

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成25年4月10日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(A)

研究期間：2009～2012

課題番号：21248021

研究課題名（和文）

木質構造物の腐朽等による強度劣化ならびに崩壊過程シミュレーション手法の開発

研究課題名（英文）

Development of a modeling method for the strength decreases and collapse process of wooden structures by the decay in progress

研究代表者

太田 正光 (OHTA MASAMITSU)

東京大学・大学院農学生命科学研究科・教授

研究者番号：20126006

研究成果の概要（和文）：木造住宅や木橋などは腐朽等によって耐力を失い、大地震時の被害が甚大となる。しかし従来、この劣化の進行を予測する手段はほとんどなかった。本研究ではまず、腐朽試験で木材密度の減少を詳細に追い、木材中での腐朽進行の速度は繊維方向とそれに直交する方向では大きく異なることを明らかとした。また、密度低下と圧縮ならびに引っ張り強度の関係を求めた。これらの結果を総合して、木材中での腐朽進行、強度低下の過程をモデル化する方法を提案した。

研究成果の概要（英文）：Wooden houses and wooden bridges attacked by fungi lose their stress resistant ability and suffer by serious damages in the case of severe earthquake. However there had been few means to predict the progress of the degradation. In this research, the decreasing process of wood density was precisely examined, and it was clarified that the decay progress velocity has an anisotropy between fiber direction and transvers directions. The relationships between density loss and compressive or tensile strength were also obtained. By summarizing these results, I proposed a method of modeling of the decay progress and strength reducing progress for wood.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	12,600,000	3,780,000	16,380,000
2010年度	8,400,000	2,520,000	10,920,000
2011年度	3,400,000	1,020,000	4,420,000
2012年度	4,300,000	1,290,000	5,590,000
年度			
総計	28,700,000	8,610,000	37,310,000

研究分野：農学

科研費の分科・細目：森林学・木質科学

キーワード：強度・木質構造、木材腐朽、強度低下、崩壊、X線デンシトメトリー、腐朽進行シミュレーション

1. 研究開始当初の背景

(1) 本研究の着想の発端は 1999 年 9 月愛媛県北宇和郡津島町のレクリエーション公園内での木製人道橋が竣工からわずか 9 年 6 ヶ月で落下した事故であった。近代的設計による木橋の落下は国内外で報告が無く、同じ形式の木橋が数多く存在する欧州でも例はなく、木材関係者に与えた衝撃は大きかった。調査によるとポニートラス下弦材の接合部において、部材内部で腐朽が進行していたとされる。また、2007 年には電柱を再利用した遊具の折損によって、児童が怪我をした事件の報道も社会的に反響があった。

(2) このように、外構材は腐朽等により本来の強度を日々失っていく可能性をもつが、その安全性を確保するためには、内部腐朽の進行を常時監視するようなシステムの構築が必要となる。打音検査、超音波伝播時間測定、木ネジ捻じ込みトルク測定等の非破壊型の試験、局部破壊型の試験、さらには AE による監視などを定期的に行うことが定法であるが、本研究は、腐朽進行に関してこれまで試みてこられなかった全く別の面からアプローチをおこなったものである。

2. 研究の目的

(1) すなわち、腐朽にともなう木材の劣化の進展と構造物の突然の破壊を計算機上でシミュレートすることの可能性を探ることが本研究の最終目標である。

(2) そのために、木材が腐朽菌によって、時間とともに劣化していく過程を定式化することを第一の目標とした。これは、木材の樹種、寸法、形状、おかれた環境等によってさまざまに変化する可能性があるが、モデル化のための基礎的データが不足しているのをこれを明らかにすることとした。

(3) 次に劣化過程のアルゴリズムの作成を試みた。そして、これらの成果を構造物の突然の崩壊という現象のシミュレーションに繋がられるように整理することを目的とした。

3. 研究の方法

(1) 既往の文献から得られるデータでは、木材内部の詳細な強度低下の進行を明らかにするには不足であったので、強制腐朽実験を実施した。試験に用いた樹種はベイツガで、試験体の寸法は 20mm×20mm×100mm とした。劣化試験チャンバーで、オオウズラタケとカワラタケを用いた腐朽試験を行い、一定腐朽期間ごとに試験体を取り出し、試験前後の重量減少率を測定した。また、X線スキャナを用いて、デンシトメトリーを行い、密度分布

の変化を測定した。

(2) 腐朽試験体の各部から、小さな試験体を採取し、引っ張りならびに圧縮試験を行い、シミュレーションに必要な、各時間経過後の縦方向と横方向の弾性定数、ならびに強度を測定した。これら実験結果から、密度減少率と残存強度との関係を求め、両者の関係を定式化した。

(3) 木材における腐朽の進行速度は腐朽が進行する方向によって異なることが予想されたので、X線CT装置を用いて、密度分布から見た木材の腐朽進行速度の異方性を3次的に評価することを試みた。試料にはスプルースを用い、それぞれ L, R, T の 3 方向を長軸とした、断面 20mm×20 mm の棒状試験体を準備した。菌の侵入面以外にエポキシ樹脂を塗布した 3 種類の試験体を用いて、オオウズラタケならびにカワラタケによる様々な期間の腐朽処理を施し、腐朽後の X線 CT 装置画像を密度解析した。

(4) 上記の成果を用いて、木材中での腐朽進行過程を計算機でモデル化することを試みた。

4. 研究成果

(1) 繊維方向への褐色腐朽菌、白色腐朽菌を用いた強制腐朽試験終了後に X線デンシトメトリーを用いて測定した繊維方向における密度分布より以下のことが明らかとなった。褐色腐朽菌では培地近傍から急速に腐朽が進行したのに対して、白色腐朽菌では培地近傍における密度減少がみられず、そこから少し離れた部分で腐朽が進行した(図 1)。白色腐朽では培地近傍で高含水率となり腐朽菌の活動が妨げられたことが原因であると結論づけられた。

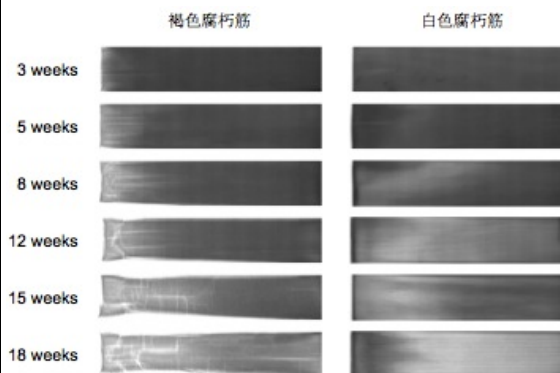


図 1 菌種による腐朽進行の違い
(淡色部の密度が低下している)

(2) 腐朽材の密度と強度との間の関係を検討した。圧縮強度は試験体の平均密度との間に強い相関がみられた。そこでこの関係を使って腐朽試験体の圧縮強度分布の経時的変化の推定を試みたところ、試験体の密度分布から圧縮強度分布が時間と共にどのように変化するかを推定することができた。一方で、引張強度は破壊部分の平均密度との間に相関は認められなかった。また、引張強度を推定するには材内のばらつきについても評価する必要があることが示唆された。すなわち腐朽材の引張強度は密度減少だけでは推定できず、別の強度劣化メカニズムを仮定する必要があることが明らかとなった。

(3) 腐朽進行の異方性について調べた結果では、褐色腐朽菌の場合は繊維方向の腐朽が最も早く進行し、接線方向、放射方向への腐朽では、木口面からの侵入が無かった場合、腐朽速度は繊維方向の10分の1程度であった。また、腐朽材ごとのばらつきが大きく、接線・放射方向への腐朽が進行したものは、エポキシ樹脂でシールしていた木口面から腐朽菌が侵入していたものが多かった。白色腐朽菌では接線方向、放射方向への腐朽試験では腐朽はほとんど進行せず、重量減少は見られなかった。また、褐色腐朽菌では、腐朽の進行とともに木材の収縮率が大きく変化していることが明らかになった。X線CT装置を用いることにより、腐朽により密度低下した部分を三次元的に表現することが可能となった(図2)。また、乾燥時の寸法変化を三次元的に視覚化できた(図3)。年輪内では早材より晩材部の方が密度低下率が大きいことなども判明した。

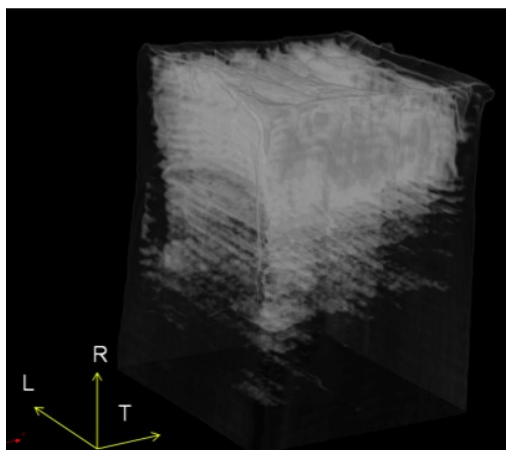


図2 褐色腐朽により密度低下した部分の視覚化(半径方向へ進行した腐朽白色部分が密度低下している)

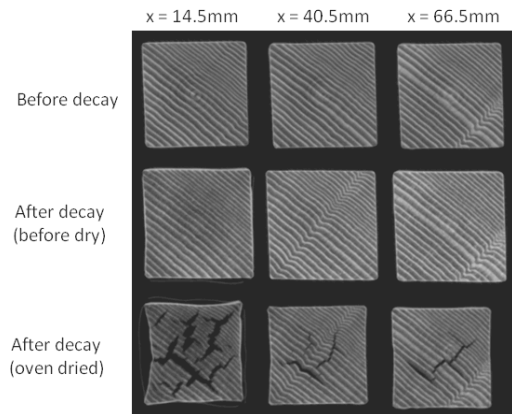


図3 褐色腐朽による断面寸法の変化

(4) ① 木材中での腐朽進行は主として木材の繊維方向に進行し、横方向への進行は非常に遅いことが明らかになったので、腐朽進行シミュレーションは繊維方向への一次元の進行に限り、腐朽過程での密度低下の再現のためのモデル化を行った。まず腐朽開始時間を定め、それ以前を腐朽前段階とし、腐朽開始後の過程を腐朽進行速度をもとに3つのフェーズに分類した(図4)。

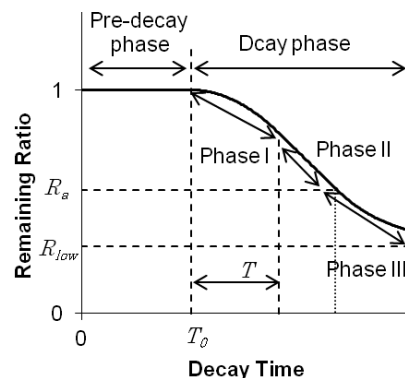


図4 腐朽進行の3つのフェーズ

② 腐朽進行には木材の含水率が支配因子であると仮定し、水分移動方程式を基本にモデルを組み立てた。また定式時に必要なパラメータは実験によりX線CT装置で得られた密度変化ならびに給水実験等で得られた水分移動速度を利用して最適化を行った。

③ シミュレーションの適合度は使用する腐朽菌の種類により異なり、褐色腐朽菌では比較的良く密度低下過程を再現することが出来たが、白色腐朽菌ではJIS試験法の指示により試験体を培地に直接接触させるためにその部分が高含水率になり、初期モデルの適合度はあまり良くなかった。しかし培地試験

体間の水分移動速度を調整することにより、最終的には適合度を可なり上げることが出来た。

(5) つぎに密度低下モデルから強度低下の変動を推定するモデルを作成した(図 5, 図 6)。予備実験から得られた密度と強度の関係から、強制腐朽処理過程試験体の強度分布を推定し、それを実験結果と比較した。圧縮強度に関しては比較的良い一致を見たが、引っ張り強度に関しては適合させるのに困難が伴った。これは密度減少にはあられない菌によるセルロース鎖の切断等が関連していると思われる。

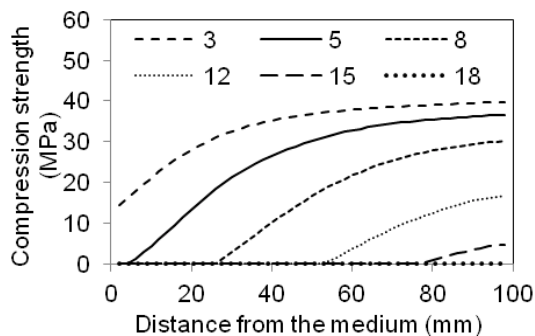


図 5 シミュレーションにより得られた褐色腐朽による圧縮強さ分布の変化 (数字は処理週)

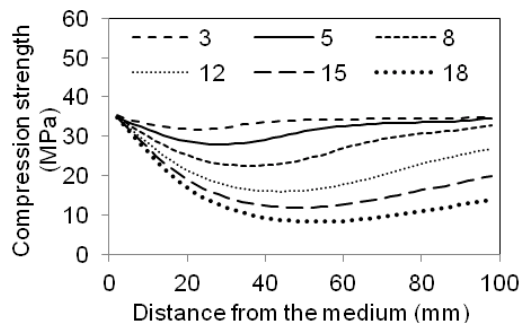


図 6 シミュレーションにより得られた白色腐朽による圧縮強さ分布の変化 (数字は処理週)

(6) 腐朽した材は非常に脆くなることが知られているが、とくに腐朽したボルト接合部などに捻り力を加えると簡単に壊れてしまう。この外力様式に関してはそもそも健全材でのデータがないので、両端にボルトを通した棒の捻りに関しても実験を行い、基本的データをj得ることが出来た。

(7) 今後の展望：今回得られた成果は、木材中で時間とともに腐朽がどのように進行していくかを詳細に追ったユニークなもので、X線CT装置と密度補正の技術があって初めて成し遂げられたもので、この分野の研究に与えるインパクトは大きいと思う。また、腐朽進行をモデル化する試みはこれまであまりなされてこなかったもので、この面でも今後この研究をさらに発展させていくことは必要であると考えている。強度変化のモデル化は今回の研究ではまだ初期段階にとどまっているが、いくつかの不足している部分を補って、個別要素法を適用して構造物の崩壊過程のシミュレーションを実現するところまで持って行ければ、実用的に有用な手法となることが期待できる。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 1 件)

① MAEDA Kei, OHTA Masamitsu, MOMOHARA Ikuo : Analysis of decay progress anisotropy by X-Ray computer tomography. 査読有, Pro Ligno, 7(4), 18-25 (2011)

〔学会発表〕(計 7 件)

① MAEDA Kei, OHTA Masamitsu, MOMOHARA Ikuo : Simulation method for wooden construction under the decay. Proceedings of the 11th World Conference on Timber Engineering, CD, Riva del Garda, イタリア, June 20-24 (2010)

② TAKAHASHI Anzu, OHTA Masamitsu : Torsional strength of bolt-connected bar. Proceedings of International Conference "Wood Science and Engineering in the Third Millennium" 8th Edition. p. 515-520, Brasov, ルーマニア, November 03-05 (2011)

③ MAEDA Kei, OHTA Masamitsu : Analysis of decay progress anisotropy by X-ray computer tomography. Proceedings of 2012 IUFRO Conference Division 5 Forest Products, p. 73, Lisbon, ポルトガル, July 8-13 (2012)

④ 前田啓, 太田正光, 桃原郁夫: 腐朽材の密度分布と強度分布の比較、第 60 回日本木材学会大会研究発表要旨集, p.81 (N18-1445), 宮崎 (2010)

⑤ 前田啓, 太田正光, 桃原郁夫: 木材の腐朽進行の異方性の 3 次元的评价、第 61 回日本木材学会大会研究発表要旨集, p. 16 (N18-07-1100), 京都 (2011)

⑥ 前田啓, 太田正光, 桃原郁夫: CT 画像を用いた腐朽材の 3 次元密度分布の評価、第 62 回日本木材学会大会研究発表要旨集, N16-07-1045, 札幌 (2012)

⑦ 前田 啓, 太田正光: 腐朽材の CT 画像から得られる水分分布と密度減少の関係の検討, 第 63 回日本木材学会大会研究発表要旨集, N28-P-PM09, 盛岡 (2013)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

太田 正光 (OHTA MASAMITSU)
東京大学・大学院農学生命科学研究科・教授
研究者番号: 20126006

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

桃原 郁夫 (MOMOHARA IKUO)
(独) 森林総合研究所・チーム長
研究者番号: 60222345
中川貴文 (NAKAGAWA TAKAFUMI)
(独) 建築研究所・研究員
研究者番号: 60414968