

加熱される木材の含水率が力学的性能に及ぼす影響

3. 防火—4. 防・耐火性—c. 木質系構造・材料

スギ 曲げ試験 荷重変位関係

温度依存性 含水率依存性 ヤング係数

準会員 ○ 鈴木達朗^{*1} 正会員 加來千紘^{*2}
 正会員 長谷見雄二^{*3} // 安井昇^{*4}
 // 上川大輔^{*5} // 長尾博文^{*6}
 // 腰原幹雄^{*7} // 亀山直央^{*8}

1 研究背景・目的

近年、公共建築物等木材利用促進法の制定や低炭素化社会の追い風を受け木造建築物の気運は高まってきており、大規模木造建築物や特殊建築物が新たな市場として注目されている。用途・技術ともに新しくなっていく木造建築物の安全性を確保するためには、耐火性能の工学的予測手法の確立が重要である。特に、火災を受ける木質部材の非損傷性には、炭化して断面が減少することのほか主に以下 2 つの要因が残存断面の力学的性能に影響すると考える。

- i) 内部温度分布の変化と温度履歴
 - ii) 水分移動と含水率の変化
- i) については既往研究¹⁾の中で明らかにされつつある。しかし、木材は他の建築構造材料と比べ力学的性能を決定する要因が多く複雑であるため、加熱高温時の力学定期性能を定量的かつ簡易的に判断しようとするとはほぼ全乾状態という制約下で試験を行うこととなり、ii) 水分移動と含水率の変化の影響は未だ明らかにされていない。
- そこで本研究では、まず加熱を受ける木材の含水率が力学的性能に与える影響を曲げ試験によって明らかにする。さらに、既往研究¹⁾の実験結果と併せて加熱される木材の温度依存性と含水率依存性を整理し、耐火性能の工学的予測手法の確立に向けた基礎的情報を得る(図 1)。

2 含水率が高温時の力学的性能に及ぼす影響

— 小試験体を用いた曲げ試験 —

2-1 検討方法

試験は JIS Z 2101 「木材の曲げ試験方法」に準拠し、加熱温度、含水率を変えながらそれぞれ 15 本以上行う。木材の終局時の力学的性能は、柱はヤング係数の低下に

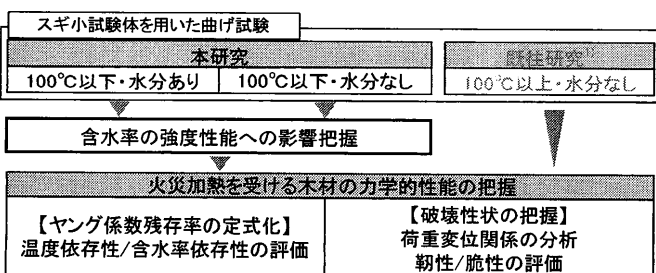


図 1 研究フロー

よる座屈に、梁は曲げ強度の低下による曲げ破壊に支配されると考え、本実験では曲げ試験によってヤング係数、曲げ強度を調べる。またヤング係数は非破壊試験が可能のため加熱前に全ての試験体で測定する。

2-2 実験概要

2-2-1 実験条件

実験条件・本数及び実験後に得た平均含水率を表 1 に示す。樹種は製材として一般的なスギを用いる。

■ 含水率

- 現在火災加熱時の非損傷性は内部温度によって整理されているが³⁾、含水率による力学的性能の変化⁴⁾も考慮した上で非損傷性に影響する要因を整理すると図 2 のように考えられる。よって以下のように実験条件を設定した。
- i) 全乾状態：力学的性能の最も高い状態を把握。試験体は 4% 程度まで乾燥させ全乾状態に近づける。
 - ii) 気乾状態：加熱前及び火災時健全部での含水率の影響を把握。
 - iii) 気乾状態から繊維飽和点までの間：部材内部で水分が移動したときを想定し、含水率上昇による力学的性能低下の勾配を把握。
 - iv) 繊維飽和点以上：含水率上昇による力学的性能低下の限界を把握。

表 1 試験体条件・本数及び条件ごとの平均含水率[%]

	全乾状態		気乾状態		気乾状態と繊維飽和点の間		繊維飽和点以上	
	本数	含水率	本数	含水率	本数	含水率	本数	含水率
常温時	15	5.1	15	13.4	20	25.7	15	98.0
50°C 高温時	15	4.7	15	13.1	15	24.6	15	98.5
80°C 高温時	15	3.7	15	12.8	15	24.7	15	101.4
95°C 高温時	15	3.3	15	12.4	15	20.5	15	101.9

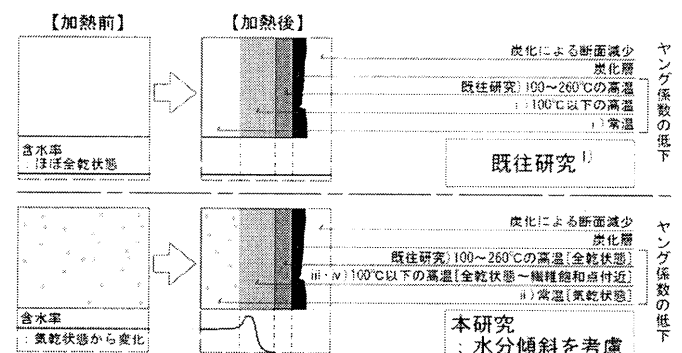


図 2 木質部材の非損傷性に対する温度と含水率の影響

■加熱温度

木材中の水分は加熱を受けると、蒸気圧を駆動力として非加熱面側に移動することが明らかにされており⁵⁾、水の沸点以上では水分は移動し、含水率はほぼ0%になると考えられる。よって加熱温度は水の沸点以下とし、約25℃であった常温の他に、50℃、80℃、95℃とする。

2-2-2 試験体概要

試験体は無欠点の寸法 20mm×20mm×320mm、二方桁のスギ製材とし、含水率の条件が i) 及び ii) の試験体は気乾状態の丸太から、iii) 及び iv) の試験体は含水率が繊維飽和点よりも十分に高い丸太からそれぞれ切り出す(図3)。ただし、切り出し時に気乾状態の丸太は欠点が多く、全ての試験体と同じ丸太から切り出すことが困難となったため一部を別の材から切り出して製作した。

2-2-3 試験方法

試験は図4の手順により、温度調整炉付きの圧縮試験機(写真1)を用いて280mm スパンの3点曲げ試験を行う。

①試験体の準備：含水率調整は全て乾燥により、必要に応じて60℃の恒温炉を用いる。含水率が平衡含水率を超える条件の試験体は、アルミホイルで包み養生することで水分放出を抑制する。

②非破壊曲げ試験：全ての試験体において試験体の強度が低下しない0.25kNまで加力を行い(以下、非破壊曲げ試験とする)、常温時のヤング係数を測定する。

③試験体の加熱：熱電対を試験体の力学的性能に影響しない支点の外側に設置し(図5)、内部温度を計測する。加熱中の試験体外部への水分放出を最低限に抑えるため、アルミホイルによる養生をしたまま曲げ試験を行う。尚、アルミホイル自体の強度は試験機の精度や木材のバラつきに比べて小さく、実験結果には影響しないものとする。

④破壊曲げ試験：試験体の内部温度が目標の温度に達した時点で、試験体が破断するまで加力を行い(以下、破壊曲げ試験とする)、加熱後の曲げ強度及びヤング係数を測定する。破壊曲げ試験、非破壊曲げ試験とも繊維方向、スパンの中央部に加力を行い、変位速度が10mm/分と一定になるように加力する。加熱による力学的性能への影響を調べるため、加熱後の破壊曲げ試験で得られたヤング係数を非破壊曲げ試験で得られた加熱前のヤング係数で除したものを、ヤング係数残存率と呼ぶこととする。

⑤含水率の算出：破壊曲げ試験直後に質量を測定したのち105℃恒温炉で乾燥を行い、再び質量を測定する。試験後の質量を用いて絶乾方式で算出した値を試験時の含水率とする。

2-3 実験結果及び考察

含水率と曲げ強度及びヤング係数の関係を加熱温度ごとにプロットしたものをそれぞれ図6、図7に示す。また各条件における曲げ強度、ヤング係数及びヤング係数残存率の平均値をそれぞれ表2~4に示す。繊維飽和点

を30%と仮定し⁴⁾、30%以上では含水率に関わらず力学的性能は一定とし平均値を、30%以下では線形近似を直線で引いた。さらに、30%以下の範囲での近似線の勾配を用いて、含水率が1%上昇したときの、全乾状態に比べた力学的性能の低下率を表5に示す。

(1)全乾状態の温度依存性

曲げ強度及びヤング係数は温度上昇とともに低下し、常温時に比べ95℃高温時には、曲げ強度は約63%に、ヤング係数は約91%に低下した。

(2)常温時の含水率依存性

曲げ強度は含水率の上昇とともに低下し、全乾状態に比べ繊維飽和点以上では約58%に低下した。一方ヤング係数については含水率の影響はほぼ見られなかった。

(3)温度依存性と含水率依存性の相関性

力学的性能低下は温度と含水率の上昇の双方から同時に影響を受けた。100℃以下で加熱温度が上昇したとき、含水率上昇による力学的性能低下率が大きくなる場合があり、力学的性能低下が見られなくなる含水率が低含水

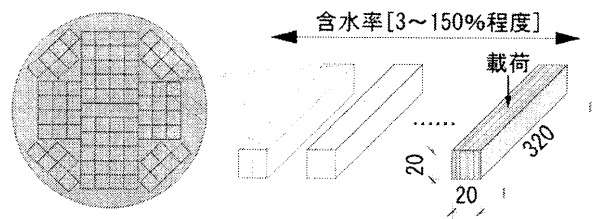


図3 試験体概要図

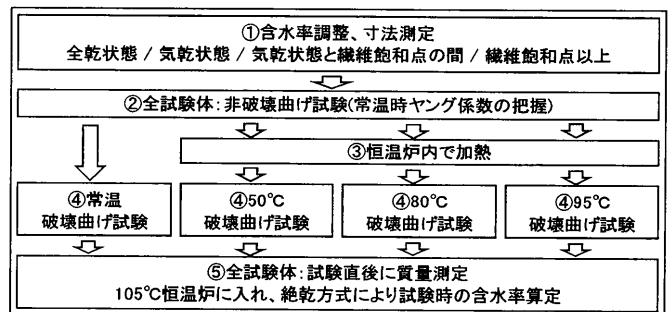


図4 実験手順



写真1 恒温炉つき曲げ試験機

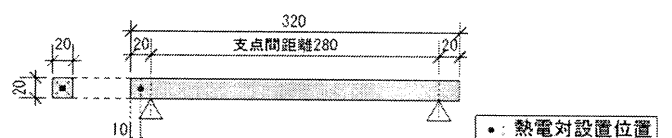


図5 熱電対設置位置

率側へ移動する傾向も認められた。

曲げ強度、ヤング係数ともに50℃以上の加熱で、含水率が1%上昇したときの力学的性能低下率が常温時よりも高まった。ヤング係数残存率は、50℃高温時には含水率によらず一定となったが、95℃高温時には繊維飽和点以上で全乾状態よりも約25%に低下した。

3 加熱される木材の力学的性能

3-1 検討概要

木材が加熱されると、その力学的性能は、水の沸点以上では温度が、沸点以下では温度と含水率が影響して低下すると考えられる。ここでは、100℃以下の加熱で温度依存性と含水率依存性を調べた2-3の結果に、100℃以上の加熱で温度依存性を調べた既往研究¹⁾のデータを併せ、加熱される木材の力学的性能を広範に調べる。

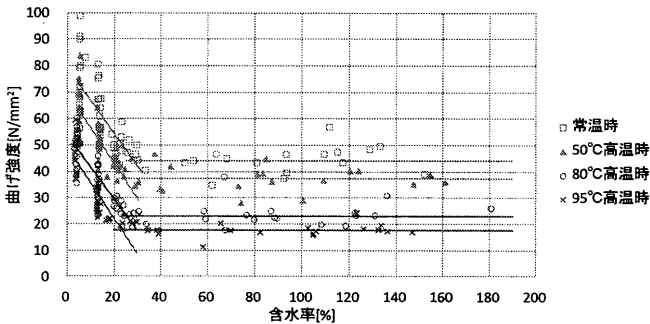


図6 加熱温度ごとの含水率と曲げ強度の関係

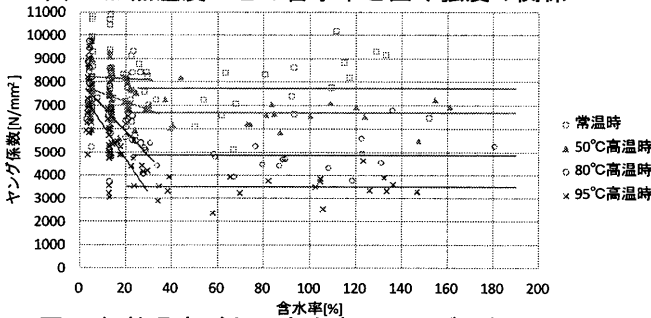


図7 加熱温度ごとの含水率とヤング係数の関係

表2 各条件における曲げ強度平均値[N/mm²]

	全乾状態		気乾状態		気乾状態と繊維飽和点の間		繊維飽和点以上	
	平均値	標準偏差	平均値	標準偏差	平均値	標準偏差	平均値	標準偏差
常温時	71.8	14.57	61.3	10.35	47.5	5.50	42.2	4.58
50℃高温時	62.2	11.07	50.0	5.43	37.4	4.09	34.9	4.69
80℃高温時	48.7	8.32	35.3	4.48	24.7	3.42	21.6	2.70
95℃高温時	45.7	6.98	27.3	3.54	20.5	3.73	16.7	2.60

表3 各条件におけるヤング係数平均値[N/mm²]

	全乾状態		気乾状態		気乾状態と繊維飽和点の間		繊維飽和点以上	
	平均値	標準偏差	平均値	標準偏差	平均値	標準偏差	平均値	標準偏差
常温時	8085	1607	8376	1507	7769	894	8044	1009
50℃高温時	7741	1213	7378	997	6955	743	6751	1057
80℃高温時	7754	1178	6275	1455	5634	751	4857	822
95℃高温時	7391	2181	5398	1385	4436	522	3533	563

表4 各条件におけるヤング係数残存率平均値[-]

	全乾状態		気乾状態		気乾状態と繊維飽和点の間		繊維飽和点以上	
	平均値	標準偏差	平均値	標準偏差	平均値	標準偏差	平均値	標準偏差
常温時	1.02	0.013	1.01	0.015	1.10	0.078	1.01	0.049
50℃高温時	0.94	0.013	0.96	0.082	0.96	0.074	0.96	0.084
80℃高温時	0.91	0.020	0.84	0.117	0.75	0.049	0.66	0.065
95℃高温時	0.89	0.016	0.75	0.138	0.61	0.097	0.62	0.107

表5 含水率が1%上昇したときの力学的性能低下率[%]

	曲げ強度	ヤング係数	ヤング係数残存率
常温時	-1.58	-0.06	0.0052
50℃高温時	-1.90	-0.46	0.0027
80℃高温時	-2.25	-1.31	-0.0077
95℃高温時	-2.77	-1.93	-0.0144

※全乾状態を100%としている。

既往研究¹⁾では2-2-3と同様の試験装置、方法で実験が行われている。実験条件として、常温に加え加熱温度は100℃、150℃、200℃、230℃の4条件、また火災後の木質部材継続利用に向けた検討のため加熱冷却後の測定が4条件、合計9条件が設定され、各条件につき20本ずつ試験が行われている。含水率は全て4%程度のほぼ全乾状態であり、樹種は扱われている4種類のうちここでは本研究との比較が可能なスギのみを対象とする。

3-2 ヤング係数残存率の予測式の考案

3-2-1 検討目的

現在の非損傷性予測³⁾では、温度を一定とする適当な範囲で部材内部を区切りヤング係数の低下を簡単に計算しているが、実火災では連続的に変化している。また、100℃以下で含水率上昇によるヤング率の低下は考えられていない。ここでは、ヤング係数残存率を温度及び含水率の連続した関数として表し、実火災に対してより再現性の高い非損傷性予測手法の確立を目指す。

3-2-2 検討方法

予測式の提案に向けて以下の知見を前提とする。

- ・100℃以上では常に含水率は0%であるものとする⁵⁾。
- ・温度上昇によるヤング係数残存率の低下は、熱分解が盛んになる180℃を境に急激になり²⁾、300℃以上では炭化し耐力を完全に失うとして考えない³⁾。

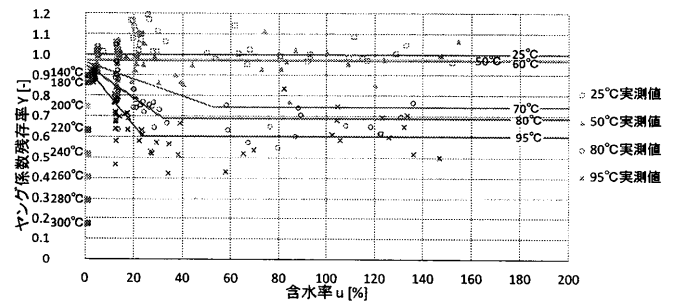
さらに、2-3の結果から以下のように条件を設定する。

- ・すべての温度で含水率0%時にヤング係数残存率が最大値をとり、以降単純減少するものとする。

- ・60℃以上100℃未満では全乾状態からの含水率上昇によるヤング係数残存率の低下が起こるとする。表5で得られた値から温度ごとに線形近似し勾配を算出する。また、ヤング係数残存率は含水率30%以上の平均値以下には低下しないものとする。

3-2-3 検討結果

ヤング係数残存率： $Y[-]$ 、初期内部温度： $t_0[℃]$ 、加熱後内部温度： $t[℃]$ 、含水率： $u[%]$ として予測式を以下に示す。また、 $t_0=25[℃]$ とした予測式の計算結果を図8に示し、実測値をプロットして整合性を確認した。



$$0 \leq t < 60 \quad Y_1(u) = 1.00 - 0.00089(t - t_0)$$

$$60 \leq t < 100 \quad Y_2(u) = \max \{1 - 0.0057(t - t_0), 1.00 - 0.00041(t - 60)u - 0.00089(t - t_0)\}$$

$$100 \leq t < 180 \quad (X, Y_3) = (0, 1.00 - 0.00089(t - t_0))$$

$$180 \leq t \leq 300 \quad (X, Y_4) = (0, 1.00 - 0.0057(t - 180) - 0.00089(180 - t_0))$$

図8 ヤング係数残存率の予測値と実測値

3-3 高温時及び加熱冷却後における木材の破壊性状

3-3-1 検討方法

温度及び含水率の上昇は、材料強度以外にも変形能力や加工性に大きな影響を与えることが知られている⁶⁾。また、大断面集成材をはじめ新たな技術を用いた木造建築物は、実大で終局時の挙動に関して知見が少ない。ここでは小試験体を用いた曲げ試験の荷重変位曲線から、木材の加熱高温時及び加熱冷却後の破壊性状を考察する。

3-3-2 分析結果及び考察

分析にあたり、最大荷重を迎えるまでの荷重と変位の積を仕事とみなし、常温時を100%として比率を算出した。これを表6、7に示し、温度及び含水率の破壊性状への影響を傾向として把握するため、実験条件ごとに仕事がその実験条件の平均値に最も近い試験体の荷重変位曲線を選択し、比較したものを図9～12に示す。

(1) 常温時における含水率の影響

含水率上昇によって力学的強度は低下するが、全乾状態と気乾状態の仕事はほぼ同値であり、気乾状態から繊維飽和点付近で仕事は最大となった。

(2) 全乾状態における100℃以下の加熱の影響

加熱温度の上昇によって力学的性能と仕事は減少し、破壊性状の大きな変化は見られなかった。

(3) 100℃以下の加熱と含水率の影響

含水率の上昇によって降伏が緩やかになり、いずれの温度でも仕事は全乾状態よりも気乾状態の方が大きい。

(4) 100℃以上の加熱の影響

加熱温度の上昇によって降伏が緩やかになり、仕事も常温時に比べ最大80%程度低下する。加熱冷却後のヤング係数残存率は200℃以下の加熱ではほぼ回復することが報告されているが⁷⁾、200℃加熱冷却後に仕事は常温時より25%減少し、脆性破壊の危険が高まると予想される。

4 総括

加熱を受けるスギ材の含水率が力学的性能と破壊性状に及ぼす影響について、以下のような知見を得た。

- ・ 力学的性能の低下は温度上昇と含水率上昇の影響を同時に受け、95℃高温時の全乾状態に比べ気乾状態では、曲げ強度は約59%に、ヤング係数は約73%に低下した。
- ・ 含水率の変化は曲げ強度、ヤング係数以外にも破壊性状と仕事に影響した。また、200℃以上の加熱冷却後には仕事が約80%に低下し脆性破壊の危険が高まった。

今後の課題として、含水率の力学的性能への影響について樹種や試験体寸法による違いの有無を把握し、部材レベルで適用できるよう検討していく必要がある。

【謝辞】

本研究に関する実験は、科学研究費基盤研究「大断面木質部材の耐火性能設計の工学モデル」(研究代表者：長谷見雄二)により行いました。ご支援いただき心より感謝申し上げます。

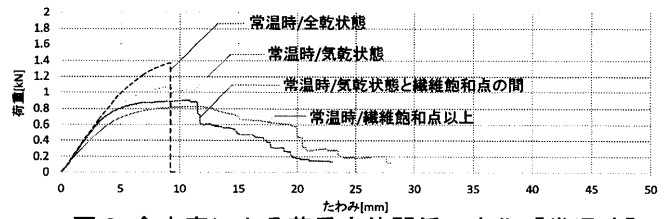


図9 含水率による荷重変位関係の変化【常温時】

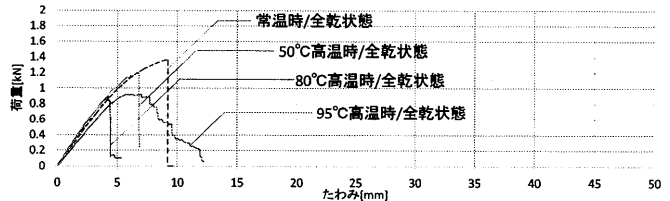


図10 加熱温度による荷重変位関係の変化【全乾状態】

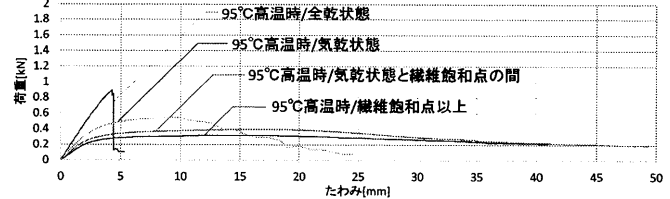


図11 含水率による荷重変位関係の変化【95℃高温時】

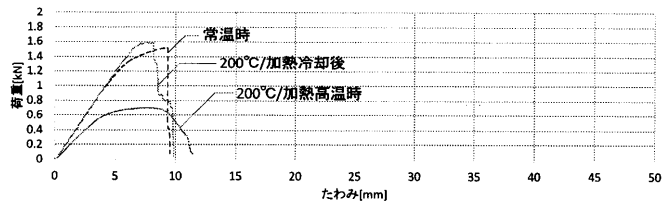


図12 200℃加熱冷却後の荷重変位関係の変化

表6 仕事[J]と全乾常温時との比率[%]【100℃以下】

	全乾状態		気乾状態		気乾状態と繊維飽和点の間		繊維飽和点以上	
	仕事	比率	仕事	比率	仕事	比率	仕事	比率
常温時	6.29	(100.0)	6.33	100.5	6.91	109.7	4.58	72.7
50℃高温時	5.01	79.6	5.31	84.3	6.30	100.2	5.53	87.8
80℃高温時	2.74	43.5	4.60	73.1	4.76	75.5	5.95	94.5
95℃高温時	2.85	45.2	4.40	69.9	4.07	64.6	5.10	80.9

表7 仕事[J]と常温時との比率[%]【100℃以上】

	高温時		加熱冷却後	
	仕事	比率	仕事	比率
常温	8.68	(100.0)		
100℃	5.82	67.0	8.72	100.5
150℃	4.07	46.9	9.23	106.3
200℃	3.14	36.1	6.57	75.7
230℃	1.74	20.1	5.60	64.5

【参考文献】

- 1) 加来千紘他「火災加熱が木材の力学的性能に及ぼす影響—加熱した針葉樹材及び広葉樹材の高温時及び加熱冷却後のヤング係数・曲げ係数の測定—」日本建築学会構造系論文集 701号、pp1065-1072、2014.7
- 2) 山口智世他「木材の燃焼過程における吸発熱性状のモデル化に向けた基礎研究」日本建築学会関東支部研究報告集 83巻1号、pp613-616、2013.3
- 3) 安井昇他「柱圧縮試験による木造土壁の火災加熱時の非損傷性予測と木造土壁外壁の防火設計」日本建築学会環系論文集第574号、pp1-6、2003.12
- 4) 村田誠四郎「木材工業ハンドブック改訂4版」2004.3
- 5) BERTIL FREDLUND「A MODEL FOR HEAT AND MASS TRANSFER IN TIMBER STRUCTURES DURING FIRE」LUND UNIVERSITY, SWEDEN, 1988.5
- 6) 古田裕三「放水木材の熱軟化特性」木材工業 57巻8号、2002.8

- *1 早稲田大学建築学科
- *2 早稲田大学大学院博士課程・工修
- *3 早稲田大学理工学術院(建築)教授・工博
- *4 早稲田大学理工学研究所招聘研究員・博士(工学)
- *5 (独) 森林総合研究所・博士(工学)
- *6 (独) 森林総合研究所
- *7 東京大学生産技術研究所教授・博士(工学)
- *8 亀山建設(株)・工修