

撥水処理材の水分特性と木質壁への利用

2013 年

李 哲鋒

撥水処理材の水分特性と木質壁への利用

東京農業大学大学院
農学研究科林学専攻
木材工学研究室
李 哲鋒

2013

要 旨

木材は、生活用品・燃料および器具などとして昔から広く使われている材料である。また木材は、建築用材としての優れた性能から、構造材や内外装材などにも使われている。特に、木造住宅にとっては主材料である。その他にも、土木用材料・造園用材料などの外構部材として多くの用途がある。

しかし木材には、吸湿・吸水にともなう変形や腐れや虫害が生じ易く、このことは木材の利用上の大きな欠点である。このように、木材の水分特性は材料として利用を考える場合に極めて大きな課題である。そのため、木材の特徴を維持した上で、しかも長寿命化が図れる木材保存処理や塗装などの加工技術が求められている。

そのような加工技術の一つとして、木材や木質材料に撥水剤を塗布（以下、「撥水处理」）することが考えられる。撥水剤を塗布した木材や木質材料（以下、「撥水处理材」）には、木材そのものの美観や手触りの良さを失わずに撥水性と防水性が付与されと同時に、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が向上することが期待される。また撥水剤には、使用しやすく安全性に富んだものがある。撥水处理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、撥水处理材の性質に関する研究も少ない。

一方、近年の木造住宅の外壁は高断熱化と高气密化が進んでいる。しかしこのような壁では、一旦壁内に水が入り込むと、壁内に閉じ込められるため、壁内結露の原因となる。そのため防水透湿シートが外壁の屋外側に施行されることがある。しかし、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・放出させることができ、防水透湿シートがなくても壁内結露を防ぐことができる可能性がある。

本論文では、撥水处理材の調湿性や結露などに関する性質について調べた上で、撥水处理材を外壁の屋外側に使用した場合の木質壁の性能について考察し、以下のような結果を得た。

撥水处理材の水分特性：

撥水处理材は撥水性の付与に伴い防水性も著しく向上した。一方、吸放湿性（調湿性）にはほとんど影響を与えなかった。また、吸水による寸法変化を起しにくく、寸法安定性が向上した。また、鉄汚染現象による彩度の変化をある程度抑えることができた。表面結露形態や結露量が撥水处理によって異なることから木質外壁への利用可能性を示めせた。

撥水处理材の木質外壁への利用：

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は少ないが、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であった。浸水壁（壁内に水分が入った場合を想定した壁モデル）の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。

展望：

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る。このことによって、構造物の耐久性を延ばすことができれば、木材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。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。

Abstract

Wood is a material that has long been used for making everyday goods and tools, as fuel for fires, and many more uses. Due to its properties, which are superbly fitted to the requirements of a building material, one use for wood is as a construction material and for interior and exterior finishing, in particular, in wooden dwellings. It has many other uses for exterior structural components, as well, in civil engineering works, landscape gardening, and other applications.

Nevertheless, wood is vulnerable to deformation, rot, and insect damage due to the absorption of moisture and water, which are critical weaknesses in its use. Thus, the moisture properties of wood pose a very important challenge when considering its use as a material. Consequently, there is a demand for processing technologies such as coatings and preservative treatments that will extend the life of wood while preserving its properties.

One such candidate technology is to apply a water-repelling agent (below, water-repellent treatment) to wood or a wood-based material. Such a treatment would be expected to confer water repellency, waterproofing, moisture conditioning, and moisture permeability to water-repellent-treated wood or wood-based material (below water-repellent-treated wood materials) while preserving the innate beauty and feel of the wood, and at the same time, providing improved dimensional stability and durability. Despite some water repellents being very safe and easy to use, water-repellent treatments are not much used on wood, and little research has been carried out on the behavior of water-repellent-treated wood materials.

Recent years have seen progress in achieving heat insulation and airtightness in the exterior walls of wooden houses. Once water gains entrance to these walls, however, it is trapped there and gives rise to condensation in the walls. For this reason, moisture-permeable waterproof sheet is sometimes used on exterior walls.

However, if the material of exterior walls is conferred with water repellency and an appropriate level of moisture permeability, the water in the walls can be diffused and released from the exterior walls, and condensation in the walls can be prevented even without a moisture permeable waterproof sheet.

In this report, the properties of water-repellent-treated wood materials associated with moisture conditioning, condensation, and other parameters are examined and the performance of wooden exterior walls with water-repellent-treated wood materials are considered.

Moisture properties of water-repellent-treated wood materials:

The waterproofing properties of the material were dramatically augmented by conferring water-repellency. However, there was almost no influence from this on the absorption/desorption of moisture (moisture conditioning). Also, dimensional changes due to water absorption were suppressed, improving dimensional stability. Changes in color intensity due to iron contamination were suppressed to some degree. Since the form and amount of surface condensation was altered by water-repellent treatment, it was demonstrated that this method is practicable in wooden exterior walls.

Use of water-repellent-treated wood materials in wooden exterior walls:

Water-repellent treatment slightly reduced the permeability coefficient, but had almost no effect on condensation on the outer wall in winter. There were few differences between different exterior wall materials in condensation proofing. However, differences between models had a greater influence than did the water-repellent treatment. Overall, the condensation proofing was greatest in the order Model III > Model II > Model I.

Untreated structural plywood used as the material for an exterior wall penetrated by water (a model that envisioned a case in which moisture had entered into the wall) showed the highest potential for condensation.

Future prospects:

It is assumed that the durability of water-repellent-treated wood material are further enhanced by improving weather resistance and giving the water-repelling agent antifungal properties. If the durability of a structure can be extended in this way, we can expect this to reduce the consumption of wood resources and the generation of wastes.

Methods that take full advantage of these factors must be further examined in the future.

目次

要旨	1
Abstract	3
目次	5
記号説明	11
第一章 序論	13
1. 諸言	13
1.1. 研究の背景	13
1.2. 研究の目的	14
2. 既往の研究	15
2.1. 自然界での撥水性と撥水剤研究の始まり	15
2.2. 撥水性の応用	15
2.3. 撥水剤による撥水性付与以外での撥水性	15
2.4. フッ素系・シリコン系撥水剤への注目	16
2.5. 撥水処理に伴う耐久性・耐汚（染）性・防カビ性などの付与	16
2.6. 住宅における結露	17
3. 本研究の位置付けと展望	18
3.1. 本研究の位置付け	18
3.1.1. 撥水処理材の性質に関する研究	18
3.1.2. 木造住宅の外壁の高断熱化と高气密化に伴う結露問題	18
3.1.3. 撥水処理材の木造住宅の木質壁への利用とそのための研究の必要性	19
3.2. 撥水性を応用した機能性材料の展望	20
4. 本論文の概要	21
4.1. 第一章（序論）	21
4.1.1. 研究の背景	21
4.1.2. 研究の目的	21
4.1.3. 既往の研究	21
4.1.4. 本研究の位置付けと展望	22
4.2. 第二章（撥水処理木材の性質）	23

4.3. 第三章（撥水处理材の木質壁への利用）	23
4.3.1. 実験1（壁の内部に浸水が無い場合）	24
4.3.2. 実験2（壁の内部に浸水した場合）	24
第二章 撥水处理材の性質	25
1. 撥水性	25
1.1. 目的	25
1.2. 実験	25
1.2.1. 供試材・試験片・実験装置	25
1.2.2. 撥水性・接触角	25
1.2.3. 接触角の測定	26
1.2.4. 撥水剤の塗布（撥水处理）	27
1.2.5. 水滴量・測定回数・塗布回数の決定	27
1.3. 結果と考察	27
1.3.1. 水滴量の影響	27
1.3.2. 測定回数の決定	28
1.3.3. 塗布回数の決定	30
1.3.4. 撥水効果の確認	31
1.4. 結論	32
2. 吸水性	33
2.1. 目的	33
2.2. 実験	33
2.2.1. 試験片と装置	33
2.2.2. 実験条件と手順	33
2.2.3. 吸水量の計算	33
2.2.4. 吸水係数の計算	34
2.3. 結果と考察	34
2.4. 結論	35
3. 吸放湿性と調湿性	37
3.1. 目的	37
3.2. 実験	37
3.2.1. 吸放湿性	37
3.2.1.1. 試験片と装置	37
3.2.1.2. 試験片の調湿と乾湿繰り返し手順	37
3.2.2. 調湿性	38

3.2.2.1.	試験体	38
3.2.2.2.	実験装置	38
3.2.2.3.	測定手順と温湿度条件	38
3.3.	結果と考察	39
3.3.1.	放湿性に関する結果と考察	39
3.3.2.	調湿性に関する結果と考察	41
3.4.	結論	42
4.	透湿性	44
4.1.	目的	44
4.2.	実験	44
4.2.1.	供試材料と試験片	44
4.2.2.	試験方法と透湿係数	44
4.3.	結果と考察	45
4.4.	結論	46
5.	鉄汚染	48
5.1.	目的	48
5.2.	実験	48
5.2.1.	供試材と装置	48
5.2.2.	$L^*a^*b^*$ 表色系と色差	48
5.2.3.	実験条件と手順	49
5.3.	結果と考察	50
5.3.1.	外観による観察	50
5.3.2.	色調の変化	51
5.3.3.	色差	53
5.4.	結論	53
6.	表面結露	54
6.1.	目的	54
6.2.	実験	54
6.3.	結果と考察	54
6.4.	結論	56
第三章 撥水処理材の木質壁への利用		
(木質壁における結露)		
1.	目的	57

2.	壁における熱伝導と湿気の移動	57
2.1.	伝熱	57
2.2.	定常伝熱・非定常伝熱	57
2.3.	湿気の移動と定常状態・非定常状態	58
2.4.	結露と単層壁	59
2.5.	結露の判定	61
3.	壁の断熱構法（内断熱と外断熱）	62
4.	壁の内部における水	63
5.	実験	65
5.1.	木質壁のモデル化	65
5.2.	供試壁材料の物性値と温湿度の測定装置	67
5.3.	屋内外の温湿度条件	69
5.4.	実験1（壁の内部に浸水が無い場合）	70
5.4.1.	実験方法（撥水処理とモデルの違い）	70
5.4.2.	実験方法（外壁材料・撥水処理とモデルの違い）	70
5.5.	実験2（壁の内部に浸水した場合）	71
6.	結果と考察	72
6.1.	実験1	72
6.1.1.	撥水処理とモデルの違い	72
6.1.2.	外壁材料・撥水処理とモデルの違いによる結露発生位置の比較	74
6.2.	実験2	76
6.2.1.	浸水壁と外壁材料・撥水処理	76
6.2.2.	非定常状態における相対湿度の経時変化	79
7.	結論	82
第四章 総括		83
1.	木材資源の有効活用と目的	83
2.	撥水処理材の性質	83
2.1.	撥水性	83
2.2.	吸水性	83
2.3.	吸放湿性と調湿性	83
2.4.	透湿性	83
2.5.	鉄汚染	83

2.6. 表面結露.....	84
3. 撥水処理材の木質壁への利用.....	84
4. 結 論.....	84
参考文献.....	85
謝 辞.....	87
補 論.....	88
夏期の壁内結露現象	88
附 録.....	94
論文に関連する発表	94
補充（結露計算、結露問題、断熱・気密性など）	94

記号説明

本論文で使われた主な記号

θ : 接触角 (°)

h : 着液高さ(mm)

r : 接触半径(mm)

γ_s : 固体表面の表面張力(m·N/m)

γ_L : 液体の表面張力(m·N/m)

γ_{Ls} : 固体と液体間に界面張力(m·N/m)

Q_a : 吸水量(g/cm²)

W_{nh} : 浸せき後の各測定時における試験体質量 (g)

W_1 : 防水処理した試験体の質量 (g)

A_a : 吸水面の総面積 (cm²)

Q_p : 透湿量(g)

K : 透湿係数 (g/(m²·h·mmHg))

ΔP : 材料の両側の水蒸気圧差 (mmHg)

A_p : 透過面積 (m²)

E : 飽和水蒸気圧 (hPa)

E_p : 水蒸気圧 (hPa)

e : 容積絶対湿度 (g/m³)

h : 調湿力 (g/m²°C)

V : 箱内の容積 (m³)

S : 箱の表面積 (m²)

U : 熱貫流率 (W/(m²·K))

α_1 、 α_2 : 壁両側の熱伝達率 (W/(m²·K))

λ : 壁の熱伝導率 (W/(m·K))

q : 単位面積、単位時間当たりの伝熱量(W/m²)

n : 熱流方向の微小長さ(m)

R : 熱貫流抵抗(m²·h·°C/kcal)

Z : 湿気貫流抵抗(m²·h·mmHg/g)

f_s : 多層壁内の飽和水蒸気圧 (mmHg)

f_a : 多層壁内の実在水蒸気圧 (mmHg)

第一章 序 論

1. 諸 言

1.1. 研究の背景

木材は、昔から生活用具や燃料に、建材用材としては構造用材や内外装に広く使われてきた。特に木造住宅では主材料であり重要な位置を占めている。木材の資源的特徴は、再生産可能な循環資源である。しかし、その適切な循環と環境保全のためには、森林における生長量より伐採量を少なくし、資源の長期的な維持を図る必要がある。また、CO₂ 排出抑制目標を経済的かつ効果的に達成するには、木造住宅のようなかたちで貯蔵することが重要である。このような木材の炭素貯蔵（固定）能力を活かすためには使用期間を長くする必要があり^[1]。このように木材の有効利用は、我々の安定した生活基盤の確保に深く関わっている。

木材の利用に際しては、その水分管理は重要であり、水分状態の変化に伴い寸法変化や腐朽を起こしたりさまざまな性質が変化したりする。そして、そのことが利用上のトラブルの原因となることが多い。

そのため木材の利用においては、防水・保護・美観などを目的として、塗装や各種の処理が行われることがある。木材の塗装は一般に、表面に塗膜を形成させる場合が多いが、塗膜をほとんど形成しない浸透性の塗料や亜麻仁油などのオイルフィニッシュ用の仕上げ剤を用いた塗装もある。塗膜を形成しないオイルフィニッシュなどの特徴としては、木材自体の個性と自然美を引き出せること、塗膜の割れや剥離が生じないこと、撥水性や吸透湿性が良いことなどがある^[2]。一方近年、衣類や傘の防水加工には撥水剤が利用されることが多くなっており、撥水剤を塗布した布帛は透湿性を保持したまま撥水性・防水性を付与できることが特徴である。

撥水剤を木材に塗布した場合も、空気や水蒸気は通すが水を通さないという特殊な構造で木材表面に密着している^[3]。また、オイルフィニッシュと同様に、木材そのものの美観・手触りの良さや調湿能を維持したまま、寸法安定性や耐久性の向上が期待できる。さらに撥水剤には、使用しやすく、環境への影響が極めて少なく、安全性に富んだ製品も出てきている^{[3][4]}。このような特徴があるにもかかわらず、木材への撥水剤の利用はまだ少なく、撥水剤を塗布した木材の性質に対する検討は少ないのが現状である。

一方現在、各分野で省エネルギーが重要視されているが、木造住宅における外壁の高断熱化・高气密化も重要な課題である。たとえばドイツにおいては、エネルギー消費量に占める暖房エネルギーの割合が高く、建物外壁の断熱性の改善が極めて有効な手段であることが立証されている^[5]。中国では、外壁の熱効率が劣るなど建築物の省エネ技術は遅れて

いるが、新築や改造する際には省エネ効果にも現在は力が注がれている。もちろん日本においても、住宅性能の一つである温熱環境と省エネ対策がますます注目され、木造住宅の外壁は高断熱化・高气密化が進んでいる。

そのような現状の中で、冷暖房における省エネルギー、住居の快適性の向上、結露防止など木造住宅の気密・断熱化に関連した「住宅性能表示制度」¹⁶⁾が施工された。

木造建築物の外壁の屋内側には調湿性（吸放湿性）や防湿性、さらに結露しにくい性質が求められ、屋外側では撥水性や防水性が重要である。また近年の高断熱・高气密化が進んだ外壁では、施工時や使用時に隙間や穴を通して建物の内外から外壁の内部に湿気が入り込むと、壁体内部にたまった湿気は壁外へ排出されにくい。そのため壁内の温度が低くなると、壁内に結露が発生しやすい環境になり、カビの発生や腐れを誘発して建物の耐久性を落とす原因となる。また、繊維系の断熱材の中に湿気が入り込むと、断熱性能も低下する。

壁内結露を防ぐためには、壁内に通気層を設けて積極的に換気する方法もあるが、外気の状態によっては逆効果になることもある。また、外壁の屋外側に防水透湿シートを施工する場合もある。

しかし、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防水透湿シートがなくても壁内結露を防ぐことができるかもしれない。一方、これまでの報告^{17) 18)}により、シリコン水系撥水剤で処理をした木材は高い撥水性を持つが、素材の持つ透湿性や調湿性は失われないという性質を持つことが確認されている。したがって、撥水処理をした木材を外壁に用いることによって、壁内結露を軽減できるかもしれない。

1.2. 研究の目的

木材の利用にあたっては、水分の管理が重要である。特に、木造住宅などの建築材料として木材や木質材料を用いる場合には、建物の耐久性や住環境の快適性などと深く関わるので重要である。そのような建築材料として、たとえば木造住宅の外壁材として撥水処理剤をした木材や木質材料（以後、「撥水処理材」）を利用しようとするにはその性質を十分理解する必要があるが、これに関する研究は少ない。

従って、撥水処理をした木材の基本的な水分（移動）特性を解明するために、シリコン系撥水剤¹⁴⁾を塗布した木材の調湿性や結露特性などの撥水性・寸法安定性・吸水性・吸放湿性・調湿性・透湿性・耐鉄（金属）汚染性や表面結露現象について検討することを目的とした。また、高い撥水性を持つが素材の持つ透湿性や調湿性は失われないという性質を持つ撥水処理材を木造住宅の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することを目的とした。

2. 既往の研究

2.1. 自然界での撥水性と撥水剤研究の始まり

自然界には撥水性の例が沢山ある。例えばハスやサトイモのロータス効果 (Lotus effect) がよく知られている。日本に撥水表面の実現の端緒を開くものとなった渡辺、鄭らの研究は特許として出願されている^{[9][10]}。人工的な撥水剤の研究と利用は1950年代前後から様々な方法で行われてきた^[11]。

2.2. 撥水性の応用

撥水剤は繊維の撥水加工剤として早くから商品化され、続いて食品・化粧品・医療材料などに利用されるようになってきた^[3]。また最近開発されたものは、基本的な撥水・防水性能の向上が図られた上に、木材・コンクリートなどの構造物の劣化を防ぐことができ、使用しやすく、安全で環境への影響も極めて少ないものもある^[3]。そのため、木質材料の撥水処理の研究と利用は基材の耐久性の向上に着目したものもある。

峯村ら^[12]は、塗膜を作らない表面保護法としてカラマツ材に撥水剤を塗布し、表面の変色についてウエザメータと屋外暴露で検討した。その結果、リグニンの光分解と分解物および撥水剤の雨水による溶脱で、材色が白色ないし灰色化して表面も荒れることがわかった。これに対して、耐光性顔料着色による照射光減少が有効で、内装用の表面仕上げ法として、PEG (Polyethylene glycol 400) をワックス剤と併用して使うと、光変色抑制を兼ねた表面保護ができることを明らかにした。

2.3. 撥水剤による撥水性付与以外での撥水性

矢田ら^[13]は、パラフィンによる処理をし、その融点が温度の変化による撥水性(接触角)の変化に影響を与え、吸湿速度を遅らせる効果があることを報告している。

また、瀬戸山^[14]はCF₄の大気圧プラズマ処理により高撥水性・吸湿性を付与し、防水透湿性の機能(例えば、ゴアテックスに匹敵するような)を持つ木材処理法について紹介した。ここで、大気圧プラズマ処理装置は実験室段階のものであるが、この処理法は従来の高真空を要する低温プラズマ法では限界があった重厚長大な素材への応用実現に向けて展望を開くものである。

同じように、結露などによる木材の劣化を防止する目的で、片上ら^[15]はエチレンのプラズマ重合による処理をした処理木材の耐水試験で、10日間水中に浸漬した後も大きい接触角を維持し、処理前後の外観の肉眼による色差は確認できなかったとしている。

さらに、シリコンモノマーを塗料のように木材表面に塗布した後、大気圧プラズマで

重合処理をしても、フッ素処理と同様に高撥水性を示すと同時に、良好な防汚性能を持つ木材が得られることが確認された^[14]。

2.4. フッ素系・シリコン系撥水剤への注目

しかし、前述(2.3)のような処理による撥水性は不十分であるし、処理の容易さや安全性に関して望ましくないこともある。そこで、フッ素系撥水剤とシリコン系撥水剤が注目されることになった。

装飾塗料と塗装における最新の解決方法、つまり木材用撥水剤の発展方向はフッ素系とシリコン系に向かっている。シリコンを基にした新材料添加剤を入れると、低VOCで耐水性が向上して強撥水性を付与できる^[3]。シリコン系撥水剤はフッ素系撥水剤より歴史が古いが、近年ではフッ素の効果より広く利用されているようになってきた。また、衣料品や医療品や食品などに利用する際には人間への安全性の面からシリコンが高く評価されている。さらに、フロンによる環境破壊、柔軟性と耐洗濯性からもシリコン系のほうが衆目されている。

海外でも新しい水性系の撥水剤に関して研究を進めている。例えば、アメリカのSTARK LA^[16]は、シリコンに親水性基を導入すると、塗布された木材などの素地と反応・架橋して水不溶性になり疎水性面を形成するとした。さらに、各種素地に塗布した場合のデータによって20%濃度で一年以上も安定であると言及した。それは透明な水溶液で、木部やコンクリートによく浸透することを示し、このようなシリコン樹脂の応用は実用化できると述べた^[17]。

そうした背景から、撥水处理により木材をより長く、より美しく使用していく可能性が見いだされた。

2.5. 撥水处理に伴う耐久性・耐汚(染)性・防カビ性などの付与

上記(2.4)のような状況の下で、撥水剤には、塗料として木質材料に撥水性を付与したうえで、木材の耐久性・耐汚染などを付加した場合の性質も追求されるようになってきた。

この中で、抗カビの性能が注目された。FEIST^{[18][19][20][21]}は、屋外暴露木材のカビをおさえる撥水剤と防カビ剤を併用した場合の効果を研究した。最終的な処理効果に影響する木材表面・処理方法・環境条件などの因子について考察し、天候・建築様式との相互関係について記述した。また、浸透系の処理剤は表面に塗膜を形成しないが、木材の前処理・撥水性防腐剤・撥水剤塗装などに関して低コストで維持管理しやすく耐久性があるということに言及した。

斎藤^[22]は、内壁用仕上げ塗装剤の機能について再考し、内装の湿害にはパイプの保温工事でセメントに撥水性の防水剤を多量に混ぜたモルタルを使えばカビの防止が可能だとい

うことに言及した。

山本ら^[23]は、木材の吸水を防止するために、従来から各種の撥水剤が検討・使用されてきているが、長期にわたる屋外暴露に耐えられるものは今のところ確立されていないという視点から、木材用撥水剤の耐候性の向上について検討した。

また、小田（川上塗料）^[24]は、木材用『スイヨウ撥スイ 150』について、降雨試験後の形状変化、水滴滴下による耐吸水試験、耐汚染(耐汚染浸透)性試験による撥水処理の効果を示した。

木口^[25]は、木材用造膜型塗料と木材保護塗料の性能と問題点、および基材処理について解説し、今後の処理技術について展望した。その中で、木材素材に利用するために研究開発を集中することが基本的に重要であるとした。

他の性質についても、少ないがいくつかの研究がある。DAHLEN Joseph ら^[26]は、トル油ロジンによる撥水処理をした外装材（マツ材）の撥水性および寸法安定性について検討した。その結果、無処理に比べて吸水量が約 3 分の 1 に低下し、亀裂発生および変形が減少したと報告している。また林^[27]は、撥水性向上効果を付与した変性ケイ酸塩系樹脂塗料の防蟻効果について実験検証した。さらにまた、高付加価値・多機能化などを目指した新製品や用途の開発が進むとともに、他の応用例として、汚れ防止、防霧、着霜、着雪、凍結防止などがある^[28]。

2.6. 住宅における結露

木造住宅の結露に関する研究はたくさんある、特に建築分野の視点から構造・工法・使用材料などについての研究は大変進んでいる。

岡野^[29]は、湿気と内装との関係について論じ、特に内装材料の選択・住居環境（温湿度）・内装壁の構造などの問題点を整理した。そこでは、住宅の換気と材料の調湿性が重要だということが明確になり、幾つかの壁構造とその湿気の動きを分析して壁内結露の防止のため調湿能のある壁をつくることが可能であることが分かった。

山田^[30]は、建築物の構造・構法と使用材料に関連した結露に着眼し、熱・湿気の拡散・移動について詳しく述べた。

坂本、石井、鈴木らによる、木造住宅の耐久性向上（耐候性・結露防止）に関する研究^[31]^[32]^[33]^[34]^[35]^[36]^[37]^[38]は、住宅の工法、通気層、断熱・気密構造などに焦点をあてた。

壁内結露についての考察は、一般的に時間経過とともに変化する材料の熱容量の変化を略して、定常状態を想定して検討する^[30]^[39]^[40]。しかし田中ら^[41]は、北海道と沖縄の特徴的な場所を対象として非定常状態で考察した。同じ工法でも、地域の気象条件により、壁体内の湿気性状に不具合が生じるため、非定常シミュレーションにより確認する必要があるとした。

3. 本研究の位置付けと展望

3.1. 本研究の位置付け

3.1.1. 撥水処理材の性質に関する研究

既往の研究で述べたように、撥水剤や撥水処理の方法、撥水性の利用に関して、様々の領域で研究・利用が進められている。また近年、企業および研究機関の取り組みが活発化している（表 1.1）^[42]。しかし、撥水処理の木材や木質材料への利用やその視点から撥水処理を検討した研究は少ない。従って、撥水処理材の性質を解明することが不可欠である。

表 1.1 撥水性材料の開発経緯^[42]

開発メーカー	技術内容
(財)応用科学研究所	複合メッキ
巴川製紙所・東レファインケキカル社	フッ素繊維シート、テフロン繊維からなる不織布
帝人	超撥水性布
JR鉄道総研	雪氷固着防止コーティング剤
NTT	粉体塗料、成形体
秩父小野田・アスク・渡辺(応用科学研究所)	フッ素樹脂材料
三井造船	静電塗装による撥水
松下電器産業	撥水性フィルム
東電環境エンジニアリング	撥水性材料、成形体 スプレー塗装による撥水性表面
花王	アルキルケテンダイマー(AKD)処理した表面が超撥水性を示す、表面のフラクタル性が寄与する(研究中)
山形大学	含フッ素高分子とシリコーン高分子とのグラフト共重合体(研究中)

3.1.2. 木造住宅の外壁の高断熱化と高气密化に伴う結露問題

近年、省エネルギー化を目指して木造住宅の外壁は高断熱化・高气密化が進んでいる。このような外壁には防湿層が設けられることが多いが、施工時や使用時に一旦壁内に水分が入り込むと、その水分は壁内に閉じこめられるため、壁内結露の原因となることがあり、それにとまなう木材の腐れ・カビの発生などの問題が生じ始めた。

壁内結露は、屋外側の温度が屋内側の温度より低く（冬期の場合）、外壁の室内側にある断熱材が屋内の熱を遮って外壁の外壁材の温度が低いときに、室内の空気が壁の中に入り、断熱材の中を透過してその空気の露点温度より低い温度の外壁材に接触して結露する現象である（図 1.1）。したがって、プレハブ住宅の普及と共に気密性や断熱性の良い住宅が求められるようになり、断熱材を壁内部に使用するようになったことがこの問題の原因であ

る。

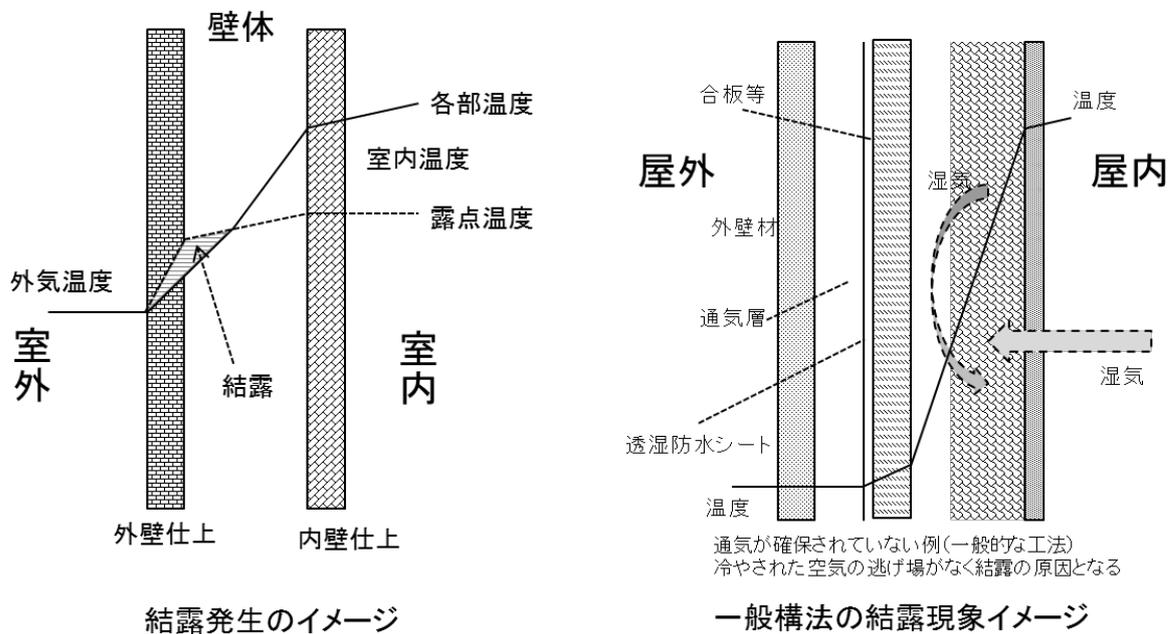


図1.1 木造住宅の結露現象

3.1.3. 撥水処理材の木造住宅の木質壁への利用とそのための研究の必要性

建物を長持ちさせるためには、湿気から木材を守ることが最重要課題である。現在の高断熱化・高气密化が進んだ木造住宅の外壁では、断熱材の外側（外気側）に防水透湿シートを施工するケースが多い。壁内結露を防ぐためには、壁内を積極的に換気する方法も考えられるが、外気の状態によっては逆効果のこともある。しかし、外壁に適度な透湿性があれば壁内結露を防ぐことができるかもしれない。例えば、撥水処理材は撥水性を持つが調湿性は失われない、という特徴がある。したがって、このような特徴を生かした用途の一つとして、撥水処理材の外壁への利用が考えられる。その際には、構造・施工方法や社会的・経済的な面からも検討すべきである。

木材や木質材料には、吸水にともない変形や腐れや虫害が生じる。このことは木材や木質材料の利用を考える場合に極めて大きな欠点である。この欠点を補うために木材保護塗料が使われるようになってきている。木材保護塗料の市場規模は約 65 億円と推計される^[4]が、公共工事の減少などにより、需要は減少傾向にある^[43]。メーカーや輸入販売会社間での価格競争が厳しくなる中で、いかに付加価値を高めていくかが問われており、環境対応の流れに呼応し、安全で環境にやさしいとされる水性塗料へのシフトの動きもある^[44]。

一方、ニーズとして耐久性の向上が根強くあり、環境と機能の両立をいかに図るかも大きな問題である。撥水処理材の利用を考える場合には、その性能の他にも、現場における

操作の簡便さや耐久性も重要であり、コストも経済的に重大であろう。さらに今、多様な住宅建築工法が存在しているが、いずれの工法においても、撥水処理材は撥水性を有するが、吸放湿は行われることに着目するべきである。撥水処理材が吸放湿性を持っていること、すなわち湿度調節機能を持っていることは健康・快適性・湿害防止など居住性の観点からきわめて重要なことであると考えられる。

しかし、これらの問題の解決に向けた研究は少なく、全ての因子についての分析は難しいので、建築と環境、建材の耐久性などの条件の内のいくつか組み合わせたものがいくつかあるだけである。

例えば、気候条件および熱湿気の伝達条件、地中における熱と湿気、室内環境と伝達条件などに言及した研究^[45]、耐久・強度などの性能の面を考量して、建築用材の選択方法を整理した研究^[46]、坂本らによる建築分野の視点から、木造住宅の結露について議論した研究^[47]^[48]^[49]^[50]^[51]、鈴木らによる、木造住宅の耐久性向上のための、建築工法・断熱手法などによる解決方法についての研究^[52]^[53]などがある。

このように、木造住宅の断熱・気密性向上を目的として、現在の断熱構法の普及と省エネ手法の開発に集中しているが、壁材料の処理、特に撥水処理に関する研究はまだ少ない。

従って、こうした壁の高機能化に取り組む上では、撥水のメカニズムや特徴を理解し、用途やニーズに応じた検討がなされることが必要であり、撥水処理材の性質や木質壁におけるその応用技術および制御技術へのアプローチの契機となればと考えている。

3.2. 撥水性を応用した機能性材料の展望

最近では、撥水性を応用した機能性材料は、様々な塗料や建造物の外壁、日常雑貨品や窓ガラスなどのコーティング加工に活用されている。材料表面の撥水性および親水性は製品の品質や機械的性能と関わっているため、多くの生産現場で求められる重要な性能要素となっている。また、自動車のフロントガラスやミラー、建造物の外壁や窓ガラス、様々な生活用品や衣料、医療などの分野に広く利用されている。最近では、ディスプレイ用機能性フィルムや太陽電池・燃料電池・電気二重層キャパシタといったエレクトロニクスや新エネルギーの分野への応用展開も試みられ^[54]、注目を集めているが、未解明な部分も多く、研究途上の分野といえるだろう。

4. 本論文の概要

4.1. 第一章（序論）

4.1.1. 研究の背景

木材資源の適切な循環と環境保全のためには、木材の炭素貯蔵（固定）能力を活かす必要があり、そのためには使用期間を長くする必要がある。また、木材や木質材料の特性や性能を十分に活かして有効に利用するためにも、その水分管理が重要であり、塗装や各種の処理などが行われる。

撥水剤を木材や木質材料に塗布した場合には、非造膜系塗料のように、木材そのものの美観・手触りの良さや調湿能を維持したままで、耐久性や寸法安定性の向上が期待できる。しかし、木材や木質材料への撥水剤の利用はまだ少なく、撥水剤を塗布した木材の性質に対する検討は少ないのが現状である。

木材や木質材料が最も多く使われるのは木造住宅であり、木造住宅の外壁の屋内側には、調湿性（吸放湿性）・防湿性や結露しにくい性質が求められ、屋外側では防水性が重要であり、壁内結露が生じにくいことも重要である。現在のように、高断熱・高气密化が進んだ外壁では、何らかの理由で外壁の内部に湿気が入り込むと湿気は壁外へ排出されにくい。そのため結露が発生しやすい環境になり、カビの発生や腐れを誘発して建物の耐久性を落とす原因となる。また、繊維系の断熱材の中に湿気が入り込むと、断熱性能も低下する。

シリコン水系撥水剤で処理をした木材は高い撥水性を持つが、素材の持つ透湿性や調湿性は失われないという性質を持つので、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結露を防ぐことができる可能性がある。しかし、撥水処理材を外壁に用いた場合の性能や効果については検討されたことが無い。

4.1.2. 研究の目的

本論文では、シリコン系撥水剤を塗布した木材の調湿性や結露特性などの性質について検討すること、また、撥水処理を施した木質材料を木造住宅の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することを目的とした。

4.1.3. 既往の研究

自然界における撥水性の例としてロータス効果がある。一方、人工的な撥水剤の研究と利用は 1950 年代前後から始まった。撥水性の応用は、繊維の撥水加工から始まり、続いて食品・化粧品・医療材料などに及んできた。さらに、基本的な撥水性の付与に加えて、木材・コンクリートなどの構造物の劣化を防ぐ目的でも使用されるようになってきており、木質材料の撥水処理の研究と利用は基材の耐久性向上に着目したものもある。撥水剤以外での撥水性としては、 CF_4 やシリコンモノマーの大気圧プラズマ処理などが有る。80 年

代後半 90 年代から、フッ素系・シリコン系撥水剤が注目され、シリコンに親水性基を導入すると、木材などの素地と反応して水不溶性になり、疎水性面を形成する。それは透明な水溶液で、木部やコンクリートによく浸透する。そうした背景から木材をより長く、より美しく使用していく可能性が見いだされた。撥水処理にともなう耐久性・耐汚（染）性・防カビ性などの付与について着目し、屋外暴露木材のかび防止に撥水剤と防かび剤を併用した場合の効果や木材用撥水剤の耐候性の向上、降雨試験後の形状変化・水滴滴下による耐吸水試験・耐汚染(耐汚染浸透)性試験による撥水処理の効果、トール油ロジンによる撥水処理をした外装材（マツ材）の撥水性および寸法安定性、変性ケイ酸塩系樹脂塗料の防蟻効果について検討した研究もある。

住宅における結露に関しては、内装材料の選択・住居環境（温・湿度）・内装壁の構造などの問題点や建築物の構造・構法と使用材料に関連した結露に着眼した研究。北海道と沖縄の特徴的な場所を対象として非定常状態で考察し、地域の気象条件により、壁体内の湿気性状に不具合が生じるため、非定常シミュレーションにより確認する必要があるとした研究もある。

4.1.4. 本研究の位置付けと展望

日本における撥水性表面に関する研究の端緒となった渡辺、鄭らの研究^{[9][10]}以来、企業および研究機関の取り組みが活発化しており^[42]、建材としての木材・木質材料に撥水処理が利用されるようになってきている。撥水処理をした木材は、撥水性を持つ他に、木材の持つ調湿性は失われぬなどという特徴がある。このような特徴を生かした用途について、検討すべきだと考えている。撥水処理木材の性質に関する研究が少ない、建物を長持ちさせるためには、湿気から木材を守ることが最重要課題である。しかし、これらの問題の解決に向けた研究も少ない。

近年、木造住宅の外壁は高断熱化・高气密化が進んでいるが、施工時や使用時に一旦壁内に水分が入り込むと、その水分は壁内に閉じこめられるため、壁内結露の原因となることがある。このような外壁に適度な透湿性があれば壁内結露を防ぐことができるかもしれないので、撥水処理材が利用できるかもしれない。このような用途やニーズに応じるためには、撥水処理材の特徴や性質について知る必要があり、さらに木質壁への応用技術に関する基礎データが必要である。

撥水性を応用した機能性材料は、様々な塗料や建造物の外壁、日常雑貨品や窓ガラスなどのコーティング加工に活用されるようになってきているが、未解明な部分も多く、研究途上の分野といえるだろう。

この研究が、撥水処理材の特徴や性質の解明とそれを活かした用途拡大のためのアプローチの契機となればと考えている。

4.2. 第二章（撥水処理木材の性質）

撥水剤を塗布した木材は、木の自然な質感や調湿性を保持した上で撥水性や防汚性などが要求される部分で使用できる可能性がある。さらに撥水剤には、使用しやすく、環境への影響が極めて少なく、安全性に富んだ製品も開発されている。

このような特徴があるにもかかわらず、木材への撥水剤の利用はまだ少なく、撥水剤を塗布した木材の性質に対する研究は少ない。そこで、撥水処理剤を塗布した木材の性質について検討した。

ここでは、シリコーン系撥水剤を塗布した木材（スギ）の①撥水性を確認するために、その評価指標としての接触角を測定する際の水滴量・測定回数を決定したうえで、塗布回数を変化させて撥水性を確認した。その後、撥水剤を塗布した木材の②吸水性、③吸放湿性（調湿性）、④透湿性、⑤金属（鉄）汚染性を評価し、さらに⑥結露現象について観察した。

その結果、以下のようなことがわかった。

① 撥水性：

2回の塗布で撥水効果が十分現れていると判断できた。その時の塗布量は合計約75~175g/m²で、3断面のいずれの面上でもおよそ接触角は122°で、無処理材のもの2~3倍であった。

② 吸水性：

吸水係数は、撥水処理によっていずれも小さくなり、木口面(0.0572) > 柀目面(0.0193) > 板目面(0.0142)で、無処理の場合と比べて吸水は遅くなった。したがって、吸水による寸法変化が起りにくくなった。

③ 吸放湿性と調湿性：

吸放湿量は、撥水処理の有無によってほとんど差が無かったので、撥水処理をしても吸放湿性（調湿性）にはほとんど影響を与えない。

④ 透湿性：

透湿係数は、撥水処理によってわずかに小さくなるが、透湿性への影響は少ない。

⑤ 鉄汚染：

塩化鉄水溶液を塗布しても、撥水処理材は無処理材に比べて色調(L^* 、 a^* 、 b^*)の変化は小さく、鉄汚染による色調の変化を軽減できた。

⑥ 表面結露：

撥水処理の有無は、表面結露による水滴の形状や様子に影響を与えた。

4.3. 第三章（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。

4.3.1. 実験 1 (壁の内部に浸水が無い場合)

① モデルによる結露発生位置の違い：

壁内結露の発生位置は、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、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。

② 外壁材の選択：

モデル（Ⅰ、Ⅱ）、外壁材の種類（合板、窯業材）、撥水処理（有、無）によっても壁内結露の発生位置には違いが無かった。

4.3.2. 実験 2 (壁の内部に浸水した場合)

① 壁の表面を肉眼で観察すると、結露が発生する量は無処理材>撥水処理材≒窯業系材であった。

② 撥水処理は、壁のモデルに関わらず、その断熱性や防露性能にほとんど影響を与えなかった。

第二章 撥水処理材の性質

1. 撥水性

1.1. 目的

撥水性は防水のように水の浸透を防ぐのではなく、水を弾くという異なる特徴である。ここで、撥水剤を塗布した木材や木質材料（以下、「撥水処理材」）の撥水性を評価することを目的とした。

1.2. 実験

撥水性の評価指標には接触角を用いた。固体の表面に液体（蒸留水）が接触している状態は濡れ（wetting）と呼ばれ、木材の濡れの評価には液滴法、傾斜（傾板）法などの方法によって接触角を測定する³⁾が、本実験では液滴法の拡大映像法によって接触角の測定を行った。

1.2.1. 供試材・試験片・実験装置

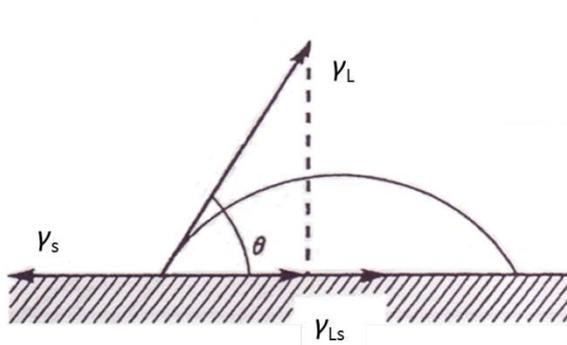
供試材にはスギ（*Cryptomeria japonica* D.Don）を用い、30（T：接線方向）×30（R：半径方向）×60（L：繊維方向）（mm）のプレーナー仕上げをした二方桁目木取りの直方体を作製して実験に供した。試験片には、測定面（RT：木口面、RL：桁目面、TL：板目面）と塗布回数（添え字：₀、₁、₂）を表す記号を付けた。

撥水剤には撥水剤#0127・SV（サンオー産業株式会社提供）を使用した。使用した撥水剤の主剤はシリコーンである⁴⁾。

接触角の測定に際しては、マクロ撮影装置つきカメラ、マイクロピペット、水準器、ストップウォッチを用いた。

1.2.2. 撥水性・接触角

撥水性とは、固体表面が水によって濡れる程度を表す言葉である。図 2.1.1 の下式（式 2.1.1：Young-Dupre³⁾）に示したように、3 相相互の張力が求まれば、接触角を算出することができるし、逆に接触角を利用して張力を算出することもできる。固体表面が平面の場合には、以下のような接触角の理論が適用できる。接触角が大きければ大きいほど、撥水性は高いといえる。



$$\gamma_s = \gamma_L \cos \theta + \gamma_{Ls} \quad \text{式 2.1.1}$$

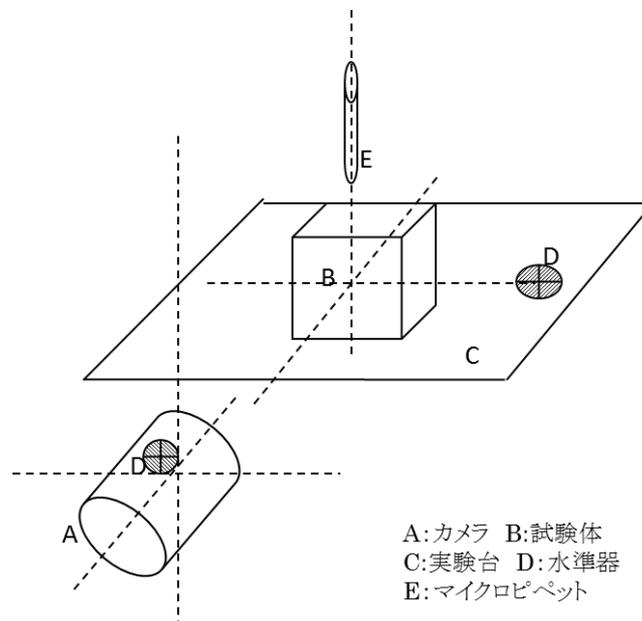
- γ_s 固体表面の表面張力
- γ_L 液体の表面張力
- γ_{Ls} 固体と液体間に界面張力
- θ 接触角

図 2.1.1 接触角と表面張力

1.2.3. 接触角の測定

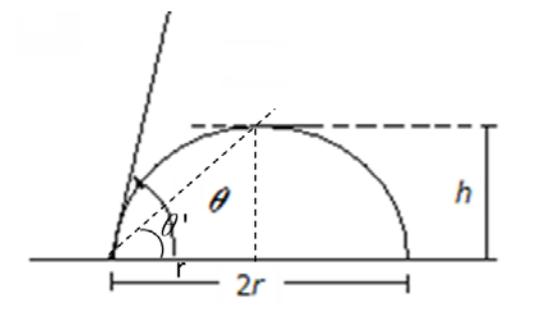
接触角は、図 2.1.2 に示すように、各測定面の上にマイクロピペットで水滴を滴下し、試験片の繊維方向に対して撮影方向が直角になるようにして、滴下後 30 秒以内に液滴の拡大像 [3] [55] を撮影した。

水滴は球面の一部とみなすことができる (図 2.1.3) ので、式 2.1.2 $\frac{1}{2}\theta$ 法によって接触角を求めた。なお、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 [55]、恒温恒湿室内 (20 ± 1 °C、 65 ± 1 %RH、以下同じ設定) で養生・調湿し、平衡状態になった試験片を用い恒温恒湿室内で測定した。



- A: カメラ B: 試験体
- C: 実験台 D: 水準器
- E: マイクロピペット

図 2.1.2 実体撮影のイメージ



$$\theta = 2\theta' = 2\tan^{-1}\left(\frac{h}{r}\right) \quad \text{式2.1.2}$$

h : 着液高さ
 r : 接触半径

図 2.1.3 液滴形状による接触角の測定($\frac{1}{2}\theta$ 法)

1.2.4. 撥水剤の塗布（撥水处理）

撥水剤による撥水効果が発揮される塗布回数を決定するため、刷毛を用いて1度塗布し、30分以内に生乾き状態で2度塗り、または3度塗りを行った後、室温で24時間以上の養生を行った。

1.2.5. 水滴量・測定回数・塗布回数の決定

適切な水滴量を決定するために、水滴量を0.5、1.0、1.5、2.0 μl と変化させて接触角を測定した。

測定回数を決定するために、各試験片の測定面（RT、RL、TL）上に水滴（1.5 μl ）を静かに滴下し、13ヶ所で接触角を測定した。1、2、3回塗布と無塗布（0回）の試験片を準備し、水滴量1.5 μl で接触角を測定した。測定回数は8回、試験片数は4個とした。

1.3. 結果と考察

1.3.1. 水滴量の影響

水滴量が変わると、接触角はその影響を受けたが、図 2.1.4 に示すように1.5と2.0 μl の場合に変動係数が一番小さかった。木口面においては1.5よりも2.0 μl の方が標準偏差あるいは変動係数が小さいが、実用的には木口面に撥水处理をすることは少なく、本実験でも木口面よりも板目面の方が重要と考えたので、以後の測定では水滴量1.5 μl を採用することとした。

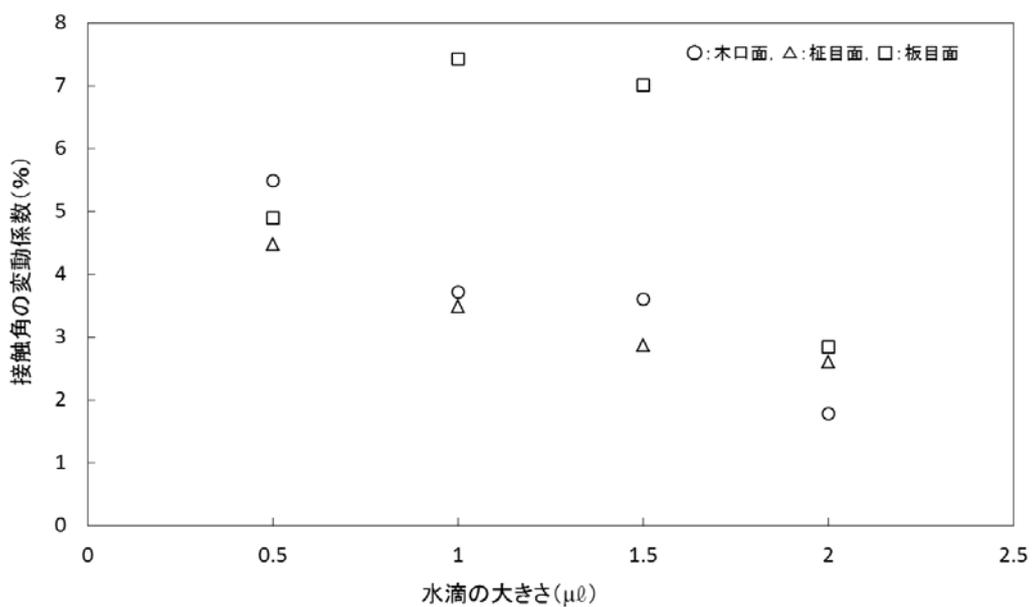
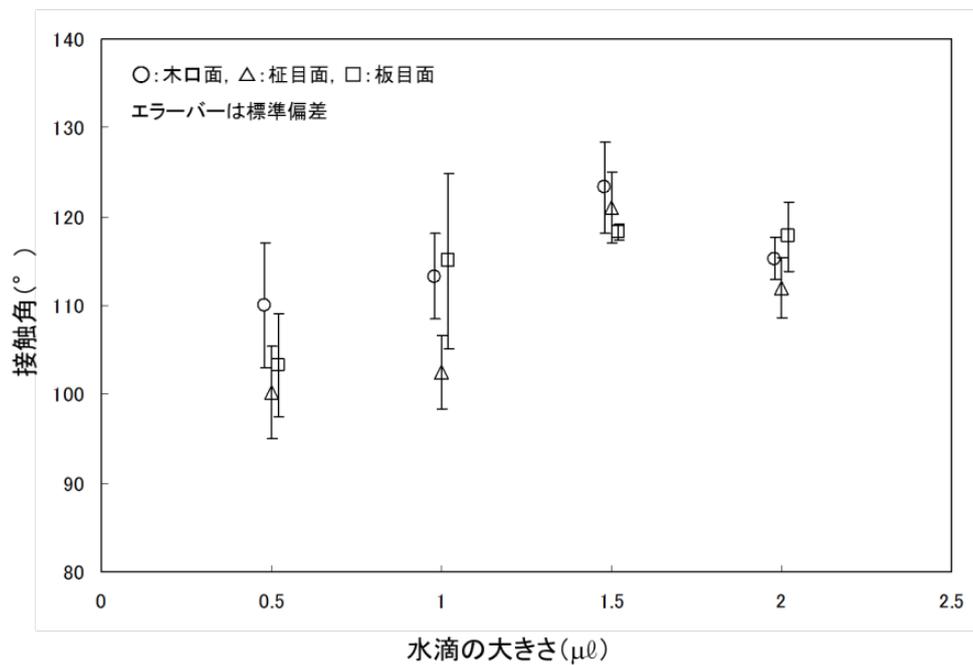


図 2.1.4 水滴量と接触角との関係

1.3.2. 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、5回以上では標準偏差(σ)が小さくほぼ一定となり、7回以後では変動係数も小さくなった(図 2.1.5)。

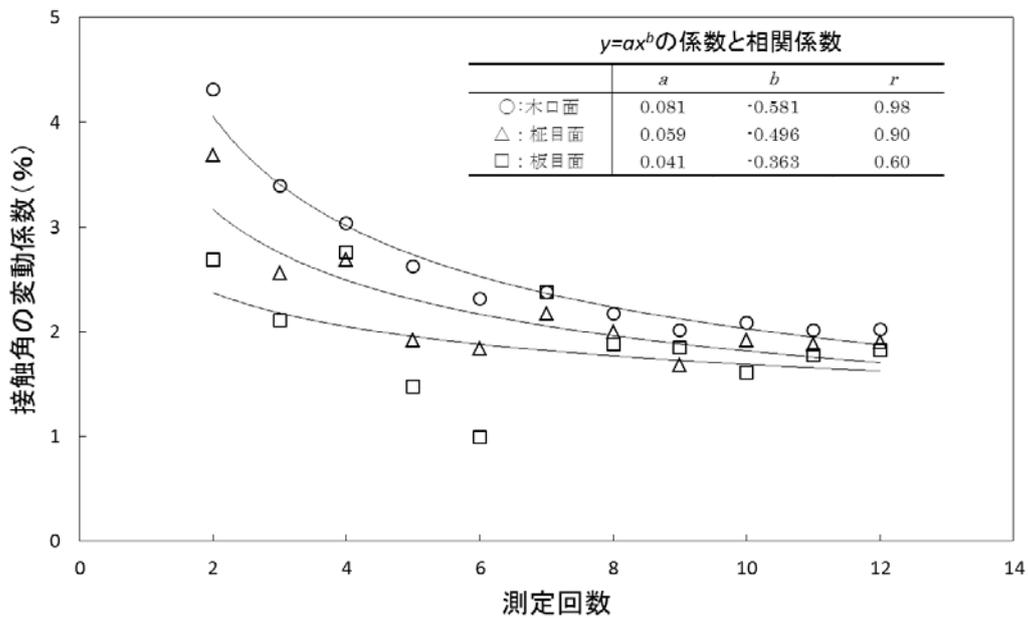
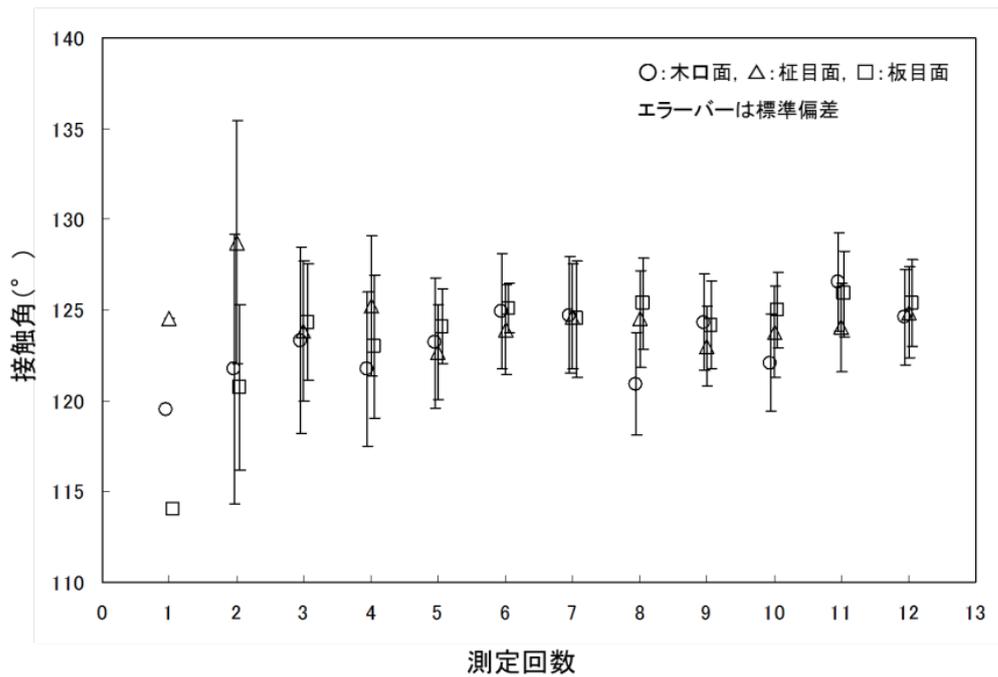


図 2.1.5 接触角と測定回数による変化

近似曲線として $y=ax^b$ (a と b は定数) がよくあてはまった。従って、測定回数を増加させても変動係数の低下割合が小さくなっていく (図 2.1.5) ので、これ以後の実験で測定回数は 8 回とした。

1.3.3. 塗布回数のご決定

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（図 2.1.6）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。2回の塗布量の合計は約 75~175 g/m²であった。

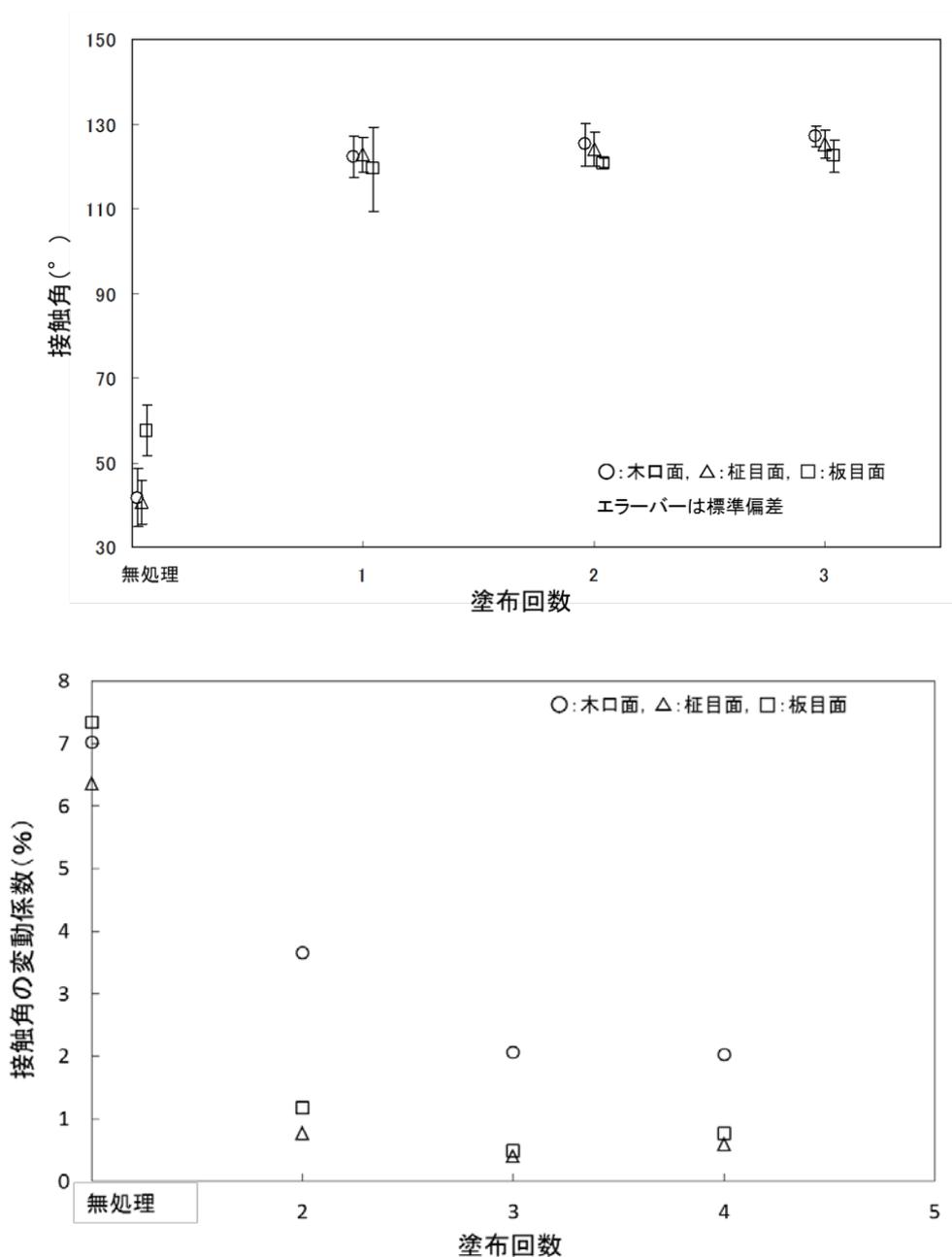


図 2.1.6 塗布回数と接触角との関係

1.3.4. 撥水効果の確認

写真 2.1.1 に、撥水剤を 2 回塗布した試験片上に 1.5 μl の水滴を滴下し、30 秒後に接触角を測定したときの拡大写真の一例を示した。接触角は撥水処理材上の方が明らかに大きかった。逆に、無処理材の木口面上では水滴は完全に無くなった。また、プリントした写真上の水滴に接線を引いて接触角を求めても、式 2.1.2 によって求めても、どちらも接触角はほぼ同じであった。

表 2.1.1 には、撥水処理材と無処理材の接触角（8 カ所の平均）を示した。一般に、 90° 以上なら撥水性があり、 120° 以上なら超撥水性が有るといわれる^[3]が、撥水処理材の接触角は 3 断面のどの面上でもおよそ 122° であり、無処理材のもの 2~3 倍であった。

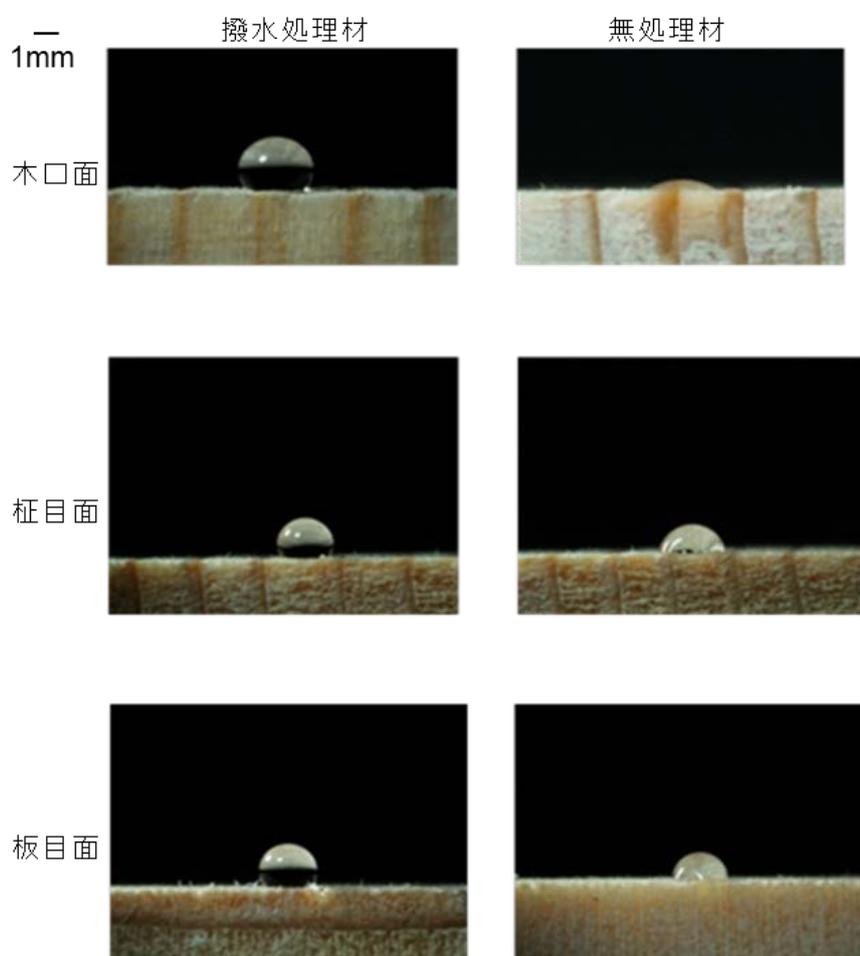


写真 2.1.1 木材表面における水滴の拡大写真

表2.1.1 各断面における接触角
(8カ所の平均)

滴下面	接触角の平均値(°)	
	撥水処理材	無処理材
木口面	122.1	41.7
柂目面	123.7	43.3
板目面	122.7	57.6

1.4. 結論

- ・ 接触角を効率的で精度良く測定するには、気温が 20 °C、65 %RH の環境条件下では、水滴量 1.5 μl、測定回数 8 回が適切であった。
- ・ 上記の環境条件下における撥水剤の塗布では、2 回の塗布で撥水効果が十分現れていると判断できた。そのときの塗布量は合計約 75~175g/m²であった。
- ・ 無処理材では、木口面上での接触角が一番小さかった。
- ・ 撥水処理材の接触角は、3 断面のいずれの面上でもおよそ 122° であり、無処理材のもの 2~3 倍であった。120° を超えたことは、高い撥水効果を持つといえる。

2. 吸水性

2.1. 目的

撥水性はその性質を持つ表面において液体の水をはじく性質であり、気体の水（水蒸気）は通す。しかし、水圧が大きければ液体の水を通すし、水と接する時間が長ければ水蒸気として通過して、内部に水分を通してしまう。

ここでは、試験片を水中に浸せきして時間経過に伴う質量変化（吸水量）を測定することで、撥水処理材の吸水性について評価した。

2.2. 実験

2.2.1. 試験片と装置

供試材にはスギ (*Cryptomeria japonica* D.Don) を用い、30 (T) × 30 (R) × 100 (L) (mm) のプレーナー仕上げをした二方桁木取りの直六面体を試験片とした。試験片個数は各面ごとに 3~5 個とした。浸漬には恒温水槽 (EYELA SB-650 型、東京理化工業株式会社)、質量の測定には電磁式天秤 (A&D GF-3000 型、研精工業株式会社) を用いた。

2.2.2. 実験条件と手順

試験片は、恒温恒湿室 (20±1 °C、65±1 %RH : 以下同じ設定) で平衡状態に調湿した後、吸水面以外の 2 面にエポキシ系接着剤 (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防水処理した。吸水面に撥水剤を塗布し、恒温恒湿室で養生後、試験片 (撥水剤と被覆材料を含む) の質量を測定した。

浸漬は、恒温水槽 (25±1 °C) に吸水面を垂直にし、上面が水面に平行で水面から 50 mm の深さになるように重りを載せて試験片全体を水中に沈め、一定時間ごとに重量を測定した。また、質量測定時には、試験片の表面に付いている水は、キッチンペーパーで同じ程度に軽くふきとった。その後、100~105°Cで全乾にして、その全乾質量を測定した。

2.2.3. 吸水量の計算

吸水量 Q_a は式 2.2.1^[55]によって求めた。

$$Q_a = (W_{nh} - W_i) / A_a \quad \text{式2.2.1}$$

A_a : 吸水面の総面積 (cm²)

W_{nh} : 浸せき後の各測定時における試験体質量 (g)

W_i : 防水処理した試験体の質量 (g)

2.2.4. 吸水係数の計算

吸水量 Q_a と吸水時間 t との間には式 2.2.2^[55] の関係があると言われており、縦軸に吸水量 Q_a 、横軸に吸水時間の平方根 \sqrt{t} を取って吸水曲線を描くと、その傾きは吸水係数 K になるので、図から吸水係数 K を求めた。

$$Q_a = K\sqrt{t} \quad \text{式2.2.2}$$

Q_a : 吸水量 (g/cm²)

t : 吸水時間

2.3. 結果と考察

図 2.2.1 に、試験片を水中に浸漬後の時間経過に伴う各面からの単位面積当たりの吸水量を示した。

無処理材では、木口面 > 柾目面 > 板目面の順で吸水が早かった。撥水処理材では、いずれの面においても、吸水はゼロにはならないが無処理材と比べて遅くなった。また撥水処理を行っても、木口面 > 柾目面 > 板目面の順は変わらなかった。また、同じように異方構造と放射組織の影響で、細胞間の非晶領域に水分が出入りして、含水率も吸水量と同様の变化をすると考えられる。

図 2.2.2 に示すように、無処理材の吸水係数 K は、木口面 (0.1145) > 柾目面 (0.0697) > 板目面 (0.0374) であり、撥水処理によっていずれも小さくなり、木口面 (0.0572) > 柾目面 (0.0193) > 板目面 (0.0142) になった。しかし、吸水係数 K の比は、撥水処理によって、木口面/柾目面では 1.64 から 2.96 に、木口面/板目面では 3.06 から 4.03 になり、異方性は大きくなった。

これらの結果から、撥水処理によって吸水が遅くなるので、吸水による寸法変化が起りにくくなると考える。

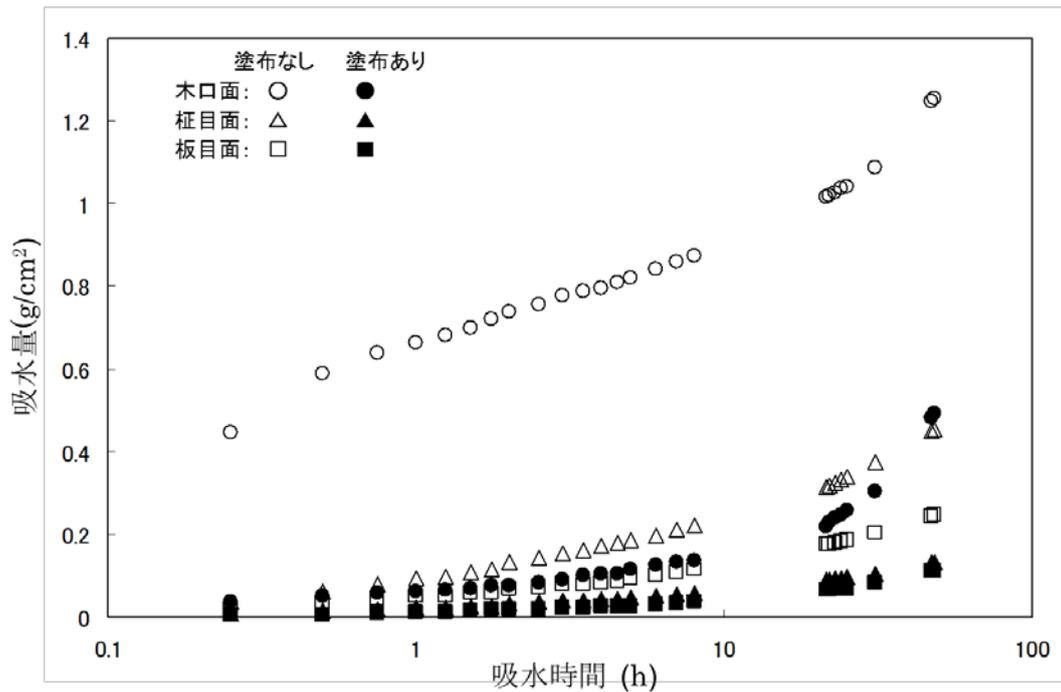


図 2.2.1 吸水量と吸水時間 との関係

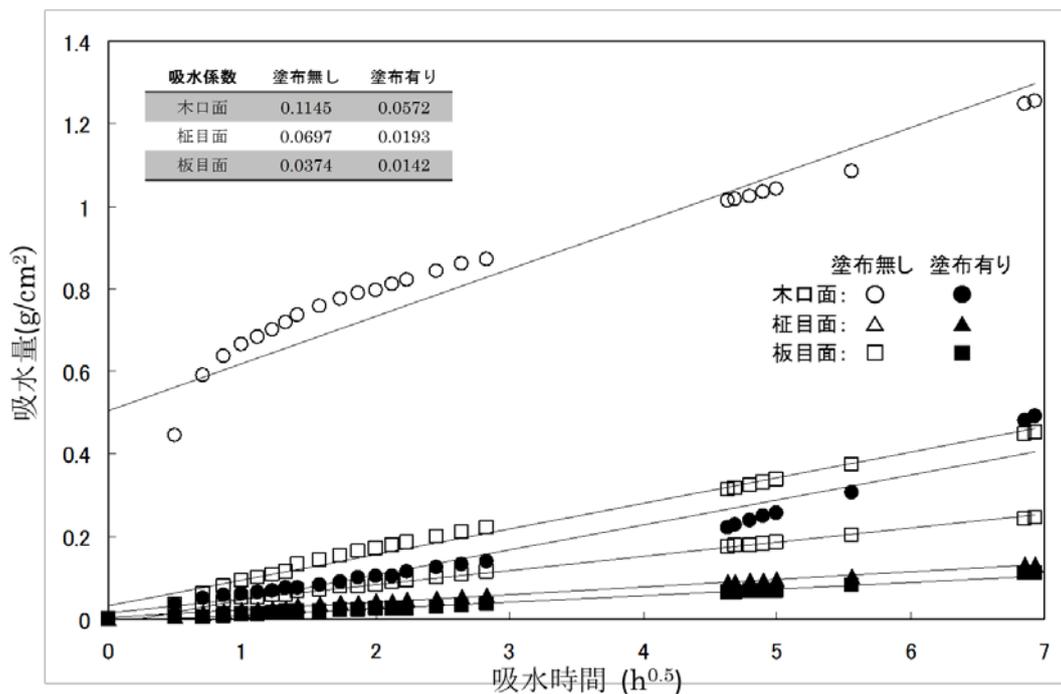


図 2.2.2 試験体の吸水曲線

2.4. 結論

- ・ 無処理材の単位面積当たりの吸水量は、木口面>柁目面>板目面の順であった。

- 撥水処理材の吸水は、ゼロにはならないが、無処理の場合と比べて遅くなった。
- 撥水処理を行っても、木口面>柾目面>板目面の順は変わらなかった。
- 無処理材の吸水係数 K 値は、木口面 (0.1145) > 柾目面(0.0697)>板目面 (0.0374) であったが、撥水処理によっていずれも小さくなり、木口面 (0.0572) > 柾目面 (0.0193) > 板目面 (0.0142) になった。
- 上記の結果から、撥水処理によって吸水が遅くなるので、吸水による寸法変化が起りにくくなると考える。

3. 吸放湿性と調湿性

3.1. 目的

人間が快適で過ごしやすい居住環境を得るためには、住宅に温度調節機能の他に湿度調整機能が備わっていることが重要である。木材や木質材料には吸放湿作用があり、建材としてある程度以上の面積で使用された場合には、温湿度が変化する環境で湿度調整を行うことができる。

内装材料の調湿性能つまり吸放湿速度や量が、住宅内の温湿度変動に影響を与えることが分かっており、内装材料の選択や組み合わせなどが調湿性能に影響を与える。従って、優れた吸放湿性を持っている木質材料は住宅の内装仕上げ材料として多く使用されている。

一方、美観や保護のために木材に塗装を行うと、多くの塗料、特に造膜タイプの塗料はその吸放湿を妨げてしまう。しかし撥水剤を塗布した木材は、木材そのものの美観や手触りを保持したままで撥水性を有するが、吸放湿は行われる。

撥水剤を塗装した木質材料がどの程度の調湿性能を示すか、また外壁に用いた場合の特性について検討し、それを木造住宅の設計に活かすことが必要である。

本実験では、木材の吸放湿量を質量法^{4,5)}で測定することによって、吸放湿性(調湿性)を評価した。また、乾湿繰り返しにおける吸放湿と密閉箱の温湿度変化を測定した。

3.2. 実験

3.2.1. 吸放湿性

3.2.1.1. 試験片と装置

試験片は30(T)×30(R)×60(L)(mm)のプレーナー仕上げをした二方柱木取りの直六面体である。試験片は恒温恒湿室で調湿後、吸放湿面の以外の2面にエポキシ系接着剤(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た。温湿度の設定には低温恒温恒湿器(いすゞ製作所製 HPAF-288-20型)を用いた。

3.2.1.2. 試験片の調湿と乾湿繰り返し手順

撥水剤を塗布していない試験片を①気乾(室内常態)、②予備乾燥(塩化カルシウムの入ったデシケーター内)、③調湿(低温恒温恒湿器内:22~26℃、60±5%RH)の雰囲気中で質量が恒量に達した後、④室内で測定面に撥水剤を塗布し、⑤再調湿(低温恒温恒湿器内:22~26℃、60±5%RH)、の手順で行った。

撥水剤を塗布し調湿済みの試験片(⑤)を、⑥低湿(低温恒温恒湿器内:40℃、60±1%RH)、⑦高湿(低温恒温恒湿器内:40℃、90±1%RH)の条件で⑥~⑦を4サイクル繰り返して湿度変化を与え、その後⑧乾燥(100~105℃、全乾まで)させた。

①～④の各状態では試験片の重量を、⑤～⑧の各状態では被覆材料を含む試験片の重量を測定した。

①⇒②⇒③⇒④⇒⑤⇒⑥⇔⑦⇒⑧

3.2.2. 調湿性

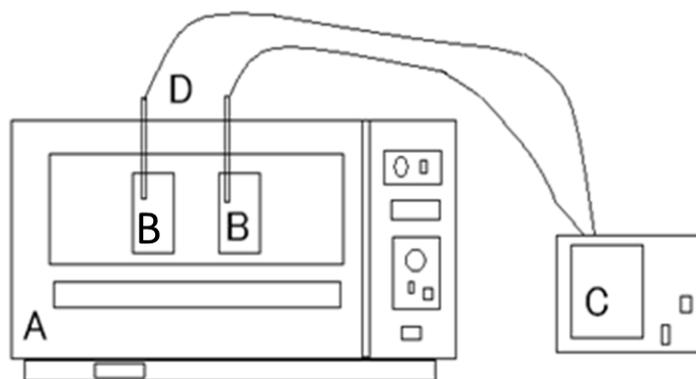
3.2.2.1. 試験体

供試樹種： スギ (*Cryptomeria japonica* D.Don)

試験体： 柁目板 (厚さ=5mm) を用いて、外側の寸法が 55×55×90 (mm)の直方体で密閉できる箱を 8 個〔無処理 2 個、片面処理 4 個 (外側処理 2 個、内側処理 2 個)、両面処理 2 個〕を作製した。

3.2.2.2. 実験装置

図 2.3.1 に示すように、密閉した箱 (B) の外部の温湿度を低温恒温恒湿器 (A: いすゞ製 HPAF-288-20 型) を用いて変化させ、箱内部の温度と湿度を温湿度センサー (D: T&D 製、RT-3310 型) と温湿度データロガー (C: T&D 製 Thermo Recorder RTR-52 型) で計測した。



A: 低温恒温恒湿器 B: 供試体、
C: データロガー D: 温湿度センサー

図 2.3.1 測定装置のイメージ

3.2.2.3. 測定手順と温湿度条件

- ① 試験体 (8 個) が室温状態 (21.5℃、54%RH) で平衡になるまで養生した。
- ② 試験体 (8 個) にそれぞれ温湿度センサーを入れて密閉し、データロガーに接続した。
- ③ その後、試験体 (密閉箱: 8 個) を高湿状態 (40℃、湿度 90%RH) に設定した低温恒温恒湿器の中に入れ、

④ 試験体（密閉箱：8個）の箱内がほぼ平衡に達するまで、データロガーにより温湿度を一定時間に間隔で記録した。

なお、飽和水蒸気圧は式 2.3.1（Tetens(1930)式より）、水蒸気圧は式 2.3.2、容積絶対湿度は式 2.3.3（気体状態方程式より）、調湿力は式 2.3.4（JIS A 1470-2 より）で求めた。

$$E = 6.1078 \times 10^{(7.5t/237.3+t)} \quad \text{式2.3.1}$$

E : 飽和水蒸気圧 (hPa)
 t : 温度 (°C)

$$E_p = E \times RH/100 \quad \text{式2.3.2}$$

E_p : 水蒸気圧 (hPa)
RH: 相対湿度 (%)

$$e = 217 \frac{E_p}{t+273.15} \quad \text{式2.3.3}$$

e : 容積絶対湿度 (g/m³)

$$h = \frac{e \times V}{s \times t} \quad \text{式2.3.4}$$

h : 調湿力 (g/m²°C)
 V : 箱内の容積 (m³)
 s : 箱の表面積 (m²)

3.3. 結果と考察

3.3.1. 放湿性に関する結果と考察

乾湿繰り返しを行っても、含水率の変化は、撥水処理の有無によってほとんど差異はなかった（図 2.3.2）。吸放湿の速い木口面以外の含水率が乾湿繰り返しによって少しずつ上昇するのは、本実験の乾湿繰り返しは一定時間ごとであり、低含水率（低湿：60%RH）から始めたため、吸脱湿のヒステレシスの影響を受けたためだと考える。

図 2.3.3 に示すように、撥水処理の有無にかかわらず、乾湿繰り返しによる吸放湿量は木口面からが多く、柾目面と板目面からは少なかった。また、吸放湿における異方性にも影響がなかった。また撥水処理をしても、乾湿繰り返しによる吸放湿量は3断面の平均で約 0.08 g/cm² であり、木材の調湿性能は殆ど変わらないと判断できる。

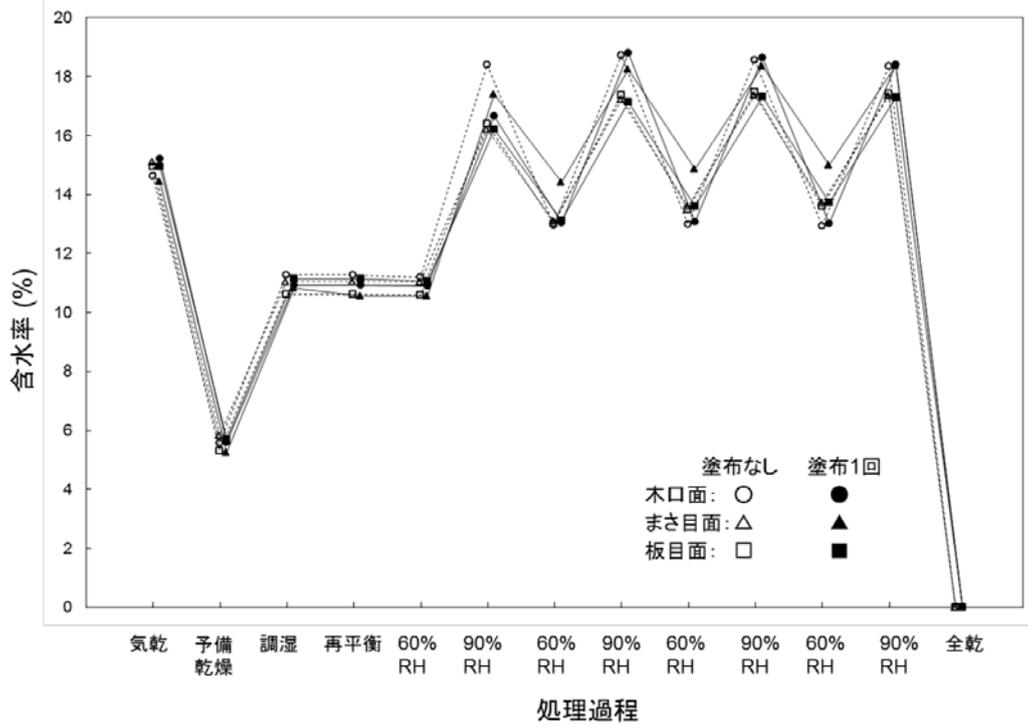


図2.3.2 試験体の含水率の変化

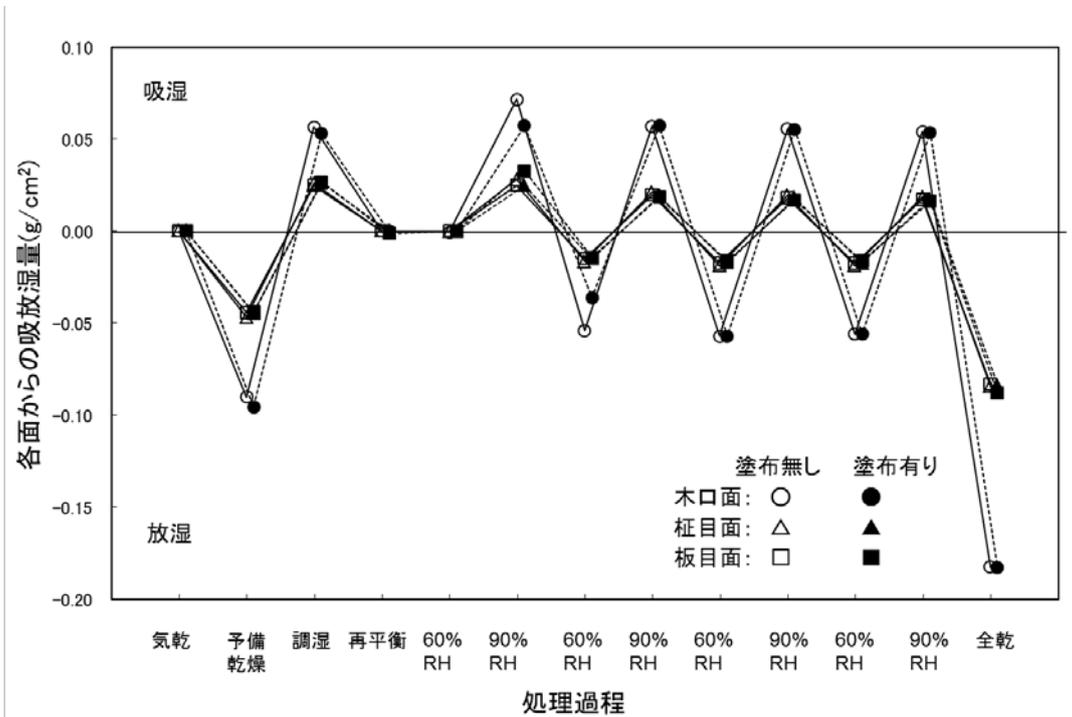


図2.3.3 試験体の各面における吸放湿量の変化

3.3.2. 調湿性に関する結果と考察

室内 (21.5°C、54%RH) で平衡状態に達した箱を低温恒温恒湿器 (40°C、湿度 90%RH) に入れた時の箱内の相対湿度の経時変化を図 2.3.4 に示した。

箱を低温恒温恒湿器に入れた直後は、箱の温度が低い (室温の 21.5°Cに近い) ので相対湿度は高いが、2 時間以後は箱の温度が低温恒温恒湿器内の温度に近くなるので、相対湿度は急激に低くなり、その後徐々に低温恒温恒湿器内の湿度条件に近づいた。この傾向は処理の方法 (無処理・片面処理・両面処理) に関わらず同じであった。しかし各時間における相対湿度は、無処理 > 片面処理 > 両面処理の順でわずかつ高かった。片面処理の内側処理と外側処理の差はほとんど無かったので、平均値で表したが、内側処理が両面処理にわずかに近かった。

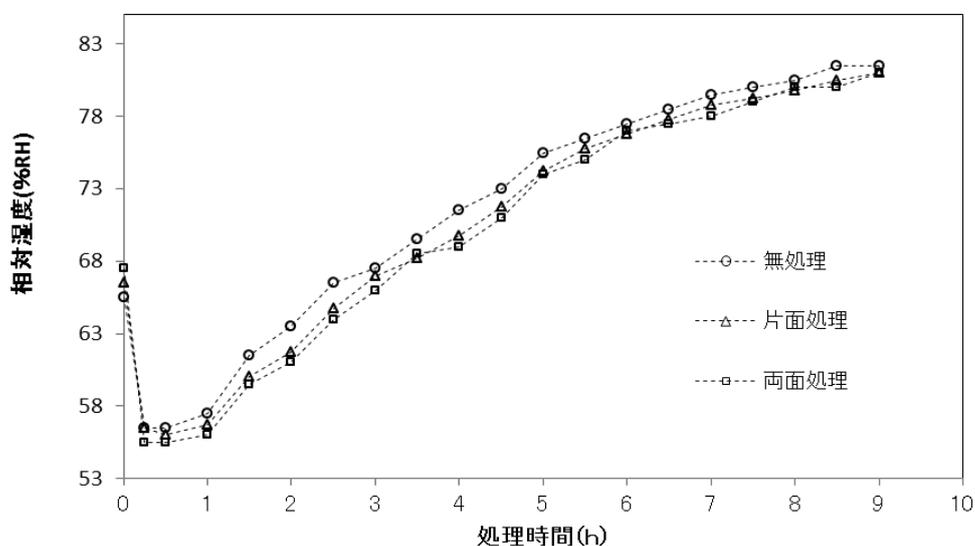


図 2.3.4 処理時間における湿度の変化

図 2.3.5 に示すように、湿度の変化率の経時変化の傾向は処理にかかわらずほぼ同じであったが、各時間では無処理材の湿度の変化率が最も大きかった。しかし、撥水処理材は依然、調湿能力を持っていると思う。

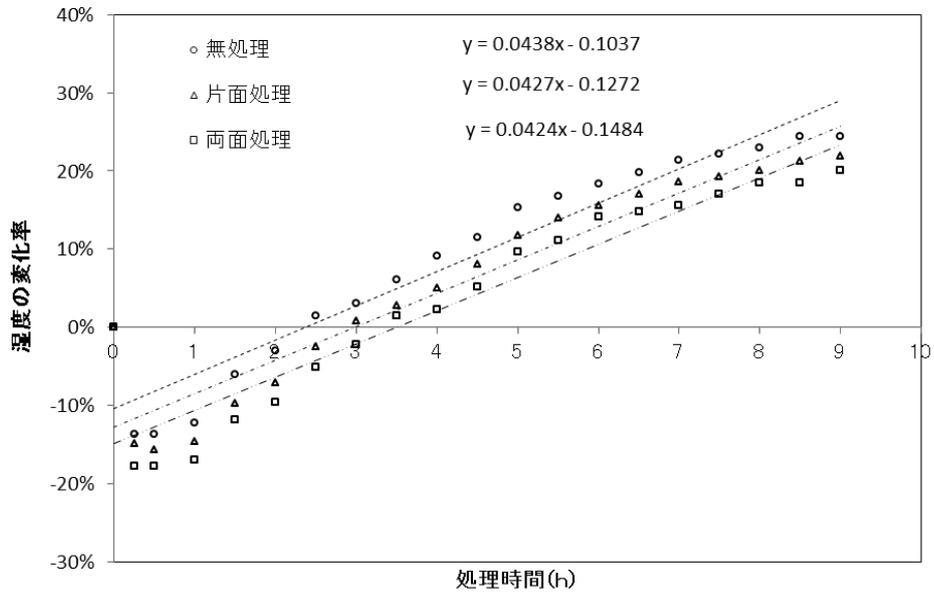


図 2.3.5 試験体の湿度の変化率

図 2.3.6 に示すように、時間経過とともに調湿力（単位温度、単位面積当たり）は増大したが、徐々に飽和した。この傾向は処理の有無にかかわらず同じであるが、調湿力は無処理材がわずかに大きかった。

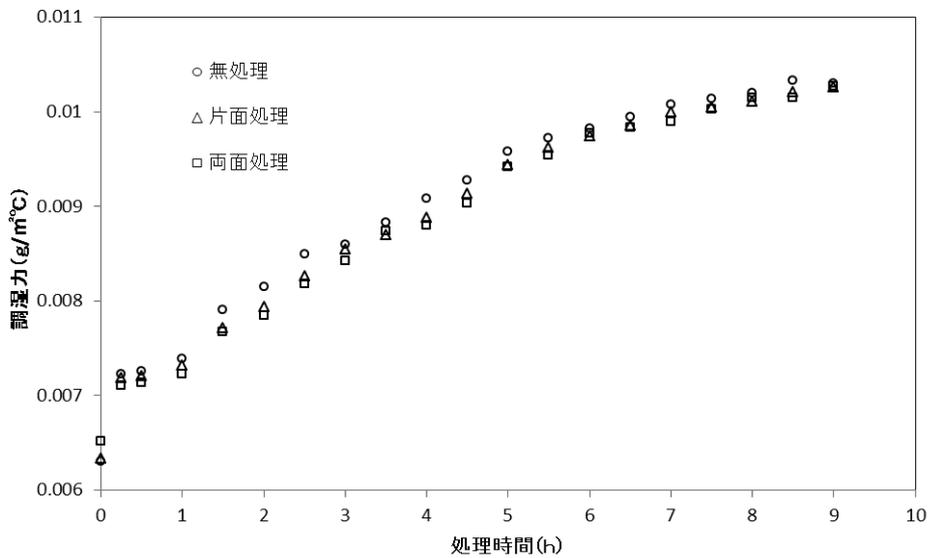


図2.3.6 時間における調湿力の変化

3.4. 結論

- ・ 乾湿繰り返しによる含水率の変化は、撥水処理の有無によってほとんど差異がない。

- 乾湿繰り返しによる吸放湿量は、木口面が最も大きく、板目面と柾目面はほぼ同じであった。また、撥水処理の有無によってほとんど差が無かった。
- 調湿力は、撥水処理材より無処理材がわずかに大きい。また、両面撥水処理材より片面撥水処理材がごくわずかに大きい。しかし、これらの差は無視できるほどである。

4. 透湿性

4.1. 目的

透湿は、材料の両側に水蒸気圧差がある場合に、湿度の高い方から湿度の低い方に材料内を水蒸気（湿気）が移動していくことである。これは木造住宅の屋内気候に影響を与え、その結果住居環境の快適性に影響を与える。特に、木質壁の壁内外の結露の発生に大きく影響する。

ここでは、木質壁の材料としての木材・木質材料に撥水処理を施して外部からの水の進入を防ぐ撥水性を付与し、このことによる透湿性の変化について検討することを目的とした。

4.2. 実験

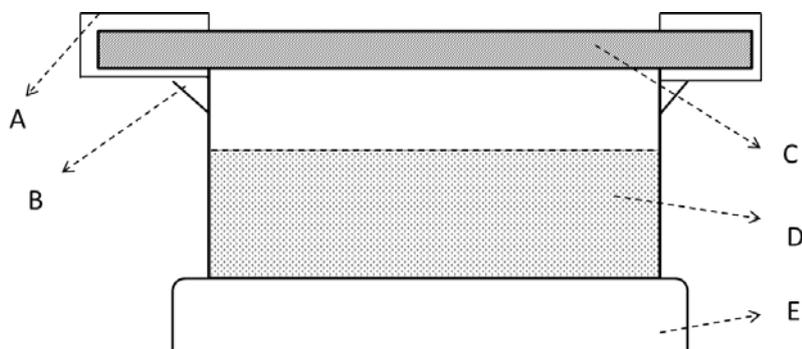
4.2.1. 供試材料と試験片

供試材料は、樹種：スギ（*Cryptomeria japonica* D. Don）、撥水剤：#0217・SV（サンオ一産業株式会社提供）、封蝋剤：パラフィン（M. P. 68~70℃）、透湿カップ：ガラス製シャーレー（φ75 mm、h45 mm）、低温恒温恒湿器：いすゞ製（HPAF-288-20型）とした。

試験片寸法は80(L)×80(R)×4(T) (mm)とし、撥水処理・無処理のそれぞれに12個を用意した。試験片番号には、撥水処理の有無による添え字（_{1, 0}）を表す記号を付けた。

4.2.2. 試験方法と透湿係数

透湿係数の測定法としては、水蒸気の透過による質量の変化を量る質量法が一般的である^[5]。本実験では、質量法の一つであるカップ法（JIS A 1324 建築材料の透湿性測定方法）に準じて、以下のように行った（図2.4.1）。



A:アルミホイル B:パラフィン C:試験片 D:シリカゲル E:電子天秤

図2.4.1 透湿実験の概要図

- ① カップの中に吸湿剤(シリカゲル)をいれて、シリカゲルの表面をできるだけ平らにし、試験片の下面との間が約 3 mm となるように試験片をカップの上端に密着するように載せて、パラフィンで周縁を完全に封じた。この操作は、室内 (22℃、50%RH) で行った。
- ② その後、高湿状態 (40 ℃、90%±5% RH) の恒温高湿器の中におき、水蒸気の透過を定常状態にするため 16 時間以上養生した後、一定時間毎に取り出し、室温で平衡させたのち質量を測定した。
- ③ 材料の透湿性は、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 2.4.1 で示される。

$$Q_p = K \times \Delta P \times A_p \times t \quad \text{式2.4.1}$$

Q_p : 透湿量 (g)

K : 透湿係数 (g/(m²・h・mmHg))

ΔP : 材料の両側の水蒸気圧差 (mmHg)

A_p : 透過面積 (m²)

t : 時間 (h)

4.3. 結果と考察

時間経過にともなう透過水蒸気量(以下、「透湿量」)の変化を図 2.4.2 に示し、透湿係数 K を求めるために回帰直線を書き入れた。 K は、無処理 (0.2954) > 片面処理 (0.2772) > 両面処理 (0.2633) となったが、その間の差は < 0.01 で、 K には大きな差異が無かった。

各経過時間における透湿量の変化率を図 2.4.3 に示した。各処理条件により、平衡に達するまではわずかに差があったが、初期における試験片自体の吸湿によるためだと思う。無処理と片面処理(内側、外側)は、透湿量はほぼ同じであることがわかった。これら結果により、撥水処理による透湿性への影響は少ないといえる。

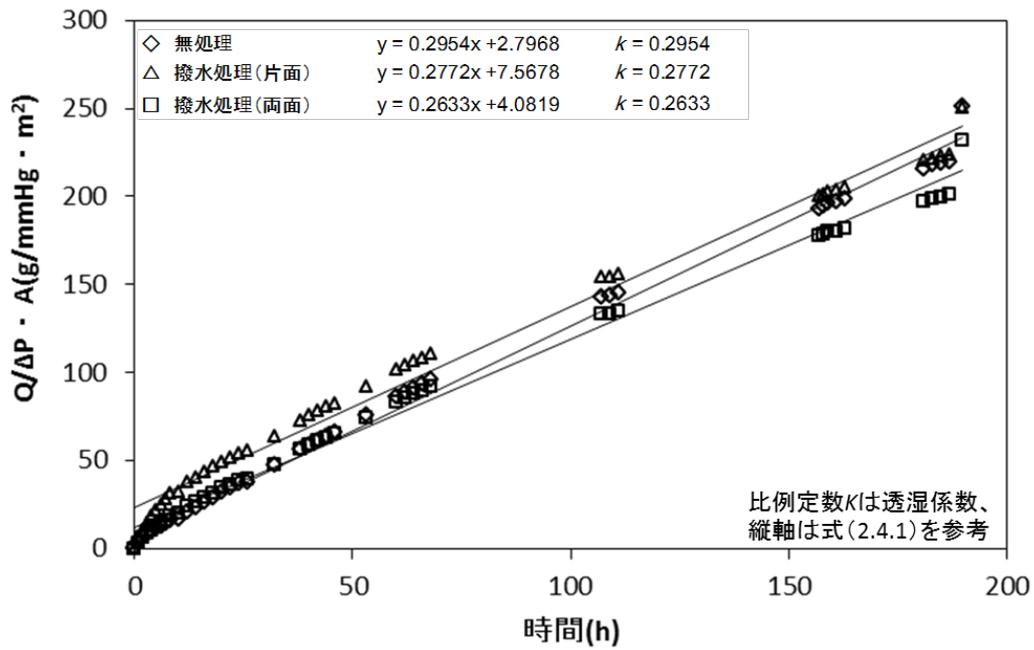


図2.4.2 時間経過に伴う透湿係数

1

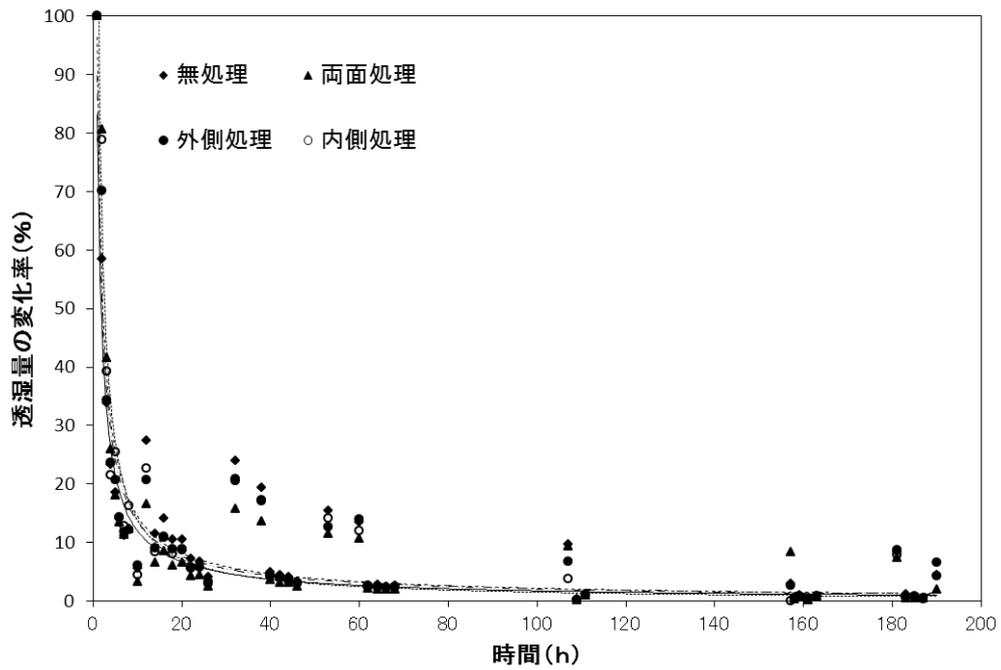


図2.4.3 処理時間における透湿量の変化率

4.4. 結論

- ・透湿係数 K は、無処理 (0.0664) > 片面処理 (0.0637) > 両面処理 (0.0597) となった

が、その間の差は 0.01 より小さく、撥水処理による大きな差異が無かった。

・時間経過にともなう透湿量の変化率は、撥水処理によってほとんど差が無いので、透湿性への影響は少ないといえる。

5. 鉄汚染

5.1. 目的

木材は、鉄イオンと木材に含まれるタンニンなどフェノール性物質の水酸基が水分を介して反応して黒色化合物を生成し、褐色から黒色へ変色する。このような現象は鉄（金属）汚染と呼ばれる。木材に含まれている変色原因物質は種類が非常に多く、微量でも変色するため、樹種によって変色の過程はさまざまである。

一方木造住宅では、木材を接合するために釘やボルトといった鉄製品が使われることが多い。そのため木材を屋外に使用して濡れたり結露によって濡れたりした場合や湿度が高い場合に鉄汚染が発生するケースが多い。

ここでは、撥水処理をしたスギ材に塩化鉄水溶液（ Fe^{2+} ）を塗布し、一定時間後に色彩色差計で色の変化を測定し、鉄汚染に対する撥水処理の効果について検討した。

5.2. 実験

5.2.1. 供試材と装置

- ・ 供試樹種： スギ（*Cryptomeria japonica* D. Don）
- ・ 試験片： 110（L）×50（R）×15（T）mm の柾目板、心材、辺材それぞれ数枚
- ・ 塩化鉄（酸性） FeCl_2 0.5 %水溶液
- ・ 色彩色差計（KONIC MINOLTA 製 CR-400 型）

5.2.2. $L^*a^*b^*$ 表色系と色差

CIE Lab （ $L^*a^*b^*$ 表色系）（CIE 1976）は、色を、明度 L^* とクロマネティクス指数 a^* 、 b^* からなる均等色空間上の座標で表したものである（図 2.5.1）。JIS-Z8729 に人の目の色覚を基に規定されている。色差 ΔE^*_{ab} は JIS-Z8730 に規定された下記の計算式で求めた。

$$\Delta E^*_{ab} = [(\Delta L^*)^2 + (\Delta a^*)^2 + (\Delta b^*)^2]^{1/2} \quad \text{式2.5.1}$$

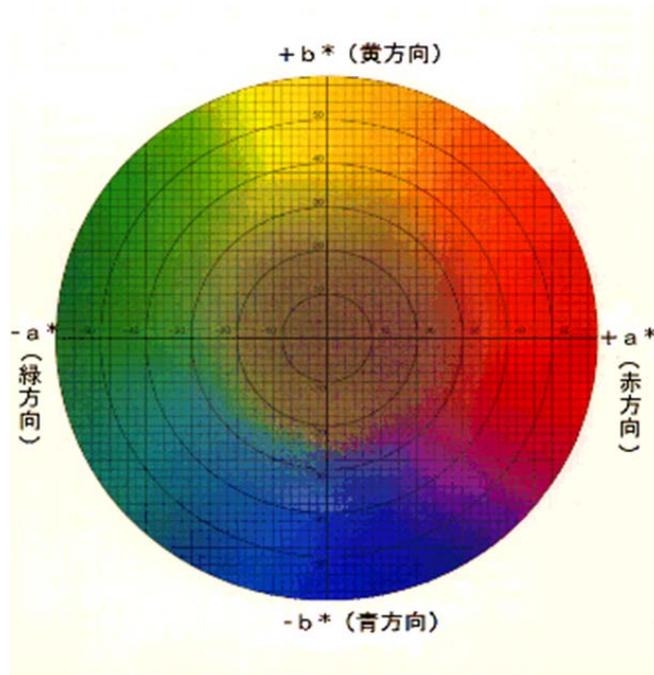


図2.5.1 L*a*b*色度図

ここで ΔL^* 、 Δa^* 、 Δb^* は、座標軸 L^* 、 a^* 、 b^* 上における二つの物体色の差であり、 ΔE^*_{ab} は色差で二つの物体色の座標のユークリッド距離である。

注意：色の三属性（色相、彩度、明度）の内、二つの属性（彩度、明度）を合わせて色調という。色相は、赤、黄、緑、青、紫といった光の波長による相違である。 a^* と b^* は彩度で、 a^* はプラスが赤色でマイナスが緑の方向、 b^* はプラスが黄色でマイナスが青の方向であり、値が大きいほど彩度が高くなる。 L^* は明度で、0は黒、100は白である。

5.2.3. 実験条件と手順

実験は室内（22°C、45%RH）で行った。

- ① 無処理あるいは撥水处理をした試験片を24時間以上室内で養生
- ② 塩化鉄水溶液（Fe²⁺）を実験材に塗布
- ③ 塗布面の数カ所に黒鉛筆で測定位置の印をつける（写真 2.5.1：丸い印の大きさは色彩色差計の光測定センサー部分に合わせた）
- ④ 塗布後からの経過時間毎に観察し、色彩色差計で測定

5.3. 結果と考察

5.3.1. 外観による観察

鉄汚染による変色の様子(360 時間後)を写真 2.5.1 に示した。外観的には、無処理材の表面では全体的に変色が生じ、黄っぽくなった。撥水処理材は晩材のところに黒っぽい変色の跡が帯状に生じた。このような違いは撥水処理が鉄汚染の防止に有効であるといえる。また、撥水処理材の晩材部に変色の跡が帯状に生じることは、晩材部はフェノール成分が多いためだと考える。



写真 2.5.1 撥水処理により鉄汚染の変色



写真2.5.2 鉄汚染による変色の比較

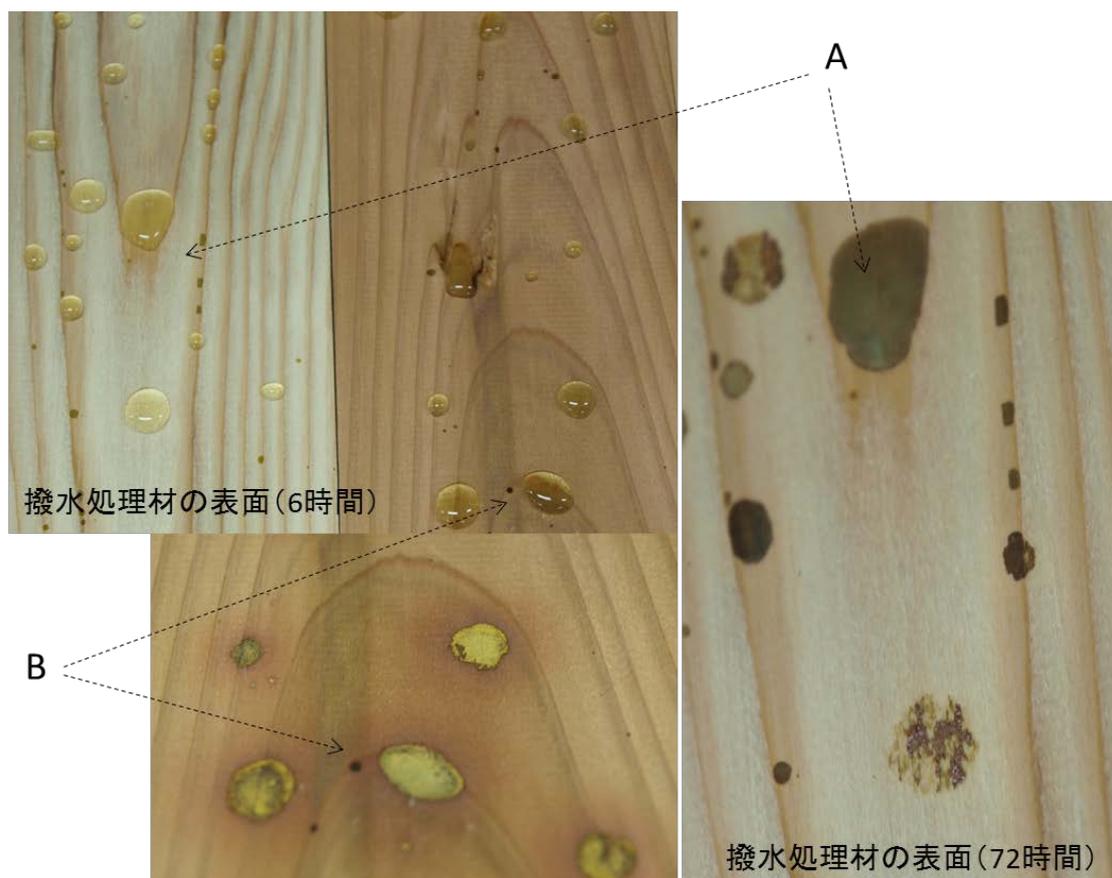


写真2.5.3 鉄汚染による変色の比較

(図2.5.2の赤い部分の拡大図)

写真 2.5.2 に示すように、心材・辺材に関係なく鉄汚染によって変色した。しかし、無処理のほうが全体的に黒くなったが、撥水処理材には点状の痕ができた。これは撥水効果があるため、塩化鉄の水溶液が水滴状に表面に残って（写真 2.5.3）処理時間の経過によって水が蒸発した後に、 Fe^{2+} が残ったためと考えている。

5.3.2. 色調の変化

塩化鉄水溶液の塗布後、時間経過にともなう彩度変化を図 2.5.2 に示した（処理時間 0 は塗布直後の状態）。

b^* （黄（+）－青（-））は、撥水処理の有無にかかわらず、24 時間経過後にはやや大きくなり、その後は次第に小さくなった。撥水処理をしたものは無処理に比べて全体に大きかったが、変化の幅は小さかった。

a^* （緑（+）－赤（-））は、撥水処理の有無にかかわらず、24 時間経過後には小さくなり、72 時間経過後にはやや大きくなり、その後は次第に小さくなった。撥水処理をしたものは無処理に比べて全体に大きかったが、変化の幅は小さかった。

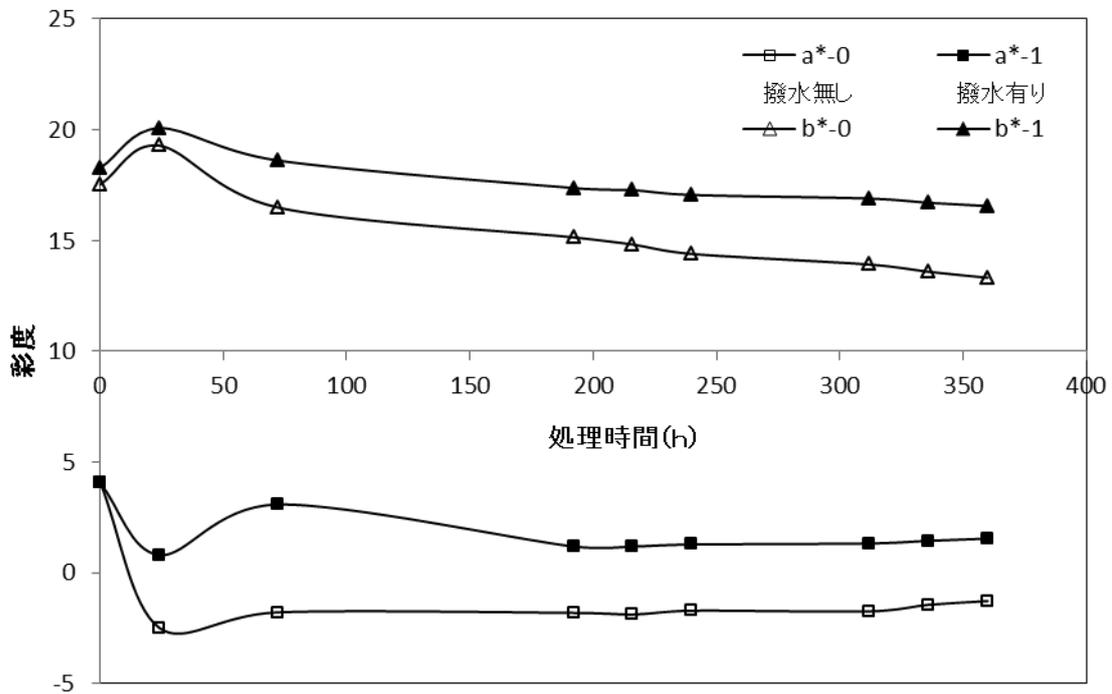


図 2.5.2 実験体の彩度変化関係

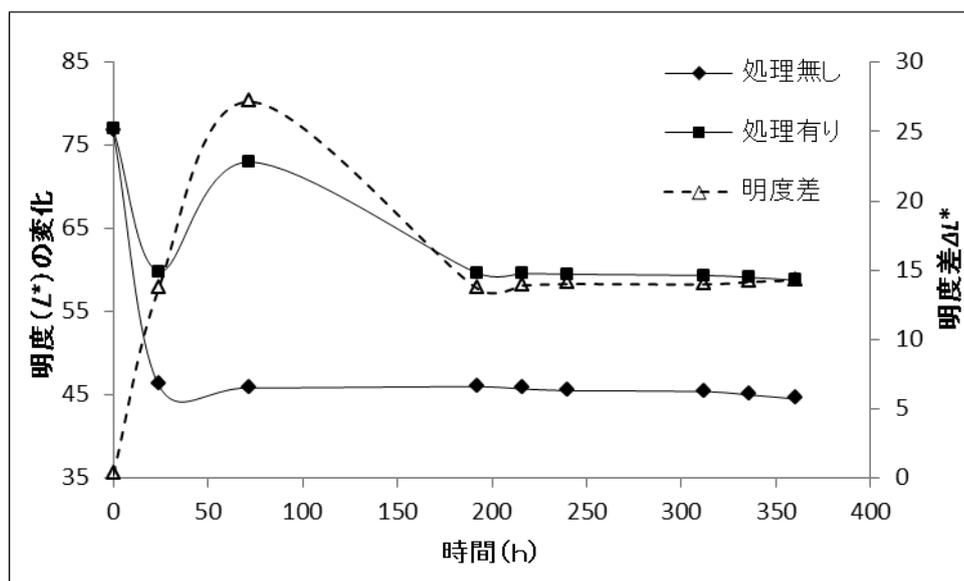


図2.5.3 撥水処理材と無処理材との明度の時間経過による変化

明度 L^* の変化を図 2.5.3 に示した。

L^* は、 a^* と同様の变化を示した。撥水処理材の明度の減少量は無処理材より少なかった。

以上に示したように、撥水処理材の鉄汚染による色調（明度+彩度）の変化は無処理材に比べて小さかった。したがって、撥水処理は鉄汚染による色調の変化の軽減に効果があったと思う。

5.3.3. 色差

撥水処理材と無処理材の色差（塩化鉄水溶液塗布前後の）の時間経過にともなう変化を図 2.5.4 に示した。

撥水処理材の時間経過による色差の変化は無処理材より小さいため、撥水処理の効果があるといえる。また、色差 ΔE は明度 ΔL^* と同様の変化を示した（図 2.5.3、図 2.5.4）。

しかし、屋外暴露などによる時間経過による色調の変化には、鉄汚染だけではなく、同時に光変色やカビなどによる色調の変化も問題になる。したがって、撥水処理剤に防腐効果や耐紫外線効果などの性能を持たせることも必要だと思う。

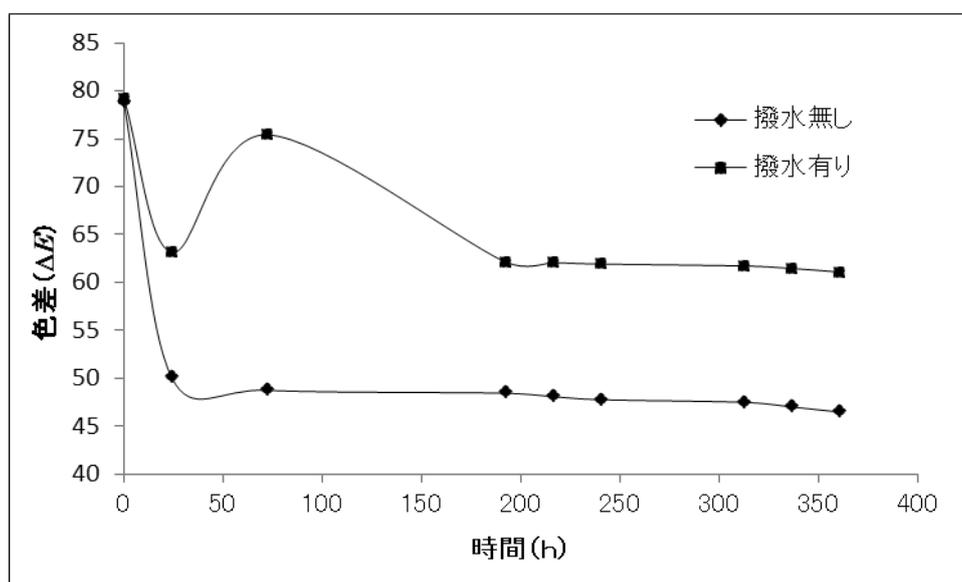


図2.5.4 時間における色差の変化

5.4. 結論

塩化鉄水溶液の塗布（鉄汚染）によるスギ材の色調の変化について調べ、以下の結果を得た。

- ・ 外観的には、無処理材は全体的に暗く黄っぽくなり、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彩度 (a^* 、 b^*) の変化は少ない。
- ・ 撥水処理材は無処理材に比べて明度 (L^*) の減少量は少ない。
- ・ 撥水処理材は無処理材に比べて色調 (L^* 、 a^* 、 b^*) の変化は小さく、鉄汚染による色調の変化を軽減できる。

6. 表面結露

6.1. 目的

建物の壁などに表面結露が生じると、壁面や室内等をジメジメした湿気の多い環境にするので、カビやダニを発生させる原因となることもあり、人体の健康に悪影響を与える。

本実験では、撥水処理材を住宅の壁に用いるための基礎資料として、撥水処理をした木材の表面結露現象について検討した。

6.2. 実験

スギ (*Cryptomeria japonica* D.Don) の板目板 (厚さ=5 mm) を用いて、内側の寸法が 50×50×80 (mm) の箱を作製して試験体とした。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 °C、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表面の温度をデジタル放射温度計 (YOKOGAWA 製、530-01 型) で測定した (写真 2.6.1)。



写真2.6.1 表面結露の実験様子

6.3. 結果と考察

試験体の内部に氷水を入れてから 30 分経過後に外側の表面を観察すると、撥水処理の有無にかかわらず両方とも結露が無かった (写真 2.6.2 の 1、2)。120 分経過後では、両方と

も表面結露が生じた（写真 2.6.2 の 3、4）。撥水処理材（写真 2.6.2 の 3）では、細かい水滴が沢山付いていた。一方無処理材では、濡れて全体的に深い材色になり、撥水処理材の表面より大きい点状の水滴が晩材部の付近に多く発生した（写真 2.6.2 の 4）。また、水滴が下縁部分に集中して流れ出しそうなほどであった（写真 2.6.2 の 5）。

晩材部に水滴が多く発生したのは、晩材部の密度が大きいので熱伝導率が大きく、これが冷橋として作用したことが影響したと考える。また、撥水剤を塗布した際には、早材部は晩材部よりもよく浸透した。

このように、撥水処理の有無により試験体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。

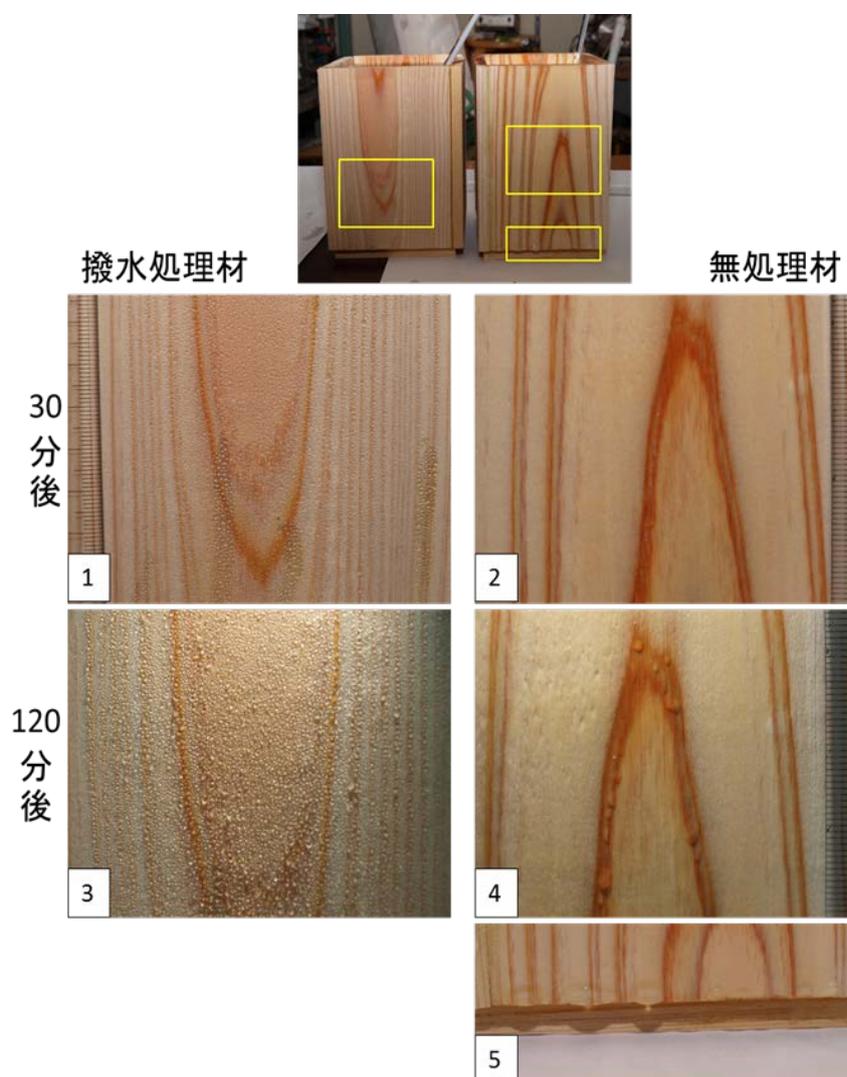


写真2.6.2 表面結露の様子

また、図 2.6.1 から見ると、2 時間後（120 分後）実験体の温度が一番低くなった。撥

水処理の有無に関わらず内側の温度が大体同じ程度で変化していたが、撥水処理材の外側の温度が少し高くと見えている。これは、試験体表面に発生する液体の水滴の形状や様子には違いによって、その表面の熱伝達率が変わったと考えている。

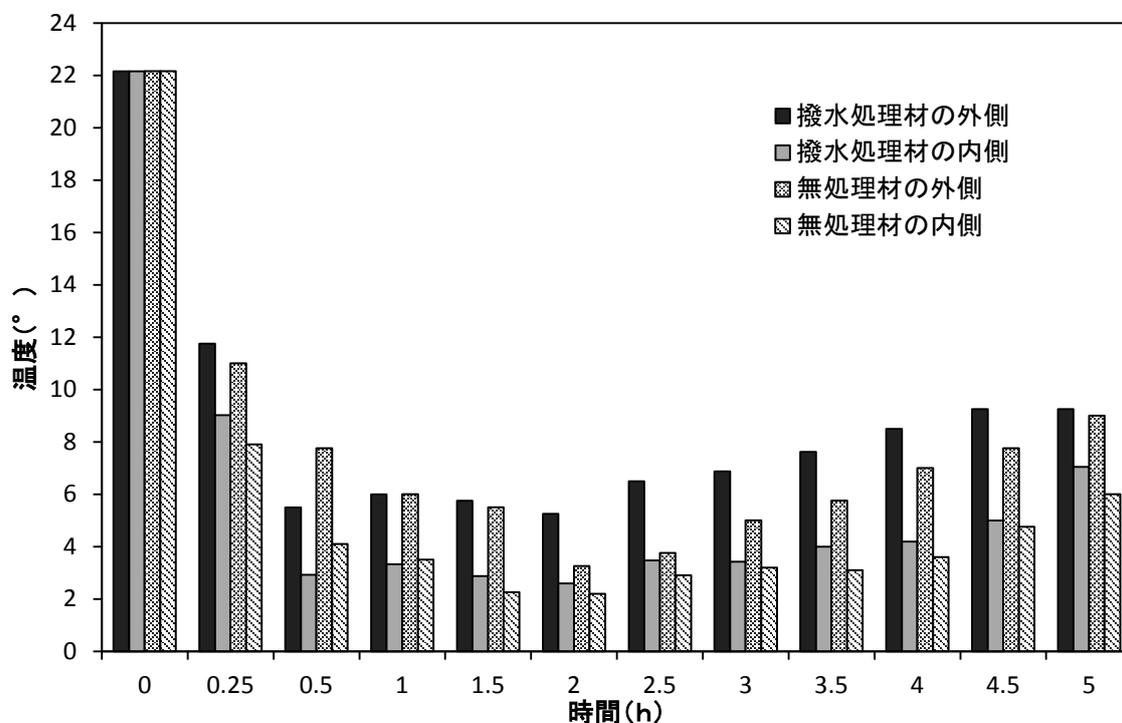


図2.6.1 時間経過における実験体の両側の温度変化

6.4. 結論

- ・ 撥水処理の有無は、表面結露による水滴の形状や様子に影響を与える。
- ・ 撥水処理材の表面には、表面結露による細かい水滴が沢山できて付着する。
- ・ 無処理材の表面には、表面結露による比較的大きな水滴ができて濡れる。

第三章 撥水処理材の木質壁への利用 (木質壁における結露)

1. 目的

撥水処理材は撥水性を持つが、木材の持つ透湿性や調湿性は失われないという性質を持つので、撥水処理材を外壁の屋外側に使用した木質壁の壁内結露現象について検討することを目的とした。

実験 1 では、冬期の木質壁の温湿度環境を模倣するため、モデル化した木質の外壁を屋外側が市販の冷蔵庫の内側に向くようにして取り付けて壁内結露について検討した。

実験 2 では、高断熱・高气密化した外壁では、壁内に一旦湿気が入り込むと排出されにくく、結露が発生しやすい状態になるので、実験 1 の外壁の内部に水の入った皿を入れた場合の壁内結露について検討した。

2. 壁における熱伝導と湿気の移動

2.1. 伝熱

伝熱には、大きく分けて以下のような熱伝導・熱伝達・熱放射が有るが、壁ではこのいずれも生じる。

- ・ 熱伝導は、主に固体中での物質の移動を伴わない高温側から低温側への熱の伝わり方。
- ・ 熱伝達は、物質の流れや凝縮や蒸発、濃度の変化など、他の物理現象を伴った熱の伝わり方。例えば、物質の流れには、気体・液体中で、暖まったものが上昇することで生じる流れ（対流）がある。
- ・ 熱放射は、固体表面から電磁波として放出されるエネルギーによる伝わり方。

2.2. 定常伝熱・非定常伝熱

壁体の伝熱（熱の伝わり方）の状態には定常伝熱と非定常伝熱がある。

定常伝熱は、壁体の両面の空気温度、或は表面温度が長時間一定に保たれ、各部の温度が時間によって変化せず、各断面の熱流量が一定になった場合の伝熱状態であって、自然界ではむしろ特別な状態である。しかし一般的には、表面熱流と貫流熱流が等しい定常状態だと考えて、壁内の内部結露が発生する可能性を考査する。

一方、非定常伝熱は、両面の空気温度などが時間と共に変化し、壁体表面での熱流量なども変動する伝熱状態である。図 3.2.1 のように、温度の変化と共に壁体内に熱の蓄積が進

むため、過度的な状態が非定常状態であり、非定常伝熱では式 3.2.1 が基礎式^[56]であり、その概念図を図 3.2.2 に示した。

実際の壁では、壁体の熱移動は厳密には常に非定常伝熱である。日射や雨の影響、吸放湿に伴う熱や湿気の移動があり、空気温度と表面温度との間には温度差がある。また、熱伝導率と温度が共に変化したり、さらに時間経過に伴い熱や湿気が停滞・蓄積したりすることもあるので、熱や水蒸気の発生は不規則で、定常状態における測定だけでは不十分な場合もある。したがって、非定常状態として取扱うことも必要だと考えて壁内の温湿度の測定も実施した。

2.3. 湿気の移動と定常状態・非定常状態

一般的に、材料内の湿気の移動には、①水蒸気の形で行われる場合、②水分の形で行われる場合、③水蒸気と水分とが共存する場合がある。

定常計算では（第5.3節の実験結果）①の場合を対象とし、②③の場合は非定常計算として扱われる。

ここでは、木造住宅の建築部位の水蒸気および液水移動（材料自体の吸放湿など）を考慮するうえで、伝熱の場合と同様に、定常状態における測定だけでは不十分な場合も多いため、浸水壁の壁内結露について調べて、非定常状態における結露発生の可能性を解析してみた。

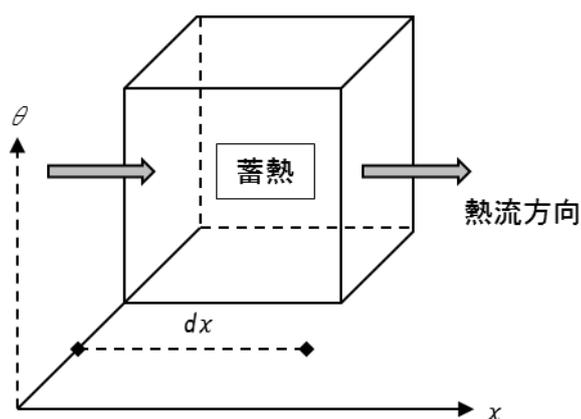


図3.2.1 一次元非定常熱伝導

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = a \left(\frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} \right)$$

$$a = \frac{\lambda}{c\rho}$$

$\frac{\partial \theta}{\partial t}$: dt時間中の壁体の温度上昇(°C/h)

a : 温度伝導率(m²/s)

λ : 熱伝導率(W/mK)

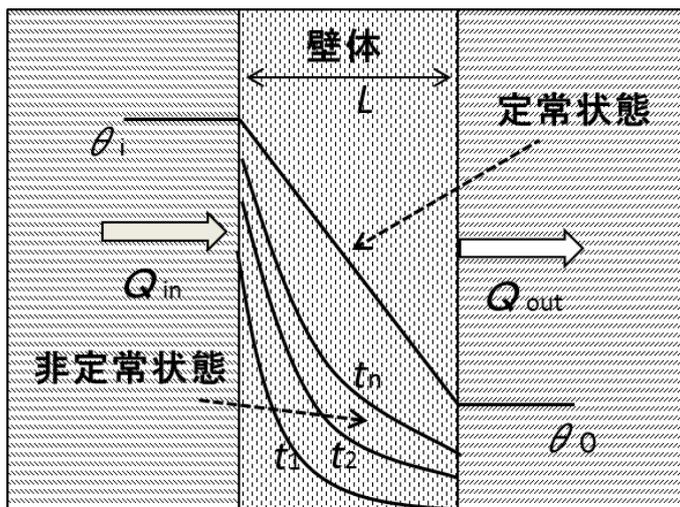
c : 壁体の比熱(J/kgK)

ρ : 壁体の密度(kg/m³)

θ : 温度(°C)

x : 熱の伝導方向距離(m)

..... (式 3.2.1)



* 壁体は平行平板の場合

・林 國郎:入門講座 熱伝導率
(3)非定常熱線法,金属,アグネ
技術センター,2000, pp672-
682

図3.2.2 熱貫流より温度分布の時間的变化*

2.4. 結露と単層壁

結露²⁾は、周りの空気の露点温度より低い固体の表面で、周りの空気中の水蒸気が凝縮して液体の水になる現象のことである。熱伝導の概念からみた表面結露と壁内結露のイメージを図 3.2.3 に示した。

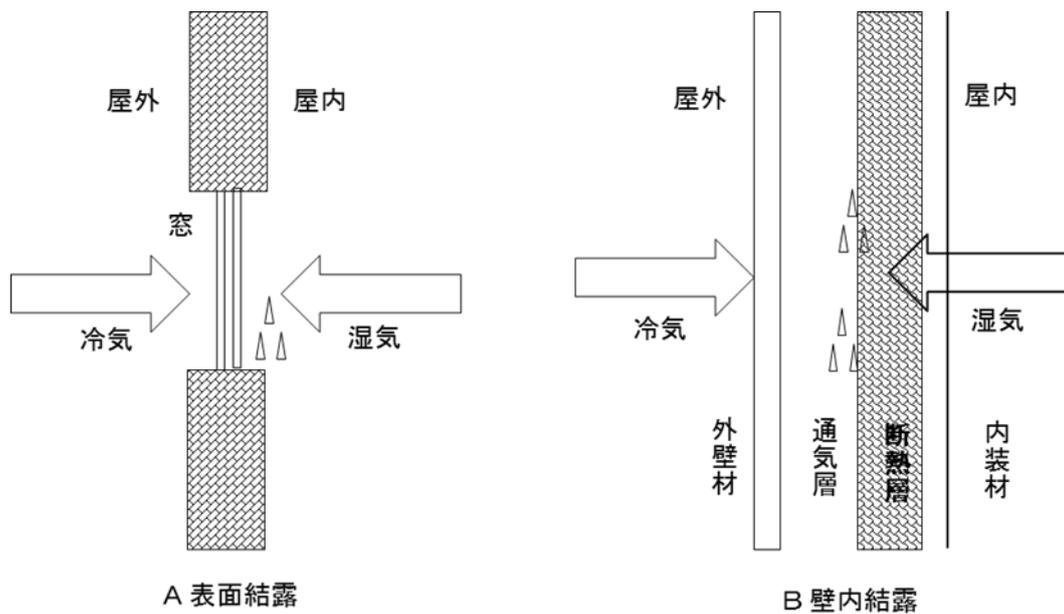


図3.2.3 表面結露と壁内結露の例

一般的には、建築の壁体は近似的には一次元壁体（図 3.2.4^[56]）とみなすことができ、固体中の熱伝導の基礎式はフーリエ（Fourier）の式^[56]（式 3.2.2）で表される。図 3.2.5 に示すように、外側の表面熱伝達率を h_o 、内側の表面熱伝達率を h_i 、この構造の熱伝導抵抗を R_s とすると、多層の構造でも単層壁としてモデル化ができる。

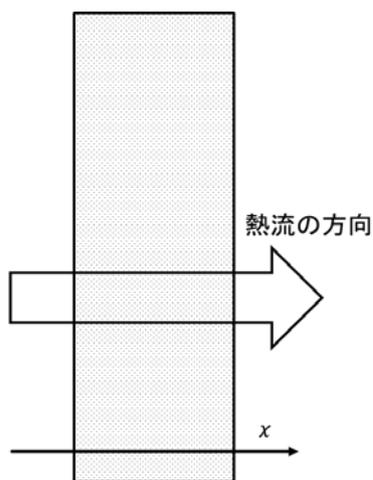


図3.2.4 一次元壁体の熱流

$$q = -\lambda \left(\frac{\partial \theta}{\partial n} \right) \quad \dots\dots\dots \text{式3.2.2}$$

q : 単位面積、単位時間当たりの伝熱量(W/m²)
 n : 熱流方向の微小長さ(m)
 λ : 熱伝導率(W/mK)
 θ : 温度(K)

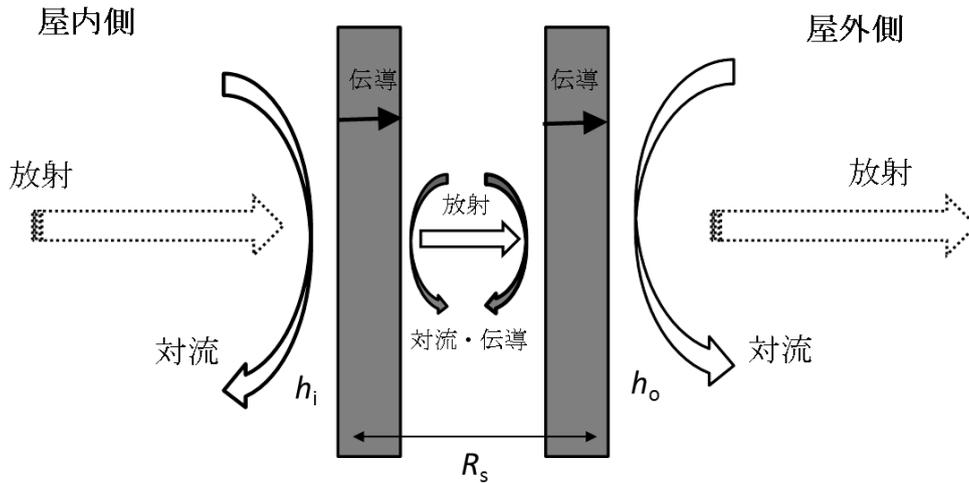


図3.2.5 一般的な構造の熱伝達概念

2.5. 結露の判定

結露条件の計算には測定データの中で最低気温を採用した。熱貫流率 U は以下の式 3.2.5⁷⁾ を用いて計算した。さらに、壁体の表面温度と壁内の各測定点の温度は式 3.2.6⁷⁾ により求めた。壁内の各測定点の気圧は式 3.2.7⁷⁾ を用いて求めた。

$$U^{-1} = \alpha_1^{-1} + \left(\sum \frac{d}{\lambda} \right)^{-1} + \alpha_2^{-1} \quad \dots\dots\dots \text{式 3.2.5}$$

ここで、 U : 熱貫流率 (W/(m² · K))、 α_1 、 α_2 : 壁両側の熱伝導率 (W/(m² · K))、 d : 構成要素の厚さ (m)、 λ : 各構成要素の熱伝導率 (W/(m · K))、

$\frac{d}{\lambda}$: 壁の熱伝抵抗 (m² · K /W)

$$\theta_x = \theta_i - (\theta_i - \theta_o) \times \frac{R_x}{R_t} \quad \dots\dots\dots \text{式 3.2.6}$$

ここで、 θ_x ：測定点 x の温度(°C)、 θ_i ：室温(°C)、 θ_o ：外気温度(°C)、 R_t ：熱貫流抵抗($m^2 \cdot K/W$)、 R_x ：測定点 x から室内側の熱伝導抵抗の和($m^2 \cdot K/W$)。

$$f_x = f_i - (f_i - f_o) \times \frac{Z_x}{Z_t} \quad \dots\dots (式 3.2.7)$$

ここで、 f_x ：測定点 x の水蒸気圧(mmHg)、 f_i ：室内の水蒸気圧(mmHg)、 f_o ：外気の水蒸気圧(mmHg)、 Z_t ：湿気貫流抵抗($m^2 \cdot h \cdot mmHg/g$)、 Z_x ：測定点 x から室内側の透湿抵抗の和($m^2 \cdot h \cdot mmHg/g$)。

また、飽和水蒸気圧は Tetens(1930)の式 3.2.8 を用いて算出できる。各層の実測温湿度と比較して、各層の壁内結露可能性を考察した。

$$E = 6.11 \times 10^{\frac{7.5t}{237.3+t}} \quad \dots\dots (式 3.2.8)$$

$$E(\text{hPa}) = 1.333224 \times E(\text{mmHg})$$

E ：飽和水蒸気圧 (hPa)
 t ：外気温度 (°C)

ここで、指定した温度 t °C における飽和水蒸気圧 $E(\text{hPa})$ が求まる。

また、結露発生の確認手順は：①外気温（屋外側）および内部の温・湿度（屋内側）を確定；②温・湿度境界各層を構成している材料の確認；③構成材料の熱伝導抵抗、透湿抵抗を確認；④熱貫流抵抗、湿気貫流抵抗を計算；⑤各層の温度を計算；⑥対象温度での飽和水蒸気圧を計算；⑦各層の実在水蒸気圧を計算；⑧飽和水蒸気圧と実在水蒸気圧を比較して、結露可能性を考察した。

3. 壁の断熱構法（内断熱と外断熱）

木造住宅の断熱方法には、大きく分けると 2 種類あり、充填断熱（内断熱）と外断熱（外貼り断熱）がある（図 3.3.1）。その壁の構造を図 3.3.1 [57]に示した。

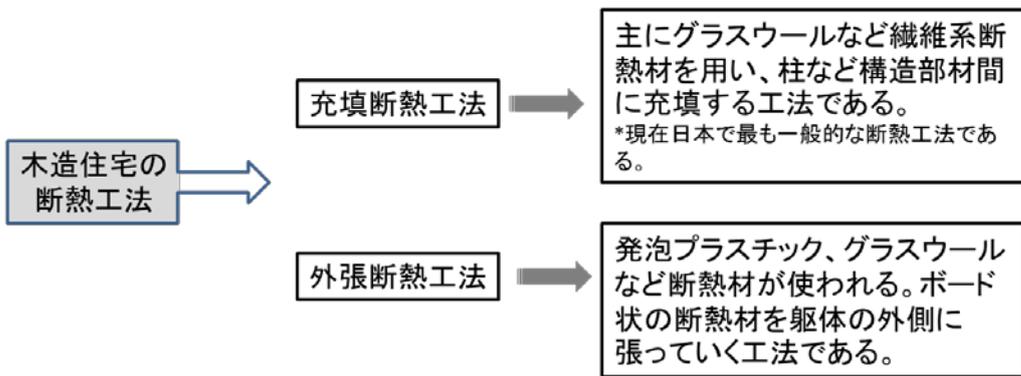


図3.3.1 木造住宅における断热工法

* 2008年硝子繊維協会調査資料より

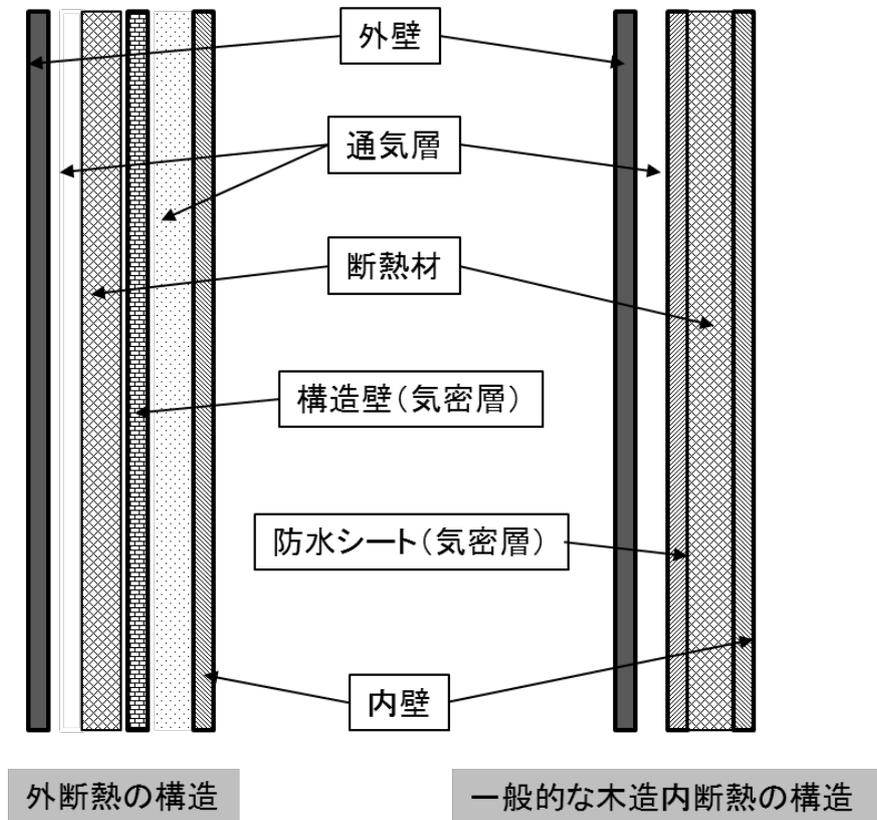


図3.3.1 木質壁の断热構造

4. 壁の内部における水

建物における結露は、住宅の使用寿命に大きく影響するだけにとどまらず、住環境やそ

ここに住まう人の生活背景にも大きな影響を及ぼす。図 3.4.1 に示したように、木造住宅の外壁は雪や雨などにより水が浸入する可能性と調理や暖房により室内からの水蒸気・湿気の流入も考慮しなければならない。さらに図 3.4.2 に示すように、無断熱の時や断熱材が薄いときは外壁と断熱材の間には空気層（隙間）ができ、そこに雨水が滲入しても隙間を伝わって雨水は下に流れてしまう。しかし一方、断熱性能を高くした外壁では、断熱材と外壁下地は密着するので、外壁から雨水が滲入すれば断熱材を湿潤させることになり、断熱材に入り込んだ水は乾燥しにくいのでいずれ土台や外壁下地の下の方の部分を腐らせることになる。

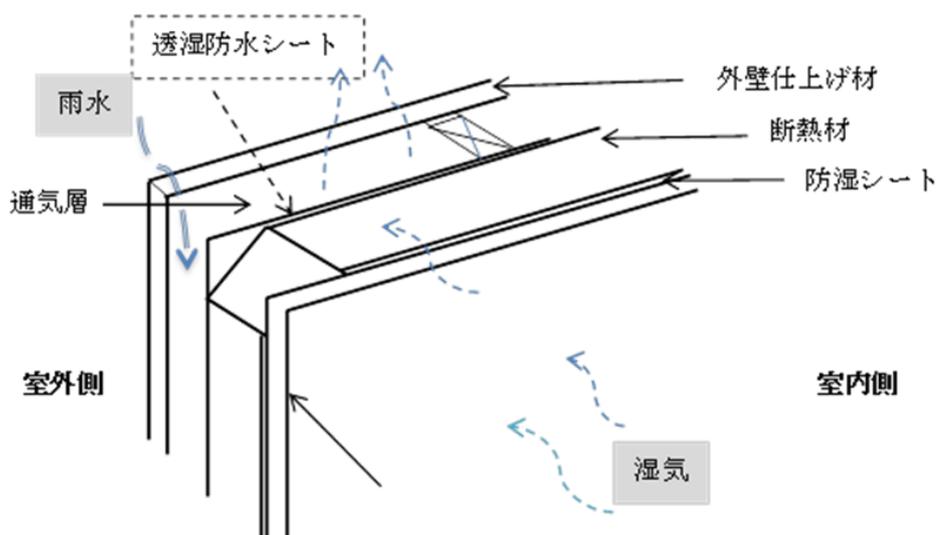


図 3.4.1 木質壁の構造イメージ

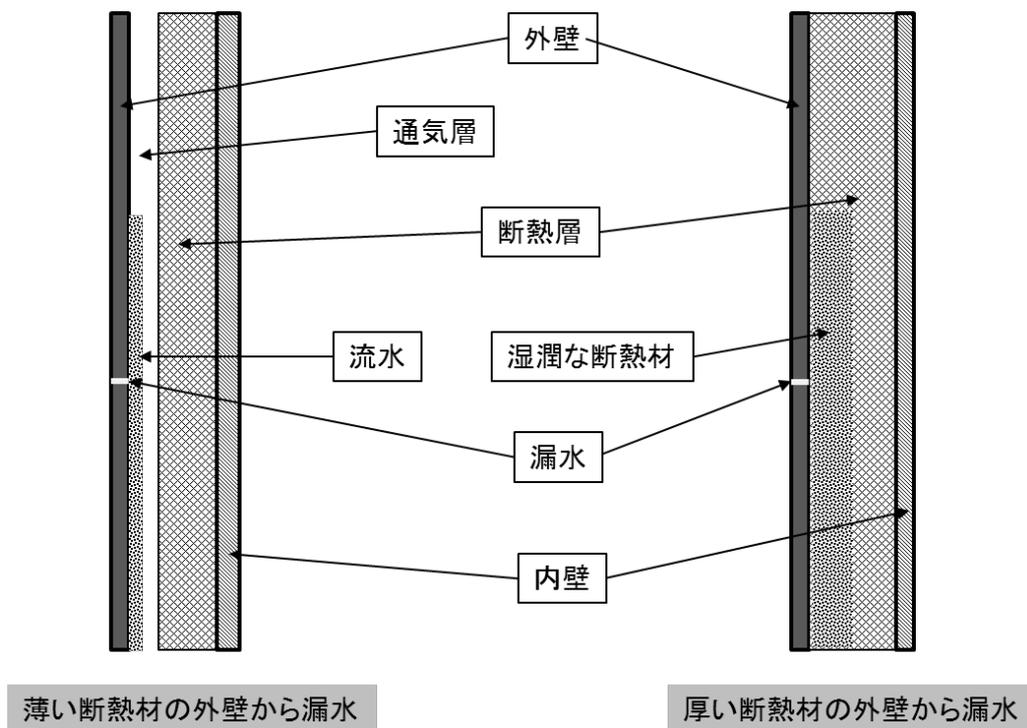


図3.4.2 壁体内部に浸水のイメージ(外壁から侵入の例)

5. 実験

5.1. 木質壁のモデル化

図 5.1.1⁴⁶⁾に外壁の屋内側の壁の構造の例を示した。このモデルにおいて、結露抑止のポイントはIの断熱層(熱伝導を小さくする)、Bの防湿層(湿気拡散を小さくする)である。もう一つの要素は調湿能をもつ壁材(W:木質ボード)と通気層で、これらは結露防止の点で有効である。これらはさらに、室内気候の調節(温湿度の変動幅を小さくする作用)にも役立つ可能性がある。また(1)、(4)、(7)のように、外壁と断熱材の間に通気層を設けるのが一般的である。また湿気を通しやすい断熱材の場合は、内装材と断熱材の間に防湿層(シート)を入れる。

このような外壁を参考として、図 5.1.2 に示すような、異なった構造を持つ外壁(モデル I、II、III)を撥水处理合板あるいは無処理合板を外壁材として用いて作製して、供試木質壁(以下、「モデル」)とした。

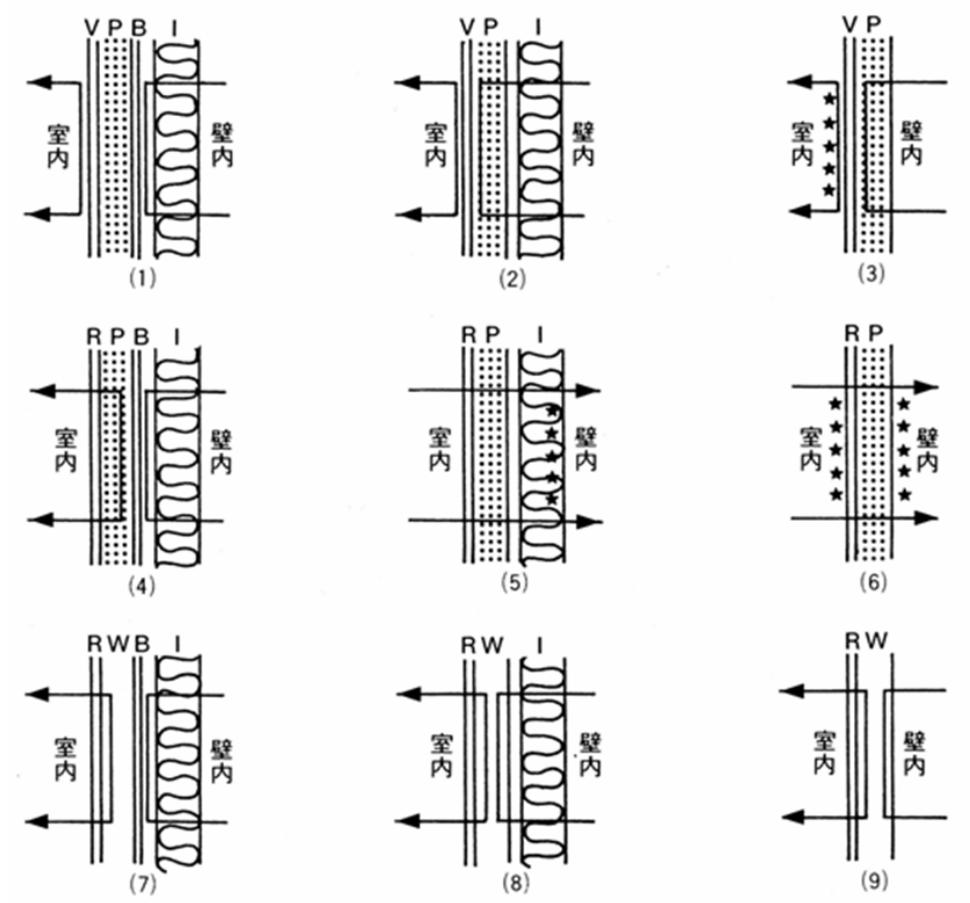
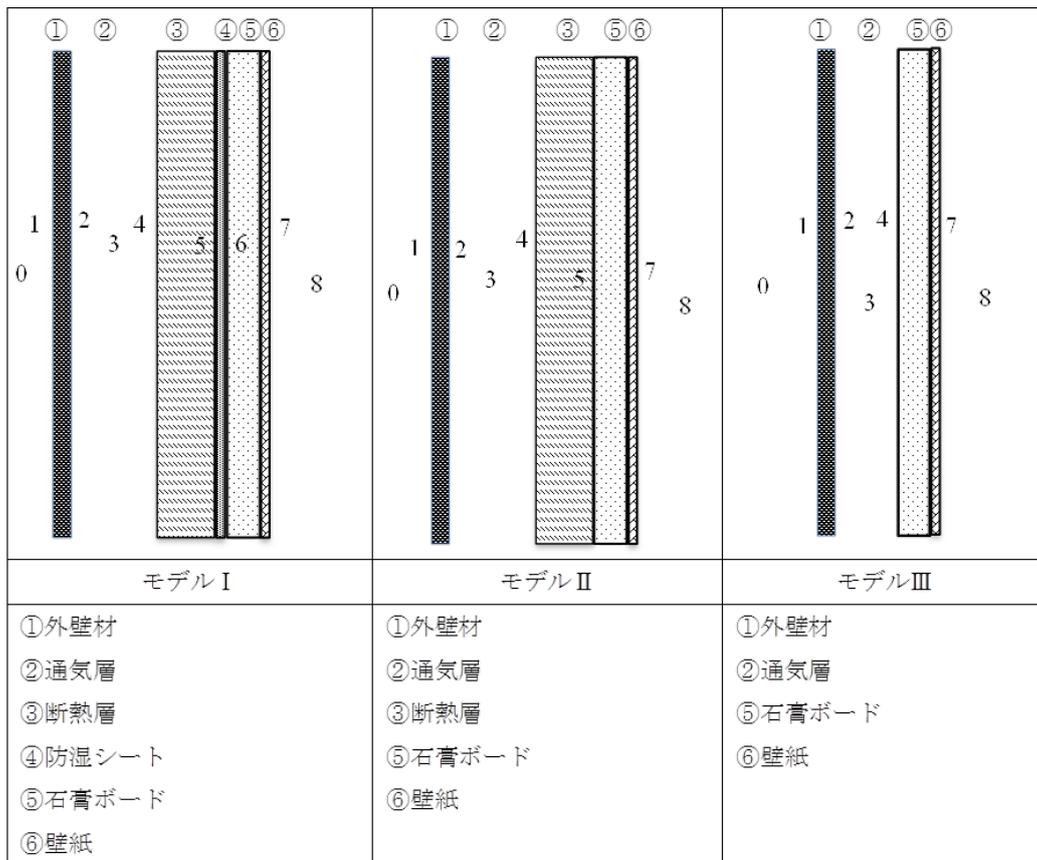


図 5.1.1 壁のモデルと湿気の動き

V:ビニル壁紙 P:石膏ボード B:防湿層 R:布壁紙 W:木質ボード I:断熱層
 矢印は湿気の動き ★:結露



①～⑥ 各層で使用材料の表示
 0～8 各層における測定位置の表示点

図5.1.2 供試木質壁のモデル

5.2. 供試壁材料の物性値と温湿度の測定装置

供試壁材料の物性値を表 5.1.1 に示した。温湿度の測定には、温湿度センサー（T&D 製、RT-3310、精度：平均±0.3℃・±5%RH）、データロガー（RTR-53、データコレクタ RTR-57C、株式会社ティアンドデイ）を用いた。

撥水剤には MOLCOP・#0217・SV（サンオー産業株式会社提供）を用いた。また、各モデルの熱貫流抵抗などを表 5.1.2 に示した。

表5.1.1 モデルに使用した材料の物性値

名称	材厚 (mm)	熱伝導抵抗 ($m^2 \cdot h \cdot ^\circ C / kcal$)	透湿抵抗 ($m^2 \cdot h \cdot mmHg / g$)	備考
合板	12	0.0923	7.69	市販品
窯業系サイディング	13	0.0722	12	ニチハ製 無塗装品 (シーラー品)
通気層	50	0.1~0.18	0.01	
グラスウール系断熱材	40	1.395	1.25	マグ・イゾパール製 「床トップ」UB42H-263
防湿シート(PEシート)	0.2	0.001	452	アイネット製 ブルー シート#3000
石膏ボード	9.5	0.1	0.64	吉野石膏製 タイガー ボードQM-9828
壁紙	0.5	0.01	0.52	東リ製 ウォール織物 WEN6034
室外側	—	0.03	0.02	住宅金融公庫「木造住宅工 事共通仕様書」付録3「熱貫 流率の計算方法」による
室内側	—	0.13	0.06	

※ 住宅金融支援機構(旧 住宅金融公庫)木造住宅工事仕様書(全国版)、日本建築学会編「建築設計資料集成」(1978)丸善などを参考に作成

表5.1.2 検討対象と結露計算基準

		構造用合板	窯業系サイディング
モデル Ⅰ	厚さ (mm)	$12+50+40+0.2+9.5+0.5=112.2$	$13+50+40+0.2+9.5+0.5$
	熱貫流抵抗 ($m^2 h ^\circ C / kcal$)	$0.0923+0.1+1.395+0.001+0.1+0.01+0.13+0.03$	$0.0722+0.1+1.395+0.001+0.1+0.01+0.13+0.03$
	湿気貫流抵抗 ($m^2 h mmHg / g$)	$7.69+1.25+452+0.64+0.52+0.06+0.02$	$12+1.25+452+0.64+0.52+0.06+0.02$
モデル Ⅱ	厚さ (mm)	$12+50+40+9.5+0.5=112$	$12+50+40+9.5+0.5$
	熱貫流抵抗 ($m^2 h ^\circ C / kcal$)	$0.0923+0.1+1.395+0.1+0.01+0.13+0.03$	$0.0722+0.1+1.395+0.1+0.01+0.13+0.03$
	湿気貫流抵抗 ($m^2 h mmHg / g$)	$7.69+1.25+0.64+0.52+0.06+0.02$	$12+1.25+0.64+0.52+0.06+0.02$
モデル Ⅲ	厚さ (mm)	$12+50+9.5+0.5=72$	$12+50+9.5+0.5$
	熱貫流抵抗 ($m^2 h ^\circ C / kcal$)	$0.0923+0.1+0.1+0.01+0.13+0.03$	$0.0722+0.1+0.1+0.01+0.13+0.03$
	湿気貫流抵抗 ($m^2 h mmHg / g$)	$7.69+0.64+0.52+0.06+0.02$	$12+0.64+0.52+0.06+0.02$

5.3. 屋内外の温湿度条件

屋外条件（冷蔵庫内）は、**図 5.3.1** の気象庁のデータ [58]（東京）を参考にして、冬の時期（1.2月）の中で、最低温度、湿度範囲（グラフの点線部分）を基準として、温度 1~7℃、湿度 20~50%RH とした。冷蔵庫の外側（屋内）の条件は、室内状態としたが、温度 18~23℃、湿度 30~55%RH であった。

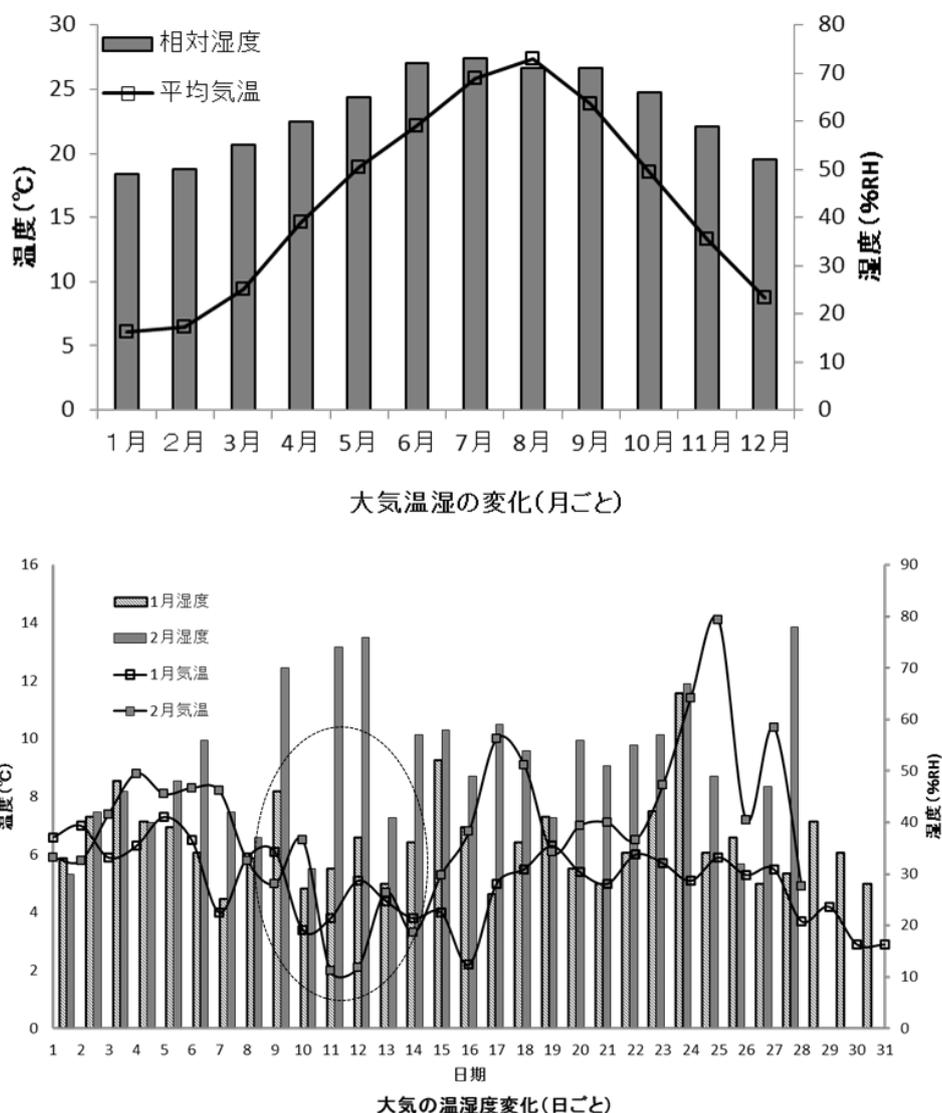


図5.3.1 外気条件の変化範囲

5.4. 実験 1 (壁の内部に浸水が無い場合)

5.4.1. 実験方法 (撥水処理とモデルの違い)

図 5.1.2 に示すような、異なった構造を持つ外壁 (モデル I、II、III) を撥水処理材あるいは無処理材を外壁材として用いて作製して、供試木質壁 (以下、「モデル」) とした。このモデルを冷蔵庫内が冬期の環境条件になるように設定し、冷蔵庫のドアの代わりに枠を作製し、この枠を上下に 2 分割し、モデル毎に撥水処理材、無処理材を用いたモデルをはめ込んで、それぞれの壁の各測定点 (図 5.1.2) について 1 回目の温湿度を測定し、配置を換えて 2 回目の温湿度を測定した。

5.4.2. 実験方法 (外壁材料・撥水処理とモデルの違い)

図 5.1.2 に示すようなモデルの内、モデル I と II について、冷蔵庫内が冬期の環境条件になるように設定し、冷蔵庫のドアの代わりに枠を作製し、この枠を上下に 3 分割し、モデル毎に外壁材として無処理材、撥水処理材、窯業材を用いたモデルをはめ込んで、それぞれの壁の各測定点 (図 5.4.1) について温湿度を測定した。供試した壁を写真 5.4.1 に示した。

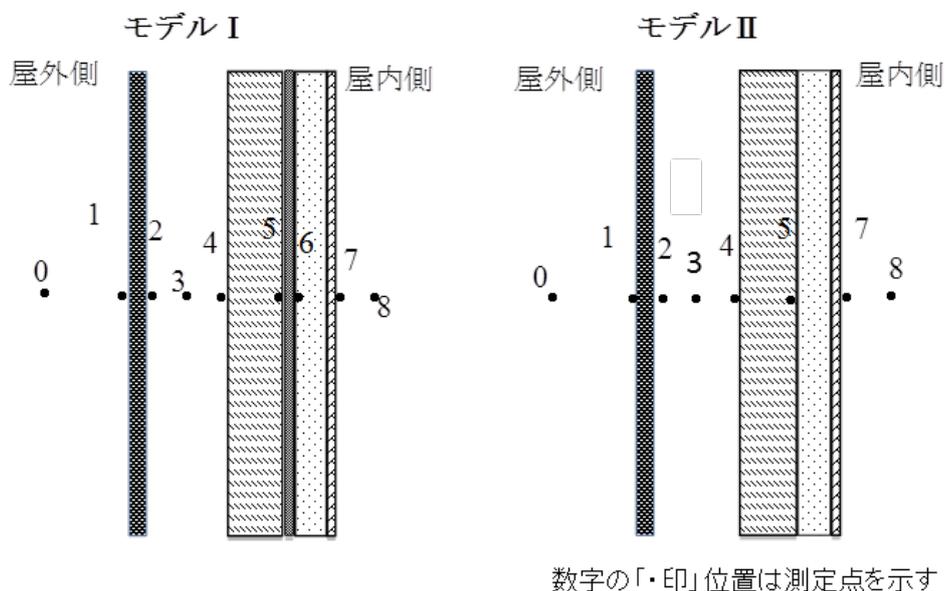


図5.4.1 壁内温湿度の測定点位置

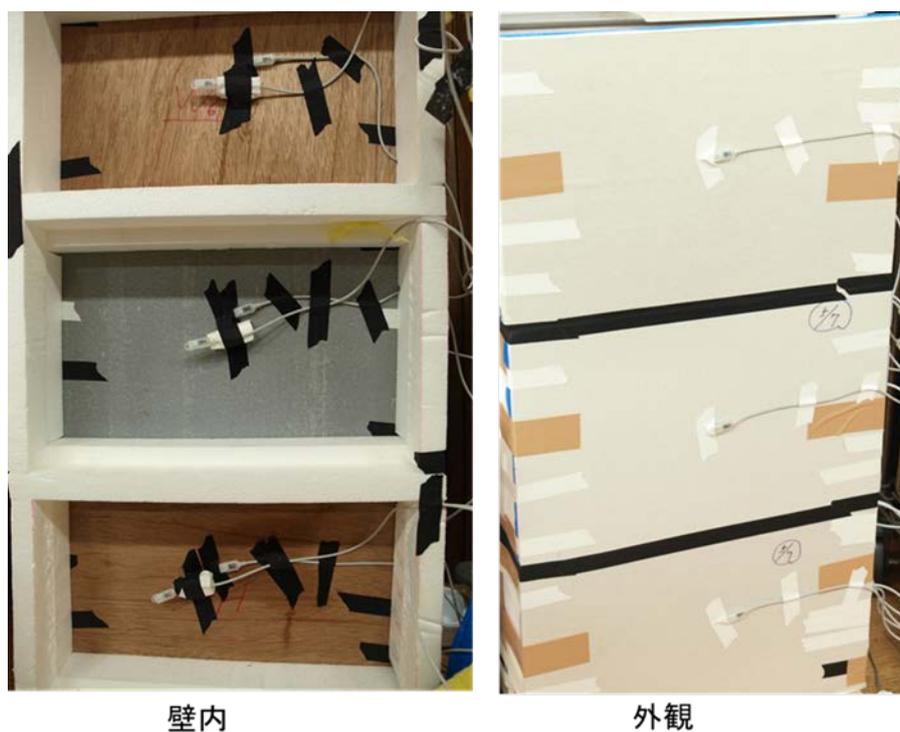


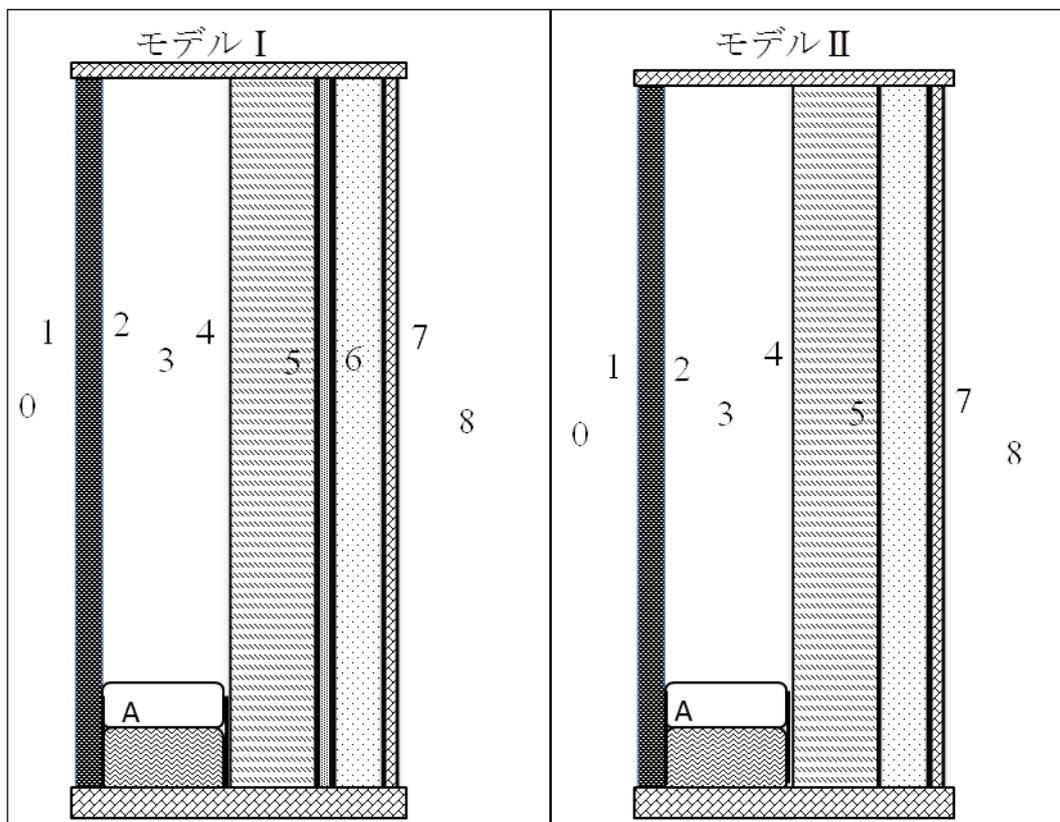
写真5.4.1 供試した壁

5.5. 実験 2 (壁の内部に浸水した場合)

実験方法 (浸水壁と外壁材料・撥水処理)

図 5.1.2 に示すようなモデルの内、モデル I、II を供試した。壁内に液体の水が侵入した状態は、各モデルの空気層 (図 5.5.1 の測定点 2 と 4 の間) に設置したプラスチック容器 (図 5.5.1 の A) に水を入れた状態 (以下、「浸水壁」) とし、5.4.2 と同様に、枠を上下に 3 分割し、モデル毎に外壁材として無処理材、撥水処理材、窯業材を用いたモデルをはめ込んで、それぞれの壁について、各測定点 (図 5.5.1) の温湿度を測定した。

その他の実験方法と条件は**実験 1**と同様にした。



A: 水が入ったプラスチック容器

図5.5.1 浸水壁のモデルと測定点

6. 結果と考察

6.1. 実験1

6.1.1. 撥水処理とモデルの違い

各モデル（図 5.1.2）の熱伝導抵抗と透湿抵抗を表 6.1.1 に示した。また、各測定点の気圧と飽和気圧を図 6.1.1 に示した。

なお、壁内結露発生の可能性のある測定点（以下、「発生位置」）は、測定点の気圧 > 飽和水蒸気圧になるところである。

モデル I では、測定点 6（④防湿シートと⑤石膏ボードとの間）で測定点の気圧 > 飽和水蒸気圧になっており、結露が発生する可能性があるが、測定点 5（石膏ボードと断熱層の境界）は発生の可能性が低かった（図 6.1.1）。防湿シートがあるので屋内からの水蒸気が流入しないため、防湿シートは壁内結露の防止に効果があったと考える。撥水処理材と無処理材とでは差が無かった。

モデルⅡでは、処理の有無にかかわらず測定点1～4が発生位置となったが、気圧の差は無処理材の方が撥水処理材より大きく、結露の可能性が高くなった(図6.1.1)。モデルⅡは防湿シートがなく、全体的に湿気貫流抵抗が低い(表6.1.1)ためである、と考える。一方、測定点5では結露は生じないが、そこに断熱材があり、温度が高いので飽和気圧が上昇することによると考える。

モデルⅢでは、処理の有無にかかわらず、測定点2、3、4、7が発生位置であった(図6.1.1)。このことは、モデルⅢの熱貫流抵抗が低い(表6.1.1)ので外気温の影響を受けやすいことによると考える。従って、モデルⅢは断熱・調湿性能が劣り、外壁として問題が多い。撥水処理材と無処理材とでは差が無かった。モデルⅢは結露抑止の性能が劣り、実際に外壁として使用は不適であるといえる。

上記のように発生位置は、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、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。

表6.1.1 壁材料の熱伝導抵抗と透湿抵抗

位置*	モデルⅠ		モデルⅡ		モデルⅢ	
	R	Z	R	Z	R	Z
0	-	-	-	-	-	-
1	1.9083	462.17	1.9073	10.17	0.5123	8.92
2	1.816	454.48	1.815	2.48	0.42	1.23
3	1.786	454.47	1.785	2.47	0.39	1.22
4	1.636	454.47	1.635	2.47	0.24	1.22
5	0.241	453.22	0.24	1.22	-	-
6	0.24	1.22	-	-	-	-
7	0.13	0.06	0.13	0.06	0.13	0.06
8	-	-	-	-	-	-
R _t	1.9383	-	1.9373	-	0.5423	-
Z _t	-	462.19	-	10.19	-	8.94
材料*	t		t		t	
①	12		12		12	
②	50		50		50	
③	40		40		40	
④	0.2		-		-	
⑤	9.5		9.5		-	
⑥	0.5		0.5		0.5	

*: 第3図中の測定位置または材料の位置
R: 熱伝導抵抗 (m²・h・°C/kcal), Z: 透湿抵抗 (m²・h・mmHg/g), t: 厚さ (mm)
R_t: 熱貫流抵抗 (m²・h・°C/kcal), Z_t: 湿気貫流抵抗 (m²・h・mmHg/g)

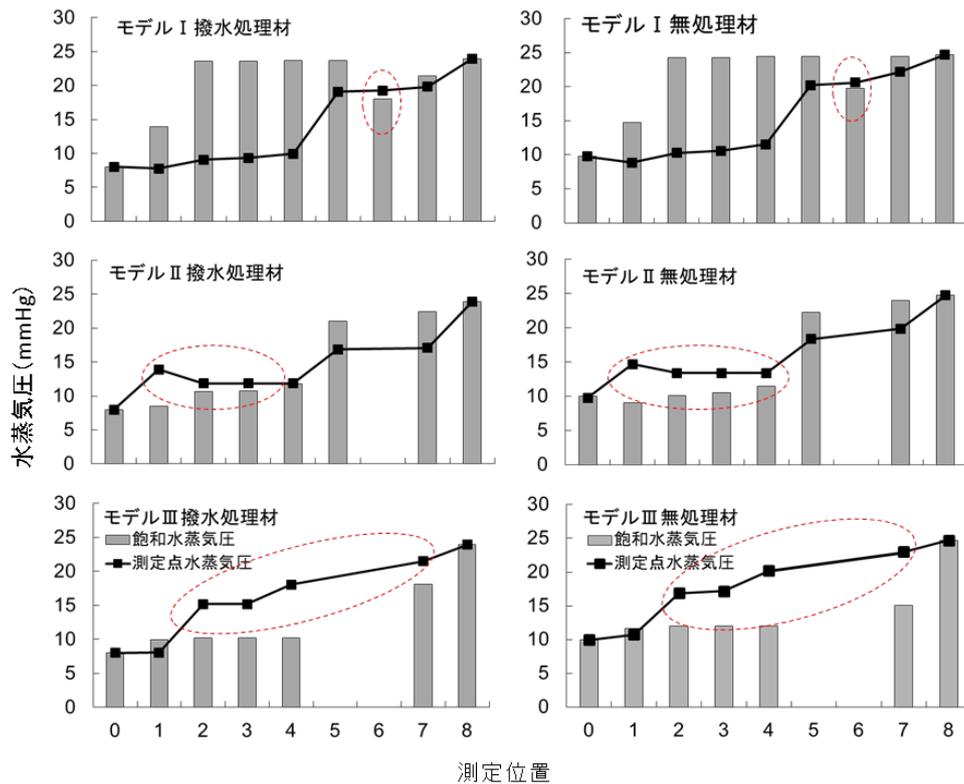


図 6.1.1 壁内の水蒸気圧の分布(無浸水壁)

6.1.2. 外壁材料・撥水処理とモデルの違いによる結露発生位置の比較

モデル I とモデル II について、外壁材に構造用合板（撥水処理：有と無）あるいは窯業材を使用して外壁材の違いによる結露発生位置について比較した（図 5.5.1）。外壁材の熱伝導抵抗と透湿抵抗を表 6.1.2 に示した。また、各測定点の気圧と飽和大气圧を図 6.1.2 に示した。

飽和水蒸気圧 $f_s <$ 実在水蒸気圧 f_a の時に結露が発生するが、図 6.1.2 に示すように、モデル（I・II）、外壁材の種類（撥水処理材・無処理材・窯業材）が異なっても、結露発生位置は 2～4 で違いが無かった。

表6.1.2 壁材料の熱伝導抵抗と透湿抵抗

		合板		窯業材	
モデルⅠ	測定位置	R	Z	R	Z
	0	-	-	-	-
	1	1.9083	462.17	1.8882	466.48
	2	1.816	454.48	1.816	454.48
	3	1.786	454.47	1.786	454.47
	4	1.636	454.47	1.636	454.47
	5	0.241	453.22	0.241	453.22
	6	0.24	1.22	0.24	1.22
	7	0.13	0.06	0.13	0.06
	8	-	-	-	-
	R_t	1.9383	-	1.9182	-
Z_t	-	462.19	-	462.19	
		合板		窯業材	
モデルⅡ	測定位置	R	Z	R	Z
	0	-	-	-	-
	1	1.9073	10.17	1.8872	14.48
	2	1.815	2.48	1.815	2.48
	3	1.785	2.47	1.785	2.47
	4	1.635	2.47	1.635	2.47
	5	0.24	1.22	0.24	1.22
	6	-	-	-	-
	7	0.13	0.06	0.13	0.06
	8	-	-	-	-
	R_t	1.9373	-	1.9172	-
Z_t	-	10.19	-	10.19	

R : 熱伝導抵抗 ($m^2 \cdot h \cdot ^\circ C / kcal$), Z : 透湿抵抗 ($m^2 \cdot h \cdot mmHg / g$)
 R_t : 熱貫流抵抗 ($m^2 \cdot h \cdot ^\circ C / kcal$), Z_t : 湿気貫流抵抗 ($m^2 \cdot h \cdot mmHg / g$)

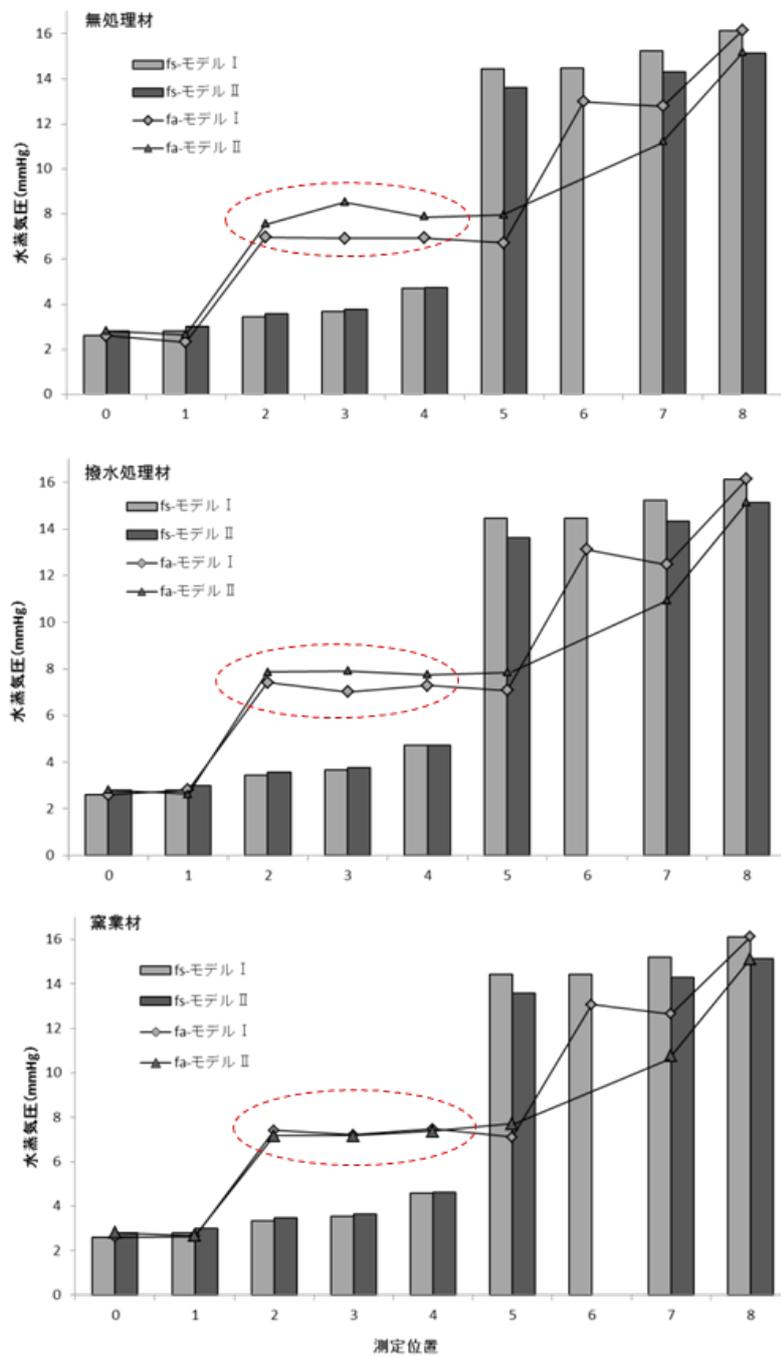


図6.1.2 壁材料の違いによる壁内の水蒸気圧の分布(無浸水壁)

6.2. 実験 2

6.2.1. 浸水壁と外壁材料・撥水処理

浸水壁（壁内の空気層に設置したプラスチック容器に水がある壁）では、写真 6.2.1 に示

すように、壁の表面を肉眼で観察すると、結露が発生する量は無処理材>撥水処理材≒窯業材であった。撥水処理材では液体の結露水が自重で流れだしていた(写真6.2.1のモデルⅡ)。窯業材の場合は、その表面(特に裏面)が凹凸状なので、液体水が表面によく付着する様子がみえた(写真6.2.1のモデルⅡ、写真6.2.2)。

また、全体的にモデルⅠのほうがモデルⅡより結露が少ないように見えた。

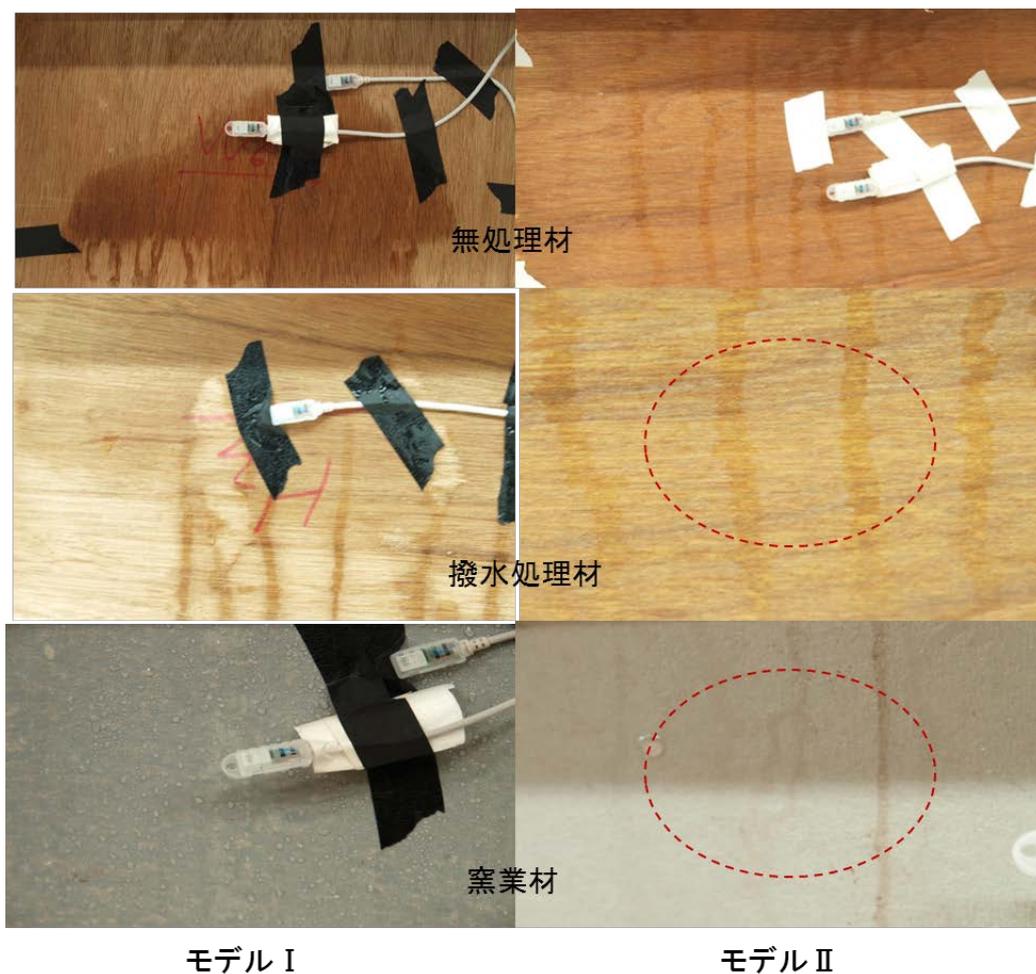


写真6.2.1 壁内の結露状態(浸水壁)



写真6.2.2 実体写真の拡大図

*写真6.2.1のモデルⅡの撥水処理材(上)と窯業材(下)

壁体の内部結露は、実測水蒸気圧 f_a > 飽和水蒸気圧 f_s の場合に発生のあるとすれば、**図 6.2.1** に示すように、測定点 2~4 において発生のある可能性がある。

各モデルにおける飽和水蒸気圧は、実験方法 (5.5.1) に示したように、同時に行われているので、ほぼ同じはずである。このことは**図 6.2.1** から確認できる。

撥水処理材と窯業材との差異が少ない原因として、断熱材の外気側に透湿抵抗の比較的高い構造用合板を設置しているために(一般的には、シーリングボード $1.3(\text{m}^2\text{hmmHg/g})$ 、MDF $2.6(\text{m}^2\text{hmmHg/g})$ であるが、構造用合板は $7.69\sim 20(\text{m}^2\text{hmmHg/g})$ である)、外気からも水蒸気が入りにくいこと、さらに防湿シートがあるために室内からも壁体内へ水蒸気が入りにくいこと、また面材の透湿抵抗が大きくとも室内と壁体内部との気圧の差が大きいので壁体内の気圧が平衡状態になっていたことに起因するのではないかと考える。

モデルⅠとモデルⅡを比較すると、ややモデルⅡの方が飽和水蒸気圧と実在水蒸気圧との差が大きいのので、結露しやすいかもしれない。このことは、**写真 6.2.1** と**写真 6.2.2** にも示すように、モデルⅡでは結露によって濡れた範囲が広く、水で濡れた痕が広範囲にあっ

て、浸水壁内の水の量が多かったといえる。

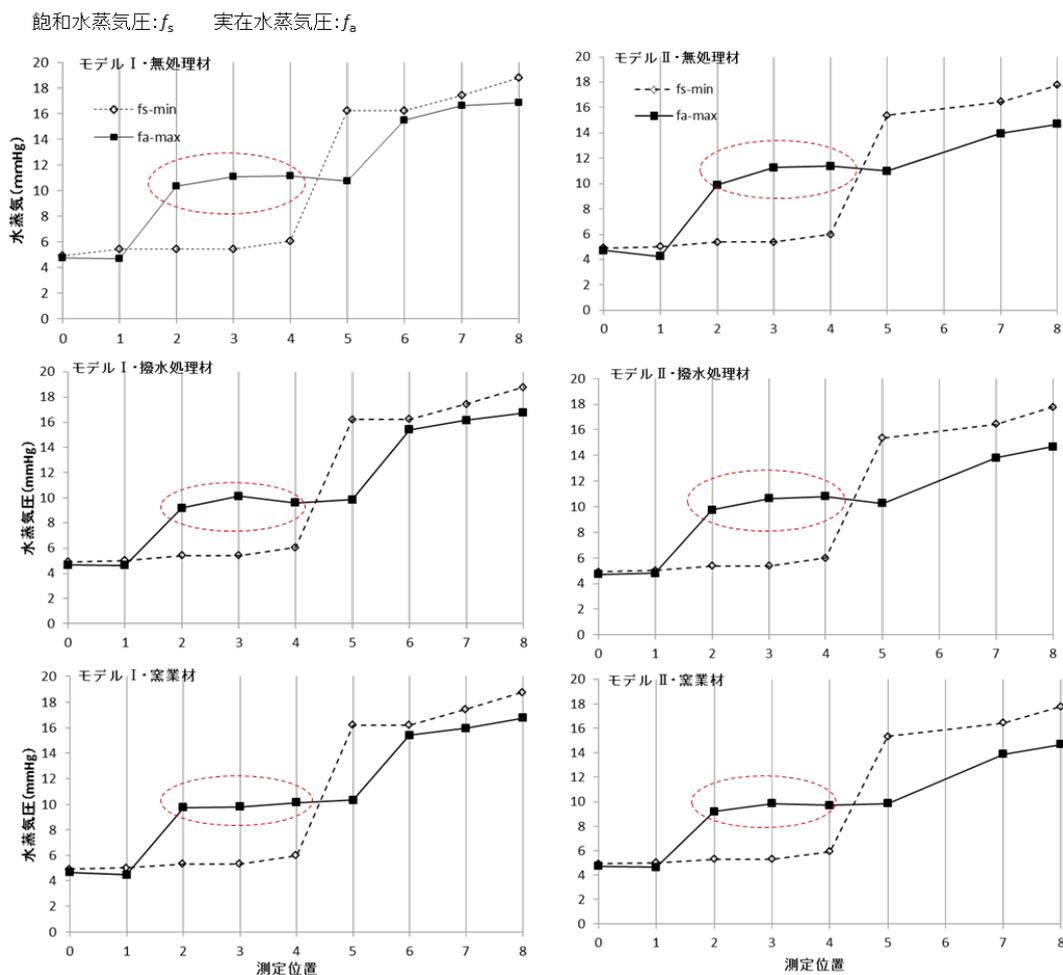


図6.2.1 壁材料の違いによる壁内の水蒸気圧の分布(浸水壁)

6.2.2. 非定常状態における相対湿度の経時変化

非定常状態における各測定点 (図 5.5.1) の時間経過にともなう実測の相対湿度の変化を図 6.2.3 と図 6.2.4 に示した。

図 6.2.3 と図 6.2.4 では、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、その部分を赤い破線の矢印で示した。同じ外壁材では、モデル II のほうがモデル I より黒の点線の矢印の部分が多く、結露が発生しやすいと考える。同じモデルでは、窯業材において、結露が最も発生しやすいと見られる。またモデル I では、撥水処理合板が無処理合板より最大相対湿度が高いため、結露しやすいと言えるだろう。

非定常状態の場合、断熱層の屋内側に設置した防湿シートの透湿抵抗が大きいと、室内の湿気が壁内に入りにくいので結露は発生しにくくなるが、外壁材の透湿抵抗が大きいと、

壁内に入った湿気が外気側に移動・発散しにくいために結露が発生し易くなると考えられる。そのため、合板より透湿抵抗が大きい窯業材の方が外壁側（測定点 2）で結露が発生する可能性が高いと考えられる。このように外壁材料の透湿性あるいは通気性が壁内の結露発生に影響を与えると考える。

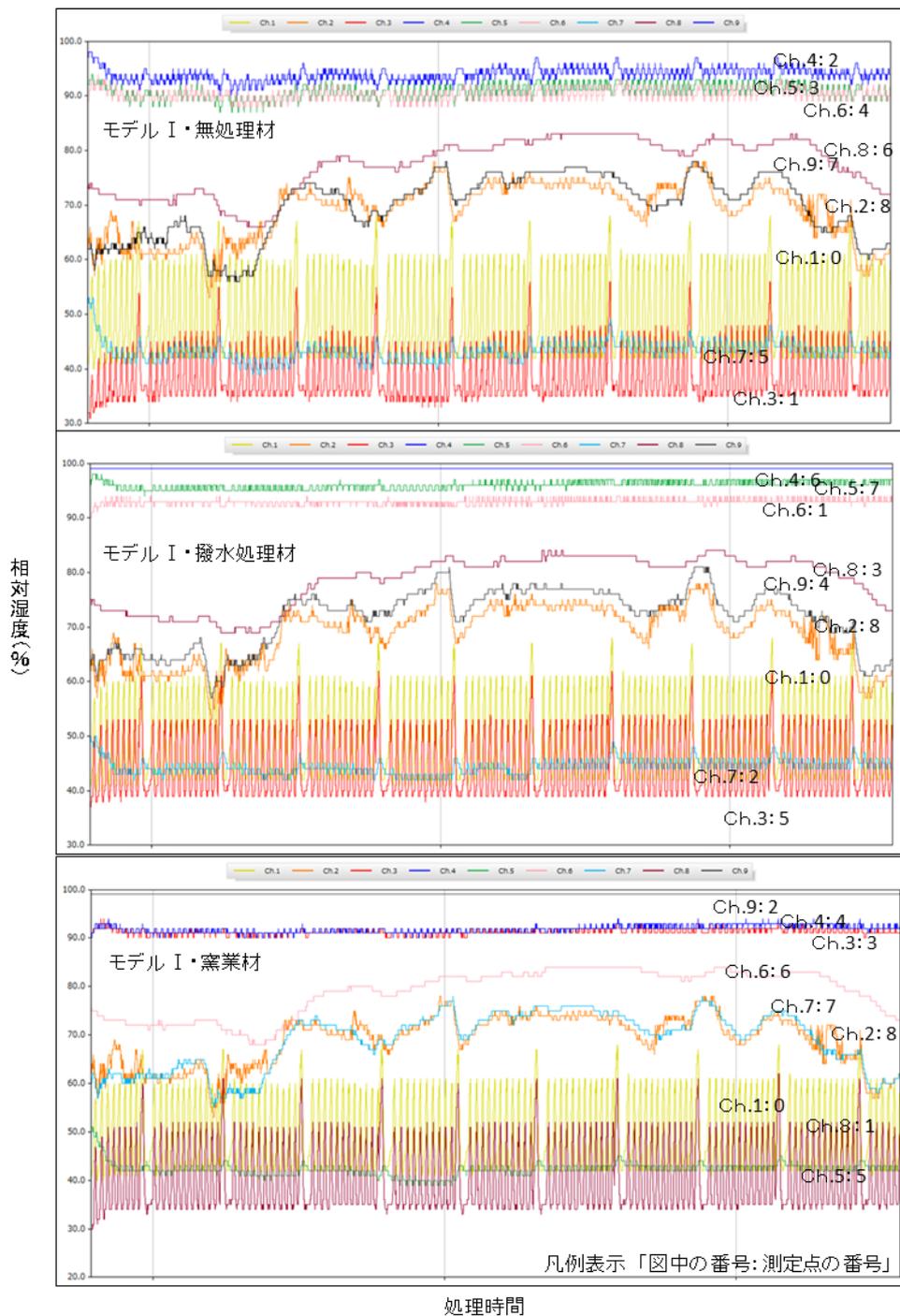


図6.2.3 壁内の相対湿度変化(モデル I)

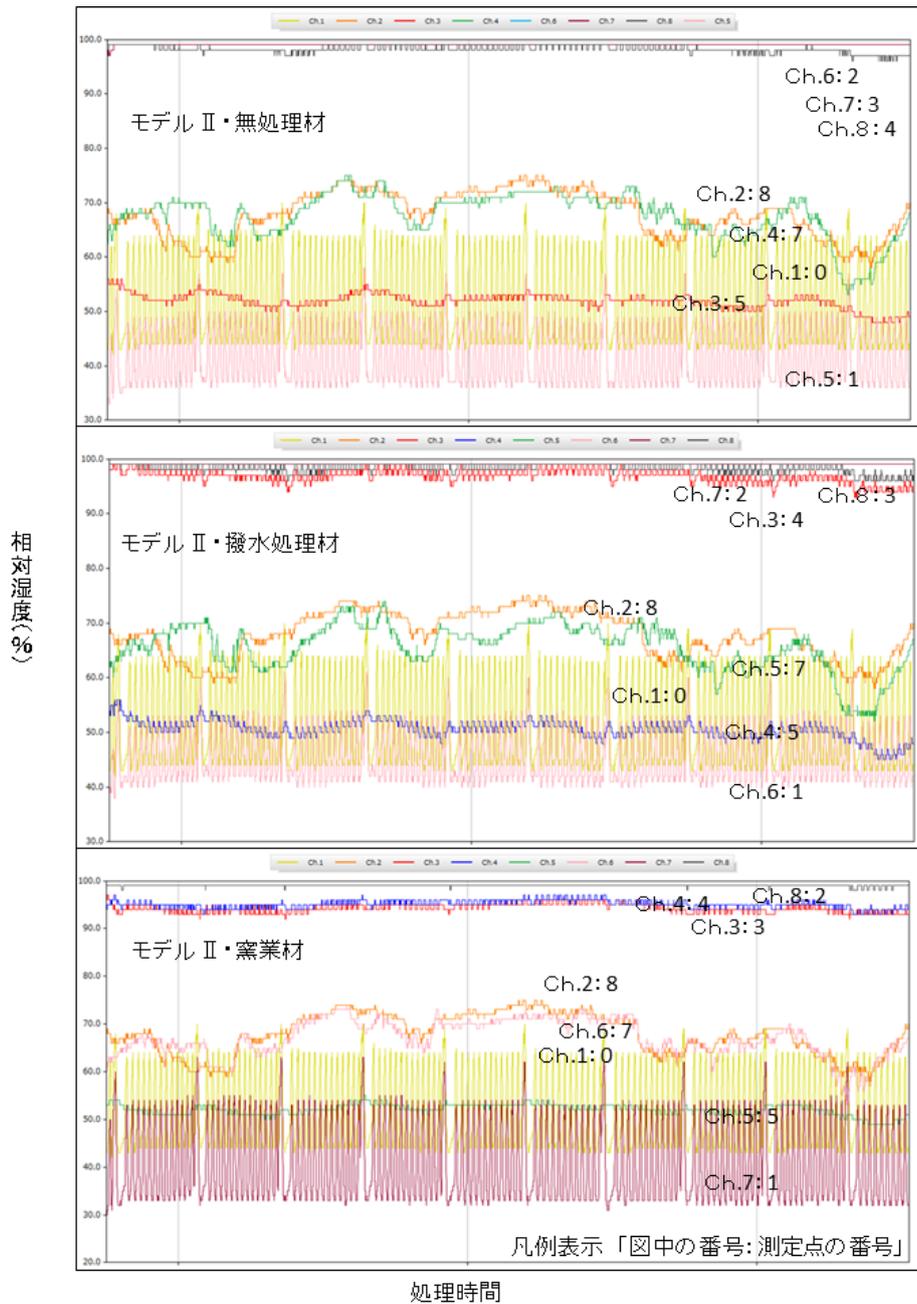


図6.2.4 壁内の相対湿度変化(モデル II)

また、図 6.2.3 図 6.2.4 に示すように、測定点 4、5、6 では相対湿度が 95%RH 以上の高湿度状態になっている。この原因は壁内の湿度が少しずつ上昇傾向にあり、その結果相対湿度も上昇しているためだと考える。

写真 6.2.3 で観察できるように、モデルでは、窯業材よりも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。

このことは、図 6.2.3 図 6.2.4 に示すように、撥水処理を行った面（測定点 1：外気に

接する面) の実測水蒸気圧は飽和水蒸気圧に近かった。仮にここに結露が発生した場合、撥水処理材の表面の結露は木材に浸透せず、含水率の上昇は小さいので、熱伝導率が大きくなることはない(熱伝導抵抗は低下しない)。したがって合板の温度は下がりにくい。一方、無処理材の表面で結露した水は、木材中に浸透して含水率を高める。その結果、熱伝導率が大きくなる(熱伝導抵抗が小さくなる)ので、無処理材の温度が外気温の影響を受けて下がりやすくなり、その結果結露が顕著になった、と考えている。

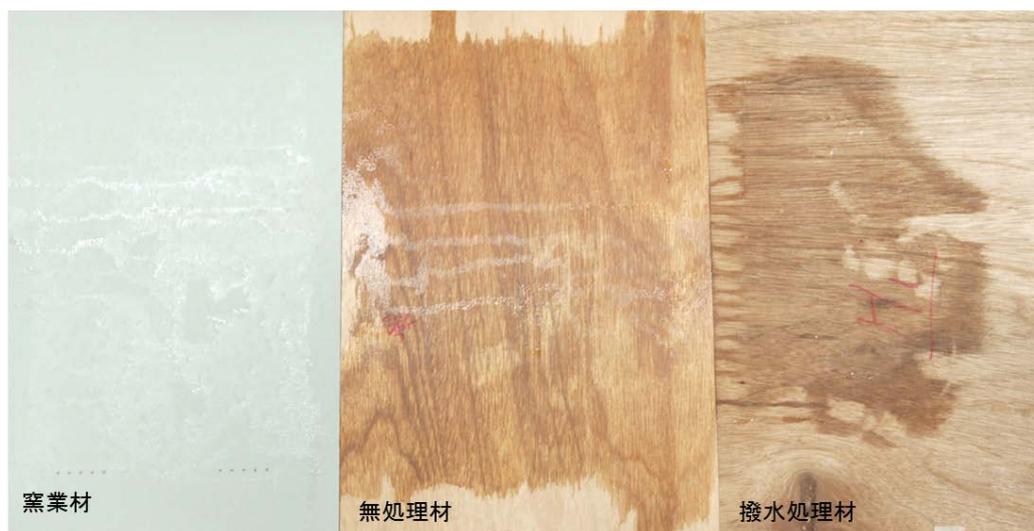


写真6.2.3 撥水処理と壁内結露(モデルⅡ・浸水壁の例)

7. 結論

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。

- ・ 無浸水壁では、発生位置は、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、モデルⅠの防露性能が一番良かった。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。防湿シート(モデルⅠ)や断熱層(モデルⅠ、Ⅱ)を設けることは防露に有効であった。モデルⅢは実際の使用には不適であった。
- ・ 無浸水壁では、モデル(Ⅰ・Ⅱ)や外壁材の種類(撥水処理材・無処理材・窯業材)が異なっても、結露発生位置は2~4でほとんど違いが無かった。しかし、防湿シートの無いモデルⅡでは、撥水処理材の方が無処理材よりわずかに結露しにくいかもしれない。
- ・ 浸水壁では、全体的にモデルⅠのほうがモデルⅡより結露が少ないように見えた。
- ・ 浸水壁のモデルⅡでは、壁の表面を肉眼で観察すると、結露が発生する量は無処理材>撥水処理材≒窯業材であった。
- ・ 施工や使用時に生じた穴などにより防湿シートが機能しにくくなり、気密性が低減した場合にも、撥水処理材の撥水性や透湿性は変化しないと考えられるので、壁内に進入した湿気を壁外に放散できるので、外壁の健全性を保つためには有利かもしれない。

第四章 総括

1. 木材資源の有効活用と目的

本論文は、環境汚染・資源枯渇・地球温暖化などへの危機意識を背景に、エコマテリアル (Environment Conscious Materials、 Ecological Materials) である木材資源のさらなる有効活用を図るために、撥水処理をした木材や木質材料の性質を知ること、さらに木造住宅の省エネを進めるために、撥水処理材を高断熱高気密化しつつある外壁の性能改善に利用することを目的とし、撥水処理材の性質や木質の外壁の外気側に使用した場合の性質について検討した。

得られた結果は以下のものである。

2. 撥水処理材の性質

2.1. 撥水性

木材の持つ表面性 (外観) を変化させない。木材に撥水剤を塗布した後も、その表面の外観はほとんど変わらない。撥水処理材の接触角は、3断面のいずれの面上でもおよそ 122° であり、無処理材のもの $2\sim 3$ 倍であった。 120° を超えたことは、高い撥水効果を持つといえる。

2.2. 吸水性

無処理材の吸水係数 K 値は、木口面 (0.1145) > 柀目面 (0.0697) > 板目面 (0.0374) であったが、撥水処理によっていずれも小さくなり、木口面 (0.0572) > 柀目面 (0.0193) > 板目面 (0.0142) になった。撥水処理によって吸水が遅くなるので、吸水による寸法変化が起りにくくなる。

2.3. 吸放湿性と調湿性

乾湿繰り返しによる含水率の変化は、撥水処理の有無によってほとんど差異がない。

吸放湿性は、撥水処理より無処理材がわずかに大きい。調湿力はほとんど変わらないといえる。吸放湿速度が遅くなることによって、寸法安定効果が期待できる。

2.4. 透湿性

透湿係数 K は、無処理 (0.0664) > 片面処理 (0.0637) > 両面処理 (0.0597) となったが、撥水処理による透湿性への影響は少ないといえる。

2.5. 鉄汚染

撥水処理材は無処理材に比べて色調 (L^* 、 a^* 、 b^*) の変化は小さく、鉄汚染による色調の変化を軽減できる。

2.6. 表面結露

無処理材の表面が結露により濡れるのに対して、撥水処理材の表面には、表面結露による細かい水滴が沢山できて付着する。

3. 撥水処理材の木質壁への利用

無浸水壁では、モデル (I・II) や外壁材の種類 (撥水処理材・無処理材・窯業材) が異なっても、結露発生位置は2~4でほとんど違いが無かった。しかし、防湿シートの無いモデルIIでは、撥水処理材の方が無処理材よりわずかに結露しにくいかもしれない。

浸水壁のモデルIIでは、壁の表面を肉眼で観察すると、結露が発生する量は無処理材>撥水処理材=窯業材であった。

4. 結論

以上のように、撥水処理材は高い撥水性を持ち吸水性は小さくなるが、木材の持つ調湿性や透湿性などの基本的な性質に大きな影響を与えることはない。したがって、木材の持つ長所はそのまま活かされる。

木質住宅の外壁に利用した場合には、壁内の結露を軽減できる効果はわずかであっても、施工や使用時に生じた穴などにより防湿シートが機能しにくくなり、気密性が低減した場合にも、撥水処理材の撥水性や透湿性は変化しないと考えられるので、長期的には壁内に生じた湿気を壁外に放散できるかもしれない、外壁の健全性を保つためには有利かもしれない。

参考文献

文献目録

- [1]. コーティングメディア：屋外木部用（木材保護）塗料特集（2009）。
- [2]. 大熊幹章：木材工業、Vol.53、No. 2、54-59（1998）。
- [3]. 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、pp.1-4、p10。
- [4]. サンオー産業株式会社：“キセトナーS 超撥水剤 技術/検証資料”（2009）。
- [5]. 外断熱.com NPO 外断熱推進会議・有限会社：海外の外断熱の現状—ドイツ、<http://www.sotodannetsu.com/kaigai1.html>、Accessed 12. 5.2012。
- [6]. 日法律第 81 号 2000 年：“住宅の品質確保の促進等に関する法律（住宅品質確保促進法）”、国土交通省（2000）。
- [7]. 李哲鋒、大林宏也、桃井尊央、栃木紀郎、小林純：木材工業、Vol.67、No.9、389-393、（2012）。
- [8]. 李哲鋒、桃井尊央、栃木紀郎、小林純、大林宏也：木材工業、Vol.68、No.3、104-108、（2013）。
- [9]. 渡辺信淳：特開平 4-285199（1994）。
- [10]. 鄭 容宝：工業材料、Vol.44 No.8、30、（1996）。
- [11]. 中前勝彦：工業材料、Vol.144 No. 8、26、（1996）。
- [12]. 峰村伸哉、佐藤光秋、梅原勝雄：北海道立林産試験場月報 380、11-16、（1983）。
- [13]. 矢田茂樹、田村健、田本真志：木材保存、Vol.21、No.3、113-118、（1995）。
- [14]. 瀬戸山幸一：工業材料、Vol.44、No.8、56-60、（1996）。
- [15]. 片上英治、片山裕之、上原 徹：日本接着学会誌、Vol.37、No.10、380-384、（2001）。
- [16]. STARK L A, NARULA D B, WOODWARD R S：Proc Water-Borne High-Solids Powder Coat Symp 19、334-354、（1992）。
- [17]. ALSTARK-KASLEY：Mod Paint Coatings 82、120-122、126、（1992）。
- [18]. CWFEIST：Am Paint Coatings J、Vol.69、No.34、45-51、（1985）。
- [19]. CWFEIST：Am Paint Coatings J、Vol.70、No.8、44-45、48、50-56、（1985）。
- [20]. CWFEIST：Am Paint Coatings J、Vol.69、No.35、40-47、（1985）。
- [21]. CWFEIST：Am Paint Coatings J、Vol.70、No.9、40、42、44-48、（1985）。
- [22]. 斎藤平蔵：建築仕上げ技術、Vol. 10、No.120、129-131、（1985）。
- [23]. 山本 昭、今村祐嗣：木材保存、Vol.33、No. 5、226-230、（2007）。
- [24]. 小田 修：工業塗装 169、75-77、（2001）。
- [25]. 木口 実：木材保存、Vol.120、No. 2、55-62、（1994）。
- [26]. DAHLEN JosephDarrel D、SCHULTZ Tor PNICHOLAS：J Wood Chem Technol、Vol.28、No. 1、47-54、（2008）。
- [27]. 林静怡、安藤直人：日本木材学会大会研究発表要旨集(完全版) Vol.62、札幌、2012、p. N16-07-1315。
- [28]. 森 和彦：塗装工学、Vol.43、No.4、123-129、（2008）。
- [29]. 岡野 健：木材工業、Vol. 42、No.2、53-59、（1986）。
- [30]. 山田雅士：“建築の結露—その原因と対策”、井上書院、東京 1996 増補版。
- [31]. 坂本雄三、瀬戸裕直、渡辺一正：日本建築学会大会学術講演梗概集、関東、1988、pp.367-368。
- [32]. 坂本雄三、瀬戸裕直、渡辺一正：日本建築学会大会学術講演梗概集、関東、1989、pp.1381-1382。
- [33]. 坂本雄三、渡辺一正：日本建築学会大会学術講演梗概集、中国、1990、pp.1105-1106。
- [34]. 坂本雄三、瀬戸裕直、渡辺一正：日本建築学会東海支部研究報告集、1991、pp. 301

- 304.

- [35]. 坂本雄三、瀬戸裕直、渡辺一正：日本建築学会大会学術講演梗概集、北陸、1992、pp.943-944.
- [36]. 石井 宏：日本建築学会技術報告集、Vol. 24、No.496、213-219、(2006)。
- [37]. 鈴木大隆：日本建築学会北海道支部研究報告集、66、265-268、(1993)。
- [38]. 鈴木大隆：日本建築学会北海道支部研究報告集、67、297-300、(1994)。
- [39]. (財団法人)日本住宅・木材技術センター：“木材と木造住宅 Q&A108”、丸善、東京、2008、pp. 186-187.
- [40]. 岡野 健、鈴木正治、葉石猛夫：“木材居住環境ハンドブック”、朝倉書店、東京、1995、pp.7、77-82、98-104.
- [41]. 柚木 玲、田中辰明：日本家政学会長良川国際会議、岐阜、2007、p.住居 H2-10 100018.
- [42]. 徳海明夫：塗装と塗料、Vol.98-1、No.571、37、(1998)。
- [43]. ペイント&コーティングジャーナル インターネット版：<http://www.coatingmedia.com/cgi-bin/cm/mt4i/cgi?id=3&mode=individual&no=264&eid=2547>. Accessed 12.3.2012.
- [44]. 日刊木材新聞：NGP ニュース、Vol.209、(2008)。
- [45]. 田中辰明、KunzelHartwig M：建築仕上げ技術、Vol.30、No.355、50-60、(2005)。
- [46]. 石川廣三：建築の性能規定と建築材料の選択、(財)建材試験センター、(2007)。
- [47]. 坂本雄三、瀬戸裕直、渡辺一正：“木造建築における湿気予測と結露害防止に関する研究(その1-木材の含水率に対する水分拡散係数の測定)”、日本建築学会大会、昭 63.
- [48]. 坂本雄三、瀬戸裕直、渡辺一正：“木造建築における湿気予測と結露害防止に関する研究(その2-熱湿気同時移動計算における室内側の温湿度条件について)”、日本建築学会大会、1989.
- [49]. 坂本雄三、渡辺一正：“木造建築における湿気予測と結露害防止に関する研究(その3-材料の吸放湿性を考量した壁体防湿設計用チャートの作成)”、日本建徳学会大会、1990.
- [50]. 坂本雄三、瀬戸裕直、渡辺一正：“木造建築における湿気予測と結露害防止に関する研究(その4-吸放湿性を利用した防湿構法壁体の実大防湿試験)”、日本建築学会東海支部、1991.
- [51]. 坂本雄三、瀬戸裕直、渡辺一正：“木造建築における湿気予想と結露害防止に関する研究(その5-実大防湿試験の測定結果を用いた壁体内湿気計算の検証)”、日本建築学会大会、1992.
- [52]. 鈴木大隆、福島明、林勝郎、佐々木隆：“木造住宅の耐久性向上手法に関する研究：その1 通気層工法に関する検討”、日本建築学会北海道支部研究報告集、1993.
- [53]. 鈴木大隆、温暖地に向けた断熱外壁の防露技術に関する研究 - 防湿気密層のない壁体の熱湿気性状に関する実験報告 -、
- [54]. 矢嶋龍彦：“高撥水技術の最新動向 超撥水・超親水化のメカニズムとコントロール～表面の基礎と各種材料における実用～”、株式会社 R&D 支援センター、(2012)。
- [55]. 日本木材学会・物理・工学編編集委員会：“木材科学実験書 I 物理・工学編”、中外産業調査会、平成元年.
- [56]. 田中俊六、寺尾道仁、岩田利枝：“最新 建築環境工学”、井上書院、東京、2012.
- [57]. (株)スターフィールド建築設計：<http://starfield/homepagelife/jp/13.html>、住宅性能一外断熱と内断熱の違い、Accessed 11.28.2012.
- [58]. 気象庁：<http://www.data/jma/go.jp/obd/stats/etrn/index.php>、気象統計情報一過去の気象データ：Accessed 9.3.2012.

謝 辞

研究活動全般にわたり格別なる御指導をして頂いた小林純教授に感謝の気持ちと御礼を申し上げます。研究生から現在に至るまで日頃より研究内容および方針について適切な助言を賜りまして、私が曲がりなりにも、ゆっくりとした成長に辛抱強く付き合ってくださった事に感謝いたします。

貴重な御教示を賜りました大林宏也教授から様々な御支援を頂きました。先生方の御助言により、実験での精密さが改善され、投稿論文などを含めて本論文の完成度が高まりました。この場を借りて御礼を申し上げます。また、栃木紀郎教授、桃井尊央研究員と木材工学研究室の皆様にも、私の研究に対する好意的な意見も頂き、研究活動の大きな励みになりました。誠に有り難う御座いました。

また、実験用撥水剤の提供を受けたサンオー産業株式会社に感謝申し上げます。

最後に、ありとあらゆる場面で私に様々な形でサポートしてくださった皆様にも、心より深く感謝いたしております。

補 論

夏期の壁内結露現象¹

撥水処理木質壁における結露発生に関する検討

1. 目的

断熱性能が高い家の方が冬暖かく暮らせることに、建物内部で使う暖房や内部発熱によって温められた室内にある熱エネルギーを高い断熱性能が屋外に逃さないようにするからである。

夏に外気の温度が上昇し、特に強い日差しを受ける部屋や冷蔵庫を置いた部屋などでは初夏を過ぎると換気が必要となる。日本のように蒸し暑い夏の気候で高断熱建築物を設計するときはスムーズに夏の排熱ができるように配慮する必要があるけれども、冬の暖房負荷と夏の冷房負荷の違いには、断熱性能を高めることで解決できると思っている。冬の暖房負荷は、外気に冷やされた建物の外側の表面温度と室温の差（その差は外気温度と室内温度の差とほぼ等しい）によって熱伝導が生じることが原因である。一方、夏の冷房負荷は、日射を受けない壁面や床下では暖房負荷と同様に外気温度と室温の差に応じた熱伝導が生じますが、日射を受ける屋根や壁面では太陽の輻射熱を受けて 60～80℃と外気温度より遥かに高くなった建物の表面温度と室温の差によって起こされる熱伝導の結果とすることができる。

それで、木質壁には鉄骨や釘や金属件など木材と比べて熱伝導率が大きいものがあるため、木造住宅にも熱橋の扱い可能である。夏の室内環境と断熱性能の関係から考えると温湿条件における結露対策が必要となる。

従って、住宅の外壁の屋内側には調湿性や防湿性、そして結露しにくい性質が求められ、屋外側では防水性が必要とされていると考える。本論（第三章）では、冬期における撥水処理材の木質壁への利用について議論した。ここでは、前述した撥水処理した木材の性質（第二章）を解明した上で、夏場の気候に重点をおき、結露に対する対策として撥水材を用いた結露防止効果について検討する。

2. 実験

本実験では、2 つの実験（A、B）から木質の外壁の外気側に撥水処理材を用いた場合の夏期における壁体内結露に対する効果を検討した。

実験装置の外観を写真 1 に示した。実験 A では、夏期における室内外の温湿度条件下で、

¹ 三浦理子：“撥水処理をした木質壁の夏期における結露現象”、H24 木材工学研究室卒業論文、2013

壁内結露の可能性と発生位置について検討した。実験 B では、実験 A とほぼ同一温湿度条件下で、壁体内に液体の水が浸入した場合を想定して、壁内結露の可能性と発生位置について検討した。

2.1. 多層構造壁体モデルの作製

壁体は、第三章の図 5.1.2 のモデル I・II の構造を参考に作製した。屋外側から順に、外壁材、通気層(発泡スチロールを用いて幅 50mm に設定)、断熱層(グラスウール系断熱材)、防湿シート、石膏ボード、壁紙にした。ここで、外壁材に撥水処理をした合板・無処理の合板・窯業材(窯業系サイディングボード)を用いた壁体モデルをそれぞれ作製した。使用した材料の物性値を第三章の表 5.1.1 に記した。

2.2. 実験装置と条件

低温恒温恒湿槽の槽内が夏期の屋外、室内側(低温恒温恒湿槽全体をビニールのカバーで覆った)が夏期の屋内の環境条件を想定した温湿度条件に近くなるようにして実験を行った。低温恒温恒湿槽のドアの代わりに用いたモデルを取り付けるためのフレームは上下に 2 分割した。壁体モデルの組み立て例(モデル II)を図 1 に示した。



写真1 供試装置とその設置

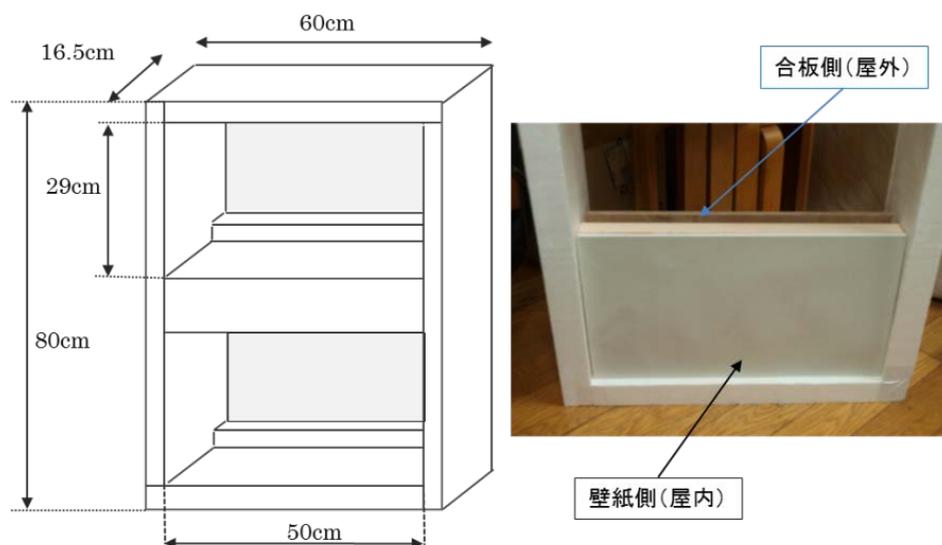


図1 発泡スチロール製フレームと実体写真

一般に建物に対する熱負荷を計算するときには、建物の外部温度を気温、内部温度を暖房による設定温度あるいは冷房による設定温度と考えて建物各部の熱貫流量を計算する。しかし、実際の日中には日射（輻射熱）を受ける面の温度は外気温度より上昇し、建物外部の表面温度は外気温度よりかなり高くなる。従って低温恒温恒湿槽内の温湿度条件を屋外側とみなして 50℃、90%で一定とした。低温恒温恒湿槽の外側の温湿度条件は夏期の一般的な家庭の室内環境を想定し 26℃、60%とした。

2.3. 実験 A（壁内に水が浸入していない場合の壁体内結露）

温湿度の測定には温湿度センサー(T&D 製、TR-3310、精度:平均 $\pm 0.3^{\circ}\text{C}$ ・ $\pm 5\% \text{RH}$)を第三章の図 5.4.1 内の 0～8 で示した測定箇所に取り付けた。なお、測定はデータロガー(T&D 製、RTR-53)を用いて各層の温湿度を収集した。計測した温湿度のデータから、各層の飽和水蒸気圧と実測水蒸気圧を算出し、壁体内の結露の判定は第三章の 2.5 項と同様とした。

2.4. 実験 B（壁内に水が浸入した場合の壁体内結露）

実験 A と同様に、低温恒温恒湿槽内の温湿度条件を屋外側とみなして 50℃、90%で一定とし、恒温恒湿槽の外側(屋内)の温湿度条件は夏期の一般的な家庭の室内環境を想定した 26℃、60%になるべく近づくよう調整しながら実験を行った。

壁体モデルの通気層内(図 1 ②)にあらかじめ水(600 g)を入れた容器(発泡スチロールとポリプロピレンのボードを用いた箱状のもの(幅 40mm×450mm,高さ 100mm)を設置し(図 2)、2.3 項の実験 1 と同じ温湿度条件で 9 時間の実験を行った。

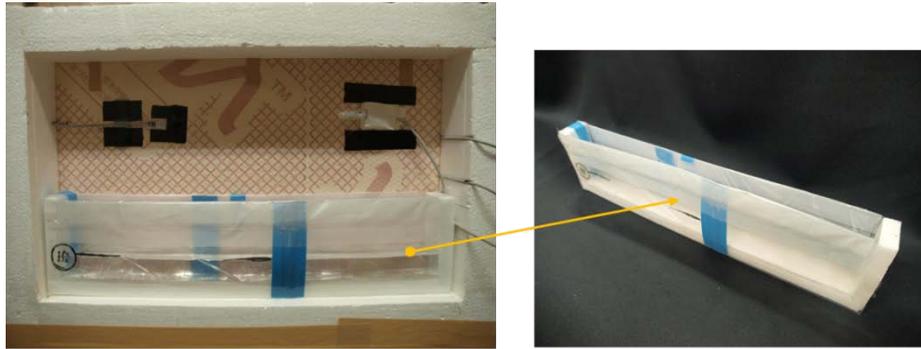


図2 浸水壁内の設定様子

3. 結果と考察

3.1. 実験時間の確定

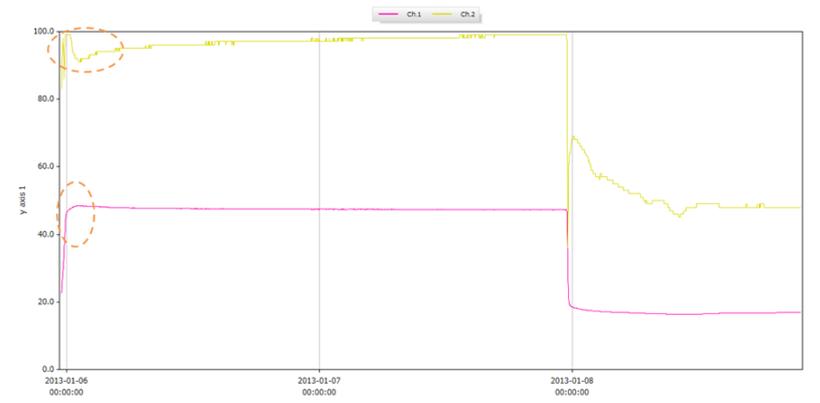


図3 時間経過の温湿度変化

温度と湿度の経時変化について24時間以上測定した（図3）。温度（ピンク）は2時間後に一定となった、湿度（黄色）は8時間後に一定となった（石膏ボード表面のデータから参考）。

従って、実験は定常状態で実験を行うために、8時間以上が必要だと考えて、9時間の各項数値を分析データとして採用した。

3.2. 実験 A（壁内に水が浸入していない場合の壁体内結露）

結露が発生する基本条件は「実測温度 t < 結露温度 t_{dw} 」である。図4に示すように、窯業材は外壁材として、モデル I における測定点 6（防湿シートの屋内側）と 7（壁紙の表面）のところで、結露発生する可能性がある。

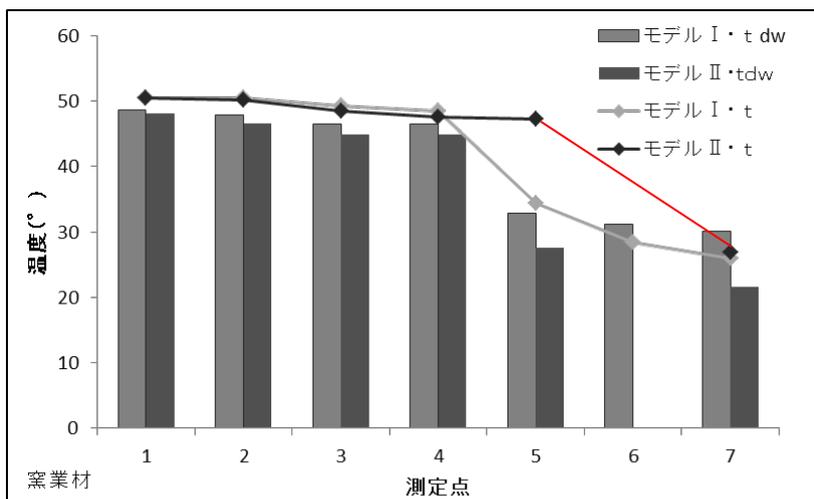
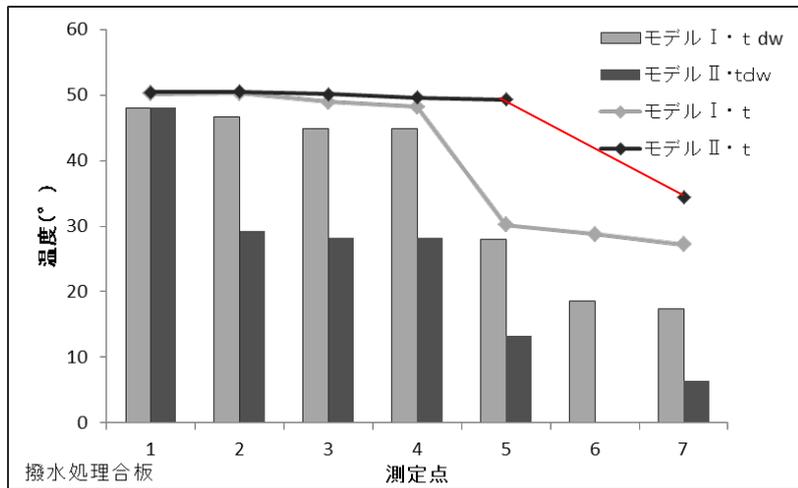
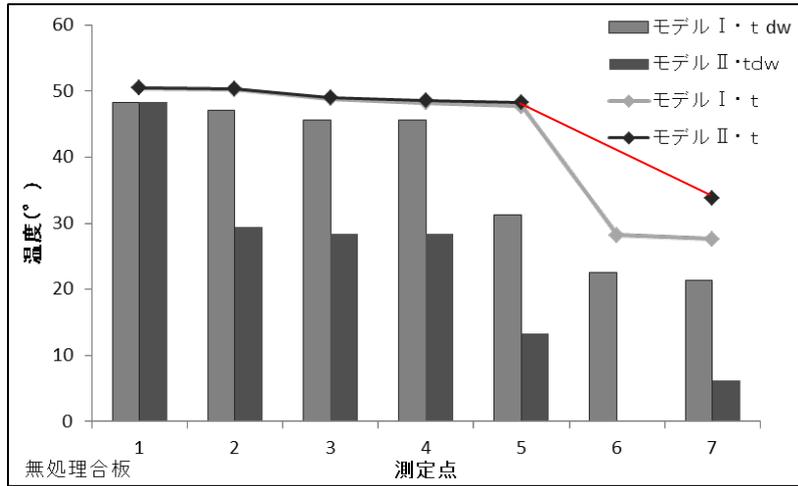


図4 外壁材により各層における温度の変化

3.2 壁内に水が浸入した際の撥水剤の吸放湿性能実験

表1に示すように、外壁材(構造用合板)に撥水処理を施したモデルは実験前に比べて、容器内の水分が4.76g減少しており、無処理のものは0.25g減少していた。このことから外壁材に撥水処理をした壁体モデルのほうが、無処理のものより壁体内の水分が多く減少しているということがわかり、撥水剤には壁体内の水分をより効果的に壁外へ放出させる効果があると考えられる。

表1 壁体内の水と外壁材の重量変化

重さ(g)		実験前	実験後	差
撥水処理	水	600	595.24	-4.76
	合板	1148.71	1178.01	29.3
無処理	水	600	599.75	-0.25
	合板	1139.35	1175.47	36.12

4. 結論

本実験では夏期における壁体内の結露現象をうまく再現することができず、また壁体内結露に対する撥水剤の効果も明確にできなかった。構造用合板のモデルIにおいては、撥水剤が壁体内結露を軽減させる働きをしたかのように思えたが、なぜ断熱材の表面の結露を防ぐことができたのかということまで考察はできなかった。しかし、壁内に水が浸入した際は、撥水剤に壁内の水分を効果的に壁外へ放出できる可能性があると考えられる。

今回はたまたま効果があるように見えたが、この1回の実験のみで判断をするのは正確さに欠けるため、今後の課題として、繰り返し同様の実験を行うこと、またなぜ撥水剤で処理したもののほうが高い吸放湿性能が得られたのか、その理由もあわせて考察する必要がある。以上のことより、撥水剤を外壁材に塗布することで壁体内に悪い影響は及ぼさないということがわかった。

本実験では夏期における壁体内結露に対する撥水処理材の効果を検討するために、実際に夏期の温湿度の条件で壁体内に結露を生じさせる実験を行い、撥水処理材の効果を観察した。多少ではあるが、撥水剤には壁内の水分を効果的に壁外へ逃がすことに有効に働く可能性があると考えられた。

参考文献：

- [1] 黒木勝一、土屋 喬雄、斉藤 宏昭：“日本建築学会大会学術講演梗概集 冷房時の夏型壁体内結露に関する研究” 1996.p265~266
- [2] 山田雅士：“建築の結露—その原因と対策”、井上書院、東京 1996 増補版.
- [3] 田中俊六、寺尾道仁、岩田利枝：“最新 建築環境工学”、井上書院、東京、2012.

附 録

論文に関連する発表

1. 李哲鋒、桃井尊央、栃木紀郎、小林純、大林宏也：“撥水処理をした木材の水分特性（第2報）— 透湿性および木質壁の冬期における結露 —”、木材工業、Vol.68 No.3、104–108、2013.
2. 李哲鋒、大林宏也、桃井尊央、栃木紀郎、小林純：“撥水処理をした木材の水分特性（第1報）— 撥水・吸水性と吸放湿性 —”、木材工業、Vol.67 No.9、389–393、2012.
3. 李哲鋒、大林宏也、栃木紀郎、小林純：“撥水処理をした木質壁の壁内結露”、日本木材学会大会発表要旨集、Vol.62、ROMBUNNO.I15-P-AM02、2012.
4. 李哲鋒、大林宏也、栃木紀郎、小林純：“撥水剤を塗布したスギ材の湿氣的性質”、日本木材学会大会発表要旨集、Vol.60、ROMBUNNO.PI020、2010.
5. 李哲鋒、大林宏也、桃井尊央、栃木紀郎、小林純：“撥水剤を塗布した木材の寸法安定性とその評価”、日本木材学会大会発表要旨集、Vol.59、ROMBUNNO.PI001、2009.

補充（結露計算、結露問題、断熱・気密性など）

1. 結露の計算法^{1,2,3)}

・実験内容と手順：

1. 計算条件（内部、外部の温・湿度）の決定
2. 壁面の層構成を決定
3. 温・湿度境界（多層壁）の層を構成している材料の確認
4. 構成材料の熱伝導抵抗、透湿抵抗を確認
5. 熱貫流抵抗、湿気貫流抵抗を計算
6. 各層の温度状態を計算
7. 対象温度で（当該温度）の飽和水蒸気圧を計算
8. 各層の実在水蒸気圧を計算
9. 飽和水蒸気圧と実在水蒸気圧を比較

その中での確認ポイント

- ・ 外気温および対象となる室内の温・湿度を設定
- ・ 室内側の温・湿度における露点温度を計算
- ・ 各層の温度を計算

また、計算した時、使用に当たっては下記の事項を前提とする。

- ・ 対象となる壁の温度は0℃以上とする
- ・ 各部材の接合部（目地など）における熱損失は考慮しない（例えば、接着部分、計測コード、テープなど）

ただし、結果はあくまでも標準的な計算値である（理論上定常状態だと考える）。
実際に、室内の温度分布は床と天井でも異なり、壁の隅角部や家具の背部でも温度低下を
起こします。要するに、壁体の内部には温度の分布（熱分布）により温度の区域変化があ
る。従って気圧は、壁体内部の各層では一致しないのではないかと思う。

・具体的に本研究では、

①壁面（屋根面）の層構成を決定

材料とその厚さ、重ねる順番を決定しないと、結露の計算はできない。順番を変えただ
けで、結露が発生しないものは結露が発生することもある。冬期の結露を防ぐためには、
断湿気を通しにくいものほど室内側に、湿気を通しやすいものほど外部側に配列。断熱は
極力、低温側（外部側）に設定したほうがよいと考える。

②材料の熱伝導抵抗、透湿抵抗を調査

メーカーのカタログや各種参考資料を見ながら、出来るだけ正確に熱伝導率、透湿比抵
抗、透湿抵抗を調べる。厚み（m）を熱伝導率（kcal/m・h・℃）で除すると熱伝導抵抗
（m²・h・℃/kcal）が得られる。透湿比抵抗（m・h・mmHg/g）だけがわかった場合は、
厚み（m）を乗じて、透湿抵抗（m²・h・mmHg/g）を求める。透湿係数（g/m²・h・mmHg）
だけが分かった場合は逆数をとって透湿抵抗に直す。均一でない材料の場合、透湿は材料
の厚みごとに変わるので、できるだけ近い厚みのもので計算する方がよい。

SI 単位で計算したい場合は、熱伝導率を W/mK、熱伝導抵抗を m²K/W、透湿比抵抗を
mhPa/g、透湿抵抗を mhkPa/g とする。旧単位から SI 単位に直すには次のようにする。

$$1\text{kcal/mh}^\circ\text{C} = 1.6279\text{W/mK}$$

$$1\text{m}^2\text{h}^\circ\text{C/kcal} = 0.86\text{m}^2\text{K/W}$$

$$1\text{mhmmHg/g} = 133.322\text{mhPa/g} = 0.133322\text{mhkPa/g}$$

③熱貫流抵抗、湿気貫流抵抗の計算

熱貫流抵抗は各材料の熱伝導抵抗の総和に、内外表面の熱伝達抵抗を加えて計算する。
中空層がある場合には、さらに厚さに応じてきまる中空層の熱伝導抵抗を加える。

湿気貫流抵抗は、単純に各材料の透湿抵抗の総和に、厚さに応じてきまる中空層の透湿抵
抗を加えて求める。内外表面の湿気伝達抵抗は無視してもよい。

各項目は以下の式により計算する。計算条件は測定 of データの中で最低気温をとれば結
露検討の上では安全のため、試験体の内部、外部の温湿度状態を決定する。

$$E = 6.11 \times 10^{(7.5t/(237.3+t))} \dots\dots\dots \text{(式 1)}$$

E: 飽和水蒸気圧 (hPa)

t: 気温 (°C)

$$Q = K \times \Delta P \times A \times t \dots\dots\dots \text{(式 2)}$$

Q : 透湿量(g)

K : 透湿係数 (g/ (m²・h・mmHg))

ΔP : 材料の両側の水蒸気圧差 (mmHg)

A : 透過面積 (m²)

t : 時間 (h)

$$U^{-1} = \alpha_1^{-1} + \lambda + \alpha_2^{-1} \quad \dots\dots\dots \text{(式 3)}$$

U : 熱貫流率 (W/m²・K)

α_1, α_2 : 壁両側の熱伝達率

λ : 壁の熱伝導率

表面結露の計算は式 1 により、露点温度 θ_d は測定時点の条件の空気線図より求める。

$$\theta_s = \theta_i - (\theta_i - \theta_o) \times \frac{R_i}{R_t} \quad \dots\dots\dots \text{(式 4)}$$

θ_s : 表面温度 (°C)、 θ_i : 室温 (°C)

θ_o : 外気温度 (°C)

R_t : 熱貫流抵抗 (m²h°C/kcal)

R_i : 室内側表面熱伝導抵抗 (m²h°C/kcal)

$$\theta_x = \theta_i - (\theta_i - \theta_o) \times \frac{R_x}{R_t} \quad \dots\dots\dots \text{(式 5)}$$

θ_x : 壁中測定点の温度 (°C)、

θ_i : 室温 (°C)

θ_o : 外気温度 (°C)

R_t : 熱貫流抵抗 (m²h°C/kcal)

R_x : 測定点より室内側の熱抵抗の和 (m²h°C/kcal)

$$f_x = f_i - (f_i - f_o) \times \frac{Z_x}{Z_t} \quad \dots\dots\dots \text{(式 6)}$$

f_x : 壁の中に測定点の水蒸気圧 (mmHg)

f_i : 室内の水蒸気圧 (mmHg)

f_o : 外気の水蒸気圧 (mmHg)

Z_t : 湿気貫流抵抗 (m²hmmHg/g)

Z_x : 測定点より室内側の透湿抵抗の和 (m²hmmHg/g)

$$\ln(f) = -6096.9385 \times T^{-1} + 21.2409642 - 2.711193 \times 10^{-2} \times T + 1.673952 \times 10^{-5} \times T^2 + 2.433502 \times \ln(T) \quad \dots\dots\dots \text{(式 7)}$$

*0°C < T < 100°C

$$y = \ln(e/611.213) \quad \dots\dots\dots \text{(式 8)}$$

$$**y \geq 0$$

$$t_d = 13.715 \times y + 8.42662 \times 10^{-1} \times y^2 + 1.9048 \times 10^{-2} \times y^3 + 7.8158 \times 10^{-3} \times y^4$$

$$**y < 0$$

$$t_d = 13.7204 \times y + 7.36631 \times 10^{-1} \times y^2 + 3.32136 \times 10^{-2} \times y^3 + 7.78591 \times 10^{-4} \times y^4$$

t_d : 露点温度 (°C)

④計算条件 (内部、外部の温湿度) の決定

次に、内部外部の温湿度状態を決定し。その地方の最低気温をとれば結露検討の上では安全である。設定温湿度は気象庁のデータとか理科年表などによると、冬日 (日最低気温が 0°C 未満の日) の気温、湿度を決めることとする。(設定した温湿度における飽和水蒸気圧を空気線図などで調べ)

⑤各層の温度状態を計算

次のようなモデル表 1 で、内部温度を t_i 、外部温度を t_o 、全体熱貫流抵抗を R_t 、室内側表面の熱伝達抵抗を R_{si} 、外部側表面の熱伝達抵抗を R_{so} 、各部材の熱伝導抵抗を R_i とすると、各層の温度分布は次のような式で計算できる。

表 1 多層における各境界面の配列
*5 層の例

内部 R_{si}	R_1	境界面 1	R_2	境界面 2	R_3	境界面 3	R_4	境界面 4	R_5	外部 R_{so}
θ_i		θ_1		θ_2		θ_3		θ_4		θ_o

内部表面温度は $\theta_{si} = t_i - (t_i - t_o) \times R_{si} / R_t$

境界面 1 温度は $\theta_1 = t_i - (t_i - t_o) \times (R_{si} + R_1) / R_t$

境界面 2 温度は $\theta_2 = t_i - (t_i - t_o) \times (R_{si} + R_1 + R_2) / R_t$

境界面 n 温度は $\theta_n = t_i - (t_i - t_o) \times (R_{si} + \sum R_n) / R_t$

これは、内部から考えると、熱貫流抵抗に対する、各層の熱伝導抵抗の割合に応じて、直線的に外部に向かって温度が低下していくことを意味する。

⑥当該温度での飽和水蒸気圧を調査

⑤で求められた各層について、その温度における飽和水蒸気圧を空気線図で調べる。本実験の場合は、別途 0.1°C ごとの飽和水蒸気圧の表をつくり、エクセルの vlook 関数で参照するという方法を使った (かなりマヌケな方法である。真似しないように)。Goff-Gratch の式とかいうものを使うと計算できる。

⑦各層の実在水蒸気圧を計算

⑤の温度の計算と全く同じ方法で、各層の水蒸気圧を計算することが出来る。(湿度の場合は、表面の湿気伝達抵抗は無視しても) 内部水蒸気圧を f_i 、外部水蒸気圧を f_o 、湿気貫流抵抗を R_t 、室内側表面の熱伝達抵抗を f_{si} 、外部側表面の熱伝達抵抗を f_{so} 、各部材の透湿抵抗を R_n とすると、各層の温度分布は次のような式で計算できる。

内部水蒸気圧は $f_{si} = f_i - (f_i - f_o) \times R_{si} / R_t$

境界面 1 水蒸気圧は $f_1 = t_i - (f_i - f_o) \times (R_{si} + R_1) / R_t$

境界面 2 水蒸気圧は $f_2 = t_i - (f_i - f_o) \times (R_{si} + R_1 + R_2) / R_t$

境界面 n 水蒸気圧は $f_n = t_i - (f_i - f_o) \times (R_{si} + \sum R_n) / R_t$

⑧飽和水蒸気圧と実在水蒸気圧を比較

最後に、⑥で求めた飽和水蒸気圧と⑦の実在水蒸気圧を比較。実在水蒸気圧／飽和水蒸気圧が 1 を越えれば過飽和になっている。すなわち結露が発生していることになる。要する判断基準は実測気圧 $f_A >$ 飽和気圧 f_s 、或は露点温度 $t_d \geq$ 実測温度 t_n 。また、気圧が低いほど露点温度が低くなる⁹⁾。

2. 撥水関連問題の編纂^{4,5,6)}

・撥水の原理と塗布（撥水处理）

ナノレベル（微粒子）のシリコーン剤で構成されている。

塗布面をよく洗浄し乾かした後、10 倍の水（水道水で OK）で薄めてスプレーや刷毛にて塗布面に塗布する。塗布面からしみ込んで、5 分～30 分で水分のみが自然乾燥した後に残ったシリコーンが撥水効果を表わし、雨水などから守りカビや汚れを防止すること。

・材質の吸放湿性を防げない原因（撥水の特徴）

内部に浸透する低分子構造の水溶性であるから、水分が蒸発し乾燥する事によりシリコーンの網の目の毛細管が内壁に並ぶ。このシリコーンの毛細管は水が通れないが、空気・水蒸気(湿気)は通過できる。

・撥水能力について（接触角）

通常撥水力は接触角で判定することができる。一般的には接触角が $90^\circ \sim 120^\circ$ を「撥水」と呼び、接触角が 120 度以上を「超撥水」と呼ぶ。

塗布する素材、室内か室外、環境により異なる。特に外温、太陽光、風力の自然現象に影響を受ける。例えば、屋外に施工したブロック塀で約 3 年と考えると下さい。3 年前後でメンテナンスが必要となる。雨降りの際の撥水効果で確認できることに注意。

・フッ素系とシリコーン系とでは違う

環境にも人体にもやさしい事である。フッ素は最終的に焼却すると「フロン」を発生させるのに対してシリコーンは焼却しても無害である。環境に対する有害性は主成分や溶媒の種類より判断できる。

・保管時の注意点

水性ですので冬場の保管に注意して下さい。凍結した材料は使用できません。直射日光

は避けて下さい。蓋は完全に閉めて下さい。等々

・木材に施工するときの注意点

松類（唐松など針葉樹）・タンニン（ヒバ類・南洋木材類広葉樹）など樹液を多く含む樹種については、樹液成分がにじみ出して斑点になる場合がある。例えば、ウッドデッキに施工する場合に、堅い木の場合（ジャラ・イペ・黒壇他）しみ込みにくいので大量に塗らないで、無風の時に作業するほうがよいと。

・劣化の見分け方

コンクリートにカビやコケが生えたら・・・中性化が進んでいる。

白化現象が見られたら・・・内部で劣化が進行している可能性が高い。

ヒビ割れが見えたら・・・雨水がしみ込み冬季、凍っている可能。

（海の近く、寒冷地ではでは：劣化が早く進む。雨が多い場所、酸性雨が降ると：劣化が早く進むこと。）

3. 断熱・気密性 7,8,9)

断熱性能の低い住宅では、暖房をしている部屋の天井と床の温度差が大きい為、快適感が得られない。更に、暖房をしていない部屋との温度差が大きい為、ヒートショックや活動範囲が狭まることによる、高齢者の運動不足やボケの原因にもなる。

夏の冷房効果：足元だけが冷え部屋全体としては涼しさを感じる事が出来ない。逆に、夜間は外気温が下がっているにも関わらず蒸し暑くて寝られない。

冬の暖房効果：天井の温度は高いのに足元が寒いので暖房を強運転にしている。逆に朝は、寒くて布団から出られない。天気の良い日の午前中は、外の方が家の中より暖かい

図 1 に示すように、断熱性能は、**Q 値**（熱損失）で表され性能を上げることにより、外気温に関係なく室内の温度を一定に保つことが出来る。気密性能は、**C 値**（隙間相当面積）で表され性能を上げることで室内と外との間で空気の流れを作らず断熱性能を保持する事が出来る。また、各基準は表 1、2 に示す。

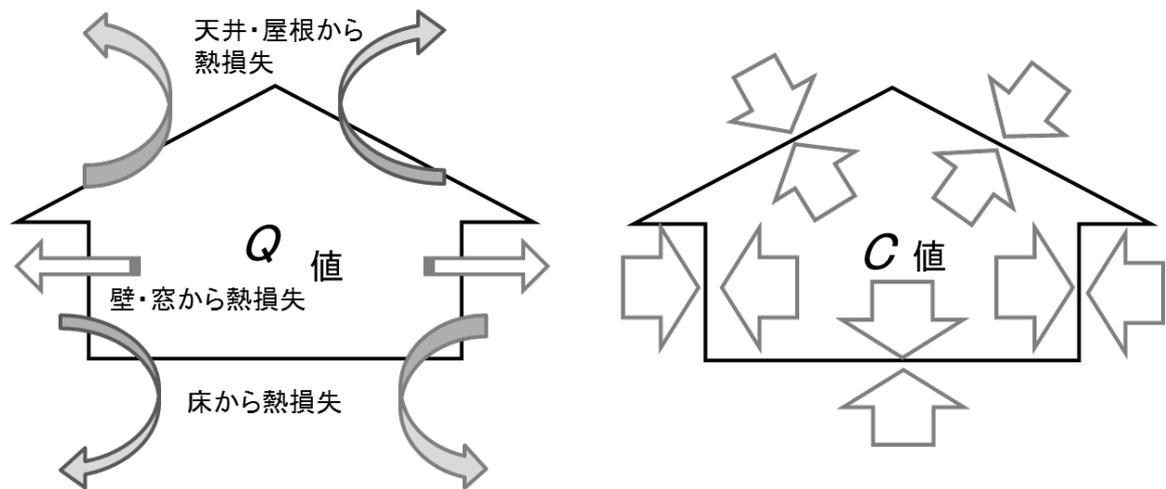


図1 断熱性能と気密性能とのイメージ

表1 断熱性能および省エネルギー性能の地域別区分表

Q 値 (熱損失係数) :
 熱損失係数とは、一般的に「Q 値」といわれているもので住宅の断熱性能を数値的に表したものである。値が小さいほど断熱性能が高いことを表す。計算上で表す係数の為、施工上の精度は、関係なく数字で表されるので注意が必要。

C 値 (隙間相当面積) : 隙間相当面積とは、外界と断熱で遮断された室内空間の全容積 (小屋裏・吹抜け・基礎断熱時の床下を含む) を $h = 2.6m$ で割った値。(実質延べ床面積) の $1m^2$ 当たりにつき、どれくらいの隙間があるかを表す

断熱性能地域区分	地 域 (都道府県は省略)
I	北海道
II	青森、岩手、秋田
III	宮城、山形、福島、群馬、栃木、茨城、新潟、富山、石川、福井、長野北部、京都北部、兵庫北部
IV	全記以外
V	静岡、宮城、鹿児島、沖縄

表2 省エネの Q と C の基準 (日本)

断熱性能 (Q値) の全国次世代省エネ基準						
地域	I	II	III	IV	V	VI
	1.6W/m ² ・k	1.9W/m ² ・k	2.4W/m ² ・k	2.7W/m ² ・k	2.7W/m ² ・k	3.7W/m ² ・k
気密性能 (C値) の基準						
C=5~15	従来の住宅					
C≤5	省エネ基準に定める気密住宅					
C≤2	次世代省エネルギー基準で定める気密住宅					
C≤0.9	R-2000住宅*					

* R-2000住宅とは「2000年までに全ての住宅の外壁の断熱性能をR-20以上にして、家庭で消費する暖房費を1/4以下にしよう」という国民省エネ運動の略称。各部位の断熱性能をR(熱貫流抵抗)値で表す。

数値で単位は、 cm^2/m^2 で表す。値が小さいほど気密性能が高いことを表す。気密測定器を使って1棟ごとに測定するため、信頼性のある数値といえる。

室内環境を考えた場合、高断熱・高气密の場合は、通常後から換気性能が出てくる。しかし、本来は、換気問題が先に出てくるはずである。換気で室内環境を最適な空間に保つためには、どうするかを考えた場合、隙間風や外部からの熱、太陽光線が大きな妨げとなる。そこで、高断熱・高气密・EVが研究開発された。気密は、風圧の影響が大きくなる台風時でも建物内部の空気が外部との間で移動しないように計画する為、あえて50Paの圧力を掛ける。しかし、日本の住宅で単純に50Paの気圧を掛けて測定した場合、内壁のボードや気密シートが脱落もしくは、剥がれてしまうことが考えられる。但し、施工中での測定をする場合、対策を取らずに測定をすると気密シートが殆ど壊滅状態になりますので、注意をして測定するべきだと思う。

- 1) 田中俊六ら：最新建築環境工学（改訂3版）、井上書院、p.177,218.
- 2) 山田雅士：“建築の結露—その原因と対策”，井上書院，東京，2005 増補改訂版，pp18-20, p.21,p32 ,p.220.
- 3) 結露について（実務編）：<http://www.geocities.jp/mori-tadaoki/theme006.html> Accessed 2012.03.05 & 結露計算の方法：<http://www8.plala.or.jp/yutaka-i/keturo3.html> Accessed Dec.09.2009.
- 4) 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.
- 5) 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.
- 6) 景観グリーンライフ(株)：よくある質問 <http://keikan-greenlife.com/guzzu.php?catid=9> Accessed 2012.11.20.
- 7) 外断熱ドットコム：断熱・気密・換気に関する，
<http://www.sotodannetsu.com/uchidan-sotodan.html> Accessed 2012.12.3.
- 8) 次世代省エネルギー基準解説書編集委員会編：住宅のエネルギー基準の解説（第三版），（財）建築環境・省エネルギー機構，p.33,2009.
- 9) 木質構造研究会編：新・木質構造建築読本，特定非営利活動法人木未来，pp.232-258,2012.