

# 博 士 論 文

---

( 2016年 11月 18日 提出)

伝統技能で施工される土壁 (建築材料)

---

の熱湿気性能評価と利用に関する研究

---

申請者氏名 横林 修造



大阪工業大学大学院

# 目次

第1章 序論 .....	1
1-1 はじめに.....	1
1-2 従来の研究.....	3
1-3 本研究の目的と概要.....	4
第2章 伝統技能継承を取り巻く現状.....	8
2-1 はじめに.....	8
2-2 技能検定合格者数の推移.....	8
2-2-1 調査方法.....	8
2-2-2 技能検定.....	8
2-2-3 技能検定の系統分類.....	10
2-2-4 技能検定申請者・合格者数.....	11
2-3 伝統技能継承機関（職業能力開発施設）の変遷.....	14
2-3-1 調査方法.....	14
2-3-2 職業能力開発施設.....	14
2-3-3 職業能力開発施設の系統分類.....	16
2-3-4 職業能力開発施設の変遷.....	17
2-3-5 職業能力開発基本計画の策定.....	19
2-4 第2章のまとめ.....	22
第3章 左官技能で施工された建材の熱湿気物性測定.....	25
3-1 はじめに.....	25
3-2 中塗り土の物性値測定.....	25
3-2-1 試験体.....	25
3-2-2 平衡含水率測定.....	29
3-2-2-1 測定方法.....	29
3-2-2-2 測定結果.....	30
3-2-2-3 限界含水率測定.....	31
3-2-2-4 平衡含水率曲線.....	32
3-2-3 湿気伝導率測定.....	33
3-2-3-1 測定方法.....	33
3-2-3-2 測定結果.....	34
3-2-3-3 湿気伝導率の湿度依存性.....	38

3-2-3-4	既往研究と比較した中塗り土の湿気伝導率	39
3-2-4	熱伝導率測定	40
3-2-4-1	測定方法	40
3-2-4-2	測定結果	42
3-2-4-3	熱伝導率の温湿度依存性	43
3-2-5	まとめ	46
3-3	珪藻土の物性値測定	46
3-3-1	試験体	46
3-3-2	平衡含水率測定	48
3-3-2-1	測定方法	48
3-3-2-2	測定結果と平衡含水率曲線	48
3-3-3	湿気伝導率測定	49
3-3-3-1	測定方法	49
3-3-3-2	測定結果	51
3-3-3-3	湿気伝導率の湿度依存性	52
3-3-4	熱伝導率測定	52
3-3-4-1	測定方法	52
3-3-4-2	測定結果と考察（温湿度依存性）	53
3-3-5	数値解析による吸放湿性能の評価	55
3-3-5-1	解析条件	55
3-3-5-2	解析結果と考察	56
3-3-6	まとめ	57
3-4	第3章のまとめ	57

## 第4章 伝統技能で施工された土壁の熱湿気性状

4-1	はじめに	60
4-2	伝統技能で施工された土壁（木舞、貫入り）の熱物性測定	61
4-2-1	試験体	61
4-2-1-1	試験体施工	61
4-2-1-2	試験体収縮率	65
4-2-2	熱コンダクタンス・熱伝導率測定	70
4-2-2-1	測定方法と結果	70
4-2-2-2	試験体温度分布の考察	74
4-2-2-3	混合材モデルの考察	75
4-2-3	まとめ	75
4-3	中塗り土の乾燥収縮ひびわれが熱湿気物性へ及ぼす影響	76
4-3-1	現場施工された中塗り土の調査	76

4-3-2	数値解析による吸放湿性能の評価 .....	79
4-3-2-1	解析条件 .....	79
4-3-2-2	解析結果と評価 .....	81
4-3-3	まとめ .....	83
4-4	第4章のまとめ .....	83
<b>第5章</b>	<b>実施工した土壁が室内環境に及ぼす影響</b> .....	<b>85</b>
5-1	はじめに .....	85
5-2	調和解析による中塗り土の熱湿気応答の特性 .....	85
5-2-1	解析条件 .....	85
5-2-2	熱湿気応答 .....	89
5-2-3	まとめ .....	98
5-3	技能継承により施工された土壁を有する住宅の室内環境評価 .....	98
5-3-1	解析条件 .....	98
5-3-2	室内温湿度変動 .....	105
5-3-2-1	自然状態 .....	105
5-3-2-2	冷暖房状態 .....	115
5-3-3	まとめ .....	123
5-4	第5章のまとめ .....	123
<b>第6章</b>	<b>結論</b> .....	<b>126</b>
	<b>本研究に関する発表論文一覧</b> .....	<b>128</b>
A.	原著論文 .....	128
B.	国際会議 .....	128
C.	学術講演 .....	129
	<b>謝辞</b> .....	<b>132</b>

# 第1章 序論

## 1-1 はじめに

近年の工業技術の躍進と規格化されたローコスト住宅の発達に伴い、現代住宅では安価で汎用性のある石油由来の化学製品(以下石油系建材という)が建築材料として大量に利用されてきた。製造工場で加工される石油系建材は品質が均一であり、優れた施工技能を必要としないため工期の短縮や製品の統一を図るうえで有効である。しかし、これらの石油系建材から放出されるホルムアルデヒド等の化学物質や住宅の気密性能向上はアトピーやアレルギーといった過敏症を引き起こす原因となり、シックハウス症候群といった居住者の健康を損ねる社会問題[1][2][3]となった。それゆえ、人体に悪影響を及ぼす化学物質を含まない伝統技能を使った土壁が再評価されつつある。

日本古来(A. D. 600年頃)の伝統技能でつくられる土壁は地球環境にもやさしく[4]健康的[5]とされてきた。国内の伝統技能でつくられ、脱VOCの健康的な住環境を得ることが可能な土壁は施工時の接着剤等が不要であるため、健康的な住環境が構築可能である。また、材料は近隣の水田や川から採取可能であり、土やその合成物となる”すき”や糊は添加物を含まず、元の自然状態に廃棄可能であるため、材料搬送エネルギーや廃棄等にかかわるCO2排出量削減や環境負荷削減にも期待ができる。国内の歴史的建造物でも土壁保存で話題の姫路城備前丸は、左官技能者の伝統技能により改修前と変わらぬ施工法で修復された。しかし、この伝統技能を持つ職方は年々減少傾向にある。土壁施工に必要な下地作製や下塗り上塗り等の複雑作業は、人件費の増加や長工期に繋がり一般建築物における土壁施工の機会は減少し続けている。左官技能者が土にかかわる技能を継承する機会は寺社建築等の一部の重要文化財保護を目的とした施工現場等で僅かに残る程度であり、一般建築物の施工現場では殆ど見られない。また、技術の近代化、職業意識の変化等の影響に伴い、技能習得を目指す若年者数は減少傾向にあるため、技能指導を与える施設では技能者育成が困難になりつつある。更に、近年の指導現場は就職後の即戦力育成を目的とし、近代技術に応じた訓練を実施することに主眼を置きつつあるため、伝統技能を伴う訓練は重要視さ

れず、自己啓発程度のレベルに意識がシフトしつつある。公的機関の職業訓練施設では伝統技能のレベルを維持するため、技能継承の時間を他の専門教育機関より多く割いているが、これは公的機関が伝統技能を継承する責務があるという理由から継続してきたものであり、その訓練を評価することは非常に難しい。

日本では長年、左官技能者が施工した土壁が居住者の生活を支えてきた。左官技能者により施される土壁施工（木舞等の下地材を含む）の技術は国内の伝統技能である。法隆寺伽藍に存在する土壁は国内最古（但し、修復工事済み）のものであり、下地から上塗りまで順次塗り重ねる土壁の施工法は現代の左官技能者のものに近い[6]。土壁の材料である粘土の産出される場所は施工現場付近の田畑や、そこから少し登った山林の一部にある場合が多く、技能者らは山林等に粘土を保管した後、粒子を揃える“こなし作業”を行う[7]。土は水分の蒸発に伴い、高分子の分子間引力で固着する自硬性という性質[8]により硬化し、稲わらなどの植物繊維を乾燥させた”すさ”が練り混ぜ後の乾燥収縮ひび割れや剥落を防止する。中塗り土に用いる土は粒度が中程度であり、粘性は荒土より弱いため“わらすさ”や麻、場合によっては“つのまた糊”を加えて調合される。国内の左官技能は、下地材の“木舞”や”すさ”、”鋤押さえ”という上塗りの細部を仕上げる高度な技能に伴い発達した。左官技能者の材料や工具が揃ったのは仏教伝来以後であり、当時の土壁は社寺のみに使用された。平安時代の土壁は蔵や住宅等にも用いられたが、その大部分は極めて粗末な荒壁（下塗）であり、高級住宅でも上塗り施工を施した例（主要室以外）は少ない。土壁（上塗りを含む）にかかわる左官技能が一般住宅のものとして確立されたのは江戸時代初期である。国内ではこのような伝統技能が、左官技能者達により連綿と受け継がれてきた。しかし、近年の一般住宅では土壁を用いる例が少なく、技能継承が可能な技能者の存在を把握することが難しい。一方で、左官技能を活用した堅牢な土壁を有する蔵は現代でも文化財等の貯蔵庫として重用されており、国内各地に存在する。蔵の土壁を有する今西家（奈良県橿原市今井町）に代表される住宅建築は良好な室内環境をもたらすとされており、現代でもその評価が高い。

筆者は以上の社会情勢より、途絶えつつある伝統技能が近い将来消滅して当然と捉えるべきか、

また継承の必要性を認めて継承していくべきかを評価し、向き合う必要があると考えた。本章では以下に、この観点から得た従来の研究の成果について述べ、本研究の目的と概要を示す。

## 1-2 従来の研究

従来の研究を伝統技能で施工された建材の物性測定に関する研究と伝統建材が室内に及ぼす熱湿気性状に関する研究に大別し、以下に整理した。

### 1-2-1 伝統技能で施工された建材の物性測定に関する研究

土壁の構成材料を単独材料とし、物性値測定することは古くから行われているが、その測定について詳細に提示した報告は少なく、その測定結果を用いて熱湿気性能を評価した例は未だ乏しい。宮野ら[9][10]は木下、清水ら[11]の測定した既往の熱伝導特性測定値（土壁の原材料及び和壁）をまとめ直し、自らも熱物性を測定することで仕上げ材を含んだ多層土壁の熱伝導率（温度依存性、材料密度依存性）を求めた。高田ら[12][13]は中塗り土と漆喰の平衡含水率、湿気伝導率を測定し、高湿度域内における平衡含水率曲線の特性と湿気伝導率（相対湿度依存性）について述べた。

珪藻土の吸放湿気特性を測定、評価した例はいくつかあるが、珪藻土は産地や糊等により、構成が異なるため、測定、評価を重ねる必要がある。本間ら[14]は珪藻土タイルの吸放湿実験から平衡含水率と湿気伝達を推定し、中湿度範囲における $\kappa \cdot v$ （絶対湿度変化に対する）の取り扱いについて述べた。鈴木ら[15]は稚内珪藻岩を用いたサンプルを対象に細孔分布測定や水蒸気吸着等温線測定、吸放湿機能測定等を行い、その調湿特性を述べた。

ひび割れの研究では、発生要因やメカニズム[16][17]が整理されているが、その要因は多岐に及ぶため、その性状や効果を確認する必要がある。松本[18]らは仕上げモルタルの乾燥収縮量について計測、解析を行い、ひび割れの発生しやすい位置、方向の評価し、ひび割れと引張応力の関連性等について述べた。中村ら[19]は、糊、すさの調合条件を変更した土壁の表面ひび割れ発

生を測定することで、土壁の体積収縮ひずみとひび割れ面積の関係を述べた。

### 1-2-2 伝統建材が室内に及ぼす熱湿気性状に関する研究

土壁は長い間建築技能の代表的な建材として継承されてきたため、正当な評価が行われずに現代まで至った可能性がある。土壁を用いて建造された蔵は、伝統産業製品の保存に最適<sup>注1)</sup>とされ、断熱・調湿性能に効果があるとして高く評価されているが、土壁が室内環境に及ぼす影響を測定、解析で示した例は乏しく、土壁の断熱・調湿性能や冷暖房負荷等を明確に述べた例は殆どない。

太田ら[20]は、伝統構法木造住宅と現代構法木造住宅を対象に室内熱環境実測を行い、土壁の断熱化や蓄熱効果を評価した。望月ら[21][22]は土壁造住宅の外壁内部等の温湿度実測を行い、土壁の内部結露の危険性と室温の平準化について述べた。高田ら[12]は土壁の有する居室（冬期の就寝時を想定）の数値解析を行い、土壁の熱湿気容量や室内の湿度上昇の緩和について述べた。水沼[23]らは、実測と数値解析より土壁の利点を生かしつつ、現代の技術を付加させた外気側充填断熱工法を提示し、断熱仕様や気密性、換気計画への配慮を怠ることで発生する内部結露の危険性について述べた。

### 1-3 本研究の目的と概要

本研究では左官技能者の技能継承を適正に評価するため、技能継承の現状調査と土壁の構成材料（単独材料）の熱湿気物性測定、実施工壁体（複合材料）の熱物性測定を行った。土壁にかかわる物性値測定を行った既往研究は僅かに存在するが、これらは左官技能者の施工調査が不十分なため、定量的な技能評価とは言い難い。土壁やその構成材料は施工現場の環境次第で調合や工程等が異なるため、左官技能を定量的に評価するには施工状況を詳しく述べる必要がある。本研究では土壁とその構成材料の調合、材料産地、季節、作成した技能者等を詳細に報告し、諸物性値の測定結果を述べる。数値解析（蒸気拡散支配における熱水分同時移動方程式[24]）では本研究の測定値を用いて、左官技能者が施工した土壁の熱湿気性状（ひび割れ、単層壁、土壁住居）



を示し、左官技能を定量的に評価した。

第2章では、土壁にかかわる左官技能者を対象に、技能継承の可否を定量的に評価した。左官技能の評価を行う以前に現代の技能継承の可否について確認することは重要である。第2章では、国内で実施される技能検定制度より一定の技能を有する技能者数等を調査し、その変遷と原因を確認した。徒弟制度の少ない現代において、土壁施工の伝統技能を次世代に技能を継承するためには公的な教育システムの協力が必要である。第2章では、公的教育システムの現状とそれにかかわる技能継承について評価した。

第3章では、左官技能で施工された中塗り土と珪藻土の熱湿気物性測定（平衡含水率、湿気伝導率、熱伝導率）を行ったため、結果を報告する。土壁の物性値を測定、評価することは、技能継承の必要性を判断するうえで、重要な指標となる。土壁の構成材料の諸物性値を単独材料として測定することは多層壁体の数値解析等においても有意であり、また、技能者が施工した土壁の物性値と既往の物性値を比較することは、左官技能や物性値の特性を把握するうえでも重要である。

第4章では、左官技能者が実施工した土壁の熱湿気性状を評価した。熱性状評価では、左官技能者が木舞・貫建てをした土壁の熱コンダクタンスと熱伝導率を測定、評価した。第4章では木舞や貫を含んだ土壁（複合材料）の熱性状についても検討を行い、結果を整理した。伝統技能で施工された土壁（複合材）の熱伝導率にかかわるモデルを確立することは、数値解析等を行ううえでも有意となる。湿気性状では中塗り土表面にあるひび割れに注目し、その発生状況が与える影響について評価する。定常状態で養生管理を行えない施工現場では、材料表面に僅かなひび割れが発生し、そのひび割れが室内の熱湿気性状に与える可能性がある。第4章では、ひび割れの影響を数値解析より評価した。

第5章では、建材としての中塗り土の利用法を示すため、中塗り土の熱湿気応答特性（単層壁）と壁体（多層壁）の応答特性が住居環境に与える影響を数値解析で評価した。本論文で測定した中塗り土の熱湿気物性値と土壁の熱容量等が室内の温湿度環境に与える影響を応答解析のみでなく、冷暖房負荷等についても併せて評価したため、結果を述べる。

注1)「日本経済新聞(朝刊)」(2007.8.25)では、「能登半島地震から5ヵ月、輪島塗支える土蔵修復へー支援の輪広がる」が記載された。

- [1] 西岡秀三：低炭素社会へのロードマップ-国の CO2 削減への取り組み, 空気調和・衛生工学, pp. 3~8, 2010. 11
- [2] 田邊敏明：環境外交から見た地球温暖化問題, 日本建築学会建築雑誌, pp. 6~11, 1999. 10
- [3] 宇沢弘文：地球温暖化を考える, 岩波書店, 1995. 8
- [4] 小林澄夫:左官礼讃, 石風社, 2001. 8
- [5] 玉川和浩:家族・住い・地球が長生きできる家, 現代書林, 2008. 1
- [6] 山田幸一:壁, 法政大学出版局, 1981. 12
- [7] 建築資料研究社：素材・建材ハンドブック, 建築資料研究社, 2006. 11
- [8] 大政正隆：土の科学, 日本放送出版協会, 1977. 1
- [9] 宮野則彦, 宮野秋彦：土壁の熱伝導特性に関する考察（第1報）, 第23回日本熱物性シンポジウム講演論文集, pp. 95~97, 2002. 10
- [10] 宮野則彦, 宮野秋彦：土壁の熱伝導特性に関する考察（第2報）, 第24回日本熱物性シンポジウム講演論文集, pp. 95~97, 2003. 10
- [11] 木下正雄, 清水定吉：各種建築構造物の熱伝導に関する研究（第1報）—日本壁体の熱伝導率測定—, 東京工業大学学報第5巻第10号, 1992
- [12] 高田暁, 宇野勇治, 太田昌宏:土壁の吸放湿特性に関する研究 平衡含水率曲線と居室の温湿度解析, 日本建築学会近畿支部研究報告集第53号, pp. 177~180, 2013
- [13] 森山直哉, 高田暁：伝統的建材の湿気物性に関する研究（その1）土壁と漆喰の湿気伝導率測定, 日本建築学会近畿支部研究報告集第54号, pp. 285~288, 2014
- [14] 本間義規, 銚井修一, 福島明:吸放湿性建築材料の実用的湿気物性同定に関する基礎的研究, 日本建築学会計画系論文集513号, pp. 31~37, 1998. 11

- [15] 鈴木慎, 渡村信治, 前田雅喜 大橋文彦: 稚内珪藻頁岩の調湿特性について, 粘土科学討論会講演要旨集 41 巻, pp. 170~171, 1997. 9
- [16] 日本建築学会: 鉄筋コンクリート造建築物の収縮ひび割れ制御設計・施工指針 (案)・同解説, 丸善株式会社, 2006. 2
- [17] 日本コンクリート協会: コンクリートの収縮ひび割れメカニズムと対策技術の現状一, 丸善株式会社, 2003. 6
- [18] 松本慎也, 大久保孝昭: 下地コンクリートに拘束される仕上げモルタルにおいて乾燥収縮ひび割れが発生しやすい位置の予測, 日本建築学会近畿支部研究報告集第 75 号, pp. 241~249, 2010. 2
- [19] 磯野 亮太, 中村 成春: 土壁の乾燥収縮におけるひび割れ模様に関する基礎的研究, 日本建築仕上学会 2012 年大会学術講演会研究発表論文集, pp. 58~61, 2012
- [20] 太田昌宏, 宇野勇治, 堀越哲美: 伝統構法木造住宅と現代構法木造住宅を対象とした室内熱環境実測と評価, 日本建築学会大会学術講演梗概集 D-2, pp. 89~90, 2008. 9
- [21] 望月昭, 鈴木大隆, 北谷幸恵, 澤地孝男, 本間義規, 藤田里美: 土壁住宅の断熱技術に関する研究 その 1 愛知県に立つ実住宅での実測結果, 日本建築学会大会学術講演梗概集 D-2, pp. 75~76, 2002. 8
- [22] 望月昭, 鈴木大隆, 北谷幸恵, 澤地孝男: 土壁住宅の断熱技術に関する研究 その 2 愛知県に立つ実住宅における通年の実測結果と考察, 日本建築学会大会学術講演梗概集 D-2, pp. 169~170, 2003. 9
- [23] 水沼信, 澤地孝男, 鈴木大隆, 瀬戸裕直, 齋藤宏昭, 中村安弘: 温暖地における土壁住宅の外気側充填断熱工法の提案と断熱防露性能の検証, 日本建築学会環境系論文集 73 号, 624, pp. 175~182, 2008. 2

## 第2章 伝統技能継承を取り巻く現状

### 2-1 はじめに

本章の調査では、脱石油製品といわれる土壁にかかわる左官技能者を対象に技能継承を定量的に評価したい。徒弟制度の少なくなった現代において土壁の有用性を理解し、次世代に技能を継承していくには公的な教育システムの協力が必要である。本章では、公的教育システムの現状についても併せて評価した。

### 2-2 技能検定合格者数の推移

#### 2-2-1 調査方法

本章では、一定の技能を持った技能者数を定量的に評価するため、技能検定制度より技能者の変遷を確認した。技能検定制度は昭和34年から実施された国家資格である。本調査では、昭和48年度から平成20年度までの技能検定申請者・合格者数を調査した。現代の公共工事では技能検定1級技能者の常駐が義務付けられている。本章では、伝統技能を持つ技能者数の確認を行い、伝統技能継承の現状を評価するため、技能検定実施状況[1]より建築分野の技能検定申請者・合格者数を調査した。

#### 2-2-2 技能検定

技能検定は厚生労働大臣が政令で定める職種毎に行う検定である。技能検定は規定される136職種について行われ(2009年度現在)、各職種の技能の内容に応じて等級別に区分されている。表1に技能検定の等級区分[2]、表2に各職種実施等級を示す。建築の分野の技能検定には特級、単一等級がないため、調査対象には含まない。また、3級は実施職種が少なく、基礎1級、2級は外国人向けに行われている等級であるため、同様の処理とした。

表1 技能検定の等級区分[2]

等級	技能検定合格に関する技能及びこれに関する知識の程度
特級	管理者または監督者が通常有すべき技能及びこれに関する知識の程度
1級	上級の技能者が通常有すべき技能及びこれに関する知識の程度
2級	中級の技能者が通常有すべき技能及びこれに関する知識の程度
3級	初級の技能者が通常有すべき技能及びこれに関する知識の程度
基礎1級	基本的な業務を遂行するために必要な技能及びこれに関する知識の程度 (研修経験1年の技能者が通常有すべき技能の程度とされている。)
基礎2級	基本的な業務を遂行するために必要な基礎的な技能及びこれに関する知識の程度 (研修経験半年の技能者が通常有すべき技能の程度とされている。)
単一等級	上級の技能者が通常有すべき技能及びこれに関する知識の程度

表2 各職種実施等級

技能職種	特級	1級	2級	3級	基礎1級	基礎2級	単一等級
建築大工	-	○	○	○	○	○	-
左官	-	○	○	○	-	○	-
配管	-	○	○	○	-	○	-
建具製作	-	○	○	-	-	○	-
タイル張り	-	○	○	-	-	○	-
塗装	-	○	○	-	-	○	-
畳製作	-	○	○	-	-	-	-
鉄筋施工	-	○	○	-	○	○	-
かわらぶき	-	○	○	-	-	○	-
型枠施工	-	○	○	-	○	○	-
石材施工	-	○	○	-	-	○	-
内装仕上げ	-	○	○	○	-	○	-
表装	-	○	○	-	-	○	-
冷凍空気調和 機器施工	-	○	○	○	-	○	-

技能検定の受験資格[2]を表3に示す。技能検定1級を最短で取得しようとする、中学卒業後から実務経験2年で技能検定2級を取得、その後実務経験2年で技能検定1級が取得可能となるため、19歳で取得可能となる。最遅となるのは、大学卒業後に技能検定2級を取得し、その後実務経験2年で技能検定1級が取得可能となる26歳である。

表3 技能検定の受験資格[2]

受験対象者		1 級		2 級		
		2 級合格後	3 級合格後	2 級合格後	3 級合格後	
						2 級合格後
実務経験のみ		7	2	4	2	0
専門高校卒業		6			0	
短大・高専・高校専攻科卒業		5			0	
大学卒業		4			0	
専修学校	800 時間以上	6			0	
	1600 時間以上	5			0	
	3200 時間以上	4			0	
短期課程の 普通職業訓練修了	700 時間以上	6			0	
普通課程の 普通職業訓練修了	2800 時間未満	5			0	
	2800 時間以上	4			0	

### 2-2-3 技能検定の系統分類

技能検定（建築分野）の系統分けを表 4 に示す。技能検定のうち、建築分野の技能検定は表 4 の 15 職種である。本章では、左官技能と他の技能を比較しやすくするため、技能検定（建築分野）の職種を 5 系統に分類した。表 4 には、建築分野の技能検定を系統分けするときに使用した定義も示す。左官系職種にはタイル工事も含んだ。これは、左官工事とタイル工事が共に湿式工事であることと、タイル下地工事には左官工事が含まれることが理由である。以降は、表 4 の系統分けより技能者数を定量的に評価した。

表4 技能検定（建築分野）の系統分け

系統	大工系	左官系	内装系	設備系	施工系
定義	大工工事を主とする作業	左官工事・タイル工事を主とする作業	左官・タイル工事を除く、内装工事を主とする作業	設備工事を主とする作業	大工以外の施工を主とする作業
技能職種	建築大工	左官 タイル張り	建具製作 塗装 畳製作 内装仕上げ施工 表装	配管 冷凍空気調和 機器施工	鉄筋施工 かわらぶき 型枠施工 石材施工 防水施工

#### 2-2-4 技能検定申請者・合格者数

技能検定申請者数（1、2級）の推移[1]を図1（以下本章の図中では年度を年表示とする）に示す。大工系に関しては昭和48年度に15548人だった申請者数が平成20年度には3068人となった。左官系は昭和48年度に9019人の申請者数を排出していたが平成20年度には1652人となり、大工系、左官系共に昭和48年度には約8割減となった。内装系に関しては、昭和48年度には6244人だった申請者数が平成20年度には7714人となり約2割増となる。施工系では、昭和48年度には3657人だった申請者数が平成20年度には9557人となり約2.6倍の申請者数となった。設備系に関しては昭和48年度には6151人だった申請者数が平成20年度には4906人となり、約2割減の申請者数となった。伝統技能にかかわる大工系、左官系の技能検定申請者は他の職種に比べて減少が著しく、この原因には若年者の技能離れ等が考えられる。

技能検定1級合格者（以下合格者という）の推移[1]を図2に示す。大工系、左官系の合格者数の減少は他系に比べて著しい。昭和48年度の大工系、左官系の合格者数は6168人、3422人であったが、平成20年度では1533人、1241人まで減少した（大工系は約8割減、左官系は約7割減となる）。この原因には、ユニットバス導入[3]や水回りの仕様の変化に伴うタイル職人の減少が考えられる。図3に新築住宅着工件数と浴槽ユニット出荷数の関係[3][4]を示す。図示のように平成5年度以降のユニットバスに使用される浴槽ユニットはタイル張り浴室に使用される単品

浴槽の出荷数を上回り、平成 17 年度では新築住宅着工件数を上回った。対して、単品浴槽の出荷数は減少を続けており、タイル張り浴室の需要が減少したことが分かる。このことは、技能検定 2 級の申請者・合格者数でも顕著に表れた。図 1、図 2 を見ると浴槽ユニット出荷数が単品浴槽出荷数を上回った翌年度の平成 6 年度からタイル張りの申請者・合格者数が減少し始めたことが分かる。技能検定においてタイル張りの申請者・合格者数が減少している要因の一つには、タイル張り浴室の需要減少がある。

大工、左官系以外の合格者数の減少に対し、内装系、設備系、施工系の合格者は増加傾向にある。内装系、施工系、設備系の合格者は昭和 48 年度の 2977 人、2210 人、1269 人であったが、平成 20 年度では 6256 人、7955 人、2818 人となった。内装系、施工系、設備系の合格者は約 2.1 倍、約 3.6 倍、約 2.2 倍に増加した。昭和 56 年度、平成 16 年度に全系統で合格者数の増加がみられる。平成 16 年度以降の合格者は再度減少しているが、その減少の原因は平成 16 年度の合格者が過度に増加したためである。左官系の平成 16 年度以降の減少は平成 16 年度の増加が関係しているとはいえない。左官系は昭和 56 年度の増加後、合格者数が減少し続けたが、平成 3 年度ごろから平成 15 年度まで大きな増減は見られず大略一定数の技能者を排出しており、平成元年度以降の合格者数が 900 人台より大きく減少することはない。技能検定 1 級合格者数は大工系、左官系が減少傾向にあるのに対し、内装系、施工系、設備系が増加傾向にあることが分かった。左官系の合格者は減少傾向にあるものの、平成以降は大略一定の合格者を排出している。

平成 16 年度以降の合格者数が全系統で一定数確保できた原因のひとつには、官庁営繕関係統一基準で定められた 1 級技能現場常駐制度[5]の影響が考えられる。この制度は、1 現場に 1 人の 1 級技能士常駐の義務が課されるものである。1 級技能士現場常駐制度は、官公庁の工事に適用される制度であり、一般民間工事には適用されていないが文化財や町屋保存の工事では、この制度が適用される場合もある。本章では技能検定申請者の受験資格と平成元年度の合格者数から伝統技能の技能継承を推定する。平成元年度の合格者は受験時の年齢が大略 23~26 歳（実務経験 7 年以上）と予測されるため、現在は 50 歳代と考えられる。技能継承を担う熟練技能者となるには



約 20 年の実務経験が必要と言われる<sup>注1)</sup>。このため、現代は技能継承可能な平成 6 年度の合格者が熟練技能者として一定数確保されており、この状況は今後約 20 年間維持可能である。筆者は、公官庁が定める制度等が助力となれば、左官技能者により施工される土壁が文化財に限らず日常生活の建材として利用可能となり、技能継承の危機を緩和できると考える。

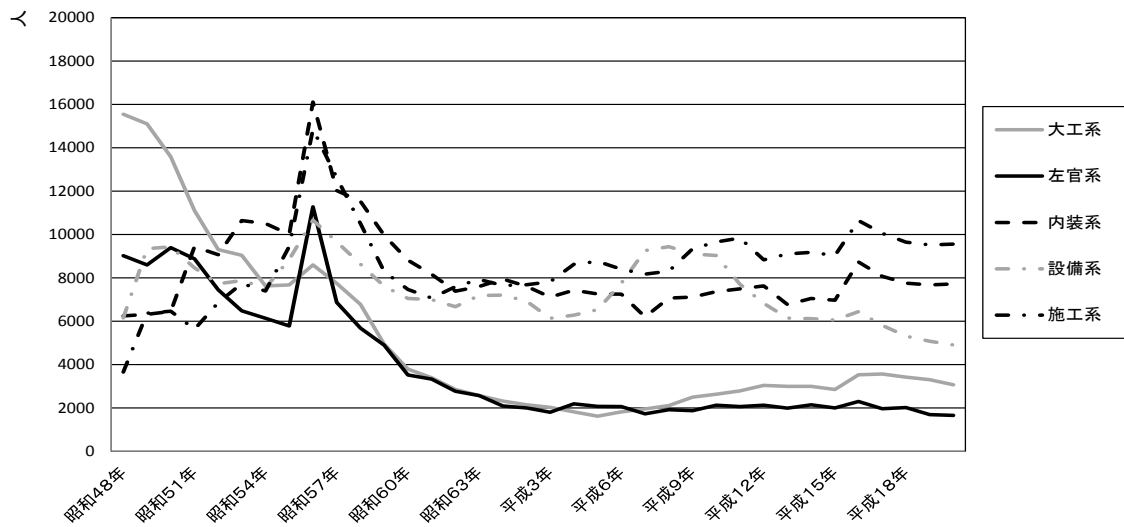


図1 技能検定申請者数（1、2級）の推移[1]

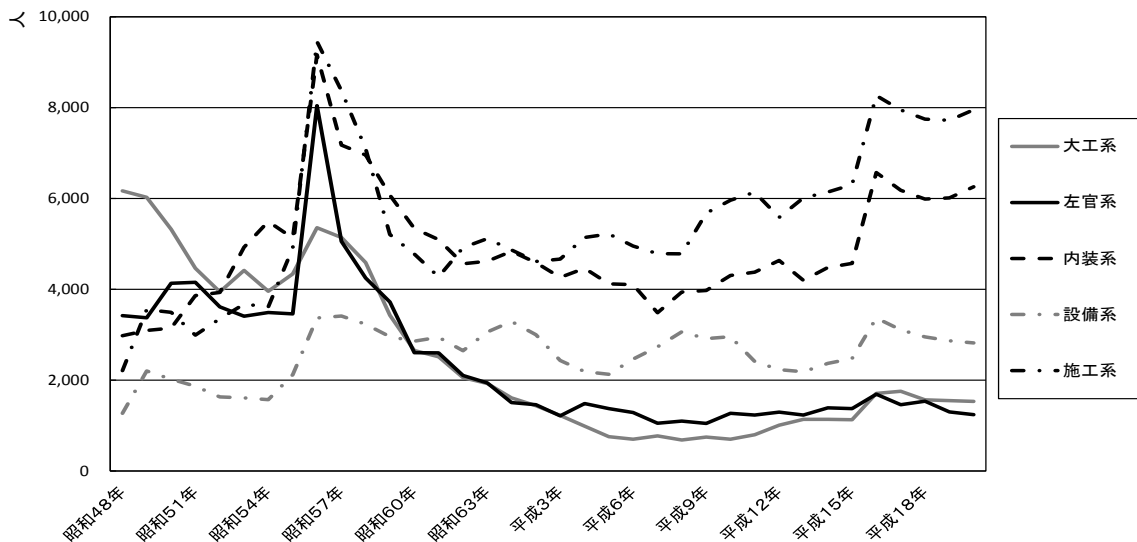


図2 技能検定1級合格者の推移[1]

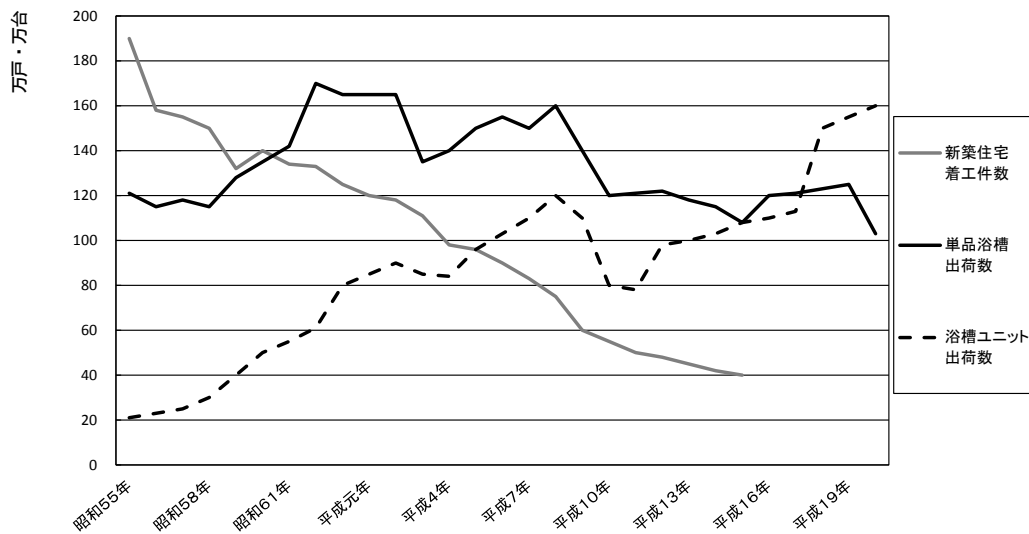


図3 新築住宅着工件数と浴槽ユニット出荷数[3][4]

## 2-3 伝統技能継承機関（職業能力開発施設）の変遷

### 2-3-1 調査方法

前節では、1級技能士現場常駐制度より平成16年度以降の技能検定1級合格者数が増加したことを確認した。技能検定合格者数は国の法律や制度で必要とされれば増加することが分かる。技能者数の変動には公的制度の及ぼす影響が大きい。本章では、公的制度にある技能教育システムが現在機能しているのか、今後伝統技能を残せる環境にあるのか、を評価するため伝統技能継承にかかわる公的機関の取り組みを調査する。伝統技能教育を行う場の一つに職業能力開発施設がある。本章の調査では、伝統技能教育の現状を把握するため、平成14年度から平成21年度までの8年間の職業能力開発施設の変遷を評価した。

### 2-3-2 職業能力開発施設

職業能力開発施設は職業能力開発促進法に基づき職業訓練を行う教育訓練機関であり、戦後における国内のものづくり産業を支えてきた。本章では、伝統技能継承の場として職業能力開発施設の現状を調査する。職業能力開発施設には公共職業能力開発施設と認定職業能力開発施設があ

り、設置主体毎に区分されている。表5に職業能力開発施設の区分と設置主体を示す。

表5 職業能力開発施設の区分と設置主体

	区分	設置主体
公共職業能力開発施設	公共	国、都道府県及び独立行政法人雇用能力開発機構
認定職業能力開発施設	事業所単独	企業単独
	共同	地域や同業種の中小企業の合同

職業能力開発施設で行われる職業訓練には2種類の訓練があり、各訓練の中に訓練課程が存在する。表6に職業訓練課程の概要を示す。短期課程は離職者やニート等が対象者であり、訓練期間も短いため、技能継承が期待できない。公的教育システムにおいて技能教育の役割を担うのは訓練期間の長い普通課程が適していると考えられる。普通課程を卒業すると技能検定2級の学科試験が免除されるため、技能検定を受検する者も多い。短期課程卒業では技能検定の学科試験が免除対象とならないため、技能検定を受検する者が少なく、伝統技能にかかわる教育を行うことが難しい。

表 6 職業訓練課程の概要

職業訓練の種類	訓練課程	訓練の概要	訓練期間及び総訓練時間
普通職業訓練	普通課程	中卒者等又は高卒者対して行う、長期間の課程	高卒者等 1 年 総訓練時間 1,400 時間以上 中卒者等 2 年総訓練時間 2,800 時間以上 1 年につき概ね 1,400 時間
	短期課程	在職労働者、離職者等に対して行う、短期間の課程	6 ヶ月以下 総訓練時間 12 時間以上 ただし管理監督者コースにあっては 10 時間以上
高度職業訓練	専門課程	高卒者等に対して高度な訓練を行う、長期間の課程	高卒者 2 年 総訓練時間 2,800 時間以上 1 年につき概ね 1,400 時間
	応用課程	専門課程修了者等に対して、高度で専門的かつ応用的な訓練を行う、長期間の課程	専門課程修了者等 2 年 総訓練時間 2,800 時間以上 1 年につき概ね 1,400 時間
	専門短期課程	在職労働者等に対し、高度な訓練を行う、短期間の課程	6 ヶ月以下 総訓練時間 12 時間以上
	応用短期課程	在職労働者等に対し、高度で専門的かつ応用的な訓練を行う、短期間の課程	1 年以下 総訓練時間 60 時間以上

### 2-3-3 職業能力開発施設の系統分類

職業能力開発施設の系統を表 7 に示す。本章では職業能力開発施設における多種の科目から左官系訓練の現状を評価するため、職業能力開発施設の科目を技能系統毎に分類した。

表7 職業能力開発施設の系統

系統	大工系	左官系	内装系	設備系	施工系	建築士系
定義	大工工事を主とする学科	左官・タイル施工を主とする学科	左官・タイルを除く内装工事全般	設備関連学科	大工以外の施工系の学科	建築士取得を目指す学科
キーワード	木造建築科	左官タイル施工科	内装リフォーム科	建築設備科	建築施工管理科	建築デザイン科
	木造住宅科	総合左官科	内装施工科	建築システム科	建築システム工学科	住居環境科
	建築施工科	左官技術科	住宅インテリア科	設備工学科	建築外装施工科	住宅デザイン科
	建築大工科 等	 等	建築内装施工科 等	建築設備設計科 等	建築施工システム技術科 等	建築住環境設計科 等

#### 2-3-4 職業能力開発施設の変遷

公共訓練の系統別設置科目数（普通課程）を図4に示す。科目数は大工、設備、施工系に大きな変動はなく、建築士系の減少は小さい。対して、左官系の科目数は平成15年度で3、平成20年度で2、平成21年度で1となった。公共訓練の普通課程において左官技能者を育成することは非常に難しい。公共訓練における技能教育を把握するために公共訓練の系統別定員（普通課程）を図5に示した。平成21年度の大工系は920人、設備系は630人であったため、技能者育成が可能な環境にあるが、左官系は平成15年度から19年度で30人、平成21年度で10人であったため、技能者育成を行うことが難しい環境にある。公共訓練では左官にかかわる教育システムが機能しておらず、技能継承が可能な環境は整っていない。

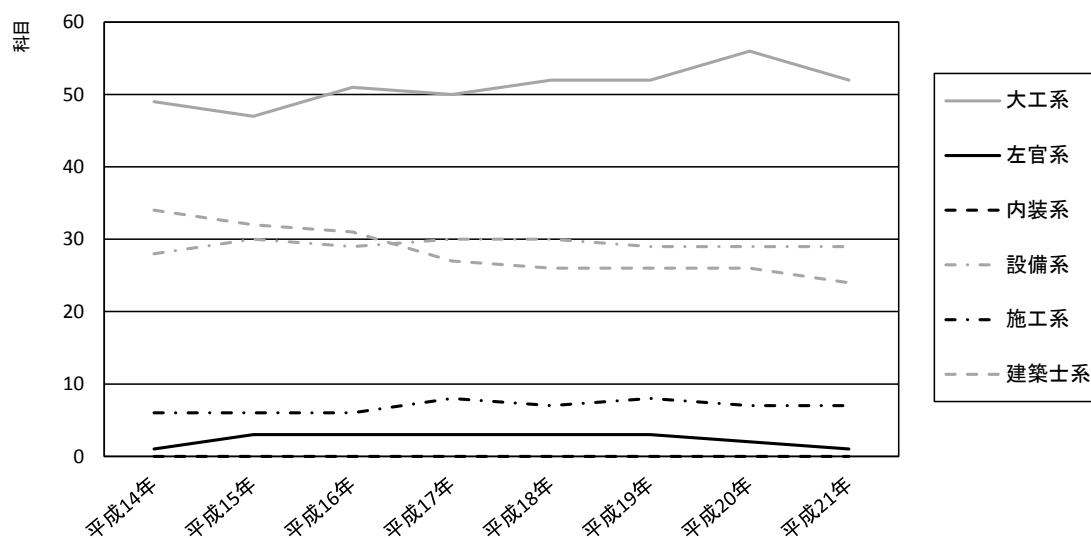


図4 公共訓練の系統別設置科目数 (普通課程)

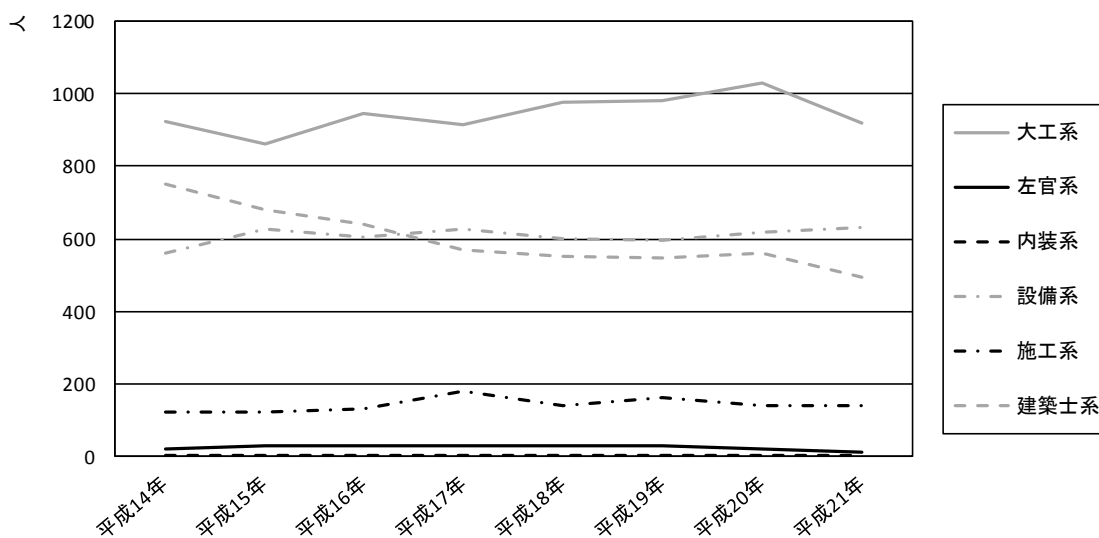


図5 公共訓練の系統別定員 (普通課程)

共同訓練の系統別設置科目数 (普通課程) を図6 に示す。共同職業能力開発施設も公共職業能力開発施設と同様に全系統で減少しているが、共同職業能力開発施設の科目数は公共訓練施設より圧倒的に多い。共同職業能力開発施設の科目減少は、科目数の少ない内装系、施工系を除いた

4系統で顕著である。4系統の減少率は大工系、左官系が共に約25%、設備系が約35%、建築士系が約20%となる。共同職業能力開発施設における左官系訓練は平成21年度以降の8年間で19科目（75から56科目）減少しているが、公共訓練と比べると技能育成の環境が整っている。このことから、現在の公的教育システムにおける技能者育成は、企業や地域、協会等が設置主体とする共同訓練が役割を担っていると言える。

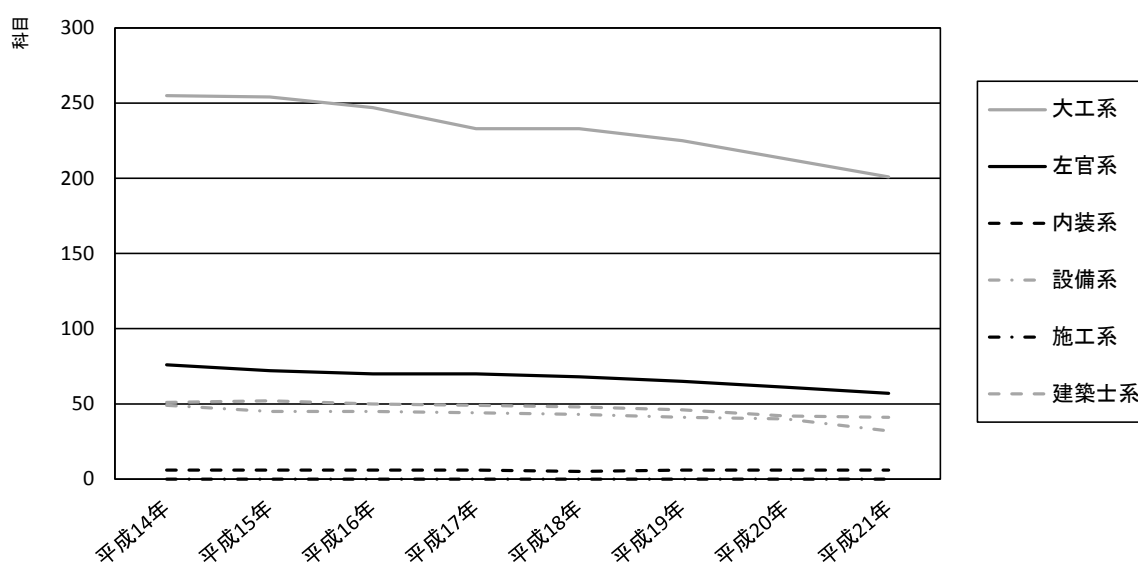


図6 共同訓練の系統別設置科目数（普通課程）

### 2-3-5 職業能力開発基本計画の策定

職業能力開発に関する法改正は、職業能力開発基本計画より行われる。職業能力開発基本計画とは、厚生労働大臣が職業能力開発促進法第5条の規定に基づき策定する職業能力開発に関する基本的な計画である。職業能力開発基本計画では、職業能力開発の実施目標に関する事項等を定め、この計画に基づき職業能力開発施策を実施する。職業能力開発基本計画は、昭和46年に第1次職業能力開発基本計画が策定され、平成18～22年度は第8次職業能力開発基本計画の実施期間内である。第8次職業能力開発基本計画では若年失業者やニートの増加等の対策が盛り込まれており、公共訓練の役割は短期課程の重点的な実施と日本版デュアルシステムの普及、定着を行う

ことにある。平成13年度以降から平成22年度までの職業能力開発基本計画を以下に示す。

・第7次職業能力開発基本計画[7]

この計画は、平成13年5月に告示され、実施期間は平成13年から平成17年までの5年間である。第7次職業能力開発計画（以下、第7次計画という）策定の背景には、職業能力のミスマッチの拡大が指摘されている。労働者の職業能力に対する認識が、労働者及び事業主双方に不足していることから職業能力のミスマッチが生じ、雇用の安定や再就職の阻害要因となっている面もある。職業能力のミスマッチにより、若年者の失業率や転職率が高くなってきている。実施目標としては、職業能力のミスマッチを解消し雇用失業情勢を改善するため、求人ニーズに即した離転職者向けの訓練コースの設定を行うことにある。更に、パートタイム労働や主婦、自営業者等の多様な就業形態に対応した職業能力開発を推進することが目的である。第7次計画では大工系に僅かな増加があるが、この計画が職業能力開発施設の建築系訓練に与えた影響は少ない。

・第8次職業能力開発基本計画[8]

この計画は、平成18年7月に告示され、実施期間は平成18年から平成22年までの5年間である。第8次職業能力開発基本計画（以下、第8次計画という）策定の背景には、若年失業者、フリーター、ニートの増加が指摘されている。一方で熟練した技能を有する団塊の世代が定年に到達してきて、現場力が低下している。さらに、進学率の上昇に伴い、現場に入職する若者が不足し、ものづくり現場を支える熟練した技能が継承されずに失われてしまう問題が指摘されている。公共訓練の実施目標としては、離職者を対象とした短期課程の訓練の重点的な実施、若者を対象にした日本版デュアルシステムの普及、定着を行うことにある。

国の施策に対する職業能力開発施設の反映を評価するため、公共訓練の系統別設置科目数（短



期課程)を図7に示す。大工系科目は平成14年度(57科目)から平成21年度(68科目)で11科目増加した。第7次、第8次職業能力開発基本計画を反映して増加したのは大工系の短期過程のみである。平成14年度から平成21年度では設備系が14科目、左官系が4科目減少した。内装系、施工系、建築士系は大きな増減がなく科目数を維持しており、左官系、設備系は科目数が減少したものの、平成18年度以降は科目数を維持した。第8次計画では、離職者を対象とした短期課程の訓練が重点的に実施されたが、反映されたのは大工系のみであり、その他の系統に反映されない。

第8次計画のもう一つの実施目標である日本版デュアルシステムの反映を評価するため、日本版デュアルシステムの系統別実施科目数(短期課程)を図8に示す。デュアルシステムとは、訓練校の訓練と企業の実習を繰り返して行う訓練である。デュアルシステムはドイツ発祥であり、本来はマイスターを養成するシステムであるが、現在行われている日本版デュアルシステムは、若年失業者やフリーター、ニートの受け皿になっているのが現状である。図示のように、この計画が告示された翌年度の平成19年度にはデュアルシステムが3校で実施された。その後もデュアルシステム実施校は増加しているが、短期課程の大工系が多く実施されおり、普通課程のデュアルシステム実施科目数では増加が見られなかった。この施策でも反映されたのは、短期課程のみであり普通課程で反映されることはない。

現在の国の対策では、離職者やフリーター等に対する対策が重点的に実施され、伝統技能教育には目が向けられていない。十分な伝統技能教育を実施するには、ある一定の訓練期間が必要であるため、訓練期間が短い短期課程で技能継承を行うことは難しい。

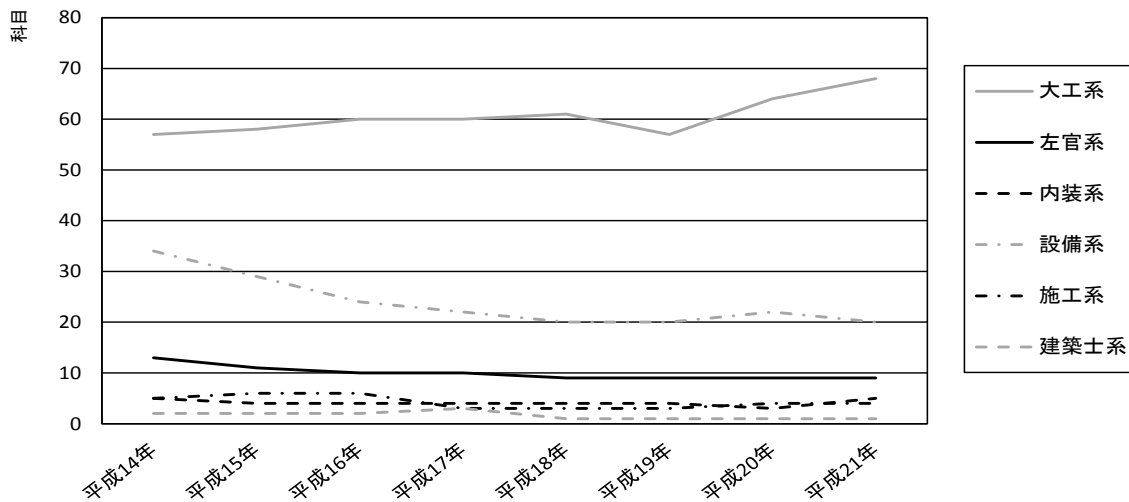


図7 公共訓練の系統別設置科目数（短期課程）

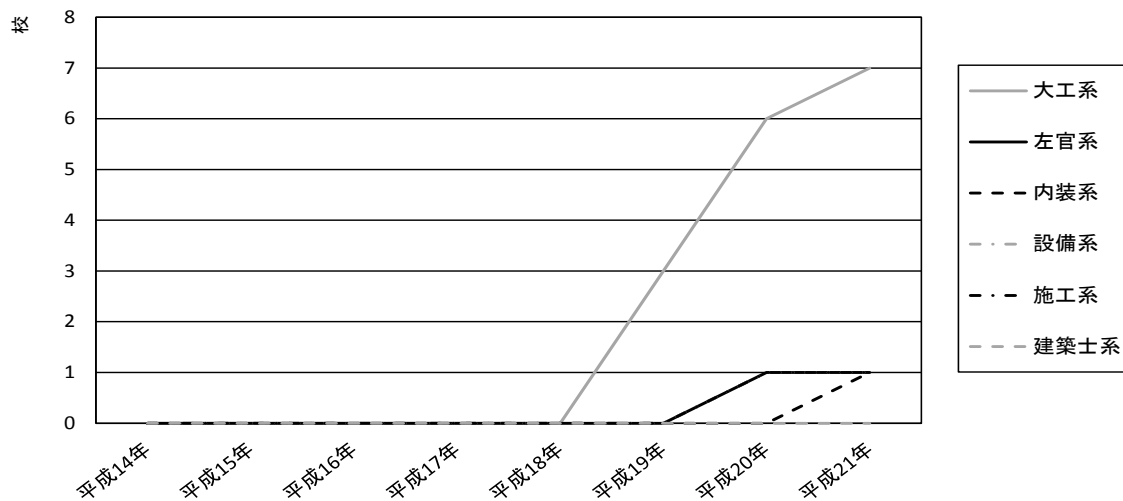


図8 日本版デュアルシステムの系統別実施科目数（短期課程）

## 2-4 第2章のまとめ

本章では国内の伝統技能である土壁施工にかかわる技能者を対象に技能継承の可能性を定量的に評価した。また、公的教育システムがかかわる技能継承の現状とその取り組みについても併せて評価した。

1) 左官の技能検定合格者数は平成元年度以降の20年間で一定数を輩出していることから、現在

は熟練技能者が確保されており、今後この環境は約 20 年間維持可能である。技能者数の変動には公的制度の影響が大きく、技能検定の合格者数増加には国の法律や制度による助力が効果的である。

- 2) 公共訓練における左官系の訓練科目(普通訓練)は、平成 21 年度で 1 科目しか残っておらず、左官技能継承が行える環境は整っていない。現在の左官技能者育成は、共同職業能力開発施設が役割を担っており、公共職業能力開発施設で技能継承を行うことは難しい。国は施策として伝統技能教育に目を向けておらず、技能継承は企業や協会に依存しているのが現状である。

現在の左官技能は、継承可能な技能者が熟練技能者として一定数確保されているため、技能継承が可能である。この状況は平成 21 年度から約 20 年間維持可能であるため、筆者は、左官技能者により施工される建材の環境調整性能が文化財に限らず日常使用の建材として定量的に評価され、公官庁が定める制度等が助力となれば、技能継承の危機を緩和できる可能性があると考える。

- 注 1) 熟練技能者となるために必要な経験年数については、兵庫県立但馬技術大学校左官科元職業訓練指導員中尾金三先生、株式会社山脇組職長柴田正樹氏らにヒアリング調査を行うことで決定した。

#### 引用文献

- [1] 厚生労働省職業能力開発局能力評価課：技能検定実施状況 昭和 52 年度版～平成 20 年度版，1977～2008
- [2] 厚生労働省職業能力開発局能力評価課：職業能力評価ダイジェスト(平成 21 年度版)，2009
- [3] 厚生労働省：平成 20 年度版 国土交通白書，ぎょうせい，2008.8
- [4] 記念史編集委員会編：40 年のあゆみ サステナブル社会に貢献する工業会活動，キッチンバス工業会，2005.5

- [5] 国土交通省：公共建築工事標準仕様書, p8, 2003
- [6] 中央職業能力開発協会：全国職業能力開発施設ガイドブックー全国公共職業能力開発施設及び認定職業能力開発施設ガイドー, 中央職業能力開発協会, 2002.3～2009.3
- [7] 厚生労働省：平成13年度版 国土交通白書, ぎょうせい, 2001.9
- [8] 厚生労働省：平成18年度版 国土交通白書, ぎょうせい, 2006.9

## 第3章 左官技能で施工された中塗り土、珪藻土の熱湿気物性測定

### 3-1 はじめに

本章では、左官技能で施工された中塗り土と珪藻土の熱湿気物性（平衡含水率、湿気伝導率、熱伝導率）を測定した。土壁の構成材料の諸物性値を単独材料として測定することは、左官技能の評価や数値解析による定量的な評価を行うときに有用となる。

3-2 では、中塗り土の物性値測定結果と評価を示した。中塗り土は荒土と並んで土壁の主たる構成材料であり、多様な仕上げを有する土壁の構成材料として汎用性が高い。左官技能者の施工において規範となる技能が集約された構成材料である。

3-3 では、数ある仕上げ材料の中から珪藻土を採用し、物性値測定を行ったため、結果を示した。珪藻土は、植物プランクトンの死骸が長年にわたって堆積してできたものであり、古くからコンロ、耐火煉瓦の原料や、ビールの濾過材、吸着材、脱臭材などとして幅広く利用されており、保湿、調湿、脱臭等の特性を持つことから壁材への利用用途が見直され、脚光を浴びている。麻等の繊維系自然素材を繋ぎ材料として調合する漆喰と比べて廉価な珪藻土は、住まいや暮らしの改善のために自らの手で改修、リフォームを行う DIY (DO IT YOURSELF) にも適しており、塗布する作業は特殊な技能を必要としないため、居住者が土と馴染んだ暮らしを求めるとき、容易に選択できる構成材料である。本章では、JIS A 1470（周期的に吸湿側の境界条件を変更（24時間：50-90%RH））に相当する周期解を数値解析より求め、珪藻土の吸放湿性状を評価した。

### 3-2 中塗り土の物性値測定

#### 3-2-1 試験体

試験体に用いた中塗り土調合比を表1に示す。調合は2004年9月8日と2005年7月2日の時期に区分されるため、本論文では、2004年9月8日の調合を秋調合、2005年7月2日の調合を夏調合と呼ぶ。2つ調合を比較すると夏調合の水の量は秋調合の約1.5倍、すさ、土の量は秋調合の約1.1倍となる。これは技能者が施工後の仕上がり状態を一定に保つよう経験に基づいて配合

したものであり、この違いは施工時期によって選択される。

乾燥状態となった試験体の密度測定の一例として、平衡含水率試験体の測定結果（中塗り土：乾燥密度）を表2に示す。乾燥密度は最小の1621.02kg/m<sup>3</sup>（試験体6）に対して、最大が1731.68kg/m<sup>3</sup>（試験体3）であり、約7%のばらつきが生じた。この原因は、技能者が全て手練り作業で試験体製作したためである。また、試験体が非常に小さいため土、砂、すさを均等に配分するということが難しく、その影響もあったと考えられる。試験体寸法と乾燥密度測定結果（中塗り土：平均値）を表3に示す。夏調合の試験体の乾燥密度は1824kg/m<sup>3</sup>～1891kg/m<sup>3</sup>であり、身近な材料ではモルタル[1]程度の値を示した。対して秋調合の乾燥密度は1665kg/m<sup>3</sup>～1682kg/m<sup>3</sup>と軽量コンクリート[1]程度であり、夏調合に比して乾燥密度が1割程度小さい。これは、夏の施工で材料の分離を防ぐため調合量を変化させたことが原因と考えられる。空隙率測定状況を写真1に示す。空隙率は施工直後の質量と乾燥状態の質量を比較して算出した。夏調合は47.48%、秋調合は41.47%となる。空隙率は、試験体を細かく砕いてから溶液とし、その容積から水と中塗り土の容積を比較した結果から求めた。崩壊した試験体容積から流入水分容積を除いた値を中塗り土の実質部とし、実質部と崩壊した試験体容積の百分率を空隙率として算出する。これより、夏調合の試験体内部は秋調合と比較して小さな空隙を多量に含んでいると予測できる。この空隙率及び調合の違いが物性値に及ぼす影響は後述する。

すさの調合状況を写真2に示す。すさは刈り取り後の藁を叩いて繊維を分解してから水を掛けて蒸らし、約1年間乾燥させた”もみすさ”であり、砂は作製前日に3mmのふるいにかけたものである。平衡含水率試験体の成型には木枠、湿気伝導率・熱伝導率試験体には耐熱性硬質塩化ビニル管を使用した。中塗り土原料を写真3、中塗り土調合状況を写真4、湿気伝導率試験体成型状況(1)を写真5、平衡含水率試験体成型状況を写真6、湿気伝導率試験体成型状況(2)を写真7、熱伝導率試験体成型状況を写真8に示す。施工後は8～16週間の常温養生期間を設けた。

表1 中塗り土調合比

施工日	2004/9/8		2005/7/2	
	容積 (L)	質量 (kg)	容積 (L)	質量 (kg)
淡路土	5.00	6.653	6.00	7.008
家島砂	8.00	11.312	8.00	11.000
すさ	-	0.150	-	0.162
水	3.50		5.35	
空隙率	47.48 (m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> )		41.47 (m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> )	

表2 平衡含水率試験体の測定結果 (中塗り土 : 乾燥密度)

	縦 (mm)	横 (mm)	高さ (mm)	質量 (g)	密度 (kg/m <sup>3</sup> )
1	29.75	30.30	30.55	44.650	1621.36
2	29.85	30.20	30.30	44.458	1627.64
3	30.25	30.63	29.60	45.000	1640.78
4	30.00	30.65	30.23	45.826	1648.62
5	30.33	30.70	33.15	50.208	1626.60
6	30.48	29.90	30.18	44.585	1621.02
7	30.95	30.53	30.05	47.347	1667.48
8	29.88	30.70	29.80	46.601	1704.76
9	30.18	30.55	29.90	47.311	1716.16
10	30.70	29.70	29.88	46.403	1703.22
11	30.03	30.50	29.93	47.471	1731.68
12	30.00	30.48	29.88	45.745	1674.26
平均	30.20	30.40	30.29	46.300	1665.30

表3 試験体寸法と乾燥密度測定結果 (中塗り土 : 平均値)

施工日	試験体	縦 (mm)	横 (mm)	高さ (mm)	質量 (kg)	密度 (kg/m <sup>3</sup> )
2004/9/8	平衡含水率	30.20	30.40	30.29	0.05	1665
	湿気伝導率 (ドライカップ)	φ 107.0		45.00	0.68	1682
2005/7/2	熱伝導率	200.04	200.28	20.08	1.52	1891
	湿気伝導率 (ドライカップ)	φ 107.0		45.00	0.74	1829
	湿気伝導率 (ウェットカップ)	φ 80.2		9.96	0.09	1824



写真1 空隙率測定状況



写真2 すさの調合状況



写真3 中塗り土原料



写真4 中塗り土調合状況



写真5 湿気伝導率試験体成型状況(1)



写真6 平衡含水率試験体成型状況



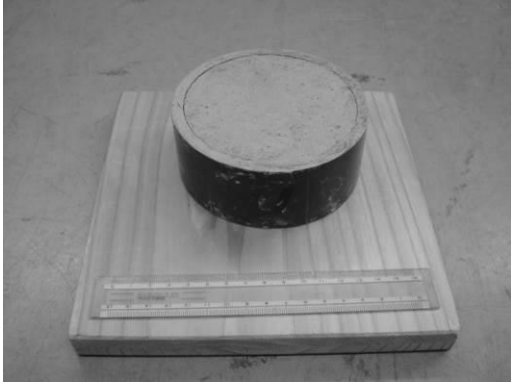


写真7 湿気伝導率試験体成型状況(2)

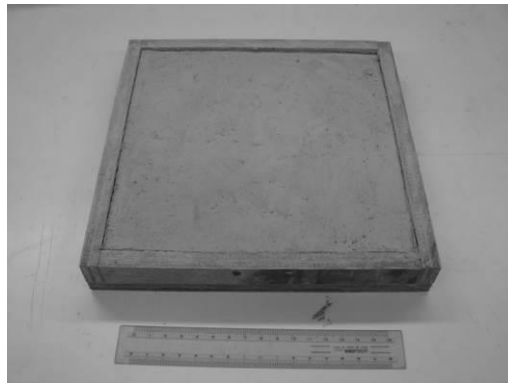


写真8 熱伝導率試験体成型状況

### 3-2-2 平衡含水率測定

#### 3-2-2-1 測定方法

平衡含水率は、建築学会規準で示される[2]デシケータ法(ISO 12570、ISO 12571)に準じて測定した。平衡含水率測定装置を写真9、平衡含水率試験体配置図を図1に示す。恒温室、インキュベーター(ヤマト科学(株)プログラム低温恒温器 IN800)内の温度は常温20℃に設定し、デシケータ内の相対湿度(以下相対湿度の単位表記は%RHとする)は、低湿度域、中湿度域、高湿度域と分かれるように飽和塩(MgCl<sub>2</sub>:33%RH、Mg(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>:54%RH、NaCl:77%RH、KCl:87%RH)を入れた。本論文では、24時間毎の連続した3回の質量変化が総質量の0.1%以下になった状態を平衡状態と判断とする。試験体は乾燥状態とした後、デシケータ内に設置した。質量含水率に用いた式は以下のとおりとする。

$$u = \frac{m - m_0}{m_0} \quad (3-1)$$

u : 質量含水率 (kg/kg)   m<sub>0</sub> : 乾燥材料の質量 (kg)   m : 材料の質量 (kg)



写真9 平衡含水率測定装置

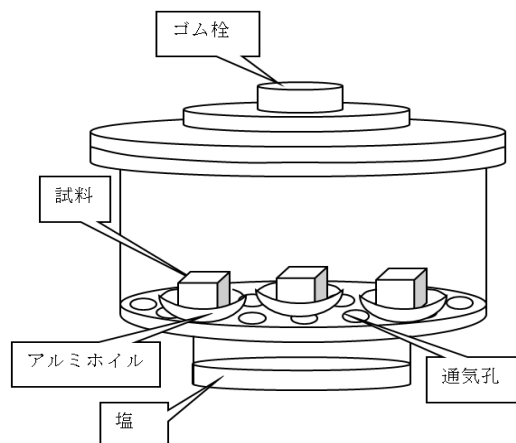


図1 平衡含水率試験体配置図

### 3-2-2-2 測定結果

測定は2004年10月19日の測定開始から1週間毎に実施し、4週目の同年11月17日に測定を終了した(29日間)。平衡含水率測定値(中塗り土)を図2に示す。全測定値のばらつきは最大で1%の程度(87%RHの含水率域)と予想以上に少ない。各測定の試験体と比較して、平衡含水率の試験体は小さいが、技能者が施工した建築材料はほぼ均一材として扱うことが可能である。全測定値を採用した平衡含水率測定結果(中塗り土:平均値)を表4に示す。

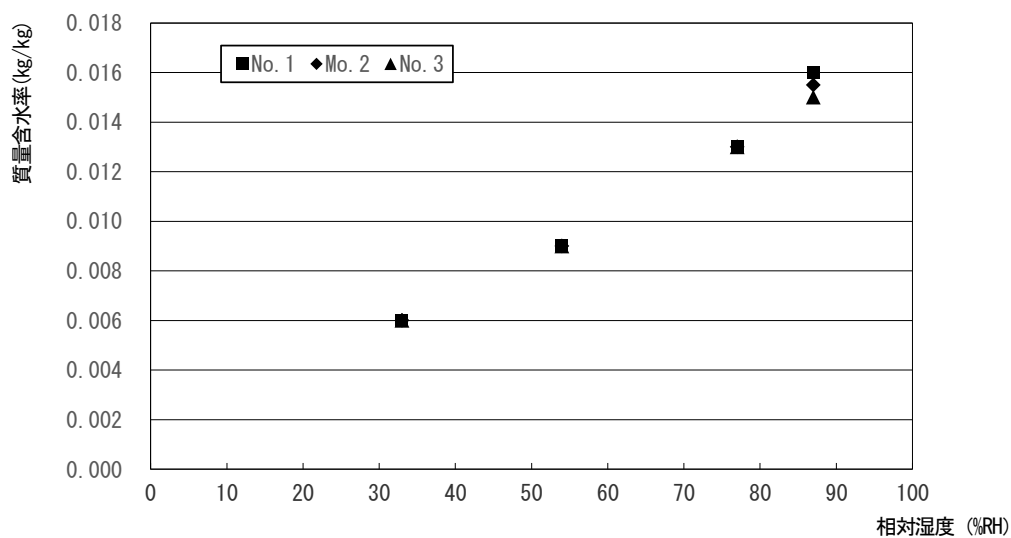


図2 平衡含水率測定値(中塗り土)

表 4 平衡含水率測定結果（中塗り土：平均値）

相対湿度（%RH）	33	54	77	87
乾燥質量（g）[a]	44.70	46.87	47.09	46.54
平衡質量（g）[b]	44.98	47.30	47.69	47.27
変化量（g）[b-a]	0.27	0.42	0.60	0.73
乾燥密度（kg/m <sup>3</sup> ）	1629.93	1632.08	1696.13	1703.05
質量含水率（kg/kg）	$6.0 \times 10^{-3}$	$9.0 \times 10^{-3}$	$1.3 \times 10^{-2}$	$1.6 \times 10^{-2}$
容積含水率（kg/m <sup>3</sup> ）	10.01	14.69	21.67	26.59

### 3-2-2-3 限界含水率測定

本章では、高含水域における中塗り土の平衡含水率を求めるために限界含水率を測定[2]した。限界含水率測定試験体、限界含水率測定装置を写真 10、写真 11 に示す。測定装置のある恒温恒湿槽内は 25°C55%RH 設定とした。限界含水率を得るため、材料中には蒸気と液の移動が生じるよう、水柱(高さ 5cm)でポテンシャル差を与えた。装置から試験体に流入する水分流量を測定する。水分流量は 1 日毎に測定し、24 時間以上の連続測定（2 回）において試験体の質量変化が試験体質量の 0.1%未満となった時点で測定終了とした。試験体の材料流量は大略一定となった後に急激な変化が起こり、試験体が崩壊する。流量水分量変化の一例を図 3 に示す。本論文では崩壊が起きる直前の質量含水率が 0.0617kg/kg となるため、この値を限界含水率とみなした。



写真 10 限界含水率測定試験体

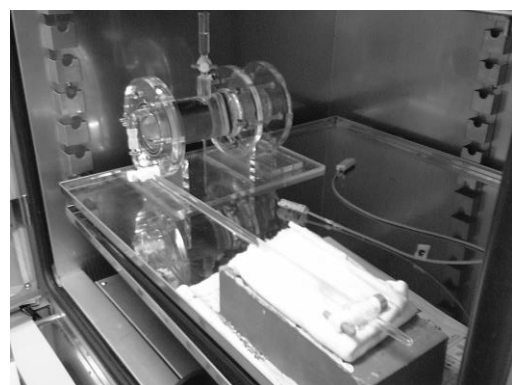


写真 11 限界含水率測定装置

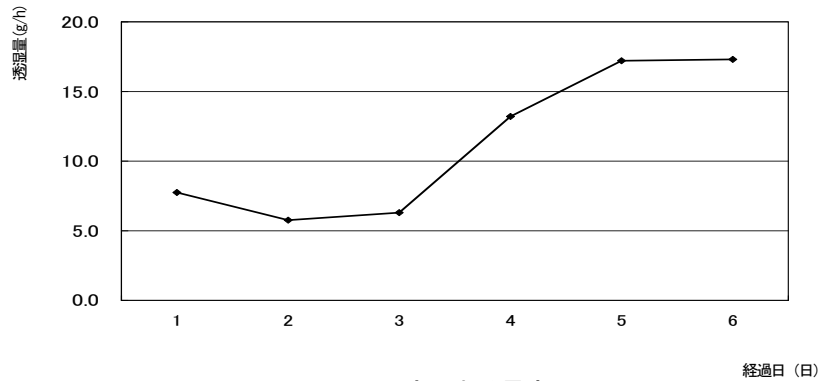


図3 流入水分量変化

### 3-2-2-4 平衡含水率曲線

全測定結果を最小2乗法で多項式近似し、平衡含水率曲線を求めたため、石膏ボードの値[1]と共に結果を図4に示す。図示の近似曲線は相対湿度90%RHを境とした2本の近似関数で表現した。中塗り土の平衡含水率関係は相対湿度90%RH以下において石膏ボードの値と大略一致する。

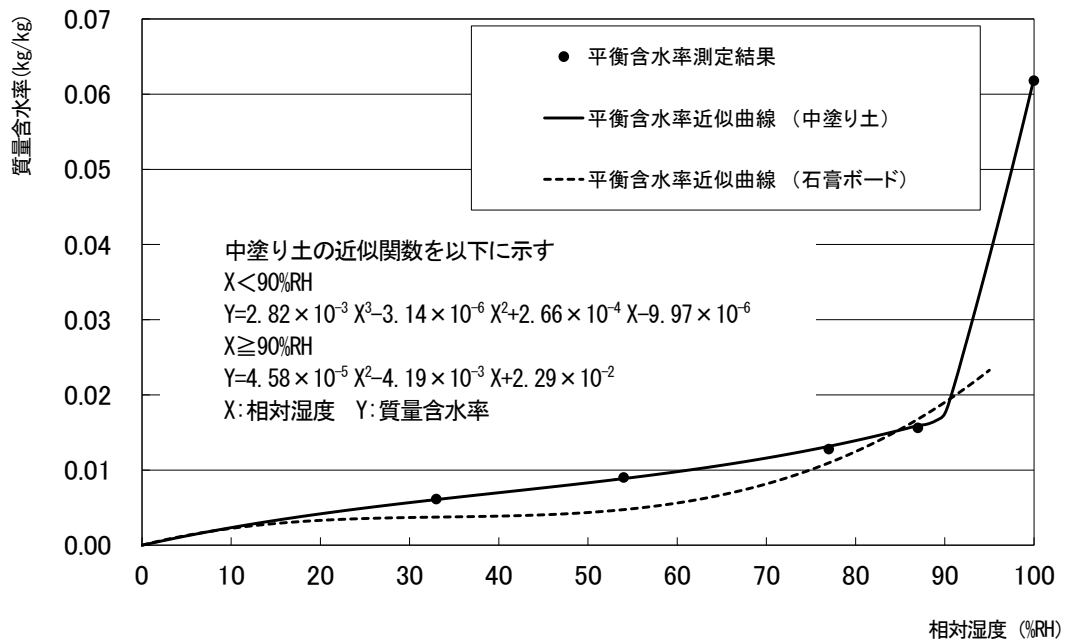


図4 平衡含水率関係 (中塗り土) [1]

### 3-2-3 湿気伝導率測定

#### 3-2-3-1 測定方法

中塗り土の水蒸気拡散速度を決定する湿気伝導率の測定では、低湿度域(25°C25%RH、25°C42%RH)をJIS A 1324 (以下ドライカップ[3]という)、高湿度域(25°C60%RH、25°C81%RH)をISO 12572 (以下ウェットカップ[4]という)に準じて行った。ドライカップ測定装置、ウェットカップ測定装置、ドライカップ測定装置(恒温恒湿槽内)、ウェットカップ試験体、ウェットカップ内飽和塩、ドライカップ測定装置(恒温恒湿槽内)を写真12~17、ドライカップ、ウェットカップ各々の測定装置概要を図5、図6に示す。恒温恒湿槽内の環境条件は25°C50%RH、25°C85%RHとし、ドライカップ内には無水塩化カルシウム、ウェットカップ内には飽和塩溶液[4]( $MgCl_2$ (25°C35%RH)、 $NaCl$ (25°C77%

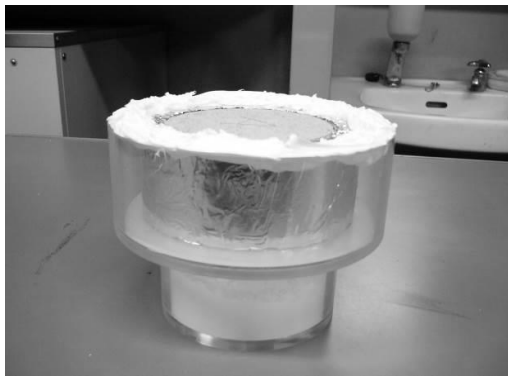


写真12 ドライカップ測定装置

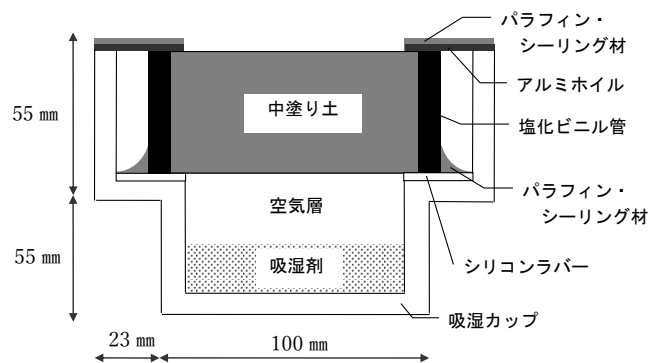


図5 ドライカップ測定装置概要

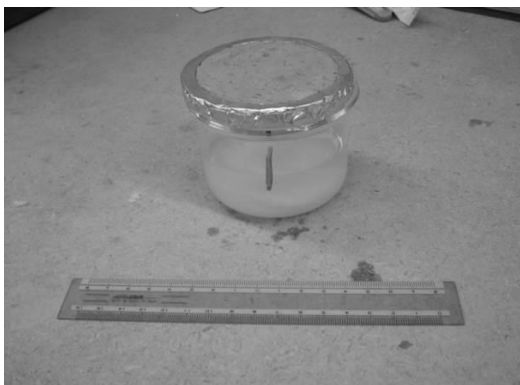


写真13 ウェットカップ測定装置

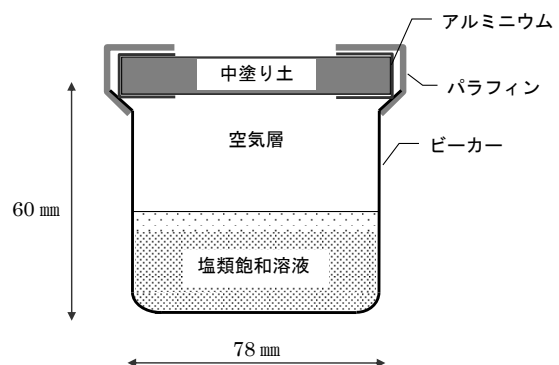


図6 ウェットカップ測定装置概要

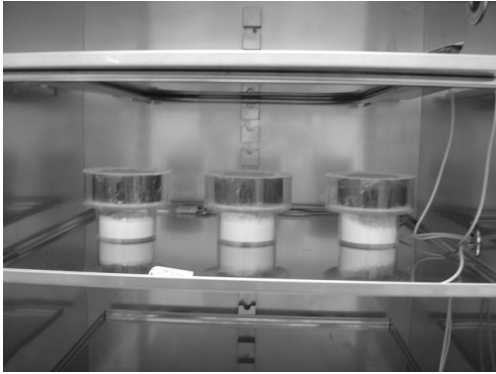


写真14 ドライカップ測定装置  
(恒温恒湿槽内)

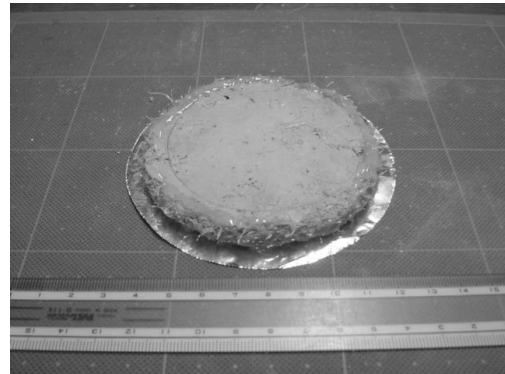


写真15 ウェットカップ試験体

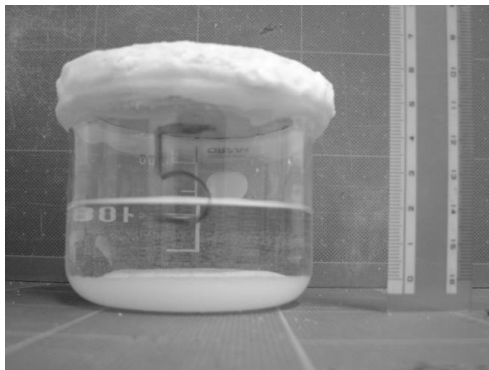


写真16 ウェットカップ内飽和塩

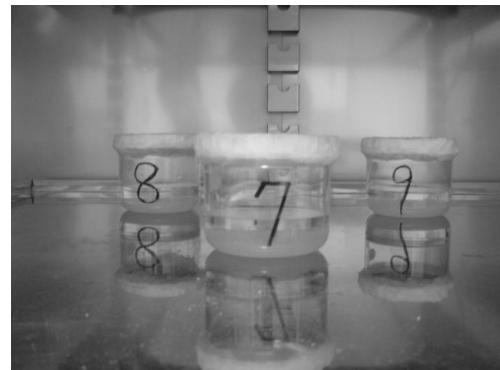


写真17 ウェットカップ測定装置  
(恒温恒湿槽内)

RH) を入れて測定した。測定装置の断湿にはシリコン系シーリング材、パラフィンを用いた。試験体表面は左官技能者が入念な鏝押さえを施し(ウェットカップは片面)、仕上げたものとする。

### 3-2-3-2 測定結果

ドライカップ及びウェットカップの各々の透湿量変化(中塗り土)を図7、8に示す。定常状態は増加した透湿量の5測定点(図7、8中白抜きマーカで表示したデータ)が連続して前測定値の5%以内となった時点と判断し実験を終了した。定常状態に達するにはドライカップ(低湿度域)の25°C27%RHが11日間、25°C42.5%RHが9日間、ウェットカップ(高湿度域)の25°C60%RHが8日間、25°C86%RHが6日間の期間を要した。

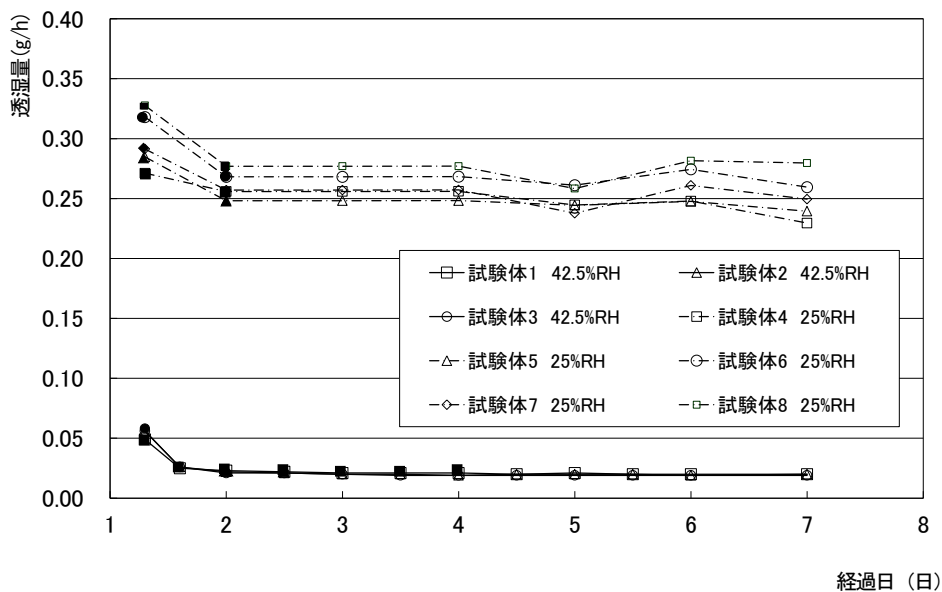


図7 ドライカップ透過湿量変化 (中塗り土) 注1)

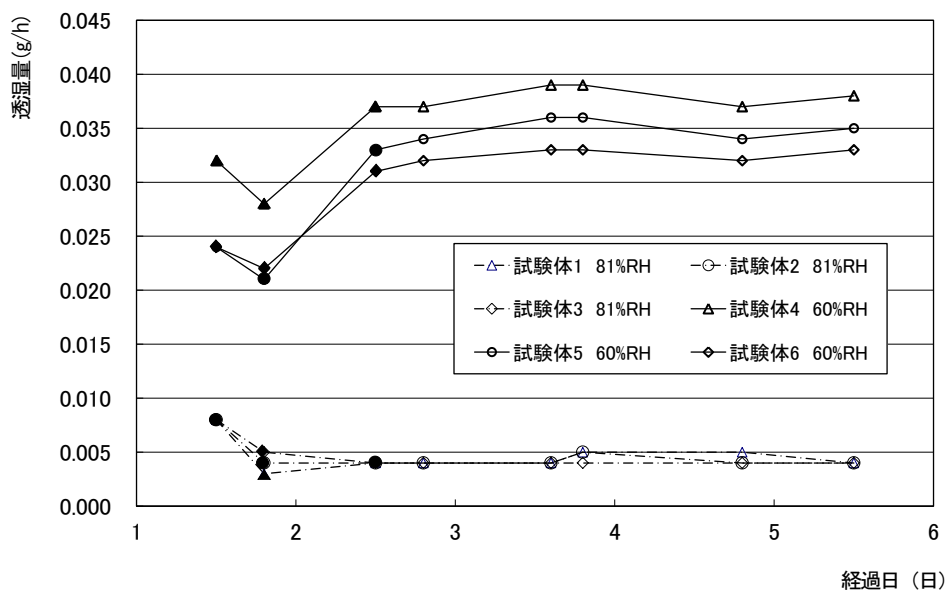


図8 ウェットカップ透過湿量変化 (中塗り土) 注1)

シリコン系シーリング材を断湿に使用した測定装置には補計算が必要である。シリコン系シーリング材は放湿量が極めて大きい材料として知られているため、測定結果に影響を及ぼす可能性がある。測定では、シリコン系シーリング材適量を恒温恒湿槽内に放置し、単位時間あたりの放湿量よ

り、ドライカップ質量変化の補正計算を行った。計算後、中塗り土の透湿率を求める。水蒸気分圧の算出には、sontagの式を採用した。算出に用いた式を以下に示す。

$$G = \frac{\Delta m}{\Delta t} \quad (3-2)$$

$$Z_p = \frac{(P_1 - P_2) \times A}{G} \quad (3-3)$$

$$W_p = \frac{1}{Z_p} \quad (3-4)$$

$$\mu = W_p \times d \quad (3-5)$$

$\Delta t$  : 測定間隔 (h)       $G$  : 透湿量 (kg/h)       $W_p$  : 透湿係数 (kg/m<sup>2</sup>·h·mmHg)

$Z_p$  : 透湿抵抗 (m<sup>2</sup>·h·mmHg/kg)       $A$  : 透湿面積 (m<sup>2</sup>)

$P_1$  : 恒温恒湿槽内部の水蒸気分圧 (mmHg)       $P_2$  : カップ内の空気の水蒸気分圧 (0mmHg)

$\mu$  : 透湿率 (kg/m·h·mmHg)       $d$  : 試験体厚さ (m)

測定値から湿気伝導率を考えると、ドライカップのカップ内空気層はJIS規定のとおり厚さ(20mm程度)であるため、カップ内空気層の抵抗は考慮しないものとした。また、恒温恒湿槽内の空気抵抗も、検討の結果無視できると判断した。ウェットカップでは、使用した塩の濃度やカップの形状がカップ内の空気層に影響したため、JIS規定どおりの厚さの確保が難しい。本章では、空気層の厚さを30mmとした。ウェットカップの測定値から湿気伝導率を得るために貫流率を検討する(恒温恒湿槽内の空気抵抗についてはドライカップ同様に無視した)。カップ内の空気抵抗には斉藤の提案値[5]と恒温恒湿槽内温度(25°C)を用いた。



$$\lambda'_{air} = 0.0863 \times \left( \frac{273.16 + \theta}{288} \right)^{2.75}$$

$$= 0.09493 \text{ (g / m} \cdot \text{h} \cdot \text{mmHg)} = 1.983 \times 10^{-10} \text{ (kg / m} \cdot \text{s} \cdot \text{Pa)} \quad (3-6)$$

$$\lambda'_{air(w)} = 1.983 \times 10^{-10} \div 0.030 = 6.610 \times 10^{-9} \text{ (kg / m}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{Pa)} \quad (3-7)$$

$\lambda'_{air}$  : 空気層の湿気伝導率 (kg/m・s・Pa)

$\lambda'_{air(w)}$  : ウェットカップ内空気層の湿気伝達率 (kg/m<sup>2</sup>・s・Pa)

本章では、以上の計算により得たウェットカップ内の空気抵抗を用いて中塗り土の湿気伝導率を求めた。測定で得た透湿係数を湿気貫流率とし、(3-8)式より算出する。

$$\lambda' = \frac{L}{\frac{1}{K_w} - \frac{1}{\lambda'_{air(w)}}} \quad (3-8)$$

$\lambda'$  : 中塗り土の湿気伝導率 (kg/m・s・Pa)

$K_w$  : 中塗り土の湿気貫流率 (kg/m<sup>2</sup>・s・Pa) [測定値]

算出結果した中塗り土の湿気伝導率測定結果 (平均値) を表 5 に示す。中塗り土の湿気伝導率 (25°C60%RH) を他建材と比較するとその値は、軽量コンクリート程度[6]となった。中塗り土の吸放湿性能 (平衡含水率も含む) が、他建材より極めて高いと評価することは難しい。

表 5 中塗り土の湿気伝導率測定結果 (平均値)

測定法	ドライカップ		ウェットカップ	
	25°C50%RH	25°C85%RH	25°C85%RH	25°C85%RH
恒温恒湿槽内環境	25°C50%RH	25°C85%RH	25°C85%RH	25°C85%RH
カップ内飽和塩	CaCl <sub>2</sub> (0%RH)		MgCl <sub>2</sub> (35%RH)	NaCl (77% RH)
試験体平均相対湿度	25%RH	42.5%RH	60%RH	81%RH
湿気伝導率 (kg/m・s・Pa)	$1.24 \times 10^{-11}$	$2.55 \times 10^{-11}$	$1.84 \times 10^{-11}$	$1.81 \times 10^{-11}$

### 3-2-3-3 湿気伝導率の湿度依存性

本章では中塗り土試験体の空隙率の違いが湿気伝導率測定結果に及ぼす影響を検討する。試験体の湿気伝導率は毛細管内含水（湿）率に応じる湿り空気の水蒸気拡散で予測が可能と考え、秋調合試験体の湿気伝導率を基準として高湿度域の湿気伝導率を予測した。

夏調合試験体の平均相対湿度に応じる含水率を秋調合試験体の平衡含水率関係から求め、この条件下の毛細管内湿り空気の水蒸気拡散を求めた結果、夏調合の実測値は予測値の7割程度の値となった。この影響を現場施工材に見られるばらつきとみなして、夏調合、秋調合にかかわらず試験体各測定結果を中塗り土の湿気伝導率として評価した。夏調合、秋調合の中塗り土の湿気伝導率（湿気伝導率-相対湿度関係）を図9に示す。これより調合による材料空隙率の差は、湿気伝導率に影響を与えることが分かる。図中 42.5%RH で湿気伝導率が最大値を示しているが、一般的な材料の湿気伝導率の特性からは説明がつかない。よって、本章ではこの値を参照値として示した。更に解析に利用可能な湿気伝導率の連続値を得るため、参照値を除いた測定値を最小2乗法（多項式）により近似して図中に示す。3つの測定点から近似した湿気伝導率は、相対湿度に線形的に依存する。

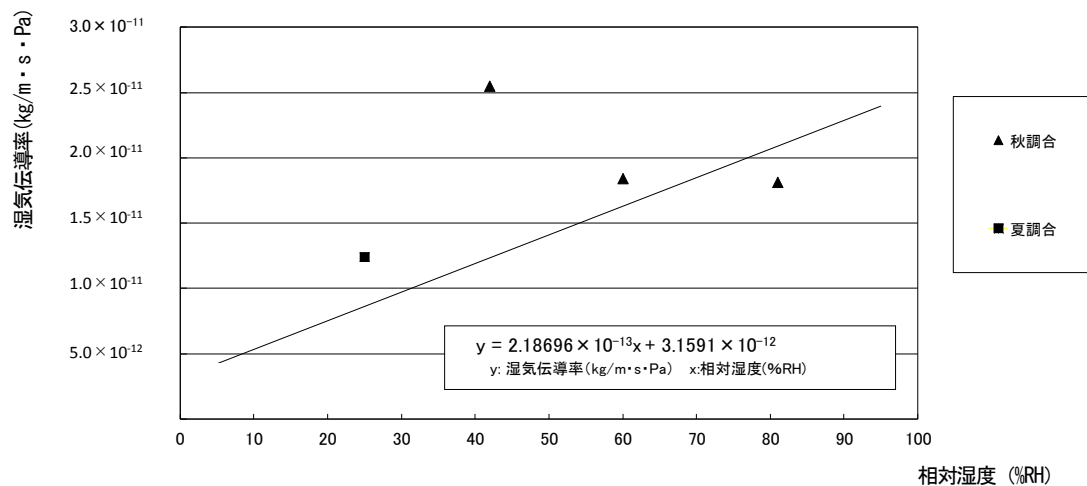


図9 中塗り土の湿気伝導率（湿気伝導率-相対湿度関係）

### 3-2-3-4 既往研究と比較した中塗り土の湿気伝導率

中塗り土の物性値測定は高田ら[7]も精力的に行っている。図10に高田らとの湿気伝導率比較(相対湿度依存性)を示す。高田らの報告にある湿気伝導率は測定値を単位換算後、本論文で用いた斉藤の提案値(カップ内の湿気伝達抵抗は空気層23mmより換算)より換算した。同一時期に施工された試験体の測定結果であるが、本章の中塗り土の湿気伝導率(60%RH:  $1.84 \times 10^{-11}$  (kg/m $\cdot$ s $\cdot$ Pa))は高田らの湿気伝導率(65%RH:  $5.10 \times 10^{-11}$  (kg/m $\cdot$ s $\cdot$ Pa))の約1/3程度となった。この原因には測定方法と測定時期の違い等が考えられる。高田らの測定では、本章に用いた中塗り土試験体をスライスし、その一部を切り取って使用している。中塗り土試験体の片側表面は本章のものと同様の状態であるが、もう片側表面は粗い。この試験体表面の違いが物性値の差を生じさせる原因となった可能性がある。高田らが試験体を測定した時期は、本章の中塗り土の湿気伝導率測定から約7年後の2014年である。測定に用いた試験体は実験室にて常温保管を行っていたが、試験体の経年変化を否定することはできない。土壁試験体は自然素材であるため、長い年月を経過することで、透過湿量が増加した可能性がある。

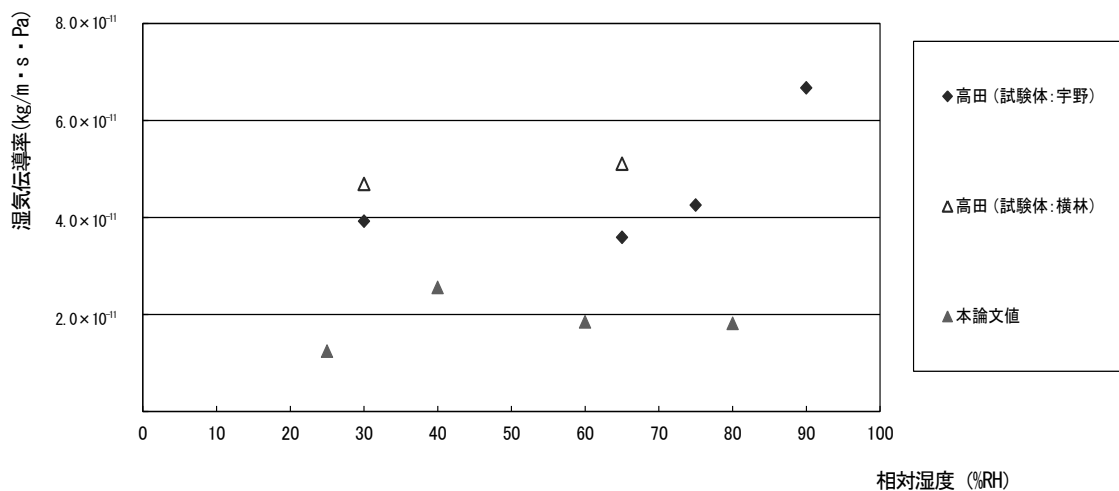


図10 高田らとの湿気伝導率比較(相対湿度依存性)[7]

### 3-2-4 熱伝導率測定

#### 3-2-4-1 測定方法

測定方法は JIS A 1412 に基づいた平板比較法[8]を採用した。熱伝導率測定装置(1)、(2)を写真 18、写真 19、熱伝導率測定試験体を写真 20、測定に用いた標準板を写真 21、熱伝導率測定位置を図 11、平均温度と熱伝導率の関係(標準板)を図 12 に示す。測定装置(写真 18、19、図 11)内の温度測定部分は試験体の上面、試験体と標準板の間、標準板の下面とした。本章で用いた標準板(200mm×200mm×25mm)は、材質がグラスウールであり、JIS A 1412-1 に従った試験検査を行ったものである。高温部はラバーヒーターを温度調節機により調整し、低温部はエアチャンバー内に冷水槽をもつ測定装置及び室内の空調機で温度を一定に保った。測定値はラバーヒーターが温度調整のために行う温度スイングの周期に応じた平均値とし、試験体の温度差が 30 分当たり 1%以上変動しない定常状態となることを確認した。この測定値によって得られた 3 試験体の中央値±5%以内に含まれる値を用いた平均値を熱伝導率とする。

試験体の養生条件は25°C55%RHの気乾状態と25°C85%RHの湿潤状態とし、測定温度差は気乾、湿潤状態共に40°C-20°C(ラバーヒーター直上配置)、30°C-20°C(ラバーヒーター直上配置)、30°C-15°C(冷水槽直上配置)の3種類とした。なお、湿潤状態の試験体は、測定中の材料内の含水率変化を防止するため食品包装用ポリ塩化ビニリデンフィルムで密封した。



写真 18 熱伝導率測定装置(1)

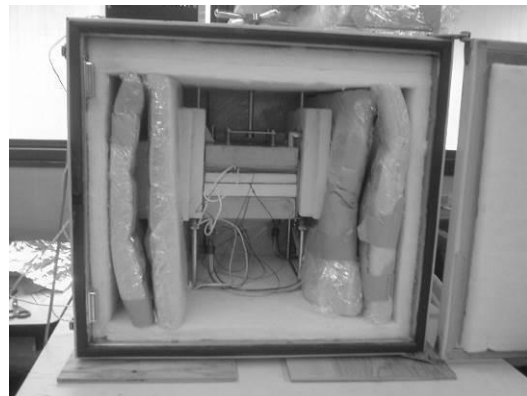


写真 19 熱伝導率測定装置(2)



写真 20 熱伝導率測定試験体

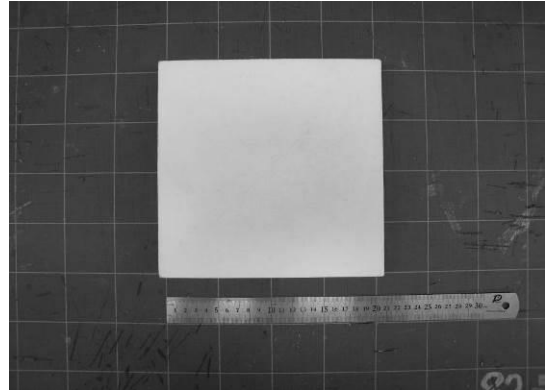


写真 21 標準板

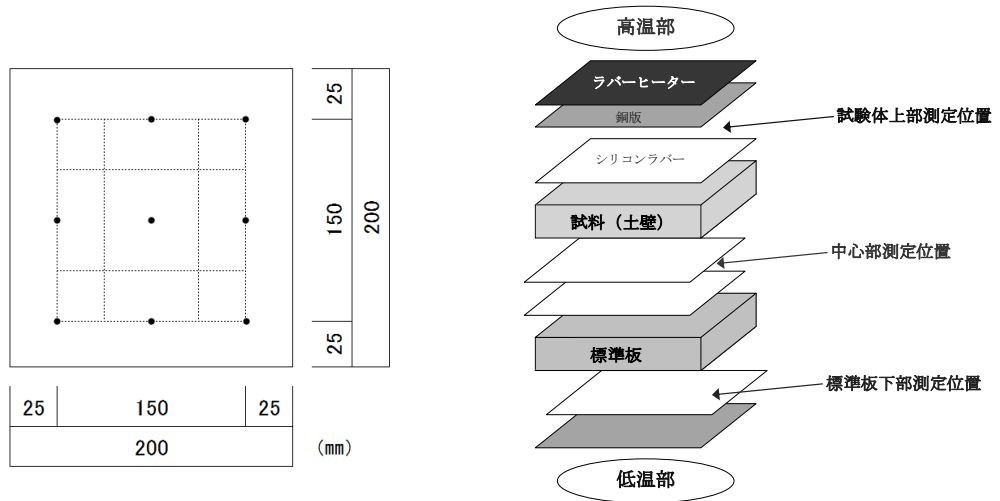


図 11 熱伝導率測定位置

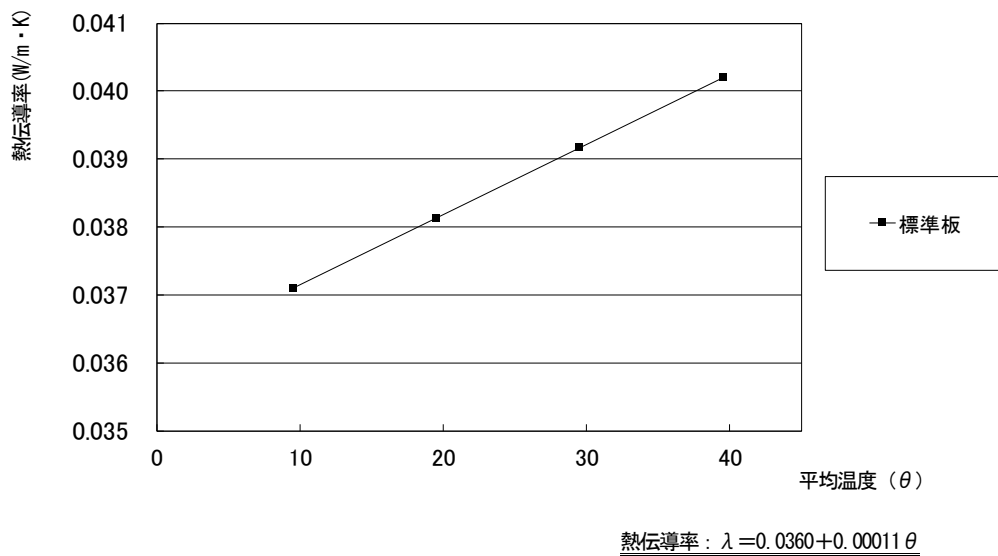


図 12 平均温度と熱伝導率の関係（標準板）

### 3-2-4-2 測定結果

測定開始より約3時間後に定常状態を確認した後、放湿量確認の質量測定を行った。質量変化は約0.03%であり測定前後の含水率変化は無視できるほど小さい。熱伝導率算出用の温度測定結果（25°C55%RH 試験体1）を表6、熱伝導率測定結果（中塗り土：平均値）を表7に示す。測定結果はJISに準拠し、平均値としたものである。結果より試験体上部及び標準板下部については隣り合う測定点に対して差が最大0.3°Cと少なく、全体を見て比較しても示度の差がほとんどない。また、図示しないが、測定値の中心について全体を見た時の示度の差は最大1.0°Cであり、隣り合う測定点だけで見た時の差は最大0.7°Cであった。この結果より、隣り合う測定点で示度の差が少ないので二次元的に熱は流れていないと考えられる。また高温面である試験体上部で既にいくらか温度差があるので、それが伝わった熱流を考慮すると水平面における分布はないとみなすことができる。表7の熱伝導率は、測定結果の重み付け平均と式(3-8)、(3-9)より算出した。

表 6 熱伝導率算出用の温度測定結果 (25°C55%RH 試験体 1)

	試験体上部			中央部			標準板下部		
温度 (°C)	40.0	40.2	40.2	37.8	38.2	37.9	21.3	21.3	21.2
	40.1	40.1	40.2	38.1	38.2	38.0	21.1	21.1	21.2
	40.0	40.0	40.0	37.8	38.1	37.8	21.4	21.3	21.1

表 7 熱伝導率測定結果 (中塗り土 : 平均値)

	25°C55%RH			25°C85%RH		
試験体平均温度 (°C)	15.8	30.3	39.9	16.0	30.3	39.9
熱伝導率測定平均値 (W/m・K)	0.355	0.362 <sup>注2)</sup>	0.324 <sup>注2)</sup>	0.379	0.387	0.429

$$R_c = \frac{d_0}{\lambda_0} \times \frac{\Delta\theta}{\Delta\theta_0} \quad (3-8)$$

$$\lambda_{test} = \frac{d}{R_c} \quad (3-9)$$

$R_c$  : 試験体の熱抵抗 ( $m^2 \cdot K/w$ )       $\lambda_0$  : 標準板の平均温度における熱伝導率 ( $w/m \cdot K$ )

$\Delta\theta$  : 試験体温度差 (K)       $\Delta\theta_0$  : 標準板温度差 (K)       $d_0$  : 標準板の厚さ (m)

$\lambda_{test}$  : 試験体の熱伝導率 ( $w/m \cdot K$ )       $d$  : 試験体厚さ (m)

### 3-2-4-3 熱伝導率の温湿度依存性

熱伝導率の温度依存性を図 13 に示す。図示のように中塗り土の熱伝導率の温度依存性は 30.3°C 以下ならば無視し得る。また、熱伝導率は気乾、湿潤いずれも 39.9°C で約 1 割変化する。湿潤状態で平均温度 39.9°C の熱伝導率は 30°C 以下の熱伝導率の約 1 割増しであり、気乾状態では平均温度 39.9°C の値が 30°C 以下の測定値より約 1 割程度小さくなった。気乾状態 39.9°C で熱伝導率の値が小さくなるということが材料の特性であるかは現時点では判断がつかないため、今後の検討課題とする。

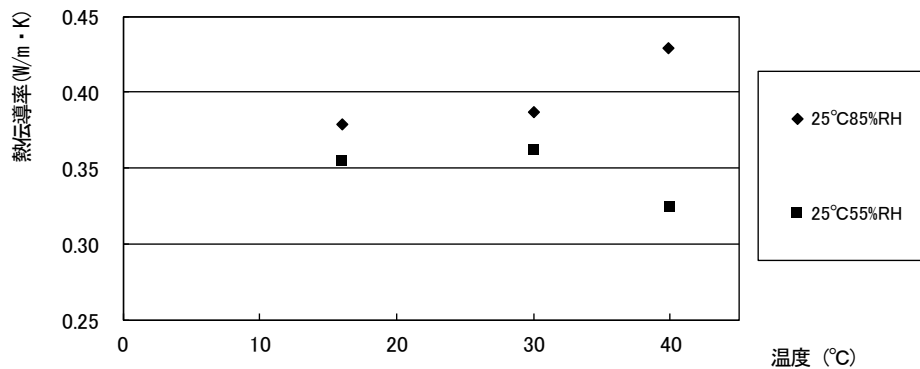


図 13 異なる温度状態における熱伝導率-温度関係 (中塗り土)

異なる湿度状態における熱伝導率-相対湿度関係 (中塗り土) について図 14 に示す。15.8°C・30.3°Cの同一条件において熱伝導率の温度依存性は約7%高くなる (55%RH から 85%RH)。本章では、この変化量を今後の解析に利用可能とするため直線補間した。

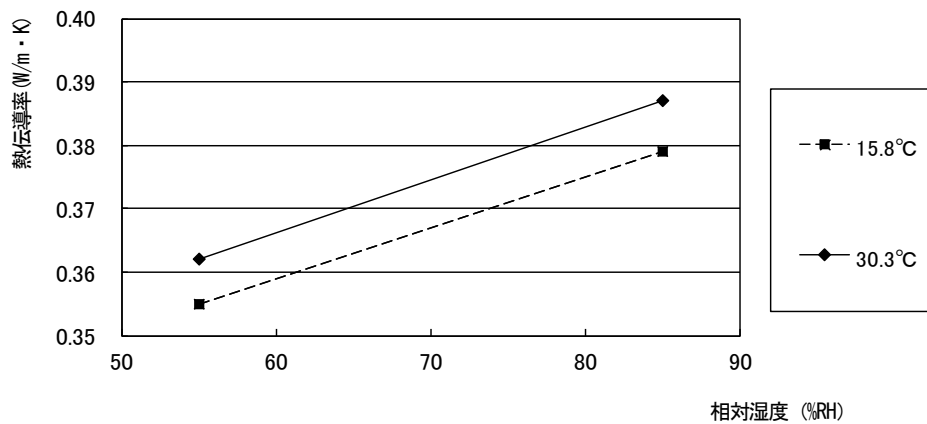
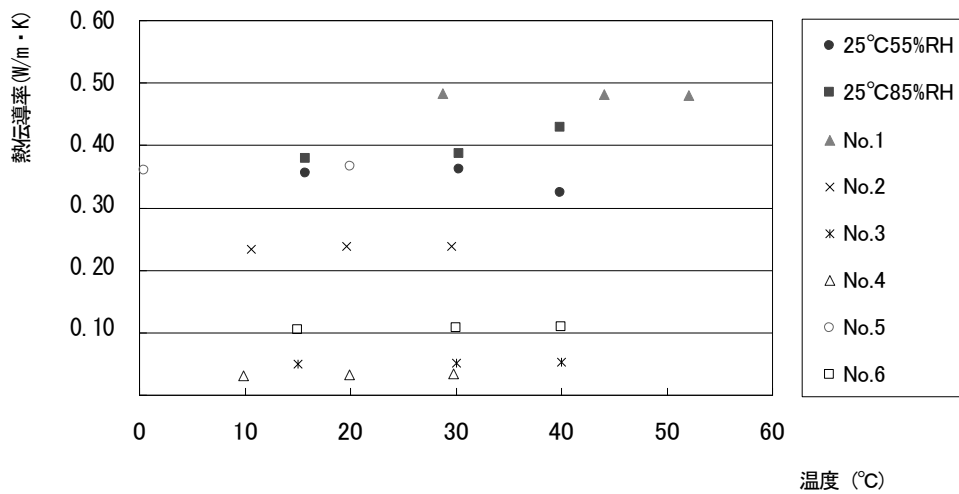


図 14 異なる湿度状態における熱伝導率-相対湿度関係 (中塗り土)

他建材と比較した熱伝導率-温度関係[1][6][9]を図 15 に示す。図示のとおり本測定値は宮野らと比較して約0.8倍となった。中塗り土の熱伝導率は、一般的な内装材である石膏ボードの約1.5倍、断熱性能に優れるグラスウール (2号10K) の約7倍となる。中塗り土を単純に断熱材の代替品とし、断熱性能を期待することは難しい。中塗り土と最も近い熱伝導率を有する建材は、軽量コンクリートである。





No. 1 中塗り土                      No. 2 石膏ボード  
 No. 3 けい酸カルシウム板      No. 4 グラスウール(43.4kg/m<sup>3</sup> 50mm)  
 No. 5 軽量コンクリート        No. 6 けいそう土断熱れんが

図 15 他建材と比較した熱伝導率-温度関係[1][6][9]

他建材と比較した熱伝導率-相対湿度関係[1][9]を表8に示す。本章では、文献[1][9]に乾燥と表示されていたものは気乾状態と判断し、同列表示した。中塗り土の熱伝導率の含水率依存性は他の新建材と同様に少ない。

表 8 他建材と比較した熱伝導率-相対湿度関係[1][9]

	気乾状態	湿潤状態 (80%RH)
本測定結果 (15.8°C)	0.36	0.38 <sup>注3)</sup>
中塗り土	0.48	-
石膏ボード	0.14	0.17
グラスウール (2号10K)	0.05	0.06
けい酸カルシウム板	0.12	0.15

単位 : W/m·K

### 3-2-5 まとめ

中塗り土の物性値測定より得られた結果は以下のとおりである。

- 1) 中塗り土の平衡含水率曲線と気乾状態から湿潤状態までの幅広い熱湿気伝導率測定値を得た。
- 2) 材料内の水分許容値を示す平衡含水率関係は廉価である程度の調湿性能を有する石膏ボードと大略一致した。一般的な調湿性能として必要とされる中湿度域での含水率は大きくない。
- 3) 湿気伝導率は小さく、調湿性能の評価にかかわる材料内湿気拡散速度は遅く、湿気が伝わりにくい。含水率依存性は線形とみなせる。
- 4) 熱伝導率の温度・含水率依存性の差は共に約 1 割と小さく、 $0.362 \text{ (W/m} \cdot \text{K)}$  ( $25^\circ\text{C}55\%RH$ : 試験体平均温度  $30.3^\circ\text{C}$ ) の一定値として扱いうる。
- 5) 中塗り土の熱伝導率は、一般的な断熱材であるグラスウール (2号10K) の約 7 倍であるため、単純に断熱材の代替品として断熱性能を期待することは難しい。

## 3-3 珪藻土の物性値測定

### 3-3-1 試験体

試験体に使用した材料は、珪藻土 40%と粉末樹脂 60%である。水は本来材料と同等質量で練るが本章では試験体を型枠 (耐熱性硬質塩化ビニル管) で成型したため水分量を半分 (水 : 珪藻土壁材 = 1 : 2) とした。試験体施工は中塗り土の試験体を施工した 1 級技能士が施工した。施工期間は試験体の乾燥収縮によるひび割れを防ぐため、1 週間毎に 2 mm ずつの上塗りを重ねたことで約 1 ヶ月の期間を要した (ただし、平衡含水率試験体は型枠に珪藻土を流し込んで鏝押さえを行い、作成した (施工 1 日目))。試験体の調合状況、湿気伝導率試験体施工状況、湿気伝導率試験体施工状況 (1)、(2) を写真 22、写真 23、写真 24、写真 25、各試験の試験体平均寸法と乾燥密度 (珪藻土 : 平均値) を表 9 に示す。各試験体は中塗り土と同様、技能者の鏝押さえにより入念に施工された。



写真 22 試験体の調合状況



写真 23 熱伝導率試験体の施工状況



写真 24 熱伝導率試験体の施工状況(1)



写真 25 熱伝導率試験体の施工状況(2)

本章の珪藻土の乾燥密度は、最大で  $1095\text{kg/m}^3$  となった。これは、本間[11]らの値 ( $1080\text{kg/m}^3$ ) とほぼ同等となり、一般建材と比較すると石膏ボード[1]程度である。

表 9 試験体平均寸法と乾燥密度 (珪藻土 : 平均値)

試験体	縦 (mm)	横 (mm)	高 (mm)	質量 (kg)	容積 ( $\text{m}^3$ )	密度 ( $\text{kg/m}^3$ )
平衡含水率用	20.12	20.03	12.22	0.05	51.14	1105
熱伝導率用	200.04	200.28	20.08	0.88	965.02	1095
湿気伝導率用	$\phi 80.2$		10.50	0.05	55.28	1024

### 3-3-2 平衡含水率測定

#### 3-3-2-1 測定方法

平衡含水率の測定は、中塗り土測定と同様にデシケータ法を用いた。恒温室、インキュベーター内の温度を常温 25℃に設定し、デシケータ内の相対湿度を含水域毎に分類できるように飽和塩 (MgCl<sub>2</sub> : 32%RH、Mg(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub> : 56%RH、NaCl : 77%RH、KCl : 87%RH) を用いた。

#### 3-3-2-2 測定結果と平衡含水率曲線

測定は2008年10月26日より測定開始した。測定終了はMgCl<sub>2</sub> (32%RH)、Mg(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub> (56%RH) が11月15日 (21日間)、NaCl (77%RH) が11月24日 (30日間)、KCl (87%RH) が12月3日 (39日間) となった。平衡含水率測定結果 (珪藻土 : 平均値) を表 10、平衡含水率関係 (珪藻土) を図 16 に示す。本測定結果を文献値 [1] [11] [12] と比較した。本測定結果の平衡含水率は材料 1 [1]、2 [11]、3 [12] より大きくなり、10%程度と小さい値となった。更に材料 1、2、3 に比べ高湿度域での含水率はほとんど増えない。本章で試験体とした珪藻土は試験体として十分な成型ができるよう水分比が実用より小さい材料となり、技能者が鋺押さえすることで材料内部が密となるため、毛細管の発達を実用の珪藻土のように十分行われていない。それゆえ、保有水分量の小さい材料としての測定結果が得られたと予測される。

表 10 平衡含水率測定結果 (珪藻土 : 平均値)

相対湿度 (%RH)	32	56	77	87
乾燥質量 (g) [a]	5.452	5.189	5.765	5.138
平衡質量 (g) [b]	5.453	5.191	5.770	5.159
変化量 (g) [b-a]	0.001	0.002	0.005	0.021
質量含水率 (kg/kg)	$1.8 \times 10^{-4}$	$2.5 \times 10^{-4}$	$8.4 \times 10^{-4}$	$4.1 \times 10^{-3}$
容積含水率 (kg/m <sup>3</sup> )	0.19	0.26	0.93	4.18

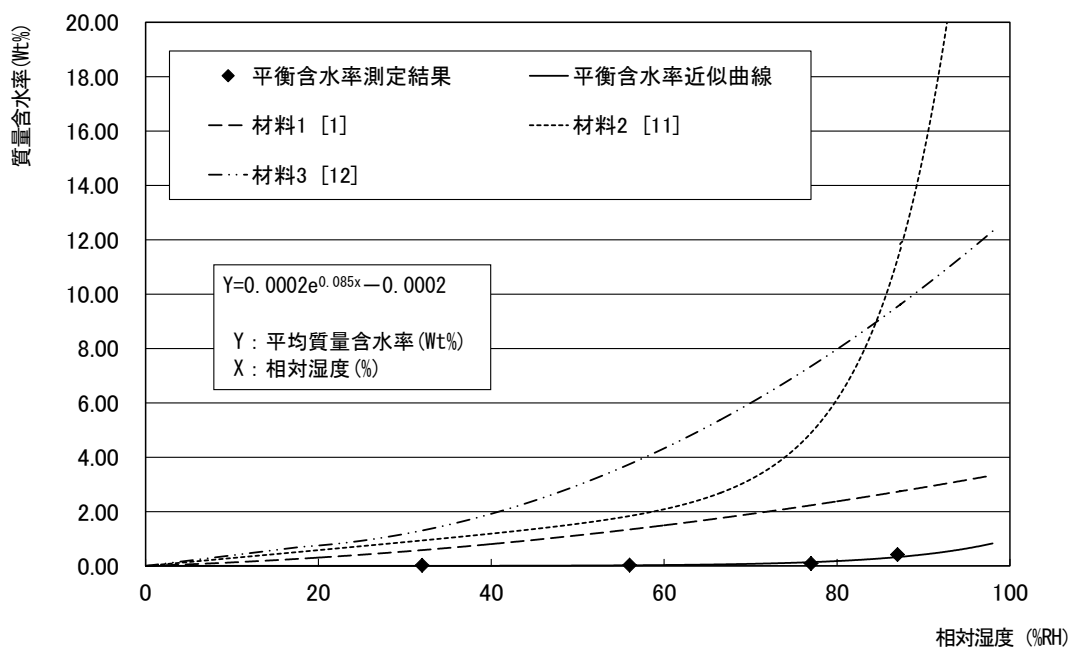


図 16 平衡含水率関係 (珪藻土) [1][11][12]

### 3-3-3 湿気伝導率測定

#### 3-3-3-1 測定方法

湿気伝導率の測定法は中塗り土と同様に、JIS A 1324[3]と ISO 12572[4]に準じて行った。ドライカップは低湿度域(25°C27%RH、25°C42.5%RH)とし、ウェットカップは高湿度域(25°C58.5%RH、25°C86%RH)とする。恒温恒湿槽は25°C54%RH、85%RHとし、飽和塩溶液[4]にはMgCl<sub>2</sub>(25°C32%RH)、NaCl(25°C77%RH)を用いた。試験体の断湿にはパラフィンを使用する。測定では試験体を乾燥状態にした後、ウェットカップ測定の試験体のみ養生(25°C55%RH、25°C85%RH)を行い、測定を開始した。ドライカップ及びウェットカップの各々の透湿量変化(珪藻土)を図17、18に示す。定常状態は増加した透湿量の5測定点(図17、18中白抜きマーカで表示したデータ)が連続して前測定値の5%以内となった時点と判断し測定を終了した。定常状態に達するにはドライカップ(低湿度域)25°C27%RHが11日間、25°C42.5%RHが9日間、ウェットカップ(高湿度域)25°C58.5%RHが8日間、25°C86%RHが13日間の期間を要した。

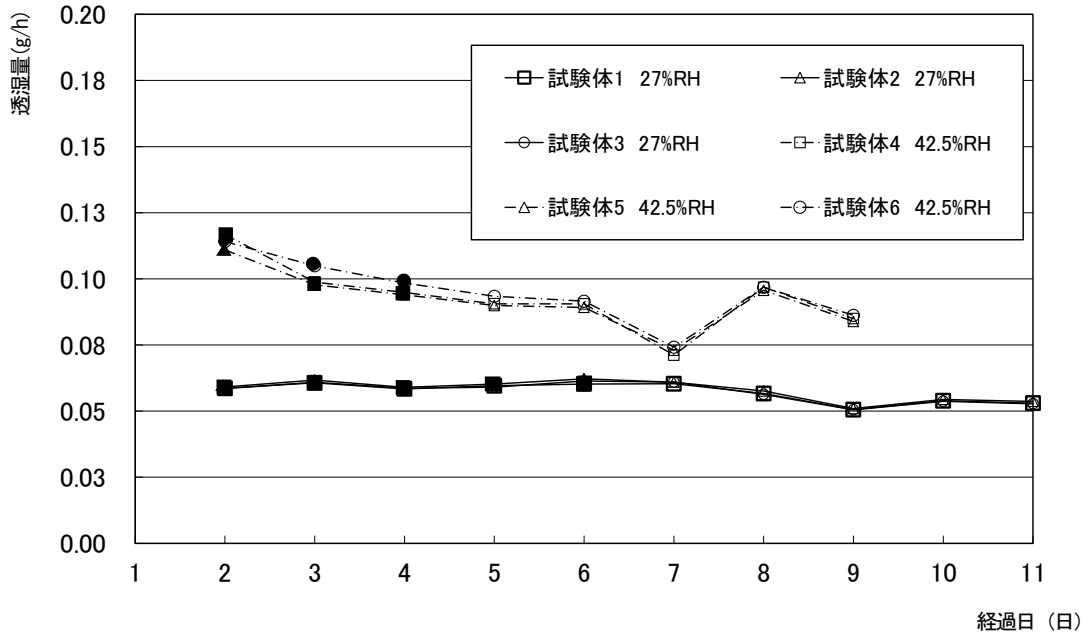


図17 ドライカップ透過湿量変化 (珪藻土) 注1)

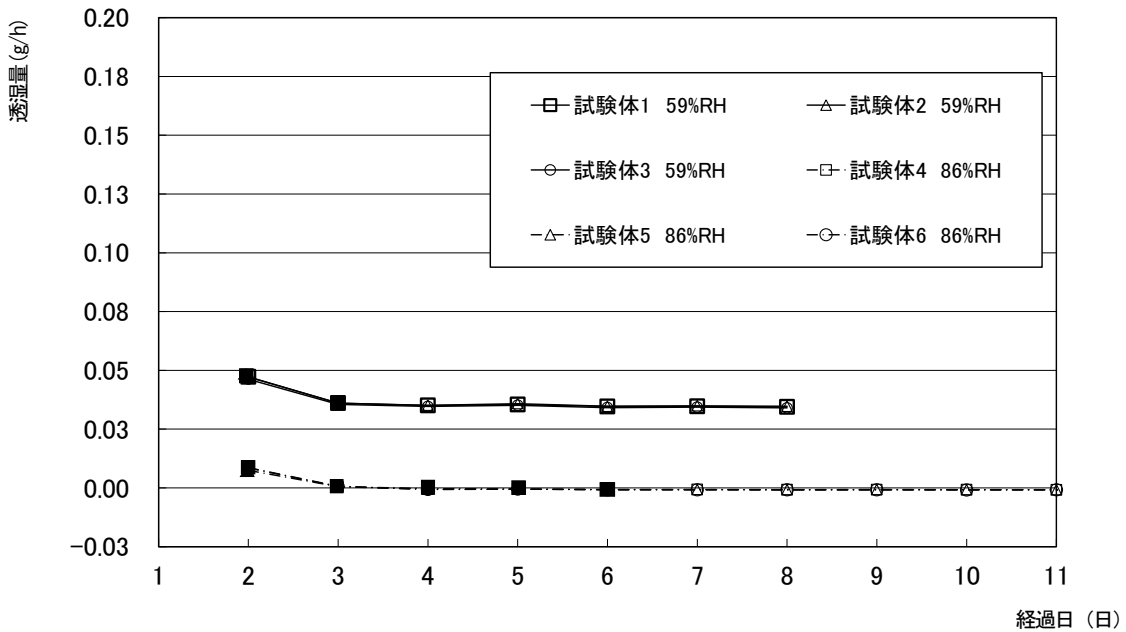


図18 ウェットカップ透過湿量変化 (珪藻土) 注1)

### 3-3-3-2 測定結果

湿気伝導率測定結果（珪藻土：平均値）を表 11、珪藻土の湿気伝導率（湿気伝導率-相対湿度関係）を図 19 に示す。湿気伝導率の算出方法は中塗り土と同様とした。図示のとおり低中湿度域での湿気伝導率は  $1.5 \times 10^{-11}$  (kg/m・s・Pa) 程度の一定とみなせるが、高湿度域（86%RH）では低中湿度域の 60%程度の値となる。高湿度域の湿気伝導率が小さい原因については検討の必要がある（カップ放湿）。25°C58.5%RH の測定では、試験体が測定環境（相対湿度）に対して安定するまで約 2 日間かかったが、その後安定した透過水分量が得られ、定常性を確保することができた。25°C86%RH では試験体が測定環境に対して安定するまで吸湿が見られ、その後放湿する。透過水分量が非常に小さく、測定に長時間を要したため、定常性に不安が残る。

表 11 湿気伝導率測定結果（珪藻土：平均値）

測定法	ドライカップ		ウェットカップ	
	25°C54%RH	24°C85%RH	24°C85%RH	24°C85%RH
恒温恒湿槽内環境	25°C54%RH	24°C85%RH	24°C85%RH	24°C85%RH
カップ内飽和塩	CaCl <sub>2</sub> (0%RH)		MgCl <sub>2</sub> (32%RH)	KCl (87% RH)
試験体平均相対湿度	27%RH	42.5%RH	58.5%RH	86%RH
湿気伝導率 (kg/m・s・Pa)	$1.53 \times 10^{-11}$	$1.55 \times 10^{-11}$	$1.54 \times 10^{-11}$	$9.46 \times 10^{-12}$

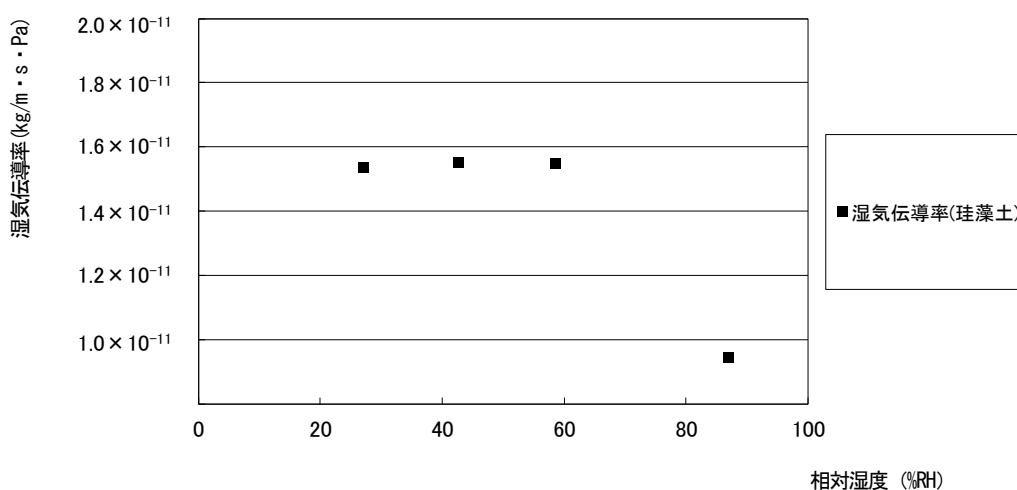


図 19 珪藻土の湿気伝導率（湿気伝導率-相対湿度関係）

### 3-3-3-3 湿気伝導率の湿度依存性

珪藻土と他建材の湿気伝導率[1]を図20に示す。比較のために石膏ボード、赤松の各相対湿度における湿気伝導率[1]を示した。本章の珪藻土の湿気伝導率は、図20に示すように低中湿度域(20~60%RH)で $1.5 \times 10^{-11}$  (kg/m・s・Pa)程度の値となり、高湿度域(相対湿度80%)では低中湿度域の6割程度の湿気伝導率となる。一般的な多孔質材は、高湿度域で水分の液移動が顕著になり湿気伝導率が高くなるが、本章の珪藻土では負の相関がみられた。この相関は今後の検討課題とする。吸放湿性がある石膏ボード、木材(赤松)の湿気伝導率と本章で測定した珪藻土の湿気伝導率を比較する。図示のように珪藻土の湿気伝導率は赤松より大きく、石膏ボードより小さい。中湿度域(60%RH)では、珪藻土の湿気伝導率が赤松の約2.5倍となった。拡散係数の大きいと言われている珪藻土であるが、本章では珪藻土が密実に施工されたため、石膏ボードの約5割の湿気伝導率しか得られない。

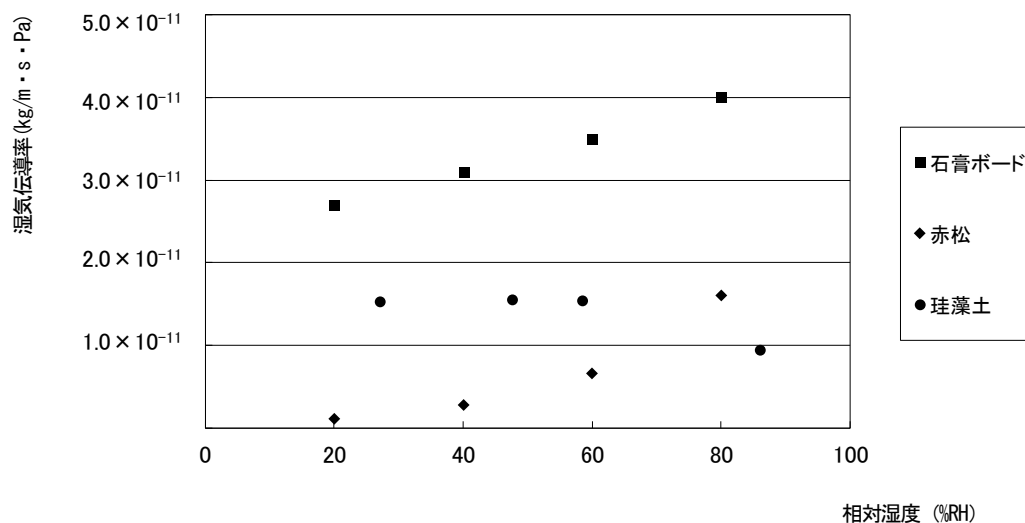


図20 珪藻土と他建材の湿気伝導率[1]

### 3-3-4 熱伝導率測定

#### 3-3-4-1 測定方法

測定方法は中塗り土と同様の平板比較法(JIS A 1412)を採用した。測定装置は中塗り土測定



に用いたものと同一であり、試験体の養生条件は 25°C55%RH を気乾状態、25°C85%RH を湿潤状態とする。温度差は気乾・湿潤状態共に 40-20°C（ラバーヒーター直下配置、冷水槽直上配置）、35-15°C（ラバーヒーター直下配置）、30-10°C（冷水槽直上配置）の4種類とし、測定装置内の温度測定点は同一平面上の温度を均一とみなせることを確認したため、試験体の上面、試験体と標準板の間、標準板の下面の中央部1点のみの測定とした。

### 3-3-4-2 測定結果と考察（温湿度依存性）

熱伝導率算出に用いた温度測定結果（試験体平均温度 10°C、20°C）を表 12、熱伝導率測定結果（珪藻土：平均値）を表 13、異なる温度状態における熱伝導率-温度関係（珪藻土）を図 21 に示す。熱伝導率算出に用いた式は中塗り土のものと同様のものである。図示のとおり気乾・湿潤状態共に試験体平均温度 10°C、20°Cでの温度依存性は殆どないが、40°C近辺の熱伝導率は 20°Cと比較して 10%程度小さい。通常熱伝導率は高温になるに従って大きくなるため、この物理的性質については今後検討の必要がある。相対湿度依存性はどの試験体平均温度においても小さい。

表 12 温度測定結果（試験体平均温度 10°C、20°C）

養生条件	試験体	試験体 平均温度 (°C)	ラバーヒーター ・標準板境界 (°C)	標準板 ・冷水槽境界 (°C)	標準板 ・試験体境界 (°C)
25°C・55%RH	試験体2	11.6	30.9	12.8	10.4
	試験体3	11.7	30.9	13.0	10.4
	試験体4	11.6	30.9	12.8	10.4
24.4°C・85%RH	試験体2	11.6	31.0	12.6	10.5
	試験体3	11.6	31.1	12.6	10.5
	試験体4	11.6	31.0	12.6	10.5
25°C・55%RH	試験体2	21.6	40.9	22.8	20.4
	試験体3	21.7	40.8	22.9	20.5
	試験体4	21.6	40.8	22.8	20.4
24.4°C・85%RH	試験体2	21.6	41.1	22.6	20.5
	試験体3	21.7	41.0	22.7	20.6
	試験体4	21.6	41.2	22.6	20.6

表 13 熱伝導率測定結果 (珪藻土：平均値)

試験体養生条件	25°C55%RH			
試験体平均温度 (°C)	11.6	21.6	34.7	39.6
熱伝導率平均値 (W/m・K)	0.232	0.236	0.208	0.208
試験体養生条件	25°C85%RH			
試験体平均温度 (°C)	11.5	21.6	34.5	39.7
熱伝導率平均値 (W/m・K)	0.270	0.277	0.212	0.233

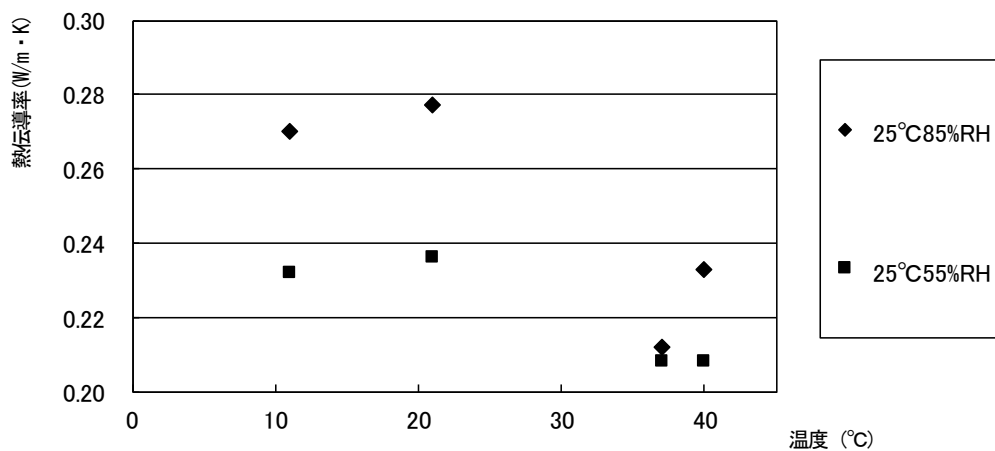


図 21 異なる温度状態における熱伝導率-温度関係 (珪藻土)

珪藻土は内装材として用いられることが多いため、石膏ボード、合板と比較した。図 22 に他建材との熱伝導率比較 (熱伝導率-相対湿度) を示す。図示のように、乾燥状態では、低温時の珪藻土の熱伝導率が石膏ボードの約 38% と小さく、高温時でも約 33% と小さい。同様に湿潤状態では、低温時が約 35%、高温時が約 30% と小さい。合板との比較では、乾燥状態では、低温時の値は合板の値より約 60% 大きく、高温時の値は約 40% 大きい。湿潤状態では、低温時の値は約 70% 大きく、高温時の値は約 20% 大きい結果となった。珪藻土の熱伝導率は石膏ボードよりも小さく、合板よりも大きな値である。本章で測定された珪藻土の断熱性能は、一般に使用される断熱材と比較すると殆どない。しかし、内装材としての比較では石膏ボードより大きい断熱性能を有することを確認した。

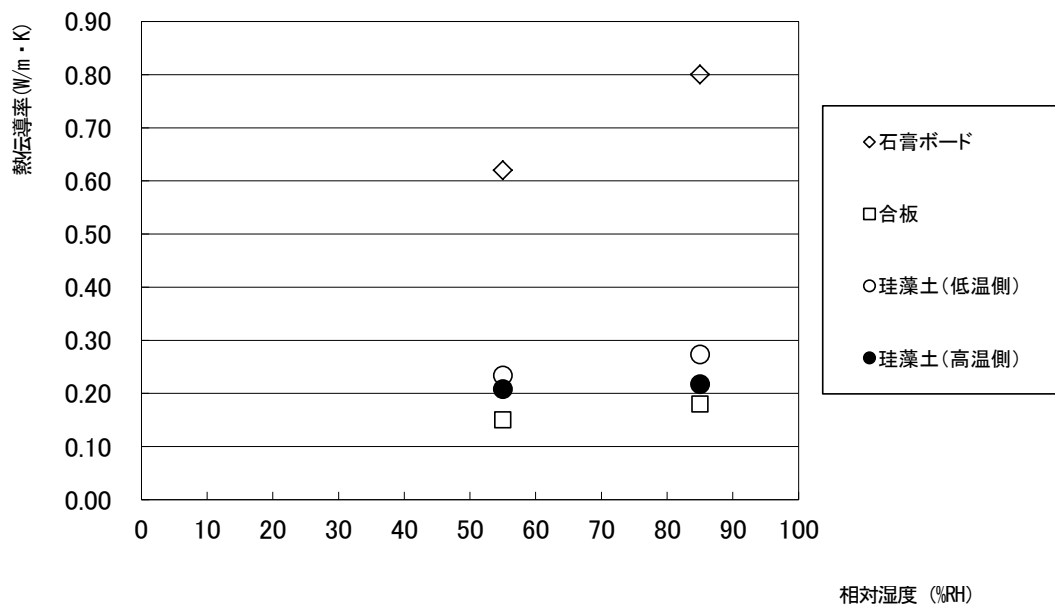


図 22 他建材との熱伝導率比較 (熱伝導率-相対湿度)

### 3-3-5 数値解析による吸放湿性能の評価

#### 3-3-5-1 解析条件

本章では、測定で得た物性値を用いて数値解析 (解析条件は JIS A 1470 [13] に準じる) を行い、珪藻土の吸放湿性能を評価した。吸湿側の境界条件は周期的 (24 時間) に相対湿度の条件を変えたもの (25°C 50-90%RH) とし、もう一方は 25°C の断湿状態とした。解析モデルを図 23 に示す。計算には、第 5 章に記載した蒸気拡散支配の熱水分同時移動方程式 [10] を用いた。時間刻みは 0.005 秒刻みとし、時間、場所は前進差分、珪藻土の初期条件は 25°C 50%RH とした。解析に用いた諸物性値を表 14 [1] [2] [12] に示す。本章では、既往研究で報告された平衡含水率を用いて、数値解析により材料 1、2、3 (材料 1 は [1]、2 は [11]、3 は [12] の平衡含水率を用いた) の吸放湿性能を求めた。材料 1、2、3 の数値解析に用いた諸物性値は表 13 のとおりとする。

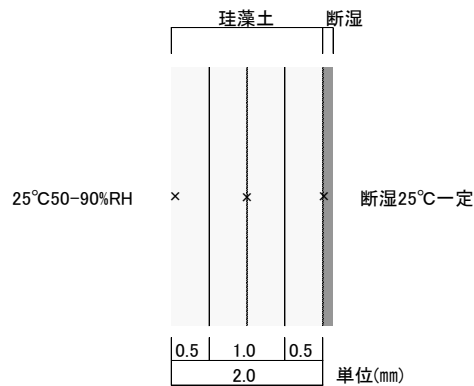


図 23 解析モデル

表 14 諸物性値[1][11][12]

材料	乾燥密度 (kg/m <sup>3</sup> )	比熱 (J/kg・K)	熱伝導率 (W/m・K)	湿気伝導率 (kg/m・s・Pa)	空隙率 (m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> )
本測定結果	1028	1188	0.236	$1.55 \times 10^{-11}$	0.53
材料1, 2, 3	1080	1188	0.33	$1.33 \times 10^{-11}$	0.53

### 3-3-5-2 解析結果と考察

吸放湿解析結果 (25°C) [1][11][12]を図 24 に示す。図 16 に示す平衡含水率が低中湿度域で大きな材料3[12]は吸湿量が最大であり、材料2[11]の最大含水量の値を僅かに上回る。材料1は高湿度域の平衡含水率が大きくないため最大吸湿量が材料2,3の半分以下となる。本解析結果は最大値をとる材料3の8%程度の値となった。吸放湿の変化量は高湿度域での平衡含水率の急激な増加がある場合、長時間の吸湿が期待できるが、本測定結果のように高湿度域での平衡含水率の変化が乏しい材料は材料1[1]と同様初期の時間のみで吸放湿が発生した。

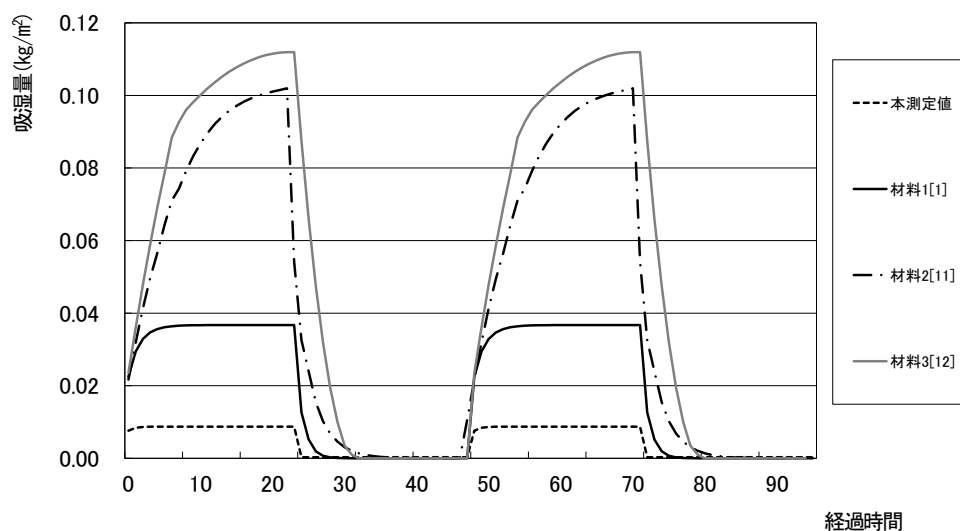


図 24 吸放湿解析結果 (25°C) [1][11][12]

### 3-3-6 まとめ

測定した練り混ぜ水分量の小さい市販珪藻土壁材の物性値評価は以下のとおりである。

- 1) 平衡含水率は珪藻土単体の測定値の 1 割と小さい。
- 2) 湿気伝導率は低中湿度域で  $1.5 \times 10^{-11}$  (kg/m · s · Pa) 程度の一定値とみなせる。高湿度域での値は今後検討する。
- 3) 熱伝導率は気乾・湿潤状態共に温・湿度の依存性が殆どない。ただし、試験体平均温度が高い場合(30°C、40°C)では、20°Cでの測定結果より 10%程度小さい値となる。
- 4) JIS A 1470 (周期法) の吸放湿性能評価に相当する数値解析の結果、本測定結果の吸湿量は、低中湿度域の水分容量が大きな材料の 8%程度しかない。本章の珪藻土試験体では、高湿度域で水分容量が急激に増加することや長時間に及ぶ吸湿が望めない。

### 3-4 第 3 章のまとめ

本章では、左官技能者が施工した単独材料 (中塗り土、珪藻土) の平衡含水率、湿気伝導率、

熱伝導率の測定することで、材料の断熱・調湿性能を客観的に評価する物性値を得た。本章で測定を重ねた結果、ある一定の技能レベルを有する技能者が施工する建築材料は測定誤差が少なく、均一材料として扱えることが分かった。本章のものと他者の物性値が異なる主な原因には、試験体の施工過程の違い等が挙げられる。本章の試験体は左官技能者が鏝押さえを行ったものであり、他者の試験体と比較して密実に仕上げられたものである。密実に施工された中塗り土の平衡含水率は石膏ボード、熱湿気伝導率は軽量コンクリート程度となった。中塗り土の吸放湿性能が他建材と比較して極めて高いと評価することは難しい。熱伝導率は一般的な断熱材であるグラスウール(2号10K)より大きいため、壁体には断熱補強の検討が必要である。しかし、施工された土壁の容量等を考えるとそれらの要因が室内環境に対して優位に働く可能性もある。第5章ではこれらの物性値を用いた数値解析を行い、技能者が施工した土壁が住宅の室内環境にいかに関与するかを評価する。

注1) 図中の定常状態に至るまでの測定期間は各試験体によって異なる。

注2) 本熱伝導率は、既報[14]の値を再評価したものである。2006年度に使用した測定装置は1次元熱流の保障に不安があった。従って、熱伝導率を評価する表面温度は試験体表面積60%以内の9測定温度を面積の重み付け平均したものとした。本章をまとめるにあたり既報[14]の測定結果から、熱伝導率測定装置内の熱流を非定常熱伝導方程式で解析した。測定装置内の熱流の1次元性が確認できたため改めて既報[14]の試験体中央温度を用いて熱伝導率を再評価した。

注3) 湿潤状態(80%RH)の熱伝導率は、本測定値を直線補間したものである。

## 引用文献

[1] 日本建築学会編：建築設計資料集成1環境, 丸善株式会社, 1979. 1

[2] 日本建築学会編 環境工学委員会 熱環境小委員会 湿気 WG 湿気物性アカデミックスタンダ

- ード SWG：湿気物性学術基準—測定法と測定値について—, 日本建築学会, pp. 3～33, 2003. 7
- [3] 日本工業規格：JIS A 1324 建築材料の透湿係数測定方法, 日本規格協会, 1995
- [4] International Organization for Standardization：ISO 12572 Hygrothermal performance of building materials and products – Determination of water vapour transmission properties, Japanese Standards Association, 2001. 6
- [5] 日本建築学会：建築学便覧 I 計画, 丸善株式会社, p. 955, 1980
- [6] M. Kummar KUMARAN：建築材料の熱・空気・湿気物性値, 丸善, pp. 15～17, 2001. 9
- [7] 森山直哉, 高田暁：伝統的建材の湿気物性に関する研究（その1）土壁と漆喰の湿気伝導率測定, 日本建築学会近畿支部研究報告集第54号, pp. 285～288, 2014
- [8] 日本工業規格：JIS A 1412 熱絶縁材の熱抵抗及び熱伝導率の測定方法 附属書 A（規定）, 日本規格協会, 1994
- [9] 宮野則彦, 宮野秋彦：土壁の熱伝導特性に関する考察（第2報）, 第24回日本熱物性シンポジウム講演論文集, pp. 95～97, 2003. 10
- [10] 中村泰人, 松尾陽, 松本衛, 土屋喬雄, 橋秀樹, 宮田紀元：新建築学体系 10 環境物理, 彰国社, pp. 105～157, 1984. 8
- [11] 本間義規, 銚井修一, 福島明：吸放湿性建築材料の実用的湿気物性同定に関する基礎的検討, 日本建築学会計画系論文集 513 号, pp. 31～37, 1998. 11
- [12] 鈴木慎, 渡村信治, 前田雅喜 大橋文彦：稚内珪藻頁岩の調湿特性について, 粘土科学討論会講演要旨集 41 巻, pp. 170～171, 1997. 9
- [13] 日本工業規格：JIS A 1470 建築材料の吸放湿性試験方法—第1部 湿度応答法—日本規格協会, 2008
- [14] 横林修造, 佐藤真奈美：兵庫県産左官材料の湿気特性に関する考察第2報数値解析による土壁の断熱・吸放湿性能の検討, 学術講演梗概 2006 年度（神奈川）大会 D-2, pp. 5～6, 2006. 9

## 第4章 伝統技能で施工された土壁の熱湿気性状

### 4-1 はじめに

本章では、左官技能者が伝統技能により実施工した土壁の熱湿気性能評価を行う。左官材料である中塗り土の物性値測定では、測定用に施工した試験体を採用することが多く、精度よく施工された試験体は恒温恒湿状態で養生した後に測定される。このような実験室測定では施工現場と条件が異なるため、環境に応じた物性値を測定、評価することが難しい。本章ではこのような問題を解決するため、左官技能者が実施工した土壁の熱伝導率測定を行った。

4-2 では、木舞、貫建てに荒土塗り、中塗り土塗り仕上げを施した実施工に近い試験体の熱コンダクタンスと木舞建てに中塗り土仕上げを施した試験体の熱伝導率測定を行い、土壁の熱的性能を評価した。木舞や貫を用いた土壁は複合材料であるため、その熱特性についても検討を行い、結果を記述する。

4-3 では、施工現場で実施工した土壁の熱湿気性状を評価するため、中塗り土のひび割れ状況を調査し、数値解析を用いた評価を行った。第3章では中塗り土の湿気物性を測定、評価したが、測定結果のみで中塗り土の調湿効果を期待することは難しい。本章では現場施工で発生する中塗り土の乾燥収縮に伴うひび割れ（以下本章ではひび割れという）が室内の熱湿気性状に及ぼす影響について評価する。現場施工材料である土壁の施工精度と養生条件は、主に主要構造部の構造耐力や材料強度確保により決定される。一般に必要な材料強度が確保できれば、材料表面に発生するひび割れが問題になることはない。しかし、定常状態で養生管理を行うことのできない施工現場では材料表面に僅かなひび割れが発生する。本章ではひび割れがない試験体（以下標準試験体という）の熱湿気物性測定値がひび割れの発生により受ける影響を数値解析により定量的に評価する。実験室測定では、施工現場の環境に応じて発生したひび割れを持つ試験体を測定することが難しい。本章では施工現場のひび割れ発生状況を把握するために施工現場でひび割れの実測を行った。熱湿気物性値を評価するには施工現場で試験体を採取することも重要である。しかし、試験体採取のために完成した壁体を破壊することは困難であるため、本章では中塗り土の温湿度



挙動を数値解析により評価した。

## 4-2 伝統技能で施工された土壁(木舞・貫入り)の熱物性測定

### 4-2-1 試験体

#### 4-2-1-1 試験体施工

試験体施工図を図1に示す。試験体は1辺900mmの試験体(以下900角という)と1辺300mmの試験体(以下300角という)を各3体(No.1~3)用いた。900角は下地を貫(2本)、間渡し(6本)、木舞(28本)とし、左官塗りには荒土<sup>注1)</sup>(厚さ55mm)、中塗り土<sup>注1)</sup>(両面:厚さ10mm)塗りを施した。300角は下地を木舞(12本)とし、左官塗りには中塗り土(総厚さ:60mm)を施す。下地構造(900角、300角)を写真1、写真2、木舞建て施工状況を写真3、木舞建て(外気側)を写真4、裏なで前施工状況を写真5、左官塗り施工状況を写真6に示す。土壁の裏なでとは荒土塗りの段階で荒土を木舞裏面に十分突出させ、同日中に鏝でなで返し、木舞になじませる技能である。この技能を用いることで木舞と荒土の構成はより密実になり、後述する裏返し作業が容易となる。下地材の貫には杉材、間渡しと木舞には真竹、木舞の固定には藁縄を使用した。試験体の木舞間隔は22~24mmとなり、標準施工(45mm以下)[1]のものより細かい。

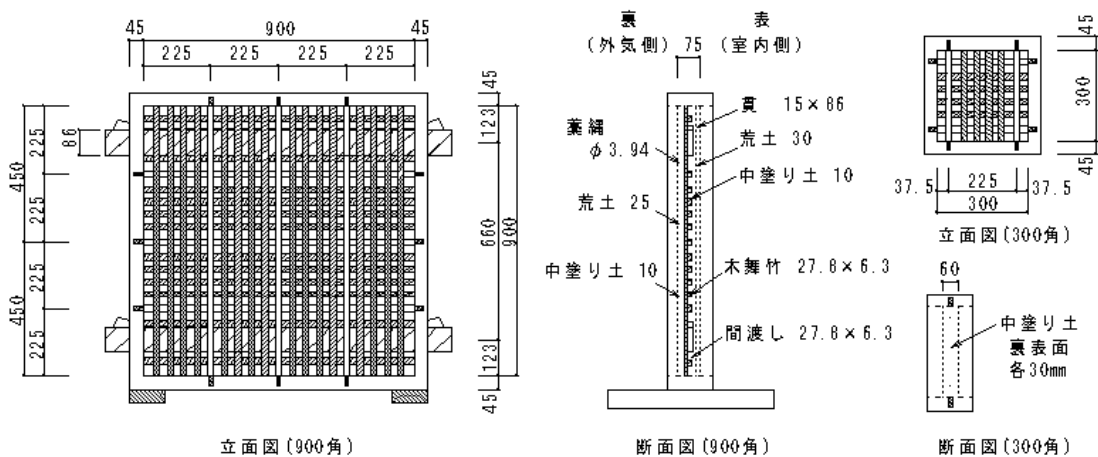


図1 試験体施工図



写真1 下地構造 (90°角)



写真2 下地構造 (30°角)



写真3 木舞建て施工状況

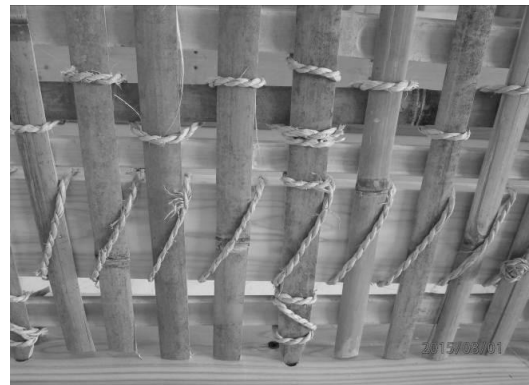


写真4 木舞建て (外気側)



写真5 裏なで前施工状況



写真6 左官塗り施工状況

左官塗り工程（900 角）を図 2 に示す。図 2 の工程は左官塗りの伝統的作業工程であり、900 角施工の工程は、ちり回り塗りと暖簾打ち、むら直し、上塗りを省いた必要最低限のものである。水あわせとは土壁に藁すさを加え塗りつけを行うまで湿潤状態に保ったまま保存しておくことであり、裏返しとは壁土をやや厚めに塗ってなであげ、貫の下に隙間ができないように充填する技能である。裏返し後は貫板周辺の収縮によるひび割れを防ぐため荒土の完全乾燥後、貫面の裏に藁を伏せ込む貫伏せを行い、中塗り土塗りを施した。土壁の仕上げは中塗り土塗りとした。漆喰塗り等の上塗りを含む施工では暖簾打ち（壁と柱間のちり際に発生する乾燥収縮防止を目的に麻布等を糊着する）という工程が施される。

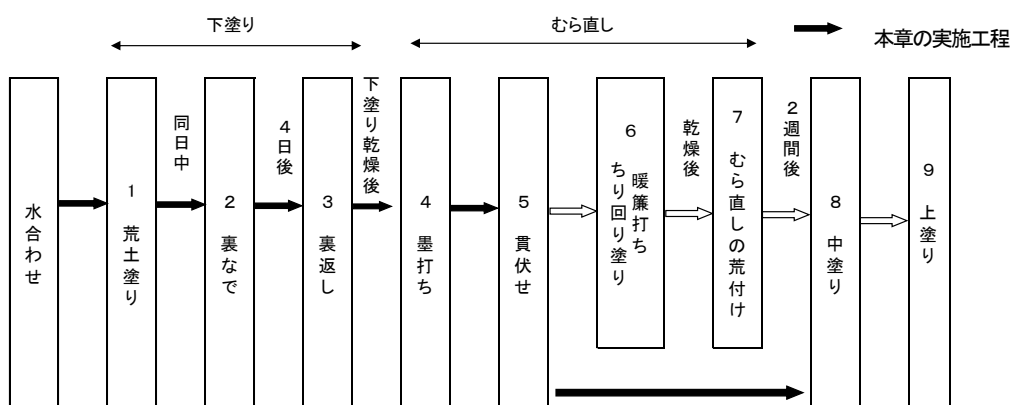


図 2 左官塗り工程（900 角）

施工日程を表 1 に示す。施工期間は 2015 年 7 月 28 日から 8 月 19 日の約 25 日間とした。養生期間は施工後より約 2 ヶ月間とする（兵庫県姫路市）。養生後の試験体は恒温恒湿室に保管し、熱物性測定を実施した。測定期間は 11 月 4 日から 13 日までの約 10 日間である。

荒土調合比を表 2、荒土（原材料）の保存状況を写真 7、荒土の原材料を写真 8 に示す。荒土に使用した土は田圃の床土（兵庫県たつの市産）を約 5 年間山に寝かせた後、左官方が練り保管したものである。藁すさの藁は手刈りし、乾燥させたものを使用した。荒土用藁すさは 20 cm 程度に切断したものであり、中塗り土用藁すさは 2 cm 程度に切断した後、揉みほぐしたものを使用した。

藁や藁すきは土壁の乾燥に伴う収縮とひび割れを防止し、藁からでる滲出液の成分は土粒子に膠着作用を促す。荒土の調合状況を写真9、中塗り土の調合状況を写真10に示す。荒土は床土と藁すき、水で調合する。第3章の調合比と共に中塗り土の調合比を表3に示す。中塗り土に用いた砂は第3章の調合が標準的[2]であり、砂が土の1.5倍の容積で調合されたが、本章の中塗り土は土（兵庫県たつの市産）、砂（岡山県吉井川産）がほぼ同量であり、すきの量の割合は第3章と比較して約2倍と多い。土壁施工で調合される土、砂、すきの量は左官技能者個々で調整されるため、常に標準調合とは一致しない。

試験体の使用材料(1体あたりの平均値)を表4に示す。木舞、貫、藁縄の測定は施工前に行い、平均断面寸法は木舞竹が27.78mm×6.26mm、貫が86mm×15mm、藁縄がφ3.94mm、平均材料密度は木舞が422.5kg/m<sup>3</sup>、藁縄が559.0kg/m<sup>3</sup>であることを確認した。



写真7 荒土（原材料）の保存状況



写真8 荒土の原材料



写真9 荒土の調合状況



写真10 中塗り土の調合状況

表1 施工日程

	900角	300角	場所
2015/7/28	荒土、中塗り土練り		姫路城内 左官練り場(株式会社 山脇組)
2015/8/1	木舞かき、荒土塗り(片面)	木舞かき、中塗り土塗り(片面)	兵庫県立ものづくり大学校 実習棟
2015/8/5	荒土塗り(片面)	中塗り土塗り(片面)	
2015/8/19	中塗り土塗り(両面)		
2015/11/4~13	測定開始		一般社団法人 日本建築総合試験所 環境試験室

表2 荒土調合比<sup>注2)</sup>

	2015/7/28	
	容積(L)	質量(kg)
土	198.8	-
藁	-	21.7
水	145.2	

表3 中塗り土調合比<sup>注3)</sup>

	2004/9/8		2005/7/2		2015/7/28	
	容積(L)	質量(kg)	容積(L)	質量(kg)	容積(L)	質量(kg)
土	5.00	6.65	6.00	7.01	65.48	89.06
砂	8.00	11.31	8.00	11.00	65.26	90.77
すさ	-	0.15	-	0.16	-	2.86
水	3.50		5.35		40.00	

表4 試験体の使用材料(1体あたりの平均値)<sup>注4)</sup>

	900角					300角		
	荒土	中塗り土	貫	木舞竹	藁縄	中塗り土	木舞竹	藁縄
容積(m <sup>3</sup> )	$3.64 \times 10^{-2}$	$2.43 \times 10^{-2}$	$2.32 \times 10^{-3}$	$5.29 \times 10^{-3}$	$3.16 \times 10^{-4}$	$6.15 \times 10^{-2}$	$1.73 \times 10^{-4}$	$1.22 \times 10^{-5}$
質量(kg)	69.82	47.86	0.93	2.53	0.33	121.13	0.30	0.05

#### 4-2-1-2 試験体収縮率

900角の外周部測定位置を図3、試験体(900角)の収縮幅測定状況を写真11、試験体(900角)の材料厚さ測定状況を写真12に示す。乾燥収縮で発生した型枠と試験体との隙間はすきまゲージで測定した(1辺9分割位置)。試験体の面積は熱物性測定日に脱型後、自立した支柱に水系を水平方向に張り付けて収縮分の確認測定を行い、公称面面積から収縮分を引き去って求める。試験体厚さは、外周をノギスと鋼尺で測定することで試験体の厚さを求めた。熱コンダクタンス測定後の研り作業で確認した測定位置の構造確認状況を写真13、材料の充填状況を写真14、表面温度測定位置(900角)を図4に示す。試験体は熱物性測定位置を対象に研り作業を行い、均質な材料(木舞、貫)構成を確認した。

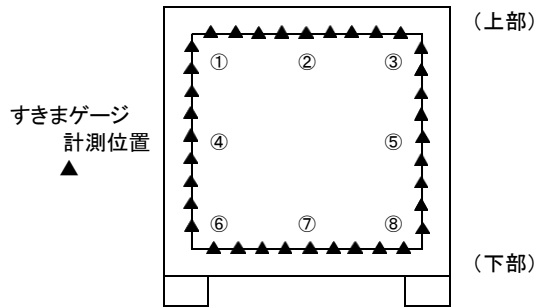


図3 900角の外周部測定位置

表5 900角の収縮幅と収縮厚さ(平均値)

(mm)

		No.1	No.2	No.3	平均値
幅	①,②,③	1.37	1.36	1.42	1.38
	③,⑤,⑧	0.51	0.72	0.56	0.60
	①,④,⑥	0.36	0.32	0.39	0.36
厚さ	⑥,⑦,⑧	0.26	0.33	0.16	0.25
	①,③,⑥,⑧	4.74	4.08	6.29	5.04
	②,④,⑤,⑦	2.63	2.14	3.76	2.84

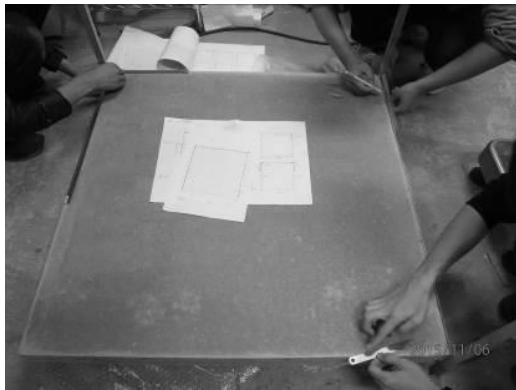


写真11 試験体(900角)の収縮幅測定状況



写真12 試験体(900角)の材料厚さ測定状況



写真13 測定位置の構造確認状況



写真14 材料の充填状況

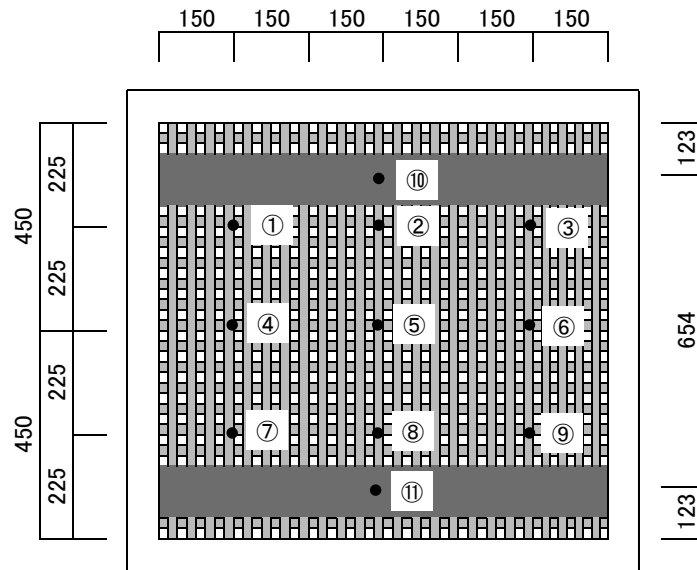


図4 表面温度測定位置 (900 角)

900 角の収縮幅と収縮厚さ（平均値）を表 5 に示す。試験体上部の収縮幅は左右下部の平均値の約 3.5 倍の収縮幅となることを確認した。試験体上部の収縮幅は土の自重が重力方向に加わるため、他の部位に比べて顕著となる。外周部の厚さは最大値 10.8 mm、最小値 0.4 mm の収縮が確認できた。外周の収縮厚さでは表 5 に示すように隅角部（①、③、⑥、⑧）で顕著であり、平均値では外周中央部（②、④、⑤、⑦）の約 1.8 倍の収縮が確認できた。本章では外周中央部の平均値を試験体の代表厚さとみなす。300 角の収縮率を表 6、900 角の収縮率を表 7 に示す。定常時（気乾状態）の容積収縮率（平均値）は 300 角が 5.7%、900 角が 4.4% となる。試験体の厚さと面積の収縮差を 900 角の測定結果より評価する。面積の収縮率は約 1% 未満であるのに対し、厚さの収縮率は約 4.0%（3 試験体平均厚さ 0.072m）と大きく、収縮の過半を占める。土壁の乾燥収縮は左官技能者が実施工で施工する上塗りや暖簾打ちで処理する。300 角、900 角の収縮率より荒土と中塗り土の収縮率も算出した。収縮率は荒土が 4.4%、中塗り土が 5.5% となり、中塗り土の収縮率は荒土の約 1.3 倍であることを確認した。

900 角試験体(施工後約 40 日目)を写真 15、900 角試験体(施工後約 90 日目)を写真 16 に示す。土壁表面には、施工に使用した藁縄が原因となり灰汁が時折発生する。灰汁は土の粒子間結合を

促進するため構造上問題視されることはない。土壁は意匠上、表面仕上げの灰汁防止のために藁縄や藁すさを水に浸しておく灰汁抜きやエマルジョン系有機溶剤を塗布する灰汁止めを行うが、本論文の試験体は材料物性値への影響を懸念し、灰汁止めを行わなかった。表面を灰汁止めした一般住宅の土壁は吸放湿性能が損なわれ、土壁の湿気性状を十分に発揮できない可能性がある。

表 6 300 角の収縮率 (平均値)

		No.1	No.2	No.3
面積 (m <sup>2</sup> )	公称	0.0900		
	実寸	0.0900	0.0900	0.0900
塗り厚さ (m)	公称	0.0600		
	実寸	0.0566	0.0563	0.0573
容積 (m <sup>3</sup> )	公称	0.0054		
	実寸	0.0051	0.0050	0.0052
収縮率(%)		5.90	6.50	4.56

表 7 900 角の収縮率 (平均値)

		No. 1	No. 2	No. 3
面積 (m <sup>2</sup> )	公称	0.8100		
	実寸	0.8028	0.8038	0.8002
厚さ (m)	荒土	公称	0.0550	
		実寸	0.0541	0.0545
	中塗り	公称	0.0200	
		実寸	0.0183	0.0184
	合計 (総塗り)	公称	0.0750	
		実寸	0.0724	0.0729
容積 (m <sup>3</sup> )	公称	0.0608		
	実寸	0.0581	0.0586	0.0570
収縮率 (%)		4.36	3.54	6.17

$$\text{収縮率 (\%)} = (\text{公称容積} - \text{実寸容積}) / \text{公称容積} \times 100$$



写真 15 900 角試験体 (施工後約 40 日目)

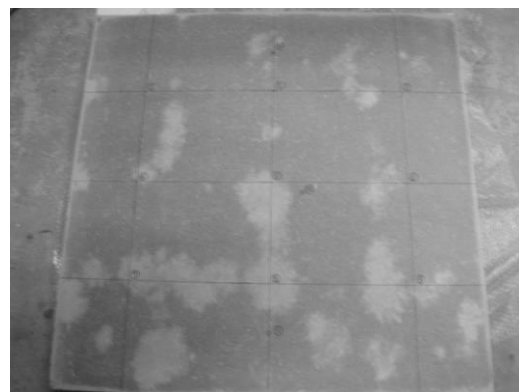


写真 16 900 角試験体 (施工後約 90 日目)



試験体(300角)の質量変化を図5に示す。試験体の質量測定には電子天秤(A&D社、最大秤量6kg、天秤精度0.005kg)を用いた。定常(気乾)状態は質量変化が3日連続で0.1%以内となる日と判断する。300角の定常状態は施工終了日から約60日後の2015年10月7日で確認した。900角の定常状態は養生過程における質量測定が困難であったため、300角の定常確認日より約1ヶ月後を定常とみなした。試験体は定常確認後、(一財)日本総合試験所(大阪府吹田市)に輸送し、測定を行った。測定までは、同試験所内の恒温恒湿室に保管する。

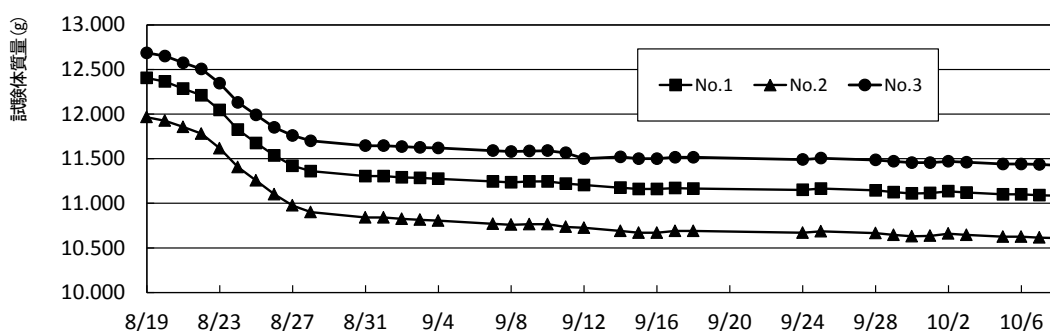


図5 試験体(300角)の質量変化

材料密度を表8に示す。荒土の材料密度は中塗り土より小さい(約0.94倍(8月1日))。中塗り土は施工時期の材料密度が第3章(平均値:1768.4kg/m<sup>3</sup>)より約3%(8月5日)大きいが、砂やすさの調合比に大きな差があっても、材料密度に大きな違いはない。養生後の材料密度は減少が著しい。10月30日の材料密度は表示のように第3章の約0.9倍となった。養生後の材料密度が小さくなる原因のひとつには測定試験体の乾燥収縮がある。第3章では小試験体での測定<sup>注5)</sup>であったため試験体の乾燥収縮が観察されなかったが、本章の材料密度測定に用いた試験体は試験体容積が大きいものを用いたため、土の乾燥収縮が顕著に表れた。表7に示した300角の収縮率より換算した乾燥後の中塗り土の材料密度(気乾状態)は1576kg/m<sup>3</sup>となり、900角の収縮率から換算した荒土の乾燥後の材料密度(気乾状態)は1562kg/m<sup>3</sup>となる。定量的評価に必須な材料密度は乾燥後の値であるため、湿式工法建材の乾燥収縮と材料密度に関する考察は今後継続して評価していきたい。

表 8 材料密度<sup>注5)</sup>

	状態	°C	%RH	材料密度 kg/m <sup>3</sup>	
				荒土	中塗り土
2015/7/28	練り後	32.1	63.6	1828	1910
2015/8/1	練り前	31.6	61.5	1718	1827
2015/8/5	練り前	32.0	59.8	1811	1856
2015/10/30	材齢87日目	32.0	59.8	1562	1576

#### 4-2-2 熱コンダクタンス・熱伝導率測定

##### 4-2-2-1 測定方法と結果

測定は900角を校正熱箱法[3] (JISA1420 付属書B)、300角を熱流計法[4] (JISA1412-2) で実施した。試験体平均温度は900角が30°C (40°C-20°C)、300角が20°C (30°C-10°C) である。測定では中塗り土の熱伝導率 (温度依存性) を確認した。測定温度範囲内における試験体の熱伝導率は、温度依存性が極めて小さい。校正熱箱内の風速は0.5m/s以下、壁体放射率は0.9以上である。900角の定常状態は試験体両側の空気及び表面温度が一方向に変化せず、その変化が30分毎の5回測定で±0.1°C以内となる状態と判断した。300角の定常状態は試験体の表面温度が上昇又は下降し続けなくなった後、試験体温度差が30分当たり1%以上変動せず、かつ、熱流計の出力が30分当たり2%変動しない状態と判断した。各試験体の測定時間は900角で約150分 (試験体設置から約1日間放置)、300角で約180分であった。測定点 (図4) は試験体表面に既定の9点、複合材熱物性評価のために⑩、⑪を追加した。①～⑨は土と木舞 (以下木舞部分という)、⑩、⑪は土と木舞、貫 (以下貫部分という) が伝熱経路にある。900角の熱電対配置状況を写真17、校正熱箱法測定装置を写真18に示す。測定機器に用いた熱電対の取り付けにはサージカルテープ、補強にスプレー糊を用いた。測定前後の試験体質量測定結果を表9に示す。試験体は熱伝導率測定まで20°C55%RHの環境に置かれる。測定前後の質量変化は最大0.32%と小さい。このため、本章では測定への含水率依存性を無視した。

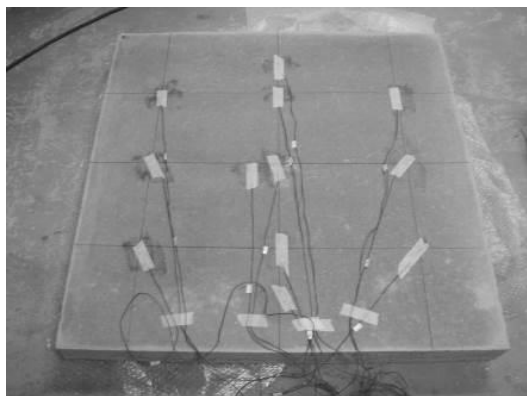


写真 17 900 角試験体の熱電対配置状況



写真 18 校正熱箱法測定装置

表 9 測定前後の試験体質量測定結果

	900角			300角		
	No.1	No.2	No.3	No.1	No.2	No.3
試験前(kg)	78.63	79.33	80.38	7.088	7.272	7.347
試験後(kg)	78.22	79.13	80.12	7.087	7.268	7.345
変化率(%)	0.24	0.25	0.32	0.01	0.04	0.02

表面温度分布(900 角)を図 6 に示す。900 角は複合材料であるため、試験体の定常状態を確認する木舞部分に温度分布が生じる。試験体 No. 3、測定位置⑦の温度差は他の測定点の平均値と比較して約 14%小さい。これは、測定点⑦の試験体厚さ(伝熱距離)が他の部分に比べて薄い(64.5 mm(荒土 45 mm、中塗り土 16.5 mm))ためである。温度測定位置①～④、⑥～⑨(木舞部分)の表面平均温度差は中央部⑤の表面温度差に対して約 3%大きい。隅角部の表面平均温度差も中央部⑤に対し約 3.5%大きいとその差は僅かであり、後述する熱伝導率に換算した結果でもその差は僅かである。試験体は実施工に近い縦置き状態で施工されたため、試験体上下部の温度差についても考察を行った。木舞部分①～③、⑦～⑨の表面温度差は差が少ない。⑩、⑪(貫部分)の表面平均温度差は中央部⑤の表面温度差より約 18%大きい。これは貫部分の貫の熱伝導率が荒土より小さいためである。

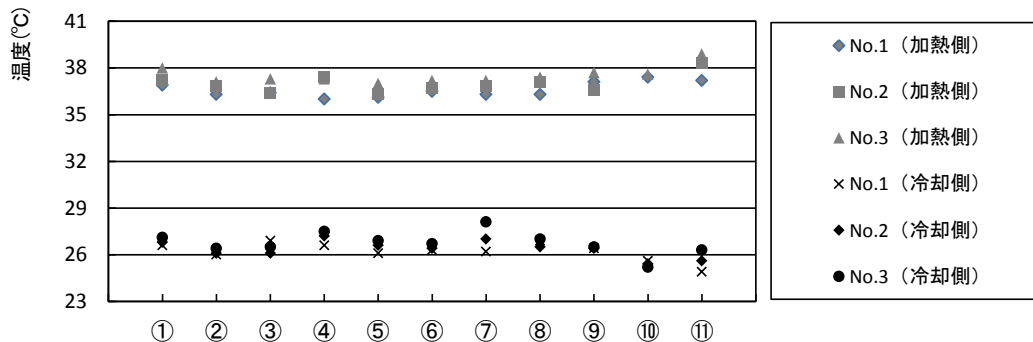


図6 表面温度分布 (900 角)

表6に示した材料厚さで換算した900角の熱コンダクタンス測定結果を表10に示す。900角の熱コンダクタンス、熱伝導率は11測定点の測定平均値より算出したものである。3試験体間の熱コンダクタンス、等価熱伝導率の最大誤差は2%程度となり精度良い結果が得られた。貫と木舞、荒土、中塗り土で構成された土壁の等価熱伝導率は0.392(W/m・K)(3体の平均値)となる。300角の熱伝導率測定結果を表11に示す。結果のばらつきはNo.1試験体の伝熱面の不陸により生じた。本章ではNo.2、3試験体の平均値0.344(W/m・K)を木舞と中塗り土で構成した土壁の熱伝導率とみなした。

建材、左官仕上げとの熱伝導率比較[7][8][9]を表12に示す。本章では900角の熱コンダクタンスより求めた等価熱伝導率を土壁の熱伝導率として評価する。土壁の熱伝導率は構造材(普通コンクリート等)に比べて約0.3倍と小さいが、内装建材(石膏ボード、漆喰等)と比較すると大きく、約2.8~4.9倍となる。土壁の比較対象とした建材は施工状況等で容量(仕上げ厚)が異なるため考察することが必要であるが、土壁のみで施工した一般住居には断熱補強が必要である。荒土、中塗り土の熱伝導率[10]を表13に示す。荒土、中塗り土の熱伝導率は測定結果より算出した。300角、900角の熱伝導率を分散型のみかけの熱伝導とみなし、竹(0.15(W/m・K))[5]、藁(0.07(W/m・K))[6]の熱伝導率と試験体の重み付け平均(容積比)より、中塗り土と荒土の熱伝導率を算定する。中塗り土の熱伝導率は0.37(W/m・K)であり、第3章の値との差が少ない(約1.03倍)。荒土の熱伝導率は0.46(W/m・K)となる。荒土は中塗り土より藁の配合が多く、材料密度が小さいが、

熱伝導率は約 1.2 倍と大きい。この原因は、藁で連結される土粒子間で熱橋に近い伝熱回路が生じたことが予測される。

表 10 900 角の熱コンダクタンス測定結果

		単位	No.1	No.2	No.3	平均値
試験体通過熱量		W	45.80	46.60	46.60	46.33
試験体 表面温度	低温側(上部)	°C	26.20	26.40	26.70	26.43
	高温側(下部)		36.60	37.00	37.50	37.03
試験体平均温度			31.40	31.70	32.10	31.73
伝熱面積		m <sup>2</sup>	0.81	0.81	0.81	0.81
熱コンダクタンス		W/m <sup>2</sup> ・K	5.470	5.510	5.360	5.446
熱伝導率		W/m・K	0.396	0.400	0.382	0.392

表 11 300 角の熱伝導率測定結果

		単位	No.1	No.2	No.3
熱流密度		W/m <sup>2</sup>	92.66	109.90	97.80
試験体厚さ		m	0.06	0.06	0.06
試験体表面温度	高温側	°C	30.0		
	低温側		10.0		
熱コンダクタンス		W/m <sup>2</sup> ・K	4.63	6.57	5.75
熱伝導率		W/m・K	0.264	0.356	0.332

表 12 建材, 左官仕上げとの熱伝導率比較[7][8][9]

(建築材料)				(左官仕上げ)			
材料	°C	%RH	λ	材料	°C	%RH	λ
石膏ボード	20	乾燥状態	0.14	漆喰	-	-	0.08
ALC	20	乾燥状態	0.15	土壁(中塗り土仕上げ)	20	55	0.39
土壁	20	55	0.39	大津壁	40.8	-	0.61
れんが	29.8	-	0.44	プaster	20	乾燥状態	0.62
普通コンクリート	20	乾燥状態	1.30	タイル・モルタル	20	乾燥状態	1.30

表 13 荒土, 中塗り土の熱伝導率[10]

材料	°C	%RH	λ
中塗り土 <sup>注6)</sup>	20	55	0.36
中塗り土	20	55	0.37
荒土	20	55	0.46
中塗り土	17.5	-	0.49
荒土	21.8	-	0.52

#### 4-2-2-2 試験体温度分布の考察

900 角の測定結果を例として換算した貫、木舞を有する土壁の熱伝導率（900 角 : No. 3）を表 14、木舞、貫部分の熱伝導率算出モデル（900 角）を図 7 に示す。木舞、貫部分の熱伝導率は表面温度測定点と関連性の少ない端部（図 7 空白部）を除いた面積比を用いて検討する。木舞、荒土、中塗り土を含む木舞部分の熱伝導率は 0.394(W/m・K)、木舞、貫、荒土、中塗り土を含む貫部分の熱伝導率は 0.329(W/m・K)（上下貫の平均値）となる。木舞部分の熱伝導率は貫部分の約 1.2 倍と大きい。本章では各部分の熱伝導率計算に面積比を用いたが、容積比を用いた換算でも結果は大略一致する。

表 14 貫、木舞を有する土壁の熱伝導率（900 角 : No. 3）

	単位	木舞部分 (①~⑨)	貫部分	
			上貫 (⑩)	下貫 (⑪)
試験体通過熱流	W	46.600		
伝熱面積	m <sup>2</sup>	0.512	0.078	0.078
温度差	°C	10.380	12.400	12.600
伝熱距離	m	0.071		
各部熱伝導率	W/m・K	0.394	0.331	0.327
900角熱伝導率			0.385	

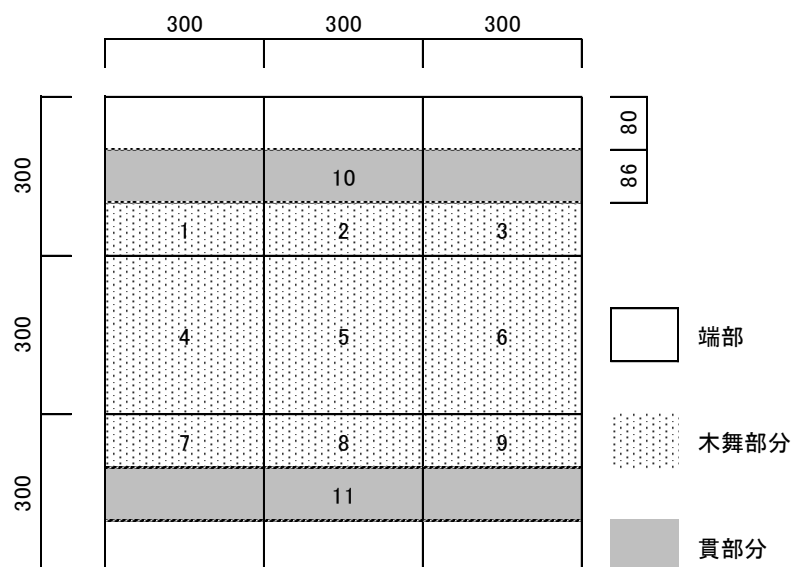


図 7 木舞、貫部分の熱伝導率算出モデル（900 角）

#### 4-2-2-3 混合材モデルの考察

混合材として熱伝導率を推定するために用いた混合材伝熱モデルを図 8、容積比から換算した混合材の等価熱伝導率を表 15 に示す。混合材の等価熱伝導率は施工後の土壁の容積比により推定した。混合材が並列の伝熱回路を持つと仮定した貫、木舞を有する土壁を重み付け平均した等価熱伝導率は 0.381 (W/m・K) となり、この結果は表 12 に示す測定結果を精度よく説明できる。また、容積比から換算した混合材（木舞、貫部分）の等価熱伝導率は測定結果より換算した熱伝導率と大略一致するため、測定結果の捕捉が十分可能である。本章の測定結果を精査することで、左官技能者（技能検定 1 級）が施工した土壁（複合材料）は概ね均質な構造であり、建材として安定性のある熱物性値を有することを確認した。

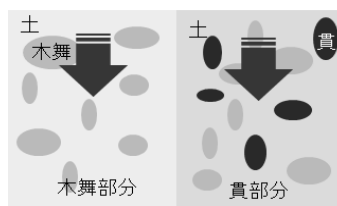


図 8 混合材伝熱モデル

表 15 容積比から換算した混合材の等価熱伝導率

試験体構成材料	竹	荒土	中塗り土	貫	混合材 等価熱伝導率 (W/m・K)	土壁 等価熱伝導率 (W/m・K)
熱伝導率 (W/m・K)	0.15	0.46	0.37	0.12		
木舞部分 材料容積比 (%)	13.38	60.54	26.08	-	0.394	0.381
貫部分 材料容積比 (%)	8.92	43.76	26.08	21.24	0.336	

#### 4-2-3 まとめ

まとめは以下のとおりである。

- 1) 貫、木舞を有する土壁(900 角)の熱コンダクタンス (平均値) は 5.446 (W/m<sup>2</sup>・K)、熱伝導 0.392 (W/m・K) である。土壁の熱伝導率は一般的な内装建材と比較して約 2.8~4.9 倍と大きい。

- 2) 貫部分と木舞部分の等価熱伝導率をそれぞれの構成材の有する熱伝導率と容積混合比で推定し、更に貫、木舞部分を並列の伝熱回路として評価すると、推定した等価熱伝導率は実測値を十分な精度で捕捉できる。
- 3) 土壁(900 角)の収縮率は面積で約 1%未満、厚さで約 4.5%となることを確認した。厚さ収縮は全収縮の過半を占める。土壁の乾燥収縮は左官技能者が実施工する仕上げ塗り等で補填されるが、その影響は材料料密度や数値解析等に及ぶ可能性があるため、考慮する必要がある。
- 4) 左官技能者が現場の状況判断で調整する中塗り土の土、砂、すさの調合比の違いは熱伝導率にほとんど影響しない。
- 5) 荒土は中塗り土と比べて密度が小さいにもかかわらず、熱伝導率が高い。これは、藁で連結される土粒子間で熱橋に近い伝熱回路が生じたことが予測される。
- 6) 暖簾打ちを実施せず、一定厚さで仕上げした土壁の体積は最大 6.17%収縮することを確認した。本章では左官技能者が実施工時にこの程度の乾燥収縮を伝統技能で抑制し、土壁の品質を一定に保つことを観察した。

### 4-3 中塗り土の乾燥収縮ひびわれが熱湿気物性へ及ぼす影響

#### 4-3-1 現場施工された中塗り土の調査

ひび割れ調査の測定対象は兵庫県姫路市柳町にある再生住宅の北壁面(1階:居間の床間 1.770×2.140=3.78m<sup>2</sup>)とした。中塗り土の施工は2011年11月1日、ひび割れ実測は11月9日に実施した。中塗り土調合比を表16に示す。材料の調合及び中塗り土仕上げは伝統技能を有する左官技能者が施工した。壁体断面詳細図を図9、木舞建て施工状況を写真19、荒土塗り施工状況を写真20に示す。左官下地は柱に楔打ちして固定した貫と真竹をシュロ縄で編み込んだ木舞壁である。荒壁の材料は水田から採取した土と藁を混合して約2か月間保管した。中塗り土施工は荒壁塗り施工の2週間後に実施した。施工日に測定した塗厚は平均15mm程度であり、中央部は端部より約2mm厚い。これは左官技能者が居住者の錯覚を防ぐために施した工夫である。



表 16 中塗り土の調合比

	2011/11/1	
	容積(L)	質量(kg)
土	25.30	30.40
砂	49.30	69.60
すさ	-	1.40
水	27.20	

土は淡路産、砂は家島(姫路市)産

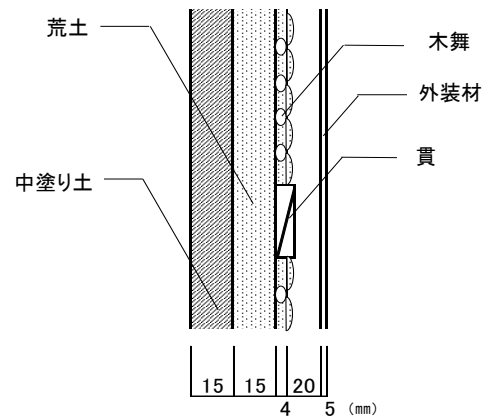


図 9 壁体断面詳細図



写真 19 木舞建て施工状況



写真 20 荒土塗り施工状況

中塗り土の調合比を評価する。すさの占める割合は第3章の標準的[2]な調合とほぼ同等となった。土砂に対する水の割合は約35%を占める。この割合は、第3章の夏調合より約10%多く、秋調合より約5%少ない結果となった。4-3-1の調合は、第3章の秋調合より約2か月遅いが、施工現場の環境状況等が要因となり、水の少ない調合となったと考えられる。

壁面表面をメッシュ分割した後、ひび割れ幅を0.1~1mm、1~2mm、2~3mmに分類し、測定したひび割れ幅毎のひび割れ長さをメッシュ毎に積算した。ひび割れの発生状況(1)、(2)を写真

21、写真 22、メッシュ分割状況を写真 23、ひび割れの測定状況を写真 24、ひび割れの測定結果を図 10 に示す。ひび割れ間隔は貫下地位置で最小 2 mm と狭く、木舞下地位置では最小 48 mm と貫下地位置の 24 倍となった。単独のひび割れ長さは最大で 38 mm となり、発生位置に貫下地と木舞下地による差は殆どない。ひび割れ密度は貫下地（図 10 に示す 1、4、5、7 行）が木舞下地（図 10 に示す 2、3、6 行）の約 2.4 倍である。この違いは材料強度が小さい中塗り土が、表面乾燥飽水状態で拘束された後に材料表面で急速に乾燥収縮した結果、内部拘束による応力を受けた影響 [11][12] だと考えられる。木舞下地は貫下地に比べて拘束力が少ないため表面ひび割れが少ない。ひび割れの単位方面積当たり見かけ面積（ひび割れ幅平均値×積算長さ）は平均値で  $10.6 \times 10^{-2} \text{ mm}^2/\text{m}^2$  となった。



写真 21 ひび割れの発生状況(1)



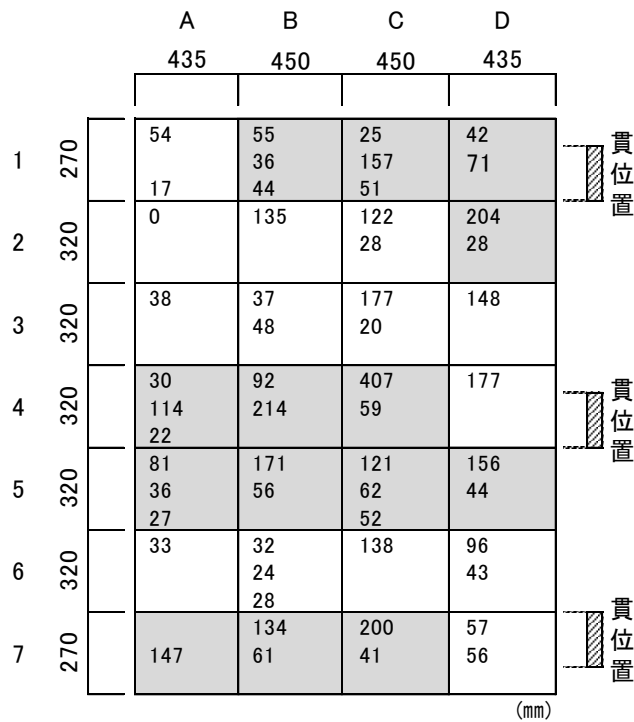
写真 22 ひび割れの発生状況(2)



写真 23 メッシュ分割状況



写真 24 ひび割れ測定状況



平均ひび割れ幅の積算長さ

(0.1~1mm)
(1~2mm)
(2~3mm)

注) 塗りつぶし部は、ひび割れの単位面積当たりの  
見かけ面積が $1000\text{mm}^2/\text{m}^2$ 以上を計測

図 10 ひび割れの測定結果

#### 4-3-2 数値解析による吸放湿性能の評価

##### 4-3-2-1 解析条件

温湿度挙動の評価は JIS A 1470 の実測条件に準じて数値解析で行った。差分領域モデルを図 11 に示す。本章では、平均ひび割れ密度を有するひび割れ試験体と比較するため、ひび割れがない標準試験体を解析した。ひび割れ試験体の表面層 3 mm 厚を飽水状態に近づけるために吸湿側の相対湿度の境界条件は 96-99%RH とし、一方は断湿した。60 時間の時間周期変動を与え、温度は 20°C 一定とする。

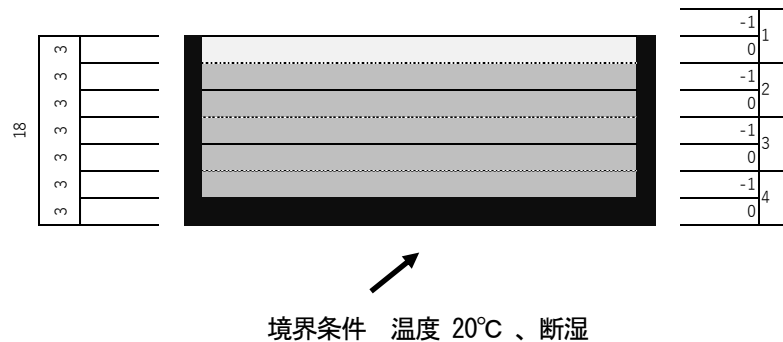


図 11 差分領域モデル (JIS A 1470)

計算には第 5 章の蒸気拡散支配における熱水分同時移動方程式[13]を用いた (前進差分)。材料表面に流出入する熱水分流は平均ひび割れ密度の面積分だけ増加したものとす。中塗り土の材料密度は  $1512\text{kg/m}^3$ 、比熱は  $900\text{J/kg} \cdot \text{K}$ 、平衡含水率関係、湿気伝導率、熱伝導率、空隙率は、本論文の測定値を使用する。中塗り土の熱伝導率及び湿気伝導率は測定値を反映して相対湿度に依存性する。毛細管内水分は 98%RH 未満では水蒸気、98%RH を超えるとひび割れ内に存在する凝縮水が発生するモデルとした。凝縮水モデルを図 12 に示す。ひび割れ内の凝縮水は毛細管内水蒸気が 98%RH 未満になると 98%RH を上限として毛細管内へ再放湿する。ひび割れ密度  $10.6 \times 10^{-2} \text{mm}^2/\text{m}^2$  に対して図 12 に示すような深さ 0.1mm の僅かな凝縮水が保持可能だと仮定するとひび割れ内で保持できる凝縮水量は  $0.11\text{g/m}^3$  となる。ひび割れ内の凝縮、再蒸発については潜熱変化 ( $2.46 \times 106\text{J/kg}$ ) を考慮した。

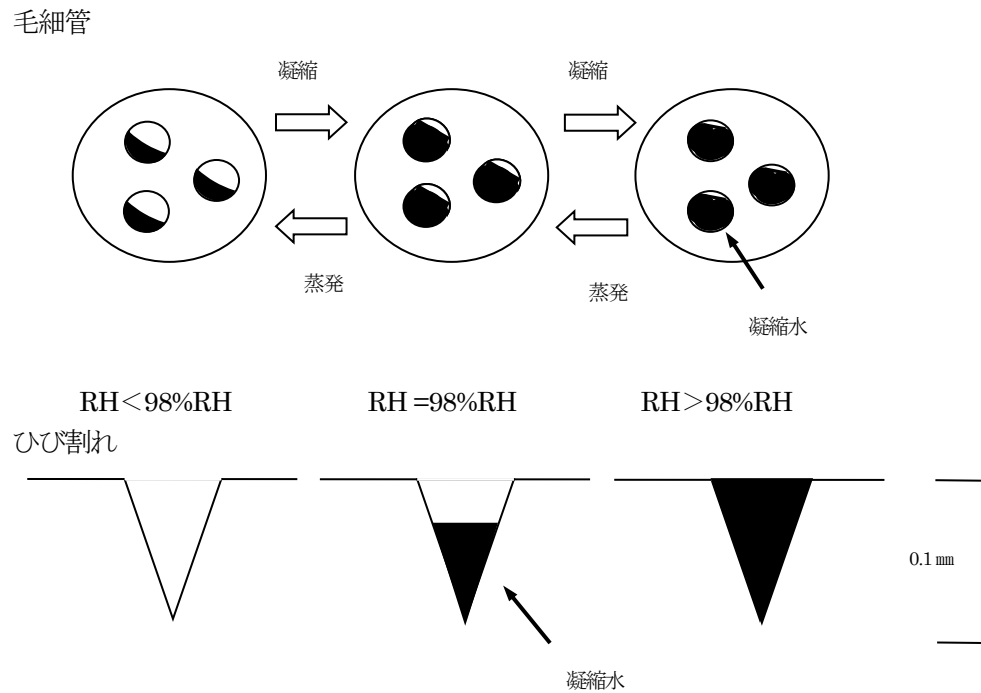


図 12 凝縮水モデル

#### 4-3-2-2 解析結果と評価

定常状態に達した試験体表面の相対湿度挙動応答を図 13 に示す。標準試験体の 98%RH の状態 (以下高湿状態という) は 22 時間である。ひび割れ試験体の高湿状態は標準試験体より 25 時間長い 47 時間となった。ひび割れ試験体の高湿状態は吸放湿側の境界条件が低湿度域 (96%RH) となった後も 20 時間持続する。これは試験体表面が 98%RH 以下となってもひび割れ内の凝縮水が毛細管内へ再放湿するためである。吸湿過程ではひび割れ試験体が高湿状態に達する時間が標準試験体に比べて 6 時間早い。これは、ひび割れ試験体の高湿状態が標準試験体より長時間となるためである。

凝縮水積算量を図 14 に示す。標準試験体の凝縮水はひび割れ内で保持されないため 98%RH 以上の凝縮水が材料内で蓄積された。定常状態の標準試験体が 480 時間後に蓄積する凝縮水の量は  $7.6 \times 10^{-4} \text{g/m}^3$  である。ひび割れ試験体ではひび割れの再放湿により標準試験体で蓄積された凝縮水が解消された。

温度変動を図 15 に示す。ひび割れ試験体に比べて標準試験体の温度は平均値で  $0.02^\circ\text{C}$  程度高

い。これは標準試験体では凝縮のみが起きるのに対し、ひび割れ試験体ではひび割れ内で凝縮と再蒸発による熱収支が取れているためである。

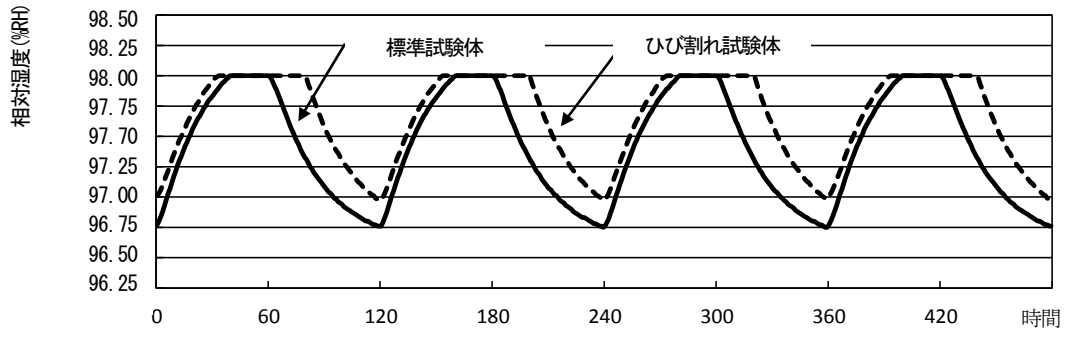


図 13 相対湿度挙動応答

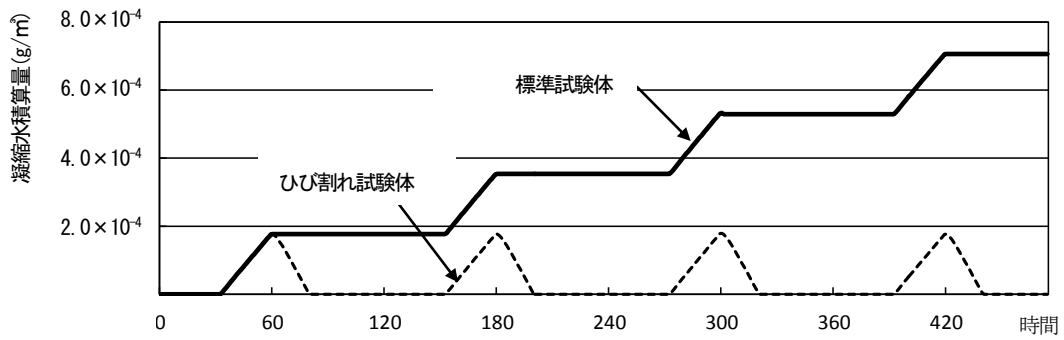


図 14 凝縮水積算量

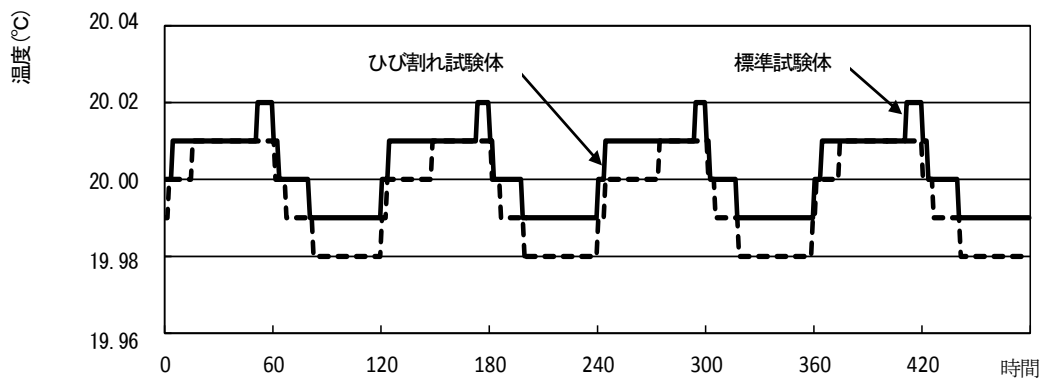


図 15 温度挙動応答

#### 4-3-3 まとめ

本章では施工現場の実測調査を用いて中塗り土の乾燥収縮ひび割れが材料表面の温湿度挙動に及ぼす影響を評価した。

本章で用いた解析条件のみであるが、中塗り土の乾燥収縮ひび割れで98%RHを超えた毛細管内水分（凝縮水）を保持できるなら、高湿度域を維持した環境でも土壁は崩壊の危険性が少なく、壁体の耐久性向上に役立つ可能性がある。

#### 4-4 第4章のまとめ

本章では、実施工に近い土壁の熱コンダクタンス、熱伝導率を求めることで土壁の熱的性能と混合材による推測値が整合性を持つことを確認した。左官技能者が施工する土壁は乾燥収縮の影響を考慮する必要があるが、材料構成と熱性状を利用した混合材モデルにより熱伝導率が推測可能となり、数値解析等にも活用できる。中塗り土の乾燥収縮ひび割れ評価では、中塗り土の乾燥収縮ひび割れで98%RHを超えた毛細管内水分を保持できると仮定すれば、ひび割れは土壁の耐久性向上に役立つ可能性があることも確認した。中塗り土のおかれる環境条件は施工現場次第であるため多岐に及ぶが、今後は乾燥収縮ひび割れにかかわる物性値測定等を行うことで中塗り土の熱湿気挙動を評価したい。

注1) 荒土、中塗り土は粘性のある砂質粘土（荒土の類）であり、15 mmふるいを通過するものを荒土、10 mmふるいを通過するものを中塗り土という。

注2) 荒土に使用した藁の相当質量は材料容積と密度、水、土は1バット（40L）あたりに使用した材料容積より算出した。

注3) 土、砂の質量は実測した単位容積あたりの質量と施工に使用した材料容積より換算した。

注4) 木舞、藁縄の質量は測定した材料密度、貫は文献値[1] (400kg/m<sup>3</sup>)より換算した。

注5) 材料密度換算に用いた試験体の容積は中塗り土が2L、荒土が0.55Lである。

注6) 物性値は第3章の値 (15.8°C、60%RH) を用いた。

#### 引用文献

- [1] 社団法人日本左官業組合連合会：左官辞典, 工文社, pp. 262, 2004
- [2] 日本建築学会：建築工事標準仕様書 JASS15 左官工事, pp. 279～287, 2007
- [3] 日本工業規格：JISA1420 付属書 B 建築用構成材の断熱性測定方法—校正熱箱法及び保護熱箱法, 日本規格協会, 1999
- [4] 日本工業規格：JISA1412-2 熱絶縁材の熱抵抗及び熱伝導率の測定方法—第2部 熱流計法 (HFM 法), 日本規格協会, 1999
- [5] 渡辺法美:竹製品 LCA を使用した評価と広告方法の提案, 高知工科大, p11, 2007
- [6] 日本工業規格：JIS A 5901 (2014) 稲わら畳床及び稲わらサンドイッチ畳床, 日本工業標準調査会, pp. 12～14, 2014
- [7] 日本建築学会:建築設計資料集成 1 環境, 丸善株式会社, pp. 119～121, 1979
- [8] 日本建築学会：建築材料の熱・空気・湿気特性値, 丸善株式会社, pp. 23～27, 2001
- [9] 宮野則彦, 宮野秋彦：土壁の熱伝導特性に関する考察 (第1報), 第23回日本熱物性シンポジウム講演論文集, pp. 95～97, 2002. 10
- [10] 宮野則彦, 宮野秋彦：土壁の熱伝導特性に関する考察 (第2報), 第24回日本熱物性シンポジウム講演論文集, pp. 95～97, 2003. 10
- [11] 日本建築学会:鉄筋コンクリート造建築物の収縮ひび割れ制御設計・施工指針 (案)・同解説. 丸善株式会社, 2006. 2
- [12] 日本コンクリート協会：コンクリートの収縮ひび割れ—メカニズムと対策技術の現状—, 丸善株式会社, 2003. 6
- [13] 中村泰人, 松尾陽, 松本衛, 土屋喬雄, 橋秀樹, 宮田紀元：新建築学体系 10 環境物理, 彰国社, pp. 105～157, 1984. 8



## 第5章 実施工した土壁が室内環境に及ぼす影響

### 5-1 はじめに

第3章では、土壁の構成材料である中塗り土の平衡含水率、湿気伝導率、熱伝導率測定した。中塗り土の断熱性能は断熱材ほどの効果を期待できないが、土壁は現代でも蔵づくり等に重用されており、蔵は物品等の貯蔵庫として高い評価を得ている。蔵で発揮される中塗り土の熱湿気性能が明確になれば、一般住宅用建材として土壁を活用できる可能性がある。本章では建材としての中塗り土の利用法とそれにかかわる熱湿気応答を数値解析により提示し、評価することを目的とする。5-2では、単層壁の非線形な熱湿気応答特性を周期成分毎に分類するため、蔵造り[1]を想定した壁等を対象に外気条件の周期成分とそれに対する壁体の応答特性を調和解析で評価した。5-3では、伝統技能者が施工した土壁住宅を対象に数値解析を行い、土壁が室内環境にもたらす熱湿気性状を定量的に評価したため、結果を示す。

### 5-2 調和解析による中塗り土の熱湿気応答の特性

#### 5-2-1 解析条件

本章の解析対象は兵庫県豊岡市に建築された建造物の北壁面とした。中塗り土の厚さは在来軸組工法真壁想定で50mm、大壁想定で100mm、蔵造り想定[1]で300mmの3種類とした。解析には水蒸気分圧をポテンシャルとした蒸気拡散支配の熱水分同時移動方程式[2]を用いた。式を以下に示す。

【熱水分収支】

$$\left( \frac{\Phi}{R_v T} + \kappa \right) \frac{\partial P_v}{\partial t} + (-\nu) \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla(\lambda'_{p_v} \nabla P_v) \quad (5-1)$$

$$(c\rho + \gamma \cdot \nu) \frac{\partial T}{\partial t} + (-\gamma \cdot \kappa) \frac{\partial P_v}{\partial t} = \nabla(\lambda \nabla T) \quad (5-2)$$

$$\kappa = \rho_w \frac{\partial \phi}{\partial P_v} \quad (\text{kg/m}^3 \cdot \text{Pa}) \quad (5-3)$$

$$\nu = -\rho_w \frac{\partial \phi}{\partial T} \quad (\text{kg/m}^3 \cdot \text{K}) \quad (5-4)$$

$$c\rho = \Phi \rho_{av} \cdot c p_{av} + \phi \rho_w \cdot c p_w + \rho_s \cdot c p_s \quad (\text{J/m}^3 \cdot \text{K}) \quad (5-5)$$

$$\frac{\Phi}{R_v T} \quad : \text{温度 } T \text{ は一定値}(20^\circ\text{C})$$

【熱水分収支 (境界式)】

$$\alpha'_{P_v} (P v_{air} - P v) = -\lambda'_{P_v} \nabla P v \quad (5-6)$$

$$\alpha (T_{air} - T) = -\lambda \nabla T \quad (5-7)$$

$\Phi$  : 空隙率 ( $\text{m}^3/\text{m}^3$ )

$\phi$  : 含水率 ( $\text{m}^3/\text{m}^3$ )

$T$  : 温度 (K)

$P v$  : 水蒸気分圧 (Pa)

$R v$  : 水蒸気のガス定数 ( $\text{N} \cdot \text{m}/\text{kg} \cdot \text{K}$ )

$\gamma$  : 相変化熱 (J/kg)

$\lambda'_{P_v}$  : 湿気伝導率 ( $\text{kg}/\text{m} \cdot \text{s} \cdot \text{Pa}$ )

$\lambda$  : 熱伝導率 ( $\text{W}/\text{m} \cdot \text{K}$ )

$\alpha$  : 熱伝達率 ( $\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}$ )

$\alpha'_{P_v}$  : 熱伝達率 ( $\text{Kg}/\text{m}^2 \cdot \text{Pa}$ )

$\rho_i$  :  $i$  成分の密度 ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )

$c p_i$  :  $i$  成分の定圧比熱 ( $\text{W} \cdot \text{s}/\text{kg} \cdot \text{K}$ )

( $i$  : w 液水 av 湿り空気 s 材料実質)

時間分割は1秒間として周期定常解を得られるまで計算を行った。中塗り土の物性値は第3章で測定した限界含水率を含んだ平衡含水率関係、相対湿度依存性のある熱湿気伝導率、空隙率を採用し、材料密度を  $1513 \text{kg}/\text{m}^3$ 、比熱を  $900 \text{J}/\text{kg} \cdot \text{K}$  [3] とした。

外気条件は同市の標準年気象データをフーリエ級数展開して使用した。年周成分合計6項で近似した壁体の近似関数を図1、差分領域モデル(中塗り土壁)を図2、解析に用いた室内外の熱湿

気伝導率を表 1、外気条件の周期成分を表 2 に示す。近似関数と標準年気象データの平均誤差は温度が  $1.54^{\circ}\text{C}/\text{日}$ 、水蒸気分圧が  $149.5\text{Pa}/\text{日}$  である。これはフーリエ級数展開した結果から振幅が大きい項 12 項まで使用して近似したが近似精度が上がらなかったためであり、誤差の変化を小さくした 6 項までを用いた。日周期変動は夏至 (8/22) と冬至 (12/21) の平均値より振幅  $2.9^{\circ}\text{C}$ 、 $154.3\text{Pa}$  とし、24 時間周期成分として年周期成分と併せて計算した。室内の温湿度は同市の年間平均値である温度  $14.39^{\circ}\text{C}$ 、 $62\%RH$  の一定値とする。

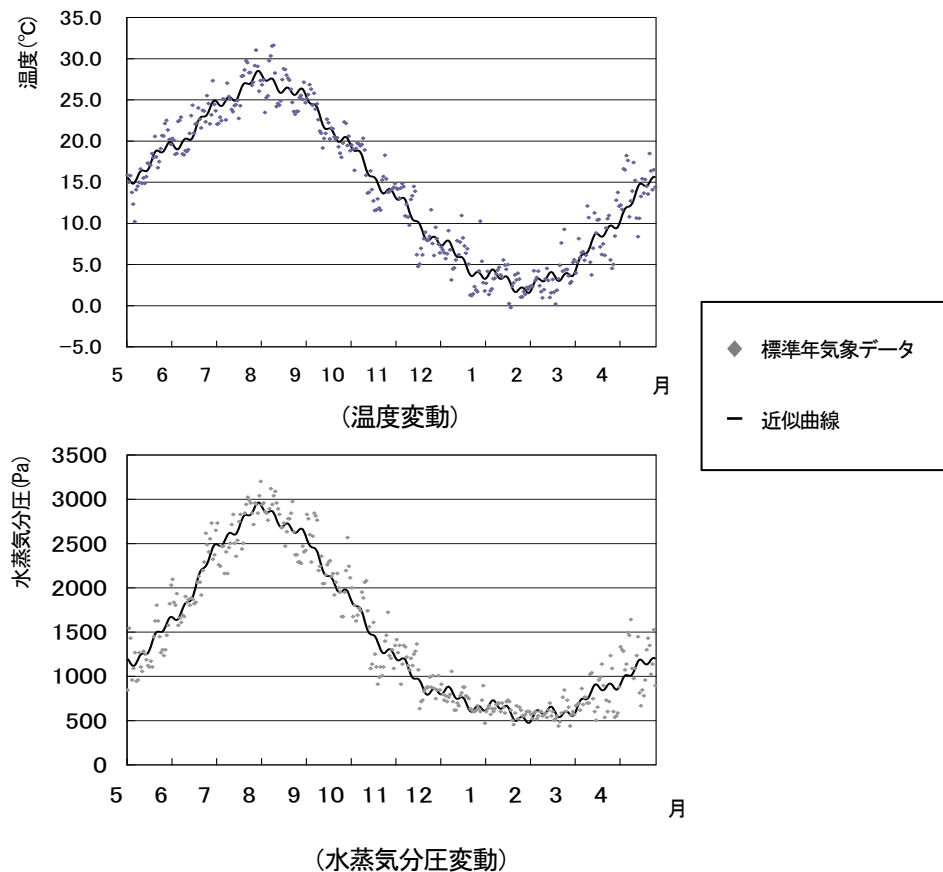


図 1 外気条件 (年変動)

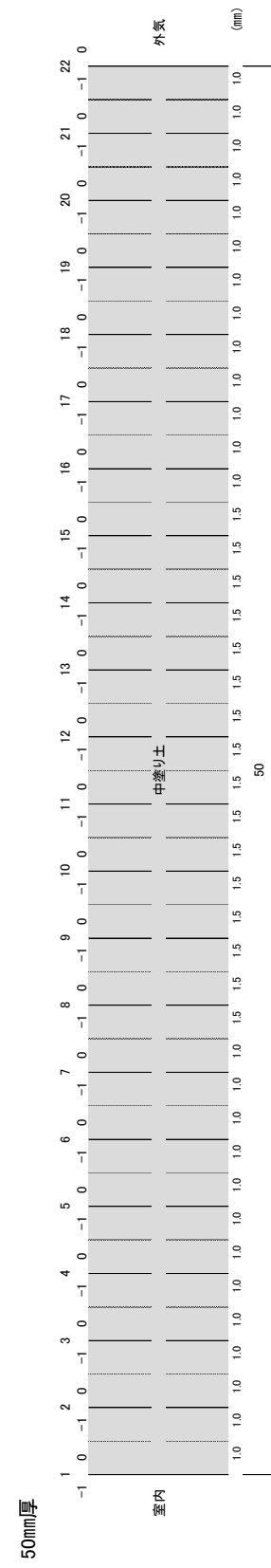
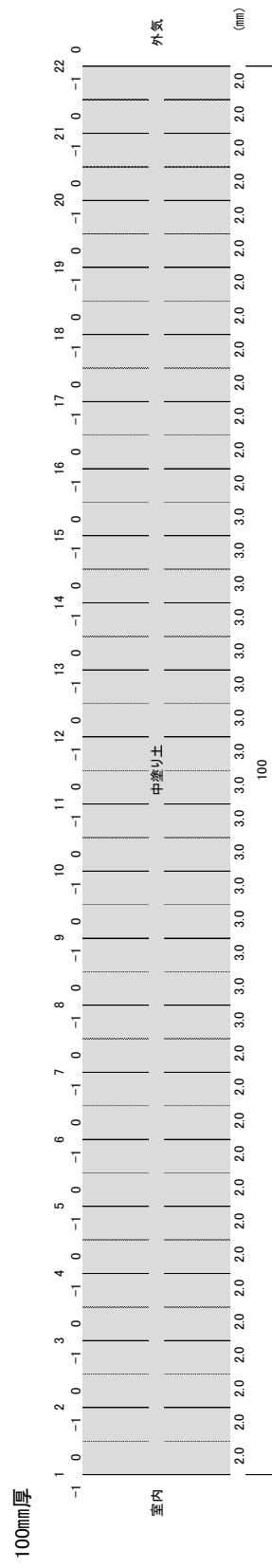
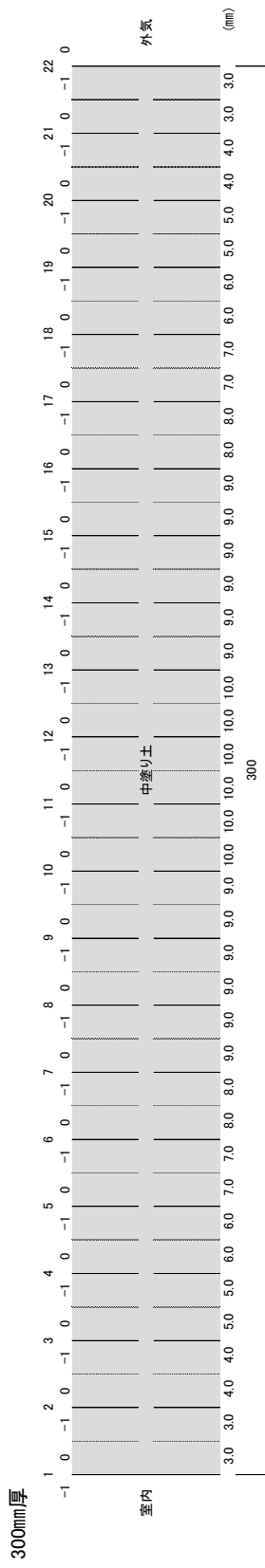


図2 差分領域モデル (中塗り土壁)

表 1 室内外の熱湿気伝達率

	熱伝達率(W/m <sup>2</sup> ・K)	湿気伝達率(kg/Pa・m <sup>2</sup> ・s)
室内側	9.30	5.01 × 10 <sup>-8</sup>
外気側	23.30	1.34 × 10 <sup>-7</sup>

表 2 外気条件の周期成分

温度

周期(年)	cos 項	周期(年)	sin 項	振幅(°C)	位相(日)
1	0.21	1	11.76	11.77	1.04
1/2	-0.22	1/2	-0.47	0.52	24.98
1/3	0.51	1/3	-0.67	0.84	-37.59
1/4	0.28	1/4	-0.09	0.29	-72.87
1/36	0.48	1/11	-0.72	0.87	-34.48

水蒸気分圧

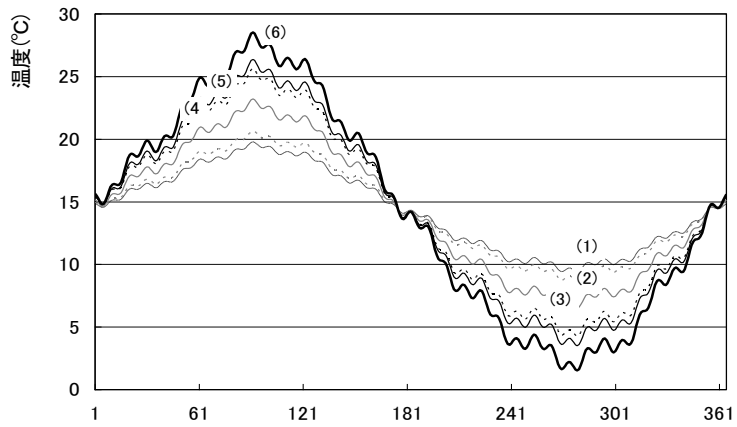
周期(年)	cos 項	周期(年)	sin 項	振幅(Pa)	位相(日)
1	-72.64	1	1054.25	1056.75	-4.00
1/2	-248.74	1/2	-69.78	258.34	75.40
1/3	24.60	1/3	-93.16	96.35	-15.01
1/4	16.10	1/4	-35.85	39.30	-24.53
1/36	43.84	1/11	-63.51	77.17	-35.11

5-2-2 熱湿気応答

壁体内における近似関数の温度、水蒸気分圧応答解析結果（年周期）を図 3、図 4 に示す。近似関数と標準年気象データの応答誤差を最大となる 300 mm厚の壁体と比較すると温度は中央部 0.69°C/日、室内側表面 0.14°C/日となり、水蒸気分圧は中央部 89.48Pa/日、室内側表面 0.31Pa/日となった。これらの結果をフーリエ級数展開して応答にかかわる周期成分を求め、外気条件と同成分とその他で最大の成分を壁応答にかかわる周波数成分（年周期）として表 3 に示す。外気条件では cos 項 1/36 周期と sin 項 1/11 周期の成分を単独で用いたが、応答では両項共大きい値をとったため、併せて表に示した。温度、水蒸気分圧の壁体中央部、室内側表面の応答は 1 年周期成分が顕著であり、他成分の応答は小さい。温度振幅の減衰は壁体厚さにかかわらず中央部で外気条件の約 6 割、室内側表面では 50 mm厚で約 4 割、100 mm厚で約 3 割、300 mm厚で約 1 割となった。1 年周期成分の位相遅れは 5 月 1 日午前 0 時を起点として、壁体厚さにかかわらず中央部で約 0.3 日となり、室内側表面は 50・100 mm厚で約 0.4 日、300 mm厚で 1.0 日となった。温度応

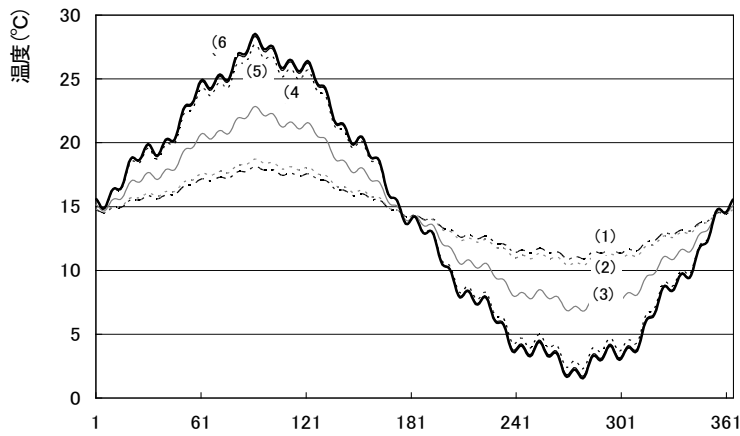
答での位相遅れはほとんどない。年周期の温度応答（単層壁）では、中塗り土壁体の熱湿気応答は壁厚（壁体容量）を変更（50～100 mm）しても差が少ないことが分かる。1年を通じて温度変動を平準化させるためには300 mm以上の壁厚が必要となるが、中塗り土の特性を利用した壁体を施工するのであれば、50～100 mmの壁厚でも十分活用可能である。

水蒸気分圧応答では50 mm厚の室内側表面で1/180、1/181項の周波数成分が最も大きくなった。外気条件と比較すると壁厚にかかわらず中央部は1年周期で約5割、1/2年周期で約0.7～1割、1/3年周期で約0.2～0.4割となった。位相遅れは最大となる300 mm厚の中央部において1年周期で69.3日、1/2年周期で40.3日、1/3年周期で69.4日となり、室内側表面は1年周期で81.3日、1/2年周期で175.4日、1/3年周期で136日となった。振幅は壁体の厚さにかかわらず中央部で外気条件の約5割、室内側表面では50 mm厚で約2割減衰する。100、300 mm厚の室内側表面1年を通じ大略一定値となり、年周期の外気変動の影響を受けない。位相遅れは50 mm厚の中央部で7.4日、100 mm厚で15.7日、300 mm厚で69.3日、室内側表面では50 mm厚で7.53日となった。



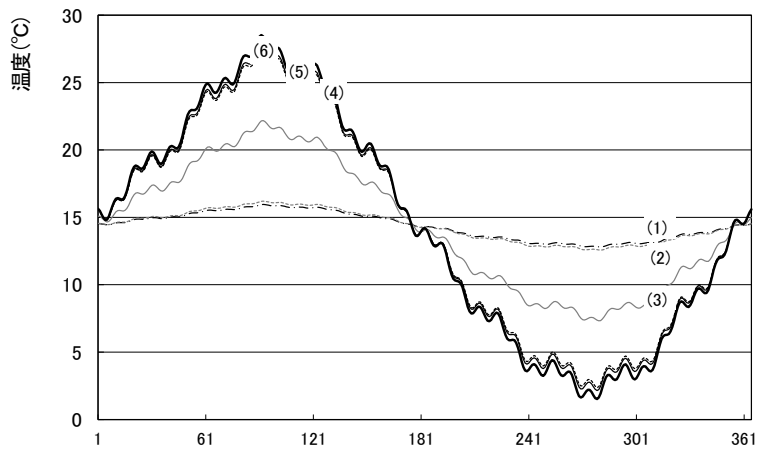
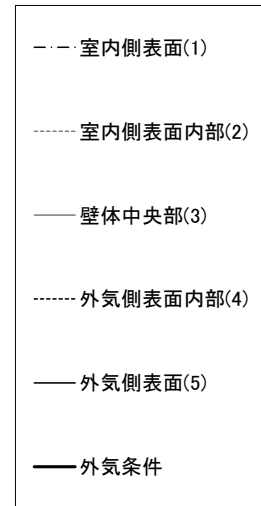
(50 mm厚)

日



(100 mm厚)

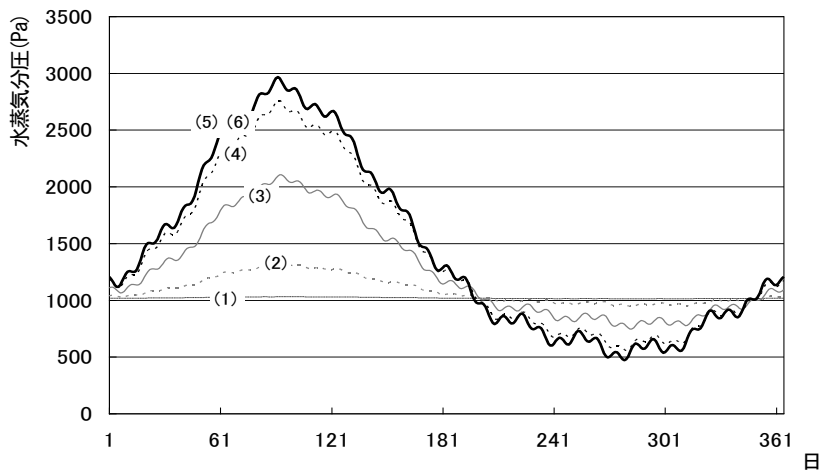
日



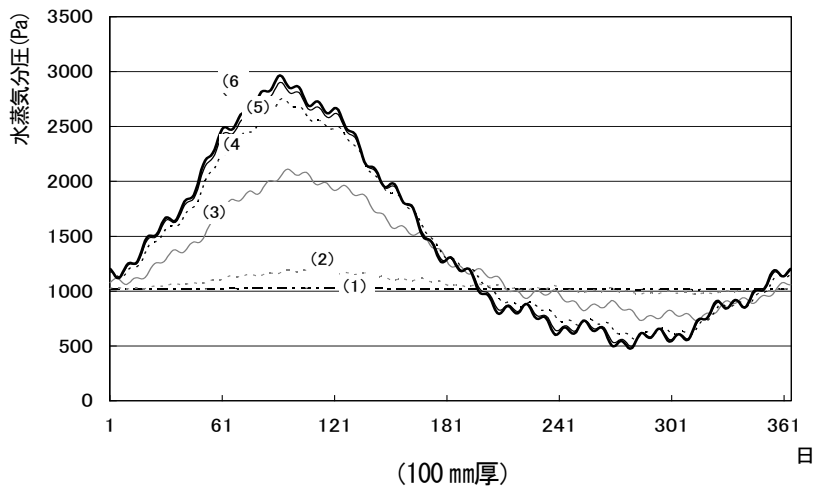
(300 mm厚)

日

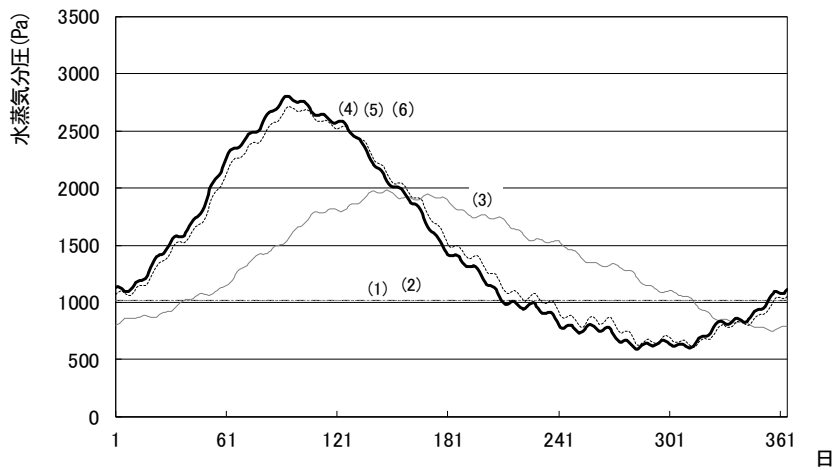
图3 温度応答解析結果 (年周期)



(50 mm厚)



(100 mm厚)



(300 mm厚)

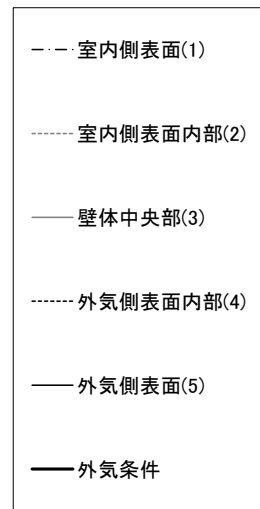


图 4 水蒸気分圧応答解析結果 (年周期)



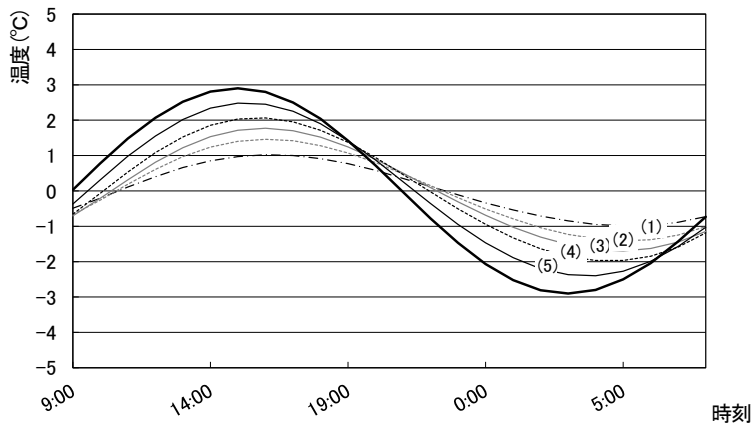
表3 壁応答にかかわる周波数成分 (年周期)

	50mm厚				100mm厚				300mm厚			
	周期(年)	cos項	振幅	位相(日)	周期(年)	cos項	振幅	位相(日)	周期(年)	cos項	振幅	位相(日)
温度	1/1	-0.04	7.28 °C	-0.31	-0.04	7.00 °C	-0.31	28.43 °C	1/1	-0.03	5.31 °C	-0.32
	1/2	-0.17	-0.29 °C	30.15	-0.15	-0.28 °C	0.32 °C	28.43	1/2	-0.11	-0.27 °C	23.04
	1/3	0.33	-0.40 °C	-40.02	0.31	-0.39 °C	0.50 °C	-39.37	1/3	0.31	-0.36 °C	-42.07
	1/4	0.18	-0.05 °C	-77.00	0.17	-0.04 °C	0.17 °C	-76.61	1/4	0.15	-0.05 °C	-74.07
	1/11	0.06	-0.44 °C	-7.88	0.06	-0.43 °C	0.43 °C	-8.69	1/11	0.15	-0.37 °C	-22.23
	1/36	0.27	0.12 °C	66.59	0.25	0.07 °C	0.15 °C	75.16	1/36	0.09	0.19 °C	25.94
	1/35	-0.01	-0.01 °C	42.14	0.00	-0.09 °C	0.09 °C	0.01	1/37	0.02	0.03 °C	41.81
	1/2	-72.93	566.69 Pa	-7.44	-157.17	566.52 Pa	587.92 Pa	-15.73	1/2	-566.34	224.99 Pa	609.40 Pa
	1/3	-148.10	-45.53 Pa	73.96	-127.62	-44.39 Pa	135.12 Pa	71.84	1/3	-52.32	-62.90 Pa	81.82 Pa
	1/4	18.34	-49.71 Pa	-20.54	31.65	-36.25 Pa	48.12 Pa	-41.71	1/4	10.89	19.55 Pa	22.38 Pa
水蒸気分圧	1/1	18.80	-25.27 Pa	-37.17	35.20	9.87 Pa	36.55 Pa	75.41	1/1	9.71	-71.24 Pa	71.90 Pa
	1/36	-6.30	19.79 Pa	-17.92	-28.07	1.86 Pa	28.13 Pa	87.45	1/36	43.71	19.70 Pa	47.98 Pa
	1/180	-1.15	-12.93 Pa	5.14	12.02	-6.62 Pa	13.72 Pa	-62.03	1/12	5.48	-3.81 Pa	6.67 Pa

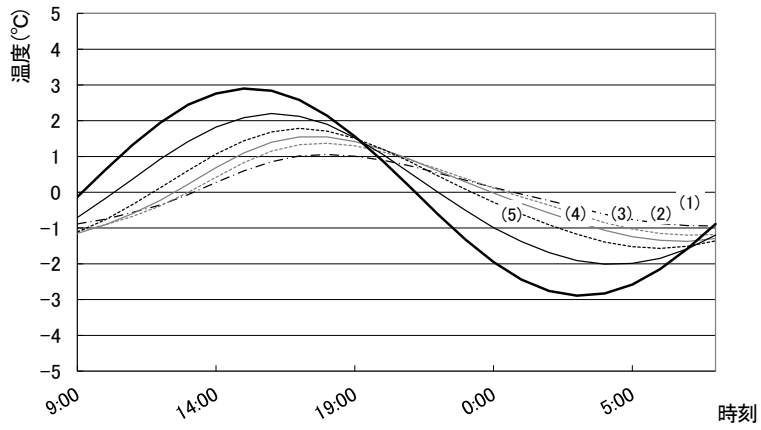
室内側表面

	50mm厚				100mm厚				300mm厚			
	周期(年)	cos項	振幅	位相(日)	周期(年)	cos項	振幅	位相(日)	周期(年)	cos項	振幅	位相(日)
温度	1/1	-0.03	4.51 °C	-0.40	-0.03	3.15 °C	-0.47	16.85 °C	1/1	-0.02	1.40 °C	-1.01
	1/2	-0.07	-0.19 °C	19.56	-0.04	-0.13 °C	0.14 °C	16.85	1/2	0.02	-0.07 °C	-15.14
	1/3	0.19	-0.26 °C	-36.95	0.15	-0.17 °C	0.23 °C	-40.81	1/3	0.09	-0.06 °C	-54.38
	1/4	0.10	-0.03 °C	-75.49	0.08	-0.02 °C	0.09 °C	-75.87	1/4	0.04	-0.02 °C	-65.89
	1/11	0.03	-0.27 °C	-5.64	0.04	-0.20 °C	0.20 °C	-12.99	1/11	0.06	-0.07 °C	-38.55
	1/36	0.18	0.08 °C	66.33	0.10	0.07 °C	0.15 °C	53.93	1/36	0.02	-0.03 °C	-39.26
	1/37	0.01	-0.01 °C	-43.32	0.02	0.01 °C	0.02 °C	54.59	1/35	0.00	-0.03 °C	2.19
	1/2	-2.69	215.19 Pa	-7.53	-1.14	3.41 Pa	3.60 Pa	-18.77	1/2	-3.09	0.53 Pa	3.13 Pa
	1/3	-2.86	8.04 Pa	19.84	-0.79	-1.14 Pa	1.39 Pa	35.37	1/3	0.19	1.03 Pa	1.05 Pa
	1/4	-0.69	-0.39 Pa	61.16	-0.28	-0.68 Pa	0.74 Pa	22.89	1/4	0.81	0.70 Pa	1.07 Pa
水蒸気分圧	1/1	-0.71	-0.60 Pa	50.47	-0.55	0.15 Pa	0.57 Pa	-75.53	1/1	1.38	-0.27 Pa	1.41 Pa
	1/11	-0.54	0.16 Pa	-74.85	-0.33	0.40 Pa	0.52 Pa	-39.68	1/11	1.13	0.12 Pa	1.14 Pa
	1/36	-1.71	-0.81 Pa	65.68	-0.20	0.42 Pa	0.46 Pa	26.04	1/36	-1.07	-0.52 Pa	1.19 Pa
	1/181	-1.22	-56.91 Pa	1.24	-0.88	-0.67 Pa	0.96 Pa	46.37	1/34	0.70	-0.99 Pa	1.21 Pa

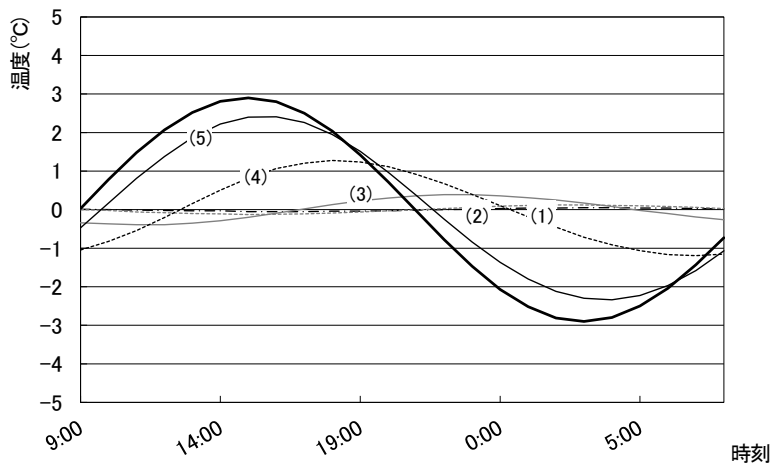
日周期変動については、夏至の温度応答結果（日周期）を図 5、水蒸気分圧応答結果（日周期）を図 6、主周期成分をフーリエ級数で求めた壁応答にかかわる周波数成分（日周期）を表 4 に示した。温度、水蒸気分圧の周波数成分は、全ての壁厚及び場所において 1 日周期成分が支配的となった。周期成分で求めた曲線は日周期応答結果に対して十分な近似精度を得ることが出来た。周波数成分は温度、水蒸気分圧共に 1 日周期のみ卓越しており、温度の振幅は 50 mm 厚の室内側表面で外気条件の 3~4 割、100 mm 厚で 1~2 割となった。水蒸気分圧は 50 mm 厚の室内側表面で約 1 割となったが、それ以上の厚さの壁体では僅かな振幅を示す程度となった。1/2 日以降の日周期成分はどの壁厚においても解への影響は殆どない。300 mm 厚の壁体は温度、水蒸気分圧共に小数点 2 桁以下の僅かな周期成分しか確認できない。温度の位相遅れは 5 月 1 日午前 9 時を起点とした室内側表面で、50 mm 厚が約 2.61~5.08 時間となり、100 mm 厚が約 5.36~11.02 時間、300 mm 厚が約 14.25~27.43 時間となった。水蒸気分圧は 50 mm 厚が約 13.9~29.97 時間、100 mm 厚が約 39.5~45.25 時間、300 mm 厚が約 72.8~84.73 時間である。



(50 mm厚)



(100 mm厚)



(300 mm厚)

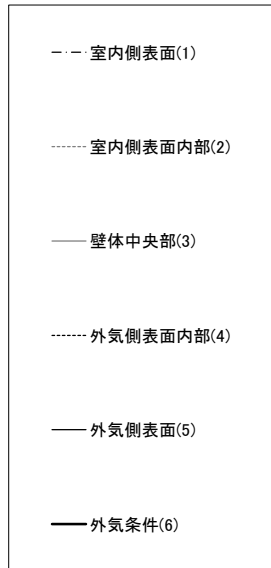
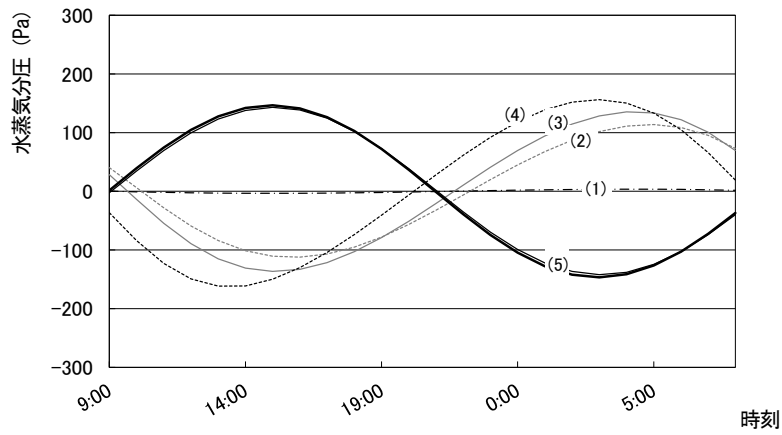
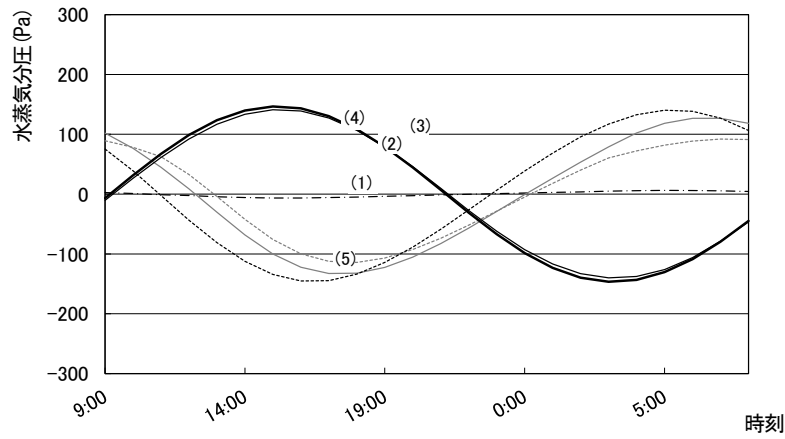


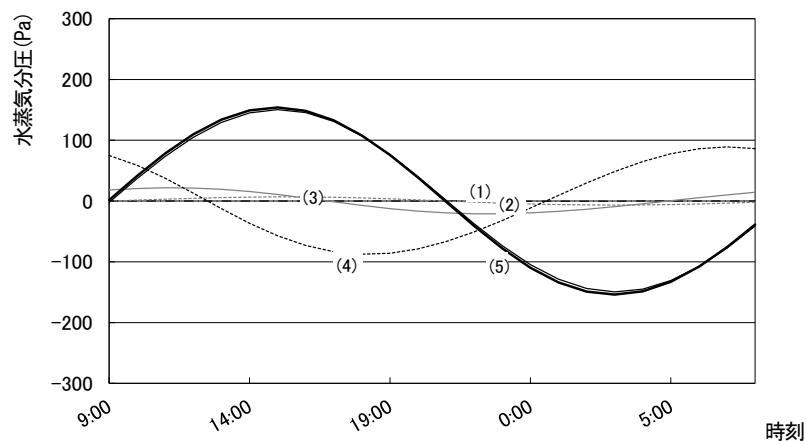
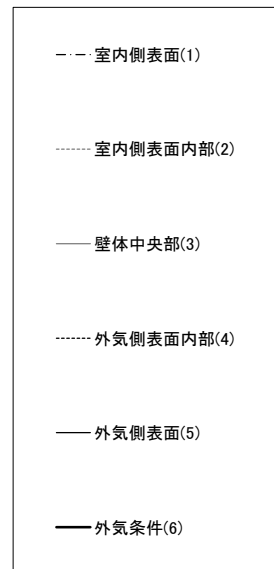
図5 夏至の温度応答解析結果 (日周期)



(50 mm厚)



(100 mm厚)



(300 mm厚)

図6 夏至の水蒸気分圧応答解析結果 (日周期)

表 4 壁応答にかかわる周波数成分（日周期）

(夏至)

	周期(日)	50mm厚		100mm厚		300mm厚	
		振幅	位相(時間)	振幅	位相(時間)	振幅	位相(時間)
温度	1	1.02 °C	-2.61	0.52 °C	-5.36	0.05 °C	-14.25
	1/2	0.08 °C	-5.74	0.07 °C	0.46	0.00 °C	-15.96
	1/3	0.02 °C	-5.03	0.01 °C	-3.14	0.00 °C	-7.73
	1/4	0.00 °C	-4.00	0.00 °C	-2.35	0.00 °C	-14.23
	1/5	0.00 °C	-4.68	0.00 °C	2.23	0.00 °C	-8.39
	1/6	0.00 °C	-6.00	0.00 °C	-3.94	0.00 °C	-15.23
	1/7	0.00 °C	-5.64	0.00 °C	5.24	0.00 °C	-12.56
	1/8	0.00 °C	4.00	0.00 °C	-2.00	0.00 °C	-16.23
	1/9	0.00 °C	-4.09	0.00 °C	-2.78	0.00 °C	-10.73
	1/10	0.00 °C	-3.05	0.00 °C	2.55	0.00 °C	-14.50
	1/11	0.01 °C	-1.15	0.00 °C	-1.16	0.00 °C	-12.24
	1/12	0.00 °C	-6.00	0.01 °C	0.16	0.00 °C	-18.23
水蒸気分圧	1	14.53 Pa	-13.90	8.55 Pa	-39.52	0.12 Pa	-72.86
	1/2	1.65 Pa	-14.94	1.28 Pa	-38.94	0.01 Pa	-72.77
	1/3	0.46 Pa	-16.83	0.23 Pa	-40.59	0.00 Pa	-73.91
	1/4	0.19 Pa	-6.18	0.10 Pa	-39.58	0.00 Pa	-75.57
	1/5	0.12 Pa	-7.33	0.07 Pa	-39.26	0.00 Pa	-76.33
	1/6	0.09 Pa	-8.58	0.06 Pa	-39.76	0.00 Pa	-76.92
	1/7	0.08 Pa	-9.97	0.06 Pa	-40.22	0.00 Pa	-76.87
	1/8	0.08 Pa	-11.43	0.05 Pa	-40.78	0.00 Pa	-77.16
	1/9	0.07 Pa	-12.94	0.05 Pa	-41.06	0.00 Pa	-77.97
	1/10	0.07 Pa	-14.45	0.05 Pa	-41.70	0.00 Pa	-78.27
	1/11	0.85 Pa	-11.19	0.55 Pa	-37.00	0.00 Pa	-73.47
	1/12	0.03 Pa	-5.46	0.03 Pa	-33.39	0.00 Pa	-67.37

(冬至)

	周期(日)	50mm厚		100mm厚		300mm厚	
		振幅	位相(時間)	振幅	位相(時間)	振幅	位相(時間)
温度	1	0.95 °C	-5.08	0.26 °C	-11.02	0.01 °C	-27.43
	1/2	0.17 °C	1.57	0.05 °C	-7.32	0.00 °C	-27.46
	1/3	0.06 °C	-1.21	0.01 °C	-13.97	0.00 °C	-19.96
	1/4	0.06 °C	1.56	0.01 °C	-11.39	0.00 °C	-24.46
	1/5	0.05 °C	-4.62	0.01 °C	-17.46	0.00 °C	-19.11
	1/6	0.06 °C	0.11	0.01 °C	-11.29	0.00 °C	-23.03
	1/7	0.06 °C	4.83	0.01 °C	-6.35	0.00 °C	-23.80
	1/8	0.06 °C	-1.90	0.01 °C	-14.78	0.00 °C	-18.46
	1/9	0.06 °C	3.00	0.01 °C	-9.45	0.00 °C	-22.96
	1/10	0.06 °C	-4.01	0.01 °C	-16.96	0.00 °C	-27.46
	1/11	0.03 °C	2.07	0.01 °C	-14.60	0.00 °C	-27.67
	1/12	0.66 °C	0.16	0.11 °C	-12.11	0.00 °C	-24.25
水蒸気分圧	1	12.03 Pa	-17.74	6.95 Pa	-45.25	0.02 Pa	-84.73
	1/2	1.90 Pa	-17.90	0.38 Pa	-50.15	0.00 Pa	-91.58
	1/3	0.45 Pa	-16.75	0.01 Pa	-44.22	0.00 Pa	-87.84
	1/4	0.12 Pa	-13.27	0.02 Pa	-46.72	0.00 Pa	-84.33
	1/5	0.29 Pa	-17.32	0.01 Pa	-48.11	0.00 Pa	-91.36
	1/6	0.22 Pa	-12.95	0.01 Pa	-48.84	0.00 Pa	-85.26
	1/7	0.34 Pa	-15.08	0.01 Pa	-50.10	0.00 Pa	-80.15
	1/8	0.35 Pa	-14.09	0.01 Pa	-50.92	0.00 Pa	-88.05
	1/9	0.33 Pa	-14.14	0.00 Pa	-52.28	0.00 Pa	-83.23
	1/10	0.40 Pa	-13.37	0.00 Pa	-53.05	0.00 Pa	-89.88
	1/11	0.89 Pa	-19.70	0.14 Pa	-49.04	0.00 Pa	-84.20
	1/12	0.22 Pa	-12.34	0.00 Pa	-53.27	0.02 Pa	-85.41

### 5-2-3 まとめ

外気の温湿度周期変動に応じる中塗り土壁の応答を評価した。

- 1) 年周期入力に対する温度応答は線形的であり、水蒸気分圧応答には非線形性を示す周波数成分が確認できた。
- 2) 50～100 mm厚壁体の室内側表面温度応答は外気温度振幅の約3～4割減衰させる。1年を通じた温度変動の平準化には300 mm厚以上が必要となるが、中塗り土の特性を利用した壁体を施工するのであれば、50～100 mmの壁厚でも十分活用可能である。
- 3) 外気の湿度振幅は50 mm厚壁体でも約2割に減衰する。100 mmを超えると一年を通じ湿度変動は平準化した。位相差は50・100 mm厚で1～2週間程度の遅れとなるが、300 mm厚を超えると2ヶ月以上遅れる。
- 4) 外気の年・日周期変動を遮蔽し、室内側表面の温度と水蒸気分圧の振幅をほぼ平準化させるには50・100 mm厚で十分であるが、温度の完全な平準化を求めるのであれば、300 mm厚以上の中塗り土が必要である。

## 5-3 技能継承により施工された土壁を有する住宅の室内環境評価

### 5-3-1 解析条件

壁体構造を図7、室内環境評価の対象住宅平面図を図8、差分領域モデル（中塗り土充填壁）を図9、差分領域モデル（木舞下地壁）を図10、壁体寸法を表5に示す。本章では在来軸組工法に見合う3寸5分の柱（桧：105×105 mm）を有する壁（以下木舞下地壁という）と小規模の蔵の柱（桧：150×150 mm）を活用した壁（以下中塗り土充填壁という）を比較評価する。降幡らが手掛ける再生住宅[4]では、現代住宅の在来軸組工法と異なる古材を再利用する場合、5寸程度の大型柱が使用可能となる。5寸程度の柱材を新築で実施工するには、樹齢100年以上の芯持ち桧材が必要であり、価格は通常のプレカット材の4倍程度となるため難しい。木舞下地壁は筋交いに頼らず、通し貫といわれる水平構造材を用いた[5]。中塗り土充填壁は土の熱湿気容量を最大限に生

かけた壁となる。両壁は共に耐力補強と外装材の下地を確保するための構造用合板を有する。中塗り土充填壁の実施工では合板と中塗り土の間に不連続な中空層が発生するが、断熱性能は不確かなため無視した。木舞下地壁の材料である木舞竹を写真 1、木舞の施工状況を写真 2 に示す。写真 2 の実測調査により、矩形とみなした木舞竹（8 mm厚@40）を編み込んだものを木舞部分、間渡し竹（φ20@300）と貫 4 本（12×80 mm）を配置したものを貫部分と設定した。解析モデルの正面図を図 11、断面図を図 12、平衡含水率関係[6][7][11][12]を図 13、材料物性値[6][7][8][9][11][10]を表 6 に示す。住宅の壁、柱と窓は熱湿流方向（1次元）に並列配置とし、中塗り土の木舞部分、貫部分の物性値は第 3 章で用いた混合材モデルによる熱湿気物性値、比熱、比重を用いて定義する。中空層の等価熱伝導抵抗[6]は  $0.18(\text{m}^2 \cdot \text{K}/\text{W})$ 、透湿係数[8]は  $9.0 \times 10^{-8}(\text{kg}/\text{m}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{Pa})$ 、窓面（Low-E Pair 硝子）の熱貫流率は  $1.67(\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{K})$  とする。壁体の熱湿気貫流率（50%RH に平衡した材を想定）は木舞下地壁が  $1.41(\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{K})$ 、 $1.2 \times 10^{-10}(\text{kg}/\text{m}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{Pa})$ 、中塗り土充填壁が  $1.36(\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{K})$ 、 $7.7 \times 10^{-11}(\text{kg}/\text{m}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{Pa})$  となる。間渡し竹の内部空隙の熱性能を無視した木舞下地壁と中塗り土充填壁の熱貫流率はほぼ同等であり、湿気貫流率は木舞下地壁が中塗り土充填壁の約 1.4 倍である。

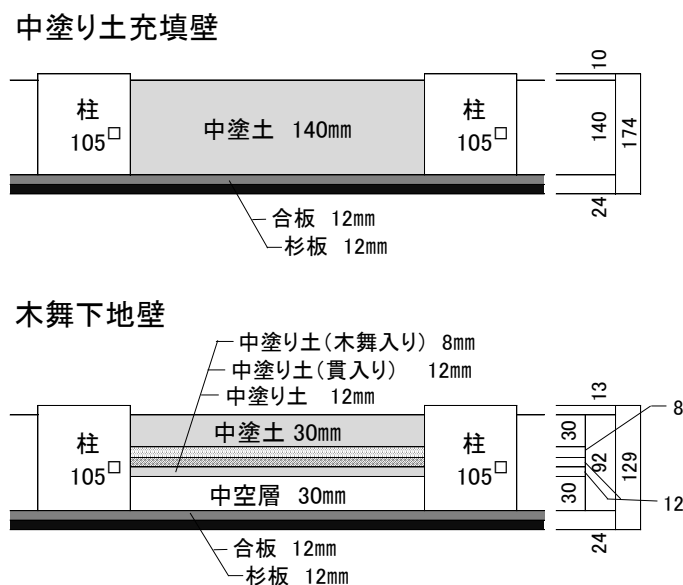


図 7 壁体構造

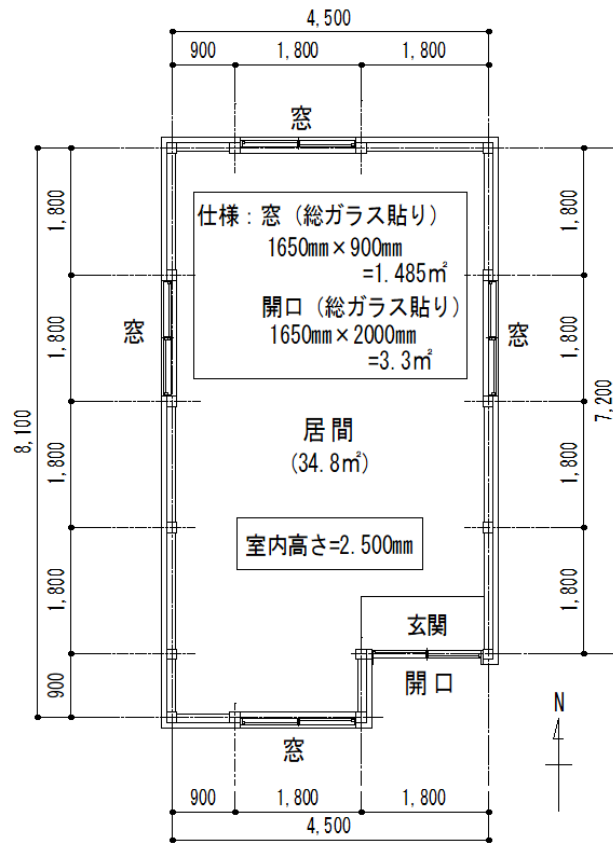


図8 室内環境評価の対象住宅平面

表5 壁体寸法

中塗り土充填壁		木舞下地壁	
材料	材厚(mm)	材料	材厚(mm)
中塗り土	140	中塗り土	30
		中塗り土 (木舞入り)	8
		中塗り土 (貫舞入り)	12
		中塗り土	12
		中空層	30
合板	12	合板	12
杉	12	杉	12
総壁厚	164	総壁厚	116
熱貫流率	1.36	熱貫流率	1.41
湿気貫流率	$7.7 \times 10^{-11}$	湿気貫流率	$1.2 \times 10^{-11}$

単位 熱貫流率：W/ m<sup>2</sup>・K  
湿気貫流率：kg/ m<sup>2</sup>・s・Pa



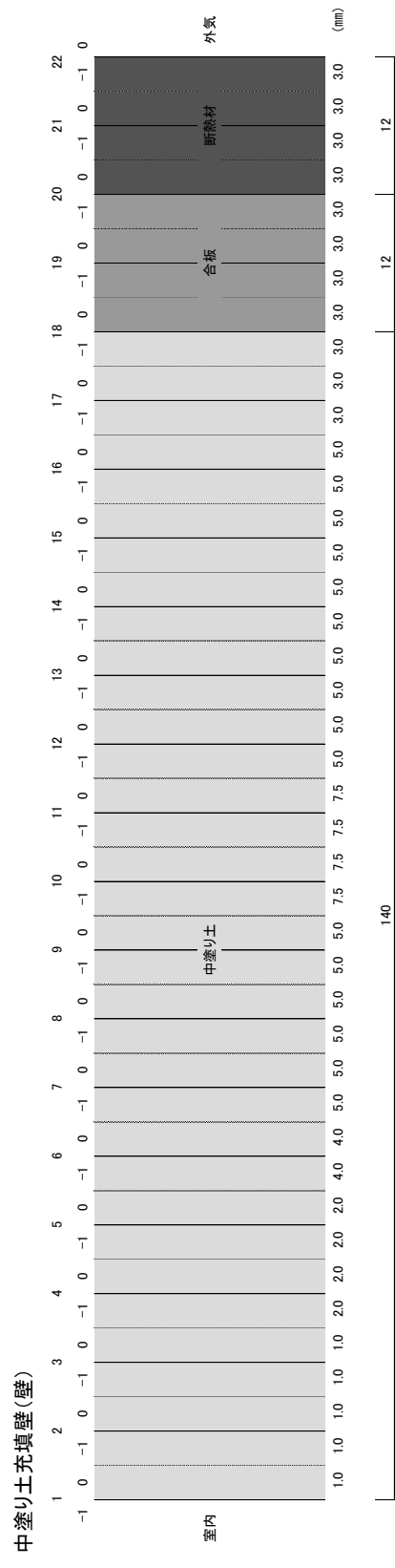
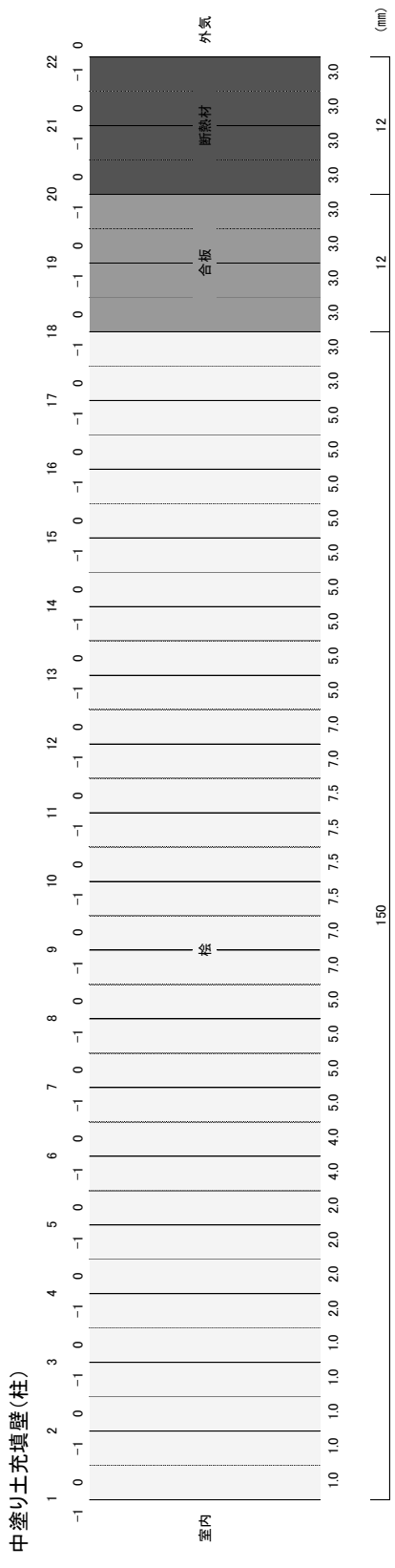


図9 差分領域モデル (中塗り土充填壁)

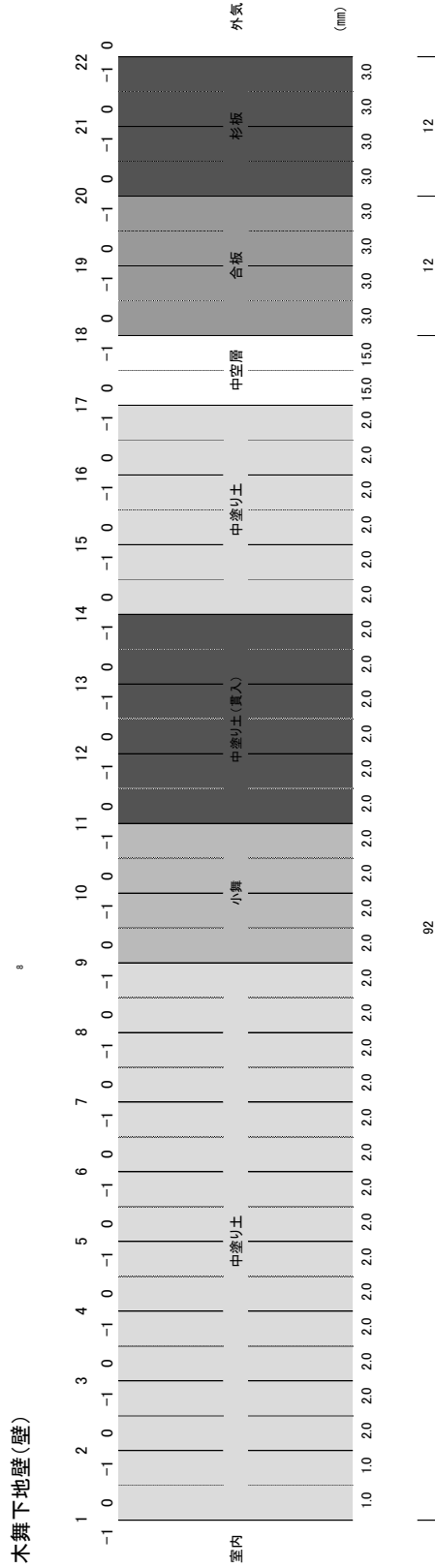
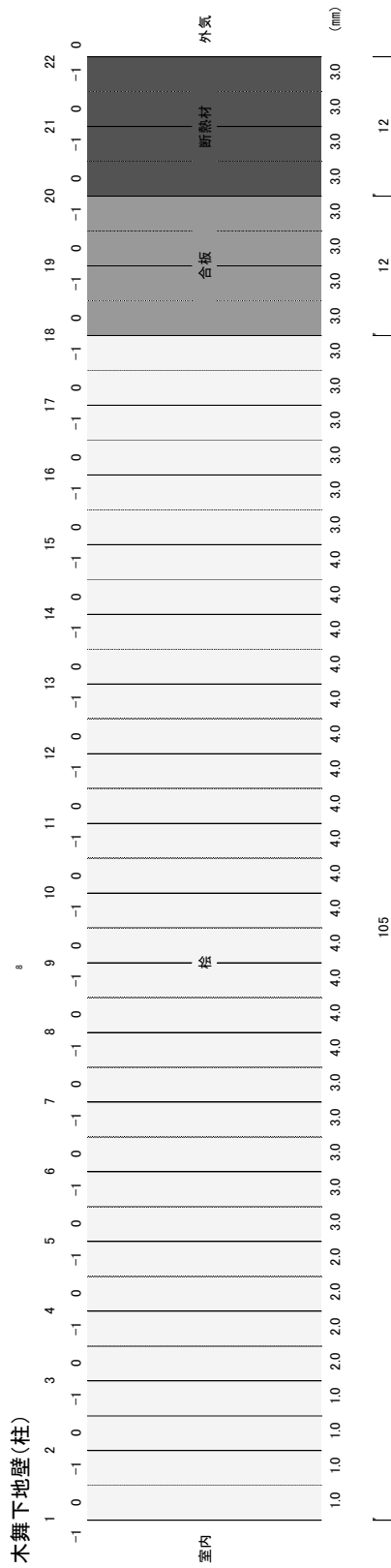


図10 差分領域モデル(木舞下地壁)



写真1 木舞竹



写真2 木舞竹の施工状況

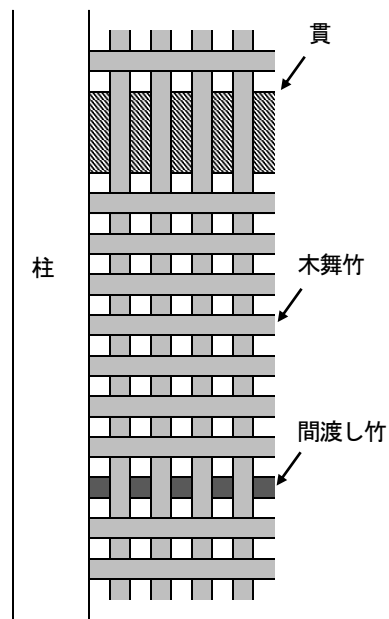


図11 木舞・貫部分の解析モデル(正面図)

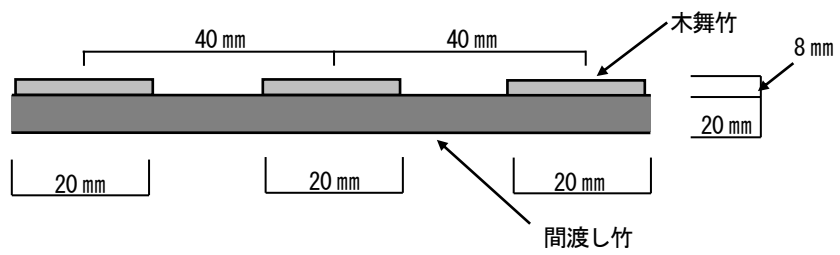


図12 木舞・貫部分の解析モデル(断面図)

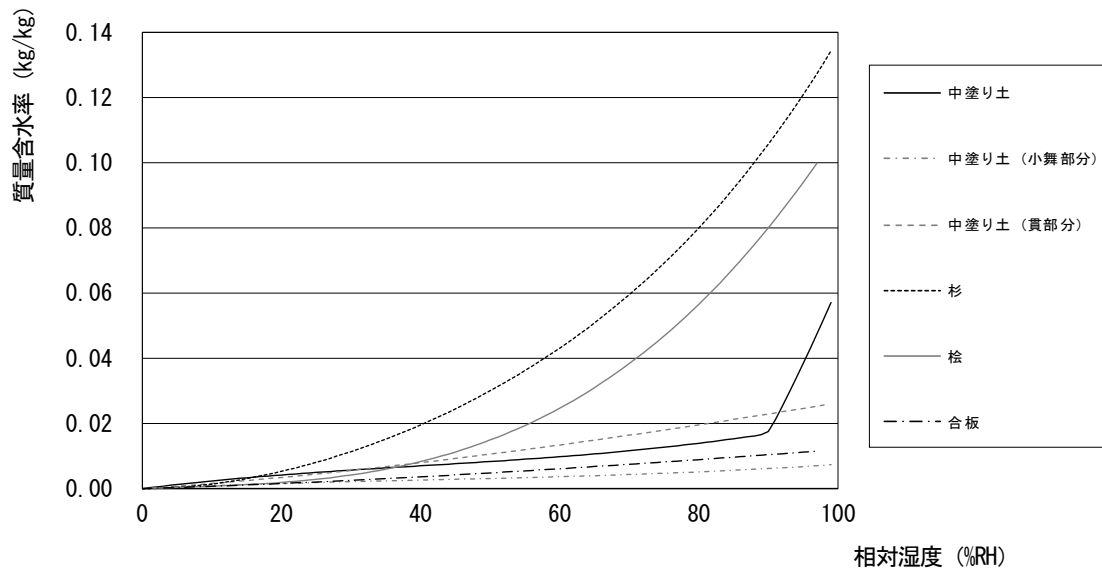


図 13 平衡含水率関係 [6][7][11][12]

表 6 材料物性値[6][7][8][9][10][11]

	熱伝導率 (W/m・K)	湿気伝導率 (kg/m・s・Pa)	密度 (kg/m <sup>3</sup> )	比熱 (J/kg・K)	空隙率 (m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> )
杉	0.15	$1.7 \times 10^{-11}$	400	1300	0.82
合板	0.12	$7.9 \times 10^{-12}$	622	1880	0.48
中塗り土	$(0.0016 \times \%RH) + 0.266$	$(2.18 \times 10^{-13} \times \%RH) + 3.15 \times 10^{-12}$	1665	900	0.41
桧	0.10	$1.1 \times 10^{-11}$	496	1300	0.75
竹	0.15	-	800	1300	-
中塗り土 (木舞部分)	0.22	$5.3 \times 10^{-12}$	1129	1148	0.45
中塗り土 (貫部分)	0.32	$1.58 \times 10^{-11}$	940	1148	0.55

外界条件は兵庫県豊岡市のアメダスデータ[13]の標準年(1991年~2000年)を使用した。外気温度には日射の等価気温[14](全天日射量の直散分離はNagataモデルを採用)を用いる。高温低温化に伴う土の劣化を評価するとき、大気放射の影響は無視できないが、壁体は外気側に構造用合板を有する杉板張り仕上げであるため、大気放射の影響による土の低温化が生じにくいと判断

した。室内条件の生活行為[15]を表7に示す。室内は夫婦2人と機器等の発熱、発湿[15]を考慮した限定的な空間である。人体の発熱、発湿のみを想定した室内条件の解析結果を自然状態、冷暖房運転を行った解析結果を冷暖房状態と呼ぶ。冷暖房運転[16]の室内温度は夏期[16](7/15～9/15)を28℃、冬期[16](12/1～3/31)を20℃とし、相対湿度は55%RHとする。解析対象である居間は換気回数が0.5回/h、上下階は同条件の居室が存在すると想定(居室天井と床を断熱断湿)した。解析には、水蒸気分圧をポテンシャルとした蒸気拡散支配の熱水分同時移動方程式[17]を用いる。計算方法は場所が中心差分、時間が前進差分とし、時間分割は1秒で安定した解を得た。本章では木舞下地壁施工の室内(以下木舞下地壁室内という)と中塗り土充填壁施工の室内(以下中塗り土充填壁室内という)を比較することで室内の温湿度挙動を評価する。

表7 生活行為[15]

時刻	1~5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
在室人数(人)	0	1	2	2	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	2	2	2	2	0
人体発熱(W)	0	76	152	152	76	76	76	76	76	76	0	76	76	76	76	152	152	152	152	0
人体発湿(g)	0	30	60	60	30	30	30	30	30	30	0	30	30	30	30	60	60	60	60	0
照明(W)	0	180	180	180	180	0	0	0	0	0	0	300	300	300	300	300	300	300	300	0
機器(W)	0	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	0
冷暖房運転	OFF	ON	ON	ON	OFF	OFF	OFF	ON	ON	OFF	OFF	ON	ON	ON	ON	ON	ON	ON	OFF	OFF

### 5-3-2 室内温湿度変動

#### 5-3-2-1 自然状態

解析地域の気候は夏が高温多湿、冬が多雪(湿)寒冷である。標準年の年間平均気温は14.4℃であるが、夏期と冬期の平均気温(夏期26.0℃、冬期4.8℃)とは差が大きく、外気温が5℃以下となる期間が長期(10/24～4/20)に及ぶ。外気の相対湿度は夏期、冬期の平均値が約80%RHと高く、一年の大半が高湿度であり、100%RHとなる時間は68時間(7/16～1/18)発生した。梅雨期(4/17～6/21)の平均相対湿度(73%RH)は年間を通じて最も低く、外気が30%RH以下となる乾燥

状態が 53 時間(3/20～6/20)発生する。

年間温度変動(自然状態 室内)を図 14 に示す。湿湿度は 1 時間毎に算出した値である。中塗り土充填壁室内と木舞下地壁室内の年間平均室温 (15.1℃) は壁体の熱貫流率がほぼ同等であるため差がない。いずれの壁体も熱貫流率が大きいため(次世代省エネルギー基準(0.45(W/m<sup>2</sup>・K[18]))の約 3 倍)、室内変動は低温高湿な冬期の外気条件とほぼ等しい変動となる。冬期の平均室温 (5.3℃) は直達日射量の影響で外気温より約 0.5℃高い。冬期は外界条件に見合う断熱性能がないため、中塗り土充填壁や木舞下地壁を要する住居(以下土壁住居という)の室温は低くなる。室温 15℃以下の期間(中塗り土充填壁室内 4321 時間(10/16～5/16)、木舞下地壁室内 4313 時間(10/15～5/24))は長期に及んだ。室温 5℃以下の時間は冬期以外でも発生する(中塗り土充填壁室内 42 時間(4/1～4/4)、木舞下地壁室内 58 時間(11/20～11/30))。本章の土壁住居は無暖房居室とすることが難しいため、壁体の断熱施工の検討や暖房運転を行う必要がある。

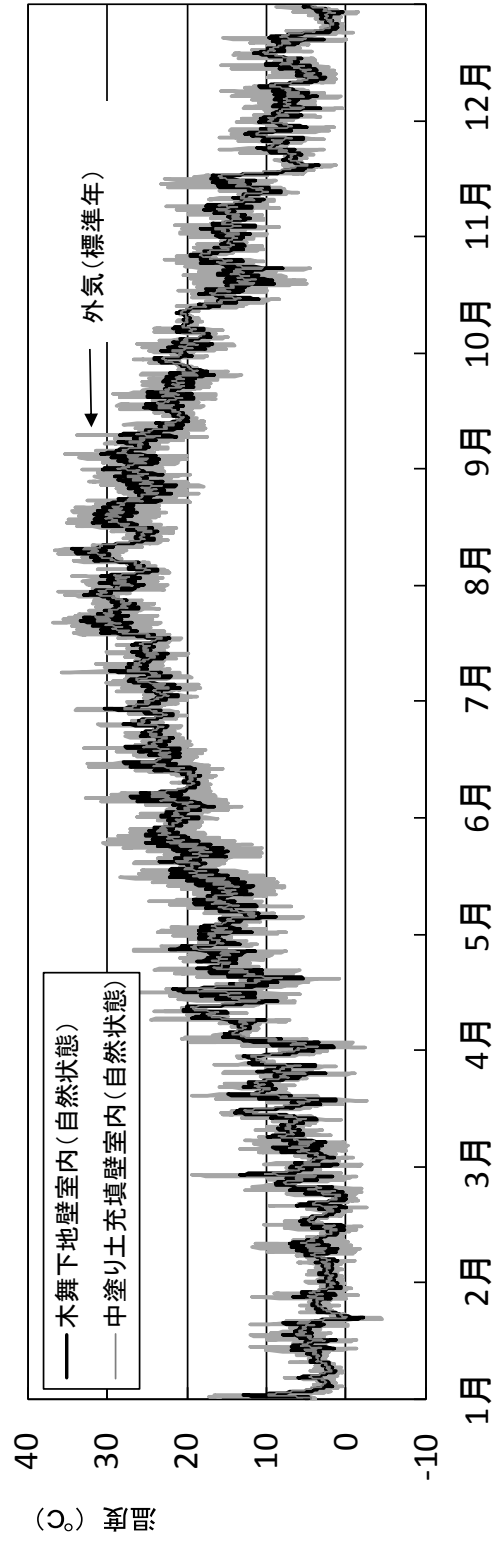


図 14 年間温度変動 (自然状態 室内)

日変動（室内）は温度振幅の大きい夏期の3日間を対象に評価した。夏期3日間（自然状態）の温度変動（室内）を図15に示す。室内の温度変動は外気振幅に対して中塗り土充填壁室内が約2割（位相5時間）、木舞下地壁室内が約5割（位相3時間）まで低減された。木舞下地壁室内の温度振幅は中塗り土充填壁室内の約2.8倍と大きいですが、両室内の温度振幅差が室内環境に及ぼす影響は少ないことから、土壁住居室内の日変動特性（温湿度）は壁体構造によらず年間を通じて差がないと言える。温度振幅の位相遅れにより日射の熱は夜間に持ち越される。これは土壁住居が冬期の夜間居住に有効となることを示す。年間温度変動（室内）をデGREEデイで評価した。室温20℃以下の期間(9/26～5/24)の中塗り土充填壁室内と木舞下地壁室内ではデGREEデイ(20℃以下)差は殆どない(中塗り土充填壁室内56632h℃、木舞下地壁室内56536h℃)。室温28℃以上の期間(7/1～9/8)のデGREEデイ(28℃以上)は木舞下地壁室内が中塗り土充填壁室内の約1.3倍となった(中塗り土充填壁室内882h℃、木舞下地壁室内1141h℃)。木舞下地壁室内は中塗り土充填壁室内より温度振幅が大きく、冷房条件に該当する時間(温度差)が増加するため、デGREEデイ(28℃以上)差が顕著となる。これは後述する冷房負荷に影響を及ぼす。

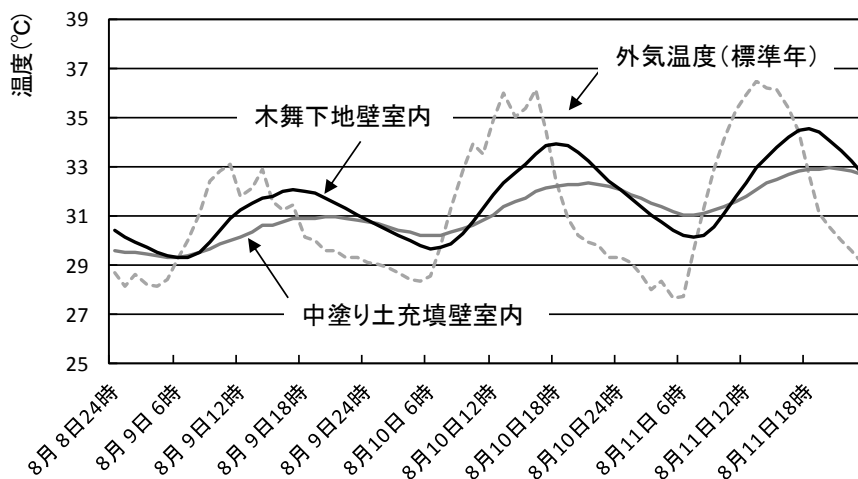


図15 夏期3日間（自然状態）の温度変動（室内）



年間水蒸気分圧変動（自然状態 室内）を図 16、年間相対湿度変動（自然状態 室内）を図 17 に示す。中塗り土充填壁室内と木舞下地壁室内の年間平均相対湿度（80%RH）には差がない。冬期の土壁住居室内は室温低下に伴い高湿となる。秋口から高湿となる土壁住居室内の平均相対湿度は冬期で約 85%RH となった。冬期の土壁住居室内の相対湿度が 90%RH 以上となる積算時間には差がない（中塗り土充填壁室内 387 時間(9/29～2/26)、木舞下地壁室内 389 時間(9/28～2/26)）。梅雨期の土壁住居室内は相対湿度 70%RH 以下の時間（中塗り土充填壁室内 465 時間(4/17～6/21)、木舞下地壁室内 510 時間(4/17～6/21)）が発生し、期間内平均値は約 72%RH となる。梅雨期の期間内平均値が他期間（6/22～4/16 の期間内平均値 81%RH）より低い原因は直達日射量の増加に伴う等価気温の上昇である。

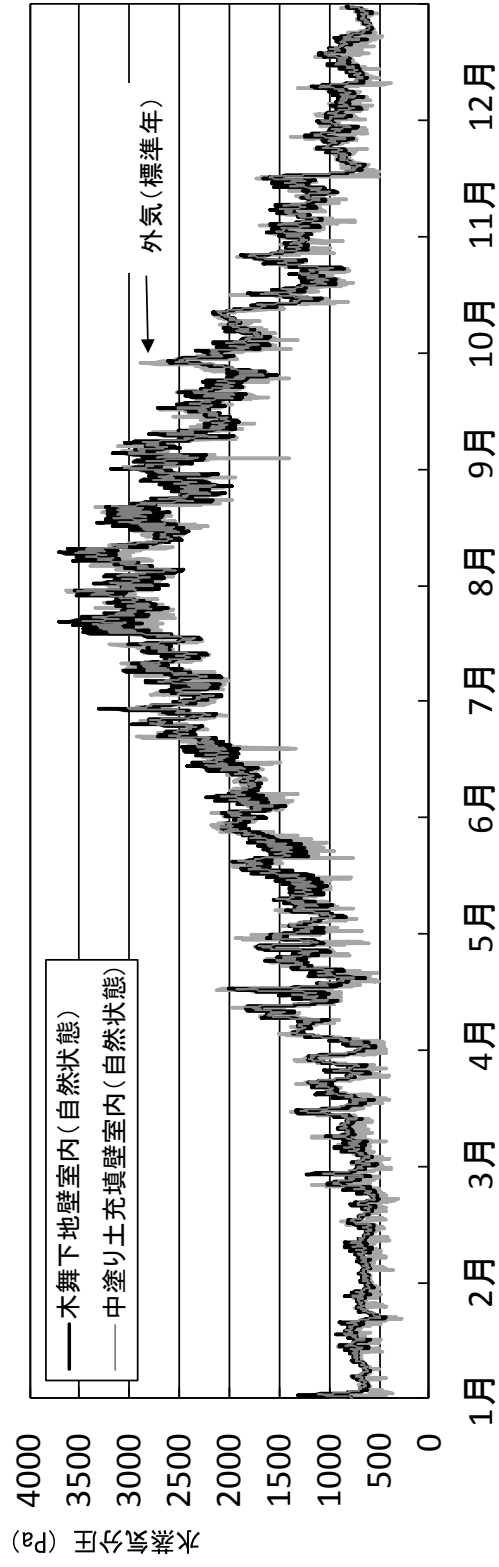


图 16 年間水蒸気分圧変動 (自然状態 室内)

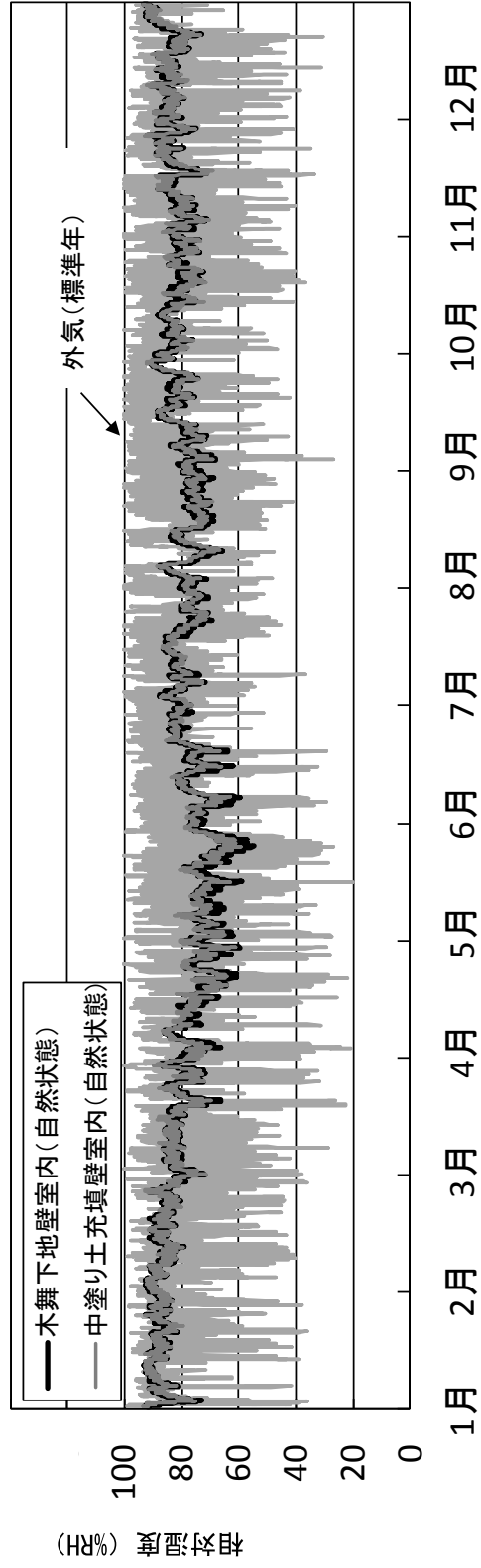


図17 年間相対湿度変動(自然状態 室内)

夏期3日間（自然状態）の水蒸気分圧変動(室内)を図18、相対湿度変動(室内)を図19に示す。

木舞下地壁室内は中塗り土充填壁室内より外気からの水分供給による影響を受けやすい。木舞下地壁室内の水蒸気分圧変動は中塗り土充填壁室内と比較すると振幅が約1.9倍、位相遅れが約3時間となった。これは木舞を有する木舞下地壁の湿気貫流率が中塗り土充填壁より大きいためである。中塗り土充填壁、木舞下地壁の振幅は外気の約1割となった（位相は共に概ね一定）。木舞下地壁室内の水蒸気分圧変動は中塗り土充填壁室内より大きい、室内の相対湿度変動に与える影響は少ない。

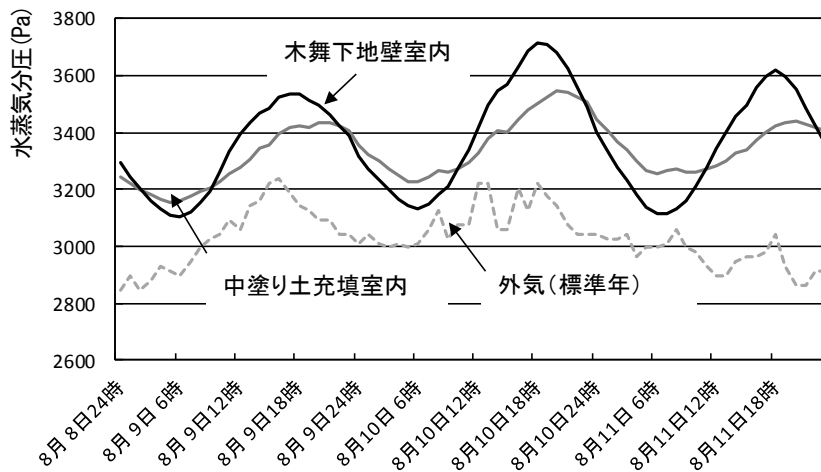


図18 夏期3日間（自然状態）の水蒸気分圧変動（室内）

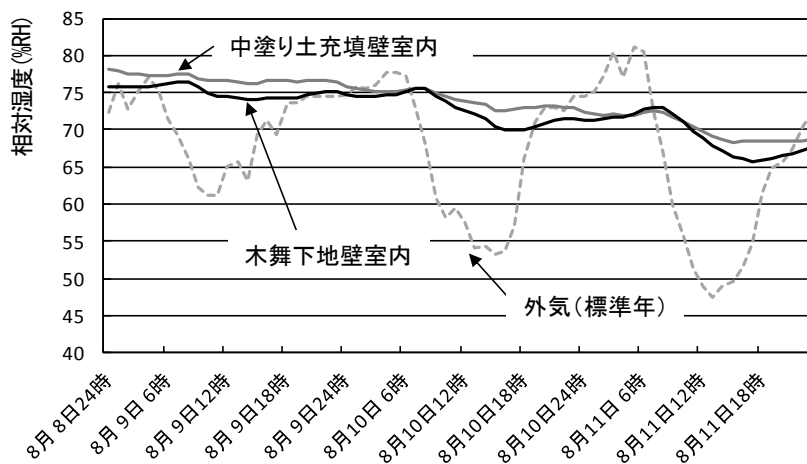


図19 夏期3日間（自然状態）の相対湿度変動（室内）

室内側表面より 30 mm 内部（外気側）の熱流を確認し、壁体の断熱性能を比較評価する。材料分散型の熱伝導率が物性値どおりに挙動をすれば、本章の木舞下地壁の薄い木舞等(86 mm)と中塗り土充填壁の分厚い中塗り土(136 mm)は代替可能となる。熱流確認箇所の説明図(a点)を図20、夏期3日間の室内側表面、壁体内部(a点)熱流変動を図21に示す。中塗り土充填壁(a点)の熱流変動は木舞下地壁(a点)に対して振幅が約0.8倍、位相遅れが1時間となった。本章の木舞等と分厚い中塗り土は内部熱流に僅かな変動差が発生するが断熱性能はほぼ同程度であることを確認した。内部熱流の変動に差が発生した原因は壁体の熱容量である。本章では木舞下地壁の熱容量を中塗り土充填壁の約0.4倍(木舞下地壁:  $3.74 \times 10^4$  J/K(50%RH) 中塗り土充填壁:  $8.48 \times 10^4$  J/K(50%RH))とした。

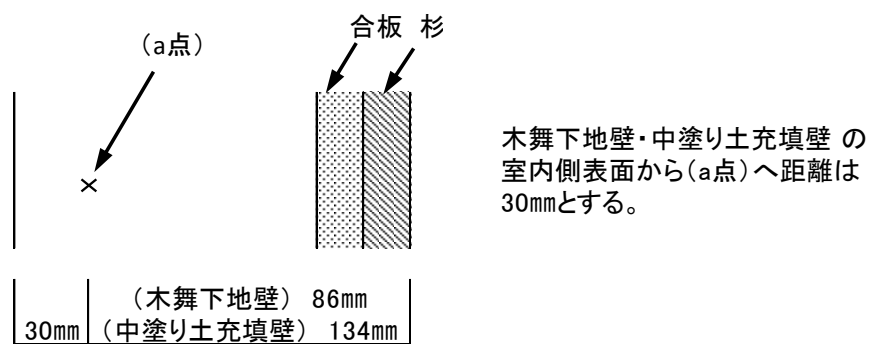


図20 熱流確認箇所

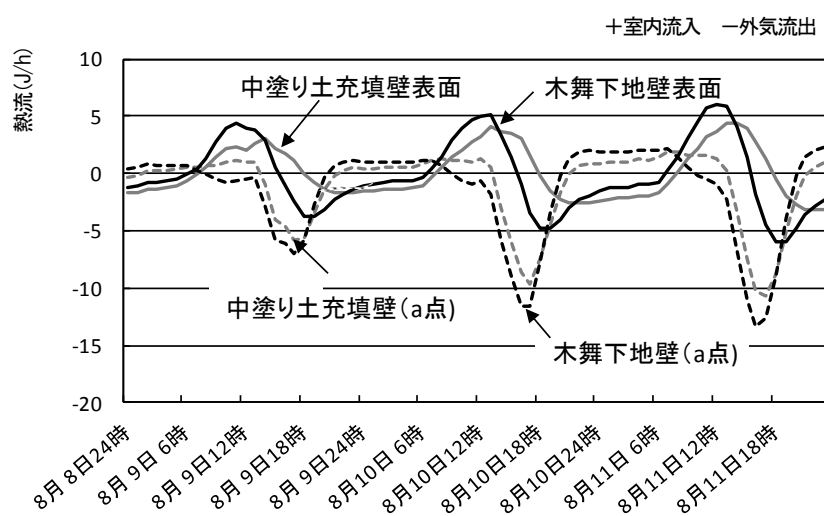


図21 夏期3日間の室内側表面、壁体内部(a点)熱流変動

土壁住居室内（壁柱面、窓面、換気）の熱流変動（7-9 月期 時間毎平均値）を図 22 に示す。室内の熱流出変動は年間を通じてほぼ同様の特性であり、窓面と壁柱面の熱流はほぼ等しい。窓面から昼間に供給された熱流（日射熱）は壁柱面ではほぼ吸収（蓄熱）され、夜間室内へ放熱される。本章では開口部の有する住居に熱容量のある土壁を用いたため、昼間に開口部から壁体内部に蓄熱された熱量が室内の温度変動に影響を与えた。中塗り土充填壁と木舞下地壁は熱容量が異なるため、室内の温度変動に差が発生する。木舞下地壁と比較して熱容量の大きい中塗り土充填壁は室内への放熱応答が木舞下地壁と比較して遅く、放熱量は木舞下地壁より最大 78.1J/h（7:00）大きい。換気熱量は四方位からの直達日射量が影響するため約 1 時間の位相遅れが発生した。

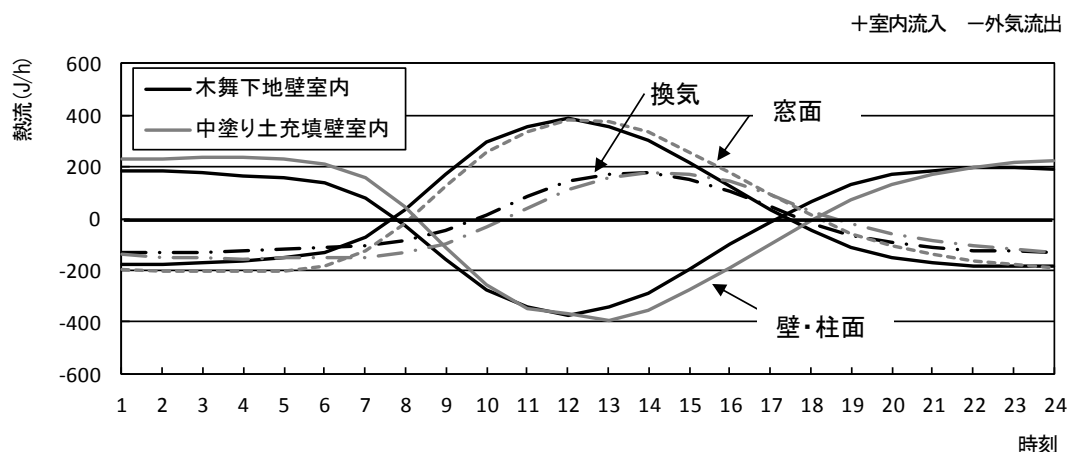


図 22 土壁住居室内（壁柱面、窓面、換気）の熱流変動（7-9 月期 時間毎平均値）

室内の吸放湿変動（時間毎平均値）を図 23 に示す。自然状態の壁表面の吸放湿変動には人体の間欠加湿が大きく影響する。人体の間欠加湿により室内は高湿となるが、加湿分は土壁表面にほぼ吸湿された。換気に伴う放湿積算量（g/day）は1-3 月期が7-9 月期の約 1.8 倍と多いが、室内の湿度環境の形成に大きく影響しない。土壁住居室内の冬期の室温低下に伴い高湿となった。

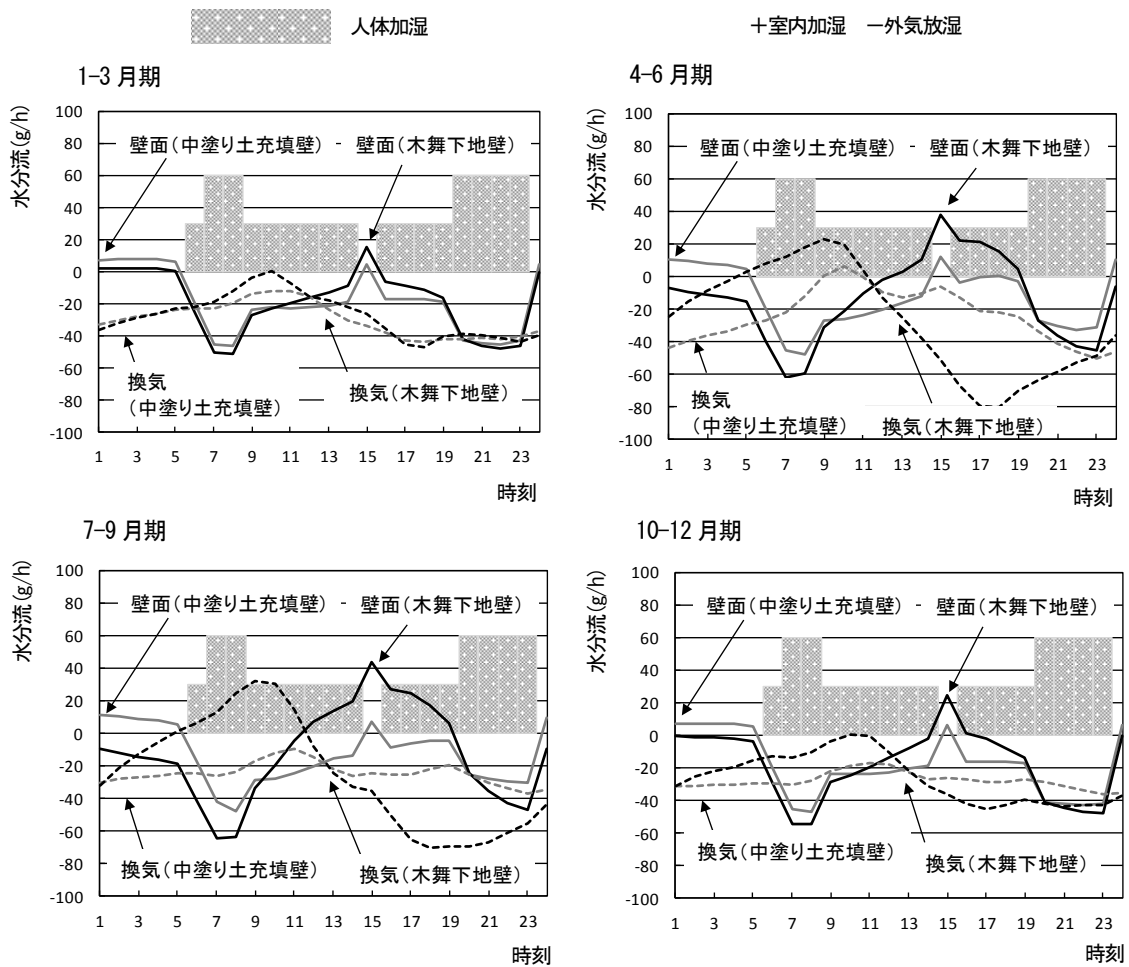


図 23 室内の吸放湿変動（時間毎平均値）

### 5-3-2-2 冷暖房状態

年間温度変動(冷暖房状態 室内)を図 24、年間水蒸気分圧変動(冷暖房状態 室内)を図 25、年間相対湿度変動(冷暖房状態 室内)を図 26 に示す。自然状態と冷暖房状態の室内温湿度変動は冷暖房期間を除いて殆ど差がない。壁体の熱容量が少ない木舞下地壁室内は、中塗り土充填壁室内より夏期の日射負荷の影響を受けやすく、温度振幅が大きいため、冷房条件に該当する時間が多い。冷房期後半では(8/26~9/15) で中塗り土充填壁室内の冷房運転が稼働しない。運転対象積算時間(822 時間)で評価すると木舞下地壁室内の冷房時間(302 時間)は中塗り土充填壁室内(234 時間)より約 1 割多く、冷房稼働率は中塗り土充填壁室内が約 28%、木舞下地壁室内が約 34%となった。暖房運転は両室内共に全ての運転対象積算時間(2904 時間)で稼働する。

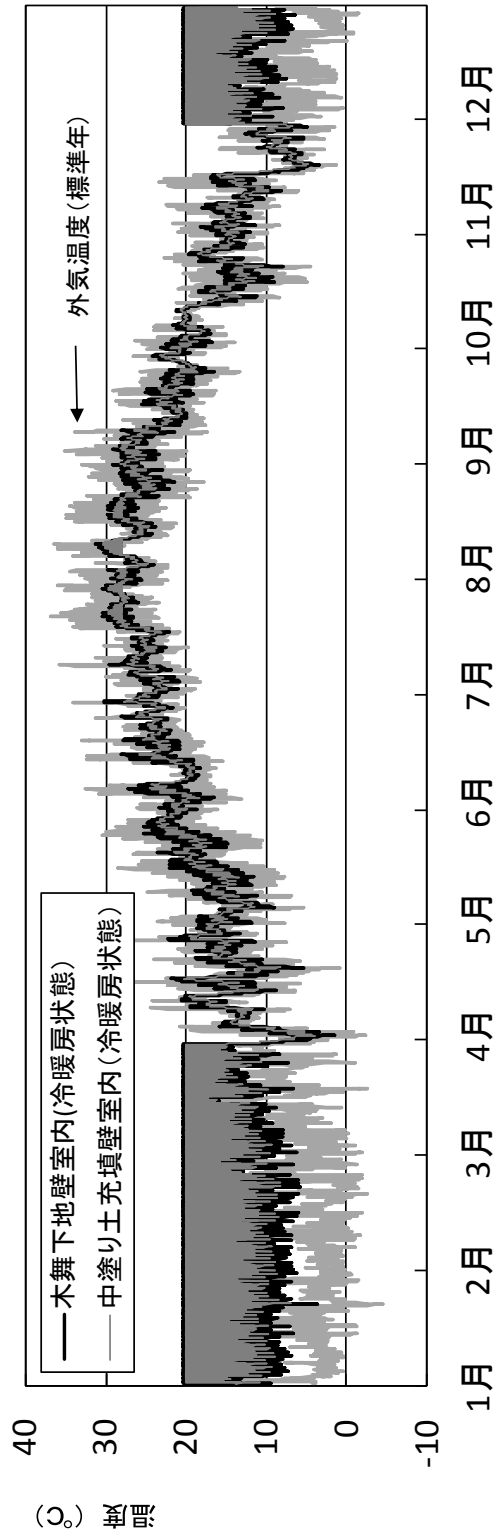


図 24 年間温度変動 (冷暖房状態 室内)



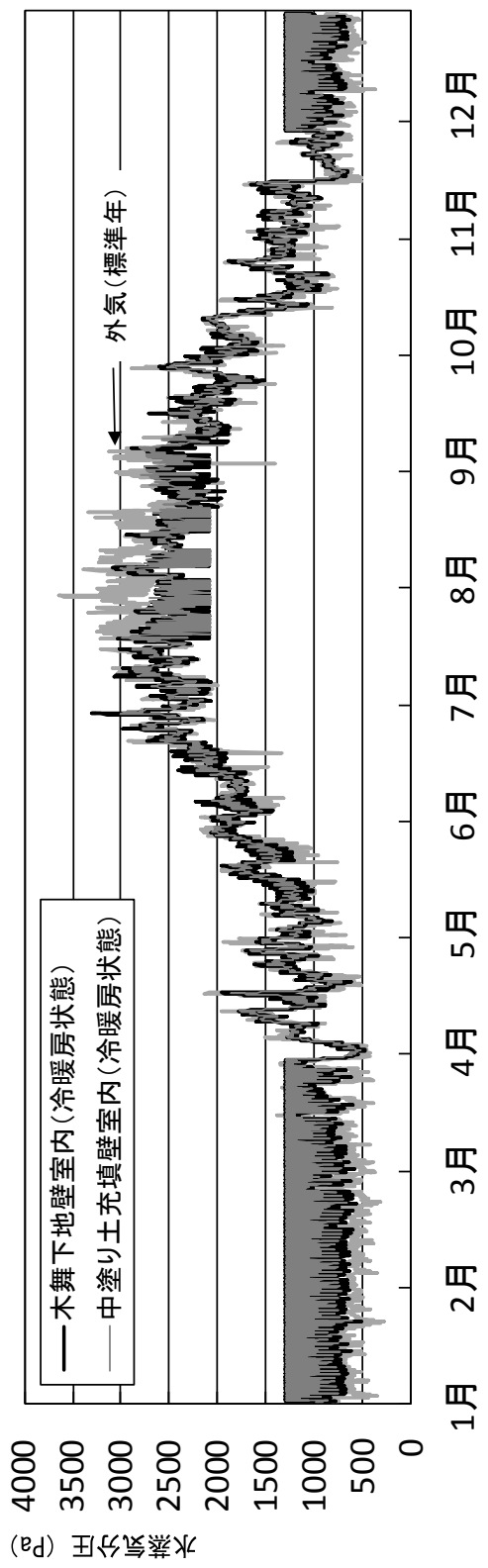


図 25 年間水蒸気分圧変動 (冷暖房状態 室内)

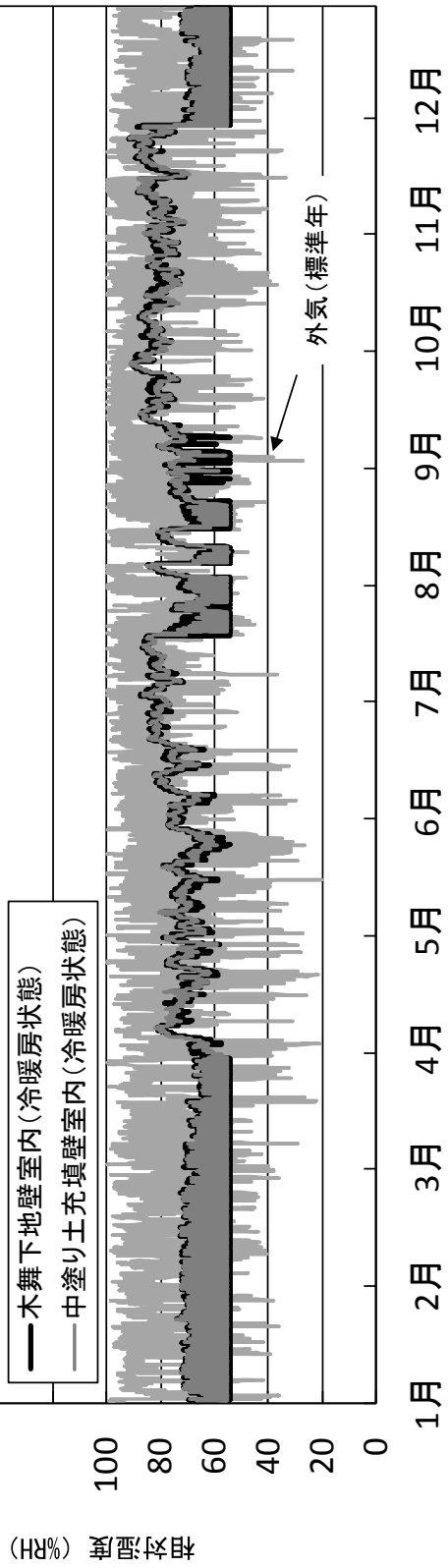


図 26 年間相対湿度変動 (冷暖房状態 室内)

室内の冷暖房負荷を表 8 に示す。木舞下地壁室内の暖房負荷は中塗り土充填壁室内で同等となるが、冷房負荷は中塗り土充填壁室内の約 1.4 倍となる。冷暖房負荷のうち潜熱負荷が占める割合は約 3%であるため、潜熱負荷が冷暖房負荷に及ぼす影響は少ない。中塗り土充填壁室内と木舞下地壁室内で冷房時の潜熱負荷の差が小さい原因は本章の換気回数 (0.5 回/h) に依るところが大きく、壁体の吸放湿性能が妨げられたと考えられる。

表 8 室内冷暖房負荷

		MJ/m <sup>2</sup>		
		冷房負荷	暖房負荷	合計
中塗り土 充填壁 室内	顕熱負荷	7.4	396.0	403.4
	潜熱負荷	3.5	7.0	10.5
	合計	10.9	403.0	413.9
木舞 下地壁 室内	顕熱負荷	11.7	402.5	414.2
	潜熱負荷	4.1	7.1	11.2
	合計	15.8	409.6	425.6

冷房期の水蒸気分圧変動 (室内 時間毎平均値) を図 27 に示す。木舞下地壁室内と中塗り土充填壁室内の水蒸気分圧変動の差は冷房期が最も大きい。木舞下地壁室内の水蒸気分圧の振幅は中塗り土充填壁室内の約 1.8 倍となる。木舞下地壁室内と中塗り土充填壁室内の水蒸気分圧変動は冷房除湿に伴い差が発生した。冷房期の水分流変動を図 28 に示す。冷房除湿 (11:00~20:00) に伴い、壁表面の水分は室内側に放湿される。換気水分は常時流出した。木舞下地壁の放湿積算量 (g/day) は中塗り土充填壁の約 1.2 倍と多いが、壁面の吸放湿量は居室の湿気容量に対して少なく、壁表面の吸放湿に伴う過重な潜熱負荷が発生しない。

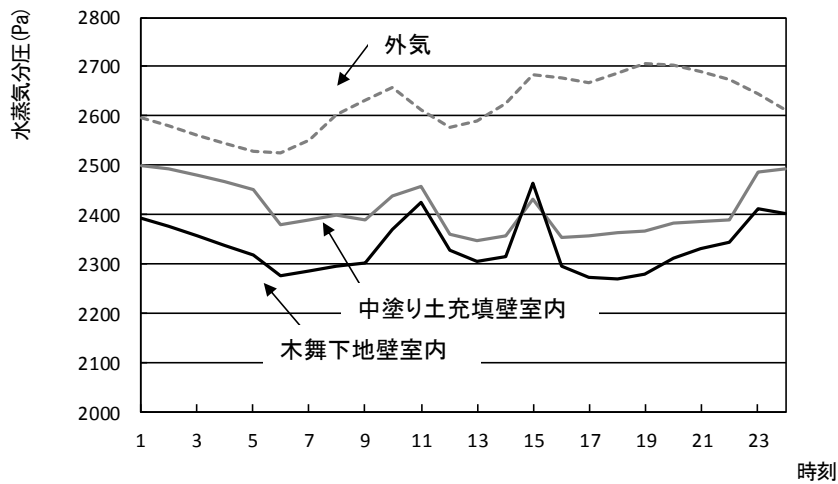


図 27 冷房期の水蒸気分圧変動 (室内 時間毎平均値)

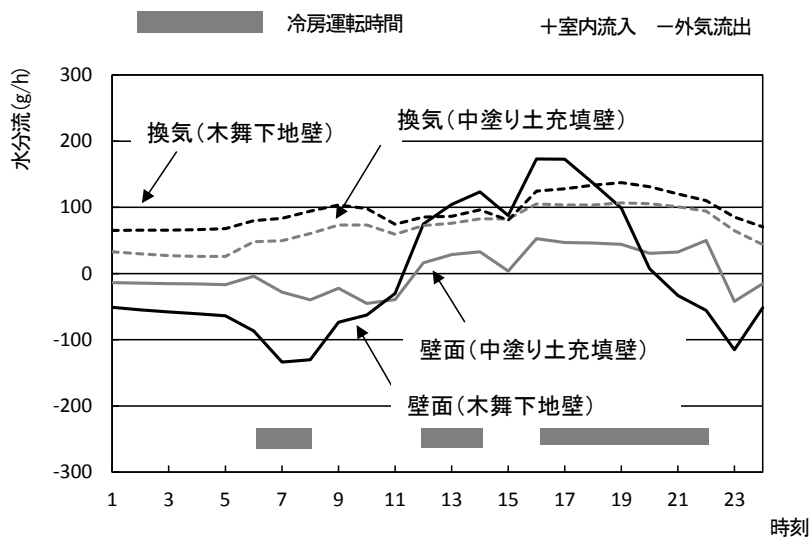


図 28 冷房期の水分流変動

暖房停止後の相対湿度変動(室内)を図 29 に示す。暖房運転停止直後の相対湿度は室温の低い自然状態で約 80%RH、暖房状態で約 60%RH を推移する。自然状態と暖房状態の相対湿度変動の違いは暖房運転終了後、約 20 日間継続する。暖房停止後の温度変動を図 30、水蒸気分圧変動(室内)を図 31 に示す。暖房運転後の相対湿度差の原因は壁体の吸放湿効果である。暖房期(4ヶ月)の室内除湿により乾燥した壁体の吸放湿効果が約 20 日間持続する。壁体の蓄熱効果の持続期間は暖房運転終了後から約 3 日間であった。

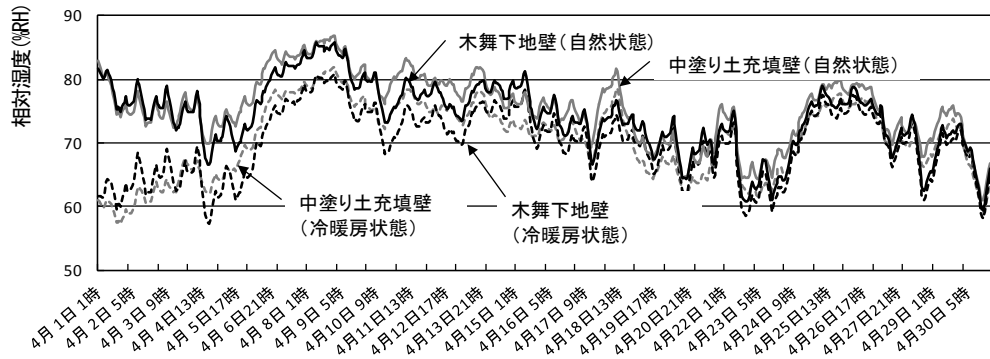


図 29 暖房停止後の相対湿度変動 (室内)

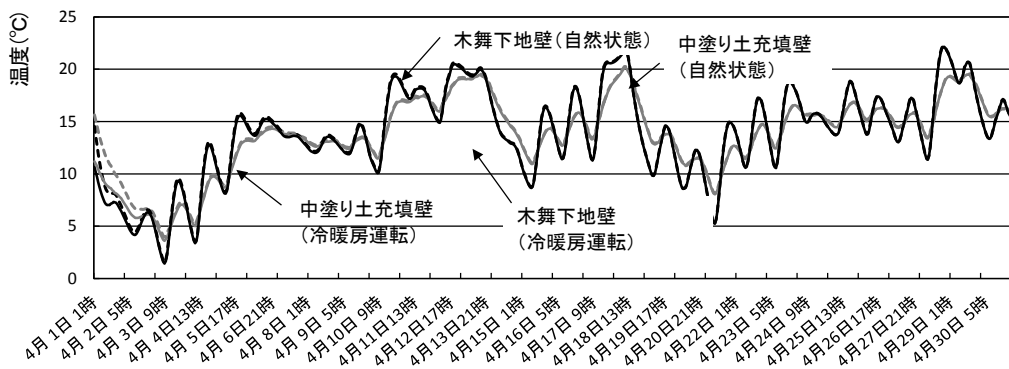


図 30 暖房停止後の温度変動 (室内)

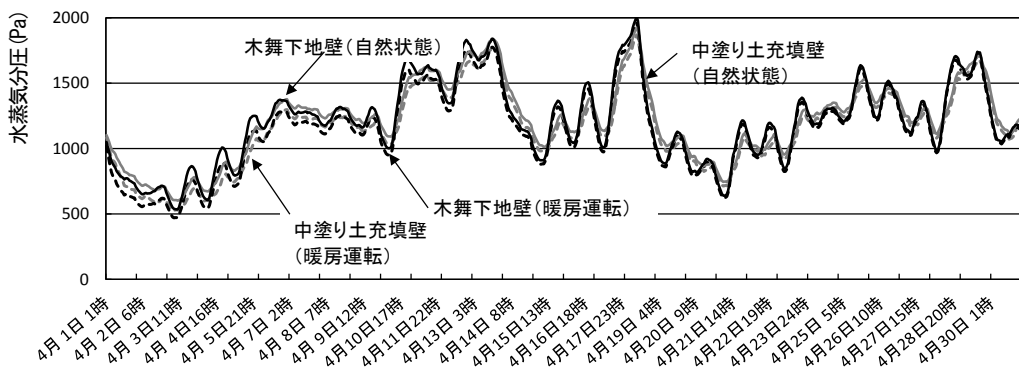


図 31 暖房停止後の水蒸気分圧変動 (室内)

冷暖房期の室温・室内表面温度を図 32 に示す。冷房期の壁表面温度は室温とほぼ一致する。夜間の冷房時間では壁表面温度が室温より高いため、体感上快適とならない可能性がある。暖房運転時の壁表面温度は明け方（6:00～9:00）で室温より最大 5.1℃低く、それ以外の時間帯（12:00～14:00、16:00～22:00）でも平均 2.8℃低い。暖房運転時以外の壁表面温度は 15℃以下となった。本章では壁体の熱容量により土壁住居の住環境が良好となることが期待されたが、冬期の間欠暖房のみでは良好な住環境を確保できない。暖房期の土壁住居の居住性を確保するためには暖房方法や土壁の施工法等を検討する必要がある。

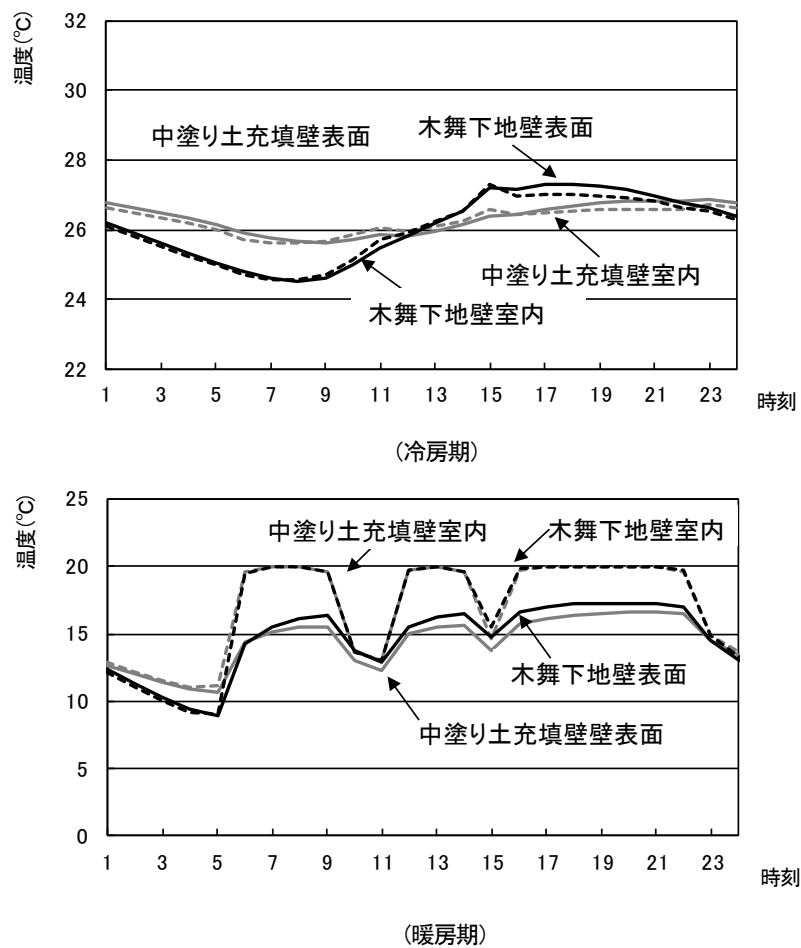


図 32 冷暖房期の室温・室内表面温度

### 5-3-3 まとめ

土壁住居室内の解析結果を結果を以下にまとめた。

- 1) 自然状態であれば、左官技能者が高度な技能で施工する木舞下地壁は土の量を問わず特性を十分利用できる。土壁住居室内の温度変動は温度外気振幅に対して中塗り土充填壁が約2割（位相5時間）、木舞下地壁が約5割（位相3時間）まで低減できる。
- 2) 本章の土壁住居室内は冬期の外気条件（低温高湿）に等しく変動する。自然状態の冬期の平均室温（5.3℃）は外気平均気温に対して約0.5℃だけ高い。相対湿度は室温の低下に伴い高湿（約85%RH）となった。土壁住居室内の解析に用いた土壁は現代住宅で必要とされる断熱性能が期待できないため、ゼロエネルギーの省エネ住宅等とするためには壁体の断熱補強の検討を行う必要がある。
- 3) 木舞下地壁室内と中塗り土充填壁室内の暖房負荷は同等である。冷房負荷は夏期の日射負荷の影響で木舞下地壁室内が中塗り土充填壁室内の約1.4倍となった。冷房運転に伴う木舞下地壁面の放湿量は中塗り土充填壁面の約1.2倍となるが、居室の湿気容量と換気量に対して少ないため、過重な潜熱負荷が発生しない。
- 4) 冷房期の壁表面温度は室温より高く、体感上快適とならない可能性があるため、日射遮蔽を検討する必要がある。暖房期は明け方（6:00～9:00）の壁表面温度が室温より最大で5.1℃低いため、断熱施工や暖房運転には適切な方法が必要である。

### 5-4 第5章のまとめ

本章では、中塗り土で構成された壁体の温度・水蒸気分圧応答を線型的に解析した結果、壁体厚さに伴う振幅の減少と位相関係を確認することができた。室内側表面の温度応答は50～100 mm厚壁体で外気温度振幅が約3～4割まで減衰し、湿気応答は100 mm厚壁体で平準化した。これらを考察した結果、中塗り土の特性を生かしながら室内側表面の温度、水蒸気分圧の振幅をほぼ平準化させるためには、50～100 mmの塗り厚が必要であることが分かった。左官技能者が高度な技能

で施工する木舞下地壁を利用すれば、土の量を問わず、その特性を十分利用することができる。本章では、中塗り土充填壁という壁体のもたらす室内環境維持の特性（恒温・恒湿性（自然室温））が、左官技能者が伝統技能で施工した木舞下地壁でも十分に得られることを確認した。

#### 引用文献

- [1] 富山県教育委員会, 「富山の土蔵」, 富山県, pp. 47-59, 2003. 3
- [2] 松本衛他, 「新建築環境 10 環境物理」, 彰国社, pp. 105-133, 1984
- [3] 日本建築学会編, 「建築設計資料集成 1 環境」, 丸善, pp. 118-120, 1979. 1
- [4] 降幡廣信: 古民家再生ものがたり, 晶文社, 2005. 2
- [5] 増田一眞: 激震でも倒壊しない伝統工法, NPO 法人伝統木構造の会, 2007. 7
- [6] 日本建築学会: 建築設計資料集成 1 環境, 丸善株式会社, pp. 119~177, 1979
- [7] 日本建築学会: 建築材料の熱・空気・湿気特性値, 丸善株式会社, pp. 33~62, 2001
- [8] 日本建築学会: 建築学便覧 I 計画, 丸善株式会社, pp. 948~945, 1980
- [9] 田中俊六, 岩田利枝, 寺尾道仁, 武田仁: 最新建築環境工学, 井上書院, pp. 182~183, 1985
- [10] 渡辺法美: 竹製品 LCA を使用した評価と広告方法の提案, 高知工科大, p. 11, 2007
- [11] 西畑雄介, 松下敬幸, 佐藤真奈美, 大石健吾, 中村泰人: 高断熱・高気密壁体の熱・湿気挙動, その 1, 日本建築学会大会学術講演梗概集, D-2, pp. 271~272, 2000. 9
- [12] 小森清志, 大澤徹夫, 角舎輝典, 土川忠浩, 水谷章夫: 木材の吸放湿特性に関する研究, 日本建築学会大会学術講演梗概集, D-2, pp. 289~290, 2002. 8
- [13] 日本建築学会: 拡張アメダス気象データ 1981-2000, 株式会社鹿児島 TLO, 2005. 8
- [14] 田中俊六, 岩田利枝, 寺尾道仁, 武田仁: 最新建築環境工学, 井上書院, pp. 200~201, 1985
- [15] 林徹夫: 熱環境小委員会第 30 回熱シンポジウム, 規格・標準化の検討課題 (その 2), 日本建築学会 pp. 79~83, 2002
- [16] 国土交通省: 官民共同研究 エネルギー・資源の自立循環型住宅・都市基盤整備支援システ



ム開発, 自律循環型住宅開発委員会, pp. 919~924, 2004. 3

[17] 中村泰人, 松尾陽, 松本衛, 土屋喬雄, 橘秀樹, 宮田紀元 : 新建築学体系 10 環境物理, 彰国社, pp. 105~157, 1984. 8

[18]一般財団法人住宅・建築省エネルギー機構 : 住宅の次世代省エネルギー基準と指針, 1999. 3

## 第6章 結論

本論文では、近年の社会情勢より途絶えつつある左官技能の継承性を定量的に評価するため、技能継承の現状調査と土壁構成材料（単独材料）・実施工壁体（複合材料）の物性値測定、土壁の熱湿気性状（表面ひび割れに伴う吸放湿・単層壁・土壁住居）の数値解析を行った。

第2章では、土壁にかかわる左官技能者、訓練施設を対象に現状調査を行い、技能継承の可否を定量的に評価した。現状調査より、左官の技能継承では技能継承可能な熟練技能者が一定数確保されている現状とこの状況が今後約20年間持続可能であることを確認した。左官技能者が施工する建材の環境調整性能を定量的に評価し、公官庁が定める制度等が助力となれば左官技能の継承の危機が緩和できる可能性がある。

第3章では、左官技能で施工された材料の熱湿気物性（平衡含水率、湿気伝導率、熱伝導率）を測定、評価した。左官技能者が施した“鏝押さえ”は建材の物性値に影響を及ぼす。“鏝押さえ”で密実となった中塗り土の平衡含水率は石膏ボード、熱湿気伝導率は軽量コンクリート程度となった。中塗り土の吸放湿性能が他建材より極めて高いと評価することは難しい。熱伝導率は断熱材より大きいため、壁体には断熱補強の検討が必要である。

第4章では、実施工壁体（複合材料）の熱湿気性状を評価した。熱性状では、実施工壁体の熱コンダクタンス、熱伝導率測定を行い、物性値を評価した。左官技能者が伝統技能で施工した実施工壁体は均一材料として取り扱うことが可能となり、熱伝導率の推定には混合材料容積比を用いた混合材モデルが有効となる。湿気性状では、材料表面に発生するひび割れの凝縮水保持を検討した。現場測定と数値解析により熱湿気応答を推定した結果、壁体表面に発生する乾燥収縮ひび割れが凝縮水を保持し、再蒸発を促すことで土壁の吸放湿性能が向上することを確認した。

第5章では、中塗り土の利用法を示すため、数値解析を用いて熱湿気応答（単層壁）と室内環境性状（土壁住居）を評価した。本論文の測定値と数値解析により、年周期の熱湿気応答（単層壁）を調和解析した結果、中塗り土壁体の熱湿気応答は50～100mmの壁厚（壁体容量）でも十分活用可能であることを確認した。室内環境性状（土壁住居）では、土壁施工を模擬した住宅を対

象に数値解析（非線形、非定常）を行い、中塗り土充填壁（中塗り土塗厚：140 mm）と木舞下地壁（木舞入り、中塗り土塗厚：62 mm）の比較、評価した。中塗り土充填壁がもたらす恒温、恒湿性（自然室温）という室内環境維持特性は、左官技能者が伝統技能により施工した木舞下地壁で十分に補うことができる。

土壁は自然素材を用いた現場施工建材であるが、左官技能者が継承した伝統技能を用いれば均一材として取り扱うことができる。土壁の構成材料である中塗り土は熱伝導率が大きいため、壁体には断熱補強の検討が必要であるが、蔵の環境特性である恒温恒湿性を利用、調整するには左官技能者が伝統技能で施工した木舞下地が土の量を問わず有効となることを確認した。土壁は石油製品に比べて健康的であり、科学物質が殆ど発生しない建材である。土壁の施工には左官技能者の有する伝統技能が必要不可欠であり、それにかかわる後継者を育成するためには施工現場や育成機関が技能継承教育を継続する必要がある。一度途絶えた技能を再び確立することは難しい。今後はこれらの結果を踏まえ、土壁（複合材料）の湿気特性やその利用法、更に複合的な条件に対する数値解析等の検討を行い、左官技能を定量的に評価する必要がある。

## 本研究に関する発表論文一覧

### A. 原著論文

1. 横林修造, 佐藤真奈美: 兵庫県産左官材料中塗り土壁の熱・湿気特性に関する考察 大阪工業大学紀要, 理工篇 52(1), pp.1~4, 2007
2. 横林修造, 佐藤真奈美: 伝統技能によって施工される材料の熱・湿気特性に関する考察 兵庫県産左官材料(中塗り土)の評価, 日本建築学会環境系論文集, 第73巻630号, 日本建築学会, 2008年8月30日
3. Shuzo Yokobayashi, Manami Sato: Estimation of indoor environment of a Tsuchikabe house constructed by Japanese Sakan craftsmen, Energy Procedia Volume 78, November 2015
4. 横林修造, 佐藤真奈美: 技能継承により施工された土壁を有する住宅の室内環境評価, 日本建築学会環境系論文集, 第81巻720号, 日本建築学会, 2016年2月28日
5. 横林修造, 佐藤真奈美: 伝統技能で施工された土壁(木舞・貫入り)の熱物性測定, 日本建築学会環境系論文集, 第82巻第732号, 日本建築学会, 2017年2月28日

### B. 国際会議

1. Shuzo Yokobayashi, Manami Sato: A study on heat and moisture properties “Tsuchikabe” that is the specialty of Hyogo prefecture, International Thermophysics Congress, 22 August 2007, Paper No.171
2. Shuzo Yokobayashi, Manami Sato: Estimation of indoor environment of a Tsuchikabe house constructed by Japanese Sakan craftsmen, International Association of Building Physics, 14 June 2015, Paper No.242

## C.学術講演

1. 横林修造, 佐藤真奈美: 兵庫県産左官材料の湿気特性に関する考察 第1報 平衡含水率関係及び湿気伝導率測定, 日本建築学会近畿支部, 2005年6月18日 (日本建築学会近畿支部研究報告集第45号 pp. 293~296)
2. 横林修造, 佐藤真奈美: 兵庫県産左官材料の湿気特性に関する考察 第1報 平衡含水率関係及び湿気伝導率測定, 日本建築学会, 2005年9月1日 (2005年度大会 (近畿) 学術講演梗概集 D-2 pp. 377~378)
3. 横林修造, 佐藤真奈美: 兵庫県産左官材料の湿気特性に関する考察 第1報 平衡含水率関係及び湿気伝導率測定, 日本熱物性学会, 2005年11月9日 (第26回日本熱物性シンポジウム講演論文集 pp. 144~146)
4. 横林修造, 佐藤真奈美: 兵庫県産左官材料の熱・湿気特性に関する考察 第2報 数値解析による土壁の断熱・吸放湿性能の検討, 日本建築学会, 2006年9月7日 (2006年度大会 (関東) 学術講演梗概集 D-2 pp. 5~6)
5. 横林修造, 佐藤真奈美: 兵庫県産左官材料の湿気特性に関する考察 第2報 熱・湿気物性測定, 日本熱物性学会, 2006年10月8日 (第27回日本熱物性シンポジウム講演論文集 pp. 226~228)
6. 横林修造, 佐藤真奈美: 兵庫県産左官材料の熱・湿気特性に関する考察 第3報 物性値測定及び数値解析による断熱・吸放湿性能の検討, 日本建築学会近畿支部, 2007年6月17日 (日本建築学会近畿支部研究報告集第47号 pp. 121~124)
7. 横林修造, 佐藤真奈美: 兵庫県産左官材料の熱・湿気特性に関する考察 第3報 物性値測定及び数値解析による断熱・吸放湿性能の検討, 日本建築学会, 2007年8月29日 (2007年度大会 (九州) 学術講演梗概集 D-2 pp. 365~366)
8. 横林修造, 佐藤真奈美: 兵庫県産左官材料の熱・湿気特性に関する考察 第3報 熱・湿気物性測定 その2, 日本熱物性学会, 2007年10月25日 (第28回日本熱物性シンポジウム講演論文集 pp. 144~146)

ウム講演論文集 pp. 238～240)

9. 横林修造, 佐藤真奈美: 市販珪藻土壁材の熱・湿気物性値 一定常法を用いた測定一, 日本建築学会, 2008年9月18-20日(2008年度大会(中国) 学術講演梗概集 D-2 pp. 331～332)
10. 横林修造, 佐藤真奈美: 数値解析による兵庫県左官材料を用いた壁体の熱湿気性状評価, 日本熱物性学会, 2008年10月8日(第29回日本熱物性シンポジウム講演論文集 pp. 62～64)
11. 横林修造, 佐藤真奈美: 調和解析による中塗り土の熱・吸放湿応答の特性, 日本建築学会, 2009年8月26日(2009年度大会(東北) 学術講演梗概集 D-2 pp. 231～232)
12. 横林修造, 佐藤真奈美: 数値解析による中塗り土の熱湿気応答特性, 日本熱物性学会, 2009年10月29日(第30回日本熱物性シンポジウム講演論文集 pp. 277～279)
13. 横林修造, 佐藤真奈美: 伝統技能の熱湿気環境評価と技能継承について, 日本建築学会近畿支部, 2010年6月20日(日本建築学会近畿支部研究報告集第50号 pp. 117～120)
14. 横林修造, 佐藤真奈美: 伝統技能再生住宅の熱湿気環境評価と技能継承について, 日本建築学会, 2010年9月11日(2010年度大会(北陸) 学術講演梗概集 D-2 pp. 207～208)
15. 横林修造, 佐藤真奈美: 伝統技能で施工される再生住宅の壁体設計 - 通気層の防露効果 -, 日本建築学会近畿支部, 2011年6月18日(日本建築学会近畿支部研究報告集第51号 pp. 97～100)
16. 横林修造, 佐藤真奈美: 伝統技能で施工される再生住宅の壁体設計 一通気層の防露効果一, 日本建築学会, 2011年8月25日(2011年度大会(関東) 学術講演梗概集 D-2 pp. 171～172)
17. 横林修造, 佐藤真奈美: 現場施工建材(中塗り土)の乾燥収縮ひびわれが熱湿気物性へ及ぼす影響, 日本熱物性学会, 2012年10月3日(第33回日本熱物性シンポジウム講演論文集 pp. 143～145)
18. 横林修造, 佐藤真奈美: 伝統技能で施工された土壁を有する住宅の室内環境評価, 日本建

- 築学会近畿支部, 2014年6月22日(日本建築学会近畿支部研究報告第54号集 pp. 313~316)
19. 横林修造, 佐藤真奈美: 伝統技能で施工された土壁を有する住宅の室内環境評価, 日本建築学会, 2014年9月14日(2014年度大会(近畿) 学術講演梗概集 pp. 245~246)
  20. 横林修造, 佐藤真奈美: 土(中塗り土)壁を有する住宅の室内環境と耐久性評価, 日本建築学会, 2015年9月6日(2015年度大会(関東) 学術講演梗概集 D-2 pp. 285~286)
  21. 横林修造, 佐藤真奈美: 伝統技能で施工された土壁(木舞・貫入り)の熱物性測定, 日本建築学会近畿支部, 2016年6月25日(日本建築学会近畿支部研究報告集第56号 pp. 233~236)
  22. 横林修造, 佐藤真奈美: 伝統技能で施工された土壁(木舞・貫入り)の熱物性測定, 日本建築学会, 2016年8月25日(2016年度大会(九州) 学術講演梗概集 D-2 pp. 133~134)
  23. 横林修造, 佐藤真奈美: 複合材料の熱物性測定 -実施工された土壁の熱性能評価-, 日本熱物性学会, 2016年11月28日(第36回日本熱物性シンポジウム講演論文集)

## 謝辞

大阪工業大学佐藤真奈美准教授のご指導には心からお礼を申し上げます。筆者が兵庫県より大阪工業大学の研究生として配属されて以来、先生には公私にわたって懇切なご指導を頂きました。熱水分同時移動に関する理論や数値解析方法、物性値測定など、研究活動全般にかかわる佐藤博士のご教授が筆者の人生観に与えた影響は計り知りません。理路整然とした数理的評価方法や研究活動に対して妥協を許さない姿勢をお示し頂いたことは、今後研究に従事する筆者にとって貴重な財産となりました。現在も日々ご教授頂いておりますが、筆者が曲がりながらも研究活動に従事し、本論文をまとめ終えたのは、先生のお陰であり、心から感謝の意を表すと共に厚く御礼申し上げます。

本論文を執筆するにあたり、適切にご指導、ご助言、そして励ましを頂きました大阪工業大学寺地洋之教授に深く感謝申し上げます。

京都大学銚井修一特任教授、神戸大学高田暁准教授には、筆者の研究活動にかかわる様々な問題に対して貴重なご支援とご助言、温かい励ましを頂きました。深く感謝の意を表します。

研究活動に従事する上での様々なご指導と励ましを頂きました近畿大学岩前篤教授、京都大学小椋大輔准教授、近畿大学安福勝准教授、京都大学伊庭千恵美助教、神戸大学中嶋麻起子助教には心から謝意を表します。

乾燥収縮ひび割れ測定結果整理法については大阪工業大学中村成春准教授に丁寧な御教授を頂きました。厚く御礼申し上げます。

標準板の貸与及び小型エアチャンバーを提供、複合建材の熱性能測定では（一財）日本建築総合試験所小南和也環境試験室長に多大なご協力を頂きました。また、複合材の測定性能法については、（一財）日本建築総合試験所小早川香主査に様々なご助言を頂きました。ここに感謝の意を表します。

兵庫県立但馬技術大学校中尾金三先生、兵庫県左官工業協同組合嶋田弘之理事長、株式会社山脇組山脇一夫社長、小川建築小川芳治社長には、本論文の試験体作製のために惜しみないご協力



を頂きました。ここに感謝の意を表します。

大阪工業大学小嶋和平非常勤講師には1級技能士現場常駐制度の適応範囲、厚生労働省能力開発課山崎琢也氏、兵庫県職業能力開発協会の皆様には省内データ開示と技能検定実施状況の資料提供についてご助言、ご協力を頂きました。ここに感謝の意を表します。

最後に、私事で恐縮ではありますが、今日に至るまで不肖な息子を常に変わらず暖かい目で見つめ続け頂き、多大なる寛容をもって接して頂いた両親、妻に深く感謝いたします。