

令和 6 年 6 月 6 日現在

機関番号：14301

研究種目：若手研究

研究期間：2019～2023

課題番号：19K15885

研究課題名（和文）様々な樹種における木材の経年変化インデックスの構築

研究課題名（英文）Establishment of an ageing index of wood in various species

研究代表者

松尾 美幸（Matsuo-Ueda, Miyuki）

京都大学・生存圏研究所・准教授

研究者番号：70631597

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,300,000円

研究成果の概要（和文）：木材は適切な管理がされると長期間使用可能だが、樹種ごとの経年変化には差があり、これを定量化する必要がある。本研究では、国内外で文化財に用いられる代表的な10樹種を対象に様々な処理温度で熱処理を施し、その物性変化を測定した。質量減少や寸法変化、平衡含水率変化、色変化のデータから、見かけの活性化エネルギーを算出した。これにより、常温での経年変化の予測モデルを構築し、樹種ごとの経年変化インデックスを作成した。結果として、物性変化には大きな樹種差があることが確認された。また、反応速度の違いが見かけの活性化エネルギーとして定量化され、常温での変化予測の重要性が示された。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究の学術的意義は、木材の経年変化を熱による促進処理により再現し、樹種ごとの特性を定量化した点にある。特に、見かけの活性化エネルギーを算出し、経年変化の予測モデルを構築したことで、残存物性の推測や将来にわたる物性変化を予測する方法を確立した。また、これまで個別で単発的に論じられることが多かった熱処理による物性変化の樹種差についても、網羅的な知見を与えるものである。社会的意義としては、本予測モデルを木質科学以外の専門家にも利用可能な形で広く公開することで、木質文化財の保存・修復に役立てることが考えられる。将来的には、古材から得られる物性情報と突き合わせることで予測を更に精緻化することができる。

研究成果の概要（英文）：Wood can be used for a long time with proper management, but the aging process varies among different species, necessitating quantification. In this study, we conducted heat treatments at various temperatures on ten representative wood species used in cultural properties, both domestically and internationally, and measured their changes in physical properties. From data on mass loss and changes in dimension, equilibrium moisture content, and color, the apparent activation energy was calculated. This allowed us to construct a predictive model for aging at room temperature and create an aging index for each species and each property. Significant differences in changes in the physical properties among species were confirmed. Additionally, the differences in reaction rates were quantified as apparent activation energy, highlighting the importance of predicting changes at room temperature.

研究分野：木質科学

キーワード：経年変化 促進劣化処理 樹種多様性 寿命予測 熱処理

### 1. 研究開始当初の背景

木材は、迅速な劣化をもたらす生物劣化や気象劣化が適切な管理により防がれた場合、100年～1000年単位の長期にわたり建築などの構造物を支え続けられる長寿命材料である。建築物や美術品、工芸品などの木質文化財を適切に保存・修復するためには、部材の材質が長期間にわたる経年によってどのように変化するか(経年変化)を知ることが重要である。これまで、十分な量のヒノキ古材およびケヤキ古材を用いて経年変化を比較した研究により、力学特性や色などの変化に樹種差があることが知られている<sup>1, 2, 3</sup>。しかし、これ以外の樹種については、古材サンプルの少なさや年代の不確かさのため、断片的なデータや相反する結果しか報告されていない。実際の木質文化財には様々な樹種が材料として用いられており、これらの樹種について経年変化挙動を推定する際には、ヒノキやケヤキの挙動に基づいて類推するか、対象物からサンプルを採取して破壊的な測定をせざるを得ない。

一方、多くの工業材料では、促進劣化試験により経年変化を予測する技術が確立されている。これを参考にして研究代表者らは、木材の経年変化を予測するための研究に取り組み、乾熱処理や湿熱処理による物性変化から常温・常湿での挙動を推測する「温度-時間換算則」ならびに「温度-湿度-時間換算則」が木材に適用可能であることを明らかにした。一連の研究は、ヒノキ、ケヤキ、スギ、スプルースによって行われ、これ以外の樹種にも拡張して適用可能であることが示唆された<sup>4, 5, 6</sup>。

### 2. 研究の目的

上述の背景から本研究では、樹種によって異なる経年変化を定量化し、樹種ごとの経年変化挙動の違いを総覧できる「経年変化インデックス」を作成することを目的とした。国内外の木質文化財に用いられる様々な樹種について、熱処理による物性変化のモデル化と見かけの活性化エネルギーの算出をおこなう。物性変化がモデルと見かけの活性化エネルギーで記述されることにより、常温での経年変化だけでなく、任意の温度における物性変化を予測できるようになる。

### 3. 研究の方法

#### (1) 試料

日本の建築や工芸に用いられる代表的な樹種として、ヒノキ、スギ、マツ、ヤマザクラ、クスノキを、またヨーロッパの代表的な樹種として、スプルース、ハードメープル、ライムウッド、クロアチアオーク、ポプラの計10樹種を用いた。いずれも乾燥履歴が明らかで、天然乾燥あるいは60℃以下で人工乾燥されたものであった。それぞれの樹種からまさ目試験体と木口試験体を作製した。

#### (2) 熱処理

一定温度に設定した送風乾燥器を用いて乾熱処理をおこなった。処理温度および処理時間は表1の通りである。各処理条件につき、試験体数を5とした。

処理温度	処理時間
120 °C	4～512 日間
140 °C	12 時間～64 日間
160 °C	3 時間～16 日間
180 °C	45 分間～4 日間

#### (3) 測定

熱処理前および熱処理後に、試験体を全乾状態\*および相対湿度60%での平衡状態にし、各種測定(寸法、質量、平衡含水率、色)をおこなった。(※熱処理前の加熱をできるだけ避けるため、45℃に設定した減圧乾燥器内にP<sub>2</sub>O<sub>5</sub>粉末と試験体を置き、P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>上に吸湿による膜ができなくなるまで減圧乾燥をした。)

### 4. 研究成果

#### (1) 熱処理による物性変化

熱処理による物性変化の傾向はいずれの樹種においても同様であり、また、熱処理について行われている多くの既往研究の傾向とも一致した。すなわち、処理にともない、質量減少、接線方向・放射方向の寸法減少、平衡含水率の低下、明度の低下などが見られた。色彩値(a\*, b\*)については樹種それぞれの特徴が現れた。また、処理温度が高いほどおよび処理時間が長いほど、熱処理による物性変化が進行することについても、既往研究と一致した。同じ処理条件における物性変化の程度は、樹種により大きく異なり、例えば質量減少率では2倍程度、放射方向寸法減少率では4倍程度の差があった(図1)。

<sup>1</sup> 小原, 千葉大学工学部研究報告, 1958

<sup>2</sup> Yokoyama et al., Comptes Rendus Physique, 2009

<sup>3</sup> 松尾ら, 木材学会誌, 2016

<sup>4</sup> Matsuo et al. Holzforschung, 2011

<sup>5</sup> Matsuo et al. Journal of Wood Science, 2014

<sup>6</sup> Zeniya et al. SN Applied Science, 2018

### (2) 樹種差の要因についての考察

同じ熱処理条件であっても物性変化の程度に樹種差が生じる要因を探るべく、①各種物性変化と質量変化の関係、②化学成分組成の違い（針葉樹/広葉樹）や組織構造の違い（道管配置、放射組織）により説明できるかどうかを検討した。図2は、いずれも質量変化を横軸に、縦軸に一例として放射方向寸法変化をプロットしたグラフであり、②の分類により3種類に色分けしたものである。同程度の質量変化に対して、寸法変化に樹種差があることが分かる。他の物性についても、質量変化の違いだけで物性変化の樹種差を説明することはできなかった。また、針葉樹/広葉樹、環孔材/半環孔材/散孔材、単列放射組織/複列放射組織/広放射組織の別で分類を試みたが、いずれも樹種差を説明することができなかった。

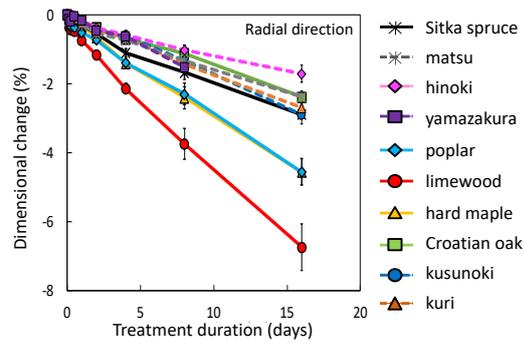


図1. 熱処理による物性変化 (例:放射方向寸法変化, 160°C 処理)

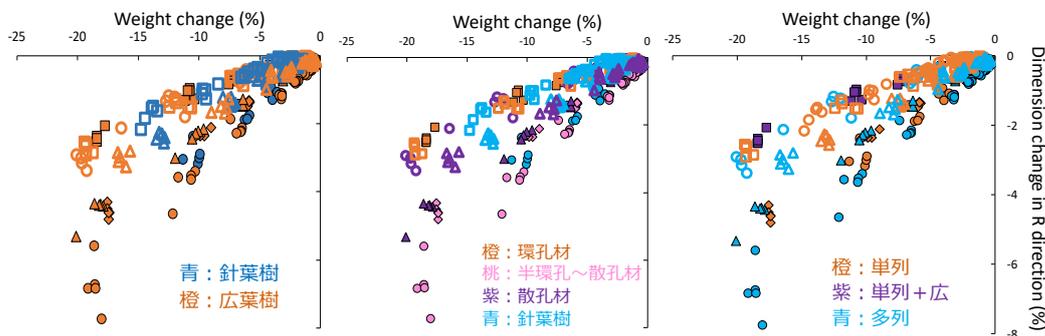


図2. 各特徴による物性変化の分類の試み (例:放射方向寸法変化, 160°C 処理)

### (3) 物性変化のモデル化と見かけの活性化エネルギーの算出

それぞれの樹種および物性変化に対して、0次反応モデルおよび1次反応モデルの適用を試み、いずれのモデルも適用精度が低い場合は温度-時間換算則による重ね合わせを適用して、見かけの活性化エネルギーを算出した。質量、寸法、および平衡含水率の変化に対しては1次反応モデル、色差の変化については重ね合わせが適用された。それぞれの樹種および物性変化における活性化エネルギーは、103~158 kJ/molの範囲にあり、樹種により差があった。これを元にして常温を15°Cとして予測した色差変化を、160°Cにおける色差変化と比較して図3に示す。この図から、物性変化の相対的な速度（ある樹種の物性変化が他の樹種に比べて速いか遅いか）が、想定する温度により変わることが分かる。これは、単位温度変化当たりの反応速度変化が樹種により異なることによるもので、見かけの活性化エネルギーはこれを定量化したものである。このことから、常温での変化を推測する際は、とある温度での熱処理の結果のみを見て予測することは危険であり、反応速度変化の温度依存性を考慮する必要があることが分かった。

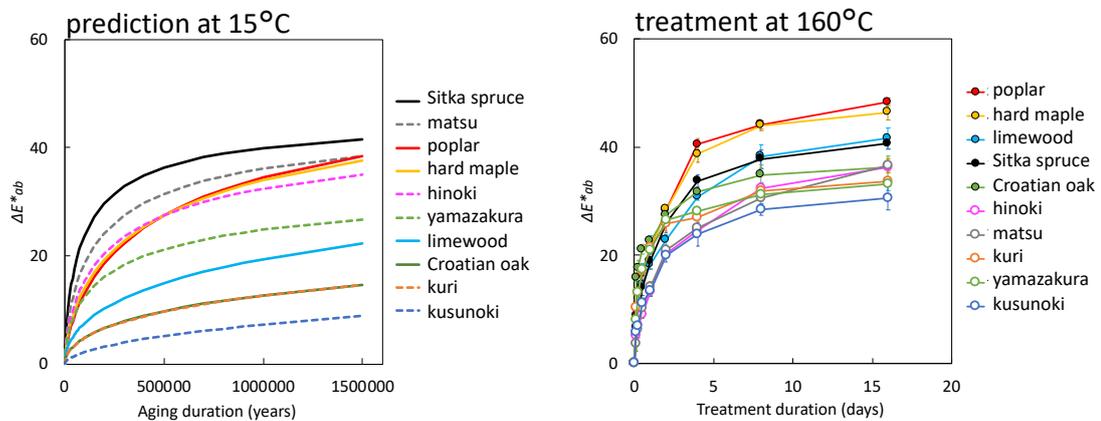


図3. 15°Cにおける色差変化の予測(左)と160°C熱処理による色差変化(右)

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計6件（うち招待講演 4件 / うち国際学会 1件）

1. 発表者名 Joseph GRIL, Miyuki Matsuo-Ueda, Matteo Bourchanin
2. 発表標題 Characterisation of the physical, mechanical and chemical properties of Notre-Dame-de-Paris oaks
3. 学会等名 AG ANR Casimodo (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Miyuki Matsuo-Ueda
2. 発表標題 Diversity of natural aging among wood species
3. 学会等名 Time4WoodCraft - 2nd Workshop (招待講演)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 松尾美幸
2. 発表標題 木材の経年変化：1000年を経た木材はどうなるのか
3. 学会等名 第118回 京都大学丸の内セミナー (招待講演)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 松尾美幸
2. 発表標題 木材の経年変化についての研究動向
3. 学会等名 日本木材学会 木材の化学加工研究会オンライン特別シンポジウム (招待講演)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 小川 ひかり、松尾 美幸、山本 浩之、吉田 正人
2. 発表標題 熱による加速劣化処理における樹種依存性
3. 学会等名 日本木材学会大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 松尾美幸
2. 発表標題 次の千年の木材のおはなし
3. 学会等名 令和5年度 京大大学生存圏研究所 公開講座「サステナブルな未来を創る新しい材料のはなし」第1回（招待講演）
4. 発表年 2023年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織		備考
氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関		
	フランス	Polytech Clermont	Universite de Montpellier, CNRS