木造断熱外壁の防湿・気密措置と防露性能に関する研究

－ 繊維系断熱材充填工法に対する要求性能 －

STUDY ON HYGROTHERMAL PERFORMANCE RELATED TO VAPOR PROOFING
AND AIR TIGHTNESS FOR WOODEN EXTERIOR WALLS

－ Requirements for exterior walls with fibrous insulation material －

齋藤 宏昭^{*1}, 三浦 尚志^{*2}, 桑沢 保夫^{*3}*Hiroaki SAITO, Hisashi MIURA and Yasuo KUWASAWA*

This study focuses on impact of vapor proofing and airtightness on hygrothermal performance for wooden exterior walls. Partial air and moisture penetration into fibrous insulation layer of the wall were mainly addressed in terms of practical issue for the hygrothermal design. Laboratory experiments using wall assemblies with partial defects for vapor proofing such as outlet were implemented to better understand moisture distribution and air flow within the walls when pressure difference occurs between the indoor and the outdoor rooms. After a developed HAM analysis model was verified by the lab-experiments, long-term simulations were performed to clarify moisture accumulation within the wall under various climate conditions. The simulation results indicated that requirements of both the vapor proofing and the air tightness can be mitigated in mild climate regions. Additionally, the results showed that the partial defect at the top of walls causes the moisture accumulation.

Keywords: Vapor Proofing, Airflow, Heat and moisture transfer, Exterior wall, Laboratory experiment

防湿, 空気流動, 熱水分移動, 外壁, 実験室実験

1. 序

近年の戸建て住宅では構造用面材の普及や工法の改良、開口部等の性能向上によって一定程度の気密性能が概ね担保されたと考えられており¹⁾、平成20年に改正された住宅の省エネルギー基準では気密性能の定量的指標である相当隙間面積が告示から削除された²⁾。本来、住宅の気密性は漏気による空調負荷の低減、温熱環境の改善、適切な計画換気に加え、壁内結露の防止を目的としている。漏気による壁体内部の移流に着目すれば、熱損失などの熱的影響に比べ壁内結露への影響は大きく^{3), 4)}、寒冷地では材料内の水蒸気透過に加え漏気の防止を意図した防湿・気密措置が防露上不可欠とされている。しかし、関東以西の地域では手間のかかる寒冷地並みの防湿・気密措置は定着しておらず、省エネルギー基準からの気密性能の指標削除により防露上目指すべき性能も曖昧な状況となっている。

これまで、漏気や壁体内部の移流による防露性能への影響については、福島⁵⁾、鈴木⁶⁾、佐藤⁷⁾、向井⁴⁾、石井⁸⁾等の検討事例がある。福島、鈴木は屋外に建つ在来工法の実験住宅を用い、床下空間を経由した低温空気の流入が外壁の内部結露発生を助長することを示唆している。佐藤⁷⁾は繊維系断熱材内部の空気移動に Darcy 即を適用し、熱湿気同時移動方程式と連成させた数値計算を試みている。向井⁴⁾らは佐藤と同様のモデルによる予測結果を断熱壁体内の温湿度測定結果と比較し、モデルの妥当性を検証している。一方、国外では Kumaran がカナダ国内における漏気量と壁体内の水分蓄積の関係を数値計算によって求め、気密層に相当する Air Barrier の要求性能

を提案している³⁾。Desmarais ら⁹⁾は外壁の漏気経路と外装下地材の結露範囲について定常条件下における実験室実験により検討し、寒冷な気候条件下では防湿層に透湿抵抗の高い材料を配置しても、僅かな漏気が躯体の含水率上昇を引き起こす危険性を示唆している。

このように、内部結露に対する漏気と移流の影響は重要であることが既往研究で述べられており、寒冷な気象条件下では躯体の気密性能確保による漏気防止が防露対策に不可欠との認識が定着している。しかし、我が国のように寒冷地から蒸暑地までの全地域において、厳格な防湿・気密措置が必要か否かは明確ではなく、要求性能の明示を意図した定量的検討は少ない。今後国内では、省エネ基準義務化に伴う戸建住宅の断熱化が予想されるうえ、気密性が乏しい既存住宅に対する省エネ改修技術の確立も求められており、気象条件を勘案した防湿・気密措置の要件は重要な課題と位置づけられる。

以上の背景を考慮して、本研究では木造断熱外壁の防湿・気密措置と防露性能の関係について検討する。初めに取合いやコンセントボックスといった防湿・気密欠損部の透湿性及び通気特性の程度を部位モデルによって定量化する。次に試験壁体を用いた実験室実験によって、温暖地の木造戸建住宅で多くみられる防湿・気密欠損が壁内温湿度分布に及ぼす影響を把握したうえで、漏気や移流を考慮した熱水分移動解析を行い温湿度分布形成のメカニズムを検討する。最後に、気象データを用いたシミュレーション計算によって通年の壁内温湿度や含水率を算出し、代表的な都市において必要な防湿・気密措置に関する知見の整理を試みる。

^{*1} 足利工業大学工学部創生工学科 准教授・博士(工学)^{*2} 国土技術政策総合研究所 主任研究官・博士(工学)^{*3} 独立行政法人建築研究所 上席研究員・博士(工学)Assoc. Prof., Faculty of Engineering, Division of Architecture and Civil Engineering, Ashikaga Institute of Technology, Dr. Eng.
Senior Research Officer, National Institute for Land and Infrastructure Management, Dr. Eng.
Chief Research Engineer, Dept. of Environmental Engineering, Building Research Institute, Dr. Eng.

2. 部位モデルによる欠損部の防湿・気密性能の測定

壁、床、天井の取合部の防湿・気密措置は、断熱性能を確保するための壁内気流防止と漏気による内部結露防止の観点から重要であり、図1で示した箇所の措置が省エネルギー基準解説書²⁾等で求められている。近年は温暖な関東以西の地域でもこれらの防湿気密措置の目的を理解し丁寧な施工を行う業者も増えている一方で、石井らの調査結果⁸⁾が示唆するように意識の低いビルダーも多い。特に図1の写真に示す筋交や横架材周り、電気配線・金物貫通部などは、施工上の隙間が生じ易いが内部結露に対する影響の程度が明確ではない。石井らは、これら施工方法に起因する隙間量を炭酸ガスの濃度減衰によって比較しているが、後述する熱水分・空気の連成計算を行ううえでは相当隙間面積など漏気量と圧力差の関係に加え、透湿抵抗を把握する必要がある。そこで代表的な防湿・気密欠損部の部位モデルを作成し、熱水分及び空気移動解析に適用しうる透湿性及び隙間特性のデータを収集する。

図1 防湿気密措置が必要とされる箇所²⁾

2.1 実験概要

測定対象とする部位は、後述する結露実験の試験体に設ける防湿・気密欠損で、表1に示す壁と天井及び床との取合やコンセント部分である。①、②は桁や階間の胴差周りにみられる防湿フィルム端部の面材による押えを省略した仕様で、図1の写真に示した現場施工の状況等を参考に重ね幅を5mm、30mmとした。③及び④は面材を下地部分で突付け、ビス又は釘で止め付けた際に生じる隙間を再現したもので、石膏ボードや構造用面材と木部の重なり部分に該当する。⑤、⑥は住宅用のコンセントボックス（以下、略称をCBとする）で、プラグが2口の一般品と気密仕様の2水準である。

透湿試験はJIS A 1324（建築材料の透湿性試験方法）¹⁰⁾に準拠し、透湿面積が0.15m²（600×250mm）の表1に示す透湿カップに試験体を設置した。各試験体は、取合以外からの透湿を防ぐため、試験対象部分以外はパラフィンまたはアルミテープにより封ろうした。透湿カップ内部の乾燥剤は無水塩化カルシウムを用い、雰囲気の設定温湿度は23℃50%、恒温室内のカップ周辺の風速は約0.5m/s以下とした。隙間特性については、透湿抵抗試験で用いた透湿カップ内部の空気をエアポンプにより吸引し、湿式ガス流量計と微差圧計により差圧と流量の関係を測定して、通気率及び隙間特性値を求めた。

2.2 試験結果

2.2.1 透湿抵抗

透湿抵抗の試験結果を図2に示す。取合の隙間に関しては、隙間長

表1 試験体概要

分類	防湿フィルム重ね	面材突きつけ	コンセントボックス
名称	①防湿フィルム重ね5mm ②防湿フィルム重ね30mm	③石膏ボード突きつけ ④合板突きつけ	⑤CB一般品 ⑥CB気密仕様
概要			
備考	隙間長さ:600mm [面材押さえなし]	隙間長さ:600mm [下地あり(野縁)]	透湿面積:120×70mm

図2 欠損部の透湿抵抗測定結果

表2 欠損部の隙間特性値測定結果

名称	通気率a (m ³ /sPa)	隙間特性値n (-)	長さあたりの相当隙間面積αA (cm ² /m)
①防湿フィルム重ね5mm	9.53×10 ⁻⁵ [1.99×10 ⁻⁴]	1.5 [1.3]	1.70 [4.40]
②防湿フィルム重ね30mm	5.65×10 ⁻⁵ [7.10×10 ⁻⁵]	1.6 [1.2]	0.82 [1.90]
③石膏ボード突きつけ	6.13×10 ⁻⁷	1.0	0.019
④合板突きつけ	5.91×10 ⁻⁶	1.4	0.084
⑤CB一般品	2.20×10 ⁻⁴	1.1	3.68*
⑥CB気密仕様	3.25×10 ⁻⁵	1.4	0.29*

*1個あたりの相当隙間面積 (cm²)、[]: 加圧法による値

図3 欠損部の隙間特性値測定結果

さあたりの透湿抵抗を算出し、コンセントボックスについては、単位面積あたりの透湿抵抗を算出した。防湿フィルム重ねについては近傍風速0.5m/sに加え、透湿抵抗試験において一般に用いられる恒温恒湿層内の風速1.5m/sに対する結果も求めた。

図2からは、下地のあるボード突きつけの防湿性能は高く、防湿フ

フィルム重ね部分は低いことがわかる。特に、試験体近傍風速が1.5m/sの場合は、重ね幅にかかわらず透湿抵抗が低く、フィルム重ね5mmでは周辺気流の乱れにより隙間から透湿カップ内に直接空気が流入したと予想される。コンセントボックスについては一般品に比べ気密仕様が2割程度高い結果であった。

2.2.2 隙間特性

隙間特性値の測定結果を表2及び図3に示す。透湿抵抗と同様に、①～④に関しては隙間長さあたりの隙間面積を算出し、⑤～⑥のコンセントボックスについては1個あたりの値を算出した。

一般に、隙間量が大きければ濃度差による拡散量も増加するため、図3の隙間量と図2の透湿抵抗の関係はおおよそこの傾向に従う結果となっている。下地に接する面材突きつけの隙間量は小さく、目地長さあたりの隙間量は0.1cm²/m以下であった。また、コンセントボックスについては、一般品と気密仕様が10倍程の差異が読み取れ、漏気防止の観点では気密コンセントの優位性が確認された。フィルム重ね部分については流れ方向の影響が大きいと予想されるため、減圧法に加え加圧法による測定も行った。フィルム重ね部分は減圧時と加圧時で2倍以上の差異が見られ、特に重ね5mmでは4cm²/mを越えるオーダーであった。

3. 防湿・気密欠損を持つ試験壁体による結露実験

外壁と土台及び胴差の取合を再現した試験壁体を人工気候室に設置し、欠損部の組合せや内外差圧が異なる条件下での結露実験を行い、壁内温湿度分布に関する実験データを収集する。

3.1 実験概要

3.1.1 試験体

試験体は木造外壁の1階部分をモデル化したもので、外装下地材に構造用合板、断熱材に防湿フィルム付きグラスウールを充填した従来の軸組工法とし、外壁・床ともに平成11年省エネルギー基準Ⅳ地域の断熱性能を満たす仕様とした。試験体断面図及び床部分の詳細を図4に示す。

床周りは2水準の気密性能を設定した。「気密床」は床と壁の僅かな隙間もテープ等で塞ぎ、ほぼ完全に気密を確保した仕様である。「剛床」は床合板を土台に直接留め付けるため、断熱性を確保する気流止めとしては十分な性能を有する仕様であるが、床合板と間柱の突き付け部分の両端に、施工上のクリアランス確保のため5mm角程度の隙間^{注1)}がある(写真1左)。

胴差周りは、胴差まで石膏ボードを張上げ断熱材付属の防湿フィルムを面的に押え、端部の防湿・気密を確保する「防湿」と、防湿フィルムの押えを省略する「欠損」(写真1右)の2水準を設けた。また、壁面下部に防湿フィルムを貫通するコンセントボックスを設置した「CB」についても設定した。各試験体の取合及び欠損部の仕様は表3の組合せで、床周りについてはType1～4それぞれについて「気密床」と「剛床」の試験を行う。温湿度センサー設置位置を図4の断面図に併記する。上述した試験体は写真2に示すように人工気候室の界壁に取付け、床下部分は外気空気が流入するよう外気側に開放した。

3.1.2 試験条件

実験時の雰囲気気温湿度は室内側20℃、50%RH、外気側5℃(相対湿度はなりゆき)一定とした。室内外の圧力差は暖房時や全般換気

運転時を想定し、自然状態、減圧(室内側が-2Pa)及び加圧(室内側が+2Pa)の3条件とし、試験室間の圧力差は界壁部分に設置した軸流ファンにより制御した。試験体表面近傍の気流は、室内外ともに約0.2m/secであった。実験は、土台や胴差周りの各仕様の組合せについて壁体各部の温湿度がほぼ定常となるまで(各条件で約2～6日間)行った。なお、温湿度は10分間隔の連続測定とし、室内外の差圧は試験期間を通じて設定値に対して±0.2Pa以内に収まることを確認した。

図4 試験体断面図及び床部分の詳細

写真1 防湿・気密欠損(左:剛床、右:胴差欠損)

写真2 試験体外観(左:室内側、右:外気側)

表3 試験体の取合及び欠損部の仕様

部位	Type1	Type2	Type3	Type4
胴差	防湿	防湿	欠損	欠損
CB	なし	あり	なし	あり
床	気密床及び剛床			

3.2. 移流を考慮した熱水分移動解析の概要

3.2.1 基本式

多孔質材内部の移流を考慮した熱水分移動解析は、佐藤が繊維系断熱材にDarcy則を適用した事例⁷⁾があり、Kumaran³⁾らが用いたモデル「LATENITE」なども同様の計算手法を用いている。また、向井らは断熱外壁を対象に実験室実験でモデルの検証を行い、計算手

法の妥当性を検証している⁴⁾。これらは多孔質材内部の流れ場を層流と仮定しモデルを構築しており、本研究においても同様のプログラムを独自に開発し¹¹⁾計算に用いた。

基本式は2次元の熱・水分・空気に関する収支式を用いる。石膏ボード、木材など透気率の小さい多孔質材に関しては空気移動を無視し、(1)、(2)式に示す液水移動まで対応可能な含水率をポテンシャルとした熱水分同時移動方程式を適用する。

$$\rho_l \frac{\partial w}{\partial t} = \nabla D_w \nabla w + \nabla D_T \nabla T \quad (1)$$

$$c\rho \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \lambda \nabla T \quad (2)$$

移流成分の影響が顕著な繊維系断熱材はハイグロスコピック域を対象とした熱湿気同時移動方程式を適用し、移流項を加えた熱及び水分収支式(3)、(4)を用いた。なお、移流項については隣接する上流側のみ影響するものとする。

$$(\Phi \rho_a + \kappa) V \frac{\partial X}{\partial t} = \sum C'_{ij} A_{ij} (X_j - X_i) + \sum Q_{ij} (X_j - X_i) + v \frac{\partial T}{\partial t} V \quad (3)$$

$$(c\rho + r_v v) V \frac{\partial T}{\partial t} = \sum C_{ij} A_{ij} (T_j - T_i) + \sum c_a Q_{ij} (T_j - T_i) + r_v \kappa \frac{\partial X}{\partial t} V \quad (4)$$

多孔質材内部の移流は、透気率を用いた以下の式を用いて算出する。欠損部の境界面に生じる圧力については、試験室の床を基準面として求めた値を与えた¹²⁾。(5)、(6)式では流量と圧力差の線形関係を前提としているが、圧力差による透気率 k_a の変化はグラスウールなどの繊維系断熱材では僅かであることを別途実験により確認しており¹¹⁾、一定として扱った。

$$Q_{ij} = k_a \cdot \Delta P_{ij} \cdot A_{ij} / \Delta x_{ij} \quad (\text{水平方向}) \quad (5)$$

$$Q_{ij} = k_a \cdot \Delta P_{ij} \cdot A_{ij} / \Delta y_{ij} \quad (\text{垂直方向}) \quad (6)$$

各接点間の圧力差は、計算メッシュの中央を基準面とし、以下の式で算出する。

$$\text{水平方向: } \Delta P_{ij} = P_j - P_i \quad (7)$$

$$\text{上部方向: } \Delta P_{ij} = P_j - P_i + g(\rho_j \Delta y_j + \rho_i \Delta y_i) / 2 \quad (8)$$

$$\text{下部方向: } \Delta P_{ij} = P_j - P_i - g(\rho_j \Delta y_j + \rho_i \Delta y_i) / 2 \quad (9)$$

数値計算法は、前述した各式を後退差分近似により離散化しSOR法によりに解く。移流項は1次精度風上差分、その他は2次精度中心差分とした。熱と空気については浮力の影響があるので連成させるが、水分に関しては独立して扱う。移流に関しては連続の式により各セルにおける流量の総和が0になると仮定して、各接点圧力を逐次求めた。なお、空間分割は直交格子の非等間隔のメッシュとし、水分蓄積が生じる木材や合板表面については1mm程度とした。

3.2.2 計算対象及び条件

計算対象は図5に示す垂直断面で、図4の各試験体と同じ仕様である。計算プログラムは2次元モデルであるため、コンセントについては図2、図3で得られた隙間量と透湿抵抗を試験体寸法を勘案して与えた(図5参照、透湿抵抗は湿気コンダクタンスに換算した値を記載)。なお、「防湿」、「気密床」は2節の石膏ボード突きつけの値を、「欠損」は防湿フィルム重ね幅30mmの値を与え、剛床に関しては隙間寸法から換算した値とした。材料表面の境界条件¹³⁾については総合熱伝達率を用い、物質伝達率は対流熱伝達率からLewisの相似則を用いて算出した。

向井⁴⁾らの検討によれば、充填工法の繊維系断熱材端部は施工の

際に僅かな隙間が生じ、湿度分布への影響が大きいと、本計算においても断熱材が他の部材と接する計算ポイントの透気率は、グラスウールの10倍の値とした。なお、欠損部に関しては、プログラム中で相当隙間面積を空気貫流率に逐次換算して用いた。材料物性値は文献値を用いた¹⁴⁾。

図5 計算対象と欠損部の設定

3.3 結果及び考察

3.3.1 実験結果と解析結果の比較

温湿度が安定した後の、断熱材外気側上下温湿度分布の実験値と計算値を図6に示す。本研究では主に防露性能に関する考察を行うため、図6では断熱材外気側の測定結果のみ掲載した。なお、剛床については、図中の凡例において内外の試験室間に設定した圧力差を記載しており、マイナスは室内側が減圧、プラスは加圧を意味する。気密床は漏気がほとんど生じないため自然状態のみとした。

土台・床取合と胴差周りの防湿・気密措置が確保されたType1の実験結果では、構造熱橋の影響により上下の温度分布が生じているが、絶対湿度は高さ方向での変化が僅かであり漏気の影響は小さい。計算値と比較すると、温度が若干高めとなっているが、実験とほぼ同様の分布が得られている。

Type2の実験結果では、差圧が生じた際にコンセント付近における欠損の影響が見られ、加圧時の土台付近は室内空気の流入によって飽和点に達している。計算結果は温湿度分布を再現できているが、加圧時の温度にやや乖離が生じている。

Type3は自然状態でも胴差周りの湿度上昇がみられ、計算でもこれらの傾向は再現できている。ただし、自然状態の壁体上部の絶対湿度計算値は実験値に比べやや低く、加圧時の壁体下部は約2g/kgDAの差が生じている。

Type4は胴差及びコンセント周りに気密欠損があるため、加圧時の実験結果ではこれら欠損部周辺における湿度上昇が確認できる。計算では胴差周りの湿度上昇は良く再現できているものの、高さ1.8m付近の湿度については実験値との差異が見られる。

一般に、繊維系断熱材は施工時の密度ムラによって間柱近傍の隅角部と上下端部に隙間が生じ易く、移流がこの部分に偏ることが指摘されている⁴⁾。図7はType4(+2Pa)について今回の実験・計算結果と密度ムラが無いと仮定した計算結果(密度ムラ無視)を併記している。図7からは密度ムラが全く生じない場合、温度0.5℃、相対湿度15%RH程度の差が生じると読み取れる。本試験のセンサー設置位置は、密度ムラの生じ難い断熱材中央部であったため、図

図 6 断熱材外気側の上下温湿度分布（左より Type1~Type4）

図 7 上下温湿度分布への密度ムラの影響（Type4、+2Pa）

図 8 試験体上部の断面温湿度分布（Type3、-2Pa）

6、Type4 の高さ 1.8m 付近の実験値との乖離は密度ムラによる 3 次元的な移流の偏りが原因と推測される。図 8 は Type3（-2Pa）断熱材上部の断面温湿度分布で、断熱材内部では 10mm あたり 1.2℃程度の温度勾配が生じることがわかる。図 6 の試験体上部で顕著であった温度の誤差は、温湿度センサーの設置位置や前述した密度ムラの影響と思われる。

上述した内容を勘案すると、図 6 における実験値と計算値の乖離は、施工精度に起因する断熱材の密度ムラとセンサー設置の精度、2 次元モデルの採用などが複合的に影響したもので、加圧時（+2Pa）の Type3 を除けば本計算モデルの誤差は温度 1℃、相対湿度 15%程度と推測される。本論で検討すべき防湿・気密措置や圧力場の違い（Type1~Type4 における差異）は相対湿度で 50%RH を越え、断熱材内部の密度ムラに比べ極めて影響が大きいことを図 6~8 の結果は示唆している。ゆえに、本論では断熱材内部の流れ場に対するモデルの詳細な検討は避け、計算精度の向上は今後の課題としたい。

3.3.2 防湿気密欠損による漏気量及び湿度分布への影響

前述した実験時における漏気量と湿度分布を解析により求め、漏気の影響を考察する。図 9 に欠損部の漏気量（l/min）、壁体内の風速ベクトル及び相対湿度分布を示す。本計算は 2 次元モデルであるため漏気量は壁体の単位長さあたり（奥行き方向）の値であり、一般的な在来工法の間柱間 455mm の範囲の流量は表示値の約 0.45 倍と

なる。また、壁内への流入を正、流出を負として表示している。速度ベクトルについては、断熱材内部の流速が外周部と比べ極端に小さく判別が出来なくなるため、矢印の大きさを統一した。

Type1 は最も気密性が高い条件であるが、壁内では内外温度差による僅かな対流が生じている。壁内の流速は透気率を大きく設定した断熱材の境界付近で約 $4.0 \times 10^{-3} \text{m/s}$ 、断熱材内部は 10^{-5}m/s のオーダーであった。壁内の相対湿度分布に上下差は見られず、欠損が僅かな状況では防露性能に対する断熱材内部の移流の影響は小さい。コンセントの気密欠損を想定した Type2 気密床では、若干の漏気があるものの断熱材低温側の湿度上昇は上下方向に一樣で、50%RH 程度に抑えられている。Type2 剛床自然状態と-2Pa では、床下からの低温空気の流入により低湿度が維持されている。しかし、+2Pa ではコンセント付近に漏気が集中することにより、土台付近にかけて相対湿度が上昇している。Type2 剛床では他の仕様に比べ通気経路が短いため漏気量は多く、Type3 +2Pa の2倍以上であった。

胴差取合に防湿気密欠損がある Type3 気密床では、漏気量は僅かであるが、上部の高湿化が見られる。これは、蒸気圧拡散により防湿フィルムの隙間から侵入した水蒸気が断熱材内部の対流によって低温部へ到達したことによる。床の気密を剛床程度とした Type3 剛床自然状態の漏気量は 0.15/l/min (換気回数 0.04 回/h 相当)、さらに

室内を-2Pa とした際は 1.0l/min (換気回数 0.27 回/h 相当) となり、後者では床下の乾燥空気流入による壁内湿度の低下が生じている。ただし、-2Pa でも壁内の流速は最大で $7.0 \times 10^{-3} \text{m/s}$ であり、断熱材の通気抵抗によって流速は低く抑えられる傾向であった。室内を加圧した+2Pa では室内空気が床の取合から流出するが、下向き流れは断熱材室外側に偏る傾向が見られた。また、室内の湿った空気が胴差付近から流入するため断熱材上部の相対湿度が高い。

胴差取合とコンセントによる欠損がある Type4 では、Type3 とは室内空気の出入りの向きが異なる。気密床の場合は胴差より壁内に流入した空気がコンセントより室内側へ戻る経路となり、床取合いからの流入量は僅かであった。しかし、床面の気密性が剛床程度に下ると (Type4 剛床自然状態)、床下から流入した低温空気の割合が高まる。湿度分布については床取合いの気密性にかかわらず胴差部分からの水蒸気流入によって断熱材低温側上部の値が上昇し結露に至っている。室内を減圧した場合も (Type4 剛床-2Pa)、Type3 剛床-2Pa に比べ若干湿度が高い結果であった。これは、床下から壁内を経由し室内へ流入する空気が下部に位置するコンセントに偏り、胴差取合いの流量が-0.33 (l/min) と少ないことが影響している。室内側を加圧した Type4 剛床+2Pa では室内から壁内への流量の増加に伴い、断熱材上部の湿度が更に上昇している。

上述した漏気量と壁内湿度分布の関係は、床断熱の外壁 1 階部分を想定した知見であるが、欠損のある壁体は欠損部の位置と内外差圧により、漏気と透湿のバランスや通気経路が変化し、湿度上昇の生じる位置の異なることが示唆された。特に、胴差付近の防湿フィルム押え材の省略は、断熱材内部の対流による壁体上部の局所的な湿度上昇を助長し、室内が正圧となった場合、内部結露発生リスクが高まると言えよう。また、コンセントについては床下の低温空気が室内へ流入し易く、足元温度の低下など室内温熱環境への影響が懸念されるが、室内側が正圧でない限り内部結露のリスクは低いと考えられる。

4. 数値計算による防湿・気密措置の要求性能に関する検討

外界条件として気象データを用いた数値計算を行い、代表的な都市において要求される取合の防湿・気密措置の要求性能に関する知見を整理する。

4.1 計算対象

計算対象は断熱層の内側となる階間等の影響も考慮するため、図 10 に示す 2 階建ての外壁とした。断熱方法は外壁が防湿フィルム付き繊維系断熱材の充填工法とし、その他は天井断熱、床断熱とした。断熱性能は平成 11 年基準の IV 地域相当とし、外装材はサイディング 15mm、通気層厚さは 18mm、内装材は石膏ボードである。外壁の取合及び欠損部は前節の表 3 に提示した Type1~4 の組合せであるが、2 階建てを想定するため図 10 に示す納まりとなる。なお、床周りについては剛床のみとした。

図 10 計算対象と防湿気密措置の詳細

4.2 計算条件

室内温湿度条件は連続空調（以下、連続）及び間欠空調（以下、間欠）の 2 通りとし、空調時及び非空調時の室温 θ (°C)・相対湿度

RH (%) を次式で定めた。「連続」の場合は下記空調時の値を常時採用し、「間欠」の場合は 7~22 時を空調、それ以外を非空調とした。
 空調時： $\theta = 4.5 \cos\{2\pi \cdot (\text{day} - 212) / 365\} + 22.5$ 、 $RH = 60$ (10)
 非空調時： $\theta = 7.0 \cos\{2\pi \cdot (\text{day} - 212) / 365\} + 20.0$ 、 $RH = 70$ (11)

ここで、day は 1 月 1 日を起点とした延べ日数である。

計算対象は、II 地域以南の盛岡、宇都宮、富山、岡山、鹿児島とし、標準年の拡張アメダス気象データの外気温湿度を与条件とした。なお、階間空間は断熱層の内側に位置するため居室の温湿度と等しいと仮定し、床下及び小屋裏空間は無次元温度を 0.3 として、室内外の温度差より逐次求めた値を用いた^{注 5)}。

防湿・気密欠損部の隙間特性や湿気コンダクタンスは 3 節と同様に、図 10 に示す値を与えた。流出入条件についても 3 節の自然状態と同様に、居室と外気温度差により生じる圧力差を 1 階床面からの高さに応じて与えた^{注 2)}。なお、外部風の影響については無視した。

外装下地材は構造用合板と透湿性の高い軟質繊維板の 2 水準とした。計算ケース数は表 4 に示す各組合せとなるが、盛岡については寒冷であるため連続暖房のみとし、合計 72 ケースとなる。数値計算における時間分割は 5 分、助走期間を半年とし、各ケースに対し 1 年半の計算を行った。ただし、空気移動に関する計算間隔は計算負荷が大きいため 1 時間毎とした。

表 4 計算で変更したパラメータ

項目	条件	備考
桁・胴差周り	防湿、欠損	図 10 参照
コンセントボックス	CB なし、CB あり	図 10 参照
外装下地材	合板、軟質繊維板（厚さ 9mm）	注 4)
室内条件	連続、間欠	(10), (11) 式
地域	盛岡、宇都宮、富山、岡山、鹿児島	

4.3 結果及び考察

4.3.1 防湿気密欠損による断面湿度分布への影響

断面湿度分布については室内条件が連続空調、外装下地材は構造用合板の岡山及び盛岡の結果について考察する。図 11 は岡山の 2 月 1 日 0 時における断面湿度分布である。防湿・気密欠損が剛床の隙間のみの Type1 では上下方向の相対湿度分布はほとんど生じておらず、3 節の実験結果（図 6）とほぼ同様の傾向が示されている。コンセントボックス程度の欠損を持つ Type2 についても同様で、温暖な岡山の気象条件では結露が生じる程の湿度上昇は見られない。一方、桁・胴差周りに欠損がある Type3 では、胴差下面は低いものの上面の相対湿度は 90%RH を越える結果となった。これは、室内外温度差による差圧を想定した本計算では、壁内において上向き流れが生じるため 1 階部分に床下を経由した乾燥空気が流入するのに対し、胴差上面では高湿な階間空気が 2 階床との隙間から流入するため、低温となる断熱材外気側での相対湿度上昇に至ったと考えられる。コンセントボックスが併設される Type4 では、室内からの水蒸气流入が促進されるため 1 階外壁も高湿となっている。

図 12 は盛岡の結果であるが、岡山に比べて外気温度が低い Type1 でも 2 階床付近の湿度上昇が見られる。胴差やコンセントボックスなどの欠損を持つ Type2~4 では高湿となる範囲は更に広がっており、盛岡のような寒冷地では僅かな防湿気密欠損も内部結露発生リスクを高めることを示唆している。

4.3.2 冬期に高湿となるポイントの年間湿度変動

図13に最も高湿となる箇所である、胴差上部の1年を通じた相対湿度日平均値の変化を示す。なお、外装下地材は合板、室内条件は連続空調である。図13によれば、結露に至らない場合は高湿となる期間が最寒期の1~2月となるが、結露期間が長い条件では外気温度が上昇する4月以降も高湿状態が継続している。特に盛岡では6月以降も高湿度の状態が続いており、Type4では湿度95%を下回るのは1年のうち2か月未満であった。これは、Type4では冬期に室内からの多量の水蒸気流入によって合板の含水率が上昇し、乾燥が遅れたことによる。また、桁・胴差周りを欠損としたType3、Type4では、地域によらず湿度が高めに推移しており、鹿児島以外では結露発生の危険性が高い。一方、Type1、Type2のように、桁・胴差周りの防湿・気密を確保すれば、鹿児島に加え岡山でも湿度90%以下を維持できるものと考えられる。

図11 断面相対湿度分布（岡山、連続空調）

図12 断面相対湿度分布（盛岡、連続空調）

図13 冬期に高湿となるポイントの年間湿度変動（連続空調）

4.3.3 各仕様の冬期相対湿度

胴差上部における1～2月の相対湿度期間平均値を表5に示す。表5では、空調スケジュール、桁・胴差の防湿、コンセントボックスの有無、外装下地材の種類、それぞれに対応した結果を掲載した。また、既往研究を参考に木材腐朽菌による加水分解の生じるリスクが低いと思われる、相対湿度97%以下を網掛けとした¹³⁾。

外装下地材が合板の場合、鹿児島以外では桁・胴差が欠損した条件の相対湿度が97%を越えており、防露上最も注意すべき部位であることが読み取れる。コンセントボックスについては、桁・胴差の防湿・気密措置が確保されていれば、岡山、鹿児島に限り97%以下を維持できる。一方、外装下地材を軟質繊維板とした場合、今回設定した防湿・気密欠損の程度では、盛岡を除き相対湿度97%以下を維持できた。この結果は、温暖地の場合、僅かな漏気ならば透湿性の高い外装下地材を用いることで、内部結露発生リスクを低減できることを示唆している。空調方式の影響は、若干の差異が見られる程度であった。

表5 胴差上部における1～2月の相対湿度平均値（単位：%RH）

外装下地材	空調方式	桁・胴差	CBの有無	盛岡	宇都宮	富山	岡山	鹿児島
構造用合板	連続	防湿	無	100	90	87	80	72
		防湿	有	100	98	96	85	74
		欠損	無	100	100	100	100	89
		欠損	有	100	100	100	100	85
	間欠	防湿	無	—	94	87	82	72
		防湿	有	—	98	96	85	74
		欠損	無	—	100	100	100	84
		欠損	有	—	100	100	99	82
軟質繊維板	連続	防湿	無	80	65	72	59	59
		防湿	有	87	69	78	62	61
		欠損	無	100	96	97	83	70
		欠損	有	98	83	89	73	66
	間欠	防湿	無	—	69	73	61	59
		防湿	有	—	69	78	62	61
		欠損	無	—	92	95	79	67
		欠損	有	—	80	87	70	63

5. まとめ

本研究では繊維系断熱材を充填した木造外壁を対象に、防湿・気密欠損が壁内温湿度分布に及ぼす影響を把握するため、部位モデルによる透湿及び通気特性試験、壁体モデルによる結露実験を行った。さらに、移流を考慮した熱水分移動解析により、代表的な都市を対象に必要な防湿・気密措置に関する知見の整理を試みた。得られた知見を以下に示す。

- 1) 外壁端部の防湿を確保するには、防湿シート端部を野縁や胴差など木下地に留め、内装材又は胴縁等で面的に押さえることが不可欠である。タッカーのみにより固定された防湿フィルム端部や、コンセントボックスの透湿性及び隙間量はこれらの10倍以上であり、壁内への水蒸気流入防止は難しい
- 2) 防湿・気密性能が十分に確保された外壁では、繊維系断熱材内部の移流に起因する湿度分布は僅かであり、防露性能に対する影響はほぼ無視できる。
- 3) 胴差周りの防湿・気密欠損は、壁内に侵入した水蒸気が外壁

上部低温側に滞留し、局所的な湿度上昇を引き起こす可能性がある。コンセントボックス等の外壁下部に位置する欠損では、断熱材内部の移流の影響により侵入した水蒸気が壁内全体に拡散するため、室内が正圧でなければ局所的な湿度上昇の生じるリスクは上部の欠損に比べやや低い。

- 4) 卓越風や第2種換気等により室内が常に正圧となる場合、欠損付近の低温側湿度が上昇し、内部結露発生リスクが高まる。一方、室内が負圧で床下から乾燥空気が流入する場合は湿度上昇を緩和するが、2階居室や天井懐から室内空気が流入する箇所では湿度が上昇する。
- 5) 省エネ基準の地域区分Ⅱ地域に該当する盛岡では剛床程度の僅かな欠損も許容できず、厳格な防湿・気密措置を講ずる必要がある。
- 6) IVa地域に分類される富山、宇都宮では桁・胴差の処理に注意し、コンセントボックス等の隙間から通ずる移流を低減することが望ましい。しかし、床のみの欠損ならば剛床程度の隙間（1cm²/m）を許容できることが示唆されている。
- 7) 冬期も比較的温暖なIVb地域の岡山では、桁・胴差の処理は不可欠であるが、コンセントボックス等の局所的な欠損の影響は小さい。V地域の鹿児島ならば桁・胴差部分の欠損も内部結露の発生要因にはならない。

本報の防湿・気密措置の要求性能に関する検討では、外壁・床の取合に比較的气密性能が高い剛床を対象とし、冬期の内外温度差による差圧を想定した解析を行った。しかし、換気システム・卓越風などにより圧力場の想定が大きく異なる状況や、取合の気密性が低い住宅では、本論の知見は適用できない。また、断熱材自体の施工精度に起因する断熱材内部の流れ場については、計算精度向上のため更なる検討が必要であり、今後の課題と言えよう。

謝辞

本研究は国土交通省 平成19～21年度住宅・建築関連先端技術開発助成事業「新築および既築改修を対象とした低コスト普及型断熱工法の開発」、独立行政法人建築研究所研究課題「建築物におけるより実効的な省エネルギー性能向上技術と既存ストックへの適用手法に関する研究」、「建築・コミュニティのライフサイクルにわたる低炭素化のための技術開発」の研究の一環として実施した。

注

注1) 剛床工法では本部の寸法変化による不具合を避けるため、間柱と床合板の突き付け部分に隙間を設けることが一般的である。

注2) 床下空間は外気側試験室にほぼ開放されているため、床下空間に面する開口の境界条件 P_i (Pa) は(A1)式で、室内に面する開口の境界条件 P_i は(A2)で与えた。室内の床面基準圧 P_r は(A3)式で求めた。なお、 P_f は送風機などにより強制的に試験空間で差圧を与えた際に付加する項であり、自然状態では $P_f=0$ である。

$$P_i = -g(\rho_o - \rho_c)h_i \quad (A1)$$

$$P_i = P_r - g(\rho_o - \rho_r)h_i \quad (A2)$$

$$P_r = P_f - g(\rho_o - \rho_c)H_c \quad (A3)$$

ここに、 ρ_o ：外気側試験室の空気密度 (kg/m³)、 ρ_c ：床下空間の空気密

度 (kg/m³)、 h_i : 床面からの開口高さ (m)、 H_e : 床下空間の階高 (m)、 g : 重力加速度 (m/s²)

注 3) 流体と材料表面との境界条件は (A4)、(A5) 式を、異種材料間については (A6)、(A7) 式を用いた。なお、水分収支に関して繊維系断熱材と木部などの境界については、(A8) 式を用いた。

$$-\lambda \frac{\partial T_s}{\partial n} = \alpha(T_a - T_s) \quad (A4)$$

$$-D_w \frac{\partial w_s}{\partial n} - D_T \frac{\partial T_s}{\partial n} = \alpha'_X(X_a - X_s) \quad (A5)$$

$$-\lambda_1 \frac{\partial T_s}{\partial n} \Big|_1 = -\lambda_2 \frac{\partial T_s}{\partial n} \Big|_2 \quad (A6)$$

$$-D_{w1} \frac{\partial w_s}{\partial n} \Big|_1 - D_{T1} \frac{\partial T_s}{\partial n} \Big|_1 = -D_{w2} \frac{\partial w_s}{\partial n} \Big|_2 - D_{T2} \frac{\partial T_s}{\partial n} \Big|_2 \quad (A7)$$

$$-D_{w1} \frac{\partial w_s}{\partial n} \Big|_1 - D_{T1} \frac{\partial T_s}{\partial n} \Big|_1 = -\lambda'_X \frac{\partial X_s}{\partial n} \Big|_2 \quad (A8)$$

注 4) 計算に用いた材料物性値を別表 1 に、水分拡散係数及び平衡含水率を別図 1、別図 2 に示す。なお、グラスウールの透気率は 1.16×10^{-4} (kg/[m³・s・Pa]) とした。

別表 1 計算に使用した材料物性値^{2),12)}

材料	熱伝導率 W/[m・K]	湿気伝導率 kg/[m ³ ・s・Pa]	比熱 J/[K・kg]	密度 kg/m ³
石膏ボード	0.22	2.93×10^{-11}	870	787
グラスウール 16K	0.045	1.58×10^{-10}	698	16
木材	0.0952	4.58×10^{-12}	1880	460
サイディング	0.963	1.30×10^{-11}	879	1095
合板	0.160	1.11×10^{-12}	1880	613
軟質繊維板	0.0629	1.88×10^{-11}	1052	371
防湿フィルム*	-	2.92×10^{10}	-	-

*防湿フィルムについては透湿抵抗([m²sPa]/kg)のみ表示した。

別図 1 水分拡散係数

別図 2 平衡含水率

注 5) 室内温度 θ_i (°C)、外気温度 θ_o (°C) とすると、無次元温度 Θ (—) に対応した空間の温度 θ_a は下式で求められる。

$$\theta_a = \theta_o + \Theta \cdot (\theta_i - \theta_o) \quad (A9)$$

小屋裏及び床下温度については無次元温度 Θ を 0.3 として逐次算出した。

参考文献

- 澤地孝男, 清水則夫, 大澤元毅, 城地哲哉, 田島昌樹, 堀 祐治: 関東地域に建設された木造戸建住宅の気密性に関する実態把握及び漏気量推定、日本建築学会環境系論文集 第 580 号、pp45-51、2004.6
- (財) 住宅・建築省エネルギー機構: 住宅の次世代省エネルギー基準と指針 2009
- Tuomo Ojanen, Kumar Kumaran: Effect of Exfiltration on the Hygrothermal Behavior of a Residential Wall Assembly, Proceedings of 3rd Canada & Japan Housing R&D Workshop (Ottawa), pp39- 46 1996.6
- 向井一将, 鉾井修一, 小南和也, 安福勝, 鈴木大隆, 伊庭千恵美: 在来木造住宅の断熱壁体内における熱・湿気性状 — 空気流動を考慮した実大壁体実験の解析 —、日本建築学会環境系論文集 第 623 号、pp17-22、

2008.1

- 福島明, 上野栄, 石川松四郎, 五十嵐照男: グラスウール断熱壁の通気による影響、日本建築学会大会学術講演梗概集 計画系、pp.707-708、1981.9
- 鈴木大隆: 積雪寒冷地における断熱外壁の防露・防水・断熱性向上、および、屋根の積雪障害防止に関する研究、東京大学博士論文、1998
- 佐藤真奈美: 建築壁体の熱・湿気性状の解析と防湿設計法に関する研究、神戸大学博士論文、1995
- 石井宏, 久保隆太郎, 酒井孝司, 石原修: 隙間風の流入による充填断熱壁体内の結露可能性に関する研究、日本建築学会環境系論文集 第 602 号、pp.39-46、2006.4
- Guylaine Desmarais, Dominique Derome, Paul Fazio: Mapping of Air Leakage in Exterior Wall Assemblies, Journal of Thermal Envelope & Building Science Vol.24, pp132-154, 2000.10
- JIS A 1324 -1995 建築材料の透湿性測定方法、日本規格協会
- 齋藤宏昭, 坂本雄三, 澤地孝男, 瀬戸裕直: 木造断熱外壁の空隙における移流を考慮した湿気性状の解析: 透気率及び隙間量の測定と 2 次元計算モデルの検証、日本建築学会大会学術講演梗概集 D-2、pp.389-392、2006.8
- Kumar Kumaran, John Lackey, Nicole Normandin, David van Reenen, Fitsum Tariku: Hygrothermal Properties of Several Building Materials, Summary Report from Task 3 of MEWS Project (NRCC-45369), pp.1-68, 2002.
- 齋藤宏昭, 福田青春, 澤地孝男, 大島明: 水分収支を考慮した木造外皮の耐久性評価のための木材腐朽予測モデル 建築外皮の湿害に対する評価手法の開発 その 1、日本建築学会環境系論文集、第 630 号、pp.971-978、2008.8

記号

t : 時間 (s)	Q : 質量流量 (kg/s)	T : 温度
w : 体積含水率 (m ³ /m ³)	Φ : 空隙率 (m ³ /m ³)	X : 絶対湿度
T : 温度 (K)	ρ_a : 空気密度 (kg/m ³)	w : 含水率
X : 絶対湿度 (kg/kgDA)	r_v : 潜熱 (J/kg)	v : 水蒸気
D : 水分拡散係数	A : 面積 (m ²)	l : 液水
λ : 熱伝導率 (W/[m・K])	V : 体積 (m ³)	a : 空気
k_a : 透気率 (kg/[m ³ ・s・Pa])	P : 圧力 (Pa)	s : 表面
c : 比熱 (J/[kg・K])	a : 通気率(m ³ /sPa)	
C : 熱コンダクタンス (W/[m ² ・K])	n : 隙間特性値(-)	
ρ : 密度 (kg/m ³)	x, y : 座標 (m)	
αA : 長さあたりの相当隙間面積 (cm ² /m)		
C' : 湿気コンダクタンス (kg/[m ² ・s・kg/kgDA])		
λ' : 湿気伝導率 (kg/[m ³ ・s・kg/kgDA])		
κ : 絶対湿度変化に対する含水率勾配(kg/[m ³ ・kg/kgDA])		
v : 温度変化に対する含水率勾配(kg/[m ³ ・K])		

(2012年 9 月10日原稿受理, 2013年 3 月 4 日採用決定)