

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・曲げ強度の測定 -

INFLUENCE OF FIRE EXPOSURE ON THE MECHANICAL PROPERTIES OF WOOD

- Exposure temperature dependence of Young's modulus and bending strength of Cryptomeria japonica, Larix leptolepis, Pseudotsuga menziesii and Zelkova serrata under and after heating -

加来千紘*¹, 長谷見雄二*², 安井昇*³, 保川みずほ*⁴, 上川大輔*⁵
亀山直央*⁶, 小野徹郎*⁷, 腰原幹雄*⁸, 長尾博文*⁹Chihiro KAKU, Yuji HASEMI, Noboru YASUI,
Mizuho YASUKAWA, Daisuke KAMIKAWA, Naohisa KAMEYAMA,
Tetsuro ONO, Mikio KOSHIHARA and Hirofumi NAGAO

Young's modulus and bending strength of 3 species of wood commonly used for engineered wood and Zelkova, hardwood normally used for traditional large building, heated up to 250°C are measured at the elevated temperature and after cooling to the room temperature as an engineering basis for the structural fire safety design and the reusability diagnosis of large-scale timber buildings. The results show the both properties, either at elevated temperature or after cooling, are highly dependent on exposed temperature for 150-200°C or higher, and correlation between the Young's modulus and the bending strength tends to become weaker with rise of exposed temperature. The bending strength at elevated temperature is found to converge while it is notably scattered at normal temperature.

Keywords : Young's modulus, bending strength, temperature dependence, after fire heating, softwoods, hardwoods

ヤング係数, 曲げ強度, 温度依存性, 加熱冷却後, 針葉樹材, 広葉樹材

1. はじめに

近年、木造建築は森林資源の管理や低炭素化等、様々な方面から注目されており、大規模建築への木造活用に向けた法整備や行政的施策が進められている¹⁾。今後、大規模建築に適した耐火・準耐火構造等の木造部材の開発が期待されるが、効率的に技術開発するには、火災加熱による部材の力学的性能の変化を予測できるようにする必要がある。火災加熱が木質部材の力学的性能に及ぼす影響には、炭化による断面の減少、木材の温度上昇による力学的性能の変化等があり、いくつかの実測例が報告されている^{2)~9)}。筆者らは、所定の火災加熱時間後の部材断面内の温度分布を整理し、既往文献による木材の温度依存性を反映させることにより部材の力学的性能を予測できることを示した^{7)~9)}。

この手法では、非損傷性が、柱は座屈に、はり曲げ破壊に支配されると仮定し、所定の火災加熱時間後の部材の残存断面及び内部温度分布の予測から破壊時の荷重を算定し、部材にかかる荷重との

比較により評価する。既報では、柱について高温時ヤング係数の実測値に基づき座屈荷重を算定したが^{7)~9)}、はりについては、曲げ強度が非破壊測定できず、その温度依存性にも不明な点が多いため、部材強度の5%下限値をもとに規定する建築基準法告示の基準強度を使用し、破壊時の曲げ強度を算定することで、スギ集成材はりについて安全側の設計が得られることを報告した⁹⁾。しかし、同様の方法をケヤキ製材はりの載荷加熱試験に適用したところ、基準曲げ強度の定義から予想されるほど安全側にはならず、ケヤキ製材では、曲げ強度が高温では顕著に低下する可能性がある¹⁰⁾と予想された^{10)~11)}。はり材については、高温での曲げ強度を把握する必要があるが、非破壊測定できないため、その予測の方法には、曲げ強度と相関を有し、非破壊測定可能な物性から推定する方法等が考えられる。

一方、耐火構造・準耐火構造の建物は、火災時の崩壊危険を抑制するため、所定の非損傷性を有し、全焼等大きな火災被害を受けない限り、火災後も建物が継続的に使用される可能性が高い。そのた

本論文の実験の骨子及び結果の一部(ケヤキ)については、文献18)で口頭発表した。

*¹ 早稲田大学大学院*² 早稲田大学理工学術院 教授・工博*³ 早稲田大学理工学研究所 招聘研究員・博士(工学)*⁴ 東京都庁 工修

(当時 早稲田大学大学院)

*⁵ 独立行政法人森林総合研究所 博士(工学)*⁶ 亀山建設㈱ 代表取締役社長・工修*⁷ 椋山女学園大学 教授・工博*⁸ 東京大学生産技術研究所 教授・博士(工学)*⁹ 独立行政法人森林総合研究所

Graduate School, Waseda Univ.

Prof., Department of Architecture, Waseda Univ., Ph. D.

Visiting Researcher, RISE, Waseda Univ., Ph. D.

Tokyo Metropolitan Government, M. Eng.

(Former Waseda Univ.)

Forestry and Forest Products Research Institute, Ph. D.

President, Kameyama Construction, M. Eng.

Prof., Sugiyama Jogakuen Univ., Ph. D.

Prof., Institute of Industrial Science, The University of Tokyo, Ph. D.

Forestry and Forest Products Research Institute

め、大規模木造建築では、火災時だけでなく火災後の構造部材の力学的性能を適切に評価できるようにする必要がある。火災で構造部材が被災した木造建物を健全な状態で継続的に使用するためには、火災後の構造部材の残存耐力を把握する必要があり、またそのためには、火災加熱を受けた部材が火災後に再び常温まで冷却された場合（以下、加熱冷却後）の力学的性能の変化の有無・程度の把握が不可欠である。しかし、木構造において火災後の継続的使用を想定した防火性能の検討例は少なく、大断面木造部材の加熱冷却後の力学的性能は、火災で被災した大断面集成木造体育館の部材に関する実測例が報告されている¹²⁾程度である。

そこで本研究では、実験により炭化に至らない温度範囲で、ヤング係数及び曲げ強度の温度依存性及び加熱冷却後の特性を把握し、併せて、高温時及び加熱冷却後の曲げ強度を非破壊測定可能な諸量から予測できるかを確認するために、ヤング係数及び密度との相関を調べた。実験は、温度調整炉付きの圧縮試験機により JISZ2101「木材の曲げ試験方法」に準拠する曲げ試験を行い、試験体には、大断面木質部材に用いられるスギ、カラマツ、ベイマツ、ケヤキ製の無欠点小試験体を用いた。以上を通じ、火災加熱が木造建築物の火災時及び火災後の構造性能に与える影響を把握し、より系統的な評価を検討するための基礎的情報を得る。

2. 火災加熱による木材の力学的性能への影響の検討方法

木材の力学的性能において、ヤング係数は非破壊の曲げ試験により測定が可能であるのに対し、曲げ強度は、試験体が破壊した際の荷重により算出するため、非破壊での把握は不可能である。そこで、ヤング係数については、常温で測定を行った後、同じ試験体を加熱して、高温時または加熱冷却後に測定し、加熱前後の測定値を比較する方針とした。一方、曲げ強度は、同一の試験体で各条件での比較ができないため、加熱温度及び加熱後の冷却の有無それぞれの条件で測定した試験体群の曲げ強度を常温で測定した試験体群の値と比較し、火災加熱が曲げ強度に及ぼす影響を把握する方針とした。加熱温度は、木材が炭化しない範囲を想定し、常温以外は、100℃、150℃、200℃、250℃とした。スギの試験体は、250℃の加熱中に、試験体に着火したため、最高温度を 230℃とした。

以下、本論文では、加熱前に常温で測定した値を常温時ヤング係数、常温時曲げ強度と呼び、各加熱温度で加熱した際のヤング係数、曲げ強度は高温時ヤング係数、高温時曲げ強度という。更に、加熱後、常温に冷却した後の値を加熱冷却後ヤング係数、加熱冷却後曲げ強度とする。また、高温時の値を常温時の値で除した値を高温時残存率、加熱冷却後の値を常温時の値で除した値を加熱冷却後残存率ということにする。これらの残存率は、ヤング係数については試験体ごとに算出可能であるが、曲げ強度については常温時、高温時、

加熱冷却後、それぞれの平均値の比として算出される値である。

なお、本論文では、加熱温度と高温時及び加熱冷却後の木材の力学的性能の関係の把握を主題とするため、力学的性能の常温時の平均値や残存率の算出にあたっては、曲げ破壊の破壊形態が異なり、力学的性能が試験体群の分布範囲から大きく外れる試験体や一般的文献値¹³⁾と明らかに異なる試験体は除外することとした。

3. 実験方法

3-1 試験体の条件

試験体には、針葉樹としてスギ、カラマツ、ベイマツ、広葉樹としてケヤキを選択し、含水率が平衡状態の 1 本の丸太から切り出した、寸法 20mm×20mm×320mm、2 方征、無欠点の木片を使用した（図 1）。力学的性能に対する諸条件の影響が複雑にならないようにするため、試験体は 1 本の丸太から切り出し、試験前に 60℃程度の乾燥機の中で含水率を 3%程度まで下げ、重量を測定してから試験を行うこととした。実験に供せられる試験体数は、この条件の制約を受ける。

3-2 試験方法

試験は JISZ2101「木材の曲げ試験方法」に準拠して、280mm スパンの 3 点曲げ試験とし、試験装置は、温度調整炉付きの圧縮試験機を使用した（写真 1）。

実験の手順を図 2、各条件での試験体数を表 1 に示す。まず、試験体の強度が低下しない範囲（ケヤキ 0.5kN、スギ、カラマツ、ベイマツ 0.25kN）で加力を行う曲げ試験（以下、非破壊曲げ試験）により、全試験体の常温時ヤング係数を把握し、併せて試験体重量

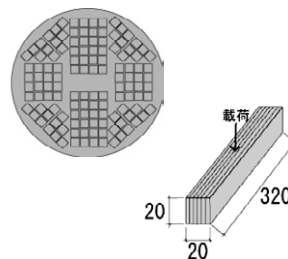


図 1 試験体図

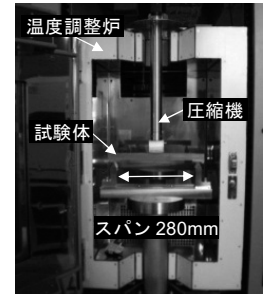
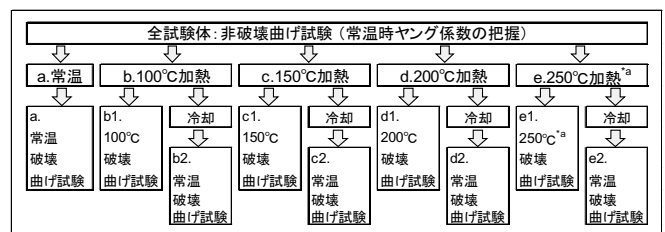


写真 1 温度調整炉付き圧縮試験機



*a スギの試験体は、250℃の加熱中に試験体が発火したため、最高温度を230℃とした。

図 2 実験の手順

表 1 各条件での試験体数一覧

樹種	スギ ^a		カラマツ		ベイマツ		ケヤキ	
	高温時	加熱冷却後 ^b	高温時	加熱冷却後 ^b	高温時	加熱冷却後 ^b	高温時	加熱冷却後 ^b
常温	20		14		15		14	
100℃	20	20 (2)	15	15 (2)	15	15 (2)	16	16
150℃	20	20 (2)	15	15 (2)	15	15 (2)	16	15 (3)
200℃	20	20 (2)	15	15 (2)	15	15 (2)	16	15 (3)
250℃(230℃) ^a	20	20 (2)	14	14 (1)	15	15 (2)	16	16 (2)

^a スギの試験体は、250℃の加熱中に試験体が発火したため、最高温度を230℃とした。

^b ()内の数値は冷却方法を急冷とした場合の試験体の本数を示す。

を測定した。その後、試験体が破断に至るまで加力する曲げ試験（以下、破壊曲げ試験）を行うため、実験条件に応じてa～eの5グループに分けた。すなわち、aグループは破壊曲げ試験を常温で行い、常温でのヤング係数及び曲げ強度を算出した。b～eグループは、試験体内部及び雰囲気温度が所定の各加熱温度（100℃、150℃、200℃、250℃（スギは230℃））に達するのを確認した後、各グループの半数の試験体は高温のまま破壊曲げ試験を行い、高温時ヤング係数及び曲げ強度を算出した（b1、c1、d1、e1）。またb～eグループの残りの半数の試験体は、恒温炉から取り出し、含水率の上昇を避けるため、デシケータの中で常温まで自然冷却した後、破壊曲げ試験を行い、加熱冷却後ヤング係数及び曲げ強度を算出した（b2、c2、d2、e2）。各条件での曲げ試験開始時には、再度試験体重量を測定し、破壊時の試験体密度を算出した。

なお、非破壊曲げ試験、破壊曲げ試験とも、載荷位置はスパンの中央部とし、変位が10mm/分となるよう載荷した。試験体内部温度は、試験体と同断面の木片中心部に熱電対を設置した温度計測用サンプルを、曲げ試験用試験体と同時に恒温炉に入れ計測した。また、冷却方法の影響を調べるため、加熱冷却後の試験について、冷却方法を水による急冷とした試験を加熱温度ごとに数本実施した。その際、含水率の変化を防ぐため、試験体はポリエチレン製の袋に入れて水に浸すこととし、実験結果の平均値、残存率の算出からは除外した。

4. 実験結果及び考察

4-1 ヤング係数

(1) ヤング係数の温度依存性

高温時ヤング係数の測定結果及び残存率を表2、図3に示す。スギ、カラマツ、ベイマツ及びケヤキ、全ての樹種において、加熱温度の上昇に伴い残存率が低下し、200℃以上では、ヤング係数残存率の温度に対する低下率が0.52～0.57%/Kと、顕著に低下している。これは、木材が200℃付近以上で、熱分解による成分変化の影響を受ける¹⁴⁾ためと考えられる。特に、ケヤキではヤング係数の著しい

表2 高温時ヤング係数及び曲げ強度

樹種	加熱温度	ヤング係数 [N/mm ²]			曲げ強度 [N/mm ²]		
		実測値(平均)	変動係数[%]	残存率(平均)	実測値(平均)	変動係数[%]	残存率
スギ	常温	8,067	8.11	1.03	81.39	10.32	1.00
	100℃	6,992	9.36	0.91	60.28	7.62	0.74
	150℃	6,713	8.06	0.88	52.19	11.06	0.64
	200℃	5,672	7.27	0.73	37.55	7.80	0.46
	230℃	4,313	11.62	0.56	24.42	9.55	0.30
カラマツ	常温	9,868	11.97	0.99	117.03	13.92	1.00
	100℃	9,068	13.84	0.92	88.22	17.65	0.75
	150℃	8,011	12.09	0.82	66.75	13.10	0.57
	200℃	6,876	13.33	0.70	47.98	18.42	0.41
ベイマツ	常温	12,018	4.03	1.01	121.66	7.86	1.00
	100℃	10,552	4.46	0.88	73.31	6.68	0.60
	150℃	9,961	5.86	0.83	70.71	7.97	0.58
	200℃	9,052	5.46	0.76	59.26	7.93	0.49
ケヤキ	常温	10,516	15.20	1.00	127.27	11.66	1.00
	100℃	9,155	13.03	0.87	83.15	16.75	0.65
	150℃	8,503	15.11	0.81	72.69	14.52	0.57
	200℃	5,652	21.37	0.53	38.95	22.97	0.31
	250℃	3,283	29.83	0.31	18.59	20.57	0.15

表3 加熱冷却後ヤング係数及び曲げ強度

樹種	加熱温度	ヤング係数 [N/mm ²]			曲げ強度 [N/mm ²]		
		実測値(平均)	変動係数[%]	残存率(平均)	実測値(平均)	変動係数[%]	残存率
スギ	常温	8,067	8.11	1.03	81.39	10.32	1.00
	100℃	7,788	9.21	1.03	82.52	12.37	1.01
	150℃	7,632	7.17	1.01	82.61	9.49	1.01
	200℃	7,517	8.41	0.97	78.11	8.51	0.96
	230℃	7,290	7.68	0.95	70.88	10.92	0.87
カラマツ	常温	9,868	11.97	0.99	117.03	13.92	1.00
	100℃	9,911	12.78	1.01	118.74	20.34	1.01
	150℃	9,904	11.39	1.01	119.78	15.75	1.02
	200℃	9,517	12.57	0.98	101.25	22.21	0.87
ベイマツ	常温	12,018	4.03	1.01	121.66	7.86	1.00
	100℃	11,793	5.19	0.99	123.21	4.99	1.01
	150℃	11,661	5.47	0.99	125.72	6.02	1.03
	200℃	11,349	5.89	0.96	119.92	9.95	0.99
ケヤキ	常温	10,516	15.20	1.00	127.27	11.66	1.00
	100℃	10,476	14.63	0.99	120.48	17.66	0.95
	150℃	10,434	13.31	0.98	113.16	19.65	0.89
	200℃	10,208	14.12	0.97	99.70	22.89	0.78
	250℃	9,841	14.38	0.94	55.27	15.86	0.43

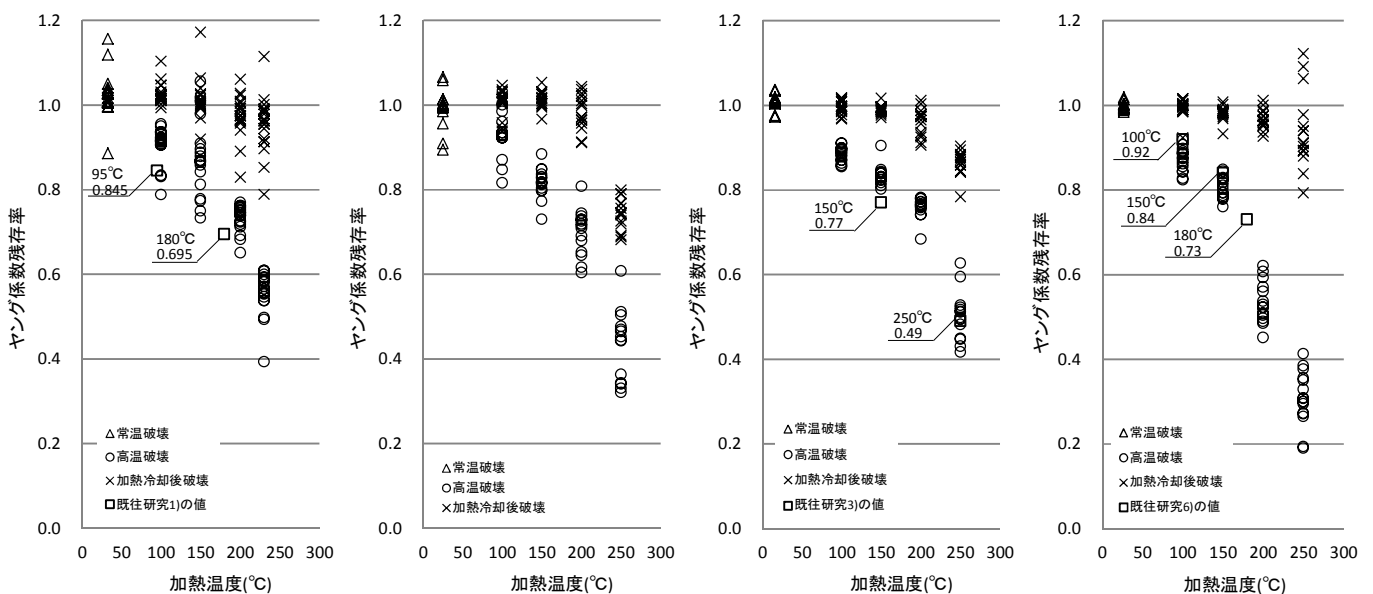


図3 加熱温度と高温時及び加熱冷却後のヤング係数残存率（左からスギ、カラマツ、ベイマツ、ケヤキ）

低下が 150℃以上で始まっている。図 3 には、スギ、ケヤキの小試験体やベイマツ集成材の既往研究^{1),3),6)}の報告値も記載したが、いずれも本実験の結果に近い。

(2) 加熱冷却後のヤング係数

加熱冷却後ヤング係数の測定結果及び残存率を表 3、図 3 に示す。残存率の平均値は、200℃では全樹種で 0.96 以上であり、加熱温度 200℃以下では、常温まで試験体の温度が下がると、常温時と同程度のヤング係数に回復する。しかし、250℃では、カラマツ、ベイマツの残存率が各々 0.74、0.86 と 10%を超える低下が認められ、熱分解による成分の変化が冷却後の力学的性能にも影響を残していると考えられる。また、冷却方法を急冷とした試験体の残存率は、急冷を実施した全ての樹種及び加熱温度において、自然冷却した試験体群の残存率と同じ範囲に分布し、急冷による違いはみられなかった。

4-2 曲げ強度

(1) 曲げ強度の温度依存性

高温時曲げ強度の測定結果及び残存率を表 2、図 4 に示す。高温時曲げ強度は、残存率が 100℃で 0.60~0.75 と、ヤング係数に比べて低温で低下が始まる。いずれの樹種も 200℃での残存率は 0.5 未満にまで低下し、同条件でのヤング係数残存率に対して約 0.6 倍となる。曲げ強度の温度に対する低下率は、針葉樹では 200℃以上、ケヤキは 150℃を超えると大きくなり、高温でのケヤキの曲げ強度の低下は特に顕著である。

(2) 加熱冷却後の曲げ強度

加熱冷却後曲げ強度の測定結果及び残存率を表 3、図 4 に示す。スギ、カラマツ、ベイマツの残存率は、150℃で 1.01、1.02、1.03 ケヤキは 100℃で 0.95 である。従って、針葉樹材は 150℃以下、広葉樹材のケヤキは 100℃以下の加熱温度では、常温時と同程度の曲げ強度に回復するといえる。しかし、いずれも 200℃以上で残存率は低下し始め、特にカラマツ、ケヤキでは、200℃での残存率が各々 0.87、0.78 と、10%を超える低下を示す。250℃(スギは 230℃)では、高温時の著しい低下から大きくは回復していない。これは、200℃付近以上で起こる熱分解による成分変化が、曲げ強度については不可逆的な変化を発生させている可能性を示唆するものである。なお、冷却方法を急冷とした試験体の加熱冷却後曲げ強度は、急冷を実施した全ての樹種及び加熱温度において、自然冷却した試験体群の結果と比較し、急冷による差異はみられなかった。

4-3 曲げ強度と非破壊により把握可能な物性の関係

2章で述べたように、曲げ強度は非破壊での把握はできないため、木構造の品質管理上、非破壊検査可能な諸量から推定できるようにすることが望ましい。常温時の木材の曲げ強度については、樹種毎に、密度やヤング係数との相関があるとの報告¹⁰⁻¹⁷⁾がある。そこで、本実験における常温時、高温時及び加熱冷却後曲げ強度について、試験体密度及びヤング係数との関係を考察する。

(1) ヤング係数と曲げ強度の関係

本実験における常温時、高温時及び加熱冷却後曲げ強度について、ヤング係数との関係を図 5~12 に示す。図には、試験体群ごとの回帰式及び相関係数 r を示す。

カラマツ、ケヤキでは、200℃以下の範囲で両者の間に高い相関が認められ、ヤング係数による曲げ強度の予測に可能性があると考

えられる。加熱温度が 200℃を超える高温時曲げ強度は、高温時ヤング係数との相関係数はまちまちであるが、ヤング係数の値にかかわらず樹種ごとに狭い範囲に集中しており、ほぼ一定の値に低下していることから予測可能である。スギ、ベイマツでは、どの加熱温度でも高い相関性が見られないが、高温時曲げ強度の値は樹種ごとに加熱温度に応じて狭い範囲に集まっている。

一方、加熱冷却後の力学的性能を見ると、カラマツ、ケヤキでは、ヤング係数と曲げ強度が広い加熱温度範囲で高い相関を示すのに対し、スギ、ベイマツでは、どの加熱温度でも高い相関が見られないが、200℃以下では、ほぼ常温の値に回復しており、常温での曲げ強度が把握されていれば、改めて、予測法を検討する必要はない。

(2) 密度と曲げ強度の関係

本実験に用いた全ての無欠点小試験体の加熱前の密度は、スギ 0.32~0.47 [g/cm³]、平均 0.37[g/cm³]、カラマツ 0.44~0.59[g/cm³]、平均 0.54[g/cm³]、ベイマツ 0.46~0.55 [g/cm³]、平均 0.50[g/cm³]、

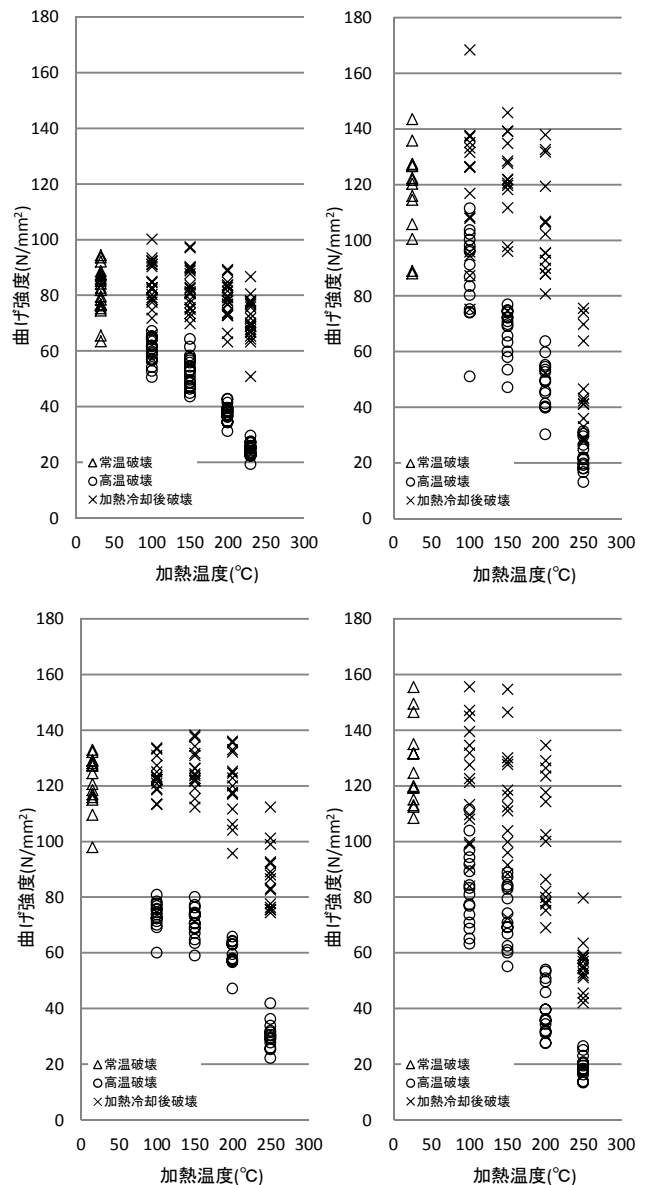


図 4 加熱温度と高温時及び加熱冷却後の曲げ強度 (上段 左スギ、右カラマツ、下段 左ベイマツ、右ケヤキ)

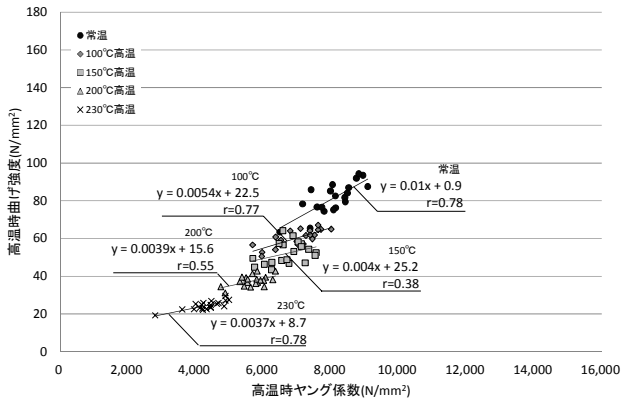


図 5 高温時ヤング係数と曲げ強度 (スギ)

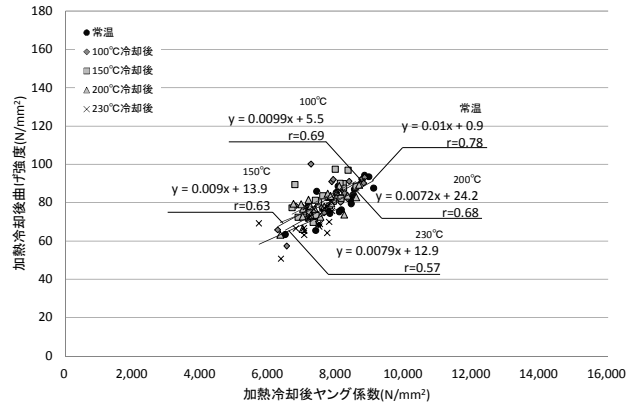


図 6 加熱冷却後ヤング係数と曲げ強度 (スギ)

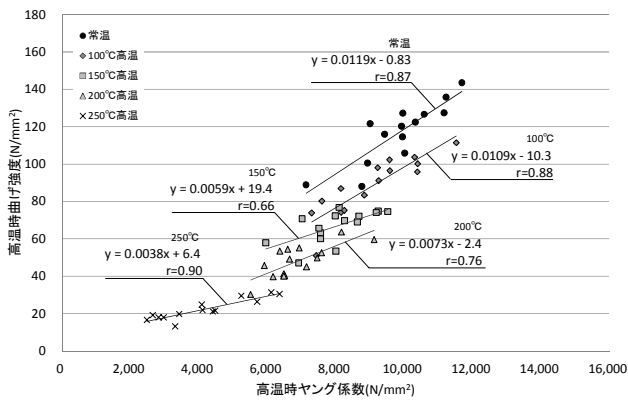


図 7 高温時ヤング係数と曲げ強度 (カラマツ)

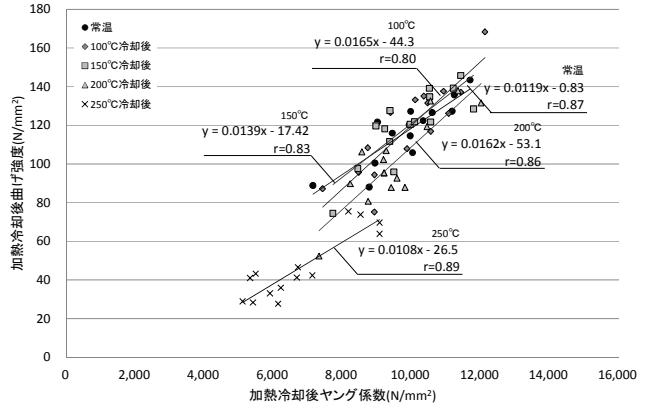


図 8 加熱冷却後ヤング係数と曲げ強度 (カラマツ)

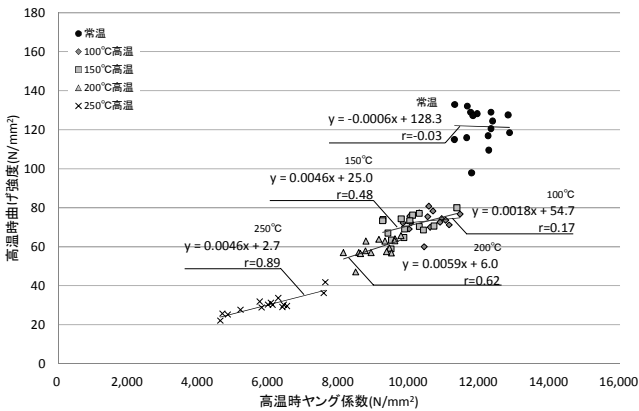


図 9 高温時ヤング係数と曲げ強度 (バイマツ)

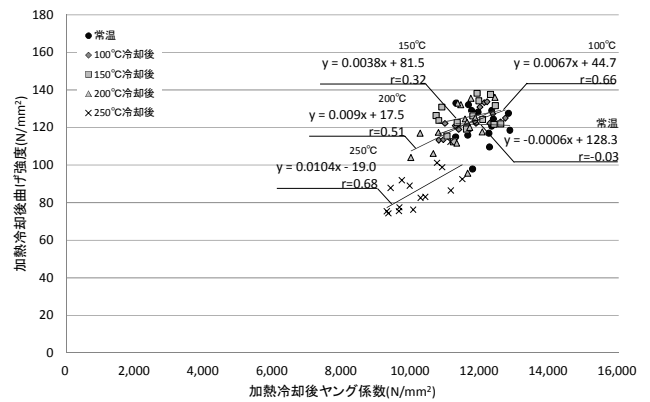


図 10 加熱冷却後ヤング係数と曲げ強度 (バイマツ)

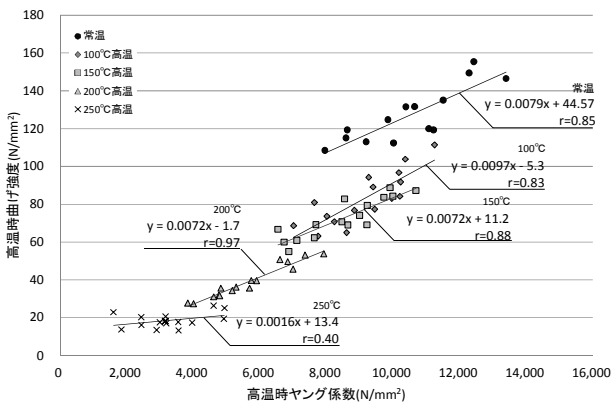


図 11 高温時ヤング係数と曲げ強度 (ケヤキ)

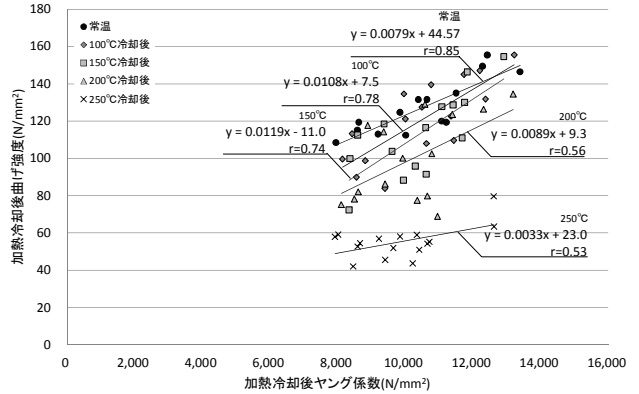


図 12 加熱冷却後ヤング係数と曲げ強度 (ケヤキ)

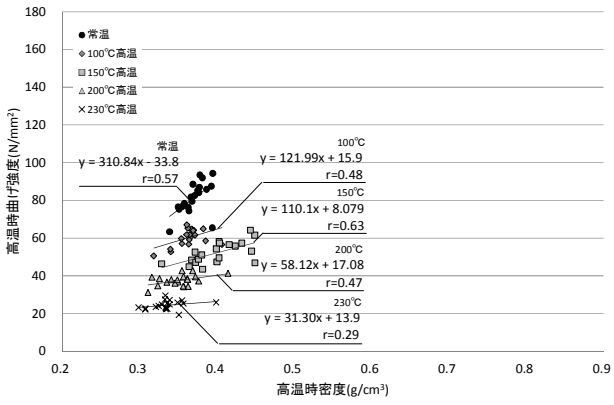


図 13 高温時密度と曲げ強度 (スギ)

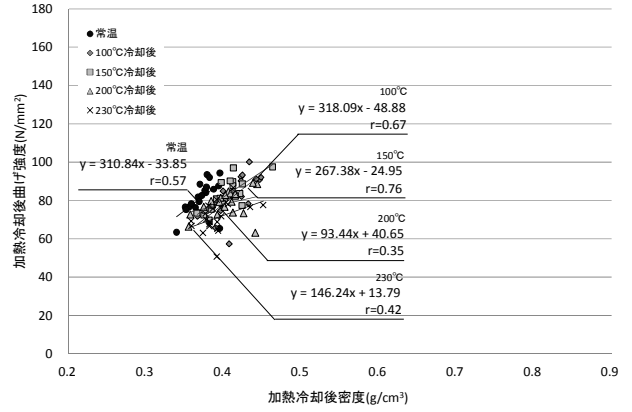


図 14 加熱冷却後密度と曲げ強度 (スギ)

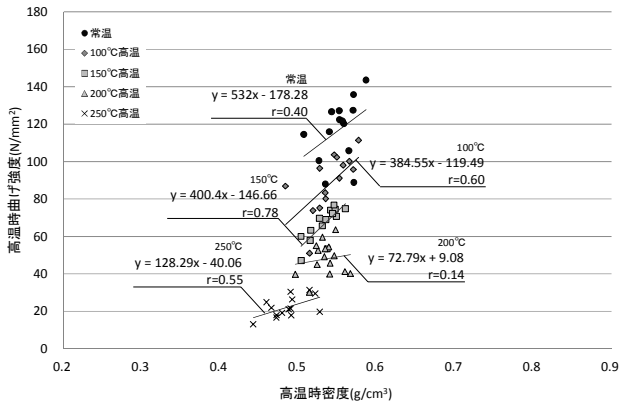


図 15 高温時密度と曲げ強度 (カラムツ)

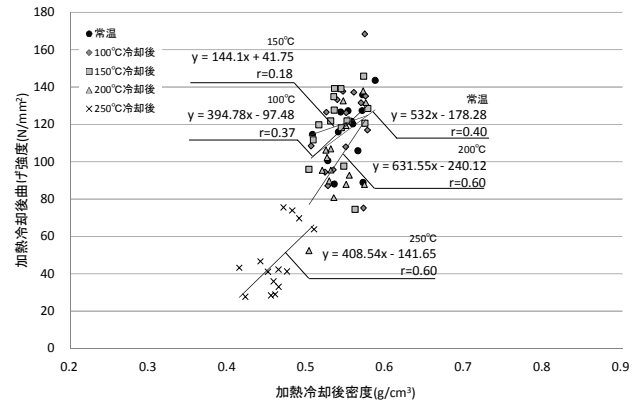


図 16 加熱冷却後密度と曲げ強度 (カラムツ)

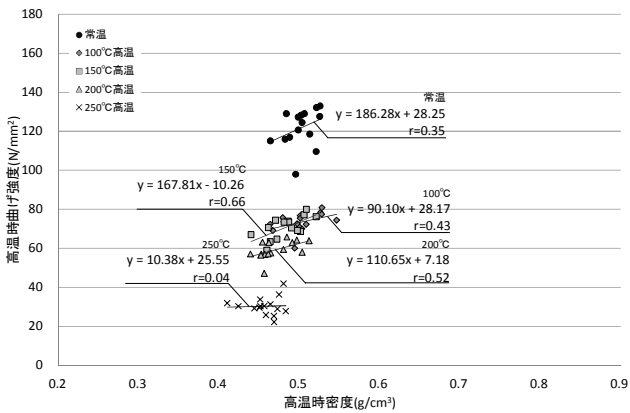


図 17 高温時密度と曲げ強度 (バイマツ)

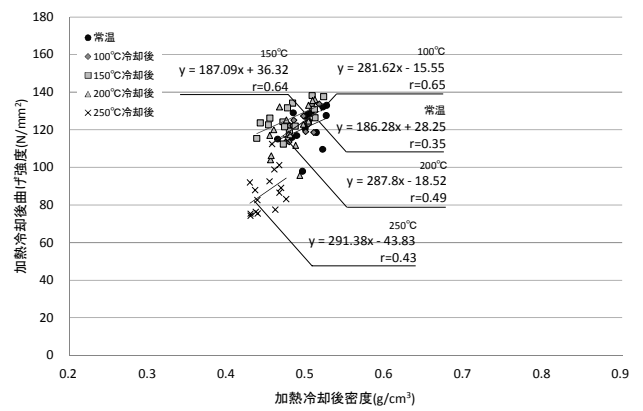


図 18 加熱冷却後密度と曲げ強度 (バイマツ)

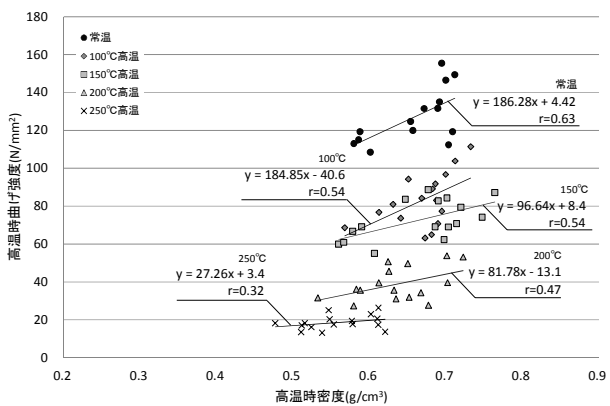


図 19 高温時密度と曲げ強度 (ケヤキ)

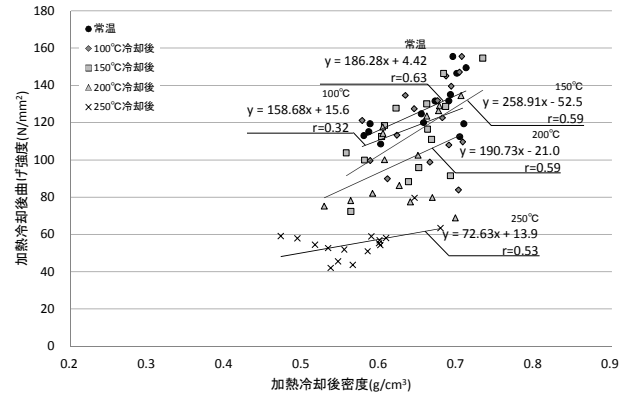


図 20 加熱冷却後密度と曲げ強度 (ケヤキ)

ケヤキ 0.55~0.77 [g/cm³]、平均 0.66[g/cm³]である。また、常温時、高温時及び加熱冷却後曲げ強度について、破壊時の密度との関係を図 13~20 に示す。図には、試験体群ごとの回帰式及び相関係数 r を示すが、曲げ強度と密度の間に正の相関は認められるものの、曲げ強度の予測に活用できるほどの高い相関は見られない。なお、木材において、常温で一般に認められる密度と力学的性能の関係には、含水率も一要因となっていると考えられる¹⁷⁾が、本実験は試験体含水率を 3%まで下げて行っており、含水率の影響は生じ難い。

5. 結論

スギ、カラマツ、ベイマツ及びケヤキ製材に関する高温時及び加熱冷却後の曲げ試験により、以下の知見を得た。

- (1) 高温時ヤング係数は、全樹種において、200℃以上では残存率が著しく低下する。
- (2) 加熱冷却後は、全ての樹種において、加熱温度 200℃以下の場合、温度が再び常温まで下がると、ヤング係数は、ほぼ常温時の値に回復する。
- (3) 高温時の曲げ強度は、全樹種において、残存率が 100℃で 0.60~0.75 と、ヤング係数に比べて低温で低下が始まり、いずれも 200℃では残存率が 0.5 未満にまで低下する。
- (4) 加熱冷却後の曲げ強度は、針葉樹材は 150℃以下、広葉樹材のケヤキは 100℃以下の加熱温度では、常温時と同程度に回復する。しかし、200℃を超えると残存率の低下は著しく、カラマツ、ケヤキでは、200℃での残存率が 10%を超える低下を示し、250℃(スギは 230℃) では、高温時の著しい低下から大きくは回復しない。
- (5) 曲げ強度は非破壊測定できないが、カラマツ、ケヤキでは、200℃以下の範囲で、高温時及び加熱冷却後の曲げ強度は、同じ条件のヤング係数と高い相関を示す。他の樹種及び 250℃(スギは 230℃)では、ヤング係数の値にかかわらず、高温時及び加熱冷却後の曲げ強度は樹種毎に比較的狭い範囲に集中する。
- (6) 木材が火災加熱を受けても、100℃に達しなかった部分は、冷却後、ヤング係数・曲げ強度とも火災の影響をほとんど受けないと判断し得る。更に、スギ、ベイマツで 200℃以下、カラマツで 150℃以下の部分は、冷却後の力学的性能の変化は 10%未満に留まる。

なお、本研究は、火災加熱を想定として、木材の力学的性能と温度の直接的な関係を把握するために、その他の要因を排除するように実験を計画した。通常流通する木材を想定とした欠点の有無や心材・辺材の別、また火災加熱中の木材中の水分移動による含水率の変化等、火災時の木質部材の力学的性能に影響し得る他の要因の検討については、更に今後の研究課題としたい。

謝辞

本研究の実験中、針葉樹に関するものは、科学研究費補助金「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)により行った。実験の遂行にあたり、森林総合研究所の原田寿郎氏、宮武敦氏、亀山建設(株)の長尾大貴氏、研究当時早稲田大学大学院の鈴木あさ美氏、小宮祐人氏、早稲田大学大学院の山口智世氏に多大なるご協力とご支援を頂きました。また、実験の計画、分

析にあたり、日本建築学会防委員会住宅の火災安全小委員会伝統木造準耐火構造 WG の皆様、秋田県立大学の板垣直行准教授に多大なるご指導、ご協力を頂きました。心からお礼申し上げます。

注

注 1) 公共建築物木材利用促進法が 2010 年に制定後、木造 3 階建て学校の防火基準検討、大規模木造に対する助成等の政策が実施されている。

参考文献

- 1) 上杉三郎：スギ材の 180℃以下加熱における曲げ性能、日本木材学会誌 Vol.38, No.11, pp.985-994, 1992.11
- 2) 中村賢一、最上滋二、竹生敏彦、宮林正幸：構造用集成材の耐火性能(第 5 報)、日本建築学会大会学術講演梗概集、防火、pp.827-828, 1986.8
- 3) 中村賢一、最上滋二、竹生敏彦、宮林正幸：構造用集成材の耐火性能(第 6 報)、日本建築学会大会学術講演梗概集、防火、pp.787-788, 1987.10
- 4) 橋本寛、斉藤宏文：高温下木材の縦引張強さ、日本建築学会東北支部研究報告集、pp.361-364, 1996.6
- 5) 日本建築学会：構造材料の耐火性ガイドブック 2009、丸善、2009.3
- 6) 保川みずほ、安井昇、鈴木あさ美、長谷見雄二、亀山直央、豊田康二、門岡直也、上川大輔、腰原幹雄、小野徹郎：大断面広葉樹(ケヤキ)製材による軸組柱の防耐火性能予測に関する研究、日本建築学会環境系論文集 第 685 号、pp.633-638, 2013.3
- 7) 安井昇、清水真理子、長谷見雄二、村上 雅英、上島 基英、木村 忠紀、北後 明彦、田村 佳英、吉田 正友、山本 幸一：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、日本建築学会環境系論文集 第 574 号、pp.1-6, 2003.12
- 8) 清水真理子、長谷見雄二、村上雅英、安井昇：木造真壁の耐火性能予測、日本建築学会構造系論文集、第 611 号、pp.165-170, 2007.1
- 9) 安井昇、長谷見雄二、平井宏幸、渡邊圭太、腰原幹雄、澤野恵直、小川敦史、木村忠紀、山本幸一：横架材の加熱後曲げ応力度予測に基づく伝統木造床の防耐火設計と梁長さ・間隔の拡張可能性、日本建築学会構造系論文集 第 642 号、pp.1523-1529, 2009.8
- 10) 亀山直央、保川みずほ、長谷見雄二、安井昇、鈴木あさ美、豊田康二、門岡直也、腰原幹雄、遊佐秀逸、小野徹郎：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・はりの開発(その 2) はりの載荷加熱実験と柱・はり接合部の防耐火性能の把握、日本建築学会大会学術講演梗概集、防火、pp.165-168, 2011.8
- 11) 保川みずほ、安井昇、鈴木あさ美、長谷見雄二、亀山直央、豊田康二、門岡直也、腰原幹雄、小野徹郎、遊佐秀逸：大断面広葉樹(ケヤキ)製材による寺院建築仕様軸組の防耐火性能一はり及び柱・はり接合部の載荷加熱実験一、日本建築学会技術報告集第 43 号、pp.977-982, 2013.10
- 12) 長谷見雄二、鍵屋浩司、北後明彦、宮武敦：大規模集成木造体育館の火災調査：日本建築学会技術報告集第 17 号、pp.209-212, 2003.6
- 13) 中井孝、山井良三郎：日本産主要 35 樹種の強度的性質、林業試験所研究報告第 319 号、pp.13-46, 1982.1
- 14) 森林総合研究所監修：木材工業ハンドブック改訂 4 版、丸善、2004.3
- 15) (財)日本住宅・木材技術センター、構造用木材の強度試験マニュアル、2010.3
- 16) 飯島泰男：木質構造の研究の現状と今後の課題 Part II, 日本木材学会強度・木質構造研究会編、日本木材学会、pp.7-8, 1994
- 17) 岡野健、祖父江信夫 編：木材科学ハンドブック、朝倉書店、2006.2
- 18) 加来千紘、長谷見雄二、安井昇、保川みずほ、鈴木あさ美、上川大輔、亀山直央、小野徹郎、腰原幹雄、長尾博文、萩原一郎、遊佐秀逸：火災後の部材の継続的使用を前提とした大規模木造建築の防耐火計画法~柱の火害診断方法及び改修方法の提案~、日本建築学会大会学術講演梗概集、防火、pp.323-326, 2012.9

INFLUENCE OF FIRE EXPOSURE ON THE MECHANICAL PROPERTIES OF WOOD
– Exposure temperature dependence of Young’s modulus and bending strength of
Cryptomeria japonica, Larix leptolepis, Pseudotsuga menziesii and Zelkova serrata under and after heating –

Chihiro KAKU^{*1}, *Yuji HASEMI*^{*2}, *Noboru YASUI*^{*3},
Mizuho YASUKAWA^{*4}, *Daisuke KAMIKAWA*^{*5}, *Naohisa KAMEYAMA*^{*6},
Tetsuro ONO^{*7}, *Mikio KOSHIHARA*^{*8} and *Hirofumi NAGAO*^{*9}

^{*1} Graduate School, Waseda Univ.

^{*2} Prof., Department of Architecture, Waseda Univ., Ph. D.

^{*3} Visiting Researcher, RISE, Waseda Univ., Ph. D.

^{*4} Tokyo Metropolitan Government, M. Eng. (Former Waseda Univ.)

^{*5} Forestry and Forest Products Research Institute, Ph. D.

^{*6} President, Kameyama Construction, M. Eng.

^{*7} Prof., Sugiyama Jogakuen Univ., Ph. D.

^{*8} Prof., Institute of Industrial Science, The University of Tokyo, Ph. D.

^{*9} Forestry and Forest Products Research Institute

In recent years, the wooden building has been noted from various perspective, low-carbonization and management of forest resources etc., and cases of new wood utilization to public buildings are increasing in Japan. On the other hand, fire-resistive and quasi-fireproof constructions are assessed from the mechanical fire safety view point to prevent the collapse. If a fire-spread is prevented in a large-scale timber-based building, fire damage remain locally and it is highly possible to reuse the structural members including those damaged by fire. While mechanical behaviors of wood that are cooled to the room temperature after fire have been seldom studied, it is necessary to understand the residual strength of structural members after a fire for reusing fired wooden buildings.

In this paper, Young’s modulus and bending strength of 3 species of wood commonly used for engineered timber and Zelkova serrata, hardwood normally used for traditional large building, heated up to 250°C are measured at the elevated temperature and after cooling to the room temperature as an engineering basis for the structural fire safety design and the reusability diagnosis of large-scale timber buildings. As an analysis of the experiment, the facts listed below were revealed.

1. Temperature dependence of Young’s modulus and bending strength under heating.
2. Recovery characteristics of Young’s modulus and bending strength after heating.
3. Relations between Young’s modulus, density and bending strength under and after heating.

This bending experiment, measurements of the Mechanical properties of Cryptomeria japonica, Larix leptolepis, Pseudotsuga menziesii and Zelkova serrata, was conducted under and after heating on a scale of 1 to 5 below char temperature (the room temperature, 50°C, 100°C, 150°C, 200°C, 250°C). The specimens were hewed out from same log without knots and sized 20mm square and 320mm span (fig.1). These were dewatered to approximately 3 % moisture content before the bending test. The bending test was conducted as provided by JISZ2101 “The examination method for the bending strength” and taken place in compression testing machine with heat-controlled chamber (picture.1). The experimental procedure is shown in fig.2.

The results show the both properties, either at elevated temperature or after cooling, are highly dependent on exposed temperature for 150-200°C or higher, and correlation between the Young’s modulus and the bending strength tends to become weaker with rise of exposed temperature. The bending strength at elevated temperature is found to converge while it is notably scattered at normal temperature. This study is reported experimental evidence of an assessment for the structural fire safety and the reusability diagnosis of large-scale timber buildings.

(2014年 1月31日原稿受理, 2014年 3月31日採用決定)