熱抵抗と地盤の熱容量のため、通路と遺構面の気温は、外気と比較して変動が小さく安定していた。しかし、北棟館内の気温と比べると、通路、遺構面の気温は外気温と近い変動を示した。これは、南棟では空調が設置されておらず、ルーバー状の開口部より常に通気があるためであると考えられる。

図3.3-57は、相対湿度の推移を示したものである。館内の相対湿度は、冬期に低下する様子が認められた。これは、外気と比較して冬期の館内の気温が高い傾向にあるためと考えられる。図3.3-58は、絶対湿度の推移を示したものである。館内の絶対湿度は、外気と同じように推移したことがわかる。

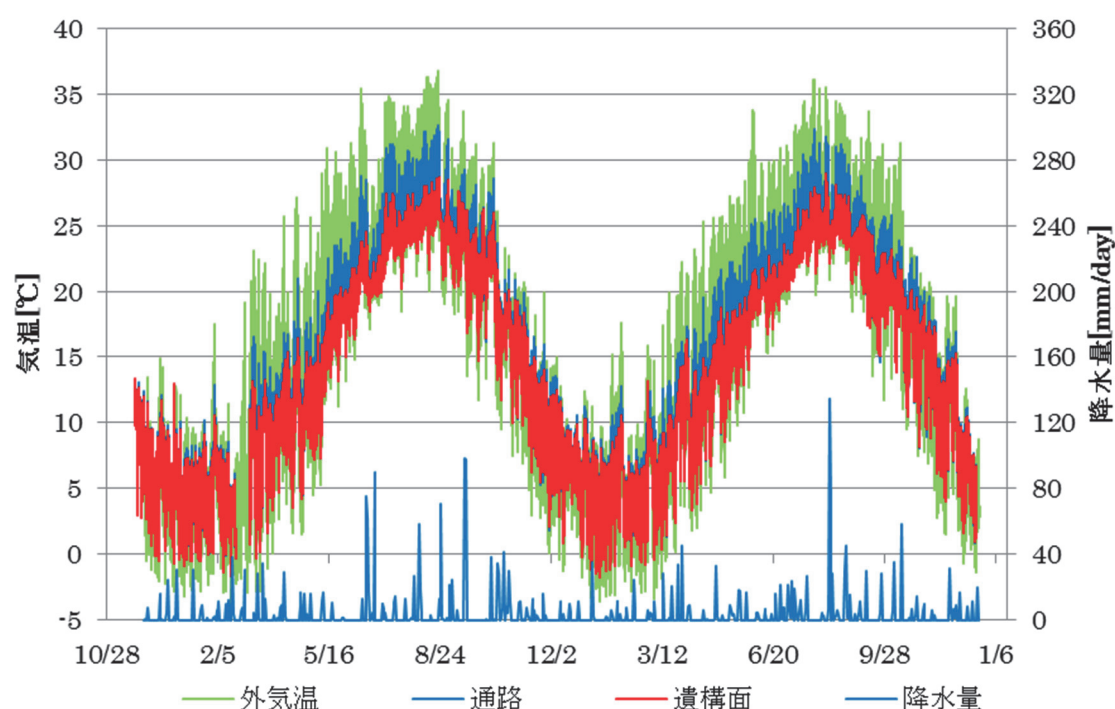


図 3.3-56 気温 (2012～2014 年) : 南棟

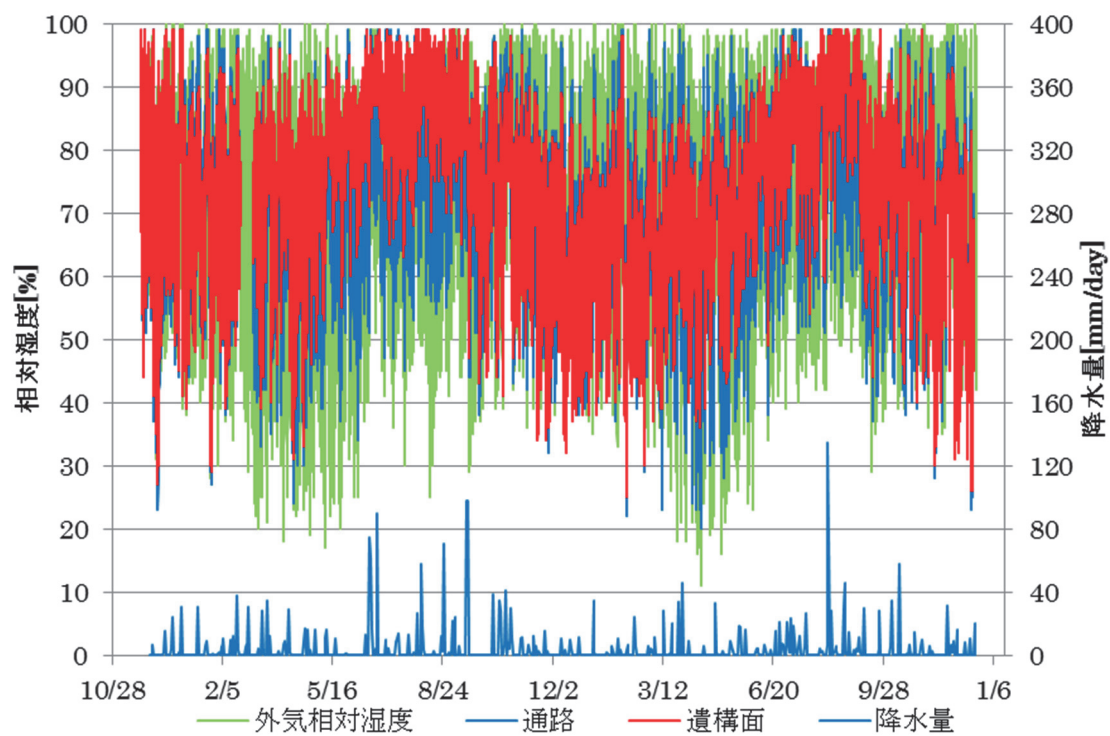


図 3.3-57 相对湿度(2012~2014 年)：南棟

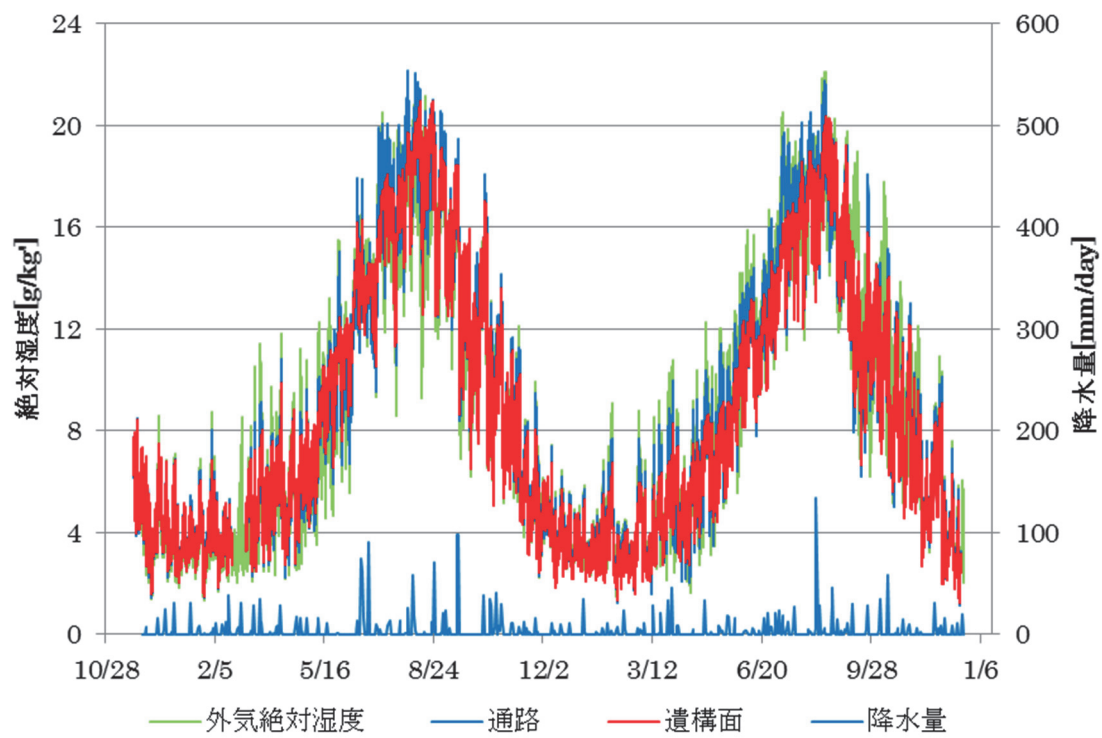


図 3.3-58 絶対湿度(2012~2014 年)：南棟

② 夏期

図 3.3-59～図 3.3-61 に 2014 年 8 月 14 日～21 日の期間における南棟の温湿度の測定結果を示す。外気の温湿度、降水量は奈良地方気象台の気象データ³⁻⁵⁾である。

図 3.3-59 は、気温の推移を示したものである。通路の気温変動は、外気温より安定しているが、通気のために夜間は外気とほぼ同様の挙動を示した。遺構面の気温の変動は、通路の気温と比較して安定していた。これは、地盤の熱容量の影響と考えられる。しかし、変動幅は日によって異なり、遺構面の気温においても、外気の影響が見受けられた。

図 3.3-60 に相対湿度の推移を示す。相対湿度は、遺構面において顕著に高く、概ね 90%～100%で推移した。日中に相対湿度が低下したのは、通気による外気の影響と考えられる。

図 3.3-61 に絶対湿度の推移を示す。遺構面の絶対湿度は、降水のあった約 1 日後から高い値を示した。これは、雨水が地盤を通して浸透し、覆屋内の遺構面から蒸発したためと考えられる。

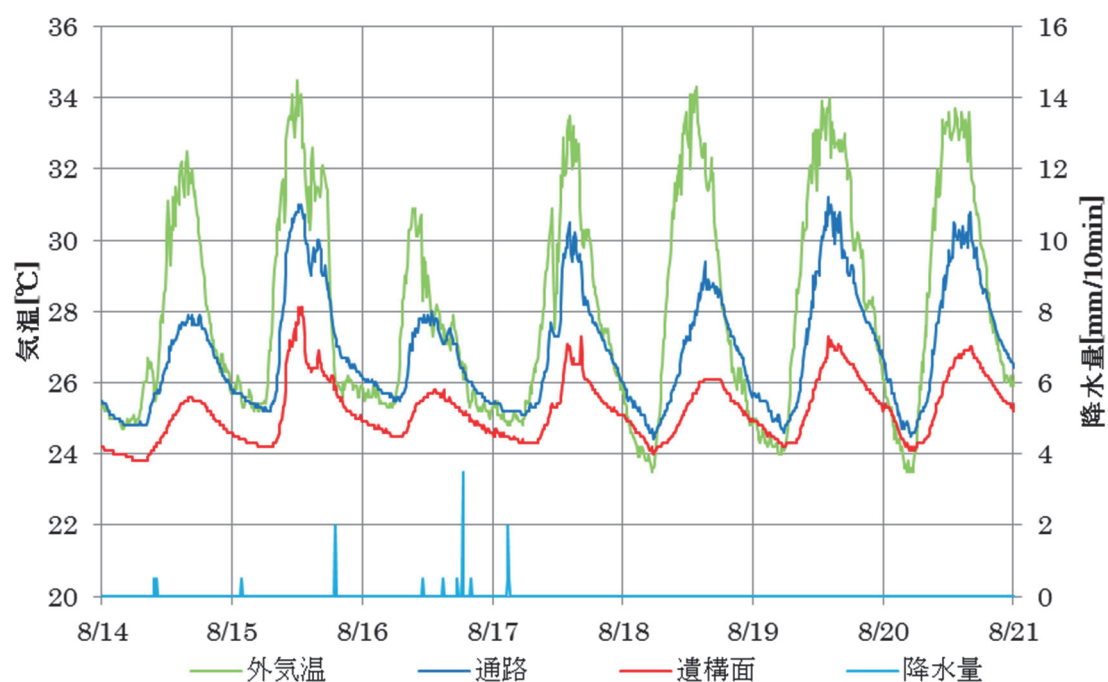


図 3.3-59 気温（夏期）：南棟

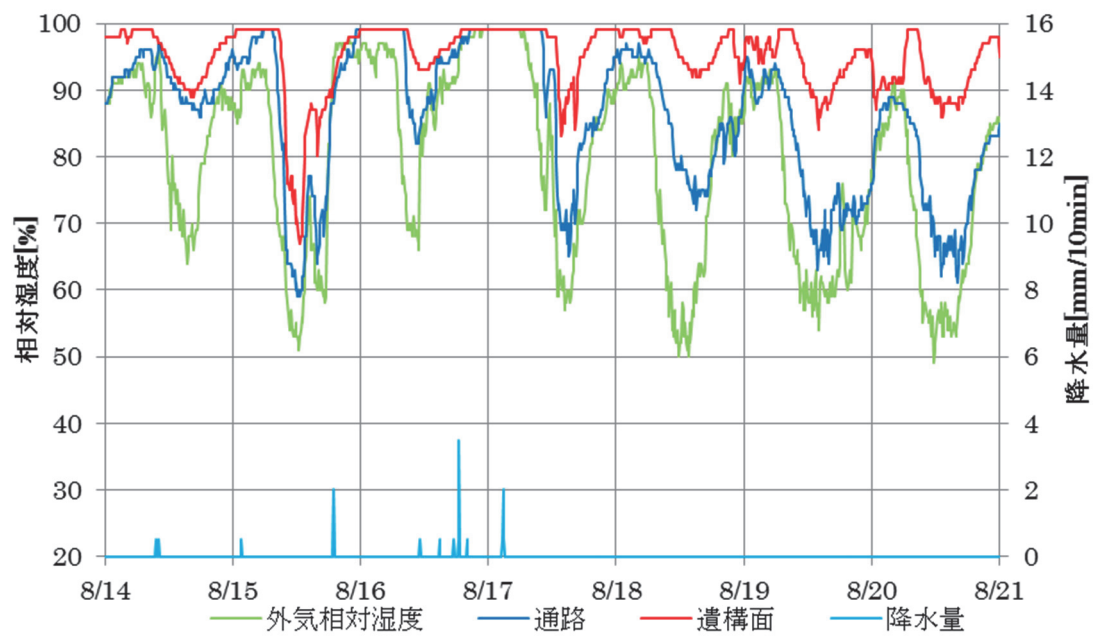


图 3.3-60 相对湿度（夏期）：南棟

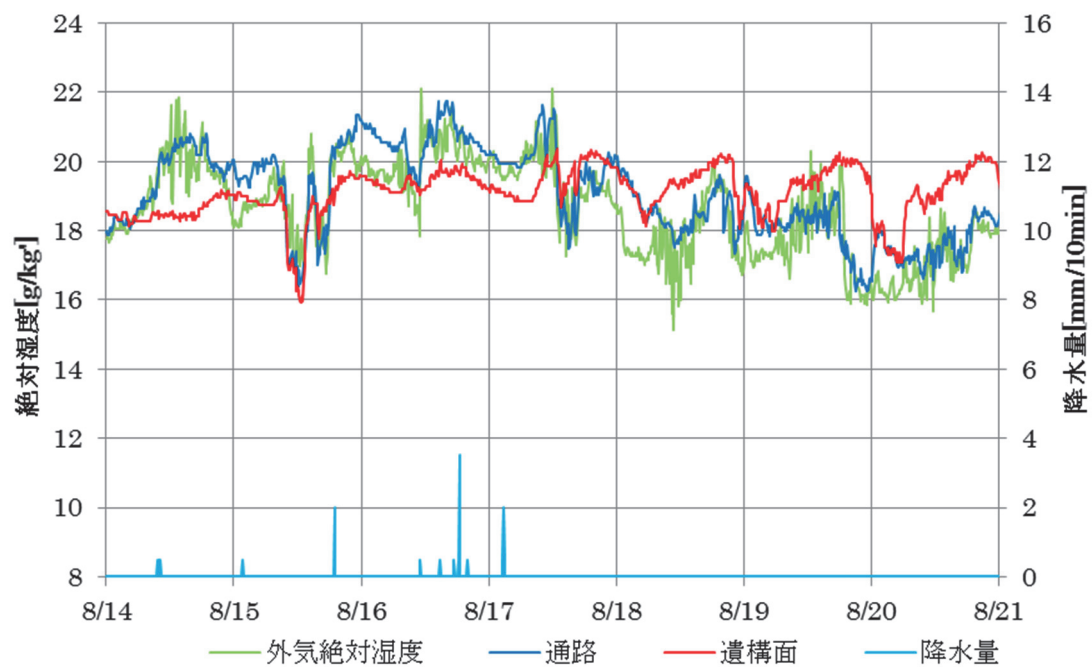


图 3.3-61 絶対湿度（夏期）：南棟

③ 冬期

図 3.3-62 から図 3.3-64 に 2014 年 2 月 14 日～21 日の期間における南棟の温湿度の測定結果を示す。

図 3.3-62 は気温の推移を示したものである。通路、遺構面の気温差はほとんど認められず、概ね同様の挙動を示した。夜間の気温は外気と比較して高く、これは、覆屋の熱抵抗と地盤の熱容量の影響であると考えられる。一方で、気温の変動は、外気の変動と同じ位相となり、ルーバー開口からの通気の影響があると考えられる。

図 3.3-63 は相対湿度の推移を示したものである。降水のあった 2 月 14 日～15 日を除いて、外気の相対湿度は、夜間の気温低下に伴って増加し、日中の気温上昇により低下した。通路、遺構面の相対湿度は、外気と比較して、夜間は 15%ほど低く、日中はほぼ同じ値であった。また、遺構面の相対湿度の方が通路よりわずかに低い値を示した。しかし、降雨後 2 日目の 2 月 17 日の日中には、通路、外気の相対湿度が低下する一方で、遺構面の相対湿度は増加した。

図 3.3-64 に示した絶対湿度の推移をみると、2 月 17 日に遺構面の絶対湿度が上昇していることがわかる。これは、雨水が地盤より遺構へ流入し、遺構面において蒸発したことを示唆している。

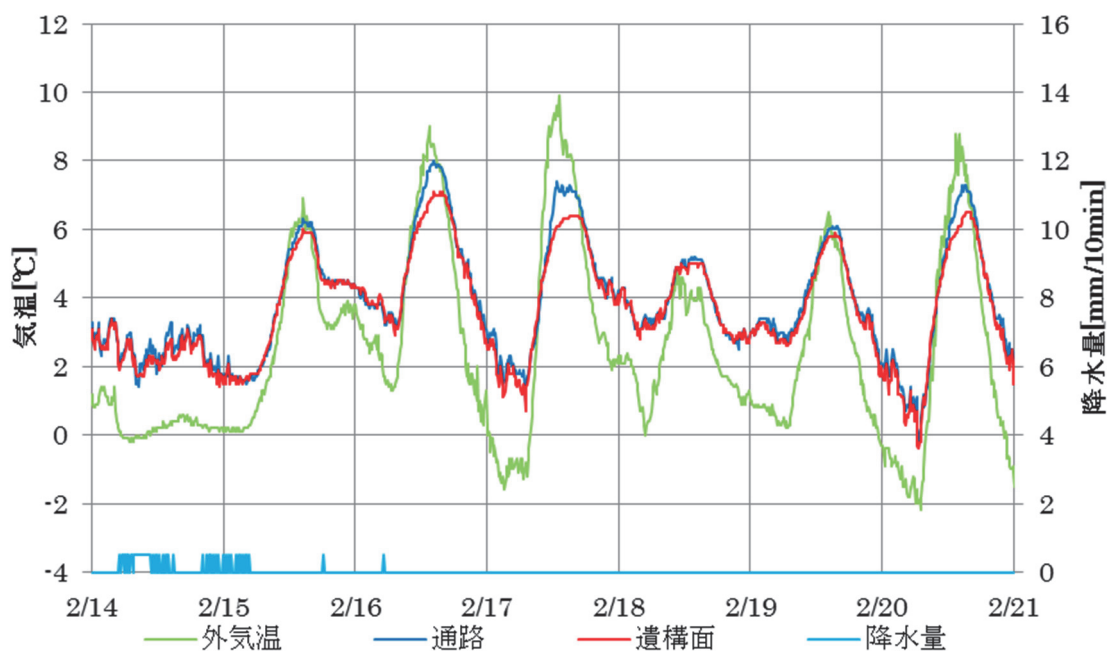


図 3.3-62 気温（冬期）：南棟

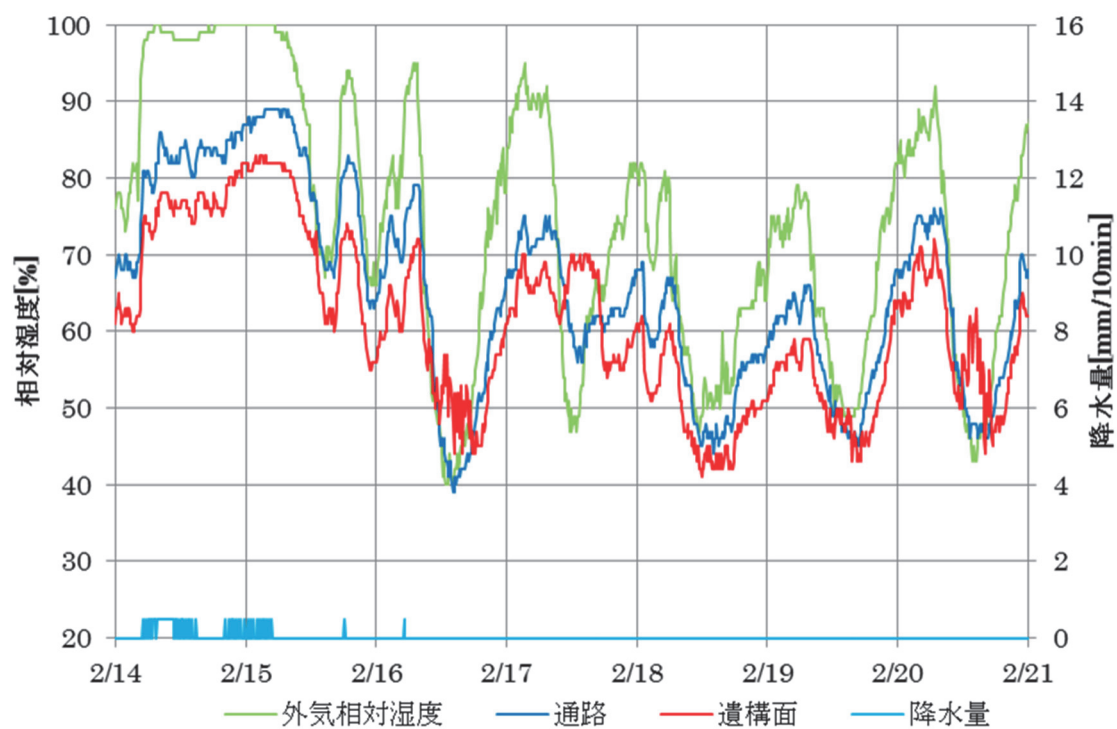


图 3.3-63 相对湿度（冬期）：南棟



图 3.3-64 絶対湿度（冬期）：南棟

2) 重力換気の影響の検討

南棟の通路と遺構面の温湿度に対しては、温度差による重力換気が大きく影響していると考えられる。図 3.3-65 に南棟の通路と遺構面および外気の気温と絶対湿度の推移を示す。日中は通路付近では、日射の影響により、気温が上昇する一方で、遺構面は地盤の熱容量のために温度上昇は緩やかであった。また、遺構面の絶対湿度は、通路と遺構面との温度差がなくなる夜間に急激に低下する。これは、夜間の外気温の低下と夜間放射により、通路の気温が低下することで、地盤の熱容量をもつ遺構面の温度の方が、通路より高くなり、重力換気による上下方向の換気量が増加したためと考えられる。

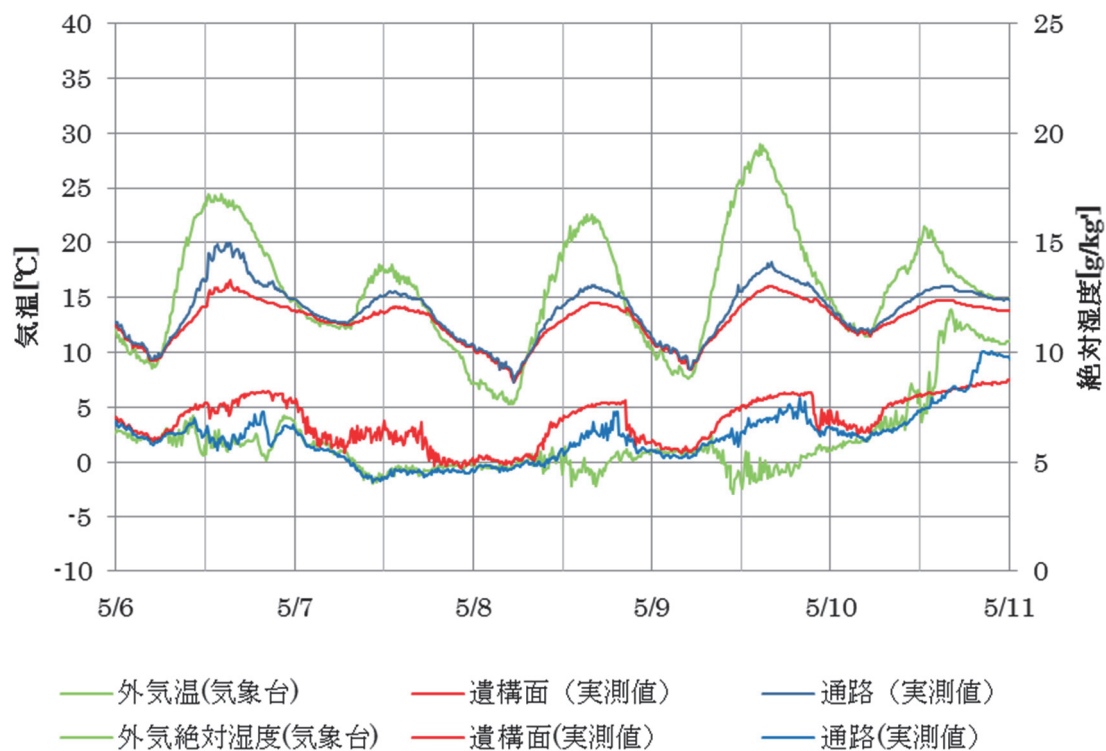


図 3.3-65 気温と絶対湿度の推移 (2013 年 5 月)

図 3.3-66 に冬期の通路、遺構面、外気の気温と絶対湿度の推移を示す。冬期は、外気温が低いため、通路の気温も低く、遺構面と通路の上下の温度差が小さい値を示した。さらに地盤の熱容量により、遺構面の気温の方が通路より高くなることで、重力換気の影響が大きくなると考えられる。また重力換気の影響が大きくなることで、通路と遺構面の温度差がわずかな状態で推移すると考えられる。

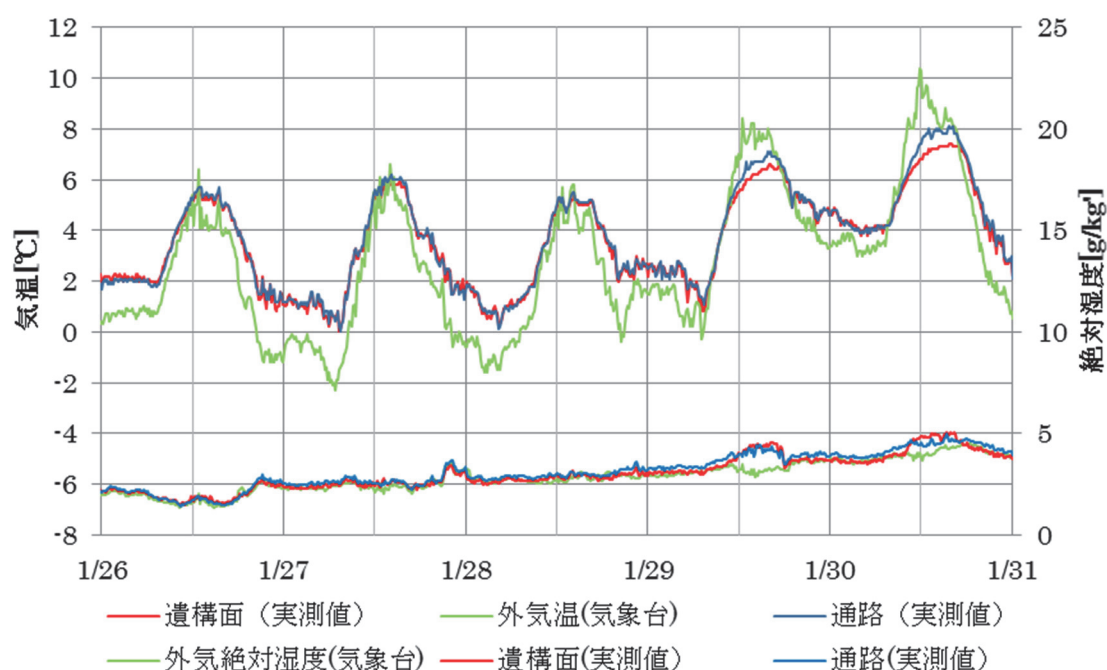


図 3.3-66 気温と絶対湿度の推移（2013 年 1 月）

4 第3節のまとめ

本節では遺構展示館周辺の地盤における水分環境と水質に関する実測調査の結果、および館内の温湿度環境と水分環境の結果を記し、前節で記した劣化要因のうち、特に塩析出や褐色沈殿物が生じる要因である、地下水の水質と遺構展示館館内温熱環境、および周辺地盤の酸化還元環境について考察した。

遺構展示館周辺地盤および館内の水分環境に関する調査結果から、地下水位は4月下旬から8月上旬の期間では低下するものの、その他の期間では高い位置にあり、この期間、南北の遺構面では、埋戻し土―遺構面の層境界から地下水を起源とする水分が流入していることが示唆された。一方、降雨時には盛土―埋戻し土の層境界から、雨水を起源とする水分が遺構面に流入していると考えられた。また、それら地下水や雨水の流入は南棟において特に顕著で、北棟では南棟と比較して流入量が少なく、その流入箇所も

限定的であることが示唆された。

また、観測孔内の DO 濃度を測定した結果、DO 濃度は季節変動を示さず、その濃度は地下水面の位置と降雨、そして土層境界における水平方向の水分流によって形成されると推察された。その理論に基づき、遺構面に流入する地下水の DO 濃度を検討した結果、地下水が流入する時期では、概ね常に DO が枯渇した還元的な水分が流入していると考えられた。したがって、流入する水分には鉄が 2 価の溶存態として含まれており、これらが遺構面において酸化されて水酸化物沈殿を生ずることで遺構の汚損を引き起こしていると考えられる。

観測孔内から地下水を採取して溶存成分を定量分析した結果、陽イオンではカルシウムイオン、次いでナトリウムイオンが優勢で、陰イオンでは硫酸イオンが優勢であった。したがって、第 2 章 2 節で記した遺構展示館内で析出している塩、すなわち硫酸カルシウムと硫酸ナトリウムの起源は、地下水中の溶存成分であることが示唆された。また、これらの濃度変化は、やや不明瞭ながら夏期に極大値を示した一方で、南棟において冬期にのみ硫酸ナトリウムが確認された。したがって、硫酸ナトリウムの析出が冬期に限定されている主な要因は、地下水中の溶存成分の季節変化ではなく、南棟の気温が換気によって冬期に著しく低下することと考えられる。

館内の温熱環境調査から、南北棟ともに絶対湿度は通路と比較して遺構面において高い値で推移することがあきらかとなり、したがって遺構面から水分蒸発が生じていることが示唆された。また、南棟では空調設備を備えていないことに加え、ルーバーを介しての通気量が多いために、北棟と比較して冬期の館内気温が低く、外気と同等の気温まで低下することがあきらかとなった。したがって、溶解度の温度依存性が高い硫酸ナトリウムは冬期に南棟でのみ析出しており、この期間、磚や石材、遺構面の劣化を引き起こしていると考えられる。

第 3 節の参考文献

- 3-1) 地下水ハンドブック編集委員会：地下水ハンドブック、建設産業調査会（1979）
- 3-2) 株式会社トータルメディア開発研究所・応用地質株式会社：平城宮跡内遺構展示館周辺ボーリング調査 報告書 （2010）
- 3-3) 広城吉成・赤木啓悟・細川土佐男・神野健二：沿岸部帯水層の塩水遷移域における二価鉄イオンの動態に着目した輸送モデル、土木学会論文集 B、Vol.63 No.3、pp.178-188（2007）
- 3-4) Bolt, G.H., and Bruggenwert, M.G.M. : Soil Chemistry, Elsevier Scientific Publishing Company (1976) (岩田進午・三輪睿太郎・井上隆弘・陽捷行訳：土壌の化学、学術出版センター (1980))
- 3-5) 気象庁ホームページ <http://www.data.jma.go.jp/> (2014)
- 3-6) 特別史跡平城宮跡遺構展示館等その他改修工事 完成図 (2010)

第4節 熱・水分・溶質移動に関する基礎理論と解析方法

1 はじめに

本節では遺構展示館の室空気および遺構周辺地盤における熱水分溶質移動を解析する際の基礎理論となる、建築壁体、展示館内空間、および地盤の熱水分の収支を表す基礎方程式を示す。さらに、遺構展示館における熱水分溶質移動の解析を実施するために用いる外界気象条件、および遺構展示館を構成する3種の土壌、すなわち盛土、埋戻し土、および遺構土壌について、それらの水分移動特性について述べる。ここで、土壌の水分移動特性については、本来であれば解析対象となる遺構展示館内土壌の不攪乱試料を採取して、水分移動特性に関する試験を実施するべきではある。しかし、平城宮跡遺構展示館は観覧に供することを目的としているため、土壌試料採取のために館内の遺構の一部を破壊することはきわめて困難である。そこで、本研究における解析には、土壌の成因などを考慮した上で、他の遺跡においてこれまでに試料採取をおこなった土壌の水分移動特性をもちいることとした。

2 熱水分移動に関する基礎方程式

遺構展示館で展示されている遺構地盤、石材や磚と呼ばれる古代のレンガはいずれも多孔質材料である。このような多孔質材料中における熱と水分の移動は、水分蒸発に伴う潜熱移動や、材料中の含水率が変化することで、熱の移動性状が変化するなど相互に影響し合っており、カップリング現象として捉える必要がある。本節で記す材料中の熱水分移動の支配方程式は、材料の温度、および水分化学ポテンシャル（含水率）を熱移動と水分移動の駆動力としてもちいる熱水分同時移動方程式である⁴⁻¹⁾。ここで、水分化学ポテンシャルは下記の式で定義される。

$$\mu = R_v T \ln h \quad \dots (4.2.1)$$

ここで、 μ は水分化学ポテンシャル[J/kg]、 R_v は水蒸気の気体常数で $R_v = R/M_v$ 、 T は絶対温度 [K]、 h は相対湿度 [-]である。ただし R は一般気体常数[Pa・m³/kmol・K]、 M_v は水蒸気の分子量[kg/kmol]である。

ここでは、以下の点を仮定する。すなわち

1. 多孔質材料内部において、気相水分と液相水分は局所平衡している。
2. 多孔質材料は等方的として、異方性を考慮しない。
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下式のように表せる。

【熱収支式】

$$c\rho \frac{\partial T}{\partial t} = -\nabla \cdot q_s - r\nabla \cdot J_{1w(s)} \quad \dots (4.2.2)$$

【水分収支式】

$$\rho_w \left(\frac{\partial \psi}{\partial \mu} \right) \frac{\partial \mu}{\partial t} = -\nabla \cdot J_w \quad \dots (4.2.3)$$

ただし、

$$q_s = -\lambda \nabla T \quad \dots (4.2.4)$$

$$J_w = J_{1w(s)} + J_{2w(s)} \quad \dots (4.2.5)$$

$$J_{1w(s)} = -\lambda'_{\mu g} (\nabla \mu - nF_w) - \lambda'_{Tg} \nabla T \quad \dots (4.2.6)$$

$$J_{2w(s)} = -\lambda'_{\mu l} (\nabla \mu - nF_w) - \lambda'_{Tl} \nabla T \quad \dots (4.2.7)$$

ただし、 $J_{1w(s)}$ 、 $J_{2w(s)}$ は、多孔質材料内のそれぞれ気相水分流[kg/m²s]、液相水分流[kg/m²s]、 $c\rho$ は材料のみかけの容積比熱[J/m³K]、 q_s は熱移動のフラックス[W/m²]、 ρ_w は液相水の密度[kg/m³]、 ψ は体積含水率[m³/m³]、 λ は熱伝導率[J/msK]、 F_w は水に作用する重力加速度[m/s²]、 $\lambda'_{\mu g}$ 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・s(J/kg)]、 λ'_{Tg} は温度勾配に関する気相水分伝導率[kg/m・s・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・s(J/kg)]、 λ'_{Tl} は温度勾配に関する液相水分伝導率[kg/m・s・K]、 n は鉛直下向きを正とする単位ベクトルである。

本稿では熱水分移動解析で用いた方程式の記述は上記の基礎方程式にとどめ、材料表面における熱水分流を表す式、室内空間における熱水分収支式、さらに遺構地盤内の酸化還元状態を推定するための物質移動に関する基礎方程式について、詳細な記述は割愛する。なお、数値計算方法には前進型有限差分法を用いた。

3 外界気象条件

本稿の解析における外界気象条件には、2013年の1年間に奈良地方気象台において測定された値を供した⁴²⁾。ただし、第3章第6節で述べる地盤内の酸化還元環境に関する実測値との比較については、実測調査を2014年に実施したことから、2014年1年間の奈良地方気象台の測定値を供した。

後述の解析でもちいた外気の気温、相対湿度、降水量、および水平面全天日射量を図3.4-1から図3.4-4に示す。なお、降水量と水平面全天日射量については、それぞれ10

分間と 1 時間毎の積算値、その他については 10 分間毎の平均値である。

また、水平面全天日射量については下記の Bouguer の式と Berlage の式をもちいて直散分離をおこなった⁴³⁾。すなわち、各時刻における太陽方位角と太陽高度および大気透過率から水平面直達日射量と水平面天空放射量を算出した。ここで、大気透過率は水平面直達日射量と水平面天空放射量の和が水平面全天日射量の実測値と一致するように、各時刻における値を決定した。Bouguer の式と Berlage の式を以下に示す。

$$J_{dh} = J_0 \cdot P^{\frac{1}{\sin h}} \quad (4.3.1)$$

$$J_{sh} = \frac{1}{2} \cdot J_0 \cdot \sin h \cdot \frac{1 - P^{\frac{1}{\sin h}}}{1 - 1.4 \ln P} \quad (4.3.2)$$

ここで、 J_{dh} : 法線面直達日射量[W/m²]、 J_0 : 太陽定数[W/m²]、 J_{sh} : 水平面天空放射量[W/m²]、 h : 太陽高度[°]、 P : 大気透過率[-]

得られた結果から、遺構展示館覆屋各壁面の鉛直面直達日射量と鉛直面天空放射量を算出した。

また夜間放射量 J_{eh} [W/m²]は、下記の Brunt の式から算出した。

$$J_{eh} = \sigma T_{out}^4 (0.474 - 0.075 \sqrt{f}) \quad (4.3.3)$$

ここで、 σ : Stephen-Boltzman 定数、 T_{out} : 外気温度[°C]、 f : 水蒸気圧[mmHg]

夜間放射の雲量補正には、以下の式をもちいた。雲量が c のとき、夜間放射 J_{ehc} は下式で表される。

$$J_{ehc} = J_{eh} \left\{ 1 - (1 - k) \frac{c}{10} \right\} \quad (4.3.4)$$

ここで、上層雲 $k=0.8$ 、中層雲 $k=0.3$ 、下層雲 $k=0.15$ で、後述する解析では、中層雲 $k=0.3$ をもちいた。得られた夜間放射量を図 3.4-5 に示す。

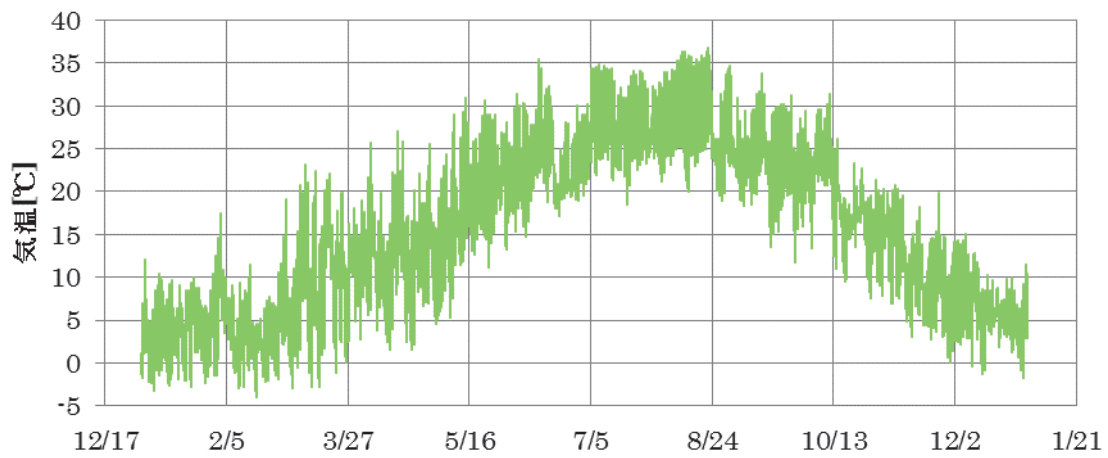


图 3.4-1 外气温 (2013 年)

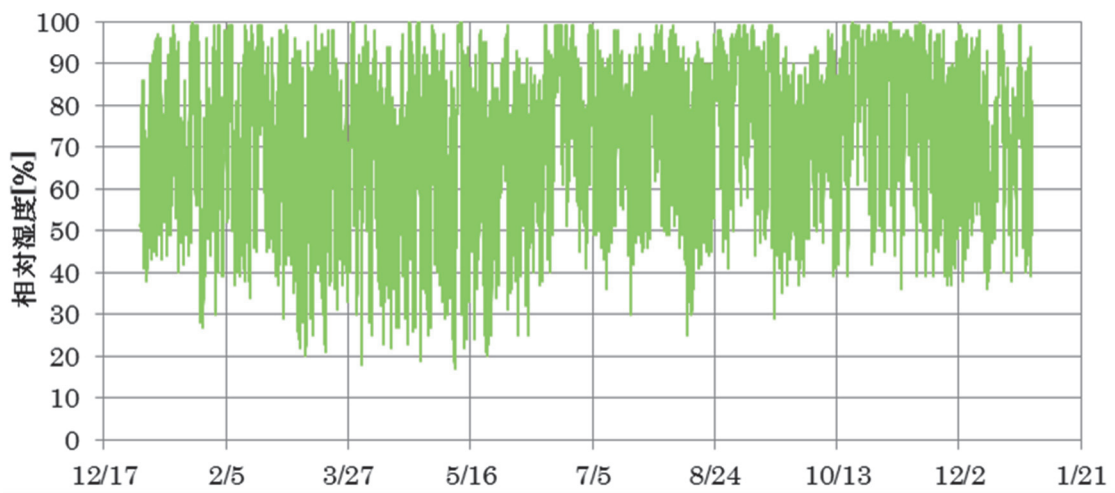


图 3.4-2 相对湿度 (2013 年)

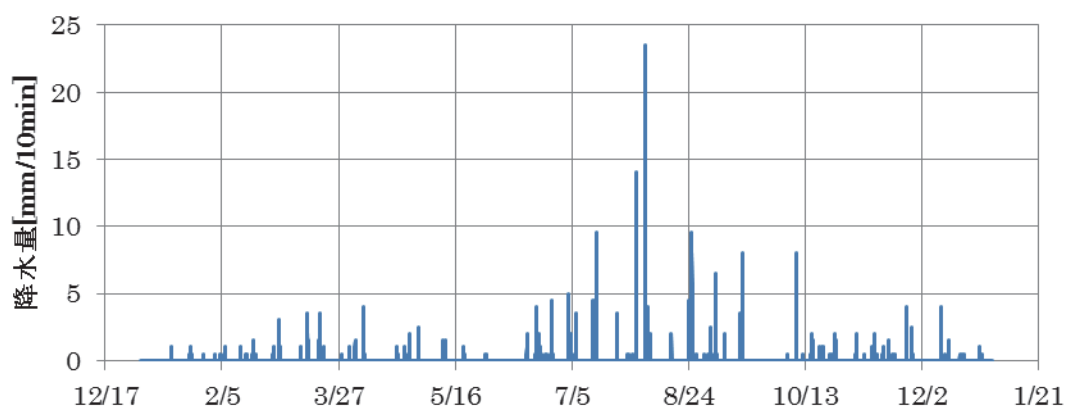


图 3.4-3 降水量 (2013 年)

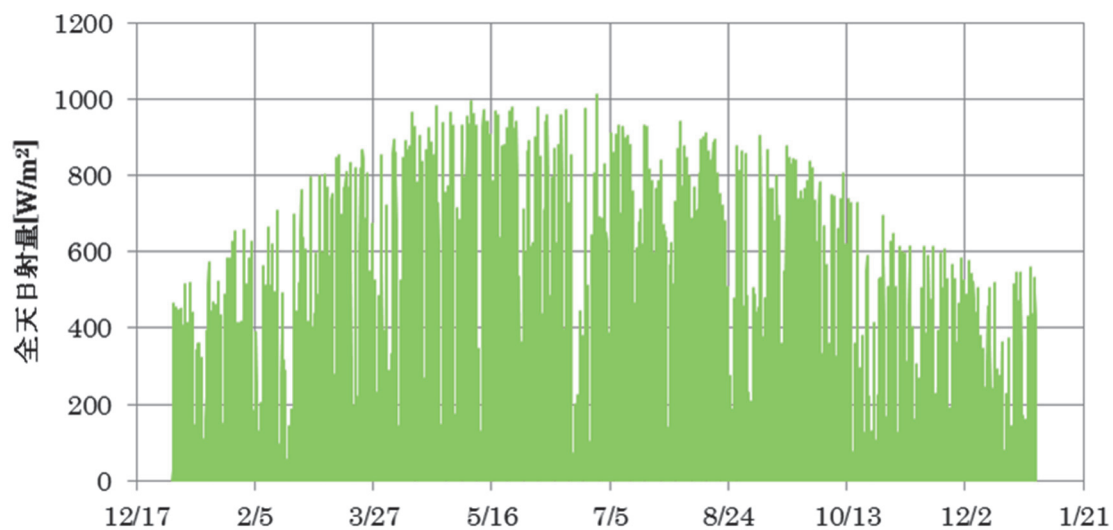


図 3.4-4 全天日射量（2013 年）

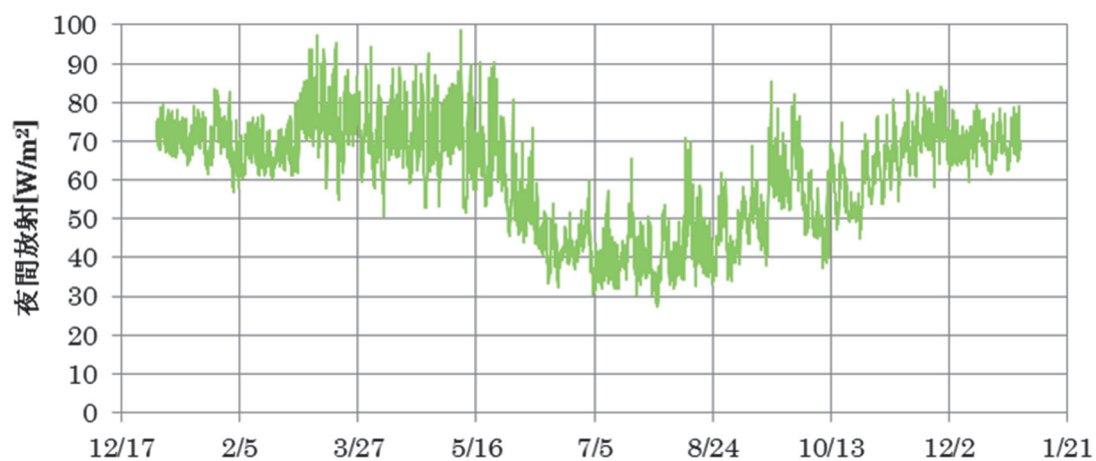


図 3.4-5 夜間放射（2013 年）

4 地盤の熱水分移動特性に関する物性値

熱水分同時移動の理論解析をおこなう際に必要となる、材料の熱水分移動性状に関する物性値は、材料の状態量、とりわけ水分化学ポテンシャルに強く依存する。ここでは、van-Genuchten Mualem^{4-4) 4-5)}モデルをもちいて水分化学ポテンシャルと含水率の関係曲線、および不飽和透水係数をもとめ、得られた透水係数から、温度、および水分化学ポテンシャル勾配に関する気相・液相水分伝導率について推定をおこなった。

(1) 水分化学ポテンシャル－含水率曲線（水分特性曲線）

1) 試験に供した土壌について

平城宮跡遺構展示館は3種の土壌、すなわち地表から盛土、埋戻し土、および遺構土

壤から構成されている。先述の通り、本来は現地にて不攪乱土壌量を採取すべきであるが、遺構展示館は観覧に供しているものであるため、土壌試料を採取することは困難であった。そこで、本研究では筆者らがこれまで水分移動特性を実測した、他の遺跡で採取した土壌の物性値を当てることとした。盛土には花崗岩の風化土であるマサ土がもちいられており、自然堆積のものではないため、土壌としての締まり具合は緩いと考えられる。そこで、遺構展示館の盛土については、大分県日田市に位置するガランドヤ1号墳の石室周辺保護盛土の物性値を与えた。ガランドヤ1号墳周辺の保護盛土は、周辺の住宅が取り壊されたのち、十数年前に盛土の施工がなされたもので、それ以降の降雨による水締め程度の締まり具合であり、比較的高い透水性を有する。

埋戻し土は、シルトあるいは粘土のように細粒の土壌粒子から構成されていると推察され、比較的締まった土壌と考えられる。そこで、埋戻し土については岡山県岡山市に位置する千足古墳の埋め戻し土の物性値を与えた。千足古墳では大正時代に盗掘を受けた後に、埋め戻しがなされた。上記ガランドヤ1号墳の保護盛土と比較すると、長期にわたる水締めの影響で透水性状が比較的低い土である。

遺構土壌は自然堆積のもので人為的な攪乱を受けていない、いわゆる地山土でもっとも締まり具合の高い、すなわち透水性状の低い土壌と推察される。そこで、遺構土壌については、先述の千足古墳において盗掘の際に攪乱を受けていない墳丘土壌の物性値を与えることとした。

2) 透水性状に関するモデル式について

不飽和土中における鉛直一次元の液相水分移動は、(4.4.1)式のリチャーズ式で表される。

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left[K(h) \left(\frac{\partial h}{\partial z} + 1 \right) \right] \quad (4.4.1)$$

ここで、 θ は体積含水率[m³/m³]、 h は土中水のマトリックポテンシャル[m]、 $K(h)$ は不飽和透水係数[m/sec]、 t は時間[sec]、 z は上向き正の空間座標[m]である。なお、マトリックポテンシャルとは土中水のポテンシャルの1つであり、吸着力によって土粒子表面に保持された水や、毛管力によって土粒子接点に保持された水の化学ポテンシャル低下量である。溶質濃度が低い場合、溶質を溶かし込むことによるポテンシャル低下量、すなわち浸透ポテンシャルを無視することができるので、マトリックポテンシャルは水分化学ポテンシャルに等しいと考えられる。このリチャーズ式に基づき、実際の水分移動を表現するためには、水分特性曲線および不飽和透水係数とマトリックポテンシャルの関係を、適切な関数およびパラメータで与える必要がある。水分特性曲線および不飽和透水係数の関数には多くの経験式が提案されているが、本研究では飽和体積含水率 θ_s 、残

留体積含水率 θ_r 、形状を決めるパラメータ α 、 n を含む van Genuchten モデル^{4.5)}に対して、飽和透水係数 K_s と間隙結合係数 l を含む Mualem モデル^{4.4)}を連結した van Genuchten-Mualem モデルを採用した。このモデルでは、体積含水率 $\theta(h)$ および不飽和透水係数 $K(h)$ はマトリックポテンシャル h の関数として、以下の式で与えられる。

$$\theta(h) = (\theta_s - \theta_r) \frac{1}{[1 + |\alpha h|^n]^m} + \theta_r \quad (4.4.2)$$

$$K(h) = K_s S_e^l \left[1 - \left(1 - S_e^{1/m} \right)^m \right]^2 \quad (4.4.3)$$

ここで S_e は有効飽和度で、飽和体積含水率 θ_s と残留体積含水率 θ_r をもちいて $(\theta - \theta_r)/(\theta_s - \theta_r)$ で与えられる。残留体積含水率は通常水分移動に関与しない含水率を指す。 K_s はその土の飽和透水係数 [m/sec] である。また α [1/m]、 n [-]、および $m (= 1 + 1/n)$ [-] は水分特性曲線の形状を与えるフィッティングパラメータであり、物理的意味を有する K_s や θ_s とは異なりそれぞれ単独で意味を持つものではない。 l は間隙結合係数と呼ばれるパラメータで、一般的には 0.5 の値が推奨されている^{4.4)}。

3) 土壌の透水性状に関する試験方法について

上記 3 種類の土壌において、透水性状が比較的高い盛土、すなわちガランドヤ 1 号墳の保護盛土に対してはマルチステップ法によって、透水性状が比較的低い埋戻し土と遺構土壌、すなわちそれぞれ千足古墳の埋戻し土と地山土の 2 種類の土壌に対しては、蒸発法により上記モデル式中のフィッティングパラメータの推定をおこなった。なお、本稿ではこれらの試験方法の詳細については割愛する。

マルチステップ法と蒸発法では、テンシオメータを用いて土中水のマトリックポテンシャルを実測する。しかし、テンシオメータで測定されるマトリックポテンシャルは、含水状態が比較的高い領域に限定されることから、逆解析によって広範囲な含水状態における水分特性を求める際に、特に低含水領域において実際のポテンシャルと推定値が乖離する可能性が高い。そこで、飽和塩溶液をもちいて調湿した環境下における平衡含水率を測定して、低含水領域における土壌の水分特性を求めた。塩の種類により、温度一定の条件下では飽和塩溶液と平衡する空気相の相対湿度は一定、すなわち水蒸気の水分化学ポテンシャルが一定である。水蒸気の水分化学ポテンシャルは下記の式で表され⁴⁾、各水分化学ポテンシャルと土壌の含水率の関係が得られる。

$$\mu = \frac{RT}{M} \ln \left(\frac{P}{P_{sat}} \right) \quad (4.4.4)$$

表 3.4-1 飽和塩溶液が与える相対湿度と水蒸気の化学ポテンシャル μ (20 °C)

塩	相対湿度 [%]	μ [J/kg]
KNO ₃	95	-6940
KCl	85	-21900
NaCl	75	-39000
NaBr	59	-71000
MgCl ₂ · 6H ₂ O	33	-148000

ここで μ は水蒸気の化学ポテンシャル[J/kg]、 R は気体常数、 M は水の分子量[0.018 kg/mol]、 P_{sat} は飽和水蒸気圧[Pa]、 P は水蒸気の蒸気圧[Pa]である。なお得られた値に水の密度を乗じて、ポテンシャルのディメンションを単位体積当りのエネルギーとして (すなわち Pa として)、以下では記す。

蒸気圧法による試験は地盤工学会の定める土の保水性試験方法 (JGS0151) に準拠しておこなった。温度 $20 \pm 1^\circ\text{C}$ に保った恒温槽内において、およそ 3~4 g 程度の攪乱土壌試料と、飽和塩溶液および固体の塩をデシケーター内に静置した。土壌試料の重量が恒量となるまで、適時試料の重量測定をおこなった。試料重量が恒量となったところで、試料を 110°C のオーブンで絶乾した。得られた含水率から、各ポテンシャルと平衡状態での体積含水率を算出した。蒸気圧法にもちいた塩の一覧を表 3.4-1 に示す。

得られた実験データに対して、不飽和水分移動汎用プログラムである HYDRUS-1D⁴⁾ をもちいた逆解析により、(4.4.2)、(4.4.3) 式の θ_r 、 α 、 n の 3 個のパラメータを各土壌試料に対して推定した。すなわち、得られた実測値と、(4.4.2) 式および (4.4.3) 式で表現される水分特性曲線および不飽和透水係数と体積含水率の関係曲線の誤差が最小となるように、HYDRUS-1D により各フィッティングパラメータの最適値を推定した。 θ_s は上記のマルチステップ法および蒸発法による実験開始時を飽和状態として、実験および炉乾による重量の減量分から算出した。 K_s は透水試験の実測値を、 l には推奨値 0.5 をもちいた。

4) 試験結果

マルチステップ法と蒸発法、および 3 種の土壌試料に対する蒸気圧法の試験結果をもとに、HYDRUS-1D をもちいた逆解析法から得られた各土壌試料のパラメータと、算出した飽和体積含水率 θ_s 、透水試験から得られた飽和透水係数を表 3.4-2 に示す。また、後述の解析でもちいる水分特性曲線、すなわち水分化学ポテンシャルと体積含水率の関係式を記す。

表 3.4-2 逆解析から推定されたモデル式中のパラメータ⁴⁻⁷⁾

		盛土	埋戻し土	遺構土壌
パラメータ		(ガランドヤ古墳保護盛土)	(千足古墳埋戻し土)	(千足古墳墳丘土)
θ_r	[m ³ /m ³]	0.010	0.020	0.028
θ_s	[m ³ /m ³]	0.501	0.420	0.491
α	[1/cm]	3.30E-02	0.215E-01	0.797E-03
n	[-]	1.21	1.13	1.44
K_{sat}	[m/sec]	4.00E-06	2.38E-06	1.18E-09

盛土

$$\psi = \begin{cases} 0.3417 \times (10.197162 \times (-\mu))^{-0.153} & (5.170262 \leq \log_{10}(-\mu)) \\ -0.023 \times \log_e(10.197162 \times (-\mu)) + 0.3598 & (3.841554 \leq \log_{10}(-\mu) < 5.170262) \\ -0.032 \times \log_e(10.197162 \times (-\mu)) + 0.4678 & (1.991521 \leq \log_{10}(-\mu) < 3.841554) \\ \theta_r + (\theta_s - \theta_r)/(1 + 1/[1 + |\alpha h|^n]^m) & (\log_{10} - \mu) < 1.991521 \end{cases} \quad (4.4.5)$$

埋戻し土

$$\psi = \begin{cases} 0.0327 \times (10.197162 \times (-\mu))^{-0.021} & (5.170262 \leq \log_{10}(-\mu)) \\ 7.1661 \times (10.197162 \times (-\mu))^{-0.399} & (3.841554 \leq \log_{10}(-\mu) < 5.170262) \\ -0.048 \times \log_e(10.197162 \times (-\mu)) + 0.6147 & (1.991521 \leq \log_{10}(-\mu) < 3.841554) \\ \theta_r + (\theta_s - \theta_r)/(1 + 1/[1 + |\alpha h|^n]^m) & (\log_{10} - \mu) 1.991521 \end{cases} \quad (4.4.6)$$

遺構土壌

$$\psi = \begin{cases} 0.0395 \times (10.197162 \times (-\mu))^{-0.015} & (5.170262 \leq \log_{10}(-\mu)) \\ -0.027 \times \log_e(10.197162 \times (-\mu)) + 0.4207 & (3.841554 \leq \log_{10}(-\mu) < 5.170262) \\ -0.049 \times \log_e(10.197162 \times (-\mu)) + 0.6595 & (2.991521 \leq \log_{10}(-\mu) < 3.841554) \\ \theta_r + (\theta_s - \theta_r)/(1 + 1/[1 + |\alpha h|^n]^m) & (\log_{10} - \mu) 2.991521 \end{cases} \quad (4.4.7)$$

各土壌試料の水分特性曲線、すなわち水分化学ポテンシャル－含水率の関数を図 3.4-6 から図 3.4-8 に示す。

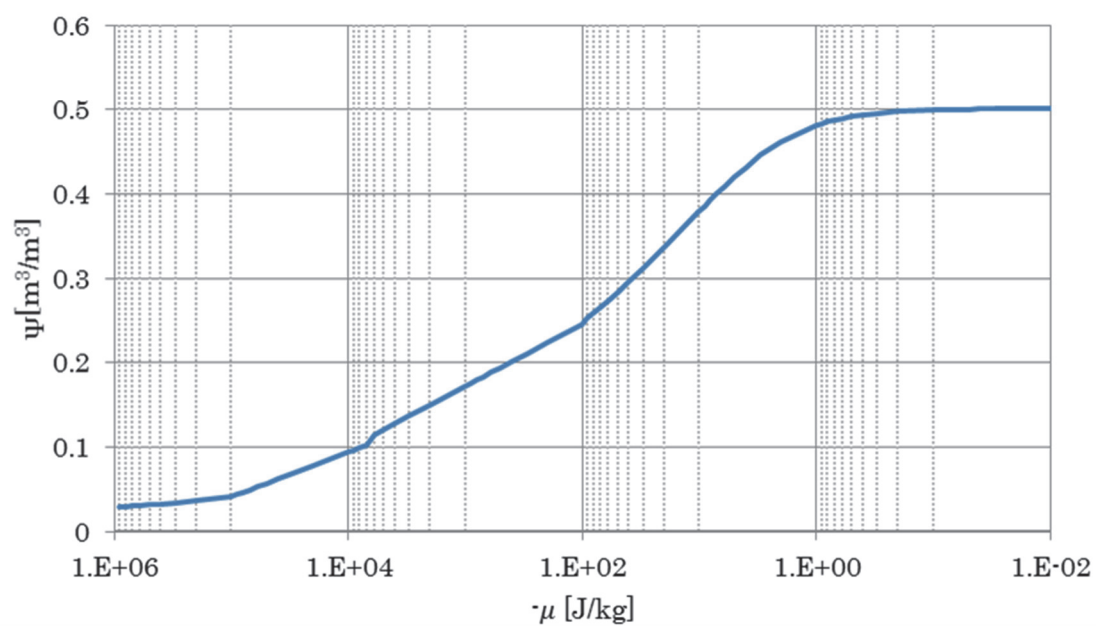


図 3.4-6 水分化学ポテンシャルー含水率関係（盛土）

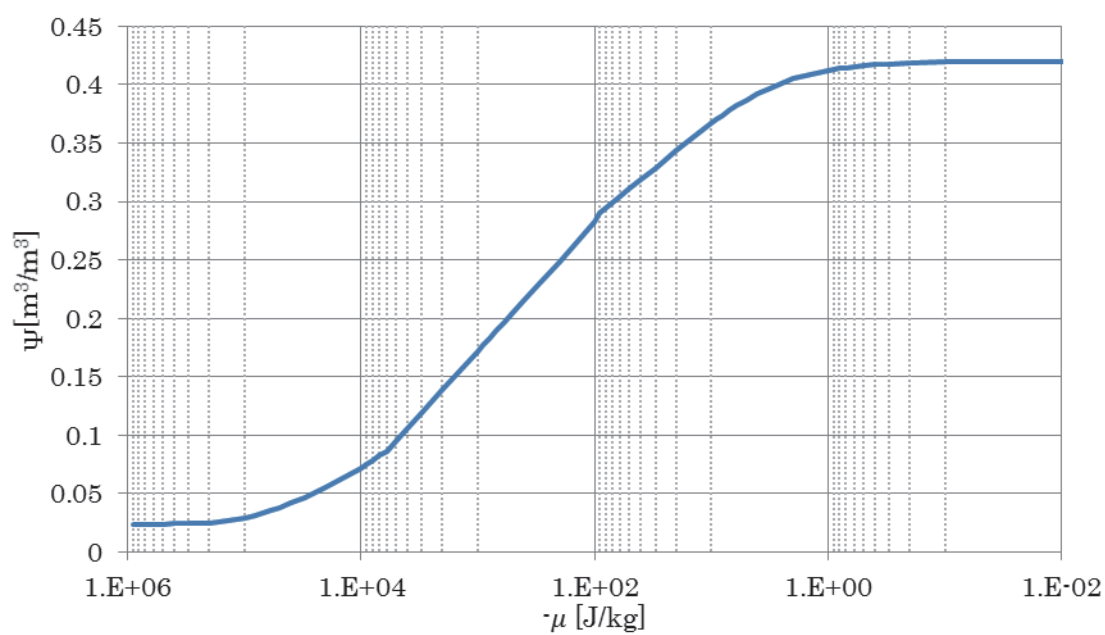


図 3.4-7 水分化学ポテンシャルー含水率関係（埋戻し土）

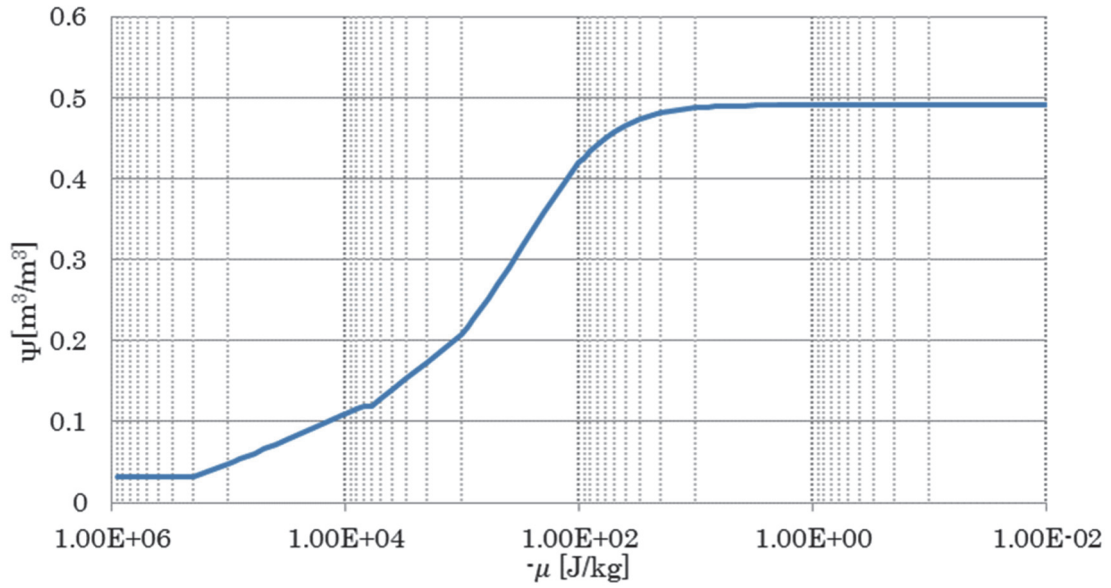


図 3.4-8 水分化学ポテンシャル－含水率関係（遺構土）

（２）水分化学ポテンシャル勾配に関する気相水分伝導率

水分化学ポテンシャル勾配に関する気相水分伝導率の導出は、小椋の導出方法に拠った⁴⁾
⁸⁾。本稿ではその導出については割愛する。

$$\lambda'_{\mu g}(\psi) = \frac{\phi_0 - \psi}{\phi_0 - \psi_{low}} \cdot \lambda'_{\mu}(\psi_{low}) \cdot \exp\left(\frac{\mu - \mu(\psi_{low})}{R_v T}\right) \quad (4.4.8)$$

ただし、低含水時の水分伝導率 $\lambda'_{\mu}(\psi_{low})$ は以下の通りである。

$$\lambda'_{\mu}(\psi_{low}) = 10^{\frac{-2.61867}{\psi_{low} + 0.07866} - 0.428146} \quad (4.4.9)$$

式(4.4.8)で与えられる気相水分伝導率は 20 [°C]のときの値なので、温度変化に関する項について比をとって下記のように温度補正する。

$$\lambda'_{\mu g} = \lambda'_{\mu g}|_{\theta=20^{\circ}\text{C}} \cdot \frac{p_{vs}}{p_{vs}|_{\theta=20^{\circ}\text{C}}} \quad (4.4.10)$$

各土壌試料の水分化学ポテンシャル勾配に関する気相水分伝導率を図 3.4-9 から図 3.4-11 に示す。

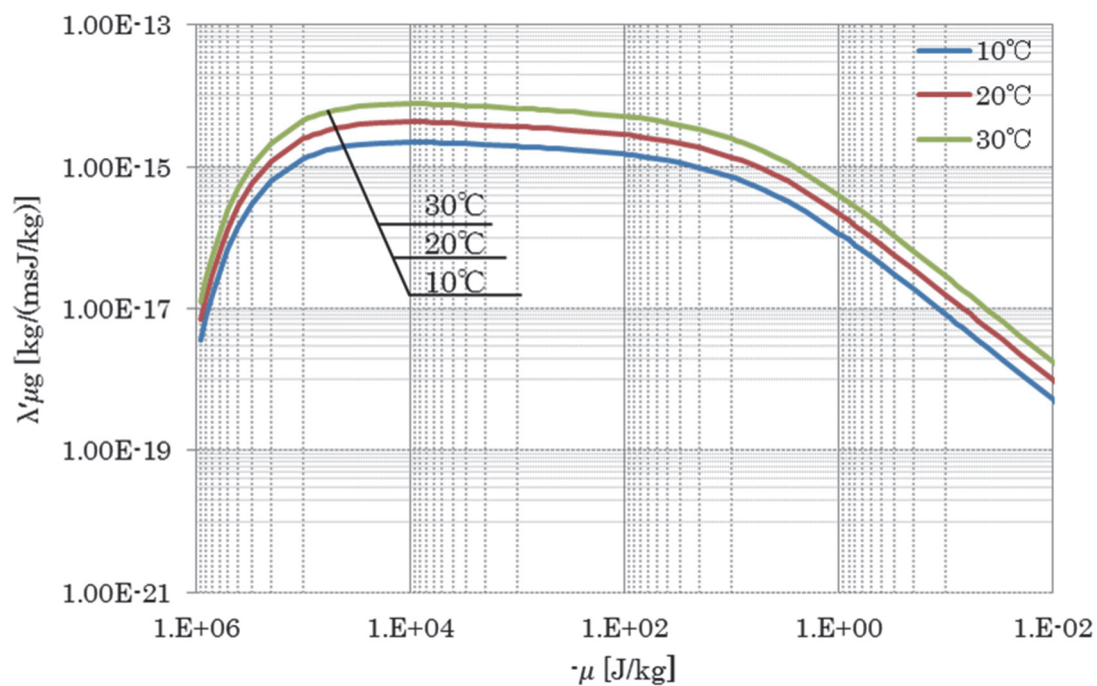


図 3.4-9 水分化学ポテンシャル勾配に関する気相水分伝導率（盛土）

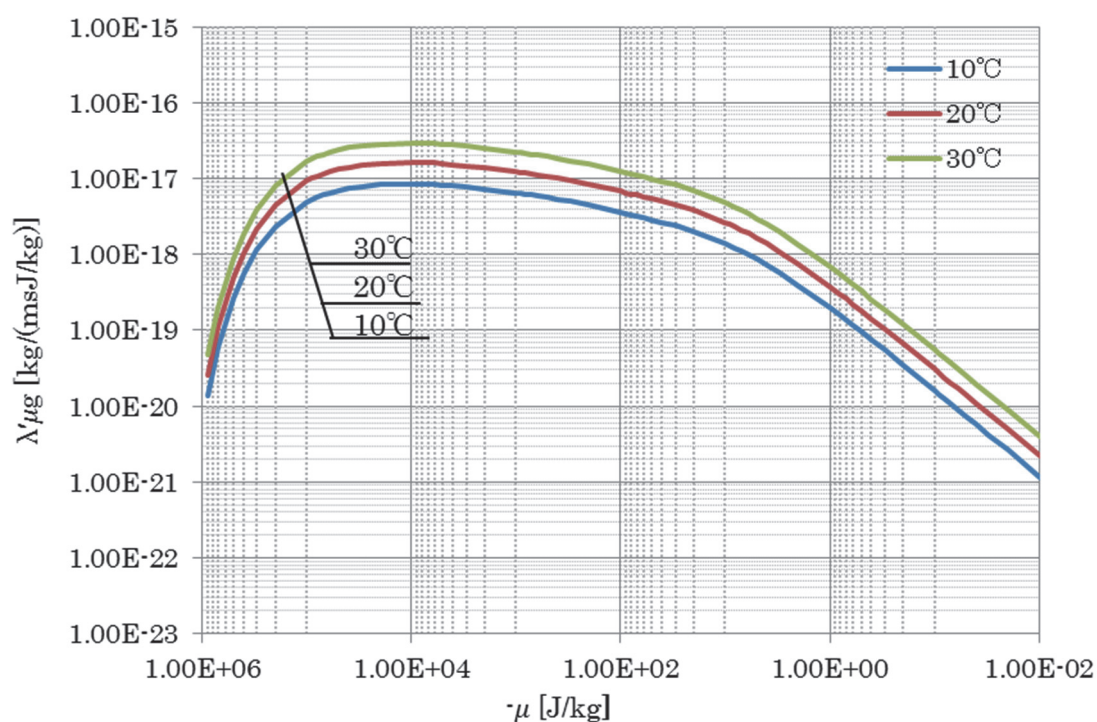


図 3.4-10 水分化学ポテンシャル勾配に関する気相水分伝導率（埋戻し土）

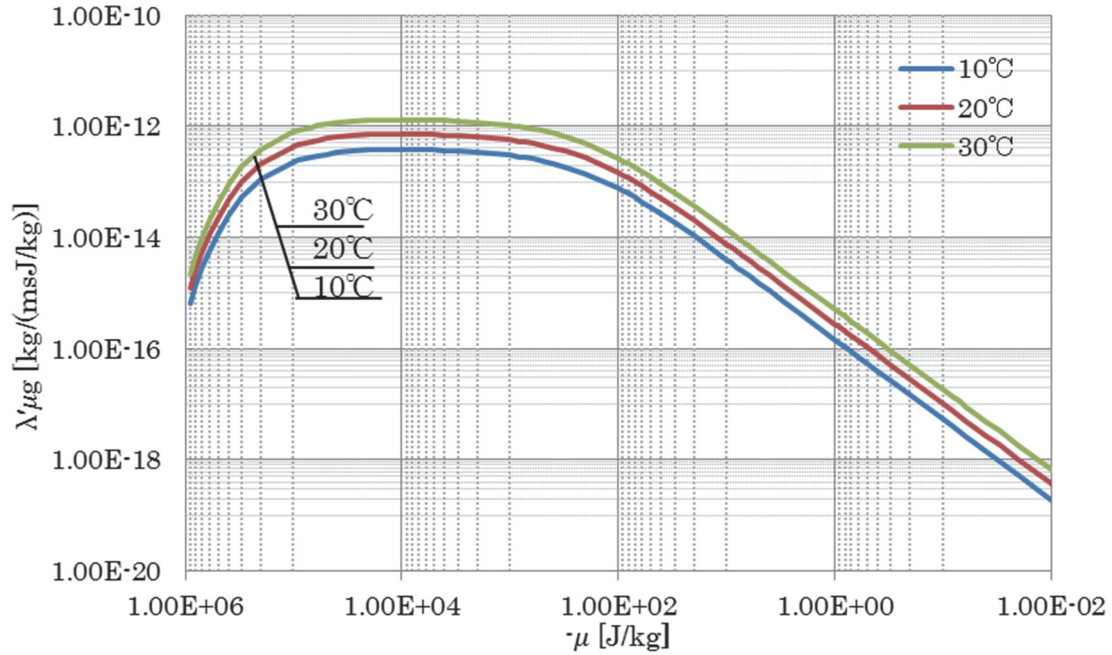


図 3.4-11 水分化学ポテンシャル勾配に関する気相水分伝導率（遺構土）

（３）水分伝導率

ダルシー式で表される液相水分流では、水分移動のポテンシャルとしてマトリックポテンシャルのみを考慮して、温度勾配を考慮しない。したがって、ダルシー式では液相水分流 J_{2w} [kg/m²sec] は以下のように表される。

$$J_{2w} = -\rho_w K \nabla \Psi \quad (4.4.11)$$

ただし、 ρ_w は水の密度 [kg/m³]、 K は透水係数 [m/sec]、 Ψ はマトリックポテンシャル [m] である。多孔質材料中の水分が溶質を含まない純水と考えられる場合、マトリックポテンシャルと水分化学ポテンシャルの関係は以下の通りとなる。

$$\mu = \Psi g \quad (4.4.12)$$

ただし、 g は重力加速度 [m/sec²] である。
水分移動のポテンシャルを水分化学ポテンシャルとした液相水分流は

$$J_{2w} = -\lambda'_{\mu l} \nabla \mu \quad (4.4.13)$$

と表される。したがって、水分化学ポテンシャル勾配に関する液相水分伝導率は以下のように表される。

$$\lambda'_{\mu l} = K \frac{\rho_w}{g} \quad (4.4.14)$$

水分化学ポテンシャル勾配による水分伝導率は、水分化学ポテンシャル勾配に関する気相水分伝導率および液相水分伝導率を合成した値であるため、以下のように表される。

$$\lambda'_\mu(\psi) = \lambda'_{\mu l}(\psi) \cdot f(T) + \lambda'_{\mu g}(\psi) \quad (4.4.15)$$

ただし、水分化学ポテンシャル勾配に関する液相水分伝導率の温度依存性を表す $f(T)$ は以下のように表される。

$$f(T) = 0.0234(T - 273.16) + 0.532 \quad (4.4.16)$$

各土壌試料の水分化学ポテンシャル勾配に関する水分伝導率を図 3.4-12 から図 3.4-14 に示す。

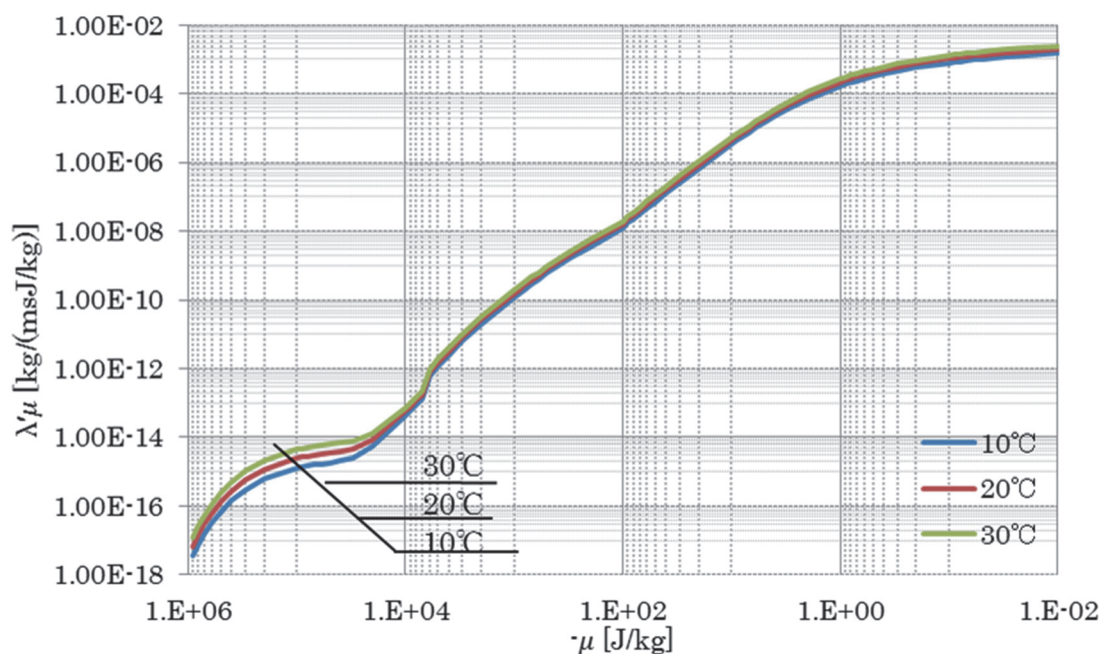


図 3.4-12 水分化学ポテンシャル勾配に関する水分伝導率（盛土）

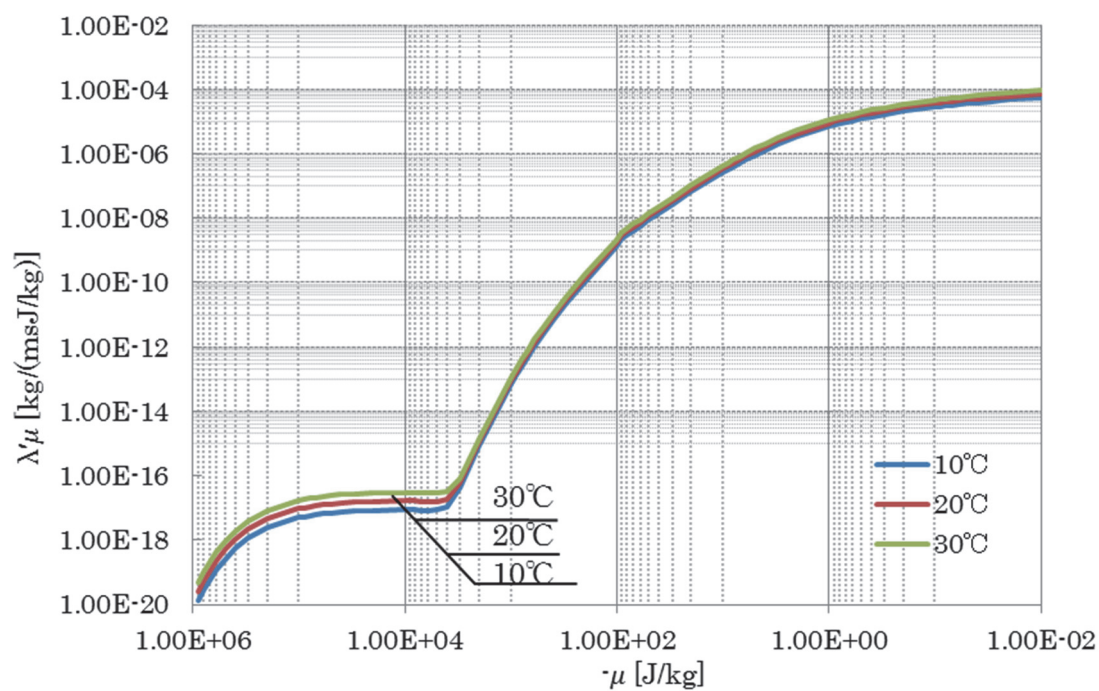


図 3.4-13 水分化学ポテンシャル勾配に関する水分伝導率（埋戻し土）

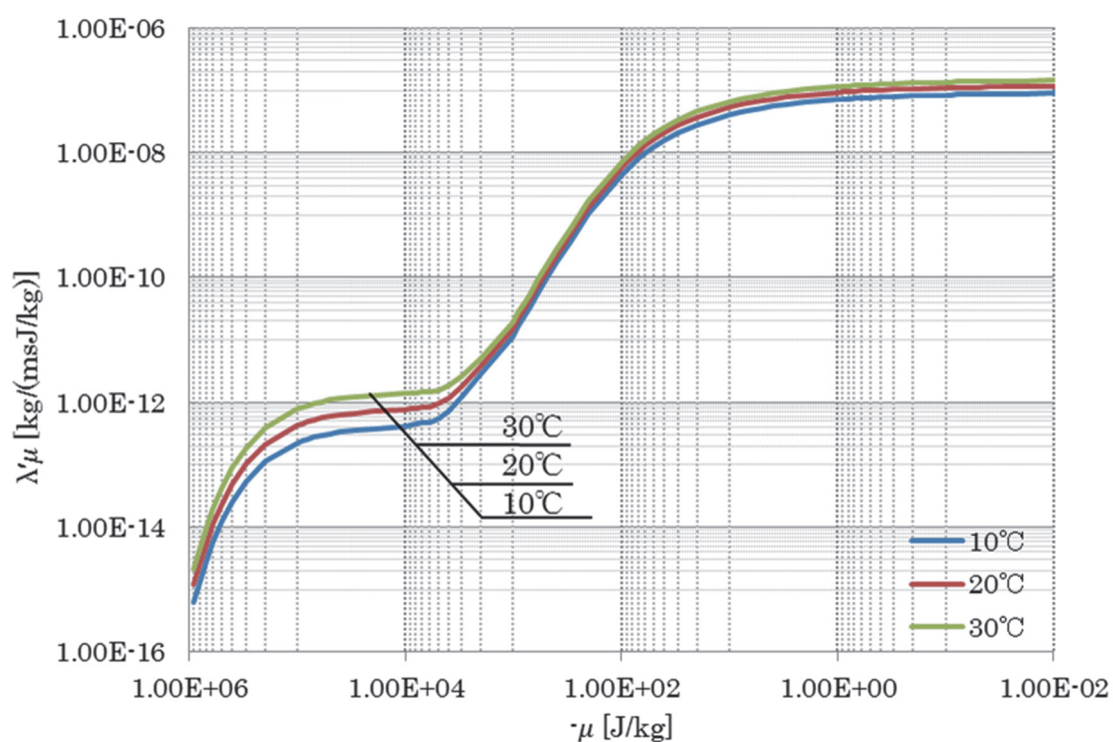


図 3.4-14 水分化学ポテンシャル勾配に関する水分伝導率（遺構土）

(4) 気相水分伝導率

ここでは液相水分移動はダルシー則に従うと仮定し、したがって温度勾配に関する液相水分伝導率はゼロとなり、 $\lambda'_T = \lambda'_{Tg}$ である。ここでも式の導出の詳細は割愛するが、気相水分伝導率は下記式(4.4.17)で表される。

$$\lambda'_{Tg}|_{\theta=20^\circ\text{C}} = \lambda'_{\mu g}|_{\theta=20^\circ\text{C}} \left(\frac{R_v T}{p_{vs}} \cdot \frac{\partial p_{vs}}{\partial T} - \frac{\mu}{T} \right) \quad (4.4.17)$$

上記近似式で得られる値は 20[°C]のときの値なので、下記式(4.4.18)から気相水分伝導率の温度補正をおこなう。

$$\lambda'_{Tg} = \lambda'_{Tg}|_{\theta=20^\circ\text{C}} \cdot \frac{\partial p_{vs}}{\partial T} / \frac{\partial p_{vs}}{\partial T} \Big|_{\theta=20^\circ\text{C}} \quad (4.4.18)$$

各土壌試料の温度勾配に関する水分伝導率を図 3.4-15 から図 3.4-17 に示す。

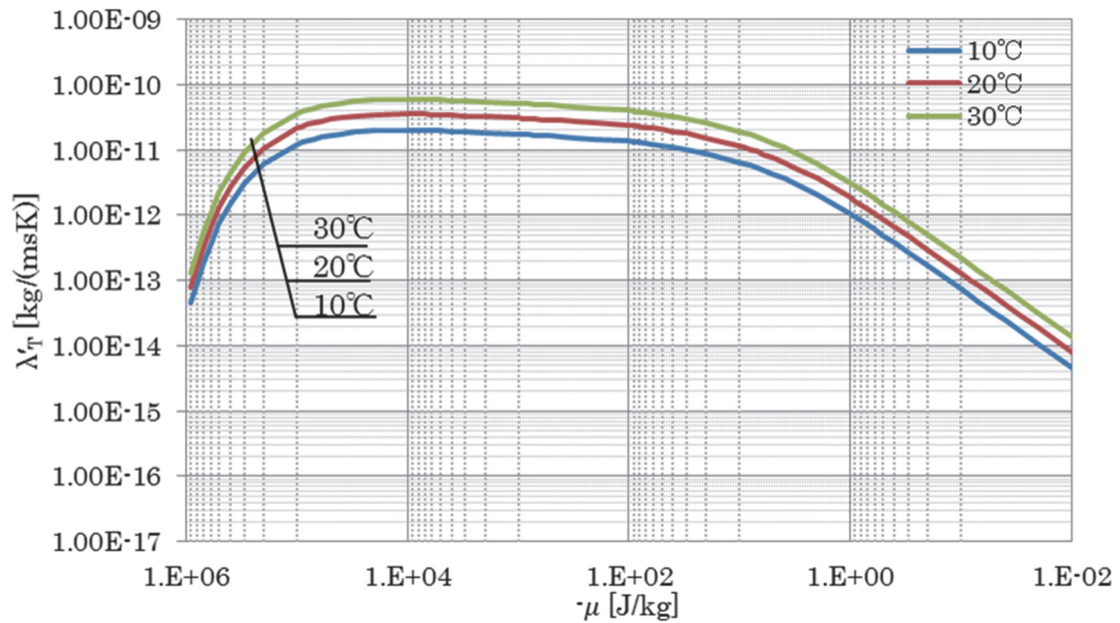


図 3.4-15 温度勾配に関する水分伝導率（盛土）

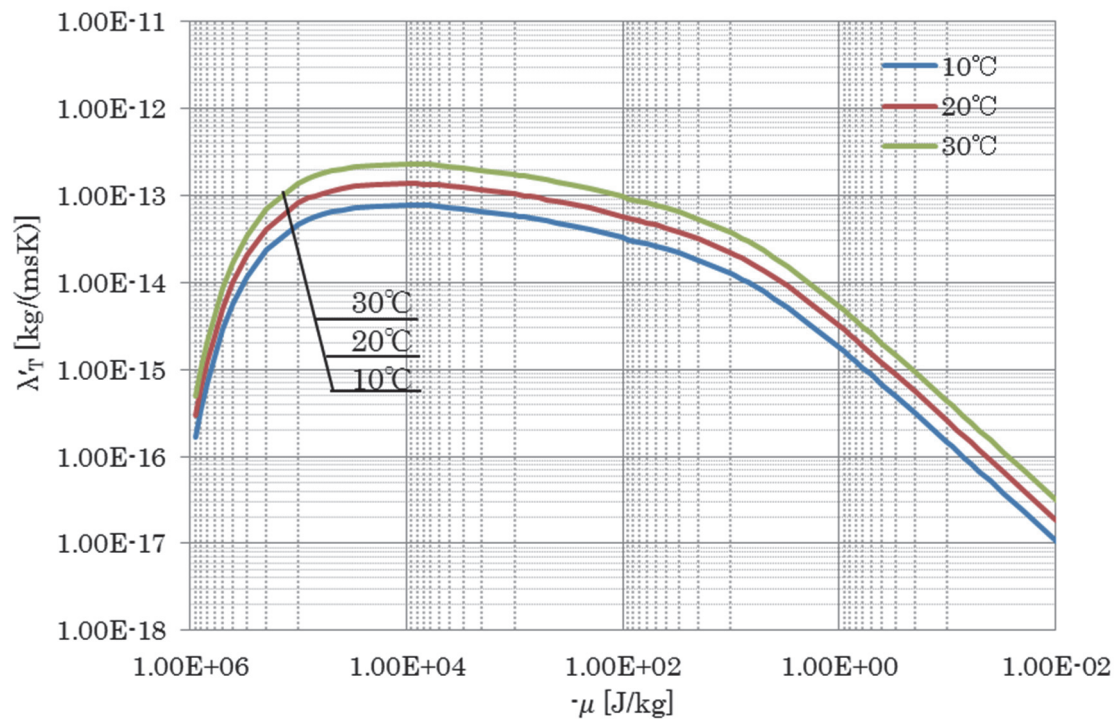


図 3.4-16 温度勾配に関する水分伝導率（埋戻し土）

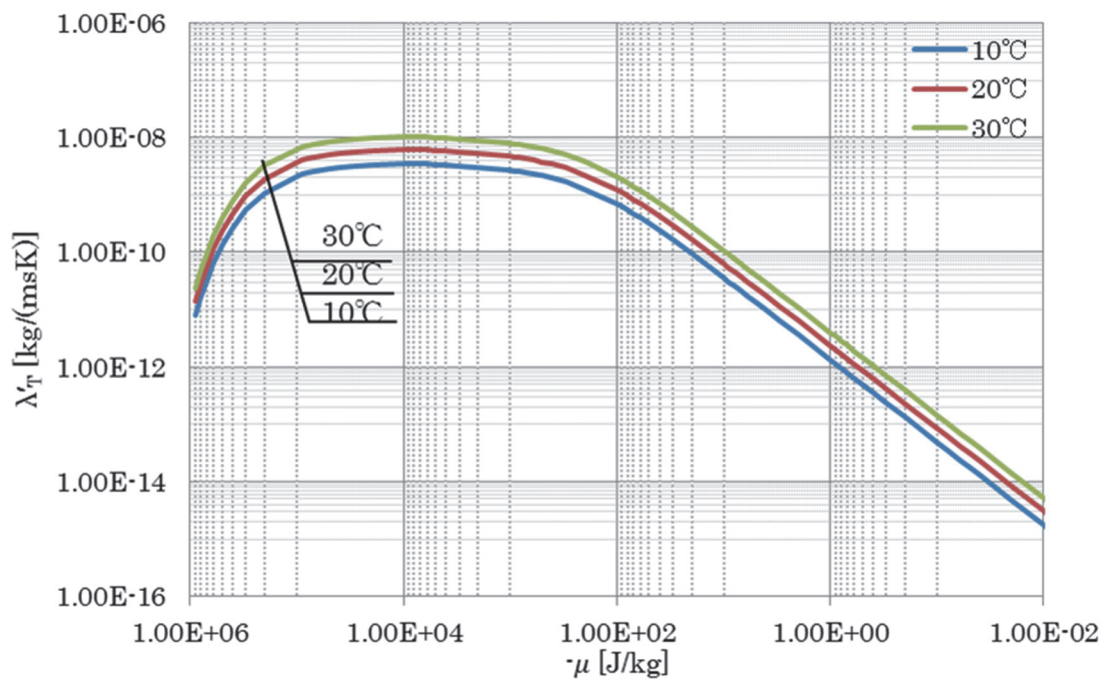


図 3.4-17 温度勾配に関する水分伝導率（遺構土）

(5) 熱伝導率

熱伝導率は含水率の関数で表現した小棕の近似式を用いて^{4・8)}、これに水蒸気移動にともなう潜熱移動の影響を考慮した下式から算出した。

$$\lambda^* = -46.144\psi^4 + 57.8615\psi^3 - 28.8076\psi^2 + 7.75485\psi + 0.588412 \quad (4.4.19)$$

$$\lambda = \lambda^* - r\lambda'_{Tg}\big|_{\theta=20^\circ\text{C}} \quad (4.4.20)$$

各土壌試料の熱伝導率を図 3.4-18 から図 3.4-20 に示す。

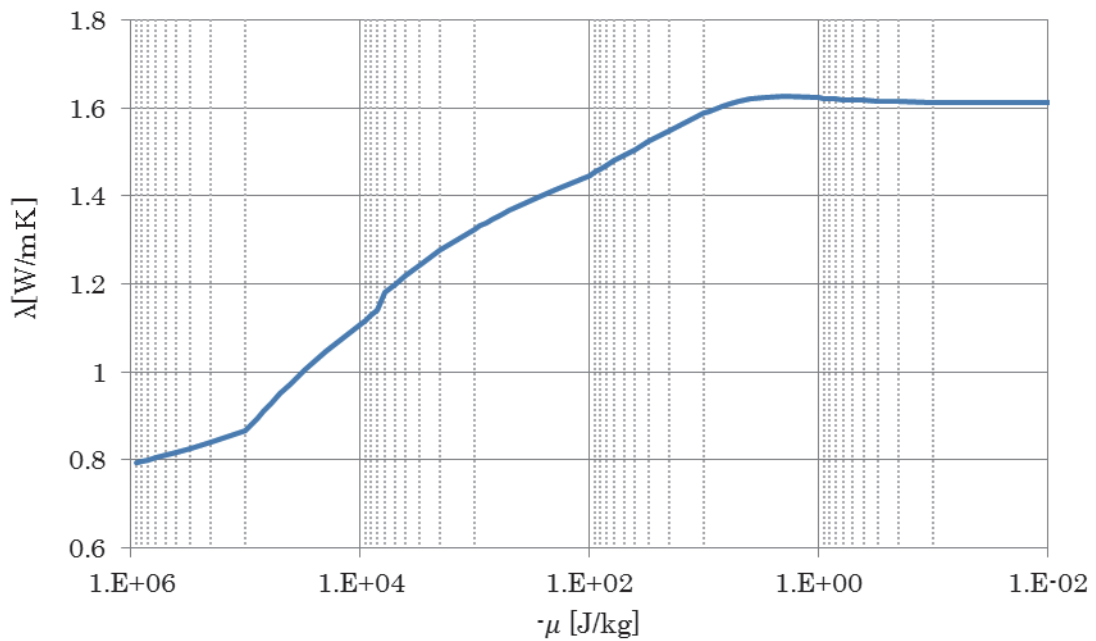


図 3.4-18 熱伝導率（盛土）

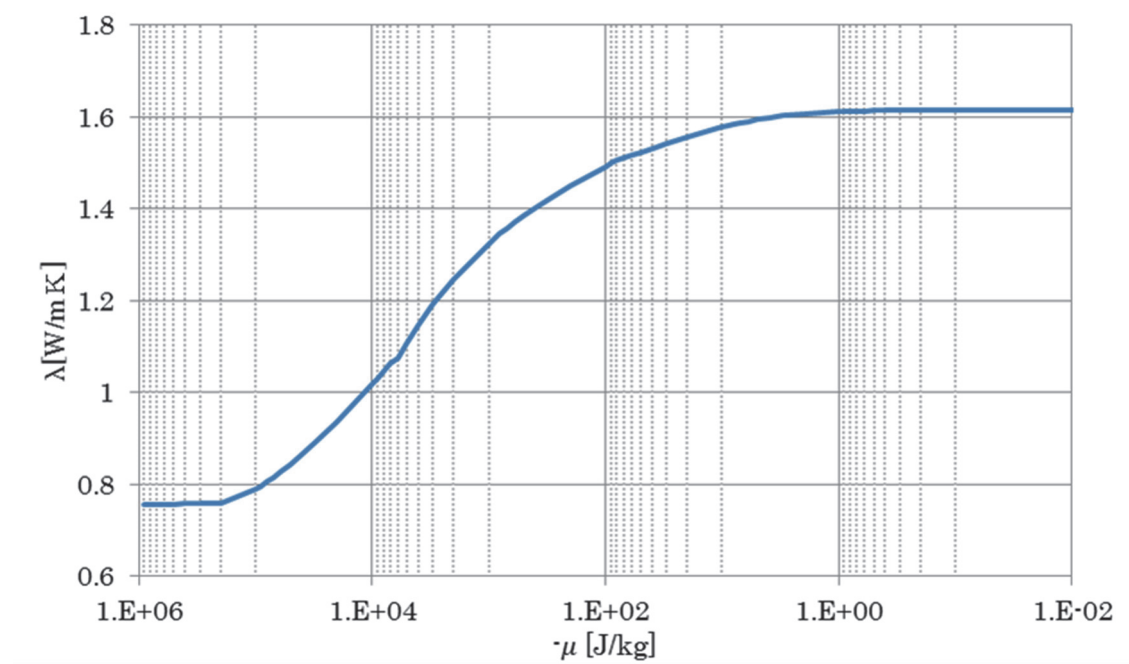


図 3.4-19 熱伝導率（埋戻し土）

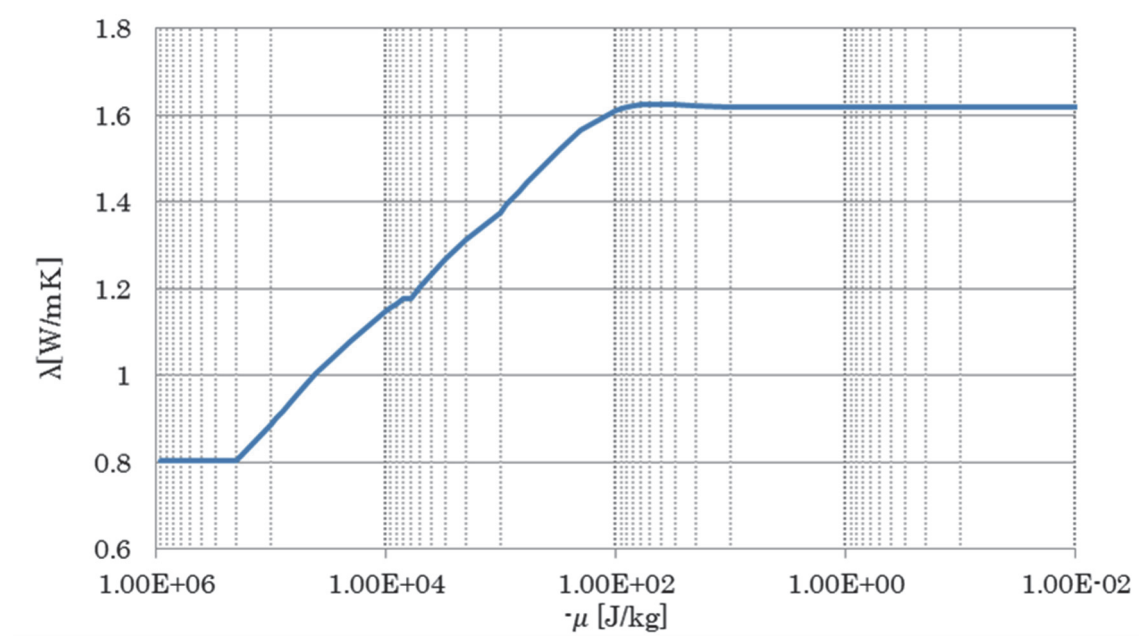


図 3.4-20 熱伝導率（遺構土）

(6) 容積比熱

上記3種類の土壌におけるみかけの容積比熱は、含水状態による容積比熱変化を考慮して体積含水率の関数とした下記の式から算出した。

盛土

$$c_{s1}\rho_{s1} = 1285117.35 + \rho_w\psi \times 4186.05 \quad (4.4.21)$$

埋戻し土

$$c_{s2}\rho_{s2} = 991000 + \rho_w\psi \times 4186.05 \quad (4.4.22)$$

遺構土壌

$$c_{s3}\rho_{s3} = 991000 + \rho_w\psi \times 4186.05 \quad (4.4.23)$$

ここで、 c_p はみかけの容積比熱 [$\text{J}/\text{m}^3\text{K}$]、 ρ_w は水の密度 [kg/m^3]、 ψ は体積含水率 [m^3/m^3] である。

20℃における各土壌試料の諸物性値を比較したものを図 3.4-21 から図 3.4-25 に示す。図 3.4-21 から土壌の保水性については遺構土壌で最も高く、埋戻し土で最も低いこととなる。また、透水性状についても、遺構土壌で最も高く、埋戻し土で最も低い値を与えていることがわかる。

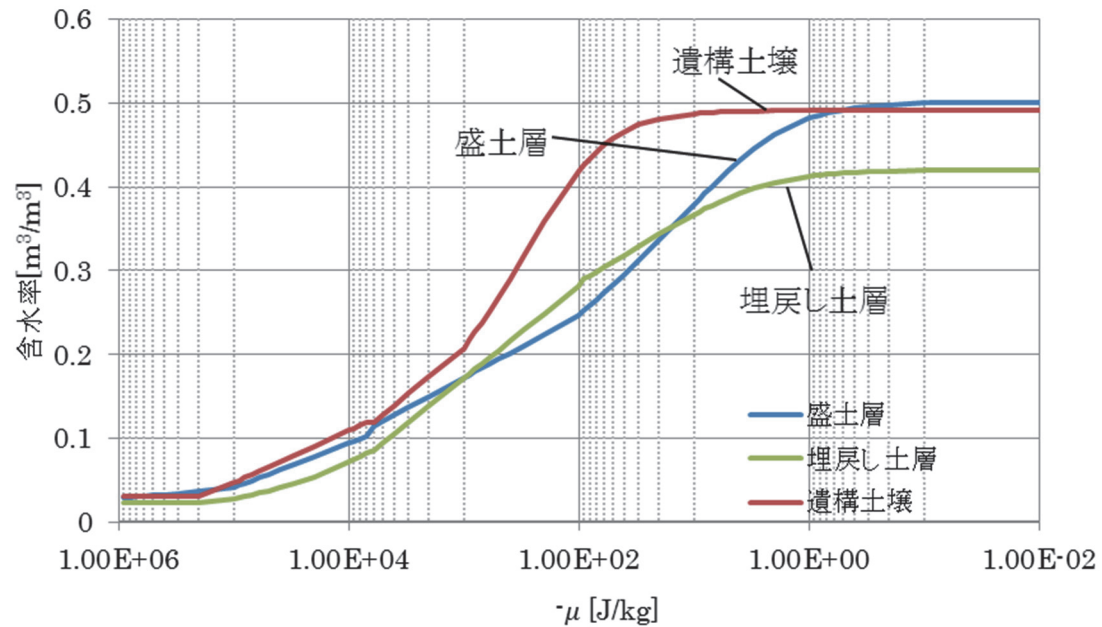


図 3.4-21 水分化学ポテンシャルー含水率関係

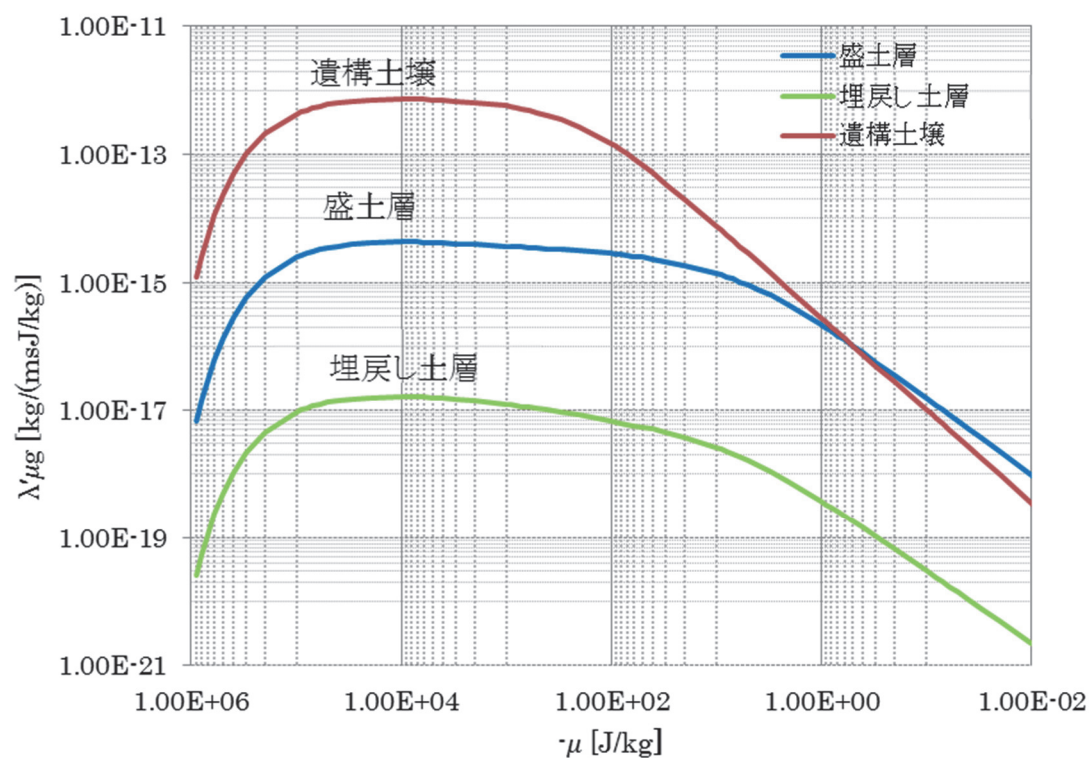


図 3.4-22 水分化学ポテンシャル勾配に関する気相水分伝導率

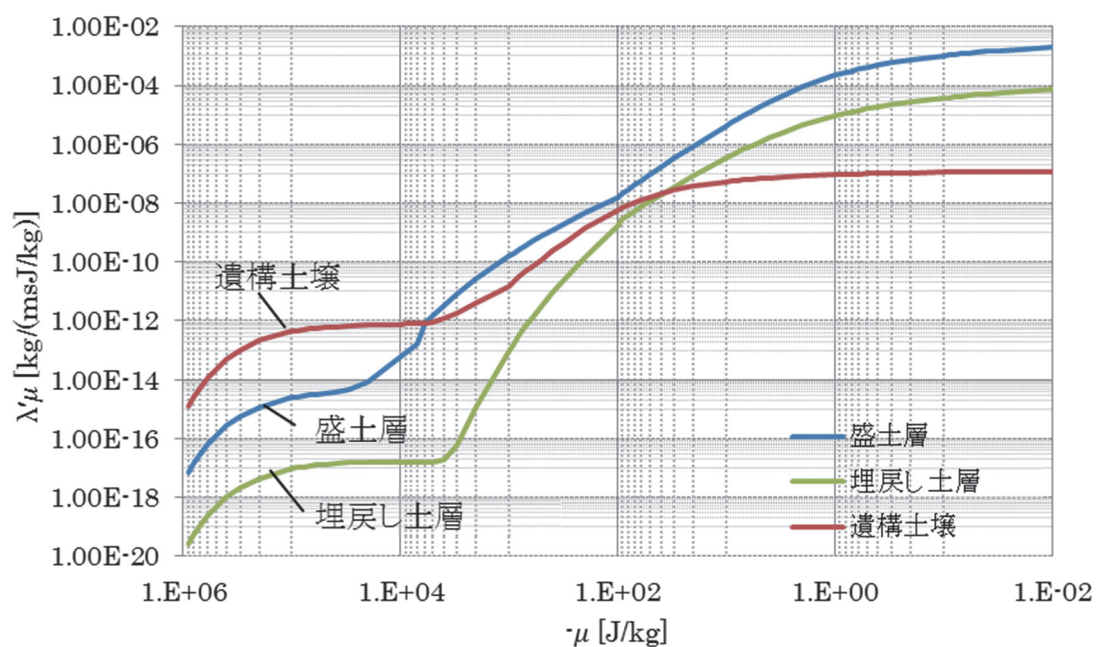


図 3.4-23 水分化学ポテンシャル勾配に関する水分伝導率

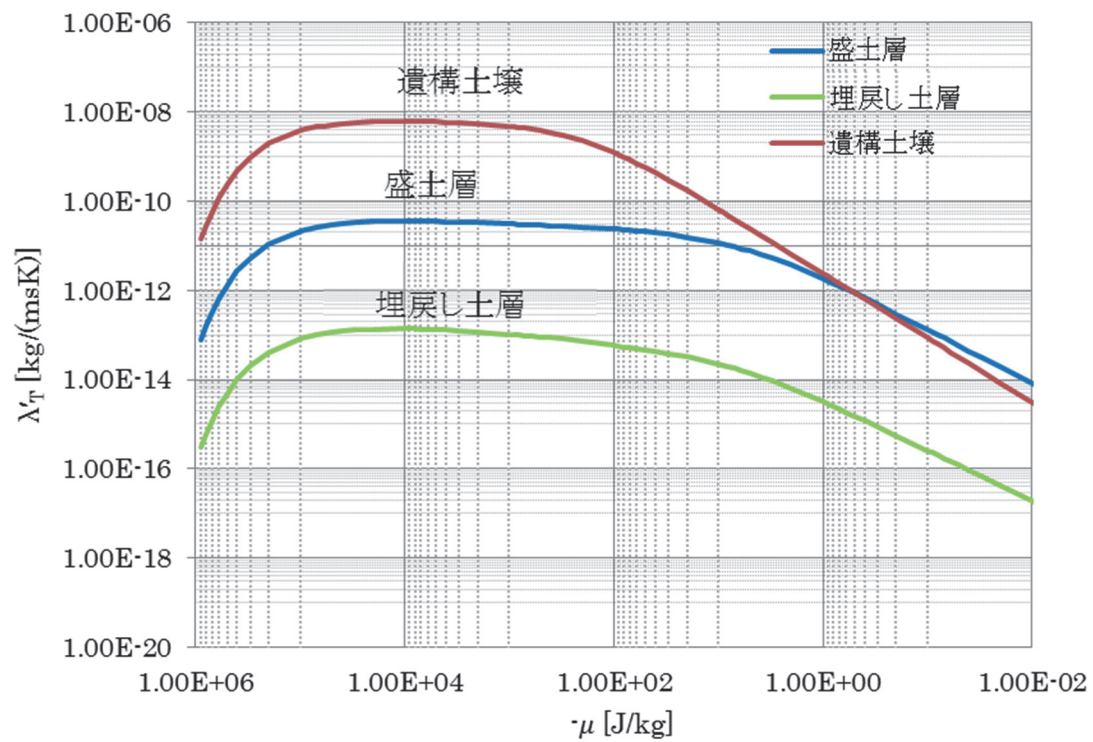


図 3.4-24 温度勾配に関する水分伝導率

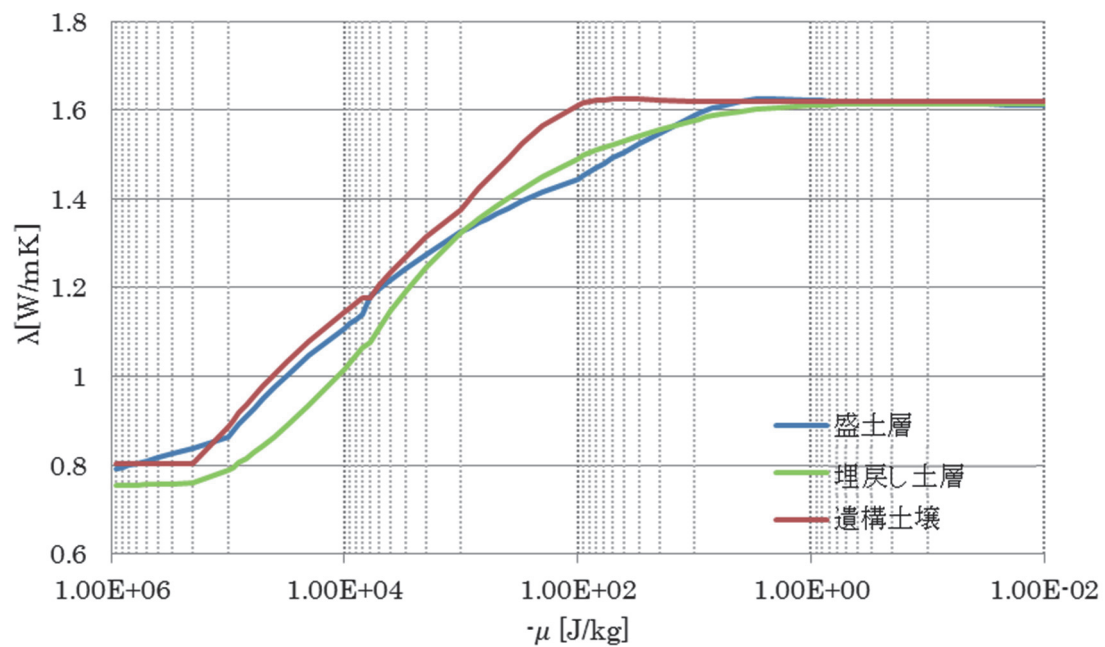


図 3.4-25 熱伝導率

5 覆屋を構成する建材の熱水分移動特性に関する物性値

遺構展示館の壁体および屋根の構造、構成材料について、北棟のものを図 3.4-26 に、南棟のものを図 3.4-27 に示す。また、それぞれの材料の物性値を表 3.4-3 に示す。覆屋の壁体および屋根を構成する材料は湿気を通さないものとし、熱移動のみを考慮することとした。盛土表面にはコンクリートのタイルを敷いていることから、南北棟ともに覆屋床面は厚さ 9.3 [cm] のコンクリートとし、熱と水分の両者の移動を考慮することとした。

(1) 壁体および屋根の構成材料の物性値

北棟は展示室側には内天井（図 3.4-26c）が設置されているが、遺構面上部の通路側には内天井は設置されていない（図 3.4-26b）。壁体は ALC 板の室内側表面に断熱材（吹き付けウレタンフォーム）を施工し、空気層（厚さ 200 [mm]）を介して石膏ボードで仕上げをおこなっている。

南棟の壁体も北棟と同様に、ALC 板に吹き付けウレタンフォームによる断熱材を施工し、石膏ボードで仕上げをおこなっている。空気層は厚さ 100 [mm] で北棟よりも薄い。屋根はコルテン鋼に断熱材（グラスウール）を設置し、石膏ボードで仕上げをおこなっている。

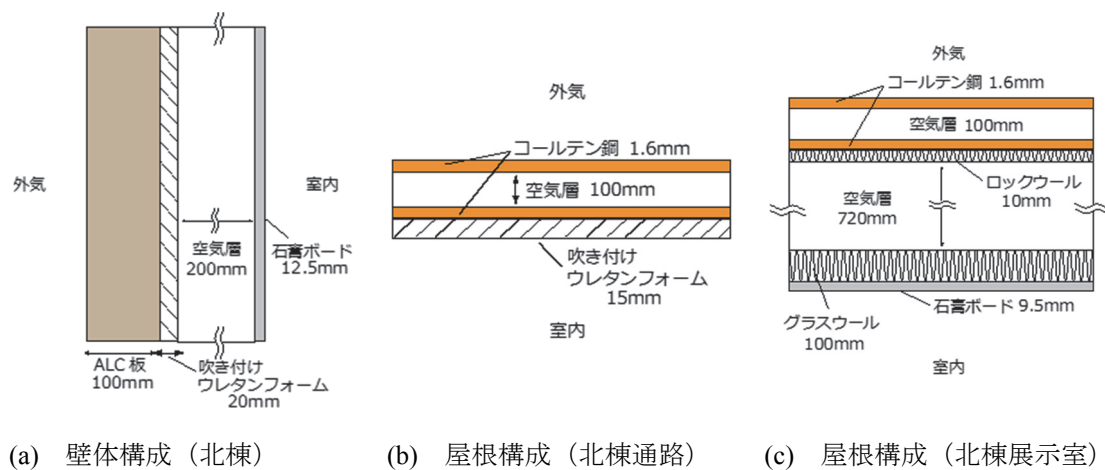


図 3.4-26 北棟の壁体および屋根構成

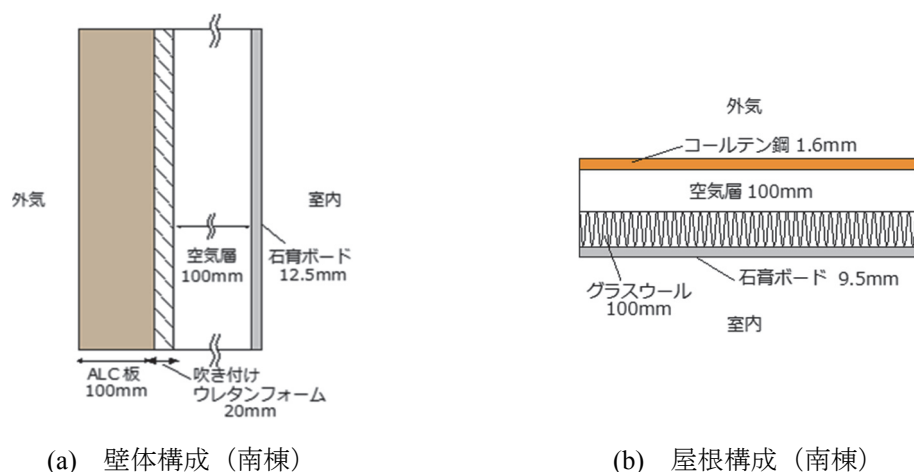


図 3.4-27 南棟の壁体および屋根構成

表 3.4-3 各材料の物性値一覧 ⁴⁻⁹⁾ 4-10)

材料名	熱伝導率 [W/mK]	比熱 [J/kgK]	密度 [kg/m ³]
ALC 板	0.15	1000	530
コールテン鋼	45	461	7800
アルミニウム	210	900	2700
石膏ボード	0.22	870	700
ウレタンフォーム	0.029	1000	40
ロックウール	0.051	840	1200
グラスウール	0.039	840	24

（２）コンクリート（床面）の物性値

覆屋内床面のコンクリートについては先述の通り熱および水分の移動を考慮する。コンクリートの熱水分移動性状する物性値については、小椋（2000）に示されている関数を引用した。

１）水分化学ポテンシャル－含水率曲線（水分特性曲線）

コンクリートの水分化学ポテンシャルと体積含水率の関係式、すなわち水分特性曲線には下式をもちいた。

$$\psi = \begin{cases} 0 & (10.1694 \leq \log_{10}(-\mu)) \\ -0.0098 + 0.06395/(\log_{10}(-\mu) - 3.644) & (5.298 \leq \log_{10}(-\mu)) < 10.1694 \\ -3.065454 + 2.267467 \times \log_{10}(-\mu) & \\ -5.208352 \times 10^{-1} \times [\log_{10}(-\mu)]^2 & (3.768 \leq \log_{10}(-\mu)) < 5.298 \\ +3.833344 \times 10^{-2} \times [\log_{10}(-\mu)]^3 & \\ 0.1639 + 0.03518/[\log_{10}(-\mu) - 4.9593] & (-3 \leq \log_{10}(-\mu) < 3.768) \\ 0.2412 \times \mu + 0.15972 & (\log_{10}(-\mu) < -3) \end{cases} \quad (4.5.1)$$

2) 容積比熱

地盤と同様に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とで算出する。

$$c_c \rho_c = 2533520 + \rho_w \psi \times 4186.05 \quad (4.5.2)$$

3) 気相水分伝導率

先述の通り、温度勾配に関する液相水分伝導率は 0 と仮定し、 $\lambda'_T = \lambda'_{Tg}$ である。

$$\lambda'_{Tg}|_{\theta=20^\circ\text{C}} = \begin{cases} 10^{-9.8729-0.010101/\psi} & (0 < \psi \leq 0.032964) \\ 10^{-10.48931+10.3883\psi-56.45732\psi^2+806.5875\psi^3} & (0.032964 < \psi \leq 0.1278) \\ 10^{-8063.5 \times (\psi-0.13)^2 - 8.36} & (0.1278 < \psi \leq 0.15972) \end{cases} \quad (4.5.3)$$

得られた結果について、式(4.4.18)と同様に温度補正をおこなう。

4) 液相水分伝導率

水分化学ポテンシャル勾配に関する気相水分伝導率 $\lambda'_{\mu g}$ 、および水分化学ポテンシャル勾配に関する液相水分伝導率 $\lambda'_{\mu l}$ は下式で示す関係がある。

$$\lambda'_{\mu g} = \lambda'_{Tg} / \left(\frac{R_v T}{p_{vs}} \cdot \frac{\partial p_{vs}}{\partial T} - \frac{\mu}{T} \right) \quad (4.5.4)$$

$$\lambda'_{\mu l} = \exp(-75.10212 + 350.007\psi) \quad (4.5.5)$$

水分化学ポテンシャル勾配に関する水分伝導率 λ'_μ は下記の通りとなる。

$$\lambda'_{\mu} = \lambda'_{\mu l} + \lambda'_{\mu g} \quad (4.5.6)$$

5) 熱伝導率

熱伝導率は下記の近似式から算出する。

$$\lambda = 1.3 + 3.5 \times \psi \quad (4.5.7)$$

以上、4.5.2で述べた各関数を図 3.4-28 から図 3.4-32 に示す。

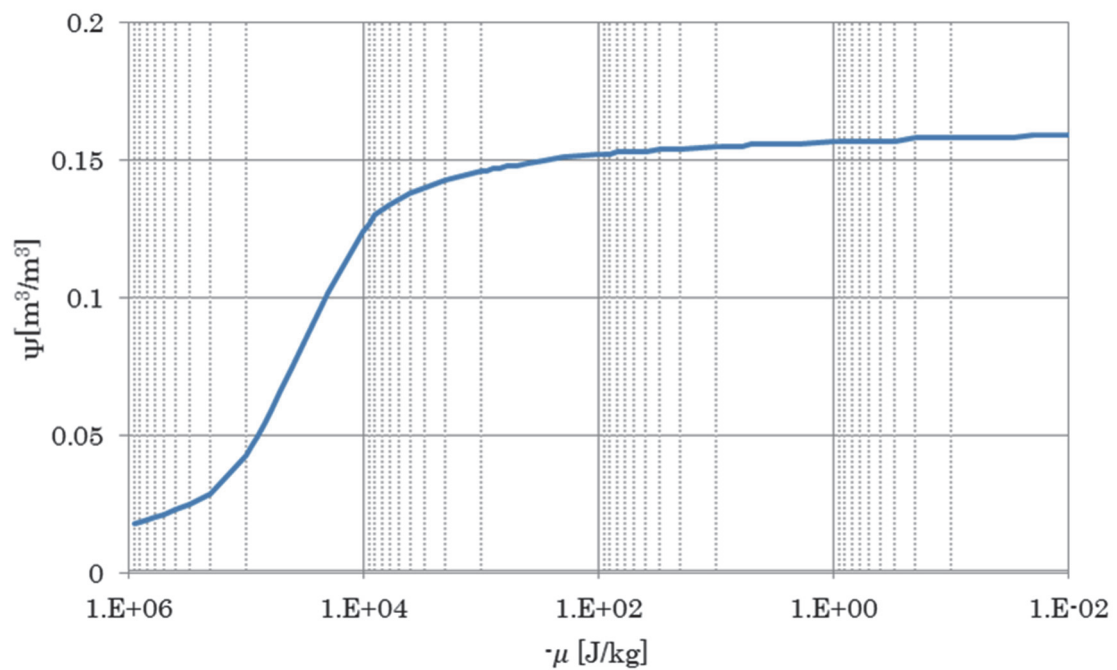


図 3.4-28 水分化学ポテンシャルー含水率関係（コンクリート）

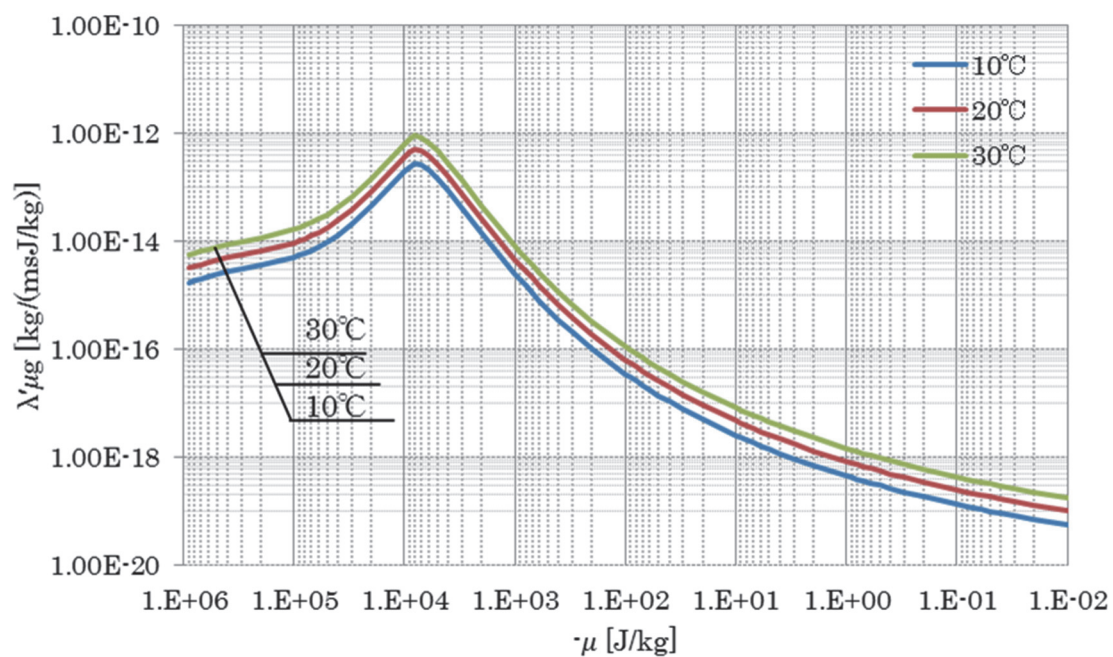


図 3.4-29 水分化学ポテンシャル勾配に関する気相水分伝導率（コンクリート）

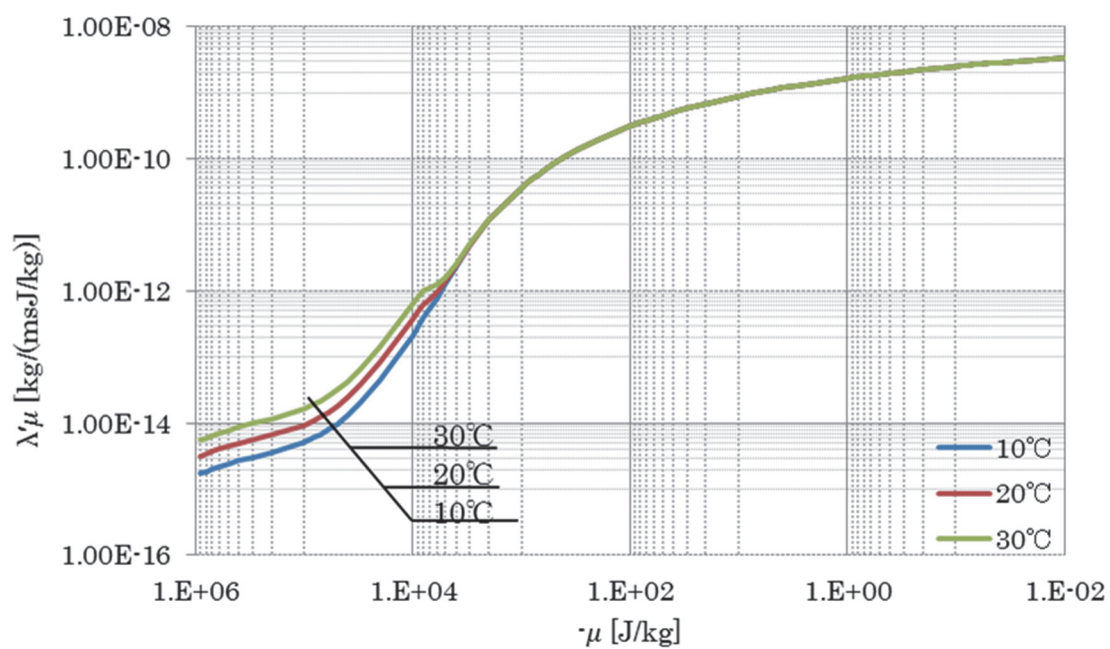


図 3.4-30 水分化学ポテンシャル勾配に関する水分伝導率（コンクリート）

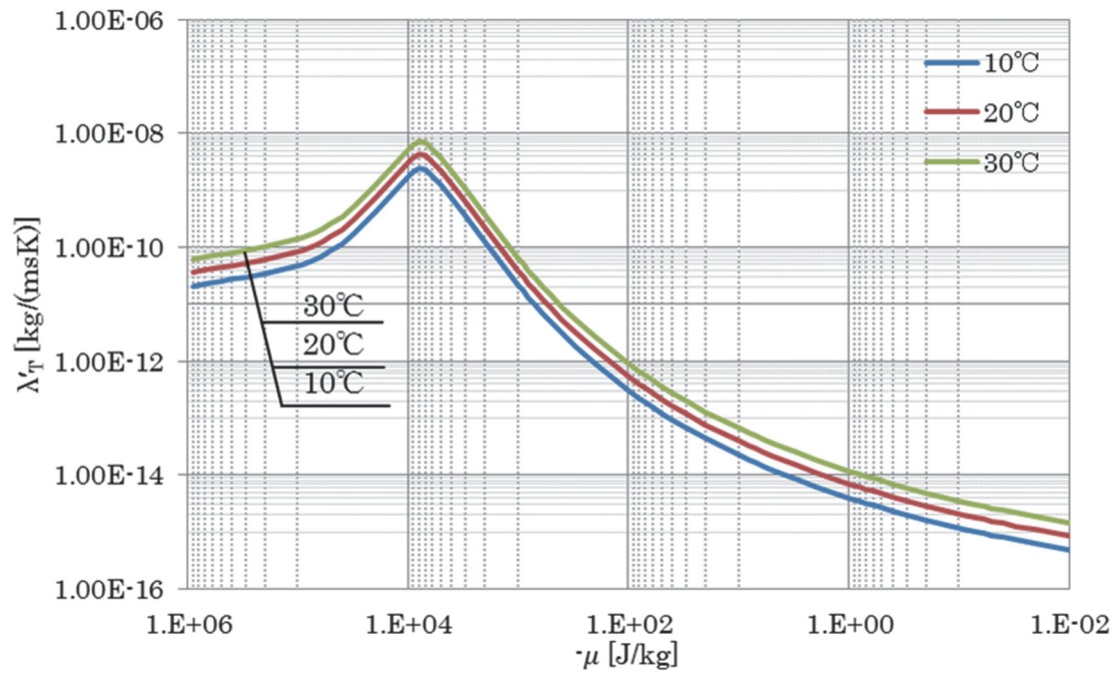


図 3.4-31 温度勾配に関する水分伝導率（コンクリート）

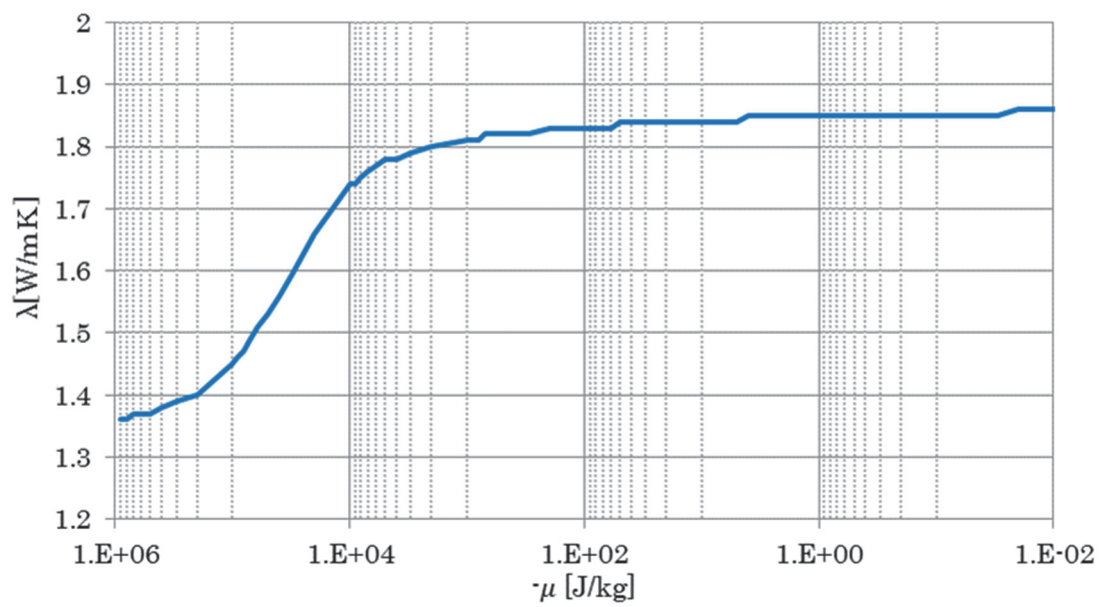


図 3.4-32 熱伝導率（コンクリート）

6 空気側伝達層の物性値およびその他の材料の諸物性値

解析でもちいた物性値を表 3.4-4 に示す。

表 3.4-4 各材料の諸物性値 ^{4-3) 4-10)}

項目	値
日射吸収率（壁体）	0.4 [-]
日射吸収率（屋根）	0.4 [-]
日射吸収率（土壌）	0.83 [-]
中空層の熱伝導抵抗値（垂直：100 mm）	0.18 [m ² K/W]
中空層の熱伝導抵抗値（垂直：200 mm）	0.17 [m ² K/W]
中空層の熱伝導抵抗値（水平：100 mm）	0.23 [m ² K/W]
ガラスの熱貫流率	6.29 [W/m ² K]
ガラスの日射透過率	0.855 [-]
室内側熱伝達率	9.3 [W/m ² K]
室外側熱伝達率	23.3 [W/m ² K]
室内側湿気伝達率	2.85×10^{-8} [kg/m ² sPa]
室外側湿気伝達率	1.14×10^{-7} [kg/m ² sPa]

7 第4節のまとめ

本節では、解析で用いる地盤及び建築壁体の熱水分移動の基礎方程式について述べた。これらを元に後述する覆屋及び周辺地盤を考慮した熱水分同時移動のモデル化をおこなう。また、後述の解析に用いる外界気象条件と、遺構周辺地盤を構成する3種の土壌および覆屋の建材の熱水分移動性状に関する物性値を示した。

3種の土壌については、遺構保存の観点から現地での不攪乱土壌試料の採取は実施できなかったが、それらの土壌の成因、圧密の程度を考慮し、他の遺構において採取した土壌から得られた物性値を充てた。熱水分物性値は、特に水分化学ポテンシャルに強く依存しており、非線型性が大きい。したがって、理論解析をおこなうためには数値解析によらざるを得ず、数値解析で用いる関数の導出をおこなった。特に水分化学ポテンシャルと含水率の関係をあらわす関数については、飽和透水係数や、乾燥領域における平衡含水率の実測値と、マルチステップ法、および蒸発法から得られた結果から逆解析をおこない、水分化学ポテンシャルと体積含水率の関係を表す van-Genuchten Mualem モデルのフィッティングパラメータを決定した。

覆屋を構成する建材の熱水分物性値については、文献値による材料の熱物性値を示した。

第4節の参考文献

- 4-1) 松本衛：新建築学大系 10 環境物理 3.湿気、彰国社（1984）
- 4-2) 気象庁ホームページ <http://www.data.jma.go.jp/>（2014）
- 4-3) 松浦邦男・高橋大弐：エース建築環境工学Ⅰ ー日照・光・音ー、朝倉書店（2001）
- 4-4) Mualem, Y. : A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media, Water Resources Research, 12(3), pp.513-522 (1976)
- 4-5) van Genuchten, M. Th. : A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils, Soil Science Society of America Journal, 44, pp.892-898 (1980)
- 4-6) Šimůnek, J., Wendroth, O., van Genuchten, M.Th., : Parameter estimation analysis of the evaporation method for determining soil hydraulic properties, Soil Science Society of America Journal, 62, pp.894-905 (1998)
- 4-7) Soichiro Wakiya, Yohsei Kohdzuma, Takanori Kusaara, Mamoru Mimura, and Takeshi Ishizaki : An Investigation of preserving the carved stone in burial mound using numerical analysis of heat and moisture simultaneous transfer, in proceedings of the 5th IBPC, pp.1323-1330 (2012)
- 4-8) 小椋大輔：地下構造物の熱・湿気性状に関する研究、学位論文（2000）
- 4-9) 日本熱物性学会編：熱物性ハンドブック、養賢堂、p118、p201、p208（2000）
- 4-10) 銚井修一・池田哲郎・新田勝通：エース建築環境工学Ⅱ ー熱・湿気・換気ー、朝倉書店（2002）

第5節 温湿度解析モデルによる遺構展示館の室内環境の再現

1 はじめに

本節では、遺構展示館の北棟および南棟の館内空気の温湿度、および地盤の含水状態に関する解析条件と解析結果について述べる。遺構展示館は北棟と南棟から構成され、それらの室内環境は大きく異なる。本節では、北棟及び南棟における現状の室内温湿度と地盤の含水状態の再現をおこない、解析モデルの妥当性について検討する。

2 解析条件

解析対象は、北棟、南棟の地盤及び覆屋である。地盤は2次元系、覆屋の壁体、屋根は1次元系として考慮した。また覆屋の壁体、屋根面は断湿とし、熱のみの移動を考慮した。

(1) 北棟

1) 解析対象のモデル化

北棟を図 3.5-1 に示すように、室上部（室1）、通路（室2）、展示室（室3）、および遺構面（室4）の4室から構成される空間としてモデル化した。展示室には内天井が設置されている。また南側と西側の壁面に開口部があり、これらはガラス面として扱った。北棟の北側と南側の一部には排煙連続窓がついているが、これらは常時閉じており考慮しないこととした。建築壁体の構成は第3章第4節で示した通りである。

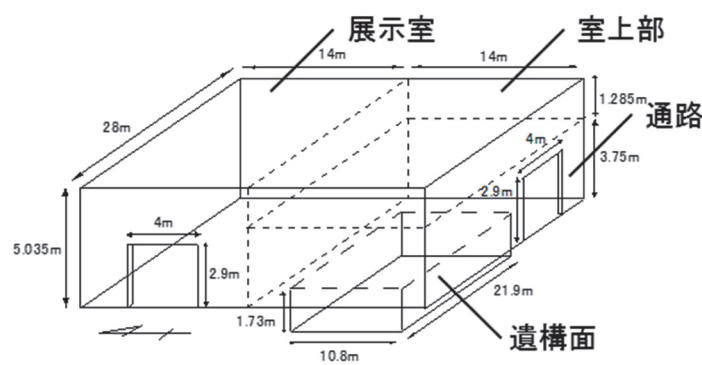


図 3.5-1 北棟解析モデル

表 3.5-1 開口部の面積

開口部	面積（幅×高さ）
南側	4.0m×2.9m
西側	4.0m×2.9m

① 日射量

北棟の開口部は渡り廊下につながり、展示棟、事務棟が隣接する。これらの周辺の建物の影響を考慮し、西側と南側の開口部から入射する日射量は各方位の日射量の 1/2 とした。

② 地下水位

地下水位は、遺構面から -1.2m に位置するとし、水位は一定とした。

③ 内部発熱

照明による内部発熱を考慮した。照明は、通路（室 2）と展示室（室 3）に設置されている。それぞれの空間における照明の発熱量の合計を表 3.5-2 に示す。照明は、開館時間に稼働するものとした。

表 3.5-2 照明発熱

照明の発熱量	
通路（室 2）	1815 [W]
展示室（室 3）	1395 [W]

④ 地盤モデル

地盤は、南北断面 A-A'における地盤構成をモデル化する（図 3.5-2）。盛土層、埋戻し土層、遺構土壌の 3 種類の土壌構成を再現した。北棟モデルにおける土壌構成を図 3.5-3 に示す。また遺構展示館内の地盤からの熱水分流は、奥行き方向の長さを考慮し、遺構の周長と等しくなるように補正した。東西面の水分蒸発を考慮するため、北側法面の周長に東西面の周長を加算した。

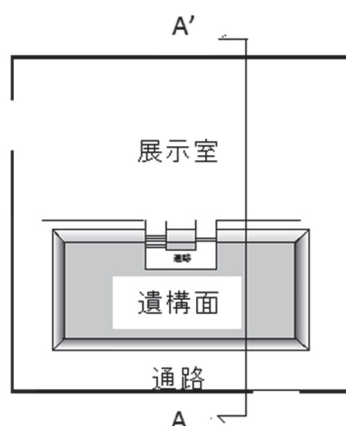


図 3.5-2 北棟平面図

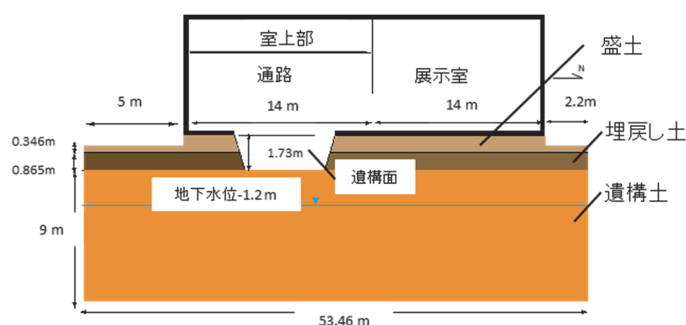


図 3.5-3 北棟の地盤モデル

2) 換気計算における諸条件

北棟の4室間の換気と外気との換気を考慮した(図 3.5-4)。開館時間(9:00～16:30)と閉館時間および、夏期(7月～8月)冬期(11月～3月)中間期(4～6月、9～10月)における換気回数を表 3.5-3 に示す。それぞれの換気回数は、展示室(室3)と外気の換気回数については展示室(室3)を基準とし、その他の換気回数は、通路(室1)を基準とした。また週一回の休館日は、閉館時間と同じ換気回数条件で解析をおこなうこととした。

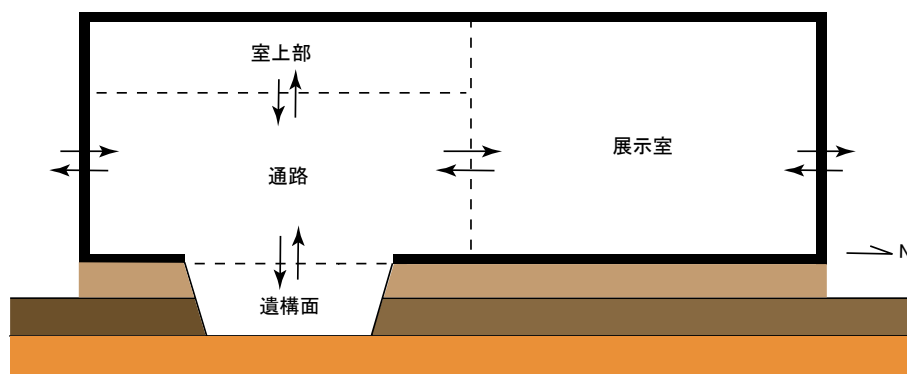


図 3.5-4 北棟解析モデル

表 3.5-3 北棟の換気回数条件

		開館時間（9:00~16:30）			閉館時間		
		夏期	中間期	冬期	夏期	中間期	冬期
室間	通路－室上部	3.0 回/h	2.0 回/h	4.0 回/h	1.0 回/h	1.0 回/h	2.0 回/h
	通路－遺構面	3.5 回/h	3.0 回/h	5.0 回/h	2.0 回/h	2.0 回/h	4.8 回/h
	通路－展示室	2.0 回/h	2.0 回/h	3.0 回/h	1.0 回/h	2.0 回/h	2.0 回/h
外気	通路－外気	1.8 回/h			0.5 回/h		
	展示室－外気	1.8 回/h			0.5 回/h		

3) 空調における諸条件

先述の通り、遺構展示館の北棟には空調が設置されている。設置箇所は、通路（室2）および展示室（室3）である。本解析での空調の影響は、空調吹き出し口からの空気流入と室空気流出という換気として考慮した。9時から16時30分の開館時間において、4月～8月に冷房運転、11月～3月に暖房運転がおこなわれるとした。また休館日は、空調運転はおこなわれていないものとした。

解析に使用する換気回数と吹き出し口温湿度を表3.5-4に示す。これらの温湿度は、空調の実測調査で計測された吹き出し口温湿度に基づいて決定した。また換気回数は、吹き出し口における風速測定結果と吹き出し口面積から算出した。

表 3.5-4 北棟の空調条件（開館時間 9：00～16：30 に空調運転）

		換気回数	吹き出し口温度	吹き出し口 相対湿度
空調 1 通路	暖房：冬 11～3 月	2.0 回/h	26℃	60%
	冷房：春 4～5 月	5.8 回/h	21℃	80%
	冷房：夏 6～8 月	5.8 回/h	21℃	65%
空調 2 展示室	暖房：冬 11～3 月	2.0 回/h	26℃	70%
	冷房：春 4～5 月	4.5 回/h	22℃	85%
	冷房：夏 6～8 月	4.5 回/h	24℃	80%

(2) 南棟

1) 解析対象のモデル化

南棟については図 3.5-5 に示したように、室上部（室 1）と通路（室 2）、および遺構面（室 3）の 3 室構成としてモデル化した。南側、西側、北側に開口部があり、開口部はガラス面として扱った。各開口部の面積は表 3.5-5 に示した通りである。建築壁体の構成は第 3 章第 4 節で示した通りである。なお、南棟には空調は設置されていない。

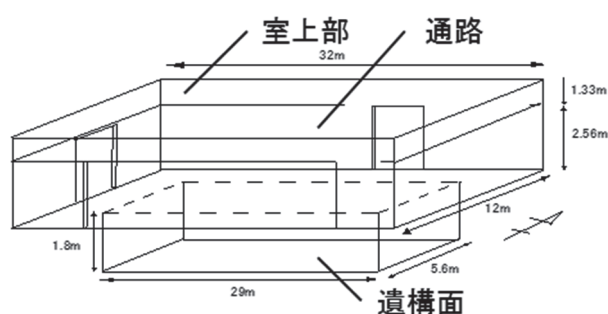


図 3.5-5 南棟解析モデル

表 3.5-5 開口部の面積

開口部	面積（幅×高さ）
北側	3.74m×2.25m
南側	24m×2.25m
西側	3.74m×2.3m

① 日射

北側の開口部は周辺の建物を考慮し、入射する日射量を各方位の日射量の 1/2 とした。また南側の開口部は、ブラインドによって日射の一部が遮蔽されるとした。また北側と南側壁体上部にルーバーが設置された開口部がある。開口率を 31%⁵⁻¹⁾ として天空光のみが入射するものとした。

② 地下水位

地下水位は遺構面から -28cm の深さに位置するとし、水位は一定とした。

③ 内部発熱

照明による内部発熱を考慮した。照明は室上部（室 1）に設置されている。室上部における照明の発熱量の合計を表 3.5-6 に示す。

表 3.5-6 照明発熱

照明	発熱量
室上部（室 1）	1280[W]

④ 地盤モデル

地盤は、南北断面 A-A'における地盤構成をモデル化する（図 3.5-6）。盛土層、埋戻し土層、遺構土壌の 3 種類の土壌構成を再現した。南棟モデルにおける土壌構成を図 3.5-7 に示す。地下水位は、遺構面から -28cm に位置するとし、水位は一定とした。

遺構展示館内の地盤からの熱水分流は、奥行き方向の長さを考慮し、遺構の周長と等しくなるように補正をおこなった。今回の補正では、南側法面の周長に西側と東側の法面の周長を加算した。

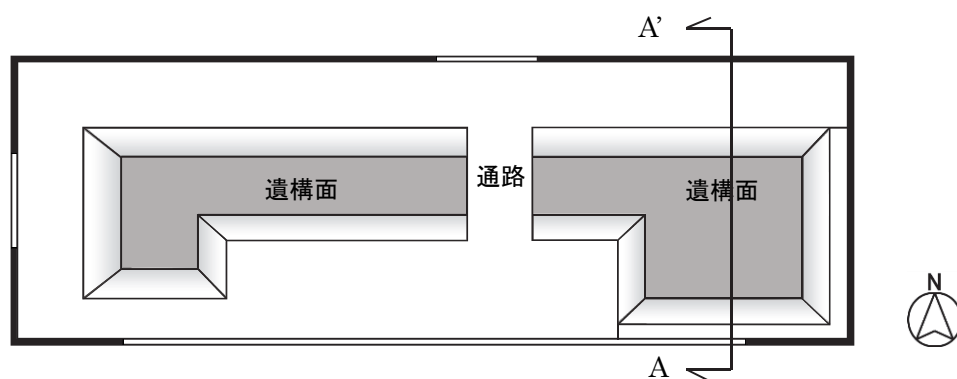


図 3.5-6 南棟平面図

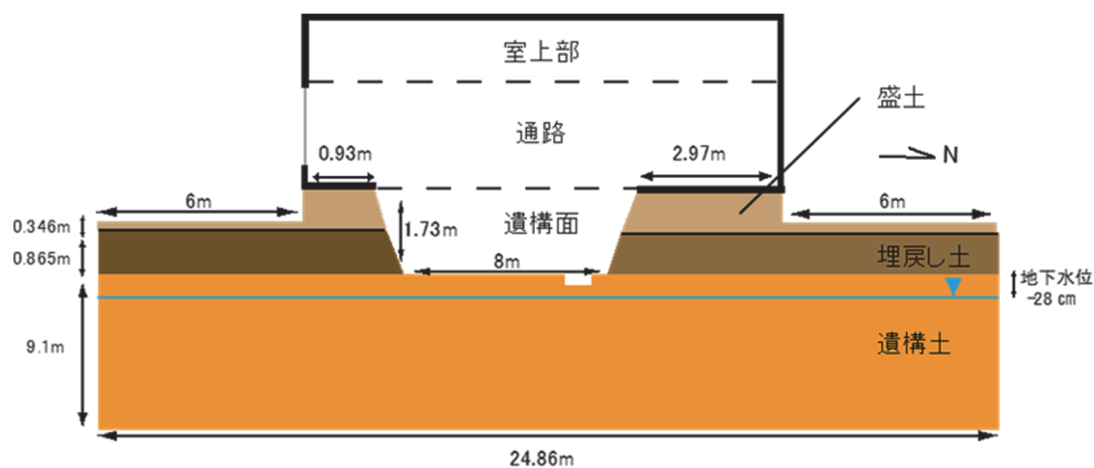


図 3.5-7 南棟の地盤モデル

2) 換気計算における諸条件

南棟の 3 室間の換気および外気との換気を考慮した（図 3.5-8）。開館時間（9:00～16:30）と閉館時間、夏期（7 月～8 月）冬期（11 月～3 月）中間期（4～6 月、9～10

月)における換気回数を表 3.5-7 から表 3.5-9 に示す。換気回数は、外気と室上部(室 1)においては室上部を基準とし、その他の換気回数は通路(室 2)を基準とした。

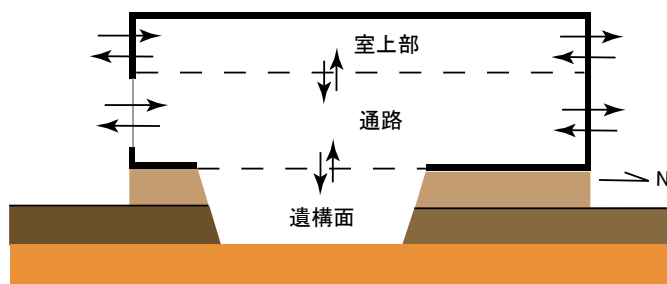


図 3.5-8 南棟解析モデル

表 3.5-7 通路－外気の換気回数条件

		開館時間 (9:00~16:30)	閉館時間
外気	通路－外気	2.5 回/h	1.5 回/h

表 3.5-8 室上部－外気の換気回数条件

		1～4 月	5～7 月	8 月	9～10 月	11 月	12 月
外気	室上部－外気	35 回/h	18 回/h	8 回/h	18 回/h	8 回/h	18 回/h

表 3.5-9 南棟室内の換気回数条件

		日中			夜間		
		夏季	中間期	冬季	夏季	中間期	冬季
室間	室上部－通路	16 回/h	20 回/h	30 回/h	9 回/h	20 回/h	34 回/h
	通路－遺構面	1.5 回/h	1.5 回/h	8 回/h	10 回/h	22 回/h	34 回/h

通路(室 2)の外気との換気回数は、開館時間と閉館時間の違いによる換気量の違いを考慮した(表 3.5-7)。

室上部は、ルーバー状の開口部があり、常に通気がある。そのため、季節的な外部風速の違いから室上部との換気回数を検討した。奈良地方気象台⁵⁻²⁾で 2013 年に観測された風速の月平均を図 3.5-9 に示す。1 月～4 月に風速が大きく、8 月と 11 月の風速が小さいことから、表 3.5-8 のように室上部と外気の換気回数を与えた。

上下方向の換気については、上下の温度差による重力換気を考慮し、換気回数を与えた(表 3.5-9)。すなわち、通路、室上部の気温が遺構面より高い日中は、遺構面と通路の換気回数を少なく、夜間放射により、遺構面より通路の気温が低くなると考えられる夜間は、換気回数を多く与えた。

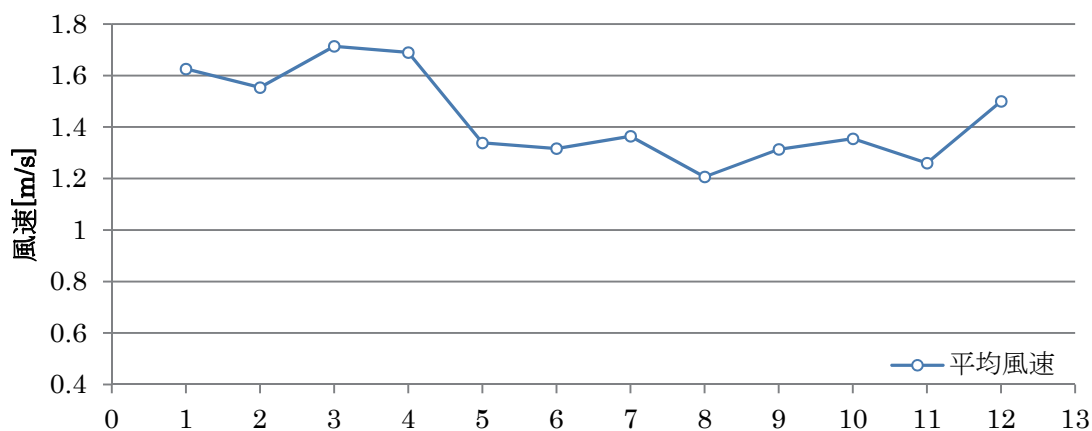


図 3.5-9 月平均風速 (2013 年)

(3) 計算方法

計算方法は、前進型有限差分法を用いる。地盤の空間刻みは水平方向で 0.12m から 1m、鉛直方向で 0.01m から 1m とした。時間刻みは 10 秒である。2013 年の気象条件が 10 年間繰り返されるという条件下で解析をおこない、周期定常の結果を得た。

また地盤において、含水率がそれぞれの土壌の飽和含水率を超えた場合は、飽和状態とし、飽和含水率の値を与えた。

(4) 境界条件

境界条件は、地表面、室内側表面は第 3 種境界条件、地盤底面は第 1 種境界条件（温度 15.37℃、水分化学ポテンシャル -5J/kg ）とした。ここで 15.37℃とは外気の年間平均気温である。また、遠方の地盤鉛直面は断熱、断湿の第 2 種境界条件とした。

(5) 初期条件

地盤の各質点の温度は外気年間平均外気温（15.37℃）、水分化学ポテンシャルは -50J/kg を与えた。また覆屋を構成する建材、室内温湿度は、2013 年 1 月 1 日 0 時 0 分の温湿度の実測値を初期値とした。

3 解析結果

(1) 北棟

1) 室内温湿度の実測値と解析値の比較

① 年間の推移

通路（室 2）における解析値と実測値の気温、絶対湿度の日平均を図 3.5-10 に、相対

湿度の日平均を図 3.5-11 に示す。気温は、年間変動としては、よく再現できていると考えられる。絶対湿度は、8 月に解析値が実測値より高くなる傾向を示した。それに伴い、この時期に相対湿度も解析値は高くなる傾向を示した。その期間を除くと、絶対湿度、相対湿度ともに再現できていると考えられる。

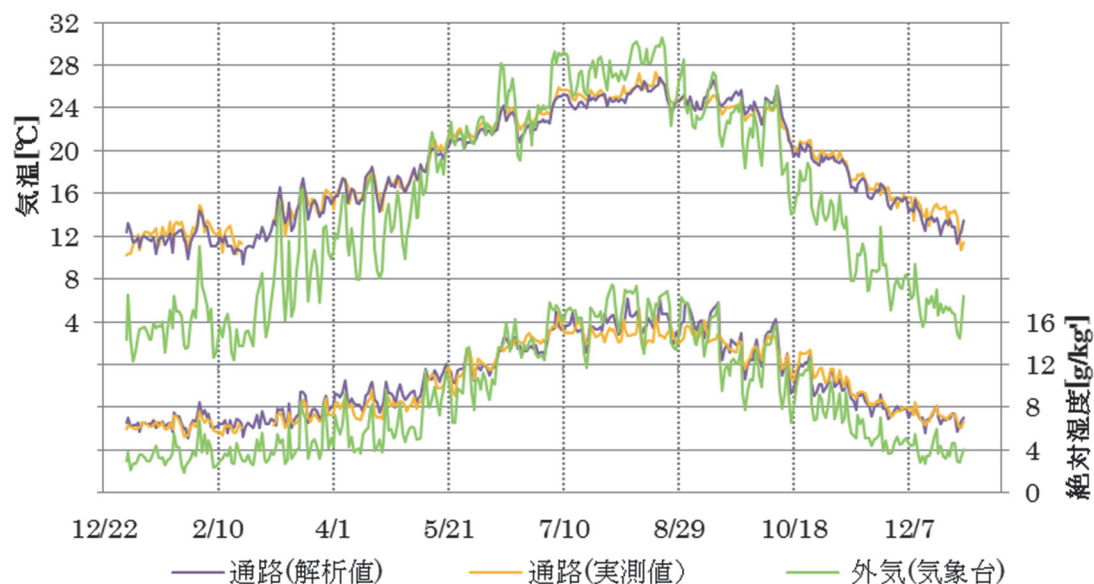


図 3.5-10 気温と絶対湿度（通路）：年間

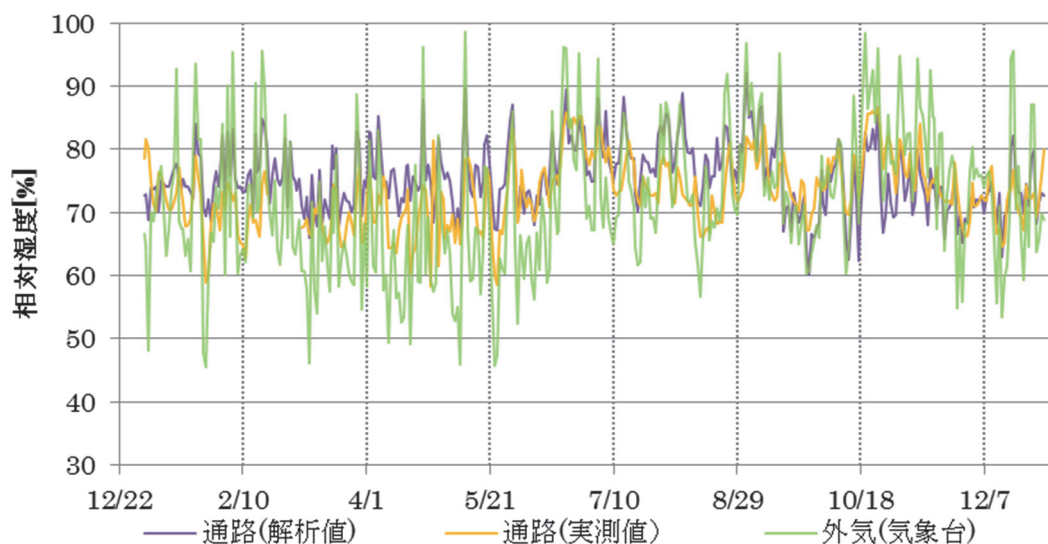


図 3.5-11 相対湿度（通路）：年間

遺構面（室 4）における解析値と実測値の気温、絶対湿度の日平均を図 3.5-12 に、相対湿度の日平均を図 3.5-13 に示す。気温は、年間変動としては、よく再現できていると考えられる。絶対湿度は、5 月と 10 月に解析値が実測値より低くなる傾向を示し、それに伴い、この時期は相対湿度も解析値が低下する傾向を示した。その期間を除くと、

絶対湿度、相対湿度ともに再現できていると考えられる。

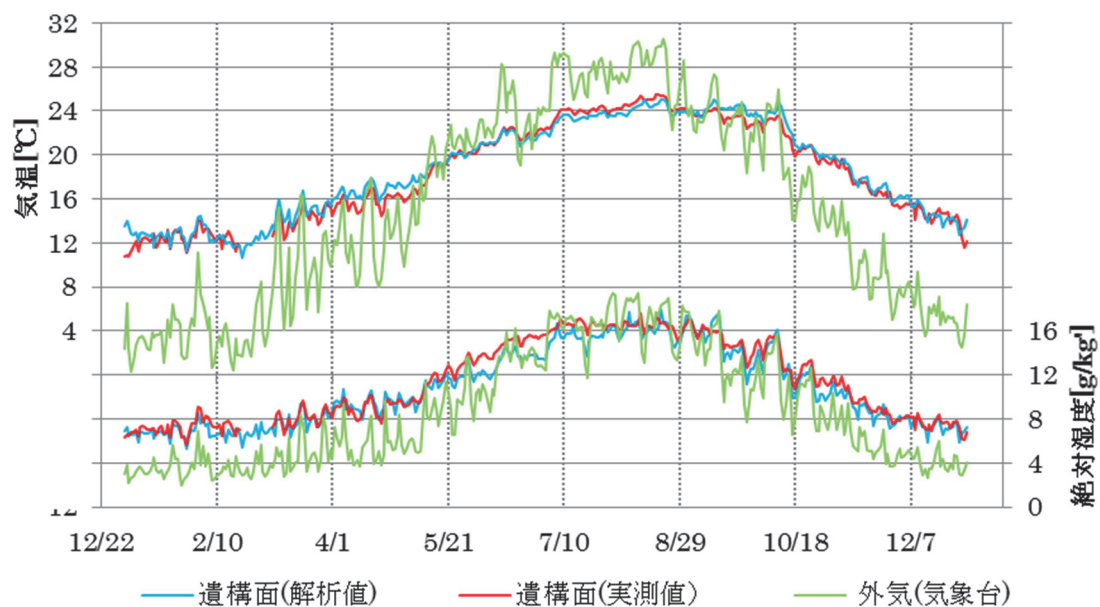


図 3.5-12 気温と絶対湿度（遺構面）：年間

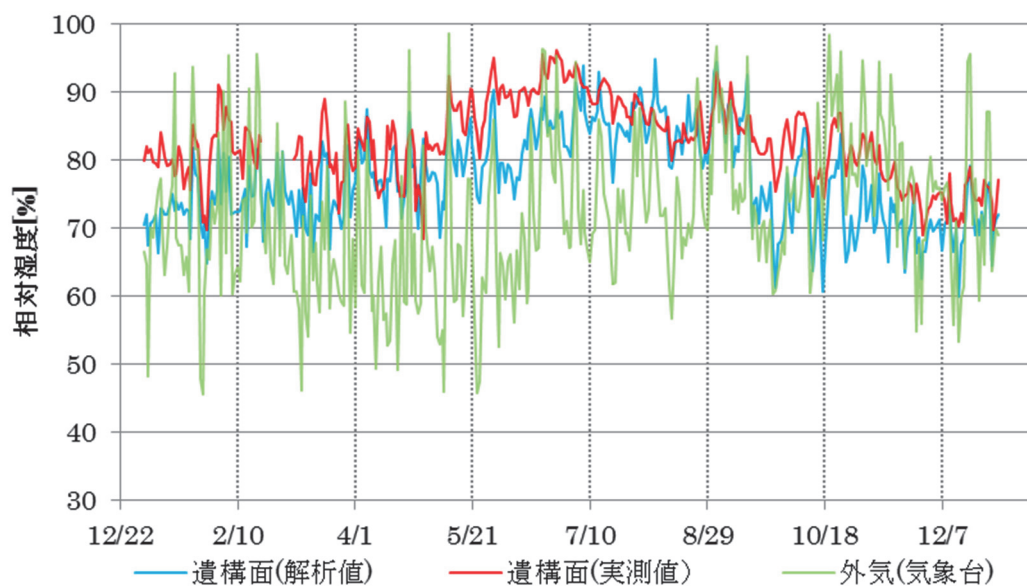


図 3.5-13 相対湿度（遺構面）：年間

② 冬期

1月の通路（室2）における気温と絶対湿度の実測値と解析値を図 3.5-14 に、相対湿度を図 3.5-15 に示す。通路の気温の解析値は、夜間の温度低下が実測値より早いものの、概ね再現できていると考えられる。また、絶対湿度はよく一致を示した。相対湿度は、夜間の実測値と解析値の温度差のために、解析値が高い傾向を示したと考えられる。

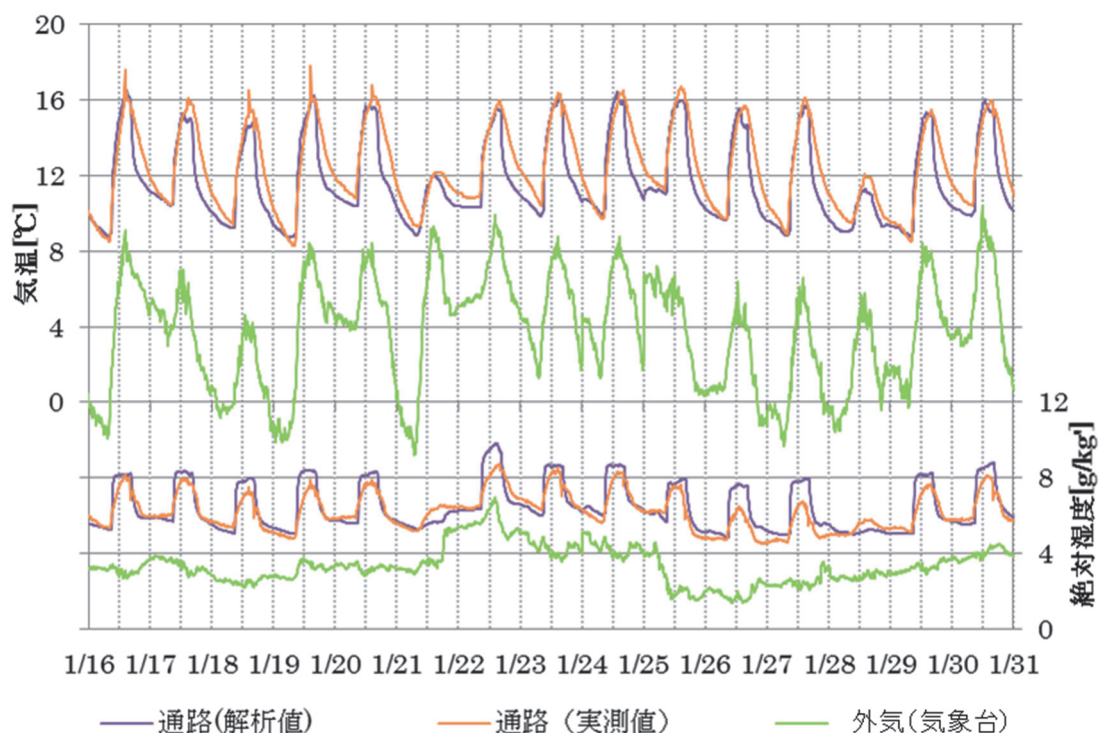


図 3.5-14 気温と絶対湿度（北棟通路）：1 月

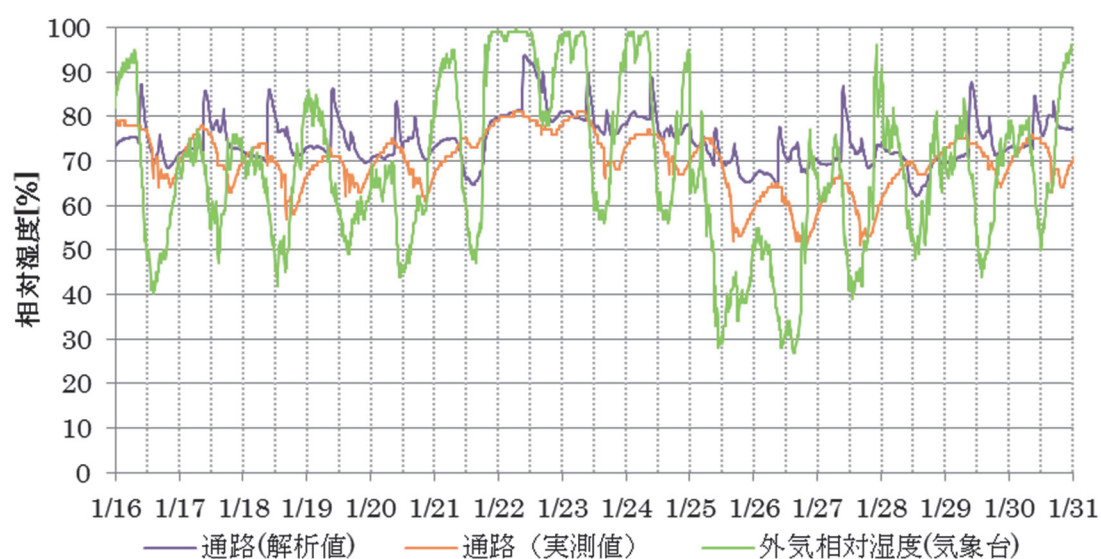


図 3.5-15 相対湿度（北棟通路）：1 月

1月の遺構面（室4）における気温と絶対湿度の実測値と解析値を図 3.5-16 に、相対湿度を図 3.5-17 に示す。遺構面の気温は、解析値の方がわずかに高い極大値を示したが、概ね再現できていると考えられる。また絶対湿度の変動も再現できていると考えられる。一方で、絶対湿度の最大値においては、実測値の方が解析値よりも高い値を示したため、相対湿度の最大値において、解析値は実測値より低い値を示したと考えられる。

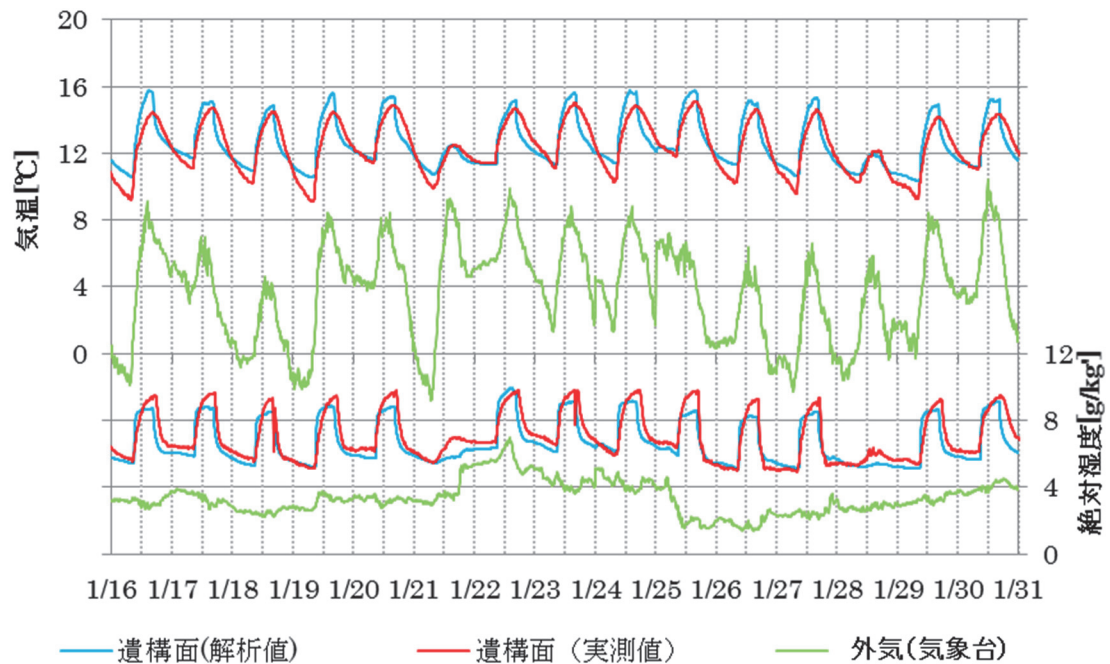


図 3.5-16 気温と絶対湿度（北棟遺構面）：1 月

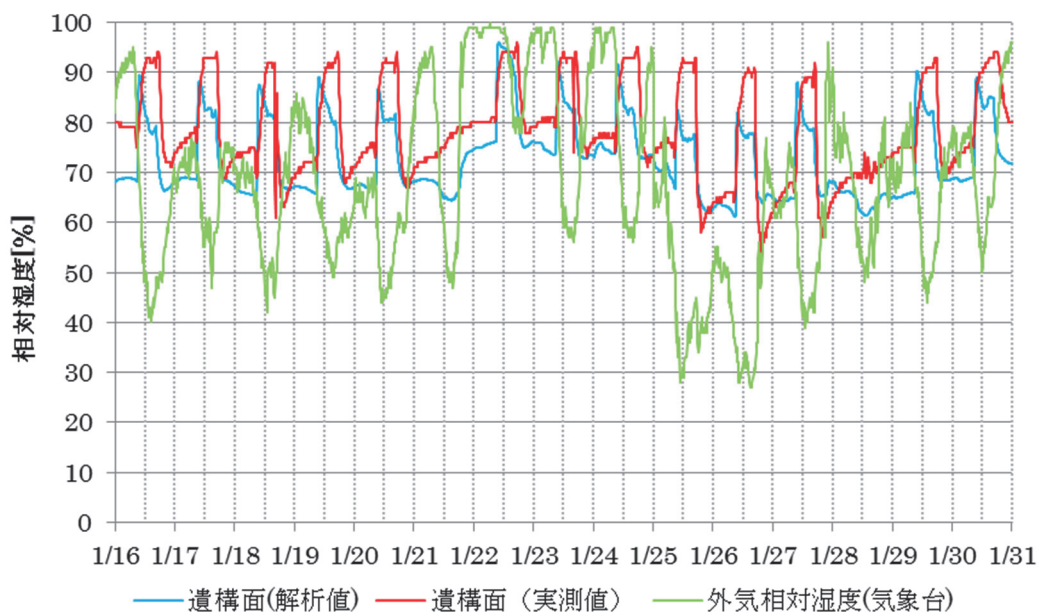


図 3.5-17 相対湿度（北棟遺構面）：1 月

③ 夏期

8月の通路（室2）における気温と絶対湿度の実測値と解析値を図 3.5-18 に、相対湿度を図 3.5-19 に示す。通路の気温は、夜間の温度低下が実測値より早い、概ね再現できていると考えられる。絶対湿度は、日中の空調稼働時は再現できているが、夜間に実測値より大幅に上昇し、再現できていない。絶対湿度の解析値が高いために、相対湿度も高い傾向を示し、あまり一致していない結果を示した。

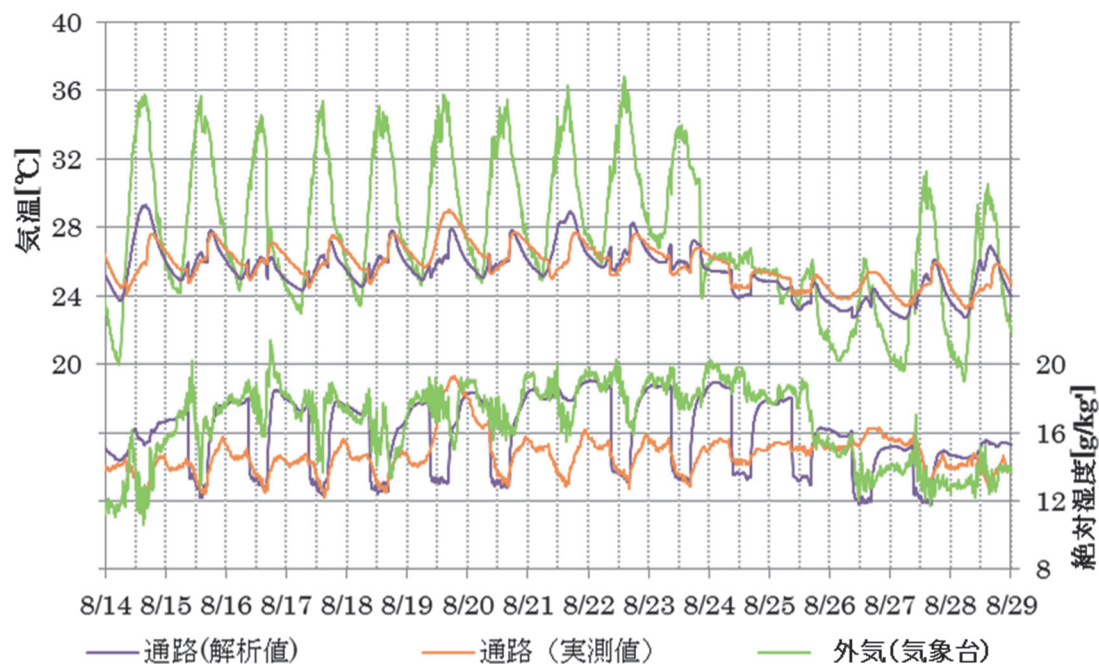


図 3.5-18 気温と絶対湿度（北棟通路）：8 月

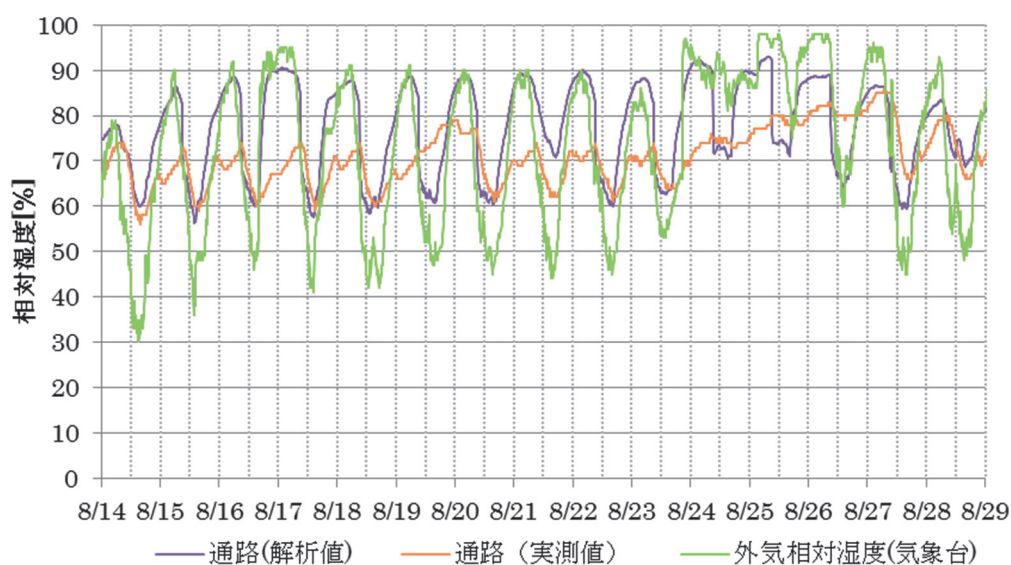


図 3.5-19 相対湿度（北棟通路）：8 月

8月の遺構面（室4）における気温と絶対湿度の実測値と解析値を図 3.5-20 に、相対湿度を図 3.5-21 に示す。遺構面の気温は概ね再現できていると考えられる。絶対湿度の変動は概ね再現できているが、解析値は夜間に実測値より若干高い値を示し、再現できていない。そのため、相対湿度も解析値は高い値を示す傾向となった。

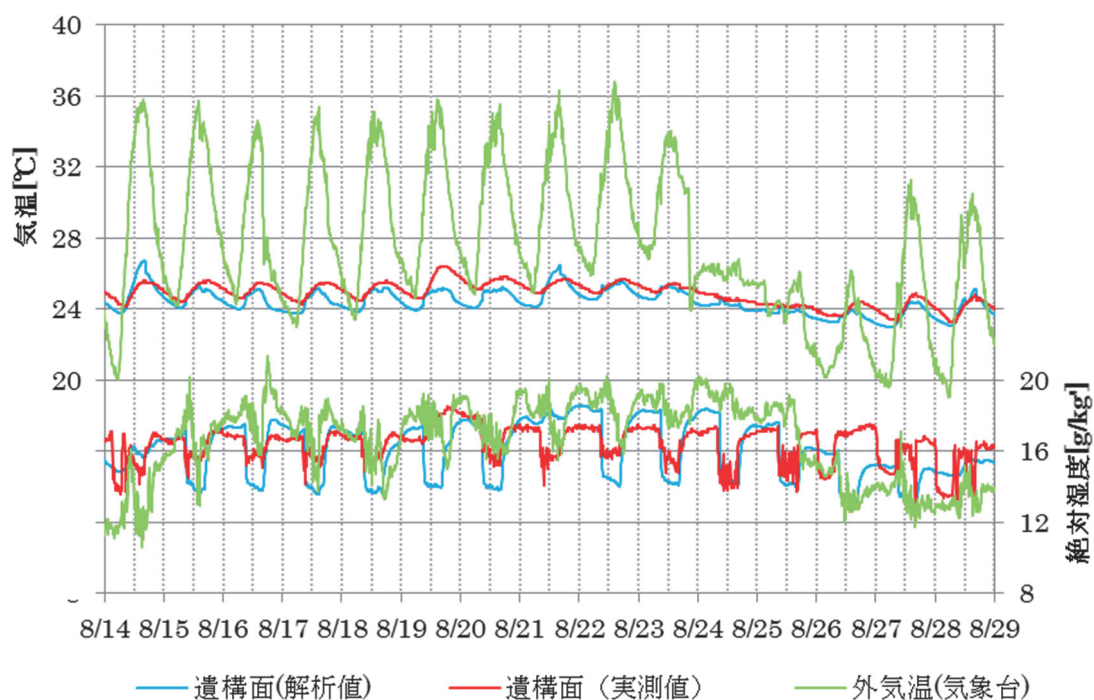


図 3.5-20 気温と絶対湿度（北棟遺構面）：8 月

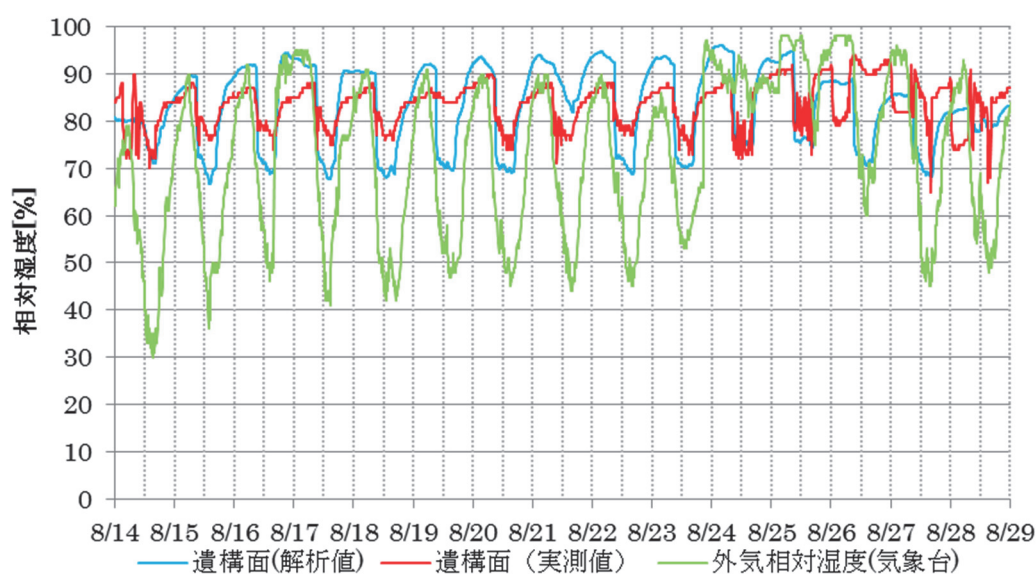


図 3.5-21 相対湿度（北棟遺構面）：8 月

④ 中間期

5月の通路（室2）における気温と絶対湿度の実測値と解析値を図 3.5-22 に、相対湿度を図 3.5-23 に示す。通路の気温については、解析値の夜間の気温が実測値よりも若干低い値を示したが、変動はよく再現できていると考えられる。絶対湿度に関しては、12日から15日を除くと概ね再現できていると考えられる。気温の解析値が低いため、相対湿度の解析値が夜間に高い値を示す傾向にあった。

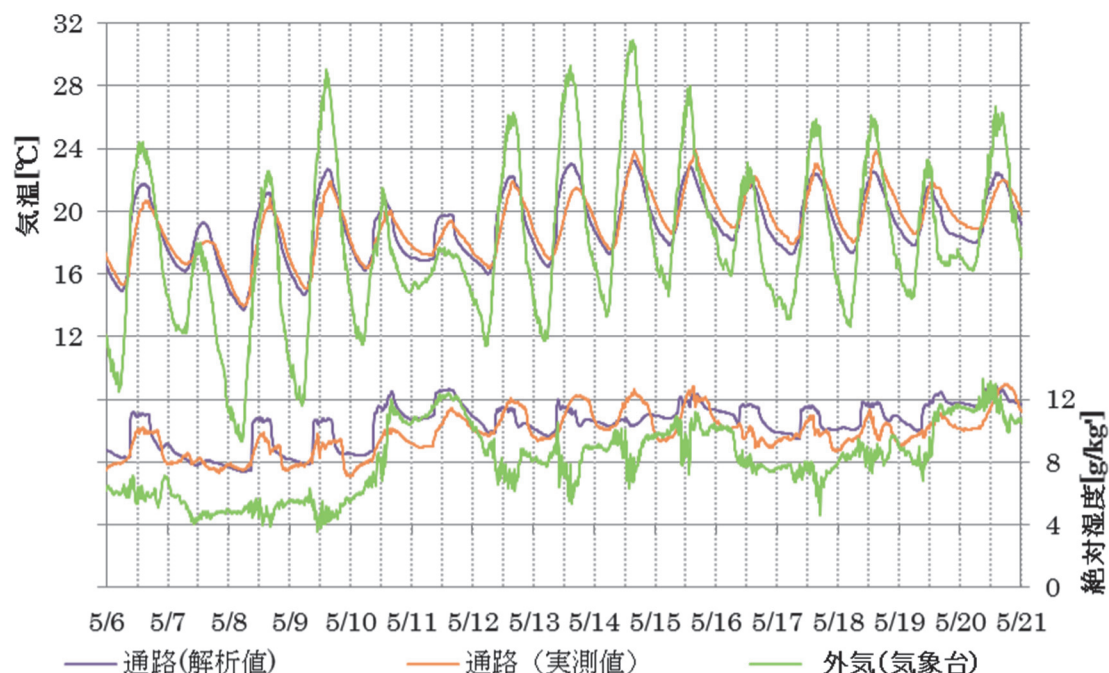


図 3.5-22 気温と絶対湿度（北棟通路）：5 月

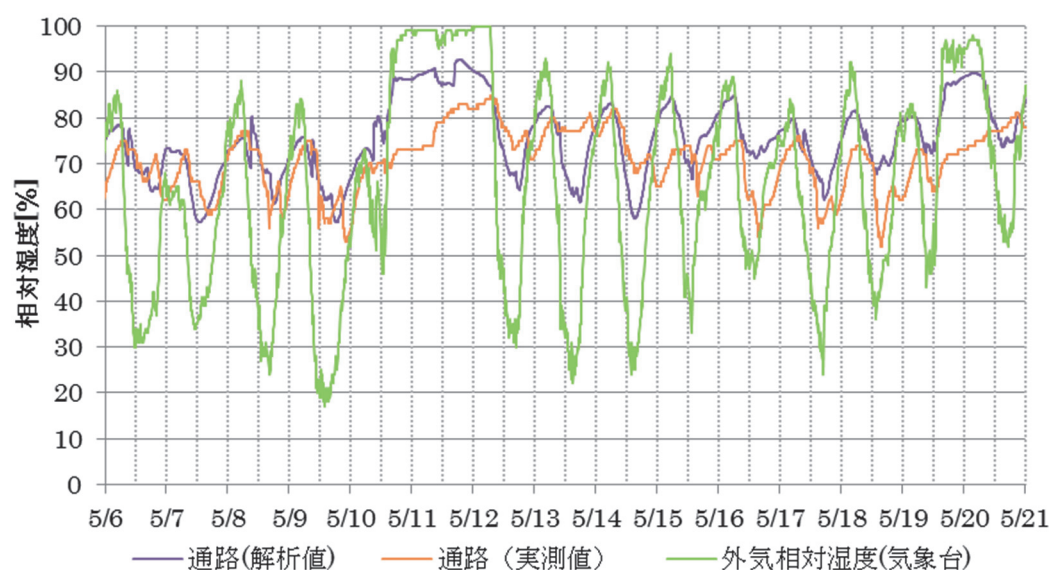


図 3.5-23 相対湿度（北棟通路）：5 月

5月の遺構面（室4）における気温と絶対湿度の実測値と解析値を図 3.5-24 に、相対湿度を図 3.5-25 に示す。遺構面の気温はよく再現できていると考えられる。また絶対湿度は、解析値が実測値よりも速やかに低下する傾向を示した。そのため、相対湿度については、解析値は実測値より低い値を示したと考えられる。

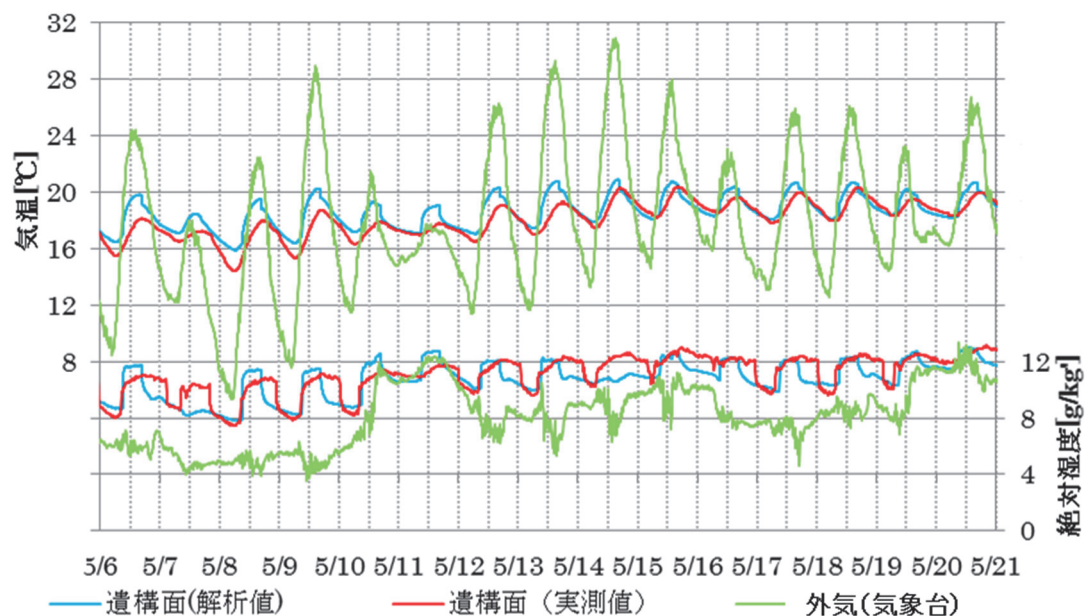


図 3.5-24 気温と絶対湿度（北棟遺構面）：5 月

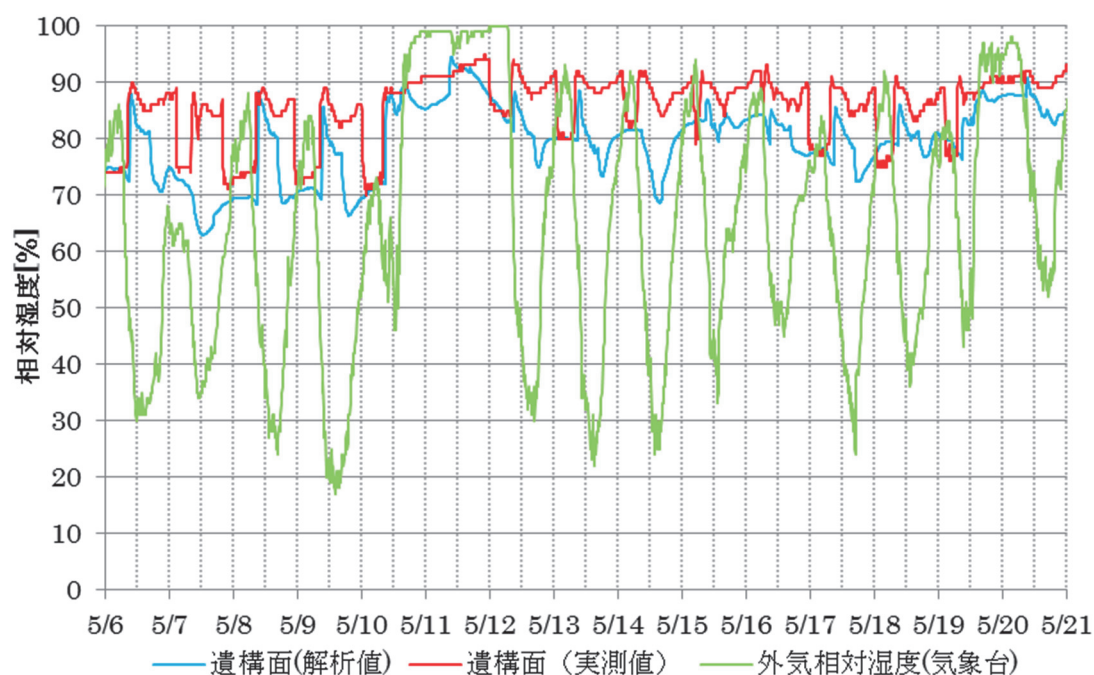


図 3.5-25 相対湿度（北棟遺構面）：5 月

2) 遺構地盤の水分性状

ここでは、第3章第5節3(1)1)において、解析値が実測値を大略再現できていると考えられたことから、解析値から遺構地盤の水分性状について検討する。

図 3.5-26 に示す北棟南側法面の各土層境界直近の点において、解析から得られた土壌含水率の推移を図 3.5-27 に示す。それぞれ北棟の南側法面における盛土層上部と盛土層下部（図中、盛土（北）含水率1、含水率2とそれぞれ表記）、および埋戻し土層上部と埋戻し土層下部（図中、埋戻し土（北）含水率3、含水率4とそれぞれ表記）の推移を表す。降水量は、本解析で入力値として与えたものである。

ここで示す土壌含水率は空気と接する最表層の計算値であること、および5.2.1で述べたように、ここで示した解析結果は地下水位位置を遺構面から-1.2 m で一定として計算した場合の結果である。一方で、第3章第3節で示した法面の土壌含水率の実測値は、土壌に挿入するセンサー長（10 cm）の範囲における土壌含水率の平均値である

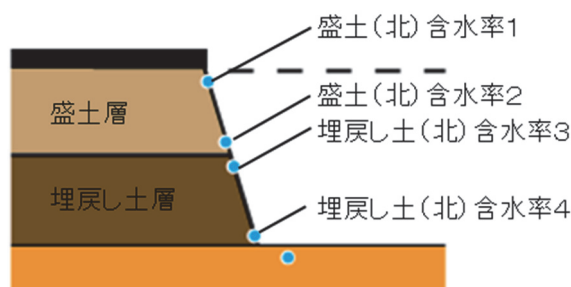


図 3.5-26 北棟南側法面の土壌含水率出力点

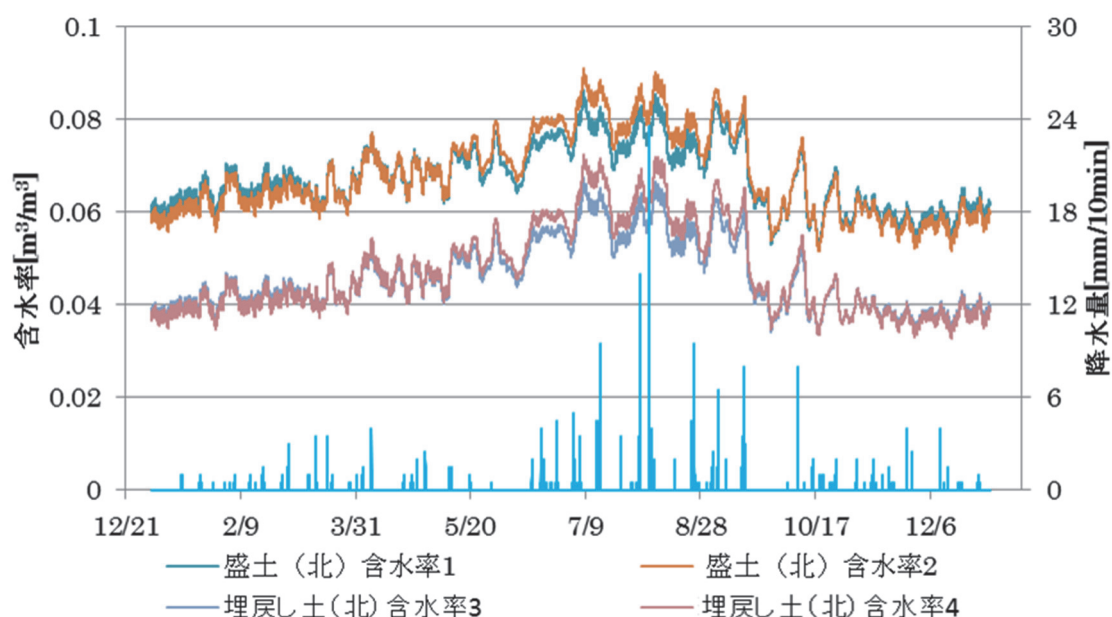


図 3.5-27 遺構法面表面の含水率

こと、および実際の地下水位位置は第3章第3節3（1）で示した観測孔 No.2 と観測孔 No.3 の間に位置すると考えられ、計算条件で与えた地下水位よりも高い位置で変動していると考えられる。したがって、第3章第3節で示した実測値は図 3.5-27 に示した結果と比較して高い含水率を示したと考えられ、ここでは両者の絶対値について比較はしないこととする。

図 3.5-27 に示した結果から、いずれの箇所においても法面表面土壌の含水率は、絶対値こそ低いものの、降雨後に含水率が増加する様子が認められた。したがって、遺構展示館屋外の地表面に供給された雨水が、屋内の法面土壌の含水状態に影響をおよぼしていることが示唆された。

次に遺構展示館北棟周辺の地盤内部の含水率について年間の変動を検討する。図 3.5-28 から図 3.5-31 に、それぞれ1月、4月、7月および10月における地盤の含水率分布を0~0.49の範囲で示す。なお、図中左側が南、右側が北である。図 3.5-28 から図 3.5-31 に示した結果から、北棟周辺地盤の含水率分布は年間を通して大きな変化は生じないことが示唆された。法面表面の含水率は図 3.5-27 に示したように低いものの、奥行き方向（水平方向）内部では含水率が高くなっており、特に屋外に近い南側法面では法面内部の含水状態が北側法面と比較して高いことが示唆された。この結果からも、屋外の地表面に供給される雨水が、屋内の法面内部の含水状態に大きく影響をおよぼしていることが示唆された。第3章第2節3（1）で述べたように、法面表面では土壌の乾燥が進行して、土壌粒子の崩落が生じている様子が認められる一方で、その内部では比較的含水状態が高い状態が常に形成されており、これらの水分が法面表面へとポテンシャル勾配によって移動することで、法面表面への塩の移動、および表面での塩析出を引き起こしていると考えられる。これらの結果から、遺構展示館屋内の法面における水分蒸発量、すなわち塩の析出量を減ずるためには、屋外において地表面から地盤内部へと浸透する雨水を遮断することが効果的であると考えられる。

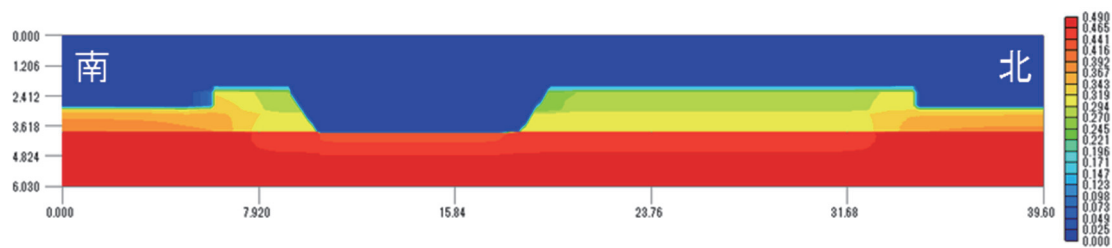


图 3.5-28 北棟周辺地盤含水率（1 月）

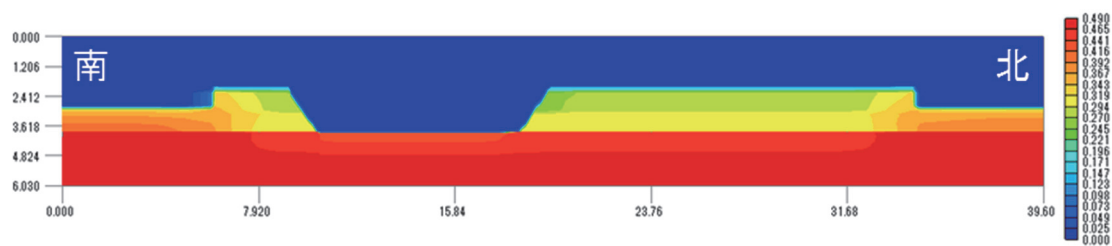


图 3.5-29 北棟周辺地盤含水率（4 月）

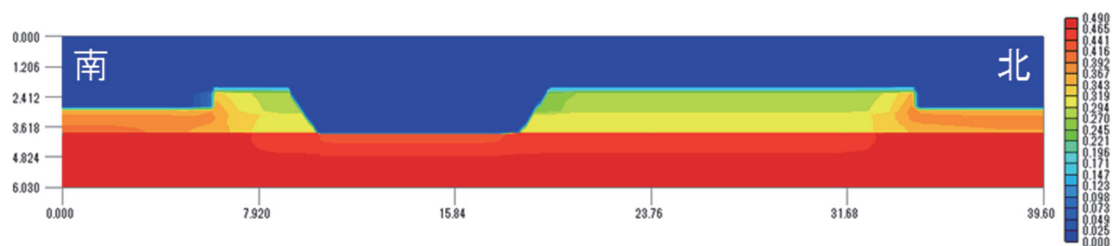


图 3.5-30 北棟周辺地盤含水率（7 月）

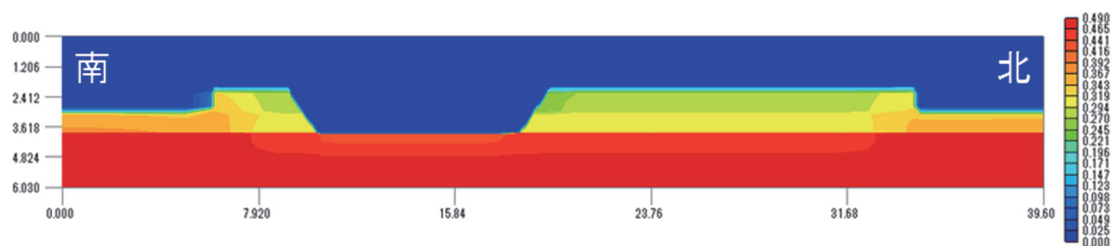


图 3.5-31 北棟周辺地盤含水率（10 月）

(2) 南棟

1) 室内温湿度の実測値と解析値の比較

① 年間の推移

通路（室2）における気温、絶対湿度の解析値と実測値の日平均を図 3.5-32 に、相対湿度の日平均を図 3.5-33 に示す。気温については、年間を通して解析値が実測値よりやや高い値を示し、再現できていない。これは、測定点の位置が地盤面に近く、日射の影響を受けなかったためであると考えられる。また絶対湿度は、年間変動としては、概ね再現できている。解析値の気温が高い値を示したため、相対湿度は低い値を示した。

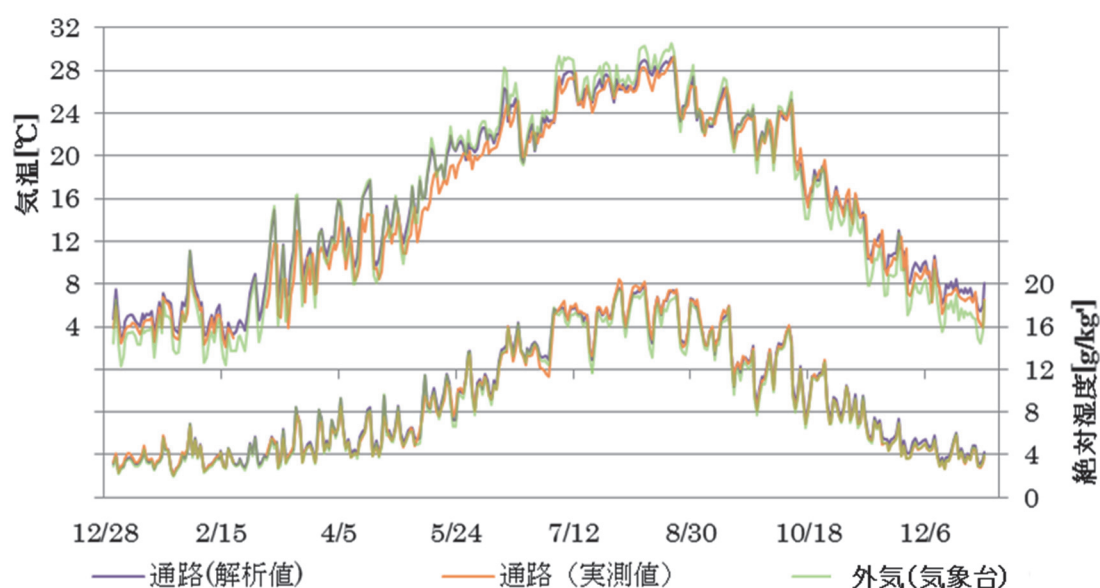


図 3.5-32 気温と絶対湿度（通路）：年間

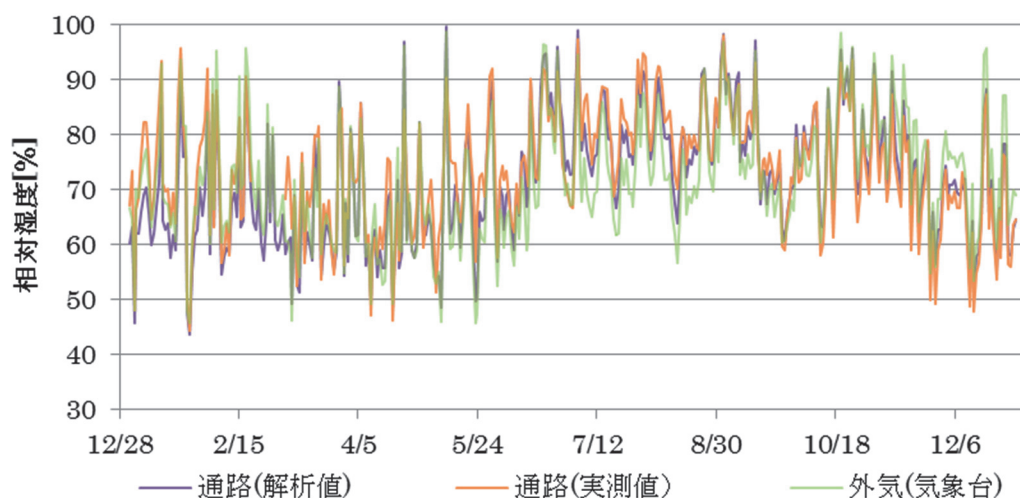


図 3.5-33 相対湿度（通路）：年間

遺構面（室3）における気温、絶対湿度の解析値と実測値の日平均を図 3.5-34 に、相対湿度の日平均を図 3.5-35 に示す。気温は、3月から5月にかけて解析値は実測値より高い傾向を示した。その期間を除くと、年間変動としてはよく再現できていると考えられる。絶対湿度も、年間変動は概ね再現できていると考えられる。3月から5月にかけて、解析値と実測値に差が生じたため、相対湿度の解析値は低い値を示した。その期間を除くと、相対湿度についても概ね解析値は実測値を再現できていると考えられる。

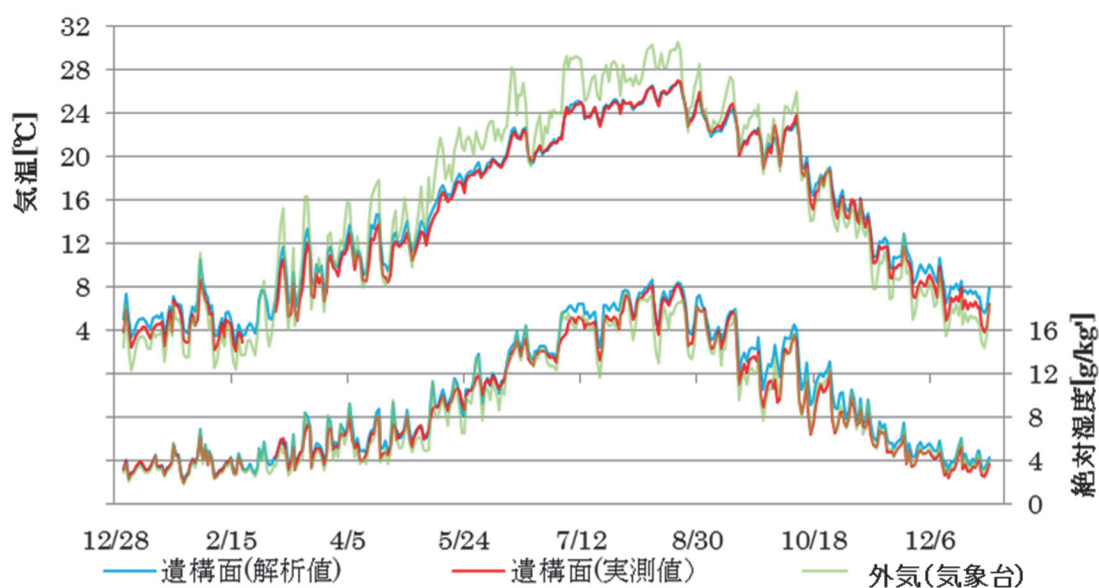


図 3.5-34 気温と絶対湿度（遺構面）：年間

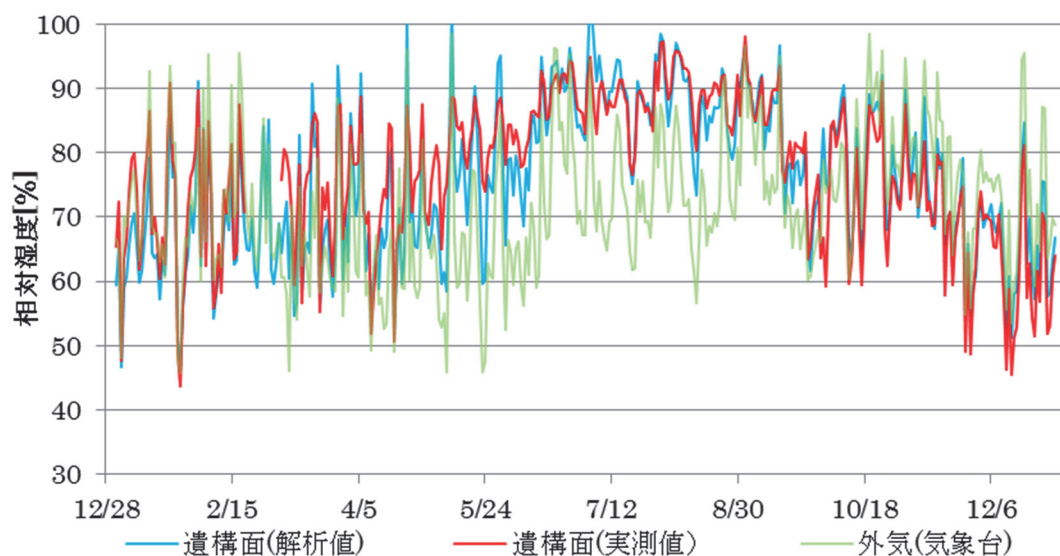


図 3.5-35 相対湿度（遺構面）：年間

② 冬期

1月の通路（室2）における気温と絶対湿度の実測値と解析値を図 3.5-36 に、相対湿度を図 3.5-37 に示す。通路の気温の解析値は、日中に実測値より高くなる傾向を示した。一方、絶対湿度はよく再現できていると考えられる。温度の解析値が日中に高い傾向を示したため、相対湿度の解析値は日中に低い値を示す傾向にあった。

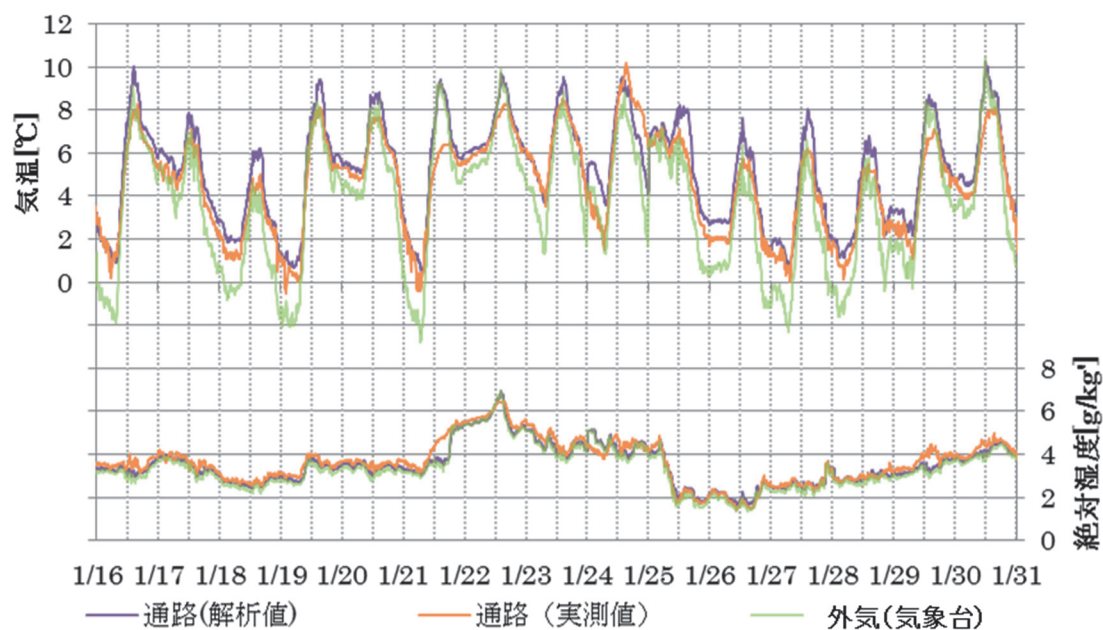


図 3.5-36 気温と絶対湿度（南棟通路）：1 月

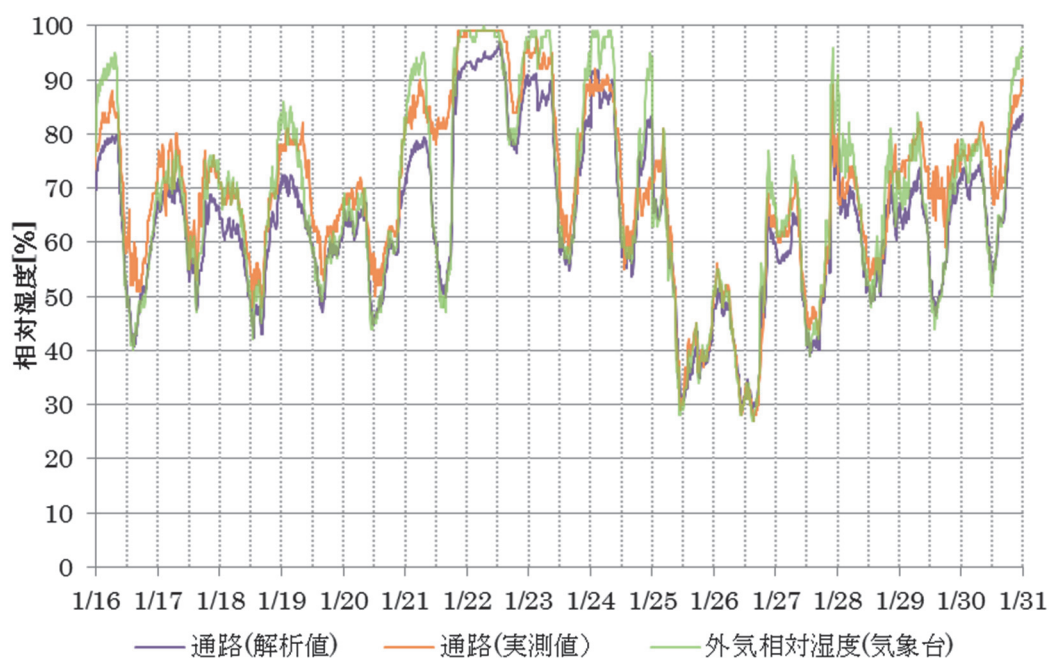


図 3.5-37 相対湿度（南棟通路）：1 月

1月の遺構面（室3）における気温と絶対湿度の実測値と解析値を図 3.5-38 に、相対湿度を図 3.5-39 に示す。遺構面の気温は、全体的に解析値の方が高い値を示したが、変動は再現できていると考えられる。また、絶対湿度も変動はよく再現できていると考えられる。一方で、絶対湿度の最大値においては、実測値の方が解析値より高い値を示したため、相対湿度の極大値は解析値の方が実測値よりやや低くなる傾向を示した。

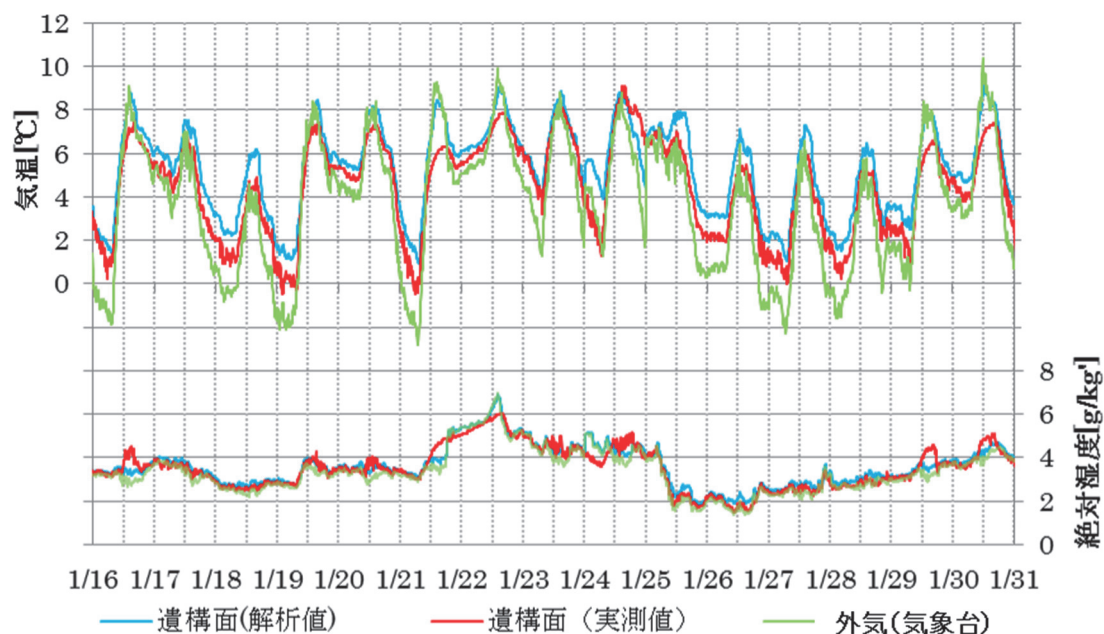


図 3.5-38 気温と絶対湿度（南棟遺構面）：1 月



図 3.5-39 相対湿度（南棟遺構面）：1 月

③ 夏期

8月の通路（室2）における気温と絶対湿度の実測値と解析値を図 3.5-40 に、相対湿度を図 3.5-41 に示す。通路の気温については、解析値の方が実測値よりも日中に高い値を示した。一方、絶対湿度は、概ね再現できている。気温の解析値が高い値を示したために、相対湿度の解析値は実測値よりも低い傾向を示した。

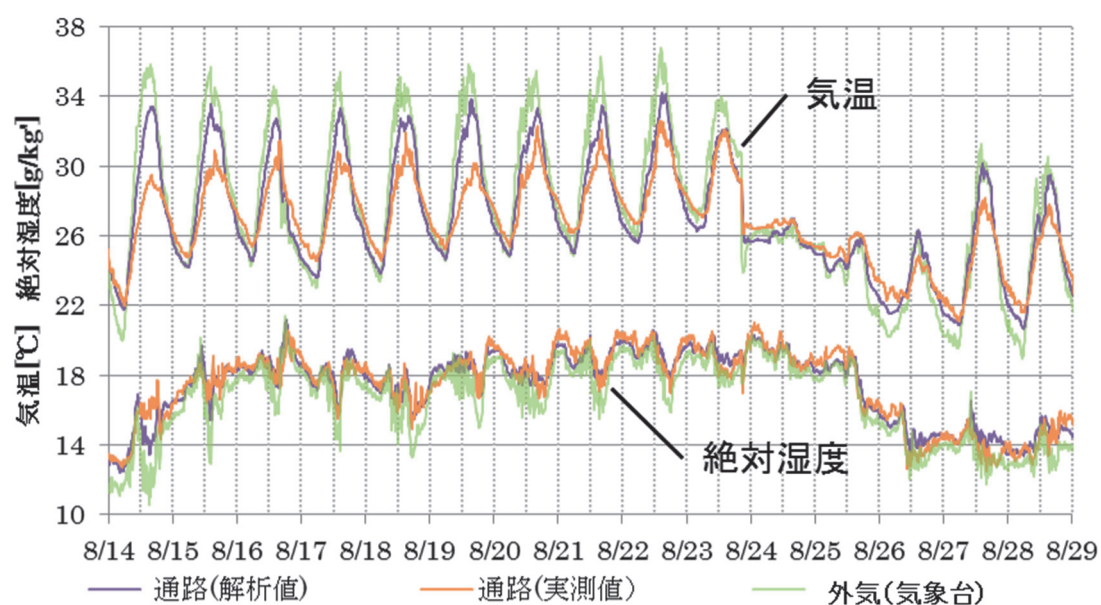


図 3.5-40 気温と絶対湿度（南棟通路）：8月

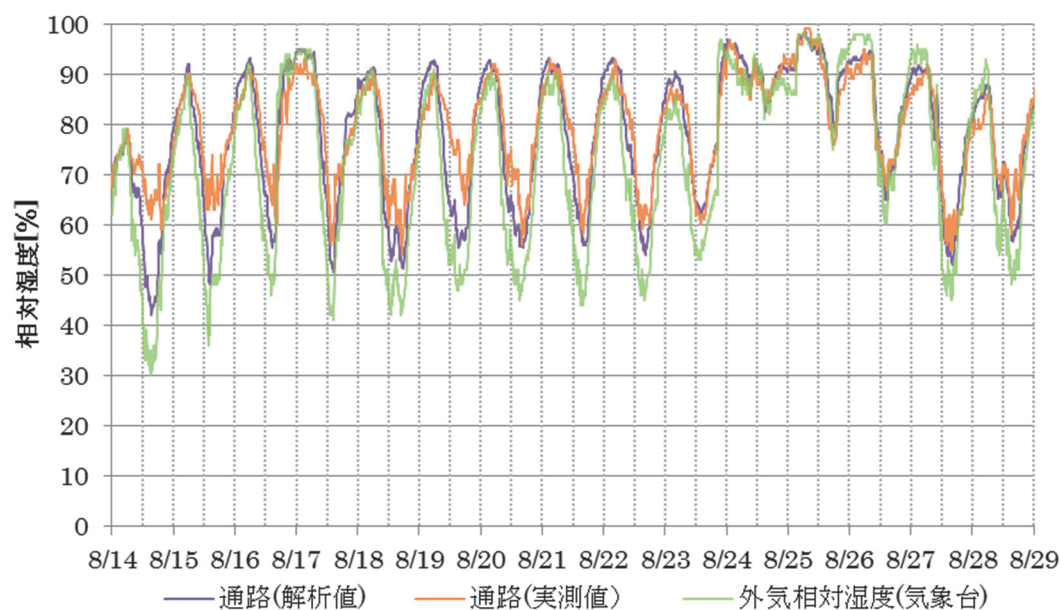


図 3.5-41 相対湿度（南棟通路）：8月

8月の遺構面（室3）における気温と絶対湿度の実測値と解析値を図 3.5-42 に、相対湿度を図 3.5-43 に示す。遺構面の気温は、概ね再現できていると考えられる。絶対湿度も概ね再現できているが、実測値と比較して解析値の方がやや高い値をとる時間帯が生じた。相対湿度の変動はよく再現できているが、解析値と実測値の絶対湿度における差異のために、相対湿度の極小値は解析値の方が高い値を示したと考えられる。

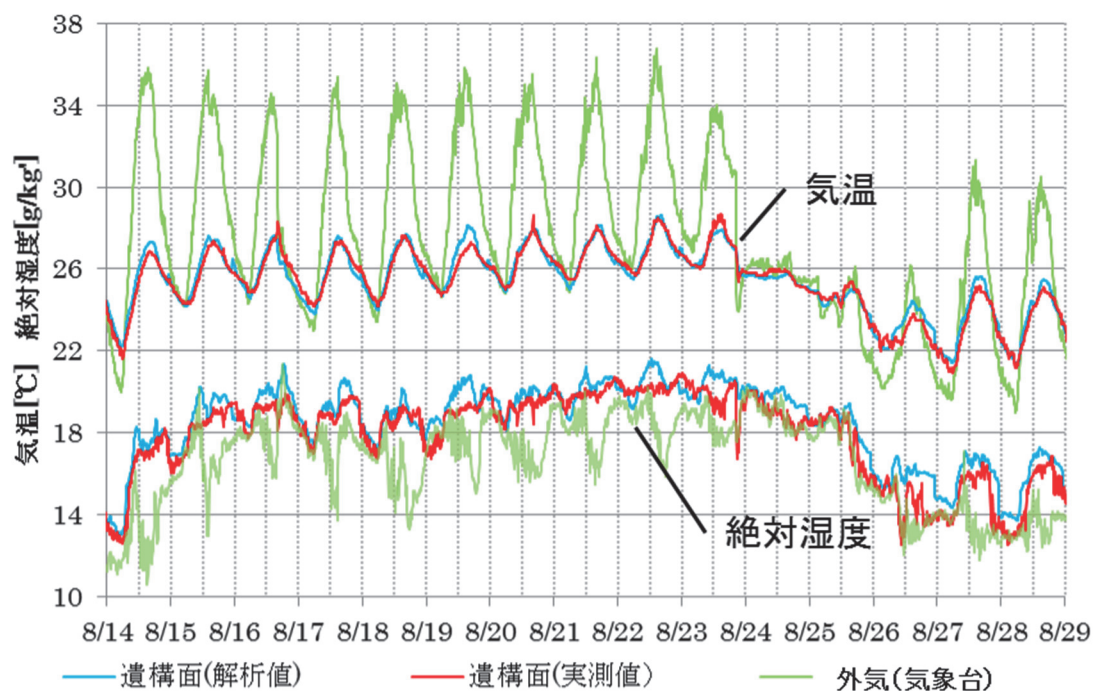


図 3.5-42 気温と絶対湿度（南棟遺構面）：8月

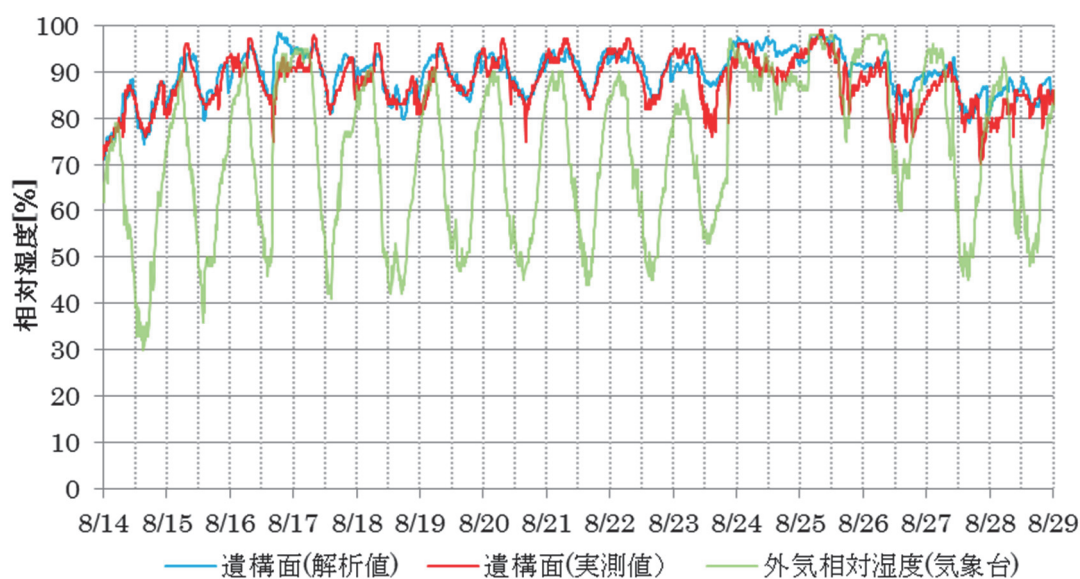


図 3.5-43 相対湿度（南棟遺構面）：8月

④ 中間期

11月の通路（室2）における気温と絶対湿度の実測値と解析値を図3.5-44に、相対湿度を図3.5-45に示す。気温については、日中において実測値よりも解析値がやや高い値を示したが、変動は概ね再現できていると考えられる。また、絶対湿度に関しては、よく再現できていると考えられる。気温と絶対湿度が概ね一致したことから、相対湿度の解析値も実測値をよく再現できていると考えられる。

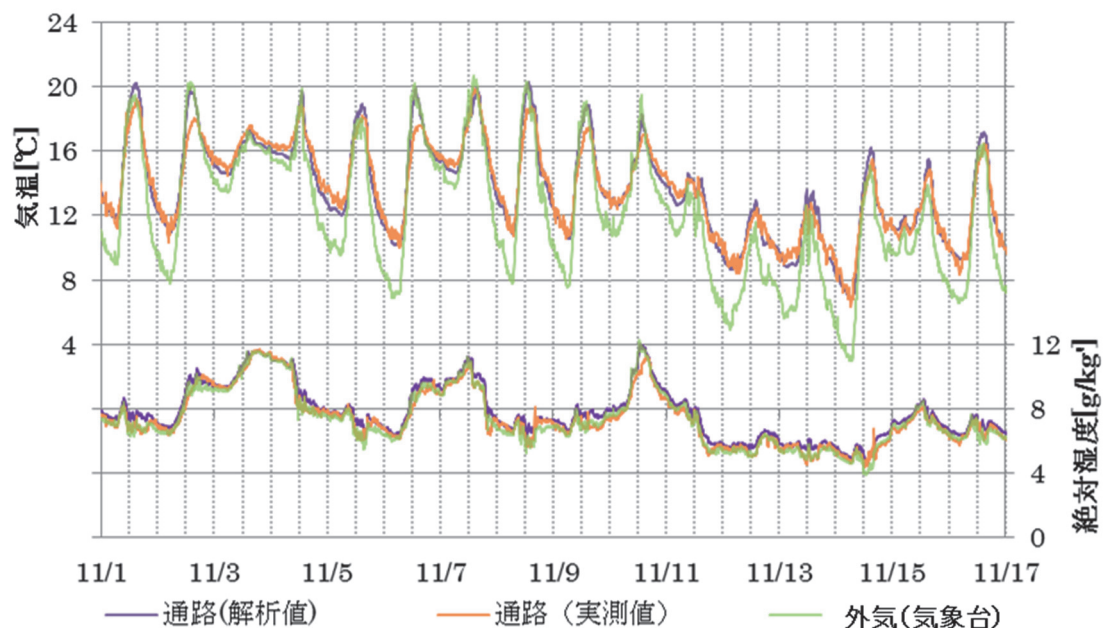


図 3.5-44 気温と絶対湿度（南棟通路）：11月

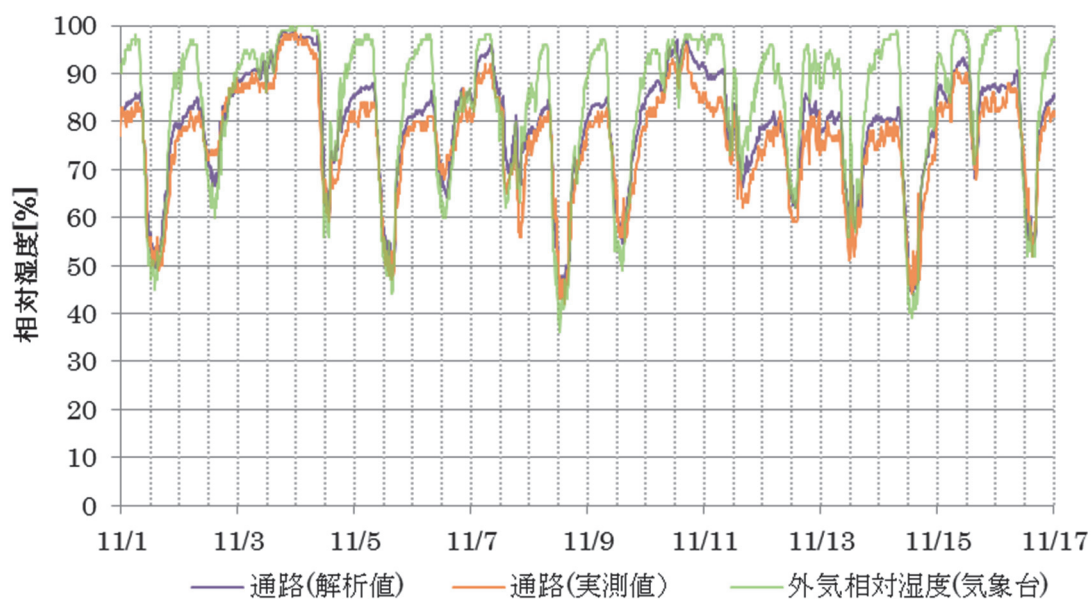


図 3.5-45 相対湿度（南棟通路）：11月

11月の遺構面（室3）における気温と絶対湿度の実測値と解析値を図3.5-46に、相対湿度を図3.5-47に示す。遺構面の気温はよく再現できていると考えられる。また、絶対湿度についても、11日を除いてよく再現できていると考えられる。このため、相対湿度についても解析値は実測値を大略、再現できていると考えられる。

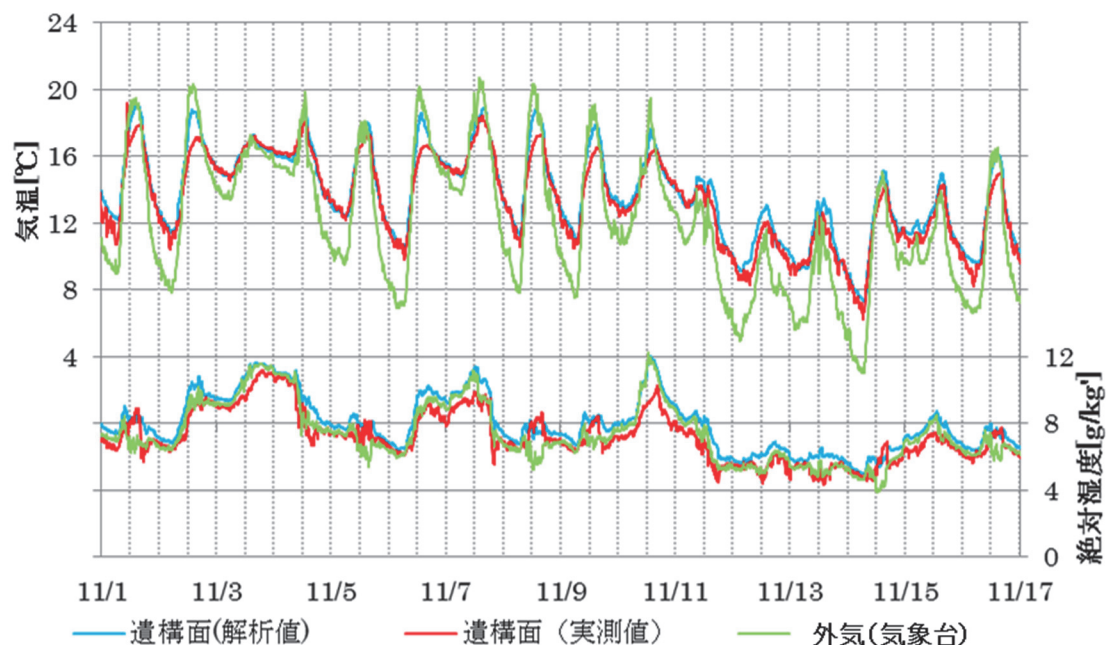


図 3.5-46 気温と絶対湿度（南棟遺構面）：11月

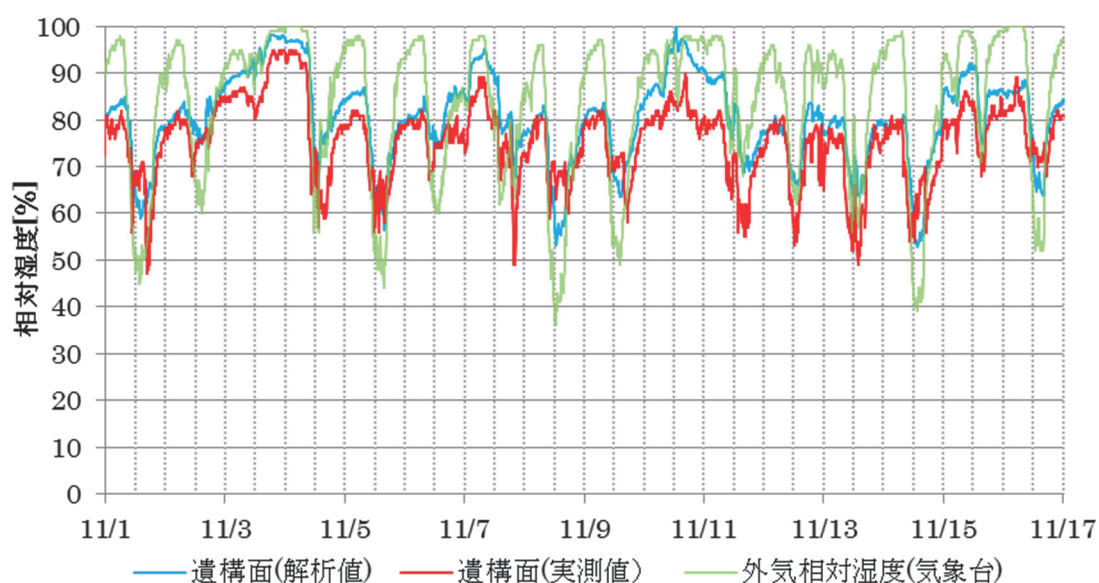


図 3.5-47 相対湿度（南棟遺構面）：11月

2) 遺構地盤の水分性状

ここでは、第3章第5節3(2)1)において、解析値が実測値を大略再現できていると考えられたことから、解析値から遺構地盤の水分性状について検討する。

図 3.5-48 に示す南棟南側法面の各土層境界直近の点において、解析から得られた土壌含水率の推移を図 3.5-49 に示す。それぞれ南側法面における盛土層上部と盛土層下部(図中、盛土(南)含水率1、含水率2とそれぞれ表記)、および埋戻し土層上部と埋戻し土層下部(図中、埋戻し土(南)含水率3、含水率4とそれぞれ表記)の推移を表す。降水量は、本解析で入力値として与えたものである。

北棟の場合と同様に、ここで示す土壌含水率は空気と接する最表層の計算値であること、および第3章第5節2(2)で述べたように、本解析結果は地下水位位置を遺構面から-28 cm で一定として計算した場合の結果である。一方で、第3章第3節で示した法面の土壌含水率の実測値は、土壌に挿入するセンサー長(10 cm)の範囲における土壌

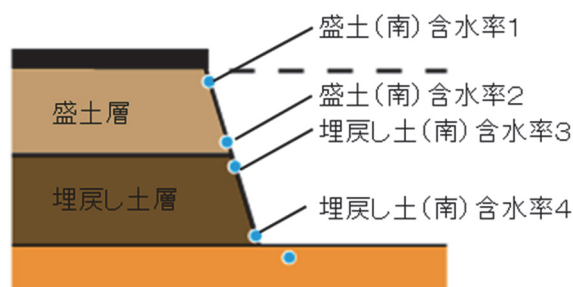


図 3.5-48 南棟南側法面の土壌含水率出力点

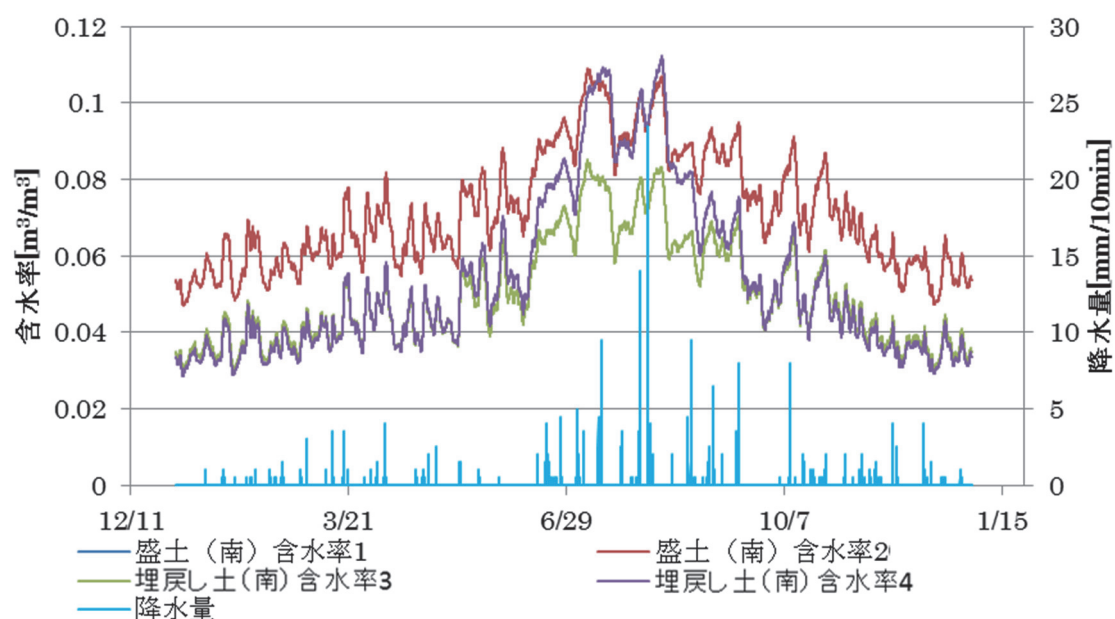


図 3.5-49 遺構法面表面の含水率

含水率の平均値であること、および実際の地下水位位置は第3章第3節3（1）で示した観測孔 No.5 と概ね同じ深さに位置すると考えられ、遺構面よりも高い深度に地下水位が位置する時期があり、計算条件で与えた地下水位よりも高い位置で変動していると考えられる。したがって、第3章第3節で示した実測値は図 3.5-49 に示した結果と比較して高い含水率を示したと考えられ、ここでも北棟の場合と同様に、両者の絶対値について比較はしないこととする。

図 3.5-49 に示した結果から、いずれの箇所においても法面表面土壌の含水率は、絶対値こそ低いものの、やはり降雨後に含水率が増加する様子が認められた。したがって北棟と同様に、遺構展示館屋外の地表面に供給された雨水が、南棟屋内の法面土壌の含水状態に影響をおよぼしていることが示唆された。

次に遺構展示館南棟周辺の地盤内部の含水率について年間の変動を検討する。図 3.5-50 から図 3.5-53 に、それぞれ1月、4月、7月および10月における地盤の含水率分布を0~0.49の範囲で示す。なお、図中左側が南、右側が北である。図 3.5-50 から図 3.5-53 に示した結果から、南棟においても周辺地盤の含水率分布は年間を通して大きな変化は生じないことが示唆された。法面表面の含水率は図 3.5-49 に示したように低いものの、奥行き方向（水平方向）内部では北棟と比較して急激に含水率が高くなっており、特に屋外に近い南側法面では法面内部の含水状態が北側法面と比較して高いことが示唆された。この結果からも、屋外の地表面に供給される雨水が、屋内の法面内部の含水状態に大きく影響をおよぼしており、その影響が北棟と比較して顕著であることが示唆された。第3章第2節3（1）で述べたように、法面表面では土壌の乾燥が進行して、土壌粒子の崩落が生じている様子が認められる一方で、ここでの解析結果からは、その内部では比較的含水状態が高い状態が常に形成されており、さらにその含水率変化が急激であることが示唆された。これら法面内部の水分が、法面表面へとポテンシャル勾配によって移動することで、法面表面への塩の移動、および表面での塩析出を引き起こしていると考えられる。これらの結果から、遺構展示館屋内の法面における水分蒸発量、すなわち塩の析出量を減ずるためには、北棟と同様に、屋外において地表面から地盤内部へと浸透する雨水を遮断することが効果的であると考えられる。

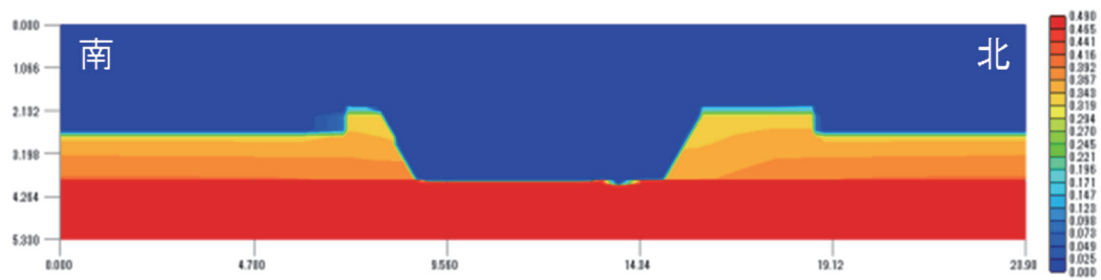


图 3.5-50 南棟周辺地盤含水率（1 月）

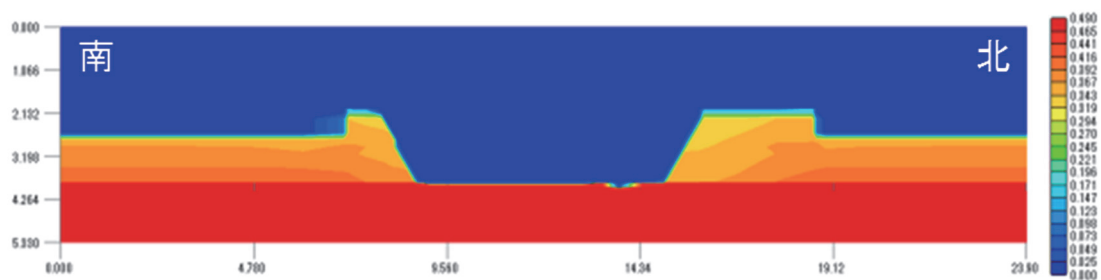


图 3.5-51 南棟周辺地盤含水率（4 月）

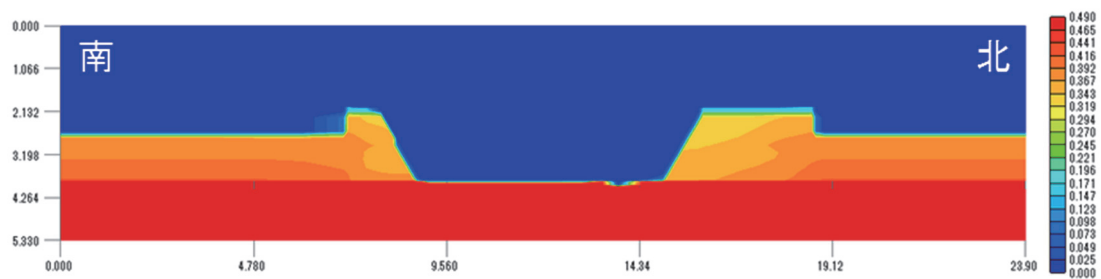


图 3.5-52 南棟周辺地盤含水率（7 月）

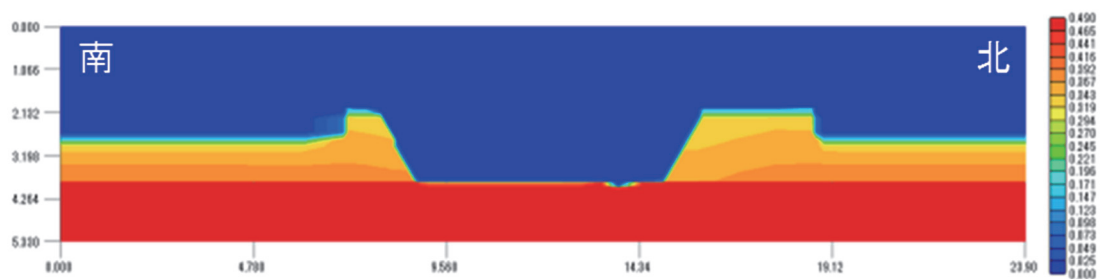


图 3.5-53 南棟周辺地盤含水率（10 月）

4 第5節のまとめ

本節では、第3章第4節で示した熱水分同時移動方程式、および各材料の物性値を使用し、北棟及び南棟の温湿度解析モデルを作成した。また、これらの温湿度解析モデルによって、遺構展示館の館内温湿度の再現をおこなった。また同モデルによって、遺構および周辺地盤の含水率の分布、推移を推察した。

北棟の解析モデルについては、夏期の絶対湿度の再現が十分とは言えず、今後の課題ではあるが、その期間を除く、館内温湿度の年変動はよく再現できたと考えられる。南棟の解析モデルについては、通路の気温変動については十分な再現には至らなかった。これは、解析上、各空間（室上部、通路および遺構面）をそれぞれ1質点で代表している一方で、実測調査は比較的遺構面近傍で、解析対象の空間を代表する点で実測ができていなかったためと考えられる。遺構面については、3月～5月の相対湿度が再現できていないが、その期間を除くと年間変動、日変動ともに概ね再現できたと考えられる。特に硫酸ナトリウムの析出が確認された冬期における温湿度については良く再現できていることから、本解析モデルに基づいて第3章第8節で環境設計の検討をおこなうこととする。

また、館内空気の温湿度がある程度再現され得たことから、ここでの解析モデルは妥当と判断し、本解析モデルを用いて地盤内部の含水状態について解析結果から検討した。その結果、北棟および南棟ともに、館内法面表面の土壌の含水率は常に低い値を示すものの、屋外で降雨があった際には含水率がわずかに増加したことから、屋外の地表面に浸透した雨水が、館内の土壌の含水状態に影響をおよぼしていることが示唆された。館内法面内部では常に高い含水状態が維持されており、特に南棟においては奥行き方向の含水率の変化が急激であることが示唆された。これらの水は、先述の通り屋外の地表面に浸透した雨水で、これらの水が溶存状態の塩とともに屋内の法面表面へと移動し、蒸発することで、屋内の法面表面において塩析出を引き起こしていると考えられる。したがって、屋内の法面表面において認められる塩析出を抑制するためには、屋外の地表面に浸透する雨水を遮断することが効果的であると考えられる。

第5節の参考文献

- 5-1) 特別史跡平城宮跡遺構展示館等その他改修工事 完成図 2010
- 5-2) 気象庁ホームページ <http://www.data.jma.go.jp> 2014

第6節 遺構展示館南棟における水の浸み出しと褐色沈殿物に関する調査

1 はじめに

遺構展示館周辺地盤は過去の発掘調査時に除去され、その後人為的に埋め戻されたものである。したがって、透水性状が異なる土が、層状に堆積しており、いわゆる自然堆積の土壌とは透水性状が大きく異なる。周辺地盤の地表面に雨水として、あるいは遺構展示館の東西を北から南へ向かって流れる排水路（第3章第1節3参照）から地盤内部に浸透した水は、土層境界に沿った水分流となって、その一部が南棟遺構面へと流入している。さらに、浸出水に溶存する鉄が遺構面において沈殿することで著しい汚損を引き起こしている。しかし、これらの水分流や褐色沈殿物の発生箇所は遺構内の一定箇所に局在化している。本章では、遺構面に浸出する水の挙動と褐色沈殿物が発生する箇所の分布、その量的変化の挙動について目視による観察をおこない、褐色沈殿物の発生要因、さらには抑制方法について検討する。

2 調査方法と結果

（1）調査方法

南棟遺構面雨落ち溝の水量、館内法面から流入する水分流の分布と流量、および褐色沈殿物の増減について、約1ヶ月に1回の頻度で遺構面に立ち入って目視観察をおこなった。また、開館日には南棟雨落ち溝を跨ぐ通路上から、東西方向の遺構面の定点写真撮影をおこない変化の記録をおこなった。定点の撮影箇所は図3.6-1中、①、②である。

（2）水の浸み出しについて

図3.6-2に2014年7月下旬から8月上旬までの日降水量を示す。7月20日の降雨を最後に翌日以降、降雨が殆ど観測されず、その後8月9日に134.5 [mm/day]と相当量の降雨が観測された。この降雨の前後における遺構展示館南棟の湛水状態を示す写真を図3.6-3から図3.6-7に示す。図3.6-3に示したように、2014年8月8日の時点では雨落ち溝や南側に並ぶ柱穴は湛水状態にないが、8月8日から12日までの降雨後では図3.6-4、3.6-5に示したように、雨落ち溝および南側の柱穴（図3.6-3中、破線で示した箇所）が湛水状態へと急速に変化しており、さらに南側法面（図左側）下半の土壌が濡れ色を呈していることが

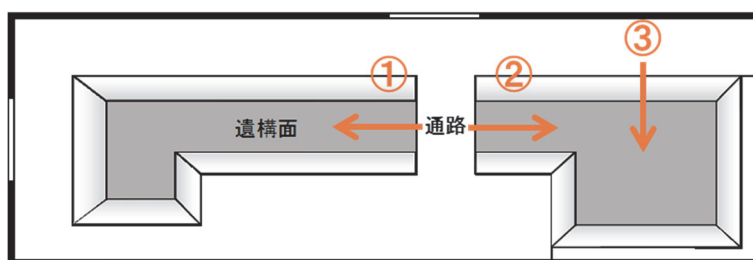


図 3.6-1 南棟写真撮影箇所

確認された。また、図 3.6-6 に示すように、雨落ち溝内の水が東へと緩やかに流れるのに伴い、懸濁状の褐色物質も移動する様子が観察された。さらに 8 月 16 日では南側法面下半の

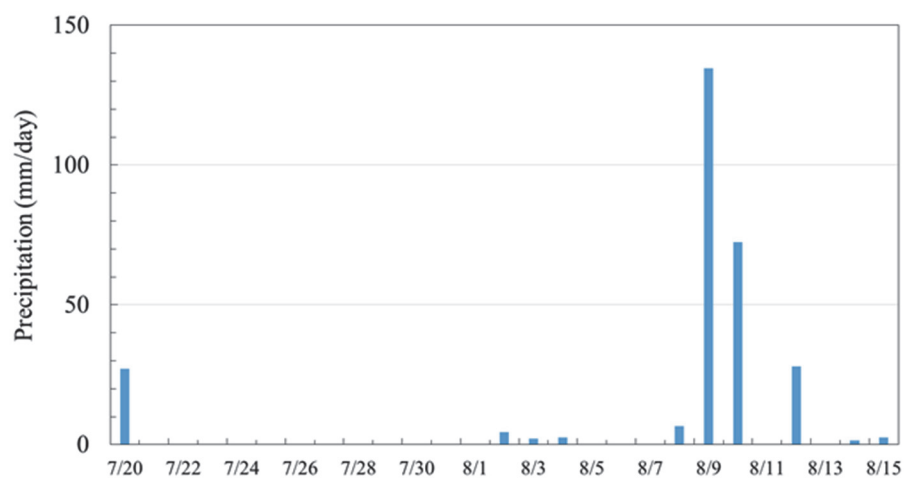


図 3.6-2 2014 年 7 月下旬から 8 月中旬の降水量



図 3.6-3 遺構面① (2014/8/8)



図 3.6-4 遺構面① (2014/8/13)



図 3.6-5 柱穴 (2014/8/13)



図 3.6-6 雨落ち溝を移動する懸濁状の褐色物質 (2014/8/13)

濡れ色を呈する領域が拡大するとともに（図 3.6-7）、褐色沈殿物が雨落ち溝内をさらに東（図 3.6-7 下方向）へ移動する様子が観察された。雨落ち溝底面は東に向かって緩やかに勾配を有しており、遺構面東側においてポンプによって排水される。今回のように雨落ち溝がある程度の水位に達すると、水勾配とポンプによる排水によって東向き水分流が生じ、それによって褐色沈殿物の移動、さらに排出が生じ得るものと推察される。

また、同時期に南棟遺構面を観察した結果、図 3.6-8 に示したように、南東隅では盛土と



図 3.6-7 遺構面①（2014/8/16）



図 3.6-8 遺構面③（2014/8/13）



図 3.6-9 遺構面③拡大（2014/8/13）



図 3.6-10 遺構面④（2014/8/13）



図 3.6-11 遺構面⑤（2014/8/13）

埋戻し土の層境界から水が流下しており、遺構面に濁水が流入する様子が観察された（図 3.6-9）。一方その他の箇所として、図 3.6-10、図 3.6-11 にそれぞれ南西隅、北側法面を示したが、南東隅以外の箇所では、盛土と埋戻し土の層境界より下の領域では濡れ色を呈し含水率が増加している様子は観察されるものの、法面表面を水が流下する様子は観察されず、下方の埋戻し土と遺構面の層境界からのみ水が流入している様子が観察された。以上の観察結果から、降雨が無く地下水面が低下している時期では雨落ち溝や柱穴は湛水状態になく、一定量の降雨があると速やかに水が遺構面へと浸出して、雨落ち溝や一部の柱穴は湛水状態へと移行することがあきらかとなった。また、遺構面へ水が浸出する経路は、主として埋戻し土と遺構面の層境界からで、上方に位置する盛土と埋戻し土の層境界からは南東隅でのみ水が流入しており、そのほかの箇所では埋戻し土が濡れ色を呈するものの、水が流入するには至らないことがあきらかとなった。

（３）褐色沈殿物の生成について

１）褐色沈殿物の生成箇所について

年間を通して褐色の沈殿物の発生量は増減を示すが、発生する箇所は概ね一定で、図 3.6-12 に示すように、南棟東側と南側法面の一部（図 3.6-12 中、それぞれ P01、P02、P03）、北西隅（P04）および南西隅（P05）である。沈殿物は地下水中に溶存する鉄に由来すると考えられることから、少なくともこれらの箇所において地下水が遺構面へと浸出している

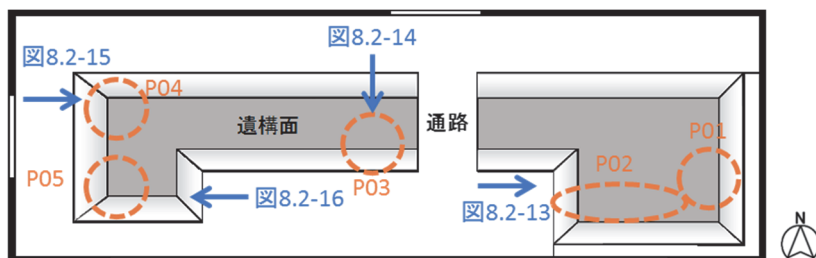


図 3.6-12 褐色沈殿物が生じる箇所（南棟）



図 3.6-13 P01、P02 (2015/2/3)



図 3.6-14 P03 (2015/2/3)



図 3.6-15 P04 (2015/2/3)



図 3.6-16 P05 (2015/2/3)

と考えられる。各箇所の沈殿物の様子を図 3.6-13 から図 3.6-16 に示す。これらの図に示したように、褐色沈殿物の生成量は場所によって大きく異なり、図 3.6-13 で示した P02 および P04 において析出量が顕著に多い。しかし、図 3.6-13、図 3.6-14 および図 3.6-16 で認められるように、盛土と埋戻し土の層境界においても土が濡れ色を呈しているにもかかわらず、これらの箇所では褐色沈殿物は一切認められず、いずれの箇所においても遺構面直上の層境界から浸みだした水のみから褐色沈殿が生じていることが認められる。

2) 南棟東側における褐色沈殿物量の時系列変化について

図 3.6-17 に観測孔 No.5 の地下水位と南棟遺構面標高を示す。また、観測孔 No.5 に近い南棟東側遺構面における毎月の褐色沈殿物量の定点観察結果を図 3.6-18 以降に示す。

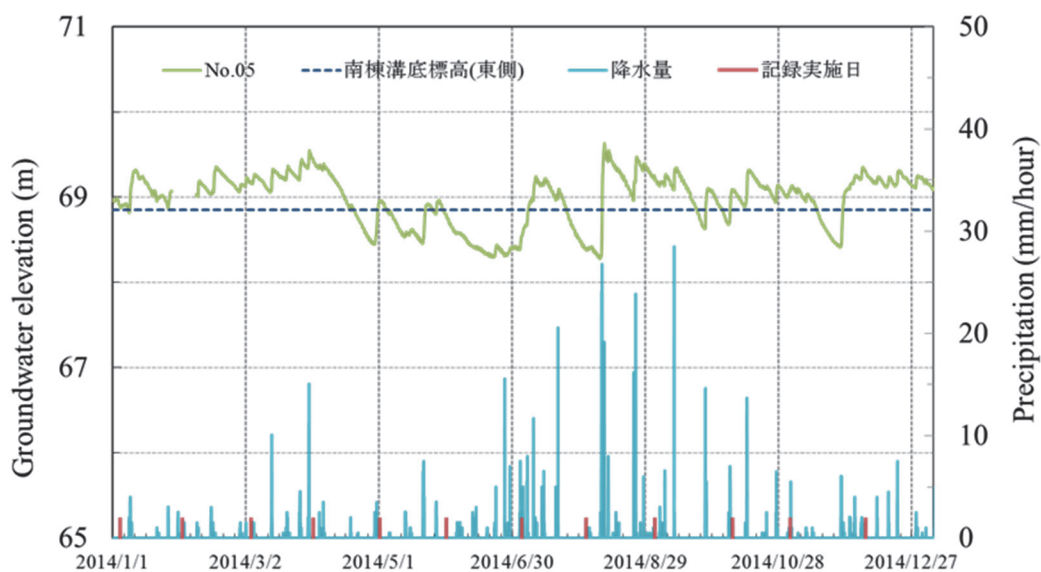


図 3.6-17 観測孔 No.5 の地下水位変化と南棟遺構面標高

図 3.6-17 に示したように、2014 年 1 月から 4 月上旬にかけては、南棟遺構面と比較して地下水位が有意に高く、地下水が遺構面直上の層境界から浸出していたと推察される。この時期、図 3.6-18 から図 3.6-21 に示したように、遺構面南東側（図中破線箇所）において褐色沈殿物が増加している様子が観察される。また、この間は比較的降水量が少なく、かつ降雨強度が小さいため、図 3.6-6 で示したような沈殿物の流出は生じておらず、沈殿物の蓄積が進行したものと推察される。4 月中旬以降、7 月中旬に至るまでの期間は地下水位が遺構



図 3.6-18 2014/1/4



図 3.6-19 2014/2/1



図 3.6-20 2014/3/4



図 3.6-21 2014/4/1



図 3.6-22 2014/5/1



図 3.6-23 2014/5/31

面よりも低い位置で推移しているため、図 3.6-22 から図 3.6-24 に示した期間では褐色沈殿物の増加は認められない。7月中旬に再び地下水位が上昇した結果、再び遺構面への地下水の浸出が生じたと推察され、図 3.6-25 に示したように、褐色沈殿物がわずかに増加した様子が認められた。8月2日の観察後、台風にもなう降雨強度の強い降雨が観測されると、地下水面の急激な上昇が生じるとともに、図 3.6-8、図 3.6-9 に示した通り、遺構面へ多量の水が浸出した。その結果、図 3.6-3 から図 3.6-7 に示したように、褐色沈殿物の流出が生



図 3.6-24 2014/7/4



図 3.6-25 2014/8/2



図 3.6-26 2014/9/2



図 3.6-27 2014/10/7



図 3.6-28 2014/11/2



図 3.6-29 2014/12/6

じており、定点観察箇所においても褐色沈殿物が顕著に減少した様子が認められた（図 3.6-26）。10 月以降は再び降雨強度が比較的弱い降雨が断続的に観測された結果、地下水位は遺構面よりも概ね高い位置で推移しており、この期間から翌年 4 月頃まで、再び褐色沈殿物が蓄積されていくものと推察される。図 3.6-1 中の③で示した方向から実測調査実施日に撮影した遺構面の様子を、図 3.6-30 から図 3.6-32 に示す。夏期の豪雨以前の状態（図 3.6-30）と比較して、豪雨後（図 3.6-31）では褐色沈殿物が流出して減少した様子が認められる。また、図 3.6-32 では、10 月以降の地下水位の上昇によって、遺構面において再び褐色沈殿物が増加し始めている様子が認められる。

以上の結果から、降雨強度が比較的弱い降雨が断続的に観測される 10 月から翌年の 4 月頃では、遺構面において褐色沈殿物の蓄積が進行することがあきらかとなった。そして、地下水位が低下する 5 月以降では、褐色沈殿物の顕著な増加は進行せず、夏期を中心に台風などによって降雨強度が強い降雨が観測されると、遺構面に流入する地下水や、盛土と埋戻し土の層境界から流入する雨水によって褐色沈殿物の一部は流出し、除去され得ることが示唆された。また、本調査の結果から、遺構面において、ある一定の流速で水分移動を発生させることが可能であれば、遺構面における褐色沈殿物の蓄積を抑制し得ることが示唆された。



図 3.6-30 2014/5/14



図 3.6-31 2014/9/18



図 3.6-32 2014/12/19

遺構展示館周辺には未だ多量の木製品などの有機質遺物が埋蔵されていると考えられる。したがって、褐色沈殿物による南棟遺構面の汚損を抑制するために、地下水位の低下を図る、あるいは遺構面に浸出した地下水に、何らかの薬剤を散布するなどの対策を実施した場合、周辺の地盤に埋蔵されている遺物の埋蔵環境が悪化することが懸念される。むしろ、遺構面における褐色沈殿物の蓄積を抑制すると同時に、周辺地盤内の地下水の水質におよぼす影響を軽微なものとするためには、降雨時に褐色沈殿物が排出された状況を再現することが効果的と考えられる。すなわち、遺構面においてある一定流速以上の水分移動を作り出して、雨落溝で沈殿した褐色沈殿物を移動させて、最終的には排水ポンプで排出することによって、沈殿による遺構の汚損の抑制を図る方法が効果的と考えられる。

3 第6節のまとめ

本章では遺構展示館南棟で認められる褐色沈殿物への対策を検討するために、南棟遺構面の湛水状態および褐色沈殿物の発生箇所や、その増減に関する季節変動について、主に肉眼観察による調査を実施した。

調査の結果、降雨時において南棟遺構面南東隅では盛土と埋戻し土の層境界、および埋戻し土と遺構面の層境界の2箇所から、その他の箇所では後者の層境界からのみ水が流入することがあきらかとなった。褐色沈殿物は常に一定箇所において生じており、盛土と埋戻し土の層境界と、埋戻し土と遺構面の層境界の深度が異なる2箇所から水が流入する南東隅も含め、いずれの箇所においても遺構面直上から流入する水においてのみ生じることがあきらかとなった。沈殿物の増減については、比較的降雨強度が弱い降雨が断続的に観測される10月頃から翌年の4月頃までは、地下水が遺構面へと緩やかに流入し続けることから沈殿物は蓄積され続けており、その後地下水位が低下する夏期では沈殿物量には顕著な変化は認められなかった。8月頃から降雨強度が強い降雨が観測されると、遺構面へ流入する水がある一定以上の速度で遺構面北東方向へと流下するのにもなって沈殿物も移動して、遺構面南東隅では沈殿物が大幅に除去される様子が認められた。したがって、沈殿物が蓄積される秋期から春期にかけて、遺構面においてある一定の流速を有する水分移動を作り出すことで、沈殿物の蓄積を抑制し、現在生じている汚損を軽減し得るものと推察される。

第7節 遺構展示館周辺地盤における水分移動の再現と酸化還元環境の解析

1 はじめに

本節では第3章第4節で示した基礎方程式をもちいて南棟覆屋付近の地盤における酸化還元環境を解析するための条件と、解析結果について述べる。一般に、陸域の土壌中は酸化還元環境が季節変動を示し、その環境の変化に対して鉄は顕著な応答を示す。すなわち、還元環境ではその殆どが2価の鉄イオンとして土壌間隙水中に溶存し、一方で酸化環境では含水酸化鉄として褐色を呈する懸濁粒子、あるいは沈殿物として存在する。第3章第2節3(5)で述べた通り、遺構展示館南棟では雨落ち溝に褐色を呈する含水酸化鉄が大量に沈殿、懸濁しており、遺構の汚損を引き起こしている。遺構面は大気と接触しているため常に酸化環境にあることから、含水酸化鉄によって生じる遺構面の汚損の多寡は、遺構面に浸出する水の量とそれに溶存する鉄の濃度に依存しており、すなわち遺構周辺地盤の酸化還元環境に依存していると言える。

一般的な地下水における酸化剤は溶存酸素(Dissolved Oxygen、DOと略記する)で、その濃度が地盤内の酸化還元環境の指標となり得る。DOは土壌中の微生物が間隙水中のDOを利用しながら有機物を酸化分解する際に減少する一方で、雨水や地下水面からの溶け込みによって供給されるため、間隙水中のDO濃度、すなわち地盤内の酸化還元環境は常に変化する。ここでは、DOを土中水の溶質として扱い、地盤内部の熱水分の移動とともにDOの移動について数値解析し、地盤内の酸化還元環境をモデル化する。

解析モデルの妥当性を検証する際、実測値と解析結果の比較が不可欠となるが、一般的な溶存酸素濃度計はバルクの水中での使用を前提としたものであるため、地盤内のDO濃度の実測値を得ることが不可能である。したがって、南棟周辺地盤におけるDO移動に関する解析モデルの妥当性について、実測値と解析結果の比較によって直接的に評価することが出来ない。そこで、本節では南棟東側に位置する地下水位観測孔No.5における地下水位変化をまず再現することにより、遺構周辺地盤における水分移動モデルの妥当性について検討した。ここで観測孔No.5を対象とした理由は、南棟遺構面においては東側、すなわちNo.5が位置する側からの水の浸み出し、および含水酸化鉄の沈殿が顕著であることによる。次に、その結果に基づき、地盤中の酸化還元環境の解析、すなわちDOおよび溶存態の鉄の移動について解析をおこない、その濃度の変化と地下水位から遺構面に褐色沈殿物が生じる時期について考察し、DO濃度変化の解析結果が、相応の妥当性を有するものであるのか第3章第6節で述べた観察結果と比較検討した。

2 南棟周辺地盤における水分移動のモデル化

地盤内部の酸化還元環境は、地盤内部の水に溶存する酸素量によって支配される⁷⁻¹⁾。このDOの分布は、主として地盤内部の水分移動によるDOの移流に支配されていることから、ここでは第一段階として、遺構展示館周辺地盤における水分移動のモデル化をおこなう。

なお、モデルの妥当性については、観測孔 No.5 で実測した南棟周辺地盤における地下水位を再現することで評価する。

(1) 解析対象のモデル化

1) 周辺地盤の構造

南棟周辺の地盤は、いわゆる自然堆積の地盤とは大きく異なり、遺跡保存のための保護盛土や、北側からの排水路が設けられており、これらが各観測孔や遺構面への水分移動に大きく影響をおよぼしている。周辺地盤の概略について、図 3.7-1 に南棟、および観測孔 No.5 周辺の東西断面を、図 3.7-2 に南北断面を示す。

図 3.7-1 に示すように、観測孔 No.5 が設置されている地盤は東側の周辺地盤に対して約 0.5 m、西側の南棟遺構面に対して約 1.2 m 高い位置にあり、周囲の地形の中でひと際高くなっている。また、観測孔 No.5 の東側約 26 m の位置には南北方向に流れる素掘りの排水路があり、これまでの観察の結果、年間の大半の期間は排水の水分流が認められ、かつ素掘りであることから、排水路の水分は観測孔 No.5 の水位に影響をおよぼしているものと推察される。すなわち、観測孔 No.5 における地下水位が排水路の水面よりも有意に低い位置にある時には、東側排水路から観測孔 No.5 周辺地盤へ水が供給されていると考えられる。

また、図 3.7-2 に示すように、遺構展示館周辺地盤は北から南へと緩やかな勾配を有している。しかし、図中青色破線部で示した南棟南側の箇所では奈良時代の建物の基壇を復元した盛土があるため、南棟周辺のみひと際高くなっていることから、南棟南側で地表面が急激に約 1.0 m 低下する。したがって、観測孔 No.5 および南棟周辺地盤は遺構面、および南棟南側地盤と比較して局所的に約 1 m 高くなっていることから、降雨時に観測孔 No.5 の地下水位が上昇して地下水面が GL-1 m に近い位置となった場合、その後に観測孔 No.5 周辺の

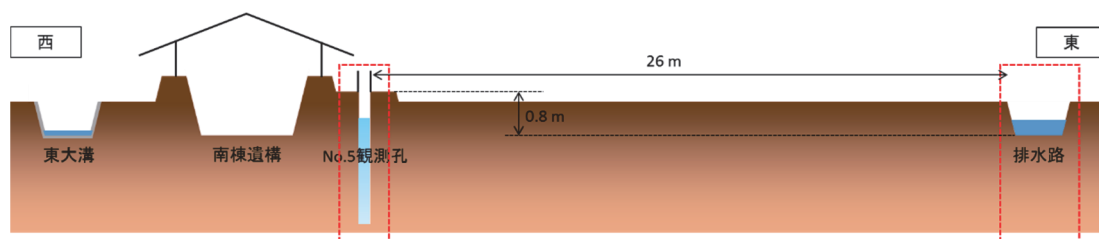


図 3.7-1 南棟周辺東西断面

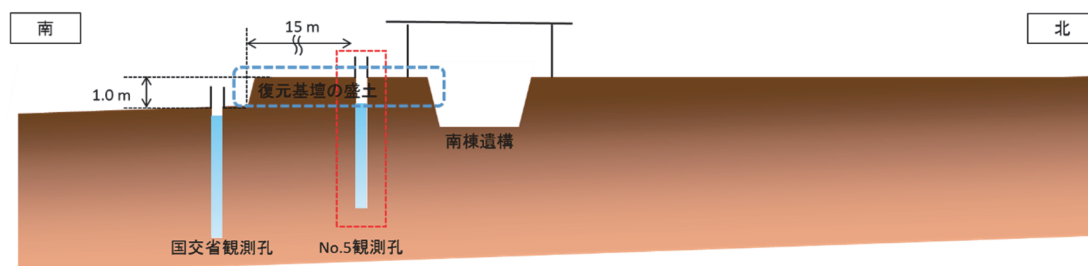


図 3.7-2 南棟周辺南北断面

ひと際高い地盤表面に供給された水は、観測孔の西側の遺構法面や、南側および東側の周辺地盤へ速やかに排水されることとなり、地下水位は GL-1 m からは上昇しにくい状況にあると考えられる。

以上のことから、観測孔 No.5 周辺のひと際高くなっている地盤では、雨水による地表面からの水分供給のみではなく、地下水位が低下している時期に東側排水路が湛水状態の場合では、地盤内部で排水路の水面付近の高さから水分の供給が生じていると考えられる。また、地下水位が上昇する過程においては、観測孔 No.5 西側の遺構面、東側および南側地盤への排水が速やかに生じると考えられることから、地表から深さ 1 m よりも浅い位置には地下水位が到達しにくい環境にあると考えられる。

観測孔 No.5 の地下水位と排水路の含水状態は互いに影響をおよぼすことから、ここでの計算では観測孔 No.5 と排水路の 2 箇所（図 3.7-3 中赤色破線で囲った 2 箇所）を、それぞれを鉛直 1 次元のモデルとして個別に計算した。そして、図 3.7-3 に示すように、排水路の地表面が水分飽和状態で、かつ観測孔 No.5 の地下水位が排水路水面よりも低い位置にあるときに、観測孔 No.5 の内部で排水路底面に相当する深度から地下水位までの領域において、一定量の水分の流入が生じるとした。反対に、図 3.7-4 に示すように、観測孔 No.5 の地下水位の方が、排水路底面よりも高い位置にあるときは、排水路地表面が水分飽和であるか否かに関わらず観測孔から周辺地盤へ一定量の排水が生じるとした。また、一定量の水分の流入（図 3.7-3 の場合）と排水（図 3.7-4 の場合）の流量は等しい値を与えた。

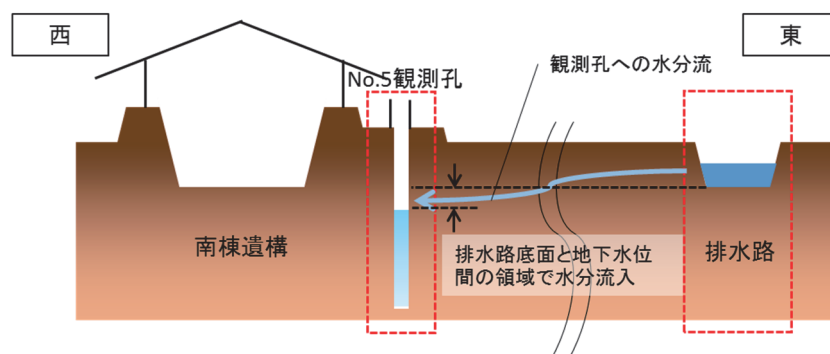


図 3.7-3 排水路が湛水状態にあり、観測孔水位が低い場合

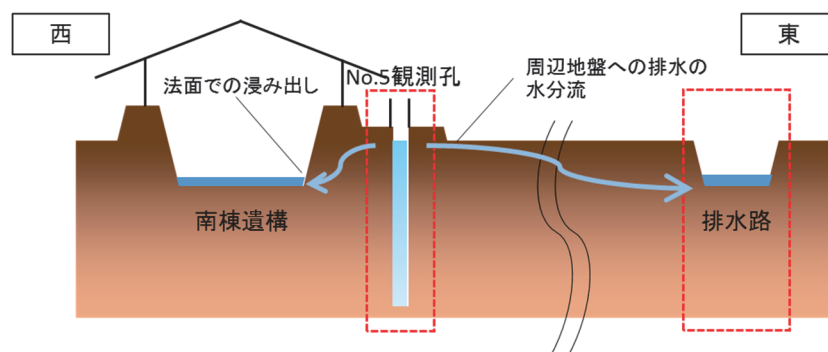


図 3.7-4 観測孔水位が排水路底面標高よりも高い場合

2) 土層構造

解析対象とする観測孔 No.5 周辺地盤の土層構造モデルは、同地点におけるボーリング調査結果に基づき⁷⁻²⁾、5 層の土壌からなる深さ 15 m の成層土とした（図 3.7-5 左）。ボーリング調査の結果を表 3.7-1 に示す。表 3.7-1 の結果から、観測孔 No.5 周辺地盤では地表から GL-1.05 m まで、および GL-1.45 m から GL-2.70 m では透水性が高い土層で、その間にやや透水性が低い土層が存在し、さらに GL-2.70 m 以深では粘性土の堆積のため、ふたたび透水性が低い土層が存在すると考えられる。そこで、解析モデルではこれらの透水性の差異を考慮して、第 3 章第 4 節で記した盛土、埋戻し土、遺構土壌の熱水分移動特性を各土層に充てた。また、表土と GL-2.70 m 以深の粘性土以外の土層に対しては、各土層の水分

表 3.7-1 地下水位観測孔 No.5 のボーリング調査結果

深度 [GL-m]	土質区分
0.00 ～ -1.05	砂利・礫混じり粗砂
-1.05 ～ -1.45	砂利・礫混じり粘土
-1.45 ～ -2.70	砂礫
-2.70 ～ -3.10	粘土
-3.10 ～ -3.50	粘土質砂
-3.50 ～ -5.00	粘土

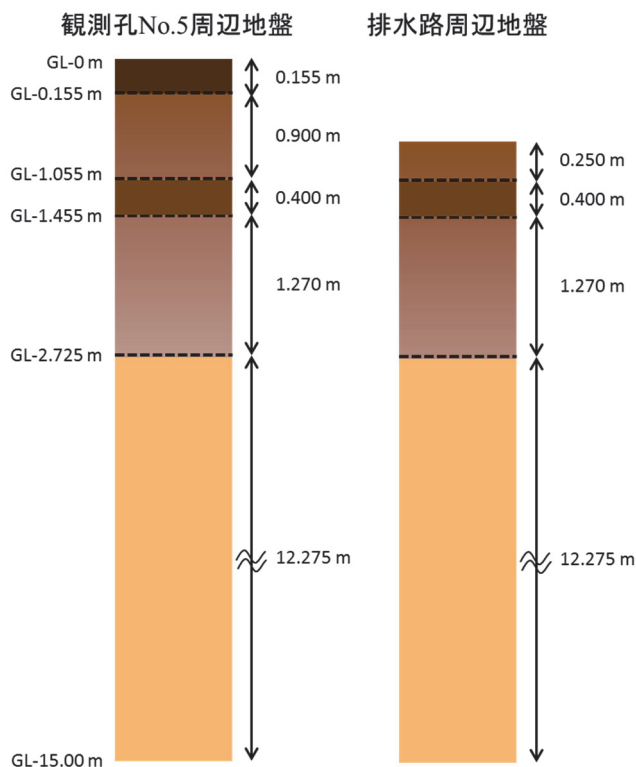


図 3.7-5 観測孔 No.5 周辺地盤および排水路周辺地盤の土層構造モデル

移動特性を考慮して、埋戻し土の水分伝導率に適当な係数をかけた値を与えた。各土層の深度、熱水分伝導率を充てた土壌を表 3.7-2 に示す。

排水路の土層構造については、図 3.7-1 に示すように観測孔 No.5 と比較して排水路底面は約 0.8 m 低いものの、土層構造は東西方向には概ね水平と考え、図 3.7-5 右に示したように、観測孔 No.5 周辺地盤と土層分布標高は同一で、地表側 0.8 m 分の土壌を取り除いたモデルとした。

表 3.7-2 地下水位観測孔 No.5 周辺地盤の解析土層モデル

深度 [m]	熱水分移動性状を充てた土	係数 ($\times \lambda'_{\mu}$)
0.00 ～ 0.155	盛土	1.0
0.155 ～ 1.055	埋戻し土	3.0
1.055 ～ 1.455	埋戻し土	1.0
1.455 ～ 2.725	埋戻し土	2.5
2.725 ～ 15.00	遺構土壌	1.0

3) 周辺地盤との間の水分流

第3章第1節で述べたように、平城宮跡北側には水上池やウワナベ古墳、コナベ古墳といった水源が存在しており、また平城宮跡周辺の地形は北から南へ向かって下る緩やかな勾配を有している。さらに、第3章第3節3(1)で示したように各地下水位観測孔で測定された地下水の水頭も北から南に向かって下降する傾向を示していることから、平城宮跡周辺の地下水は巨視的には北から南へと移動し、やがて河川水となって速やかに排水されていると考えられる。ボーリング調査の結果から、観測孔周辺地盤では透水性状が比較的高いと考えられる粗砂および砂礫と、透水性状が比較的低いと考えられる粘質土が互層となっており、透水性が比較的高いと考えられる粗砂あるいは砂礫層が透水層になっていると推察される。このように巨視的な北から南への地下水の移動に加えて、観測孔 No.5 周辺地盤は周囲の地盤よりも局所的に高くなっていること、さらに北西側に南棟法面が、東側に素掘り排水路が位置することから、観測孔 No.5 周辺地盤の水分移動は鉛直方向のものに加え、水平方向の水分移動が少なからず寄与していると考えられる。

本解析モデルでは鉛直1次元の水分移動を基本とするが、上記の水平方向、とりわけ東西方向を想定した水平方向の水分流を考慮した。すなわち、図 3.7-6 に示すように、観測孔 No.5 周辺地盤の地下水位が排水路周辺地盤の地下水位よりも高い場合、地下水面に該当する CV は直上の CV との間で水分化学ポテンシャルおよび温度勾配に応じた水分移動を考慮し、直下の CV との間では後述する排水の一定水分流量を水分移動量として与えることで、観測孔 No.5 周辺地盤から周囲の地盤に向かう水平方向の排水の水分移動を考慮した。また、さらに下方に位置する CV では常に流入量と流出量が等しいと考え、水分収支は計算していない。地下水面よりも上方の CV では上下の CV との間で水分化学ポテンシャルおよ

び温度勾配に応じた水分移動を考慮した。

観測孔 No.5 周辺地盤の地下水位が排水路周辺地盤の地下水位よりも低い場合 (図 3.7-7)、排水路底部の標高に該当する CV から地下水面直上の CV まで、すなわち排水路側地盤から水が流入する CV では、上下の CV との間の水分化学ポテンシャル勾配、温度勾配による水分移動と、土層に応じて定めた一定流量の水分が流入するとして水分収支を計算した。地下水面に該当する CV では、直上の CV との間の水分化学ポテンシャル勾配、温度勾配による水分移動から水分収支を計算した。また、地下水面に該当する CV よりも下方の CV に対し

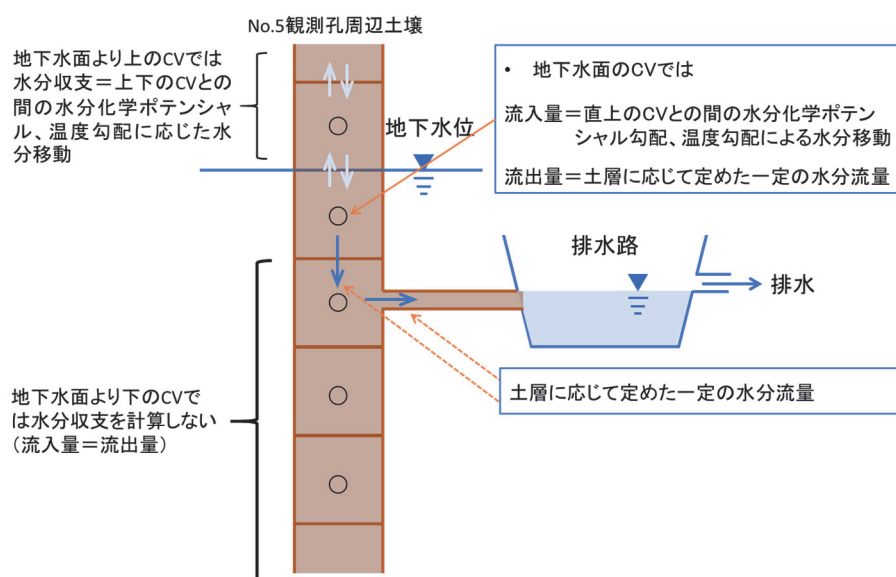


図 3.7-6 計算方法 (No.5 観測孔周辺地盤の地下水位が排水路側よりも高い場合)

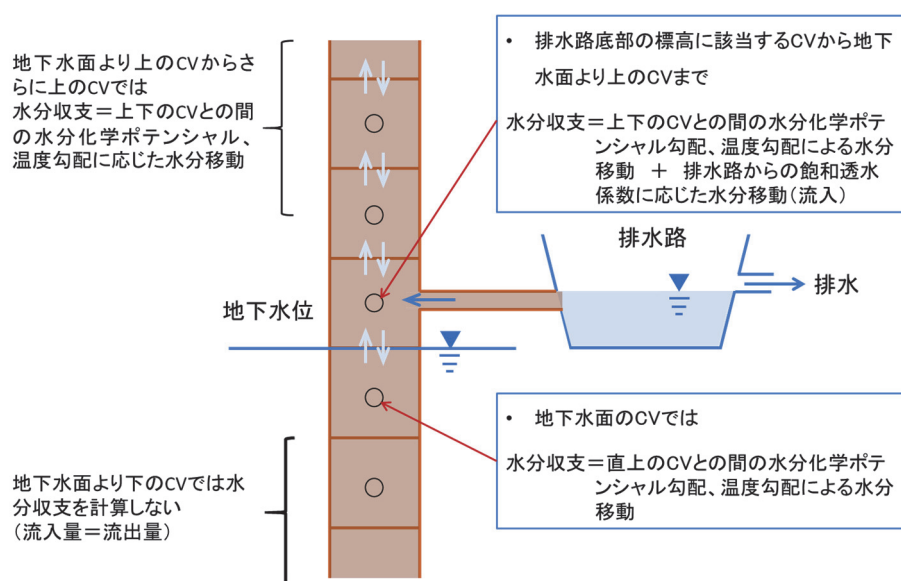


図 3.7-7 計算方法 (No.5 観測孔周辺地盤の地下水位が排水路側よりも低い場合)

ては上記と同様に、水分収支は計算していない。排水路底部の標高に該当する CV よりもさらに上方の CV では上下の CV との間の水分化学ポテンシャル勾配、温度勾配による水分移動から水分収支を計算した。

(2) 地下水面の評価方法

各 CV の水分飽和の閾値は水分化学ポテンシャル -1.0 [J/kg]とした。ある時刻における地下水面が $y=N$ の CV に位置するとし、微小時間 Δt 秒後に $y=N$ と、その直上の CV の水分化学ポテンシャルが -1.0 [J/kg]となった場合は地下水面が 1 つ上の CV に上昇すると判定し、反対に $y=N$ の CV の水分化学ポテンシャルが減少して -1.0 [J/kg]を下回った場合は、地下水面が 1 つ下の CV に下降すると判定した。

(3) 計算方法

1) 空間刻みおよび時間刻みについて

地盤の空間刻みは地下水面が主として変動する領域である GL-2.0 m までは、0.01 m とし、さらに深部では 0.02 m から少しずつ刻み幅を大きくとり、最深部において最大 0.4 m とした。時間刻みは 10 秒である。2013 年の気象条件を助走計算期間として繰り返し与え、周期的定常状態となった上で 2014 年の気象条件を与え計算をおこなった。

2) 境界条件および初期条件について

地表面の境界条件は第 3 種境界条件として、上記の通り 2013 年、および 2014 年の外界気象条件を与えた。また、大気中の酸素濃度は 20.9%で一定とした。地盤下端は第 1 種境界条件として、2013 年の外気温の年平均値 15.4°C とした。

助走計算における初期条件として、地下水位は 2014 年 1 月 1 日の実測値 GL-1.20 m を与え、地盤の各質点の温度は同様に 2013 年 1 月 1 日午前 0 時 0 分の気温 0.6°C を与えた。また地下水面以浅の各質点の水分化学ポテンシャルは -10 [J/kg]とし、地下水面以深では $-1\text{E}-4$ [J/kg]を与えた。

3) 排水の水分流量について

第 3 章第 7 節 2 (1) 2) で述べたように、土層ごとに透水性状が異なると考えられることから、排水の水分流量は土層ごとに異なる値を与えた。各土層の透水性状を考慮して土層ごとに排水の流量を適宜定めた値を表 3.7-3 に示す。第 3 章第 7 節 2 (1) 1) に記した、排水路底部の標高における排水路側地盤から観測孔 No.5 周辺地盤への一定量の水分の流入、および反対に排水路側地盤への水分流出の流量については、表 3.7-3 に示したように $3.0\text{E}-6$ [kg/sec]を与え、他の深度における流量と比較して大きな流量とした。地表付近では、観測孔 No.5 周辺地盤から南棟法面へ水が浸み出すことから、排水路側地盤と比較して観測孔周辺地盤では排水の流量を約 10 倍とし、さらに深い箇所では両者の排水流量は等しい値とした。

表 3.7-3 土層深度別の排水の水分流量

観測孔 No.5 地表からの深度 [m]	流量 [kg/sec]	
	観測孔 No.5	排水路
0 ～ 0.805	3.0E-6	
0.805 ～ 0.995	1.6E-6	1.6E-7
0.995 ～ 1.795	1.4E-6	1.0E-7
1.795 ～ 1.995	1.2E-6	
1.995 ～	0.8E-6	

4) 計算安定性の改善法について

本解析では地下水面直上の CV、あるいは降雨時における地表付近の CV は水分飽和に非常に近い領域にある。土壌などの多孔質材料は飽和付近の領域において平衡含水率曲線の勾配が急激に大きくなり、したがって水分伝導率も急増するため、前進型差分方で計算をおこなうと、しばしば解が発散してしまう。このような場合、計算の安定性を得るために、時間刻みを非常に細かくとる必要があるが、一方で計算に要する時間が膨大なものとなる。そこで、ここでは対象とする差分点に隣接する差分点の水分化学ポテンシャルと温度を定数として常微分方程式(7.2.1)、(7.2.3)を作成し計算を実施した⁷⁻³⁾。水分収支式において、計算対象とする差分点(i, j)の係数を c_1 、定数項を c_2 とすると、常微分方程式の解は(7.2.2)で表される。また、熱収支式においては同様に常微分方程式の解は(7.2.4)で表される。地下水面以浅の CV では(7.2.2)および(7.2.4)で表される解を用いて解析をおこなった。

【水分収支式】

$$A_1 \frac{d\mu(j)}{dt} = c_1 \mu(j) + c_2 \quad (7.2.1)$$

$$\mu(j)^t = \left(\mu(j)^0 + \frac{c_2}{c_1} \right) e^{\left(\frac{c_1}{A_1} t \right)} - \frac{c_2}{c_1} \quad (7.2.2)$$

ここで、 $A_1 = \rho_w \frac{\partial \psi}{\partial \mu} V$ 、 $V = \Delta x \Delta y \Delta z$ 、 $S_Y = \Delta x \Delta z$ (ただし、ここでは $\Delta x = \Delta z = 1$)

$$c_1 = - \left(\frac{\lambda'_{\mu(j-1)}}{\Delta y_{j-1}} + \frac{\lambda'_{\mu(j)}}{\Delta y_j} \right) S_Y,$$

$$c_2 = \left(\frac{\lambda'_{\mu(j-1)}}{\Delta y_{j-1}} \mu(j-1) + \frac{\lambda'_{\mu(j)}}{\Delta y_j} \mu(j) + J_{TgY}(j-1) - J_{TgY}(j) \right) S_Y$$

【熱収支式】

$$A_2 \frac{dT(j)}{dt} = c_3 T(j) + c_4 \quad (7.2.3)$$

$$T(j)^t = \left(T(j)^0 + \frac{c_4}{c_3} \right) e^{\left(\frac{c_3}{A_2} t \right)} - \frac{c_4}{c_3} \quad (7.2.4)$$

ここで、 $A_2 = c\rho\psi V$ 、 $V = \Delta x \Delta y \Delta z$ 、 $S_Y = \Delta x \Delta z$ （ただし、ここでは $\Delta x = \Delta z = 1$ ）

$$c_3 = - \left(\frac{\lambda_{j-1} + R \cdot \lambda'_{Tg(j-1)}}{\Delta y_{j-1}} + \frac{\lambda_j + R \cdot \lambda'_{Tg(j)}}{\Delta y_j} \right) S_Y、$$

$$c_4 = \left(\frac{\lambda_{j-1}}{\Delta y_{j-1}} T(j-1) + \frac{\lambda_j}{\Delta y_j} T(j) + R \cdot \left(J_{\mu g^Y}(j-1) - J_{\mu g^Y}(j) \right) \right) S_Y$$

(4) 観測孔 No.5 周辺地盤における水分移動モデルの解析結果

観測孔 No.5 周辺地盤の地下水位変化について、解析結果と実測値を図 3.7-8 に示す。

図 3.7-8 に示した結果から、2014 年 4 月上旬および 8 月上旬の降雨時に地下水位が急激に上昇した際、解析結果では地表付近まで地下水位が到達しており、実測値とは大きく異なる結果を示した。この差異は、各 CV の水分容量を実際よりも小さく見積もっていることに起因する可能性があることに加え、第 3 章第 7 節 2 (1) 1) で述べたように、観測孔 No.5 周辺地盤は局所的な高まりとなっているため、観測孔 No.5 周辺の一段低い地表面よりも高い位置に地下水位が到達した場合、計算で与えた以上の排水が実際には生じて、地下水位の急激な上昇が抑制されていることに起因すると考えられる。しかし、その他の期間では両者は良く対応したことから、本解析モデルは観測孔 No.5 周辺地盤の地下水位変化を概ね再現できていると考えられる。

ある深度における水平方向の水分流を仮定しなかった場合、排水のフラックスは地表面付近の水分蒸発量のみとなる。水分蒸発量のみで地下水位の低下速度を再現する場合、土壌中の間隙量はきわめて小さな値でなければならない。一方で、土壌の間隙量がきわめて小さいと仮定すると、降雨に対して、地表面まで即座に水分飽和する結果となる。したがって、地下水位の上昇と低下の両者を再現するためには、水平方向の水分流を考慮することが妥当と考えられる。



図 3.7-8 観測孔 No.5 における地下水位変化の実測値と解析値比較

3 遺構に浸出する水の酸化還元状態に関する解析

(1) 計算方法

ここでは、第3章第7節2で示したように観測孔 No.5 周辺地盤の地下水位変化、すなわち水分移動を大略再現できたと考えられたことから、水分移動とあわせて DO の移動を計算することで、地盤内部の DO 分布、すなわち地盤の酸化還元状態を推定する。

解析方法は第3章第7節2で記したものと等しく、それらの諸条件にくわえて、各 CV における気相酸素濃度、DO 濃度および溶存鉄 (Fe^{2+}) 濃度の初期条件を与えた。気相酸素濃度については、地下水面以深の CV については空隙が存在しないため 0 [%]として、地下水面以浅の CV に対しては大気中と同じ 20.9 [%]を与えた。DO 濃度については、ヘンリー則が成り立つものとして、気相酸素濃度が 20.9 [%]の状態と平衡する DO 濃度を与えた。溶存鉄濃度については、平城宮跡で実施された既往の水質調査において、南棟の南側約 25 m の箇所に位置する地下水位観測孔から採取した水に含まれる溶存鉄濃度が、定量下限値の 0.1 [mg/L] ($=1.79\text{E}\cdot3$ [mmol/L]) 未満であったことから⁷⁻⁴⁾、ここでは 0.1 [mg/L] ($=1.79\text{E}\cdot3$ [mmol/L]) を初期濃度として与えた。また、水酸化第一鉄の溶解度積を 3×10^{-14} [mol³/L³]⁷⁻⁵⁾、pH を 6 で一定とした。

(2) 遺構に浸出する水の酸化還元状態の解析結果

遺構展示館南棟において、浸み出した水から沈殿した含水酸化鉄による遺構面の汚損は、南東隅周辺および北西隅から南西隅において顕著である。観測孔 No.5 は遺構面南東隅と隣接することから、観測孔 No.5 周辺地盤中の水が遺構面南東隅に流入していると考えられる。第3章第7節2(4)で示したように、観測孔 No.5 周辺地盤における水分移動モデルは実測値を概ね再現できていると考えられることから、ここでは観測孔 No.5 周辺地盤内の水質変化について検討する。南棟南東隅では盛土と埋戻し土の層境界、および埋戻し土と遺構面の層境界の2箇所から水が浸出しており、それぞれ観測孔 No.5 の地表面からおおよそ GL-0.3 m、および GL-1.2m の位置に相当することから、観測孔 No.5 周辺地盤内におけるこれらの深度の水質変化について解析結果から検討した。

深度 GL-1.2 m における土壌間隙水中の DO 濃度、気相酸素濃度の解析値を地下水位変化とあわせて図 3.7-9 に示す。なお、灰色の破線は GL-1.2 m を示す。図に示した結果から、深度 GL-1.2 m では地下水面位置に応じて土中の水分が DO を含む酸化的な環境と DO が枯渇した還元的な環境に、年間を通して頻繁に変化することが示唆された。また、DO は気相酸素が存在したときのみ存在することから、地下水位が GL-1.2 m よりも下方へと移動することで土壌中に間隙が生じ、間隙中に含まれる気相酸素の土中水への移動が DO 濃度を支配しており、液相中の DO の拡散は殆ど寄与していないことが示唆された。

また、4月上旬と8月上旬に一時的に地下水位の解析値が実測値よりも高い値を示した。したがって、この時、実際の地下水位よりも上方に位置する土壌では解析結果よりも低い含水状態にあったと考えられ、解析結果ではこの時の気相酸素および DO の濃度はいずれも

0[%]あるいは[mg/L]であるが、実際には解析結果よりも高い濃度にあったと推察される。

遺構面に地下水が浸出し得るのは、地下水位が遺構面よりも高い位置にある期間で、このとき、地下水中の DO は常に枯渇した状態、すなわち溶存状態の鉄を含み得る状態であることが解析結果から示された。第3章第6節で述べた通り、地下水位が遺構面よりも高い位置にある秋期から翌年の春期にかけては、遺構面に褐色沈殿物が蓄積され続けるという観察結果が得られており、本解析結果は観察結果と調和的なものと考えられる。

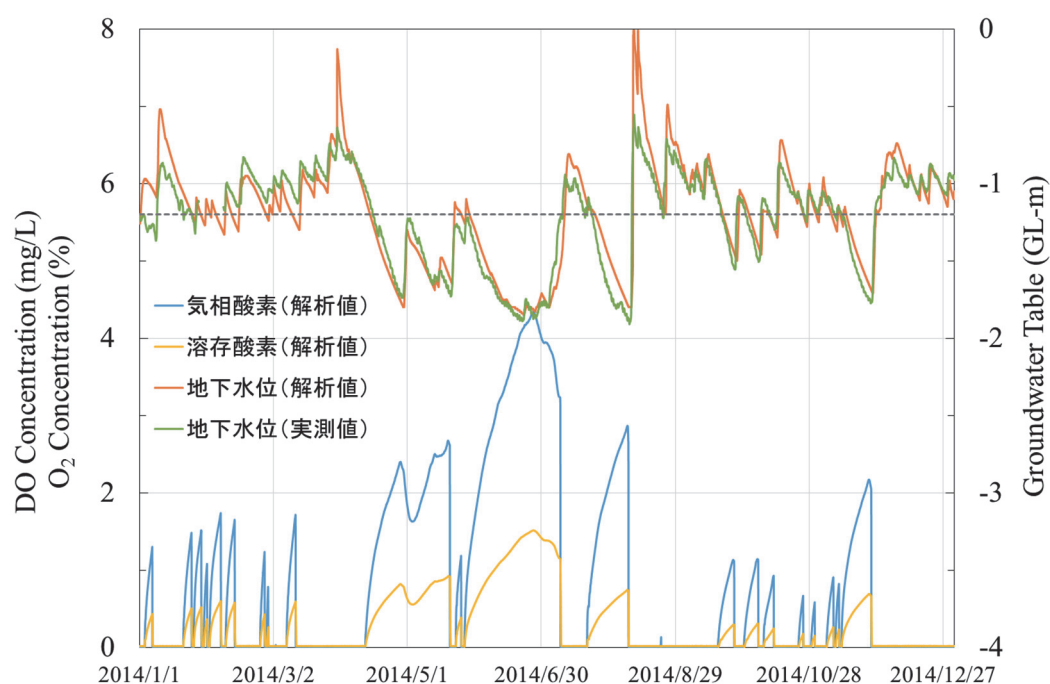


図 3.7-9 埋戻し土—遺構面層境界深度（GL-1.2 m）における地盤内の酸素濃度

盛土と埋戻し土の層境界の深度に当たる深度 GL-0.3 m の酸素濃度の解析結果を図 3.7-10 に示す。図の結果から、GL-1.2 m における結果と比較して、あきらかに土壌間隙中の気相酸素濃度および土中水中の DO 濃度は通年高い値を示し、深度 GL-0.3 m では概ね常に酸化的な環境であることが示唆された。図中赤色破線で示した時期では、気相酸素と DO いずれも濃度が急激な減少を示した。このとき、地下水位の解析結果は実測値と大きく異なり、地表付近まで移動している。したがって、解析結果ではこの時水分飽和状態へ移行しており、その結果、気相酸素と DO の急激な減少を示したと考えられる。実際には地下水位が上昇した際にも GL-0.3 m までは達していないことから、この深度では常に水分不飽和状態にあり、したがって深度 GL-0.3 m では常に酸化的な環境で溶存状態の鉄を含み得ない状態にあると推察される。

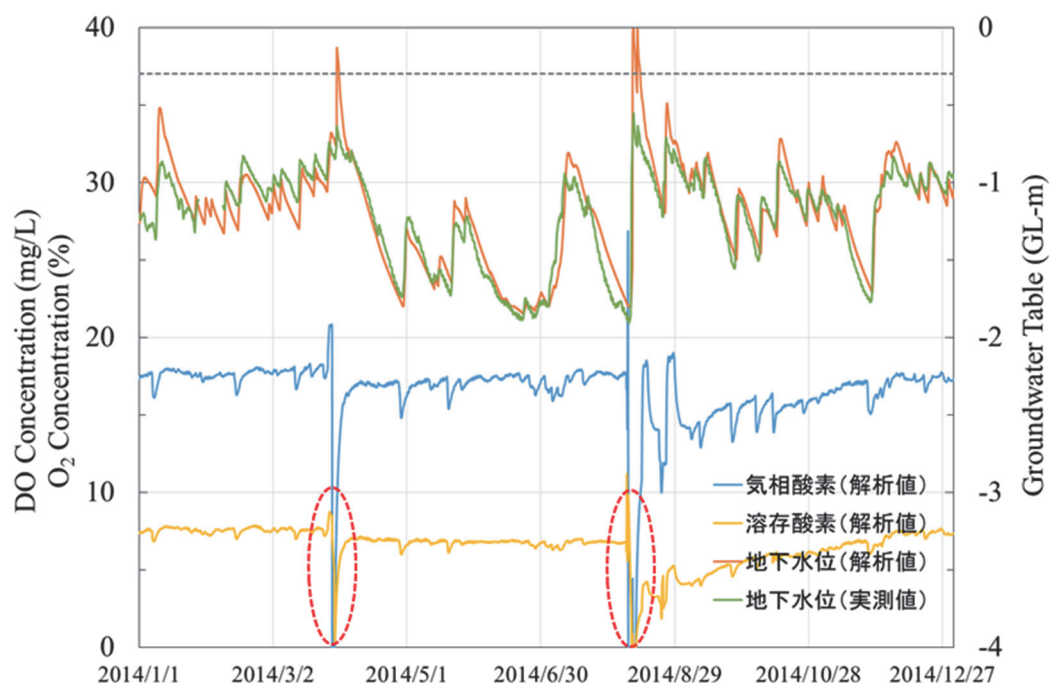


図 3.7-10 盛土－埋戻し土層境界深度（GL-0.3 m）における地盤内の酸素濃度

次に、深度 GL-1.2 m および GL-0.3 m の2つの深度における溶存態鉄の濃度変化をそれぞれ図 3.7-11、および図 3.7-12 に示す。図 3.7-9 に示したように、遺構面深度では酸化的な環境と還元的な環境を繰り返すため、溶存態の鉄の濃度は酸化還元状態に応じて増減を

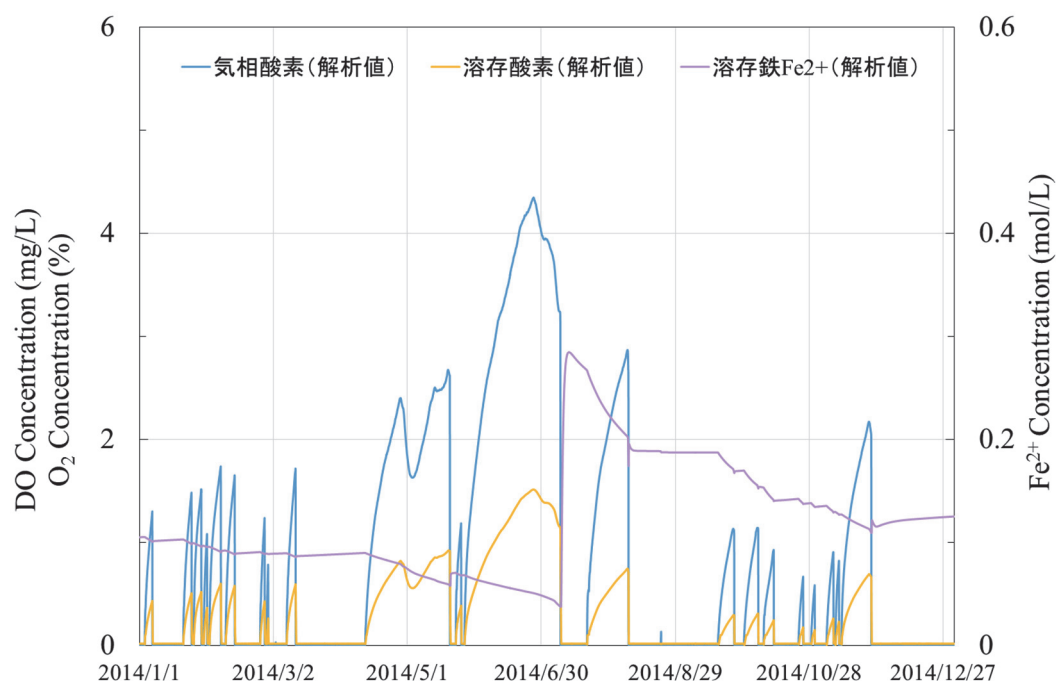


図 3.7-11 埋戻し土ー遺構面層境界深度 (GL-1.2 m) における地盤内の溶存態鉄濃度

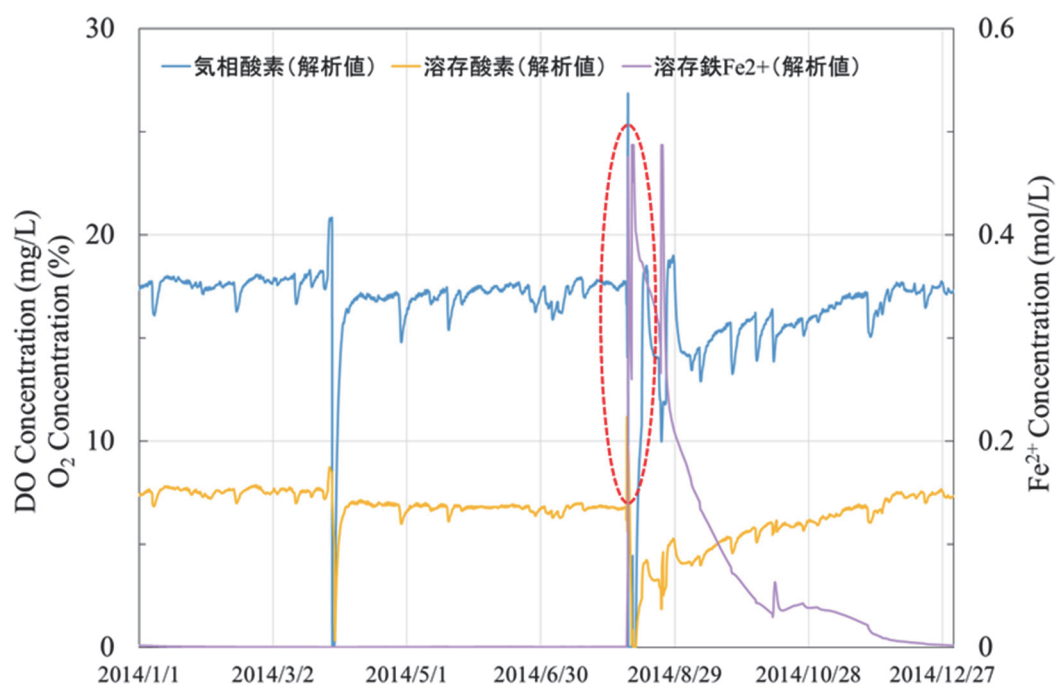


図 3.7-12 盛土ー埋戻し土層境界深度 (GL-0.3 m) における地盤内の溶存態鉄濃度

繰り返すことが示唆された。特に8月上旬に地下水位が上昇して以降は翌年の4月頃まで概ね DO 濃度は低い値で推移する、すなわち還元的な環境が継続することから、この期間では溶存状態の鉄濃度は高い値を維持していることが示唆された。したがって、この期間において遺構面直上から浸出する地下水には常に溶存状態の鉄が含まれているため、地下水が浸出する時期では常に褐色沈殿物が生じることとなり、第3章第6節で述べた遺構面の観察結果と調和的な結果と考えられる。

盛土と埋戻し土の層境界深度における溶存状態の鉄濃度を図 3.7-12 に示す。図 3.7-10 と同様に図 3.7-12 の破線箇所は、地下水位の解析値が地表面付近まで急激に上昇したこと起因する溶存鉄濃度の一時的な増加であり、解析上の誤差と考えられる。その他の期間の結果から、盛土と埋戻し土の層境界深度では、遺構面深度と比較して酸化的な環境にあることから溶存態の鉄濃度が通年低い値で推移することが示唆された。また、先述の通り、観測の結果から地下水位が GL-0.3 m まで上昇することはなかったため、盛土と埋戻し土の層境界から水が浸出するのは降雨時に限定される。土層境界から浸出する水は土中水と雨水が混合した水と考えられることから、土中水に微量に含まれる溶存態の鉄は希釈されると同時に雨水中の DO によってさらに酸化されるため、盛土と埋戻し土の層境界から浸出する水には溶存態の鉄は殆ど含まれず、褐色沈殿物が生じないと考えられる。したがって、盛土と埋戻し土の層境界深度における溶存態の鉄濃度に関する解析結果も、第3章第6節で述べた遺構面における褐色沈殿物の発生箇所に関する観察結果と調和的な結果と考えられる。

4 第7節のまとめ

本節では、前節までに示した解析手法と条件を用いて、遺構展示館南棟周辺地盤における水分移動を計算し、地下水位変化について実測値との比較をおこなった。地下水位変化の解析においては、外界気象条件の影響だけではなく、観測孔 No.5 周辺地盤の高低差に起因する排水や、東側の排水路との間の水分移動を考慮した結果、6月から8月にかけて実測値よりも若干高い地下水位を示したものの、その他の期間においては地下水位の低下速度や降雨時の応答などの地下水位の変動が大略再現された。

この遺構展示館南棟周辺地盤における水分移動モデルに、溶存酸素や溶存態および懸濁態鉄などの物質移動を合わせて計算をおこない、南棟南東隅で水の浸み出しが見られる2箇所、すなわち盛土と埋戻し土の層境界、および埋戻し土と遺構面の層境界に当たる深度の土中水中の物質濃度変化を推定した。その結果、溶存酸素濃度は地下水位位置によって支配されており、地下水位よりも常に高い箇所に位置する盛土と埋戻し土の層境界では常に溶存酸素濃度が約 5 [mg/L]を示し酸化的な環境にある一方で、夏期を除く期間では地下水位よりも低い箇所に位置する埋戻し土と遺構面の層境界では常に溶存酸素が枯渇した還元的な環境にあることが示唆された。したがって、遺構面から地下水が浸出する秋期から翌年の春期にかけては、地下水中に多量の溶存態の鉄が含まれており、遺構面に浸出した水から褐色沈殿物が生じて蓄積され得ることが示唆され、南棟の定点観察結果と調和的な結果を得た。

第 7 節の参考文献

- 7-1) 地下水ハンドブック編集委員会：地下水ハンドブック、建設産業調査会（1979）
- 7-2) 株式会社トータルメディア開発研究所・応用地質株式会社：平城宮跡内遺構展示館周辺ボーリング調査 報告書（2010）
- 7-3) 岸本嘉彦：ひび割れを有する建築壁体の熱水分移動と酸性雨が中性化に及ぼす影響、博士論文（2005）
- 7-4) 福井水道工業株式会社：平城宮跡地内観測井水質調査及び環境調査にともなう試験報告書（2010）
- 7-5) 化学大辞典編集委員会編：化学大辞典 5、共立出版、p29（1961）

第8節 温湿度解析モデルによる室内環境設計の検討

1 はじめに

本節では、第3章第4節で示した解析方法と物性値、および第5節で示した熱水分移動解析モデルを使用して、第3章第7節までであきらかとした遺構展示館、露出展示遺構の劣化現象について、特に塩析出に着目して、その劣化を抑制し得る保存環境設計を検討する。地盤に関しては、地下水位を制御した場合と地表面からの雨水の浸透量を制御した場合の効果について検討する。覆屋に関しては、日射量を制御した場合と、外気との換気回数を制御した場合の効果について検討する。

2 目標とする環境条件

露出展示遺構の保存環境設計の目標は塩析出の抑制とする。特に、南棟では **Thenardite** といった、多孔質材料の劣化に与える影響が大きいとされる塩の析出が確認された。そこで、塩析出による劣化を防ぐために、以下の方針に基づいて保存環境の検討をおこなう。

(1) 水分蒸発量の抑制

塩を含んだ液水が遺構面近傍で蒸発することで、液水の塩分濃度が上昇し、やがてその濃度が溶解度に達すると塩が析出する。したがって、遺構面からの積算水分蒸発量は、塩の析出量の1つの指標となり、蒸発量を抑制することが塩析出の抑制につながると考えられる。

(2) 塩の水和物変化の抑制

第3章第2節で示したように、析出した塩の相変化による体積変化は、周辺の温湿度変化に支配される。図3.8-1は南棟の塩の相変化と月平均温湿度の関係を示したものである。11月から12月にかけて、月平均温湿度が **Mirabilite** と **Thenardite** の境界と交錯していることから、この期間に相変化が起こっていると考えられる。したがって、室内の温湿度を **Mirabilite** と **Thenardite** の境界をこえないようにすることで、塩析出による劣化を軽減できると考えられる。

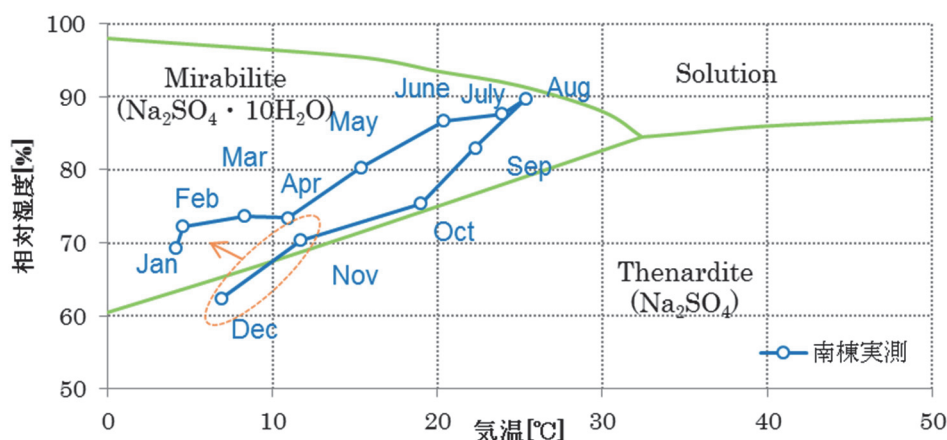


図 3.8-1 塩析出と温湿度の関係⁸⁻¹⁾

3 地下水位制御に関する検討

(1) 解析条件

第3章第5節で示したモデルを現状モデルとして扱い、ここでは地下水位を変化させた場合の効果を現状モデルと比較検討する。すなわち、第5節で示したモデルに対して、水分化学ポテンシャルを -5 J/kg で一定の第一種境界条件を与える深度を変えて計算をおこなった。表 3.8-1 に示すように、地下水位が遺構面底面から深さ -12cm に設定したものを MODEL2、深さ -150cm に設定したものを MODEL3 として解析をおこなった。

表 3.8-1 解析条件

	地下水位
MODEL1 (現状モデル)	-28 cm
MODEL2 (地下水位上昇モデル)	-12 cm
MODEL3 (地下水位低下モデル)	-150 cm

(2) 解析結果および劣化に与える影響

遺構面における年間の温湿度の推移を図 3.8-2 から図 3.8-4 に示す。値は1か月毎の平均値である。気温については、MODEL1 と MODEL3 では大きな差異はないが、MODEL2 は、他の2つのモデルに対して高い値で推移した。遺構面の絶対湿度は、地下水位が高いほど高く (図 3.8-4)、一方で、相対湿度については、MODEL2 の気温が高いため MODEL1 の方が高い相対湿度で推移することが示唆された (図 3.8-3)。

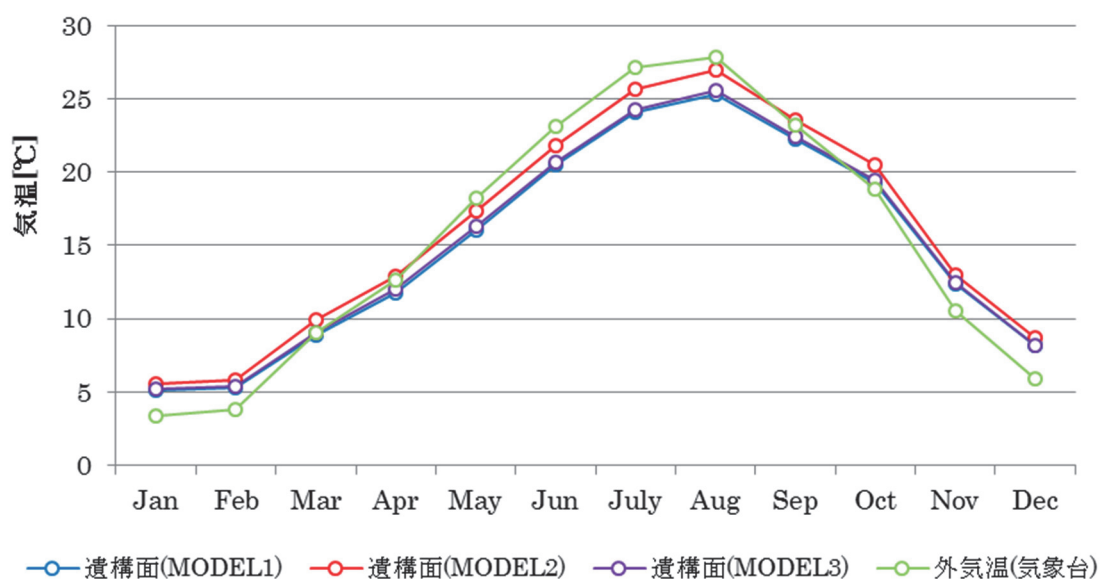


図 3.8-2 気温

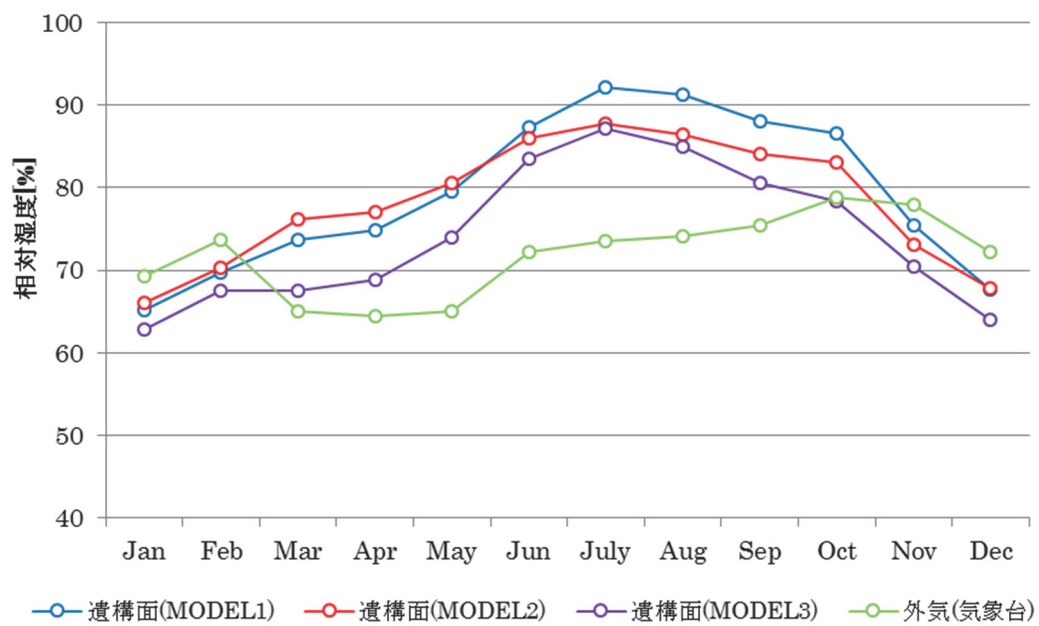


図 3.8-3 相对湿度

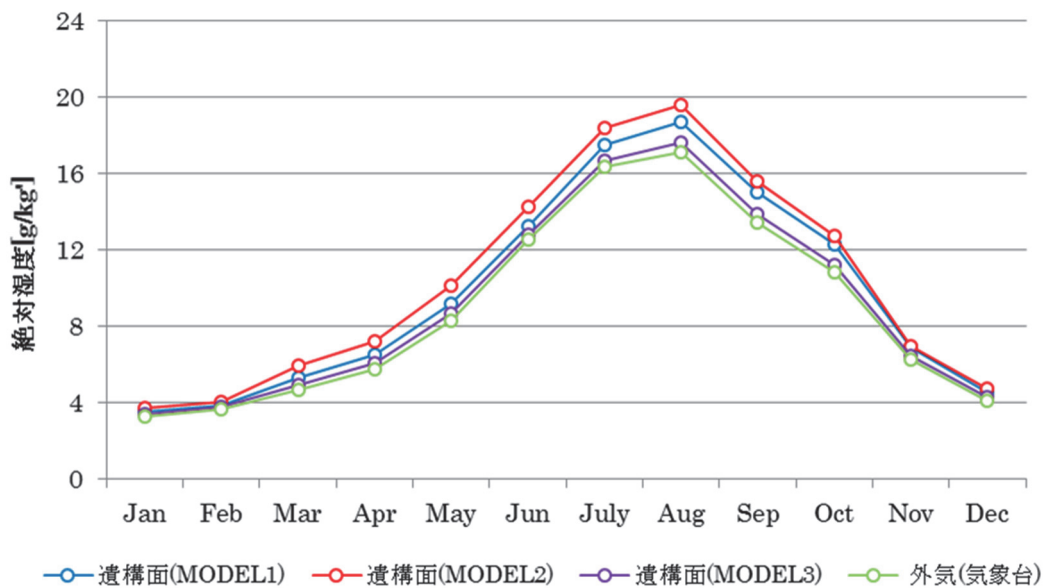


図 3.8-4 絶対湿度

遺構面の単位面積当たりの年間積算水分蒸発量を図 3.8-5 に示す。地下水位が最も高い MODEL2 の水分蒸発量が最も多く、地下水位が低くなるほど、水分蒸発量は減少することが示唆された。図 3.8-6 に遺構面の含水率の推移を示す。地下水位が低いほど、含水率が低い値で推移することが示唆された。

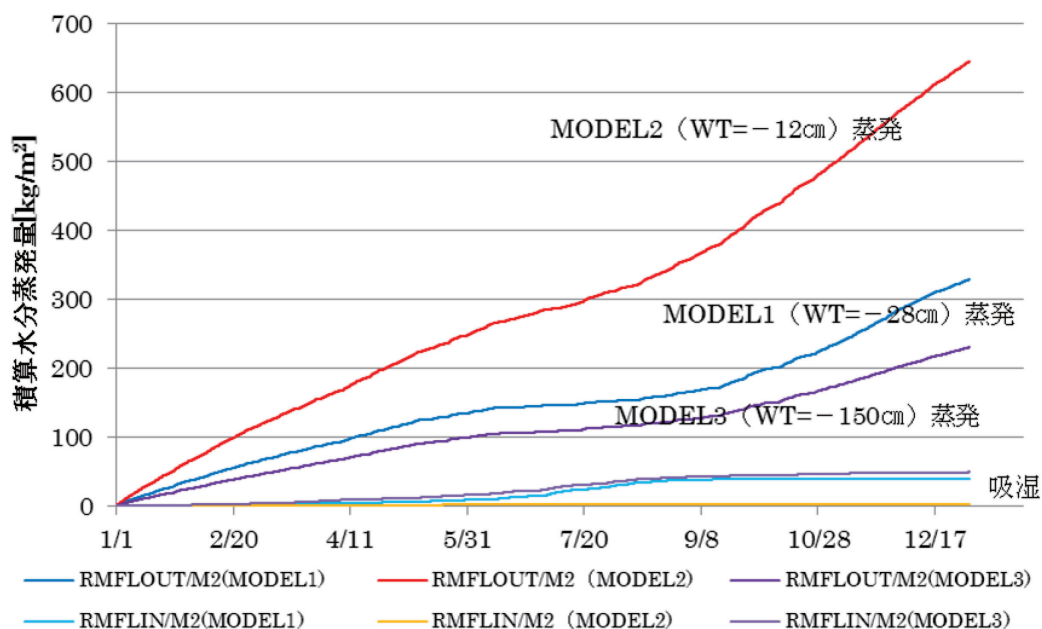


図 3.8-5 年間積算水分蒸発量（遺構面）

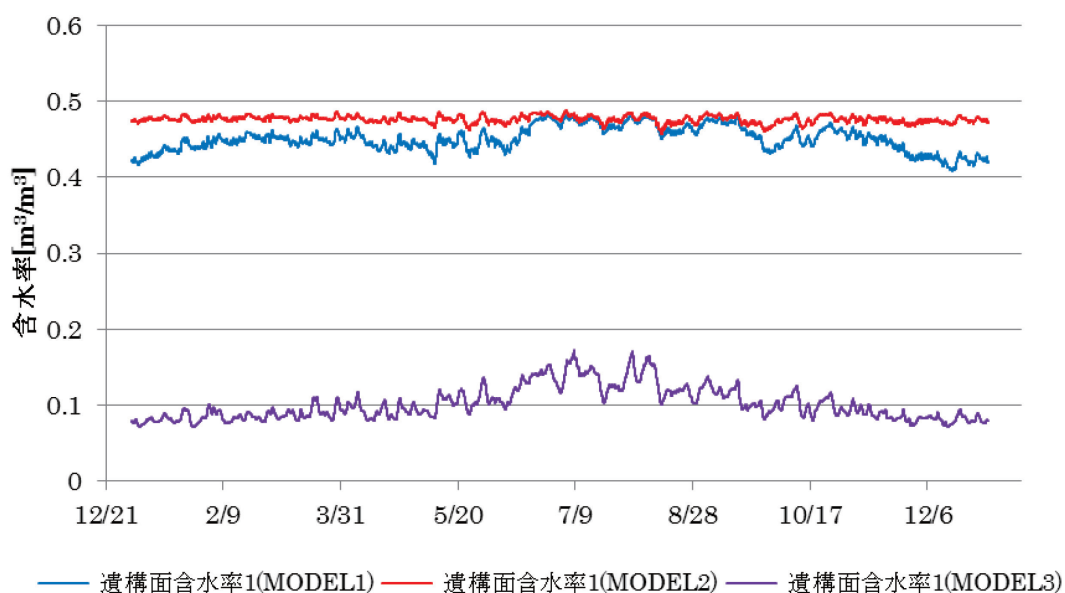


図 3.8-6 遺構面の含水率

図 3.8-7 に南側法面の単位面積あたりの年間積算水分蒸発量を示す。法面においては、地下水位が低い MODEL1 の方が、MODEL2 より積算水分蒸発量が多い結果となった。これは MODEL1 の方が MODEL2 より、遺構面の室空気から法面表層への吸湿量が多いことが影響していると考えられる。盛土と埋戻し土の層境界直下における含水率の推移を図 3.8-8 に示す。含水率は、MODEL1>MODEL2>MODEL3 の順に高く、積算水分蒸発量の大小と順序が一致した。MODEL3 は常に水分蒸発量が少ないことから、遺構法面からの水分蒸発量を減少させるためには、一定以上の深さまで地下水位を下げる必要があると考えられる。

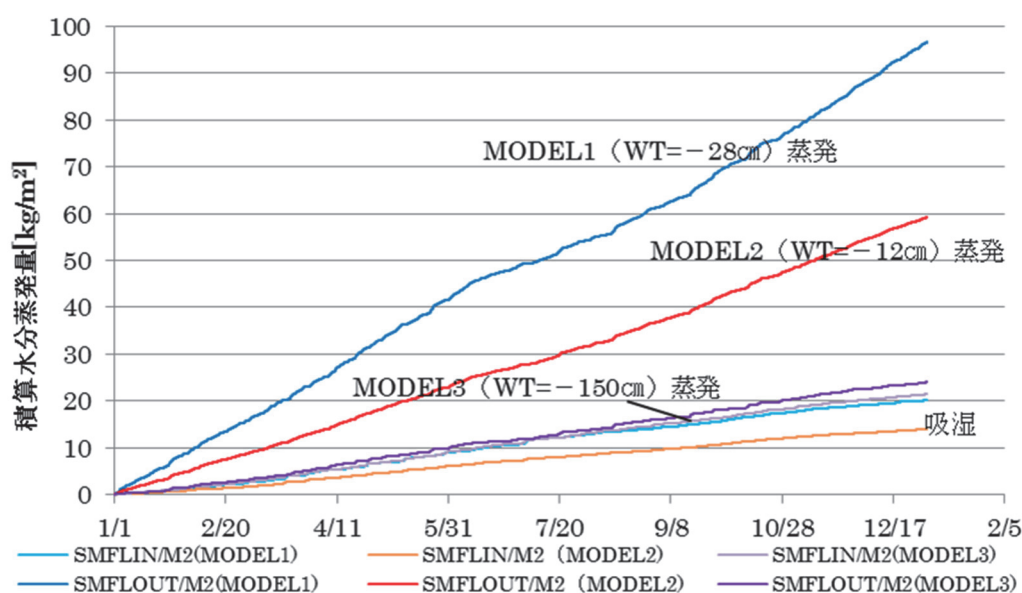


図 3.8-7 年間積算水分蒸発量（南側法面）

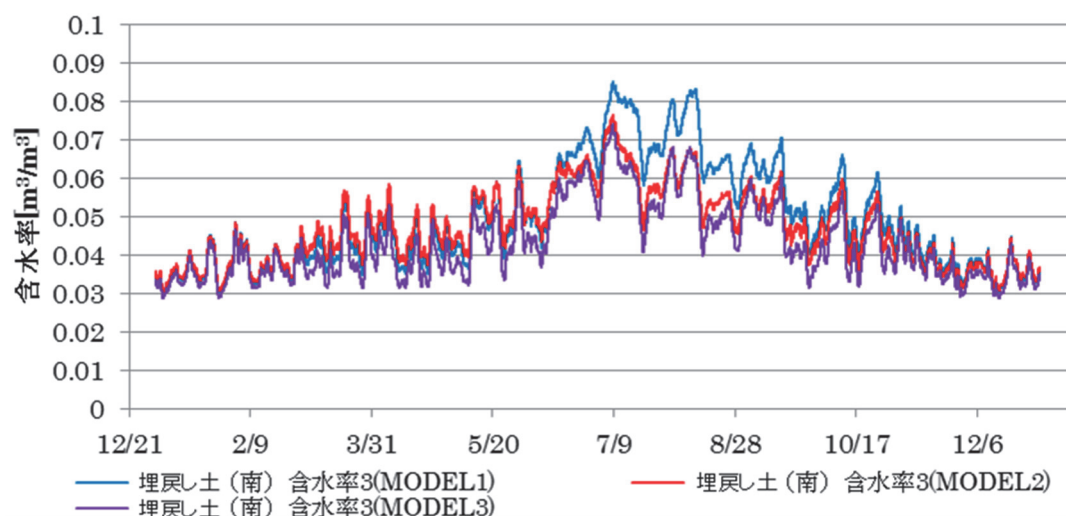


図 3.8-8 南側法面（土層境界直下）の含水率

4 周辺地盤からの水分流入の抑制に関する検討

(1) 解析条件

南棟では磚積み基壇の北半は館内で展示しつつ、南半は屋外で復元展示している。この復元基壇部、すなわち雨水が浸透する面は遺構面と比較して有意に高く、ここから浸透した雨水が遺構面あるいは法面から浸み出す水の一部と考えられる。したがって、ここでは遺構展示館南側の復元基壇表面からの雨水の浸透を抑えることによる、覆屋内部の温熱環境および土壌の含水状態に与える影響について検討する。図 3.8-9 に解析モデルを示す。ここでは南側の屋外基壇表面への雨水が完全に排水されると仮定し、屋外基壇表面（図中排水と表記）における雨水の供給量を $0 \text{ kg/m}^2\text{sec}$ とした（MODEL6）。

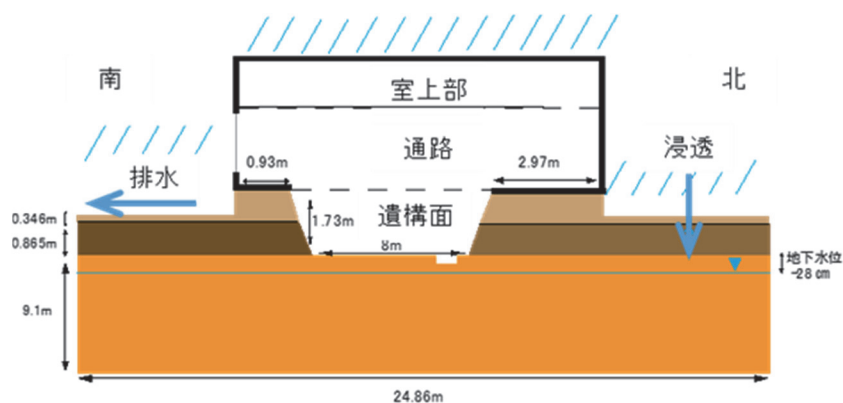


図 3.8-9 解析モデル図

(2) 解析結果および劣化に与える影響

現状モデルの MODEL1 と雨水を制限した MODEL6 の温湿度の月平均の推移を図 3.8-10 から図 3.8-12 に示す。MODEL1 と MODEL6 において、気温に大きな差異は認められなかった。これは、南棟は外気との換気量が大きいためと考えられる。一方で、絶対湿度と相対湿度は、MODEL1 と比較して MODEL6 ではわずかに低下することが示唆された。

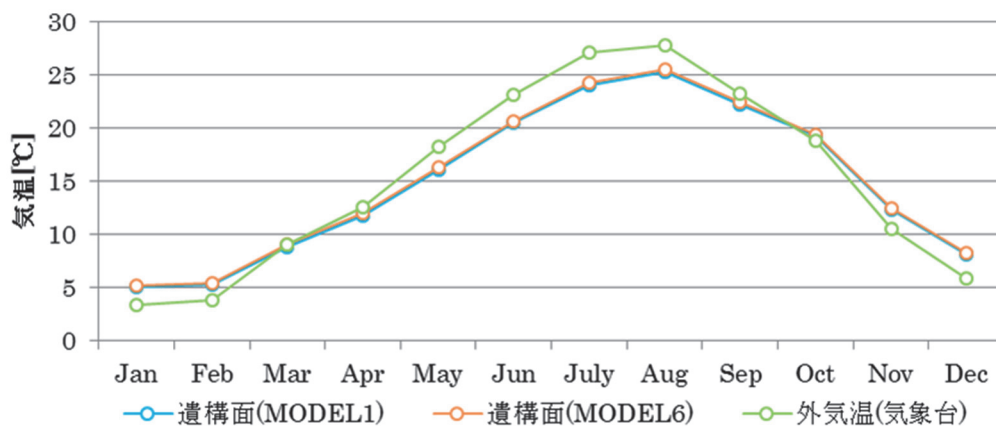


図 3.8-10 気温

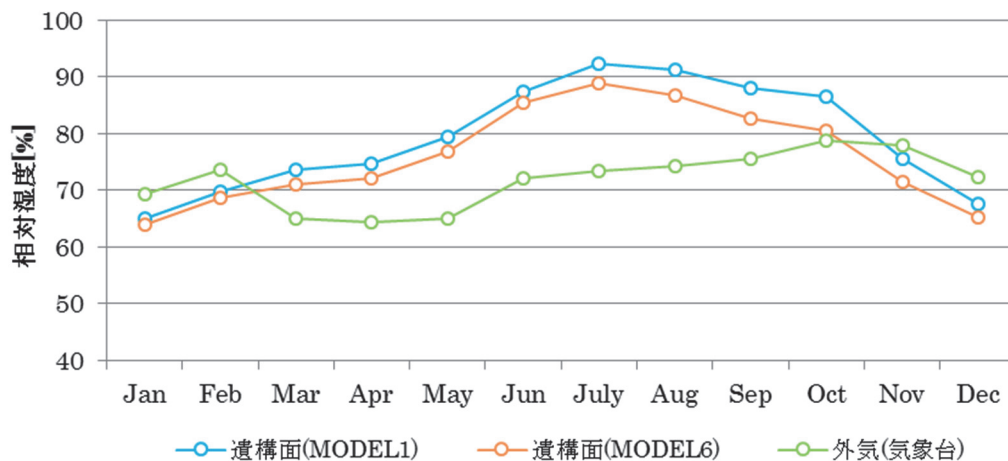


図 3.8-11 相对湿度

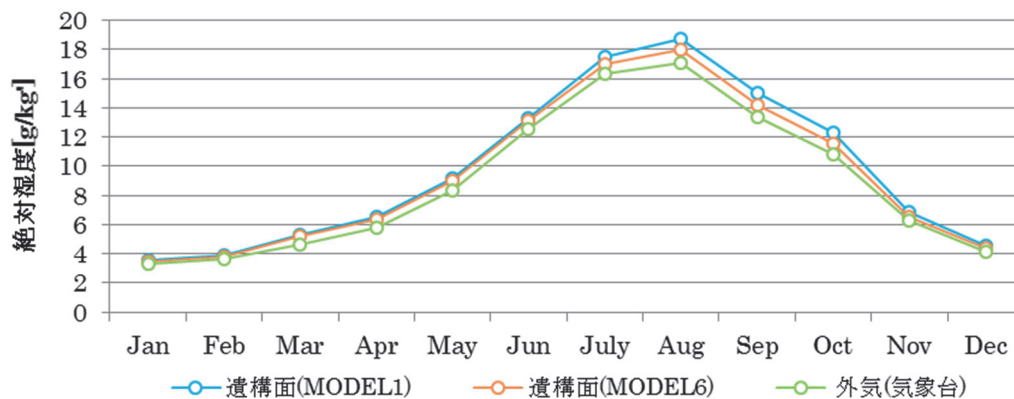


図 3.8-12 絶対湿度

南側法面における年間積算水分蒸発量を図 3.8-13 に示す。覆屋屋外からの雨水の浸透を抑制した MODEL6 では、MODEL1 と比較して水分蒸発量が大幅に減少することが示唆された。したがって、法面の土層境界で見られる硫酸カルシウムの析出を抑制する効果があるものと考えられる。また、MODEL6 において蒸発した水分の由来は、遺構面の室空気から法面表面へ吸湿されたものが大部分を占めると考えられる。

北側法面における積算水分蒸発量を図 3.8-14 に示す。北側の外部地盤は、MODEL6 も MODEL1 と同様に雨水が地盤に浸透するものの、北側法面からの積算水分蒸発量は、MODEL6 の方がわずかに多いことが示唆された。これは、10 月~12 月にかけて MODEL6 の方が室空気からの吸湿量が多いこと、また夏期において、MODEL6 の室空気の絶対湿度が MODEL1 のものよりも低いことが影響していると考えられる。

以上のことから、屋外の地表面における排水処理を適切におこなうことによって、遺構法面からの水分蒸発量を効果的に減少させ得ることが示唆された。

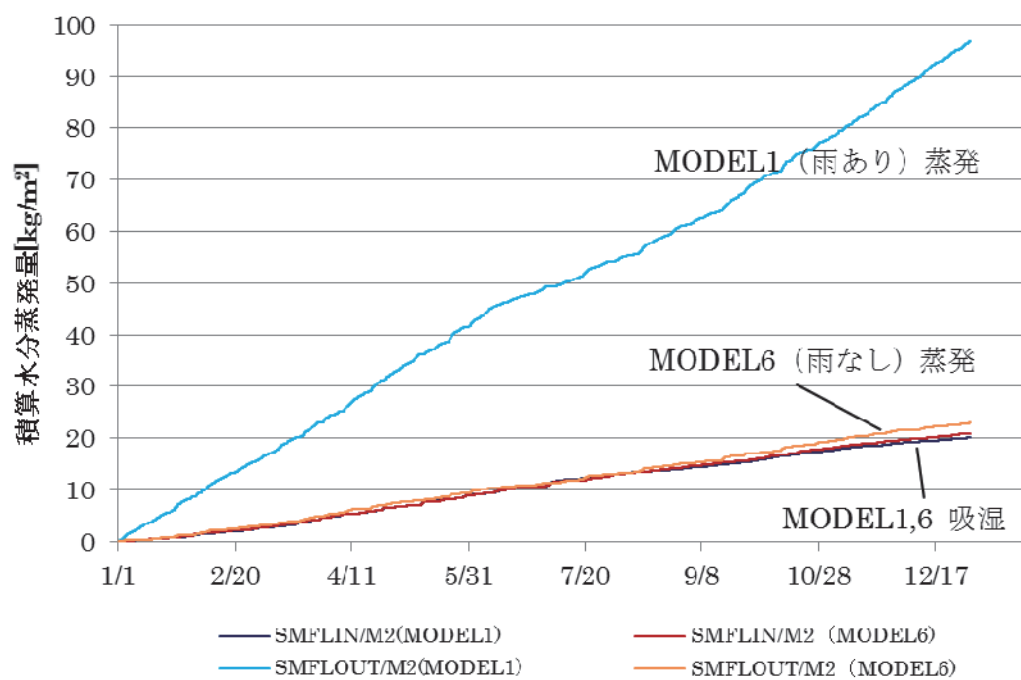


図 3.8-13 年間積算水分蒸発量 (南側法面)

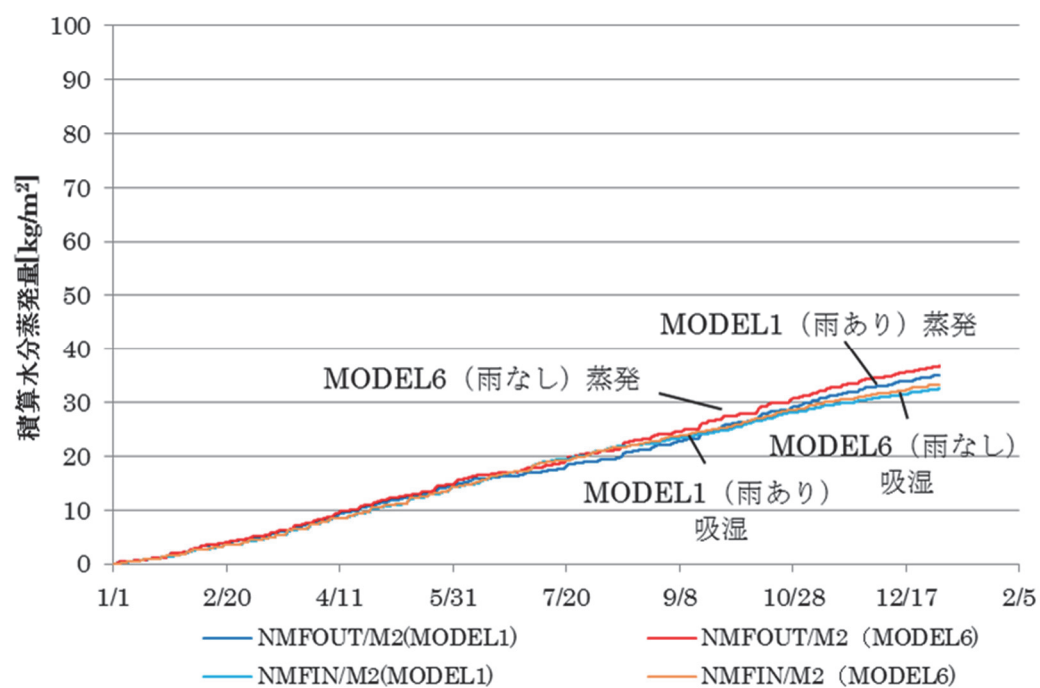


図 3.8-14 年間積算水分蒸発量 (北側法面)

5 換気回数に関する検討

(1) 解析条件

先述の通り、南棟で磚などの劣化を引き起こしている硫酸ナトリウムは、その溶解度の温度依存性が非常に高い。したがって、南棟室上部の開口部における通気によって、南棟の気温が低下することは塩析出を助長していると考えられる。ここでは、開口部での通気を抑えることを想定し、第3章第5節で示したモデルに対して、表 3.8-2 に示すように室上部と外気との換気回数を 0.2 回/h として解析をおこなった (MODEL4)。

表 3.8-2 室上部－外気の換気回数条件

	1～4 月	5～7 月	8 月	9～10 月	11 月	12 月
MODEL1	35 回/h	18 回/h	8 回/h	18 回/h	8 回/h	18 回/h
MODEL4	0.2 回/h					

(2) 解析結果および劣化に与える影響

MODEL1 と MODEL4 の遺構面における年間の温湿度の推移を図 3.8-15 から図 3.8-17 に示す。値は 1 か月毎の平均値である。外気の換気回数が少ないため、MODEL1 と比較して気温は冬季に高く、夏季は低い値を示した。また年間を通して、相対湿度、絶対湿度いずれも MODEL1 と比較して高い値を示した。MODEL4 では、夏季に相対湿度が 90%を超えるので、カビの発生や蘚苔類の生育が促進される可能性がある。そのため、生物による劣化の観点からは、夏季において換気回数を増やし、相対湿度を下げる必要があると考えられる。

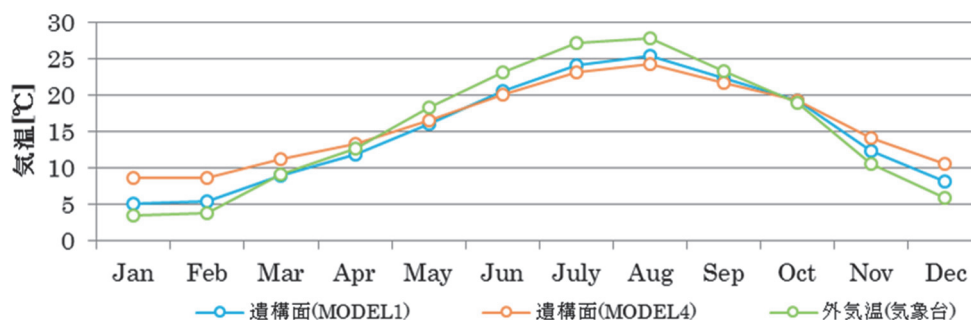


図 3.8-15 気温

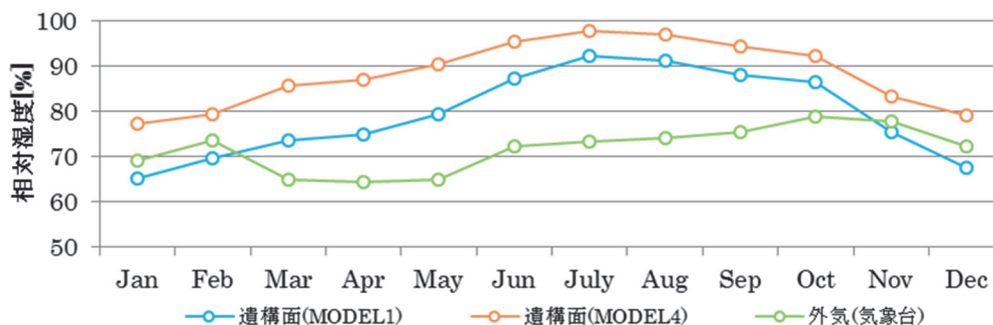


図 3.8-16 相対湿度

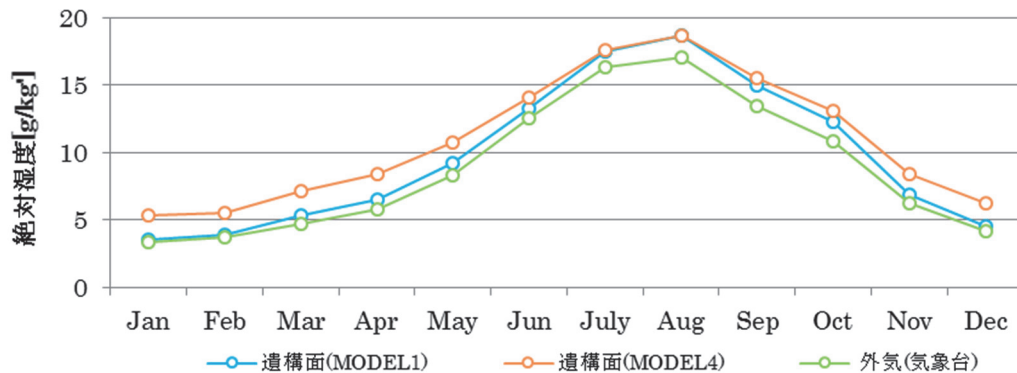


図 3.8-17 絶対湿度

図 3.8-18 に硫酸ナトリウムの相図に MODEL4 の温湿度をプロットしたものを示す。換気回数を減らすことで、遺構面の相対湿度が全体的に高くなり、Mirabilite から Thenardite への相変化は起きにくい環境へと変化することが示唆された。

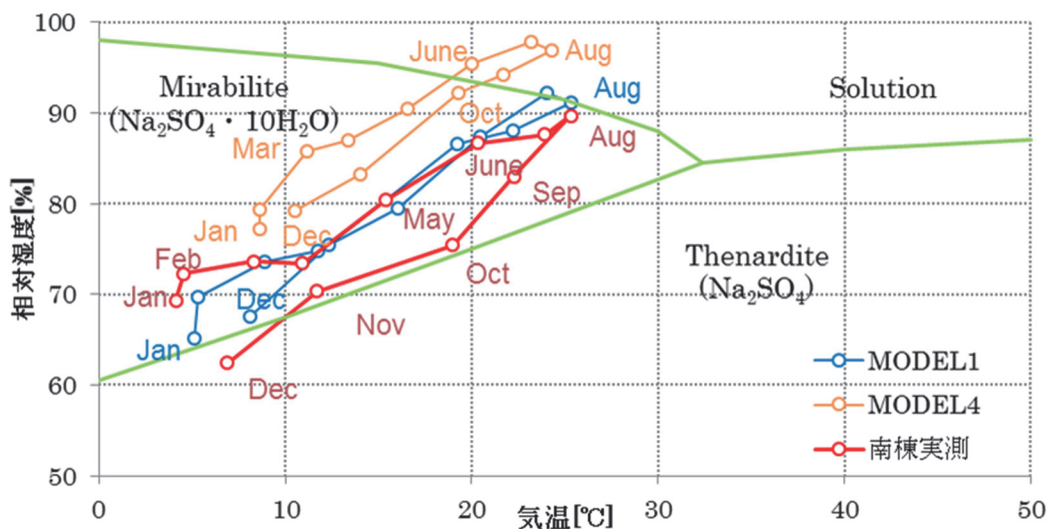


図 3.8-18 塩析出と温湿度の関係—MODEL4 の検討—

図 3.8-19 に遺構面における年間積算水分蒸発量を示す。1 月から 5 月までの水分蒸発量は MODEL4 の方がわずかに多く、これは、MODEL1 に比べて MODEL4 の方が遺構面の気温が高いことに起因すると考えられる。一方で、5 月以降は MODEL1 の水分蒸発量が増加し、年間積算値としては MODEL4 の方が少ない結果を得た。換気の抑制によって冬期の南棟館内の気温が上昇することは硫酸ナトリウムの析出を抑制する効果が期待される一方で、この時期に遺構面からの水分蒸発量が増加することで、磚などの多孔質材料内部における塩の析出深度が材料表面から内部へと移動し、多孔質材料表面の剥離の被害が一層甚大

なものとなる可能性が示唆された。硫酸ナトリウムによる多孔質材料の破壊に対する正味の効果については今後検討を要する。また図 3.8-20 は、南側法面における積算水分蒸発量を示したものである。ここでも遺構面同様に、MODEL1 と比較して MODEL4 では積算水分蒸発量は減少することが示唆された。

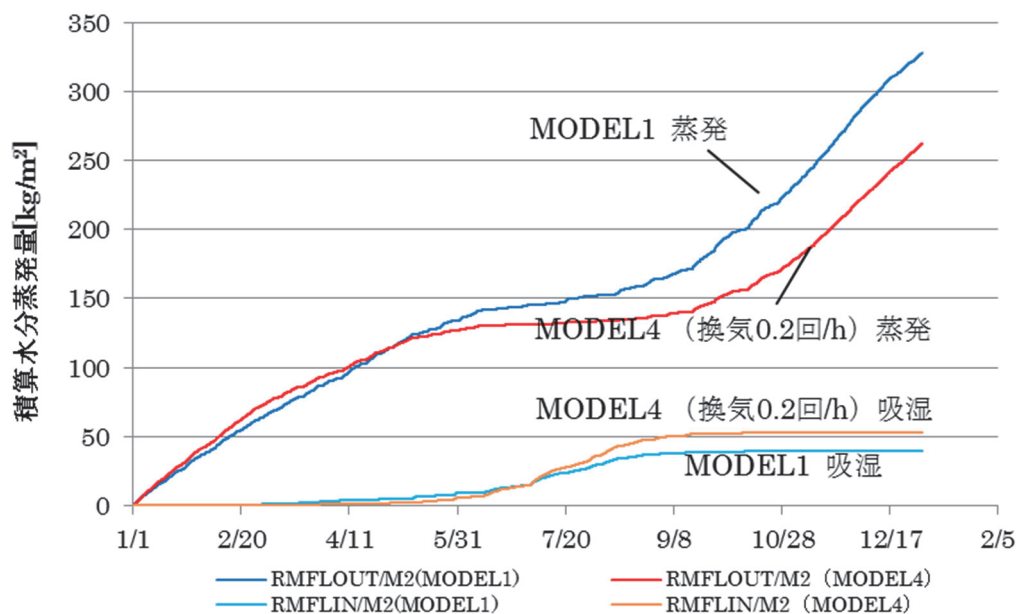


図 3.8-19 年間積算水分蒸発量（遺構面）

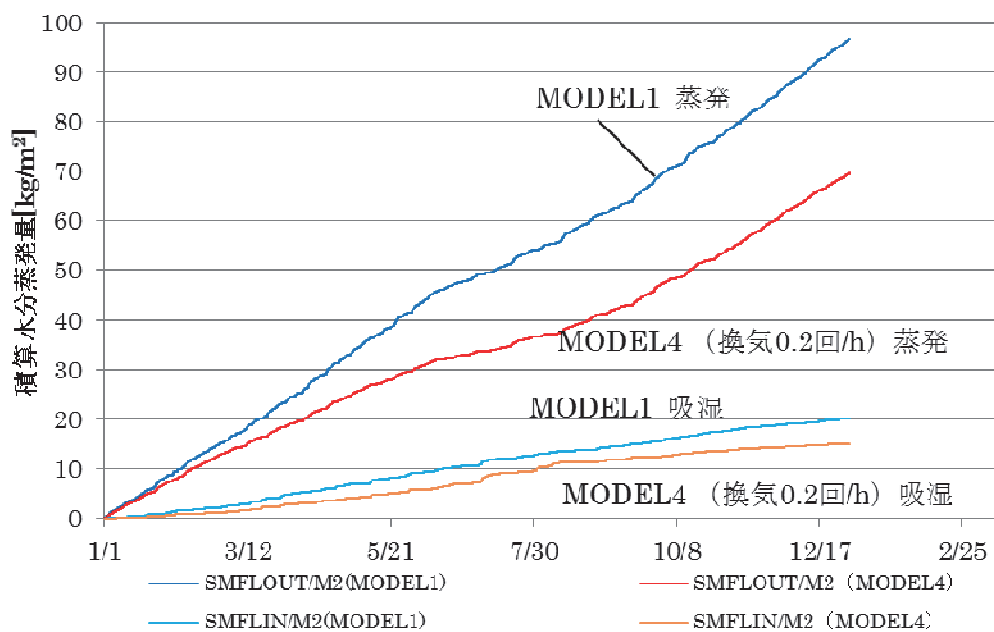


図 3.8-20 年間積算水分蒸発量（南側法面）

6 日射制御に関する検討

(1) 解析条件

開口部から遺構面や法面へと入射する日射は、遺構面や法面での水分蒸発を促進する。そこで、ここでは土壌表面からの水分蒸発量を減少させるため、日射を遮蔽した状態を想定して、第3章第5節で示したモデルに対して、開口部から入射して通路の空気へ与えていた日射量を 0 W/m^2 として解析をおこなった。このモデルを **MODEL5** とする。

(2) 解析結果および劣化に与える影響

温湿度の月平均の推移を図 3.8-21 から図 3.8-23 に示す。値は1か月毎の平均値である。夏期の温度上昇が、**MODEL1** と比較してわずかに小さく、日射を遮蔽したことに起因すると考えられる。絶対湿度は、両者でほとんど差がないため、相対湿度は **MODEL5** の方がわずかに高い値を示したと考えられる。

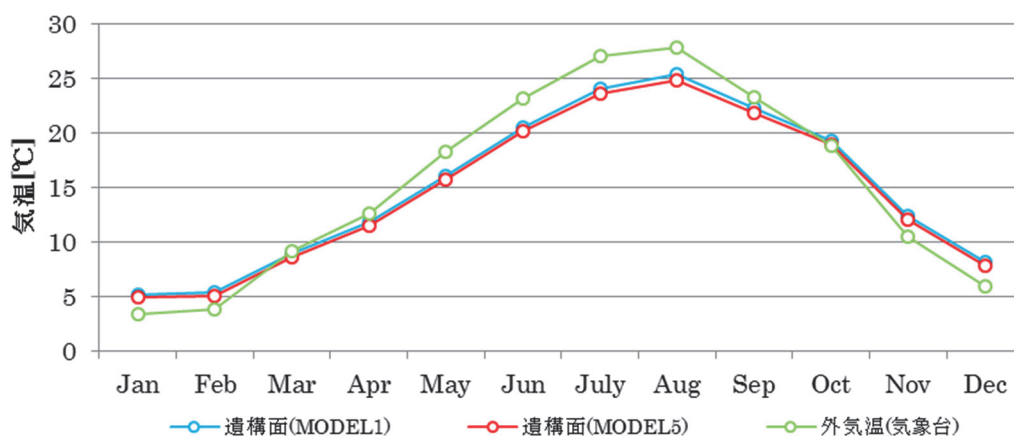


図 3.8-21 気温

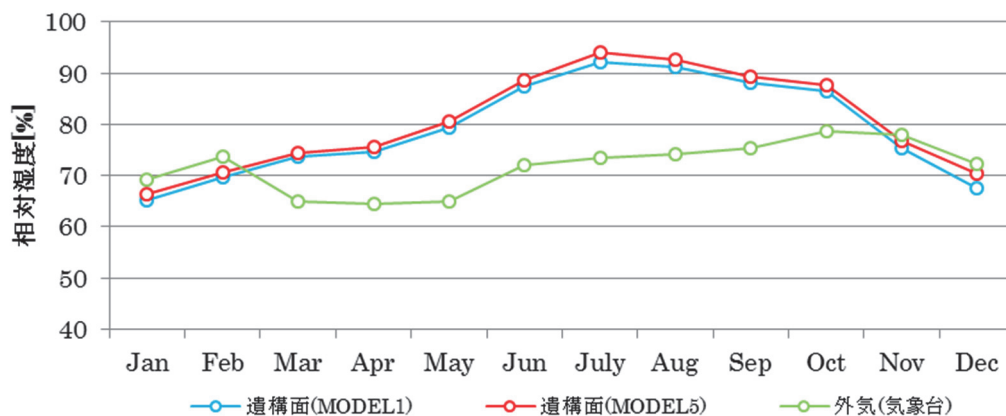


図 3.8-22 相対湿度

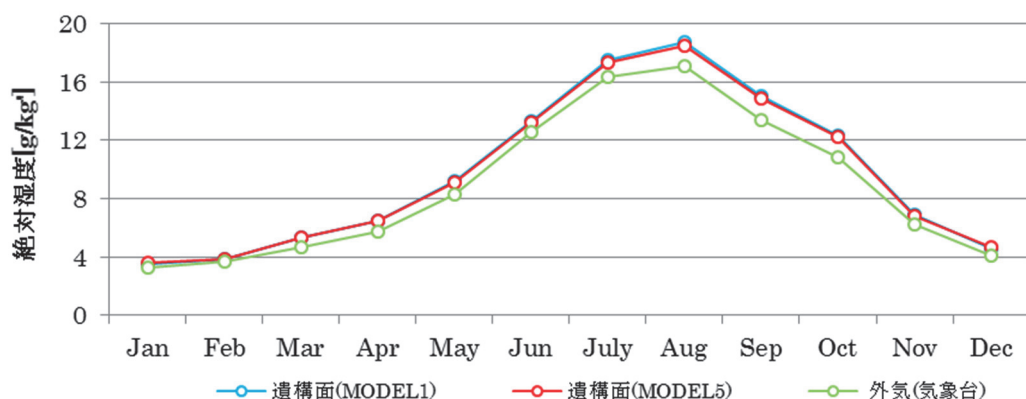


図 3.8-23 絶対湿度

遺構面と南側法面における単位面積当たりの年間積算水分蒸発量をそれぞれ図 3.8-24、図 3.8-25 に示す。両者ともに、MODEL1 と比較して MODEL5 の方が水分蒸発量は少ない値を示した。MODEL1 では、日射が遺構表面に直接あたる場合を考慮しておらず、壁体を貫流した熱は室空気へのみ与えている。すなわち、MODEL1 の結果は、実際に日射があたる遺構面と比較して、水分蒸発量を過小評価しているが、それでも MODEL5 において日射を制御することで、さらに水分蒸発量は減少することが示唆された。また蘚苔類の生育の抑制を目的として日射を遮蔽した場合、水分蒸発量を減少させ得るという水分性状の観点からも、劣化抑制に寄与すると考えられる。

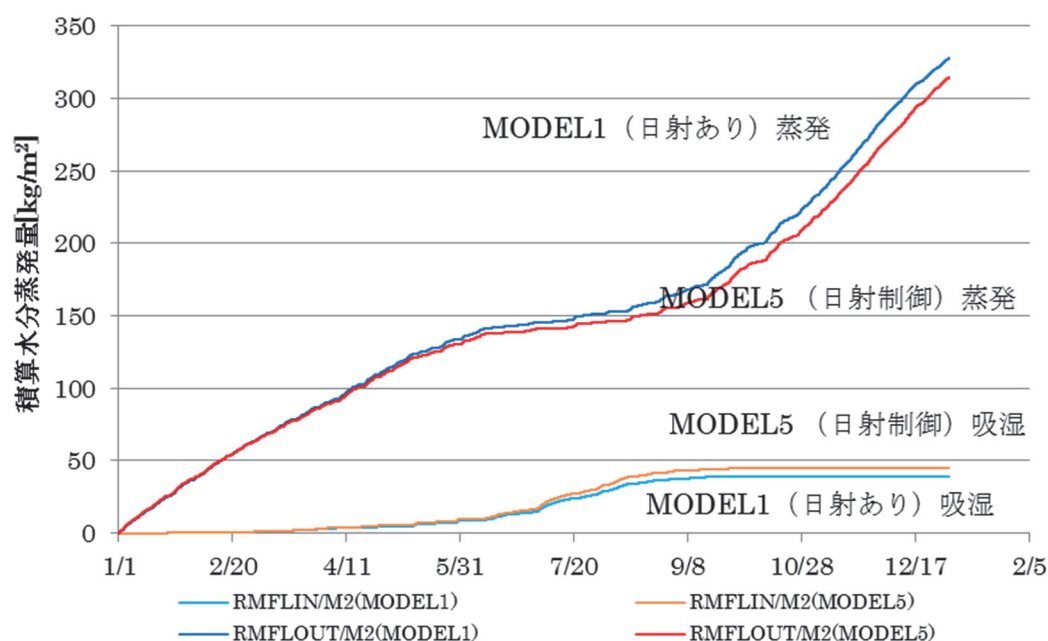


図 3.8-24 年間積算水分蒸発量（遺構面）

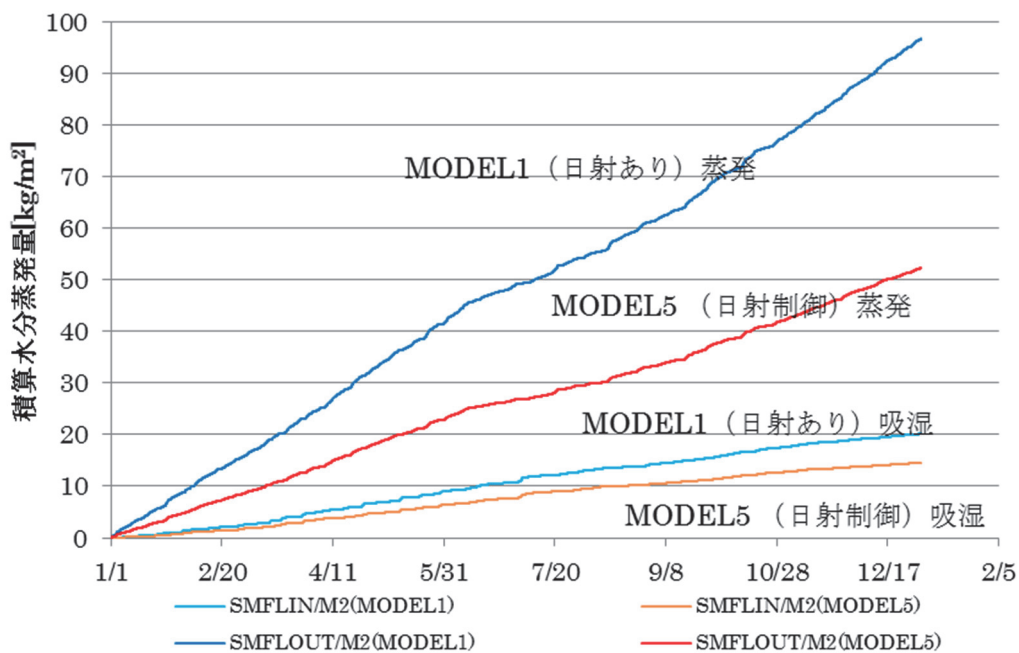


図 3.8-25 年間積算水分蒸発量（南側法面）

7 盛土層に関する検討

(1) 解析条件

地表面となる盛土層は、覆屋を建設した際に覆屋が遺構を破壊することの無いよう、遺構の養生のために設けられた客土の層である。したがって、遺構保存に適した環境を得るために、盛土に用いる土を選択することは可能である。ここでは、盛土に使用される土壌の透水性状が遺構にどのように影響するかを検討した。第3章第5節で示したモデルに対して、盛土の水分化学ポテンシャル勾配に関する液相水分伝導率 λ'_{μ} をMODEL1の100分の1とした場合をMODEL7とする。土壌の物性値は図3.8-26のようになる。

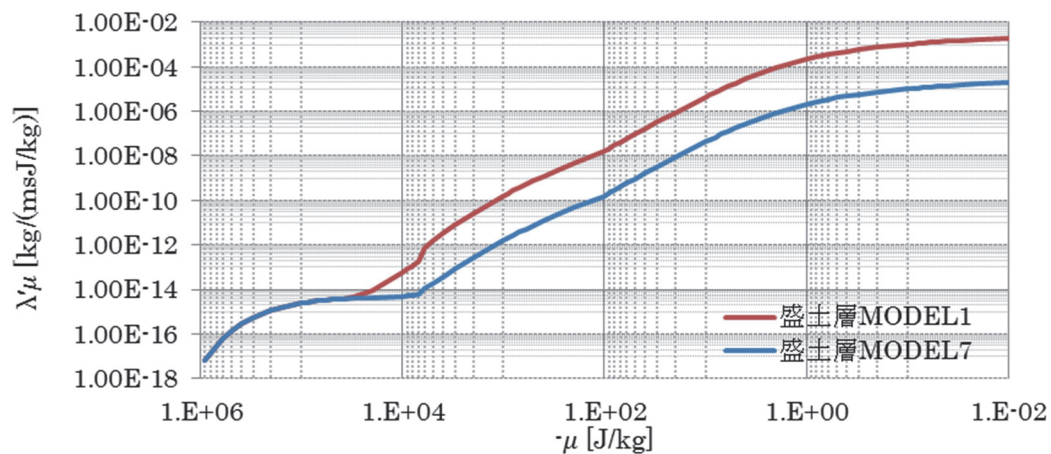


図 3.8-26 盛土層の物性値

(2) 解析結果および劣化に与える影響

温湿度の月平均の推移を図 3.8-27 から図 3.8-29 に示す。値は 1 か月毎の平均値である。気温の推移については、MODEL1 と MODEL7 の間で有意な差異は認められなかった。絶対湿度については、MODEL1 と比較して MODEL7 はわずかに低下しており、それに伴って相対湿度も MODEL7 は低い値で推移した。

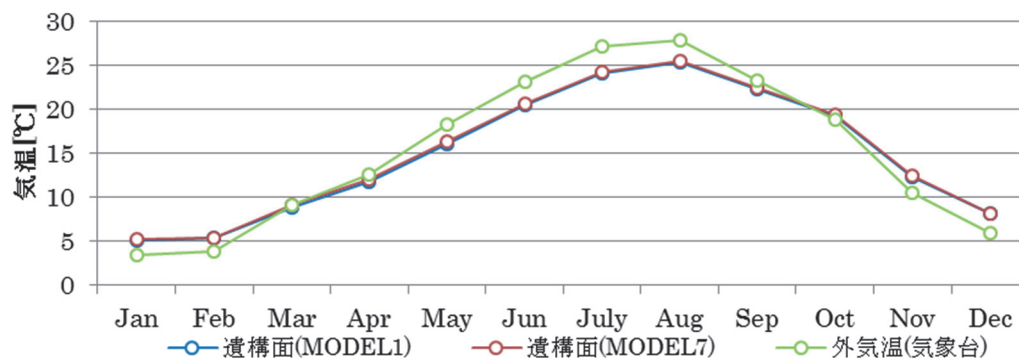


図 3.8-27 気温

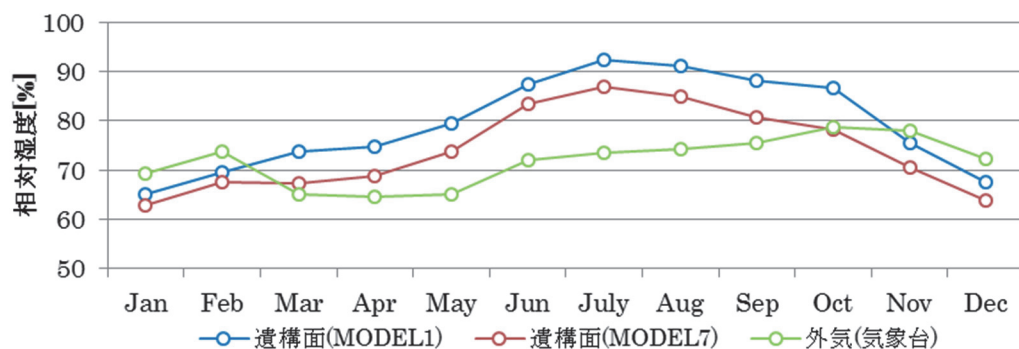


図 3.8-28 相対湿度

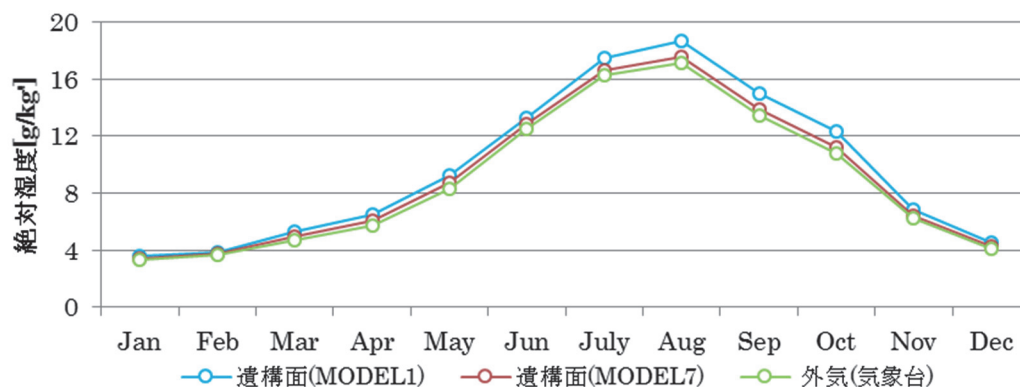


図 3.8-29 絶対湿度

遺構面および南側法面における単位面積当たりの年間積算水分蒸発量をそれぞれ図 3.8-30、図 3.8-31 に示す。遺構面、および南側法面ともに水分蒸発量は MODEL1 と比較して MODEL7 では大きく減少する結果を得た。すなわち、盛土層に水分伝導率が小さな土壌を使用することで、周辺の地盤に浸透する水分量を減少させることができるため、遺構面および法面における水分蒸発量が減少することが示唆された。

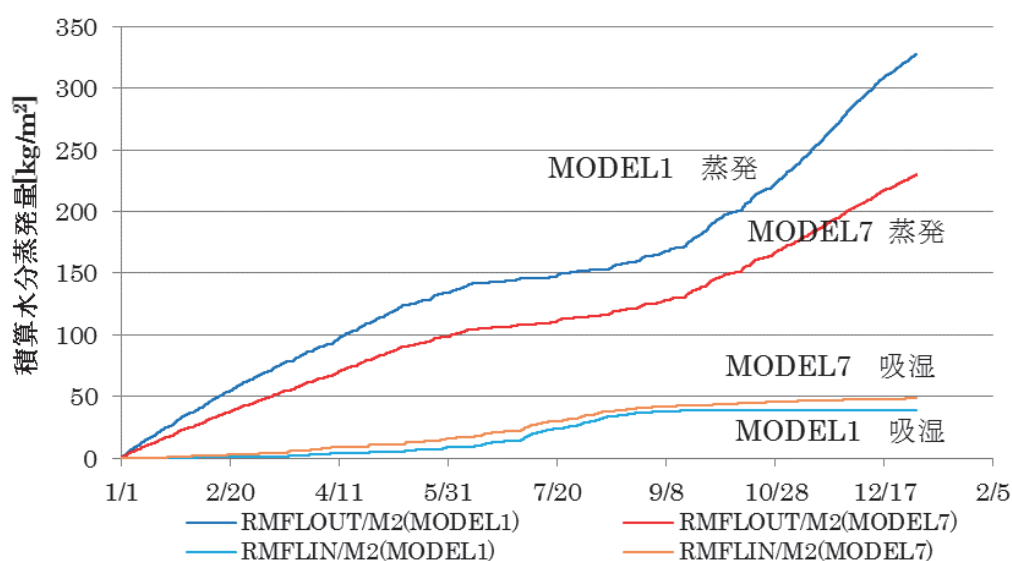


図 3.8-30 年間積算水分蒸発量（遺構面）

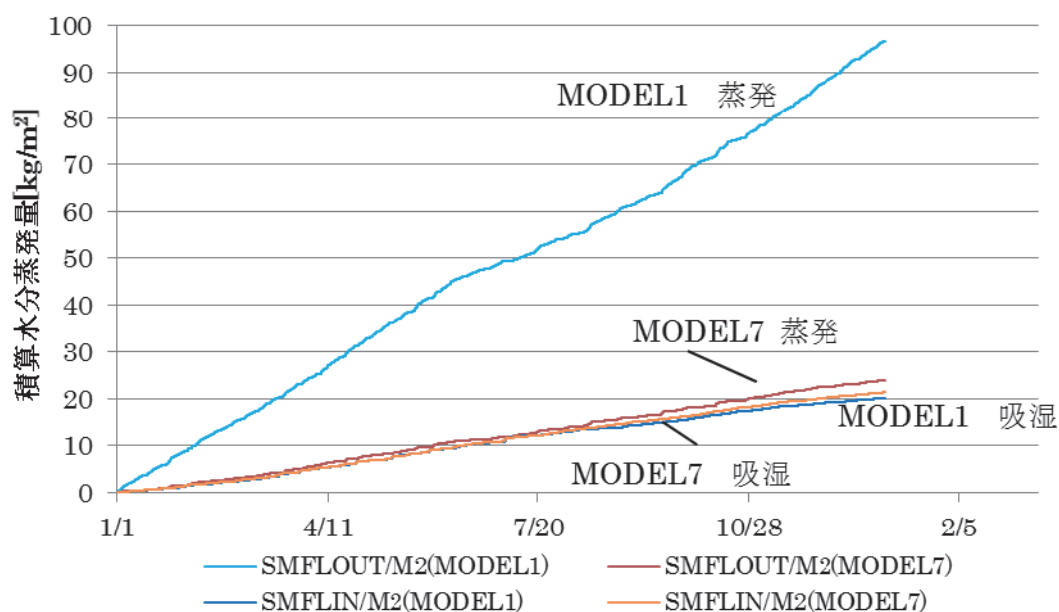


図 3.8-31 年間積算水分蒸発量（南側法面）

8 第8節のまとめ

本節では、温湿度解析モデルを用いて、1) 遺構面における水分蒸発量を減少させること、および2) 館内の気温低下を抑制すること、という2つの観点から、塩の析出を抑制し得る室内環境設計について検討した。

地下水位を低下させた場合、遺構面からの水分蒸発量を減少させることができるものの、遺構法面からの水分蒸発量は、一定の深さ以上に水位を下げなければ減少し得ないことが示唆された。

南側屋外の地表面への雨水の浸透を防ぐことにより、遺構法面からの水分蒸発量が減少する結果を得た。したがって、周辺地盤において雨水を適切に排水することによって、覆屋内部の遺構へ水分の流入を抑制でき、遺構面からの水分蒸発量を減少させ得ることが示唆された。

換気回数を抑制した場合、覆屋内部の相対湿度が上昇するため、硫酸ナトリウムの相変化、すなわち 10 水和物 (Mirabilite) から無水物 (Thenardite) への相変化を抑制し得る温湿度環境へと移行することが示唆された。また、換気回数の制御によって、遺構面における年間積算水分蒸発量は減少するが、室内の気温が上昇することによって水分蒸発量が増加する期間があると考えられる。また、夏期においては、相対湿度が 90%を超える結果を得たことから、カビや蘚苔類の生育が促進される可能性がある。したがって、季節ごとの換気計画が必要であると言える。

館内に入射する日射を完全に遮蔽した場合、遺構面からの水分蒸発量をわずかではあるが減少させ得ることが示唆された。蘚苔類の繁茂を抑制するために日射の取り込みを抑制した場合、土壌からの水分蒸発量を抑制するという効果も得られることが示唆され、遺構の劣化の進行を抑制することに寄与するものと考えられる。

地表面となる保護盛土に使用される土壌の水分移動特性が、遺構からの水分蒸発量に影響を与えることが示唆された。水分伝導率が小さい土壌を保護盛土に用いると、遺構面からの水分蒸発量を減少させ得ることが示された。

第8節の参考文献

- 8-1) D.Camuffo Microclimate for Cultural Heritage: Restoration, and Maintenance of Indoor and Outdoor Monuments Elsevier Science 2013

第9節 遺構展示館環境改善策の効果に関する検証

1 はじめに

本節では、第3章第8節で記した温湿度解析モデルによる保存環境設計のうち、南棟屋外の南側と東側地盤表面からの雨水浸透を遮断することが遺構の保存環境にもたらす効果について、遺構展示館での含水率測定などの実測調査から検証作業を実施した結果について記す。

2 南棟屋外周辺地盤表面からの雨水浸透抑制について

(1) 南棟屋外周辺地盤の防水施工について

第3章第8節で述べたように、南棟屋外南側の周辺地盤から浸透する雨水は、南棟法面からの水分蒸発、さらには塩析出に大きく影響をおよぼしていると考えられる。そこで、南棟屋外南側および東側の地盤表面に防水シートを敷設して、雨水の浸透を抑制することで南棟法面の含水率が減少するか検証作業をおこなった。防水シートは2016年6月下旬に敷設した。防水シートを敷設した範囲を図3.9-1に、敷設状況を図3.9-2および3.9-3に示す。

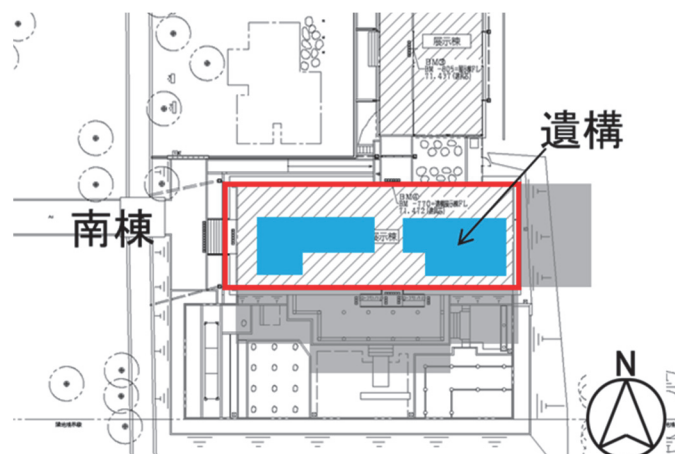


図 3.9-1 南棟屋外地盤の防水シート敷設範囲（灰色のトーンの範囲）



図 3.9-2 防水シート敷設状況（南東から）



図 3.9-3 防水シート敷設状況（北東から）

第3章第3節2(3)で記した南棟法面の土壌含水率測定箇所(図3.3-3参照)における、防水シート敷設前後の期間の土壌含水率測定結果を図3.9-4から図3.9-6に示す。

図3.9-4に示した南棟東側法面において、埋戻し土一遺構面層境界直上の土壌含水率は概

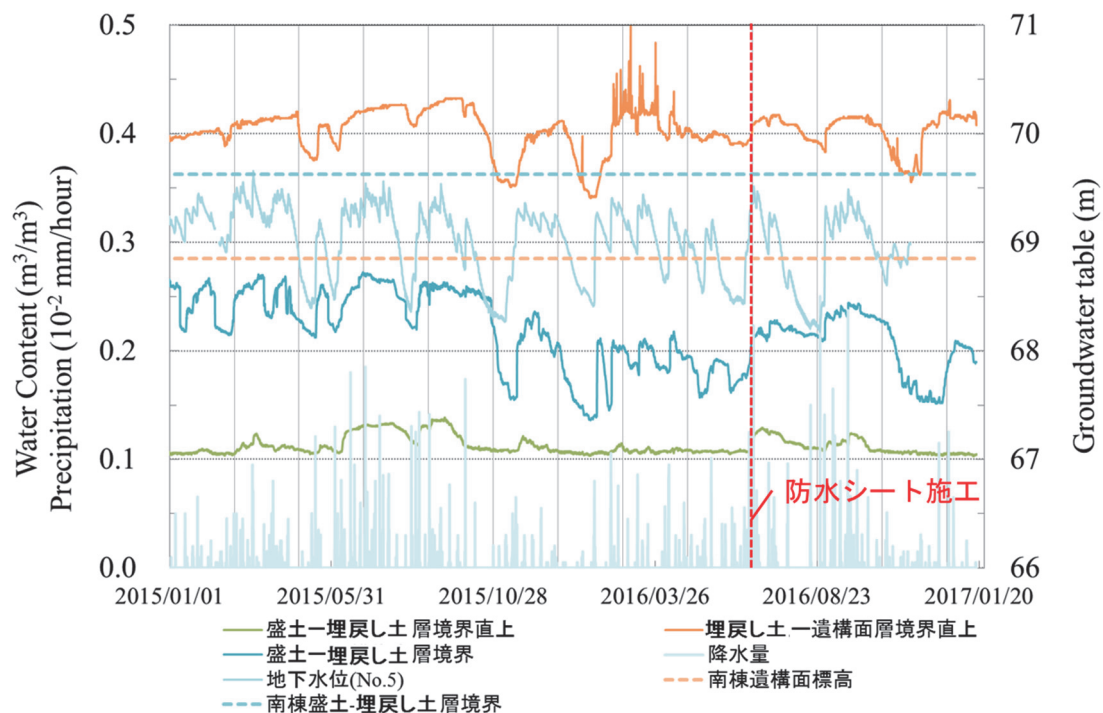


図 3.9-4 南棟東側法面の土壌含水率

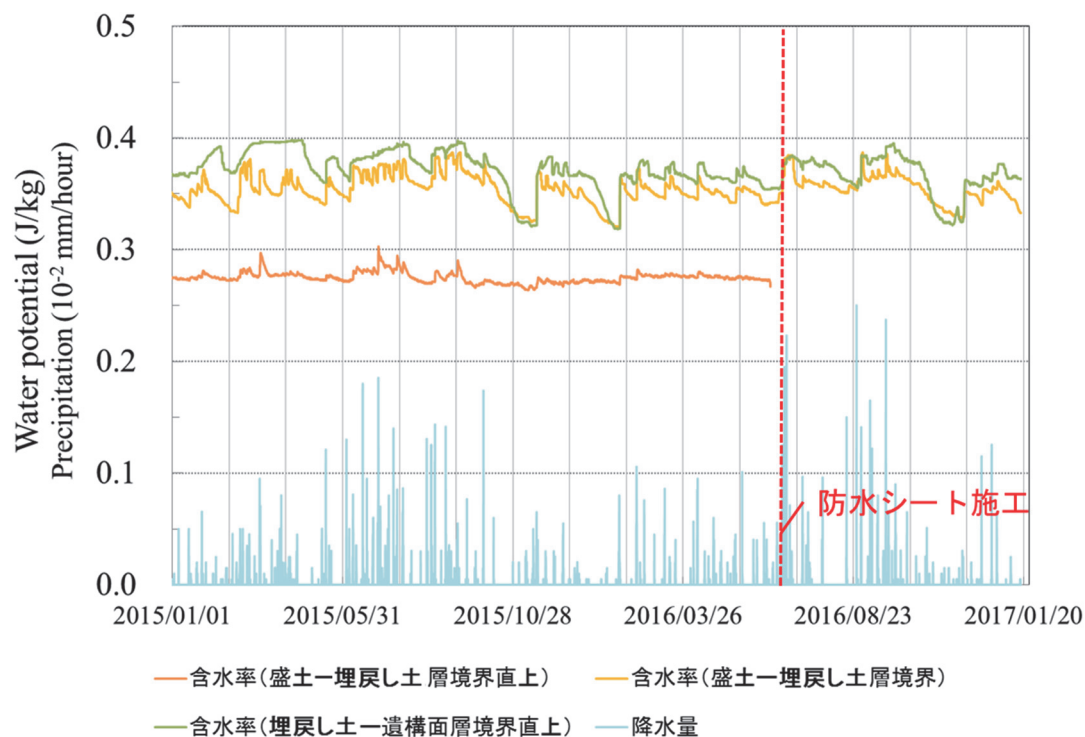


図 3.9-5 南棟南側法面の土壌含水率

ね常に高い含水状態にあるが、これは先述の通り地下水の浸み出しの影響を受けた結果と考えられる。一方、雨水由来の水の浸透が大きく影響をおよぼしていると考えられる盛土一埋戻し土層境界に着目すると、防水シート施工前と比較して施工後では降雨時の土壤含水率の増加が比較的緩慢となっており、含水率の平均値が減少したように思われる。図 3.9-5 に示した南側法面の盛土一埋戻し土層境界では、防水シート施工の前後において降雨時の含水率の変化幅などにおいて明確な差異は認められなかった。しかし、同じ南側法面の含水率について 2016 年以降のみの測定結果を示した図 3.9-6 からは、防水シート施工後では盛土一埋戻し土層境界の土壤含水率が降雨時に一時的に増加するものの、施工前と比較して速やかに減少する傾向が示された。したがって、防水シートを施工したものの、その施工範囲が若干狭かったために引き続き雨水が浸透し続けているものの、その浸透量を減じること成功しており、防水シートの施工の効果が認められたものと考えられる。

防水シート施工前後において、降雨時に南棟南側法面に雨水が浸透する様子を図 3.9-7、3.9-8 に示す。なお、それぞれの写真撮影時を図 3.9-6 内に示した。

図 3.9-6 に示した盛土一埋戻し土層境界の含水率では、2016 年 6 月 30 日と 12 月 3 日では大きな差異は認められないが、法面において濡れ色を呈する領域、すなわち雨水の浸透が生じた領域は、防水シート施工後において明確に縮小していることが定点観察から認められた。防水シート施工後では、盛土一埋戻し土層境界の限定された箇所のみから雨水の浸透が認められており、そのいわば水みちとなっている箇所において含水率の測定を実施していることから、上記の含水率測定結果からは防水シート施工の効果は明確には認められなかったものと考えられる。したがって、ここでは防水シートの施工による雨水浸透量の変化

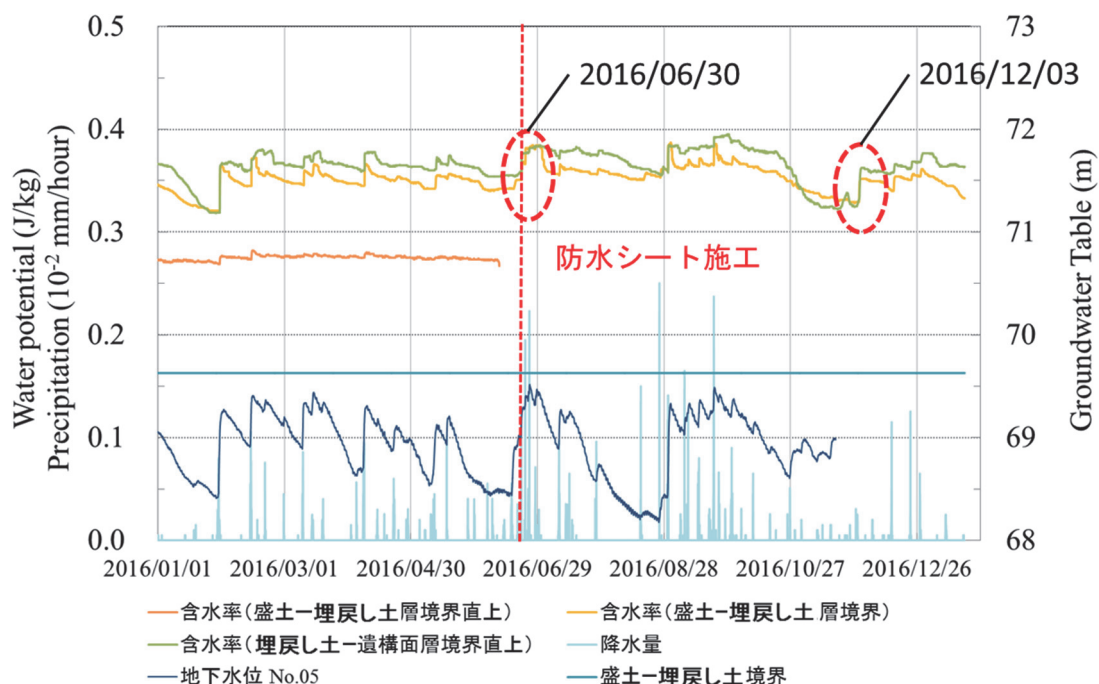


図 3.9-6 南棟南側法面の土壤含水率（期間拡大）

を定量的に評価するには至らなかったものの、図 3.9-7 と図 3.9-8 の比較から、法面全体の含水率は防水シートの施工によって大きく減少したものと推察され、層境界における塩析出や蘚苔類の繁茂を抑制する効果が期待されるものと考えられる。



図 3.9-7 降雨時における南棟南側法面の雨水浸透領域（2016 年 6 月 30 日）



図 3.9-8 降雨時における南棟南側法面の雨水浸透領域（2016 年 12 月 3 日）

第4章 まとめと今後の展望

以前から遺構の劣化などが確認され、遺構露出展示の在り方について問題視されてきたが具体的な対応については実施されていなかった。そこで、平城宮跡遺構展示館を対象として、その環境改善を図るため平成21年から遺構の劣化状態調査や環境調査などの各調査が実施されてきた。文化庁では平成23年度に「平城宮跡遺構展示館の露出展示改善に関する検討委員会」を立ち上げて、上記の調査結果について検討するとともに、遺構展示館の展示環境を改善する方法等を本格的に検討してきた。本章では第4章で詳述した調査結果と露出展示の問題点、課題について要点の整理をおこなう。

1 露出展示によって生じる遺構の変化

土中に埋もれていた遺構を露出展示することで長期間大気に曝した場合、遺構表面の熱環境、水分環境は埋蔵されていた時の環境とは大きく異なるものへと変化する。その変化にともない、遺構表面にも様々な変化が生じることとなる。ここでは露出展示後の遺構表面において一般に見られる状態の変化について概説する。

- 一般に土壌は熱伝導、水分伝導において抵抗となるため、埋蔵環境下においては遺構を覆う土壌によって、遺構に対して外界気象がおよぼす影響が大きく緩和される。しかし、露出展示によって遺構面が大気と接するようになることで、外界気象が遺構の熱、水分環境に対して大きく影響をおよぼすこととなり、遺構面の温度、含水状態は日周期、年周期いずれの変化においても振幅が大きくなる。土壌で構成される遺構の場合、土壌の含水状態の振幅が大きくなることで、過度の乾燥が進行した結果、クラックが生じる場合や、さらには鉛直面などでは土の塑性が失われ崩落に至ることがある。
- 覆屋を設けて露出展示した場合、遺構面における年間の正味の水分移動は、一般に遺構面からの水分蒸発が大きく卓越する。特に外気の相対湿度、気温ともに低下する冬季は遺構面からは概ね水分蒸発のみが生じることになるため、土中水に溶存していた成分が塩として遺構面表面近傍に析出し、遺構表面の汚損、さらには表面の粉状化や剥離などの物理的な破壊を引き起こすことがある。
- 上記と関連して、外気温度と湿度が低下する冬季においては、遺構面からの水分蒸発が促進されるのみならず、硫酸ナトリウム、炭酸ナトリウムなど溶解度の温度依存性が大きな塩の場合は、気温の低下によって急激に溶解度が低下した結果、遺構面において塩の析出が生じて遺構面の破壊が引き起こされる。
- 発掘以前の状態において、遺構面と地下水位が同等、あるいは遺構面の方が地下水位よりも下方に位置していた場合、遺構面は還元的な環境にあることが多い。ところが地下水を排出して発掘をおこなうと、酸化剤である酸素が遺構面に供給されることで、遺構

面は急激に酸化的な環境へと移行して、青灰色を呈していた土壌が褐色へ変色する。これらの発色は、いずれも土壌中に含まれる鉄によるもので、鉄の酸化還元状態の変化が土色の変化を引き起こしたものである。

- 遺構面付近に地下水位がある場合、周辺地盤から遺構土壌へ地下水由来の水分が供給されており、これらの供給を断つことは極めて困難である。むしろ、土壌で構成される遺構では地下水由来の水分供給があることで一定の含水状態が維持されて土の塑性が保たれ、遺構面の形状が維持され得ることから、遺構面からの水分蒸発を促進することは好ましくはない。したがって、遺構面はその形状を維持する一方で、常に一定量の水分を含むことから、容易にカビが繁茂する環境にある。カビの繁茂は観覧者の健康被害を引き起こし得るものであることから、決して看過できるものではない。しかし、カビの繁茂は遺構面の汚損こそ引き起こしているが、遺構面の粉状化や崩落といった、物理的な劣化を引き起こしているとは考えにくく、遺構面に与える影響については慎重に検討すべきと考える。
- 上記と関連して、遺構面が一定の含水状態を維持している場合、遺構面に蘚苔類が繁茂する例がしばしば見られる。蘚苔類が繁茂する主な条件には水分条件、温度条件、および照度条件がある。これらのうち遺構面の水分条件と温度条件については、その制御が困難である。一方で、照度については開口部の配置を検討したり開口部にブラインドを併用する、あるいは照明設備などの工夫で制御が可能であるので、遺構面での蘚苔類の繁茂を抑制するためには照度の制御が有効であると考えられる。

2 遺構の露出展示保存を検討する際に実施すべき調査項目

乾燥や塩析出、あるいは蘚苔類の繁茂などによって引き起こされる遺構の劣化に対しては、遺構における熱と水分の移動が大きく影響をおよぼす。そして、それらの移動方向、移動量は外界の気象条件と、遺構およびその周辺地盤を構成する材料の熱と水分の移動性状によって決定される。そこで、遺構の露出展示を実施した場合に生じる遺構の劣化現象をあらかじめ予測し、その発生、進行を抑制するための環境制御をおこなうために実施すべき調査項目について以下に列記する。

• 外界の気象条件

これまで述べたように、遺構の劣化は遺構における熱と水分の移動と、その結果形成される遺構の温熱環境、水分環境に大きく影響されることから、遺構における熱と水分の収支に関する検討が極めて重要である。遺構周辺地盤に対する熱と水分の供給において、日射と降雨は大きく影響しており、またさらに遺構面からの熱と水分の移動量、移動方向は外界気象条件によって支配されることから、遺構の保存を検討する上で不可欠の情報である。測定すべき一般的な項目は外気の温度と相対湿度、水平面全天日射量、降水量、大気圧、および風向風速である。これらの気象条件は周辺の地形などの影響を受けることから、遺跡現地にて

実測することが望ましいが、実施が困難な場合は気象庁が提供する気象データ (<http://www.data.jma.go.jp/obd/stats/etrn/>) を利用することも可能である。

- 覆屋内の温湿度

覆屋をとまなう遺構の場合、遺構表面が接する覆屋内空気は遺構表面における熱、水分移動を支配するだけではなく、塩の析出や遺構土壌の含水状態に対しても大きく影響をおよぼす。特に塩については、先述のように塩の種類によって析出し得る相対湿度が異なることや、硫酸ナトリウムのように一部の塩は溶解度が雰囲気温度に大きく依存することから、その消長を検討する上で、覆屋内の温湿度に関する情報は不可欠のものである。

- 土壌の含水状態

土壌のようにセンサーを挿入可能な材料の場合は、土壌水分計や水ポテンシャルセンサーを土中に設置して含水状態の実測調査を実施する。遺構土壌の含水率あるいは水分化学ポテンシャルが増減を繰り返して一定の含水状態を維持するものであるのか、あるいは減少し続けて乾燥状態へ移行し続けるのかなど評価をおこなう。また、外界気象条件で実測する降雨に対して遺構土壌の含水率が応答を示した場合、覆屋外の地表から浸透した雨水が遺構面にも浸透していると判断され得ることから、遺構土壌への水分の供給源を推定することも可能となる。

一方、石材などのように針状の水分センサーを挿入することが困難な場合は、材料の含水状態を測定する1つの調査方法として、赤外線水分計による非接触の測定方法が挙げられる。なお、この場合は含水状態の連続測定は不可能であり、調査実施時の瞬間値のみのデータとなることから、遺構周辺地盤における水分移動について精緻な議論をすることは困難である。

- ボーリング調査による土層構造の把握と地下水の調査

土壌はその粒度分布や、互いの土粒子の結びつき、すなわち土壌の構造によって透水性状が異なることから、可能な限り遺構周辺の複数箇所でボーリング調査を実施して遺構周辺地盤の土層構造を推定することが重要である。また、ボーリング調査によって遺構面の深度付近に地下水面が検出され、地下水位の変動が遺構面土壌の含水状態に影響をおよぼし得ると推定される場合では、地下水位の測定も実施することが望ましい。特に遺構面よりも上方で地下水位が変動する場合は、遺構面を露出展示した場合、遺構面に常に水分が供給されて地下水に溶存する成分が遺構面において塩として析出したり、あるいは蘚苔類やカビなどの繁茂が生じる危険性が高いと考えられる。一般に地下水位を下げ、低い位置で維持することは困難をとまなうこと、露出展示される遺構周辺に有機質遺物が埋蔵されている場合には、地下水位が低下することで、それらの埋蔵環境が悪化する可能性があることから、遺構露出展示のために地下水位を低下させるという手法については慎重な検討を要すると

考えられる。

また、繰り返し述べたように塩析出による遺構の劣化は、多くの露出展示遺構でしばしば問題となるもので、その析出速度、析出する塩の種類については遺構面からの水分蒸発速度に加え、そもそも土中水中に含まれる各種のイオン濃度が大きく影響をおよぼす。したがって、可能であれば季節毎の実施を目安として、イオンクロマトグラフィなどを用いて地下水中に溶存するイオンの定量分析を実施することが望ましい。

- 遺構を構成する多孔質材料の熱、水分移動性状に関する物性値の把握

遺構面の含水状態や温度を推定する上で、上記の環境条件に関する実測調査とともに、遺構を構成する材料の熱、水分移動性状について定量的に把握することが重要である。熱、水分の移動性状は多孔質材料の微視的な構造に大きく影響されるものであるため、土壌の場合では不攪乱試料を採取して、試験に供することが望ましい。

3 遺構保護施設としての覆屋の設計に関する検討項目

- 雨水の浸入に対する検討

多くの場合、覆屋内部で露出展示される遺構面は、覆屋周辺の地表面よりも下方に位置する。したがって、覆屋外の地表面から浸透した雨水は遺構面に供給され、そこで蒸発し、その際に塩析出が生じることで遺構の劣化を引き起こしたり、蘚苔類やカビの繁殖を引き起こすことなどが考えられる。覆屋の庇や覆屋周辺の地表面に設けた難透水層（たとえば舗装など）によって雨水が遮蔽される範囲が、遺構に対して影響をおよぼさない十分なものであるのか検討する。

- 排水設計について

遺構展示館では覆屋屋根から樋を經由して排水会所に集められた雨水が、会所の不具合のために漏れ出し、遺構面に浸入している箇所が発見された。このように設備の不具合や老朽化によって排水されるべき水が遺構面へ供給されることの無いよう排水路を設計するとともに、排水会所などの設備については継続的なメンテナンスが必要である。

- 覆屋内部の温熱環境設計について

覆屋内の温熱環境は、遺構を構成する材料表面と空気の間での熱、水分移動を支配するもので、遺構の保存環境においてきわめて重要な要素である。たとえば、材料表面において結露の発生と水分蒸発を繰り返した場合、土や多孔質な石材などは乾湿繰り返しによるストレスを受けて劣化が生じることが考えられる。あるいは、先述した通り、土や石材などの多孔質材料から水分が蒸発し続けた場合、材料表面近傍から塩が析出することで材料表層の剥離や粉状化という、きわめて甚大な劣化が生じている例がしばしば認められる。さらには、高温多湿な環境では遺構面にカビが発生する例も認められ、そ

れによって誘発される観覧者への健康被害も決して看過することができない問題である。一般に相対湿度が高い環境では、塩類の析出は抑制されるが、一方でカビは容易に発生することから、両者の発生を抑制し得る温熱環境の実現は困難で、今後さらなる検討を要する。

塩析出による遺構の劣化は極めて普遍的な問題である。第3章で述べたように、塩が析出する相対湿度に閾値があることや、溶解度が温度によって変化する塩が多いことなどから、覆屋内の温熱環境は遺構面での塩析出に対して大きく影響をおよぼす。したがって、周辺地盤中の水の成分分析結果から析出する塩を予測し、あるいは既に塩析出が認められる場合には塩の分析をおこない、塩の析出を抑制する温熱環境を検討することが重要である。覆屋内の温熱環境に対しては、空調設備の有無はもちろんのこと、覆屋内空気の換気量（漏気量）や壁体の断熱性などが大きく影響をおよぼす。特に換気については、外気の温湿度が季節変動を示すことから、季節によって覆屋内の温熱環境、すなわち遺構劣化の発生、進行におよぼす影響が大きく変化するため、季節ごとに換気の運用方法を検討する必要があると考えられる。

- 照度の制御について

遺構表面での蘚苔類の繁茂に関しては材料の含水状態、温度、照度が影響をおよぼすと考えられる。遺構の含水状態については制御が困難であるのに対して、温度、特に照度は比較的制御が容易である。たとえば開口部を設置すると、遺構面に日射が供給されることになり、遺構面で蘚苔類の発生、生育を引き起こしてしまう。開口部の設置について慎重に検討するとともに、ブラインドなどを併用して照度の制御を可能とすることが好ましいと考えられる。また、照明設備についても常時点灯するのではなく、人感センサーを使用することによって照度の積算量を抑え、観覧に適した照度を確保しつつ蘚苔類の発生、生育を抑制する照度の制御をおこなうことが好ましいと考えられる。

4 今後の展望

本検討会は3ヵ年の事業の中で、1) 遺構で生じる劣化現象とその発生、進行を助長する覆屋の問題点の抽出、2) 遺構展示館内の温熱環境と遺構土壌の水分移動に関してモデル化をおこない、解析により塩析出を中心に劣化の進行を抑制する方策を検討し、さらに3) 提案した方策のいくつかについて、遺構展示館現地においてその効果の検証作業を実施している。この検証作業については、未だ作業の途に就いたばかりであり、今後相応の期間にわたり環境調査を継続する必要がある。

以上の結果をもって平城宮跡遺構展示館については、当面、遺構の露出展示を継続することとした。今回の調査研究による改善策を基本として、5年程度を目途に、引き続き観測のうえデータ収集を実施し、今後の方針については、収集したデータを元に改めて検討会を開催して検討する。

平城宮跡遺構展示館の露出展示改善に関する 検討委員会設置要項

平成24年 1月23日
文化財部長決定

1. 目 的

本委員会は、平城宮跡遺構展示館の露出展示改善にあたり、専門的な事項の検討を実施するために設置する。

2. 構 成

- (1) 本委員会は、別紙の学識経験者等で構成する。ただし、特に必要がある場合には臨時委員を置くことができる。
- (2) 本委員会には委員長を置く。
- (3) 委員長は委員の互選によって選出する。

3. 検討事項

- (1) 遺構展示館の露出展示調査に関する事項
- (2) 遺構展示館の露出展示改善の検討に関する事項
- (3) 遺構展示館の露出展示における当面の管理方法に関する事項
- (4) その他

4. 庶 務

- (1) 本委員会に関する庶務は、文化財部記念物課において処理する。

5. そ の 他

- (1) 前各号に定めるもののほか、本委員会の運営に関し必要な事項は委員の意見を聞いて委員長が定める。
- (2) 本委員会は必要に応じ、関係機関の職員その他関係者の出席を求めることができる。