

ホウ酸—ケイ酸ナトリウム処理による難燃化茅葺材を用いた文化財建物の高度維持技法の開発

ホウ酸, ケイ酸ナトリウム, 茅葺屋根, 難燃化

熊谷早織*1, 田村雅紀*2, 後藤治*3, 山本博一*4

1. はじめに

かつて日本の屋根の主流であった茅葺屋根の建築物は年々減少傾向にある。その背景として、屋根に使用する茅材の耐用年数確保が難しいことや火災に弱いなどの物理的要因、定期的な葺き替えに多額の修繕費用がかかるなどの経済的要因、職人の高齢化、後継者不足、生活様式の変化および茅材材料が入手困難なことなどの社会的要因が挙げられる。伝統的木造建築物である茅葺屋根は保存対象となっているが、これらの物理的、経済的、社会的要因のため文化財として指定されていても個人で保存していくには困難な状況である¹⁾。既往の研究によると、珪酸ナトリウム (水ガラス)、ホウ素化合物系およびコロイダルシリカ溶液系による木材を用いた無機質複合体を生成することにより木質材料の難燃性、耐朽性、耐蟻性および硬さの性能を向上させることが明らかとなっている^{4) 5) 6)}。特に、ホウ素化合物で生成した場合、寸法安定性、耐朽性および難燃性などの性能が向上すると報告されている。そして、ホウ素化合物と珪酸ナトリウムを混合するとゲル化し使用材料に固着すると考えられている。以上を参考に、本研究は茅葺屋根材料に使用されるススキの難燃化を試み、無機物である珪酸ナトリウムおよびホウ酸と有機物であるススキを用いて、茅材の作業工程を前提とした難燃性能付与を試みたものである。

2. 研究概要

2.1 使用材料と試験項目

表1に使用材料、表2に研究1および研究2の要因と水準を示す。使用材料として研究1と研究2では同様の場所で採取されたススキを用いる。また、本研究ではホウ酸と珪酸ナトリウムを主に用いて難燃化を試みる。表3に実験項目と方法を示す。研究1では、無機溶液含浸実験を行い質量増加率の測定をする。このとき質量増加分を難燃剤とみなしている。研究2では毛細管力を利用した吸水実験を行い、平均絶乾密度と標準偏差を算出した上で未処理材との密度比較をする。研究3では、研究1および研究2で作製した試験体に対し燃焼実験を行う。その中で、K熱電対を用いて温度変化の測定を行い、同時に燃焼時間の測定をする。その後、初期重量と燃焼後重量を用いて残炭率を算出する。この温度変化と燃焼時間、残炭率から難燃性を評価し処理方法についての考察を行う。

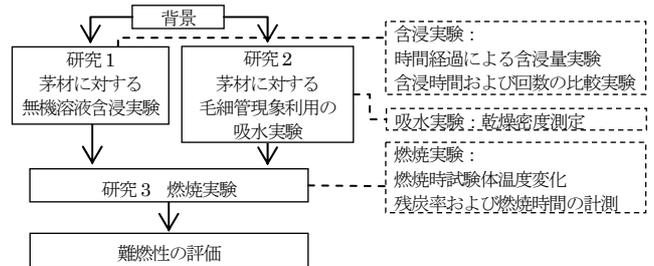


図1 研究の流れ

表1 使用材料

記号	材料	内容
S	ススキ(研究1および研究2)	東京都八王子市採取
B	ホウ酸	H ₃ BO ₃ 20℃飽和水溶液を用いる
N	珪酸ナトリウム溶液	Na ₂ SiO ₃

表2 要因と水準(研究1・研究2)

研究	要因		水準			
	研究1	温度	20℃ 40℃ 60℃	濃度	B×N20 B×N3	時間×回数
研究2	環境	室内(20℃・60%) 室外				
	日数	1日 3日 7日				
	溶液濃度	B×N20	B×N9	B×N3	B50×N20 B50×N9 B25×N20	

表3 試験体条件

グループ	研究1				研究2			
	記号	温度	濃度	時間×回数	記号	濃度	期間	根本からの距離(cm)
AA	Aa60	60℃ (60)	B×N20(A)	3h×4 (a)	Al7d	B×N20 (A)	7日(7d)	0-10(l)
	Ab60			6h×2(b)	Am7d			10-20(m)
	Ac60			12h×1 (c)	Ah7d			20-30(h)
BB	Ad60	60℃ (60)	B×N20(A)	6h×1(d)	Cl7d	B50×N9 (C)	7日(7d)	0-10(l)
	Bd60				B×N3(B)			Cl3d
	Ad40	40℃ (40)	B×N20(A)		Cl1d	1日(1d)	0-10(l)	
	Ad20	20℃ (20)	B×N20(A)		Cm1d		10-20(m)	
	Bd20	B×N3(B)	Ch1d		20-30(h)			
CC	Ae60	60℃ (60)	B×N20(A)	1h×1(e)	備考: AAは最も高い難燃性が見込まれるグループである。また、各研究の記載は高い難燃性が見込まれる順である。			
	Be60				B×N3(B)			
	Ae20	20℃ (20)	B×N20(A)					
	Be20	B×N3(B)						

表4 実験項目と方法

研究	実験項目	方法
研究1	無機溶液含浸実験	手順①:実験を行う前に40℃の乾燥機内で十分に乾燥させる。 手順②:各試験体の水準に従ってB液に浸す。 手順③:手順②と同じ試験体水準に従いN液に浸す。 手順④:40℃の乾燥機内で十分に乾燥させる。 手順⑤:手順②~④を各試験体水準に従い繰り返す。
	質量増加率	式(1)を用いて質量増加率(%)を算出する。 質量増加率 m' (%) 初期質量 m_2 (g) 含浸後質量 m_1 (g) とする。 $m' = m_1 / m_2 \cdot \dots \cdot (1)$
研究2	毛細管現象を利用した吸水実験	手順①:ススキを根本から刈り取る。 手順②:2時間以内にB液に垂直方向、各試験体条件の期間浸ける。 手順③:手順②と同じ期間N液に浸ける。 手順④:40℃の乾燥機内で十分に乾燥させる。
	絶乾密度測定	根本から10cmごとに乾燥密度(g/cm ³)を式(2)より計測する。 乾燥密度 ρ (g/cm ³) 体積 V (cm ³) 最大直径 α (mm) 最少直径 β (mm) 高さ h (mm) 質量 m (g) とする。 $V = 250 \cdot \alpha \cdot h \cdot \pi \cdot \rho = m / V \cdot \dots \cdot (2)$
研究3	試験体温度変化	熱電対を用いて試験体上部および下部の温度変化(℃)を計測する。
	残炭率	式(3)を用い残炭率を算出する。 残炭率 z (%) 燃焼前質量 m_0 (g) 燃焼後質量 m_1 (g) とする。 $z = m_1 / m_0 \cdot \dots \cdot (3)$
	燃焼時間	着火してから鎮火するまでの時間(s)を計測する。

*1 工学院大学建築学学科・学部生 *2 工学院大学建築学部・准教授 *3 工学院大学建築学部教授 *4 東京大学教授

2.2 ススキに対する無機溶液含浸実験(研究1)

2.2.1 時間経過による溶液含浸測定

無機溶液含浸実験を行う前に水を用いて時間経過による含水量計測を行った。測定結果を図2に示す。単位時間当たりの質量増加量を見ると、1~2時間経過時の質量増加量はどの時間帯よりも高い値を示していることがわかる。また、この時間以降はほぼ一定の割合で質量増加していくことがわかる。このことより、より多くの溶液を茅材に含有させるには短時間で複数回溶液に浸けることが有効であると推察される。研究1ではこの処理を行い、質量増加分を難燃剤とみなし含有量を比較する。また、図2は初期重量を100%としたときの質量増加率を示している。

2.2.2 含浸時間および回数の検討による質量増加率の比較

図3に含浸時間および回数の検討による質量増加率の比較を行った結果を示す。図3を見ると12hを1回で浸けたAa60Tよりも2回および4回で浸けたAb60TおよびAc60Tのほうが、はるかに質量増加率が高い値であることがわかる。また、Ab60TとAc60Tは線形で示すとほぼ変わらない線を示すが、Ac60Tのみの点を追うと2回目と3回目の質量増加率は著しく多く、Ab60Tをわずかに上回る増加率を示した。各試験体の12h経過時の質量増加率はAa60Tが1.84%、Ab60Tが4.56%、Ac60Tが5.49%であった。値のみでみても、Ac60TはAa60Tの約2.5倍質量増加していることがわかる。このことより、質量増加率のみでみると短時間複数回での含浸処理は難燃剤をより多く含有させることに非常に効果的であり、著しい増加をさせることができる。

2.3 毛細管現象を利用したススキの吸水実験(研究2)

研究2では、既往の研究²⁾³⁾に従い表4のように作製した試験体の難燃剤含有量を知るために未処理材との密度比較を行う。写真1に試験体作製状況を示す。図4はaが未処理材(S)、bが難燃処理材(C1d)である。C1dは、作製した試験体の中でも特に効果が表れたものである。図4をみると、Sに比べてC1dは根本に近い部分の密度が比較的高い値を示していることがわかる。増加分を難燃剤とみなすならば根本のみ難燃化出来ているということになる。また、難燃剤をより高い位置まで含ませるにはいくつかの要因があるのではないかと推察される。そして、毛細管力により吸い上げられる条件として考えられる要因は、吸水時の溶液に浸かっていた部分の長さ、溶液の濃度および浸かっていた期間である。しかし浸かっていた部分の長さであるが、暴露実験を行っていたため溶液が常に同じ長さ浸かっていたということにはなかった。また、ホウ酸は揮発性を持っているため、特に蒸発しやすい物質であったこともあり、浸かっていた長さは知ることが出来なかった。しかし、濃度と期間についてある傾向が見られた。溶液の濃度は、薄いものほどより高い位置でも密度増加が見られた一方で、特にN液の濃度が高いと毛細管力が働きにくく根本にごく近い部分でも微小の増加しか認められなかった。浸かっていた期間では、長いほど密度は低い傾向にあった。これは、期間が長すぎたため溶脱してしまったことなどが考えられるが今のところ不明である。しかし、材のばらつきが多く必要分の固着を得ることが困難である。

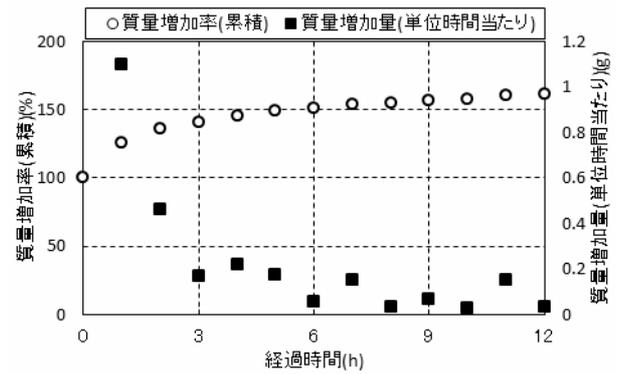


図2 ススキの質量増加率と前回測定からの増加質量

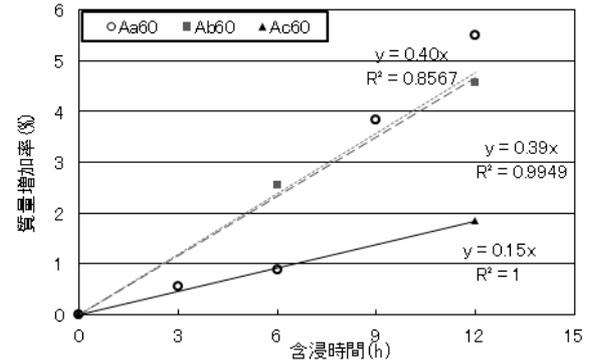


図3 時間および回数検討による質量増加率測定結果



写真1 試験体作製の状況(研究2)

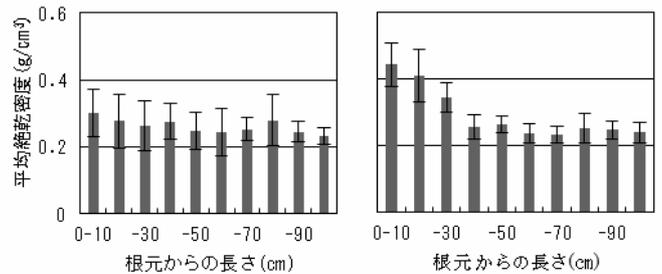


図4 試験体密度分布(研究2)

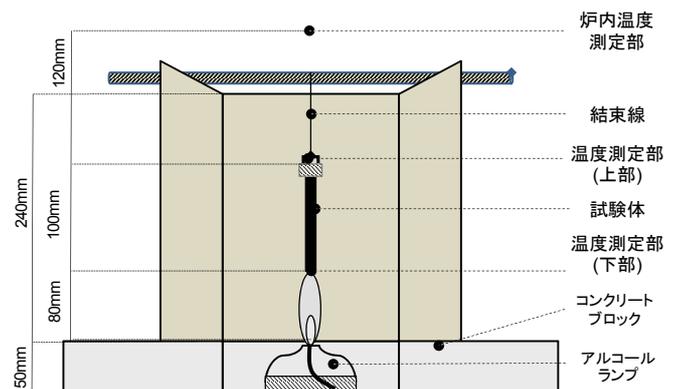


図5 燃焼試験器具(研究3)

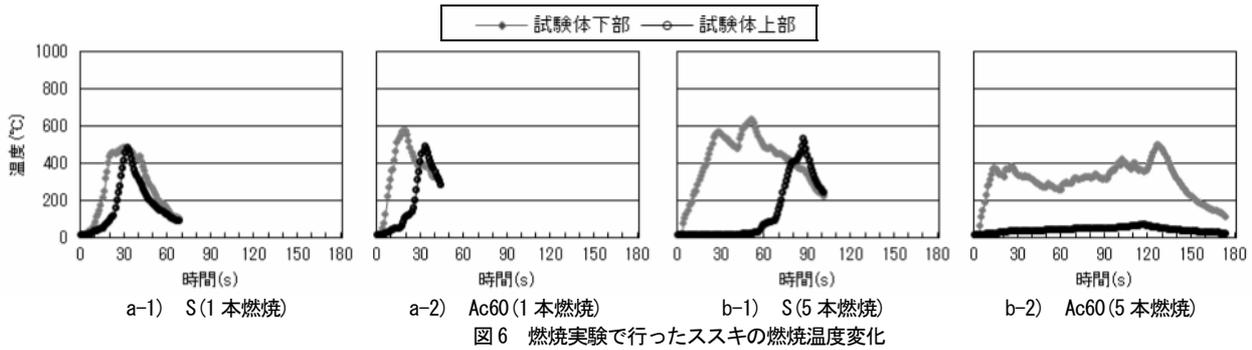
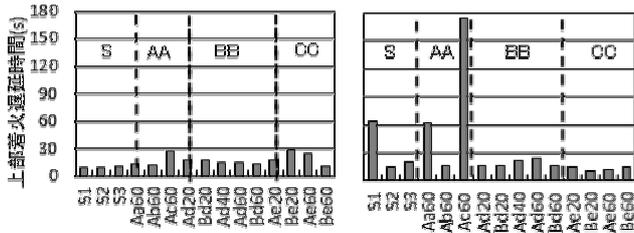


図6 燃焼実験で行ったスキの燃焼温度変化



a) 1本燃焼(研究1) b) 5本燃焼(研究1)
図7 試験体下部着火から上部着火までの遅延時間(a)



a) データロガーおよび熱電対 b) 燃焼実験に用いた試験体



c) 着火状況 d) 燃焼状況



e) 鎮火状況 f) 表面のみ炭化した試験体

写真2 燃焼実験状況

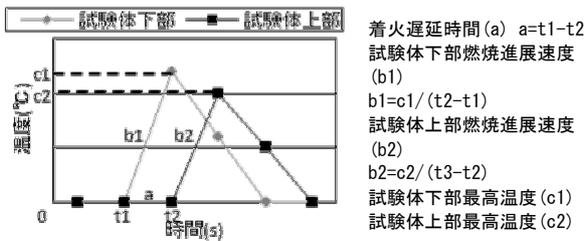


図8 燃焼実験パラメータモデル

表5 スキの燃焼実験から得られたパラメータ値

研究1		a	b1	b2	c1	c2
1本	S	10.0	41.0	44.3	494.9	539.6
	AA	17.3	30.5	28.1	557.5	512.9
5本	S	32.3	35.1	26.1	734.6	573.7
	AA	84.0	23.2	4.2	688.9	321.5

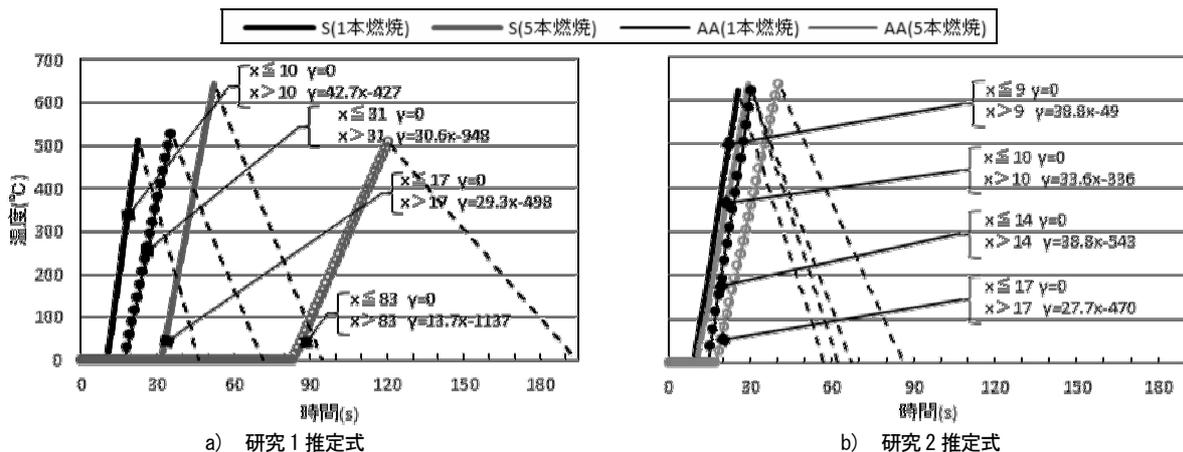


図9 スキの燃焼実験による推定式

2.4 研究1および研究2試験体の燃焼実験(研究3)

2.4.1 スキの燃焼温度変化

図5のような実験器具を作製して燃焼実験を実施した。茅葺屋根はおよそ45°で葺くが安全側を取り、試験体は上部から垂直方向に吊るし、下方向からアルコールランプで着火する方法を取る。

実験は各試験体につき1本と5本の燃焼実験を行う。燃焼実験を行い温度変化の測定をした結果、未処理材と難燃剤に一定の傾向が見られた(図6)。難燃処理を行ったものは試験体下部が着火してから上部着火するまでの時間が長くなる傾向がある。これは難燃効果が高いほど長くなり、難燃効果の重要な尺度になる。各試

表6 ススキの燃焼時間と残炭率結果

	研究1	1本		5本		研究2	1本		5本	
		燃焼時間(s)	残炭率(%)	燃焼時間(s)	残炭率(%)		燃焼時間(s)	残炭率(%)	燃焼時間(s)	残炭率(%)
S	S	0:30	13.1	1:11	12.8	S	0:22	8.8	1:06	13.6
	S	0:35	14.1	1:11	13.3	S	0:19	6.5	1:03	13.3
	S	0:31	14.8	1:12	8.3	S	0:13	25.8	1:04	16.3
AA	Aa60	0:33	24.1	3:00	51.5	Al7d	0:41	17.2	2:10	26.7
	Ab60	0:41	22.6	1:24	18.5	Am7d	0:23	16.0	1:38	36.7
	Ac60	0:49	22.4	2:29	40.3	Ah7d	0:13	35.3	3:00	33.1
BB	Ad60	2:03	39.8	3:00	27.5	Cl7d	0:35	16.8	2:06	19.8
	Bd60	0:29	18.4	0:52	12.7	Cl3d	0:42	5.5	0:57	16.2
	Ad40	0:28	26.0	0:55	17.7	Cl1d	0:57	8.1	3:05	38.3
	Ad20	0:44	20.1	0:54	12.4	Cm1d	0:36	3.4	2:04	20.2
	Bd20	0:42	14.3	0:43	12.3	Ch1d	0:45	11.0	1:29	40.2
CC	Ae60	0:31	22.6	0:42	18.2	備考：Sはそれぞれ3回の燃焼実験を行った。また、AAを難燃化型、BBを簡易型、CCを短時間型とする。				
	Be60	0:30	12.2	1:23	19.9					
	Ae20	0:37	8.7	0:48	14.1					
	Be20	1:02	8.8	0:50	10.2					

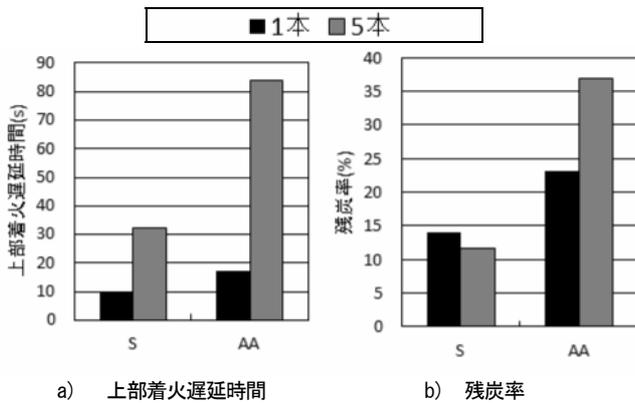


図10 上部着火遅延時間および残炭率の本数比較

験体の上部着火遅延速度を図7に示した。図7を見ると、研究1では、総時間12h含浸を行ったものは高い難燃性を有しているのに対し、6hから下は未処理材とあまり違いが見られない。このことより、難燃性付与には12h以上の含浸処理を行う必要がある。また、図6b-2は上部温度が低い値を保持し非常に高い難燃性を持っている。

グラフを一般化するために図8のようなモデル図を用いる。着火遅延時間(a)、試験体下部燃焼進展速度(b1)、試験体上部燃焼進展速度(b2)、試験体下部最高温度(c1)、試験体上部最高温度(c2)とし各グラフを一般化する。表5がSとAAの実測値である。この表5をグラフ化したものが図9である。図9では温度上昇の線形を数式化しており、傾きが緩やかでy=0の範囲が長いほど難燃性が高い。また、1本燃焼と5本燃焼を比較するとn本での上部着火遅延時間が推測できる可能性がある。

2.4.2 燃焼時間および残炭率計測結果

表6に燃焼時間および残炭量の計測結果を示す。AAを難燃化型、BBをAAより処理を簡易化した簡易型、CCを1時間で難燃化処理を行った短時間型とする。時間での判断をする場合は上部着火遅延時間で判断することが望ましい。AAでは十分な難燃性が得られたが、BBおよびCCでは得られなかった。そして、実用化する場合、AAのレベルでの処理が必要である。図10は上部着火遅延時間と残炭率の燃焼本数比較を行ったものである。図10a 上部着火遅延時間では、本数を増やしたときAAが非常に高

い伸び率を示している。上部着火遅延時間に関しては一般式により示すことが出来る可能性がある。図10bでは、AAの残炭率は5本燃焼にすると比較的伸びている。これは、写真2fのように内部まで火が回らなかったことが大きく影響している。

まとめ

- 1) 短時間で複数回含浸処理を行うと1回で同時間含浸させるよりも多くの溶液を含有させることが出来る。Aa60は非常に高い質量増加率を示した。
- 2) 研究2の方法では根本付近に密度が集中し、その部分しか難燃化できない。難燃剤の含有量の調整が困難である。未処理材と比べても難燃効果はほぼ変わらない。
- 3) 難燃効果が高いと進展速度が遅くなり、上部着火が遅くなる。上部着火遅延時間を軸に見ると、Ac60の難燃性が非常に高い。
- 4) 上部着火遅延速度および残炭率は今回1本燃焼および5本燃焼を行ったが一般化できる可能性がある。

参考文献

- 1) 石塚裕実: 茅勾配を変化させた伝統的茅葺屋根の内部温湿度分布と乾燥状態の変化、日本建築工学会、pp.229-232、2011年度
- 2) 金井良浩: 茅葺屋根に使用するススキの難燃化に関する実証的研究(その1)、日本建築学会、関東支部研究報告集、pp.129-132、2009年度
- 3) 金井良浩: 茅葺屋根に使用するススキの難燃化に関する実証的研究(その2)、日本建築学会、関東支部研究報告集、pp.81-84、2010年度
- 4) 古野毅、後藤崇志、加藤定信: ケイ酸塩-ホウ酸化合物系による木材無機複合体のEPMA観察と酸素指数法による難燃性評価、日本材料学会、Vol.50、No.4、pp.383-390、2001.4
- 5) 後藤崇志、古野毅: コロイダルシリカー-ホウ酸溶液によって無機質複合処理したスギ単板とコナラ単板の難燃性評価、日本材料学会 Vol.53、No.4、pp.381-387、Apr.2004
- 6) 古野毅、田所隆治、上原徹: 水ガラス-ホウ酸化合物系による無機質複合体の接着性と難燃性、日本材料学会、Vol.44、No.498、pp.292-296、Mar.1995

謝辞

本研究において、熊谷産業各位、田揚裕子氏に助力を得た。また、工学院大学UDM・PJ研究、H23年度科研費(基盤A)文化的価値のある伝統的木造建築を維持するための植物性資材確保の基礎的要件の解明(代表:山本博一東京大学教授)の一部である。ここに、深謝の意を表する。