

木材の含水率が高温時の力学的性能に及ぼす影響  
(その1)針葉樹材(スギ)の高温時ヤング係数・曲げ強度の把握

正会員 ○鈴木 達朗\*1 正会員 加來 千紘\*2 正会員 長谷見 雄二\*3  
 正会員 上川 大輔\*4 正会員 安井 昇\*5 正会員 亀山 直央\*6  
 正会員 腰原 幹雄\*7 正会員 長尾 博文\*8

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

1. はじめに

近年、公共建築物等木材利用促進法の制定や低炭素化への関心から、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。木造建築物の安全性を確保するためには、防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、主に以下の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<sup>1)</sup>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、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、既報<sup>1)</sup>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

木質部材のの終局時の力学的性能は、柱はヤング係数の低下による座屈に、梁は曲げ強度の低下による曲げ破壊に支配されるとし、JIS Z 2101「木材の曲げ試験方法」に準拠した小試験体の曲げ試験によってヤング係数、曲げ強度を調べる。

2-2. 実験概要

2-2-1. 試験体概要

試験体は無欠点の寸法 20mm×20mm×320mm、ニ方柱とする。樹種は、(その1)で製材として一般的な針葉樹のスギを、(その2)で伝統建築物に広く用いられる広葉樹のケヤキを対象とする。

2-2-2 実験条件

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<sup>3)</sup>、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いる<sup>4)</sup>。よって、非損傷性に影響する要因を温度と含水率について整理すると図2のようになり、以下のように条件を設定した。また、各条件15本以上とし、実験後に得た各条件の平均含水率と試験体本数を表1に示す。

■加熱温度

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°Cであった常温の他に、50°C、80°C、95°Cとする。

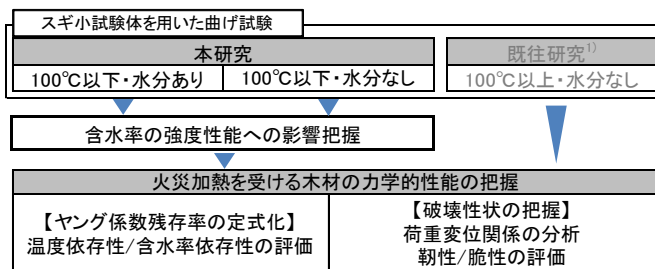


図1 研究フロー

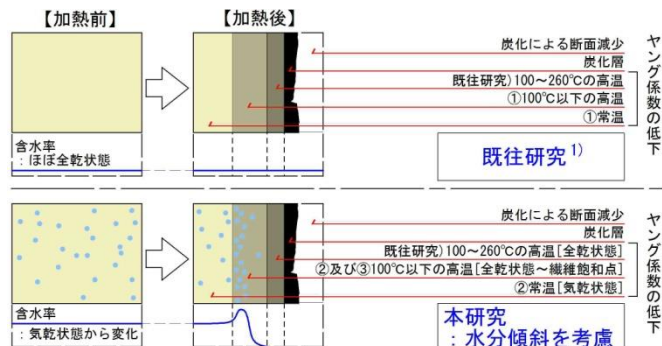


図2 温度と含水率の非損傷性への影響

表1 実験条件と平均含水率[%]及び試験体数[本]

|         | 低域[5%未満] |     | 中域[5~30%] |      | 高域[30%以上] |      |
|---------|----------|-----|-----------|------|-----------|------|
|         | ほぼ全乾状態   |     | 気乾状態付近    |      | 繊維飽和点以上   |      |
|         | 本数       | 含水率 | 本数        | 含水率  | 本数        | 含水率  |
| 常温時     | 15       | 5.1 | 32        | 18.8 | 18        | 90.0 |
| 50°C高温時 | 15       | 4.7 | 27        | 16.8 | 18        | 88.2 |
| 80°C高温時 | 15       | 3.7 | 28        | 17.7 | 17        | 93.2 |
| 95°C高温時 | 15       | 3.3 | 27        | 16.2 | 18        | 90.9 |

Influence of Water Content on the Mechanical Properties of Wood under Heating  
 Part1: Exposure temperature and Water Content dependence of Young's modulus and bending strength of cedar

SUZUKI Tatsuro, KAKU Chihiro, HASEMI Yuji, KAMIKAWA DAISUKE, YASUI Noboru, KAMEYAMA Naohisa, KOSHIHARA Mikio, NAGAO Hirofumi

## ■含水率

①**低域**：試験体を含水率 5%未満まで乾燥させ、全乾状態に近い状態とする。本領域での検証は、木材の力学的強度の最も高い状態を把握することを目的とする。

②**中域**：試験体を含水率 5~30%まで乾燥させ、気乾状態付近の含水率とする。本領域での検証は、大断面の木質構造部材における加熱前及び火災時健全部、及び部材内部で水分移動が起こった場合を想定し、含水率上昇による力学的強度低下の勾配を把握することを目的とする。

③**高域**：試験体を含水率 30%以上の状態とする。本領域での検証は、木材の含水率上昇による力学的強度低下の下限を把握することを目的とする。

### 2-2-3 試験方法

試験は図3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**：試験体は繊維飽和点より十分に湿った丸太と気乾状態の丸太の二本から切り出し、乾燥のみによって含水率調整を行う(図4)。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。ただし、気乾状態の丸太は切り出し時に欠点が多く、一部別の材から切り出した試験体を使用している。

②**非破壊曲げ試験**：全ての試験体において、曲げ試験によって力学的強度低下しない範囲で加力を行い(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。このときスグでは 0.25kN まで、ケヤキでは 0.5kN まで加力を行う。

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加力位置はスパンの中央部とし、変位速度が 10mm/分と一定になるように加力する。加熱による力学的強度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含水率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、ヤング係数、ヤング係数残存率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6,7,8に示す。本研究で用いた試験体の平均密度は

0.362[g/cm<sup>3</sup>]、含水率はおおよそ 3~150%程度であったが、100%以上では、含水率は力学的強度にほぼ影響しないと考え図6,7,8には表示していない。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2,3,4に示す。

繊維飽和点を 30%と仮定し<sup>5)</sup>、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%以下では線形近似した。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、全乾状態に比した力学的性能の低下率を表5に示す。

#### (1)含水率低域の温度依存性

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 0.63 倍に、ヤング係数は約 0.91 倍に低下した。

#### (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、低域と比べ高域では曲げ強度は約 0.61 倍に低下した。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。

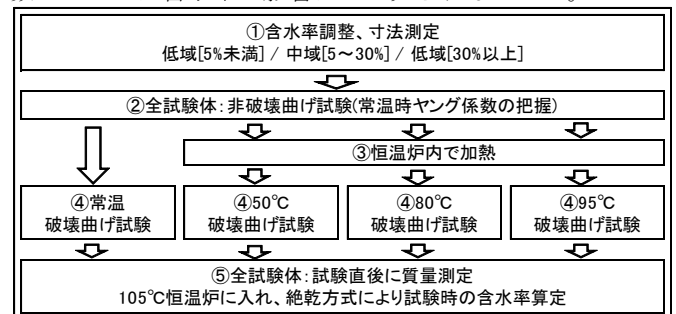


図3 実験手順



写真1 恒温炉つき曲げ試験機

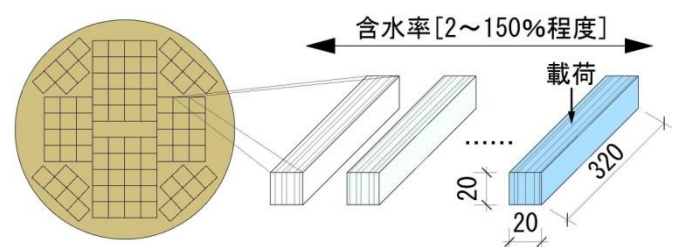


図4 試験体概要図



図5 試験体図及び熱電対設置位置

### (3)温度依存性と含水率依存性の相関性

力学的強度の低下は温度上昇と含水率上昇の双方に影響を受け、これら二つの要因が相乗効果となり、高温時には常温時よりも含水率依存性が高まる場合がある。

曲げ強度は本実験で最も低い 50℃以上の加熱で、ヤング係数は 80℃以上の加熱においてのみ、常温時よりも含水率依存性が高まった。ヤング係数残存率は、表 4 に示すように 50℃高温時には含水率によらず一定となったが、95℃高温時には低域から高域へ約 0.63 倍に低下した。

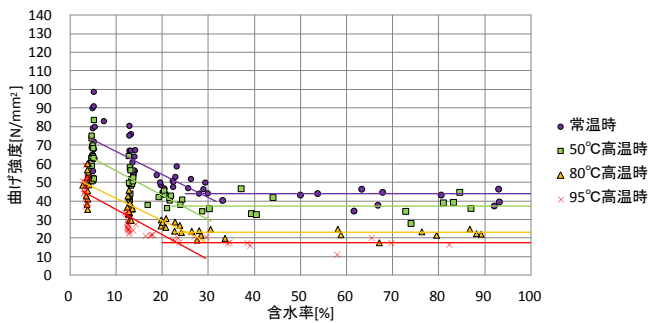


図 6 加熱温度ごとの含水率と曲げ強度の関係

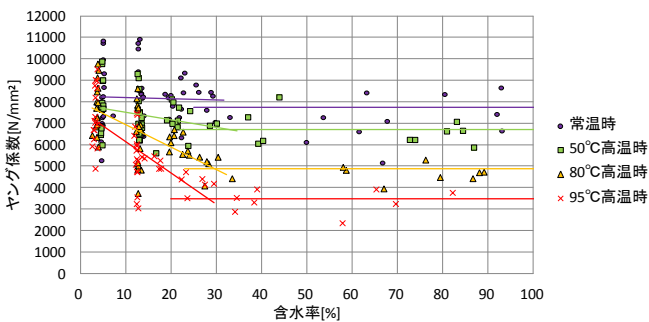


図 7 加熱温度ごとの含水率とヤング係数の関係

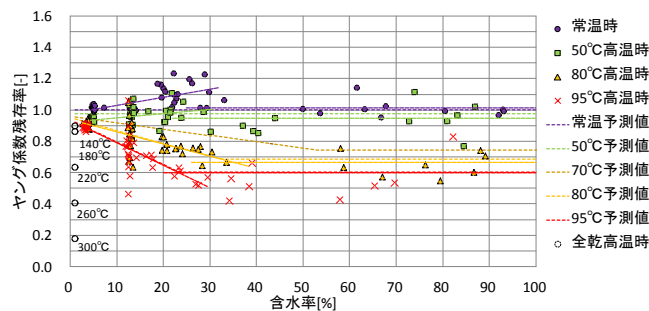


図 8 加熱温度ごとの含水率とヤング係数残存率の関係

表 2 各条件における曲げ強度[N/mm²]の平均値

|        | 低域[5%未満] |       | 中域[5~30%] |      | 高域[30%以上] |      |
|--------|----------|-------|-----------|------|-----------|------|
|        | 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 | 55.4      | 9.89 | 44.0      | 5.26 |
| 50℃高温時 | 62.2     | 11.07 | 46.9      | 7.33 | 37.3      | 4.86 |
| 80℃高温時 | 48.7     | 8.32  | 31.7      | 7.03 | 23.1      | 3.05 |
| 95℃高温時 | 45.7     | 6.98  | 25.2      | 4.80 | 17.6      | 2.49 |

表 3 各条件におけるヤング係数[N/mm²]の平均値

|        | 低域[5%未満] |      | 中域[5~30%] |      | 高域[30%以上] |      |
|--------|----------|------|-----------|------|-----------|------|
|        | 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 | 8202      | 1170 | 7736      | 1286 |
| 50℃高温時 | 7741     | 1213 | 7250      | 891  | 6696      | 630  |
| 80℃高温時 | 7754     | 1178 | 6028      | 1185 | 4866      | 708  |
| 95℃高温時 | 7391     | 2181 | 5103      | 1142 | 3486      | 535  |

表 4 各条件におけるヤング係数残存率[-]の平均値

|        | 低域[5%未満] |       | 中域[5~30%] |       | 高域[30%以上] |       |
|--------|----------|-------|-----------|-------|-----------|-------|
|        | 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 | 1.07      | 0.076 | 1.01      | 0.048 |
| 50℃高温時 | 0.94     | 0.013 | 0.97      | 0.073 | 0.95      | 0.085 |
| 80℃高温時 | 0.91     | 0.020 | 0.80      | 0.099 | 0.67      | 0.063 |
| 95℃高温時 | 0.89     | 0.016 | 0.70      | 0.127 | 0.60      | 0.110 |

### 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の両方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 に、100℃以上の加熱で温度依存性を調べた既報<sup>1)</sup>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。

既報<sup>1)</sup>では 2-2 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

既報の非損傷性予測<sup>2)</sup>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と含水率の連続した関数として表す予測式を提案する。

##### 3-2-2 検討方法

予測式の提案に向けて以下のように仮定する。

- ・100℃以上では常に含水率は0%であるものとする<sup>4)</sup>。
- ・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<sup>2)</sup>、300℃以上では炭化し耐力を完全に失うとして考えない<sup>3)</sup>。

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、 $t_0 = 25 [℃]$ としたときの予測結果を図 8 に点線で併記し、実験結果との整合性を確認した。

$$\begin{aligned}
 &0 \leq t < 60 \quad Y_1(u) = 1.00 - 0.00089(t - t_0) \\
 &60 \leq t < 100 \quad Y_2(u) = \\
 &\quad \max \{1 - 0.0057(t - t_0), 1.00 - 0.00041(t - 60)u - 0.00089(t - t_0)\} \\
 &100 \leq t < 180 \quad (X, Y_3) = (0, 1.00 - 0.00089(t - t_0)) \\
 &180 \leq t \leq 300 \quad (X, Y_4) = (0, 1.00 - 0.0057(t - 180) - 0.00089(180 - t_0))
 \end{aligned}$$

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。

### 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<sup>6)</sup>。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

分析によって得た荷重変位曲線の一部を図9, 10, 11に示す。条件ごとに曲げ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、実験強度が平均値に最も近い試験体の荷重変位曲線を用いた。また、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%として算出した比率を表6, 7に示す。図9, 10, 11には、各条件の平均の曲げ強度を $\sigma$ 、ヤング係数をE、仕事をPとして荷重変位曲線に併記している。

##### (1) 常温時の含水率の影響(図9)

含水率上昇によって力学的強度は低下するが、含水率低域と中域の仕事はほぼ同値であった。

##### (2) 100℃以下の加熱高温時の含水率の影響(図10)

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低域よりも中域の方が大きい。

##### (3) 100℃以上の加熱の影響(図11)

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<sup>7)</sup>、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

高温時のスギの含水率が力学的に及ぼす影響について、以下のような知見を得た。

- ・ 力学的強度の低下は温度と含水率の影響を同時に受け、95℃高温時の繊維飽和点以上の含水率では、ほぼ全乾状態に比べて曲げ強度は0.59倍に、ヤング係数は0.73倍に低下した。

- ・ 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量が2割以上減少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材径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。広葉樹材の実験結果は、続報を参考にされたい。

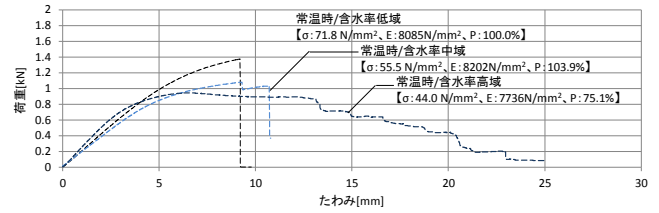


図9 含水率による荷重変位関係の変化【全乾状態】

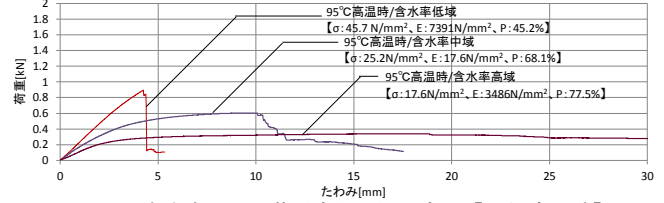


図10 含水率による荷重変位関係の変化【95℃高温時】

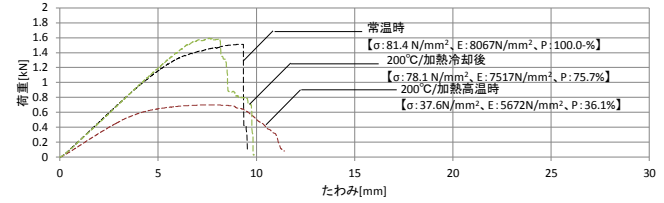


図11 200℃加熱冷却後の荷重変位関係の変化

表6 仕事[J]と全乾常温時との比率[%]【100℃以下】

|        | 低域[5%未満] |         | 中域[5~30%] |       | 高域[30%以上] |      |
|--------|----------|---------|-----------|-------|-----------|------|
|        | 仕事       | 比率      | 仕事        | 比率    | 仕事        | 比率   |
| 常温時    | 6.29     | (100.0) | 6.54      | 103.9 | 4.73      | 75.1 |
| 50℃高温時 | 5.01     | 79.6    | 5.91      | 93.9  | 5.42      | 86.1 |
| 80℃高温時 | 2.74     | 43.5    | 4.77      | 75.8  | 5.65      | 89.7 |
| 95℃高温時 | 2.85     | 45.2    | 4.28      | 68.1  | 4.88      | 77.5 |

表7 仕事[J]と全乾常温時との比率[%]【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、613-616、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) BERTIL FREDLUND「A MODEL FOR HEAT AND MASS TRANSFER IN TIMBER STRUCTURES DURING FIRE」PhD Dissertation, LUND UNIVERSITY, SWEDEN, 19885
- 5) 村田誠四郎「木材工業ハンドブック改訂4版」2004.3
- 6) 古田裕三「飽水木材の熱軟化特性」木材工業57巻8号、2002.8

##### 【謝辞】

本研究に関する実験は、科学研究費基盤研究「大断面木質部材の防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。心より感謝申し上げます。

\*1 早稲田大学大学院  
 \*2 早稲田大学大学院・工博  
 \*3 早稲田大学理工学術院教授・工博  
 \*4 (国立研究開発法人)森林総合研究所・博士(工学)  
 \*5 早稲田大学理工学研究所客員研究員・博士(工学)  
 \*6 亀山建設(株)・工博  
 \*7 東京大学生産技術研究所教授・博士(工学)  
 \*8 (国立研究開発法人)森林総合研究所

\*1 Graduate School of Waseda Univ.  
 \*2 Graduate School of Waseda Univ., M.Eng.  
 \*3 Prof., Department of Architecture, Waseda Univ., Dr.Eng.  
 \*4 Forestry and Forest Products Research Institute, Dr.Eng.  
 \*5 Visiting Researcher, RISE Waseda Univ, Ph.D.  
 \*6 Kameyama Construction, M.Eng.  
 \*7 Prof., Institute of Industrial Science, The University of Tokyo, Dr.Eng.  
 \*8 Forestry and Forest Products Research Institute.