

雨掛かりを考慮した外壁通気構法の 水分挙動に関する研究

2022 年度

長村 貞治

目次

第1章 序論

| | | |
|-------|----------------------|---|
| 1.1 | はじめに | 1 |
| 1.2 | 既往の研究 | 2 |
| 1.2.1 | 防露（放湿型結露） | |
| 1.2.2 | 通気層への雨水浸入 | |
| 1.2.3 | 雨水由来の水分による壁内結露事例 | |
| 1.3 | 事例（放湿型結露）に基づく発生原因の推定 | 6 |
| 1.3.1 | 調査事例 | |
| 1.3.2 | 推定した放湿型結露発生メカニズム | |
| 1.4 | 本論文の目的 | 8 |
| 1.5 | 本論文の構成と概要 | 8 |

第2章 雨掛かりによる外皮からの水分影響の検討

| | | |
|-------|--------------------------|----|
| 2.1 | はじめに | 12 |
| 2.2 | サイディング嵌合部からの雨水浸入試験 | 13 |
| 2.2.1 | 実験概要 | |
| 2.2.2 | 風圧力と浸入量・浸入率の関係 | |
| 2.3 | 経年劣化によるサイディング表面からの吸水量の変化 | 21 |
| 2.3.1 | 実験概要 | |
| 2.3.2 | 塗膜劣化による吸水量・吸水速度係数の相違 | |
| 2.4 | サイディングの材料特性 | 24 |
| 2.4.1 | 測定試料の概要 | |
| 2.4.2 | 平衡含水率（デシケーター法） | |
| 2.4.3 | 平衡含水率（遠心法） | |
| 2.4.4 | 水分拡散係数 | |
| 2.4.5 | 仕上げ面を含めた透湿抵抗 | |
| 2.4.6 | 仕上げ面を含めた透水抵抗 | |
| 2.5 | 第2章のまとめ | 49 |

第3章 通気層の排水性能及び、通気特性の検討

| | | |
|-----|----------------|----|
| 3.1 | はじめに | 52 |
| 3.2 | 通気仕様による排水性能の把握 | 53 |

| | | |
|-------|--------------------------|----|
| 3.2.1 | 実験概要 | |
| 3.2.2 | 通気仕様による注水量と滞留量の収支 | |
| 3.2.3 | 通気層内における雨水の流下挙動 | |
| 3.3 | 通気仕様による通気特性の把握 | 57 |
| 3.3.1 | 実験方法、条件及び測定箇所 | |
| 3.3.2 | 試験体仕様 | |
| 3.3.3 | 通気特性の算出方法 | |
| 3.3.4 | 通気層および部位別の通気特性 | |
| 3.3.5 | 通気層内における摩擦抵抗係数とレイノルズ数の関係 | |
| 3.3.6 | 建物高さによる通気層全体の相当開口面積 | |
| 3.4 | 第3章のまとめ | 67 |

第4章 実験棟による壁内水分挙動の実態把握

| | | |
|-------|-------------------------|----|
| 4.1 | はじめに | 70 |
| 4.2 | 壁内水分挙動の実態把握 | 70 |
| 4.2.1 | 実験棟の概要 | |
| 4.2.2 | 相当開口面積による通気量の比較 | |
| 4.2.3 | 放湿型結露時における壁内水分挙動 | |
| 4.2.4 | 放湿型結露による結露水流下の目視調査 | |
| 4.2.5 | 通気層の排水及び排湿性能が壁内湿度に及ぼす影響 | |
| 4.3 | 第4章のまとめ | 86 |

第5章 雨掛かりによる水分を考慮した壁内結露の評価方法

| | | |
|-------|---------------------------------------|-----|
| 5.1 | はじめに | 89 |
| 5.2 | 雨掛かりによる付着水を考慮した水分収支モデルの概要 | 90 |
| 5.3 | 壁面雨量、及び通気層内への浸水量の算出方法 | 92 |
| 5.4 | 外装表面及び通気層内に到達した雨水からの吸水 | 93 |
| 5.5 | 横胴縁に付着する雨水の扱い | 95 |
| 5.5.1 | 横胴縁に付着した雨水の扱いの概要 | |
| 5.5.2 | 横胴縁に滞留する水分の計算方法 | |
| 5.5.3 | 外壁内へ流入する水分の計算方法 | |
| 5.6 | 計算条件 | 101 |
| 5.6.1 | 基本式 | |
| 5.6.2 | 塗膜を介したサイディング基材、及び透湿防水シートを介した合板への湿気伝達率 | |
| 5.6.3 | 計算条件 | |

| | | |
|-------------------------------|------------------------------|-----|
| 5.7 | 異なる通気仕様、及び方位における壁内水分収支の計算結果 | 105 |
| 5.7.1 | 東面の計算結果 | |
| 5.7.2 | 北面の計算結果 | |
| 5.8 | 第5章のまとめ | 130 |
| 第6章 放湿型結露防止に必要な通気仕様の検討 | | |
| 6.1 | はじめに | 133 |
| 6.2 | 雨水由来の水分による放湿型結露防止に必要な通気仕様の検討 | 133 |
| 6.2.1 | 解析概要 | |
| 6.3.2 | 計算結果 | |
| 6.3 | サイディング塗膜の透水及び透湿抵抗が壁内湿度に及ぼす影響 | 144 |
| 6.3.1 | 解析概要 | |
| 6.3.2 | 計算結果 | |
| 6.4 | 第6章のまとめ | 148 |
| 第7章 総括 | | |
| 7.1 | 本論文の総括 | 149 |
| 7.2 | 今後の課題 | 151 |
| | | |
| | 記号表 | 153 |
| | 本研究に関する発表論文 | 155 |

第1章 序論

1.1 はじめに

窯業系サイディング（以下サイディングという）を用いた外壁通気構法は、1次防水層のサイディングと2次防水層となる透湿防水シートの間に通気層を設け、サイディング嵌合部等から浸入した雨水や壁内からの湿気を速やかに排出する構法（図 1-1-1）である。1970年代に住宅の高断熱化が進む北海道を中心に普及が始まったとされ、当時主流のモルタル直張り工法に変わって現在では多くの木造住宅で採用されており、外壁面から躯体内部への漏水や内部結露は激減した。

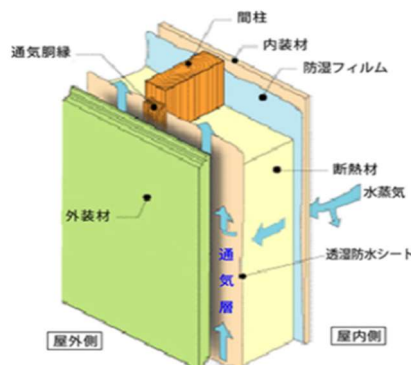


図 1-1-1 サイディングを用いた外壁通気構法の概要[1-1]

しかし、近年、狭小地住宅やデザイン性の高いキューブ型住宅など外装面への雨掛かり負荷の高い軒の出の無い住宅が増加し、外壁内への雨水浸入のリスクが高まっている[1-2]。また、これまでの外壁下地は隙間のある小幅板が用いられるなど、壁内気流により結露が軽減されることが期待されていた。しかし、耐震・施工・省エネルギー性向上のため、壁面と床面に構造用面材を使用するなど住宅の高気密化が推進されることにより、これまでのような壁内気流が見込めなくなった。その結果、壁内に一旦雨水が浸入すると構造体が乾燥しにくく、木材腐朽が生じ易い高湿な環境が形成されやすくなった。このような背景から、外壁内への雨水浸入によるものと推察される壁内結露事例が散見されている。

筆者らの壁内結露の事例調査においては、調査物件にてサイディング表面に紫外線劣化による白亜化が見受けられたことから、雨水浸入の他にサイディング表面塗膜が経年劣化することにより防水性能が低下し、降雨によってサイディング基材表面から吸水された水分の影響も無視し得ないと考えられる。外壁は方位により暴露される熱環境や降雨負荷が大きく異なり、特に日射による温度変動は躯体内に浸入した水分挙動に大きく影響する。

温度変化は建材が保持する水分を放出させる為、水蒸気となって躯体・材料内を移動し低温部分での結露を誘発する恐れがある。これらの状況を勘案すると、雨水に起因した壁体結露は、通気層への雨水浸入や外装材の吸水と温度変動に伴う、熱履歴と水分移動が複合的に影響し生じたものと考えられる。しかしながら、これら雨掛かりによる水分影響が結露誘発を示す湿気性状の検討は見受けられない。

さらに、近年は社会資本である住宅の長寿命化及び、カーボンニュートラルの実現に向け炭素貯蔵効果の高い木造建築の活用領域拡大（中高層建築化など）が求められており、木造住宅の劣化現象解明と対策の提示は、重要な課題と位置付けられている。

そこで、本論文ではサイディングを備えた外壁通気構法を用いた住宅での雨水由来の水分による壁内結露メカニズムを解明し、壁内結露防止に求められる通気性能を明らかにすることを目的としている。

1.2 既往の研究

窯業系サイディングを用いた外壁通気構法の防露性能に関しては、これまで多くの研究がなされている。木造断熱外壁における壁内結露は、大別すると放湿型結露と冬型結露に区分され[1-3]、発生要因により次のように定義されている[1-4]。放湿型結露は、日射等による急激な加熱で吸放湿性がある材料内部に蓄積されていた水分が隣接空間に放出され、この水蒸気が空間内で拡散し、低温箇所では液水が発生する現象である。以前は夏型結露とも呼ばれていたが、本論文では既往研究も含め、このような要因で生じた壁内結露を放湿型結露として扱う。なお、夏型結露は梅雨・夏季の絶対湿度の高い外気が建物内に流入し、低温室や地下室の地盤に面した壁等の建物内における低温部位で発生する結露として定義されている。冬型結露は、外皮が低温となる時期に、室内の空気中に含まれる水蒸気が露点温度以下の部位に触れることで、水蒸気が凝縮し液水が発生する現象である。

近年散見される雨水由来の水分によるものと推察される壁内結露は、放湿型結露に分類されるため、ここでは窯業系サイディングを用いた外壁通気構法の放湿型結露、通気層への雨水浸入、及び壁内結露事例に関する既往研究のレビューを行い、これまでに得られている知見を確認する。

1.2.1 防露(放湿型結露)

外壁通気構法は冬型結露対策として 1970 年代に北海道から普及が始まり、1980 年代から本州に徐々に広がってきた。しかし、季節蒸熱地域となる本州では、防湿シート界面における放湿型結露が指摘され多くの研究が実施されている。

鎌田、林らは(1992)壁体パネルを対象とした数値計算と実験室実験により温暖地における放湿型結露について検討しているが、日射の影響が加味されていない[1-5]。これに対し、須貝、尾崎ら(1993)は試験家屋による屋外測定、人工気候室実験及び、数値計算に

より、通気層厚さ 16.5mm の壁体において構造体に含まれている初期含湿量などの条件によつては放湿型結露の可能性があることを報告している[1-6、1-7]。

齋藤ら（1996-1999）は人工気候室による非定常結露実験及び数値計算により、合板や胴縁などの壁体構成材が主な加湿源となること、及び通気層厚さ 18mmの通気構法は、密閉構法（通気層の無い在来構法）に比べ放湿型結露に対して安全側であることを報告している[1-8、1-9]。田中ら（1999）も数値計算を行い、外壁下地となる構造用合板が主な加湿源となること、及び通気構法においても夏季に結露は生じるものの、通気層によつて結露量を抑えることができることを報告している[1-10]。

日本窯業外装材協会の技術資料（2001）では、通気層内の流束をシミュレーション算定し、2 室型恒温恒湿室試験により通気層の厚さを変化させ、湿気排出性能の定量的評価を実施した。外壁通気層の水分排出機能が最も低下すると考えられる北面壁を主体として評価し、新築時の構造木材と室内からの水分量を考慮した場合、夏期及び梅雨期における通気層の必要厚さは、防湿シートの欠損数により 7～12mm 以上と報告している[1-11]。

石川（2014）は放湿型結露事例を調査し、同物件から採取した外装材を用いて、水流下試験と加熱試験を実施した。外装材に壁面雨量毎時 1mm 相当の水を 10 時間流下させることにより、外装材は 4[kg/m²]の水を吸水すること、並びに流下試験後の外装材表面を繰り返し加熱し残存含水量を計測することにより、1 回の降雨で浸入・保持された雨水はその後の晴天時においても長期間残存し、結露発生水分供給源になることを考察している[1-12]。梅野（2016）は、1[mm/h]以上の降雨が生じた際に、通気層へ浸入した雨水により外装材裏面が飽和すると仮定した数値計算により、通気層が高湿度環境となることを示している[1-13]。

このように、構造体などの建材に含まれている初期水分を考慮した研究については、試験家屋による屋外測定、人工気候室実験及び、数値計算などが報告されている。しかしながら、雨掛かりにより通気層に浸入する雨水やサイディングの吸水量は考慮されていない。これら雨水由来の水分が結露誘発に及ぼす影響については、近年の湿害事例から検討されつつあるが、試験家屋などによる実測事例は無く、雨水由来の水分が結露誘発に及ぼす影響の検討は十分とは言い難い。

雨水由来の水分と湿害に関する国外の研究を俯瞰すると、ブリティッシュ・コロンビア州における木造建築物の湿害調査（1996）によれば、軒の出が少ないほど湿害発生率も高く、雨水との関係性が示されている[1-14]。MEWS Project（2002）ではスタッコ壁、ラップサイディング（樹脂、繊維セメント）などの外装材に対して水密試験を行い構造体への浸水率が報告[1-15]され、Mao ら（2010）は直貼りスタッコ壁と通気層を有した木製サイディングを備えた外壁の乾燥性能を測定したうえで、通気層による蒸発量と構造体への雨水浸入量を数値計算により比較している[1-16]。

Straube ら（2009）は直貼りスタッコ壁の外皮仕様に対して壁面雨量の 0.1～1%が構造体の外側合板又は断熱材内への浸水による合板含水率変動を比較[1-17]している。Theresa

ら（2010）は試験家屋において構造体の中に湿潤シートを設置し、定期的な注水を行い外装材及び防湿層の違いによる下地合板の含水率変動差を確認した。高温多湿な地域であれば、乾燥性能は防湿層が無い方が良好なこと、室内側への蒸気移動は保水性外装の場合に顕著なことを報告[1-18]している。Mcneil（2007）らも構造体の中に湿潤シートを設置し定期的な注水による外装材種類、通気層仕様による乾燥性能の比較を行い、裏面からの吸水性が無い外装材の乾燥性能が早いことを報告[1-19]している。

このように、国外においては雨水由来の水分が結露誘発に及ぼす影響は検討されつつある。しかしながら、検討されている外装材は、国内の主たる外壁通気構法で使用されている窯業系サイディングと排水設計が異なり、ラップサイディング（ビニール、繊維セメント、木材）を用いたレインスクリーン壁[1-20]であるため、雨水浸入箇所は構造体内を対象とした研究が主である。

一方、ASHRAE Standard 160（2009）では外皮の熱水分性状の解析において、壁面雨量の1%の水分が2次防水層に達することを前提にした評価方法が記されている[1-21]。しかし、この浸入率はレンガ積み壁の未発表データに基づいた推定値であり、より適切なデータが不足していることが報告されている[1-22]。

1.2.2 通気層への雨水浸入

通気層への雨水浸入に関して、建築工事標準仕様書・同解説 JASS 27 乾式外壁工事の窯業系サイディング外壁工事[1-23]には「サイディング相じゃくり目地は水密性が低く、シーリング目地は劣化によりひび割れが発生し、雨水が浸入する危険性を有する」と記されている。また、この1次防水層を担う外装システムに求められる性能値に関する基準は無く、同仕様書には防水性能の目標として「サイディング、防水補助材、構造体を組み合わせた状態で水密設計用風圧力に対し、室内への漏水がないものとする」という概念的な表現しかない。ここでは、サイディング嵌合部、及びサッシなどの取り付け部から通気層への雨水浸入に関する研究について記す。

北方建築総合研究所とケイミュー株式会社の調査研究「窯業系外装材のシーリングレス工法化に関する研究」（2011）では、JIS A1414-3（建築用パネルの性能試験）の水密性試験に準じて、下地合板と通気層を備えた試験体に縦張りサイディングを取り付け、嵌合部の止水パッキンの有無及び下地合板の気密度に応じて、サイディング嵌合部からの漏水状況の目視観察を行っている。散水量 $4[\text{L}/\text{min}\cdot\text{m}^2]$ では下地合板の気密度に応じてサイディング内外の圧力差が異なり、圧力差 $25\sim 370\text{Pa}$ にて水漏れが生じたことを報告している[1-24]。国土技術政策総合研究所資料「木造住宅の耐久性向上に関わる建物外皮の構造・仕様とその評価に関する研究」（2017）では、通気層への雨水浸入について、JIS A1414-3（建築用パネルの性能試験）の水密性試験に準じて6種類の横張りサイディング材における嵌合部からの漏水量を測定している。漏水量は散水量 $4[\text{L}/\text{min}\cdot\text{m}^2]$ ・圧力差 150Pa で $0.013\sim 0.188[\text{L}/\text{min}]$ であり、嵌合部からの流れ出しが確認されるとともに、圧力差に応じて漏

水量が増加することを報告している[1-25]。一般に開口上には通気層内に浸入した雨水を排水するための排水路を設けることとされている[1-26]。北野ら（2014）は送風散水試験により、現在流通している窓上の水抜き部材は、部材から通気層への雨水の吹き込みを確認している[1-27]。

また、上記水密試験では評価できない屋根との取り合いなど立体的な部位の評価については、大型送風散水試験装置を用いた評価が行われている。田村ら（2019）は屋根と外壁取り合い部の納りは雨漏れの発生しやすい箇所とし、軒ゼロの破風下端と壁面の取り合い部からの隙間に応じて通気層に浸入する雨水の挙動を目視観察している。散水量 $4[\text{L}/\text{min}\cdot\text{m}^2]$ では 19.5mm の隙間を設けた場合、風速 $10[\text{m}/\text{s}]$ でも通気層に広範囲の濡れが生じたことを報告している[1-28]。

このように、通気層内に浸入する雨水を完全に防止することは困難であり、浸入する水分を前提にした評価が必要であるが、通気層への浸水量を測定した研究は一部しかない。また、多くの試験は防水性能把握を目的としているため、散水条件は $4[\text{L}/\text{min}\cdot\text{m}^2]$ と現実では起こり難い条件で評価を行っている。実環境での浸入条件を把握するためには、風雨の同時性[1-29]を考慮し低散水量かつ低圧力条件で評価することが必要であると考えられる。

1.2.3 雨水由来の水分による壁内結露事例

これまで放湿型結露の結露水量は冬型結露に比べれば微々たるものであり、放湿型結露によって木材の腐朽などが発生したという被害は一つも報告されていないと記されている[1-30]。しかし、近年、以下のような雨水由来の水分によるものと推測されている外壁通気構法の壁内結露事例が報告されている。

梅野ら（2010）は、築4年目で東面における構造体内合板の屋外側で生じた結露事例を報告し、2室型恒温恒湿室試験において再現実験を行い、雨水による通気層の高湿化が原因と推定している[1-31]。石川（2014）は、乾式タイル張り外装構法における壁内の著しい湿潤、躯体と下地木部の早期劣化が多数の住宅で発生した事例を報告し、現場調査と採取した外装部材を用いたモデルによる再現試験の結果、雨掛かりによりサイディングに吸水された雨水を発生源とする放湿型結露と推定している[1-12]。国土技術政策総合研究所資料（2017）では3例報告している[1-25]。1例目は築12年目で東面における外壁下地の水蒸気飽和・構造体腐朽、2例目は築7年目で東面における外壁下地の全面腐朽、3例目は築3年目で南面における外壁下地合板表層のカビを報告している。また、建築系雑誌（2019）では「顕在化する夏型結露トラブル」と題し、1例目として築10年目における南東面、2例目として築10年目における西面それぞれの外壁内における断熱材と室内側の防湿フィルム間で生じた放湿型結露事例が掲載されている[1-32]。

1.3 事例(放湿型結露)に基づく発生原因の推定

前述したように近年、雨水由来の水分によるものと推定される放湿型結露が散見されているものの、これらの水分が結露誘発に及ぼす影響の検討は十分とは言い難い。また、放湿型結露が生じた部位は、断熱層室内側の防湿フィルム表面や外壁下地合板など様々であり、部位により結露発生メカニズムは異なる。発生原因を推定するには、各事例の断面構成、ディテール、状況写真及び建築条件などが必要となるが、詳細までは公開されていない。ここでは、筆者らの壁内結露事例を取り上げ、雨水由来の水分による防湿層界面で生じた壁内結露メカニズムを推定し、本論文で取り組む研究の方向性を示す。

1.3.1 調査事例

図1-3-1、1-3-2は築12年の住宅にて発生した壁内結露事例である。壁内の防湿フィルム層表面に発生した結露水が流下し、枠組み横芯材に滞留した現象が観察され以下に示す性状が確認された。

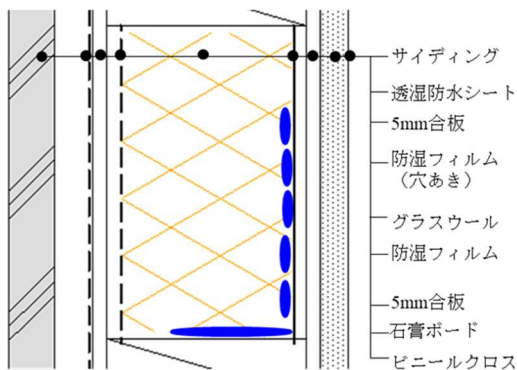


図1-3-1 壁内の結露部位と通気構法の構成

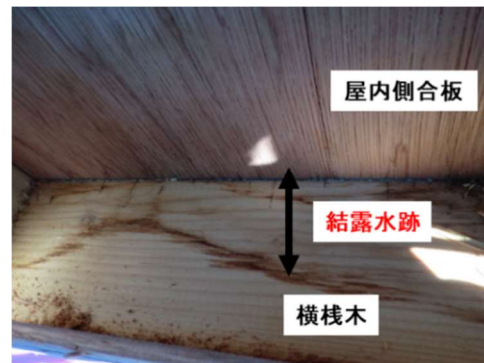


図1-3-2 横椽木に生じた結露水によるものと推察される水跡

- 1) 外装材はサイディングであり、再塗装などのメンテナンスを実施しておらず、サイディング表面に白亜化が見受けられる状態であった。また、サイディングは横張りであり、上下左右にあいじゃくりのある4方サネ形状をしていた。外装材の固定は通気金具を用いていた。
- 2) 通気層は6mmであり、透湿防水シートを留めつけるステーブルの施工間隔は303mm以下など適正な施工であった。また、通気層内が高湿状態であったことからか、ステーブルに錆が見受けられた。
- 3) 外側合板の表裏面には雨染みが無く、雨水が直接構造体内部に浸入した形跡はない。
- 4) 結露の発生箇所は東面や西面の壁内であり、前方に建築物は無く日当たりの良い

立地であった。

1.3.2 推定した放湿型結露発生メカニズム

上記状況から防湿フィルム表面の結露発生メカニズムを以下のように推測した。

- 1) サイディングの4方サネ形状は、あいじゃくりの交点にピンホールが発生するため、一般的な2方サネ形状と比較し通気層への雨水浸入量が多くなる。
- 2) サイディング表面は白亜化しており、外壁塗膜の劣化により防水性能が低下し、雨掛かりによるサイディング表面からの吸水量が新築時より多くなる。
- 3) 外壁基材・通気層内に多くの水分が保持された状態にて、日射が当たると高温高湿となった水蒸気が通気層内に拡散する。通常であれば、通気層の出口から排出されるが、排出されず滞留した水蒸気が外側合板の含水率を上昇させる。
- 4) 外側合板に蓄積された水分が断熱層に浸入し、東面に朝日が当たり始める頃の室内は比較的低温の為、断熱層に浸入した水蒸気が室内側へ移動する。その後、低温の防湿フィルム表面にて結露する。
- 5) 断熱材の含水率も上昇し壁内の水分やフィルム表面の結露水も増加する。その結果、結露水が防湿フィルム表面を流下し枠組み横芯材に滞留する。

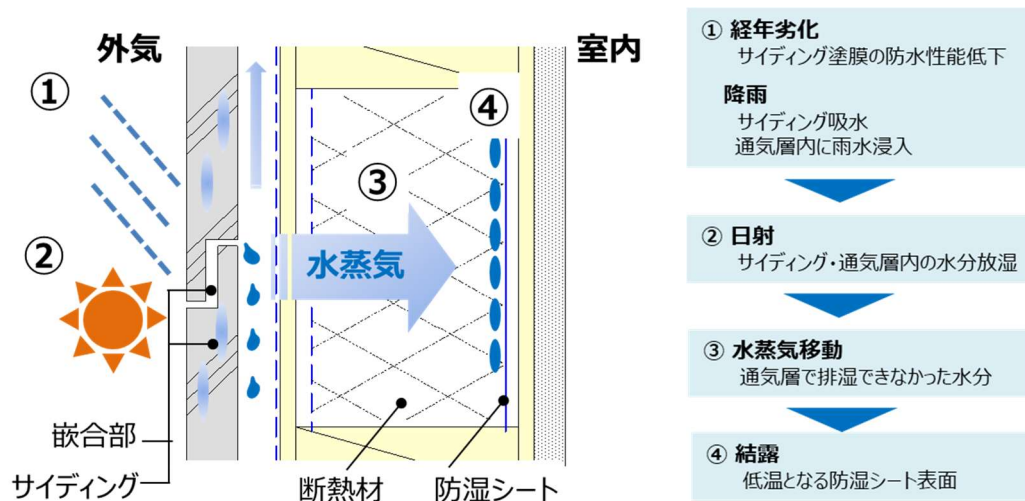


図 1-3-3 推定した放湿型結露発生メカニズム

このような水分供給源を雨水とする放湿型の壁内結露は、工法的な要因である雨水浸入及び通気特性、物性の変化といった材料特性、熱履歴などの環境要因が複合的に影響し生じたものと考えられる。しかしながら、この雨掛かりに起因した放湿型結露の現象は解明されておらず、工法、材料、環境物理の横断的な検討が必要と考えられる。

1.4 本論文の目的

これらの背景から本論文では、雨掛かりによるサイディングから通気層への浸水量を定量化するとともに、サイディングの材料特性、並びに通気層の排水及び通気特性を把握する。そして、調査事例で示した放湿型結露を実験棟において再現したうえで、熱水分移動解析を行うことにより、外壁通気構法を用いた住宅での雨水由来の水分に起因する壁内結露メカニズム解明を目的とする。また、これらの現象を考慮し、雨水由来の水分を起因とした放湿型結露防止に求められる通気層の通気性能を明らかにする。

1.5 本論文の構成と概要

本論文の構成を図 1-5-1 に示す。

第 1 章では、研究の背景、雨水由来の水分による壁内結露の推定原因、既往研究の要点と本研究の目的、論文構成について述べる。

第 2 章では、雨掛かりにより外皮から浸入する水分に着目して、サイディングの防水性能及び吸水特性を検討する。防水性能に関しては、サイディング勘合部から通気層への雨水浸入率を水密試験により定量化する。吸水特性に関しては、調査事例と同仕様の劣化したサイディングを採取し、吸水試験により吸水速度係数を求める。さらに、サイディングの水分に関する物性値を測定する。

第 3 章では、通気層の性能に着目して、異なる通気仕様における通気層の排水性能、及び通気特性を検討する。排水性能に関しては、通気層内への注水試験を行い、注水と排水量の差分から通気層内の滞留率を求める。次に通気特性試験により、異なる通気仕様における通気層全体の相当開口面積、及び通気層を構成する各部位（水切り、通気層、軒天部）の通気特性値を求める。

第 4 章では、雨水由来の水分負荷を与える実験棟を建設し、調査事例で示した壁内結露を再現することにより、放湿型結露時における壁内の温湿度性状を把握する。さらに、異なる通気仕様の壁内水分挙動を比較することにより、通気層の排水及び排湿性能が壁内湿度に及ぼす影響を把握する。

第 5 章では、雨水由来の水分による壁内水分挙動を予測する数値モデルを提案し、実験棟の温湿度測定結果との比較からその再現性を検証する。

第 6 章では、第 5 章で提案した予測モデルを用いて異なる通気仕様・サイディングでの数値解析を行うことにより、雨水由来の水分を起因とした放湿型結露による実害防止に必要な相当開口面積を検討する。

第 7 章では、本論文の総括と今後の課題について述べる。

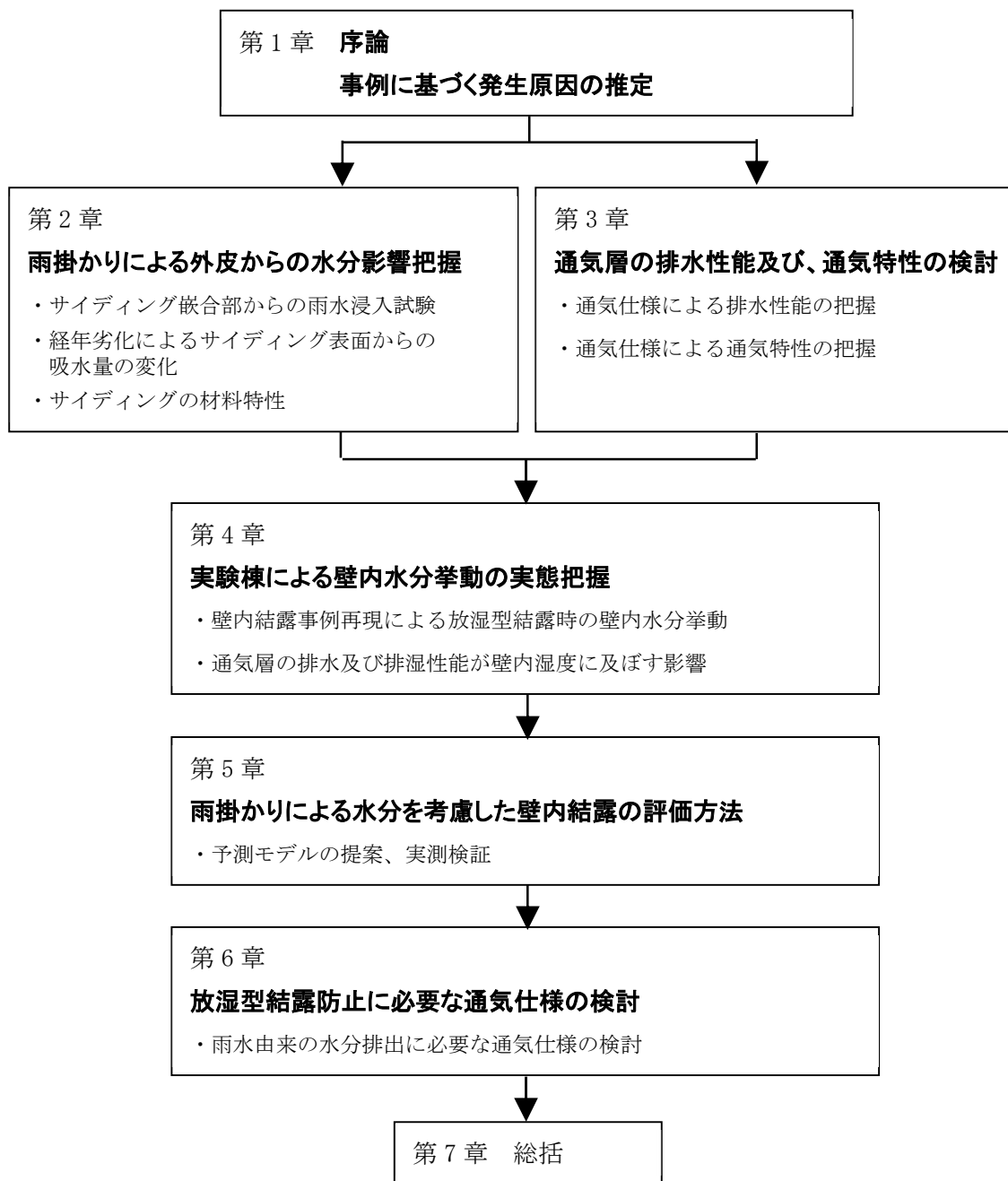


図 1-5-1 本研究の構成

第1章 参考文献

- [1-1] 日本窯業外装材協会 ホームページ：<https://www.nyg.gr.jp/toha/tuukikouhou.html>、2022年調べ
- [1-2] 日本保証機構：防水施工マニュアル（住宅用防水施工技術）2017、技報堂出版株式会社、2017
- [1-3] 最新建築環境工学、株式会社井上書院、2016
- [1-4] 日本家建築学会：建物における湿害の診断と対策に関する規準・同解説、2021.3
- [1-5] 鎌田紀彦、林康治、浅野聡、石渡修：温暖地における断熱壁体の内部結露に関する研究、日本建築学会北海道支部研究報告集、第65号、pp.261-264、1992.3
- [1-6] 渡辺康徳、龍有二、尾崎明仁、藤田協二、渡辺俊行、須貝高、赤司泰義、岩岡重樹：高断熱高气密住宅の夏季壁体内部結露に関する研究 その5、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp.1255-1256、1993.7
- [1-7] 藤田協二、龍有二、尾崎明仁、渡辺康徳、渡辺俊行、須貝高、赤司泰義：高断熱高气密住宅の夏季壁体内部結露に関する研究 その6、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp.1257-1258、1993.7
- [1-8] 齋藤宏昭、土屋高雄：冷房時における夏型壁体内結露に関する研究（その1）、日本建築学会計画系論文集No519、pp.39-45、1999.5
- [1-9] 齋藤宏昭、土屋高雄、黒木勝一：冷房時における夏型壁体内結露に関する研究（その2）、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp.267-268、1996.5
- [1-10] 田中秀弥、池田哲朗：通気工法における壁体内結露性状とその被害についての検討、日本建築学会近畿支部 研究報告書、pp.89-92、1999
- [1-11] 日本窯業外装材協会：住宅の品質・耐久性向上と外壁通気構法 技術資料.Vol.8、2001.6
- [1-12] 石川廣三：壁面の雨がかり性状および湿害発生要因としての雨水浸入の重要性、第44回熱シンポジウム、pp.49-54、2014.10
- [1-13] 梅野徹也：木造住宅の通気層工法外壁における湿害防止のための基礎的研究、京都大学博士論文、2016.3
- [1-14] D.Hazleden.Maibc.Mraic, J.Rousseau :Survey of Building envelope failures in the coastal climate of British Columbia, Report by Morrison-Hershfield for CMHC, Ottawa,1996.11
- [1-15] Baaulieu.P , Bomberg.M.T, Cornick.S.M, Dalgliesh.W.A, Desmarais.G, Djebbar.R, Kumaran.M.K, Lacasse.M.K, Lackey.J.C, Maref.W, Mukhopadhyaya.P, Nofal.M, Nicholls.M, O`Connor.T, Quirt.J, Rousseau.M.Z, Said.M.N, Swinton.M.C, Tariku.F, vanreenen.D :Hygrothermal response of exterior wall systems to climate loading : methodology and interpretation of results for stucco, EIFS, Masonry and siding clad wood-frame walls. Final report from Task 8 of MEWS Project(T8-03),IRC-RR-112.Ottawa,Canada, Institute for Research in Construction, National Research Council Canada,2002
- [1-16] Qian Mao, Paul Fazio, Jiwu Rao :A limit state design(LSD) approach for comparing relative drying performance of wood-frame envelope systems with full-scale lab testing, Building and

- Environment,2010.8
- [1-17] John Straube, Graham Finch, Ventilated wall claddings: Review, Field performance, and hygrothermal modeling, Research Report-0907, Building Science Press, 2009
- [1-18] Theresa A. Weston, Liza C. Minnich, Jonathan Smegal, Jennifer Van Mullekom, Chis Schumacher, Jessica S. Conlon :Evaluation of cladding and water-resistive barrier performance in hot-humid climates using a real-weather, real-time test facility, Buildings XI, 2010
- [1-19] Stephen Mcneil, Mark Bassett, Moisture recovery rates for walls in temperate climates, 11th Canadian Conference on Buildings Science and Technology Banff, Alberta, 2007
- [1-20] 財団法人 建築環境・省エネルギー機構：建物外皮における結露防止のためのガイドライン 第6 回日加住宅 R&D ワークショップ公表初版、2003. 5
- [1-21] ASHRAE:Criteria for Moisture-Control Design Analysis in Buildings, AHRAE Standard 160-2009, 2009
- [1-22] Anton Tenwolde, ASHRAE Standard 160P - Criteria for Moisture Control Design Analysis in Buildings, ASHRAE Transaction, Vol.114, Part1, pp 167-169, 2008
- [1-23] 建築工事標準仕様書・同開設 JASS 27 乾式外壁工事の窯業系サイディング外壁工事
- [1-24] 地方独立行政法人北海道立総合研究機構 北方建築総合研究所、ケイミュー(株)：窯業系外装材のシーリングレス工法化に関する研究、2011. 3
- [1-25] 国土交通省 国土技術政策総合研究所：共同研究成果報告書 木造住宅の耐久性向上に関わる建物外皮の構造・仕様とその評価に関する研究、2017. 6
- [1-26] 日本窯業外装材協会：窯業系サイディングと標準施工、2004. 12
- [1-27] 北野公一、石川廣三、森田育男、宮村雅史：木造住宅の耐久性向上に関わる建物外皮の構造・仕様とその評価に関する研究 外壁開口上部目地の水処理構造の提案、日本建築学会大会学術講演梗概集、材料施工、pp. 777-778、2014. 7
- [1-28] 田村公彦、石川廣三、松本知大、松本智史、牧田均、根元央希、木村雄太、楠木義正：大型送風散水装置を用いた屋根と外壁の取り合い部における浸入雨水の挙動の検討（その4 屋根と外壁取り合い部の隙間からの雨水浸入性状）、日本建築学会大会学術講演梗概集、材料施工、pp. 987-988、2019. 7
- [1-29] 日本建築学会編：建築設計資料集成1 環境 風を伴う雨の頻度、丸善、1978
- [1-30] 財団法人建築環境・省エネルギー機構：建物外皮における結露防水のためのガイドライン、2003. 5
- [1-31] 梅野徹也、銚井修一：木造住宅の壁体内通気層における湿害に関する検討、第40 回熱シンポジウム、pp. 119-126、2010. 10
- [1-32] 日経 BP：日経ホームビルダー2019 年7 月号、pp. 24-29、2019. 6

第2章 雨掛かりによる外皮からの水分影響の検討

2.1 はじめに

サイディングを用いた外壁通気構法は、1次防水層のサイディングと2次防水層となる透湿防水シートの間に通気層を設け、サイディング嵌合部等から浸入した雨水や壁内からの湿気を速やかに排出する構法である。

サイディング嵌合部の水密性能に対して、建築工事標準仕様書・同解説 JASS 27 乾式外壁工事の窯業系サイディング外壁工事[2-1]には「サイディング相じゃくり目地は水密性が低く、雨水が浸入する危険性を有する」と記されている。また、この1次防水層を担う外装システムに求められる性能値に関する基準は無く、同仕様書には防水性能の目標として「サイディング、防水補助材、構造材を組み合わせた状態で水密設計用風圧力に対し、室内への漏水がないものとする」という概念的な表現しか無い。

サイディング嵌合部からの雨水浸入に関して、北方建築総合研究所[2-2]及び国土技術政策総合研究所[2-3]の調査研究では、JIS A1414-3（建築用パネルの性能試験）の水密性試験により通気層に浸入する雨水の漏水状況、及び漏水量が報告されている。しかしながら、散水条件は $4[L/min \cdot m^2]$ と現実では起こり難い条件で評価を行っている。実環境での浸入条件を把握するためには、風雨の同時性[2-4]を考慮し低散水量かつ低圧力条件で評価することが必要であると考えられる。

また、サイディングには防水のため、通常その表面に塗膜が施されており、この塗膜の透水抵抗によって雨水の透過を防止している。したがってサイディングの含水率挙動に対して塗膜は重要な役割を持っており[2-5]、JIS A5422（窯業系サイディング）では、サイディング表面を対象とした透水抵抗試験が規定されている。これらのことを勘案すると、第1章で示した筆者の調査事例では、塗膜の経年劣化を示す白亜化が見受けられたことから、塗膜の防水性能低下により降雨時にサイディングに蓄積された水分が、放湿型結露に影響を及ぼしたことが考えられる。

第2章では、雨掛かりによる外皮からの水分影響に着目して、2.2節ではサイディング嵌合部からの雨水浸入率を低散水量かつ低圧力条件下で定量化し、2.3節では経年劣化によるサイディング表面からの吸水量の変化を把握する。さらに、2.4節では、サイディングの水分に関する物性値の測定を行う。

2.2 サイディング嵌合部からの雨水浸入試験

サイディング接合部から通気層への雨水浸入経路について検討する。瑕疵担保履行法施行後の2009年から6年間における事故物件をみると95.1%が雨漏りであり、雨水浸入部位のワースト1位が外壁開口部である[2-6]。このことから、通気層内への雨水浸入経路としては、あいじゃくりに当たった雨水が勘合部の防水材(ホットメルト)を乗り越えられず、サネ表面を流れサッシなどの建具と干渉する部位から浸入することが考えられる。そこで本節では、代表的なサイディングを用いた外装システムに対し、JISA1517圧力箱方式による建具の水密性試験[2-7]を行い、このような建具周りや、あいじゃくりから通気層内への浸入量を測定した。

2.2.1 実験の概要と条件

(1) 実験概要

雨水浸入経路について、強風時は図2-2-1の①に示すように、あいじゃくり部から防水材を乗り越え通気層に浸入すると想定される。弱風時は同図②のように、雨水はあいじゃくりを乗り越えられず、サネ表面を横走りしサッシなどの建具と干渉する部位に施工されるシーリングとの取り合い部から浸入する。外壁面で想定される雨水浸入部位は図2-2-2となり、このような部位からの浸入水は通気層を流下し、サッシ上部に集積されやすいことが考えられる。

本試験では、図2-2-1に示す部位からの雨水浸入量を測定する為、あいじゃくりとサッシ上部との取り合い部に発生するシーリング納まりを想定し、通気層内への浸入水を受水升に集積し測定した(図2-2-3)。なお、シーリング周りに必要なハットジョイナーの高さ寸法については製造会社指定の値とした。実験装置の概要を図2-2-4に示す。

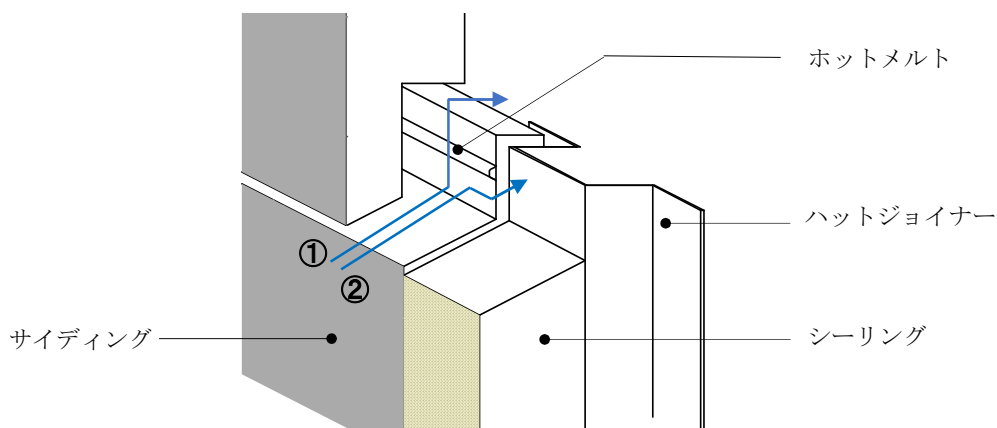


図2-2-1 サネ嵌合部からの雨水浸入経路

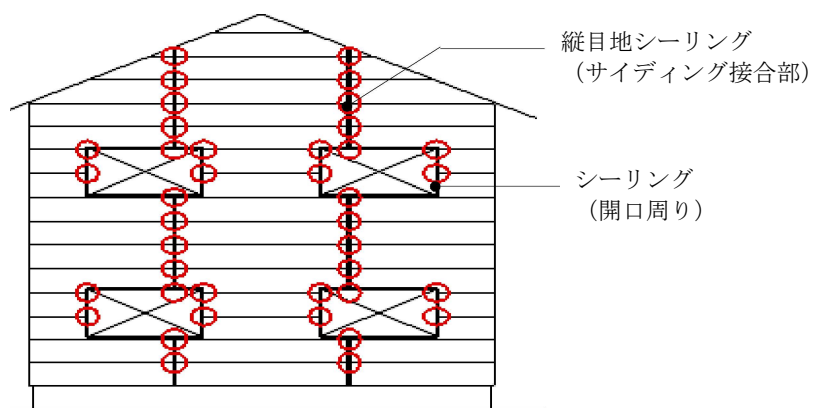


図 2-2-2 横張り 2 方サネにおけるサネ嵌合部からの想定される雨水浸入部位 (○部)

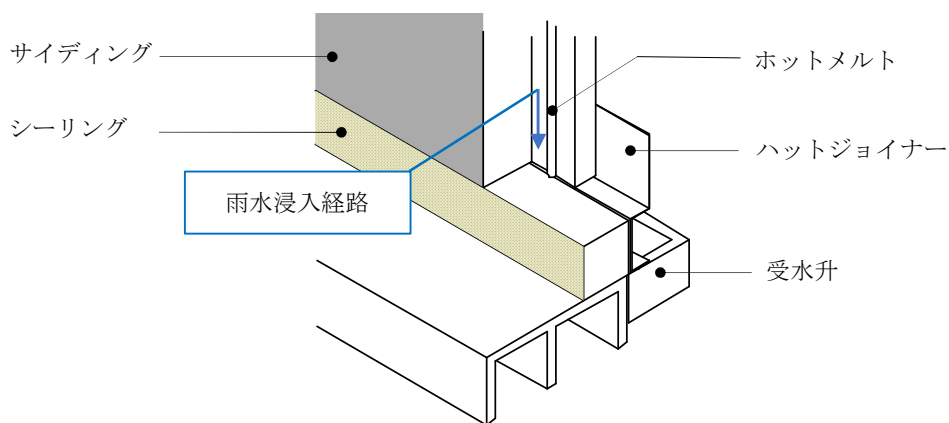


図 2-2-3 試験体下端の納り

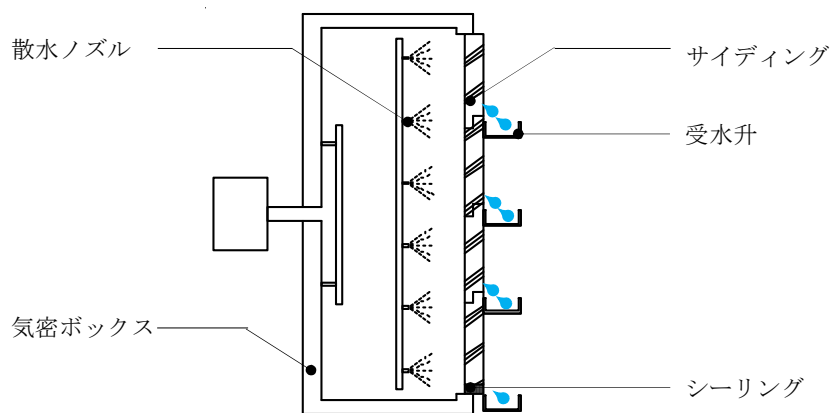


図 2-2-4 試験方法の概要

(2) 実験条件

一般的な水密試験では、JIS A4706 サッシの水密等級[2-8]に従い高圧力(150~350Pa)、高水量(4ℓ/min・㎡)の負荷で実施することが多いが、実際の住宅では、このような条件の発生頻度は低い[2-9]。現実に発生し得る風雨条件下での浸入量の把握を目的に、本試験では低圧力かつ低水量にて実施した。圧力条件・散水量を表 2-2-1 に示す。圧力条件は脈動圧とせず、静圧とした。また、散水量は散水ノズルへの給水量ではなく、予め試験体に掛る水量を事前に測定し調整した。^{注1)}

試験体はサイディング工法による差を確認するため、表 2-2-2 に示す勘合部の仕様が異なる 4 工法とした。試験体概要を図 2-2-5~2-2-7 に示す。試験体中央にサイディング横方向の継手を配置し、最下端にサッシ上を想定した横方向のシーリング納まりを再現し、通気層への浸入量を図 2-2-4 に示す受水升にて測定した。

散水試験では通気層内への雨水浸入状態を目視観察し、浸入量を測定した。なお、浸入量と浸入率は次式より求めた。

$$J_p = \frac{m_w}{t} \quad (2.2.1)$$

$$f = \frac{J_p}{R_w} \times 100 \quad (2.2.2)$$

J_p : 浸入量[g/s] m_w : 計測された総浸入量[g]
 t : 散水時間[s] f : 浸入率[%] R_w : 散水量[g/s]

表 2-2-1 水密試験条件

| 差圧[Pa] | 0 | 15 | 100 | 150 | 250 |
|---------------|----------------|-----|--------|--------|--------|
| (風速[m/s]) | (0) | (5) | (12.9) | (15.8) | (20.4) |
| 散水量[ℓ/min・㎡] | 0.2、0.5、0.8 | | | | |
| (壁面降水量[mm/h]) | (13)、(30)、(50) | | | | |
| 散水時間[min] | 11 | | | | |
| 加圧条件 | 静圧 | | | | |

表 2-2-2 試験体の概要

| 仕様 | 張り方向 | サネ嵌合 | 固定方法 |
|----|------|------------|-----------|
| A | 横張り | 2方サネ(上下方向) | 金具 |
| B | 縦張り | 2方サネ(左右方向) | 金具 |
| C | 横張り | 4方サネ | 金具+振れ止め金具 |
| D | 横張り | 4方サネ | 金具 |

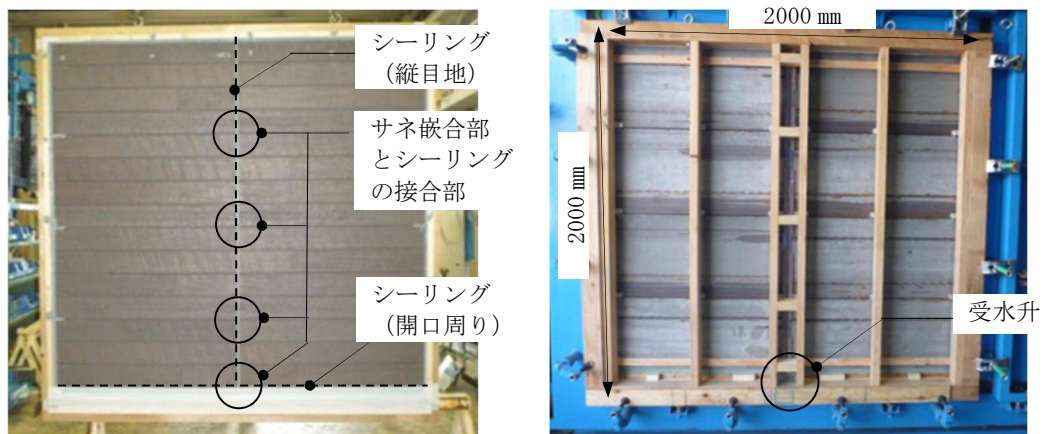


図 2-2-5 仕様 A 試験体の概要 (左図：仕上げ面外観、右図：裏面外観)

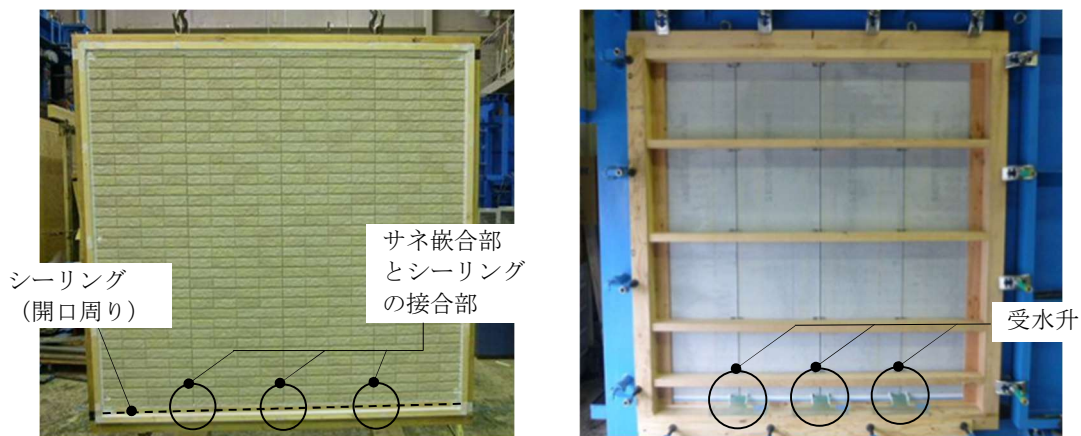


図 2-2-6 仕様 B 試験体の概要 (左図：仕上げ面外観、右図：裏面外観)

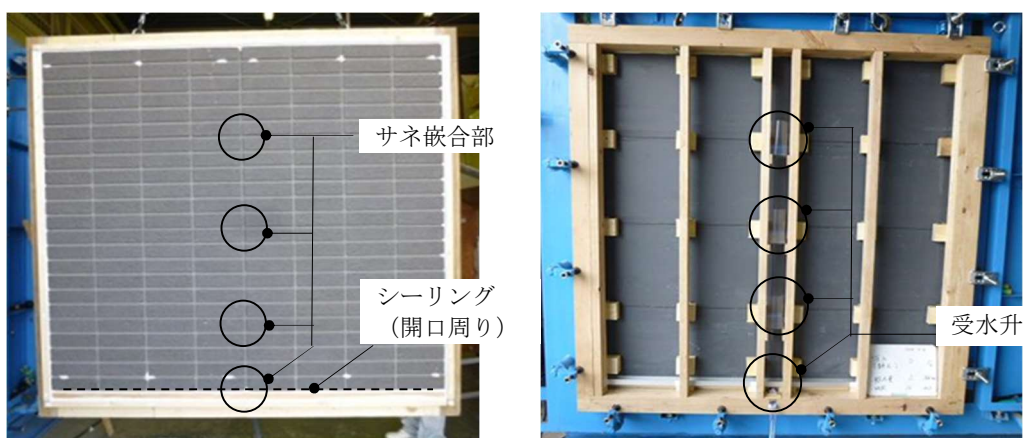


図 2-2-7 仕様 C・D 試験体の概要 (左図：仕上げ面外観、右図：裏面外観)

2.2.2 風圧力と浸入量・浸入率の関係

実験結果を表 2-2-3、2-2-4、及び図 2-2-10、2-2-11 に示す。サイディング工法により雨水浸入量・浸入率に差が見受けられる。

仕様 A は風速 15.8m/s (圧力差 150Pa) 以下の雨水浸入が観察された条件では、図 2-2-1 ②に示した経路であるサネ表面を横走りした雨水が縦目地のシーリング部に伝わり、通気層への流れ出しが生じ受水升に雨水が集積された。さらに強風の 20.4m/s (250Pa) 時には、浸入量が大幅に増加した。これは、図 2-2-1 ①に示した、あいじゃくりの防水材を乗り越えサイディング裏面全体から流れ出しが生じたことによるものである (図 2-2-8)。

仕様 B についても同様にサネ表面を流れ落ちた雨水が横目地のシーリング部に集積し、サネ・シーリング・ハットジョイナーの取り合い部から通気層内へ流れ出した (図 2-2-9)。仕様 A に比べ浸入水が少ない傾向にあるのは、あいじゃくりが縦方向のため、あいじゃくり部に滞留する雨水が仕様 A より少ないことや、浸入部であるサネ・シーリング・ハットジョイナーの接点が少ないことによるものと推察される。

仕様 C については、風速 12.9m/s (圧力差 100Pa) までは上記同様にサネ表面を横走り・流れ落ちた雨水 (図 2-2-10) が横目地のシーリング部からの流れ出しが生じた。15.8m/s 以降においては、あいじゃくり交点に発生するピンホール (図 2-2-10○部) からの吹き出しが確認された。

仕様 D については、等圧状態においても横目地シーリングとの取り合いから継続的な流れ出しが発生し、浸入率が約 5~11%と多くの浸入が確認された (図 2-2-11)。仕様 C には、サイディングのずれ防止用に振れ止め金具が取り付けられており、この振れ止め金具があいじゃくり交点に設置される為、ピンホールの面積を狭めサネ表面から流れ落ちる雨水浸入を抑制したものと考えられる。

浸入量と浸入率については、同じ圧力条件であれば散水量の増加とともに、浸入量も増加したが、浸入率は低下する傾向であった (図 2-2-12、2-2-13)。また、通気層への雨水浸入状態については、浸入量が 1g であった仕様 C の条件 (散水量: 0.2L/min・m²、圧力: 0Pa) を除き、試験開始直後から雨水浸入が生じ、定常的な浸入状態が観察された。

第 1 章の図 1-3-1 に示した結露事例が発生した物件は、仕様 D であり、降雨時における継続的な雨水浸入が影響した可能性は十分に考えられる。

また、サッシ周囲の漏水事例が多い[2-6]のは、このように通気層内へ浸入する雨水の多くが、あいじゃくりを乗り越える浸入ではなく、サネ表面を横流れしサッシなどのシーリング周囲から浸入、集積されることが原因の一つと推察される。さらに、サイディングは築後に硬化収縮するため[2-11]、経年劣化によりあいじゃくりに開きが生じ、雨水浸入量増加に至った可能性が考えられる。



図 2-2-8 仕様A サイディング裏面全体の流れ出しの状況 (圧力差: 250Pa)

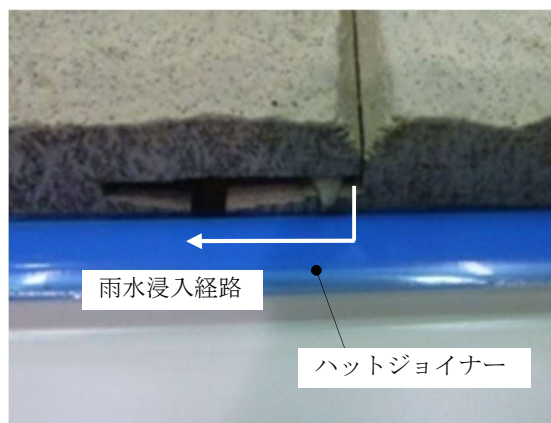


図 2-2-9 2方サネの浸入経路



図 2-2-10 4方サネの浸入経路



図 2-2-11 仕様D あいじゃくり交点からの流れ出しの状況 (圧力差: 0Pa)

表 2-2-3 雨水浸入試験結果(仕様 A、B)

| 散水量 [l/min・m ²] | 圧力差 [Pa] | 風速 [m/s] | 仕様 A | | | | 仕様 B | | | |
|--------------------------------|-------------|-------------|------|---------|-------|------|------|---------|------|------|
| | | | m[g] | Jn[g/s] | f[%] | 浸水状況 | m[g] | Jn[g/s] | f[%] | 浸水状況 |
| 0.2 | 0 | 0 | 0 | 0.00 | 0.00 | 浸水無し | 0 | 0.00 | 0.00 | 浸水無し |
| | 15 | 5 | 0 | 0.00 | 0.00 | 浸水無し | 0 | 0.00 | 0.00 | 浸水無し |
| | 100 | 12.9 | 0 | 0.00 | 0.00 | 浸水無し | 6 | 0.01 | 0.08 | 流れ出し |
| | 150 | 15.8 | 0 | 0.00 | 0.00 | 浸水無し | 23 | 0.03 | 0.34 | 流れ出し |
| | 250 | 20.4 | 2245 | 3.40 | 32.22 | 流れ出し | 11 | 0.02 | 0.15 | 流れ出し |
| 0.5 | 0 | 0 | 0 | 0.00 | 0.00 | 浸水無し | 8 | 0.01 | 0.04 | 流れ出し |
| | 15 | 5 | 0 | 0.00 | 0.00 | 浸水無し | 20 | 0.03 | 0.12 | 流れ出し |
| | 100 | 12.9 | 26 | 0.04 | 0.15 | 流れ出し | 96 | 0.15 | 0.55 | 流れ出し |
| | 150 | 15.8 | 29 | 0.04 | 0.20 | 流れ出し | 75 | 0.11 | 0.43 | 流れ出し |
| | 250 | 20.4 | 4805 | 7.28 | 27.67 | 流れ出し | 36 | 0.05 | 0.21 | 流れ出し |
| 0.8 | 0 | 0 | 7 | 0.01 | 0.02 | 流れ出し | 13 | 0.02 | 0.05 | 流れ出し |
| | 15 | 5 | 12 | 0.02 | 0.04 | 流れ出し | 42 | 0.06 | 0.15 | 流れ出し |
| | 100 | 12.9 | 27 | 0.04 | 0.09 | 流れ出し | 165 | 0.25 | 0.57 | 流れ出し |
| | 150 | 15.8 | 46 | 0.07 | 0.20 | 流れ出し | 183 | 0.28 | 0.63 | 流れ出し |
| | 250 | 20.4 | 4859 | 7.36 | 16.83 | 流れ出し | 106 | 0.16 | 0.37 | 流れ出し |

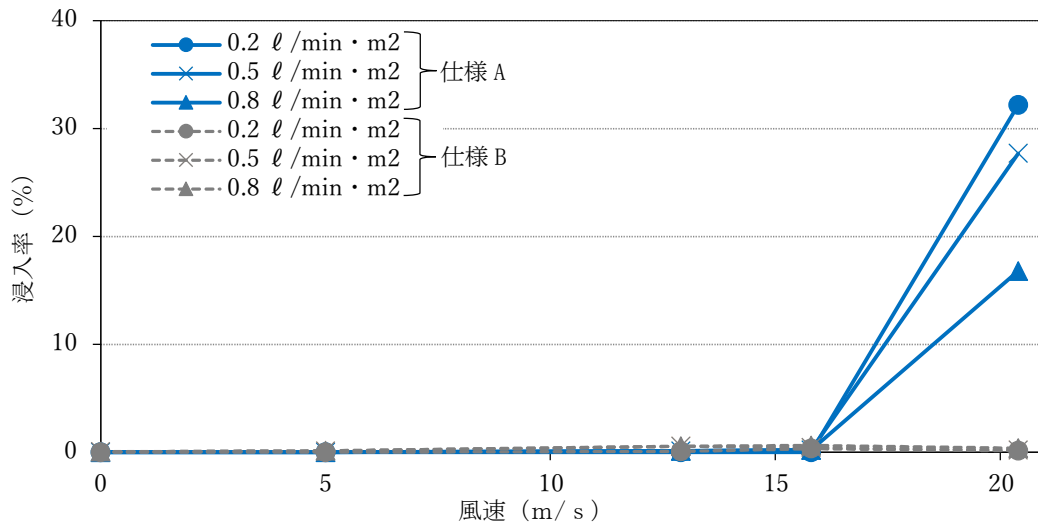


図 2-2-12 風速と浸水率の関係 (仕様 A、B)

表 2-2-4 雨水浸入試験結果(仕様 C、D)

| 散水量 [$\ell/\text{min} \cdot \text{m}^2$] | 圧力差 [Pa] | 風速 風速 [m/s] | 仕様 C | | | | | | 仕様 D | | | | | |
|---|-------------|-------------------|------|-----|------|-------------|----------|------|------|-----|------|-------------|----------|------|
| | | | m[g] | | | Jp [g/s] | f [%] | 浸水状況 | m[g] | | | Jp [g/s] | f [%] | 浸水状況 |
| | | | 下端 | 中央 | 合計 | | | | 下端 | 中央 | 合計 | | | |
| 0.2 | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0.00 | 0.02 | 流れ出し | 788 | 0 | 788 | 1.19 | 11.31 | 流れ出し |
| | 15 | 5 | 8 | 0 | 8 | 0.01 | 0.11 | 流れ出し | 812 | 0 | 812 | 1.23 | 11.65 | 流れ出し |
| | 100 | 12.9 | 888 | 0 | 888 | 1.35 | 12.74 | 流れ出し | 1172 | 5 | 1177 | 1.78 | 16.90 | 飛沫出し |
| | 150 | 15.8 | 1095 | 127 | 1222 | 1.85 | 17.54 | 飛沫出し | 1420 | 77 | 1497 | 2.27 | 21.49 | 飛沫出し |
| | 250 | 20.4 | 1385 | 228 | 1612 | 2.44 | 23.14 | 飛沫出し | 2047 | 21 | 2068 | 3.13 | 29.69 | 飛沫出し |
| 0.5 | 0 | 0 | 129 | 0 | 129 | 0.20 | 0.74 | 流れ出し | 1200 | 0 | 1200 | 1.82 | 6.91 | 流れ出し |
| | 15 | 5 | 222 | 0 | 222 | 0.34 | 1.28 | 流れ出し | 1408 | 0 | 1408 | 2.13 | 8.11 | 流れ出し |
| | 100 | 12.9 | 798 | 0 | 798 | 1.21 | 4.59 | 流れ出し | 1939 | 1 | 1941 | 2.94 | 11.18 | 飛沫出し |
| | 150 | 15.8 | 885 | 44 | 928 | 1.41 | 5.35 | 飛沫出し | 2397 | 74 | 2472 | 3.74 | 14.23 | 飛沫出し |
| | 250 | 20.4 | 2754 | 410 | 3164 | 4.79 | 18.22 | 飛沫出し | 2595 | 772 | 3368 | 5.10 | 19.39 | 飛沫出し |
| 0.8 | 0 | 0 | 6 | 0 | 6 | 0.01 | 0.02 | 流れ出し | 1385 | 0 | 1385 | 2.10 | 4.80 | 流れ出し |
| | 15 | 5 | 106 | 0 | 106 | 0.16 | 0.37 | 流れ出し | 1594 | 0 | 1594 | 2.42 | 5.52 | 流れ出し |
| | 100 | 12.9 | 911 | 1 | 912 | 1.38 | 3.16 | 流れ出し | 1922 | 275 | 2197 | 3.33 | 7.61 | 飛沫出し |
| | 150 | 15.8 | 1353 | 163 | 1516 | 2.30 | 5.25 | 飛沫出し | 2250 | 831 | 3082 | 4.67 | 10.67 | 飛沫出し |
| | 250 | 20.4 | 2880 | 759 | 3639 | 5.51 | 12.60 | 飛沫出し | 3401 | 928 | 4329 | 6.56 | 14.99 | 飛沫出し |

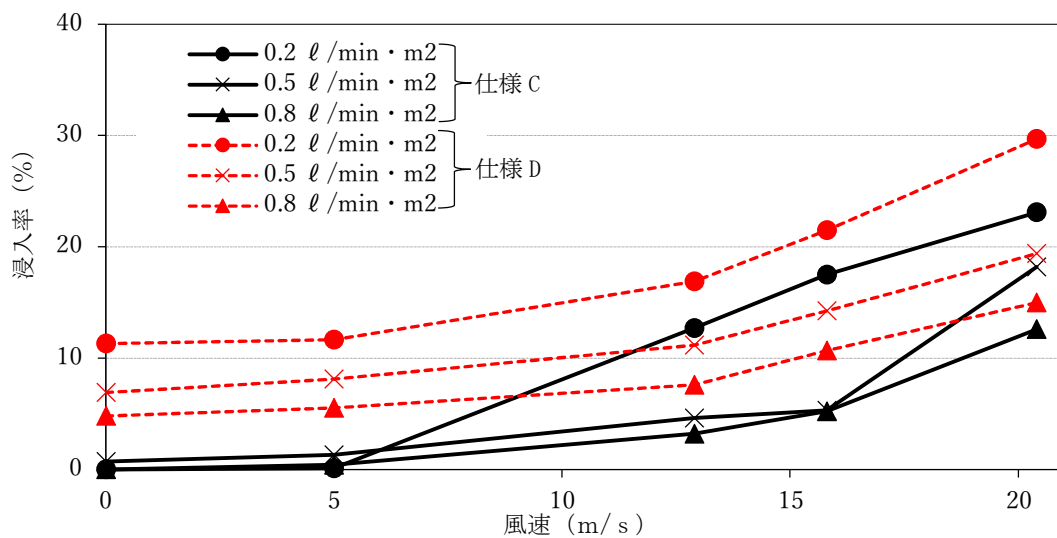


図 2-2-13 風速と浸水率の関係 (仕様 C、D)

2.3 経年劣化によるサイディング表面からの吸水量の変化

一般に外壁表面に白亜化が生じた段階では、基材の保護（防水）機能が低下していることから塗り替えを実施する目安と考えられている[2-12]。第1章の調査事例では、紫外線劣化によりサイディング表面に白亜化が見受けられ、前節での雨水浸入による影響の他にサイディング表面から吸水される水分が壁内湿度に影響を及ぼすことが考えられる。そこで、本節では、塗膜劣化度が異なるサイディングの吸水量を測定した。

2.3.1 実験概要

金澤ら[2-13]は雨水浸入時を想定したサイディング裏面・小口の吸水試験を行っているが、表面に関しては新品時の塗膜保護により吸水が少ないことから測定は実施していない。しかし、塗膜の紫外線劣化によりサイディングが吸水し壁体内の水分蓄積に影響を与えることが考えられることから、本節では、調査事例（図 1-3-1）の12年暴露を経た白亜化が生じているサイディングを採取し、サイディング表面の吸水量を確認した。また、塗膜劣化による吸水性能の違いを確認する為、同物件から最も紫外線劣化の影響が少ないと考えられる、北面の軒下直下に施工された白亜化が生じていないサイディングを用いた。試験を実施した試験片を表 2-2-5 に示す。

試験片は各種サイディングを 100mm×100mm に加工後、23℃・50%RH の恒温恒湿器で 2 週間養生し気乾状態とした。小口面はシーリング処置を施し、試験片数は各種 3 体とした。この試験片を JIS A1414-3 建築用パネルの性能試験方法（第 3 部：温湿度・水分に対する試験）を参考に図 2-2-12 に示す方法にて、吸水面から 10mm 浸漬させ吸水量を測定した。

表 2-2-5 試験体の仕様一覧

| 仕様 | 組成 | 製造方法 | 暴露期間 [年] | 厚み [mm] | 採取方位 | 外観 |
|----|-----------|------|-------------|------------|------|-----|
| A | 繊維補強セメント板 | 抄造法 | 12 | 12 | 西面 | 白亜化 |
| B | | | | | 北面 | - |

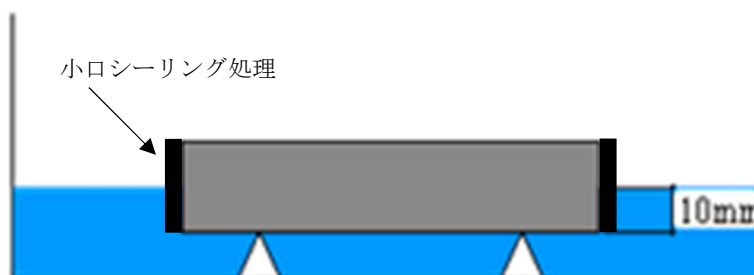


図 2-2-12 試験体の浸漬方法

吸水時間は 30 分、1 時間、2 時間、4 時間、8 時間、24 時間、48 時間とし、単位面積あたりの吸水量を(2.3.1)式にて求めた。多孔質材料の一面からの継続的吸水に関しては、吸水量 q と吸水時間 t の平方根が線形関係とみなせる時、(2.3.2)式にて表すことができる。ここで近似直線回帰式の比例定数を吸水速度係数 a として読み取った。

$$q = \frac{m_h - m_1}{A} \quad (2.3.1)$$

q : 単位吸水面積あたりの吸水量[kg/m^2]

m_h : h 時間吸水後の試験体質量 [kg]

m_1 : 浸漬前の試験体質量 [kg]、 A : 吸水面積 [m^2]

$$q = a\sqrt{t} \quad (2.3.2)$$

a : 吸水速度係数[$\text{kg}/\text{m}^2 \cdot \text{s}^{0.5}$]

2.3.2 塗膜劣化による吸水量・吸水速度係数の相違

試験結果を表 2-2-6、図 2-2-13 に示す。白亜化の生じている仕様 A の吸水速度係数は $0.021 [\text{kg}/\text{m}^2 \cdot \text{s}^{0.5}]$ と、白亜化の生じていない仕様 B と比較し 7 倍となった。特に浸漬後 1 時間にて約 $1.0 \text{ kg}/\text{m}^2$ 吸水し、仕様 B の約 17 倍の吸水量となった。これは壁面雨量 $10\text{mm}/\text{h}$ の雨量を吸水することとなり、降雨のたびに多くの水分をサイディング表面から吸水している事が考えられる。また、最大 $4 \text{ kg}/\text{m}^2$ 超の水分を吸水した。以上のことから、塗膜の経年劣化による基材保護機能低下が吸水量を増加させる事が確認された。

また、近年、長寿命となる製品が流通しつつあるが、一般的な塗装仕様(アクリル樹脂系)では、5~10 年程度で白亜化が生じるとされていることから[2-12]、このような築後数年で生じる吸水量増加の影響を考慮する必要があると考えられる。

表 2-2-6 経過時間毎の吸水量[kg/m^2]と吸水速度係数

| 仕様 | 吸水時間[$\sqrt{\text{s}}$] | | | | | | | | 吸水速度係数 [$\text{kg}/\text{m}^2 \cdot \text{s}^{0.5}$] |
|----|---------------------------|------|------|------|------|------|------|------|---|
| | 0 | 42 | 60 | 85 | 120 | 170 | 294 | 416 | |
| A | 0 | 0.62 | 1.01 | 1.67 | 2.65 | 3.84 | 4.10 | 4.20 | 0.021 |
| B | 0 | 0.06 | 0.06 | 0.11 | 0.17 | 0.30 | 0.82 | 1.28 | 0.003 |

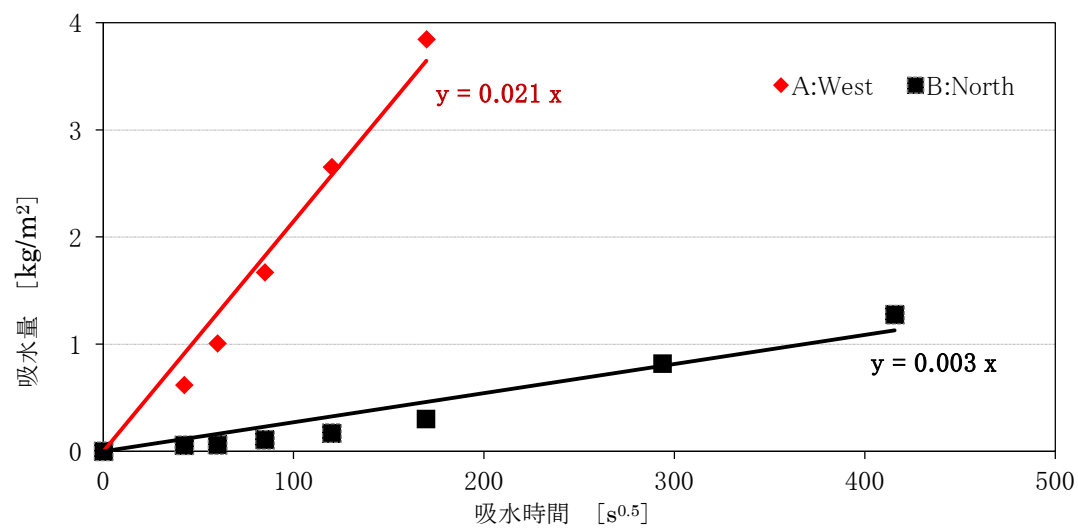


図 2-2-13 吸水量の時間変化

2.4 サイディングの材料特性

木造住宅外皮の防水設計・施工指針および防水設計・施工要領（案）[2-14]では、サイディング 1 m²あたりの 24 時間吸水量の概算値は 0.9~6.2[kg/m²]であり、雨掛かりによるサイディングの吸水による内部結露対策の一つの方法として吸水性が低い材質・部材を選定することが記されている。国外では試験家屋による注水実験から Theresa らは室内側への蒸気移動は保水性外装の場合では顕著であること、Mcneil らは裏面からの吸水性が無い外装材は乾燥性能が早いことを報告している[2-15、2-16]。

一方、サイディングの耐久性評価において、材の含水率は各種性能・物性試験や促進試験に少なからず影響を与えることが懸念されることから、材料により吸水・乾燥特性が大きく異なることが報告[2-17]されている。

そこで本節では、調査事例で示したサイディングを含む代表的な基材組成のサイディングの水分に関する材料特性を把握することを目的とし、基本物性、低湿領域から高湿域にわたる水分保持性能、及び水分移動特性の測定を行う。

2.4.1 測定試料の概要

基材組成が異なる代表的[2-18、2-19]なサイディングとして、調査事例にて示した繊維補強セメント板系の他に木繊維補強セメント板系、及び繊維補強セメント・けい酸カルシウム板系の 3 仕様を選定した。

試料の組成、及び製造法を表 2-4-1 に示す。仕様 FC の調査事例仕様は、吸水試験と同様の暴露 12 年の材料である。仕様 WC 及び CS は新品の材料である。製造法に関して、抄造法は原料のセメントや繊維材料などを大量の水で溶いて、抄造フェルト上にすき上げ、脱水後に加圧成形するものであり、空隙構造は、直径数千~一万 nm の粗大空隙が多くなる。プレス法は、木片や木繊維、セメント、水などの混合割合を変えたものを積層し、高圧でプレスしながら成形するものであり、空隙構造は、粗大空隙が少なく直径数千 nm の空隙量が多くそれ以外の空隙が少ないのが特徴である[2-20]。また、3 仕様ともに表層面だけで無く裏側にも塗膜が塗布されている。

表 2-4-1 測定試料の概要

| 仕様 | FC | WC | CS |
|-----|---|---|---|
| 組成 | 繊維補強セメント板系 | 木繊維補強セメント板系 | 繊維補強セメント・けい酸カルシウム板系 |
| 製造法 | 抄造 | プレス | 抄造 |
| 厚さ | 12 mm | 14 mm | 14 mm |
| 備考 | <ul style="list-style-type: none"> ・調査事例品 ・屋外暴露 12 年 ・表面に白亜化有り | <ul style="list-style-type: none"> ・新品 | <ul style="list-style-type: none"> ・新品 |

(1) 乾燥密度

試料の表面と裏面の仕上げ層部分を除去し基材素地を露出させ、105℃の乾燥機で2日間乾燥後、乾燥密度を算出した。試料数は3体とし、算出した各仕様の平均値を表2-4-2に示す。試料サイズは300mm×300mmである。

表 2-4-2 各仕様における基材の乾燥密度

| 項目 | 仕様 FC | 仕様 WC | 仕様 CS |
|--------------------------|-------|-------|-------|
| 乾燥密度[kg/m ³] | 1078 | 1137 | 1171 |

2.4.2 平衡含水率(デシケーター法)

基材組成による水分保持性能を把握するため、基材素地の平衡含水率を測定する。

(1) 試料

試料の表面と裏面の仕上げ層部分を除去し、素地のみの部分とした。試料サイズは、幅10mm角、厚みはそれぞれの試料厚みとした(図2-4-1)。試料数は、それぞれ3個ずつとした。

試料は表面を洗浄した後、105℃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(図2-4-2)。この時の質量を測定し、乾燥質量とする。



図 2-4-1 測定試料



図 2-4-2 試料の乾燥状況

(2)測定方法

測定方法は、JIS A 1475（建築材料の平衡含水率測定方法）のデシケーター法に準拠し、吸湿過程と放湿過程の平衡含水率を測定した。なお、湿度調整用の容器は気密蓋付きのガラス容器（図 2-4-3）を用いた。

相対湿度の設定を表 2-4-3 に示す。設定相対湿度は 33～93%とし、容器内の相対湿度の計測にはロガー付き小型温湿度計（おんどとり TR-72wf）を用いた。なお、複数の段階の相対湿度を平行して測定するため、各段階分の試料及び容器を用意して実施（図 2-4-4）した。各段階における試料数はそれぞれ 3 体とした。

吸湿と放湿の測定は分けて行った。質量測定については、0.0001g まで測定可能な電子天秤を用いた。恒量は測定間隔を 24 時間以上空けた質量測定において、質量変化率が 3 回連続して 0.1%以下となった時点とした。

表 2-4-3 設定相対湿度と使用塩類

| 設定相対湿度[%] | 33 | 53 | 75 | 85 | 93 |
|-----------|-------------------|-----------------------------------|------|-----|------------------|
| 塩類 | MgCl ₂ | Mg(NO ₃) ₂ | NaCl | KCl | KNO ₃ |

注記：相対湿度の値は、23℃における値である。



図 2-4-3 容器内への試料の設置



図 2-4-4 湿度調湿用ガラス容器

(3) 平衡含水率の算出方法

各設定相対湿度の質量を測定後、乾燥状態の質量を測定し、質量含水率 u [kg/kg]及び容積基準含水率 ψ [m³/m³]をそれぞれ式(2.4.1)、式(2.4.2)を用いて計算し、吸湿過程と放湿過程の平衡含水率曲線を求めた。水の密度 ρ_w は23°Cにおける値997.6[kg/m³]を用いた。

$$u = \frac{m - m_0}{m_0} \quad (2.4.1)$$

m : 試料の質量[kg]、 m_0 : 基準乾燥時の試料の質量[kg]

$$\psi = u \frac{\rho_0}{\rho_w} \quad (2.4.1)$$

ρ_0 : 基準乾燥時の試料の密度[kg/m³]、 ρ_w : 水の密度[kg/m³]

(4) 測定結果

図2-4-5～2-4-7に各仕様の吸放湿過程における相対湿度と容積含水率の測定結果を示す。含水率は各相対湿度で測定した3体の平均値で示している。

調査事例仕様の仕様FC(繊維混入セメント板系)が最も低い値であった。いずれの仕様においても吸湿過程より放湿過程の含水率が高い値となり、履歴の影響があることがわかる。

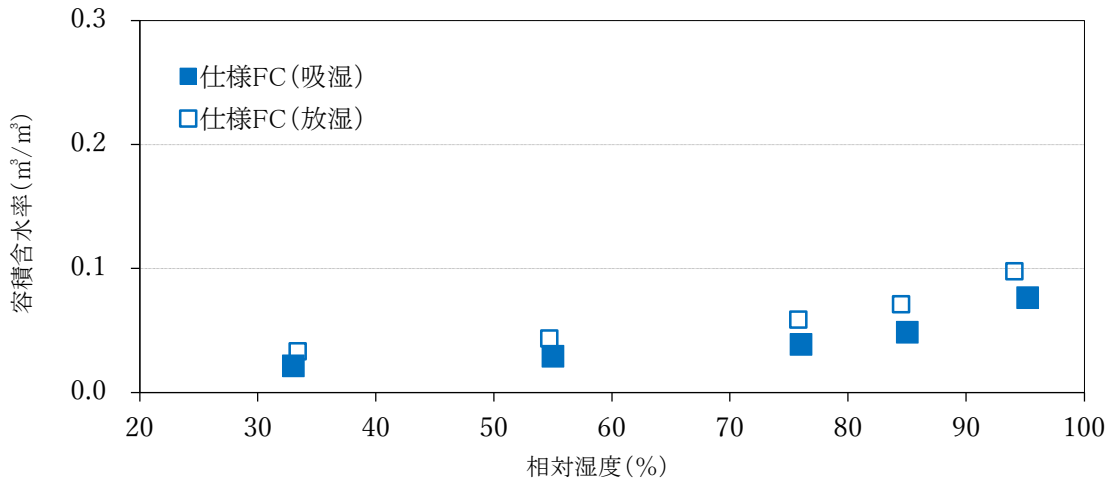


図 2-4-5 仕様FCの吸放湿過程における相対湿度と容積含水率

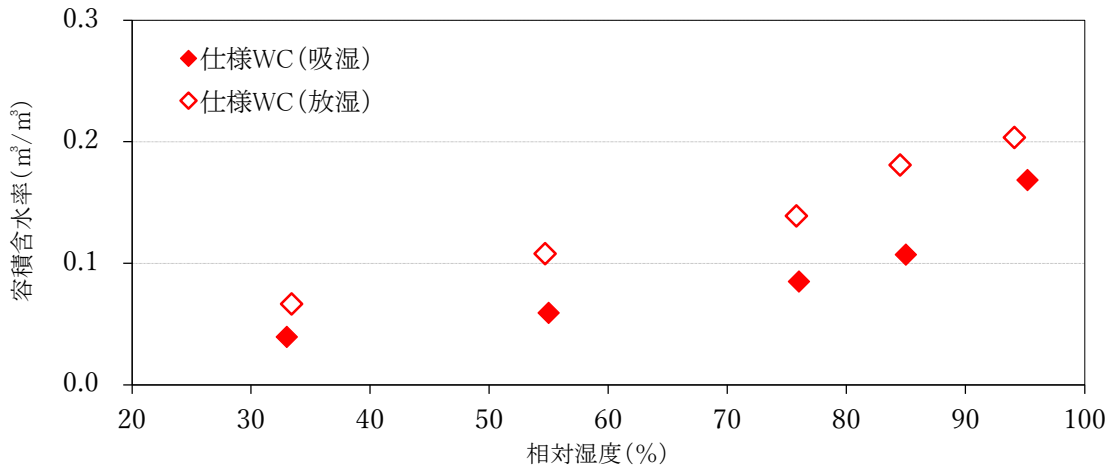


図 2-4-6 仕様WCの吸放湿過程における相対湿度と容積含水率

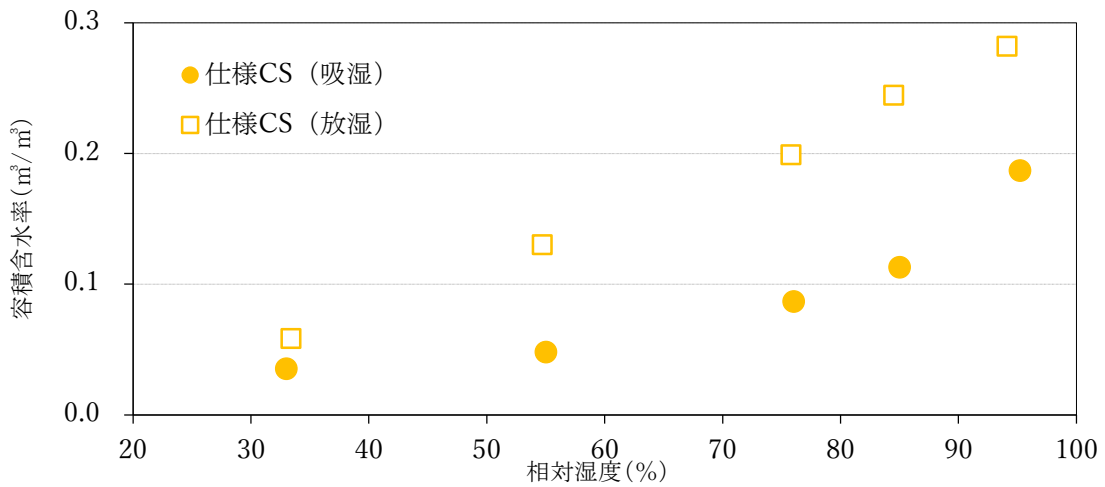


図 2-4-7 仕様CSの吸放湿過程における相対湿度と容積含水率

2.4.2 平衡含水率(遠心法)

一般にサイディングなどの多孔質材料の平衡含水率曲線は、相対湿度 90%以降に急激に増加する傾向がある[2-21]。また、熱湿気解析のためのベンチマークテスト[2-22]では、壁内における高湿度域の性状を正確に再現させるためにはハイグロスコピック域を超えた平衡含水率の取得が課題であることを示している。

そこで、本節ではハイグロスコピック域を超える相対湿度 98%以上[2-21]の平衡含水率を土の保水性試験に準拠し求めた。

(1) 試料

試料の表面と裏面の仕上げ層部分を除いた素地みの部分とした。試料サイズは、直径 50 mmの円形(図 2-4-8)、厚みはそれぞれの試料厚みとした。試料数は、それぞれ 3 個とした。



図 2-4-8 測定試料 (仕様 FC)

(2) 測定方法

測定方法は、地盤工学会基準 (JGS 0151-2009) 「土の保水性試験方法」 6.2 遠心法[2-23]に準拠し、表 2-4-4 に示す水のポテンシャルに相当する回転数を与え、平衡状態に達したときの質量を測定し平衡含水率を求めた。

最初に、試料を飽和させるため、温度 23°Cの純水を入れた容器に試料を浸漬し、これを真空デシケーター内に静置し、真空ポンプにより真空デシケーター内の圧力を大気圧から 0.1[MPa]程度減圧させ、8 時間以上維持したのち重量を測定した。なお、これを相対湿度 100%の重量とした。

次に、飽和させた試料を容器に入れ(図 2-4-9)、冷却/高速遠心機「H-9R」(株式会社コクサン製、図 2-4-10)を用い、所定のポテンシャルに相当する回転数を与え平衡状態に達したときの質量を測定した。

表 2-4-4 平衡含水率試験条件（水のポテンシャルと相対湿度の関係）

| | | | |
|---------------|---------|--------|-------|
| 水のポテンシャル[kPa] | -1507.1 | -354.7 | -54.5 |
| 相対湿度[%] | 98.90 | 99.74 | 99.96 |



図 2-4-9 試料を遠心法の容器に設置した状態



図 2-4-10 容器を遠心法装置に設置した状況

(3) 平衡含水率の算出方法

各設定相対湿度の質量を測定後、乾燥状態の質量を測定し、質量含水率 u [kg/kg]及び容積基準含水率 Ψ [m³/m³]をそれぞれ式 (2.4.3)、式 (2.4.4) を用いて計算し、平衡含水率を求めた。水の密度 ρ_w は 23℃における値 997.6[kg/ m³]を用いた。

$$u = \frac{m - m_0}{m_0} \quad (2.4.3)$$

m : 試料の質量[kg]、 m_0 :基準乾燥時の試料の質量[kg]

$$\Psi = u \frac{\rho_0}{\rho_w} \quad (2.4.4)$$

ρ_0 : 基準乾燥時の試料の密度[kg/ m³]、 ρ_w : 水の密度[kg/ m³]

(4) 測定結果

図 2-4-10～2-4-12 に各仕様の相対湿度と容積含水率の測定結果を示す。含水率は各相対湿度で測定した 3 体の平均値で示している。また、前節の平衡含水率試験(デシケーター法)で得られた相対湿度 95%時の含水率(吸湿過程)を併せて示す。このことから、相対湿度 99%から含水率が大きく変化する傾向にあることがわかる。

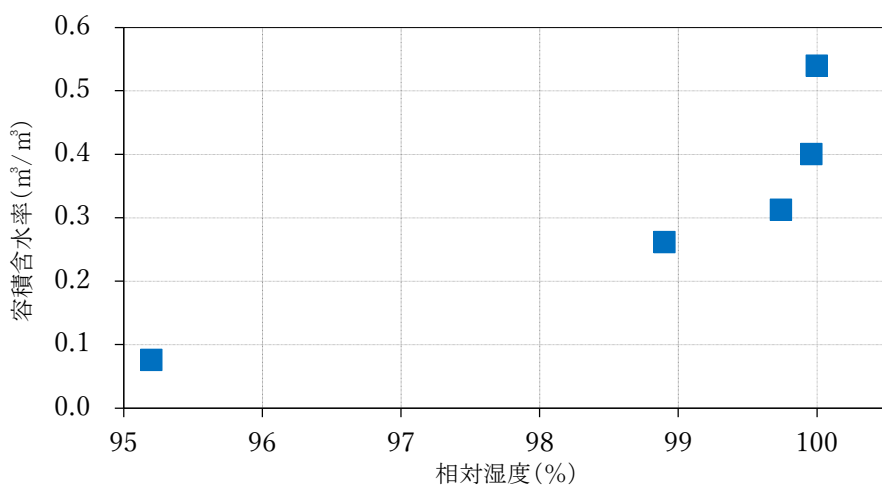


図 2-4-10 仕様 FC の高湿度領域における相対湿度と容積含水率

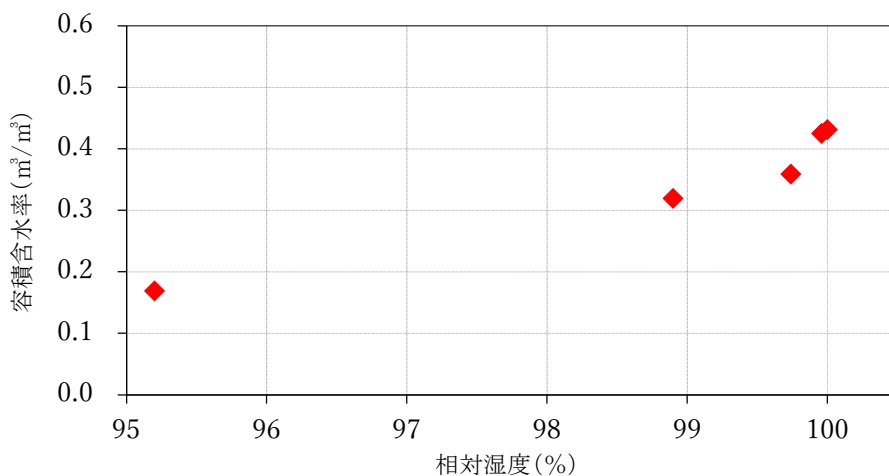


図 2-4-11 仕様 WC の高湿度領域における相対湿度と容積含水率

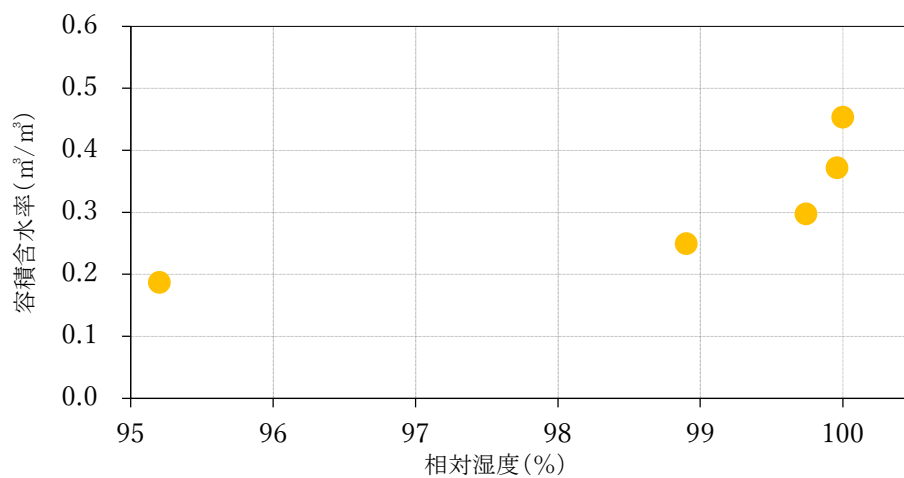


図 2-4-12 仕様 CS の高湿度領域における相対湿度と容積含水率

2.4.3 水分拡散係数

2.3 節の吸水試験により、経年劣化によりサイディングの吸水量が増加することが確認された。吸水により高含水率となったサイディングの水分移動解析には、水分拡散係数が必要となる。一般に水分拡散係数の測定は数ヶ月の時間を要するが、近年は非破壊で含水率の推移を把握することにより、短期間に水分拡散係数を同定する解析法が検討されている[2-24]。そこで、本節ではサイディングの吸水試験を行い、X線透過画像によって得られた含水率分布から水分拡散係数を同定した。

(1) 試料

試料の表面と裏面の防水層部分を除去し素地のみの部分とした。試料サイズは、幅 30 mm、高さ 100 mm、厚みはそれぞれの試料厚みとした（図 2-4-13）。試料数は、仕様 FC 及び WC が 3 個ずつ、仕様 CS は 1 個とした。

試料の質量測定後、一次元の水分流を再現するため、吸水面（下面）及びそれと相対する面（上面）を除く 4 面をエポキシ樹脂で断湿した（図 2-4-14）。



図 2-4-13 各種試料の素地の状態
(左から、仕様 FC、WC、CS)

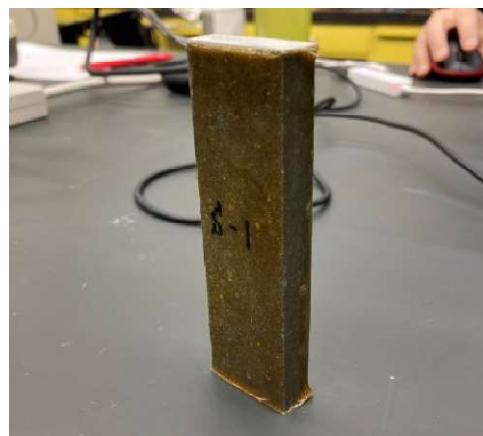


図 2-4-14 試料 4 面にエポキシ樹脂を塗布した状態

(2) 測定方法

測定手順を以下に示す。

- i) エポキシ樹脂でシールされた試料を、温度 60°C の乾燥機で 3 日間乾燥させた。
- ii) 乾燥させた試料を埼玉県産業技術総合センターに持ち込み、ISO 15148[2-25]の吸水係数の測定方法と同様の鉛直上向きの吸水試験を行う。図 2-4-15 に示すように試料の下面を約 5 mm 水に浸し、任意の時間間隔で試料の質量を測定した。また、質量測定後に X 線 CT 装置「TOSCANER-34500FD」（東芝 IT コントロールシステム株式会社製）により透過画像を撮影した（図 2-4-16）。撮影時の各種条件は、印加電圧（ビームエネルギー）220kV、電流 0.8mA とした。吸水試験時の試験室内の環境は、温度 22±4°C、相対湿度 30±25% であった。

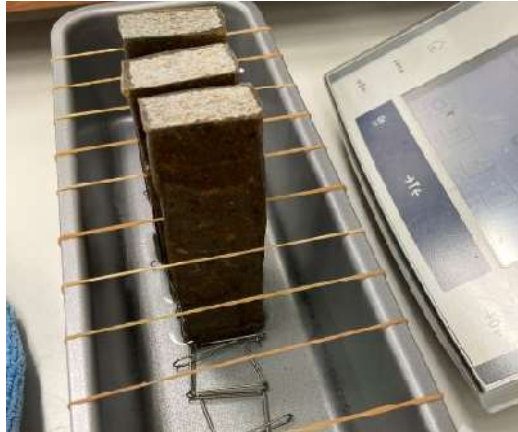


図 2-4-15 吸水試験状況



図 2-4-16 X線CTでの透過画像撮影状況

- iii) 各試料の透過画像を解析して各ピクセルの色調（0～255）を取得し、試料全体の平均色調を求めた。また、試料を高さ方向に 20 分割し、各領域の平均色調を求めた。解析には、階調を反転させた透過画像を用いた。
- iv) 各測定回の試料全体の容積基準質量含水率と試料全体の平均色調との関係を検量線とし、この検量線から各測定回の各領域の容積基準質量含水率を求めた。なお、求めた容積基準質量含水率がマイナスとなる場合は 0[kg/m³]とした。使用した X 線 CT 装置は、上下でわずかに明るさの差が生じる特性を有しているとともに、測定毎に明るさの差が生じていると思われる傾向が見られた。このため、以下の 2 つの仮定条件を与え、式(2.4.4)より各測定回の色調を補正した。

【仮定条件 1】

初期は試料の容積基準質量含水率は 0[kg/m³]、かつ、試料全体に密度分布はないと仮定し、初期の各試料全体の平均色調と各領域の平均色調の差を求め、これを装置の特性により生じていると考えられる色調の差（補正值 1） ΔG_{x1} とする。補正方法のイメージを図 2-4-17 に示す。

【仮定条件 2】

試料の上部（試料上端から 5 分割分）は測定期間中に含水率が変化していないと仮定し、初期の各試料上部（試料上端から 5 分割分）の平均色調と経時後の各測定回のもとの差を求め、これを各測定回に生じる初期との色調の差（補正值 2） ΔG_{x2} とする。

$$G_{x.c} = G_{x.m} - \Delta G_{x1} - \Delta G_{x2} \quad (2.4.4)$$

$G_{x.c}$: 補正後の色調[-]、 $G_{x.m}$: 補正前の色調[-]

ΔG_{x1} : 補正值 1[-]、 ΔG_{x2} : 補正值 2[-]

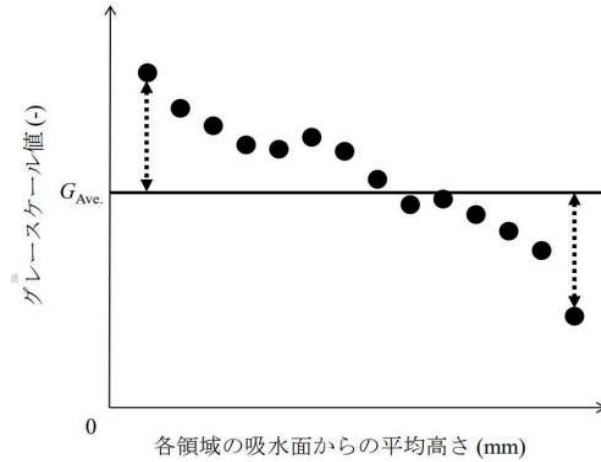


図 2-4-17 仮定条件 1 の補正イメージ

(3)水分拡散係数の同定方法

水分拡散係数 $D_l(w)$ の同定は Carmeliet らの解析法[2-26]を用いた。材料内の含水率の支配方程式は 1 次元等温系に対し式 (2.4.5) で定義する。この支配方程式に対してボルツマン変換を施し、 λ を式 (2.4.6) で定義し解くと、水分拡散係数 $D_l(w)$ は式 (2.4.7) で表される。

$$\frac{\partial w}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(D_l(w) \frac{\partial w}{\partial x} \right) \quad (2.4.5)$$

$$\lambda = \frac{x}{\sqrt{t}} \quad (2.4.6)$$

$$D_l(w) = -\frac{1}{2} \frac{\int_{w_0}^w \lambda \, dw}{\frac{dw}{d\lambda}} \quad (2.4.7)$$

$D_l(w)$: 液移動に対する水分拡散係数[m²/s]、 w : 容積基準含水率[kg/m³]

λ : ボルツマン変数[m/s^{0.5}]、 x : 領域 x の吸水面からの平均高さ[m]、 t :時間[s]

液移動に対する水分拡散係数 $D_l(w)$ は、任意の時刻において得られた含水率分布を $w - \lambda$ 図上にプロットし、この点列にフィットする関数を定めて式 (2.4.7) より決定した。

(3)測定結果

各試料の質量変化量と時間との関係を図 2-4-18 に、X 線 CT による透過画像の一例を図 2-4-19～2-4-21 に示す。また、各試料の透過画像を解析して求めた容積基準質量含水率分布を図 2-4-22～2-4-24 に示す。また、仕様 FC、WC の各 3 体、及び仕様 CS の 1 体の測定結果から求めたボルツマン変数と容積基準質量含水率の関係、及び水分拡散係数と容積基準質量含水率の関係を図 2-4-25～2-4-27 に示す。

各仕様の水分拡散係数を容積基準質量含水率 400[kg/m³]時で比較すると、仕様 FC が約 120×10^{-9} [m²/s]、仕様 WC が約 4.5×10^{-9} [m²/s]、仕様 CS が 20×10^{-9} [m²/s]となった。

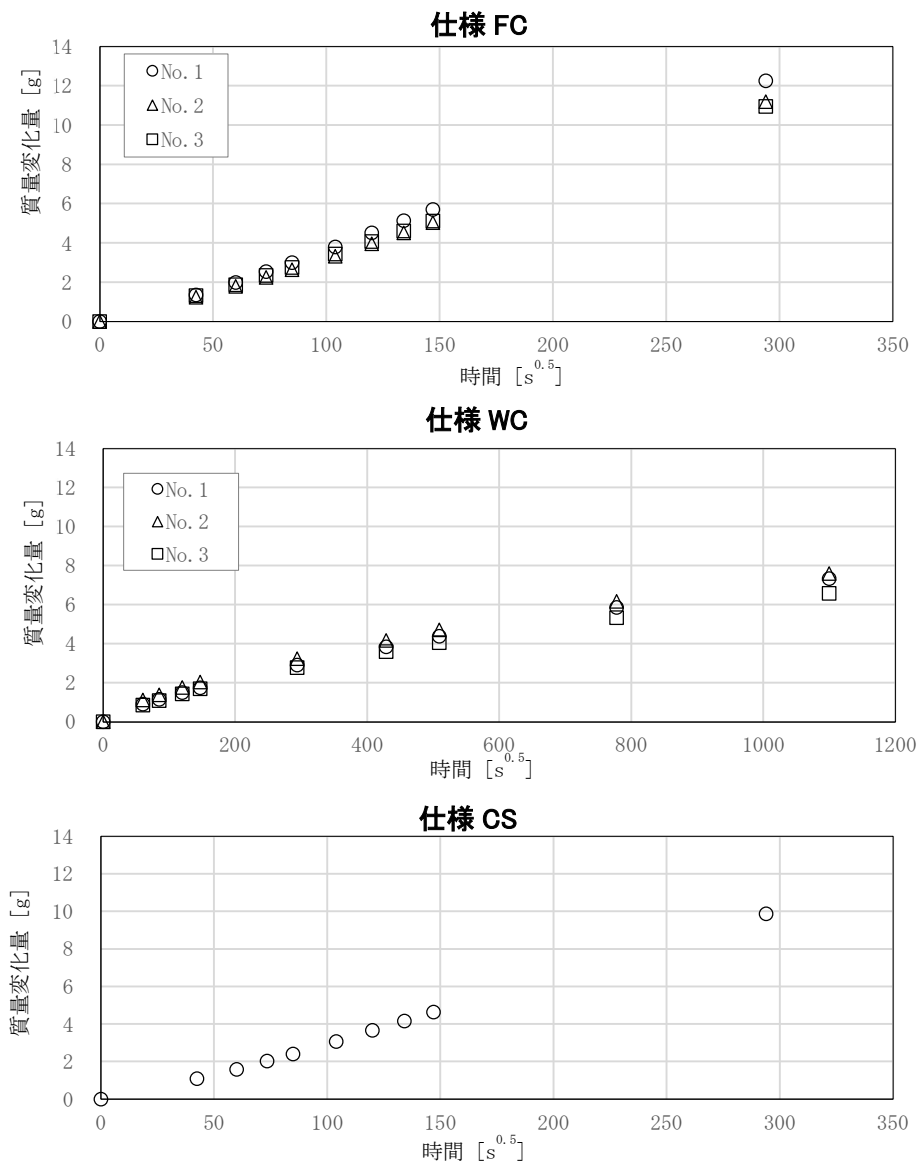


図 2-4-18 吸水試験による質量変化量と時間の関係（上から仕様 FC、WC、CS）

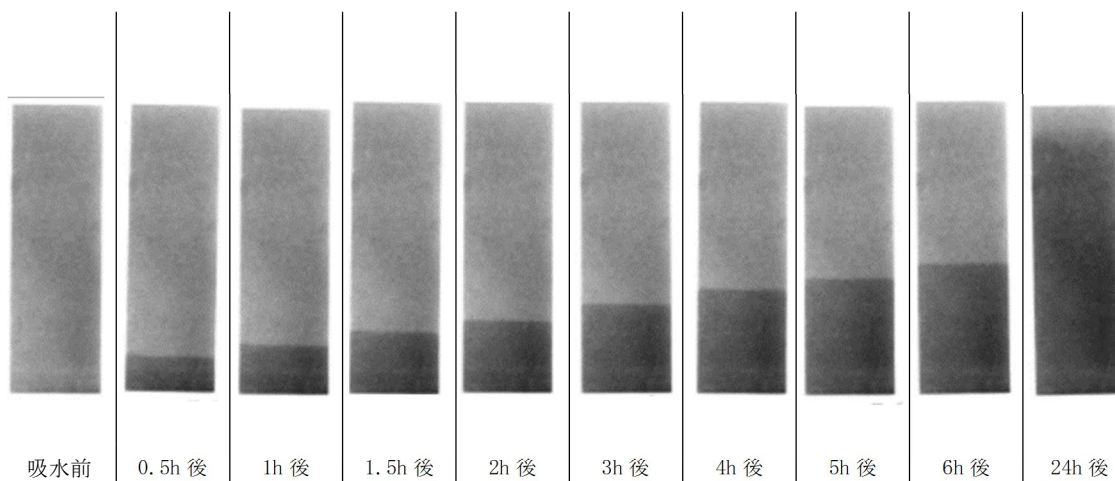


図 2-4-19 X線 CT による経過時間毎の透過画像（仕様 FC、No3）

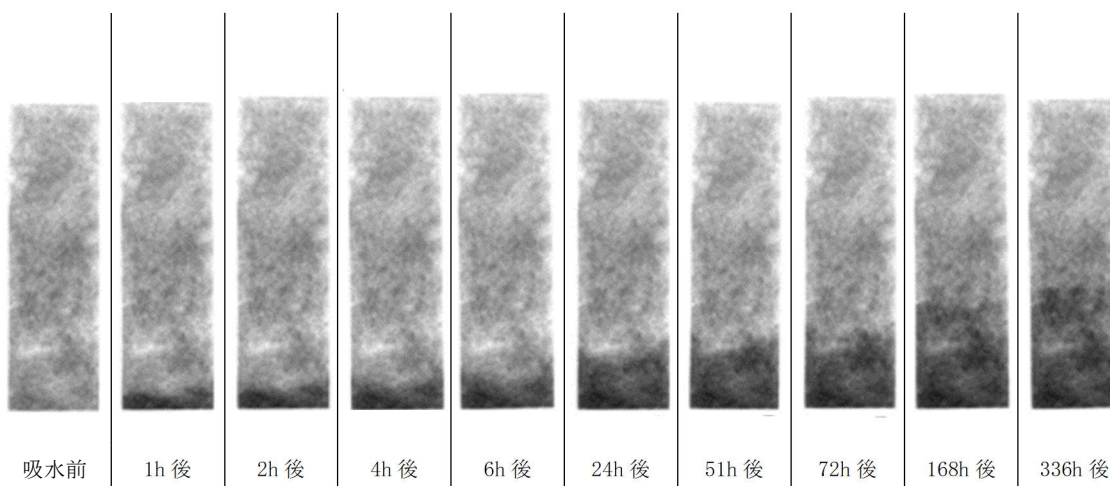


図 2-4-20 X線 CT による経過時間毎の透過画像（仕様 WC、No3）

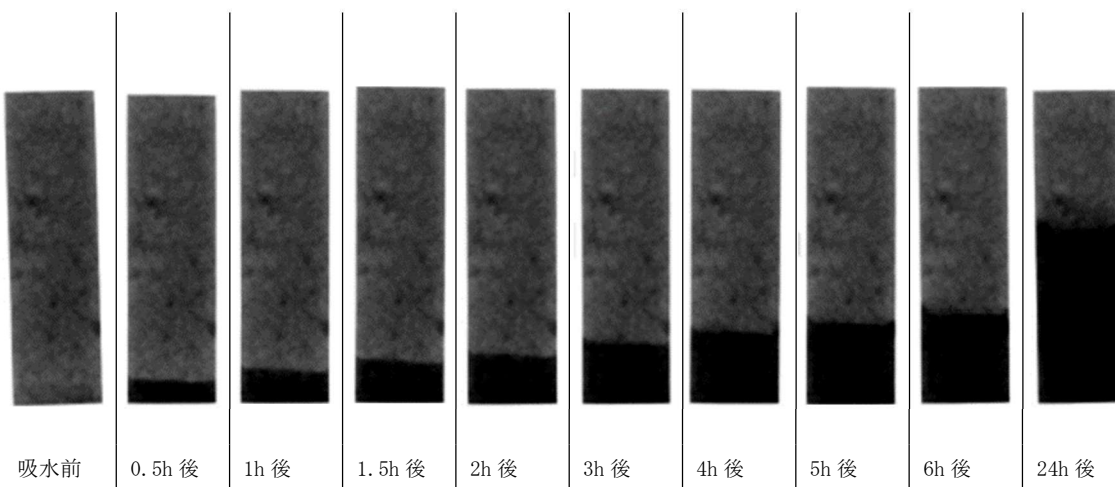


図 2-4-21 X線 CT による透過画像（仕様 CS）

第2章 雨掛かりによる外皮からの水分影響の検討

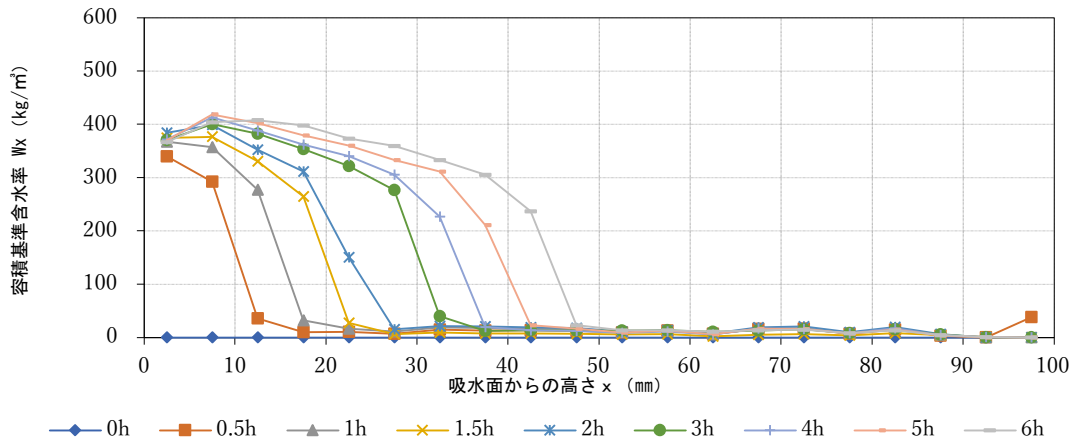


図 2-4-22 吸水試験時の各領域の容積基準質量含水率の経時変化 (仕様 FC、No3)

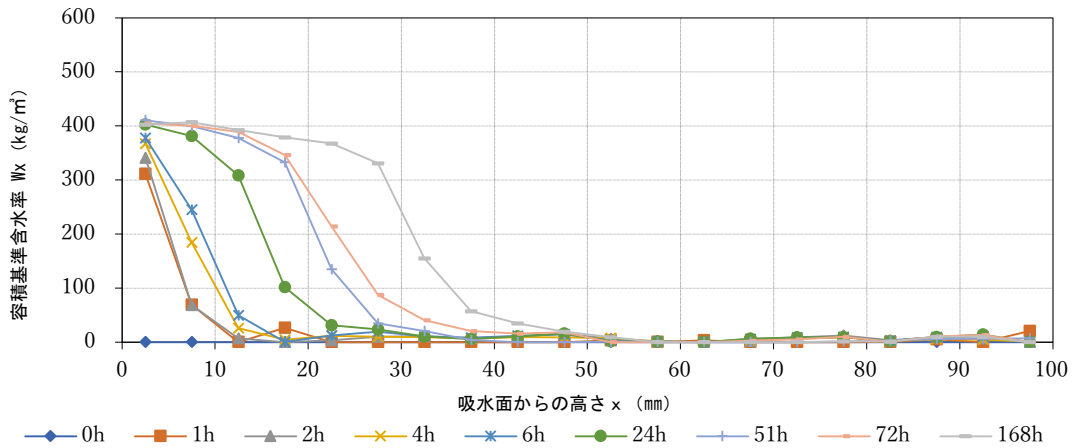


図 2-4-23 吸水試験時の各領域の容積基準質量含水率の経時変化 (仕様 WC、No3)

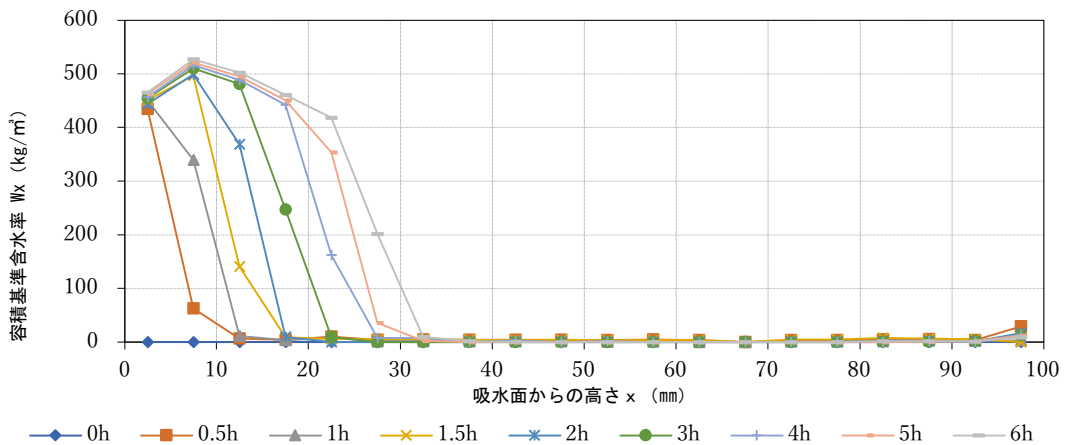


図 2-4-24 吸水試験時の各領域の容積基準質量含水率の経時変化 (仕様 CS)

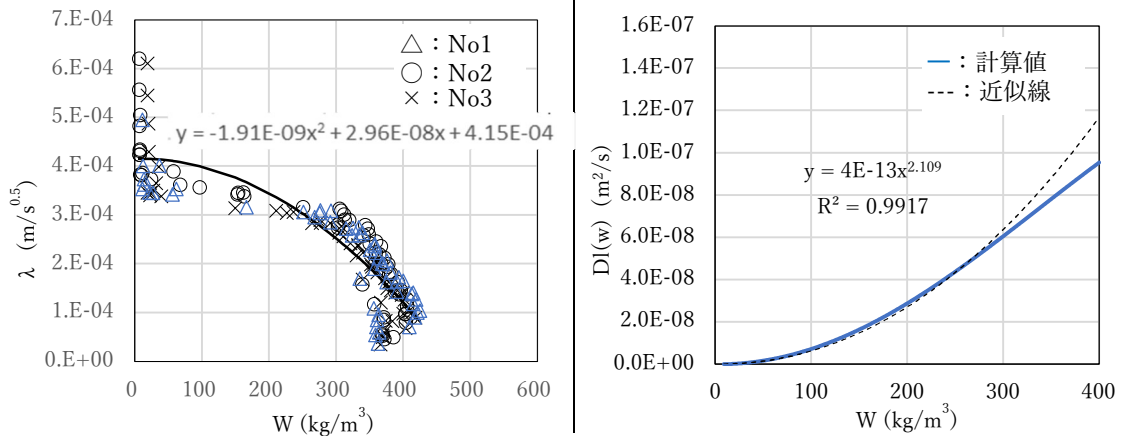


図 2-4-25 容積基準質量含水率 W とボルツマン変数 λ の関係
及び、容積基準質量含水率 W と水分拡散係数 $D_l(w)$ の関係 (仕様 FC)

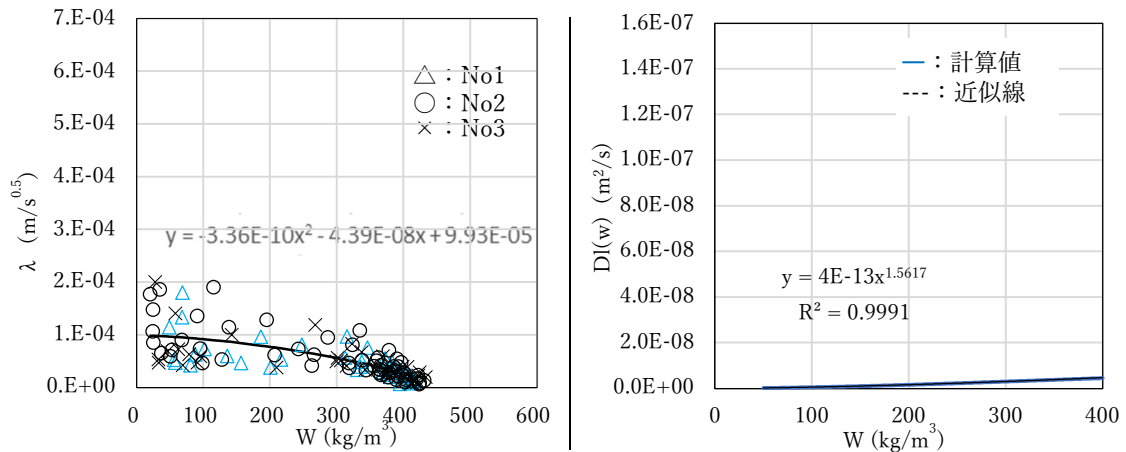


図 2-4-26 容積基準質量含水率 W とボルツマン変数 λ の関係
及び、容積基準質量含水率 W と水分拡散係数 $D_l(w)$ の関係 (仕様 WC)

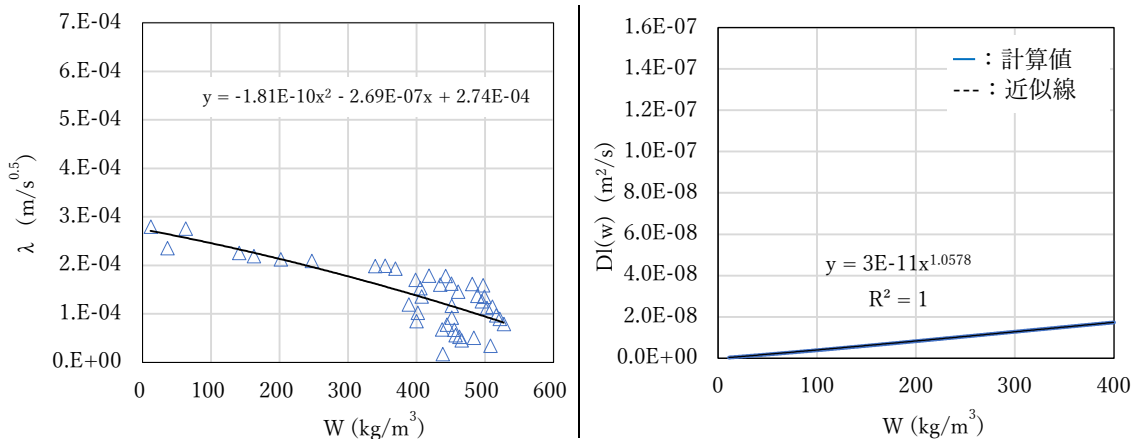


図 2-4-27 容積基準質量含水率とボルツマン変数の関係
及び、容積基準質量含水率 W と水分拡散係数 $D_l(w)$ の関係 (仕様 CS)

2.4.4 仕上げ面を含めた透湿係数

サイディング基材の透湿係数を JIS A1324 (建築材料の透湿性測定方法 カップ法) により測定した。また、一般的にサイディングには防水のため、表面及び裏面に塗膜が施されている。雨掛かりによるサイディングの含水率挙動を推定するためには、塗膜の物性値も必要となる。そこで、本節では塗膜も測定対象とした。

(1) 試料

試料のサイズは約 285 mm角、厚さはそれぞれの試料厚みとした。図 2-4-28 のように表面塗膜を対象とした場合は裏面塗膜を取り除き、裏面塗膜を対象とした場合は表面塗膜を取り除き、基材を対象とした場合は表裏面の塗膜を取り除いた。塗膜の除去方法は紙ヤスリで研磨し、塗膜が目視で確認出来なくなる状態にした。試料数は表面、裏面が各 2 個、基材は 3 個とした。

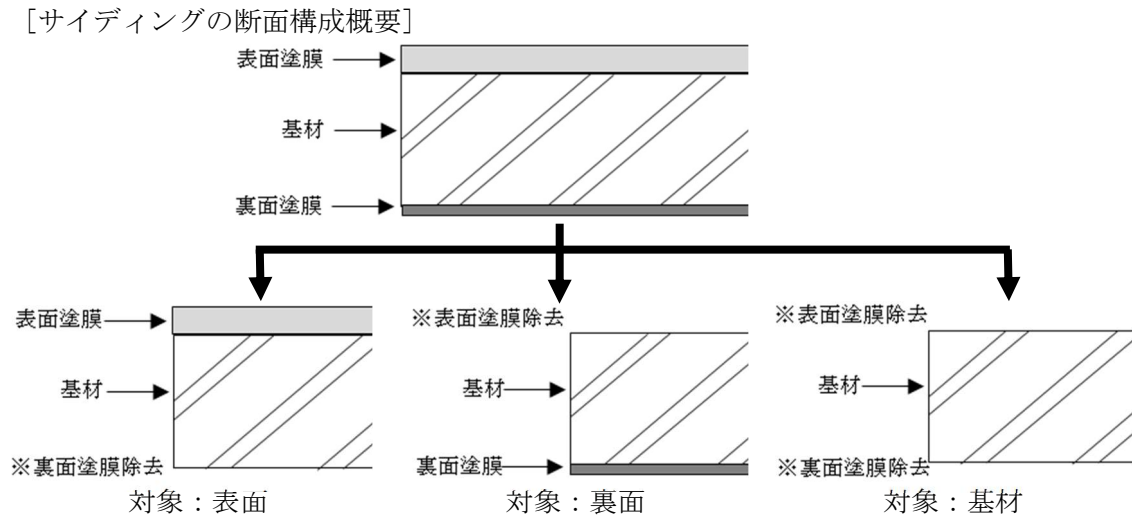


図 2-4-28 試験対象面の断面概要

(2) 測定方法

JIS A1324 (建築材料の透湿性測定方法) 5.2 カップ法) [2-27]に準じ行った。試験状況を図 2-4-29 に示す。塗膜の透湿係数は、直接測定することが困難なため、塗膜が施されたサイディングと基材のみの透湿係数を用いて塗膜の透湿係数を求めた。



図 2-4-29 透湿率試験状況（左から仕様 FC、WC、CS の基材面）

(3)測定結果

測定結果より各試料の平均値を表 2-4-5 に示す。基材の透湿率に関しては、密度が低い仕様 FC が最も大きい値となった。また、文献値 $2.1 \times 10^{-12} [\text{kg}/\text{m} \cdot \text{s} \cdot \text{Pa}]$ [2-28] と比べると、1.5～3.2 倍程度であった。

表 2-4-5 透湿試験結果

| 仕様 | 対象 | 厚さ [mm] | 透湿率 [kg/m·s·Pa] | 透湿係数 [kg/m ² ·s·Pa] |
|----|----|------------|------------------------|-----------------------------------|
| FC | 表面 | 11.2 | - | 2.40×10^{-10} |
| | 裏面 | 10.1 | - | 3.95×10^{-10} |
| | 基材 | 10.9 | 6.72×10^{-12} | 6.13×10^{-10} |
| WC | 表面 | 15.5 | - | 0.05×10^{-10} |
| | 裏面 | 15.1 | - | 1.37×10^{-10} |
| | 基材 | 14.9 | 3.05×10^{-12} | 2.04×10^{-10} |
| CS | 表面 | 13.4 | - | 1.00×10^{-10} |
| | 裏面 | 13.5 | - | 2.53×10^{-10} |
| | 基材 | 13.0 | 3.20×10^{-12} | 2.46×10^{-10} |

塗膜の透湿係数は、塗膜の厚さを 100[μm][2-29]として基材の透湿率を用いて計算した。結果を表 2-4-6 に示す。表面塗膜については、結露事例の仕様 FC が最も小さい。塗膜の劣化により透湿抵抗も低下しているものと推察される。仕様 CS の裏面塗膜が負の値となった。裏面塗膜の透湿係数が小さく結果に反映されなかったものと考えられる。

表 2-4-6 塗膜の透湿係数

| 仕様 | 対象塗膜 | 透湿係数 [$\text{kg}/\text{m}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{Pa}$] |
|----|------|---|
| FC | 表面 | 3.98×10^{-10} |
| | 裏面 | 9.60×10^{-10} |
| WC | 表面 | 0.05×10^{-10} |
| | 裏面 | 4.20×10^{-10} |
| CS | 表面 | 1.71×10^{-10} |
| | 裏面 | -0.47×10^{-10} |

2.4.5 仕上げ面を含めた透水抵抗

2.3 節の吸水試験より塗膜が劣化したサイディングは、表面からの吸水量が増加することを確認した。このように、サイディングの含水率挙動に対して塗膜は重要な役割を持っている。JIS A5422（窯業系サイディング）では、サイディング表面を対象とした透水性試験が規定されているが、試験時のサイディングは乾燥状態である。そのため、試験時にはサイディング含水率に応じた内部への吸引圧が影響し、塗膜自体の透水抵抗を得ることはできない。そこで、本節では試料を水に浸し飽水状態のサイディングに対し透水試験を行い、塗膜の水分伝導率及び透水抵抗を求めた。

(1) 試料

前節の透湿試験同様に、表面塗膜を対象とした場合は裏面塗膜を取り除き、裏面塗膜を対象とした場合は表面塗膜を取り除き、基材を対象とした場合は表裏面の塗膜を取り除いた。試料の状態を図 2-4-30 に示す。試料のサイズは 50 mm の円形とした。試料の側面、及び対象塗膜の端部には、エポキシ樹脂によりより断湿した。また、透湿防水シートも試験対象とした（サイズ：70 mm）。試料数は各 1 体とした。



図 2-4-30 測定試料（仕様 CS）

(2)測定方法

JIS A1218（土の透水試験方法、変水位透水試験）[2-30]を参考に、図 2-4-31、2-4-32 に示す測定装置を用いて試料を透過する水分量から水分伝導率及び透水抵抗を求めた。

① 試料の取付け

- 1) 試料と透水円筒の固定方法は、シリコン系シーリングを用い厚さを 10 mm 以上確保し、塗膜面が下側となるように取り付けた。透水円筒ごと試料を真空にしたデシケーター内で吸水させ、ほぼ飽和状態とした。
- 2) 透水円筒とスタンドパイプセットの固定方法は、円形状のゴムパッキン（O リング）を介して取り付けた。なお、試料が透湿防水シートの場合については、試料を透水円筒とスタンドパイプセットの間に挟む形で取り付けた。
- 3) スタンドパイプセット内に気泡を抜いた脱気水を注水する。水位は越流水槽水面から 1m とした。スタンドパイプセットの上端には、水分の蒸発を抑制するためラップで塞いでいるが、水面を大気圧に維持するため、直径 1 mm 程度の穴を開けた。

②測定順序

- 1) スタンドパイプセットのコックを開け、ビュレットの目盛りを目視にて測定し、経過時間毎の水位変化を記録した。測定間隔は透過水量が 0.1～1cc の範囲となるような時間とした。試験環境温度は 20℃とした。
- 2) 測定回数は 5 回以上とし、連続した 5 点以上の水位変化が一定になるまで測定を続けた。

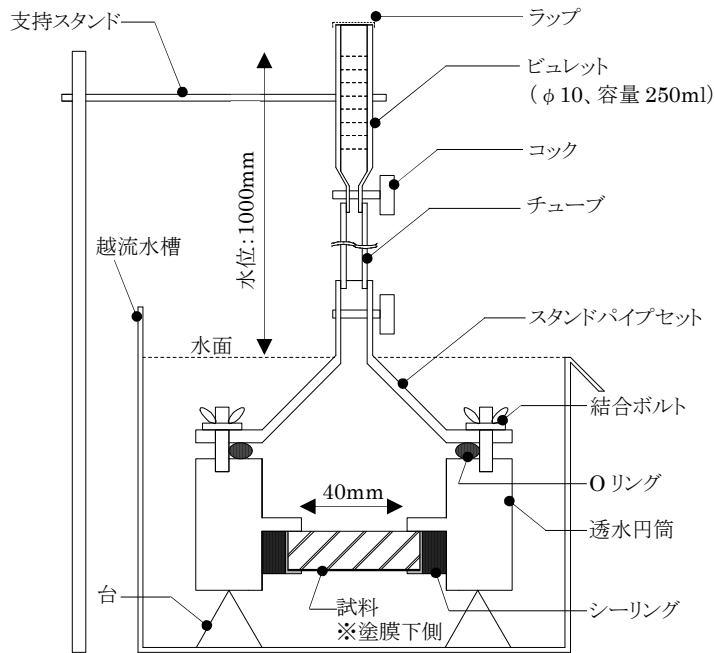


図 2-4-31 測定装置の概要



図 2-4-31 測定装置の外観

(3) 水分伝導率及び透水抵抗の求め方

試料上下の水圧差 ΔP [Pa]と試料を通して流れた水分流 J_w [kg/(m²・s)]から、水分伝導率 λ_p [kg/(m・s・Pa)]を(2.4.8)(2.4.9)式、透水抵抗 R_w [(m²・s・Pa)/kg]を(2.4.10)式にて求めた[2-31]。

$$\Delta P = (H - h_t) \rho_w g \quad (2.4.8)$$

$$\lambda_p = J_w \frac{L_k}{\Delta P} \quad (2.4.9)$$

$$R_w = \frac{L_k}{\lambda_p} \quad (2.4.10)$$

H :試験開始時の水位高さ[m]、 h_t :測定時の水位高さ[m]

ρ_w :20°Cにおける水の密度[kg/m³]、 g :重力加速度[m/s²]、 L_k : 試料厚さ[m]、

(3)測定結果

各試料の測定結果を図 2-4-32～2-4-35 に示す。サイディング基材の水分伝導率は、測定誤差と思われる上下変動が見受けられるが、ほぼ一定の値であった。試料の水分伝導率及び透水抵抗は、各測定値を平均し求めた。試料の水分伝導率、透水抵抗及び試料厚さを表 2-4-7、塗膜の厚さを 100[μm]とし基材との差分から求めた塗膜の透水抵抗を表 2-4-8 に示す。なお、凹凸のあるサイディング試料厚みは、凹部を測定した。

表面塗膜の透水抵抗に関して、仕様 WC 及び CS は、透湿防水シートと同程度の値であることから、新品の塗膜は防水性能を有していることが示された。一方、表面塗膜が劣化している仕様 FC は、仕様 WC と CS に比べ約 1/300 程度であった。塗膜の経年劣化により防水性能が低下した影響によるものと考えられる。仕上げ層がある瓦を対象とした伊庭ら[2-31]の測定では、表面仕上げ層が $3.24 \sim 4.95 \times 10^9 [(\text{m}^2 \text{sPa})/\text{kg}]$ 、基材が $3.69 \sim 6.28 \times 10^6 [(\text{m}^2 \text{sPa})/\text{kg}]$ と、仕上げ層の方が基材より 2～3 桁大きい。基材や被膜の材料及び厚みが異なるものの、仕様 CS と比べると、塗膜と基材の差分はほぼ同じオーダーであり、防水層である塗膜が水分移動特性に大きな影響を与えることが確認出来た。

裏面塗膜の透水抵抗に関して、新品の仕様 WC 及び CS は同程度の値であり、仕様 FC はこれらに比べ 5 桁程度小さい値であった。仕様 CS の裏面塗料は、前節で測定した透湿抵抗が測定困難なほど低かったことから、透湿系の防水塗料が使用されていることが考えられる。仕様により抵抗値が異なった原因としては、塗膜の種類、及び熱劣化の影響などが挙げられる。

第2章 雨掛かりによる外皮からの水分影響の検討

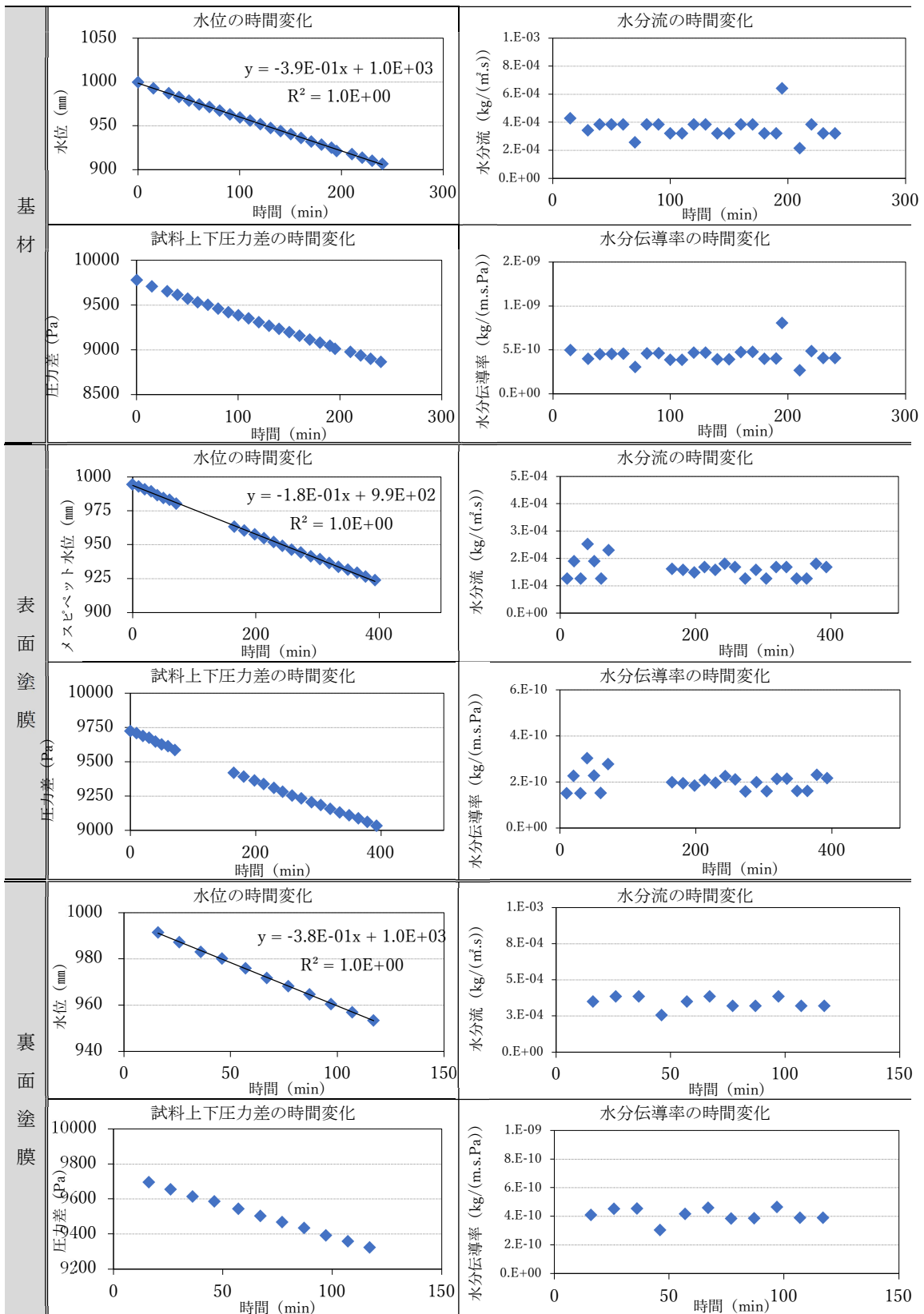


図 2-4-32 FC の測定結果

第2章 雨掛かりによる外皮からの水分影響の検討

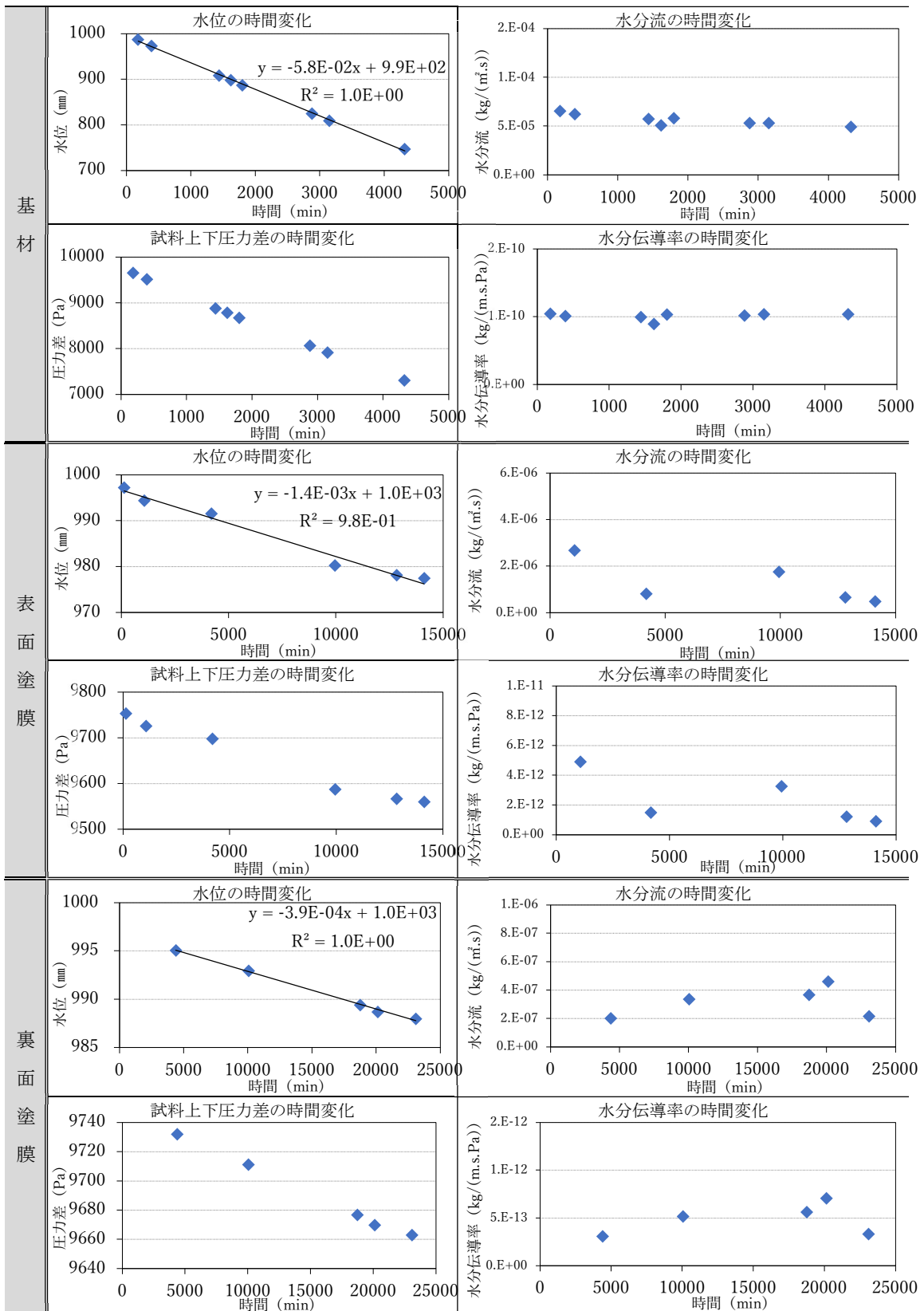


図 2-4-33 WC の測定結果

第2章 雨掛かりによる外皮からの水分影響の検討

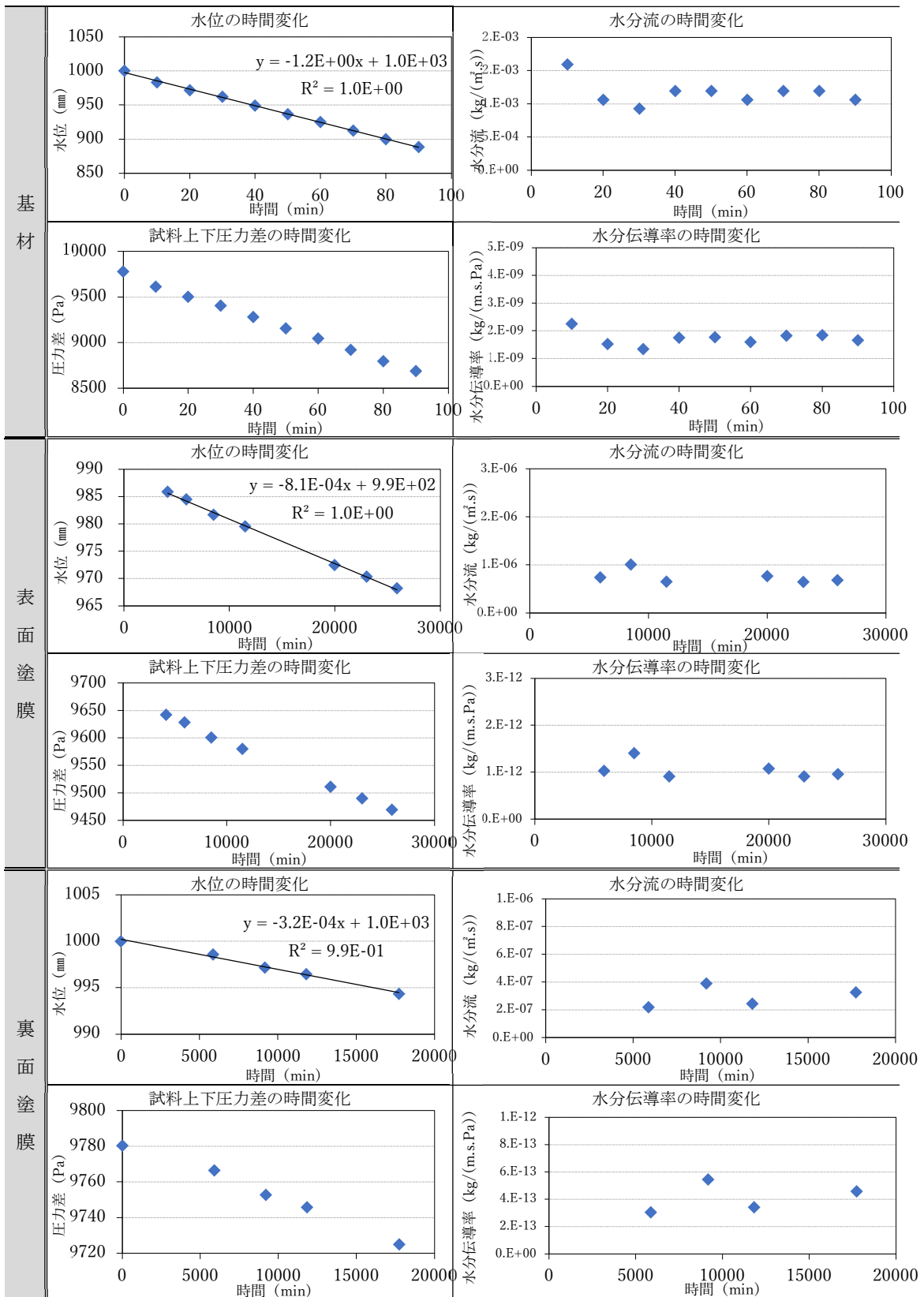


図 2-4-34 CS の測定結果

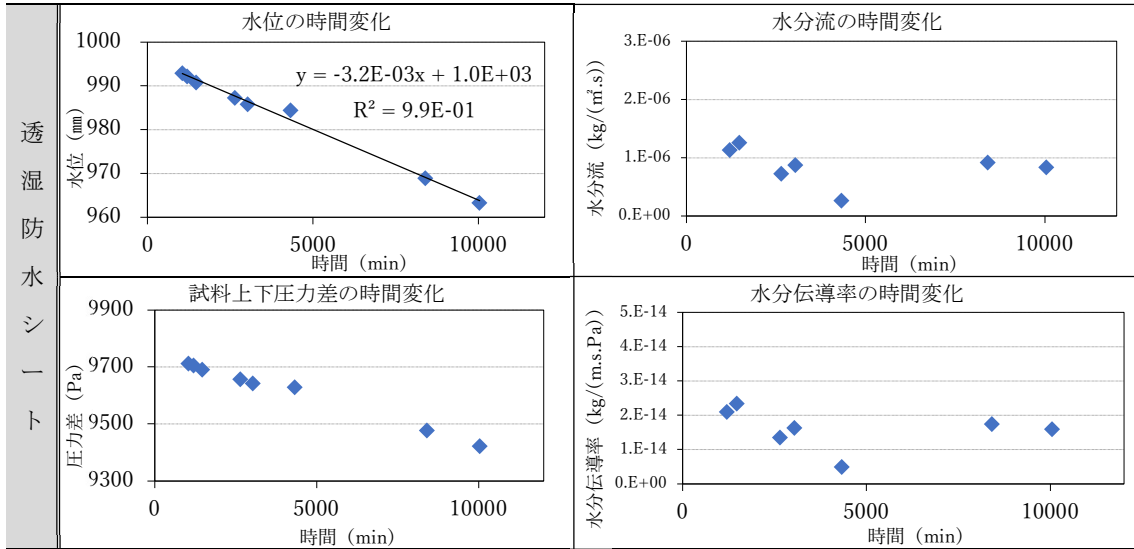


図 2-4-35 透湿防水シートの測定結果

表 2-4-7 各仕様の水分伝導率・透水抵抗

| 仕様 | | 厚さ (mm) | 水分伝導率 [kg/(m·s·Pa)] | 透水抵抗 [(m²·s·Pa)/kg] |
|---------|------|---------|---------------------|---------------------|
| FC | 基材 | 11.38 | 4.4E-10 | 2.7E+07 |
| | 表面塗膜 | 11.58 | 2.0E-10 | 6.0E+07 |
| | 裏面塗膜 | 11.43 | 4.5E-10 | 2.7E+07 |
| WC | 基材 | 15.41 | 1.0E-10 | 1.6E+08 |
| | 表面塗膜 | 17.81 | 2.4E-12 | 1.1E+10 |
| | 裏面塗膜 | 14.80 | 1.2E-12 | 3.4E+10 |
| CS | 基材 | 13.55 | 1.7E-09 | 8.2E+06 |
| | 表面塗膜 | 13.46 | 1.1E-12 | 1.3E+10 |
| | 裏面塗膜 | 13.65 | 4.1E-13 | 3.5E+10 |
| 透湿防水シート | | 0.18 | 8.9E-03 | 1.4E+10 |

表 2-4-8 塗膜の透水抵抗

| 仕様 | 透水抵抗[(m²·s·Pa)/kg] | |
|----|--------------------|---------|
| | 表面塗膜 | 裏面塗膜 |
| FC | 3.3E+07 | 2.4E+05 |
| WC | 1.1E+10 | 3.4E+10 |
| CS | 1.3E+10 | 3.5E+10 |

2.5 第2章のまとめ

本章では、雨掛かりによる外皮からの水分影響に着目して、サイディング接合部からの雨水浸入や、経年劣化したサイディングの吸水など、雨水に起因する壁体内への水分蓄積の現象を確認した。さらに、組成が異なるサイディングの水分に関する物性値の測定を行った。得られた知見を下記に示す。

- 1) 2.2 節ではサイディングからの雨水浸入試験により、工法による雨水浸入量の大きな差を確認した。調査事例仕様においては、サネ勘合部にピンホールが生じる為、発生頻度の高い低風速時（0～5m/s）に浸入率が約5～12%となった。
- 2) 2.3 節では吸水試験により、塗膜劣化度による吸水性能の違いを確認した。結露が発生した方位面である白亜化の生じているサイディングは、白亜化の生じていないサイディングと比較し吸水速度係数が7倍となった。特に浸漬後1時間にて約1.0kg/m²吸水し、白亜化が生じていないサイディングの約17倍の吸水量となり、降雨のたびに多くの水分をサイディング表面から吸水している事が考えられる。
- 3) 2.4 節では調査事例で示したサイディングを含む代表的な基材組成のサイディングの水分に関する物性値の測定を行った。平衡含水率に関して、デシケーター法と土の保水性試験により、ハイグロスコピック域を超える相対湿度99%以降から含水率が大きく変化することを確認した。水分拡散係数に関して、吸水試験を行いX線CT画像から水分拡散係数を同定した。調査事例仕様が最も大きく、組成により6～25倍異なることを確認した。また、透湿係数及び透水抵抗は、仕上げ面である塗膜も含め測定した。透水抵抗に関しては、新品の塗膜は防水性能を有しており、調査事例の劣化した塗膜は新品の1/300程度であり、防水層である塗膜が水分移動特性に大きな影響を与えることが確認出来た。

注釈

[注1] 試験体に掛かる壁面雨量は、以下の手順により定めた。

水密試験機に試験体の代わりに防水シートを設置し壁面に当たった雨量を下端に設置した受水升にて測定する。測定回数は3回とした。測定結果から、壁面雨量は下記(A1)式にて求めた。試験結果を付表1に示す。

$$R_w = \frac{M}{A \times t} \tag{A1}$$

- R_w : 壁面雨量 [ℓ/m²・min]
- M : 測定した雨量の平均値[ℓ]
- A : 散水面積 [m²]
- t : 散水時間 [min]

付表1 壁面雨量の測定結果

| | | | |
|----------------------------|------|------|------|
| 散水量[ℓ/m ² min] | 0.2 | 0.5 | 0.8 |
| 散水時間[min] | 3 | | |
| 散水面積[m ²] | 3.61 | | |
| 測定結果[ℓ] | 2.27 | 5.53 | 9.12 |
| 壁面雨量[ℓ/m ² min] | 0.21 | 0.52 | 0.84 |

第2章 参考文献

- [2-1] 建築工事標準仕様書・同開設 JASS 27 乾式外壁工事の窯業系サイディング外壁工事
- [2-2] 地方独立行政法人北海道立総合研究機構 北方建築総合研究所、ケイミュー(株)：窯業系外装材のシーリングレス工法化に関する研究、2011.3
- [2-3] 国土交通省 国土技術政策総合研究所：共同研究成果報告書 木造住宅の耐久性向上に関わる建物外皮の構造・仕様とその評価に関する研究、2017.6
- [2-4] 日本建築学会編：建築設計資料集成1 環境 風を伴う雨の頻度、丸善、1978
- [2-5] 松本衛、銚井修一、三浦健治、塚本彰、佐藤安広：セメント系多孔質材建築材料の結露、乾燥過程の実験とその解析、日本建築学会計画系論文報告集、第353号、pp.11-20、1985.7
- [2-6] 日本住宅保証検査機構：防水施工マニュアル（住宅用防水施工技術）2017、技報堂出版株式会社、2017.12
- [2-7] 日本工業規格：建具の水密試験方法、日本規格協会、1996
- [2-8] 日本工業規格：サッシ、日本規格協会、2000
- [2-9] 日本建築学会編：建築設計資料集成1 環境 風を伴う雨の頻度、丸善、1978
- [2-11] 日本建築学会：外壁接合部の水密設計および施工に関する技術指針・同解説、丸善株式会社、2008.2
- [2-12] 日本窯業外装材協会：サイディングの維持管理はどうするの、2011

第2章 雨掛かりによる外皮からの水分影響の検討

- [2-13] 金澤光明, 石川廣三:窯業系サイディング小口および裏面からの吸水試験, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 材料施工, pp.1031-1032, 2017.7
- [2-14] 日本建築学会:木造住宅外皮の防水設計・施工指針および防水設計・施工要領(案)、丸善出版株式会社、2021.3
- [2-15] Theresa A.Weston, Liza C.Minnich, Jonathan Smegal, Jennifer Van Mullekom, Chis Schumacher, Jessica S. Conlon :Evaluation of cladding and water-resistive barrier performance in hot-humid climates using a real-weather, real-time test facility, Buildings XI,2010
- [2-16] Stephen Mcneil, Mark Bassett, Moisture recovery rates for walls in temperate climates, 11th Canadian Conference on Buildings Science and Technology Banff, Alberta, 2007
- [2-17] 財団法人建材試験センター:窯業系サイディングの長期耐久性評価手法に関する標準化調査研究成果報告書、2011.3
- [2-18] NPO 法人住宅外装テクニカルセンター:防火構造認定番号 PC030BE-9201、2002.5
- [2-19] 三間武師、小山明男、内田弘樹、菊池雅史:窯業系サイディング材の長期耐久性評価に向けた促進劣化試験とその物性変化に関する実験的研究(その1:炭酸化及び乾燥湿潤繰り返し試験)、日本建築学会大会学術講演梗概集, 材料施工, pp.1122-1123, 2010.7
- [2-20] 吉野利幸:最近の住宅の外装材、林産試だより 2007年8月号
- [2-21] 一般社団法人日本建築学会:建築材料の熱・空気・湿気物性値、丸善出版株式会社、2001.1
- [2-22] 財団法人建築環境・省エネルギー機構:建物外皮における結露防止のためのガイドライン 第6回日加住宅R&Dワークショップ公表初版、2003.6
- [2-23] 地盤工学会規格:土の保水性試験、地盤工学会、2009
- [2-24] 一般社団法人日本建築学会:日本建築学会環境基準 AIJES-H0001-2020 湿気物性に関する測定基準・同解説、丸善出版株式会社、2020.3
- [2-25] ISO 15148 : Hygrothermal performance of building materials and products-Determination of water absorption coefficient by partial immersion,2002
- [2-26] J.Carmeliet, H.Hens, S.Roels, O.Adan, H.Brocken, R.Cerny, Z.Pavlik, C.Hall, K.Kumaran, L.Pel.:Determination of the liquid water diffusivity from transient moisture transfer experiments, Journal of Thermal Envelope and Building Science 27(4), pp277-305, 2004
- [2-27] 日本規格協会:JIS A 1324 建築材料の透湿性測定方法、1995
- [2-28] 一般社団法人住宅性能評価・表示協会:長期優良住宅認定に係る技術審査マニュアル、2015
- [2-29] 日本ペイント ホームページ:<https://www.nipponpaint.co.jp/support/faq/32/>、2022年調べ
- [2-30] 日本工業規格:土の透水試験方法、日本規格協会、2009
- [2-31] 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, 日本建築学会計画系論文集 第640号、pp.693-699、2009.6

第3章 通気層の排水性能、及び通気特性の検討

3.1 はじめに

第2章の雨水浸入試験により、サイディング嵌合部から通気層への雨水浸入率を定量化した。調査事例に用いられていた仕様の浸入率は、発生頻度の高い低風速時（0～5m/s）において5～12%であり、通気層への雨水浸入は日常的な現象であることを示した。外壁通気構法の通気層は、この浸入した雨水を速やかに排水し、通気層内に滞留した水分や室内からの水蒸気を排出する役割を担っている。しかしながら、通気層にはサイディングを固定する下地材として、図3-1-1に示すような横胴縁、縦胴縁及び固定金具といった種類があり、下地の仕様によって排水及び排湿性能が異なることが考えられる。

第3章では、通気層の性能に着目して、3.2節では通気層内への注水試験を行い、注水と排水の差分から通気層内の滞留率を求める。3.3節では通気特性試験を行い、異なる通気仕様における通気層全体の相当開口面積、及び通気層を構成する各部位（水切り、通気層、軒天部）の通気特性を算出する。

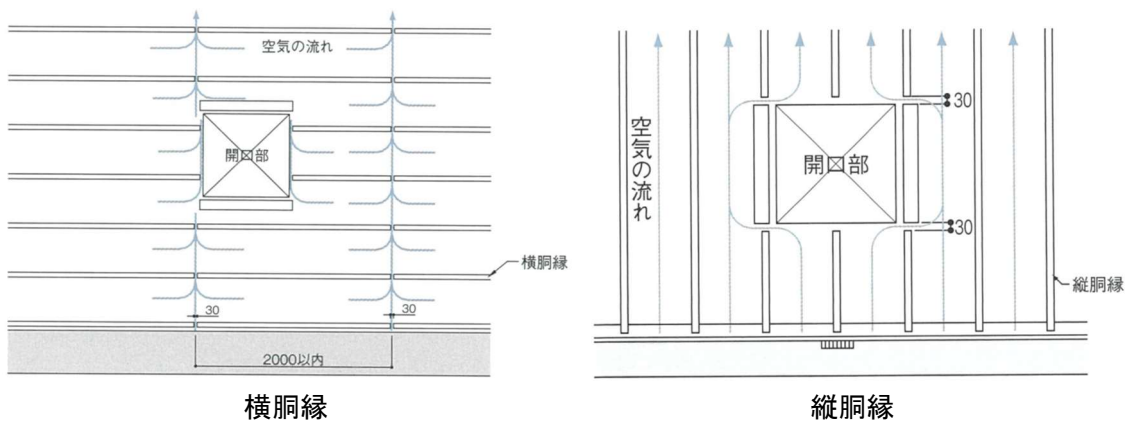


図3-1-1 胴縁の仕様による空気の流れ[3-1]

3.2 通気仕様による排水性能の把握

本節では、浸入水の滞留が予想される横胴縁と排水経路が確保されると考えられる金具留め仕様に対し注水試験を行い、通気層に浸入した雨水の滞留率及び挙動を確認した。また、通気層内に残留した水量から、通気層壁面における単位面積当たりの最大付着量を求めた。

3.2.1 実験概要

試験体の概要を図 3-2-1、3-2-2 に示す。横胴縁仕様は標準施工[3-1]に従い、通気経路として中央に 30 mm の隙間を設け、上下方向に 455 mm 間隔で取り付けた。

注水方法は、注水タンクに水を溜め先端に注水針を備えたチューブを用い通気層へ 24 時間掛け注水した。注水タンクの水量は、栃木県佐野市における梅雨期の平均日降雨量に対し、3 階分の壁面雨量の 5% 分に当たる 900 g^{注1)} とした。注水位置について、金具留め仕様は外壁下端より 1700 mm の位置から注水し、横胴縁仕様は注水量を 3 等分し 3 カ所から注水した。注水は横胴縁から 228 mm の位置とした。注水量と滞留量の収支については、図 3-2-3、3-2-4 のように試験体下端に集水升を設置し、試験終了後に集水量を測定し滞留率を求めた。また、通気層内における雨水の挙動は、外装材の代わりにアクリル板を用い目視にて確認した。

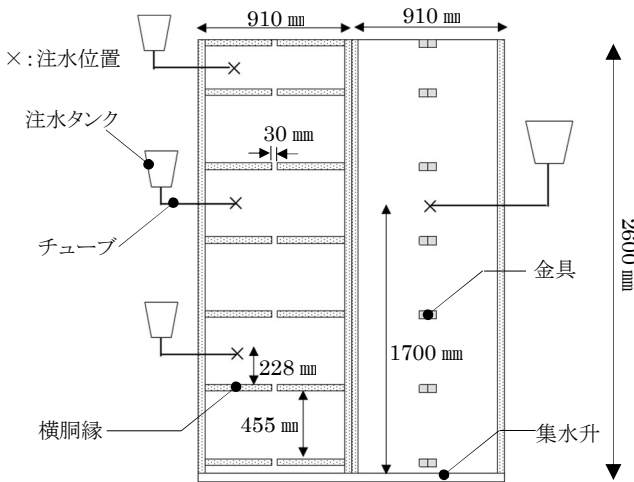


図 3-2-1 注水試験体の概要

(左側：横胴縁仕様、右側：15 mm金具仕様)



図 3-2-2 注水試験体の概要

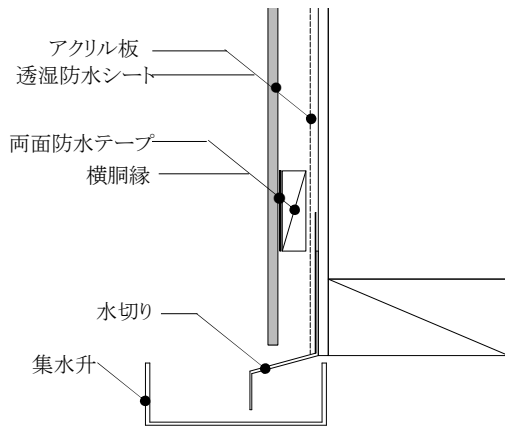


図 3-2-3 断面構成と集水方法



図 3-2-4 集水升の状況

3.2.2 通気仕様による注水量と滞留量の収支

試験結果を表 3-2-1 に示す。排水経路が確保されている金具仕様は注水量の約 9 割が排水され、約 1 割が通気層内に滞留した。横胴縁仕様は約 6 割が排水され、約 4 割が通気層内に滞留した。通気層内に横胴縁のような閉塞物がある場合、通気層内に浸入した雨水は、15 mm 金具と比較し約 4 倍の水が排水されず通気層内に滞留する可能性があることが確認できた。

表 3-2-1 各仕様の排水量、及び滞留率の結果

| 仕様 | 通気層厚さ [mm] | 注水量 [g] | 排水量 [g] | 滞留量 [g] | 滞留率 [%] |
|------|---------------|------------|------------|------------|------------|
| 横胴縁 | 12 | 900 | 513 | 387 | 43 |
| 金具留め | 15 | | 796 | 104 | 12 |

3.2.3 通気層内における雨水の流下挙動

金具仕様に浸入した雨水の挙動は、注水位置から少しずつ横に広がりながら 200 mm 程度の幅で流下し排水升へ流れ落ちた (図 3-2-5、3-2-6)。流下時に透湿防水シート及びアクリル板表面に水滴が残り、通気層内へ 1 割程度の水分が滞留した。なお、注水位置が横胴縁仕様の上段部と比べると 0.9m 程度低いため、同一の高さから注水した場合、高さ方向の滞留量が均一と仮定すれば 2 割弱の滞留率となる。注水直下の位置に金具を配置したが、注水が金具を固定するビスから伝わり合板を濡らした形跡は見受けられなかった。

横胴縁仕様については、注水位置直下の横胴縁上部に雨水が滞留し、徐々に横に広がりながら胴縁上部の滞留水が増加した。図 3-2-7 に示すように幅 300~400 mm (平均 350mm)、高さ 3 mm 程度 (約 11~14g (平均 12.5g)) まで滞留すると、胴縁と透湿防水シートの接面の一部から流れ落ち、この現象を繰り返しながら集水升へ徐々に流下した。試験後、この接

面の濡れ状況を確認するため、水分に反応するスプレーを塗布した。図 3-2-8 に示すように
 胴縁と透湿防水シート接面からの排水経路が確認できた。また横胴縁裏面の水分残留が確
 認され、乾燥し難い状況となっていた。このように胴縁上部への滞留水や胴縁に吸水された
 水分、並びに透湿防水シートやアクリル板表面への付着により注水量の 4 割程度が通気層
 内に滞留したと考えられる。



図 3-2-5 注水針による注水状況

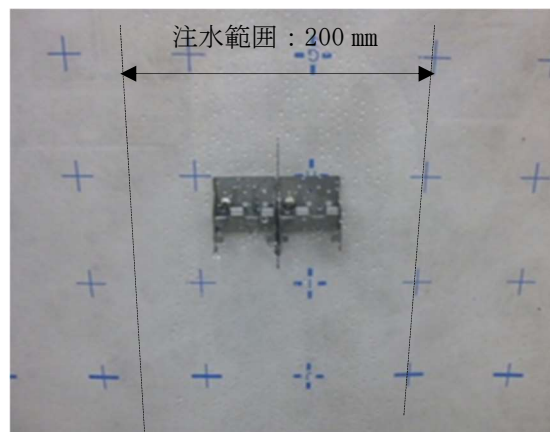


図 3-2-6 金具仕様の流下範囲

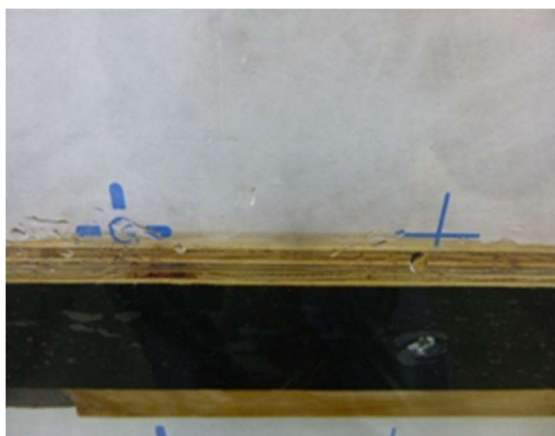


図 3-2-7 横胴縁上端に滞留した水

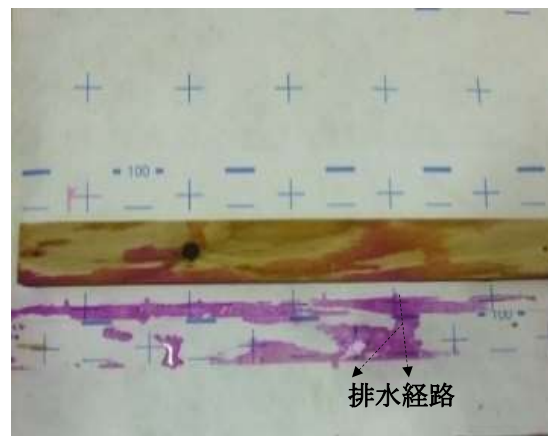


図 3-2-8 横胴縁裏面の濡れ状況と排水経路

本試験より得た各仕様の単位面積当たりの最大付着量を表 3-2-2 に示す。金具仕様の最大
 付着量は、目視観察した壁面の濡れ面積から求めた。横胴縁仕様については、壁面濡れ幅を
 横胴縁上端の濡れ幅 350 mm の半分とし、金具仕様の最大付着量から壁面付着量を求めた。
 表 3-2-3 に横胴縁上部における滞留水量を示す。本試験では胴縁が 6 本設置されているた
 め、横胴縁上端に滞留した水量の合計値は 75g となる。通気層内の壁面はアクリル板及び
 透湿防水シートのため壁面への吸水、及び付着水の蒸発は無いものとする、試験後の滞留

第3章 通気層の排水性能、及び通気特性の検討

量 387g との差分から胴縁の吸水量は 6 本分で 177g と推定される。

これらのことから、通気仕様により通気層内へ浸入した雨水の排水量及び挙動が異なることが確認できた。サイディング嵌合部及びシーリングの劣化などの雨掛かりによる通気層への浸入雨水を排水するためには、横胴縁などの通気層内の障害物をできるだけ無くし水分を滞留させないような設計上の配慮が必要であると思われる。

表 3-2-2 金具、横胴縁仕様における通気層壁面の最大付着量

| 仕様 | 注水高さ [m] | 壁面濡れ幅 [m] | 濡れ面積[m ²] | | 壁面付着量 [kg] | 最大付着量 [kg/m ²] |
|-----|-------------|--------------|-----------------------|---------|---------------|-------------------------------|
| | | | アクリル板 | 透湿防水シート | | |
| 金具 | 1.7 | 0.200 | 0.34 | 0.34 | 0.104 | 0.153 |
| 横胴縁 | 2.5 | 0.175 | 0.44 | 0.44 | 0.135 | |

表 3-2-3 1 本当たりの横胴縁上部における滞留水量

| 胴縁厚さ [m] | 上端滞留幅 [m] | 濡れ面積 [m ²] | 滞留水量 [kg] | 最大付着量 [kg/m ²] |
|-------------|--------------|---------------------------|--------------|-------------------------------|
| 0.012 | 0.35 | 0.0042 | 0.0125 | 3.0 |

3.3 通気仕様による通気特性の把握

通気層は浸入した雨水の排水のほか、通気層内に滞留した水分及び室内からの水蒸気を排湿する役目を担っている。一般に通気構法は基礎水切り、サイディング下端の位置出しに用いられるスターター、固定金具、野縁等様々な部材で構成されており、通気層の厚さに加えこれらの部材が抵抗となり通気特性に影響を及ぼすと考えられる。本節では、異なる通気仕様における通気層全体、及び構成部材の通気特性を把握することにより、構成部材による通気特性への影響について検討した。

3.3.1 実験方法、条件及び測定箇所

住宅の省エネルギー基準解説の通気特性試験方法 [3-2] より、通気層全体及び構成部材の通気特性を求めた。試験方法の概要を図 3-3-1 に示す。気密チャンバー内外の圧力差を 0.5～5Pa まで段階的に変化させ、その際の通気量を超音波流量計 (FD-G25、㈱キーエンス) で、圧力損失を微差圧計 (GC30、長野計器㈱) で測定した。

通気方向は外装下端から外装上端方向とした。圧力測定点は P0～P5 とし気密チャンバー内外 (P1- P0 間) の他、各部位 (水切り部 (P0- P5 間)・通気層 (P3- P4 間)・軒天部 (P1- P2 間)) に生じる圧力差を測定した。

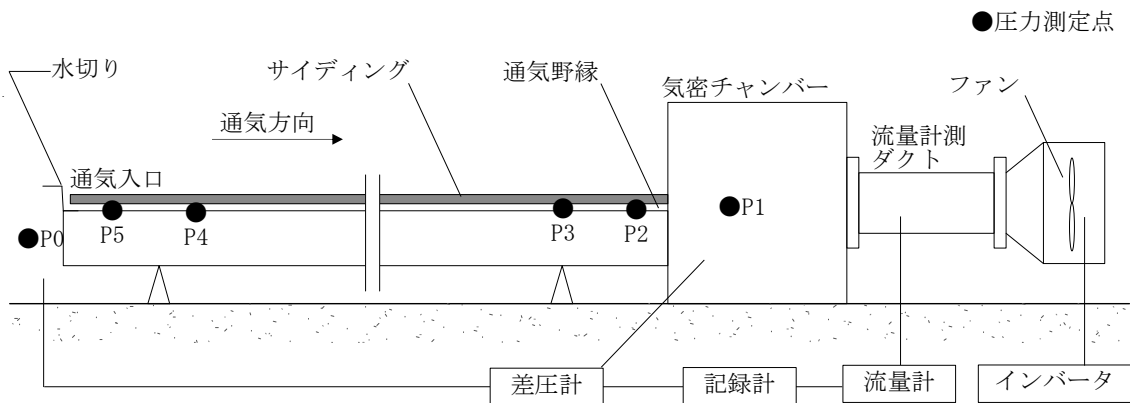


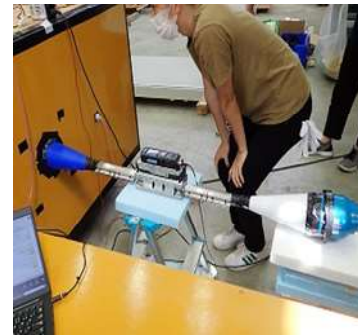
図 3-3-1 通気特性試験方法の概要



試験状況全景



気密チャンバー接続状況



風量測定状況

図 3-3-2 試験体設置状況

3.3.2 試験体仕様

試験体仕様を表 3-3-1 に示す。前節の注水試験と同様に横胴縁仕様と金具仕様とした。金具仕様にはサイディングの垂直荷重を保持するため、サイディング下端にスターターと呼ばれる支持が取り付けられる。このスターターによる影響を確認するため、施工性及び耐荷重性能の確保を目的に用いられるロングスターターと、通気経路確保を優先したショートスターターの 2 種類とした (図 3-3-3、3-3-4)。スターターの開口面積は、ロングスターターは通気穴の面積、ショートスターターはスターターの取り付け間隔から求めた。試験体概要を図 3-3-5～3-3-10 に示す。横胴縁仕様は、注水試験と同様に中央に 30 mm の通気幅を設けた。試験体寸法は幅 910 mm、高さ 3000 mm とした。試験体は、木製スタッドの上に、厚さ 12 mm の合板を施工し、その上から透湿防水シートを設置した。外装材は厚さ 14 mm のサイディングとし、基礎水切りと外壁下端との隙間は 7 mm とした。

表 3-3-1 試験体仕様の概要

| 仕様 | 固定方法 | 通気層厚さ [mm] | 断面積 [cm ²] | スターター | スターター開口面積 [cm ²] |
|----|------|---------------|---------------------------|-------|---------------------------------|
| A | 横胴縁 | 12 | 109.2 | | |
| B | 金具 | 6 | 54.6 | ロング | 10 |
| C | | | | ショート | 46 |
| D | | 15 | 136.5 | ロング | 10 |
| E | | | | ショート | 107 |



図 3-3-3 ロングスターター



図 3-3-4 ショートスターター

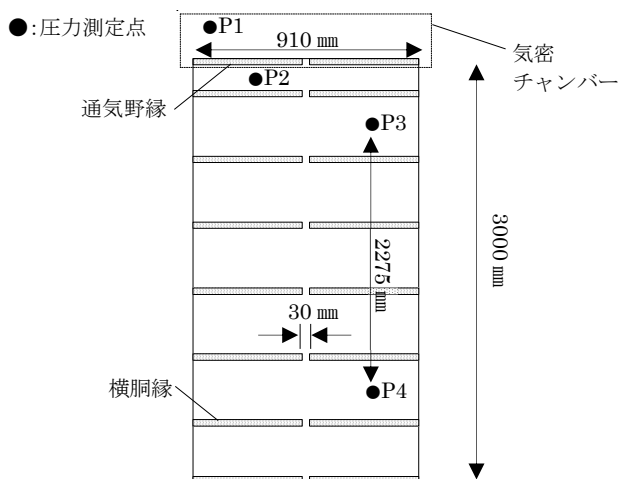


図 3-3-5 試験体の概要 (仕様 A: 横胴縁)



図 3-3-6 横胴縁仕様の状況

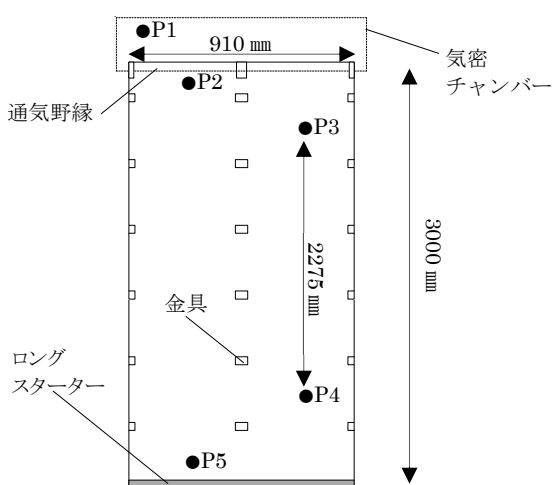


図 3-3-7 試験体の概要 (仕様 B、D: ロングスターター)



図 3-3-8 金具仕様の状況

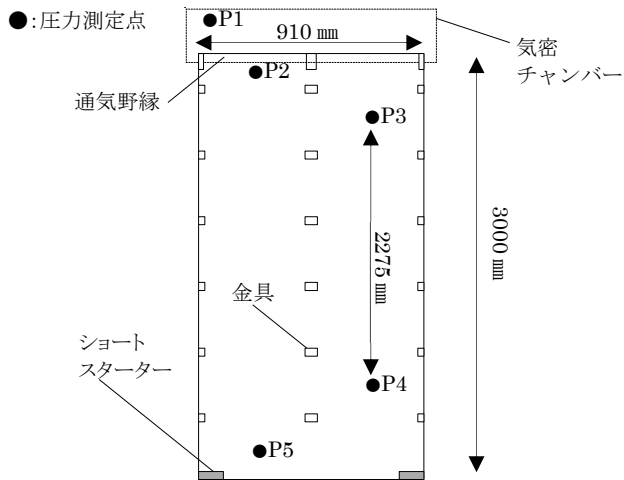


図 3-3-9 試験体の概要（仕様 C、E：ショートスターター）



図 3-3-10 サイディング設置状況

3.3.3 通気特性の算出方法

測定で得られた通気量-圧力差の関係を用い、通気層の通気特性（隙間特性値 n 、通気率 a 、相当開口面積 αA 、圧力損失係数 ζ 、摩擦抵抗係数 λ ）を算出した。なお、 αA 、 ζ 及び λ は試験体内外圧力差 9.8Pa 時の値とした。

①測定状態の通気量

本試験において、各圧力差における通気量は標準状態（0℃、1013Pa）における流量（ノルマル流量）から式（3.3.1）により算出した。

$$Q = Q_N \frac{T + 273.15}{273.15} \frac{0.1013}{P + 0.1013} \quad (3.3.1)$$

Q ：測定時の空気密度における通気量 [m³/h]、 P ：測定時の気圧 [MPa]

Q_N ：標準状態における通気量 [m³/h]、 T ：測定時の空気温度 [℃]

また、本試験において圧力差と通気量の関係は式（3.3.2）によって回帰できる[3-3]。

$$Q = a \Delta P^{1/n} \quad (3.3.2)$$

ΔP ：圧力差 [Pa]、 a ：通気率 [(m³/h) / P^{1/n}]、

n ：隙間特性値 [無次元] 通常 1~2

②相当開口面積 αA

相当開口面積 αA は、以下に示す方法で算出した。一般に抵抗のある開口部を含む空気の流量は式 (3.3.3) で定義される。

$$Q = \frac{3600}{10000} \alpha A V \quad (3.3.3)$$

α : 流量係数[無次元]、 A : 断面積[cm²]
 V : 相当風速[m/s]、 ρ : 空気の密度 1.205[kg/m³]

流量係数 α は、部材表面の摩擦や縮流などのために断面積 A を一様な風速で流れないため、 A に対する有効面積を係数化したものである。流れに対して抵抗の大きいものは α が小さい。風速 V は、ベルヌーイの式より $\Delta P = \rho/2 V^2$ の関係[3-3]があるので、これより V を求め式 (3.3.3) に代入すると。

$$Q = \frac{3600}{10000} \alpha A \left(\frac{2}{\rho}\right)^{1/2} \Delta P^{1/2} \quad (3.3.4)$$

相当開口面積 αA [cm²]は、有効面積を計数化した流量係数 α と、ある抵抗を持つ断面積 A の相乗積として表すことができる。式 (3.3.4) と式 (3.3.2) を等しいとして、これより相当開口面積 αA は (3.3.5) 及び (3.3.6) 式のように表せる。 n が 2 未満の場合は、圧力差 ΔP によって相当開口面積 αA は変化し、 n が 2 の場合は一定となる。

【 $n < 2.0$ の場合】

$$\alpha A = \frac{10000}{3600} \left(\frac{\rho}{2}\right)^{1/2} a \Delta P^{1/n - 1/2} \quad (3.3.5)$$

【 $n = 2.0$ の場合】

$$\alpha A = \frac{10000}{3600} \left(\frac{\rho}{2}\right)^{1/2} a \quad (3.3.6)$$

③圧力損失係数 ζ

一般に、空気の流れにおける圧力損失は流量に影響するので動圧の形で次のように表す [3-4]。

$$\Delta P_T = \zeta \frac{\rho}{2} V^2 \quad (3.3.7)$$

ζ : 圧力損失係数[無次元]、 ΔP_T : 全圧損失[Pa]

圧力損失係数 ζ は、孔の形状や寸法等により通気特性が異なるので個々に決定され、 ζ の大きいほど流れに対して抵抗が大きくなる。なお、相当風速 V は試験体断面を一様に風が流れていると仮定した場合の風速であり、連続の式 ($Q=3600/10000 \times AV$ A : 断面積[cm²]) から算出した。

本試験の場合、全圧損失 ΔP_T と試験体前後の圧力差 ΔP は等しいと考えることが出来るので、式(3.3.2)と連続の式から相当風速 V を求め、式(3.3.7)に代入すると圧力損失係数 ζ は(3.3.8)及び(3.3.9)式のように表せる。 n が2未満の場合は、圧力差 ΔP によって ζ は変化し、 $n=2$ の場合は一定となる。

【 $n < 2.0$ の場合】

$$\zeta = \left(\frac{3600 A}{10000 a} \right)^2 \frac{2}{\rho} \Delta P^{1 - \frac{2}{n}} \quad (3.3.8)$$

【 $n = 2.0$ の場合】

$$\zeta = \left(\frac{3600 A}{10000 a} \right)^2 \frac{2}{\rho} \quad (3.3.9)$$

3.3.4 通気層および部位別の通気特性

各仕様の圧力差と通気量の関係を図 3-3-11～3-3-15、各部位の通気特性値を表 3-3-2 に示す。通気層内における通気幅が 30 mm の横胴縁 (仕様 A) が 2.4[cm²/m] と最も低く、6 mm 金具が 5.5～6.1[cm²/m]、15 mm 金具が 20.9～47.4[cm²/m] と金具仕様は通気層の厚さに応じ相当開口面積も増加した。

各部位の圧力損失について、仕様 A、B、C は通気層部 (P3- P4 間) の圧力損失が大きく、通気層部の圧力損失が通気層全体の相当開口面積に影響を及ぼしたと推察される。仕様 D は、ロングスターターの影響により水切り部 (P0- P5 間) の圧力損失が仕様 E (ショートスターター) に比べ 20 倍以上となった。この影響により αA が仕様 E の半分以下となったと推察される。

表 3-3-2 通気特性試験結果

| 仕様 | 測定箇所 | | | | | | |
|----|--------------------------------|---|----------------------------|--------------------------------|--------------------------------|------|--------------------------------|
| | P ₀ -P ₁ | | | P ₀ -P ₅ | P ₃ -P ₄ | | P ₁ -P ₂ |
| | n | a [(m ³ /h) / Pa ^{1/n}] | αA [cm ² /m] | ζ ₁ | ζ ₂ | λ | ζ ₃ |
| A | 1.45 | 0.626 | 2.4 | / | 1334 | 6.8 | 1.0 |
| B | 1.13 | 0.941 | 5.5 | - | 50 | 0.13 | 1.2 |
| C | 1.24 | 1.241 | 6.1 | - | 45 | 0.11 | - |
| D | 1.72 | 7.045 | 20.9 | 51.8 | - | - | 1.0 |
| E | 1.35 | 11.090 | 47.4 | 2.1 | 3 | 0.02 | 3.2 |

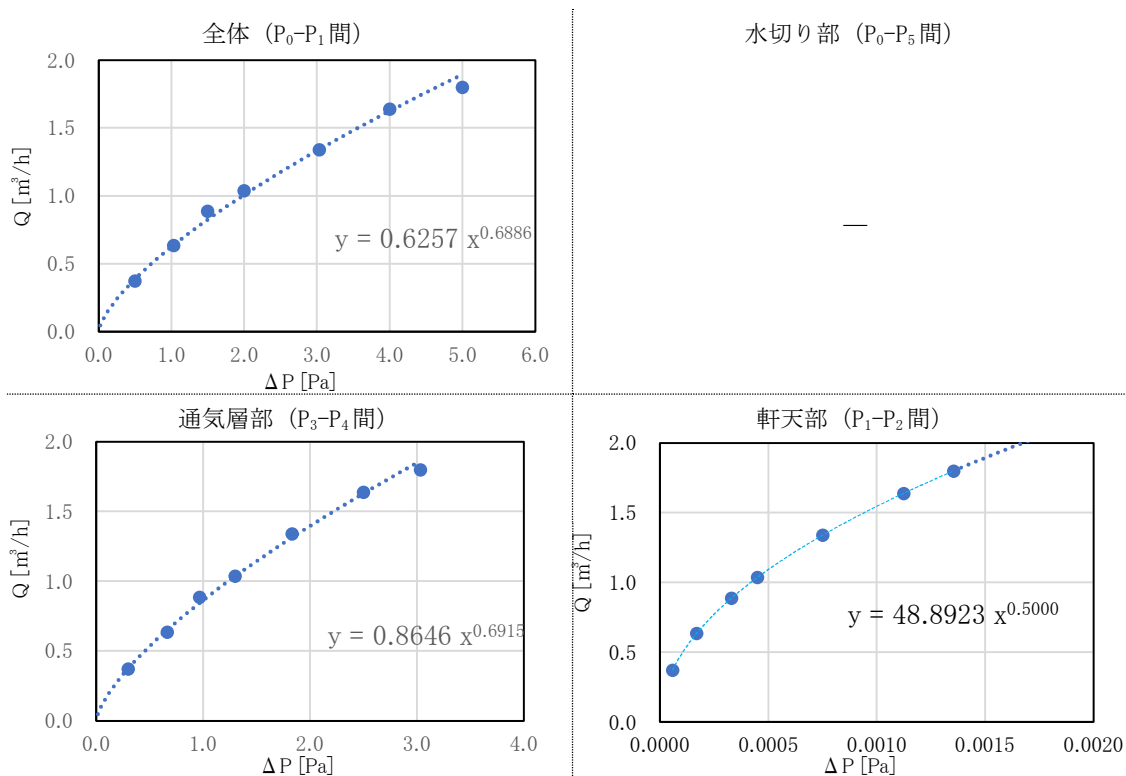


図 3-3-11 仕様 A の圧力差 ΔP と通気量 Q の関係

第3章 通気層の排水性能、及び通気特性の検討

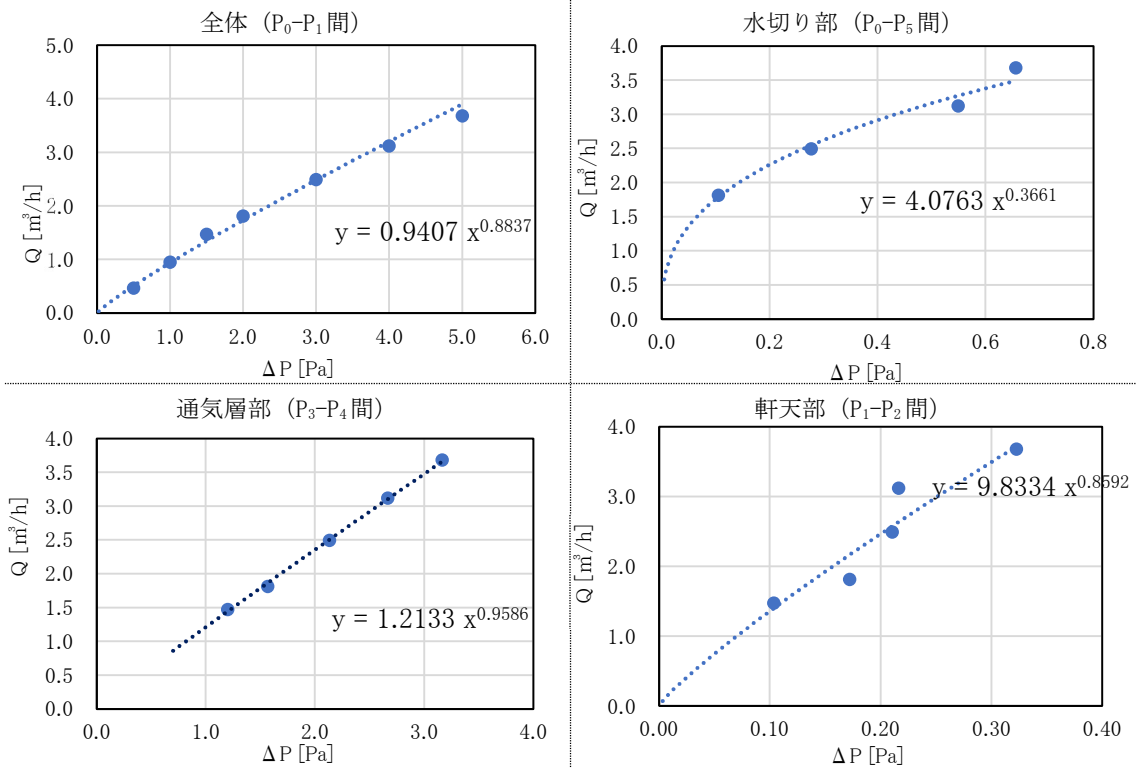


図 3-3-12 仕様 B の圧力差 ΔP と通気量 Q の関係

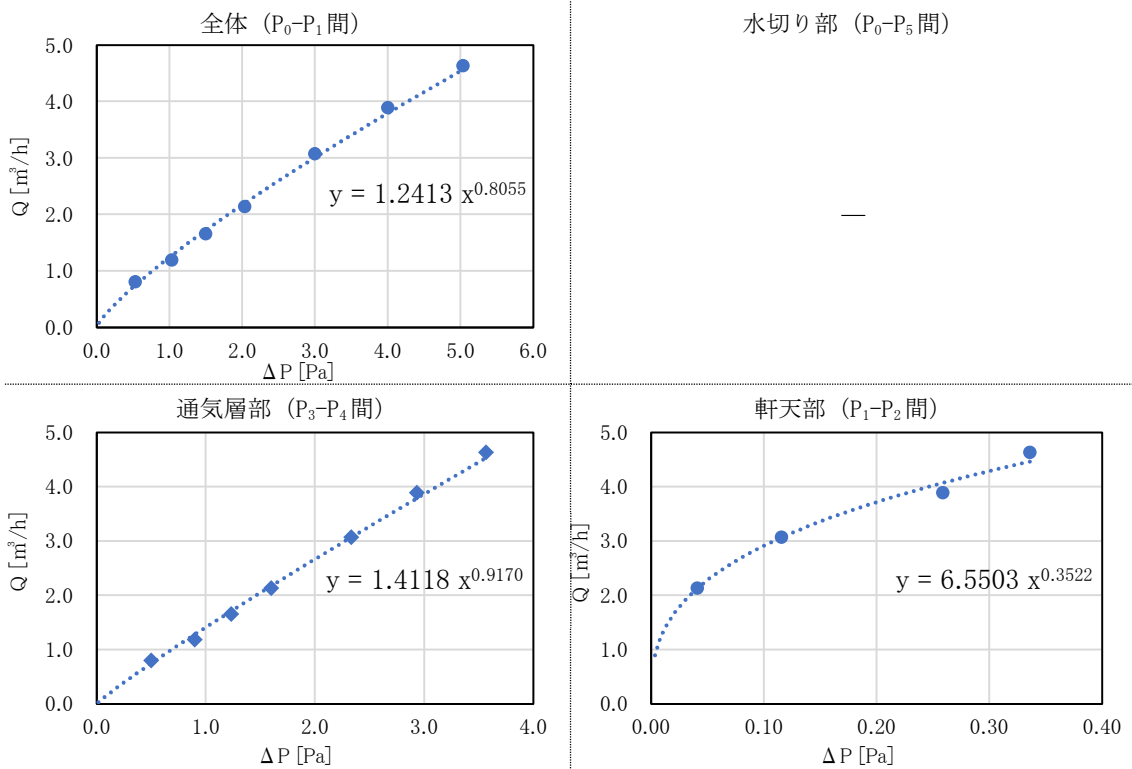


図 3-3-13 仕様 C の圧力差 ΔP と通気量 Q の関係

第3章 通気層の排水性能、及び通気特性の検討

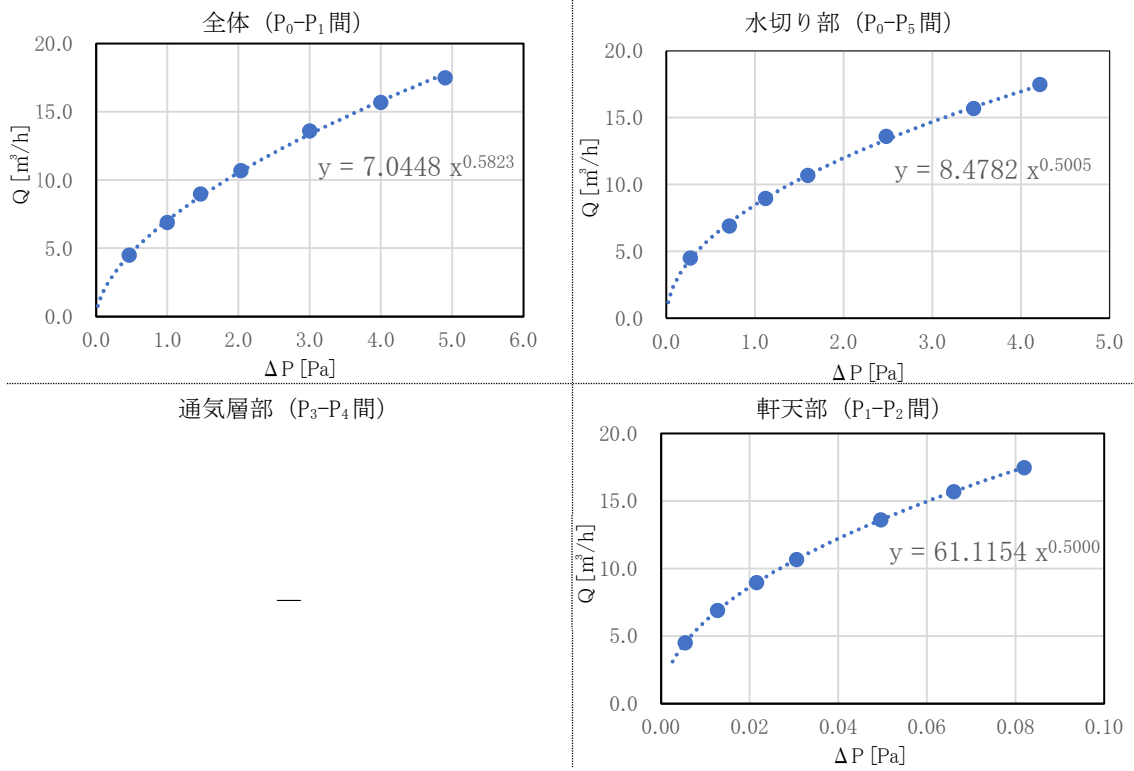


図 3-3-14 仕様 D の圧力差 ΔP と通気量 Q の関係

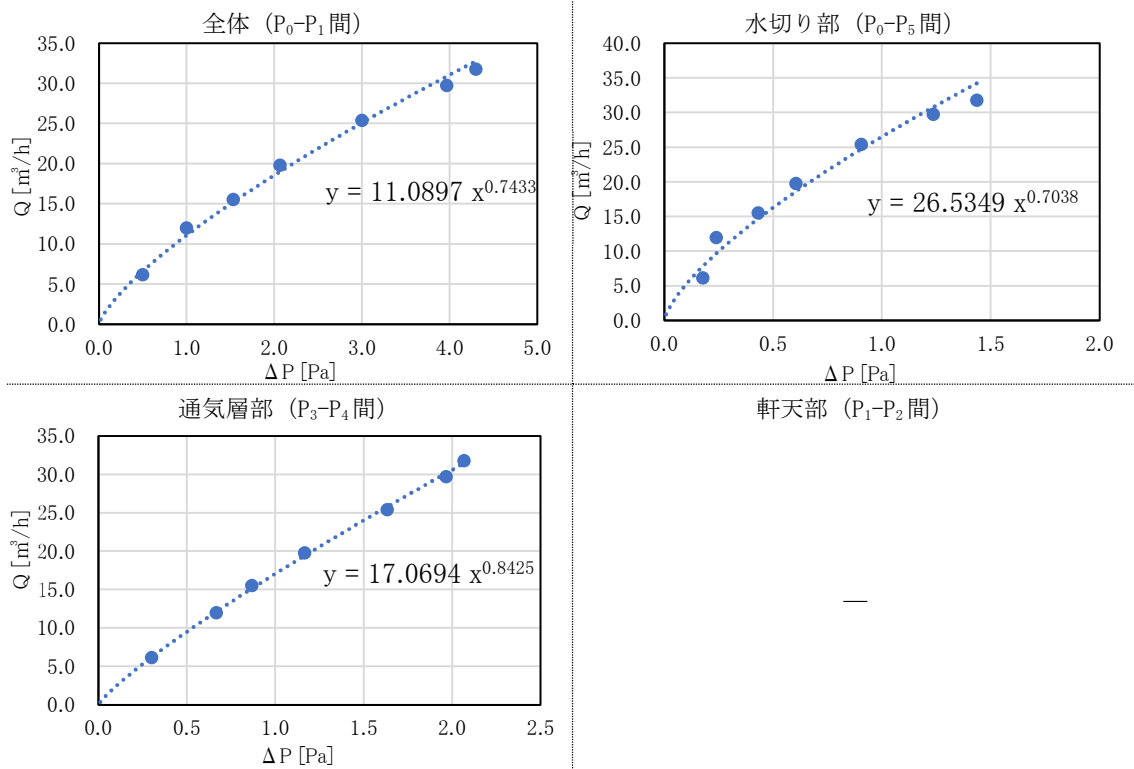


図 3-3-15 仕様 E の圧力差 ΔP と通気量 Q の関係

3.3.5 通気層内における摩擦抵抗係数とレイノルズ数の関係

6 mm及び 15 mm金具（仕様 C・E）において、平行二平面とみなせる区間（P3- P4 間）の摩擦抵抗係数 λ とレイノルズ数 Re を、各圧力差の通気流量から風速を求め(3.3.10)(3.3.11)式より算出した（図 3-3-16）。一般に、円形ダクトのムーディー線図で層流の λ を求める際は比例定数 $64/Re$ を使用しているが[3-4]、本結果での比例定数は $76/Re$ となった。通気金具、透湿防水シート及びサイディング表面で生じる圧力損失が影響したものと推察される。

本試験において、仕様 C・E の風量から換算した通気層内風速の最大値は 0.9m/s であった。梅野ら[3-5]は 2 階建て住宅における通気層内風速の 80%近くが 0.4m/s 未満であることを報告していることから、実環境下の通気特性を測定できていたと考えられる。そして、レイノルズ数が 2000 以下であることから、金具留め仕様の通気層内はほぼ層流であると推察される。

$$\Delta P = \lambda \cdot \frac{l}{D} \cdot \frac{\rho}{2} \cdot v^2 \quad (3.3.10)$$

$$Re = \frac{v \cdot D}{\gamma} \quad (3.3.11)$$

ΔP : 圧力差 [Pa]、 l : 通気層長さ [m]、 D : 等価直径 [=2 d]
 ρ : 空気密度 [=1.293 kg/m³]、 v : 通気層風速 [m/s]
 γ : 空気の動粘性係数 [=1.5×10⁻⁵ m²/s]、 d : 通気層厚さ [m]

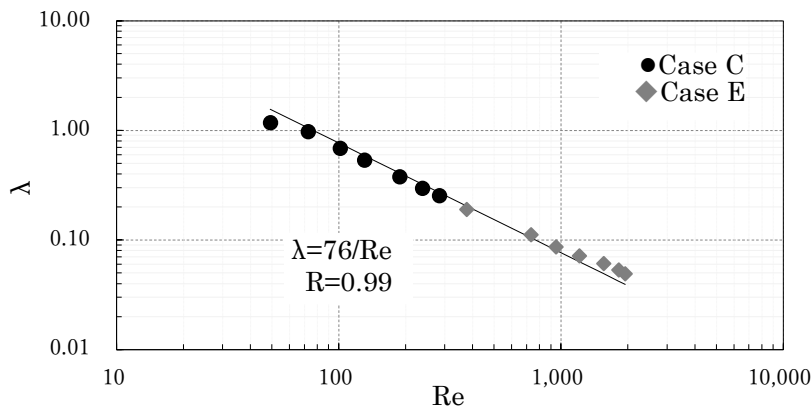


図 3-3-16 レイノルズ数 Re と摩擦抵抗係数 λ との関係

3.3.6 建物高さによる通気層全体の相当開口面積

表 3-3-2 の値より建物高さ L による通気層全体の相当開口面積 αA を、(3.3.12)式より求めた結果を図 3-3-17 に示す。なお、一部の抵抗が大きく算出不能であった部位については、

仕様 E の値を用いた。仕様 A 及び C は、建物高さに応じて通気層部の圧力損失が増加するため、相当開口面積が低減し高さ 18m では 3m の半分となった。仕様 D はスターター部の圧力損失が大きいため、高さに応じた通気層部の圧力損失による影響が少なく通気層全体における相当開口面積の変化が最も少なくなった。仕様 E も高さに応じて相当開口面積が低減したが、元の値が大きいため、18m の高さにおいても仕様 D 以上の値となった。

本節の結果より、スターターの種類や建物高さなど通気層を構成する部材の組み合わせにより相当開口面積が半減するなど、通気層の構成部材が通気特性に影響を及ぼすことが確認出来た。通気層全体の相当開口面積を確保するためには、通気層の厚さだけでなく構成部材の組み合わせも考慮することが必要であると考えられる。

$$\alpha A = \frac{1}{\sqrt{\zeta_1 + \lambda \frac{L}{D} + \zeta_3}} A \quad (3.3.12)$$

L : 建物高さ [m] 、 A : 幅 1m 当たりの断面積 [cm^2/m]

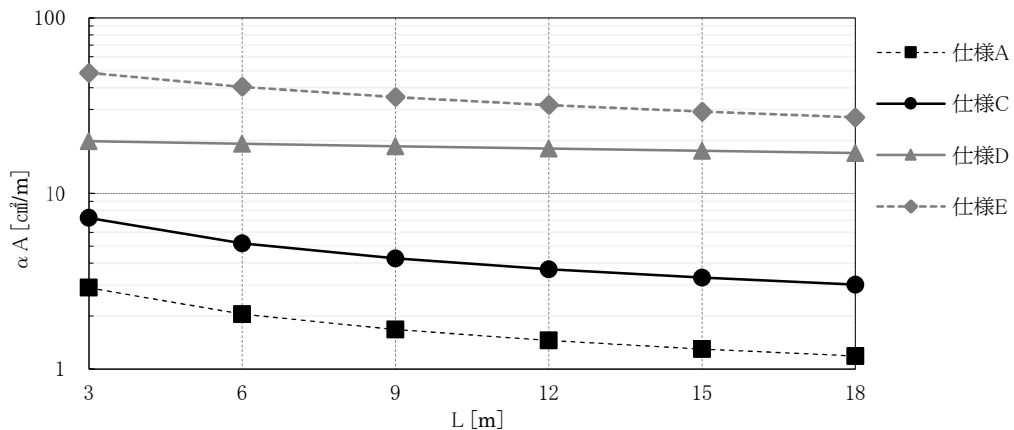


図 3-3-17 建物高さ L と相当傾向面積 αA との関係

3.4 第3章のまとめ

注水試験及び通気特性試験により、異なる通気仕様における浸入雨水の滞留率及び通気特性を把握した。得られた知見を下記に示す。

- 1) 3.2 節では通気層内への注水試験より、注水が横胴縁の上に滞留した横胴縁仕様の滞留率は4割、排水経路が確保されている金具仕様の滞留率は1割であった。通気層内に横胴縁のような閉塞物がある場合、通気層内に浸入した雨水は、15 mm金具と比較し約4倍の水が排水されず通気層内に滞留する可能性があることが確認できた。また、試験結果より通気層内に滞留可能な最大付着水量を得た。
- 2) 3.3 節では通気特性試験より、異なる通気仕様における通気層全体の相当開口面積を算出した。通気層内における通気幅が30 mmの横胴縁が最も低く、金具仕様は通気層の厚さに応じ相当開口面積も増加した。また、金具仕様におけるスターターの種類、及び建物高さなど通気層を構成する部材の組み合わせにより相当開口面積が半減した。通気層全体の相当開口面積を確保するためには、通気層の厚みだけでは無く構成部材の圧力損失も併せて考慮する必要がある。

注釈

[注1] 注水量[g]について

注水タンクの水量は、佐野市における気象データの水平面降雨量と壁面雨量の関係を勘案し、以下の手順より求めた。

注水タンクの水量は通気層への注水量となる。通気層への注水量 J_p は、壁面雨量 R_w [L/m²h]に対し一定の浸入率 f で壁面積 S_w [m²]に浸入すると想定すると (A1) 式で表される。

$$J_p = R_w \cdot f \cdot S_w \quad (A1)$$

壁面雨量 R_w については、壁面雨量係数 α [s/m]、水平面降雨量 R_h [mm/ m²h]、外部風速 U [m/s]、水平面上における風向と壁面の法線がなす角度 θ [°]とすると (A2) 式で表される[3-6]。

$$R_w = \alpha \cdot R_h^n \cdot U \cdot \cos\theta \quad (A2)$$

(A1) 式に (A2) 式を代入すると、 J_p は (A3) 式となる。

$$J_p = \alpha \cdot f \cdot S_w \cdot R_h^n \cdot U \cdot \cos\theta \quad (A3)$$

ここで、壁面雨量係数 α については、既往研究で0.02~0.26[s/m]まで広範囲に亘る報告[3-6]があるが、本研究では石川ら[3-7]による実験から得られた小規模建築物に対する常数 0.109 (≒1/9.2)を採用した。水平面降雨量 R_h は、佐野市における過去数年の梅雨期の平均日降雨量が約6~16[mm/日]

であることから、安全側の計算を行うため 20 mm/日とした。風向 θ は 0° (鉛直方向)、風速 U は $1[\text{m/s}]$ 、浸入率 f は 2.2 節の水密試験より 5%、 R_h^n の指数 n は 1 とした。これらの値を (A3) 式に代入し、24 時間分の注水量 $J_p \doteq 900\text{g}$ を求めた。

第 3 章 参考文献

- [3-1] 日本窯業外装材協会：住宅の品質・耐久性向上と外壁通気構法 技術資料. Vol. 8、2001. 6
- [3-2] 財団法人建築環境・省エネルギー機構：住宅の省エネルギー基準の解説 第 3 版 7 刷, 財団法人建築環境・省エネルギー機構, 2010
- [3-3] 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
- [3-4] 田中俊六, 武田仁, 岩田利枝, 土屋高雄, 寺尾通仁, 秋元孝之：最新 建築環境工学, 井上書院, 2016
- [3-5] 梅野徹也, 銚井修一, 齋藤宏昭, 本間義規：壁体内通気層における防露性能の実態に関する研究 (その 2) , 日本建築学会環境系論文集, 第 729 号, pp. 951-959, 2016. 11
- [3-6] B.Blocken, and J.Carmeliet: Overview of three state-of-the-art wind-driven rain assessment models and comparison based on model theory, Building and Environment Vol.45, pp.691-703, 2010
- [3-7] 石川廣三, 橋本佳大：壁面に衝突する雨滴の傾斜角の推定 外壁面におよぼす雨がかり負荷の評価に関する基礎的研究, 日本建築学会構造系論文集, 第 611 号, pp. 13-20, 2007. 1

第4章 実験棟による壁内水分挙動の実態把握

4.1 はじめに

第1章では、放湿型結露事例から発生原因を、工法的な要因である雨水浸入及び通気特性、物性の変化といった材料特性、熱履歴などの環境要因が複合的に影響し生じたものと推定した。第2章において、雨掛かりによる外皮からの水分影響に着目して、サイディング嵌合部からの雨水浸入率を水密試験により定量化し、経年劣化によるサイディング表面からの吸水量の変化を把握した。サイディングを用いた通気構法において、通気層への雨水浸入は日常的な現象であること、及び塗膜の劣化によりサイディングの吸水量が増加することを確認した。

第3章では、通気層の性能に着目して、異なる通気仕様における通気層の排水性能、及び通気特性を把握した。横胴縁仕様の滞留率は金具留めの4倍、金具仕様の相当開口面積は、通気層の厚みだけでなくスターターなど通気層を構成する部材の組み合わせにより半減することを確認した。

本章では、雨水由来の水分負荷を与える実験棟を建設し、年間を通じた屋外試験から、異なる通気仕様の壁内水分挙動を比較することにより、通気層への雨水浸入及びサイディングの吸水、並びに通気層の排水及び排湿性能が壁内湿度に及ぼす影響を把握する。

4.2 壁内水分挙動の実態把握

4.2.1 実験棟の概要

実験棟は、栃木県足利市内の足利大学キャンパス内に平屋の実験棟を木質パネル構法にて建設した。実験棟の外観及び概要を図4-2-1、表4-2-1、ならびに構成及び測定部位を図4-2-2に示す。屋根形状は寄棟であり軒の出は無く軒先に雨樋を設置した。周囲に隣接する建物は無い。

雨掛かりによる外皮からの水分負荷を壁内に与えるため、外装材は第2章で材料特性を把握した仕様FC（第1章で示した結露事例（図1-3-2）と同様の経年劣化により白亜化した暴露期間12年のサイディング）を取り付けた。また、降雨量に比例した長期的な雨水浸入を再現するため、軒先に漏斗を取り付け捕集した雨水をチューブにより壁面中央の高さから通気層へ直接注水した。漏斗面積は、雨水滞留の促進実験と仮定し幅0.91m階高3mの3階分の壁面雨量が1階壁面に流下し、この流下雨量に対し第2章での水密試験から得た浸入率5%分の雨水を捕集できる寸法^{註1)}とした。

第4章 実験棟による壁内水分挙動の実態把握

壁内の測定項目については、通気層・断熱材外気側・断熱材室内側・室内の温湿度、通気層に面する5mm合板の含水率を測定した（測定間隔60分）。合板含水率は長さ4mmの電極による電気抵抗式の含水率計により測定した。通気層の風速は、東面のみ測定した（測定間隔1分）。



図 4-2-1 実験棟の外観、及び注水用漏斗とチューブの設置状況

表 4-2-1 実験棟の概要

| | |
|--------|--|
| 建築地 | 栃木県足利市（足利大学キャンパス内） |
| 構法 | 木質パネル工法 |
| 床面積 | 10 m ² （2.73×3.64m） |
| 屋根形状 | 寄棟（屋根勾配：1/2） |
| 断熱材 | 外壁：グラスウール 24k75mm 天井：ロックウール 100mm |
| サイディング | 組成：繊維補強セメント板 製造方法：抄造法 暴露期間：12年（表面に白亜化有り） |

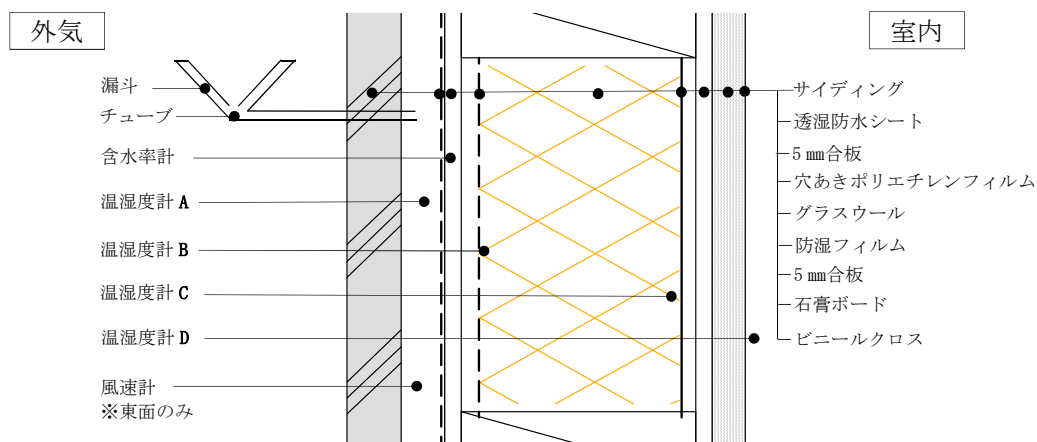


図 4-2-2 外壁構成と計測部位

通気層の仕様を表 4-2-2 に示す。第 3 章で確認した通気及び浸入雨水の滞留する横胴縁、及びこれらの排出経路が確保される金具留めを含め、3 種類の異なる仕様とした。仕様①は横胴縁（通気層厚さ：12mm、滞留率：4 割、相当開口面積：2.4[cm²/m]）、仕様②を金具留め（通気層厚さ：6mm、滞留率：1 割、相当開口面積：6.1[cm²/m]）、仕様③を金具留め（通気層厚さ：15mm、滞留率：1 割、相当開口面積：20.9[cm²/m]）とした。なお、結露事例（図 1-3-2）は仕様②が該当する。

表 4-2-2 通気層の仕様、及び排水・通気特性

| 仕様 | ① | ② | ③ |
|-----------------------------|-----|-----|------|
| 固定方法 | 横胴縁 | 金具 | 金具 |
| 通気層厚さ [mm] | 12 | 6 | 15 |
| 滞留率 | 4 割 | 1 割 | 1 割 |
| 相当開口面積 [cm ² /m] | 2.4 | 6.1 | 20.9 |

試験体の概要、及び測定位置を図 4-2-3 に示す。各仕様は幅 910 mmとし、仕様①の横胴縁には中央に 30 mmの通気幅を設け、仕様③の下端には第 3 章の通気特性試験で用いた通気孔を有したロングスターターを設置した。なお、横胴縁仕様の注水箇所は、浸入水が横胴縁の上に滞留するため、局所的に注水が集中しないように漏斗面積を 1/3 にし壁面上中下の 3 カ所から注水し、東面のみ各注水箇所の下を測定した。金具留め仕様は、排出経路が確保されることにより通気層内に滞留する水量が少ないことから壁面の中央から注水した。通気層下端は土台水切りを設置し開放し、通気層上端は小屋裏を介して棟換気により外気に開放されている。開口部は西面にドアがあるだけで、サッシなどの窓部は設けていない。

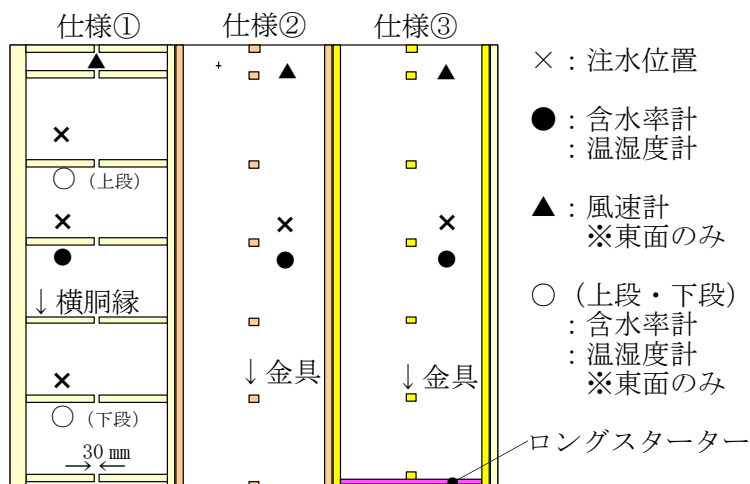


図 4-2-3 通気層の概要

測定位置について、温湿度・含水率は 1 階の中央高さ（FL+1300mm）近傍に設置し、風

速計は東面のみ壁面上端に設置した。測定期間は、2018年9月から2019年8月末日まで実施し、注水も同時期から開始した。室内の冷房は26℃とし2019年6月より6時から23時の間稼働させた。

4.2.2 相当開口面積による通気量の比較

第3章では通気特性試験から各通気仕様の相当開口面積を算出した。一般に相当開口面積が大きい通気仕様ほど、通気量が多くなり通気層の排湿性能が高いと考えられる。本節では、通気仕様による通気量の相違を把握するため、通気層内の風速を熱線風速計（アイ電子技研製）により測定し、通気量を算定した。風速計の設置位置は図4-2-3に示すよう東面の壁面上部とし、横胴縁仕様は胴縁間の通気用スリット（幅30mm）上部に配置した。

外壁幅1mあたりの通気量について、梅野ら[4-1]は通気層内の流れを上下方向の層流かつ、断面方向の風速分布を2次曲線[4-2]と想定し(4.2.1)式にて通気量を算定しており、本節においても本式を用いた。なお、横胴縁仕様は30mm幅の通気用スリットで測定された風速のため、試験体幅910mmで通気幅を除いて外壁幅1mあたりの通気量に換算した。測定期間は2019年8月6日から3日間とした（測定間隔1分間）。

$$Q = \frac{2}{3}vd3600 \quad (4.2.1)$$

Q : 通気量[m³/h], v : 風速[m/s], d : 通気層厚さ[m]

測定結果を表4-2-3に示す。通気層内における3日間の平均風速から求めた平均通気量は、相当開口面積に応じて増加し15mm金具仕様が最も高くなった。通気仕様による1日の通気量変動を図4-2-4に示す。通気量の変動については、東面のため午前中に日射取得によって生じる通気層内外の温度差により通気量が上昇し、特に通気量の多い15mm金具仕様の上昇が大きくなったと推察される。

表 4-2-3 各仕様の平均風速と平均通気量

| 仕様 | αA [cm ² /m] | 平均風速[m/s] | 平均通気量[m ³ /h] |
|------------|---------------------------------|-----------|--------------------------|
| ① (横胴縁) | 2.4 | 0.37 | 0.33 |
| ② (6mm金具) | 6.1 | 0.13 | 1.84 |
| ③ (15mm金具) | 20.9 | 0.08 | 2.80 |

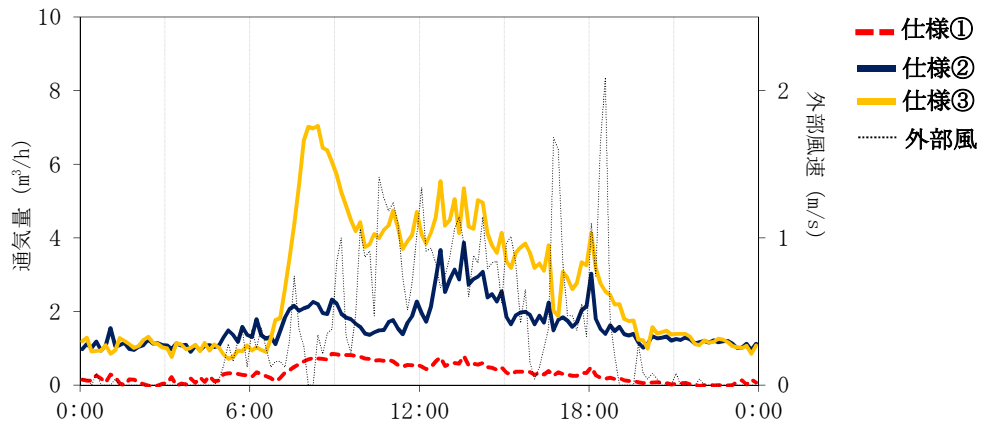


図 4-2-4 各通気仕様の通気量、及び外部風速の日変動（測定日：8月7日）

4.2.3 実測結果に基づく通気量の推定方法の検証

前節で述べた通気層風速の測定期間は限られるため、以下に述べる相当開口面積、温度、及び外部風速の測定結果から通気量を推定する手法を検証した。

一般に通気層内の通気量は、(4.2.2)式を用い相当開口面積 αA 、通気層内外温度差による圧力差 ΔP_t 、及び外部風による圧力差 ΔP_w から求めることができる。

$$Q = \alpha A \sqrt{\frac{2}{\rho} (\Delta P_t + \Delta P_w)} 3600 \quad (4.2.2)$$

Q ：通気層内の通気量(m^3/h)、 αA ：相当開口面積(m^2/m)

ΔP_t ：通気層内外温度差による通気層内外の圧力差(Pa)

ΔP_w ：外部風による通気層内外の圧力差(Pa)

ρ ：空気の密度 (kg/m^3)

通気層内外温度差による圧力差 ΔP_t は(4.2.3)式で表される。ここでは、圧力差を求める任意高さ h を通気層高さ 2.6mとし、実験棟における温度の測定値を用いて ΔP_t を算出した。

$$\begin{aligned} \Delta P_t &= gh(\rho_o - \rho_i) \\ &= gh(353.25/T_o - 353.25/T_i) \end{aligned} \quad (4.2.3)$$

h ：通気層高さ (m)

ρ_o ：外気の空気密度 (kg/m^3)、 ρ_i ：通気層内の空気密度(kg/m^3)

T_o ：外気温度 (K)、 T_i ：通気層内温度 (K)

外部風による圧力差 ΔP_w は、風向や実験棟の周囲環境によって異なるため、外部の風向風速と通気層内風速の測定値との関係から、(4.2.4)式[4-1]に示される 16 方位別の比例定数 C を求めて推定した。なお、 C は通気層内外の温度差の影響を少なくするため、2019年8月6日からの3日間のうち通気層内外温度差が5K以下の風速を用いて求めた。また、横胴縁仕様については、30mmの通気幅直上の風速を計測しているため、試験体幅910mmに対する通気幅30mmの割合を測定値に乗じたものを(4.2.4)式の通気層内風速 v として用いた。図4-2-5に得られた比例定数を示す。

$$v = Cv_o \quad (4.2.4)$$

C : 外部風による比例定数 (無次元)、 v_o : 外部風速 (m/s)

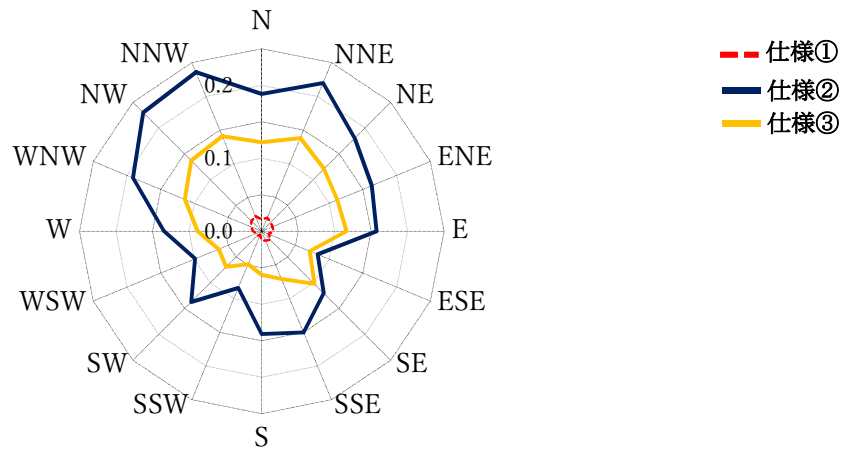


図 4-2-5 外部の風向風速と通気層内風速の比例定数 C

(4.2.4) 式で得た通気層内風速の推定値と外壁幅 1mあたりの風量の関係は前述した(4.2.1)式より求めることができる。また、(4.2.1)式、(4.2.2)式の通気量が等しく、(4.2.2)式で通気層温度差を無視すれば(4.2.5)式が得られ、外部風による通気層内外の圧力差 ΔP_w は(4.2.6)式により求めることができる。

$$\alpha A \sqrt{\frac{2}{\rho} \Delta P_w} 3600 = \frac{2}{3} C v_o d 3600 \quad (4.2.5)$$

$$\Delta P_w = \frac{\rho}{2} \left(\frac{2}{3} \frac{d}{\alpha A} C v_o \right)^2 \quad (4.2.6)$$

(4.2.3)、(4.2.6)式を(4.2.2)式に代入すると、通気層内の通気量を表す(4.2.7)式が得られる。

$$Q = \alpha A \sqrt{\frac{2}{\rho} \left[gh \left(\frac{353.25}{T_o} - \frac{353.25}{T_i} \right) + \frac{\rho}{2} \left(\frac{2}{3} \frac{d}{\alpha A} C v_o \right)^2 \right]} 3600 \quad (4.2.7)$$

実験棟における通気量の実測値と(4.2.7)式での計算値の比較結果を図 4-2-6 に示す。

(4.2.7) 式から求めた通気量は、午前中の値に差が見受けられた。このことに関して、図 4-2-7 に軒先部の納まりを示す。実験棟の通気経路は小屋裏を介して換気棟から排気される経路であり、通気層の上端部と小屋裏空間が近い納まりとなっている。また、雨樋の裏側には小屋裏換気の吸気孔が設けられている。仕様③の結果をみると、計算値の通気量は 6 時頃から上昇し、10 時頃ピークを迎え徐々に減少傾向を示した。これは、日射取得に伴い通気層内の温度が上昇し、通気層内の空気密度が外気より小さくなったことによるものである。一方、実測値の通気量は、計算値と同時刻に上昇し始めたが、8 時頃に下降傾向を示した。ここで、加藤ら[4-3]の夏期における屋根各部材の測定によれば、屋根葺き材が黒色スレート材の場合、屋根下地合板裏面の最高温度は 55℃、小屋裏内部は 46℃であった。また、実験棟における測定日の通気層内の最高温度は 10 時頃に 46℃であった。これらのことより、午前中に通気量の差が生じた原因は、太陽高度が上昇し 8 時頃から屋根面に日射が当たり始め、小屋裏空間の温度、特に通気層の上端に近い屋根下地合板近傍の温度が上昇し、本部位の空気密度が通気層内の値と比べ低く、通気層内の空気の上昇が妨げられた可能性が考えられる。その場合、計算モデルは小屋裏空間と繋がっておらず、通気量は日射取得に伴う通気層の内外温度差に応じて増加するため、このような差が現われる。

しかしながら、その他の時間帯については実測値と近い結果となっており、通気量の日変動の大略を通気層の相当開口面積、比例定数C、温度及び外部風速を使用して得ることが可能と考えられる。

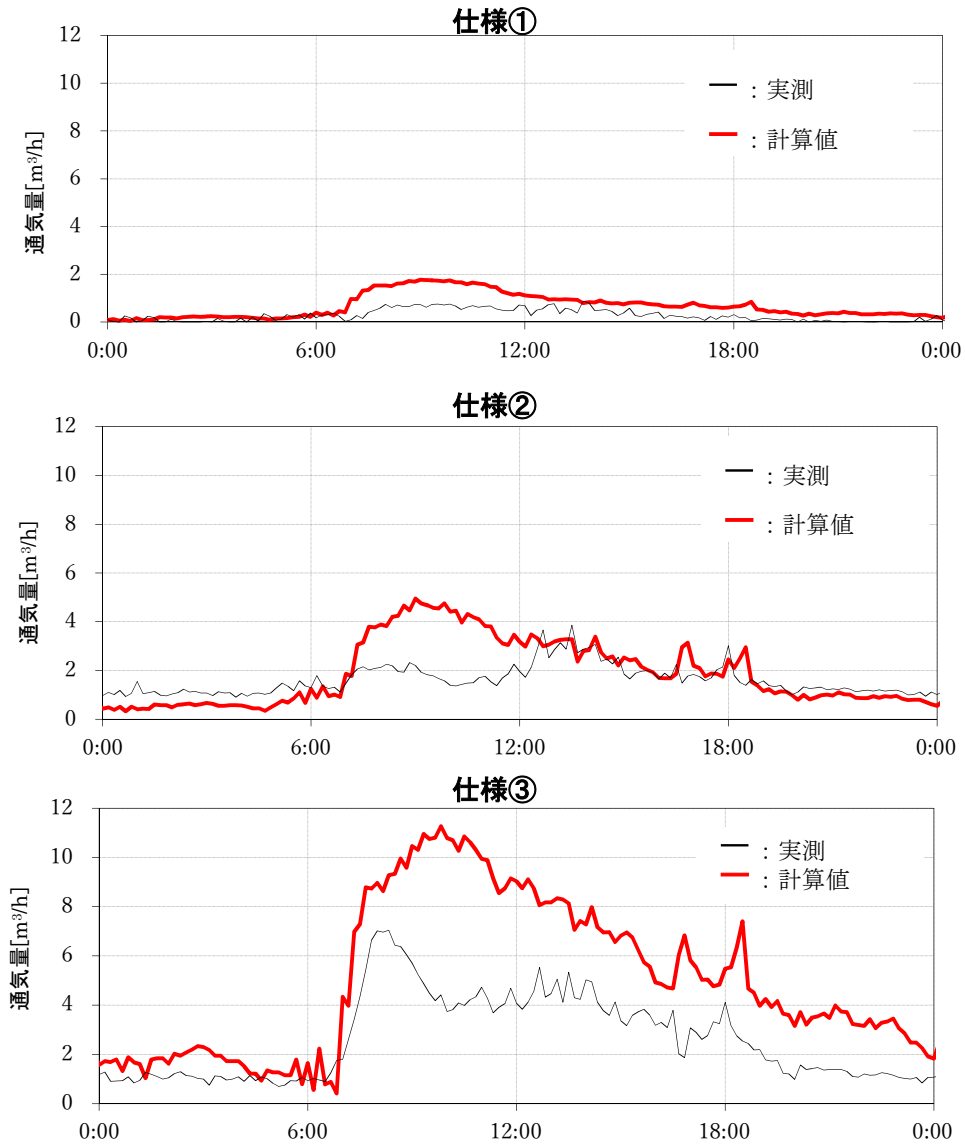


図 4-2-6 通気量の実測と計算値の比較 (測定日：8月7日)

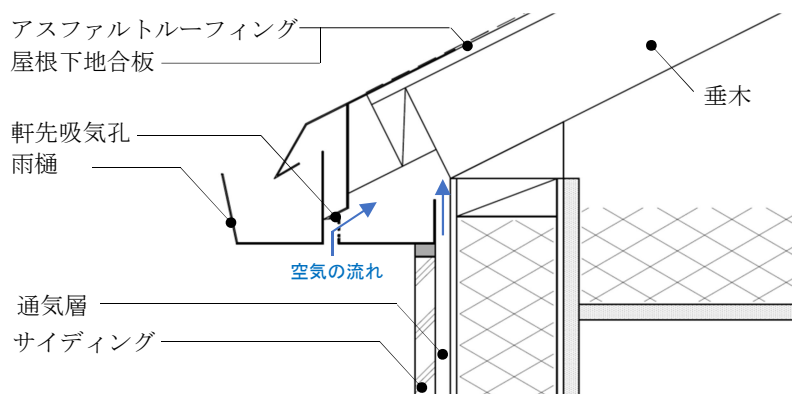


図 4-2-7 軒先部の納まり

4.2.3 放湿型結露時における壁内水分挙動

4.2.3.1 夏期における降雨に伴う壁内湿度及び合板含水率の上昇

最も水分蓄積の生じた夏期における測定結果の一例として、東面における梅雨明け前後の通気層又は壁内の温度、相対湿度、含水率、及び外気温の日平均、並びに日降水量の推移を図 4-2-8～4-2-11 に示す。なお、通気層の相対湿度について、横胴縁仕様は中段のデータが欠損したため、上段と下段の値を示す。また、前節(4.2.7)式を用いて計算した通気量の日平均を図 4-2-12 に示す。通気量の計算には佐野市の気象データを用いた。

梅雨であった 7 月 25 日までは雨掛かりによる通気層への雨水浸入及びサイディングの吸水の影響により、外側合板の含水率、通気層及び壁内の相対湿度が上昇傾向であったと推察される(図 4-2-8～4-2-10)。梅雨明け以降は、図 4-2-8 の合板含水率が低下しており、外気の温度上昇に伴いサイディングや外側合板に含まれていた水分が、通気層及び低温の室内側に放湿されたと推察される。

そして、最も通気量の少ない仕様①(横胴縁)では、図 4-2-11 及び図 4-2-12、に示すように壁内で 30 日以上、次に通気量の少ない仕様②(6 mm 金具)では 12 日間飽和状態が継続し、防湿層界面での結露の兆候が見られたことから、雨水由来の水分を十分に排湿できなかったものと推察される。一方、最も通気量が多い仕様③(15 mm 金具)では相対湿度 90% 以下に抑えられていた。

横胴縁仕様における通気層の相対湿度は、上段より下段の方が高くなった(図 4-2-9)。これは、局所的に注水が集中しないよう 3 カ所から注水したが、上段及び中段からの流下水が下段まで流下したことによる影響と推察される。データが欠損した中段の相対湿度は、上段と中段の間の範囲で変動するものと考えられる。

各仕様による相当開口面積及び滞留率は、仕様①が 2.4[cm²/m]及び 4 割、仕様②が 6.1[cm²/m]及び 1 割、仕様③が 20.9[cm²/m]及び 1 割であり、相当開口面積が大きく浸入水の滞留率が小さい仕様ほど通気層の水分排出効果が高く、断熱層内の高湿化を避けられることが確認出来た。

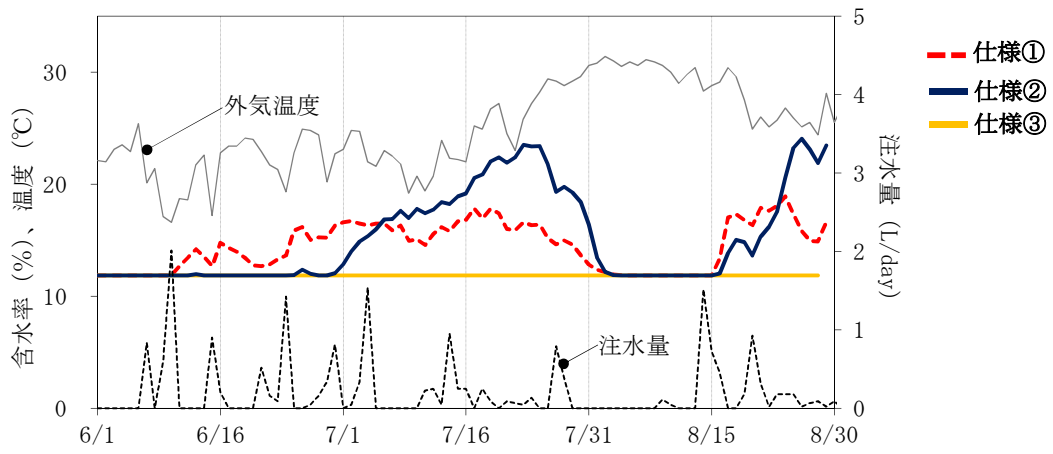


図 4-2-8 夏期における合板の含水率変動

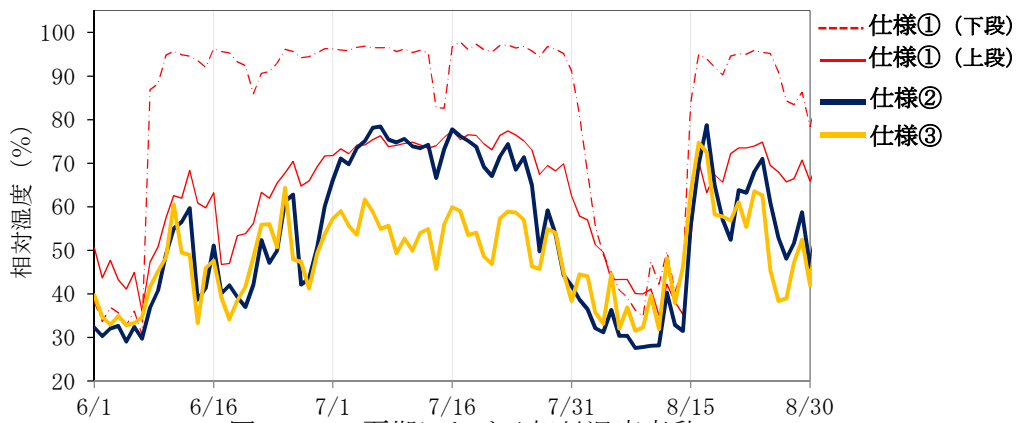


図 4-2-9 夏期における相対湿度変動
(湿度 A 点：通気層)

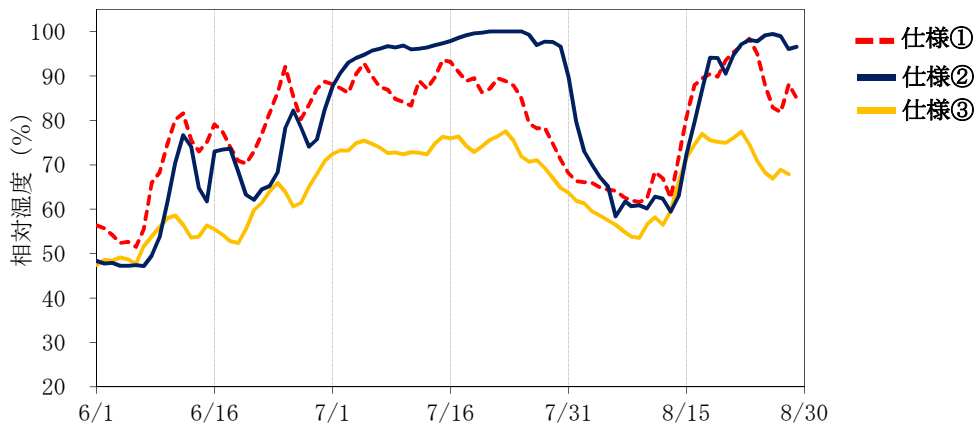


図 4-2-10 夏期における相対湿度変動
(湿度 B 点：穴あきポリエチレンフィルムと断熱材間)

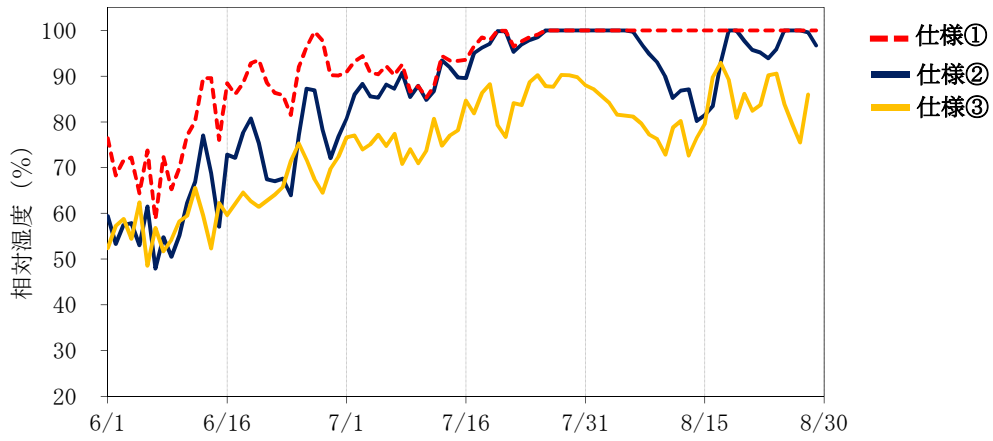


図 4-2-11 夏期における相対湿度変動（湿度C点：断熱材と防湿フィルム間）

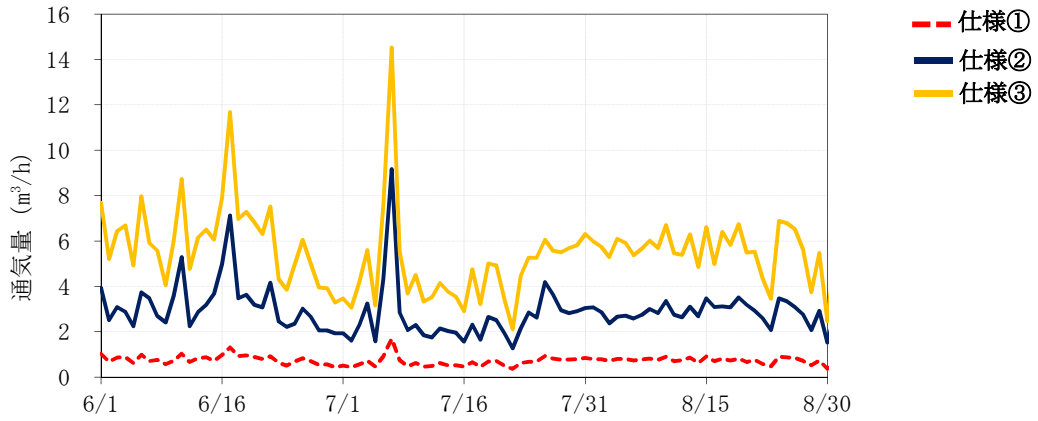


図 4-2-12 夏期における通気量の計算値

4.2.3.2 壁内における水分移動のプロセス

水分移動のプロセスを東面の仕様②（金具 6mm）の結果を用いて考察する。雨期（7月17日）の温度・絶対湿度・含水率を図4-2-13、4-2-14に示す。

午前中の日射取得に伴う温度上昇により、サイディングに含まれた水分が放湿され、午前中から昼前に通気層の絶対湿度Aが上昇する。同時に通気層から排湿できなかった水分が、透湿防水シートを透過し外側合板に吸湿され、さらに外側合板から放湿された水分が壁体内に浸入する。壁内の水分は低温部である室内側に移動するため、断熱材・防湿フィルム間の絶対湿度Cが緩やかに上昇し12時頃最も高くなった。その後、絶対湿度A～C全て低下するが、20時以降はC点が最も高く断熱材室内側に水分が蓄積されていることが確認できた。

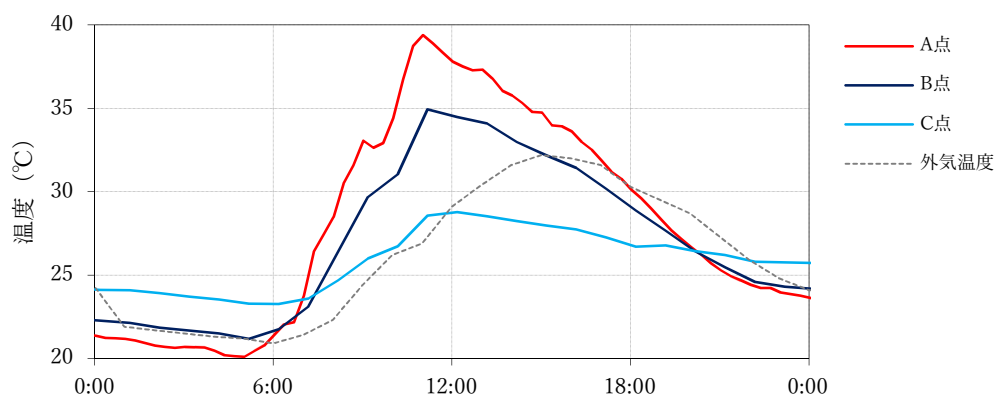


図 4-2-13 7月17日の東面における温度変化（仕様②）

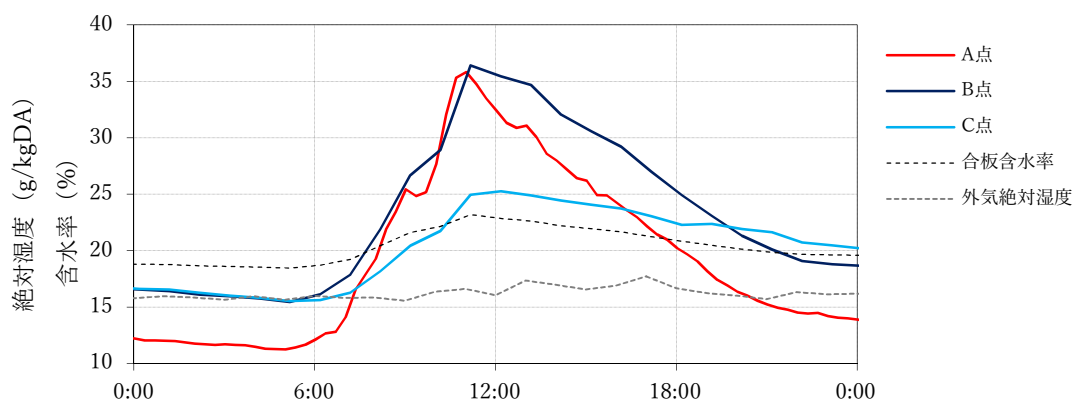


図 4-2-14 7月17日の東面における絶対湿度及び含水率の変化（仕様②）

4.2.3.3 通気仕様による壁内水分挙動の比較

通気仕様の違いによる壁内の水分挙動を比較するため、雨期（7月17日）東面における断熱層内の絶対湿度及び相対湿度を図4-2-15、4-2-16に示す。

最も通気量の少ない横胴縁仕様については、図4-2-15（絶対湿度）に示すように、午前中の日射取得に伴う温度上昇により、雨水由来の水分が通気層及び断熱層内へ放湿され絶対湿度が上昇したと推察される。図4-2-16の相対湿度の変化については、日射取得に伴う断熱層内の水蒸気量の増加によって相対湿度が上昇し、防湿層界面の室内側（相対湿度C）で飽和状態に至った。その後、外気側（相対湿度B）の相対湿度は低下するが、断熱層室内側は結露水の滞留により飽和状態が翌日まで継続したと推察される。このようなプロセスを繰り返しながら、防湿層界面に水分が徐々に蓄積され、外気温が上昇する7月末日以降は、図4-2-11に示すように飽和状態が30日間以上も継続したと思われる。

一方、最も通気量の多い15mm金具仕様においては、同様に午前中はサイディング等から水分が放湿されるが、通気層の排湿及び排水効果により断熱層内に放湿される水分量は横胴縁仕様より少なく、絶対湿度Bが10[g/kgDA]程度低くなったものと考えられる。その結果、室内側の相対湿度Cは上昇するが飽和に至らなかった。

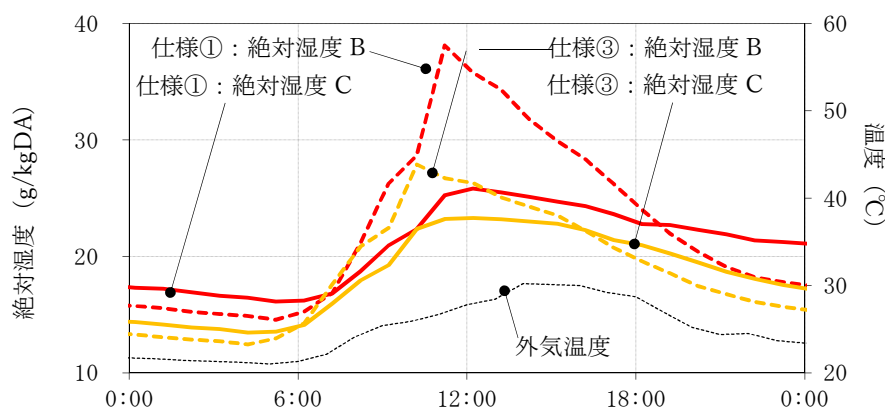


図4-2-15 7月17日の東面における絶対湿度と外部温度の変化（仕様①、③）

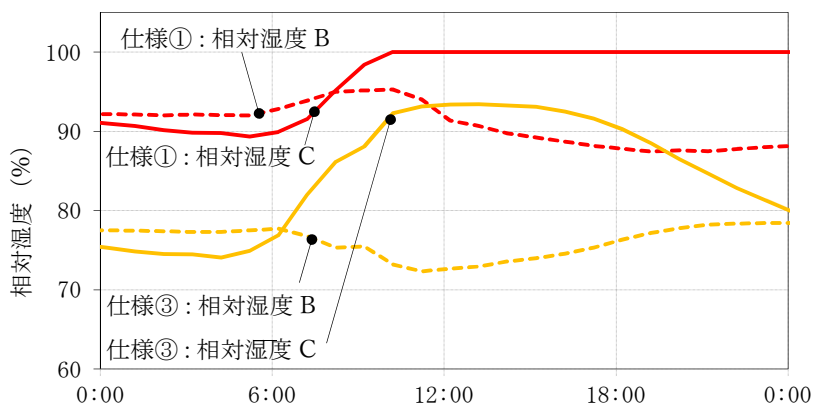


図4-2-16 7月17日の東面における相対湿度の変化（仕様①、③）

4.2.4 放湿型結露による結露水流下の目視調査

前節までの実験棟での実測調査から、雨水由来の水分を十分に排湿できなかった仕様において放湿型結露の兆候が示唆された。本節では防湿層界面における結露状況を確認するため、夏期経過後に室内側から構造体内部を目視確認した（図 4-2-17）。比較のため、図 4-2-18 に放湿型結露が生じた実住宅（築 12 年、通気層仕様：6 mm 金具、外装材：実験棟と同一）の目視状況を示す。図 4-2-11 で飽和状態に至らなかった 15 mm 金具仕様は結露水の痕跡は確認できなかったが、飽和状態が継続した 6 mm 金具及び横胴縁仕様では、実住宅同様に結露水の流下によって生じたと推察される枠組み横芯材の水跡が確認できた。

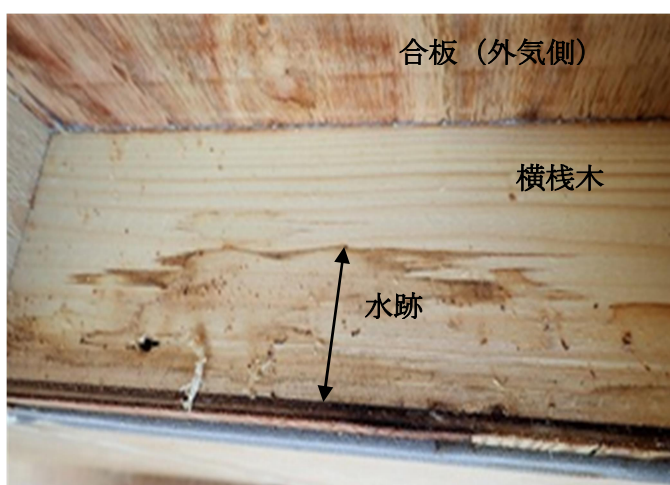


図 4-2-17 実験棟における結露水流下状況の確認（仕様②）

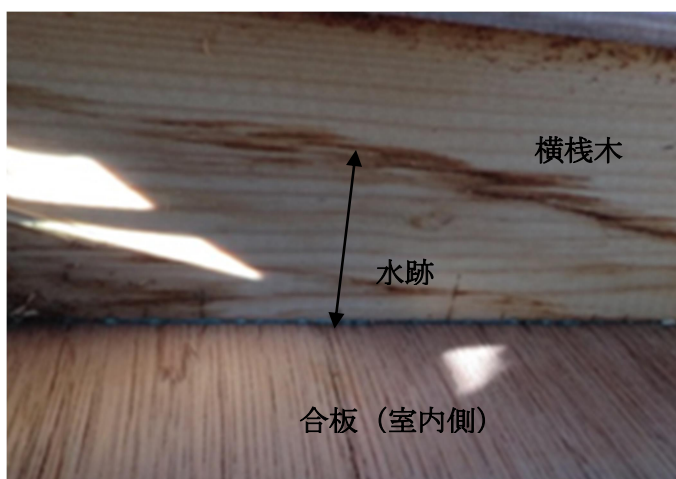


図 4-2-18 実住宅における結露水流下状況（結露事例仕様）

4.2.5 通気層の排水及び排湿性能が壁内湿度に及ぼす影響

4.2.5.1 通気仕様及び方位による壁内の積算結露時間

断熱層内の湿度センサーが 100%RH に達した時点で結露発生と見なし、仕様及び方位毎に積算時間をまとめた結果を表 4-2-4 に示す。横胴縁及び 6 mm 金具仕様はいずれかの方位で断熱層における結露が生じたが、15 mm 金具仕様は年間を通じ全方位で結露が発生していない。また、東面室内側における結露発生の積算時間は、横胴縁仕様で約 1500 時間、6 mm 金具仕様で約 650 時間であるが、15 mm 金具仕様では結露が発生せず、前節同様に相当開口面積が大きく滞留率が小さい仕様ほど壁内結露が生じ難いことが確認出来た。

日射による温度変化を受けやすい東、西、南面については、前節に示した放湿型結露により断熱層室内側（相対湿度 C）が外気側（相対湿度 B）に比べ結露時間が長くなったと推察される。

日射による温度変化を受け難い北面については、横胴縁仕様のみ飽和が生じ、断熱層室内外側ともに他の方位に比べ最も結露時間が長い結果となった。また、秋から春にかけての断熱層外気側（相対湿度 B）に結露が見られ、他方位とは大きく異なっていた。

表 4-2-4 各仕様における方位別壁内の積算結露時間

| 方位 | 仕様 | 湿度 B 点 (外気側) | | | | | 湿度 C 点 (室内側) | | | | |
|----|----|--------------|-----|-----|-----|-------|--------------|---|-----|------|-------|
| | | 秋 | 冬 | 春 | 夏 | 合計 | 秋 | 冬 | 春 | 夏 | 合計 |
| 東 | ① | 6 | 0 | 0 | 14 | 20 | 256 | 0 | 169 | 1100 | 1,525 |
| | ② | 2 | 0 | 0 | 274 | 276 | 26 | 0 | 0 | 630 | 656 |
| | ③ | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 西 | ① | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 51 | 0 | 121 | 899 | 1,071 |
| | ② | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| | ③ | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 南 | ① | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 10 | 0 | 0 | 178 | 188 |
| | ② | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| | ③ | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 北 | ① | 418 | 138 | 479 | 935 | 1,970 | 29 | 2 | 309 | 1374 | 1,714 |
| | ② | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| | ③ | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |

4.2.5.2 方位及び通気仕様による年間の壁内水分挙動

最も飽和が生じた横胴縁仕様と飽和の生じなかった 15 mm 金具仕様の東面と北面における年間の温湿度と外気の日平均変動、及び時間降水量を図 4-2-19～4-2-22 に示す。

横胴縁仕様の東面については、図 4-2-19、4-2-20 に示すように秋雨期の浸入雨水が横胴縁で滞留するため、断熱層内の相対湿度が徐々に上昇した。その後、降水量及び気温の低

下により断熱層内の水分が排湿され、10月中旬以降は相対湿度が徐々に低下した。冬期は晴天日が多いため、断熱層内の相対湿度も低下傾向であったが、4月以降の降水量の増加とともに断熱層内の相対湿度も上昇した。その後、梅雨が明けた7月末日以降に、湿度C点にて30日間以上飽和状態が継続したことから、前節で示した防湿フィルム界面における結露水の流下が生じたものと推察される。

北面の横胴縁仕様については日射量が少なく低温が維持されるため、図4-2-19、4-2-20に示すように断熱層内の水分が排湿されず、東面に比べ外気側（相対湿度B）の相対湿度が室内側（相対湿度C）より高く推移したと推察される。結果として、他方位と異なり、秋から春にかけて断熱層内の結露時間が最も長くなったと考えられる。

一方、15mm金具仕様については、秋雨期及び梅雨期に断熱層内の相対湿度は上昇するが（図4-2-21、4-2-22）、通気及び排水性能が十分に確保されているため、東面及び北面においても年間を通じ結露が生じず、横胴縁仕様に比べ方位による差も小さくなったものと推察される。

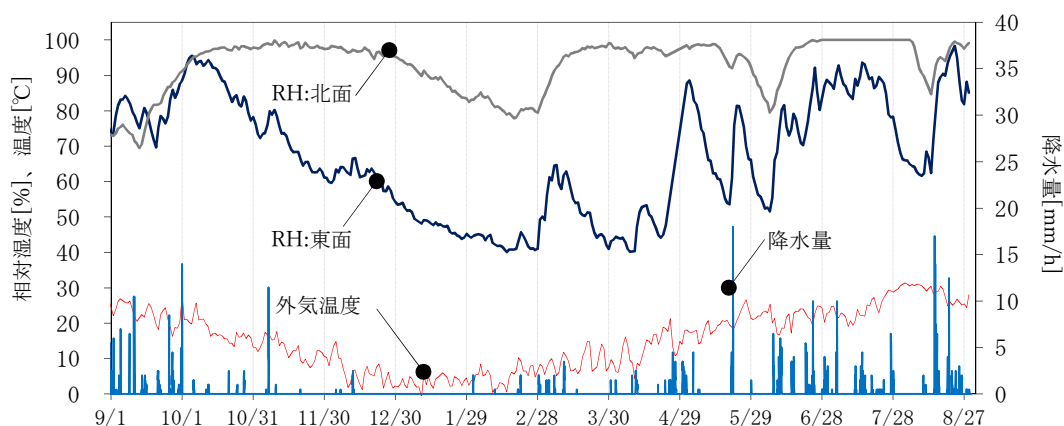


図4-2-19 東面及び北面における湿度B点（穴あきポリエチレンフィルムと断熱材間）の相対湿度変動（仕様①：横胴縁仕様）、並びに気象条件

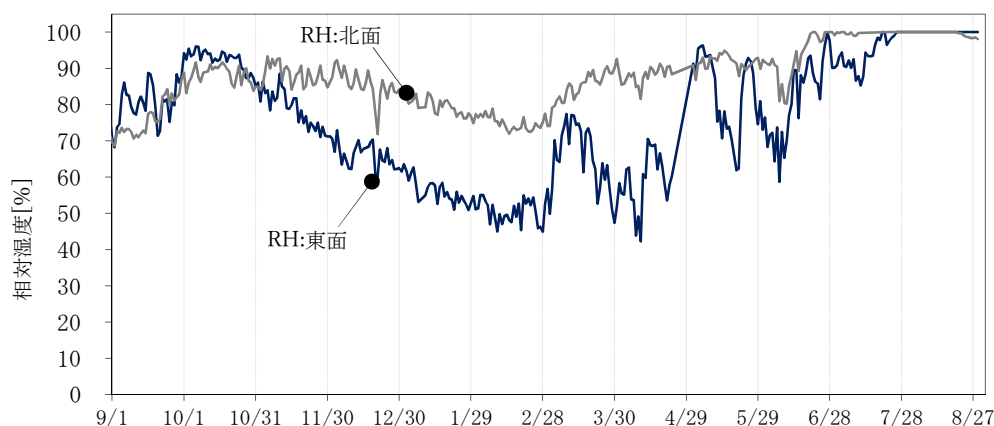


図4-2-20 東面及び北面における湿度C点（断熱材と防湿フィルム間）の相対湿度変動（仕様①：横胴縁仕様）

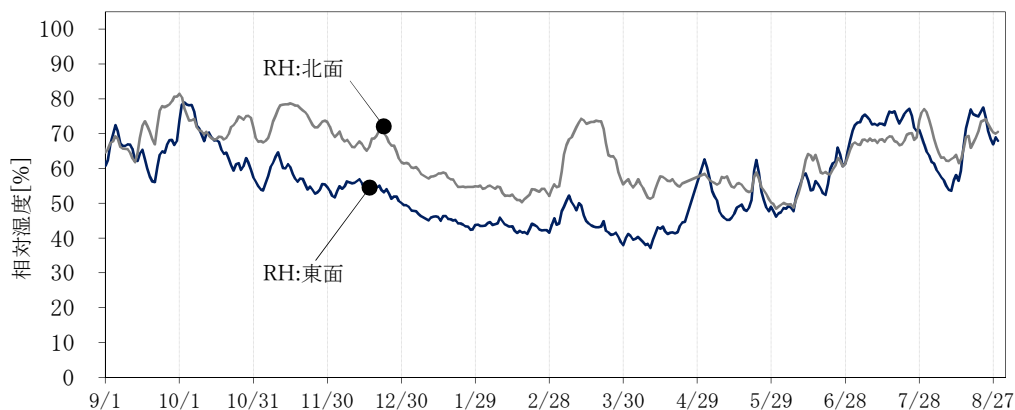


図 4-2-21 東面及び北面における湿度 C 点（断熱材と防湿フィルム間）の相対湿度変動（仕様③：15 mm金具仕様）

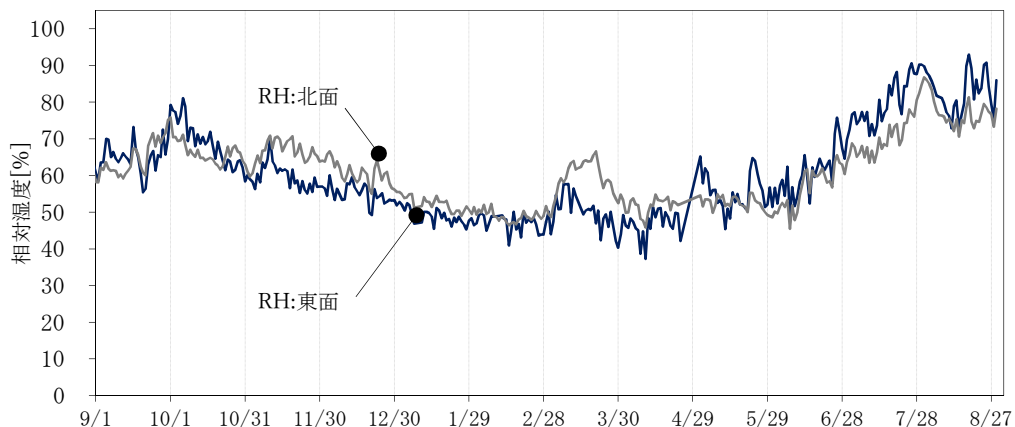


図 4-2-22 東面及び北面における湿度 C 点（断熱材と防湿フィルム間）の相対湿度変動（仕様③：15 mm金具仕様）

4.3 第4章のまとめ

4章では、年間を通じた実験棟での実測から各通気仕様の壁内水分挙動を比較することにより、滞留率が小さく相当開口面積が大きい通気仕様ほど壁内結露が生じ難い結果となった。得られた知見を下記に示す。

- 1) 実験棟における夏期の実測から、異なる通気仕様における壁内水分挙動、及び通気量の差を把握した。通気量の少ない横胴縁及び 6 mm金具仕様では、防湿層界面の飽和状態が 12 日間以上継続した。一方、最も通気量の多い 15 mm金具仕様では相対湿度 90%以下に抑えられていた。また、構造体内部の目視観察から、長期間飽和が生じた仕様において、調査事例と同様の横芯材における水跡が見受けられた。このこ

とより、防湿層にて結露水の流下が生じたことを確認した。なお、実験棟における通気層への注水量は、サイディング接合部からの雨水浸入を想定した第2章の水密試験結果に基づき、3階分の壁面雨量の5%とした。

- 2) 上記実験棟での年間を通じた実測により、断熱層で結露が生じた積算時間を示した。横胴縁（相当開口面積 $2.4 \text{ cm}^2/\text{m}$ 、滞留率4割）にて約1,500時間、6mm金具仕様（相当開口面積 $6.1 \text{ cm}^2/\text{m}$ 、滞留率1割）にて約650時間結露が生じた。しかし、15mm金具仕様（相当開口面積 $20.9 \text{ cm}^2/\text{m}$ 、滞留率1割）では結露が生じず、相当開口面積が大きく、滞留率が小さい仕様ほど壁内結露が生じ難い結果となった。

外壁通気構法を用いた住宅の長寿命化には、フェイルセーフとして雨水浸入や経年劣化により増加するサイディング表層からの吸水などの雨水由来の水分を考慮することが不可欠であり、この水分を排出するためには、浸入雨水の滞留率を抑制し、通気層全体の相当開口面積を一定値以上確保することが重要であると考えられる。

注釈

[注1] 漏斗面積について

通気層への注水に用いた漏斗の面積は、以下の手順により定めた。

一般に壁面雨量 R_w については、壁面雨量係数 α [s/m]、水平面降雨量 R_h [mm/m²h]、外部風速 U [m/s]、水平面上における風向と壁面の法線がなす角度 θ [°]とすると (A1) 式で表される[4-4]。

$$R_w = \alpha \cdot R_h^n \cdot U \cdot \cos\theta \quad (\text{A1})$$

ここに、 α は壁面雨量係数[s/m]である。壁面積 S_w [m²]の試験対象壁通気層への浸入量 J_p は、壁面雨量 R_w に対し一定の浸入率 f [%]で浸入すると想定すると (A2) 式で表される。

$$J_p = R_w \cdot f \cdot S_w \quad (\text{A2})$$

(A2) 式に (A1) 式を代入すると、 J_p は (A3) 式となる。

$$J_p = \alpha \cdot f \cdot S_w \cdot R_h^n \cdot U \cdot \cos\theta \quad (\text{A3})$$

本実験では漏斗により雨水を捕集・注水するため、(A3) 式右辺の水平面降雨量 R_h を除いた係数の積が漏斗の面積となる。ここで、図4-2-3に示した各仕様の幅0.91m、階高3mの3階分の壁面雨量が1階部分の通気層に浸入すると想定し、壁面積 $S_w=8.2\text{m}^2$ とした。壁面雨量係数 α については、既往研究で0.02~0.26[s/m]まで広範囲に亘る報告[4-4]があるが、本研究では石川ら[4-5]による実験から得られた小規模建築物に対する常数0.109 ($\approx 1/9.2$)を採用した。(A3) 式の浸入率 f を2.2節の水密試験より5[%]、指数 $n=1$ 、 $U \cdot \cos\theta=1$ とすると浸入量 J_p は下式となる。

$$J_p = 0.045 \cdot R_h \quad (A4)$$

実験に用いた漏斗面積は、(A4) 式の係数である 0.045m^2 に近くなる製品を選択し、仕様①は高さ方向 3 箇所へ注水するため 150ϕ を 3 個 (合計 0.053m^2)、その他の仕様は 240ϕ を 1 個 (0.045m^2) 設置した。

第 4 章 参考文献

- [4-1] 梅野徹也, 鉾井修一, 齋藤宏昭, 本間義規: 実験住宅における通気量の実態把握, 日本建築学会環境系論文集, 第 694 号, pp. 909-916, 2013. 12
- [4-2] 鉾井修一, 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
- [4-3] 加藤正守, 吉池祐一, 富沢幸夫: 葺屋根の材料と構法に関する研究 (その 2), 日本建築学会大会学術講演梗概集, 材料施工, pp. 1124-1125, 1979
- [4-4] B.Blocken, and J.Carmeliet: Overview of three state-of-the-art wind-driven rain assessment models and comparison based on model theory, Building and Environment Vol.45, pp.691-703, 2010
- [4-5] 石川廣三, 橋本佳大: 壁面に衝突する雨滴の傾斜角の推定 外壁面におよぼす雨がかり負荷の評価に関する基礎的研究, 日本建築学会構造系論文集, 第 611 号, pp. 13-20, 2007. 1

第 5 章 雨掛かりによる水分を考慮した壁内結露の評価方法

5.1 はじめに

多孔質材料内における熱と水分の同時移動に対しては、熱水分移動方程式に代表される拡散方程式で表され、松本ら[5-1、5-2]により、理論的な基礎はほぼ確立されたと評価されている[5-3]。この水分化学ポテンシャル勾配と温度勾配の要素で構成された基礎式は、異なる部材で構成された多層壁のような場合でも、水分の状態、相（気、液、固）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解ける利点を有している[5-3、5-4]。

この理論を基軸として、齋藤らは人工気候室での非定常結露実験と含水率をポテンシャルとした数値解析により、合板や胴縁などの壁体構成材が放湿型結露の主な加湿源となることを報告している[5-5、5-6]。また、須貝、尾崎らは、熱力学に基づき水分ポテンシャルによる拡散方程式を提案し、試験家屋による屋外測定、人工気候室実験及び、数値解析により、構造体に含まれている初期含湿量などの条件によっては放湿型結露の可能性があることを報告している[5-7、5-8]。しかしながら、これらの解析モデルには、第 4 章の屋外試験で確認した雨水浸入や経年劣化により増加するサイディング表層からの吸水などの雨水由来の水分が考慮されていない。

一方、ASHRAE Standard 160[5-9]では通気層への雨水浸入を前提とした評価方法が記されているが、浸入水は通気層内の防水層に留まり続ける前提となっており、第 3 章で確認した浸入雨水の流下や障害物による水分収支、更には外装材吸水の影響が考慮されていない。

そこで、第 5 章では雨掛かりによる外装材表面及び通気層で形成される付着水の水分収支を考慮した予測モデルを提案し、実験棟で測定した結果と比較する。

5.2 節では、雨掛かりによる付着水の水分収支を考慮した予測モデルを概説する。5.3～5.5 節にて、外装材表面及び通気層で形成される付着水の水分収支として、外装材及び合板への吸水、通気層内への蒸発、及び流下水の計算方法、並びに横胴縁に滞留する雨水の扱い方を示す。5.6 節では、水分化学ポテンシャルを用いた熱水分移動方程式、境界条件、計算に用いた材料の物性値を示す。そして、5.7 節で予測モデルを用いて実験棟で測定した結果（異なる通気仕様、及び方位）との比較を行う。

5.2 雨掛かりによる付着水を考慮した水分収支モデルの概要

第2章の水密試験及び第3章の注水試験により得た知見に基づき、雨掛かりにより外装材表面、及び通気層内における雨水の挙動を整理したものを図5-2-1に示す。

- ①：降雨の一部が外装材表面に付着し、付着した雨水の一部が吸水される。また、サイディング嵌合部から通気層へ雨水が浸入する。
- ②：浸入雨水は外装材裏面、及び固定金具などを介して透湿防水シート表面へ付着する。付着した雨水の一部は吸水されるとともに、表面に水膜を形成する。水膜が一定量に達した後、浸入雨水は下方へ流下する。
- ③：通気層に横胴縁などの障害物がある場合、流下水は胴縁上端へ付着し、上端より吸水されるとともに、胴縁上端に水膜を形成する。水膜が一定量に達した後、流下水は胴縁の下方へ流下する。
- ④：外装材及び下地合板から通気層へ放湿された水分は、通気層を介して排湿される。

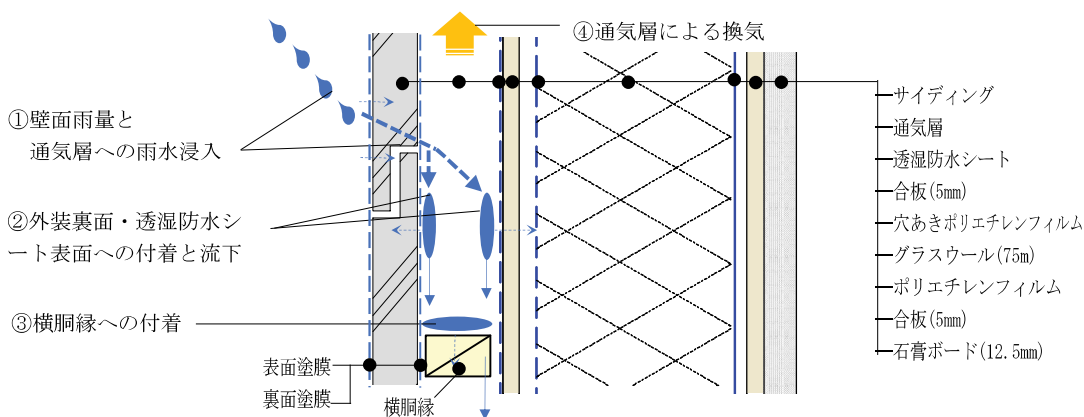


図 5-2-1 外装材表面、及び通気層内における雨水の挙動

このように、外装材表面に付着する水分は壁面雨量、通気層内に付着する水分は壁面雨量、風圧、及び通気層の仕様に影響を受ける。外壁面に当たる雨の濡れ方は、同一壁面でも建物形態、風向及び位置によって著しい差があり、特に住宅などの低層建築では、軒の出の大きさが壁面雨量に大きく影響する[5-10]。通気層に浸入した雨水が障害物に付着する部位は、横胴縁だけでなく開口部なども含まれ、浸入雨水の流下や障害物による付着などの水分収支を考慮すべき部位はサイディングの下地仕様に問わず多々存在する。また、通気層内における高さ方向の温湿度分布に関しては、通気層の下層から放湿された水分の影響により上層階ほど通気層内の水蒸気圧が上昇することも考えられる。

本研究では第4章で建設した実験棟のような、雨掛かり負荷が厳しい軒の出が無い低層の建物形態への適用を想定し、同一方位における壁面雨量、及び高さ方向における温湿度の空間的分布は等しく、壁面及び通気層内の障害物に付着する水分を考慮した断面方向一次

第5章 雨掛かりによる水分を考慮した壁内結露の評価方法

元のモデル化を行った。図 5-2-2 に計算モデルの概要を示す。

- (i) : 同一方位において壁面雨量の分布は等しく、付着した雨水の一部は表面塗膜を介して外装材基材に吸水される。なお、吸水に伴う熱の移動、及び第4章において冬期の壁内結露時間が最も少なかったことから、放射冷却などで生じる外装材表面の結露水は考慮していない。
- (ii) : 通気層内への浸入水は、外装材裏面と透湿防水シート表面に按分し、面内で均等に分布されるものとする。そのため、水膜が一定量付着した後、流下水は通気層外へ排水される。また、付着水は吸水と蒸発により減少する。
- (iii) : 塗膜を介した外装材基材、及び透湿防水シートや穴あきポリエチレンフィルムを介した合板への湿気伝達抵抗は、水分移動に伴う抵抗のみを考慮し容量は無いものとして扱う。
- (iv) : 通気層へ流入する空気の温湿度は外気同等とし、通気層内の温湿度は瞬時拡散を仮定し、通気層内における高さ方向の温湿度分布は均等なものとする。外装材及び下地合板から通気層へ放湿された水分は、通気層を介して排湿される。また、換気計算は、通気層全体の相当開口面積を用いて通気量を求めることにより、通気層の構成部材（スターター等）による圧力損失の影響を考慮する。
- (v) : 横胴縁などの障害物に付着する雨水、及び付着した雨水から外壁内へ流入する水分は、独立した質点を設け扱う。

これらを含め外壁構成を対象とした水分収支式で構成される。

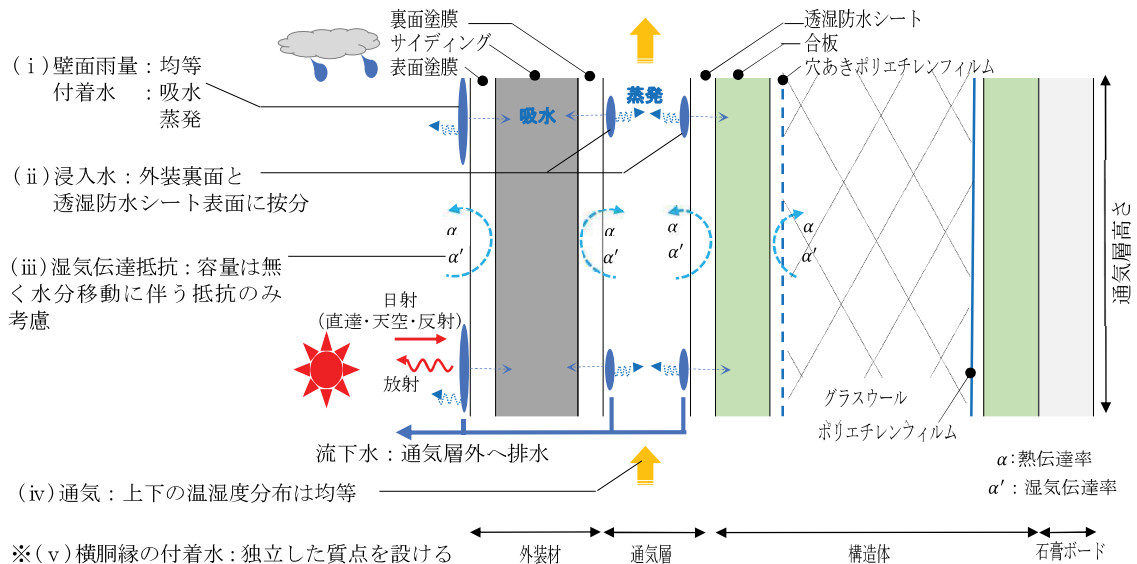


図 5-2-2 断面方向に対する一次元モデルの概要

5.3 壁面雨量、及び通気層内への浸水量の算出方法

外壁面に当たる雨の濡れ方は、同一壁面でも建物形態、風向及び位置によって著しい差があり、近年では建物周囲における気流内の雨滴の挙動を理論的に解析して壁面雨量分布を厳密に求める手法が報告されている[5-11]。しかしながら、この手法は甚大な計算労力を伴うとともに、個別の建築物への適用に限られ、普遍的な応用性を欠く[5-12]。そこで、本研究では石川ら[5-13]により提案されている小規模建築物に対する常数を用いた(5.3.1)式により壁面雨量 R_w [kg/m²s]を求めた。そして、(5.3.2)式に示す壁面雨量と第2章の水密試験で得た浸水率 f [%]との積により、通気層内への浸水量 J_R [kg/m²s]を算出した。

$$R_w = \frac{1}{C_{im}} \cdot R_h U \cos\theta \quad (5.3.1)$$

C_{im} : 小規模建築物に対する常数 9.2 [-]

U : 外部風速[m/s]

θ : 水平面上における風向と壁面の法線がなす角度[°]

$$J_R = R_w \cdot f / 100 \quad (5.3.2)$$

5.4 外装表面及び通気層内に到達した雨水からの吸水

外装材は表裏面に基材保護のため塗装が施されており、通気層室内側には合板の表面に透湿防水シートが設置されている。これらを透過する液相水分流 $J_{IN,i}$ [kg/m²s]については、伊庭[5-14]により提案されている仕上げ層を透過する最大水分流 $J_{max,i}$ [kg/m²s]を仕上げ層の透水抵抗 R [m²s(J/kg)/kg]、仕上げ層と実質部の境界点の水分化学ポテンシャル μ_j [J/kg]により求める (5.4.1) 式を用いた。概要を図 5-4-1 に示す。なお、外部から水分供給がある場合、仕上げ層外気側の水分化学ポテンシャル $\mu_s = 0$ とした。仕上げ層を通る気相水分流は0とおく。添字 i は仕上げ層の各位置を示す (1: 外装材裏面塗膜、2: 透湿防水シート、3: 外装材表面塗膜)。また、第3章の注水試験から、注水は外装材を固定する金具などを介して外装材裏面と透湿防水シート表面に付着水が観察されたことから、通気層内への浸水量 J_R は外装材裏面と透湿防水シート表面に按分した。

$$J_{max,i} = (\mu_s - \mu_j) / R \quad (5.4.1)$$

仕上げ層を透過する液相水分流は以下のように場合分けできる。通気層内への浸水量 $\frac{1}{2}J_R$ が $J_{max,i}$ より小さい時、 $J_{IN,i}$ は $\frac{1}{2}J_R$ となり壁面へ到達した全ての雨量が浸透する ((5.4.2) 式)。また、 $\frac{1}{2}J_R$ が $J_{max,i}$ 以上の時、 $J_{IN,i}$ は $J_{max,i}$ となり壁面へ到達した一部の雨量が浸透する ((5.4.3) 式)。

$$\text{【}J_R < J_{max,i}\text{の場合】} \quad J_{IN,i} = \frac{1}{2} \cdot J_R \quad (5.4.2)$$

$$\text{【}J_R \geq J_{max,i}\text{の場合】} \quad J_{IN,i} = J_{max,i} \quad (5.4.3)$$

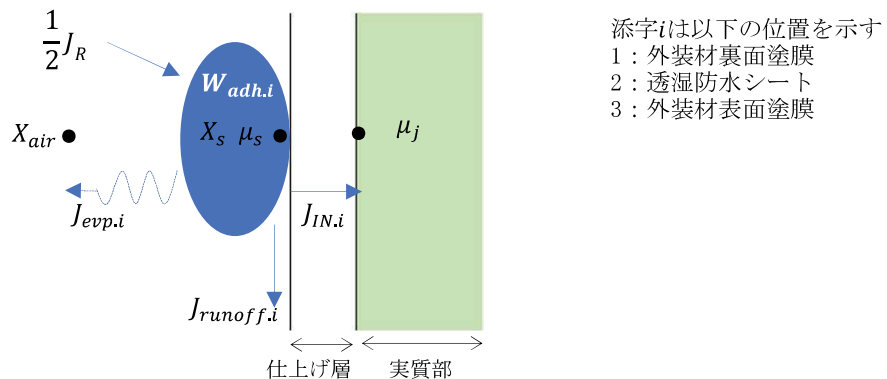


図 5-4-1 仕上げ層を透過する液相水分流の扱い

(5.4.3)式の場合、壁面へ到達し浸透されなかった残りの雨量が仕上げ層表面に付着水 $W_{adh,i}$ [kg/ m²] を形成する。さらに付着水から空気層へ気相水分流 $J_{evp,i}$ [kg/ m²s] が生じるものとし ((5.4.4) 式)、付着水量の時間変化 $dW_{adh,i}/dt$ [kg/m²s] を (5.4.5) 式で求めた。この付着水が閾値 $W_{adh,i max}$ [kg/ m²] となった場合、下方への流下水 $J_{runoff,i}$ [kg/ m²s] が生じるものとした ((5.4.7) 式)。なお、外装材表面からの $J_{IN,3}$ を求める際には、 $\frac{1}{2}J_R$ に代わり壁面雨量 R_w を用いた。

$$J_{evp,i} = \alpha'_o (X_{s,i} - X_{air}) \quad (5.4.4)$$

α'_o : 湿気伝達率 [kg/m² s(kg/kgDA)],
 $X_{s,i}$: 仕上げ層外気側の表面温度に対する飽和絶対湿度 [kg/kgDA]
 X_{air} : 空気層の絶対湿度 [kg/kgDA]

【 $J_R \geq J_{max,i}$ かつ、 $0 \leq W_{adh,i} < W_{adh,i max}$ 】 の場合

$$\frac{dW_{adh,i}}{dt} = \frac{1}{2} \cdot J_R - (J_{IN,i} + J_{evp,i}) \quad (5.4.5)$$

【 $J_R \geq J_{max,i}$ かつ、 $W_{adh,i} \geq W_{adh,i max}$ 】 の場合

$$W_{adh,i} = W_{adh,i max} \quad (5.4.6)$$

$$J_{runoff,i} = \frac{1}{2} \cdot J_R - (J_{IN,i} + J_{evp,i}) \quad (5.4.7)$$

5.5 横胴縁に付着する雨水の扱い

本予測モデルは断面方向の 1 次元で扱うため、横胴縁のような通気層内の障害物に対しては独立した質点を設けた。5.5.1 節では、横胴縁に付着した雨水の扱いの概要を示す。5.5.2 節では、前節で示した壁面からの流下水により生じる横胴縁に滞留する水分の計算方法を示す。5.5.3 節では、この横胴縁の滞留水から外壁内へ流入する水分の計算方法を示す。

5.5.1 横胴縁に付着した雨水の扱いの概要

前節で示した壁面からの流下水により、横胴縁へ吸水及び付着した雨水から外壁内への水分流の扱いを図 5-5-1 に示す。

(1)横胴縁に滞留する水分について

第 3 章の注水試験では、通気層内を流下した雨水が横胴縁上端に付着し、一定量に達した後下方へ流下する現象が確認された。このことより、透湿防水シート及びサイディング裏面からの流下水 $J_{runoff,1}$ 及び $J_{runoff,2}$ が横胴縁上端に付着水 $W_{adh,d}$ [kg/m^2]を形成するとともに横胴縁への含水 W_{abs} [kg/m^2]が生じるものとした。次に、この付着水が閾値 $W_{adh,d max}$ [kg/m^2]となった場合、胴縁下方への流下水 $J_{runoff,d}$ が生じ通気層外へ排水されるものとした。

(2)外壁内へ流入する水分について

第 2 章における仕上げ層の透湿試験において、実験棟で用いたサイディング（仕様 FC）裏面塗膜の透湿抵抗は、透湿防水シートに比べ約 $1/50,000$ と非常に小さい値であった。また、第 3 章での注水試験では、横胴縁と透湿防水シート設置面に濡れた跡が確認されたものの、透湿防水シート裏面の合板は濡れた跡が認められなかった。これらのことを勘案し、横胴縁の含水量 W_{abs} 及び付着水量 $W_{adh,d}$ は、外装材裏面の塗膜を介してサイディングへ吸水($J_{IN,d}$ [$\text{kg}/\text{m}^2\text{s}$])、及び通気層へ蒸発($J_{evp,d}$ [$\text{kg}/\text{m}^2\text{s}$])によって減少するものとした。

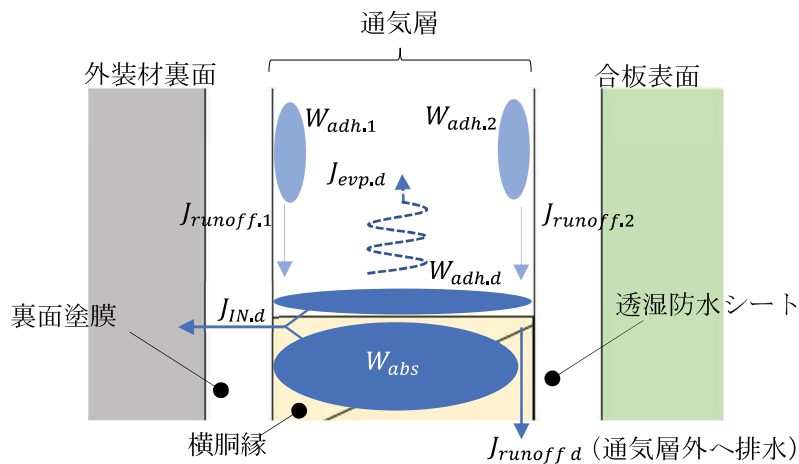


図 5-5-1 横胴縁の含水量、及び付着水量から外壁内への水分流の扱い

図 5-5-2 に雨掛かりによる外壁内への水分流、及び付着水の計算手順を示す。

初めに、5.4 節で示した計算方法により、外装表面及び通気層内に到達した雨水から外壁内への水分流、付着水、及び流下水を求める。

横胴縁仕様の場合、壁面からの流下水を確認し、この流下水により横胴縁の滞留水 (W_{abs} 及び $W_{adh,d}$) を増加させる。次に、滞留水が形成されていることを確認する。晴天時などこれらの水量が形成されていない場合、外壁内への水分流は生じない。滞留水が形成されている場合、横胴縁の滞留水から外壁内への水分流 $J_{IN,d}$ 及び $J_{evp,d}$ を求め、この水分流により滞留水を減少させる。そして、求めた外壁内への水分流と熱水分移動方程式を用いて計算を行う。次節以降に W_{abs} 、 $W_{adh,d}$ 、 $J_{IN,d}$ 及び $J_{evp,d}$ の計算方法を示す。

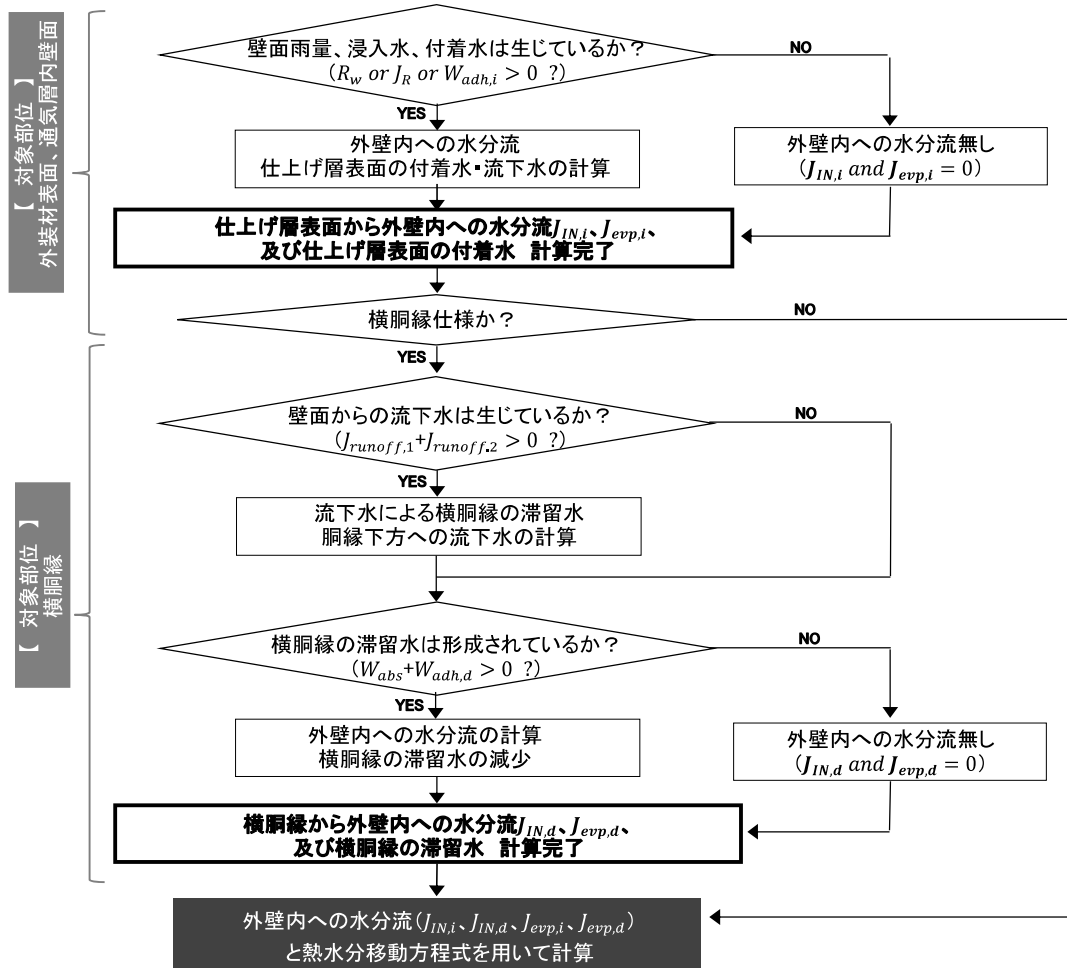


図 5-5-2 雨掛かりによる外壁内への水分流及び付着水の計算手順

5.5.2 横胴縁に滞留する水分の計算方法

(1) 横胴縁の含水量 W_{abs} の計算方法

一般的に継続的な吸水の場合、図 5-5-3 に示すように横胴縁への含水量は吸水速度係数を用いた(5.5.1)式にて求めることができ、含水量の時間変化 dW_{abs}/dt [kg/m²s] は吸水開始からの時間 t に対して Δt 時間前の含水量 $W_{abs}(t - \Delta t)$ [kg/m²] との関係より(5.5.2)式にて表すことができる。なお、 W_{abs} は壁単位面積当たりの重量を示している。

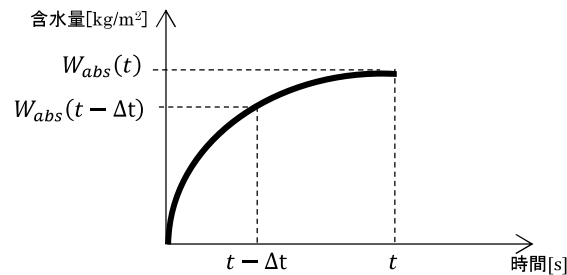


図 5-5-3 継続的な吸水時における含水量の変化

$$W_{abs}(t) = a\sqrt{t} \cdot S_{d,k} \cdot n \quad (5.5.1)$$

a : 吸水速度係数 [kg/m² s^{0.5}]

$S_{d,k}$: 壁単位面積当たりの横胴縁小口 1 本分の面積 [m²/本]

n : 壁単位面積当たりの横胴縁の本数 [本/m²]

t : 吸水開始からの時間 [s]

$$\begin{aligned} \frac{dW_{abs}}{dt} &= \frac{W_{abs}(t) - W_{abs}(t - \Delta t)}{\Delta t} \\ &= \frac{a \cdot S_d \cdot n (\sqrt{t} - \sqrt{t - \Delta t})}{\Delta t} \end{aligned} \quad (5.5.2)$$

ここで、断続的な降雨が生じている時間帯における含水量 W_{abs} の時間変化を図 5-5-4 に示す。晴天時など壁面からの流下水が生じない時間帯において、含水量は外壁内への水分流 ($J_{IN,d}$ 及び $J_{evp,d}$) により減少 (後述) する。乾燥過程時と連続吸水時の含水量が同一だとしても、材料内の含水率勾配は異なるため、材料内の水分流も異なることが考えられる。しかしながら、本節では吸水過程に関わらず含水量が同一の場合、横胴縁は連続吸水時と同様に吸水するものと仮定した。任意時間における含水量の時間変化 dW_{abs}/dt は、任意時間 T に対して Δt 時間前の含水量 $W_{abs}(T - \Delta t)$ [kg/m²] を用いて、(5.5.3)式により吸水開始からの時間 $t - \Delta t$ を求め、(5.5.2)式により dW_{abs}/dt を求めた。

$$t - \Delta t = \left(\frac{W_{abs}(T - \Delta t)}{a \cdot S_d \cdot n} \right)^2 \quad (5.5.3)$$

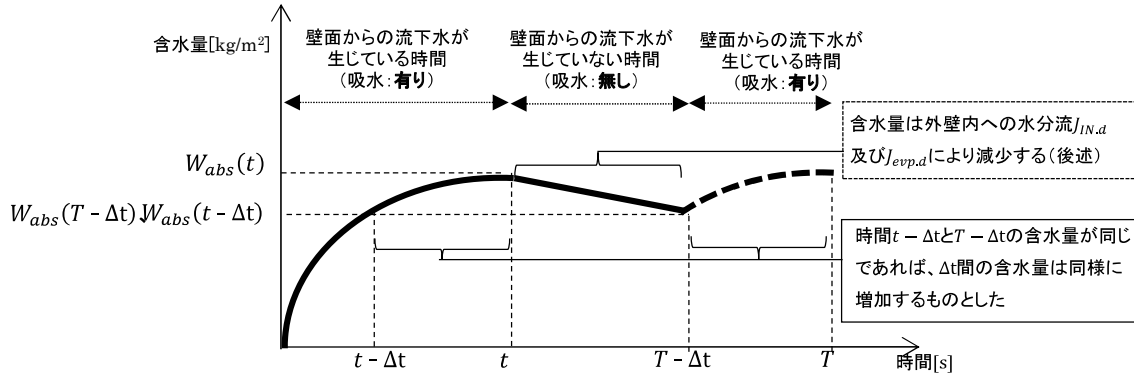


図 5-5-4 断続的な吸水過程における含水量の時間変化

なお、壁面からの流下水($J_{runoff,1} + J_{runoff,2}$)が(5.5.2)式で求めた含水量の時間変化 dW_{abs}/dt 以下の場合、流下水より多くの水分が横胴縁に吸水されないように dW_{abs}/dt は流下水と等しくした ((5.5.4)式)。

【 $J_{runoff,1} + J_{runoff,2} \leq dW_{abs}/dt$ 】 の場合

$$\frac{dW_{abs}}{dt} = J_{runoff,1} + J_{runoff,2} \quad (5.5.4)$$

また、(5.5.2)及び(5.5.4)式で増加した W_{abs} は、閾値 $W_{abs,max}$ [kg/m²] 以上の場合、含水量は閾値に留まり、 dW_{abs}/dt は 0 とした。

【 $W_{abs} \geq W_{abs,max}$ 】 の場合

$$W_{abs} = W_{abs,max} \quad (5.5.5)$$

(2)横胴縁の付着水量 $W_{adh,d}$ の計算方法

横胴縁上端の付着水量の時間変化 $dW_{adh,d}/dt$ [kg/ m²s]は、流下水と横胴縁の含水量の差分で増加し、(5.5.6)式を用いて求めた。

$$\frac{dW_{adh,d}}{dt} = J_{runoff,1} + J_{runoff,2} - \frac{dW_{abs}}{dt} \quad (5.5.6)$$

また、付着水量が閾値 $W_{adh,d max}$ [kg/m²]以上の場合、付着水量は閾値に留まり ((5.5.7)式)、横胴縁下への流下水 $J_{runoff,d}$ を(5.5.8)式で求めた。

【 $W_{adh,d} \geq W_{adh,d max}$ 】の場合

$$W_{adh,d} = W_{adh,d max} \quad (5.5.7)$$

$$J_{runoff,d} = J_{runoff,1} + J_{runoff,2} - \frac{dW_{abs}}{dt} \quad (5.5.8)$$

5.5.3 外壁内へ流入する水分の計算方法

横胴縁の含水量 W_{abs} 及び付着水量 $W_{adh,d}$ が形成されている場合、外装材裏面への液相水分流 $J_{IN,d}$ [kg/m²s]は、外装材裏面に付着水が形成されている状態として扱うとともに、横胴縁と外装材裏面が接する面積より吸水されるものとして(5.5.9)及び(5.5.10)式で求めた。

$$J_{IN,d} = J_{max,1} \cdot r_d \quad (5.5.9)$$

$$r_d = S_{d,w} \cdot n \quad (5.5.10)$$

$J_{max,1}$: サイディング裏面塗膜の最大液相水分流 [kg/ m²s]

r_d : 壁単位面積当たりの横胴縁とサイディング裏面が接する比率 [-]

$S_{d,w}$: 壁単位面積当たりの横胴縁 1 本分の面積 [m²/本] (胴縁高さ=0.04[m])

n : 壁単位面積当たりの横胴縁の本数 [本/m²]

通気層への気相水分流 $J_{evp,d}$ [kg/ m²s]は、(5.4.4)式に横胴縁小口面積 $S_{d,k}$ を乗じた(5.5.11)で求めた。横胴縁の表面温度に対する飽和絶対湿度 $X_{s,d}$ は、通気層の温度を用いて求めた。なお、 $J_{evp,d}$ は壁単位面積当たりの水分流を示している。

$$J_{evp,d} = \alpha_o (X_{s,d} - X_{air}) \cdot S_{d,k} \cdot n \quad (5.5.11)$$

次に、これら外壁内への水分流による W_{abs} 及び $W_{adh,d}$ の時間変化 dW_{abs}/dt 、及び $dW_{adh,d}/dt$ については、表層に現われている $W_{adh,d}$ から先に減少するものとし

((5.5.12)、(5.5.13)式)、その後、 W_{abs} が減少するものとした ((5.5.14)、(5.5.15)式)。これらの水分流により W_{abs} 及び $W_{adh,d}$ が0以下となった場合、横胴縁に滞留した水分は消滅し、外壁内への水分流も生じなくなる

【 $W_{adh,d} > 0$ 】の場合

$$\frac{dW_{adh,d}}{dt} = - (J_{IN,d} + J_{evp,d}) \quad (5.5.12)$$

$$\frac{dW_{abs}}{dt} = 0 \quad (5.5.13)$$

【 $W_{adh,d} = 0$ かつ $W_{abs} > 0$ 】の場合

$$\frac{dW_{adh,d}}{dt} = 0 \quad (5.5.14)$$

$$\frac{dW_{abs}}{dt} = - (J_{IN,d} + J_{evp,d}) \quad (5.5.15)$$

5.6 計算条件

5.6.1 基本式

計算対象となる外壁構成は、図 5-2-1 に示す断面構成の壁体とした。基本式は 1 次元の熱水分同時移動方程式と熱湿気の収支式、温度差換気による回路網計算である。多孔質材に対しては、多層壁に対しても統一場で解析できる利点を持つ、水分化学ポテンシャルを用いた熱水分同時移動方程式 (5.6.1)、(5.6.2) 式を適用した[5-4]。

通気層に関しては、温度差による換気量を(5.6.5)式から逐次計算した。なお、第4章での通気量の解析において、通気量は日射取得に伴う温度差により増加する影響が大きかったため、外部風速の影響は考慮していない。通気層内は瞬時拡散を仮定して(5.6.3)、(5.6.4)式から熱湿気の収支を求めた。(5.6.4)式右辺第3項の $J_{evp,i}$ は、仕上げ層表面からの気相水分流である。

境界条件の(5.6.7)式右辺第3項の $J_{IN,i}$ は仕上げ面を透過する液相水分流であり、本計算では外装材表面及び裏面、並びに下地合板表面の計算ポイントのみ J_{IN} を加えた。

数値計算は、断面方向の 1 次元流を仮定して (5.6.1) ~ (5.6.4) 式を後退差分近似し、得られた連立方程式を過大緩和法により解く方法を採用した。なお、本節で示した $J_{evp,i}$ 及び $J_{IN,i}$ には、 $J_{evp,d}$ 及び $J_{IN,d}$ も含む。

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \{ (\lambda + r \lambda_{Tg}) \nabla T + r \lambda_{\mu g} \nabla \mu \} \quad (5.6.1)$$

$$\rho_w \frac{\partial \phi}{\partial \mu} \frac{\partial \mu}{\partial t} = \nabla (\lambda_{\mu} \nabla \mu + r \lambda_T \nabla T) \quad (5.6.2)$$

$$\rho_a c V \frac{\partial T_v}{\partial t} = \Sigma \alpha A (T_s - T_v) + \rho_a c Q (T_o - T_v) \quad (5.6.3)$$

$$\rho_a V \frac{\partial X_v}{\partial t} = \Sigma \alpha' A (X_s - X_v) + \rho_a Q (X_o - X_v) + J_{evp,i} A \quad (5.6.4)$$

$$Q = \alpha A \sqrt{2 / \rho_a |g(\rho_v - \rho_o) h|} \quad (5.6.5)$$

室内外及び通気層との境界条件は (5.6.6)、(5.6.7) 式を用いた。

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial n} - r \left(\lambda_{\mu g} \frac{\partial \mu}{\partial n} + \lambda_{Tg} \frac{\partial T}{\partial n} \right) = (\alpha + r \alpha_{T'}) (T_o - T) + r \alpha_{\mu} (\mu_o - \mu) \quad (5.6.6)$$

$$-\lambda_{\mu} \frac{\partial \mu}{\partial n} - \lambda_T \frac{\partial T}{\partial n} = \alpha_{\mu} (\mu_o - \mu) + \alpha_T (T_o - T) + J_{IN,i} \quad (5.6.7)$$

水分の化学ポテンシャルを水分移動ポテンシャルとした場合の伝導率 λ_{μ} 及び λ_T は、気相・液相の水分伝導率 $\lambda_{\mu g}$ 、 λ_{Tg} および $\lambda_{\mu l}$ 、 λ_{Tl} を用い (5.6.8) (5.6.9) 式の関係となる。

$$\lambda_{\mu} = \lambda_{\mu l} + \lambda_{\mu g} \quad (5.6.8)$$

$$\lambda_T = \lambda_{Tl} + \lambda_{Tg} \quad (5.6.9)$$

気相水分伝導率は、各種材料の湿気伝導率 λ [kg/(msPa)]を用い時間ステップごとに (5.6.10) (5.6.11) 式により数値微分を行い逐次計算したものを与えた。

$$\lambda_{\mu g} = \lambda \left. \frac{\partial P}{\partial \mu} \right|_T \quad (5.6.10)$$

$$\lambda_{Tg} = \lambda \left. \frac{\partial P}{\partial T} \right|_{\mu} \quad (5.6.11)$$

液相水分伝導率は、水分拡散係数 D_w [m²/s]、水の密度 ρ_w [kg/m³]を用いて時間ステップごとに (5.6.12) 式により数値微分を行い逐次計算したものを与えた。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。

$$\lambda_{\mu l} = \rho_w D_w \left. \frac{\partial \varphi}{\partial \mu} \right|_T \quad (5.6.12)$$

5.6.2 塗膜を介したサイディング基材、及び透湿防水シートを介した合板への湿気伝達率

通常サイディングには防水のため、表面と裏面に塗膜が施されている。また、外側合板の外気側には、透湿防水シートが施されている。一般に塗膜は0.1[mm]、透湿防水シートは0.18[mm]と基材及び合板に比べ非常に薄いことから、本解析においては水分移動に対する抵抗のみを考慮し、容量は無いものとして扱う[5-14]。

塗膜及び透湿防水シートを介したサイディング基材又は外側合板への湿気伝達率 α' は、外気又は通気層側の湿気伝達率 α'_o [kg/m²sPa]及び第2章で得た塗膜の透湿係数[kg/m² sPa]から求めた透湿抵抗 R' [m²sPa/kg]を以下式により合成して求める。

$$\alpha' = \frac{1}{\frac{1}{\alpha'_o} + R'} \quad (5.6.13)$$

5.6.3 計算条件

各材料の物性値を表 5-6-1~5-6-2 に、平衡含水率曲線を図 5-6-1 に示す。サイディングの物性値は第 2 章で得た値を用いた。境界面での計算に用いた係数[5-15]を表 5-6-3 に示す。通気層の仕様を表 5-6-4 に示す。通気層の相当開口面積は第 3 章で得た値を用いた。通気層への浸入率 f は、漏斗にて注水したため漏斗径より水平面降水量の 5%とした。なお、第 3 章の注水試験から外装材裏面と透湿防水シート表面に付着水が観察されたことから、浸入水は外装材裏面と透湿防水シート表面に按分した。

表 5-6-1 計算に使用した材料物性値

| 材料 | 厚さ [mm] | 熱伝導率 [W/mk] | 比熱 [J/(Kkg)] | 密度 [kg/m ³] | 湿気伝導率 [kg/msPa] |
|----------------|------------|----------------|-----------------|----------------------------|------------------------|
| サイディング (仕様 FC) | 12 | 0.963 | 879 | 1078 | 6.72×10^{-12} |
| 合板 | 5 | 0.16 | 1860 | 600 | 1.11×10^{-12} |
| グラスウール | 90 | 0.045 | 698 | 24 | 1.15×10^{-10} |
| 石膏ボード | 12.5 | 0.22 | 870 | 787 | 3.97×10^{-11} |

表 5-6-2 計算に使用した透湿係数、透水抵抗

| 材料 | 透湿係数 [kg/m ² sPa] | 透水抵抗 [m ² sPa/kg] |
|---------------------|---------------------------------|---------------------------------|
| 透湿防水シート | 9.09×10^{-9} | 1.4×10^{10} |
| 穴あき防湿フィルム | 1.92×10^{-9} | - |
| 防湿フィルム | 2.13×10^{-11} | - |
| サイディング (仕様 : FC) | 表面塗膜 | 3.98×10^{-10} |
| | 裏面塗膜 | 9.60×10^{-10} |

表 5-6-3 境界面での計算に用いた係数

| 名称 | 値 | 単位 |
|-------|------|-----------------------|
| 熱伝達率 | 外気側 | 23 |
| | 通気層側 | 9.3 |
| 湿気伝達率 | 外気側 | 104×10^{-9} |
| | 通気層側 | 34.7×10^{-9} |

表 5-6-4 通気層の仕様、及び相当開口面積

| 仕様 | 15 mm金具 | 6 mm金具 | 横胴縁 |
|-----------------------------|---------|--------|-----|
| 通気層厚さ [mm] | 15 | 6 | 12 |
| 相当開口面積 [cm ² /m] | 20.9 | 6.1 | 2.4 |

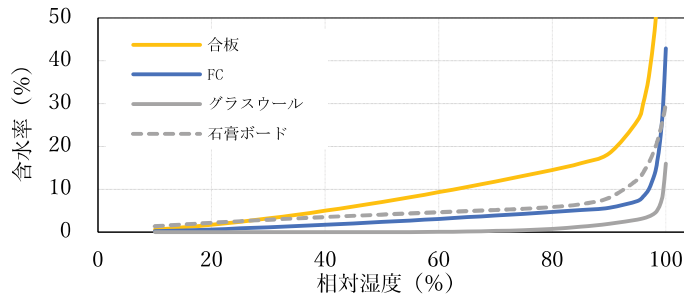


図 5-6-1 平衡含水率曲線

通気層内における仕上げ層表面の付着水閾値 $W_{adh\ max}$ [kg/ m²]については、第 3 章の注水試験で得た最大付着量[kg/m²]と壁面濡れ幅を壁面濡れ率 W_{rate} [-]として (5.6.14) 式より求めた。

$$W_{adh\ max} = 0.153 \cdot W_{rate} \quad (5.6.14)$$

横胴縁上部の付着水閾値 $W_{adh,d\ max}$ [kg/ m²]、及び含水量の閾値 $W_{abs\ max}$ [kg/ m²]は、上記同様に注水試験で得た最大付着量[kg/ m²]、並びに吸水試験^{注 1)}により得た最大含水量[kg/ m²]、上端滞留幅を胴縁濡れ率 $W_{d,rate}$ [-]として (5.6.15) 及び (5.6.16) 式より求めた。なお、 $W_{adh\ max}$ 及び $W_{abs\ max}$ は壁単位面積当たりの重量を示す。

$$W_{adh,d\ max} = 3.0 \cdot S_{d,k} \cdot n \cdot W_{d,rate} \quad (5.6.15)$$

$$W_{abs\ max} = 14.5 \cdot S_{d,k} \cdot n \cdot W_{d,rate} \quad (5.6.16)$$

$S_{d,k}$: 壁単位面積当たりの横胴縁小口 1 本分の面積[m²/本]

n : 壁単位面積当たりの横胴縁の本数[本/m²]

対象方位は東面と北面、計算期間は第 4 章で示した最も水分蓄積の生じた夏期 (7 月初旬～8 月末日) とした。

5.7 異なる通気仕様、及び方位における壁内水分収支の計算結果

5.7.1 東面の計算結果

15 mm金具仕様のサイディング含水率、通気層付着水量、通気層、壁内外気側（外側合板、穴あき防湿フィルム間）及び壁内室内側（グラスウール・防湿フィルム間）の温度、絶対湿度、相対湿度、並びに外気温と降水量を図 5-7-1～5-7-4 に、同様に 6 mm金具仕様を図 5-7-5～5-7-8、横胴縁仕様を図 5-7-9～5-7-12 に示す。なお、通気層付着水量は、外装裏面、透湿防水シート表面における付着水量の合算値であり、横胴縁仕様のみ胴縁上端の付着水量と胴縁含水量も含まれている。

各通気仕様における通気量の計算値、実測値、及び第 4 章で得た推定式との比較を図 5-7-13 に示す。

(1) 15 mm金具仕様

サイディング含水率の計算値は、雨期に 15%程度まで上昇した後、梅雨明け以降に低下傾向を示した。これは、雨掛かりによる外装材表面及び裏面からの吸水の影響により含水率が上昇し、晴天時にサイディングに含まれた水分の一部が通気層に放湿されたものと推察される。また、通気層への付着水量の最大値は、降雨日に透湿防水シート表面の閾値である $3[\times 10^{-2} \text{kg/m}^2]$ を示した。降雨日には、透湿防水シート表面から下方への流下水が生じていると推察される。

温度に関して、通気層における 7 月下旬から 8 月初旬の日中最高温度をみると、計算値は実測値より高い値を示したものの、3 仕様中最も低い値であることや、外気温上昇に伴い通気層温度も上昇するなど実測と同様の変動を示した。壁内（外気側及び室内側）の計算値も期間全体に渡り実測と同様の変動を示した。

絶対湿度に関して、通気層の計算値は実測に比べ高い値で推移し、実測値は期間全体に渡り外気絶対湿度より低い値であった。このことについて、外壁通気構法における通気層内の夏期（8 月）絶対湿度を実測した既往研究をみると、図 5-7-14 に示す渡辺らの実測では[5-7]、通気層厚さ 18 mm（測定方位：西面）の場合、外気絶対湿度 $17[\text{g/kgDA}]$ 前後に対し、通気層内の絶対湿度は、日中 $60[\text{g/kgDA}]$ まで上昇した後、夜間 $13[\text{g/kgDA}]$ 程度まで低下した。図 5-7-15 に示す齋藤らの実測では[5-16]、通気層厚さ 18 mm（測定方位：南面）の場合、外気絶対湿度 $15[\text{g/kgDA}]$ 前後に対し、通気層内の絶対湿度は、日中 $25[\text{g/kgDA}]$ 程度まで上昇した後、夜間 $8[\text{g/kgDA}]$ 程度まで低下した。図 5-7-16 に示す梅野の実測では[5-17]、通気層厚さ 18 mm（測定方位：東面）の場合、外気絶対湿度 $18[\text{g/kgDA}]$ 前後に対し、通気層内の絶対湿度は、日中 $20[\text{g/kgDA}]$ 程度まで上昇した後、夜間 $13[\text{g/kgDA}]$ 程度まで低下した。

また、図 5-7-17 に示す筆者らの通気層への注水を行った別の実験棟での実測では[5-18]、梅雨明けの 7 月末日において、通気層厚さ 15 mm（測定方位：東面）の縦胴縁仕様の場合、外気絶対湿度 $17[\text{g/kgDA}]$ 前後に対し、日中 $30[\text{g/kgDA}]$ 程度まで上昇した後、夜間

15[g/kgDA]程度まで低下した。このように地域、測定方位、及び外壁を構成する材料が異なるものの、通気層厚さ15～18mmにおける通気層内の絶対湿度は、外気より日中に同等以上、夜間に低くなる傾向であることがわかる。

本予測モデルの8月3～8月8日における計算値は、外気絶対湿度20[g/kgDA]前後に対し、日射取得によりサイディングから放湿された水分の影響で日中30[g/kgDA]程度まで上昇した後、夜間17[g/kgDA]程度まで低下するなど既往研究と同様の変動を示した。

これらのことより、計算値が実測より高く推移した原因については、通気層に設置した湿度センサー端子の電極間に挟まれた感湿材料が外気からの粉塵により汚れたことや、注水位置近傍に湿度センサーを設置したため、注水による流下水がセンサーに接触したことなどにより、湿度センサーの感度が低下した影響による可能性が考えられる。

外気や注水が直接接触しない壁内（外気側及び室内側）における絶対湿度の計算値は、雨期であった7月下旬までは上昇傾向であり、雨期明け以降、外気の温度上昇に伴いサイディング及び合板から放湿された水分により日中の最大値が高い期間が継続するなど、実測値と同様の変動を示した。

壁内の相対湿度に関して、外気側の計算値は、実測値同様に雨期明け以降において日中の最大湿度がピークを迎えるが飽和状態に至っていない。室内側の計算値は、雨期明け以降、温度上昇に伴い減少傾向を示すなど、実測値を概ね再現している。

(2)6mm金具仕様

サイディング含水率の計算値は、15mm金具同様に雨期に上昇した後、低下傾向を示した。最大値は18%程度であり、通気量の大きい15mm金具仕様より高い値を示した。

温度に関して、通気層、外気側及び室内側ともに実測値と概ね一致していることが示されている。

絶対湿度に関して、通気層の計算値は、実測値に比べ夜間の値が高く推移したものの、外気の温度上昇に伴いサイディングから放湿された水分の影響で、外気より日中高く夜間低くなるなど実測と同様に変動する傾向が示されている。壁内外気側の計算値は、梅雨明け前後（7/19～8/3）の夜間、及び降雨後（7/26～8/6）の日中最大値が実測値より低い値を示したものの、15mm金具仕様に比べ日中最大値は大きくなるなど、室内側も含め全体的には実測値と同様の変動を示している。

壁内相対湿度に関して、外気側の計算値は、上記で示した梅雨明け前後の期間で実測値より低い値を示したが、室内側の計算値では、実測値同様に7月下旬以降にハイグロスコピック域を超える相対湿度98%以上[5・19]の状態が数日間に渡り継続する傾向が示されている。

(3)横胴縁仕様

通気層における横胴縁中段の実測データが一部欠損した。通気層の凡例について、実測値は横胴縁中段の測定点、横胴縁上段は横胴縁上段の測定点、横胴縁下段は横胴縁下段の測定点を示す。

通気層における付着水量の最大値は、胴縁に付着及び吸水された水分の影響により $18[\times 10^{-2} \text{kg/m}^2]$ と金具仕様の6倍を示した。通気量も3仕様中最も少ないことから、サイディング含水率の計算値は、30%まで上昇するなど3仕様中最も高い値を示した。

温度に関して、通気層、外気側及び室内側ともに実測値と概ね一致していることが示されている。

絶対湿度に関して、通気層における横胴縁中段の実測データが欠損したため、上段と下段の値を示す。通気層の計算値は、実測値に比べ夜間の値が高く推移したものの、梅雨明け以降に6mm金具仕様より高くなるなど実測と同様の変動を示した。壁内外気側の計算値は、日中最大値が実測より高い値を示したが、その他の時間帯では実測値を概ね再現している。

相対湿度に関して、壁内室内側の計算値は、7月下旬以降に相対湿度98%以上の状態が約20日間に渡り継続するなど、実測値と同様の傾向を示している。

(4)通気量の計算値

各仕様における通気量の計算値は、第4章の推定式((4.2.7)式)を用いた結果と同様の変動を示した(図5-7-13)。これは、第4章での通気量の解析において、実験棟での通気量は日射取得による温度差の影響が大きく、通気層内温度の計算値は、実測と同様に変動したことによるものである。通気量の計算値は、実測値と比較すると午前中に差は見受けられるが、その他の時間帯について実測と近い結果となっており、通気量の日変動の大略を示している。

第5章 雨掛かりによる水分を考慮した壁内結露の評価方法

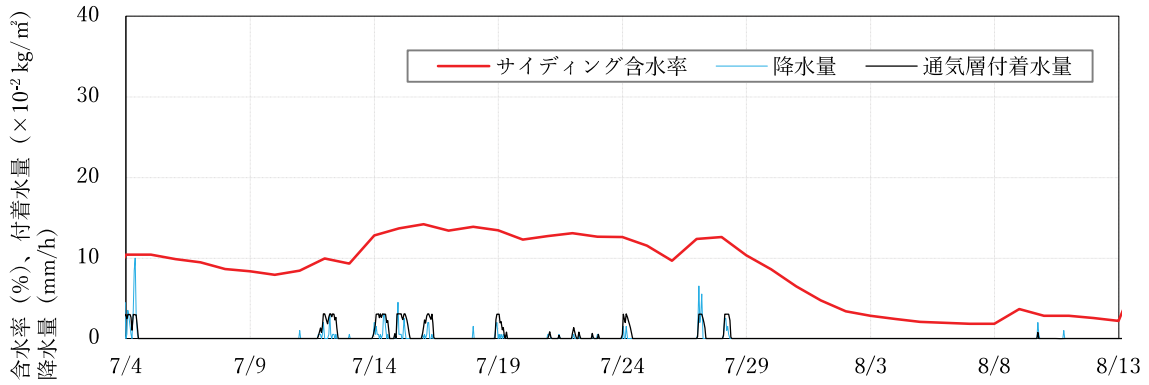


図 5-7-1 東面 15 mm金具仕様 サイディング含水率、通気層付着水量の解析結果

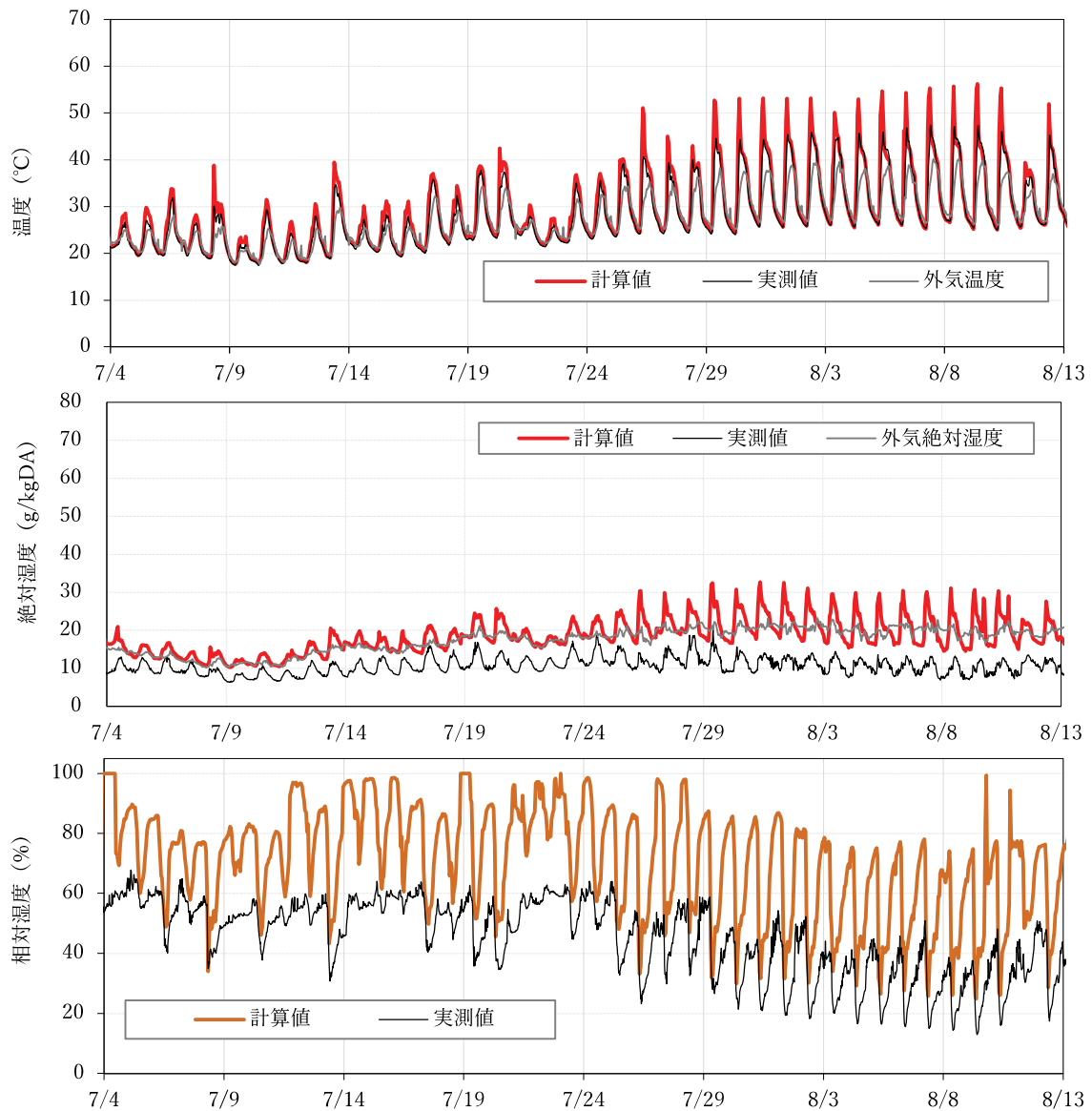


図 5-7-2 東面 15 mm金具仕様 通気層における温度・絶対湿度・相対湿度の解析結果

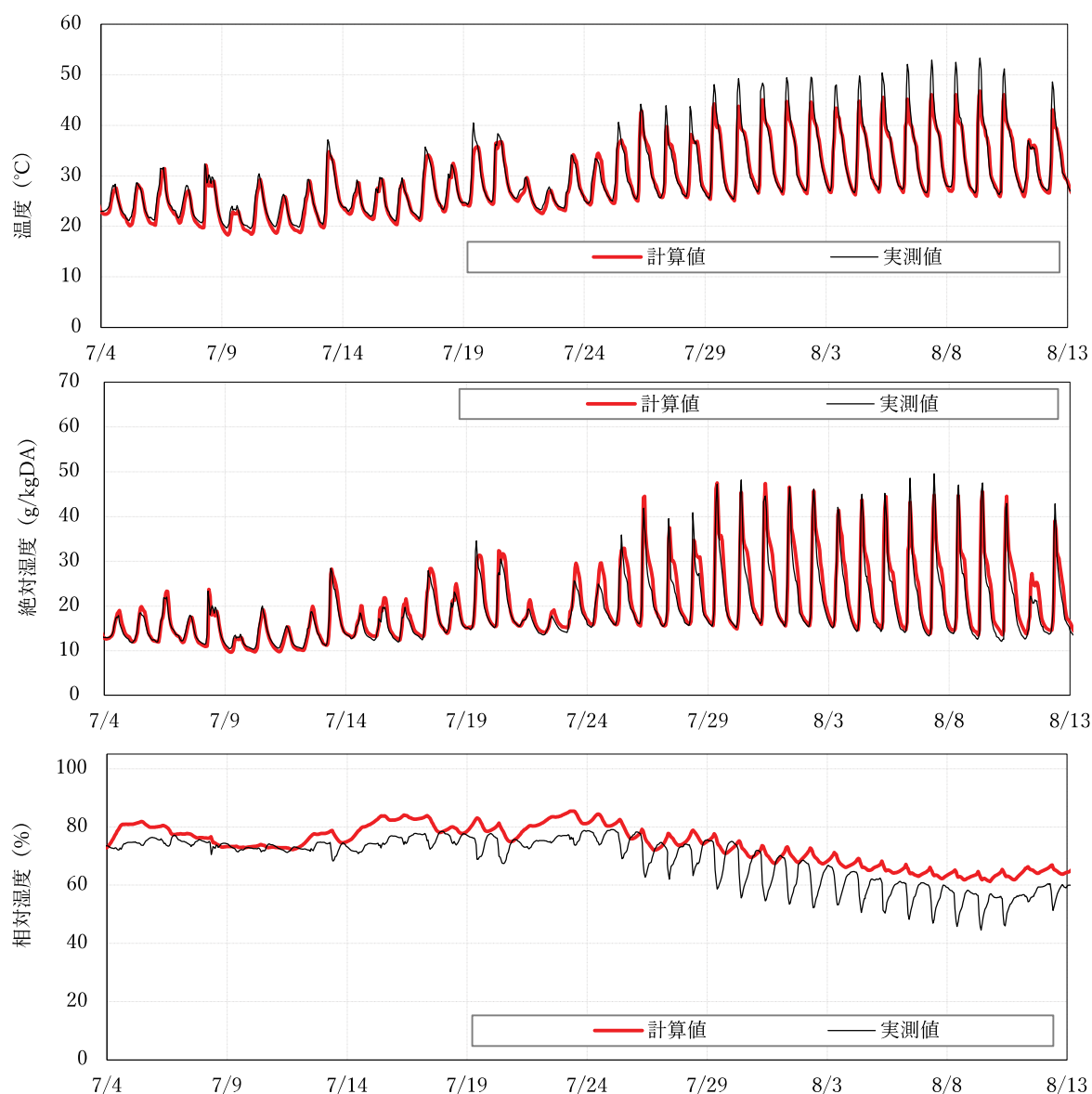


図 5-7-3 東面 15 mm金具仕様 壁内外気側 (外側合板・穴あきポリエチレンフィルム間) における温度・絶対湿度・相対湿度の解析結果

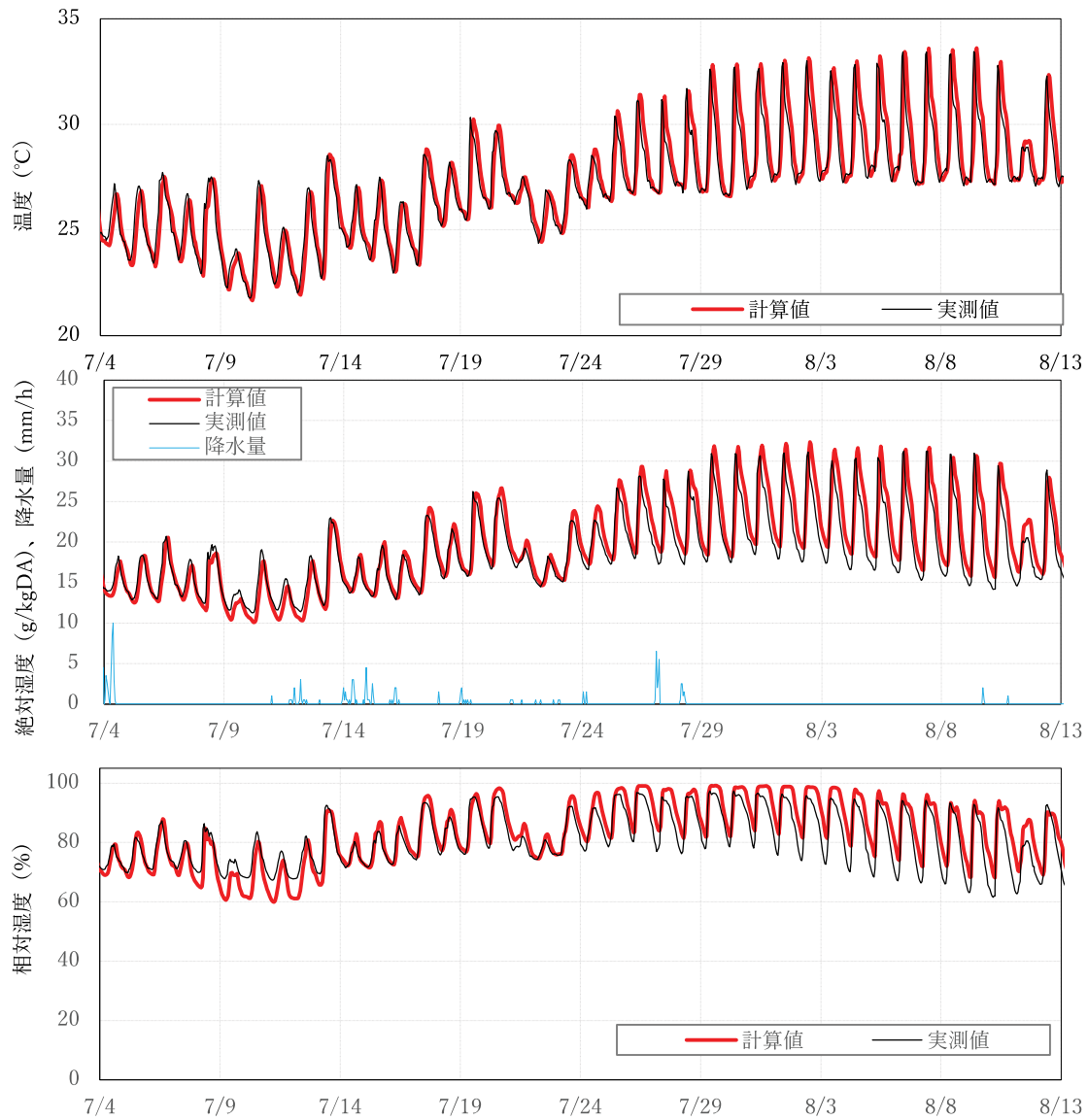


図 5-7-4 東面 15mm金具仕様 壁内室内側 (グラスウール・防湿フィルム間) における 温度・絶対湿度・相対湿度の解析結果

第5章 雨掛かりによる水分を考慮した壁内結露の評価方法

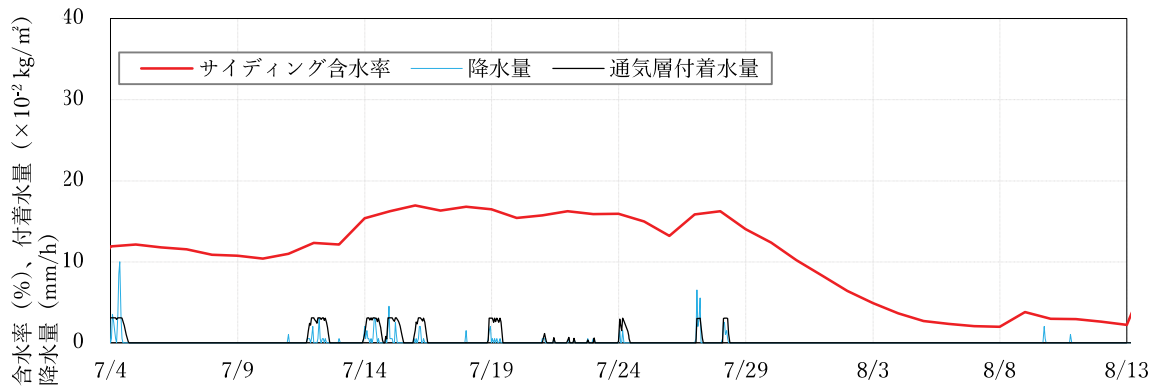


図 5-7-5 東面 6mm金具仕様 サイディング含水率、通気層付着水量の解析結果

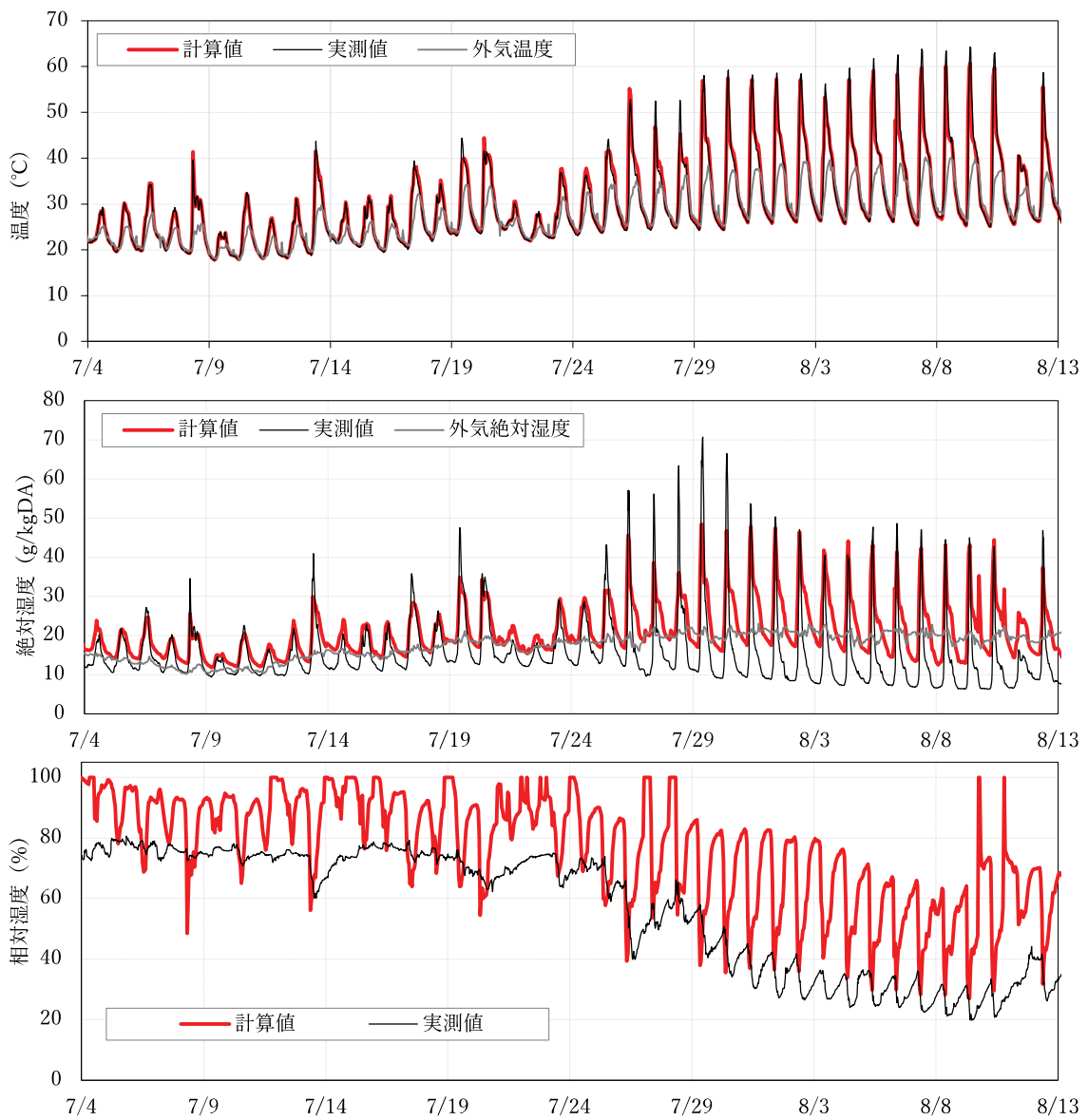


図 5-7-6 東面 6mm金具仕様 通気層における温度・絶対湿度・相対湿度の解析結果

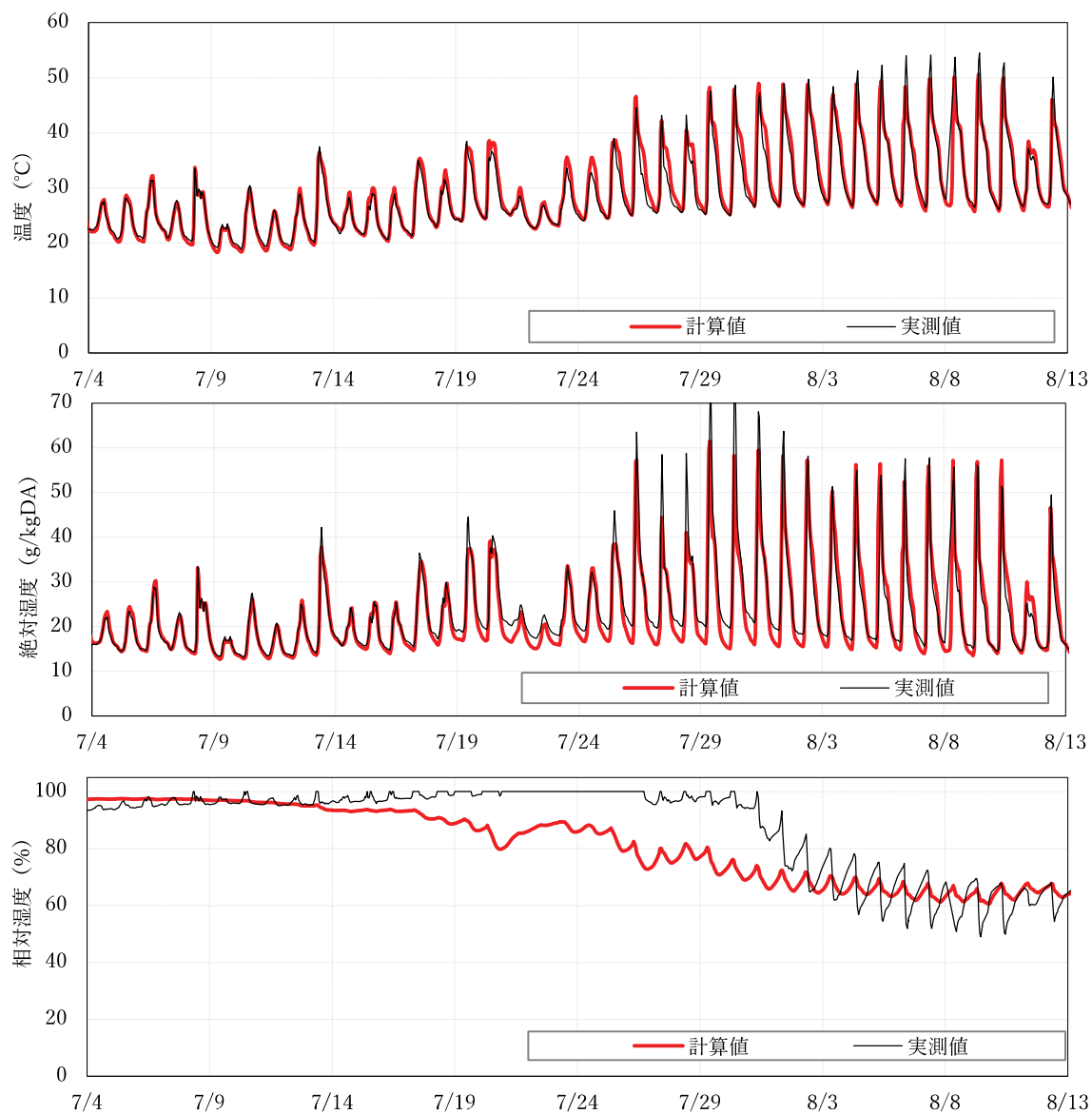


図 5-7-7 東面 6mm金具仕様 壁内外気側 (外側合板・穴あきポリエチレンフィルム間) における温度・絶対湿度・相対湿度の解析結果

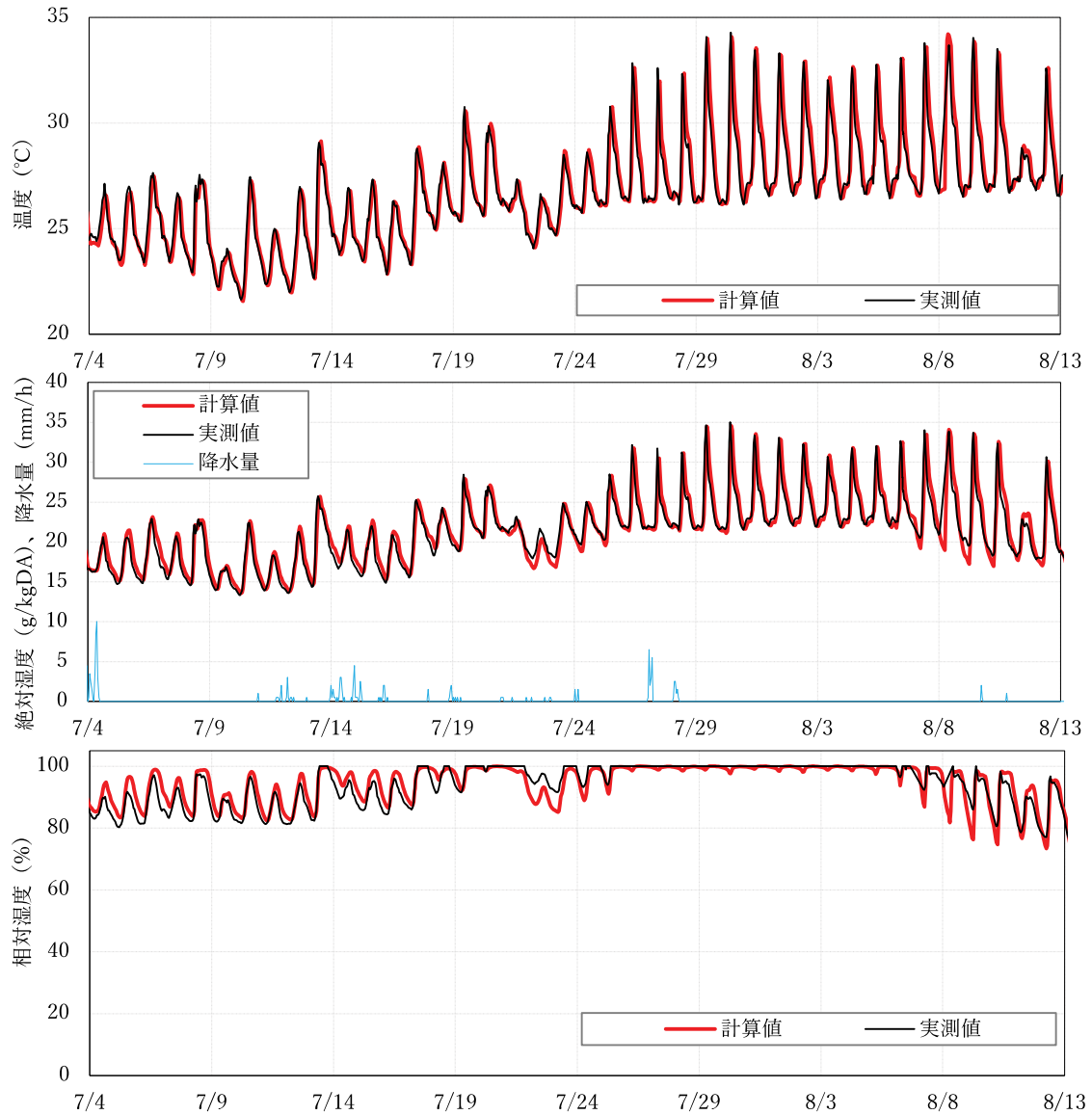


図 5-7-8 東面 6mm金具仕様 壁内室内側 (ガラスウール・防湿フィルム間) における温度・絶対湿度・相対湿度の解析結果

第5章 雨掛かりによる水分を考慮した壁内結露の評価方法

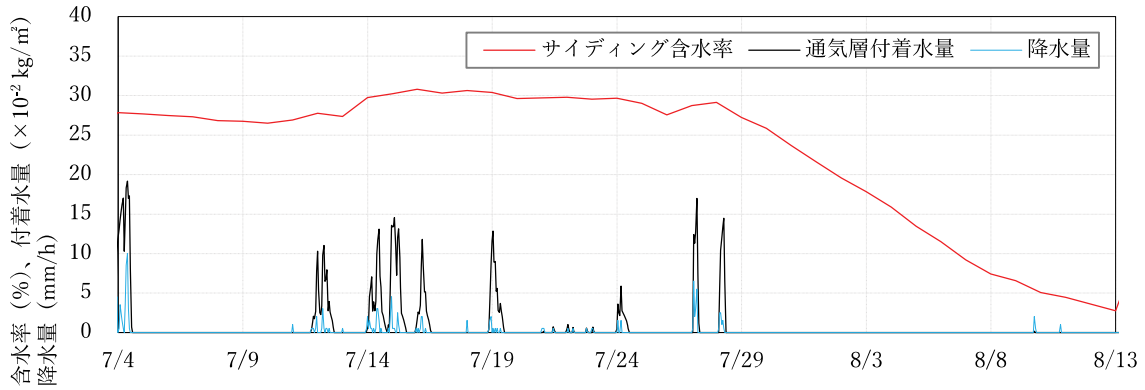


図 5-7-9 東面 横胴縁仕様 サイディング含水率、通気層付着水量の解析結果

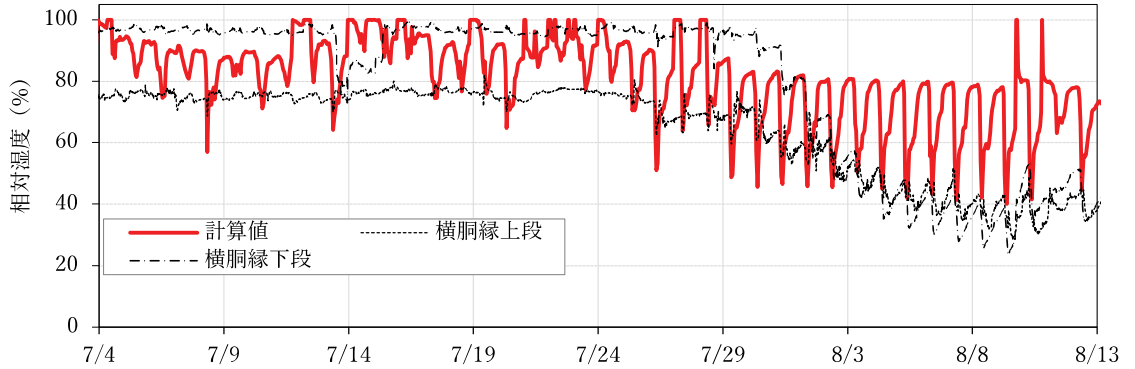
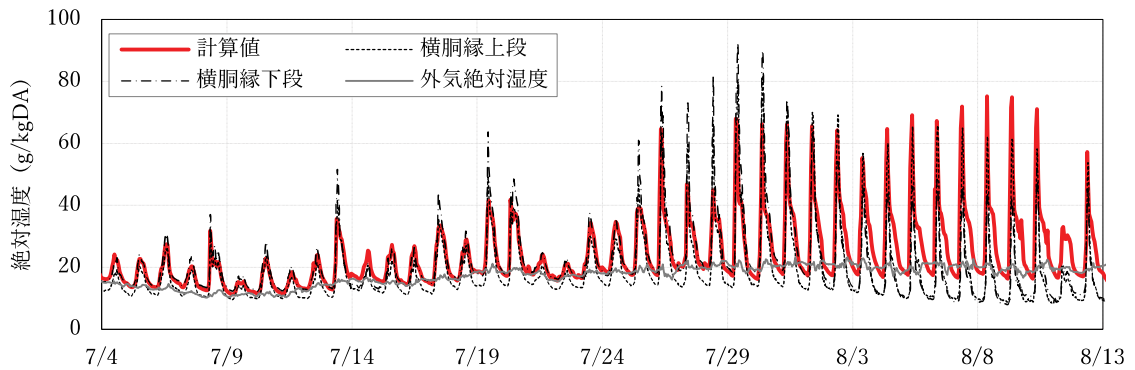
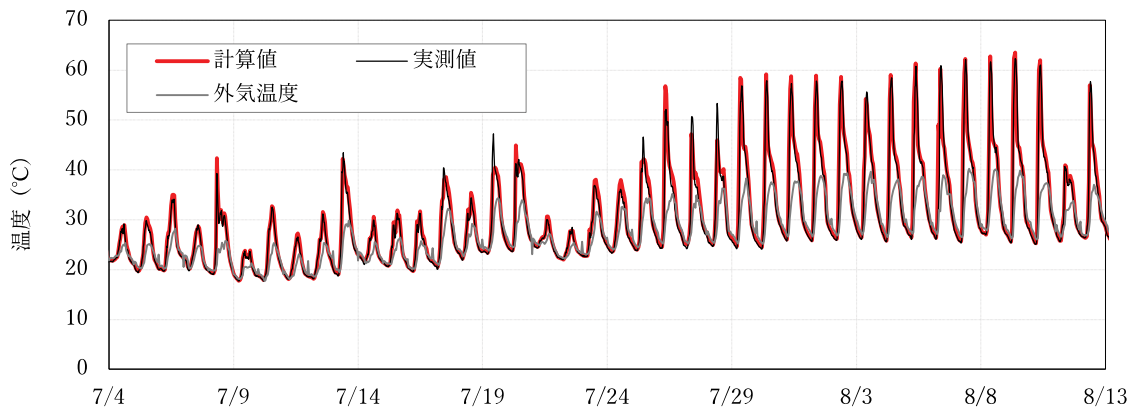


図 5-7-10 東面 横胴縁仕様 壁内外気側（外側合板・穴あきポリエチレンフィルム間）における温度・絶対湿度・相対湿度の解析結果

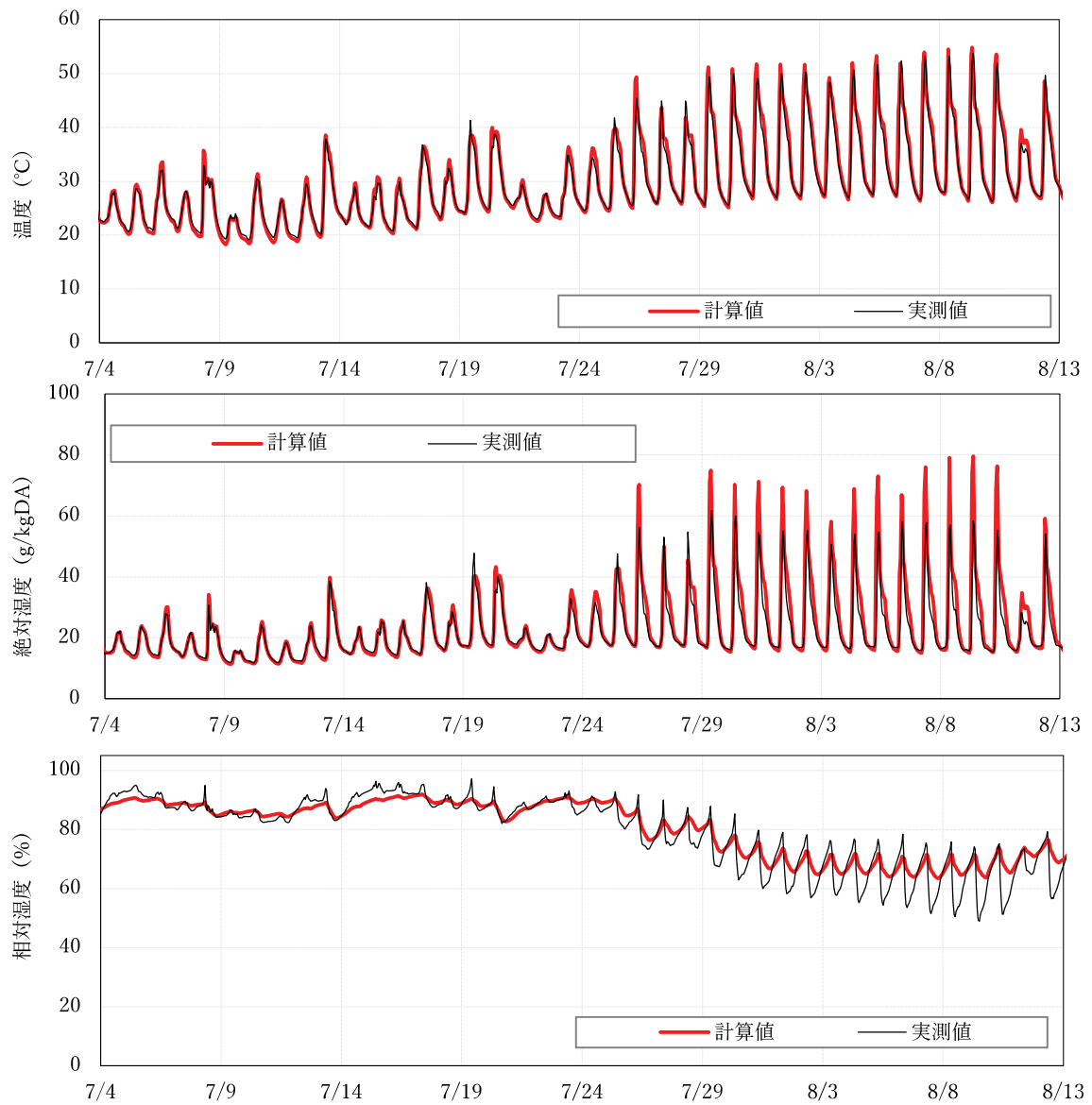


図 5-7-11 東面 横胴縁仕様 壁内外気側 (外側合板・穴あきポリエチレンフィルム間) における温度・絶対湿度・相対湿度の解析結果

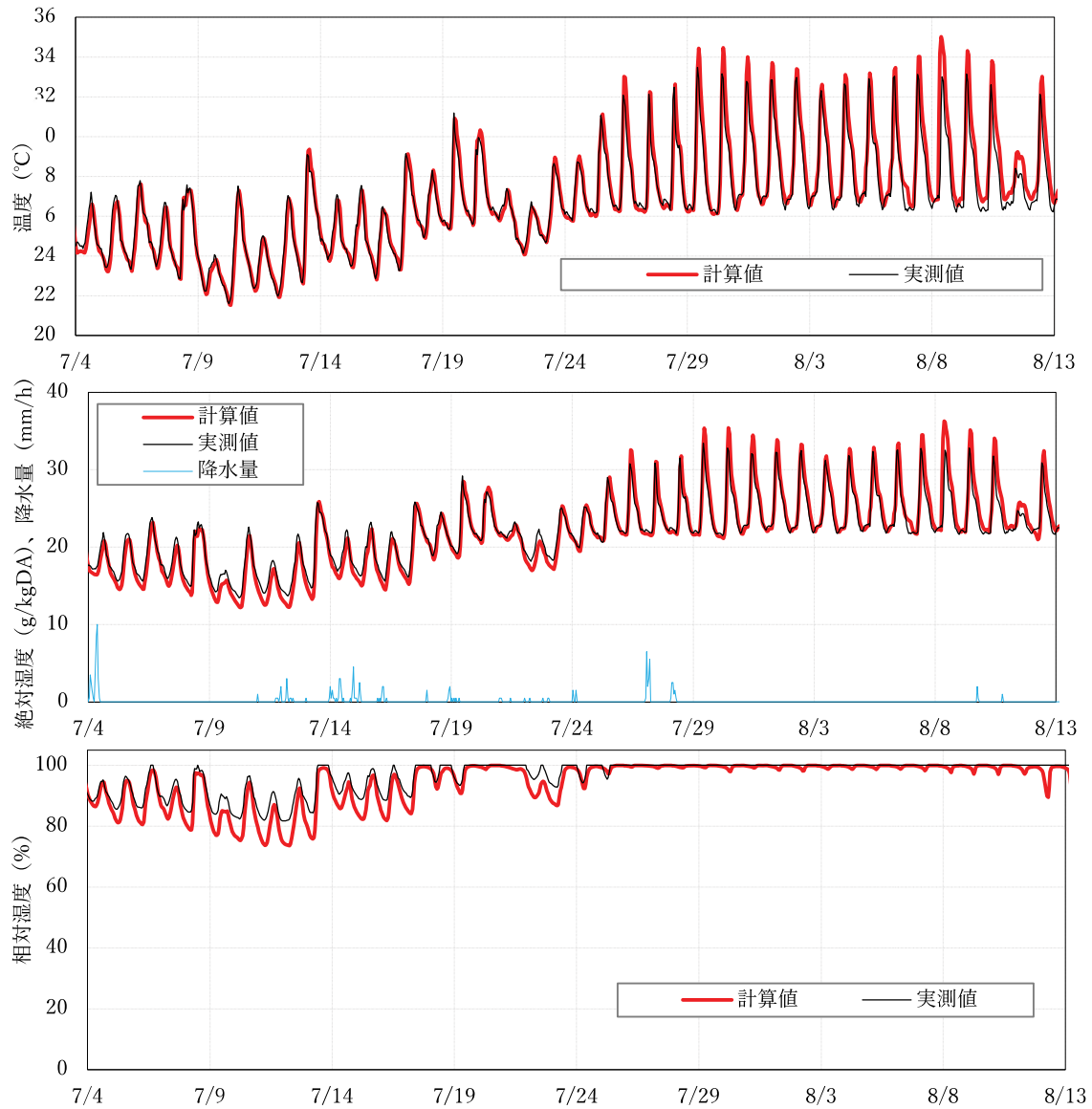


図 5-7-12 東面 横胴縁仕様 壁内室内側（グラスウール・防湿フィルム間）における温度・絶対湿度・相対湿度の解析結果

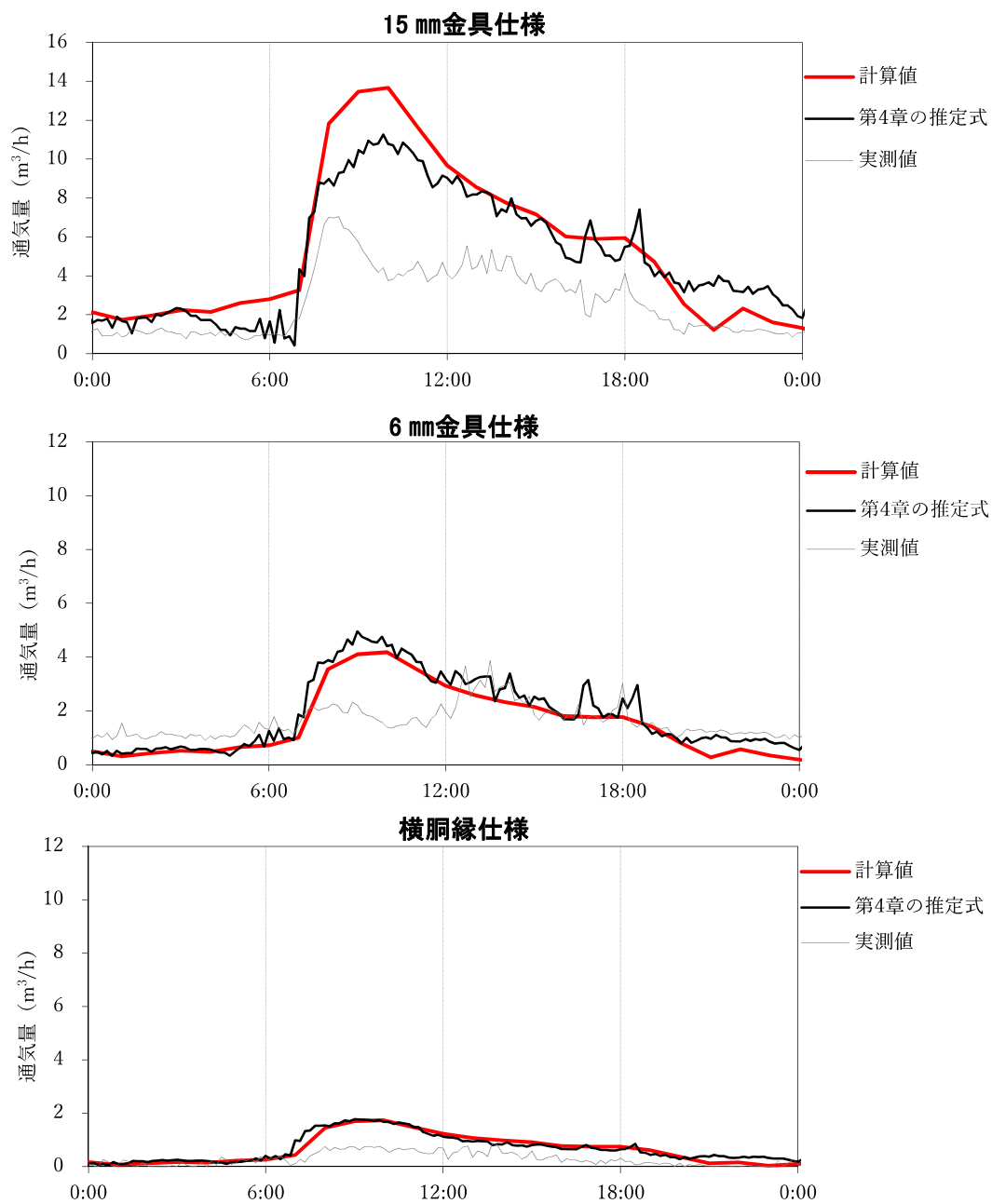


図 5-7-13 通気量の計算値、実測値及び第4章の推定式との比較 (対象日: 8月7日)

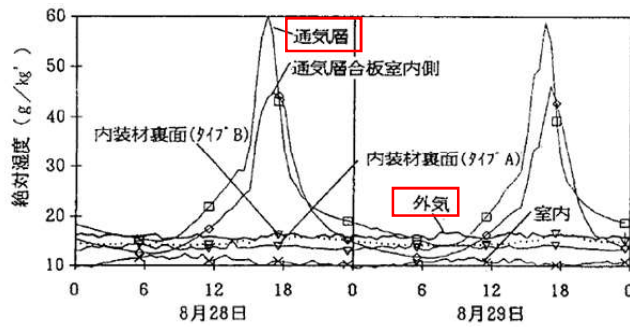


図 5-7-14 渡辺らの実測結果[5-15] (方位：西面、通気層厚さ：18 mm)

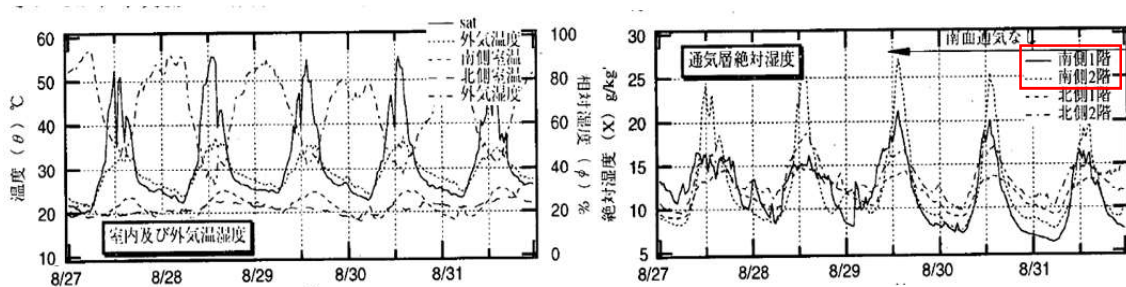


図 5-7-15 齋藤らの実測結果[5-16] (方位：南面、通気層厚さ：18 mm)

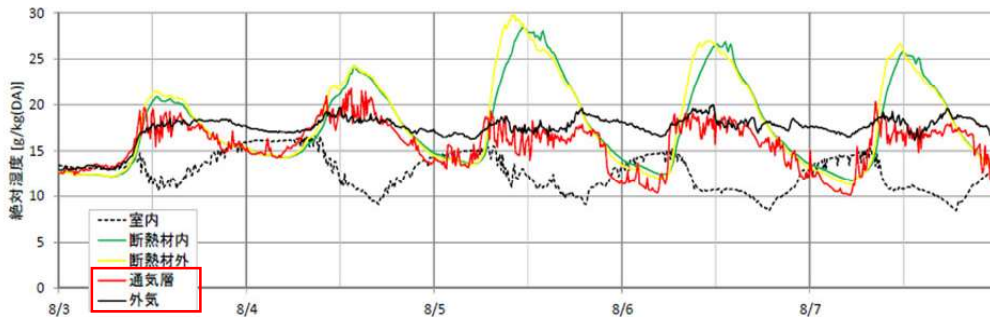


図 5-7-16 梅野の測定結果[5-17] (方位：東面、通気層厚さ：18 mm (屋根断熱仕様))
通気層の絶対湿度は日中に外気同程度に上昇、夜間に外気より低くなる傾向が見られた。

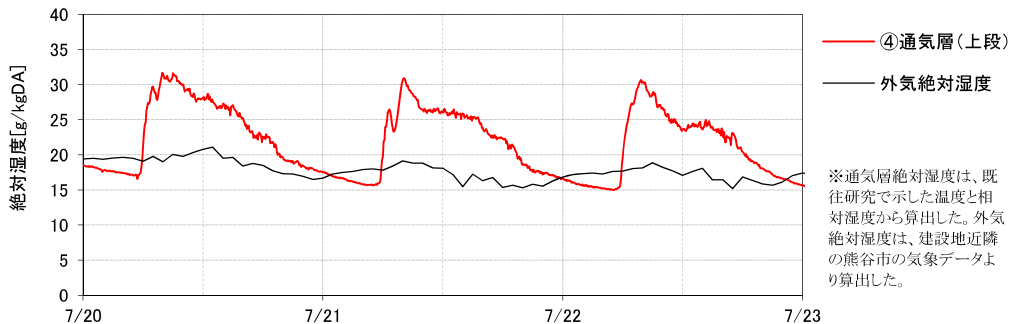


図 5-7-17 通気層へ注水を行った別の実験棟での実測結果[5-18]
(方位：東面、通気層厚さ：15 mm(縦胴縁)、階数：2 階、注水量：第 4 章の実験棟と同等)

5.7.2 北面の計算結果

5.7.1 節同様に北面における 15 mm金具仕様の計算結果を図 5-7-18～5-7-21、6 mm金具仕様を図 5-7-22～5-7-25、及び横胴縁仕様を図 5-7-26～5-7-29 に示す。なお、6 mm金具の 7/19～7/23、8/1 及び 8/4、横胴縁仕様の 7/10～7/22 の実測値、並びに通気層について、15 mm金具仕様と横胴縁仕様は絶対湿度と相対湿度、6 mm金具仕様は温度と絶対湿度の実測値が欠損している。

(1)15 mm金具仕様

サイディング含水率の計算値は、東面同様に雨掛かりによる外装材表面及び裏面からの吸水の影響により、雨期に 15%程度まで上昇した後、梅雨明け以降に低下傾向を示した。梅雨明けの低下傾向は、東面に比べ緩やかな傾向を示した。

温度及び絶対湿度に関して、通気層、及び壁内（外気側と室内側）ともに計算値は、東面に比べ日中の最大値が低くなるなど実測値と概ね一致していることが示されている。日射による温度上昇が少ない方位のため、サイディング及び外側合板からの放湿量が少ない影響が現われている。

壁内相対湿度に関して、室内側の計算値は、東面同様に雨期に上昇した後、晴天時に乾燥傾向を示すなど、実測値と同様の変動を示している。

(2)6 mm金具仕様

サイディング含水率の計算値は、15 mm金具同様に雨期に上昇した後、低下傾向を示した。東面と異なり、最大値は 15 mm金具仕様と同程度の値となった。日射が当たり難い方位のため、通気層内外の温度差が生じにくく、通気量による乾燥性能の差が影響しにくかったものと推察される。

壁内温度及び絶対湿度に関して、15 mm金具同様に外気側、室内側ともに計算値は、東面に比べ日中の最大値が低くなるなど実測値と同様の変動を示した。

壁内相対湿度に関して、室内側の計算値は東面と異なり、実測値同様に相対湿度 98%以上の状態が数日間継続する傾向は示さなかった。

(3)横胴縁仕様

通気層における付着水量の最大値は、胴縁に付着、吸水された水分の影響により $17[\times 10^{-2} \text{kg/m}^2]$ と金具仕様の約 6 倍を示した。通気量も 3 仕様中最も少ないことから、サイディング含水率の計算値は、32%まで上昇するなど 3 仕様中最も高い値を示した。

温度に関して、通気層及び壁内（外気側と室内側）の計算値は、東面に比べ日中の最大値が低くなるなど、実測値と概ね一致していることが示されている。

壁内絶対湿度に関して、外気側の計算値は、7 月下旬以降における夜間の値が実測値より

低い値を示したが、3仕様中最も高くなるなど実測値と同様の変動を示している。室内側の計算値は、期間全体で実測値と概ね一致していることが示されている。

壁内相対湿度に関して、室内側の計算値は、7月中旬以降に相対湿度98%以上の状態が約20日間に渡り継続するなど、実測値と同様の傾向を示している。

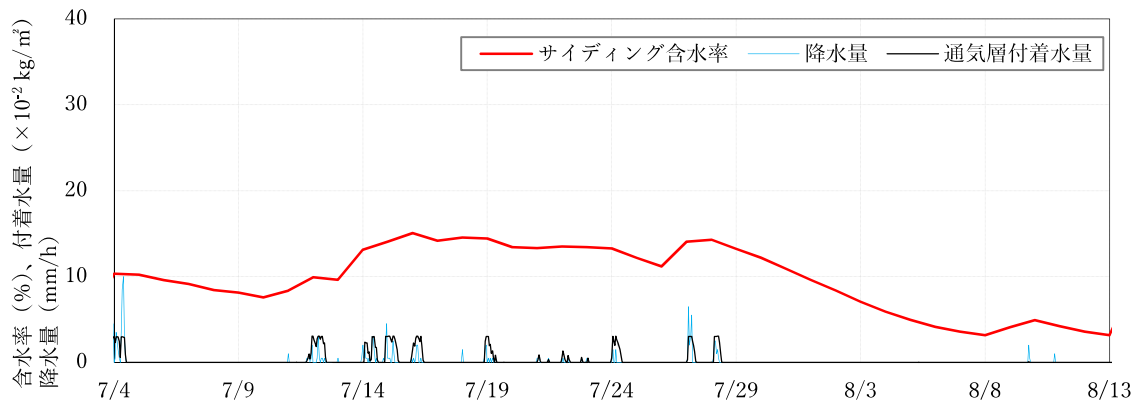


図 5-7-18 北面 15 mm金具仕様 サイディング含水率、通気層付着水量の解析結果

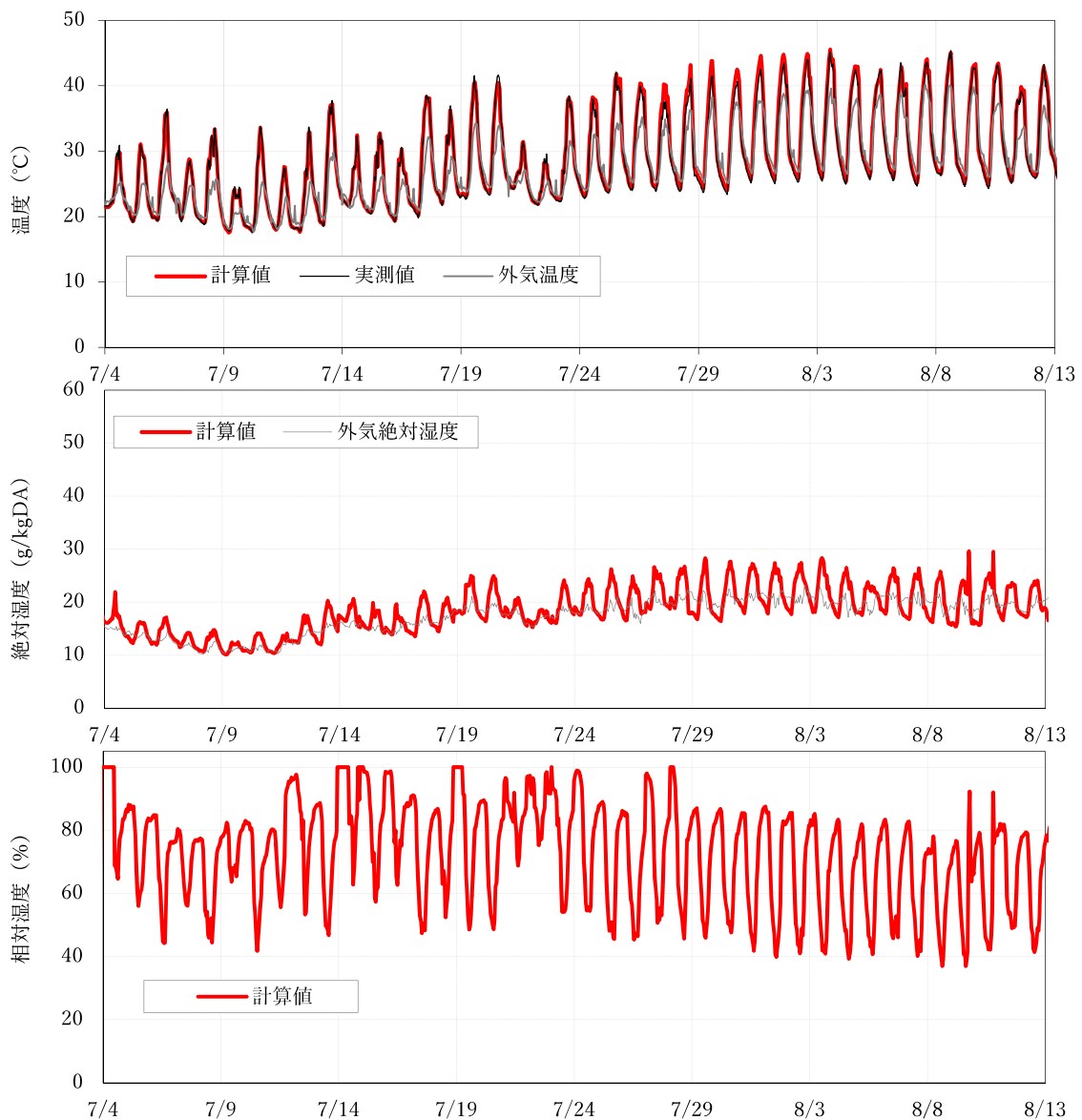


図 5-7-19 北面 15 mm金具仕様 通基層における温度・絶対湿度・相対湿度の解析結果

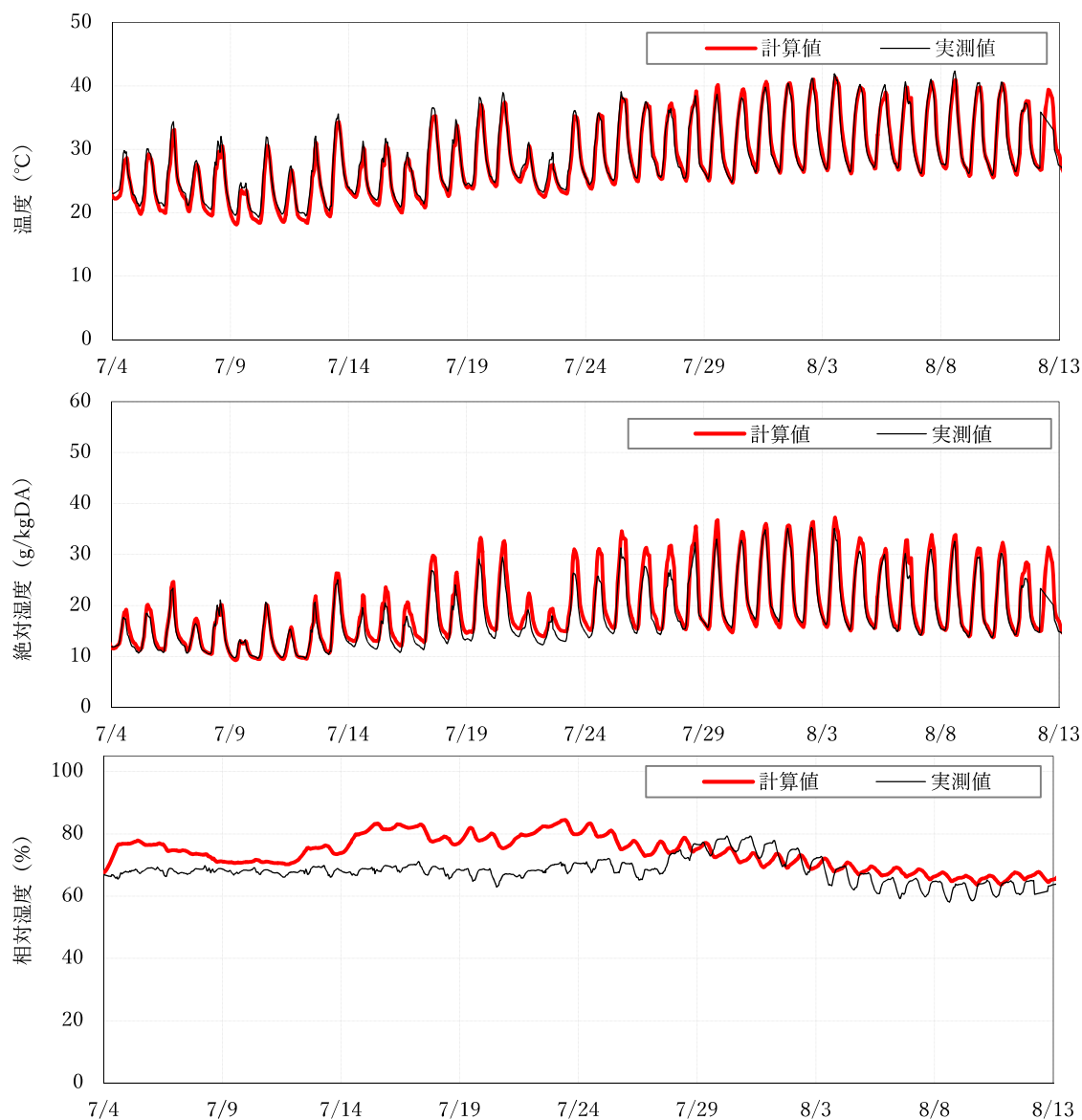


図 5-7-20 北面 15 mm金具仕様 サイディング含水率、壁内外気側（外側合板・穴あきポリエチレンフィルム間）における温度・絶対湿度・相対湿度の解析結果

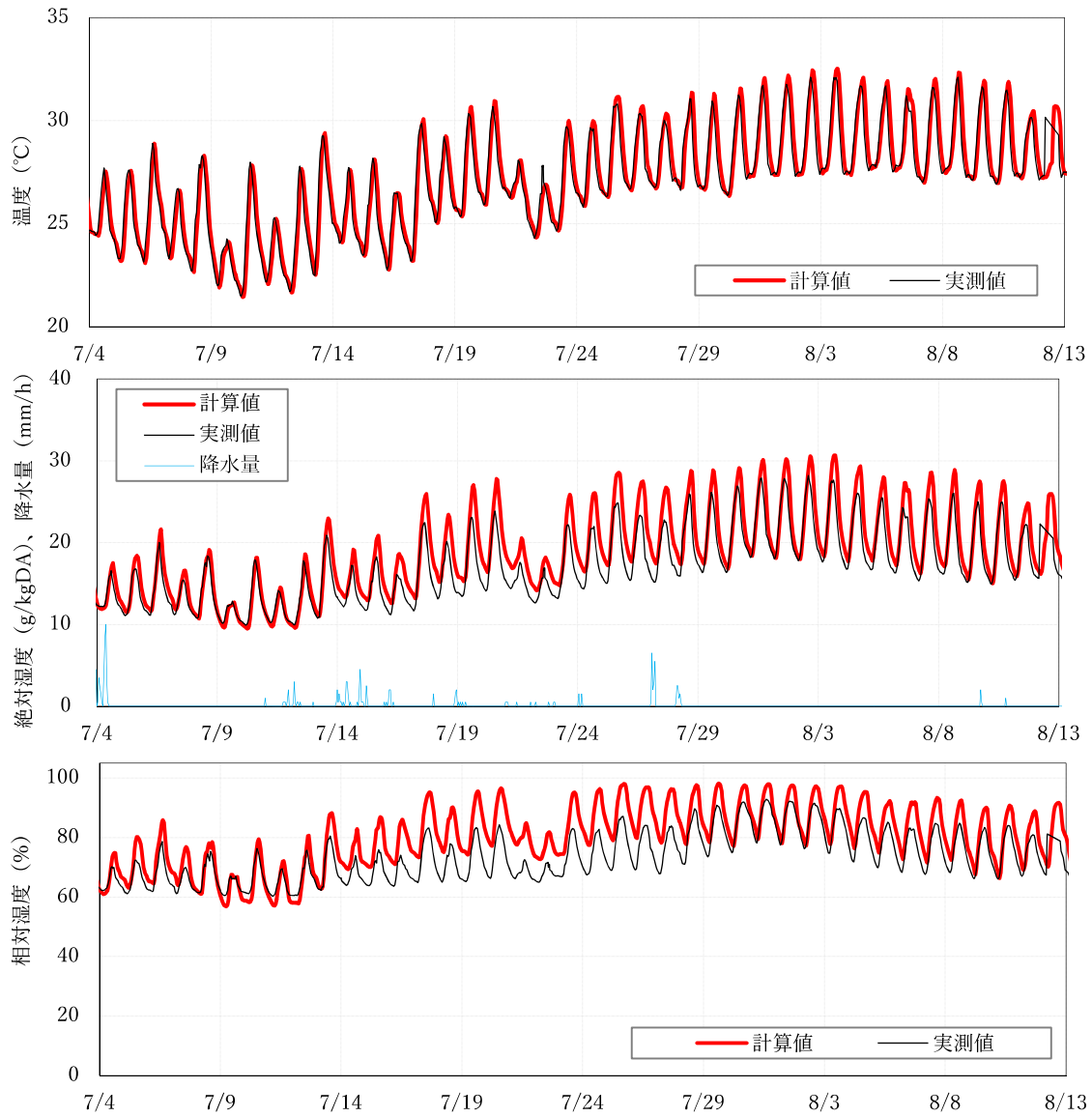


図 5-7-21 北面 15 mm金具仕様 壁内室内側（グラスウール・防湿フィルム間）における温度・絶対湿度・相対湿度の解析結果

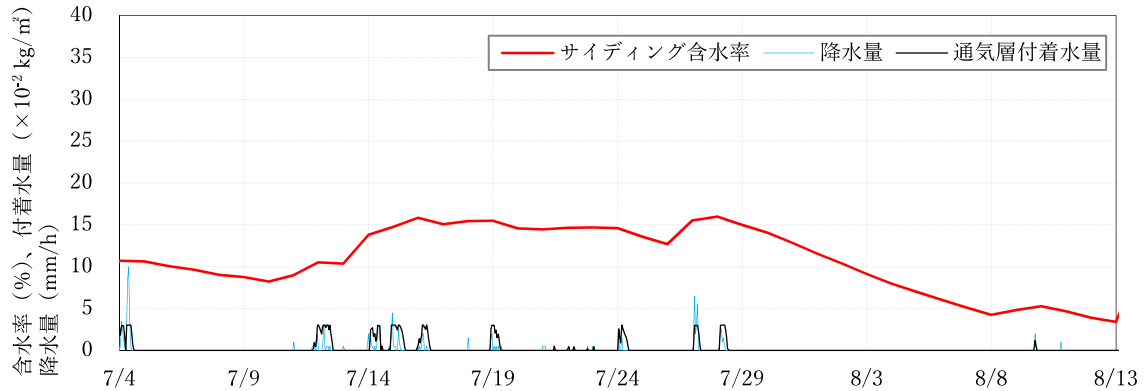


図 5-7-22 北面 6mm金具仕様 サイディング含水率、通気層付着水量の解析結果

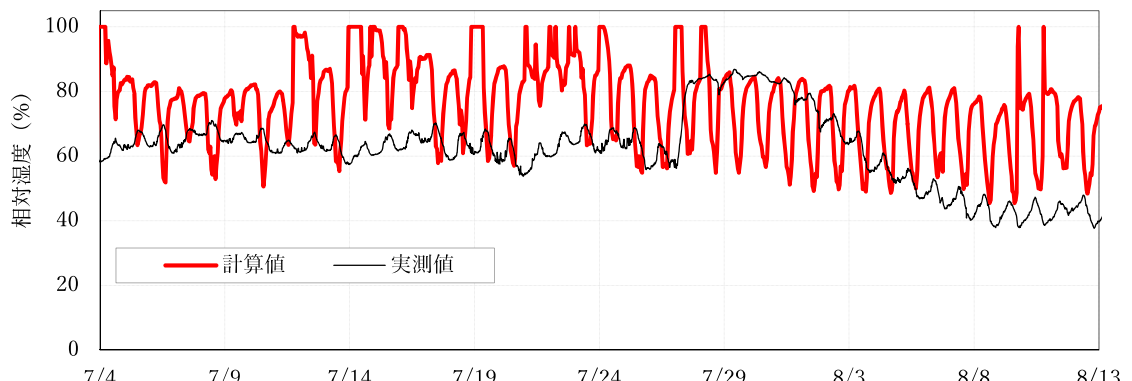
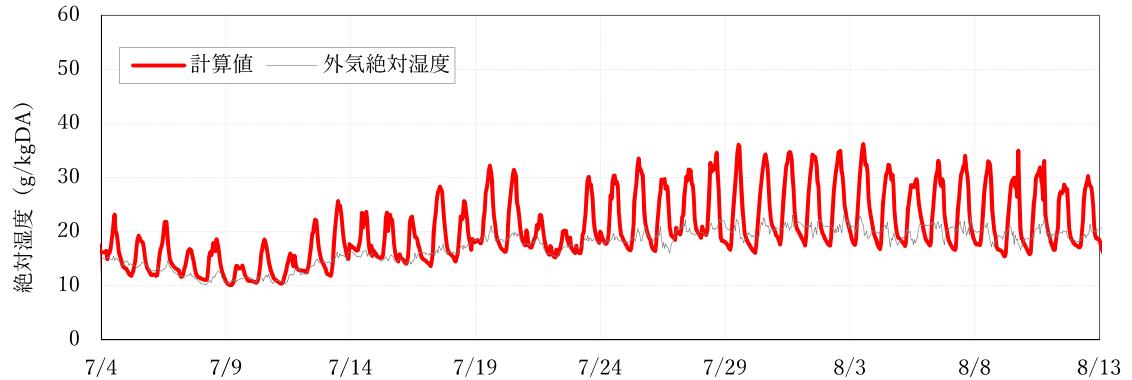
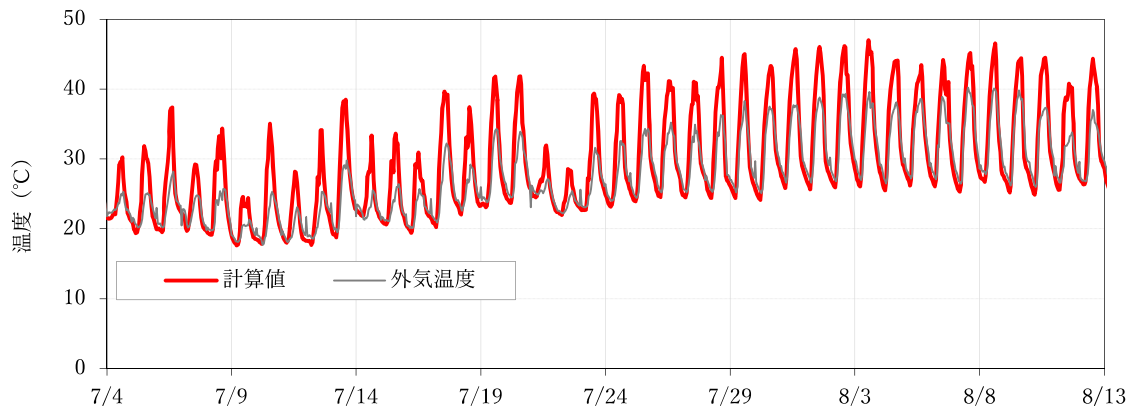


図 5-7-23 北面 6mm金具仕様 通気層における温度・絶対湿度・相対湿度の解析結果

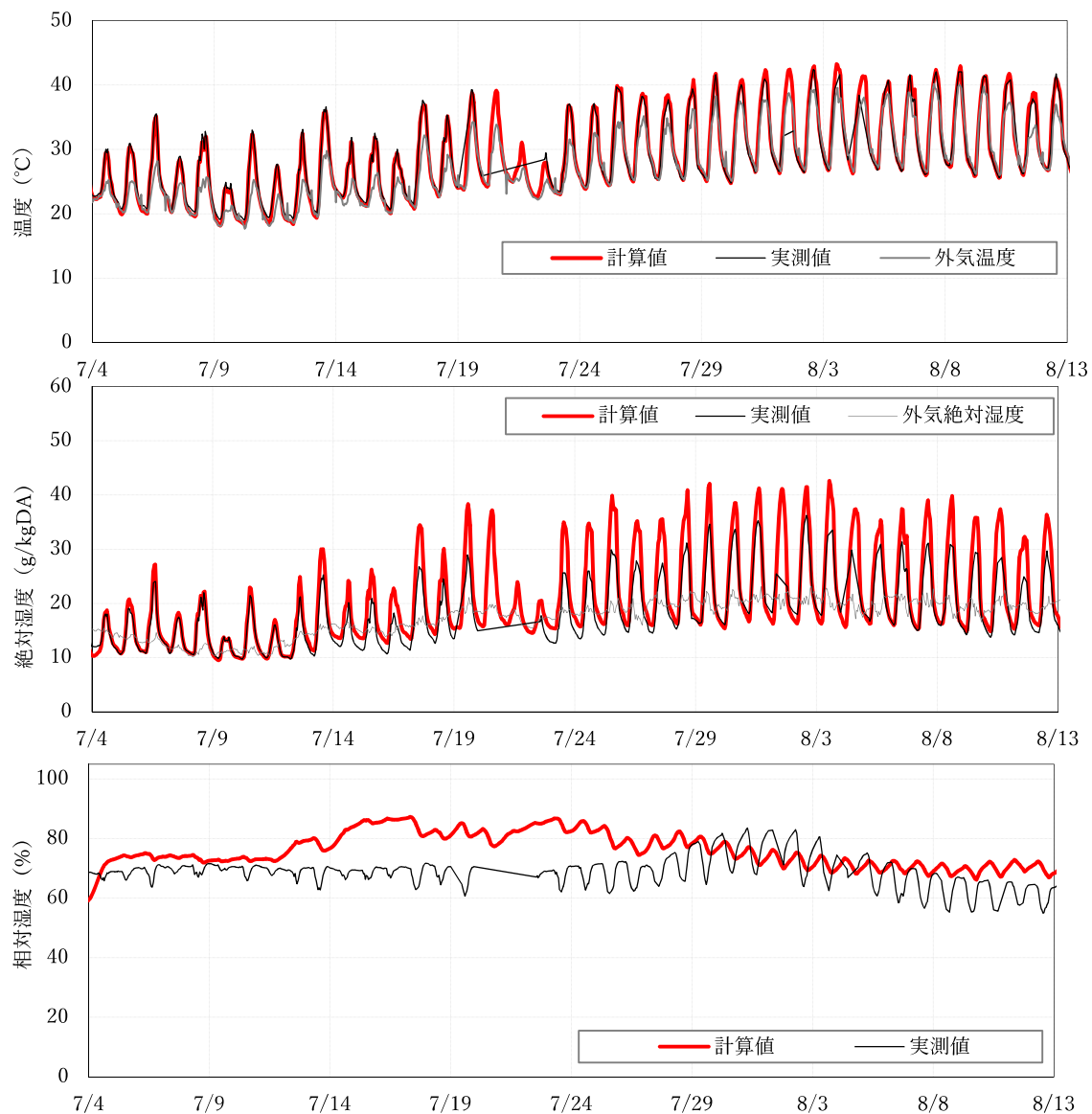


図 5-7-24 北面 6mm金具仕様 サイディング含水率、壁内外気側（外側合板・穴あきポリエチレンフィルム間）における温度・絶対湿度・相対湿度の解析結果

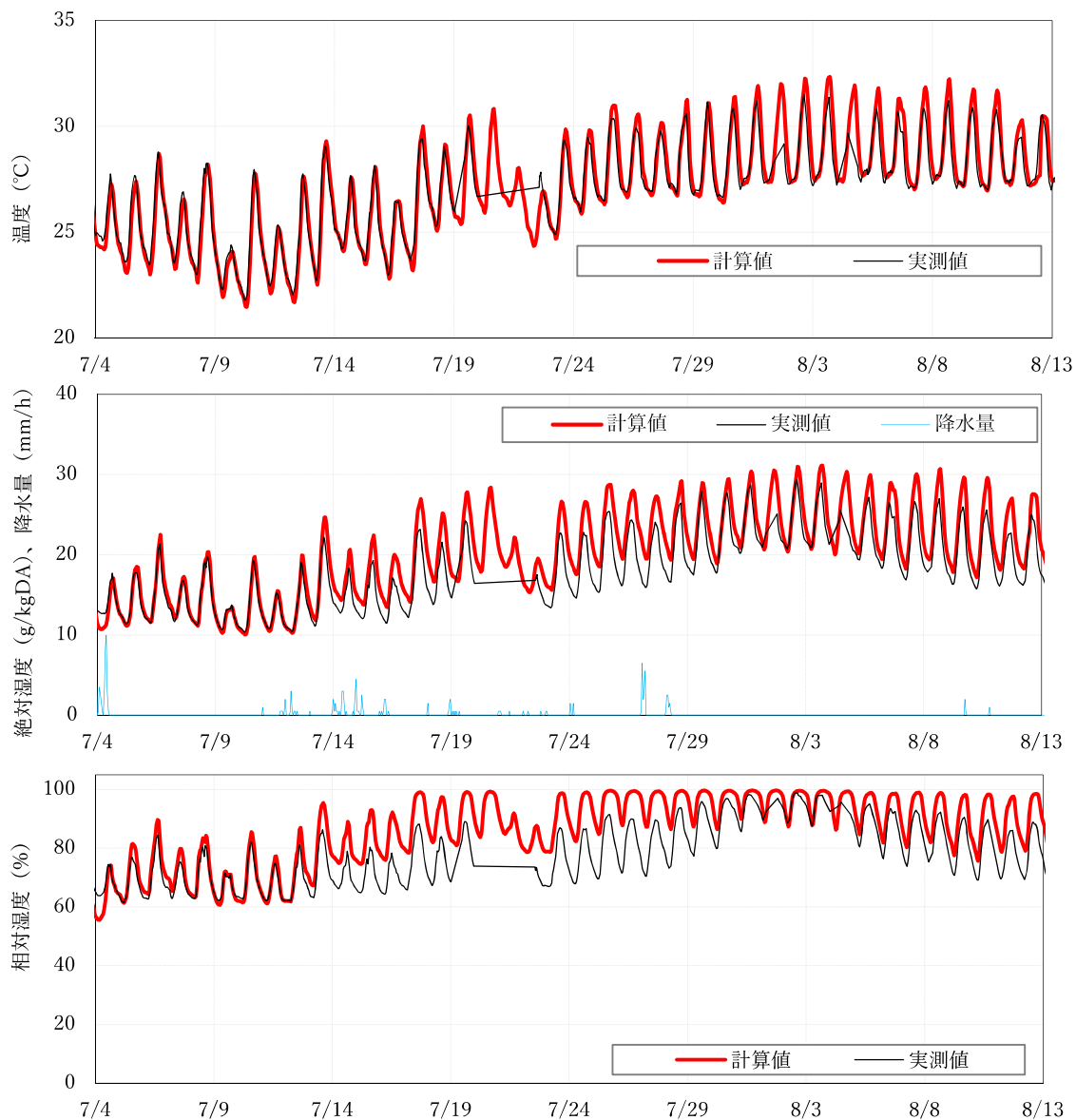


図 5-7-25 北面 6mm金具仕様 壁内室内側 (グラスウール・防湿フィルム間) における 温度・絶対湿度・相対湿度の解析結果

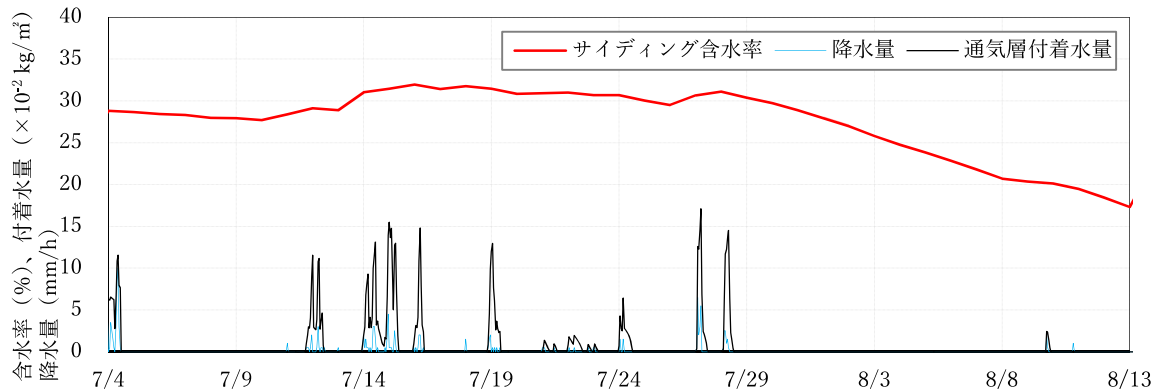


図 5-7-26 北面 横胴縁仕様 サイディング含水率、通気層付着水量の解析結果

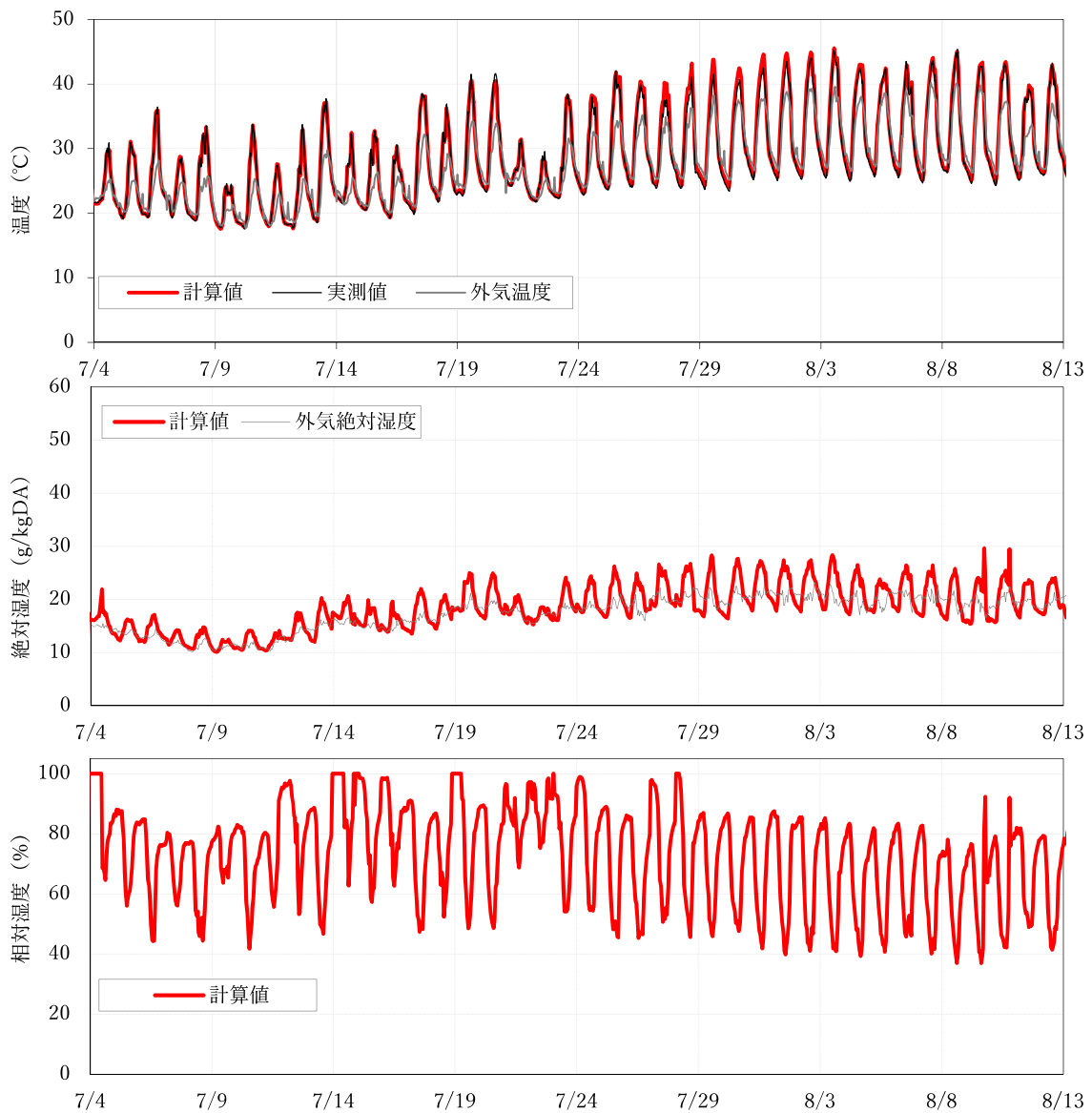


図 5-7-27 北面 横胴縁仕様 通気層における温度・絶対湿度・相対湿度の解析結果

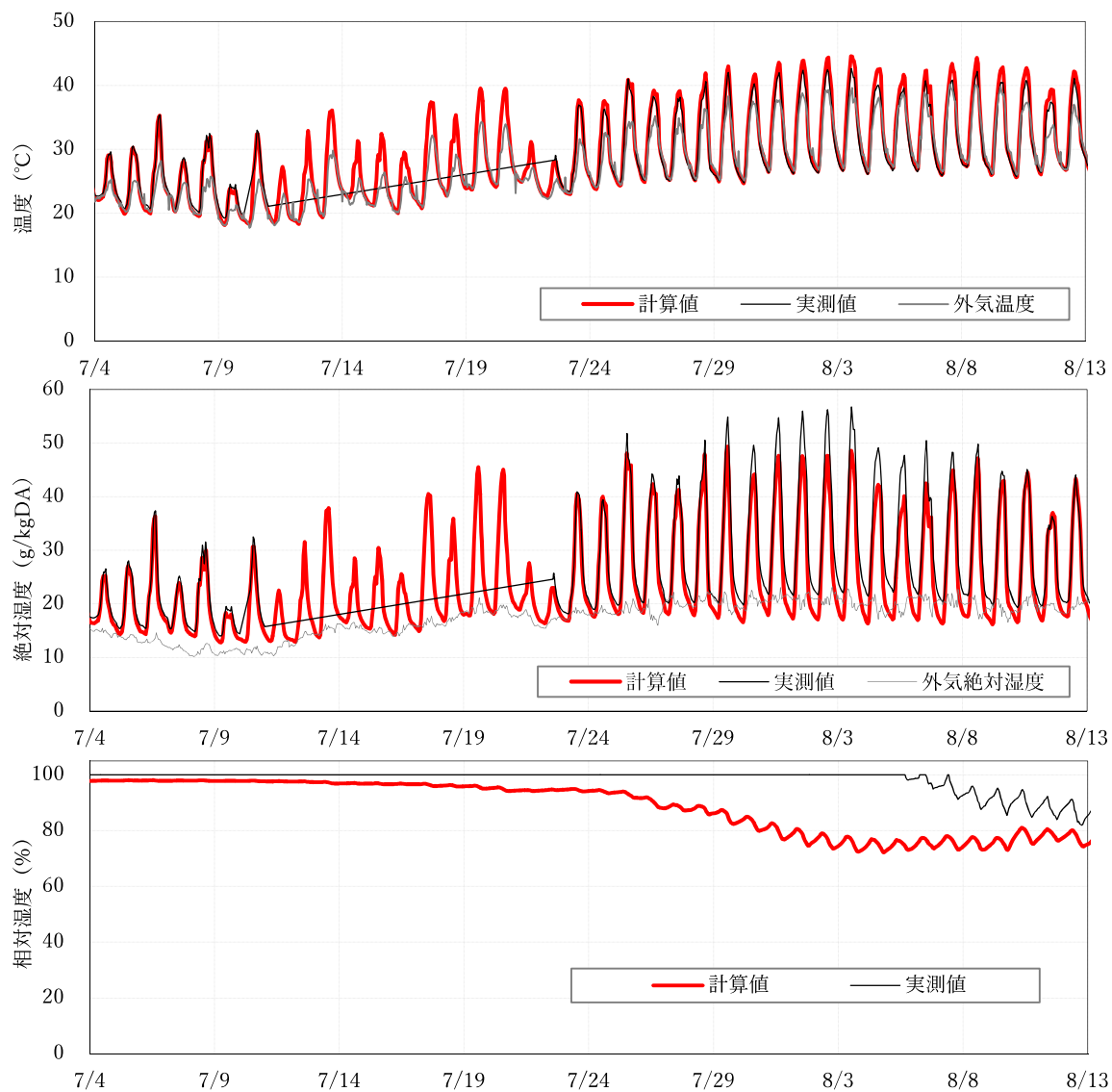


図 5-7-28 北面 横胴縁仕様 壁内外気側 (外側合板・穴あきポリエチレンフィルム間) における温度・絶対湿度・相対湿度の解析結果

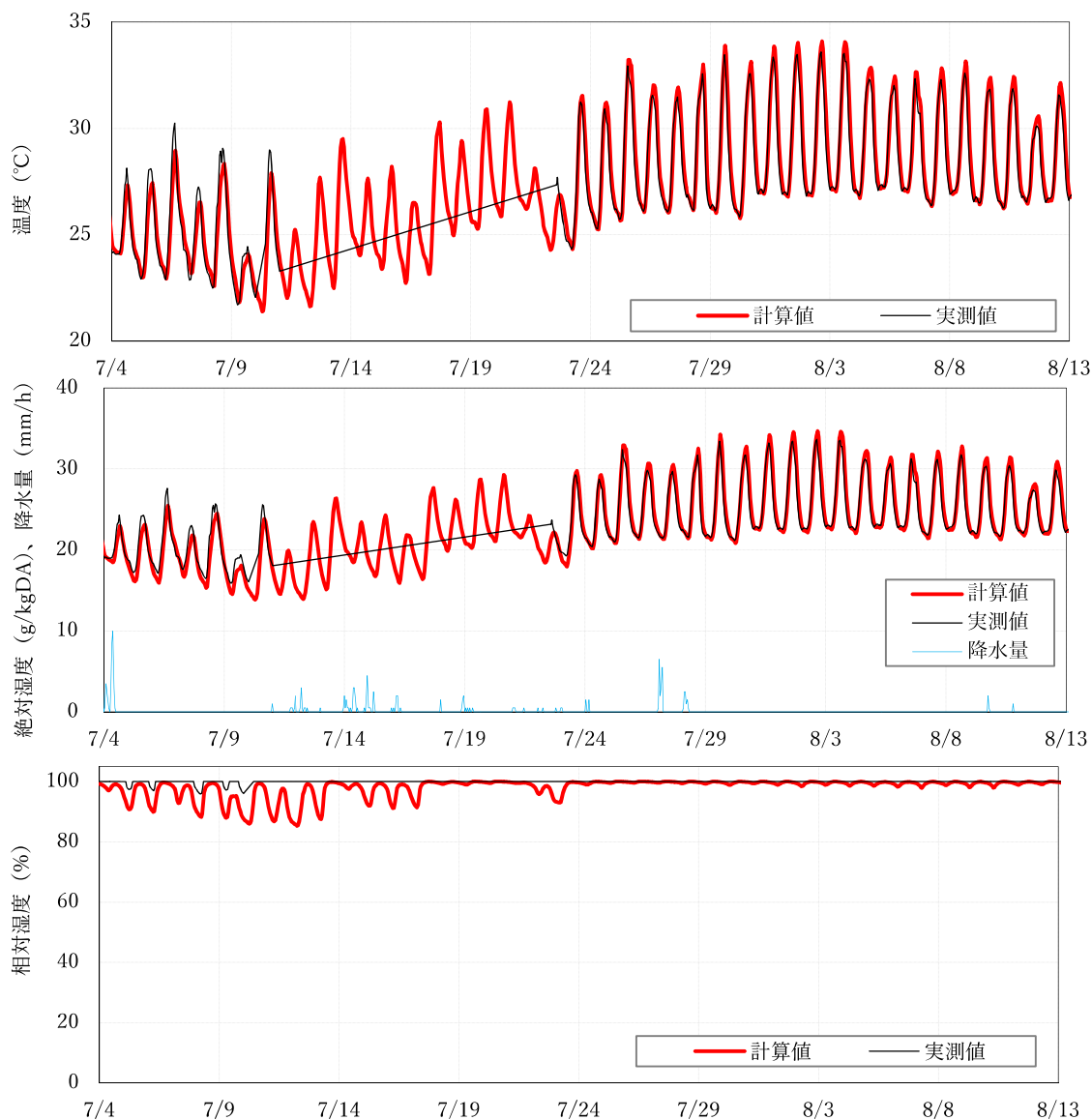


図 5-7-29 北面 横胴縁仕様 壁内室内側 (グラスウール・防湿フィルム間) における温度・絶対湿度・相対湿度の解析結果

5.8 第5章のまとめ

雨掛かりによる外装材表面及び通気層で形成される付着水の水分収支を考慮した予測モデルを提案し、実験棟で測定した結果と比較した。計算結果より、以下の知見が得られた。

- 1) 金具仕様におけるサイディングの含水率は、雨掛かりによるサイディング表面、及び裏面からの吸水の影響により雨期に 18%程度まで上昇し、晴天時に吸水した水分の一部が通気層側へ放湿される。
- 2) 横胴縁仕様におけるサイディングの含水率は、サイディング表面、及び裏面からの吸水に加え、横胴縁上端に滞留、及び横胴縁に吸水された水分の影響により、雨期に 30%程度まで上昇した。また、通気層における付着水量の最大値は、胴縁に付着、吸水された水分の影響により $18[\times 10^{-2} \text{kg/m}^2]$ と金具仕様の 6 倍を示した。
- 3) 壁内室内側における相対湿度の計算値は、実測値と同様に雨水の滞留率が小さく相当開口面積が大きい仕様ほど、飽和状態に至る時間が短いことを示した。また、東面の相対湿度変動は、実測値と同様に 15 mm 金具仕様は断続的な高湿度状態（ハイグロスコピック域を超える相対湿度 98%以上の状態）、6 mm 金具及び横胴縁仕様は長期間にわたり高湿度状態を示した。北面の相対湿度変動も実測値と同様に、15 mm 及び 6 mm 金具仕様は断続的な高湿度状態、横胴縁は長期間にわたり高湿度状態を示した。
- 4) 壁内外気側における相対湿度の計算値は、実測値が高湿度領域に至る一部の期間において、実測値より低い値を示したが、その他の期間においては概ね実測と同様の変動を示したと考えられる。壁内温度の計算値について、東面は日射の影響により日中の最大値が外気温度より高く、北面は外気温度同程度となり、実測と同様の変動を示した。壁内絶対湿度の計算値は、東面の日中最大値が北面より高くなるなど実測と同様の変動を示した。
- 5) 通気層の絶対湿度に関して、計算値は実測値より高い値を示した時間帯があったものの、日射取得によりサイディングから放湿された水分の影響で、外気より日中高く、夜間に低くなるなど実測と同様の変動を示した。

以上の結果より、通気層及び壁内外気側の水分変動について改善の余地が残るものの、本章で提案した予測モデルは、雨水由来の水分が及ぼす壁内の温湿度性状を把握する目的で活用できると考えられる。

注釈

[注1] 横胴縁の最大含水量 [kg/m²]について

横胴縁を24時間浸漬させ、横胴縁の最大含水量[kg/m²]を求めた。

- ・試験方法：試料を水中に浸漬させ24時間後の含水量を最大値とした。
- ・試料：12mm横胴縁（厚さ：12mm、高さ：40mm、長さ：100mm、試料数：3体）を23℃、相対湿度50%にて14日養生。これを乾燥時の重量とした。
- ・試験結果：付表1に示す。

付表1 横胴縁の最大含水量

| | 厚さ [m] | 長さ [m] | 面積 [m ²] | 重量[kg] | | 最大含水量 [kg/m ²] |
|----|-----------|-----------|-------------------------|---------|----------|-------------------------------|
| | | | | 試験前 | 試験後 | |
| 1 | 0.012 | 0.100 | 0.0012 | 0.02487 | 0.04314 | 14.5 |
| 2 | 0.012 | 0.100 | 0.0012 | 0.02579 | 0.04225 | |
| 3 | 0.012 | 0.100 | 0.0012 | 0.02532 | 0.042274 | |
| 平均 | 0.012 | 0.100 | 0.0012 | 0.02533 | 0.04271 | |

第5章 参考文献

- [5-1] 松本衛：建築壁体における熱・水分の同時移動および水分蓄積に関する研究、京都大学博士論文、1978年
- [5-2] 池田哲朗：結露障害防止に関する基礎的研究、京都大学博士論文、1979年
- [5-3] 財団法人 建築環境・省エネルギー機構：建物外皮における結露防止のためのガイドライン 第6回日加住宅R&Dワークショップ公表初版、2003.5
- [5-4] 松本衛：新建築学体系10 環境物理3章 湿気、彰国社、1984年
- [5-5] 齋藤宏昭、土屋高雄：冷房時における夏型壁体内結露に関する研究（その1）、日本建築学会計画系論文集No519、pp.39-45、1999.5
- [5-6] 齋藤宏昭、土屋高雄、黒木勝一：冷房時における夏型壁体内結露に関する研究（その2）、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp.267-268、1996.5
- [5-7] 渡辺康徳、龍有二、尾崎明仁、藤田協二、渡辺俊行、須貝高、赤司泰義、岩岡重樹：高断熱高気密住宅の夏季壁体内部結露に関する研究 その5、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp.1255-1256、1993.7
- [5-8] 藤田協二、龍有二、尾崎明仁、渡辺康徳、渡辺俊行、須貝高、赤司泰義：高断熱高気密住宅の夏季壁体内部結露に関する研究 その6、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp.1257-1258、1993.7
- [5-9] ASHRAE:Criteria for Moisture-Control Design Analysis in Buildings, AHRAE Standard 160-2009,2009
- [5-10] 石川廣三：軒の形状・寸法に応じた外壁面内の雨がかり分布の算定方法、日本建築学会構造系論文集、第664号、pp.1069-1075、2011.6

- [5-11] B.Blocken, and J.Carmeliet: Spatial and temporal distribution of driving rain on a low-rise buildings, Wind Struct.5,5, pp.441-462, 2002
- [5-12] 日本建築学会：木造住宅外皮の防水設計・施工指針および防水設計・施工要領（案）、丸善出版株式会社、2021.3
- [5-13] 石川廣三, 橋本佳大：壁面に衝突する雨滴の傾斜角の推定 外壁面におよぼす雨がかり負荷の評価に関する基礎的研究, 日本建築学会構造系論文集, 第611号, pp.13-20, 2007.1
- [5-14] 伊庭千恵美：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、京都大学博士論文、pp.105-107、2010.3
- [5-15] 最新建築環境工学、株式会社井上書院、2016
- [5-16] 齋藤宏昭、土屋高雄、子安誠、笹島秀之：冷房時における夏型壁体内結露に関する研究（その6）、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp.271-272、1998.7
- [5-17] 梅野徹也：木造住宅の通気層工法外壁における湿害防止のための基礎的研究、京都大学博士論文、2016.3
- [5-18] 齋藤宏昭、宮村雅史、松岡大介、長村貞治、三島直生：通気層への雨水浸入を考慮した外壁の乾燥性の検証（その1）、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp.1233-1234、2022.7
- [5-19] 一般社団法人日本建築学会：建築材料の熱・空気・湿気物性値、丸善出版株式会社、2001.1

第 6 章 放湿型結露防止に必要な通気仕様の検討

6.1 はじめに

第 4 章で実施した屋外試験は、雨水滞留の促進試験として漏斗により集積した雨水を通気層へ直接注水した。漏斗径は水密試験結果に基づき設定をしたものの、雨掛かりにより通気層に浸入した雨水や外装材表面からの吸水といった雨水由来の水分の供給バランスは、実環境と異なる可能性が考えられる。

本章では、これまでの各章で得たサイディング仕様による水分物性値と雨水浸入、通気層の通気特性を総合的にとらえ、実気象条件下で雨水由来の水分による放湿型結露防止に必要な通気仕様とその性状を検討する。

6.2 節では、第 2 章の水密試験で得た壁面雨量と風圧による雨水浸入率、異なるサイディング仕様の水分物性値、第 3 章で得た通気仕様による相当開口面積、及び第 5 章で提案した予測モデルを用いて、実気象条件下で雨水由来の水分による放湿型結露防止に必要な通気仕様を検討する。

6.3 節では、サイディング表裏面の仕上げ層である塗膜に着目し、塗膜の透水及び透湿抵抗が壁内湿度に及ぼす影響を検討する。

6.2 雨水由来の水分による放湿型結露防止に必要な通気仕様の検討

6.2.1 解析概要

(1) 雨水由来の水分負荷、通気層、建物の条件

計算条件を表 6-2-1 に示す。雨水由来の水分負荷が異なる 4 条件により、通気層への雨水浸入、サイディングの水分特性が壁内湿度に及ぼす影響を確認する。また、異なる相当開口面積の通気仕様を比較することにより、放湿型結露防止に必要な通気仕様を検討する。

サイディング各仕様の物性を表 6-2-2 に示す。材料特性は、第 2 章の水分特性試験より水分拡散係数が最も高かった仕様 FC（繊維補強セメント板系）と最も低かった仕様 WC（木繊維補強セメント板系）の 2 種類とした。

サイディング嵌合部の仕様による壁面雨量、風速に対する浸入率を図 6-2-1 に示す。第 2 章の水密試験より浸入率が最も高かった仕様 D（4 方サネ）と低風速時の浸入率が低かった仕様 A（横張り 2 方サネ）の 2 種類とした。また、嵌合部仕様による通気層内の壁面濡れ率を表 6-2-3 に示す。仕様 A は水密試験においてサイディング裏面全体に流下水が付着していたことから、壁面及び胴縁の濡れ率を 1.0 とした。

第6章 放湿型結露防止に必要な通気仕様の検討

通気層の仕様、及び相当開口面積を表 6-2-4 に示す。相当開口面積は第 3 章で得た値を用いた。なお、12 mm 金具（ショートスターター）仕様の相当開口面積は、6 mm 金具（ショートスターター）の流量計数を用いて求めた。

対象とする外壁の断面構成及び建物形状は第 5 章で計算した条件と同様とした。計算対象の方位は、第 4 章にて放湿型結露が生じた東面とした。

表 6-2-1 計算条件

| Case | サイディング | | 通気層仕様 | 対象方位 |
|------|------------------------|------------------|---------------------|------|
| | 材料特性（組成・塗膜） | 嵌合部 | | |
| 1 | 仕様 FC (繊維補強セメント板系) | 仕様 D (4 方サネ) | 表 6-2-4 に示す 5 種類 | 東面 |
| 2 | | 仕様 A (2 方サネ上下方向) | | |
| 3 | 仕様 WC (木繊維補強セメント板系) | 仕様 D (4 方サネ) | | |
| 4 | | 仕様 A (2 方サネ上下方向) | | |

表 6-2-2 サイディングの材料特性

| 仕様 | 透湿率 [kg/msPa] | 透湿係数 [kg/m ² sPa] | | 透水抵抗 [m ² s Pa/kg] | |
|----|------------------------|---------------------------------|------------------------|----------------------------------|----------------------|
| | 基材 | 表面塗膜 | 裏面塗膜 | 表面塗膜 | 裏面塗膜 |
| FC | 6.72×10^{-12} | 3.98×10^{-10} | 9.60×10^{-10} | 3.3×10^7 | 2.4×10^5 |
| WC | 3.05×10^{-12} | 0.05×10^{-10} | 4.20×10^{-10} | 1.1×10^{10} | 3.4×10^{10} |

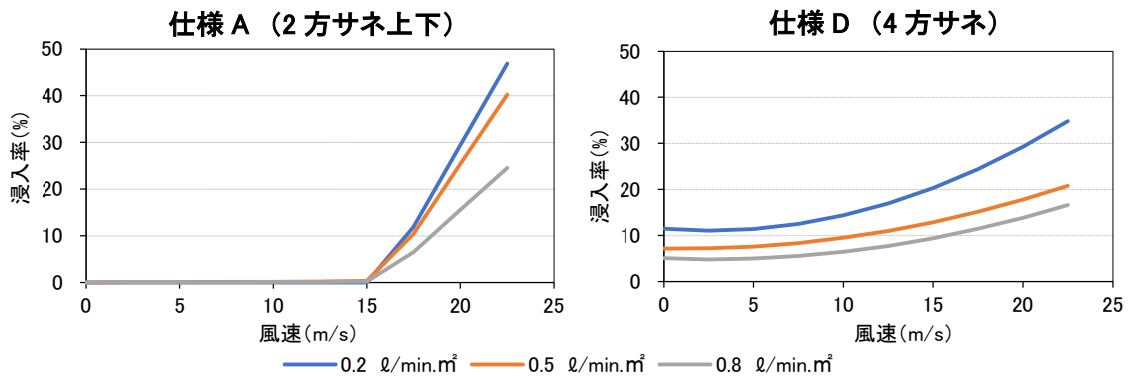


図 6-2-1 サイディング嵌合部仕様による壁面雨量、風速に対する通気層への雨水浸入率

表 6-2-3 サイディング嵌合部仕様による通気層内の壁面及び胴縁濡れ率

| サイディング仕様 | W_{rate} | $W_{d rate}$ |
|----------------|------------|--------------|
| 仕様 A (2 方サネ上下) | 1.0 | 1.0 |
| 仕様 D (4 方サネ) | 0.2 | 0.35 |

表 6-2-4 通気層の相当開口面積、付着水の閾値

| 仕様 | 相当開口面積 [cm ² /m] | 最大付着量 [kg/m ²] | |
|---------------------|--------------------------------|----------------------------|-------|
| | | 仕上げ層表面 | 横胴縁上端 |
| 横胴縁 | 2.4 | 0.153 | 3.0 |
| 6 mm金具 (ショートスターター) | 6.1 | | - |
| 12 mm金具 (ショートスターター) | 12.2 | | - |
| 15 mm金具 (ロングスターター) | 20.9 | | - |
| 15 mm金具 (ショートスターター) | 47.4 | | - |

(2)外気及び室内条件

外気条件は、拡張アメダス気象データの東京における標準年気象データを用いた。計算期間は夏期（6～8月）とした。該当期間の外気温、降水量、風速、及び風向の発生頻度を図6-2-2,6-2-3に示す。なお、風速は建物高さに合わせて補正した。

室内条件は、住宅性能表示制度の型式性能認定における結露防止に関するガイドライン[6-1]を参考に定め、温度については(6-1)式で与え、相対湿度は期間中60%RH一定とした。室内温度を図6-2-2に示す。

$$\theta_r = 22.5 + 4.5 \cos\left(\frac{2\pi(\text{day} - 212)}{365}\right) \quad \dots (6-1)$$

θ_r :温度 [°C]、day:1/1 を起点とした延べ日数

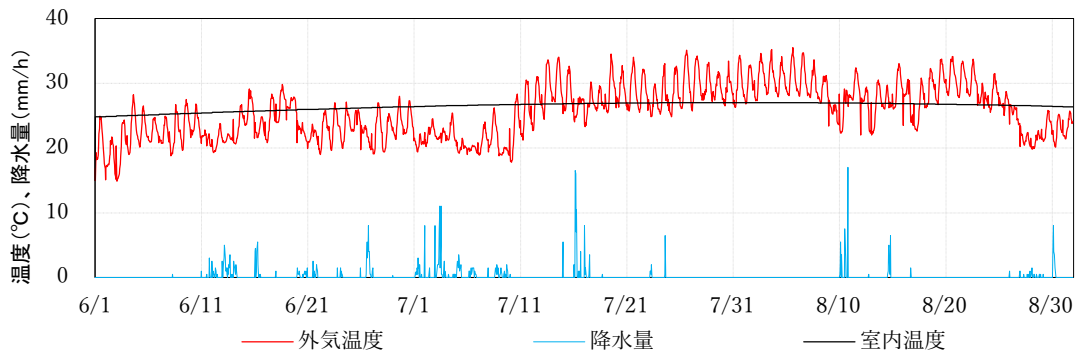


図 6-2-2 計算に用いた外気温度、降水量、室内温度

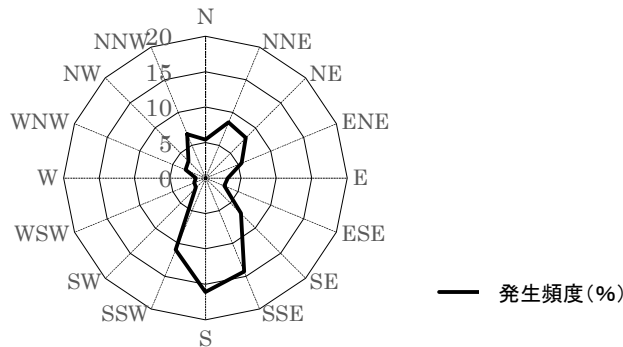
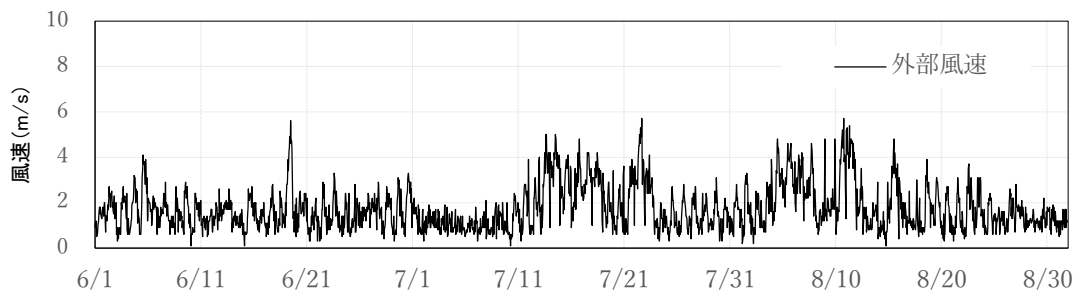


図 6-2-3 計算に用いた外部風速、外部風向の発生頻度

6.2.2 計算結果

防湿層界面で生じる放湿型結露防止の設計要件について検討する。従来の防露設計は、壁内で結露を生じさせないことが目的であり、壁体の含水率をハイグロスコピックな状態（相対湿度が98%以下）に維持することが理想とされている[6-3]。しかし、僅かな結露も許容しないという考え方は安全であることは間違いないが、設計の自由度が制限される恐れがある[6-4]。ここで、内部結露に起因する湿害を、構造体の耐力低下を引き起こす木材の腐朽とすれば、木材表面の湿潤による腐朽菌定着までの期間は相対湿度98%以上で1か月程度との報告がある[6-5]。一方、第4章で示した実験棟での実測では、防湿層界面にて相対湿度98%以上の状態が数日間継続した仕様において、結露水の流下が確認された。これらのことを勘案し、放湿型結露防止の設計要件は、安全をみて防湿層表面の相対湿度が98%以上の状態が24時間以上継続しないこととした。

計算結果から、各仕様の防湿層界面にて高湿度（相対湿度98%以上）が継続した日数を表6-2-5、高湿度の出現時間と全解析時間に対する割合として算出した高湿度頻度を表6-2-6に示す。

雨期と雨期後の晴天日を含む6月11日～8月12日における壁内の防湿層界面の相対湿度、及び通気層内の付着水量、並びにサイディングと外側合板における含水率の日平均値を図6-2-4～6-2-7に示す。

(1) Case1(雨水浸入率、吸水性が高い外装材の場合)

図6-2-4よりサイディング含水率に関して、横胴縁は最大23%、金具仕様は最大18%まで上昇した。横胴縁の方が高いのは、通気層における浸入雨水の付着水量が多く、通気量が少ない影響によるものである。

同図及び表6-2-5より、防湿層界面の高湿度（相対湿度98%以上）が継続した日数に関して、横胴縁仕様は7月17日と同24日前後に外気温低下の影響により一時的に相対湿度が低下するも再度高湿度状態が継続している。このような一時的な相対湿度の低下日を除けば、20日間高湿度状態が継続し、6mm金具（ショートスターター）は4日継続した。実気象条件下においても雨水由来の水分により、これらの仕様は実験棟と同様に高湿度状態が継続することが示された。

表6-2-5及び表6-2-6より、相当開口面積が大きい仕様ほど壁内の高湿度化が抑制されており、相当開口面積12.2 cm²/m以上の金具仕様であれば閾値に至らないことが示された。

(2) Case2(雨水浸入率が低く吸水性の高いサイディング仕様)

図6-2-5より全ての仕様において通気層内における付着水量の増加は示されなかった。解析期間における外部風速の最大値は6m/sであり、通気層への雨水浸入が生じなかったことによるものである。このことから本条件において、壁内湿度上昇に影響を及ぼした雨水由来の水分は、外装材表面から吸水された水分であることがわかる。

各仕様におけるサイディングの含水率は14%程度まで上昇した。通気層に浸入した雨水滞留の影響が無いいため横胴縁と金具仕様との差が少ない結果となった。

防湿層界面の高湿度が継続した日数及び出現時間はCase1より少なく、相当開口面積6.1cm²/m以上の金具仕様であれば閾値に至らないことが示されており、通気層へ浸入した水分の有無による影響が現われている。

(3) Case3(雨水浸入率が高く、吸水性の低いサイディング仕様)

図6-2-6よりCase1に比べサイディングの含水率は低いが、通気層内における付着水量の最大値は多い。サイディング表裏面の透水抵抗及び水分拡散係数の影響によりサイディングが吸水し難く、サイディング裏面に付着水が形成されたことによるものである。

外側合板の含水率は各仕様とも15~17%程度まで上昇した。通気層内における付着水が蒸発した水分、及び外気流入の影響によるものと考えられる。

防湿層界面の高湿度が継続した日数については、横胴縁仕様にて高湿度状態の継続が示された。表6-2-6より高湿度の出現時間はCase2より少ない傾向が示された。本計算条件においては、通気層内における付着水が蒸発した水分より外装材表面から吸水された水分の方が壁内湿度に与える影響は多いことが示された。

(4) Case4(雨水浸入率が低く、吸水性の低いサイディング仕様)

防湿層界面の高湿度が継続した日数は、横胴縁仕様においても0日であった。また、高湿度の出現時間は、これまでと異なり相当開口面積が大きい仕様程、相対湿度が高い傾向が示された。このことは、通気量増加による高湿な外気流入の影響と考えられる。梅野の解析[6-2]においても通気量が多い仕様ほど通気層内の高湿度環境が続くなど本結果と矛盾が無いことが示されている。

第6章 放湿型結露防止に必要な通気仕様の検討

表 6-2-5 各計算条件における防湿層界面で高湿度が継続した日数

| 計算条件 | | | 通気層仕様（上段：仕様、下段：相当開口面積 [cm ² /m] | | | | |
|------|------|------|--|-----------------------|------------------------|-----------------------|----------------------|
| Case | 材料特性 | 嵌合部 | 横胴縁 | 6 mm金具 (ショートスターター) | 12 mm金具 (ショートスターター) | 15 mm金具 (ロングスターター) | 15 mm (ショートスターター) |
| | | | 2.4 | 6.1 | 12.2 | 20.9 | 47.4 |
| 1 | 仕様 | 仕様 D | 20 | 4 | 0 | 0 | 0 |
| 2 | FC | 仕様 A | 2 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 3 | 仕様 | 仕様 D | 3 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 4 | WC | 仕様 A | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |

表 6-2-6 各計算条件における防湿層界面での高湿度の出現時間と頻度

| Case | 材料特性 | 嵌合部 | 横胴縁 | | 6 mm金具 (ショートスターター) | | 12 mm金具 (ショートスターター) | | 15 mm金具 (ロングスターター) | | 15 mm (ショートスターター) | |
|------|------|------|-----|-----------|-----------------------|-----------|------------------------|-----------|-----------------------|-----------|----------------------|-----------|
| | | | 時間 | 高湿度 頻度 | 時間 | 高湿度 頻度 | 時間 | 高湿度 頻度 | 時間 | 高湿度 頻度 | 時間 | 高湿度 頻度 |
| | | | [h] | [%] | [h] | [%] | [h] | [%] | [h] | [%] | [h] | [%] |
| 1 | 仕様 | 仕様 D | 804 | 36 | 395 | 18 | 240 | 11 | 165 | 8 | 70 | 3 |
| 2 | FC | 仕様 A | 342 | 16 | 158 | 7 | 105 | 5 | 73 | 3 | 21 | 1 |
| 3 | 仕様 | 仕様 D | 222 | 10 | 127 | 6 | 91 | 4 | 70 | 3 | 28 | 1 |
| 4 | WC | 仕様 A | 0 | 0 | 2 | 0.1 | 9 | 0.4 | 11 | 0.5 | 3 | 0.1 |

第6章 放湿型結露防止に必要な通気仕様の検討

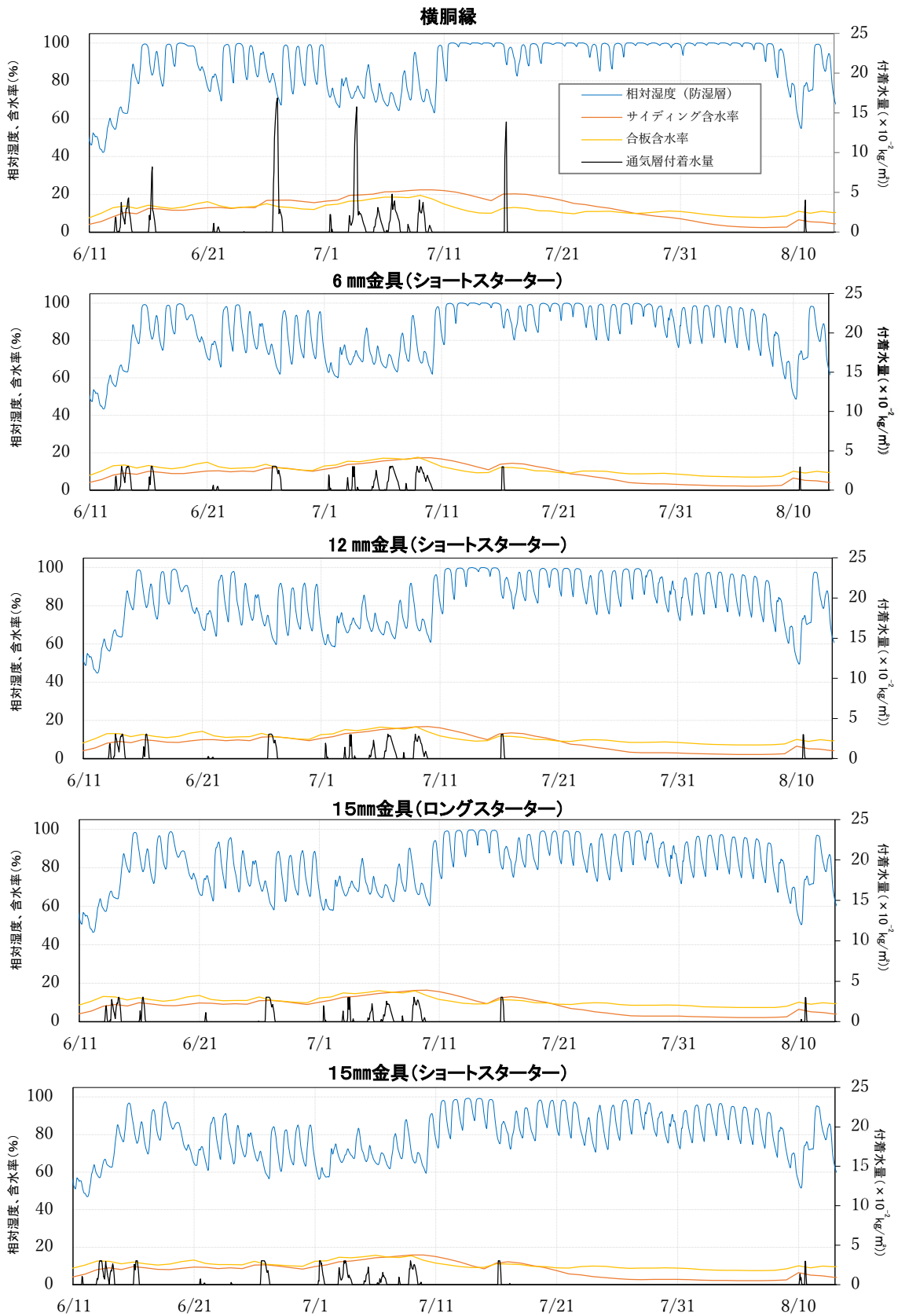


図 6-2-4 Case1 (材料特性 : FC、嵌合部 : 4 方サネ) の計算結果

第6章 放湿型結露防止に必要な通気仕様の検討

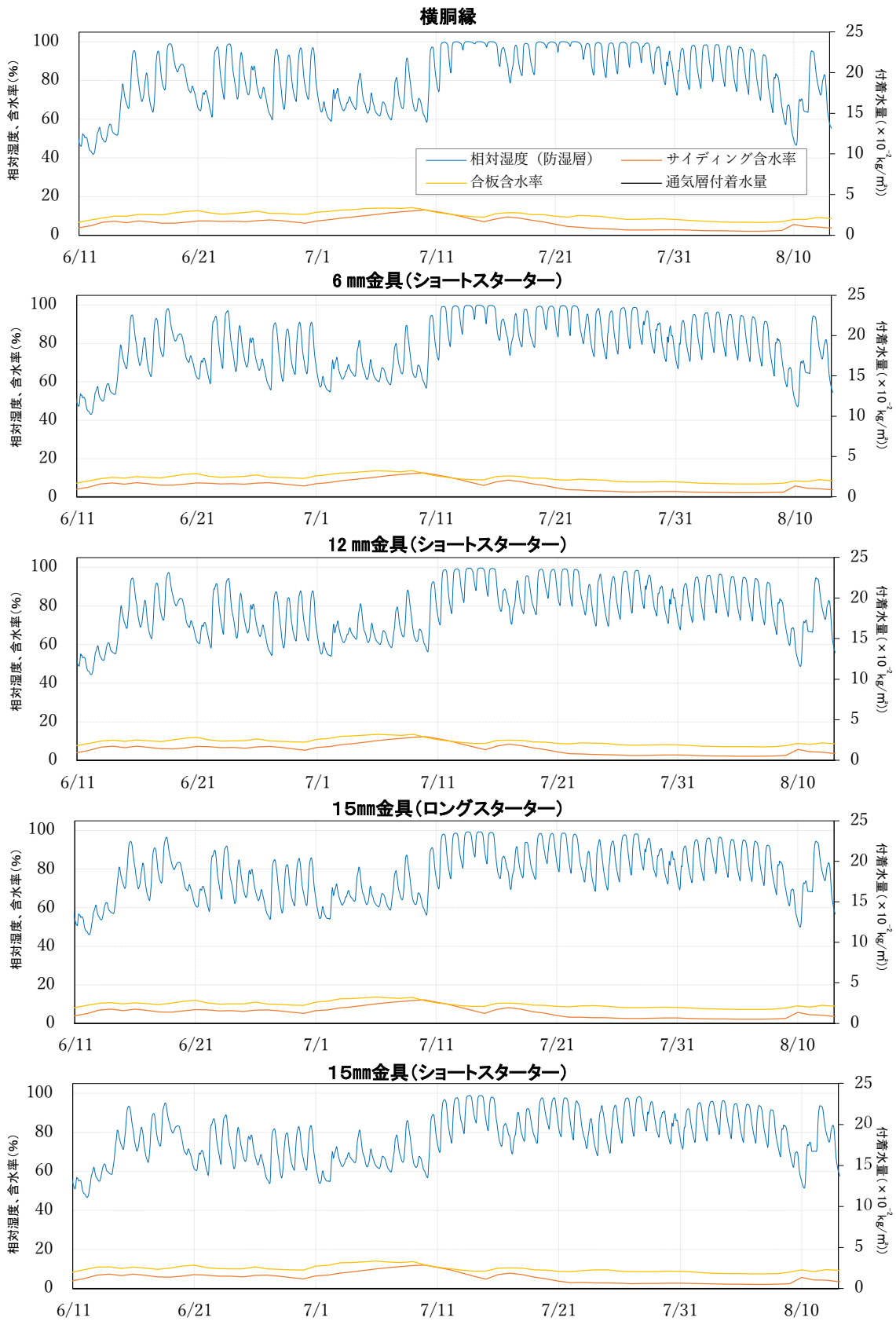


図 6-2-5 Case2 (材料特性 : FC、嵌合部 : 2 方サネ上下方向) の計算結果

第6章 放湿型結露防止に必要な通気仕様の検討

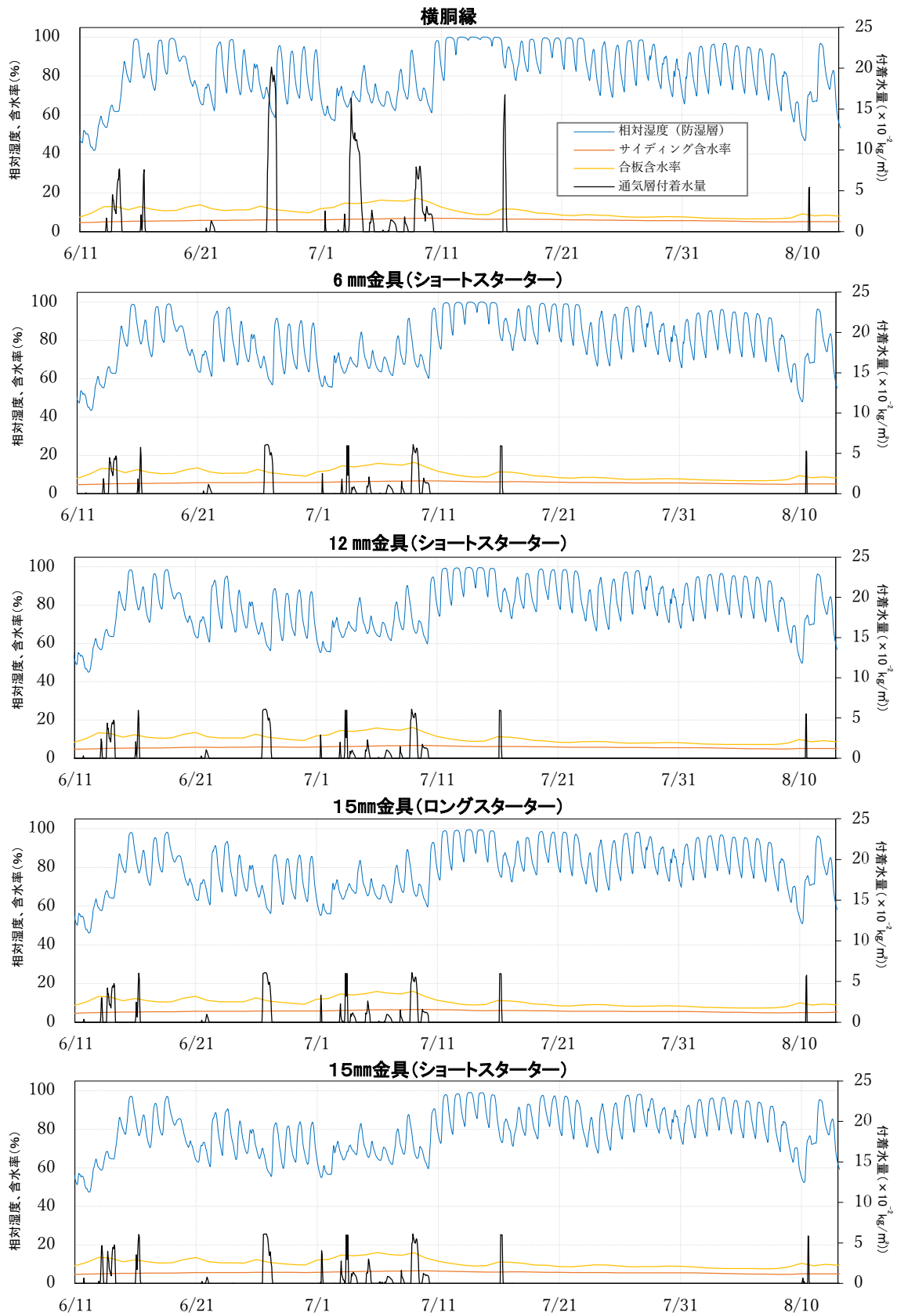


図 6-2-6 Case3 (材料特性：WC、嵌合部：4方サネ) の計算結果

第6章 放湿型結露防止に必要な通気仕様の検討

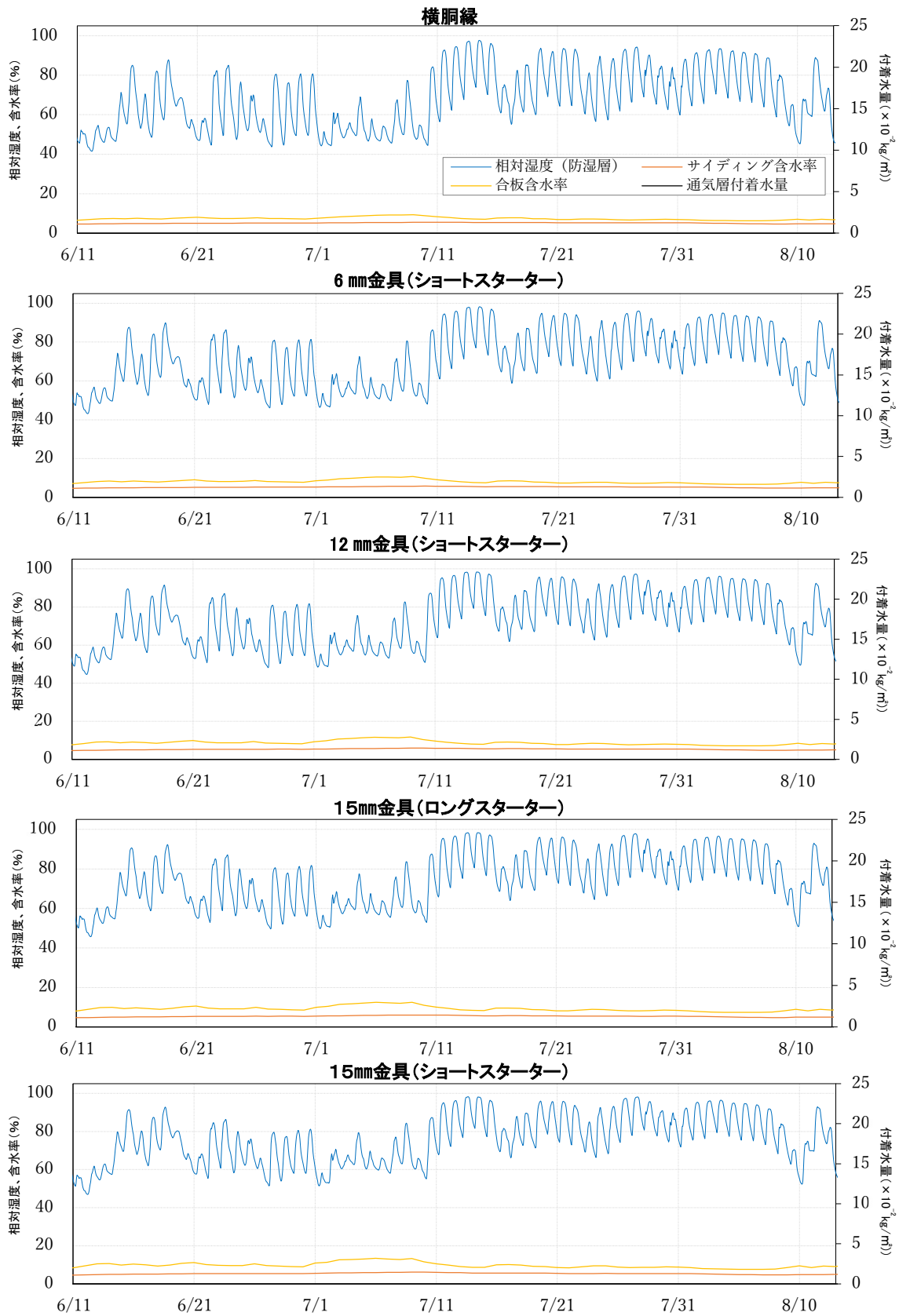


図 6-2-7 Case4 (材料特性 : WC、嵌合部 : 2 方サネ上下方向) の計算結果

6.3 サイディング塗膜の透水及び透湿抵抗が壁内湿度に及ぼす影響

前節の計算より、吸水性の高い外装材仕様において高湿度状態の継続日が多くなった。これは、雨水由来の水分がサイディングに吸水され、日射により放湿された水分の一部が壁内へ流入したことが影響している。

このように壁内へ流入する水分の一部は、サイディングの仕上げ層である表裏面の塗膜を介したものであり、流入量は塗膜の透水及び透湿抵抗値に大きく依存することが考えられる。そこで、本節ではサイディング表裏面塗膜の透水及び透湿抵抗値が壁内湿度に及ぼす影響を検討する。

6.3.1 解析概要

(1) サイディング塗膜の条件

計算条件を表 6-3-1 に示す。計算に用いた塗膜の透水及び透湿抵抗は、第 2 章で得た各材料の抵抗値から最大と最小値を選定し、それぞれを組み合わせた 16 条件とした。選定した透水抵抗値について、表裏面の抵抗値大は仕様 CS、表裏面の抵抗値小は仕様 FC の値を用いた。選定した透湿抵抗値について、表裏面の抵抗値大は仕様 WC、表面の抵抗値小は仕様 FC、裏面の抵抗値小は仕様 CS の値を用いた。なお、仕様 CS の裏面塗膜の透湿抵抗値は負の値であったが、抵抗が小さいための測定誤差と考え抵抗値を 0 とした。

表 6-3-1 サイディング表裏面塗膜の透水及び透湿抵抗値

| 抵抗値 | 透水抵抗 [(m ² s Pa) /kg] | | 透湿抵抗 [(m ² s Pa) /kg] | |
|-----|----------------------------------|----------------------|----------------------------------|---------------------|
| | 表面 | 裏面 | 表面 | 裏面 |
| 大 | 1.3×10 ¹⁰ | 3.5×10 ¹⁰ | 2.0×10 ¹¹ | 2.4×10 ⁹ |
| 小 | 3.3×10 ⁷ | 2.4×10 ⁵ | 2.5×10 ⁹ | 0 |

(2) その他の条件(建物形状、外壁構成、方位、通気仕様)

建物形状、外壁構成、対象方位、解析期間及び建築地は 6.2 節と同様とし、通気層の仕様は 15 mm 金具 (ロングスターター) 仕様とした。

6.3.2 計算結果

計算結果から、防湿層界面にて相対湿度 98%以上の出現時間と全解析時間に対する割合として算出した高湿度頻度を表 6-3-2 及び図 6-3-1 に示す。

表 6-3-2 防湿層界面における高湿度の出現時間と頻度

| Case | 透水抵抗 [(m ² s Pa)/kg] | | 透湿抵抗 [(m ² s Pa)/kg] | | 出現時間 [時間] | 高湿度頻度 [%] |
|------|------------------------------------|----|------------------------------------|----|--------------|--------------|
| | 表面 | 裏面 | 表面 | 裏面 | | |
| 1 | 大 | 大 | 大 | 大 | 71 | 3.2 |
| 2 | | | 大 | 小 | 218 | 9.9 |
| 3 | | | 小 | 大 | 80 | 3.6 |
| 4 | | | 小 | 小 | 236 | 10.7 |
| 5 | 小 | 小 | 大 | 大 | 148 | 6.7 |
| 6 | | | 大 | 小 | 371 | 16.8 |
| 7 | | | 小 | 大 | 130 | 5.9 |
| 8 | | | 小 | 小 | 378 | 17.1 |
| 9 | 大 | 小 | 大 | 大 | 98 | 4.4 |
| 10 | | | 大 | 小 | 228 | 10.3 |
| 11 | | | 小 | 大 | 84 | 3.8 |
| 12 | | | 小 | 小 | 245 | 11.1 |
| 13 | 小 | 大 | 大 | 大 | 165 | 7.5 |
| 14 | | | 大 | 小 | 359 | 16.3 |
| 15 | | | 小 | 大 | 142 | 6.4 |
| 16 | | | 小 | 小 | 371 | 16.8 |

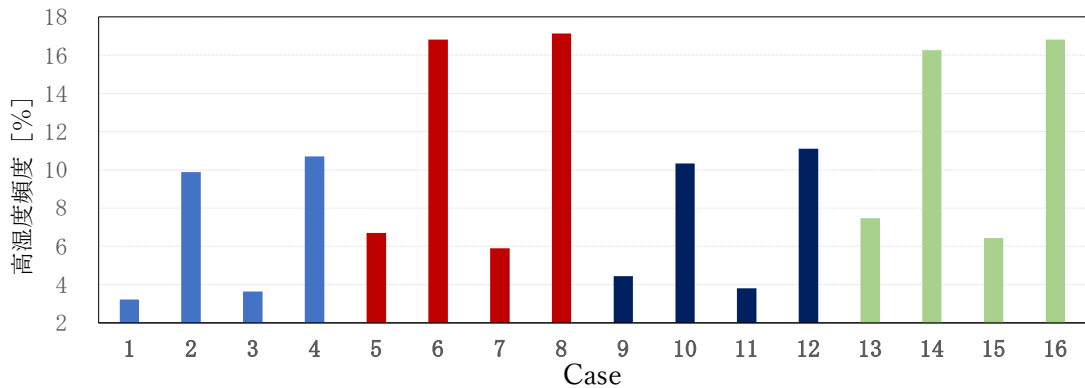


図 6-3-1 防湿層界面における高湿度の出現頻度

高湿度の出現頻度については、表面塗膜の透水抵抗、裏面塗膜の透湿抵抗が大きい値を用いた Case1、3、9 及び 11 が低く、反対にこれらの抵抗が小さい Case6、8、14 及び 16 が高くなった。これらの抵抗値を大きくすることが壁内の高湿度化抑制に効果があることが示されている。

つぎに、この効果の高い表面塗膜の透水抵抗と裏面塗膜の透湿抵抗が壁内湿度に及ぼす影響を検討する。

表面塗膜の透水抵抗が大きい Case1~4 及び Case9~12 における高湿度頻度の最大値は、11.1%であった。同様に裏面透湿抵抗の大きい Case1、3、5、7、9、11、13 及び 15 の最大値は 7.5%であった。また、表面塗膜の透水抵抗のみ異なる Case1 と 13、2 と 14、3 と 15 及び 4 と 16、同様にその他 (Case5 と 9、6 と 10、7 と 11、8 と 12) の高湿度頻度を比較すると、表面塗膜の透水抵抗の大きい条件は小さい条件に比べ平均して 1.7 倍である。裏面塗膜の透湿抵抗のみ異なる Case1 と 2 及び 3 と 4、同様にその他 (Case5 と 6、7 と 8、9 と 10、11 と 12、13 と 14、15 と 16) の条件を比較すると平均して 2.7 倍である。

これらのことから、本計算条件においては裏面塗膜の透湿抵抗、次いで表面塗膜の透水抵抗の順で壁内湿度に及ぼす影響が大きい傾向であることがわかる。

裏面塗膜の透湿抵抗の影響が大きい傾向の理由として、図 6-3-2 に裏面塗膜の透湿抵抗が大きい Case5 と同抵抗が小さい Case6 におけるサイディング含水率及び通気層の絶対湿度の計算結果を示す。Case5 は Case6 よりサイディング含水率が上昇しているが、通気層における絶対湿度の日中最大値が低い。その結果、Case5 の高湿度頻度は Case6 の半分以下となった。このように、裏面塗膜の透湿抵抗が大きいと、サイディングの保水量が多い場合においても通気層への放湿量が抑えられることが、壁内の高湿度化抑制に影響している。

ただし、裏面の透湿抵抗が大きいと Case5 のようにサイディングに水分が保持された状態が継続しやすくなる。冬期においては、さらに乾燥し難くなることが想定されるため、サイディングの凍害など材自体の耐久性に影響を及ぼす可能性があることに注意が必要である。

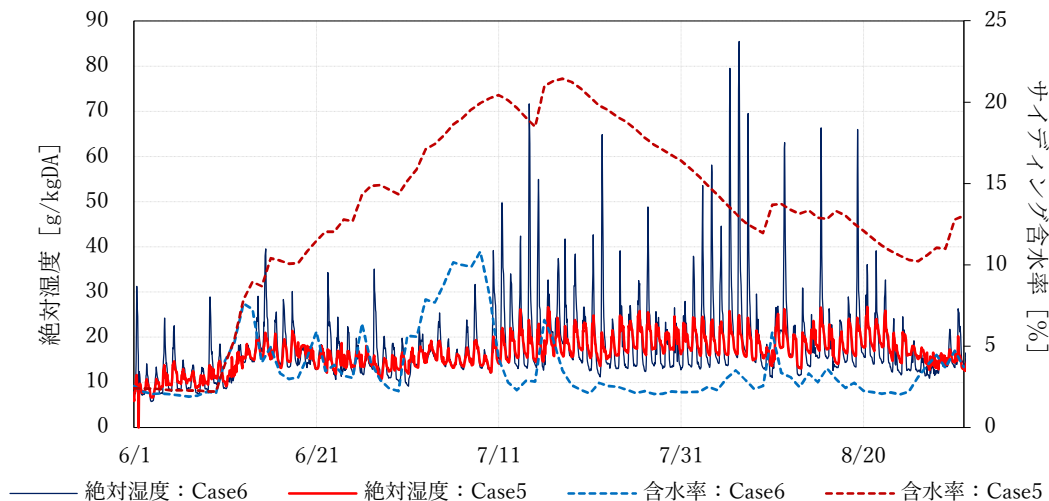


図 6-3-2 透水抵抗値の異なる各 Case におけるサイディング含水率の変動

次に表面塗膜の透水抵抗の影響が大きい傾向の理由として、図 6-3-3 に表裏面塗膜の透水

抵抗が大きい Case1、表面塗膜の透水抵抗が大きく裏面塗膜の透水抵抗が小さい Case9、反対に表面塗膜の透水抵抗が小さく裏面塗膜の透水抵抗が大きい Case13 におけるサイディング含水率の計算結果を示す。Case1 のサイディング含水率の最大値と比べ、Case9 は2倍、Case13 は4倍であった。外装材表面は裏面よりも壁面に到達する雨量が多いため、表面塗膜の透水抵抗が小さい Case13 の含水率が最も上昇したと考えられる。その結果、Case1 の高湿度頻度に比べ Case9 は1.4倍、Case13 は2.3倍となった。

このように、表面塗膜の透水抵抗が大きいと、水分供給源となるサイディング含水率の上昇を抑えられることが、壁内の高湿度化抑制に影響している。

表面塗膜の透水抵抗は、第2章の吸水試験で示したように経年劣化により防水性能が低下することが考えられる。壁内の高湿度化を抑制し耐久性を維持するには、再塗装などの定期的なメンテナンスを行うことが重要であるといえる。

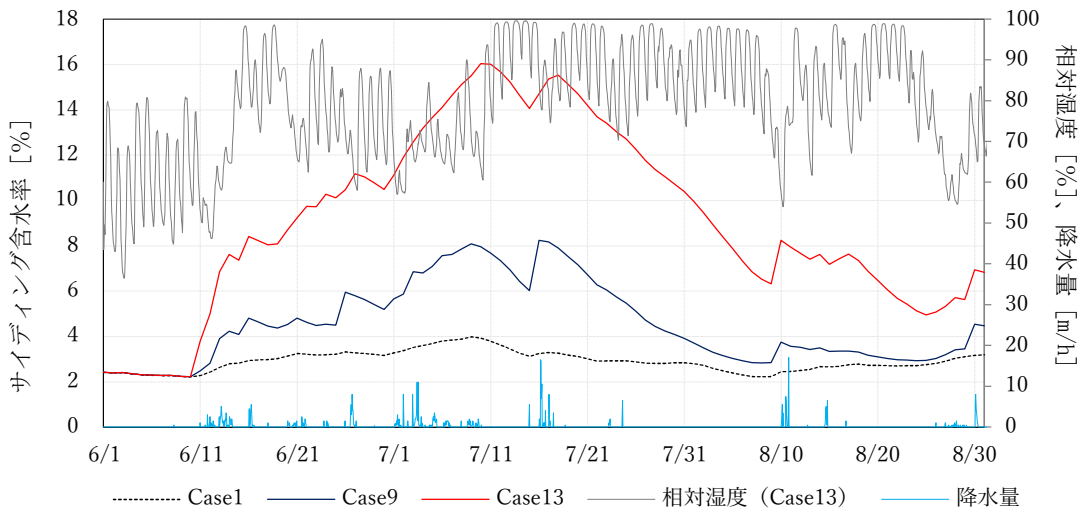


図 6-3-3 透水抵抗値の異なる各 Case におけるサイディング含水率の変動

6.4 第6章のまとめ

これまで得た各種パラメータ及び提案モデルを用い、実気象条件下で雨水由来の水分を起因とした放湿型結露防止に必要な通気仕様とその性状を検討した。計算結果より、以下のような傾向が確認された。

- 1) 雨水由来の水分（通気層への雨水浸入、及びサイディング吸水）が壁内湿度に及ぼす影響を検討した。通気層への雨水浸入率が高く、表面塗膜が経年劣化した吸水性の高いサイディング仕様を用いた条件では、相当開口面積 $12.2 \text{ cm}^2/\text{m}$ 以上の金具仕様で防湿層界面における高湿度日の継続が生じないことが示された。
- 2) 雨水浸入率が低く吸水性の高いサイディング仕様、又は雨水浸入率が高く吸水性の低いサイディング仕様を用いた条件では、相当開口面積 $6.1 \text{ cm}^2/\text{m}$ 以上の金具仕様で防湿層界面における高湿度日の継続が生じないことが示された。また、雨水浸入率及び吸水性が低いサイディング仕様の場合、相当開口面積 $2.4 \text{ cm}^2/\text{m}$ の横胴縁仕様においても高湿度日の継続は生じなかった。
- 3) サイディング表裏面塗膜の透水及び透湿抵抗値が壁内湿度に及ぼす影響については、表面塗膜の透水抵抗及び裏面塗膜の透湿抵抗値の影響が大きいことが示された。表面塗膜の透水抵抗は、第2章の吸水試験で示したように経年劣化により防水性能が低下することが考えられる。壁内の高湿度化を抑制し耐久性を維持するには、再塗装などの定期的なメンテナンスを行うことが重要であるといえる。

以上の結果より、雨水由来の水分が壁内結露に及ぼす影響を明らかにし、外皮の構成により放湿型結露防止に求められる通気層の相当開口面積を示した。

第6章 参考文献

- [6-1] 計算又は実験の結果による温熱環境（結露の発生を防止する対策）に関する試験ガイドライン 住宅性能評価機関等連絡協議会資料
- [6-2] 梅野徹也：木造住宅の通気層工法外壁における湿害防止のための基礎的研究、京都大学博士論文、2016.3
- [6-3] 松本衛：新建築学体系 10、環境物理 3 章 湿気、彰国社、1984
- [6-4] 財団法人 建築環境・省エネルギー機構：建物外皮における結露防止のためのガイドライン 第6 回日加住宅 R&D ワークショップ公表初版、2003.5
- [6-5] 公益社団法人日本木材保存協会：木造長期優良住宅の総合的検証委員会 耐久性分科会 平成 25 年度報告集、2014.3

第7章 総括

7.1 本論文の総括

窯業系サイディングを用いた外壁通気構法は、サイディング嵌合部等から通気層に浸入した雨水、及び居室から壁内に浸入した湿気を速やかに排出する構法であり、多くの木造住宅で採用されている。しかし、近年、壁内への水分滞留による劣化事例が散見されており、現象の解明と対策が急務となっている。

本論文では、壁内結露の調査事例に基づき発生原因を推定し、雨水由来の水分に着目した。次に、雨掛かりによるサイディングから通気層への浸水量を定量化するとともに、サイディングの吸水特性、並びに通気層の排水及び通気特性を把握する。そして、調査事例で示した放湿型結露を実験棟において再現したうえで、熱水分移動解析を行うことにより、外壁通気構法を用いた住宅での雨水由来の水分に起因する壁内結露メカニズム解明を目的とする。また、これらの現象を考慮し、雨水由来の水分を起因とした放湿型結露防止に求められる通気層の通気性能を明らかにする。

第1章では、外壁通気構法の放湿型結露に関するこれまでの研究を整理した。雨水由来の水分が結露誘発に及ぼす影響については、試験家屋などによる実測事例は無く検討が十分でないことを示した。次に、壁内結露の調査事例から雨水由来の水分による壁内結露メカニズムを推定し、現象解明には雨水浸入及び通気特性といった工法的要因、物性の変化といった材料特性、環境条件による熱水分移動特性を横断的に検討する必要性を述べた。

第2章では、雨掛かりにより外皮から浸入する水分に着目して、サイディングの防水性能及び吸水特性を検討した。防水性能に関しては、サイディング勘合部から通気層への雨水浸入率を水密試験により定量化した。調査事例に用いられていた仕様の浸入率は、発生頻度の高い低風速時(0~5m/s)において5~12%であった。通気層への雨水浸入は日常的な現象であり、水分の浸入を前提にした評価の必要性を示した。

吸水特性に関しては、調査事例と同仕様の劣化したサイディングを採取し、吸水試験により吸水速度係数を求めた。経年劣化により表面に白亜化が生じたサイディングの吸水速度係数は、白亜化が生じていないサイディングの7倍であり、塗膜の経年劣化により吸水量が増加することを確認した。さらに、サイディングの水分特性を把握するため、組成の異なるサイディングの平衡含水率、水分移動係数、透湿及び透水抵抗を測定した。

第3章では、通気層の性能に着目して、異なる通気仕様における通気層の排水性能、及び

通気特性を検討した。排水性能に関しては、通気層内への注水試験を行い、注水と排水量の差分から通気層内の滞留率を求めた。注水が横胴縁の上に滞留した横胴縁仕様の滞留率は4割、排水経路が確保されている金具仕様の滞留率は1割であり、工法により通気層内に滞留する水分量が異なることを確認した。

次に通気特性試験により、異なる通気仕様における通気層全体の相当開口面積、及び通気層を構成する各部位（水切り、通気層、軒天部）の通気特性値を算出した。高さ3mの試験体における相当開口面積は、サイディング製造会社の標準仕様である15mm金具仕様を基準とすると、調査事例の6mm金具は3割、横胴縁（通気層厚12mm、通気幅30mm）は1割程度であった。また、サイディングの鉛直荷重を支える支持部材であるスターターの種類や建物高さなど、通気層を構成する部材の組み合わせにより相当開口面積が半減した。通気層全体の相当開口面積を確保するためには、通気層の厚みだけでは無く構成部材の圧力損失も併せて考慮する必要性を示した。

第4章では、実験棟における夏期の実測から、第3章で通気特性を確認した通気仕様の壁内水分挙動、及び通気量の差を把握した。通気量の少ない横胴縁及び調査事例の6mm金具仕様では、防湿層界面にて飽和状態が12日間以上継続した。一方、最も通気量の多い15mm金具仕様では相対湿度90%以下に抑えられていた。また、構造体内部の目視観察から、長期間飽和が生じた仕様において、調査事例と同様の横芯材における水跡が見受けられた。このことより、防湿層にて結露水の流下が生じたことを確認した。

次に年間を通じた実測から、防湿層界面で相対湿度が飽和に達した積算時間を示した。各仕様の飽和に達した時間は、横胴縁1500時間、6mm金具650時間であった。しかし、15mm金具仕様は飽和に至らず、相当開口面積が大きく、滞留率が小さい仕様ほど飽和状態に至り難いことがわかった。

第5章では、雨掛かりによる外装材表裏面及び通気層で形成される付着水の水分収支を考慮した予測モデルを提案し、実験棟の温湿度測定結果との比較からその再現性を検証した。壁内における防湿層界面の高湿度状態（相対湿度98%以上）が継続した日数について、計算値は実測値と同様に、相当開口面積が大きく浸入雨水の滞留率が小さい仕様ほど、高湿度状態に至り難い傾向を示した。提案した予測モデルは、雨水由来の水分が及ぼす壁内の温湿度性状を把握する目的で有効であることを示した。

第6章では、第2章の水密試験で得た壁面雨量と風圧による雨水浸入率、異なるサイディング仕様の水分物性値、第3章で得た構成部材による相当開口面積、及び第5章で提案した予測モデルを用いて、実気象条件下において雨水由来の水分を起因とした放湿結露防止に必要な相当開口面積を検討した。

計算結果より通気層への雨水浸入率が高く、表面塗膜が経年劣化した吸水性の高いサイ

ディング仕様では、相当開口面積 $12 \text{ cm}^2/\text{m}$ 以上の金具仕様において防湿層界面における高湿度状態の継続が生じないことがわかった。次に、雨水浸入率が低く吸水性の高いサイディング仕様、又は雨水浸入率が高く吸水性の低いサイディング仕様を用いた条件では、それぞれ相当開口面積 $6 \text{ cm}^2/\text{m}$ 以上の金具仕様において高湿度状態の継続が生じないことが示された。一方、雨水浸入率及び吸水性が低いサイディング仕様の場合、相当開口面積 $2 \text{ cm}^2/\text{m}$ の横胴縁仕様においても高湿度状態の継続は生じなかった。雨水由来の水分が壁内結露に及ぼす影響を明らかにし、外皮の構成により放湿型結露防止に求められる通気層の相当開口面積を示した。

以上の検討より、調査事例で示した放湿型結露のメカニズムを明らかにし、外壁通気構法を用いた住宅の長寿命化には、フェイルセーフとして雨水浸入や経年劣化により増加するサイディング表層からの吸水などの雨水由来の水分を考慮することが不可欠であることを示した。また、本研究で提案した予測モデルを用いることにより、雨水由来の水分が及ぼす壁内の温湿度性状を推定することが可能であると考えられ、防湿層界面での放湿型結露防止に求められる通気層の相当開口面積を評価する方法を示した。

7.2 今後の課題

(1) 高さ方向の温湿度分布の計算手法

第4章で実態把握に用いた実験棟は平屋のため、通気層上下の温湿度分布差は少ないものとして、推定モデルにおける通気層内の温湿度は瞬時拡散を仮定した。一方、近年はカーボンニュートラルの実現に向け炭素貯蔵効果の高い木造建築の領域拡大の一例として、中高層建築化が検討されている。このような複層階の建築物となった場合には、通気層の下層から放湿された分の影響により上層階ほど通気層内の水蒸気圧が上昇することが考えられる。さらに高層階は壁面雨量も増加することから、雨水由来の水分を考慮することは不可欠である。今後は、本研究で提案した一次元モデルを積層し、通気層の温度及び湿度の上下分布を算出可能な推定モデルを構築する予定である。

(2) 湿害を防止するための閾値の開発

従来の防露設計は、壁内で結露を生じさせないことが目的であり、壁体の含水率をマイクロスコピックな状態（相対湿度が98%以下）に維持することが理想とされている[7-1]。しかし、僅かな結露も許容しないという考え方は安全であることは間違いないが、設計の自由度が制限される恐れがある。そのため、第6章で示した放湿型結露防止に必要な相当開口面積を求める際に用いた閾値は、木材への腐朽菌定着や結露水の流下を勘案し、安全を見て防湿層表面の相対湿度が98%以上の状態が24時間以上継続しないこととした。このように断熱外皮における防露設計の閾値は明確になっておらず[7-2]、温湿度や時間をパラメーター

とした指標などが確立されることが望まれる。

(3) 通気層を構成する各種部材の通気特性値の取得

通気層全体の相当開口面積を確保するためには、通気層の厚みだけでは無く構成部材の圧力損失も併せて考慮する必要があるが、本研究で取得した圧力損失係数や摩擦抵抗係数の種類は限られている。また、これらの係数は部材の形状により異なるため、網羅することは困難である。一方、小屋裏換気部材は換気面積を計算するため、製造業者が発行するカタログに有効開口面積が表記されている。今後は、通気層を構成する各部材についても圧力損失係数や相当開口面積がカタログなどに表記されることが望まれる。

(4) 窯業系サイディング以外の外壁を用いた通気構法への適用

本研究では、窯業系サイディングを用いた外壁通気構法を対象とした。金属、樹脂、ALCなどの異なる外装材システムを用いた外壁通気構法に対して、本研究で示した一連の検討を行うことにより、雨水由来の水分が及ぼす壁内の温湿度性状を把握することが可能になると考えられる。

第7章 参考文献

[7-1] 松本衛：新建築学体系 10、環境物理 3 章 湿気、彰国社、1984

[7-2] 財団法人 建築環境・省エネルギー機構：建物外皮における結露防止のためのガイドライン 第6 回日加住宅 R&D ワークショップ公表初版、2003.5

記号表

| | |
|----------------|--|
| U | : 外部風速 [m/s] |
| C_{im} | : 9.2 (小規模建築物に対する値 [記-1]) |
| θ | : 壁面に対する風速の角度 [°] |
| μ | : 水分化学ポテンシャル [J/kg] |
| μ_s | : 仕上げ層外気側の水分化学ポテンシャル [J/kg] |
| μ_i | : 実質部外気側の水分化学ポテンシャル [J/kg] |
| a | : 吸水係数 [kg/m ² s ^{0.5}] は9 mm合板小口の値 [記-2]を用いた |
| t | : 時間 [s] |
| ρ | : 材料密度 [kg/m ³] |
| c | : 比熱 [J/kg K] |
| T | : 温度 [K] |
| λ | : 熱伝導率 [W/m K] |
| r | : 潜熱 [J/kg K] |
| λ' | : 水分伝導率 [kg/m ² s J/kg] |
| ρ_w | : 水の密度 [kg/m ³] |
| φ | : 体積含水率 [m ³ /m ³] |
| ρ_a | : 空気密度 [kg/m ³] |
| V | : 体積 [m ³] |
| αA | : 相当開口面積 [m ² /m] |
| Q | : 換気量 [m ³ /s] |
| X | : 絶対湿度 [kg/(kg/kgDA)] |
| g | : 重力加速度 [m/s ²] |
| h | : 建物高さ [m] |
| λ'_μ | : 水分化学ポテンシャル勾配に対する水分伝導率 [kg/(m s J/kg)] |
| λ'_T | : 温度勾配に対する水分伝導率 [kg/(m·s·K)] |
| ρ_o | : 外気の空気密度 [kg/m ³] |
| T_v | : 通気層温度 [K] |
| T_s | : 表面温度 [K] |
| T_o | : 外気温度 [K] |
| X_v | : 通気層絶対湿度 [kg/(kg/kgDA)] |
| X_s | : 表面絶対湿度 [kg/(kg/kgDA)] |
| X_o | : 外気絶対湿度 [kg/(kg/kgDA)] |
| ρ_v | : 通気層の空気密度 [kg/m ³] |

α_{μ} : 水分化学ポテンシャル勾配に対する湿気伝達率 [kg/(m² s J/kg)]

α_T : 温度勾配に対する湿気伝達率 [kg/(m² s K)]

P : 圧力 [Pa]

参考文献

[記-1] 石川廣三、橋本佳大：壁面に衝突する雨滴の傾斜角の推定、日本建築学会構造系論文集、第 611 号、pp. 13-20、2007. 1

[記-2] 栗田紀之、齋藤宏昭、石川廣三、宮村雅史：構造用合板の表面および小口面からの吸水試験、日本建築学会大会学術講演梗概集，材料施工， pp. 1033-1034， 2017

本研究に関する既発表論文

(1) 査読付き論文

- ① 長村貞治、齋藤宏昭、中島正夫;雨掛かりを考慮した外壁通気層の水分挙動に関する研究(その1):通気層への雨水浸入および外装材吸水が壁内湿度に及ぼす影響, 日本建築学会環境系論文集, 第85巻, 第767号, pp.19-28, 2020年10月
- ② 長村貞治、齋藤宏昭、中島正夫;雨掛かりを考慮した外壁通気層の水分挙動に関する研究(その2):通気層の構成部材による排水及び通気特性への影響, 日本建築学会環境系論文集, 第87巻, 第797号, pp.428-438, 2022年7月

(2) 国際学会

- ① Sadaharu Osamura, Hiroaki Saito ;Field survey of hygrothermal behavior within wall assembly derived from rain penetration and ventilation performance of exterior system, XV International Conference on Durability of Building Materials and Components, DBMC 2020, 2020年10月

(3) 学術講演(査読無し)

- ① 長村貞治、齋藤宏昭、中島正夫;雨掛かりを考慮した外壁通気層の水分挙動に関する研究 その1 夏型結露時における壁内水分挙動の実測調査, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.923-924, 2020年7月
- ② 長村貞治、齋藤宏昭、中島正夫、松岡大介、関口洋嗣;雨掛かりを考慮した外壁通気層の水分挙動に関する研究 その2 通気層の構成部材による通気特性への影響, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.595-596, 2021年7月
- ③ 長村貞治、齋藤宏昭、中島正夫;雨掛かりを考慮した外壁通気層の水分挙動に関する研究 その3 外装表面及び通気層における付着水を考慮した水分収支モデル, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.1231-1232, 2022年7月