

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 4 年 6 月 28 日現在

機関番号：32201

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2018～2021

課題番号：18K04461

研究課題名(和文)環境条件による木構造の長期劣化プロセスの予測に関する研究

研究課題名(英文) Prediction for long term degradation process of timber structures due to environmental conditions

研究代表者

齋藤 宏昭 (Saito, Hiroaki)

足利大学・工学部・教授

研究者番号：20597827

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)：腐朽進行予測モデルを構造躯体へ適用する際の課題を解決するため、高さ9cm、断面寸法100cm程度の柱材の腐朽実験を行い、X線CT画像の解析によって腐朽プロセスを検証するとともに、腐朽菌の代謝影響を定量化し、木構造の劣化プロセスの予測・解明に資する知見を収集した。

腐朽実験の結果、木口腐朽では上下方向に対し均一に腐朽が進んでいるものの、木口断面方向では分布が大きく、局所的な密度との相関が確認された。含水率分布も同様の傾向が見られ、仮道管の断面積等が水分移動物性に影響したと推測される。また、酸素濃度による腐朽速度の低下や、木材分解に伴うガス生成・消費等の代謝影響を再現するパラメータを得た。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究は、建物の環境要因と設計情報を環境物理の解析技術によって木造躯体の劣化進行予測に繋げることを、一連の研究の到達点としている。木材は、コンクリートなど他の一般建材と異なり不均質性と異方性があり、建築の構造躯体に用いる寸法の場合、予測結果に影響を及ぼすことが懸念される。そのため、柱材レベルの寸法の試料を腐朽させ、X線CT撮影によって得られた含水率や腐朽度の内部分布から、腐朽プロセスの検証を試み、予測モデル精緻化のための知見を得た。また、劣化速度に影響を及ぼす腐朽菌の代謝影響について、酸素や二酸化炭素といったガス移動を含めた予測手法の開発に取り組んだ。

研究成果の概要(英文)：This research focuses on elucidation of wood decay process in terms of mass transfer and metabolism in wood structures with heartwood. Distributions of both mass loss and moisture content in decayed wood were measured by X-ray CT imaging. In addition, impact of metabolism associated with wood degradation was quantified. Although distribution of mass loss and moisture content in fiber direction were not large in the wood decay test, dispersion of these values in end grain plane was remarkable. Correlation between the mass loss and initial density in the end grain plane was observed. This result indicated that mass transfer properties depending on diameter of tracheid affected the dispersion of the mass loss in the end grain plane. As for the impact of metabolism, it was shown that the oxygen consumption and the carbon dioxide production can be approximately calculated from degraded quantities of wood substrate.

研究分野：建築環境工学

キーワード：木材 劣化 耐久性 水分 予測モデル

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

構造耐力上問題となる木材の劣化は腐朽と蟻害があり、腐朽については環境要因から定まる木部の温度や湿潤状態によって進行度が変化する。近年の木造住宅では、意匠や構法の変化により、水分が躯体内に滞留し、木材が腐朽に至る事例が散見される。このような建物の劣化リスクを評価するため、環境条件から腐朽進行を予測するモデルの開発が試みられているが、寸法が大きい構造躯体への適用において、いくつかの課題が残されている。一般に、木材の腐朽現象はセルロース等の分解に伴い、菌の代謝として酸素が消費され、水と二酸化炭素が生成される。そのため、寸法によっては材料表面と内部でのガス濃度の分布が生じ、木材小片に対する腐朽実験に基づき開発した既往の予測モデルとは異なる性状を示す可能性がある。さらに、木材は繊維方向や晩材・早材といった、密度や物性値の異なる特性を内包しており、腐朽現象におけるこれらの影響を精査し、予測モデルに反映する必要がある。

### 2. 研究の目的

本研究では、腐朽現象における代謝影響を定量化するとともに、柱材の腐朽実験により X 線 CT 画像の解析によって腐朽プロセスを検証し、環境条件による木構造の劣化プロセスの予測・解明に資する知見を収集する。具体的には、(1)木口腐朽に対する木材特有の不均質性と異方性に関する影響把握、(2)腐朽菌による代謝影響の定量化に関する検討であり、これまで開発してきた腐朽進行予測モデルの適用範囲を、実大寸法の建築構造材へ拡張することが目的である。特に、これまで材単体で検討されていた腐朽現象を、室内外環境や水分滞留と結びつけるアプローチにより、個々の材料と納まりから構成される建物部位を対象とした分析を可能にする狙いがある。

### 3. 研究の方法

研究は、(1)芯持ち材を対象とした腐朽実験、(2)酸素濃度による腐朽速度低下率及び腐朽に伴うガス生成・消費量の測定、によって構成した。

(1)木造住宅の主要構造材となる 100cm<sup>2</sup> 程度の断面寸法を持つアカマツの芯持ち材を試料とし、腐朽操作前後の X 線 CT 画像から腐朽度と含水率分布の定量化を試みた。試料は、側面をエポキシ樹脂でシールし、試料上面からの酸素供給の影響比較のため、試料上面を開放した case1 とアルミテープによりシールした case2 を設定した。腐朽操作は樹脂シャーレの培地上で培養した *Fomitopsis palustris* (和名：オオズラタケ) を、試料下面に 10mm 程度の隙間を設けて設置し、柱材が外壁内の水分滞留などにより、底部の木口から腐朽する状況を再現した (図 1 参照)。腐朽操作後の試料は、底に蒸留水を満たして加湿したタッパーに分け入れ、20 ℃ のインキュベータ内で暴露した。腐朽操作前後の X 線 CT 画像の撮影は、京都大学桂キャンパスの X 線 CT 三次元測定機を使用して行った。得られた X 線 CT 画像の CT 値を、MATLAB (MathWorks 社製) を用いて解析し、CT 値と密度の回帰式を求め、試料内部の含水率と質量減少率の分布を算出した。

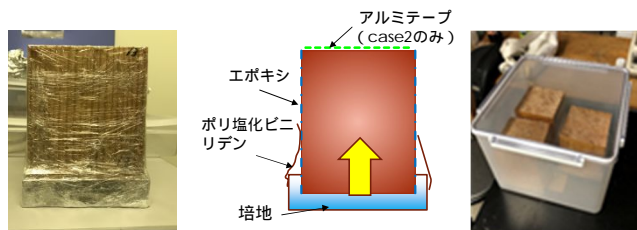


図 1 試料外観及び設置状況

(2) 酸素濃度による腐朽速度低下率については、図 2 に示す酸素濃度を制御できるデシケーター内に、寒天培地上で *Fomitopsis palustris* を接種したアカマツ辺材 (25×25×5mm) 投入し、一定温度条件下での重量変化から含水率と質量減少率を算出し、酸素濃度との関係を整理した。腐朽に伴うガス生成・消費量の測定については、菌糸を接種した試料をデュランビンに入れ、インキュベータに設置し、マイクロシリンジにより定期的に内部の空気を採取し、容器内の O<sub>2</sub>、CO<sub>2</sub> 濃度の変化から質量減少量と代謝量の関係を求めた (図 3)。

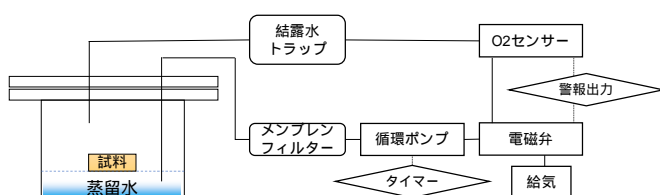


図 2 腐朽速度低下率測定装置の概要

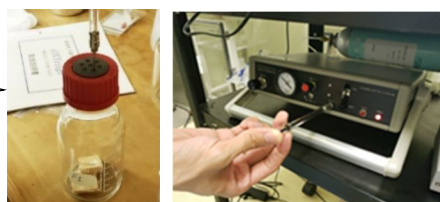


図 3 腐朽に伴うガス生成・消費量の測定状況

#### 4. 研究成果

##### (1) 芯持ち材を対象とした腐朽実験

芯持ち材に対する腐朽操作前と暴露後の CT 値を分析し、試料内部の質量減少率と含水率を求めた結果、木口腐朽について以下の知見が得られた。なお、本実験では試料底面と培地に隙間があるため、試料への主な水分供給は水蒸気移動による。また、図 4~8 は腐朽操作後 2 ヶ月、図 9 は 6 ヶ月の結果である。

質量減少率及び含水率に対する水平方向の平均値を比較したところ、木口腐朽では上下方向に大きな差はなく、高さ中央を除けば均一に腐朽が進んでいた(図 4、5)。

上面開放の case1 とシールした case2 を比較すると、case1 の質量減少率がやや大きいものの、上面のシール有無による影響が明確とは言い難い(図 4、5)。これは高さ 90mm 程度の試料では、底部からの水分及び O<sub>2</sub> 供給、CO<sub>2</sub> 排出によって腐朽菌の代謝が維持できていたものと推測される。

上下方向の結果と異なり、質量減少率の水平分布の差異は大きく(図 6)、どちらも移行材である写真右上が低く、左下の心側ほど高い傾向であった。また、含水率も同様の傾向で、質量減少率との相関がみられた(図 7)。

水平断面の初期密度と質量減少率の関係(図 8)を整理すると、初期密度が高くなるにつれて質量減少率が低下しており、密度や晩材率の高い領域は、含水率が低く腐朽が進み難いことを示唆している。

図 6 の水平断面で腐朽状況が大きく異なる 7×7mm の領域について、垂直方向の分布を比較したところ(図 9) 質量減少率が高い箇所の含水率は繊維飽和点を超過しているが、低い箇所は含水率 20%以下となっていた。これは、仮道管の断面積等が水分移動物性に影響し、水平方向に対する差異を生じさせたことが推測される。

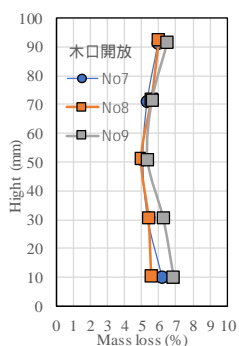


図 4 質量減少率の垂直分布

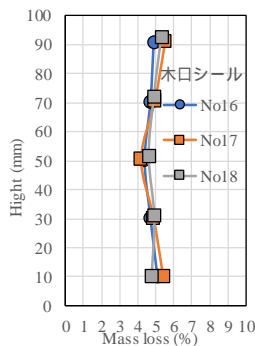


図 5 含水率の垂直分布

(暴露 2 か月後で図 1、図 2 とともに左が上面を開放した case1、右がシールした case2)

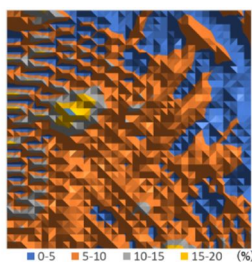


図 6 質量減少率の水平分布

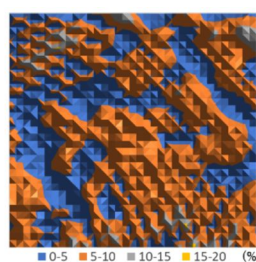


図 7 含水率の水平分布

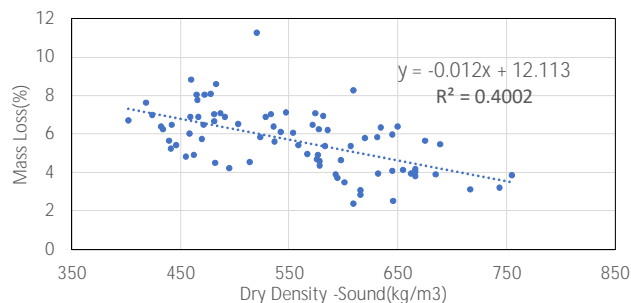


図 8 水平断面における初期密度と質量減少率の関係



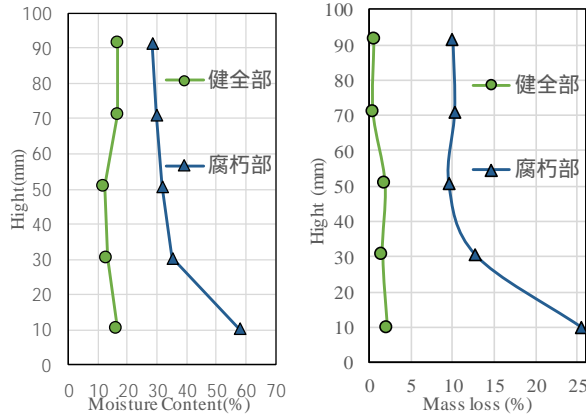


図9 健全部（密度低）と腐朽部（密度高）における質量減少率の垂直分布

(2) 酸素濃度による腐朽速度低下率及び腐朽に伴うガス生成・消費量の測定

腐朽速度の低下率は、図10に示す質量減少率の時間変化について、各条件の勾配を求め、大気相当（ $O_2$ 濃度21%）に対する割合を算出した（表1）。既往の予測モデルでは、腐朽による材料密度の減少を反応速度定数  $k_p$  ( $kg/m^3s$ ) を用いて(1)式で求めているが、 $k_p$ が温度や酸素濃度に対する変化率  $\tau_p$ 、 $o_p$ に依存すると仮定すれば、 $k_p$ は(2)式で表すことが出来る。 $k_{p.ref}$ は基準温度での反応速度定数であり、これを補正する腐朽速度のパラメータ(低下率)  $o_p(-)$ を提案した。

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = k_p \quad (1)$$

$$k_p = k_{p.ref} \cdot \tau_p \cdot o_p \quad (2)$$

ここに、 $k_p$ :反応速度定数(密度基準)( $kg/m^3s$ )、 $k_{p.ref}$ :基準温度における反応速度定数(密度基準)( $kg/m^3s$ )、 $\tau_p$ :温度によるパラメータ(-)、 $o_p$ :酸素濃度によるパラメータ(-)

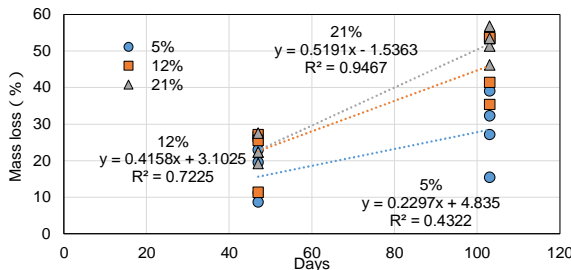


図10 酸素濃度による質量減少率の変化

表1 酸素濃度と腐朽速度の低下率

項目	5%	12%	20%
酸素濃度測定値 (%)	6.8	13.7	20.3
含水率 MC (%)	54.6	111	117
質量減少率 ML (%)	28.5	46	52
腐朽速度の低下率 $o_p(-)$	0.44	0.8	1

腐朽に伴うガス生成・消費量は、材内部の解析をする際に、上述した腐朽速度の低下に影響する。図11、図12は、 $O_2$ 消費速度と $CO_2$ 生成速度の周囲濃度との関係について、密閉容器内のガス濃度測定値から(3)式で算出した値(マーカー)と、試料の質量減少量から(4)式により算出した値(実線及び点線)を比較したものである。(4)式でガスのモル質量  $M_i$  の6倍としたのは、理論上、腐朽では分解されるセルロースの6倍のモル数の  $O_2$ 、 $CO_2$ が消費・生成されるためである。(4)式で算出した推定値は、20%の $CO_2$ 生成速度に若干の乖離が見られるものの、ガス濃度から換算した値をおおよそ再現できることが確認された。なお、腐朽菌は酸素濃度が低下した際には発酵代謝に変わり、 $CO_2$ 生成割合が増大するといった報告もあり、適用にあたっては注意が必要である。

$$R_{i,P/C} = \frac{dC_i}{dt} \cdot \frac{M_{r,i} \cdot 273.15 \cdot P \cdot 10}{22.4 \cdot T \cdot 1013} \cdot \frac{V_b}{V_{wood}} \quad (3)$$

$$R_{i,P/S} = \frac{dm_{wood}}{dt} \cdot \frac{6M_i}{M_{wood} \cdot V_{wood}} \quad (4)$$

ここに、 $R_{i,P/C}$ :容器内の濃度変化から算出したi成分のガス消費・生成速度( $kg/m^3s$ )、 $R_{i,P/S}$ :基質の質量変化から算出したi成分のガス消費・生成速度( $kg/m^3s$ )、 $C_i$ :i成分のガス濃度(%)、 $t$ :時間(s)、 $M_{r,i}$ :i成分の分子量(-)、 $M_i$ :i成分のモル質量( $g/mol$ )、 $P$ :大気圧(hPa)、 $T$ :絶対温度(K)、 $V_b$ :容器容積( $m^3$ )、 $V_{wood}$ :試料体積( $m^3$ )

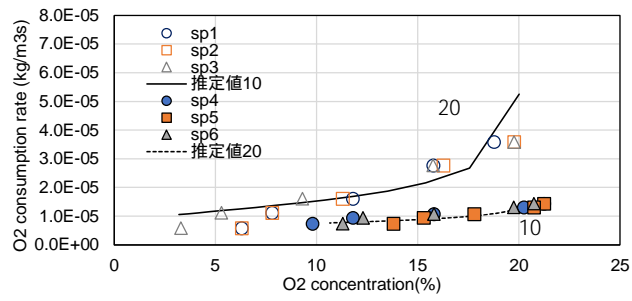


図 11 O<sub>2</sub>消費速度と周囲濃度の関係

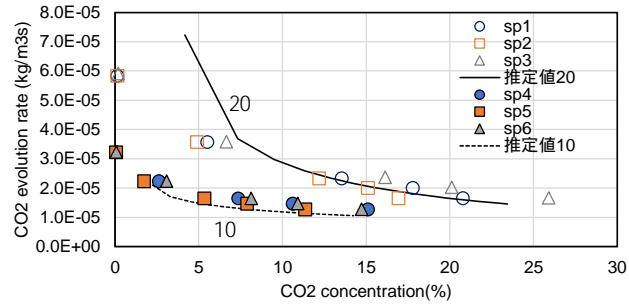


図 12 CO<sub>2</sub>生成速度と周囲濃度の関係

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計9件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 齋藤宏昭
2. 発表標題 酸素濃度による腐朽速度低減係数の測定
3. 学会等名 日本木材学会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Zhu Hao
2. 発表標題 X線CTを用いた柱材の腐朽プロセスに関する研究
3. 学会等名 日本木材学会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 齋藤宏昭
2. 発表標題 酸素濃度による腐朽速度低下率の測定
3. 学会等名 日本建築学会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Zhu Hao
2. 発表標題 X線CTを用いた柱材の腐朽プロセスに関する研究
3. 学会等名 日本建築学会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 齋藤宏昭
2. 発表標題 木材腐朽に伴うガス生成・消費率の測定
3. 学会等名 日本木材学会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Zhu Hao
2. 発表標題 吸水実験に基づくアカマツの水分拡散係数の測定
3. 学会等名 日本木材学会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 齋藤宏昭
2. 発表標題 木材分解の代謝に伴うガス生成・消費率の定量
3. 学会等名 日本建築学会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Zhu Hao
2. 発表標題 環境条件による木造構造の長期劣化プロセスの予測に関する研究 その2 密度分布による腐朽プロセスの考察
3. 学会等名 日本建築学会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 齋藤宏昭
2. 発表標題 環境条件による木構造の長期劣化プロセスの予測に関する研究
3. 学会等名 日本建築学会
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	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)	備考
研究分担者	森 拓郎 (Mori Takuro)  (00335225)	広島大学・先進理工系科学研究科(工)・准教授  (15401)	
研究分担者	堀澤 栄 (Horisawa Sakae)  (20368856)	高知工科大学・環境理工学群・教授  (26402)	
研究分担者	中嶋 麻起子 (Nakajima Makiko)  (40773221)	広島工業大学・工学部・助教  (35403)	
研究分担者	小椋 大輔 (Ogura Daisuke)  (60283868)	京都大学・工学研究科・教授  (14301)	



6. 研究組織（つづき）

	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)	備考
研究協力者	土居 修一  (Doi Shuichi)	元筑波大学大学院・生命環境科学研究科・教授	

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