

令和元年9月24日現在

機関番号：13901

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K18722

研究課題名(和文) 温度・湿度変動を考慮したシミュレーションで捉える木材の経年変化

研究課題名(英文) Hygrothermal treatment and simulation for understanding the natural aging of wood

研究代表者

松尾 美幸 (Matsuo-Ueda, Miyuki)

名古屋大学・生命農学研究科・講師

研究者番号：70631597

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,400,000円

研究成果の概要(和文)：本研究課題では、木材の経年変化を理解するために、温度依存性のみを論じる従来の促進劣化処理を発展させ、温度依存性と湿度依存性の両方を考慮し、経年にもなう物性変化と比較することで、経年変化への熱と水分の寄与を明らかにすることを目的とした。具体的には、様々な温度条件と湿度条件を設定した木材の湿熱処理をおこない、実際の経年による物性変化と比較した。その結果、実際の経年における物性変化速度を決めるファクターは木材の含水率であることが分かった。湿熱処理においては、常温常湿での木材の含水率と同定度になるように温度・湿度を設定することで、経年変化と湿熱処理を統一的に捉えられることが示唆された。

研究成果の学術的意義や社会的意義

日本では古来から木材で建築物や工芸品が作られてきており、しかもその中には長い時間を経てなお現役で使われているものもあります。木材は我が国の文化を形成する重要な材料です。木材は100年～1000年の単位でゆっくりと材質が変化し、これを「木材の経年変化」と呼びますが、その全容や詳細なメカニズムはまだ分かっていません。本研究では、木材の経年変化についてより深く知るために、熱処理によって経年変化を再現し、実際の経年変化とどのように異なるか等を数値解析によって明らかにしました。その結果、木材中の水分量(含水率)が経年変化のスピードを決める重要なファクターであることが分かりました。

研究成果の概要(英文)：This study aims to understand the natural aging of wood by the accelerated aging test at various treatment temperatures and relative humidity. The changes in color properties were predicted by extrapolating the reaction rate of the accelerated aging test to the ambient condition, and the predicted values of color properties were compared with those of natural aging. The results showed that the key factor to accelerate the natural aging by the hygrothermal treatment was the moisture content of wood samples. When the moisture content is the same between the natural aging and the hygrothermal treatment, the reaction rate can be explained at the same theoretical background.

研究分野：木質物理，木質文化財科学

キーワード：湿熱処理 温度-時間換算則 湿度-時間換算則 経年変化 促進劣化

1. 研究開始当初の背景

現存する世界最古の木造建築である法隆寺から近代の諸建築に至るまで、木材は、百年～千年のスパンで建築物を支え続けるほどの材料寿命をもつ。木材の経年変化や材料寿命に関する研究については、古材試料を用いた研究が多くなされ数々の重要な知見が報告されたが、一方で、古材試料の年代の不確かさ、少ない試料数、試料の個体差などの問題が指摘されていた。

応募者は上述の問題点を解決すべく、科学的に年代を測定した古材から十分な試料を作製し、物性を測定することによって経年変化の全容をより精確に明らかにしてきた。また、乾熱処理による促進劣化処理材を作製して古材と比較することで、木材の経年変化を温度依存性のある反応として速度論的に解析したところ、経年によるヒノキの色変化は乾熱処理と同様、常温での緩慢な熱酸化反応としておおむね説明できることを明らかにした。しかしながら、乾熱処理を常温まで外挿した予測よりも、実際の経年変化がわずかに速く進んでいた。また、ケヤキの色変化は、乾燥状態で起こる熱酸化反応によるものだけでは説明できず、それを速める因子あるいは別のメカニズムが存在する可能性が示唆された。実際の使用環境では、木材は温度・湿度の上下に常にさらされていること、また、湿熱処理においては、処理湿度が高いほど熱処理による劣化が速く進むことなどから、経年変化には空気中あるいは木材中の水分が関わっている可能性が非常に高い。木材の経年変化に水分が関わっているという指摘は、直感的・経験的には多くなされてきたものの、経年変化をもたらす反応への熱の寄与、水分の寄与およびそれらの繰り返しによる効果を、系統的に論じた研究はなかった。

2. 研究の目的

上述の背景を踏まえ、本研究課題では、温度依存性のみを論じる従来の研究を発展させ、温度依存性と湿度依存性の両方を考慮し、経年にとまなう物性変化と比較することで、経年変化への熱と水分の寄与を明らかにすることを旨とした。

なお、これまでも、木材の改質を目的として湿熱処理が行われることがあったが、様々な湿度で湿熱処理がおこなわれることはまれであり、また、あったとしても密閉系（高圧下）での研究のみであった。本研究では、温度・湿度以外の条件を木材の実際の使用環境に近づけるため、解放系で常圧のもと湿熱処理をおこなうこととした。

3. 研究の方法

具体的には、以下をおこなった。

(1) さまざまな温度条件と湿度条件に設定して木材の湿熱処理をおこない、処理にとまなう物性変化を測定した。これにより、物性変化に温度・湿度依存性が見られるか、また、

既往研究で言われているように「湿度が高いほど物性変化が速い」かどうかを確認した。

(2)(1)の結果より、実際の使用環境（建物内）での温湿度変動条件における木材の物性変化を外挿的にシミュレートした。

(3)シミュレーションの結果と、古材の測定によって明らかになった経年変化速度を比較し、熱のみでは説明できない物性変化について、水分の寄与によって説明できるかどうかを確かめた。

それぞれについて、以下に詳説する。

(1) 木材の湿熱処理と物性測定

均質な材質をもつヒノキ材から柎目試験片を作製し、7条件(温度95 相対湿度95%、95 85%、95 75%、95 65%、85 95%、75 95%、65 95%)に設定した恒温恒湿器内で処理した。処理時間は最長 32 日とした。なお、処理中の温湿度条件にて到達すると推定される含水率に調湿してから湿熱処理を行うことで、処理中の吸湿によるタイムロスを防いだ。処理ののちに温度 20 相対湿度 60%にて調湿し、各種物性（平衡含水率、曲げヤング率、色）を測定した。

(2) 実際の使用環境（建物内）における物性変化のシミュレーション

測定結果から、物性変化速度の温度依存性および湿度依存性を明らかにした。すなわち、物性変化速度と処理温度あるいは物性変化速度と処理湿度の間に法則を見だし、それを用いて任意の温度・湿度での物性変化をシミュレーションできるようにした。

(3) シミュレーションの結果と古材の比較

(2)の結果から、実際の使用環境における温度・湿度条件での物性変化を外挿的に予測し、それを古材から測定した物性変化と比較した。実際の使用環境における温度・湿度としては、奈良県の歴史的木造建築物群の内部において計測された平均温度・湿度の文献値（15 73%）を用いた。

4. 研究成果

(1) 木材の湿熱処理と物性測定

平衡含水率（EMC）の変化

平衡含水率は、ほとんどの処理条件において、処理時間 1～2 日の間に若干増加し、その後、徐々に減少することが分かった(図1)。また、処理温度および処理湿度が高いほど、減少速度が速かった。処理初期段階における増加は、特に高湿度処理で顕著に見られたことから、試料の乾燥過程で蓄積した可逆的な疎水化が、高湿度での処理によって解除されたためと考えられた。これについては、湿熱処理後の高湿度処理をおこなうことにより可逆的な効果と不可逆的な効果を分けるなどして、さらに検討する必要がある。

曲げヤング率の変化

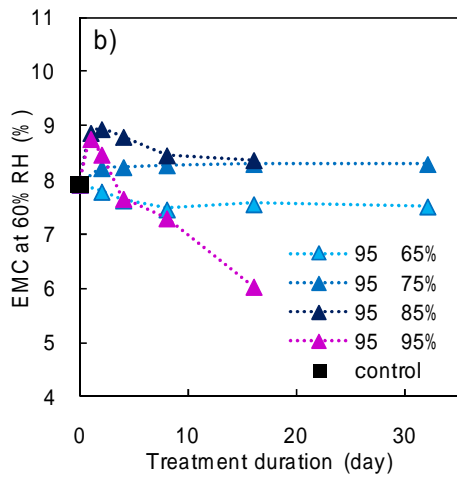
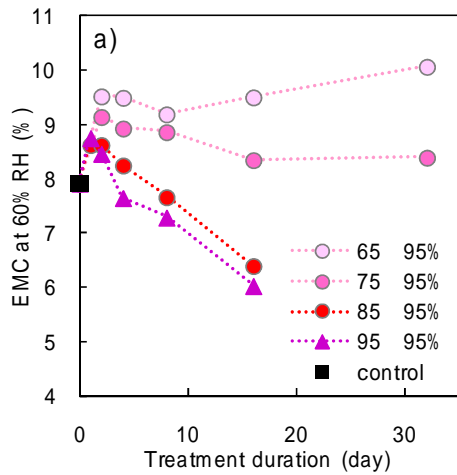


図1 湿熱処理にともなうEMCの変化
a)湿度一定, b)温度一定

曲げヤング率については今回の処理条件ではほとんど変化せず、また、変化したように見えても EMC の変化によるものの範囲であると考えられた。

色の变化

色については、処理が進むに従って濃色化し、CIELAB 表色系の色彩値 (L^* , a^* , および b^*) の変化として表れた (図2)。また、温度および湿度が高いほど色の変化が速く、一定の温度依存性・湿度依存性を示した。

(2) 実際の使用環境 (建物内) における物性変化のシミュレーション

(1) の結果から、明らかな温度・湿度依存性があると思われた色彩値についてのみ、解析を行うことにした。温度についてのシフトファクター (a_T) と湿度についてのシフトファクター (a_H) を用いたグラフの重ね合わせをおこなった。最適な a_T および a_H を求めることでグラフを1本のマスターカーブに重ね合わせることができ、 a_T および a_H と温度および湿度との関係を調べた。温度については、乾熱処理と同様にアレニウス則に従うことが分かった。見かけの活性化エネルギーは約

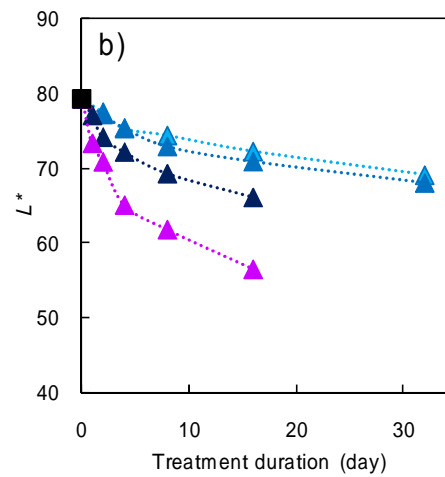
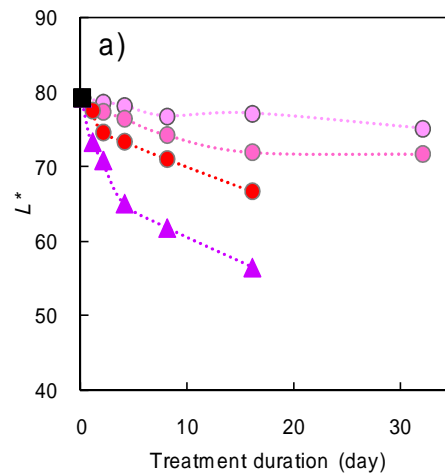


図2 湿熱処理にともなう明度 (L^*) の変化
a)湿度一定, b)温度一定
(凡例は図1に同じ)

110kJ/mol であり、この値は乾熱処理におけるものとはほぼ同じであった。また、この値は先だてて求めていた密閉系での湿熱処理による木粉の色変化の活性化エネルギーと比べると、3 倍程度大きな値であった。このことから、密閉系であるか開放系であるかや、試料の形状が、色変化速度の温度依存性に大きく影響していることが示唆された。

湿度については、本研究の湿度範囲では、 a_H と相対湿度とは線形関係として表された。同じヒノキ材を乾熱処理した先行研究から計算した相対湿度 0% における a_H も加え、アリングモデルをベースにした種々のモデルへの当てはめを試みたが、いずれのモデルでもうまく説明することはできなかった。一方で、処理温度・湿度における木材の含水率と a_H との関係を調べたところ、線形関係で表されたことから、湿熱処理における物性変化の速度を決める因子としては含水率が重要であることが示唆された。

(3) シミュレーションの結果と古材の比較

(2) で明らかになった a_T および a_H と温度および含水率の関係をを用い、15 73%での色

変化を計算し、実際の経年による色変化と比較した。その結果、 a_T の温度依存性のみを用いた場合、実際の経年による色変化の速度とほぼ同じになることが分かった。

以上のことから、実際の経年における色変化は、湿度が高い状態での熱処理と同様の反応であり、それは温度を上げることによって促進できることが示唆された。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 2 件)

1. 松尾 美幸, 山本 浩之, 梅村 研二, 川井 秀一 (2016) 木材の経年および熱処理による色変化. 木材学会誌, 査読有, 62(6): 266-274
DOI: 10.2488/jwrs.62.266
2. Matsuo MU, Mitsui K, Kobayashi I, Kohara M, Yoshida M, Yamamoto H (2016) Effect of hygrothermal treatment on wood properties: Color changes and kinetic analysis using four softwood and seven hardwood species. Wood Science and Technology, 査読有, 50(6): 1145-1160
DOI: 10.1007/s00226-016-0833-1

〔学会発表〕(計 1 件)

1. 松尾美幸, 水戸菜摘, 吉田正人, 山本浩之 (2017/3/17-19) 湿熱処理による材質変化の湿度依存性, 日本木材学会, 福岡

〔その他〕

ホームページ等

<https://www.agr.nagoya-u.ac.jp/~butsur i/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

松尾 美幸 (MATSUO Miyuki)

名古屋大学・大学院生命農学研究科・講師

研究者番号: 70631597