古材の劣化調査

福勝寺本堂（重要文化財）垂木用材の食害と材質^{*1}

斎藤幸恵^{*2}, 信田 聡^{*2}, 太田正光^{*2}, 山本博一^{*3}, 多井忠嗣^{*4},
大村和香子^{*5}, 榎原 寛^{*5}, 能城修一^{*5}, 後藤 治^{*6}

Deterioration Character of Aged Timbers Insect damage and material aging of rafters in a historic building of Fukushoji-temple^{*1}

Yukie SAITO^{*2}, Satoshi SHIDA^{*2}, Masamitsu OHTA^{*2}, Hirokazu YAMAMOTO^{*3}, Tadatsugu TAI^{*4},
Wakako OHMURA^{*5}, Hiroshi MAKIHARA^{*5}, Shuichi NOSHIO^{*5} and Osamu GOTO^{*6}

Aged balk timber in a historic building of Fukushoji-temple (national cultural property) was investigated to estimate the extent of deterioration of aged timbers. The samples were all *Pinus densiflora*, but installed in different years, approximately 1500, 1662 and 1836. They were of similar rank order and built in similar circumstances. The timbers had insect damage by *Nicobium hirtum*. Soft X-ray transfer imaging and density measurements revealed that the insect damage was more severe with increasing age. To discuss change by aging of wood substance itself, insect-damaged parts were eliminated and undamaged parts were investigated: the oxidization temperature and Young's modulus in L-direction seemed to be higher for the present than the aged wood, but clear relation with aging was not detected. X-ray diffraction analysis of undamaged part revealed that relative cellulose crystallinity of aged samples was similar to or rather higher than that of the present sample. The crystallinity was negatively correlated with the Young's modulus. The holocellulose content of the undamaged parts seemed to decrease with aging. These facts imply that slight changes of chemical components other than crystalline cellulose might occur by aging. Comprehensively, in this case, the practical issue was insect damage, rather than deterioration by aging.

Keywords: aged wood, crystallinity of cellulose, Young's modulus, holocellulose.

重要文化財福勝寺本堂に用いられていた垂木で、施工年代が異なり（1500, 1662, 1836年頃）、品等・使用環境が似通ったものの劣化調査を実施した。供試試料は全てアカマツである。ケブカシバンムシによる食害が、古い材ほど著しく進んでいた。食害部分を除いた、木材実質の経年変化を検討するために、未被食部のみを取り出して供試した。古材未被食部の酸化開始温度、および微小試験片の縦方向引張ヤング率は、現代材より低い傾向にあったものの、経年によって低下の程度が増すとは断定できなかった。未被食部のX線回折から求めたセルロース相対結晶化度には経年による増大の傾向が見られ、縦方向引張ヤング率との間に、弱い負の相関が見られた。また古い材ほどホロセルロース率が低下する傾向があり、経年による未被食部の成分変性を示唆していた。木材実質そのものの変性よりはどちらかといえば虫害の方が、実用上の性能低下に大きく影響すると考えられた。

^{*1} Received March 26, 2008; accepted April 23, 2008. 本研究の一部は第58回日本木材学会大会（つくば、2008年3月）において発表した。

^{*2} 東京大学大学院農学生命科学研究科 Graduate School of Agriculture and Life Sciences, The University of Tokyo, Tokyo 113-8657, Japan

^{*3} 東京大学大学院新領域創成科学研究科 Graduate School of Frontier Sciences, The University of Tokyo, Kashiwa 277-8561, Japan

^{*4} 和歌山県文化財センター Center for Cultural Properties in Wakayama Prefecture, Wakayama 640-8404, Japan

^{*5} 森林総合研究所 Forestry and Forest Products Research Institute, Tsukuba 305-8687, Japan

^{*6} 工学院大学工学部 Faculty of Engineering, Kogakuin University, Tokyo 163-8677, Japan

1. はじめに

経年による材質の変化を明らかにすることは、科学的意義のみならず社会的要請からも課題となっている。環境問題への関心の高まりを反映し、昨今、古材を家具や内装に再用することに関心が持たれるようになってきており、リサイクル利用を見越し先がけて古材の物性を明らかにする研究も行われている¹⁻⁴⁾。地球温暖化防止条約に係わる「京都議定書」の第一約束期間（2008-2012年）における日本の削減目標「1990年の放出量の6%」のうち3.8%が、森林における二酸化炭素の吸収に期待されており、そのための国産材の利用目標は2500万立方メートルとされている。第二約束期間に向けて今後、伐採木材の扱いが議論され⁵⁾、将来的には木材が「炭素を貯蔵する材料」の観点で取り扱われることから、材料としての時間軸に沿った変化を捉えてデータとして蓄積しておく必要があると思われる。また直接的には、木造文化財の継承を目的とした修復現場において、再利用される古材の性能を検証する上で重要である。

本研究では、1500年以降の異なる年代に施工され、樹種が同じで品質・等級・使用環境が似通っている古材について調査した。この試料は、和歌山県海南市の福勝寺本堂（重要文化財）の解体修理のために、平成17年1月より開始された保存修理事業において、現代材との交換に伴い排出されたものである。福勝寺本堂は寄棟造りの中世の標準的な三間堂で、造営年は確認されていないが建物の様式から15世紀後期頃と判断され、室内には永正12年（1514）の墨書が残されている。福勝寺の建物は60～100年ごとに紀州藩や地元住民による修復を繰り返すことによって維持されてきたことが、棟札や古文書などの史料に記録されている。今回試験体として用いたのは、異なる年代1500年頃から現代までの異なる4年代に施工された、いずれも垂木部材である。古材を用いた調査では一般に、個体差が結果に投影されてしまうことが苦慮される。現代材の実験では、それぞれ別個体から得た試験体の、数を増やすことで、個体差による影響を統計的に除去することができるが、古材では同一試験体での経時追跡が不可能な難点がある。強度特性を比較するとき障害となる密度平均値および分布の違いを、現代材と古材で合致させるために、モンテカルロシミュレーションを適用した例もある¹⁻³⁾。古材の入手は古建築や文化財等の解体の折に限定され、試験体自体が稀で検体の本数が限られていることも多い。本研究で用いた材は、試

験体数は多くはないものの、同樹種・同品等で使用環境が正確に把握されている点、異なる三年代にわたっており施工年もほとんど確実に解っている点で、特徴的な一連の古材試験体である。これらの個々の試験体に関して、ヤング率およびそれと相関があるとされるセルローズ結晶化度、成分変化などの材質に関係する数値のいくつかを明らかにすることで、木材の経年変化に関して何らかの示唆を得られるのではないかと考え調査した。

2. 方 法

2.1 試料

福勝寺本堂（和歌山県海南市、重要文化財）の垂木部材を試料とした。垂木を選んだ理由は、同一の部材・同一の年代に施工・同一の環境で使用されたことがほぼ確実と考えられ、かつ複数の試験体を揃えることのできる部材であったことによる。試料の採取箇所を Table 1 に示した。用いられたのは1500年頃、1662年頃、1836年頃に施工された垂木用材および、修復代替材として品等の同じ現代材（以降それぞれ当初材：I，寛文材：K，天保材：T，現代材：Pと表記）である。提供された試験体は約7×8×20(L) cm（追柂）である。これらはいずれも、今回の修理において劣化が原因で取り替えるべきであると判断されたものの中で比較的被害が少なく、再利用可能に近く、漏水などによる腐朽が認められない健全な部分である。

2.2 虫害の程度の評価

軟X線透過像撮影と、見かけ密度測定とを試みた。見かけ密度は、試験体の三辺の長さ測定により体積を求め、絶乾質量を体積で割って算出した。軟X線透過像は、試験体を Digital X-ray Microscope (Matsusada) に設置して加速電圧53 kV、電流289 μ A でL軸方向にX線照射して得た。透過像の撮影領域

Table 1. Building date and position of collected samples.

Name	Age D. C.	Collected position
I1	1500*	Initial
I2	1500*	
K3	1662	Kanbun
K4	1662	
T5	1836	Tenpo
T6	1836	
T7	1836	
P1	2007	Present
P2	2007	

(* ; ca.)

は上面で3 cm 平方, 下面で1 cm 平方であった。上下面で撮影領域が異なるのは使用しているX線が平行光線でないためである。得られた画像を画像処理ソフトでヒストグラム化して、明度平均値を算出した。

2.3 未被食部ホロセルロース率

虫害に伴って生成した木粉・虫糞を除去しながら注意深く、未被食部のみを鉄製ヤスリで削り、篩別して粒径100-200 μm の木粉を得た。この木粉をJIS法に準じエタノール・ベンゼン(1:2 v/v)混合溶剤で有機溶媒可溶分抽出して脱脂木粉を得た。この脱脂木粉を亜塩素酸塩法(Wise法)に準じてホロセルロース定量に供した。すなわち蒸留水50 mlとともに試料約1.5 gを100 mlガラス器に入れ、亜塩素酸ナトリウム330 mg、氷酢酸66 μl を1時間おきに加え、スターラーで攪拌しながら80℃にて4回処理した。白色になったことを確認した試料を、1G2ガラスフィルタでろ過し、300 mlの水、引き続き30 mlのアセトンで洗浄し恒量になるまで105℃乾燥器中で乾燥後、秤量瓶を用いて精秤し、脱脂木粉に対するホロセルロース量を、ホロセルロース率とした。

2.4 未被食部の酸化発熱の開始温度

2.3で得た未処理木粉2 mgをThermoplus2(Rigaku)により定速昇温試験に供し、空気気流350 ml/min、昇温速度10 K/minにて示差熱分析(DTA)に供し、酸化発熱の開始温度を比較した。

2.5 未被食部の相対結晶化度

本研究の食害虫(下記)の近縁種 *Anobium punctatum* はセルラーゼを持つことが知られており⁶⁾、孔道付近の成分が変化している懸念があった。そこで孔道から少なくとも1年輪分を隔てた正常材部の早材から1 mm厚の板目試験片を切り出した。試験片は、各試料の異なる3年輪から採取した。X線回折はロータフレックス(Rigaku)により加速電圧50 kV、加速電流100 mAで発生させたCuK α 線を用い、減圧下、ラウエカメラ法によりIPプレート(富士フィルム)に記録した。相対結晶化度の測定は、結晶部分の干渉強度と非結晶部分の干渉強度との和がX線干渉強度であると仮定して、X線干渉強度曲線の反射角 $2\theta = 10 \sim 40^\circ$ にて、次のように求めた。 $(\text{相対結晶化度}\%) = (\text{結晶部分の面積})/(\text{全体の面積}) \times 100$ 。

2.6 未被食部の縦方向引張ヤング率

スライディングミクロトームを用いて170 μm 厚さ(仮道管数約5本分)の早材板目切片を作製し、カッターナイフを用いて被食部(孔道)の周辺を避けるようトリミングして30(L) $\times$ 3(T) $\times$ 0.17(R) mm

短冊状の薄切試験体を得た。これらの操作では、目切れしないよう、最少の抵抗力で細胞軸方向に平行に削ぐよう、切削方向に細心の注意を払った。薄切試験体の両端に滑り止めの紙やすりを接着してチャックに挟んだ。23℃、45% RHの恒温室で3週間調湿し、同室内で小型卓上試験機リトルセンサー(JTトーチ)を用いて、クロスヘッドスピード1 mm/minにて引張試験に供した。伸び歪みは、予め薄切試験体に記した標点間隔(13 mm)の距離変化をCCDカメラにより非接触読取で計測した。

薄切試験体は1年輪から5体ずつ、一試料あたり異なる3年輪から得た(計15体)。ただし、虫害の進行により、I2, K3, K4については2年輪のみから作製、I1については薄切試験体が作製できなかった。薄切試験体の場合、試料作製による誤差の影響が懸念されるので、参考までに一試料上の異なる2年輪から得た試験体同士のt検定を行った。その結果、差があるとする場合の危険率はK5とP8のある2年輪同士で1%以上となったものの、他の試料では全て10%ないし30%以上であった。

3. 結 果

3.1 樹種識別

Fig. 1に試料のうちひとつから得た三断面の光学顕微鏡像を記した。樹脂道、分野壁孔などの形態的特徴から全試料がアカマツ *Pinus densiflora* と同定された。試料を切削した際、K3, K4, T5, T6にマツ材固有の強い香気があった。またK4, T6では樹脂道のみならず仮道管内部にもヤニが充填されているのが観察された。

3.2 食害とその程度の評価

Fig. 2(上列)に試料外観を示した。とくに当初材表面には虫害による円孔が目立つ。L方向に2つ割りして内部を観察したところ、食害は、当初材では内部に及び、寛永材では内部にまで至るものもあるが少なく、天保材では殆ど表層数年輪分に留まり内部まで達するものは稀であった。当初材の食害部を拡大してみたところ、数ミリ径の孔道が見られ、

Fig. 1. Optical micrographs of cross (left), tangential (middle) and radial (right) sections of a sample (*Pinus densiflora*).

Fig. 2. Examples of insect damaged samples of three different ages, Initial (I1), Kanbun (K3) and Tenpo (T5). Tops : appearance of samples. Surface on the left and inside on the right, respectively. Bottoms : Transmission images of soft X-ray.

体長数ミリ茶褐色の昆虫も観察された (Fig. 3)。食害の特徴から、この食害虫はケブカシバンムシ *Nicobium hirtum* と判定された。軟X線透過像を Fig. 2 (下例) に示した。年代が古くなるほど像の明度が増しており、食害が進んでいることが見て取れる。試験体 I1, K3, T5 の明度値はそれぞれ140, 72, 42で、目視による食害の程度に対応していた。被食害材の残留強度を評価する手段に引抜試験が使われ⁷⁾

たりするが、軟X線透過像には内部の食害程度を非破壊で評価できる利点がある。但し、今回のように用いた軟X線の照射方向が平行でない場合は、内部の食害の正確な評価には補正の工夫が必要である。今回は、見かけ密度値をもって、試験体の食害程度を比較することとした (Fig. 4)。食害前の密度値が不明なため個体差に影響される懸念はあるが、目視や軟X線透過像の結果に沿い、食害程度を反映していると思われる。古い材ほど食害が進んでいることが明らかであった。

3.3 未被食部の組成と物性

もし食害を免れたとすれば、未被食部そのものの材質変化の程度が、材の強度を見積るうえで重要な要素となってくる。そこで、以下のような未被食部の検討をおこなった。

3.3.1 ホロセルロース率

Fig. 5 にホロセルロース率を示した。現代材は、通常のマツ材と同等の値を示したが、古い材になるほどホロセルロース率が低くなるのが見てとれた。古材のホロセルロースの分解について、小原は針葉

Fig. 3. *Nicobium hirtum* (left) and the insect damaged wood, I1 (right). Arrow : a cocoon. Arrow head : a worm hole.

Fig. 4. Apparent density of samples.

Fig. 5. Holocellulose content of undamaged parts.

樹材埋没木の場合1500年で半減するとしている⁸⁾。

3.3.2 酸化発熱の開始温度

空気気流下での DTA 曲線に現れた酸化発熱のピークの形は、古材も現代材も殆ど同じであった (Fig. 6a)。酸化発熱の開始点を示す、低温側のピークの立ち上がり温度を比較すると、古材の中では K3 のように現代材より 26℃ も低い場合が見られた (Fig. 6b)。ところが当初材は現代材と殆ど変わらなかった。古材では現代材よりも酸化発熱温度が低い傾向が見られるものの、この結果からは古くなるほど燃えやすいとは断定できない。

3.3.3 セルロース結晶化度

Fig. 7a に回折強度曲線の一部を示した。当初材、寛永材、天保材ともにセルロース結晶による回折が明瞭に見られた。年代ごとの相対結晶化度の平均値は、当初材と殆ど変わらないか、むしろ古材の結晶化度が上昇しているように見えた (Fig. 7b)。

Fig. 6. (a) Examples of DTA curves of undamaged parts.
(b) The onset values of the first exothermic peaks.

3.3.4 縦引張ヤング率

縦引張における応力-ひずみ曲線は Fig. 8a に示したように立ち上がりに直線領域を持ち、その傾きからヤング率を読みとることが可能だった。線のゆがみは、カメラによる標点間読み取り閾値の影響による。Fig. 8b に試料ごとに平均したヤング率を示した。t-検定によれば 5% 有意水準で、当初材および天保材は現代材よりもヤング率が低い、寛文材は天保材よりも高い (Table 2)。この結果から、古材のヤング率は現代材より低い傾向にあったものの、経年によりヤング率低下の程度が増すとは断定できない。

4. 考 察

香気やヤニを持つ試料があったが、香気やヤニの有無が食害程度や、酸化発熱開始温度、セルロース結晶化度、ヤング率などには影響していないようであった。

Fig. 7. (a) Examples of X-ray diffractograms of undamaged parts. (b) The relative crystallinity of undamaged parts.

食害の程度は当初>寛永>天保>現代で、施工年代の古いものほど食害の程度が大きい。シバンムシが古材を好んで食害することは知られている⁹⁾。それに加え、施工後に年数を経るほど、虫による攻撃を受ける頻度が高くなること、また一度穿孔された孔道を用いての更なる攻撃が行なわれ易くなることも、古いほど食害が進んでいたことの要因と考えられる。食害を受けたとしても、大断面材の場合は、中心部分が健全であれば断面欠損が無視でき、再用が可能である。しかし、当研究で扱った500年程度で未被食部の経年劣化がさほど顕著でないことを考慮すれば、顕著にダメージを与えるのは材質変化よりむしろ食害である。食害を封じるための対策がなされれば、材の強度をよく維持できると考えられる。

DTA 酸化開始温度は「燃えやすさ」の指標となると考えられる。当研究の結果では、木材実質自体の経年変化が発熱温度の大規模な低下を招くというよりは、むしろ実用上では、材の燃えやすさには容積重が大きく関わるので、食害を受けて空隙率が増

Fig. 8. (a) An examples of stress-strain diagram (I2). (b) The average Young's modulus of each sample.

Table 2. *t*-test of Young's modulus (s : significant, n : no significant).

Kanbun	Tenpo	Present	
s	n	s	Initial
	s	n	Kanbun
		s	Tenpo

すことのほうが低温での燃焼を招く要因として大きいと考えられる。

ホロセルロース率、酸化開始温度、相対結晶化度、ヤング率に関して、各々の相関を検討したが、(1) 相対結晶化度-ヤング率間、(2) ホロセルロース率-相対結晶化度の組み合わせのみに、いずれも $R=0.49$ の弱い負の相関が見られた。(1)について、既報では古材の結晶領域含有率とヤング率とに正の相関があるとされている¹⁰⁾ のに対し、本研究の結果は逆の傾向を示している。これらの変化が約500年の経年によりもたらされたと捉えるならば、説明としては例えば①セルロース結晶間を充填する成分が脆くなることによる、ヤング率の低下、および非晶領域のセルロースへの拘束の緩和に伴う相対結晶化度の

Fig. 9. Young's modulus and holocellulose content plotted vs. relative crystallinity.

増大, ②セルロース結晶間を充填しているヘミセルロースの一部の分解・除去による, ヤング率の低下と, セルロース相対結晶化度のみかけの増大, などの考え方がある。(2)での負の相関が後者の可能性を示唆するようにみえる。しかし試料数が限られているうえ, 化学分析処理を経年により変成していると考えられる古材にそのまま適用しているため成分量が正しく評価されていない可能性もあり, 結論には更なる検討を要する。八世紀末に法隆寺建造物の構成部材として使用されたヒノキ古材のFT-IRではリグニンの構造変化が認められている¹¹⁾が, 本

研究で扱った比較的新しいといえる西暦1500年程度の材でも, 木材実質に何らかの成分変化が認められることは確かであり, それが木材実質の強度特性に影響している可能性がある。

5. 結 論

重要文化財福勝寺本堂に用いられていた垂木の, 当初材(1500年頃)2体, 寛文材(1662年頃)2体, 天保材(1836年頃)3体の劣化調査を実施し, 現代材(2007年)と比較した。供試試料は全てアカマツで, ケブカシバンムシによる食害を受けており, 食害は古い材ほど著しいことが, 見かけ密度測定値と軟X線透過像から示された。未被食部について検討したところ, 古い材ほどホロセルロース率が低下する傾向が見られ, 成分の変成が示唆された。未被食部の酸化開始温度, 縦方向引張ヤング率に関して, 古材では現代材より顕著に高いものが見られなかったが, 古い材ほど低下するとは断定できない結果であった。本研究で扱った古材においては, 木材実質そのものの変成は実用上さほど問題でなく, むしろ虫による食害のほうが強度性能低下に大きく影響すると考えられた。

謝 辞

本研究の一部は文部科学省科学研究費補助金 基盤研究(A)17200051(山本博一代表, 2005-2007)によった。また軟X線による検討の一部を基盤研究(B)18380103(信田聡代表, 2006-2008)によった。ここに謝意を表する。

文 献

- 1) 平嶋義彦, 杉原未奈, 佐々木康寿, 安藤幸世, 山崎真理子: 木材学会誌 **50**(5), 301-309 (2004).
- 2) 平嶋義彦, 杉原未奈, 佐々木康寿, 安藤幸世, 山崎真理子: 木材学会誌 **50**(6), 368-375 (2004).
- 3) 平嶋義彦, 杉原未奈, 佐々木康寿, 安藤幸世, 山崎真理子: 木材学会誌 **51**(3), 146-152 (2005).
- 4) Ando, K., Hirashima, Y., Sugihara, M., Hirao, S., Sasaki, Y.: *J. Wood Sci.* **52**(6), 483-489 (2006).
- 5) 有馬孝禮: 第58回日本木材学会大会研究発表要旨集, つくば, 2008, pp. 875-878.
- 6) Serdjukova, I. R.: *Zoologicheskii Zhurnal* **72**(6), 43-51 (1993).
- 7) Gilfillan, J. R., Gilbert, S. G.: *Const. Build. Mat.* **15**(7), 381-388 (2001).
- 8) 小原二郎: 木材学会誌 **2**(5), 195-200 (1956).
- 9) “日本家屋害虫事典”, 日本家屋害虫学会編, 井

- 上書院, 東京, 1995, pp. 270-271.
- 10) 小原二郎, 岡本 一: 木材学会誌 **1** (2), 80-84 (1955).
- 11) 武井利之, 濱島正士, 神庭信幸: 木材学会誌 **43** (3), 285-294 (1997).