

令和 4 年 6 月 13 日現在

機関番号：82105

研究種目：若手研究

研究期間：2018～2021

課題番号：18K14498

研究課題名（和文）木材腐朽における材の割れがもたらすリスク定量化に向けた取り組み

研究課題名（英文）Quantification of decay risk for strength property of wood with cracks

研究代表者

前田 啓 (MAEDA, Kei)

国立研究開発法人森林研究・整備機構・森林総合研究所・主任研究員 等

研究者番号：00714883

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,100,000円

研究成果の概要（和文）：木材中の割れの存在が腐朽に対するリスク要因になりうるか明らかにするため、繊維直交方向にスリット加工を施した各種針葉樹材について、オオウスラタケによる腐朽処理を施し、スリットの影響を検討した。X線デンストメトリーにより得られた質量減少率の分布より、スリットの存在により繊維直交方向の腐朽進行が促進する可能性が示された。また、局所的な質量減少が大きな強度低下をもたらす可能性についても確認された。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究では、繊維直交方向の腐朽においても繊維方向と比較可能な速さで腐朽が進行しうることを示し、新しい着眼点として繊維方向と繊維直交方向の腐朽を同時に考えることの必要性を示すことができた。また、菌の侵入箇所から離れていても割れなどの存在が木材の劣化を促進させる要因となりうるという知見は、劣化のリスク要因の把握を通じ、木造建築物のメンテナンス技術の向上につながる知見といえる。

研究成果の概要（英文）：To determine whether the presence of cracks in wood can be a risk factor for decay, various softwoods with slit in the perpendicular direction of the fibers were treated for decay fungi, and the effect of the slits was examined. The distribution of mass loss obtained by X-ray densitometry indicated that the presence of slits may accelerate the progression of decay. It was also confirmed that localized mass loss may cause significant strength loss.

研究分野：木質科学

キーワード：木材腐朽 割れ 密度分布 強度分布

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

建築物を長期間利用するためにはその間の安全を担保することが必要であり、定期的なメンテナンスによる劣化への対処が必要である。その中で、効率的にメンテナンスを実施するためにはそれぞれの部材の劣化リスク要因を把握し、リスクの高い部材について重点的に点検を行うことが必要である。

木材や木質材料の劣化要因としては、クリープや DOL に代表される時間経過に伴った劣化、紫外線等による気象劣化、そして腐朽菌やシロアリに代表される生物劣化が挙げられる。この中で木材腐朽に関するリスクは、大きく環境要因と部材自身の要因に分けることが可能である。温度や湿度といった環境要因については、一般に高温で結露が生じやすい環境で腐朽が生じやすいことが明らかになっていることを踏まえ、本研究では部材自身の要因、特に経年使用によって生じる割れや釘などの加工などによって生じる穴（以下割れなど）の存在が、腐朽進行に与える影響に着目することとした。

木材腐朽においては、木材の組織構造に由来する異方性の存在、すなわち道管や仮道管の存在により腐朽菌は木口面から侵入しやすいこと、繊維直交方向に比べて繊維方向の腐朽進行が速いことが知られている。その一方で、板目面や柾目面が材面として利用されることから、実際の木材の劣化を考えるうえでは、ある程度の時間をかけ、外部から内部に進行する繊維直交方向の腐朽についての知見も重要である。ここで、先に挙げた割れなどは一般に繊維直交方向に存在することから、材面以外の面の露出をもたらす（図1）。そのため、腐朽菌の侵入が生じた場合はいきなり内部に腐朽が生じることになる。また、割れなどを経由した腐朽菌の進展が、細胞壁などが障害となる木材内部を経由した進展より早い場合、腐朽菌の侵入箇所から離れた場所に存在する割れなどについても、繊維直交方向の腐朽を促進する効果を持つ可能性が考えられる。そのため、割れなどが木材腐朽に対して与えるリスクを明らかにするためには、繊維直交方向の腐朽促進効果についても明らかにする必要があるといえる。

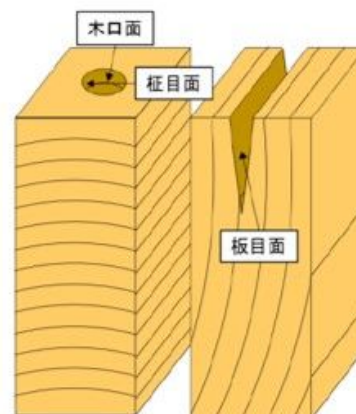


図1 釘穴や割れによって露出する面の例

2. 研究の目的

本研究の最終的な目標は、木材の表面や内部の割れなどの存在が木材腐朽に対してどれだけのリスク要因になりうるかを定量的に明らかにすることである。そのための第一歩として、本研究では割れを模したスリットを入れた木材を対象とし、はじめにスリットの影響を検討するために相応しい腐朽処理方法の探索を実施した。その後、スリットの有無が繊維直交方向の腐朽を促進しうるか、検討を行った。また、割れなどにより材料内部に局所的な腐朽が生じた場合の材料全体の強度性能についても、併せて検討を行った。

3. 研究の方法

(1) 材面を菌叢に接触させた腐朽試験による検討

100×100×10mmのベイマツ (*Pseudotsuga menziesii*) 柾目板、板目板について、腐朽開始面からの距離と長さが異なるスリット（約1mm幅）と腐朽開始面（木口面）となる切り欠きの加工後（図2）、腐朽開始面以外からの腐朽菌の侵入防止のためエポキシ系接着剤を塗布し、エチレンオキシドガスによる滅菌を施して試験に供した。培養容器中の PDA 培地に褐色腐朽菌であるオオウズラタケ (*Fomitopsis palustris*) の菌糸を展開させ、厚さ1mmの園芸用ネットを挟んで試験体を培地に平置きし（図3）、培養室（26℃、>70%RH）において1.5~8カ月の腐朽試験（各3体）を行った後、60℃の条件で恒量に達するまで送風乾燥を行った。X線デンストメトリーによる密度測定を行った後、腐朽が生じた可能性のある部分から縦引張試験体（繊維方向の長さ30mm、破壊が生じる部分の断面積5mm²）を作成し、縦引張強度の検討を行った（クロスヘッドスピード1mm/min）。

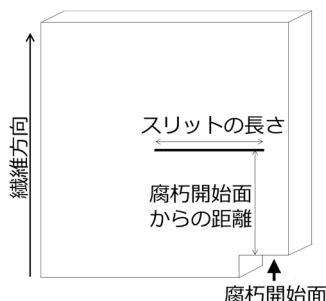


図2 試験体の模式図



図3 腐朽処理終了時の培養容器の様子

(2) 腐朽菌の侵入面と菌叢・培地が接する腐朽試験の検討

腐朽開始面が菌叢・培地に接する条件での腐朽試験として、海砂培地、寒天培地、パーミキュライト培地による腐朽処理を検討した。試験体には 100×40×10 (mm) のスギ (*Cryptomeria japonica*) 辺材の板目板とし、スリット加工後に菌叢接触面以外についてエポキシ樹脂系接着剤を塗布し、エチレンオキサイドガスによる滅菌後に試験に供した (図4)。腐朽菌については、(1)と同じオウズラタケに加え、白色腐朽菌であるカワラタケ (*Trametes versicolor*) についても検討を行った。海砂培地による腐朽処理については、培養ボトル内に培地を JIS K1571 (2010) に準拠して準備し、菌叢接触面が下向きになり培地と接するよう試験体を設置した。寒天培地を用いた腐朽試験では、金属製のバットに PDA 培地を作成し、腐朽菌を接種して 2 週間培養後、菌叢接触面が上側となるよう設置した試験体の上に菌叢と接触面が接するようバットを設置した。パーミキュライト培地を用いた腐朽試験では、培養容器 1 つにつきパーミキュライト 1L に培養液 0.4L を混和し、腐朽菌を接種後 2 週間培養し、試験体を設置した。いずれの試験についても、培養室にて最大 16 週間の腐朽処理を施し、(1)と同様の乾燥処理後に X 線デンストメトリーによる密度分布の測定を行った。

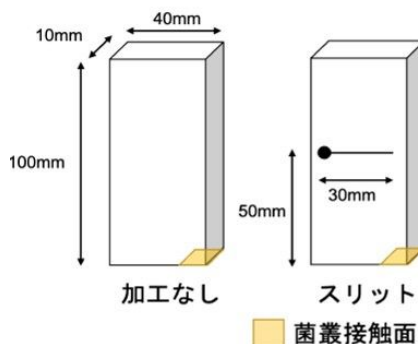


図4 試験体の模式図

(3) スリットの加工および位置が繊維直交方向の腐朽進行に与える影響の検討

試験体にはスギ辺材の板目板 (90×40×10 (mm)) を使用し、接線方向のスリットを図5に示す位置に加工した後、(2)と同様の加工・滅菌処理を施した。腐朽処理はオウズラタケを展開させた海砂培地を用いて 4~12 週間実施し、(1)と同様の条件で乾燥処理後、X 線デンストメトリーによる密度分布の測定を行った。また、木口面と接合金物が接する場面を模してスリット (菌叢接触面からの距離 50mm) に厚さ 0.3mm のステンレス板を挿入した条件、スリット幅の狭い条件として長さ 50mm の試験体を縦継ぎした条件についても、同様の腐朽処理と測定を実施した。

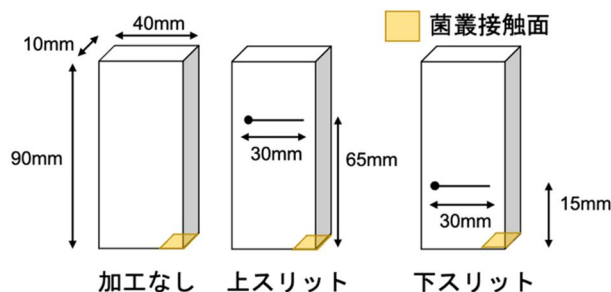


図5 スリットの加工位置

(4) 腐朽進行のばらつきが強度性能に与える影響の検討

100 (L) × 10 (R) × 10 (T) mm のエゾマツ (*Picea jezoensis*) を使用した。一部の試験体については、材内の質量減少にばらつきが生じるよう、木口面の 50% にあたる部分にエポキシ系接着剤を塗布した。木口面へのメッシュシート貼り付けと滅菌の後、木口面が菌叢に接するようオウズラタケによる強制腐朽試験を実施した。所定の腐朽期間 (4~12 週間) の経過後、60 2 日間の乾燥後に SKYSCAN1174 (SKYSCAN 社) による CT 画像撮影を行い、卓上万能試験機 LITTLE SENSTAR (JT トーシ) を用いた曲げ試験 (曲げスパン 90mm、クロスヘッドスピード 4mm/min) を実施した。

4. 研究成果

(1) 材面を菌叢に接触させた腐朽試験による検討

この腐朽試験では、8 カ月の腐朽処理においても半数以上の試験体で X 線デンストメトリーによる質量減少が観察されなかった。同様に木口面に腐朽菌侵入面を設定し、板目面が菌叢と接するよう腐朽試験を行った既往研究 (前田ほか、2017) では、8 カ月の腐朽処理により全ての試験体で明確な質量減少が観察されたが、今回の腐朽処理では以下の点が異なっていた。

- ・試験体の下にメッシュシートを挿入 (過度の吸水の防止)
- ・スリット近傍の樹脂が厚く塗布 (スリットからの侵入防止)

これらの点と培地の凹凸の影響で、腐朽開始面と菌叢の距離が離れたことが一部の試験体でのみ質量減少が生じた直接的な原因として考えられた。

一方、腐朽が確認された試験体については、スリットのある試験体において、スリットから繊維方向に沿った質量減少が観察された (図6)。この質量減少は腐朽開始面から繊維方向に連続していないため、スリットを介した接線方向の腐朽進行によ

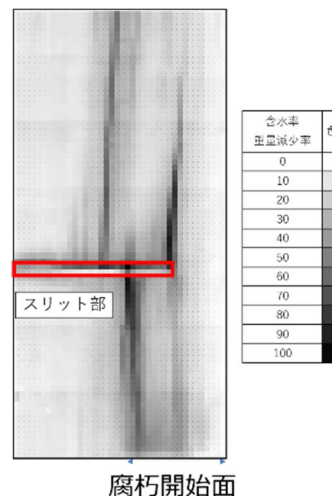


図6 腐朽開始面近傍の密度分布 (腐朽期間 8 カ月)

るものである可能性が考えられた。引張強度については、X線デンシトメトリーにおいて質量減少が観察された部分で強度の低下が確認された。繊維方向における質量減少の分布と強度性能の比較を行った既往研究 (Maeda et al. 2015) と異なり、質量減少を伴わない強度低下は確認されなかった。これは繊維方向に比べて繊維直交方向の腐朽進行が遅いことから、本実験では質量減少を伴わない強度低下が生じる領域が狭かったことが原因として考えられた。

(2) 腐朽菌の侵入面と菌叢・培地が接する腐朽試験の検討

オオウズラタケの場合、海砂、寒天、パーミキュライトのいずれの培地を用いた場合についても、12週間の腐朽処理による質量減少が観察された。材内部の著しい含水率のばらつきなど、課題がみられた試験体はあったものの、いずれの培地についても適当な対応を行うことで、スリットの影響を検討可能であると判断した。カワラタケでは、寒天培地を用いた場合のみ明確な質量減少が観察され、菌叢と試験体の接触について十分な配慮が必要であることが確認された。

一方、オオウズラタケの場合に最も腐朽進行が著しかったパーミキュライト培地では、X線デンシトメトリーで測定される密度分布について、今後検討が必要な事項が確認された。図7にパーミキュライト培地で得られた腐朽材のX線デンシトメトリーにより求めた質量減少率の分布を示す。これを見ると、菌叢接触面付近での質量減少がほとんど観察されなかったことがわかる。この部分について全乾法による質量減少率を測定したところ、他の部分より大きな質量減少率となった(図7下)。この部分の試験体に変色がみられたこと、X線デンシトメトリーにおいて軟X線を用いていたことを併せて考えると、パーミキュライト中に存在するFeなど、木材に多く存在するH、C、Oより原子番号が大きく質量吸収係数の大きい原子が木材中に侵入した

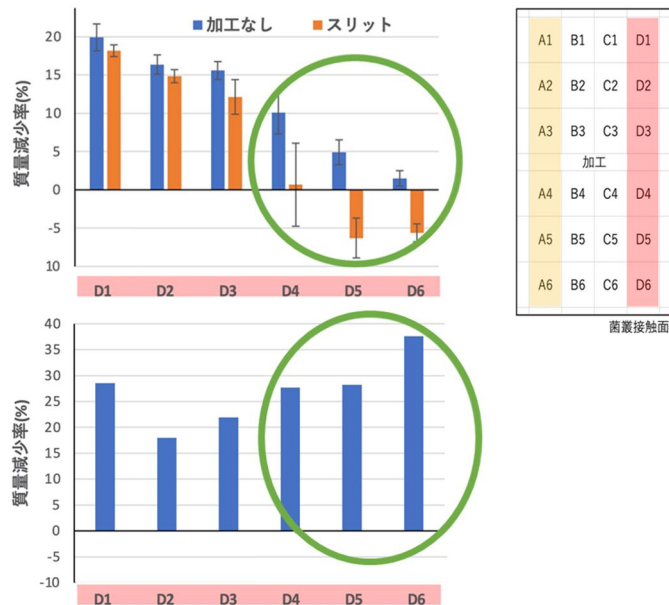


図7 X線デンシトメトリー(上)と全乾法(下)で求めた質量減少率の分布

ことで、X線デンシトメトリーで測定される腐朽材の密度が本来の密度より大きくなった可能性がある。このような現象が生じうることは、CTを含むX線デンシトメトリーを用いた測定を行う上で重要な知見となり得る。そのため、今後腐朽材の元素分析等を絡めた検討が望まれる。

(3) スリットの加工および位置が繊維直交方向の腐朽進行に与える影響の検討

腐朽開始面から繊維方向に約70mm離れた2か所の質量減少率を図8に示す。スリット加工の有無で比較すると、菌叢接触面の反対側(図8の青枠)においては、スリットを持つ場合の質量減少率が加工なしの場合と比べて大きくなっていたが、菌叢接触面側(図8の赤枠)では、加工の有無にかかわらず質量減少が生じていた。加工なしにおいて繊維直交方向の腐朽進行があまり見られなかったという結果は、柁目面から接線方向への腐朽進行が約4カ月で2mm程度 (Maeda et al. 2011) という知見と一致していた。菌叢接触面側の質量減少に差がみられなかったことを踏まえると、加工条件ごとに腐朽菌の活性が異なっていたとは考えづらく、スリット内部に菌糸が観察されたことも併せると、今回の結果よりスリットを経由した繊維直交方向の腐朽進行の可能性を示すことができたと考えられる。

スリットの位置の影響については、腐朽期間が4、8週間において下スリットより上スリットの質量減少率が大きかった。一方、8週間を超える腐朽においてはいずれのスリット位置でも菌叢接触面側の質量減少率が反対側より若干大きくなっていった。このことから、繊維直交方向への腐朽進行の促進効果については同程度であったと考えられ、今回の条件ではスリットの位置による影響がみられなかったといえる。ステンレス板の有無、スリットの幅による違いについては、今回の実験条件では特に確認されなかった。

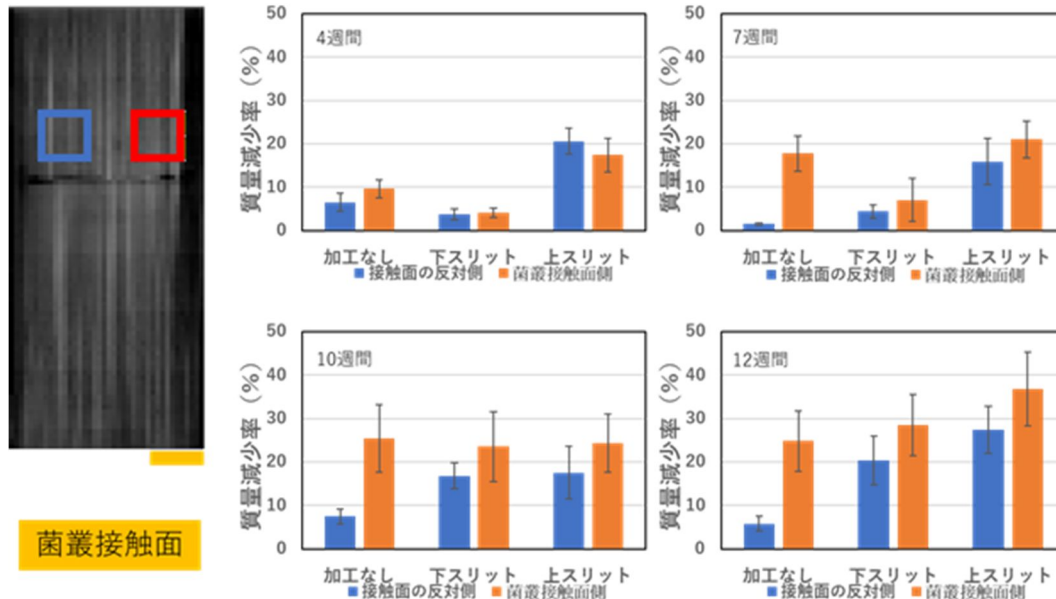


図8 スリット近傍における、接線方向の質量減少分布（加工なし：スリット無し、下スリット：スリットの位置が菌叢接触面から15mm、上スリット：スリットの位置が菌叢接触面から65mm）

(4) スリットの加工および位置が繊維直交方向の腐朽進行に与える影響の検討

試験体全体の密度と質量減少率は、いずれも曲げ強度と相関がみられたが、相関の程度は質量減少率の方が明らかに大きかった。これは、健全材における曲げ強度は概ね密度と比例するのに対し、腐朽材では質量減少率に比較して強度の減少率が大きいことが影響したと考えられる。

材料内部の腐朽進行のばらつきの影響については、試験体の寸法が小さく木口面内に密度のばらつきを生じさせることができなかったため、木口面のシールと加力方向の組み合わせによる影響は特に認められなかった(図8)。その一方で、同程度の質量減少率で曲げ強度に差がみられた3体の試験体(図9のA、B、C)についてX線CTで求めた加力点における密度分布と比較すると、圧縮側より引張側の密度が小さい試験体(図9のC)の曲げ強度が最も小さくなっていった。これは、同じ質量減少率でも圧縮強度より引張強度の方が低下の度合いが大きいという知見と一致しており、腐朽材の強度性能を考える際に材料内部の腐朽進行のばらつきを考慮する必要がある可能性を示唆したといえる。

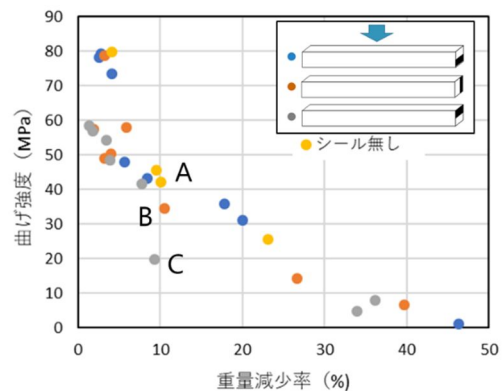


図9 質量減少率と曲げ強度の関係

- A: 圧縮側 324kg/m³、引張側 340kg/m³
- B: 圧縮側 413kg/m³、引張側 417kg/m³
- C: 圧縮側 350kg/m³、引張側 324kg/m³

(5) まとめ

本研究で開発した腐朽試験を用いることで、木材中のスリットが繊維直交方向の腐朽進行を促進する可能性が確認された。また、強度試験の結果から、局所的な質量減少が大きな強度低下をもたらす可能性が確認された。また、計画時に予定していなかった知見として、パーミキュライト培地を用いて得られた腐朽材の密度について、X線デンストメトリーと全乾法で大きく異なっていたことが挙げられる。今後、培地の成分の違いを考慮した検討を通じ、本手法の信頼性に繋がる知見が得られることを期待したい。

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 0件 / うち国際学会 1件）

1. 発表者名 野中彩名、恒次祐子、前田啓、神原広平
2. 発表標題 内部に割れを持つ木材の腐朽試験方法に関する検討
3. 学会等名 第72回日本木材学会大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 野中彩名、前田啓、恒次祐子、神原広平
2. 発表標題 接合部を模した構造が繊維直交方向の腐朽に与える影響
3. 学会等名 第71回日本木材学会大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 前田啓
2. 発表標題 私の木材物理学～「木材腐朽に伴う強度変化のモデル化」を通じて考えたこと～
3. 学会等名 2019年度木質物性研究会秋のシンポジウム
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 前田啓、神原広平
2. 発表標題 X線CTにより測定した腐朽材の密度分布と強度性能の関係
3. 学会等名 公益社団法人日本木材保存協会第35回年次大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 前田啓、秋山駿、神原広平、信田聡
2. 発表標題 繊維直交方向の腐朽における重量減少と縦引張強度の関係
3. 学会等名 公益社団法人日本木材保存協会第34回年次大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Kei Maeda
2. 発表標題 Relationship between Mass and Strength Profiles of Decayed Douglas Fir in Radial and Tangential Direction
3. 学会等名 2018 SWST/JWRS International Convention (国際学会)
4. 発表年 2018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

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