

非居住空間 気密 換気
クロス 湿度 実験

1.研究背景

夏季蒸暑期において住宅内の温熱環境を適切に保つためには、空調機器による冷房が必要となる。しかし、室内を低温に長時間冷房した場合、隙間を通じ室内側近傍まで多湿な外気が侵入する可能性のある非居住空間(間仕切壁や天井裏、天井断熱材下等)では、夏型結露の発生が危惧される(図 1)。

夏型結露について、齋藤ら(1999)¹⁾は、通気層を有する木造住宅の外壁を対象に、当時(1990~2000年頃)の東京の夏季の代表的な晴天日を想定した外気条件(露点 21℃程度)かつ室温 26℃の場合に室内側防湿層で結露が発生しなかったという実験結果を示した。それら一連の研究成果を元に、省エネ基準解説書(2009)²⁾では「初期水分の影響が解消された後では、通常の 27~28℃程度の居室冷房の影響で夏型結露が発生する期間は年間で数週間程度であるうえ、木材含水率上昇など躯体の耐久性に影響を与えることはまずないと言える。したがって、一般的な住宅では乾燥材の使用や通気層の設置等、初期結露対策を講じている限り、過度に夏型結露を懸念する必要はない。」と示された。

一方、川田ら(2019)³⁾は近年において夏季外気絶対湿度が上昇傾向にあること、有馬(2017)⁴⁾は将来的に夏季絶対湿度上昇が予想されることについて言及している。東京における外気温および露点温度(8月平均)^{5),6)}を図 2 に示す。文献¹⁾と同時期(1990~2000年頃)は露点温度 21℃程度だったが近年(2020年頃)では 23~24℃程度まで上昇しており、更に将来(2077~2099年)には 24℃を超えるという予測データがある。また、夏季平日のエアコン使用時間の変化^{7),8)}より作成を図 3 に示す。長時間冷房運転する割合が増加傾向

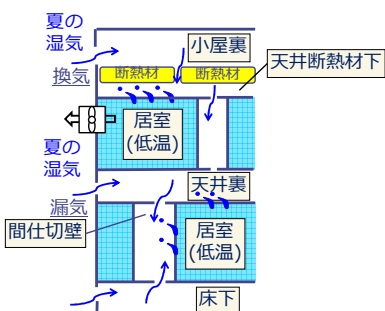


図 1 夏型結露発生イメージ

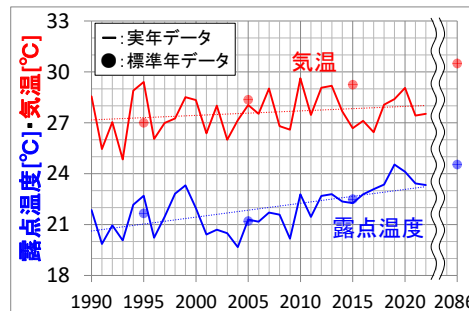


図 2 外気温, 露点(東京, 8月)

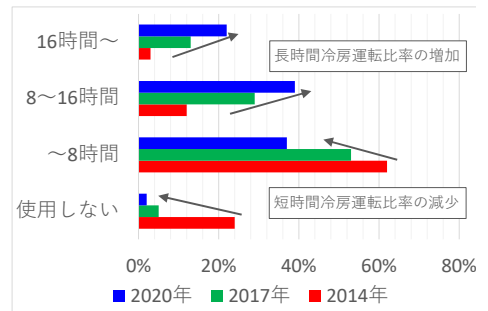


図 3 エアコン使用時間(夏季平日)

にあることが分かる。環境省(2017,2020)^{7),8)}や糸井川(2016)¹⁰⁾の冷房設定温度に関するアンケート調査によると約 2 割の人は冷房設定 25℃以下である。以上より、一定の割合で低温に冷房する居住者が存在し、過去に比べて夏季外気絶対湿度が上昇しており、冷房時間が長くなっているため、夏型結露が発生しやすくなっていると考えられる。実際、夏型結露の問題が増加しているという報告がある¹¹⁾。将来、更なる夏季絶対湿度上昇により、夏型結露がより発生しやすくなる可能性がある。

2.研究目的

本研究は、夏型結露に影響を与える非居住空間の温湿度形成要因を把握し、非居住空間における夏型結露防止の対策方法を提案することを最終目的としている。本報では、気密性能や換気方式、クロスの透湿抵抗が非居住空間(間仕切壁と天井断熱材下)の湿度環境に及ぼす影響の把握を目的として行った実験結果と外気高湿化による夏型結露発生リスク増大の検討結果について示す。

3.実験方法

3.1.実験建物

測定は、恒温恒湿室内に建てた木造小屋(床面積 9.9 m²、平屋、天井断熱、充填断熱(外壁)、剛床)で行った。本建物における平面図を図 4 に、断面図、断熱仕様を図 5 に示す。断熱性能は省エネ基準相当、相当隙間面積は約 5 cm²/m²(後述する間仕切壁上下部および室内の天井面に設けた貫通穴が無い場合。総相当隙間面積 51.2 cm²、隙間特性値 1.69)である。換気は第 1 種換気と第 3 種換気を切り替えることができる。給排気口やエアコン、測定対象とした間仕切壁、天井の位置は図 4 に示す通りである。

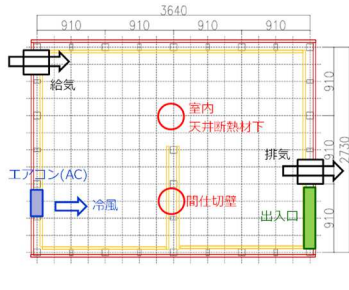


図 4 平面図

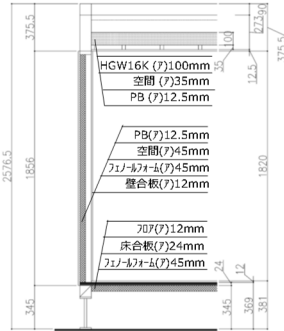


図 5 断面図, 断熱仕様

3.2. 実験条件

屋外は常時 30°C, 室内はエアコンを 24°C に設定し風量は微風モードで冷房運転を行った. 条件ごとの非居住空間の湿度上昇差を把握するため, 恒温恒湿室内を低湿状態(30%RH, 露点温度 10.5°C)から約 1 時間後に高湿状態(60%RH, 露点温度 21.4°C)になるようステップ上に変化させた.

表 1 に示す条件で実験した. 気密性能が悪い条件(No.1~3)として, 図 4 の中央に位置する区画の間仕切壁上下部に配線用貫通穴を想定し $\phi 25\text{mm}$ を一か所ずつ, 室内の天井面の測定位置付近に $\phi 25\text{mm}$ の一か所の貫通穴を設けた. なお, 間仕切壁上部の貫通穴は間仕切壁と天井断熱材下の間, 間仕切壁下部の貫通穴は間仕切壁と床下の間, 室内の天井面の貫通穴は室内と天井断熱材下の上に位置する. また, 気密性能が良い条件(No.4)では, 間仕切壁上下部および室内の天井面の貫通穴をテープで目貼りし閉じた. 全条件において, スイッチ類の隙間を想定し室内に面する間仕切壁垂直面(出入口側)の FL+1000mm に $\phi 25\text{mm}$ の一か所の貫通穴を設けた. 換気方式は第 1 種換気(No.1), 室内が正圧となるように第 1 種換気で給気量が多い場合(No.2), 室内が負圧となる第 3 種換気(No.3,4)の 3 条件とした. クロスの透湿抵抗の大きさを比較できるように, 石膏ボード室内側表面にシート(PE100 μ , 0.21 m² sPa/ng)を貼った場合(シートあり)と貼らない場合(シートなし)を全条件に対して実験した. なお, 一般ビニル壁紙が 0.016 m² sPa/ng¹²⁾であるため, 本実験で用いたシートは比較的透湿抵抗の高いクロス(例えば, クリーンルームで使用される防塵クロス等)の部類に該当する.

3.3. 実験機器および測定機器

窓用エアコン TIW-A180M(トヨタミ製)を用い冷房し, 中間形トイレファン VT-20(オーム電機製)を用い電圧調整器で換気風量を調整した. 屋外, 室内, 非居住空間(間仕切壁, 天井断熱材下, 床下, 小屋裏)の温湿度は T 型熱電対および湿度センサ CHS-UPS(TDK 製)を用い 1 分間隔で, それらの空間の差圧は SDP800(Sensirion 製)を用い 1 秒間隔で実験開始から 18 時間後まで測定した.

4. 実験結果

4.1., 4.2.では, 非居住空間の湿度環境に注目し, 気密性能, 換気方式, クロスの透湿抵抗の影響について分析する. 4.3.では, クロスと石膏ボードの間(以下, クロス裏面と記す)の湿度環境に注目して分析する.

4.1. 非居住空間における温湿度, 差圧

条件 No.1(シートなし)における温湿度の測定結果を図 6 に, 差圧の測定結果を図 7 に示す. 恒温恒湿室内が高湿になった後, 室内は冷房の影響で 24~25 °C 55%RH10~11g/kg', 屋外, 小屋裏は約 30°C60%RH15g/kg', 床下は地盤の影響を受け屋外より低く約 29°C, 間仕切壁は垂直面双方が室内に面するため室内と同程度の温度で

表 1 実験条件

条件	気密	換気方式(換気量)
No.1	貫通穴あり	第 1 種換気 (給排気量:30 m ³ /h)
No.2		第 1 種換気給気過多 (給気量:45 m ³ /h, 排気量 30 m ³ /h)
No.3	貫通穴なし	第 3 種換気 (排気量:30 m ³ /h)
No.4		

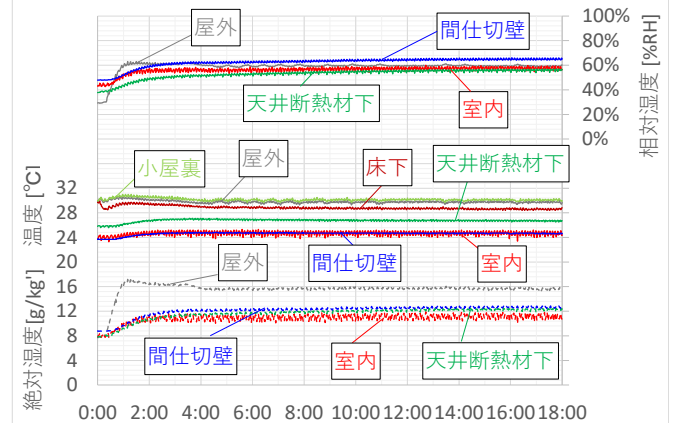


図 6 温湿度(条件 No.1(シートなし))

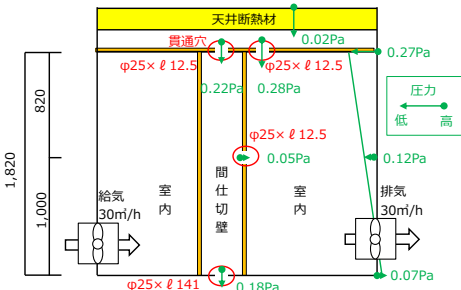


図 7 条件 No.1(シートなし)

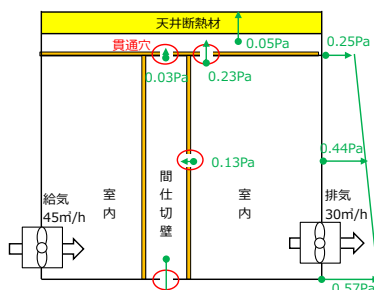


図 8 条件 No.2(シートなし)

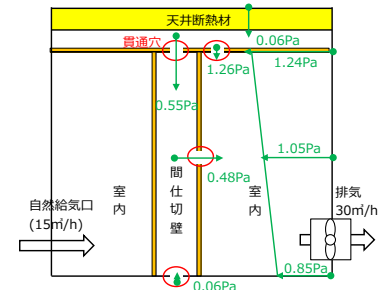


図 9 条件 No.3(シートなし)

差圧^{注1)}

あり、条件 No.1 では 65%RH13g/kg'程度、天井断熱材下は 27℃ 55%RH12g/kg'程度に達した。水平方向の差圧を FL+1000mm、垂直方向の差圧を境界部(天井面あるいは床面等)で評価した場合、機械換気による給排気量が同等であるため室内外差圧は 0Pa に近く、間仕切壁は天井断熱材下に比べて 0.22Pa 低く、床下に比べて 0.18Pa 高く、室内に比べて 0.05Pa 高い。そのため、天井断熱材下から間仕切壁に外気が侵入し、間仕切壁から床下や室内に空気が流れる。また、天井断熱材下は小屋裏に比べ 0.02Pa 低く、室内に比べ 0.28Pa 高い。そのため、小屋裏から天井断熱材下を経由して室内に空気が流れる。なお、既報¹³⁾で示した実住宅における夏季の差圧の測定結果に基づいた非居住空間の流れ性状についても同様の傾向であった。一方、給気量が多く室内が正圧になる条件 No.2(図 8)では、No.1 とは逆に室内から間仕切壁、天井断熱材下に空気が流れる。室内が負圧となる第 3 種換気の条件 No.3(図 9)では、非居住空間-室内間の差圧の向きは No.1 と同じだが、差圧は大きくなっている。

4.2.非居住空間における無次元絶対湿度比

非居住空間の絶対湿度は、屋外と室内の値に依存するため、式(1)に示す無次元絶対湿度比 χ により両者の影響を考慮する^{14)15)註2}。 χ が 0 に近いと非居住空間絶対湿度は室内に近く、1 に近いと屋外に近い。

$$\chi_a = (X_a - X_i)/(X_o - X_i) \quad (1)$$

間仕切壁、天井断熱材下における各条件の χ (30 分移動平均)を図 10、図 11 に示す。間仕切壁において、貫通穴が無い条件 No.4 では全く湿度が上昇しなかったことから、間仕切壁の湿度上昇を抑制するために気密化が重要であることが分かる。18 時間後の間仕切壁の χ は、クロス想定シートがない場合、条件 No.2(1 種換気給気過多)が 0.08, No.1(1 種換気)が 0.33, No.3(3 種換気)が 0.46 と、左記に示す順で小さくなった。これは室内が正圧になるほど外部から間仕切壁への湿流が抑制されたためと考えられ、間仕切壁の湿度環境において換気方式の影響が大きいことが分かる。クロス想定シートが有る条件の方が 18 時間後の間仕切壁の χ は高い傾向にある。例えば、条件 No.1(1 種換気)において、シートありが 0.63, シートなしが 0.33 と差が大きい。これは間仕切壁から室内への透湿が抑制された影響と考えられ、間仕切壁の湿度環境においてクロスの透湿抵抗の影響が大きいことが分かる。一方、天井断熱材下の χ は、間仕切壁と同様の傾向にあるが、No.2(1 種換気給気過多)では 0 となっている。これは、室内が正圧になることで、天井断熱材下には主に室内から空気が流れ屋外の高湿外気が入りにくくなっているためと考えられる。また、間仕切壁、天井断熱材下ともに、第 3 種換気、かつ、透湿抵抗が高いクロス想定シートが有る場合で最も χ は高くなった。

4.3.クロス裏面における湿度環境

クロスの透湿抵抗が高い場合に、クロス裏面に夏型結露が発生し、カビや黒ずみ等の原因となることがある。シートを貼った条件においてクロス裏面の湿度環境について検討した。条件 No.1 におけるクロス裏面(間仕切壁 AC 側)の温湿度の測定結果を図 12 に示す。クロス裏面の温度は AC 冷風の影響を受け、間仕切壁に比べ低くなる。クロス裏面の絶対湿度は間仕切壁とほぼ同等である。クロス裏面と間仕切壁の間に石膏ボードが存在するが、本実験で使用した石膏ボード 12.5mm の透湿抵抗は 0.0003 m² sPa/ng²とクロスに比べて極めて小さいことに起因する。結果として、クロス裏面の相対湿度は間仕切壁に比べ高く、結露発生の危険性が高い箇所であると考えられる。透湿抵抗の大きいクロスを採用する場合は、通常クロス使用時に比べ、4.2.で述べた気密、換気方式、更に設定室温等に留意した防露設計・施工を行う必要がある。

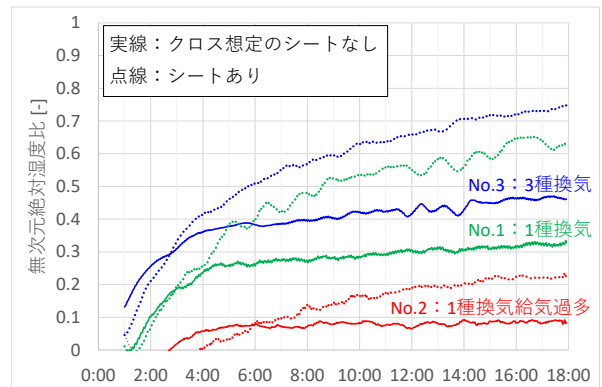


図 10 無次元絶対湿度比(間仕切壁)

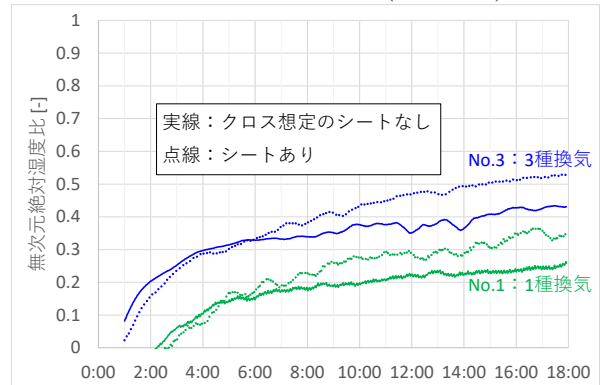


図 11 無次元絶対湿度比(天井断熱材下)

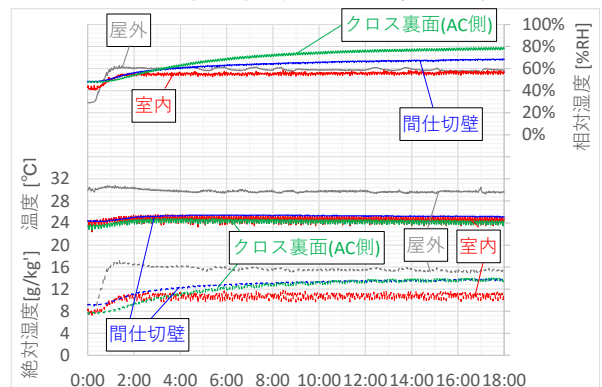


図 12 クロス裏面(間仕切壁 AC 側)の温湿度(条件 No.1)

5. 外気高湿化による夏型結露およびカビ発生リスクの増大

4章では、一定条件下において、気密、換気方式、クロスの透湿抵抗が非居住空間(間仕切壁、天井断熱材下)やクロス裏面の湿度環境に与える影響について検討した。その検討条件で扱った屋外 30°C60%RH は露点温度 21.4°C であり、2000 年頃の東京における夏季の外気条件に近い。そこで、本章では、近年や将来に発生しうる外気条件として露点温度 24°C(30°Cでは 70%RH 程度)を想定し、最も無次元絶対湿度比が高く夏型結露発生リスクが高いと考えられる第 3 種換気、かつ、透湿抵抗が高いクロスが有る条件を対象に、室温ごとの定常条件下での非居住空間(間仕切壁)の相対湿度を算出し外気高湿化に伴う結露発生リスクの増大について検討する。計算では、間仕切壁温度は室温と等しく、間仕切壁絶対湿度は外気と等しいと仮定し、カビ発生リスクは、カビ指数¹⁶⁾を用いた。

外気露点温度、室温ごとの間仕切壁相対湿度およびカビ指数の計算結果を図 13 に示す。外気露点温度が高いほど、室温が低いほど、間仕切壁相対湿度は高くなり、外気露点温度 24°C の場合に室温が 24°C 以下の場合には間仕切壁相対湿度は 100% となり結露が発生する。また、室温 26°C の場合に、外気露点温度 21.4°C ではカビ指数は 14 でありカビによる汚染開始までに 1~2 年程度¹⁷⁾を要するが、外気露点温度 24°C ではカビ指数が 100 を超えカビによる汚染開始まで 1~2 か月程度¹⁷⁾に短縮される試算結果となる。以上より、外気高湿化に伴い、夏型結露およびカビ発生リスクが高まることが示唆される。

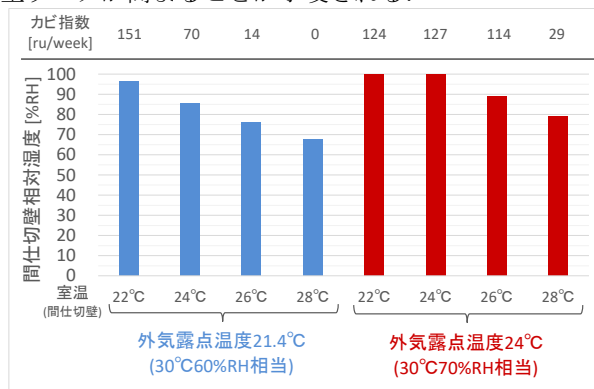


図 13 外気露点温度、室温ごとの間仕切壁相対湿度

6. まとめ

気密性能や換気方式、クロスの透湿抵抗が非居住空間の湿度環境に及ぼす影響の把握を目的とした実験、および外気高湿化による夏型結露発生リスク増大の検討を実施し、以下の結果が得られた。

- ・ 気密が確保された非居住空間では、外気侵入による高湿化の影響は見られなかった。一方、φ25mm という小さい穴でも間仕切壁上下部や天井面に存在すれば、その穴から外気が侵入することで非居住空間の湿度は上昇する。

- ・ 第 3 種換気の場合は建物内が負圧となり非居住空間への外気侵入が促進され、非居住空間の湿度は上昇しやすい。対して、1 種換気ではその影響が小さくなる。
- ・ クロスの透湿抵抗が大きい場合、非居住空間から室内への透湿が抑制され、非居住空間およびクロス裏面の湿度は高くなりやすい。
- ・ 将来、外気が更に高湿化した場合、非居住空間における夏型結露およびカビ発生リスクが高まる。

注1 実験で用いた窓用エアコンについて、コンプレッサーが稼働する際に、室内から窓用エアコンを経由して排気されるために室内は 2.5Pa 程度減圧される。およそ 2 分程度コンプレッサーが稼働し、4 分程度停止するという動きを繰り返す。なお、図 7~図 9 で示した差圧は、コンプレッサーが稼働していない時間帯の測定結果(平均値)である。

注2 Hens ら、松岡の手法を参考に、本報では非居住空間の湿度上昇の評価に用いた。なお、夏季を想定した条件であるため、無次元絶対湿度比について高湿側の屋外を 1、低湿側の室内を 0 とした。

記号一覧 χ :無次元絶対湿度比[-], X:絶対湿度[g/kg]

添え字 a:非居住空間各部の, i:室内の, o:屋外の

参考文献 1)齋藤宏昭ら：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第 519 号, pp.39-45, 1999.5. 2)住宅の省エネルギー基準の解説, 財団法人建築環境・省エネルギー機構, pp.203,310, 2009.5. 3)川田一貴ら：気象観測点周辺における土地被覆状況と気候変化の関係について, 日本建築学会環境系論文集第 84 巻第 756 号, pp.197-204, 2019.2. 4)有馬雄祐：建築熱負荷計算用の将来気象データ作成に関する研究, 東京大学博士論文, p.27, 2017.9. 5)気象庁:過去の気象データ<<https://www.data.jma.go.jp/gmd/risk/obsdl/index.php>>, (参照日 2023 年 2 月 8 日) 6)標準年 EA 気象データ, 株式会社気象データシステム 7)環境省：令和 2 年度家庭部門の CO2 排出実態統計調査 資料編 (確報値), pp.66,70, 令和 4 年 3 月 8)環境省：平成 29 年度 家庭部門の CO2 排出実態統計調査 資料編 (確報値), pp.66,70, 平成 31 年 3 月 9)環境省：平成 26 年度家庭部門における二酸化炭素排出構造詳細把握委託業務報告書, p.109, 平成 27 年 3 月 10)糸井川高穂：冷房を使用する理由と設定室温, 日本建築学会環境系論文集第 81 巻第 724 号, pp.545-551, 2016.6. 11)安立拓末ら：近年の温暖化に伴う夏型結露の増加と対策その 1, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.1201-1202, 2022.9. 12)住宅の省エネルギー基準の解説, 財団法人 建築環境・省エネルギー機構, p.141, 2002.6. 13)出端祐輔ら：戸建住宅における非居住空間の温湿度形成に関する基礎的研究—実験住宅における夏期の室内外差圧と空間流れの性状—, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.1439-1440, 2022.9. 14)Hugo Hens et al.: Heat and Moisture Response of Vented and Compact Cathedral Ceilings, A Test House Evaluation, ASHRAE Transactions: symposia, pp.837-850,1999 15)松岡 大介：温暖地における木造住宅の小屋裏湿度形成に関する研究, 京都大学博士論文, pp.30,35, 2016.3. 16)建物外皮における結露防止のガイドライン, 財団法人建築環境・省エネルギー機構, p.209, 2003.5. 17)倉島孝行：ワイヤレス予測カビ指数計 LR8520, 日置技報 VOL.37, p.1, 2016.

*1 積水ハウス 修士(工学)

*2 京都大学大学院工学研究科 教授・博士(工学)

*1 Sekisuihouse, M.Eng.

*2 Prof., Graduate School of Engineering Kyoto University, Dr.Eng.