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(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

STUDY ON HYGROTHERMAL BEHAVIOR OF WALL ASSEMBLY WITH VENTED CAVITY IN
CONSIDERATION OF DRIVING RAIN (PART 1): IMPACT OF RAIN PENETRATION AND WATER
ABSORPTION OF EXTERIOR SYSTEM ON HYGROTHERMAL BEHAVIOR WITHIN WALL ASSEMBLY

長村 貞治^{*1}, 齋藤 宏昭^{*2}, 中島 正夫^{*3}

Sadaharu OSAMURA, Hiroaki SAITO and Masao NAKAJIMA

Although it is said that moisture condensation at the vapor retarder doesn't occur in wall assemblies with vented cavity, investigations by authors suggested that rain penetration and water absorption at outside finishings affected the moisture condensation.

This research is focused on unraveling of mechanism of the internal condensation experimentally. Quantity of rain penetration from siding joints was quantified by water spray tests, and water absorptivity of the deteriorated siding was confirmed. In the field measurement, the internal condensation was demonstrated by intermittent injection of rain water into the vented cavity, and the drying performance of different ventilation configurations was compared.

Keywords : *Concealed condensation in summer season, Vented cavity, Rain penetration, Absorption and desorption, Field survey, Siding*

夏型結露, 通気層, 雨水浸入, 吸放湿, 実測, サイディング

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体内からの湿気を速やかに排出する構法であり、耐久性向上を目的として多くの木造住宅で採用されている。近年、狭小地住宅やデザインを重視した住宅の増加とともに、外装面への雨掛かり負荷の高い軒の出が無い住宅も増加し雨水浸入のリスクが高まっている¹⁾。外壁通気層への雨水浸入については、木村、Sahal、Lacasseらの報告³⁾⁴⁾⁵⁾にあるよう外装材裏面への雨水浸入を完全に防止することは困難であり、欧米においては *drying capacity*⁶⁾に関する研究やASHRAE Standard 160⁷⁾など、外皮内への雨水浸入を前提とした評価方法が検討されている。

一方で、外壁通気構法において温度上昇に伴う多孔質材の吸放湿によって引き起こされる壁体内結露については既報等⁸⁾にて報告されており、渡辺、蔵重⁹⁾¹⁰⁾らはこの問題について数値計算を実施し、夏季暑暑地域における壁体内結露の発生を報告している。梅野¹¹⁾らは構造体内合板の屋外側で生じる結露メカニズムについて、雨水に

よる通気層の高湿化が原因と推定している。また、国土技術政策総合研究所資料¹²⁾では、築12年物件における雨水浸入・通気阻害における外壁下地の水蒸気飽和・構造体腐朽を報告している。

筆者らの壁体内結露の事例調査においては、多くの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ることから、雨水浸入の他にサイディング表面塗膜の経年劣化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内結露は、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られない。

さらに、これまで在来軸組構法においては、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。しかし近年、施工性や気密性

^{*1} (株)ミサワホーム総合研究所

^{*2} 足利大学工学部創生工学科建築・土木分野
教授・博士(工学)

^{*3} 関東学院大学建築・環境学部 教授・博士(工学)

Researcher, Misawa Homes Institute of Research and Development Co., Ltd.
Prof. Faculty of Engineering, Division of Architecture and Civil Engineering,
Ashikaga University, Dr.Eng.

Prof. Dept. of Architecture and Environment, Kanto Gakuin University, Dr.Eng.

向上の為に、壁面と床面に構造用面材を用いる場合や、高断熱化による断熱材充填量の増加により、これまでのような壁内気流が見込めなく、外壁通気層による排湿性能確保の重要性が高まっている。

そこで、本研究では、通気構法の長期的な性能を検証する目的で、サイディングからの雨水浸入や、経年劣化によるサイディング基材吸水の影響を確認した上で、通気層へ断続的に雨水浸入が生じた際の外壁内における温湿度及び含水率を実験棟で測定する。これらの結果から、不具合事例で散見される外壁内部への水分蓄積のメカニズムを把握するとともに、異なる仕様の通気層を比較し、各仕様の乾燥性能に関する検証データを収集し通気層への雨水浸入と外装材吸水が壁内湿度へ及ぼす影響について考察した。

2. 事例に基づく発生原因の推測

図1は築12年の住宅にて発生した壁体内結露事例である。壁体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。

Fig.1 Example for moisture accumulation in stud cavity

- 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。
- 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が、透湿防水シートの端部が一部反ることにより通気阻害を引き起こしていた。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。
- 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。
- 結露の発生箇所は東面や西面の壁体内であり、前方に建築物は無く日当たりの良い立地であった。

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。

- 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。
- 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。
- 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、一部透湿防水シートの反り等により通気層が閉塞され場合、多量の水蒸気が滞留し外側合板の含水率が上昇する。

- 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し、低温の防湿フィルム表面にて結露する。
- 断熱材の含水率も上昇し壁体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。

本研究では上記推測の妥当性を確認する為、サイディングサネ形状に起因する雨水浸入量の測定と、サイディング基材の吸水量について確認試験を行うとともに、屋外実験棟にて雨水浸入及びサイディング吸水量が多い状況における壁体内の水分挙動を検証した。

3. サイディング接合部からの雨水浸入量の測定

サイディングを用いた通気構法では、外装材は1次防水層となり、強風時にあいじゃくり等から浸入した雨水が2次防水層となる透湿防水シート表面を流れ落ち土台水切り等から外部へ排出する。しかし、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国内の基準は無い。

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。そこで本項では、代表的なサイディングを用いた外装システムに対し、JIS A1517 圧力箱方式による建具の水密性試験¹²⁾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。

3.1 実験概要

雨水浸入経路について、強風時は図2①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、図2②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付け部から浸入する。外壁面で想定される雨水浸入部位は図3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付け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4）。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5に示す。

Fig.2 Water leakage path at shiplap joint

Fig.3 Cross joint on exterior surface(Part○)

Fig.6 Test specimen of Case A
(Left: Frontside view, Right: Backside view)

Fig.7 Test specimen of Case B
(Left: Frontside view, Right: Backside view)

Fig.8 Test specimen of Case C・D
(Left: Frontside view, Right: Backside view)

3.2 実験条件

一般的な水密試験では高圧力（150～350Pa）、高水量（40ℓ/min・㎡）の負荷で実施するが、実際の住宅では、このような条件の発生頻度は低い。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1に示す。圧力条件は脈動圧とせず、一定圧とした。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為、表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6～8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。

$$J_p = \frac{m_w}{t} \quad \dots \quad (1)$$

$$f = \frac{J_p}{R_w} \times 100 \quad \dots \quad (2)$$

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)

Table1 Experiment conditions for water spray test

Pressure difference (Pa)	0,	15,	100,	150,	250
[Wind speed (m/s)]	[0],	[5],	[12.9],	[15.8],	[20.4]
Quantity of water spray (ℓ/min・㎡)	0.2, 0.5, 0.8				
[Vertical flux of spraying water (mm/hr)]	[13], [30], [50]				
Duration of water spray test (minutes)	11				
Pressurising	Constant				

Table2 Configuration of specimen

Case	Direction	Shi lap joint	Installation method
A	Horizontal siding	Two-way shi lap joints (top and bottom)	Panel clip
B	Vertical siding	Two-way shi lap joints (right and left)	Panel clip
C	Horizontal siding	Four-way shi lap joints	Panel clip + Vertical joint clip
D	Horizontal siding	Four-way shi lap joints	Panel clip

3.3 風圧力と浸入量・浸入率の関係

実験結果を図9～10、表3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2②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到雨水が集積された。さらに強風の20.4m/s（250Pa）時には、図2①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から流れ出し、浸入量が大幅に増加した。

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付け部から通気層内へ流れ出した（図11左）。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為、あいじゃくり部に滞留する雨水が仕様Aより少ない事や、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為と思われる。

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11右）が横目地のシーリ

Table3 Results of water penetration test

Quantity of water spray (L/min · m ²)	Pressure difference (Pa)	Wind speed (m/s)	Case A				Case B				Case C						Case D					
			m _w (g)	Jp (g/s)	f (%)	Observ ation※	m _w (g)	Jp (g/s)	f (%)	Obser vation ※	m _w (g)			Jp (g/s)	f (%)	Observ ation ※	m _w (g)			Jp (g/s)	f (%)	Observ ation※
											Bottom	Centre	Total				Bottom	Centr e	Total			
0.2	0	0	0	0.00	0.00	-	0	0.00	0.00	-	1	0	1	0.00	0.02	F	788	0	788	1.19	11.31	F
	15	5	0	0.00	0.00	-	0	0.00	0.00	-	8	0	8	0.01	0.11	F	812	0	812	1.23	11.65	F
	100	12.9	0	0.00	0.00	-	6	0.01	0.08	F	888	0	888	1.35	12.74	F	1172	5	1177	1.78	16.90	S
	150	15.8	0	0.00	0.00	-	23	0.03	0.34	F	1095	127	1222	1.85	17.54	S	1420	77	1497	2.27	21.49	S
	250	20.4	2245	3.40	32.22	F	11	0.02	0.15	F	1385	228	1612	2.44	23.14	S	2047	21	2068	3.13	29.69	S
0.5	0	0	0	0.00	0.00	-	8	0.01	0.04	F	129	0	129	0.20	0.74	F	1200	0	1200	1.82	6.91	F
	15	5	0	0.00	0.00	-	20	0.03	0.12	F	222	0	222	0.34	1.28	F	1408	0	1408	2.13	8.11	F
	100	12.9	26	0.04	0.15	F	96	0.15	0.55	F	798	0	798	1.21	4.59	F	1939	1	1941	2.94	11.18	S
	150	15.8	29	0.04	0.20	F	75	0.11	0.43	F	885	44	928	1.41	5.35	S	2397	74	2472	3.74	14.23	S
	250	20.4	4805	7.28	27.67	F	36	0.05	0.21	F	2754	410	3164	4.79	18.22	S	2595	772	3368	5.10	19.39	S
0.8	0	0	7	0.01	0.02	F	13	0.02	0.05	F	6	0	6	0.01	0.02	F	1385	0	1385	2.10	4.80	F
	15	5	12	0.02	0.04	F	42	0.06	0.15	F	106	0	106	0.16	0.37	F	1594	0	1594	2.42	5.52	F
	100	12.9	27	0.04	0.09	F	165	0.25	0.57	F	911	1	912	1.38	3.16	F	1922	275	2197	3.33	7.61	S
	150	15.8	46	0.07	0.20	F	183	0.28	0.63	F	1353	163	1516	2.30	5.25	S	2250	831	3082	4.67	10.67	S
	250	20.4	4859	7.36	16.83	F	106	0.16	0.37	F	2880	759	3639	5.51	12.60	S	3401	928	4329	6.56	14.99	S

※F: Flow-down、S: Splash

Fig.9 Relation between water penetration rate and velocity in case of two-way shiplap joints

Fig.10 Relation between water penetration rate and velocity in case of four-way shiplap joints

Fig.11 Leakage path

(Left; two-way shiplap joints ,Right; four-way shiplap joints)

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 11 右○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。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と思われる。

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共に、浸入量も増加したが、浸入率は低下する傾向であった (図 9・10)。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。

図 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⁹⁾が多いのは、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為、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。

4. サイディング表面からの吸水試験

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¹³⁾。図 1 の事例では、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が吸水する水分が通気層や壁内湿度に影響を及ぼすことが考えられる。そこで、本項では、塗膜劣化度が異なるサイディングの吸水量を測定した。

4.1 実験概要

金澤¹⁴⁾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、本項では、事例（図 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 4 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。吸水面以外は、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 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。

Table4 List of test samples

Case	Composition	Manufacturing method	Exposure years	Thickness (mm)	Azimuth orientation	Observation
A	Fiber mixture perlite cement board	Sheet forming method	12	12	West	Chalking
B					North	—

Fig.12 Immersion method

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下記(3)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、下記(4)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。

$$q = \frac{m_h - m_1}{A} \quad \dots (3)$$

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)

$$q = a\sqrt{t} \quad \dots (4)$$

a : 吸水速度係数 ($\text{kg}/\text{m}^2 \cdot \text{s}^{1/2}$)

4.2 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 5、図 13 に示す。白亜化の生じている仕様 A の吸水速度係数は $0.021 \text{ kg}/\text{m}^2 \cdot \text{s}^{1/2}$ 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 $10 \text{ mm}/\text{hr}$ 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。

Table5 Quantity of absorption water(kg/m^2) and water absorption coefficient($\text{kg}/\text{m}^2 \cdot \text{s}^{1/2}$)

Case	Time ($\sqrt{\text{sec}}$)								Water absorption coefficient
	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

Fig.13 Time change of absorption water

5. 実験棟による雨水浸入と外装材吸水が壁内湿度に及ぼす影響

前節までの結果より、サイディングを用いた通気構法では、サネやあいじゃくり交点からの雨水浸入や塗膜の経年劣化によるサイディングの吸水が生じるリスクが示唆された。本項においては、事例（図 1）の事象を再現し、壁体内における水分蓄積を検証する為、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、通気層への雨水浸入を再現した実験棟を建設し、壁体内の水分挙動を測定・考察した。

5.1 実験棟概要

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。実験棟の外観を図 14 に概要を表 6 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。

通気滞留が予想される横胴縁や通気経路が確保される金具留めを含め、各仕様による排湿性能を確認する為、外壁下地仕様は 910mm スパン毎に 3 種類の異なる仕様とした。各種仕様を表 7 に示す。仕様①は横胴縁（通気層厚さ：12mm）、仕様②を金具留め（通気層厚さ：6mm）、仕様③を金具留め（通気層厚さ：15mm）とした。また、東面においては、透湿防水シートの反り等により通気が閉塞された事を想定し、仕様②の通気層上端を塞いだ仕様②'を追加した。なお、事例（図 1）は仕様②、②'が該当する。各種仕様の境界は湿度が行き来しない様、通気層に縦胴縁を 2 本配置した。

通気層下端は土台水切りを設置し開放している。仕様③の下端には外装材の位置出しとして使用される通気孔を有したロングスターターを設置した。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。

通気層への雨水浸入量については、降雨量に比例した長期的な浸入を再現する為、軒先に漏斗を取り付け捕集した雨水を速やかに注水するよう直径 10 mm の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。漏斗の直径は 3 階分の壁面雨量の 5% を捕集できる寸法^{注1)}とし、浸入水の滞留が予想される横胴縁仕様については、漏斗面積を 1/3 にしたものを 3 個設置し、横胴縁の上・中・下に 3 分割して注水した。

Fig.14 Experimental house and pouring funnel

Table6 Outline of experimental house

Site	Ashikaga, Tochigi-Pre (Ashikaga university)
Construction method	Wood panel construction
Total floor area	10 m ² (2.73×3.64m)
Roof	Hipped roof (Pitch of roof :1/2)
Insulation material	Outer wall : GW24k75mm Ceiling : RW100mm
External finishing	Ceramic siding (four-way rabbit joint) + Porcelain tile Composition : Fiber mixture perlite cement board Manufacturing method : Sheet forming method Exposure years : 12 years(with chalking)
Vented cavity	Horizontal furring strips(12mm) Panel clip(6mm) Panel clip(15mm) ※ East side:6mm thickness vented cavity with clip (Closed at the top opening)

Table7 Configuration of vented cavity

Case	①	②	②'	③
Installation method	horizontal furring strips	Panel clip	Panel clip	Panel clip
Thickness of vented cavity	12mm	6mm	6mm (Closed at the top opening)	15mm

5.2 測定項目

壁体内の測定項目、測定位置を図 15～17 に示す。温湿度・含水率は 1 階の中央高さ (FL+1300mm) 近傍に設置し、通気層・断熱材外側・断熱材内側・室内の温湿度、通気層に面する 5 mm 合板の含水率を測定した。合板含水率は長さ 4 mm の電極による電気抵抗式の含水率計により測定した。横胴縁仕様については壁面上・中・下の 3 か所に設置。東面の仕様②' は上部への水分滞留を測定する為、上部閉塞付近にも設置した。測定間隔は 60 分とした。通気層の風速は、東面のみ壁面上端に設置した (測定間隔 1 分)。測定期間は 2018 年 9 月より実施し、注水も同時期から開始した。また、室内の冷暖房

は行わず成り行きとした。

Fig.15 Wall configuration and sensor location

Fig.16 Configuration of cavity (South, North, West side)

Fig.17 Configuration of cavity (East side)

5.3 秋期における測定結果及び考察

5.3.1 降雨に伴う壁内湿度・合板含水率の上昇

秋期における測定結果の一例として、断熱材・防湿フィルム間の相対湿度 (湿度 C) を図 18、合板含水率の推移を図 19 に示す。外気温湿度・降雨量は、建物近傍の高さ約 3m の位置にて測定した。注水量は注 2) の式 (B4) より降雨量 (mm/h) に 0.0445 を乗じて求めた。含水率は測定下限値 12% 以下の値は、下限値 (12%) を示す。降雨翌日以降の外気温上昇 (9 月 22 日、9 月 28 日、10 月 1 日)

に伴い、壁体内の湿度や合板含水率が上昇している。温度上昇によって、注水や降雨によりサイディングや通気層に保持された水分が壁体内に蓄積されていることが観察された。また、期間全体で湿度・含水率は上昇傾向であり、この現象を繰り返しながら徐々に壁体内に水分が蓄積し、10月初旬には一部仕様で結露が長時間継続した。結露時の熱・水分移動や方位、通気仕様による壁体内の水分挙動詳細を次項に示す。

Fig.18 Relative humidity variation on the east side

Fig.19 Moisture content variation on the east side

5.3.2 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。日中の絶対湿度・相対湿度・温度変化を図 20 に示す。日射によるサイディングからの放湿によって、午前中から昼前に通気層の絶対湿度 A が急激に上昇する。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。壁体内の水分は低温部である室内側に移動する為、断熱材・防湿フィルム間の絶

対湿度 C が日没まで緩やかに上昇し 16 時頃最も高くなった。その後、通気層の温度 A が壁体内温度より低下する為、壁体内の水分が通気層へ排出される。夜間に絶対湿度は A～C 全て低下するが、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。

Fig.20 Temperature, humidity ratio, humidity, and moisture content variation on the East side Case②(10/3)

5.3.3 通気層仕様による影響

10 月初旬(10/1-10/4)東面における湿度 C の結果を図 21 に示す。前節の現象により、東面の仕様①、②について、防湿フィルム層で湿度が 100%となる状態が 10～13 時間継続した。仕様①については、12mm の通気層を設けているが、通気層内に浸入した雨水が横胴縁にて滞留し壁体内に水分が蓄積され易く、通気層の排湿量も少ないことが原因と思われる。仕様②については、通気層上部を閉塞していることから通気層内の空気が滞り、日射により放湿された水蒸気が排出できず、壁体内へ浸入したことが原因であろう。

仕様②については、通気層内の排湿量が確保される為、同様に午前中に壁体内の湿度上昇が確認できたが、現段階では一時的な湿度上昇に抑えられた。仕様③についても、午前中の壁体内湿度上昇は緩和された。

Fig.21 Relative humidity variation between insulation and vapor barrier on east side type C (10/1-4)

5.3.4 方位による違い

前節同期間における東面以外の結果を図 22 に示す。西・南面については、東面同様の傾向が確認できた。東面と比較し、結露時間が短くなった理由としては、日中の室内温度上昇により、壁体内温度が東面より高くなった為と思われる。仕様①における各方位の壁体内温度（C 点）を図 23 に示す。室内が冷房状態であれば、東面のような長時間の結露状態が発生する可能性が考えられる。

Fig.22 Relative humidity variation between insulation and vapor barrier on type C (10/1-4)

Fig.23 Temperature variation between insulation and vapor barrier on type C in case① (10/1-4)

北面については、仕様①において通気層内へ浸入した雨水が横胴縁に滞留し外側合板の含水率の上昇を引き起こした。しかし、日射が当たり難い為、壁体内での結露状態は確認できなかった。

6. まとめ

本研究により、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。また、実験住宅において事例（図 1）と同部位での壁体内結露を再現し、通気仕様による壁体内水分挙動の大略を得た。得られた知見を下記に示す。

- 1) 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に大きな差がある。事例（図 1）の仕様 D 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) 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（仕様 A）は、白亜化の生じていないサイディング（仕様 B）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、仕様 B 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) 実験住宅の実測により、雨水浸入による水分蓄積が確認された東面において、降雨後に外壁基材や通気層内に保持された水分が日射授受時の温度上昇により壁体内へ放湿され、事例の通気層厚 6mm 金具仕様（②・②）にて推測の通り防湿フィルム層での壁体内結露が再現された。
- 4) 通気性能の低い横胴縁、6mm 金具（上部閉塞）仕様の東面において試験開始より 1 カ月程度で壁体内に結露が日中 10～13 時間継続した。通気性能が確保されている 15mm 金具仕様においては、一時的に湿度 95% まで上昇はするが、結露は発生しなかった。

現段階において、結露水の流下までは確認できなかったが、図 1 の事例に示した壁体内結露は、雨水浸入や外装材吸水、通気性能、日照条件など複数要因の重複によって発生することが確認できた。

住宅の長寿命化には、住まい手のメンテナンスが必要不可欠ではあるが、フェイルセーフとして、雨水浸入や劣化時に想定される外皮からの水分も適切に排湿可能な機能が通気構法には求められる。

今後は冬期～春期にかけ外皮内に蓄積された水分が、室内冷房された夏期に壁体内に放湿される状況を確認する。また、通気層内へ浸入する雨水の挙動や、通気層の厚みによる通気特性を確認し、シミュレーションを行い長期的に安定した通気性能が維持可能な設計手法を検討する。

注

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替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) 式にて求める。試験結果を付表 1 に示す。

$$R_w = \frac{M}{A \times t} \quad \dots \quad (A1)$$

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

Attached Table 1 Measured result of quantity of water spray (ℓ/㎡・min)

Quantity of water spray (ℓ/㎡・min)	0.2	0.5	0.8
Spray time (min)	3		
Test area (㎡)	3.61		
Measured result (ℓ)	2.27	5.59	9.12
Measured result of quantity of water spray (ℓ/㎡・min)	0.21	0.52	0.84

注2) 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、水平面降雨量 Rh (mm/h)、外部風速 U (m/s)、水平面上における風向と壁面の法線が為す角度 θ (°) とすると、壁面雨量 R_w (L/㎡h) は (B1) 式で表される¹⁵⁾。

$$R_w = \alpha \cdot R_h^n \cdot U \cdot \cos\theta \quad \dots \quad (B1)$$

ここに、 α は壁面雨量係数 (s/m) である。壁面積 S_w (㎡) 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 (B2) 式で表される。

$$J_p = R_w \cdot f \cdot S_w \quad \dots \quad (B2)$$

(B2) 式に (B1) 式を代入すると (B3) 式となる。

$$J_p = \alpha \cdot f \cdot S_w \cdot R_h^n \cdot U \cdot \cos\theta \quad \dots \quad (B3)$$

本実験では漏斗により雨水を捕集・注水するため、(B3) 式右辺の水平面降雨量 Rh を除いた係数の積が漏斗の面積となる。ここで、図 16 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=8.1㎡とした。壁面雨量係数 α については、既往研究で 0.02~0.26s/m まで広範囲に亘る報告¹⁵⁾ があるが、本研究では石川ら¹⁶⁾ 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。(B3) 式の指数 n=1、 $U \cdot \cos\theta=1$ とすると浸入量 J_p は下式となる。

$$J_p = 0.0445 \cdot R_h \quad \dots \quad (B4)$$

実験に用いた漏斗面積は、(B4) 式の係数である 0.0445㎡に近くなる製品を選択し、仕様①は高さ方向 3 箇所に注水するため 150φを 3 個 (合計 0.0530㎡)、その他の仕様は 240φを 1 個 (0.0452㎡) 設置した。

参考文献

- 1) National Institute for Land and Infrastructure Management Ministry of Land: Research on construction method and its performance of external envelope of timber framed houses for durability upgrading, TECHNICAL NOTE of National Institute for Land and Infrastructure Management No.975, 2017(in Japanese)
国土技術総合研究所: 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, 国土技術政策総合研究所資料第 975 号, 2017
- 2) JIO Corporation: Waterproofing construction manual 2017, GIHODO SHUPPAN Co. Ltd, 2017(in Japanese)
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
- 3) Kimura, Y., Ishikawa, H., Akune, H., Kusuki, Y. and Makita, H.: Model tests on rainwater movement around flashing at roof abutments Part1, Summaries of Technical Papers of Annual Meeting, Architectural Institute of Japan, Materials and Construction, pp.1361-1362, 2013.7(in Japanese)
木村雄太, 石川廣三, 阿久根浩, 楠木義正, 牧田均: 屋根の雨押え部における浸入雨水の挙動 その 1, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 材料施工, pp.1361-1362, 2013.7
- 4) Nil Sahal. and Michael A. Lacasse: Water entry function of a hardboard siding-clab wood stud wall, Building and Environment, pp.1479-1491, 2005
- 5) Michael A. Lacasse: Recent studies on the control of rain penetration in exterior wood-frame walls, IRC Building Science Insight, pp.1-6,

2003

- 6) Qian Mao, Paul Fazio et al.: In-cavity evaporation allowance-A drying capacity indicator for wood-frame wall system, Building and Environment Vol.44, pp.2418-242, 2009
- 7) ASHRAE: Criteria for Moisture-Control Design Analysis in Buildings. ASHRAE Standard 160-2009
- 8) Saito, H. and Tsuchiya, T.: Study on Concealed Condensation in Wooden Walls During Cooling Period of Summer Season Part1, Journal of Architecture, Planning and Environmental Engineering (Transactions of AIJ), No.519, pp.39-45, 1999.5
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, 第 519 号, pp.39-45, 1999.5
- 9) Watanabe, Y., Fujita, K., Watanabe, T., Sugai, T. and Ozaki, A.: Study on the Condensation in Exterior Walls of a Highly Insulated and Airtight House in Summer Part5, Part6, Summaries of Technical Papers of Annual Meeting, Architectural Institute of Japan, Environmental Engineering, pp.1255-1258, 1993.7(in Japanese)
渡辺康徳, 藤田協二, 渡辺俊行, 須貝高, 尾崎明仁: 高断熱高気密住宅の夏季壁体内結露に関する研究その 5, その 6 日本建築学会大会学術講演梗概集, 環境工学, pp.1255-1258, 1993.7
- 10) Kurashige, H., Ozaki, A., Watanabe, T. and Sugai, T.: Dew Proofing Plan of External Wall in Seasonally Hot-Humid Region Part1, Part2, Summaries of Technical Papers of Annual Meeting, Architectural Institute of Japan, Environmental Engineering II, pp.271-274, 1996.7(in Japanese)
蔵重裕行, 尾崎明仁, 渡辺俊行, 須貝高他: 季節蒸暑地域における壁体の防露設計指針, その 1, その 2 日本建築学会大会学術講演梗概集, 環境工学 II, pp.271-274, 1996.7
- 11) Umeno, T. and Hokoi, S.: Moisture Damage in Vented Air Space of Exterior Walls of Wooden Houses, 40th Symposium on Thermal Environment, (Transactions of AIJ), pp.119-126, 2010.10(in Japanese)
梅野徹也, 鉾井修一: 木造住宅の壁体内通気層における湿害に関する検討, 日本建築学会第 40 回熱シンポジウム pp.119-126, 2010.10
- 12) Japanese Industrial Standards: Windows and doorsets-Watertightness test under dynamic pressure, Japanese Standards Association, 1996(in Japanese)
日本工業規格: 建具の水密性試験方法, 日本規格協会, 1996
- 13) Japan Fiber Reinforced Cement Sidingsmanufactures Association: What do you do for the maintenance of the siding, 2011(in Japanese)
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
- 14) Kanazawa, M. and Ishikawa, H.: Water absorption rate from the edge side and the rear surface of the fiber reinforced cement siding, Summaries of Technical Papers of Annual Meeting, Architectural Institute of Japan, Materials and Construction, pp.1031-1032, 2017.7(in Japanese)
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
- 15) 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
- 16) Ishikawa, H. and Hashimoto, Y.: Estimation of Impringing Angle of Driving Rain Against Wall Surfaces: Fundamental study on evaluating exposure severity of external walls to driving rain, Journal of Structural and Construction Engineering(Transactions of AIJ), No.611, pp.13-20, 2007.1
石川廣三, 橋本佳大: 壁面に衝突する雨滴の傾斜角の推定 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

STUDY ON HYGROTHERMAL BEHAVIOR OF WALL ASSEMBLY WITH VENTED CAVITY IN CONSIDERATION OF DRIVING RAIN (PART 1) : IMPACT OF RAIN PENETRATION AND WATER ABSORPTION OF EXTERIOR SYSTEM ON HYGROTHERMAL BEHAVIOR WITHIN WALL ASSEMBLY

Sadaharu OSAMURA ^{*1}, Hiroaki SAITO ^{*2} and Masao NAKAJIMA ^{*3}

^{*1} Researcher, Misawa Homes Institute of Research and Development Co., Ltd.

^{*2} Prof., Faculty of Engineering, Division of Architecture and Civil Engineering, Ashikaga University, Dr.Eng.

^{*3} Prof., Dept. of Architecture and Environment, Kanto Gakuin University, Dr.Eng.

The wall assembly with vented cavity using the siding is installed for durable improvement in many wooden houses. The houses with less projected eaves built on very narrow and small properties are increasing in recent years. According to an investigation of moisture damage by authors, many of houses which internal condensation occurs were built in less than ten years. Deteriorated siding and joints in these houses have potential for water absorption and rain penetration. It is considered that these accumulated moisture have significant impact to cause the internal condensation within stud cavity, when surface temperature on the siding raises by solar radiation. However there are few studies regarding hygrothermal behavior in consideration of these impacts such as water absorption and rain penetration at outside finishings.

To unravel mechanism of the internal condensation due to moisture cause the rain water, lab-experiments and field measurements were conducted. In the lab-experiments, water penetration rate and water absorption coefficient of sidings were quantitated. In the field measurement, the internal condensation was reproduced by intermittent injection of rain water into the vented cavity. Additionally, the drying performance of different ventilation configurations were compared by humidity and moisture content variations within wall assemblies in field measurements. The findings of the study are as follows;

- (1) **Quantity of rain penetration from siding joints** : Quantity of rain penetration from siding joints of four installation methods were measured by water spray test. It was confirmed that there were significant differences in the amount of water penetration between the installation methods. In the cases which condensation occurred, the water penetration rate was 5 to 12 % at low wind speed. From the result, it is considered that intermittent rain penetration occurs with high frequency in rainy day.
- (2) **Water absorption test from siding surfaces** : Quantity of water absorption of siding with chalking and sound one just after the testing are 0.62 kg/m² and 0.06 kg/m² respectively. This result is suggested that the quantity of absorption water increased with deterioration of the surface coating due to aging. In addition, since water was absorbed just after water absorption, it is considered that water is absorbed and retained every time it rains.
- (3) **Impact of rain penetration and water absorption of exterior system on hygrothermal behavior within wall assembly at the experimental house** : For the external finishing of the experimental house, deteriorated sidings were installed to four types of vented cavity. To verify hygrothermal behavior within wall assembly, authors reproduced intermittent long-term rain penetration into the vented cavity, and measured the temperature, humidity and moisture content variations.

Authors confirmed that moisture accumulation in wall assembly being reproduced on east side of the wall, when the moisture retained in the sidings and vented cavity was released into the wall assembly. This phenomenon was caused when the surface temperature on sidings were raised by solar radiation after rain. Especially in case of the configuration with low ventilation performance, the condensation occurred for 10 to 13 hours in daytime. As for the configuration with secured ventilation performance, the internal condensation did not occur.

In conclusion, aforementioned results verified that the moisture condensation at the vapor retarder due to rain water was caused by co-occurrence of several factors, i.e. rain penetration, water absorption, insufficient ventilation and solar radiation.

(2019年6月4日原稿受理, 2019年10月9日採用決定)