

セルロース・ファイバーの耐結露性について

セルロース・ファイバー断熱材の結露抑制特性の評価（そのⅠ）

山本里見

Tests on Heat Insulation and Dew Condensation of Cellulose Fiber. Study on Suppression of Dew Condensation for Insulation made of Cellulose Fiber (I)

Satomi YAMAMOTO

(1996年11月29日受理)

Cellulose fiber that is made from used paper, and glass wool are generally used as insulation in wooden houses. Some experiments showed that cellulose fiber absorb much amount of water vapor without dew condensation. To make sure the characteristics of cellulose fiber, comparing with glass wool, experiments were made using two experimental houses. One was coated with cellulose fiber and the other with glass wool. Keeping both houses's room temperature and humidity same, surface temperature, water content, water vapor permeance of insulation were observed.

1. いきさつ

木造住宅には断熱材を使用する。柱と柱との間に断熱材を装入する工法（柱間断熱または内断熱）に使う断熱材は繊維系断熱材で、それには無機質のグラスウール（以下、GWとする）と有機質のセルロースファイバー（以下、CFとする）とがある。CFは故紙から製造され、しかも製造工程でほとんどエネルギーを消費せず、欧米では主流の断熱材のひとつである。実験室での吸湿試験で、CFの吸湿量および保水量がGWより大きいことを確かめた。¹⁾CFは結露を防ぐ特性を持つと判断できるので、実験棟で使用し結露抑制効果を確認することにした。



写真1 実験棟全景

2. 実験装置および実験・測定方法

実験棟2棟（写真1）のそれぞれをCF、GWのみで断熱施工し、室内と壁内の結露状況、壁面および断熱材の表面温度、断熱材内湿度、補給水量などを測定し、両棟で比較した。

2.1 実験棟仕様

木造1階建て（床面積：7.07 m²、天井高さ：1.8

m、床：GL+0.45 m）外壁は防火サイジング横貼り、屋根はカラー鉄板平葺き、通気口がコンクリート布基礎には東西両側に各2ヶ、小屋裏には同じく各1ヶある。各棟北側に断熱した扉があるが、窓および仕切りはない。室内仕上げは、合板またはボード板を内壁として打ちつけたままである。断熱材の吸湿、結露状況を比較するため、壁屋外側の防風シート張り、通気層確保、屋内側の防水シート張りなどは行わなかった。断熱仕様を次のようにし、施工は専門業者に委託した。

CF棟：東側の棟をCF（吉水商事製ファイバーエース）で断熱施工した。断熱材厚さ100mmで装入密度壁部；55 kg/m³，天井；33 kg/m³，床；40 kg/m³となるように乾燥状態で空気搬送により吹き込んだ。GW棟：西側の棟を包装GW（日本マイクロジーウール（株）製マグシルバー：アスファルト防水紙張り100mm，10 kg/m³，ハウスロン：ビニールシート張り100mm，10 kg/m³）で壁，天井を施工し，床下にはスタイロフォーム板36mmを敷いた。

2.2 実験法

一般家庭の生活条件下での結露発生状況を観察するのを目的にした。生活条件を再現するために，7時から22時までの間は室温22℃，相対湿度80%（露点：18℃）になるように，1200w電熱ヒーターおよび蓋をあけたままの700w湯沸ポットを作動させた。

2.3 測定項目および測定法

- 1) 結露状況：肉眼により壁面と壁内断熱材の湿り状況を観察するとともに，断熱材と木材の含水率を測定した。断熱材含水率は電子水分計（ザルトリウス社），木材の含水率は木材水分計（KETT社）で測定した。
- 2) 壁内温度：断熱材の屋内側，屋外側に熱電対（銅-コンスタンタン）を設置した。CF棟壁ではCF両側とメッシュ網との間，天井では小屋裏側と天井板側に設置し，GW棟の壁，天井では包装材の外側に貼りつけた。
- 3) 壁内湿度：断熱材の屋内側，屋外側に湿度センサーを設置した。CF棟にはTDK湿度センサーユニット/CHSシリーズ，GW棟には湿度センサー（株・ノース・ハイテックHU-1A）を設置したが，GW棟ではほとんど測定できなかった。
- 4) 壁面温度：熱電対素線を壁面に密着させ，その上を発泡スチロール板で覆った。
- 5) 補給水量：水蒸気供給用湯沸ポットへの補給水量を測定した。

3. 実験結果と考察

実験期間は1993.1/8から1993.4/30までであり，その間に2回内・外壁を取り外し，断熱材の状況を観察するとともに含水率を測定した。（2/16，3/12）

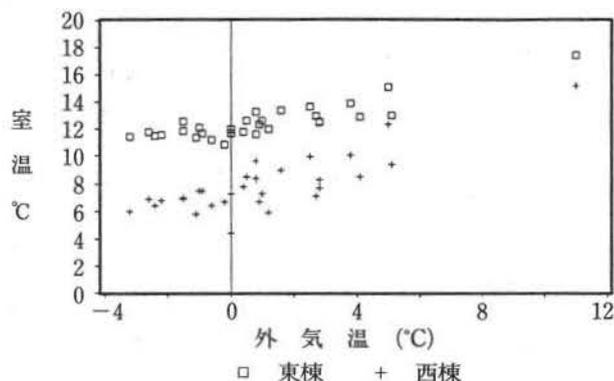


図1 暖房前室温と外気温との関係（6時）

3.1 暖房開始前の室温比較

CF棟の暖房前の室温は常にGW棟よりも高い。6時の室温（床上1.2m）と外気温との関係を示すと図1のようになる。外気温としてGW棟北側屋外で測定した値を用いた。

両棟での室温と外気温との関係は次の回帰式で示される。

$$Y = 0.39X + 12.1 \quad \gamma = 0.87*** \quad (\text{CF棟})$$

$$Y = 0.59X + 7.3 \quad \gamma = 0.82*** \quad (\text{GW棟})$$

$$Y: 6\text{時の室温}^\circ\text{C} \quad X: 6\text{時の外気温}^\circ\text{C}$$

（***，**，は危険率1,5%有意を示す。以下，同じ）

CF棟の暖房開始前室温はGW棟のそれよりも外気温の影響を受けにくい。両棟での気温差は外気温0℃で4.8℃となり，外気温が低いほどこの差は大きくなる。

3.2 結露状況

実験開始翌日にはGW棟南壁に壁面結露による濡れが発生し，二日後にはGW棟天井南東隅に水滴がついていた。水滴，濡れは外気温の影響を受け，冷えると成長し暖かいと縮小する。試験期間の水滴，濡れの位置を実験棟の展開図に示すと図2のようになる。

水滴，濡れはGW棟に多い。CF棟では水滴は見られず濡れのみが南壁の柱部に少々見られたのに対し，GW棟では壁面の濡れた個所が多くしかも面積も広い。天井の濡れはCF棟にはないが，GW棟では5カ所に水滴，濡れが発生した。

実験開始後40日に採取した断熱材の含水率を測定した結果を表1に示す。

CF棟；壁の床部分のCF含水率が高くなり，64ないしい70%になったが，天井，床下では含水率の上昇はみられない。含水率69.8%以外の場所のCF

表1 断熱材の水分率, 含水率 (%) 3/12測定

断熱材	試料採取位置			水分率	含水率
CF	南東隅南壁屋内側	床上	180cm	15.4	18.3
	同上		135cm	14.3	16.7
	同上		80cm	12.2	13.9
	同上		10cm	18.0	22.0
	南東隅南壁屋外側	床上	180cm	41.1	69.8
	同上		80cm	15.5	18.4
	東壁No.2間柱屋外側	床上	80cm	39.1	64.2
	西壁中央天井下屋外側			31.5	46.0
	天井屋外側点検孔部			13.6	15.7
	床下部屋中央 屋内側			12.1	13.8
同上 屋外側			14.0	16.2	
GW	東壁南No.3間柱屋外側	床上	80cm	29.6	42.1
	同上			21.4	27.2
	西壁南No.1間柱屋外側	床上	80cm	32.6	48.3
	同上			38.5	62.5
	天井部屋中央屋外側			79.1	378.5

注) 水分率: 含水試料中の水分量比率 (測定値)
 含水率: 乾燥断熱材の保有する水分量比率に換算
 (水分量/乾燥断熱材)*100

には湿っているという感触はなかった。

GW棟;濡れている壁では局部的に濡れが激しく,その部分の包装GWの表面に水滴が付着,あるいは水滴が流れていた。天井のGW自体および包装ビニール表面には結露が見られた。含水率27%でもGW繊維間に水滴が観察され,天井での含水率378%の試料では傾けると水が流れ出るほどであった。

壁面濡れの原因および場所による濡れの差を検討するために壁面温度を測定した。

1) 南合板壁および西ボード壁表面温度

濡れが見られる南合板壁と濡れない西ボード壁北側表面温度は,非暖房時にはほぼ同じであるが,暖房時に濡れない西ボード壁が南合板壁より3℃ほど高いのがCF, GW両棟に共通してみられた。

南合板壁には濡れている部分と濡れていない部分とがある。南壁の西側角から10cm間隔(床上46cm)で表面温度を測定した。CF棟では場所による温度の変動は小さいが, GW棟では西端の柱の部分(濡れている場所に相当)での温度低下が大きいことと,間柱の位置に相当する部分での温度が低いのがみられた。

2) 南東隅合板壁表面温度

両棟で共通して南東隅の壁に濡れがある。同時刻に測定した両棟壁表面の温度には大きな差があった。CF棟壁では10時ですでに20℃になっているに

もかわらず, GW棟壁では10時にはCF棟壁よりも6℃低く, 22時になっても3℃低い。さらに, 床上直上部では22時になってもCF棟壁より8℃低い温度にしかない。

両棟の壁面温度比較から濡れのみられた個所の温度が低いことが分かり, GW棟南東隅の壁温度が特に低いために同部分への濡れ(結露)が激しくなったといえる。この低温部は断熱材装入の不完全さと断熱材のない柱部に起因するといえる。丁寧に装入したはずのGW棟のGWでもめくれている部分があり, 水滴, 濡れにつながっている。一方, CFでは装入不良個所がないので, 結露する条件(局部的に壁が冷える)が取り除かれている。

3.3 木材の水分量

断熱材含水率の測定と同時に, 両棟の柱の表面含水率を測定した結果を表2に示す。CF棟柱の表面含水率はGW棟よりも東壁で6%, 西壁で3%低い。天井南東部の異常に高い部分を除くと, CF棟がほぼ5%低い。柱付近断熱材中での結露の有無による違いと考えられる。

表2 木材含水率の比較 (%)

測定場所		CF棟	GW棟
東壁中心柱	天井下	21	28
	ヒノキ	22	28
	床上	24	30
西壁中心柱	天井下	23	28
	ヒノキ	22	23
	床上	17	20
天井合板	中心南	16	20
	合板	14	20
	南東隅	25	53

3.4 断熱材表面の温度

断熱材表面の温度は暖房, 非暖房時で異なるので, 6, 20時に屋内外の両面で比較した。CFの屋外側表面の温度がGW棟のそれより5~10℃ほど高く, 非暖房時でもCF断熱材両表面の温度が約4℃ほど高い。

表面温度はその時刻の外気温に支配されており, 屋内外表面で外気温との間に直線関係が認められた。(図3) 各温度測定個所と外気温との関係を求めると有意な相関がえられた。回帰式の一部を示すと以下のようになり, いずれの回帰分析でも危険率1%の有意であった。

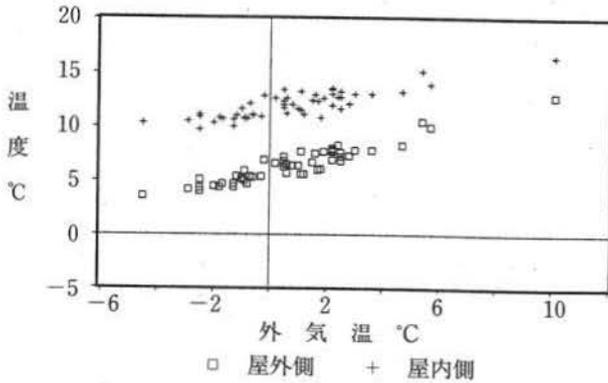


図3 CF表面温度と外気温との関係の例
東合板壁 h = 65 cm 6時

	6時	20時
CF棟		
東合板壁上屋外側	$Y = 0.66X + 5.9$	$Y = 0.52X + 9.6$
屋内側	$Y = 0.45X + 11.6$	$Y = 0.10X + 19.7$
GW棟		
東合板壁上屋外側	$Y = 0.85X + 1.7$	$Y = 0.86X + 3.5$
屋内側	$Y = 0.59X + 8.0$	$Y = 0.14X + 20.2$

Y: 断熱材表面温度(°C) X: 外気温(°C)

これらの関係式から外気温0°Cでの壁面温度を求め、両棟で比較すると表3のようになる。ほとんどの場所で、両時刻ともCF棟の断熱材表面温度が高いのが確かめられた。

CFの屋外側表面の温度がGWのそれより暖房時5°C、非暖房時に3°C高い。CF棟室内側も非暖房時にはGW棟のそれより4°C高い。

表3 両棟での壁面温度比較 (外気温: 0°C) (°C)

場所	6時		20時	
	CF棟	GW棟	CF棟	GW棟
東合板壁下 : 屋外側	4.6	0.9	6.8	1.2
: 屋内側	11.2	5.2	18.0	9.0
東合板壁上 : 屋外側	5.9	1.7	9.6	3.5
: 屋内側	11.6	8.0	19.7	20.2
天井 : 屋外側	4.6	0.8	6.2	3.1
: 屋内側	9.8	7.4	16.6	20.0

3.8 補給水量

実験時に湯沸ポットに水を毎日補給するが、その量は800から1800 mlでCF棟での量がGW棟のそれより多く、しかもその変動に周期性が見られた。

夜間の非暖房時に低下した室内湿度を高くするため、朝に室内に水蒸気が補給されるが、その量は100 g以下と計算される。また、室内に結露、凝結する水量はその期間での壁の濡れ面積変化から小さいと考えられる。この2点から、補給した水の大部分は水蒸気として実験棟の壁面を透過して屋外に拡散したと考えることができる。

一定温度で透湿による定常湿流は次式で示される。

$$W = 1.2 (X_1 - X_2) \cdot K_f \quad (2)$$

W: 材料の単位面積を単位時間に通過する湿気
の量: kg/m²h

X₁, X₂: 材料の両面に接する空気
の重量絶対湿度: kg/kg'

K_f: 湿気貫流率: kg/m²h · (kg/kg')

補給水量を測定した期間の1時間毎の室内、外気温、相対湿度から実験棟内と外気との重量絶対湿度差 (X₁ - X₂: kg/kg') を積算し、補給水量との関係で示すと図4のようになる。両者に直線関係がみられるので、補給水は透湿で屋外に拡散した水蒸気を補充するために蒸発したものと考えられる。

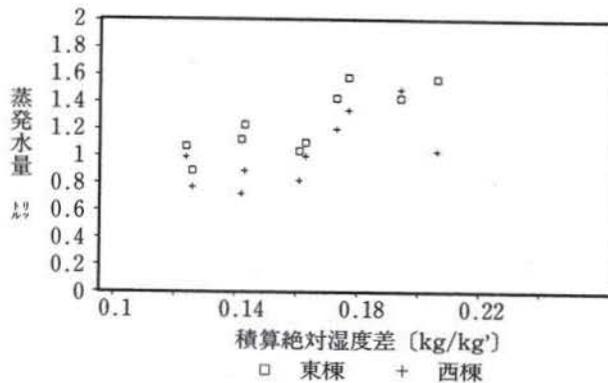


図4 補給水量と積算重量湿度差との関係

両棟それぞれで回帰式を求めると次の式になる。

$$\text{GW棟: 補給水量(kg)} = 8.39 \cdot (\text{積算重量絶対湿度差}) - 0.16 \quad \gamma = 0.78 \ast \ast \ast$$

$$\text{CF棟: 補給水量(kg)} = 6.15 \cdot (\text{積算重量絶対湿度差}) - 0.04 \quad \gamma = 0.67 \ast \ast$$

補給水全量が蒸発したのち透湿により棟外に出

表 4 見かけの湿気貫流率

積算重量絶対 湿度差(kg/kg')	K' r		
	C F棟	GW棟	比
0.120	5.9	5.4	1.1
0.160	6.3	5.3	1.2
0.200	6.3	5.3	1.2

る、その際の通路は断熱材のみである（微細なすき間は無視する）と仮定すると、上記の回帰式から各実験棟の見かけの湿気貫流率（ $K' r$ ）を算定できる。両棟の全表面積、内外の壁材質が同じであるから、両棟の差は使った断熱材の差に対応するといえ、その値が大きいほど水蒸気が通りやすいことになる。なお、（ $K' r$ ）の計算では両棟の表面積だけでなく柱などの断面積も等しいので、実験棟全体での値として求めた。各積算重量絶対湿度差のもとでの見かけの湿気貫流率を示すと表4のようになる。今回の実験範囲では、CF棟での湿気貫流率はGW棟のそれより約20%ほど大きく、より透湿しやすかったといえる。

今回の測定は一部が比較的気温が高い時期にかかったため、より寒い時期を想定し推定してみる。冬季の室温、外気温と相対湿度とを今回の実験から推定し積算重量絶対湿度差を求めると0.25程度になる。両棟での湿気貫流率比は1.23と大きくなり、寒い時期にはCFの透湿性がより発揮されると考えられる。

4. まとめ

それぞれCF, GWで断熱した実験棟での長期実験で、次項がはっきりになった。

- 1)CF棟の暖房前室温はGW棟よりも4.8°C(外気温0°C)高い。
- 2)CF棟では壁面の濡れがわずか見られる程度であるが、GW棟の壁、天井には水滴付着、濡れなどが多い。
- 3)CF棟のCF含水率は70%以下で、含水率64%以下では濡れた感じがしない。天井、床下のCFでは使用前と比較し含水率の上昇がみられない。

GW棟GWの含水率27%でも繊維間に水滴が観察され、含水率378%の天井GWは傾けると水が流れてるほどであった。

- 4)GW棟の壁面温度はCF棟のそれよりも低い。両

棟で共通して濡れの激しい南東隅床上部では、最も暖められている22時になってもGW棟ではCF棟よりも8°C低い。壁温度が低いために同部分への濡れ（結露）が激しくなったといえる。

- 5)CF棟柱の表面含水率はGW棟よりも3ないし6%低い。

- 6)CFの屋外側表面の温度がGWのそれより暖房時5°C、非暖房時に3°C高い。CF棟室内側も非暖房時にはGW棟のそれより4°C高い。

- 7)両棟での補給水量はCF棟が多く、その変動に周期性がみられた。CF棟の見かけの湿気貫流率（ $K' r$ ）はGW棟のそれより約20%大きい。

以上の諸結果から、CFを断熱材として使用した家屋の特性をGW使用家屋と比較してみる。

内断熱方式でGWを使用する場合、壁、天井での非装入部を全くなくすることは作業上不可能といえる。一方、CFの場合は乾燥状態で小薄片を空気搬送で吹き込む方法を採用するので、非装入部をなくすることが可能である。これにより壁自体の断熱性能が高くなり、壁内の断熱材表面の温度および室温も高くなり断熱材装入の本来の目的が達成されただけでなく、壁表面および壁内で結露しにくい条件となるので壁の濡れも少なくなる。

さらに、吸水性、保水性が大きいという本来の特性も壁内で発揮され、CF屋外側表面の含水率がやや高くなるが湿りはあまり感じられない。さらに、水蒸気の建物を通過しやすさの程度（湿気貫流率）はGW棟よりも20%大きい。天井、床のCF含水率に二ヶ月後も大きな変化の見られないのもこの特性を裏付けている。

このように、セルロース・ファイバーを断熱材として使用するの

家屋各部の温度を高く維持できる

室内および断熱材自体の水蒸気を屋外に排出しやすい

の両特性から、断熱強化、結露防止に適しているといえる。

参考文献

- 1) 山本里見, 秋田工業高等専門学校: 寒冷環境教育研究センター年報 NO. 6 (1992) 92
- 2) 例えば, 山田雅士 建築の結露 その原因と対策 井上書院 (1981) 37