壁体内通気層における防露性能の実態に関する研究

実験住宅における通気量の実態把握

STUDY ON THE MOISTURE CONDENSATION PROOF PERFORMANCE
IN THE VENTED AIR SPACE OF EXTERIOR WALLS

Field survey on the ventilation volume in the experimental house

梅野 徹也*, 銚井 修一**, 齋藤 宏昭***, 本間 義規****

*Tetsuya UMENO, Shuichi HOKOI, Hiroaki SAITO
and Yoshinori HONMA*

Most exterior walls of wooden residential buildings in Japan have vented air space between the exterior cladding and the insulation, which is designed to dehumidify the exterior walls by discharging humidity to the outside and taking outdoor air into the walls, with the purpose of decreasing the risk of condensation in exterior walls in winter. Several studies have been carried out on the vented air space, and the most effective thickness for dehumidification has been determined. However, most of these studies have only investigated the performance of vented air spaces under laboratory conditions, and the characteristics of vented air spaces in a field environment have not been clarified. The driving forces of the airflow in the vented air space are the buoyancy force due to the temperature difference between the outdoor air and the vented air space and the wind pressure. However, few studies have dealt with the influence of wind pressure. Since the velocity and the direction of the wind change irregularly, it is difficult to estimate the ventilation volume due to the wind. The objective of this study is to survey the ventilation volume through the vented air space and to investigate the effect of the driving force of the ventilation, which are buoyancy force and wind. Measurements have been carried out on the vented air space in an experimental wooden house that has several types of vented air spaces. The correlation between the ventilation volume and the driving force was discussed.

Keywords : *Vented Air Space, Wind, Temperature Difference, Residence, Exterior Wall, Ventilation Volume*

壁体内通気層, 外部風, 温度差, 住宅, 壁体, 通気量

1. はじめに

日本の在来木造住宅の外壁では、通気層工法が多く採用されている。通気層工法とは、外装材と断熱層の間に、外気へ通じる空気層（壁体内通気層）を設けることによって壁体内の湿気を排出し、壁体内の高湿化を抑制する工法である。壁体内通気層の湿気特性に関しては多くの研究^{1) 2) 3) 4) 5)}がなされており、壁体内の湿気排出に有効な通気層厚さなどの知見が得られている。また、通気層の伝熱特性についての計算法も確立されている^{6) 7) 8)}。しかしながら、実住宅において壁体内通気層の排湿効果を検討した事例^{9) 10)}は少なく、特に通気層内を流れる通気量の実態に関する検討は十分とは言えない。

壁体内通気層を空気が流れるための駆動力は、外気と通気層の温度差による浮力と外部風による風圧力であるが、外部風と通気量の

関係性についての検討例は少ない^{11) 12)}。赤坂ら⁸⁾による通気層の伝熱計算法においても、通気量の算定には温度差による浮力のみを対象としている。実住宅では外部風の風圧力によって通気量に変化するだけでなく、小屋裏を介して通気層が互いに影響することにより、例えば通気方向が下向きになるなど、複雑な状況となっていることも予想される¹³⁾ことから、外部風の風圧力が働く実住宅において通気性状を確認する必要があると考えられる。

本研究は、壁体内通気層の通気量の実態を把握し、外気条件が通気量に及ぼす影響を明らかにすることを目的としている。その第一段階として、実験住宅において通気層の通気量を測定した結果を示し、外気と通気層の温度差、外部風向・風速が通気量に及ぼす影響を検討した結果について報告する。

* 積水ハウス 工修

** 京都大学大学院工学研究科建築学専攻 教授・工博

*** 足利工業大学 准教授・工博

**** 岩手県立大学 教授・工博

Institute of Research and Technology, Sekisuihouse Co., Ltd., M. Eng.

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

Assoc. Prof., Faculty of Engineering, Ashikaga Institute of Technology, Dr. Eng.

Prof., Morioka Junior College, Iwate Prefectural University, Dr. Eng.

2. 壁体内通気層

通気層工法の一例として、本研究で対象とする外壁の構成を図1、図2に示す。木造軸組み工法で、断熱材としてグラスウールを柱間に充填し、外装材と断熱材の間に通気層を設けた場合である。通気層と断熱材の間には防風層が設置される。防風層としては透湿防水シートその他、近年は図1のように構造用合板を用いることが多い。壁合板に縦胴縁を貼り、壁体内通気層を確保する。通気層の厚さは18mmとすることが多い。本研究では18mmを含めて3通りの通気層厚さを設定した。基礎水切りと外壁の隙間が通気層下端の開口であり、通気層上端は軒裏を介して外気または小屋裏に開放されている(図2)。

壁体内通気層における通気の駆動力は、外気と通気層の温度差による浮力と、外部風による風圧力である。このうち、浮力による通気については(1)式により通気量が算出される。

Q = \bar{v} A = \alpha A \sqrt{\frac{2}{\rho} \Delta P} = \alpha A \sqrt{\frac{2gh}{\rho} \Delta \rho} \tag{1}

ここで、Qは通気量(m³/s)、\bar{v}は平均風速(m/s)、Aは通気層断面積(m²)、\alphaは流量係数(N.D.)、\rhoは空気密度(kg/m³)、Pは圧力差(Pa)、gは重力加速度(m/s²)、hは通気層高さ(m)である。

外部風による通気は、通気層上下端にかかる主に風圧力の差により決定されるが、風圧力の分布には住宅形状など多くの要因が関係しており、その実態は把握されていない。

3. 測定の概要

壁体内通気層における通気の実態把握を目的として、実験住宅における通気量の長期測定を実施した。測定の概要を以下に示す。

3.1. 実験住宅の概要

測定は、岩手県立大学敷地内に建設された岩手県立大学盛岡短期大学の建築環境工学実験棟にて行った。実験住宅の概要を表1、図3に示す。西向き片流れ屋根の総2階建てで、周囲に隣接する建物はなく、開けた敷地に建っている。

図1 外壁の材料構成(水平断面)

図2 通気層上下端の納まり

図3 実験住宅の平面図・立面図

表1 実験住宅の概要

建設地	岩手県滝沢村(岩手県立大学敷地内)
工法	木造総2階建て
延床面積	33.12㎡ (3.64×4.55m)
屋根	片流れ (3寸勾配)
断熱仕様	外壁: 高性能GW16K 100mm 天井: 高性能GW16K 200mm 基礎: XPS3種b 100mm(外張り)
通気層厚さ	東西面: 9mm, 18mm, 27mmの3仕様、南北面: 18mm

図1、図2に示したとおり、壁合板と透湿防水シートを防風層とする一般的な通気層工法の外壁を有する。北側は天井断熱、南側は屋根断熱であるため、小屋裏換気方式が異なっている。ただし通気層の上端は軒裏に開放されており、軒裏空間を介して小屋裏または屋根通気層につながっている。通気層の厚さは9mm、18mm、27mmの3仕様を図4に示すとおり配置した。

図5のように、通気胴縁の厚さを変えて外装材の位置を変えることにより通気層厚さを調整した。窓がなく1、2階連続した壁を対象とし、天井断熱に通ずる厚さ9mm、18mmの通気層を「天井9mm」、「天井18mm」、屋根断熱に通ずる厚さ18mm、27mmの通気層を「屋根18mm」、「屋根27mm」として、通気量を比較した。

図4 通気層厚さの配置

図5 胴縁による通気層厚さの調整

3.2. 通気量測定

各通気層において、通気層内風速、温度、外部風向・風速、外気温を測定した。通気層内風速は、無指向性の風速風温プローブとアナログ変換器(QB-10 と MONITOR-N、いずれも(株)Tohnic 製、精度 $\pm 5\%$ FS)、通気層の温度はT型熱電対により測定した。外部風向・風速と外気温の測定には、気象計測器(Vantage Pro2, Davis 社製)を用いた。気象計測器の精度は、風速 1m/s、温度 $\pm 0.5^\circ\text{C}$ である。西面では通気層上下端の圧力差を測定し、通気層内の通気方向の判定に用いた。風向・風速と圧力差は1分間隔、温度は10分間隔でそれぞれ瞬時値を記録した。測定期間は、2010年3月から2011年5月である。

通気量の算定において、通気層内の流れは上下方向の層流とし、断面方向の風速分布を図6のとおり2次曲線と想定した¹⁴⁾。通気層内風速の測定値を中心風速とみなすと、図6の風速分布を積分した(2)式より外壁幅1mあたりの通気量が算定される。

$$Q = \frac{2}{3} v d \quad (2)$$

ここで Q は通気量(m^3/s)、 v は通気層厚さ中心の風速 (m/s)、 d は通気層厚さ(m) である。

図6 通気層内風速分布の想定

3.3. 通気方向の判定

通気層上下端の圧力差測定の概要を図7に示す。差圧計はバラトロン((株)MKS 社製、精度 $\pm 0.1\text{Pa}$)を用いた。通気層内の静圧を測定できるよう、差圧計のチューブ先端を壁合板の通気層側面に揃えて水平向きに設置し、通気方向に直交させた(図8)。通気層の測定点の高さが異なることから、差圧計で測定される差圧計指示圧力差は、チューブ内の浮力を考慮して(3)式で表される。

$$\Delta P_m = [SP_{v1} - \rho_{r1}gh_1] - [SP_{v2} + \rho_{r2}gh_2] \quad (3)$$

ここで、 ΔP_m は差圧計指示圧力差(Pa)、 SP は静圧(Pa)、 ρ は空気密度(kg/m^3)、 h は高さ(m)、添え字は図7の通りである。

通気層下端の測定点(v1)と上端の測定点(v2)の全圧差は、通気層内を空気が流れる際の圧力損失であるから、この圧力損失の正負によって通気層内空気の流れ方向を判定できる。上向きの流れを正とすると、圧力損失 ΔP_v は差圧系指示圧力差 ΔP_m を用いて(4)式で表される。次節以降、西面外壁の通気層内の流れ方向については、上向きの通気を正、下向きを負と表す。

$$\Delta P_v = \frac{\rho_{v1}}{2} v_1^2 - \frac{\rho_{v2}}{2} v_2^2 + \Delta P_m + \rho_{r1}gh_1 + \rho_{r2}gh_2 - \rho_v gh_0 \quad (4)$$

ここで、 ΔP_v は圧力損失(Pa)、 v は風速(m/s)、添え字 v は通気層測定点 v1 と v2 の平均である。

図7 通気層内上下圧力差測定の概要

図8 差圧計チューブの設置状況 (2F 通気層測定点 v2)

4. 測定結果

4.1. 通気層内風速

図9は2010年5月のある2日間における西面通気層内風速および外部風速の測定結果である。通気層内風速はおよそ0～1m/sで変動している。外部風速に応じて、日中の風速が大きく、夜間に風速が小さい傾向が見られる。外部風速と通気層風速の10分間移動平均値の相関を見ると、およそ比例関係にあるが、ばらつきは大きい(図10)。通気層内風速に対し外部風が大きな影響を及ぼしているものの、温度差による浮力、外部風向の影響も小さくないことが分かる。なお、この2日間における通気層と外気の温度差は-3～10℃、外部風向は南風が75%近くを占めていた。

図9 通気層内風速測定結果 (西面)

図10 通気層内風速と外部風速の相関 (10分間移動平均)

全測定期間（2010年3月18日～2011年5月22日）における通気層内風速の平均値を表2に、頻度分布を図11に示す。いずれの通気層も80%以上の時間帯において風速は0.4m/s以下である。西面では通気層厚さが薄い「天井9mm」の平均風速が「天井18mm」より大きい、東面では「屋根18mm」が「屋根27mm」より大きいなど、壁の方位や小屋裏換気方式の違いによって、壁体内通気性状は異なる。

表2 通気層内平均風速 [m/s]

	天井9mm	天井18mm	屋根18mm	屋根27mm
西面	0.209	0.105	0.166	0.26
東面	0.066	0.190	0.253	0.215

図11 風速の頻度分布 (上: 西面、下: 東面)

4.2. 通気量

通気層内風速から換算した通気量の頻度分布を図12に示す。西面では、「天井9mm」と「天井18mm」の通気量がほぼ等しく、「屋根18mm」、「屋根27mm」の順で通気量が多い。東面では、「天井9mm」の通気量が少なく、「天井18mm」、「屋根18mm」、「屋根27mm」の順で通気量が多い。概ね通気層厚さに応じて通気量が多くなっているが、壁の方位や小屋裏換気方式の違いによって通気量が異なる。なお、通気量の平均値は換気回数23～117[1/h]に相当する。

図12 通気量の頻度分布（上：西面、下：東面）

4.3. 通気方向

通気層上下端の圧力差より通気方向を判定し、下向きの通気を負とした西面の風速の頻度分布を図13に示す。「屋根18mm」の圧力差測定が欠測であったため残り3つの通気層について示す。16～36%の時間帯において下向きの通気が生じている。上向きの通気と比較して下向き通気の風速は小さいものの、壁体内通気層では一定の時間、下向きに通気されていることが分かる。

5. 温度差による通気

通気の2つの駆動力のうち、外気と通気層の温度差による通気について検討する。外部風による通気の影響を小さくするため、通気層内風速の測定値のうち、外部風速がほぼ0 m/s (0.4m/s未満)の時間帯を抽出した。また、通気層の温度には1階と2階のそれぞれ高さ中心における測定値の平均値を用いた。図14に温度差と壁体内通気量の相関を示す。「屋根18mm」を除く西面では、通気の上方向（上向きを正）も表現している。

図13 上下方向を考慮した風速の頻度分布（西面）

図14 通気層内風速と温度差の相関（左:西面、右:東面）

図14より、通気層と外気の温度差が大きいほど通気層内風速も大きくなっている。概ね温度差の1/2乗に比例していることより、温度差による通気層内風速は(5)式で表される。

$$v = C_1 \Delta T^{0.5} \quad (5)$$

ここで v は通気層厚さ中心の風速 (m/s)、 C_1 は定数(m/(sK^{0.5}))、 ΔT は通気層と外気の温度差(K)である。

各通気層における比例定数 C_1 を表3に示す。同じ通気層厚さでも方位や小屋裏換気方式によって比例定数は異なっている。また、上

下通気方向を考慮した西面では、温度差が正であっても下向きの通気が生じている。これらは、外部風が小さく温度差による通気が支配的な状況でも、小屋裏や他の通気層との連続性により通気量やその方向が影響を受けているためと推測される。

表3 温度差の1/2乗に対する通気層内風速の比例定数C_i

	天井 9mm	天井 18mm	屋根 18mm	屋根 27mm
西面 (上向き)	0.097	0.046	0.086	0.156
東面	0.044	0.114	0.188	0.144

6. 外部風による通気

外部風圧力による通気について検討する。温度差による通気の影響を小さくするため、通気層と外気の温度差が0.5(K)未満である時間帯の測定値を抽出した。

抽出した時間帯における外部風の風向頻度、風向別の外部風平均風速を図15に示す。約63%の時間において南南東～南南西の南寄りの風が吹いている。北寄りの風が次に多く、西風と東風は非常に少なかった。平均風速も南寄りの風が強く、東風は弱い傾向が見られる。

図15 外部風向の頻度（左）と平均風速（右）

西面の「天井 9mm」について、通気層内風速と外部風速の相関を、16方位の外部風向別に図16に示す。風速はそれぞれ、1分間隔の瞬時値を用いた。実験住宅を中心として、外部風が当たる方向にそれぞれの風向別の図を配置している。

西面の通気層では、西風（図の左）のとき、通気層内風速と外部風速に正の相関が見られる。東風（図の右）では、通気層内風速はほぼ0m/sであるが、外部風速に対し負の相関がうかがえる。外部風圧力によって、外部風に対し風上側にある通気層では上向きの通気、風下側にある通気層では下向きの通気が生じている。

一方、西面の通気層に平行に風が吹く南風および北風のとき、外部風速が大きくなるほど通気層内風速が大きくなっているが、通気方向は上向きと下向きともに生じている。通気層内風速のばらつきは大きく、0m/sの結果も多く見られる。外部風に対し平行な面にある通気層では、通気方向が変動していることが分かる。

西面の他の通気層においても、外部風に対し通気層内風速は同様の変動を示した。東壁「天井 18mm」について通気層内風速と外部風速の相関を図17に示す。東面では通気方向を判定できていないが、西面と同様、通気層内風速は概ね外部風速に比例していることが分かる。

通気層内風速と外部風速の測定結果を最小2乗法により近似し、その関係を(6)式で表すと、比例定数C₂は外部風向別に図18のようになる。ただしここでは、西面においても通気方向は考慮していない。

$$v = C_2 v_o \tag{6}$$

ここでvは通気層厚さ中心の風速（m/s）、C₂は定数(-)、v_oは外部風速(m/s)である。

図18より、外部風によって生じる通気層内風速は、通気層が風上にある場合に外部風速の0.07～0.24倍と大きく、通気層が風下にある場合は外部風速の0.008～0.1倍と小さいことが分かる。

図18 外部風速に対する通気層内風速の比例定数C₂(上:西面、下:東面)

7. まとめ

壁体内通気層における通気量の実態を把握するため、実験住宅における測定を行い、通気の駆動力である温度差および外部風と通気量の関係について検討した。総2階建て片流れ屋根の住宅における壁体内通気について以下の通気性状を確認した。

- (1) 通気層内の風速は概ね1m/s以下であり、0.4m/s未満の風速が80%近くを占めている。
- (2) 通気方向が下向きになる時間が16～36%近くある。
- (3) 通気層厚さだけでなく、方位や小屋裏換気方式によって通気量は大きく異なる。
- (4) 外部風速が小さい時、通気量は概ね外気と通気層の温度差の1/2乗に比例する。各通気層の比例定数の違いは、通気層厚さだけでなく、方位や小屋裏との連続性などに影響されている。
- (5) 温度差が小さい時、通気層内風速は外部風速に比例する傾向がある。
- (6) 外部風により、風上側の通気層では主に上向き、風下側では下向きの通気が生じる。外部風に平行な通気層では、上向きと下向きの両方の通気を生じている。

図 1-6 外部風速と通気層内風速の相関（外部風向別、西面「天井 9mm」）

図 1-7 外部風速と通気層内風速の相関（外部風向別、東面「天井 18mm」）

謝辞

実験住宅の実測利用は岩手県立大学盛岡短期大学の協力を受けた。本研究は自立循環型住宅開発委員会第3フェーズの一環として実施した。また内容の一部は平成23年度国土交通省住宅・建築関連先端技術開発助成事業として実施したものである。

参考文献

- 1) 水谷章夫, 大澤徹夫, 宮野秋彦 : 垂直通気層の放湿効果におよぼす温度差の影響 通気層による構造体の防湿効果に関する研究 その3, 日本建築学会計画系論文報告集 第389号, pp.37-45, 1988.7.
- 2) 鎌田紀彦, 鈴木大隆, 廣田誠一 : 寒冷地における繊維系断熱材を充填した木造壁体の内部結露の防止構法に関する実験的研究, 日本建築学会計画系論文集 第513号, pp.39-45, 1998.11.
- 3) 鈴木大隆, 廣田誠一, 福島明 : シート状防風材を用いた木造断熱壁における通気層空隙の確保に関する実験的研究, 日本建築学会計画系論文集 第480号, pp.123-128, 1996.2.
- 4) 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集, pp.89-92, 1999.6.
- 5) 石田卓, 須貝高, 尾崎明仁, 蔵重裕行 : 断熱壁体の内部結露とその防止に関する研究 その1 夏季・冬季の屋外比較実験, 日本建築学会大会学術講演梗概集 D-2, pp.337-338, 1995.8
- 6) 角舎輝典, 青山三男, 本間宏 : 密度差換気のなされる中空壁体の伝熱

特性に関する研究 その1 壁の簡易熱流計算法について, 日本建築学会大会学術講演梗概集, D, pp.723-724, 1989.10.

- 7) 石原修, 酒井孝司, 田島美沙子, 上森清美 : 外張断熱通気工法における壁体内通気層の熱・通気特性に関する研究, 日本建築学会計画系論文集 第502号, pp.29-36, 1997.12.
- 8) 赤坂裕, 武田和大 : 通気層を有する外壁, 屋根の遮熱・断熱効果の計算法, 日本建築学会環境系論文集 第595号, pp.33-40, 2005.9.
- 9) 須釜洋年, 土屋喬雄, 永峰章 : 外壁通気層の防湿防暑効果に関する研究, 日本建築学会大会学術講演梗概集, D, pp.1431-1432, 1989.10.
- 10) 小野公平, 須貝高, 渡辺俊行, 龍有二, 尾崎明仁, 赤司泰義, 蔵重裕行, 宮副泰彰, 加藤誠, 田中崇浩 : 高断熱壁体の夏季・冬季の湿害防止に関する研究 その1 通気層の効果, 日本建築学会大会学術講演梗概集 D-2, pp.285-286, 1997.9.
- 11) 佐々木隆, 橋本直樹, 荒谷登 : 日射と風力変動による通気性状, 断熱壁体通気層の除湿換気動力源に関する研究 その2, 日本建築学会大会学術講演梗概集, D, pp.1105-1106, 1987.10.
- 12) 橋本直樹, 佐々木隆, 荒谷登 : 通気層の内部構造を考慮した風力換気性状の検討, 断熱壁体通気層の除湿換気動力源に関する研究 その3, 日本建築学会大会学術講演梗概集, D, pp.1107-1108, 1987.10.
- 13) 梅野徹也, 鉦井修一 : 壁体内通気層の通気量に及ぼす外部風の影響に関する検討, 日本建築学会大会学術講演梗概集, D-2, pp.817-818 2010.9.
- 14) 鉦井修一, 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, p.152, 2002.3.

(2013年5月10日原稿受理, 2013年9月4日採用決定)