

木材の寿命を考える*

川井 秀一**

1. はじめに

木材は古来よりわれわれの身近な暮らしにあつて、加工しやすく、丈夫な材料として住宅や道具に多用されている。とくに、わが国は樹木の生長に適した温暖多湿な自然風土に恵まれ、“木の文化”と端的に表現される木質系文化遺産を数多く保有するに到っている。1300 年の時を越えて現存する法隆寺をはじめとする多くの歴史的木造建造物、木彫像や木工芸に代表される豊かで多様な木質系文化財は、日本文化の際立った特徴となっている。このことはわが国の国宝・重要文化財指定建造物 4,339 棟の 90% が木質系文化財であることから伺える。

ところで、木材の材料寿命はどの程度であろうか？

歴史的木造建造物や木彫文化財は、日々年々のメンテナンスに加え、100～200 年毎に大修理が行われることが多い。時に応じて取り替え材を使用することもあるが、人手をかけて守られた当初の材料が大切に使われ続けられていることも多い。薬師寺西塔の再建で有名な西岡常一棟梁は、「木は二度生きる」という¹⁾。樹木として第一のいのちを生き、伐採されたのち、木材として第二のいのちを生きるという意味である。

本講演では、材料としての木材の寿命や経年変化について、歴史的木造建造物由来の古材と熱処理(現生)木材を比較検討しながら考える。

2. 木材の風化と老化、生物劣化

木材の経年変化にはさまざまな要因が考えられる。腐朽菌やシロアリなどの生物による劣化、紫外線や水分による風化のほか、長期にわたる劣化については通常的环境下における老化(エージング)も重要な因子である。生物劣化は原因が明確であり、また、生物活性の高い条件、すなわち、1) 酸素の存在、2) 水分の存在、3) 高気温、4) 栄養(木材)の存在などの条件が整えば、数年のオーダーで木材の劣化が進行する²⁾。風化は紫外線によるほか、環境湿度の変動などによる加水分解によ



図1：木材の生物劣化、風化、老化（左：シロアリおよび腐朽菌による劣化、中央：風化、右：法隆寺部材の老化）

*2011 年 6 月 18 日作成 本稿は第 7 回生存圏研究所公開講演会(2010 年 10 月 24 日開催)講演要旨に加筆・修正を行ったものである。

**〒611-0011 宇治市五ヶ庄 京大大学生存圏研究所循環材料創生分野
E-mail: skawai@rish.kyoto-u.ac.jp

ると考えられるので、通常、材料表面に影響が強く現れる数十年オーダーの劣化である。

これに対して、老化は極めて長時間にわたる劣化であり、そのメカニズムも明確ではない。サンプルとなる出自の明らかな古材資料を集めることが難しいため、観測データも少ないのが現状である。ここでは、木材が適切に管理され、健全に保存された状態での経年変化を老化として、材料としての寿命を追ってみたい。

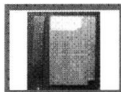
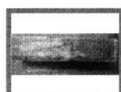
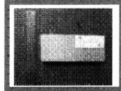
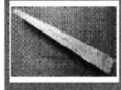
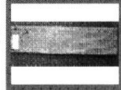
3. 木材の生年を測る

いわゆる古材の生年を知ることは容易ではない。建築史、美術史では、古文書など人文科学的な記載を基にした文献学的手法や部材の様式、加工痕などを頼りに考証が進められることが多い。建物小屋裏の棟札や木彫仏の胎内文書の発見等によって建築年代や製作年が特定されることもある。一方、自然科学的手法には、年輪年代学のほか、放射性炭素同位体 (C^{14}) 年代学などで材形成年代を同定することが行われている。しかし、同一試料について、人文系と自然系の手法を駆使し、総合的な観点からこれを論じたものはほとんど見あたらない。

木質科学、年輪年代学、放射性炭素年代学の研究者、建築史・美学など人文科学の研究者や仏師らが共同して、生存圏研究所材鑑調査室に所轄される歴史的建造物由来の古材試料について実施した研究事例を紹介したい³⁾。

試料として飛鳥時代から現生に至るヒノキ材 (*Chamaecyparis obtusa*) 9 点を選び、指定文化財の付帯文書や材料表面の加工痕跡を含め、生育および使用履歴についての詳細を調査したうえで、同一試料を用いて年輪年代測定法と放射性炭素ウィグルマッチング法による年代評価を行い、比較検証した結果を表 1 に示す。表より、年輪年代法と放射性炭素年代法の結果は大変良い一致をみていることがわかる。

表 1：ヒノキ材試料の外観と年輪年代測定法および放射性炭素ウィグルマッチング法による年代評価

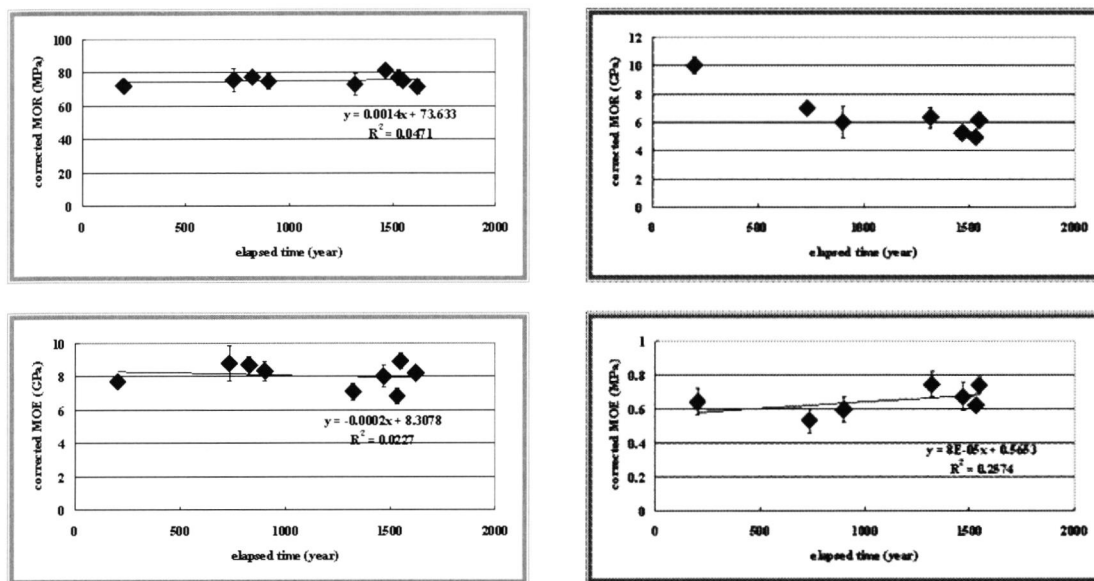
A		E			由来	年輪年代(AD)	放射性炭素年代(AD)	
B		F		A	伝法隆寺古材	343/434	367/458	KYOW2701
C		G		B	伝法隆寺古材	458/612	418/572	KYOW2737
D		H		C	伝法隆寺古材	400/502	418/520	
				D	伝法隆寺古材	431/537	421/527	
				E	伝法隆寺古材	584/792	587/795	
				F	伝法隆寺古材	1029/1086	1000/1059	
				G	伝法隆寺古材	1106/1270	1098/1262	
				H	専修寺	1069/1438	1071/1438	
				I	木曽産	1622/1988	1631/1973	

4. 木材の老化と寿命

木材の経年変化・寿命予測に関する研究は、木造建築物の保存修復のうえで、また材料としての木材の基礎物性を理解するうえで大変重要であり、これまでに多くの研究がなされている。その中で、古材の強度および諸性質を評価した先駆的研究として小原二郎氏の報告がよく知られている⁴⁻⁵⁾。

建築史の記述と矛盾がなく、年輪年代学、放射性炭素年代による年代測定によって履歴を明らかに

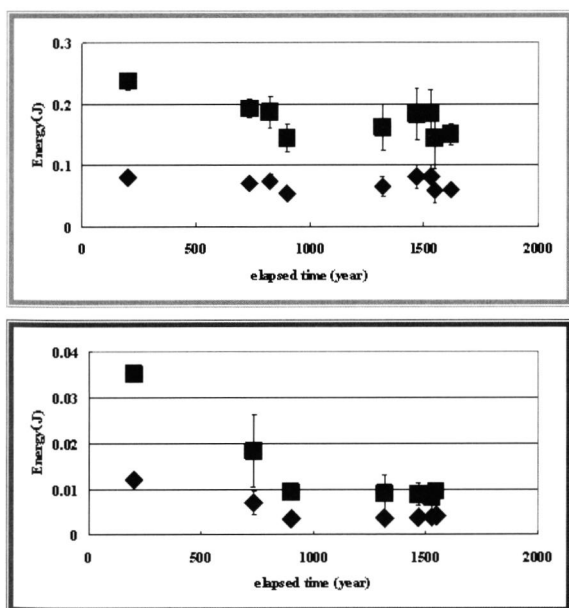
した歴史的建造物由来のヒノキ古材（前章表 1 参照）を用いて経年による木材物性の変化について体系的に検討した結果は以下のとおりである。なお、評価の項目は、密度、平衡含水率などの諸物性、ヤング率、強度、破壊靱性などの強度特性、木材構成成分ならびに細胞壁組織構造の経年変化などで



繊維方向

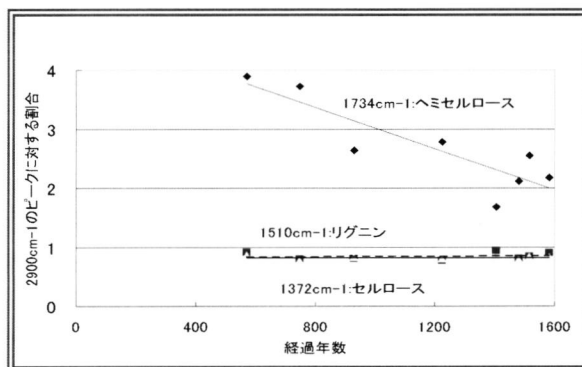
半径方向

図 2：ヒノキ材の曲げ強度（MOR）・ヤング率（MOE）の経年変化（繊維方向および半径方向）



破壊エネルギー

図 3：ヒノキ材の破壊靱性の経年変化
上図：繊維方向、下図：半径方向



FTIR スペクトルの $2,900\text{ cm}^{-1}$ を基準としたときの 3 成分のピーク高さの相対値で評価

図 4：木材成分の経年変化の一例

ある³⁾。顕著な結果についてみると、ヒノキ材の 1,600 年間に及ぶ繊維方向曲げ強度 (MOR)・ヤング率 (MOE) の変化や劣化は極めて小さい (図 2 左)。これに対して、繊維直交 (半径) 方向の曲げ性能は時間の経過と共に低下し (図 2 右)、また両者の破壊靱性は共に低下して脆性が増す (図 3)。一方、細胞壁内のセルロース結晶は経年に対して比較的安定であり、ヘミセルロースは量的に低減し (図 4)、リグニンは質的变化を生じていることを示唆する結果が得られている⁶⁾。

5. 木材の老化を再現する試み

木材の色は経年に伴い赤みと黄みが増し、濃色化することが知られている。図 6 は古材の見かけの色調を示す。これら古材の色変化を熱処理した現生材のそれ (図 7) と比較すると、極めて類似性が高いことがわかる。試料の色の差異を分光測色計で精密に測定して、反応速度論的な解析を行い、両者の類似性を検証した。この結果、色の経年変化は反応速度論 (アレニウス式) に従い、時間-温度加算則が概ね成り立つことが示された。この研究結果は木材の老化が常温下の緩やかな熱酸化反応であることを示唆している。さらに、熱処理セルロースについて同様の解析を行った結果、木材の主成分であるセルロースの色変化もまた同様の傾向を示し、木材の色の経年変化の主たる要因であることが推察された⁷⁻⁸⁾。

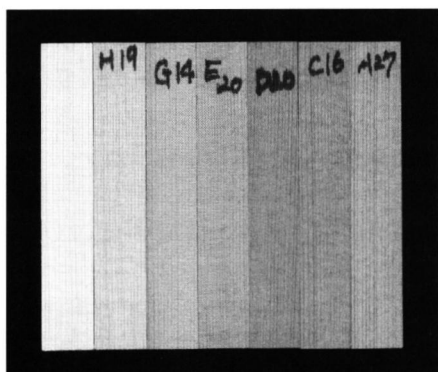


図 6 : 古材の見かけの色の経年変化
(左端 : 現生材、右端 : 1,600 年経年)

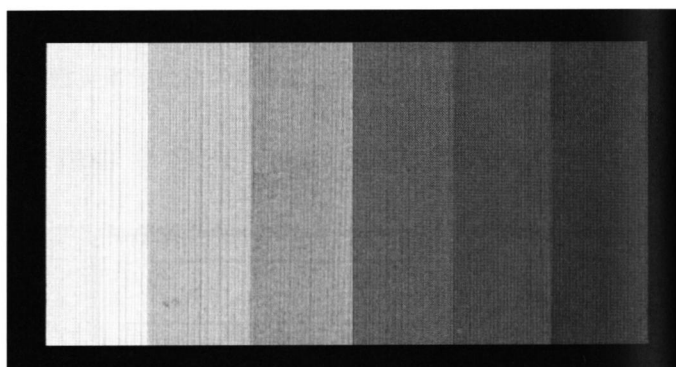


図 7 : 熱処理材の見かけの色の経年変化
(左端 : 現生材、右端 : 180°C、120 時間処理)

さて、本研究は木材の老化のメカニズム解明のうえで重要であると同時に、いくつかの実用的な観点から応用研究がなされている。木材の経年はその色や密度、寸法安定性の変化に現れ、木彫文化財に携わる技術者は経験的にこれを推測の指標としてきた。一方、木彫仏等の保存修復においては欠損部を補う後補材として色や寸法安定性が元の古材と調和し、かつ加工性のよい材料が求められる。たとえば、仏像の補修に後補材を用いる場合、予め熱処理を施し、当初材に色調や物性を合わせることで、より安定した修復が可能になり、古色仕上げとして補彩の手間を省くこともできる (図 8)。

また、常温下で何年も保管されて経年変化した書画用紙 (宣紙) は、「寝かせた紙」「枯れた紙」などと呼ばれ、見た目や書き心地の面で優れた性質を示すと言われている。これは、紙が保管されている過程で何らかの化学反応が起こり、紙の諸物性が変化するためである。熱処理によって経年変化を人為的に促進 (促進劣化処理) した中国宣紙について書家の官能検査を行った結果、色特性や墨の浸透特性に関して、経年変化と同様の変化が熱処理をした紙にも起こっていることが明らかになっている (図 9)。



図8：修復前後の仏像の羅髪（らほつ） 図9：書家、杭迫柏樹氏による臨書「王羲之 蘭亭序」（左：未処理、中央：180℃ 8 時間処理、右：180℃ 48 時間処理）

6. おわりに

木材の老化に関わる研究は、木質科学において材料の耐久性や寿命を考えるうえで重要である。また、文化財の保存修復という実用的な観点からも大切である。本講演で紹介した古材に関する一連の取り組みは、これまでは個別的にしか実施されなかった科学的調査を分野の異なる多くの研究者・技術者の協働によって総合的かつ複合的手法で行った初めての研究事例である。今後さらに古材の諸性質に関する現象の記述を集約し、経年変化のメカニズムの詳細について検討したいと考える。

謝辞

本稿の取りまとめにあたり、日本学術振興会特別研究員横山操氏ならびに本学農学研究科博士課程松尾美幸氏に大変お世話になりました。記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 西岡常一，小原二郎，「法隆寺を支えた木」 NHK ブックス，日本放送出版協会刊，1978.
- 2) 安藤直人，今村祐嗣，中島正夫，安全で長持ちする木の家，（株）ラトルズ，2010.
- 3) 川井秀一他，木材の材料寿命—歴史的木造古建築および木彫文化財由来の試料を用いた検討—，平成 17 年度～平成 19 年度科学研究費補助金基盤研究（B）報告書
- 4) 小原二郎，古材の研究，千葉大学工学部研究報告，9（15），1—55，1958.
- 5) 小原二郎，古材の研究，千葉大学工学部研究報告，9（16），23—65，1958.
- 6) Yokoyama, M., Gril, J., Matsuo, M., Yano, H., Sugiyama, J., Clair, B., Kubodera, S., Mitsutani, T., Sakamoto, M., Ozaki, H., Imamura, M., and Kawai, S., Mechanical characteristics of aged Hinoki wood from Japanese historical buildings, *Comptes Rendus Physique*, **10**, 601-611, 2009.
- 7) Matsuo, M., Yokoyama, M., Umemura, K., Gril, J., Yano, K., and Kawai, S., Color changes in wood during heating: Kinetic analysis by applying a time-temperature superposition method, *Appl. Phys. A*, **99**, 47-52, 2010.
- 8) Matsuo, M., Yokoyama, M., Umemura, K., Sugiyama, J., Kawai, S., Gril, J., Kubodera, S., Mitsutani, T., Ozaki, H., Sakamoto, M., and Imamura, M., Aging of wood -Analysis of color changes during natural aging and heat treatment-, *Holzforschung*, **65** (3), 361-368, 2011.