

大型寺社建築のための大断面広葉樹製材による準耐火構造の柱の開発  
～広葉樹材の防耐火性能把握に向けた実験的研究～

3.防火-4.防・耐火性-C.木質系構造・材料

準会員 ○保川みずほ<sup>1</sup> 正会員 長谷見雄二<sup>2</sup>  
正会員 安井昇<sup>3</sup> // 鈴木あさ美<sup>4</sup>  
// 豊田康二<sup>5</sup> // 門岡直也<sup>5</sup>  
// 上川大輔<sup>6</sup> // 腰原幹雄<sup>7</sup>  
// 亀山直央<sup>8</sup>

広葉樹 ケヤキ 非損傷性  
準耐火構造 柱 炭化速度

1.はじめに

広葉樹材は古くは奈良時代から建築部材として利用されてきており、特にケヤキは西本願寺を始めとする寺社建築において最も重要な木材の1つとされてきた<sup>※</sup>。今後も文化財保存修理の用材やその他の寺社建築の用材等として、広葉樹材の積極的活用が望まれると考えられる。

寺社建築の特徴として木の躯体が現しであることが挙げられるが、現行の建築基準法において木の躯体を現しとした大規模木造建築物<sup>註1</sup>を建てるには、柱に対して燃えしろ設計<sup>註2</sup>を行う必要がある。しかし広葉樹材は、スギ等の針葉樹材や集成材に比べ防耐火性能に関するデータが極端に少なく、JAS化もされていないため、現行法令運用上、燃えしろ設計を適用できなくなっている。一方、建築基準法施行令第129条の2の3では、燃えしろ設計を行わなくても主要構造部の1時間準耐火構造の認定を受ければ木の躯体を現しとした大規模木造建築物が可能になると解釈できる。

そこで本研究では、広葉樹材による1時間準耐火構造の柱を開発するために、広葉樹材の火災加熱下での炭化、温度分布形成、高温での力学特性の把握を行ったうえ、実大規模の載荷加熱試験を行い、非損傷性予測手法<sup>註3</sup>による広葉樹柱の非損傷性の予測が可能であるか検証した。

2.小型試験体を用いた加熱実験

樹種を問わず、木材の耐力部材としての準耐火性能を予測するには、火災加熱時の炭化速度、断面温度形成と力学的性状を把握する必要がある。そこでケヤキ製材の小型試験体を用いた加熱実験を行い、炭化速度及び加熱時の部材内部温度分布を測定した。また、火災加熱時の部材性状の把握がスギの小断面製材に集中していることを考慮し、ヒノキ、スギの大断面製材についても同様の実験を行い、材種の比較を行った。

2-1.実験概要

樹種、含水率、断面形状及び表面割れの有無をパラメータとし、高さ1mの試験体を計12体製作した(表1)。割れは、製材特有の乾燥割れを想定し、試験体に疑似的な割れ(1、2、3mm)を入れた。また、試験体仕様による内部温度分布への影響を把握するため、各試験体の上部から265mm、端部から一定間隔の位置にCA熱電対を差し込んだ(図1-1~1-4)。試験は水平炉に試験体を4体設置し、非載荷でISO834標準加熱曲線に沿った加熱を60分間行った(図1-5、写真2-1)。加熱後は試験体を4体同時に脱炉し、速やかに消火を行った。

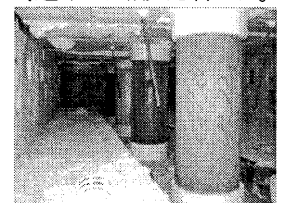
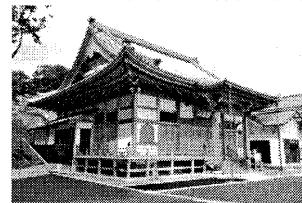


写真1-1 広葉樹材を使用した寺院  
東京都多摩市 大乘寺

写真2-1 水平炉内の様子

表1 試験体一覧

試験体No	樹種	断面寸法	試験当日含水率(%)			ヤング係数*		絶乾密度
			芯	周	芯、周平均	打撃 (tf/cm2)	曲げ (tf/cm2)	
第1回加熱	1 ケヤキ	φ 354mm	13.8	13.7	13.7	78	50	0.59
	2 ヒノキ	φ 360mm	14.4	14.3	14.4	64	77	0.36
	3 スギ	φ 360mm	18.2	18.3	18.3	63	55	0.30
第2回加熱	4 ケヤキ	φ 356mm	29.8	25.3	27.5	66	111	0.63
	5 ヒノキ	φ 357mm	19.9	19.8	19.8	82	87	0.40
	6 ケヤキ	φ 358mm (擬似割れ入)	13.2	12.9	13.1	97	55	0.65
第3回加熱	7 ヒノキ	φ 360mm (擬似割れ入)	15.1	14.7	14.9	64	77	0.37
	8 ケヤキ	245mm角	12.6	12.7	12.6	111	120	0.64
	9 ケヤキ	150mm角	13.3			118	110	0.60
10	クリ	150mm角	37.9			78	80	0.44
11	ヒノキ	150mm角	14.1			93	93	0.35
12	スギ	150mm角	15.5			88	95	0.35

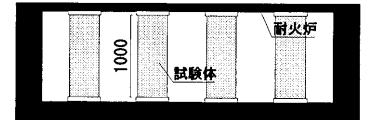
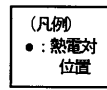
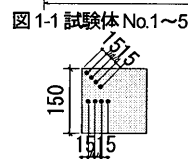
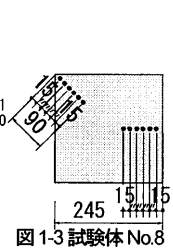
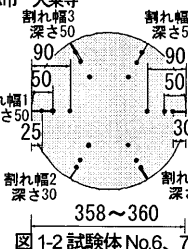
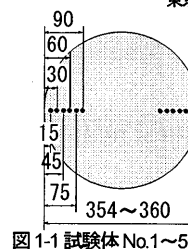


図1-4 試験体No.9~12

図1-5 水平炉イメージ図

## 2-2 実験結果及び考察

### 2-2-1 炭化性状について

試験後の残存断面より算出した炭化速度を表2、ケヤキの試験体(試験体 No.1、6、8、9)の炭化図を図2-1~図2-4に示す。試験体 No.1~5 は最大炭化部及び最小炭化部について、試験体 No.6、7 は割れを入れた部分について、試験体 No.8~12 は角部分と辺部分それぞれの最大炭化部及び最小炭化部について炭化速度を算出した。以下に各要素が炭化性状に与える影響についての検証結果を示す。

(1)樹種 ケヤキ、ヒノキ、スギの最大炭化速度を比較すると、大断面丸柱(試験体 No.1~3)は0.7~0.8mm/分となり、150mm角柱(試験体 No.9、11、12)の辺部分は0.6mm/分となった。これより、この3樹種は同程度の炭化性状だと考えられる。

(3)割れ 試験体 No.6、No.7 の疑似割れ(幅1.5~4.5mm、深さ50mm及び30mm)による炭化速度の違いを比較すると、割れ幅が大きいほど、炭化速度が大きくなる傾向となったが、割れ深さの影響はほとんどなかった。

疑似割れ無し丸柱と疑似割れ有り丸柱の炭化図を比較すると、割れを入れた試験体であっても、割れ部分以外は割れの無い試験体と同様40mm程度の炭化深さであることがわかる。大断面部材の場合、割れが部材全体の炭化性状に与える影響は少ないと考えられる(図2-1、2-2)。

### 2-2-2 加熱時の部材内部温度分布について(図2-5)

試験体の加熱時の内部温度分布を把握するため、丸柱(試験体 No.1~7)の残存断面内の熱電対について、炭化層からの距離と1時間加熱後の部材内部の温度の関係(以下、内部温度分布とする)をグラフ化した(図2-5)。

ケヤキとヒノキの内部温度分布はほぼ等しいが、スギは炭化層からの距離によっては、他2樹種に比べ10℃程度高い温度となる部分もあった。図2-5中破線は、既往研究の針葉樹材の非損傷性予測手法で用いる内部温度分布である。本実験における内部温度分布は、破線の下部もしくは周辺に位置していることがわかる。

### 2-2-3 ケヤキの非損傷性予測手法に向けて

実験結果をふまえ、広葉樹材(ケヤキ)の非損傷性予測手法に用いる炭化速度及び内部温度分布を決定した。

(1)炭化速度 ケヤキは疑似割れ部分や角部分を除けば、含水率や形状に違いがあっても、炭化速度が0.8mm/分を超えることはなかったため(表2)、炭化速度には0.8mm/分を用いる。

(2)内部温度分布 ケヤキの内部温度分布は針葉樹材の非損傷性予測手法で想定する内部温度以下であったため(図2-5)、安全側の設計となるように、内部温度分布には、針葉樹材における非損傷性予測手法と同じ値を用いる。

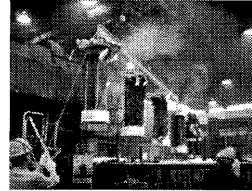


写真2-2 試験体脱炉の様子

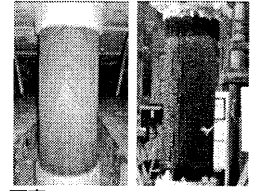


写真2-3 試験体No.4加熱前、加熱後の様子

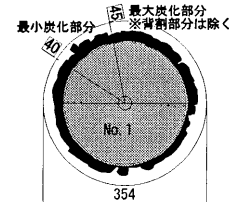


図2-1 試験体No.1炭化図(ケヤキ)

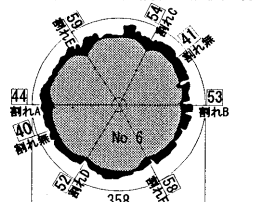


図2-2 試験体No.6炭化図(ケヤキ)

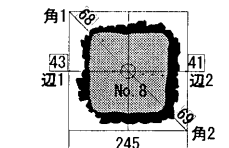


図2-3 試験体No.8炭化図(ケヤキ)

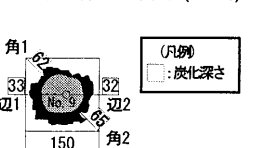


図2-4 試験体No.9炭化図(ケヤキ)

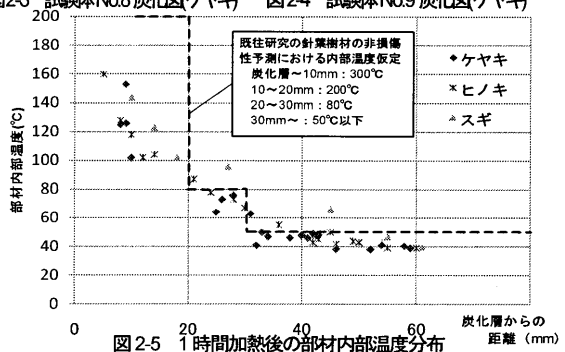


図2-5 1時間加熱後の部材内部温度分布

表2 炭化速度一覧

試験体 No	樹種	断面寸法	試験当日含水率(%)	割れ幅及び深さ、角または辺	炭化深さ(mm)		炭化速度(mm/分)	
					最小炭化部	最大炭化部	最小炭化部	最大炭化部
1	ケヤキ	φ 354mm	13.7		40.1	45.8	0.7	0.8
2	ヒノキ	φ 360mm	14.4		31.6	46.5	0.5	0.8
3	スギ	φ 360mm	18.3		29.1	44.5	0.5	0.7
4	ケヤキ	φ 356mm	27.5		33.1	39.0	0.6	0.7
5	ヒノキ	φ 357mm	19.8		31.8	42.4	0.5	0.7
6	ケヤキ	φ 358mm	13.1	割れA 幅2.5、深さ50	44.1			0.7
				割れB 幅2.5、深さ30	52.7			0.9
				割れC 幅4.0、深さ50	53.6			0.9
				割れD 幅4.0、深さ30	51.7			0.9
				割れE 幅4.5、深さ50	58.5			1.0
				割れF 幅4.0、深さ30	57.9			1.0
7	ヒノキ	φ 360mm	14.9	割れG 幅1.5、深さ50	47.3			0.8
				割れH 幅2.0、深さ30	47.3			0.8
				割れI 幅4.0、深さ50	52.7			0.9
				割れJ 幅3.0、深さ30	47.3			0.8
				割れK 幅4.5、深さ50	53.0			0.9
				割れL 幅4.0、深さ30	51.9			0.9
8	ケヤキ	245mm角	12.6	角	67.2	68.9	1.1	1.1
				辺	35.3	46.1	0.6	0.8
9	ケヤキ	150mm角	13.3	角	61.2	65.3	1.0	1.1
				辺	32.4	37.7	0.5	0.6
10	クリ	150mm角	37.9	角	53.5	57.6	0.9	1.0
				辺	26.8	35.2	0.4	0.6
11	ヒノキ	150mm角	14.1	角	67.3	73.1	1.1	1.2
				辺	36.3	38.8	0.6	0.6
12	スギ	150mm角	15.5	角	65.3	69.2	1.1	1.2
				辺	33.6	38.6	0.6	0.6

\*最大炭化部は、乾燥割れ部を除いた部分における最大炭化部を示す。

### 3. ケヤキの高温時ヤング係数測定試験

木材の内部温度が上昇するとヤング係数が低下し、建築部材の耐火性能に影響を及ぼすことが知られている。既往研究<sup>※2</sup>において針葉樹材の高温時のヤング係数残存率は把握されたが、広葉樹材については把握されていない。そこで本実験では広葉樹材の高温時のヤング係数残存率を把握するため、ケヤキの高温時のヤング係数を測定した。

#### 3-1. 実験概要

(1)試験体概要 同一のケヤキ（含水率が平衡状態にある築80年の建物の解体材）から寸法20mm×20mm×320mm、2方征、無欠点の木片を切り出した（図3-1）。加熱時の含水率低下による影響を排除するため、乾燥器を用い含水率を2%程度まで下げてから試験を行った。

(2)実験方法 温度調整炉付きの圧縮試験機（写真3-1）で、JIS Z2101 木材の曲げ試験方法に準拠する280mmスパンの3点曲げ方法で試験体を加力し、ヤング係数を測定した。まず常温で、試験体の強度が低下しない範囲で加力を行う曲げ試験を全試験体について行い、常温時ヤング係数を測定した。常温時ヤング係数は70~134tf/cm<sup>2</sup>であり、平均値は102tf/cm<sup>2</sup>でケヤキのヤング係数の慣用値<sup>※3</sup>105tf/cm<sup>2</sup>に近い値となった。

その後、高温で試験体が破断に至るまで加力する曲げ試験で高温時ヤング係数を測定した。温度設定は50℃、100℃、150℃、180℃とし、温度ごとに20本ずつ測定した。

常温時ヤング係数に対する、高温時ヤング係数の比を、ヤング係数残存率(以下残存率とする)とした。なお常温時ヤング係数、高温時ヤング係数ともに試験体の載荷位置はスパン中央部、載荷速度は10mm/分として測定した。

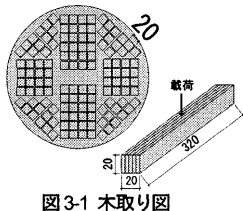


図3-1 木取り図

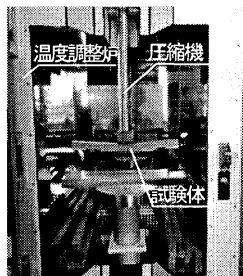


写真3-1 圧縮試験機

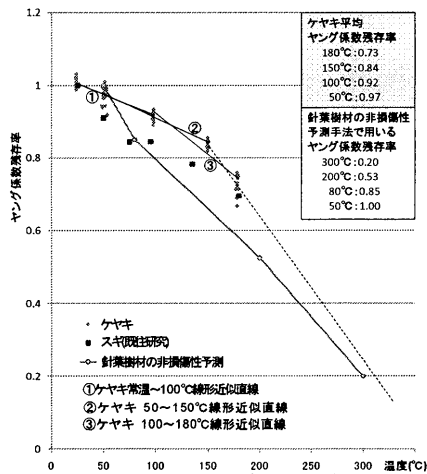


図3-3 ヤング係数残存率

### 3-2. 実験結果及び考察

本実験のケヤキの残存率の平均は、180℃では0.73、150℃では0.84、100℃では0.92、50℃では0.97となった。温度帯ごとの残存率の変化の違いを把握するため、常温~100℃、50~150℃、100~180℃の範囲で線形近似直線(各々①、②、③)を求めた(図3-3)。また図3-3中の点線は150~180℃の線形近似直線を300℃まで延長し、180℃以降の残存率を予測したものである。温度帯が上がるほど、直線の勾配が大きいことから、温度が上昇するほど、ヤング係数の低下が急速に進むと考えられる。

#### 3-3-3 非損傷性予測手法に向けて

本実験結果は、針葉樹材の非損傷性予測手法の設定よりも高温時のヤング係数低下が緩やかであった(図3-3)。針葉樹材の非損傷性予測手法で想定する残存率を用いれば、ケヤキの非損傷性を安全側に評価できると考えられる。これをふまえ、広葉樹材(ケヤキ)の非損傷性予測の際には、ヤング係数残存率は針葉樹材と同じ値を用いる。

### 4. ケヤキの実大柱載荷加熱実験

広葉樹製材による1時間準耐火構造の柱の開発に向け、含水率やヤング係数が載荷時の柱に与える影響を把握する必要がある。そこでケヤキ製材を用いた実大柱の載荷加熱実験を行った。また小型試験体を用いた加熱実験及び高温時ヤング係数測定試験の結果を基に、広葉樹材における非損傷性予測手法の提案を行い本実験の結果と比較することで、その妥当性の検証を行った。

#### 4-1. 実験概要

載荷荷重及びヤング係数をパラメータとし、ケヤキ製材を用いた直径343mm、長さ3500mmの試験体を計3体製作した(表4-1)。試験は柱炉を使用し、一定の荷重をかけ試験体が座屈するまで加熱を続けた(写真4-1、4-2)。

表4-1 試験体仕様一覧

試験体名	樹種	寸法	試験直前平均含水率	ヤング係数 <sup>a,b</sup> (tf/cm <sup>2</sup> )	載荷荷重(kN)
ア	ケヤキ	φ343mm L=3500	30.4%	95	長期許容荷重 640
イ			29.1%	111	長期許容荷重 640
ウ			23.0%	94	実載荷重 320

※1) 試験体ア及びイは曲げ試験より算出する曲げヤング係数の値を記す。試験体ウは材料採着時の材長が短く、JIS Z2101 木材の曲げ試験方法に規定される材断面とスパンの条件を満たさなかったため、グレーディングヤング係数を記す。

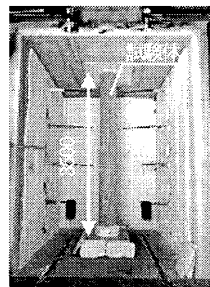


写真4-1 加熱前試験体の様子

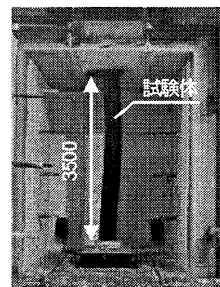


写真4-2 加熱後試験体の様子

## 4-2. 広葉樹材の非損傷性予測手法の提案

本実験における載荷荷重検討及び予想座屈荷重算出の際に、広葉樹材の非損傷性予測手法の提案を行った。なお小型試験体を用いた加熱実験及びケヤキの高温時ヤング係数測定試験の結果をふまえ、炭化速度には0.8mm/分、加熱時部材内部温度分布及び高温時ヤング係数残存率には針葉樹材の非損傷性予測手法と同じ値を使用した。

(1)載荷荷重検討 図4-1に示す非損傷性予測手法を用いて本実験の試験体における60分加熱後の予想座屈荷重を算出し、載荷荷重の検討を行った(表4-2)。3試験体とも算出した予想座屈荷重が長期許容荷重を上回ったため、本実験の試験体は長期許容荷重を載荷し加熱した場合でも、60分間の非損傷性が保たれると予測できた。これより載荷荷重として長期許容荷重を用いた。また大型寺社建築の柱にかかる荷重を計算し、安全側の評価となるよう長期許容荷重の5割の荷重を載荷した実験も行った。

(2)予想座屈時間算出 図4-1中の予想座屈荷重式を逆算し、試験体の座屈時の仮定断面を算出し、各試験体の予想座屈時間を算出した。試験体アは74分、試験体イは79分、試験体ウは94分で座屈するという予測結果となった(表4-3)。

## 4-3. 実験結果及び考察(表4-4)

(1)非損傷性 試験体アは加熱時間82分において、軸方向最大収縮速度が非損傷性の判定基準を超えたため実験を終了した。また試験体イは加熱時間94.5分、試験体ウは加熱時間111分が経過した時点で圧縮耐力が低下し、載荷不可能となったため実験を終了した(表4-4)。3試験体とも60分以上の非損傷性を確保したため、本実験の条件であればケヤキ製材の大断面柱が1時間準耐火構造の性能を有することを確認した。

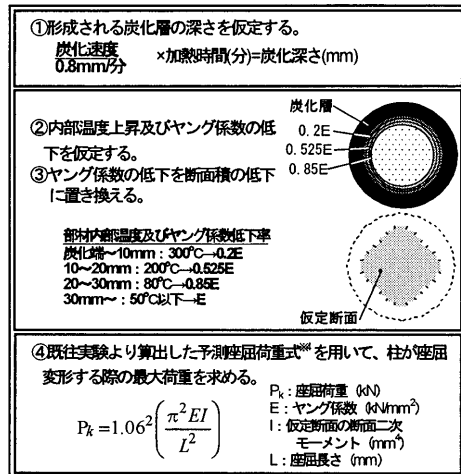


図4-1 本論文で提案する非損傷性予測手法の手順

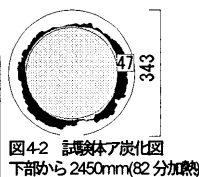


図4-2 試験体ア炭化図  
下部から2450mm(82分加熱)

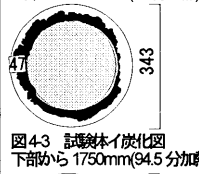


図4-3 試験体イ炭化図  
下部から1750mm(94.5分加熱)



図4-4 試験体ウ炭化図  
下部から2450mm(111分加熱)  
(凡例) □: 最大炭化深さ

(2)広葉樹材の非損傷性予測手法の妥当性検証 3試験体とも実験終了時間が予想座屈時間を超えたため、本論文で提案した非損傷性予測手法を用いれば危険側の予測ができることを確認した。これより、非損傷性予測手法が広葉樹材にも適用可能であることがわかった。

## 5. 結論

広葉樹材(ケヤキ)の防耐火性能把握に向けた実験を行うことにより、以下の知見を得た。

- ・ケヤキの炭化速度は、部材の大きな割れ部分(約3mm幅)を除けば0.8mm/分であった。
- ・ケヤキの加熱時の部材内部温度分布は、針葉樹材の値とほぼ同じであった。
- ・ケヤキの高温時のヤング係数は、針葉樹材より低下が緩やかであった。
- ・針葉樹材において開発された非損傷性予測手法は、炭化速度の設定を0.8mm/分とすることで、広葉樹材にも適用可能であることを確認した。
- ・大断面広葉樹製材で1時間準耐火構造の柱の開発の見通しが得られた。

表4-2 載荷荷重検討

試験体名	載荷荷重検討		
	80分加熱後の予想座屈荷重(kN)	長期許容荷重(kN) <sup>c</sup>	判定
ア	957	> 640	○
イ	1118	> 640	○
ウ	947	> 640	○

表4-3 試験体仕様一覧及び予想座屈時間

ケヤキ製材 φ343mm L=3500

試験体名	試験体仕様			予想座屈時間
	試験体前平均含水率	ヤング係数(tl/cm <sup>2</sup> )	載荷荷重(kN)	
ア	30.4%	95	長期許容荷重 640	74分
イ	29.1%	111	長期許容荷重 640	79分
ウ	23.0%	94	実態荷重 320	94分

<sup>c</sup> 長期許容荷重算出の拠点は、平成12年建設省告示第1452号第六に規定されたケヤキ無等級材の圧縮強度21N/mm<sup>2</sup>を用いた。

表4-4 実験結果一覧

試験体名	予想座屈時間	実験終了時間	消火時間(分)	実験結果			
				軸方向最大収縮速度(mm/分)		軸方向最大炭化深さ(mm)	
				実験値	判定基準 <sup>a</sup>	実験値	判定基準 <sup>a</sup>
ア	74分 <	82分	87分	15.6 < 35	10.7 > 10.5	47	0.5
イ	79分 <	94.5分	99分	20.3 < 35	8.6 < 10.5	47	0.5
ウ	94分 <	111分	120分	18.9 < 35	5.2 < 10.5	67	0.6

<sup>a</sup> 日本建築総合試験所「防耐火性能試験・評価業務方法書」に従い、非損傷性の判定基準を以下の通りとする。

軸方向最大収縮速度 ≤ h/100 または、軸方向最大収縮速度 ≤ 3h/1000

### 【注釈】

- 注1: 高さ13m超又は軒高9m超の木造建築物。
- 注2: 柱に燃えしろ法を付加することで表面部分が燃えた場合の構造耐力を確保する設計法。
- 注3: 内部温度上昇によるヤング係数の低下を断面積の低減に置き換え、加熱後の断面性能及び予想座屈荷重を算出する手法。(図4-1参照)

### 【参考文献】

- ※1 村田健一: 伝統木造建築を読み解く 2006.9
- ※2 上杉 三郎: スギ材の180℃以下加熱における曲げ性能: 木材学会誌 vol.38, No.11, p.985-994, 1992
- ※3 森林総合研究所監修: 木材工業ハンドブック改訂4版, 2004.1
- ※4 澤野直志・長谷見雄二・安井昇・小川敏史・平井宏幸・木村忠紀・山本幸一: 伝統土壁構法間仕切壁の両面加熱時の防耐火性能: 日本建築学会環境系論文集 第635号, 2009.1

### 【謝辞】

本研究は、木構造振興株式会社による「平成21年度地域材利用加速化緊急対策支援事業」の一環で行われた。本実験を行うにあたり、日本建築学会伝統木造準耐火構造WG、(財)日本建築総合試験所及び(株)東亜理科の皆様には多大なるご協力とご支援をいただきました。ここに深く感謝の意を表します。

- \*1 早稲田大学建築学科 \*2 早稲田大学理工学術院教授・博士(工学)
- \*3 早稲田大学理工学研究所客員研究員・博士(工学)
- \*4 早稲田大学大学院修士課程 \*5 (財)日本建築総合試験所
- \*6 (財)森林総合研究所 \*7 東京大学生産技術研究所准教授・博士(工学)
- \*8 (株)亀山建設