－研究（Original Article）－

難燃処理木材の白華発生による燃焼抑制作用の変化

河原﨑　政行，関　一人*1，平林　靖*2

The effect of efflorescence on the fire performance of fire-retardant-treated wood

Masayuki KAWARASAKI, Kazuto SEKI, Yasushi HIRABAYASHI

To understand the fire performance of fire-retardant-treated wood (FRT wood) with efflorescence, chemical retention was calculated, and a cone calorimeter test was performed on the FRT wood with artificially generated efflorescence. As a fire retardant, diammonium hydrogen phosphate was applied to wood board specimens with thicknesses of 12 mm and 18 mm. And the chemical retention was set to two levels: 130kg/m^3 and 225 kg/m^3. Based on the calculation result of chemical retention, efflorescence caused a chemical retention decrease in FRT wood with a chemical retention of approximately 225kg/m^3. In FRT wood with chemical retention of approximately 225kg/m^3, there was no difference in the chemical retention decrease caused by efflorescence between the thicknesses of 12 mm and 18 mm. The cone calorimeter test revealed that there was no effect on the combustion properties of the efflorescence in all FRT wood specimens. From these results, it was assumed that efflorescence causes leaching of the fire retardant in FRT wood with chemical retention of approximately 225kg/m^3, but does not significantly reduce fire performance.

Keywords: *Fire-retardant treated wood, efflorescence, fire performance, Cone Calorimeter, chemical retention*
難燃処理木材，白華，防火性能，コーンカロリーメーター，薬剤固形分量

白華が発生した難燃処理木材の燃焼抑制作用を把握するため，人工的に白華を発生させる操作を行った処理木材について残存薬剤固形分量の算出及び発熱性試験を行い，操作前との比較を行った。試験体は，厚さを12mmと18mmの2水準とし，難燃処理は難燃剤にリン酸水素二アンモニウムを用いて薬剤固形分量を130kg/m^{3}前後と225kg/m^{3}前後の2水準とした。残存薬剤固形分量の算出結果から，白華発生操作は，薬剤固形分量225kg/m^{3}前後の処理木材において薬剤固形分量の減少を生じさせた。また，白華発生後の難燃処理木材の薬剤固形分量の減少量は，厚さ12mmと18mm間に差違が無かった。発熱性試験の結果では，薬剤固形分量の減少が生じた処理木材を含めて，全ての処理木材に白華発生操作による燃焼性状への影響が認められなかった。これらの結果から，白華の発生は，225kg/m^{3}前後の薬剤固形分量の難燃処理木材においては難燃剤の溶脱を生じさせるが，防火性能を急激に低下させる可能性は少ないと推測された。

1．はじめに

難燃処理木材は，難燃剤を注入処理することで木材の燃焼を抑制した材料であり，建築物の内装において法令により防火上の制限が適用される部分を木質化する際に使用されてきた。平成22年に公共建築物等木材利用促進法が施行されて以降，公共施設や駅舎等の比較的規模の大きな建築物の内装に難燃処理木材が使用される事例が増えた。同法律は令和3年10月の改正により，対象が「公共建築物」から民間の建築物を含む「建築物一般」に拡大されたことから，今後難燃処理木材の使用機会が更に増えていくことが予想される。

一方，難燃処理木材は，施工後において材内から溶出した難燃剤が表面で固まる現象（以下，白華とする）が発生し，美観が損なわれることが問題になっている。（公財）日本住宅・木材技術センターの報告書[1)]では，難燃処理木材が内装に施工された18棟の建築物の68の場所を調査した結果，78%の場所で白華の発生が確認されたことを示している。

難燃処理木材の白華発生要因については，筆者らの既報[2)]において，難燃剤の種類が影響すること，薬剤固形分量が高いほど，雰囲気湿度が高いほど発生の可能性が高まることを示した。難燃処理木材の白華の抑制については，これまで難燃剤の改良や塗装による方法が試みられており，有用な結果が得られている[3-7)]。筆者らは，準不燃材料の性能を有する難燃処理木材は，吸湿性の低いリン酸グアニジン系難燃剤を用い，造膜系の溶剤系ウレタン樹脂塗料を表面に塗布することにより，湿度90%RHにおいても白華を抑制できる可能性を示した[8)]。

以上のように，難燃処理木材の白華防止に係る技術的知見は徐々に蓄積されてきている。一方，白華の発生後の難燃処理木材について，補修方法を技術的に検討された報告はほぼ無い。難燃処理木材は，前述のように今後使用量増加が予想されることから，白華発生後の補修が必要とされる機会が増えていくと考える。このことから，今後において難燃処理木材の補修技術の開発に対する要望は高まると予想される。

難燃処理木材は，法令で防火上の制限が適用される内装に使用されるため，補修後においても法定の基準性能を維持することが必要である。そのため，補修技術の開発には難燃処理木材について白華発生による燃焼抑制作用の変化を把握する必要がある。そこで本研究では，人工的に白華を生じさせた難燃処理木材について，残存薬剤固形分量の算出及び燃焼試験により燃焼抑制作用の変化を考察した。なお本研究の一部は，2018年度日本建築学会大会[9)]で発表した。

2. 試験体

2.1 供試材料

試験体に用いた板材は，樹種をスギ(Cryptomeria japonica)とし，心材を用いた。板材の寸法は，長さ200×幅105mmとし，厚さを12，18mmの2種類とした。それらの板材は，長さ1800mmの長尺の板材から節等の欠点および辺材部を避けて採取した。採取した板材は，寸法，質量および全乾法により求めたサンプルの含水率から全乾密度を算出し，242～311kg/m^{3}の範囲を試験体に使用した。

難燃剤はリン酸水素二アンモニウム（米山化学工業(株)製）を用いた。難燃剤は粉末の状態であり，水道水に溶解させて，厚さ12mmの板材では濃度29%，厚さ18mmの板材では17%及び29%に調整して注入処理に使用した。

2.2 難燃剤の注入処理

注入処理前の板材は，強制循環式恒温乾燥器を用いて60℃で72時間乾燥した後，デシケータ内で常温まで冷却した。乾燥後の板材は，質量を測定した。

注入処理は減圧加圧注入処理装置を用いて行った。減圧加圧条件は，減圧を−0.09MPa（ゲージ圧）で30分，加圧を1.17MPa（ゲージ圧）で2時間とした。注入処理後の板材は，　室内に30分間立てかけた後，表面の水溶液を拭き取り質量を測定した。その後，処理板材は室内で3日間以上風乾させた後，40℃に設定した強制循環式恒温乾燥器を用いて含水率10%前後まで乾燥させた。

各処理板材は，式（1）を用いて薬剤固形分量Lを算出し，厚さ12mmでは250～270kg/m^3，厚さ18mmでは130～150kg/m^3（薬液濃度17%）と 250～270kg/m^3（薬液濃度29%）の範囲を試験体用に選定した。試験体は厚さごとに，薬剤固形分量Lがほぼ同じになる3枚を1組として2組作成して，一方の組を白華発生操作用試験体とし，他方を比較対象用試験体とした。試験体の概要を**第1表**に示す。

$$\text{薬剤固形分量L（kg/m}^3\text{）} = \frac{(M_2 - M_1) \times \dfrac{C}{100}}{V_1} \quad (1)$$

M_1：注入処理前の板材の質量（kg）
M_2：注入処理後の板材の質量（kg）
C：難燃剤水溶液濃度（%）
V_1：処理前の板材の体積（m^3）

3. 試験方法

3.1 白華発生操作

操作前の試験体は，温度23℃・湿度50%RHに設定した恒温恒湿装置内で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，両木口を2液性のエポキシ樹脂（神東塗料(株)製 ネオゴーセー#6000）でシールした。シールの際

第1表　試験体の概要
Table1. Specifications of specimens.

試験体 Specimen			処理前の全乾密度 Dry density before treatment (kg/m³)	薬剤固形分量L[a] chemical retention L[a] (kg/m³)	寸法 Demension (mm) 長さ length	幅 width	厚さ thickness	質量 Mass (g)	密度 Density (kg/m³)	木口シールの質量 mass of seals (g)
比較対象 control	PM18	N1	290	142	200.8	105.5	18.2	180.3	467	−
		N2	250	146	200.8	105.3	18.2	164.6	428	−
		N3	290	146	200.8	106.3	18.4	181.8	464	−
		平均 average	277	145	201	106	18	175.6	453	−
白華発生操作 efflorescence operation		L1	304	146	200.8	106.3	18.2	188.4	484	4.6
		L2	304	149	200.7	107.6	18.3	190.2	482	4.2
		L3	301	144	200.8	106.3	18.2	186.4	479	3.9
		平均 average	303	146	201	107	18	188.3	482	4.2
比較対象 control	PH12	N1	297	264	200.9	105.1	12.3	153.2	590	−
		N2	243	255	201.0	105.6	12.3	133.5	513	−
		N3	287	265	201.1	105.3	12.3	150.4	579	−
		平均 average	276	261	201	105	12	145.7	560	−
白華発生操作 efflorescence operation		L1	297	267	200.9	106.1	12.3	153.6	585	2.0
		L2	287	261	200.9	106.0	12.2	148.7	572	2.0
		L3	304	260	201.1	106.5	12.2	153.6	586	2.5
		平均 average	296	263	201	106	12	152.0	581	2.2
比較対象 control	PH18	N1	308	265	200.7	105.7	18.3	234.6	606	−
		N2	303	255	200.8	106.1	18.2	227.7	587	−
		N3	301	264	201.0	105.7	18.4	230.1	588	−
		平均 average	304	261	201	106	18	230.8	594	−
白華発生操作 efflorescence operation		L1	304	268	201.0	105.8	18.1	233.6	606	3.0
		L2	301	260	200.6	106.6	18.3	229.1	587	3.3
		L3	309	259	200.8	106.1	18.3	232.3	596	3.1
		平均 average	304	263	201	106	18	231.7	596	3.1

a）式（1）により算出

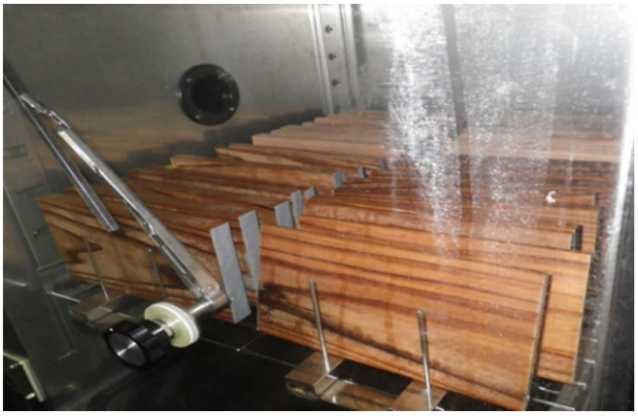
には，試験体の質量を測定し，塗布前後の質量差からシールの質量を算出した。

操作は，高湿度雰囲気下への3週間の放置とした。放置する雰囲気は，難燃処理木材に関する欧州規格EN16755[10]及びアメリカの規格ASTM D3201[11]における白華発生に関する評価試験を参考に温度30℃・湿度90%RHとした。試験体は，高湿度雰囲気に調整した恒温恒湿装置（エスペック(株)，CSH-220）内に，ステンレス製のスタンドにほぼ垂直に立てかけて静置させた（**第1図**）。暴露操作が終了した試験体は，強制循環式恒温乾燥器（タバイエスペック(株)，HPP-200）を用いて60℃で72時間乾燥させた。

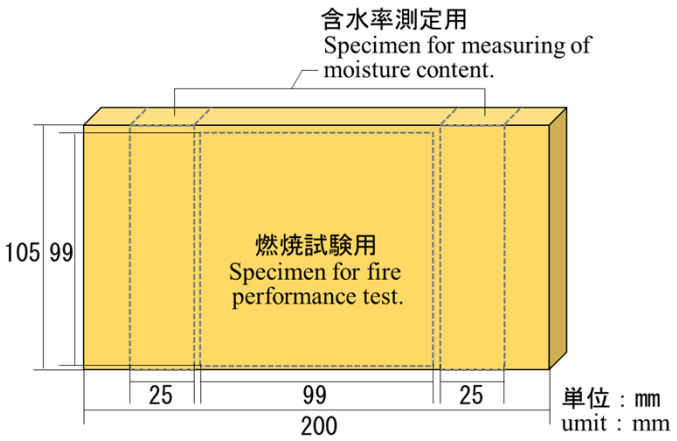
暴露中の試験体は，最初の10日間は24時間間隔で，試験体の表面状態の観察および質量の測定をした。暴露10日目以降は，試験体の変化が少なくなったため，間隔を開けて17日目から試験体の観察および質量測定を行った。また，72時間の乾燥を行った試験体についても，同様に表面状態の観察および質量測定を行った。

3.2　残存薬剤固形分量の算出

白華発生操作後の試験体及び比較対象用試験体は，温度23℃・湿度50%RHに調整した恒温恒湿装置内で，24時間の質量変化率が0.1%以下になるまで養



第1図　高湿度雰囲気放置中の試験体
Fig.1. Specimens exposed to high humidity condition.



第2図　試験体の採取
Fig.2. Diagram for collecting of specimens.

残存薬剤固形分量（kg/m³）$= Ds_0 - Dw_0$　(2)

$$Ds_0 = \frac{Ms_0}{Vw_1}$$

$$Ms_0 = \frac{(Ms_1 - Mseal)}{\left(1 + \frac{MC}{100}\right)}$$

Ds_0：試験体の全乾密度（kg/m³）
Dw_0：注入処理前の板材の全乾密度（kg/m³）
Ms_0：試験体の全乾密度（kg/m³）
Vw_1：注入処理前の板材の体積（kg/m³）
Ms_1：養生後の試験体の質量（kg/m³）
$Mseal$：両木口のシールの質量（kg）
MC：養生後の試験体の含水率（%）

生した。養生後の試験体は，**第2図**に示すように含水率測定用と燃焼試験用の試験体を採取した。含水率測定用試験体は，全乾法により全乾質量を求め，2体の乾燥前の合計質量と全乾質量の合計を基に含水率を算出した。そして，式（2）を用いて，試験体の全乾密度および試験体に用いた板材の全乾密度から試験体の残存薬剤固形分量を算出した。

3.3　燃焼試験

3.2で採取した燃焼試験用試験体は，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後，燃焼試験に供した。試験は，指定性能評価機関の試験方法評価業務方法書[12)]に規定される発熱性試験とした。

装置は，コーンカロリー計試験装置（Fire Testing Technology Ltd. ,UK）を用いた。試験体への加熱条件は，強度を50kW/m²とし，時間を不燃材料の評価時間である20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。

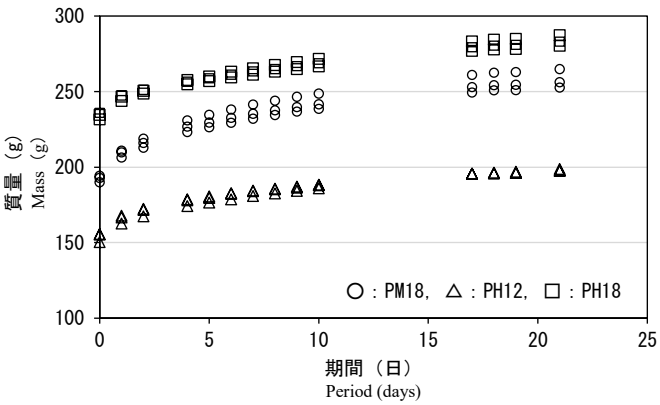
加熱中は，リングサンプラーから採取した排気ガスを分析装置に送り酸素，二酸化炭素及び一酸化炭素の濃度を測定するとともに，ダクト内の排気ガスの温度及び差圧の測定を1秒間隔で行い，業務方法書に基づき発熱速度を算出した。そして，発熱速度の推移から最高発熱速度と20分間の総発熱量を算出した。

4.　結果と考察

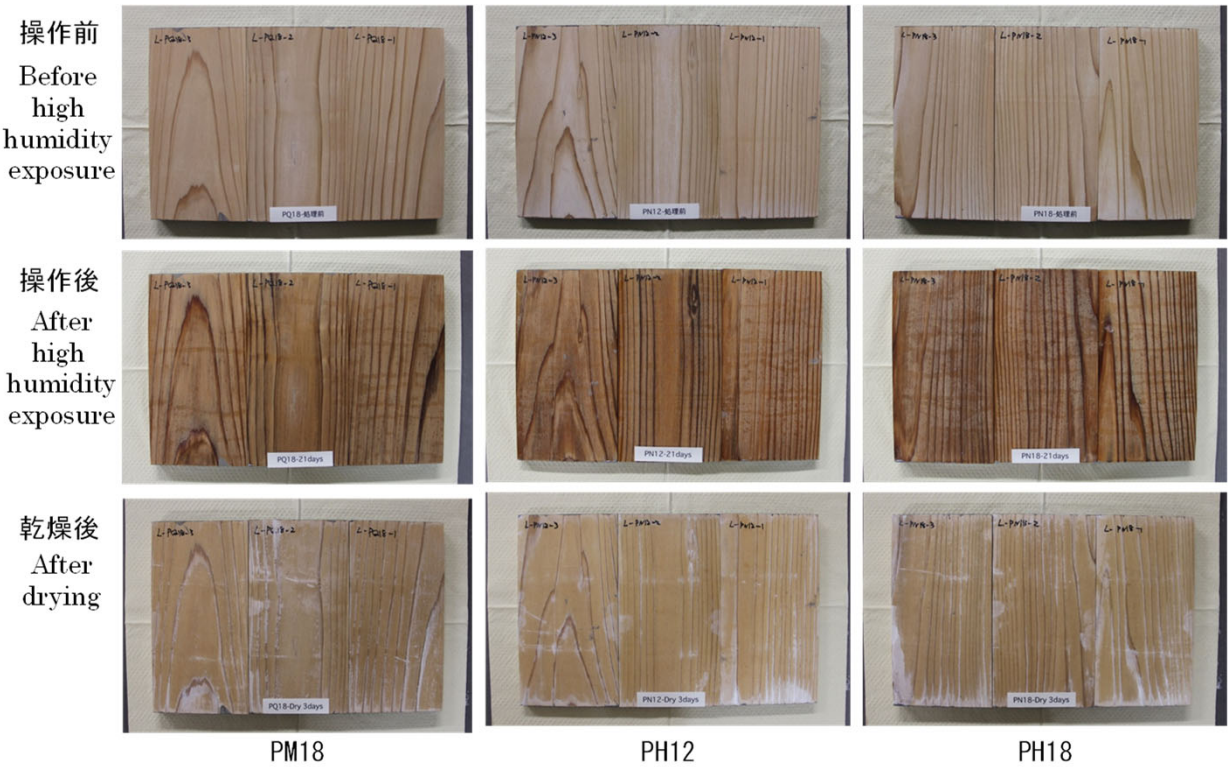
4.1　白華発生操作における試験体の状態

白華発生操作中の試験体の質量変化を**第3図**に示す。全ての試験体の質量は，暴露初期に大きく増加し，その後徐々に増加の割合が小さくなった。同じ厚さで薬剤固形分量が異なるPM18とPH18を比較すると，薬剤固形分量の少ないPM18の質量増加が大きかった。既往の報告[2)]では，温度30℃・湿度90%RHの雰囲気下おける難燃処理木材の吸湿量は，薬剤固形分量との間に正の比例関係が示されており，上記の状態はこれとは異なっていた。この原因として，本試験では暴露期間が既報の報告よりも短いため，PH18が平衡状態まで吸湿が進んでいないことが考えられた。

白華発生操作前後及び72時間乾燥後の試験体の表面状態を**第4図**に示す。全ての試験体は，操作中に水滴，乾燥後に白華が発生した。また，水滴の発生は，PM18では放置後4～5日目，PH12及びPH18では放置後2～4日目に最も多く，その後はしだいに少なくなった。



第3図　試験体の質量変化
Fig.3. Changing of specimen's mass.



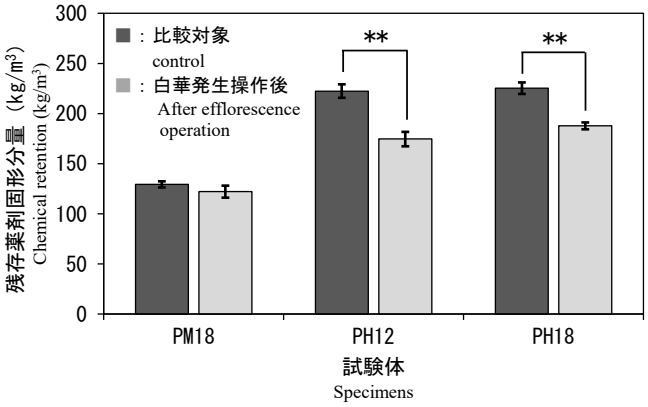
第4図　試験体の表面状態
Fig.4. Appearance of specimen's surface.

4.2　残存薬剤固形分量

試験体の残存薬剤固形分量を**第5図**に示す。各試験体間の残存薬剤固形分量の差異は，Tukey-Kramerの方法による多重比較[13)]を行い，結果を図中に併記する。残存薬剤固形分量は，操作後においてPH12とPH18に減少が見られた。また，同一薬剤固形分量で厚さの異なるPH12とPH18については，操作後における薬剤固形分量に差違は見られなかった。PH12とPH18の操作による薬剤固形分量の減少量は，平均値で47kg/m^{3}と37kg/m^{3}であり，当初の薬剤固形分量の21%と16%であった。これらの結果から，難燃処理木材の白華発生による難燃剤の溶脱は，比較対象用試験体の残存薬剤固形分量の最低値である215kg/m^{3}以上で生じる可能性が高く，溶脱量には厚さ12mmと18mm間で差異が無いことが分かった。

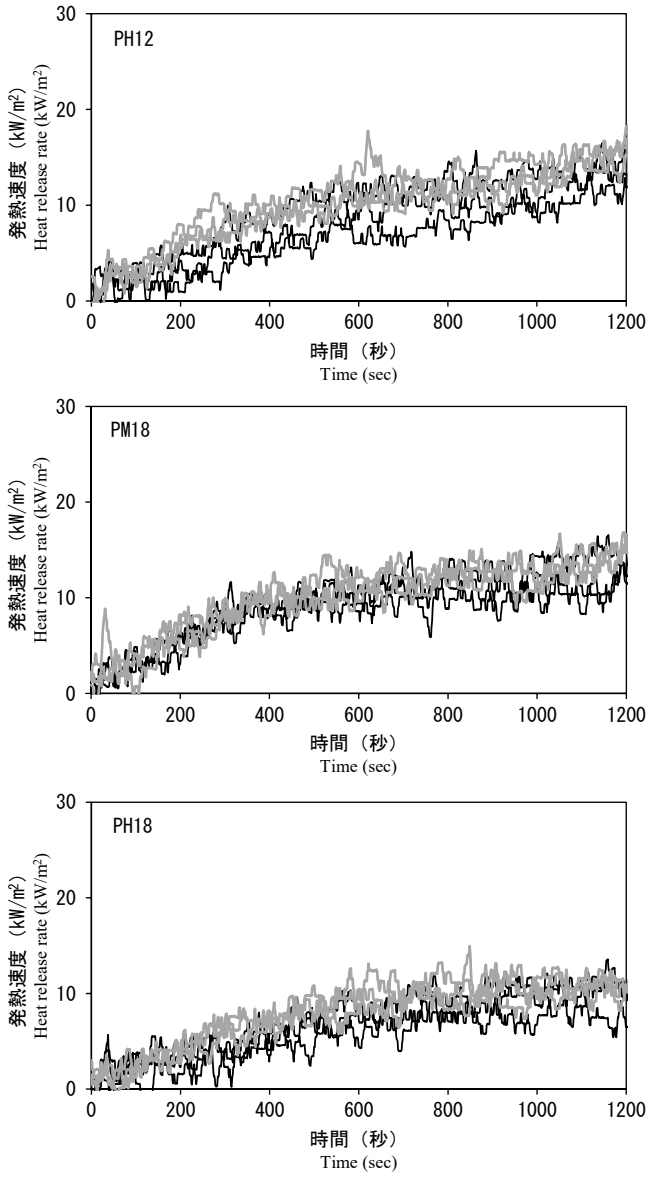
4.3　燃焼試験

各試験体の発熱速度の推移を**第6図**に示す。全ての試験体は，比較対象及び操作後においても加熱中に有炎燃焼を生じることは無かった。全ての試験体の発熱速度は，20kw/m^{2}未満の低い値で加熱終了時まで推移した。比較対象と操作後の試験体間については，発熱速度の推移において部分的及び全体としても明らかな差違が見られなかった。



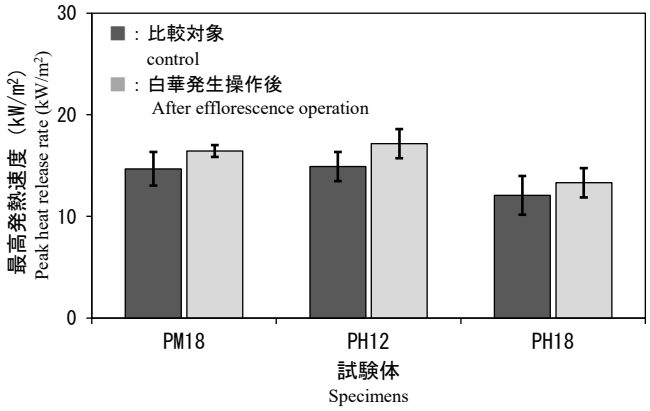
第5図　残存薬剤固形分量の変化
Fig.5. Changing of chemical retention.

値：平均値，n=3，エラーバー：標準偏差，多重比較（Tukey-Kramerの方法）の結果：＊　5%水準において有意差あり，＊＊　1%水準において有意差あり
Value: average, error bar: standard deviation, n=3, Significant difference used multiple comparison procedure of Tukey-Kramer, *: significant at 5% level, **: significant at 1% level.



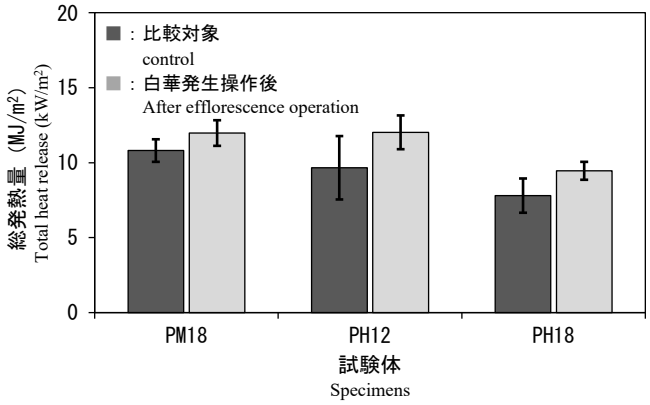
第6図　発熱速度の変化
Fig.6. Changing of heat release rate.

——— ：比較対象，control　——— ：白華発生操作後 After efflorescence operation



第7図　最高発熱速度の変化
Fig.7. Changing of peak heat release rate.

値：平均値，n=3，エラーバー：標準偏差，多重比較（Tukey-Kramerの方法）の結果：＊　5%水準において有意差あり，＊＊　1%水準において有意差あり
Value: average, error bar: standard deviation, n=3, Significant difference used multiple comparison procedure of Tukey-Kramer, *: significant at 5% level, **: significant at 1% level.



第8図　総発熱量の変化
Fig.8. Changing of total heat release.

値：平均値，n=3，エラーバー：標準偏差，多重比較（Tukey-Kramerの方法）の結果：＊　5%水準において有意差あり，＊＊　1%水準において有意差あり
Value: average, error bar: standard deviation, n=3, Significant difference used multiple comparison procedure of Tukey-Kramer, *: significant at 5% level, **: significant at 1% level.

各試験体の最高発熱量を第7図に，総発熱量を第8図に示す。総発熱量と最高発熱速度についてTukey-Kramerの方法による多重比較[13)]を行った結果，比較対象と操作後間において有意差が認められなかった。また，同水準の薬剤固形分量であり，厚さの異なるPH12とPH18間についても有意差は見られなかった。

前項では，PH12とPH18は，白華発生操作により残存薬剤固形分量の減少が認められたが，燃焼性状ではそれらの影響が表れなかった。既往の報告[3)]では，難燃処理木材の最高発熱速度及び総発熱量は，薬剤固形分量との間に指数関数的な関係が得られている。つまり，最高発熱速度及び総発熱量は，薬剤固形分量が多くなるに従い低下するが，その低下の割合は薬剤固形分量が多いほど小さくなる。このことから，PH12及びPH18は，当初の薬剤固形分量が215～230kg/m³と多いため，50kg/m³未満の薬剤固形分量の減少では最高発熱速度及び総発熱量に影響が現れにくかったと推察される。

5．まとめ

難燃処理木材について白華発生による燃焼抑制作用の変化に関する知見を得るため，厚さ及び薬剤固形分量を変えた難燃処理木材について人工的に白華を発生させた後，残存薬剤固形分量の算出及び発熱性試験を行った。

その結果，厚さ12～18mmの難燃処理木材は，薬剤固形分量215kg/m^{3}以上では白華の発生により薬剤固形分量が減少する可能性があるが，燃焼抑制作用を早急に低下させるまでには至らないと考えられた。

これらのことから施工後の難燃処理木材は，白華が発生したとしても，法定の基準の防火性能を早急に失うことは無いと推測された。ただし，実際に内装に施工された難燃処理木材は，数年にわたって白華の発生が繰り返される場合があり，その場合では本結果と異なる可能性がある。

今後においては，本研究で得られた成果を踏まえて，難燃処理木材の施工後の燃焼抑制作用の評価手法や防火上の基準性能を担保した再塗装方法等の開発を進め，メンテナンス技術の確立を目指したい。

【本研究は平成29年度林野庁委託事業　都市の木質化等に向けた新たな製品・技術の開発・普及委託事業（木質耐火部材開発）において行われた。】

文　献

1) （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）.

2) 河原﨑政行，平林靖：木材保存，40(1)，17-24（2014）.

3) Jing Pan, Jun Mu, Zhaoxu Wu, Xiaoteng Zhang ： Fire and Materials，38，817-826（2014）.

4) Don Won Son, Mee Ran Kang, Won Joung Hwang, Hyun Mi Lee, Sang Bum Park : J. Korean wood Sci. Technol.，42(2)，157-162（2014）.

5) Toshiro Harada, Yasushi Nakashima, Yasushi Anazawa：J. Wood Sci，53，249-254（2007）.

6) 伊藤貴文，横谷昭，春日二郎：第40回木材の化学加工研究会シンポジウム講演集，東京都，pp.13-19（2010）.

7) 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，盛岡市，N28-P-PM17（2013）.

8) 河原﨑政行：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，博士学位論文，秋田県立大学（2021）.

9) 河原﨑政行：日本建築学会大会学術講演梗概集（東北），仙台市，pp.381-382（2018）.

10) 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）.

11) ASTM D3201：Standard method for hygroscopic properties of fire-retardant wood and wood-based products.，The American Society Testing and Materials（2013）.

12) （一財）日本建築総合試験所：“防耐火性能試験・評価業務方法書（2000年 6月 1日制定， 2020年 6月 15日変更）”，http://www.gbrc.or.jp/contents/documents/center/8A-103-01.pdf.， 2021年11月5日参照.

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，pp.35-40（2015）.

ー性能部　保存グループー
ー*1：利用部　バイオマスグループー
ー*2：技術部　生産技術グループー

（原稿受理：2021.11.19）