

次の千年の木材のおはなし

松尾 美幸^{1*}

The Future of Wood: Insights into Ageing Processes

Miyuki Matsuo-Ueda^{1*}

概要

木材は、適切なメンテナンスをすれば非常に長持ちする材料である。日本各地に残る歴史的木造建築から分かるように、百年単位の長きにわたって構造材として建築物を支えることができる。一方で、木材を構成する成分は長い時間をかけて少しずつ変化しており、これにより材料特性もゆっくりと変化していくことが知られている。この変化を木材の「経年変化 (ageing)」と呼ぶ。本稿では、木材の経年変化についての研究を紹介するとともに、今後の百年あるいは千年単位の経年変化を予測する試みについて紹介する。

1. はじめに

木材が日光や雨にさらされる屋外で使用された場合、その表面は灰色、黒、茶色、などに変色し、木目に沿って凹凸ができることが多い。これを木材の気象劣化と呼び、針葉樹では 100 年で 5~10 mm、広葉樹では 100 年で 2~5 mm の速度で木材表面の実質が失われていくとの報告例がある¹⁾。古寺や古民家の外観が濃い茶色や灰色を呈することが多いのはこの気象劣化のためである。気象劣化の影響は木材の表面のみに留まり、紫外線や雨が浸透しない内部では、新しい木材と同様に見える部分が残っている (図 1)。内部の木材は、色が明るく、樹種によっては削ると再びその樹種に特徴的な匂いを発することもある。

木材の材料特性は、セルロース、ヘミセルロース、リグニン、抽出成分と呼ばれる主要化学成分の特性や存在比、さらに細胞壁の層構造、細胞の種類や形、並び方といった組織構造の組み合わせにより決定する。木材が数百年単位の時間を経るとき、これらのうち特に化学成分にゆっくりとした変化が生じ、その結果、材料特性も変化すると考えられてきた。これを木材の「経年変化」と呼ぶ。木材の経年変化に関する研究は、木材の特性や耐久性を理解する上で重要な分野であり、特に歴史的に重要な建築物の保存と修復ならびに長期の使用においては不可欠な課題である。そのため、国内外で木質科学の研究対象とされてきた。

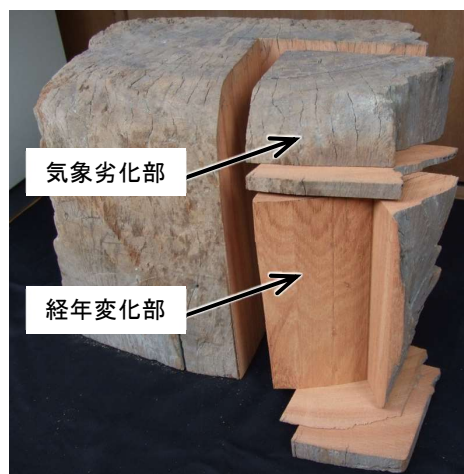


図 1 : 約 230 年経年した古材とその断面 (ケヤキ, 生存圏研究所材鑑調査室所蔵)

2024 年 9 月 18 日受理.

¹〒606-8502 京都市左京区北白川追分町 京都大学 大学院農学研究科 森林科学専攻

* E-mail: matsuo.miyuki.4d@kyoto-u.ac.jp

2. 古材に関する研究の動向

木材の経年変化を調べるために用いられる方法は、建築物等から採取された古い木材（古材）と新しい木材（新材）を比較し、経年による木材の材質変化を調べることである。「長期間使用した木材の材質はどうなるのか」という問いは古くからの関心事であったようで、最初期の研究としては1930年代にイギリス、ドイツ、日本で行われたものが挙げられる。イギリスでは²⁾、その当時すでに「古い木材は新しい木材よりも寸法安定性が高いという議論」があったとされ、Forest Products Research Boardが古材と新材の寸法安定性を調査したところ、両者には差がなかった（試料の樹種や年代は不明）。ドイツでは³⁾、100年間使用した木橋のマツ材を再使用できるかという観点から各種材質が調べられ、再使用に耐えうる十分な強度があるとされた。日本では⁴⁾、複数の年代にわたると推定された法隆寺ヒノキ古材（200～1,100年間の経年）について、化学成分比と強度を新材と比べたところ、両者に顕著な差はなくヒノキの材料寿命が非常に長いことが指摘されている。

1950年代には、小原二郎博士が日本国内の古刹から多数の古材を収集し、その化学的・物理的性質を詳細に分析した^{5,6)}。小原博士の研究は、木材の経年変化に関する知見を大きく更新し、特に樹種によって経年変化の傾向が異なることを明らかにした。それによれば、ヒノキ材の強度は伐採後約200年間増加し、その後ゆるかに低下する一方で、ケヤキ材では直線的に強度が低下することが示された。ただし、この報告には課題もあり、この時代には年代学が未発達であったことから実験試料の年代に科学的根拠が与えられていないことや、新材（経年時間0年）と経年時間200年までを埋める古材のデータがないことが指摘されていた。

世界各国の研究者から報告された経年変化に関する研究をまとめると、報告によって結果が一致するものとそうでないものがあることが分かる。Krántzらの総説⁷⁾によると、経年に伴うヘミセルロースの減少や、それに伴う灰分の増加と平衡含水率の低下、衝撃曲げ強度の低下は多くの研究で共通して報告されているが、他の性質については経年変化の傾向（増加/減少/変化なし）が報告により様々である。これは、古材試料の樹種、古材試料がおかれていた環境、年代測定の有無などが異なるためと考えられる。また、ほとんどの報告において、古材試料の年代や測定項目に偏りがある。これは、貴重な古材試料を一度に十分量入手して様々な実験を行うことが容易ではないことを表している。その中で、先述の小原博士の研究は、化学成分比から物理特性までのほとんどの測定項目を網羅し、また、時間経過に対する「傾向」を述べるに足る幅広い年代の古材試料を用いている。また、ケヤキとアカマツに関する一連の研究や^{8,9,10)}、生存圏研究所による小原博士の研究の再検証^{11,12)}など、特に日本では古材研究の蓄積が豊富である。この背景には、日本では歴史的木造建築の大規模修理が定期的に行われ、古材の材質に対する関心が諸外国より高いこと、また、古材を学術研究に供するために多くの努力が重ねられてきたことがあると考えられる。

京都大学生存圏研究所には、木材標本の収集とデータベース化およびこれを活用した共同研究推進を役割とする「材鑑調査室」と呼ばれる施設がある¹³⁾。この材鑑調査室の特色あるコレクションの一つが、日本各地の歴史的木造建築等から収集された古材試料620点（2024年時点）である。これには、小原博士から寄贈された古材試料200点も含まれる。生存圏研究所では、これらの古材試料を用いて、木材の経年変化を体系的に研究し、長期的な木材の使用に関する知見を深めるための研究を進めてきた^{14,15)}。先述した小原博士の研究の再検証もその一貫であり、年代測定（年輪年代法・放射性炭素年代法）により試料の年代が科学的に確定されたヒノキ古材およびケヤキ古材を用いて実験が行われた。その結果、ヒノキの繊維方向の力学性能は経年によりほとんど変化しないこと、伐採後200年間強度が増加するとの傾向については確認されなかったこと、一方で放射方向の力学性能については経年に伴い脆性的になることが示された¹¹⁾。また、ケヤキの力学性能については、経年により単調減少するという小原博士の結果と一致する結果が得られた¹²⁾。

古材に関する研究をより発展させるために、二つの展望が期待される。一つ目は、これまでに貴重な古材試料を用いて行われた研究について試料情報や実験方法を精査し、複数の文献にまたがるデー

タを再解析することである。例えば、同時測定された密度や含水率があれば力学特性値を補正する、年代測定の有無でデータを仕分ける、同じ樹種の同じ特性値について同一時間軸上にプロットする、などが考えられる。二つ目は、古材研究の基準化である。木材の標準的な試験法については、すでに JIS や ASTM などの規格が存在するが、潤沢に試験体を得られない古材研究ではこれらの規格が適用できないことも多い。古材研究特有の事情を考慮した試験方法を記録方法も含め検討し、国際的にかつ将来にわたって共有することで、貴重な古材試料からより効果的に学術的知見を得られると考えられる。また、実験後の古材試料の取り扱いについても、共通のフォーマットを決めて可能な限り試料を残せば、将来にわたって貴重な古材試料を有効に活用することが可能である。

3. 木材の熱処理による経年変化の再現の試み

上述のように、古材を用いる研究には様々な制約がある。この制約を回避し、木材の経年変化を理解するための方法として、木材の熱処理によって経年変化を人為的に再現する試みがされてきた。木材の熱処理では、木材を加熱することで化学的・物理的特性を変化させる。一般的な木材の熱処理は、材質改善（寸法安定性の向上、耐久性の向上、調色など）を目的として行われ、送風乾燥器で加熱する単純な方法から、窒素ガス下、水蒸気存在下、油での加熱など、様々な方法が研究され産業化されてきた。Hill らの総説によると、150°C 以下の加熱を”Thermal treatment (ageing)”、150°C～240°C を”Thermal modification”、240°C 以上を”Thermal degradation”と分類し、経年変化の人為的再現は 150°C 以下の”ageing”が該当する¹⁶⁾。特に 150°C 以上ではそれ以下とは異なる化学的変化が起こるためこのように分類されるが、特性によっては 150°C 以上の処理でも 150°C 以下と同様の変化が起こるケースもある。また、酸素や水分の有無によっても熱処理中に起こる現象は異なる。熱処理による材質変化については、多くの総説にまとめられているため参考にされたい¹⁷⁾。

熱により劣化や経年を促進できるとの概念は、高分子材料の劣化シミュレーションや寿命予測に用いられてきた¹⁸⁾。使用温度で進行する化学的・物理的な変化を熱により促進し、長期間の使用と同様の効果を短期間で再現して、そこに現れる法則から使用温度での挙動を推測する考え方である。高分子から構成される木材においても、これが当てはまる可能性が古くから指摘され^{6, 19)}、経年変化と熱処理による材質変化の比較がおこなわれてきた。例えば、木材の色に関しては、ヒノキ材を 180°C で 12 時間処理すると、1500 年程度経過した古材と同様の色が得られる（図 2）。90°C から 180°C の間の熱処理では、色変化の傾向はどの温度でも同じであり、さらに古材を用いて測定した常温における色変化も同様の傾向を示す²⁰⁾。一方、ケヤキ材では、経年による色変化では赤みを示す指標（ $L^*a^*b^*$ 表色系の a^* 値）が増加するが、熱処理による色変化では処理温度が高いとその傾向が見られない。ただし熱処理温度を下げていくと、徐々に赤みの増加が見られるようになり、増加の程度は温度依存的である²¹⁾。つまり、ヒノキの色変化は経年変化でも熱処理でも同じ経路を辿り、その通過速度が異なるだけと言えるが、一方のケヤキは温度が高くなるほど（常温から離れるほど）経路がずれていくのである。強度などの力学特性については、一般的に熱処理により低下することが知られているが、熱処理のごく初期段階では曲げ弾性率が増加するとの報告もある¹⁷⁾。熱処理木材をモデル材料として評価法を確立し、次いで古材と比較することでセルロースミクロフィブリルの力学特性の経年変化を評価した例もある^{22, 23)}。振動特性に関しては、温度に加えて湿度依存的な現象が起こることも報告されている。湿度 0% から 100% の間の様々な湿度条件でスプルス材を熱処理し、処理前後の振動特性を調査したところ、35～80% 程度の中湿度でしか起こらない振動特性の変化が確認された²⁴⁾。経年の間、環境湿度に応じて木材は常に 10～14% 程度の水分を含んでいることからこの結果は妥当であり、中湿度の熱処理による効果は楽器用材の ageing を説明するとされた。古材の力学特性は先述の通り報告により異なることから、熱処理木材をうまく活用しながらさらなる検証が必要である。

経年変化を熱処理等の手法で再現することは、科学研究におけるモデル材料作製や材料寿命予測に有効なだけではない。木製文化財の保存修復では、欠損部や損傷の著しい部分を新しい部材（後補材）で補う。後補材として、色や寸法安定性において周囲の古材と調和する熱処理木材を用いることで、より安定した修復が可能になると考えられる¹⁵⁾。また、洗浄や接着など修復過程で必要な侵襲的作業が古材にどのような影響を及ぼすか、熱処理木材を用いてあらかじめ検討しておくことも可能である。現場の要請に応じて古材と同様の材質をもつ材、いわば任意の擬似古材を作るには、熱処理による材質変化の予測とその制御が必要である。これまでに、樹種は限られているが温度あるいは湿度と材質変化速度の関係を定式化できることが分かっており、これに基づいて最適な処理条件を設定することが可能である^{20, 24, 25)}。今後、異なる温度、湿度、時間で処理された様々な樹種の特性データが蓄積されることで、将来的にはより精度の高い経年変化予測モデルの構築が期待できるとともに、精密に制御された擬似古材作製法の確立も期待される。



図2：ヒノキ新材，古材，熱処理材の比較
（*経年時間は、年輪年代法により求められた試料最外年輪の生育年代から算出²⁰⁾）

4. おわりに

木材の経年変化に関する研究は、木材の超長期的な化学的・物理的特性を理解するだけでなく、文化財の保存や持続可能な木材利用に貢献するものである。また、国際的にも木材の長期利用や再利用への機運が高まる今、百年～千年単位の変化を扱う本研究が、木材の究極の長期利用を探るものとして我々の材料への概念を見直す一助になればと考えている。

※最後に、「〇〇年経年した古材を再現するには、何℃で何時間処理すればいいですか」というご質問をしばしばいただくので、これまでに発表したデータを元に、任意の温度での熱処理による色変化をシミュレーションし、古材の色変化を比較できるサイトを作成しました。まだ試作段階ではありますが、興味のある方は覗いていただき、もしもフィードバックをいただけるようでしたら幸いです²⁶⁾。

参考文献

- 1) Sell, J. and Feist, W. C., Role of density in the erosion of wood during weathering, *Forest Products Journal*, **36**(3), 57–60, 1986.
- 2) Department of Scientific and Industrial Research, “Report of the Forest Products Research Board for the Year 1932”, His Majesty’s Stationary Office, pp.9, 1933.
- 3) Brunn, G., Strength properties of old pine timber, *Forstarchiv*, **11**, 193–194, 1932.
- 4) 三好東一，法隆寺建造古材に就て，*御料林*, **92**, 77–85, 1936.
- 5) 小原二郎，古材に関する研究，*千葉大学工学部研究報告*, **9**(15), 1–55, 1958.
- 6) 小原二郎，古材に関する研究，*千葉大学工学部研究報告*, **9**(16), 23–65, 1958.
- 7) Kránitz, K., Sonderegger, W., Bues, C. T., Nimz, P., Effects of aging on wood: a literature review, *Wood Science and Technology*, **50**, 7–22, 2016.
- 8) 平嶋義彦，杉原未奈，佐々木康寿，安藤幸世，山崎真理子，古材の強度特性（第1報）ケヤキおよびアカマツの引張強度特性，*木材学会誌*, **50**(5), 301–309, 2004.
- 9) 平嶋義彦，杉原未奈，佐々木康寿，安藤幸世，山崎真理子，古材の強度特性（第2報）ケヤキおよびアカマツ

- の圧縮強度特性，せん断強さおよび硬さ，*木材学会誌*, **50**(6), 368–375, 2004.
- 10) 平嶋義彦，杉原未奈，佐々木康寿，安藤幸世，山崎真理子，古材の強度特性（第3報）ケヤキおよびアカマツの静的曲げ強度特性および衝撃曲げ強さ，*木材学会誌*, **51**(3), 146–152, 2005.
 - 11) Yokoyama, M., Gril, J., Matsuo, M., Yano, H., Sugiyama, J., Clair, B., Kubodera, S., Mitsutani, T., Sakamoto, M., Ozaki, H., Imamura, M., Kawai, S., Mechanical characteristics of aged Hinoki wood from Japanese historical buildings, *Comptes Rendus Physique*, **10**, 601–611, 2009.
 - 12) 松尾美幸，木材物性の变化とその時間温度依存性, *Cellulose Communications*, **23**(4), 178–182, 2016.
 - 13) 京都大学生存圏研究所材鑑調査室, <https://www.rish.kyoto-u.ac.jp/Xylarium/>, 2024年9月2日アクセス
 - 14) 横山操，杉山淳司，伊東隆夫，川井秀一，歴史的建造物由来古材のデータベース構築に向けて：文化財指定建造物修理事業からの古材提供，*生存圏研究*, **4**, 35–40, 2008.
 - 15) 川井秀一，木材の寿命を考える，*生存圏研究*, **7**, 1–5, 2012.
 - 16) Hill, C., Altgen, M., Rautkari, L. Thermal modification of wood—a review: chemical changes and hygroscopicity, *Journal of Materials Science*, **56**, 6581–6614, 2021.
 - 17) Esteves, B.M., Pereira, H. M., Wood modification by heat treatment: A review, *Bioresources*, **4**(1), 370–404, 2009.
 - 18) 大澤善次郎，寿命予測，“高分子劣化・長寿命化ハンドブック”，丸善出版, pp.199–212, 2011.
 - 19) Stamm, A.J., Thermal degradation of wood and cellulose, *Industrial and Engineering Chemistry*, **48**(3), 413–417, 1956.
 - 20) Matsuo, M., Yokoyama, M., Umemura, K., Sugiyama, J., Kawai, S., Gril, J., Kubodera, S., Mitsutani, T., Ozaki, H., Sakamoto, M., Imamura, M., Aging of wood: Analysis of color changes during natural aging and heat treatment, *Holzforschung*, **65**(3), 361–368, 2011.
 - 21) 松尾美幸，山本浩之，梅村研二，川井秀一，木材の経年および熱処理による色変化，*木材学会誌*, **62**(6), 266–274, 2016.
 - 22) Kojima, E., Yamasaki, M., Imaeda, K., Lee, C. G., Sugimoto, T., Sasaki, Y., XRD investigation of mechanical properties of cellulose microfibrils in S1 and S3 layers of thermally modified wood under tensile loading, *Wood Science and Technology*, **55**, 955–969, 2021.
 - 23) Kojima, E., Yamasaki, M., Lee, C. G., Sasaki, Y., Synchrotron X-ray measurements of cellulose in the cell wall of aged wood under uniaxial loading, *Holzforschung*, **77**(4), 260–269, 2023.
 - 24) Zeniya, N., Obataya, E., Endo-Ujiie, K., Matsuo-Ueda, M., Application of time–temperature–humidity superposition to the mass loss of wood through hygrothermally accelerated ageing at 95–140 °C and different relative humidity levels. *SN Applied Science*, **1**, 3, 2019.
 - 25) Matsuo, M., Umemura, K., Kawai, S., Kinetic analysis of color changes in keyaki (*Zelkova serrata*) and sugi (*Cryptomeria japonica*) wood during heat treatment, *Journal of Wood Science*, **60**, 12–20, 2014.
 - 26) OVEN project, <https://matsuo-ueda.github.io/TTWsimulator/index.html>, 2024年9月2日アクセス.

著者プロフィール



松尾 美幸 (Miyuki Matsuo-Ueda)

＜略歴＞ 2007 年京都大学農学部森林科学科卒業／2012 年京都大学大学院農学研究科博士後期課程修了（博士（農学））／同年名古屋大学大学院生命農学研究科助教／2017 年同講師／2021 年京都大学生存圏研究所准教授／2024 年同大学大学院農学研究科准教授、現在に至る。＜研究テーマと抱負＞木材の経年変化と樹木の成長応力。いずれもスパンの長い現象を扱っています。