

氏名	李 哲 鋒
学位(専攻分野の名称)	博士(林学)
学位記番号	甲第659号
学位授与の日付	平成25年9月30日
学位論文題目	撥水処理材の水分特性と木質壁への利用
論文審査委員	主査 教授・農学博士 小林 純 博士(農学) 飯島 倫明* 農学博士 信田 聡** 教授・博士(林学) 大林 宏也

## 論文内容の要旨

### 1. はじめに

木材は昔から広く使われている材料であり、生活用品・燃料・器具などのように、我々の身近でも色々な使われ方をしている。また、木材はその優れる性能から、建築用材としても構造や内外装などに使われ、重要な位置を占めている。特に木造住宅にとっては、主材料である。その他にも、屋外用建築材料・土木用材料・造園用材料・コンテナ用材などの外装・外構部材として多くの用途がある。

しかし、木材には吸水にともなう変形や腐れや虫害が生じ、このことは木材の利用上の大きな欠点であり、木材の特徴を維持し、しかも長寿命化が図れる防腐処理や塗装などの加工技術が求められている。木材と水との関係は材料としての利用を考える場合に極めて大きな課題である。

撥水剤には、使用しやすく、安全性に富んだものがあり、撥水剤を塗布しても木材そのものの美観・手触りの良さを失わず、撥水性・防水性の付与ができる上に、木材の持つ調湿性や透湿性を保持したままで寸法安定性や耐久性の向上が期待できると考える。撥水剤にはこのような特徴があるにもかかわらず、木材への利用はまだ少なく、撥水処理材の性質に関する検討も少ない。

一方、近年の木造住宅の外壁は高断熱化・高气密化が進んでおり、一旦壁内に水分が入り込むと、壁内に閉じ込められるため、壁内結露の原因となることがある。そこで、外壁の屋外側の材料に撥水性と適度な透湿性を持たせれば、壁内の水分を外壁の外側に拡散・放出できるかもしれないし、防水透湿シートが無くても壁内結露を防ぐことができるかもしれない。

そこで本論文では、撥水剤を木材に塗布した撥水処理

材の調湿性や結露に対する性質等について調べた上で、撥水処理材を用いた木質壁の性能について検討した。

### 2. 撥水性と接触角

撥水性とは、固体表面が水を弾く(濡れにくい)性質あるいはその程度を表す言葉である。材料表面の撥水性を表す尺度として、最も広く用いられている指標が材料と水との接触角である。一般的に、接触角 $\theta$ が $90^\circ$ を越えると撥水性があるとされる<sup>1)</sup>。

### 3. 結露現象と熱伝導

自然環境では熱(温度)と水蒸気(湿度)は常に密接な関係があり、建築では常に熱移動をしている<sup>2)</sup>。結露<sup>3)</sup>は、物体が冷えることで、その周囲の空気の水蒸気が露となる現象であり、我々の周りに常に見られる現象である。特に木造住宅では結露対策を十分に考えなければならない。

## 4. 実験

### 4.1. 撥水性

#### 4.1.1. 供試材料と試験体寸法

供試材にはスギ(*Cryptomeria japonica* D. Don)を用い、辺長(放射方向、接線方向)30mm、長さ(繊維方向)60mmのプレーナー仕上げをした二方桁目木取りの直方体を作製し、実験に供した。撥水剤には#0217・SV(サンオー産業製)を供試した。

#### 4.1.2. 撥水性の確認

撥水処理の効果確認には、各測定面の上に水滴を滴下して、液滴の拡大像<sup>4,5)</sup>を撮影し、 $\theta/2$ 法<sup>5)</sup>によって接触角を測定した。なお接触角は、水滴を滴下後30秒以

\* 公益社団法人日本木材保存協会

\*\* 東京大学大学院准教授(生物材料物理学)

内に繊維に直角な方向から実体写真を撮影して行った。また、接触角の測定では、測定環境（温湿度）と木材の含水率が大きい影響を与えるため<sup>5)</sup>、恒温恒湿室内（20±1℃、65±1%RH、以下同じ設定）で平衡状態になった試験体を用いて恒温恒湿室内で測定し、測定回数・水滴量・塗布回数を決定した。

#### 4.2. 吸水性

吸水性は、試験体を水中に浸せきして時間経過に伴う重量変化を測定することで評価した。試験体は、恒温恒湿室で平衡状態に調湿した後、吸水面以外の2面に接着剤（セメダイン製 ハイスーパー 30）を塗布し、アルミホイルで被覆して完全に防水した後、吸水面に撥水剤を塗布した。

浸せきは、恒温水槽（20±1℃）に吸水面を水面に垂直、上面が水面と平行になるようにして、試験体の上面が水面から50mmの深さになるように試験体全体を水中に沈め、一定時間ごとに重量を測定した。

#### 4.3. 吸・放湿性

質量法<sup>5)</sup>で木材の吸湿量を測定した。試験体は、恒温恒湿室で調湿後、4.2項と同様に吸湿面の以外の2面に接着剤を塗布し、アルミホイルで被覆した。温湿度の設定には恒温恒湿装置（いすゞ製作所製 HPAF-288-20型）を用いた。

#### 4.4. 透湿性

透湿係数の測定<sup>5)</sup>は、カップ法（JIS A 1324）に準じて行った。透湿性は、材料両側の温度が同じで、水蒸気の透過が定常状態のとき、以下の式（1）<sup>5)</sup>で示される。

$$Q = K \times \Delta P \times A \times t \dots\dots (1)$$
ここで、 $Q$ : 透湿量 (g),  $K$ : 透湿係数 ( $\text{g}/\text{m}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{mmHg}$ ),  $\Delta P$ : 材料の両側の水蒸気圧差 (mmHg),  $A$ : 透過面積 ( $\text{m}^2$ ),  $t$ : 測定時間 (h)。なお、透湿係数  $K$  の逆数を透湿抵抗 ( $\text{m}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{mmHg}/\text{g}$ ) といい<sup>2)</sup>、湿気の通りにくさを示す。

#### 4.5. 調湿性能

調湿性能を評価する方法として、箱の内外部で温度が異なる環境下で密閉箱中の湿度と温度を計る方法を採用した。また、調湿力は式（2）（JIS A 1470-2による）で求めた。

$$h = \frac{e \times V}{s \times t} \dots\dots (2)$$
ここで、 $h$ : 調湿力 ( $\text{g}/\text{m}^2 \cdot \text{C}$ ),  $V$ : 箱内の容積 ( $\text{m}^3$ ),  $s$ : 箱の表面積 ( $\text{m}^2$ )。

#### 4.6. 金属（鉄）汚染現象

供試材はスギの110×50×15 (mm)の柁目板を数枚用意した。試験片を24時間以上室内で養生した後に、塩化鉄水溶液 ( $\text{Fe}^{2+}$ ) を実験片に塗布した。色彩色差計（KONICA MINOLTA製 CR-400型）を使って一定時間に色彩色差計で測定した。色差の表示方法は JIS Z

8730に準拠して、 $L^* a^* b^*$ 表色系で色差  $\Delta E^*$  を求めた。

#### 4.7. 表面結露現象

スギの板目板（厚さ5mm）を用いて、内側の寸法が50×50×80 (mm)の箱を作製し、箱の内壁面にビニル袋を広げて入れ、氷水と保冷剤を袋の中に入れて、室内（21.5±5℃、50.5±5%RH）に置き、氷水の温度を温度計で確認すると同時に外部温度をデジタル放射温度計（YOKOGAWA製、530-01型）で測定した。

#### 4.8. 壁における結露

外壁のモデル<sup>6)</sup>（以下、「モデル」）を参考に撥水処理合板或いは無処理合板を外壁材（①）として用いて作製した。冷蔵庫内が冬期の環境条件になるように設定した。冷蔵庫内（屋外）の温湿度条件は、気象庁のデータ<sup>7)</sup>を参考して温度1~7℃、湿度20~50%とした。冷蔵庫の外側（屋内）の条件は温度18~23℃、湿度30~55%であった。壁内外の温湿度を計測すると共に結露状態を観察した。なお、温湿度の測定には、温湿度センサー（T & D製、TR-3310、精度：平均 ±0.3℃・±5%RH）、データロガー（T & D製、RTR-53）を用いた。

#### 4.9. 壁内水分の拡散・移動と結露

壁内に液体の水が浸入した状態を想定して、壁内の通気層に設置したプラスチック容器の中に水を入れた状態を観測した。冬期の屋外と屋内の環境条件を設定するために、冷蔵庫のドアの代わりにするように枠を作製し、各モデルに浸水の状態によって測定が行った。

### 5. 結果と考察

#### 5.1. 撥水性

##### 5.1.1. 測定回数の決定

同一条件で接触角の測定を繰り返すと、測定面にかかわらず接触角の変動係数が変わる。実験では測定回数は8回とした。

##### 5.1.2. 水滴量の決定

接触角の測定に用いる水滴量が変わると、接触角はその影響を受けたが、結果により測定では水滴量1.5  $\mu\text{l}$ を採用することとした。

##### 5.1.3. 塗布回数の決定

塗布回数に関わらず接触角はほぼ一定となったが、2回以上で変動係数が小さくなったので、撥水剤の塗布効果は2回の塗布で十分現れていると判断した。

#### 5.2. 吸水性

試験体を水中に浸せきして、吸水量  $Q$  と吸水時間  $t$  との間には式（3）の関係がある<sup>5)</sup>と言われている。

$$Q = K\sqrt{t} \dots\dots (3)$$
  $K$  値は、撥水剤を塗布しない場合、

柎目面>板目面であり、異方性が大きかった。一方、撥水剤を塗布すると何れも小さくなり、異方性も小さくなった。

### 5.3. 吸・放湿性

乾湿繰り返しを行った結果、撥水処理の有無に関わらず木口面からの吸湿量が多いが、柎目面と板目面からの吸湿量は少なかった。

### 5.4. 透湿性

$t$  が 18 時間以後では定常状態に達したと判断して、それ以後の測定値に帰直線をあてはめて記入した。透湿係数  $K$  は、無処理>片面処理>両面処理の順であったが、撥水処理による透湿性への影響は少ないといえる。

### 5.5. 金属（鉄）汚染

外観的には、無処理材は全体的に暗く黄色っぽくなり、撥水処理材は晩材部分に黒っぽい変色の跡が帯状で生じた。撥水処理材は無処理材に比べて色調の変化は小さく、鉄汚染による色調の変化を軽減できる。

### 5.6. 調湿性能

調湿力は、両面撥水処理材と片面撥水処理材は大体同じだが、無処理材が僅かに大きかった。しかし、撥水処理をしても木材の調湿性はほとんど変わらないと言える。

### 5.7. 表面結露

試験体の内部に氷水を入れてから 120 分経過後では、両方とも表面結露が生じた。結果によって、撥水処理の有無により試験片表面に発生する液体の水滴の形状や様子には違いがあることが分かった。

### 5.8. 壁における結露

#### 5.8.1. 木質壁のモデルと外壁の使用材料

各測定位置の水蒸気圧と飽和水蒸気圧を示した。なお、壁内結露発生の可能性のある測定位置は、測定位置の水蒸気圧>飽和水蒸気圧となる位置である<sup>6)</sup>。

壁内結露の発生程度は、撥水処理の有無にかかわらず、モデルⅢ>モデルⅡ>モデルⅠであり<sup>8)</sup>、モデルの違いの方が撥水処理の有無より大きく影響を与えた。また、壁材料の違いにかかわらず、モデルⅠよりモデルⅡの方がやや結露が発生する可能性のある位置（測定点 2, 3, 4 付近）が多かった。特に無処理材ではモデルⅠよりⅡがやや大きくなった。

#### 5.8.2. 壁内に水がある場合（浸水壁）

内部結露は、測定点 2~4 において発生の可能性があったことが分かった。

#### 5.8.3. 時間経過における相対湿度変化（非定常状態）

非定常状態における各測定点の時間経過にともなう実

測の相対湿度の変化をみると、各層の相対湿度が 100% に近いほど結露が発生しやすいと仮定したところ、測定結果でそのような部分が確認できた。また、モデルでは、窯業材、撥水処理合板よりも無処理合板の結露面積が大きくなった。

## 6. まとめ

### 6.1. 撥水処理材の水分特性

撥水処理材は撥水性の付与に伴い防水性も著しく向上する一方、吸放湿性（調湿性）にはほとんど影響を与えないということが分かった。また、吸水による寸法変化を起しにくく、寸法安定性が向上するといえる。また、鉄汚染現象の場合に彩度の変化をある程度抑えることができることがわかった。表面結露現象における結露形態や程度が撥水処理によって異なることが分かった。

### 6.2. 撥水処理材の木質壁への利用

撥水処理材を外壁の屋外側に使用した場合の木質壁の結露現象について検討した。その結果、撥水処理は透湿係数をわずかに小さくするが、冬期における外壁の結露現象にほとんど影響を与えなかった。各外壁材の防露性の差異が少ないが、モデルの違いの方が撥水処理の有無より大きく影響を与え、全体的にモデルⅢ>モデルⅡ>モデルⅠである。浸水壁に時間経過における外壁用材に無処理の構造用合板を用いた場合に結露が発生する可能性が一番高い。

撥水処理材は、撥水性を持つと同時に吸放湿速度も遅くなると考えられる。従って、寸法安定性も付与できる。同時に、撥水処理材は耐候性も向上し、撥水剤に抗カビ性能を持たせたものはさらに耐久性も向上すると考えられる。このことによって、建造物の耐久性を延ばすことができれば、資源消費を抑え廃棄物の減量にも繋がることを期待できる。

撥水材を塗布した場合、表面性状はほとんど変化しないので、木材の自然な外観を維持することができる。また、撥水剤は使用が容易で、環境への影響も極めて少なく安全性にも富んでいる。撥水処理をした木材は、以上のような特徴があることが分かり、これらを生かした利用方法などについて今後検討する必要がある。

## 参考文献

- 1) 産業技術調査研究部：“高撥水技術の最新動向—超撥水材料から最新の応用まで—”，東レリサーチセンター，東京，2005，p2, 10, pp. 1-4.
- 2) 田中俊六ら：“最新 建築環境工学 改訂 3 版”，井上書院，2012，p33.

- 3) 山田雅士：“建築の結露—その原因と対策”，井上書院，1996 増補版，p18, pp. 53-57.
- 4) キセトーナス R 超撥水剤 技術/検証資料，サンオー産業株式会社 東京
- 5) 日本木材学会・物理・工学編編集委員会：“増補改訂 木材科学実験書 I. 物理・工学編” 中外産業調査会，1990, p133, pp135-140, pp143-148.
- 6) 岡野健：木材工業，42 (2)，53-59 (1986).
- 7) 気象庁：気象統計情報—過去の気象データ，<http://www.data.jma.go.jp/obd/stats/etrn/index.php> Accessed Sept, 03, 2012.
- 8) 李 哲鋒ら：木材工業，68 (3)，104-108 (2013).

#### 審査報告概要

木材は広く使われている材料だが，吸水や吸湿に伴う変形や腐朽等の利用上の欠点があり，木材の特徴を生かし，長寿命化が図れる加工技術が求められている。木材と水との関係は材料としての利用を考える場合にきわめて大きな課題である。撥水剤を塗布した木材は撥水性が付与されるが，木材そのものもつ調湿性や透湿性などは変化しないと考えられる。しかし，これまで撥水処理材の基本的な水分特性について確認・検討した例は少ない。したがって，本論文では，撥水処理材の表面へ水滴を滴下して接触角を測定して撥水性能を確認し，つづいて吸水性および吸放湿性，調湿性能などの基礎的な水分

特性を明らかにした。さらに，撥水処理材の木質壁への利用を検討するため，外壁の最外層を撥水処理材とした木質壁体モデルで結露現象を検討した。その結果，撥水処理材は木材のもつ調湿性や透湿性を保持し，かつ防水性が著しく向上し，吸水による寸法変化を低減でき，さらに結露現象が撥水処理によって改善されることがわかった。また，木質壁へ適用した場合には外壁の結露現象を改善するという新しい知見が得られた。

よって，審査員一同は博士（林学）の学位を授与する価値があると判断した。