〈研究〉

ツープайフォー工法壁体の断熱・防露性能*

鷺岡 雅**・大沢元毅***・瀬戸裕直***・坊垣和明***

Thermal Characteristics and Moisture Control in Wood-Frame Walls

Tadashi SAGIOKA*², Haruki OSAWA*³, Hironao SETO*³, Kazuaki BOUGAKI*³

Summary

The stud space of full scale, wood-frame wall having asbestos-cement board siding were constructed. The halves of these test walls were conventional walls and the other halves were walls with ventilation space outside backing board. These test walls were sandwiched between a hot and cold box apparatus in the laboratory.

Thermal characteristics and moisture control within various components (vapor barrier, holes in the backing board) of the two halves of the test walls were compared.

The ventilation space and the holes in the backing board were not effective for preventing moisture accumulation in the absence of siding heating imaged solar radiation. In such a case, only vapor barrier was effective. But, those components were extremely effective in the presence of siding heating.

要 旨

乾式サイディングで外装仕上げされた枠組壁工法壁体モデルとして、通気のない普通壁体および通気層を設けた通気壁体の二種類の試験体を作製した。これら試験体を用い、通気層の有無のほか、防湿層と通気孔、日射を想定した外壁加熱の有無が壁体の断熱・防露性能に及ぼす影響について検討した。外壁加熱がない場合、壁体の防露性能を確保するうえにおいて、別付け防湿層の有効性が明らかになった。しかし、通気層および通気孔の除湿効果はほとんど認められなかった。外壁加熱がある場合、通気層と通気孔の効果は大きく、壁内結露の危険はほとんどないことが明らかになった。

1. 緒 言

乾燥した規格材と合板など面材料とによって構成され

るツープайフォー工法の壁体は断熱・気密性が高く、優れた居住性と省エネルギー性が確保され易いといわれている。

しかしながら、比較的寒冷・乾燥した地域¹⁾(米国の大半の地域のClimate Index値は60以下)で完成されたこの工法が、わが国のような温暖・多湿な気候条件²⁾(北海道、東北および中部山間部を除く地域でのC.I.値は60以上)においても十分な耐久性を期待できるかどうか、あるいは水蒸気多量発散型の暖房方式や住まい方の住環境における防露性の問題等については、本工法が普及してまだ日が浅いこともあり、必ずしも明らかでない。

特に、壁内結露、水分蓄積の問題は枠材の含水率の上昇、さらには木材腐朽に発展する可能性もあり、ツープайフォー工法壁体の防露性能を把握するための基礎資料の蓄積が求められている。

このような観点に立ち、本研究では、実大壁体モデル

* 本報告の一部は第37回日本木材学会(1987年, 京府大)において発表した。

** 富山県林業技術センター Toyama Forestry and Forest Products Research Institute, Kosugi, Toyama

*** 建設省建築研究所第5研究部 Building Research Institute, Ministry of Construction, Tsukuba, Ibaraki

を用いた実験を行うことにより、ツーバイフォー工法の断熱・防露性能を明らかにしようとした。なお、本研究は日本ツーバイフォー建築協会支援のもとに実施されたものである。

2. 実 験

2.1 試験壁体

断熱・防露実験に使用した試験体の壁体構成は表-1に示す6種類である。

試験体の概要は図-1に示したとおりであり、普通壁体と通気壁体の2種類が同時に測定できるように製作した。縦枠は芯々距離455mmに配置し、枠組材は38×89mmのツーバイフォー工法用の製材品を使用した。試験体に用いた木材は、含水率20%未満の乾燥材である。通気壁体は壁体上・下部に水切りを兼ねた金物を取り付け、外装材と防水紙との間に18×45mmの胴縁材により縦方向に厚さ18mmの通気層を設けている。また、普通壁体と通気壁体との境界部は、縦胴縁の厚さに相当する段差が生じるため、この部分の気密性と防湿性を完全にする目的でコーキング処理されている。

壁体構成については、試験体1は別付けのペーパーバ

リヤーおよび通気壁体の合板下地に孔のない壁体である。試験体2は試験体1の通気壁体合板下地の上・下部にそれぞれ3個の孔(直径20mm, 間隔120mm:図-1参照)を開けた壁体である。試験体3は試験体2に別途ペーパーバリヤーを断熱材の室内側に加えて施工した壁体である。

試験体の構成材料は、外装材には乾式サイディングとして使用される厚さ11mmの石綿スレート板を用いた。外装下地材は厚さ9mmのベイマツ3プライ合板、断熱材は公称厚さ50mmロックウール(片面アルミ蒸着フィルム, 他面クラフト紙), 防水紙は20Kのアスファルトルーフィングである。内装は、下地に12mm厚さの石膏ボードを使用し、ボード間の継目はパテによって目地処理した。内装仕上げ材は一般的なビニール壁紙である。また、ペーパーバリヤーに使用した防湿材は、0.1mm厚さのポリエチレンフィルムである。

2.2 実験概要

実験は、高温室(25°C, 60% RH)と低温室(5°C, 湿度はなりゆき)との境界部分(W2800×H2400mm)に2種類の試験壁体を取り付け、同時に測定を行った(図-2)。

各試験体の実験期間は、壁体内外の温湿度分布がほぼ

表-1 試験壁体の種類
Table 1 Kind of test walls

試験体 test wall	防湿層 vapor barrier	断熱材(50mm) insulation	合板の孔(20mm) hole in the plywood	通気層(18mm) ventilation space	外装材(11mm) siding
試験壁体1 test wall 1					
普通壁1 conventional wall 1	付属VB ^{a)}	ロックウール rock-wool insulation	なし absent	なし absent	石綿スレート板 asbestos-cement board
通気壁1 wall 1 with vent. space	付属VB ^{a)}	ロックウール rock-wool insulation	なし absent	あり present	石綿スレート板 asbestos-cement board
試験壁体2 test wall 2					
普通壁2 conventional wall 2	付属VB ^{a)}	ロックウール rock-wool insulation	なし absent	なし absent	石綿スレート板 asbestos-cement board
通気壁2 wall 2 with vent. space	付属VB ^{a)}	ロックウール rock-wool insulation	あり present	あり present	石綿スレート板 asbestos-cement board
試験壁体3 test wall 3					
普通壁3 conventional wall 3	別付VB ^{b)}	ロックウール rock-wool insulation	なし absent	なし absent	石綿スレート板 asbestos-cement board
通気壁3 wall 3 with vent. space	別付VB ^{b)}	ロックウール rock-wool insulation	あり present	あり present	石綿スレート板 asbestos-cement board

a) ロックウール断熱材に付属している防湿材

a) Vapor barrier with rock-wool insulation

b) 0.1mm厚さポリエチレンフィルム

b) Polyethylene film (0.1mm thick)

図-1 試験壁体概要およびセンサー設置位置

Fig. 1 A schematic diagram of test wall and location of measurement transducers

定常に達する時点を目標としており、4日間（96時間）を基本サイクルとした。しかし、温湿度条件の安定に要する時間は必ずしも一定ではなく、とりわけ湿度条件が厳密な意味での定常に達するにはさらに長時間を要すると思われるが、時間的な制約もあり、実験期間は3～5日とした。

また、今回の実験では、壁体が日射を受けた場合の壁に設けた通気層の効果を検討するため、各試験体について通常の実験を行った後、外気側全面に面状発熱体を設置し加熱を行った。熱量は日射量相当の400 kcal/m²・hとし、試験期間中連続して加熱した。

2.3 計測方法

2.3.1 温湿度測定

壁体各部位での温度測定は、銅-コンスタンタン熱電対（C-C, 0.2mm）を用い、多点デジタル記録計により自動記録した。熱電対の設置場所は図-1に示すとおりであり、試

図-2 試験装置概要

Fig. 2 A schematic diagram of the wall test apparatus

験体内の上下方向の分布を見るために、上部、中央部、下部の3箇所温度を測定した。

壁体中空部における湿度測定は、エース製温湿度センサーを壁体内に入れて行い、C-C熱電対によりその位置の温度測定も併せて行った。測定は普通壁体、通気壁体ともに上・中・下部の3箇所(図-1)で行った。

2.3.2 枠組材の含水率

枠組材の含水率の測定は、抵抗式の木材含水率計(コーナー製)を用いた。測定用センサーは長さ25mmのステンレス製木ネジとし、測定点に20mmの間隔をおいてねじ込んだ。センサーの出力は抵抗測定ユニットを経て、3時間の測定間隔で自動計測した。含水率の測定点は図-1に示すとおり、上・下枠材で各1箇所ずつ、縦枠材3箇所である。

3. 結果と考察

3.1 壁体各部位の温度分布

試験体1の普通壁体および通気壁体の中央部分の縦断面温度分布の経時変化(試験開始24時間のみ表示)を図-3に示す。普通壁体、通気壁体に関係なく、試験開始

約12時間後にはほぼ平衡に近い温度に達していることが認められる。面状発熱体による加熱を開始した場合も、約12時間後には平衡に達していることを確認している。各測定点の温度は、高温室側の温度制御性から約6時間の周期をもったサイン曲線を示し、その振幅は室内側から外壁側に移るにつれて小さくなっていく傾向がある。

試験体1, 2, 3の定常時(実験開始24~26時間経過)における縦断面の温度分布および温度勾配を図-4に示す。

これらの図より、日射を想定した外壁加熱の効果はきわめて顕著であり、外壁表面温度は普通壁体では22.9~40.9℃、通気壁体では18.4~37.4℃にまで上昇した。宮村ら³⁾はモルタル仕上げ壁体、サイディング仕上げ壁体等を実際の屋外環境に設置し、冬季の外壁表面温度を測定した結果、南面壁では正午付近で最高50℃位にまで上昇したことを報告している。本外壁加熱実験においても、壁体下部を除いて、いずれも外壁表面温度は室内表面温度よりも高い値を示している。

壁内結露に密接な関係をもつ中空層側合板表面温度(以下、合板表面温度と略記)は、外壁加熱を行った場合、普通壁体の方が通気壁体に較べて高い値を示した。これ

図-3 試験壁体縦断面温度分布の経時変化(中央部)

Fig. 3 Distribution curves of temperature on the test wall middle section as a function of elapsed time.

図-4 試験壁体の縦断面温度傾斜 (定常時)

Fig. 4 The temperature gradient on the test wall sections from outside to inside (at steady heat flow)

は加熱により外壁材料の温度が高くなり、この熱が伝達していくとき、通気層が遮熱材として機能したためと思われる。外壁加熱を行わなかった場合、両壁体間での合板表面温度の差異はほとんど認められなかった。

試験体1, 2, 3間の差異、すなわち壁内中空部空間での通気の影響については、通気壁体における合板表面温度の垂直分布に大きな特徴が認められる。加熱なしの場合、試験体1の合板上下間の温度差はないか小さい(0.9 ~ 1.2°C)のに比べ、合板上・下部にそれぞれ3個の通気孔がある試験体2では上下温度差が2.2°Cあり、試験体3ではその温度差が3.0°Cになっている。加熱を行った場合、合板表面での上部と下部での温度差はさらに拡大し、試験体1では上部と下部でそれぞれ26.9°Cと15.8°Cであり、試験体2では28.1°Cと13.5°C、試験体3では29.8°C、12.1°Cとなり、試験体1<試験体2<試験体3の順序でその差が大きくなっている。このような垂直温度分布は、低温の外気が下部通気孔から侵入し壁体下部の合板表面温度を引き下げるとともに、外壁加熱により暖められた壁内空気が上方へ移動したために生じたものであり、壁体内空間での換気存在を示すものと考えられるが、その効果を期待するためには、外壁加熱に相当する日射の存在あるいは外部風の力を借りる必要がある。

また、壁内中空部通気を有する壁体の合板表面温度は、上下の温度分布の差が大きいため、壁内中空部での結露を検討する場合、部分的な結露を発生させないためにも上部、中央部、下部と区分して考慮する必要があることが明らかとなった。

3.2 壁内中空部の温湿度変化

試験体1, 2, 3の中央部分における壁内中空部の空気温度および絶対湿度の経時変化を図-5に示す。

壁内空気温度については、外壁加熱のない場合には約12~15°Cの温度を示し、各試験体とも所期の保温性を持っていた。下地合板の通気孔および別付け防湿層が空気温度に与える影響については明らかではなかった。また、外側通気層(18mm)の影響も明確ではなかった。一方、外壁加熱を行った場合における測定結果は、外側通気層の影響を明らかに示しており、各試験体とも普通壁体では34~35°Cにも達しているのに対し、通気壁体では23°Cまでにしか上昇しなかった。この結果は前述の合板表面温度分布の結果と同様であり、通気層の遮熱効果によるものと思われる。なお、試験体1の普通壁体、試験体2の普通壁体における急激な温度低下は、外壁加熱のための面状発熱体が脱落したことによるものである。

壁内空気の絶対湿度は、空気温度と相対湿度とから算出した。外壁加熱のない場合、外側通気層の付加による壁内絶対湿度の顕著な低下は見られず、その除湿効果はほとんど期待できなかった。筆者ら⁴⁾は鉄骨系外壁パネルを用いて、通気層および通気孔による壁内除湿効果を検討した結果、通気孔の数の違いによる壁体内の絶対湿度の差は少なく、通気層の厚さが壁体内の温湿度を左右するとし、防湿材が施工されていない場合においても20mm程度の通気層厚さを確保すれば、壁体内部の絶対湿度は外気のそれとほぼ等しく、結露発生の危険性はなくなると結論した。また福島⁵⁾は、在来構法、2×4構法(釘止め施工)、パネル構法(面材合板を接着)の3種の100mm断熱壁体について通気層の効果を検討した結果、防湿層が全くない条件の場合、通気層による結露防止を期待することは困難であることを報告している。本実験においては防湿材の施工されている試験体3においてもその効果は顕著ではなかった。このように、外壁加熱がない場合の通気層付加による結露防止効果は、壁体構成材料、断熱材厚さ、構法、通気層の厚さ、通気孔の数と位置、外部風力など影響する要因が多く、その組み合わせによっては複雑な結果が得られることもあるが、実際の結露防止構法を考える上では、これらの点に関する詳細な実験とデータ蓄積が望まれる。

つぎに、防湿層の壁内結露防止効果については、別付けの防湿材が施工されている試験体3の壁内絶対湿度の増加割合は試験体1や試験体2に比べて著しく小さい。Burchら^{6,7)}は防湿性ペイントの石膏ボード内装材表面への塗装は、壁内水分蓄積量を減少させるとともに、壁体の熱貫流率を抑制する効果もあるとし、防湿層の重要性を報告している。

外壁加熱を行った場合の通気の効果については、どの試験体においても明らかであり、その程度は、合板に孔を設けた場合(試験体2)、通気孔と防湿層の両方を設けた場合(試験体3)と順次大きくなっていく。宮村ら³⁾も冬季における北面壁体の壁内相対湿度は70%付近と高い値を示すのに対し、南面壁体のそれは25%と低く、日射の効果の大きいことを指摘している。しかし図-5から明らかなように、外壁加熱は壁内空気温度を急激に上昇させ、絶対湿度を大幅に高める作用も認められる。これは合板、枠材などからの水分放出が原因と考えられるが、未乾燥材を多用する在来構法などにおいては建設初期の南面壁体での壁内結露の恐れも十分考えられる。

図-5 壁内中空部の空気温度、絶対湿度および枠材含水率の経時変化(中央部)

Fig. 5 The curves of air temperature, absolute humidity and of moisture content on the studs as a function of elapsed time (middle section).

3.3 枠組材の含水率

表-2に縦枠材含水率の各実験ステージ終了前24時間の平均値を測定部位毎に示す。実験は試験体1の無加熱、加熱実験、つづいて試験体2の無加熱、加熱実験、最後に試験体3の無加熱、加熱実験の順序で行い、試験体1の枠材は試験体3の実験が終了するまで取り替えることなく使用した。したがって、試験体間および加熱の有無による含水率の差を比較、検討することはあまり意味がなく、ここでは普通壁体と通気壁体との違いおよび測定位置による違い（上下分布）について述べる。

まず普通壁体と通気壁体の比較では、試験体1の加熱なしの最終段階における縦枠材含水率は、前者が13.6～16.2%の値を示したのに対し、後者は9.4～12.3%と比較的低い値を示した。通気壁体の低含水率については、下地合板は接着層を有しており壁内除湿を促すほどの透湿効果は期待できないこと、外壁加熱がない場合の壁内絶対湿度は普通壁体と通気壁体とで差が認められなかったことから、通気の効果とすることには疑問がある。推測の域を出ないが、むしろ両者の枠材表面温度の差が影響したものと思われる。事実、通気壁体の枠材表面温度は普通壁体のそれに較べて1.6～2.4℃も高く、しかもこれら枠材表面温度は中空部空気温度に較べて1.3～4.9℃高い温度を示していた。このような条件にあるとき、高温である枠材と壁内空気との境界領域（空気層）の相対湿度は低下し、その結果枠材の乾燥が進行するものと思われる。

枠材の含水率の上下分布については、普通壁体中央部と通気壁体上部で低い値となっているのが特徴的であった。

このように枠組材の含水率はほとんど15%以下にとどまり、危険なレベルにまでは達していなかった。しかし本実験では外壁加熱操作が組み込まれていたこと、および実験期間が4,5日と比較的短期間であったことから、壁内水分蓄積を検討する条件になく、これを正確に求めるためにはさらに長期間の実験を実施する必要があると思われる。

3.4 下地合板での結露の危険性

合板表面温度（壁内中空部側）と壁内空気露点温度の差（以下、温度差と略記）を表-3に示す。露点温度は壁内空気温度と相対湿度から算出した。この温度差が小さいほど結露の危険性が高いが、外壁加熱の効果は明らかに大きい。しかし加熱がない場合、外壁通気の効果は試験体1,2ではあまり期待できなかった。ただ、試験体3

表-2 縦枠材の含水率（試験終了前24時間の平均値）

Table 2 Moisture content of studs
(mean for the last 24 hours)

縦枠材含水率 (%) moisture content of studs (%)		普通壁体 conventional wall		通気壁体 wall with ventilation space	
		加熱有 siding heating	無 not doing	加熱有 siding heating	無 not doing
試験体 1 No 1	上部 top	13.4	16.2	9.6	9.4
	中央 middle	12.4	15.9	12.7	13.3
	下部 bottom	12.7	13.6	12.4	12.6
試験体 2 No 2	上部 top	13.8	12.3	9.2	9.7
	中央 middle	11.7	11.0	12.0	12.2
	下部 bottom	12.5	12.2	12.0	12.3
試験体 3 No 3	上部 top	12.6	12.3	8.1	8.3
	中央 middle	11.1	10.1	11.1	11.2
	下部 bottom	13.4	11.9	11.7	12.1

表-3 合板表面温度と壁内空気温度の差
（試験終了前24時間の平均値）

Table 3 The differences between surface temperature on the plywood and dew point in the wall cavity.
(mean for the last 24 hours)

合板表面温度-露点温度 (°C) plywood surface temp. - dew point		普通壁体 conventional wall		通気壁体 wall with ventilation space	
		加熱有 siding heating	無 not doing	加熱有 siding heating	無 not doing
試験体 1 No 1	上部 top	19.3	2.5	14.4	2.7
	中央 middle	20.3	0.2	9.2	3.6
	下部 bottom	19.9	0.7	3.1	2.1
試験体 2 No 2	上部 top	17.8	0.8	16.3	1.2
	中央 middle	17.7	0.0	9.5	0.0
	下部 bottom	7.5	0.7	6.4	0.0
試験体 3 No 3	上部 top	19.6	6.9	19.8	5.1
	中央 middle	17.2	2.9	16.6	4.8
	下部 bottom	4.0	1.7	7.6	5.1

の壁体中央部，下部では温度差が開き，防湿層の効果が若干認められた。またこの温度差は壁体上・中・下部において大きく異なり，同一壁体においても局部的な結露が発生する危険性を示している。このような傾向は外壁加熱を行った場合に顕著であり，とくに壁体下部での温度差が小さい。

これらのことから，下地合板での結露の危険性を減少させるためには，防湿層の施工が効果的であり，通気層の設置は補助的な対策として考えるのが妥当と思われる。

文 献

- 1) 有馬孝禮，駕海四郎：木材工業，35，6，10～15 (1980)
- 2) 長谷川益男：とやまの木材，8，5～6 (1981)
- 3) 宮村雅史：枠組壁工法による木造試験家屋の壁内温湿度環境 建築研究所第二研究部研究発表会資料 24～27 (1985)
- 4) 瀬戸裕直：日本建築学会梗概集（計画系），781～782 (1984)
- 5) 福島明：北海道寒地研究所調査研究報告，47，3～14 (1986)
- 6) D.M. Burch and S.J. Treado: ASHRAE Trans., 84 part 1, 197～206 (1978)
- 7) D.M. Burch, A.G. Contreras and S.J. Treado: ASHRAE Trans. 85, part 2, 547～562 (1979)
(1988. 3. 8 受理)