

粘土瓦の水分移動特性と
温暖地における凍結・融解過程に関する基礎的研究

平成二十二年

伊庭 千恵美

目次

第1章 序論

1.1	はじめに	1
1.2	既往の研究.....	3
1.2.1	瓦及びセラミック材料の耐寒性に関する研究	
1.2.2	建築材料の凍害に関する研究	
1.2.3	凍結・融解過程を含む多孔質材料の熱水分移動に関する研究	
1.3	本論文の目的.....	4
1.4	本論文の構成と概要	5

第2章 瓦の劣化性状に関する調査

2.1	はじめに	9
2.2	粘土瓦の劣化性状に関する文献調査.....	9
2.2.1	粘土瓦の耐寒性および凍結・融解性状に関する報告	
2.2.2	その他の劣化に関する報告	
2.2.3	文献調査のまとめ	
2.3	京都市内の屋根瓦調査	15
2.3.1	調査方法	
2.3.2	調査結果	
2.3.3	調査のまとめ	
2.4	瓦製造者および施工者、保存関係者へのヒアリング調査.....	24
2.4.1	愛知県豊橋市内の建築工事会社での瓦調査	
2.4.2	京都市内の瓦製造・工事会社でのヒアリング	
2.4.3	淡路島の粘土瓦製造会社でのヒアリング	
2.5	促進劣化試験における粘土瓦の劣化性状.....	30
2.5.1	凍結融解試験（気中凍結水中融解法）	
2.5.2	凍結融解試験（異なる水分条件を用いる方法）	
2.5.3	複合劣化試験	
2.5.4	促進劣化試験における劣化性状のまとめ	
2.6	瓦の劣化要因と課題の抽出	40
2.6.1	劣化性状の分類	
2.6.2	劣化要因の推定	
2.6.3	検討課題の抽出	
2.7	第2章のまとめ.....	43

第3章 瓦の材料特性に関する検討

3.1	はじめに	47
3.2	測定試料の基本物性	47
3.2.1	測定試料の概要	
3.2.2	乾燥密度	
3.2.3	吸水率 (24 時間・48 時間)	
3.2.4	細孔径分布	
3.3	水分保持性能の測定	54
3.3.1	平衡含水率	
3.3.2	水分特性値 (pF 値)	
3.4	仕上げ層を含めた水分移動特性の検討	60
3.4.1	透湿係数・透湿抵抗	
3.4.2	飽和時の透水係数 (水分伝導率)	
3.5	第3章のまとめ	69

第4章 瓦の水分移動における空気の影響

4.1	はじめに	71
4.2	空気が水分移動に影響を与えるメカニズム	71
4.2.1	材料内部の空気圧力の影響	
4.2.2	仕上げ層の透気抵抗の影響	
4.3	解析方法	73
4.3.1	計算対象	
4.3.2	基礎式と計算方法	
4.3.3	境界条件	
4.3.4	空気の影響のモデル化	
4.4	解析結果	76
4.4.1	表面仕上げ層がない場合	
4.4.2	表面仕上げ層を上側とした場合	
4.4.3	表面仕上げ層を下側とした場合	
4.5	第4章のまとめ	81

第5章 凍結・融解過程を考慮した熱水分移動の基礎理論

5.1	はじめに	83
5.2	凍結・融解過程の水の性質	84
5.2.1	密度変化	
5.2.2	熱伝導率変化	
5.2.3	凝固点降下 (結氷条件)	

5.3	熱水分移動の基礎方程式	87
5.3.1	固体材料内の水分	
5.3.2	二相系の熱水分同時移動方程式	
5.3.3	三相系の熱水分同時移動方程式	
5.3.4	空気に接する表面における熱・水分移動の扱い	
5.4	数値計算手法	93
5.4.1	基礎方程式の離散化	
5.4.2	解析的手法（二相系）	
5.4.3	飽和付近の扱い方	
5.4.4	外部からの水分供給の扱い方	
5.4.5	数値解析プログラムの流れ	
5.5	数値解析に用いる材料物性値の整理	101
5.5.1	乾燥密度・空隙率・比熱	
5.5.2	熱伝導率	
5.5.3	水分移動係数	
5.5.4	平衡含水率関係	
5.6	第5章のまとめ	108

第6章 表面仕上げ層をもつ粘土瓦における水分移動

6.1	はじめに	111
6.2	水分浸透性状の実験的検討	111
6.2.1	実験室における水分浸透実験	
6.2.2	降雨環境に曝された瓦への水分浸透実験	
6.2.3	水分浸透実験のまとめ	
6.3	水分浸透実験の数値解析（二相系熱水分移動解析）	118
6.3.1	数値解析の概要	
6.3.2	実験室における実験の解析	
6.3.3	屋外実験の解析	
6.4	第6章のまとめ	133

第7章 温暖地における屋根瓦の凍結融解過程に関する検討

7.1	はじめに	135
7.2	屋根面での表面結露量と頻度に関する検討	135
7.2.1	解析概要	
7.2.2	夜間放射量と表面温度低下	
7.2.3	環境・建物条件の違いによる結露への影響	
7.2.4	結露水と放射冷却が瓦内部の水分分布に与える影響	
7.3	降雨と結露頻度を考慮した冬季間の凍結融解回数に関する検討	145

7.3.1	解析概要	
7.3.2	解析結果	
7.3.3	冬季間の凍結融解回数に関する検討のまとめ	
7.4	各種要因が凍結融解過程に与える影響に関する検討	155
7.4.1	材料の水分伝導率と表面仕上げ位置の影響	
7.4.2	表面仕上げの欠損の影響	
7.4.3	局所的な環境条件の影響	
7.4.4	各種要因が凍結融解過程に与える影響のまとめ	
7.5	第7章のまとめ	168

第8章 総括

8.1	本論文のまとめ	169
8.2	今後の課題と展開	172

記号表	174
本研究に関する発表論文	176
謝辞	178

第1章 序論

1.1. はじめに

環境問題がクローズアップされる昨今において、日本においても2007年に「200年住宅ビジョン」が打ち上げられるなど建物の長寿命化、建築材料の耐久性向上が急務の課題となっている[1-1]。

外界気象条件下に曝される建物においては、熱や水分、化学物質等様々な要因によって、外装材料の劣化が進行する。中でも水分が建築材料の劣化に与える影響は大きく、壁体材料の腐朽や断熱性能の劣化、カビの発生など様々な被害を引き起こす。特に寒冷地では、低温環境下で材料内部に蓄積した水分が凍結・融解を繰り返すことにより、外装材表面の剥離・亀裂、更には壁体の剥落など甚大な被害につながる「凍害」を生じることもある[1-2]。このような現象は、写真1.1.1、1.1.2に示すように住宅や寺社における屋根瓦にも見られ、「瓦が凍てる」などの言い方もされている[1-3]。

日本における粘土瓦の製造には長い歴史がある。瓦の凍結に対する抵抗性は耐寒性とも呼ばれ、凍害に強い瓦の研究開発、製造が続けられてきた。しかし、製造技術が進歩し、劣化メカニズムの研究が進んでいる昨今においても、瓦の凍害はしばしば生じており、葺替えから数年足らずで劣化してしまうこともある。

既往の研究から、一般的には高温で焼成し吸水率を低くすることで、瓦の耐凍害性が向上すると言われている。開放気孔が多く吸水率が高い瓦は凍害を生じやすいが、焼結が進むにつれ密閉された気孔が増加し吸水しにくくなるため凍害を生じにくい、また焼き締められ（高温で焼成され組織が緻密化され）強度が増すことで総合的に耐凍害性が向上するという報告もある[1-4]。ま



写真 1.1.1 凍害を受けた棧瓦

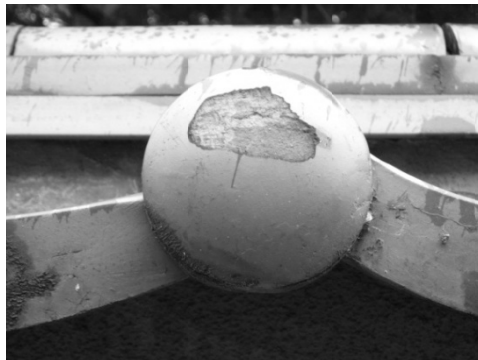


写真 1.1.2 凍害を受けた万十軒瓦

た、耐凍害性を直接確認する方法として、様々な条件下での凍結融解試験の検討がなされ[1-5]、1974年には粘土瓦の工業製品規格（JIS A 5208）においても、凍害試験の方法が定められている[1-6]。しかしながら、多くの凍結融解試験と同様、試験条件と現実の温熱環境、試験のサイクル数と実時間の対応については明らかにされていない。

近年、中国においても、文化財保護の観点から屋根瓦の凍害に対する関心が高まっている。中国で古くから使われる瑠璃瓦と呼ばれる釉薬瓦において、風化や汚染、亀裂など様々な劣化性状の中で、釉薬の剥離と凍結による劣化が非常に多い。素地と釉薬層の熱膨張係数の違いにより釉薬層にひびが入り、そこから水分が浸透し釉薬裏面で凍結を生じる[1-7] [1-8]。日本の屋根瓦も、いぶし瓦の炭素皮膜など多くは素地とは組成の異なる表面仕上げ層を持つため、それらの水分浸透性状の違いを考慮し耐凍害性を検討する必要がある。

屋根瓦の凍害は、東北や北陸地方のような積雪寒冷地のみで生じる問題ではなく、降雪量が少なく冬期の平均外気温が 0℃を上回る東海・近畿・中国地方等の温暖な地域においても生じている。これは屋根が天空に対して開いているため、夜間放射冷却の影響を受け、外気が 0℃以上であっても表面温度が 0℃以下に下がる場合があるためと考えられる[1-9]。

材料内部で凍結が生じるためには水分の存在が不可欠である。多孔質材料内部の水分は毛細管力による凝固点降下を受けるため、温度が 0℃以下になっても凍結しないという状況が生じる。材料内部の含水率が上昇し、飽和に近い領域になると 0℃付近で凍結が生じるようになる。すなわち、放射冷却の影響を受けるとはいえ屋根面温度が外気よりも大幅に下がるとは考えにくい温暖地では、飽和に近い高含水状態になることが、凍害を生じる重要な要件といえる。

水分の供給源としては第一に雨水が考えられる。しかし、例えば京都市の冬期（12～2月）の降雨日数は 20 日、総雨量も 135[mm]と、夏期（6～8月：同じく 35 日、760[mm]）と比較し多いとは言い難い[1-10]。たとえ降雨があっても基本的には流下し、さらに直後の日射により乾燥する可能性もある。降雨以外の水分供給源としては、結露水が挙げられる。冬期は外気が低温であるため飽和絶対湿度が低く、夜間放射冷却により表面温度が下がれば結露を生じる可能性が高い。

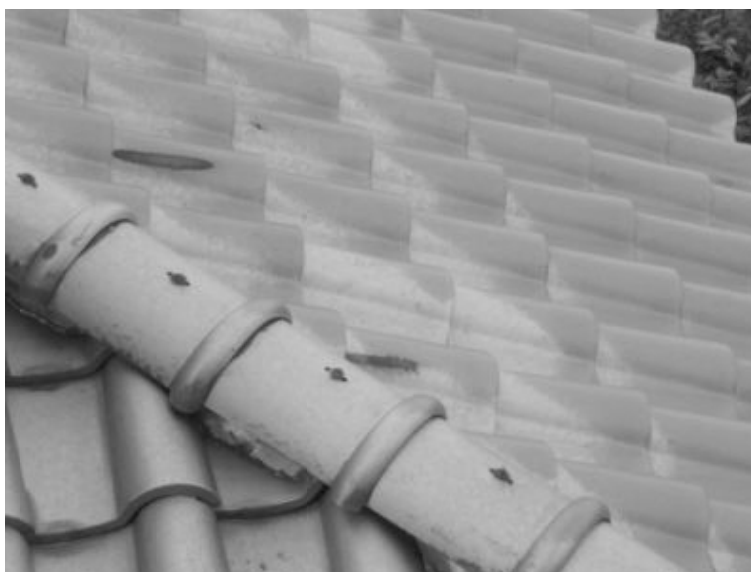


写真 1.1.3 屋根瓦の表面結露

写真 1.1.3 は、滋賀県大津市の民家の屋根の様子であるが、冬期の早朝には、このような屋根瓦への表面結露が毎日のように見られる。一度の結露量は少なくても、毎日のように繰り返されることで、十分な水分供給源となることもあり得る。このような、瓦が実際に使用される温熱環境と水分供給経路に着目した研究は、あまりなされていない。材料物性と使用される環境の両方の影響を定量的に把握することができれば、環境条件に適した材料物性の改良を行うことや、材料物性から使用可能な環境条件を推測することができ、粘土瓦を用いた屋根の劣化が抑制され、耐久性が向上すると考えられる。

1.2. 既往の研究

1.2.1 瓦及びセラミック材料の耐寒性に関する研究

粘土瓦は、原料となる土の産地により性質が大きく異なり、配合土の粒土組成や焼成温度によっても異なる物性をとり、耐寒性（耐凍結融解性）にも影響することが報告されている。

日本国内で瓦の生産が多い地域は、一般に愛知県（三州瓦）、兵庫県（淡路瓦）、島根県（石州瓦）の3ヶ所である。国内における瓦の出荷数量のうち半数以上を占める愛知県[1-11]では、常滑窯業技術センターを中心に瓦に関する種々の研究が進められている。本研究に関連する「耐寒性」をキーワードとする研究は比較的少ないが、昭和50年代に、島村ら[1-12]により原料組成と耐寒性の関係、永柳ら[1-13]により寒冷地向きの原料土の配合、山本ら[1-14]により耐寒性の評価法について、それぞれ研究報告がなされている。愛知県に次ぐ出荷数量を持つ島根県においても、昭和54年に石飛[1-4]らが凍害に関する研究報告を行っており、各種瓦の凍害に関する実験データから、粘土瓦内部で凍結による応力が発生すると、ラミネーションに並行な方向に破壊を受けること、凍結破壊が亀裂から始まり剥離に進んでいくことを示した。香川県では、中原ら[1-15]は、粘土瓦の粒度分布と気孔分布の関係が耐寒性に及ぼす影響について示しており、細孔半径 $1.0\sim 1.35\ \mu\text{m}$ の気孔が耐寒性と関連があると推測している。近藤ら[1-16]は、粘土瓦の粒度組成を基本に研究を行った結果、粘土分が多い素地、シルト分が多い素地等、粒度組成にかたよりのある素地は耐寒性に劣り、範囲の広い粒度組成を持つ素地が耐寒性に優れていることを示している。

粘土瓦の原土、製造工程、種類ごとの特性に関しては、田中が「粘土瓦ハンドブック」[1-17]にまとめており、粘土瓦の凍害と耐寒性向上の章では、気孔の大きさや分布、飽和係数と耐凍害性の関係や、それらの物性に与える素地の粒度分布や成形方法の影響について説明している。また、経験的に瓦の表裏面での温度差が大きい場合や、台所や浴室の屋根など瓦が吸湿しやすい場合には凍害を受けやすいことを述べている。素木は「建築用セラミック材料」[1-18]において、粘土瓦を含む一般の焼成セラミック材料について種々の凍結融解試験の結果から、凍害のメカニズムや耐凍害性に影響を与える気孔径等の因子について説明しており、実際の環境条件下で徐々に進行する凍結過程と凍結融解試験における過冷却に続く急激な凍結過程では、氷の形成により材料内部に発生する圧力状態が異なることなどを指摘している。

Wardeh, Perrin ら[1-19][1-20][1-21]は焼成粘土質材料を用い、凍結融解サイクル試験を通して多孔質材料内における氷の形成のメカニズム、また測定されたひずみを用いて凍結過程に生じる内部応力を計算し、試料の物性が凍結融解サイクルに対する抵抗に及ぼす影響を示している。

これらの研究では、瓦の細孔構造や凍結時に生じる内部応力、瓦の強度、凍害の性状について

検討を行っているが、瓦が実際におかれる環境条件や凍結を生じる主要な要因である水分の浸透経路について検討された例は少ない。

1.2.2 建築材料の凍害に関する研究

建築材料の分野では、特に建築・土木構造物の主要な構造材料として用いられるコンクリートに関して、凍害の原因とメカニズムの解明について多くの研究がなされている。

凍害のメカニズムについては、コンクリート中の水の凍結に伴う体積増加の結果引き起こされる不凍水の移動から不凍水圧が生じ、組織が破壊されるとした T. C. Powers の水圧説[1-22]が知られている。国内では、コンクリートの細孔構造を考慮し、細孔径に依存する凝固点降下現象を取り入れることで凍結温度の影響を説明した鎌田の凍害理論が示され[1-23]、桂は、凍害の原因となる不凍水圧の発生を過冷却現象下にある水が凍結する際の急激な氷晶の成長により説明する凍結機構を提案している[1-24]。これらの研究では、材料内部の凍害メカニズムが詳細に検討されているが、変動する気象条件下での影響については考慮されていない。

コンクリート以外の外装材料に関しては、吉野ら[1-25]が、窯業系サイディングについて10年間の屋外暴露試験と促進凍結融解試験を行い、暴露環境と耐凍害性の関係について明らかにし、環境要因の定量化を図っている。

1.2.3 凍結・融解過程を含む多孔質材料の熱水分移動に関する研究

多孔体における結氷問題については、主に化学分野で多孔体内の毛管水の凝固点降下のメカニズムを説明する種々の理論が展開されている（例えば Defay[1-26]、樋口[1-27]など）。

松本は、凝固点温度の低下現象は、多孔体における固相・液相・気相水分の平衡を想定することで説明可能であるとし、水分の状態や相に関係なく用いることができ、固体内の水分状態を統一的に記述することができる化学ポテンシャルと多孔体内における凝固点降下の関係を導出し、解析法を示した[1-28]。高ら[1-29]は土壌（Leda Clay）、岩前ら[1-30]は積雪における0°C以下のポテンシャルと液水含水率関係を実験によりそれぞれ求めた。松本・馬は土壌における数値解析を行い、これらの基礎理論の適用可能性を示した[1-31]。さらに、銚井、畑野、筆者らは、グラスファイバーボード [1-32]、ALC [1-33]、Leda Clay[1-34]、レンガ[1-35]等の建築材料について、周辺環境の影響や熱水分物性値の影響を検討している。

これらの解析においては、おもに単体の材料についての検討がなされており、本研究で対象とする瓦のように主に防水を目的とする表面仕上げ層が内部の水分蓄積と結氷性状に与える影響について検討された例は少ない。実環境下において仕上げ層は水分浸透に影響を及ぼし、瓦内部の水分蓄積とその耐寒性に大きく関係するため、実環境下での検討を行う際には仕上げ層も含めて考慮する必要がある。

1.3. 本研究の目的

本研究の目的は、瓦の材料特性を把握し、水分移動と凍結・融解過程時の性状について定量的に明らかにした上で、温暖地における瓦の凍害の可能性を示すことである。

(1) 表面仕上げ層をもつ粘土瓦の水分移動特性の把握

粘土瓦の気相・液相水分の移動係数の測定を通して、表面仕上げ層をもつ材料の水分移動特性を把握する。さらに、数値解析により外部から液水が供給された場合の瓦内部の含水状況を明らかにする。また、仕上げ層をもつ材料の液相水分移動係数の測定については、試験方法の提案も合わせて行う。

(2) 粘土瓦内部での凍結・融解過程の把握

従来の試験法とは異なる凍結融解試験を行い、種々の条件下での劣化性状を確認する。また、変動する環境下における粘土瓦内部の温度と含水状況を数値計算により明らかにし、毛細管現象による凝固点降下をふまえて結氷の有無と量を把握する。数値計算においては、既往の凍結・融解を考慮した熱水分移動解析において取り扱うことが困難であった、材料内部が水と氷で飽和する状況の取り扱い方を述べる。これにより、凍結融解試験では把握しきれない材料内部の結氷性状を知る一助とする。

(3) 温暖地における瓦の凍害の可能性

凍害というと、外気温が氷点下になる積雪寒冷地に特有の現象であると考えられがちであるが、関西や東海地方など日本国内では比較的温暖な地域でも実際に生じる場合がある。温暖地の気象条件下での数値解析を通して、放射冷却による温度低下、結露と降雨による水分浸透を定量的に検討し、瓦内部で結氷が生じるプロセスと環境条件を明らかにする。

1.4. 本論文の構成と概要

本論文の構成を図 1.4.1 に示す。

第1章では、研究の背景と目的、既往研究の要点と本研究の着眼点、論文の構成について述べる。

第2章では、文献調査、実地調査・ヒアリングにより、粘土瓦の劣化の実態と性状を明らかにし、劣化性状の分類を行う。また、劣化促進試験により凍結により粘土瓦が破壊されることを確認する。これらにより、第3章以降の実験・数値解析における課題を把握する。

第3章では、特に水分に関する性質に着目して、粘土瓦の物性値の測定を行う。水分容量に関しては、平衡含水率と高湿域でのポテンシャル含水率関係の測定を行い、低湿域から高湿域にわたる平衡関係を明らかにする。水分移動抵抗に関しては、水分仕上げ層と材料実質部の水蒸気・液水両方の移動係数の測定を行う。

第4章では、第3章の液相水分の移動係数測定において問題となる空気の影響について、そのメカニズムと数値解析による影響の定量化を試みる。

第5章では、既往の三相系熱水分同時解析理論について述べた後、測定された粘土瓦の物性値を用いて、数値解析に適用する移動係数の推定方法について説明する。また、従来取り扱いが困難であった飽和付近の高含水率域での計算方法についても述べる。第6章以降の数値解析は、すべてこの数値解析理論と計算方法に基づいて行われる。

第6章では、実験室と屋外環境で粘土瓦の水分浸透実験を行い、仕上げ層をもつ材料における

水分の浸透性状を把握する。また、凍結・融解を生じない条件下での水分移動解析を行い、仕上げ層の水分移動抵抗と実質部の水分移動速度の影響を検討する。

第7章では、瓦が実際に使用される温暖地の気象条件下において、放射冷却と表面結露、降雨の影響も含め、屋根瓦の凍結可能性と頻度について数値解析による検討を行う。また、表面の仕上げ層の影響や周囲の環境条件が瓦の凍結・融解過程に与える影響を明らかにする。

第8章では、本論文の総括と今後の課題について述べる。

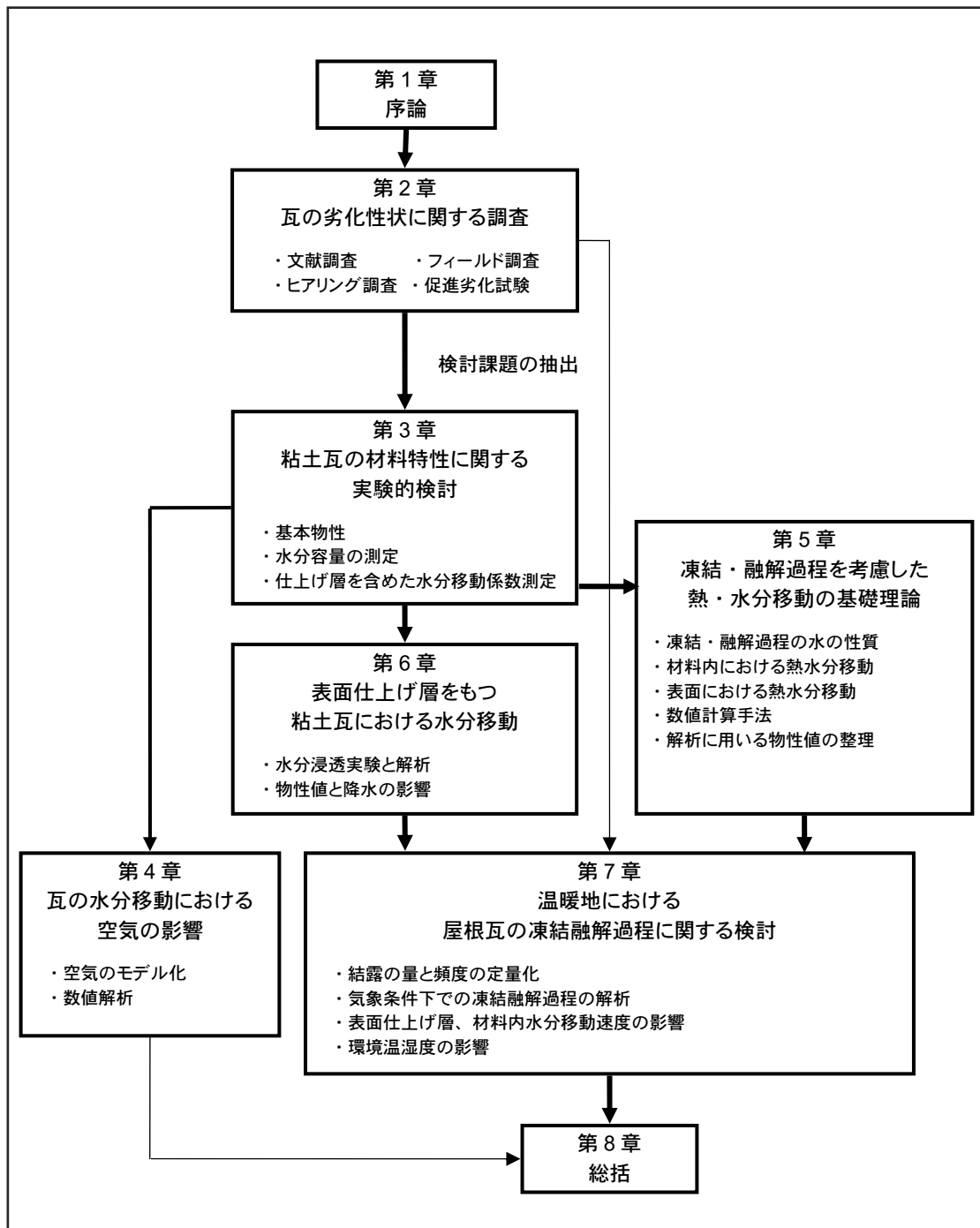


図 1.4.1 本論文の構成

第1章 参考文献

- [1-1] 自由民主党政務調査会.”200年住宅ビジョン”.2007.6.1,
<http://www.jimin.jp/jimin/seisaku/2007/pdf/seisaku-007b.pdf>, (参照 2009-3-16).
- [1-2] 鎌田英治：気泡コンクリートの凍害劣化の現象、日本建築学会環境工学委員会 熱環境運営委員会第21回熱シンポジウム、1991.8 など
- [1-3] 田中稔：粘土瓦 製造技術と将来への指針 第15章 耐寒性の向上、兵庫県釉薬瓦工業組合 発行、1972.8
- [1-4] 石飛裕、永島晴夫、長野和秀、若槻和郎、大西亜城：石州瓦の耐寒性に関する研究－粘土瓦の凍害発生機構－、島根県立工業技術センター研究報告書 第16号、1979
- [1-5] 日本建築学会：勾配屋根の材料・工法・性能 第9章 耐久性、丸善、1999.10
- [1-6] 日本規格協会：JIS A 5208 粘土がわら、1996.11
- [1-7] 故宮博物院文保科技部 古建部：古代建築琉璃構件剥釉機理内在因素研究、故宮博物院印刊、No.139、pp. 115-129、2008
- [1-8] 故宮博物院文保科技部 古建部：清代剥釉琉璃瓦件施釉重焼的再研究、故宮博物院印刊、No.140、pp. 106-124、2008
- [1-9] Hokoi, S. and Iba, C. : Freezing-Thawing Processes in a Wall Made of Soil in Relatively Warm Area of Japan”, Proceedings of the 3rd International Conference on Cold Climate Heating, Ventilating and Air-Conditioning, pp. 139-144, 2000.11
- [1-10] 日本建築学会 編：拡張アメダス気象データ 1981-2000、2005.8
- [1-11] 経済産業省経済産業政策局調査統計部、平成16年 工業統計表「品目編」、2004
- [1-12] 島村修、田中愛造、星幸二：粘土瓦用原料組成と耐寒性に関する研究、愛知県常滑窯業技術センター報告 第7号、pp. 9-11、1979
- [1-13] 永柳辰一、福永均、田中愛造、伊藤征幸：寒冷地向き粘土瓦について、愛知県常滑窯業技術センター報告 第8号、pp. 69-73、1982
- [1-14] 山本紀一、福永均、伊藤征幸、森川泰年：耐凍害性の評価法に関する一考察、愛知県常滑窯業技術センター報告 第10号、pp. 49-54、1984
- [1-15] 中原理栄、近藤祥人、橋塚豊、瀬嶋昌代：粘土瓦の耐寒性に及ぼす配合土の粒度組成の影響について、香川県工業技術センター業務年報、pp.33-38、1988
- [1-16] 近藤祥人、岩崎賢一、橋塚豊：粘土瓦の凍結融解メカニズムに関する研究、香川県工業技術センター業務年報、pp. 42-56、1977
- [1-17] 田中稔：粘土瓦ハンドブック 第17章 粘土瓦の凍害と耐寒性の向上、技報堂出版、1980.11
- [1-18] 素木洋一：焼結セラミック詳論2 建築用セラミック材料 第12章 凍結に対する抵抗性、技報堂出版、1984.7
- [1-19] G.Wardeh, B.Perrin : Analysis of Strains in Baked Clay Based Materials During Freezing and Thawing Cycles, Journal of Building Physics, Vol.29, No.3, pp. 201-217, 2006
- [1-20] G.Wardeh, B.Perrin : Freezing-thawing phenomena in fired clay materials and consequences on their durability, Construction and Building Materials, Vol. 22, No.4, pp. 600-608, 2008.4

- [1-21] G.Wardeh, B.Perrin : Numerical modelling of the behaviour of consolidated porous media exposed to frost action, *Construction and Building Materials*, Vol. 22, No.5, pp. 820-828, 2008.5
- [1-22] T.C. Powers : A Working Hypothesis for Further Studies of Frost Resistance of Concrete, *Journal of American Concrete Institute*, Vol.16, No.4, pp. 245-272, 1945
- [1-23] 鎌田英治：コンクリートの凍害機構に関する基礎的研究、北海道大学、博士論文、1971.5
- [1-24] 桂修：過冷却現象を考慮したコンクリートの凍害機構に関する研究、北海道大学、博士論文、1999.9
- [1-25] 吉野利幸、桂修、松村宇、谷口円、小川貢：建築材料の耐久性に関する調査－窯業系サイディングの耐凍害性－、北海道立北方建築総合研究所 調査研究中間報告、2006.3
- [1-26] Defay, R., Prigogine, I., Bellemans, A., Everett, D. : *Surface Tension and Adsorption*, Longmans, pp. 243-255, 1966
- [1-27] 樋口泉：多孔体の毛管内に分散した物質の性質と毛管構造(I)、*表面*、Vol.6、No.3、pp. 168-176、1968
- [1-28] 松本衛、高揚：多孔質材料の凍結と融解過程の解析－基礎方程式とその解法－、*日本建築学会大会学術講演梗概集 D-II*、pp. 813-814、1991.9
- [1-29] 高揚、松本衛、銚井修一：多孔質材料の凍結・融解過程に関する研究－0℃以下におけるポテンシャル・液水含水率平衡関係の測定－、*日本建築学会大会学術講演梗概集 D-II*、pp. 919-920、1992.8
- [1-30] 岩前篤、松本衛：野外実験による積雪の熱水分性状に関する研究、*日本建築学会計画系論文集*、第468号、pp. 17-25、1995.2
- [1-31] 松本衛、馬沙：地盤の凍結と融解過程の解析に関する研究、*日本建築学会計画系論文集*、第482号、pp. 25-34、1996.4
- [1-32] Hokoi, S., Hatano, M., Matsumoto, M. and Kumaran, M. K. : Freezing-Thawing Processes in Glass Fiber Board, *Journal of Thermal Environment and Building Science*, Vol. 24, pp. 42-60, 2000.7
- [1-33] 畑野雅範、銚井修一、松本衛：ALC 壁体における凍結・融解過程に関する研究、*日本建築学会計画系論文集*、第545号、pp. 23-28、2001.7
- [1-34] Hokoi, S. and Iba, C. : Freezing-Thawing Processes in a Wall Made of Soil in Relatively Warm Area of Japan, *Proceedings of the 3rd International Conference on Cold Climate Heating, Ventilating and Air-Conditioning*, pp. 139-144, 2000.11
- [1-35] Iba, C. and Hokoi, S. : Freezing-Thawing Processes in a Brick Wall in Relatively Warm Area of Japan, *Proceedings of the 2nd International Conference on Building Physics*, pp. 257-266, 2003.9
- [1-36] 大岩祐司、佐藤靖彦、上田多門、松本浩嗣：凍結及び融解時におけるモルタルの変形挙動解析、*コンクリート工学年次論文集*、Vol.29、No.1、2007
- [1-37] 山本紀一、松下福三、中村雅光：釉薬瓦の透水試験法、*愛知県常滑窯業技術センター報告 第13号*、pp. 19-25、1986

第 2 章 瓦の劣化性状に関する調査

2.1 はじめに

粘土瓦は飛鳥時代に日本国内で初めて製造され、施工や実用上の観点から形状が工夫され、品質の向上を目指して製造技術が発達してきた。明治時代には一般にも普及し、明治から大正にかけては従来の人力による製造から機械による土練、成形が行われるようになり、トンネル窯での連続焼成により大量生産が可能となった[2-1][2-2]。製造技術の発達とともに屋根に求められる防水性や強度、耐寒性等に関する研究が行われ、品質の向上が図られてきた。特に、瓦の劣化の主要な要因とされる凍害については、昭和 50 年代に数多くの研究報告がなされ、種々の凍結融解試験により原料の配合や粒度調整の方法、凍害を受けにくい瓦の性質等が明らかになってきている。それにもかかわらず瓦の凍害は現在も起こっている現象である。それと同時に、実際に使用される環境下での劣化性状は、実験室実験により確かめられた性能とは必ずしも一致しない。

本章では、既往文献や実地での調査を通して、屋根瓦の典型的な劣化性状を明らかにし、次章以降で取り上げる課題を抽出することを目的とする。

2.2 では、粘土瓦の劣化に関する既往の研究を整理し、劣化に影響の大きい材料特性や環境条件の知見を得る。2.3 節では、京都市における瓦の劣化性状の調査について述べる。ここでは、各種要因と屋根瓦の劣化との関係を把握する有力な手段の一つとして、実在の屋根瓦の劣化性状を広域に亘って調査することとする。2.4 節では粘土瓦の製造者・施工者へのヒアリング調査を行い、調査で得られた情報の補完を行う。2.5 節では凍結融解をとまなう促進劣化試験を行い、実際に凍結により瓦が破壊される様子を確認する。2.6 節では、以上の調査や実験結果をふまえて被害の系統的な整理を行い、瓦の劣化に影響を与える材料と環境要因を抽出する。

2.2 粘土瓦の劣化性状に関する文献調査

平成 3 年に発行された「建築材料等の耐久性に関する標準化のための調査研究総括報告書」[2-3]によると、気象条件下に曝される外装材料の劣化要因としては、紫外線や酸性雨による化学的劣化、熱膨張・収縮や乾燥・湿潤、凍結・融解などによる物理的劣化、カビ菌・腐朽菌、藻類等による生物的劣化、ばい煙・じん埃等による劣化などがある。これらの要因の中で、瓦と同じセラミック材料である陶磁器タイルについては主に物理的劣化因子の影響を受け、亀裂や破断、ひび割れ、剥離等の劣化現象を引き起こす可能性があるとされている。物理的因子以外では、藻類等の生物的因子、ばい煙・じん埃による汚れが劣化現象として挙げられている。

粘土瓦を含む建築用粘土製品の劣化や耐久性について要求される性質として、素木は風化に対

する抵抗性、繰返し凍結に対する抵抗性（凍結融解試験後の強度の保持）、白華の原因となる可能性のある可溶性塩類の量、雨やほこりで摩耗されない硬度、等を挙げている[2-4]。特に凍結による害については、自然の破壊現象のうち最も大きな害を建築物に与えるものとしている。

ここでは、凍害とそれ以外の要因に分けて、既往の文献から粘土瓦の劣化性状について考察を行う。

2.2.1 粘土瓦の耐寒性および凍結・融解性状に関する報告

(1) 積雪地での瓦の劣化形態に関する報告

五十嵐[2-5]は、若狭湾沿岸地域での降雪による被害の一つに瓦の破損を挙げ、破損した瓦の形状を3つの型に分類している（表 2.2.1）。このうち表面剥離型は瓦内部の水分が凍結したものであるとして凍結実験を行っているが、舞鶴地方で使用される瓦の強度が高いこともあり、微小な亀裂が入る程度で大きな破損には至らないとしている。切断型と混合型は瓦の外部からの力によるものであり、若狭湾沿岸地方は湿った雪が大量に降ること、屋根に積もった雪は日中に一部が解け雪を湿らせること、夜間から早朝にかけて気温が下がると積雪の下層部が完全な氷となり瓦へ局部的な力を与えること、雪がなければ瓦の乾燥化が進み凍結しにくいこと、を原因に挙げている。

表 2.2.1 凍結による破損形状の分類（五十嵐）

破壊形状の種類	性状
表面剥離型	<ul style="list-style-type: none"> ・主として瓦の表側に起こり、瓦の面から1~2mm深さで片鱗状に剥離 ・発生率は少ない ・気孔中に含まれた水分の凍結により微小破壊を起こしたものが年数と共に累加
完全切断型	<ul style="list-style-type: none"> ・曲げモーメントのような形式の力が作用し、大きな破壊が生じる
切欠剥離混合型	<ul style="list-style-type: none"> ・必ず瓦の側面に起こる破壊で、小湾曲部周辺から側部にかけて発生 ・切断と剥離が共に生じており積雪の凍結と重みにより生じた可能性 ・被害としては最も多い

(2) 飽和係数と吸水率に関する報告

粘土瓦の凍害に対する抵抗性（＝「耐寒性」）は古くから重要な課題とされており、多くの研究がなされているが、中でも、凍害の安全範囲となる飽和係数と吸水率、吸水方法について議論しているものが多い。

飽和係数とは、材料の空隙容積(B)に対する、材料が自然の状態ですべて吸水する水の容積(C)の比(C/B)を指す[2-4]。ただし、空隙容積の求め方には煮沸法、加圧法、真空法などにより浸入した水分量から計算する方法があるが、それぞれの方法や吸水時間によって浸入する水分量が異なる場合があるため、飽和係数の取り扱いには注意が必要である。素木は「建築用セラミック材料」の中で、屋根瓦については煮沸による吸水により飽和容積を求める方法がよいという S. Robert の報告と、凍害に対する抵抗性は気孔の大きさと分布状態によるものとし、直径 0.84[μm]以上の気孔が容積で 32%以上あれば凍害を受けず、そのためには原料坏土（注 1）の粒径は 11~38[μm]を多くするとよいとした Winkler の報告を紹介している。

太田[2-6]は、日本国内各地で製造された瓦約120種類を対象に、試料を48時間静水に浸せきさせて吸水率と飽和係数の測定および凍結融解試験を行った結果、見かけ気孔率（注2）20%以下のものは耐寒性にすぐれること、飽和係数が0.45～0.5の範囲内が最も安全であることを指摘している。

(3) 原料土、製造方法、素地の気孔率に関する報告

耐凍害性と粘土の種類や瓦の製造方法の関係についても諸説ある。「建築用セラミック材料」では、粘土の種類によっては硬く焼成しても凍害を受けない素地を作ることにはできないことや、粘土の採取箇所によって、凍害を受けるものと受けないものがあることが述べられている。

香川県工業技術センターでは、中原ら[2-7]が香川県産粘土を原料として粒度組成と焼成温度の異なる試料を用いて吸水率、飽和係数、みかけ気孔率、気孔径分布の測定と耐寒試験を行い、細粒分が多くなるほど吸水率が小さくなること、焼成温度が高くなるにつれ細孔容積の総量が減少することなどを明らかにした。近藤ら[2-8]は香川県産粘土を原料とした同様の測定を行い、焼成温度が高くなるほど吸水率と飽和係数が小さくなり、耐寒性にすぐれた素地となることを確認し、その原因は焼成温度が高くなると原料粘土中に含まれる長石が熔融し、大気圧下で水が浸入し得ない小さな気孔が生成されるためとしている。また、粒度組成に関しては組成の偏りが少ないことが重要であり、耐寒性に密接に関係するラミネーション（注3）については粘土分が多いほど発生しやすく、63 μm を超える粒子を多く有するものはラミネーションが発生しにくいとしている。

愛知県常滑窯業技術センター（現：愛知県産業技術研究所常滑窯業技術センター）では、島村ら[2-9]が愛知県三河産の原料粘土71種類について、素地の諸性質の測定と焼成後の凍結融解試験を行い、吸水率と粒度分布が耐寒性に強く影響すること、粒度5～63 μm のシルト領域に入る粒子の含有率が高いほど耐寒性は向上することを明らかにした。永柳ら[2-10]は、寒冷地向き粘土瓦の開発を目指し、耐寒性向上と輸送コスト低減のための軽量化を目的に、粒度組成の異なる土を調合して各種物性測定と凍結融解試験を行い、5 μm 以下の粘土分が多い試料は成形時のラミネーションが原因で貫入、剥離が発生することや、5～63 μm の土を多く配合すると耐寒性が向上すること、坏土を再粉碎して湿式分級などの前処理を行うことで従来品より12%の軽量化が実現できることなどを述べている。

山本ら[2-11]は、真空土練機を使用すると耐寒性が低下するのは、主として機械の構造に起因するラミネーションによるものとしている。石飛ら[2-12]によれば、ラミネーションは、粘土を主体とする練り土が真空土練機から瓦の曲率を持った板として押し出される際に、板の両表面に垂直な圧縮応力を受け、練り土内の粘土粒子が横方向（圧縮方向に垂直な方向）に流れることで形成される。そのため、粘土瓦はラミネーションの方向に平行な引張り応力には強く、垂直な引張り応力には弱いという強度の異方性を持ち、粘土瓦の内部で凍結による圧力が生じれば、まず弱い部分であるラミネーションに平行な方向に破壊が生じるとしている。

(4) 耐凍害性評価方法に関する報告

耐凍害性を評価する方法についても、種々の提案がなされている。耐凍害性を直接試験する凍結融解試験（凍害試験）は、材料に吸水させてから低温環境下で凍結させ、常温水中で融解させる過程を繰り返して材料が破壊するかどうかを確認する方法であり、粘土瓦の工業規格であるJIS

A 5208 にも規定されている（注4）。

しかし、このような凍結融解試験と実環境における凍結融解性状が異なることや、試験時の吸水方法や冷却速度によっても結果が異なることが、多くの研究者から指摘されている。

中村ら[2-13][2-14][2-15]は、珪藻土断熱煉瓦や粘土瓦素地、陶器素地、タイル素地について、試料中を熱流が一次元に流れる一次元冷却法と、試料周囲全面から冷却される三次元冷却法での凍結融解試験を行い、凍害破壊の性状を比較している。これによると、凍害破壊の亀裂は三次元冷却法の場合には無秩序に入るが、一次元冷却法では冷却方向に直角に層状に剥落するように入り、実際のセラミックの凍害破壊性状に近い。粘土瓦は材料中にラミネーションや粒子の配向などによる極端な強度の異方性があるため、組織体内で氷の発生に伴う圧力が生じれば、強度的に最も弱い方向（加圧成形方向と直角方向）に最初に亀裂が入る。凍結融解回数が同じであれば、一次元冷却法の方が損傷は著しい。三次元冷却法では冷却速度が速い方が凍害を受けやすく、一次元冷却法では冷却速度が遅い方が凍害破壊を生じやすい、などの知見が得られている。

凍結融解試験と実環境下での凍害性状が異なる理由としては、過冷却の影響も指摘されている[2-4]。実験室における人工的な条件の下では、氷の生成を促進させる核としての氷の微細結晶が空気中に存在せず、水は過冷却された状態となって凍結温度に到っても凍結しないことがあるが、いったん氷が生成されると急激な凍結が起こる。実際の外部環境では、空気中には常に微細な氷片が存在するため、材料中の水は凍結温度に達するとただちに凍結し始めるということである。過冷却の場合は、素地は衝撃を強く受け破損しやすい。

山本ら[2-16]は粘土瓦の JIS による凍害試験では異常が認められない場合でも実際に施工すると凍害が発生することもあることから、JIS の試験方法よりも時間を短縮しながら、耐凍害性を適切に評価する手法を検討している。凍害の程度を判断する指標としてヤング率の減少に着目し、目視による判断と凍害発生までの凍結融解回数との関連を調べている。また、冷却時間、冷却温度、試験前の吸水方法（減圧給水の圧力）、1次元と3次元冷却などの試験条件による差についても検討し、吸水時の減圧が大きすぎると全体的に早く凍害が発生し、瓦の耐凍害性の優劣がつけにくいことや、低圧での吸水や1次元冷却凍害の発生を確認するまでに多くのサイクル数を必要とし試験時間が長くなることなどから、試験前は 500mmHg で減圧給水し、試験は -40°C で3時間冷却（三次元）後、常温で1時間給水させる方法を提案している。

耐凍害性の直接試験は時間・費用がかかるため、凍害に関連の深い材料の諸特性値によって迅速・簡便・低廉な間接評価を行う試みもなされている。中村ら[2-17]は、吸水率、見掛け気孔率、水蒸気吸着率、曲げ強度、毛管飽和点含水率及び気孔径分布等の諸物性をパラメータとして、凍結融解試験（直接試験）を行い、凍害感受性の多重回帰による相関分析を行っている。その結果、粘土瓦の凍害感受性の間接評価に対する最も有力な材料特性因子は、試料の内表面積であるとし、内表面積の目安となる 45%RH 下での水蒸気吸着率、吸水率、見掛け気孔率から凍害指数を求められている。

(5) 使用環境下での凍害性状に関する報告

素木[2-4]は、外部環境では凍害の度合は材料が曝されている温度と降雨の状態に左右され、特に強い雨に続いて苛酷な霜の作用が重なると凍害はひどく、氷点近くで温度の変動があると連続して温度が下がっていくときよりも凍害の危険性が大きくなるとしている。また、「建築用セラミック材料」の中で、モスクワにおけるレンガやタイル等の粘土質焼成材料について、特に湿度の

多い台所、風呂場、洗面所などでは水は外部に向かって移動し、外面から約3~5mmの深さの所に集まり、レンガやタイルは薄層または椀型に剥離すること、凍害は温度よりもむしろ飽水度と壁面の冷却速度とに左右されることを実験により確認し、表面だけでも急激に冷却されると、徐々にそれよりも低温に冷却された場合よりも作用は著しいとする Tscharny の報告を紹介している。

田中[2-18]は、瓦の気孔中の水分は瓦の表面から透水するのみではなく、空気中の水蒸気が浸入し温度低下に伴い結露・結氷を生じるとしている。また、瓦は葺き上げられた状態で全面均一に同一温度に曝されるのではなく、上面は氷点以下の外気に曝されて氷結してその膨張圧を受け、下面は室内からの熱を受け氷点以上の温度となり氷結しないことから、応力の不均衡で曲げモーメントを受けることにもなり、力学的な作用を受けるとしている。これらの例として、1軒の家で同じ瓦を使用している、室内から熱と湿気の移動を受けやすい台所や浴室の屋根だけが凍害を受けた例や、逆に天井の高い、例えば社寺の大屋根で室内からの暖房の影響を受けないような屋根では、寒冷地にあっても被害は少ないといわれることなどを紹介している。

Pels-Leusden と Bergmann はドイツ北部およびスイス地区で実際の天候のもとで瓦や煉瓦の表面、内部、縁の部分の温度測定を行い、屋根瓦では、表面と内部の温度差が日射を受ける日中と氷結が生じる夜間とで大きく違うこと、一枚の瓦でも位置によってその変化の程度が変わることを示した[2-4]。この理由として、組織が不均一であることを示しており、したがって混練を十分に行って均質な坏土としなければならないとしている。

愛知県陶器瓦工業組合が札幌市で実施した屋外暴露試験[2-19]では、積雪時には瓦の表面温度は積雪状態で $-1\sim-2^{\circ}\text{C}$ 、厳冬期で $-5\sim-10^{\circ}\text{C}$ であり、表裏面の温度差も小さく瓦全体がほぼ様な温度となるため、凍害による劣化を受けにくい、初冬期や融雪期は表面温度が $-10\sim+40^{\circ}\text{C}$ と大きく変化するため、凍結・融解の繰り返しによる応力の影響を受けやすいとしている。

瓦全体が結氷温度以下に保たれ凍結状態が持続する場合、結氷温度に応じた量の水分が凍結すると、新たに水分が供給されない限りはそれ以上氷晶の成長は生じないため、氷の膨張圧による応力を受けず、劣化は進行しない。しかし、瓦内部の水分が凍結・融解を繰り返す場合は、凍結による膨張圧で材料の組織が（ひび割れ等の影響を受け）劣化を生じ、水の供給があればより多くの水が材料内に浸透し、劣化を拡大するため、凍結・融解を繰り返す方が劣化が進行しやすいと考えられる。

2.2.2 その他の劣化に関する報告

(1) 釉薬瓦の釉薬剥離

苗、王らは、北京の紫禁城の瑠璃瓦をはじめとする中国全土の古建築の釉薬瓦について劣化性状の調査を行い、変色、汚れ、ひび割れ、風化、釉の剥落が生じていること、中でも釉の剥落が最も多く被害も深刻であると報告している[2-20]。釉が剥落することで、屋根面の防水と装飾機能が担保されなくなる[2-21]。中国の瑠璃瓦は光沢をもたせるため鉛を含有した釉薬を用いているが、鉛釉は熔融温度が低いため、瓦を焼成する際は、1度目に 1000°C 以上で粘土素地がある程度焼結するまで焼成し、2度目は 950°C 以下で鉛釉を融解し、素地と釉層を一体化させるために焼成する。この時、素地の焼成温度が高く焼結が進みすぎていると気孔率が小さくなり、釉薬が素地に浸入しにくくなるため素地と一体化しにくく、釉が薄くなり色と輝きを失う。焼結程度が低くなると気孔率が大きくなり、吸水膨張や凍害により釉層が剥離しやすくなり、素地自体の強度が低

下する。釉層にひびが入る原因は、釉と素地の熱膨張係数が違うため釉の中で応力を生じること、焼成後冷却する際に熱による応力を生じることとしている。ひび割れが釉層と釉薬と素地の結合層を貫通すると、水分の浸入経路となる。釉薬厚さは薄い方が釉層と素地の熱膨張係数が近い値となるため、ひび割れに対して有利であり、90~160 μm の厚さのものの保存状態がよいとされている。文化財保護の観点からは、釉が剥落した瓦素地に再び施釉して再焼成するという手法も提案されている。これは、古建築に用いられている瓦の裏面には、当時の製造者・製造方法などの貴重な情報が刻まれているため、これを保護し今後も使用し続けていくことが求められているためである。この時、釉の配合を調整し、鉛釉の輝きを保ちながら熱膨張係数を一定のレベルに低下させること、目標とする吸水率(9~13%)を達成するため、素地の組成に適した焼成温度で再焼成を行うことが重要とされている。

田中[2-19]は、釉薬面の亀裂については水和膨張も原因の一つであり、釉薬と素地の適合性を検討することが重要であると指摘している。水和膨張とは、多孔質素地が吸湿、吸水をすることによって容積を膨張することであり、粘土瓦は水和膨張によって釉面亀裂を興し、これにより水の浸入が増し、凍害につながるとしている。

(2) 塩害

粘土瓦の原料土に含まれる可溶性塩類が、焼成によって分解されずに素地の中に残存し、瓦が屋根に施工された後、浸透した雨水などに溶解し、水分移動とともに表面に移動して結晶化し、析出する。この結晶化する際の体積膨張により剥離などを生じることが塩害という[2-4]。レンガやタイルのエフロレッセンスと同様の現象である。海岸部地域では、海塩粒子 NaCl の影響でこれに似た現象が生じることがあり、大野ら[2-22]は塩害の促進試験を行い、粘土瓦の耐塩害性を向上させるためには、1,200 $^{\circ}\text{C}$ 以上で焼き締め吸水率を小さくする必要があるが、製造コストを考慮すると、現行の焼成温度のまま撥水剤による表面処理を行うことが適当であるとしている。

2.2.3 文献調査のまとめ

凍害に関する報告を主として、粘土瓦の劣化に関する文献調査を行った。既往の研究では、粒度組成等の原料土の性質、吸水率や飽和係数等の焼成後の瓦の性質と耐凍害性の関係について相当数の実験や研究が行われており、その中で用いられた試験条件下での耐凍害性と材料物性の関係については、多くの知見が得られている。

また、瓦の凍結融解試験においては、破壊の性状や程度、破壊に到る凍結融解回数で耐凍害性が判断されることが多いが、試験の目的は材料間の優劣を比較することや、特定の試験条件において材料がもつ凍結融解に対する抵抗力を把握することであるため、試験室での破壊性状が実際の使用条件下での破壊性状とは異なることも指摘されている。

一方、実際の使用環境下における瓦の温度については測定された例があるものの、含水状況については定性的な説明に留まっており、凍害を生じて初めてその原因について考察されている状況である。瓦内部での凍結を生じるために不可欠な水分が、どのような経路をたどり瓦内部に浸入するか、どのような環境条件下で凍結を生じるか、という点に着目した研究はあまり行われていない。さらに、瓦への水分浸透に大きく影響すると考えられる表面仕上げ層が凍結融解過程に与える影響についてはほとんど言及されていない。したがって、本研究では表面仕上げ層をもつ

瓦への水分の浸透経路を明らかにし、実際の使用条件下での凍結融解過程における温度と含水状況を明らかにすることが重要と考える。

2.3 京都市内の屋根瓦調査

瓦が実際に用いられる環境下では、さまざまな環境要因が影響して劣化が進行すると考えられる。ここでは、温暖地における屋根瓦の劣化の現状を把握するため、京都市内の屋根瓦を中心に行った実態調査について述べる。特に、水分に起因する劣化と考えられる事例に着目し、劣化が生じている部位や瓦が置かれる環境が与える影響について考察を行う。

2.3.1. 調査方法

屋根瓦の劣化性状を明確にするには、それが実際に用いられている環境下で長期にわたって観察する必要がある。ここでは、出来るだけ広域にわたる多くの事例調査により、長期の観察に代わる情報が得られるものとする。

調査内容は、京都市内の寺社を中心とした建物の塀瓦、屋根瓦の目視観察であり、写真記録を行う。調査地域は、周辺建物や植生等の環境条件の異なる地域を含むように選定する。

調査項目としては、被害の状況とともに地域の気象条件、建物周りの（微気象に關係する）環境条件、建物条件（方位、階数、隣接建物など）、屋根構造（方位、勾配、瓦の種別など）を記録する。

2.3.2. 調査結果

以下に調査結果から、瓦の主な破壊性状、水分供給・浸入経路、瓦が置かれた環境の影響について述べる。なお、本文中の瓦の部分名称は「日本の瓦屋根」[2-1]による（図 2.3.1、2.3.2）。観察のしやすさから塀に用いられている瓦も調査の対象としているが、屋根に使われるものと同じ形状の瓦は、屋根に使われる名称（軒瓦、棧瓦など）を用いて分類している。

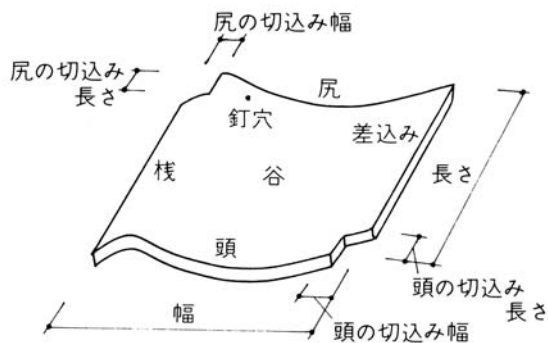


図 2.3.1 棧瓦の各部の名称

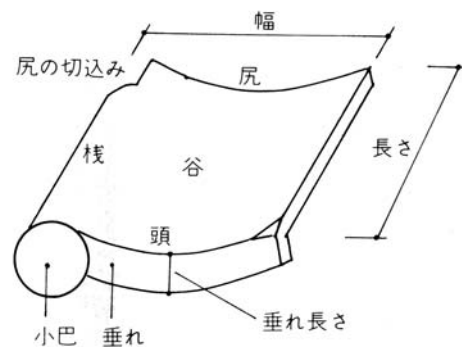


図 2.3.2 軒瓦の各部の名称

(1) 破壊性状（欠け・剥離・ひび割れ）

1) 軒瓦の破損

軒瓦の小巴部分は、調査を行った中で最も剥離や欠けが多く見られた部分である。

写真 2.3.1 は万十軒瓦の万十部分の欠けである。凸状となっている部分の端部が欠けている場合もあるが、球面の頂部が大きくえぐられるように剥離しているものも多い。写真 2.3.2 は、一般的な軒瓦の小巴部分の劣化の様子である。多くは部分的な剥離が見られる程度であったが、(c)のように大きなひびが生じているものや、(d)(e)(f)のように大きく欠けているものもある。

同じ軒瓦でも、小巴部分のない鎌軒瓦は、鎌状になっている部分に剥離やひび割れが生じている（写真 2.3.3）。以上の軒瓦の劣化のうち、剥離しているものは瓦内部に蓄積した水分が凍結することにより内部応力を生じ、力学的に弱い部分で剥離が生じたものと考えられる。ひび割れも凍結・融解によるものと考えられるが、ひびがあると内部へ水分が浸透しやすくなるため、さらに凍結を促進する。

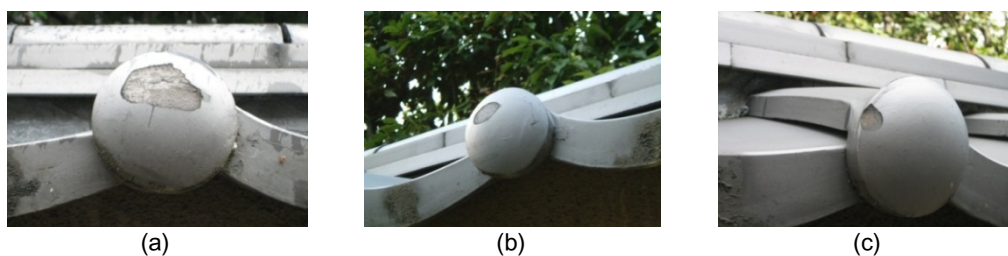


写真 2.3.1 万十軒瓦の万十部分の剥離

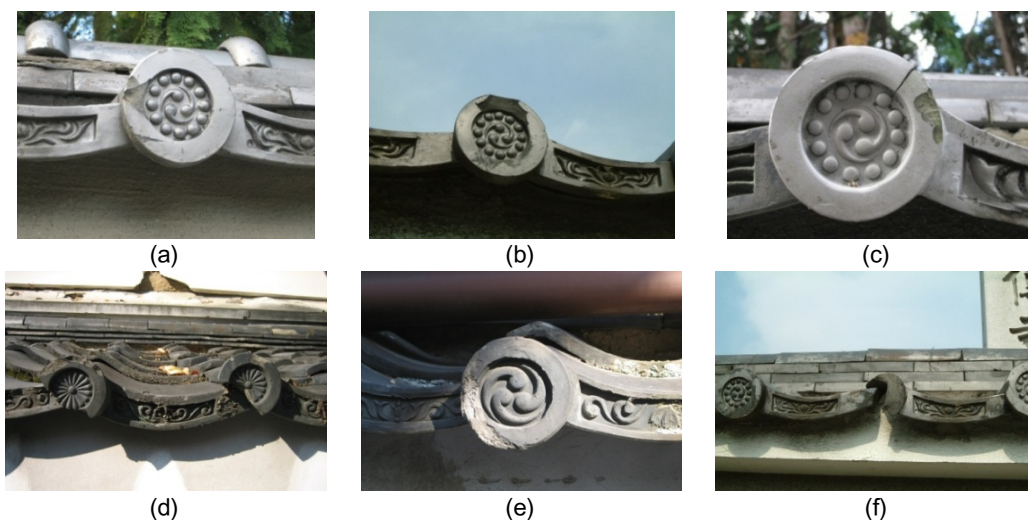


写真 2.3.2 軒瓦の小巴部分の剥離・割れ

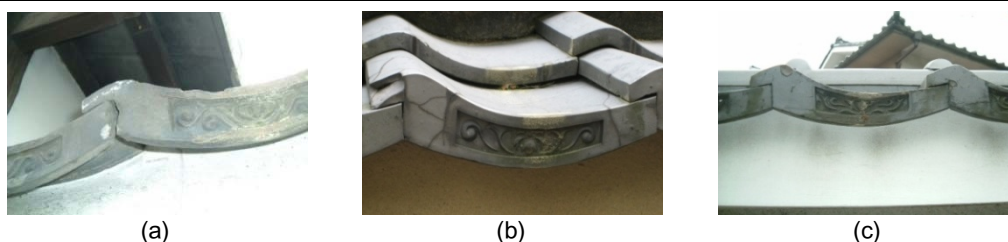
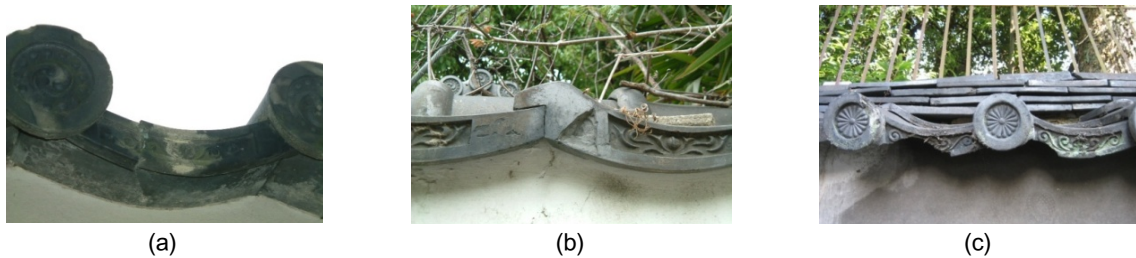


写真 2.3.3 鎌軒瓦のひび割れ・剥離

写真 2.3.4 は、軒瓦垂れ部分の割れや欠けを示したものである。(a)は縦に大きく割れを生じている。(b)では垂れ部分の一部が三角形にえぐられるような剥離を生じている。(c)は斜め下側が大きく欠けている。(b)は水分がたまりやすい部分に集中的に凍結が生じ剥離したもの、(c)は同じような位置が欠けているため、内部で凍結が生じた際に製造上強度が不足していた部分で割れ、欠けてしまったものと推察される。



真 2.3.4 軒瓦の垂れ部分の割れ・欠け

2) 棧瓦の破損

写真 2.3.5 は棧瓦の劣化の様子を示したものである。(a)に見られるように棧瓦の谷の部分には雨筋の跡が残り、長い年月をかけて表面を汚損する。雨筋跡の頭側（屋根に葺いた時に下となる側）では、端部が欠けているものが多く見られる（写真中白点線）。この部分を拡大したものが(a)'である。(a)の白実線で示した部分では、棧瓦の棧と呼ばれる凸状部分の表面が剥離している。(b)の屋根では、新しい瓦と古い瓦が混在している。白実線四角部分を拡大したものが(b)'である。古い瓦の部分で、谷の頭側が大きく欠けている。また、谷の尻側（屋根に葺いた時に上となる側）の表面が剥離している。このように大きく破損した瓦では屋根に求められる防水性を確保できないため、部分的な交換がなされているものと考えられる。

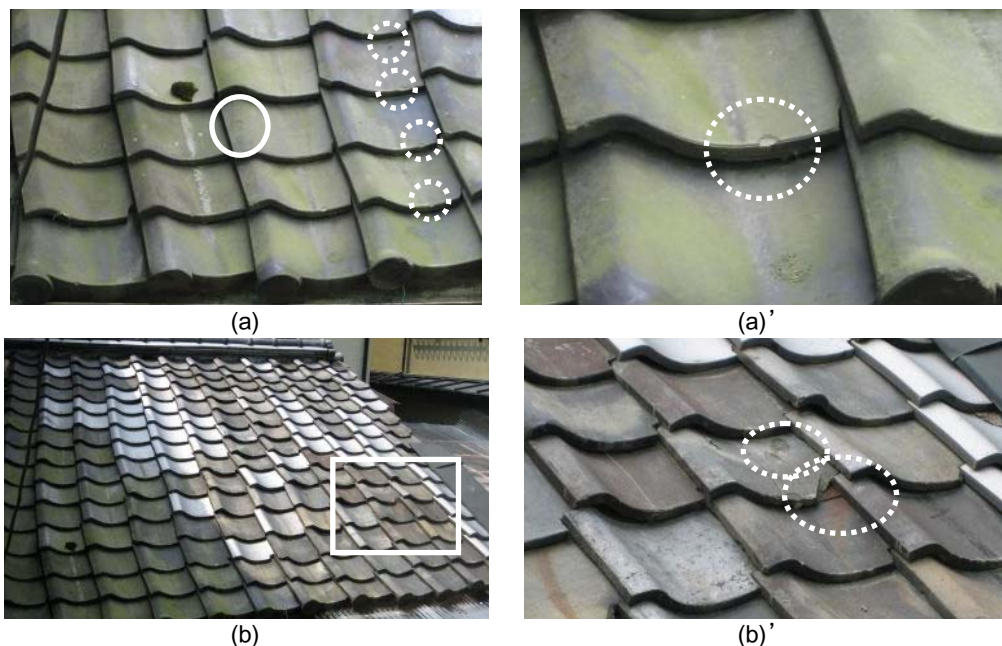


写真 2.3.5 棧瓦の欠け・剥離

3) 塀上部の瓦の破損

写真 2.3.6 に、塀の上部に用いられる丸瓦や紐丸瓦、熨斗瓦のひび割れ、剥離を示す。紐丸瓦は、紐部分に小さな剥離が生じているもの(b)も多く見られた。(a)のような丸瓦端部の剥離や、(d)のような熨斗瓦の瓦が隣り合う部分の剥離は、水が溜まりやすい位置で凍結が生じたと考えられる。

4) その他の劣化性状

写真 2.3.7(a)は、軒瓦の垂れ部分の様子が溶けるようになり、地衣類と見られる植物が繁殖している状況を示している。このような劣化は凍結によるものではなく、塩害によるものと考えられる。

(b)・(c)はいずれも軒瓦の裏面の劣化の様子である。瓦だけでなく木材が水分を含んで変色していることから、軒瓦の裏面にも水分が回り込んでいる可能性が高い。また、(c)のように葺き土を用いた場合、瓦の裏面に回りこんだ水分は土に吸収されるが乾燥はしにくいため、土が保持できる以上の水分が供給された場合は瓦も高含水状態となることが推察される。

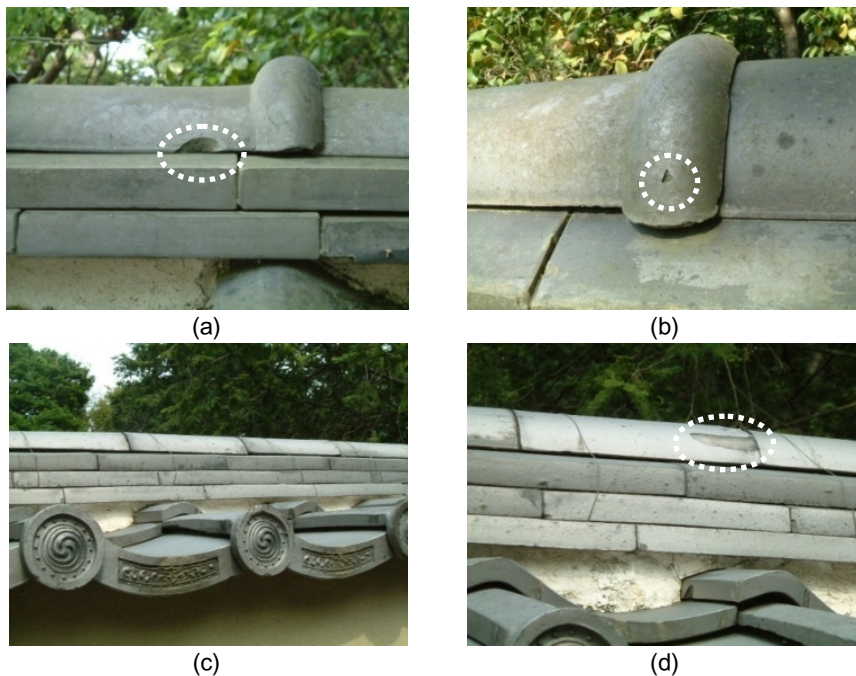


写真 2.3.6 塀上部の丸瓦・紐丸瓦・熨斗瓦のひび割れ・剥離



(a)塩害を受けた瓦

(b)軒瓦裏面の剥離

(c)裏面の葺き土

写真 2.3.7 その他部位、他種の瓦の劣化

5) 釉薬瓦の破損

京都市内の社寺ではいぶし瓦が主に使用されているため、以上はいぶし瓦で観察された劣化性状である。釉薬瓦の例は少ないが、代表的なものを写真 2.3.8 に示す。

(a)(b)は軒瓦の剥離で、いぶし瓦と同様に小巴部分や垂れの下端部が剥離し、茶色い素地が露出している。(c)～(f)は塀の上部に用いられている伏間瓦である。程度の差はあるものの、紐部分の頂部が剥離し素地が露出しているものが見られる。また、(e)(f)のように、瓦の下端部には細かい剥離が見られるものも多い。釉薬層はガラス質ではあるが全く水を透さないわけではなく、山本ら[2-23]の報告によると透水の程度には釉薬層の貫入(注5)が影響を及ぼしている。このような貫入の大きい部分や、釉薬層が欠けたりひび割れたりしたところから水分が浸透し凍結したものと考えられる。

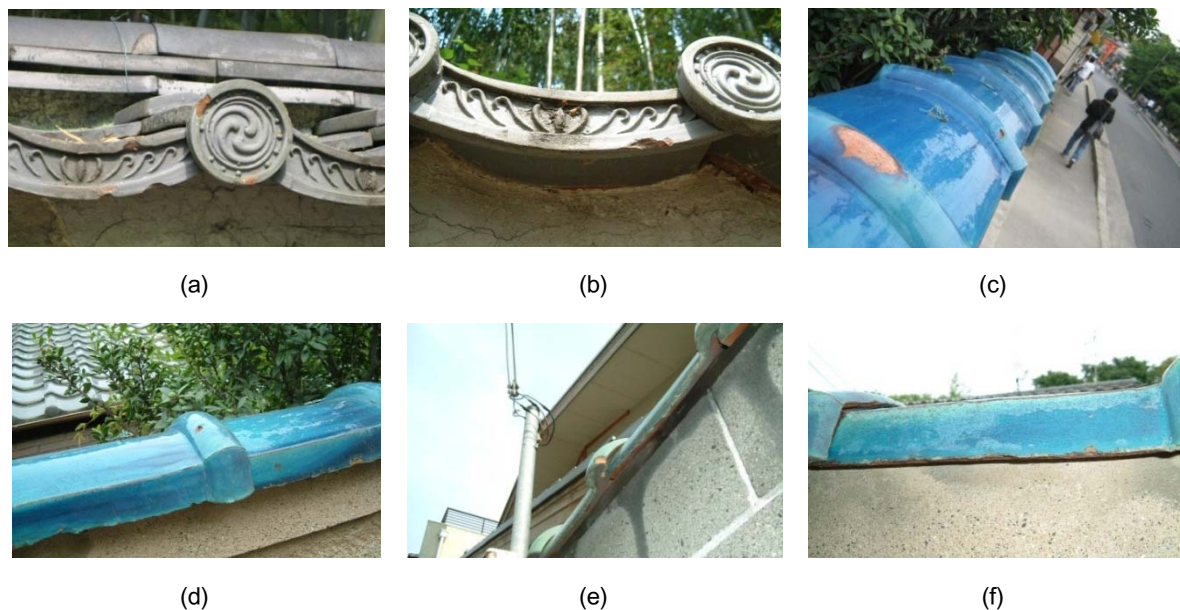


写真 2.3.8 釉薬瓦の剥離

(2) 瓦への水分供給・浸入経路

1) 瓦表面に付着した藻・苔・地衣類

調査中、瓦の表面に藻類など微生物や苔等の植物が繁殖している様子が非常に多く観察された。このように微生物や植物が繁殖している瓦には劣化しているものも多く見られた。

写真 2.3.9 に、軒瓦の垂れや小巴部分に付着した微生物や植物を示す。(a)～(c)に示した垂れや小巴部分に模様のあるタイプの瓦では、緑色の藻類が模様に沿うように繁殖していた。また、(d)～(f)のように垂れ部分の中央部(谷からの水道となる部分)に、黒や白、緑の付着物が数多く観測された。コンクリート外壁等に黒や緑の汚れが発生している場合、菌の採取を行うと藻類であることが多い[2-24]。藻類は乾燥状態になると活動を休止、あるいは死滅し黒色化するため、写真 2.3.9(e)に見られるような黒い汚れは主に藻類であると考えられる。白い汚れは前述の塩害により析出した塩の結晶や、藻類と菌類の共生体である地衣類が多い。地衣類は雨ではなく朝露程度の湿気があれば十分に代謝を行うことができる[2-25]。

写真 2.3.10 は、瓦の一部ではなく全体が苔むした様子を示している。これらに共通していえる

ことは、周囲に樹木が多いことである。

宮内ら[2-26]は、タイにおける大仏表面の藻類繁殖についての報告を行っており、繁殖の条件として、

- ①水分供給が多い
- ②水分がたまりやすい、乾燥しづらい
- ③光合成に必要な日射が得られる(ただし、表面温度上昇と乾燥による成長抑制作用もある)

を挙げている。

瓦の場合も同様に、微生物や植物が繁殖している部位には水分供給があると考えられる。軒瓦の垂れや小巴の模様部分は形状が複雑であるため、水が流下しづらくたまりやすい部分である。

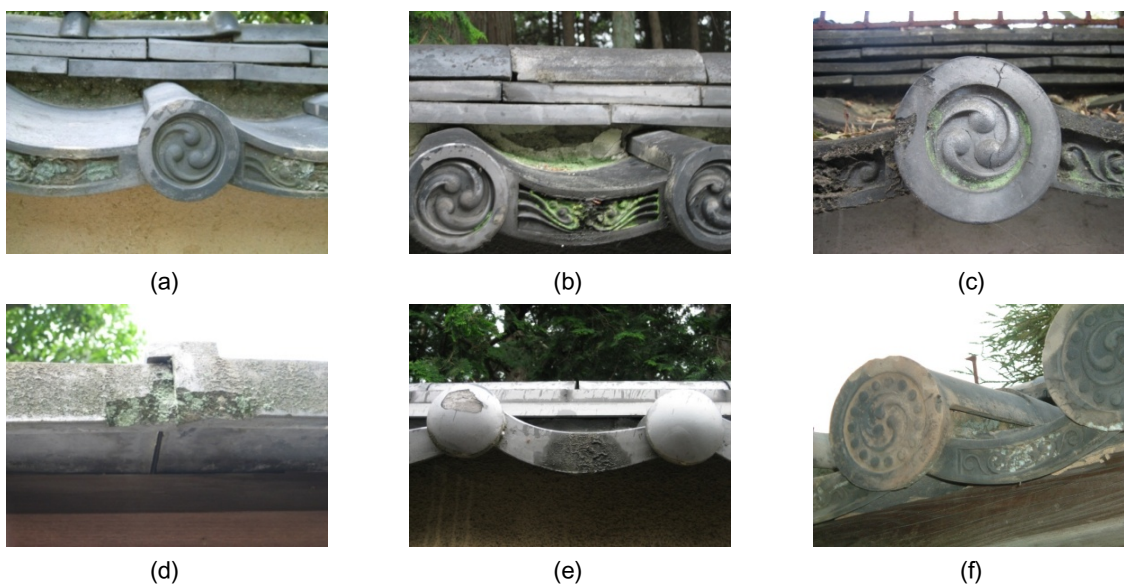


写真 2.3.9 軒瓦の垂れ・小巴部分に付着した藻・苔・地衣類

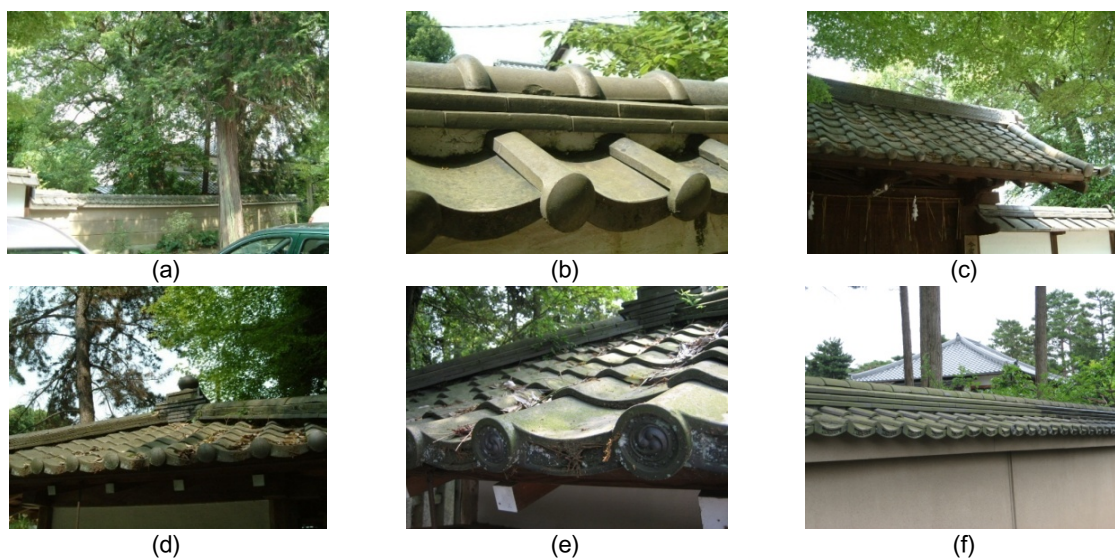


表 2.3.10 瓦表面（全面）に生えた苔・藻

降雨時のように一時的に多量の水分が供給される場合は、瓦の谷部分に水道ができて流れ落ちるが、表面結露した場合はより広範囲にわたって水滴が付着すると考えられるため、瓦表面全体に藻類や植物が繁殖している事例は結露による水分付着の可能性が高い。周囲に樹木等があり外気の絶対湿度も高くなること、日射が遮られ表面温度が上昇しにくいことから、表面に付着した水分は蒸発しにくい。付着した水分はある割合で仕上げ層を通して瓦内部へ浸透し、蓄積される。瓦が使用される環境の微気候も瓦の水分性状に影響を与えるといえる。

2) 降雨時の水の流れ

写真 2.3.11 は、降雨時における万十軒瓦の様子である。(a)(b)より、上部から流れてきた水は、雨筋はあるものの、比較的一様に万十部や垂れ部分を下流していく様子が見て取れる。(c)は雨がやんだ直後であるが、流れた水は、万十部や垂れの下側で切れにくく、湿った状態が続くことを示している。ここに藻が生じ、それが水分の蓄積を加速させる。

(d)～(f)は瓦の側面をつたう水の流れを示している。瓦の側面では、「ちぎり」という吸水しやすい部分があり、その部分に集中的に水がたまり変色していることがわかる。また、この部分では欠けも生じており、水分が劣化に影響を与える可能性が示されている。

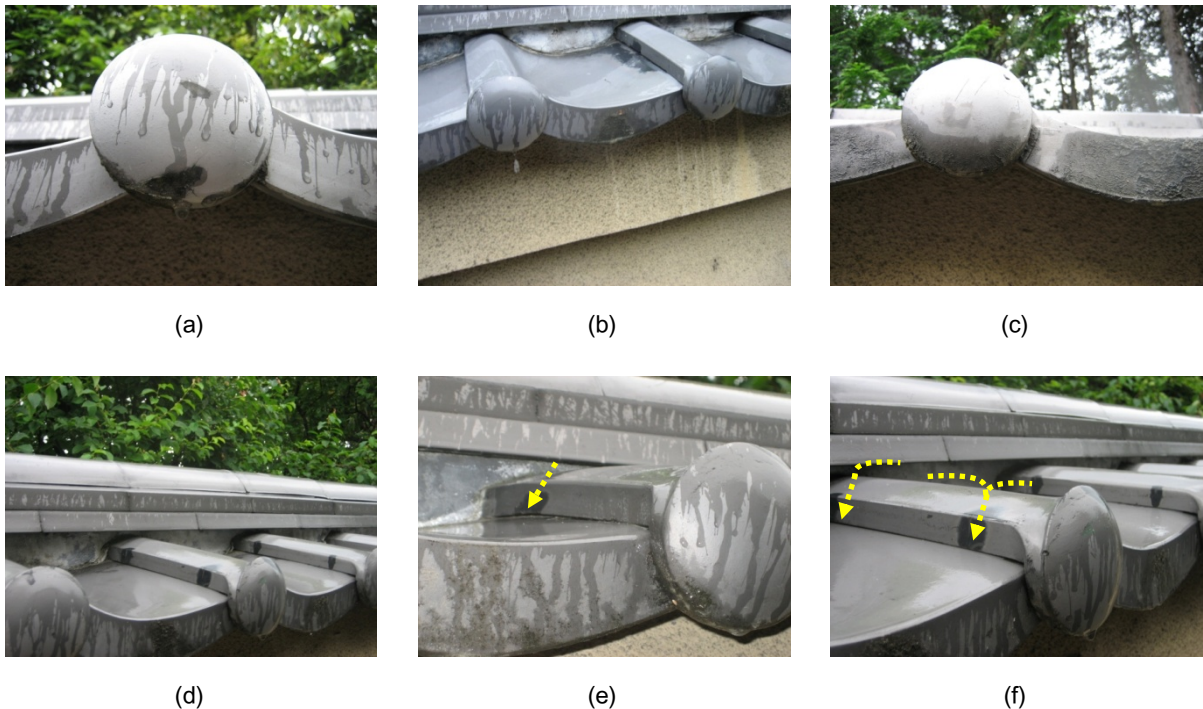


写真 2.3.11 軒瓦における降雨時の水の流れ

(3) 環境条件の影響

1) 方位と日射の影響

方位の違いが瓦表面の植生に及ぼす影響が観察された例を写真 2.3.12 に示す。これは、同じ建物の塀の北向きと南向きの瓦である。北向きの方が軒瓦の垂れ部分に繁殖した藻などの微生物が多い。日射が当たりにくく、水分が蒸発しにくいと考えられる。

瓦が面する方位が異なれば受ける日射量も異なるが、本調査では上記の例以外には瓦の劣化に方位による明確な違いは見られなかった。これは、観察を行った多くの屋根や塀の勾配が緩いため日射量に大きな差が生じなかったこと、凍害による劣化は主に温度が低下する深夜から早朝にかけて生じるため、方位よりも勾配に関係する夜間放射量が影響することが理由として考えられる。



(a)北向き



(b)南向き

写真 2.3.12 方位の違いによる瓦表面の藻の違い

2) 周囲環境（建物・植生）

写真 2.3.13 は、屋根が二重にかかっている建物を示している。このような場所では、屋根の下にある瓦に劣化はほとんど見られなかった。上の屋根により降雨が直接当たらないこと、天空に対して開いていないため放射冷却の影響を受けにくく、凍結を生じるような温度低下が生じにくいことが原因として考えられる。



(a)大屋根の下の小屋根



(b)塀瓦の上にかかる屋根

写真 2.3.13 二重にかかる屋根

写真 2.3.14 は、部分的に藻が繁殖した塀の瓦を示している。(a)の「左側」と示した部分は塀の前後にある樹木により日射が遮られている。さらに降雨があった場合は樹木に付着した水滴が多く落下することもあり得る。したがって、降雨や結露により表面に繁殖した藻は乾燥しにくく、緑色を保っていると考えられる。「右側」と示した部分は瓦表面の藻が少なく、乾燥して黒くなっている。この部分は日射を遮る樹木等がなく、瓦表面に付着した水分が蒸発しやすいためと考えられる。また、劣化した瓦は「右側」の方が少ないことがわかった。

このように、方位だけではなく周囲の環境による日射量の違いや湿度条件の違いなどが、瓦の劣化の程度にも影響を与えると推測できる。



写真 2.3.14 部分的に藻が繁殖した瓦

2.3.3. 調査のまとめ

京都市内の寺社を中心とした建物の塀瓦、屋根瓦について、特に水分に起因する劣化と考えられる事例に着目して調査を行った。

劣化の性状としては、軒瓦の小巴部分や垂れ部分のような形状が複雑になっている部分で、程度の大小はあるが剥離や欠けが多く見られた。周囲の環境が異なっても同じような部位で劣化が生じていることから、瓦の内部で凍結による応力が生じた場合、力学的に弱い部分で破壊が生じると考えられる。また剥離や欠けが生じている部分の周囲にはひびが入っているものが多いため、吸湿・吸水による膨張や凍結融解を繰り返すことにより、力学的に弱い部分に少しずつひびが入り、そこからさらに浸透した水が凍結を促進し、破壊を生じたものと推測される。

鎌田ら[2-27]は ALC の凍害について、冬期に外気温が 0°C 以下を持続するような条件では、材料表面に平行に割れが生じ大きく剥落するような性状を示すことが多く、凍結融解を繰り返す条件下では表面付近が仕上げ材とともに剥離するような性状を示すことを明らかにしている。本調査においても、冬期の外気温が 0°C 以下で持続することがなく、凍結・融解を繰り返すと考えられる京都においては、大きな剥落というよりも表面が薄く小さく剥離しているものが多いことが確認できた。

水分との関係については、水が滞留しやすいところに劣化が多いこと、周囲に樹木が多い場所では藻や苔が発生していることが多く、剥離や欠けを生じている場合も多いことがわかった。

降雨時のように一時的に多量の水分が供給される場合は、瓦の谷部分に水道ができて流れて落ちるが、表面結露した場合はより広範囲にわたって水滴が付着すると考えられるため、瓦表面全体に藻類や植物が繁殖している事例は結露による水分付着の可能性が高いことも確認できた。

方位の影響に関しては、観察を行った多くの屋根や塀の勾配が緩いため日射量に大きな差がなく、明確な違いは見られなかった。周囲の建物との関係では、屋根の上に屋根が架かっているような特殊な場合を除き、影響を把握することはできなかった。

以上のことから、瓦の凍結融解過程を詳細に検討する際には、表面への水分付着がどのようになっているか、建物近傍の温湿度と水分蒸発への影響、凍結融解を繰り返すか否か、というような点に着目することとする。

2.4 瓦製造者及び施工者、保存関係者へのヒアリング調査

2.4.1 愛知県豊橋市内の建築工事会社での瓦調査 (2003年12月11日)

愛知県豊橋市内にある建築工事会社において、住宅の解体現場から採取した劣化した瓦サンプルの調査を行った。劣化したサンプルの破損状況を写真2.4.1に示す。

(a)・(b)・(c)は鬼瓦の端部が剥離したものである。(d)、(e)は軒瓦の表面(棧・谷)に当たる部分がえぐられるように剥離している。(f)は軒瓦の谷の部分の裏面が薄く広範囲にわたって剥離している。(g)は熨斗瓦の端部が大きく欠けている。以上はいぶし瓦の様子であるが、釉薬瓦においても(h)のように表面が大きく剥離しているものがある。瓦工事職人によると、これらはいずれも瓦が「凍てた」ため、すなわち凍害によるものである。程度の差はあるものの、端部は欠けたように剥離し、面状部は薄くはがれるように剥離している特徴がある。(i)に見られる台熨斗瓦の破損も原因は凍害によるものと考えられるが、裏面の土が露出しているため、このような部位での破損は屋根の防水上問題が生じると考えられる。



写真 2.4.1 劣化した瓦サンプル

2.4.2 京都市内の瓦製造・工事会社でのヒアリング（2006年7月6日）

京都市内にある瓦製造・工事会社において、瓦の劣化性状を中心に、一般的な製法や屋根構成についても聞き取り調査を行った。以下にその概要を示す。

(1) 瓦が受ける劣化作用について

1) 凍害

京都のように雪がほとんど降らず、凍ったり解けたりする地域が最も凍害を生じやすい。京都市内でも岩倉地区など寒い地域に耐凍害性の低い瓦を用いれば、一冬で半分くらいが破損してしまうこともある。雪が多く降る地域（福井、新潟など）は、雪が断熱層となり屋根の表面温度が下がりにくく、どちらかという凍害を生じにくい。

瓦の劣化の原因が凍害であるか否かは、耐凍害性の高くない瓦を使っているかどうかという状況で判断することが多い。淡路瓦や泉州瓦、菊間瓦など雌土（めんつち）を使用して見た目にきめ細やかできれいな瓦は、焼成温度が低く凍害に強くないと言われる。また、製造上の問題で完全に焼結せず、吸水率の大きいものは凍害を生じやすい。

山が裏にある、風通しが悪いなど湿気が滞留しやすい場所では凍害の可能性も高くなる。凍害を引き起こす水分は雨水だけでなく、水蒸気吸着や結露により空気中の水分が瓦に吸収されるためではないかと考えられる。

セメント瓦は、製造初期は強度が低いですが1年ほどで水和が進行し強度が上がる。ただし、吸水率が大きく凍害には弱い。

2) 塩害

土に含まれる塩分が析出、あるいは空気中の塩分を取り込んで、表面を剥離させる。沿岸部では特に多く見られるが、海のない地域でも見られる。瓦の巴部分や鬼瓦の模様がなくなるように（溶けるように）剥離する。

3) 釉薬瓦の剥離

土と釉薬の相性が悪いと、素地と釉薬層の間に水が入り剥離を生じることがある。

4) 瓦の温度収縮

焼成温度が高い瓦は、日射が当たる程度の温度上昇ではほとんど膨張しない。

(2) 瓦屋根の雨漏りについて

目の粗い土は水分を透すため雨水が透水し、雨漏れの原因となり得る。瓦のそばに葉の多い樹木があると、棧瓦の隙間に葉（特に松葉）が入り込み、水を誘引する。大きな雨漏れが生じた時は、瓦がどこかで割れていることが多い。

(3) 瓦の製法について

文化財では1100℃以上の焼成温度とするように決められている。

現在の瓦の製造工程は、ホッパで土を破碎・混練し、真空土練機で脱気、プレスした後乾燥し、窯入れという流れである。焼き方により強度的に弱いところが出ることや、いぶし瓦の場合うまくいぶし（炭素膜）がのらないことがある。焼成したら目視で検査し、打音検査（よく焼けていたら金属音がする）、形の検査を行う。また、JIS A 5208「粘土がわら」による耐寒性試験、吸水

率の測定、曲げ強度の測定を行う。

(4) 瓦の原料土について

雌土（めんつち）というきめ細かい粘土の耐火度は約 900℃、雄土（おんつち）という粗い土の耐火度は約 1350℃。それ以上の温度で焼くと土が溶ける。雌土は水を吸うと抜けにくく、内部で凍結が生じると応力を受け凍害が生じる。雄土は粗いため気泡があり、水を吸っても抜けやすく、凍害を生じにくいのではないかと考えられている。

(5) 瓦の種類と歴史について

1) 無釉色瓦

飛鳥寺から一部移された元興寺極楽坊の瓦は、約 1400 年から現在まで残っている

2) いぶし瓦

日本では鎌倉時代以降用いられている。いぶし瓦は最後に「燻化」という工程があり、焼成温度より 200～300℃下げて行う。これにより、表面に炭素の微粒子を付着させ、銀色に見せている。かつては松葉などを燃やしていぶしていたが、現在は LPG ガスなどを用いる。いぶしによる炭素膜は片面だけではなく、裏面や側面にも付着する。うまくいぶしがのらないとスス状に黒くなったり、脆くなったりする。

3) 釉薬瓦

日本では飛鳥時代に仏教伝来とともに製法が伝わっている。釉薬の種類により様々な色があるが、「緑釉」という種類は位の高い建物に使われる。2000 年以上前の西安でも使われたとされる。北京の故宮などでは緑と飴色の瓦で構成された「瑠璃瓦」が使われている。

(6) 瓦屋根の構成について

古い建物は野地板の上に草・皮葺きが一般的であり、松の皮、檜皮を使用したものは上等とされる。最近では野地板の上にアスファルトルーフィング等を用いる場合が多い。スライスした杉、サワラなどの板を野地板の上にはる土居葺きという工法もある。

土を接着剤代わりにして、瓦の下全面に厚さ 2～3 寸程度で施工する「土葺き」という葺き方もある。1 年ほど寝かせた良質の土であれば、年数を経過しても瓦から離れない。新しい土で葺くと、次第に目減りして瓦が固定されにくい。

阪神大震災以降は、土を使わない「から葺き」が主流となっている。栈木に瓦を引っかけて施工するもので、3 枚に 1 枚くらいの割合で釘留めを行う（1 枚 1 枚を釘留めしたら、瓦に割れや欠けが生じた時に取り替えができないため）。瓦の谷部分にのみ土を葺く「筋葺き」や、瓦の一部だけに土を葺く「なじみ土葺き」もある。

本瓦葺きの屋根は、坪 1 トン程度の重量があり、このうち 1 / 3 が土の重量であるため、土を使わなければ屋根の荷重を減らすことができる。

(7) 瓦の寸法と見え方について

瓦の厚みは、屋根のボリュームに関係する。かつての本瓦葺きでは、屋根の大きさによって厚さを変えていた。瓦の大きさは、屋根一坪あたり何枚葺かれているか、という表示の仕方をする。昔は六四判、最近では五三判（JIS の 53A など）が主流で、少し大きくなっている。

棧瓦の見える部分は全体の七掛け（70%）くらいであり、あとは重なっていて見えない。平板瓦は厚みもなく重なりも小さく、軽く見えるという特徴がある。

(8) 京都市内での瓦の劣化調査（2.3節）の結果について

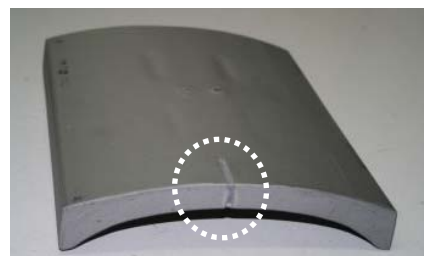
釉薬瓦の上部が欠けているのは「凍て」すなわち凍害が原因である。型押しで作るため、紐部分にきちんと土が充填されず、弱くなった可能性があり、製造上の問題と考えられる。

万十部分に見られた黒い汚れは、いぶしがはがれた後の瓦土の色の可能性もあるが、こすって取れるのであれば単なる汚れか藻の可能性が高い。万十の黒い部分が欠けているのは凍害によるものだと考えられる。また、瓦が吸水すれば、藻や苔、草が生える可能性はある。

軒瓦の小巴部分に白い跡が見られるのは、瓦を窯に入れて焼く時に支える「ちぎり（ちぎれ）」の跡である。瓦の端部（木口）に見られる黒い筋も、「ちぎり」の跡。窯への置き方によって、様々な部位にちぎりの跡が見られる（写真 2.4.2）。



(a) 棧瓦上側面



(b) 熨斗瓦



(c) 棧瓦の下側面



(d) 小巴部分

表 2.4.2 瓦に見られる「ちぎり」の跡の例

2.4.3 淡路島の粘土瓦製造会社でのヒアリング（2006年12月4日）

兵庫県淡路市にある粘土瓦の製造会社において、原土の採掘現場と瓦の製造工程の調査、瓦の物性と劣化性状、前節で述べた京都市内での実態調査における疑問点などに関するヒアリングを行った。以下にその概要を記す。

(1) 瓦の種類について

1) いぶし瓦

いぶし瓦は、焼成の最終工程で「いぶし」と呼ばれる還元反応を生じさせ、表面に銀色の光沢を持つ炭素皮膜を形成させた瓦である。酸素を抜いて不完全燃焼の状態で作ることにより土の中

の酸化鉄が還元反応を生じることや、内部へ炭素が浸透することにより、素地部分も銀灰色となる。かつては、瓦をいぶすために松材や松葉が使われていたが、現在ではブタンなどLPGの生ガスが使われている。いぶし瓦は日本の伝統的な瓦であり、いぶし瓦で葺かれた屋根は重厚感のある落ち着いた雰囲気になる。

2) 釉薬瓦

釉薬瓦は、別名陶器瓦や色瓦とも呼ばれる。製造工程はいぶし瓦とほとんど変わらないが、粘土を成形、乾燥し、白地（しらじ）の段階で釉薬という上薬を塗り焼成する。焼くと釉薬が溶け瓦の表面にガラス質が形成される。釉薬の成分を変えることで、様々な色彩の瓦を作ることができる。また、釉薬は瓦全体に塗ることも可能である。製造工程でのいぶし瓦との大きな違いは、焼く前に処理するか、焼いてから処理するかの違いである。いぶし瓦では焼成の最終工程でいぶすが、釉薬瓦では焼成前に釉薬を塗り焼成する。釉薬瓦の素地の色は焼成した土本来の色である。

(2) 和形いぶし瓦の製造工程について

和形いぶし瓦の製造工程の一部を写真 2.4.3 に示す。原土現場から採取してきた粘土(a)は工場のホッパに入れられ(b)、水分調整などの処理がなされる。次に粘土を真空土練機から押し出し、板状にする(c)。粘土は焼成時に焼成前の形状に戻ろうとする性質があるため、あらかじめ瓦の形状に押し出す。和形の場合は曲面状に押し出される。続いて粘土を1枚の瓦の大きさに切断し(d)、プレス機で上下から圧力を加えて挟み込み、成形する(e)(f)。この作業により粘土が密となり、焼成後の瓦の歪みが少なくなる。粘土瓦の乾燥は、以前は約1週間かけて自然乾燥させていたが、現在は乾燥室で32~50時間かけて行う(g)。乾燥時間によって強度が変わると考えられているが、コスト上、長時間乾燥させることは効率が悪いためである。瓦の表面強度の向上と表面をなめらかにするため、成形した粘土の上にはけ土（微粒子の土を水に溶いたもの）を付着させる(h)。焼成台車に積み込み、トンネル窯で焼成する。トンネル窯は和形いぶし瓦の場合、約80mの長さがあり、これを12~18時間かけて進みながら焼成する(i)。奥に進むほど温度は高くなっており、焼成後600度以下まで温度が下がると外に出す。焼成の最終工程でいぶしを行う。焼成後、出来上がった瓦は検査・選別され、出荷される。

(3) 釉薬平板瓦の製造工程について

釉薬平板瓦の製造工程の一部を写真 2.4.4 に示す。原土の調整、土練機からの押し出し(a)、切断、プレスまではいぶし瓦と同様の工程となる。プレスされた瓦は乾燥され、釉薬を表面に施される(b)。平板瓦の場合、全て斜め向きに瓦を台車に載せる(c)。また、焼成については、トンネル窯は約120m（右下写真）と、和形いぶし瓦のトンネル窯よりも長い。焼成温度も最高温度が約1070度と、和形いぶし瓦の場合より高い。この焼成を終え、人が木槌を使って検査・選別を行い、それをクリアした瓦は完成品として出荷される。

(4) 瓦の劣化要因について

凍害は瓦の劣化要因の一つであるといえるが、製造上の問題も劣化には大いに関係する。瓦の製造工程において、プレスが弱いとその部分の強度が下がる。特に軒瓦の万十部分はプレスをかけるのが難しく、他の部分より弱くなる。瓦は採取してきた粘土の性質によって強度が決まる。粘土に木片などの不純物が入った状態で焼成すると強度が大きく低下する。このような瓦は劣化

しやすい。

いぶし瓦に付着している黒いシミについては、年数を経た瓦であれば炭素膜を雨水などが流れることによってできた可能性はある。新しい瓦の場合は、運搬時や施工時に表面を擦ったことにより炭素膜の一部が剥がれ、光の加減で黒く見えている可能性がある。

かつては粘土を手でこねて焼いていたため、瓦の内部には空気を多く含み、水が浸透しやすかった。現在では製造技術が進歩し、機械による強いプレスがかかることが可能となり、瓦内部は密となったため、以前より水は溜まりにくくなったが、いったん凍結すると水分の逃げ道がなく、すぐに劣化してしまう可能性がある。また、いぶし瓦の場合、焼成するときに支えがつく「ちぎり」の部分は炭素膜が形成されず、他の部分に比べ吸水しやすい。



写真 2.4.3 和形いぶし瓦の製造工程



写真 2.4.4 陶器平板瓦（釉薬平板瓦）の製造工程

2.5 促進劣化試験における粘土瓦の劣化性状

長期にわたる瓦の耐久性や劣化性状を調べるために、実環境下での挙動をみる屋外曝露試験と環境負荷に相当するインパクトを短時間のサイクルで与える促進劣化試験が用いられている。ここでは、3種類の促進劣化試験における粘土瓦の劣化性状について述べる。

2.5.1 凍結融解試験（気中凍結水中融解法）

粘土瓦の耐凍害性試験については、JIS A 5208「粘土がわら」に試験方法が規定されている。水温 15～25℃の静水中で 24 時間以上吸水させた後、-20℃の空气中にこぼ立てして 8 時間以上静置し、次に 15～25℃の水中に 6 時間入れた後に観察する。この凍結・融解・観察を 1 サイクルとして、所定の回数を繰り返し、凍結融解によるひび割れ及び剥離の有無を調べるという方法である。同 JIS の解説には「凍害試験は、寒冷地で使用するかわらについて必要に応じて実施するもので、その繰り返し回数は使用場所などの条件を勘案して当事者間で協定した回数行う」とされている。

ここでは瓦の耐久性を確認するためではなく、凍結融解により生じる瓦の劣化性状を確認することを目的として、より短時間サイクルで凍結融解を繰り返す JIS A 1435「建築用外壁材料の耐凍害性試験方法（凍結融解法）」に準じた試験を行った。

(1) 試験方法

JIS A 1435「建築用外壁材料の耐凍害性試験方法（凍結融解法）」の気中凍結水中融解法に準じ、瓦試料を常温の水中で 24 時間吸水させた後、試験装置内にこぼ立てした。凍結過程は-20℃の空气中で 100 分、融解過程は+10℃の水中で 80 分とし、これを 1 サイクルとして定期的に外観のひび割れや剥離の観察を行った。

試験に用いた瓦は、いぶし瓦の平板瓦 2 体、棧瓦 1 体、熨斗瓦 1 体、釉薬瓦の平板瓦が 2 体の計 6 体である。瓦はいずれも全形のまま用いた。凍結融解試験装置内に置かれた瓦の様子を写真 2.5.1 に示す。なお、凍結融解試験開始時の吸水率は、いぶし瓦の平板瓦が平均 2.3%、棧瓦・熨斗瓦がともに 10.3%、釉薬瓦の平板瓦が平均 7.3%であった。

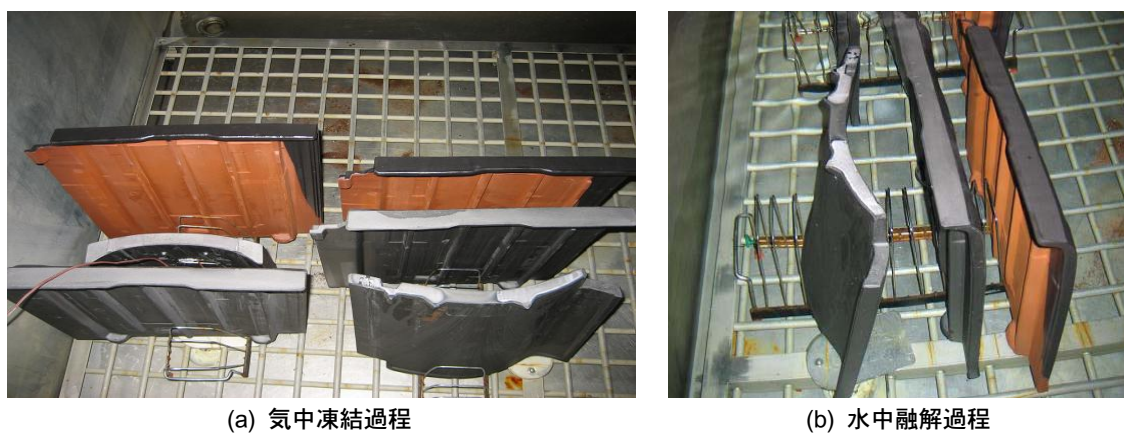


写真 2.5.1 凍結融解試験機内の瓦試料

(2) 観察結果と劣化性状

30 サイクル経過後の棧瓦、熨斗瓦の様子を写真 2.5.2 に示す。(a)の棧瓦は棧（表面から見て山になっている部分）の頭側にひびわれが生じ、そこから水が浸透している様子がわかる。浸透した水分は表面付近で凍結し、さらにひび割れを広げているが、大きく破断するような様子は見られなかった。(b)の熨斗瓦は全体的に大きなひび割れを生じているが、側面の一部でひび割れ部分から浸透した水分が凍結し、表面が持ち上がり剥離しかけている。吸水率の高い棧瓦と熨斗瓦の場合、凍結融解試験においては、このように表面にひび割れが生じ、水分が浸透、凍結することによりさらにひび割れを広げるという劣化性状を示すことが明らかとなった。実態調査で見られた表面がえぐられるような剥離や端部の欠けといった劣化は見られなかった。

平板瓦では、釉薬瓦の突起部分にひび割れが見られた他は、特に顕著な劣化は観察されなかった。本実験に用いた平板瓦は、棧瓦や熨斗瓦よりも高温（1,070℃）で焼成されたため焼き締まっており、吸水率が小さく強度も高いためだと考えられる。

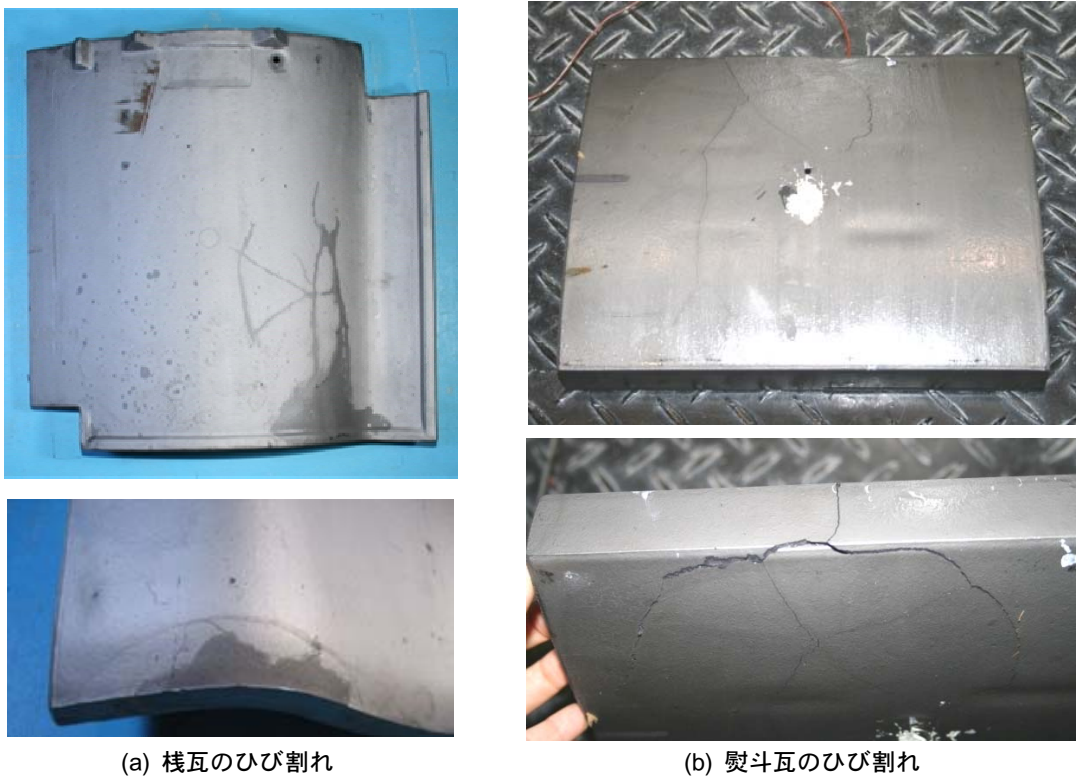


写真 2.5.2 凍結融解(30 サイクル)後の棧瓦と熨斗瓦

2.5.2 凍結融解試験（異なる水分条件を用いる方法）

前節で行った従来通りの気中水中試験方法では、実態調査で見られた剥離や欠けというような劣化性状を示さない。これは、試験体に十分吸水させてから試験を行うことから、凍結過程では試験体内部で多量の結氷が生じ、大きなひび割れとなって現れるためだと考えられる。そこで、本節では試験体への水分の供給条件を変えた試験を行い、それぞれの条件における劣化性状を観察する。

(1) 試験方法

試験体は前節で用いた熨斗瓦とする。1枚の熨斗瓦を3分割し、切断した側面はエポキシ樹脂接着剤とアルミ箔で断湿する。

試験装置は、RILEM（国際材料構造試験研究機関連合）CIF/CDF 試験法[2-28]に準拠した装置を用いる。試験体設置の様子を写真 2.5.3 に示す。試験体を設置したステンレス容器は不凍液に接しており、不凍液の温度を測定条件に合うよう制御する。測定条件は、最初に+20℃から4時間で-20℃まで降温させ、-20℃を3時間維持（凍結過程）した後、再び4時間かけて+20℃まで昇温させ、最後に+20℃のまま1時間維持（融解過程）する。この12時間を1サイクルとして、実験を行う。

水分供給条件は、①結露条件、②片面吸水条件、③吸湿・放湿なし条件の3つとした。実験の模式図を図 2.5.1 に示す。①は、ステンレス容器に入れた水に試験体が接しないよう浮かせて設置し、表面結露による水分供給を行う。試験槽の気密性が高いため、水面から蒸発する水分により融解過程での槽内の相対湿度はほぼ100%に近い値となる。槽内に設置された瓦は熱容量の影響により、融解過程で周囲の空気より温度上昇が遅れるため瓦の表面で結露が生じる。

②は、試験体の下面から約5mmの深さまで水に浸かるようにステンレス容器に水を張ったものである。①と②については、ステンレス容器のふたの有無による違いも確認する。ふたがある場合は、ふたの裏側で結露してできた水滴が試験体に落下するため、水分の供給量が若干多くなると考えたためである。③は、試験前に半日吸水させた試験体をラップフィルムで二重に包み、外部との水蒸気移動がないとしたものである。ステンレス容器には水を張らず、断熱材を介して試験体を容器底面から浮かせて設置している。③の条件ではふたがある場合で2体測定している。



写真 2.5.3 CIF/CDF 試験機内の瓦試料

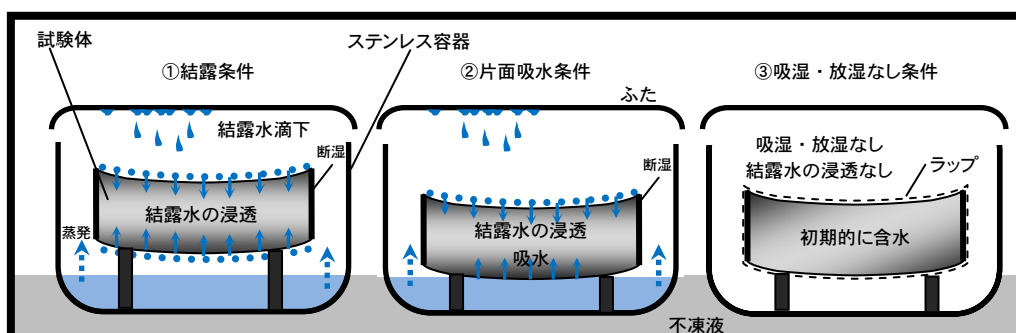


図 2.5.1 異なる水分供給条件

(2) 観察結果と劣化性状

各条件における各試験体の56サイクル後の試験体の様子を写真2.5.4に示す。

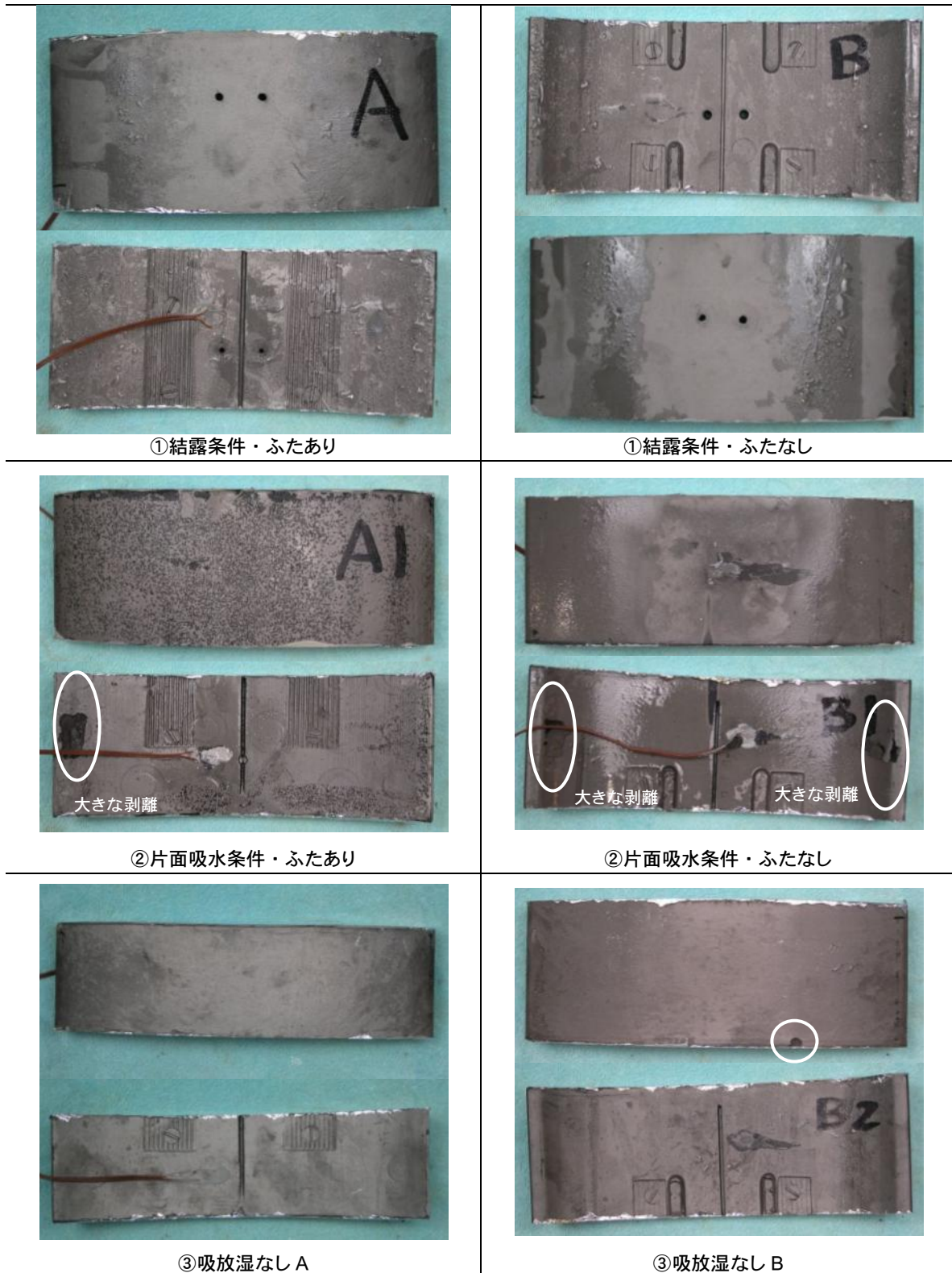


写真 2.5.4 水分供給条件を変えた凍結融解試験後の試験体

①の結露条件では、ふたあり・なしの両方とも 56 サイクル経過後には剥離等の劣化は見られなかったが、ふたありの方で 70 サイクル経過後に、片面吸水と同様の細かい剥離が生じ始め、90 サイクル経過後には写真 2.5.6 に示すように、上面に大きな剥離が見られた。ふたがある条件では、ふたに付着した結露水が滴下するため、ふたがない場合よりも上面からの水分供給量が多いと考えられる。このことにより、表面結露や結露水の落下程度の水分供給でも凍害による剥離が生じることが明らかとなった。

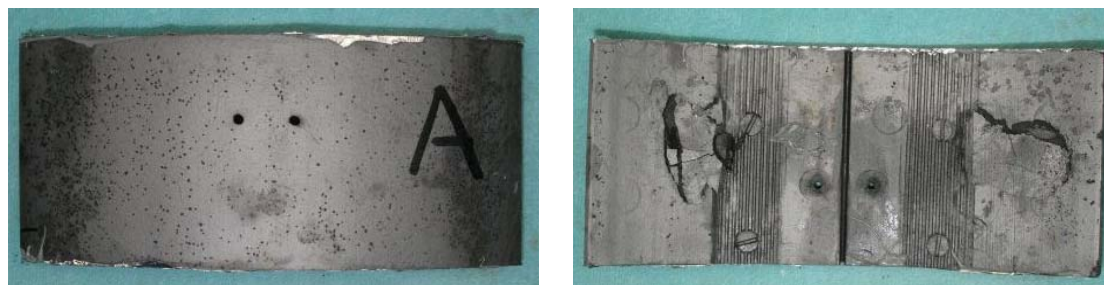


写真 2.5.6 ①結露条件・ふたあり 下面の細かい剥離（左）と上面の大きな剥離（右）

②の片面吸水条件・ふたありの場合では、16 サイクル経過後には吸水面の中央付近に、直径 1mm 程度の微細な剥離が観察され始めた。また、上面は端部近くに同様の細かい剥離が見られるとともに、写真 2.5.4 の白丸で示した部分に大きな剥離が見られた。56 サイクル経過後には、吸水面のほぼ全面にわたって細かい剥離が生じ、上面も端部付近を中心に剥離の数が増えている。

この細かい剥離部分を拡大したのが、写真 2.5.5 である。剥離した部分の近くにはひび割れが多数生じている。また、剥離した部分は炭素膜及び素地の表面付近だけが脆くなっており、内部まで劣化している様子は見られなかった。

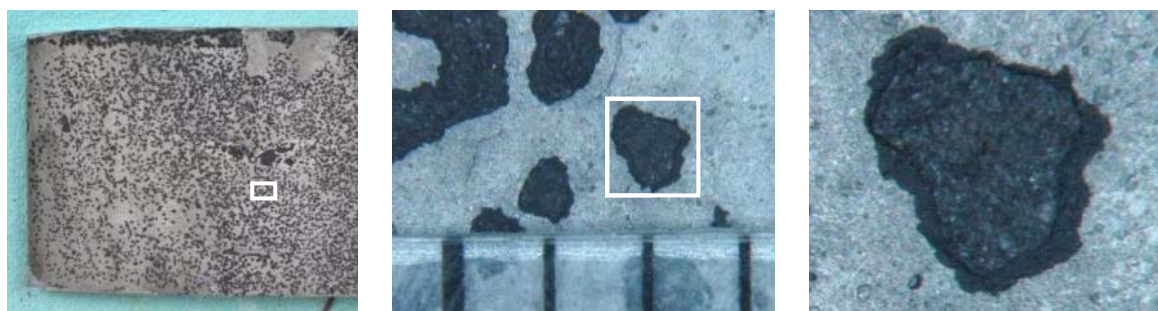


写真 2.5.5 ②片面吸水条件・ふたありの剥離部分を拡大した様子

②の片面吸水条件・ふたなしの場合は、56 サイクル終了後には上面の両端部で大きな剥離が生じている。この部分の直下は水面には触れていないため、特に含水しやすい部分ではないと考えられるが、製法上強度を出すことができず、破壊を受けやすい場所である可能性がある。

③の吸放湿なし条件では、56 サイクル時点で B の端部に小さな剥離が見られた他は、90 サイクル経過後も特に劣化している様子は観察されなかった。試験前の吸水時間が短く、温度が低下した時に結氷を生じるほどの水分が、試験体中に存在していなかったと考えられる。

①と②の条件ではいずれもふたがある方に表面の細かな剥離が見られたが、これらは同じ瓦を分割したものを使用しているため、特に劣化を受けやすいものであった可能性がある。いぶし瓦の炭素膜の表面には、劣化を受けていなくても写真 2.5.7 に示すようなひび割れが生じているものもあり、劣化の発生にはこのようなひびの有無や試験体内部の強度のばらつき等、様々な要因が相互に影響しあっていると考えられる。

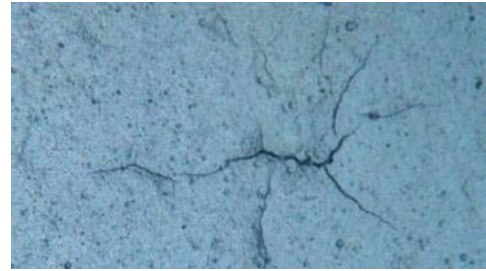


写真 2.5.7 いぶし瓦炭素膜のひび
(幅 0.03~0.07mm)

2.5.3 複合劣化試験

複合劣化試験とは、平成 14 年に北海道立北方建築総合研究所に新たに導入された試験装置によって行われる、実大壁の劣化促進試験である。試験体サイズが高さ 2.5m×幅 2.0m と大型であることと室内と室外を模した環境条件を与えられることから、材料単体ではなく工法としての評価が可能であることが特徴である。

複合劣化試験では、外装材料の劣化に関係する因子として、高温・降雨（散水）・低温環境が与えられる。温度変化と水分供給を繰り返し与えることで、熱による膨張収縮や凍結融解による劣化性状を把握することができる。しかし、温度や散水量、繰り返し回数等の実験条件と実際に瓦が用いられる環境要因との対応は明らかになっていない[2-29]。

凍結融解試験の場合は、融解時に試験体を水中に浸すため水分の供給量が多く、凍害に関しては厳しい試験条件といえる。複合劣化試験は散水により水分を供給するため、より実環境下での水分供給形態に近い。ここでは、複合劣化試験における劣化性状を確認するとともに、測定によって得られた温度データから凍結の可能性を検討する。

(1) 試験方法・条件

複合劣化試験装置は下部にターンテーブルを持つ中央の恒温恒湿室と、その三方にある高温室・低温室・降雨室から成る。試験体は恒温恒湿室の一面に取り付けられ、所定の時間ごとに高温→降雨→低温→常温という環境に曝される。これを 1 サイクルとする。

試験は条件を変更して 2 期に分けて行った。試験条件と複合劣化試験装置の平面図を図 2.5.2、図 2.5.3 に示す。

第 1 期試験は、短時間で多くのサイクル数を得るため、高温過程を 20 分、降雨室での散水過程を 10 分とした。低温過程は装置の性能上、空気温度が所定の温度まで低下するのに時間がかかるため、120 分とした。高温室の温度は日射が当たることを想定し、60℃とした。降雨室の散水量 4.0[L/min・m²]は、1 時間降水量で 240mm に相当する。これは、台風常襲地域である日本各地の最大降水量を考慮した建具の水密試験 (JIS A 1517[2-30]) の規定値に合わせたものである。降雨室と室内室には 10Pa 程度の圧力差をつけることが可能で、これは風力係数 C=0.8、地域別係数を K=1.0 とした場合、風速 4.5m に相当する[2-31]。低温室は、温暖地での凍結を想定し、瓦の表面温度が 0℃~ -5℃の間となるよう事前の予備実験から -15℃と設定した。中央の恒温恒湿室は、温度を 23℃、相対湿度は室内の水分発生を想定し、通常よりやや高い 65%とした。第 1 期試験は 40 サイクル行った。

第2期試験（図 2.5.3）は瓦に与える負荷をさらに大きくするため、高温過程を 70℃120 分、低温過程を -25℃120 分とし、温度による膨張・収縮の影響をさらに加えた。また、散水過程も 120 分とし多量の水分を瓦に供給するようにした。第2期試験は 32 サイクル行った。

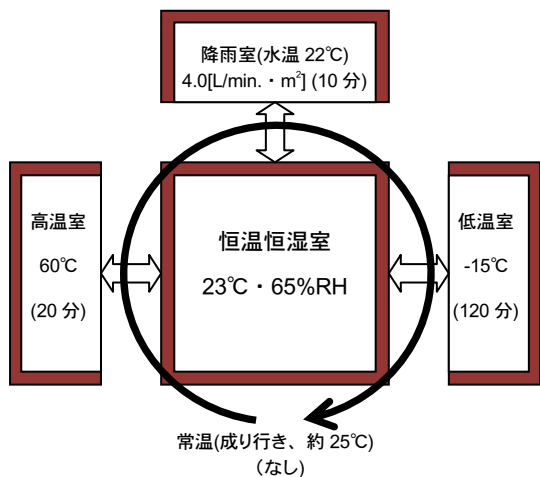


図 2.5.2 第1期試験条件

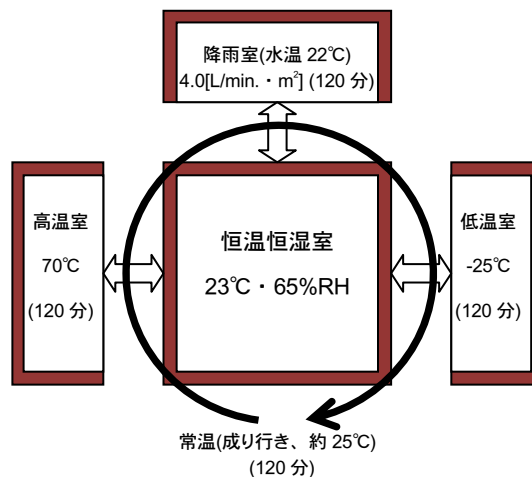


図 2.5.3 第2期試験条件

(2) 試験体と測定項目

写真 2.5.8 と図 2.5.4 に試験体の外観と温度測定点を示す。試験体として、中心に屋根を模した勾配（4寸）に葺いた棧瓦と万十軒瓦を設置した。また、その他のスペースには平板瓦と熨斗瓦を垂直につり下げて設置した。



写真 2.5.8 複合劣化試験体の外観

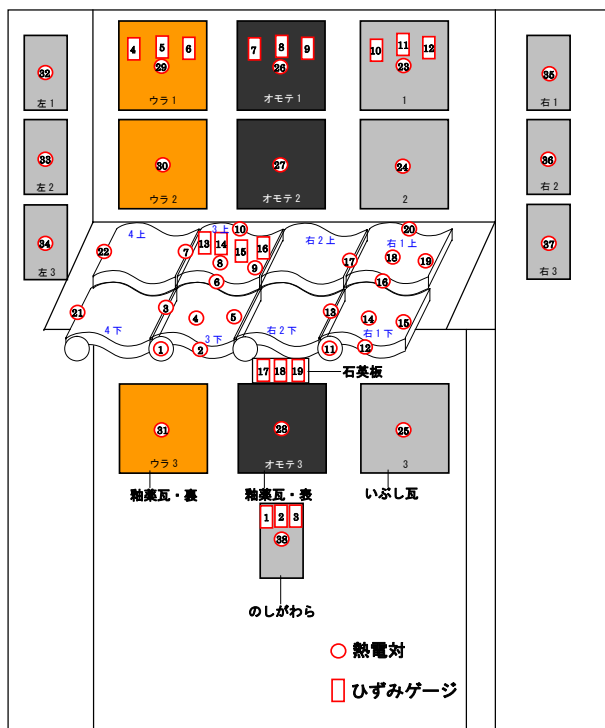


図 2.5.4 複合劣化試験体の温度測定点

測定項目は、瓦の表面及び周囲環境の温度、外観変化である。表面温度測定にはT型熱電対を用い、エポキシ系接着剤で瓦表面に接着した。外観観察では目視及び写真による記録を行い、劣化の性状を観察するとともに、水の流れ方や水滴の付着の様子に着目した。

(3) 温度測定結果

第1期試験における万十軒瓦各部の14～17サイクル目における温度変動を図2.5.5に示す。図の温度測定点の位置を写真2.5.9に示す。全体的に空気温度より遅れて温度が変化しているのは、瓦の熱容量のためである。この中で、1の万十と2の垂れでは比較的空气の温度変化に追従し、高温過程では表面温度が30℃以上まで上昇する。これらの部位は下地に接しないため、周囲の温度変化の影響を最も受けやすいといえる。

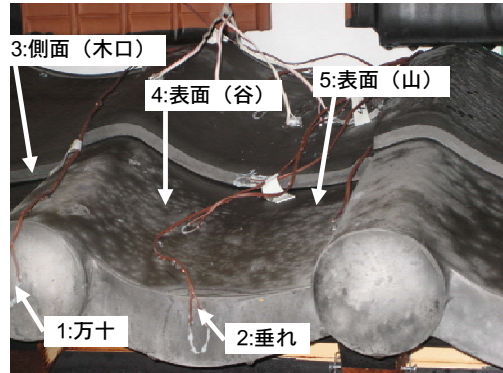


写真 2.5.9 万十軒瓦の表面温度測定位置

3,4,5は高温過程においても温度の上昇が遅く、20分間では20℃程度までしか上昇していない。これらの点では、低温(凍結)過程の途中までは空气の温度低下に追従して温度が低下するが、0℃付近で温度がほぼ一定となる時間が見られる。特に、3の側面(木口)ではその傾向が顕著である。これは、瓦に付着した水分が凍結することにより潜熱を発生し、温度低下を遅らせるためと考えられる。凍結する水量が多いほど温度が低下しにくいいため、3の側面には多くの水が付着し、次いで4の谷部に多いと推察される。水分が凍結し終ると、温度はさらに低下する。高温過程では、凍結した水分の融解に熱が使われるため、温度上昇が遅くなっている。1の万十部と2の垂れ部は水が流れ落ちやすい部位であるため、側面や谷部と比較し凍結する水量は少ない。

このように同じ1枚の瓦であっても、水分の付着程度に差があれば、大きな温度の違いが生じる可能性がある。

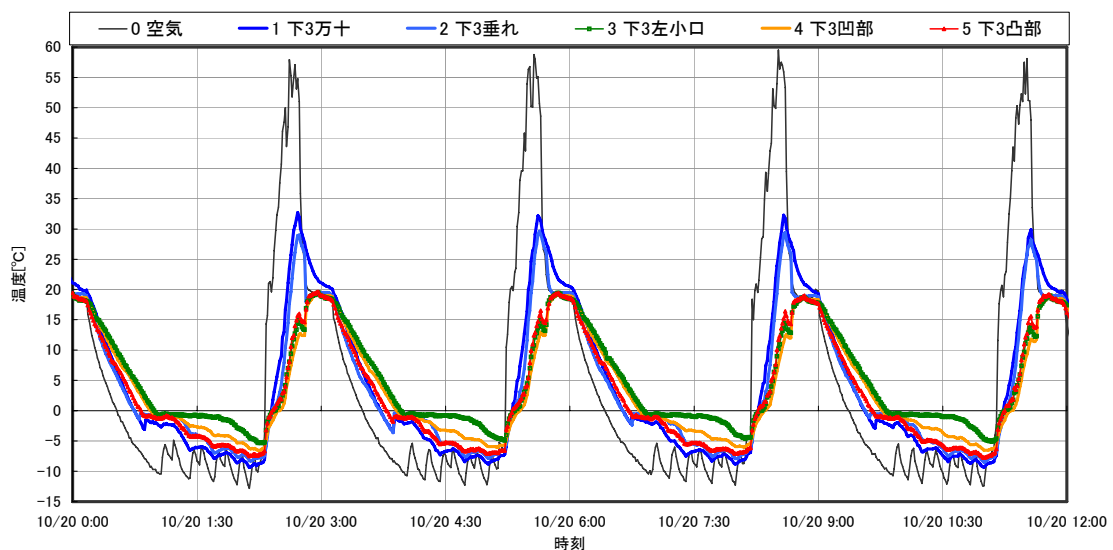


図 2.5.5 第1期試験 14～17サイクルの万十軒瓦表面温度変動

図 2.5.6 は 40 サイクル目の低温過程終了直後の試験体の熱画像、写真 2.5.10 はその時の試験体の様子である。写真から、瓦の表面に水滴及び氷がある部分が残っているのがわかる。このような部分は熱画像を見ると低温になっており、水分が蒸発し始めたところから温度が高くなっている。これを見ても、万十部や垂れ部は、木口（側面）や谷部と比べて温度が早く上昇し始めることが確認できる。

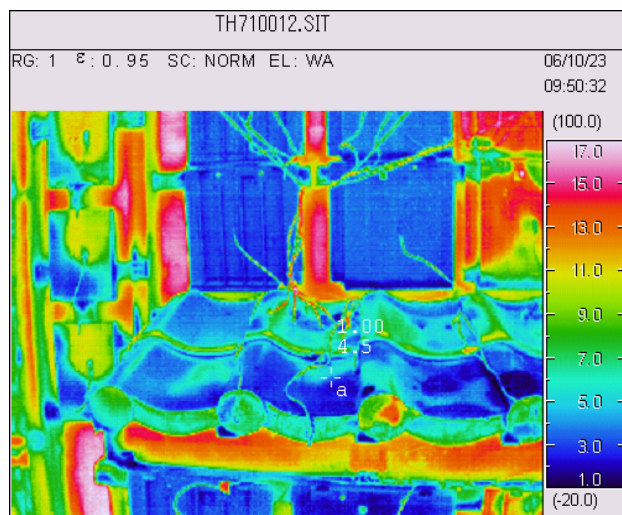


図 2.5.6 低温過程直後の試験体熱画像



写真 2.5.10 低温過程直後の試験体

(4) 外観観察結果

第 1 期試験では、試験体にひび割れや剥離といった劣化は観察されなかった。そこで、より条件の厳しい第 2 期試験を行ったところ、21 サイクルで万十部分にひびが入り始め、32 サイクルではひび割れた部分が浮き、最終的には欠けが生じた。劣化の様子を写真 2.5.11 に示す。

万十部分は表面温度から判断すると結氷量は他に比べ少ないが、一旦浸入した水分が内部で凍結すると、力学的に弱い部分のため割れが発生したものと考えられる。

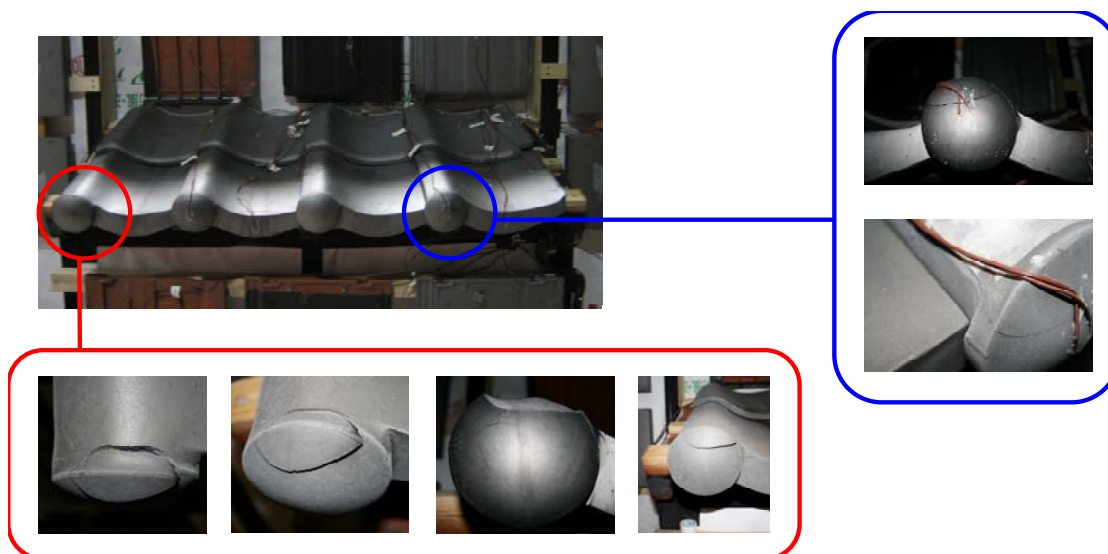


写真 2.5.11 万十軒瓦の欠け（32 サイクル目）

また、さらに約 30 サイクルを経過すると、写真 2.5.12 に示すように棧瓦の棧（山状）部分に大きなひび割れが生じ、剥離しているのが観察された。この部分では、ひび割れから水が浸入して内部で結氷を生じ、体積膨張による圧力で表面が持ち上がり剥離したと考えられる。このように表面に沿って剥離が生じるのは、2.2 節で述べた文献にも述べられている通り、瓦のラミネーション構造により弱い部分に劣化が生じるためだと考えられる。



(a) 棧瓦の表面のひび

(b) ひび拡大

(c) 剥離した部分

写真 2.5.12 棧瓦表面のひび割れと剥離

2.5.4 促進劣化試験における劣化性状のまとめ

従来から行われている気中凍結水中融解法による凍結融解試験においては、最初にひび割れが生じ、そのひび割れ部分から水が浸透し、内部の結氷量が増加して、剥離・剥落が生じることが確認できた。また、文献やヒアリングによる調査から得られた情報の通り、力学的に弱い部分で劣化が生じることがわかった。また、京都市における実態調査よりも凍結融解試験の方が劣化の程度が激しく、2.2 節で述べた凍結融解試験の問題点と同じ傾向が現れることが確認できた。

水分の供給条件を変えた凍結融解試験では、実際の劣化の状況に近い、表面の細かな剥離やえぐられたような形状の剥離など、従来の凍結融解試験では見られない劣化の様子が観察された。また、水分の供給条件によって、劣化の程度や劣化に要する時間が異なることも確認できた。

複合劣化試験においては、1 枚の瓦の中でも部位により温度や水分の付着の状況が異なることがわかった。温度は風の当たり方や下地の有無により変わり、水分の付着状況は瓦の形状によって変わる。瓦の凍結融解過程を詳細に検討する際には、瓦が施工される工法や接する空気、下地等の局所的な影響も考慮する必要がある。また、凍結・融解過程では潜熱が発生するため見かけ上の温度変化が 0 に近づくため、温度測定の結果から結氷量の多少はある程度推測できると考えられる。

本節では、3 つの異なる凍結融解の促進試験を行ったが、従来のように瓦全体を水中で融解・吸水させる方法よりも、部分的な吸水、結露水の滴下、降雨を模した噴霧等、一様ではない水分の与え方をの方が、より実際に近い形状での劣化が観察されることが示唆された。本論文では性状の確認にとどまっているが、瓦の耐凍害性を適切に評価する試験方法として、今後検討されるべき課題であるといえる。

2.6 瓦の劣化要因と課題の抽出

2.6.1 劣化性状の分類

瓦の劣化に関する文献調査、実地調査、ヒアリング及び劣化促進試験結果から得られた劣化の特徴について分類を行う。

表 2.6.1 に劣化の形態とその特徴、実地調査において発生が確認された主な瓦の種類や部位を示す。劣化性状としては、ひび割れ、剥離、欠けが多く見られ、剥離の程度が大きい表面剥落を生じているものもある。原因については、凍害によるものが最も多い。

汚れについて、スス状に黒くなっている場合には、いぶし瓦の燻化の際にうまく炭素膜が形成されなかったことに起因するものもあり、これは劣化ではない。焼成温度の高い粘土瓦は、日中の日射による程度の温度上昇では、ほとんど膨張はしない。

表 2.6.1 劣化性状による分類と主な発生部位

劣化性状	特徴	主な瓦種類・部位	主な原因
ひび割れ ・亀裂	<ul style="list-style-type: none"> ・瓦全体に及ぶ大きな亀裂や局所的なひび割れなど多数。 ・欠けや剥離が生じている部分の近くにはひび割れが見られる例が多い。 	各種瓦、瓦全体	凍害 積雪による害 冷め割れ（注6）
表面剥離	<ul style="list-style-type: none"> ・主として瓦の表側で生じ、薄片鱗状に剥離。 	棧瓦の凸状部分	凍害、塩害
表面剥落	<ul style="list-style-type: none"> ・面状部では面に並行な方向に層状に剥落。 ・えぐられるような剥離形態を示す場合もある。 ・裏面でも生じる。 ・仕上げ層があるものは、仕上げ層を含む材料の剥落により素地が露出する。 	軒瓦の小巴部、垂れの下端部 紐丸瓦の紐部分 棧瓦の凸状部分	凍害
欠け	<ul style="list-style-type: none"> ・複雑な形状をした部分の端部で欠けが生じている場合が多い。 ・表面剥離よりも大きく、側面で生じやすい。 	棧瓦の端部 軒瓦の小巴・万十部 軒瓦の垂れ	凍害
割れ	<ul style="list-style-type: none"> ・積雪の凍結と重みにより瓦に曲げモーメントのような力が生じ、大きな破壊が生じる。 	軒瓦、棧瓦	凍害、積雪
汚れ ・変色	<ul style="list-style-type: none"> ・雨やほこりによる摩耗により表面が変色する。 ・降雨時の水道となる部分には跡が残り、長い年月をかけて表面を汚損する。 	棧瓦の表面	摩耗
溶解	<ul style="list-style-type: none"> ・模様が溶けるようになくなる。 ・沿岸部では特に多く見られるが、海のない地域でも見られる。 	軒瓦の垂れ部分 瓦の巴部分 鬼瓦	塩害
釉薬の 亀裂・剥離	<ul style="list-style-type: none"> ・釉薬瓦の釉薬層に亀裂が入り、表面がうすく狭い範囲で剥離する。 	釉薬層	凍害

2.6.2 劣化要因の推定

(1) 強度要因

- ・ 粘土瓦は材料中にラミネーションや粒子の配向などによる強度の異方性があるため、組織体内で氷の発生に伴う圧力が生じれば、強度的に最も弱い方向(加圧成形方向と直角方向)に最初に亀裂が入る。

(2) 原料・製法要因

- ・ 瓦は採取した原料土により耐凍害性が左右される。雌土（めんつち）を使用した瓦は、焼成温度を高くすることができないため、吸水率が比較的高く、凍害を生じやすい。
- ・ 型押しで作るものは、土がきちんと充填されず強度が低下する可能性がある。
- ・ 瓦の製造工程の中でプレスをする段階で、土がきちんと充填されない、あるいは形状が複雑で強い圧力をかけられない部位は強度が低下しやすい。
- ・ 粘土に木片などの不純物が入った状態で焼成すると強度が大きく低下する。
- ・ 瓦を窯に入れて焼成する時に倒れないように支える金具が接する部分は、焼成後に跡が残り「ちぎり（ちぎれ）」と呼ばれる。窯への置き方によって、様々な部位にちぎりの跡が見られる。いぶし瓦の場合、「ちぎり」の部分は炭素膜が形成されず、他の部分に比べ吸水しやすい。
- ・ 製造上の問題で完全に焼結しないものは、吸水率が大きくなる傾向がある。
- ・ 従来は焼成前の土練・プレスにおいて高い圧力をかけられず、瓦内部に空気を多く含んでいたため透水性が高かったが、機械で土練・プレスするようになり瓦の内部が密となり、低い透水性を示すようになった。
- ・ 原料となる粘土の耐火度により焼成温度が決まり、粘土の組成や特徴によって透水性が変わる。
- ・ 素地と釉薬層の熱膨張係数が異なる場合がある。

(3) 環境・工法要因

- ・ 降雨等で水が流れた時に水切れが悪く湿った状態が続くと藻が生じ、それが水分の蓄積を加速させる。
葺き土を用いた場合、瓦の裏面に回りこんだ水分は土に吸収されるが乾燥しにくいいため、土が保持できる以上の水分が供給された場合は瓦も高含水状態となることが推察される。
- ・ 方位の違いにより日射の当たり方が異なると水分蒸発量も異なるため、表面の藻の生育状況などに影響を与える。ただし、勾配の緩い屋根であれば方位の影響はそれほど受けない。
- ・ 屋根が二重にかかるなど、直接雨がかりにならない部位では、水と放射冷却の両方の影響を受けにくいいためか、劣化が進行しにくい。
- ・ 周囲に樹木が多い場所や風通しの悪い場所では、空気の絶対湿度が高く、瓦に湿気が吸収されやすい。降雨による水分浸透も含め、このような場所では瓦内部に蓄積した水分は蒸発しにくくなるため、全体に苔むした様相を呈する場合がある。また、瓦のそばに葉の多い樹木があると、棧瓦の隙間に葉（特に松葉）が入り込み、水を誘引する。
- ・ 降雨時のように一時的に多量の水分が供給される場合は、瓦の谷部分に水道（みずみち）

ができて流れて落ちるが、表面結露した場合はより広範囲にわたって水滴が付着すると考えられるため、瓦表面全体に藻類や植物が繁殖している事例は結露による水分付着の可能性が高い。

(4) 地域の気象条件の影響

- ・ 冬季の外気温が、日中は0°C以上、夜間は0°C近辺に低下するような地域の中で、特に積雪が少ない地域では、凍結・融解による劣化を生じやすい。
- ・ 冬季の外気温が0°Cをはさんで上下する地域でも積雪量が多い地域では屋根上に積もった雪が断熱層となり、屋根の表面温度が下がりにくいため、内部で凍結が生じることによる破損は生じにくい。屋根に積もった雪は日中に一部が解け雪を湿らせ、積雪の下層部が氷結し、瓦へ局部的な力を与え破壊に至らせる場合がある。
- ・ 冬季の外気温が常時0°Cを下回るような寒冷地では、凍結・融解の繰り返しによる応力を受けないが、初冬期や融雪期は融雪水を吸水し、表面温度も0°Cをはさんで大きく変化するため、凍害を生じる危険性が高い。

2.6.3 検討課題の抽出

前節までに述べた瓦の劣化性状と要因から、次章以降で検討すべき課題の抽出を行った。瓦の劣化の原因としては凍結・融解によるものが最も多いことから、凍結・融解過程における瓦内部の水分性状、結氷の量と位置について、物性と環境の両面から検討を行い、調査結果の妥当性を確認する。なお、本研究においては力学的な解析までは行わない。検討課題を図2.6.1に示す。

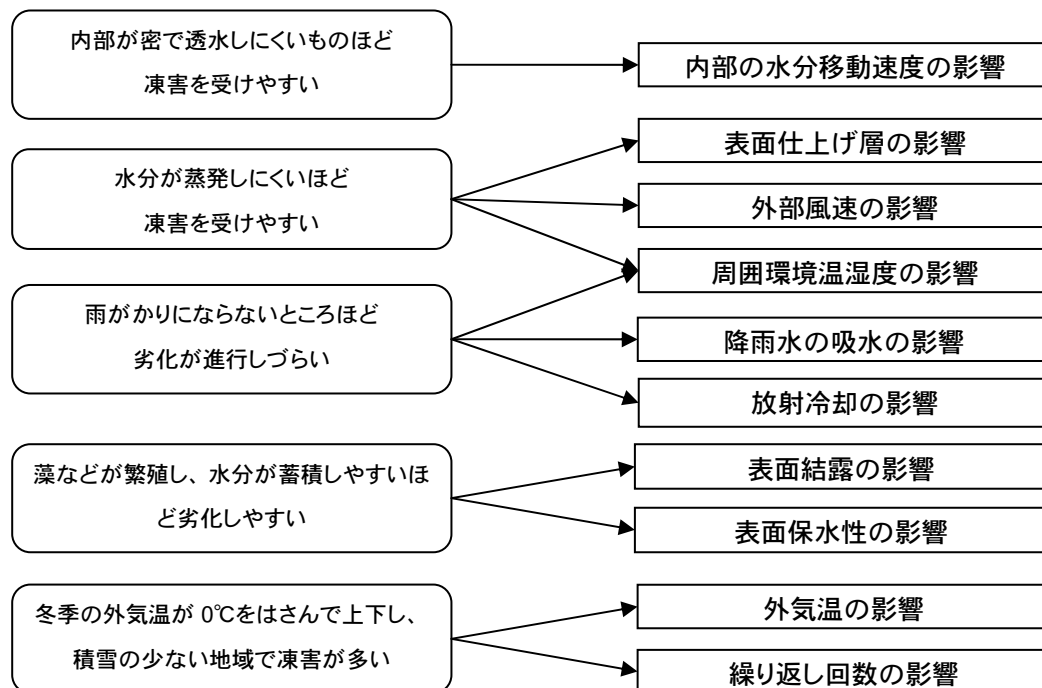


図 2.6.1 検討課題の抽出

2.7 第2章のまとめ

本章では、文献調査、実地調査、ヒアリング調査から瓦の劣化性状と要因についての情報を整理し、促進劣化試験により凍結・融解を生じた場合の性状を確認した。

文献調査によると、原料土や焼成後の材料物性と凍害試験の結果については、数多くの研究がなされ、知見が得られている。一方で試験室における実験と実際の環境下では劣化性状が異なることが指摘されており、本研究においても京都市内での実態調査と凍結融解試験を行い、その差異を示した。

また、調査結果から次章以降で検討すべき課題を抽出した。

注釈

(注1) 坏土

陶磁器を作る素地土のこと。

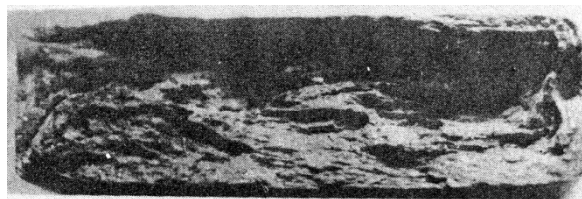
(注2) 見かけ気孔率

試料の容積に対する（見かけ上の）開気孔の容積の割合。JIS A 1509-3「陶磁器質タイル試験方法—第3部：吸水率、見掛け気孔率及びかさ密度の測定方法」によると、試料を真空あるいは煮沸により吸水させて得られた質量を m_b 、吸水した試料の水中質量を m_w 、乾燥質量を m_d とすると、見掛け気孔率 $P[\%]$ は下式で表される。

$$P = \frac{m_b - m_d}{m_b - m_w} \times 100$$

(注3) ラミネーション

瓦素地を、機械を用いて練る際に一方回転にともなううねり波層



ラミネーションをもつ瓦の例（参考文献[2-8]より抜粋・真空土練後の試験体断面）

(注4) JIS A 5208-1996 粘土がわら 5.5 凍害試験

(1) 試験体を水温 15～25℃の清水中に 24 時間以上浸し、吸水させてから取り出し、手早く試験体を湿布でふき、直ちに -20±3℃の冷気中に試験体同士が接触しないようにこぼ立てし、8 時間以上静置する。

(2) 次に、これを再び水温 15～25℃の水中に 6 時間以上入れた後、取り出して湿布でふき、試験体のひび割れ及びはく離の有無を観察する。

(3) 凍結融解及び観察の操作を 1 回とし、所定の回数繰り返し*、凍結融解によるひび割れ及び

はく離の有無を調べる。

*繰り返しの回数は、当事者間の協議による。

(注5) 貫入

素地よりも釉薬層の熱膨張が大きい場合に、焼成後の冷却時に釉薬層に入るひび・亀裂のこと。

(注6) 冷め割れ

瓦素地を焼成した後、冷却する過程において、焼成窯内部での気流の当たり方の違いや瓦の形状の影響で、瓦の周縁部と中心部などで温度低下速度が異なり、瓦内部で熱応力が生じ、亀裂や破損を生じる現象。

第2章 参考文献

- [2-1] 坪井利弘：日本の瓦屋根（第25版）、理工学社、2003.12
- [2-2] 坪井利弘：これだけは知っておきたい 建築家のための瓦の知識、鹿島出版会、1988.5
- [2-3] (財)建材試験センター：建築材料等の耐久性に関する標準化のための調査研究総括報告書、1991.2.13
- [2-4] 素木洋一：焼結セラミック詳論2 建築用セラミック材料、技報堂出版、1973
- [2-5] 五十嵐安雄：屋根瓦の凍害とその防止策、舞鶴工業高等専門学校紀要、第5号、pp.1-17、1970.3
- [2-6] 大田緑：本邦粘土瓦の耐寒性について、窯業協会誌、72号[1]、pp.1-7、1964
- [2-7] 中原理栄、近藤祥人、橋塚豊、瀬嶋昌代：粘土瓦の耐寒性に及ぼす配合土の粒度組成の影響について、昭和63年度香川県工業技術センター業務年報、pp.33-38、1988
- [2-8] 近藤祥人、岩崎賢一、橋塚豊：粘土瓦の凍結融解メカニズムに関する研究、昭和52年度香川県工業技術センター業務年報、pp.42-56、1977
- [2-9] 島村修、田中愛造、星幸二：粘土瓦用原料組成と耐寒性に関する研究、愛知県常滑窯業技術センター報告、第7号、pp.9-11、1979
- [2-10] 永柳辰一、福永均、田中愛造、伊藤征幸：寒冷地向け粘土瓦について、愛知県常滑窯業技術センター報告、第8号、pp.69-73、1982
- [2-11] 山本隆一、加藤晶司、西村幸雄、内藤隆三：焼成粘土製品の耐寒性（第2報）素地の吸水量および真空土練機使用の影響、名古屋工業技術試験所報告、Vol.12、No.10、pp.511-516、1963
- [2-12] 石飛裕、永島晴夫、長野和秀、若槻和郎、大西亜城：石州瓦の耐寒性に関する研究－粘土瓦の凍害発生機構－、島根県立工業技術センター研究報告書、第16号、1979
- [2-13] 中村雅彦、奥田進：一次元および三次元冷却法によるセラミックスの凍害現象の比較、窯業協会誌、84号[7]、pp.325-332、1976
- [2-14] 中村雅彦、奥田進：一次元冷却下でのセラミックスの凍害におよぼす粒子配向の影響、窯業協会誌、84号[8]、pp.372-376、1976
- [2-15] 中村雅彦、都賀谷紀宏、奥田進：多孔性セラミックスの一次元冷却条件下での耐凍害性におよぼす気孔径分布の影響、窯業協会誌、85号[11]、pp.549-554、1977
- [2-16] 山本紀一、福永均、伊藤征幸、森川泰年：耐凍害性の評価法に関する一考察、愛知県常滑窯業技術センター報告、第10号、pp.49-54、1984

- [2-17] 中村雅彦、浜明德、松本晋一、奥田進、Peter P. Hudec：粘土瓦の凍害性の間接評価、窯業協会誌、94号[11]、pp.1149-1156、1986
- [2-18] 田中稔：粘土瓦ハンドブック、技報堂出版、1980
- [2-19] 日本建築学会：勾配屋根の材料・構法・性能、丸善、1999
- [2-20] 故宮博物院文保科技部 古建部：古代建築瑠璃構件剥釉機理内在因素研究、故宮博物院印刊、No.139、pp. 115-129、2008
- [2-21] 故宮博物院文保科技部 古建部：清代剥釉瑠璃瓦件施釉重燒的再研究、故宮博物院印刊、No.140、pp. 106-124、2008
- [2-22] 大野昌彦、浅井邦雄、山本紀一：いぶし瓦の塩害、愛知県常滑窯業センター報告 第24号、pp. 53-54、1997
- [2-23] 山本紀一、松下福三、中村雅光：釉薬瓦の透水試験法、愛知県常滑窯業技術センター報告 第13号、pp. 19-25、1986
- [2-24] 井上容實：建物の汚れの原因と対策シート、彰国社、1999
- [2-25] W.M.ダーリー：基礎微生物学9 藻類の生理生態学、培風館、1987
- [2-26] 宮内真紀子、銚井修一、宇野朋子、小椋大輔：高温多湿気候下における遺跡への藻類による影響、日本建築学会環境系論文集、No.623、pp.9-15、2008.1
- [2-27] 鎌田英治：気泡コンクリートの凍害劣化の現象、日本建築学会環境工学委員会 熱環境運営委員会第21回熱シンポジウム、1991.8
- [2-28] M. J. Setzer, P. Heine, S. Kasparek, S. Palecki, R. Auberg, V. Feldrappe, E. Siebel : Final Recommendation of RILEM TC 176-IDC 'Internal Damage of Concrete due to frost action' Test methods of frost resistance of concrete: CIF-Test: Capillary suction, internal damage and freeze thaw test) - Reference method and alternative methods A and B, 2004
- [2-29] 伊庭千恵美、鈴木大隆、廣田誠一、福島明、吉野利幸：複合劣化試験装置を用いた建築外皮の耐久性評価手法の開発：その1 装置を用いた試験における課題の整理と基礎検討、日本建築学会北海道支部研究報告集、No.76、pp.189-192、2003.6
- [2-30] 日本規格協会：JIS A 1517 建具の水密性試験方法、1996.3
- [2-31] 日本規格協会：JIS A 1516 建具の気密性試験方法、1998.8

第3章 瓦の材料特性に関する検討

3.1 はじめに

屋根の最も重要な機能は防水である。瓦を用いた屋根は瓦層と下葺き層の2層から成り、瓦層では表面仕上げの透水抵抗と形状や重なり幅による雨仕舞により、雨水の透過を防止する。下葺き層は、瓦層での雨水処理能力を上回る降雨が生じた時や、設計時に予期しない瓦の変形や挙動により生じた隙間からの浸水が生じた時に、野地板を濡らすことなく排水を行う役割を担うが、降雨の度に下葺き材で雨水を処理するような場合には、瓦を緊結する材料や緊結具まわりの野地板の腐朽、浸透水の凍結による瓦の凍害などが生ずる恐れがあり、十分な防雨性をもっているとはいえない[3-1]。したがって、屋根材には水分によって材質に変化がなく、吸水率が小さく透水しないことが求められる[3-2]。

山本ら[3-3]は粘土瓦の品質向上の一環として、釉薬瓦の施釉品と無釉品について、JIS A 5403「石綿スレート」[3-4](1995年廃止)を参考にした変水位試験とJIS A 1218「土の透水試験方法」[3-5]を参考にした定水位の2通りの方法で透水試験を行った。変水位試験は裏面の水滴の有無と濡れを観察するという定性的な方法であるため透水性の小さな釉薬瓦には適用しにくいこと、定水位試験法は水頭を一定に保ち試験体を通過した水の流量から透水率を求めるものであるが、施釉品の場合は水頭と流量が比例関係、直線関係にならないことなどを指摘している。釉薬部の貫入の大きさや深さ、その割合などが複雑に影響するとして、表面仕上げ層の水分移動特性を把握する困難さについて述べているが、水分蓄積に及ぼす仕上げ層の影響までは言及していない。

本章は粘土瓦の材料特性を把握することを目的としている。3.2節では測定対象材料の基本物性の測定を行い、3.3節では、低湿域から高湿域にわたる水分保持性能と空隙率の測定を行う。3.4節では、仕上げ層を含めた水蒸気、液水両方に対する水分移動特性の測定を行う。

3.2 測定試料の基本物性

3.2.1 測定試料の概要

本章の測定には兵庫県淡路で産出された粘土を1,070℃で焼成した瓦を用いた。瓦の種類はいぶし瓦と釉薬瓦の2種類とし、形状はいずれも平板瓦とした。また、吸水率のみ棧瓦と熨斗瓦について測定を行った（棧瓦と熨斗瓦の焼成温度は1,000～1,030℃）。試験体を写真3.2.1に示す。

いぶし瓦は焼成過程の最終段階で還元反応を生じさせ、表面全面に厚さ約10μmの薄い炭素の被膜を設けた瓦であり、釉薬瓦は素地の外側表面に釉薬を塗って焼成し、ガラス質の防水層を設

けたものである[3-6]。

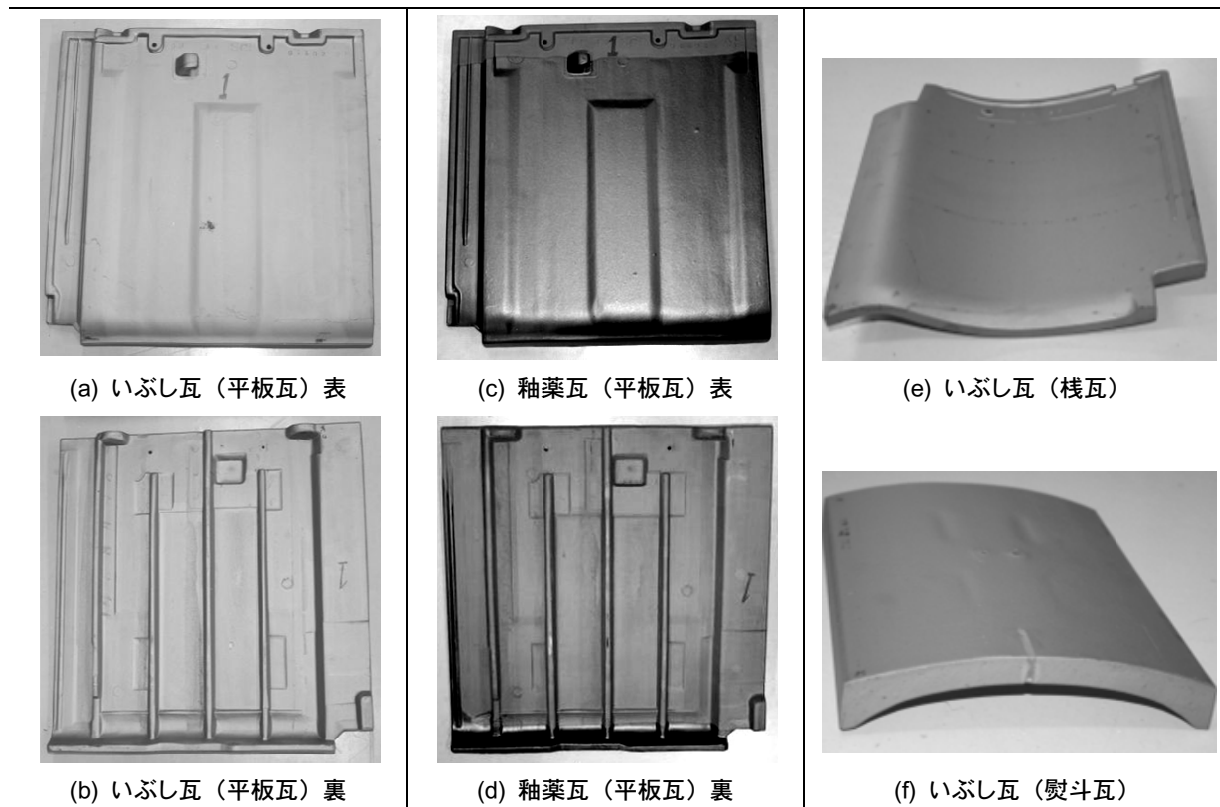


写真 3.2.1 棧瓦と熨斗瓦の外観

3.2.2 乾燥密度

(1) 試料

試料はいぶし瓦、釉薬瓦の2種類で、いずれも仕上げ層部分をのぞいた素地のみの部分とした。試料のサイズは約77mm角で、厚さは約12mmである。試料を写真3.2.2に示す。

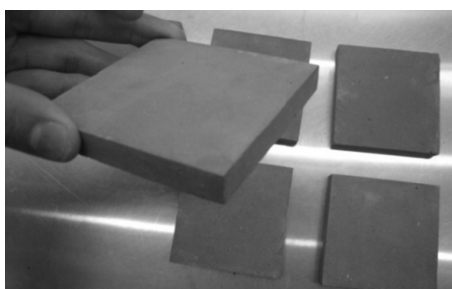


写真 3.2.2 密度測定用試料（素地のみ）

(2) 測定方法

試料は、温度を100℃に設定した乾燥機の中で24時間乾燥させた後、乾燥質量 m_d [kg]を測定する。その後、試料の縦・横長さ（試料の四隅の厚さ平均）をノギスで計測後、体積 V [m³]を算出する。乾燥密度 ρ_d [kg/m³]は式(3.2.1)を用いて算出される。いぶし・釉薬とも計8体ずつを

測定し、平均値を求めた。

$$\rho_d = \frac{m_d}{V \times 1000} \quad (3.2.1)$$

(3) 測定結果

測定結果を表 3.2.1 に示す。いぶし瓦の平均値は 1970 [kg/m³] (標準偏差 29 [kg/m³])、釉薬瓦の平均値は 2018 [kg/m³] (標準偏差 17 [kg/m³]) であった。

表 3.2.1 乾燥密度測定結果 (単位: kg/m³)

試料 No.	1	2	3	4	5	6	7	8
いぶし瓦	1990	1952	1964	1998	1947	2018	1952	1936
いぶし瓦平均値	1970							
釉薬瓦	2024	1997	2040	2020	1993	2012	2028	2032
釉薬瓦平均値	2018							

3.2.3 吸水率 (24 時間・48 時間)

(1) 試料

試験体はいぶし瓦と釉薬瓦の平板形で、全形 (製品姿) のまま用いる。また、吸水率測定では焼成温度の異なるいぶし瓦の棧瓦と熨斗瓦の測定も行っている (写真 3.2.1)。

(2) 測定方法

粘土瓦の製品規格である JIS A 5208-1996 「粘土がわら」 [3-7] に示されている吸水試験方法に準拠し、瓦の吸水率の測定及び吸水性状の把握を行う。

最初に瓦試料を空気乾燥機に入れ、110℃で 24 時間以上乾燥させた後 (写真 3.2.3)、乾燥後質量 m_1 [g] を測定する。JIS では室温 (20~25℃) の静水中に 24 時間以上静置することとなっているため、ここでは 24 時間と 48 時間の 2 通りの測定を行っている。この時、瓦の上端が水面下約 10cm のところにくるように木端立てして静置する (写真 3.2.4)。



写真 3.2.3 乾燥機内で試料を乾燥



写真 3.2.4 瓦を水中に静置

水から取り出した後表面の水滴を湿布で拭き取り、吸水後質量 m_2 [g]を測定する。式(3.2.2)により質量吸水率 A_w [%]を求める。

$$A_w = \frac{m_2 - m_1}{m_1} \times 100 \quad (3.2.2)$$

(3) 測定結果

測定結果の一覧を表 3.2.2 に示す。今回測定に用いた平板瓦は 1070°C以上の高温で焼成したものであり、吸水率はいぶし瓦、釉薬瓦とも JIS に規定されている値（釉薬瓦：12 [wt.%]以下、いぶし瓦 15 [wt.%]以下）を大きく下回った。また、釉薬瓦は 24 時間と 48 時間ではほぼ同じ値となったが、いぶし瓦では 24 時間吸水率を測定した 2 枚の瓦で 1.5%以上の差が見られた。24 時間と 48 時間では、ほぼ同じ値となるものもあったため、個体差があると言える。この原因については次節で確認する。熨斗瓦と棧瓦は平板瓦よりも低温で焼成されたこと、表面に明らかに炭素膜が形成されていない部分（「ちぎり」という焼成時に支えが接する部分；2.4 参照）があったことから、平板瓦の吸水率を大きく上回った。

表 3.2.2 吸水率測定結果

	瓦質量[g]				吸水量 [g]	質量吸水率 [wt.%]
	乾燥前	乾燥後	24 時間吸水後	48 時間吸水後		
いぶし瓦・平板 1	3856	3854.65	4012	—	157.35	4.08
いぶし瓦・平板 2	3864	3863.25	3956	—	92.75	2.40
いぶし瓦・平板 3	3891	※	—	4049	158	4.06
釉薬瓦・平板 1	3888	3887.17	4180	—	292.83	7.53
釉薬瓦・平板 2	3904	3903.28	4208	—	304.72	7.81
釉薬瓦・平板 3	3896	※	—	4183	287	7.37
釉薬瓦・平板 4	3903	※	—	4189	286	7.33
いぶし瓦・熨斗瓦	2280	※	—	2515	235	10.32
いぶし瓦・棧瓦	3019	※	—	3330	311	10.30

※乾燥前後で重量がほとんど変わらなかったため、乾燥機で乾燥をさせず、気乾状態で乾燥質量を測定した。

(4) 吸水率測定時の水分分布

いぶし瓦の平板瓦は吸水率が規格値を大きく下回っていることと、試験体によるばらつきがあることから、24 時間吸水後の試験体を切断し、内部の水分分布を調べた。写真 3.2.5 に切断した瓦の各部の質量含水率を示す。また、内部の様子を写真 3.2.7 に示す。写真に示されるように 24 時間吸水後の瓦内部には水分が浸透している部分としていない部分があり、飽和での吸水率とはいえない。これは、いぶし瓦表面の炭素膜が水分の浸入を妨げるためと考えられる。また、瓦の頭側（屋根施工時に下側になる部分）の含水率が高いという分布が見られた。

一方、釉薬瓦は試験体間のばらつきが小さく、24 時間後と 48 時間後での吸水率がほとんど変

わらないという結果が得られた。写真 3.2.6 に割断した釉薬瓦の各部の質量含水率を、写真 3.2.8 に内部の様子を示す。釉薬瓦は部分によらずほぼ一様に吸水していることがわかる。これは釉薬層のない部分から水分が素早く浸透したためだと考えられ、24 時間でほぼ飽和に達しているものと考えられる。

以上のように、仕上げ層の透水抵抗や仕上げが施されている部分により、同じ吸水時間であっても内部の含水状況が異なるため、JIS 規格における吸水率は材料素地の吸水率を指すのではなく、表面仕上げの影響も加味した吸水率となっているといえる。

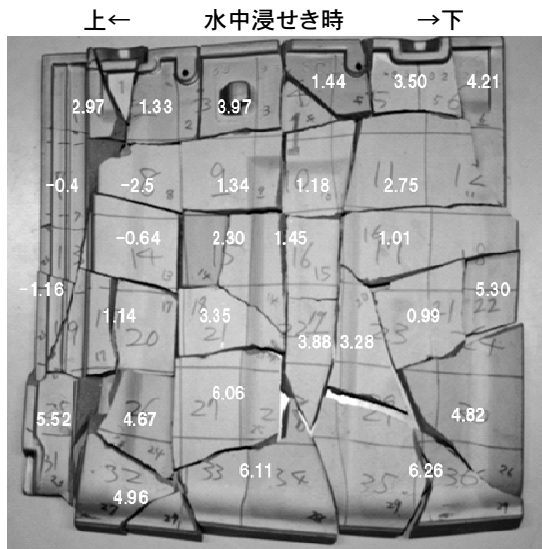


写真 3.2.5 いぶし瓦・平板1の質量含水率分布 (24 時間吸水後)

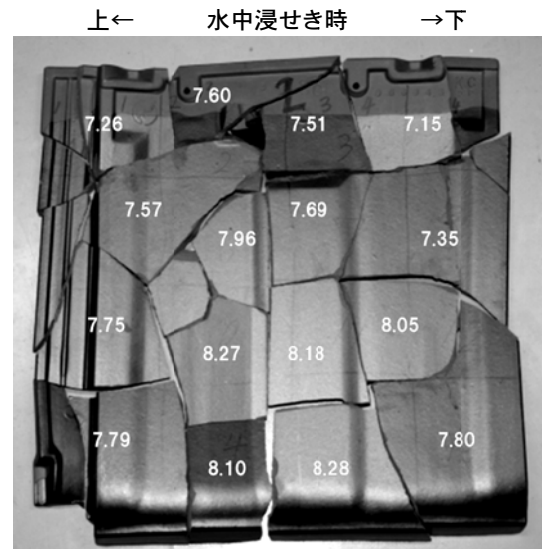


写真 3.2.6 釉薬瓦・平板1の質量含水率分布 (24 時間吸水後)



(a)



(b)



(c)

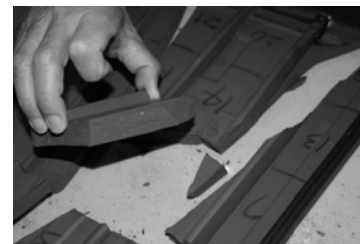
写真 3.2.7 いぶし瓦内部の水分分布 (24 時間吸水後)



(a)



(b)



(c)

写真 3.2.8 釉薬瓦内部の水分分布 (24 時間吸水後)

3.2.4 細孔径分布

(1) 試料

測定試料はいぶし瓦・釉薬瓦の2種類で、仕上げ層のない部分を $4\text{mm} \times 4\text{mm} \times 10\text{mm}$ のサイズに切断したものである。いぶし瓦、釉薬瓦をそれぞれ2体用いる。試料は測定前に脱気処理し、吸着異物を取り除いておく。

(2) 測定方法

水銀圧入法[3-8]によって、試料内の累積気孔体積を求める。水銀圧入法は、水銀の表面張力が大きく、気孔を含む固体試料と接しても水銀が気孔に入りづらいことを利用し、外部から圧力をかけることによって気孔に水分を圧入し、圧力と水銀の浸入量の関係を求める測定法である。気孔の形状を直径 d [m] の円筒と仮定し、水銀の表面張力を γ_{ag} [N/m]、水銀と試料との接触角を θ_{ag} [°] とすると、気孔が水銀を排出しようとする力は $-\pi d \gamma_{ag} (\cos \theta_{ag})$ [N] となる (図 3.2.1)。一方、水銀に圧力 P [Pa] をかけると、気孔断面に加わる力は $\pi d^2 P / 4$ [N] となり、平衡状態では式(3.2.3)が成立する。

$$-\pi d \gamma_{ag} (\cos \theta_{ag}) = \pi d^2 P / 4 \quad (3.2.3)$$

したがって、圧力 P と気孔径 d の関係は次の Washburn 式で表される。

$$d = -4 \gamma_{ag} (\cos \theta_{ag}) / P \quad (3.2.4)$$

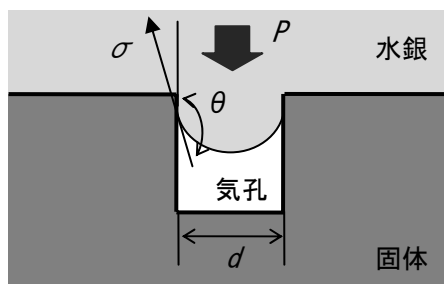


図 3.2.1 固体内気孔への水銀圧入の模式図

水銀圧入量は気孔の体積に相当するため、圧力を変化させながら水銀の圧入量を測定することで、累積気孔体積を求めることができる。ここでは、水銀の接触角を 140° 、水銀の表面張力を 0.4821 [N/m] として細孔径を算出した。

(3) 測定結果

図 3.2.2 は、横軸に細孔直径を、縦軸に累加細孔体積をとったものである。加圧過程において圧力が低い時は径の大きな細孔から満たされるため、径の小さい方に向かって細孔体積が累積される。この結果から、いぶし瓦・釉薬瓦による違いはあまりなく、いずれも直径 $1 \sim 3$ [μm] 程度の細

孔が非常に多く、全細孔容積の約7割を占めることがわかる。

図に示したように、水銀圧入法では加圧過程と減圧過程での曲線が一致しないことが多く、圧力を0としても細孔内に水銀が残っていることを示している。これは、ボトルネック形細孔がある場合や、水銀の前進接触角（細孔に入る時）と後退接触角（細孔から出る時）で違うこと、細孔構造が弱い時に圧力によって破壊されることなどに原因があると考えられている[3-9]。

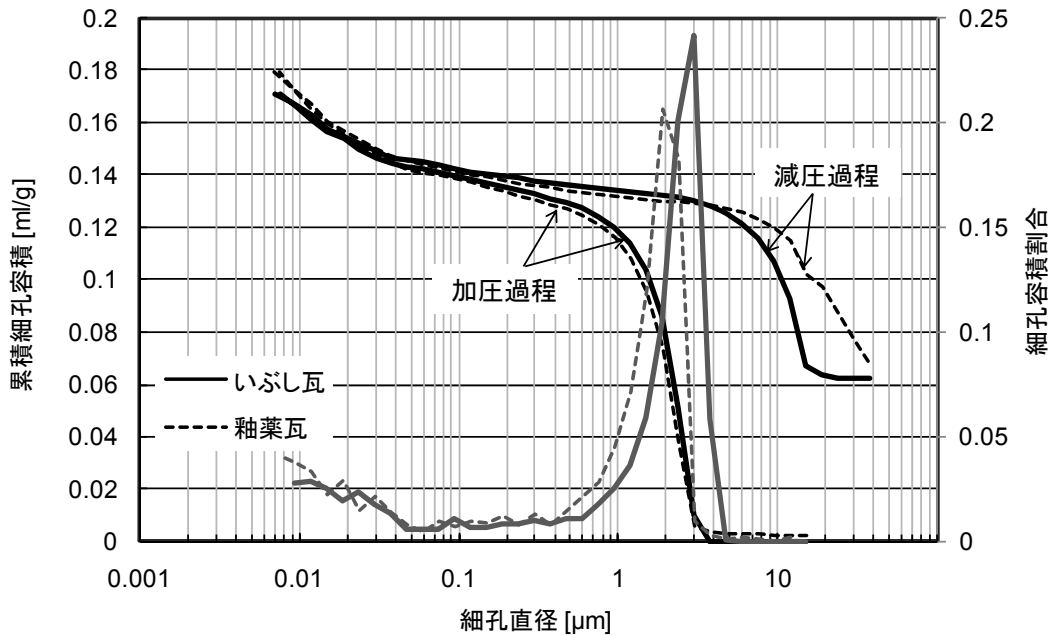


図 3.2.2 細孔直径と累積気孔体積、細孔容積の割合

細孔内での水蒸気吸着に関しては、相対湿度 ϕ に対応する半径 r [m] 以下の全ての毛管に凝縮が生じるが、 r_k より大きな半径の毛管内には全く凝縮が生じないとする毛管凝縮説があり、細孔を円筒形と仮定した以下の Kelvin 式が成立するとされている[3-10]。

$$r_k = \frac{-2V_M \sigma_w \cos \theta_w}{R_v T \ln(\phi)} \quad (3.2.5)$$

これに対し、Wheeler と Shull は、 r_k よりも大きな半径の毛管内では、相対湿度 ϕ に対応する厚さの多分子層吸着が生じるとする多分子層-毛管凝縮説を提案している。細孔を全て円筒形と仮定し、吸着層の厚さを t_a [m] とすると、Kelvin 式に従う半径は、細孔半径と吸着層厚さの差となる。桂[3-11]は毛管凝縮が起きていない円筒細孔内の吸着平衡の関係から、吸着層厚さを次式のように表している。

$$t_a = \frac{-V_M \sigma_w}{R_v T \ln(\phi)} \quad (3.2.6)$$

水の接触角 θ_w を 0、細孔半径を r [m]、相対湿度 ϕ に対応する水分化学ポテンシャルを μ_ϕ [J/kg] とすると、細孔半径は式(3.2.7)で表される。

$$r = r_k + t_a = \frac{-2V_M \sigma_w \cos \theta}{R_v T \ln(\phi)} + \frac{-V_M \sigma_w}{R_v T \ln(\phi)} = \frac{-3V_M \sigma_w}{\mu_\phi} \quad (3.2.7)$$

一方、材料内部の凍結・融解過程を考えると、多孔質材料内部の水は細孔の径に応じた毛管力を受け、細孔径に依存した凝固点降下現象が生じる。詳細は5.2.3節で述べるが、結氷温度 T_{fr} と水分化学ポテンシャル μ_{fr} の間には式(3.2.8)が成立する。

$$\mu_{fr} = H_{li} \ln \left(\frac{T_{fr}}{T_0} \right) \quad (3.2.8)$$

式(3.2.7)と式(3.2.8)において、 $\mu_\phi = \mu_{fr}$ とおくと、細孔半径に応じた結氷温度が求められる。図3.2.3は、細孔直径に応じた結氷温度と細孔の容積割合を示したものである。本測定で対象とした瓦は直径1.5~3.5 μm 程度の気孔が多いため、約-0.1~-0.25 $^{\circ}\text{C}$ で結氷を生じる気孔が多いと言える。

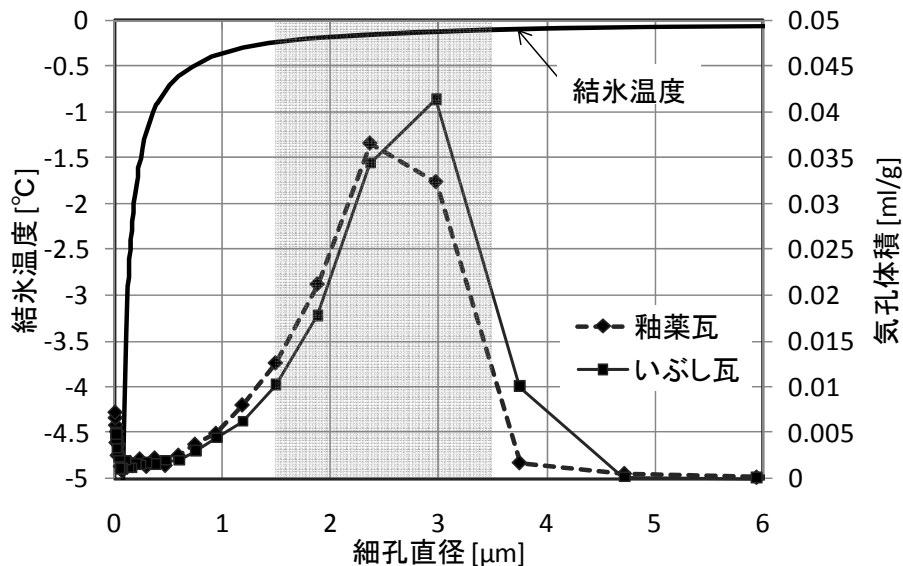


図 3.2.3 細孔直径と結氷温度

3.3 水分保持性能の測定

3.3.1 平衡含水率

(1) 試料

いぶし瓦と釉薬瓦を対象とする。試料は材料固有の多孔性や毛細管構造を維持する程度の大きさや形態であることと、測定精度の関係上少なくとも10g以上とするのが望ましい[3-12]ことから、仕上げ層のない瓦を10~12g程度に破碎し、試料とした(写真3.3.1)。試料数はいぶし瓦・釉薬瓦共に吸湿用・放湿用それぞれ15個ずつとした。

試料は表面を洗浄した後、105 $^{\circ}\text{C}$ に設定した乾燥機に入れ、質量が一定になるまで乾燥させた(写真3.3.2)。この時の質量を測定し、乾燥質量とする。



写真 3.3.1 測定試料



写真 3.3.2 試料の乾燥

(2) 測定方法

測定方法はデシケータ法[3-12]を用いた。乾燥状態および湿潤状態の試料を様々な相対湿度一定の空間に放置し、それぞれの相対湿度における平衡含水率を測定する。

相対湿度の設定を表 3.3.1 に示す。相対湿度一定の空間を作るために、5つのデシケータにそれぞれ $MgCl_2$ 、 $NaCl$ 、 KCl 、 Na_2CO_3 、 K_2SO_4 の飽和溶液を入れて密閉した(写真 3.3.3)。これらの相対湿度を選択したのは、文献[3-13]から、同じ焼成材料であるレンガは 90%以上の高湿度域で平衡含水率の変化率が著しく大きくなることから、できるだけ高湿度域での平衡含水率を測定するためである。デシケータ内の温湿度はそれぞれ表に示す温湿度計測器を用いて計測した。測定環境の温湿度は $20^{\circ}C \cdot 60\%$ に設定した。

表 3.3.1 相対湿度の設定

設定相対湿度[%]	33	75	86	92	96
飽和溶液	$MgCl_2$	$NaCl$	KCl	Na_2CO_3	K_2SO_4
温湿度計測器	ロガー付小型温湿度計 (TR-72U)			高速絶対湿度計 (RHM-1000)	
測定精度	温度 $\pm 0.3^{\circ}C$ 、相対湿度 $\pm 5\%RH$			温度 $\pm 0.2^{\circ}C$ 、絶対湿度 $\pm 1g/m^3$	
測定インターバル	10分			5分	



写真 3.3.3 湿度調整用デシケータ

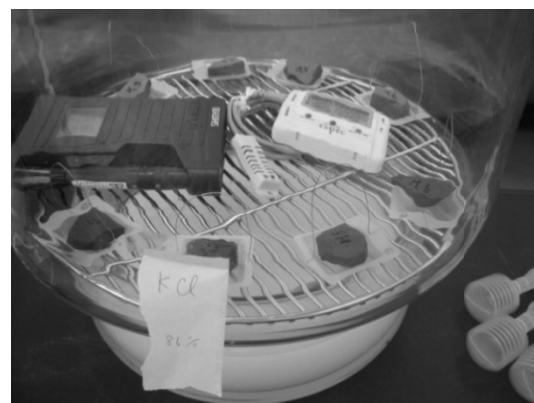


写真 3.3.4 デシケータ内への試料の設置

吸湿と放湿の測定は分けて行う。それぞれのデシケータの中に、いぶし瓦・釉薬瓦の試料を2個ずつ入れる。質量を量る際に試料に触れないようにするため、それぞれの試料は、プラスチック製の小さな皿にのせてデシケータに入れる（写真3.3.4）。測定試料の質量を定期的に測定し、3回の継続した質量測定値の変化が総質量の0.1%未満になれば、平衡状態に達したと見なし、その時の質量を求めた。

(3) 平衡含水率の算出方法

各試料に対して、乾燥状態の質量と平衡時の質量から、質量含水率 u [kg/kg] と容積基準含水率 ψ [m³/m³] をそれぞれ式(3.3.1)、式(3.3.2) を用いて計算し、吸湿時及び放湿時の平衡含水率曲線を求める。水の密度 ρ_w は文献[3-14]から、20°Cにおける値 998.2[kg/m³] を用いる。また、3.2.1 で述べた密度測定結果から、いぶし瓦の密度を 2007.7 [kg/m³]、釉薬瓦の密度を 2010.0 [kg/m³] とする。なお、試料の乾燥質量は、後述する3回乾燥後の値を用いて計算を行う。

$$u = \frac{m - m_0}{m_0} \quad (3.3.1)$$

$$\psi = \frac{m - m_0}{\rho_w V} = u \frac{\rho_m}{\rho_w} \quad (3.3.2)$$

(4) 測定結果

図3.3.1に、いぶし瓦、釉薬瓦の吸放湿両過程の平衡含水率曲線を示す。含水率は各相対湿度で測定した2体の平均値で示している。

いぶし瓦の方が釉薬瓦よりもわずかに高い含水率を示しているが、相対湿度96%においてもいぶし瓦の質量含水率は0.0015 [kg/kg]程度であり、非常に小さい値であることがわかる。

放湿過程では、相対湿度が高い領域では釉薬瓦といぶし瓦が同程度であり、相対湿度が低い領域では釉薬瓦の方がわずかに高い値をとる。この結果から、いぶし瓦では吸放湿の履歴がほとんどなく、釉薬瓦では履歴の影響があることがわかる。

(5) 測定上の留意点

吸湿過程の平衡含水率測定においては、最初に測定した乾燥質量を用いて平衡含水率曲線を求めたところ、吸湿過程の含水率が放湿過程の含水率を上回る結果が得られた。平衡含水率曲線において履歴が存在する場合は、放湿過程の含水率が吸湿過程の含水率を上回るのが通常であり[3-9]、そのような結果が得られることは考えにくい。

そこで、全試料について再度乾燥を行い、質量測定を行った。試料はデシケータに入れられる前に再度乾燥させていたため、測定前の最初の乾燥を含めると試料は3回乾燥されたこととなる。最初の乾燥質量と3回乾燥後の質量を比較すると、すべての試料において、3回乾燥後の方が0.001～0.003g程度質量が増加することがわかった。瓦が乾燥を繰り返すことにより質量が増加する原因については、試料内での酸化反応などが考えられるが、これについては調査中である。

平衡含水率測定においては、測定前後での乾燥質量の変化の有無を確認することが重要といえる。

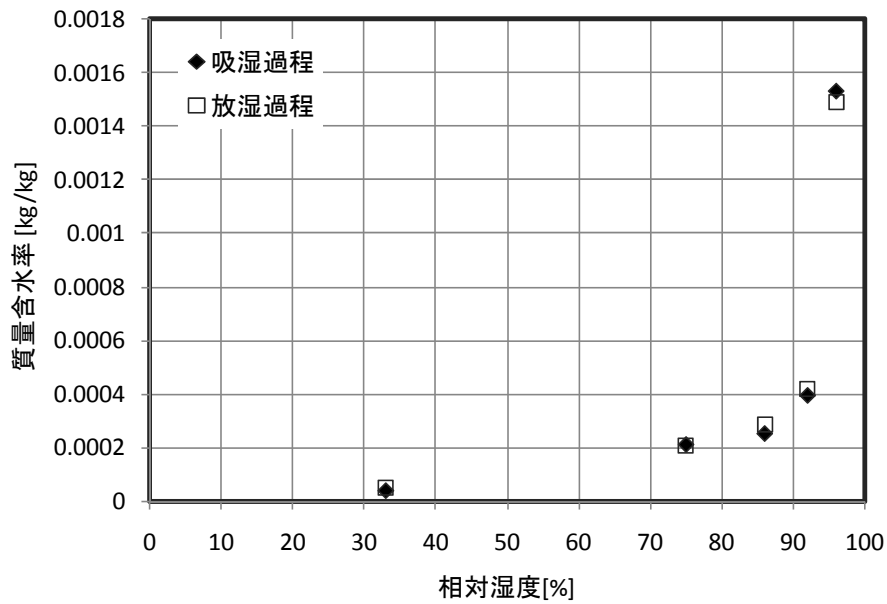


図 3.3.1 質量含水率で表した平衡含水率曲線（いぶし瓦）

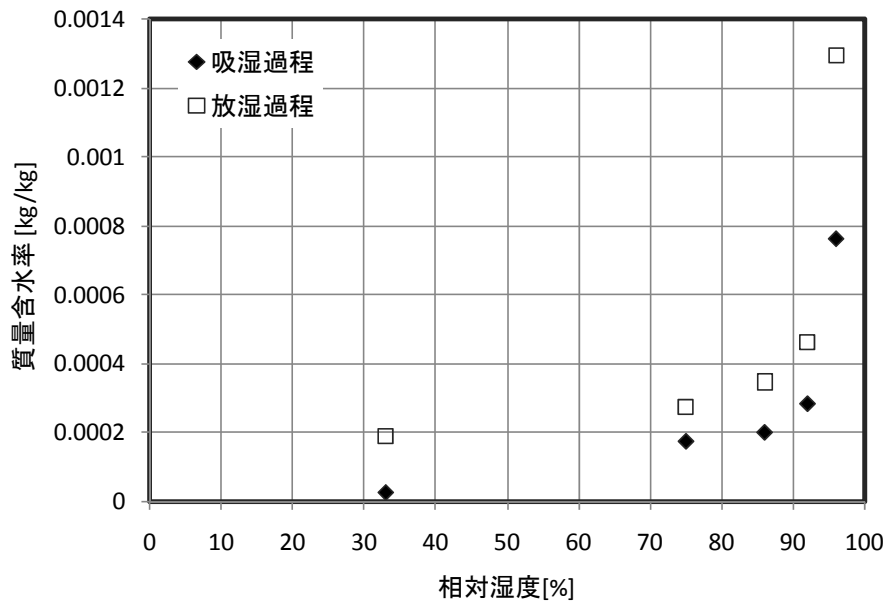


図 3.3.2 質量含水率で表した平衡含水率曲線（釉薬瓦）

3.3.2 水分特性値（pF 値）

(1) 測定概要

前節の最後に述べたように、瓦の平衡含水率は飽和に近い領域で急激に増加する。本節では土壌の pF 値測定装置を用いて、相対湿度 99~100%に相当する高湿度域における粘土瓦の平衡含水率測定を行う。土壌の pF 値とは、土中の化学ポテンシャルの低下量（吸引圧力に相当する）を水柱高さ[cm]で表し、その常用対数値をとったものである[3-15]。

(2) 試料

試料は透水係数測定で用いた素地のみのもを用いた。いぶし瓦2体、釉薬瓦1体を対象とする。側面断湿などの措置は行っていない。

(3) 測定方法

本測定に用いた装置は本来、土壌の pF 値を加圧板法により測定するものである。加圧板法は試料に任意の正水圧を加えて水圧の低い自由水側に脱水させる方法である[3-16]。装置の模式図を図 3.3.4 に示す。

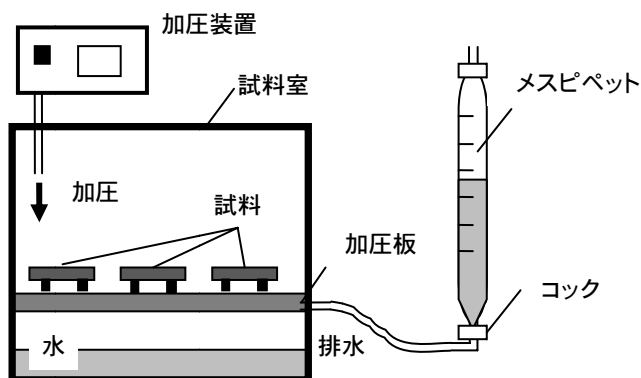


図 3.3.4 加圧板法による pF 値測定の模式図

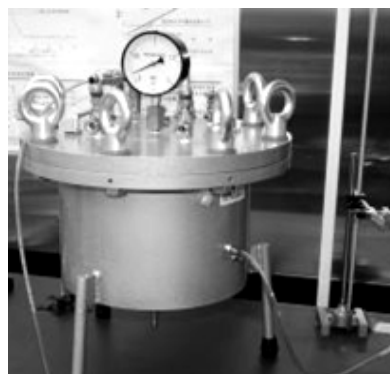


写真 3.3.7 試料室外観

試料は最初に真空デシケータ内で吸水させ、飽和状態にしておく。また、試料に接する加圧板（セラミック板）もあらかじめ飽和させておく。密封した試料室に圧力 P_1 [Pa]（大気圧以上に変化させる）を加え、試料水分と加圧板を境にして大気圧 P_0 [Pa] に平衡した自由水とを接続させる。この P_1 と P_0 の圧力差によって試料内の水分は P_0 側に移動し、加圧板から流出する。試料中の水分は吸引圧が P_1 に対応する状態で平衡に達すると、加圧板からの水分流出が停止する。この時の質量を測定し、乾燥質量との差から平衡含水率を求める。

本測定においては、加圧板からの水分流出量を把握するため、加圧板から出ているチューブにメスピペットを接続したが、同時に排出された空気が接続チューブから抜けなため、正確な流出水分量は測定できなかった。

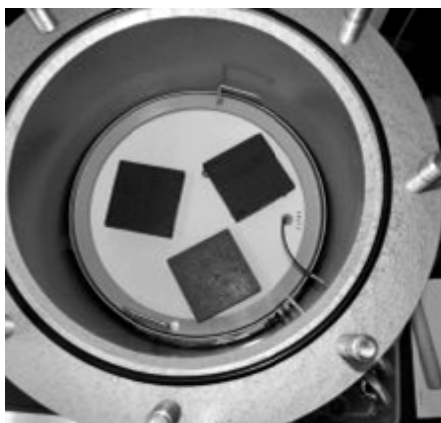


写真 3.3.8 試料室内の試料

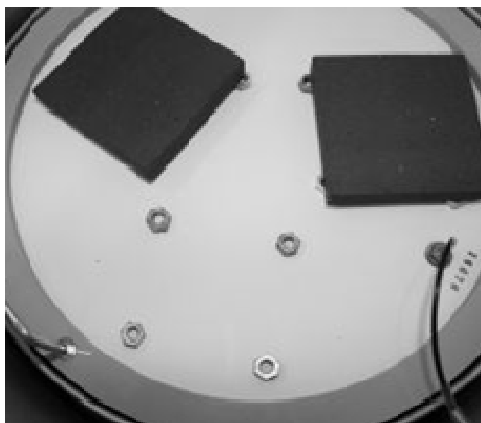


写真 3.3.9 試料を浮かせるナット

質量測定時には試料室のふたを開け、試料を取り出す必要があるが、その時試料室が減圧されるため、メスピペット側から水分が戻ることがあり、正確な質量が測定できない可能性がある。このため、減圧時にメスピペット側から水分が戻らないように、減圧時にはメスピペット下側のコックを閉めることと、試料を加圧板から浮かせて設置することで、測定方法の改善を図った。その様子を写真 3.3.9 に示す。

測定時の周囲環境の温湿度は 20°C・50% に設定した。

(4) pF 値と平衡含水率の関係

pF 値は吸引圧 P_s' [cmH₂O] の常用対数をとったものであり、式(3.3.3)で表される。

吸引圧 P_s [Pa] と自由水基準の水分化学ポテンシャル μ [J/kg] は、水の測定温度における密度を ρ_w [kg/m³] とし、式(3.3.4)で表される。また、水分化学ポテンシャル μ と相対湿度 ϕ の関係は、式(3.3.5)のようになるため、相対湿度と含水率の関係が求められる。ここでは加える圧力を 3 段階に変化させ、測定を行った。測定結果を表 3.3.2 に示す。

$$pF = \log_{10}(P_s') \quad (3.3.3)$$

$$\mu = -\frac{P_s}{\rho_w} = -\frac{98.0642P_s'}{\rho_w} \quad (3.3.4)$$

$$\phi = \exp\left(\frac{\mu}{R_v T}\right) \quad (3.3.5)$$

(5) 測定結果

いぶし瓦 2 体の平均値と釉薬瓦の測定結果を表 3.3.2 にあわせて示す。ここで測定した相対湿度が 99.88% 以上の領域においては、飽和時とほぼ変わらない含水率となることがわかった。

図 3.3.5 に、相対湿度 95% 以上の高湿域での平衡含水率関係を示す。前節の平衡含水率測定で得られた相対湿度 96% の時の含水率（吸湿過程）を併せて示した。これらの結果から、相対湿度 96% から 99.88% の間において急激に平衡含水率が変化することがわかる。

表 3.3.2 測定条件と結果

pF 設定値	吸引圧 P_s' [cmH ₂ O]	吸引圧 P_s [Pa]	水分化学ポテンシャル [J/kg]	相対湿度 [%]	いぶし瓦		釉薬瓦	
					質量含水率 [kg/kg]	容積基準含水率 [m ³ /m ³]	質量含水率 [kg/kg]	容積基準含水率 [m ³ /m ³]
飽和	0	0	0	100	0.1312	0.2585	0.1180	0.2381
2.0	100.0	9806.4	-9.8	99.99276	0.1285	0.2531	0.1154	0.2329
3.0	1000.0	98064.2	-98.2	99.92747	0.1273	0.2508	0.1144	0.2309
3.2	1584.9	155421.9	-155.7	99.88502	0.1221	0.2405	0.1119	0.2258

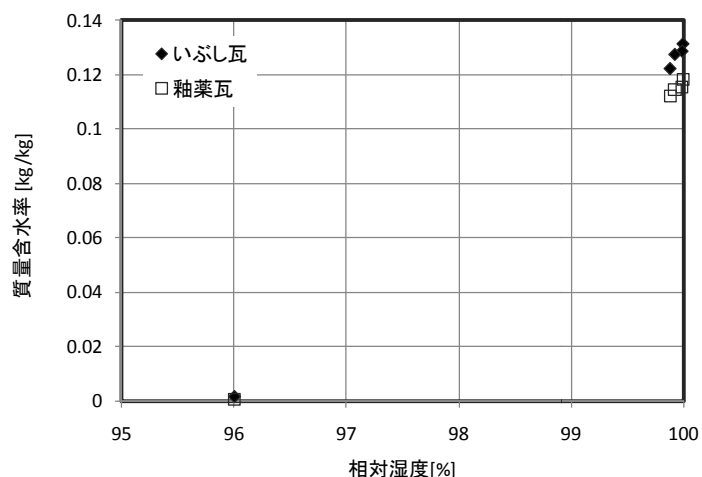


図 3.3.5 高湿域の平衡含水率

3.4 仕上げ層を含めた水分移動特性の検討

3.4.1 透湿係数・透湿抵抗

(1) 試料

試料は、いぶし瓦と釉薬瓦の平板瓦を 270mm×270mm に切断したものである。裏面の突起部分は削り取っている。仕上げ層有無の影響をみるため、いぶし瓦・釉薬瓦共に片面仕上げありの場合と両面仕上げなしの2種類で測定を行った。なお、仕上げなしとした場合は、釉薬層についてはグラインダーで研磨し、いぶし層については紙ヤスリで研磨し、素地同等と見なした。釉薬瓦試験体の外観を写真 3.4.1 に示す。

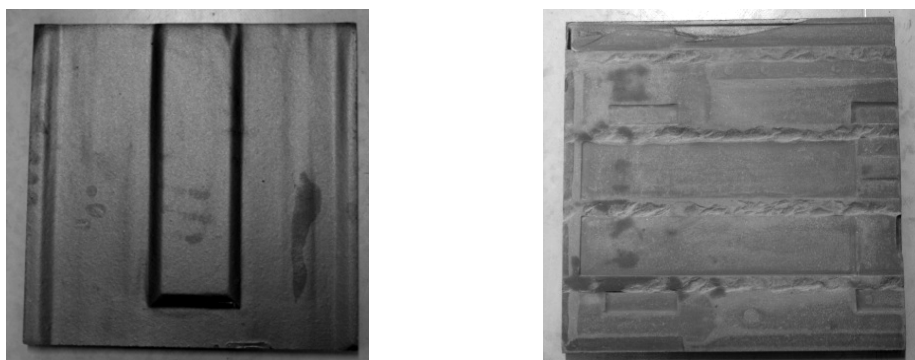


写真 3.4.1 釉薬瓦試験体 (左：仕上げ層あり、右：仕上げ層なし・突起研磨)

(2) 測定方法

JIS A 1324-1995 建築材料の透湿性測定方法 カップ法[3-17]に準じ、非透湿性のアルミ製カップ内に吸湿剤として無水塩化カルシウム 500g を入れ、カップに試験体を設置し、試験体周囲をアルミテープとパラフィンで断湿する。カップを 23°C53% に設定した恒温恒湿槽に置き (写真 3.4.2)、カップごと定期的に質量を測定する (写真 3.4.3)。

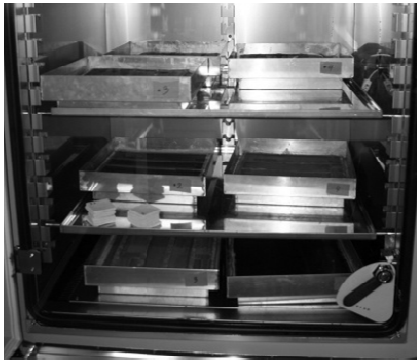


写真 3.4.2 恒温恒湿層に置かれたカップ



写真 3.4.3 カップの質量測定

カップの質量増加速度を G_v [kg/s]、カップをおいた恒温恒湿層内の水蒸気圧を P_{v0} [Pa]、透湿面積を $A(=0.25 \times 0.25)$ [m²]として、式(3.4.1)、式(3.4.2)により透湿係数 C' [kg/(m²·s·Pa)]と透湿抵抗 R' [(m²·s·Pa)/g]を求める。なお、カップ内の水蒸気圧を 0 とみなすため、 $\Delta P_v = P_{v0}$ とする。

$$C' = \frac{G_v}{A \cdot \Delta P_v} \quad (3.4.1)$$

$$R' = \frac{1}{C'} \quad (3.4.2)$$

(3) 測定結果

測定から得られた透湿抵抗と透湿係数を図 3.4.1 に示す。釉薬瓦の仕上げありは2体の平均値、仕上げなしは1体のみの測定値、いぶし瓦の仕上げあり・なしはそれぞれ3体の平均値である。釉薬瓦・いぶし瓦とも両面仕上げがない場合はほぼ同程度の透湿係数となった。

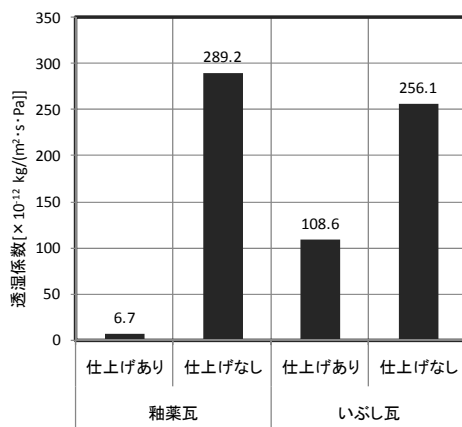


図 3.4.1 瓦の透湿係数測定値

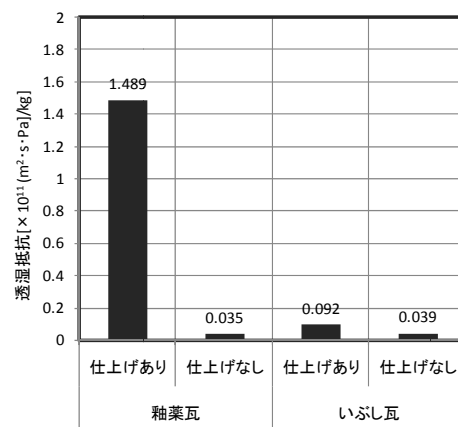


図 3.4.2 瓦の透湿抵抗測定値

本測定に用いた試験体は厚さが一様ではないが、厚さを 15mm として実質部の透湿率を計算した。結果を表 3.4.1 に示す。同じ焼成材料であるレンガの文献値[3-13]は $1.0 \sim 32 \times 10^{-12}$ [kg/(m²·s·Pa)]

であり、今回測定した瓦は一般のレンガと比較すると透湿率はいくぶん小さめであるといえる。この透湿率を用い、仕上げ層の厚さを 10[μm]として仕上げ層の透湿抵抗を計算した結果を表 3.4.1 にあわせて示す。釉薬面はいぶし瓦の炭素膜と比較し、約 30 倍の透湿抵抗をもつことがわかる。

表 3.4.1 瓦実質部の透湿率と仕上げ層の透湿抵抗

	透湿率[$\text{kg}/(\text{m}\cdot\text{s}\cdot\text{Pa})$]	仕上げ層の透湿抵抗[$(\text{m}^2\cdot\text{s}\cdot\text{Pa})/\text{kg}$]
いぶし瓦	3.84×10^{-12}	5.35×10^9
釉薬瓦	4.34×10^{-12}	1.49×10^{11}

3.4.2 飽和時の透水係数（水分伝導率）

多孔質材料の水分伝導率は含水率により大きく変化する。ここでは、材料の基本的物性として飽和時の水分伝導率の測定を行う。ただし、本測定においては、飽和を期した測定を行ったにもかかわらず、不飽和状態が生じている可能性があることが明らかとなったため、以下では、まず測定方法と飽和を期した場合の測定結果を示し、次に測定における問題点とその影響について述べる。

(1) 試料

試料はいぶし瓦と釉薬瓦（ともに平板形）の2種類である。試験体は、これらの瓦の表面を研磨し素地のみとしたものと、片面のみ表面仕上げ層を残したものの、計4種類である。試料の大きさは約 77mm 角、厚さは約 10~13mm である。試料は 100°Cの乾燥機で 24 時間乾燥後、側面にアルミ箔をエポキシ樹脂接着剤で貼りつけ断湿し（写真 3.4.4）、真空にしたデシケータ内で吸水させほぼ飽和状態とした。

(2) 測定方法

測定装置を図 3.4.3、写真 3.4.4 に示す。

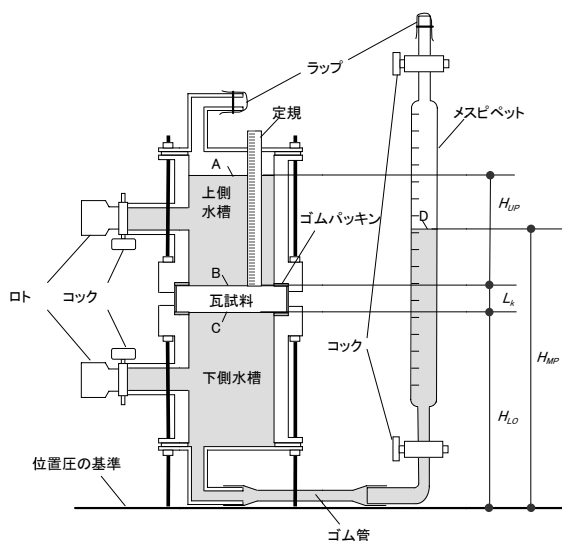


図 3.4.3 測定装置の概要

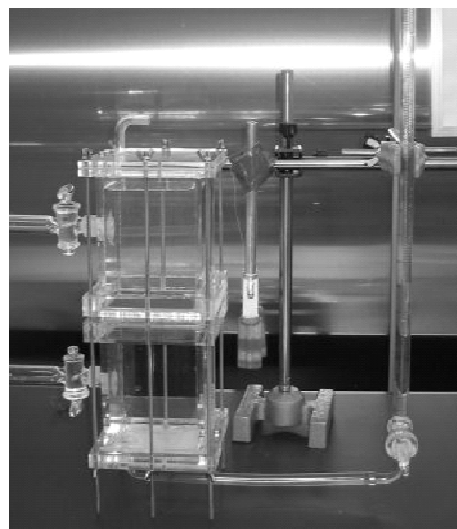


写真 3.4.4 測定装置

装置は2つの水槽と、下側の水槽とゴム管でつながったメスピペットから成る。試料は2つの水槽の間にゴムパッキンを介して設置する。測定前に、上下水槽およびメスピペットに、気泡を抜いた蒸留水を入れる。上側水槽上部のチューブ先端とメスピペットの上部先端は、水分の蒸発を抑制するためラップでふさいでいるが、水面を大気圧に維持するため、直径 1mm 程度の穴を開けている。測定開始時には、図 3.4.3 に示すように上側水槽とメスピペットに水位差を設けることにより、水槽からメスピペットへ流れる水分流を発生させる。上側水槽とメスピペットの水位を測定精度 0.01mm の読み取り顕微鏡で一定時間ごとに計測し、水位の変化を記録する。

なお、試験装置の置かれている恒温恒湿室は、20℃・60%RH に設定した。

(3) 水分伝導率の求め方

試料上下の水圧差 ΔP [Pa]と試料を通して流れた水分流量 J_w [kg/(m²・s)]から、水分伝導率 λ'_p [kg/(m・s・Pa)]を式(3.4.3)により求める。

$$\lambda'_p = J_w \frac{L_k}{\Delta P} \tag{3.4.3}$$

試料上下の圧力差 ΔP は、図 3.4.3 の B 点と C 点における全圧力の差であり、メスピペットと上側水槽 A の水位から表 3.4.2 の通りに求められる。本測定においては水の流れが十分遅く、大気に面した水面からの水深に比例する圧力はほぼ静水圧に等しいと見なした。A 点と D 点の高さの差による空気圧の差を無視して、試料上面 (B 点) は上側水槽水面 (A 点) を、試料下面 (C 点) はメスピペット水面 (D 点) を静水圧の基準とする。また、各点には基準面からの高さに応じて、重力による位置圧がかかる。A~D の各点において、水圧と位置圧の和が全圧となる。したがって、試料上下の圧力差 ΔP は式(3.4.4)で求められる。

$$\Delta P = (H_{UP} + L_k + H_{LO} - H_{MP}) \cdot \rho_w \cdot g \tag{3.4.4}$$

試料が水で飽和していない時は、試料内部には吸引圧 $P_s(\psi)$ が生ずる。これは、大気圧を基準とした負の圧力で、不飽和度が高い (含水率 ψ が小さい) ほど大きな負の値をとり、試料内空気圧力が大気圧から変動すれば、それに平衡した値をとる。試料内部が不飽和の場合は試料内空気圧力に平衡する吸引圧と位置圧の和が全圧となり、飽和した場合は試料上下の静水圧勾配に応じた水圧と位置圧の和が全圧となる。試料内部が完全に飽和になると、試料内の位置によらず下向きの一定水分流が得られる。A 点と D 点の水位が等しくなった時点で、水分流が止まり、測定が終了する。

表 3.4.2 各位置における圧力 (単位 : Pa)

	位置圧	(静)水圧	吸引圧	全圧力
A	$(H_{UP}+L_k+H_{LO})\rho_w g$	P_o (大気圧)	0	$P_o+(H_{UP}+L_k+H_{LO})\rho_w g$
B	$(L_k + H_{LO})\rho_w g$	$P_o+H_{UP}\rho_w g$	0	$P_o+(H_{UP}+L_k+H_{LO})\rho_w g$
試料内部	$(L_k - x + H_{LO})\rho_w g$	—	$P_s(\psi)$	$P_s(\psi)+(L_k - x + H_{LO})\rho_w g$
C	$H_{LO}\rho_w g$	$P_o+(H_{MP}-H_{LO})\rho_w g$	0	$P_o + H_{MP}\rho_w g$
D	$H_{MP}\rho_w g$	P_o (大気圧)	0	$P_o + H_{MP}\rho_w g$

ψ : 容積基準含水率[m³/m³]、 x : 試料内の任意の点の上側表面からの距離[m]

(4) 測定結果

1) 表面仕上げ層がない場合

ここでは、表面仕上げ層のないいぶし瓦（厚さ 11.52mm）の測定結果を例に、水分伝導率算出過程について述べる。これは、装置に設置して 14 日後に測定を開始した試料の結果である（後述）。

上側水槽とメスピペットの 10 分おきの水位測定値、水位から算出した水分流量と試料上下面圧力差、水分流量と試料上下圧力差を式(3.4.3)に代入して求めた水分伝導率の経時変化を図 3.4.4 に示す。表面仕上げ層がない場合は瓦内部の水分移動が速く、測定開始から約 3 時間で上側水槽とメスピペットの水位変化がほぼ 0 となる。上側水槽の水位変化は非常に小さく測定誤差が大きくなりやすいため、水分流量はばらつきが大きく負の値をとることも生じる。従って、水分流量としてはメスピペットの水位から算出した値を計算に使用する。両者の水位差が小さくなるにつれ試料上下面の圧力差が小さくなり、それに伴い水分流量も小さくなる。

水分伝導率は測定開始から約 2 時間まではほぼ一定となっているが、水分流量が小さくなるにつれ測定誤差が大きくなり、ばらつきが大きくなる。測定開始から約 2~3 時間の結果を平均すると、 3.73×10^{-9} [kg/(m·s·Pa)] という値が得られた。釉薬瓦（厚さ 12.23mm）についても同様に測定を行い、 2.15×10^{-9} [kg/(m·s·Pa)] という結果を得た。

2) 表面仕上げ層がある場合

表面仕上げ層のある試験体は、仕上げ層を上とし測定を行ったところ初期に意図した方向の水分流が得られず、測定に長期間を要した。そこで、試料上下面の水圧差を駆動力とする飽和状態での定常水分流を想定すると、両者の透水抵抗は等しくなるはずであるが、仕上げ層を下とした場合の測定も行った。図 3.4.5 に、いぶし瓦の仕上げ層（炭素膜）を上側とした場合と下側とした場合の水位測定結果、水位の時間変化から求めた試料上下水圧差と水分流量を示す。

仕上げ層がある場合は水分の移動速度が小さくなるため、横軸の単位は時間 [h] で示している。測定間隔は 24[h] である。開始から 84 時間（約 4 日間）の測定では、仕上げ層が上か下かによって異なる挙動が見られる。仕上げ層を下とした場合には、仕上げ層がない場合と同様、メスピペット水位は上昇し上側水槽水位は下降して、水位が等しくなる方向に水分流が発生する。一方、仕上げ層を上側とした場合には、測定開始から 4 日経過後もメスピペットの水位が減少している。釉薬層のある釉薬瓦に関しても、同様の傾向が見られた（図 3.4.5 水位の時間変化）。

上側水槽からメスピペットへの透水が進むと水位差が小さくなり、試料上下面の水圧差が小さくなるはずであるが、仕上げ層を上側とした場合は測定初期では水圧差が大きくなった。仕上げ層を下側に設置した場合は、早い段階で安定した水分流量が得られたものの（図 3.4.5 水分流量の時間変化）、水圧差が 0 に近づくまでには長い時間がかかることが推測される（図 3.4.5 試料上下圧力差の時間変化）。

いぶし瓦試料のみ、試料を装置に取り付けた状態で水位の読み取りを停止し、測定開始から 25 日経過後に再び読み取りを開始すると、メスピペットの水位が時間の経過とともに上昇した（図 3.4.6 左）。また、上側水槽の水位低下速度は 25 日経過後の方が速くなっている。

仕上げ層を下とした場合の測定から得られた水分伝導率は、いぶし瓦（厚さ 13.77mm）が 2.78×10^{-12} [kg/(m·s·Pa)]、釉薬瓦（厚さ 13.52mm）が 4.16×10^{-12} [kg/(m·s·Pa)] であった。

表面仕上げ層の厚さを 10 μ m と仮定して透水抵抗を算出すると、いぶし瓦の場合は 4.95×10^9 [(m²·s·Pa)/kg]、釉薬瓦の場合は 3.24×10^9 [(m²·s·Pa)/kg] となった。表面仕上げ層の透水抵抗は、実質部の抵抗（いぶし瓦約 3.69×10^6 [(m²·s·Pa)/kg]、釉薬瓦 6.28×10^6 [(m²·s·Pa)/kg]）と比較して約

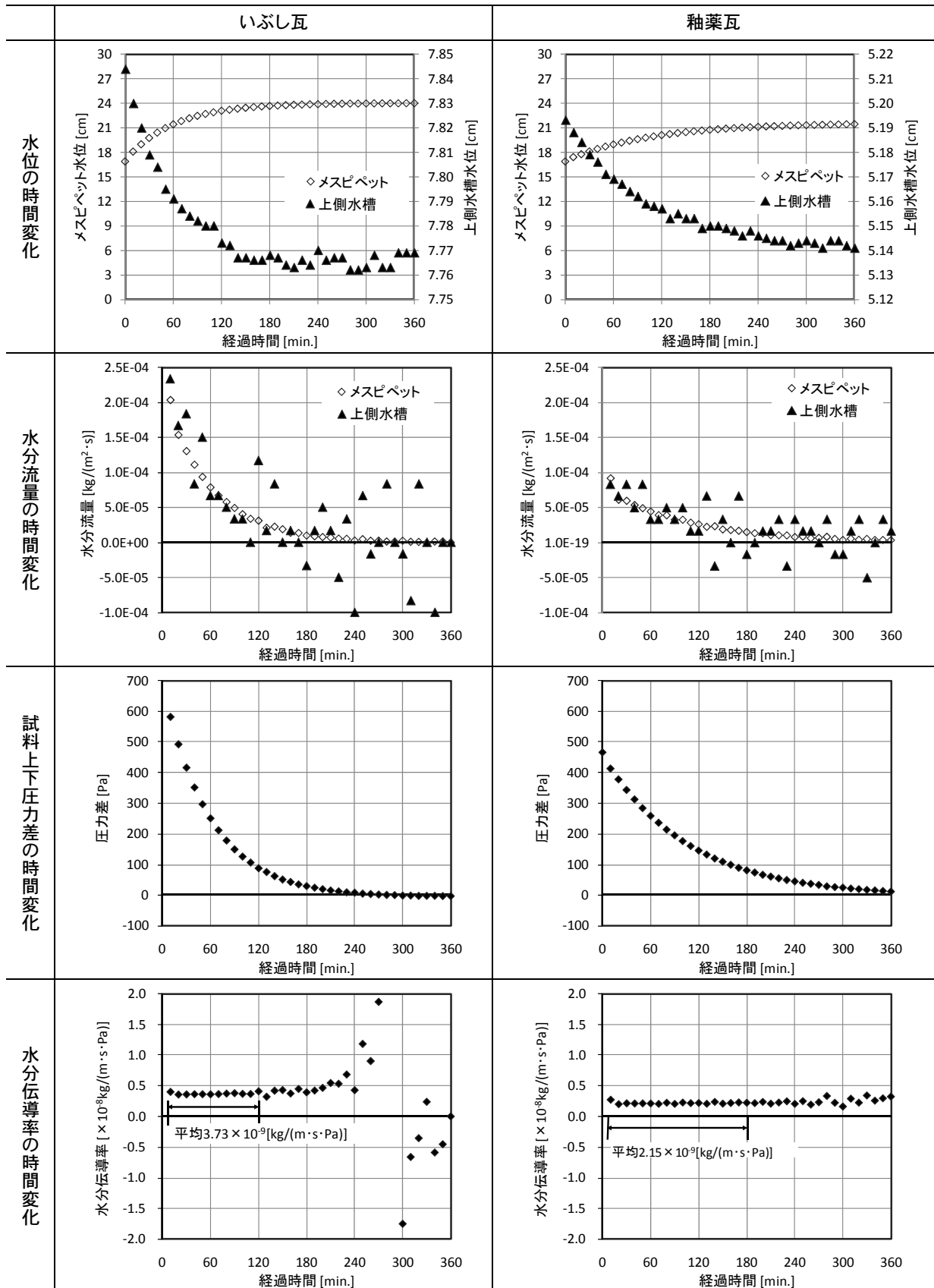


図 3.4.4 表面仕上げ層がない場合の測定結果

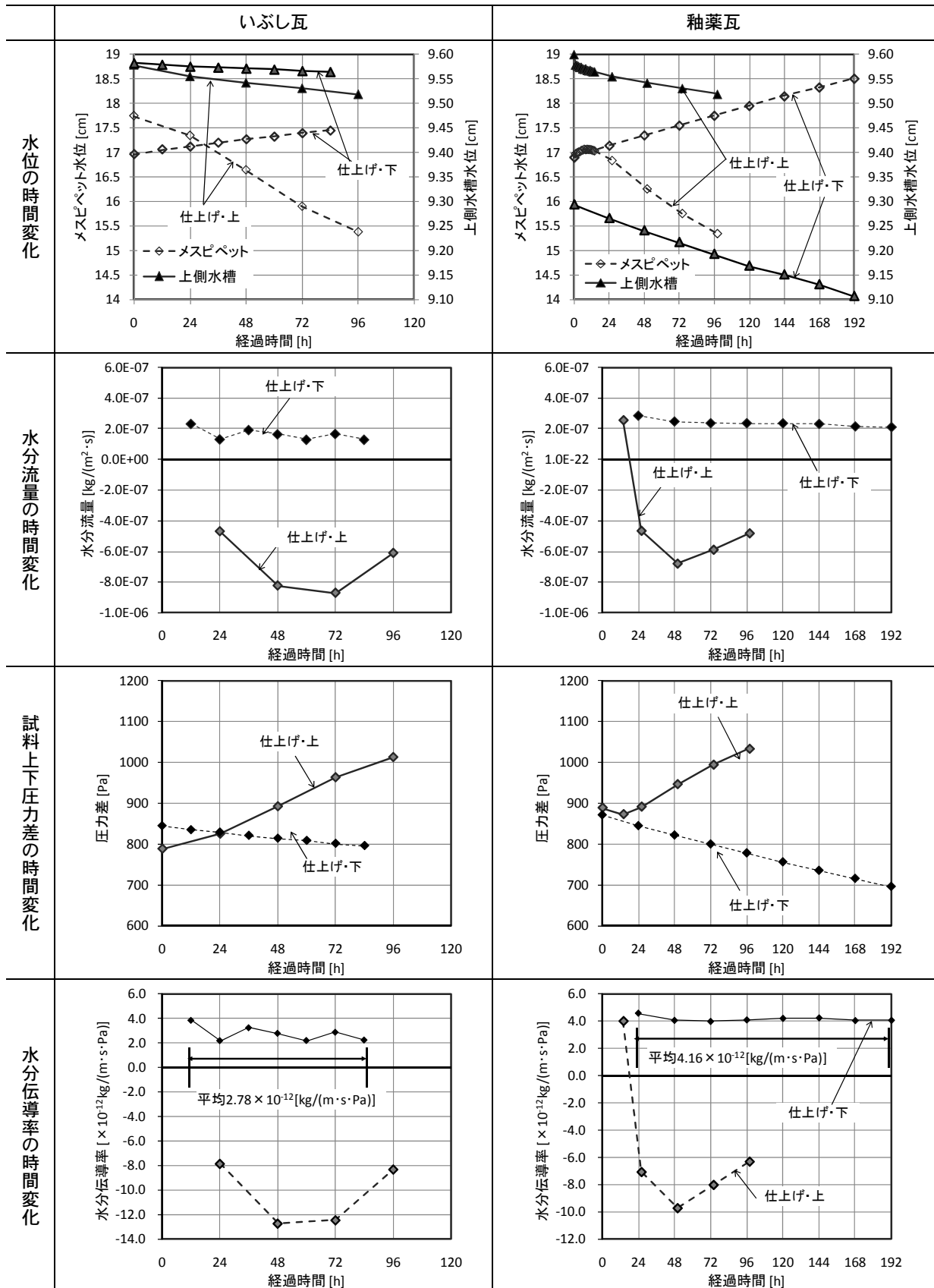


図 3.4.5 表面仕上げ層がある場合の測定結果

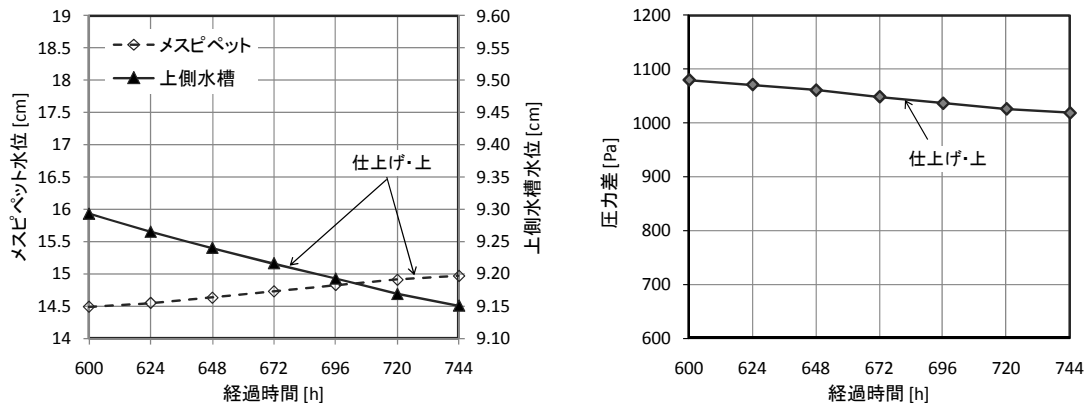


図 3.4.6 表面仕上げ層がある場合の測定結果 (いぶし瓦・仕上げあり、測定開始後 25 日目以降)

1000 倍となり、水分移動特性に大きな影響を与えることが確認できた。

これらの水分伝導率の単位を[m/s]に変換し透水係数を求めると、いぶし瓦の仕上げありは 2.72×10^{-11} [m/s]、仕上げなしは 3660×10^{-11} [m/s]、釉薬瓦の仕上げありは 4.08×10^{-11} [m/s]、仕上げなしは 2110×10^{-11} [m/s]であった。山本ら[3-3]の測定では、施釉品が約 $2.8 \sim 14 \times 10^{-11}$ [m/s]、無釉品が約 $8.3 \sim 111 \times 10^{-11}$ [m/s]であったため、仕上げがある場合は本測定の結果とほぼ同程度のオーダーとなっているが、仕上げがない場合は 20~30 倍の差がある。この原因としては、文献で用いられている瓦の方が厚いこと、焼成温度が高く見掛け気孔率も小さいことなどが挙げられる。

3) 測定時間と水分伝導率測定結果

仕上げ層のないいぶし瓦 3 体 (測定 5 回)、釉薬瓦 4 体 (測定 4 回) について測定を行ったところ、いぶし瓦は $2.12 \sim 3.73 \times 10^{-9}$ [kg/(m·s·Pa)]、釉薬瓦は $1.47 \times 10^{-9} \sim 2.15 \times 10^{-9}$ [kg/(m·s·Pa)]という値が得られた。この値を、試料を装置に取り付けてから測定を開始するまでの経過日数との関係で示したものが図 3.4.7 である。

試料を装置に取り付けた後、測定を開始するまでの日数が長いほど水分伝導率が大きくなる傾向が見られる。いぶし瓦の 1 日後、2 日後、14 日後の測定結果はいずれも(1)で説明した試料についての結果である。経過日数が短い時には試料内の透水を妨げる現象が発生し、水分伝導率の値が実際よりも小さく見積もられたと考えられる。

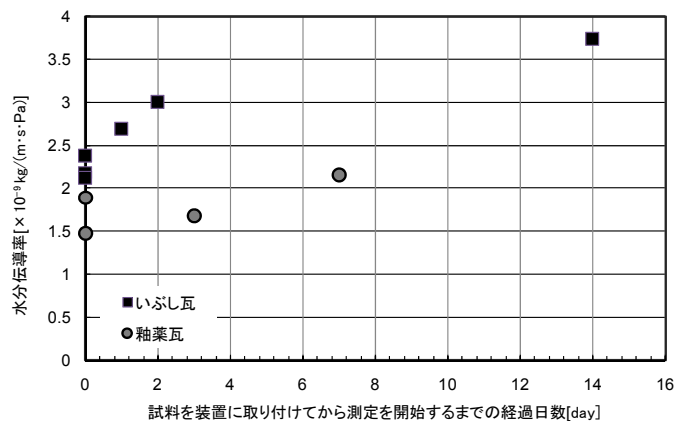


図 3.4.7 経過日数と水分伝導率の関係

(5) 測定結果の考察

以上より、仕上げ層の有無、仕上げ層の位置の違い、試料設置後の経過時間により測定結果が異なることが分かる。これらの結果は以下の4点にまとめられる。

- ① 仕上げ層のない場合には、装置への試料設置から測定開始までの日数が長くなるほど、水分伝導率の値が大きくなる傾向がある。
- ② 仕上げ層がある場合は、仕上げ層がない場合と比較し、試料上下の圧力差が0に近づくまでには長い時間がかかる。
- ③ 仕上げ層を下側とした場合には、上側水槽からメスピペットへ流れる一方向の水分流となる。試料上下の圧力差は減少する方向へ向かう。
- ④ 仕上げ層を上側とした場合には、測定開始から数日間にわたってメスピペット水位の減少、すなわち試料の下面から試料内部へ流入する方向の水分流が観察される。同時に上側水槽の水位も減少することから、試料の上面からも内部へ水分が流入している。測定開始から長時間経過後は、上側水槽からメスピペットへ流れる一方向の水分流となる。

このような結果が生じる原因として、2)については仕上げ層の透水抵抗が大きいため、1) 3) 4)については、飽和を期した実験ではあるものの、装置に試料を設置する時に試料内部に空気が含まれた不飽和の状態となり、その空気が透水の抵抗となるためと推察した。

空気が水分移動に与える影響については、次章で詳細に検討する。

(6) 空気が存在する可能性

透水係数測定において、装置取り付け時に試料内に空気が入るか否かについて、追加実験を行った。実験は、水分伝導率測定時と同様の手順で、測定装置に試料を設置し、その後すぐに試料をデシケータの水中に浸漬し気泡の有無を観察する。その後、真空ポンプでデシケータ内の空気を抜き、再び気泡の有無を観察するというものである（写真3.4.5）。

真空デシケータ内で吸水させた瓦試料を、脱気水で満たした下側水槽の上に設置した時の様子を写真3.4.5左に示す。これは仕上げ層を上側とした場合の釉薬瓦の様子であるが、試料から下側水槽内に気泡が出て行くことが確認された。この場合、仕上げ層の透気抵抗は大きいと考えられるため、抵抗の少ない下側から空気が抜けたものと考えられる。また、この瓦をデシケータ内に戻し真空脱気した時の様子を写真3.4.6に示す。このように気泡が生じることから、装置取り付け時に試料内部に空気が入ったと考えられる。

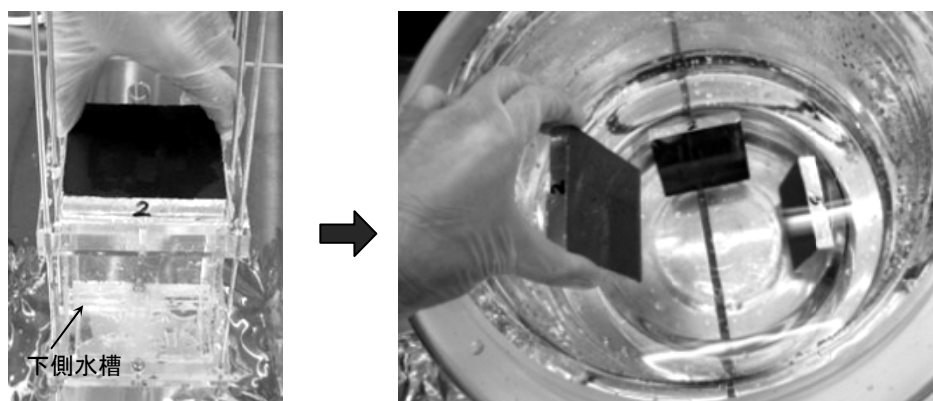


写真 3.4.5 瓦試料内の気泡の確認

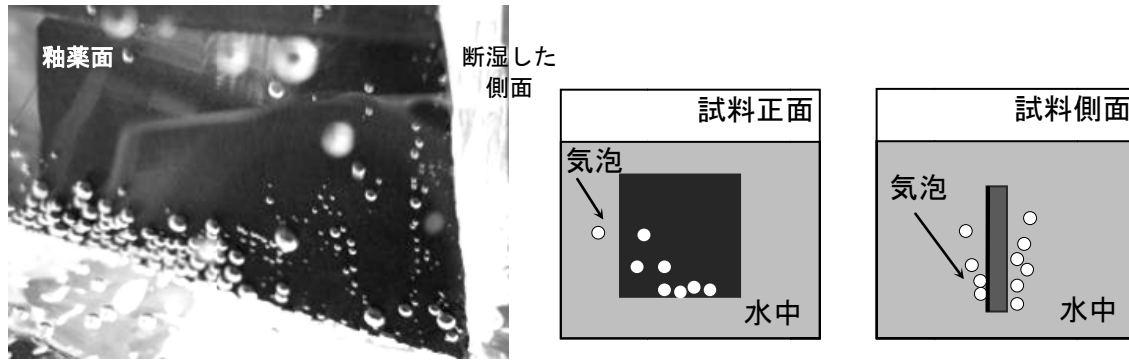


写真 3.4.6 瓦から発生する気泡

3.5 第3章のまとめ

本章では、表面仕上げ層をもつ粘土瓦の水分特性を把握することを目的に、基本物性、水分保持性能、水分移動係数の測定を行った。

3.2節では、基本物性として乾燥密度、吸水率、細孔径分布の測定を行った。粘土瓦のJISに準拠した吸水率の測定では、いぶし瓦のように全面が仕上げ層で覆われている場合、24時間を経過しても内部では含水している部分と乾燥している部分が見られるため、JISで規定される数値は素地の性質を示すものではなく、仕上げ層の透水抵抗も含めた値となっていることを指摘した。

細孔径分布の測定からは、1~3[μm]の直径をもつ細孔が全体の7割を占めることがわかった。相対湿度が約99%以上になるとこの径で水蒸気が凝縮し始めることから、平衡含水率曲線の傾きがこの湿度範囲で大きくなることが推測された。

3.3節では相対湿度96%以下の低湿域での平衡含水率と99.8%以上の高湿域での保水性の測定を行い、高湿域で平衡する含水率が急激に増加することを確認した。

3.4節では、水蒸気と液水の両方について、表面仕上げの有無による移動係数の違いを測定した。いぶし瓦と釉薬瓦では、素地（実質部）の透湿率や水分伝導率、仕上げ層の液水に対する水分伝導抵抗は同程度であったが、透湿抵抗は釉薬層の方がいぶし瓦の炭素膜よりも約30倍大きいことがわかった。仕上げ層をもつ材料における飽和時の水分伝導率については測定方法の提案を行い、試料内部に閉じこめられた空気が透水の抵抗となる可能性がある問題点を示した。ここで示された空気の影響については、次章で詳細に検討を行う。

第3章 参考文献

- [3-1] 日本建築学会：勾配屋根の材料・構法・性能、丸善、1999
- [3-2] 坪井利弘：日本の瓦屋根（第25版）、理工学社、2003
- [3-3] 山本紀一、松下福三、中村雅光：釉薬瓦の透水試験法、愛知県常滑窯業技術センター報告 第13号、pp.19-25、1986

- [3-4] 日本規格協会：JIS A 5403 石綿スレート、1989 (→1995 廃止)
- [3-5] 日本規格協会：JIS A 1218 土の透水試験方法、1980
- [3-6] 田中稔：粘土瓦ハンドブック、技報堂出版、1980
- [3-7] 日本規格協会：JIS A 5208 粘土がわら、1996
- [3-8] 日本規格協会：JIS R1655 ファインセラミックスの水銀圧入法による成形体気孔径分布試験方法、2003
- [3-9] 近藤精一、石川達雄、安部郁夫：吸着の科学 第2版、丸善、2001
- [3-10] 慶伊富長：吸着、共立出版、1990
- [3-11] 桂修：過冷却現象を考慮したコンクリートの凍害機構に関する研究、北海道大学、博士論文、1999.9
- [3-12] 日本建築学会編：湿気物性に関する測定規準・同解説、日本建築学会、2006
- [3-13] M. K. Kumaran：“建築材料の熱・空気・湿気物性値”、日本建築学会誌、丸善、2001
- [3-14] 国立天文台編、理科年表（平成19年） 机上版第80冊、丸善、2007
- [3-15] 土壌物理研究会 編：土の物理学—土質工学の基礎—、森北出版、1979
- [3-16] 土質工学会 編：土質試験法—第2回改訂版—、(社)土質工学会、1979
- [3-17] 日本規格協会：JIS A 1324 建築材料の透湿性測定方法、1995

第4章 瓦の水分移動における空気の影響

4.1 はじめに

前章で示した粘土瓦の飽和透水係数の測定において、測定開始時に試料内部に含まれる空気が水分浸透を妨げる可能性があることが示唆された。Descamps[4-1]は、calcium silicate brick を用いた一連の実験により、試料内部の空気圧力の上昇が水分移動を遅らせることを確認し、水と空気が混合しない分離した相で移動するとした discrete modeling approach によって、実験結果を説明している。

本章では、空気が透水の妨げとなるメカニズムを推測し、数値解析によりその影響を明らかにすることを目的とする。4.2 節では、透水係数測定から得られた結果について考察を行う。4.3 節では、材料内部の空気圧力を考慮した水分移動のモデルと、解析方法・条件について説明する。4.4 節では、3 章で示した透水係数測定条件を用いた数値解析を行い、仕上げ層の有無による空気の影響の違いを明らかにする。4.5 節では、本章のまとめと透水係数測定における注意点について述べる。

4.2 空気が水分移動に影響を与えるメカニズム

4.2.1 材料内部の空気圧力の影響

空気が水分移動の抵抗となることのメカニズムは以下のように考えられる。

- ① 測定開始時には、試料内部にある割合の空気が存在する。
- ② 試料内部に水が浸透するにしたがい内部の空気は圧縮され、圧力が高まる。大気圧下では負の値をとる吸引圧は試料内部の全圧変化分に応じて変化するため、絶対値が小さくなる方向に動く (図 4.2.1)。
- ③ 材料の水分伝導率が一定であるとする、水分移動量は圧力差に比例する。試料内部の水の吸引圧が小さくなると、試料内部へ水が浸透しにくくなり、水分流量が小さくなる。
- ④ 測定においては、水分流量と水圧差から水分伝導率を算出するため、水分流量が小さい場合、水分伝導率を小さく見積もることになる。
- ⑤ 試料内部に含まれる空気には浮力が作用することと、空気は水に溶解するため、一定時間を経過すると内部の空気はすべて抜け、試料内部は水で飽和する。その時に飽和時の水分伝導率が得られる。

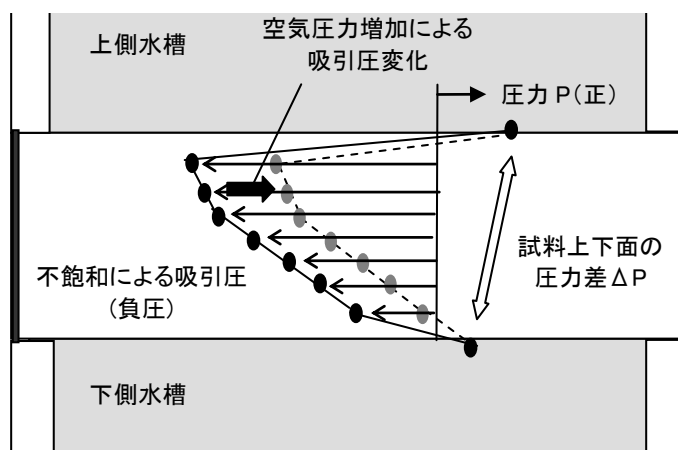


図 4.2.1 空気圧力増加による試料内部吸引圧上昇のイメージ

したがって、仕上げ層のない場合、試料を装置へ取り付けてから測定を開始するまでの日数が長いほど大きな水分伝導率の値が得られることについては、長い時間をかけて試料内部の空気が抜け、水で飽和した状態に近づいたためであると考えられる。

4.2.2 仕上げ層の透気抵抗の影響

仕上げ層を上とした場合に他と異なる挙動を示すことは、空気の影響を考慮すると次のように説明できる。

- ① 測定開始時には試料内部に空気を含む。すなわち、不飽和の状態にある。
- ② 試料内部に存在する空気と仕上げ層により、上側水槽から流入する透水量は少ない。仕上げ層のない下側からは不飽和部分へ水分が流入する。ただし、空気の影響によりその流入速度は小さいため、数日間にわたりメスピペットの水位は減少する (図 4.2.2(a))。
- ③ 主に試料下面から水分が流入することで、試料内部の含水率が上昇し、空気容積は減少する。
- ④ 試料上面の仕上げ層の透気抵抗が大きい場合、空気は上に抜けにくいいため、空気は圧縮され空気圧力は上昇する (図 4.2.2(b))。
- ⑤ さらに空気圧力が上昇することで仕上げ層を通して空気が上方向へ抜けると、試料内部の全圧が低下し、吸引圧は負の大きな値をとる。したがって上下面から水分が流入しやすくなる。また、試料内部の含水率が上昇すると液水の移動量が増加し、上側水槽の水位低下速度が初期よりも大きくなる。
- ⑥ 試料内部の含水率が飽和近くまで上昇すると、上側水槽からメスピペットへ向かう一方の水分流が生じる。これにより、メスピペット水位の上昇が観察される (図 4.2.2(c))。
- ⑦ 試料内部が水で飽和すると定常水分流が得られ、試料上下面の水圧差と水分流量から水分伝導率が求められる。

空気は浮力により上方向へ抜けやすいとすると、仕上げ層がない場合と仕上げ層を下とした場合は、比較的速く空気が抜ける。これは、メスピペットでの水位低下が観察されなかったことと矛盾しない。

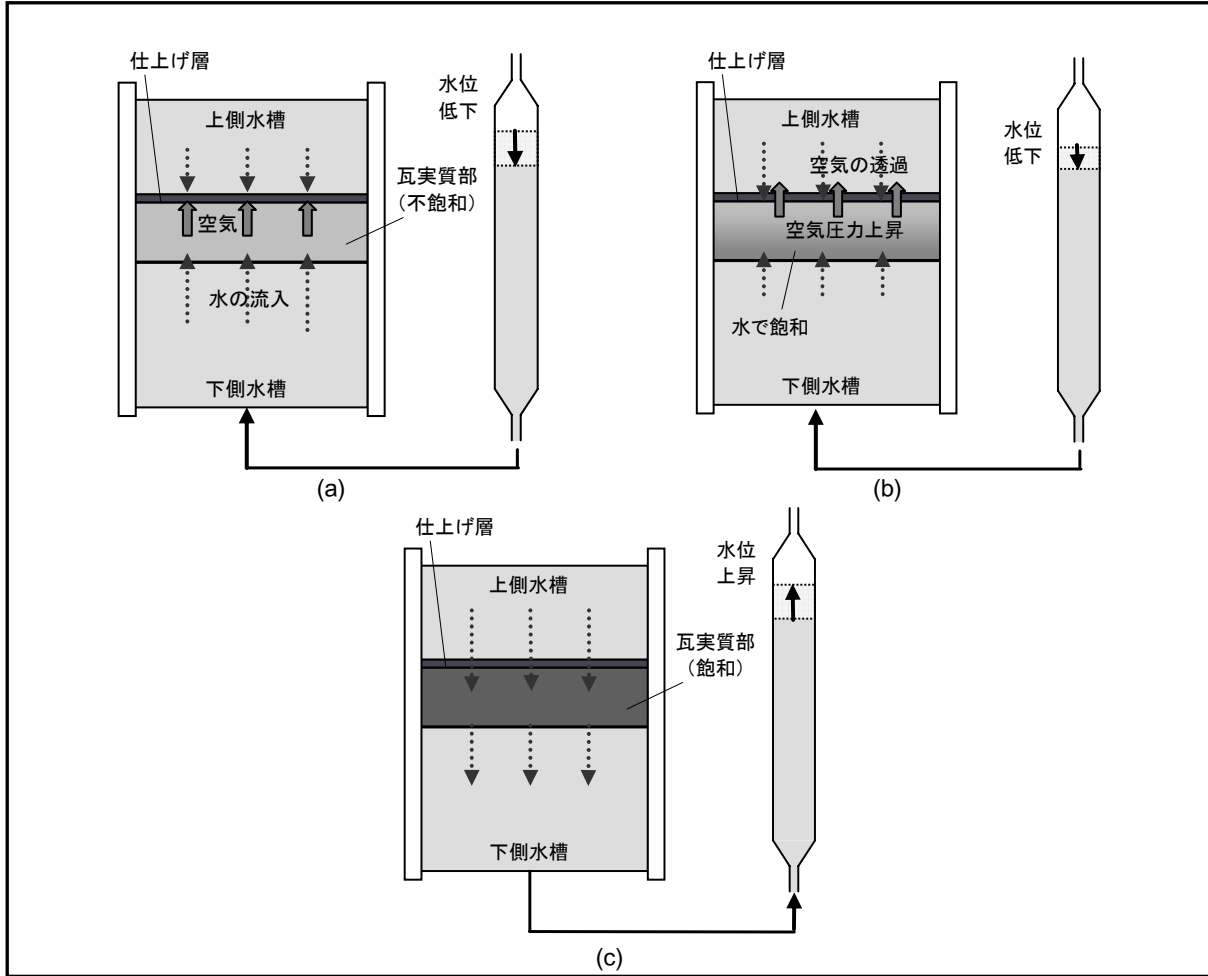


図 4.2.2 仕上げ層を上とした場合の透水過程

4.3 解析方法

4.3.1 計算対象

計算対象は 14mm 厚のいぶし瓦とし、測定時と同様、表面仕上げ層のない場合 (Case 0)、仕上げ層を上とした場合 (Case 1)、下とした場合 (Case 2) の 3 ケースについて計算を行う。3.4.2 節で測定された値を用いて、瓦の実質部の水分伝導率は 3.73×10^{-9} [kg/(m·s·Pa)]、仕上げ層の透水抵抗は 4.98×10^9 [(m²·s·Pa)/kg] とする。なお、仕上げの厚さは考慮しない。

4.3.2 基礎式と計算方法

水分移動解析は、1次元の差分計算を行う。瓦実質部は厚さ方向に約 1mm 刻みで 14 分割する。瓦内部の水分流は式(4.3.1)で表される。

$$J_w = -\lambda'_p(\psi) \frac{\partial P}{\partial x} \tag{4.3.1}$$

計算開始時には、瓦内部は不飽和の状態とする。式(4.3.2)は、不飽和時の水分伝導率を示す。瓦内部の初期含水率分布と、指数 N の値は未知であるため、それぞれ感度解析を行い、推定する。

$$\lambda'_p(\psi) = \lambda'_{p,sat} \left(\frac{\psi}{\psi_{sat}} \right)^N \quad (4.3.2)$$

式(4.3.3)は不飽和時の瓦内部の水分収支式を示している。本式により含水率変化が求められる。

$$\rho_w \frac{\partial \psi}{\partial t} = - \frac{\partial}{\partial x} \left(- \lambda'_p(\psi) \frac{\partial P}{\partial x} \right) \quad (4.3.3)$$

吸引圧は、瓦の平衡含水率曲線を用いて、含水率から求められる。測定条件下では、含水率は飽和に近い極めて狭い範囲の値をとると考えられるため、ここでは平衡含水率曲線を、相対湿度96%以上の範囲で直線近似したものをを用いる。

瓦の上側表面と下側表面を通る水分流から、上側水槽とメスピペットの水位変化を求める。このとき、別途測定した水面からの蒸発量(上側水槽: 1.74×10^{-7} [kg/(m²·s)]、メスピペット: 1.83×10^{-11} [kg/(m²·s)]) を考慮する。

4.3.3 境界条件

瓦の上側表面と下側表面の総圧は、静水圧と位置圧からなり、計算の境界条件として与えられる。両表面には、実際の瓦でもいぶし瓦の炭素膜近傍には炭素がある程度浸透していることなどを考慮し、仮想の水と空気の伝達抵抗層があるとして計算を行う。水分伝達抵抗は 1.0×10^5 [(m²·s·Pa)/kg]、空気伝達抵抗は 1.0×10^4 [(m²·s·Pa)/kg] とする。

表面仕上げ層は水分容量をもたないものとして扱い、仕上げ層のある面は、仕上げの抵抗と伝達抵抗の合成値により水分流が決定される。

表面仕上げ層の透気率は、固有透過率 k_0 [m²] を用いて式(4.3.4)により求められる[4-2]。

$$k_0 = \frac{L_f \times \eta_w}{R'_{pfa} \times \rho_w} = \frac{L_f \times \eta_a}{R'_{pfa} \times \rho_a} \quad (4.3.4)$$

ここでは、表面仕上げ層の透気抵抗は 7.45×10^{10} [(m²·s·Pa)/kg] とする。

4.3.4 空気の影響のモデル化

図 4.3.1 に試料内部の空気圧力と容積、質量の模式図を示す。瓦内部が不飽和の時、水で満たされていない空隙は空気を含んでいる。空気の容積 V_a は式(4.3.5)のように表される。

$$V_a = (\phi - \psi) \times V_m \quad (4.3.5)$$

初期の空気圧力 P_a が大気圧に等しいとすると、空気量 N_a は理想気体の状態方程式を用いて次のように求められる。

$$N_a = \frac{P_a \times V_a}{R_a \times T} \tag{4.3.6}$$

ここでは、瓦の内部を空気が移動する速度は水の移動速度と比べて速いと考え、瓦内部の空気圧力は位置によらず一様とする。水が瓦に浸透し含水率が上昇するにつれて、空気の容積は減少する ($V_a' < V_a$)。空気が抜けることができず瓦内部にとどまれば、空気が圧縮され空気の圧力が高くなる ($P_a' > P_a$)。内部の空気圧力が瓦上部の水圧よりも高くなると、空気は仕上げ層を通して上に抜け、内部の空気量は減少し ($N_a' < N_a$)、空気圧力も低下する。本モデルでは、瓦内部のすべての空気が抜けるまで繰り返される。

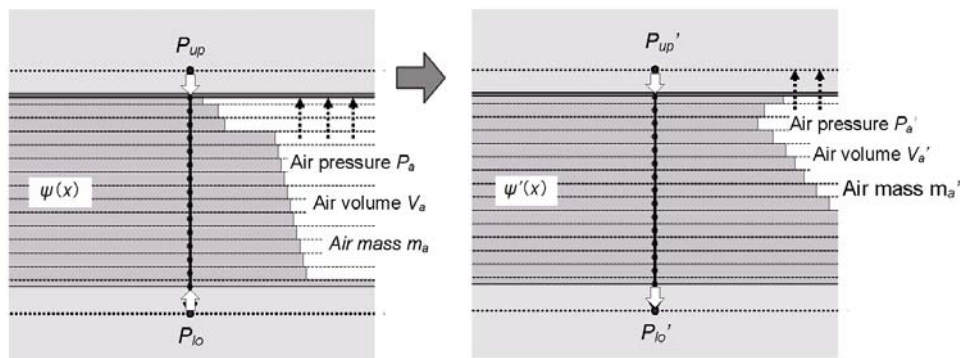


図 4.3.1 瓦内部の空気圧力、容積と質量の関係

瓦内部の吸引圧は、内部の空気圧力の上昇に伴い上昇する。試料内部が水で満たされていない不飽和の状態の時、内部には水を吸い込もうとする圧力（吸引圧）が生じる。吸引圧は、飽和時を 0 とした負の値をとり、内部が乾燥状態であればあるほど、負の大きな値をとる。水分化学ポテンシャル μ [J/kg] と吸引圧 P_s [Pa] の関係は、式(4.3.7)で表される。

$$P_s = \mu \cdot \rho_w \tag{4.3.7}$$

吸放湿の履歴を無視すると、大気圧下では相対湿度（水分化学ポテンシャル）がわかれば含水率は一意に定まる。したがって、平衡含水率関係と式(4.3.7)から、吸引圧と含水率の関係が求められる。しかし、試料内の空気圧力が大気圧よりも上昇し、内部の全圧が大きくなると、図 4.3.2 に示したように同じ含水率であっても吸引圧の値は大きくなる。したがって、試料上面にかかる水圧と試料上面付近の吸引圧の差、試料下面にかかる水圧と試料下面付近の吸引圧の差は、それぞれ小さくなり、水が浸透しにくくなると考えられる。

図 4.3.2 は、全圧の上昇が平衡含水率関係に与える影響を示したものである。試料内部の全圧が上昇すると、平衡関係も圧力が高くなる方に平行移動する。含水率が $\psi_1 (< \psi_{sat})$ の時、大気圧(1 [atm])下における吸引圧を P_{s1} とすると、同じ含水率で空気圧力が P_{a1} [atm] の時の吸引圧 P_{s1}' は次のように表される。

$$P_{s1}' = P_{s1} + (P_{a1} - 1) \tag{4.3.8}$$

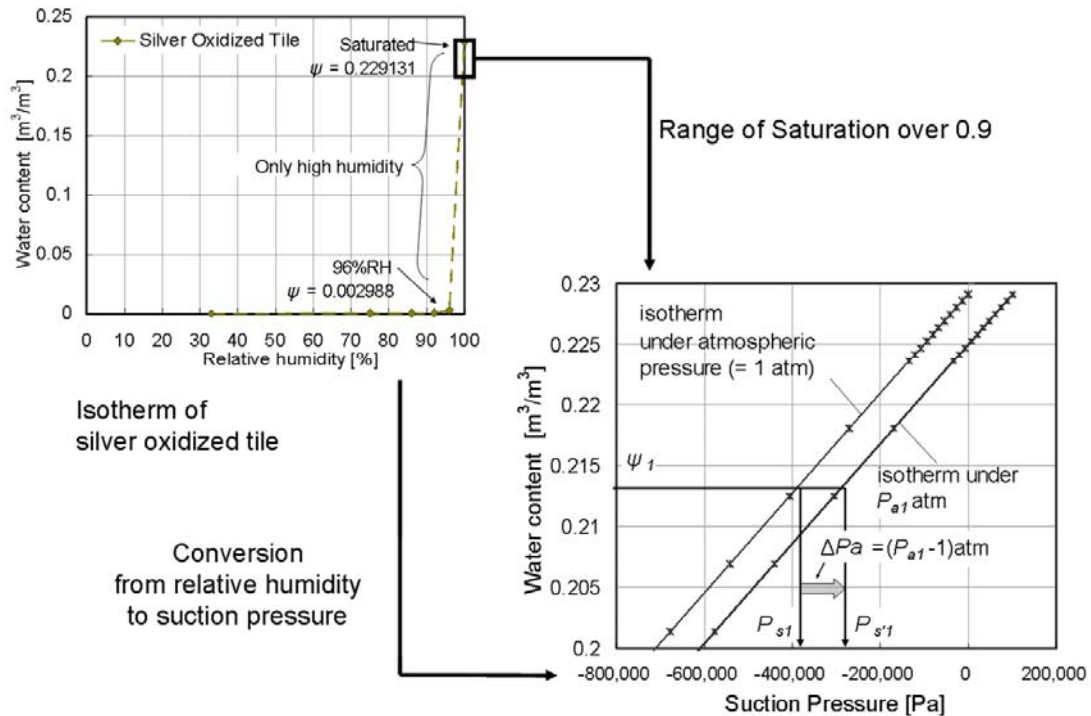


図 4.3.2 空気圧力の吸引圧への影響

4.4 解析結果

4.4.1 表面仕上げ層がない場合 (Case 0-1)

3.4.2 節で述べた通り、表面仕上げ層がない場合、水分伝導率の測定値は試料が装置に設置されてからの日数が長いほど大きくなる傾向があった。表 4.4.1 に、3 回の測定が行われたある 1 体の試料について、水分伝導率の測定値と、測定開始までの日数を示す。解析はこの 3 回について行った。飽和時の水分伝導率は、いずれも 3.73×10^{-9} [kg/(m·s·Pa)] であるとした。初期の飽和度も表 4.4.1 に示す 3 パターンを想定した。不飽和時には、瓦内部に空気が存在するものとする。

表 4.4.1 表面仕上げがない場合の計算条件

Case No.	水分伝導率 測定結果 [kg/(m·s·Pa)]	装置に設置してから 測定開始までの期間 [day(s)]	測定時間 [hour(s)]	初期含水率 [m³/m³]	計算に用いた 水分伝導率 [kg/(m·s·Pa)]
0-1 (a)	2.69×10^{-9}	1	8	$0.95 \times \psi_{sat}$	3.73×10^{-9}
0-1 (b)	3.00×10^{-9}	2	11	$0.99 \times \psi_{sat}$	
0-1 (c)	3.73×10^{-9}	14	6	$1.0 \times \psi_{sat}$	

メスピペットと上側水槽の水位変化を図 4.4.1 (Case 0-1(a))、図 4.4.2 (Case 0-1(b))、図 4.4.3 (Case 0-1(c)) に示す。これらの結果はすべて、 $N=1000$ として得られたものである。

Case 0-1(a)と Case 0-1(b)では、初期含水率を飽和よりも小さいとして計算した時の結果が、実測結果とよく一致している。しかし、Case 0-1(c)では、最初から飽和していたとして計算した結果が、実測結果をよく再現している。

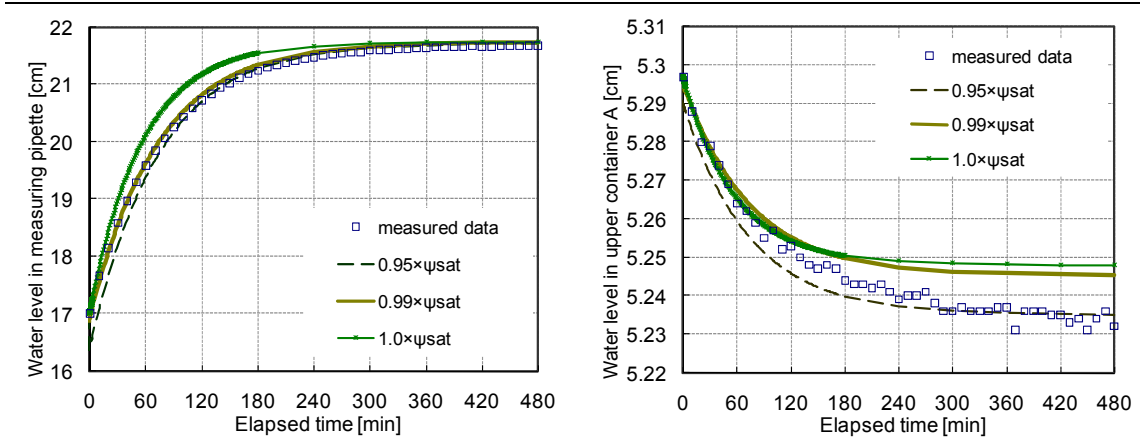


図 4.4.1 Case 0-1 (a) におけるメスピペット (左) と上側水槽 (右) の水位変化

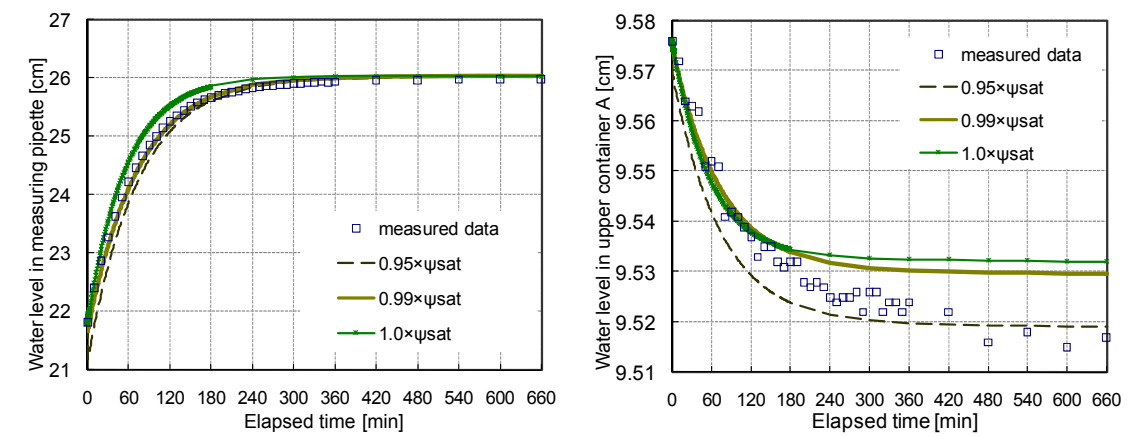


図 4.4.2 Case 0-1 (b) におけるメスピペット (左) と上側水槽 (右) の水位変化

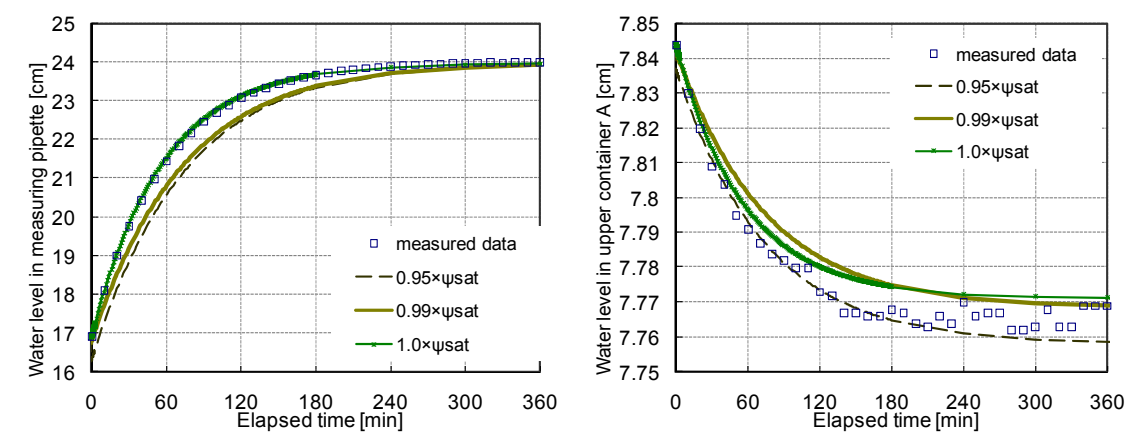


図 4.4.3 Case 0-1 (c) におけるメスピペット (左) と上側水槽 (右) の水位変化

各 Case において、計算で得られた試料の上下水圧差と水分流を用いて、水分伝導率を計算により求めた。結果を表 4.4.2 に示す。計算された水分伝導率が実測値とよく一致し、試料内部に入ってしまった空気により水分伝導率が低く見積もられることを確認できた。

表 4.4.2 計算により求められた水分伝導率 (Case 0-1)

Case No.	計算結果 (計算開始から 2 時間の平均値)		
	$0.95 \times \psi_{sat}$	$0.99 \times \psi_{sat}$	$1.0 \times \psi_{sat}$
0-1 (a)	2.707×10^{-9}	2.715×10^{-9}	3.522×10^{-9}
0-1 (b)	2.715×10^{-9}	2.722×10^{-9}	3.522×10^{-9}
0-1 (c)	2.685×10^{-9}	2.692×10^{-9}	3.491×10^{-9}

4.4.2 表面仕上げ層を上側とした場合 (Case 1-1)

表面仕上げ層を上とした場合 (Case 1-1) では、メスピペットの水位が測定を開始してから 4 日間下がり続けた。この期間中、上側水槽の水面の蒸発を考慮しても、瓦に浸透した水は少なくとも 3.483ml と見積もられる。これを容積含水率に換算すると $0.0427[\text{m}^3/\text{m}^3]$ となる。測定に用いた瓦の飽和容積含水率は $0.229[\text{m}^3/\text{m}^3]$ であるため、初期の飽和度は約 81.4% と推定できる。

測定は装置の上に試料を設置してすぐに開始したため、試料内部に空気が存在していたと考えられる。本節では、初期の飽和度は同じ 81.4% として、初期含水率が一様に分布していた場合 (図 4.4.4(a)) と試料下面がほぼ飽和となるように直線上に分布していた場合 (図 4.4.4(b)) の解析を行い、初期含水率分布の影響についても検討を行う。さらに、(c) では初期飽和度のより低い条件も設定した。

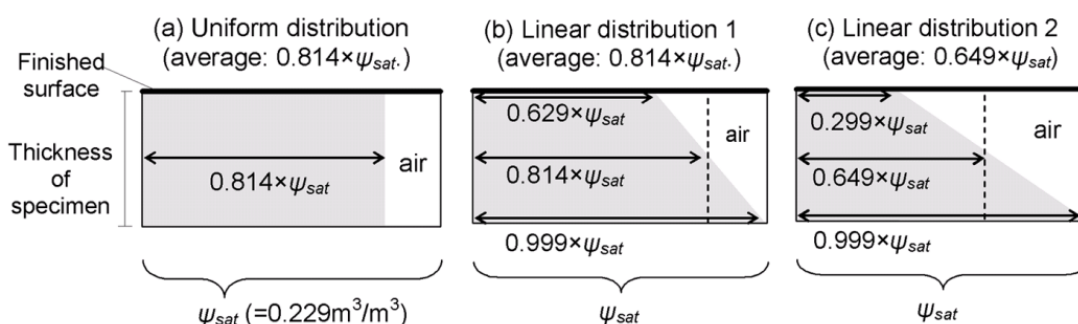


図 4.4.4 初期含水率分布

測定では、瓦内部の高い空気圧力が水の浸透を妨げた可能性が示唆された。したがって、初期の空気圧力と表面仕上げ層の透気率の影響についても検討を行う。パラメータの値を表 4.4.3 に示す。表 4.4.3 に太字で示した、初期含水率分布(b)、初期空気圧力 1.5[atm]、仕上げ層の透気抵抗 10 倍を基本条件とし、結果の比較を行う。

表 4.4.3 計算におけるパラメータ (Case 1-1、太字は基本条件)

初期含水率分布 (図 4.4.4)	(a) 一様分布 ($0.814 \times \psi_{sat}$)	(b) 直線分布 1 (平均: $0.814 \times \psi_{sat}$)	(c) 直線分布 2 (平均: $0.649 \times \psi_{sat}$)
初期空気圧力	1.0 atm	1.5 atm	1.6 atm
表面仕上げ層の 透気抵抗	R_{pfa} ($=7.45 \times 10^{10} [(\text{m}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{Pa})/\text{kg}]$)	$R_{pfa} \times 5.0$	$R_{pfa} \times 12.5$

図 4.4.5 と図 4.4.6 は、Case1-1 におけるメスピペットと上側水槽の水位を示している。これらは計算開始から6日目までの結果である。

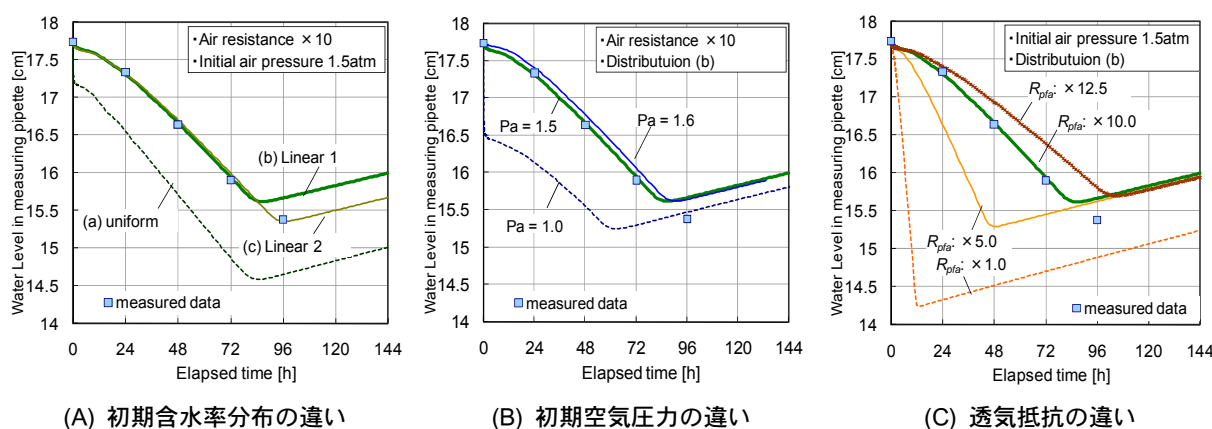


図 4.4.5 メスピペットの水位変化 (Case 0-1、計算開始後 6 日間の結果)

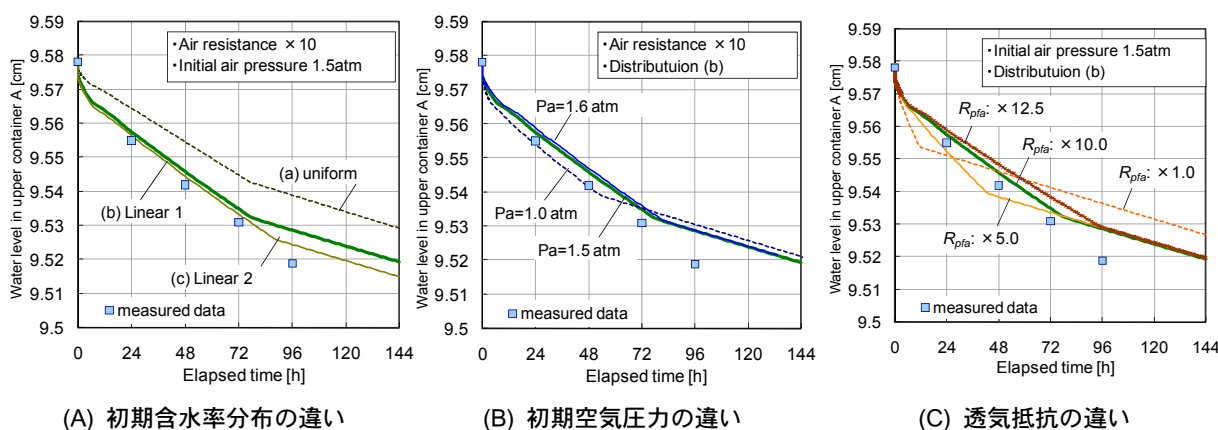


図 4.4.6 上側水槽の水位変化 (Case 0-1、計算開始後 6 日間の結果)

図 4.4.5(A)から、瓦の初期含水率分布を一様とした場合には、メスピペットの水位が最初に急激に低下する。これは、瓦の下部と下側表面の水圧差が、直線分布とした場合よりも大きいため、下側表面を通してメスピペット側からより多くの水が浸透したためと考えられる。初期含水率を直線分布とすると、計算開始から3日までは測定結果とよい一致を示すが、初期飽和度が高

い(b)直線分布1では、測定時よりも先にメスピペットの水位が上昇に転じている。このことから、初期飽和度は、最初に推定した値よりもさらに低い可能性もあるといえる。

図 4.4.5 (B)・(C)より、初期空気圧力が高ければ高いほど、また透気率が小さいほど空気が長く試料内部に残るため、試料への水の浸透は遅くなることがわかる。それゆえ、メスピペットの水位もしばらくの間下がり続ける。時期の差はあるものの、すべての計算条件においてメスピペットの水位は計算後半では上昇に転じた。種々の不確定要因を推定する必要があるため、計算後半では測定値のとのよい一致は見られなかったが、空気の影響を考慮することで、測定開始後にメスピペットの水位が下がり続けることは説明できたと考えられる。

図 4.4.6 (B)・(C)より、上側水槽の水位変化については初期空気圧力や透気率の影響はそれほど大きくはないが、(A)初期含水率分布は直線状とした方が測定値によく合っている。直線分布の場合、試料上側の含水率が低いいため吸引圧が大きく、より多くの水を浸透するため、上側水槽の水位低下が速くなったものと考えられる。このことから、測定を開始した時には、試料の上側に空気が滞留していたことが推察される。

4.4.3 表面仕上げ層を下側とした場合 (Case 2-1)

Case2-1におけるメスピペットと上側水槽の水位の測定値と計算値を図 4.4.7 に示す。この Case では、試料が装置の上に設置されてから4日後に測定を開始したため、初期飽和度を0.99とした。

試料上面に仕上げがなければ、測定開始直後は試料の上面から水が多く浸透する。試料下面には透気抵抗の高い仕上げがあることと、試料内部の空気は浮力を受けるため、空気は上方に移動し素早く抜ける。したがって、仕上げ層を下側とした場合は、空気が透水の抵抗となることはほとんどなく、上側水槽からメスピペットに向けて水が流れる。解析においても、仕上げ層を上とした場合と異なり、メスピペットの水位は測定開始後すぐに上昇し始めることが確認できた。

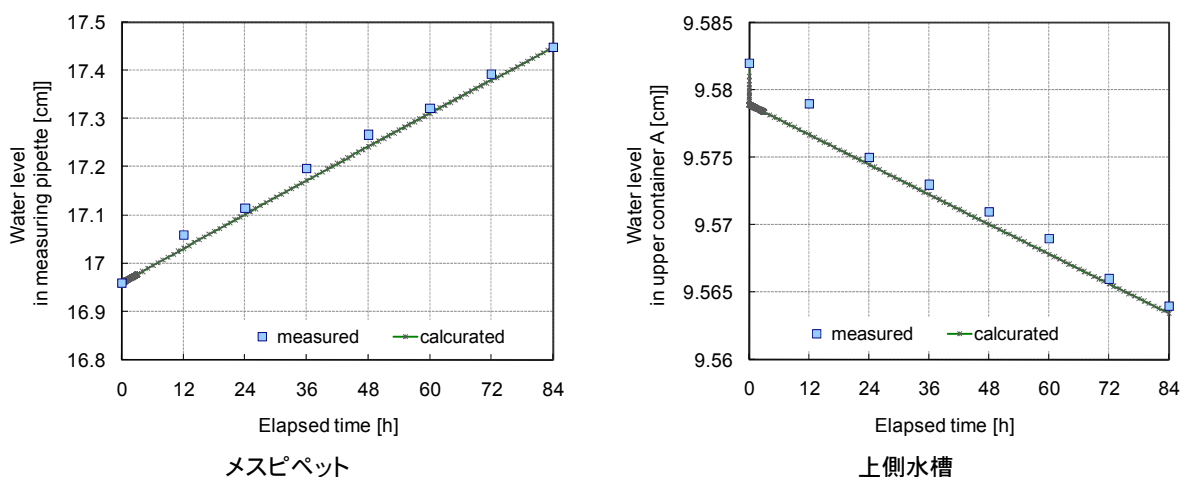


図 4.4.7 水位の計算結果 (Case 2-1)

4.5 第4章のまとめ

本章では、前章で示された空気が水分浸透の妨げとなる点について、簡単なモデルを用いて数値解析を行った。その結果、瓦内部の空気が抜けにくく、圧縮され圧力が上昇するような状況では、水分浸透へ与える空気の影響が大きいことを明らかにした。

特に空気の影響が問題となるのは、透水係数の測定のように両面から水圧がかかり空気が抜けにくい状況の時である。この場合、空気の存在を考えずに測定を行うと値を低く見積もる可能性があるため、物性値の測定という本来の目的が達せられない。測定前に試料内の空気を十分に抜くことと、測定開始時に試料内部が十分に飽和していることを確認する必要がある。

実環境下においては、いぶし瓦のように全面に透気抵抗の高い層をもつ材料に雨水が浸透するなど、飽和に近い条件下では内部の空気圧力が上昇し、水分が浸透しにくくなる可能性が考えられる。

第4章 参考文献

- [4-1] Filip Descamps : Continuum and discrete modelling of water and air transfer in porous media, Ph.D. thesis, Catholic University of Leuven, 1997.
- [4-2] R.J.M.De Wiest : Flow Through Porous Media, Academic Press Inc., U.S., p. 282, 2002.

第5章 凍結・融解過程を考慮した熱水分移動の基礎理論

5.1 はじめに

建築多孔質材料内に生じる熱と水分の同時移動に対しては、取り扱う現象（液水移動の有無）や適用領域の違いによる設計許容誤差の違いにより、各種の基礎式が示されている。

松本[5-1]は、それ以前の Philip、De Vries 及び Luikov らによる材料内の水分勾配及び温度勾配による水分流の表現を包括する基礎式を、非可逆過程の熱力学に基づいて導出した。水分の状態量に、自由水基準の化学ポテンシャル（Gibbs's Free Energy）を用いることで、これまで取り扱いが困難であった異種媒質が接合する内部境界の表現を容易にした。化学ポテンシャルは水分の状態、相に関係なく用いることができるため[5-2]、固体内の水分状態を統一的に記述することができる。

多孔体における結氷問題については、主に化学分野で多孔体内の毛管水の凝固点降下のメカニズムを説明する種々の理論が展開されている（例えば Puri[5-3]、樋口[5-4]など）。

松本、高、馬らは、凝固点温度の低下現象は、多孔体における固相・液相・気相水分の平衡を想定することで説明可能であるとし、多孔体内における凝固点降下と水分化学ポテンシャルの関係を導出した。また、土壌における実験によりその理論の妥当性を示した[5-5] [5-6]。

銚井、畑野、筆者らは、それらの基礎理論をふまえ、ALC[5-7]、グラスファイバーボード[5-8]、Leda Clay[5-9]、レンガ[5-10]等の建築材料について、周辺環境の影響や熱水分物性値の影響を検討した。多孔質材料内部での水分の凍結は、内部の含水率が飽和に近い（自由水基準の化学ポテンシャルが0に近い）ほど、凝固点降下は小さく 0°C付近で凍結を生じる。言い換えれば、本研究で取り上げている温暖地のように、-5°C程度までの温度域を対象とする場合、飽和に近い高含水率域でなければ凍結を生じないといえる。畑野らが行った数値解析では飽和付近を対象としていなかったため、本章では、外部から多量の水分が供給され飽和に至る過程を含めた数値解析手法を示す。

5.2 節では凍結融解過程の水の性質、特に多孔質材料中の凝固点降下について述べる。5.3 節では、松本により示された気・液・固を含む三相系の熱水分同時移動解析の理論を概説する。5.4 節では表面における熱水分移動の計算方法、特に、降雨を含む外部からの水分供給の取り扱い方と、飽和付近の扱い方を含む数値計算手法について述べる。5.5 節では、3 章で測定された粘土瓦の材料物性値を数値解析に適用できるよう整理を行う。

5.2 凍結・融解過程の水の性質

5.2.1 密度変化

水の密度は温度に依存し、大気圧 (101325[Pa]) 下では 3.98°C で最大密度 999.972[kg/m³] をとる [5-11]。0°C における水の密度は 999.84[kg/m³] であり、この水が凍結すると密度は 916.8[kg/m³] となる。この場合、 $999.84/916.8 \approx 1.09$ であるから体積は約 9% 増加し、膨張することとなる。

大気圧下で安定的に存在する氷 (氷 I) の密度は、-175°C での値に換算されても 920[kg/m³] であり [5-12]、氷の密度変化の温度依存性は水と比較し小さいといえる。通常の建築壁体において問題となる低温域は -40°C 程度までであり、この範囲では氷の密度は一定と扱っても差し支えないと考えられる。本研究では氷の密度を $\rho_i = 917.0$ [kg/m³] として扱う。

氷を含む三相系で材料内の熱移動を考える際には、固体実質部の熱容量に加え、各相水分の熱容量を考慮する必要がある。各相水分を含む材料の容積比熱 $c\rho\psi$ [J/m³K] は、式(5.2.1)の通りとなる。

$$c\rho\psi = c_b\rho_b\psi_b + c_g\rho_g\psi_g + c_l\rho_l\psi_l + c_i\rho_i\psi_i \quad (5.2.1)$$

ただし、水蒸気の密度 ρ_g (20°C における飽和水蒸気密度は 0.01729[kg/m³] [5-11]) は液水及び氷の密度と比較し十分に小さく、材料が乾燥に近い状態を扱うことは稀なので以降で述べる計算においては $c_g\rho_g\psi_g$ の項は無視する。

5.2.2 熱伝導率変化

0°C における水の熱伝導率は 0.561[W/mK] であり、空気の熱伝導率は 0.0241[W/mK] であるため [5-11]、多孔質材料中に液水が存在する場合、材料全体として熱伝導率は乾燥時と比較し大きくなる。特に高湿域を問題とする場合は材料内の含水率が高くなるため、その影響が顕著である。いくつかの建築材料については、熱伝導率と含水率の関係が測定されており [5-13]、熱伝導率は含水率の関数として式(5.2.2)のように表現することができる。

$$\lambda = f(\psi_l) \quad (5.2.2)$$

0°C における氷の熱伝導率は 2.2[W/mK] である [5-11] ため、材料中に氷がある場合には、液水のみの方と比較しさらに熱伝導率が大きくなる。ここでは、結氷による熱伝導率増大の影響を、液水含水率の増加とみなし、式(5.2.2)に代入して、式(5.2.2)' のように扱う。

$$\lambda = f\left(\psi_l + \frac{\lambda_i}{\lambda_l}\psi_i\right) \quad (5.2.2)'$$

なお、乾燥材料の熱伝導率も温度依存性があるが、含水による影響の方が大きいため、ここでは乾燥時の熱伝導率は温度によらず一定として扱う。

5.2.3 凝固点降下（結氷条件）

多孔質材料内部の水は、細孔の径に応じた毛管力を受け、同じ温度の自由水と比べて化学ポテンシャルが小さい。すなわち、自由水の化学ポテンシャルを0とすると、細孔中の水の化学ポテンシャルは負の値をとる。このような水においては、細孔径に依存した凝固点降下現象が生じる[5-14]。松本ら[5-6]は、熱力学の観点から、水分化学ポテンシャルを用いて凝固点降下度を以下のように与えた。

単位質量水分の Gibbs 自由エネルギーは次式で表される。

$$G = U + PV - TS \quad (5.2.3)$$

Gibbs 自由エネルギーの変化 dG は、

$$dG = dU + PdV + VdP - SdT - TdS \quad (5.2.4)$$

熱力学第一法則より、内部エネルギーの変化は与えられた熱量と外に対して行う仕事量との差に等しく、等圧過程においては、仕事量は体積変化に比例することから、

$$dU = dQ - dW = dQ - PdV \quad (5.2.5)$$

また、エントロピーの定義から、

$$dS = dQ/T \quad (5.2.6)$$

式(5.2.5)、式(5.2.6)を式(5.2.4)に代入して、

$$dG = dQ - PdV + PdV + VdP - SdT - T(dQ/T) = VdP - SdT \quad (5.2.7)$$

各相の化学ポテンシャルは単位質量あたりの Gibbs 自由エネルギーに等しいため、以下が成り立つ。

$$d\mu_g = V_g dP_g - S_g dT_g \quad (5.2.8)$$

$$d\mu_l = V_l dP_l - S_l dT_l \quad (5.2.9)$$

$$d\mu_i = V_i dP_i - S_i dT_i \quad (5.2.10)$$

三相系局所平衡仮定より各相の化学ポテンシャルと温度は等しいとすると、次式が成立する。

$$d\mu_g = d\mu_l = d\mu_i = d\mu \quad (5.2.11)$$

$$dT_g = dT_l = dT_i = dT \quad (5.2.12)$$

氷の内部圧力変化を0とすると、

$$dP_i = 0 \tag{5.2.13}$$

式(5.2.9)、式(5.2.10)、式(5.2.11)より、

$$V_l dP_l - S_l dT_l = -S_i dT_i \tag{5.2.14}$$

また、液水・氷の平衡より、

$$I_l - S_l T = I_i - S_i T \tag{5.2.15}$$

式(5.2.14)に式(5.2.15)を代入して変形すると、

$$dP_l = \frac{I_l - I_i}{V_l} \cdot \frac{dT}{T} = \frac{H_{li}}{V_l} \cdot \frac{dT}{T} \tag{5.2.16}$$

潜熱 H_{li} は、通常バルクの水の潜熱の値として $6.0139[\text{J/kmol}] (=333822[\text{J/kg}])$ が知られているが、Radjy はエンタルピーの測定結果から凍結の潜熱 H_{li} が温度の低下とともに減少することを、式(5.2.19)のように示している[5-15]。

$$H_{li} = (6.01593 + 0.0407T) / M_w \tag{5.2.19}$$

ここで、 T : 温度[°C]、 M_w : 水の分子量[kg/kmol] ($=18.01528$)

凝固点降下度と化学ポテンシャルの関係を、バルクの水の潜熱と式(5.2.19)を用いて計算したものを図 5.2.1 に示す。

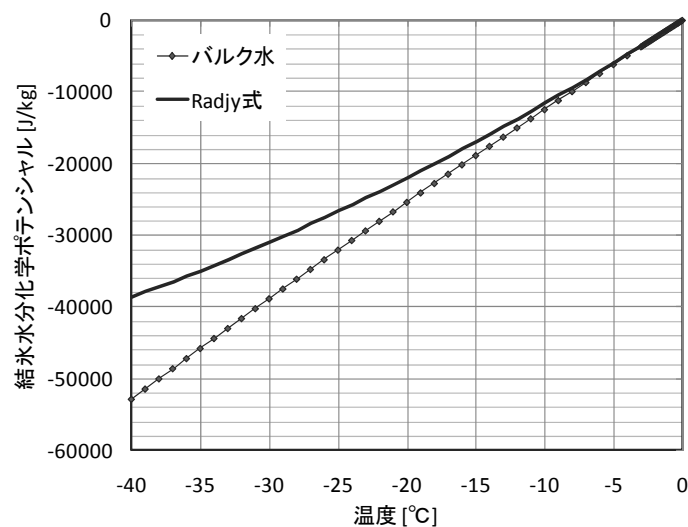


図 5.2.1 潜熱の扱い方の違いによる凝固点降下度の違い

潜熱の温度依存性が顕著に表れるのは -10°C を下回る範囲であり、本研究で対象とする -10°C 以上の温度域では、潜熱の扱い方による差はほとんどない。したがって、以降の計算においては、潜熱はバルクの水の値を用いることとする。

自由水の結氷温度を T_0 とすると、 $P_l=0$ の時 $T=T_0$ となる。式(5.2.16)の両辺を積分して、

$$P_l = \frac{H_{li}}{V_l} \log_e \left(\frac{T}{T_0} \right) \quad (5.2.17)$$

P_l を自由水基準の水分化学ポテンシャルで表わすと、 $P_l=\mu/V_l$ であるから、

$$\mu = H_{li} \log_e \left(\frac{T}{T_0} \right) \quad (5.2.18)$$

材料内温度が $T_l(<T_0)$ の時、材料内部の含水率が低く、液水の化学ポテンシャルが $\mu(T_l)$ より低い場合、液水は結氷せず不凍水となる。材料内部の含水率が上昇し、液水の化学ポテンシャルが $\mu(T_l)$ に達すると結氷する。

5.3 熱水分移動の基礎方程式

5.3.1 固体材料内の水分

固体材料の水分の状態（自由エネルギー）は、水分の化学ポテンシャル μ [J/kg]で表わされる。水分の化学ポテンシャルは水の状態（気相（水蒸気）・液相（水）・固相（氷））によらないため、高含水率領域から結氷する領域を扱う際に便利である。水分化学ポテンシャル μ [J/kg]と相対湿度 ϕ [-]には次式で表わされる関係がある。

$$\mu = R_v T \ln \phi \quad (5.3.1)$$

固体材料を一定の温湿度の湿り空気中に十分長い時間おき、これと平衡させた時の材料の含水率と相対湿度の関係を示したものを平衡含水率曲線（または等温吸着線）と呼ぶ（3.3.1節参照）。平衡含水率曲線では、一般に吸湿過程と放湿過程で異なる値をとる履歴現象が見られるが、履歴を無視すれば、平衡含水率 ψ （または ϕ ）は、温度 T と水分化学ポテンシャル μ または相対湿度 ϕ によって、一意に定まる。

また、材料が不飽和の時は水を吸引しようとする力が働き、これを吸引圧（サクション）と呼ぶ。吸引圧と水分化学ポテンシャルには、次の関係がある。

$$\mu = -\frac{P_{suc}}{\rho_w} \quad (5.3.2)$$

材料内の吸引圧と含水率の関係は、水分特性曲線の測定によって得られる（3.3.3節参照）。

5.3.2 二相系の熱水分同時移動方程式

多孔質材料内部で水分の凍結・融解が生じない場合の熱水分同時移動の方程式は式(5.3.3)と式(5.3.4)のようになる[5-2]。液相水分については、平衡含水率曲線の履歴を考慮せず、含水率 ψ に対応する水分化学ポテンシャル μ は一意に定まるとしている。この2式における未知変数は μ と T のみであるため、2式を連立することで解を求めることができる。

【水分収支式】

$$\left(\frac{\partial \rho_l \psi_l}{\partial \mu} \right) \frac{\partial \mu}{\partial t} = \nabla(\lambda'_{Tg} \nabla T) + \nabla\{(\lambda'_{\mu g} + \lambda'_{\mu l}) \nabla \mu\} \quad (5.3.3)$$

【エネルギー収支式】

$$c\rho\psi \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla(\lambda \nabla T) + H_{gl} \{ \nabla(\lambda'_{Tg} \nabla T) + \nabla(\lambda'_{\mu g} \nabla \mu) \} \quad (5.3.4)$$

$$\text{ただし、} c\rho\psi = c_b \rho_b \psi_b + c_l \rho_l \psi_l$$

5.3.3 三相系の熱水分同時移動方程式

多孔質材料内部で水分の凍結・融解が生じる系は、気・液・固相水分を含む三相系として取り扱われる。三相系の場合の材料内部の水分とエネルギー収支の模式図を図 5.3.1 に示す。

水分移動は気相・液相水分のみで生じ、固相水分は移動しない。気相・液相間での蒸発・凝縮、液相・固相間での凝固・融解により液水含水率と含水率が変化し、変化量にともなう潜熱が発生する。これらの潜熱と、液相・固相水分と固体実質部の熱伝導により温度が決定される。

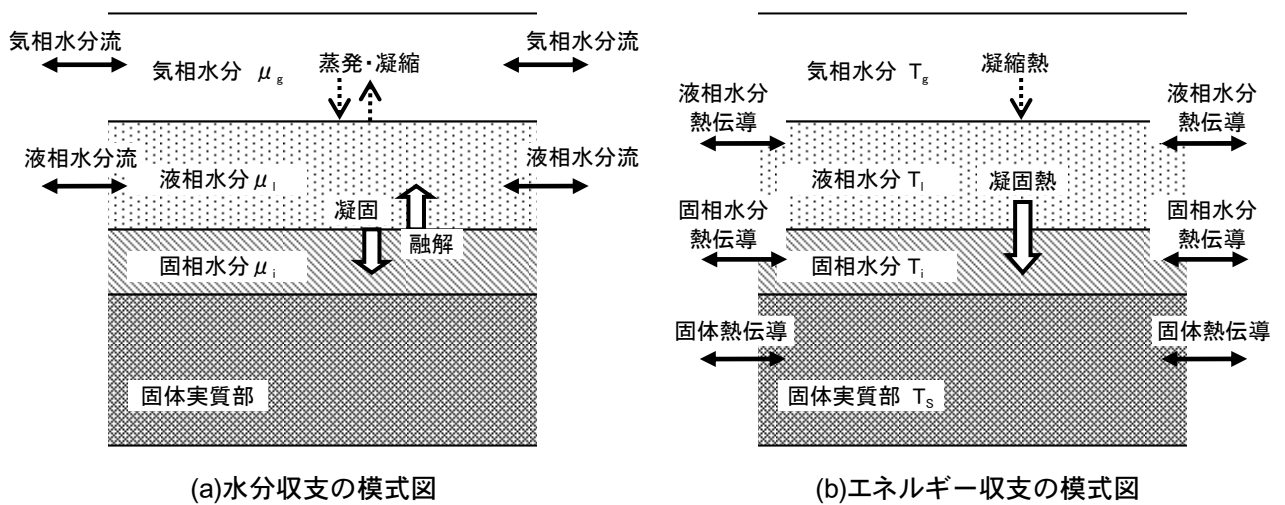


図 5.3.1 多孔質材料内部の三相系熱水分収支の模式図

(1) 水分収支式

水分に関する基礎方程式を導出するにあたり、以下の基本仮定を置く。

- 1) 多孔質材料内の各相（気・液・固）の水分は局所平衡しているとする。すなわち、

$$\mu = \mu_g = \mu_l = \mu_i \quad (5.3.5)$$

が成立する（図 5.3.1(a)）。

- 2) 多孔質材料の実質部の移動速度は0、すなわち凍結及び融解中の含氷率 ψ_i の増減により引き起こされる材料の毛細管構造の変形は十分に小さく、水分移動への影響はない。
 3) 氷と液水で空隙を満たさない不飽和域では、水分化学ポテンシャルは液水含水率により一意に定まる。すなわち、履歴現象及び過冷却現象は存在しない。
 4) 液水が結氷する際の体積増加は考慮しない。

なお、水分化学ポテンシャル－含水率関係は、結氷条件を満たす・満たさないにかかわらず同じであるものとして扱う。土壌（Leda Clay）においては、この妥当性が確認されている[5-16]。

多孔質材料中の水蒸気、液水、氷の含量は以下の関係を有する。

$$\psi_s + \psi_g + \psi_l + \psi_i = 1 \quad (5.3.6)$$

$$\rho_g \psi_g + \rho_l \psi_l + \rho_i \psi_i = \rho_w \psi_w \quad (5.3.7)$$

水分の凍結・融解を考慮した場合の各相水分についての水分収支式は、以下のようになる。

【気相】

$$\frac{\partial \rho_g \psi_g}{\partial t} = -\nabla(-\lambda'_{Tg} \nabla T) - \nabla(-\lambda'_{\mu g} \nabla \mu) - (M_{gl} + M_{gi}) \quad (5.3.8)$$

【液相】

$$\frac{\partial \rho_l \psi_l}{\partial t} = -\nabla(-\lambda'_{Tl} \nabla T) - \nabla(-\lambda'_{\mu l} \nabla \mu) - (M_{lg} + M_{li}) \quad (5.3.9)$$

【固相】

$$\frac{\partial \rho_i \psi_i}{\partial t} = -\nabla(-\lambda'_{Ti} \nabla T) - \nabla(-\lambda'_{\mu i} \nabla \mu) - (M_{ig} + M_{il}) \quad (5.3.10)$$

ただし、 M_{jk} は j 相から k 相への相変化量[kg/m³s]であり、 $M_{jk} = -M_{kj}$ である。したがって、

$$-(M_{gl} + M_{gi}) - (M_{lg} + M_{li}) - (M_{ig} + M_{il}) = 0 \quad (5.3.11)$$

となり、相変化量の和は0となる。

式(5.3.8)、式(5.3.9)、式(5.3.10)の辺々を足し合わせ、式(5.3.11)を代入すると、

$$\frac{\partial \rho_g \psi_g}{\partial t} + \frac{\partial \rho_l \psi_l}{\partial t} + \frac{\partial \rho_i \psi_i}{\partial t} = \nabla \cdot \{(\lambda'_{Tg} + \lambda'_{Tl} + \lambda'_{Ti}) \nabla T\} + \nabla \cdot \{(\lambda'_{\mu g} + \lambda'_{\mu l} + \lambda'_{\mu i}) \nabla \mu\} \quad (5.3.12)$$

気相水分の質量変化は液相・固相に比べて無視できるとすると、

$$\frac{\partial \rho_g \psi_g}{\partial t} \approx 0 \quad (5.3.13)$$

液相水分の移動がダルシー則に従うとすると、温度勾配による水分移動は無視できるので、

$$\lambda'_{Tl} = 0 \quad (5.3.14)$$

結氷した水分の移動、温度勾配による液相水分移動は小さいとすると、

$$\lambda'_{Ti} = 0, \quad \lambda'_{\mu i} = 0 \quad (5.3.15)$$

式(5.3.12)に式(5.3.13)、式(5.3.14)、式(5.3.15)を代入すると、次の水分収支式が得られる。

$$\frac{\partial \rho_l \psi_l}{\partial t} + \frac{\partial \rho_i \psi_i}{\partial t} = \nabla(\lambda'_{Tg} \nabla T) + \nabla\{(\lambda'_{\mu g} + \lambda'_{\mu l}) \nabla \mu\} \quad (5.3.16)$$

平衡含水率曲線の勾配($\partial \psi / \partial \mu$)を代入して整理すると、

$$\left(\frac{\partial \rho_l \psi_l}{\partial \mu} \right) \frac{\partial \mu}{\partial t} = \nabla(\lambda'_{Tg} \nabla T) + \nabla\{(\lambda'_{\mu g} + \lambda'_{\mu l}) \nabla \mu\} - \frac{\partial \rho_i \psi_i}{\partial t} \quad (5.3.17)$$

(2) エネルギー収支式

材料内のエネルギー収支は、次式で表わされる。

$$\begin{aligned} & \frac{\partial c_m \rho_m T \psi_m}{\partial t} + \frac{\partial I_g \rho_g \psi_g}{\partial t} + \frac{\partial I_l \rho_l \psi_l}{\partial t} + \frac{\partial I_i \rho_i \psi_i}{\partial t} \\ & = \nabla(\lambda \nabla T) + \nabla(I_g \cdot J_g) + \nabla(I_l \cdot J_l) + \nabla(I_i \cdot J_i) \end{aligned} \quad (5.3.18)$$

定圧変化におけるエンタルピーの変化は、 $dI = c \cdot dT$ であるから、式(5.3.18)の左辺を展開すると、以下ようになる。

$$\begin{aligned} (\text{左辺}) & = \left(c_m \rho_m \psi_m \frac{\partial T}{\partial t} + T \frac{\partial c_m \rho_m \psi_m}{\partial t} \right) + \left(\rho_g \psi_g \frac{\partial I_g}{\partial t} + I_g \frac{\partial \rho_g \psi_g}{\partial t} \right) \\ & \quad + \left(\rho_l \psi_l \frac{\partial I_l}{\partial t} + I_l \frac{\partial \rho_l \psi_l}{\partial t} \right) + \left(\rho_i \psi_i \frac{\partial I_i}{\partial t} + I_i \frac{\partial \rho_i \psi_i}{\partial t} \right) \quad (5.3.19) \\ & = \left(c_m \rho_m \psi_m \frac{\partial T}{\partial t} + T \frac{\partial c_m \rho_m \psi_m}{\partial t} \right) + \left(c_g \rho_g \psi_g \frac{\partial T_g}{\partial t} + I_g \frac{\partial \rho_g \psi_g}{\partial t} \right) + \dots \end{aligned}$$

固体実質部は変化しないため $\partial \rho_m \psi_m = \text{一定}$ とし、 $c\rho\psi = c_m \rho_m \psi_m + c_l \rho_l \psi_l + c_i \rho_i \psi_i$ とおくと、

$$(\text{左辺}) = c\rho\psi \frac{\partial T}{\partial t} + I_g \frac{\partial \rho_g \psi_g}{\partial t} + I_l \frac{\partial \rho_l \psi_l}{\partial t} + I_i \frac{\partial \rho_i \psi_i}{\partial t} \quad (5.3.19)'$$

一方、式(5.3.18)の右辺は、 $\nabla I = c \cdot \nabla T$ であることと、各相水分流が

$$J_g = \lambda'_{Tg} \nabla T + \lambda'_{\mu g} \nabla \mu, \quad J_l = \lambda'_{\mu l} \nabla \mu, \quad J_i = 0 \quad (5.3.20)$$

と表わされることを用いて、以下のように展開できる。

$$\begin{aligned} (\text{右辺}) &= \nabla(\lambda \nabla T) + J_g \nabla I_g + I_g \nabla J_g + J_l \nabla I_l + I_l \nabla J_l \\ &= \nabla(\lambda \nabla T) + (J_g c_g + J_l c_l) \nabla T + I_g \nabla(\lambda'_{Tg} \nabla T + \lambda'_{\mu g} \nabla \mu) + I_l \nabla \lambda'_{\mu l} \nabla \mu \end{aligned} \quad (5.3.21)$$

$(J_g c_g + J_l c_l) \nabla T$ は十分小さいので無視し、さらに式(5.3.8)、式(5.3.9)を代入して、

$$(\text{右辺}) = \nabla(\lambda \nabla T) + I_g \left\{ \frac{\partial \rho_g \psi_g}{\partial t} + (M_{gl} + M_{gi}) \right\} + I_l \left\{ \frac{\partial \rho_l \psi_l}{\partial t} + (M_{lg} + M_{li}) \right\} \quad (5.3.21)'$$

ここで、式(5.3.19)'と式(5.3.21)'を等号で結び整理すると、

$$c\rho\psi \frac{\partial T}{\partial t} + I_i \frac{\partial \rho_i \psi_i}{\partial t} = \nabla(\lambda \nabla T) + I_g (M_{gl} + M_{gi}) + I_l (M_{lg} + M_{li}) \quad (5.3.22)$$

式(5.3.10)で $\lambda'_{Tg}=0$ 、 $\lambda'_{\mu g}=0$ とすると、固相水分収支式は、

$$\frac{\partial \rho_i \psi_i}{\partial t} = M_{gi} + M_{li} \quad (5.3.23)$$

式(5.3.22)に式(5.3.23)を代入して整理すると、

$$c\rho\psi \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla(\lambda \nabla T) + (I_g - I_l) M_{gl} + (I_g - I_l) M_{gi} + (I_l - I_i) M_{li} \quad (5.3.24)$$

j相とk相のエンタルピーの差 $(I_j - I_k)$ が、j相からk相への相変化熱 H_{jk} に等しいとすると、

$$c\rho\psi \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla(\lambda \nabla T) + H_{gl} M_{gl} + H_{gi} M_{gi} + H_{li} M_{li} \quad (5.3.22)'$$

式(5.3.8)、式(5.3.13)より、気相水分収支式は、

$$M_{gl} + M_{gi} = \nabla \cdot (\lambda'_{Tg} \nabla T) + \nabla(\lambda'_{\mu g} \nabla \mu) \quad (5.3.25)$$

式(5.3.25)を式(5.3.22)'に代入して展開すると、

$$\begin{aligned}
 c\rho\psi \frac{\partial T}{\partial t} &= \nabla(\lambda\nabla T) + H_{gl} \left\{ \nabla \cdot (\lambda'_{Tg} \nabla T) + \nabla(\lambda'_{\mu g} \nabla \mu) \right\} - H_{gl} M_{gi} + H_{gi} M_{gi} + H_{li} M_{li} \\
 &= \nabla(\lambda\nabla T) + H_{gl} \left\{ \nabla \cdot (\lambda'_{Tg} \nabla T) + \nabla(\lambda'_{\mu g} \nabla \mu) \right\} - (I_g - I_l) M_{gi} + (I_g - I_i) M_{gi} + H_{li} M_{li} \\
 &= \nabla(\lambda\nabla T) + H_{gl} \left\{ \nabla \cdot (\lambda'_{Tg} \nabla T) + \nabla(\lambda'_{\mu g} \nabla \mu) \right\} + (I_l - I_i) M_{gi} + H_{li} M_{li} \\
 &= \nabla(\lambda\nabla T) + H_{gl} \left\{ \nabla \cdot (\lambda'_{Tg} \nabla T) + \nabla(\lambda'_{\mu g} \nabla \mu) \right\} + H_{li} (M_{gi} + M_{li})
 \end{aligned}$$

式(5.3.23)を代入して整理して、

$$c\rho\psi \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla(\lambda\nabla T) + H_{gl} \left\{ \nabla(\lambda'_{Tg} \nabla T) + \nabla(\lambda'_{\mu g} \nabla \mu) \right\} + H_{li} \frac{\partial \rho_i \psi_i}{\partial t} \quad (5.3.26)$$

$$\text{ただし、 } c\rho\psi = c_m \rho_m \psi_m + c_l \rho_l \psi_l + c_i \rho_i \psi_i$$

式(5.3.17)と式(5.3.26)では、平衡含水率関係 (μ と ψ_l) がわかれば、 T 、 μ 、 ψ_i の3つが未知数となる。5.2.3節で示した結氷が生じる際の温度 T と化学ポテンシャル μ の関係を決定する式(5.2.18)を合わせて、三相系の熱水分同時移動方程式の基礎式とする。

5.3.4 空気に接する表面における熱・水分移動の扱い

空気に接する固体表面における対流熱伝達率 α_c [$\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$] は、外部風速 v [m/s] を用いて粗面におけるユルゲスの式 (式(5.3.27)・式(5.3.28)) により求める。

$$\alpha_c = 6.1 + 4.2v \quad (v \leq 5 \text{ [m/s]}) \quad (5.3.27)$$

$$\alpha_c = 7.50v^{0.78} \quad (v > 5 \text{ [m/s]}) \quad (5.3.28)$$

放射による熱移動は、気象データから日射や長波長放射を考慮して決定する。詳細は第7章に示す。放射熱伝達率を用いる場合は、材料表面の放射率を0.9として求めた汎用的な値 $\alpha_r = 5.1$ [$\text{W}/\text{m}^2 \text{K}$] を用いる[5-17]。

空気に接する固体表面における湿気伝達率 α'_m [$\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{Pa})$] は、対流熱伝達率を用いてルイスの関係 (式(5.3.29)) より求める。

$$\alpha'_m = \frac{\alpha_c}{C_{pa} \cdot \rho_a \cdot R_v \cdot T} \quad (5.3.29)$$

ここで、本解析においては水分移動のポテンシャルを化学ポテンシャルとしているため、温度とポテンシャル勾配による水分伝達率を求める。表面伝達層における水分流 J_{vs} [$\text{kg}/\text{m}^2 \text{s}$] は次式のように表される。

$$J_{vs} = \alpha'_m (P_{vo} - P_{vs}) = \alpha'_\mu (\mu_o - \mu_s) + \alpha'_T (T_o - T_s) \quad (5.3.30)$$

したがって、 α'_μ [kg/(m²·s·(J/kg))], α'_T [kg/(m²·s·K)]は、それぞれ式(5.3.31)、式(5.3.32)により求められる。

$$\alpha'_\mu = \alpha'_m \frac{\partial P_v}{\partial \mu} = \alpha'_m \frac{P_{vs}}{R_v T} e^{\frac{\mu}{R_v T}} \quad (5.3.31)$$

$$\alpha'_T = \alpha'_m \frac{\partial P_v}{\partial T} = \alpha'_m \left(\frac{dP_{vs}}{dT} - \frac{P_{vs} \cdot \mu}{R_v T^2} \right) e^{\frac{\mu}{R_v T}} \quad (5.3.32)$$

空気に接する固体表面での熱・水分収支式は、 \mathbf{n} を固体表面の内向き単位法線ベクトルとして、それぞれ式(5.3.33)、式(5.3.34)となる。

$$(\alpha + H_{gl} \alpha'_T)(T_o - T_s) + H_{gl} \alpha'_\mu (\mu_o - \mu_s) = -\lambda \frac{\partial T}{\partial n} - H_{gl} \left(\lambda'_{\mu g} \frac{\partial \mu}{\partial n} + \lambda'_{Tg} \frac{\partial T}{\partial n} \right) \quad (5.3.33)$$

$$\alpha'_\mu (\mu_o - \mu_s) + \alpha'_T (T_o - T_s) = -\lambda'_\mu \frac{\partial \mu}{\partial n} - \lambda'_{Tg} \frac{\partial T}{\partial n} \quad (5.3.34)$$

5.4 数値計算手法

5.4.1 基礎方程式の離散化

前節で述べた基礎方程式を用いて、材料内の温度と含水率、結氷量を予測する数値解析を行う。数値解析においては方程式を離散化し、差分法による計算を行う。空間については中心差分、時間については前進差分とする。

2次元の場合のコントロールボリューム (CV) を図 5.4.1 に示す。図中(i,j)セル内における水分収支式とエネルギー収支式は、以下のようになる。

【水分収支式】

$$\rho_l \frac{\psi_i^{t+\Delta t} - \psi_i^t}{\Delta t} + \rho_i \frac{\psi_i^{t+\Delta t} - \psi_i^t}{\Delta t} = \frac{J_x(i,j) - J_x(i+1,j)}{\Delta x} + \frac{J_y(i,j) - J_y(i,j+1)}{\Delta y} \quad (5.4.1)$$

$$\text{ここで、} \quad J_x(i,j) = \frac{\lambda'_{\mu x1}}{\Delta x_1} (\mu(i-1,j) - \mu(i,j)), \quad J_x(i+1,j) = \frac{\lambda'_{\mu x2}}{\Delta x_2} (\mu(i,j) - \mu(i+1,j))$$

$$J_y(i,j) = \frac{\lambda'_{\mu y1}}{\Delta y_1} (\mu(i,j-1) - \mu(i,j)), \quad J_y(i,j+1) = \frac{\lambda'_{\mu y2}}{\Delta y_2} (\mu(i,j) - \mu(i,j+1))$$

【エネルギー収支式】

$$c\rho\psi\frac{T^{t+\Delta t}-T^t}{\Delta t}-H_{li}\cdot\rho_i\frac{\psi_i^{t+\Delta t}-\psi_i^t}{\Delta t}=\frac{\{Q_X(i,j)-Q_X(i+1,j)\}+H_{gl}\{J_{gX}(i,j)-J_{gX}(i+1,j)\}}{\Delta x}+\frac{\{Q_Y(i,j)-Q_Y(i,j+1)\}+H_{gl}\{J_{gY}(i,j)-J_{gY}(i,j+1)\}}{\Delta y} \quad (5.4.2)$$

$$\text{ここで、 } Q_X(i,j)=\frac{\lambda_{X1}}{\Delta x_1}(T(i-1,j)-T(i,j)), \quad Q_X(i+1,j)=\frac{\lambda_{X2}}{\Delta x_2}(T(i,j)-T(i+1,j))$$

$$Q_Y(i,j)=\frac{\lambda_{Y1}}{\Delta y_1}(T(i,j-1)-T(i,j)), \quad Q_Y(i,j+1)=\frac{\lambda_{Y2}}{\Delta y_2}(T(i,j)-T(i,j+1))$$

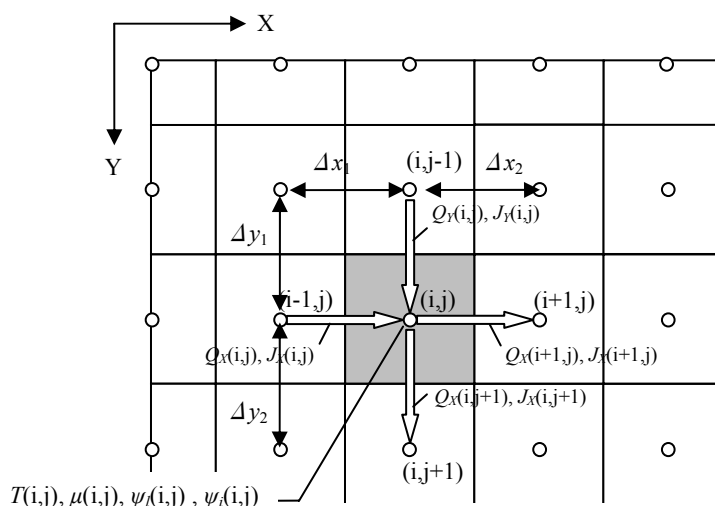


図 5.4.1 2次元のコントロールボリューム

5.4.2 解析的手法（二相系）

本解析においては、材料表面からの液水浸透の影響を精度よく把握するため、表面近傍でのセル幅を小さくしている。この場合、計算の安定性を確保するため時間刻みを非常に小さくする必要があるが、計算時間が膨大となるため、セル幅が小さい範囲では、対象とする差分点に隣接する差分点の状態量 T と μ を定数として、基礎方程式(5.3.17)、式(5.3.26)について常微分方程式(5.4.3)、(5.4.5)を作成する[5-18]。対象とする差分点 (i,j) の係数を c_1 、定数項を c_2 とすると、常微分方程式の解は(5.4.4)、(5.4.6)で表される。二相系の場合は、ここで得られた解を用いて解析を行う。

【水分収支式】（式中の記号は、図 5.4.1 参照）

$$A_1 \frac{d\mu(i,j)}{dt} = c_1 \mu(i,j) + c_2 \quad (5.4.3)$$

$$\mu(i, j)^t = \left(\mu(i, j)^0 + \frac{c_2}{c_1} \right) e^{\left(\frac{c_1 t}{A_1} \right)} - \frac{c_2}{c_1} \quad (5.4.4)$$

ここで、 $A_1 = \rho_w \frac{\partial \psi}{\partial \mu} V$ 、 $V = \Delta x \Delta y \Delta z$ 、 $S_x = \Delta y \Delta z$ 、 $S_y = \Delta x \Delta z$ ($\Delta z=1$)

$$c_1 = - \left(\frac{\lambda'_{\mu X1}}{\Delta x_1} S_x + \frac{\lambda'_{\mu X2}}{\Delta x_2} S_x \right) - \left(\frac{\lambda'_{\mu Y1}}{\Delta y_1} S_y + \frac{\lambda'_{\mu Y2}}{\Delta y_2} S_y \right)$$

$$c_2 = S_x \left(\frac{\lambda'_{\mu X1}}{\Delta x_1} \mu(i-1, j) + \frac{\lambda'_{\mu X2}}{\Delta x_2} \mu(i+1, j) + J_{TgX}(i, j) - J_{TgX}(i+1, j) \right)$$

$$+ S_y \left(\frac{\lambda'_{\mu Y1}}{\Delta y_1} \mu(i, j-1) + \frac{\lambda'_{\mu Y2}}{\Delta y_2} \mu(i, j+1) + J_{TgY}(i, j) - J_{TgY}(i, j+1) \right)$$

【エネルギー収支式】 (式中の記号は、図 5.4.1 参照)

$$A_2 \frac{dT(i, j)}{dt} = c_3 T(i, j) + c_4 \quad (5.4.5)$$

$$T(i, j)^t = \left(T(i, j)^0 + \frac{c_4}{c_3} \right) e^{\left(\frac{c_3 t}{A_2} \right)} - \frac{c_4}{c_3} \quad (5.4.6)$$

ここで、 $A_2 = c \rho \psi V$ 、 $V = \Delta x \Delta y \Delta z$ 、 $S_x = \Delta y \Delta z$ 、 $S_y = \Delta x \Delta z$ ($\Delta z=1$)

$$c_1 = - \left(\frac{\lambda_{X1} + H_{gl} \cdot \lambda'_{TgX1}}{\Delta x_1} S_x + \frac{\lambda_{X2} + H_{gl} \cdot \lambda'_{TgX2}}{\Delta x_2} S_x \right)$$

$$- \left(\frac{\lambda_{Y1} + H_{gl} \cdot \lambda'_{TgY1}}{\Delta y_1} S_y + \frac{\lambda_{Y2} + H_{gl} \cdot \lambda'_{TgY2}}{\Delta y_2} S_y \right)$$

$$c_2 = S_x \left(\frac{\lambda_{X1}}{\Delta x_1} T(i-1, j) + \frac{\lambda_{X2}}{\Delta x_2} T(i+1, j) + H_{gl} (J_{\mu gX}(i, j) - J_{\mu gX}(i+1, j)) \right)$$

$$+ S_y \left(\frac{\lambda_{Y1}}{\Delta y_1} T(i, j-1) + \frac{\lambda_{Y2}}{\Delta y_2} T(i, j+1) + H_{gl} (J_{\mu gY}(i, j) - J_{\mu gY}(i, j+1)) \right)$$

5.4.3 飽和付近の扱い方

多孔質建築材料では、相対湿度 99%以上の飽和付近の領域において平衡含水率曲線の勾配が急激に大きくなる場合があり、前進差分で計算を行う際に発散してしまう可能性がある。これを防止するには時間刻みを小さくする方法が考えられるが、非常に長い計算時間を要するため現実的ではない。

ここでは、CV が飽和しているあるいは飽和に達する場合には、以下の手順に従い計算を行うこととする。

(1) 液水と氷で飽和する場合

材料内空隙は液水と氷で飽和しているため、気相水分（水蒸気）は流入しないものとする。液相水分については、含水率が上昇する方向に駆動力が働いたとしても、セル内のポテンシャルは増加するが、含水率が空隙率を超えることはない。したがって、式(5.3.17)に示す水分の収支がとれるように水分流を調整して計算を行い、次の時間の水分化学ポテンシャルを決定する。

$$\frac{J_x(i, j)}{\Delta x} + \frac{J_y(i, j)}{\Delta y} - \rho_i \frac{\psi_i^{t+1} - \psi_i^t}{\Delta t} = \frac{J_x(i+1, j)}{\Delta x} + \frac{J_y(i, j+1)}{\Delta y} \quad (5.4.7)$$

この時、得られた化学ポテンシャルは、平衡含水率関係を満たさず、含水率に対応した値よりもプラス側の値をとる。この時の液水含水率は、空隙率と含水率の差とするのが妥当である。

温度は、結氷条件を示す式(5.2.18)から化学ポテンシャルを用いて求められる。含水率はエネルギー収支を示す式(5.3.26)より得られる。プラス側となった化学ポテンシャルに対応する結氷温度は実際よりも高めに算出され、その結果、含水率も多めに見積もられる。次の時間の含水率が空隙率を超える場合には、空隙を超えないように含水率の変化量を定め、温度を修正する。

(2) 氷で飽和する場合

空隙内部が氷で飽和している場合は、気相・液相水分ともに流入することができない。この場合、水分の移動として考えられるのは、氷が融解してできた液相水分の流出だけである。含水率は増加しないため、含水率の変化は $\Delta\psi_i \leq 0$ を満たす。水と氷で飽和する場合と同様に、式(5.3.17)を満たすように化学ポテンシャルの値を求める。この時、水分が流入する方向の場合は、水分流を0とおき計算する。結氷条件式から温度を、エネルギー収支式から含水率の変化量を求める。

5.4.4 外部からの水分供給の扱い方

(1) 屋根面にあたる降雨量の推定

気象観測データにおいて、降雨量はある時間内に地表の水平面に達した降水の深さとして、10分間、1時間、1日などの積算値として表される。雨の強さは時々刻々と変化しており、瞬間的な雨の強さを表すには降雨強度（単位時間あたりの雨量）が用いられる[5-19]。これは屋根表面に当たる雨水の流入速度に関係する。

表 5.4.1 に京都市の降水量の最大記録[5-11]を示す。例えば10分間降水量から降雨強度が10分間で変化しないとして2.6 [mm/min.]とすると、1時間では156 [mm]となり、同日に観測された1時間降水量の最大記録を超えてしまう。同時間内に、降雨強度の大きい時間と小さい時間があったことが推測できる。

表 5.4.1 京都市の降水量最大記録（カッコ内は記録日）

10分間降水量	1時間降水量	1日降水量
26 mm	88 mm	289 mm
(1980.8.26)	(1980.8.26)	(1959.8.13)

(2) 屋根面に当たる雨量

気象データから得られる降雨量は一般的に水平面が受ける雨量 R_h であるが、屋根には勾配があり、雨は風の影響を受け斜めに降るため、厳密には屋根面が受ける雨量は R_h ではない。

空気中の水滴の落下終速度は雨滴の直径によって変化するが、0~10[m/s]の範囲にある[5-20]。雨滴の落下角度（降雨の傾斜角） θ_r は、水平方向の外部風速を U_w 、雨滴の落下終速度を U_r とすると、式(5.4.8)で表される。降雨の傾斜角と風速、落下終速度の関係を図 5.4.2 に示す。

$$\theta_r = \arctan(U_r / U_w) \tag{5.4.8}$$

京都市の気象データから冬期 11~3 月の風速の出現頻度を図 5.4.3 に示す。最大風速は 4.8 [m/s] である。半数以上の時間で風速は 1.0 [m/s] 以下である。外部風速が 1.0[m/s] 以下の場合、降雨の傾斜角は図 5.4.2 から概ね 45° 以上となる。

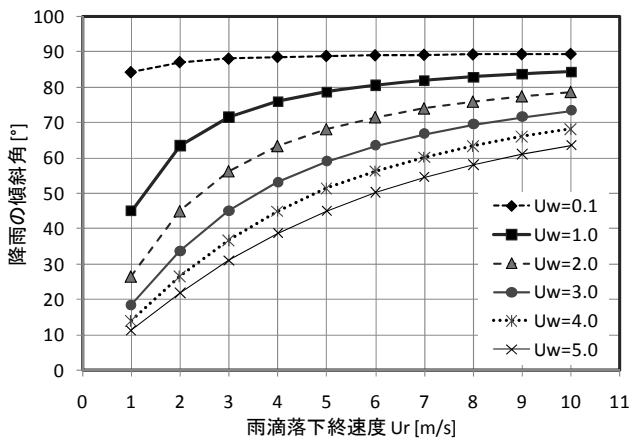


図 5.4.2 降雨の傾斜角と風速、落下終速度の関係

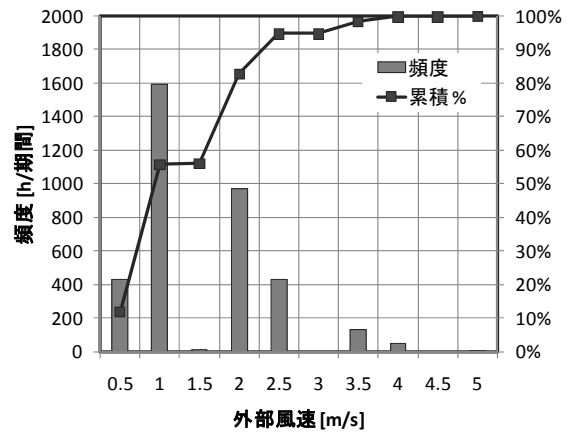


図 5.4.3 京都市の冬期の風速出現頻度

雨滴が一樣の傾きで落下すると仮定し、その水平面に対する傾斜角を β 、屋根面の勾配を θ 、降雨の方位角と屋根面の方位角の差を δ とすると、任意の勾配と屋根面上の雨量（屋根面にそのまま溜まったと仮定した時の深さ） R_r は理論上、式(5.4.9)で表される[5-19]。

$$R_r = R_h \left(\cos \theta + \frac{\sin \theta}{\tan \beta} \cos \delta \right) \tag{5.4.9}$$

4 寸勾配 ($\alpha=21.8^\circ$) と 10 寸勾配 ($\alpha=45^\circ$) の屋根における、 R_r/R_h と降雨の傾斜角 θ 、降雨の方位角と屋根面の方位角の差 δ の関係を図 5.4.4 に示す。実際の降雨時は雨滴の大きさは一樣ではなく落下角度も異なるため、式(5.4.9)で屋根面に当たる降雨量を求めることはできないが、大略推測することは可能である。

屋根面が最も多く雨を受けるのは降雨の方位角と屋根面の方位角が同じ場合 ($\delta=0^\circ$) であり、降雨の傾斜角を 45° とすると、4 寸勾配では屋根面に当たる雨量は水平面の約 1.3 倍、10 寸勾配では約 1.4 倍程度として考えなくてはならない。

しかしながら、京都市の冬期間の風速は1m/s以下となることが多く、風速が小さいほど降雨の傾斜角は90°に近付くこと、降雨と屋根面の方位角が同じであっても降雨の傾斜角が90°に近付くと屋根面降水量と水平面降水量の差は小さくなること、降雨時の風向や風速が一定でないこと等を考慮し、本解析においては屋根面降水量は水平面降水量に等しいとして計算を行う。今後、強風地域で勾配の大きい屋根に対する解析を行う際は、配慮が必要である。

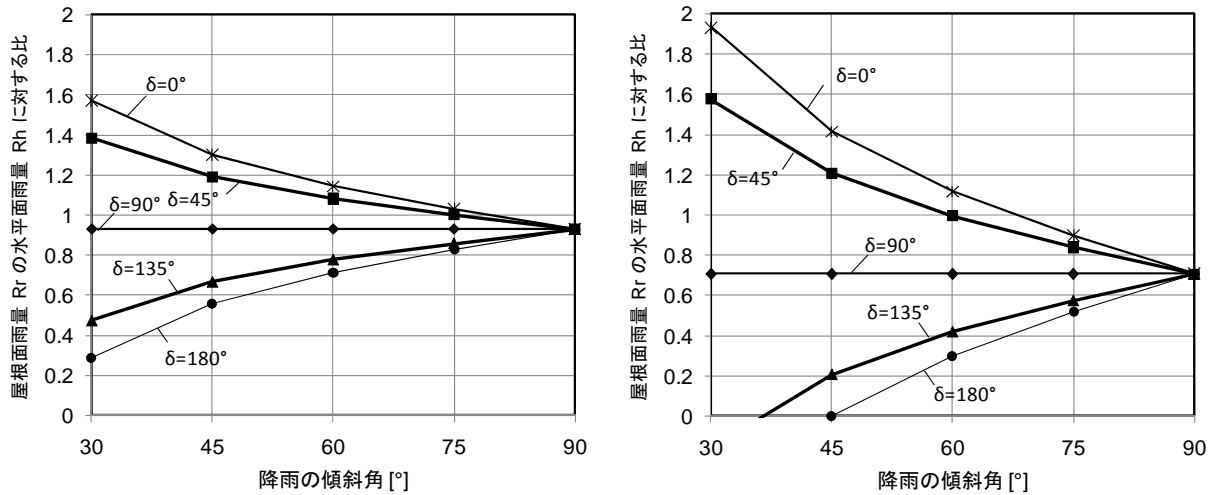


図 5.4.4 R_r/R_h と降雨の傾斜角 θ 、降雨と屋根面の方位角の差 δ の関係
(左：4 寸勾配、右：10 寸勾配)

(3) 降雨時の屋根表面の流層厚と付着する水膜厚さ

降雨量が少ない場合は、雨水は屋根材に吸収あるいは表面に水滴として付着するが、降雨量が多くなると吸収・付着しきれない水分は勾配に沿って流下する。屋根面全体が濡れた場合、屋根面のある部分における雨水の流速や流層厚は、屋根勾配や屋根面の状態、形状等によって異なるが、松下[5-21]は平均に雨を受ける平坦な屋根上の一様流れを粘性流と仮定し、流層厚 W_F [m]を示す式(5.4.10)を導いている。

$$W_F = \sqrt[3]{\frac{3\eta J_{roof}}{\rho_w g \sin \theta}} \tag{5.4.10}$$

したがって、屋根材表面に付着する水分が W_F を超えなければ、水膜は流下せずに付着するといえる。 J_{roof} は屋根面幅 1m あたりの流量 [$m^3/m \cdot s$] であり、流れの下方(屋根の軒方向)にいくほど大きくなる。京都の 11~3 月の 1 時間降水量の最大値は 14 [mm/h] であるが、この場合 4 寸勾配で屋根長さ 6m の軒先における流層厚は約 0.3mm となり、屋根材に浸透しない水分が水膜として保持される量はわずかで、ほとんどは流下することがわかる。したがって、降雨水による瓦内部への水分浸透は長時間継続しないと考えられる。

(4) 数値計算における外部からの水分供給の扱い方

瓦の外部から液水が供給される場合は、数値解析においては以下のように取り扱う。

仕上げ層と実質部の境界点を (i, j) とする。 (i, j) 点における水分収支を図 5.4.5 に示す。外部から水分供給がある場合、仕上げ層外気側表面は飽和であるとし、その時の水分化学ポテンシャルを μ_s とする。仕上げ層を通る気相水分流は 0 とおく。

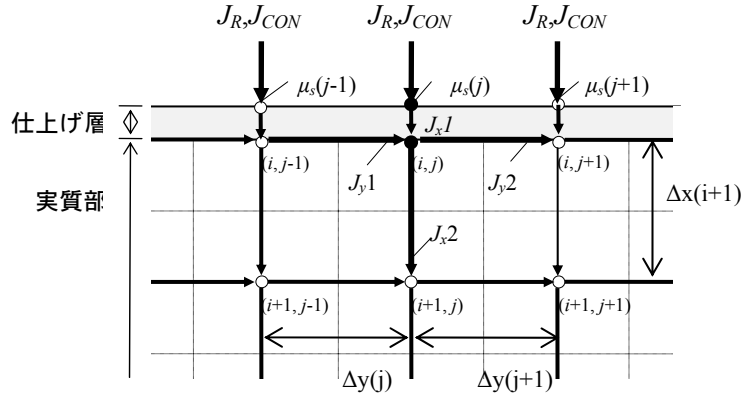


図 5.4.5 (i, j) 点における水分収支

仕上げ層に流入する液相水分は、降雨による水分流 J_R [$\text{kg}/\text{m}^2\text{s}$]と結露水による水分流 J_{CON} [$\text{kg}/\text{m}^2\text{s}$]である。

仕上げ層の透水抵抗を R'_{μ} [$\text{m}^2\text{s}(\text{J}/\text{kg})/\text{kg}$]とおくと、仕上げ層を通過して (i, j) 点に通る最大の水分流 J_{MAX} [$\text{kg}/\text{m}^2\text{s}$]は、式(5.4.11)で表される。

$$J_{MAX} = (\mu_s(j) - \mu(i, j)) / R'_{\mu} \quad (5.4.11)$$

瓦内部へ浸透する液相水分流 J_{IN} [$\text{kg}/\text{m}^2\text{s}$]は、以下のように場合分けできる。

$$(J_R + J_{CON}) < J_{MAX} \text{ の時} \quad J_{IN} = J_R + J_{CON} \quad (\text{すべて浸透}) \quad (5.4.12)$$

$$(J_R + J_{CON}) \geq J_{MAX} \text{ の時} \quad J_{IN} = J_{MAX} \quad (\text{水膜形成}) \quad (5.4.13)$$

$(J_R + J_{CON}) \geq J_{MAX}$ の時、瓦の内部へ浸透せずに表面に残留する水分は表面に水膜となり付着する。水膜の厚さ変化 ΔW_f と時刻 $t + \Delta t$ における水膜厚さ $W_f(t + \Delta t)$ [mm]はそれぞれ式(5.4.14)、式(5.4.15)の通りとなる。 $W_f(t + \Delta t) < 0$ となる場合、水膜は消滅するものとする。

$$\Delta W_f = \frac{(J_R + J_{CON} - J_{x1})}{\rho_w} \Delta t \times 1000 \quad (5.4.14)$$

$$W_f(t + \Delta t) = W_f(t) + \Delta W_f \quad (5.4.15)$$

5.4.5 数値解析プログラムの流れ

これまで述べた基礎方程式を用いて、ある環境条件下における外装材料の温度と水分状態、結氷の有無と量を計算するプログラムを作成する。

計算プログラムのフローを図 5.4.6 に示す。最初に計算の準備として、外気等境界条件、建物条件、材料物性値、定数値を入力する。次に、材料内の温度と含水率分布の初期条件を与える。

メインプログラムでは時間ステップごとに、境界条件の更新、材料物性値の更新、材料内熱流と水分流の計算を行う。材料が氷を含まず、次の時間においても結氷を生じない場合は二相系の計算となり、熱流と水分流から次の時間ステップの温度と水分化学ポテンシャルを計算する。

材料が氷を含んでいるか次に結氷を生じる場合には、三相系の計算となり、結氷条件式も含めて収束計算により次の時間の温度と水分化学ポテンシャル、含水率を求める。

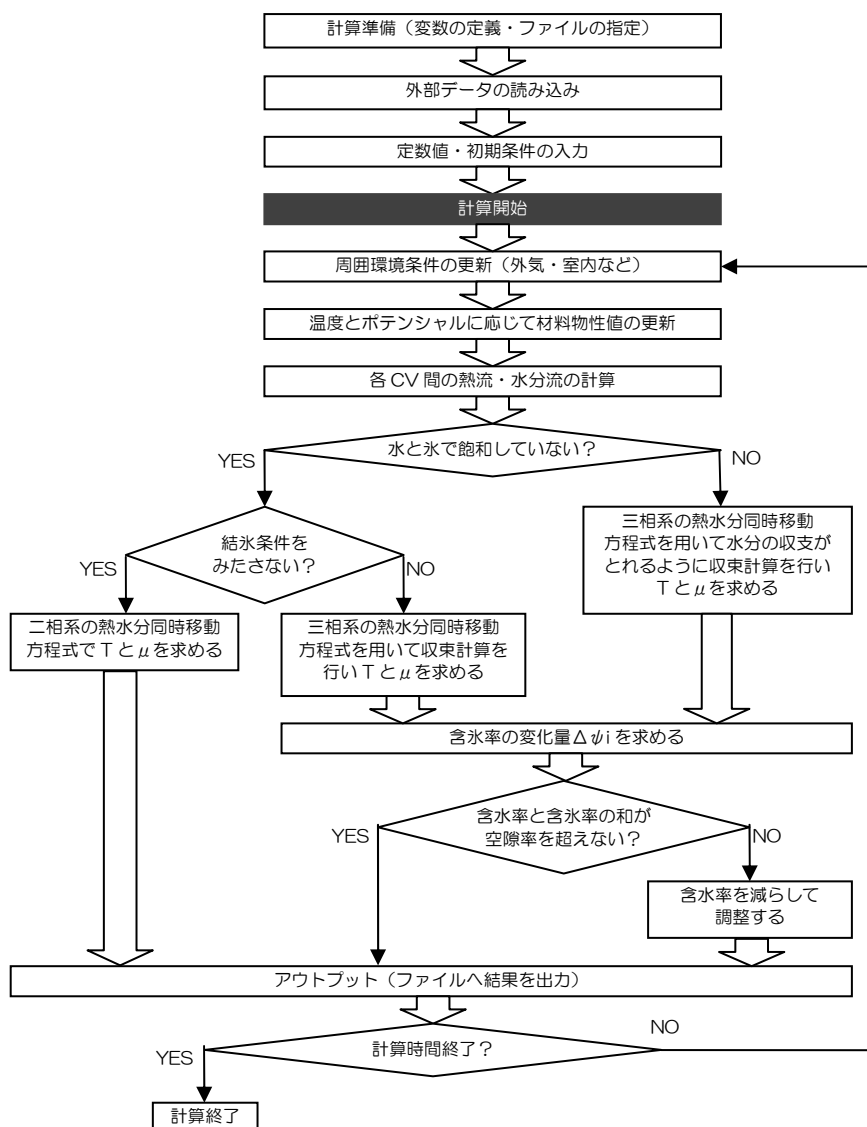


図 5.4.6 計算プログラムの流れ

5.5 数値解析に用いる材料物性値の整理

三相系の熱水分同時移動の解析に用いる基礎方程式は、式(5.3.17)、式(5.3.26)、式(5.2.18)の3式となる。これらを以下に再掲する。

$$\text{【水分収支式】} \quad \left(\frac{\partial \rho_i \psi_i}{\partial \mu} \right) \frac{\partial \mu}{\partial t} = \nabla (\lambda'_{Tg} \nabla T) + \nabla \{ (\lambda'_{\mu g} + \lambda'_{\mu l}) \nabla \mu \} - \frac{\partial \rho_i \psi_i}{\partial t}$$

$$\text{【エネルギー収支式】} \quad c \rho \psi \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla (\lambda \nabla T) + H_{gl} \{ \nabla (\lambda'_{Tg} \nabla T) + \nabla (\lambda'_{\mu g} \nabla \mu) \} + H_{li} \frac{\partial \rho_i \psi_i}{\partial t}$$

$$\text{【結氷条件式】} \quad \mu = H_{li} \log_e \left(\frac{T}{T_0} \right)$$

これらの方程式を解くためには、材料の移動係数及び平衡関係を知る必要がある。水分に関する移動係数として、温度勾配による気相水分伝導率 λ'_{Tg} [kg/msK]、水分化学ポテンシャル勾配による気相水分伝導率 $\lambda'_{\mu g}$ [kg/ms(J/kg)] と液相水分伝導率 $\lambda'_{\mu l}$ [kg/ms(J/kg)] を求める必要がある。材料内の水分状態を自由水基準の水分化学ポテンシャルで表現するため、含水率を求めるためには、平衡含水率関係の傾き（含水率の水分化学ポテンシャルによる微分） $\partial \psi_i / \partial \mu$ も予め知っておく必要がある。熱に関する移動係数としては熱伝導率 λ 、容量としては材料の比熱 c と密度 ρ が必要である。また、式中には現れていないが、飽和を超えるか否かの判断を行うため、材料の空隙率 Φ も必要である。

5.5.2 節以降では、移動係数を測定値から理論的に導出する考え方について述べる。

5.5.1 乾燥密度 ρ_d ・空隙率 Φ ・比熱 c

乾燥密度は3.2.2 節での測定結果から、いぶし瓦については 1970 [kg/m³]、釉薬瓦については 2018 [kg/m³] とする。

空隙率は、3.3.2 節で水分特性値を測定した際の、飽和時の容積基準含水率を用いる。いぶし瓦の空隙率は 25.8%、釉薬瓦の空隙率は 23.8% とする。

比熱については測定が困難であったため、同じセラミック材料であるレンガの文献値[5-22]である 920 [J/kgK] という値を用いる。

5.5.2 熱伝導率 λ

乾燥状態における粘土瓦の熱伝導率を、非定常熱線法[5-23]により測定すると、 $\lambda=0.937$ [W/mK] という値が得られた。熱伝導率 λ の含水率による変化は、文献[5-22]からセラミック材料であるレンガの値を参照し、本論文においては粘土瓦の熱伝導率を容積基準含水率の関数として、式(5.5.1)で表す。容積基準含水率と熱伝導率の関係を図 5.5.1 に示す。

$$\lambda = 93.795 \psi_i^3 - 36.146 \psi_i^2 + 7.1468 \psi_i + 0.937 \quad (5.5.1)$$

5.2.2 節で述べた通り、多孔質材料中で結氷が生じている場合は氷の熱伝導率を考慮して材料全体の熱伝導率を決定する。材料内部に液水がないとした時の、含水率と熱伝導率の関係を図 5.5.2 に示す。水のみで飽和している場合は約 2.0 [W/mK]であるが、すべてが氷になった場合は約 61 [W/mK]まで熱伝導率が増加する。

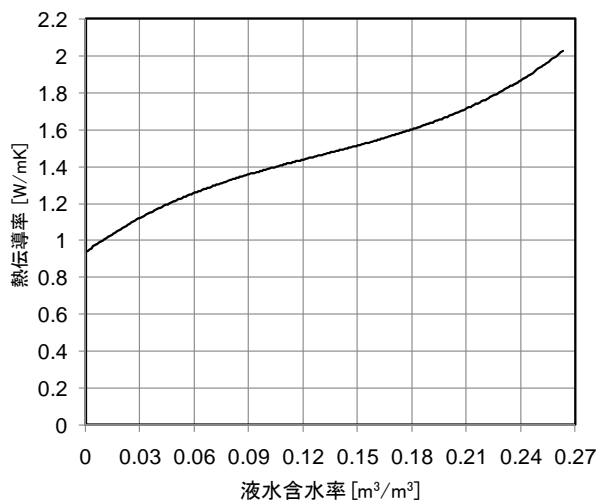


図 5.5.1 容積基準含水率と熱伝導率の関係

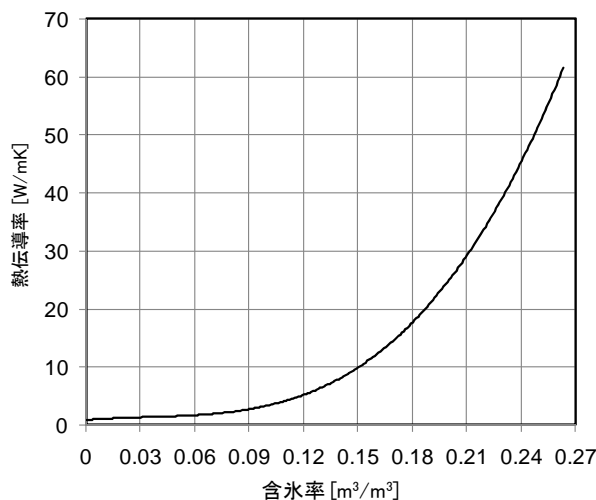


図 5.5.2 含水率と熱伝導率の関係

5.5.3 水分移動係数

(1)材料内の気相水分移動係数 $\lambda'_{\mu g}$ 、 λ'_{Tg}

測定で得られた移動係数は、水蒸気圧勾配による湿気伝導率 λ'_p [kg/(m·s·Pa)]である。3.4.1 節の測定結果から、いぶし瓦の λ'_p は 3.84×10^{-12} [kg/(m·s·Pa)]、釉薬瓦の λ'_p は 4.34×10^{-12} [kg/(m·s·Pa)]である。

材料内気相水分流を表す式を以下のように展開する。

$$J_{gw} = -\lambda'_p \frac{\partial P_v}{\partial x} = -\lambda'_p \left(\frac{\partial P_v}{\partial \mu} \right)_T \frac{\partial \mu}{\partial x} - \lambda'_p \left(\frac{\partial P_v}{\partial T} \right)_\mu \frac{\partial T}{\partial x} = -\lambda'_{\mu g} \frac{\partial \mu}{\partial x} - \lambda'_{Tg} \frac{\partial T}{\partial x} \quad (5.5.2)$$

式(5.4.2)と式(5.3.1)から、水分化学ポテンシャル勾配による気相水分伝導率 $\lambda'_{\mu g}$ [kg/ms(J/kg)]は以下の式で求められる。

$$\lambda'_{\mu g} = \lambda'_p \left(\frac{\partial P_v}{\partial \mu} \right)_T = \lambda'_p \frac{P_{vs}(T)}{R_v T} \exp\left(\frac{\mu}{R_v T} \right) \quad (5.5.3)$$

式(5.5.2)と式(5.5.3)から、湿気伝導率 λ'_p を消去して、温度勾配による気相水分伝導率 λ'_{Tg} が以下の式で求められる。

$$\begin{aligned}\lambda'_{Tg} &= \lambda'_p \left(\frac{\partial P}{\partial T} \right)_\mu = \lambda'_p \left\{ \frac{dP_{vs}(T)}{dT} \exp\left(\frac{\mu}{R_v T}\right) - P_{vs}(T) \exp\left(\frac{\mu}{R_v T}\right) \cdot \frac{\mu}{R_v T^2} \right\} \\ &= \lambda'_{\mu g} \left(\frac{dP_{vs}(T)}{dT} \cdot \frac{R_v T}{P_{vs}(T)} - \frac{\mu}{T} \right)\end{aligned}\quad (5.5.4)$$

ここで得られた $\lambda'_{\mu g}$ 、 λ'_{Tg} は一定温度のもとで測定された湿気伝導率から求められている。式(5.5.3)、式(5.5.4)から、 $\lambda'_{\mu g}$ 、 λ'_{Tg} は飽和水蒸気圧 $P_{vs}(T)$ の関数であり、 $P_{vs}(T)$ は強い温度依存性をもつ。このため、 $\lambda'_{\mu g}$ 、 λ'_{Tg} の温度補正を行う。飽和水蒸気曲線は、SONNTAG の式[5-24]を用いて、式(5.5.5)で表される。

$$P_{vs}(T) = \exp\left(\begin{aligned} &-6096.9385/T + 21.2409642 - 0.02711193T \\ &+ 1.673952 \times 10^{-5} T^2 + 2.433502 \ln(T) \end{aligned} \right)\quad (5.5.5)$$

水蒸気圧 P_v は、飽和蒸気圧 $P_{vs}(T)$ と相対湿度 h の積で表されるため、式(5.5.2)に $P_v = P_{vs}(T) \times h$ を代入する。

$$\begin{aligned}J_{gw} &= -\lambda'_p \left(\frac{\partial(P_{vs} \cdot h)}{\partial \mu} \right)_T \frac{\partial \mu}{\partial x} - \lambda'_p \left(\frac{\partial(P_{vs} \cdot h)}{\partial T} \right)_\mu \frac{\partial T}{\partial x} \\ &= -\lambda'_p \cdot P_{vs} \frac{\partial h}{\partial \mu} \frac{\partial \mu}{\partial x} - \lambda'_p \cdot h \frac{\partial P_{vs}}{\partial T} \frac{\partial T}{\partial x}\end{aligned}\quad (5.5.6)$$

測定時の温度を T_1 とし、 $\lambda'_{\mu g}$ 、 λ'_{Tg} それぞれについてまとめると、以下のようなになる。

$$\begin{aligned}\lambda'_{\mu g} &= \lambda'_p \cdot P_{vs} \frac{\partial h}{\partial \mu} = \lambda'_p \cdot P_{vs} \Big|_{T=T_1} \frac{\partial h}{\partial \mu} \frac{P_{vs}}{P_{vs} \Big|_{T=T_1}} = \lambda'_p \cdot P_{vs} \Big|_{T=T_1} \frac{\partial(P_{vs} \Big|_{T=T_1} \cdot h)}{\partial \mu} \frac{P_{vs}}{P_{vs} \Big|_{T=T_1}} \\ &= \lambda'_{\mu g} \Big|_{T=T_1} \frac{P_{vs}}{P_{vs} \Big|_{T=T_1}}\end{aligned}\quad (5.5.7)$$

$$\begin{aligned}\lambda'_{Tg} &= \lambda'_p \cdot h \frac{\partial P_{vs}}{\partial T} = \lambda'_p \cdot h \frac{\partial P_{vs}}{\partial T} \Big|_{T=T_1} \left(\frac{\partial P_{vs}}{\partial T} \Big/ \frac{\partial P_{vs}}{\partial T} \Big|_{T=T_1} \right) \\ &= \lambda'_{Tg} \Big|_{T=T_1} \left(\frac{\partial P_{vs}}{\partial T} \Big/ \frac{\partial P_{vs}}{\partial T} \Big|_{T=T_1} \right)\end{aligned}\quad (5.5.8)$$

3.4.1 節の測定で得られた、いぶし瓦と釉薬瓦の水蒸気圧勾配による湿気伝導率 λ'_p を用いて、以上の手順により $\lambda'_{\mu g}$ 、 λ'_{Tg} を求めた。得られた $\lambda'_{\mu g}$ 、 λ'_{Tg} を温度依存性も含めて、図 5.5.3、図 5.5.4 に示す。

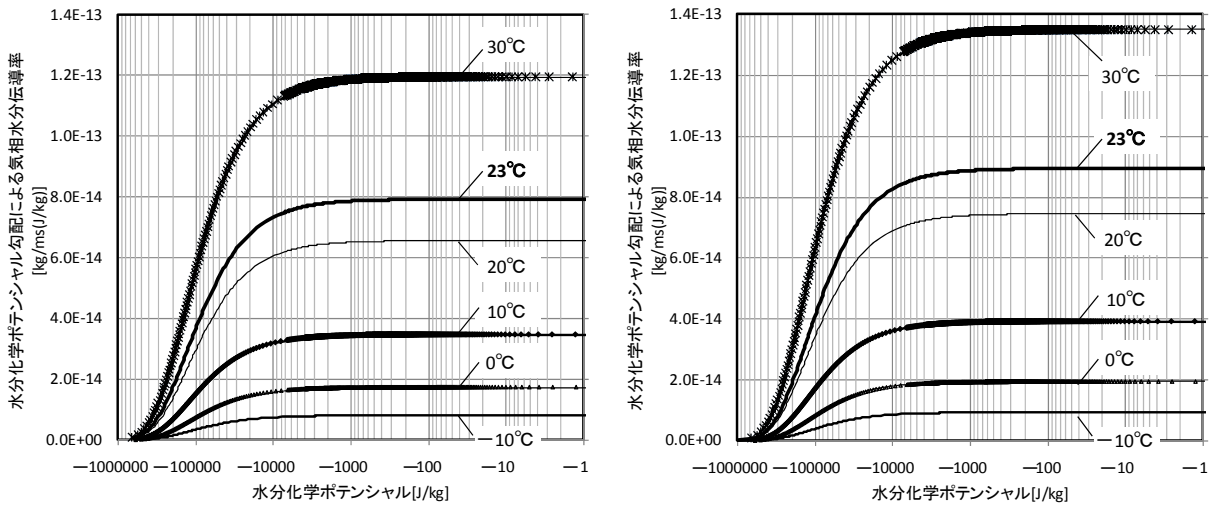


図 5.5.3 水分化学ポテンシャル勾配による気相水分伝導率 (左：いぶし瓦、右：釉薬瓦)

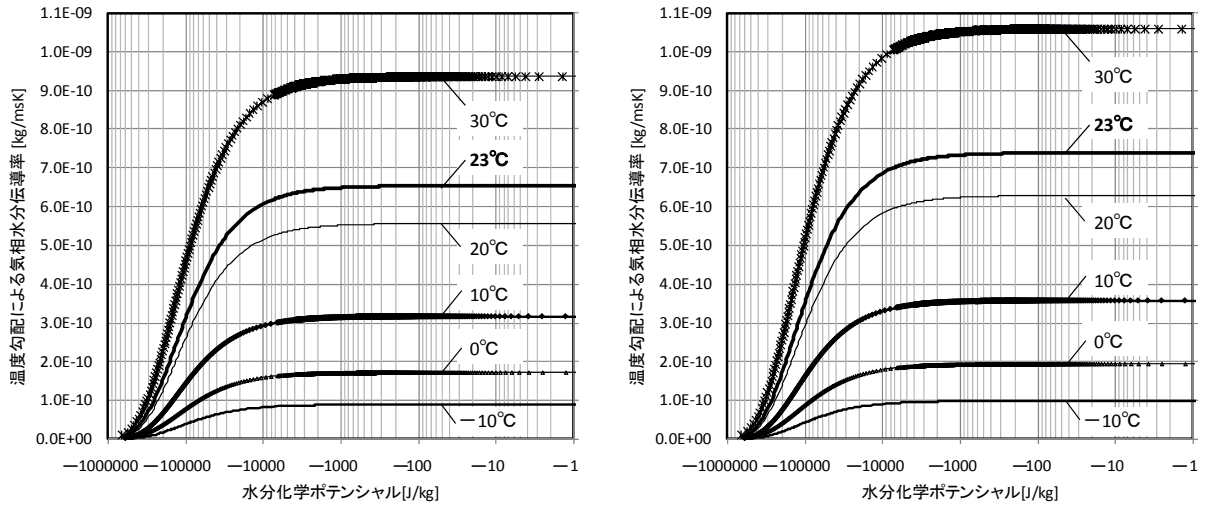


図 5.5.4 温度勾配による気相水分伝導率 (左：いぶし瓦、右：釉薬瓦)

(2)材料内の液相水分の移動係数 $\lambda'_{\mu l}$

液相水分移動は材料内部の吸引圧を P_{suc} として、以下のように変換できる。

$$J_{lw} = -\lambda'_{pl} \frac{\partial P_{suc}}{\partial x} = -\lambda'_{pl} \left(\frac{\partial P_{suc}}{\partial \mu} \right)_T \frac{\partial \mu}{\partial x} - \lambda'_{pl} \left(\frac{\partial P_{suc}}{\partial T} \right)_\mu \frac{\partial T}{\partial x} = -\lambda'_{\mu l} \frac{\partial \mu}{\partial x} - \lambda'_{Tl} \frac{\partial T}{\partial x} \quad (5.5.9)$$

ここで液相水分移動はダルシー則に従うとすると、温度勾配による液相水分伝導率 λ'_{Tl} は 0 となる。測定によって得られた飽和透水係数 k_{sat} [m/s]から、式(5.5.10)を用いて材料の吸引圧勾配による水分伝導率 $\lambda'_{pl}|_{sat}$ [kg/msPa]が求められる。式(5.3.2)より $P_{suc} = -\mu \times \rho_w$ であるから、飽和時の水分化学ポテンシャル勾配による液相水分伝導率 $\lambda'_{\mu l}|_{sat}$ [kg/ms(J/kg)]は式(5.5.11)のようになる。

$$\lambda'_{pl}|_{sat} = \frac{k_{sat}}{g} \quad (5.5.10)$$

$$\lambda'_{\mu l}|_{sat} = \lambda'_{pl}|_{sat} \left(\frac{\partial P_{suc}}{\partial \mu} \right) = k_{sat} \frac{\rho_w}{g} \quad (5.5.11)$$

式(5.5.11)から、 $\lambda'_{\mu l}$ を求める際に温度に依存する係数は水の密度 ρ_w と透水係数 k_{sat} である。 ρ_w の温度依存性は、理科年表[5-11]に掲載されている値から式(5.5.12)の通り近似式を作成した。

$$\rho_w(T) = 0.000033(T - T_0)^3 - 0.0074(T - T_0)^2 + 0.051954(T - T_0) + 999.87219 \quad (5.5.12)$$

ρ_w の温度依存性は飽和水蒸気圧ほど大きくはないが、日射による温度上昇や凍結・融解過程までを考慮する際には扱う温度域が広がるため、 $\lambda'_{\mu l}$ の温度補正も式(5.5.12)を用いて行う。透水係数の温度依存性には、液水の密度と粘性係数の温度依存性が影響する。材料の性質に依存する固有透過度[5-25]を k_0 とおくと、透水係数 k_{sat} は式(5.5.13)で表される[5-26]。

$$k_{sat} = \frac{\rho_w g}{\eta} k_0 \quad (5.5.13)$$

固有透過度の温度依存性は、水の粘性係数の温度依存性と比較し無視できるほど小さいとする。測定時の温度を T_1 とすると、任意の温度 T における透水係数 $k_{sat}(T)$ は、式(5.5.14)で表される。

$$k_{sat}(T) = \frac{\rho_w|_T \cdot \eta|_{T_1}}{\eta|_T \cdot \rho_w|_{T_1}} k_{sat}|_{T_1} \quad (5.5.14)$$

また、不飽和時の液相水分伝導率 $\lambda'_{\mu l}$ は、飽和にごく近い領域で急激に値が大きくなる瓦の性質を考慮し、材料内の飽和度 (ψ/ψ_{sat}) の関数として、式(5.5.15)で表されるものとした。

$$\lambda'_{\mu l} = a \times \psi_l + \left(\lambda'_{\mu l}|_{sat} - a \cdot \psi_{l,sat} \right) \left(\frac{\psi_l}{\psi_{l,sat}} \right)^N \quad (5.5.15)$$

ここで、パラメータ a と N は理論的に求めることが困難であるため[5-27]、別途測定を行い推定する。推定結果については、第6章で述べる。

(3)表面仕上げ層の水分移動抵抗

日本の粘土瓦は、通常の場合仕上げ層をもっている。いぶし瓦の炭素膜や釉薬瓦の釉薬層の厚さは一般的に約 10 [μm] と実質部に比べ非常に薄い[5-28]ことから、解析においては水分移動に対する抵抗のみを考慮し、容量はないものとして扱う。

仕上げ層の透湿抵抗については、材料表面における水分伝達と同様に、温度勾配と水分化学ポテンシャル勾配による水蒸気移動の抵抗に分離し、それぞれ式(5.5.16)、式(5.5.17)によって求められる。

$$R'_{\mu g} = R'_m \left/ \frac{\partial P_v}{\partial \mu} \right. = R'_m \left/ \frac{P_{vs}}{R_v T} e^{\frac{\mu}{R_v T}} \right. \quad (5.5.16)$$

$$R'_{Tg} = R'_m \left/ \frac{\partial P_v}{\partial T} \right. = R'_m \left/ \left(\frac{dP_{vs}}{dT} - \frac{P_{vs} \cdot \mu}{R_v T^2} \right) e^{\frac{\mu}{R_v T}} \right. \quad (5.5.17)$$

3.4.1 節で行った透湿抵抗測定において、いぶし瓦の仕上げ層の透湿抵抗は $R'_m = 5.4 \times 10^9$ [m^2sPa/kg]、釉薬瓦の仕上げ層の透湿抵抗は $R'_m = 1.5 \times 10^{11}$ [m^2sPa/kg]であった。これらの数値と式(5.5.16)、式(5.5.17)を用いて計算した $R'_{\mu g}$ [$m^2s(J/kg)/kg$]、 R'_{Tg} [m^2sK/kg]を図 5.5.5、図 5.5.6 に示す。水分化学ポテンシャルが -100000 [J/kg]は、 $-10 \sim 20^\circ C$ の温度範囲では相対湿度 44~48%に相当する。これ以上の相対湿度範囲では、湿度が水分伝導抵抗に与える影響はほとんどない。温度の影響については、 $-10 \sim 20^\circ C$ の範囲では水分伝導抵抗は約 10 倍の差が生じる。

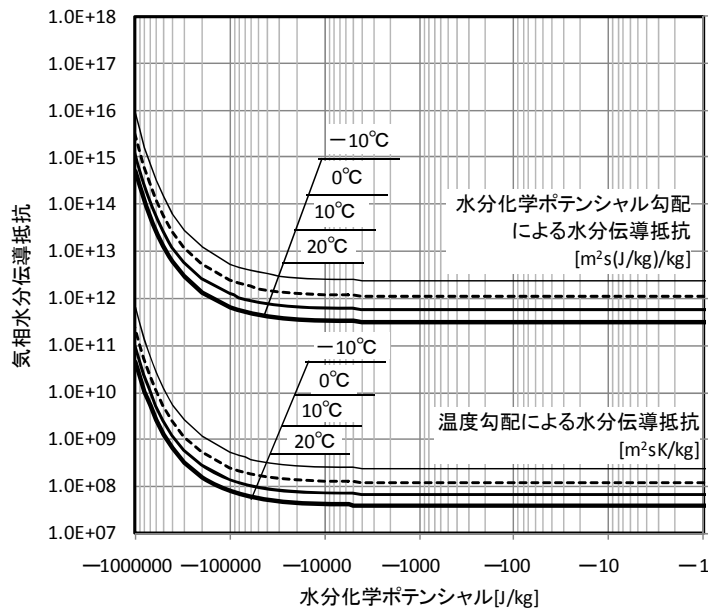


図 5.5.5 水分化学ポテンシャル勾配と温度勾配による仕上げ層の水分伝導抵抗 (いぶし瓦)

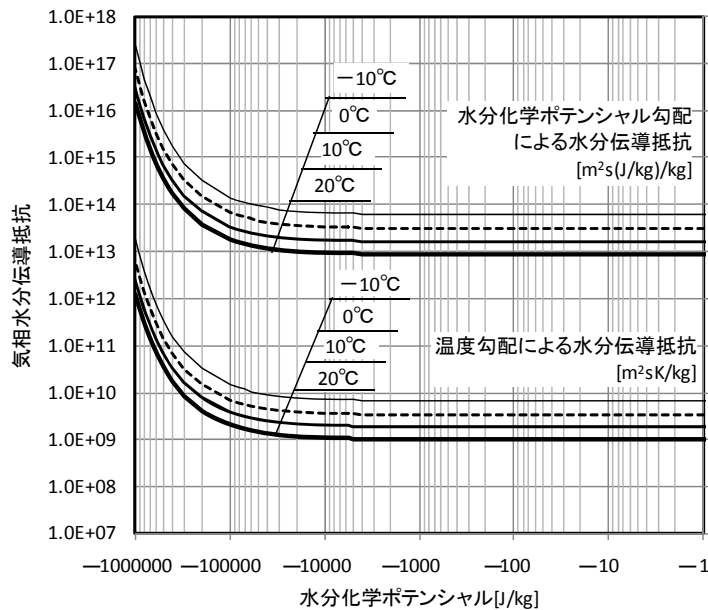


図 5.5.6 水分化学ポテンシャル勾配と温度勾配による仕上げ層の水分伝導抵抗 (釉薬瓦)

仕上げ層がある場合、水蒸気移動については仕上げ層の透湿抵抗と外気の伝達抵抗を合成して水分移動量を計算する。水分流 J_{gf} [kg/m²s] は式(5.5.18)の通りとなる。

$$J_{gf} = \left(\frac{1}{1/\alpha'_T + R'_{Tg}} \right) (T_o - T_s) + \left(\frac{1}{1/\alpha'_\mu + R'_{\mu g}} \right) (\mu_o - \mu_s) \quad (5.5.18)$$

また、液水の浸透に対する抵抗は、透水係数と同様、水圧勾配によるものから水分化学ポテンシャルによる液水移動に対する抵抗として表すと、式(5.5.19)のようになる。

$$R'_{\mu} = R'_w \left/ \frac{\partial P_w}{\partial \mu} \right. = R'_w / \rho_w \quad (5.5.19)$$

水の密度 ρ_w [kg/m³] は式(5.5.12)を用い、透水抵抗の温度依存性も考慮する。

5.5.4 平衡含水率関係

図 5.5.7 に、3.3 節で測定された相対湿度と容積含水率の関係を示す。この図から、相対湿度 96% 以上の高湿域において、低湿域と比較し含水率の変化が非常に大きいことがわかる。

図 5.5.8 は、式(5.3.1)を用いて相対湿度を水分化学ポテンシャルに換算したものと、容積含水率の関係を示したものである。温度は 20°C とする。飽和時の水分化学ポテンシャルは 0 となるが、横軸を対数で表すため、ここでは -1 とし表示している。

式(5.3.17)より、図 5.5.8 の曲線の勾配 ($\partial\psi/\partial\mu$) は材料の水分容量を示すものであり、($\partial\psi/\partial\mu$) が大きいほど、小さなポテンシャル変化で含水率が大きく変化する。

本測定で得られた平衡含水率関係を数値解析に用いるために、関数近似したものも図 5.5.7、図 5.5.8 にあわせて示す。水分化学ポテンシャル μ [J/kg] と容積含水率 ψ [m³/m³] の関係は式(5.5.20)によって表される。

$$\begin{cases} -5524.655 \leq \mu \text{ の時} \\ \psi = 0.084797892 \times \arctan(-18.5 \times \log_{10}(-\mu) + 54.03983085) + 0.13053881 \\ \mu < -5524.655 \text{ の時} \\ \psi = 17.42149546 \times \exp(-2.323867 \times \log_{10}(-\mu)) \end{cases} \quad (5.5.20)$$

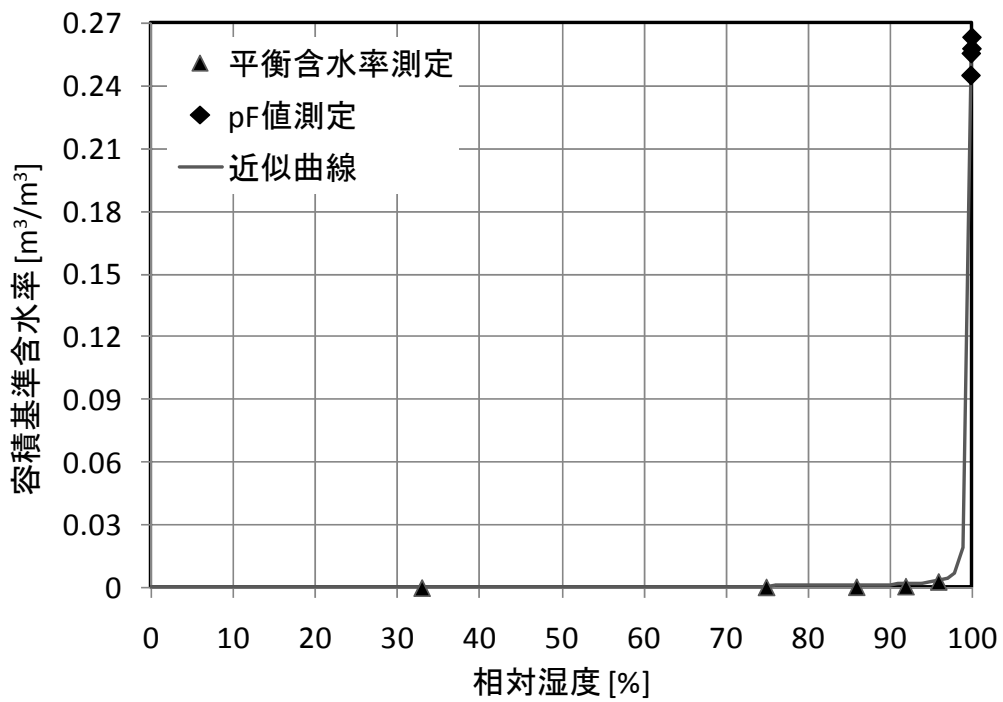


図 5.5.7 相对湿度－容積含水率関係

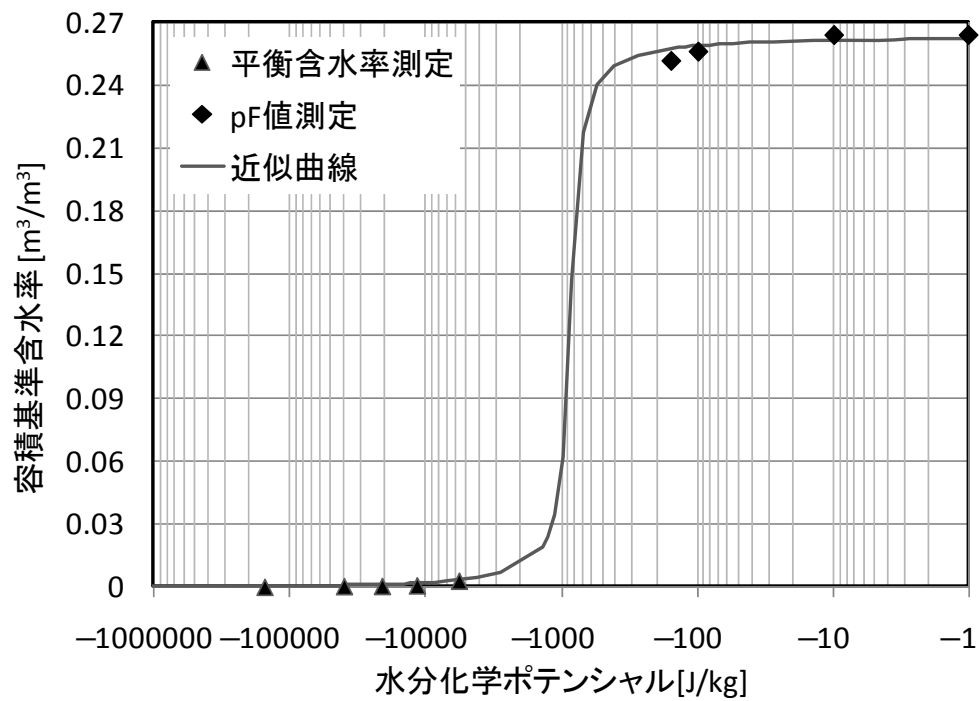


図 5.5.8 水分化学ポテンシャル－容積含水率関係

5.6 第5章のまとめ

本章で検討した内容は以下に要約される。

- (1) 水分の凍結・融解過程を生じる系においては、結氷により著しく熱伝導率が増加することを明らかにした。
- (2) 多孔質材料内部の水分化学ポテンシャルと凝固点降下の関係を説明し、検討対象とする粘土瓦において、結氷を生じる際の化学ポテンシャルと対応する細孔径、結氷温度の関係を明らかにした。
- (3) 気相・液相・固相いずれにおいても統一的に記述できる状態量である水分化学ポテンシャルを用いて、凍結・融解を生じる系の水分収支式、エネルギー収支式の導出過程を示した。
- (4) 透湿率、透水係数の測定値を用いて、数値解析に適用する移動係数を理論的に導出する過程を示した。特に温度の影響を大きく受ける気相水分伝導率については、温度依存性も考慮した。
- (5) 水分の凍結・融解を生じる系の水分収支とエネルギー収支を計算する数値解析手法を示した。数値解析においては基礎方程式を離散化して扱うが、計算精度を向上させるため表面近傍のセル幅を小さくすると、計算の安定性を確保するためには時間刻みを非常に小さくする必要があり膨大な計算時間を要する。したがって、時間刻みを小さくしないで安定した解が得られる常微分方程式を用いた解析的手法を示した。
- (6) 仕上げ層のある材料表面における熱・水蒸気・液水移動の扱い方を示した。数値解析においては、外部からの液水移動が生じる場合は仕上げ層の外側を飽和と仮定し、仕上げ層の透水抵抗に応じて流入する水分量を求め、流入できない水分は表面に水膜として一定厚さまでは保持されることとした。
- (7) 従来の解析では扱われていなかった飽和付近の扱い方を示した。材料内部の空隙が液水と氷で飽和する場合においては、材料内部での全圧が変わるため、水分化学ポテンシャルと液水含水率の平衡関係が成立しなくなる。したがって、水分の収支がとれるよう水分流を調整して化学ポテンシャルを決定する扱い方を示した。また、氷で飽和する場合は水蒸気、液水の流入は生じず、融解水分の流出のみを考慮することとした。

6章以降では、本章で述べた数値解析手法を用いて、種々の環境下における、表面仕上げ層をもつ粘土瓦内部の温度・水分性状の把握を行う。

第5章 参考文献

- [5-1] 松本衛：建築壁体における熱・水分同時移動および水分蓄積に関する研究，京都大学，1978.11，博士論文
- [5-2] 松本衛：新建築学大系 10 環境物理 3. 湿気，彰国社，1994.6
- [5-3] Puri, B.R., L.R. Sharma, M.L.Lakhanpal : Freezing Point of Water Held in Porous Bodies at Different Vapor

- Pressures, *J. Physical Chemistry* 58, pp.280-292, 1954
- [5-4] 樋口泉：多孔体の毛細管に分散した物質の性質と毛管構造, 表面, Vol. 6, No. 3, pp.168-176, 1968
- [5-5] 松本衛, 馬沙：地盤の凍結と融解過程の解析に関する研究, 日本建築学会計画系論文集, 第 482 号, pp. 25-34, 1996.4
- [5-6] Matsumoto, M., Gao, Y. & Hokoi, S. : Simultaneous Heat and Moisture Transfer during Freezing-Melting in Building Materials, CIB/W40 meeting in Budapest, 1993.9
- [5-7] 畑野雅範, 銚井修一, 松本衛：ALC 壁体における凍結・融解過程に関する研究, 日本建築学会計画系論文集, 第 545 号, pp. 23-28, 2001.7
- [5-8] Hokoi, S., Hatano, M., Matsumoto, M. and Kumaran, M. K. : Freezing-Thawing Processes in Glass Fiber Board, *Journal of Thermal Environment and Building Science*, Vol. 24, pp. 42-60, 2000.7
- [5-9] Hokoi, S. and Iba, C. : Freezing-Thawing Processes in a Wall Made of Soil in Relatively Warm Area of Japan”, *Proceedings of the 3rd International Conference on Cold Climate Heating, Ventilating and Air-Conditioning*, pp. 139-144, 2000.11
- [5-10] Iba, C. and Hokoi, S. : Freezing-Thawing Processes in a Brick Wall in Relatively Warm Area of Japan, *Proceedings of the 2nd International Conference on Building Physics*, pp. 257-266, 2003.9
- [5-11] 国立天文台編、理科年表（平成 19 年） 机上版第 80 冊、丸善、2007
- [5-12] N.F.Flecher 著, 前野紀一 訳：氷の化学物理, 共立出版, 1974
- [5-13] Kumaran, K., 日本建築学会：建築材料の熱・空気・湿気物性値, 丸善, pp. 23-27, 2001.10
- [5-14] 土壌物理研究会：土の物理学—土質工学の基礎, 森北出版, 1979.10
- [5-15] Radjy, F : Thermodynamic parameters for sorption of water by hardened cement, Paper No.6 presented at the 77th Annual Meeting of the American Ceramic Society, Cements Division, Washington D.C. , pp.10, 1975
- [5-16] 高揚, 松本衛, 銚井修一：多孔質材料の凍結・融解過程に関する研究 —0℃以下におけるポテンシャル・液水含水率平衡関係の測定—, 日本建築学会学術講演梗概集 環境工学 D-II, pp.919-920, 1992.8
- [5-17] 銚井修一, 池田哲朗, 新田勝通：エース建築環境工学Ⅱ—熱・湿気・換気—, 朝倉書店, 2002.3
- [5-18] 中沢康明：時変係数熱的系の遷移行列による解法について、日本建築学会大会学術講演梗概集 計画系、pp.331-332, 1975.10
- [5-19] 日本建築学会：勾配屋根の材料・構法・性能 第3章雨仕舞・防水性能、丸善、1999
- [5-20] 石川廣三：雨仕舞のしくみ 基本と応用、彰国社、2004
- [5-21] 松下清夫：雨仕舞法の理論、工学図書、1948
- [5-22] M. K. Kumaran：“建築材料の熱・空気・湿気物性値”、日本建築学会誌、丸善、2001.10
- [5-23] 日本建築学会：湿気物性に関する測定規準・同解説 日本建築学会環境基準 AIJES-H001-2006, 丸善, 2006.1
- [5-24] 日本規格協会：JIS Z 8806 湿度—測定方法、2001
- [5-25] 鈴木淑夫：岩石学辞典、朝倉書店、2005
- [5-26] 千々松正和, 藤田朝雄, 鈴木英明, 松本一浩：緩衝材の水理特性, 核燃料サイクル開発機構技報, No.5, 1999.12
- [5-27] Campbell, G. S. : A simple method of determining unsaturated conductivity from moisture retention data, *Soil Sci.*, pp.311-314, 1974
- [5-28] 田中稔：粘土瓦ハンドブック, 技報堂出版, 1980.11

第 6 章 表面仕上げ層をもつ粘土瓦における水分移動

6.1 はじめに

3章の水分移動係数測定において、粘土瓦の実質部と表面仕上げ層では、液水・水蒸気とも水分移動特性が大きく異なること、表面仕上げ層の中でも、いぶし瓦の炭素膜と釉薬瓦の釉薬層では特に水蒸気移動に対する抵抗が大きく異なることを明らかにした。

粘土瓦が実際に使われる外部環境では、外気の温湿度や降雨等により、内部の水分蓄積状況が時々刻々と変化する。含水率が高い時に温度が低下すると凍結が生じる可能性もあるため、凍害を生じる条件や部位を予測するためにも、最初に瓦内部の含水率分布を把握することが非常に重要である。

本章では、実験と数値解析により、表面仕上げ層をもつ瓦内部の水分蓄積性状を明らかにすることを目的とする。ただし、凍結を生じない温度域を扱う。

6.2節では、降雨環境下での瓦内部の水分蓄積状況を、実験室と外部環境における2つの実験により把握する。

6.3節では、6.2節の実験条件を入力し瓦内部の熱水分移動解析を行い、水分蓄積の状況を再現する。また、瓦の表面仕上げ層の透湿抵抗・透水抵抗の分布や内部での水分移動速度の違いが含水率分布に与える影響を検討する。

6.2 水分浸透性状の実験的検討

実際の使用条件下において、表面仕上げを持つ屋根瓦へ雨水や結露水等の水分がどのように浸透し、内部でどのような水分分布が形成されるかを確認するため、実験室と降雨時の屋外で水分浸透実験を行った。

瓦の仕上げ層には一見すると傷のように見える部分があり、3章で述べた仕上げ層の透水抵抗はそのような部分を含めた値として測定を行っている。その測定より仕上げ層の透水抵抗が実質部の1000倍以上あるということを明らかにしたが、水が全く浸透しないわけではない。

本実験では、仕上げ層内で水を浸透させる主な部分が、目視で判別できる傷部分に対応するかどうかを確認する。瓦への水分浸透経路や分布性状が明らかとなれば、瓦の凍結を生じやすい部分を推測することができる。さらに、実験室と屋外の実験結果の比較により、実験室実験の妥当性もあわせて検証する。

6.2.1 実験室における水分浸透実験

(1) 試験体

試験体は、3章で材料物性の測定を行ったいぶし瓦と釉薬瓦の平板瓦である。ここでは、目視で傷と判別された部分（以下、傷部とする）にあらかじめ印をつけておき（写真 6.2.1）、傷部の影響を中心に観察を行った。

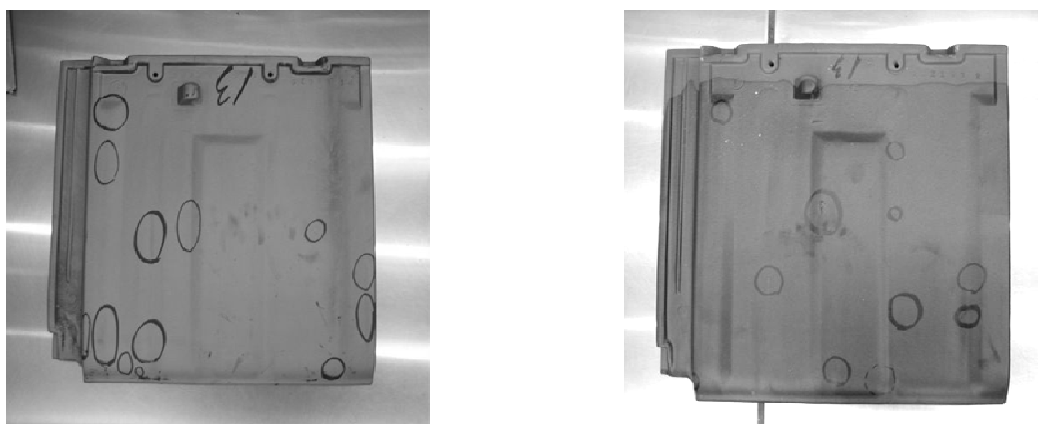


写真 6.2.1 水分浸透実験用試験体（仕上げ層へのマーキング）

(2) 実験方法

実験室では、周囲の温湿度が水分浸透に与える影響を除外するため、一定温湿度のもとで実験を行った。実験室内の温湿度は、 $20^{\circ}\text{C} \cdot 60\%RH$ に設定した。

試験体は写真 6.2.2 に示すように 2 個のコンクリートシリンダーの上に水平に設置した。大きな水圧をかけることなく瓦の上面を常に水に接しさせるため、水で湿らせたタオルで瓦の上面を覆った（写真 6.2.3）。いぶし瓦、釉薬瓦とも 2 体ずつ実験を行い、1 体はタオルを被せてから 9 時間後、もう 1 体は 3 日後に瓦を切断し、内部の水分分布を目視により観察した。なお、タオルの水分がすべて蒸発しないよう、定期的には上から水をかけ湿らせた。

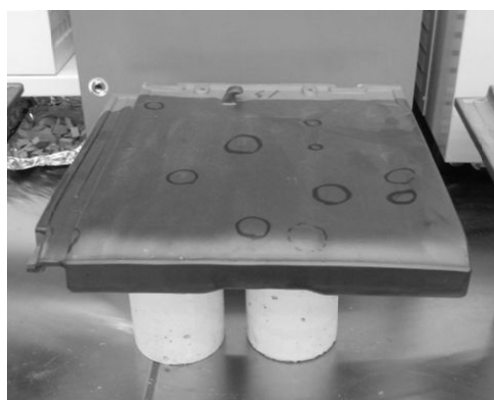


写真 6.2.2 コンクリートシリンダーに載せた瓦



写真 6.2.3 瓦に被せた濡れタオル

(3) いぶし瓦の観察結果

測定開始から9時間経過後、瓦表面には部分的に水滴がついていた。9時間後のいぶし瓦各部の断面での水分分布を写真6.2.4に、3日間経過したいぶし瓦の水分分布を写真6.2.5に示す。

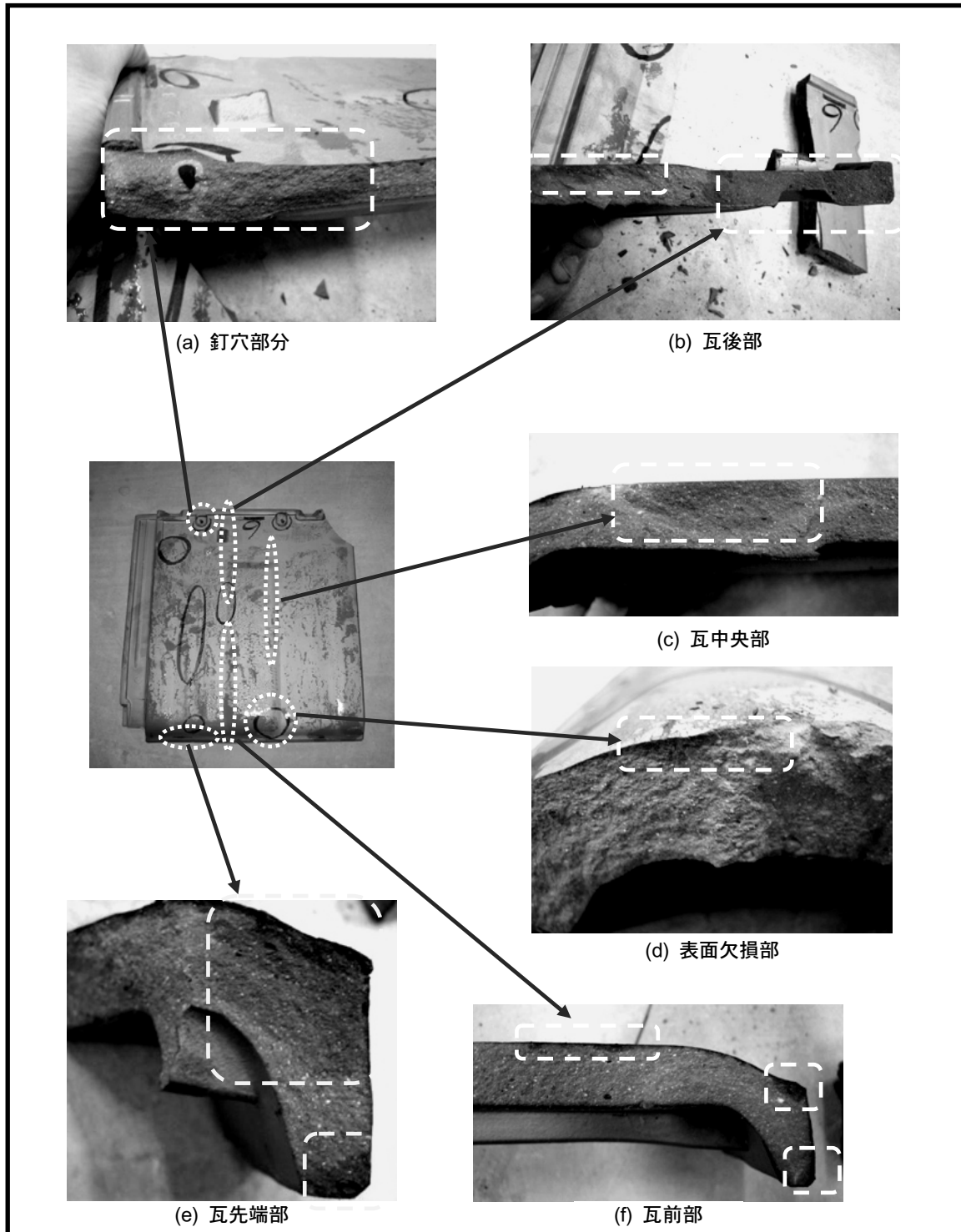


写真 6.2.4 いぶし瓦・9時間後の水分分布

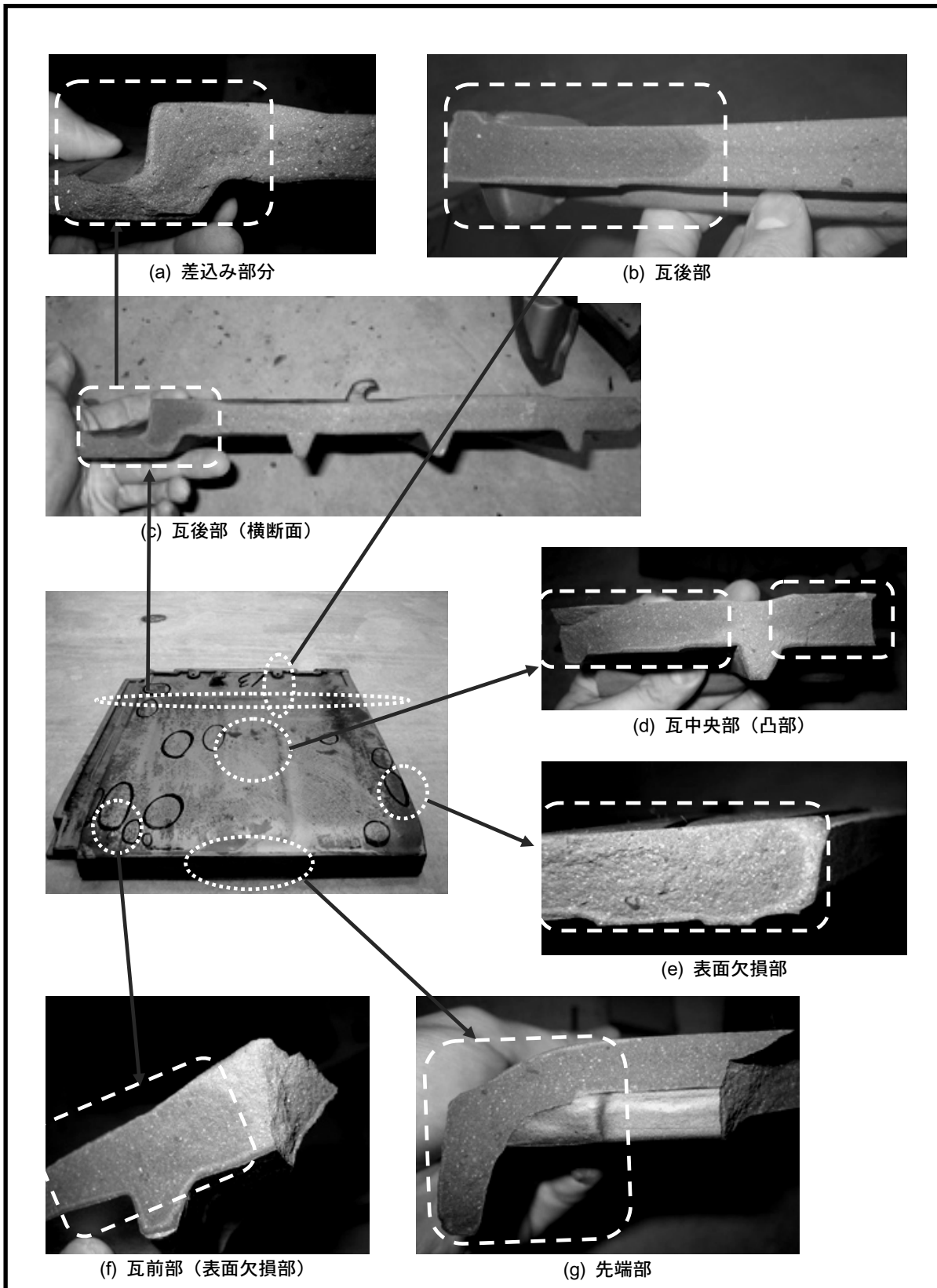


写真 6.2.5 いぶし瓦・3日後の水分分布

写真 6.2.4 (a)、(b)は、瓦の後部の水分分布を示した写真である。いずれも広範囲に水が浸透していることが見てとれる。しかし、(a)に示した釘穴のごく近くは水が浸透していないように見える。これと同様の様子は、後述する3日目の内部の水分分布に顕著に見られる。

(c)は中央部の分布である。中央部には局所的に上面から水分が浸透している。また、表面仕上げ層に傷が確認できなかった部分からも水分が浸透している。(d)は傷部であるが、わずかに水分が浸透しているものの、際立って浸透量が多いというわけではない。目視で判別できる傷の有無と水の浸透量は必ずしも対応していない。

(e)、(f)は瓦の前部の分布である。特に先端部分には水分が蓄積しやすいことがわかる。この部分は屋根に施工された場合は下側になるため水分が蓄積しやすく、さらに形状が複雑で凸状になっており、低温環境下では凍結による膨張圧等により、欠けなどが生じる可能性が高いと考えられる。

写真 6.2.5 (a)、(b)、(c)は3日後の瓦の後部の水分分布を示したものである。(b)、(c)から、後部では端部に近いほど水分が多く浸透していることがわかる。特に、(a)に示した差込み部分には多く水分が蓄積している。

(d)は中央部で裏面の凸部の影響がわかるように横方向に分割した断面である。凸部付近への水分浸透は見られないが、その両側へは多く水分が蓄積している。(e)、(f)、(g)は瓦の前部の水分分布を示している。(g)の先端部では、9時間経過後と同様に水分が多く浸透している。

写真 6.2.5 で現れているように、瓦内部への水分浸透量が増えると、表面の炭素膜近傍に水で湿っていないと思われる部分が白く際立ってくる。これは、いぶし瓦の焼成過程の最後の「いぶし」(燻化過程)で炭素膜を付着させる時、空気中の炭素が素地の気孔に根をおろすように浸透する[6-1]ため、この部分に付着した炭素の撥水性によるものと考えられる。9時間後の写真 6.2.4 (a)の釘穴部分で見られた分布も、これと同じ理由によると考えられる。

しかし、素地の中でも炭素が多く浸透している部分とそうでない部分の境界は明瞭ではないため、第3章では素地は一樣として扱い、その表面に炭素膜があるとして、炭素膜部分の透水抵抗を算出した。実際には、表面近傍の素地が撥水作用により透水しにくくなっていることを考慮すると、表面の近傍の透水抵抗は計算値よりも大きくなる可能性がある。

実験により、瓦の上面だけでも常時水で湿っている状況であれば、内部へ多量の水分が浸透し蓄積する可能性があるといえる。一度に多量の水分が供給される降雨だけでなく、表面結露のように量は少ないものの長時間表面に水分が付着するような状況下でも、瓦内部への水分流入・蓄積が起こる可能性が示されたと言える。

(4) 釉薬瓦の観察結果

測定開始から9時間経過後と3日経過後の釉薬瓦内部の水分分布を写真 6.2.6、6.2.7 に示す。

釉薬瓦では、釉薬仕上げ層がない後部から水分が浸透し、前部に向かっている。9時間後では、仕上げ層部分からの水分浸透は傷部も含めてほとんど見られず、いぶし瓦では水分蓄積が多かった先端部も乾燥していた。3日後には瓦の内部に水分が一樣に分布していたが、これは後部から浸透した水が移動したのと考えられる。

瓦は通常重ねて葺かれるため、釉薬瓦の仕上げ層がない部分が外気に露出することはない。ただし、暴風雨の時など、風や毛細管力によって水が重ねの隙間部分に浸入した場合や、表面結露が生じた場合は、仕上げ層のない部分から水分が浸透する可能性がある。



写真 6.2.6 釉薬瓦内部の水分分布（9時間後）



写真 6.2.7 釉薬瓦内部の水分分布（3日後）

6.2.2 降雨環境に曝露された瓦への水分浸透実験

(1) 実験方法

試験体は前節と同様いぶし瓦と釉薬瓦の平板瓦であり、京都大学桂キャンパス内に設置された木製の棚に、実際の屋根の勾配を想定し置かれた（写真 6.2.8）。実験期間は 2008 年 1 月 28 日 15 時～1 月 29 日 17 時であり、気象条件は雨後時々曇りで、平均気温 4.1℃（最高 6℃、最低 2.2℃）、平均湿度 83%、合計降水量は 5.5mm であった[6-2]。降雨環境に 26 時間曝露した後瓦を分割し、瓦内部への水分の浸透、分布を目視により確認した。



写真 6.2.8 曝露実験における瓦の設置状況

(2) いぶし瓦の観察結果

写真 6.2.9 にいぶし瓦内部の水分分布を示す。瓦の内部には部位によらず部分的に水分が浸透しており、実験室実験と同様、先端部には多く水分が蓄積している。また、浸透した水分量は、実験室実験における 9 時間経過後の結果よりは多く、3 日後の結果よりも少ない。

このように、水分が浸透したところとしていないところが目視でも明確に判別できることから、乾燥している部分では、瓦の液水移動は非常に遅く、含水率が高くなるほど速くなると推察される。

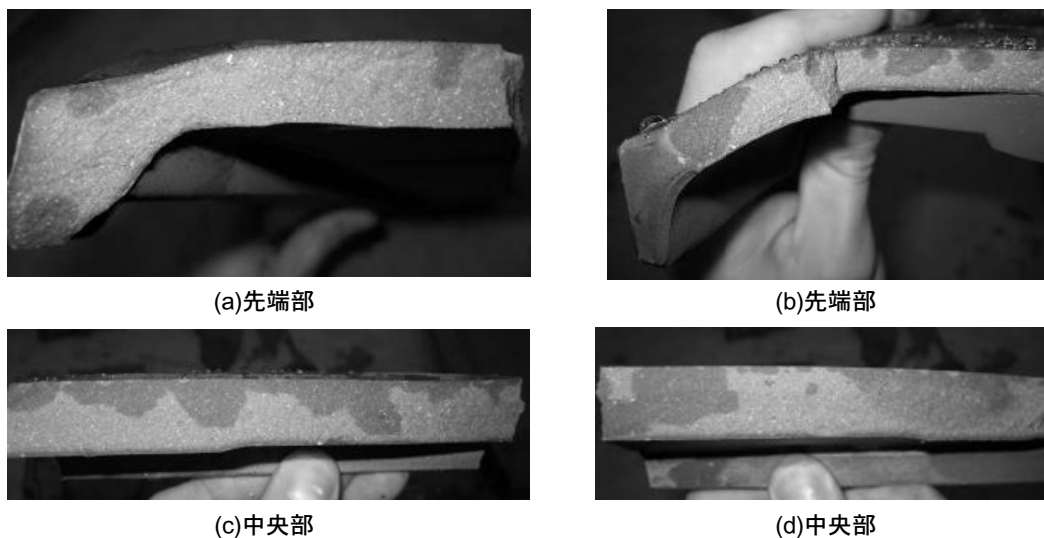


写真 6.2.9 曝露実験後のいぶし瓦内部の水分分布

(3) 釉薬瓦の観察結果

写真 6.2.10 は、釉薬瓦の観察結果である。表（おもて）面は全面的に降雨により濡れているが、裏面は瓦後部から約半分の範囲に水が浸透していることがわかる。この部分を分割すると、断面は水でほぼ満たされており、釉薬瓦では含水率の著しく高い部分と低い部分に大きく分かれる可能性があることがわかった。

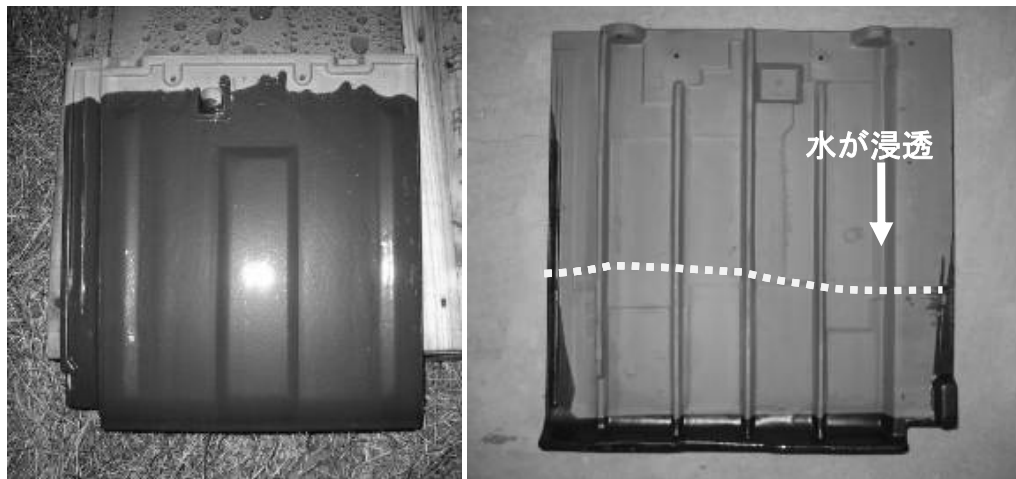


写真 6.2.10 曝露実験後の釉薬瓦表面と裏面

6.2.3 水分浸透実験のまとめ

水分浸透実験の結果からは、全面に炭素膜の仕上げ層を持ついぶし瓦と、一面のみに釉薬層を持つ釉薬瓦では、同じ環境下に置かれた場合でも水分浸透性状が全く異なることがわかった。

いぶし瓦の場合は、表面に水が接している状況では局所的に水が浸透し、内部に水分の分布が形成される。どの部分が透水しやすいかを表面からの目視で判別するのは困難である。釉薬瓦の仕上げ層の透水抵抗は大きく欠損部の影響も少ないが、仕上げ層のない部分から多量の水分が浸

透し、一様な水分分布が形成される。このような水分分布の違いは、低温環境下で内部の水分が凍結した場合、瓦の劣化性状に影響を与えらる。と考えられる。

3章で測定した結果から、いぶし瓦の透水係数は釉薬瓦のそれに比していくぶん大きい、水分が一様に分布していないこと、いぶし瓦は全面的に仕上げ層が施されているため、表面から水分が浸透した場合は、初期に内部に含まれていた空気は流出しづらいつらいとされらることから、4章で述べたように、空気の存在が水分移動速度を遅らせている可能性もあるとされら。

降雨環境における実験結果は、実験室における水分浸透実験の結果と同様の傾向を示しており、今回の実験室実験により降雨の影響の評価が可能とされら。

6.3 水分浸透実験の数値解析（二相系熱水分移動解析）

ここでは、6.2節で行った実験室及び外部環境での水分浸透実験における水分分布を再現する数値解析を行う。

いぶし瓦では表面の炭素膜に目視では判別できない欠損部がある場合、釉薬瓦では仕上げ層のある部分とない部分が明確に分かれている場合を想定したモデル化を行う。また、実験結果の含水率分布との比較により、材料物性値を推定する。

6.3.1 数値解析の概要

(1) 検討対象

検討対象は、図 6.3.1 に示すいぶし瓦と釉薬瓦の一部である。瓦の厚さは共に 16mm とする。いぶし瓦は上下表面に炭素膜による仕上げ層をもち、釉薬瓦は上側表面にのみ釉薬による仕上げ層をもつものとする。ただし、釉薬瓦の後方 30mm の範囲には仕上げ層がなく、素地のままとする。いぶし瓦においては、仕上げ層の欠損部の有無についても検討を行う。

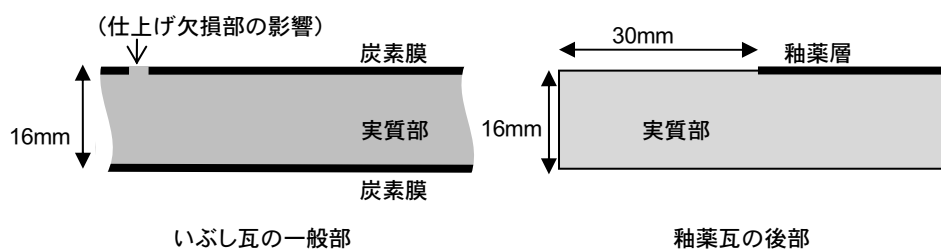


図 6.3.1 検討対象部分

(2) 計算対象範囲

いぶし瓦の中央部分断面の数値解析モデルを図 6.3.2 に示す。厚さ方向に X 軸、横方向に Y 軸をとる。上境界 (X=0mm)・下境界 (X=16mm) にはいぶし瓦の炭素膜を想定した透湿・透水抵抗があるが、炭素膜の熱抵抗は 0 とする。解析範囲は、Y 方向に 20mm の範囲である。空気に接するのは X=0mm と X=16mm の面のみであり、Y=0mm と Y=20mm の部分では対称性を考慮し、熱・水分の移動はないものとする (断熱・断湿)。差分の分割幅は X 方向については表面に近いほど小さくする。

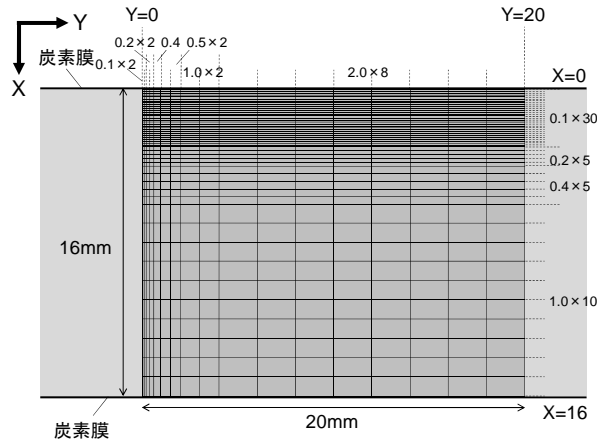


図 6.3.2 いぶし瓦の解析範囲

釉薬瓦の後方部分断面の数値解析モデルを図 6.3.3 に示す。いぶし瓦と同様、計算対象は厚さ 16mm の瓦であり、厚さ方向に X 軸、長さ方向に Y 軸をとる。上側 (X=0mm) には釉薬瓦の釉薬層を想定した透湿・透水抵抗があるが、Y 方向に 30mm までは仕上げがなく素地のままとする。解析範囲は瓦の後部、Y 方向に 150mm の範囲である。空気に接するのは X=0mm と X=16mm、Y=0mm の 3 面であり、Y=140mm の部分では熱・水分の移動はないものとする (断熱・断湿)。

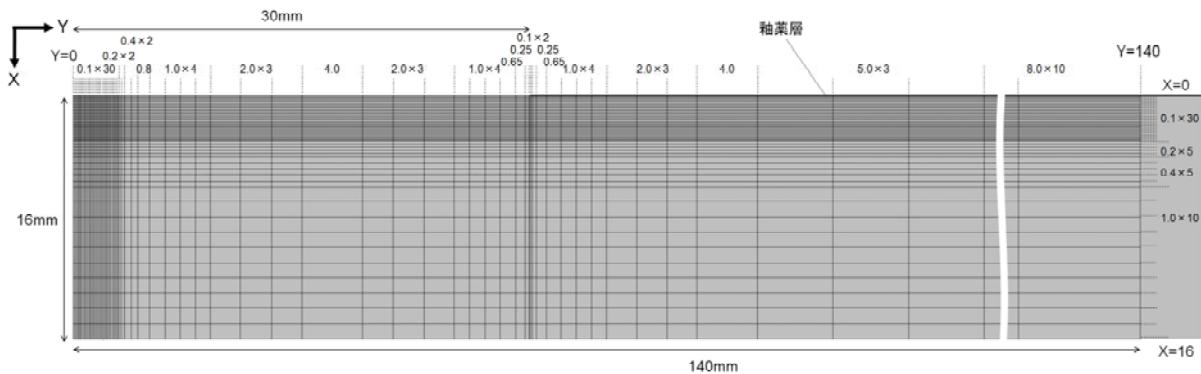


図 6.3.3 釉薬瓦の解析範囲

(3) 材料物性値

計算に用いる材料物性値は、5.5 節で整理した値を用いる。いぶし瓦の炭素膜と釉薬瓦の釉薬層の透湿抵抗と透水抵抗を表 6.3.1 に示す。ここに示した値は液水については水圧勾配、水蒸気については水蒸気圧勾配による移動の抵抗値であるため、5.5 節で示した方法に従い、それぞれ温度勾配と水分化学ポテンシャル勾配による移動の抵抗値へと変換する。仕上げのない部分については、仕上げ層と同じ厚さ (10 μ m) の実質部があると仮定し、その抵抗を考慮する。

表 6.3.1 仕上げ層の透湿抵抗・透水抵抗

	透湿抵抗 R'_v [$\text{m}^2\text{sPa/kg}$]		透水抵抗 R'_w [$\text{m}^2\text{sPa/kg}$]	
	(仕上げ層あり)	(仕上げ層なし)	(仕上げ層あり)	(仕上げ層なし)
いぶし瓦	5.35×10^9	2.42×10^6	4.96×10^9	2677.8
釉薬瓦	1.45×10^{11}	2.13×10^6	3.24×10^9	4651.5

材料内部の水分化学ポテンシャル勾配による液相水分伝導率 $\lambda'_{\mu l}$ については、飽和にごく近い領域で急激に値が大きくなる瓦の性質を考慮し、式(6.3.1)で表されるものとした。係数 a と N は理論的に求めることが困難であるため、実験室での実験を模擬した数値解析を行い決定する。

$$\lambda'_{\mu l} = a \times \psi_l + \left(\lambda'_{\mu l, sat} - a \cdot \psi_{l, sat} \right) \left(\frac{\psi_l}{\psi_{l, sat}} \right)^N \quad (6.3.1)$$

計算に用いた a と N の数値を表 6.3.2 に、それぞれを代入して求めたいぶし瓦の $\lambda'_{\mu l}$ を図 6.3.4 に示す。本計算で用いる a と N の範囲では、容積基準含水率が約 $0.25[\text{m}^3/\text{m}^3]$ (≒飽和度 0.95) に達するまでは、 $\lambda'_{\mu l}$ は a の値にほぼ比例し、飽和度が 0.95 を超える範囲では N の値により $\lambda'_{\mu l}$ が大きく変化する。いぶし瓦と釉薬瓦では飽和時の水分伝導率 ($\lambda'_{\mu l, sat}$) の値は異なるものの同程度のオーダー (いぶし瓦 : $3.73 \times 10^{-6} [\text{kg}/\text{ms}(\text{J}/\text{kg})]$ 、釉薬瓦 : $2.11 \times 10^{-6} [\text{kg}/\text{ms}(\text{J}/\text{kg})]$) であるため、 a と N による影響は同様と考えられる。

表 6.3.2 $\lambda'_{\mu l}$ を決定するパラメータ

a	2.5×10^{-10}	5.0×10^{-10}	7.5×10^{-10}
N	500	750	1000

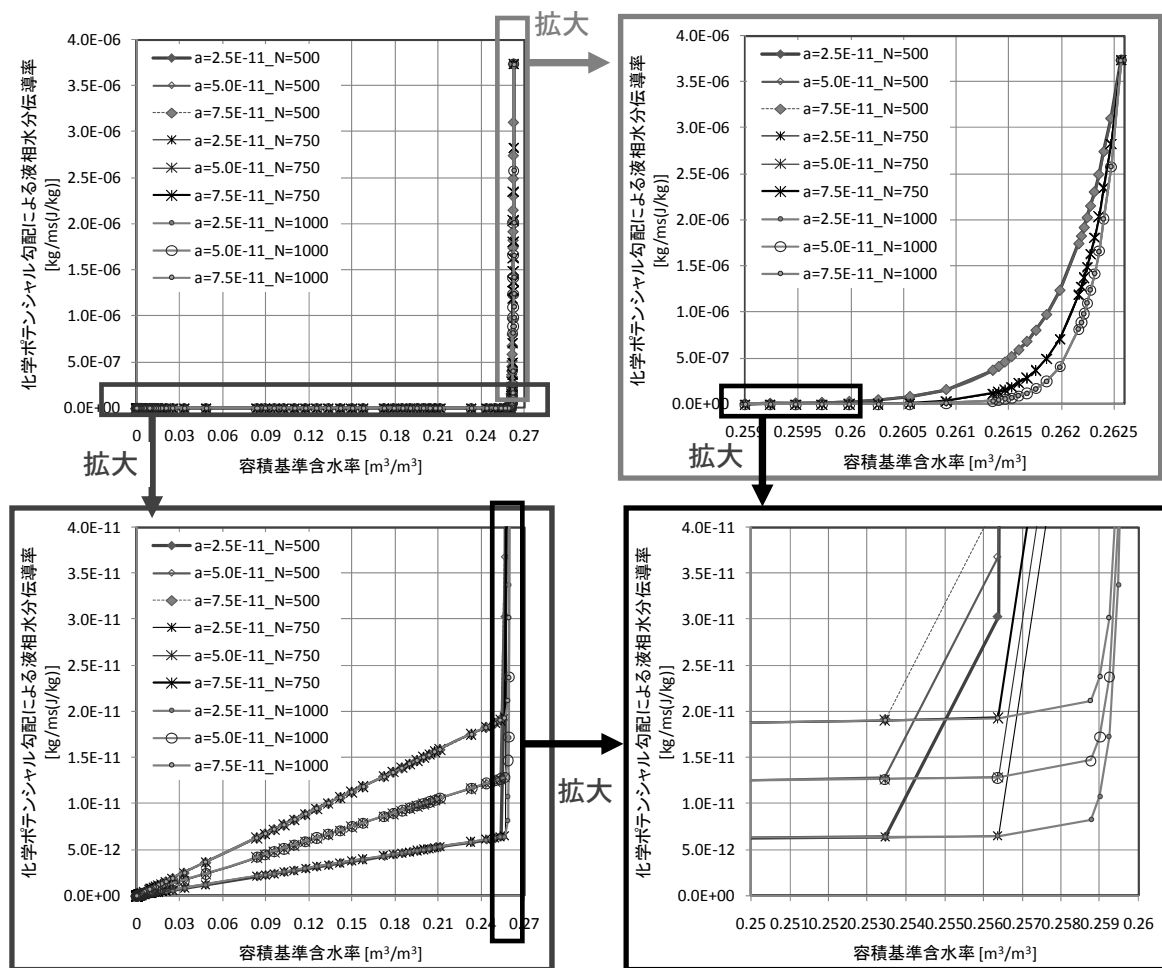


図 6.3.4 パラメータ a と N の違いによる液相水分伝導率の違い (いぶし瓦)

6.3.2 実験室における実験の解析

(1) 境界条件と計算条件

瓦の周囲の温湿度は、実験時の環境に合わせて $20^{\circ}\text{C}60\%\text{RH}$ とする。瓦の境界条件を図 6.3.5 に示す。実験時にタオルで覆われていた上面では水蒸気の移動はなく、仕上げ層の上側が常に飽和であるとみなし、水分化学ポテンシャルを $-0.1[\text{J}/\text{kg}]$ とする。下面は仕上げ層を通して水蒸気移動があるとする。湿気伝達率は対流熱伝達率 ($4.65[\text{W}/\text{m}^2\text{K}]$) からルイスの関係を用いて求めた[6-3]。

瓦内部の温度と水分化学ポテンシャルの初期値は、周囲空気の温湿度 ($20^{\circ}\text{C} \cdot 60\%\text{RH}$) に平衡する値とする。計算における時間刻みは $0.01 [\text{s}]$ とし、計算時間は 72 時間 (3 日間) とする。

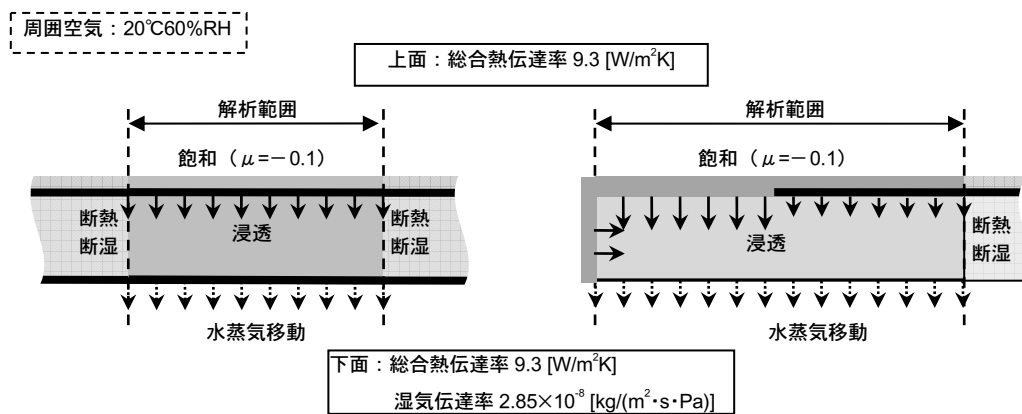


図 6.3.5 実験室実験における境界条件

(2) いぶし瓦の場合

1) 表面の透水抵抗分布パターンの設定

いぶし瓦の水分浸透実験においては、水が浸透している部分としていない部分が見られたことから、表面仕上げ層の透水抵抗に分布があると推定される。そこで、いくつかの分布パターンを想定して解析を行う。分布パターンの考え方を図 6.3.6 に示す。

測定で得られた仕上げ層の透水抵抗は、欠損部も含む平均化された値であるため、著しく透湿抵抗が低い欠損部分があるとすると、それ以外の一般部分の透水抵抗は測定値よりもいくぶん大きくなるのが考えられる。

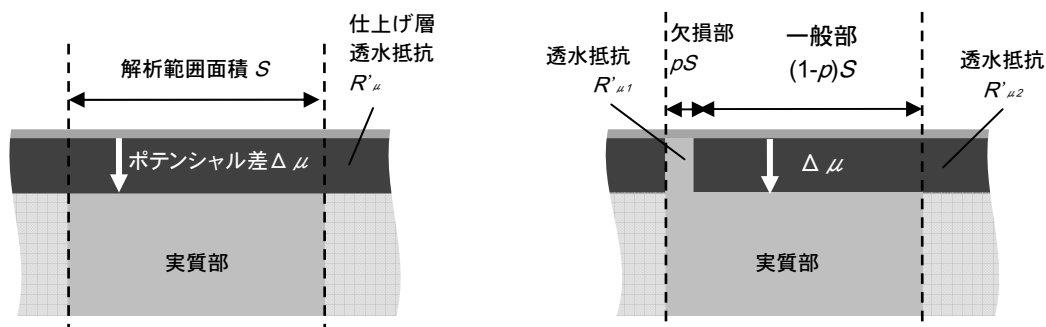


図 6.3.6 表面仕上げ層の透水抵抗分布の考え方

測定で得られた透水抵抗を $R'_{\mu}[\text{m}^2 \cdot \text{s} \cdot (\text{J}/\text{kg})/\text{kg}]$ とし、欠損部、一般部の透水抵抗を $R'_{\mu 1}[\text{m}^2 \cdot \text{s} \cdot (\text{J}/\text{kg})/\text{kg}]$ 、 $R'_{\mu 2}[\text{m}^2 \cdot \text{s} \cdot (\text{J}/\text{kg})/\text{kg}]$ とする。仕上げ層の中で欠損部が一定の割合 p だけ存在するとする。仕上げ層に分布があるとした場合もトータルでの水分流は等しいと仮定し、仕上げ層の上下での水分ポテンシャル差を $\Delta\mu$ [J/kg] とすると、ある面積 S [m²] を通る水分流 J_w [kg/s] は式(6.3.2)で表される。

$$J_w = \frac{\Delta\mu}{R'_{\mu}} S = \frac{\Delta\mu}{R'_{\mu 1}} pS + \frac{\Delta\mu}{R'_{\mu 2}} (1-p)S \tag{6.3.2}$$

これより、一般部の透水抵抗 $R'_{\mu 2}$ を測定値の 1.5 倍、2.0 倍、5.0 倍、10 倍と固定すると、欠損部の面積割合 p と透水抵抗 $R'_{\mu 2}$ の測定値 R'_{μ} に対する割合 $R'_{\mu 2}/R'_{\mu}$ の関係が図 6.3.7 のように得られる。

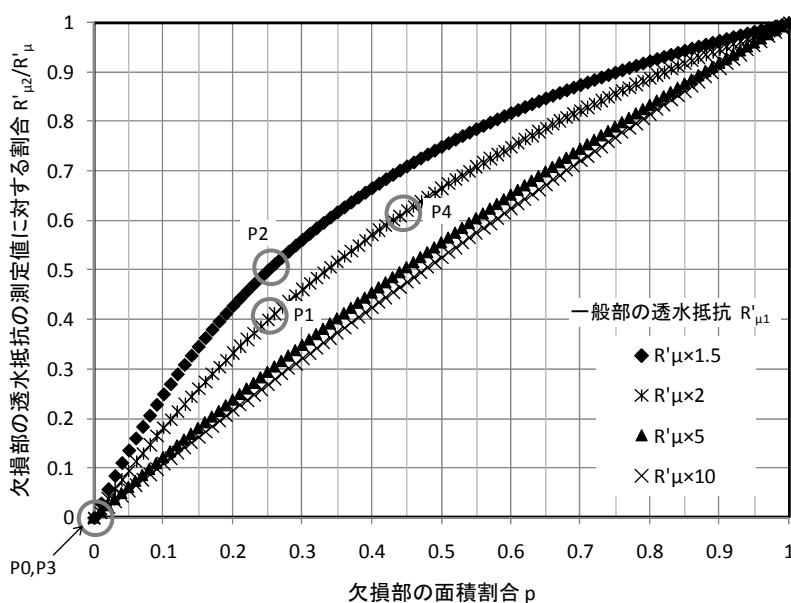


図 6.3.7 欠損部の面積割合と透水抵抗の関係

ここでは、表 6.3.3 に示す 5 パターンの透水抵抗分布を用いた解析を行い、欠損部の大きさ（面積割合）と透水抵抗が含水率分布に与える影響を把握する。なお、P0 は欠損がない場合である。図 6.3.7 には、P0～P4 の位置も示している。計算は対称性を考慮して欠損部を中心とした片側のみについて行い、結果の出力は両側について示す（図 6.3.8）。

表 6.3.3 表面透水抵抗分布パターン

	欠損部の透水抵抗 $R'_{\mu 1}$	欠損部の面積割合 p	一般部の透水抵抗 $R'_{\mu 2}$	備考
P0	4.96×10^6	0	4.96×10^6	欠損なし
P1	1.98×10^6	0.25	9.92×10^6	一般部は 2 倍
P2	2.48×10^6	0.25	7.44×10^6	一般部は 1.5 倍
P3	37015	0.0025	9.92×10^6	傷等の微小な欠損を想定
P4	3.52×10^6	0.44	9.92×10^6	仕上げ層のむらを想定

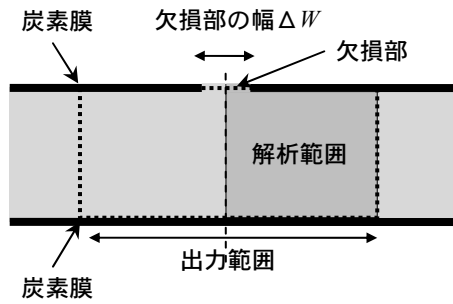


図 6.3.8 仕上げ層の透水抵抗分布の影響に関する解析範囲と出力範囲

2) 材料内部での液水移動速度の影響

最初に、水分化学ポテンシャル勾配による液相水分伝導率を決定するパラメータを変えて計算を行い、移動速度と含水率分布の関係を検討する。パラメータ a と N の値は表 6.3.2 に示した通りである。なお、表面仕上げの欠損部の幅と透水抵抗は表 6.3.3 に示した P1 とした。

各条件における計算開始から 1 時間後、3 時間後、9 時間後、24 時間後、3 日後の含水率分布を図 6.3.9~6.3.13 にそれぞれ示す。

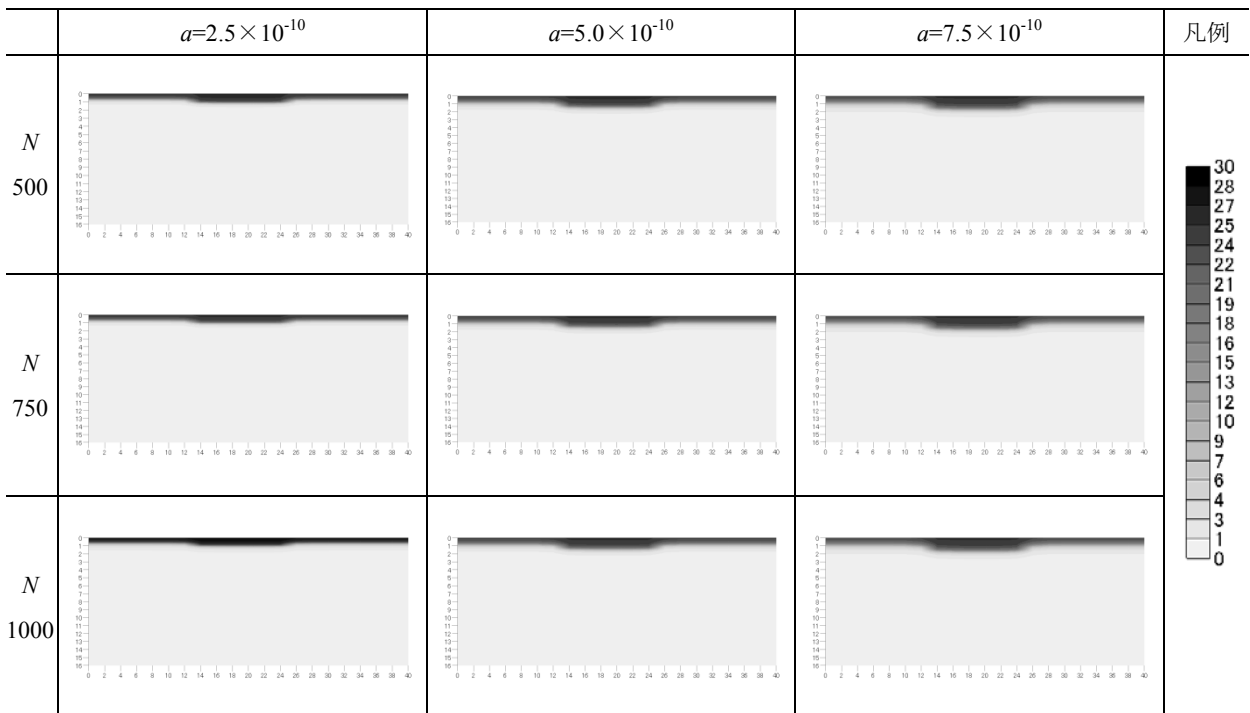


図 6.3.9 1 時間後の含水率分布

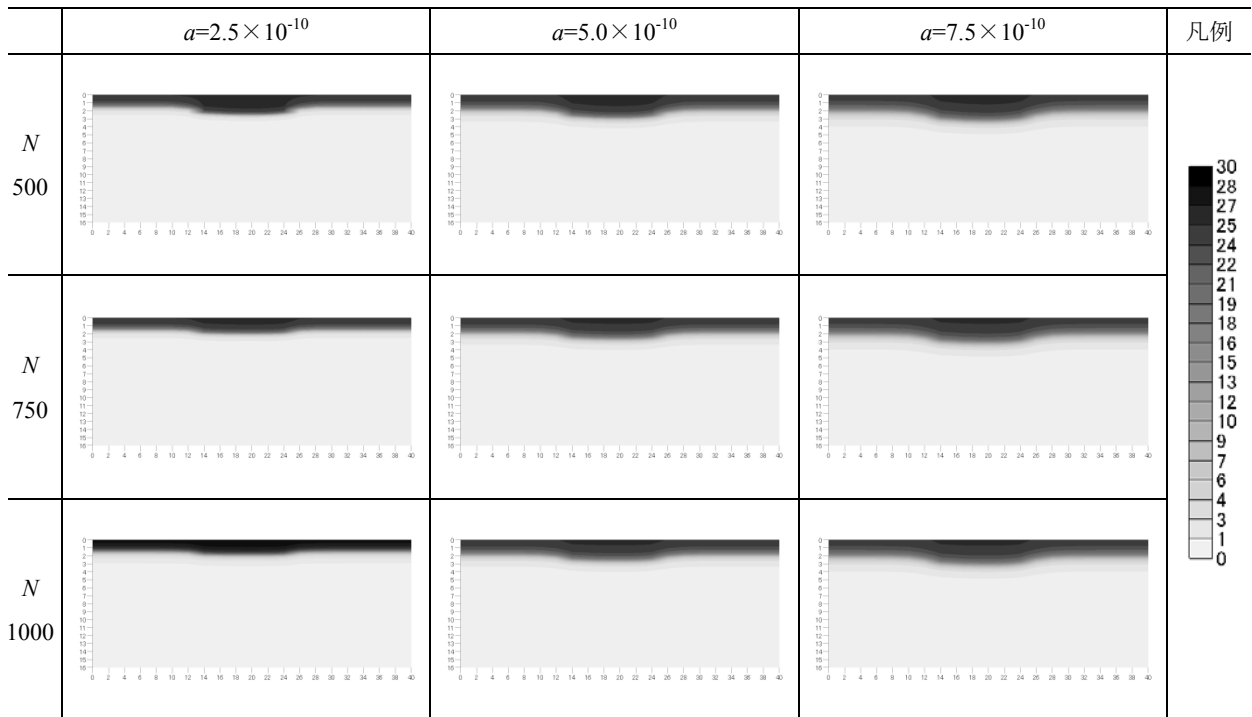


図 6.3.10 3 時間後の含水率分布

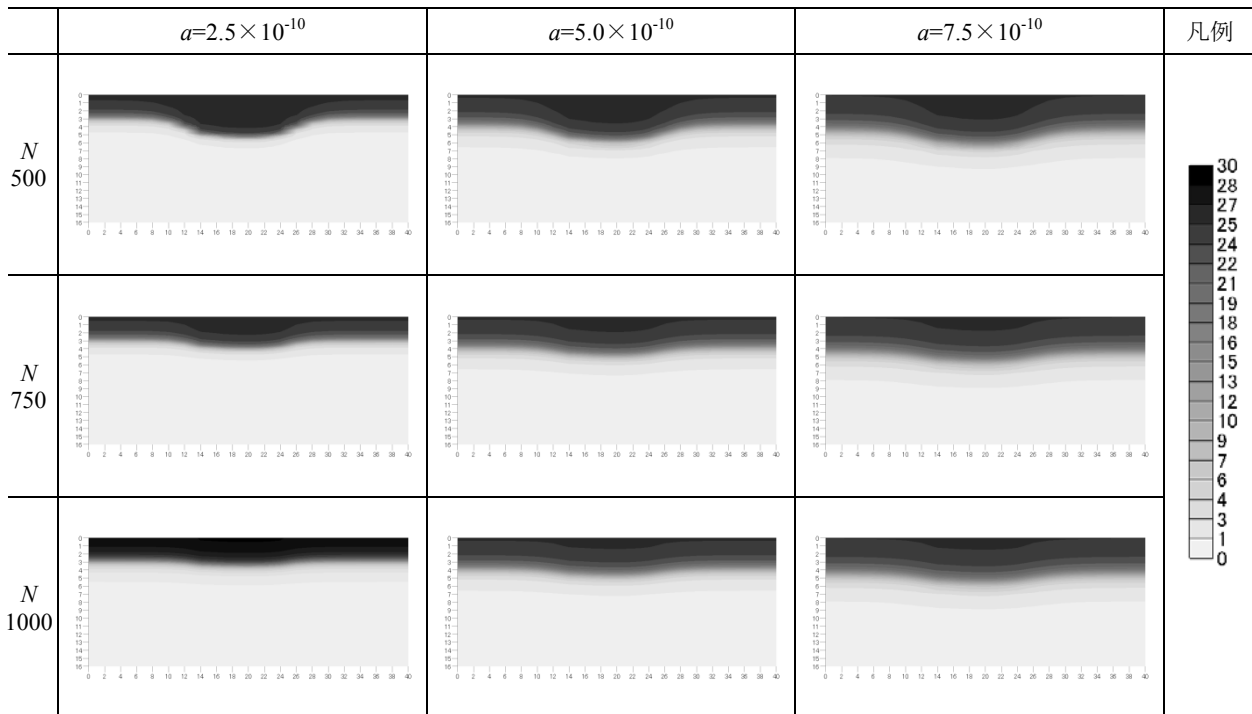


図 6.3.11 9 時間後の含水率分布

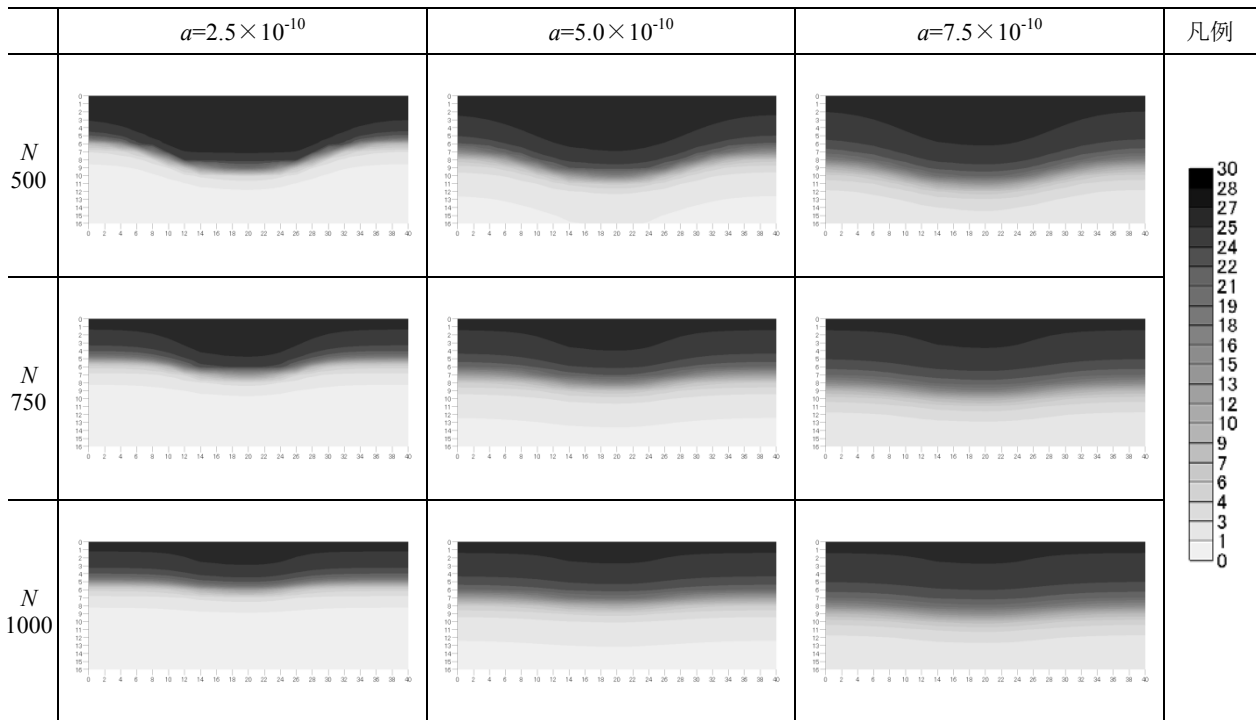


図 6.3.12 24 時間後の含水率分布

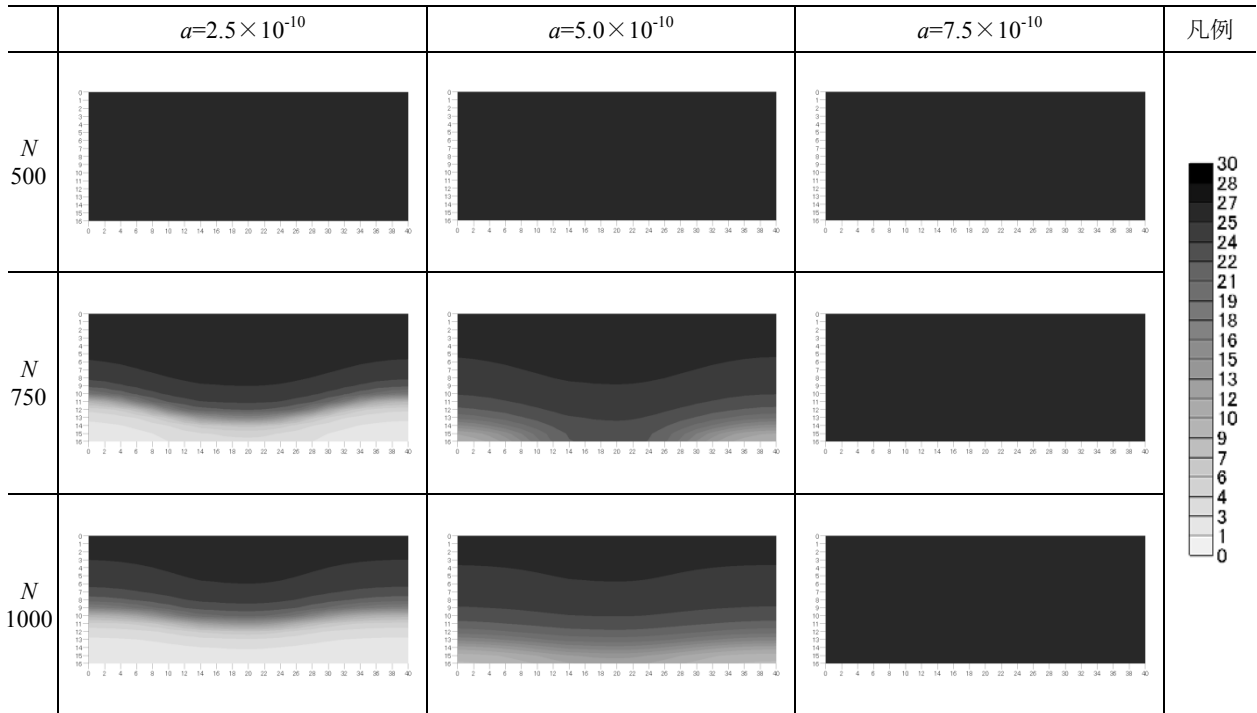


図 6.3.13 3 日後の含水率分布

瓦内部の初期含水率が非常に小さい(0.023[vol.%])ため、仕上げ層の上側を飽和とすると、仕上げ層を通して水が浸透することがわかる。仕上げ層のない部分からはより多くの水が流入するが、 a の値が大きくなると低含水率域での移動量が大きくなるため、乾燥した部分へも拡散しやすく、内部への浸透量が多くなる。 a の値が小さい方が欠損部の影響が顕著に現れている。 N については、値が大きくなるほど高い含水率にならないければ移動速度が急激に大きくならないため、水が浸透しにくく、同じ時間経過した時の含水率分布を比較すると、高含水率の範囲が狭くなる。また、本解析のように一面からのみ水分の供給がある場合は、表面に沿うように拡散し、水分の浸透ともなって内部へと拡散する傾向を示すため、欠損部の影響が明確ではない。実験で内部の含水率分布を確認した9時間後の分布(写真6.2.4)と比較すると、表面に平行に一樣に水が浸透しているというよりも、局所的に含水率の高い部分と乾燥している部分が見られること、さらに、3日後の分布(写真6.2.5)では裏面近くまで水が浸透していたことから、本解析結果からは、 $a=2.5 \times 10^{-10}$ 、 $N=500$ 程度とすると、実験で観察された性状に近いと考えられる。これ以降は、この値を用いて解析を行う。

2) 仕上げ層欠損部の幅と透水抵抗の影響

前節の計算結果より、 $a=2.5 \times 10^{-10}$ 、 $N=500$ として、表6.3.3に示す5パターンでの透水抵抗分布での計算を行った。各パターンにおける3時間後、9時間後、24時間後の含水率分布を図6.3.14に示す。

仕上げ層に欠損がないと想定したP0においても表面から徐々に水分が浸透する。P1~P4はいずれも一般部の透水抵抗がP0よりも大きいため、この部分からの水分浸透量は少なくなっている。P1とP2は欠損部の幅が等しく、P1では欠損部の透水抵抗が一般部の1/5、P2では1/3であるが、いずれも含水率分布には欠損部の影響が見られる。P3の欠損部は面積割合が0.25%と非常に小さいが、透水抵抗を一般部の1/400としていることから、明らかにこの部分から多くの水が流入していることがわかる。

以上のことから、写真6.2.4、6.2.5で見られたようないぶし瓦内部の含水率分布は、表面仕上げ層の厚さのムラや施工・運搬時の傷などにより生じうることが確認できた。

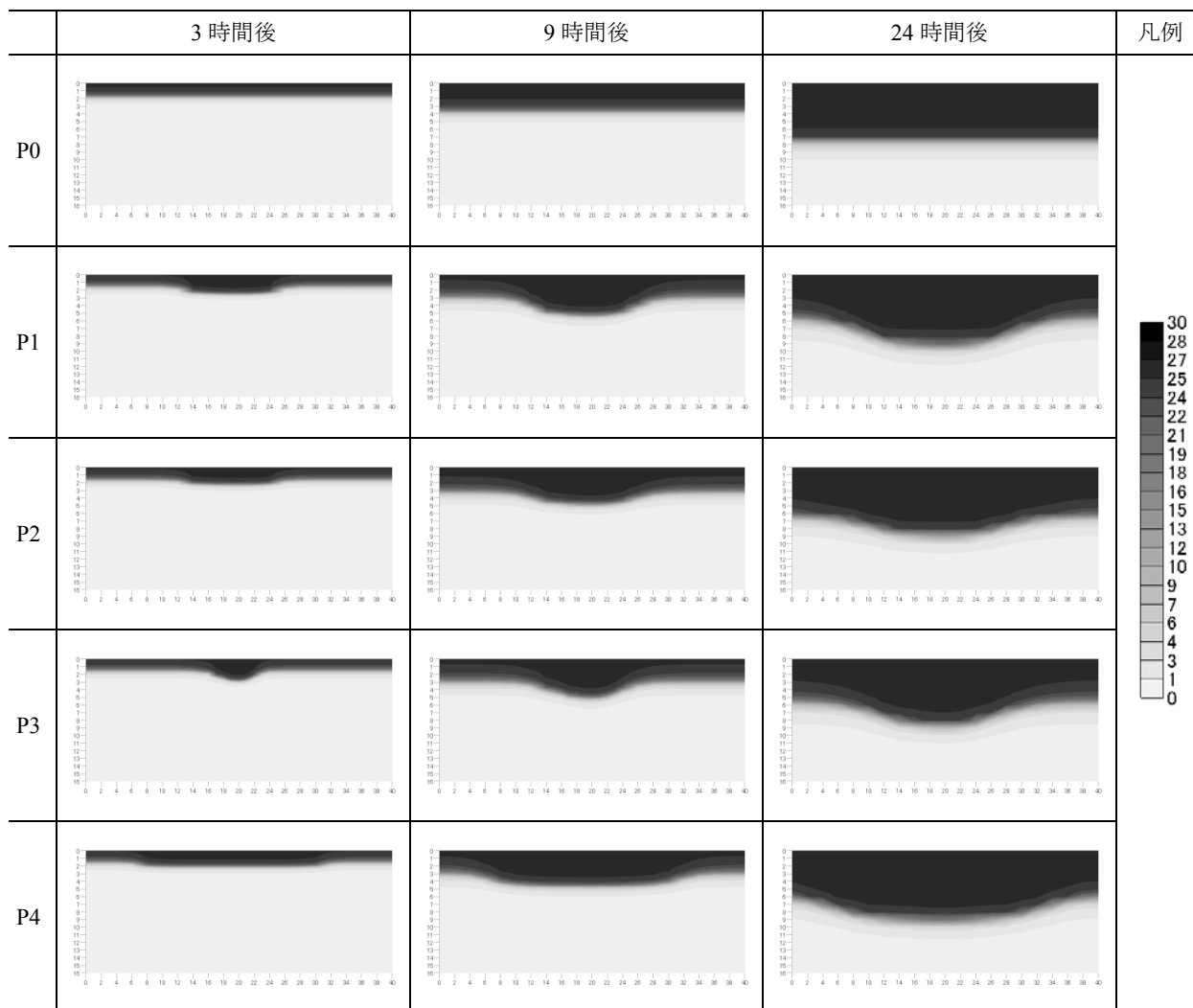


図 6.3.14 仕上げ層の欠損部の幅の違いによる含水率分布の違い

(3) 釉薬瓦の場合

釉薬瓦の場合も、いぶし瓦と同様に水分化学ポテンシャル勾配による液相水分伝導率 λ'_{ul} を決定するパラメータ a と N について、いくつかのパターンで計算を行い、実験時の含水率分布との比較を行う。計算パターンを表 6.3.4 に示す。

表 6.3.4 釉薬瓦の計算パターン

No.	a	N	No.	a	N
①	2.5×10^{-10}	100	④	1.0×10^{-9}	500
②	2.5×10^{-10}	500	⑤	2.5×10^{-9}	500
③	7.5×10^{-10}	500	⑥	2.5×10^{-9}	750

各パターンにおける計算開始から 1 時間後、3 時間後、9 時間後、24 時間後の含水率分布を図 6.3.15 に示す。

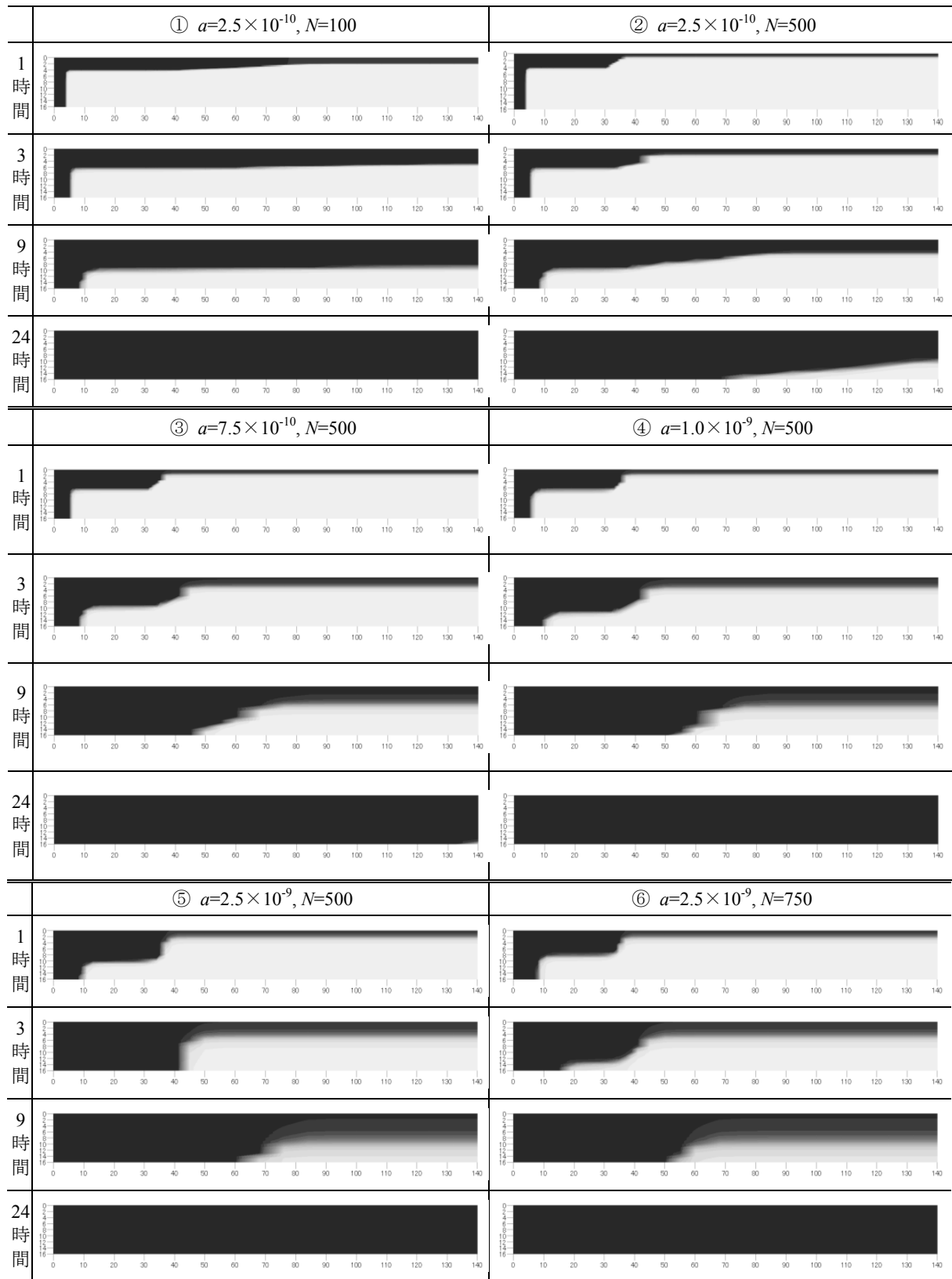


図 6.3.15 a と N の違いによる含水率分布の推移 (凡例は図 6.3.18 の通り)

いずれのパターンにおいても、仕上げ層のない部分（瓦後部及び瓦上部の 30mm）から主に水分が浸透し、仕上げ層のある部分へ拡散している。 a の値が大きい方が低含水率域での水分移動速度が速くなるため、同じ時間で比較すると、より広い含水率分布を示す。

係数の詳細についてはまだ検討の余地があるものの、⑤のパターンのように釉薬瓦では仕上げのない部分から多く水が浸透し、仕上げのある部分まで時間をかけて拡散していく様子が大略は再現できたといえる。

6.3.3 屋外実験の解析

ここでは、5.4.4 節で述べた降雨の強さと、材料内水分移動係数の影響に着目して検討を行う。解析対象は仕上げ層に欠損があるいぶし瓦とする。

(1) 境界条件と計算条件

周囲空気の温湿度と降水量は、2008年1月28日15:00～29日17:00の気象庁のデータ[6-2]で与える。外気条件を図 6.3.16 に示す。降雨は 20:00（実験開始から 5 時間後）から断続的にある。ここで示した降水量 $1.39 \times 10^{-4} [\text{kg}/\text{m}^2\text{s}]$ は、1 時間あたり 0.5mm に相当する雨量である。

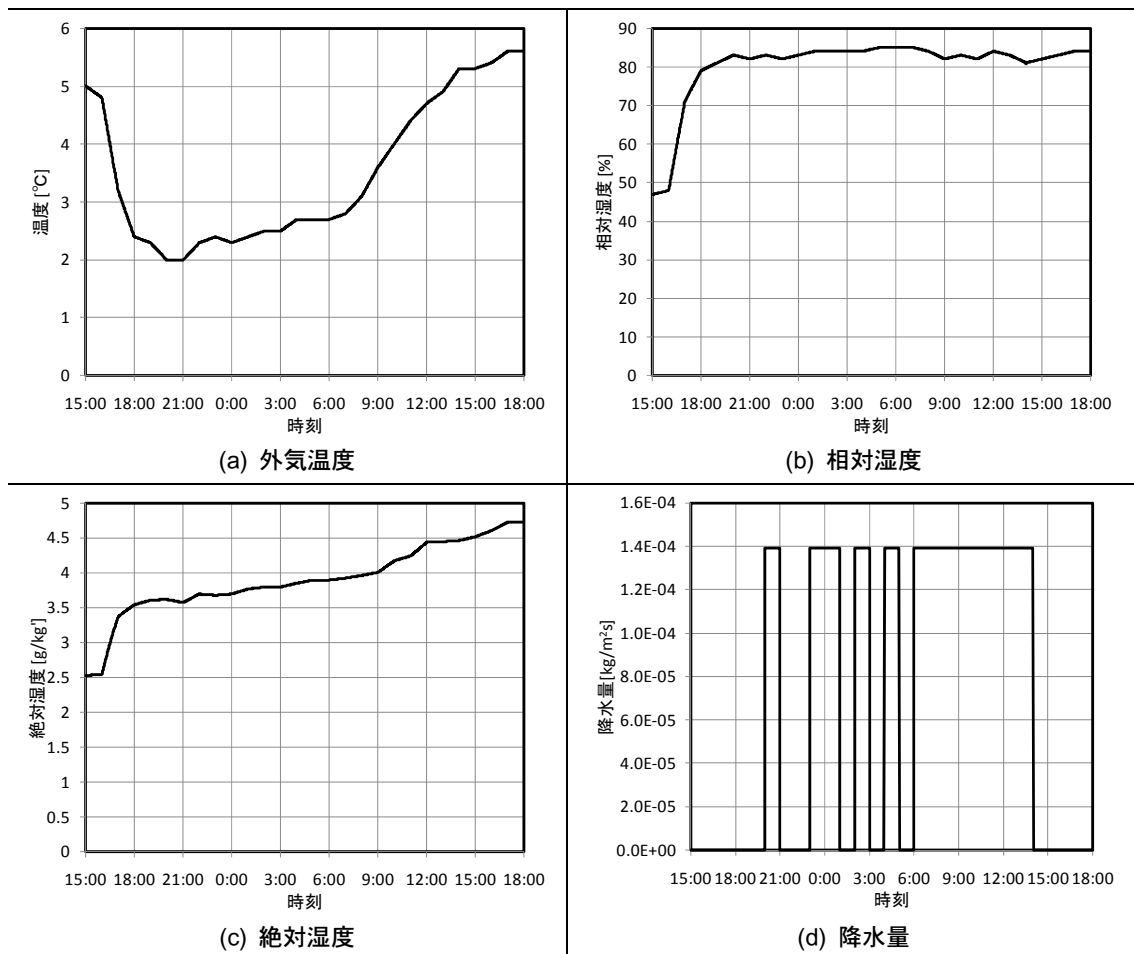


図 6.3.16 屋外実験時の外気条件

境界条件を図 6.3.17 に示す。降雨がある場合は、5.4.5 節に示した方法で瓦の内部に浸透する水分量を推定する。瓦の上側・下側表面とも外気に接するが、風の通りやすさを考慮して対流熱伝達率を変える。放射の影響は放射熱伝達率で考慮し、降雨時であるため日射はない。降雨がある時は、上側表面での水蒸気移動は 0 とする。

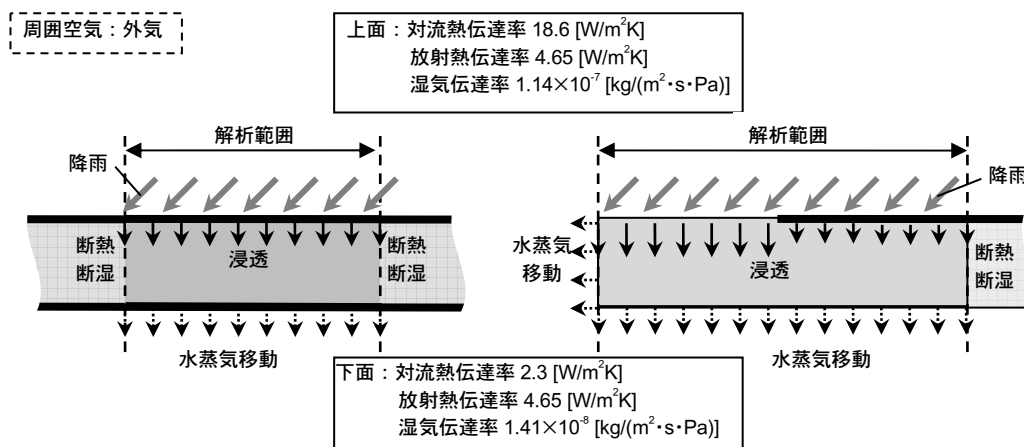


図 6.3.17 屋外実験における境界条件

瓦内部の温度と水分化学ポテンシャルの初期値は、1月28日15:00時点での外気の温湿度(5°C・47%RH)に平衡しているとする。計算における時間刻みは0.01[s]とし、計算時間は26時間とする。

計算パターンを表 6.3.5 に示す。表面仕上げ層の透水抵抗分布は表 6.3.3 に示した P3 の条件とした。内部での水分移動速度の影響については前節と同様 $a=2.5 \times 10^{-10} \cdot N=500$ を基本 (aN-S) とし、低含水率域での移動量が多い場合 (aN-L) と、より低い含水率で移動係数が急激に大きくなる場合 (aN-H) について、それぞれ計算を行った。

本解析においては、瓦内部への雨水の浸透を対象とするため、雨水の総量が重要な要素となるが、総量が同じでも降雨強度が大きく降雨時間が短いほど内部へ浸透せずに流れ落ちる水量が多くなると考えられるため、降雨強度の異なる計算を行う。気象データから得られる降水量は1時間の積算値であるが、その時間中平均して降雨があった場合と、最初の10分間に降雨が集中していた場合を想定する。

表 6.3.5 屋外実験に対応する解析 計算パターン

パターン No.	透水抵抗分布	a	N	雨の降り方
①	P3 (微小な傷)	2.5×10^{-10}	500	1 時間に平均
②	P3 (微小な傷)	2.5×10^{-10}	500	10 分間に集中
③	P3 (微小な傷)	7.5×10^{-10}	500	1 時間に平均
④	P3 (微小な傷)	7.5×10^{-10}	500	10 分間に集中
⑤	P3 (微小な傷)	2.5×10^{-10}	100	1 時間に平均
⑥	P3 (微小な傷)	2.5×10^{-10}	100	10 分間に集中

(2) 計算結果

各計算パターンにおける、欠損中央部 (Y=0) の含水率分布の推移を図 6.3.18~6.3.20 に示す。

内部での水分伝導率の係数 (a, N) の違いにより、26 時間後に含水率が高くなっている部分の深さ (上側表面からの距離) が異なる。また、いずれの場合においても、降雨を 1 時間に平均して与えた場合より、10 分間に集中して与えた場合の方が、高含水率域が狭くなっている。

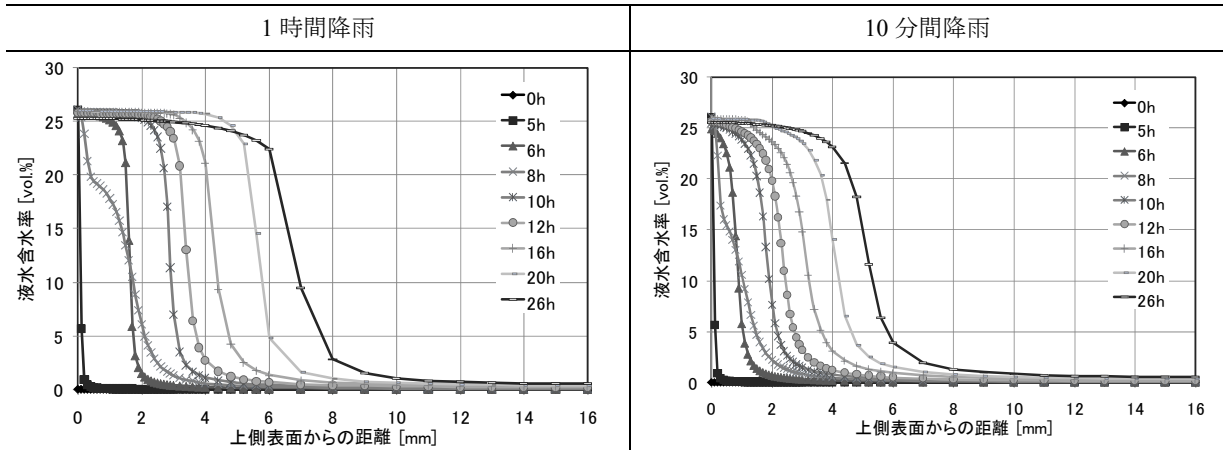


図 6.3.18 計算パターン①・②における厚さ方向含水率分布の推移

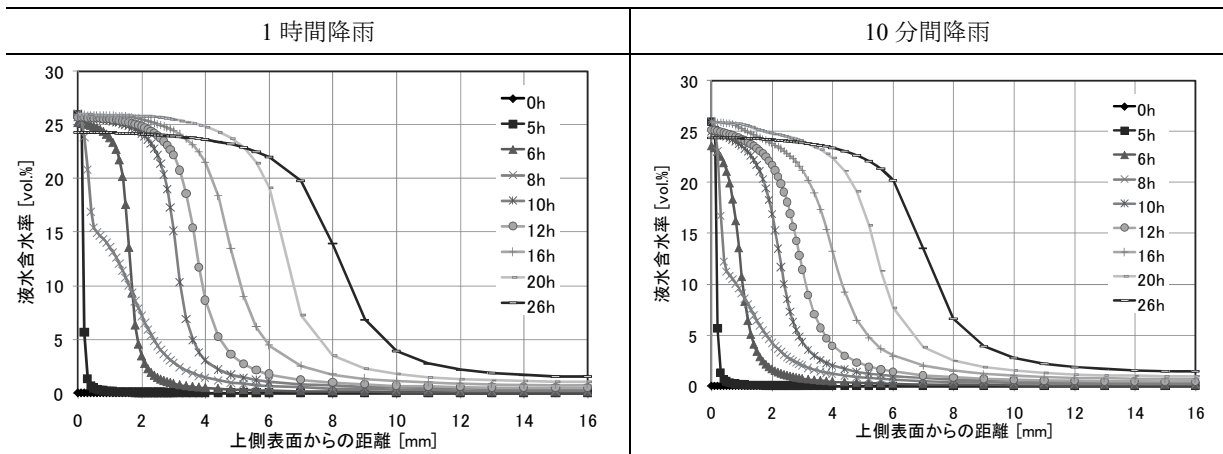


図 6.3.19 計算パターン③・④における厚さ方向含水率分布の推移

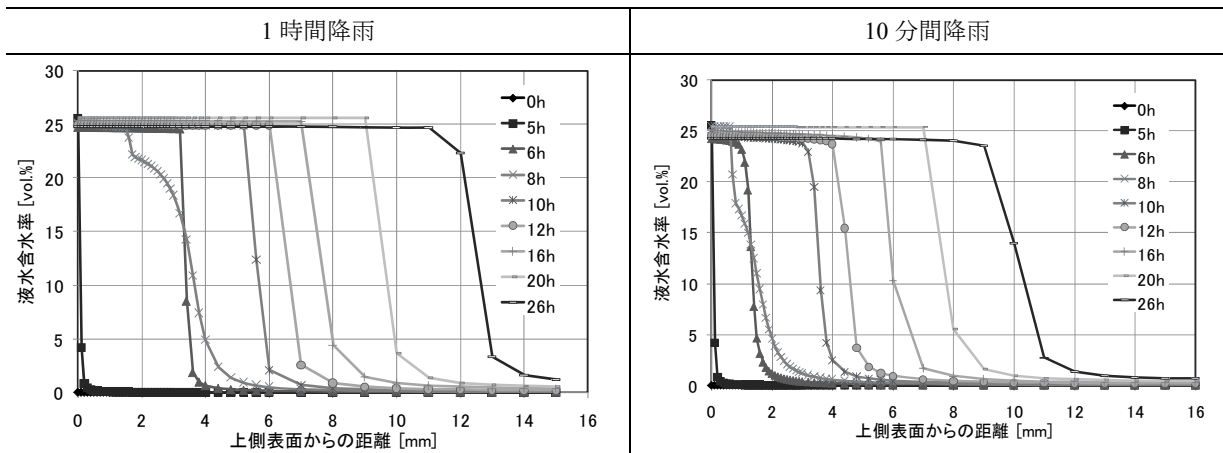


図 6.3.20 計算パターン⑤・⑥における厚さ方向含水率分布の推移

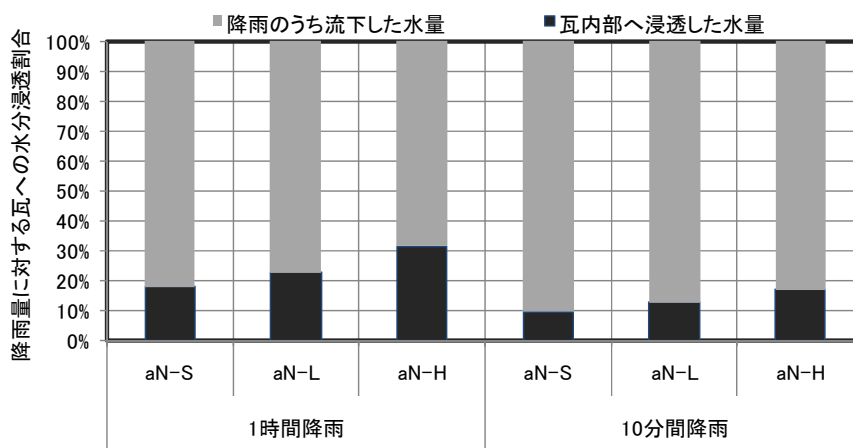


図 6.3.21 降雨量のうち瓦内部へ浸透する水分量の割合

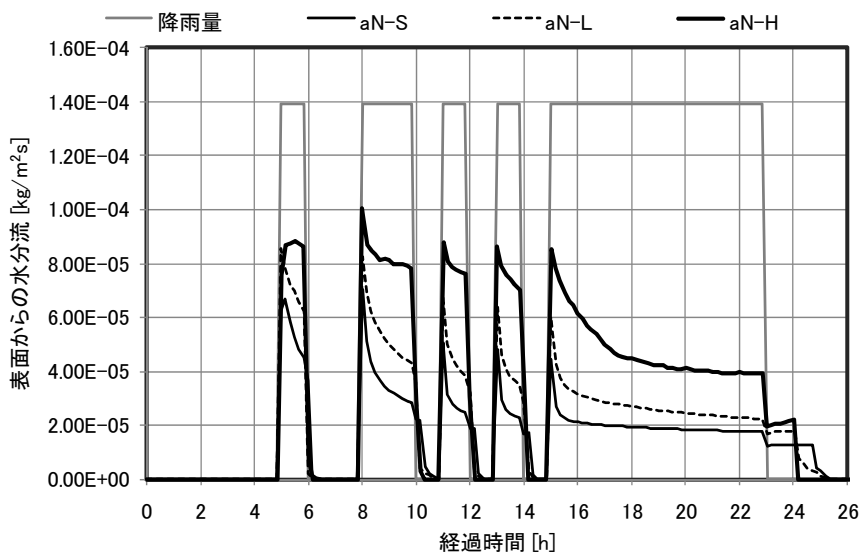


図 6.3.22 水分移動係数の違いによる瓦への浸透水分量の違い (1 時間降雨)

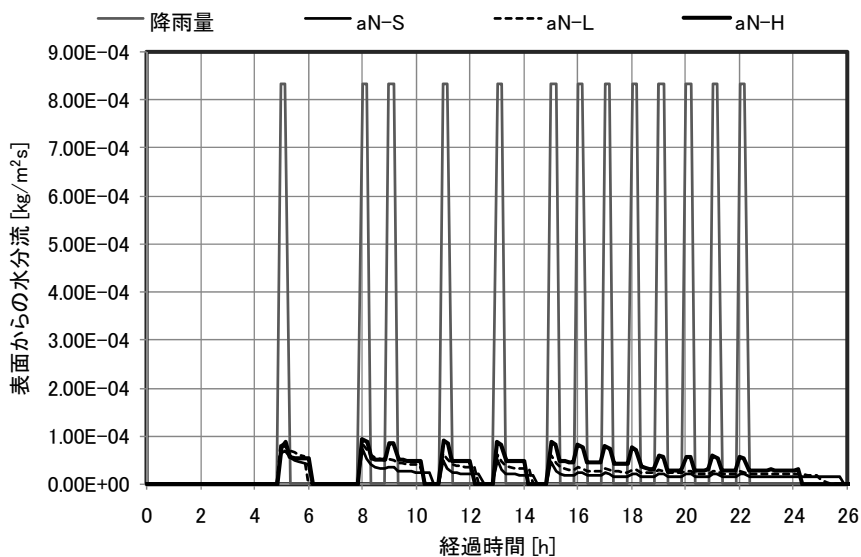


図 6.3.23 水分移動係数の違いによる瓦への浸透水分量の違い (10 分間降雨)

図 6.3.21 は、解析期間中の全降雨量のうち、瓦に浸透した水分の割合を示したものである。特に高含水率域での水分移動係数が大きくなる (aN-H) ほど、内部への浸透量は多い。瓦内部での移動速度が小さい場合は、外部から供給される多量の水分が内部へ浸透しにくく、屋根の勾配と外部からの水分供給量で決定される付着水膜厚さ (式(5.4.10)) を超えると流下する

10 分間に集中して降雨があった場合は、浸透できずに流下する量が多くなり、全体として、1 時間に平均して降雨があった場合の約半分の量しか瓦内部へ浸透しない。図 6.3.22 と図 6.3.23 は、表面から流入する水分流の経時変化を降雨量とともに示したものである。降雨開始直後には雨が多く流入するが、降雨が続くと流入量が減ってくるのがわかる。また、雨がやんだ後も、表面に水膜が付着していれば水分の流入は続く。

6.4 第6章のまとめ

本章では、表面仕上げ層をもつ瓦内部の水分移動について、実験と数値解析により性状の把握を行った。

実験では、全体に表面仕上げ層をもついぶし瓦と、仕上げ層が一部にしかない釉薬瓦では、同じ時間降雨環境下に曝されていても異なる水分分布をとることがわかった。

いぶし瓦では内部で写真 6.4.1 に示すように、局所的に水が浸透している部分が見られた。



写真 6.4.1 いぶし瓦に特徴的な含水率分布

この部分は目視で確認できる表面仕上げの欠損部とは必ずしも一致せず、先端部や差し込み部など部分によって異なる傾向が見られた。数値解析においては表面仕上げを通して一定の水分が流入することが確認でき、表面仕上げ層の透水抵抗の分布や、内部の空隙構造のむら等に起因する水分移動速度の違いにより含水率分布が異なる可能性を示した。

釉薬瓦では、釉薬層のない部分から多く水分が流入し、釉薬に覆われている部分へ時間の経過とともに浸透していく様子が実験により確認できた。内部での液水移動速度については、いぶし瓦よりも釉薬瓦の方が速いことが実験により示唆された。飽和時の水分伝導率はほぼ同程度であったことから、釉薬瓦はいぶし瓦よりも比較的低い含水率の領域での液水移動量が多いことがその理由と考えられる。したがって、不飽和時の水分伝導率を決定するパラメータの値を変えることでその違いを表した。

また、本章では雨の降り方についての検討も行った。積算降水量が同じであっても、長時間にわたる弱い雨の場合より、短時間に強く降る雨の方が、瓦内部へ流入する水分流は少なくなる。これは、急激に多量の水分が供給されることにより、内部への拡散が間に合わず表面付近が飽和近くに達し、内部へ流入できない水分は流下するためである。したがって、結露水のように長時

間にわたり少量の水分が付着しているような場合も、瓦内部への水分供給源として無視できない影響を与える可能性がある。これについては、次章で詳細に検討を行う。

第6章 参考文献

- [6-1] 田中稔：粘土瓦ハンドブック 13章いぶし瓦の焼成と操炉、技報堂出版、1980
- [6-2] 気象庁：気象統計情報. 2001, <http://www.jma.go.jp/jma/menu/report.html>, (参照 2008-12-3).
- [6-3] 銚井修一、池田哲朗、新田勝通：エース建築環境工学Ⅱ、朝倉書店、2002

第7章 温暖地における屋根瓦の凍結融解過程に関する検討

7.1 はじめに

第1章で述べたように、冬季の外気温の平均値が 0°C を上回る温暖な地域であっても、屋根瓦の凍害が見られる。それは、屋根が天空に面していることから放射冷却の影響を受け、温度が氷点下になるためと考えられる。凍害を引き起こす瓦内部の水分の凍結は、温度と含水状態が結氷する条件を満たす時に生じる。

瓦内部の含水率が上昇する要因としては、降雨が第一に考えられる。それと共に、冬季は外気温が低く飽和絶対湿度が非常に低いため、瓦の表面温度が外気温よりも低下すれば結露を生じる可能性が高くなる。この結露水が浸透し材料内部の含水率上昇を引き起こし、凍結の原因となることも考えられる。

本章では、放射冷却による屋根面の温度低下と、表面結露と降雨による瓦への水分供給を総合的にとらえ、実気象条件下で屋根瓦が凍結する可能性とその性状について検討を行う。

7.2節では、瓦の外観調査により実際に凍害が観察された京都を例として、12～2月の外気温平年値が 5.4°C という 0°C を上回る気象条件下で屋根瓦の温湿度に関する非定常解析を行い、結露の発生量と頻度を明らかにする。さらに屋根の方位や傾斜角、外部風速等の建物・環境要因が屋根面温度と結露に与える影響について検討を行う。

7.3節では、仕上げ層をもつ瓦において、降雨と結露による水分供給を考慮し、凍結が生じる頻度と量について解析を行う。

7.4節では、水分の移動速度や表面仕上げ、局所的な境界条件の違い等の各種要因が凍結・融解過程の性状に与える影響を検討する。

7.2 屋根面での表面結露量と頻度に関する検討

7.2.1 解析概要

(1) 計算モデル

図7.2.1は検討の対象(a)と、その簡易化した計算モデル(b)を示したものである。野地板の上に防水材を施工し、棧木を打ち瓦を引掛けて葺く工法を想定し、瓦と防水材の間に外気に連通する空気層がある断面を検討対象とする。瓦の裏面空気層は、室内から野地板を経て伝わる熱流と湿流、空気の移動に伴う外気の温湿度の影響を受ける。その影響の程度は、屋根や天井の断熱性能、

小屋裏換気、防水材の防湿性、瓦間の隙間面積、空気層の外気への開放度などによって異なる。一般に室内の影響を受ける程度が大きければ空気層の温度は外気よりも高くなると考えられるが、これは瓦の表面結露を検討する際には安全側に働くと考えられる。ここでは、熱的に最も厳しい条件を想定し、空気層の温湿度は外気に等しいという簡易なモデル化を行った。

屋根勾配は 20° ($= \pi/9$ rad、概ね4寸勾配) とし、方位は北に面しているとする。ここでは、表面結露量を明確にするため、瓦の種類としては、片側の面に透湿・透水抵抗が大きいガラス質の仕上げを持つ釉薬瓦を想定する。外気側では水蒸気の透過、液水の透水はないが、裏面の空気層側表面では水蒸気の透過、液水の透水ともにあるものとする。瓦の厚さは16mmとし、2mm刻みで一次元の差分計算を行う。

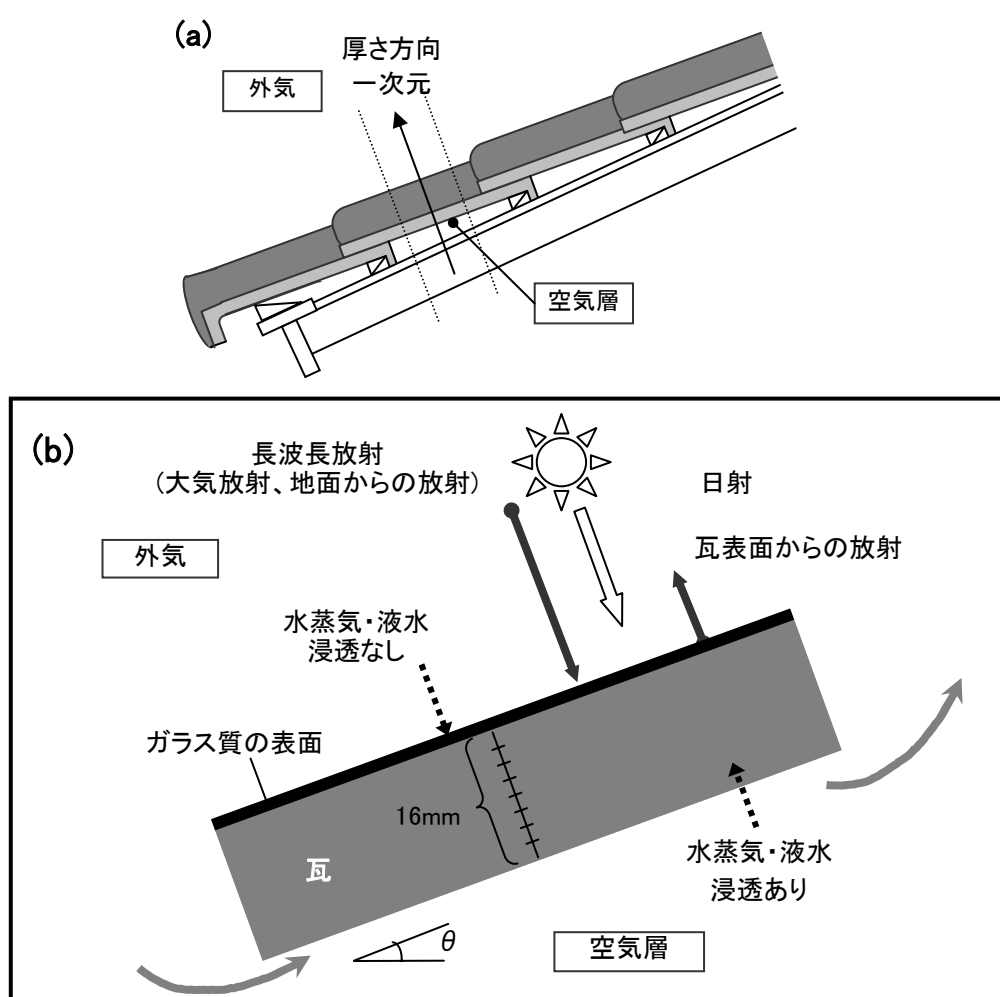


図 7.2.1 計算対象(a)と簡易計算モデル(b)

(2) 基礎方程式・材料物性値

瓦内部の熱と水分の移動は、3章で述べた水分の凍結・融解を考慮した三相系の熱水分同時移動方程式を用いて計算する。材料物性値も4.5節で整理した値を用いる。

(3) 境界面での熱・水分移動の取り扱い

外気および空気層に接する瓦表面での水分及びエネルギー収支は式(7.2.1)～(7.2.4)とする。表面の熱移動は対流熱伝達、日射及び長波長放射、水分の蒸発・凝縮に伴う相変化熱の影響を受ける。長波長放射は大気放射、地表からの放射、瓦表面からの放射から成る。なお、ここでは周囲の建物からの放射や反射による影響は考慮していない。空気層側の熱移動については日射は当たらないものとし、放射の影響は総合熱伝達率を用いることで考慮した。

【水分移動】

$$(外気側) \quad -(\lambda'_{\mu g} + \lambda'_{\mu l}) \frac{\partial \mu}{\partial x} - \lambda'_{Tg} \frac{\partial T}{\partial x} = 0 \quad (7.2.1)$$

$$(空気層側) \quad -(\lambda'_{\mu g} + \lambda'_{\mu l}) \frac{\partial \mu}{\partial x} - \lambda'_{Tg} \frac{\partial T}{\partial x} = \alpha'_{in} (X_{s,in} - X_{in}) \quad (7.2.2)$$

【熱移動】

$$(外気側) \quad -\lambda \frac{\partial T}{\partial x} - H_{gl} \left(\lambda'_{Tg} \frac{\partial T}{\partial x} + \lambda'_{\mu g} \frac{\partial \mu}{\partial x} \right) = \alpha_{c,out} (T_{out} - T_{s,out}) + J_{solar} + J_a + J_G - J_r \quad (7.2.3)$$

$$(空気層側) \quad -\lambda \frac{\partial T}{\partial x} - H_{gl} \left(\lambda'_{Tg} \frac{\partial T}{\partial x} + \lambda'_{\mu g} \frac{\partial \mu}{\partial x} \right) = \alpha_{in} (T_{s,in} - T_{in}) + H_{gl} \alpha'_{in} (X_{s,in} - X_{in}) \quad (7.2.4)$$

屋根面の傾斜角を θ [rad] とすると、天空に対する形態係数 F は式(7.2.5)で表される。

$$F = \frac{1 + \cos \theta}{2} \quad (7.2.5)$$

日射による熱流は直達日射・天空日射・地表面での反射日射を合わせたものであり、式(7.2.6)により求められる。大気放射は Brunt の式 (式(7.2.7)) で計算する[7-1]。ここでは雲による影響は考慮せず、常に晴天 (雲量=0) としているが、これは最も夜間放射の影響が大きく現れる場合に対応する。地表面からの放射、瓦表面からの放射はそれぞれ式(7.2.8)、式(7.2.9)で表される。

$$J_{solar} = a_s (J_{dn} (\cos \theta \sinh_{sun} + \sin \theta \cosh_{sun} \cos(A_s - A)) + F \cdot J_{sh} + (1 - F) \rho_G J_h) \quad (7.2.6)$$

$$J_a = F \cdot \varepsilon_s \cdot \sigma \cdot T_{out}^4 (0.526 + 0.076 \sqrt{f}) \quad (7.2.7)$$

$$J_G = (1 - F) \varepsilon_s \varepsilon_G \sigma T_G^4 \quad (7.2.8)$$

$$J_r = \varepsilon_s \sigma T_s^4 \quad (7.2.9)$$

水分浸透のない瓦表面への結露による水滴付着量 D_{ew} [kg/m²] は次のように計算される。外気の絶対湿度 X_{out} が瓦の外気側表面温度 T_s における飽和絶対湿度 $X_{s,sat}$ より大であれば結露が生じ、結

露による水滴付着量は時刻を Δt [s] とすると、

$$\Delta D_{ew} = \alpha'_{out} (X_{out} - X_{S,sat}) \cdot \Delta t \quad (7.2.10)$$

$$D_{ew} = Dew + \Delta Dew \quad (7.2.11)$$

となる。逆に $Dew > 0$ かつ $X_{s,sat} > X_{out}$ ならば付着した水滴は蒸発し、 ΔDew は負の値をとる。結露による水滴の大きさはそれほど大きくないと考えられるため、ここでは垂下は考慮しないとする。また、結露水の温度は瓦の表面温度に等しいと仮定し、結露水の凍結可能性を検討する。

(4) 計算条件

1) 外気条件・初期条件

外気条件としては、拡張アメダス気象データ[7-2]の京都における標準年気象データを用いる。京都の冬季（11～3月）の外気温と外気絶対湿度、降水量を図7.2.2～7.2.4に示す。なお、ここでは参考のため降水量を示してはいるが、計算において降雨はないものとしている。計算は11～3月までの5ヶ月間（151日）について行った。瓦内部の初期温湿度は11月1日0:00の外気の温湿度である13.9℃、73%RHに平衡する値とした。

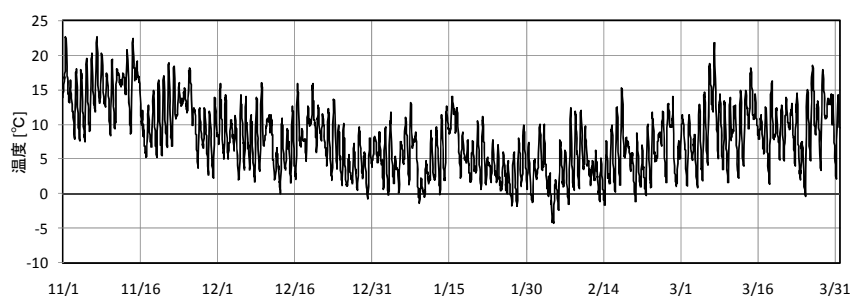


図 7.2.2 京都市の冬期外気温度

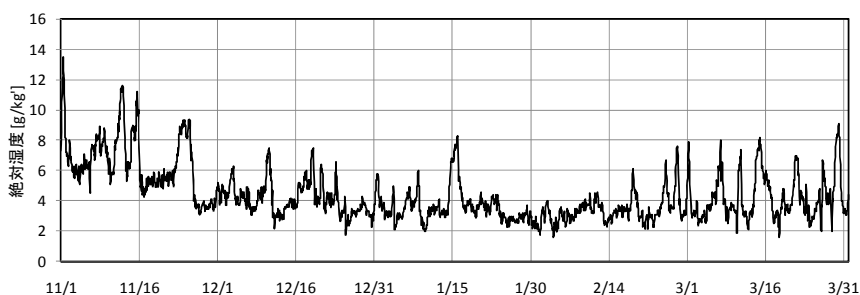


図 7.2.3 京都市の冬期外気絶対湿度

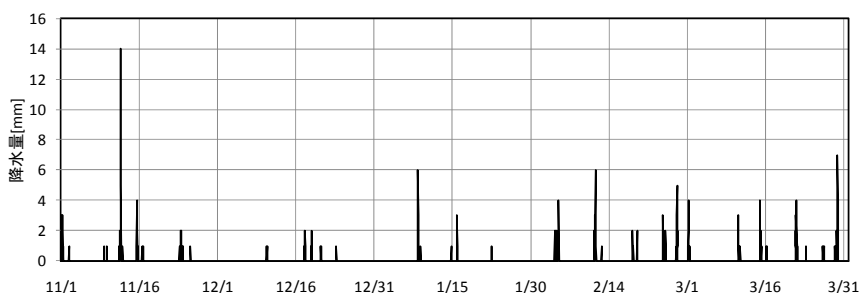


図 7.2.4 京都市の冬期降水量（参考）

2) 境界条件

境界面での熱伝達、放射に関する係数を表 7.2.1 に示す。

表 7.2.1 境界面での計算に用いた係数

記号	名称	単位	数値
$\alpha_{c,out}$	対流熱伝達率 (外気側)	W/m ² K	18.6
α_{in}	総合熱伝達率 (空気層側)	W/m ² K	9.3
α'_{out}	湿気伝達率 (外気側)	kg/m ² s(kg/kg')	0.0185
α'_{in}	湿気伝達率 (空気層側)	kg/m ² s(kg/kg')	0.00444
a_s	瓦の日射吸収率	-	0.8
ε_s	瓦の長波長放射率	-	0.9
ε_G	地表面の長波長放射率	-	0.8
ρ_G	地表面の日射反射率	-	0.6

3) パラメータの設定

瓦の表面温度を決定するいくつかのパラメータの値を変更し、それぞれのパラメータが結露の頻度と量に与える影響を検討する。計算 Case を表 7.2.2 に示す。1)で示した計算条件を Case 1 とする。

Case 2-1、Case 2-2 は外部風速の影響を検討するため、外気側の対流熱伝達率を変更したものである。Case 3 は瓦裏面の空気層と外気との換気が十分に行われず、室内からの熱損失により空気層の温度が外気よりも高くなる場合を想定している (※注 1)。空気層の相対湿度を外気と同じとすることで、水蒸気圧は外気よりも高くなる。Case 4-1、Case 4-2 は屋根の傾斜角を変更したもので、主に長波長放射による熱流の変化の影響をみる。Case 5 は屋根の方位角を Case 1 の北から南に変更し、日射量の違いによる影響をみる。Case 6 は瓦表面の防水仕上げがないとした場合であり、表面を通して水分が瓦内部に出入りする場合の、水分蓄積性状への影響を検討する。

表 7.2.2 計算 Case

Case No.	変更パラメータ	変更後の値
1	なし	—
2-1	外気側対流熱伝達率 $\alpha_{c,out}$ [W/m ² K]	$\alpha_{c,out}=27.9$ (風速大) $\alpha'_{out}=0.02775$ (風速大)
2-2	外気側湿気伝達率 α'_{out} [kg/m ² s(kg/kg')]	$\alpha_{c,out}=9.3$ (風速小) $\alpha'_{out}=0.00925$ (風速小)
3	空気層温度 T_m [°C] 空気層絶対湿度 X_m [kg/kg']	$T_{in}=T_{out}+2.0$ °C (相対湿度は外気と同じとする)
4-1	屋根傾斜角 θ	$\theta = \pi/4$ rad (45°)
4-2		$\theta = \pi/18$ rad (10°)
5	屋根方位角 A	$A = 0$ rad (南)
6	表面仕上げなし	$-(\lambda'_{\mu g} + \lambda'_{\mu l}) \frac{\partial \mu}{\partial x} - \lambda'_{Tg} \frac{\partial T}{\partial x} = \alpha'_{out} (X_{out} - X_{s,out})$

7.2.2 夜間放射量と表面温度低下

Case 1 の12月における日射による熱流を図7.2.5に示す。対象とした屋根は北向きではあるが、傾斜角が20°という勾配の緩い屋根であるため、直達日射による熱流は最大で250 [W/m²]程度となる。天空放射による熱流は100~200 [W/m²]、地表面からの反射日射の影響はほとんど受けない。図7.2.6は長波長放射による熱流であり、瓦表面に入射する方向を正としている。表面から300~400 [W/m²]の熱流を放出(負の値)している。大気放射による熱流は約200 [W/m²]、地表面からは放射をほとんど受けないため、長波長放射による正味の熱流は常に負の値をとっている。

日射、長波長放射による熱流それぞれの合計、対流熱伝達による熱流、以上を合計した瓦表面に流入する正味の熱流を図7.2.7に示す。日中は日射の影響を受け瓦表面に流入する方向の熱流が生じるが、夜間は瓦から放出する向きに熱流が生じる。

図7.2.8に外気温と瓦の外表面温度、表面の結露量を示す。瓦が室内からの熱供給を受けない本モデルの場合、夜間は放射冷却の影響を受け、外気よりも外表面温度が3~4°C低くなっている。最寒月ではない12月においても、外気温が0°C以上でも約半数の日で表面温度は0°Cを下回っている。

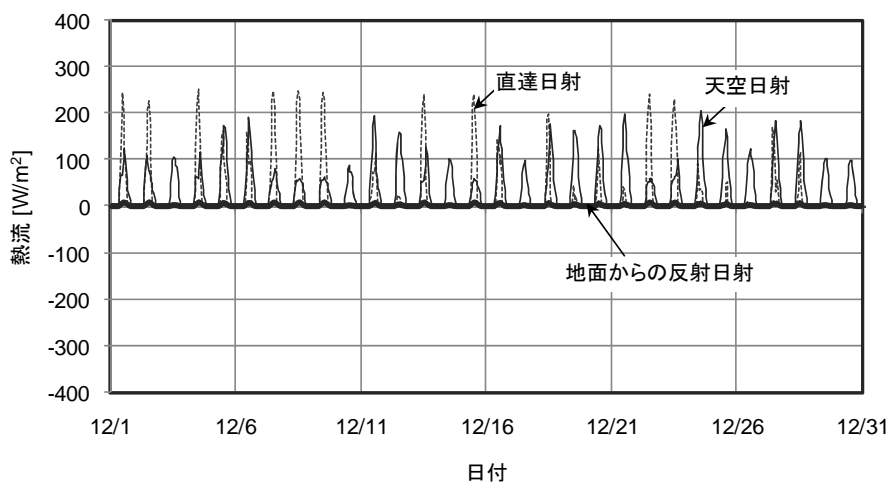


図 7.2.5 日射による外表面での熱流 (Case 1, 12月)

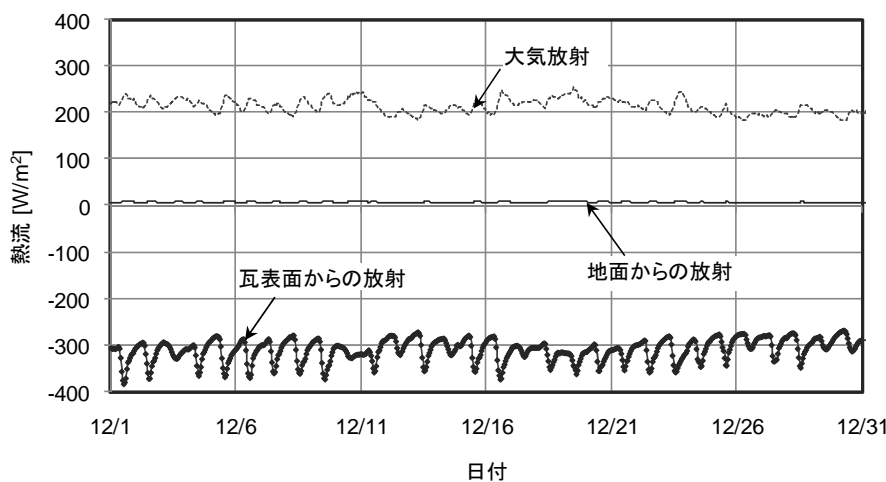


図 7.2.6 長波長放射による外表面での熱流 (Case 1, 12月)

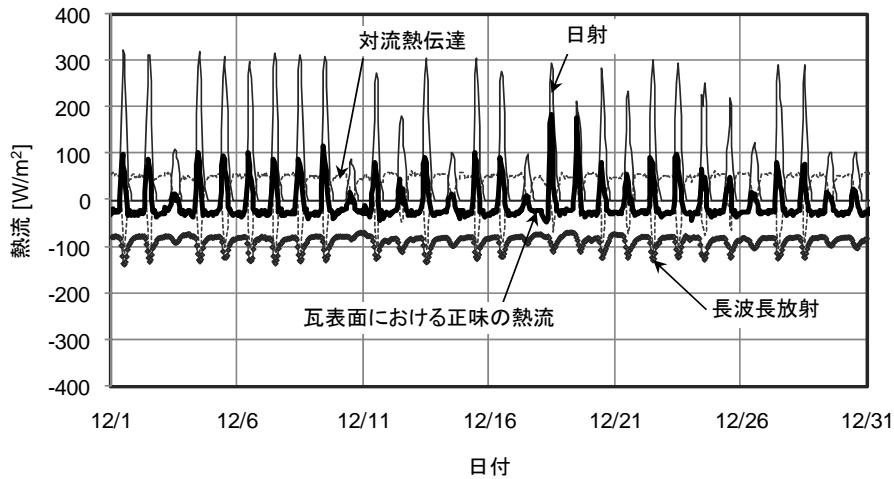


図 7.2.7 外表面での熱流 (Case 1, 12月)

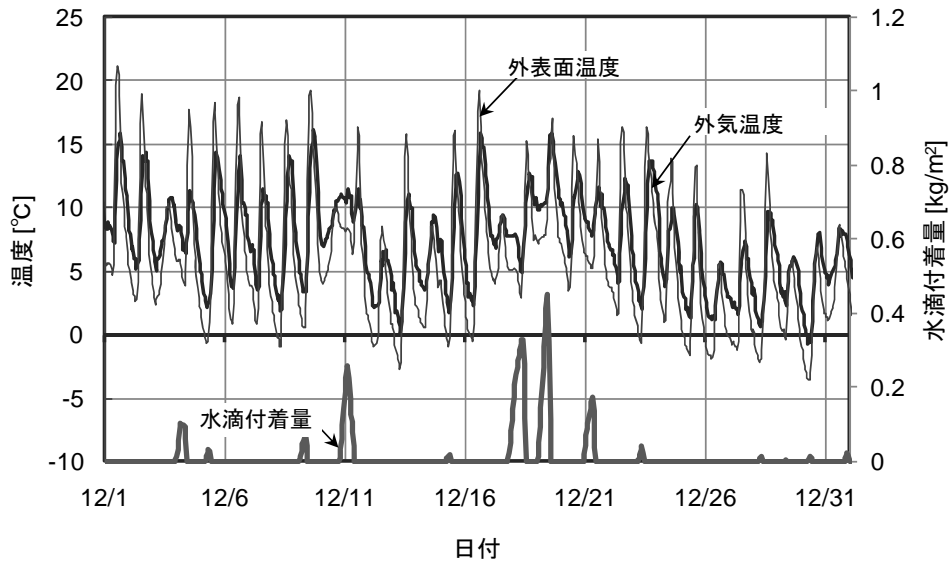


図 7.2.8 外気温と外表面温度、結露量 (Case 1, 12月)

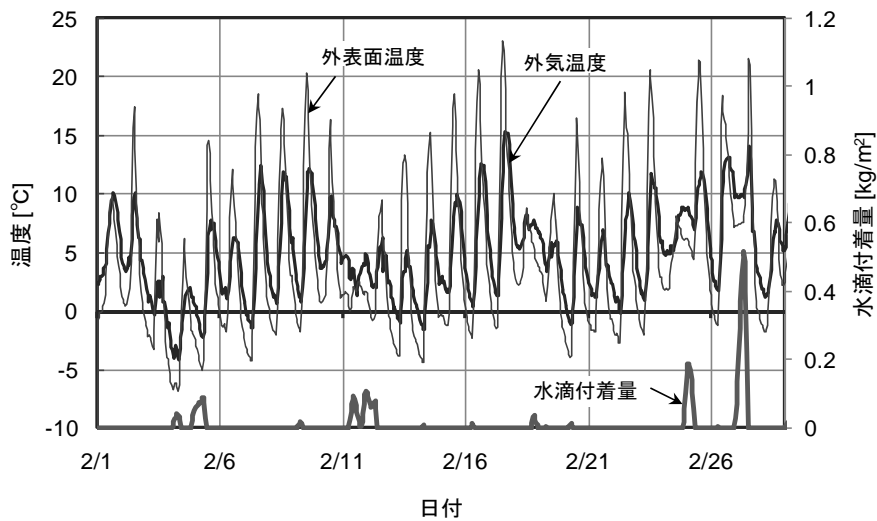


図 7.2.9 外気温と外表面温度、結露量 (Case 1, 2月)

最寒月である2月の外気温と表面温度、表面の結露量を図7.2.9に示す。表面に結露を生じる頻度は12月、2月とも2日に1回程度である。さらに、2月は外気温が0°Cを下回ることが数回あり、本モデルの場合では、表面温度が-3~-5°C程度まで低下する可能性がある。京都のような温暖地においても、瓦の凍結が生じる可能性があることがわかる。また、前述の通り瓦は凍結・融解を繰り返すことにより劣化を生じるが、今回の解析条件では最寒月の2月には20回程度の凍結融解回数があることが示された。

2月の最大水滴付着量（一度の結露で付着する最大水分量）は約0.5 [kg/m²]である。これは降水量に換算すると1時間あたり0.5 [mm]に相当する。図7.2.4に示した降水量と比較すると量的には多くはないが、頻度を考慮すると瓦内部への水分供給源として無視できない影響を与えるものと考えられる。

7.2.3 環境・建物条件の違いによる結露への影響

各計算Caseにおける瓦表面温度と外気温の関係を図7.2.10に示す。いずれのCaseにおいても、外気温よりも表面温度の方が約2°C以下の低温域での出現頻度が高いことがわかる。また、外気側の対流熱伝達率を大きくしたCase 2-1ではCase 1よりも高めの温度となっており、逆に対流熱伝達率を小さくしたCase 2-2では顕著に低温側にシフトしている。屋根傾斜角を変更したCase 4-1、4-2、方位角を変更したCase 5では、日射の当たり方の違いにより高温側ではCase 1と異なる分布をとるが、低温側はほぼ一致している。空気層側の温度を高くしたCase 3では、Case 1よりもやや高い側にシフトした頻度分布となった。

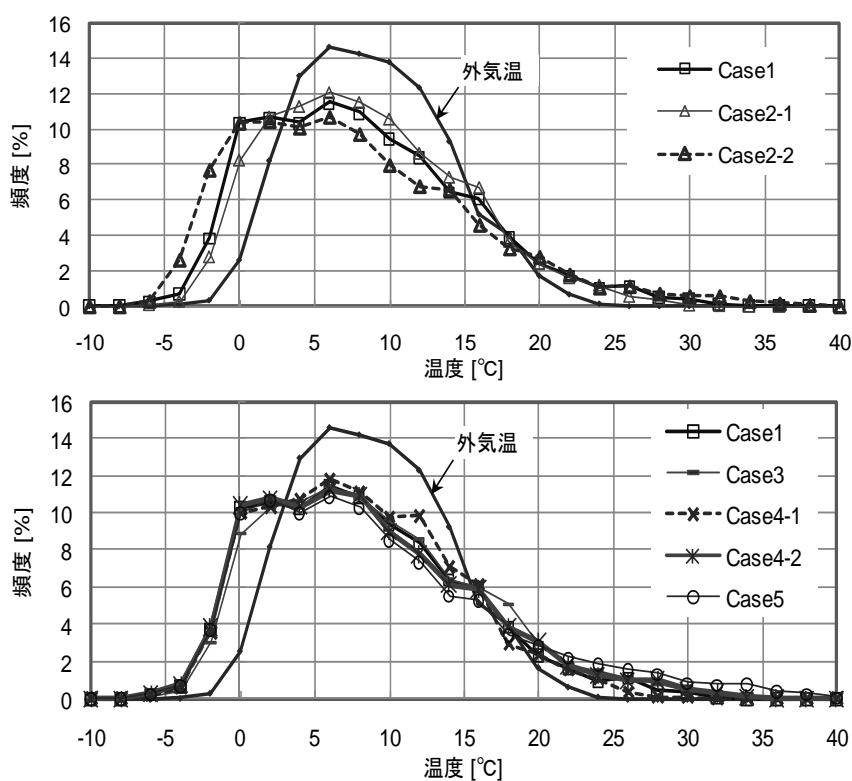


図 7.2.10 外気温と表面温度の頻度分布

表 7.2.3 に各計算 Case での外表面における結露に関する数値を示す。結露発生回数とは、瓦表面に結露が生じてから蒸発して結露水がなくなるまでを 1 回と数えたものである。結露発生時間率は、瓦表面が結露水で覆われている時間の全解析時間に対する割合として算出している。最大水滴付着量は、全解析期間中での最大水滴付着量であり、水滴の垂下がないとした場合の最大水膜厚さ[mm]と読み替えることができる。累積水滴付着量は、全解析期間を通じて瓦表面に付着した結露水量を合計したものである。

多くの場合、結露は深夜から早朝にかけての時間帯に生じ、日中には消滅する。Case 1 の結露発生回数は 62 回であり、冬期間には 3 日に 1 回以上の割合で表面結露が生じていることになる。

表面温度が最も低くなる Case 2-2 においては、解析期間中 4 日に 3 回程度結露が生じている。表には示していないが、Case 2-2 では結露が生じている時間のうちで外表面温度が 0°C を下回る時間の割合は 3 割以上となり、この場合は表面に付着した結露水が凍結することになる。

外部風速が大きく放射の影響が相対的に小さくなる Case 2-1 と、裏面空気層の温度が高い Case 3 では、表面温度は Case 1 と比較し高くなるため、結露発生回数、時間率、結露付着量のいずれも明らかに少なくなっている。屋根面傾斜角が大きく放射冷却を受けにくい Case 4-1 では結露発生回数が減り、水滴付着量も少なくなるが、その影響は小さい。傾斜が小さい Case 4-2 では逆の影響が見られるが、Case 1 との差は非常に小さい。方位を南にした Case 5 では、Case 1 とほとんど同じ結果となった。これは結露が日射の影響を最も受けにくい深夜から早朝にかけて生じるためであると考えられる。

冬期の 5 ヶ月間を通して瓦表面に付着する水分量は条件により異なるが、京都の冬期 5 ヶ月間の降水量の合計 281[mm] (=281[kg/m²]) の 1/8~1/2 程度の量となる。

表 7.2.3 結露発生頻度と結露量

Case No.	結露発生回数 [回]	結露発生時間率 [%]	最大水滴付着量 [kg/m ²]	累積水滴付着量 [kg/m ²]
1	62	16.5	0.74	78.63
2-1	41	9.1	0.62	45.98
2-2	112	34.1	0.84	133.24
3	45	10.0	0.51	35.10
4-1	58	15.3	0.72	73.59
4-2	67	16.7	0.74	79.72
5	62	16.1	0.73	77.57

7.2.4 結露水と放射冷却が瓦内部の水分分布に与える影響

外表面の防水仕上げを無しとした Case 6 に関して、外表面から 0mm、2mm、4mm の位置における液水含水率の 1~2 月の推移を図 7.2.11 上に示す。また、同図下に Case 1 における外表面の水分付着量を合わせて示す。Case 1 で結露が生じた時に Case 6 の外表面付近の含水率が上昇していることと、本解析においては降雨による水分浸透を考慮していないことから、Case 6 における含水率の上昇の要因は表面結露水の浸透であることがわかる。本解析で用いた瓦の水分移動係数

は、含水率が飽和(容積含水率で26.37%)に近づくと著しく大きくなる性質をもつため、表面(0mm)が飽和に近づくと2mm、4mmと内部へ浸透していく。ただし、瓦の外表面では水分蒸発も生じるため、表面に近いほど含水率が低下するのも速くなる。図中に「凍結」と示した2月の前半には、瓦内部の温度が低温となり、結氷が生じていたため、一時的に含水率が低下している。

防水仕上げがある場合は瓦の裏面からのみ水分が供給されるため、裏面の含水率が上昇する。Case1の外表面から12mm、14mm、16mmの位置における含水率の推移を図7.2.12に示す。図7.2.11下に示した外表面への結露と同時期に裏面の含水率も上昇する。ただし、含水率が飽和付近まで上昇しない限り瓦内部での水分移動係数は小さいため内部へは浸透しにくく、Case6で凍結が生じた日に、Case1では裏面(16mm)のみで水分の凍結が生じる。

このように、結露水によって生じる水分は、瓦内部の含水率を著しく上昇させ、凍結を引き起こす可能性があることが分かる。

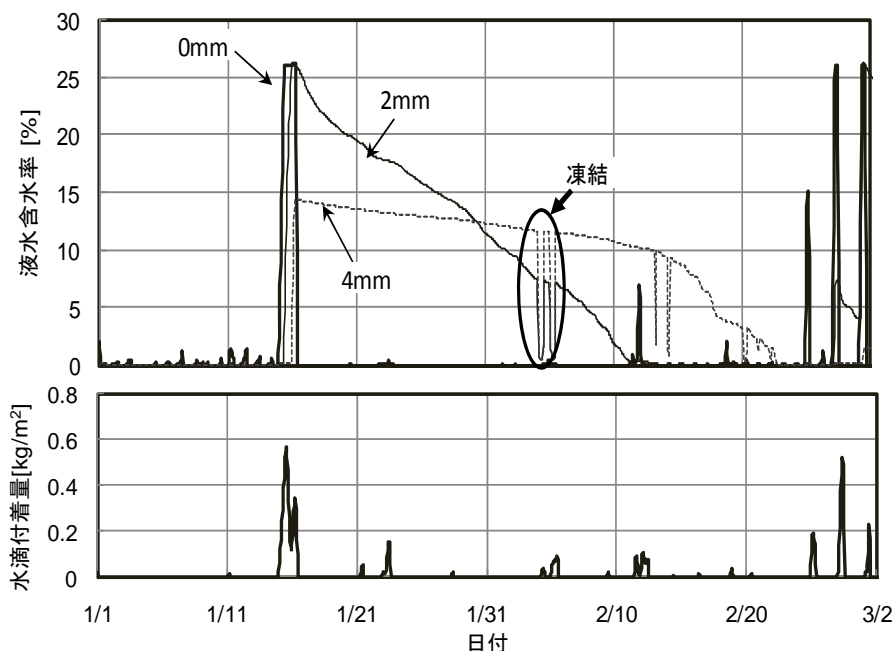


図7.2.11 1～2月におけるCase6外表面付近の液水含水率(上)とCase1の外表面水滴付着量(下)

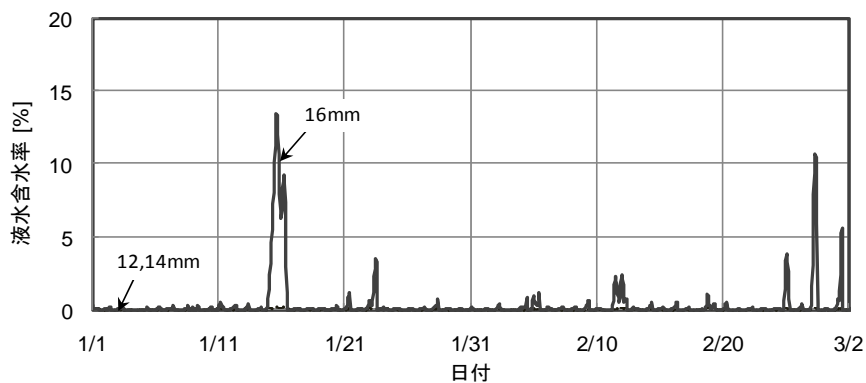


図7.2.12 1～2月におけるCase1裏面付近の液水含水率

7.3 降雨と結露を考慮した冬季の凍結融解頻度に関する検討

7.3.1 解析概要

(1) 解析対象

解析対象は前節と同様厚さ 16mm の釉薬瓦を想定し、上面は仕上げ層あり、下面は仕上げ層なしとし、1次元での計算を行う。ただし、上面の仕上げ層は、3章の測定で得られた釉薬瓦の透水抵抗と透湿抵抗をもつものとする。数値計算にあたっては、表面に近いほど差分の分割幅を小さくした。差分刻みを図 7.3.1 に示す。

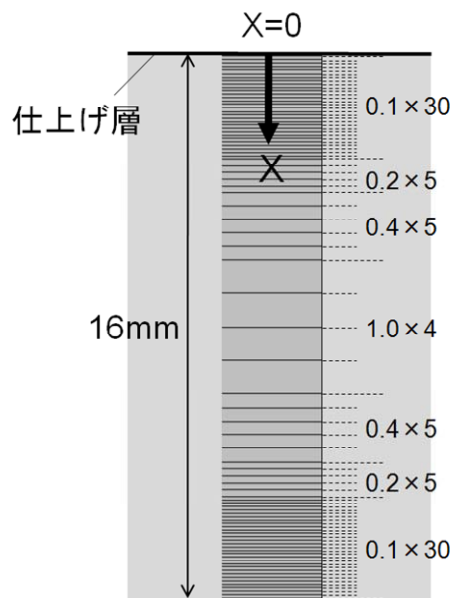


図 7.3.1 数値解析における差分刻み（一次元）

(2) 計算条件

7.2 節の表面結露計算と同様、瓦は外気側表面・裏面とも外気に接しているとする。外気条件には京都市の 11～3 月の標準年気象データを用い、熱・水分に関する境界条件も表 7.2.1 と同じとする。ただし仕上げ層部分の透水抵抗を 3.24×10^9 [$\text{m}^2\text{sPa/kg}$]、透湿抵抗を 1.45×10^{11} [$\text{m}^2\text{sPa/kg}$] とする。瓦内部の初期温湿度は 11 月 1 日 0:00 の外気の温湿度に平衡する値とした。

本節では、結露と降雨が瓦内部の含水率上昇及び凍結回数に与える影響を把握するため、

- ① 結露・降雨による外部からの液水供給を 0 とした場合（水蒸気移動はあり）
- ② 降雨がなく結露水のみによる液水供給を考慮した場合（降雨量は常に 0 とおく）
- ③ 降雨と結露による液水供給を考慮した場合

の 3 通りの計算を行う。雨水や結露水による水分浸透がある場合の扱い方は、5.4.5 節に示した通りとする。

解析期間は 11 月 1 日～3 月 31 日までの 151 日間である。計算の時間刻みは、結氷が生じない時は 0.1[s]、結氷が生じる時は 0.001[s]とし、10 分間隔で結果を出力した。

7.3.2 解析結果

(1) 結露・降雨による外部からの液水供給を0とした場合

①の外部からの液水供給がないとした場合の解析結果から、結氷に関連するデータを月ごとに表7.3.1に示す。ここで示す「回数」とは、その現象が生じ始めてから条件を満たさなくなるまでの時間を1回として数えているため、日数とは異なる。

表 7.3.1 ①外部からの液水供給がない場合の解析結果

	11月	12月	1月	2月	3月
外気平均温度 [°C]	12.9	7.3	4.9	4.9	9.6
外気最低温度 [°C]	2.3	-0.7	-1.7	-4.2	-0.3
外気温が0°Cを下回った回数 [回]	0	1	7	8	1
外気側表面の最低温度 [°C]	-0.7	-3.7	-4.8	-7.2	-3.1
外気側表面温度が0°Cを下回った回数 [回]	1	13	25	19	9
外気側表面の最大含水率 [vol.%]	0.45	0.27	0.33	0.26	0.26
外気側表面の最大含水率 [vol.%]	0	0	0	0	0
裏面の最低温度 [°C]	-0.4	-3.4	-4.4	-6.8	-2.7
裏面温度が0°Cを下回った回数 [回]	1	13	25	19	9
裏面の最大含水率 [vol.%]	2.86	1.73	1.76	2.66	1.75
裏面の最大含水率 [vol.%]	0	0	0	5.5	0
内部の結氷回数 [回]	0	0	0	3	0

温度に関しては、外気温がほぼ5°C以上であり最低気温も2.3°Cと0°Cを下回らない11月には表面温度も0°Cを下回ることほとんどないが、12月には3日に1回程度の割合で外気側表面温度が0°Cを下回る。最も寒い時期である1・2月は毎日のように外気温が0°C以下に下がっており、-7°C程度まで低下する日もある。

外部からの液水供給がないため、11～1月の瓦内部の含水率は最大でも2.86[vol.%]（11月・裏面）と常に低く保たれている。この含水率での結氷温度は約-0.94°Cであり、11月の最低温度が-0.5°Cであるため、結氷は生じない。12～1月は表面温度が低下する時は含水率も低下しており、結氷条件を満たすことはなかった。

しかし2月は、夜間に外気温が-4.2°Cまで低下することがあり（2月4日～5日）、表面温度が最低で-6.8°Cまで低下したため、裏面で結氷を生じた。この時間の温度・液水含水率分布の時間による変化を図7.3.2に示す。また、この時の外表面・裏面における気相水分流を図7.3.3に示す。水分流は外表面から裏面へ向かう向きを正としている。温度低下過程では外表面・裏面とも吸湿し、温度上昇過程では両面とも放湿する向きに水蒸気の移動が見られるが、外気側表面は仕上げ層があるため、裏面の1/1000程度の量しか移動しない。

温度低下過程では、放射冷却の影響を受け外気側表面の方がわずかに低温となるが、水蒸気が浸入しやすい裏面の方が含水率が高くなる。瓦内部は外気よりも低温となっているため、浸入し

た水蒸気が凝縮し液水となるためであり、さらなる温度低下にともなって結氷を生じた。

ここでの計算では、表面結露や降雨水の浸入を考慮していないため、解析期間を通じて瓦内部は低含水率状態に保たれている。ただ、2.4節のヒアリング調査で「空気中の水分を瓦が吸収する」と述べられたように、特に放射冷却の影響により低温となった瓦内部では外気の水蒸気が結露・結氷を生じることがわかる。

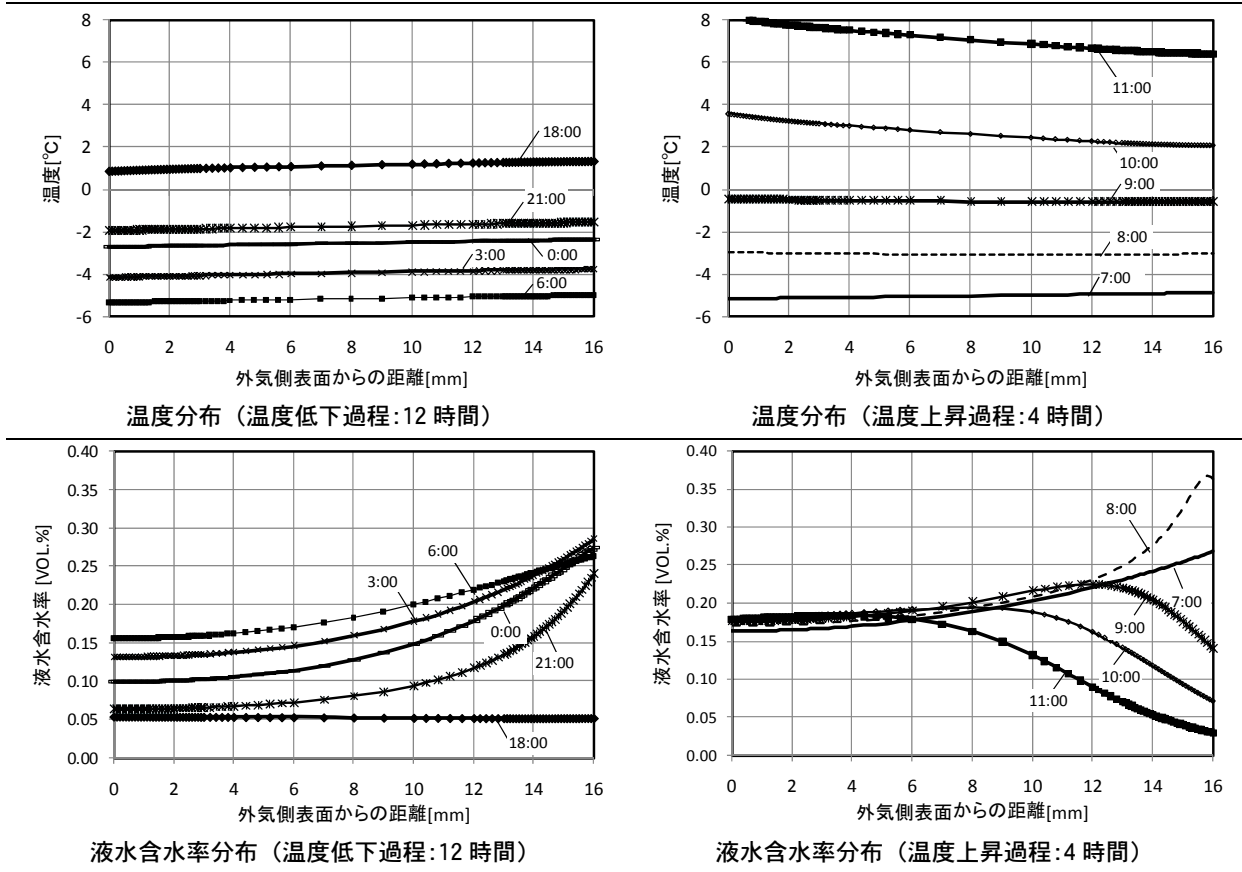


図 7.3.2 2月4日 18:00～2月5日 12:00 の瓦内部の温度・液水含水率分布

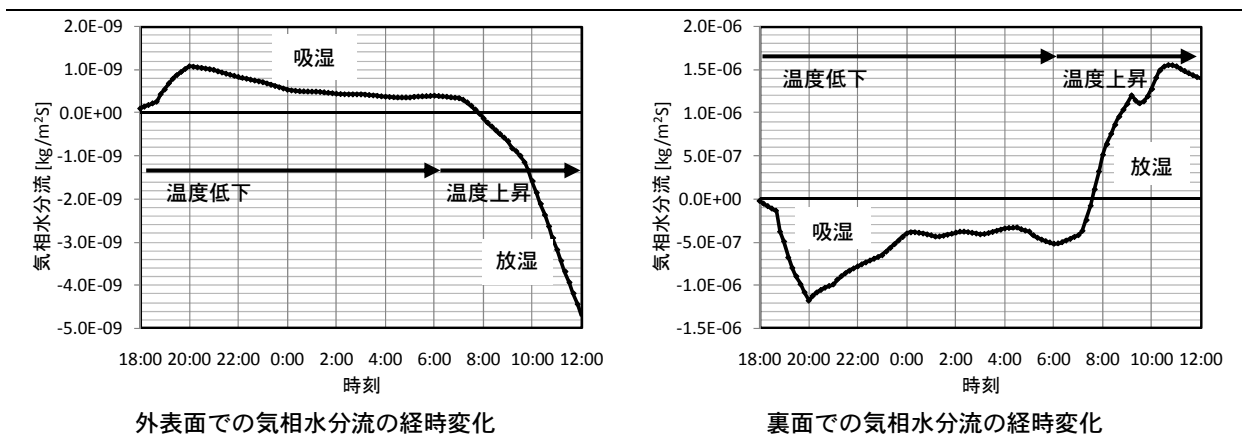


図 7.3.3 2月4日 18:00～2月5日 12:00 の外表面・裏面での気相水分流

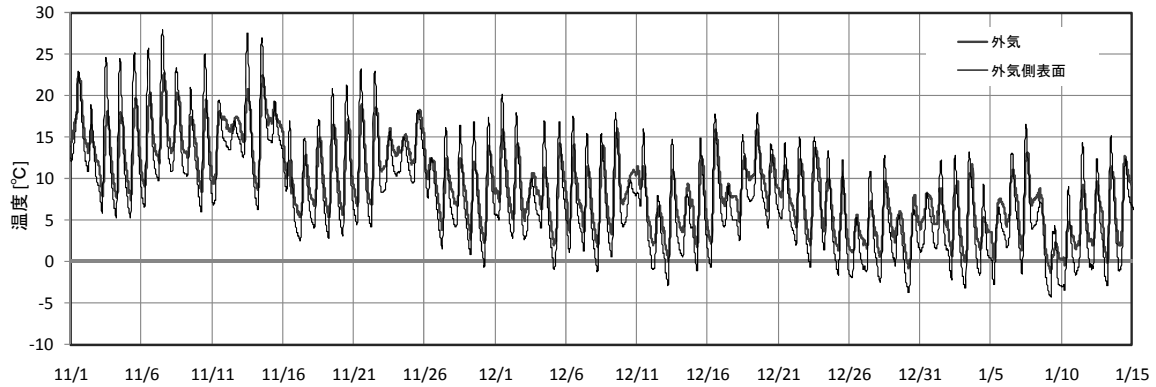
(2) 降雨がなく結露水のみによる液水供給を考慮した場合

降雨量を0とおいた②降雨がなく結露水のみによる水分供給がある場合の計算結果を図7.3.4、7.3.5に示す。温度は外気と外気側表面、各部の液水含水率と含氷率は外気側表面から2mm刻みの各差分点の推移である。また、平均含水率は各差分点の液水含水率に各コントロールボリュームの厚さを乗じて足しあわせたものを、全体の厚さで割った値である。平均含水率のグラフには、外気側表面から流入する液相水分流の値もあわせて示している。また、結氷に関するデータを表7.3.2に示す。

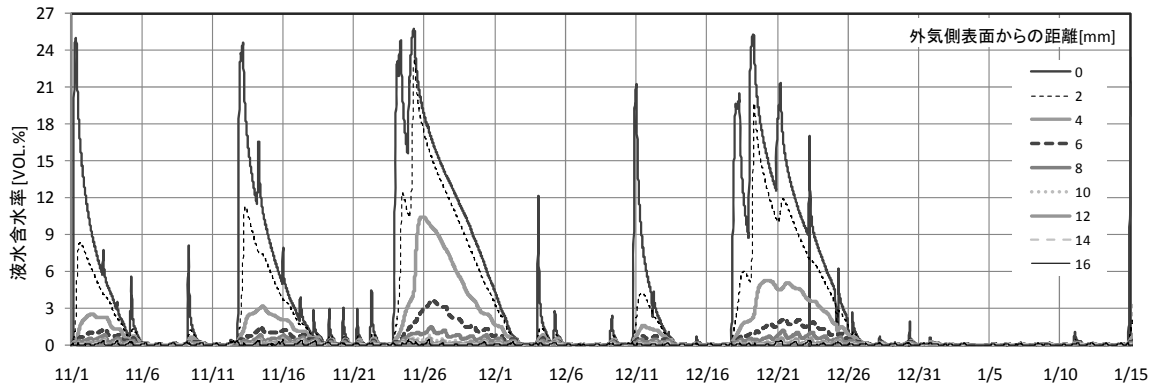
温度は①の場合とほぼ同様の結果となった。含水率については、図7.3.4(b)と(d)からわかる通り、外表面から結露水の浸透があった時と、外表面付近での瞬間的な上昇が対応している。それにともない、平均含水率も上昇する。しかし、裏面に仕上げ層がなく放湿しやすいことから、結露水の浸透が継続しなければ、数日で瓦内部は乾燥する。裏面は外表面よりもわずかに温度が高く結露量が多くないことから、最大含水率の急激な上昇は見られず、解析期間を通じて低い含水率に保たれた。

表 7.3.2 ②降雨がなく結露水のみによる水分供給がある場合の解析結果

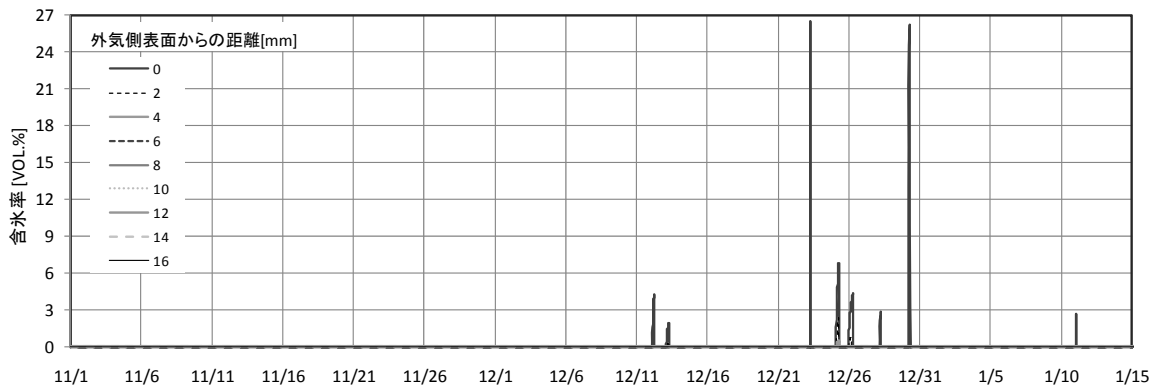
	11月	12月	1月	2月	3月
外気平均温度 [°C]	12.9	7.3	4.9	4.9	9.6
外気最低温度 [°C]	2.3	-0.7	-1.7	-4.2	-0.3
外気温が0°Cを下回った回数 [回]	0	1	7	8	1
外気側表面の最低温度 [°C]	-0.7	-3.8	-4.8	-7.1	-3.1
外気側表面温度が0°Cを下回った回数 [回]	1	13	24	19	9
外気側表面の最大含水率 [vol.%]	25.72	25.29	25.01	25.06	25.33
外気側表面の最大含氷率 [vol.%]	0	25.90	26.27	26.27	17.76
裏面の最低温度 [°C]	-0.3	-3.5	-4.4	-6.8	-2.7
裏面温度が0°Cを下回った回数 [回]	1	13	24	19	8
裏面の最大含水率 [vol.%]	0.46	0.43	0.40	0.42	0.34
裏面の最大含氷率 [vol.%]	0	0	0	0	0
内部の結氷回数 [回]	0	7	8	10	4



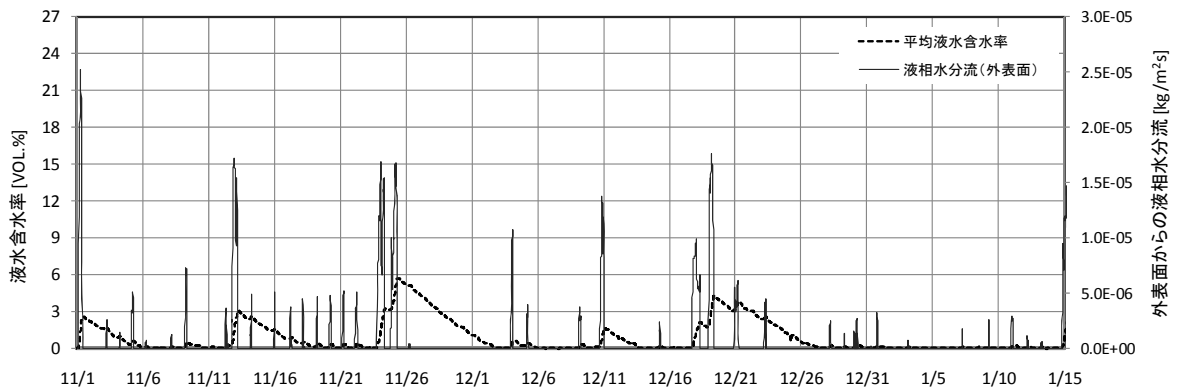
(a) 外気と外気側表面の温度推移 (11月1日~1月15日)



(b) 各部の液水含水率推移 (11月1日~1月15日)

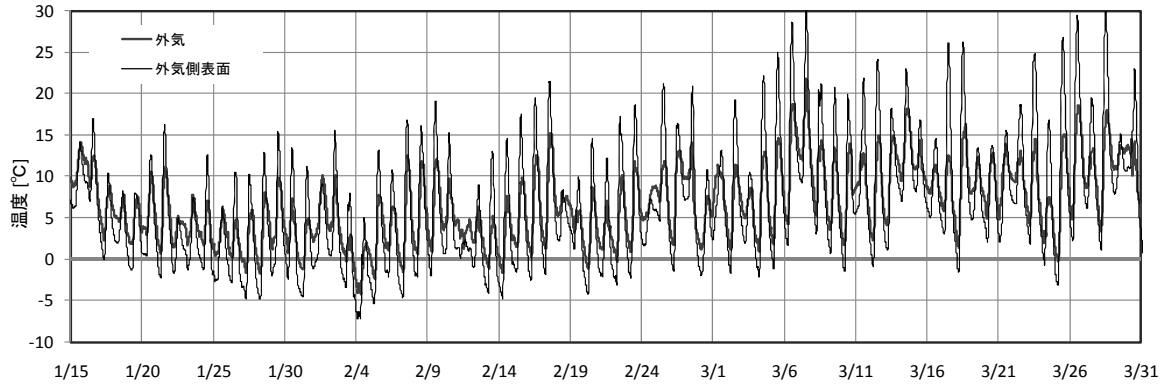


(c) 各部の含水率推移 (11月1日~1月15日)

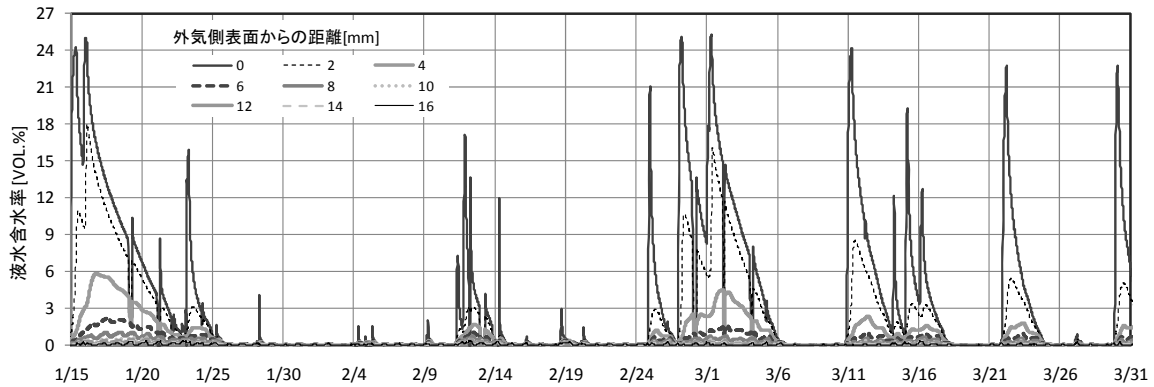


(d) 平均含水率と外気側表面からの液相水分流の推移 (11月1日~1月15日)

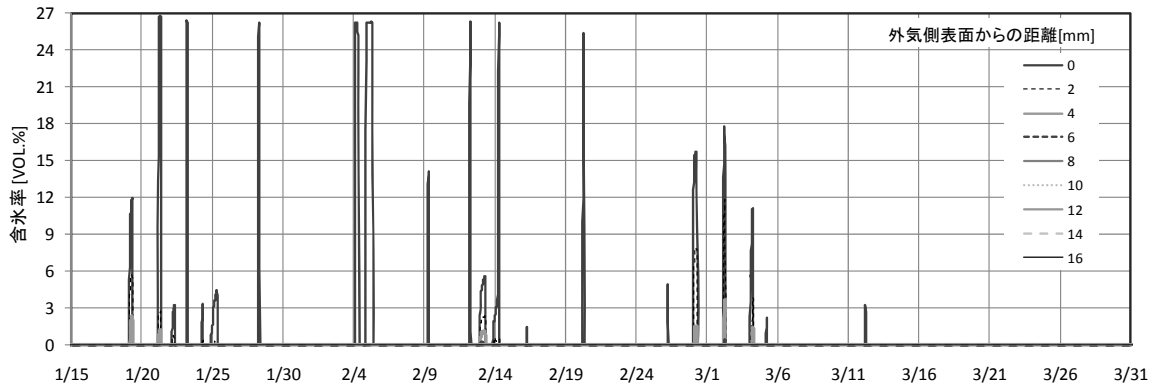
図 7.3.4 ②降雨がなく結露水のみによる水分供給がある場合の計算結果 (11月1日~1月5日)



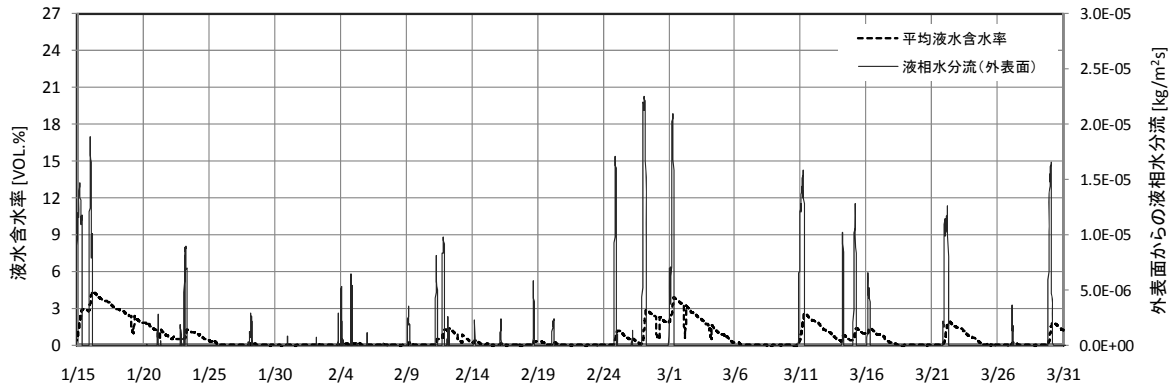
(a) 外気と外気側表面の温度推移 (1月16日~3月31日)



(b) 各部の液水含水率推移 (1月16日~3月31日)



(c) 各部の含水率推移 (1月16日~3月31日)



(d) 平均含水率と外気側表面からの液相水分流の推移 (1月16日~3月31日)

図 7.3.5 ②降雨がなく結露水のみによる水分供給がある場合の計算結果(1月16日~3月31日)

(3) 降雨と結露による液水供給を考慮した場合

③降雨と結露による水分供給を考慮した場合の計算結果を図 7.3.6、図 7.3.7 に、結氷に関するデータを表 7.3.3 に示す。

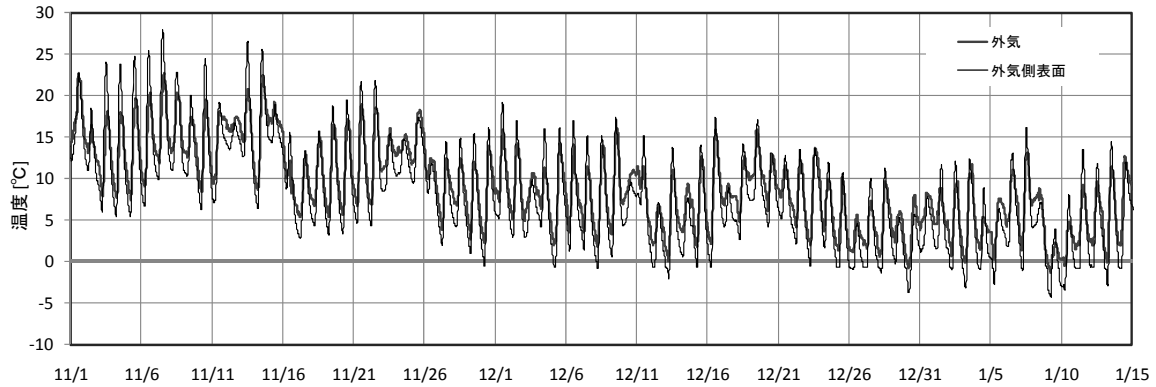
②結露のみを考慮した場合と比較し、温度に関しては大きな差はない。結露水に加え雨水が浸透することから、外表面では瞬間的に飽和近い含水率まで上昇する。結露水のみを考慮した場合は、結露水の浸透があると外表面近傍のみ含水率が上昇するが、降雨は結露に比べ一度に供給される水分量が非常に多いため、降雨を考慮した場合は含水率が上昇する範囲が広くなり、浸透した水分はより長い時間瓦内部にとどまる。含水率が高い時間が継続することは、温度低下にともなう結氷の可能性を高くすることにつながるため、降雨を考慮する方が結氷回数も多くなる。

瓦の外表面から裏面まで結氷を生じた 12 月 29 日～30 日にかけての凍結・融解過程それぞれの温度・液水含水率・含氷率の推移を図 7.3.8 に示す。凍結開始前は、外表面側の含水率が最も高く、温度は最も低い。この部分で結氷を生じ始めると、含水率が低下するため、より高い含水率をもつ近傍の領域から水分が流入し、氷晶として成長する。一方、結氷が生じた範囲は熱伝導率が著しく増加し、外表面との温度差がほとんどなくなるため、低温の領域は裏面に向かって拡大していく。その過程で温度と含水率が結氷条件を満たすと結氷を生じ始める。ここで示した時間では、瓦全体の温度が -3.5°C ～ -4.0°C 程度まで低下したため、裏面付近の低含水率域にも結氷が生じた。

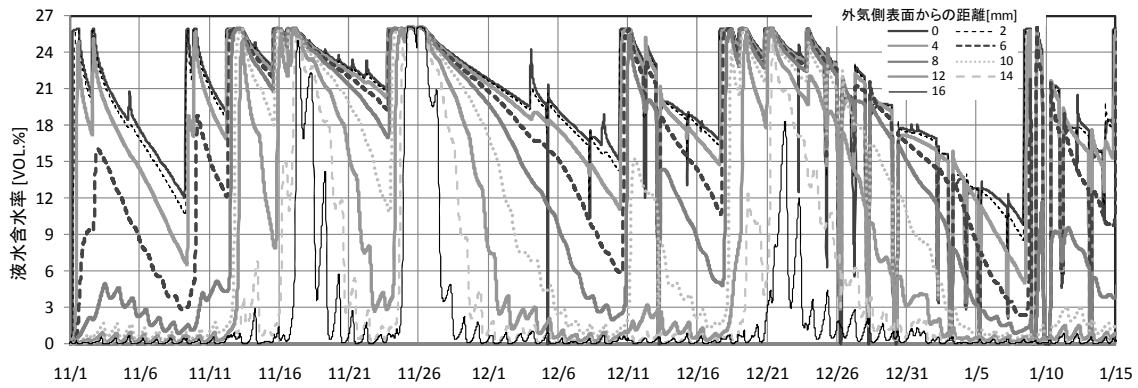
②の結露水のみを考慮した場合は、同じ 12 月 29～30 日には外表面でのみ結氷を生じた。どちらの場合も、外表面での最大含氷率はほぼ飽和に達しており、表面仕上げ層との界面で劣化を生じる可能性はあると考えられる。

表 7.3.3 ③降雨と結露による水分供給を考慮した場合の解析結果

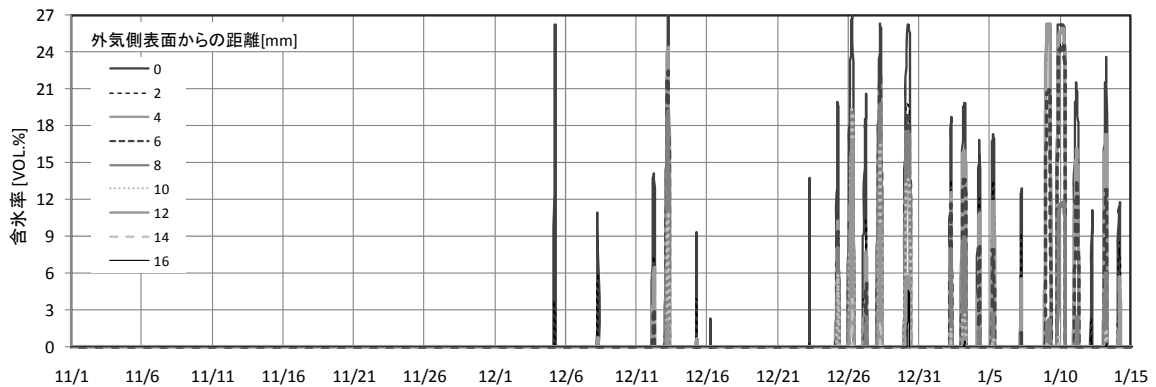
	11月	12月	1月	2月	3月
外気平均温度 [°C]	12.9	7.3	4.9	4.9	9.6
外気最低温度 [°C]	2.3	-0.7	-1.7	-4.2	-0.3
外気温が 0°Cを下回った回数 [回]	0	1	7	8	1
外気側表面の最低温度 [°C]	-0.6	-3.8	-4.8	-7.1	-2.9
外気側表面温度が 0°Cを下回った回数 [回]	1	13	24	19	7
外気側表面の最大含水率 [vol.%]	25.94	25.93	25.93	25.98	25.98
外気側表面の最大含氷率 [vol.%]	0	25.94	26.26	26.26	26.26
裏面の最低温度 [°C]	-0.3	-3.5	-4.5	-6.9	-2.8
裏面温度が 0°Cを下回った回数 [回]	1	13	24	19	7
裏面の最大含水率[vol.%]	0.88	0.74	0.61	1.42	3.42
裏面の最大含氷率[vol.%]	0	3.39	5.24	3.44	0
内部の結氷回数 [回]	0	11	21	19	7



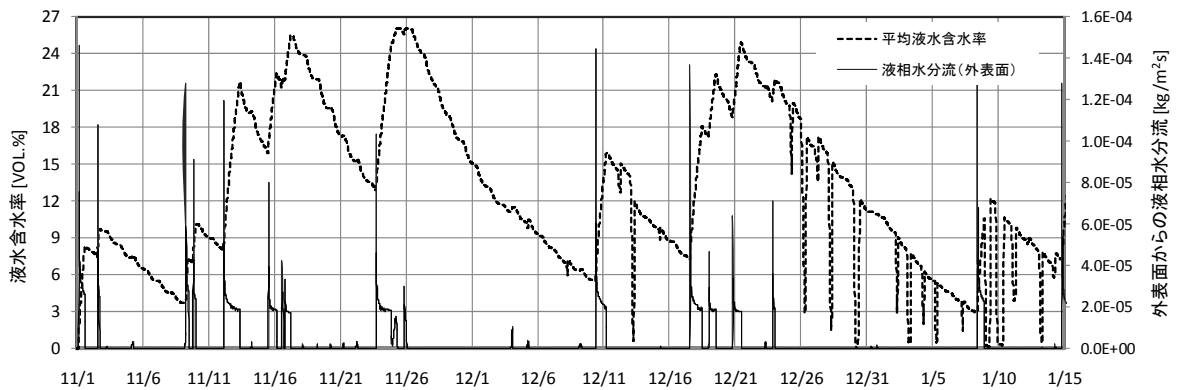
(a) 外気と外気側表面の温度推移 (11月1日~1月15日)



(b) 各部の液水含水率推移 (11月1日~1月15日)

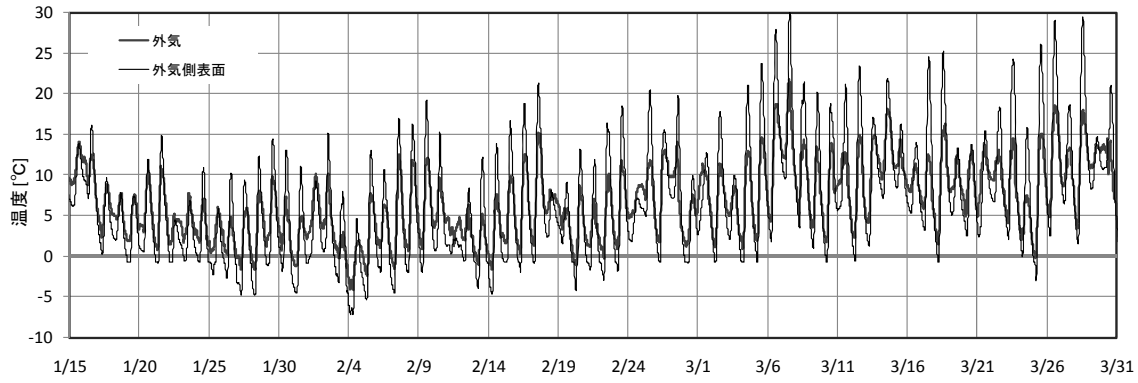


(c) 各部の含水率推移 (11月1日~1月15日)

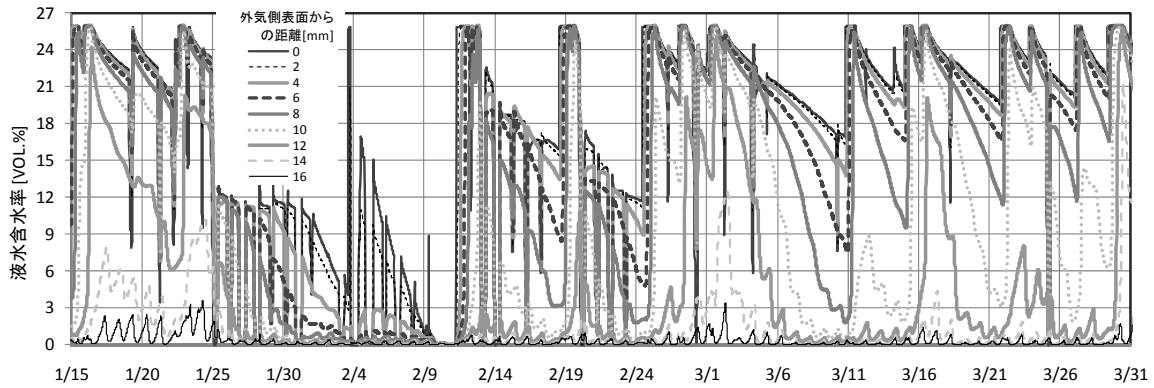


(d) 平均含水率と外気側表面からの液相水分流の推移 (11月1日~1月15日)

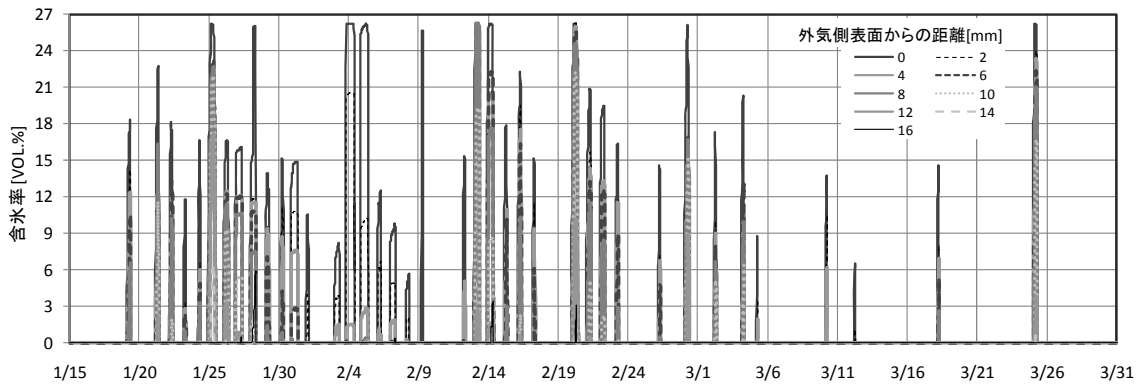
図 7.3.6 ③降雨と結露水による水分供給を考慮した場合の計算結果 (11月1日~1月15日)



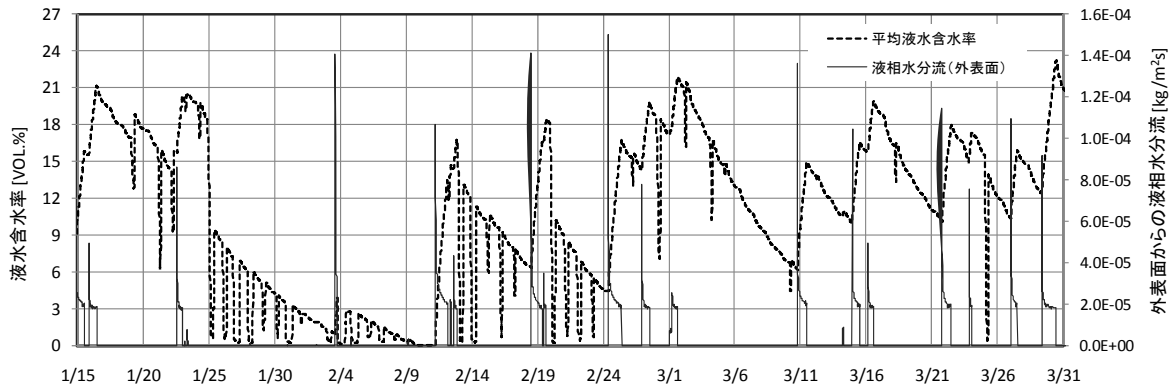
(a) 外気と外気側表面の温度推移 (1月16日～3月31日)



(b) 各部の液水含水率推移 (1月16日～3月31日)



(c) 各部の含水率推移 (1月16日～3月31日)



(d) 平均含水率と外気側表面からの液相水分流の推移 (1月16日～3月31日)

図 7.3.7 ③降雨と結露水による水分供給を考慮した場合の計算結果 (1月16日～3月31日)

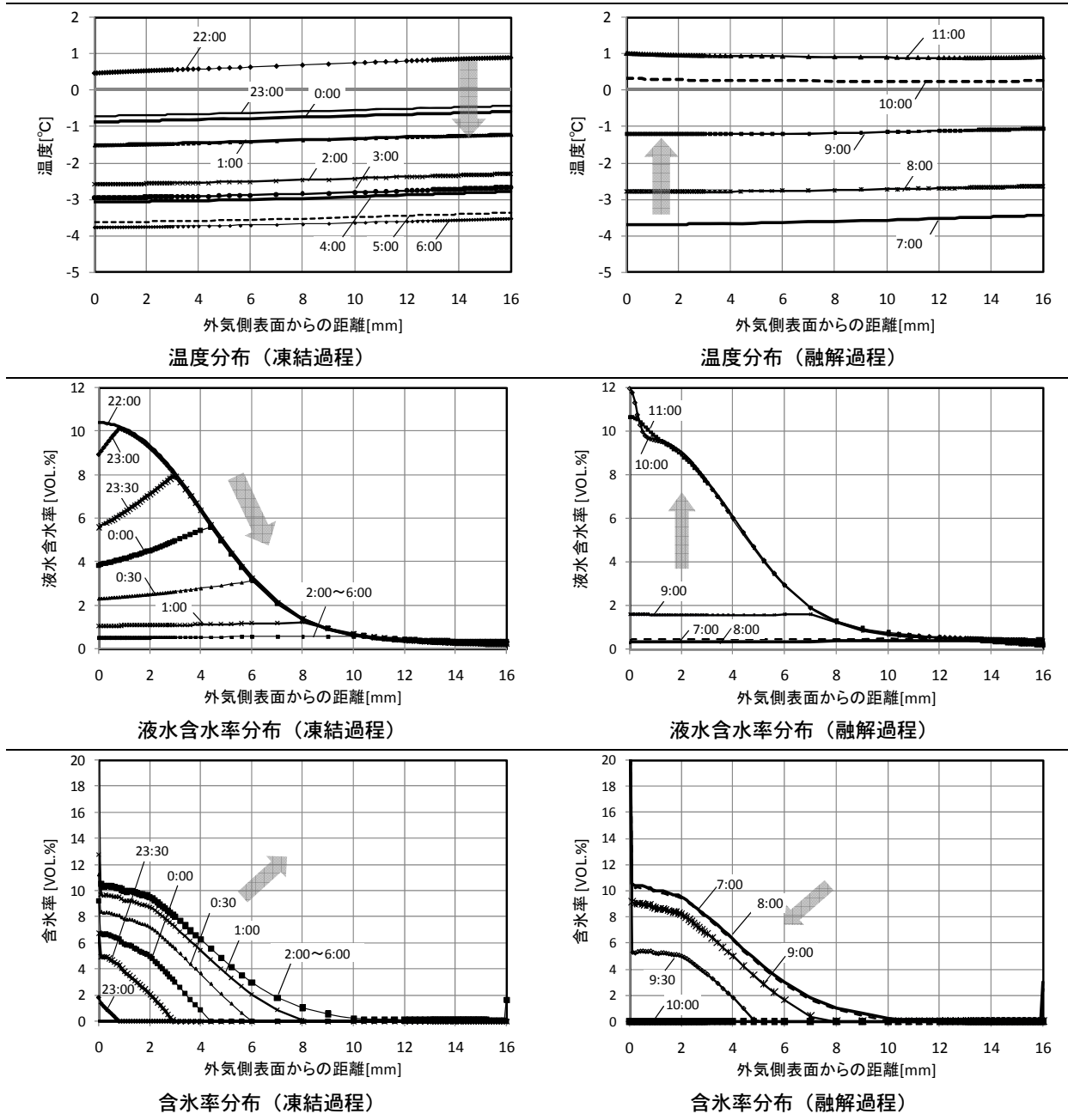


図 7.3.8 12月29日23:00~12月30日10:00の瓦内部の温度・水分分布

7.3.3 冬季の凍結融解頻度に関する検討のまとめ

拡張アメダスの標準年気象データを用いて、京都市の冬季（11～3月）の結氷発生頻度と凍結・融解過程の瓦内部の温度と水分分布に関する検討を行った。

本解析では雲量を考慮していないため、放射冷却の影響を最も受けやすい状況での結果となっているが、151日間の計算期間のうち、外気温が0°Cを下回る回数は17回であるのに対し、外表面が0°Cを下回る回数は69回にも達する。しかし、降雨や結露水の浸透による含水率上昇、及び低温時の吸湿がなければ結氷はほとんど生じない。結露水の浸透を考慮すると5ヶ月間で30回程

度の凍結融解回数を生じ、さらに降雨水の浸透も考慮に入れると約 60 回の凍結融解回数となる。

降雨は一度に多量の水分を供給するため、表面付近のみならず内部へも浸透し、結氷範囲を拡大させる可能性がある。

一方、結露に関しては流入水分量は少ないものの、頻度が多い。図 7.3.8 は、11～12 月の②結露のみを考慮した場合の外表面から流入する水分流と、気象データから得られる降雨による水分流の時期を示したものである。降雨がある時は、外気の相対湿度も高くなるため表面結露も生じやすいが、降雨がない時でも頻繁に結露は生じている。

以上のことから、京都市のように比較的温暖な地域においても、放射冷却による温度低下と結露、降雨による含水率の上昇により凍結が生じることは明らかである。また、その頻度は最大で 30～60 回であり、特に凍結発生回数には表面結露水の浸透が大きな影響をもつといえる。

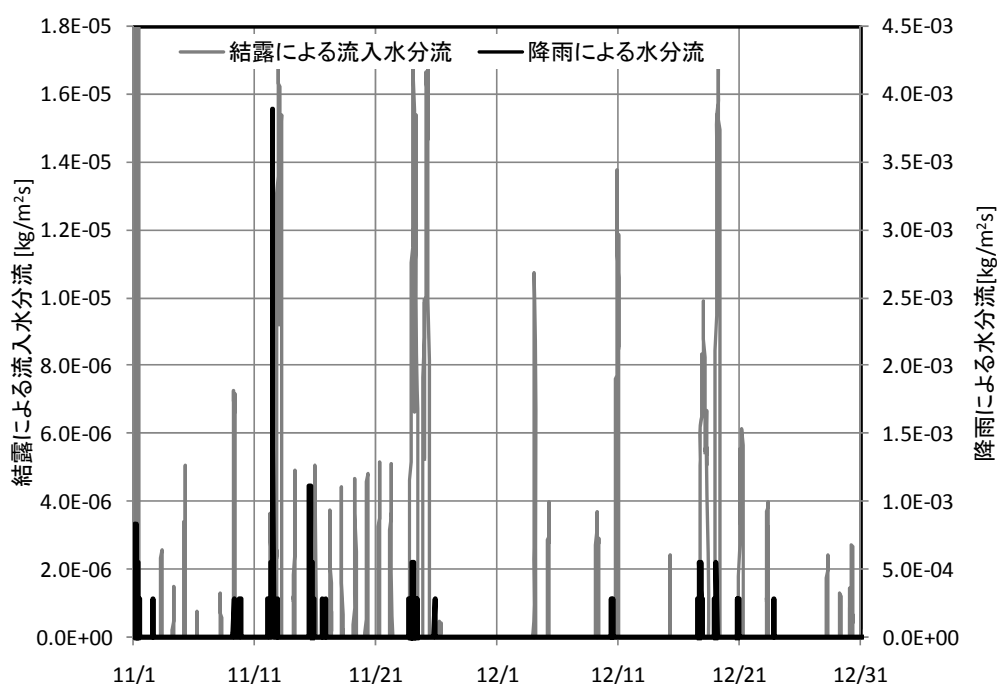


図 7.3.8 結露による水分流入と降雨による水分流の時期

7.4 各種要因が凍結融解過程に与える影響に関する検討

ここでは、前節の解析において降雨による水分供給があった約 2 日後に瓦の表面温度が -2°C 程度まで低下する 12 月 10 日 8:00～12 月 14 日 8:00 に着目して、材料物性や環境条件等の各種要因が瓦内部の温湿度性状に与える影響について検討を行う。

瓦内部の初期温度は 12 月 10 日 8:00 の外気温度である 8.4°C 、含水率の初期値は前節で行った計算結果から、同時刻の瓦内部の平均含水率 $1.37[\text{vol.}\%]$ (水分化学ポテンシャルで $-1,600[\text{J/kg}]$) を一様に与えた。

7.4.1 材料の水分伝導率と表面仕上げ位置の影響

(1) 検討対象

2章で述べた瓦の凍害に関する特徴として、「内部が密で透水しにくいものほど凍害を受けやすい」「水分が蒸発しにくいほど凍害を受けやすい」ということがあった。

第5章で述べた通り、飽和にごく近い領域で急激に水分移動係数の値が大きくなる瓦の性質を考慮し、不飽和時の液相水分伝導率 $\lambda'_{\mu l}$ は、材料内の飽和度 (ψ/ψ_{sat}) の関数として、式(7.4.1)で表されるものとした。

$$\lambda'_{\mu l} = a \times \psi_l + \left(\lambda'_{\mu l}|_{sat} - a \cdot \psi_{l,sat} \right) \left(\frac{\psi_l}{\psi_{l,sat}} \right)^N \quad (7.4.1)$$

ここではパラメータ a を変え、低含水率での移動量が多い場合 ((2) $a=7.5 \times 10^{-10}$) と少ない場合 ((3) $a=0.8 \times 10^{-10}$) について計算を行い、瓦内部の水分移動速度が結氷性状に与える影響を検討する。水分伝導率の実測値は、結果を比較しやすくするため全ていぶし瓦の値を用いる。

また、水分蒸発の影響として、7.3節で計算を行った瓦の外表面のみに仕上げ層がある場合と、いぶし瓦のように外表面・裏面の両方に仕上げ層がある場合についても計算を行う。仕上げ層の透水・透湿抵抗は、外表面のみの場合は釉薬瓦、外表面・裏面の両方の場合はいぶし瓦の実測値をそれぞれ用いる。計算パターンを表 7.4.1 に、(1)~(3)の水分伝導率を図 7.4.1 に示す。

表 7.4.1 水分伝導率と表面仕上げ位置の影響に関する計算パターン

No.	外表面		裏面		不飽和時の水分伝導率を決定するパラメータ		備考
	透水抵抗 [m ² sPa/kg]	透湿抵抗 [m ² sPa/kg]	透水抵抗 [m ² sPa/kg]	透湿抵抗 [m ² sPa/kg]	a	N	
	Y(1)	3.24×10^9	1.45×10^{11}	4651.5	2.13×10^6	2.5×10^{-10}	
Y(2)	7.5×10^{-10}					500	
Y(3)	0.8×10^{-10}					500	
S(1)	4.96×10^9	5.35×10^9	4.96×10^9	5.35×10^9	2.5×10^{-10}	500	両面に透湿・透水抵抗 (いぶし瓦)
S(2)					7.5×10^{-10}	500	
S(3)					0.8×10^{-10}	500	

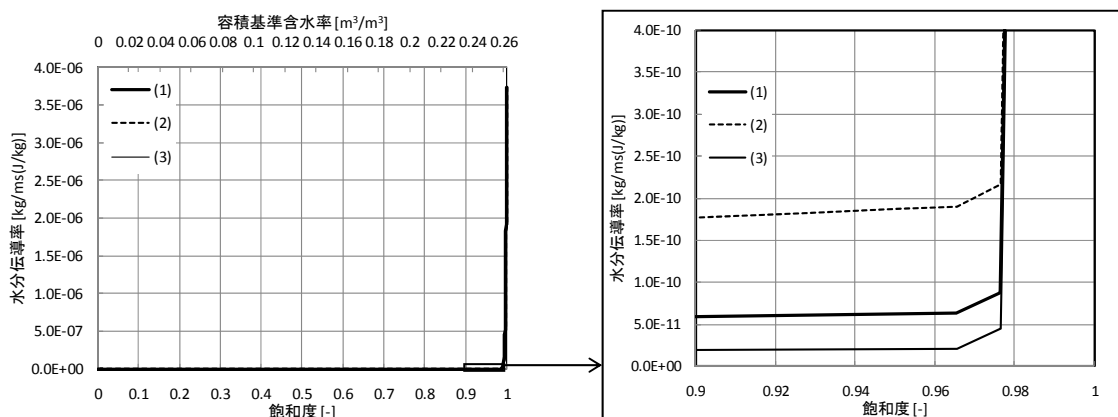
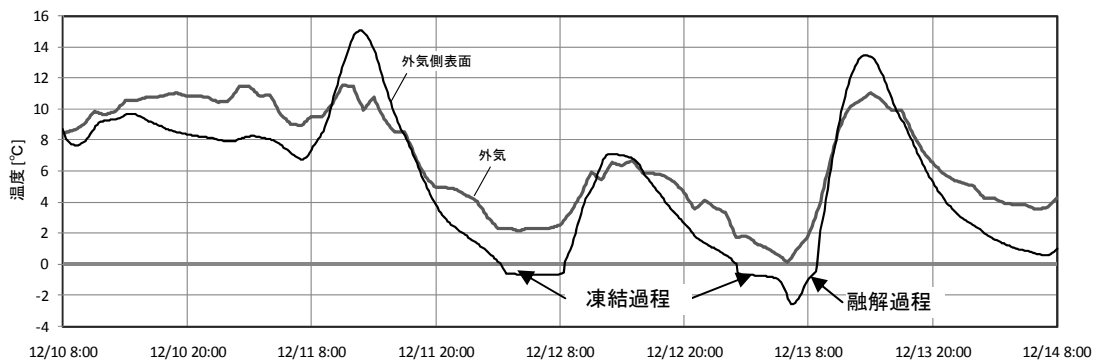


図 7.4.1 (1)~(3)の水分伝導率 (右は飽和度 0.9 以上の部分を拡大)

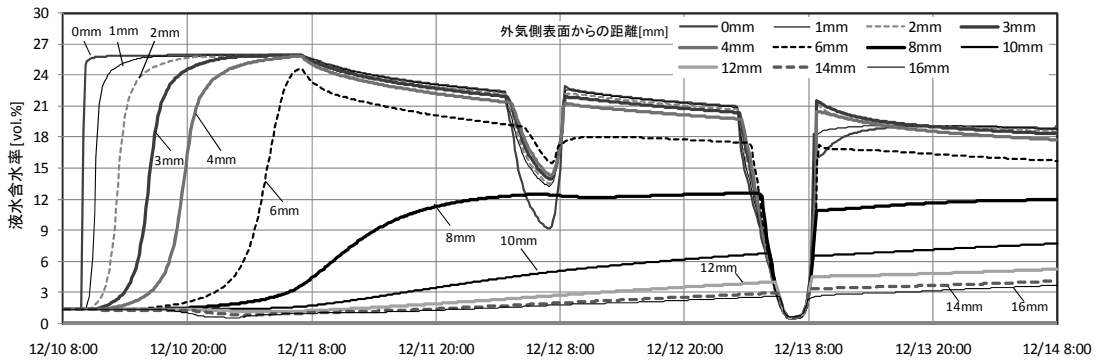
(2) 計算結果

いずれの計算パターンにおいても、外気温が低下する12月12日と13日の深夜から早朝にかけて、瓦内部で結氷が生じた。例としてS(1)における温度・液水含水率・含水率の推移を図7.4.2に示す。瓦内部の温度差は小さいため、温度は外気と外表面(0mm)の値のみを示している。

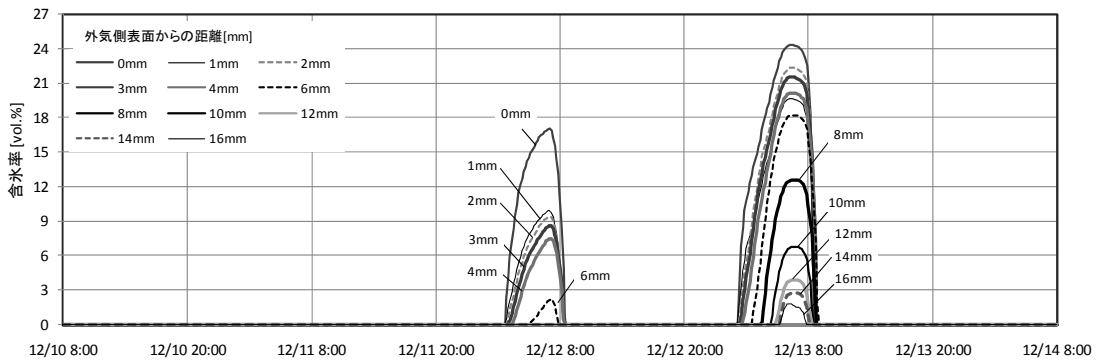
12月10日の10:00~11:00、13:00~14:00に降雨があり、外表面近傍の液水含水率が急激に上昇する。また、この日の日中は相対湿度が90%近くと高いため、17:00~11日1:00にかけては外表面で結露が生じ、結露水の浸透による水分の流入が生じた。その後、12月11日日中の温度上昇に伴って外表面側から蒸発するとともに、瓦内部へ水分が浸透するため、外表面近傍の含水率は低下し、中心から裏面にかけての含水率は上昇する。S(1)の場合、裏面にも仕上げ層があるため水分は蒸発しにくい。このような含水状況で瓦の温度が結氷温度に達すると、凍結が起きる。



(a) 温度推移



(b) 液水含水率推移



(c) 含水率推移

図7.4.2 S(1) (両面仕上げ層・ $a=2.5 \times 10^{-10}$) の温度・液水含水率・含水率推移

含水率の増加にともないその部分の液水含水率は低下するが、氷がすべて融解すると含水率はほぼ結氷開始前と同じ値となる。12月13日の2回目の凍結過程では、瓦の裏面の含水率が上昇していることと、外気温がより低下していることにより、瓦の裏面でも結氷が生じる。この時、液水含水率は瓦全体で非常に低い値をとっている。

瓦の内部で多量の結氷が生じている間は、凝固熱の発生により温度の低下が緩やかとなる（図7.4.2(a)凍結過程）。逆に融解過程では、氷の融解に熱が使われるため、温度上昇が遅れる（図7.4.2(a)融解過程）。このように、瓦の内部で結氷が生じるか否か、また結氷する場合にはその量は、温度とその時の含水率に依存する。また、その温度は、外気温や夜間放射、日射だけでなく結氷に伴う潜熱の影響も受け決定される。

図7.4.3に、各パターンにおける2回目（12月13日深夜）の凍結過程の液水含水率分布の推移を、図7.4.4に含水率分布の推移を示す。

各パターンとも8月13日1:00から2:00の間に凍結が始まっている。凍結が始まる直前の1:00

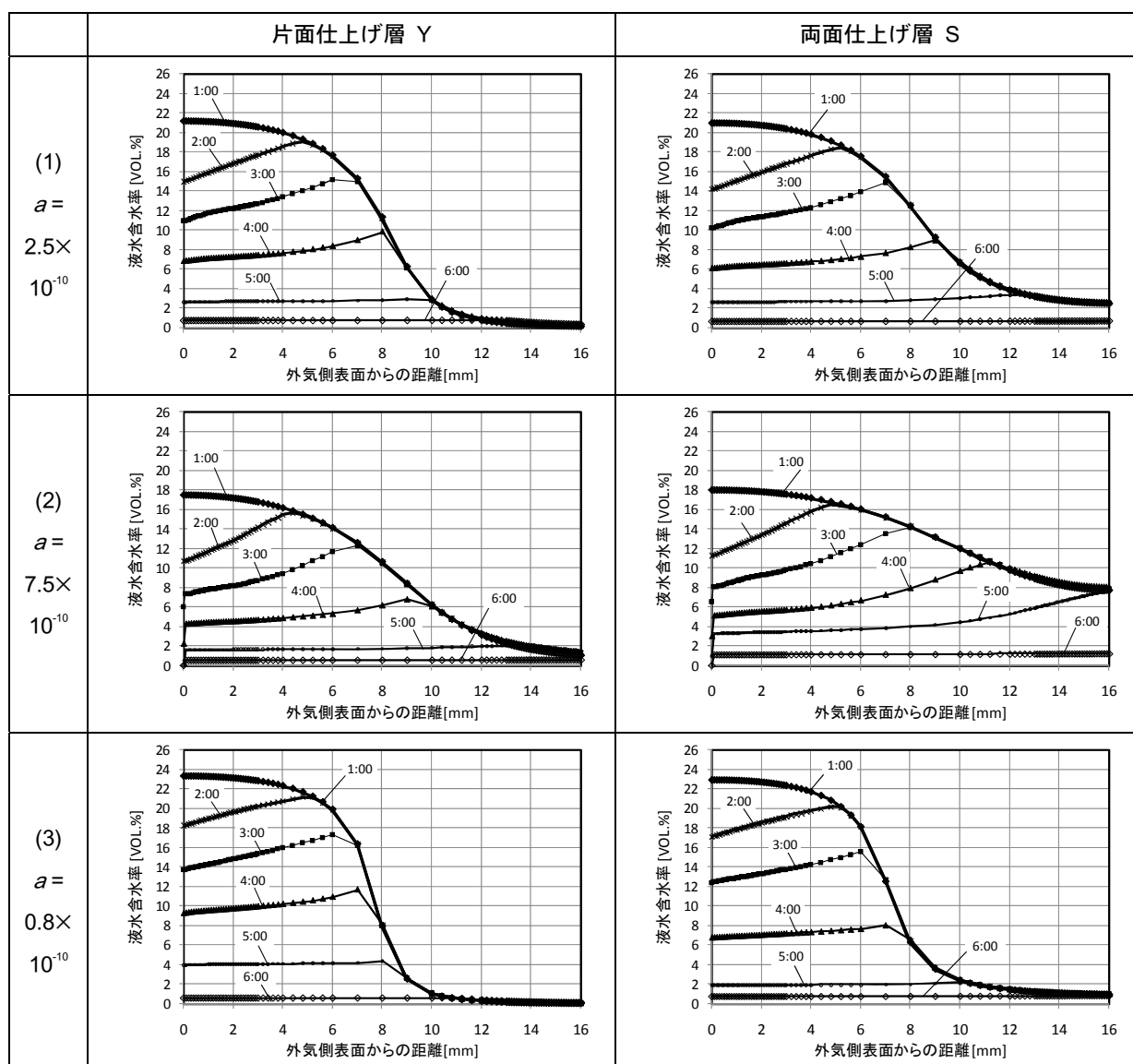


図7.4.3 12月13日の凍結過程における液水含水率分布の推移

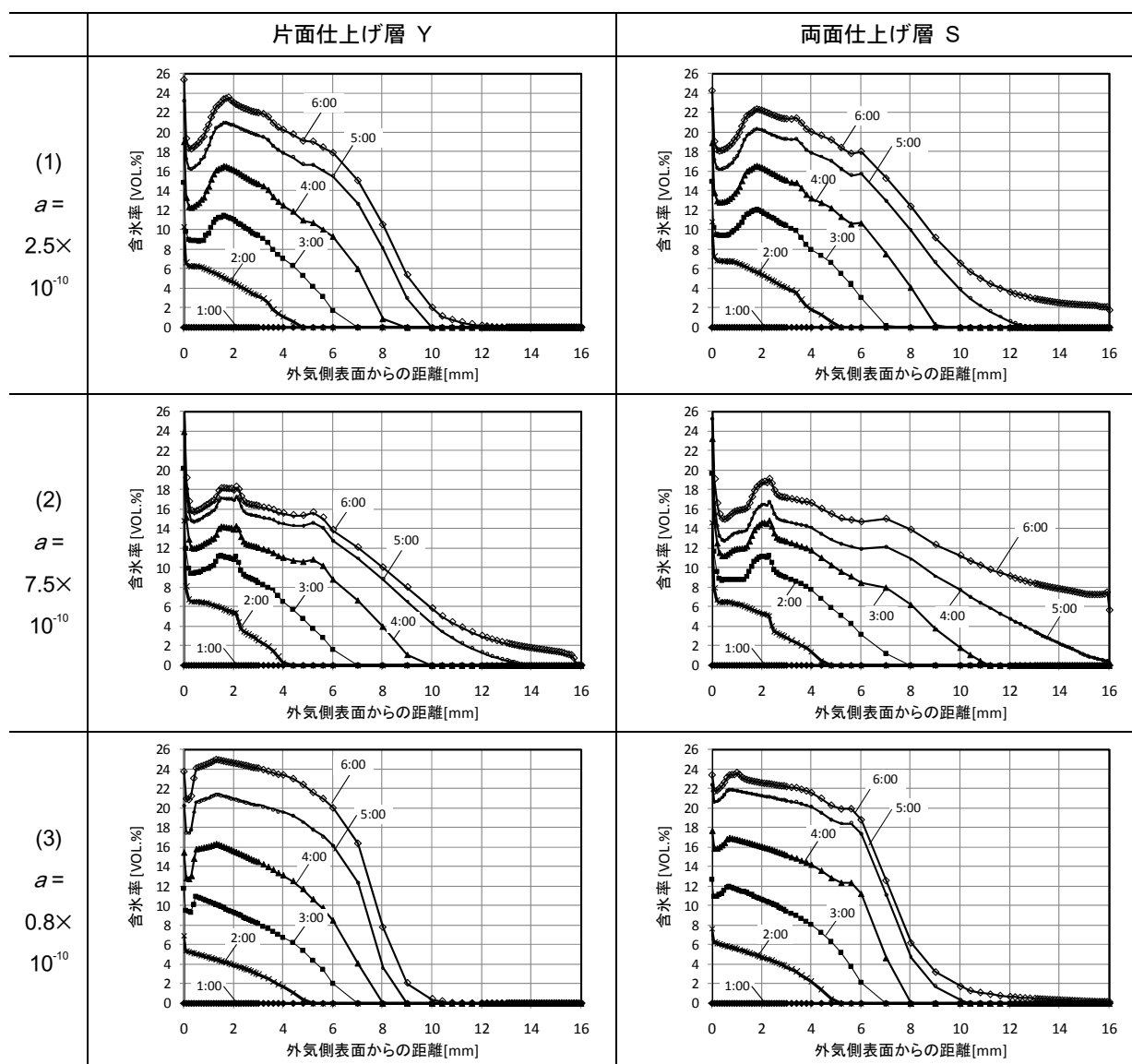


図 7.4.4 12月13日の凍結過程における含水率分布の推移

の液水含水率分布を見ると、低含水率域での水分伝導率が小さい (a が小さい) ほど、外気側の狭い範囲で含水率の高い部分ができ、水分伝導率が大きいほどなだらかな分布となる。つまり、8月10日の降雨の影響で外気側表面近傍の含水率が急激に飽和近くまで上昇した後、移動量が少なければ裏面の方へ移動するのが遅れ、瓦内部で含水率の高い部分と低い部分ができる。含水率が高いと同じ温度でも結氷の可能性が高くなることに加え、結氷が生じた時の含水率が高くなるため、含水率が空隙率を超え破壊を生じる可能性が高くなるといえる。

仕上げ層が上面にのみある場合は、仕上げのない裏面から乾燥が進むため、裏面近傍は非常に低い含水率となり、凍結過程においても結氷は生じない。仕上げ層が両面にある場合は、裏面から乾燥しにくいいため、裏面近傍の含水率がそれほど低くならず、凍結過程では裏面まで結氷する。裏面からの乾燥が進みやすいほど結氷のリスクは低下する。ただし、裏面に仕上げ層がない場合は結露水や表面から回り込んできた水分が浸透しやすい。

本解析においては、外表面の透湿抵抗と透水抵抗に釉薬瓦といぶし瓦の実測値を用いた。両者の透水抵抗は同程度であるものの、透湿抵抗は釉薬瓦の方が約30倍大きい。したがって、降雨時に瓦に浸透する雨水の量は同程度であっても、雨がやんだ後に表面から乾燥する速度が大きく異なる。図7.4.3(3) $a=0.8 \times 10^{-10}$ の1:00の含水率分布が示すように、瓦内部の水分伝導率が小さい時は、透湿抵抗が小さい方が表面近傍の含水率がわずかではあるが低くなる。外気温が0°C付近を上下するような温暖地では、このような含水率の違いが結氷するか否かに関わる大きな要因となる。したがって、いぶし瓦のように透水抵抗は大きく、透湿抵抗は比較的小さいような仕上げ層は、瓦内部の水分蓄積を抑制し、凍結を防止する効果が高いと考えられる。

図7.4.5、図7.4.6に、片面仕上げ層の場合(Y)と両面仕上げ層の場合(S)のそれぞれの平均液水含水率の推移を示す。

いずれも、瓦内部での水分伝導率が大きい(a が大きい)方が、降雨時に内部へ入る水分量が多くなり、平均含水率が高くなっている。これは第6章でも述べた通り、内部への浸透が遅い場合は、表面から浸入しきれずに流れ落ちる雨水の量が増えるためである。しかし、降雨後の乾燥

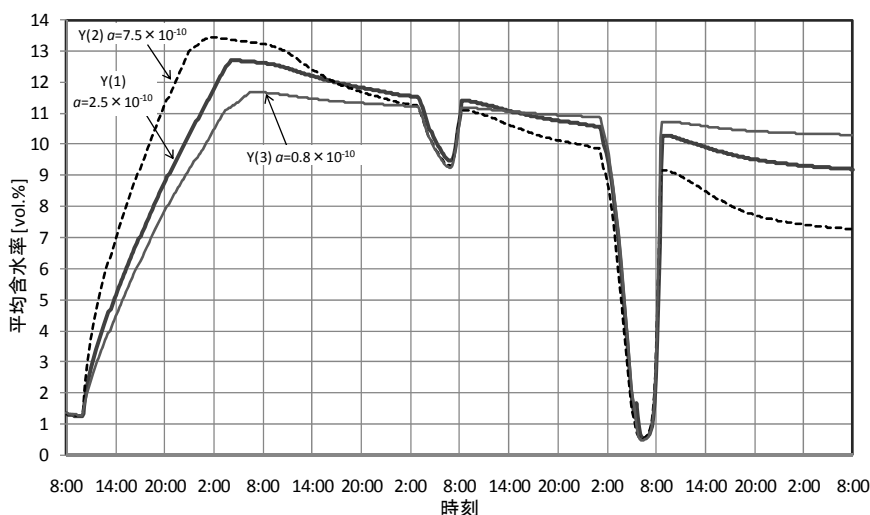


図 7.4.5 平均含水率の推移 (片面仕上げ層 Y)

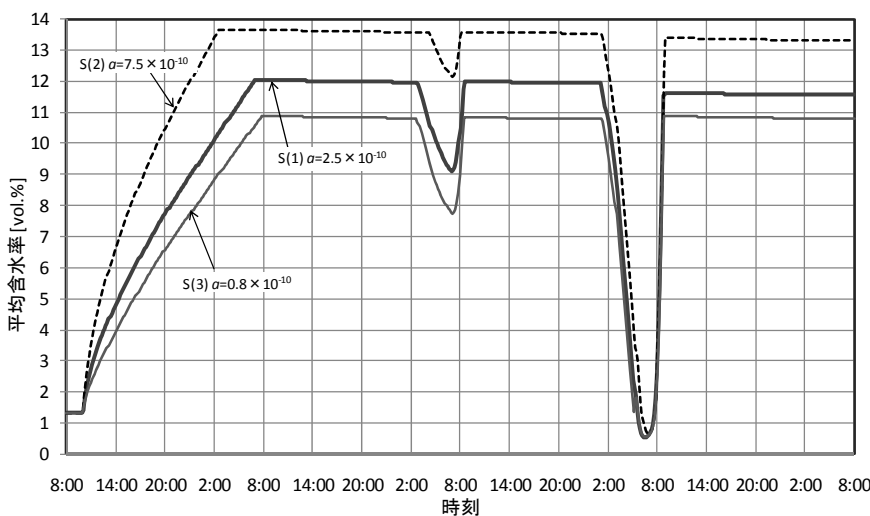


図 7.4.6 平均含水率の推移 (両面仕上げ層 S)

過程においては、裏面の仕上げ層の有無が内部での水分移動速度に及ぼす影響は逆となる。裏面に仕上げ層がなければ、仕上げ層がある場合と比較し裏面での蒸発量が多くなり乾燥が進むが、内部での移動速度が速いと表面から浸透した水分は速やかに裏面に移動し蒸発するため、平均含水率の低下が速い。一方、裏面にも仕上げ層がある場合は、裏面の透湿抵抗が高いため蒸発しにくい。したがって、降雨時により多く水分が浸透した方が平均含水率も高い状態を維持するため、凍結を生じる可能性が高くなる。裏面へ回り込んだ水の浸透を考慮せず、瓦裏面の空気層の湿度が外気と同等で乾燥が促進される状況であれば、瓦の裏面に仕上げがなく内部の移動速度が速い方が凍害を抑制できると考えられる。

7.4.2 表面仕上げの欠損の影響

(1) 検討対象と計算条件

検討対象は、第6章で表面仕上げの欠損の影響を検討したいぶし瓦の中央部とする。ただし、7.3節で解析を行った上面のみに仕上げ層があり、中央に欠損がある場合を基本パターンとする。本節では仕上げ層の影響を把握するため、裏面に仕上げ層がある場合についても計算を行う。図7.4.7に計算条件を、表7.4.2に計算パターンを示す。

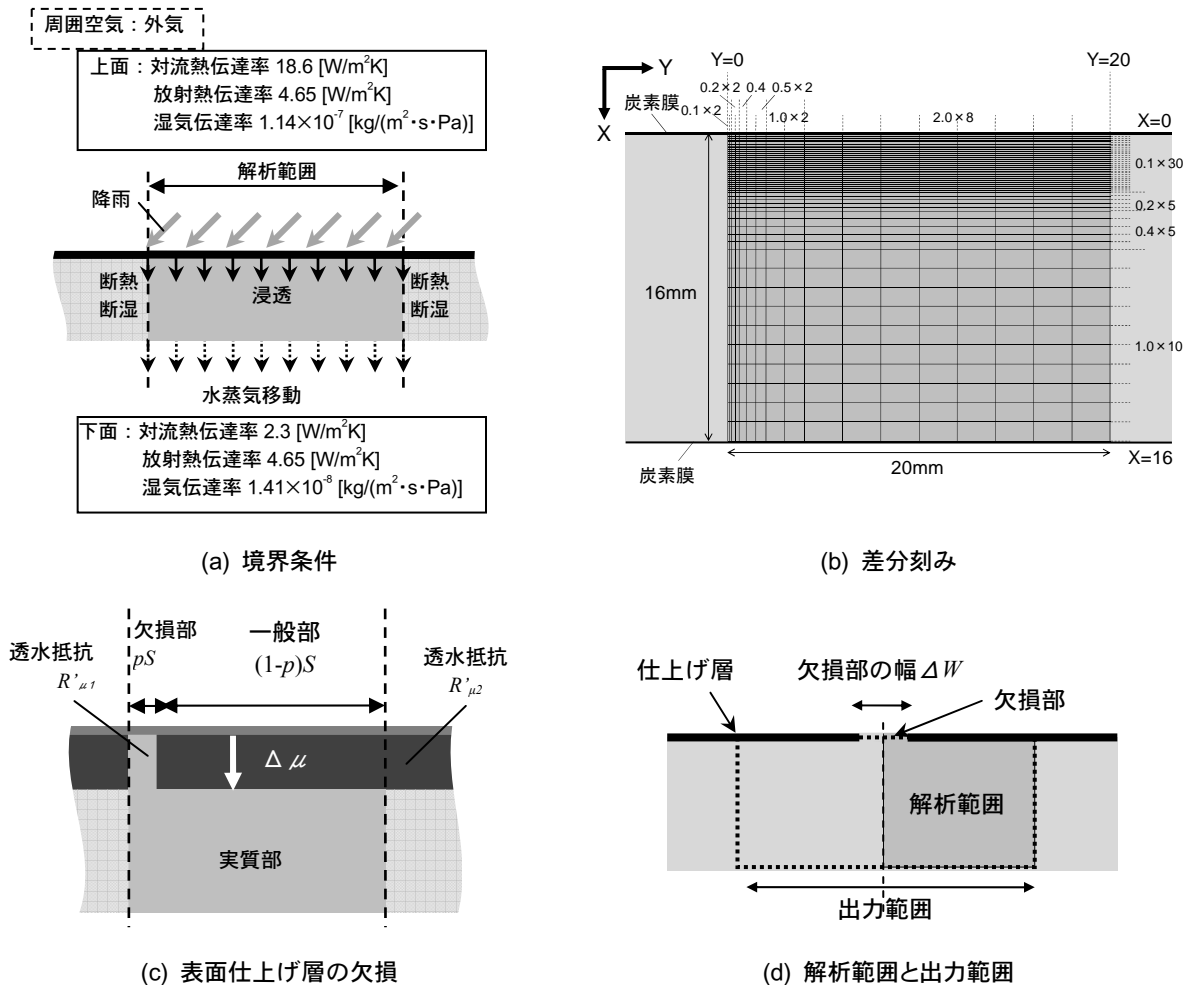


図 7.4.7 検討対象と計算条件

表 7.4.2 表面仕上げ層の影響の計算パターン

No.	外表面			裏面		備考
	透水抵抗[m ² sPa/kg]	透湿抵抗[m ² sPa/kg]	欠損部面積割合 p	透水抵抗 [m ² sPa/kg]	透湿抵抗 [m ² sPa/kg]	
Y(4)	6.48×10 ⁹ (欠損部 2.42×10 ⁷)	1.45×10 ¹¹ (欠損部 2.13×10 ⁶)	0.0025	4651.5	2.13×10 ⁶	上面に微小な欠損あり
S(4)	9.92×10 ⁹ (欠損部 3.70×10 ⁷)	5.35×10 ⁹ (欠損部 2.42×10 ⁶)	0.0025	4.96×10 ⁹	5.35×10 ⁹	上面に微小な欠損あり

(2) 計算結果

降雨の直後、凍結開始前、融解後の液水含水率分布、凍結過程で温度が最低となる時の含水率分布を図 7.4.8 に順に示す。

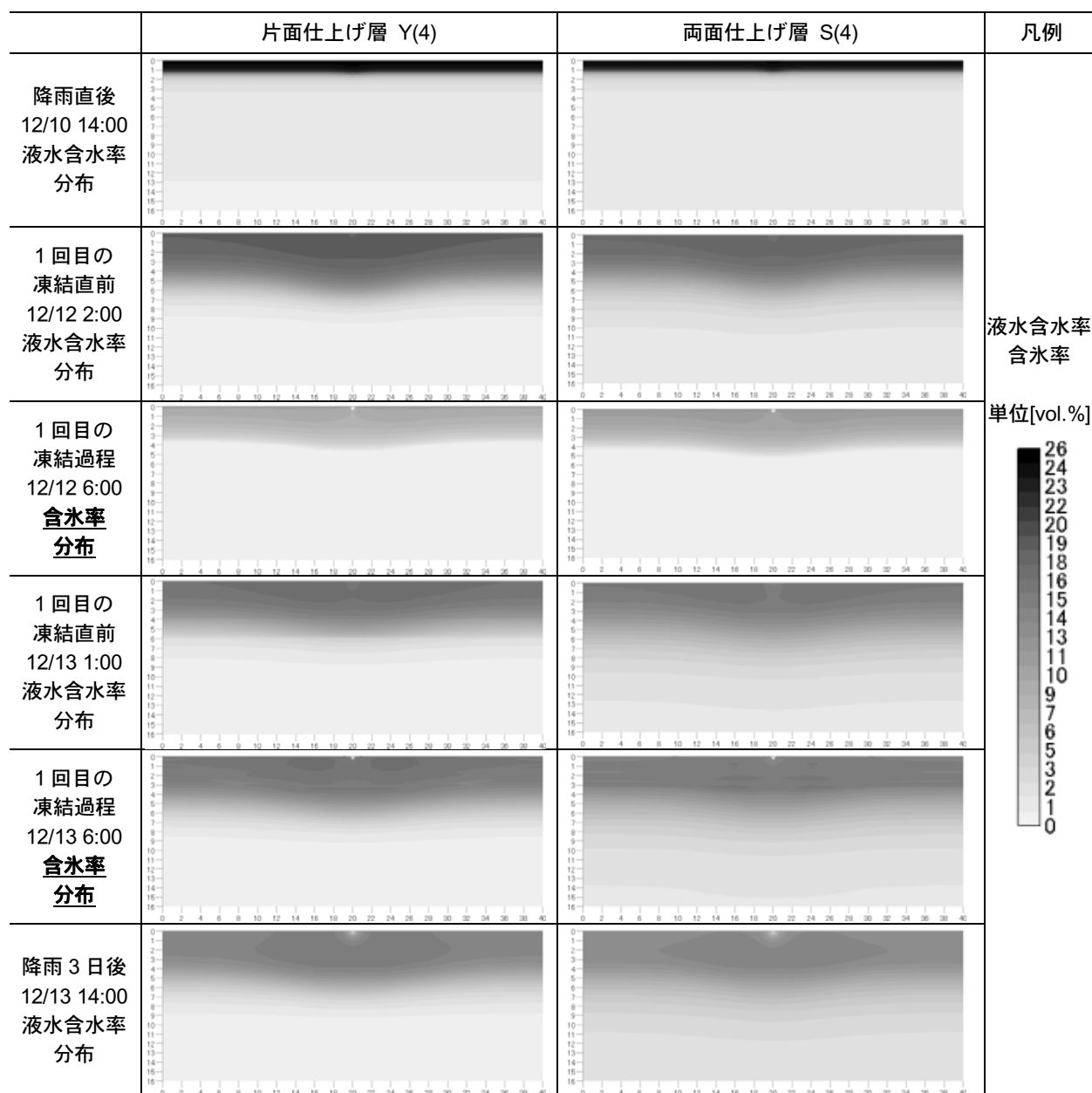


図 7.4.8 表面仕上げに欠損がある場合の液水含水率・含水率分布

12月10日の10:00と13:00から1時間ずつ降雨があった直後では、表面近傍はほぼ飽和に近く、中央にある仕上げ層の欠損の影響はそれほど見られない。しかし、降雨時に瓦内部へ浸透できなかった水は水膜となり表面に付着するため、実際には降雨時間よりも長い間表面からの水分供給が続く。その結果、1回目の凍結の直前である12月12日の2:00には仕上げ層の欠損部から多く水分が浸透したような含水率分布をとる。ここでは片面仕上げ層の方が透水抵抗が小さいとして計算しているため、片面仕上げ層の方がいくぶん高い含水率を示している。この状態で瓦の温度が低下し、温度と含水率の条件を満たした部分から結氷が始まる。瓦の温度が最低となる12月12日6:00の含水率分布は、仕上げ層の有無による違いはあまりない。結氷が生じるのは表面から4~5mmの範囲であり、結氷が生じていない部分との境界が明確である。

2回目の凍結が始まる直前である12月13日1:00の含水率分布では、裏面の仕上げ層の有無による違いが明確となる。片面仕上げ層の場合は裏面からの蒸発が多いため、外気側表面に近い含水率の高い部分と裏面側の含水率の低い部分の差が明瞭である。両面仕上げ層の場合は裏面からの蒸発量が少いため、裏面付近の含水率が低下しにくい。さらに、瓦内部での水分移動量は含水率が高くなるほど多くなるため、片面仕上げ層の場合と比べ、一様な含水率分布に近づく。この状態で凍結が生じると、表面・裏面の温度差はほとんどないため、含水率の高い部分で結氷が生じる。表面仕上げ層の欠損部分は蒸発量も多いため、この近傍では含水率が低下する。したがって、周囲で結氷が生じていても欠損近傍は結氷を生じていない。

凍結過程の途中12月13日3:00の瓦内部の含水率分布と液相水分流の向きを図7.4.9に示す。

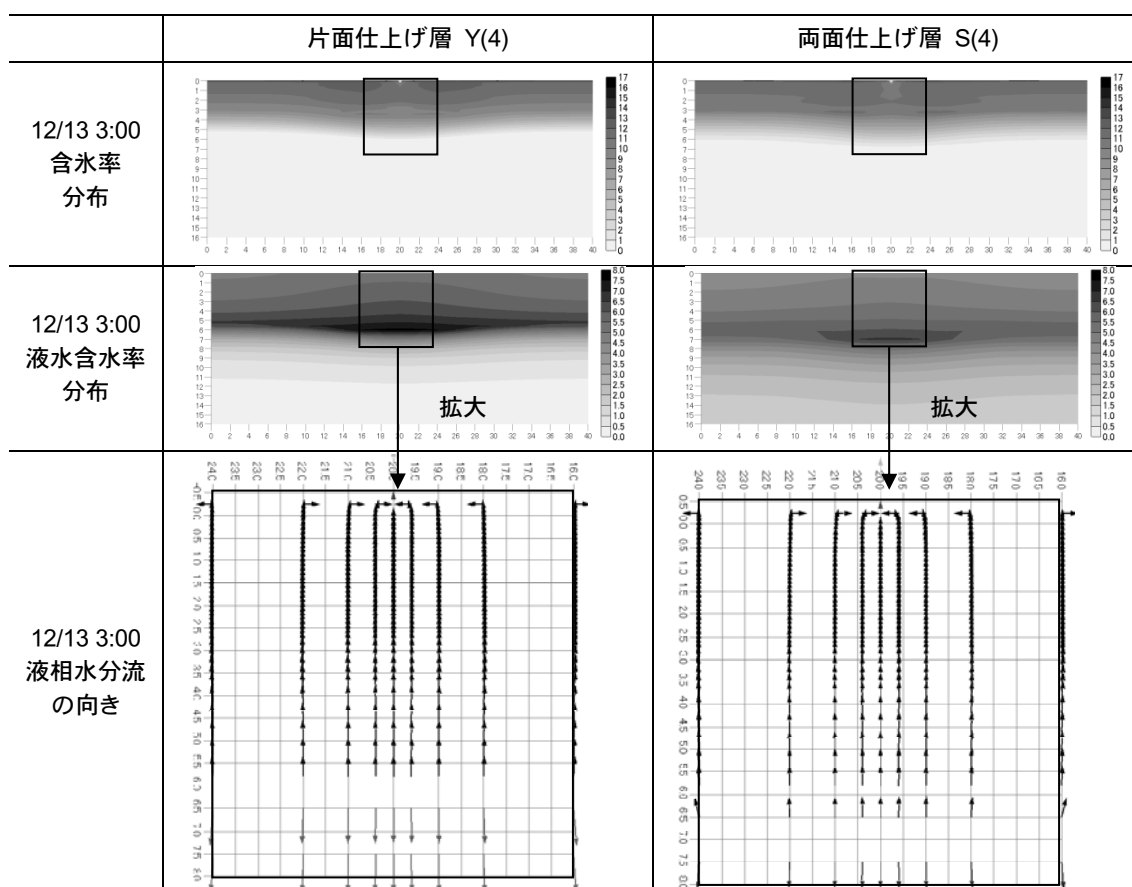


図 7.4.9 凍結過程の含水率・液水含水率・液相水分流の向き

凍結過程では、最も温度が低下する外表面付近から凍結が始まり、結氷が生じた部分の含水率は低下する。まだ凍結が始まっていない瓦の厚さ方向中央付近の含水率が最も高くなっている。この時、含水率の高い方から低い方へ水分が移動するため、結氷が生じている部分にはさらに水分が供給されることになり、含水率の増加につながる。ただし、移動する過程で結氷条件を満たせばその場所で結氷し、結氷した水は移動しない。瓦の結氷条件を満たす低温部の拡大速度と、水分移動速度のバランスで結氷する範囲と量が決まる。また、本解析では仕上げ層中央の欠損部から多くの水分が蒸発するため含水率が低下しやすく、仕上げ層付近では欠損部近傍に移動する水分流がみてとれる。

7.4.3 局所的な環境条件の影響

(1) 検討対象

7.2 節の表面結露計算で、外気側の対流熱伝達率や裏面空気層の温度が結露量と頻度に大きく影響を与えることを示した。また、2.5 節で述べた複合劣化試験においては、1 枚の瓦でも位置により温度が異なることを示した。ここでは、瓦が実際に使用される状況を考慮し、局所的な環境条件が瓦の凍結融解過程に与える影響を検討する。

検討対象を図 7.4.10 に示す。対象は、4 寸勾配の屋根の軒先を想定した瓦の先端 150mm の範囲である。瓦の裏面下側は外気に接し、裏面上側は室内からの熱・湿気供給のある空気層に面している。また、上面と軒の先端木口部分にのみ表面仕上げ層がある。仕上げ層には欠損はないものとする。

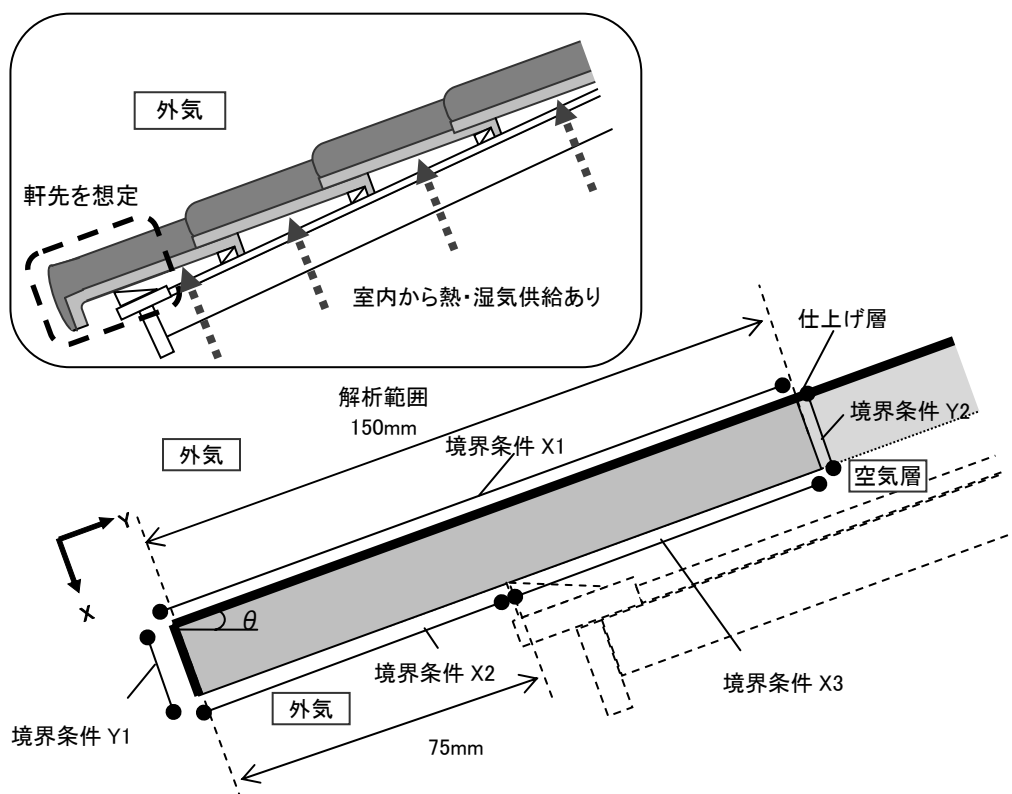


図 7.4.10 局所的な環境条件の検討対象部位

数値解析を行うにあたっては、瓦の厚さ方向を X 軸、勾配方向を Y 軸とする。境界条件は瓦の上面を X1、裏面下側（外気に接する部分）を X2、裏面上側（空気層に接する部分）を X3、先端木口部分を Y1、先端から勾配方向に 150mm の部分を Y2 とする。Y2 部分では厚さ方向の熱・水分移動があるとし、Y 方向については断熱・断湿とする。

(2) 境界条件

境界条件を表 7.4.3 に示す。瓦の上面と先端では風速約 3.0[m/s]、軒裏では風速約 0.6[m/s]と想定している。対流熱伝達率からルイスの関係を用いて湿気伝達率を計算する。

境界 X1、Y1 では、天空、地面、壁面に対する形態係数を算出し、それぞれ放射による熱の移動を考慮する。ここで地面、壁面は外気と同じ温度であるとする。境界 X2、X3 においては、放射の影響は放射熱伝達率で考慮する。

降雨時は X1 と Y1 から降雨の流入があるとし、結露が生じた時は Y2 を除くいずれの部分からも結露水の浸透があるものとする。

表 7.4.3 境界条件

	記号	単位	境界位置				
			X1	X2	X3	Y1	Y2
空気温度	T	°C	外気	外気	外気+2°C	外気	—
対流熱伝達率	α_c	W/m ² K	18.6	8.6	4.6	18.6	断熱
放射熱伝達率	α_r	W/m ² K	—	—	4.6	—	
日射吸収率	a_s	—	0.8	0.8	—	0.8	—
長波長放射率	ε_s	—	0.9	0.9	—	0.9	—
透水抵抗	R'_w	m ² sPa/kg	3.24×10 ⁹	4651.5	4651.5	3.24×10 ⁹	断湿
透湿抵抗	R'_v	m ² sPa/kg	1.45×10 ¹¹	2.13×10 ⁶	2.13×10 ⁶	1.45×10 ¹¹	

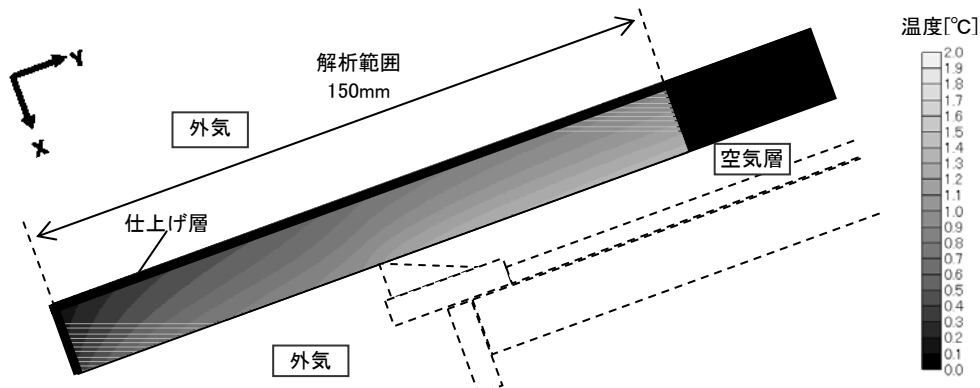
(3) 計算条件

外気には前節と同様、12月10日8:00～12月14日8:00の気象データを用いる。瓦内部の初期温度は12月10日8:00の外気温度8.4°Cであり、初期水分化学ポテンシャルは-1,600[J/kg]で一様とした。

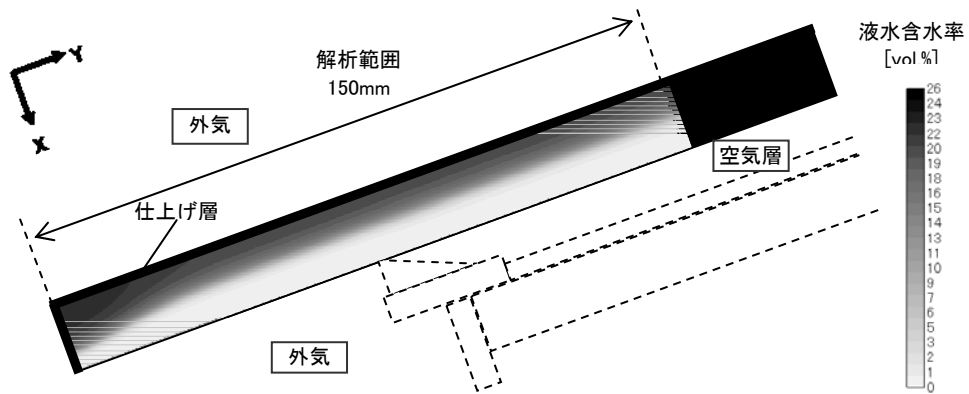
(4) 計算結果

本計算においても12日と13日の深夜2回結氷が生じた。結氷が生じた13日深夜について、結氷が生じる直前の1:00の温度と液水含水率分布を図7.4.11に示す。

外表面は放射冷却の影響を受け低温となるが、外気よりも温度が高い空気層に面した部分は温度が高くなる。したがって、軒の先端（X1とY1の交点）が最も低温となる。同じ瓦の中でも、外表面で1°C程度の温度差ができる。含水率は、外表面からも先端部からも雨水が浸透した軒の先端部分が最も高い。温度が最も下がる部位で含水率が最も高くなっているため、結氷はここから始まる。凍結過程の含水率分布の推移を1時間ごとに図7.4.12に示す。時間の経過とともに、含水率の高い部分で凍結が生じ、結氷範囲が拡大していく様子がわかる。



(a) 温度分布



(b) 液水含水率分布

図 7.4.11 12月13日1:00 (凍結開始前) の温度・液水含水率分布

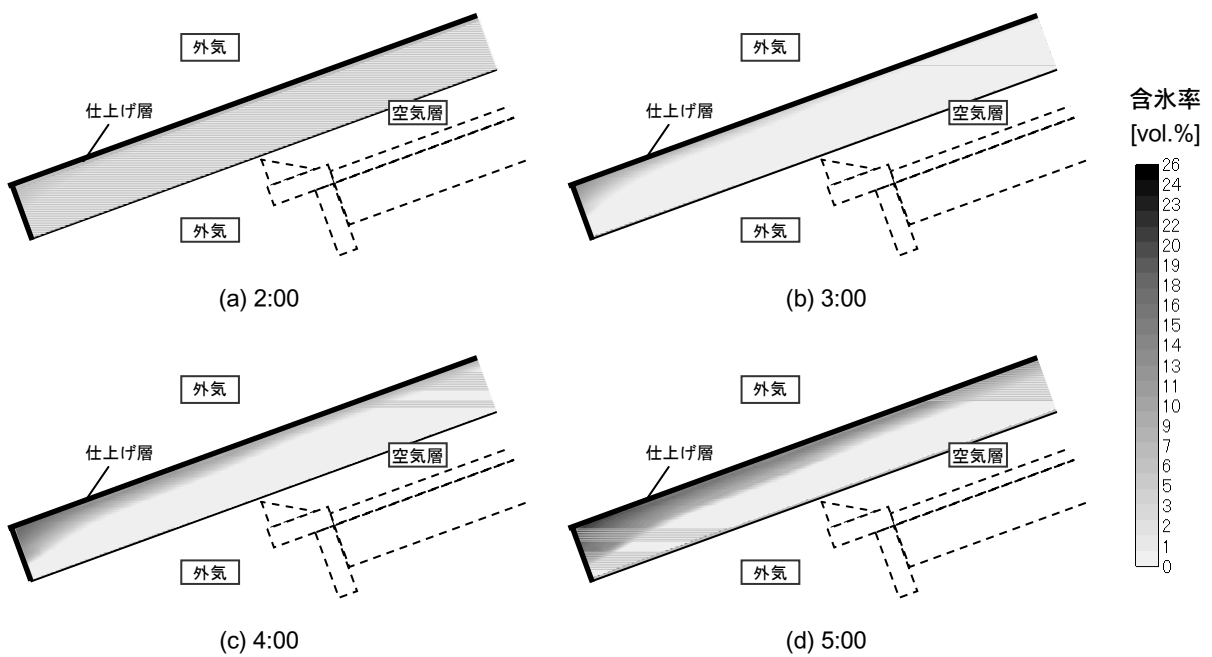


図 7.4.12 凍結過程の含水率分布の推移

7.4.4 各種要因が凍結融解過程に与える影響のまとめ

ここでは、水分移動速度の違いや仕上げ層の有無、局所的な境界条件の違いが、瓦の凍結融解性状に与える影響について検討を行った。

雨水や結露水の浸透により外表面近傍の含水率が急激に上昇した後、瓦内部での水分移動が速ければ裏面の方へ向かって素早く水分が移動するため、全体的になだらかな含水率分布となる。逆に、内部での水分移動が遅ければ外表面付近の狭い範囲だけ高い含水率の状態を維持する。この状態で温度が低下すると、含水率の高い部分から凍結が始まる。含水率が飽和に近い状態で凍結を生じると、氷の圧力により凍害を受ける可能性がある。ただし、降雨時のように一度に多量の水分が供給される条件下では、内部の移動速度が速い方がより多く水が浸入するため、裏面にも仕上げ層があり、蒸発しにくい状況では長く含水率の高い状態が続き、凍結のリスクを高める。

これらは、2章で述べた「内部が密で透水しにくいものほど凍害を受けやすい」「水分が蒸発しにくいほど凍害を受けやすい」という特徴と一致する。

表面仕上げ層に欠損がある場合、ごく小さなものであっても、水分浸透量は多くなる。ただし、この部分では蒸発も速いため、降雨や結露水の浸透が続かなければその近傍の含水率は低下する。外気温が0℃付近を上下するような温暖地では、このような含水率の違いが結氷するか否かに関わる大きな要因となる。

局所的な境界条件に違いがある場合には、下地のある部分とない部分、接する風の速さ、天空へ開いているかどうか等の要因によって、1枚の瓦であっても温度分布ができることを確認した。また、表面の欠損がなくても、降雨による水分が浸透しやすい部位で含水率が高い状態を維持することを示した。軒瓦の先端部分は、この2つの要件を満たすため、結氷が最も生じやすいといえる。

7.5 第7章のまとめ

本章では、温暖地における屋根瓦の凍害を引き起こす要因の一つとして、夜間放射による温度低下と結露水に着目し、最初に京都市の気象データを用いて表面結露の頻度と量を数値解析により推定した。現実に近い簡易なモデル化を行い、表面温度や結露量、結氷量のとる値の範囲や、種々の要因の影響を量的に把握することに主眼を置いて検討を行った。

ここで用いたような室内側からの熱供給を受けにくいモデルの場合、夜間放射の影響により表面温度は外気温度よりも3~4℃低下し、冬期は屋根表面で3日に1回程度の割合で結露が発生する可能性があることが明らかとなった。また、京都市のように冬季の外気温平年値が0℃を上回る温暖地においても屋根温度は0℃を下回り、含水率が高ければ凍結が発生することが確認できた。

屋根表面の温度を決定する要因としては、日射、夜間放射、対流熱伝達による熱移動が考えられるが、外部風が小さく対流による熱伝達が小さい場合には相対的に夜間放射の影響が大きく、結露の頻度と量も著しく増加する。屋根の傾斜角による放射量の違いや日射による日中の表面温度の違いは、結露頻度と量には大きな影響を及ぼさない。瓦裏面空間の換気量が少なく室内からの熱流入が多い場合には、瓦の温度が高くなるため結露は生じにくい。

表面結露水がすべて瓦内部に浸透する場合には、瓦表面付近の含水率が飽和近くまで上昇する。降雨水はさらに多量の水分を供給するが、頻度としては結露の方が多い。

今回標準として用いた瓦の水分移動係数は、飽和付近で著しく大きくなるが低含水率時は小さな値であるため、瓦全体に水分が浸透するというよりも局所的に含水率が大きくなる傾向があった。このような性質をもった瓦の場合、その部分で凍結が生じると結氷量が大きくなり、劣化を引き起こす要因となると推察される。

ここでは検討していないが、表面仕上げ層は水分移動だけではなく、色や材質によっては日射反射率、長波長放射率が異なるため、夜間放射の程度にも影響を及ぼすと考えられる。また、瓦は生産地により原料となる土の性質や焼成温度が異なり、内部の水分移動係数や飽和含水率（吸水率）も異なると考えられる。それらの物性値がわかれば、本章で述べた一連の計算法で、ある気象条件と建物条件下で瓦の結氷が生じるか否かを大略推測することができる。さらに、物性値をパラメータとする解析を行うことで、凍害が生じにくい特性をもつ材料の開発へフィードバックできる可能性もある。

注釈

(注1)

- ・屋根に旧省エネルギー基準（IV地域）程度の断熱（熱抵抗値 $0.8[m^2K/W]$ ）が施工されている。
- ・瓦裏面空気層と外気との間に換気がないという仮定のもと、野地板の熱抵抗や空間の熱伝達抵抗を加味して定常計算を行うと、瓦裏面空気層内外での熱抵抗比は、外側：内側 $\approx 1:6.6$ となる。冬季の室内外温度差を 15°C とすると約 1.97°C 外気よりも高くなるため、ここでは 2°C と設定した。

第7章 参考文献

- [7-1] 銚井修一・池田哲朗・新田勝通：エース建築環境工学Ⅱ－熱・湿気・換気－，朝倉書店，2002.3
[7-2] 日本建築学会：拡張アメダス気象データ(1981-2000)，2005.8

第8章 総括

8.1 本論文のまとめ

日本では、飛鳥時代から粘土瓦が製造され使用されており、瓦の凍害についても原料組成や吸水率、空隙構造などの材料物性や製造方法の点では数多くの研究が行われている。

本研究は、瓦における水分の移動と温熱環境から受ける影響に着目し、実気象条件下での建築材料の劣化状況や耐久性を予測するための基礎として、瓦の凍結融解過程における温度と水分性状を明らかにすることを目的としている。

以下に各章の概要と得られた主な知見をまとめる。

第1章では、既往研究のレビューを行い、本論文の目的を以下のようにまとめた。

- ・ 表面仕上げ層をもつ粘土瓦の水分移動特性を、実験により把握すること
- ・ 粘土瓦の凍害劣化の性状を調査と実験により明らかにすること
- ・ 粘土瓦内部の凍結・融解過程における温湿度性状を、実験と数値解析により明らかにすること
- ・ 温暖地において、瓦内部で凍結が生じる条件を明らかにすること

以上をふまえ、本論文の構成を示した。

第2章では、文献調査、実地調査、ヒアリング調査、促進劣化試験により、粘土瓦の劣化の実態と性状を明らかにし、第3章以降で取り扱う問題の抽出を行った。

まず、主に瓦の凍害に関する既往の文献調査から、以下の点を明らかにした。

- ・ 粒度組成等の原料土の性質、吸水率や飽和係数等の焼成後の瓦の性質と耐凍害性の関係について相当数の実験や研究が行われている。
- ・ 耐凍害性試験では、試験条件下での耐凍害性と材料物性の関係について多くの知見が得られているが、試験室での破壊性状が実際の使用条件下での破壊性状とは異なることも指摘されている。
- ・ 実際の使用環境下における瓦の温度や含水状況、凍結を生じるために不可欠な水分の供給経路に着目した研究はあまり行われていない。
- ・ 瓦への水分浸透に大きく影響すると考えられる表面仕上げ層が凍結融解過程に与える影響についてはほとんど言及されていない。

京都市内の寺社を中心とした建物の塀瓦、屋根瓦について、特に水分に起因する劣化と考えら

れる事例に着目した調査により、以下の点を確認した。

- ・ 程度の大小はあるが、形状が複雑になっている部分で剥離や欠けが多く見られることから、瓦の内部で凍結による応力が生じた場合、力学的に弱い部分で破壊が生じると考えられる。
- ・ 剥離や欠けが生じている部分の周囲にはひびが入っているものが多く、吸湿・吸水による膨張や凍結融解を繰り返すことにより、少しずつひびが入り、そこからさらに水が浸透し、その水が凍結を促進し、破壊を生じると推測される。
- ・ 冬期に 0℃以下の外気温が持続することが少なく、凍結・融解が繰り返されると考えられる京都においては、大きな剥落というよりも薄く小さい表面剥離が多い。
- ・ 水が滞留しやすいところで劣化が多く、周囲に樹木が多い場所では藻や苔の発生とともに、剥離や欠けを生じている場合が多い。
- ・ 降雨の場合には瓦の谷部分に水道（みずみち）ができて流れ落ちるが、表面結露した場合はより広範囲にわたって水滴が付着する。
- ・ 方位の影響に関しては、観察を行った多くの屋根や塀の勾配が緩く日射量に大きな差がなかったためか、明確な違いは見られない。

水分の供給条件や環境条件を変えて行った促進劣化試験により、以下の点を確認した。

- ・ 従来から行われている気中凍結水中融解法による凍結融解試験においては、最初にひび割れが生じ、そのひび割れ部分から水が浸透し、内部の結氷量が増加して、剥離・剥落が生じる。既往の文献で指摘されているように、実態調査よりも凍結融解試験の結果の方が劣化の程度が激しい。
- ・ 部分的な吸水、結露水の滴下、降雨を模した噴霧など水分の供給条件を変えた凍結融解試験では、実際の劣化の状況に近い表面の細かな剥離やえぐられたような形状の剥離などが生じた。また、水分の供給条件によって劣化の程度や劣化に要する時間が異なる。
- ・ 複合劣化試験においては、風の当たり方や下地の有無、水分の付着状況によって1枚の瓦でも部位により温度や水分の付着の状況が異なることがある。瓦の凍結融解過程を検討する際には、瓦の施工法や接する空気、下地等の局所的な影響も考慮する必要がある。
- ・ 凍結・融解過程では潜熱が発生するため、見かけ上の温度変化は小さくなる。

以上の結果を元に、瓦の凍結融解性状に影響を与える要因として、本論文で検討すべき項目を、①内部の水分移動速度、②表面仕上げ層、③外部風速、④周囲環境温湿度、⑤降雨、⑥放射冷却、⑦表面結露、⑧表面の保水性、⑨外気温、⑩繰り返し回数 とした。

第3章では、表面仕上げ層をもつ粘土瓦の水分特性を把握することを目的に、基本物性、水分保持性能、水分移動係数の測定を行った。

基本物性として乾燥密度、吸水率、細孔径分布の測定を行い、粘土瓦の JIS に準拠した吸水率の測定では、素地本来の性質ではなく、仕上げ層の透水抵抗の影響も含めた値が得られることを指摘した。細孔径分布の測定からは、 $-0.1\sim-0.25^{\circ}\text{C}$ で結氷を生じる $1\sim3[\mu\text{m}]$ の直径をもつ細孔が全体の7割を占めることを確認した。

また、相対湿度 96%以下の低湿域での平衡含水率と 99.8%以上の高湿域での保水性の測定を行い、高湿域で平衡含水率が急激に増加することを確認した。

水蒸気と液水の両方について、表面仕上げの有無による移動係数の違いを測定し、いぶし瓦と

釉薬瓦では、素地（実質部）の透湿率や水分伝導率、仕上げ層の液水に対する水分伝導抵抗は同程度であったが、透湿抵抗は釉薬層の方がいぶし瓦の炭素膜よりも約 30 倍大きいことがわかった。また、仕上げ層をもつ材料における飽和時の水分伝導率については測定方法の提案を行い、試料内部に閉じこめられた空気が透水の抵抗となる可能性があるという問題点を明らかにした。

第4章では、第3章の飽和時の水分伝導率測定において問題となった空気の影響について、メカニズムの推測と数値解析による影響の定量化を試みた。

簡単なモデルを用いて数値解析を行った結果、瓦内部の空気が抜けにくく、圧縮され圧力が上昇するような状況では、水分浸透へ与える空気の影響が大きいことを明らかにした。

特に空気の影響が問題となるのは、透水係数の測定のように両面から水圧がかかり空気が抜けにくい状況の時である。この場合、空気の存在を考えずに測定を行うと値を低く見積もる可能性があるため、物性値の測定という本来の目的が達せられない。測定前に試料内の空気を十分に抜くことと、測定開始時に試料内部が十分に飽和していることを確認する必要がある。

第5章では、多孔質材料内部の水分化学ポテンシャルと凝固点降下の関係、凍結・融解を生じる系の水分収支式、エネルギー収支式の導出過程を示し、数値解析手法について述べ、さらに以下の点について検討を行った。

- ・ 水分の凍結・融解が生じる系においては、結氷により熱伝導率は著しく増加すること。
- ・ 透湿率、透水係数の測定値から、温度依存性も考慮した移動係数を理論的に導出すること。
- ・ 場所についての差分刻みが小さくても、時間刻みを小さくすることなく安定した解が得られる常微分方程式を用いた解析的手法を用いること。
- ・ 仕上げ層のある材料表面における熱・水蒸気・液水移動の扱い方
- ・ 従来の解析では扱われていない飽和付近の扱い方

第6章では、表面仕上げ層をもつ瓦内部の水分移動について、実験と数値解析により性状の把握を行った。

実験では、全体に表面仕上げ層をもついぶし瓦と、仕上げ層が一部にしかない釉薬瓦では、同じ時間降雨環境に曝されていても異なる水分分布をとることがわかった。特にいぶし瓦では、目視で確認できる表面仕上げの欠損部と水分浸透部分は必ずしも一致せず、先端部や差し込み部など部分によって水分の浸透量が異なる傾向が見られた。数値解析により、表面仕上げを通して一定の水分が流入すること、表面仕上げ層の透水抵抗の分布や内部の空隙構造のむら等に起因する水分移動速度の違いにより含水率分布が異なる可能性を示した。釉薬瓦では、釉薬層のない部分から水分が多く流入し、時間の経過とともに釉薬に覆われている部分へ浸透していく様子が実験により確認された。

雨の降り方についての検討も行った。急激に多量の水分が供給されると、内部への拡散が追いつかず表面付近が飽和近くに達し、内部へ流入できない水分は流下する。そのため、積算降水量が同じであっても、長時間にわたる弱い雨の場合より短時間に強く降る雨の方が、瓦内部へ流入する水分量は少なくなる。

第7章では、温暖地における屋根瓦の凍害を引き起こす要因の一つとして、夜間放射による温度低下と結露に着目し、実気象条件下で屋根瓦が凍結する可能性と凍結融解性状の検討を行った。

まず、京都市の気象データを用いて表面結露の頻度と結露量を算定した。室内側からの熱供給を受けにくい場合には、夜間放射の影響により表面温度が外気温度よりも3~4℃低下し、冬期は屋根表面で3日に1回程度の割合で結露が発生する可能性があること、冬季の外気温平年値が0℃を上回る温暖地においても屋根温度は0℃以下となり、含水率が高ければ結氷を生じる可能性があることを明らかにした。

また、外部風が小さく対流による熱伝達が小さい場合には、相対的に夜間放射の影響が大きく結露の頻度と量も著しく増加すること、屋根の傾斜角による放射量の違いや日射による日中の表面温度の違いは結露頻度と量に大きな影響を及ぼさないこと、瓦裏面空間の換気量が少なく室内からの熱流入が多い場合には瓦の温度が高くなるため結露・結氷を生じにくいことを示した。

次に、表面結露と雨水の流入を考慮した解析を行った。降雨は多量の水分を供給するが、頻度としては結露の方が多く、結露水の浸透は瓦表面付近の含水率を飽和近くまで上昇させることが確認された。また、仕上げ層の位置や透水・透湿抵抗、瓦内部の水分伝導率が含水率・含水率分布に与える影響について検討した。水分伝導率が飽和付近では著しく大きくなるが低含水率領域では小さい瓦の場合、水分は瓦全体に浸透するというよりも局所的に含水率が高くなり、温度低下にともなってその部分でのみ結氷が生じる。これは、第2章で示した表面付近の剥離に対応すると考えられる。

8.2 今後の課題と展開

本研究に着手したきっかけは、滋賀県の住宅の屋根瓦の表面における丸い欠けに気づいたことであった。瓦職人の間では常識ともいえる瓦の凍害、それが関西地方のように日本では比較的温暖と考えられる（積雪寒冷地でない）場所で起こりうるのか、どのような条件がそろえば結氷が生じ、破壊に至るのかを定量的に明らかにすることが目的であった。

本論文では、日射や夜間放射、降雨や結露といった環境条件と結氷が生じる瓦内部の温度と含水状況を明らかにしたが、瓦の内部で生じ、成長する氷晶により受ける応力と破壊にいたるメカニズムまでは明らかにしていないため、今後は力学的な検討を加えることで、より適切に材料の凍害劣化を予測することが可能となると考えられる。

耐凍結融解性を確認する直接試験については、3つの異なる方法を用いたが、従来のように瓦全体を水中で融解・吸水させる方法よりも、部分的な吸水、結露水の滴下、降雨を模した噴霧等、一様ではない水分の与え方をする方が、より実際に近い劣化が観察されることが示唆された。本論文では性状の確認にとどまっているが、瓦の耐凍害性を適切に評価する試験方法として、今後検討されるべき課題であるといえる。

瓦の透水係数測定においては、飽和を期した実験であっても測定作業中に試料内部に空気が混入し、その空気が透水の妨げとなる可能性があることを示した。装置に取り付けてから十分に時

間を置いてから測定を行ったり、空気が抜けやすい上方に透気抵抗の大きな層を設けない、水分流の向きを逆にするなど、空気の影響を最小限にとどめる工夫が必要である。また、本論文の解析では考慮しなかったが、全面が透気抵抗の高い仕上げ層で覆われている材料などでは、実気象条件下の水分移動においても空気の影響を受けることもあると考えられるため、注意を要する。

本論文では、粘土瓦を対象に劣化性状の調査、熱水分移動特性の測定、数値解析による気象条件下での温度と含水率、含水率分布の推定を行った。

粘土瓦は地域によって原料土や製法などが異なり、表面仕上げ層の色や材質、内部の水分移動係数や吸水率等も異なると考えられる。本研究で述べた一連のアプローチにより、熱と水分に関する材料物性値がわかれば、ある気象条件と建物条件下で瓦の結氷が生じるかどうかを大略推測できる。さらに、その結果を凍害を生じにくい特性をもつ材料の開発へとつなげることができる。

また、本アプローチは、粘土瓦以外の他の多孔質建築材料にも適用可能なものと考えられる。

今後は、降雪や風速・風向などの気象要素、風圧係数や断熱性能等の建物条件を取り入れることで、積雪寒冷地を含む広範な地域と建物・部位への展開が可能となると考えられる。

記号表

a	水分伝導率を与えるパラメータ [-]	N	水分伝導率を与えるパラメータ [-]
A	屋根面の方位角 [rad]	N_a	空気のモル数 [kmol]
a_s	瓦表面の日射吸収率 [-]	P	圧力 [Pa]
A_S	太陽方位角 [rad]	P_o	大気圧 [Pa]
A_w	吸水率 [%]	Φ	空隙率 [-]
C'	透湿係数 [kg/(m ² ・s・Pa)]	$P_{suc}(\psi)$	吸引圧 [Pa]
c	比熱 [J/(kg・K)]	P_v	水蒸気圧 [Pa]
C_{pa}	空気の定圧比熱 [J/(kg・K)]	$P_{vs}(T)$	温度 T [K]における飽和水蒸気圧 [Pa]
d	直径 [m]	Q	熱量 [J]
D_{ew}	水滴付着量 [kg/m ²]	r	半径 [m]
f	大気の水蒸気圧 [mmHg]	R'	透湿抵抗 [(m ² ・s・Pa)/kg]
g	重力加速度 [m/s ²]	R_a	理想気体のガス定数 [(Pa・m ³)/(kmol・K)]
G	Gibbs 自由エネルギー [J/kg]	R_h	水平面降雨量 [mm/s]
G_v	透湿量 [kg/s]	r_k	ケルビン半径 [m]
H	水の相変化熱 [J/kg]	R'_p	透水抵抗 [(m ² ・s・Pa)/kg]
H_{LO}	下側水槽高さ [m]	R_r	屋根面上の雨量 [mm/s]
H_{MP}	メスピペット水位 [m]	R_v	水蒸気のガス定数 (= 461.643) [(Pa・m ³)/(kg・K)]
$hsun$	太陽高度 [rad]	S	エントロピー [J/(kg・K)]
H_{UP}	上側水槽水位 [m]	t	時間 [s]
I	エンタルピー [J/kg]	T	絶対温度 [K]
J_a	大気放射による熱流 [W/m ²]	T_0	自由水の結氷温度 (=273.16) [K]
J_{dn}	法線面直達日射量 [W/m ²]	t_a	吸着層厚さ [m]
J_G	地表面からの放射熱流 [W/m ²]	T_{fr}	結氷温度 [K]
J_h	全天日射量 (水平面) [W/m ²]	U	内部エネルギー [J/kg]
J_r	瓦表面からの放射熱流 [W/m ²]	μ_{fr}	結氷化学ポテンシャル [J/kg]
J_{roof}	屋根面幅 1m あたりの水分流量 [m ³ /ms]	U_r	雨滴の落下終速度 [m/s]
J_{sh}	水平面天空日射量 [W/m ²]	U_w	水平方向の外部風速 [m/s]
J_{solar}	日射による熱流 [W/m ²]	V	体積 [m ³]
J_w	水分流量 [kg/(m ² ・s)]	v	風速 [m/s]
k_0	固有透過度 [m ²]	V_M	水の比容積 [m ³ /kg]
k_{sat}	飽和時の透水係数 [m ² /s]	W	仕事量 [J]
L	厚さ [m]	W_F	水膜厚さ [m]
L_k	試料厚さ [m]	W_f	水膜厚さ [mm]
m	質量 [kg]	x	位置 [m]
M_{jk}	j 相から k 相への相変化量 [kg/(m ³ ・s)]	X	絶対湿度 [kg/kg [']]
M_w	水の分子量 [kg/kmol]	α	総合熱伝達率 [W/(m ² ・K)]

α'	湿気伝達率 [kg/(m ² ·s(kg/kg'))]	θ_w	水と材料の接触角 [rad]
α'_T	温度勾配による湿気伝達率[kg/(m ² ·s·K)]	λ	熱伝導率 [W/(m·K)]
α'_μ	水分化学ポテンシャル勾配による湿気伝達率 [kg/(m ² ·s·(J/kg))]	λ'	湿気伝導率 [kg/(m·s·Pa)]
α_c	対流熱伝達率 [W/(m ² ·K)]	λ'_p	水分伝導率 [kg/(m·s·Pa)]
α'_m	湿気伝達率（水蒸気圧勾配） [kg/(m ² ·s·Pa)]	λ'_T	温度勾配による水分伝導率 [kg/(m·s·K)]
β	雨滴の水平面に対する傾斜角 [rad]	λ'_μ	ポテンシャル勾配による水分伝導率 [kg/(m·s(J/kg))]
γ	表面張力 [N/m]	μ	自由水基準の水分化学ポテンシャル [J/kg]
δ	降雨の方位角と屋根面の方位角の差 [rad]	ρ	密度 [kg/m ³]
ΔP	試料上下圧力差 [Pa]	ρ_G	地表面の日射反射率 [-]
ε	長波長放射率 [-]	ρ_w	水の密度 [kg/m ³]
ϕ	相対湿度 [-]	σ	ステファン・ボルツマン定数(=5.67×10 ⁻⁸) [W/(m ² ·K ⁴)]
η	粘性係数 [Pa s]	ψ	容積基準含水(氷)率 [m ³ /m ³]
θ	屋根面の傾斜角 [rad]		
θ_{ag}	水銀と材料の接触角 [rad]		

添え字

w	水分	g	水蒸気
b	固体実質部	m	瓦
s	表面	G	地面
out	外気側	in	通気層側
sat	飽和	d	乾燥
l	液水	i	氷

本研究に関する発表論文

A. 査読付き論文

1. Chiemi Iba, Shuichi Hokoi : Freezing-Thawing Processes in a Brick Wall in Relatively Warm Area of Japan, Proceedings of the 2nd International Conference on Building Physics, pp.257-266, 2003.9
2. 伊庭千恵美、銚井修一：屋根瓦における結露発生に関する検討、日本建築学会環境系論文集、第74巻、第639号、pp.587-593、2009年5月
3. 伊庭千恵美、和中龍、銚井修一、小椋大輔：仕上げ層をもつ屋根瓦の水分移動特性に関する研究、日本建築学会環境系論文集、第74巻、第640号、pp.693-699、2009年6月
4. Chiemi Iba, Shuichi Hokoi : Measurement of Water Permeability of Roof Tiles and Influence of Entrapped Air, Journal of ASTM International, Vol.6, No.9, paper ID: 001909JAI, 2009.10

B. 国際学会・シンポジウム

1. Shuichi Hokoi, Chiemi Iba : Freezing-Thawing Processes in a Wall Made of Soil in Relatively Warm Area of Japan”, Proceedings of the 3rd International Conference on Cold Climate Heating, Ventilating and Air-Conditioning, pp. 139-144, 2000.11
2. 銚井修一、畑野雅範、伊庭千恵美、松本衛、M.K.Kumaran：建築壁体における凍結・融解過程に関する研究、日本建築学会環境工学委員会、熱環境小委員会 第31回熱シンポジウム「湿気研究の新たな進展」、pp.9-16、2001.10
3. Chiemi Iba, Shuichi Hokoi : Frost Damage of Roof Tiles in Relatively Warm Area in Japan - Condensation on External Surface -, 12th Symposium for Building Physics Proceedings, Vol.1、pp.120-127, 2007.3
4. Chiemi Iba, Shuichi Hokoi : FROST DAMAGE OF ROOF TILES IN RELATIVELY WARM AREA IN JAPAN - Condensation on External Surface -, Proceedings of the 10th International Building Performance Simulation Association Conference and Exhibition, pp.264-268, 2007.9
5. Chiemi Iba, Shuichi Hokoi : FROST DAMAGE OF ROOF TILES IN RELATIVELY WARM AREA IN JAPAN, Proceedings of 6th International Conference of IAQVEC, 2007.11
6. Chiemi Iba, Shuichi Hokoi : Measurement of Water Permeability of Japanese Roof Tiles and Influence of Entrapped Air, Second Symposium on Heat-Air-Moisture Transport: Measurements and Implications in Buildings, 2009.4

C. 学術講演（査読無し）

1. 伊庭千恵美、銚井修一：建築壁体における凍結・融解過程に関する研究 (1)夜間放射が与える影響、日本建築学会大会学術講演梗概集 D- II、pp.275-276、2000
2. 銚井修一、伊庭千恵美：建築壁体における凍結・融解過程に関する研究 (2)雨水が与える影響、日本建築学会大会学術講演梗概集 D- II、pp.277-278、2000
3. 伊庭千恵美、銚井修一、高田暁：建築多孔質材料内における凍結・融解過程に関する研究、日本建築学会大会学術講演梗概集 D- II、pp.337-338、2001
4. 伊庭千恵美、銚井修一、高田暁：レンガにおける凍結実験と解析、日本建築学会大会学術講演梗概集 D- II、pp.343-344、2002

-
5. 伊庭千恵美、銚井修一：温暖地における屋根瓦の凍害に関する研究－外部からの結露の発生頻度について－2004年度空気調和・衛生工学会学術講演会講演論文集、pp.1311-1314、2004
 6. 伊庭千恵美、銚井修一、和中龍：温暖地における屋根瓦の凍結劣化に関する研究 その1 屋根瓦の劣化性状と材料物性、日本建築学会学術講演梗概集 D-II、pp.351-352、2007
 7. 和中龍、銚井修一、伊庭千恵美：温暖地における屋根瓦の凍結劣化に関する研究 その2 劣化促進試験、日本建築学会学術講演梗概集 D-II、pp.353-354、2007
 8. 伊庭千恵美、銚井修一：温暖地における屋根瓦の凍結劣化に関する研究 その3 瓦の透水係数の測定、日本建築学会学術講演梗概集 D-II、pp.303-304、2008
 9. 伊庭千恵美、銚井修一：温暖地における屋根瓦の凍結劣化に関する研究 その4 透水係数測定における空気の影響、日本建築学会学術講演梗概集 D-II、pp.225-226、2009

D. その他

1. 銚井修一、伊庭千恵美：瓦における結露と凍結に関する検討、Roof & Roofing（屋根と屋根材）、No.49, pp. 53-55, 日本屋根経済新聞社、2008.1