

難燃処理された内装用及び外装用木材の  
燃焼性状と経年変化

Combustion properties and aging of  
fire retardant treated wood used for interior and exterior.

2021 年 3 月

河原崎 政行

Masayuki Kawarasaki

## 目 次

<b>第一章 緒 言</b>	1
1.1 研究の背景と関連する既往の研究	1
1.2 本論文の目的と構成	8
<b>第二章 難燃剤による木材の燃焼抑制効果の把握</b>	11
2.1 はじめに	11
2.2 試験体	11
2.2.1 供試材料	11
2.2.2 難燃剤の注入処理	16
2.3 実験方法	19
2.3.1 燃焼試験	19
2.4 結果と考察	21
2.4.1 発熱速度の推移	21
2.4.2 最高発熱速度	28
2.4.3 総発熱量	34
2.4.4 準不燃材料の基準性能との比較	40
2.5 結論	41
<b>第三章 屋内における白華抑制技術と燃焼性状</b>	42
3.1 はじめに	42
3.2 白華の発生への難燃剤の種類及び薬剤固形分量の影響	43
3.2.1 試験体	43
3.2.1.1 供試材料	43
3.2.1.2 難燃剤の注入処理	47
3.2.2 実験方法	51
3.2.2.1 高湿度雰囲気への放置操作	51
3.2.2.2 吸湿量の算出	52
3.2.2.3 表面状態の観察	53
3.2.3 結果と考察	54
3.2.3.1 吸湿量	54
3.2.3.2 表面状態の観察	60
3.2.3.3 白華を発生しない薬剤固形分量の推定	63
3.2.4 結論	67
3.3 塗装による白華抑制効果	68
3.3.1 試験体	68
3.3.2 実験方法	73

3.3.2.1	白華発生試験	. . . . .	73
3.3.2.2	燃焼試験	. . . . .	73
3.3.3	結果と考察	. . . . .	73
3.3.3.1	吸湿量	. . . . .	73
3.3.3.2	表面状態の観察	. . . . .	77
3.3.3.3	塗装による燃焼性状への影響	. . . . .	78
3.3.4	結論	. . . . .	83
<b>第四章</b>	<b>長尺の難燃処理板材の燃焼性状と模型箱試験</b>	<b>. . . . .</b>	<b>84</b>
4.1	はじめに	. . . . .	84
4.2	長さ方向における薬剤固形分量の分布	. . . . .	88
4.2.1	試験体	. . . . .	88
4.2.1.1	供試材料	. . . . .	88
4.2.1.2	難燃剤の注入処理	. . . . .	88
4.2.2	実験方法	. . . . .	94
4.2.3	結果と考察	. . . . .	96
4.2.3.1	処理小片の薬剤固形分量の算出誤差	. . . . .	96
4.2.3.2	長さ方向における薬剤固形分量の分布	. . . . .	97
4.2.4	結論	. . . . .	102
4.3	準不燃材料の長尺処理板材に必要な薬剤固形分量の推定	. . . . .	103
4.3.1	試験体	. . . . .	103
4.3.1.1	長さ方向における薬剤固形分量の分布と燃焼性状	. . . . .	103
4.3.1.2	燃焼性状への節の影響	. . . . .	105
4.3.2	燃焼試験	. . . . .	107
4.3.3	結果と考察	. . . . .	107
4.3.3.1	準不燃材料の性能が得られる薬剤固形分量の推定	. . . . .	107
4.3.3.2	準不燃長尺処理板材の長さ方向における薬剤固形分量 の分布	. . . . .	108
4.3.3.3	燃焼性状への節の影響	. . . . .	112
4.3.4	結論	. . . . .	116
4.4	模型箱試験による燃焼性状の評価	. . . . .	117
4.4.1	試験体	. . . . .	117
4.4.2	実験方法	. . . . .	118
4.4.2.1	模型箱試験	. . . . .	118
4.4.2.2	塗装処理板材の炭化状態の把握	. . . . .	126
4.4.3	結果と考察	. . . . .	126
4.4.3.1	発熱速度，総発熱量および箱内温度の推移	. . . . .	126
4.4.3.2	塗装処理板材の炭化状態	. . . . .	129

4.4.4	結論	134
<b>第五章</b>	<b>屋外における燃焼性状と経年劣化</b>	<b>135</b>
5.1	はじめに	135
5.2	試験体	136
5.2.1	供試材料	136
5.2.2	難燃剤の注入処理	138
5.2.3	処理板材の塗装	141
5.3	実験方法	142
5.3.1	屋外暴露操作	142
5.3.2	燃焼試験	144
5.3.3	残存薬剤固形分量の算出	145
5.4	結果と考察	146
5.4.1	燃焼性状の経年変化への薬剤固形分量の影響	146
5.4.1.1	発熱速度の推移	146
5.4.1.2	総発熱量及び最高発熱速度	151
5.4.1.3	残存薬剤固形分量と総発熱量の関係	153
5.4.2	燃焼性状の経年変化への難燃剤の種類及び塗装の影響	156
5.4.2.1	発熱速度の推移	156
5.4.2.2	総発熱量	161
5.4.2.3	残存薬剤固形分量	165
5.4.2.4	屋外暴露後の塗膜の状態	170
5.5	屋外暴露60ヶ月までの結論	176
<b>第六章</b>	<b>総括</b>	<b>177</b>
	引用文献	181
	謝辞	187

## 第一章 緒言

### 1.1 研究の背景と関連する既往の研究

国内の森林は、戦後造林された人工林が成熟期を迎え、資源として十分蓄積された状態にある。しかし、原木価格の下落等により林業関係者の生産意識が低下し、森林の手入れが十分行われなくなっている。森林は、国土保全や地球温暖化防止等の多面的機能を有するが、手入れが行われないうことで、それらの機能の低下が懸念されている。今後、森林の多面的機能を維持するには、国内で生産された木材（以下、国産材とする）の利用量増加が必要とされている。

建築物は、木材の需要の約4割を占める主要な用途である。特に公共建築物は、従来木造率が低いことから潜在的な国産材の需要が期待できるとともに、不特定多数の目に触れる用途であるため、国産材を使用することで一般市民に利用促進の意義が意識付けられ、一般住宅への波及効果が期待できる。また、国産材の利用量が増えることは、地域産業である木材産業の活性化及び雇用創出への効果が期待される。このようなことから、平成22年に「公共建築物等における木材の利用の促進に関する法律」が施行され、全国の各自治体において、その地域で産出・加工された木材を地域材と位置づけ、それらを使用して公共建築物等の木造化並びに内外装の木質化が進められている。

一方、民間企業では、ESG投資の活発化や、SDGsの17の目標における「⑬気候変動に具体的な対策を」及び「⑮陸の豊かさを守ろう」から、地球環境負荷低減への取り組みが求められている。国産材の利用は、地球環境負荷低減に寄与することから、民間企業では自社ビルや関連施設に国産材を利用する事例が増えている。

以上のように、現在、公共建築物や自社ビル等の比較的規模の大きな建築物を中心に、国産材の利用促進が進められている。特に、内外装の木質化は、非木造を含めて全ての建築物が対象になること、及び目に触れる部分であるため一般市民への波及効果が大きく期待できることから、今後も多くの建築物に採用されることが予想される。

しかし、公共建築物や企業の自社ビル等は、法令で内装に防火上の制限が適用されることが多い。建築物は、火災時における在館者への危険性を構造、用途及び規模を基に判断され、内装に防火上の制限が適用される範囲が定められる。この法令による内装材料への防火上の規制を内装制限と言う。公共建築物は、不特定多数が集まる用途であり、自社ビルを含めて規模が大きいため、火災時において在館者の危険度が高いと判断され、内装制限が適用されることが多い。内装制限の対象箇所は、具体的には壁と天井であり、それらの箇所では、法令に定める防火上の基準性能を満たす防火材料の使用が求められる。そのため、公共建築物や自社ビル等の内装を木質化する場合、通常の木質材料が使用できないことが多い。

一方、建築物の外装材は、法令で防火上の制限が適用される部分ではない。国土交通省の告示に定める仕様の耐火構造、準耐火構造、防火構造、準防火構造の外壁については、外装材として木材等の可燃材料を張ることが認められている<sup>1)</sup>。これは、法令の外壁への防耐火上の要求性能は、遮熱性、遮炎性、非損傷性であり、外装材に木材を使用してもそれらの性能が損なわれないためである。しかし、都市部の中高層建築物は、可燃性材料である木材を外装材に使用する場合、下階の室内火災が外装材を伝って上階に延焼することや、近隣の建物の火災が当該建物に類焼することへの懸念から、防火的な措置を要求さ

れる場合が多い。

中高層建築物については、外壁の屋外側に取り付けた可燃性材料が原因で、火災が拡大した事例が近年発生している。例えば 2015 年に韓国の議政府市のグリーンマンション火災では、駐車場で発生した車両火災から外壁に施工された有機系断熱材に燃え移り、建築物の火災を拡大したことが報告されている<sup>2)</sup>。同様のことは、2017 年のイギリスのロンドンのグレンフェル・タワー火災や、2018 年の名古屋市の高層集合住宅火災でも発生した<sup>3)</sup>。これらの事例から、外壁の外側に施工した可燃性材料は、中高層建築物の火災拡大を助長する危険性があることが明らかである。

そのような防火上の規制が適用される建築物の内装や外装を木質化する際に、難燃処理木材が使われることが多い。難燃処理木材は、燃焼を抑制する薬剤（以下、難燃剤とする）を、木材内に注入することで、木材の燃焼を抑制した材料である。難燃処理木材の製造工程では、難燃剤は水溶液で使用され、木材への注入には一般的に減圧加圧注入処理装置が用いられる。減圧加圧注入処理装置は、装置内の木材を減圧により材内の空気を取り除き、加圧により材内に難燃剤水溶液を強制的に注入する。難燃処理木材の燃焼性状は、注入された難燃剤の薬剤固形分量に依存し、一定量以上の難燃剤を注入することで、法令に定める防火上の基準性能を満たし、防火材料として認定される。そのため、難燃処理木材は、内装制限が適用される内装部分の木質化に使用できる。また、防火材料として認定された難燃処理木材は、法定の防火性能が公に認められた材料であるため、外装木質化の際の防火措置としても使用されている。しかし、難燃処理木材は次のような課題がある。

- ・内装用では、施工された難燃処理木材が高湿度環境に曝されることで内部の難燃剤が溶出し、乾燥とともに表面で白く固化する現象（以下、白華とする）が生じ、美観が損なわれるとともに防火性能の低下が懸念される。
- ・外装用では、難燃処理木材を屋外で使用した実績が少ないため、雨水等により内部の難燃剤が溶脱して燃焼抑制作用の低下が懸念される。
- ・製品の長尺処理板材は、長さ方向において薬剤固形分量が不均一に分布するため、部分的な燃焼性状から全体の燃焼性状を評価することが困難。

これらの課題が解決できれば、公共建築物等の内外装木質化が促進され、国産材の利用量増加への寄与が期待できる。以下、難燃処理木材に関する既往の研究を紹介するとともに、本研究より得られた新たな知見を述べる。

難燃処理木材に用いられる難燃剤は、主にリン系化合物やホウ素系化合物である。木材の燃焼形態及び薬剤の種類ごとの燃焼抑制作用については、既往の研究<sup>4), 5)</sup>で報告されている。それらによると、木材の燃焼は、有炎燃焼と無炎燃焼に大きく分けられる。有炎燃焼は、木材を構成するセルロース等が熱エネルギーを受けることで分解して発生する可燃性ガスと酸素によって引き起こされる化学反応である。有炎燃焼の発熱量は、木材の燃焼による発熱量の 2/3 以上を占め、この抑制にはセルロースの熱分解過程を変換して可燃性ガスの生成を減少させ、水の生成とともに炭素残渣を増加させる脱水炭化作用が有効とされている。無炎燃焼は、炎を生じない燃焼のことであり、有炎燃焼で生成した炭素残渣表面の酸化反応である赤熱燃焼が含まれる。リン系及びホウ素系の薬剤は、木材の

有炎燃焼と赤熱燃焼に対する抑制効果を有しており、このことが現在難燃剤として主に使用される理由の一つである。

難燃処理木材に関する研究は、1998年に防火材料の性能評価試験方法が、発熱性試験（第二章参照）に変更されてから、発熱性試験で燃焼性状を評価することが多くなった。例えば原田等<sup>6)</sup>は、厚さ15mmのアカマツ材を対象に、市販のポリリン酸カルバメート系薬剤を注入処理し、発熱性試験により薬剤固形分量と燃焼性状の関係を考察し、防火材料の種類として定められる難燃材料と準不燃材料の性能が得られる薬剤固形分量を明らかにした。菊地等<sup>7)</sup>は、リン系及びホウ素系の複数の薬剤について、有炎燃焼と無炎燃焼である赤熱燃焼に対する抑制効果を、発熱性試験の結果を基に考察した。その結果、リン系薬剤は、木材の有炎燃焼に対する抑制効果は高いが、赤熱燃焼の抑制効果は低いことを示した。一方、ホウ素系薬剤である八ホウ酸二ナトリウム四水和物は、赤熱燃焼の抑制効果では、リン系薬剤の中で最も高い有炎燃焼抑制効果を示すリン酸水素二アンモニウムよりも高い等、薬剤により2種類の燃焼に対する抑制効果が異なることを示した。また、石川等<sup>8)</sup>は、ホウ素系薬剤について、木材に対する燃焼抑制作用を、発熱性試験、熱重量分析及び熱分解物の分析から考察し、脱水炭化作用による炭化層の形成が燃焼抑制に寄与していることを報告した。

以上は単一の薬剤による木材の燃焼抑制を検討した報告であるが、異なる系統の薬剤を混合することによる、木材の燃焼抑制への相乗効果を検討した報告もいくつかある。Wang等<sup>9)</sup>は、リン酸グアニル尿素とホウ酸の混合薬剤の燃焼抑制作用を、熱分析及びフーリエ赤外線分光分析装置を備えたガスクロマトグラフィー(GC/FT-IR)を用いた分析を行った。その結果、ホウ酸は、リン酸グアニル尿素が作用する温度よりも低い温度域(100~300℃)において、木材の脱水及び脱酸素反応に対して触媒的に作用し、炭化を促し結果的に木材の燃焼抑制に寄与することを示した。さらに、Gao等<sup>10, 11)</sup>は、発熱性試験と熱分析(TG)の結果から、木材の燃焼抑制に対するリン酸グアニル尿素とホウ酸の混合薬剤の相乗効果を示すとともに、その原因としてリン酸グアニル尿素の脱水炭化作用とホウ酸の熱的安定性向上作用の相乗効果によるとした。

国内では河原崎等<sup>12)</sup>は、リン系薬剤としてリン酸二水素アンモニウム、リン酸水素二アンモニウム、リン酸一グアニジン及びポリリン酸カルバメートを、ホウ素系薬剤として八ホウ酸二ナトリウム四水和物を用いて、リン系薬剤とホウ素系薬剤の混合比と木材への燃焼抑制作用を発熱性試験により考察した。その結果、リン系薬剤とホウ素系薬剤の混合比が、リン酸水素二アンモニウムとポリリン酸カルバメートでは重量比として9:1と8:2で、リン酸一グアニジンでは9:1で木材の発熱抑制への相乗効果が生じることを報告した。以上のように、これまでの難燃処理木材に関する研究は、木材の燃焼抑制における難燃剤の作用に関する内容が多い。

一方、公共建築物等木材利用促進法の施行や社会的な環境負荷低減への指向により、難燃処理木材は、建築物の内装に使用される機会が増えたが、それに伴って白華の発生により、美観が損なわれるとともに防火性能の低下が懸念される問題が顕在化した。(公財)日本住宅・木材技術センターが実施した、全国から抽出した18の建築物の現地調査では、難燃処理木材を使用した箇所の77.6%で白華が見られた<sup>13)</sup>。難燃処理木材の白華の発生は、施工業者や生産業者には補修の負担を強いられ、設計士には製品品質への不安を与え

る。このことは、難燃処理木材の使用を避ける要因となり、建築物の内装木質化を滞らせることに繋がる。現在進められている建築物の内装木質化の促進には、難燃処理木材の白華を抑制する技術開発が必須である。

難燃処理木材の白華は、難燃剤に吸湿性の高い薬剤が多いため、梅雨時期等の高湿度環境下に曝されると、内部の難燃剤が吸湿して表面に溶け出し、乾燥により結晶化することで生じると考えられる。このことから、白華抑制のために処理木材の吸湿性を低下させる試みが行われている。海外では、Jing 等<sup>14)</sup>は窒素リン系薬剤に水酸化マグネシウムと水酸化アルミニウムを添加した難燃剤で処理したポプラについて、後処理として Nano-SiO<sub>2</sub> を注入することで吸湿性を低下させる効果を示した。Don 等<sup>15)</sup>は、木材にケイ酸ナトリウムを注入処理した後、助剤としてホウ酸又はリン酸水素二アンモニウムを注入処理することで、吸湿性が低下することを示した。

国内では、原田等<sup>16)</sup>は、ポリリン酸カルバメート系薬剤を注入した難燃処理木材について、ケイ酸と銀を成分とするセラミック塗料による塗装で吸湿性を抑制できることを示した。伊藤等<sup>17)</sup>は、ホウ素またはリン系の薬剤について、ナトリウム塩等の助剤を加えることによる吸湿性の抑制を燃焼性状と併せて検討し、いくつかの効果的な配合条件を明らかにした。また、花ヶ崎等<sup>18)</sup>は、リン酸二水素アンモニウムを用いた処理木材に、カルボキシメチルセルロースナトリウムにより表面の薬剤をゲル化させることで、白華の抑制を試みている。以上の報告は、処理木材の吸湿性を低下させることで白華抑制を試みた研究であるが、助剤による処理又は特殊な塗料の塗布が必要なため、製品の生産性低下及び製造コストの上昇を招く。製品化を前提とすると、現状の難燃処理木材の生産工程を維持し、市販品を使った白華抑制技術の開発が望まれる。

また、難燃処理木材の製品に用いられる長尺の板材は、天然材料であるため、製造ロット内及び同一板材の長さ方向において密度が変動する。また、難燃処理木材は、内装材や外装材に使用する際に、意匠的な目的から様々な厚さが求められる。無処理木材の燃焼性状は、密度や厚さが影響することが報告されている。原田等<sup>19)</sup>は、3種類の厚さのスギ、ヒバ、アカマツ及びブナの板材を用いて発熱性試験を行い、発熱性状への厚さの影響を考察した。その結果、板材の厚さの増加は、非加熱面への燃え抜け時に生じる発熱速度の 2nd ピークの発生時間を遅くするとともに、ピーク値を低くすることを示した。更に原田等<sup>20)</sup>は、国産材 22 種類、外国産材 20 種類の板材について発熱性試験を行い、着火後 180 秒までの平均発熱速度が密度とともに増加する傾向を示した。同様に、菊地等<sup>21)</sup>は、針葉樹 5 種類、広葉樹 1 種類の板材について発熱性試験を行い、有炎燃焼で生じる発熱量が密度の増加とともに増加することを示した。原田等及び菊地等の報告から、長尺板材における密度の変動及び厚さの違いは、板材の燃焼性状に影響することが分かり、同時に燃焼を抑制する難燃剤の作用への影響が予想される。

また、長尺の難燃処理木材は、長さ方向において難燃剤の薬剤固形分量が変動することが報告されている。河原崎等<sup>22)</sup>は、厚さ 18×幅 110×長さ 1900mm の難燃処理スギ板材について、長さ方向で 100mm 間隔に切断して採取した小片の全乾密度と、処理前の板材の全乾密度の差から薬剤固形分量を推定し、長さ方向における薬剤固形分量の変動を分析した。その結果、処理板材の薬剤固形分量は、板材への難燃剤溶液の注入量が 500～700kg/m<sup>3</sup>において、端部が多くなることを示した。また、藤田等<sup>23)</sup>は、厚さ 18×幅 120×



長さ 3000mm の難燃処理スギ板材について、同様の方法によって長さ方向に薬剤固形分量の変動がある事を示すとともに、板材に存在する節については薬剤固形分量が少なく、燃えやすい状態であることを示した。更に、亀岡等<sup>24)</sup>は、素材と比較して材質にバラツキが少ない LVL (厚さ 30×幅 150×長さ 4000mm) を用いた難燃処理板材について、同様の方法で長さ方向の薬剤固形分量の変動を分析した結果、両端部から 500mm 以内の部分において薬剤固形分量が多くなることを示した。

難燃処理木材において、長さ方向の端部の薬剤固形分量が多くなる現象は、乾燥工程における難燃剤の移動が原因との報告がある。渥美等<sup>25)</sup>は、難燃剤注入後の板材について、X線撮影装置を用いて乾燥過程における材内の難燃剤の分布状態を分析し、乾燥に伴い表面付近に難燃剤が蓄積することを示した。また、上川等<sup>26)</sup>は、処理板材を細分化して得た小片について水中で難燃剤を溶脱させ、溶脱操作前後の小片の質量差及び体積から薬剤固形分量を推定し、それらを基に材内における難燃剤の分布状態を把握した。注入処理直後と乾燥後の処理板材内の難燃剤の分布状態を比較した結果、乾燥過程において難燃剤の移動が見られ、それは心材より辺材に、接線方向及び半径方向よりも繊維方向に顕著であった。これらの報告から、難燃処理木材は、材内において難燃剤が不均一に分布しやすく、それに伴い燃焼性状が変動することが予想される。

内装制限が適用される部分に使われる防火材料は、法令の基準性能として「燃焼しないものであること」、「防火上有害な変形、溶融、き裂その他の損傷を生じないこと」及び「避難上有害な煙又はガスを発生しないこと」が定められている。そして、防火材料は、それらの基準性能を維持する時間により、20分間が不燃材料、10分間が準不燃材料、5分間が難燃材料の3種類がある。内装制限が適用される部分では、火災時における在館者の避難安全性を確保するための防火材料の種類が定められており、準不燃材料であればほとんどの部分に使用可能である。

難燃処理木材では、3つの基準性能のうち「燃焼しないものであること」を満たすことが最も難しく、この性能により防火材料の認定に必要な難燃剤の薬剤固形分量が決定される。防火材料の認定のための性能評価試験<sup>27)</sup>では、「燃焼しないものであること」の評価は、ほとんどが発熱性試験(第二章参照)で行われる。発熱性試験は、長さ 99×幅 99mm の小試験体を用いることから手軽に実施できる。また、発熱性試験は、加熱中に材料周囲の空気中の酸素濃度を継続的に測定することで、燃焼で消費された酸素量を把握する。そして、可燃性材料の燃焼による発熱量が消費された酸素の単位質量当たりではほぼ等しいという原理を利用して、酸素消費量から発熱速度及びその積算値である総発熱量を算出する(この方法を酸素消費法という)。発熱性試験で得られる発熱速度及び総発熱量は、材料の燃焼性状を詳細に把握することができ、非常に有用なデータである。しかし、発熱性試験は、試験体の寸法が小さいため、製品となる長尺の難燃処理木材のように内部において燃焼性状にバラツキがある材料では、バラツキを含めた全体的な燃焼性状を把握することが困難である。このため、発熱性試験で難燃処理木材の製品を性能評価する場合は、長さ方向において全ての部分に基準性能を付与することが求められる。このことは、製品の長尺処理木材において、基準性能付与に必要な薬剤固形分量を増加させることになる。

防火材料の性能評価試験を行う一部の機関では、準不燃材料と難燃材料について、「燃

焼しないものであること」の評価に発熱性試験に加えて、中規模試験である模型箱試験が設定されている。模型箱試験は、鉄製のフレームの内側に試験材料を留め付けて、左右の側壁、奥壁、天井の4つのパネルを作成し、それらを組み合わせて内寸が幅840×高さ840×奥行1680mmの供試箱を作成する（第四章参照）。試験では、箱内の左奥に置かれたガスバーナーにより壁と天井の試験材料が部分的に加熱され、実際の室内火災と同様に、材料への着火から部分的な燃焼に移行し、徐々に燃焼が拡大する状態が再現される。加熱時の材料の燃焼性状は、発熱性試験と同様に酸素消費法で算出される発熱速度及び総発熱量と加熱後における貫通する亀裂、穴、隙間の有無で評価される。

模型箱試験は、試験体の寸法が大きいため、材内のバラツキを含めた難燃処理木材の全体としての燃焼性状を把握できる。このことから、近年、難燃処理木材の燃焼性状を模型箱試験で評価した報告が見られるようになった。菊地等<sup>28)</sup>は、難燃処理した厚さ15mmのスギ板材及びヤチダモ板材について、火源に木クリブを用いた模型箱試験を行い、加熱中の室内温度の推移から燃焼性状を評価した。その結果、難燃処理木材は、薬剤固形分量200～250kg/m<sup>3</sup>において、不燃材料に認定されるケイ酸カルシウム板と同等の燃焼性状になることを示した。また、河原崎等<sup>29)</sup>は、厚さ18mmの難燃処理スギ板材について、性能評価機関の試験方法に基づいて模型箱試験を実施し、難燃剤の薬剤固形分量が60～88kg/m<sup>3</sup>（平均73 kg/m<sup>3</sup>）で難燃材料、88～146 kg/m<sup>3</sup>（平均120kg/m<sup>3</sup>）で準不燃材料の性能を満たすことを示した。

藤田等<sup>23)</sup>は、厚さ18mmの薬剤処理スギ板材について模型箱試験を行い、薬剤固形分量81～103kg/m<sup>3</sup>（平均92kg/m<sup>3</sup>）で準不燃材料の総発熱量と最高発熱速度の基準値を満たすことを示した。また、難燃剤の注入量が少なく燃えやすいとされる節は、燃え広がりに影響しないが、死節や放射状の亀裂を有する節では貫通する亀裂・割れの原因になることも報告した。鈴木<sup>30)</sup>等は、厚さ18mmの薬剤処理スギ材を用いて模型箱試験を行い、薬剤固形分量、節の分布、塗装の有無の燃焼性状への影響を考察した。その結果、薬剤固形分量が増加するに従って燃焼が抑えられること、節が貫通する亀裂・割れの原因になること、塗装が難燃処理木材の燃焼性状には影響しないことを示した。更に、亀岡等<sup>24)</sup>は、平均薬剤固形分量が117～127kg/m<sup>3</sup>（平均122kg/m<sup>3</sup>）の厚さ30mmの難燃処理LVLについて模型箱試験を行った結果、準不燃材料の総発熱量の基準値を加熱後14.95分まで超えないことを示した。

以上のように、模型箱試験は、難燃処理木材の燃焼性状を適正に評価することができる。しかし、模型箱試験は、試験規模が大きいために1回の試験に要する期間が長く、費用も高額になるという欠点がある。このことから、難燃処理木材の新規開発では、小試験体を用いる発熱性試験の結果から防火材料の性能に必要な薬剤固形分量を把握し、その結果を基に製品寸法の処理板材を試作して模型箱試験で防火材料の性能を評価することが効率的である。このような製造条件の検討を可能にするには、長尺処理木材について発熱性試験と模型箱試験の燃焼性状の関係を明らかにする必要があるが、これまで両者の関係を詳細に検討した報告は無い。

一方、中高層建築物の外装の木質化は、近年、都市部において見られるようになり、防火措置として難燃処理木材が使用されることが多い。しかし、国内では難燃処理木材は、主に内装に使用されてきたため、屋外の使用では難燃剤の溶脱等による燃焼抑制作用の

低下が懸念されている。

欧米では、古くから住宅の屋根や外壁に使用されるウッドシングルに難燃処理木材が使用されており、長期間の屋外暴露における経年劣化に関する知見も蓄積されている。例えば、LeVan 等<sup>31)</sup>は、樹脂成分を含む耐溶脱性の難燃剤を用いて処理したウッドシングルについて10年間の屋外暴露を行い、ASTM E108-83<sup>32)</sup>に基づく燃焼試験等によって燃焼性状を評価した。その結果、難燃処理木材の燃焼抑制作用は、暴露期間の経過に従い低下するが、暴露後10年間においても認められることを示した。Östman 等<sup>33)</sup>は、難燃処理木材について10年間の屋外暴露を行い、発熱性試験による燃焼性状の評価を基に燃焼抑制作用の経年劣化を把握すると共に、欧州の規格に基づく促進劣化操作<sup>34)</sup>との比較を行った。その結果、難燃剤の種類によっては初期の薬剤固形分量を十分多くすることで、屋外暴露後及び促進耐候操作後も基準の燃焼抑制作用を維持できること、塗装が防火性能の維持に寄与することを示した。

国内では、薬剤処理木材の屋外使用に関する報告は限られている。石原<sup>35)</sup>は、リン酸水素二アンモニウム及び木材中で樹脂化することで溶脱が抑えられるリン酸・メラミンホルムアルデヒド初期縮合物を用いてラワン合板を処理し、15年間の屋外暴露を行った。赤外線ガスバーナーを用いた燃焼試験の結果、リン酸水素二アンモニウムを用いた合板は、1年間の屋外暴露で燃焼抑制作用が低減したのに対し、リン酸・メラミンホルムアルデヒド初期縮合物を用いた合板は、3年間の暴露まで初期の性能を維持し、15年間の暴露においても若干の燃焼抑制作用が残存することを示した。

原田等<sup>36,37)</sup>は、リン系薬剤を用いた難燃処理板材について、塗装による耐候性付与効果を把握するため、ウェザーメーターを用いた2000時間までの促進劣化操作及び4年間の屋外暴露を実施した。操作後及び暴露後の試験体は、残存薬剤固形分量の算出と走査型電子顕微鏡 (SEM-EDX) による材内の薬剤分布の分析及び発熱性試験による燃焼性状の把握により劣化状態が評価された。その結果、促進耐候操作後の難燃処理板材の燃焼抑制作用は、残存する薬剤固形分量に依存すること、油性の含浸・半透明型塗料 (茶色系) は薬剤保持効果が高いことを示した。また、屋外暴露後の試験体についても同様の試験を行い、リン酸グアニジン系薬剤を用いた難燃処理板材は、油性の含浸・半透明型塗料 (茶色系)、油性の造膜・隠蔽型塗料 (白色系) 及び油性の造膜・透明型塗料による塗装が残存薬剤固形分量の低下が少なく、燃焼抑制作用の維持に有効であることを示した。

一方、国内では建築物の外装材の燃え広がり性を評価する試験方法の必要性が認識され、2015年にJIS A1310<sup>38)</sup>としてファサード試験が作成された。この試験は、ISO13785-1<sup>39)</sup>を基に、加熱手法と試験体寸法を変更したものである。また、ファサード試験は2019年の改訂により、試験体への加熱強度等が見直されるとともに、燃え広がり性の評価基準案が追加された。

試験装置の概要を図1.1に示す。試験材料は、縦4095×横1820mm以上の不燃性基材に外装材として施工され、基材裏側にある燃焼チャンバーから、基材の下部に設けた910×910mmの開口部を通して噴出火炎を発生させて外壁表面を加熱する。加熱強度は、開口部上端から900mmの位置で30kW/m<sup>2</sup>、1500mmの位置で15kW/m<sup>2</sup>とし、加熱時間は20分間である。評価基準案では、開口部から2000mm又は2500mm上方の壁面温度が、2分を超えて500℃以上を超えることを著しい燃え広がりとした。

また、ファサード試験を前提に、屋外に使用する難燃処理木材の促進劣化試験方法が、2019年にJIS A1326<sup>40)</sup>として作成された。難燃処理木材は、縦1980×横1980mm木枠に留めつけ、試験体とする。試験体の促進劣化操作は、**図1.2**の専用装置を用いて、1.5時間の乾燥期間と2時間の散水時間を1サイクルとした、180サイクルとする。

JIS A1310のファサード試験が作成されて以降では、中村等<sup>41)</sup>は、耐溶脱性のリン酸アミノ樹脂系難燃剤を用いた処理板材について、JIS A1326の促進劣化操作後の燃え広がり性状をファサード試験により評価した。試験の結果、薬剤固形分量100~128kg/m<sup>3</sup>の難燃処理板材は、促進劣化操作により燃焼抑制作用が低減するが、操作後においても燃え広がりが抑制されることを示した。また、ファサード試験と発熱性試験の結果の比較から、発熱性試験で5分間総発熱量が難燃材料の基準値に満たない難燃処理板材が、ファサード試験では燃え広がりが抑制されることを示した。ただし、現時点では難燃処理木材の燃え広がりを評価した報告は中村等のみであり、発熱性試験の評価結果との関係を明らかにするには更なる知見の蓄積が必要である。

以上の報告から、難燃処理木材は、耐溶脱性を有する難燃剤を用いることにより、屋外において燃焼抑制作用の経年劣化を抑制できること、及び塗装が燃焼抑制作用の維持に有効であることが分かる。しかし、海外の報告は、屋外暴露の気象条件が日本と異なる。また、国内の報告は、海外で用いられている耐溶脱性難燃剤が評価されていない、暴露期間が短い、塗料の種類が限られている等、屋外における難燃処理木材の経年劣化に関するデータの蓄積が不十分である。今後、国内で薬剤処理木材を中高層建築物の外装に使用するには、外装材に求められる耐用年数の期間、燃え広がりを抑制する製造技術開発が必要である。そのためには、まずは国内での屋外暴露により難燃処理木材の燃焼抑制作用の経年劣化挙動についての知見を蓄積し、製造技術開発に必要な基盤データを整備することが必要である。

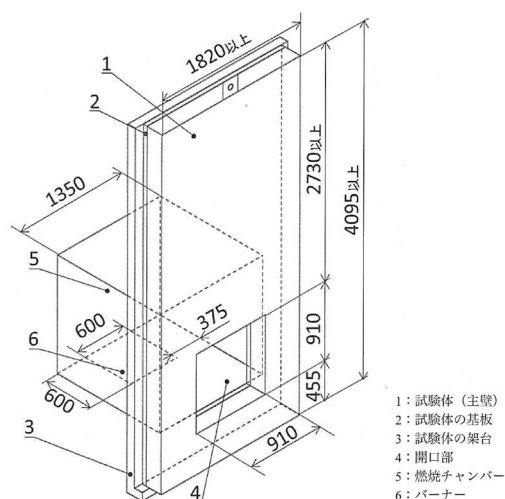


図1.1 JIS A1310のファサード試験の概要<sup>38)</sup>

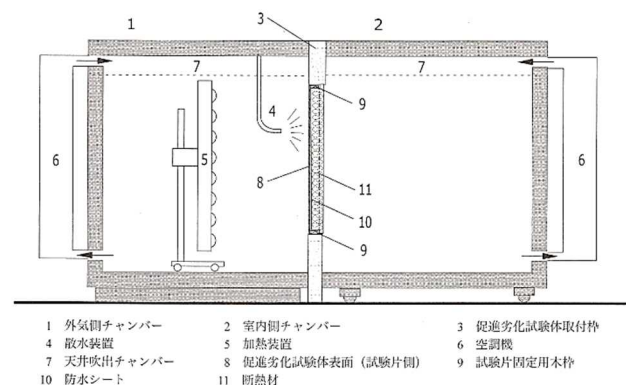


図1.2 JIS A1326の難燃処理木材の促進劣化装置<sup>40)</sup>

## 1.2 本論文の目的と構成

今後、公共建築物等木材利用促進法に関連した取り組み及び地球環境負荷低減への社会的指向から、比較的規模の大きな建築物の内外装木質化が進められることが予想される。そして、それらの建築物では、内装材は法令の内装制限、外装材は火災拡大の防止措

置のために、木質化する際に難燃処理木材が必要とされる。しかし、難燃処理木材は、内装材としては施工後における白華の発生、外装材としては経年劣化による燃焼抑制作用の低下が問題とされている。そこで著者は、それらの内装材及び外装材の問題について、難燃処理木材の製造条件との関係を明らかにするために研究を実施した。また、内装材については、製品開発を想定して、発熱性試験と模型箱試験の評価を組み合わせた方法により長尺処理木材の製造条件を検討した。本論文の構成は以下のとおりである。

**第二章**は、難燃処理木材の製造において基本となる、難燃剤の薬剤固形分量と木材の燃焼性状の関係を、長さ 550mm の板材を用いた実験により把握した結果を記す。板材は、実際の製品を考慮して厚さ及び密度を数水準用意し、それぞれについて所定の数水準の薬剤固形分量が得られる難燃剤の注入処理を行った。発熱性試験の結果、難燃剤の薬剤固形分量と燃焼性状の関係について、これまで詳細に検討されていない板材の厚さ及び密度の影響を含めて把握することができた。また、それらの関係を基に、内装制限の適用箇所に広く使うことができる、準不燃材料の性能を板材に付与する薬剤固形分量の目安を明らかにした。

**第三章**と**第四章**は、内装用の難燃処理木材について白華抑制に有効な製造条件を、製品を想定した長尺の処理木材の試作・評価まで行い検討した。**第三章**では、白華抑制技術について、製品の生産性及び製造コストを考慮し、これまで検討されていない市販の難燃剤と塗料を選定して組み合わせる製造条件による方法を試みた。試験に用いた処理板材は、市販の 3 種類の難燃剤を使用して、3 水準の薬剤固形分量に調整した。白華発生の評価は、EN16755<sup>42)</sup> 及び ASTM D3201<sup>43)</sup> を参考に、70, 80, 90%HR の高湿度雰囲気下に処理板材を放置し、吸湿量及び表面の水滴の発生状況を基にした。試験の結果、各難燃剤を用いた処理板材について、雰囲気湿度ごとに白華を抑制できる薬剤固形分量を把握できた。それらの結果と、**第二章**の結果を基に、準不燃材料の難燃処理木材に推奨される難燃剤の種類を選定した。更に、選定した難燃剤を用いた処理板材については、過去の報告<sup>24)</sup> を参考に数種類の造膜形塗料で塗装し、湿度 80, 90%RH の高湿度雰囲気下への放置試験により、白華防止効果を評価した。同時に、それらの塗装処理板材は、発熱性試験により処理板材の発熱性状への各塗装の影響を把握し、準不燃材料水準の難燃処理木材に推奨される塗料を選定した。

**第四章**では、**第三章**の結果を基に、製品を想定した長さ 3000mm 及び 4000mm の長尺の処理板材を試作し、長さ方向の部分的な難燃剤の分布状況及び燃焼性状を把握し、両者の関係から長尺処理板材に準不燃材料の基準性能を付与する薬剤固形分量を推定した。長尺処理板材の長さ方向における薬剤固形分量の分析の結果、過去の報告<sup>29)</sup> と同様に端部の薬剤固形分量が多くなる状況が見られた。また、長尺処理板材から採取した小片について発熱性試験で燃焼性状を評価した結果、長尺処理板材に準不燃材料の性能を付与する薬剤固形分量として 135kg/m<sup>3</sup> が推定された。準不燃材料の性能を有するとする長尺処理板材は、長さ方向の約 3 割が基準性能に満たないことが推定されたが、室内火災と同じ加熱状態が再現できる模型箱試験で全体的な燃焼性状を評価された結果、準不燃材料の性能を満たすことが分かった。これらの結果により、これまで不明であった難燃処理木材の発熱性試験と模型箱試験の燃焼性状の関係を得ることができ、難燃処理木材の製造者にとって製品開発の効率化に寄与する非常に有用な知見を得ることができた。

**第五章**は、外装用の難燃処理木材について燃焼抑制作用の経年劣化を製造条件の影響を含めて検討した。外装用の難燃処理木材は、国内では歴史が浅いため、現状では屋外における燃焼抑制作用の経年劣化挙動についての知見が不足している。また、外装材の燃え広がりへの評価試験は、JIS A1310として2015年に作成され、2019年の改訂で燃え広がり抑制の評価基準案が追加された。このように外装材の燃え広がりへの評価試験及び評価基準案が作成されてから間もないため、難燃処理木材の燃え広がりを抑制する製造条件を検討した報告に限られており、具体的な製造条件は明らかではない。このことから本論文では、今後の屋外用難燃処理木材を開発に必要とされる基盤データの収集を目的として行った。

試験体では、これまで検討されていない耐溶脱性の難燃剤を用い、従来の水溶性難燃剤と処理木材の燃焼抑制作用の経年劣化挙動を比較検討した。また、水溶性難燃剤を用いた試験体は、薬剤固形分量を3水準用意し、経年劣化挙動への薬剤固形分量の影響を把握した。更に、塗装による処理木材の燃焼抑制作用維持効果について、これまで検討されていない橋梁等の鉄材への耐候性付与に実績のあるフッ素樹脂系塗料を使用し、その効果を検討した。試験では、小寸法の処理板材を試験体として国内3箇所で最長5年間の屋外暴露を行った。暴露後の試験体の燃焼抑制作用は、発熱性試験と残存薬剤固形分量により評価した。試験の結果、難燃処理木材は、耐溶脱性難燃剤を用いることで水溶性難燃剤よりも薬剤固形分量の減少が抑制され、当初の燃焼抑制作用を長く維持できることが分かった。また、水溶性難燃剤を用いて薬剤固形分量を変えた処理板材の結果から、目標の基準性能に対して薬剤固形分量を過剰にすることは、基準性能を維持する期間の延長に有効であるがその期間には限界があること、暴露後の難燃処理木材の残存薬剤固形分量と燃焼性状の関係に、材内の難燃剤の分布状態の影響があることが分かった。更に、フッ素樹脂系塗料の塗装は、処理木材の燃焼抑制作用維持に有効であり、耐溶脱性難燃剤を用いた処理板材では当初の燃焼抑制作用を5年以上維持できる可能性が示唆された。

**第六章**は、上記で得られた結果を基に、内装用及び外装用に推奨される難燃処理木材の製造技術について、残された課題を含めて総括する。

## 第二章 難燃剤による木材の燃焼抑制効果の把握

### 2.1 はじめに

第一章で述べたように、難燃処理木材は、建築物の内装及び外装の木質化において、法令による内装制限の適用や外装材の燃え広がりへの抑制措置が要求される場合に使用されている。難燃処理木材の製造方法は、内装用及び外装用ともに基本的には同じである。そして、製造工程において最も重要なのは、難燃剤の注入処理工程である。これは、難燃処理木材の製品は、法令で定められた防火材料の基準性能を満たす必要があり、そのためには注入処理工程において基準性能を付与する量の難燃剤の注入が必要だからである。

これらのことから、難燃処理木材の製品を新規開発するには、まず始めに目標とする防火材料の種類を定め、その基準性能が得られる難燃剤の注入量（薬剤固形分量）を把握することが必要である。そして、製品の難燃剤の注入処理工程では、把握した薬剤固形分量を管理値として、注入処理後の板材の薬剤固形分量の管理を行う。

一方、原田の報告<sup>1)</sup>では、板材の燃焼性状には厚さ、密度及び木理（木口、板目、柾目）が影響することが示されている。内装材や外装材に使用される難燃処理木材は、意匠的な目的から様々な厚さの製品が求められる。また、難燃処理木材の製品に使用される長尺の板材は、天然材料由来の不均質性から、板材間に加えて同一板材の長さ方向においても密度に変動が生じる。また、木理については、長尺の板材では表面が板目または柾目になるが、上記の原田の報告では、両者に燃焼性状において大きな差が無いとしている。これらの注入処理前の板材の燃焼性状への厚さ及び密度の影響は、板材の燃焼を抑制する難燃剤の作用に影響することが予想される。

本章では、内装制限が適用されるほとんどの部分に使用できる準不燃材料の難燃処理木材を想定して、基準性能を付与する処理板材の薬剤固形分量の目安を得ることを目的とする。試験では、製品の厚さのバリエーション及び処理に用いる長尺板材の密度の変動を考慮し、厚さ及び全乾密度を数水準変えた板材について、数水準の薬剤固形分量になるように難燃剤の注入処理を行った。得られた処理板材から試験体を採取し、発熱性試験に供して燃焼性状を把握することで、薬剤固形分量と燃焼性状の関係を板材の厚さ及び密度の影響を踏まえて整理し、準不燃材料の目安となる薬剤固形分量を把握した。得られた結果は、第三章以降の試験において基礎データとして活用される。また、難燃処理木材の薬剤固形分量と燃焼性状の関係については、厚さ及び全乾密度の影響を踏まえて検討した報告は少なく、得られた結果は難燃処理木材の製品を開発する者にとって有用な知見となる。

### 2.2 試験体

#### 2.2.1 供試材料

試験に用いた板材及び難燃剤を表 2.1 に示す。板材は、スギ (*Cryptomeria japonica*) の心材とし、厚さを内装材及び外装材で使用されることの多い 12, 15, 18mm の 3 種類を用意した。板材に心材を使用した理由は、辺材よりも難燃剤溶液の注入性が低く、難燃処理木材に使用するのが難しい心材の製造条件を把握することで安全側の条件が得られると判断したからである。各厚さの試験用板材は、図 2.1 に示すように、長さ 3650mm の長尺板材 30 枚から 2 片の含水率用小片とともに 3 枚採取した。2 片の含水率用小片は、全

乾法により含水率を算出し、平均値を求めた。採取された試験用板材は、重量を測定し、寸法及び小片の平均含水率から全乾密度を算出した。採取した板材の全乾密度の分布を図 2.2 に示す。板材の全乾密度は、分布範囲から 3 水準を設定し、水準ごとに難燃処理用 12 枚と無処理用 2 枚の板材を選定した。表 2.2～2.4 に、選定した板材の概要と次項における注入処理の薬剤固形分水準を示す。

難燃剤は、難燃処理木材で問題とされている白華発生への抑制効果があることから、近年使用され始めているリン酸グアニジン系薬剤を用いた。

表 2.1 供試材料の概要

板 材	樹種	スギ
	寸法	長さ550mm×幅105mm×厚さ12・15・18mm
	全乾密度	低 (300kg/m <sup>3</sup> 以上～340kg/m <sup>3</sup> 未満) 中 (340kg/m <sup>3</sup> 以上～380kg/m <sup>3</sup> 未満) 高 (380kg/m <sup>3</sup> 以上～430kg/m <sup>3</sup> 未満)
	含水率	4～8%
難燃剤	リン酸グアニジン系 丸菱油化工業(株) ノンネンW-200	

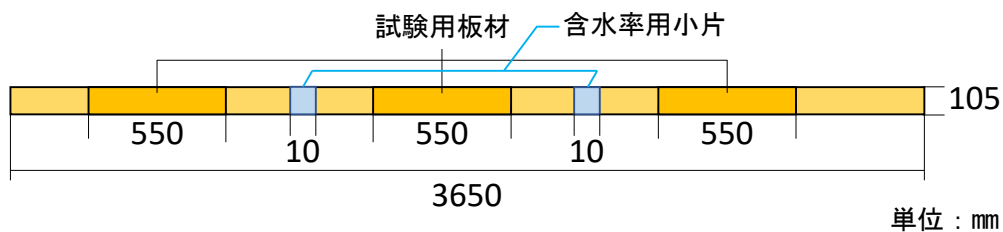


図 2.1 長尺板材からの試験用板材及び含水率用小片の採取

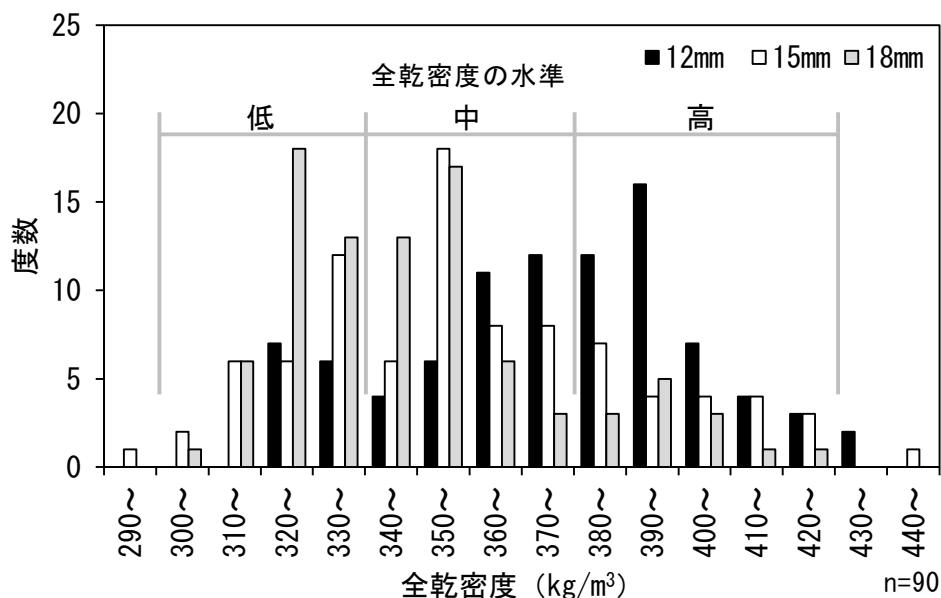


図 2.2 試験用板材の全乾密度の分布



表 2.2 選定した試験用板材の概要（厚さ 12mm）

全乾密度 水準 <sup>a)</sup>	板材の 番号		質量 (g)	含水率 (%)	全乾密度 (kg/m <sup>3</sup> )	用 途	注入処理 水準
低	4	2	251.1	3.6	338	無処理用	
	28	3	232.4	4.3	311		
	9	1	253.6	4.7	338	難燃処理用	50kg/m <sup>3</sup>
	11	1	246.7	7.0	322		
	27	1	239.7	4.2	321		
	28	1	234.5	4.3	314		
	4	3	248.0	3.6	334		
	11	2	246.2	7.0	321	100kg/m <sup>3</sup>	
	11	3	241.4	7.0	315		
	19	1	244.5	5.0	325		
	21	1	254.0	7.5	330	150kg/m <sup>3</sup>	
	24	1	245.5	4.7	327		
	27	3	236.7	4.2	317		
	28	2	237.4	4.3	318		
中	3	3	262.8	4.2	352	無処理用	
	18	3	283.0	4.4	378		
	7	2	275.2	4.2	368	難燃処理用	50kg/m <sup>3</sup>
	7	3	267.3	4.2	358		
	13	1	283.2	4.7	377		
	23	3	263.9	4.3	353		
	2	1	266.0	5.0	353		
	15	3	268.9	4.2	360	100kg/m <sup>3</sup>	
	20	2	277.5	5.8	366		
	25	1	281.7	4.2	377		
	1	2	291.0	7.8	377	150kg/m <sup>3</sup>	
	9	3	266.4	4.7	355		
	15	2	271.2	4.2	363		
	22	3	283.5	5.6	375		
高	16	3	314.7	4.4	420	無処理用	
	26	1	291.6	4.2	390		
	5	2	299.9	4.5	400	難燃処理用	50kg/m <sup>3</sup>
	9	2	293.3	4.7	391		
	18	2	300.8	4.4	402		
	30	3	316.0	5.9	416		
	6	1	300.0	4.9	399		
	16	2	293.4	4.4	392	100kg/m <sup>3</sup>	
	24	3	304.0	4.7	405		
	26	3	307.0	4.2	411		
	6	2	297.6	4.9	396	150kg/m <sup>3</sup>	
	12	1	308.0	5.0	409		
	18	1	293.4	4.4	392		
	26	2	303.6	4.2	406		

a) 範囲は表 2.1 に示す

表 2.3 選定した試験用板材の概要（厚さ 15mm）

全乾密度 水準 <sup>a)</sup>	板材の 番号		質量 (g)	含水率 (%)	全乾密度 (kg/m <sup>3</sup> )	用 途	注入処理 水準
低	5	2	299.4	4.6	337	無処理用	
	27	1	280.3	5.2	314		
	4	2	292.3	4.7	329	難燃処理用	50kg/m <sup>3</sup>
	6	1	292.5	5.5	327		
	6	2	301.7	5.5	337		
	16	3	279.1	4.5	315		
	4	1	289.4	4.7	326		
	4	3	293.4	4.7	330	100kg/m <sup>3</sup>	
	16	1	297.8	4.5	336		
	28	2	286.5	5.7	319		
	3	2	288.3	4.7	325	150kg/m <sup>3</sup>	
	27	2	288.9	5.2	324		
	30	1	300.1	6.2	333		
30	3	299.7	6.2	332			
中	20	2	314.5	5.1	353	無処理用	
	22	2	336.1	4.5	379		
	1	2	323.6	5.3	362	難燃処理用	50kg/m <sup>3</sup>
	9	2	326.1	4.9	366		
	17	1	336.0	4.9	378		
	26	3	317.6	5.2	356		
	8	1	317.8	5.1	356		
	10	3	334.0	4.6	376	100kg/m <sup>3</sup>	
	24	2	325.5	5.7	363		
	24	3	327.1	5.7	365		
	10	1	318.8	4.6	359	150kg/m <sup>3</sup>	
	14	1	322.5	4.5	364		
	21	3	328.9	4.4	371		
23	1	327.5	4.2	370			
高	11	2	373.4	4.9	419	無処理用	
	19	2	348.3	5.0	391		
	7	3	352.5	6.3	391	難燃処理用	50kg/m <sup>3</sup>
	12	3	374.4	5.5	418		
	18	1	358.9	5.1	402		
	29	1	359.6	5.5	402		
	2	2	359.4	4.8	404		
	22	3	368.7	4.5	416	100kg/m <sup>3</sup>	
	29	2	350.4	5.5	391		
	29	3	354.4	5.5	396		
	2	3	361.4	4.8	406	150kg/m <sup>3</sup>	
7	1	370.9	6.3	411			
19	1	350.7	5.0	394			
19	3	349.5	5.0	392			

a) 範囲は表 2.1 に示す

表 2.4 選定した試験用板材の概要（厚さ 18mm）

全乾密度 水準 <sup>a)</sup>	板材の 番号		質量 (g)	含水率 (%)	全乾密度 (kg/m <sup>3</sup> )	用 途	注入処理 水準
低	21	1	362.5	4.5	339	無処理用	
	27	3	345.6	5.6	320		
	3	2	361.1	4.6	337	難燃処理用	50kg/m <sup>3</sup>
	6	3	350.5	5.9	323		
	20	3	354.7	5.5	328		
	28	3	353.4	4.5	330		
	1	2	359.9	6.4	331		
	2	2	358.2	6.9	327		
	3	3	348.2	4.6	325	100kg/m <sup>3</sup>	
	25	2	361.7	5.1	336		
	6	2	353.4	5.9	326		
	22	3	355.5	3.8	335	150kg/m <sup>3</sup>	
	27	1	360.0	5.6	333		
27	2	353.5	5.6	327			
中	5	3	403.1	4.9	376	無処理用	
	30	1	376.6	5.2	350		
	6	1	380.6	5.9	351	難燃処理用	50kg/m <sup>3</sup>
	7	2	389.7	5.0	363		
	26	3	406.1	5.8	375		
	28	1	379.9	4.5	355		
	5	2	401.3	4.9	374		
	7	1	380.0	5.0	354		
	17	3	385.9	4.6	360	100kg/m <sup>3</sup>	
	26	1	382.0	5.8	353		
	9	3	400.7	5.1	372		
	10	3	377.7	4.5	353	150kg/m <sup>3</sup>	
	17	1	382.5	4.6	357		
17	2	385.6	4.6	360			
高	8	2	467.2	6.3	429	無処理用	
	19	3	413.9	5.1	385		
	11	1	449.8	5.2	418	難燃処理用	50kg/m <sup>3</sup>
	11	3	430.1	5.2	400		
	18	1	414.9	4.7	387		
	18	3	432.5	4.7	404		
	8	1	440.5	6.3	405		
	8	3	421.9	6.3	388		
	18	2	444.7	4.7	415	100kg/m <sup>3</sup>	
	19	1	429.3	5.1	399		
	1	3	431.7	6.4	396		
	5	1	437.5	4.9	408	150kg/m <sup>3</sup>	
	11	2	439.1	5.2	408		
19	2	425.1	5.1	395			

a) 範囲は表 2.1 に示す

## 2.2.2 難燃剤の注入処理

板材への難燃剤の注入処理は、減圧加圧注入処理装置を用いた。減圧加圧条件は、予備試験により板材に目標の薬剤固形分量の処理が可能であることを確認し、減圧を 8.0kPa で 30 分間、加圧を 1.1MPa で 4 時間とした。難燃剤は、濃度 50%の原液を水道水で希釈し、予備試験の結果を基に板材の薬剤固形分量が 50, 100 及び 150kg/m<sup>3</sup>になるように、濃度を 7.0%, 13.8%及び 20.7%の 3 水準に調整して用いた。注入処理後の板材は、処理前後の重量、処理前の板材の体積及び溶液濃度から、式 (2.1) を用いて薬剤固形分量 L を算出した。

$$\text{薬剤固形分量 } L \text{ (kg/m}^3\text{)} = \left( \left( \text{処理後の板材の重量 (kg)} - \text{処理前の板材の重量 (kg)} \right) \times \text{溶液濃度 (\%)} / 100 \right) / \text{処理前の板材の体積 (m}^3\text{)} \quad (2.1)$$

処理後の板材は、室内で 3 日間以上風乾した後、強制循環式の恒温乾燥機を用いて、40～50℃の温度で含水率が 10%前後に至るまで乾燥した。乾燥後の処理板材は、薬剤固形分量 L を基に、表 2.1 における 3 種類の全乾密度水準から薬剤固形分量 50 kg/m<sup>3</sup> (35～55 kg/m<sup>3</sup>) , 100 kg/m<sup>3</sup> (75～110 kg/m<sup>3</sup>) , 150 kg/m<sup>3</sup> (125～165 kg/m<sup>3</sup>) の各範囲を 2 枚選定した。なお、上記の薬剤固形分量水準は、原田等の報告<sup>2)</sup>において、厚さ 15mm のスギ板材に、準不燃材料の性能を付与する最低薬剤固形分量が 160kg/m<sup>3</sup>であることを参考にして設定した。

燃焼試験では、上記の処理板材に加えて、前項で選定した無処理板材を用いた。燃焼試験に用いた無処理板材と処理板材の概要を表 2.5～2.7 に示す。それらの板材は重量を測定した後、図 2.3 に示すように、各板材から含水率測定用の 2 小片と燃焼試験用の 3 小片を採取した。燃焼試験用小片は、可能な限り節の少ない場所をから採取した。含水率測定用の 2 小片は、全乾法により含水率を算出して平均値を求めた。各処理板材は、式 (2.2) より、重量、体積及び含水率から全乾密度を求め、処理前の板材の全乾密度との差から薬剤固形分量を算出した。無処理板材及び処理板材から採取された燃焼試験用の小片は、各板材で最も節の少ない 1 小片を選定した。

$$\text{薬剤固形分量 (kg/m}^3\text{)} = \text{処理板材の全乾密度 (kg/m}^3\text{)} - \text{処理前の板材の全乾密度 (kg/m}^3\text{)} \quad (2.2)$$

$$\text{処理板材の全乾密度 (kg/m}^3\text{)} = \text{処理板材の全乾重量 (kg)} / \text{処理前の板材の体積 (m}^3\text{)}$$

$$\text{処理板材の全乾重量 (kg)} = \text{処理板材の重量 (kg)} / (1 + \text{処理板材の含水率 (\%)} / 100)$$

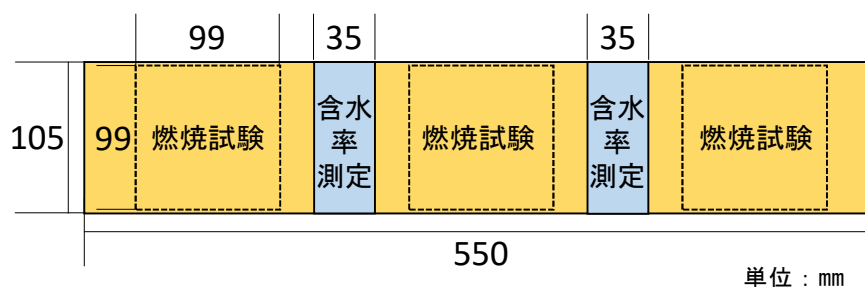


図 2.3 試験用小片の採取

表 2.5 燃焼試験に用いた板材の概要（厚さ 12mm）

薬剤 固形分量 水準	板材の 全乾密度 水準 <sup>a)</sup>	試験体	処理板材 の番号		処理前の 全乾密度 (kg/m <sup>3</sup> )	薬剤 固形分量L (kg/m <sup>3</sup> )	薬剤 固形分量 (kg/m <sup>3</sup> )
無処理	低	12-0L-1	4	2	338	—	—
		12-0L-2	28	3	311	—	—
	中	12-0M-1	3	3	352	—	—
		12-0M-2	18	3	378	—	—
	高	12-0H-1	16	3	420	—	—
		12-0H-2	26	1	390	—	—
50kg/m <sup>3</sup> (35~55kg/m <sup>3</sup> )	低	12-50L-1	9	1	338	49	42
		12-50L-2	28	1	314	53	49
	中	12-50M-1	7	2	368	49	47
		12-50M-2	7	3	358	51	46
	高	12-50H-1	9	2	391	48	42
		12-50H-2	18	2	402	49	46
100kg/m <sup>3</sup> (75~110kg/m <sup>3</sup> )	低	12-100L-1	4	3	334	104	99
		12-100L-2	11	3	315	102	97
	中	12-100M-1	15	3	360	97	87
		12-100M-2	20	2	366	102	93
	高	12-100H-1	16	2	392	94	88
		12-100H-2	24	3	405	97	92
150kg/m <sup>3</sup> (125~165kg/m <sup>3</sup> )	低	12-150L-1	21	1	330	143	138
		12-150L-2	28	2	318	170	164
	中	12-150M-1	9	3	355	141	133
		12-150M-2	15	2	363	151	141
	高	12-150H-1	6	2	396	143	138
		12-150H-2	18	1	392	161	154

a) 範囲は表 2.1 に示す

表 2.6 燃焼試験に用いた板材の概要（厚さ 15mm）

薬剤 固形分量 水準	板材の 全乾密度 水準 <sup>a)</sup>	試験体	処理板材 の番号		処理前の 全乾密度 (kg/m <sup>3</sup> )	薬剤 固形分量L (kg/m <sup>3</sup> )	薬剤 固形分量 (kg/m <sup>3</sup> )
無処理	低	15-0L-1	5	2	337	—	—
		15-0L-2	27	1	314	—	—
	中	15-0M-1	20	2	353	—	—
		15-0M-2	22	2	379	—	—
	高	15-0H-1	11	2	419	—	—
		15-0H-2	19	2	391	—	—
50kg/m <sup>3</sup> (35~55kg/m <sup>3</sup> )	低	15-50L-1	4	2	329	48	45
		15-50L-2	6	2	337	48	42
	中	15-50M-1	9	2	366	49	43
		15-50M-2	1	2	362	51	44
	高	15-50H-1	18	1	402	50	44
		15-50H-2	12	3	418	44	37
100kg/m <sup>3</sup> (75~110kg/m <sup>3</sup> )	低	15-100L-1	4	1	326	101	92
		15-100L-2	4	3	330	96	92
	中	15-100M-1	10	3	376	94	86
		15-100M-2	24	3	365	103	99
	高	15-100H-1	22	3	416	95	91
		15-100H-2	29	2	391	93	90
150kg/m <sup>3</sup> (125~165kg/m <sup>3</sup> )	低	15-150L-1	30	1	333	156	142
		15-150L-2	30	3	332	159	144
	中	15-150M-1	21	3	371	155	148
		15-150M-2	23	1	370	154	147
	高	15-150H-1	7	1	411	138	129
		15-150H-2	19	1	394	160	153

a) 範囲は表 2.1 に示す

表 2.7 燃焼試験に用いた板材の概要（厚さ 18mm）

薬剤 固形分量 水準	板材の 全乾密度 水準 <sup>a)</sup>	試験体	処理板材 の番号		処理前の 全乾密度 (kg/m <sup>3</sup> )	薬剤 固形分量L (kg/m <sup>3</sup> )	薬剤 固形分量 (kg/m <sup>3</sup> )
無処理	低	18-0L-1	21	1	339	—	—
		18-0L-2	27	3	320	—	—
	中	18-0M-1	5	3	376	—	—
		18-0M-2	30	1	350	—	—
	高	18-0H-1	8	2	429	—	—
		18-0H-2	19	3	385	—	—
50kg/m <sup>3</sup> (35~55kg/m <sup>3</sup> )	低	18-50L-1	6	3	323	53	48
		18-50L-2	28	3	330	50	39
	中	18-50M-1	7	2	363	49	42
		18-50M-2	28	1	355	50	43
	高	18-50H-1	11	1	418	50	48
		18-50H-2	18	3	404	48	41
100kg/m <sup>3</sup> (75~110kg/m <sup>3</sup> )	低	18-100L-1	2	2	327	113	106
		18-100L-2	3	3	325	86	78
	中	18-100M-1	7	1	354	113	100
		18-100M-2	17	3	360	102	92
	高	18-100H-1	18	2	415	103	94
		18-100H-2	19	1	399	102	91
150kg/m <sup>3</sup> (125~165kg/m <sup>3</sup> )	低	18-150L-1	22	3	335	137	129
		18-150L-2	27	1	333	162	151
	中	18-150M-1	10	3	353	158	144
		18-150M-2	17	1	357	147	134
	高	18-150H-1	11	2	408	155	145
		18-150H-2	19	2	395	147	141

a) 範囲は表 2.1 に示す

## 2.3 実験方法

### 2.3.1 燃焼試験

燃焼試験は、指定性能評価機関の防耐火性能試験・評価業務方法書<sup>3)</sup>の準不燃性能試験方法に従い、発熱性試験とした。試験前の試験体は、温度 23°C、湿度 50%RH に設定した恒温恒湿装置内において、24 時間の質量変化率が 0.1%未満になるまで養生した。

装置は、コーンカロリー計試験装置 (Fire Testing Technology Ltd. ,UK) を用いた。装置の概略図を図 2.4 に示す。試験体は、側面と裏面を厚さ 25 $\mu$ m のアルミニウム箔で覆った後、密度 64kg/m<sup>3</sup> セラミックブランケットを敷きつめた付属のホルダーに設置し、その上に 94×94mm の開口を設けた押さえ枠を被せた。試験体は、装置に水平方向に設置し、加熱方向を上方からとした。試験体への加熱は、強度を 50kW/m<sup>2</sup> とし、時間を準不燃材料の評価時間である 10 分間とした。加熱開始時には、試験体の加熱面の中心部上方に点火用プラグによる口火を与えた。

加熱中は、リングサンプラーから採取した排気ガスを分析装置に送り酸素、二酸化炭素及び一酸化炭素の濃度を測定するとともに、ダクト内の排気ガスの温度及び差圧の測定を 2 秒以内の間隔で行い、業務方法書に基づき式 (2.3) に基づき単位面積当たりの発熱速度及びその積算値である総発熱量を算出した。また、加熱中は、装置付属のロードセルにより試験体の質量を 2 秒以内の間隔で測定し、加熱前後の質量差から燃焼量を算出した。更に、加熱中の試験体は、有炎燃焼の発生状況を着火時間及び消火時間として、ストップウォッチで計測した。加熱終了後は、試験体に有害な変形等に判断される裏面まで貫通する亀裂・穴の有無を確認した。また、加熱後の試験体において、寸法が押さえ枠の開口部の一辺 94mm よりも小さくなった場合も有害な変形等とした。

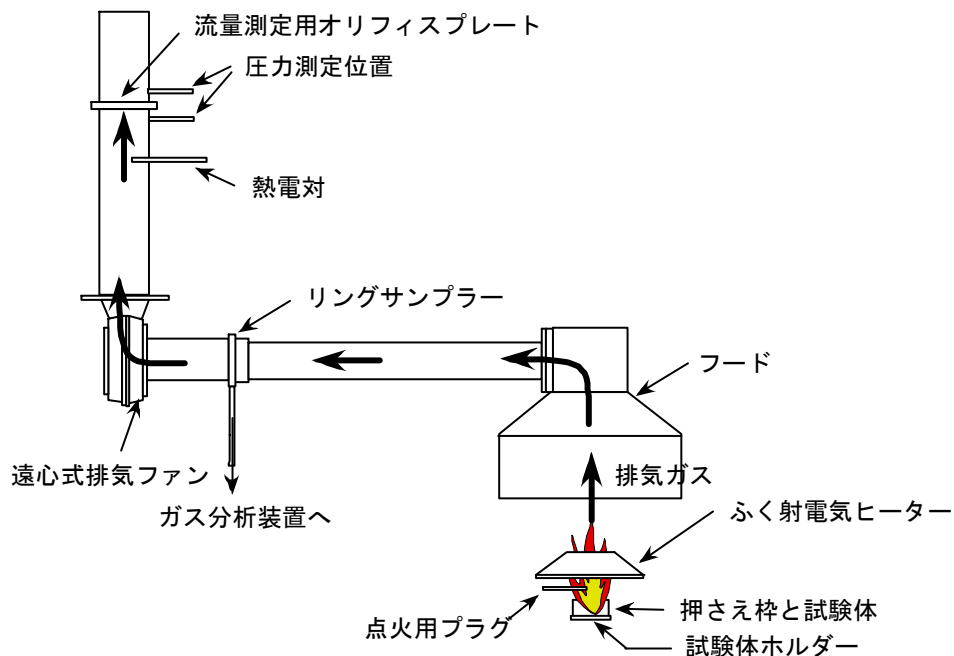


図 2.4 コーンカロリー計試験装置の概略図

単位面積当たりの発熱速度  $\dot{q}_A(t)$  は、以下の式に従って算出した。

$$\dot{q}_A(t) = \dot{q}(t) / A_s \quad (2.3)$$

$A_s$  : 試験体の初期の暴露面積 (0.0088m<sup>2</sup>)

発熱速度  $\dot{q}(t)$  の算出は、以下の式で算出した。

$$\dot{q}(t) = 1.10EX^{a_{O_2}} \left[ \frac{\Phi - \left( \frac{E_{CO} - E}{2E} \right) (1 - \Phi) X_{CO} / X_{O_2}}{(1 - \Phi) + 1.105 \Phi} \right] \dot{m}_e$$

$E$  : 消費した酸素の単位質量あたりの燃焼熱 ( $\Delta h_c / r_0$ ) (MJ/kg)

( $\Delta h_c / r_0$  は  $13.1 \times 10^3$  kJ/kg)

$X^{a_{O_2}}$  : 大気中の酸素のモル分率

$\Phi$  : 酸素消費係数

$E_{CO}$  : 一酸化炭素生成時に消費された酸素の単位消費量当たりの燃焼熱 (MJ/kg)

$X_{CO}$  : 一酸化炭素分析計の指示値 (モル分率)

$X_{O_2}$  : 酸素分析計の指示値 (モル分率)

$\dot{m}_e$  : 排気ダクト内の質量流量 (kg/s)

酸素消費係数  $\Phi$  は以下の式に従って算出した。

$$\Phi = \frac{X^{0_{O_2}} (1 - X_{CO_2} - X_{CO}) - X_{O_2} (1 - X^{0_{CO_2}})}{X^{0_{O_2}} (1 - X_{CO_2} - X_{CO} - X_{O_2})}$$

$X^{0_{O_2}}$  : 酸素分析計の指示値の初期値 (モル分率)

$X^{0_{CO_2}}$  : 二酸化炭素分析計の指示値の初期値 (モル分率)

$X_{CO_2}$  : 二酸化炭素分析計の指示値 (モル分率)

排気ダクト内の質量流量  $\dot{m}_e$  は、以下の式に従って算出した。

$$\dot{m}_e = C \sqrt{\frac{\Delta p}{T_e}}$$

$C$  : オリフィス係数 (m<sup>1/2</sup>g<sup>1/2</sup>K<sup>1/2</sup>)

$\Delta p$  : オリフィスプレート流量計の差圧 (Pa)

$T_e$  : 排気ダクト内のガスの絶対温度 (K)



## 2.4 結果と考察

燃焼試験の結果を表 2.8～2.10 に示す。

### 2.4.1 発熱速度の推移

各厚さの試験体について、難燃剤の注入処理による発熱速度の変化を図 2.5～2.7 に示す。

無処理試験体は、加熱後 10～20 秒に着火し、それに伴い発熱速度にピーク（以下、1st ピークとする）を生じた。その後の発熱速度は、低下してほぼ一定の値で推移し、厚さ 12mm では 260 秒前後、厚さ 15mm では 340 秒前後、厚さ 18mm では 425 秒前後から増加し、厚さ 12mm 及び 15mm では再びピーク（以下、2nd ピークとする）が生じた。

無処理試験体の 2nd ピーク発生時間は、厚さ 15mm が厚さ 12mm よりも遅くなった。既往の報告<sup>4)</sup>では、発熱速度の 2nd ピークは、試験体の木材の非加熱面が断熱されている場合において、非加熱面まで燃焼が達した際に発生するとされている。木材の非加熱面が燃焼に至る時間は、厚さに応じて遅くなるため、上記の厚さ 12mm 及び 15mm のように厚さ間に 2nd ピーク発生時間の差が現れる。また、厚さ 18mm の無処理試験体は、厚さ 15mm よりも更に 2nd ピーク発生時間が遅く、中密度水準と高密度水準では 2nd ピークが現れなかった。

また、木材の燃焼は、2nd ピーク終了を境に炎を生じる有炎燃焼から炭の燃焼である赤熱燃焼へと移行するといわれている<sup>4)</sup>。加熱中における燃焼状態の観察結果では、2nd ピークを生じた厚さ 12mm の全試験体と厚さ 15mm の 3 試験体は、加熱終了時までには有炎燃焼から赤熱燃焼に移行しており、同様の関係が確認された。

一方、処理試験体は、薬剤固形分量の増加とともに着火時間が遅くなり、有炎燃焼を生じる時間も短くなった。発熱速度は、薬剤固形分量の増加に伴い加熱時間全体を通して低下し、1st ピークと 2nd ピークが不明瞭になった。

表 2.8 発熱性試験の結果（厚さ 12mm）

薬剤固形分量水準	板材の全乾密度水準	試験体	最高発熱速度 (kW/m <sup>2</sup> )	総発熱量 (MJ/m <sup>2</sup> )		有害な変形等の有無 <sup>a)</sup>	有炎燃焼の発生 (秒)					
				5分間	10分間		1回目	2回目	3回目	4回目		
							着火	消火	着火	消火	着火	消火
無処理	低	12-0L-1	192	25.1	50.1	×	12	461				
		12-0L-2	215	29.9	49.3	×	10	408				
	中	12-0M-1	224	26.8	54.4	×	14	445				
		12-0M-2	256	26.0	54.3	×	12	437				
	高	12-0H-1	229	27.3	63.8	×	20	534				
		12-0H-2	236	27.8	59.2	×	13	479				
50kg/m <sup>3</sup>	低	12-50L-1	95	12.1	28.0	×	21					
		12-50L-2	73	5.4	17.2	×	14	20	63	215	312	515
	中	12-50M-1	60	2.6	14.8	×	166					
		12-50M-2	73	2.2	17.7	○	306					
	高	12-50H-1	85	10.8	25.5	×	31					
		12-50H-2	89	8.5	26.1	×	14					
100kg/m <sup>3</sup>	低	12-100L-1	11	1.2	3.9	○	無し					
		12-100L-2	21	1.8	5.8	×	150	196	346	361	501	
	中	12-100M-1	20	1.0	3.9	○	無し					
		12-100M-2	63	1.2	8.0	×	499					
	高	12-100H-1	70	2.7	14.4	○	171	178	309			
		12-100H-2	45	1.7	9.9	○	391	398	413			
150kg/m <sup>3</sup>	低	12-150L-1	9	1.1	3.2	○	無し					
		12-150L-2	6	0.5	1.5	○	無し					
	中	12-150M-1	61	1.1	9.7	○	144	151	319			
		12-150M-2	12	1.0	3.4	○	無し					
	高	12-150H-1	14	1.0	3.2	○	無し					
		12-150H-2	8	0.6	2.0	○	無し					

a) 有害な変形等：裏面まで貫通する亀裂穴、リテーナーフレームの開口部94mmより小さな収縮。○：無し。×：有り

表 2.9 発熱性試験の結果 (厚さ 15mm)

薬剤固形分量水準	板材の全乾密度水準	試験体	最高発熱速度 (kW/m <sup>3</sup> )	総発熱量 (MJ/m <sup>2</sup> )		有害な変形等の有無 <sup>a)</sup>	有炎燃焼の発生 (秒)											
				5分間	10分間		1回目		2回目		3回目		4回目					
無処理	低	15-0L-1	222	25.2	58.4	×	着火	消火	着火	消火	着火	消火	着火	消火	着火	消火		
		15-0L-2	180	24.3	53.8	×	11	556										
	中	15-0M-1	212	25.8	61.0	×	11	542										
		15-0M-2	206	23.1	57.9	○	15	575										
	高	15-0H-1	245	27.1	68.6	×	14											
		15-0H-2	210	23.3	58.8	×	15											
50kg/m <sup>3</sup>	低	15-50L-1	75	8.8	24.6	○	8	233	294									
		15-50L-2	75	4.7	20.1	○	52	187	317									
	中	15-50M-1	74	4.9	16.9	○	160											
		15-50M-2	77	5.7	19.0	○	51											
	高	15-50H-1	59	5.2	15.3	○	87	96	136	361	424							
		15-50H-2	106	12.2	31.4	○	16											
100kg/m <sup>3</sup>	低	15-100L-1	14	2.6	5.8	○	189	346										
		15-100L-2	11	1.4	3.9	○	無し											
	中	15-100M-1	11	1.2	3.7	○	無し											
		15-100M-2	25	1.5	4.8	○	574											
	高	15-100H-1	30	3.3	7.8	○	141	165	183	212	511	517	553					
		15-100H-2	32	2.0	8.5	○	351											
150kg/m <sup>3</sup>	低	15-150L-1	8	0.8	2.5	○	無し											
		15-150L-2	10	0.9	2.9	○	無し											
	中	15-150M-1	8	0.8	2.5	○	無し											
		15-150M-2	9	1.0	2.7	○	無し											
	高	15-150H-1	8	1.1	2.9	○	無し											
		15-150H-2	9	0.8	2.5	○	無し											

a) 有害な変形等：裏面まで貫通する亀裂穴、リテーナーフレイムの開口部94mmより小さな収縮、○：無し。×：有り

表 2.10 発熱性試験の結果 (厚さ 18mm)

薬剤固形分量水準	板材の全乾密度水準	試験体	最高発熱速度 (kW/m <sup>2</sup> )	総発熱量 (MJ/m <sup>3</sup> )		有害な変形等の有無 <sup>a)</sup>	有炎燃焼の発生 (秒)			
				5分間	10分間		1回目 着火 消火	2回目 着火 消火	3回目 着火 消火	4回目 着火 消火
無処理	低	18-0L-1	211	26.5	66.1	×	15			
		18-0L-2	201	25.8	61.6	×	13			
	中	18-0M-1	182	22.3	50.3	○	12			
		18-0M-2	187	23.0	50.2	○	16			
	高	18-0H-1	192	22.6	50.5	○	13			
		18-0H-2	227	24.6	57.5	○	12			
50kg/m <sup>3</sup>	低	18-50L-1	51	2.2	11.8	○	152	161	281	
		18-50L-2	64	5.4	16.0	○	173			
	中	18-50M-1	58	9.3	21.9	○	44			
		18-50M-2	68	6.5	19.1	○	152			
	高	18-50H-1	44	2.4	9.6	○	354			
		18-50H-2	49	7.0	16.8	○	63			
100kg/m <sup>3</sup>	低	18-100L-1	9	1.3	3.5	○	無し			
		18-100L-2	10	1.2	3.6	○	無し			
	中	18-100M-1	10	1.1	3.3	○	無し			
		18-100M-2	9	1.2	3.3	○	無し			
	高	18-100H-1	12	1.5	4.0	○	無し			
		18-100H-2	19	1.2	4.2	○	278	397		
150kg/m <sup>3</sup>	低	18-150L-1	8	0.7	2.4	○	無し			
		18-150L-2	8	0.5	2.1	○	無し			
	中	18-150M-1	6	0.3	1.3	○	無し			
		18-150M-2	7	0.8	2.1	○	無し			
	高	18-150H-1	6	0.6	1.6	○	無し			
		18-150H-2	7	0.6	1.8	○	無し			

a) 有害な変形等：裏面まで貫通する亀裂穴，リテーナーフレームの開口部94mmより小さな収縮，○：無し。×：有り

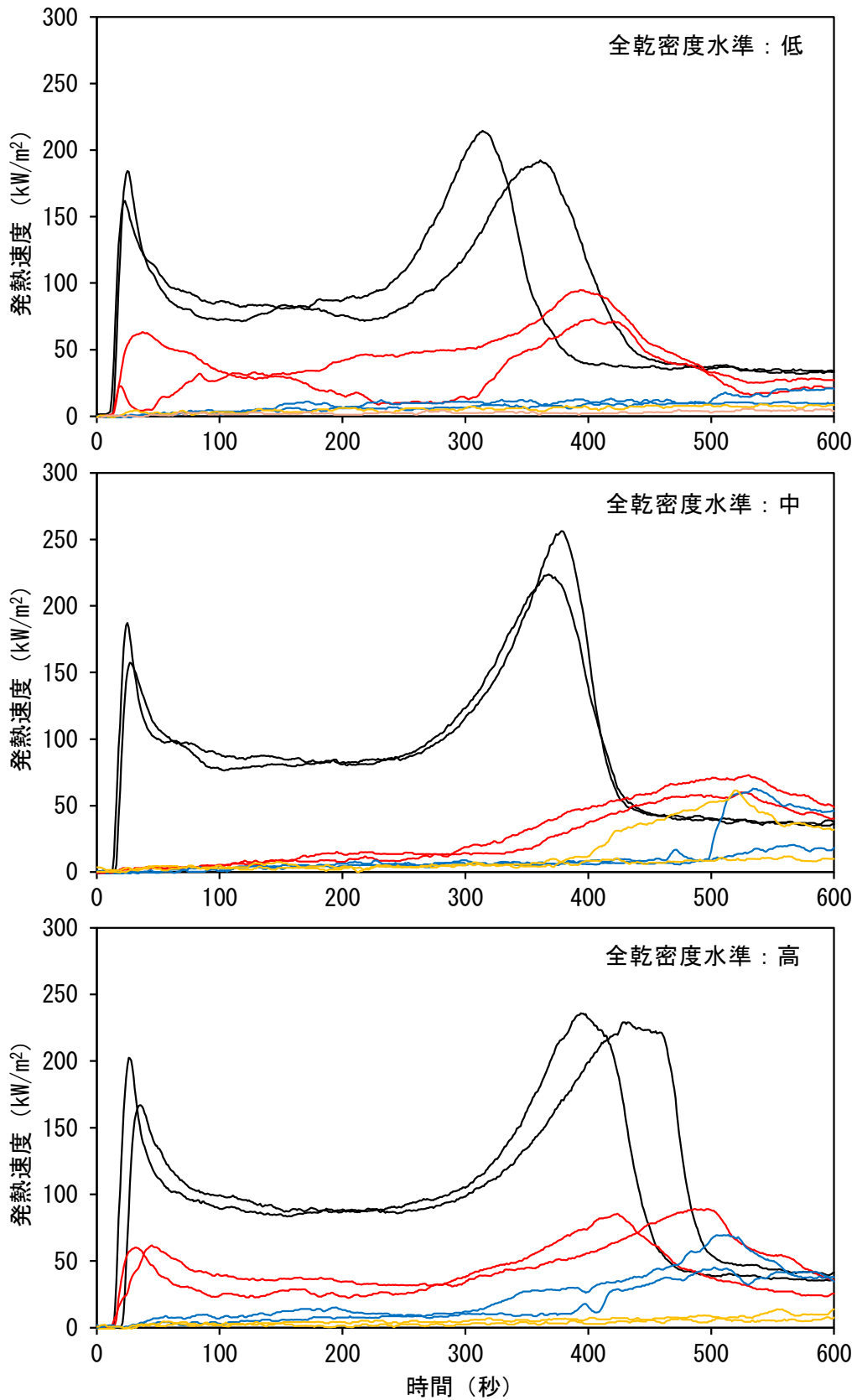


図 2.5 難燃剤の注入処理によるスギ板材の発熱速度の変化 (厚さ 12mm)

凡例： — 無処理, — 薬剤固形分量水準 50kg/m<sup>3</sup>,  
 — 薬剤固形分量水準 100kg/m<sup>3</sup>, — 薬剤固形分量水準 150kg/m<sup>3</sup>

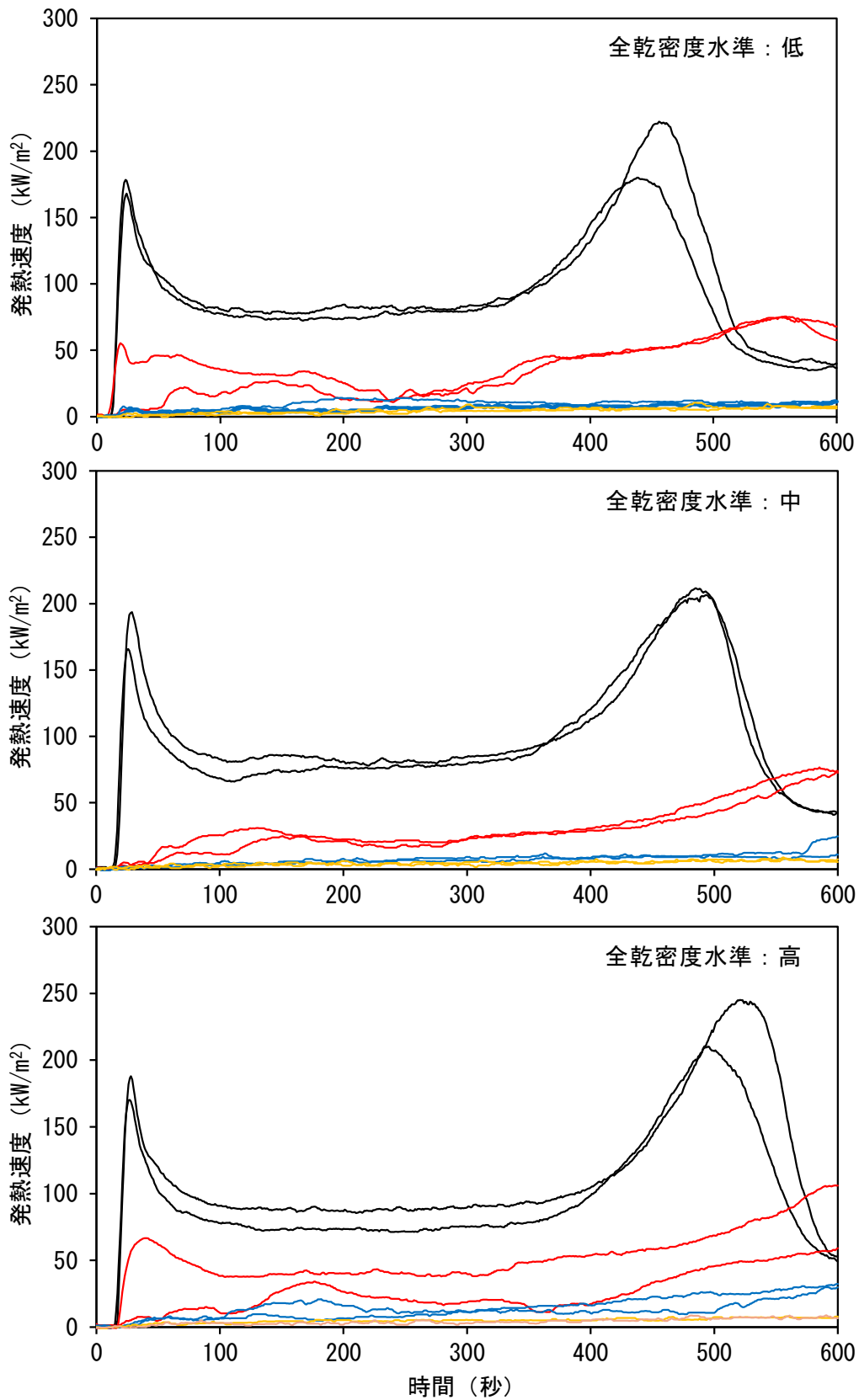


図 2.6 難燃剤の注入処理によるスギ板材の発熱速度の変化 (厚さ 15mm)

凡例： — 無処理, — 薬剤固形分量水準 50kg/m<sup>3</sup>,  
 — 薬剤固形分量水準 100kg/m<sup>3</sup>, — 薬剤固形分量水準 150kg/m<sup>3</sup>

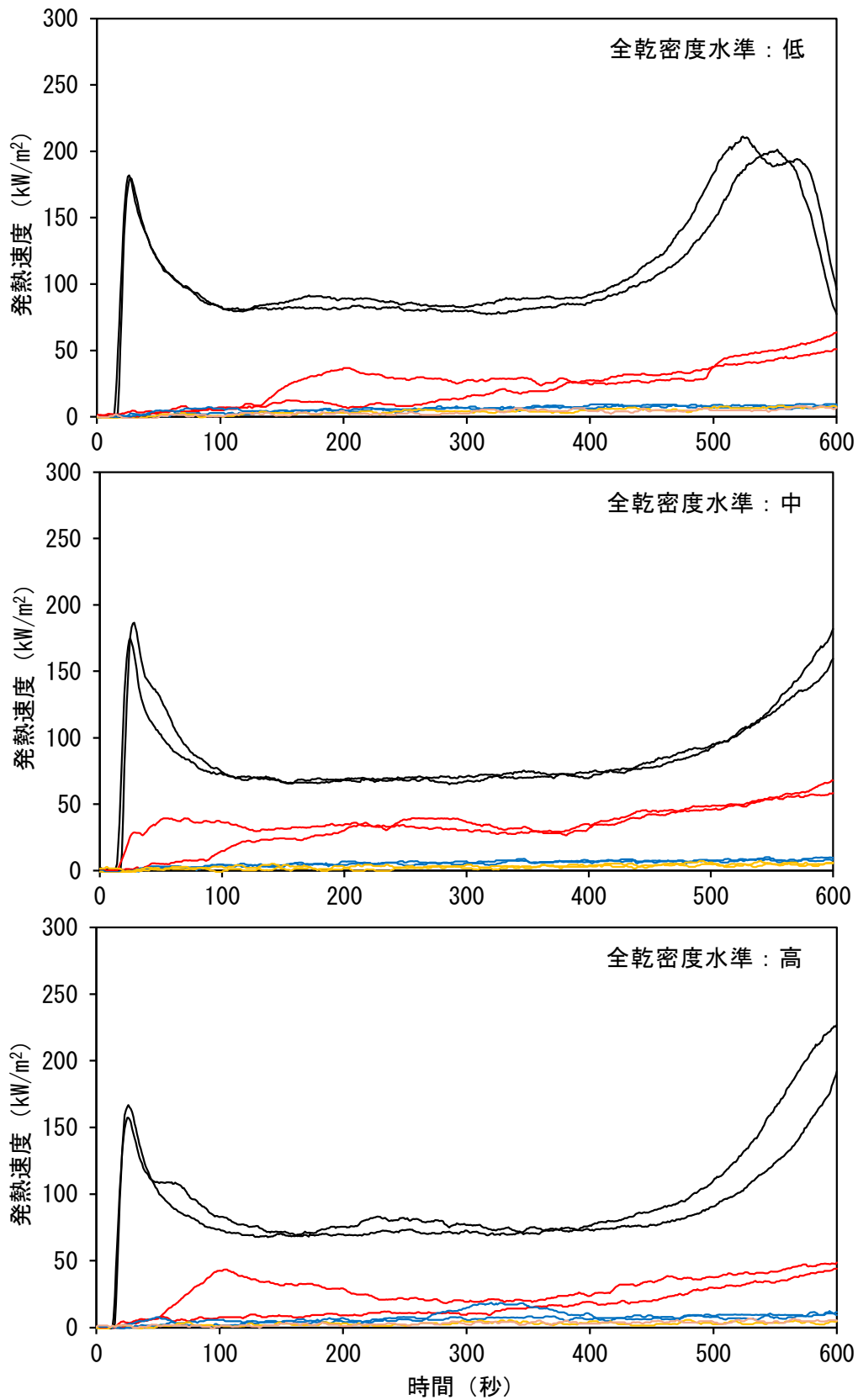


図 2.7 難燃剤の注入処理によるスギ板材の発熱速度の変化 (厚さ 18mm)

凡例： — 無処理, — 薬剤固形分量水準 50kg/m<sup>3</sup>,  
 — 薬剤固形分量水準 100kg/m<sup>3</sup>, — 薬剤固形分量水準 150kg/m<sup>3</sup>

## 2.4.2 最高発熱速度

薬剤固形分量と最高発熱速度の関係を、試験体の厚さごとに図 2.8~2.10 に示す。全ての厚さの試験体の最高発熱速度は、既往の報告<sup>2)</sup>と同様に、薬剤固形分量の増加とともに低下する傾向が見られた。最高発熱速度の低下は、無処理から薬剤固形分量 50kg/m<sup>3</sup>前後までは急激であったが、薬剤固形分量が大きくなるに従い緩やかになった。高瀬等<sup>5)</sup>は、難燃処理木材の薬剤固形分量の増加に対する最高発熱速度及び総発熱量の低下を指数関数的と位置づけ、木材の厚さ方向における薬剤固形分量の分布の影響を考察した。それらを参考にして、薬剤固形分量と最高発熱速度の関係について、指数関数を想定した回帰分析を行った。指数モデルの推定は、統計解析プログラム R を用いて非線形最小二乗法により行った。算出された回帰曲線を図中に併記する。また、指数回帰式の推定結果を表 2.11 に示す。

算出された回帰式は、2 つの係数ともに有意水準 0.1%において有意差が認められた。また、各厚さの試験体の実測データは、回帰曲線付近に分布しており指数回帰式が薬剤固形分量と最高発熱速度の関係を表していることが分かる。

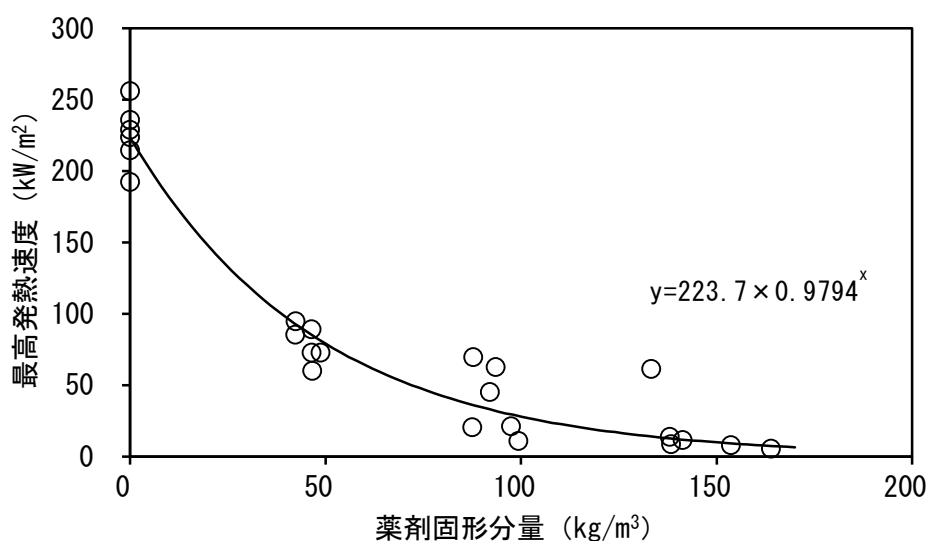


図 2.8 薬剤固形分量と最高発熱速度の関係 (厚さ 12mm)



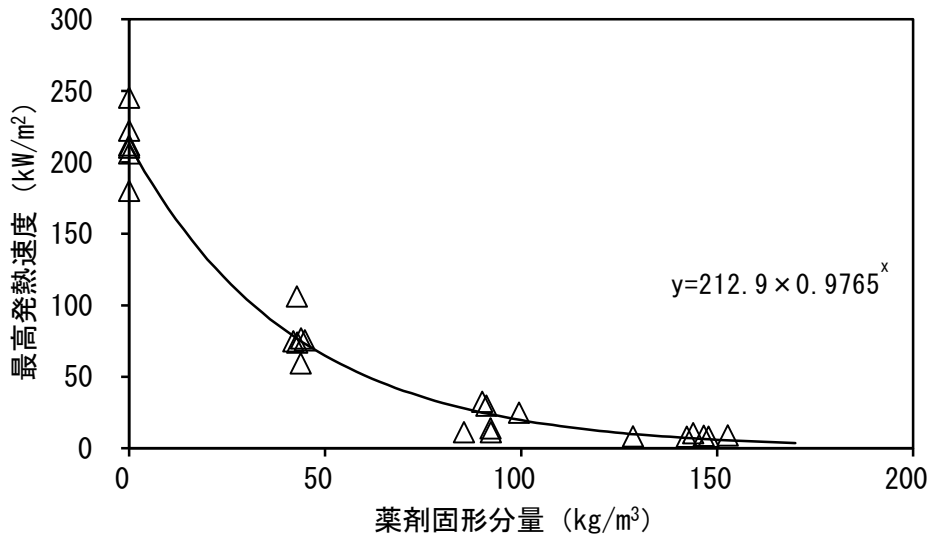


図 2.9 薬剤固形分量と最高発熱速度の関係（厚さ 15mm）

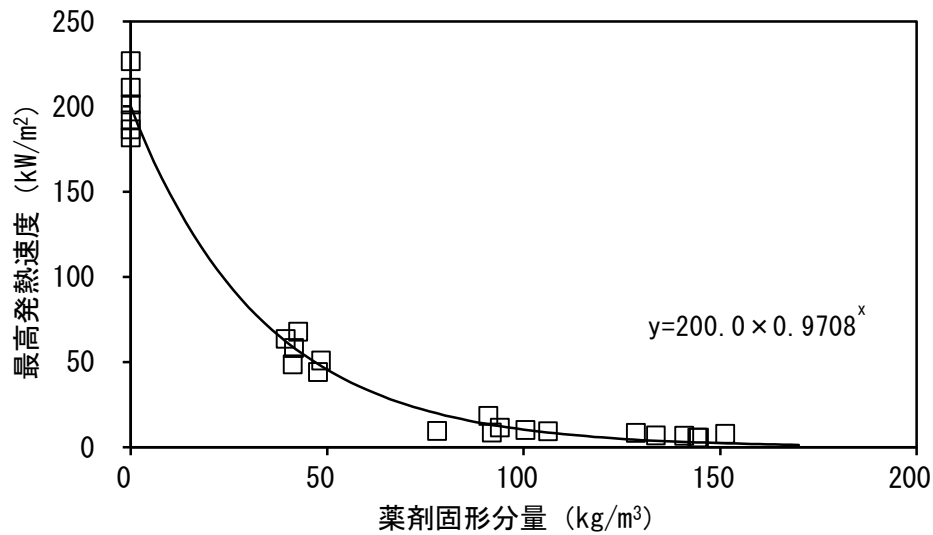


図 2.10 薬剤固形分量と最高発熱速度の関係（厚さ 18mm）

表 2.11 非線形最小二乗法による指数回帰式の推定結果

モデル式	厚さ	係数	推定値	標準誤差	t値 <sup>a)</sup>	p値 <sup>b)</sup>	残差標準誤差	自由度
$y = a \times b^x$	12mm	a	223.67	7.86	28.45	$2 \times 10^{-16}***$	19.46	22
		b	0.9794	0.0016	612.22	$2 \times 10^{-16}***$		
	15mm	a	212.90	5.51	38.61	$2 \times 10^{-16}***$	13.60	22
		b	0.9765	0.0014	693.39	$2 \times 10^{-16}***$		
	18mm	a	200.00	3.81	52.52	$2 \times 10^{-16}***$	9.35	22
		b	0.9708	0.0014	684.62	$2 \times 10^{-16}***$		

n=24, a) 「母集団において切片が0」「母集団において当該偏回帰係数が0」を帰無仮説にした t 検定の t 値, b) t 分布に基づく確率（両側）, \*\*\*: 有意水準 0.1%において有意差あり

次に試験体の薬剤固形分量水準ごとに、最高発熱速度への板材の厚さ及び全乾密度の影響を考察する。

無処理試験体について、最高発熱速度、厚さ及び全乾密度間の相関行列を表 2.12 示す。最高発熱速度は、厚さとの間のみ有意水準 5%において有意な負の相関が認められた。無処理試験体の発熱速度の推移を図 2.11 に示す。発熱速度は、2nd ピークで最も高くなり、ほとんどの試験体がこの時に最高発熱速度を記録した。2.4.1 で述べたように、発熱速度の 2nd ピークは、板材の厚さの増加とともに発生時間が遅くなり、厚さ 18mm では 6 体のうち 4 体が加熱時間内に 2nd ピークを生じなかった。これにより、厚さ 18mm の試験体の最高発熱速度は全体的に低下し、厚さとの間の負の相関に寄与したと考えられた。また、原田の報告<sup>1)</sup>では、無処理板材の発熱速度の推移において、2nd ピークの高さが厚さの増加とともに低下することが観察され、原因として 2nd ピーク前の発熱速度が低下するためとした。このことも上記の最高発熱速度と厚さ間の負の相関を生じさせた一因と考えられた。

表 2.12 最高発熱速度、厚さ及び全乾密度の相関行列（無処理試験体）

	相関係数			t値 <sup>a)</sup>			p値 <sup>b)</sup>		
	最高発熱速度	厚さ	全乾密度	最高発熱速度	厚さ	全乾密度	最高発熱速度	厚さ	全乾密度
最高発熱速度	1.0000			—			—		
厚さ	-0.4939	1.0000		-2.2719	—		0.0372*	—	
全乾密度	0.3723	0.0152	1.0000	1.6043	0.0606	—	0.1282	0.9524	—

n=18, a) 相関係数から算出した t の値, b) t 分布に基づく確率 (両側), \*: 有意水準 5%において有意差あり, \*\*: 有意水準 1%において有意差あり

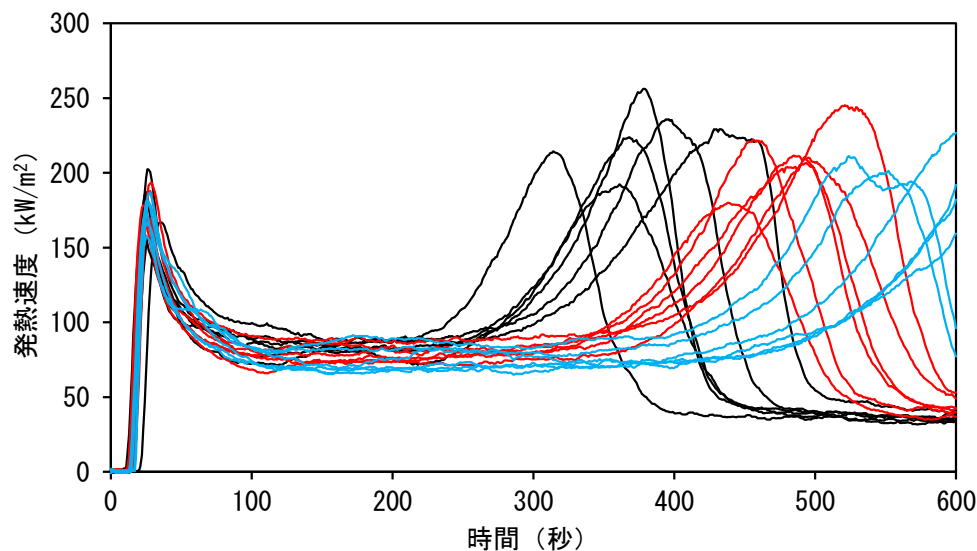


図 2.11 無処理試験体の発熱速度の推移

凡例： — 厚さ 12mm, — 厚さ 15mm, — 厚さ 18mm

次に処理試験体について、薬剤固形分量水準ごとの最高発熱速度、厚さ及び全乾密度間の相関行列を表 2.13 に示す。薬剤固形分量水準 50kg/m<sup>3</sup> と 100kg/m<sup>3</sup> の処理試験体は、最高発熱速度と厚さの間に有意水準 1% で有意な負の相関が認められた。

薬剤固形分量水準ごとに、処理試験体の発熱速度の推移を図 2.12~2.14 に示す。薬剤固形分量水準 50kg/m<sup>3</sup> の処理試験体の発熱速度は、加熱時間を通して無処理試験体よりも低く推移したが、無処理試験体と同様に有炎燃焼を生じ、緩やかであるが発熱速度にピークを生じた。それらの処理試験体の発熱速度の 2nd ピークは、無処理試験体と同様に厚さとともに発生時間が遅くなる傾向があり、厚さ 15mm の一部及び 18mm の全ての試験体では加熱時間内に 2nd ピークが現れなかった。このことから、薬剤固形分量水準 50kg/m<sup>3</sup> の処理試験体における厚さと最高発熱速度の負の相関は、無処理試験体と同様に 2nd ピークの遅延及び原田の報告<sup>1)</sup>における厚さに伴う 2nd ピークの低下によると考えられた。

薬剤固形分量水準 100kg/m<sup>3</sup> の処理試験体は、厚さ 12mm と 15mm の 4 体、厚さ 18mm の 1 体が有炎燃焼を生じた。ただし、それらの処理試験体の有炎燃焼は、無処理や薬剤固形分量水準 50kg/m<sup>3</sup> の試験体のように長時間継続することはなかった。有炎燃焼を生じた処理試験体の発熱速度の推移では、1st ピーク及び 2nd ピークが明確に認められず、一つのなだらかなピークが認められた。厚さ 12mm の処理試験体は、3 体が加熱後 500~550 秒後にピークが生じていた。厚さ 15mm の処理試験体の 3 体は、加熱後 350~500 秒後から発熱速度にピークに向かう増加傾向が見られ、厚さ 18mm では加熱時間中に発熱速度のピークは生じなかった。これらのことから、薬剤固形分量水準 100kg/m<sup>3</sup> の処理試験体における厚さと最高発熱速度の負の相関は、厚さの増加に伴い発熱速度ピークの発生時間が遅延し、加熱時間内から外れることが原因と考えられた。

一方、薬剤固形分量水準 150kg/m<sup>3</sup> の試験体は、厚さ 12mm の 12-150M-1 を除いて加熱中に有炎燃焼が発生しなかった。上記の 1 体を除く試験体の発熱速度は、3 種類の厚さとも加熱終了時まで同様の低い値で推移した。このため、薬剤固形分量水準 150kg/m<sup>3</sup> の処理試験体は、最高発熱速度に厚さの影響が現れなかった。また、有炎燃焼を生じた 12-150M-1 は、他の厚さ 12mm の処理試験体と薬剤固形分量に大差ないことから、板材内における難燃剤の分布状態が不均一であったことが原因として考えられた。

以上のように、スギ板材の加熱 10 分間の最高発熱速度は、厚さ 12~18mm において、既往の報告<sup>5)</sup>他と同様に薬剤固形分量の増加に伴い指数関数的に低下する関係が見られ、両者の間に回帰式を得ることができた。また、スギ板材の薬剤固形分量水準ごとに、最高発熱速度、厚さ及び全乾密度間で相関分析を行った結果、無処理、薬剤固形分量水準 50kg/m<sup>3</sup> 及び 100kg/m<sup>3</sup> の試験体は、最高発熱速度と厚さの間に有意な負の相関関係が認められた。この相関関係は、有炎燃焼による発熱速度のピークが厚さの増加に伴い発生時間が遅延し、加熱時間内から外れることが原因と考えられた。また、全乾密度は、今回の試験体の範囲 (310~420kg/m<sup>3</sup>) においては最高発熱速度への影響が見られなかった。

表 2.13 最高発熱速度、厚さ及び全乾密度の相関行列（処理試験体）

薬剤 固形分量 水準		相関係数			t値 <sup>a)</sup>			p値 <sup>b)</sup>		
		最高 発熱速度	厚さ	全乾密度	最高 発熱速度	厚さ	全乾密度	最高 発熱速度	厚さ	全乾密度
50kg/m <sup>3</sup>	最高発熱速度	1.0000			—			—		
	厚さ	-0.6076	1.0000		-3.0601	—		0.0075**	—	
	全乾密度	-0.0342	0.0485	1.0000	-0.1370	0.1943	—	0.8927	0.8484	—
100kg/m <sup>3</sup>	最高発熱速度	1.0000			—			—		
	厚さ	-0.6163	1.0000		-3.1301	—		0.0065**	—	
	全乾密度	0.4255	0.0187	1.0000	1.8806	0.0747	—	0.0784	0.9414	—
150kg/m <sup>3</sup>	最高発熱速度	1.0000			—			—		
	厚さ	-0.3741	1.0000		-1.6135	—		0.1262	—	
	全乾密度	-0.0549	0.0657	1.0000	-0.2201	0.2633	—	0.8286	0.7957	—

n=18, a)相関係数から算出したtの値, b)t分布に基づく確率(両側), \*:有意水準5%において有意差あり,  
\*\*:有意水準1%において有意差あり

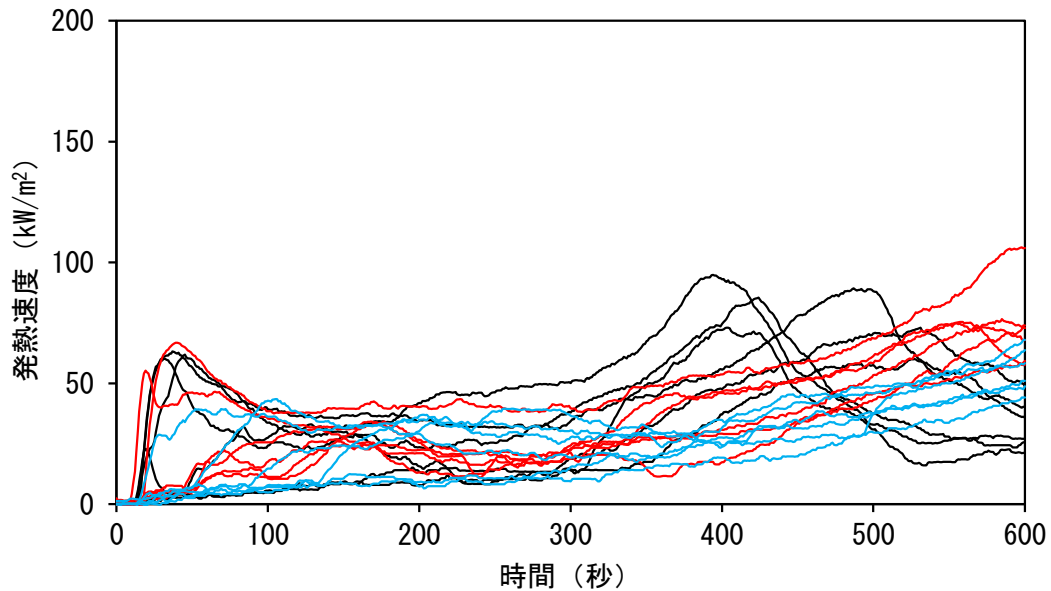


図 2.12 処理試験体の発熱速度の推移（薬剤固形分量水準 50kg/m<sup>3</sup>）

凡例： — 厚さ 12mm, — 厚さ 15mm, — 厚さ 18mm

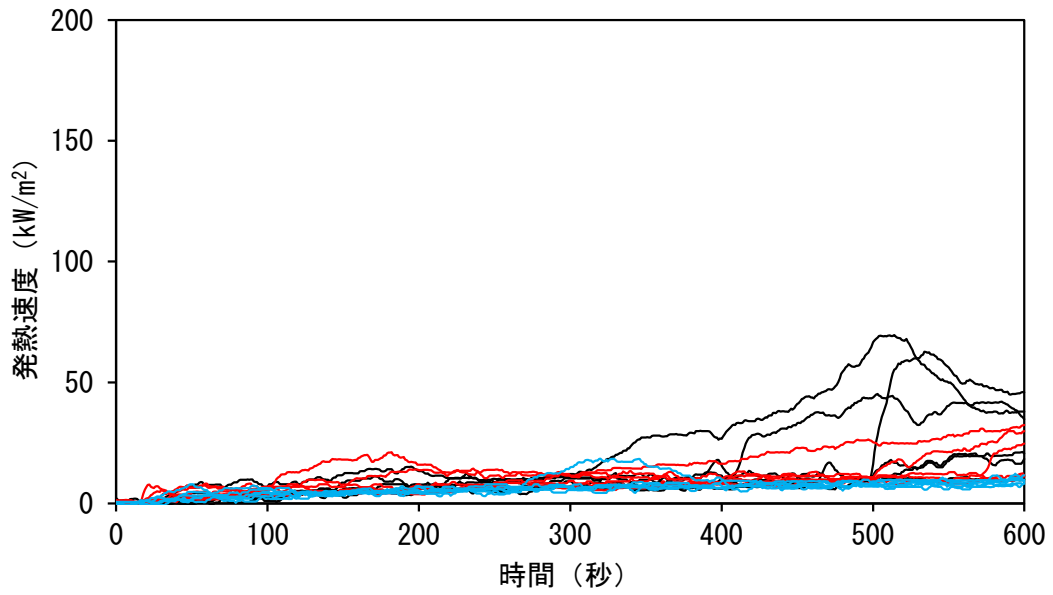


図 2.13 処理試験体の発熱速度の推移 (薬剤固形分量水準 100kg/m<sup>3</sup>)

凡例： — 厚さ 12mm, — 厚さ 15mm, — 厚さ 18mm

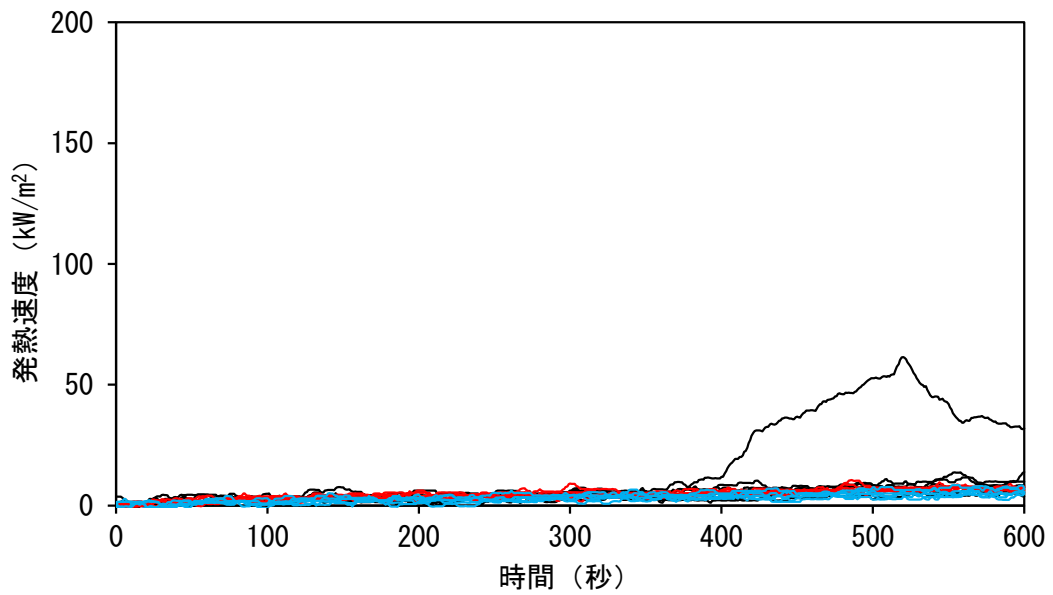


図 2.14 処理試験体の発熱速度の推移 (薬剤固形分量水準 150kg/m<sup>3</sup>)

凡例： — 厚さ 12mm, — 厚さ 15mm, — 厚さ 18mm

### 2.4.3 総発熱量

試験体の厚さごとに、薬剤固形分量と総発熱量の関係を図 2.15~2.17 に示す。全ての厚さの試験体の総発熱量は、既往の報告<sup>2)</sup>と同様に、薬剤固形分量の増加とともに低下する傾向が見られた。薬剤固形分量の増加に伴う総発熱量の低下は、最高発熱速度と同様に薬剤固形分量の低い水準では大きく、高い水準になるほど小さくなった。このことから、最高発熱速度と同様に、薬剤固形分量の増加に伴う総発熱量の低下を指数関数的と位置づけ、指数関数を想定した回帰分析を行った。指数モデルの推定は、2.4.2と同様に統計解析プログラム R を用いて非線形最小二乗法により行った。算出された回帰曲線を図中に併記する。また、指数回帰式の推定結果を表 2.14 に示す。

算出された回帰式は、2つの係数ともに有意水準 0.1%において有意差が認められた。また、実測したデータは、回帰曲線上に乗っており、回帰曲線が薬剤固形分量と総発熱量の関係を表していることが分かる。

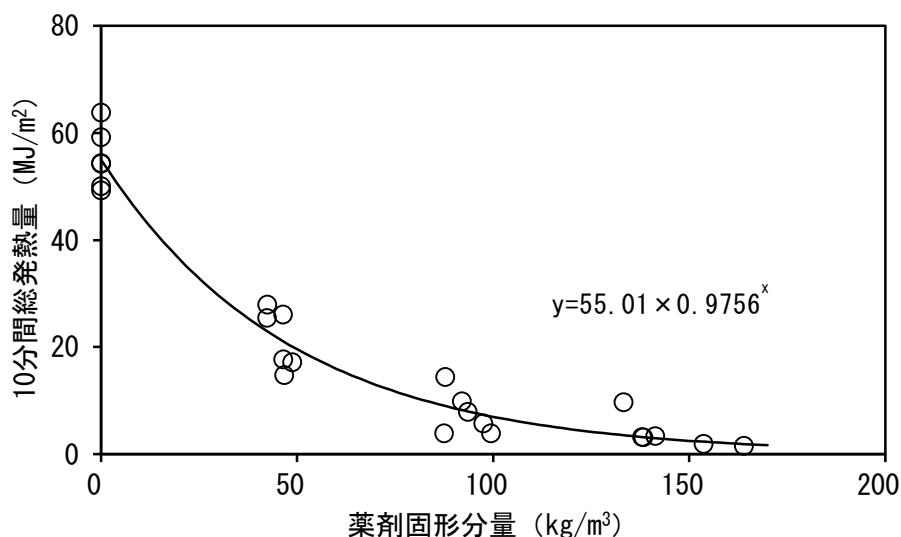


図 2.15 薬剤固形分量と 10 分間総発熱量の関係 (厚さ 12mm)

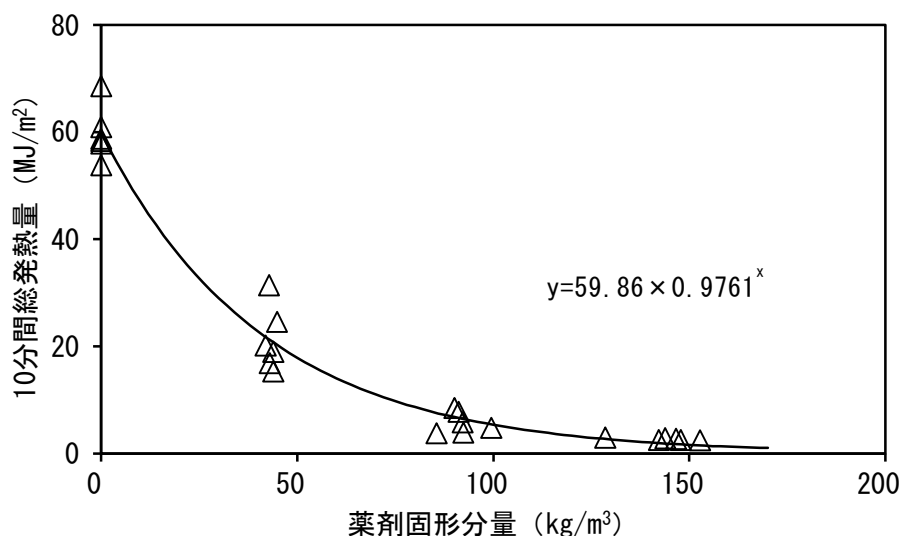


図 2.16 薬剤固形分量と 10 分間総発熱量の関係 (厚さ 15mm)

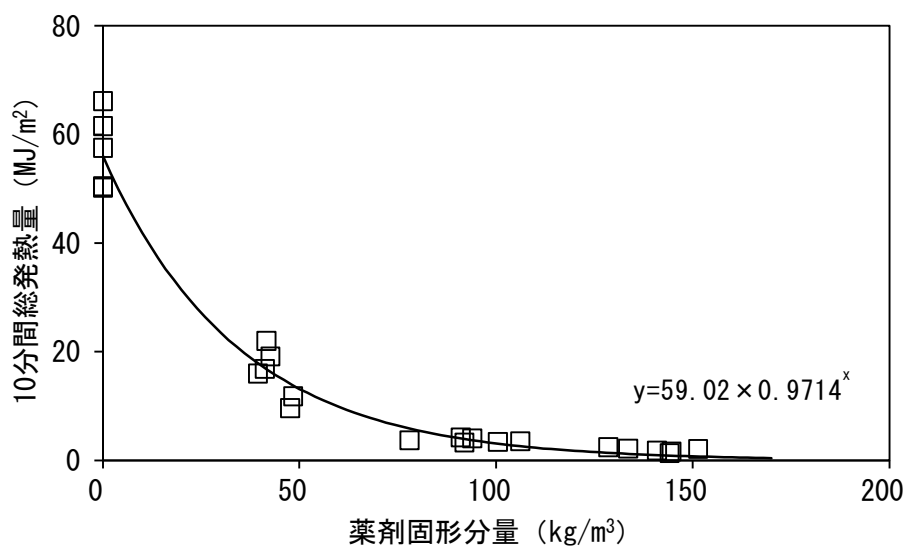


図 2.17 薬剤固形分量と 10 分間総発熱量の関係 (厚さ 18mm)

表 2.14 非線形回帰分析による指数回帰式の推定結果

モデル式	厚さ	係数	推定値	標準誤差	t値 <sup>a)</sup>	p値 <sup>b)</sup>	残差標準誤差	自由度
$y = a \times b^x$	12mm	a	55.01	1.66	33.10	$2 \times 10^{-16}***$	4.12	22
		b	0.9796	0.0014	720.10	$2 \times 10^{-16}***$		
	15mm	a	59.86	1.57	38.61	$2 \times 10^{-16}***$	3.87	22
		b	0.9761	0.0015	670.77	$2 \times 10^{-16}***$		
	18mm	a	56.02	1.55	36.14	$2 \times 10^{-16}***$	3.81	22
		b	0.9714	0.0020	487.40	$2 \times 10^{-16}***$		

n=18, a) 相関係数から算出した t の値, b) t 分布に基づく確率 (両側), \*: 有意水準 5%において有意差あり, \*\*: 有意水準 1%において有意差あり

次に薬剤固形分量水準ごとに、総発熱量への板材の厚さ及び全乾密度の影響を考察する。始めに無処理試験体について、総発熱量、厚さ及び全乾密度間の相関行列を表 2.15 に示す。無処理試験体の総発熱量は、厚さ及び全乾密度との間に有意な相関が認められず、厚さ及び全乾密度が影響しないと判断された。

無処理試験体の総発熱量の推移を図 2.18 に示す。総発熱量の推移は、図 2.11 の発熱速度の推移が反映されていた。厚さ 12mm の無処理試験体の総発熱量は、着火後に生じる発熱速度の 1st ピークにより加熱後 10～50 秒の範囲で増加した後、その後の発熱速度の低下及びほぼ一定の値での推移を反映して緩やかな直線状に増加した。その後、総発熱量は、発熱速度の 2nd ピークの発生により加熱後 270～380 秒において再び大きく増加し、2.4.1 で示したように赤熱燃焼の低い発熱速度に移行することで緩やかな増加となった。厚さ 15mm と 18mm の試験体は、加熱後 300 秒付近までは厚さ 12mm と同様に推移するが、厚さの増加により発熱速度の 2nd ピークの発生時間が遅延するため、総発熱量の急増する時間が厚さの増加とともに遅くなった。そのため、加熱時間内において、厚さ 15mm では赤熱燃焼による緩やかな総発熱量の増加期間が短くなり、厚さ 18mm では発熱速度の 2nd ピークによる総発熱量の増加までしか見られなかった。

以上のように、加熱時間内における無処理試験体の総発熱量の推移は、厚さ間で異なる挙動が見られた。表 2.15 において無処理試験体の総発熱量と厚さ間に相関関係が見られないのは、加熱終了時が、各厚さの総発熱量が同程度になる時間であったためと推察された。

表 2.15 10 分間総発熱量、厚さ及び全乾密度の相関行列（無処理試験体）

	相関係数			t 値 <sup>a)</sup>			P 値 <sup>b)</sup>		
	総発熱量	厚さ	全乾密度	総発熱量	厚さ	全乾密度	総発熱量	厚さ	全乾密度
総発熱量	1.0000			—			—		
厚さ	0.0589	1.0000		0.2359	—		0.8165	—	
全乾密度	0.2704	0.0152	1.0000	1.1234	0.0606	—	0.2779	0.9524	—

n=18, a) 相関係数から算出した t の値, b) t 分布に基づく確率 (両側), \*: 有意水準 5% において有意差あり, \*\*: 有意水準 1% において有意差あり

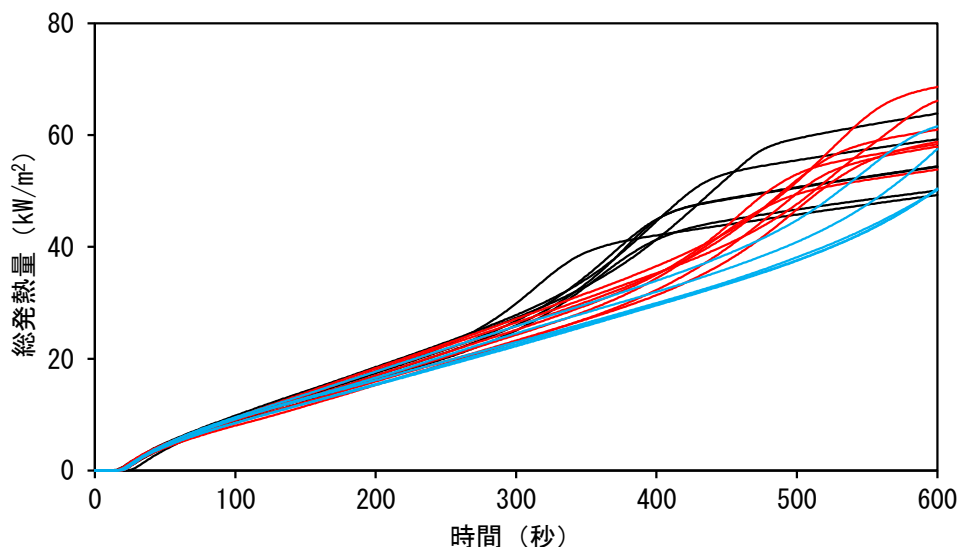


図 2.18 無処理試験体の総発熱量の推移

凡例： — 厚さ 12mm, — 厚さ 15mm, — 厚さ 18mm



次に処理試験体について、薬剤固形分量水準ごとに総発熱量、厚さ及び全乾密度間の相関行列を表 2.16 に示す。処理試験体は、薬剤固形分量水準 100kg/m<sup>3</sup>において総発熱量と厚さの間に、有意水準 5%で有意な負の相関が認められた。

薬剤固形分量水準ごとに、試験体の加熱中における総発熱量の推移を図 2.19～2.21 に示す。薬剤固形分量水準 50kg/m<sup>3</sup>の処理試験体は、図 2.12 の発熱速度の推移では有炎燃焼による 2つのピークが見られ、厚さの増加とともに 2nd ピークの発生時間が遅延した。図 2.19 の総発熱量の推移では、発熱速度の 2nd ピークに伴う急増が見られ、増加する時間は試験体の厚さとともに遅延した。ただし、処理試験体の総発熱量の増加挙動は、同一厚さ内で大きく異なった。表 2.8～2.10 に示すように、薬剤固形分量水準 50kg/m<sup>3</sup>の処理試験体は、全てが加熱中に有炎燃焼を生じたが、発生時間には大きなバラツキがあった。有炎燃焼は発熱速度が大きいいため、発生時間のバラツキは総発熱量の増加挙動に影響する。そして、総発熱量の増加挙動のバラツキは、加熱終了時の総発熱量のバラツキを招き、結果として厚さ間の差が生じなくなると考えられた。

また、薬剤固形分量水準 150kg/m<sup>3</sup>は、図 2.14 に示すように発熱速度の推移が厚さ 12mm の一体を除いてほぼ同じであった。そのため、図 2.21 に示すように処理試験体の総発熱量の推移も同じになり、厚さ間の差異がなくなった。

一方、薬剤固形分量水準 100kg/m<sup>3</sup>の処理試験体は、図 2.13 に示すように有炎燃焼により発熱速度に緩やかなピークを生じた。そして、発熱速度のピークの発生時間は、処理試験体の厚さの増加に伴い遅延した。図 2.20 に示す処理試験体の総発熱量の推移は、それらの発熱速度のピークの発生状況を反映し、厚さの増加とともに発熱速度のピークに伴い急増する時間が遅延した。このことにより、試験体の厚さと総発熱量の間に負の相関関係が生じたと考えられた。

以上のように、難燃処理木材の総発熱量は、厚さ 12～18mm において、既往の報告<sup>5)</sup>他と同様に薬剤固形分量の増加に伴い指数関数的に低下する関係が見られ、両者の間に回帰式を得ることができた。また、総発熱量は、薬剤固形分量 100kg/m<sup>3</sup>において厚さの増加に伴い低下する挙動が見られ、その理由として、有炎燃焼による発熱速度ピークが厚さにより遅延し、加熱時間内で総発熱量の急増する時間が遅延したことが考えられた。また、全乾密度については、今回の試験体の範囲において総発熱量には影響しなかった。

表 2.16 総発熱量、厚さ及び全乾密度の相関行列（処理試験体）

薬剤 固形分量 水準		相関係数			t値 <sup>a)</sup>			P値 <sup>b)</sup>		
		総発熱量	厚さ	全乾密度	総発熱量	厚さ	全乾密度	総発熱量	厚さ	全乾密度
50kg/m <sup>3</sup>	総発熱量	1.0000			—			—		
	厚さ	-0.4158	1.0000		-1.8289	—		0.0861	—	
	全乾密度	0.0572	0.0485	1.0000	0.2292	0.1943	—	0.8216	0.8484	—
100kg/m <sup>3</sup>	総発熱量	1.0000			—			—		
	厚さ	-0.5623	1.0000		-2.7197	—		0.0151	—	
	全乾密度	0.4444	0.0187	1.0000	1.9846	0.0747	—	0.0646	0.9414	—
150kg/m <sup>3</sup>	総発熱量	1.0000			—			—		
	厚さ	-0.4507	1.0000		-2.0193	—		0.0605	—	
	全乾密度	-0.0562	0.0657	1.0000	-0.2250	0.2633	—	0.8249	0.7957	—

n=18, a)相関係数から算出した t の値, b) t 分布に基づく確率 (両側), \*: 有意水準 5%において有意差あり,  
\*\* : 有意水準 1%において有意差あり

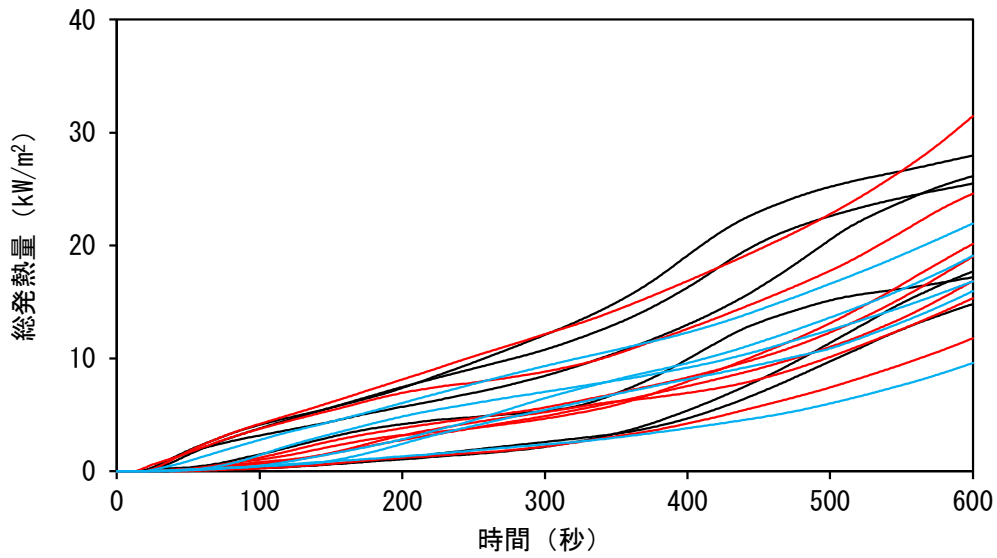


図 2.19 処理試験体の発熱量の推移（薬剤固形分量水準  $50\text{kg}/\text{m}^3$ ）  
 凡例： — 厚さ 12mm, — 厚さ 15mm, — 厚さ 18mm

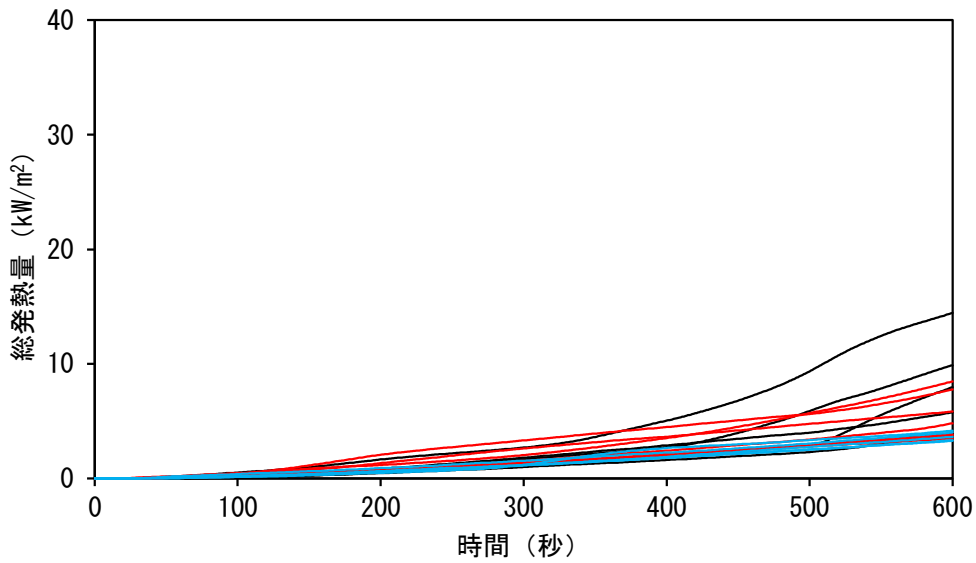


図 2.20 処理試験体の発熱量の推移（薬剤固形分量水準  $100\text{kg}/\text{m}^3$ ）  
 凡例： — 厚さ 12mm, — 厚さ 15mm, — 厚さ 18mm

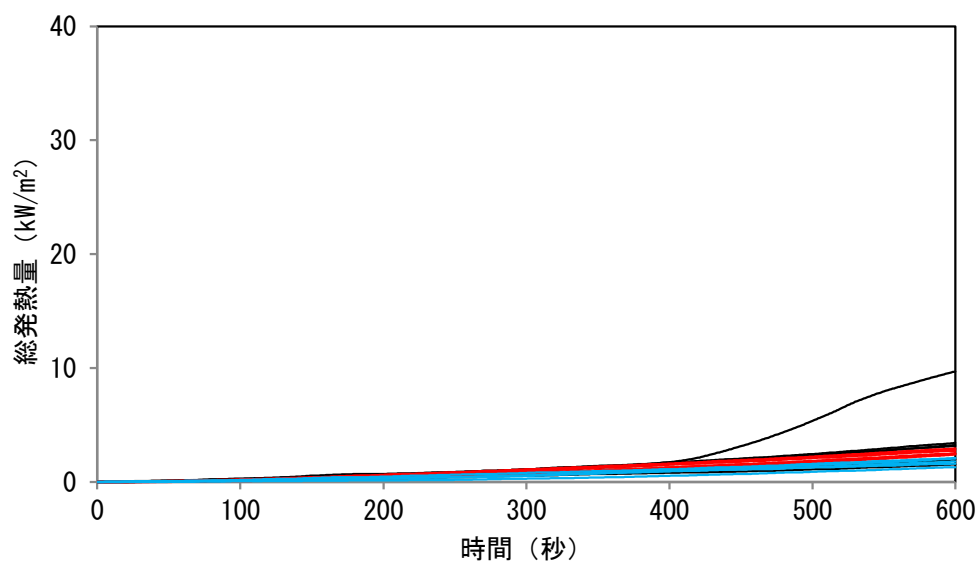


図 2.21 処理試験体の発熱量の推移 (薬剤固形分量水準 150kg/m<sup>3</sup>)

凡例： — 厚さ 12mm, — 厚さ 15mm, — 厚さ 18mm

#### 2.4.4 準不燃材料の基準性能との比較

指定性能評価機関の定める防耐火性能試験・業務方法書<sup>3)</sup>の準不燃性能試験方法では、発熱性試験の評価基準として表 2.17 を設けている。前項までの試験結果について、各基準を満たす試験体数を示すと表 2.18 のとおりとなった。

①の総発熱量に関する基準は、厚さ 15mm では薬剤固形分量水準 150kg/m<sup>3</sup>、厚さ 18mm では薬剤固形分量水準 100kg/m<sup>3</sup>で全ての試験体が満たした。一方、厚さ 12mm では、最大の薬剤固形分量水準 150kg/m<sup>3</sup>においても 1 体が基準を満たすことはできなかった。

②の加熱後の試験体の状態に関する基準は、厚さ 15mm と 18mm では薬剤固形分量水準 50kg/m<sup>3</sup>において全ての試験体が満たした。一方、厚さ 12mm では、薬剤固形分量水準 150kg/m<sup>3</sup>において全試験体が基準を満たした。

③の発熱速度に関する基準は、薬剤固形分量水準 50kg/m<sup>3</sup>において、全ての厚さの試験体が満たした。無処理試験体の最高発熱速度は、厚さ水準の中で最も高かった 12mm において 192~236kW/m<sup>2</sup>であり、基準の 200kW/m<sup>2</sup>を少し超える程度であった。2.4.2 で示したように、最高発熱速度は、薬剤固形分量の増加とともに指数関数的に低下する関係があるため、少量の薬剤固形分量で基準を満たした。

3つの評価基準を全 6 試験体が満たす薬剤固形分量水準を準不燃材料の目安とすると、厚さ 15mm では 150kg/m<sup>3</sup>、厚さ 18mm では 100kg/m<sup>3</sup>であった。厚さ 12mm については、準不燃材料の性能付与には 150kg/m<sup>3</sup>を超える薬剤固形分量が必要であった。2.4.2 で述べたように、試験体の有炎燃焼に起因する発熱速度ピークは、厚さの増加とともに発生時間が遅延し、加熱時間外にシフトする。厚さ 12mm は、厚さが薄いために処理後においても発熱速度ピークが加熱時間内に発生しやすい。そのため、厚さ 12mm の板材の総発熱量を基準値以下に低下させるには、総発熱量増加に寄与する有炎燃焼を完全に抑制する必要があり、そのためより多くの薬剤固形分量が必要になると考えられた。

表 2.17 準不燃材料の評価基準

加熱時間	基準
10	①総発熱量が8MJ/m <sup>2</sup> 以下であること。 ②防火上有害な裏面まで貫通する亀裂及び穴がないこと。 ③発熱速度が10秒以上継続して200kW/m <sup>2</sup> を超えないこと。

表 2.18 準不燃材料の基準性能を満たす試験体数

厚さ (mm)	薬剤固形分量 (kg/m <sup>3</sup> )	基準を満たす試験体数		
		①	②	③
12	50	0	1	6
	100	3	4	6
	150	5	6	6
15	50	0	6	6
	100	5	6	6
	150	6	6	6
18	50	0	6	6
	100	6	6	6
	150	6	6	6

## 2.5 結論

板材への難燃剤の注入処理による燃焼抑制に係る基本的知見を得るため、厚さ及び全乾密度を変えた板材を用いて、数水準の薬剤固形分量で難燃剤を注入処理した試験体を作成し、準不燃材料の評価試験方法に従い発熱性試験で燃焼性状を評価した。その結果をまとめると、以下の通りとなる。

- 1) 板材の最高発熱速度及び総発熱量は、厚さ 12mm, 15mm, 18mm に共通して、薬剤固形分量の増加とともに指数関数的に低下する関係が見られた。また、薬剤固形分量に対する最高発熱速度及び総発熱量の関係について、指数関数の回帰式が得られた。
- 2) 薬剤固形分量水準ごとに最高発熱速度と総発熱量について、厚さ及び全乾密度間の相関関係を分析したところ、最高発熱速度は、無処理試験体及び薬剤固形分量水準 50kg/m<sup>3</sup> と 100kg/m<sup>3</sup> の処理試験体において、厚さとの間に負の相関関係が認められた。同様に、総発熱量は、薬剤固形分量水準 100kg/m<sup>3</sup> の処理試験体において、厚さとの間に負の相関関係が認められた。
- 3) 板材の厚さに対する最高発熱速度及び総発熱量の負の相関関係は、加熱中の有炎燃焼による発熱速度ピークの発生時間が厚さに伴い遅延し、加熱時間内の発熱速度の推移が変化することが理由と考えられた。
- 4) 板材の全乾密度は、310～420kg/m<sup>3</sup> の範囲において、無処理試験体及び処理試験体の最高発熱速度及び総発熱量への影響は見られなかった。
- 5) 指定性能評価機関の防耐火性能試験・業務方法書に基づき、準不燃材料の性能を付与する薬剤固形分量を考察した結果、厚さ 15mm の板材では 150kg/m<sup>3</sup>、厚さ 18mm の板材では 100kg/m<sup>3</sup> であった。また、厚さ 12mm の板材については、試験に用いた最も高い薬剤固形分量水準の 150kg/m<sup>3</sup> においても、全ての試験体が基準を満たすことができず、より多くの薬剤固形分量が必要であった。

## 第三章 屋内における白華抑制技術と燃焼性状

### 3.1 はじめに

第一章で述べたように、難燃処理木材は、内装制限が適用される公共建築物や自社ビル等において内装を木質化する際に使用されている。近年、公共建築物等木材利用促進法の施行により、難燃処理木材が内装に使用される機会が多くなったが、同時に施工後において白華が発生し、美観の低下及び防火性能の低下が懸念される問題が生じている。難燃処理木材の白華発生を抑制することは、今後の建築物の内装木質化を進めるためにも喫緊の課題である。

難燃処理木材の白華は、高湿度環境下において難燃剤が吸湿して木材表面に溶出し、乾燥により白く固化することで生じると考えられる。そのため、白華の発生は処理板材の吸湿性の影響が大きいとし、過去の報告<sup>1~5)</sup>では白華抑制のために吸湿性の抑制を試みている。処理板材の吸湿性を抑制する方法は、大きく2つが用いられている。1つ目は難燃処理木材に別の薬剤を注入することで吸湿性を低下させる方法であり、2つ目は塗装により難燃処理木材の吸湿速度を低下させる方法である。しかし、1つ目の方法は、難燃剤への助剤の混入や別の吸湿性を低下させる薬剤による再処理があるため、製造コスト増加や生産性の低下が生じる。一方、2つ目の方法は、難燃処理木材の製造工程では通常塗装が行われていることから生産性への影響は少ない。ただし、この方法を用いた原田等の研究<sup>5)</sup>では特殊な塗料を使用するため、製造コストの増加が懸念される。

そこで本章では、近年、白華抑制に有効な低吸湿性の難燃剤の製品が開発されていることを踏まえて、市販品の難燃剤と塗料を用い、それぞれに適切な製品を選定して組み合わせることで難燃処理木材の白華発生を抑制するこれまで検討されていない方法を試みた。塗料は、内装用の木質材料に使用されることが多い造膜系塗料とした。この方法は、通常の難燃処理木材の製造工程を維持し、特殊な難燃剤及び塗料を使用することがないため、製造コストの増加を抑制することが可能である。本章の流れを以下に示す。

3.2では、通常入手することが可能な市販の3種類の難燃剤を用いて、薬剤固形分量の異なる難燃処理板材を作成し、海外の規格を参考にした高湿度雰囲気下への放置試験を行い、白華発生への難燃剤の種類、薬剤固形分量の影響を明らかにした。放置中の処理板材は、吸湿量と表面の水滴の発生状態により白華発生の可能性を評価した。試験で得られた難燃処理木材の吸湿量と、難燃剤の種類、薬剤固形分量及び雰囲気湿度との関係式は、これまで検討された事例が少なく、非常に有用な知見である。更にそれらの結果を基に、第二章で明らかにした準不燃材料の薬剤固形分量の目安を踏まえて、難燃処理木材に推奨される難燃剤の種類を選定した。

3.3では、3.2で選定した難燃剤を用いて準不燃材料の基準性能を満たす難燃処理木材を作成し、造膜形無色透明の4種類の市販塗料を用いて、塗装による白華抑制の効果を高湿度雰囲気への放置試験により考察にした。更に、塗装した難燃処理木材については、有機物である塗膜の燃焼により準不燃性能への影響が懸念されるため、発熱性試験により難燃処理木材の燃焼性状への塗装の影響を確認した。その結果を基に、白華抑制に効果のある塗料を選定した。

### 3.2 白華の発生への難燃剤の種類及び薬剤固形分量の影響

難燃処理木材の白華発生について、難燃剤の種類、薬剤固形分量の影響を検討した。難燃処理木材の白華発生の評価試験は、欧州ではEN16755<sup>6)</sup>、アメリカではASTM D3201<sup>7)</sup>で規定されている。両方の試験は、ともに材料を所定の高湿度雰囲気下に放置し、含水率や表面の白華や水滴の発生状態から白華発生の可能性に評価する。本試験では、それらを参考に、高湿度雰囲気下に試験体を放置し、水滴の発生及び吸湿量を基に白華発生の可能性を評価した。ただし、高湿度雰囲気下における難燃処理木材の白華発生を詳細に分析するため、試験体を放置する雰囲気湿度を3水準設定した。

#### 3.2.1 試験体

##### 3.2.1.1 供試材料

板材は、スギの心材（板目材，気乾密度 310～349kg/m<sup>3</sup>）を用い，寸法を長さ 140×幅 105×厚さ 18mm とした。板材の厚さを 18mm とした理由は，通常の内装材の厚さの範囲（12～18mm）において最大とすることで，試験体の表面積を大きくし，放置中の表面状態の変化を把握し易くするためである。板材は 367 枚用意し，それらから気乾密度の分布範囲の全体を含むように，注入処理用を 288 枚，無処理用を 7 枚，含水率測定用を 16 枚選定した。16 枚の含水率測定用板材は全乾法により含水率を求め，平均値を算出した。含水率の算出結果を表 3.1 に示す。選定した注入処理用と無処理用の板材は，重量，体積及び表 3.1 の平均含水率から全乾密度を推定した。選定した無処理用と注入処理用の板材の概要を表 3.2～3.5 に示す。表中の注入処理用板材は，次項の注入処理で用いる難燃剤の種類及び溶液濃度ごとに記載した。また，注入処理用板材は，処理条件間で全乾密度の分布が同じになるように配分した。

難燃剤は，表 3.6 に示す 3 種類を用いた。リン・ホウ素混合系は，過去の報告<sup>8), 9)</sup>を基に，実用化された製品である。ポリリン酸カルバメート系とリン酸グアニジン系は同じ会社の製品であり，前者が一般品，後者が白華抑制に効果があるとされる低吸湿性の製品である。なお，リン酸グアニジン系は第二章で用いた製品と同じである。

表 3.1 板材の含水率測定結果

板材番号		気乾密度 (kg/m <sup>3</sup> )	含水率 (%)	板材番号		気乾密度 (kg/m <sup>3</sup> )	含水率 (%)
138	3	326	11.2	232	3	312	11.8
156	11	330	11.9	232	12	337	11.7
172	4	333	10.7	239	4	339	11.8
176	8	320	11.3	241	8	346	11.0
215	9	315	11.8	242	14	322	12.5
218	2	310	11.2	243	11	328	11.3
222	13	324	11.6	246	12	343	11.2
227	14	318	12.2	269	5	349	11.5
平均						328	11.5
最大						349	12.5
最小						310	10.7

表 3.2 無処理用板材の概要

番号		気乾密度 (kg/m <sup>3</sup> )	全乾密度 (kg/m <sup>3</sup> )
128	13	344	309
138	10	319	286
161	9	315	282
247	6	338	303
259	11	323	290
260	11	332	297
266	2	349	313
平均		331	297
最大		349	313
最小		315	282

表 3.3 注入処理用板材の概要（難燃剤：リン・ホウ素混合系）

難燃剤溶液濃度 (%)											
11.5±1.0				17.5±1.0				23.5±1.0			
番号		気乾密度 (kg/m <sup>3</sup> )	全乾密度 (kg/m <sup>3</sup> )	番号		気乾密度 (kg/m <sup>3</sup> )	全乾密度 (kg/m <sup>3</sup> )	番号		気乾密度 (kg/m <sup>3</sup> )	全乾密度 (kg/m <sup>3</sup> )
119	8	343	307	121	8	345	309	124	7	326	292
128	1	348	312	122	13	319	286	126	4	340	305
129	7	339	304	128	7	339	304	126	11	336	301
131	2	311	279	128	12	337	302	135	7	344	308
131	9	315	282	135	9	346	310	138	7	342	307
135	6	340	305	138	9	315	283	138	13	333	298
136	11	337	302	138	14	336	301	139	3	320	287
137	8	316	284	139	12	313	280	140	8	330	296
139	10	312	280	148	9	343	308	152	13	323	290
140	10	328	295	148	12	325	291	167	1	311	279
149	7	323	290	156	10	331	297	172	10	337	302
160	2	338	303	156	12	326	292	177	12	317	284
171	9	314	281	165	4	347	311	178	12	345	309
172	2	332	298	171	14	322	289	180	8	328	294
176	9	321	287	180	12	329	295	180	10	327	293
181	5	325	292	181	8	330	296	192	4	338	303
190	13	322	288	205	8	338	303	194	13	331	297
192	7	326	293	205	10	327	293	215	5	313	281
194	3	335	300	208	13	318	285	215	8	319	286
210	11	324	291	211	1	349	313	215	10	312	280
213	3	320	287	213	11	332	298	218	12	322	289
242	9	318	286	228	10	320	287	227	10	316	283
243	6	328	294	241	11	324	290	228	9	329	295
248	3	333	299	244	1	317	284	233	5	346	310
250	1	346	310	244	10	312	279	239	12	321	288
251	3	329	295	247	10	334	299	244	11	314	282
253	1	330	296	250	3	341	306	244	13	324	291
260	4	317	285	252	5	323	289	248	12	349	313
264	13	347	311	253	11	321	288	262	10	318	285
269	4	344	309	260	7	310	278	269	12	325	291
269	8	310	278	269	10	314	282	270	2	334	300
270	7	322	289	272	10	328	294	270	11	348	312
平均		328	294	平均		328	294	平均		329	295
最大		348	312	最大		349	313	最大		349	313
最小		310	278	最小		310	278	最小		311	279



表 3.4 注入処理用板材の概要（難燃剤：ポリリン酸カルバメート系）

難燃剤溶液濃度 (%)											
11.5±1.0			17.5±1.0				23.5±1.0				
番号	気乾密度 (kg/m <sup>3</sup> )	全乾密度 (kg/m <sup>3</sup> )	番号	気乾密度 (kg/m <sup>3</sup> )	全乾密度 (kg/m <sup>3</sup> )	番号	気乾密度 (kg/m <sup>3</sup> )	全乾密度 (kg/m <sup>3</sup> )	番号	全乾密度 (kg/m <sup>3</sup> )	
122	10	335	301	132	9	344	308	119	6	336	302
126	1	344	309	140	3	337	302	119	13	328	295
129	6	337	302	141	4	336	301	121	1	319	286
136	8	341	306	147	11	348	312	121	11	337	303
138	11	332	298	149	4	320	287	124	14	326	293
139	6	321	288	152	12	316	283	125	13	313	281
152	6	313	280	156	3	330	296	126	10	330	296
153	1	318	285	156	13	327	293	132	13	344	308
153	13	315	283	165	14	321	288	133	11	348	312
160	4	343	307	171	2	325	291	136	12	335	300
161	5	316	284	171	11	314	282	138	5	328	294
167	13	310	278	171	12	317	284	147	10	349	313
170	11	333	299	172	12	342	307	149	5	325	292
171	13	320	287	177	13	322	289	165	2	342	307
172	8	331	296	208	3	311	279	167	7	321	288
180	2	339	304	208	8	328	294	172	9	338	304
190	2	323	290	213	1	331	297	173	6	329	295
194	1	347	311	213	8	323	290	173	14	320	287
194	7	329	295	217	11	324	290	177	1	316	283
205	3	327	293	217	13	332	298	180	4	340	305
211	8	311	279	224	1	313	281	210	9	323	290
217	8	346	310	230	6	340	305	215	6	312	280
230	8	325	292	233	11	349	313	215	7	317	284
250	5	322	288	233	13	346	310	217	9	324	291
251	2	324	291	236	8	334	300	224	4	333	298
252	12	329	295	239	7	326	292	232	5	322	289
253	6	338	303	247	5	329	295	233	8	346	311
253	9	318	286	253	4	338	303	251	14	311	279
269	7	328	294	260	8	312	279	260	10	332	297
270	14	314	282	262	14	319	286	264	4	345	310
272	2	348	312	270	13	345	309	273	2	315	282
273	10	323	289	273	4	318	285	273	11	318	286
平均		328	294	平均		329	295	平均		329	295
最大		348	312	最大		349	313	最大		349	313
最小		310	278	最小		311	279	最小		311	279

表 3.5 注入処理用板材の概要（難燃剤：リン酸グアニジン系）

難燃剤溶液濃度 (%)											
11.5±1.0			17.5±1.0			23.5±1.0					
番号	気乾密度 (kg/m <sup>3</sup> )	全乾密度 (kg/m <sup>3</sup> )	番号	気乾密度 (kg/m <sup>3</sup> )	全乾密度 (kg/m <sup>3</sup> )	番号	気乾密度 (kg/m <sup>3</sup> )	全乾密度 (kg/m <sup>3</sup> )			
121	7	330	296	121	5	325	291	119	12	327	293
132	8	348	312	121	9	345	309	124	3	338	303
137	7	323	290	121	14	338	303	129	3	331	297
138	4	327	293	133	7	328	294	135	3	346	310
142	1	344	309	137	4	313	281	138	6	325	291
147	14	339	304	137	6	330	296	149	8	320	287
152	3	323	289	140	9	332	298	153	7	315	282
152	14	317	285	142	10	342	306	170	3	345	310
153	5	311	279	148	13	334	299	172	11	340	305
153	8	332	298	149	14	324	290	176	7	336	301
153	14	320	287	152	11	321	288	179	11	349	313
160	8	343	307	160	1	337	302	181	3	329	295
165	1	337	302	173	5	340	305	187	3	312	280
170	1	335	300	173	13	312	279	190	5	330	296
177	4	322	288	177	7	320	287	213	2	321	288
179	10	333	299	177	8	318	285	213	4	322	289
180	1	338	303	180	5	343	308	215	4	316	283
181	2	324	291	194	9	329	295	233	14	342	307
192	2	329	295	195	1	347	311	241	4	328	294
192	10	328	295	205	1	319	286	242	11	323	290
194	2	341	305	211	6	327	293	242	13	324	291
210	3	328	294	213	12	331	297	246	6	344	308
222	1	315	282	218	13	317	284	248	1	348	312
222	10	314	281	232	2	315	283	248	4	334	300
227	8	318	286	232	11	326	292	250	10	317	284
228	6	325	292	239	1	314	282	252	10	319	286
233	10	346	310	245	13	349	313	253	2	333	298
239	8	321	288	250	8	310	278	262	12	326	292
243	12	347	311	260	3	322	289	264	7	313	281
250	11	313	280	262	6	323	290	269	13	318	285
259	12	310	278	264	3	336	301	272	12	337	303
273	12	316	284	272	3	346	310	273	14	311	279
平均		328	294	平均		328	295	平均		329	295
最大		348	312	最大		349	313	最大		349	313
最小		310	278	最小		310	278	最小		311	279

表 3.6 難燃剤の概要

難燃剤	主成分	製造会社及び製品名
リン・ホウ素 混合系	リン系薬剤：リン酸水素ニアンモニウム (NH <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> HPO <sub>4</sub> ホウ素系薬剤：八ホウ酸ナトリウム四水和物 Na <sub>2</sub> B <sub>8</sub> O <sub>13</sub> ・4H <sub>2</sub> O	過去の報告 <sup>8~9)</sup> を基に 民間企業で実用化された製品
ポリリン酸 カルバメート系	ポリリン酸カルバメート NH <sub>2</sub> CO(NH <sub>4</sub> PO <sub>3</sub> ) <sub>n</sub> CONH <sub>2</sub>	丸菱油化工業株式会社, ノンネンW2-50
リン酸 グアニジン系	リン酸グアニジン CH <sub>5</sub> N <sub>3</sub> H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub>	丸菱油化工業株式会社, ノンネンW-200

### 3.2.1.2 難燃剤の注入処理

注入処理用の板材は、処理前に難燃剤溶液の注入性への影響が考えられる含水率を均一化させるため、強制循環式恒温乾燥機を用いて60℃で72時間乾燥させた。乾燥後の板材は、シリカゲルを設置したデシケータ内に置いて常温まで冷却させた。各難燃剤は、水道水で希釈し、濃度を11.5±1.0%、17.5±1.0%及び23.5±1.0%の3水準に調整して使用した。

板材への注入処理は、減圧加圧注入処理装置を用いて行った。注入条件は、予備試験により2.2.2と同程度の難燃剤溶液の注入量が得られることを確認し、減圧を8.0kPa以下で30分間、加圧を1.27MPaで2時間とした。各板材は、注入処理の前後において重量を測定した。注入処理後の板材は、処理前後の重量、薬液の濃度及び処理前の板材の体積を基に、式(2.1)により薬剤固形分量Lを算出した。なお、薬剤固形分量LはJIS A9011「木質材料の難燃薬剤処理方法」<sup>10)</sup>において、難燃剤注入量を算出する方法として第二章で用いた注入処理前後の板材の全乾密度差から算出する方法と同様に定められている。処理前後の板材の全乾密度差から算出した薬剤固形分量よりもわずかに大きくなる傾向があるが、その差は本試験結果への影響が無い程度である。処理板材の薬剤固形分量Lの分布を図3.1～3.3に示す。乾燥後の処理板材は、算出した薬剤固形分量Lを基に、100kg/m<sup>3</sup> (80～120kg/m<sup>3</sup>)、150kg/m<sup>3</sup> (130～170kg/m<sup>3</sup>) 及び200kg/m<sup>3</sup> (180～220kg/m<sup>3</sup>) の3水準について7体を選定した。なお、上記の薬剤固形分量水準は、第二章で明らかにした、厚さ12～18mmの板材に準不燃材料の基準性能の付与する薬剤固形分量の目安を参考にして設定した。

選定した処理板材は、室内で1週間以上風乾した後、強制循環式恒温乾燥機を用いて、温度35～45℃で、式(3.1)により算出した含水率が11%以下になるまで乾燥した。また、それらの処理板材に加えて、前項で用意した無処理用板材7枚を併せて試験体とした。試験体の概要を表3.7～3.8に示す。各試験体は、試験前に23℃・50%RHに設定した恒温恒湿装置内で2週間以上養生した。養生後の試験体の含水率を表中に併記する。

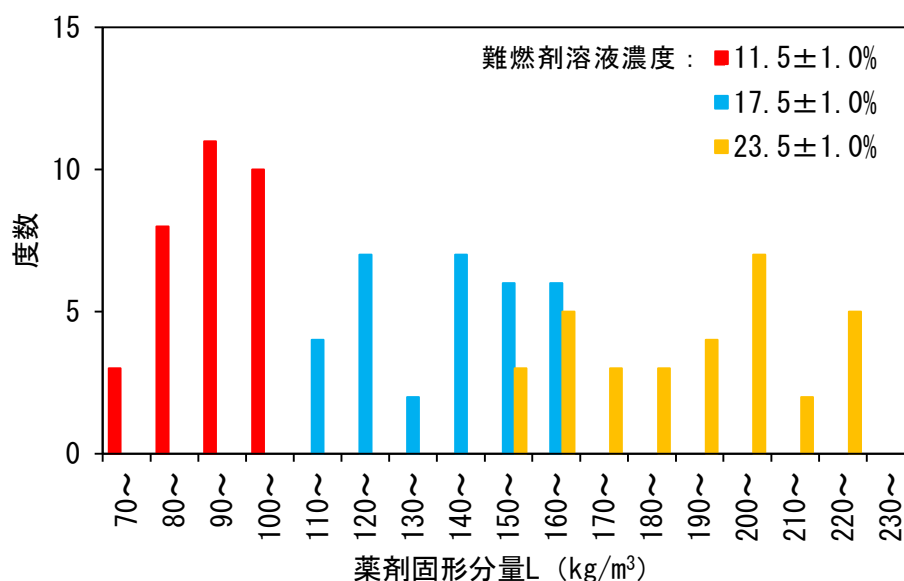


図 3.1 処理板材の薬剤固形分量L<sup>a)</sup>の分布 (リン・ホウ素混合系)  
a)式(2.1)により算出

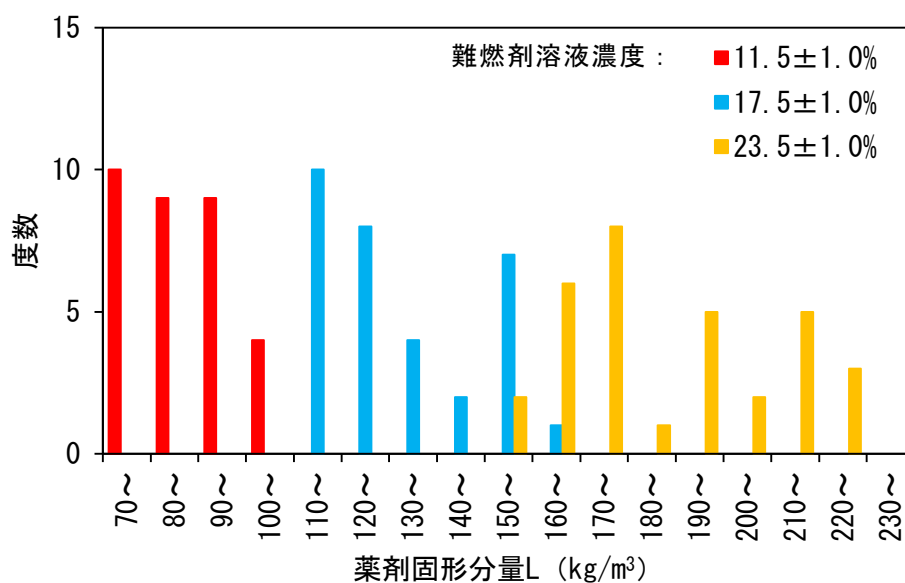


図 3.2 処理板材の薬剤固形分量 L<sup>a)</sup> の分布 (ポリリン酸カルバメート系)  
a) 式 (2.1) により算出

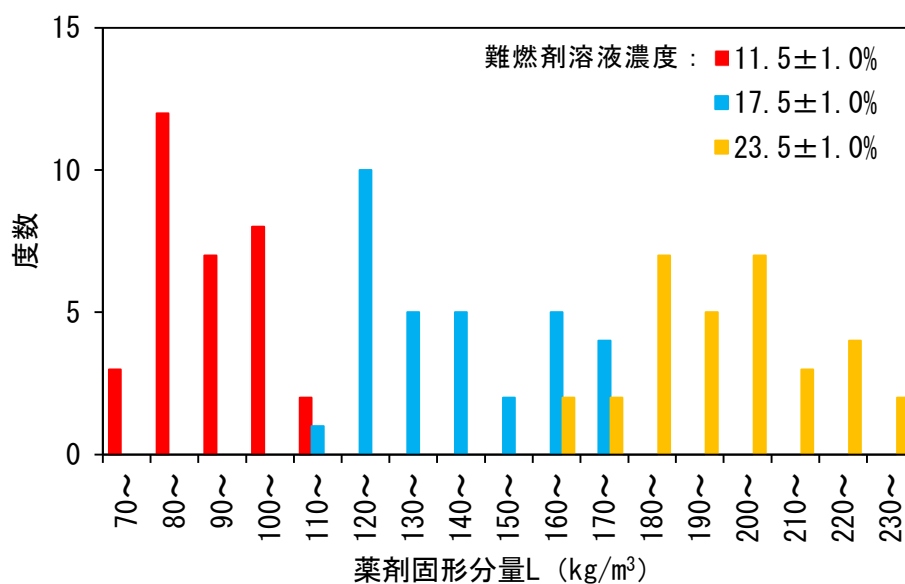


図 3.3 処理板材の薬剤固形分量 L<sup>a)</sup> の分布 (リン酸グアニジン系)  
a) 式 (2.1) により算出

$$\text{含水率 (\%)} = (m_t - m_0) / m_0 \times 100 \quad (3.1)$$

$$m_0 = m_{wd} + (m_{wa} - m_{wb}) \times c_r / 100$$

$$m_{wd} = \rho_w \times V_w$$

$m_t$  : 試験体の質量 (kg)

$m_0$  : 試験体の全乾質量 (kg)

$m_{wd}$  : 板材の全乾質量 (kg)

$m_{wb}$  : 注入処理前の板材の質量 (kg)

$m_{wa}$  : 注入処理後の板材の質量 (kg)

$c_r$  : 難燃剤溶液の濃度 (%)

$\rho_w$  : 板材の全乾密度 ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )

$V_w$  : 板材の体積 ( $\text{m}^3$ )

表 3.7 試験体の概要 1

試験体番号		難燃剤	薬剤 固形分量 水準	板材 番号		板材 全乾密度 ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )	固形分量 <sup>a)</sup> ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )	含水率 <sup>b)</sup> (%)
無処理	1			128	13	309		11.3
	2			138	10	286		11.3
	3			161	9	282		11.5
	4			247	6	303		11.0
	5			259	11	290		11.3
	6			260	11	297		10.5
	7			266	2	313		11.3
	平均							
PB-100	1	リン・ホウ素 混合系	100 $\text{kg}/\text{m}^3$	129	7	304	88	11.7
	2			135	6	305	99	12.7
	3			137	8	284	107	13.5
	4			181	5	292	104	13.1
	5			190	13	288	92	13.1
	6			248	3	299	96	12.3
	7			251	3	295	106	13.3
	平均							295
PB-150	1	リン・ホウ素 混合系	150 $\text{kg}/\text{m}^3$	135	9	310	148	13.2
	2			148	12	291	153	13.2
	3			165	4	311	163	13.1
	4			181	8	296	158	13.1
	5			211	1	313	133	12.1
	6			247	10	299	144	13.5
	7			269	10	282	165	13.5
	平均							300
PB-200	1	リン・ホウ素 混合系	200 $\text{kg}/\text{m}^3$	138	7	307	204	12.7
	2			138	13	298	196	12.4
	3			140	8	296	194	14.2
	4			152	13	290	220	14.6
	5			218	12	289	207	13.8
	6			262	10	285	186	13.6
	7			269	12	291	217	14.7
	平均							294

a) 式 (2.1) により算出, b) 式 (3.1) により算出

表 3.8 試験体の概要 2

試験体番号		難燃剤	薬剤 固形分量 水準	板材 番号		板材 全乾密度 (kg/m <sup>3</sup> )	固形分量L <sup>a)</sup> (kg/m <sup>3</sup> )	含水率 <sup>b)</sup> (%)	
A-100	1	ポリリン酸 カルバメート 系	100kg/m <sup>3</sup>	136	8	306	88	11.8	
	2			160	4	307	86	11.4	
	3			161	5	284	96	11.8	
	4			172	8	296	89	11.9	
	5			253	9	286	99	11.8	
	6			270	14	282	100	12.3	
	7			272	2	312	93	10.9	
	平均							296	93
A-150	1		150kg/m <sup>3</sup>	165	14	288	145	10.5	
	2			172	12	307	137	11.1	
	3			177	13	289	161	10.4	
	4			208	3	279	151	11.1	
	5			230	6	305	155	10.3	
	6			253	4	303	135	10.7	
	7			273	4	285	154	11.6	
	平均							294	148
A-200	1		200kg/m <sup>3</sup>	138	5	294	205	9.8	
	2			172	9	304	197	10.9	
	3			173	6	295	191	10.5	
	4			251	14	279	220	10.2	
	5			264	4	310	196	9.8	
	6			273	2	282	214	12.9	
	7			273	11	286	216	12.2	
	平均							293	205
B-100	1		リン酸 グアニジン系	100kg/m <sup>3</sup>	137	7	290	111	9.3
	2				142	1	309	98	8.5
	3				170	1	300	81	7.4
	4				181	2	291	108	8.4
	5	192			2	295	93	8.2	
	6	210			3	294	104	8.7	
	7	222			1	282	87	7.9	
	平均							295	97
B-150	1	150kg/m <sup>3</sup>		133	7	294	132	7.8	
	2			148	13	299	161	8.3	
	3			160	1	302	143	8.6	
	4			173	5	305	147	8.3	
	5			173	13	279	139	8.1	
	6			250	8	278	169	8.9	
	7			272	3	310	160	8.3	
	平均							296	150
B-200	1	200kg/m <sup>3</sup>		129	3	297	199	8.7	
	2			170	3	310	182	8.2	
	3			190	5	296	202	7.5	
	4			233	14	307	183	8.6	
	5			246	6	308	192	9.1	
	6			248	1	312	205	8.4	
	7			269	13	285	214	8.2	
	平均							302	197

a) 式 (2.1) により算出, b) 式 (3.1) により算出

### 3.2.2 実験方法

#### 3.2.2.1 高湿度雰囲気への放置操作

試験は、恒温恒湿装置（エスペック（株）製 PR-2KP）を用いて行った。試験体は、ステンレス製の治具に立て、全ての面が雰囲気に接するようにして装置内に設置した。放置中の試験体の状態を写真 3.1 に示す。

試験体の放置雰囲気は、EN16755<sup>6)</sup> 及び ASTM D3201<sup>7)</sup> の試験条件である温度 27°C・湿度 90～92%RH を参考にし、温度を 30°C で一定とし、雰囲気湿度の最高値を 90%RH した。また、雰囲気湿度については、試験体の白華の発生状況を詳細に分析するために、70 及び 80%RH を加えた。

放置中の試験体は、24 時間間隔を基本として、質量の測定と表面状態の観察を行った。放置する雰囲気湿度は、70%RH から開始し、80%RH、90%RH と上げていった。雰囲気湿度を上げるタイミングは、全ての試験体が恒量に達したと判断された時点とした。恒量の判断は、24 時間における試験体の質量変化率が 0.1%以下になった時点とした。試験は、雰囲気湿度 90%RH において、全ての試験体が恒量に達したと判断された時点で終了した。暴露中の処理試験体の雰囲気湿度と質量の推移の一例として、試験体 A-100-7、A-150-1 及び A-200-4 を図 3.4 に示す。



写真 3.1 高湿度雰囲気への放置中の試験体の状態

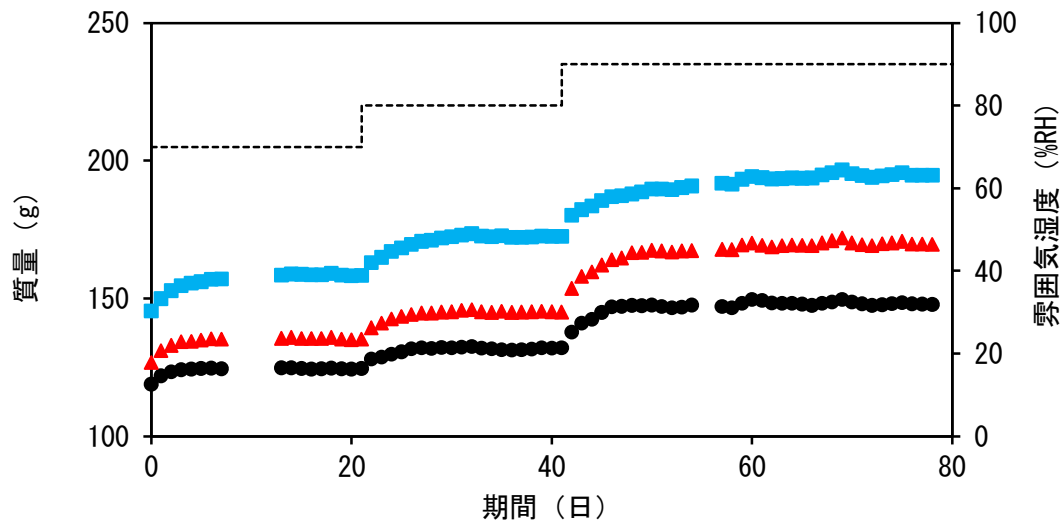


図 3.4 雾困気湿度と試験体の質量の一例  
 試験体 ● A-100-7, ▲ A-150-1, ■ A-200-4, ----- 雾困気湿度

### 3.2.2.2 吸湿量の算出

測定した試験体の質量については，試験開始時からの増加量及び試験体の体積から，以下の式を用いて吸湿量を算出した。

$$\text{吸湿量 (kg/m}^3\text{)} = (m_{\text{max}} \text{ (kg)} - m_1 \text{ (kg)}) / V \text{ (m}^3\text{)} \quad (3.2)$$

$m_{\text{max}}$  : 各雾困気湿度における各試験体の質量

$m_1$  : 暴露開始時における試験体の質量

$V$  : 試験開始時における試験体の体積



### 3.2.2.3 表面状態の観察

暴露中の試験体は、種類及び雰囲気湿度によって、写真3.2のように表面に水滴が生じた。これらの水滴は、乾燥後に薬剤の結晶と思われる白色の物質を生じたこと、及びEN16755<sup>6)</sup>及びASTM D3201<sup>7)</sup>で判定基準にされていることから、白華発生の可能性を評価する指標にした。水滴の発生の観察は、各試験体の両木口面を除く4面について行った。また、水滴の発生量については、EN16755及びASTM D3201では特に決められていないことから、本試験では表3.9の区分に従い分類した。

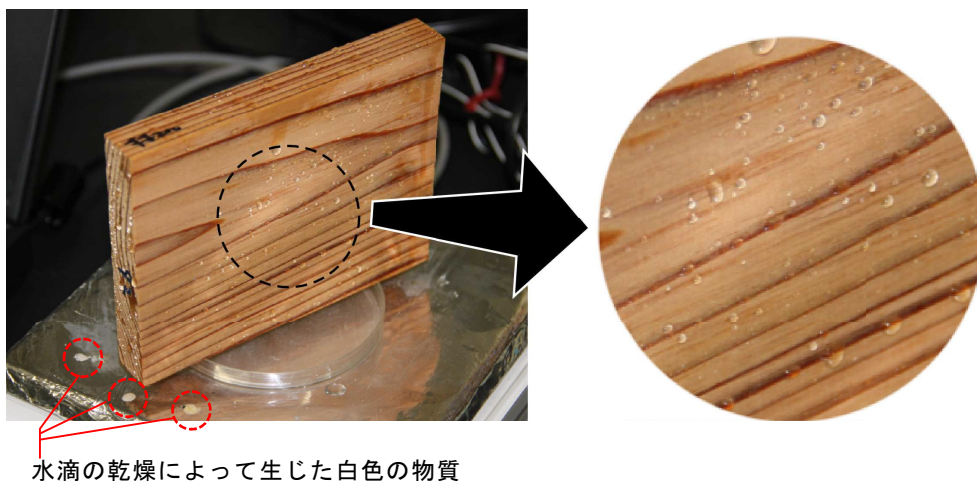


写真 3.2 表面に水滴が観察された試験体の一例

表 3.9 試験体表面に発生した水滴の区分

区 分	表面状態
無 し	水滴が観察されない
微 量	直径2mm未満の水滴が発生
一 部	直径2mm以上の水滴が表面の一部に発生
全 面	直径2mm以上の水滴が全面に発生

表面状態の観察は、試験体の両木口面を除く4面を対象とした。

### 3.2.3 結果と考察

#### 3.2.3.1 吸湿量

放置中における試験体の吸湿量の推移を、図 3.5～3.8 に示す。試験体の吸湿量は、放置開始時及び雰囲気湿度を上げた直後急激に増加し、その後増加が緩やかになり、徐々に一定の値に収束した。また、処理試験体の吸湿量は、無処理試験体よりも大きく、各雰囲気湿度において一定になるまでの期間も長く要した。なお、処理試験体の吸湿量は、雰囲気湿度が大きくなるに従ってバラツキが大きくなったが、水滴の発生状態の違いが原因の一つとして考えられた。

各雰囲気湿度における、試験体の最大吸湿量を図 3.9 に示す。処理試験体の吸湿量は、全ての種類において無処理試験体よりも大きく、平均値で3倍以上の違いがあった。処理試験体の各雰囲気湿度の吸湿量について、種類間の有意差を Steel-Dwass の方法により多重比較<sup>11)</sup>した結果を表 3.10～3.12 に示す。なお、Steel-Dwass の方法を用いた理由は、処理試験体の種類間において吸湿量の分散に違いが見られたからである。処理試験体の吸湿量は、全ての雰囲気湿度において、難燃剤の種類間に有意差が見られ、リン・ホウ素混合系≧ポリリン酸カルバメート系>リン酸グアニジン系の関係があった。また、処理試験体の吸湿量は、同一種類の難燃剤において薬剤固形分量 L の水準間にも有意差が見られた。

難燃剤の種類ごとに、処理試験体の薬剤固形分量 L と最大吸湿量の関係を図 3.10～3.12 に示す。また、図中には両者の回帰直線及び寄与率とともに、無処理試験体の最大吸湿量を併記した。各雰囲気湿度における処理試験体の最大吸湿量は、薬剤固形分量 L との間に、有意水準 1%で正の相関関係が認められた。また、薬剤固形分量 L と最大吸湿量間の回帰直線の傾きは、雰囲気湿度が高いほど大きくなり、雰囲気湿度の上昇により処理試験体の最大吸湿量が増加する傾向が見られた。

以上の結果から、高湿度雰囲気における難燃処理木材の吸湿量は、難燃剤の種類の影響を受け、薬剤固形分量 L との間に正の相関関係があること、及び暴露される雰囲気湿度が高いほど増加することが分かった。

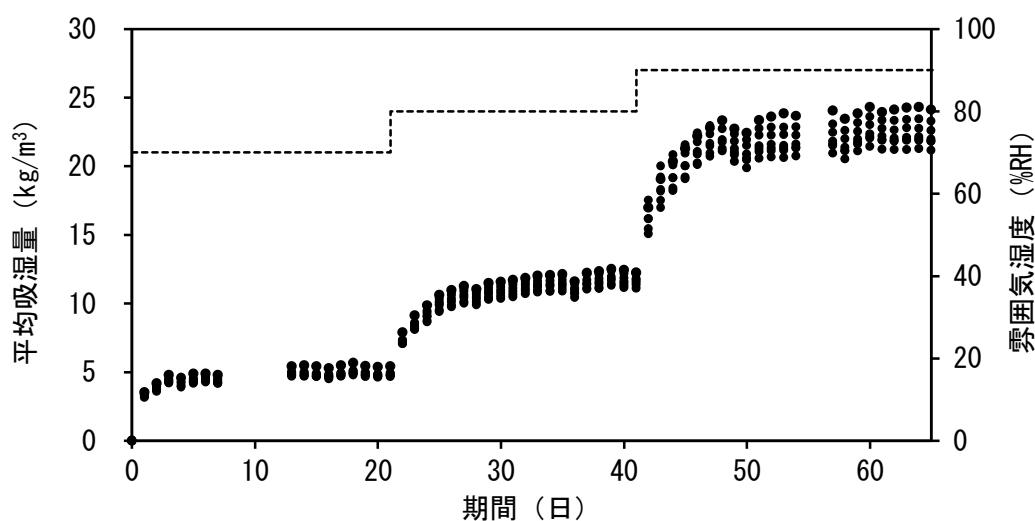


図 3.5 放置中における無処理試験体の吸湿量の推移

● : 無処理試験体, ----- : 雰囲気湿度

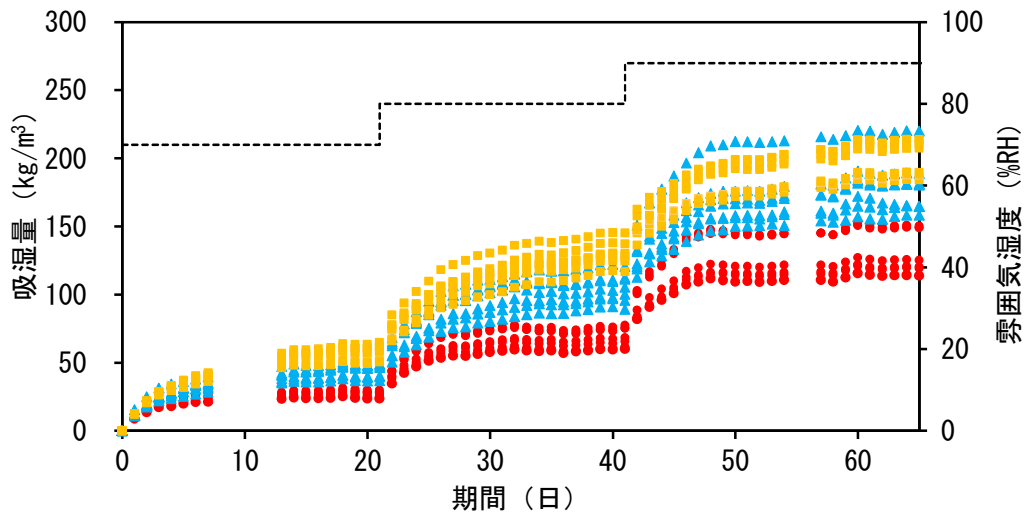


図 3.6 放置中における処理試験体の吸湿量の推移（リン・ホウ素混合系）  
 ● : PB-100, ▲ : PB-150, ■ : PB-200, - - - - : 雰囲気湿度

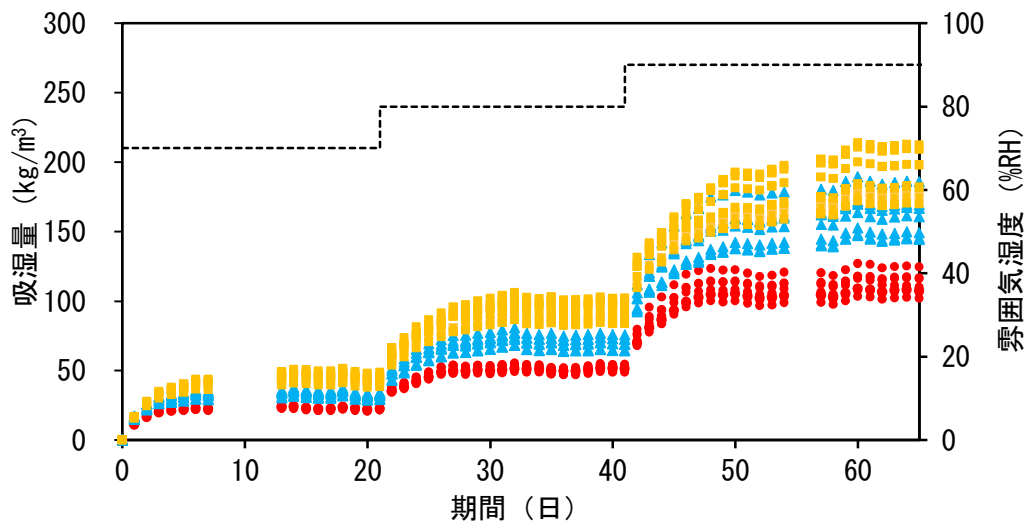


図 3.7 放置中における処理試験体の吸湿量の推移（ポリリン酸カルバメート系）  
 ● : A-100, ▲ : A-150, ■ : A-200, - - - - : 雰囲気湿度

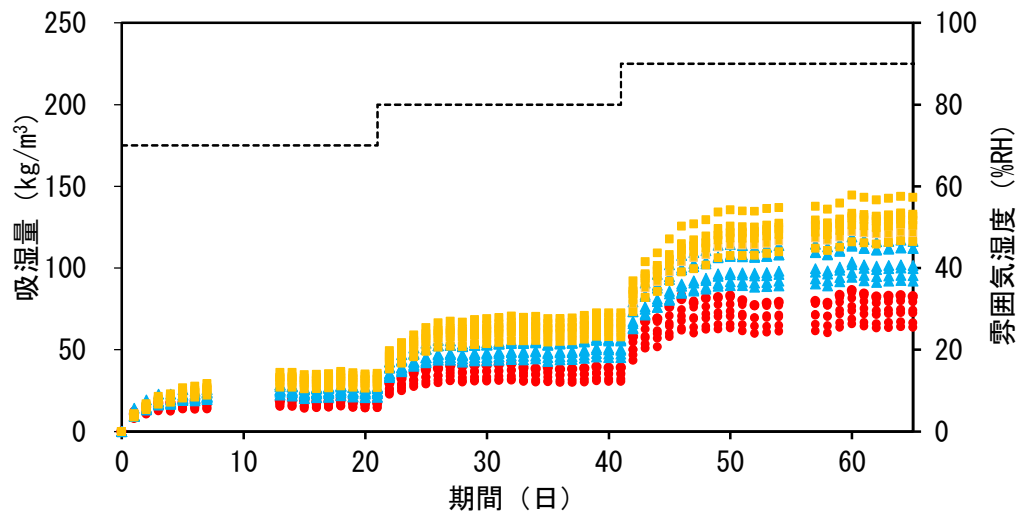


図 3.8 放置中における処理試験体の吸湿量の推移（リン酸グアニジン系）  
 ● : B-100, ▲ : B-150, ■ : B-200, - - - : 雰囲気湿度

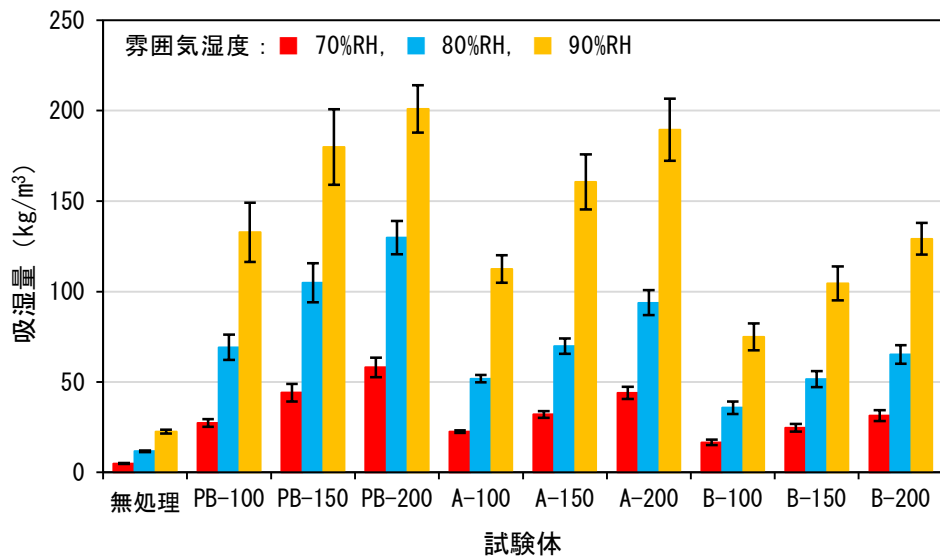


図 3.9 各雰囲気湿度における試験体の最大吸湿量  
 試験体数は 7 体, 値は平均値, エラーバーは標準偏差

表 3.10 多重比較法による処理木材間の最大吸湿量の有意差検定  
(雰囲気湿度 70%RH)

	PB-150	PB-200	A-100	A-150	A-200	B-100	B-150	B-200
PB-100	-3.130	-3.130	-3.130	2.875	-3.130	-3.130	1.981	2.236
PB-150		-3.130	-3.130	-3.130	0.319	-3.130	-3.130	-3.130
PB-200			-3.130	-3.130	-3.130	-3.130	-3.130	-3.130
A-100				-3.130	-3.130	-3.130	1.981	-3.130
A-150					-3.130	-3.130	-3.130	0.640
A-200						-3.130	-3.130	-3.130
B-100							-3.130	-3.130
B-150								3.003

Steel-Dwassの方法<sup>10)</sup>による，表中の値はt値，境界値（有意水準5%）：3.103

：有意水準5%で有意差有り

表 3.11 多重比較法による処理木材間の最大吸湿量の有意差検定  
(雰囲気湿度 80%RH)

	PB-150	PB-200	A-100	A-150	A-200	B-100	B-150	B-200
PB-100	-3.130	-3.130	-3.130	0.192	-3.130	-3.130	-3.130	1.086
PB-150		3.003	-3.130	-3.130	1.981	-3.130	-3.130	-3.130
PB-200			-3.130	-3.130	-3.130	-3.130	-3.130	-3.130
A-100				-3.130	-3.130	-3.130	0.064	-3.130
A-150					-3.130	-3.130	-3.130	1.597
A-200						-3.130	-3.130	-3.130
B-100							-3.130	-3.130
B-150								-3.130

Steel-Dwassの方法<sup>10)</sup>による，表中の値はt値，境界値（有意水準5%）：3.103

：有意水準5%で有意差有り

表 3.12 多重比較法による処理木材間の最大吸湿量の有意差検定  
(雰囲気湿度 90%RH)

	PB-150	PB-200	A-100	A-150	A-200	B-100	B-150	B-200
PB-100	-3.130	-3.130	2.492	2.236	-3.130	-3.130	3.003	0.064
PB-150		1.981	-3.130	1.597	0.958	-3.130	-3.130	-3.130
PB-200			-3.130	3.003	1.597	-3.130	-3.130	-3.130
A-100				-3.130	-3.130	-3.130	1.469	2.747
A-150					2.619	-3.130	-3.130	-3.130
A-200						-3.130	-3.130	-3.130
B-100							-3.130	-3.130
B-150								3.003

Steel-Dwassの方法<sup>10)</sup>による，表中の値はt値，境界値（有意水準5%）：3.103

：有意水準5%で有意差有り

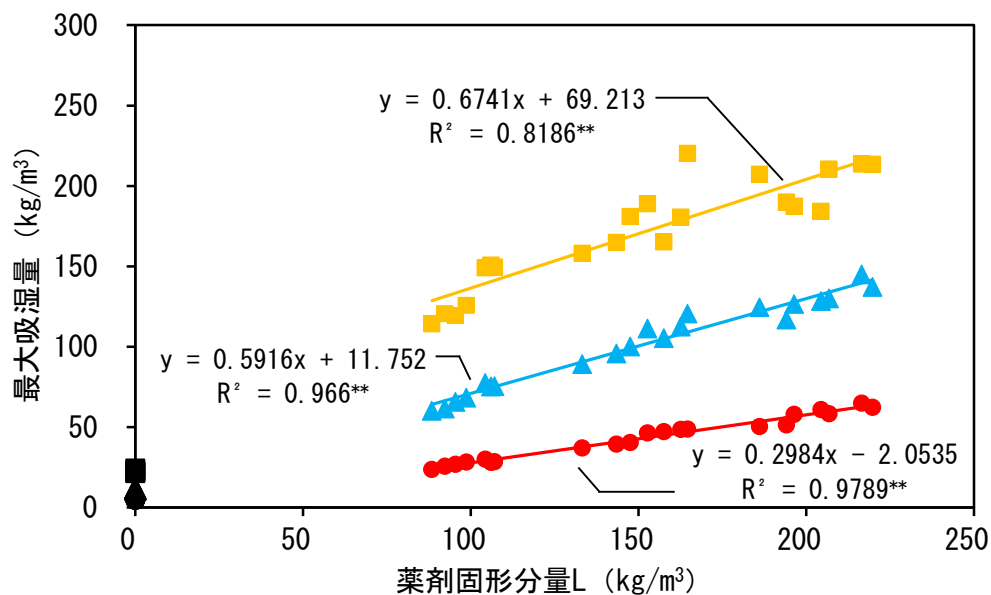


図 3.10 薬剤固形分量 L と最大吸湿量の関係  
 (無処理試験体及びの処理試験体 (リン・ホウ素混合系))  
 ● : 無処理 70%RH, ▲ : 無処理 80%RH, ■ : 無処理 90%RH, ● : PB 処理 70%RH,  
 ▲ : PB 処理 80%RH, ■ : PB 処理 90%RH, \*\*: t 検定において有意水準 1%で有意

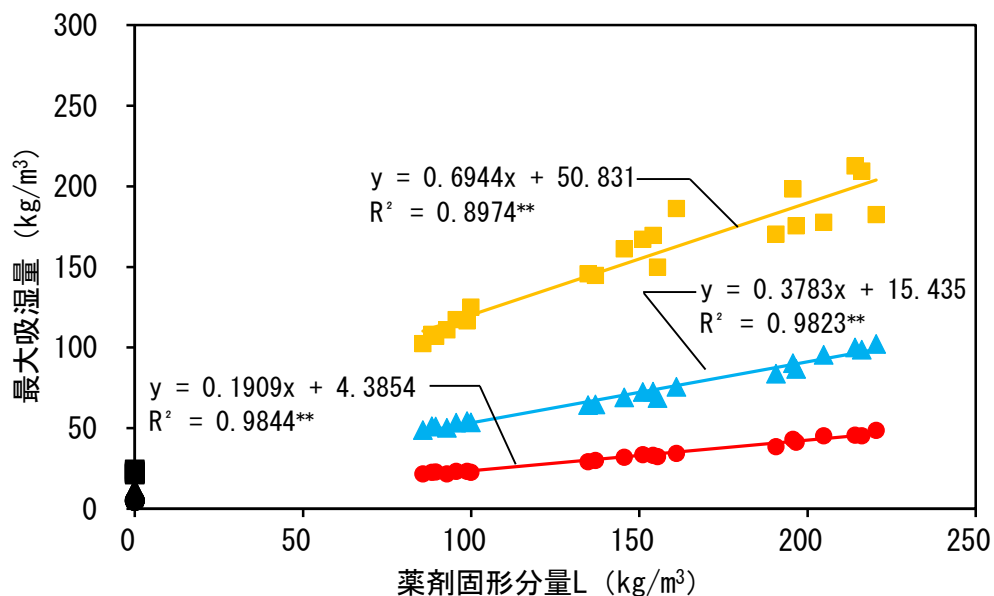


図 3.11 薬剤固形分量 L と最大吸湿量の関係  
 (無処理試験体及びの処理試験体 (ポリリン酸カルバメート系))  
 ● : 無処理 70%RH, ▲ : 無処理 80%RH, ■ : 無処理 90%RH, ● : A 処理 70%RH,  
 ▲ : A 処理 80%RH, ■ : A 処理 90%RH, \*\*: t 検定において有意水準 1%で有意

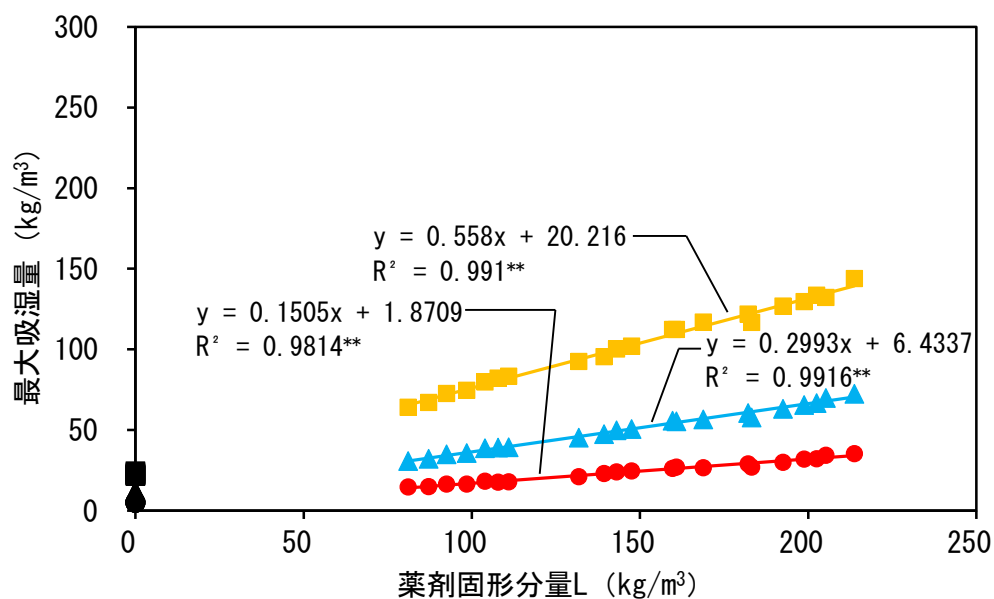


図 3.12 薬剤固形分量Lと最大吸湿量の関係  
(無処理試験体及び処理試験体 (リン酸ゲアニジン系))

● : 無処理 70%RH, ▲ : 無処理 80%RH, ■ : 無処理 90%RH, ● : B処理 70%RH,  
▲ : B処理 80%RH, ■ : B処理 90%RH, \*\*: t検定において有意水準1%で有意

### 3.2.3.2 表面状態の観察

各雰囲気湿度における、試験体の水滴の発生状態を図 3.13～3.15 に示す。無処理試験体は、全ての雰囲気湿度で水滴が発生しなかった。一方、処理試験体は、雰囲気湿度及び処理条件で水滴の発生状態が異なった。

雰囲気湿度 70%RH では、リン・ホウ素混合系とポリリン酸カルバメート系の処理試験体において、薬剤固形分量 L 水準が 150kg/m<sup>3</sup> 以上に水滴が観察された。それらの試験体の水滴発生量は、薬剤固形分量 L の増加にしたがって多くなるが、薬剤固形分量水準 200kg/m<sup>3</sup> においても「全面」に分類される試験体は無かった。薬剤の種類間では、リン・ホウ素混合系が最も水滴の発生が多く、次いでポリリン酸カルバメート系であり、リン酸グアニジン系では水滴が発生しなかった。

雰囲気湿度 80%RH では、処理試験体の水滴の発生量は、全体的に 70%RH よりも多くなった。リン・ホウ素混合系を用いた処理試験体は、薬剤固形分量水準 150kg/m<sup>3</sup> の 1 体、200kg/m<sup>3</sup> の 5 体が「全面」に分類された。また、リン酸グアニジン系を用いた処理試験体は、雰囲気湿度 70%RH では水滴を生じなかったが、薬剤固形分量 L 水準が 150kg/m<sup>3</sup> において 3 試験体に、200kg/m<sup>3</sup> において 4 試験体に「微量」の水滴が観察された。水滴の発生量と薬剤固形分量 L 及び難燃剤の種類との関係は、雰囲気湿度 70%RH と同様であった。

雰囲気湿度 90%RH では、80%RH よりも更に水滴の発生量が増え、全ての処理試験体に水滴が発生した。リン・ホウ素混合系及びポリリン酸カルバメート系を用いた処理試験体は、「一部」又は「全面」に分類された。一方、リン酸グアニジン系を用いた処理試験体は、他の難燃剤を用いた処理試験体よりも水滴の発生量が少ないが、薬剤固形分量水準 100kg/m<sup>3</sup> の 1 体、150kg/m<sup>3</sup> 及び 200kg/m<sup>3</sup> の各 5 体が「一部」に分類され、他は「微量」に分類された。水滴の発生量と薬剤固形分量 L 及び薬剤の種類との関係は、他の雰囲気湿度と同様であった。

以上の結果から、高湿度環境下において難燃処理木材に発生する水滴は、難燃剤の種類間に差があり、薬剤固形分量の増加及び雰囲気湿度の上昇により多くなることが分かった。また、これらの水滴の発生量への難燃剤の種類、薬剤固形分量及び雰囲気湿度の関係は、前項の最大吸湿量と同様であった。図 3.16 に、各水滴の発生区分に分類された処理木材の最大吸湿量を示す。水滴の発生区分が多い処理試験体ほど、最大吸湿量が大きくなる傾向が見られ、両者の間に正の相関関係があった。

なお、上記で観察された処理試験体の水滴は、放置開始及び雰囲気湿度を上昇させた直後に発生したが、放置時間の経過とともに小さくなり、衡量に達するまでには全て消えていた。水滴の発生した処理試験体の吸湿量は、図 3.6～3.8 に示すように衡量に達するまで徐々に増加したことから、水滴の水分は試験体内に吸収されたと考えられた。このことを踏まえると、処理試験体の水滴は、処理板材の表層の難燃剤により急激に吸収された水分が凝集することで生じ、その一方で水滴の水分は徐々に処理板材内部に移動すると推測された。



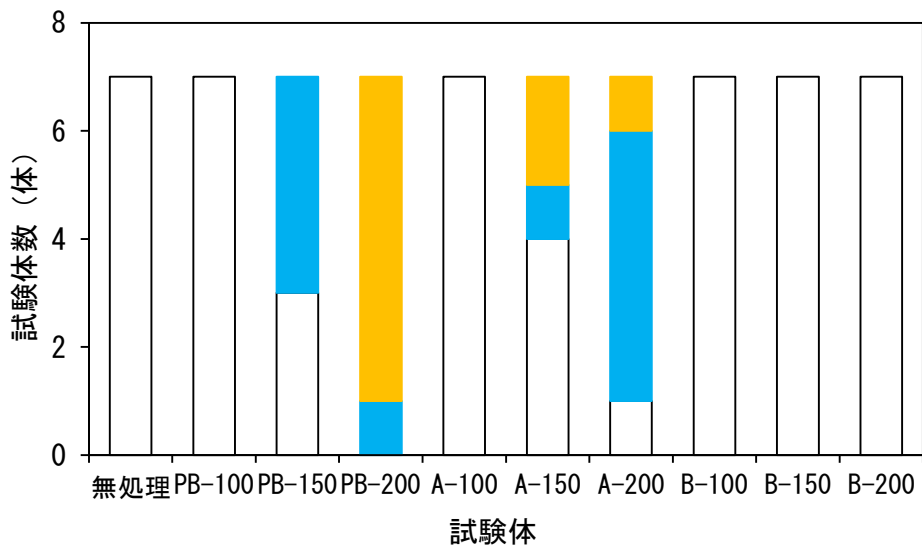


図 3.13 試験体表面への水滴の発生状況（雰囲気湿度 70%RH）  
 凡例：□ 無し，■ 微量，■ 一部，■ 全面

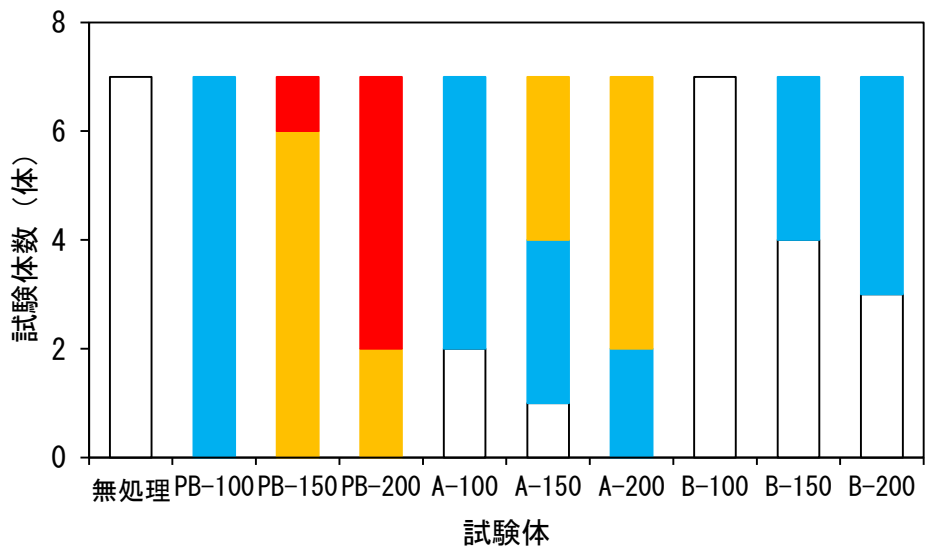


図 3.14 試験体表面への水滴の発生状況（雰囲気湿度 80%RH）  
 凡例は図 3.13 と同じ

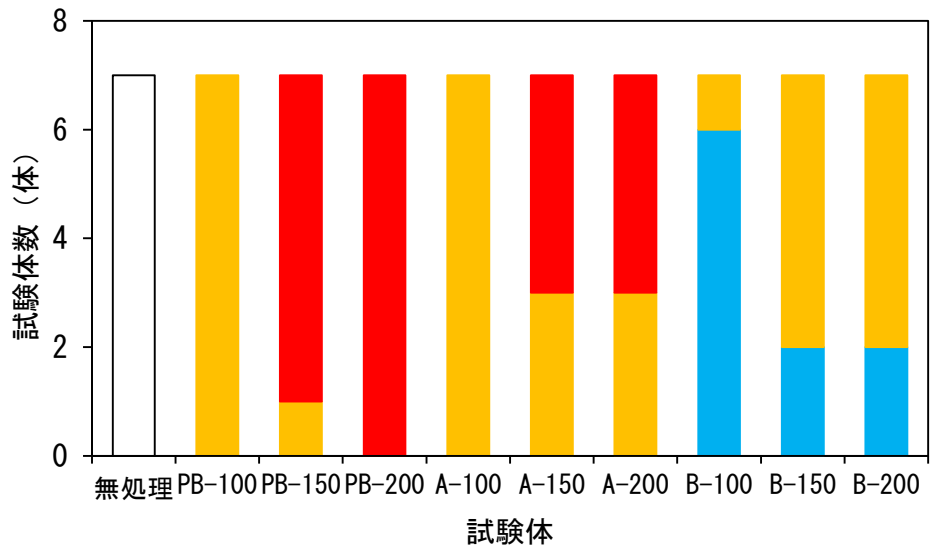


図 3.15 試験体表面への水滴の発生状況 (霧囲気湿度 90%RH)  
凡例は図 3.7 と同じ

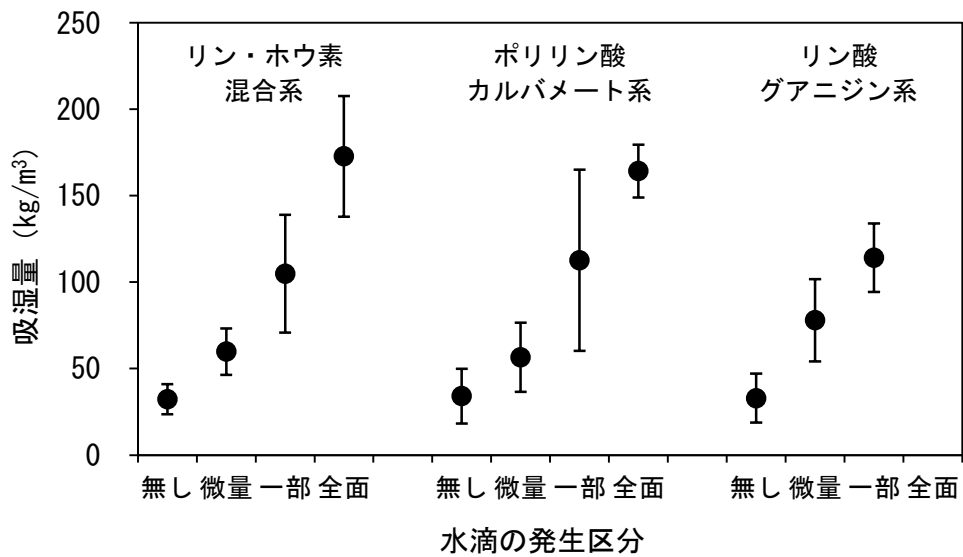


図 3.16 水滴の発生状況と吸湿量の関係  
値は平均値, エラーバーは標準偏差

### 3.2.3.3 白華を発生しない薬剤固形分量の推定

前項までの結果から、難燃処理木材の白華は、難燃剤の種類が影響し、薬剤固形分量の増加及び雰囲気湿度の上昇により発生の可能性が高まることが考えられた。

欧州規格の EN 16755<sup>6)</sup> では、屋内の湿潤環境での使用が想定される難燃処理木材に対して、吸湿性に係る基準を設けている。吸湿性の評価は、 $27\pm 2^{\circ}\text{C} \cdot 90\pm 5\%RH$  の高湿度雰囲気下において、難燃処理木材の含水率が 28%を超えないこと、及び表面に水滴や白華が生じないことを基準としている。なお、発生する水滴や白華については、大きさや量についての規定は無い。以下については、それらを参考に、前項までのデータから、処理試験体が白華を発生しない条件を考察する。

各雰囲気湿度における処理試験体の最終的な質量から、式 (3.1) により含水率を算出した。処理試験体の最大吸湿量と含水率の関係を図 3.17 に示す。また、全面に水滴が発生した処理試験体は、難燃剤の溶脱による最大吸湿量及び含水率への影響が考えられたために除いた。最大吸湿量と含水率の間には、非常に高い正の相関関係が認められた。回帰式より、処理試験体の含水率が 28%に対応する吸湿量を算出すると  $77\text{kg}/\text{m}^3$  であった。図 3.10～3.12 について、最大吸湿量  $77\text{kg}/\text{m}^3$  を示す線を併記したグラフを図 3.18～3.20 に示す。また、図中の各データは、水滴の発生区分をマーカーの種類により示した。

リン・ホウ素混合系を用いた処理試験体では、吸湿量  $77\text{kg}/\text{m}^3$  未満を満たす薬剤固形分量 L 水準は、雰囲気湿度 70%RH では全水準、雰囲気湿度 80%RH では  $100\text{kg}/\text{m}^3$  の水準であった。それらの処理試験体の水滴の発生状態は、「無し」又は「微量」に分類され、水滴の発生状況として著しくないことから、白華を発生しない範囲と判断した。

ポリリン酸カルバメート系を用いた処理試験体では、吸湿量  $77\text{kg}/\text{m}^3$  未満を満たす薬剤固形分量 L は、雰囲気湿度 70%RH では全水準、雰囲気湿度 80%RH では  $100\text{kg}/\text{m}^3$  と  $150\text{kg}/\text{m}^3$  の水準であった。それらの処理試験体の水滴の発生状況は、ほとんどが「無し」及び「微量」に分類されたが、雰囲気湿度 80%RH における薬剤固形分量 L 水準  $150\text{kg}/\text{m}^3$  の 3 試験体が「一部」に分類された。水滴の発生量「一部」は、明らかに水滴の発生が確認される量であり、乾燥後に白華の発生が予想される。これらのことから、雰囲気湿度 80%RH では薬剤固形分量  $100\text{kg}/\text{m}^3$  までが白華が発生しない範囲と判断した。

リン酸グアニジン系を用いた処理試験体では、吸湿量  $77\text{kg}/\text{m}^3$  未満を満たす薬剤固形分量 L は、雰囲気湿度 70%RH と 80%RH では全水準、雰囲気湿度 90%RH では  $100\text{kg}/\text{m}^3$  水準の 4 試験体であった。それらの処理試験体の水滴の発生状態は、雰囲気湿度 70%RH と 80%RH では「無し」と「微量」に分類され、雰囲気湿度 90%RH の薬剤固形分量 L 水準  $100\text{kg}/\text{m}^3$  では 1 試験体が「一部」に、他は「微量」に分類された。雰囲気湿度 90%RH における薬剤固形分量 L 水準  $100\text{kg}/\text{m}^3$  の処理試験体は、全てが吸湿量  $77\text{kg}/\text{m}^3$  未満を満たしていないこと、1 試験体に「一部」に分類される水滴が発生したことから、白華を抑制できないと判断した。

難燃剤の種類ごとに、白華を発生しないと判断された薬剤固形分量 L 水準を表 3.13 に示す。第二章では、板材に準不燃材料の性能を付与する薬剤固形分量の目安を、厚さ 12mm では  $150\text{kg}/\text{m}^3$  を超える量、厚さ 15mm では  $150\text{kg}/\text{m}^3$ 、厚さ 18mm では  $100\text{kg}/\text{m}^3$  とした。それらの薬剤固形分量の難燃処理木材は、本項の雰囲気湿度 90%RH における試験結果から、3 種類の難燃剤ともに白華が発生する可能性があるかと判断された。これらのことから、準

不燃材料水準の難燃処理木材は，使用する難燃剤として最も白華発生の可能性が低いリン酸グアニジン系が適当であり，更に白華抑制のために他の措置を併用することが必要と考えられた。

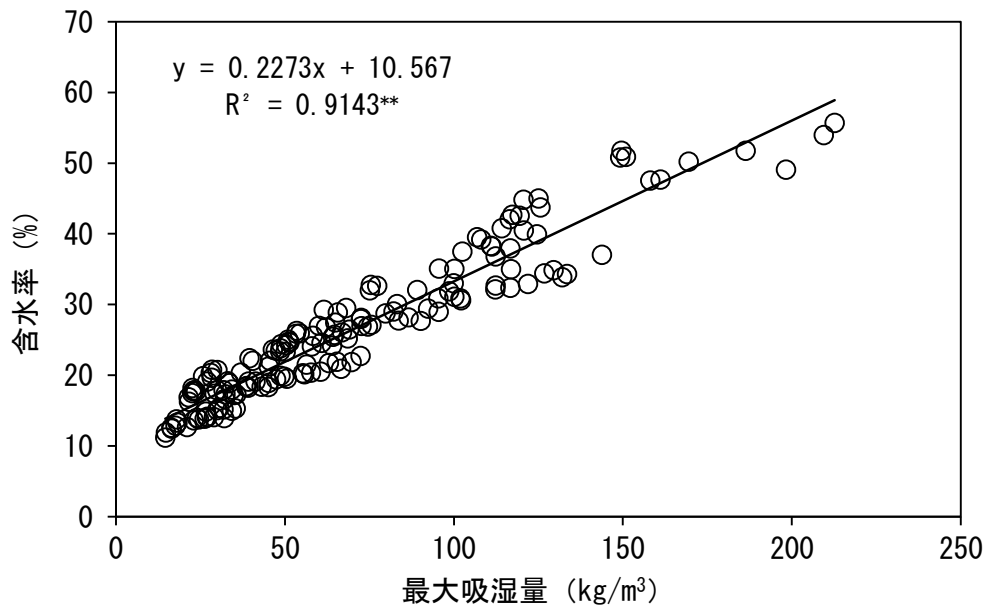


図 3.17 処理試験体の吸湿量と含水率の関係  
\*\*： t 検定において有意水準 1%で有意差あり

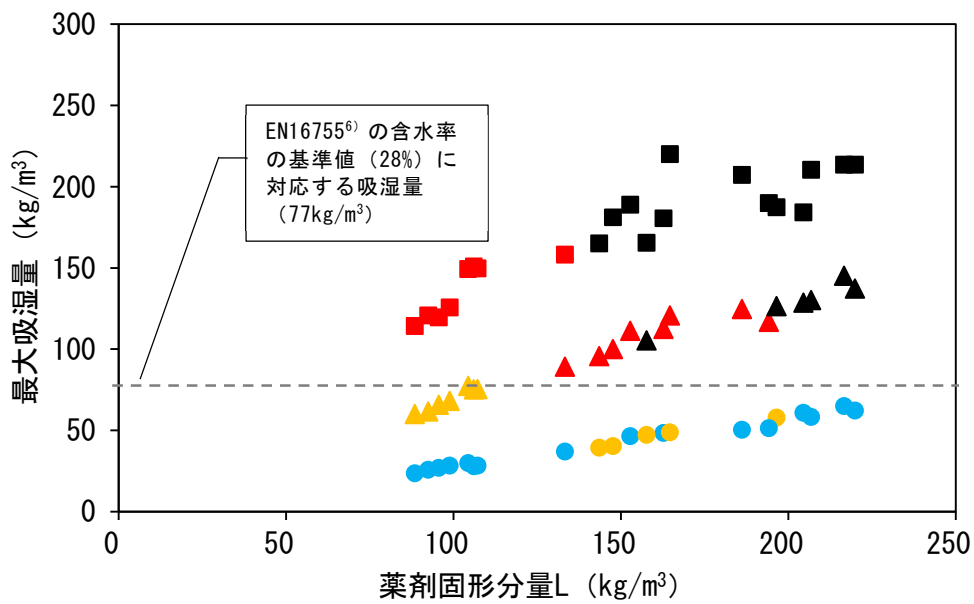


図 3.18 薬剤固形分量 L, 吸湿量及び水滴の発生の関係 (リン・ホウ素混合系)  
 凡例: 形状は雰囲気湿度 ● 70%RH, ▲ 80%RH, ■ 90%RH  
 色は水滴の発生区分 青 無し, 黄 微量, 赤 一部, 黒 全面

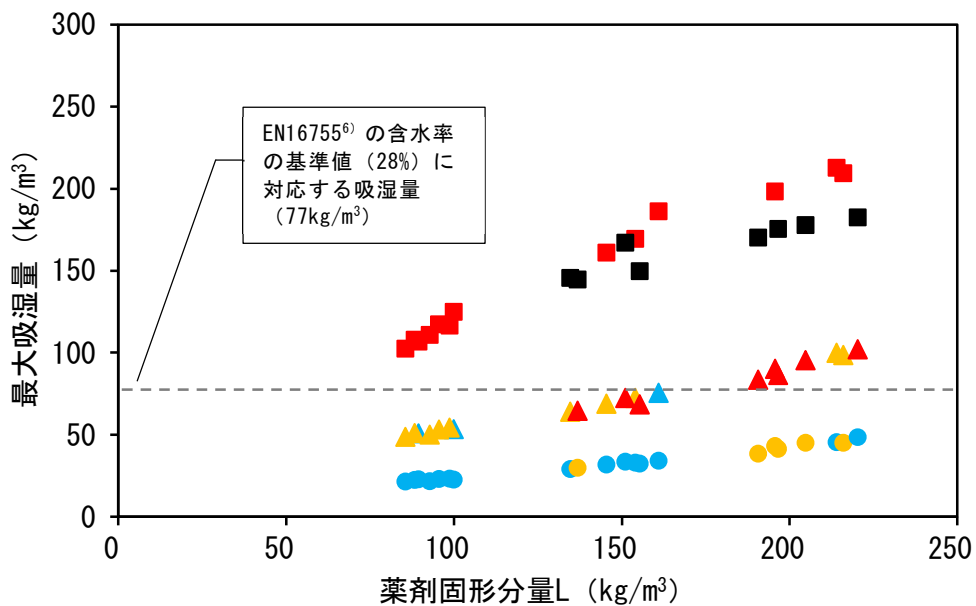


図 3.19 薬剤固形分量 L, 吸湿量及び水滴の発生の関係 (ポリリン酸カルバメート系)  
 凡例: 図 3.18 と同じ

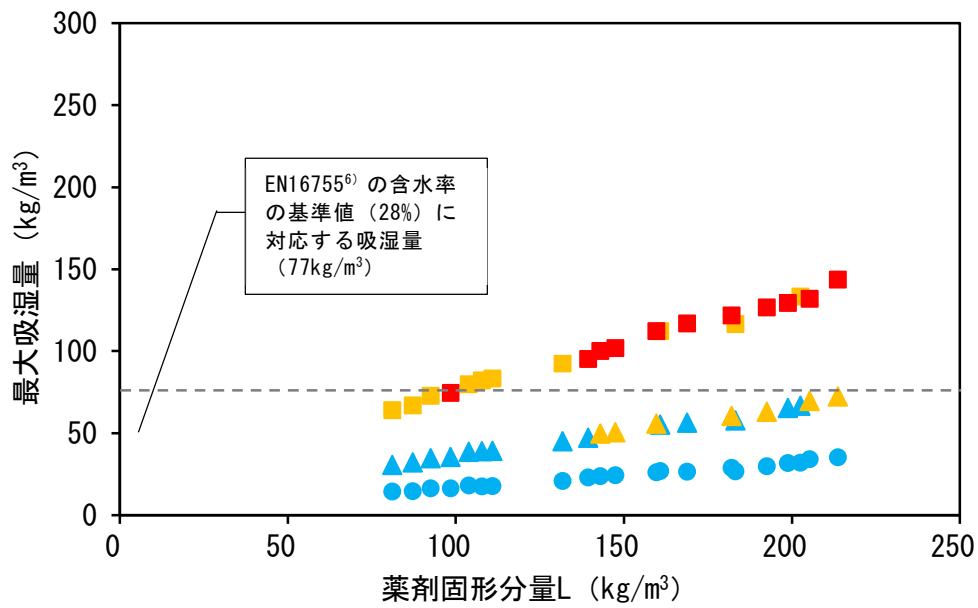


図 3.20 薬剤固形分量 L, 吸湿量及び水滴の発生の関係 (リン酸グアニジン系)  
凡例: 図 3.18 と同じ

表 3.13 白華が抑制可能と判断された薬剤固形分量 L

難燃剤の種類	雰囲気湿度 (%RH)	薬剤固形分量Lの水準		
		100kg/m <sup>3</sup>	150kg/m <sup>3</sup>	200kg/m <sup>3</sup>
リン・ホウ素 混合系薬剤	70	○	○	○
	80	○	×	×
	90	×	×	×
ポリリン酸 カルバメート系	70	○	○	○
	80	○	×	×
	90	×	×	×
リン酸 グアニジン系	70	○	○	○
	80	○	○	○
	90	×	×	×

○: 白華が発生しない, ×: 白華が発生する

### 3.2.4 結論

市販のリン・ホウ素混合系，ポリリン酸カルバメート系及びリン酸グアニジン系を難燃剤に使用して，数水準の薬剤固形分量で作成した難燃処理板材について，高湿度環境下に放置し，吸湿量及び表面に生じる水滴の発生状態から，白華発生への薬剤の種類，薬剤固形分量及び雰囲気湿度の影響を検討した。更に，得られた結果を基に，難燃剤の種類ごとに白華の生じない薬剤固形分量の範囲を考察するとともに，準不燃材料水準の難燃処理木材に推奨される難燃剤を選定した。それらの結果をまとめると，以下の通りとなる<sup>12)</sup>。

- 1) 難燃処理木材の白華の発生は，難燃剤の種類による影響があり，薬剤固形分量の増加及び雰囲気湿度の上昇とともに発生の可能性が高まる。
- 2) 欧州規格の EN 16755 の基準を参考にして，難燃剤の種類ごとに白華を発生しない薬剤固形分量範囲を推測した結果，第一章で得られた準不燃材料に必要な薬剤固形分量の目安では，3種類の難燃剤ともに白華の発生を防ぐことはできないと判断された。
- 3) 準不燃材料水準の難燃処理木材に使用する難燃剤としては，吸湿性の低いリン酸グアニジン系が推奨された。ただし，難燃処理木材の白華発生を防止のために，他の措置を併用する必要があると考えられた。

### 3.3 塗装による白華抑制効果

前項の結果から、難燃処理木材の白華の発生には、難燃剤の種類、薬剤固形分量及び雰囲気湿度の影響があると考えられた。また、試験に用いた3種類の難燃剤では、最も白華を抑制できるリン酸グアニジン系においても、準不燃材料の難燃処理木材では白華の発生が予測された。このことから、準不燃材料の難燃処理木材の白華抑制には、他の措置との併用が必要であると判断された。

白華の発生と深く関係すると考えられる、高湿度雰囲気下において発生する難燃処理木材表面の水滴は、3.2.3.2において木材内の表面付近の難燃剤が吸収した水分が内部に移動できず表面に滞留することが原因と推測された。このことを踏まえると、透湿抵抗の高い塗膜を処理木材表面に形成することは、難燃剤の急激な水分吸収を抑制するため白華抑制に有効であると考えられる。そこで、本項では3.2で選定したリン酸グアニジン系を用いて、準不燃材料水準の処理板材を作成し、それらについて塗装による白華抑制効果を検討した。塗装に用いる塗料は、内装用の木質材料に使用されることが多い無色透明の造膜系の市販品とした。

また、塗料は有機物であるため、塗膜の燃焼に伴う発熱が難燃処理木材の燃焼性状に影響することが懸念される。そこで、上記の試験体については、発熱性試験を併せて行い、難燃処理木材の燃焼性状への塗装の影響を考察した。

#### 3.3.1 試験体

板材は、スギの心材（板目材、気乾密度 $310\sim 349\text{kg/m}^3$ ）を用い、寸法を長さ $140\times$ 幅 $105\times$ 厚さ $18\text{mm}$ とした。板材は397枚用意し、3.2.1.1と同様に気乾密度範囲の全体を含むように、注入処理用を90枚、含水率測定用を20枚選定した。20枚の含水率測定用板材は全乾法により含水率を算出し、平均値を求めた。含水率の算出結果を表3.14に示す。選定した板材は、重量、体積及び表3.14の平均含水率から全乾密度を算出した。選定した板材の概要を表3.15に示す。

難燃剤は、前項で用いた3種類の中では吸湿性が低く、白華の発生が少ないとされたリン酸グアニジン系を用いた。リン酸グアニジン系難燃剤は、原液を水道水により希釈して濃度19.3%の水溶液に調整して注入処理に用いた。

板材は、3.2.1.2と同様に難燃剤水溶液を減圧加圧処理（減圧： $8.0\text{kPa}$ 以下30分間、加圧： $1.27\text{MPa}$ 2時間）により板材に注入処理した。注入処理後の板材の薬剤固形分量Lの分布を図3.21に示す。注入後の処理板材は、注入前後の板材の質量と薬液濃度から式

(2.1)により薬剤固形分量Lを算出し、 $126\sim 167\text{kg/m}^3$ を選定し、後述の白華発生試験及び燃焼試験の試験体に用いた。各試験に用いる処理板材の薬剤固形分量Lは、第二章の結果を基にした。白華発生試験の試験体の薬剤固形分量は、白華発生に処理板材の厚さの影響はないことを前提に、厚さ $15\text{mm}$ 以上の板材に準不燃材料の性能が付与される $138\sim 167\text{kg/m}^3$ 、燃焼試験では試験に用いた厚さ $18\text{mm}$ の板材に準不燃性能が付与される $126\sim 137\text{kg/m}^3$ とした。各試験の試験体に使用した処理板材の概要を、表3.16及び3.17に示す。

試験体の塗装仕様を表3.18に示す。塗料は、市販品の造膜形無色透明の4種類を用い、標準仕様書に基づく条件で処理板材の両木口に除く4面に塗布した。なお、塗装3のフッ素樹脂系塗料は、橋梁等の鉄部材の屋外耐候性付与に実績のある製品であるが、形成



する塗膜の伸縮性が低い。そのため、フッ素樹脂系塗料の塗装は、単独では雰囲気湿度の変化による木材の収縮・膨張への追従が困難と考え、過去の知見<sup>13)</sup>を参考に下塗りに比較的柔らかく木材への密着性も良好なウレタン樹脂系塗料を用いた。以上の塗装処理板材は、無塗装処理板材とともに、両木口面に水性シリコンゴム系シーラー剤を塗布し、試験体とした。各種類の試験体数は、白華発生試験では7体、発熱性試験では3体とした。

表 3.14 板材の含水率

板材番号		気乾密度 (kg/m <sup>3</sup> )	含水率 (%)	板材番号		気乾密度 (kg/m <sup>3</sup> )	含水率 (%)
129	8	348	11.6	211	3	344	12.1
149	1	318	11.6	213	6	324	11.9
165	13	337	11.6	222	14	328	11.9
167	8	310	11.8	239	9	318	12.1
180	7	338	11.9	250	6	312	12.2
181	6	320	12.0	252	13	322	11.8
181	7	315	11.5	253	5	341	11.9
192	11	332	11.7	262	2	321	11.8
192	12	329	11.6	269	9	324	12.4
194	10	334	12.2	272	4	345	12.1
平均						328	11.9
最大						348	12.4
最小						310	11.5

表 3.15 選定した板材の概要

番号	気乾密度 (kg/m <sup>3</sup> )	全乾密度 (kg/m <sup>3</sup> )	番号	気乾密度 (kg/m <sup>3</sup> )	全乾密度 (kg/m <sup>3</sup> )	番号	気乾密度 (kg/m <sup>3</sup> )	全乾密度 (kg/m <sup>3</sup> )			
119	10	337	301	156	8	335	299	228	4	332	296
121	2	319	285	160	3	347	311	228	12	325	290
121	4	323	288	165	3	333	298	236	7	346	311
121	6	328	293	171	3	321	287	236	9	336	301
124	4	345	309	172	5	335	301	236	12	338	303
124	8	330	295	173	10	311	278	239	6	323	289
124	10	318	284	177	5	320	288	241	12	323	290
124	12	325	291	177	9	321	289	241	13	318	285
125	8	337	302	178	11	347	312	242	2	328	293
128	6	346	310	179	8	319	286	244	5	311	278
128	9	340	305	180	14	335	299	244	9	318	285
131	5	318	286	187	2	314	282	246	14	344	309
133	13	346	310	187	10	317	284	247	1	333	297
133	14	340	304	190	4	327	292	248	11	344	308
136	7	348	312	190	9	345	308	250	14	315	282
136	9	340	304	192	13	330	294	251	12	313	281
136	13	342	307	205	6	333	298	252	8	329	295
138	2	324	290	205	9	338	303	252	9	316	284
140	7	343	306	205	12	325	291	259	10	337	302
140	12	336	301	210	7	311	280	260	6	313	279
141	2	334	300	211	7	328	292	262	3	328	294
147	7	348	311	211	11	314	280	262	8	324	290
148	7	329	294	217	1	326	291	262	9	315	282
149	3	316	282	217	10	322	288	262	11	319	286
149	12	310	277	224	3	314	281	262	13	321	288
152	10	343	305	224	7	322	287	266	12	348	312
153	4	316	283	224	12	312	279	269	3	349	313
153	10	327	293	227	2	325	290	272	1	338	304
156	6	332	296	227	5	322	287	272	11	328	294
156	7	328	292	228	1	331	295	273	13	315	283
平均										329	295
最大										348	312
最小										310	277

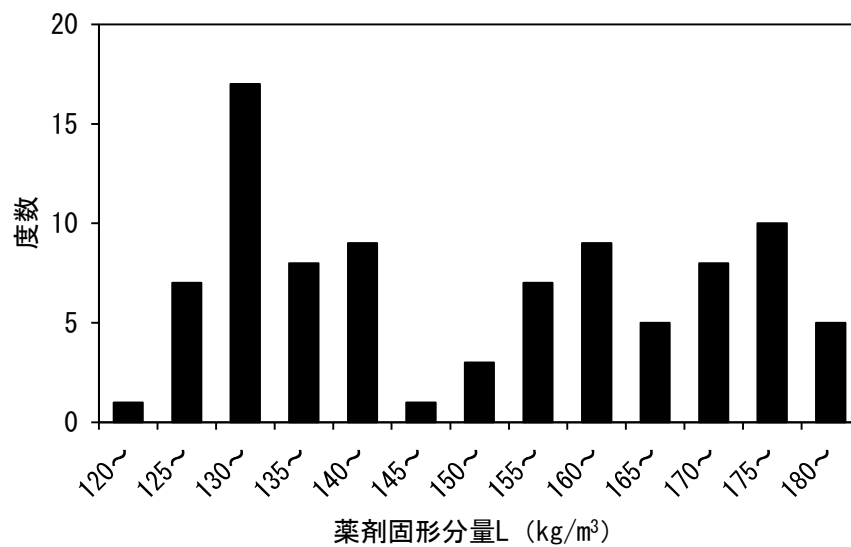


図 3.21 注入処理後における板材の薬剤固形分量 L の分布

表 3.16 白華発生試験に用いる処理板材

	試験体番号	板材番号		板材 全乾密度	薬剤 固形分量L <sup>a)</sup>	
				(kg/m <sup>3</sup> )	(kg/m <sup>3</sup> )	
無塗装試験体	無塗装	1	149	13	287	138
		2	152	4	305	164
		3	194	11	299	142
		4	218	14	282	163
		5	262	1	284	142
		6	272	5	304	158
		7	272	6	302	157
		平均			295	152
塗装試験体	塗装1	1	139	9	282	165
		2	140	2	305	156
		3	153	9	295	143
		4	155	13	310	138
		5	176	12	283	159
		6	180	9	291	141
		7	272	8	293	161
		平均			294	152
	塗装2	1	124	13	290	161
		2	126	12	303	165
		3	155	7	312	141
		4	172	3	302	156
		5	176	2	307	159
		6	246	10	309	138
		7	266	5	309	144
		平均			305	152
	塗装3	1	142	12	306	160
		2	147	2	311	141
		3	148	4	294	160
		4	152	5	277	167
		5	155	4	312	139
		6	211	5	294	148
		7	247	13	304	153
		平均			300	152
	塗装4	1	141	3	291	151
		2	172	6	311	167
		3	232	1	282	139
		4	246	11	306	141
5		247	11	296	153	
6		268	12	285	160	
7		272	7	296	160	
平均			295	153		

a) 式 (2.1) により算出

表 3.17 燃焼試験に用いる処理板材

	試験体番号	板材番号		板材 全乾密度 (kg/m <sup>3</sup> )	薬剤 固形分量L <sup>a)</sup> (kg/m <sup>3</sup> )	
無塗装試験体	無塗装	1	205	5	298	131
		2	227	1	288	126
		3	260	9	304	137
		平均			297	131
塗装試験体	塗装1	1	153	3	280	135
		2	171	6	292	126
		3	224	6	301	132
		平均			291	131
	塗装2	1	149	6	290	134
		2	205	13	290	132
		3	215	3	288	126
		平均			289	131
	塗装3	1	224	11	281	130
		2	227	3	295	127
		3	232	7	311	134
		平均			296	130
	塗装4	1	222	6	309	134
		2	239	13	286	133
		3	242	5	281	128
		平均			292	131

a) 式 (2.1) により算出

表 3.18 試験体の塗装仕様

試験体	塗料	塗布量 (g/m <sup>2</sup> )		固形分 (%)	総固形分量 (g/m <sup>2</sup> )
無塗装	無し				
塗装1	ウレタン樹脂系塗料 (一般, 溶剤系)	下塗り	90	38.2	59.1
		中・上塗り	90	27.5	
塗装2	ウレタン樹脂系塗料 (防火木材用, 溶剤系)	下塗り	90	39.9	63.4
		中・上塗り	90	30.5	
塗装3	フッ素樹脂系塗料 (溶剤系)	下塗り <sup>a)</sup>	90	38.2	75.4
		中・上塗り	110	37.3	
塗装4	無機系塗料 (水系)	下塗り	93	37.4	96.4
		中塗り	99	31.1	
		上塗り	99	31.1	

a) フッ素樹脂系塗料は過去の報告<sup>13)</sup>を参考に、下塗りに一般ウレタン樹脂系塗料を使用した

### 3.3.2 実験方法

#### 3.3.2.1 白華発生試験

試験方法は、3.2.2と同様とした。ただし、雰囲気湿度は、試験を効率的に進めるため、80%RH及び90%RHの2水準とした。白華発生の評価は、前項と同様にし、3.2.2.2に基づく吸湿量と3.2.2.3に基づく表面状態により行った。放置操作前の試験体は、23℃・50%RHの環境下において2週間以上養生させた。放置操作前の試験体の含水率は、8～11%であった。

#### 3.3.2.2 燃焼試験

試験は、2.3.1と同様の発熱性試験とした。試験前の試験体は、温度23℃・湿度50%RHの雰囲気下で24時間の質量変化率が0.1%以下になるまで養生した。装置は、コーンカロリ一計試験装置 (Fire Testing Technology Ltd., UK) を使用し、試験体への加熱強度を50kW/m<sup>2</sup>、加熱時間を10分間とし、発熱速度とその積算値である総発熱量を算出した。また、加熱終了後は、試験体に有害な変形等の有無を確認するとともに、装置付属のロードセルから得られる試験体の質量から、加熱終了時の燃焼量を算出した。

### 3.3.3 結果と考察

#### 3.3.3.1 吸湿量

試験体の吸湿量の推移を図3.22と3.23に示す。無塗装試験体は、各雰囲気湿度への放置が始まると、吸湿量が急激に増加した後、80%RHでは12日目付近で、90%RHでは8～9日目付近で一定になった。一方、塗装試験体は、無塗装試験体よりも初期の吸湿量の増加が小さいが、長期間にわたって上昇し、80%RHでは放置後23日、90%RHでは放置後23日で一定になった。

放置時における試験体の最大吸湿量を図3.24に示す。また、図には3.2.3.3で算出したEN16755<sup>6)</sup>の含水率の基準値に対応する吸湿量を併記した。塗装試験体の吸湿量は、全ての塗料の種類において無塗装試験体よりも若干低くなったが、塗装2と塗装3の2枚を除き、EN16755の基準値から算出した吸湿量よりも高くなった。

また、塗装試験体の衡量に達した時点の吸湿量は、雰囲気湿度80%RHでは無塗装試験体とほぼ同じであり、雰囲気湿度90%RHにおいても全体的な挙動から無塗装試験体に近づきつつある状態と推測された。これらのことから、塗装の作用は処理板材の吸湿特性を変えるのではなく、塗膜の吸湿抵抗により吸湿速度を低下させることと考えられた。処理板材の吸湿速度への塗装の影響を検討するため、無塗装試験体において急激な吸湿を生じた放置後5日間の吸湿量を比較する。各試験体の5日間の吸湿量について、雰囲気湿度80%RHを図3.25に、90%RHを図3.26に示す。無塗装試験体の5日間の平均吸湿量は、雰囲気湿度80%RHでは42kg/m<sup>3</sup>、90%RHでは44kg/m<sup>3</sup>であった。一方、塗装試験体の5日間の平均吸湿量は、雰囲気湿度80%RHでは16～26kg/m<sup>3</sup>、90%RHでは10～17kg/m<sup>3</sup>であり、全種類の塗料で塗装による吸湿速度の低減が認められた。塗装試験体間では、5日間の吸湿量は2水準の雰囲気湿度に共通して、塗装1と2が同じであり、塗装3がそれらと同じか若干低く、塗装4が塗装1～3よりも高くなった。塗装4については、暴露前の試験体において塗膜が少し柔らかい状態であった。塗装4の塗料は、4種類の中で唯一の水性であるため、処理板材に塗布した際に水溶性である難燃剤の成分が溶け出し、塗料の硬化を阻害した可能性がある。このこと

により塗膜の吸湿抵抗が低下し、他の塗料よりも吸湿量が高くなったことが推測された。

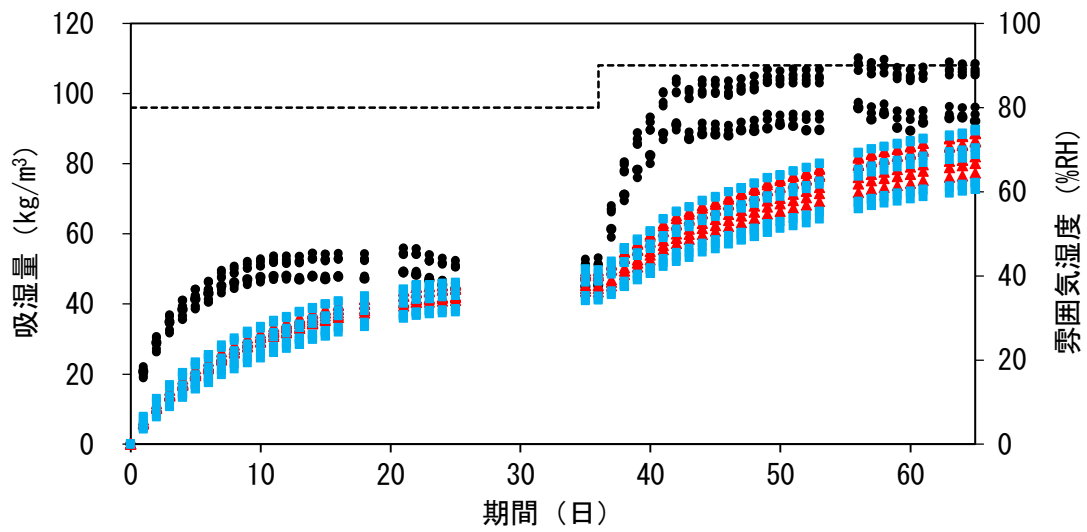


図 3.22 放置中における試験体の吸湿量の推移 1

● : 無塗装, ▲ : 塗装 1, ■ : 塗装 2, -----: 雰囲気湿度

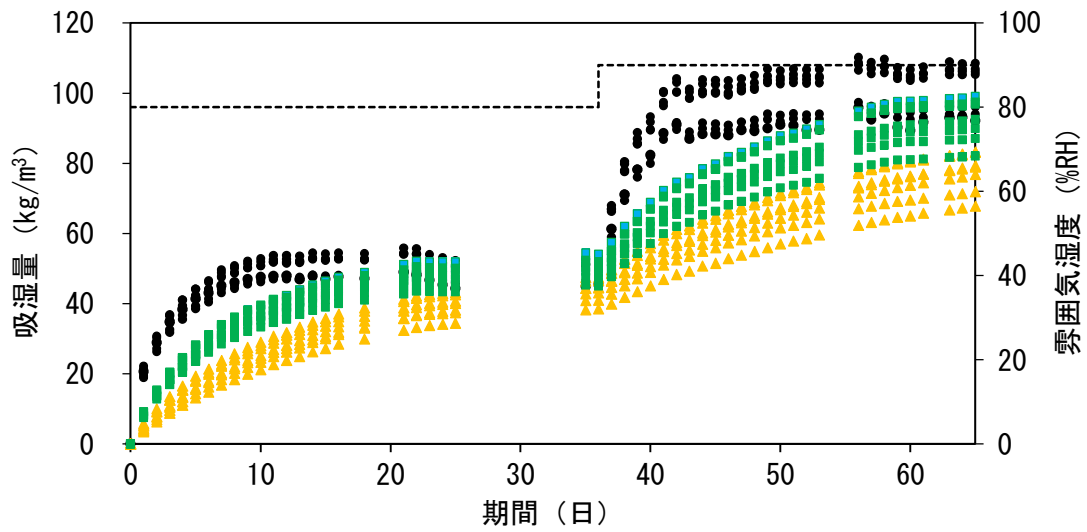


図 3.23 放置中における試験体の吸湿量の推移 2

● : 無塗装, ▲ : 塗装 3, ■ : 塗装 4, -----: 雰囲気湿度

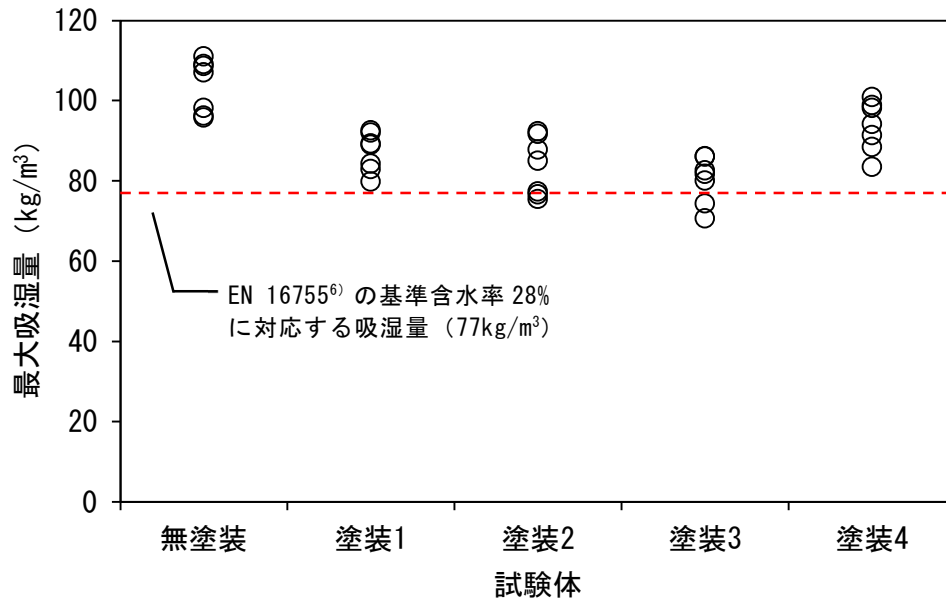


図 3.24 霧囲気湿度 90%RH における試験体の最大吸湿量

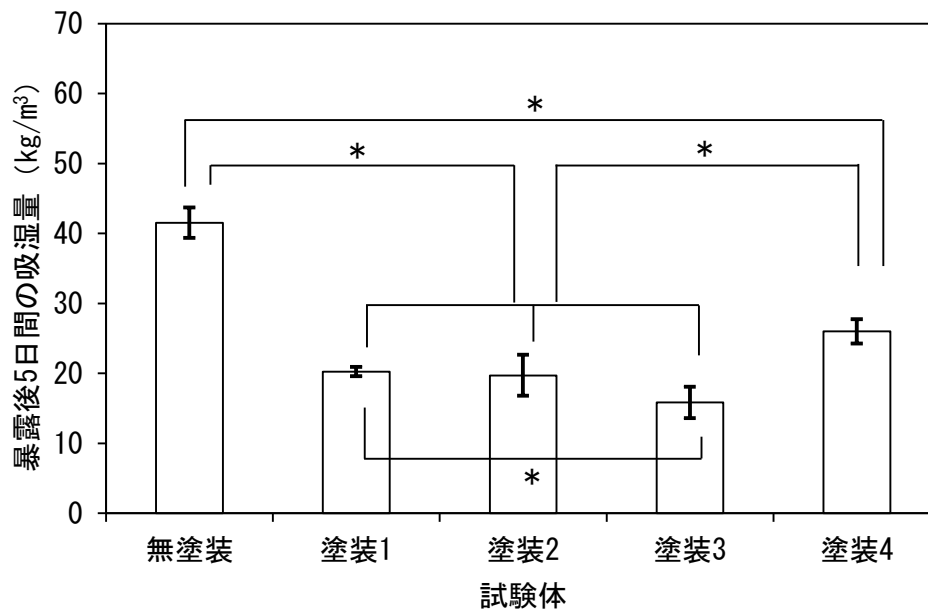


図 3.25 放置後 5 日間の吸湿量 (霧囲気湿度 80%RH)

値は平均値, エラーバーは標準偏差,

Steel-Dwass の方法による多重比較<sup>11)</sup>の結果: \* 有意水準 5%において有意差有り

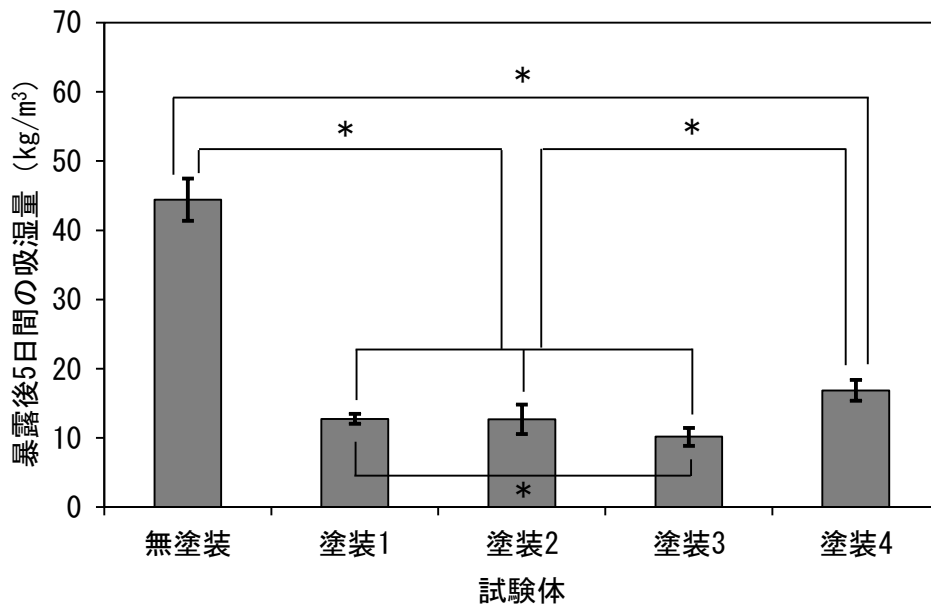


図 3.26 放置後 5 日間の吸湿量 (雰囲気湿度 90%RH)

値は平均値、エラーバーは標準偏差、

Steel-Dwass の方法による多重比較<sup>11)</sup>の結果：\* 有意水準 5%において有意差有り



### 3.3.3.2 表面状態の観察

2水準の雰囲気湿度について、放置中の試験体の水滴の発生状態を図3.27に示す。無塗装試験体は、雰囲気湿度80%RHでは放置後2日目に、90%RHでは放置後1日目に水滴が生じた。それらの水滴は、放置期間の経過とともに徐々に小さくなり、雰囲気湿度80%RHでは23日目に全7体の試験体から、雰囲気湿度90%RHでは14日目に5体の試験体から消えた。

図3.22の無塗装試験体の吸湿量は、暴露期間を通して減少していないことから、3.2.3.2と同様に、表面に生じた水滴の水分は処理板材の内部に徐々に移動したと推測された。

一方、塗装試験体は、全ての種類が放置期間終了時まで表面に水滴を生じなかった。3.2.3.2で示したように、水滴は処理板材の表層の難燃剤による吸湿が急激であるため、水分が表面に凝集して生じると推測される。塗装試験体では、表層の難燃剤の吸湿が塗膜の透湿抵抗により抑制されることで表面での水分の凝集が防がれ、一方、吸収された水分は量が少ないため板材内部に移動することで水滴が生じなくなったと考えられた。

以上の結果から、第二章で示した準不燃材料水準の難燃処理木材は、4種類の塗料の塗装により、高湿度雰囲気における吸湿量ではEN16755<sup>6)</sup>の基準含水率を超えるが、吸湿速度低下効果により白華が抑制できると判断した。ただし、塗装4の無機系塗料は、難燃剤の成分により塗料の硬化が阻害された可能性があることから不適と判断した。残りの3種類の塗料は、白華抑制に対する性能としてはほぼ同じであるが、価格、入手しやすさを考慮すると、一般木材用のウレタン樹脂系塗料（溶剤系）が準不燃材料水準の難燃処理木材に推奨される。

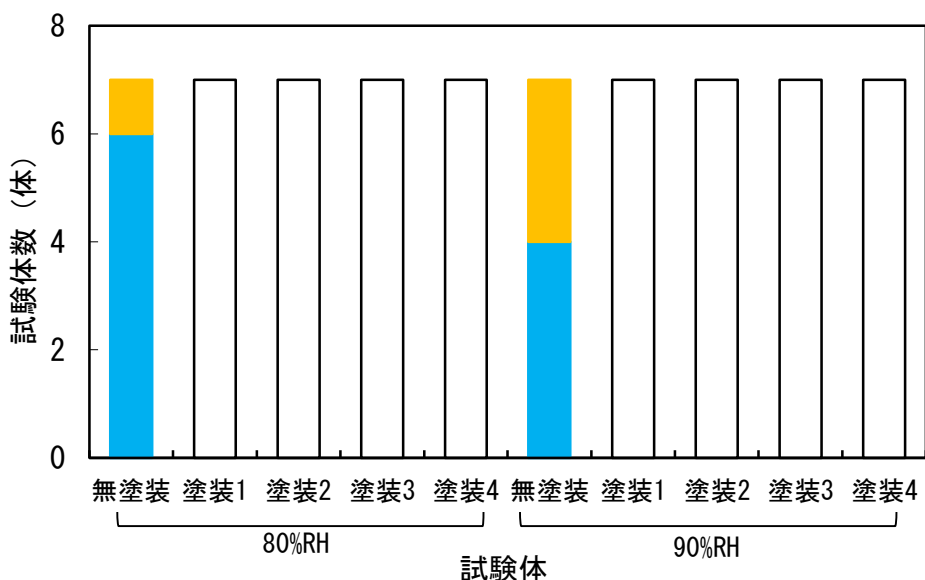


図 3.27 試験体表面への水滴の発生状況

凡例：□ 無し，■ 微量，■ 一部，■ 全面

### 3.3.3.3 塗装による燃焼性状への影響

各種類の試験体について、加熱中の発熱速度の推移を図 3.28～図 3.32 に示す。

無塗装試験体は、加熱時間内に着火することは無く、 $10\text{kW/m}^2$  未満の低い発熱速度で加熱終了時まで推移した。一方、塗装した試験体は、加熱後 4～19 秒に加熱面の塗膜に着火し、14～38 秒間有炎燃焼を生じた。塗装試験体の発熱速度は、この塗膜の燃焼によりピークが生じ、ピーク収束後では無塗装試験体と同様に低い値で加熱終了時まで推移した。

各種類の試験体の最高発熱速度を図 3.33 に示す。塗装試験体の最高発熱速度は、塗膜の燃焼による発熱速度のピークにより、無塗装試験体よりも平均値で  $124\sim 206\text{kW/m}^2$  上昇した。塗装試験体間では、塗装 4 が大きく、塗布した塗料の総固形分量を反映した結果となった。

各種類の試験体の 10 分間総発熱量を図 3.34 に示す。図中では、塗膜の燃焼に伴う発熱量が分かるように、塗膜の有炎燃焼が確認された加熱後 1 分間までの総発熱量を区分した。塗装試験体の 10 分間総発熱量は、無塗装試験体よりも平均値で  $2.1\sim 2.8\text{MJ/m}^2$  大きくなった。無塗装試験体と塗装試験体は、加熱後 1 分間を除いた総発熱量ではほぼ同じであることから、10 分間総発熱量の差は塗膜の燃焼による発熱量であることが分かる。

各試験体の発熱性試験の結果を表 3.19 に示す。なお、表中の下段には、準不燃材料の性能評価試験における評価基準<sup>14)</sup>を記載した。上記のように、処理板材は塗装することにより、最高発熱速度の上昇及び総発熱量の増加を生じた。最高発熱速度については、塗装 4 において 2 試験体が  $200\text{kW/m}^2$  を超えるが、評価基準となる 10 秒以上の継続は見られなかった。一方、10 分間総発熱量は、塗装により  $2.1\sim 2.8\text{MJ/m}^2$  増加し、基準値の  $8\text{MJ/m}^2$  に対して 26～35%を占めることから影響が大きい。塗装した難燃処理木材は、準不燃材料の認定を取得する場合は、塗膜の燃焼による発熱量を考慮し、処理木材の総発熱量を  $5.0\text{MJ/m}^2$  程度を上限とする必要があると考えられた。

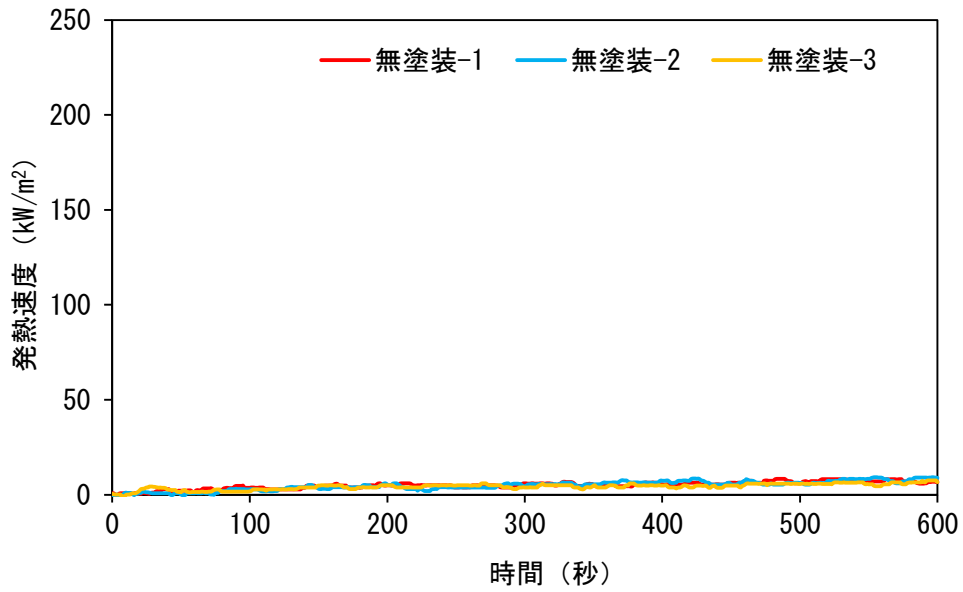


図 3.28 無塗装試験体の発熱速度及び総発熱量の推移

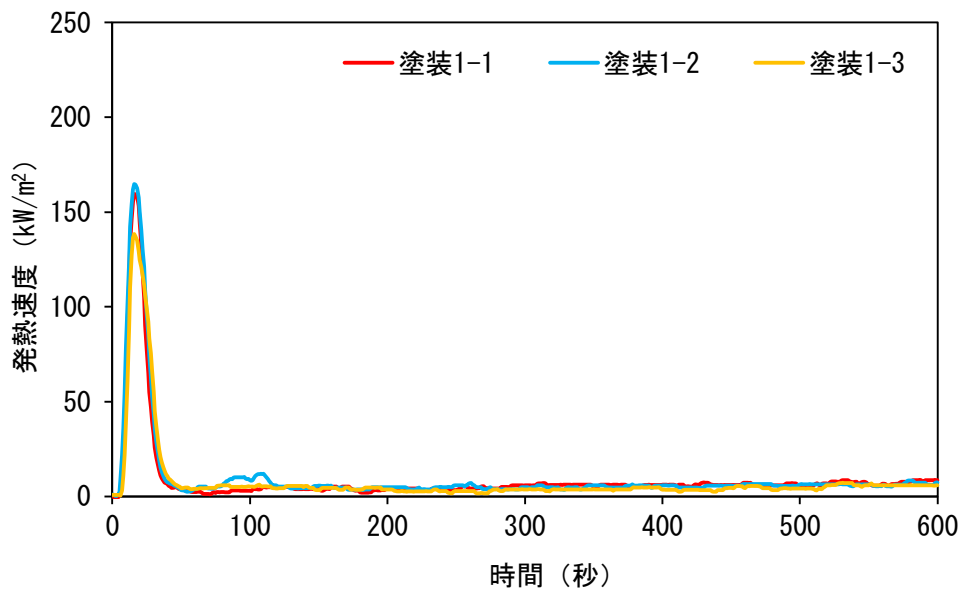


図 3.29 塗装試験体の発熱速度及び総発熱量の推移 (塗装 1)

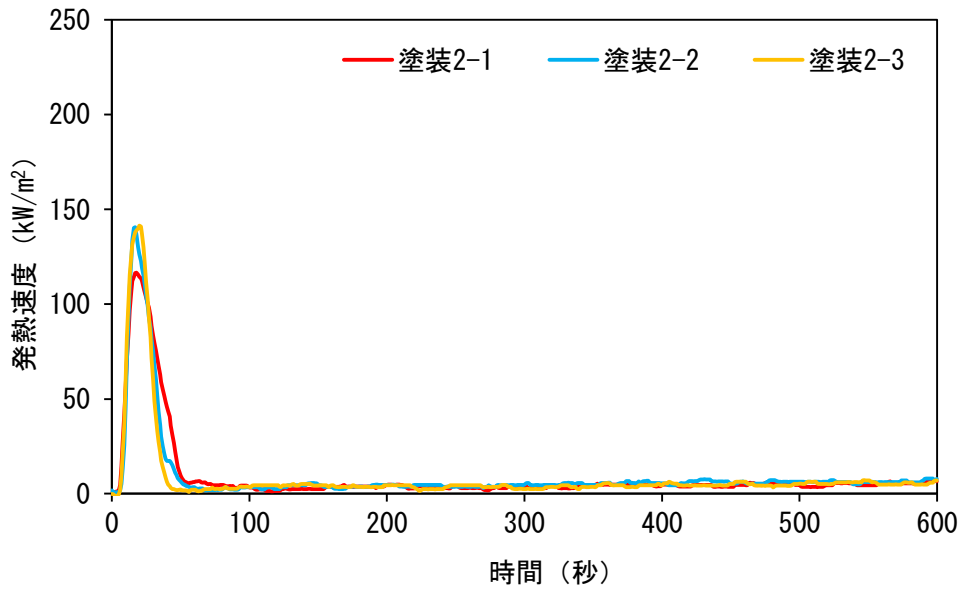


図 3.30 塗装試験体の発熱速度及び総発熱量の推移（塗装 2）

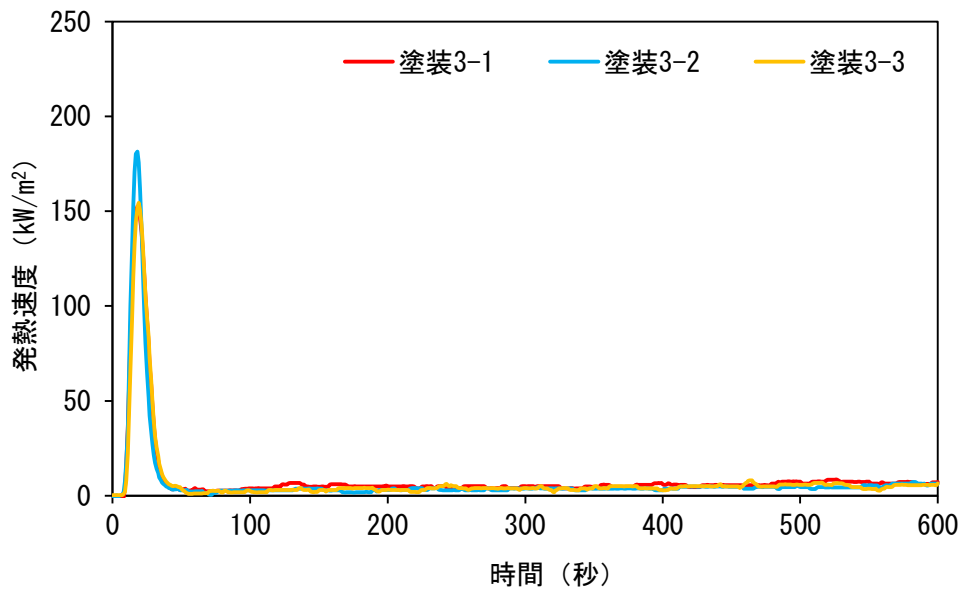


図 3.31 塗装試験体の発熱速度及び総発熱量の推移（塗装 3）

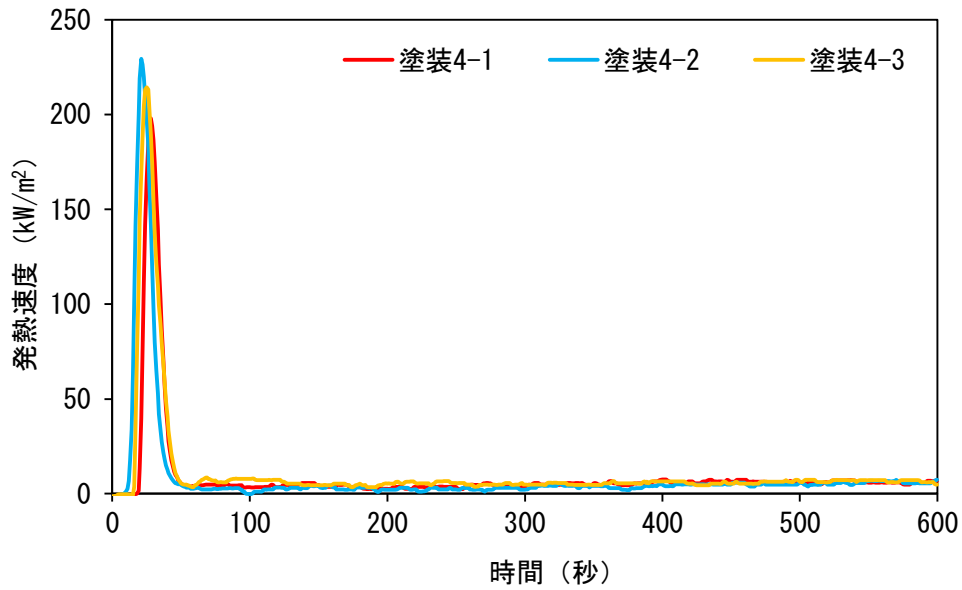


図 3.32 塗装試験体の発熱速度及び総発熱量の推移（塗装 4）

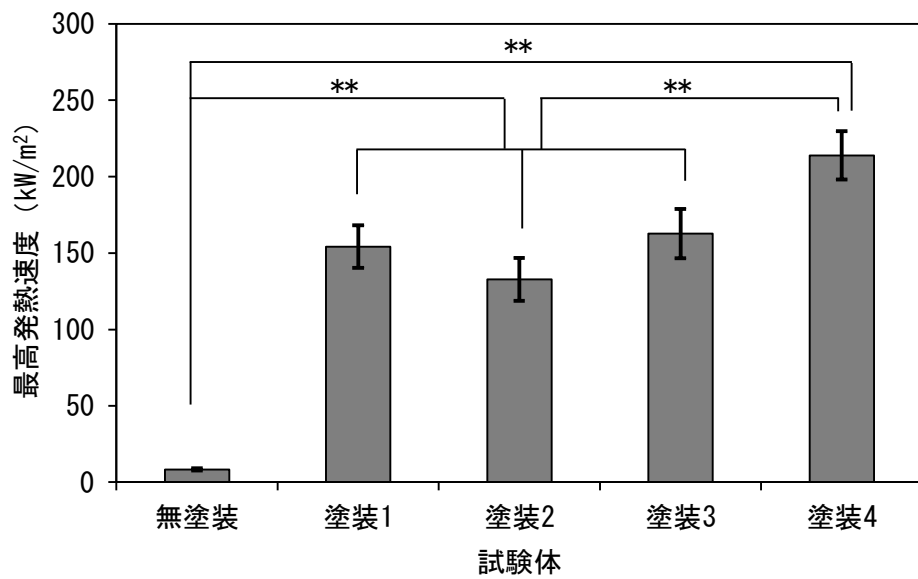


図 3.33 試験体の最高発熱速度

値は平均値，エラーバーは標準偏差，  
Tukey-Kramer の方法による多重比較<sup>11)</sup>の結果：\*\* 有意水準 1%において有意有り

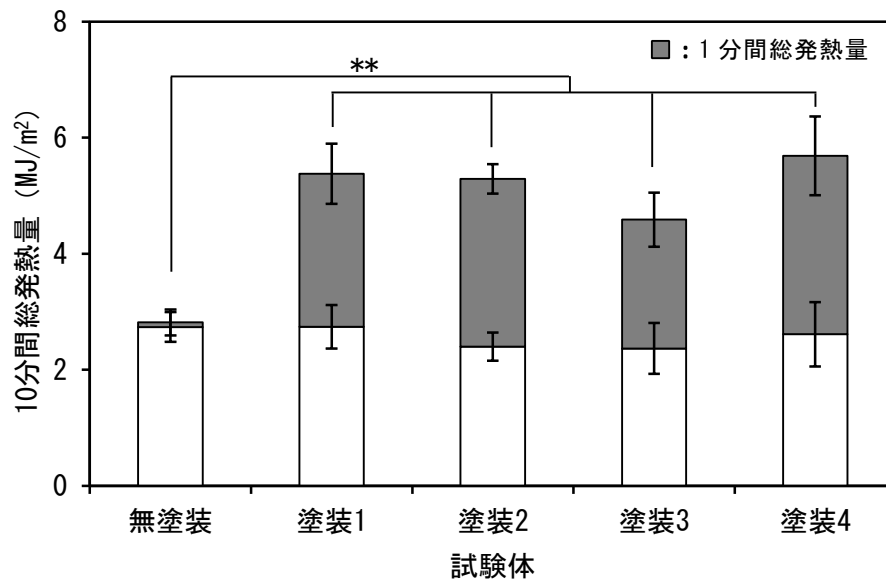


図 3.34 試験体の 10 分間総発熱量

値は平均値，エラーバーは標準偏差，

Tukey-Kramer の方法による多重比較<sup>11)</sup>の結果：\*\* 有意水準 1%において有意差有り

表 3.19 発熱性試験の結果

試験体	番号	発熱速度		10分間 総発熱量 (MJ/m <sup>2</sup> )	燃焼量 (g)	着火時間 (秒)		有害な 変形等の 有無 <sup>a)</sup>
		最高値 (kW/m <sup>2</sup> )	200kW/m <sup>2</sup> を継 続して超えた 時間 (秒)			着火	消火	
無塗装	1	8	0	3.0	22.8	無し		○
	2	9	0	2.9	22.8	無し		○
	3	8	0	2.6	22.5	無し		○
	平均	8	0	2.8	22.7	無し		
塗装1	1	160	0	5.4	24.0	5	27	○
	2	165	0	5.9	24.1	4	27	○
	3	138	0	4.8	23.0	6	28	○
	平均	154	0	5.4	23.7	5	27	
塗装2	1	117	0	5.4	24.3	5	43	○
	2	141	0	5.5	23.1	6	32	○
	3	141	0	5.0	24.6	6	34	○
	平均	133	0	5.3	24.0	6	36	
塗装3	1	153	0	5.1	24.5	7	25	○
	2	181	0	4.2	23.6	6	20	○
	3	154	0	4.4	25.6	8	25	○
	平均	163	0	4.6	24.6	7	24	
塗装4	1	198	0	5.4	25.4	19	34	○
	2	229	5	5.2	24.3	10	29	○
	3	214	5	6.5	23.9	15	38	○
	平均	214	3	5.7	24.5	15	34	
業務方法書 <sup>14)</sup> における基準		10秒以上継続して 200kW/m <sup>2</sup> を超えない		8MJ/m <sup>2</sup> 以下 であること				無いこと

a) 有害な変形等：裏面まで貫通する亀裂穴，リテーナーフレームの開口部 94mm より小さな収縮，

○：無し，×：有り

### 3.3.4 結論

3.2 で選定したリン酸グアニジン系難燃剤を用いて第二章に示した準不燃材料の基準性能を付与する薬剤固形分量の処理を行った厚さ 18mm の板材について、無色透明の造膜形塗料である、ウレタン樹脂系塗料（一般木材用，溶剤系），ウレタン樹脂系塗料（防火木材用，溶剤系），フッ素樹脂系塗料（非木材用，溶剤系），無機系塗料（水系）の塗装による白華抑制効果を，高湿度雰囲気への放置試験により評価した。更に，それらの試験体は，発熱性試験により燃焼性状を評価し，処理板材の発熱性への塗装の影響を把握した。その結果，以下が明らかになった。

- 1) 4 種類の塗装仕様は，高湿度雰囲気下における難燃処理木材の吸湿速度を低減した。
- 2) 塗装した難燃処理木材は，吸湿量では EN16755 の基準含水率を超える値となるが，処理木材の吸湿速度を低減させる効果により白華抑制が期待できた。
- 3) 無機系塗料は，唯一の水性の製品であるが，難燃剤の影響による塗膜の硬化不良を生じた可能性があることから，塗料の選定には難燃剤との相性を考慮する必要がある。
- 4) 準不燃材料の難燃処理木材に使用する塗料として，価格，処理木材との相性，入手しやすさを考慮すると，一般木材用ウレタン樹脂塗料（溶剤系）が適当と考えられた。
- 5) 4 種類の塗装仕様は，難燃処理木材に最高発熱速度の上昇及び総発熱量の増加をもたらす。そのため，塗装した難燃処理木材が準不燃材料の基準性能を満たすには，塗膜の燃焼による発熱量  $2.0\sim 2.8\text{MJ/m}^2$  を考慮して，処理木材の 10 分間総発熱量を  $5.0\text{MJ/m}^2$  を上限にする必要がある。

## 第四章 長尺の難燃処理板材の燃焼性状と模型箱試験

### 4.1 はじめに

難燃処理木材は、天然材料である木材の部分的な注入性の違いから、材内の難燃剤の分布にバラツキが生じる。既往の報告<sup>1~3)</sup>では、難燃剤の注入処理後の板材は、人工乾燥の工程において材内の難燃剤が木口方向又は表層に移動することが言われている。実際に、製品に近い長尺の難燃処理木材について、長さ方向の薬剤固形分量の分布を分析した結果では、木口付近の薬剤固形分量が大きいことが示されている<sup>4,5)</sup>。第二章で示したように難燃処理木材の燃焼性状は難燃剤の薬剤固形分量に依存することから、長尺の難燃処理木材では長さ方向において燃焼性状にバラツキがあることが考えられる。

現行の防火材料の性能評価試験<sup>6)</sup>では、法令で定める技術基準である「燃焼しないものであること」及び「防火上有害な変形、溶融、き裂その他の損傷を生じないものであること」の評価は、ほとんどがコーンカロリメーターを用いた発熱性試験で行われている。発熱性試験は、試験体の寸法が縦99×横99mmと小さいため、手軽に試験を行うことができ、材料の燃焼性状を詳細に把握するための有用なデータを得ることができる。しかし、試験体の寸法が小さいため、長尺の薬剤処理木材のように燃焼性状が部分的なバラツキがある材料では、試験体の採取場所が試験結果に影響するため、材料全体の燃焼性状を評価することが困難である。また、発熱性試験では、試験体は装置に水平方向に設置され、上方から電気ヒーターで輻射熱を均一に与えられる。しかし、それは室内火災において壁や天井の材料が受ける加熱条件と異なり、また部分的な燃焼が壁や天井の相互作用を受けながら徐々に広がっていく室内火災の進展挙動が考慮されていない。

防火材料の性能評価試験を実施する一部の機関では、準不燃材料と難燃材料の評価に発熱性試験とともに中規模試験である模型箱試験が設定されている。模型箱試験は、建物の部屋を模した供試箱（内寸で幅840×長さ1680×高さ840mm）を用いて、天井及び壁の部分に試験材料を留め付け、箱内の奥の左隅に設置したガスバーナーで加熱し、試験材料の燃焼性状を評価する。模型箱試験は、使用する試験材料の寸法が大きいため、材料の内部のバラツキを含めて全体的な燃焼性状を把握できる。更に、模型箱試験では実際の建物の部屋と同じように試験材料を取り付けるため、室内火災に近い状態で試験材料の燃焼挙動が評価される。これらのことから、難燃処理木材の燃焼性状を適正に把握するには、模型箱試験による評価が必要と考える。

難燃処理木材の燃焼性状を模型箱試験で評価した報告は限られている。河原崎等の報告<sup>1)</sup>では、リン・ホウ素混合系難燃剤を用いた厚さ18mmの長尺スギ処理板材を模型箱試験で評価した結果、薬剤固形分量88~146kg/m<sup>3</sup>（平均120kg/m<sup>3</sup>）で準不燃材料の基準することを示した。同様に、藤田等の報告<sup>2)</sup>ではリン酸・ホウ砂・ホウ酸混合難燃剤を用いて薬剤固形分量を数水準変えた厚さ18mmの長尺処理スギ板材について、模型箱試験で評価した結果、加熱後に節の部分に貫通する亀裂・割れが生じたが、薬剤固形分量81~103kg/m<sup>3</sup>（平均92kg/m<sup>3</sup>）で準不燃材料の総発熱量及び最高発熱速度の基準値を満たした。上記の2つの報告で模型箱試験の評価において、厚さ18mmの長尺板材に準不燃材料の性能を付与した薬剤固形分量は、第二章において発熱性試験の評価で厚さ18mmのスギ板材に準不燃材料の性能を付与する薬剤固形分量の目安100kg/m<sup>3</sup>と近い値である。このことから、発熱性試験の結果から、模型箱試験において準不燃材料の基準を満たす長尺処理板材の薬剤固形分量を推



定可能と考えられる。しかし、これまでの報告では、難燃処理木材について模型箱試験と発熱性試験の評価結果の関係を詳細に検討されたことはない。

そこで本章では、第三章で選定したリン酸グアニジン系難燃剤及び一般木材用ウレタン樹脂系塗料を用いて、発熱性試験の結果を基に推定した準不燃材料の性能が得られる薬剤固形分量で長尺の塗装薬剤処理板材を製造し、模型箱試験で全体的な燃焼性状を把握するとともに準不燃材料の性能を評価した。更に、模型箱試験の結果については、長尺処理板材の長さ方向の薬剤固形分量の変動の影響を考察した。

実験の流れを図 4.1 に示す。試験には、市販される難燃処理木材の寸法を踏まえて、長さ 3000mm と 4000mm の 2 種類のスギ板材を用いた。長尺板材への難燃剤の注入処理は、難燃処理木材を製造している(株)ハルキの生産設備を使い、図 4.2 に示す同社の定める製品の品質管理フローに沿って行った。

製造した長尺処理板材は、「4.2 長さ方向における薬剤固形分量の分布」と「4.3 準不燃材料の長尺処理板材に必要な薬剤固形分量の推定」の組と「4.4 模型箱試験による燃焼性状の評価」で使用した。4.2 では、薬剤固形分量  $100\sim 200\text{kg/m}^3$  の長尺処理板材を対象に、長さ方向に 100mm 間隔で切断して採取した小片について薬剤固形分量を算出し、長さ方向における薬剤固形分量の分布状態を把握した。4.3 では、採取した処理小片を発熱性試験に供し、薬剤固形分量と燃焼性状の関係を把握するとともに、長尺板材に準不燃材料の性能を付与する薬剤固形分量を推定した。そして、その結果を基に準不燃材料の性能付与が推定される長尺処理板材を選定し、長さ方向における薬剤固形分量の分布状態を把握した。更に、板材に存在する節について、発熱性試験による評価により燃焼性状への影響を把握した。

4.4 では、4.3 で準不燃材料の性能付与が推定されるとして選定した長尺処理板材と同じ薬剤固形分量範囲の長尺処理板材を長さ 4000mm から選定し、一般木材用ウレタン樹脂系塗料で塗装した後、模型箱試験により燃焼性状を把握するとともに準不燃材料の性能を評価した。更に、模型箱試験の結果については、4.3 で把握した長さ方向における薬剤固形分量の分布状態の影響を考察した。

以上の検討により、製品と同寸法の塗装処理板材に準不燃材料の性能を付与する薬剤固形分量が把握されたとともに、これまで不明であった難燃処理木材の発熱性試験と模型箱試験の燃焼性状の關係に係る知見が得られた。それらの知見は難燃処理木材の製造者にとって製品開発の効率化に寄与にする非常に有用なものになる。

長さ3000mm (218枚) と4000mm (200枚) のスギ板材 (全乾密度 $330 \pm 50 \text{kg/m}^3$ )

第三章で選定したリン酸グアニジン系難燃剤による注入処理

乾燥, 薬剤固形分量の算出

長さごとに薬剤固形分量 $100 \sim 200 \text{kg/m}^3$ を60枚選定

#### 長尺処理板材の分析

長尺処理板材を長さ方向に100mm間隔で切断して小片を採取

##### 4.2 長さ方向における薬剤固形分量の分布

- ・ 処理小片の薬剤固形分量を算出し, 長尺処理板材の長さ方向における薬剤固形分量の状態分布を把握

##### 4.3 準不燃材料の長尺処理板材に必要な薬剤固形分量の推定

- ・ 処理小片の発熱性試験により, 薬剤固形分量と燃焼性状の関係を把握し, 準不燃材料の性能が得られる薬剤固形分量を推定
- ・ 準不燃材料の性能付与が推定される長尺処理板材について長さ方向における薬剤固形分量の分布状態を把握
- ・ 発熱性試験により処理板材の燃焼性状への節の影響を把握

準不燃材料の性能付与が想定される薬剤固形分量の長尺処理板材を長さ4000mmから65枚選定

#### 長尺処理板材の燃焼性状の評価

##### 4.4 模型箱試験による燃焼性状の評価

第三章で選定したウレタン樹脂系塗料による塗装

- ・ 模型箱試験により全体的な燃焼性状を把握するとともに, 準不燃材料の性能評価
- ・ 4.3で推察された発熱性試験の結果との関係を考察

図 4.1 第四章の試験フロー

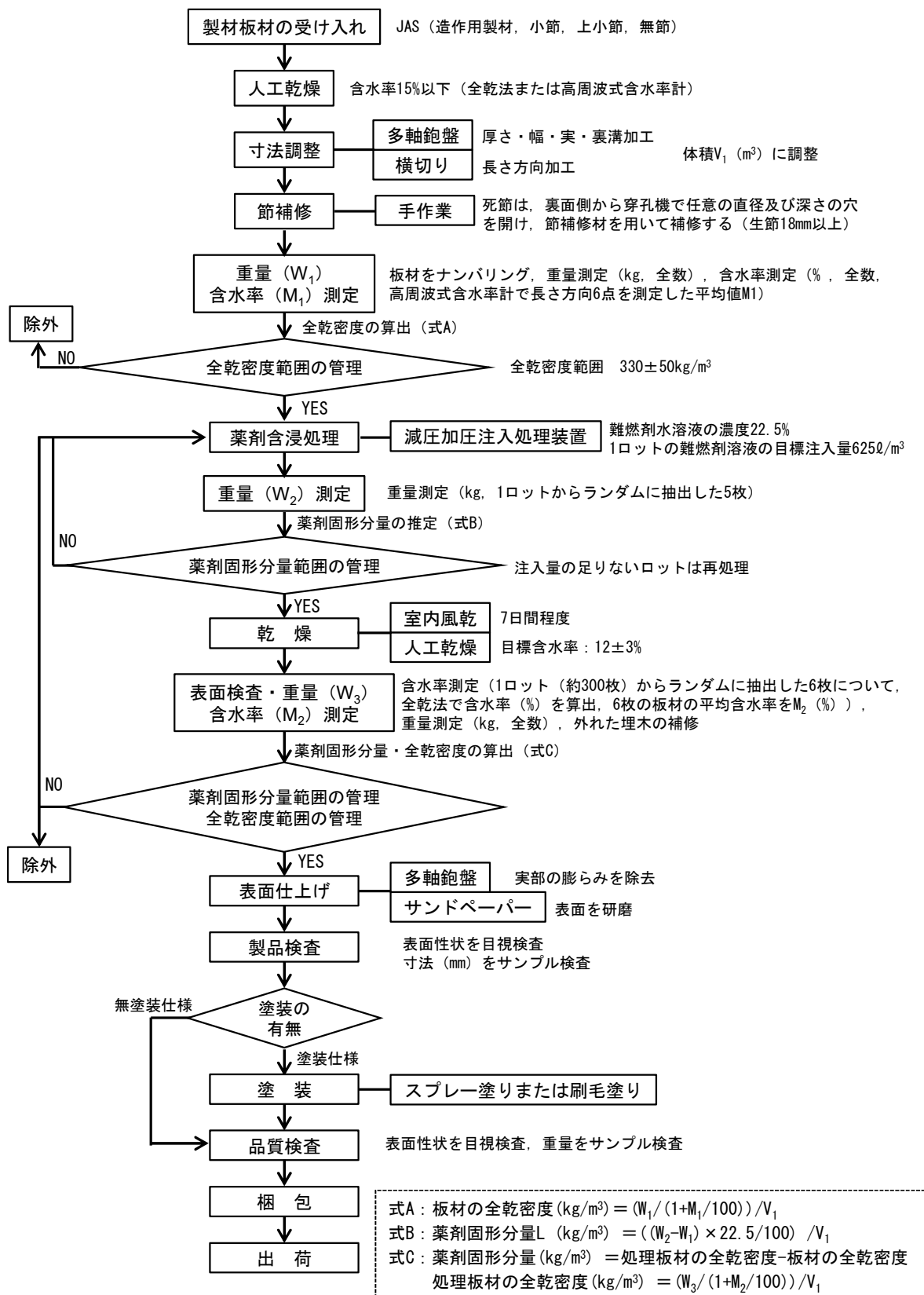


図 4.2 (株) ハルキの難燃処理木材の品質管理フロー

## 4.2 長さ方向における薬剤固形分量の分布

第三章で得られた準不燃材料の難燃処理木材の仕様を基に、製品と同寸法の難燃処理板材を製造した。各処理板材は、長さ方向に等間隔で切断して採取した小片について薬剤固形分量の算出し、長さ方向における薬剤固形分量の分布状態を把握した。

### 4.2.1 試験体

試験体となる長尺の難燃処理板材は、(株)ハルキの定める品質管理フロー(図 4.2)に沿って製造した。

#### 4.2.1.1 供試材料

板材は、樹種をスギ(*Cryptomeria japonica*)とし、製品と同様に辺心材を区別せずに使用した。板材の断面寸法は、図 4.3 に示すように厚さを 15mm、働き幅を 90mm とし、製品と同様に本実(ほんざね)加工と裏溝加工が行われていた。板材は、品質管理フローに従って重量  $M_1$  と高周波式含水率計((株)ケット科学研究所 HM-520)の測定値  $M_2$ 、及び体積  $V_1$  から式 A を用いて全乾密度を算出し、 $330 \pm 50 \text{kg/m}^3$  の範囲を用いた。それらの板材は、注入処理用と無処理用に分けて用意した。注入処理用の板材は、難燃処理木材の製品の長さが、使用する減圧加圧注入処理装置の大きさに依存することを考慮して長さ 3000mm 及び 4000mm の 2 種類とし、それぞれ 218 枚及び 200 枚を用意した。無処理用の板材は、後述する処理板材から採取した小片の薬剤固形分量の算出誤差を把握するためのものであり、注入処理用板材の 2 種類の長さのほぼ中間の 3650mm の板材を 30 枚用意した。板材の全乾密度の分布状況を図 4.4 に示す。また、各板材の節は、品質管理フローに基づいて火災時の燃え抜け防止のために、裏面から専用工具で、直径 15mm 又は 25mm で深さ 8mm の円柱状の穴を開け、酢酸ビニル樹脂エマルジョン系接着剤を塗布した後、木片をはめ込む補修を行った。

難燃剤は、第三章の結果に基づき、リン酸グアニジンを主成分とする市販難燃剤(丸菱油化工業(株)製、ノンネン W-200)を用いた。難燃剤は濃度 50%の水溶液であり、水道水で濃度を 22.5%に希釈して注入処理に用いた。

#### 4.2.1.2 難燃剤の注入処理

注入処理用の板材は、(株)ハルキの所有する減圧加圧注入処理装置(写真 4.1)を使用して難燃剤の注入処理を行った。減圧加圧条件は、製品製造時に使用する表 4.1 に示す減圧加圧プログラムに従った。処理装置内の板材は、前真空により材内の空気を抜かれた後、装置内に送られた難燃剤溶液に浸され、プログラムに設定されたステップに従い加圧された。装置は、内部の難燃剤溶液の液面を常に一定にする機構があり、装置内に送られる溶液量を計測することで板材に注入された溶液量を把握できる機能を備える。減圧加圧プログラムでは、板材の体積と溶液注入量の目標値を入力することで、加圧過程で板材に注入された溶液量が目標値に到達した時点でステップの進行が停止し、後真空に移行して処理が終了する。本試験の注入処理では、目標溶液注入量を製品製造時と同様に  $625 \text{リットル/m}^3$  とした。

注入処理後の長尺板材は、7日間以上工場内で風乾した後、人工乾燥により含水率  $12 \pm 3\%$  まで乾燥させた。乾燥後の長尺処理板材は、長さ 3000mm 及び 4000mm ごとに 6 枚の板材をランダムに抽出した。6 枚の長尺処理板材は、長さ方向で等間隔に 3 小片を採取し、全乾法で含水率を算出した。採取された 3 小片の平均含水率を長尺処理板材の含水率とし、6 枚の長尺処理板材の平均含水率を算出した。そして、注入処理後の長尺板材は、品質管理フロー

の式 C を用いて、重量  $M_3$  とロット内の含水率  $M_2$  及び処理前の板材の体積  $V_1$  から全乾密度を求め、採取された板材の注入処理前の全乾密度との差から薬剤固形分量を算出した。長尺処理板材の薬剤固形分量の分布を図 4.5 に示す。

乾燥後の長尺処理板材については、第二章で示した準不燃材料の性能が得られる薬剤固形分量の目安  $150\text{kg/m}^3$  を中心とする  $100\sim 200\text{kg/m}^3$  の範囲から平均的に 60 枚選定し、試験に用いた。試験に使用した長尺処理板材の概要を表 4.2～表 4.3 に、無処理板材の概要を表 4.4 に示す。

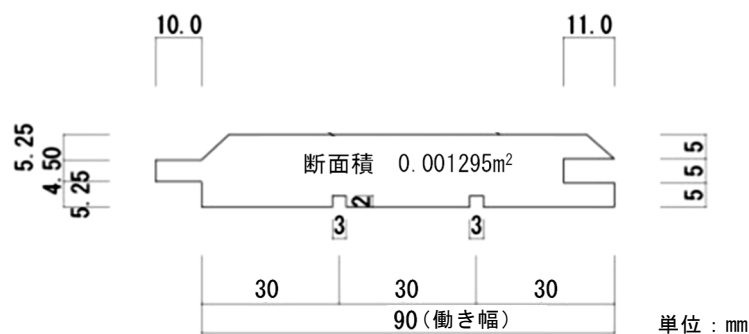


図 4.3 木材の断面形状

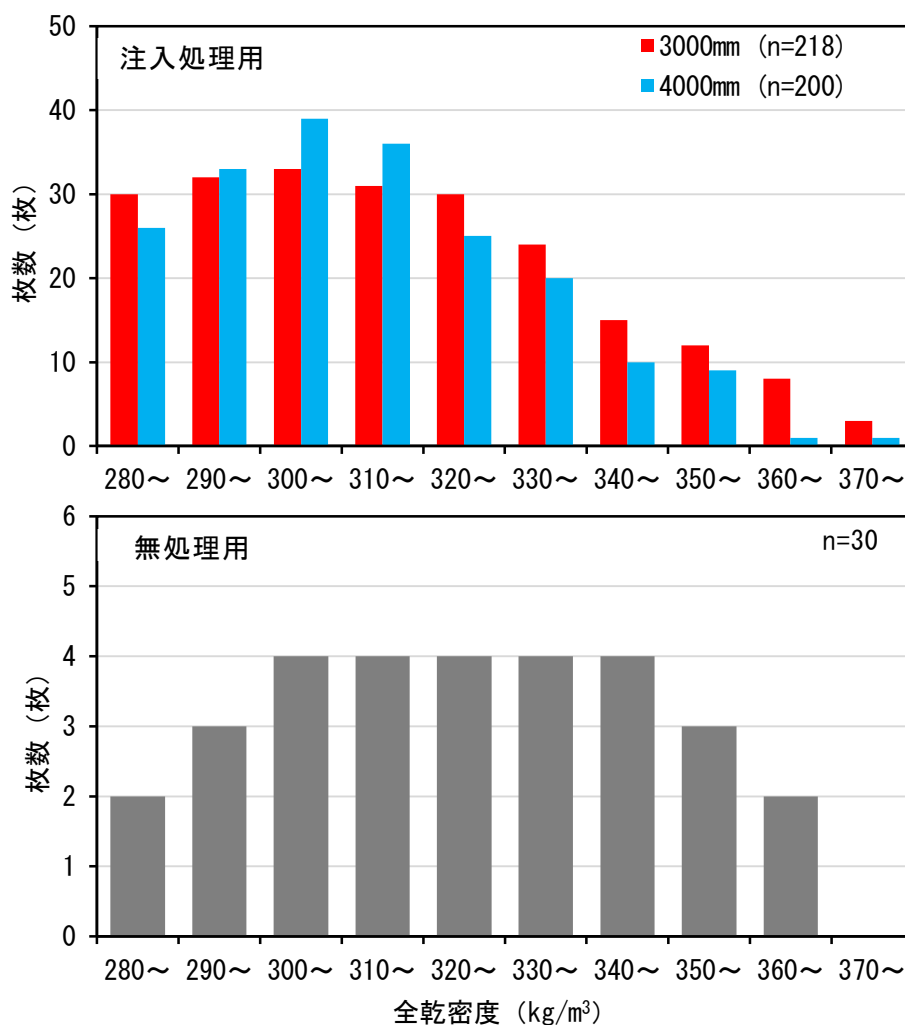


図 4.4 板材の全乾密度分布



写真 4.1 減圧加圧注入処理装置

表 4.1 減圧加圧注入処理プログラム

工 程		設定圧力 (MPa)	設定時間 (時間)
前真空		-0.085	2.00
加圧	ステップ 1	0.300	1.00
	ステップ 2	0.600	1.00
	ステップ 3	0.900	3.00
	ステップ 4	1.200	5.00
	ステップ 5	1.450	10.00
後真空		-0.085	0.25

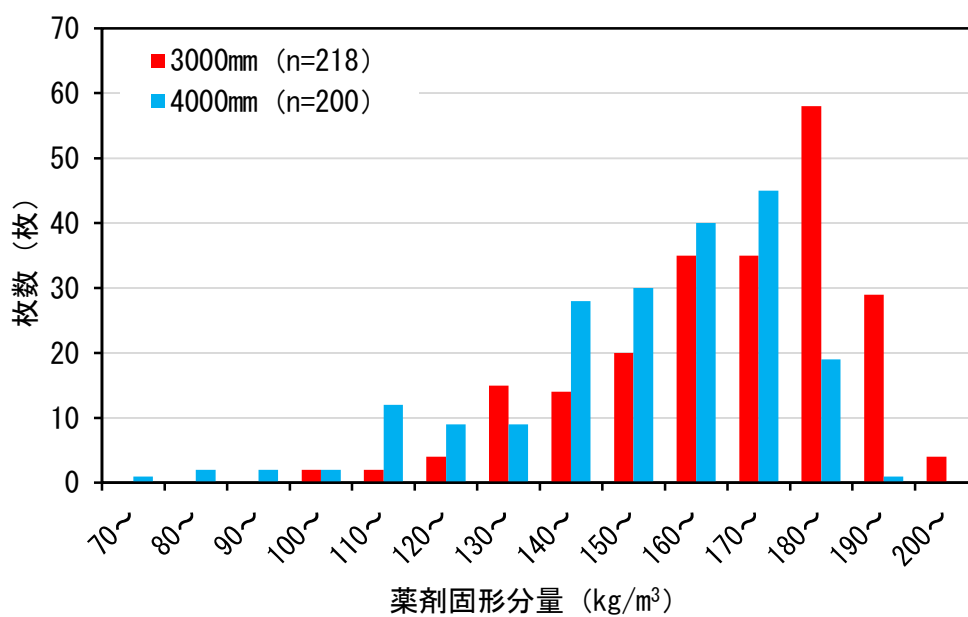


図 4.5 注入処理後の板材の薬剤固形分量の分布

表 4.2 長さ 3000mm の処理板材の概要

番号	板材 全乾密度 (kg/m <sup>3</sup> )	処理板材 全乾密度 (kg/m <sup>3</sup> )	薬剤 固形分量 (kg/m <sup>3</sup> )	番号	板材 全乾密度 (kg/m <sup>3</sup> )	処理板材 全乾密度 (kg/m <sup>3</sup> )	薬剤 固形分量 (kg/m <sup>3</sup> )
7	338	473	135	126	302	461	159
10	329	465	136	127	284	403	118
11	338	528	190	128	283	452	170
14	347	531	184	129	288	427	139
20	334	505	171	131	326	523	197
24	294	468	175	132	293	433	140
25	294	439	145	134	293	427	134
33	330	463	133	135	371	480	109
35	301	458	157	160	330	470	141
37	315	510	195	163	345	505	160
39	315	453	138	164	328	465	137
40	289	392	103	168	345	476	131
49	356	495	138	180	306	482	177
51	305	430	126	187	368	533	165
55	326	481	155	191	293	466	172
85	351	466	116	195	310	499	189
87	323	454	131	198	315	450	135
90	322	450	128	200	323	473	150
95	304	424	121	201	290	453	163
97	318	517	199	208	332	514	182
98	303	438	135	210	287	474	187
99	308	459	151	214	304	451	148
109	315	468	153	216	335	475	141
112	334	479	145	218	321	490	169
117	340	487	147	220	308	475	167
118	301	462	161	223	281	475	194
120	337	471	134	228	328	465	137
123	309	495	186	236	356	533	178
124	337	460	124	238	306	486	180
125	377	569	192	239	296	436	140
				平均	319	472	154
				最大	377	569	199
				最小	281	392	103

表 4.3 長さ 4000mm の処理板材の概要

番号	板材 全乾密度 (kg/m <sup>3</sup> )	処理板材 全乾密度 (kg/m <sup>3</sup> )	薬剤 固形分量 (kg/m <sup>3</sup> )	番号	板材 全乾密度 (kg/m <sup>3</sup> )	処理板材 全乾密度 (kg/m <sup>3</sup> )	薬剤 固形分量 (kg/m <sup>3</sup> )
10	328	489	161	94	341	454	113
13	308	425	117	104	322	457	136
17	328	512	184	109	312	468	157
18	320	503	183	111	302	486	185
19	285	463	178	114	349	457	108
21	301	470	169	122	325	507	182
25	289	405	117	124	342	456	114
35	318	503	185	128	306	419	113
38	338	521	183	134	311	490	180
39	297	447	150	145	302	475	173
40	288	471	183	151	281	459	179
42	319	455	136	153	317	486	170
43	291	454	163	154	305	460	155
45	294	435	141	156	328	441	113
47	282	413	131	159	305	424	119
48	308	437	129	163	302	461	160
49	355	467	113	164	314	467	153
58	291	449	158	171	294	438	144
61	337	451	114	189	287	473	187
65	309	474	165	193	325	497	172
67	330	454	124	194	315	455	140
76	284	422	138	202	293	485	192
78	288	416	128	204	300	486	186
79	320	441	120	209	318	465	147
80	284	411	127	210	280	380	100
81	290	442	151	225	308	457	149
83	330	505	175	228	345	479	134
85	327	513	186	232	324	491	167
86	328	452	124	233	325	436	111
93	311	444	133	234	319	464	145
				平均	311	460	149
				最大	355	521	192
				最小	280	380	100



表 4.4 長さ 3650mm の無処理板材の概要

番号	木材 全乾密度 (kg/m <sup>3</sup> )	処理材 全乾密度 (kg/m <sup>3</sup> )	薬剤 固形分量 (kg/m <sup>3</sup> )
3	308	—	—
10	342	—	—
12	369	—	—
16	335	—	—
18	295	—	—
19	354	—	—
20	325	—	—
21	282	—	—
22	298	—	—
23	359	—	—
25	321	—	—
26	303	—	—
29	273	—	—
34	319	—	—
37	284	—	—
39	327	—	—
43	340	—	—
44	324	—	—
51	301	—	—
54	345	—	—
55	314	—	—
58	308	—	—
61	320	—	—
63	349	—	—
65	358	—	—
66	310	—	—
67	316	—	—
70	294	—	—
71	345	—	—
75	321	—	—
平均	321	—	—
最大	369	—	—
最小	273	—	—

#### 4.2.2 実験方法

前項で選定した長尺処理板材は、**図 4.6**に示すように一方の端から 100mm 間隔で切断し、長さ 3000mm では 29 片、長さ 4000mm では 39 片の小片を採取した。各処理板材の末端の小片は、長さが 100mm に満たないことがあり、その場合は採取後に長さを測定した。採取した処理小片は、質量  $FWM_p$  を測定した後、長さ方向で 4 片に 1 片の割合で全乾法により含水率  $FWMC_p$  を算出した。その他の処理小片の含水率は、左右の含水率を算出した処理小片の平均値とした。また、末端付近の処理小片において含水率を測定した処理小片が片側にしかない場合は、その片側の処理小片の含水率をそれらの含水率とした。

各処理小片は、質量  $FWM_p$  と含水率  $FWMC_p$  から全乾質量  $FWDM_p$  を求め、小片の断面積と長さから求めた体積  $FWV_p$  で割ることで全乾密度  $FWDD_p$  を算出した。処理小片の全乾密度  $FWDD_p$  は、採取元の処理板材の処理前の全乾密度  $WDD_L$  との差から、**式 (4.1)** を用いて処理小片の薬剤固形分量を算出した。それらの処理小片の薬剤固形分量を基に、処理板材の長さ方向における薬剤固形分量の分布状態を分析した。

また、処理小片の薬剤固形分量は、本来は小片の処理前後の全乾密度から算出されるべきである。しかし、処理小片を採取した処理板材は、長尺の板材の状態では注入処理が行われるため、処理小片の処理前の全乾密度が把握できない。そのため、**式 (4.1)** では、処理小片の処理前の全乾密度を、採取した処理板材の処理前の全乾密度で代用した。このため、算出された処理小片の薬剤固形分量は、採取した処理板材に用いた長尺板材において小片を採取した部分と全体間の全乾密度差が誤差として含まれる。そこで、長尺処理板材の 2 種類の長さのほぼ中間の長さ 3650mm の無処理板材を用いて、上記と同様に小片を採取し、小片と採取された板材の全乾密度差を分析し、処理小片の薬剤固形分量の算出誤差を把握した。

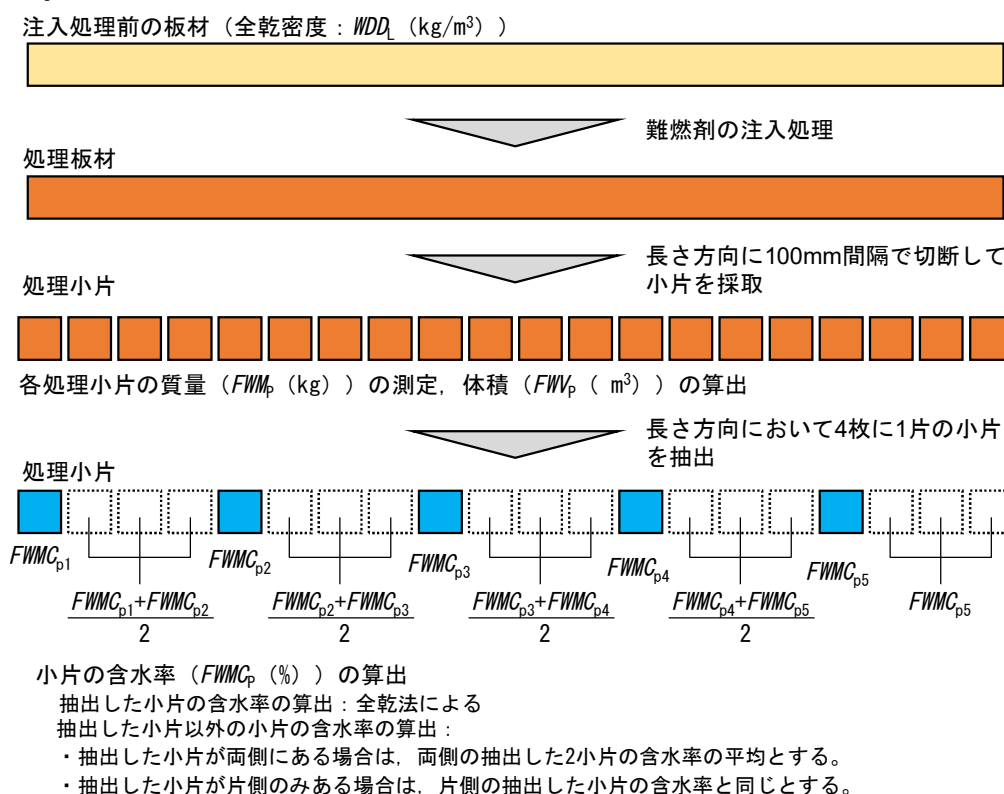


図 4.6 処理小片の薬剤固形分量算出のための測定項目

$$\text{小片の薬剤固形分量 (kg/m}^3\text{)} = FWDD_P - WDD_L \quad (4.1)$$

$$FWDD_P \text{ (kg/m}^3\text{)} = \frac{FWDM_P}{FWV_P}$$

$$FWDM_P \text{ (kg)} = \frac{FWM_P}{1 + \frac{FWMC_P}{100}}$$

$FWDD_P$  : 処理小片の全乾密度 (kg/m<sup>3</sup>)

$WDD_L$  : 処理板材の注入処理前の全乾密度 (kg/m<sup>3</sup>)

$FWDM_P$  : 処理小片の全乾質量 (kg)

$FWV_P$  : 処理小片の体積 (m<sup>3</sup>)

$FWM_P$  : 処理小片の質量 (kg)

$FWMC_P$  : 処理小片の含水率 (%), 算出方法は図 4.6 のとおり

## 4.2.3 結果と考察

### 4.2.3.1 処理小片の薬剤固形分量の算出誤差

処理小片の薬剤固形分量の算出誤差は、注入処理前の長尺板材における、処理小片を採取した部分と長尺板材全体の全乾密度の差から生じる。このことから、算出した各小片の全乾密度は、採取元の板材の全乾密度との差に変換した。

各小片の全乾密度差のヒストグラムを図 4.7 に示す。小片の全乾密度差は、 $0\text{kg/m}^3$  を中心とする山状の分布を示した。小片の全乾密度差を  $0\text{kg/m}^3$  を中心に、 $10\text{kg/m}^3$  ごとの範囲に含まれる小片数と全小片数に対する比率を表 4.5 に示す。統計的な考察では、計量値の分布は、平均値を中心に 95% の範囲を全体的な分布状況を示す一つの指標とされる。表 4.5 から、小片の全乾密度差の分布は、採取元の長尺板材の全乾密度を示す  $0\text{kg/m}^3$  を中心に  $\pm 25\text{kg/m}^3$  の範囲において、全体の約 96.4% が含まれた。このことから、小片の全乾密度は、採取元の板材の全乾密度  $\pm 25\text{kg/m}^3$  の範囲にほぼ全てが分布すると判断された。これらの結果から、算出された処理小片の薬剤固形分量は、最大で算出値  $\pm 25\text{kg/m}^3$  の誤差が生じると考えられた。

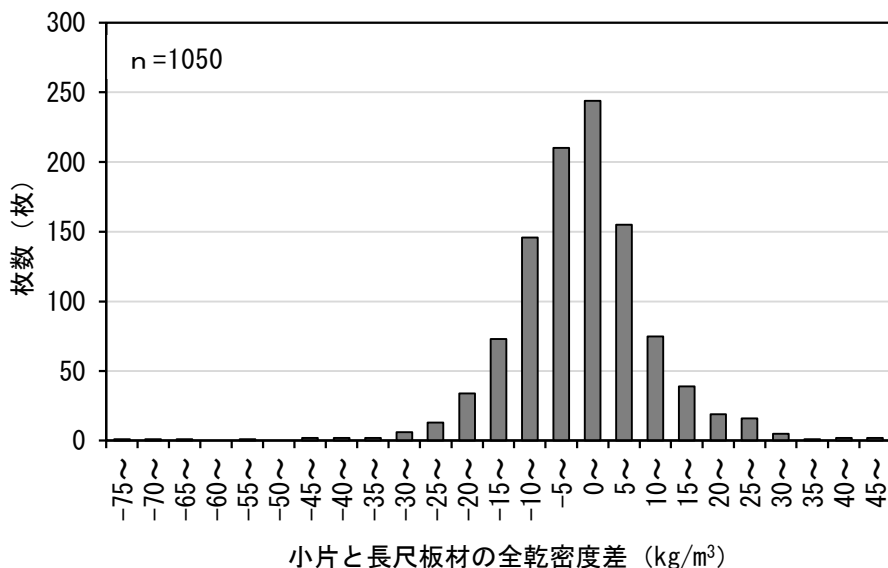


図 4.7 小片と採取した板材の全乾密度差のヒストグラム

表 4.5 小片と採取した板材の全乾密度差の分布

小片と板材の全乾密度差の範囲 (kg/m³)	小片数 (片)	全小片数に対する比率
0	59	0.056
-5~5	500	0.476
-10~10	776	0.739
-15~15	914	0.870
-20~20	980	0.933
-25~25	1012	0.964
-30~30	1030	0.981
-35~35	1037	0.988
-40~40	1042	0.992
-45~45	1044	0.994
-50~50	1046	0.996

全小片数：1050

#### 4.2.3.2 長さ方向における薬剤固形分量の分布

小片の採取位置と薬剤固形分量の関係について、長さ 3000mm を図 4.8 に、長さ 4000mm を図 4.9 に示す。図中の長尺処理板材は、薬剤固形分量範囲において下限値の 100kg/m<sup>3</sup>、中心値の 150kg/m<sup>3</sup> 及び上限値の 200kg/m<sup>3</sup> に近い 5 枚とした。

小片の採取位置と薬剤固形分量の関係から、長尺処理板材の長さ方向における薬剤固形分量の分布状態を考察する。薬剤固形分量 100kg/m<sup>3</sup> に近い範囲の長尺処理板材は、長さ 3000mm 及び 4000mm とともに両端部に向かって高くなる傾向が見られた。一方、薬剤固形分量 200kg/m<sup>3</sup> に近い範囲の長尺処理板材では、それらの傾向が不明確になった。筆者等の過去の報告<sup>1)</sup>では、難燃剤溶液の注入量が低い場合、長尺処理板材の木口付近の薬剤固形分量が高くなることを示したが、本結果からも同様の傾向が確認できた。

渥美等<sup>4)</sup>や上川等<sup>5)</sup>は、注入処理後の処理板材は、乾燥過程において難燃剤が繊維方向または厚さ方向に移動し、木口や表層付近に蓄積されることを報告している。図 4.8 と図 4.9 に見られた両端部の処理小片の薬剤固形分量が多くなる傾向は、同様の乾燥過程における難燃剤の移動が影響しているものと考えられた。また、薬剤固形分量が高い長尺処理板材では、両端部の薬剤固形分量が高くなる傾向が不明確になることから、注入処理時における板材の繊維方向の難燃剤溶液の浸透性の影響も一因として考えられた。

長さ方向における薬剤固形分量の分布について、長尺処理板材の薬剤固形分量を 100～133kg/m<sup>3</sup>、134～166kg/m<sup>3</sup> 及び 167～200kg/m<sup>3</sup> の区間に分けて考察する。長尺処理板材から採取された小片の薬剤固形分量の分布を図 4.10 及び図 4.11 に、それらを端部及び中央部ごとにまとめた結果を表 4.6 に示す。端部の処理小片の薬剤固形分量は、長尺処理板材の長さ及び薬剤固形分量に関わらず、中央部より大きくなった。また、中央部の処理小片は、採取元の長尺処理板材の薬剤固形分量の平均値付近を中心につり鐘型に分布していた。また、薬剤固形分量の平均値、標準偏差、最大値及び最小値から、中央部の処理小片の薬剤固形分量の分布する幅は、採取元の長尺処理板材の薬剤固形分量区分が変わってもほぼ同じであった。

表 4.6 長尺処理板材から採取した小片の薬剤固形分量の概要

長さ (mm)	長尺処理板材 薬剤固形分量 (kg/m <sup>3</sup> )	枚数 (枚)	採取箇所	小片数	採取された小片 薬剤固形分量 (kg/m <sup>3</sup> )			
					平均	標準偏差	最大	最小
3000	100～133 (平均：124)	11	端部	22	179	37	282	135
			中央部	297	121	24	219	68
	134～166 (平均：146)	29	端部	58	193	43	302	97
			中央部	783	143	24	232	68
	167～200 (平均：183)	20	端部	40	215	33	294	144
			中央部	540	182	23	248	108
4000	100～133 (平均：119)	20	端部	40	173	48	268	92
			中央部	740	117	28	212	41
	134～166 (平均：149)	20	端部	40	182	39	255	114
			中央部	740	146	27	241	71
	167～200 (平均：180)	20	端部	40	192	30	251	108
			中央部	740	173	23	272	105

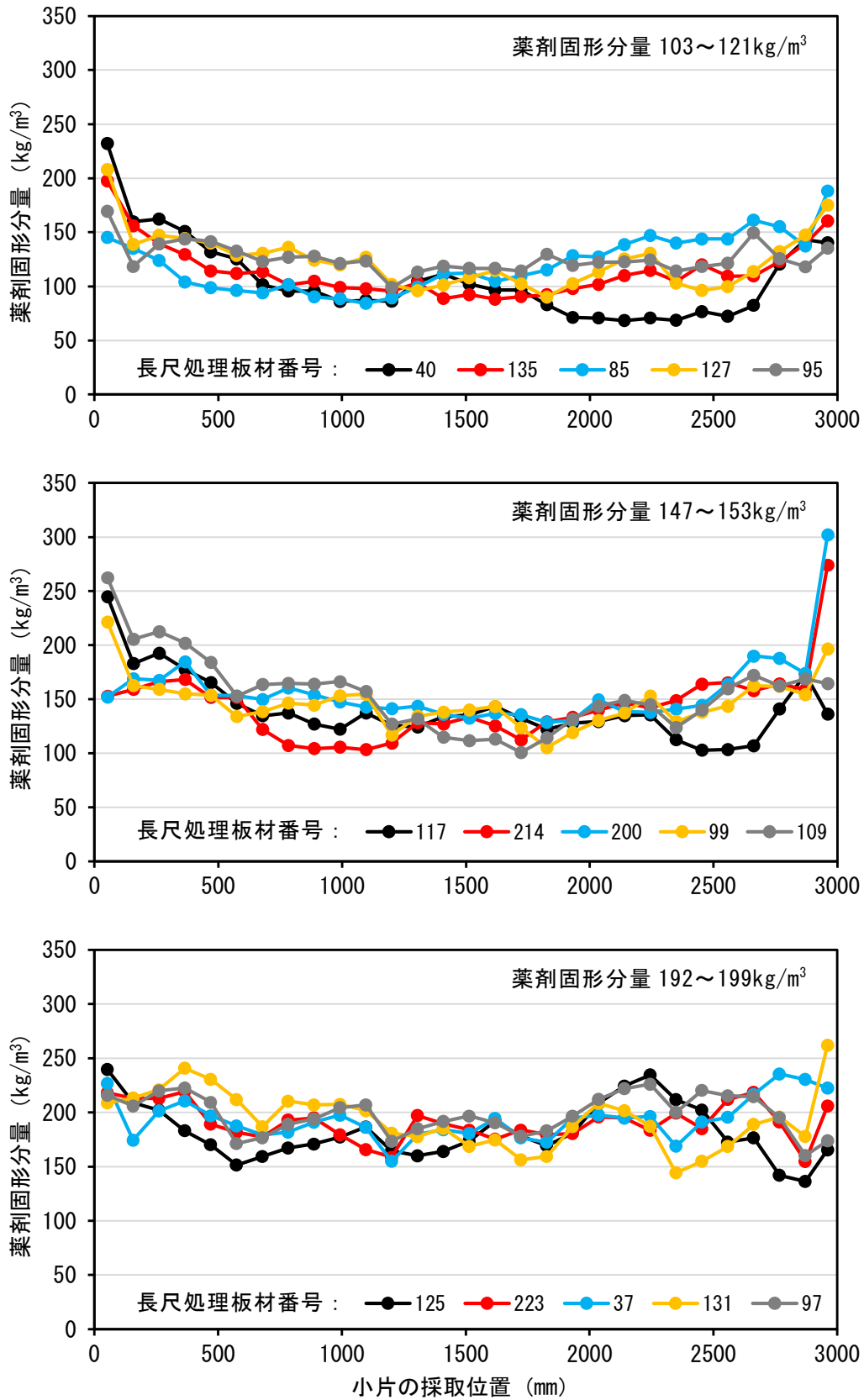


図 4.8 小片の採取位置と薬剂固形分量の一例 (長さ 3000mm)

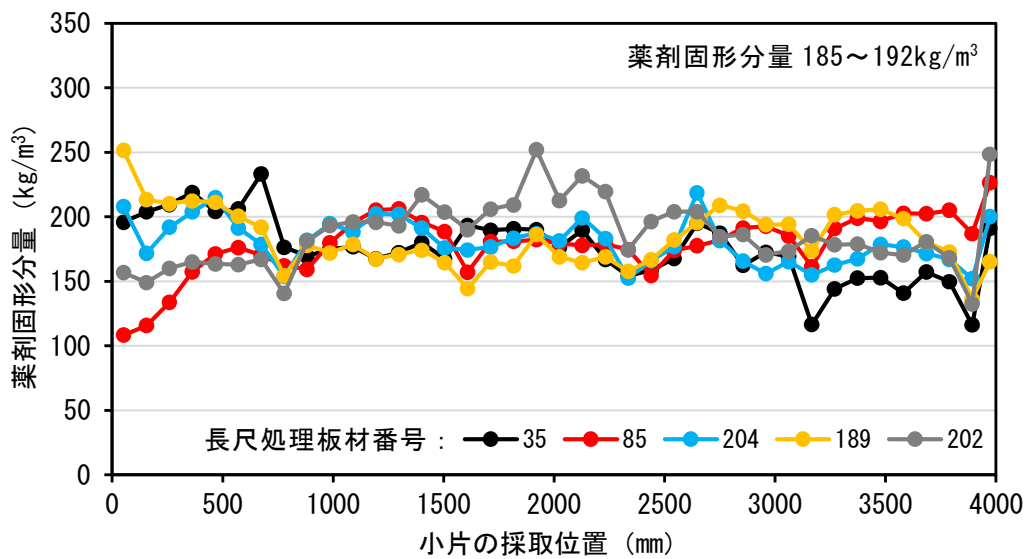
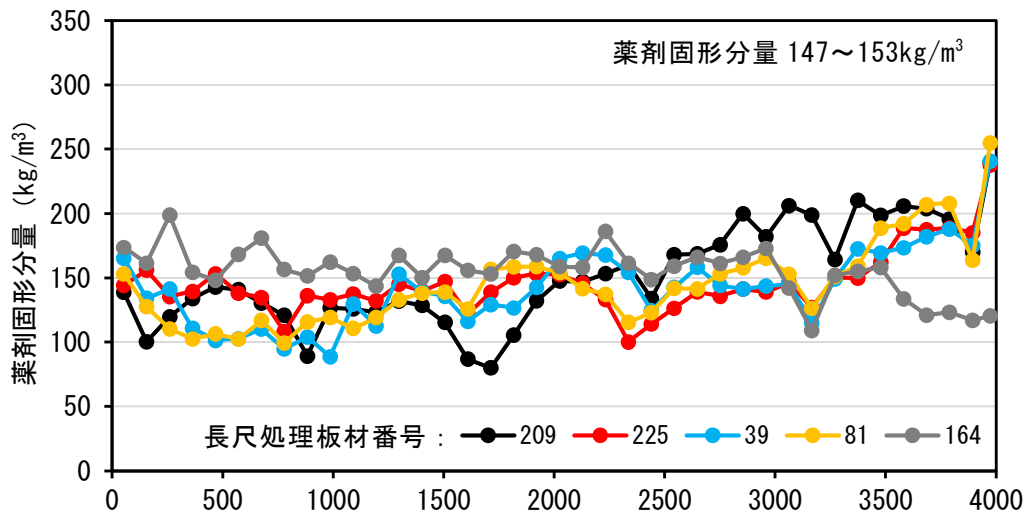
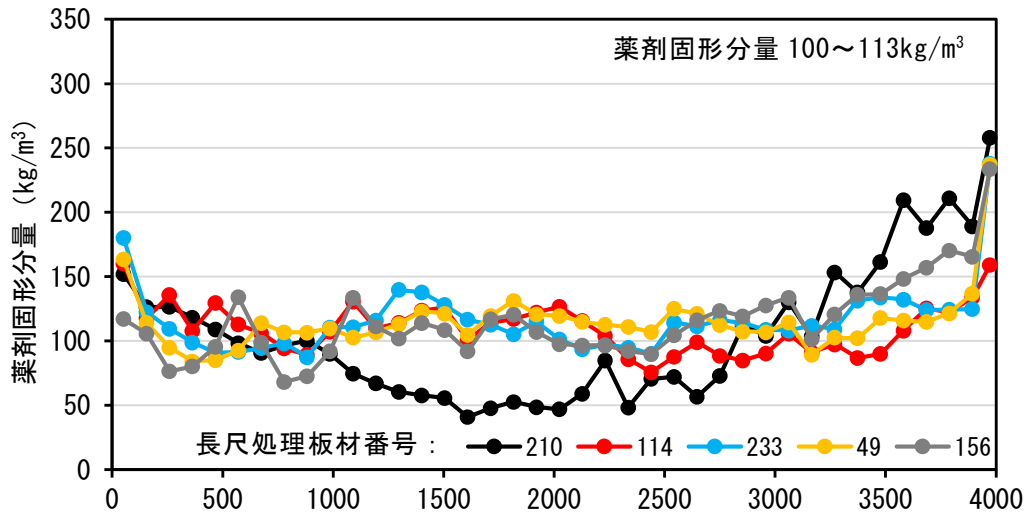


図 4.9 小片の採取位置と薬剤固形分量 (長さ 4000mm)

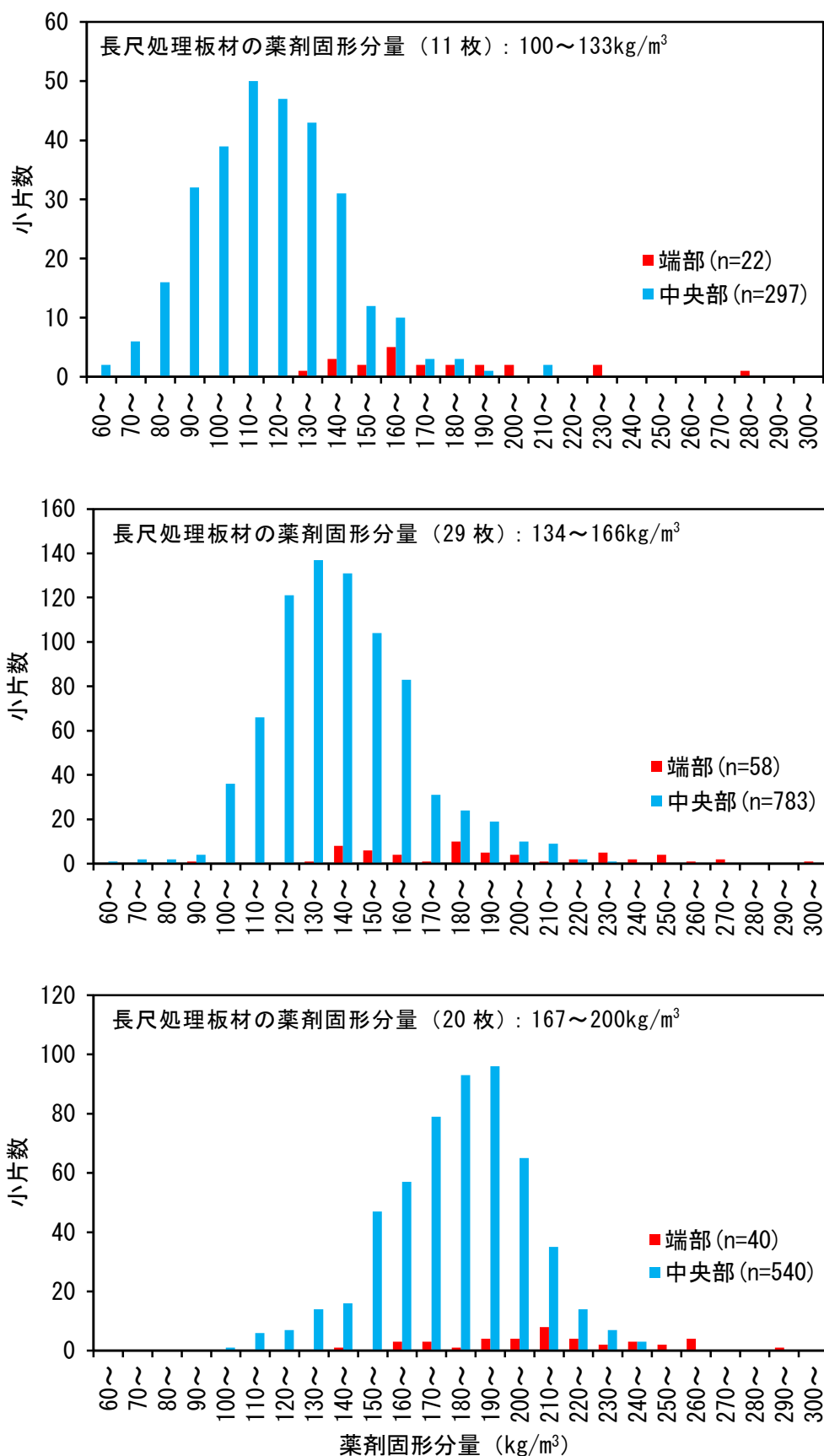


図 4.10 長尺処理板材から採取した小片の薬剤固形分量の分布 (長さ 3000mm)  
 端部 : 長さ方向の両端部の小片, 中央部 : 両端部を除く小片



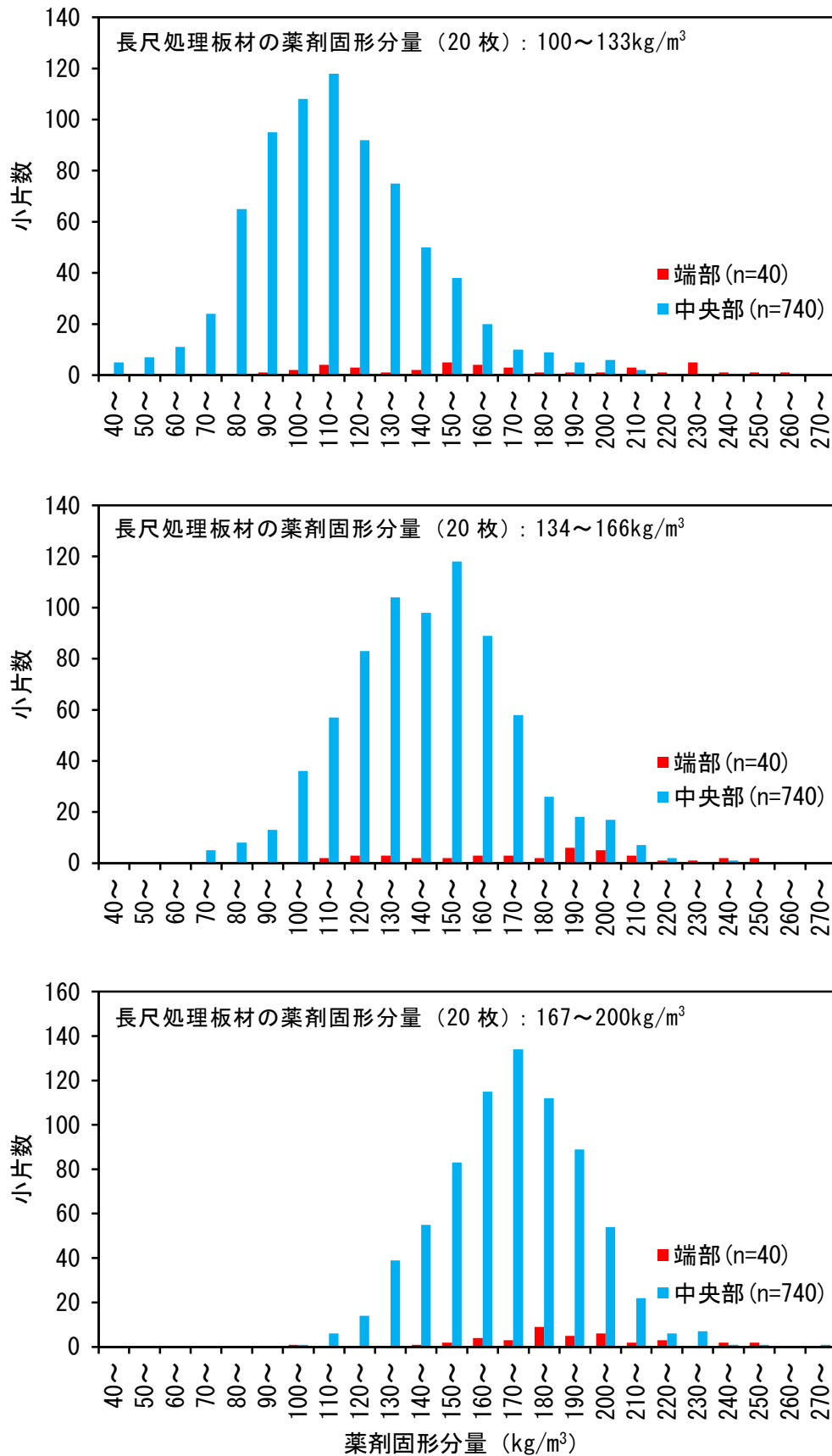


図 4.11 長尺処理板材から採取した小片の薬剤固形分量の分布 (長さ 4000mm)  
 端部：長さ方向の両端部の小片，中央部：両端部を除く小片

#### 4.2.4 結論

第三章で決定した準不燃材料の難燃処理木材の仕様に基づき、製品と同寸法である長さ3000mm及び4000mmの長尺処理板材を製造し、長さ方向における薬剤固形分量の分布を分析した。その結果をまとめると、以下の通りであった。

- 1) 長さ3000mm及び4000mmの長尺処理板材は、長さ方向において端部の薬剤固形分量が大きくなる傾向があった。
- 2) 長尺処理板材の端部を除く中央部は、長尺処理板材の薬剤固形分量付近に中心につき鐘型に分布した。
- 3) 中央部の薬剤固形分量は、長尺処理板材の薬剤固形分量範囲100~200kg/m<sup>3</sup>では、分布範囲の幅に違いなかった。

### 4.3 準不燃材料の長尺処理板材に必要な薬剤固形分量の推定

第二章の難燃処理木材の発熱性試験における燃焼性状の評価結果と過去の報告<sup>1), 2)</sup>における模型箱試験による燃焼性状の評価結果から、発熱性試験の結果を基に模型箱試験において準不燃材料の性能を付与する長尺処理板材の薬剤固形分量が推定可能と考えられた。そこで、本項では 4.2 で長尺処理板材から採取して薬剤固形分量を把握した小片を発熱性試験に供して、薬剤固形分量と燃焼性状の関係を把握し、模型箱試験において準不燃材料の性能が得られる長尺処理板材の薬剤固形分量を推定した。更に、準不燃材料の性能が得られるとする薬剤固形分量の長尺処理板材については、長さ方向における薬剤固形分量の分布状態を分析した。

#### 4.3.1 試験体

##### 4.3.1.1 長さ方向における薬剤固形分量の分布と燃焼性状

試験体には、4.2 で得られた長さ 3000mm 及び 4000mm の長尺処理板材（薬剤固形分量 100～200kg/m<sup>3</sup>）各 60 枚から採取した小片を用いた。全処理小片の薬剤固形分量の分布を図 4.12 に示す。試験体には、処理小片の薬剤固形分量の分布範囲を 6 水準（A～F）に区分して、各水準から選定した無節の 6 小片を用いた。また、選定した 6 小片は、可能な限り各水準の薬剤固形分量範囲の中央値に近いものとした。処理小片は、1 片では試験体の寸法に足りないため、薬剤固形分量水準が同じ 2 片を本実（ほんざね）で接合して試験体とした（写真 4.2）。なお、処理小片の接合部は試験体の幅方向の中央とし、加熱中に分離しないように接合部裏面をステーブルで 2 点固定した。試験体の概要を表 4.7 に示す。

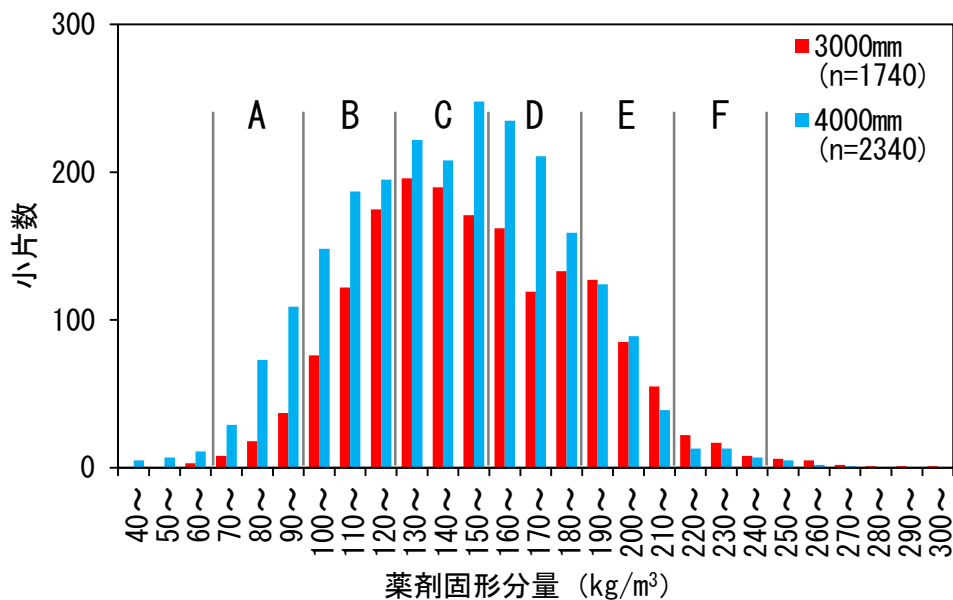


図 4.12 処理小片の薬剤固形分量と試験体の薬剤固形分量水準



加熱面



非加熱面

写真 4.2 発熱性試験用試験体の外観

表 4.7 発熱性試験用試験体の概要

処理板材 の長さ	薬剤 固形分量 水準	番号	薬剤固形分量 (kg/m <sup>3</sup> )			寸法 (mm)			体積 (cm <sup>3</sup> )	質量 (g)	密度 (kg/m <sup>3</sup> )
			小片1	小片2	平均	長さ	幅	厚さ			
3000mm	A (70~ 100kg/m <sup>3</sup> )	1	82	83	83	99.4	99.3	15.3	146.0	57.4	393
		2	86	85	86	99.4	99.6	15.3	146.3	58.6	401
		3	88	88	88	99.5	99.5	15.3	146.0	67.6	463
	B (100~ 130kg/m <sup>3</sup> )	1	114	114	114	99.4	99.4	15.4	147.0	62.4	424
		2	114	115	115	99.4	99.5	15.4	147.3	62.7	426
		3	117	117	117	99.4	99.4	15.5	147.5	62.4	423
	C (130~ 160kg/m <sup>3</sup> )	1	144	144	144	99.4	99.4	15.4	147.4	67.5	458
		2	145	145	145	99.4	99.5	15.4	147.2	68.4	465
		3	145	145	145	99.4	99.5	15.4	147.0	67.9	462
	D (160~ 190kg/m <sup>3</sup> )	1	180	171	175	99.6	99.4	15.5	148.0	71.9	486
		2	175	171	173	99.4	99.4	15.4	146.7	72.2	492
		3	175	175	175	99.3	99.4	15.5	148.0	72.9	493
	E (190~ 220kg/m <sup>3</sup> )	1	204	204	204	99.4	99.4	15.4	147.3	78.8	535
		2	205	205	205	99.4	99.5	15.4	147.2	75.9	516
		3	205	205	205	99.4	99.5	15.4	147.5	73.8	500
	F (220~ 250kg/m <sup>3</sup> )	1	230	230	230	99.4	99.5	15.4	147.4	77.9	528
		2	232	232	232	99.4	99.5	15.4	146.8	77.5	528
		3	235	230	233	99.4	99.5	15.4	147.2	79.4	539
4000mm	A (70~ 100kg/m <sup>3</sup> )	1	82	82	82	99.6	99.5	15.3	145.9	59.1	405
		2	85	85	85	99.6	99.6	15.4	147.6	61.5	417
		3	88	86	87	99.4	99.6	15.3	146.4	62.0	424
	B (100~ 130kg/m <sup>3</sup> )	1	114	113	113	99.2	99.4	15.4	146.8	58.8	401
		2	115	115	115	99.6	99.5	15.4	147.3	60.0	408
		3	116	116	116	99.4	99.5	15.4	147.2	63.1	429
	C (130~ 160kg/m <sup>3</sup> )	1	144	144	144	99.5	99.4	15.5	147.7	72.0	487
		2	145	144	145	99.2	99.5	15.4	147.3	69.0	468
		3	146	143	145	99.6	99.6	15.4	147.5	71.1	482
	D (160~ 190kg/m <sup>3</sup> )	1	175	174	175	99.4	99.4	15.4	147.4	71.5	485
		2	175	176	175	99.4	99.6	15.4	147.8	74.5	504
		3	175	175	175	99.4	99.5	15.3	146.6	72.2	493
	E (190~ 220kg/m <sup>3</sup> )	1	205	204	205	99.3	99.5	15.5	147.6	72.6	492
		2	205	207	206	99.4	99.5	15.4	147.0	76.2	518
		3	207	204	206	99.5	99.3	15.3	146.4	73.1	499
	F (220~ 250kg/m <sup>3</sup> )	1	228	231	229	99.3	99.4	15.5	147.8	82.1	555
		2	232	236	234	99.4	99.5	15.4	147.0	78.5	534
		3	240	236	238	99.4	99.6	15.4	147.3	78.9	536

#### 4.3.1.2 燃焼性状への節の影響

試験体に用いた処理小片は、前項で選定した長尺処理板材から、薬剤固形分量が第二章において厚さ 15mm の板材の準不燃材料の目安とされた 150kg/m<sup>3</sup> 以上の各長さ 30 枚から採取した。節の大きさは、繊維方向の直径（縦）と繊維直交方向の直径（横）を掛け合わせた節係数として示した。処理板材から採取された処理小片の節係数の分布を表 4.8 に示す。

長尺処理板材から採取された処理小片は、ほとんどが無節であったが、長さ 3000mm では最大 3.40cm<sup>2</sup> までの節係数の小片が、長さ 4000mm では最大 2.66cm<sup>2</sup> までの節係数の小片があった。試験体には、前項で設定した薬剤固形分量水準ごとに節のある処理小片を選定した。同一の薬剤固形分量水準において、節の大きさが異なる処理小片が得られる場合は、節係数を 0.5cm<sup>2</sup> ごとに区分し、それぞれの区分について選定した。また、選定した有節の処理小片の薬剤固形分量は、可能な限り各水準の薬剤固形分量範囲の中央値に近いものとした。

それらの有節の処理小片は、前項と同様に同一薬剤固形分量水準の処理小片と本実（ほんざね）で接合して発熱性試験の試験体を作成した。また、有節処理小片の対となる小片は、燃焼性状への節の寸法の影響を明確に把握するために、無節の小片とした（写真 4.3）。試験体の概要を表 4.9 に示す。

表 4.8 処理小片の節係数の分布

節係数 <sup>a)</sup> (cm <sup>2</sup> )	処理板材の長さ	
	3000mm	4000mm
0	859	1116
0.01～	1	23
0.50～	5	11
1.00～	2	9
1.50～	2	4
2.00～	0	6
2.50～	0	1
3.00～	1	0
合 計	870	1170

a) 節の繊維方向の直径 (cm) と繊維直交方向の直径 (cm) を掛け合わせた数値

表 4.9 節を含む試験体の概要

試験体	節の寸法 (mm)		節係数 <sup>a)</sup> (cm <sup>2</sup> )	薬剤固形分量 (kg/m <sup>3</sup> )			寸法 (mm)			体積 (cm <sup>3</sup> )	質量 (g)	密度 (kg/m <sup>3</sup> )
	縦	横		小片		平均	長さ	幅	厚さ			
				有節	無節							
A0.5-1	3	9	0.27	126	115	121	98.9	99.1	15.5	152	63.1	416
B0.5-1	3	3	0.09	147	144	145	99.1	99.1	15.5	152	65.2	429
B0.5-2	5	5	0.25	154	144	149	99.1	99.1	15.5	152	65.5	431
B2.5-1	17	13	2.21	130	145	137	99.1	99.1	15.5	152	67.9	447
C0.5-1	4	4	0.16	162	176	169	99.0	99.0	15.4	151	71.1	470
C0.5-2	3	8	0.24	180	175	178	99.0	99.2	15.4	152	68.9	454
C0.5-3	4	8	0.32	173	174	174	99.1	99.1	15.4	152	69.6	459
C1.0-1	12	5	0.60	174	173	174	99.0	99.1	15.4	151	77.0	508
C1.5-1	12	11	1.32	175	175	175	99.0	99.1	15.4	151	71.8	474
C2.0-1	12	13	1.56	178	175	176	99.1	99.2	15.5	153	76.0	498
D0.5-1	4	4	0.16	205	210	208	99.1	99.1	15.4	151	76.6	508
D1.0-1	12	7	0.84	197	206	201	98.9	99.3	15.4	152	73.8	487
D1.5-1	8	13	1.04	197	206	202	98.9	99.2	15.5	152	74.1	487
D2.0-1	13	13	1.69	195	206	201	99.0	99.2	15.4	152	77.6	512
D2.5-1	15	15	2.25	211	205	208	99.1	99.0	15.4	151	77.9	515
E2.5-1	12	19	2.28	233	226	230	99.1	99.2	15.5	152	79.8	525

a) 節の繊維方向の直径 (cm) と繊維直交方向の直径 (cm) を掛け合わせた数値



加熱面



非加熱面

写真 4.3 節を含む発熱性試験用試験体の外

### 4.3.2 燃焼試験

試験は、2.3.1と同様の発熱性試験とした。試験前の試験体は、温度23℃・湿度50%RHの雰囲気下で24時間の質量変化率が0.1%以下になるまで養生した。装置は、コーンカロリー計試験装置（Fire Testing Technology Ltd. ,UK）を使用した。試験体への加熱条件は、強度を50kW/m<sup>2</sup>、加熱時間を10分間とし、酸素濃度等の測定値から発熱速度とその積算値である総発熱量を算出した。また、加熱終了後は、試験体に有害な変形等の有無を確認するとともに、装置付属のロードセルから得られる試験体の質量から、加熱終了時の燃焼量を算出した。

### 4.3.3 結果と考察

#### 4.3.3.1 準不燃材料の性能が得られる薬剤固形分量の推定

各試験体の最高発熱速度及び10分間総発熱量について、薬剤固形分量との関係を図4.13及び図4.14に示す。試験体の最高発熱速度及び総発熱量は、薬剤固形分量の水準Aの70～100kg/m<sup>3</sup>から水準Bの100～130kg/m<sup>3</sup>の間で低下し、水準B～Fの100～250kg/m<sup>3</sup>の範囲ではほぼ同じになった。

最高発熱速度における準不燃材料の基準は、「10秒以上継続して200kW/m<sup>2</sup>を超えないこと」である。図4.13に示すように、全ての試験体の最高発熱速度は200kW/m<sup>2</sup>を超えることが無く、準不燃材料の基準を満たした。一方、総発熱量は、準不燃材料の基準が「8MJ/m<sup>2</sup>以下であること」であるが、第三章の結果から塗装する場合には処理板材の総発熱量を5MJ/m<sup>2</sup>未満にする必要がある。図4.14に示す試験体の総発熱量は、薬剤固形分量113～116kg/m<sup>3</sup>で6体中5体が、144～145kg/m<sup>3</sup>で全試験体が5MJ/m<sup>2</sup>未満になった。また、図中には、全ての試験体を対象として算出した、薬剤固形分量と総発熱量間の回帰式を併記した。この回帰式から、総発熱量が5MJ/m<sup>2</sup>になる薬剤固形分量を算出すると133kg/m<sup>3</sup>であった。4.2.3.1で示したように小片の薬剤固形分量には算出誤差があること、及び安全側の判断から準不燃材料の性能が得られる長尺処理板材の薬剤固形分量を135kg/m<sup>2</sup>とした。

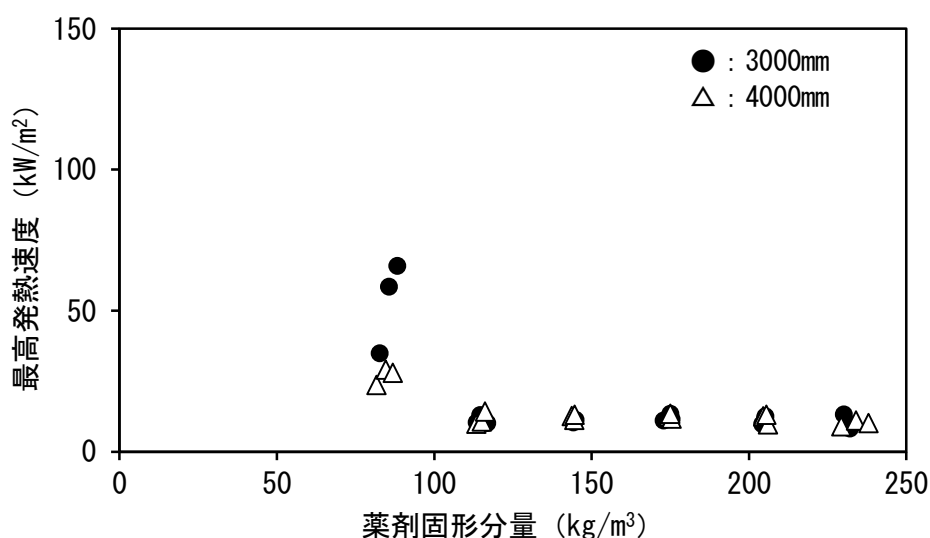


図 4.13 薬剤固形分量と最高発熱速度の関係

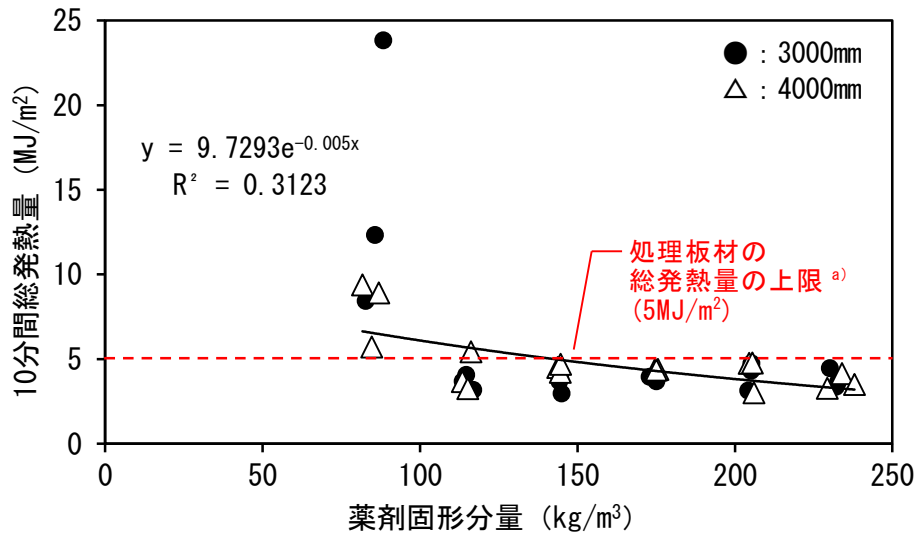


図 4.14 薬剤固形分量と 10 分間総発熱量の関係

a) 塗装を前提に、準不燃材料の基準を満たすために必要とされる処理板材の総発熱量の上限 (3.3.3.3 より)

#### 4.3.3.2 準不燃長尺処理板材の長さ方向における薬剤固形分量の分布

4.2 で使用した長尺処理板材から、4.3.3.1 で準不燃材料の性能が得られるとした薬剤固形分量 135~165kg/m<sup>3</sup> の長尺処理板材 19 枚 (表 4.10) について、採取された小片の薬剤固形分量の分布状態を図 4.15 に示す。小片の薬剤固形分量は、長さ 3000mm 及び 4000mm ともに、4.2.3.2 と同様に端部が中央部よりも高くなり、中央部は長尺処理板材の薬剤固形分量付近を中心に釣り鐘型に分布していた。

採取された小片の薬剤固形分量の累積比率を表 4.11 に示す。前項では、長尺処理板材に準不燃材料の性能を付与する薬剤固形分量を 135kg/m<sup>3</sup> とした。薬剤固形分量 135kg/m<sup>3</sup> に満たない部分は、長さ 3000mm では端部の 2.6%及び中央部の 31.8%、長さ 4000mm では端部の 15.8%及び中央部の 32.6%あり、それらの部分は塗装した場合に総発熱量が準不燃材料の基準値に満たないことが推測された。



表 4.10 準不燃材料の性能を有する長尺処理板材の仕様

長さ3000mm				長さ4000mm			
番号	木材 全乾密度 (kg/m <sup>3</sup> )	処理材 全乾密度 (kg/m <sup>3</sup> )	薬剤 固形分量 (kg/m <sup>3</sup> )	番号	木材 全乾密度 (kg/m <sup>3</sup> )	処理材 全乾密度 (kg/m <sup>3</sup> )	薬剤 固形分量 (kg/m <sup>3</sup> )
10	329	465	136	10	328	489	161
25	334	505	145	39	301	470	150
35	294	468	157	42	297	447	136
49	294	439	138	43	319	455	163
55	301	458	155	45	291	454	141
98	356	495	135	58	294	435	158
99	326	481	151	65	291	449	165
109	303	438	153	76	309	474	138
117	308	459	147	81	284	422	151
118	315	468	161	104	290	442	136
126	340	487	159	109	330	505	157
132	301	462	140	154	322	457	155
163	302	461	160	163	312	468	160
187	283	452	165	164	302	475	153
200	293	433	150	171	317	486	144
201	345	505	163	194	305	460	140
214	368	533	148	209	302	461	147
216	293	466	141	225	314	467	149
239	323	473	140	234	294	438	145
平均	316	471	150	平均	305	461	150
最大	368	533	165	最大	330	505	165
最小	283	433	135	最小	284	422	136

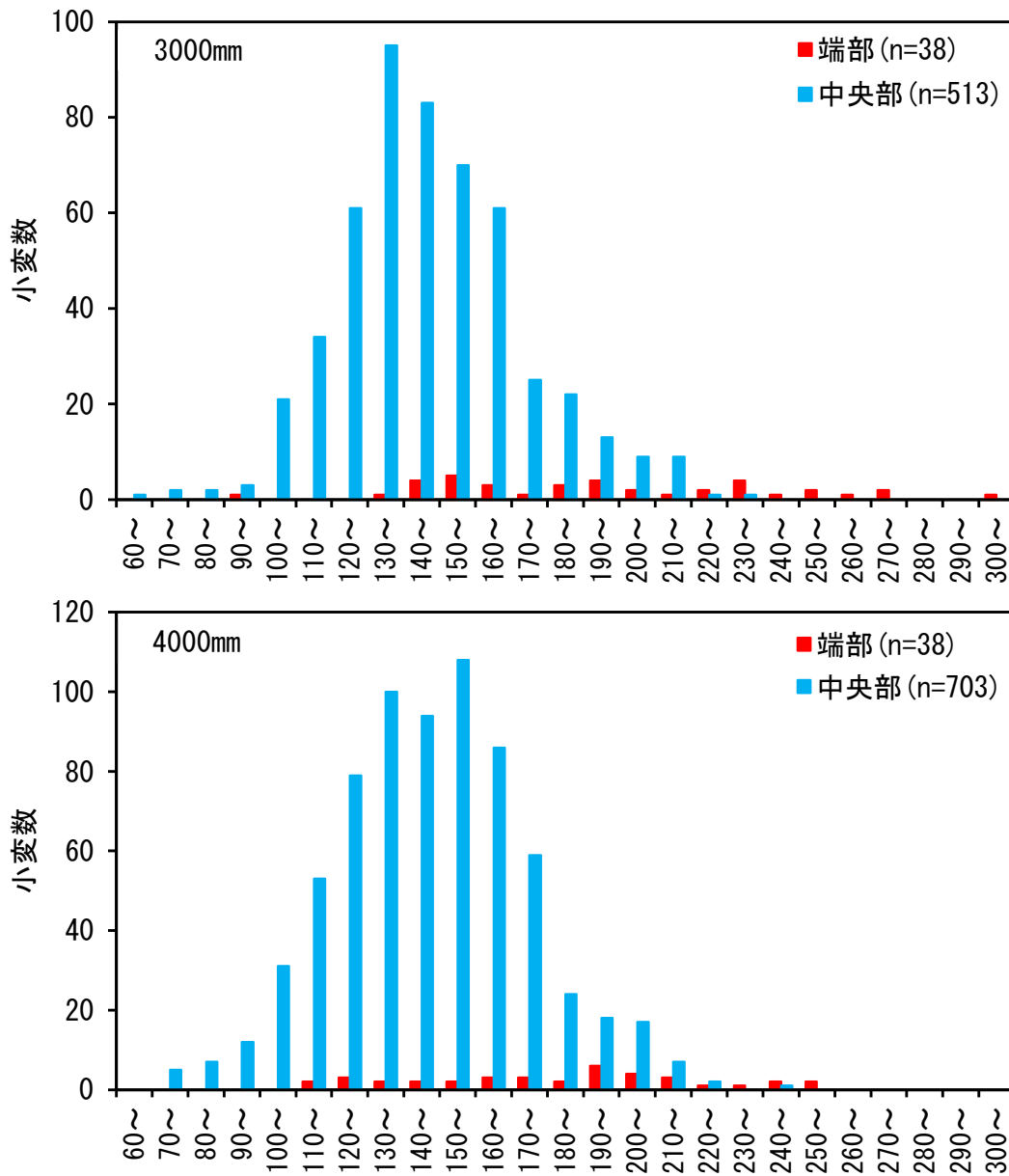


図 4.15 長尺処理板材から採取した小片の薬剤固形分量の分布  
(薬剤固形分量 135~165kg/m<sup>3</sup> 19 枚)

表 4.11 長尺処理板材から採取した処理小片の薬剤固形分量の累積比率  
(薬剤固形分量 135~165kg/m<sup>3</sup> 19 枚)

薬剤 固形分量範囲 (kg/m <sup>3</sup> )	長尺処理板材の長さ			
	3000mm		4000mm	
	端部 (n=38)	中央部 (n=513)	端部 (n=38)	中央部 (n=703)
65~	0.000	0.002	0.000	0.000
70~	0.000	0.004	0.000	0.004
75~	0.000	0.006	0.000	0.007
80~	0.000	0.008	0.000	0.010
85~	0.000	0.010	0.000	0.017
90~	0.000	0.010	0.000	0.024
95~	0.026	0.016	0.000	0.034
100~	0.026	0.035	0.000	0.054
105~	0.026	0.057	0.000	0.078
110~	0.026	0.092	0.026	0.110
115~	0.026	0.123	0.053	0.154
120~	0.026	0.168	0.105	0.203
125~	0.026	0.242	0.132	0.266
130~	0.026	0.318	0.158	0.326
135~	0.053	0.427	0.184	0.408
140~	0.105	0.519	0.237	0.486
145~	0.158	0.589	0.237	0.542
150~	0.263	0.671	0.263	0.622
155~	0.289	0.725	0.289	0.696
160~	0.316	0.793	0.316	0.752
165~	0.368	0.844	0.368	0.818
170~	0.395	0.879	0.421	0.859
175~	0.395	0.893	0.447	0.900
180~	0.447	0.916	0.474	0.919
185~	0.474	0.936	0.500	0.936
190~	0.553	0.945	0.553	0.949
195~	0.579	0.961	0.658	0.962
200~	0.605	0.973	0.684	0.973
205~	0.632	0.979	0.763	0.986
210~	0.658	0.981	0.816	0.993
215~	0.658	0.996	0.842	0.996
220~	0.711	0.998	0.868	0.997
225~	0.711	0.998	0.868	0.999
230~	0.737	1.000	0.868	0.999
235~	0.816	1.000	0.895	0.999
240~	0.816	1.000	0.947	1.000
245~	0.842	1.000	0.947	1.000
250~	0.868	1.000	0.974	1.000
255~	0.895	1.000	1.000	1.000
260~	0.921	1.000	1.000	1.000
265~	0.921	1.000	1.000	1.000
270~	0.974	1.000	1.000	1.000
275~	0.974	1.000	1.000	1.000
280~	0.974	1.000	1.000	1.000
285~	0.974	1.000	1.000	1.000
290~	0.974	1.000	1.000	1.000
295~	0.974	1.000	1.000	1.000
300~	1.000	1.000	1.000	1.000

■ : 薬剤固形分量が<sup>※</sup>135kg/m<sup>3</sup>未満

#### 4.3.3.3 燃焼性状への節の影響

発熱性試験の結果を表 4.12 に、最高発熱速度及び 10 分間総発熱量と薬剤固形分量の関係を図 4.16 と図 4.17 に示す。また、図中には前項で得られた無節試験体のデータを比較のために併記した。無節試験体の最高発熱速度及び総発熱量は、4.3.3.1 において薬剤固形分量 100~250kg/m<sup>3</sup> の範囲で変化がなかったが、有節試験体もそれらの関係から大きく外れることは無かった。ただし、比較的大きな節を有する D1.5-1 と D2.0-1 は、加熱中に短い時間であるが有炎燃焼を生じ、最高発熱速度が他の試験体よりも若干高い値を示した。

無節試験体の結果で薬剤固形分量 100~250kg/m<sup>3</sup> の範囲において、最高発熱速度及び総発熱量が変わらなかったことを踏まえ、全ての有節試験体について、節の大きさと最高発熱速度または総発熱量の関係を分析する。節係数に対する最高発熱速度及び総発熱量の関係を、図 4.18 及び図 4.19 に示す。また、各図中には、節係数と最高発熱速度及び総発熱量間の回帰直線、回帰式及び寄与率を併記した。なお寄与率は、t 検定による有意性の検定結果を示した。

最高発熱速度及び総発熱量は、ともに節係数の増加とともにわずかに増加する傾向が認められた。最高発熱速度は、準不燃材料の基準値では「10 秒以上を超えて発熱速度が 200kW/m<sup>2</sup> 継続しないこと」が定められているが、節の存在による増加はわずかであり、塗装したとしても基準値を超えることは無いと考えられた。一方、総発熱量は、第三章において塗装した状態で準不燃材料の性能を満たすためには、難燃処理木材の総発熱量を 5.0MJ/m<sup>2</sup> を上限にすることを示した。節のある試験体の総発熱量は、最大で 4.9MJ/m<sup>2</sup> であり、上限値を超えることは無かった。また、図 4.19 の回帰式から、難燃処理木材の総発熱量が 5.0MJ/m<sup>2</sup> になる節係数を算出したところ 2.9cm<sup>2</sup> であった。節係数 2.9cm<sup>2</sup> は、正円状の節の直径に換算すると 1.7cm であり、これ未満の寸法の節であれば総発熱量が 5MJ/m<sup>2</sup> 以上とならないと推測された。表 4.8 の処理小片の節係数の分布では、節係数 2.9cm<sup>2</sup> を超える小片はほとんど無いことから、処理板材の長さ方向において節の存在により準不燃材料の基準を損なう部分はほぼ無いと考えられた。

藤田等<sup>2)</sup> の報告では、難燃処理板材の節は、他の部分に比べて薬剤固形分量が大幅に低いことを示した。また、薬剤固形分量が 151~194kg/m<sup>3</sup> の長さ 3000mm の処理板材において、直径 9.5mm を超える節の部分は、総発熱量が準不燃材料の基準を超える可能性があることを示した。本試験の結果は、藤田等の報告と同様に、節の寸法の増加に伴い最高発熱速度及び総発熱量の増加が見られた。ただし、本試験における節の存在による総発熱量の増加は、藤田等の報告ほど大きくなかった。この原因として、藤田等の試験では、注入性改善を目的に処理前の板材にドリルインサイジング加工し、難燃剤の注入処理における加圧時間を 5 分間又は 60 分間と短くしているため、板材内の難燃剤の分布状態が本試験と異なることが考えられた。

表 4.12 節を含む試験体の発熱性試験の結果

試験体	薬剤 固形分量 (kg/m <sup>3</sup> )	節係数 <sup>a)</sup> (cm <sup>2</sup> )	最高 発熱速度 (kW/m <sup>2</sup> )	総発熱量 (MJ/m <sup>2</sup> )		有炎燃焼 (秒)		燃焼量 (g)
				5分間	10分間	開始	終了	
A0.5-1	121	0.27	12	1.5	4.0	無し		27.4
B0.5-1	145	0.09	8	1.1	3.0	無し		24.7
B0.5-2	149	0.25	11	1.6	4.2	無し		27.2
B2.5-1	137	2.21	15	1.8	4.9	無し		28.5
C0.5-1	169	0.16	8	1.1	2.9	無し		26.1
C0.5-2	178	0.24	10	1.5	3.9	無し		25.7
C0.5-3	174	0.32	11	1.2	3.8	無し		27.2
C1.0-1	174	0.6	13	1.6	4.5	無し		27.0
C1.5-1	175	1.32	11	1.5	4.0	無し		27.3
C2.0-1	176	1.56	13	1.8	4.8	無し		28.1
D0.5-1	208	0.16	9	1.4	3.7	無し		26.5
D1.0-1	201	0.84	11	1.2	3.8	無し		28.6
D1.5-1	202	1.04	20	1.8	4.4	565	572	27.7
D2.0-1	201	1.69	16	1.9	4.8	58	80	28.3
D2.5-1	208	2.25	12	1.4	4.1	無し		27.8
E2.5-1	230	2.28	14	1.7	4.4	無し		26.9

a) 節の繊維方向の直径 (cm) と繊維直交方向の直径 (cm) を掛け合わせた数値

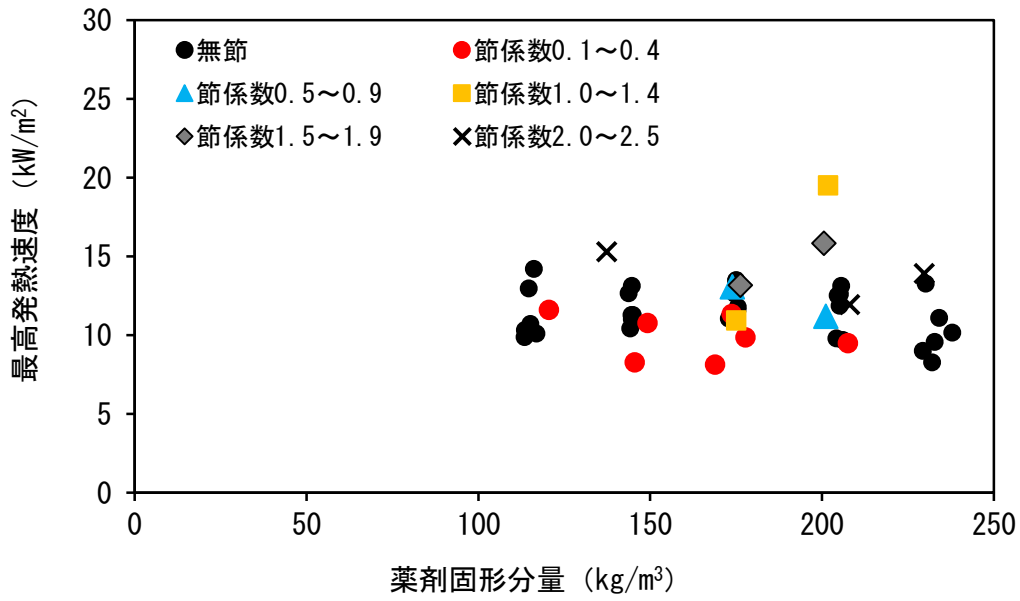


図 4.16 薬剤固形分量と最高発熱速度の関係

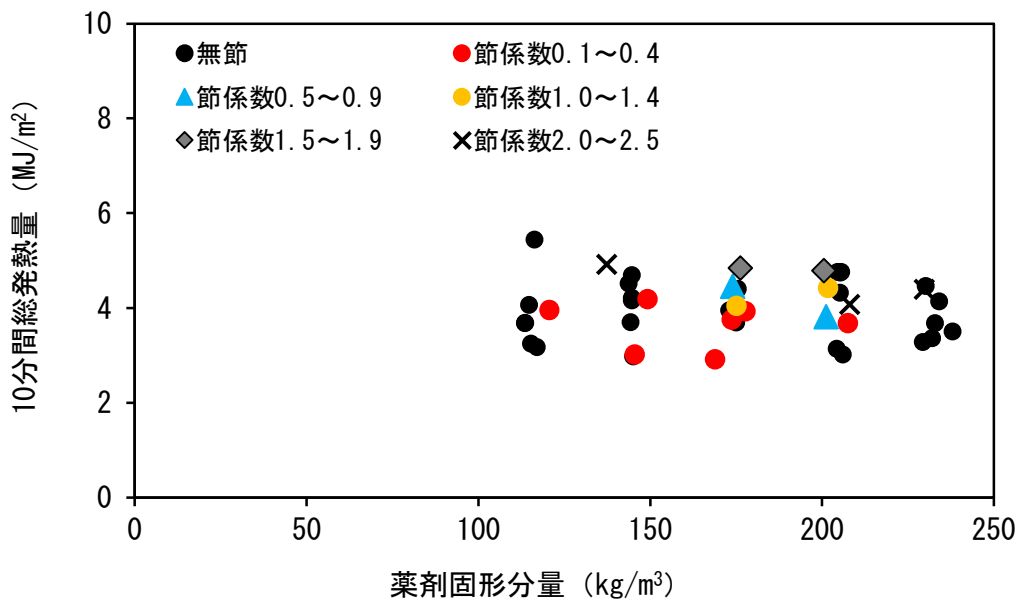


図 4.17 薬剤固形分量と10分間総発熱量の関係

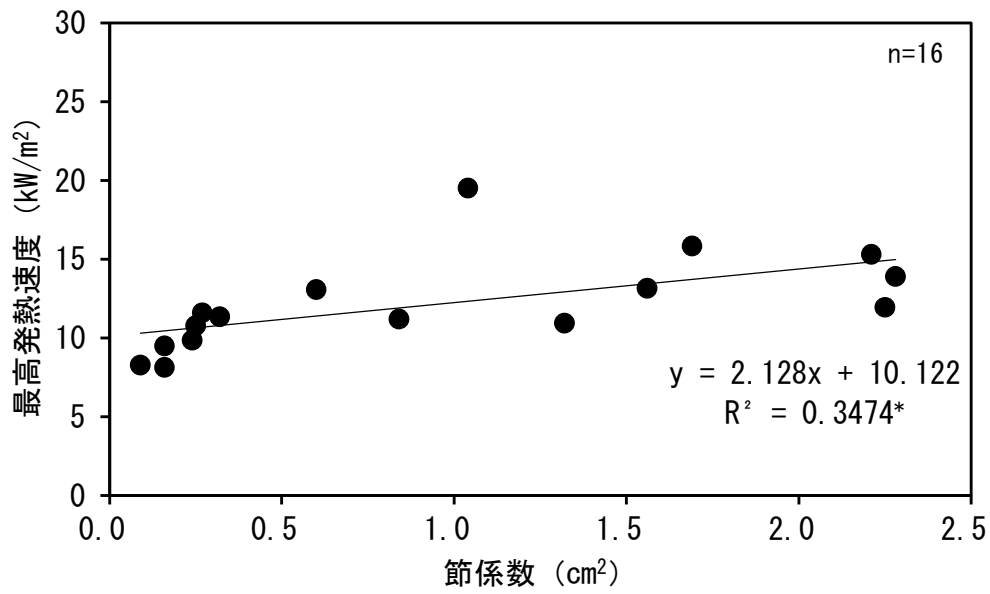


図 4.18 節係数と最高発熱速度の関係  
\* : t 検定において有意水準 5%で有意

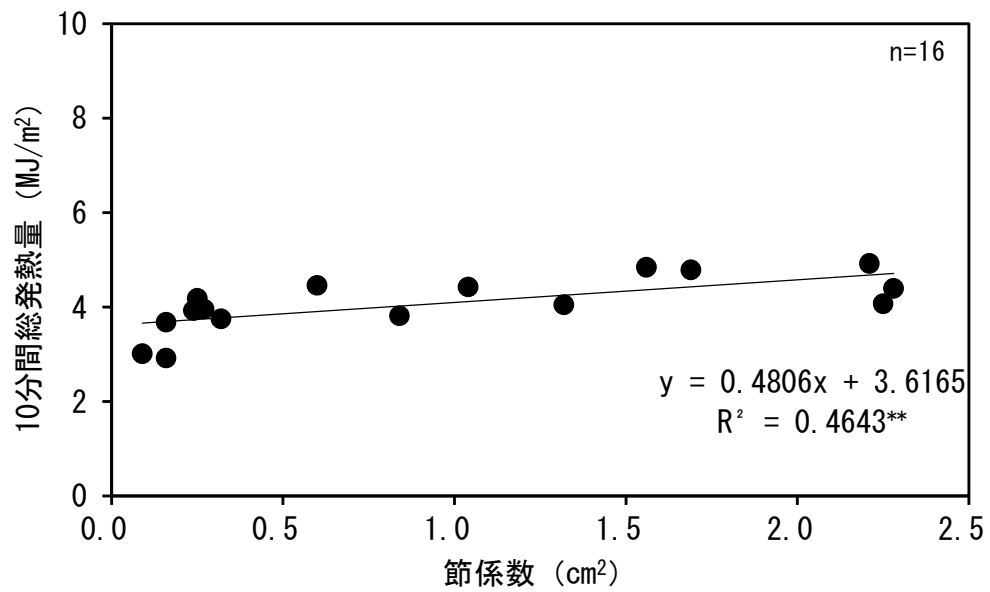


図 4.19 節係数と10分間総発熱量の関係  
\*\* : t 検定において有意水準 1%で有意

#### 4.3.4 結論

第三章で選定したリン酸グアニジン系難燃剤を用いて製造した長さ 3000mm 及び 4000mm の長尺処理板材（薬剤固形分量  $100\sim 200\text{kg}/\text{m}^3$ ）について、採取した小片を発熱性試験に供して燃焼性状を評価した。その結果から、小片の薬剤固形分量と燃焼性状の関係を把握し、長尺処理板材に準不燃材料の性能が得られる薬剤固形分量を推定した。また、準不燃材料の性能が得られるとする薬剤固形分量の長尺処理板材については、長さ方向における薬剤固形分量の分布状態を把握した。更に、板材に存在する節について、発熱性試験により燃焼性状への影響を把握した。それらの結果をまとめると以下の通りとなる。

- 1) 長尺処理板材から採取された小片の燃焼試験の結果、薬剤固形分量と最高発熱速度及び総発熱量の間に関係式が得られるとともに、長尺処理板材に準不燃性能が得られる薬剤固形分量は  $135\text{kg}/\text{m}^3$  と推定された。
- 2) 準不燃材料の性能が得られるとする薬剤固形分量  $135\sim 165\text{kg}/\text{m}^3$  の長尺処理板材は、長さ方向における薬剤固形分量の分布状態を分析した結果、 $135\text{kg}/\text{m}^3$  に満たない部分があるが、長さ 3000mm では端部の 2.6%及び中央部の 31.8%、長さ 4000mm では端部の 15.8%及び中央部の 32.6%あり、それらの部分は塗装した場合に総発熱量が準不燃材料の基準値に満たないことが推測された。
- 3) 有節の小片の燃焼試験の結果、難燃処理木材は節の寸法が大きくなるに従い最高発熱速度及び総発熱量が増加する傾向があることが分かった。ただし、本試験で認められた節の存在による最高発熱速度及び総発熱量の増加量は小さく、塗装した状態においても準不燃材料の性能が得られると考えられた。



#### 4.4 模型箱試験による燃焼性状の評価

長さ 4000mm の長尺処理板材から、4.3.3.2 で長さ方向の薬剤固形分量の分布状態を分析した長尺処理板材を同じ薬剤固形分量範囲を選定し、第三章の結果を基に塗装した後、中規模燃焼試験である模型箱試験により燃焼性状を把握するとともに、準不燃材料の性能を評価した。更に、4.3.3.2 で把握した長尺処理板材の長さ方向における薬剤固形分量のバラツキについて、模型箱試験の燃焼性状への影響を考察した。

##### 4.4.1 試験体

試験体は、4.2.1.2 で作成した長さ 4000mm の長尺処理板材から、4.3 で推定された準不燃材料の性能が得られるとする薬剤固形分量 135~165kg/m<sup>3</sup> を 65 枚選定した。選定した処理板材の概要を表 4.13 に示す。それらの処理板材は、図 4.20 に示すように両端部から 400~450mm の部分を除き、模型箱試験用の長さ 1000mm の処理板材を 3 枚と含水率測定用の小片を 2 片採取した。長さ 1000mm の処理板材は、3.3 で白華抑制に有効であった一般木材用ウレタン樹脂塗料（溶剤系）を、表 4.14 の仕様で両木口を除く 4 面にスプレーにより塗布した。

表 4.13 選定された長さ 4000mm の処理板材				表 4.14 選定された長さ 1000mm の処理板材			
番号	板材 全乾密度 (kg/m <sup>3</sup> )	板材 全乾密度 (kg/m <sup>3</sup> )	固形分量 (kg/m <sup>3</sup> )	番号	板材 全乾密度 (kg/m <sup>3</sup> )	板材 全乾密度 (kg/m <sup>3</sup> )	薬剤 固形分量 (kg/m <sup>3</sup> )
4	293	457	163	121	285	437	152
5	376	517	141	123	293	437	144
12	332	476	143	127	322	475	153
14	299	461	161	129	331	494	163
15	331	471	140	130	309	466	157
20	298	461	163	131	369	504	135
22	322	484	162	132	350	511	161
23	289	430	141	136	308	444	136
27	337	478	141	137	313	457	144
30	352	496	144	139	352	496	144
41	320	478	157	140	351	506	155
54	327	478	151	143	288	437	149
55	356	507	151	147	339	497	158
56	349	501	152	149	315	480	165
59	327	472	146	161	335	477	142
62	313	471	158	163	302	461	160
63	359	501	142	167	354	507	153
64	300	454	154	168	289	449	160
68	305	445	140	172	316	481	165
69	320	459	140	173	284	448	164
72	305	465	160	176	296	441	144
74	342	498	156	195	287	444	157
75	287	451	163	206	309	457	148
82	324	484	160	207	349	497	147
84	335	475	140	217	299	459	160
96	339	494	155	219	294	451	157
97	320	474	154	220	296	455	159
101	319	462	142	222	290	440	150
103	303	460	157	223	284	448	164
106	303	452	149	224	294	444	150
108	295	438	142	平均	317	470	152
115	307	466	159	最大	376	517	165
116	304	454	150	最小	284	430	135
117	294	456	161				
120	345	500	154				

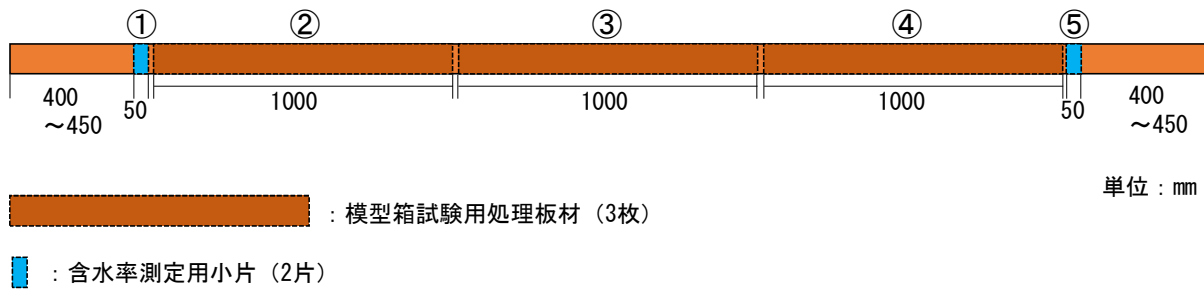


図 4.20 処理板材からの試験用材料の採取

表 4.14 処理板材の塗装条件

塗料	塗布量 (wet)		固形分 (%)	総固形分量 (g/m <sup>2</sup> )
	(g/m <sup>2</sup> )			
ウレタン樹脂系塗料 (一般, 溶剤系)	下塗り	90	27.5	63.8
	上塗り	142	27.5	

#### 4.4.2 実験方法

##### 4.4.2.1 模型箱試験

試験は、指定性能評価機関の防耐火性能試験・評価業務方法書<sup>6)</sup>の準不燃性能試験方法に基づき2回行った。試験は、一般財団法人日本建築総合試験所の設備を用いた。

長さ1000mmの塗装処理板材は、供試箱を構成する4枚の各パネルで薬剤固形分量の状態が同等になるように選定した(表4.15)。選定した塗装処理板材は、パネルの寸法に合わせて長さを調整し、図4.21に示すように鉄枠にビスで固定して天井、奥壁及び2つの側壁(右壁及び左壁)になるパネルを2組製作した。また、奥壁のパネルは、試験方法において試験材料の長さ方向の中央に欠点となる目地を設けることになっているため、1枚の塗装処理板材から長さ420mmの板材を2枚採取して鉄枠に固定した。

供試箱の各パネルに取り付けた処理板材の詳細を表4.16と表4.17に、各パネルにおける塗装処理板材の寸法及び取り付け位置を図4.22に示す。また表中には、含水率測定用小片を用いて全乾法により算出した含水率の平均値と、塗装処理板材の繊維直交方向の節の直径を併記した。

4枚のパネルは、写真4.4に示すように組み合わせて箱状(内寸:幅840×長さ1680×高さ840mm)にし、その外側を厚さ0.27mmの亜鉛めっき鋼板で覆い供試箱とした。供試箱は、図4.23に示すように内寸が幅1100×長さ1800×高さ1000mmの燃焼室の内部に入れ、正面を幅300×高さ670mmの開口を有するパネルを取り付けた。

供試箱の加熱は、火源に長さ170×幅170×高さ145mmのプロパンガスバーナーを用い、加熱強度を発熱速度40kWとした。プロパンガスバーナーは、供試箱内の左奥の隅に配置し、供試箱を内部から10分間加熱した。加熱中の供試箱の様子を写真4.5に示す。供試箱の加熱中は、排気ガス中の酸素、一酸化炭素、二酸化炭素の濃度等を1秒間隔で測定し、酸素消費法により式(4.2)を用いて発熱速度と発熱速度の積算値である総発熱量を算出した。また、供試箱内には、シース熱電対(K, 線径1.6mm, クラス2)を、箱内の奥行と幅の中心で床面から630mmの位置に設置し、加熱中の箱内温度を測定した。

加熱後は、供試箱を燃焼室から速やかに取り出し、外側の亜鉛めっき鋼板を剥がして、塗装処理木材に裏面まで貫通する亀裂及び穴の有無を観察した。

単位面積当たりの発熱速度  $\dot{q}_A(t)$  は、式 (4.2) に従って算出した。

$$\dot{q}_A(t) = E \dot{V}_{298} X^{a_{O_2}} [\phi / \{\phi(\alpha - 1) + 1\}] \quad (4.2)$$

$\dot{V}_{298}$  : 大気圧 25°C における排気ダクトの流量

$$\dot{V}_{298} = 22.4Ak \sqrt{\frac{\Delta p}{T_e}}$$

$\Phi$  : 酸素消費係数

$$\Phi = \frac{X^{O_2}(1 - X_{CO_2}) - X_{O_2}(1 - X^{O_{CO_2}})}{X^{O_2}(1 - X_{CO_2} - X_{O_2})}$$

$X^{a_{O_2}}$  : 酸素の大気中におけるモル分率

$$X^{a_{O_2}} = (1 - X^{H_2O}) X^{O_2}$$

$t$  : 時間 (s)

$E$  : 単位体積の酸素消費当たりの発熱量 (kJ/m<sup>3</sup>) = 17200 kJ/m<sup>3</sup>

$\alpha$  : 酸素を消費する化学反応による膨張係数 (酸素を消費する化学反応が試験体の燃焼の場合,  $\alpha = 1.105$ )

$A$  : ダクトの断面積 (m<sup>2</sup>)

$k$  : ダクト流量係数

$\Delta p$  : ピトー管で計測した差圧 (Pa)

$T_e$  : 排気ダクト内のガス温度 (ピトー管の付近で計測した値) (K)

$X^{O_2}$  : 酸素分析計指示値の初期値 (モル分率)

$X^{O_{CO_2}}$  : 二酸化炭素分析計指示値の初期値 (モル分率)

$X_{O_2}$  : 試験時の酸素分析計の指示値 (モル分率)

$X_{CO_2}$  : 試験時の二酸化炭素分析計の指示値 (モル分率)

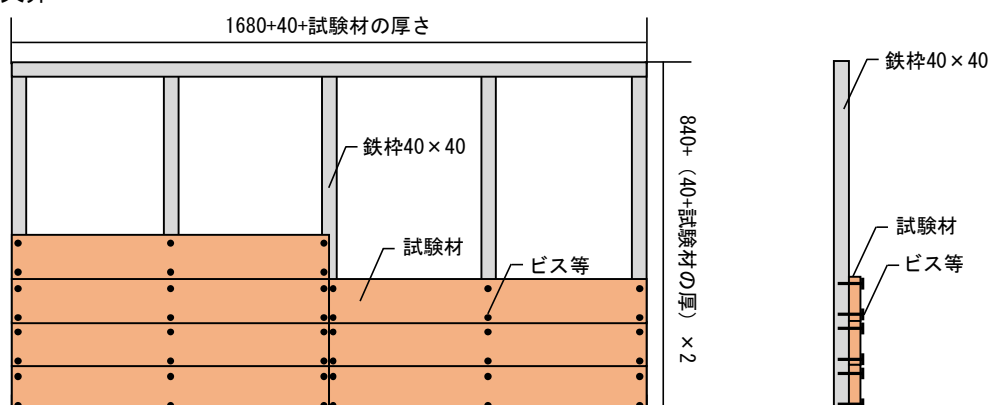
$X^{H_2O}$  : 大気中の水分のモル分率

表 4.15 供試箱に使用した塗装処理板材の概要

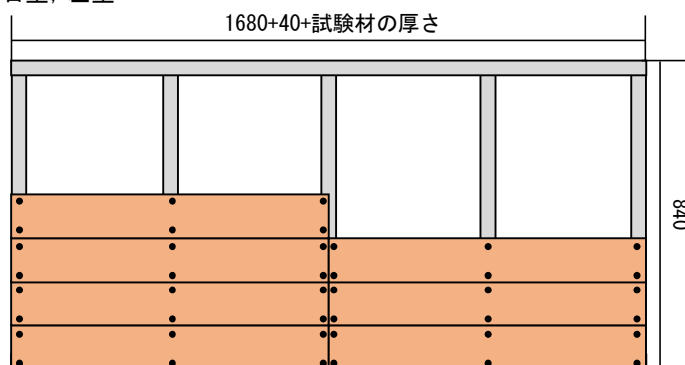
構成 パネル	処理板材 の枚数 <sup>a)</sup> (枚)		供試箱A			供試箱B		
			板材の 全乾密度 (kg/m <sup>3</sup> )	薬剤 固形分量 (kg/m <sup>3</sup> )	含水率 (%)	板材の 全乾密度 (kg/m <sup>3</sup> )	薬剤 固形分量 (kg/m <sup>3</sup> )	含水率 (%)
奥壁	10	平均	319	146	9.2	329	148	8.8
		最大	376	161	11.7	376	165	11.7
		最小	288	135	7.2	289	135	7.5
天井	22	平均	320	150	10.0	316	150	10.2
		最大	376	163	13.5	356	164	13.5
		最小	285	135	7.5	284	136	7.2
左側壁	20	平均	315	149	9.8	313	149	10.0
		最大	354	163	12.6	351	161	12.4
		最小	290	136	6.7	287	136	7.2
右側壁	20	平均	323	151	10.4	325	152	10.1
		最大	359	163	12.0	359	163	11.4
		最小	285	142	6.7	285	142	6.7
全体	72	平均	320	149	9.9	319	150	9.9
		最大	376	163	13.5	376	165	13.5
		最小	285	135	6.7	284	135	6.7

a) 長さ 1000mm の塗装処理板材の枚数

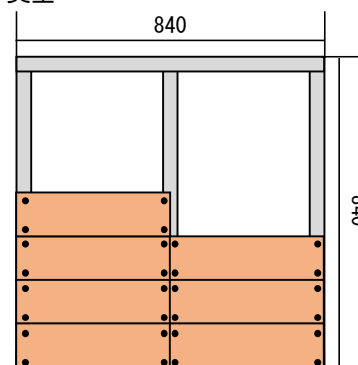
天井



右壁, 左壁



奥壁



単位 : mm

図 4.21 模型箱試験用パネルの概要

表 4.16 供試箱 A に使用された塗装処理板材の概要

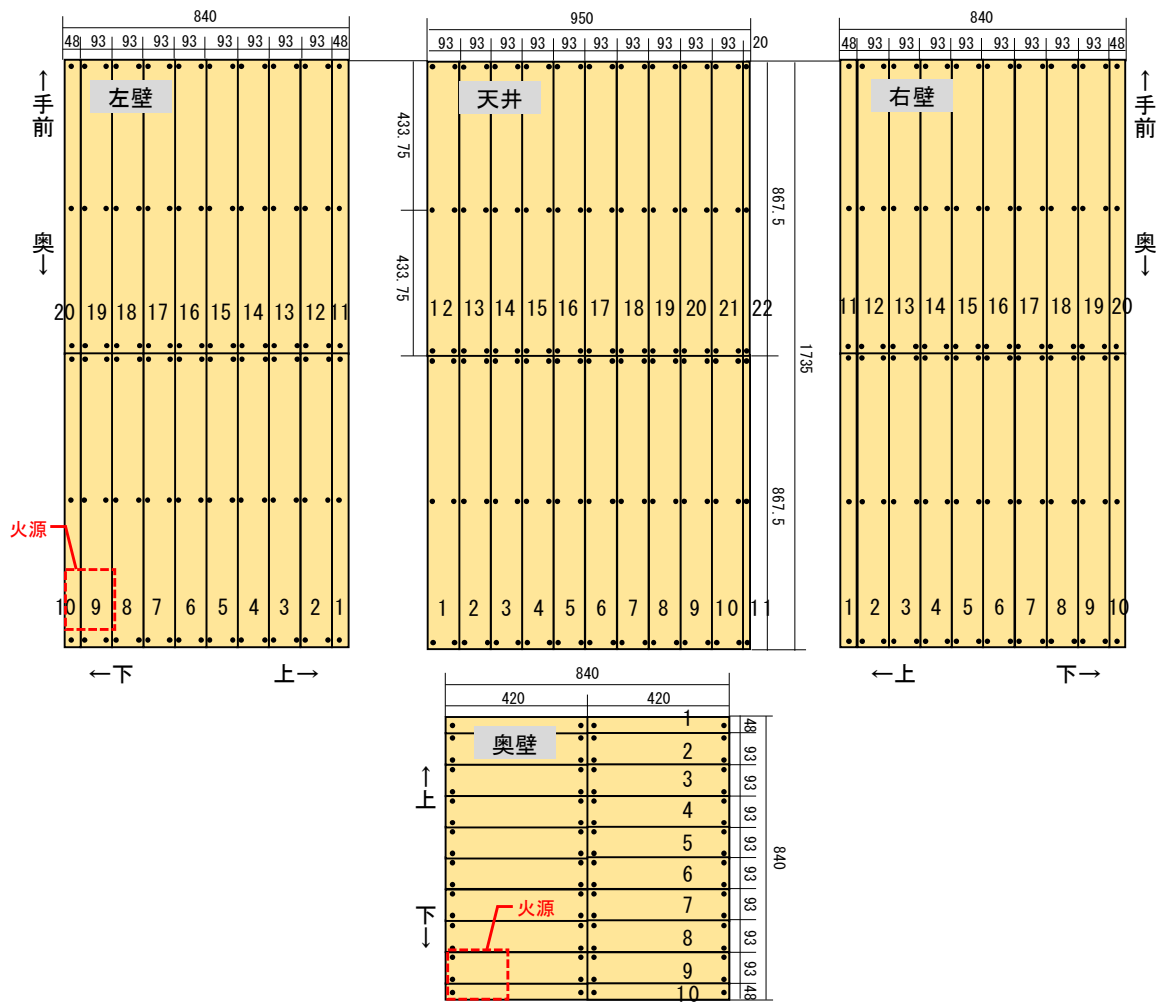
構成 パネル	部位	取り付け 位置	板材の全乾 密度 (kg/m <sup>3</sup> )	薬剤固形分量 (kg/m <sup>3</sup> )	含水率 <sup>a)</sup> (%)	節の直径 <sup>b)</sup> (mm)		
						グレー: 死に節	黄色: 生き節	
奥壁		1	369	135	7.8	10		
		2	293	144	7.2	14		
		3	305	140	11.7	5		
		4	288	149	10.3	14		
		5	331	140	8.3			
		6	349	152	10.5	16		
		7	376	141	7.5			
		8	294	157	7.9	15		
		9	289	141	9.3	14		
		10	299	161	11.1	14		
天井	奥側	1	369	135	7.8			
		2	349	147	11.3	10	8	
		3	305	140	11.7			
		4	294	150	10.7	15		
		5	331	140	8.3			
		6	345	154	12.4	13		
		7	376	141	7.5	7		
		8	339	158	7.5	10	12	
		9	335	142	8.2	7	2	15
		10	331	163	9.2	10	5	
		11	313	144	8.1			
	入口側	12	296	144	12.0			
		13	309	148	12.6			
		14	294	150	10.7			
		15	285	152	8.3	10		
		16	322	153	10.6			
		17	339	155	10.4			
		18	309	157	10.3	5		
		19	294	157	7.9			
		20	313	158	7.6			
		21	296	159	13.5			
		22	299	159	13.5			
左側壁	奥側	1	295	142	10.2	14		
		2	308	136	7.6	3		
		3	309	148	12.6	13	15	
		4	320	140	8.8			
		5	294	150	10.7	15		
		6	335	140	11.7			
		7	342	156	8.0	6	5	4
		8	337	141	11.7	6		
		9	299	160	7.9	6	6	4
		10	299	142	8.2	5		
	入口側	11	303	157	10.4	5		
		12	342	156	8.0	4		
		13	300	154	11.2			
		14	354	153	6.7			
		15	327	151	10.2			
		16	290	150	11.1	10		
		17	327	146	11.4			
		18	293	163	11.0	12		
		19	332	143	11.1			
		20	299	142	7.5			
右側壁	奥側	1	359	142	8.1			
		2	352	144	10.6			
		3	296	144	12.0			
		4	303	149	10.7			
		5	356	151	11.3	7		
		6	285	152	8.3			
		7	320	154	9.8			
		8	339	155	10.4			
		9	287	157	10.9	5		
		10	320	157	11.2	5		
	入口側	11	293	163	11.0			
		12	287	157	10.9			
		13	351	155	10.5			
		14	300	154	11.2			
		15	354	153	6.7			
		16	356	151	11.3			
		17	288	149	10.3	8		
		18	327	146	11.4			
		19	352	144	10.6			
		20	332	143	11.1	5	5	

a) 2片の含水率測定用小片の平均値, b) 繊維直交方向の直径

表 4.17 供試箱 B に使用された塗装処理板材の概要

構成 パネル	部位	取り付け 位置	板材の全乾 密度 (kg/m <sup>3</sup> )	薬剤固形分量 (kg/m <sup>3</sup> )	含水率 <sup>a)</sup> (%)	節の直径 <sup>b)</sup> (mm)			
						グレー	死に節	黄色	生き節
奥壁		1	369	135	7.8				
		2	303	157	10.4	10	12	10	
		3	305	140	11.7	7			
		4	339	158	7.5	10	15		
		5	331	140	8.3				
		6	352	144	9.9	14			
		7	376	141	7.5				
		8	315	165	7.8	14			
		9	289	141	9.3	12			
		10	313	158	7.6	13			
天井	奥側	1	308	136	7.6	16	7	8	
		2	284	164	10.9	8	8	8	8
		3	320	140	8.8				
		4	356	151	11.3	12	9		
		5	335	140	11.7				
		6	320	154	9.8	14			
		7	337	141	11.7	9	10		
		8	296	144	12.0	13			
		9	335	142	8.2	9			
		10	295	142	10.2	12			
		11	313	144	8.1	10			
	入口側	12	293	144	7.2				
		13	309	148	12.6				
		14	290	150	11.1				
		15	327	151	10.2				
		16	293	163	11.0				
		17	345	154	12.4	6			
		18	342	156	8.0	6	5		
		19	303	157	10.4				
		20	339	158	7.5	10			
		21	296	159	13.5				
		22	307	159	10.2	8			
左側壁	奥側	1	303	149	10.7	12	10	12	
		2	308	136	7.6				
		3	345	154	12.4	12	18		
		4	320	140	8.8	15			
		5	294	157	7.9	15			
		6	335	140	11.7				
		7	294	161	10.5	14			
		8	289	141	9.3	7	10		
		9	322	153	10.6	13			
		10	295	142	10.2				
	入口側	11	287	157	10.9				
		12	351	155	10.5				
		13	300	154	11.2				
		14	349	152	10.5	7			
		15	304	150	11.0				
		16	290	150	11.1				
		17	349	147	11.3				
		18	293	144	7.2				
		19	313	144	8.1				
		20	319	142	7.5	10			
右側壁	奥側	1	359	142	8.1				
		2	352	144	10.6				
		3	327	146	11.4				
		4	303	149	10.7				
		5	294	150	10.7				
		6	287	163	10.5				
		7	354	153	6.7				
		8	339	155	10.4				
		9	309	157	10.3	5			
		10	320	157	11.2	10			
	入口側	11	320	157	11.2				
		12	309	157	10.3	9			
		13	351	155	10.5				
		14	320	154	9.8				
		15	285	152	8.3	8			
		16	304	150	11.0	1			
		17	322	162	7.7	8			
		18	349	147	11.3				
		19	352	144	9.9	12			
		20	332	143	11.1	5			

a) 2片の含水率測定用小片の平均値, b) 繊維直交方向の直径

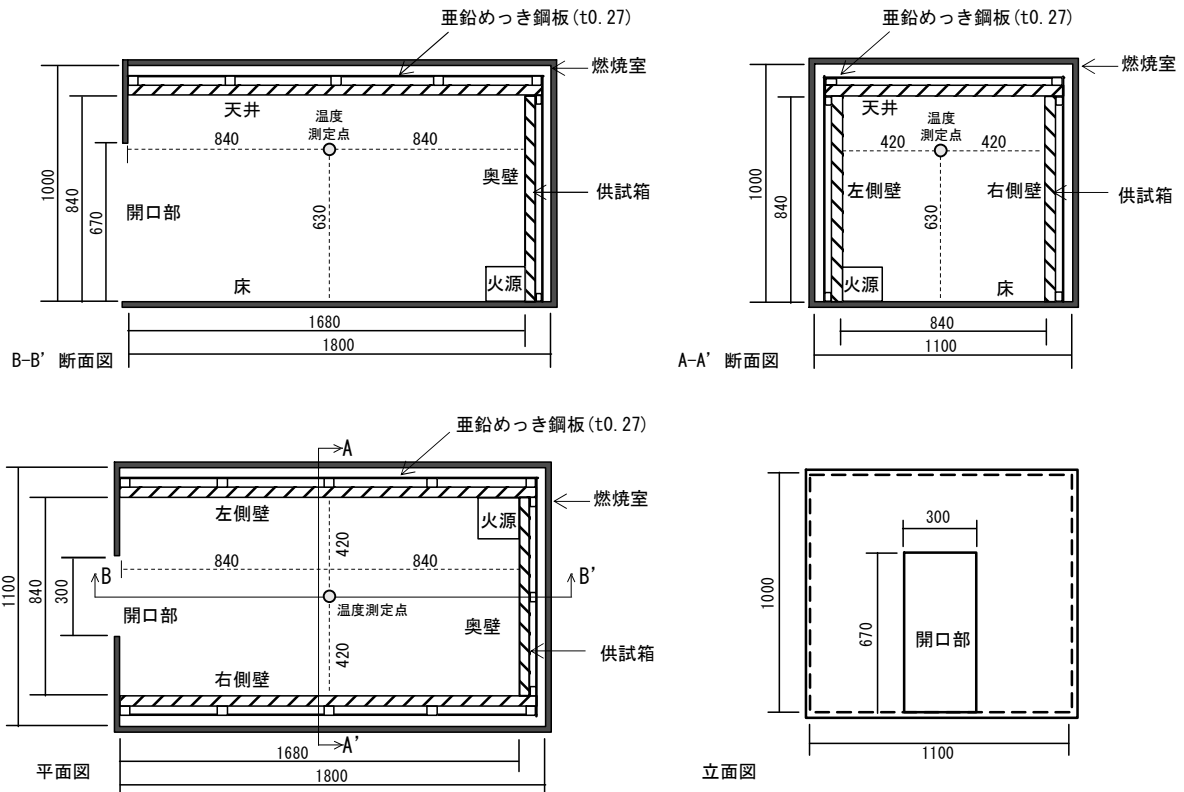


単位：mm

図 4.22 塗装処理板材の寸法と構成パネルへの取り付け位置と寸法



写真 4.4 箱状に組み立てたパネル



単位: mm

図 4.23 試験時の供試箱の状態





写真 4.5 模型箱試験の加熱状態

#### 4.4.2.2 塗装処理木材の燃焼状態の把握

試験後の供試箱は、4枚のパネルに分解した後、鉄枠から塗装処理板材をはずした。処理板材は、金属製ブラシで炭化層を除いた後、室内に面する部分を対象に長さ方向に50mm間隔で切断し、小片を採取した。各小片は、ノギスを用いて幅方向中央部の未炭化部分の厚さを測定し、試験前の厚さとの差から炭化深さを算出した。

#### 4.4.3 結果と考察

##### 4.4.3.1 発熱速度、総発熱量及び箱内温度の推移

加熱中の発熱速度と総発熱量の推移を図4.24に示す。なお、図中の発熱速度と総発熱量は、火源の発熱速度及び発熱量を含む値である。供試箱Aと供試箱Bの発熱速度は、加熱終了時まで70kW未満でほぼ一定又はわずかに増加して推移した。総発熱量は、発熱速度がほぼ一定であるため、加熱時間の経過に伴い直線的に増加した。

加熱時間内の箱内温度を図4.25に示す。箱内温度は、加熱直後に急激に上昇するが、加熱後50秒以降では緩やかな増加挙動に変わり、加熱終了時まで推移した。加熱終了時の温度は、試験体Aでは432℃、試験体Bでは400℃であった。

室内の火災を想定する区画火災では、部分的な燃焼である火源から壁面の内装材料等の可燃材料に燃え移り、上方及び水平方向に燃え広がりながら拡大する。また、天井については、火源や燃焼した内装材料等から放出される高温の煙やガスが滞留し、それらの熱放射により壁面が加熱される。天井に滞留する煙及びガスが一定量増加して温度が高まると、壁面や床面への加熱が強まり、室内の可燃物が一気に燃焼し始め、部屋全体が火炎に包まれる盛期火災へと移行する。盛期火災に移る際には、短時間に温度が数100℃上昇するとともに、区画内は急激な酸素不足状態になり、在館者の生命が危機的状況になる。このような遷移現象をフラッシュオーバーという。区画火災において在館者の安全性を維持するには、フラッシュオーバーを生じる前の段階において、燃焼の成長を抑制することが必要である。

田坂等<sup>7)</sup>は、厚さ18mmの難燃処理木材を用いて模型箱試験を行い、室内火災においてフラッシュオーバー時の箱内温度及び排気ガス中の酸素、一酸化炭素及び二酸化炭素濃度を計測した。試験では、加熱開始後10分付近から発熱速度が上昇し始めフラッシュオーバーを発生し、その時の箱内温度は600℃を超えた。本試験の2つの供試箱内の温度は、最高で432及び400℃とフラッシュオーバーの危険性のない温度であり、加熱時間内において安全性が維持されていると考えられた。

試験結果を表4.18に示す。また、表中には準不燃材料の基準値を併記した。供試箱Aと供試箱Bの最高発熱速度及び総発熱量は、ともに準不燃材料の基準値を満たした。更に、加熱終了時の塗装処理板材には、裏面まで貫通する亀裂及び穴が見られず、準不燃材料の全ての基準を満たした。

次に、4.3.3.2で得られた、長尺処理板材の長さ方向における100mm間隔の部分の薬剤固形分量の分布状態との関係を考察する。模型箱試験に使用した処理板材は、長さ4000mmの処理板材から両端から400～450mmを除いた部分から採取した。従って、処理板材の長さ方向の薬剤固形分量の分布は、図4.15及び表4.11における長さ4000mmの処理板材の中央部と同等と考えられる。すなわち、使用した塗装処理板材は、4.3.3.2で示したように、発熱性試験の評価において長さ方向において32.6%の部分の総発熱量が準不燃材料の基準値を

超えることが考えられた。しかし、模型箱試験の評価では、2つの供試箱ともに準不燃材料の基準を満たしており、それらの性能が劣る部分の影響が現れなかった。

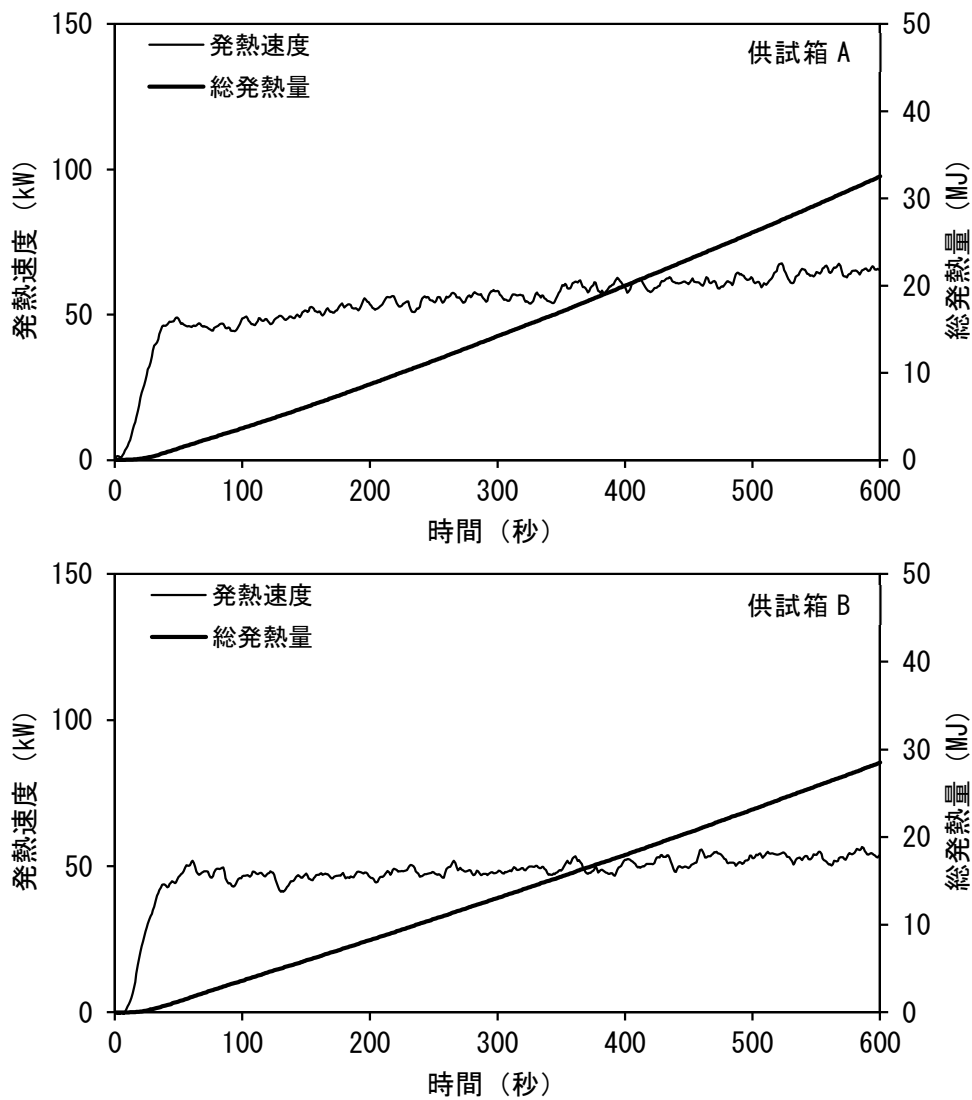


図 4.24 発熱速度と総発熱量の推移

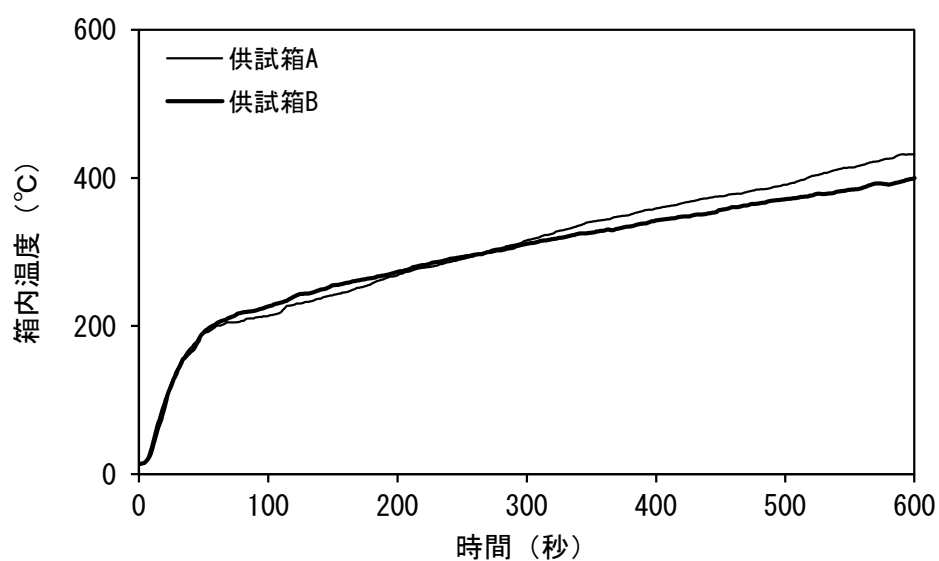


図 4.25 加熱中の箱内温度の推移

表 4.18 模型箱試験の結果

供試箱	最高発熱速度 <sup>a)</sup> (kW)	10分間総発熱量 <sup>b)</sup> (MJ)	最高箱内温度 (°C)	加熱後における裏面まで貫通する亀裂及び穴
A	68	32.5	432	無し
B	57	28.5	400	無し
平均	62	30.5	416	無し
準不燃材料の基準値	10秒以上継続して140kWを超えない	50.0		無いこと

a) 火源からの寄与分 40kW を含む, b) 火源からの寄与分 20MJ を含む

#### 4.4.3.2 塗装処理板材の炭化状態

加熱後における供試箱の状態を写真 4.6 に示す。塗装処理板材は、加熱終了後においても、加熱前と同様に鉄枠に留め付けられていた。図 4.26 に示すように供試箱の構成パネルの部位ごとに、塗装処理板材の炭化深さを測定した結果を表 4.19 に示す。表中では、天井、左壁及び右壁は、火源に近い奥側（番号 1～10）と入口側（天井：番号 12～21、左壁と右壁：番号 11～20）の 2 つの部分に分けて記した。なお、天井の番号 11 と 22 の板材は、右壁と重なる部分で加熱されていないため除いた。塗装処理板材の平均炭化深さは、2 体の供試箱ともに天井、左壁及び右壁において奥側が入口側より大きくなった。また、供試箱を構成する 4 枚のパネル間では、天井の平均炭化深さが他のパネルよりも大きく、ほぼ全面に炭化が見られた。炭化深さの最大値は、奥壁と、天井及び左壁の奥側において、11.9～12.4mm をであった。

各供試箱について、塗装処理板材の炭化深さの分布を図 4.27 と図 4.28 に示す。塗装処理板材の炭化深さは、火源の周辺と天井の奥側、左壁、右壁及び奥壁では天井に近い部分が大きくなった。一方、左壁、右壁及び奥壁において、塗装処理板材に炭化を生じていない部分が多く見られた。供試箱 A 及び供試箱 B において、炭化深さが 1mm 未満の部分の割合は、左壁全体では 49%及び 54%、右壁全体では 46%及び 53%、奥壁では 37%及び 41%であった。また、塗装処理板材の未炭化部分は、入口側の床面に近い部分ほど多く見られた。4.4.3.1 で述べたように、区画火災においては、火源から壁面に燃え移った後、垂直方向及び水平方向に燃焼が広がり、天井及び天井に近い壁面部では、火源及び周辺部の可燃物の燃焼で発生する高温の煙等の滞留により加熱を受ける。更に、燃焼が進展すると、天井に滞留したガス等の量が増加して壁面や床面への加熱が強くなり、フラッシュオーバーを経て区画内全体が燃焼する盛期火災に至る。厚さ 18mm の無処理のスギ板材を用いて模型箱試験を行った鈴木等<sup>8)</sup>の報告では、加熱してから 1 分 20 秒後にフラッシュオーバーが始まり、加熱後の板材は全面的に炭化し、それらの炭化は裏面まで達していた。本試験では加熱後の塗装処理板材は、壁面の床に近い部分や入口に近い部分において未炭化又はわずかに炭化した部分が多く見られ、燃え広がりが抑制されていた。

区画火災において、壁や天井の可燃材料は、火災の初期には加熱強度の高い火源により加熱されるが、次第に燃焼部分が広がり火源から離れるため、天井に滞留する高温の煙等や先行して燃焼した部分の生じる炎により加熱されることになる。このため、燃え広がりの継続には、滞留する煙等や先行燃焼部分からの加熱が、未燃焼部分の着火に必要な強度並びに継続時間であることが必要になる<sup>9)</sup>。

菊地は、壁面に使用される木質材料について、燃え広がりを表す火炎伝播へのポリリン酸カルバメート系難燃剤の抑制効果を報告している<sup>10)</sup>。試験は、ISO5658-2<sup>11)</sup>の火炎伝播性試験に基づき、水平方向の火炎伝播を評価した。木質材料はミズナラ、カバノキ及びトドマツの厚さ 12mm の板材を用いた。試験の結果、全樹種の板材において難燃剤の薬剤固形分量が 60kg/m<sup>3</sup>において水平方向の火炎伝播が抑制されることを示した。ポリリン酸カルバメート系の難燃剤は、本試験で用いたリン酸グアニジン系の難燃剤と同じリン系の薬剤であり、木材への燃焼抑制作用は大きくは変わらない。本試験に用いた処理板材の長さ方向における薬剤固形分量の分布は、表 4.11 に示すように最低値が 70～75kg/m<sup>3</sup>であり、60kg/m<sup>3</sup>に満たない部分は無かった。

このことから、試験に用いた塗装処理板材は、燃え広がりを抑制する性能を全体に保持していると考えられた。模型箱試験は、試験材料の加熱条件が実際の区画火災と同様であり、燃え広がり性状を含めた形で試験材料の燃焼性状が評価される。本試験に用いた塗装処理板材は、4.3.3.2で示したように長さ方向の32.6%が準不燃材能の性能に満たない部分があることが推測されたが、全体に燃え広がりを抑制する性能を保持するために箱内の燃焼が拡大せず、準不燃材料の性能が得られたと考えられた。



供試箱 A



供試箱 B

写真 4.6 加熱終了後の供試箱の状態

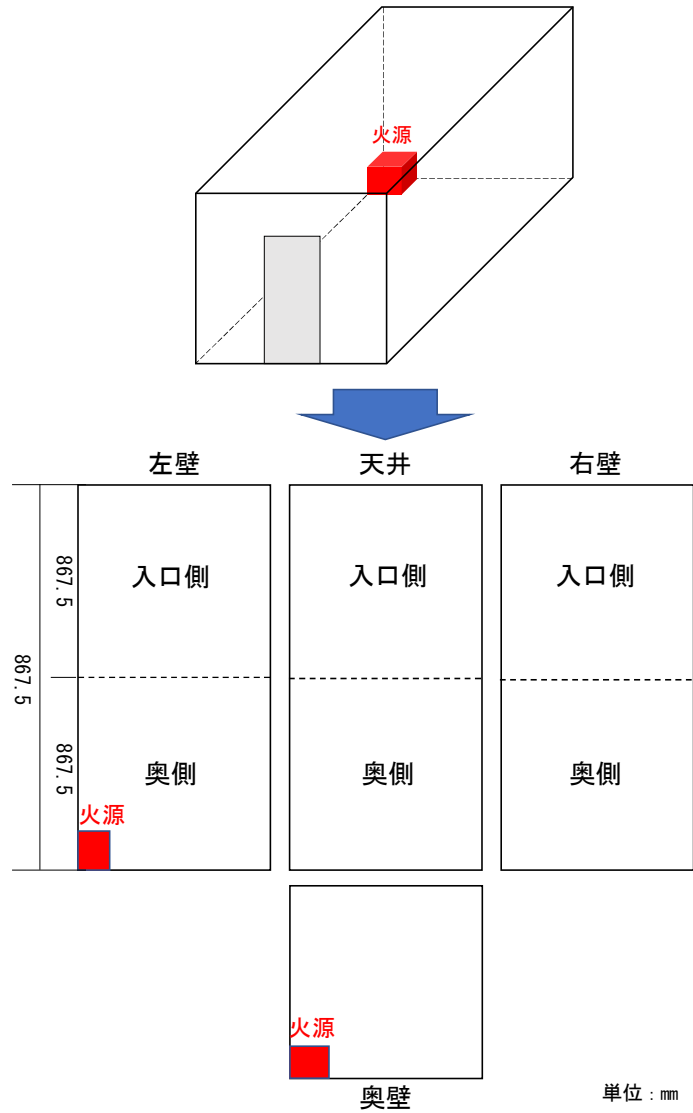


図 4.26 供試箱から構成パネルへの展開

表 4.19 処理木材の炭化深さ

パネル			試験体A		試験体B	
			奥側	入口側	奥側	入口側
天井	炭化深さ (mm)	平均	7.2	3.4	7.2	2.6
		最大	12.3	6.1	12.2	5.9
		最小	3.6	0.8	3.2	0.4
	データ数	150	160	150	160	
左壁	炭化深さ (mm)	平均	3.9	1.1	3.5	0.9
		最大	12.0	6.4	12.0	5.2
		最小	0.0	0.0	0.0	0.0
	データ数	150	160	150	160	
右壁	炭化深さ (mm)	平均	2.9	1.2	2.5	0.9
		最大	7.5	5.5	6.8	4.2
		最小	0.0	0.0	0.0	0.0
	データ数	150	160	150	160	
奥壁	炭化深さ (mm)	平均	4.1		3.8	
		最大	12.4		11.9	
		最小	0.0		0.0	
	データ数	160		160		

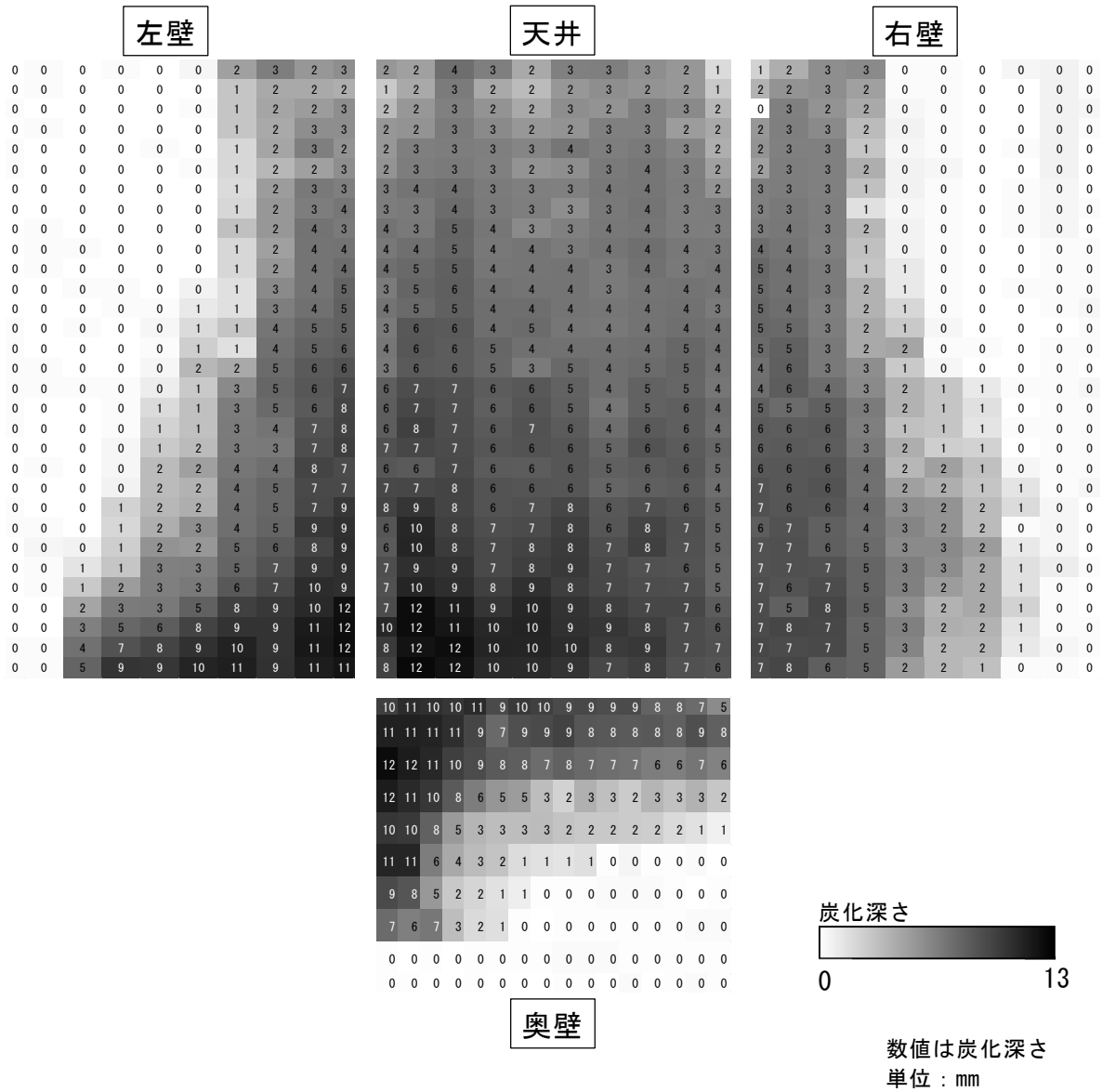


図 4.27 処理木材の炭化深さ（試験箱 A）



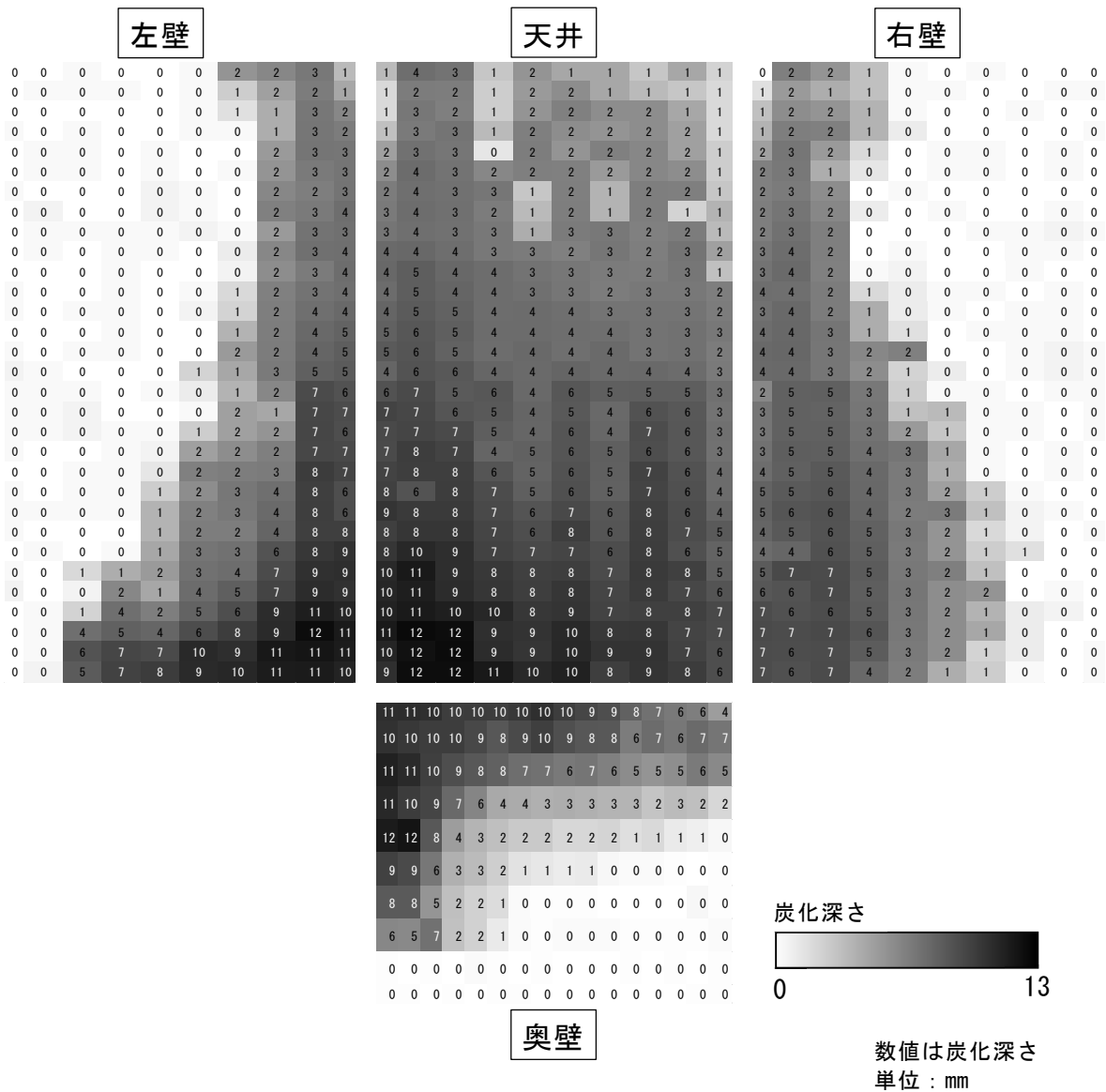


図 4.28 処理木材の炭化深さ（試験箱 B）

#### 4.4.4 結論

4.2 で製造した製品と同寸法の長さ 4000mm の処理板材について、4.3 で準不燃材料の性能が得られることが推定された薬剤固形分量範囲 135～165kg/m<sup>3</sup>を選定し、第三章で推奨された一般木材用ウレタン樹脂塗料（溶剤系）を塗装した後に、室内火災における加熱条件を再現する模型箱試験を 2 回行い、燃焼性状を把握するとともに準不燃材料の性能を評価した。その結果、以下が明らかになった。

- 1 ) 加熱中の処理板材は、70kW 未満の低い発熱速度で加熱終了時まで推移した。また、加熱中の供試箱内の温度は、最高で 432℃又は 400℃であり、フラッシュオーバーの目安となる 600℃より大幅に低く、著しい燃焼の拡大は見られなかった。
- 2 ) 4.3 の結果から、塗装処理板材は、長さ方向において 32.6%の部分が準不燃材料の総発熱量の基準値を超えることが推定されたが、模型箱試験の結果では 2 体の供試箱ともに準不燃材料の基準を満たした。
- 3 ) 加熱終了後の処理板材の炭化深さは、火源周辺において 11.9～12.7mm と大きくなったが、1mm 未満の部分が壁面の下部や入り口に近い部分に多く見られ、燃え広がりが抑制されたことを示唆した。
- 4 ) 模型箱試験は、実際の室内火災の進展と同様に、部分的な燃焼からの燃え広がりを含めて材料の燃焼性状が評価される。塗装処理板材は、準不燃材料の性能に満たない部分についても燃え広がりを抑制する性能を有することで燃焼が拡大せず、全体として準不燃性能が得られたと考えられた。

## 第五章 屋外における燃焼性状と経年劣化

### 5.1 はじめに

第一章に記したように、近年、公共建築物等木材利用促進法を踏まえた取り組みや環境負荷低減への社会的要請から、中高層建築物の外装に木材が使われる事例が増えている。建築物の外装材は、法令において燃焼性状に関する制限が無い部分である。しかし、都市部においては、可燃性材料である木材を外装に使用することが中高層建築物の火災拡大を助長するとの懸念から、難燃処理等の防火措置が求められる。

欧米では、難燃処理木材は、古くから建物の屋根や壁に使用されている。そのため、屋外における難燃処理木材の燃焼抑制作用の経年劣化に関する知見が蓄積されており<sup>1, 2)</sup>、屋外使用に適した製品も販売されている。しかし、国内では難燃処理木材は、これまでほとんどが内装材料として使用されてきたため、屋外での経年劣化に係る知見が限られている<sup>3, 4)</sup>。そのため、現状の難燃処理木材の製品を屋外に使用すると、経年劣化により燃焼抑制作用の低下が懸念される。国内外で、中高層建築物の外壁に使用した可燃性材料が火災時に燃え広がり、火災拡大の原因となった事例<sup>5, 6)</sup>が発生していることを踏まえると、外装材に使用された難燃処理木材の経年劣化は、同様に火災拡大の原因になる可能性がある。今後、中高層建築物の外装木質化を促進するには、難燃処理木材について、外装材のメンテナンスサイクルを考慮して、少なくとも10年間燃え広がり防止性能を維持できる技術開発が必要である。

しかし、現状は、外壁の屋外側に施行された可燃性材料が建築物の火災拡大の原因となる可能性が認知されたばかりである。国内では、2015年にJIS A1310として「建築ファサードの燃えひろがり試験方法」<sup>7)</sup>が定められ、外装等の燃え広がりについての評価方法が確立された。そして、2019年の改訂では、燃え広がり抑制性能の基準案が付加された。難燃処理木材については、JIS A1310で燃え広がり性状を評価したのは、中村等の報告<sup>8)</sup>等限られており、今後の知見の蓄積が望まれる状況である。また、屋外において燃え広がりを一定期間抑制する難燃処理木材の開発には、短期間で長期の経年劣化を予測できる促進耐候性試験が必須である。このことについては、2019年にJIS A1326として「外装用難燃薬剤処理木質材料の促進劣化試験方法」が定められた。しかし、国内においては、難燃処理木材の屋外における経年劣化挙動に関する知見が限られているため、同方法による促進劣化が実際の屋外暴露の何年に相当するののかについては不明である。

以上のように、難燃処理木材は外装材への需要がある一方、外装材に必要とされる燃え広がりを一定期間抑制する技術開発に必要な経年劣化挙動に関するデータが不足している。そこで本章では、国内3カ所で最長5年間の難燃処理木材の屋外暴露を行い、燃焼抑制作用の経年劣化挙動に関するデータ収集を行った。試験体の難燃処理木材に使用する難燃剤は、国内で一般的に難燃処理木材に使用される製品と、これまでの国内の報告<sup>4)</sup>で検討されていない海外で屋外用の難燃処理木材に使用される製品の2種類を用いた。また、前者の難燃剤を使用した試験体は、薬剤固形分量を3水準用意した。それらの試験体により、難燃処理木材の燃焼抑制作用の経年劣化挙動について難燃剤の種類及び薬剤固形分量の影響を把握した。

また、各難燃剤を使用した処理木材の一部は塗装し、燃焼抑制作用を維持する効果を検討した。塗装は、防水効果により雨水が難燃処理木材に直接接触することを防ぎ、材内の難燃剤の溶脱を抑制して燃焼抑制作用を維持する効果が期待できる。塗装による難燃処理木材

の燃焼抑制作用の維持効果については、国内外でいくつかの報告がある。Östman等<sup>2)</sup>は、市販の難燃処理木材にアマニ油を主成分とする塗料を塗装することにより、屋外において3年間まで当初の燃焼抑制作用を維持できることを示した。また、原田等<sup>4)</sup>は、ポリリン酸カルバメート系及びリン酸グアニジン系の難燃剤を用いた難燃処理木材について屋外暴露及び促進耐候操作による評価を行い、塗装が難燃剤の溶脱を抑制する効果が有ることを示した。しかし、それらの報告で用いた塗料は、難燃処理木材の当初の燃焼抑制作用を屋外において3年間を超えて維持できていない。本研究では、2種類の難燃剤で処理された処理板材について、これまでの報告で用いられていない橋梁等の鉄部材への耐候性付与に実績のあるフッ素樹脂系塗料で塗装し、燃焼抑制作用の維持効果を把握した。また、試験体の経年劣化挙動への地域間の差異については、暴露台の試験体固定治具の形状が暴露地点間において若干異なり、試験結果への影響が懸念されること、及び屋外暴露の計画が最長10年間までであることから、全ての暴露期間の結果が得られた後に考察する。

以降では、難燃処理木材の屋外における燃焼抑制作用の経年劣化挙動について、はじめに薬剤固形分量の影響を、次に難燃剤の種類の影響と塗装による燃焼抑制作用の維持効果を検討した。

## 5.2 試験体

### 5.2.1 供試材料

板材は、スギ (*Cryptomeria japonica*) 心材の板目材とし、寸法を長さ2000×幅105×厚さ18mmの長尺材とした。長尺板材は、気乾密度337~438kg/m<sup>3</sup>の範囲を75枚用意した。長尺板材の概要を表5.1に示す。各長尺板材は、長さ方向に切断して、長さ140mmの板材を最大14枚採取した。同一長尺板材から採取した板材のうち中央部付近の1枚は、全乾法により含水率を算出した。算出した板材の含水率は表5.1に併記した。

採取した板材は、節及び割れがあるものを除いた851片について、質量を測定し、体積と板材の含水率から全乾密度を算出した。板材の全乾密度の分布を図5.1に示す。それらの板材は、全乾密度が320~380kg/m<sup>3</sup>の範囲において、注入処理用を603枚、無処理用を21枚選定した。

難燃剤は、市販製品を用い、薬剤Aとして国内で一般的に難燃処理木材に使用されるリン・ホウ素混合系薬剤を、薬剤Bとしてアメリカで屋根等の屋外用途の難燃処理木材に使用される耐溶脱性能を有するリン酸アミノ樹脂系薬剤の2種類を用いた。なお、薬剤Aは、第三章で用いたリン・ホウ素混合系薬剤と同じである。塗料は、橋梁等の鉄材への耐候性付与に実績のあるフッ素樹脂系塗料を、既往の知見<sup>9)</sup>を基に、ポリブタジエン樹脂系塗料と組み合わせて用いた。

表 5.1 長尺板材の概要

番号	気乾密度 (kg/m <sup>3</sup> )	含水率 (%)	番号	気乾密度 (kg/m <sup>3</sup> )	含水率 (%)	番号	気乾密度 (kg/m <sup>3</sup> )	含水率 (%)	
120	367	12.7	174	414	12.4	216	423	11.8	
123	430	12.9	175	394	11.7	219	401	11.8	
129	351	10.8	178	365	12.6	220	408	13.6	
130	429	13.0	179	375	13.2	221	435	13.6	
132	354	11.0	182	414	12.1	223	380	12.3	
134	383	12.4	183	412	11.8	226	374	12.5	
135	360	12.1	184	393	12.0	230	381	11.8	
141	370	11.4	185	422	13.7	231	402	11.3	
143	386	12.5	186	416	12.4	233	350	12.5	
144	405	12.0	188	415	13.1	234	370	12.1	
146	368	12.7	189	373	12.4	235	399	12.6	
150	436	14.1	193	405	11.8	238	375	12.2	
151	406	12.1	195	384	13.1	240	406	13.4	
155	-1	356	12.0	196	411	12.2	245	363	12.8
155	-2	395	11.5	197	375	12.4	248	349	13.0
157	381	13.0	198	438	12.8	254	379	12.3	
159	404	11.9	200	419	12.7	256	389	12.1	
162	372	12.5	201	423	12.6	257	382	13.1	
163	433	12.7	202	399	13.6	258	431	12.4	
164	411	12.4	203	395	12.3	261	381	11.1	
165	-1	384	13.1	204	401	12.2	263	381	12.6
165	-2	337	11.7	206	372	12.4	265	416	13.3
166	424	12.7	207	433	11.8	266	359	12.6	
168	414	12.6	209	391	11.6	267	433	12.5	
169	359	11.6	212	404	12.3	271	357	12.1	
						平均	393	12.4	
						最大	438	14.1	
						最小	337	10.8	

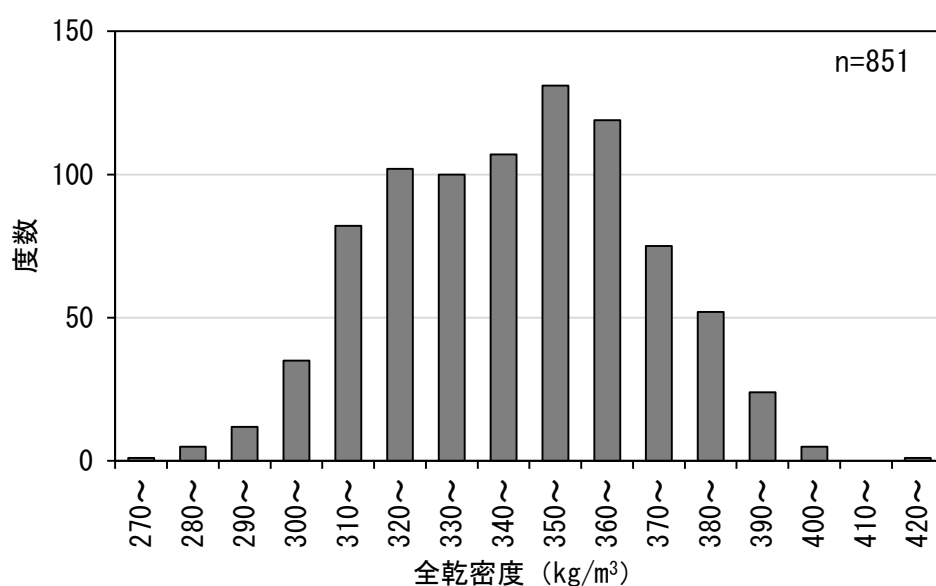


図 5.1 長尺板材から採取した板材の全乾密度の分布

## 5.2.2 難燃剤の注入処理

注入処理用の603枚の板材は、難燃剤の種類、溶液濃度及び塗装の有無により、表5.2に示すように分配した。注入処理前の板材は、含水率の調整のために強制循環式恒温乾燥器を用いて60℃で72時間乾燥させた後、シリカゲルを設置したデシケータ内で常温まで冷却させた。難燃剤は、薬剤Aでは水道水に溶かして濃度32%、19～21%及び9～11%の3種類の水溶液に、薬剤Bでは濃度50%の原液を水道水で希釈して濃度24～26%の水溶液に調整した。それらの難燃剤溶液は、減圧加圧注入処理装置を用いて板材に注入した。減圧加圧条件は、減圧が10kPaで30分間、加圧が0.70MPaで17～18時間とした。なお、板材への注入処理は、薬剤Aの濃度9～11%を除いて、越井木材工業(株)で行い、減圧加圧条件も同社の製造条件に従った。薬剤Aの濃度9～11%の注入処理は、林産試験場で行い、減圧加圧条件を越井木材工業(株)と同じとした。

注入処理後の板材は、処理前後の質量差、処理前の板材の体積及び薬液濃度から、式(5.1)を用いて薬剤固形分量Lを算出した。処理後における板材の難燃剤固形分量Lの分布を図5.2～5.5に示す。そして、薬剤Aを注入した処理板材は、濃度32%の処理から試験体AHとして薬剤固形分量Lが227～277kg/m<sup>3</sup>の39枚、濃度19～21%の処理から試験体AMとして薬剤固形分量Lが134～166kg/m<sup>3</sup>の無塗装用及び塗装用を各48枚、濃度9～11%の処理から試験体ALとして薬剤固形分量Lが63～77kg/m<sup>3</sup>の48枚を選定した。同様に、薬剤Bを注入した処理板材は、BMとして薬剤固形分量Lが179～221kg/m<sup>3</sup>の無塗装用及び塗装用を各48枚選定した。薬剤固形分量Lの水準設定は、ALの63～77kg/m<sup>3</sup>とAMの134～166kg/m<sup>3</sup>については、第二章で得られた厚さ18mmの処理板材の薬剤固形分量と総発熱量の関係を参考に、前者が難燃材料の基準性能、後者が準不燃材料の基準性能が得られる量を想定した。また、AHの227～277kg/m<sup>3</sup>は、市販の難燃処理木材<sup>10)</sup>の薬剤固形分量を参考に、不燃材料の性能が得られる量を想定した。なお、BMの179～221kg/m<sup>3</sup>は、準不燃材料の性能が得られる量を想定しており、予備試験で薬剤Aより燃焼抑制作用が若干低いことが確認されたため、薬剤Aより薬剤固形分量Lを50kg/m<sup>3</sup>程度高くした。

それらの処理板材は、室内で数日間風乾した後、強制循環式恒温乾燥器で含水率11%程度まで乾燥させた。

$$\text{薬剤固形分量L(kg/m}^3\text{)} = \left( (W_2 - W_1) \times \frac{C}{100} \right) \times \frac{1}{V} \quad (5.1)$$

$W_1$  : 注入処理前の板材の重量 (kg)

$W_2$  : 注入処理後の板材の重量 (kg)

$C$  : 薬液濃度 (%)

$V$  : 注入処理前の板材の体積 (m<sup>3</sup>)

表 5.2 無処理及び注入処理に用いた板材の概要

	難燃剤	難燃剤 溶液濃度 (%)	塗装	全乾密度 (kg/m <sup>3</sup> )			枚数 (枚)
				平均	最大	最小	
無処理用			無し	344	370	320	21
注入処理用	薬剤A (リン・ホウ素混合系薬剤)	32	無し	345	371	320	71
		19~21	無し	348	374	322	103
			有り	346	372	321	101
		9~11	有り	350	375	325	120
	薬剤B (リン酸アミノ樹脂系薬剤)	24~26	無し	353	379	327	103
有り			352	377	327	105	
全 体				349	379	320	624

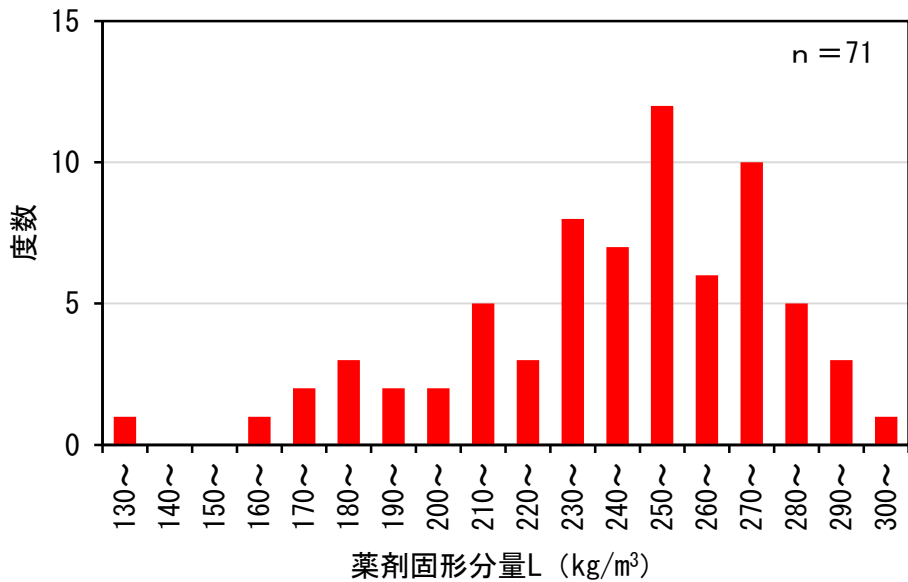


図 5.2 注入処理後の板材の薬剤固形分量 L の分布 (薬剤 A 濃度 32%)

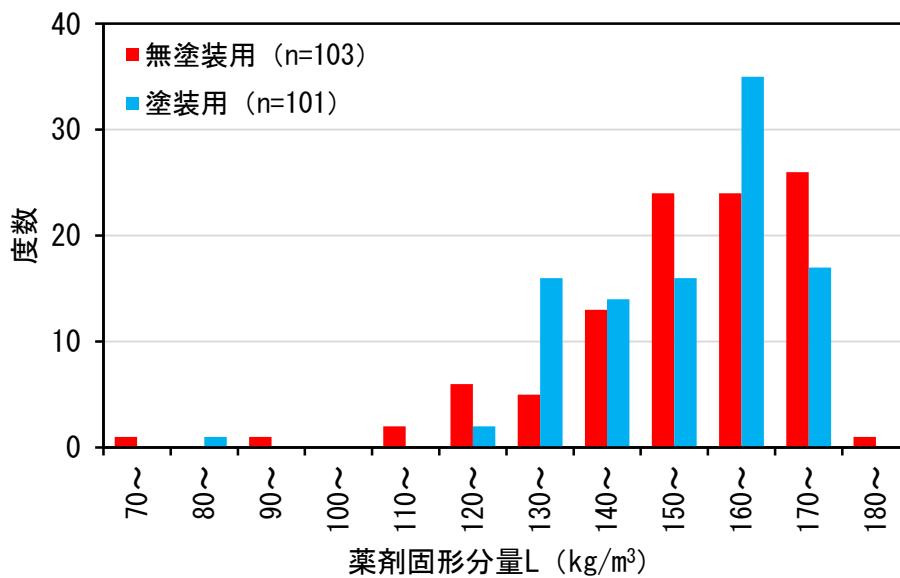


図 5.3 注入処理後の板材の薬剤固形分量L (薬剤 A 濃度 19~21%)

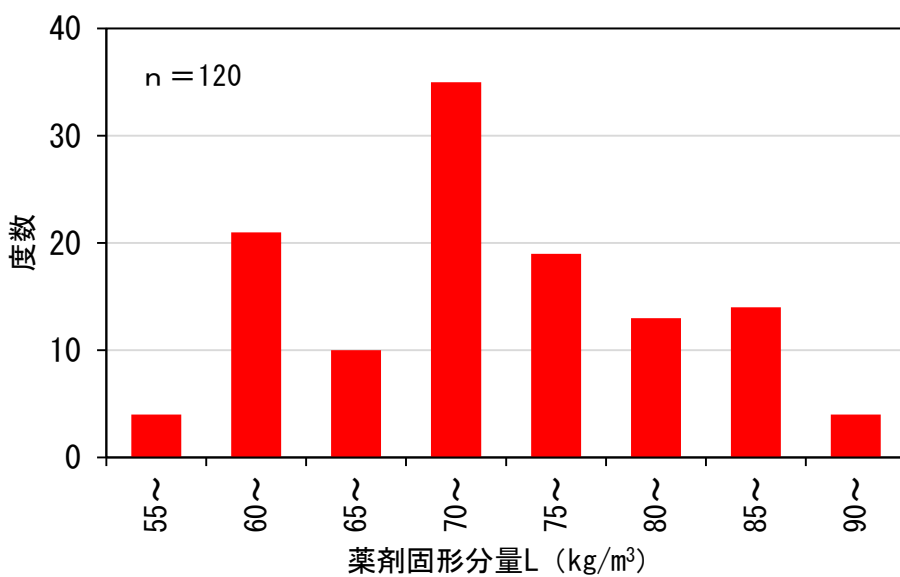


図 5.4 注入処理後の板材の薬剤固形分量L (薬剤 A 濃度 9~11%)



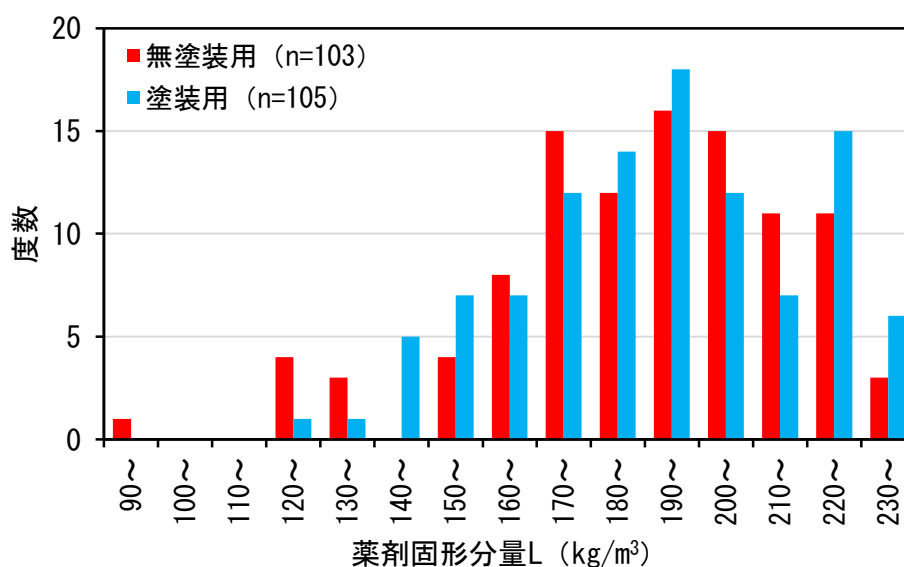


図 5.5 注入処理後の板材の薬剤固形分量L (薬剤B濃度 24~26%)

### 5.2.3 処理板材の塗装

AMとBMについては、先述したように48枚を塗装用として選定した。処理板材の塗装条件を表5.3に示す。塗装は、既往の報告<sup>9)</sup>を参考に、フッ素樹脂系塗料を上塗りに、ポリブタジエン樹脂系塗料を下塗り及び中塗りに用いた。なお、2種類の塗料はともに無色透明である。

処理板材への塗装は、低圧スプレーガンを用いて木口を除く4面に行った。また、下塗り、中塗り、上塗りの各塗装前には、塗装面の調整のためサンドペーパーを用いて塗布面を軽く研磨した。塗料の塗布量は、スプレー塗布前後の処理板材の重量差と、塗布面積から算出した。また、各塗料は、事前に式(5.2)を用いて加熱残分を算出した。加熱残分とは、JIS K5601-1-2<sup>11)</sup>で定義されおり、少量の塗料を105℃で60分間加熱し、採取した質量に対する乾燥後の質量の百分率を表したものである。

表 5.3 試験体の塗装条件

工 程	内 容		塗布量 (固形分量)
	材料	方法	
素地調整	#240 研磨紙	空研ぎ	
下塗り	ポリブタジエン樹脂系塗料	スプレー	70.4~75.8g/m <sup>2</sup> (18.4~19.8g/m <sup>2</sup> )
研磨	#320 研磨紙	空研ぎ	
中塗り1回目	ポリブタジエン樹脂系塗料	スプレー	43.3~48.8g/m <sup>2</sup> (14.1~15.9g/m <sup>2</sup> )
中塗り2回目	ポリブタジエン樹脂系塗料	スプレー	37.9~43.3g/m <sup>2</sup> (12.3~14.1g/m <sup>2</sup> )
研磨	#400 研磨紙	空研ぎ	
上塗り	フッ素樹脂系塗料	スプレー	70.4~75.8g/m <sup>2</sup> (29.3~31.5g/m <sup>2</sup> )

$$\text{加熱残分(\%)} = \frac{m_2 - m_0}{m_1 - m_0} \times 100 \quad (5.2)$$

$m_2$  : 空の皿の質量 (g)

$m_0$  : 資料及び皿の質量 (g)

$m_1$  : 残渣及び皿の質量 (g)

### 5.3 実験方法

#### 5.3.1 屋外暴露操作

試験体の概要及び暴露期間を表5.4に示す。試験体の暴露は、北海道旭川市、千葉県野田市、大阪府大阪市の3地点で、最長5年間行った。試験体は各暴露期間で3体とし、それらは各暴露期間の平均薬剤固形分量がほぼ同じになるように選定した。暴露前には、試験体の木口面を1液性エポキシ樹脂で2回塗布してシールした。

各地点の暴露中の気象条件を表5.5に示す。試験体の暴露には、アルミ製の枠材により長さ方向の両端部が固定される暴露台を用いた。各試験体は、暴露台に設置することで、暴露面が南向きとなり、地面に対して垂直の状態固定された。試験体の暴露状態の一例として、野田市を写真5.1に示す。

表5.4に示す所定の期間を経過した試験体は、暴露台から取り外した後、30～40℃に設定した強制循環式恒温乾燥器内に3週間程度放置し、気乾含水率以下まで乾燥した。乾燥後の試験体は、木口のシール材を除去した後、図5.6に示すように発熱性試験及び含水率測定に用いる試験体を採用した。

表 5.4 試験体の概要と暴露期間

試験体	難燃剤	塗装 <sup>a)</sup>	暴露地点	暴露前の薬剤固形分量 <sup>b)</sup> (kg/m <sup>3</sup> )					
				暴露期間 (月)					
				0	3	6	12	36	60
無処理	無し	無し	旭川	0	0	0	-	-	-
			野田	-	0	0	-	-	-
			大阪	-	0	0	-	-	-
AH		無し	旭川	249	246	250	253	255	-
			野田	-	247	250	253	255	-
			大阪	-	249	251	254	256	-
AM	リン・ホウ素 混合系薬剤	無し	旭川	156	151	153	154	155	153
			野田	-	151	153	155	155	154
			大阪	-	153	154	155	155	154
AM-C		有り	旭川	155	152	152	153	153	156
			野田	-	152	153	153	153	156
			大阪	-	152	153	153	154	156
AL	無し	旭川	70	70	70	70	71	72	
		野田	-	70	70	71	72	72	
		大阪	-	70	70	71	71	72	
BM	リン酸アミノ 樹脂系薬剤	無し	旭川	193	196	197	197	199	199
			野田	-	197	197	198	199	199
			大阪	-	196	197	198	199	200
BM-C		有り	旭川	192	193	194	194	198	200
			野田	-	194	194	195	198	200
			大阪	-	194	194	195	199	200

a) 塗装方法は表 5.1 のとおり。

b) 3 試験体の平均値，薬剤固形分量 L の算出は式 (5.1) による。

表 5.5 試験体の暴露地点の気象条件

暴露地点	北緯 (deg.)	東経 (deg.)	暴露期間 (月)	積算 降水量 <sup>a)</sup> (mm)	平均 気温 <sup>a)</sup> (°C)	積算 日照時間 <sup>a)</sup> (h)
北海道旭川市	43	142	3	394	19.3	516.6
			6	854	15.9	876.3
			12	1256	6.9	1544.1
			36	3791	7.2	4735.9
			60	5966	7.5	8051.6
千葉県野田市	36	140	3	561 <sup>b)</sup>	23.6 <sup>b)</sup>	491.0 <sup>b)</sup>
			6	1020 <sup>b)</sup>	21.4 <sup>b)</sup>	957.1 <sup>b)</sup>
			12	1557 <sup>b)</sup>	14.3 <sup>b)</sup>	2031.1 <sup>b)</sup>
			36	4188 <sup>b)</sup>	14.4 <sup>b)</sup>	6614.2 <sup>b)</sup>
			60	7208 <sup>b)</sup>	14.6 <sup>b)</sup>	10765.1 <sup>b)</sup>
大阪府大阪市	35	135	3	656	25.9	539.2
			6	1250	22.3	1056.2
			12	1651	16.9	2027.4
			36	4556	17.0	6510.7
			60	7597	17.1	10656.3

屋外暴露の開始日：2011年5月20日

a) アメダスのデータを基に算出, b) 野田市は近郊のつくば市のデータを代用した



写真 5.1 試験体の暴露状態（千葉県野田市）

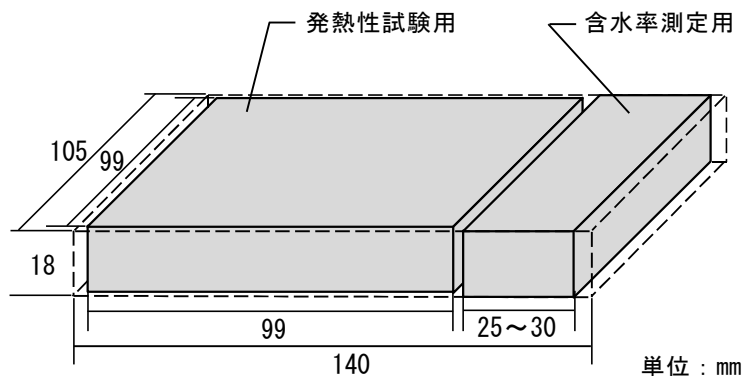


図 5.6 発熱性試験及び含水率測定に用いる試験体の採取方法

### 5.3.2 燃焼試験

試験は、2.3と同様に指定性能評価機関の防耐火性能試験・評価業務方法書<sup>12)</sup>の準不燃性能試験方法の発熱性試験とした。試験前の試験体は、温度23℃・湿度50%RHの雰囲気下で24時間の質量変化率が0.1%以下になるまで養生した。

試験装置は、コーンカロリー計試験装置（暴露0～3ヶ月：東洋精機製作所製，暴露6～60ヶ月：FTT社製）を用いた。試験体は、側面と裏面を厚さ0.025mmのアルミニウムはくで覆った後、密度65kg/m<sup>3</sup>の無機質繊維を詰めたホルダーの上に置き、それらの上から94mm×94mmの正方形の開口を持つ押さえ枠を被せた。

上記の試験体は、装置に水平方向に設置され、上部から熱流束50kW/m<sup>2</sup>で加熱されるとともに、加熱面の中心部上方に電気スパークによる着火源を与えられた。加熱時間は、各試験体が想定する防火材料の種類に応じ、AHでは不燃材料の20分間、AM、AM-C、BM及びBM-Cでは準不燃材料の10分間、ALでは難燃材料の5分間とした。また、無処理試験体の加熱時間は、全ての処理試験体と比較できるように20分間とした。加熱中は、排気ガス中の酸素濃度、ダクト温度等を1秒間隔で測定し、それらの値から単位面積当たりの発熱速度及び、5分間、10分間及び20分間の総発熱量を算出した。

### 5.3.3 残存薬剤固形分量の算出

含水率測定試験体は、発熱性試験用試験体と同様に23℃・50%RHの恒温恒湿装置内で、24時間の質量変化率が0.1%以下に達するまで養生した。養生後の試験体は、寸法及び質量を測定した後、全乾法により含水率を算出した。

養生後の含水率測定試験体の質量、体積と含水率、及び養生後の発熱性試験体の質量と体積から、式(5.3)を用いて試験体の全乾密度を求め、試験体に用いた板材の全乾密度との差から残存薬剤固形分量を算出した。なお、塗装試験体については、塗料の塗布量、塗布面積、加熱残分から塗膜の全乾質量を推定し、それを除いて処理板材の全乾密度を求め、残存薬剤固形分量を算出した。

残存薬剤固形分量 (kg/m<sup>3</sup>) = 試験体の全乾密度 (kg/m<sup>3</sup>) - 板材の全乾密度 (kg/m<sup>3</sup>) (5.3)

$$\text{試験体の全乾密度(kg/m}^3\text{)} = \left( \frac{W_c + W_m}{1 + \frac{M}{100}} - \frac{C_o}{1000} \right) \div (V_c + V_m)$$

$$C_o = (CW_t \times NV_t + CW_m \times NV_m + CW_u \times NV_u) \times \frac{CA}{100} \quad (5.4)$$

$W_c$  : 発熱性試験体の養生後の質量 (kg)

$W_m$  : 含水率測定試験体の養生後の質量 (kg)

$M$  : 養生後の含水率 (%)

$C_o$  : 塗膜の全乾質量 (g)

$V_c$  : 発熱性試験体の体積 (m<sup>3</sup>)

$V_m$  : 含水率測定試験体の体積 (m<sup>3</sup>)

$CW_t, CW_m, CW_u$  : 上塗り塗料, 中塗り塗料, 下塗り塗料の塗布量の平均値 (g/m<sup>2</sup>)

$NV_t, NV_m, NV_u$  : 上塗り塗料, 中塗り塗料, 下塗り塗料の加熱残分 (%)

$CA$  : 試験体の塗布面積 (m<sup>2</sup>)

## 5.4 結果と考察

### 5.4.1 燃焼性状の経年変化への薬剤固形分量の影響

無処理試験体と処理試験体AH, AM, ALの結果を基に、難燃処理木材の燃焼抑制作用の経年劣化挙動について、当初の薬剤固形分量の影響を考察する。

#### 5.4.1.1 発熱速度の推移

各試験体の発熱速度の推移を図5.7～5.10に示す。なお、処理試験体については、種類間の比較がし易いように、3種類ともに得られている暴露36ヶ月までのデータを示した。

無処理試験体は、加熱後10～18秒に着火して725～930秒まで有炎燃焼を生じ、その後は赤熱燃焼に移行した。発熱速度は、第二章で示した挙動と同様に、着火直後のピーク、やや低下して定常的に推移、裏面に燃え抜けによるピーク、その後の赤熱燃焼による低く定常的な推移を示した。無処理木材の発熱速度の推移は、暴露前から暴露6ヶ月の間で著しい変化は無かった。

暴露前の処理試験体では、AH及びAMは加熱中に着火が見られず、10kW/m<sup>2</sup>前後の低い発熱速度で加熱終了時まで推移した。ALは、加熱中に着火して一時的な有炎燃焼を生じ、発熱速度は上記2種類よりも高い値で推移した。暴露後の処理試験体は、3種類とも暴露期間の経過とともに加熱中に着火する試験体が多くなり、有炎燃焼が一時的なものから加熱終了時まで継続するものへと拡大した。3種類の処理試験体の発熱速度は、それらの加熱中の燃焼挙動を反映し、暴露期間の経過とともに全体的に増加した。

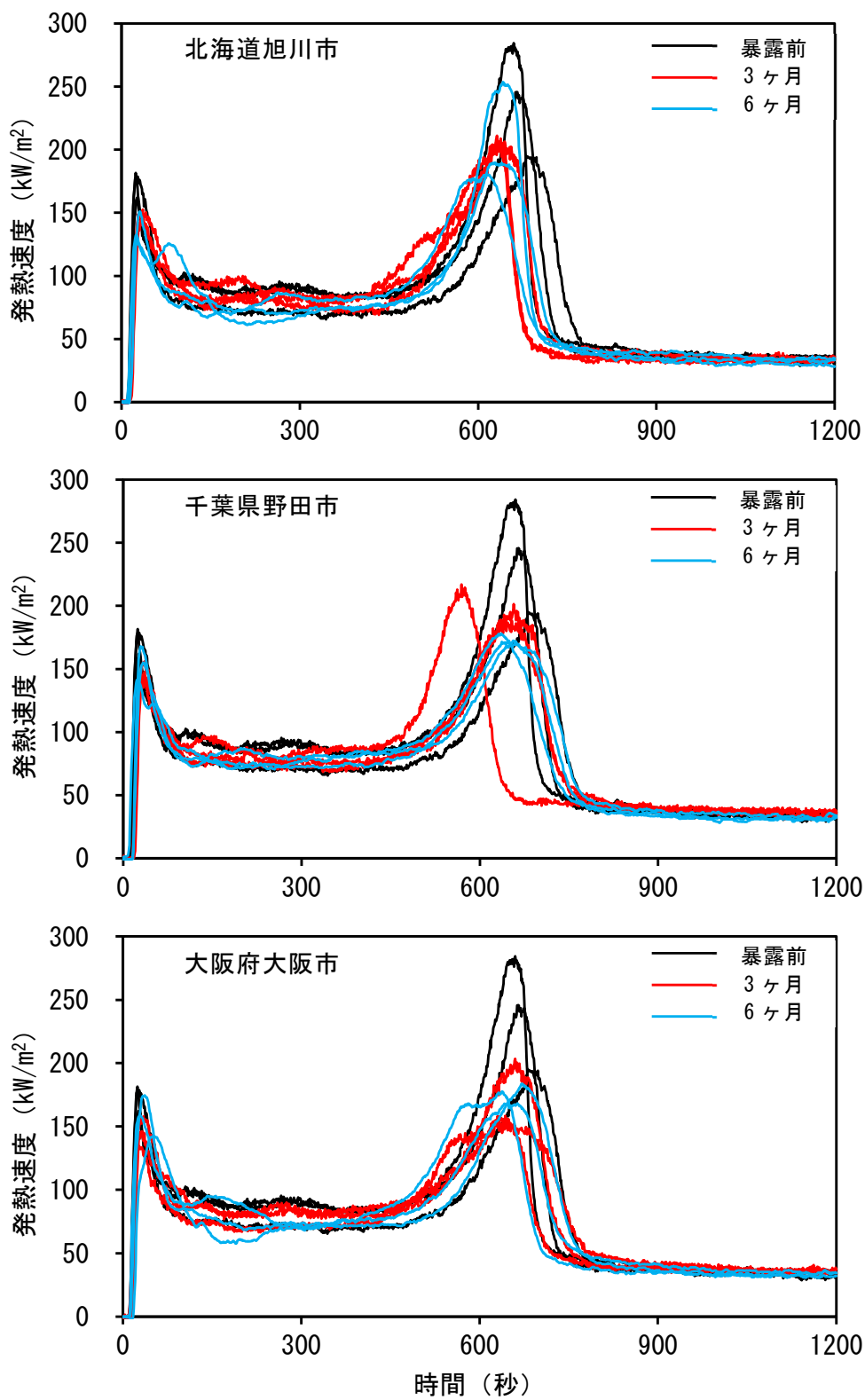


図 5.7 無処理試験体の暴露に伴う発熱速度の変化（暴露前～暴露 6 ヶ月後）

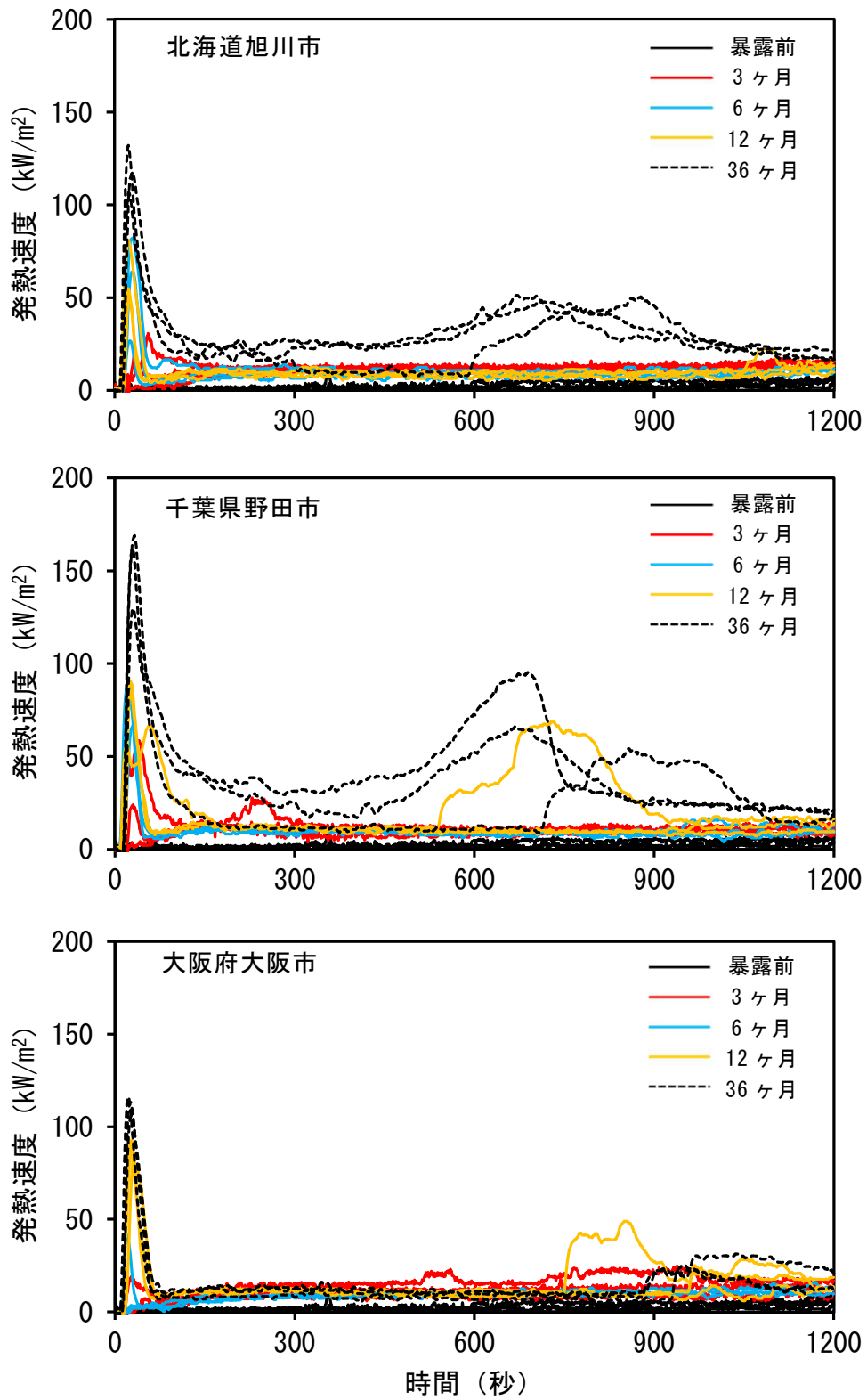


図 5.8 試験体 AH の暴露に伴う発熱速度の変化 (暴露前～暴露 36 ヶ月後)



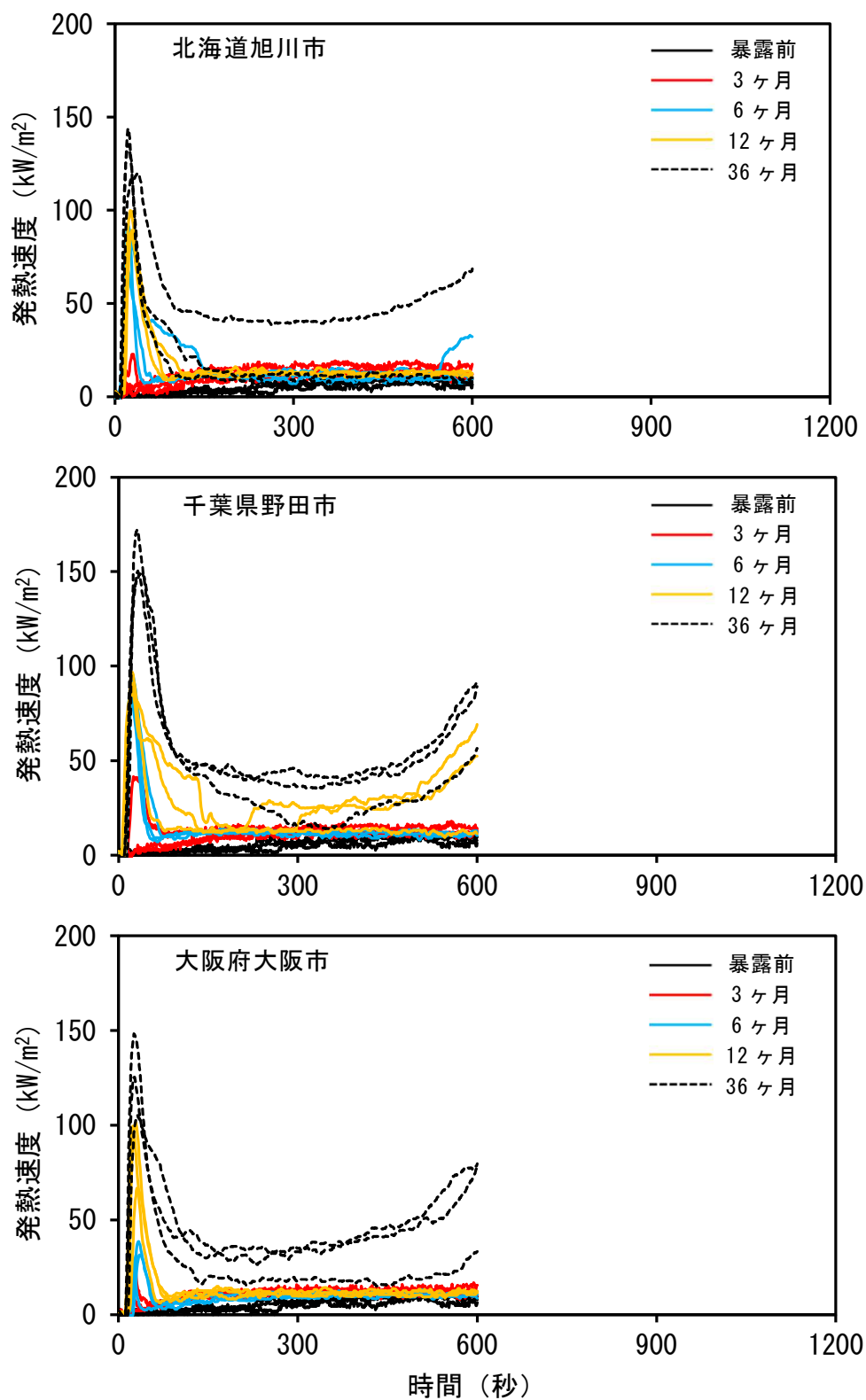


図 5.9 試験片 AM の暴露に伴う発熱速度の変化 (暴露前～暴露 36 ヶ月後)

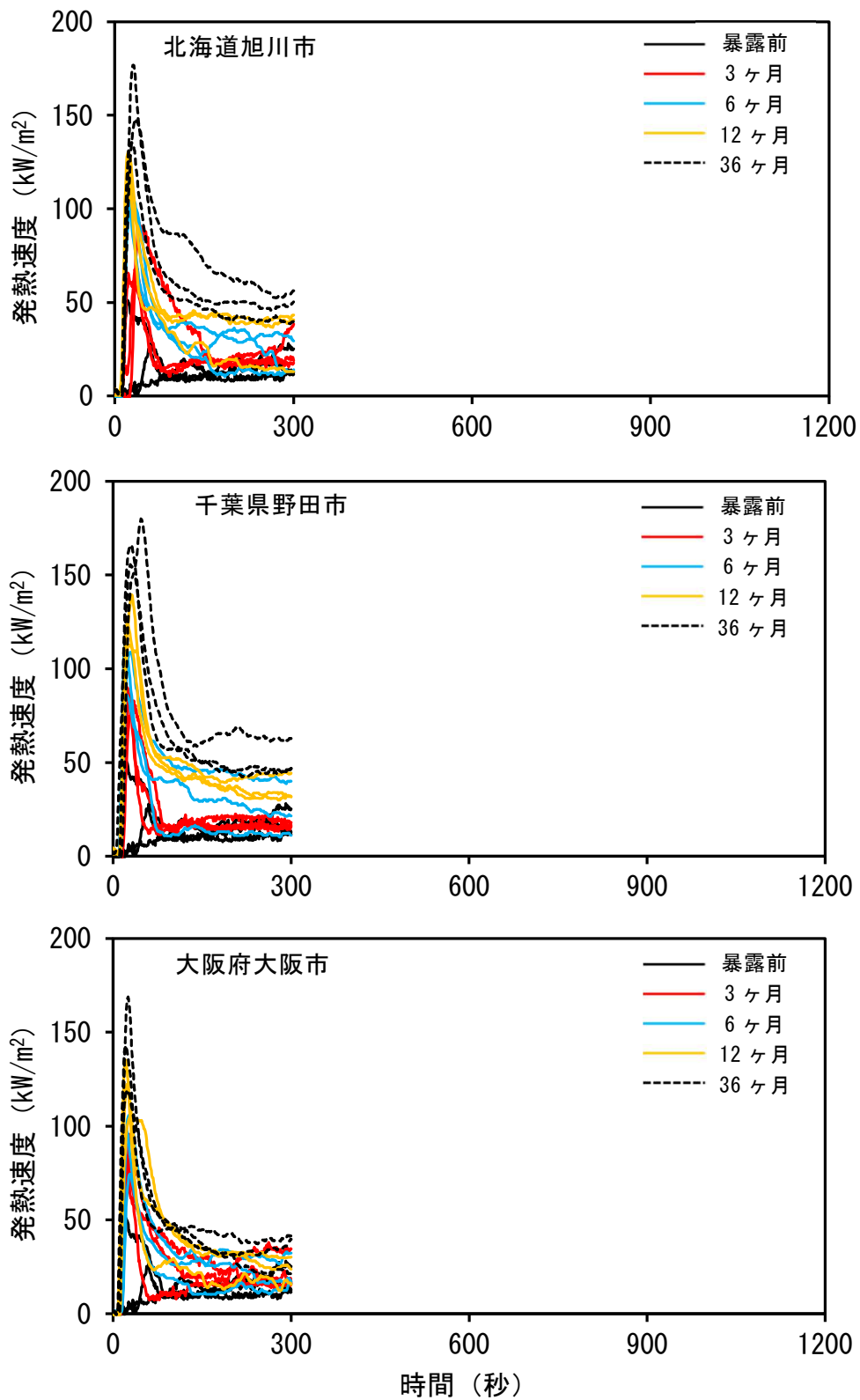


図 5.10 試験片 AL の暴露に伴う発熱速度の変化（暴露前～暴露 36 ヶ月後）

#### 5.4.1.2 総発熱量及び最高発熱速度

処理試験体について、暴露期間の経過に伴う総発熱量の変化を図5.11に示す。処理試験体の総発熱量は、全ての種類において暴露期間の経過とともに増加した。防火材料の性能評価試験では、総発熱量は $8\text{MJ}/\text{m}^2$ を超えないことを基準値とし、試験体への加熱時間を不燃材料では20分間、準不燃材料では10分間、難燃材料では5分間において評価する<sup>12)</sup>。各処理試験体の想定する防火材料の種類は、AHが不燃材料、AMが準不燃材料、ALが難燃材料である。各処理試験体の総発熱量の平均値は、暴露前では想定した防火材料の基準値を満たした。暴露後の総発熱量の平均値は、AHでは3ヶ月、AMでは12ヶ月、ALでは6ヶ月で、当初想定した防火材料の基準値を満たさなくなった。また、AHとAMの5分間総発熱量について、当初の想定より低い性能の難燃材料の基準値と比較すると、ALよりも長い暴露後12ヶ月まで基準値を満たした。このことは、当初の薬剤固形分量を過剰にし、想定する防火材料の総発熱量の基準値に対して余裕を持たせることが、基準値を維持する期間の延長に有効であることを示唆する。しかし、AHは、AMよりも薬剤固形分量 $L$ が $100\text{kg}/\text{m}^3$ 程度多いが、難燃材料の基準値の維持期間が同じであることから、当初の薬剤固形分量を過剰にすることによって延長できる期間には限界があると考えられた。

原田等<sup>3)</sup>は、ポリリン酸カルバメート系の難燃剤を用いた難燃処理板材について、ウェザーメーターによる促進劣化操作を行い、操作前後における材内の薬剤分布を走査型電子顕微鏡(SEM-EDX)により観察し、薬剤の溶脱が操作時間の経過とともに表面から内部に進行することを示した。そこで、処理試験体について表層の燃焼性状の暴露に伴う変化を、加熱開始後5分間における最高発熱速度から考察する。各処理試験体の加熱5分間の最高発熱速度を図5.12に示す。なお、暴露3ヶ月以降の処理試験体は、種類間の有意差をSteel-Dwassの方法により多重比較した結果を示した。Steel-Dwassの方法を用いた理由は、種類間において最高発熱速度の分散に差異が見られたからである。また、同方法による有意差検定は、試験体数が10体以上を推奨するため<sup>13)</sup>、試験体数が3体と大幅に少ない暴露前の試験体については検定を行わなかった。

処理試験体の加熱5分間の最高発熱速度は、全ての種類において暴露期間の経過とともに増加した。処理試験体の種類間においては、暴露前では最高発熱速度に明確な差が見られるが、暴露期間の経過とともに種類間の差が小さくなり、暴露36ヶ月では有意差がなくなった。また、36ヶ月経過した処理試験体の最高発熱速度は、図5.7に示す無処理試験体の加熱初期の最高発熱速度と同程度であった。これらの結果から、薬剤Aを用いた難燃処理板材は、当初の薬剤固形分量に関わらず、36ヶ月経過時には表層付近の薬剤がほぼ失われることが推察された。

中村等<sup>8)</sup>は、難燃処理板材について、JIS A1310に定めるファサード試験<sup>7)</sup>により建築物の外装材を想定して燃え広がり性状を評価するとともに、発熱性試験の結果と比較検討した。その結果、発熱性試験の5分間総発熱量が $14\sim 15\text{MJ}/\text{m}^2$ の難燃処理木材が、ファサード試験において燃え広がりを抑制することを示した。それらを基に、各試験体の5分間総発熱量の平均値から燃え広がりを抑制する期間を推測すると、AHとAMでは36ヶ月間、ALでは12ヶ月間であった。このことから、一般的な難燃剤を用いた難燃処理木材は、屋外暴露により燃焼抑制作用が低減するが、当初の薬剤固形分量がAMの $150\text{kg}/\text{m}^3$ 以上であれば、燃え広がりを3年間程度抑制できることが推測された。ただし、難燃処理木材のファサード試験での燃え広

がり性状と発熱性試験での総発熱量の関係については、現状では検討事例が限られているため、発熱性試験の総発熱量から燃え広がり抑制性能の維持期間を正確に予測するには更なる試験データの蓄積が必要である。

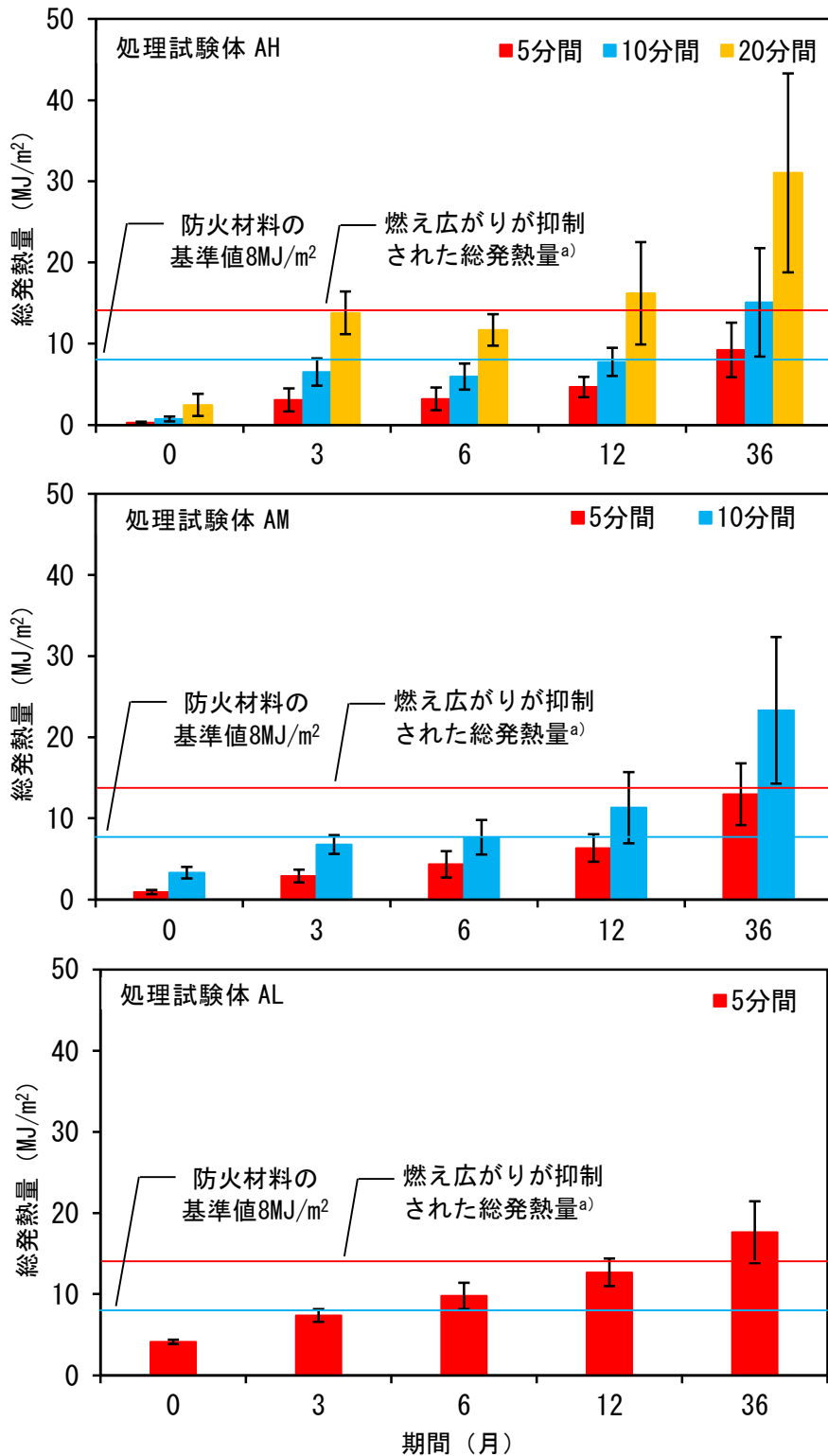


図 5.11 処理試験体の暴露に伴う総発熱量の変化

値は平均値，エラーバーは標準偏差，a) 中村等の報告<sup>8)</sup>においてファサード試験で燃え広がりが抑制された試験体の5分間総発熱量

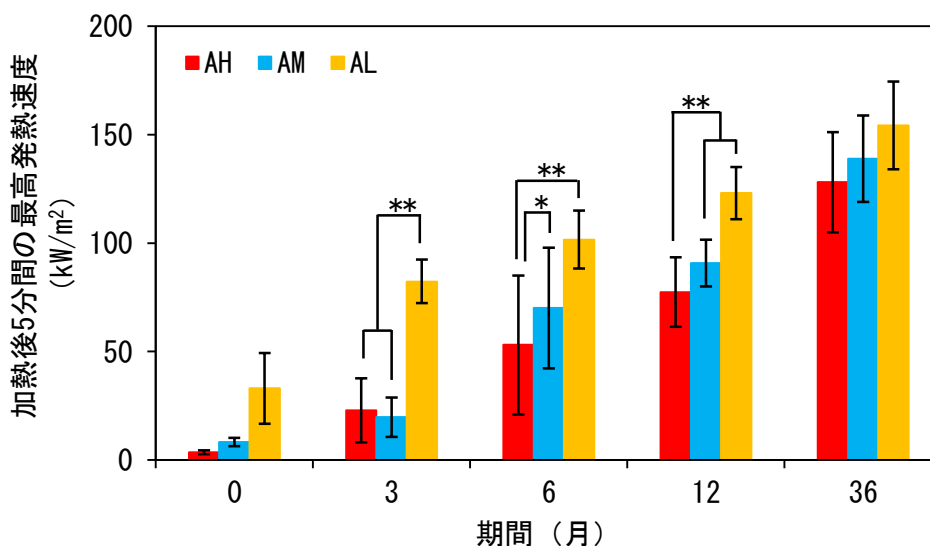


図 5.12 処理試験体の加熱後 5 分間における最高発熱速度

値：平均値，エラーバー：標準偏差，暴露 3 ヶ月以上の処理試験体において種類間の有意差を，Steel-Dwass の方法による多重比較<sup>13)</sup> で検定した。\*：有意水準 5%で有意差あり，\*\*：有意水準 1%で有意差あり

#### 5.4.1.3 残存薬剤固形分量と総発熱量の関係

各処理試験体について，式 (5.3) を用いて算出した残存薬剤固形分量と総発熱量の関係を図 5.13 に示す。全ての処理試験体は，残存薬剤固形分量の低下とともに総発熱量が増加しており，暴露による難燃剤の溶脱が燃焼抑制作用低減の原因になっていることが分かる。また，原田等<sup>3)</sup> は，難燃処理木材について塗膜の長期耐久性の評価に用いられる JIS K5600-7-7<sup>14)</sup> の促進劣化操作を 2000 時間まで行い，発熱性試験の結果と残存薬剤固形分量の関係から，防火性能が残存薬剤固形分量に依存することを報告した。同様の傾向は，本試験の結果でも認められた。

全ての暴露期間を対象とし，処理試験体の種類ごとの残存薬剤固形分量と 5 分間総発熱量の関係を図 5.14 に示す。図には，処理試験体の残存薬剤固形分量が全て失われた場合を想定し，暴露前の無処理試験体のデータを併記した。さらに，処理試験体と無処理試験体のデータを基に，統計解析プログラムソフト R を使用して，処理試験体の種類ごとに非線形最小二乗法により漸近指数曲線<sup>15)</sup> の回帰式を推定し，図中に記した。回帰式の係数を推定した結果を表 5.6 に示す。

当初の薬剤固形分量が最も大きい AH は，暴露期間の経過とともに残存薬剤固形分量が低下し，暴露前の AM 及び AL の薬剤固形分量である  $99 \sim 134 \text{ kg/m}^3$  及び  $43 \sim 60 \text{ kg/m}^3$  よりも小さくなった。暴露前の AM 及び AL と同程度の残存薬剤固形分量になった AH について，5 分間総発熱量を比較すると，暴露前の AM 及び AL では  $0.6 \sim 1.1 \text{ MJ/m}^2$  及び  $2.9 \sim 5.8 \text{ MJ/m}^2$  に対し，暴露後の AH では  $2.0 \sim 6.4 \text{ MJ/m}^2$  及び  $5.0 \sim 10.5 \text{ MJ/m}^2$  と大きく，残存薬剤固形分量と 5 分間総発熱量の関係に屋外暴露の影響が見られた。5.4.1.2 において，処理試験体は，36 ヶ月の屋外暴露により表層の薬剤がほとんど失われることが推察された。一方，図 5.13 では暴露 36 ヶ月後の処理試験体は，ほとんどが残存薬剤固形分量を有していることから，暴露後の処理試験体では厚さ方向に薬剤固形分量の傾斜が生じると考えられた。この板材の厚さ方向における薬剤固形分量の傾斜が，処理試験体の残存薬剤固形分量と 5 分間総発熱量の関係に影響したと考え

られた。また、このことは、屋外で使用された難燃処理木材の防火性能の評価には、残存薬剤固形分量のみではなく、木材内の難燃剤の分布状態を考慮する必要があることを示唆する。

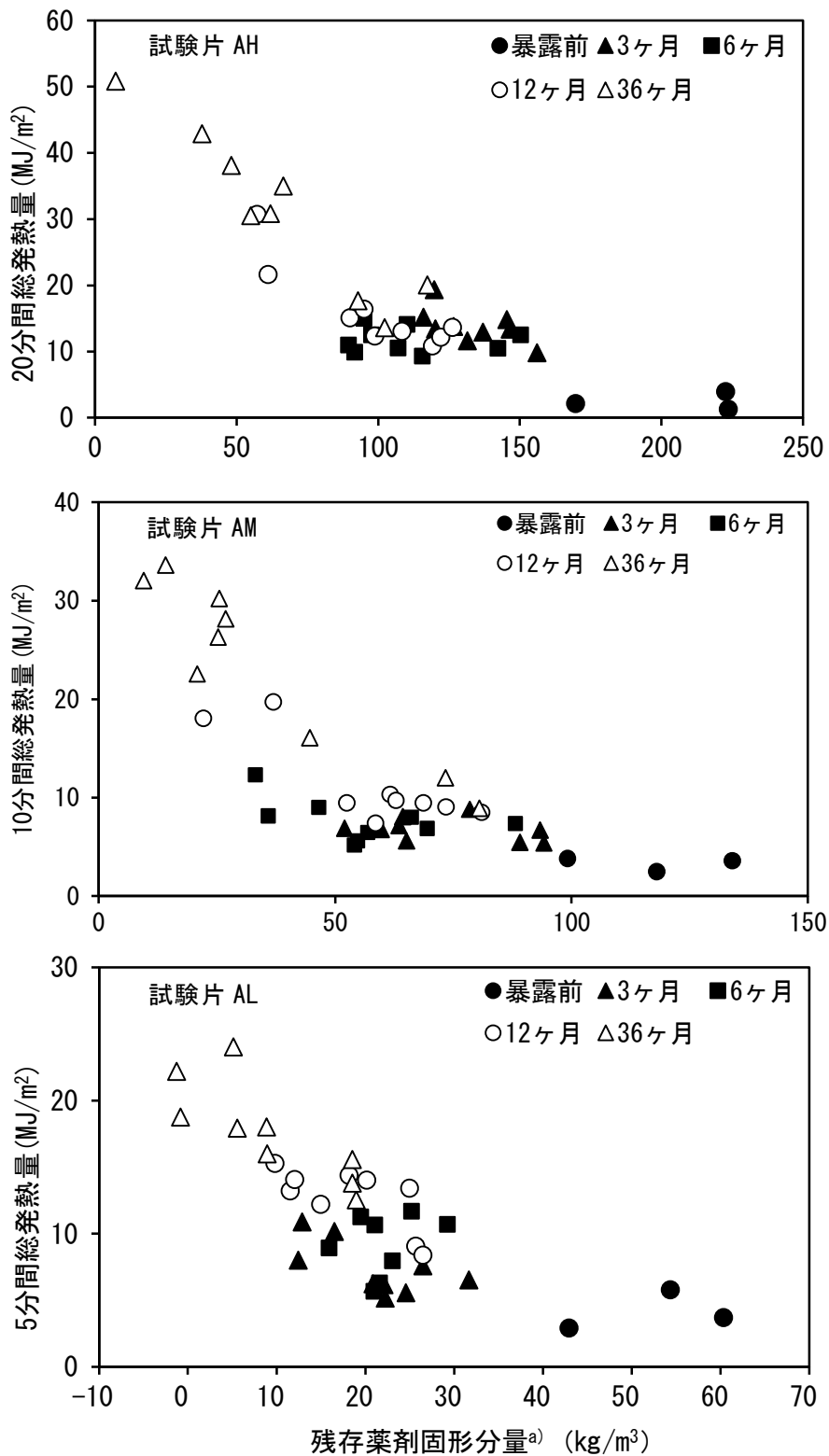


図 5.13 処理試験片の残存薬剤固形分量と総発熱量の関係  
 a) 残存薬剤固形分量は式 (5.3) により算出した

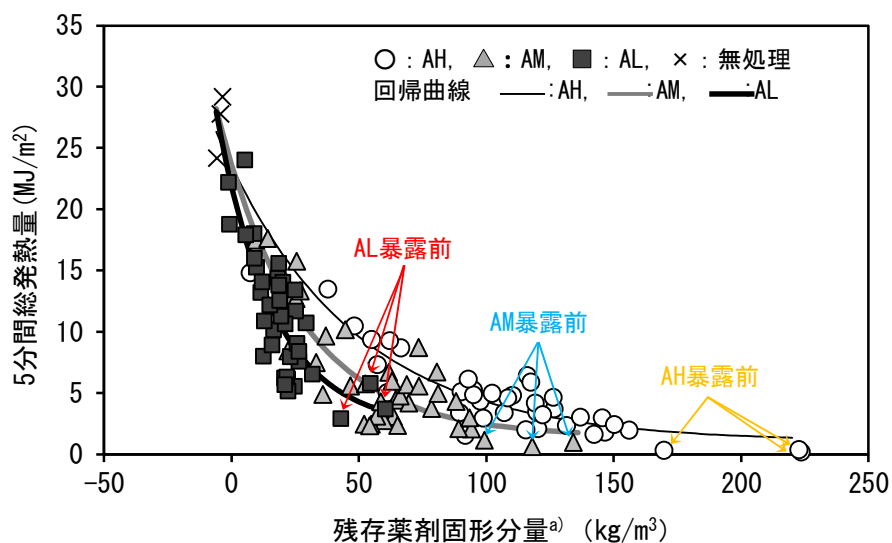


図 5.14 残存薬剤固形分量と 5 分間総発熱量の関係

a) 残存薬剤固形分量は式 (5.3) により算出した  
 回帰式は、R を使用して非線形最小二乗法により漸近指数曲線<sup>15)</sup>を推定

表 5.6 非線形最小二乗法による漸次指数回帰式の推定結果

モデル式	処理試験体	係数	推定値	標準誤差	t値 <sup>a)</sup>	p値 <sup>b)</sup>	残差標準誤差	自由度
$y = a \times b^x + C$	AH	a	22.550	1.133	19.907	$2 \times 10^{-16}***$	1.802	39
		b	0.981	0.002	433.388	$2 \times 10^{-16}***$		
		c	1.024	0.809	1.265	0.213		
	AM	a	22.243	1.405	15.826	$2 \times 10^{-16}***$	2.327	39
		b	0.970	0.004	670.770	$2 \times 10^{-16}***$		
		c	1.426	1.051	1.357	0.183		
	AL	a	19.708	2.953	6.674	$6.81 \times 10^{-8}**$	2.969	38
		b	0.956	0.010	91.963	$2 \times 10^{-16}***$		
		c	2.171	2.730	0.795	0.431		

\*\*\*: 有意水準 0.1%において有意差あり

a) 「母集団において切片が0」「母集団において当該偏回帰係数が0」を帰無仮説にした t 検定の t 値,

b) t 分布に基づく確率 (両側), \*\*\*: 有意水準 0.1%において有意差あり

## 5.4.2 燃焼性状の経年変化への難燃剤の種類及び塗装の影響

処理試験体のAM, BM及びそれらを塗装したAM-C, BM-Cの結果を用いて, 難燃処理木材の燃焼抑制作用の経年劣化挙動への難燃剤の種類及び塗装の影響を考察する。

### 5.4.2.1 発熱速度の推移

各処理試験体の発熱速度の推移を図5.15～5.18に示す。AMは, 5.4.1.1で示した暴露後36ヶ月までにおける, 暴露期間の経過に伴う有炎燃焼の拡大及び発熱速度の増加が, 暴露後60ヶ月においても引き続き見られた。

BMは, 暴露前ではAMと同様に, 加熱中に有炎燃焼を生じること無く, 低い発熱速度で加熱終了時まで推移した。暴露後のBMは, 暴露期間の経過とともに加熱初期に有炎燃焼を生じるようになり, 暴露後12ヶ月ではほぼ全ての試験体に有炎燃焼が生じた。ただし, 暴露後のBMの有炎燃焼は, 暴露後60ヶ月においても加熱初期に限定され, AMのように加熱終了時まで継続することは少なかった。暴露後におけるBMの発熱速度は, 有炎燃焼の発生に伴うピークを加熱初期に生じ, 暴露期間の経過とともにそれらのピークは大きくなった。5.4.1.3で述べた暴露による材内の難燃剤の傾斜分布を踏まえると, BMは, 暴露60ヶ月においても表層から近い部分のみ難燃剤が失われた状態と推察された。

塗装試験体のAM-C及びBM-Cは, 暴露の経過に伴う発熱速度の増加が無塗装試験体よりも抑制された。暴露前の塗装試験体は, 加熱開始後11～19秒で塗膜に着火し, 9～20秒間の有炎燃焼を生じた後, 処理板材に着火することなく加熱時間を終了した。これにより発熱速度は, 塗膜の有炎燃焼による鋭いピークが発生するが, ピーク収束以降では暴露前のAM及びBMと同様に低い値で推移した。暴露後の塗装試験体は, 両試験体ともに36ヶ月後までは暴露前と同様の燃焼挙動であり, 発熱速度の推移に変化はなかった。しかし, 暴露後60ヶ月において, AM-Cは旭川市の1体, 野田市の2体と大阪市の1体に, 塗膜の燃焼に続いて処理板材の有炎燃焼が生じ, 加熱終了時まで継続した。それらの試験体の発熱速度は, 塗膜の燃焼によるピークに引き続き, 処理板材の燃焼が最大31～53kW/m<sup>2</sup>の推移として現れた。一方, BM-Cは, 暴露後60ヶ月においても燃焼挙動及び発熱挙動ともに暴露前と同様であった。



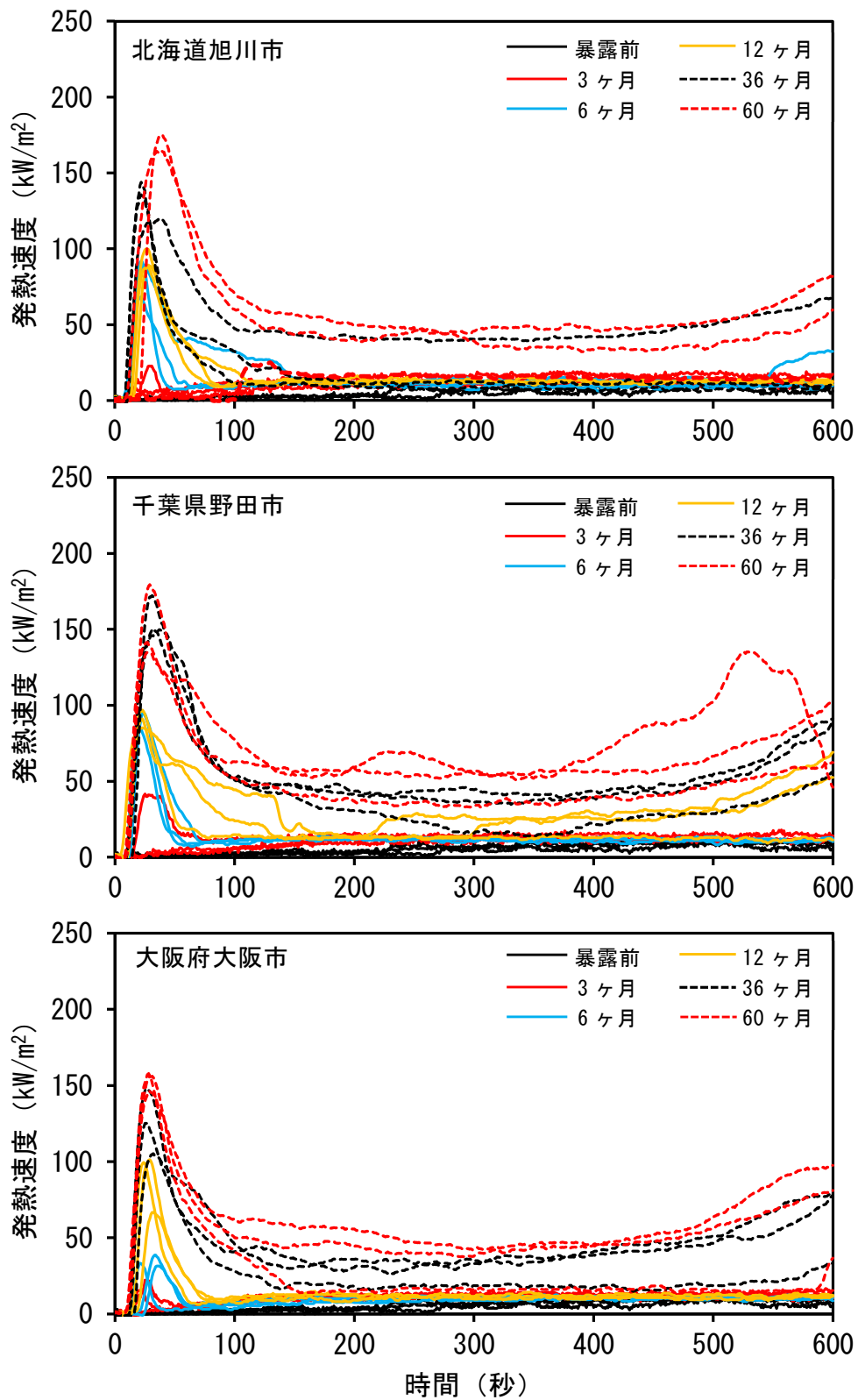


図 5.15 暴露に伴う発熱速度の推移の変化 (試験体 AM)

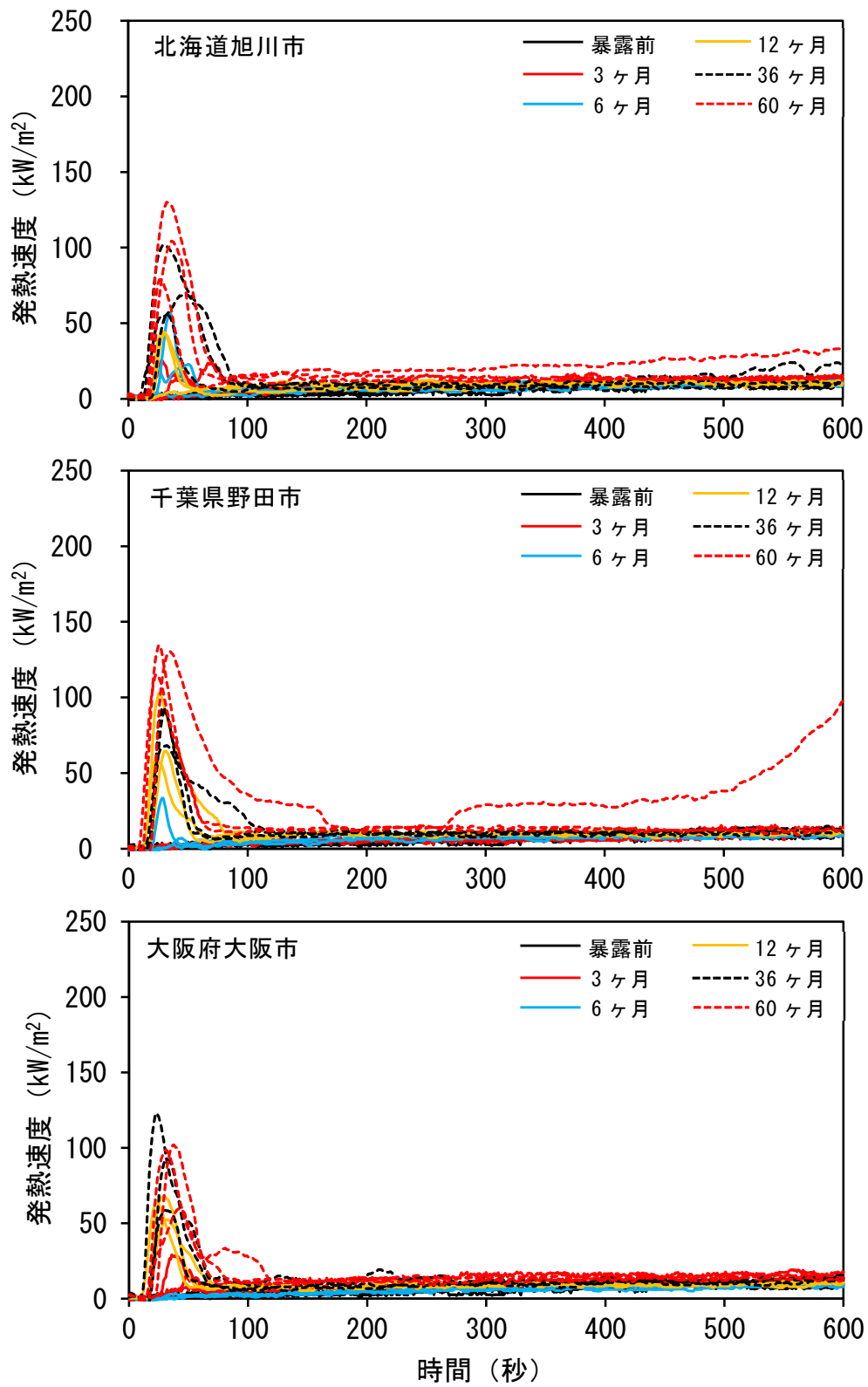


図 5.16 暴露に伴う発熱速度の推移の変化 (試験体 BM)

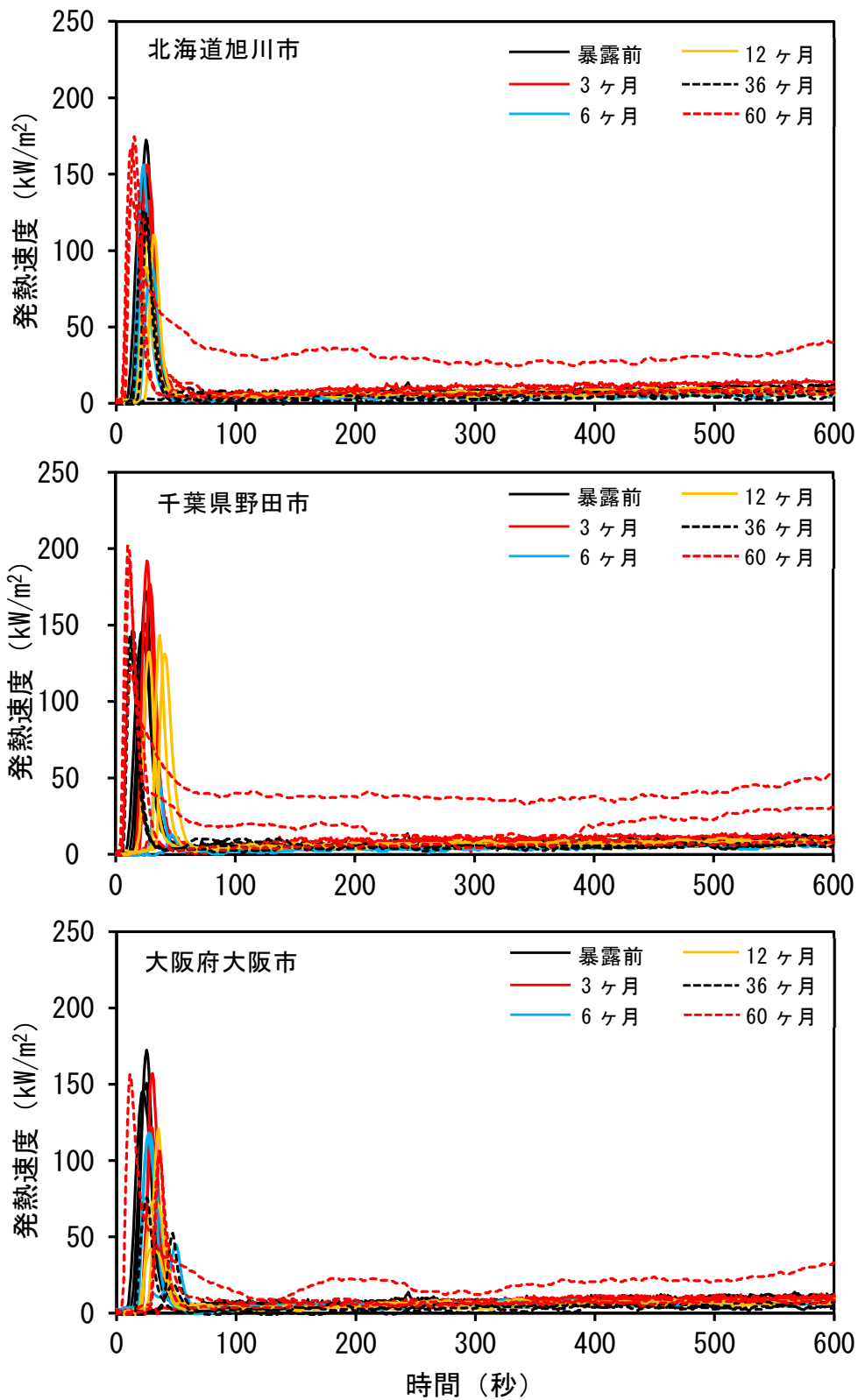


図 5.17 暴露に伴う発熱速度の推移の変化 (試験体 AM-C)

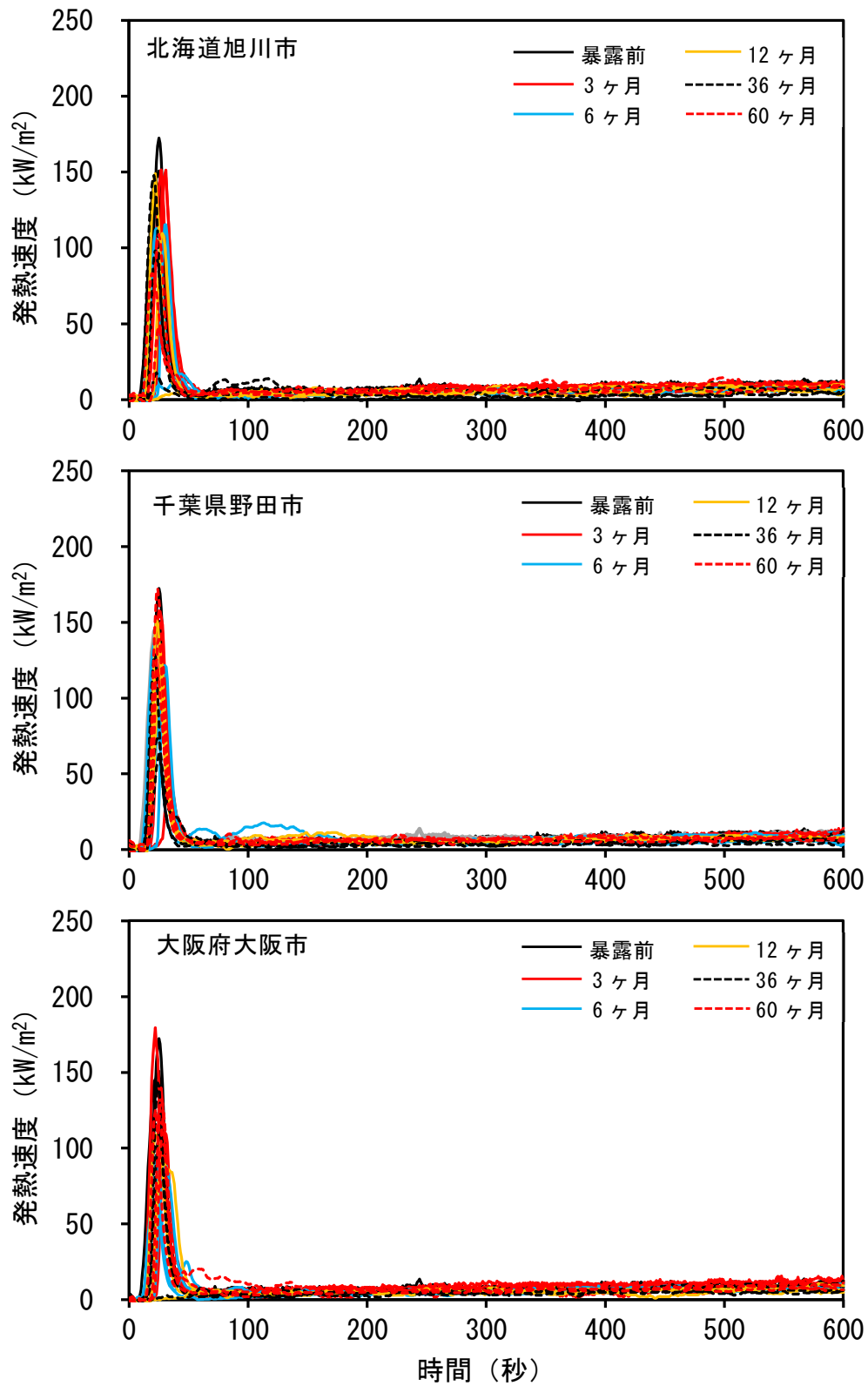


図 5.18 暴露に伴う発熱速度の推移の変化 (試験体 BM-C)

#### 5.4.2.2 総発熱量

暴露期間の経過に伴う10分間総発熱量の変化について、無塗装試験体を図5.19に、塗装試験体を図5.20に示す。図には暴露前との有意差をShirley-Williamsの方法による多重比較検定<sup>13)</sup>した結果を併記した。Shirley-Williamsの方法を用いた理由は、暴露期間の間で総発熱量の分散に差があったこと、及び暴露前の状態を維持する暴露期間を明らかにするためである。

AMの総発熱量は、暴露前では平均3.3MJ/m<sup>2</sup>であったが、暴露後では3ヶ月以降から増加し、60ヶ月では平均33.4 MJ/m<sup>2</sup>になった。一方、BMの総発熱量は、暴露前では平均3.6MJ/m<sup>2</sup>でAMとほぼ同じであり、暴露後では12ヶ月以降から増加し、60ヶ月では平均12.0 MJ/m<sup>2</sup>になった。BMの暴露の経過による総発熱量の増加は、AMと比較して非常に緩やかであり、暴露60ヶ月における増加量ではAMの1/3～1/4であった。

塗装試験体のAM-C及びBM-Cの総発熱量は、暴露前では、平均で5.1MJ/m<sup>2</sup>及び6.3MJ/m<sup>2</sup>であり、塗膜の燃焼によって無塗装よりも1.9MJ/m<sup>2</sup>及び2.7MJ/m<sup>2</sup>大きくなった。両試験体は、ともに暴露前後で総発熱量に統計的有意差が認められず、塗装による燃焼抑制作用の維持効果が見られた。ただし、AM-Cは、暴露60ヶ月において、9試験体のうち4体に13.8～25.4MJ/m<sup>2</sup>の比較的高い総発熱量が見られた。

以上の暴露による総発熱量の挙動から、難燃処理木材の燃焼抑制作用は、無塗装では屋外暴露の経過とともに低減し、その挙動には難燃剤の種類が影響することが分かった。更に、フッ素樹脂系塗料とブタジエン樹脂系塗料を組合せた塗装は、塗膜の燃焼に伴う総発熱量の増加はあるものの、屋外における難燃処理木材の燃焼抑制作用の維持に大きく寄与することが分かった。ただし、暴露60ヶ月の総発熱量におけるAM-CとBM-Cの差から、塗装の効果には板材を処理した難燃剤の種類の影響があると考えられた。また、BM-Cについては、屋外において当初の燃焼抑制作用を60ヶ月以上維持する可能性があるかと推測された。

5.4.1.2と同様に、中村等<sup>8)</sup>が報告した、ファサード試験で燃え広がりが抑制された難燃処理木材の5分間総発熱量14～15MJ/m<sup>2</sup>と比較する。各試験体の5分間総発熱量を図5.21に示す。BM, AM-C, BM-Cの5分間総発熱量は、暴露後60ヶ月においても14MJ/m<sup>2</sup>の半分以下であった。このことから、それらの仕様の難燃処理木材は、外装材に使用した場合、60ヶ月を超えて燃え広がりを抑制する可能性があると考えられた。

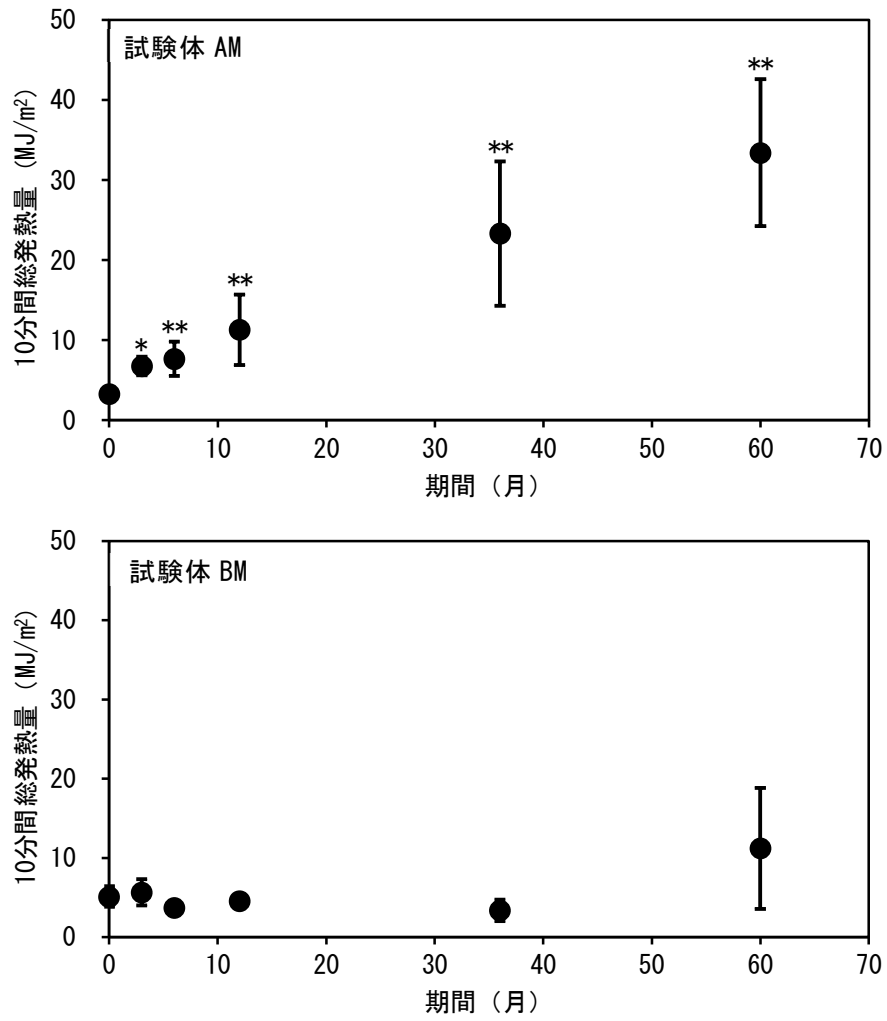


図 5.19 屋外暴露による無塗装試験体の総発熱量の変化

● : 平均値, エラーバー : 標準偏差,  
 Sharley-Williams の方法による多重比較により暴露前との有意差を検定<sup>13)</sup>  
 \* : 有意水準 5%において有意差あり, \*\* : 有意水準 1%において有意差あり

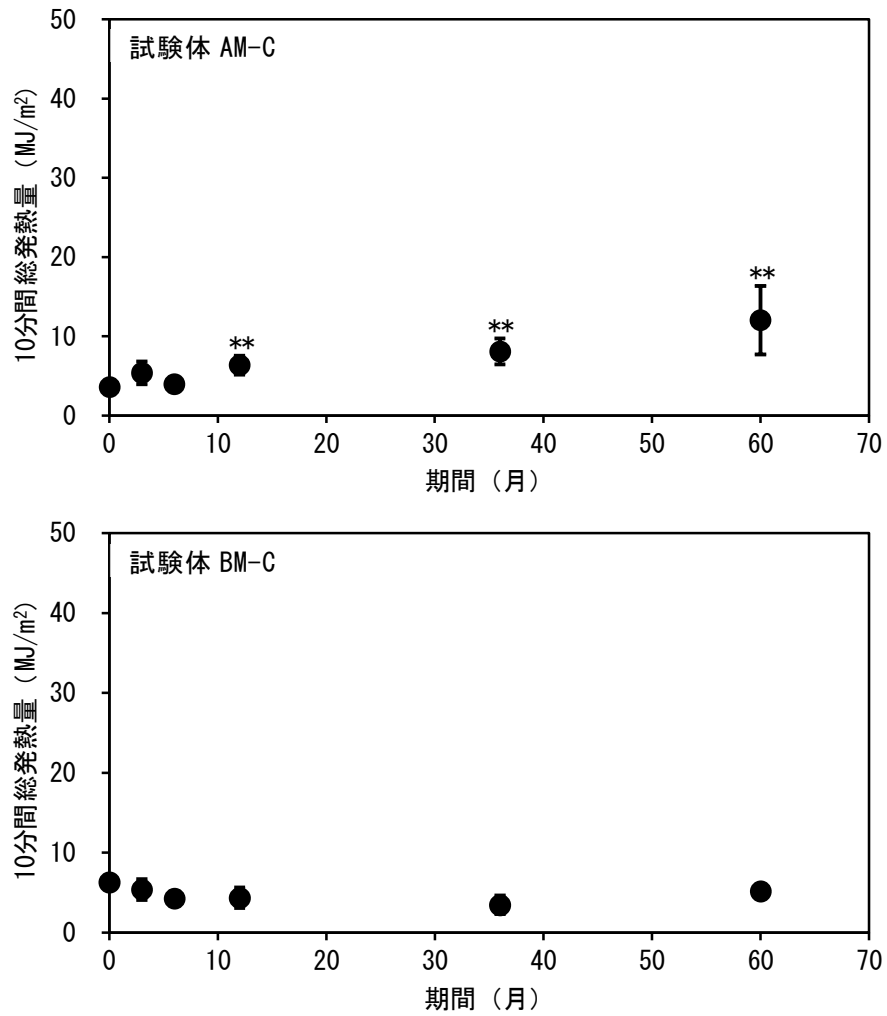


図 5.20 屋外暴露による塗装試験体の総発熱量の変化

● : 平均値, エラーバー : 標準偏差,  
 Sharley-Williams の方法による多重比較により暴露前との有意差を検定<sup>13)</sup>  
 \* : 有意水準 5%において有意差あり, \*\* : 有意水準 1%において有意差あり

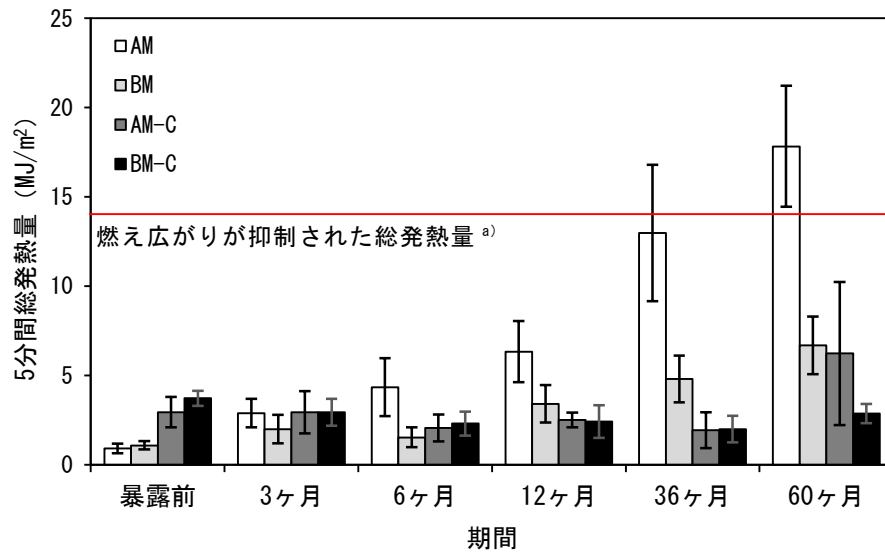


図 5.21 暴露期間の経過による 5 分間総発熱量の変化  
 値は平均値，エラーバーは標準偏差，a) 中村等の報告<sup>8)</sup>においてファサード  
 試験で燃え広がり抑制された試験体の総発熱量



### 5.4.2.3 残存薬剤固形分量

試験体の種類ごとに暴露期間と残存薬剤固形分量の関係を、無塗装試験体について図5.22に、塗装試験体について図5.23に示す。図には暴露前との有意差をShirley-Williamsの方法による多重比較検定<sup>13)</sup>した結果を併記した。Shirley-Williamsの方法を用いた理由は、前項と同様である。

AMの残存薬剤固形分量は、暴露3ヶ月から低下し、60ヶ月では平均値で暴露前の17%になった。一方、BMの残存薬剤固形分量は、暴露36ヶ月から低下し、60ヶ月では平均値で暴露前の70%となった。BMの暴露期間の経過に伴う残存薬剤固形分量の低下は、AMに比べて非常に緩やかであり、暴露60ヶ月における残存薬剤固形分量の暴露前に対する割合ではAMの約4倍と、難燃剤の種類間の溶脱性の差が明確に現れた。

塗装試験体のAM-C及びBM-Cの残存薬剤固形分量は、それぞれ暴露36ヶ月及び60ヶ月から低下した。また、暴露後60ヶ月における平均残存薬剤固形分量は、暴露前に対してAM-Cが45%、BM-Cが87%であった。2種類の塗装試験体は、ともに無塗装試験体よりも残存薬剤固形分量の低下時期が大幅に遅く、暴露後の残存薬剤固形分量も高く維持しており、塗装による難燃剤の保持効果が認められた。また、塗装試験体間では、AM-CはBM-Cよりも残存薬剤固形分量の低下時期が早く、暴露後60ヶ月の残存率も低いことから、塗装の難燃剤保持効果には難燃剤の種類が影響することが示唆された。

暴露前後の試験体の残存薬剤固形分量と総発熱量の関係を、無塗装試験体について図5.24に、塗装試験体について図5.25に示す。無塗装及び塗装試験体の総発熱量は、残存薬剤固形分量の低下とともに増加する傾向があり、原田等<sup>3)</sup>が報告した防火性能が残存薬剤固形分量に依存する関係が見られた。無塗装試験体については、BMは、AMよりも暴露の経過に伴う残存薬剤固形分量及び総発熱量の変化が少なく、難燃剤の耐溶脱性が暴露後の燃焼抑制作用の維持に寄与していることが分かる。

塗装試験体については、無塗装試験体と比較して、暴露の経過に伴う残存薬剤固形分量の低下及び総発熱量の増加の挙動が少ないことから、塗装の難燃剤保持効果が燃焼抑制作用の維持に寄与していることが分かる。ただし、AM-Cは、36ヶ月以降から残存薬剤固形分量の低下が見られ、更に暴露60ヶ月では一部の試験体が高い総発熱量を示したことから、塗装の難燃剤保持効果の低下に伴う燃焼抑制作用の低減が始まっていると考えられた。

一方、BM-Cは、暴露による残存薬剤固形分量及び総発熱量の変化が小さく、安定して性能を維持した。BM-Cの難燃剤が耐溶脱性であることを考慮すると、今後の暴露継続において塗装の難燃剤保持効果が低下しても、急激に燃焼抑制作用が低減しないことが予想された。Östman等<sup>2)</sup>は、薬剤Bと同様の耐溶脱性薬剤を含む数種類の薬剤を用いた難燃処理板材に、アルキッド樹脂系塗料及びアマニ油系塗料等で塗装した試験体を屋外暴露した後、燃焼性状を評価した結果、初期の燃焼抑制作用を最長で3年間維持し、5年間以降は概ね低下したことを報告している。本試験は、それらと暴露条件及び試験体の仕様等が異なることから単純に比較できないが、BM-Cの屋外耐候性はかなり高いものと考えられた。

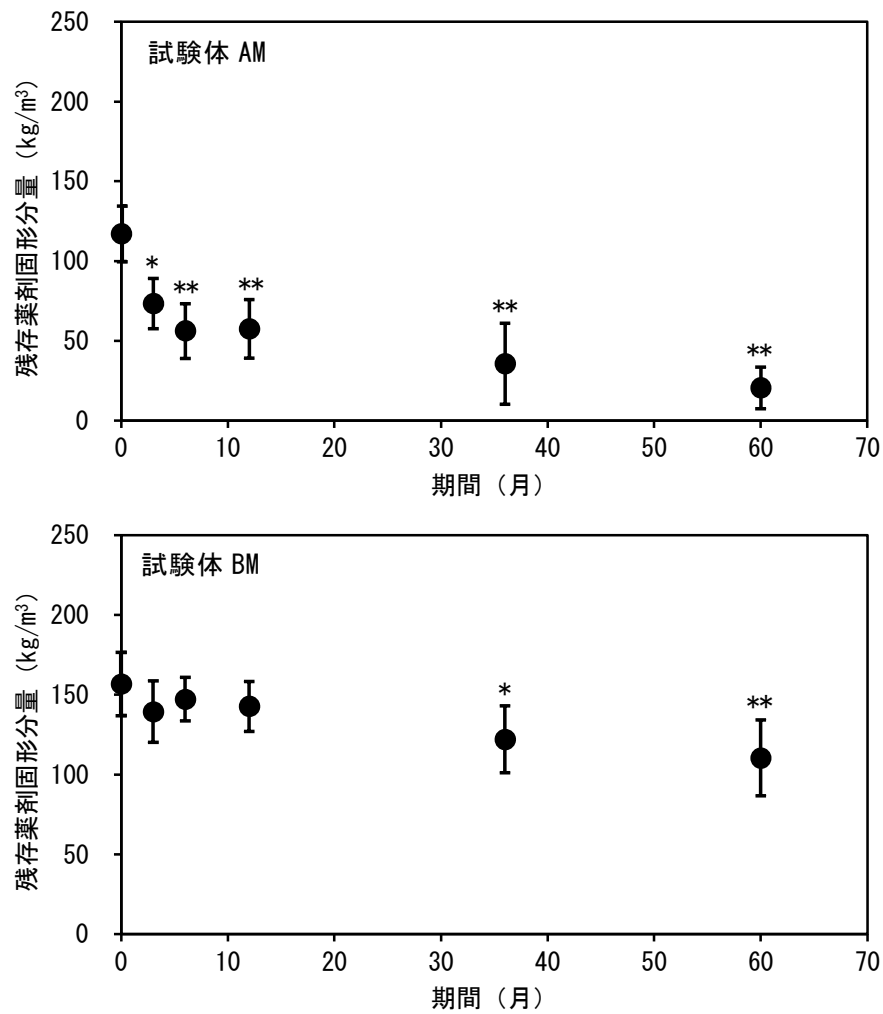


図 5.22 屋外暴露による無塗装試験体の残存薬剤固形分量の変化

● : 平均値, エラーバー : 標準偏差, Sharley-Williams の方法による多重比較<sup>13)</sup> により暴露前との有意差を検定 \* : 有意水準 5%において有意差あり, \*\* : 有意水準 1%において有意差あり

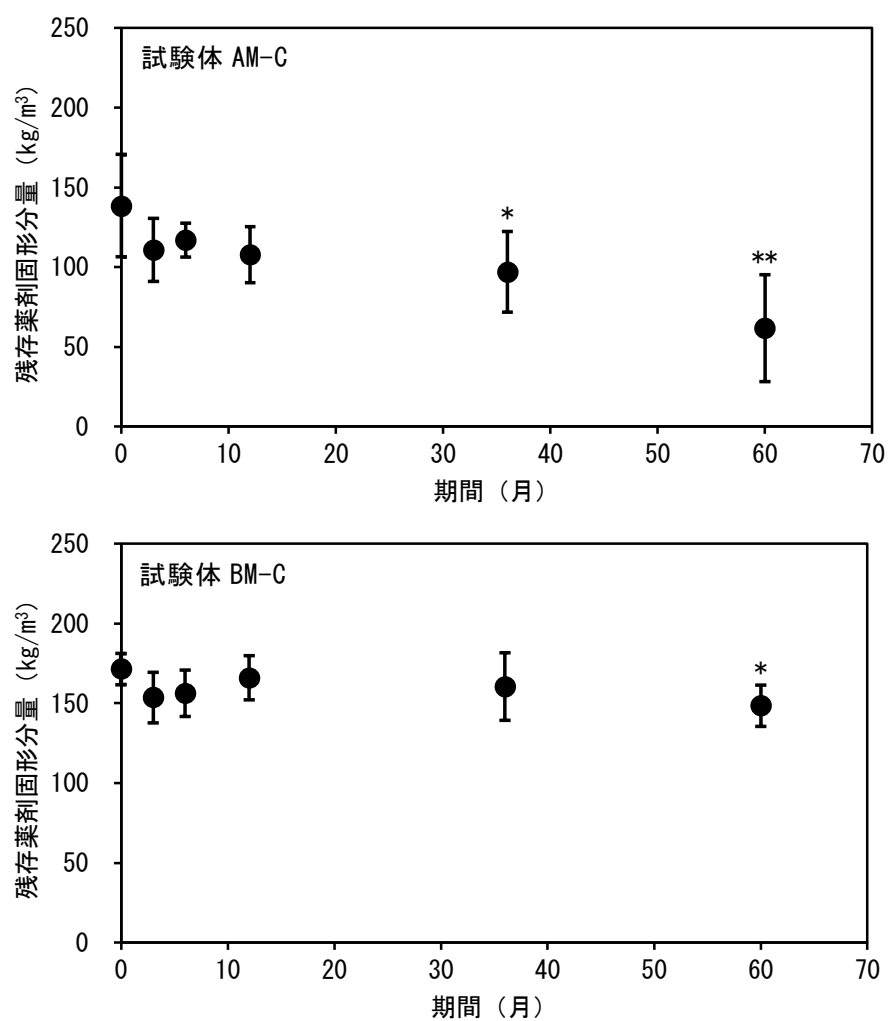


図 5.23 屋外暴露による塗装試験体の残存薬剤固形分量の変化  
 ●：平均値，エラーバー：標準偏差，Sharley-Williamsの方法による多重比較<sup>13)</sup>により暴露前との有意差を検定 \*：有意水準 5%において有意差あり，\*\*：有意水準 1%において有意差あり

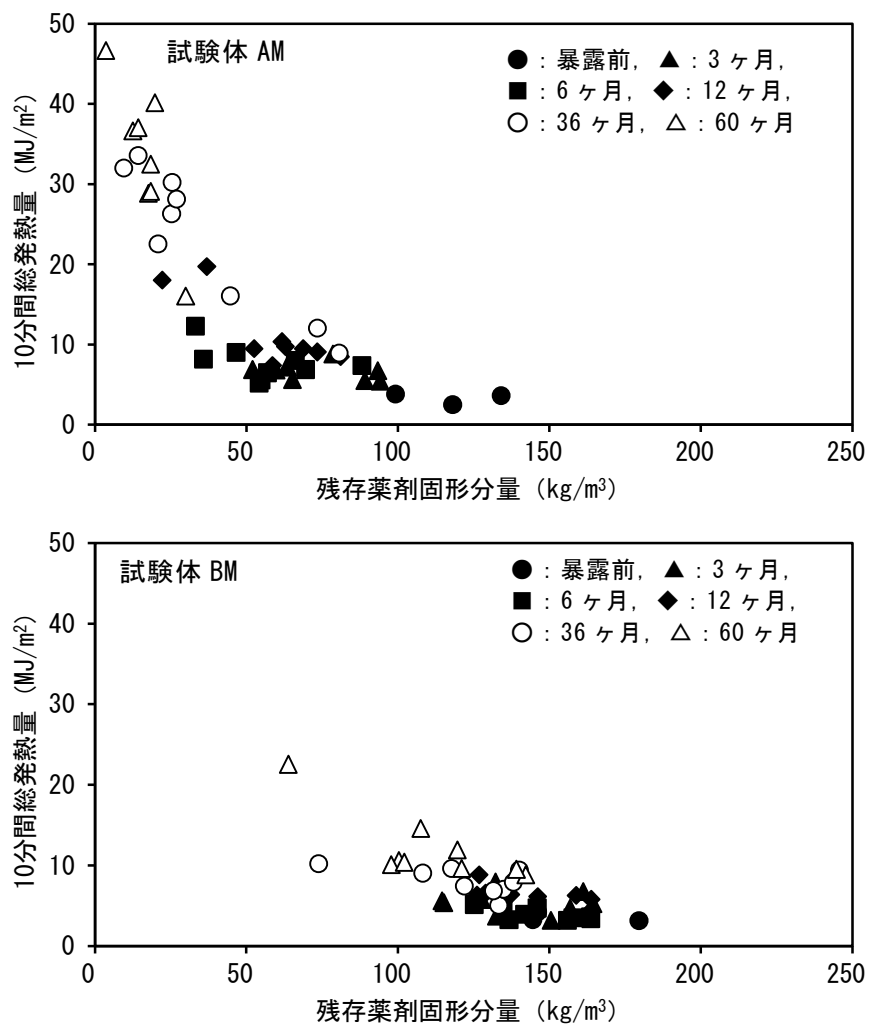


図 5.24 無塗装試験体の残存薬剤固形分量と 10 分間総発熱量の関係

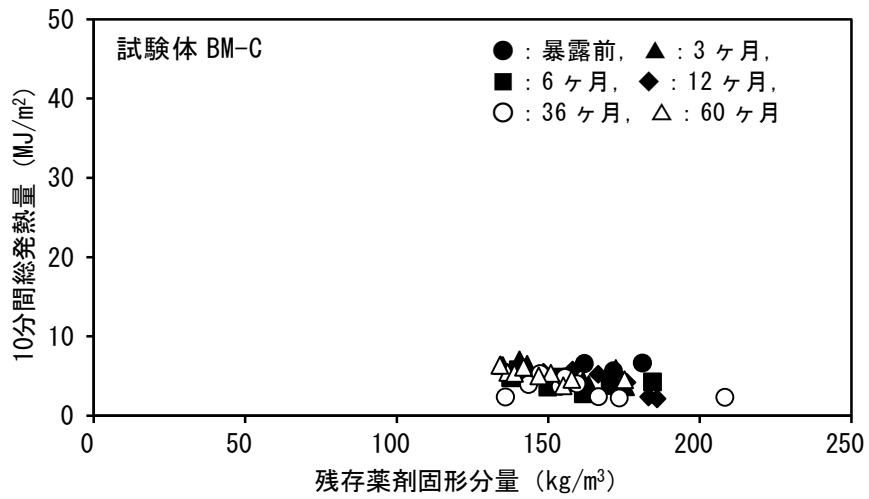
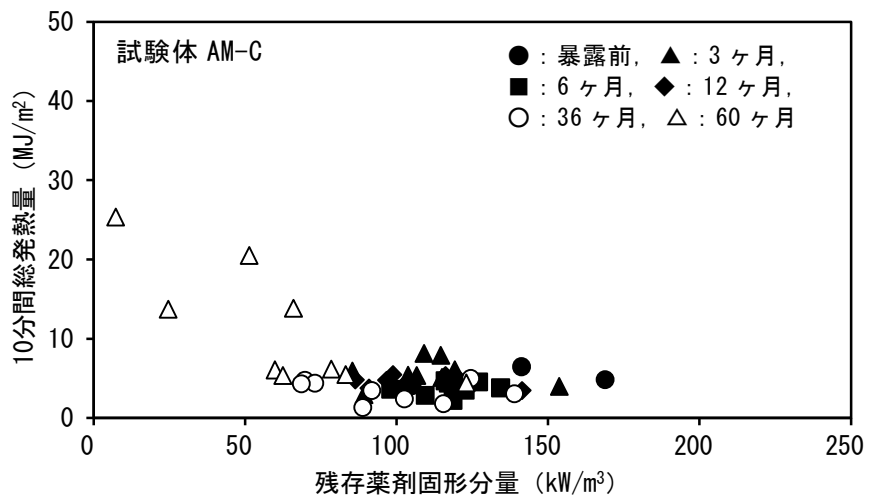


図 5.25 残存薬剤固形分量と 10 分間総発熱量の関係

#### 5.4.2.4 屋外暴露後の塗膜の状態

塗装試験体について、各暴露期間終了後の暴露面の状態を写真5.2～写真5.5に示す。AM-Cは、暴露後12ヶ月までは変化が見られなかったが、36ヶ月から塗膜の剥離が見られ、60ヶ月ではほとんどの試験体に塗膜の全面的な剥離が見られた。BM-Cは、暴露後36ヶ月で試験体の角や表面のひび割れに塗膜の剥離が若干生じた。しかし、BM-Cは、暴露後60ヶ月において、暴露後36ヶ月より塗膜の剥離が進むが、剥離は一部でありほとんどの部分が処理板材に付着していた。AM-CとBM-Cの違いは、基材の処理板材に使用した難燃剤の種類であることから、薬剤Aに塗膜と処理板材の密着力を低下させる何らかの原因があると考えられた。

暴露後60ヶ月経過したAM-Cの発熱性試験前の試験体の状態を写真5.6に示す。処理板材の剥離面は、全面的に白くなっており、難燃剤の結晶が生じていると考えられた。5.4.2.3においてAM-Cは、BM-Cよりも残存薬剤固形分量の低下時期が早く、暴露60ヶ月において一部の試験体に総発熱量の増加が見られたのは、暴露中に生じた塗膜の剥離により、雨水が処理板材の表面に接触し、難燃剤が溶脱したことが原因と推測された。

また、写真5.6から、暴露後のAM-Cで剥離した塗膜は、ほぼ健全な状態を保っていること分かる。このことから、塗装による難燃処理木材の燃焼抑制作用の維持には、塗膜と処理木材の密着力が重要であると考えられた。

暴露前  
(暴露3ヶ月  
用試験体)

北海道旭川市



3ヶ月



6ヶ月



千葉県野田市



大阪府大阪市



写真 5.2 試験体 AM-C の暴露に伴う表面状態の変化 (暴露前～暴露後 6 ヶ月)

北海道旭川市



千葉県野田市



36ヶ月



60ヶ月



写真 5.3 試験体 AM-C の暴露に伴う表面状態の変化（暴露後 12 ヶ月～暴露後 60 ヶ月）



大阪府大阪市



千葉県野田市



北海道旭川市



暴露前  
(暴露3ヶ月  
用試験体)

3ヶ月

6ヶ月

写真 5.4 試験体 BM-C の暴露に伴う表面状態の変化 (暴露前～暴露後 6ヶ月)

大阪府大阪市



千葉県野田市



北海道旭川市

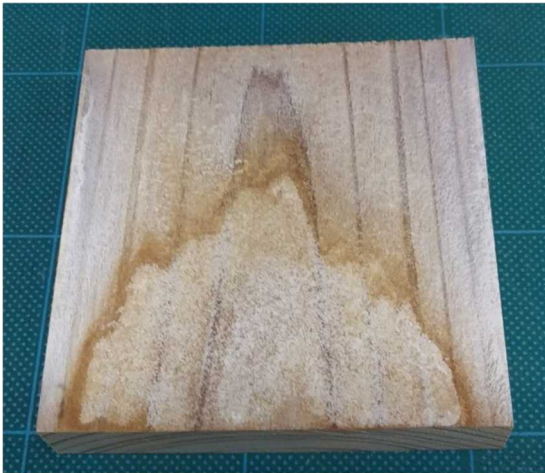


12ヶ月

36ヶ月

60ヶ月

写真 5.5 試験体 BM-C の暴露に伴う表面状態の変化 (暴露後 12 ヶ月 ~ 暴露後 60 ヶ月)



処理板材の剥離面



剥離した塗膜

写真 5.6 塗膜の剥離した発熱性試験体の状態 (AM-C 暴露地点：千葉県野田市)

## 5.5 屋外暴露60ヶ月までの結論

難燃処理板材について、北海道旭川市、千葉県野田市、大阪府大阪市の3地点で最長60ヶ月の屋外暴露操作を行い、燃焼抑制作用の経年劣化挙動の把握を試みた。難燃剤には、国内で一般的に難燃処理木材に用いられるリン・ホウ素混合系薬剤と海外において屋外用難燃処理木材に用いられるリン酸アミノ樹脂系薬剤を用い、経年劣化挙動への難燃剤の種類の影響を考察した。また、リン・ホウ素混合系薬剤を用いた処理板材については、薬剤固形分量を3水準用意し、経年劣化挙動への薬剤固形分量の影響を考察した。更に、各難燃剤を用いた難燃処理板材について1水準の薬剤固形分量は、半数を鉄骨等への耐候性付与に実績のあるフッ素樹脂系塗料による塗装を行い、塗装による燃焼抑制作用の維持効果を評価した。それらの結果から以下のことが明らかになった<sup>16,17)</sup>。

- 1) リン・ホウ素混合系薬剤を使用した難燃処理木材は、当初の薬剤固形分量に関わらず、屋外暴露により燃焼抑制作用が低減する。
- 2) 上記の難燃処理木材について当初の薬剤固形分量を多くし、防火材料の基準性能に対して余裕を持たせることは、屋外で基準性能を維持する期間の延長に有効であるが、その期間には限界がある。
- 3) 難燃処理木材の薬剤固形分量と総発熱量の関係は、屋外暴露による影響が有り、原因として難燃剤の溶脱によって生じる厚さ方向の難燃剤の傾斜分布が考えられた。このため、暴露後における難燃処理木材の防火性能の予測には、残存薬剤固形分量とともに材内の薬剤分布を考慮する必要がある。
- 4) 難燃処理木材の屋外における燃焼抑制作用の低減挙動は、難燃剤の溶脱性の影響がある。耐溶脱性を有するリン酸アミノ樹脂系難燃剤の使用は、難燃処理木材の残存薬剤固形分量の保持及び燃焼抑制作用の維持に寄与する。
- 5) フッ素樹脂系塗料とポリブタジエン樹脂系塗料の組み合わせによる塗装は、塗膜の燃焼により発熱量が付加されるが、屋外において難燃処理木材の薬剤固形分量の低下を抑制し、燃焼抑制作用の維持に寄与する。
- 6) 塗装による難燃処理木材の燃焼抑制作用の維持効果は、難燃剤の種類により異なり、その原因として塗膜と処理板材の付着性への難燃剤の影響が考えられた。
- 7) 耐溶脱性を有するリン酸アミノ樹脂系難燃剤とフッ素樹脂系塗料の組み合わせは、屋外において当初の燃焼抑制作用を5年間以上維持する可能性がある。

今後は、残りの試験体の屋外暴露を継続し、難燃処理木材の屋外における10年間の燃焼抑制作用の経年劣化挙動を明らかにする予定である。同時に、難燃処理木材の燃焼抑制作用維持への塗装の効果について様々な種類の塗料を試験し、屋外用難燃処理木材に推奨される仕様を明らかにする。更に、製品と同寸法の長尺の難燃処理木材について、屋外における燃焼抑制作用の経年劣化挙動を把握するとともに、小試験体の試験結果との関係を明らかにし、小試験体の評価により実大製品の燃焼抑制作用の経年劣化挙動の推定手法の確立を試みる予定である。

## 第六章 総括

難燃処理木材は、内装制限の適用される公共建築物等の内装や防火措置が要求される中高層建築物の外装の木質化に使用される。しかし、難燃処理木材は、内装では施工後の白華の発生が美観を劣化させるとともに防火性能の低下が懸念されること、外装では雨水等により難燃剤が溶脱して防火性能が低下することが問題になっている。本研究では、今後の難燃処理木材の開発のために必要とされる技術的知見を収集するため、内装における白華の発生並びに外装における燃焼抑制作用の経年劣化について、難燃剤の種類や薬剤固形分量の影響を把握するとともに、塗装による抑制効果を検討した。

**第二章**では、難燃処理木材の製造において基本となる、難燃剤の注入処理による木材の燃焼抑制効果を検討した。試験体には厚さ 12, 15 及び 18mm のスギ板材を用いて、小試験体を用いる発熱性試験により、薬剤固形分量と最高発熱速度又は総発熱量の関係を把握した。その結果、最高発熱速度と総発熱量は、ともに薬剤固形分量との間に指数関数的関係が見られ、3 種類の厚さごとに指数関数の回帰式を得ることができた。また、板材の厚さ間を比較した結果、最高発熱速度では薬剤固形分量水準  $100 \text{ kg/m}^3$  と  $150 \text{ kg/m}^3$  において、総発熱量では薬剤固形分量水準  $100 \text{ kg/m}^3$  において、厚さの増加に伴う低下が見られた。板材の厚さ増加による最高発熱速度及び総発熱量の低下は、発熱速度の推移から加熱中の有炎燃焼により生じる発熱速度のピークの発生時間が厚さの増加に伴い遅延し、加熱時間外に外れることが原因と考えられた。また、内装制限が適用される部分に使用する防火材料は 3 種類あるが、2 番目の性能を有する準不燃材料であれば、制限される部分のほとんどに使用することができる。このことを踏まえて、スギ板材に準不燃材料の性能が得られる薬剤固形分量の目安を分析した結果、厚さ 15mm では  $150 \text{ kg/m}^3$ 、厚さ 18mm では  $100 \text{ kg/m}^3$  であった。なお、厚さ 12mm の板材は、最大の薬剤固形分量水準である  $200 \text{ kg/m}^3$  においても準不燃材料の性能が得られなかった。

**第三章**では、準不燃材料の難燃処理木材を前提に、内装用の問題である白華の発生をこれまで検討されていない市販の難燃剤及び塗料を選定して組み合わせる製造条件としての抑制を検討した。難燃剤の選定では、市販の 3 種類の難燃剤（リン・ホウ素混合系、ポリリン酸カルバメート系、リン酸グアニジン系）を用いて、薬剤固形分量を 3 水準としたスギの処理板材を試験体にした。白華発生の評価は、温度を  $30^\circ\text{C}$  で一定とし、湿度を 70, 80 及び 90%RH とした高湿度雰囲気下に試験体を放置し、吸湿量及び表面の難燃剤を含む水滴の発生状況から白華発生の可能性を評価した。その結果、処理木材の白華は、薬剤固形分量が多くなるほど、雰囲気湿度が高くなるほど発生の可能性が高まることが分かった。また、難燃剤については種類間に白華の発生に差違があり、リン酸グアニジン系が他の 2 種類よりも少ないと判断された。また、高湿度雰囲気下で試験体の表面に発生した水滴は、放置日数の経過とともに消失する現象が見られ、その間の試験体の質量変化から水滴の水分が徐々に木材内に移動することが推測された。欧州における難燃処理木材の耐久性に係る規格である EN16755 の基準を踏まえて検討した結果、**第二章**で得られた準不燃材料の目安の薬剤固形分量では、3 種類の難燃剤ともに白華の抑制が困難であると判断された。

次に、3 種類の難燃剤の中で最も白華の発生が少ないとされたリン酸グアニジン系難燃剤を用いて、準不燃材料の目安とされる薬剤固形分量を注入したスギの処理板材について、一般木材用ウレタン樹脂系塗料（溶剤系）、防火木材用ウレタン樹脂系塗料（溶剤系）、フッ素

樹脂系塗料（溶剤系）及び無機系塗料（水系）の4種類の透明造膜系塗料の塗装による白華抑制効果を評価した。その結果、全ての塗料は、30℃・90%RHの高湿度環境下において処理板材の白華を抑制する効果が認められた。高湿度雰囲気下における試験体の吸湿量の推移から、各塗料の塗膜は、高湿度雰囲気放置直後の処理板材の急激な吸湿を抑制する効果が有り、これにより吸収された水分が処理板材の表面で滞留すること無く材内に移動することが可能になったことで、水滴の発生が無くなり白華が抑制されたと推察された。ただし、無機系塗料は塗膜の硬化不良が見られており、水系塗料のために木材内から難燃剤が溶け出し、塗料の硬化反応に影響したことが考えられた。それらの結果を基に、4種類の塗料の中から準不燃材料の難燃処理木材に適した種類を検討した結果、価格、処理木材との相性、入手しやすさから一般木材用ウレタン樹脂塗料が適当と判断された。

また、塗料は可燃性の有機物であるため、塗装により処理板材の燃焼性状への影響が懸念される。このことを踏まえて、4種類の塗料を用いて、塗装前後の処理板材の燃焼性状を発熱性試験で評価し、塗装の影響を考察した。その結果、塗装による総発熱量の増加は、2.1～2.8MJ/m<sup>2</sup>であることが分かった。準不燃材料の総発熱量の基準値は8MJ/m<sup>2</sup>であることから、塗装される処理板材は発熱量を5MJ/m<sup>2</sup>未満にする必要があると判断された。また、最高発熱速度については塗装により増加するが、準不燃材料の基準を損なうまでの影響は無かった。

**第四章**では、実用化を想定して、**第三章**で選定したリン酸グアニジン系難燃剤及び一般木材用ウレタン樹脂系塗料を用いて、発熱性試験の結果を基に推定した準不燃材料の性能が得られる薬剤固形分量で長尺の塗装薬剤処理板材を製造し、模型箱試験で材内のバラツキを含む全体的な燃焼性状を評価するとともに準不燃材料の性能を評価した。更に、模型箱試験の結果については、事前に把握した長尺処理板材の長さ方向の薬剤固形分量の変動の影響を考察した。

**第二章**の小試験体を用いた発熱性試験による評価結果と既往の長尺の難燃処理板材を用いた模型箱試験による評価結果から、両試験の小試験体及び長尺処理板材において準不燃材料の性能を付与する薬剤固形分量はほぼ同じであることが推定された。このことを踏まえて、リン酸グアニジン系難燃剤を用いて厚さ15mmで長さ3000mm及び4000mmの長尺処理板材を製造し、**第二章**で厚さ15mmの処理板材の準不燃材料の目安とした薬剤固形分量150kg/m<sup>3</sup>を中心に100～200kg/m<sup>3</sup>の範囲を選定して試験に用いた。

選定した長尺処理板材について、長さ方向に等間隔で切断して採取した小片の薬剤固形分量を基に、長さ方向における薬剤固形分量の分布状態を分析した結果、木口に近い両端部の薬剤固形分量が高く、その傾向は処理板材の薬剤固形分量が低いほど顕著であることが分かった。また、採取した小片を発熱性試験で燃焼性状を評価し、薬剤固形分量との関係を分析した結果、**第三章**で塗装を想定した難燃処理板材において準不燃材料の総発熱量の基準値とした5MJ/m<sup>2</sup>を、薬剤固形分量135kg/m<sup>3</sup>で満たすことが分かった。この結果から準不燃材料の性能が得られるとする薬剤固形分量135～165kg/m<sup>3</sup>の長尺処理板材について、長さ方向における薬剤固形分量の分布状態を両端部とその他の中央部に分けて分析した結果、長さ3000mmでは端部の2.6%、中央部の31.8%、長さ4000mmでは端部の15.8%、中央部の32.6%の部分は、塗装後において準不燃材料の基準を満たさないことが推定された。

薬剤固形分量135～165kg/m<sup>3</sup>の長さ4000mmの長尺処理板材について、**第三章**で選定した

一般木材用ウレタン樹脂系塗料（溶剤系）で塗装し、模型箱試験により燃焼性状を評価した結果、準不燃材料の基準を満たすことが確認された。試験後の塗装処理板材の炭化深さは、火源周辺部が最大で火源から離れるに従って小さくなり、炭化深さが 1mm に満たない部分が火源から離れた部分に多く見られており、燃焼が箱内全体に拡大していないことが確認された。また、加熱内の箱内温度は最高で 400～432℃であり、火災時の危機的状況であるフラッシュオーバーの目安である 600℃に至らず、安全性が確保されていることが確認された。また、試験に用いた長尺処理板材は、長さ方向の薬剤固形分量のバラツキから 32.6%の部分が準不燃材料に満たないことが推定されたが、模型箱試験ではそれらのバラツキによる影響は見られなかった。この理由として、模型箱試験では、実際の室内火災と同様に部分的な燃焼が徐々に拡大する過程を含めて燃焼性状を評価するが、難燃処理木材では 135kg/m<sup>3</sup> に満たなくても燃焼拡大の要因の一つである燃え広がりが抑制されるためと考えられた。

第五章では、外装用の難燃処理木材について、今後の製品開発に必要とされる基盤データ取得を目的とし、国内 3 箇所で最長 5 年間の屋外暴露を行い、燃焼性状の経年変化への難燃剤の種類及び薬剤固形分量の影響を把握するとともに、塗料の燃焼抑制作用維持効果を考察した。試験の結果、国内で一般的に使用されるリン・ホウ素混合系難燃剤は、当初の薬剤固形分量にかかわらず、屋外暴露により燃焼抑制作用が低減することが確認された。また、目標の防火性能に対して薬剤固形分量を過剰にすることは、防火性能を維持する期間延長に有効であるが、延焼できる期間には限界があることが分かった。暴露後の処理板材について残存薬剤固形分量と燃焼性状の関係を分析した結果、両者の関係に暴露の影響が認められ、その原因として暴露により木材内の薬剤固形分量の分布に傾斜が生じることが考えられた。このことから、暴露後における難燃処理木材の燃焼性状の予測には、残存薬剤固形分量に加えて材内の薬剤の分布状況を考慮する必要があることが示唆された。

海外で屋外用の難燃処理木材に使用される耐溶脱性のリン酸アミノ樹脂系難燃剤は、リン・ホウ素混合系難燃剤よりも屋外における残存薬剤固形分量の低下が遅く、燃焼抑制作用の維持に有効であった。また、橋梁等の鉄材への耐候性付与に実績のあるフッ素樹脂系塗料を上塗りに、ポリブタジエン樹脂系塗料を下塗りにした塗装仕様は、残存薬剤固形分量の低下を抑制し、燃焼抑制作用の維持に寄与した。ただし、塗装の効果は、処理板材に使用する難燃剤の種類による影響が見られた。リン酸アミノ樹脂系難燃剤と上記の塗料の組合せは、屋外において当初の燃焼抑制作用を 5 年以上維持する可能性があることが分かった。

本論文では、難燃処理木材の内装における問題である白華の発生、外装用における問題である燃焼抑制作用の経年劣化について、難燃剤の種類、薬剤固形分量及び塗装の影響を踏まえて検討した。その結果、内装用における白華の発生は、処理木材の吸湿性が影響し、目標とする防火材料の性能付与に必要な難燃剤の薬剤固形分量を基に、吸湿性を考慮して難燃剤の種類を選定し、急激な吸湿を抑制する塗料を塗装することで抑制可能であることが分かった。また、製品となる長尺の難燃処理板材は、長さ方向に薬剤固形分量のバラツキを生じるが、発熱性試験による長さ方向の部分的な評価で準不燃材料の性能が付与される薬剤固形分量を全体として保持していれば、模型箱試験による全体的な燃焼性状の評価においてバラツキの影響を受けず準不燃材料の基準を満たすことが分かった。また、外装用については、難燃処理木材の燃焼抑制作用の維持は、注入した難燃剤の保持が重要であり、耐溶脱

性難燃剤を使用して溶脱を抑制すること，フッ素樹脂系塗料の塗装により難燃剤溶脱の原因となる雨水との接触を防ぐことが有効であった。

以上の知見は，樹種の影響を受けるものではなく，本試験で用いたスギ以外の樹種についても適用が可能である。今後については，内装用の難燃処理木材に係る知見は，地域ごとに要望される樹種を用いた難燃処理木材の開発に活用していく予定である。また，外装用の難燃処理木材に係る知見は，今後得られる予定である暴露10年目のデータを合わせて長期の経年劣化挙動を明らかにするとともに，フッ素樹脂系塗料以外の様々な塗料について燃焼抑制作用の維持効果を把握し，外装用難燃処理木材の開発に必要な知見を蓄積していく予定である。更に，実大の難燃処理木材について燃え広がり防止性能を評価し，小試験で得られた結果との関係を検討し，製品開発を効率化させる方法を探っていく。



## 引用文献

### 【第一章】

- 1) 3. 耐火構造【令第107条】，建築物の防火避難規定の解説 2016，日本建築行政会議編集，ぎょうせい，東京，p.14.
- 2) 横田祐司，高本修一，吉岡英樹：韓国議政府市の外断熱マンション火災に係る現地調査報告，火災，65(5)，pp.19-24 (2015).
- 3) 吉岡英樹：材料分野の視点から，“2019年度日本建築学会大会（北陸）防火部門研究協議会資料 防火基準のモデルコードを作りたい”，建築学会防火委員会，昌文社，東京，2019，pp.10-17.
- 4) 石原茂久：木材の燃焼とその制御，木材学会誌，35(9)，pp.775-785 (1989).
- 5) 平田利美：木材難燃化のメカニズム．木材工業 44(5)，202-207 (1989).
- 6) Toshiro Harada, Saburou Uesugi, Hirotochi Taniuchi: Evaluation of fire-retardant wood treated with poly-phosphatic carbamate using a cone calorimeter. Forest products journal. 53(6), pp.81-85(2003).
- 7) 菊地伸一，前田恵史：木材の発熱性におよぼす難燃剤の効果，木材学会誌，53(5)，pp.276-282 (2007) .
- 8) 石川朝之，堀内清史，柴田博幸，戸谷和光，武田邦彦：木材の難燃化に及ぼす壁孔の破壊とホウ素化合物の影響．材料 53(3)，301-308 (2003).
- 9) Qingwen Wang, Jian Li, Jerrold E, Winandy: Chemical mechanism of fire retardance of boric acid on wood. Wood Sci. Technol 38, 375-389 (2004).
- 10) Ming Gao, Jincheng Niu, Rongjie Yang: Synergism of GUP and boric acid characterized by cone calorimetry and thermogravimetry. J. Fire Sci. 24, 499-511 (2006).
- 11) Ming Gao, Shousheng Yang, Rongjie Yang: Flame retardant synergism of GUP and boric acid by cone calorimetry. J. Appl. Polym. Sci. 102, 5522-5527 (2006).
- 12) 河原崎政行，菊地伸一：木材の発熱性に対するリン系とホウ素系の混合薬剤の抑制効果，木材学会誌，60(5)，pp.269-277 (2014).
- 13) (公財) 日本住宅・木材技術センター：難燃処理木材の品質管理基準等の検討事業報告書，2018年3月
- 14) Jing Pan, Jun Mu, Zhaoxu Wu, Xiaoteng Zhang: Effect of nitrogen-Phosphorus fire retardant blended with  $Mg(OH)_2/Al(OH)_3$  and nano- $SiO_2$  on fire-retardant behavior and hygroscopic of poplar, Fire and Materials, 38, pp.817-826 (2014)
- 15) Don Won Son, Mee Ran Kang, Won Joung Hwang, Hyun Mi Lee, Sang Bum Park: Hygroscopic property, leaching resistance and meal corrosive efficacy of wood treated with fire retardant, J. Korean wood Sci. Technol., 42(2), pp.157-162 (2014).
- 16) Toshiro Harada, Yasushi Nakashima, Yasushi Anazawa: The effect of ceramic coating of fire-retardant wood on combustibility and weatherability, J.

- Wood Sci., 53. pp.249-254 (2007).
- 17) 伊藤貴文, 横谷昭, 春日二郎: 吸湿性の低い不燃木材の製造技術, 第40回木材の化学加工研究会シンポジウム講演集, 13-19 (2010).
  - 18) 花ヶ崎裕洋, 石井利典, 川元満夫: 第63回日本木材学会大会要旨集, N28-P-PM17 (2013).
  - 19) 原田寿郎: 放射加熱による木材の炭化(第3報) 燃焼に及ぼす加熱面の種類の影響と発熱速度の予測, 木材学会誌, 43(3), pp.268-179 (1997).
  - 20) 原田寿郎: コーンカロリメーターによる木材の燃焼性評価, 木材工業, 59(10), pp.454-457 (2004).
  - 21) 菊地伸一, 河原崎政行: 木材の発熱性に対する密度, 水分の影響, 林産試験場報, 22(2), pp.1-6 (2008).
  - 22) 河原崎政行, 菊地伸一, 田坂茂樹, 土橋常登, 鈴木秀和: 長尺の薬剤処理木材における材内の薬剤分布と模型箱試験による防火性能の評価, 林産試験場報, 第541号, pp.17-24 (2011).
  - 23) 藤田和彦, 小城隆嗣, 原田浩司, 谷川信江, 土橋常登, 金城仁, 常世田昌寿, 上川大輔, 平井倫之, 長谷見雄二: 節を有するスギ板材の難燃化と準不燃材料の研究, 日本建築学会大会学術講演梗概集(関東), pp.181-184 (2011).
  - 24) 亀岡祐史, 宋昌錫, 李元羽, 藤田和彦, 土橋常登, 安井昇, 鈴木淳一, 腰原幹雄: 準不燃性能を持つ内装用単板積層材(LVL)の開発 その3 製品難燃処理による検討, 日本建築学会大会学術講演梗概集(北海道), 防火, 2013, pp.137-138.
  - 25) 渥美清隆, 田中孝, 山田雅章: 実大材スギに含まれた各種難燃薬剤の乾燥過程におけるX線観察, 第66回日本木材学会大会研究発表要旨集, N28-P-18 (2016).
  - 26) 上川大輔, 原田寿郎: 難燃薬剤処理木材中のムラの発生要因に関する研究, 第66回日本木材学会大会研究発表要旨集, N28-P-20 (2016).
  - 27) “防耐火性能試験・評価業務方法書(平成12年6月1日制定, 平成28年6月1日変更)”, (一財)日本建築総合試験所:  
<http://www.gbrc.or.jp/contents/documents/center/8A-103-01.pdf>. 2016年8月30日参照.
  - 28) 菊地伸一, 河原崎政行: 模型箱試験による難燃処理木材の燃焼性評価, 木材工業, 63(1), pp.14-18 (2008).
  - 29) 河原崎政行, 菊地伸一, 田坂茂樹, 土橋常登, 鈴木秀和: 長尺の薬剤処理木材における材内の薬剤分布と模型箱試験による防火性能の評価, 林産試験場報, 第541号, pp.17-24 (2011).
  - 30) 鈴木秀和, 土橋常登, 菊地伸一, 河原崎政行: 薬剤処理木材の防火性能(その2) 模型箱試験による中規模での評価, 日本建築学会大会学術講演梗概集(関東), 防火, 2013, pp.137-138 (2011).
  - 31) LeVan, S.L. and Holmes, C.A.: Effectiveness of Fire-retardant Treatments for Shingles After 10 Years of Outdoor Weathering, Research paper FPL474, United States Department of Agriculture Forest Products Laboratory, Madison, 1-15 (1986).

- 32) ASTM E108-83: Standard method of fire tests of roof coverings. The American Society Testing and Materials (1984).
- 33) Östman, B., Tsantaridis, L. : Durability of the reaction to fire performance for fire retardant treated (FRT) wood products in exterior applications - a ten years report, 2nd International Seminar for Fire-Safety of Facades, Lund (Sweden), 2016.
- 34) Nordtest method NT FIRE 053. Accelerated weathering of fire-retardant treated wood for fire testing. 2003.
- 35) 石原茂久：屋外に 1, 2, 3, 7 および 15 年暴露した難燃合板の耐久性, 材料, 43(486), 297-303 (1994).
- 36) Harada, T., Matsunaga, H., Kataoka, Y., Kiguchi, M. and Matsumura, J. : Weatherability and combustibility of fire-retardant-impregnated wood after accelerated weathering tests, Journal of Wood Sciences, 55(5), 359-366 (2009).
- 37) 原田寿郎, 片岡厚, 松永浩史, 上川大輔, 亀岡祐史, 木口実：屋外暴露後の難燃処理塗装木材の耐候性と防火性能, 木材保存, 39(1), 16-23 (2013).
- 38) JIS A1310: 建築ファサードの燃えひろがり試験方法. 日本規格協会 (2015).
- 39) ISO13785-1: Reaction-to-fire tests for façades Part1: Intermediate-scale test. International Organization for Standardization (2002).
- 40) JIS A1326: 外装用難燃薬剤処理木質材料の促進劣化試験方法. 日本規格協会 (2019)
- 41) 中村美紀, 兼松学, 西尾悠平, 神田友輔, 杉田敏之, 萩原伸治, 清水賢, 吉岡英樹, 野口貴文, 田村政道, 棚池裕, 松本悠実：促進劣化試験後の難燃処理木材ファサードの燃えひろがり評価. 日本建築学会学術講演梗概集, 防火, 2018, pp211-214.
- 42) EN16755: Durability of reaction to fire performance—Classes of fire-retardant treated wood products in interior and exterior end use applications, European committee for standardization (2017)
- 43) ASTM D3201 : Standard method for hygroscopic properties of fire-retardant wood and wood-based products. The American Society Testing and Materials (2013).

## 【第二章】

- 1) 原田寿郎：放射加熱による木材の炭化（第 3 報）燃焼に及ぼす加熱面の種類の影響と発熱速度の予測, 木材学会誌. 43(3), pp.268-179 (1997).
- 2) Toshiro Harada, Saburou Uesugi, Hirotochi Taniuchi: Evaluation of fire-retardant wood treated with poly-phosphatic carbamate using a cone calorimeter. Forest products journal. 53(6), pp.81-85 (2003).
- 3) “防耐火性能試験・評価業務方法書”, (一財)日本建築総合試験所：<https://www.gbrc.or.jp/assets/documents/center/8A-103-01.pdf>. Accessed

November 6, 2020

- 4) Marc Janssens: Rate of heat release of wood products, Fire safety journal. 17, pp.217-238 (1991).
- 5) 高瀬 椋, 上川大輔, 長谷見雄二, 松山賢: 難燃処理木材の板厚方向の薬剤分布が燃焼性状に及ぼす影響, 日本建築学会環境系論文集, 84(762), pp.709-717 (2019).

### 【第三章】

- 1) Jing Pan, Jun Mu, Zhaoxu Wu, Xiaoteng Zhang: Effect of nitrogen-Phosphorus fire retardant blended with  $Mg(OH)_2/Al(OH)_3$  and nano- $SiO_2$  on fire-retardant behavior and hygroscopic of poplar, Fire and Materials, 38, pp.817-826 (2014).
- 2) Don Won Son, Mee Ran Kang, Won Joung Hwang, Hyun Mi Lee, Sang Bum Park: Hygroscopic property, leaching resistance and meal corrosive efficacy of wood treated with fire retardant, J. Korean wood Sci. Technol., 42(2), pp.157-162 (2014).
- 3) 伊藤貴文, 横谷昭, 春日二郎: 吸湿性の低い不燃木材の製造技術, 第40回木材の化学加工研究会シンポジウム講演集, 13-19 (2010).
- 4) 花ヶ崎裕洋, 石井利典, 川元満夫: 第63回日本木材学会大会要旨集, N28-P-PM17 (2013)
- 5) Toshiro Harada, Yasushi Nakashima, Yasushi Anazawa: The effect of ceramic coating of fire-retardant wood on combustibility and weatherability, J. Wood Sci., 53. pp.249-254 (2007)
- 6) EN16755: Durability of reaction to fire performance—Classes of fire-retardant treated wood products in interior and exterior end use applications. European committee for standardization (2017)
- 7) ASTM D3201: Standard method for hygroscopic properties of fire-retardant wood and wood-based products. The American Society Testing and Materials (2013)
- 8) 菊地伸一, 前田恵史: 木材の発熱速度に及ぼす難燃剤の効果, 木材学会誌, 53(5), pp.276-282 (2007).
- 9) 河原崎政行, 菊地伸一: 木材の発熱性に対するリン系とホウ素系の混合薬剤の抑制効果, 木材学会誌, 60(5), pp.269-277 (2014).
- 10) JIS A9011: 木質材料の難燃薬剤処理方法. 日本規格協会 (2020)
- 11) 永田靖, 吉田道広: 統計的多重比較法の基礎, サイエンティスト社, 東京, 2015, pp67-70.
- 12) 河原崎政行, 平林靖: 難燃処理木材における白華の発生要因の検討, 木材保存, 40(1), pp.17-24 (2014).
- 13) 平林靖, 佐藤光秋, 梅原勝雄, 井村純夫, 中野隆人: ふっ素樹脂塗料で塗装した木材の塗膜の性能. 第42回日本木材学会大会研究発表要旨集, 名古屋, 1992,

p. 271.

- 14) “防耐火性能試験・評価業務方法書”，（一財）日本建築総合試験所：  
<https://www.gbrc.or.jp/assets/documents/center/8A-103-01.pdf>. Accessed November 6, 2020

#### 【第四章】

- 1) 河原崎政行，菊地伸一，田坂茂樹，土橋常登，鈴木秀和：長尺の薬剤処理木材における材内の薬剤分布と模型箱試験による防火性能の評価，林産試験場報，第541号，pp.17-24（2011）.
- 2) 藤田和彦，小城隆嗣，原田浩司，谷川信江，土橋常登，金城仁，常世田昌寿，上川大輔，平井倫之，長谷見雄二：節を有するスギ板材の難燃化と準不燃材料の研究，日本建築学会大会学術講演梗概集（関東），pp.181-184（2011）.
- 3) 亀岡祐史，宋昌錫，李元羽，藤田和彦，土橋常登，安井昇，鈴木淳一，腰原幹雄：準不燃性能を持つ内装用単板積層材（LVL）の開発 その3 製品難燃処理による検討，日本建築学会大会学術講演梗概集（北海道），防火，2013，pp.137-138.
- 4) 渥美清隆，田中孝，山田雅章：実大材スギに含まれた各種難燃薬剤の乾燥過程におけるX線観察，第66回日本木材学会大会研究発表要旨集，N28-P-18（2016）.
- 5) 上川大輔，原田寿郎：難燃薬剤処理木材中のムラの発生要因に関する研究，第66回日本木材学会大会研究発表要旨集，N28-P-20（2016）.
- 6) “防耐火性能試験・評価業務方法書”，（一財）日本建築総合試験所：  
<https://www.gbrc.or.jp/assets/documents/center/8A-103-01.pdf>. Accessed November 6, 2020.
- 7) 田坂茂樹，田中義昭，土橋常登，菅原信一：建築用内外装材料の防火性能評価に関する研究，日本建築学会大会学術講演梗概集（九州），pp.5-6（2007）.
- 8) 鈴木秀和，土橋常登，菊地伸一，河原崎政行：薬剤処理木材の防火性能（その2）模型箱試験による中規模での評価，日本建築学会大会学術講演梗概集（関東），防火，pp.137-138（2011）.
- 9) 成瀬友宏，野秋政希：火災現象と火災性状．“火災便覧第4版”，日本火災学会編，共立出版，東京，2018，pp.154-165.
- 10) 菊地伸一：第4章 木質壁面上の火炎伝播性評価，“火災初期の成長過程に対応した木材の燃焼特性および難燃処理の効果に関する研究”，博士学位論文，2007，pp.64-70.
- 11) ISO 5658-2：“Reaction to fire tests - Spread of flame - Part 2: Lateral spread on building and transport products in vertical configuration”．2006.

#### 【第五章】

- 1) LeVan, S.L. and Holmes, C.A. : Effectiveness of Fire-retardant Treatments for Shingles After 10 Years of Outdoor Weathering, Research paper FPL474, United States Department of Agriculture Forest Products Laboratory,

- Madison, 1-15 (1986).
- 2) Östman, B., Tsantaridis, L. : Durability of the reaction to fire performance for fire retardant treated (FRT) wood products in exterior applications - a ten years report, 2nd International Seminar for Fire-Safety of Facades, Lund (Sweden), 2016.
  - 3) Harada, T., Matsunaga, H., Kataoka, Y., Kiguchi, M. and Matsumura, J. : Weatherability and combustibility of fire-retardant-impregnated wood after accelerated weathering tests. Journal of Wood Sciences, 55(5), 359-366 (2009).
  - 4) 原田寿郎, 片岡厚, 松永浩史, 上川大輔, 亀岡祐史, 木口実 : 屋外暴露後の難燃処理塗装木材の耐候性と防火性能. 木材保存, 39(1), 16-23 (2013).
  - 5) 横田祐司, 高本修一, 吉岡秀樹 : 韓国議政府市の外断熱マンション火災に係る現地調査報告, 火災, 65(5), pp.19-24 (2015).
  - 6) 吉岡英樹 : 材料分野の視点から, “2019年度日本建築学会大会(北陸)防火部門研究協議会資料 防火基準のモデルコードを作りたい”, 建築学会防火委員会, 昌文社, 東京, 2019, pp.10-17.
  - 7) JIS A1310: 建築ファサードの燃え広がり試験方法. 日本規格協会 (2015)
  - 8) 中村美紀, 兼松学, 西尾悠平, 神田友輔, 杉田敏之, 萩原伸治, 清水賢, 吉岡英樹, 野口貴文, 田村政道, 棚池裕, 松本悠実 : 促進劣化試験後の難燃処理木材ファサードの燃えひろがり評価. 日本建築学会学術講演梗概集, 防火, 2018, pp211-214.
  - 9) 平林靖, 佐藤光秋, 梅原勝雄, 井村純夫, 中野隆人 : ふっ素樹脂塗料で塗装した木材の塗膜の性能. 第42回日本木材学会大会研究発表要旨集, 名古屋, 1992, p. 271.
  - 10) 越井木材工業(株) NM-1031, “新耐火防火構造・材料便覧 認定品目搭載 DVD for Windows”, 新日本法規, 2014.
  - 11) JIS A5601-1-2: 塗料の成分試験方法-第1部: 通則-第2節: 加熱残分. 日本規格協会 (2015).
  - 12) “防耐火性能試験・評価業務方法書”, (一財)日本建築総合試験所: <https://www.gbrc.or.jp/assets/documents/center/8A-103-01.pdf>. Accessed November 6, 2020.
  - 13) 永田靖, 吉田道広 : 統計的多重比較法の基礎, サイエンティスト社, 東京, 2015, pp. 67-70
  - 14) JIS K5600-7-7 : 塗料一般試験方法-第7部: 塗膜の長期耐久性-第7節: 促進耐候性及び促進耐光性(キセノンランプ法). 日本規格協会 (2015)
  - 15) 青木重信 : Rによる統計解析, オーム社, 東京 2009, pp.167-174.
  - 16) 河原崎政行, 平館亮一, 平林靖, 菊地伸一, 大宮喜文, 李在永, 野秋政希, 中村昇, 薬剤処理防火木材の燃焼抑制作用の経年劣化(第1報)屋外暴露60ヶ月における薬剤の種類と塗装の影響: 木材学会誌, 64(3), pp.105-114(2018).
  - 17) 河原崎政行, 平館亮一, 平林靖, 菊地伸一, 大宮喜文, 李在永, 野秋政希, 中村

昇, 薬剤処理防火木材の燃焼抑制作用の経年劣化 (第 2 報) 水溶性薬剤を用いた薬剤処理木材の屋外における劣化挙動: 木材学会誌, 66(1), pp. 31-38(2020).

## 謝 辞

本論文の作成にあたり, 終始懇切なるご指導と激励を賜った秋田県立大学木材高度加工研究所 中村昇教授に心より感謝の意を表します。

本研究は, 地方独立行政法人北海道立総合研究機構森林研究本部林産試験場で行った研究成果をとりまとめたものです。林産試験場では, 防火分野の研究を一步から教えて頂きました, 一般社団法人北海道林産技術普及協会の菊地伸一事務局長には心より感謝いたします。また, 長年にわたる温かいご支援を頂いた, 森林研究本部の八坂通泰本部長, 林産試験場の鈴木道和場長, 平間昭光性能部長, 関一人研究主幹, 実験の実施に多大なる協力を頂いた平林靖専門研究員, 平舘亮一主任主査, 更に試験体の作成にご協力頂いた佐藤義明氏, 佐久間澄夫氏, 小川尚久氏を始めとする職員の皆様に深く感謝いたします。

また, 本研究にご協力頂いた, 日本木材防腐工業組合の関澤外喜夫様, 越井木材工業株式会社技術開発室の山口秋生様, 清水賢様, 株式会社ハルキの鈴木正樹様, 竹内謙太様には深く感謝いたします。