

# 木材の腐朽進行過程における密度・ 強度分布変化の解析とそのモデル化

前田 啓

第 1 章	序論 .....	1
1.1	緒言 .....	1
1.2	本論文の構成.....	3
1.3	既往の研究 .....	5
1.3.1	腐朽進行に関する研究.....	5
1.3.2	X線デンシトメトリーの腐朽材評価の応用に関する研究.....	7
1.3.3	腐朽進行のモデル化に関する研究.....	7
1.3.4	X線C Tに関する研究.....	8
第 2 章	腐朽進行に伴う木材繊維方向における木材の密度変化に関する研究 .....	9
2.1	概要 .....	9
2.2	実験方法 .....	9
2.2.1	強制腐朽試験.....	9
2.2.1.1	試験体.....	9
2.2.1.2	腐朽菌.....	9
2.2.1.3	試験手順.....	10
2.2.2	腐朽材の繊維方向の密度分布計測.....	12
2.2.2.1	X 線デンシトメトリーの原理.....	12
2.2.2.2	腐朽材の X 線透過画像の作成.....	13
2.2.2.3	検量線作成.....	16
2.3	結果と考察 .....	17
2.3.1	重量減少率の経時変化.....	17
2.3.2	含水率の経時変化.....	18
2.3.3	X 線透過画像.....	20
2.3.4	繊維方向の密度分布.....	20

2.3.5	腐朽速度の経時変化.....	25
2.3.6	繊維方向における腐朽速度分布の経時変化.....	25
2.3.7	残存率と輝度値の分散の関係.....	27
2.4	まとめ .....	32
第3章	腐朽進行に伴う強度の変化に関する研究.....	33
3.1	はじめに .....	33
3.2	密度と強度の関係を調べるための圧縮試験.....	33
3.2.1	実験方法.....	33
3.2.2	結果と考察.....	34
3.3	密度分布から求めた圧縮強度と実際の圧縮強度の比較.....	36
3.3.1	はじめに.....	36
3.3.2	実験方法.....	36
3.3.2.1	圧縮強度の測定.....	36
3.3.2.2	密度分布を用いた圧縮強度の推定 .....	37
3.3.3	結果と考察.....	37
3.4	縦引張強度と密度の関係.....	42
3.4.1	実験方法.....	42
3.4.1.1	試験体作成.....	42
3.4.1.2	腐朽処理.....	42
3.4.1.3	軟 X 線透過画像による密度推定 .....	43
3.4.1.4	ヤング率の計測.....	44
3.4.1.5	縦引張強度の計測.....	46
3.4.2	結果と考察.....	46
3.4.2.1	密度と引張強度の関係.....	46

3.5	腐朽材の密度分布と引張強度分布の比較.....	49
3.5.1	実験方法.....	49
3.5.1.1	試験体作成.....	49
3.5.1.2	引張試験.....	50
3.5.2	結果と考察.....	50
3.5.2.1	オオウズラタケ腐朽処理材における引張強度分布 .....	50
3.5.2.2	カワラタケ腐朽処理材.....	54
3.6	まとめ .....	57
第4章	腐朽進行のモデル化.....	58
4.1	はじめに .....	58
4.2	密度分布変化のモデル化.....	58
4.3	パラメータの設定.....	62
4.3.1	腐朽試験結果からのシミュレーションのパラメータ設定 .....	62
4.3.2	水分移動係数決定のための吸水試験.....	65
4.3.2.1	実験方法.....	65
4.3.2.2	結果.....	65
4.4	結果と考察 .....	66
4.4.1	白色腐朽菌を用いたシミュレーション結果の検討.....	66
4.4.2	褐色腐朽菌を用いたシミュレーション結果の検討.....	69
4.4.3	シミュレーションによる圧縮強度評価.....	73
4.5	まとめ .....	78
第5章	腐朽進行の異方性に関する研究.....	79
5.1	はじめに .....	79
5.2	実験方法 .....	79

5.3	結果と考察 .....	81
5.3.1	重量減少率の異方性.....	81
5.4	X 線 CT 画像作成方法.....	83
5.4.1	はじめに.....	83
5.4.2	CT スキャンの原理.....	83
5.4.3	X 線 CT 画像の作成手順.....	85
5.4.4	Beam Hardening の補正 .....	86
5.4.5	CT 値と密度の関係.....	89
5.5	腐朽材の X 線 CT 画像作成.....	90
5.5.1	褐色腐朽菌の場合の繊維方向の腐朽試験の試験体.....	90
5.5.2	褐色腐朽菌の場合の放射方向の腐朽試験の試験体.....	95
5.5.3	褐色腐朽菌の場合の接線方向の腐朽試験の試験体.....	97
5.5.4	腐朽進行方向が腐朽しやすさに与える影響 (褐色腐朽菌).....	99
5.5.5	白色腐朽菌の場合の繊維方向の腐朽試験の試験体.....	100
5.6	まとめ .....	103
第 6 章	結論 .....	104
参考文献	.....	107
謝辞	.....	112

## 第1章 序論

### 1.1 緒言

過去のわが国は、大量生産・大量消費を伴う経済活動を通じて発展を遂げてきた。しかし資源の大量消費に頼った発展は天然資源が枯渇すると持続することが不可能であり、加えて発展の代償として多大な環境問題が生じてきた。現代においても、地球温暖化問題や廃棄物処理の問題に代表される課題が生じてきた。

これらの問題をふまえて持続可能な発展を可能にするにはリデュース・リユース・リサイクルの「3R」に代表される循環型社会へ移行していくことが必要である。内閣府の調査によると、90%以上の人々が循環型社会への移行の必要性を感じており<sup>1)</sup>、木材を利用していく上でもこの循環型社会への適応は必要不可欠なものとなってきた。

循環型社会に適した木材の利用については、再生紙の利用促進や住宅等の解体時に発生した廃材をパーティクルボードに再利用すること等が挙げられる。その中で、木材利用の37%を占める製材や15%を占める合板の主な利用先である建築物<sup>2)</sup>の利用方法も、すぐに取り壊すのではなく長期間に利用することが望まれている。

また地球温暖化の問題に対しても、木材を利用した建築物を長期にわたって利用することは有効である。木質構造物を長期間利用することで木材としてのストックが増大すれば、炭素固定量が増加することになり森林が増加した場合と同様のCO<sub>2</sub>削減効果が期待できる。このことは、COP17において「住宅等に使用されている木材に貯蔵されている炭素量の変化を温室効果ガスの吸収量または排出量として計上することとなった」<sup>2)</sup>というように世界的に認められ始めている。

我が国においても平成20年に長期優良住宅の普及の促進に関する法律が成立したように、木造をはじめとした建築物を長期にわたって使用するための環境作りが進められてきた。その中で、建築物を長期にわたって利用するために解決しなければならない課題も少なからず存在する。例えば住宅に長期にわたって住み続けた場合、住人の年齢構成が変わ

ることでライフスタイルに変化が生じ、それに合わせた改修を行っていかないと快適に生活することができない。あるいは住人のライフスタイルの変化が生じた時に引っ越しをする場合、中古住宅を受け入れる環境が存在しなければ解体の憂き目にあうことは容易に想像できる。

その中で、建築物を長期に渡って利用するための大前提は住宅が長期にわたって安全に使用できるということである。そのためには、建築物の構造部材が長期間経過することに伴う劣化について考える必要がある。劣化は全ての性質に生じるものであるが、その原因は構造物の種類によって様々である。強度性能の劣化についてだけを見ても繰り返し荷重による疲労、風雨にさらされることによる劣化など様々な理由が考えられる。その中で木質構造物の強度性能に大きな影響を与える因子が生物劣化である。具体的には木材腐朽菌による腐朽やシロアリによる蟻害、キクイムシなどによる虫害などが木材、木質材料の生物劣化の種類として知られているが、この中で構造物の強度性能に大きな影響を与える因子は腐朽と蟻害である。

この腐朽、蟻害を受けたことによる影響としては、土井らの調査<sup>3)</sup>によって阪神・淡路大震災において健全な家屋の全壊率が 20%前後であるのに対して腐朽・蟻害を受けた木造家屋の全壊率が 100%近いという結果が示されている。その他にも 1999 年にボンゴシ材を用いた公園用木橋が腐朽により竣工後 10 年足らずで落下したこと<sup>4)</sup>や、腐朽を受けた公園用遊具が児童の使用中に落下したことなどがあり、腐朽を受けた構造物が倒壊した事例は数多く存在する。これらの事例の多くは、構造物の風通しの悪い部分や接合部に雨水が侵入しており、腐朽もその部分にて進展していた。

腐朽進行を防ぐためには防腐剤を利用することが考えられるが、CCAをはじめとした強力な薬剤は環境汚染の懸念があるため現在使用できない。また、仮にこのような薬剤を利用したとしても腐朽進行を完全に防ぐことは困難である。しかし構造部材に腐朽が生じたとしても、腐朽進行や建築物への影響を予測することができれば適切な対応をとること

が可能となり、結果として木造建築を長期に利用することに対しての信頼をもたらすことができ、実際にこのような構造物への腐朽の影響を評価する試みはこれまで多数試みられてきている。例としては腐朽の影響を含む経年変化に伴う木橋の修復限界を表現することを試みた研究等が挙げられる。

その中で構造物の挙動解析としては有限要素法に代表されるコンピュータ解析が一般的なものとなっており、特に近年はコンピュータの性能向上も著しく活用が進展している。このコンピュータシミュレーションを、腐朽による構造物の変形や倒壊挙動の解析に用いることは、腐朽に伴う木造建築物の補修等に対して最も有用な手段になり得ると考えられる。

そこで本研究では腐朽を受けた構造物の変形・倒壊挙動シミュレーション手法構築を最終目的とし、腐朽進行に伴う強度変化を算出できるモデルの構築を試み、その結果を基に腐朽材の挙動シミュレーションの可能性の検討を行った。

## 1.2 本論文の構成

本論文の章立ての構成を以下に示す。

第2章では、腐朽進行のモデル構築のための基礎データとして繊維方向への腐朽進行試験を行い含水率と重量減少の経時変化についての評価を試みた。また、腐朽進行の位置による変化をとらえるためX線デンストメトリーを用いて繊維方向の密度分布算出を試みた。得られた密度分布に対して含水率を絡めた評価を試み、また腐朽進行のばらつきを評価するためと密度分布の分散についても評価を試みた。

第3章では、腐朽材の圧縮強度と引張強度の評価を試みた。まず腐朽を受けた小試験体を用いた強度試験を行い、強度と密度の関係の評価を行った。さらに前項で得られた腐朽材を用いて作成した試験体を用いた強度試験を行い、得られた強度分布と密度分布の関係についての評価を試みた。



第4章では前項までの結果をふまえて繊維方向への腐朽進行モデルの構築を試みた。まず、腐朽進行が含水率に依存すると仮定した腐朽モデルを構築した。シミュレーションとして水分拡散係数として木材の吸水試験から求めた値を用いたもの、水分拡散係数を腐朽菌による影響を考慮した値に変更したシミュレーションと培地からの吸水量に菌糸による制限を加えたシミュレーションを行ない、第2章で得られた密度分布や含水率分布との検討を加えることでシミュレーションの妥当性を評価した。また、シミュレーション結果に第3章で求めた密度と強度の関係を適用することでシミュレーションによる強度分布を求め、第3章で得られた強度分布との比較を試みた。

第5章では、第4章で求めた繊維方向への腐朽進行シミュレーションを他の方向へ適応させるため、繊維方向、接線方向、放射方向への腐朽試験を行った。また、強度を密度で評価する際に密度のばらつきが影響すると考えられるので、腐朽進行のばらつきを評価するため腐朽材のCT画像を撮影し、その評価を行った。

### 1.3 既往の研究

#### 1.3.1 腐朽進行に関する研究

腐朽は木材利用の上でとても重要な問題であり、腐朽進行の評価は古くから行われてきた。木材の腐朽進行の程度の簡便な評価手法としては重量減少率が挙げられ、古くからその例がみられる<sup>5)</sup>。重量減少率は含水率を整えた上で腐朽前後の重量を測定すればよいため、木材の腐朽の評価手法として規格化もなされている<sup>6)</sup>。その一方で重量減少率の値はあくまで指標としての値である。そのため実際に影響を与える強度性能等の性能との関係性の評価が必要不可欠であり、腐朽材のさまざまな種類の強度性能について重量減少率との関係が調べられている。

その中で一般的に行われてきた研究は曲げ強度に関する研究である。Cartwright ら<sup>7)</sup>は白色腐朽菌を用いてアッシュ材の腐朽材を作成し、3 点曲げ強度と圧縮強度のほかに衝撃曲げ強度と靱性についても評価を行った結果、靱性の低下が著しく、大きく離れて曲げ強度、衝撃曲げ強度、曲げヤング率の順に低下度合いが大きいことを明らかにした。Armstrong ら<sup>8)</sup>はブナ材に対して褐色腐朽菌や白色腐朽菌、軟腐朽菌による腐朽を施しその重量減少率と曲げ強度の関係を評価した。軟腐朽菌による腐朽材の静的曲げ試験から重量減少率が 10% の時、曲げ破壊強度と靱性値はそれぞれ 30% 以上と 80% 以上の減少を示した。衝撃曲げ試験の結果からは、同じ重量減少率における強度の減少は褐色腐朽菌による腐朽を受けた場合が最も大きく、次いで白色腐朽菌で最後に軟腐朽菌という結果となったが、重量減少率が大きくなるにつれて白色腐朽菌と軟腐朽菌の間の違いは小さくなる傾向がみられた。

Winandy ら<sup>9)</sup>は腐朽処理を施したベイマツ心材の強度と化学組成の関係を調べ、褐色腐朽菌による腐朽初期における 4 点曲げ強度の低下がグルコマンナンやキシランといったヘミセルロース主鎖の分解の直接的な結果であることを示した。また重量減少と強度の関係では、重量減少が生じない場合に強度が減少しないという結果と強度減少率は重量減少率の 3 から 4 倍であることを示した。藤田ら<sup>10)</sup>は、腐朽によって実際に落下した木橋の部材を用い

て腐朽部分の曲げ強度の評価を見かけの密度や曲げヤング率、切断面の目視腐朽度、ドリル穿孔時のトルク最大値のそれぞれによって行うことが可能であることを示した。Gonzalez ら<sup>11)</sup>は腐朽時の環境条件が腐朽速度に与える影響を評価するために重量減少率と曲げ試験時の MOR と MOE を用いた。その結果として褐色腐朽菌の場合は MOE が最も急に減少し MOR の減少はそれに比べると小さかったが、白色腐朽菌の場合は逆に MOR の減少のほうが大きかった。藤平ら<sup>12)</sup>は外周部からの腐朽をもたらす試験法を考案し、5 種の樹種の腐朽材の重量減少率と曲げ強度の関係の検討を行った。その結果として樹種によって重量減少と強度減少の関係が異なったが、これは外周部から徐々に腐朽したのか断面全体が腐朽したのかという違いが影響した。

曲げ試験のほかに一般的に行われている研究として圧縮強度が挙げられる。十代田<sup>13)</sup>は 10 種類の樹種の木材に対してワタグサレタケによる腐朽処理を行い、この腐朽材の縦圧縮強度減少と重量減少の関係を調べたところ、樹種によって減少の程度は異なったものの両者の比率は一定で、重量減少が 3 分の 1 を超えると圧縮強度がほとんど 0 になるという結果を示した。Green ら<sup>14)</sup>は拡散反射近赤外光分析によるマツの非破壊計測法を評価する際に圧縮強度を使用しており、その際に重量減少が 5% の時に圧縮強度が 45% 低下しているという結果が得られている。

ほかにも超音波電波時間の計測による非破壊測定に基づく MOE 測定も広くおこなわれている。例えば、Humar ら<sup>14)</sup>は、褐色腐朽菌による腐朽に対しての銅 - エタノールアミン系保存処理剤の効力を確認するために非破壊的手法による MOE 計測や FTIR によるピーク解析、色彩解析を行った。強度性能に関しては保存処理剤の有無や種類を問わず、重量減少に比べて MOE が大きく減少する結果が得られた。

そのほかの強度性能と重量減少の関係は例が少ないが、水本<sup>16)</sup>は、キチリメンタケによる腐朽がアカマツの辺材の 3 点曲げ、圧縮、硬さ、せん断の強度性能に与える影響を調べた。その結果これらの減少はいずれも重量減少よりも大きく、その中でも曲げ強度の減少度合

いが著しいという結論を導き出した。また、初期腐朽における縦引張強度と密度の関係については R.W.Kennedy ら<sup>17)</sup>が研究を行っており、褐色腐朽菌に関しては広葉樹のほうが針葉樹よりも同じ重量減少率での引張強度の減少率が大きい結果が得られている。また、初期腐朽における密度と様々な種類の強度の関係に関して W.W.Wilcox<sup>18)</sup>が研究成果をまとめている。また、木材が実際に構造材として用いられている場合の強度変化についても広くなされている。<sup>19-22)</sup>

### 1.3.2 X線デンストメトリーの腐朽材評価の応用に関する研究

本研究ではX線デンストメトリーを密度分布作成に用いるが、腐朽材のX線透過画像を用いた研究もこれまで広くなされてきた。例えば山本ら<sup>23)</sup>は、軟X線顕微密度測定法を用いて腐朽材の密度減少と細胞壁構成の変化の関係について調べ、密度減少率と木繊維壁率の減少率がよく対応することを見出した。Rinn ら<sup>24)</sup>は、レジストグラフという木材の分布をドリルの抵抗から求めるための機械の妥当性を評価するためにX線デンストメトリーを用い、レジストグラフの解析能力がX線デンストメトリーより1ケタ劣る程度であることを示した。Bucur ら<sup>25)</sup>は腐朽進行のX線デンストメトリーによる評価を試み、早材部と晩材部の腐朽進行の違いを明らかにした。Macchioni ら<sup>26)</sup>はX線透過画像による腐朽材の観察を行い密度減少速度の評価や、腐朽前の密度と密度減少量の関係などについて評価を行った。

### 1.3.3 腐朽進行のモデル化に関する研究

木材の腐朽進行に伴う密度減少のモデル化についても幅広くなされている。以下にいくつか例を示すと、森、浅野ら<sup>27)</sup>は、腐朽時間と重量減少率の関係を数式であらわすことを試みている。Viitanen<sup>28)</sup>は腐朽試験時の暴露期間や暴露時の相対湿度、気温などの要素を用いて重量減少を表現するモデル構築を試みた。斎藤ら<sup>29)</sup>は木材腐朽の進行を拡散現象ととらえ、腐朽進行の様子を重量減少の分布として表す式を作成した。斎藤ら<sup>30)</sup>は木造外皮の耐久性評価を目的として、木材の腐朽進行に伴う腐朽菌の水分生産を考慮したモデルを構築

した。また腐朽とは直接関係しないが、ヘミセルロースの減少に伴う強度低下のモデル化について Winandy ら<sup>31)</sup>が検討している。

このモデル化の際に重要となってくる腐朽速度に影響を与える因子の研究についても幅広くなされており、例えば福田ら<sup>32)</sup>が温度環境と腐朽能の関係を調べており、含水率と腐朽速度の関係については水本<sup>33)</sup>や Gonzalez ら<sup>11)</sup>、鈴木ら<sup>34)</sup>等の研究などが存在する。

#### 1.3.4 X線CTに関する研究

木材のX線CTを用いた研究は幅広くなされている。その中でCT値を用いた研究としては含水率分布測定についての研究<sup>35-40)</sup>がよくおこなわれてきた。

腐朽材に対してX線CTを適用した研究も以前から存在し、Van den Bulcke ら<sup>41)</sup>はサブミクロンの解像度を持つX線CTを用いて腐朽材内の菌糸の様子の子の可視化に取り組み、CT画像の輝度値が木材と空気の間部分部分を菌糸部分とすることで菌糸の分布を木材から識別することに成功した。また、Petutschnigg ら<sup>42)</sup>はCT画像を用いた腐朽の判定を試み、CT画像を用いた含水率測定による腐朽発見の可能性を示した。Fuhr ら<sup>43)</sup>はシンクロトロン放射光を用いて腐朽材のX線CT画像を撮影した。その結果、細胞壁の大きさの分布といった実際の木材の強度性能等と関連する情報を得ることができた。

## 第2章 腐朽進行に伴う木材繊維方向における木材の密度変化に関する研究

### 2.1 概要

本章は、木材の密度分布の腐朽進行に伴う変化について知見を得ることを目的とした。そのため腐朽試験を行い、得られた腐朽材の繊維方向の密度分布を X 線デンストメトリーによって求め、その結果の解析を行うこととした。解析手法としては密度分布や重量残存率の変化の解析を行い、さらに腐朽モデルを構築するためには腐朽速度についての情報が必要であるため、密度の減少速度の経時変化についての解析を行った。さらに、強度の議論をする際には繊維直交方向の密度分布も影響すると考えられるため、密度のばらつきの分布についても解析を試みた。これらの解析の必要性から、腐朽試験には実験条件のコントロールが比較的容易な強制腐朽試験を用いることとした。

### 2.2 実験方法

#### 2.2.1 強制腐朽試験

今回の試験では、腐朽材を得るために培養瓶を用いて行う強制腐朽試験を採用した。以下の試験条件は、試験体寸法を除いて JIS 規格<sup>6)</sup>に準じて行った。

##### 2.2.1.1 試験体

試験体にはスプルース辺材(*Picea sitchensis* sp)の無欠点試験体を使用した。寸法は 20×20×100(L)(mm)で、試験体数は 100 体とした。

##### 2.2.1.2 腐朽菌

腐朽菌は以下の 2 種類のうちのいずれかを用いた。

- ・ オオウズラタケ(褐色腐朽菌) *Fomitopsis palustris* (Berk.et Curt.) Gilbn.et Ryv. FFPRI 0507
- ・ カワラタケ(白色腐朽菌) *Trametes versicolor* (L.:Fr.)Pilat FFPRI 1030

これらの腐朽菌は、森林総合研究所にて植え継がれてきたものを PDA 培地にて増殖させた

ものである。腐朽菌は強制腐朽試験開始 1 週間前に、培養瓶内に作成した寒天培地に植え付け、恒温恒湿室( $26\pm 2^{\circ}\text{C}$ 70%RH)内に放置して菌糸を培地に充満させておいた。寒天培地は、1%麦芽抽出物と 0.5%ペプトンを含む溶液 200ml と寒天 4g を 850ml 容の培養瓶に入れ、 $121^{\circ}\text{C}$ で 30 分の条件でオートクレーブ処理をした後に自然冷却によって寒天を固めて作成した。

#### 2.2.1.3 試験手順

はじめに、試験体を  $60^{\circ}\text{C}$ 2 日間の条件で乾燥し、寸法と重量の測定を行った。その後、腐朽の前処理としてエチレンオキサイドガスによる滅菌処理をガス滅菌器(ユヤマクレープ YS-A-C64E)によって  $40^{\circ}\text{C}$ 滅菌時間 7 時間の条件で行った。その後培養瓶内に木口面が培地に接するように載せた(Fig. 2-1)。試験体と培地の接触方法については JIS Z(2009)に従い、褐色腐朽菌培地に関しては培地の上にプラスチック製メッシュカップを置き、その上に試料を載せるようにした。白色腐朽菌培地に関しては、試料を培地に直接置いた。培養瓶 1 本当たりの試料は 3 体(24 週間腐朽の一部は 2 体)。その後恒温恒湿室に決められた期間(3, 5, 8, 12, 15, 18, 21, 24 週間)放置した。培養瓶から取り出した直後の試験体は、培地に接していた面に培地が付着したり、側面に菌糸が付着したり、培地の反対側の面に子実体のようなものが付着していた(Fig. 2-2, Fig. 2-3)。これをカッターナイフで取り除いた後、乾燥前重量を求めた(Fig. 2-4, Fig. 2-5)。その後  $60^{\circ}\text{C}$ 2 日間の条件で乾燥を行い、乾燥後重量を求め、シリカゲル入りデシケータにて保管した。

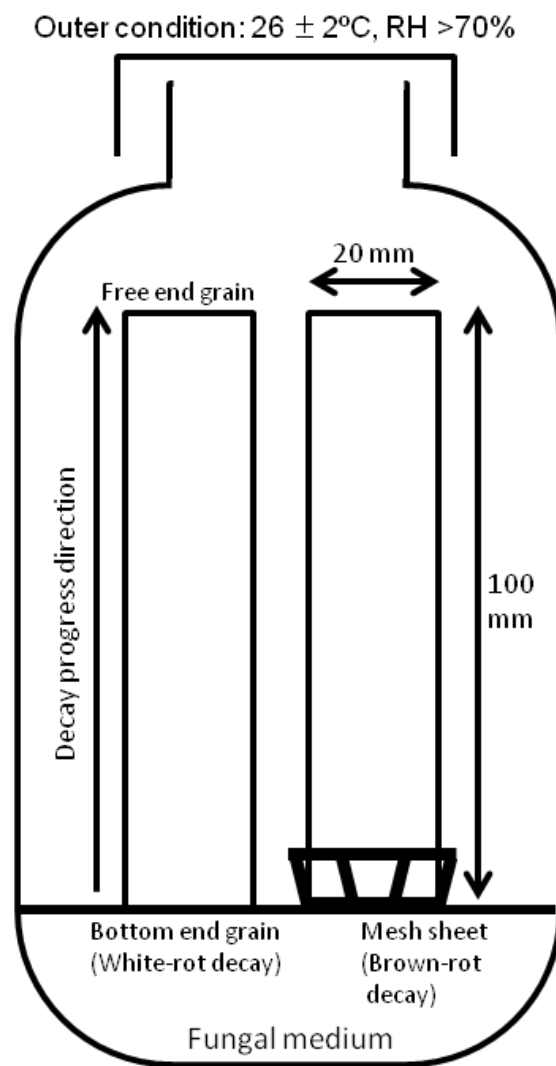


Fig. 2-1 腐朽試験の模式図



Fig. 2-2 培養瓶から取り出した直後の試験体 (褐色腐朽菌) ※左が培地側



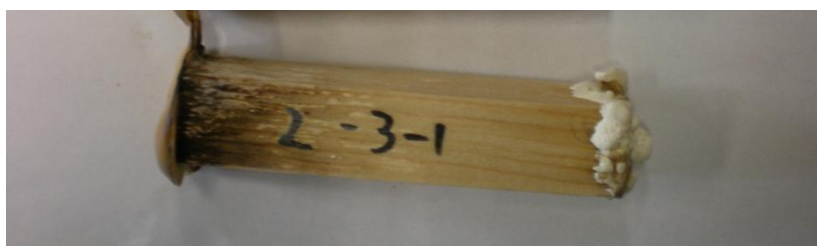


Fig. 2-3 培養瓶から取り出した直後の試験体（白色腐朽菌）※左側が培地側

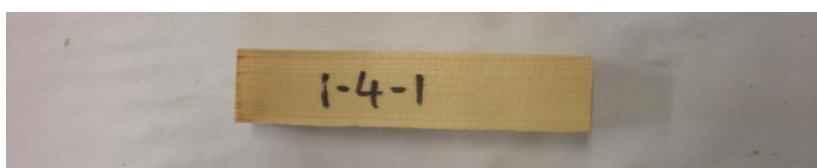


Fig. 2-4 菌糸を取り除いた直後の試験体（褐色腐朽菌）※左側が培地側

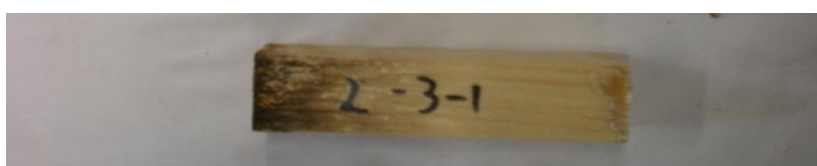


Fig. 2-5 菌糸を取り除いた直後の試験体（白色腐朽菌）※左側が培地側

## 2.2.2 腐朽材の繊維方向の密度分布計測

### 2.2.2.1 X線デンストメトリーの原理

物質に放射線 X 線を照射した際の吸収量は、物質を構成する元素の原子量、物質の密度等に影響される。ここで単色 X 線を単一の元素からなる均質な物質に照射した場合、入射 X 線量( $I_0$ )と透過線量( $I$ )の関係はランベルト・ベールの法則に従い下式のように表される。

$$I = I_0 \exp(-\lambda L) \quad \text{Eq. 2-1}$$

ここで、 $L$  は X 線が透過した物質の長さであり、 $\lambda$  は元素によって決まる線減弱係数 ( $L^{-1}$ ) である。 $\lambda$  は物質の質量や X 線の波長などによって変化するが、ここで  $\lambda$  が物質の質量に

比例すると仮定すると、 $\lambda$  は物質の密度  $\rho$  と質量あたりの減衰係数  $\mu$  はから以下のように表すことができる。

$$\lambda = \mu \rho \quad \text{Eq. 2-2}$$

この結果入射 X 線量と透過 X 線量の関係は、密度の関数として表すことができる。

$$I = I_0 \exp(-\mu \rho L) \quad \text{Eq. 2-3}$$

複数の物質を透過する場合は  $i$  番目の物質における X 線の透過した長さ、線減弱係数、密度をそれぞれ  $L_i$ ,  $\mu_i$ ,  $\rho_i$  とするとき以下のように表すことができる。

$$\mu = \sum_{i=1}^n \mu_i \rho_i L_i \quad \text{Eq. 2-4}$$

ここで物質の質量線減弱係数を一定と仮定すると、X 線の吸収量は密度分布の仕方に関わらず X 線が透過した部分の平均密度によって決まることになる。

本研究で使用する装置における X 線発生装置では様々な波長の X 線が混じった白色 X 線が発生する。第 5 章で述べるように白色 X 線の場合は単純に上で述べた理論通りにはならないが、本章では X 線の違いによる影響はないものとして密度の算出を行った。

#### 2.2.2.2 腐朽材の X 線透過画像の作成

今回密度分布作成に用いた装置は、デジタル X 線マイクロスコープ  $\mu$ B1600 ((株)松定プレシジョン製) (Fig. 2-6) である。この装置は、透過 X 線量の分布を画像の濃淡値として出力する (Fig. 2-8)。この装置における X 線投下画像の撮影原理は、下方にある X 線源から照射されて試料を透過した X 線によってシンチレーターが発光し、それを CMOS センサーによって 0~4095 の輝度値として検出するというものである (Fig. 2-7)。この際出力される輝度値は、実際の透過 X 線量の対数をとったものである。この輝度値の中から、指定範囲の輝度値を 0~255 の gray-scale で表した画像が出力される (Fig. 2-8)。

X 線デンストメトリーを行う試料としては、前項で腐朽試験後デシケータにて保管されていた腐朽材の中で腐朽期間が 18 週間以内の腐朽材を使用した。制限した理由としては 21

週間以上の腐朽材は腐朽による変形が著しかったためである。透過画像の撮影は試料の板目面が照射されるように行った。撮影条件は管電圧 50kV、管電流 130 $\mu$ A。1 度の撮影操作で 2 枚の透過画像を撮影してその平均画像を透過画像とした。画像作成に使用した輝度範囲は 400~900。Fig. 2-8 に示すように一度に試験体全てを撮影することは不可能であったため、複数回に分けて撮影を行い画像処理ソフトを用いて結合して一つの画像とした。この際、比較的均一なプラスチックを撮影した時の輝度に位置による偏りがみられた (Fig. 2-9)。このため、結合する際には透過画像 (1024 $\times$ 1024pixel) 内の左端から 268~507pixel の領域のみを常に使用した。作成した軟 X 線透過画像は数値変換ソフト ImageDiff を用いて輝度情報を CSV ファイルに変換し、繊維直行方向について平均をとることで繊維方向の輝度分布を求めた。この輝度値分布に検量線を適用することで、密度分布を求めた。



Fig. 2-6 X線デンストメトリーに用いた装置 ( $\mu$ B1600) の写真

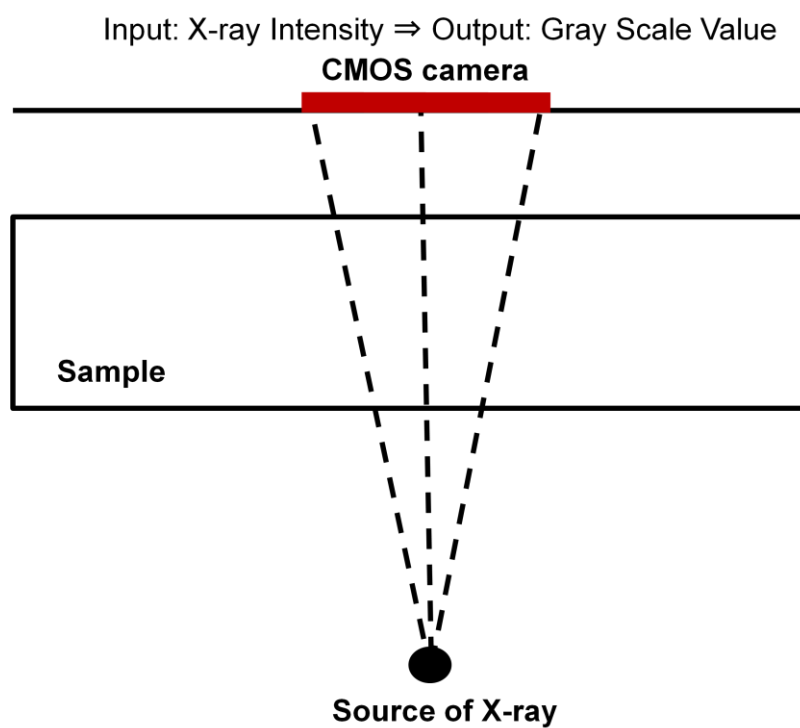


Fig. 2-7 X線透過画像撮影の模式図

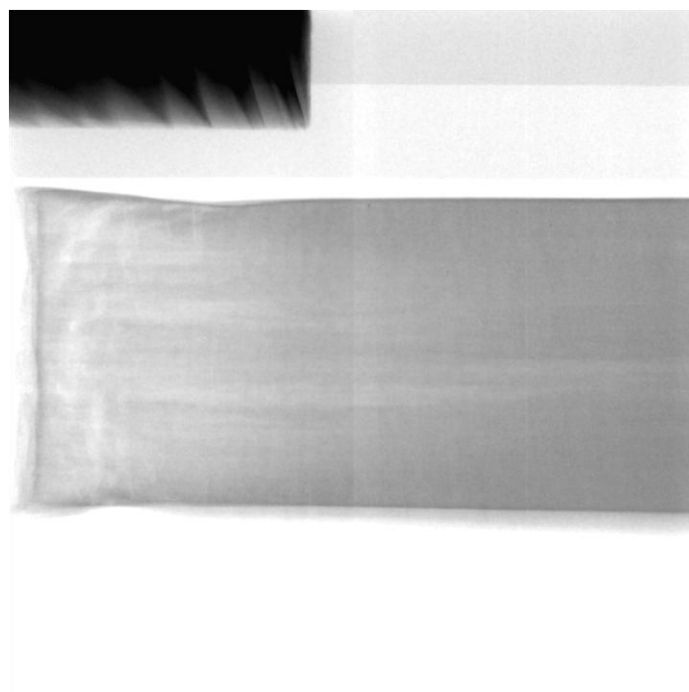


Fig. 2-8 X線透過画像の例

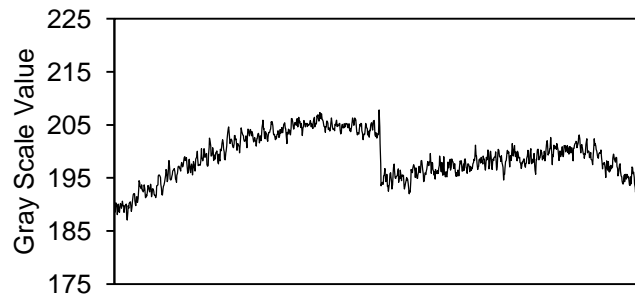


Fig. 2-9 プラスチックの平板の透過画像の横方向の輝度値分布

### 2.2.2.3 検量線作成

得られた輝度値の分布から密度分布を求めるために両者の間の検量線を求めた。前項で輝度値分布を作成する際に、X線透過画像の中で使用領域と同じ領域に透過像が入るようにするため、検量線用の試料の寸法は  $20 \times 20 \times 10$  (L) (mm) とした。試料としては密度がばらつくようにするためバルサやスプルース、ブナを用いた。60℃2日間の条件で乾燥後、寸法重量を求め前項と同じ撮影条件で板目面からの軟 X 線透過画像を作成した。その後試料の輝度の平均値を求め、輝度 $g$ と密度 $\rho$  (g/cm<sup>3</sup>)の関係が Fig. 2-10 のように得られた。この結果両者の間の関係式は以下のように表され、この式を用いて前項で得られた輝度値分布から密度分布を求めた。

$$\rho = -0.0023g + 0.6488$$

Eq. 2-5

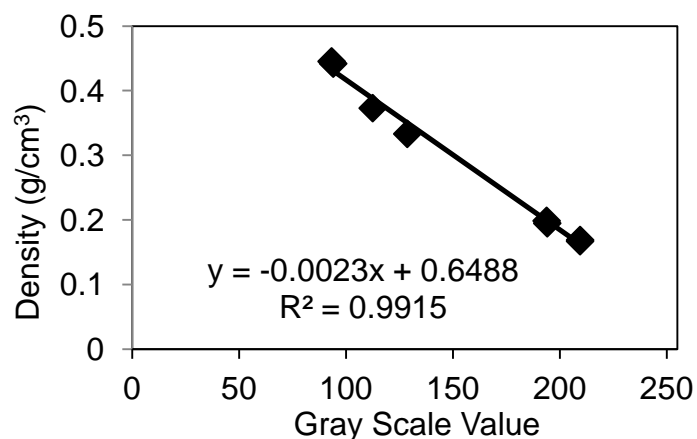


Fig. 2-10 透過画像の輝度値と密度の関係 (Gray scale value: 0 (黒) ~ 255 (白))

## 2.3 結果と考察

### 2.3.1 重量減少率の経時変化

まず培養瓶内での試験体の様子であるが、褐色腐朽菌の場合は試験体の側面を菌糸が覆っていた。白色腐朽菌の場合は培地と反対側の木口面に子実体のような塊が発生していた。

Fig. 2-11 に腐朽材の残存率の経時変化を示す。褐色腐朽菌の場合残存率は3週間後の時点で減少し始めており、18週間後まで直線的に低下している。21週間後以降については余り変化がみられず、残存率が0.4を下回った試験体は見られなかった。褐色腐朽菌は木材中のリグニンが分解できないという事実はよく知られているが<sup>44)</sup>、今回の残存率は木材中のリグニンの含有率よりも大きな値までしか減少していない。この原因の一つとしては、後述するように培地近傍における重量減少が特に著しかったが、このことが培地からの養分供給などに影響を与えた可能性が考えられる。X線透過画像による解析やシミュレーションモデル構築の際にはこれらの影響を避けるため、腐朽期間が18週間以内のデータを用いることとした。また、残存率のばらつきについては腐朽期間が短い間はほとんどばらついていないが、腐朽期間が15週間を超えるとばらつきが大きくなっていることがわかる。

一方白色腐朽菌の場合、腐朽開始から3週間後の時点ではほとんど腐朽が生じていない。その後は残存率が直線的に低下しており、24週間に至っても減少は続いているようにみられる。また、残存率のばらつきについては、8週間後の時点で確認することができた。

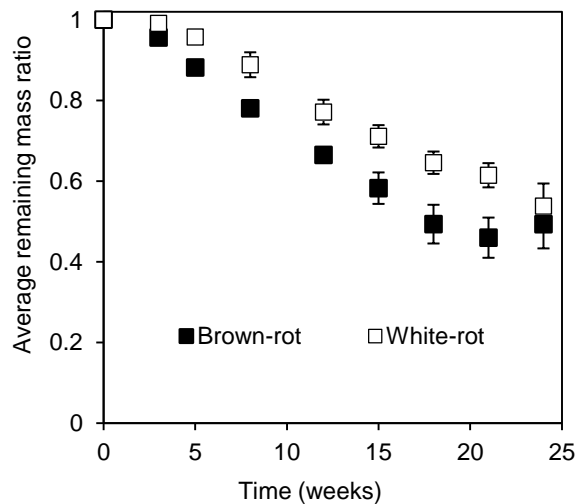


Fig. 2-11 重量残存率の経時変化

### 2.3.2 含水率の経時変化

Fig. 2-12 に腐朽進行に伴う含水率変化を示す。褐色腐朽菌の場合は腐朽進行につれて含水率が 100%程度まで上昇しているが、腐朽期間が 21 週間の時は含水率のばらつきが大きく、24 週間の試験体は水分量が低下していることがわかる。それに対し白色腐朽菌の場合は腐朽開始後 12 週間で 200%を超えるほど急激に含水率が上昇していた。含水率のばらつきは腐朽期間が長くなり含水率が高くなるにつれて大きくなっていった。

また Fig. 2-13 に腐朽進行に伴う水分量の経時変化を示す。褐色腐朽菌、白色腐朽菌のいずれの場合も腐朽進行に伴って水分量は増加していたが、増加量は明らかに白色腐朽菌の場合の方が多かった。

このような白色腐朽菌と褐色腐朽菌の間の含水率や水分量の違いの原因は腐朽処理条件の違いと考えられる。褐色腐朽菌の場合は、培地と試験体の間に挟まれたメッシュシートの影響で培地からの吸水は菌糸を通じたものとなる。菌糸を通じた吸水量は木材が水源に触れた際の吸水量を大きく下回ると考えられる。一方、白色腐朽菌の場合は試験体が直接培地に接しているため試験体と培地の間の菌糸の量は褐色腐朽菌の場合より少ない。その

ためこの場合の吸水量は褐色腐朽菌の場合に比べて大きく、結果白色腐朽菌の含水率が高くなったと考えられる。

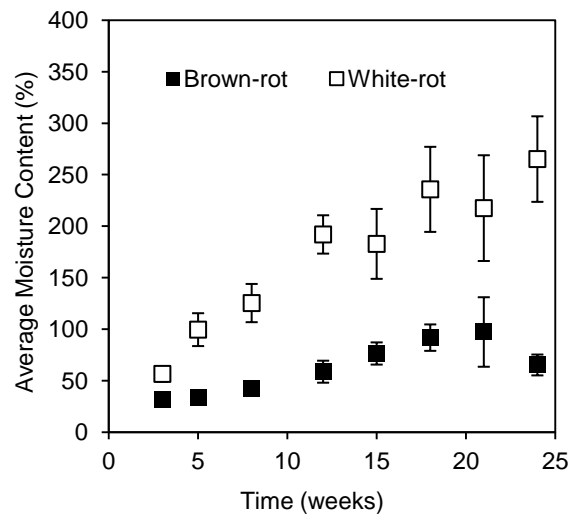


Fig. 2-12 腐朽進行に伴う含水率の経時変化

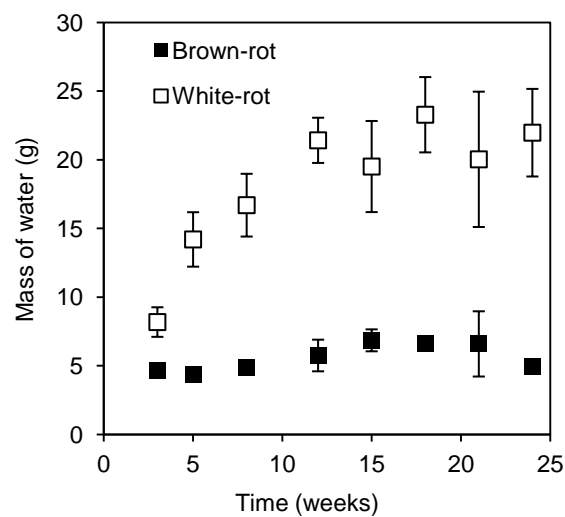


Fig. 2-13 腐朽進行に伴う水分量の経時変化

※Fig. 2-12, Fig. 2-13 のエラーバーは、共に平均値に標準偏差を足し引きしたもの。



### 2.3.3 X線透過画像

Fig. 2-14 に腐朽材のX線透過画像の例を示す。これらの画像はすべて左側が腐朽試験時に培地に接していた面で、横方向が繊維方向である。褐色腐朽菌については、腐朽期間が長くなるにつれて左側から順に白くなっている。また腐朽期間が 8 週間を超えた画像では繊維方向への割れが生じており、12 週間を超えると繊維直行方向にも割れが生じていることがわかる。また、8 週間を超えた画像では割れのほかに収縮も観察され、また培地から少し離れた部分の収縮が最も大きくなっている。これは乾燥前菌糸を取り除く際、左側の面については菌糸を取り除こうとすると材の一部が取れてしまうので菌糸が残ったことが理由の一つと考えられる。

白色腐朽菌の場合、割れや収縮は観察されなかった。密度変化に着目すると、培地近傍では余り密度が変化せず、少し培地から離れた部分が最も密度が低下していた。この原因としては、培地から吸水による含水率勾配が考えられる。腐朽菌による腐朽は含水率が高ければ高いほど腐朽進行が速くなるわけではない。例えば、飽水状態の木材はほとんどの腐朽菌の腐朽を受けないことが知られており、また含水率が 200%を超えるような条件ではあまり腐朽が進行しないという報告もある<sup>45-46)</sup>。培地近傍の含水率が腐朽進行に不適な程高含水率になった場合、培地近傍では腐朽が生じず含水率がより低い部分では腐朽が進行したためこのような密度分布になったと考えることができる。

### 2.3.4 繊維方向の密度分布

試験体の初期密度の違いの影響を除くため、得られた密度分布をそれぞれの腐朽材の腐朽前の密度で除して得られた重量残存率分布を求めた。

褐色腐朽菌の場合の結果を Fig. 2-15 に示す。褐色腐朽菌の場合、腐朽開始後 3 週間の時点で既に全領域に渡って重量減少が生じていることがわかる。その中でも培地近傍における重量減少は急激に進行しており、培地からの距離が離れるのに従って急激に残存率が増加し、ある程度培地から離れると残存率の増加の仕方が緩やかになっている。腐朽期間が 8

週間を超えると培地近傍の残存率が 0.3 前後で変化しなくなっていた。この値は針葉樹の場合のリグニン含有率と一致し、褐色腐朽菌がリグニンを分解できない事実と一致した<sup>44)</sup>。また、腐朽期間が 18 週間の試験体については培地と反対側についても中央よりも重量減少が進んでいる。これは試験体を覆っていた菌糸が培地と反対側の面から侵入を開始したためであると考えられる。

白色腐朽菌の場合の残存率分布を Fig. 2-16 に示す。X 線透過画像の項目でも述べたように残存率は培地から 20~40mm 程度離れた部分で最も減少していることがわかる。この部分の残存率は 18 週間後の時点で 0.4 程度であり、まだ減少を続けている。白色腐朽菌は木材中のセルロース、ヘミセルロース、リグニンを分解することができるのでさらに残存率が減少していくことが予想される。ここよりも離れた部分では腐朽期間が長くなるにつれて残存率が低下していた。一方で主に 15 週間の一部試験体では培地近傍の密度低下も見られた。また、これらの試験体は培地から遠い部分での残存率が比較的高かった。15 週間の腐朽処理を受けた試験体は、培養瓶内で傾いていたため吸水量が比較的小さかったため、培地近傍においても含水率が比較的低く腐朽に適していたため培地近傍でも密度が低下したと考えられる。

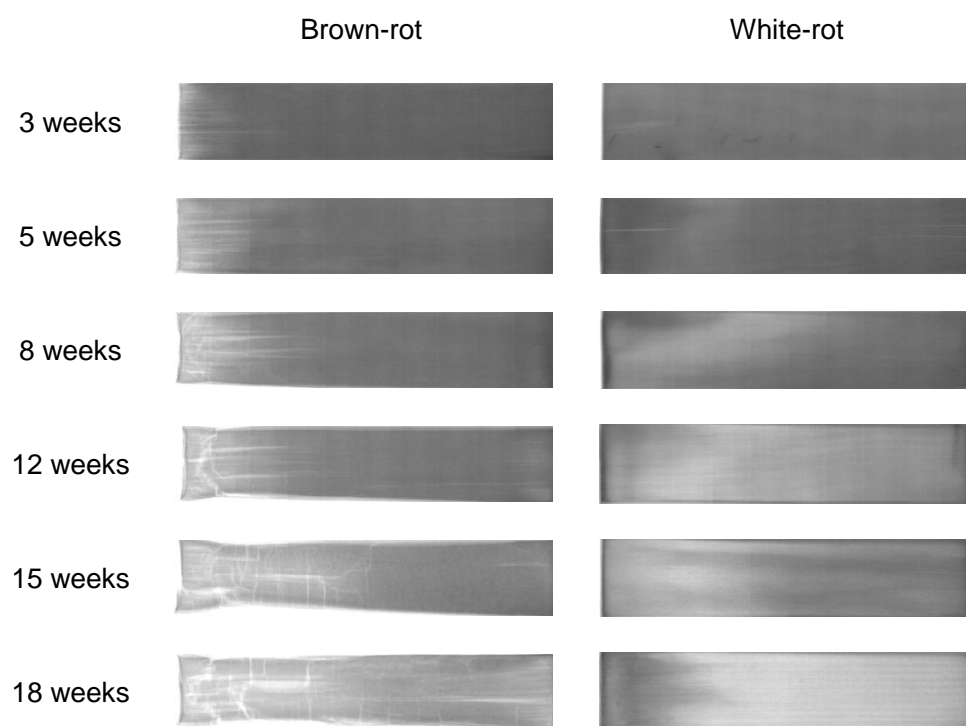


Fig. 2-14 腐朽材の X 線透過画像(すべて左側が培地側)

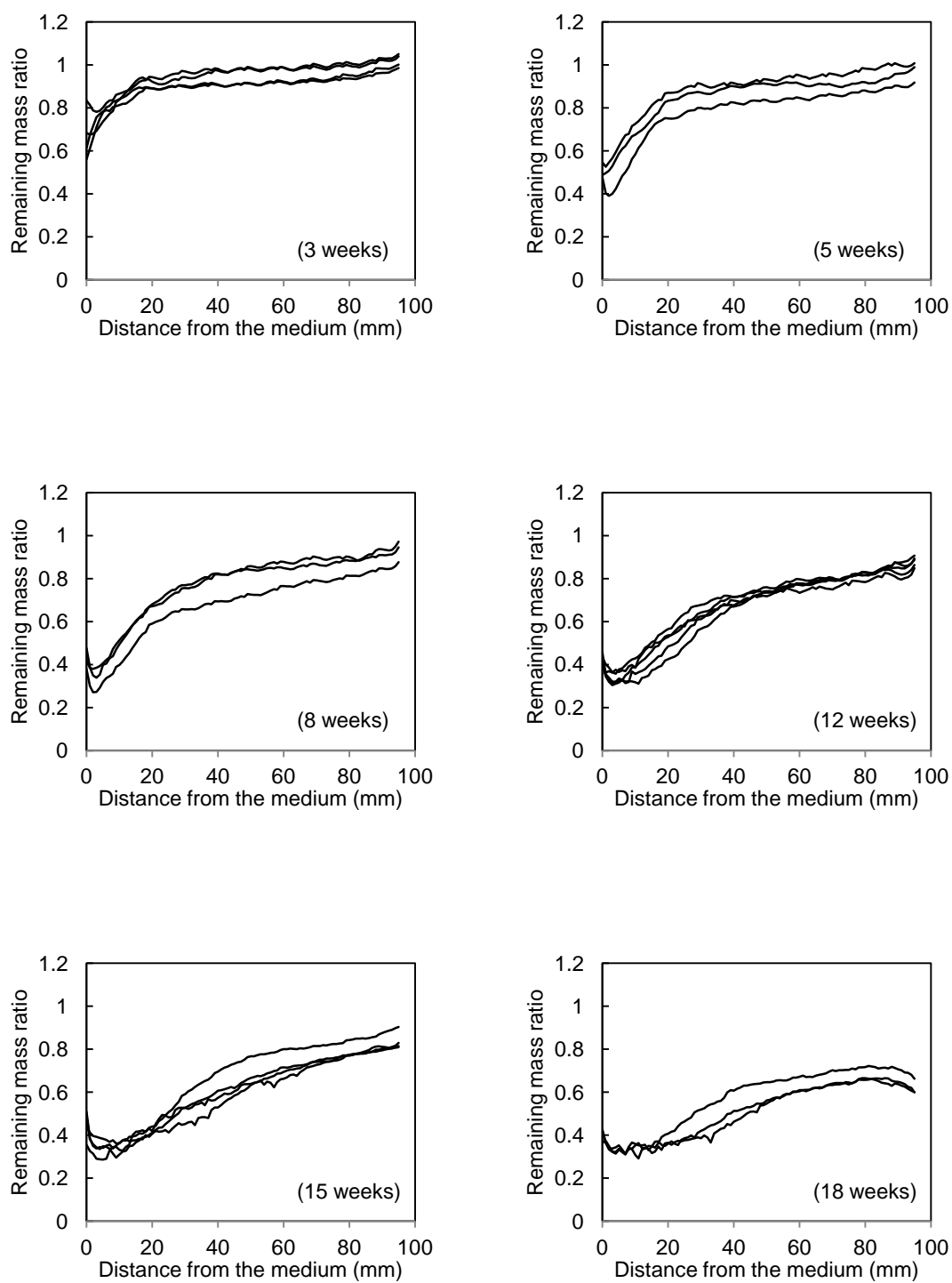


Fig. 2-15 オオウズラタケ処理材の重量残存率分布

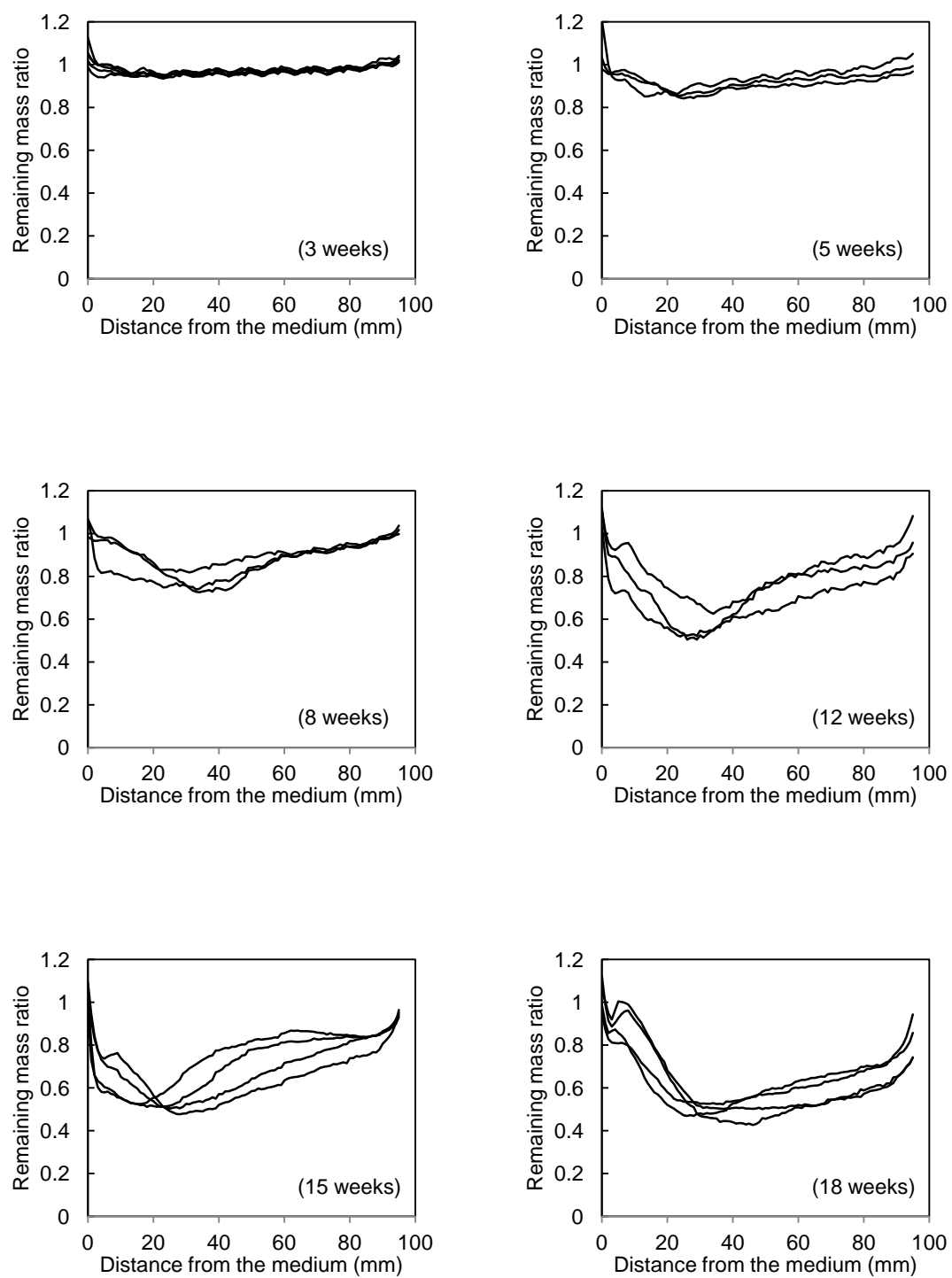


Fig. 2-16 カワラタケ処理材の重量残存率分布

### 2.3.5 腐敗速度の経時変化

前項で示した残存率分布から腐敗速度分布を求めた。腐敗期間と残存率の関係を Fig. 2-17 に示す。この図に代表されるように、腐敗速度は腐敗開始直後よりも少し時間が経過した時が最も早いことがわかる。特に制限が無ければ腐敗菌の菌糸量や酵素の量は腐敗期間に応じて増加すると考えられるため、腐敗速度は腐敗開始直後よりも後のほうが早くなると考えられる。また残存率が低くなると、腐敗速度が低下していた。これは、残存率が低下すると当然腐敗菌の分解対象が減るために腐敗速度が低下したと考えられる。

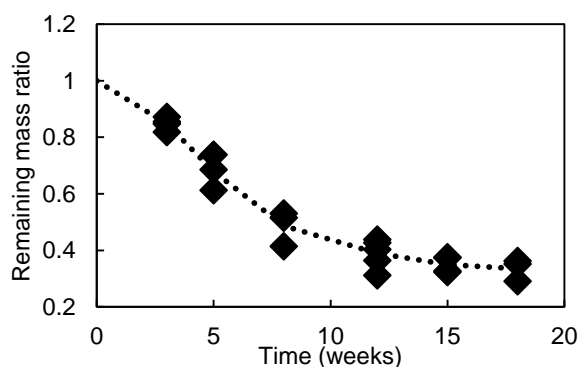


Fig. 2-17 ある地点における残存率の腐敗期間による変化

### 2.3.6 繊維方向における腐敗速度分布の経時変化

腐敗速度の算出方法は Fig. 2-17 に示したように、隣接する腐敗期間の間で残存率の平均を通る直線を引きその傾きの絶対値を腐敗速度とした。

Fig. 2-18 に褐色腐敗菌の場合の腐敗速度分布を示す。これを見ると、培地近傍の腐敗速度は 3 週間後から 5 週間後にかけて最も早くなっている。培地から離れた部分についての腐敗速度は培地近傍より遅く、腐敗期間による違いは小さかった。以上より、前述したような腐敗初期や残存率の低下による腐敗速度低下を除くと腐敗速度は基本的に培地からの距離が近いほど速いことがわかる。ちなみに腐敗期間が 15 週間から 18 週間にかけて培地と反対側の腐敗速度が速くなっているのは前述したように反対側から腐敗菌が侵入したためであると考えられる。

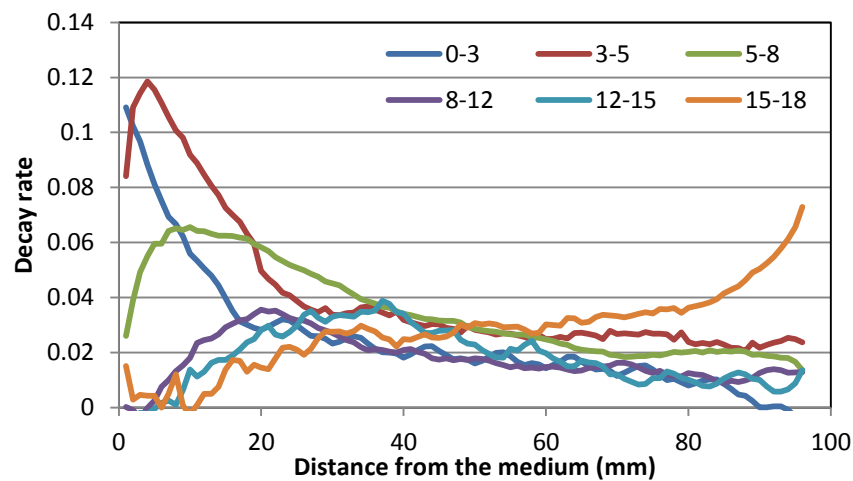


Fig. 2-18 オオウズラタケ処理材の腐朽速度分布

Fig. 2-19 に白色腐朽菌の場合の腐朽速度分布を示す。この図を見ると白色腐朽菌の場合は腐朽速度が最も速い場所は腐朽が進行するにつれて変化しているが、これは前述した 15 週間後の一部試験体の残存率分布がほかの試験体の傾向と異なることに由来する。実際培地からの距離が 50mm 程度より遠い部分では、15 週間から 18 週間後の腐朽速度は比較的速いが、その直前の 12 週間後から 15 週間後の腐朽速度はかなり遅くなっている。これを考慮すると、白色腐朽菌の場合の腐朽速度は培地からの距離が 20~40mm で一番早くなっていたと考えることができる。

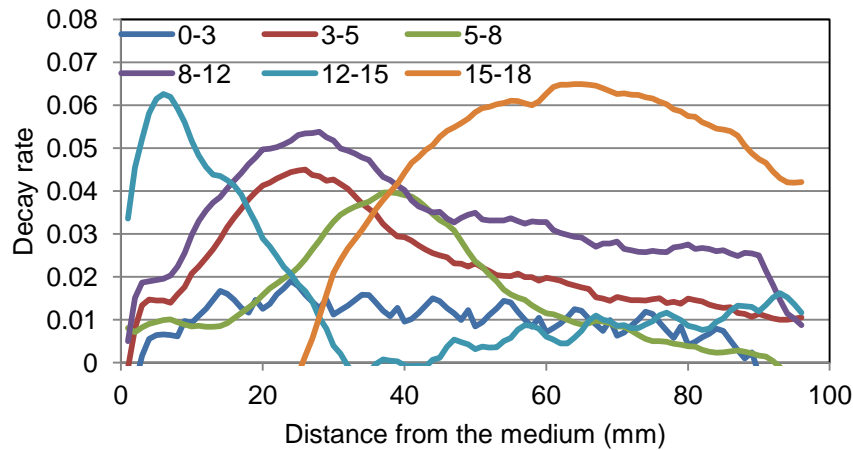


Fig. 2-19 カワラタケ処理材の腐朽速度分布

### 2.3.7 残存率と輝度値の分散の関係

これまで繊維直交方向の平均密度についての議論をしてきたが、腐朽に伴う強度劣化には局所的な腐朽進行の影響も大きいと考えられる。そこで、ここでは腐朽進行のばらつきを評価するため繊維直行方向の残存率の分散を評価することとした。

褐色腐朽菌の場合の繊維直交方向における残存率分散の分布を Fig. 2-20 に示す。褐色腐朽菌の場合、残存率の分散は培地に近い部分で高くなっていることがわかる。この領域は Fig. 2-15 に示すように残存率が低い部分と一致している。また、腐朽期間が長くなると全領域で残存率の分散が高くなっていることがわかる。腐朽期間が長くなると残存率は低くなっているので、残存率と残存率の分散の間には関係がみられると考えられる。そこで残存率とその分散の対数の関係を Fig. 2-22 に示す。これを見ると残存率が高い場合は残存率の減少に従って分散の対数が上昇し、ある程度残存率が低下した場合は残存率に関わらず残存率の分散は一定となっている。そこで、残存率が 0.8 を上回る部分についての残存率と残存率の対数の関係式を以下のように求めた。

$$\text{Log}\sigma^2(x, t) = -11.453\rho + 4.1596 \quad \text{Eq. 2-6}$$

白色腐朽菌の場合の分散の分布を Fig. 2-21 に示す。白色腐朽菌の場合についても腐朽期



間が 5 週間以前に比べて 8 週間を超えた場合の方が残存率の分散は大きくなっていた。腐朽期間が長くなると残存率の分散が腐朽開始直後ほど小さい部分は減っているが、褐色腐朽菌の場合に比べて試験体ごとのばらつきが大きく、腐朽期間が長くなっても試験体によっては残存率の分散が腐朽開始直後と変わらない部分も見られた。また、Fig. 2-23 に残存率と残存率の分散の対数の関係を示すが、白色腐朽菌の場合は両者の間に特別な関係は観察できなかった。

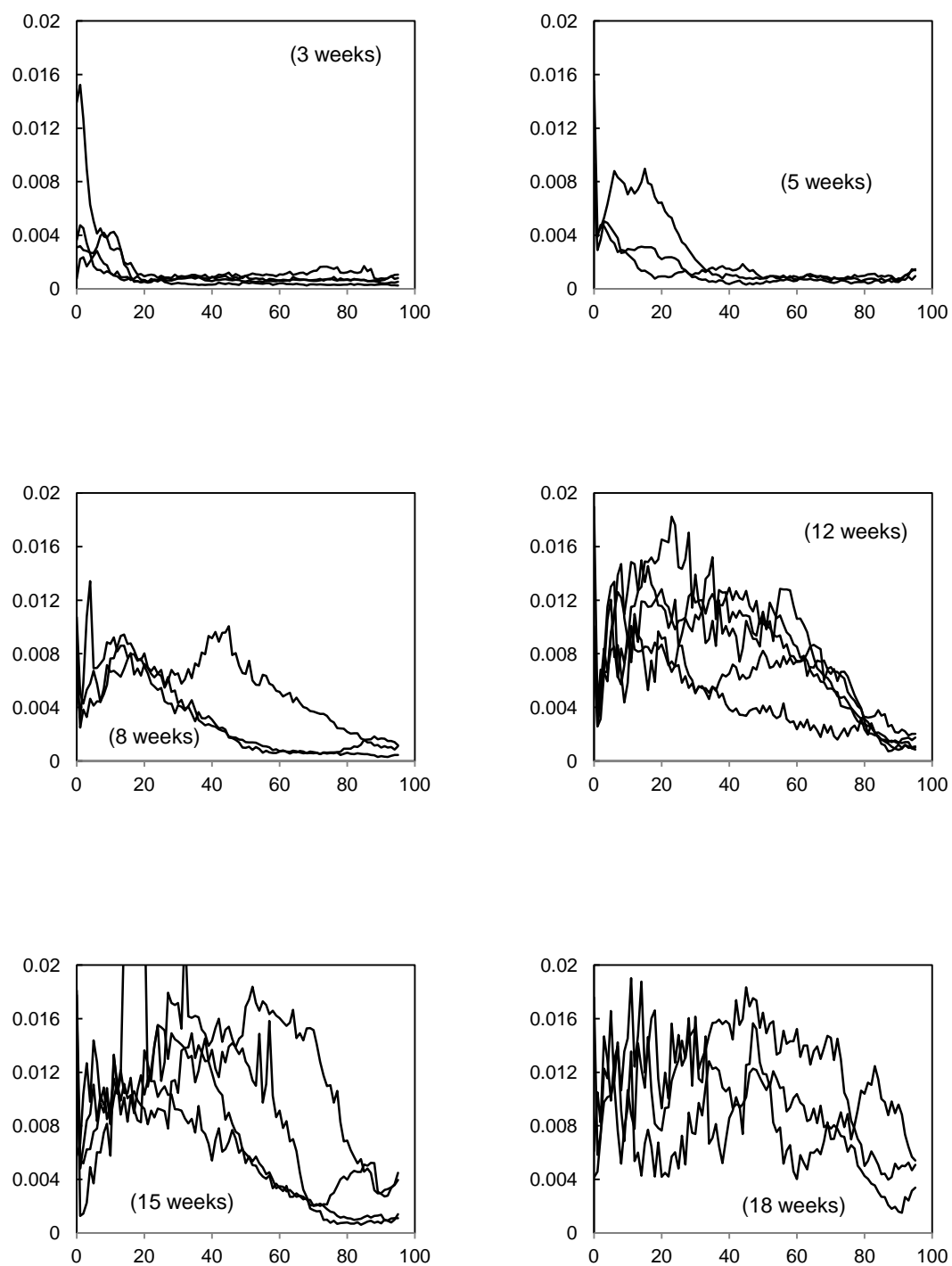


Fig. 2-20 褐色腐朽菌の場合の密度分散の分布 (縦軸:密度の分散, 横軸:培地からの距離)

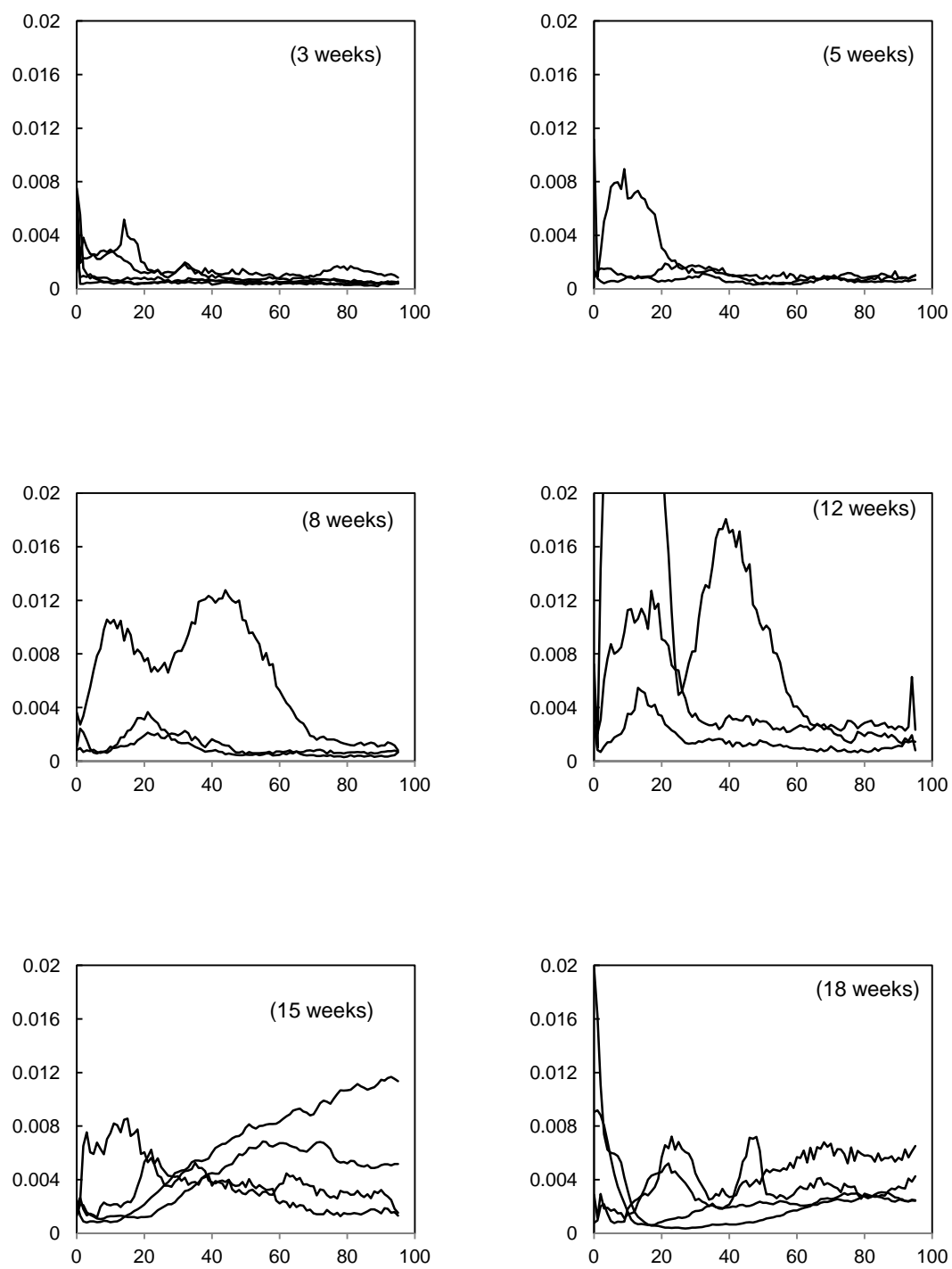


Fig. 2-21 白色腐朽菌の場合の密度分散の分布 (縦軸:密度の分散, 横軸:培地からの距離)

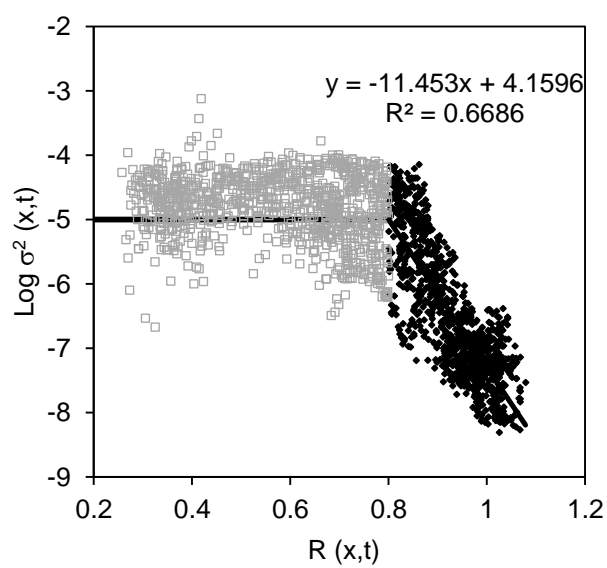


Fig. 2-22 オオウズラタケ処理材の残存率と分散の関係

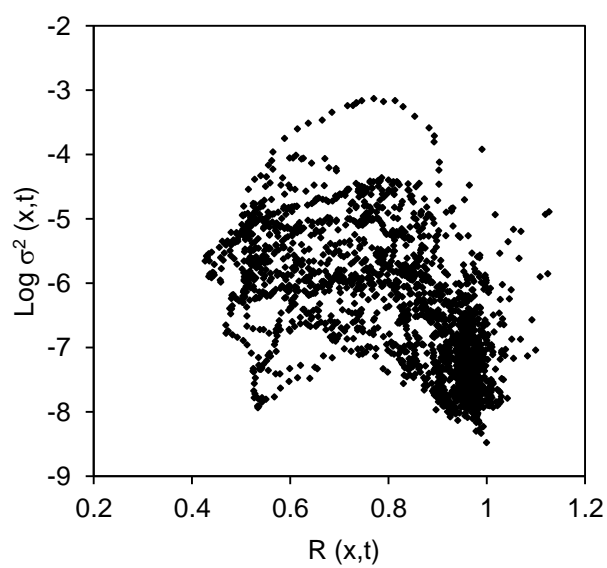


Fig. 2-23 カワラタケ処理材の残存率と分散の関係

## 2.4 まとめ

2 種類の腐朽菌を用いて異なる条件で繊維方向への強制腐朽試験を行い、その腐朽材の密度分布をX線デンストメトリーによって求めた。その結果、いずれの条件においても腐朽期間が 18 週間までは腐朽期間が長くなるにつれて重量減少が進行していた。その一方で水分量や含水率は培地と試験体を直接接触させた白色腐朽菌を用いた場合の含水率が両者の間にメッシュシートを挟んで褐色腐朽菌を用いた場合よりも高くなっていた。密度分布についてもこの水分量の違いが大きな影響を与えており、褐色腐朽菌の場合は培地に近い部分の腐朽が最もよく進行していたのに対して白色腐朽菌の場合は培地から少し離れた部分の腐朽が最も進行していた。

また腐朽速度については腐朽開始直後よりも少し時間が経過した方が速く、腐朽進行に伴って重量減少が進行すると腐朽速度が低下している様子が見られた。繊維直交方向に関する残存率のばらつきについては、特に褐色腐朽菌の条件において残存率が低下すると残存率の分散が上昇する傾向がみられた。

### 第3章 腐朽進行に伴う強度の変化に関する研究

#### 3.1 はじめに

前章では腐朽を受けた木材の密度分布について述べたが、腐朽材の力学的挙動を知るためには腐朽によって強度分布がどのように変化するかを知る必要がある。そこで本章では強度分布を求めるやり方として密度分布から求めるやり方に着目し、そのために必要なパラメータとして腐朽材の密度と強度性能の関係を求めることを試みた。求める強度性能としては縦引張、縦圧縮強度とした。一般的に強度性能の評価手法として用いられている曲げ試験については、今回得られた腐朽材から試験用の棒を作成すると、両端のいずれかの腐朽が中央部よりも進展しており支持点がせん断破壊する可能性が高いため、今回は採用しなかった。

#### 3.2 密度と強度の関係を調べるための圧縮試験

##### 3.2.1 実験方法

前章で作成した腐朽材からオオウズラタケ処理材では 5 週間、カワラタケ処理材では 8 週間の試料から  $5 \times 5 \times 10(L)(mm)$  の圧縮試験体試料を作成した (Fig. 3-1)。その後  $60^{\circ}C$  2 日間の条件で乾燥後の絶乾重量を求め、インストロン 4204 型万能材料試験機を用いてクロスヘッドスピード  $1mm/min$  の条件で加力を行い、圧縮強度を求めた。圧縮試験の終了後、再度重量を測定した後  $105^{\circ}C$  の通風乾燥機の中に 1 日放置し、重量を測定して含水率を計測した。

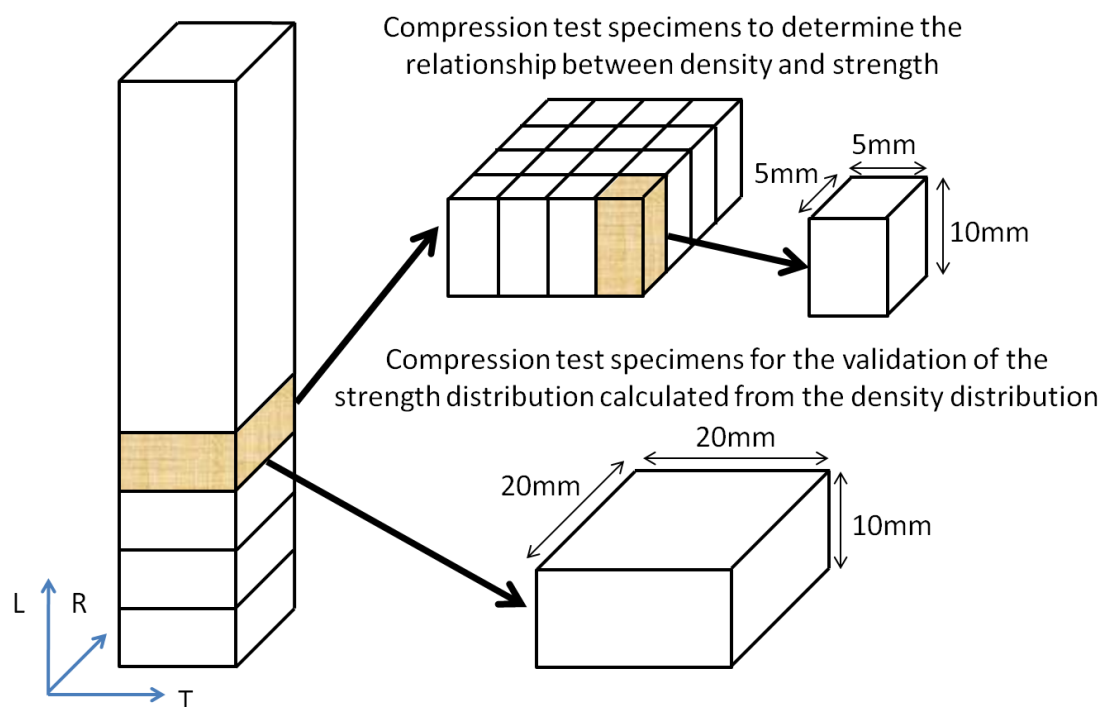


Fig. 3-1 圧縮試験体の作製法

### 3.2.2 結果と考察

気乾密度と圧縮強度の関係式を以下に示す。

$$\text{オオウズラタケ腐朽材} \quad \sigma = 231.8\rho - 49.511 \quad \text{Eq. 3-1}$$

$$\text{カワラタケ腐朽材} \quad \sigma = 146.5\rho - 22.368 \quad \text{Eq. 3-2}$$

$\sigma$  = 圧縮強度(MPa)

また、後にこの結果と軟 X 線画像から求めた密度を基に圧縮強度分布を求めるが、軟 X 線透過画像から求めた密度は全乾密度である。今回強度試験は気乾状態で行ったが、そのままでは比較にならないため含水率から全乾密度を推定し、強度との関係を Fig. 3-2, Fig. 3-3 に示す。また絶乾密度と強度の関係式を以下に示す。

$$\text{オオウズラタケ腐朽材} \quad \sigma = 0.248\rho - 49.5 \quad \text{Eq. 3-3}$$

$$\text{カワラタケ腐朽材} \quad \sigma = 0.157\rho - 22.4 \quad \text{Eq. 3-4}$$

この結果についてであるが、両者ともに密度の低下に伴って強度低下が生じている。また、この両者を比べるとオオウズラタケ処理材のほうが同じ密度における強度減少率が高い。一般的に褐色腐朽菌と白色腐朽菌の腐朽形態の違いにより、腐朽材内におけるセルロース重合度の減少度に違いがある等のことから同じ重量減少率における強度残存率は褐色腐朽菌のほうが白色腐朽菌よりも大きいことが知られており、今回の結果もこれに一致していた<sup>44)</sup>。

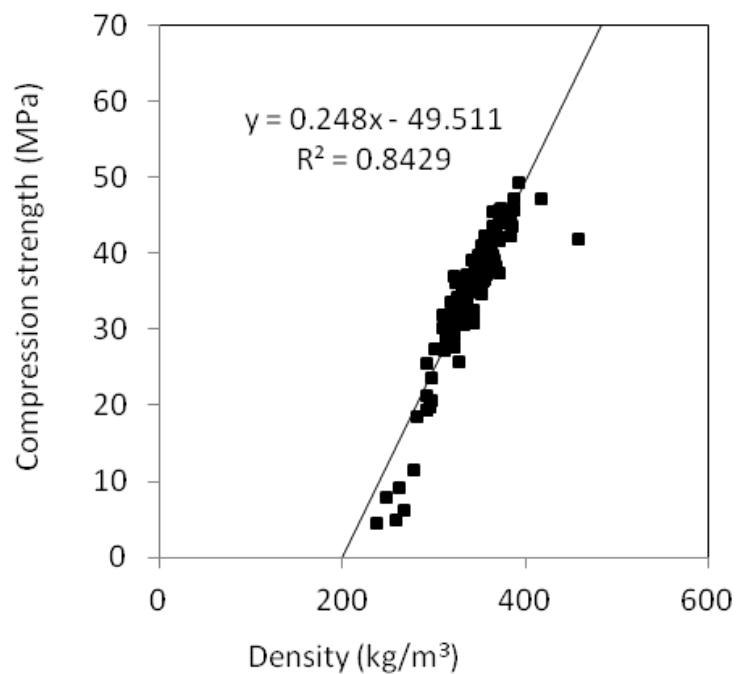


Fig. 3-2 オオウズラタケ処理材の圧縮強度と全乾密度の関係



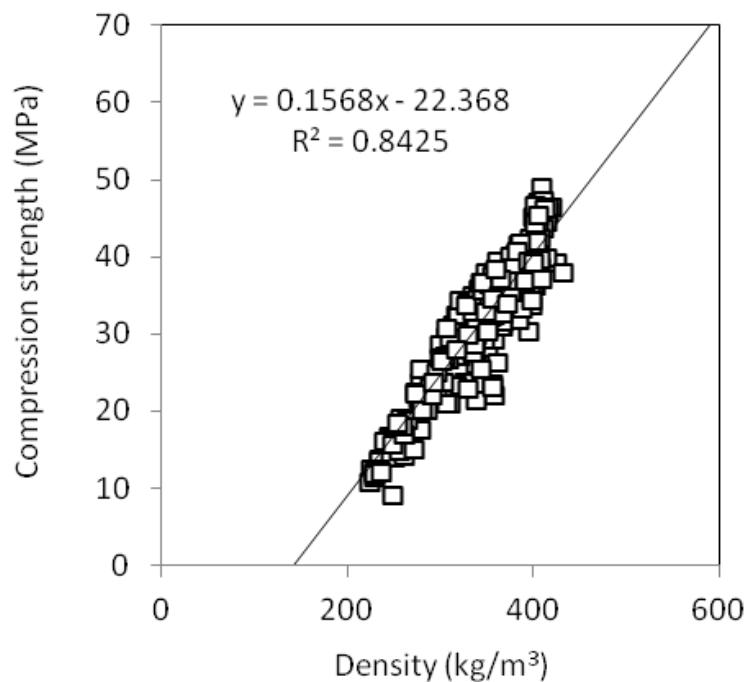


Fig. 3-3 カワラタケ処理材の圧縮強度と全乾密度の関係

### 3.3 密度分布から求めた圧縮強度と実際の圧縮強度の比較

#### 3.3.1 はじめに

前項の結果から、腐朽材の軟 X 線透過画像から得られた密度分布を用いて圧縮強度の分布を求めることができるようになった。そこで、密度分布から求められた圧縮強度と実際の強度分布との比較を試みた。

#### 3.3.2 実験方法

##### 3.3.2.1 圧縮強度の測定

軟 X 線透過画像を撮影した腐朽材の中から、密度のばらつきが大きい以下の腐朽期間の腐朽材より 3~4 体ずつを使用した。

- ・オオウズラタケ処理材 5 週間 8 週間 12 週間
- ・カワラタケ処理材 8 週間 12 週間 15 週間

これらの腐朽材を木口面に平行な面で 1mm ごとに切り出して 20×20×10 (L) (mm)の圧縮試

験体とした (Fig. 3-1) 。ただし X 線デンシトメトリーで求めた密度分布との比較のため、腐朽材の断面が変形しているものについても特に加工はせずそのまま試験体とした。寸法と重量を測定後、インストロン 4204 型万能材料試験機を用いてクロスヘッドスピード 1mm/min の条件で縦圧縮試験を行った。

#### 3.3.2.2 密度分布を用いた圧縮強度の推定

前章で軟 X 線透過画像から求めた密度分布 (Fig. 2-15, Fig. 2-16) に対して Eq. 3-3, Eq. 3-4 をそれぞれ適用することにより圧縮強度分布を求めた。

#### 3.3.3 結果と考察

Fig. 3-4, Fig. 3-5 に密度から推定した圧縮強度と実際の圧縮強度の比較を示す。オオウズラタケ処理材、カワラタケ処理材のいずれについても実際の圧縮強度の低下している部分では密度から推定した圧縮強度も低下しており、密度から推定した圧縮強度は実際の圧縮強度の変化をよく表すことができているといえる。

その一方で、オオウズラタケ処理材、カワラタケ処理材のいずれについても密度から推定した強度の値と実際の圧縮強度の値は異なっていた。Fig. 3-6 にオオウズラタケ処理材における両者の関係を示し、Fig. 3-7 にカワラタケ処理材における両者の関係を示す。この双方共に共通したこととして、実際の強度が高い部分は密度から推定した強度のほうが高かった。

この原因としては、Eq. 3-3, Eq. 3-4 を求めた際の寸法と今回腐朽材の強度を求めた際の寸法が異なることがあげられる。今回は相対的に加力方向が短くなっているため、この影響で強度が強くなっていると考えられる。またオオウズラタケ処理材に関して特徴的なこととして、実際の圧縮強度が低い部分では密度から推定した圧縮強度のほうが高くなっていることがあげられる。Fig. 3-2 を確認すると、密度の低い部分の強度は近似直線より下になっており、このことが原因として考えられる。これはオオウズラタケ処理材の圧縮試験の際に、密度の低い試験体では横引張強度の低下により試験体が割れていくつかの板状の部

分に分割し、それぞれが座屈するという破壊形状を示していた。このような破壊形状を示す試験体はそうでない試験体に比べての圧縮強度が小さくなったと考えられる。

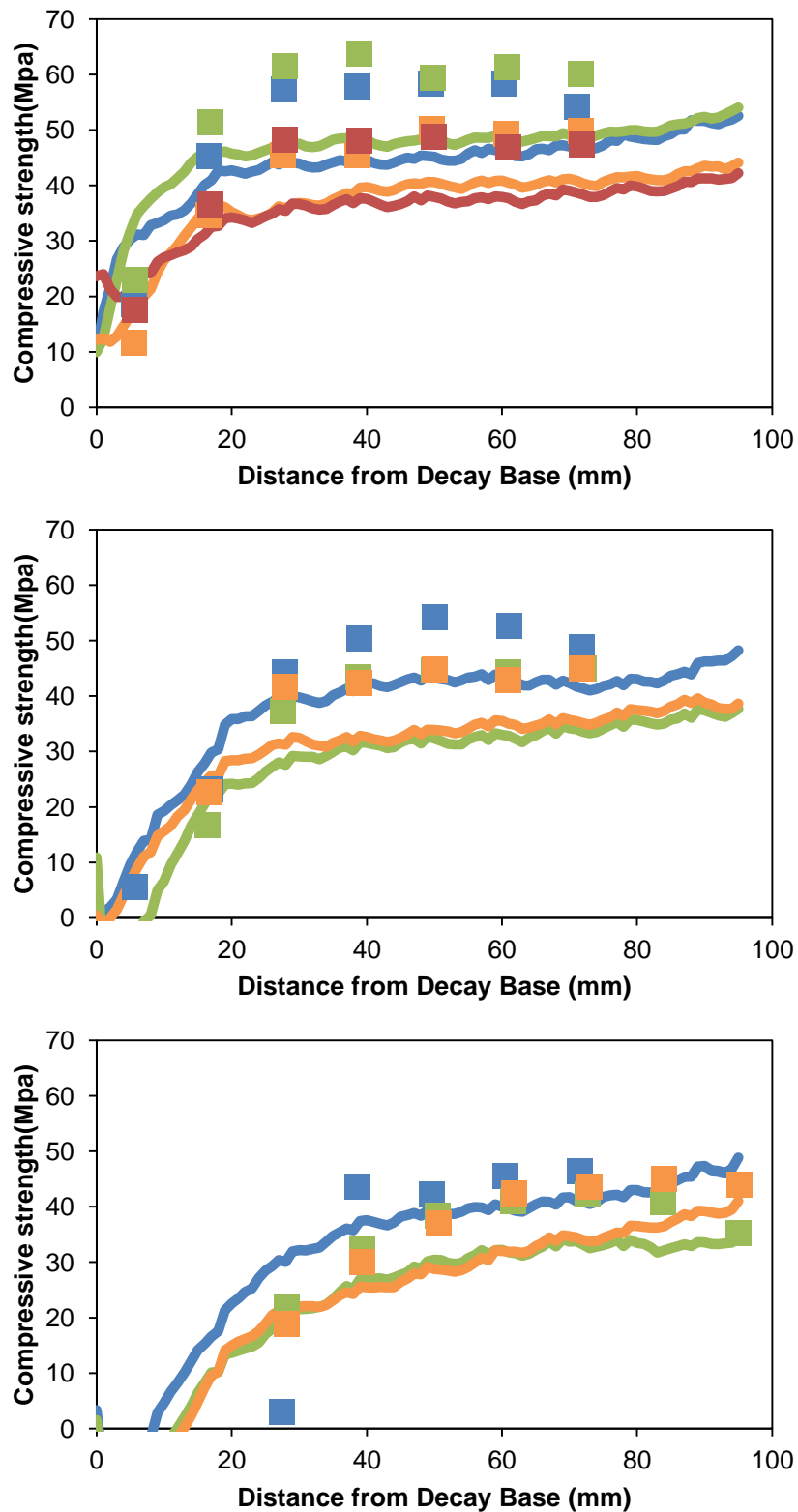


Fig. 3-4 オオウズラタケ処理材における密度から求めた圧縮強度（線）と実測値（□）の関係。色が同じ線と□は同じ試験体を表す。（上から 5 週間、8 週間、12 週間）

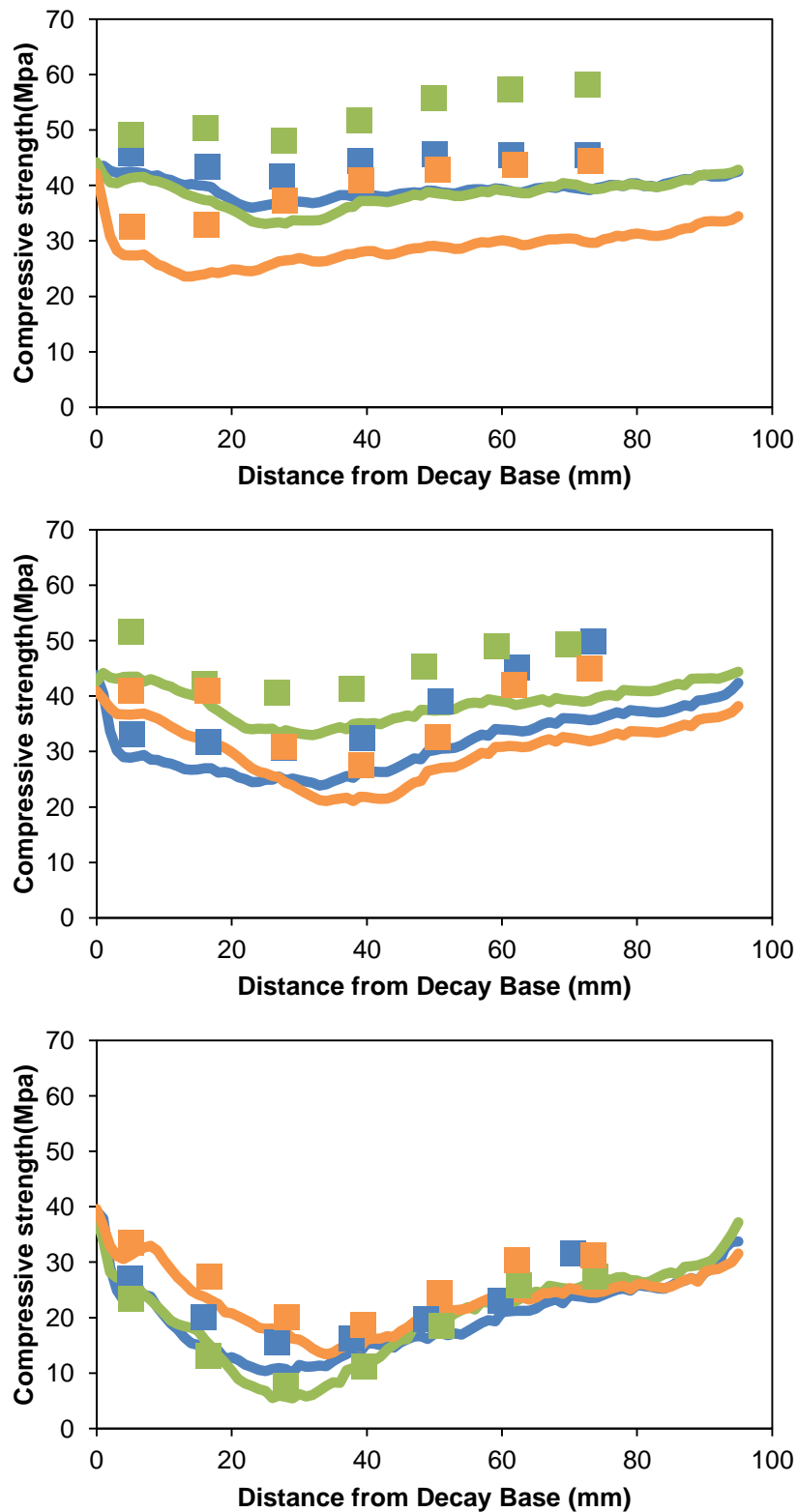


Fig. 3-5 カワラタケ処理材における密度から求めた圧縮強度（線）と実測値（□）の関係。  
色が同じ線と□は同じ試験体を表す。（上から 8 週間、12 週間、15 週間）

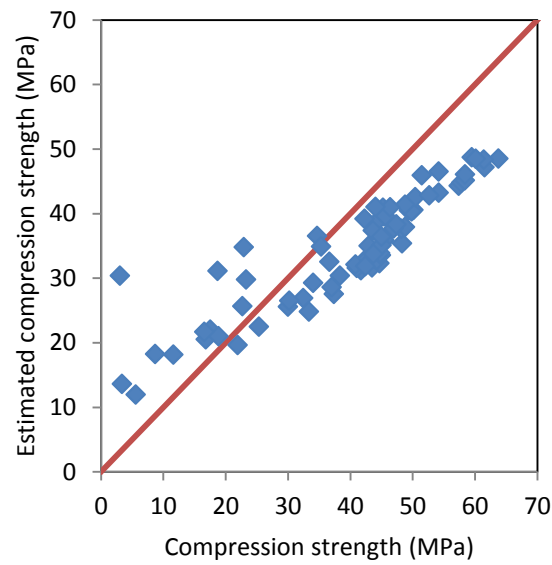


Fig. 3-6 オオウズラタケ処理材における密度から推定した圧縮強度と  
実測によって求めた圧縮強度の関係

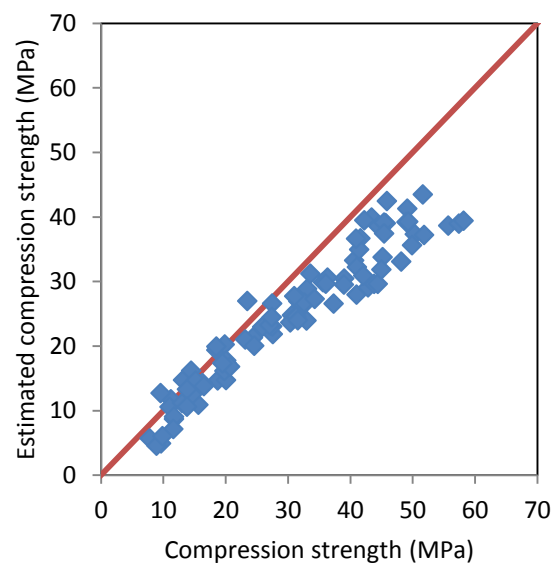


Fig. 3-7 カワラタケ処理材における密度から推定した圧縮強度と  
実測によって求めた圧縮強度の関係

### 3.4 縦引張強度と密度の関係

#### 3.4.1 実験方法

##### 3.4.1.1 試験体作成

試験体は、以下の手順で作成した。スプルー材から  $2 \times 10 \times 110$  (L) (mm) の小片を切り出す。その小片の中央部分をトリマーで Fig. 3-8 のような形になるように削り、最後に紙やすりで形を整えた元を試験体試料とした。

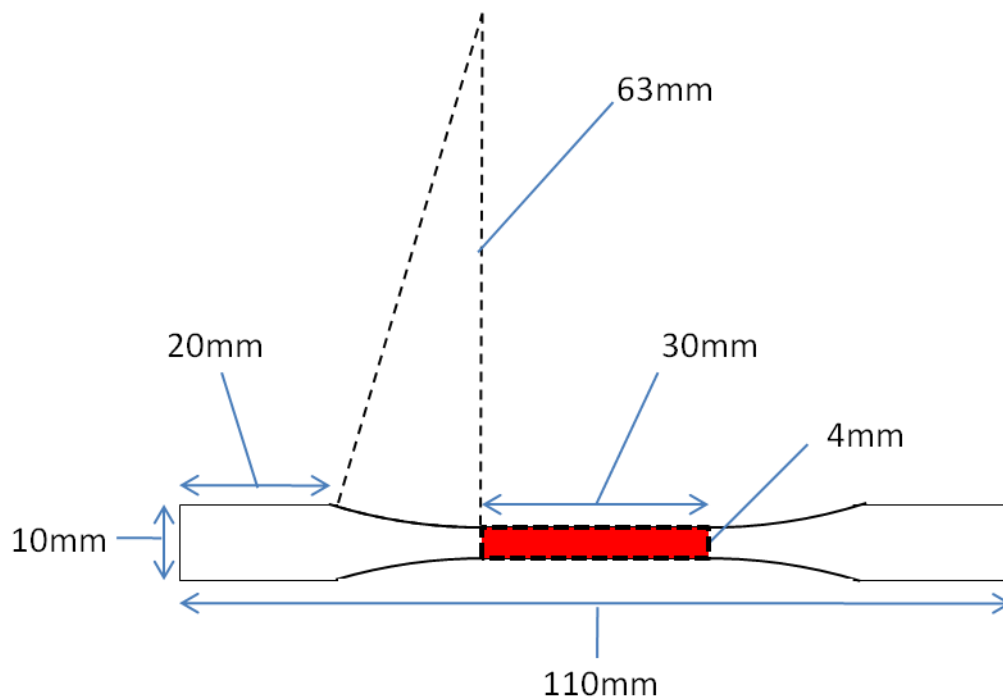


Fig. 3-8 引張試験の試験体

##### 3.4.1.2 腐朽処理

作成した試験体には腐朽処理が施された。まず、上で作成された試験体にオートクレーブ処理を行った。その後菌糸培地から直径 1cm 分だけコルクボーラーにて取り出し、滅菌シャーレ上に接地した。この培地の上に Fig. 3-8 のくびれた部分（赤色）が乗るように試験体を設置した。その後湿らせたキムタオルを敷いた容器にシャーレを入れ、 $27^{\circ}\text{C}70\%\text{RH}$  の恒温恒湿室に放置した。その後、腐朽終了時に  $60^{\circ}\text{C}2$  日間の条件で乾燥を行った。

#### 3.4.1.3 軟 X 線透過画像による密度推定

得られた試験体の軟 X 線透過画像を SKYSCAN1174 (SKYSCAN) (Fig. 3-9)を用いて作成した。撮影条件は管電流 800 $\mu$ A, 管電圧 50KV, 露出時間 1900ms である。撮影面は Fig. 3-8 の面から撮影を行った。

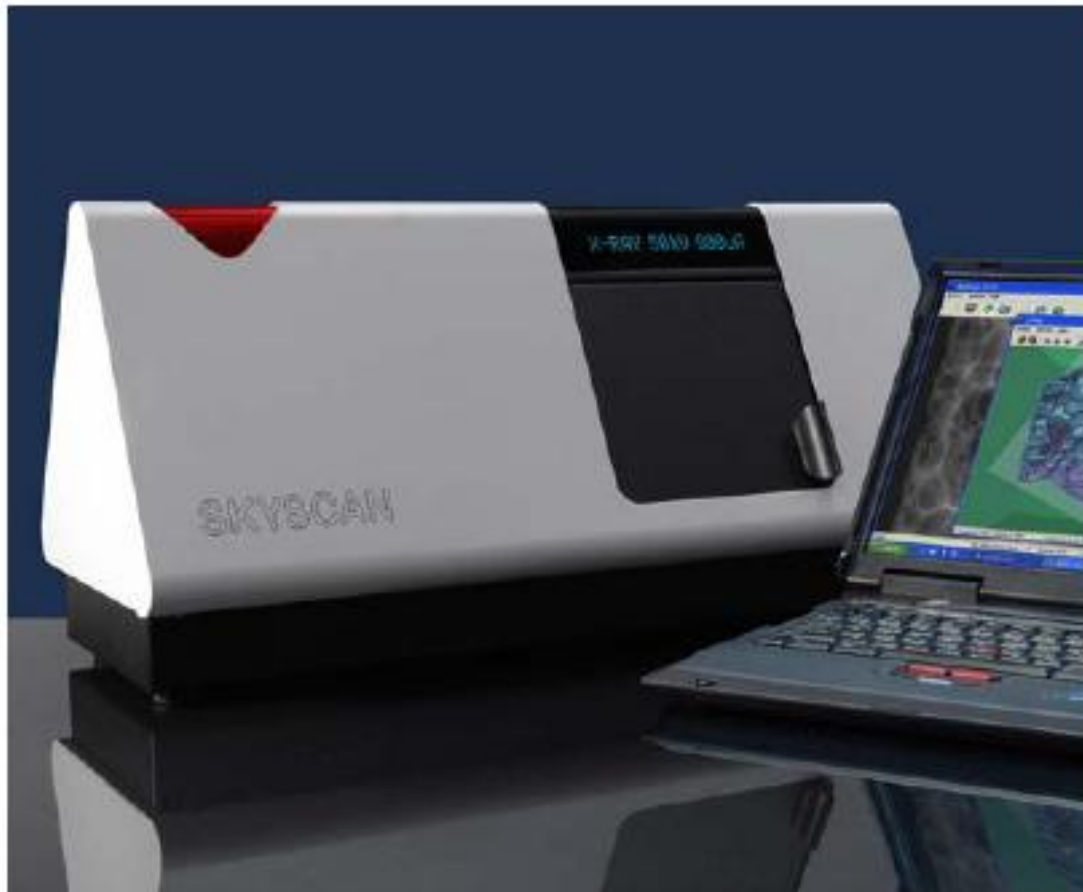


Fig. 3-9 SKYSCAN の写真

また、検量線はブナ、カツラ、バルサ材の 2mm 厚の小片から作成した。Fig.4.9 から輝度  $g$  と密度  $\rho$  (g/cm<sup>3</sup>)の検量線は次のように得られた。

$$\rho = -0.0023g + 0.6488 \quad \text{Eq. 3-5}$$



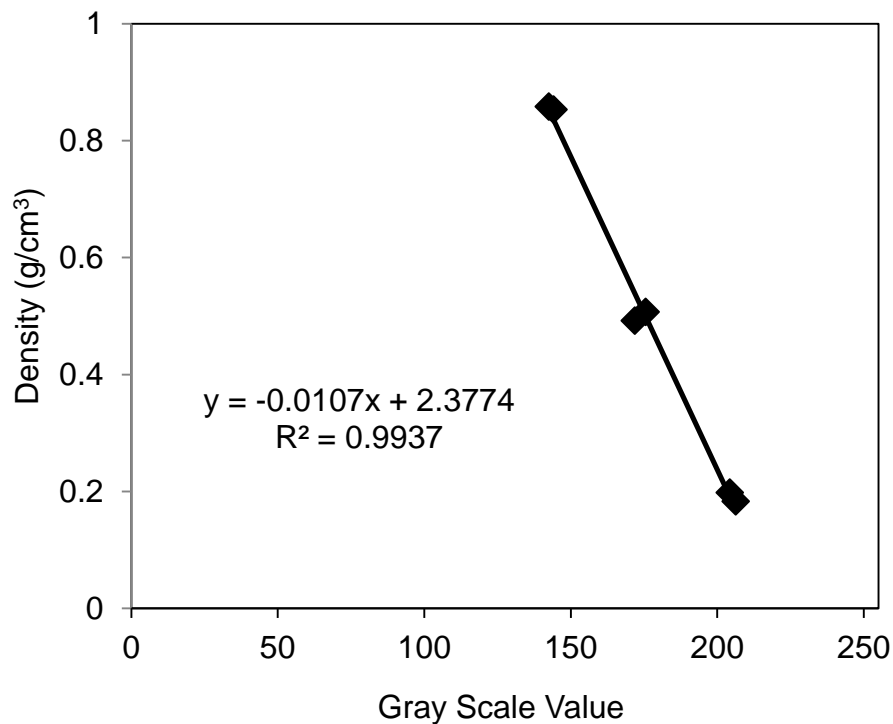


Fig. 3-10 輝度値と全乾密度の検量線

#### 3.4.1.4 ヤング率の計測

通常ヤング率を求める際には変位計やひずみゲージを用いてひずみを求め、ヤング率を求めている。ただこの試験体の場合、腐朽によって強度が低下しているものから作成しているため、場合によっては最大応力が  $10\text{N/mm}^2$  程度で破壊してしまうことが起こりうる。このことは、ひずみゲージをはるることによる試験に及ぼす影響は到底無視できるものではないということを意味する。そのため上で挙げた様な方法でひずみを求めることは不可能である。また、クロスヘッドの変位量から歪みを求めようとしても、引張治具のつかみ部と試験体の間で滑りが生じるため正確なひずみを求めることは不可能と考えられる。

そこで、今回は非接触式伸び歪み計 Strainscope ((株)JT トーシ製) (Fig. 3-11) を用いてひずみを求めることにした。Strainscope がひずみを求める原理は以下のとおりである。あらかじめ試験体に標点となる印を 2 つつけておき、試験開始時に CCD カメラで試験体の画像を撮

影した際にこの標点を認識させる。試験開始後は認識した標点の移動を追い、この 2 点間の距離求めて試験開始時の標点間の距離で除することでひずみの変化が得られる。このソフトでは上下方向の距離しか測定しないため、試験体を斜めに設置してしまうと画像上での標点間の距離の変化と実際の標点間の距離の変化が比例なくなってしまう点が注意点である。

試験方法としては、ヤング率を求める試験体に対して試験体中央部の腐朽材部分の両端にエナメル塗料によって黒い印を付けた後、ロードセルにかかる荷重が 300N に達するまで 1mm/min の条件で引っ張り試験を行った。そこで得られた応力歪曲線からヤング率の値を求めた。



Fig. 3-11 卓上小型万能試験機の写真 (Strainscope は左下のカメラ)

#### 3.4.1.5 縦引張強度の計測

引張強度の計測にはインストロン 4202 型万能材料試験機を用いた。ここで、この試験機に付属する引張試験用のジグでは今回の試験体は薄すぎて試験をすることができないことが分かった。そこで今回は試験体の両端に 20mm×25mm のチャック部分をエポキシ系接着剤（アラルダイト）を用いて取り付けた。その後引張試験をヤング率計測時と同じ条件で試験体が破壊に達するまで行った。

### 3.4.2 結果と考察

#### 3.4.2.1 密度と引張強度の関係

Fig. 3-12, Fig. 3-13 に引張試験体の密度と引張強度の関係を示す。オオウズラタケ腐朽材、カワラタケ腐朽材ともに強度の低い試料も見受けられるが、圧縮強度の場合とは異なり密度と引張強度の関係はこの結果からは見受けられなかった。また、Fig. 3-14, Fig. 3-15 にヤング率と密度の関係を示すが、これについても腐朽菌の種類に関わらず両者の間の関連は見られなかった。木材の場合、圧縮破壊した部分は破壊後も一定の応力を保持し続けるのに対して引張破壊した部分については破壊後に一切の応力を負担しない。そのため圧縮破壊の場合は各部分の圧縮強度の平均値によって強度が求まると考えられるのに対して、引張破壊の場合は最も弱い部分の強度によって強度が決まると考えられ、平均密度によって引張強度を評価することは難しいと考えられる。

ただし今回の実験では大きく強度低下の生じた試験体数が少なかったことが密度と引張強度性能の関係を評価することを難しくしている。しかし文献<sup>17)</sup>の実験結果より重量減少率と引張強度性能の間には相関がみられることが知られており、今回の実験での腐朽条件をさらに工夫してより腐朽が進行した試料が得ることで、より詳細な密度と引張強度性能の関係についての知見が得られると考えられる。

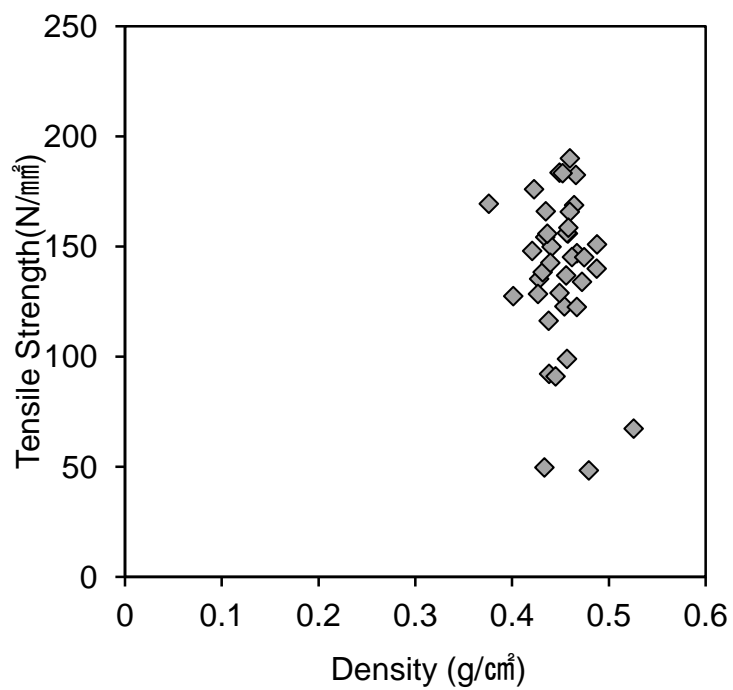


Fig. 3-12 オオウズラタケ処理材の全乾密度と引張強度

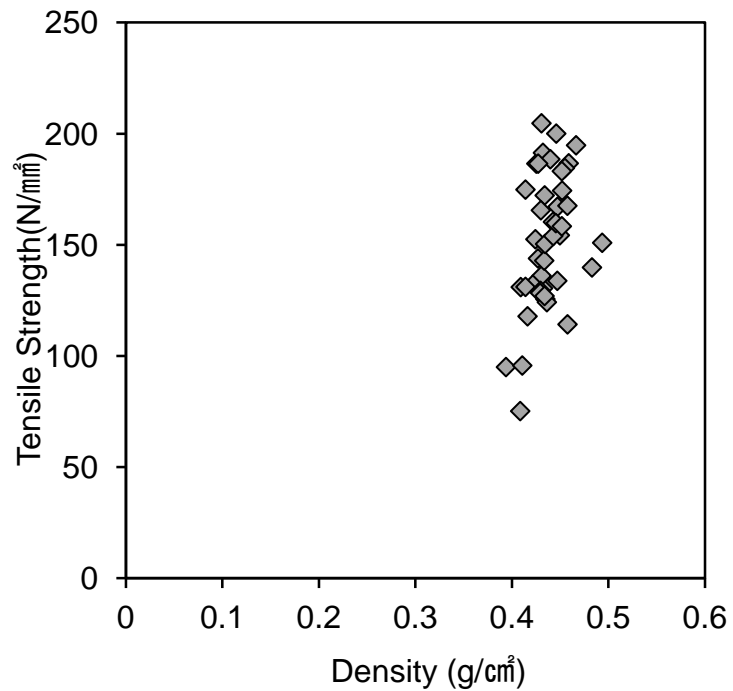


Fig. 3-13 カワラタケ処理材の全乾密度と引張強度

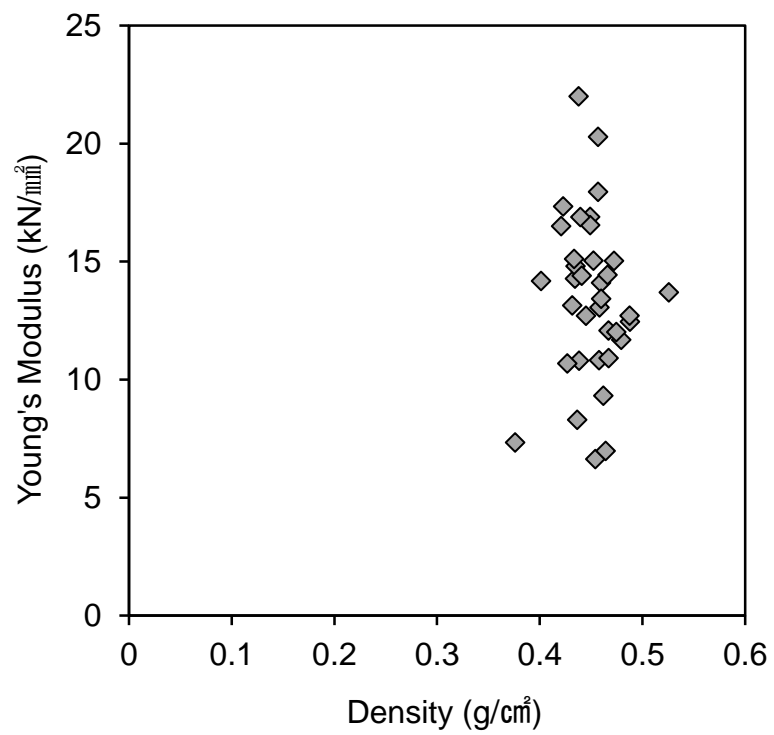


Fig. 3-14 オオウズラタケ処理材の全乾密度とヤング率

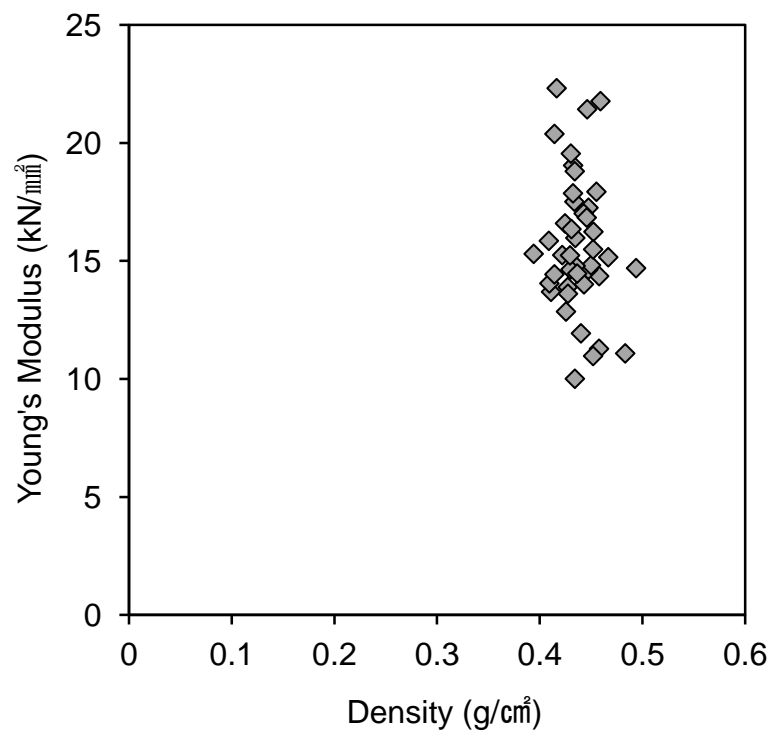


Fig. 3-15 カワラタケ処理材の全乾密度とヤング率

### 3.5 腐朽材の密度分布と引張強度分布の比較

#### 3.5.1 実験方法

##### 3.5.1.1 試験体作成

試験体に用いる腐朽材は、前章で強制腐朽試験を受けた  $20 \times 20 \times 100(L)(\text{mm})$  のスプルース材のうち、腐朽期間が 3, 5, 8, 12, 15 週間のものをオオウズラタケ腐朽処理材、カラタケ腐朽処理材から各 1~2 本ずつ合計 11 本選んだ。この材から  $2(R) \times 3 \sim 4(T) \times 30(L)(\text{mm})$  の棒をカッターナイフにて 2~3 本切りだした。今回の引っ張り試験では、スリット入りの  $2 \times 20 \times 30(\text{mm})$  の板のスリット部に試料の両端が来るように置き、スリット付きの板に両側から  $2 \times 20 \times 30(\text{mm})$  の板をエポキシ系の接着剤によって接着した。これを両面から板とクリップによって挟んで 1 日以上放置して硬化させた。その後、引張以外の理由(曲げモーメント等)による破壊の可能性を減らすために、試験体中央部の腐朽材の部分の紙やすりによって削り、断面積が  $2 \sim 3 \text{mm}^2$  程度になるようにした(Fig. 3-16)。この状態のものを引張試験に供した。

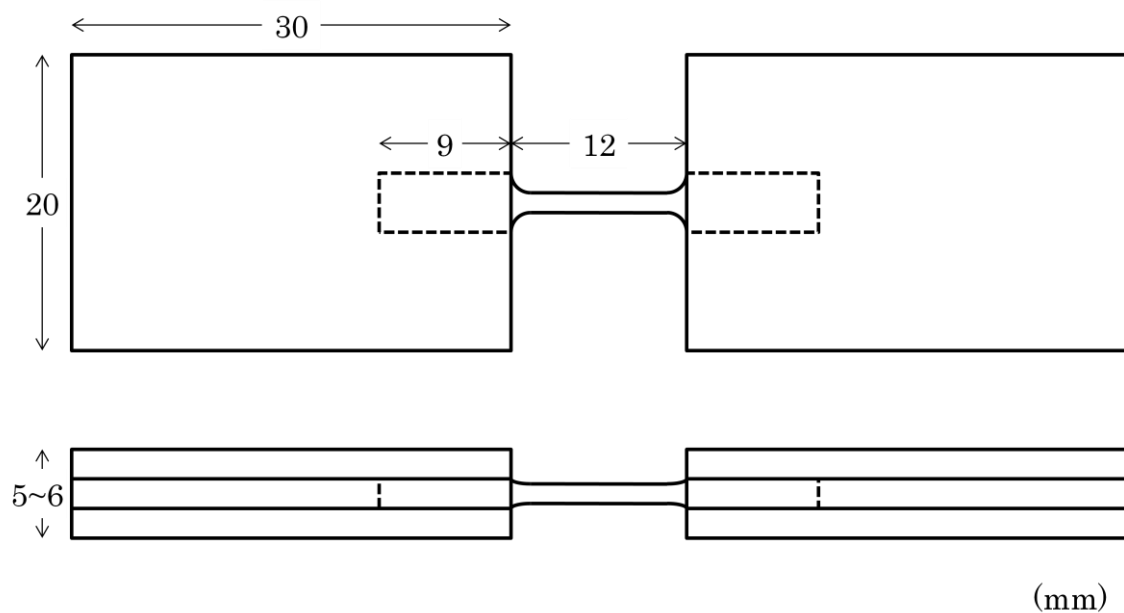


Fig. 3-16 引張試験体寸法

### 3.5.1.2 引張試験

前節で作成した試験体を小型卓上試験機リトルセンスター((株)JT トーシ製)(Fig. 3-11)に取り付け、クロスヘッドスピード 1mm/min の条件(この試験機の最低速度)にて引張試験を行い、最大荷重より引張強度を求めた。

## 3.5.2 結果と考察

### 3.5.2.1 オオウズラタケ腐朽処理材における引張強度分布

オオウズラタケ腐朽処理材における引張強度と培地からの距離の関係を示したグラフは (Fig. 3-17 ~ Fig. 3-21) である。オオウズラタケ腐朽処理材の引張強度については、腐朽処理期間が長くなると、培地からの距離が短い引張強度の値が存在していない。これは腐朽材を乾燥させたあと試料を取り出す際に材がぼろぼろになっていて 3 cmの棒が取れなかったり、試験体への加工時に折れてしまうといった理由で培地からの距離が短い試料の引張試験体を作成することができなかったことが原因である。これは、明らかに材の強度の低下を表していると考えられるので、これらの強度データが存在しなかった範囲については「引張試験を行えないほど強度が低下していた」と扱うこととし、グラフでは強度データが存在しなかったところの数値については、引張強度=0N/mm<sup>2</sup>としてプロットした(×印)。

そのことを踏まえて (Fig. 3-17 ~ Fig. 3-21) を見てみると、全ての期間の結果において培地からの距離が近いほうから順に引張強度が小さくなっていることが分かる。この傾向は密度分布とよく一致していることがわかる。

Fig. 3-17 を見てみると、培地からの距離が 1.5cm~3.5cm の範囲においてのみ引張強度が 40N/mm<sup>2</sup>を下回る点が存在している。これらの点は明らかに強度低下が起こっているといえることができるが、培地からの距離が 1.5cm~3.5cm においても強度低下が起こっているのは作った引張試験体のうちのいくつかにすぎない。このことは、この時点でスプルース材の中で腐朽による強度低下が起こっているのは局所的であるということを意味している。

ほかの部分の引張強度が腐朽前の強度とほぼ同じであることを考えると、この時点では腐朽が起こっているのは一部分であるのにもかかわらず、強度低下が起こった部分の強度は大きく低下しており、オオウズラタケによる腐朽では腐朽菌の進出が起こると強度低下があまり時間をおかずに生じることが推測される。

次に Fig. 3-18 を見てみると、培地からの距離が 8.5cm と一番遠いところについても、強度低下が生じている部分が存在することが分かる。培地からの距離が 7.5cm 以下の部分については、得られたすべての試験体の引張強度が、腐朽を受けていない場合の強度と比べて明らかに低くなっており、この部分に関してはすでに（局所的ではなく）全体的な腐朽が生じているものと考えられる。

Fig. 3-19~Fig. 3-21 については、腐朽期間の増加に伴って強度が低下していることが分かる。また、腐朽期間が 8 週間を超えた結果では引張強度が 50MPa を超えた部分は見られなかった。

以上より褐色腐朽菌の場合、引張強度の分布は密度分布と同様に培地に近い部分から減少していることが分かった。また、腐朽初期については同じ培地からの距離でも強度の低下していた部分とそうでない部分が存在することが示唆された。



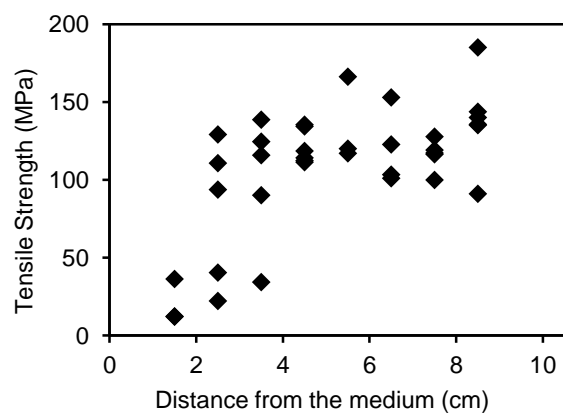


Fig. 3-17 オオウズラタケ処理材 3 週間の引張強度分布

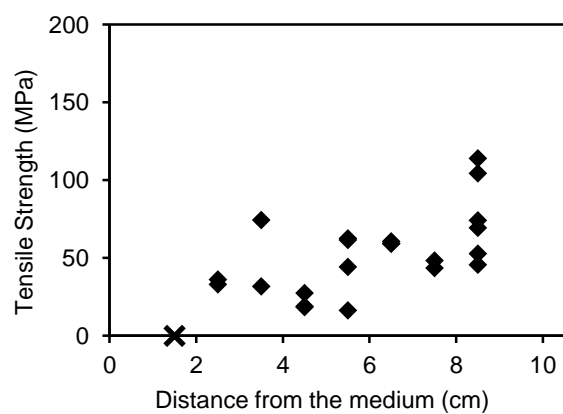


Fig. 3-18 オオウズラタケ処理材 5 週間の引張強度分布

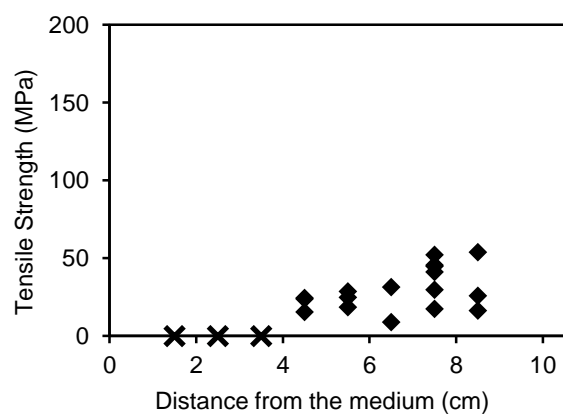


Fig. 3-19 オオウズラタケ処理材 8 週間の引張強度分布

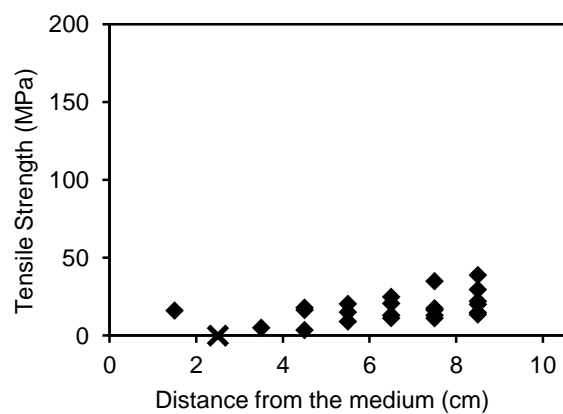


Fig. 3-20 オオウズラタケ処理材 12 週間の引張強度分布

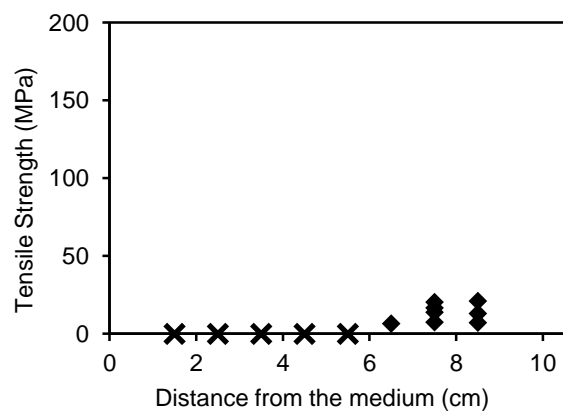


Fig. 3-21 オオウズラタケ処理材 15 週間の引張強度分布

### 3.5.2.2 カワラタケ腐朽処理材

Fig. 3-22～Fig. 3-27 はカワラタケ腐朽処理材における引張強度と培地からの距離の関係を示したグラフである。

Fig. 3-22, Fig. 3-23 を見てみると、いずれのグラフにおいても全体的に引張強度にばらつきが存在し、培地からの距離にかかわらず引張強度が  $60\text{N/mm}^2$  程度の引張試験体が存在している。ただ全体として見てみると、腐朽開始 5 週間後の試験体については、培地からの距離にかかわらず強度低下があまり生じていない、ということができる。

次に腐朽開始 8 週間後の結果は Fig. 3-24 と Fig. 3-25 に示す。Fig. 3-24 (重量減少率 10.9%) では培地からの距離が 1.5cm の強度が大きく低下しており、2.5cm, 3.5cm でやや低下していることがいえる。Fig. 3-25 (重量減少率 13.4%) では、培地からの距離が 1.5cm, 2.5cm の試験体の引張強度は大きく低下しており、3.5cm～6.5cm の間は距離に近いほど強度低下の度合いが大きく、7.5cm, 8.5cm では強度低下が生じていない。

Fig. 3-26 のグラフを見てみると、いくつか引張強度の値が高い試験体もみられる。しかし、全体としては培地からの距離が 1.5cm～6.5cm の試験体は強度が低下しており、培地からの距離が 7.5cm, 8.5cm の試験体も、度合は低いものの明らかな強度低下がみられる。

Fig. 3-27 (腐朽期間 15 週間・重量減少率 27.0%) を見てみると、培地からの距離にかかわらず引張強度が  $40\text{N/mm}^2$  以下のものが多くなり、明らかな強度低下がみられている。これらのことから、本実験の範囲である培地からの距離が 1.5cm～8.5cm の範囲では、培地からの距離が引張強度低下の程度に影響を与えるのは、腐朽期間が 8 週間～12 週間の範囲であることが分かった。

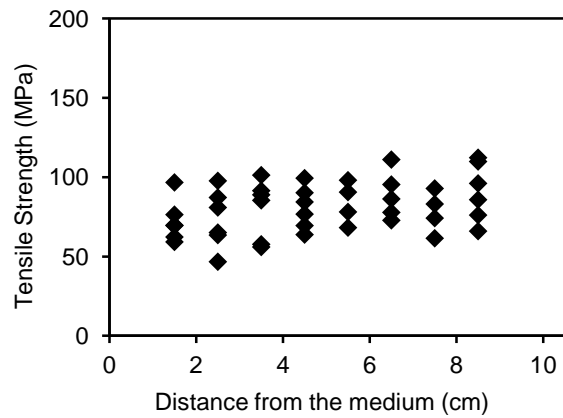


Fig. 3-22 カワラタケ処理材 3 週間の引張強度分布

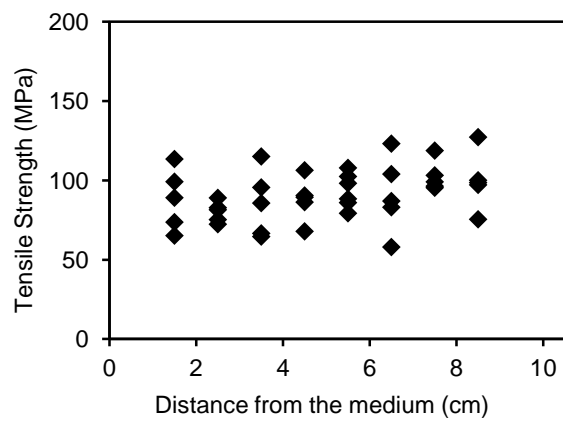


Fig. 3-23 カワラタケ処理材 5 週間の引張強度分布

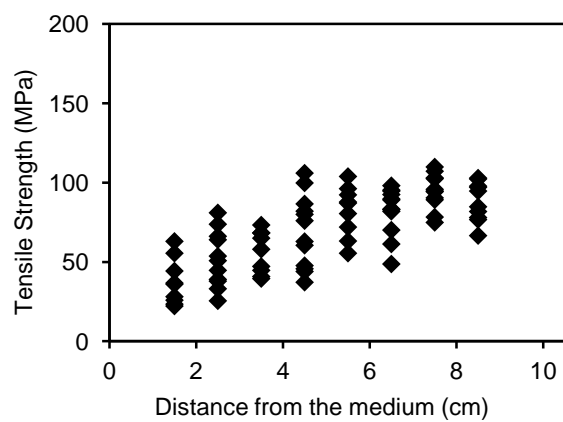


Fig. 3-24 カワラタケ処理材 8 週間の引張強度分布①

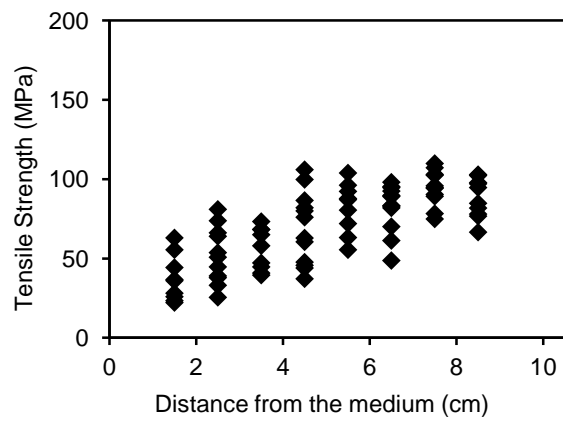


Fig. 3-25 カワラタケ処理材 8 週間の引張強度分布②

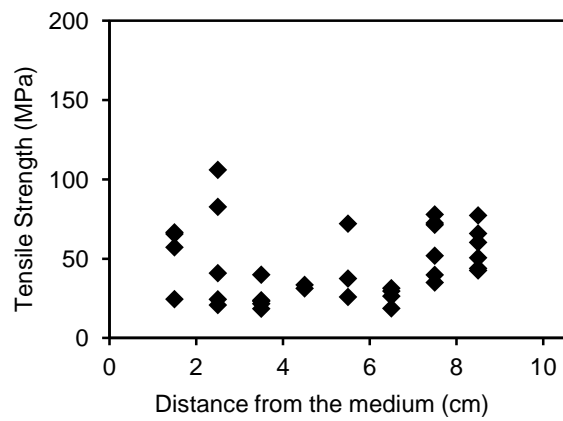


Fig. 3-26 カワラタケ処理材 12 週間の引張強度分布

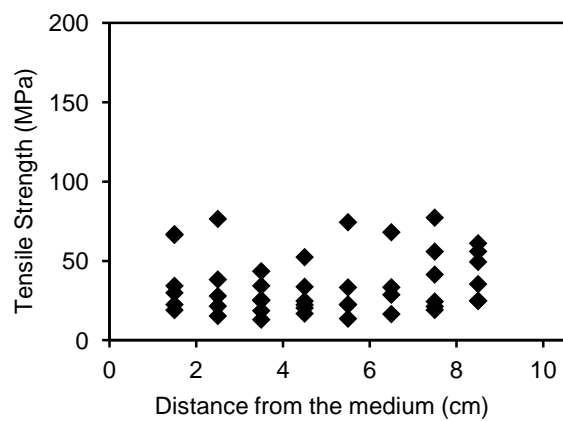


Fig. 3-27 カワラタケ処理材 15 週間の引張強度分布

### 3.6 まとめ

本章では強度分布の評価を行うため、腐朽材の圧縮強度と引張強度の分布について評価を行った。その結果、圧縮強度は腐朽材の密度と関係がみられ、密度分布から強度分布を評価することが可能であることがわかった。一方引張強度については密度と強度の関係は見られなかったものの、強度分布は密度分布と同様に培地側から低下しており、腐朽期間が長引くに従って引張強度は低下していた。

## 第4章 腐朽進行のモデル化

### 4.1 はじめに

この章ではこれまでの結果を踏まえて密度変化に着目した腐朽進行モデルの構築を試みた。また、その結果得られたモデルを使用して強度変化シミュレーションも実行し、強度分布との関係を調べることでその妥当性についても評価した。

### 4.2 密度分布変化のモデル化

下に今回の腐朽モデルの模式図を示す。

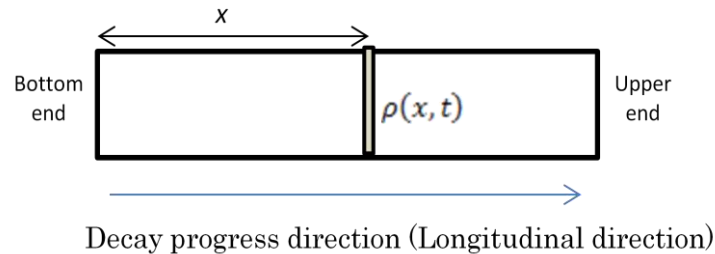


Fig. 4-1 今回の腐朽モデルの模式図

本シミュレーションにおいて試験体の長さは有限であり、試験体の両端のうち片方から腐朽菌が侵入する。両端のもう一方については外気に接していることとした。

本シミュレーションでは、腐朽進行を密度 $\rho(x, t)$ の変化としてとらえることとした。次に示すように、初期密度は $\rho_0$ で一定とした。

$$\rho(x, t = 0) = \rho_0 \quad \text{Eq. 4-1}$$

ここで $x$ は培地からの距離、 $t$ は腐朽期間(週)である。

実際にどの程度腐朽が進行したかは、初期密度の影響を取り除くため、下式で定義される密度の残存率 $R$ によって評価することにした。

$$R(x, t) = \frac{\rho(x, t)}{\rho_0} \quad \text{Eq. 4-2}$$

また、この残存率の減少速度 $\frac{\partial R(x, t)}{\partial t}$ を今後腐朽速度と定義する。

ある培地からの距離  $x$  における残存率の経時変化は Fig. 4-2 のように模式化できる。腐朽開始前の段階 Pre-decay phase においては腐朽菌による影響は何ら存在せず、残存率は一定となる。腐朽開始後のある一定期間については腐朽菌が活動を開始したばかりであるので腐朽速度は低めであり、時間がたつにつれて上昇していくと考えられる。この期間を Decay phase I とし、この期間の長さを  $T$  とする。次の段階 Decay phase II は腐朽が安定して進行する段階である。腐朽が一定値  $R_a$  を下回ると Decay phase III となる。この段階では分解可能な物質の割合が減少するため、残存率は減少速度を減じながらある一定値  $R_{low}$  に近づいていく。以上より Decay phase における腐朽速度は以下のようにまとめられる。

$$\frac{\partial R(x, t)}{\partial t} = \begin{cases} a \frac{t - T_0}{T} & \text{[phase I]} \\ a & \text{[phase II]} \\ a \frac{R - R_{low}}{R_a - R_{low}} & \text{[phase III]} \end{cases} \quad \text{Eq. 4-3}$$

$a$  は腐朽菌の種類や樹種によって決まる腐朽速度の係数で、木材内の温度や含水率などによって変化する値である。

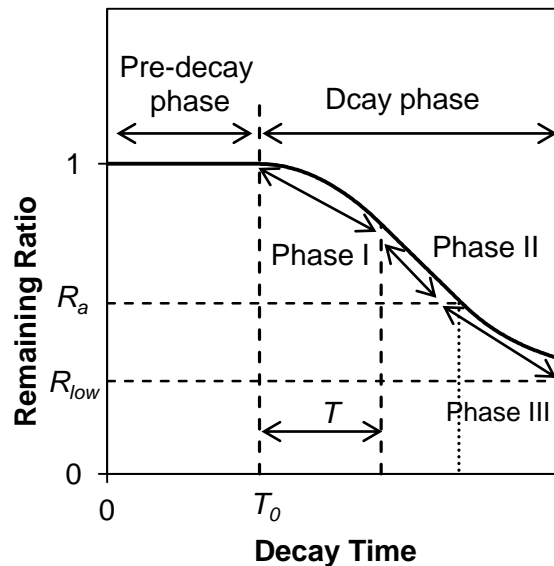


Fig. 4-2 ある地点での腐朽進行のモデル化

次に、腐朽速度の定数  $a$  への含水率の影響について考える。含水率  $u(x, t)$  は木材の密度



$\rho(x, t)$ と水分密度 $W(x, t)$ から下式によって求められることができる。

$$u(x, t) = 100 \cdot \frac{W(x, t)}{\rho(x, t)} \quad \text{Eq. 4-4}$$

含水率が繊維飽和点以下では腐朽は進行せず、また飽水状態でも腐朽は進行しない<sup>45-46)</sup>。

そこで、本研究では Fig. 4-3 のように腐朽速度を決めた。含水率が低い場合には腐朽速度が 0 であり、ある含水率を上回ると腐朽速度は含水率に比例して上昇する。含水率が腐朽に最も適した含水率  $u_{opt}$  に到達すると、それ以上に含水率が上昇すると腐朽速度が低下し、含水率が飽水状態を示す  $u_{opt}$  になった時に腐朽速度がゼロになる。以上をまとめたものが下式となる。

$$a = \begin{cases} 0 & [u(\rho) < u_{FSP}] \\ (b - c) \frac{u(\rho) - u_{FSP}}{u_{opt}(\rho) - u_{FSP}} + c & [u_{opt}(\rho) > u(\rho)] \\ b \frac{u_{max}(\rho) - u(\rho)}{u_{max}(\rho) - u_{best}(\rho)} & [u(\rho) > u_{opt}(\rho)] \end{cases} \quad \text{Eq. 4-5}$$

$b$  は腐朽速度の最大値、 $c$  は繊維飽和点時の腐朽速度。

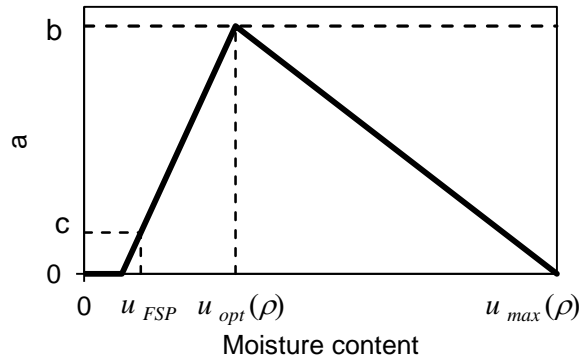


Fig. 4-3 含水率と腐朽速度の関係

$u_{FSP}$  については腐朽進行に関わらず 30% で一定とした。 $u_{max}$  については下式のように密度によって決まるため、腐朽進行に伴って密度が減少すると  $u_{max}$  は上昇する。

$$u_{opt}(\rho) = 100 \frac{(1 - \rho(x, t)/1.5)}{\rho(x, t)} + u_{FSP} \quad \text{Eq. 4-6}$$

$u_{opt}$  は、菌種や樹種によって異なるが、腐朽開始時の含水率が 80-100% の時に腐朽速度が最

大となる。 $u_{opt}$ を決める要因としては絶対的な水分密度や空気の占める割合も大きな影響を与えると考えられるので、 $u_{opt}$ は腐朽進行に伴って変化することが望ましい。そこで本研究では $u_{opt}$ となる時の空隙に占める水分の割合  $d$ を決め、その値から  $u_{opt}$ を求めることとした。

$$u_{opt}(\rho) = 100 \cdot d \frac{(1 - \rho(x, t)/1.5)}{\rho(x, t)} + u_{FSP} \quad \text{Eq. 4-7}$$

このシミュレーションにおける水分移動は、後述する初期条件より自由水の移動のみを扱う。水分移動量は、水分量の差に比例して水分移動が生じるものとした。

$$\frac{\partial W(x, t)}{\partial t} = e \frac{\partial^2 W(x, t)}{\partial x^2} \quad \text{Eq. 4-8}$$

初期条件としては、試験体全域において含水率が繊維飽和点であるとする。これは培養瓶内の相対湿度は 100%RH と考えられるために設定した。

境界条件は試験体の両端に設定する。試験体上端の境界条件については、外気の相対湿度が 100%RH と考えられるので、外気との水分移動量がゼロであると設定した。試験体下端については培地と試験体の接触の仕方によって条件が変わるので試験条件によって決定することとした。

$$\frac{\partial W(x = l, t)}{\partial x} = 0 \quad \text{Eq. 4-9}$$

以上のモデルを実施するにあたって求めなければならないパラメータは Table 4-1 に示す通りであり、その設定方法を以下に示す。 $e$ については同じ樹種を用いた吸水試験の結果から求めた。 $\rho$ については後述した腐朽試験の試験体条件から設定し、 $R_{low}$ については用いた腐朽菌の種類と樹種から決定した。境界条件は腐朽試験の条件より決定した。 $T_{start}(x)$ ,  $b$ ,  $c$ は別に実験を行うことが困難であるので、腐朽試験から得られた残存率分布から推定することとした。このうち  $b$ ,  $c$ については残存率分布から求まる 1 週間当たりの腐朽速度の分布から推定した。 $R_a$ ,  $T$ については実際の腐朽では条件が動的に変化するので推定が困難であるので、仮に  $R_a=0.7$ ,  $T=1$  と置くこととした。

Table 4-1 シミュレーションのパラメータのリスト

Parameter	Brown-rot fungus			White-rot fungus	
	b-1	b-2	b-3	w-1	w-2
$\rho_0$ (kg/m <sup>3</sup> )	370	370	370	370	370
$R_a$	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7
$R_{low}$	0.3	0.3	0.3	0	0
$T$ (week)	1	1	1	1	1
$b$	0.12	0.12	0.15	0.05	0.05
$c$	0.01	0.01	0.0125	0.005	0.005
$d$	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25
$e$ (mm <sup>2</sup> /s)	240	10	40	240	40

※b-3 についてはこの条件に加えて培地に接する部分の水分量の増加量の最大値を 10 g/m<sup>3</sup> week とした。

#### 4.3 パラメータの設定

##### 4.3.1 腐朽試験結果からのシミュレーションのパラメータ設定

腐朽速度の最大値と最小値に関するパラメータである  $b, c$  を求めるために、培地からの距離ごとの腐朽速度分布(Fig. 2-18, Fig. 2-19) から最大値、最小値の分布を求めた (Fig. 4-4) 。褐色腐朽菌の場合は、培地近傍において 3 週間後から 5 週間後の間に腐朽速度が 0.12 となり、これが最大値と考えられる。また、最小値については、培地近傍の腐朽後期における腐朽速度がほぼ 0 となっているが、これは腐朽が激しく進行して分解する対象がなくなったためである。これを除くと試験体上部において 0.1~0.2 を示しているのが腐朽速度の最小値と考えられる。この値の最大値と最小値から、腐朽速度の最大値を表す  $b$  を 0.12、繊維飽和点時の腐朽速度にあたる  $c$  を 0.015 と設定した。

白色腐朽菌の場合、腐朽期間が長くなるにつれて腐朽速度のピークが試験体の下部から上

部へと移動している様子がうかがえる。その中で、腐朽速度の最大値は試験体の中央部分で 15 週間から 18 週間にかけて 0.06 を超える値を示している。しかし直前の 12 週間から 15 週間にかけての腐朽速度が 0.01 以下と非常に低くなっており、この値は試験体ごとのばらつきによって過大な値となっている。そこで、実際の腐朽速度の最大値を表す  $b$  はこの値よりも小さな 0.05 とした。繊維飽和点時の腐朽速度にあたる  $c$  については、腐朽初期の腐朽速度が 0.01 を下回っていることから 0.005 とした。

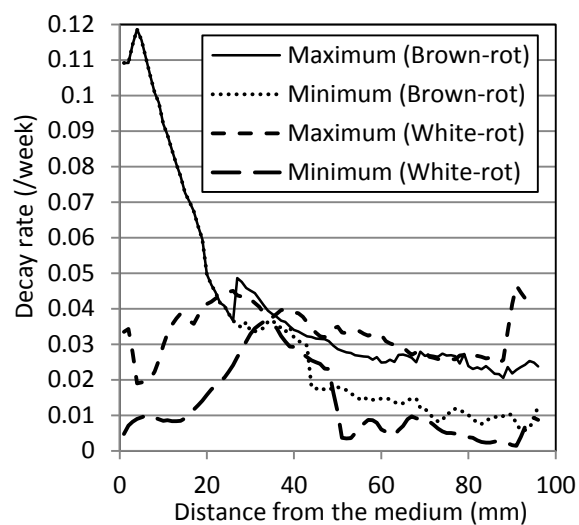


Fig. 4-4 腐朽速度の分布

腐朽開始時刻  $T_0(x)$  は、以下のように求めることとした。Fig. 4-5 に示すように 3 週間後の残存率の平均と 5 週間後の残存率の平均を結んだ直線と残存率 = 1 の直線の交点を  $T_c$  とする。この  $T_c$  から Phase I における腐朽速度減少の影響を考慮するため 1 週間を減じて  $T_0$  とした。

$$T_0 = T_c - 1 \quad \text{Eq. 4-10}$$

求めた  $T_c$  の分布を Fig. 4-6 に示す。褐色腐朽菌の腐朽条件では、培地近傍を除くと培地から遠ざかるにつれて腐朽開始時刻が遅くなっていることがわかる。一方、白色腐朽菌の場合は試験体上端については褐色腐朽菌と同様の傾向がみられるが、ほとんどの領域においてはおよそ 1 週間となっている。以上をまとめると腐朽開始時刻は以下の通りとなる。

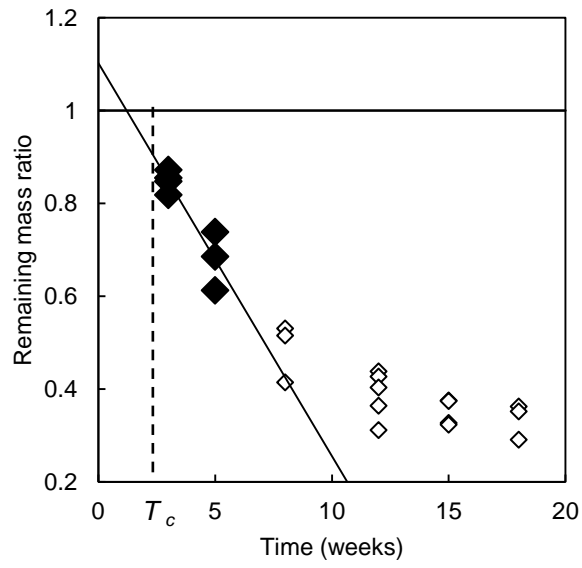


Fig. 4-5  $T_c$  の算出方法 (◆ : 算出に使用したデータ、◇ : 算出に使用しないデータ)

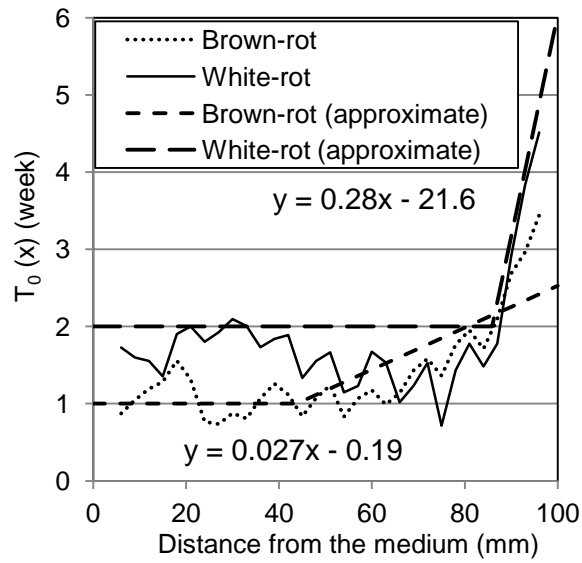


Fig. 4-6  $T_c$  の分布

$$T_c = \begin{cases} 0.027x - 0.19 & [\text{brown} - \text{rot fungus}] \\ 0.28x - 21.6 & [\text{white} - \text{rot fungus}] \end{cases} \quad \text{Eq. 4-11}$$

腐朽試験の条件から求める試験体下端の境界条件は、白色腐朽菌の場合は試験時に試験体と培地が接していて直接腐朽が生じるため、試験体下端の含水率を  $u_{\max}$  とした。

$$u(0, t) = u_{\max} \quad \text{Eq. 4-12}$$

褐色腐朽菌の場合は試験体と培地の間に菌糸が介在しているので、腐朽菌による影響を考慮し試験体下端の含水率が  $u_{\text{opt}}$  となるようにした。

$$u(0, t) = u_{\text{opt}} \quad \text{Eq. 4-13}$$

### 4.3.2 水分移動係数決定のための吸水試験

#### 4.3.2.1 実験方法

水分移動に関する係数  $e$  を推定するため、吸水試験をおこなった。試験体の寸法は  $20 \times 20 \times 20$  mm で、強制腐朽試験と同じスプールの辺材を用いた。試験体は木口面を下にして水に 1mm 沈め、4~71 時間後の重量を測定した。吸水試験後に  $105^\circ\text{C}$  1 日間の条件で全乾後、全乾重量との差から吸水量を求めた。また水分移動に関する係数  $e$  を決定するため、Eq. 4-9 と Eq. 4-12 の初期条件を用い、Eq. 4-8 に従って吸水シミュレーションを行った。

#### 4.3.2.2 結果

吸水試験の結果と、 $e = 240$  として行った吸水シミュレーションの結果を Fig. 4-7 に示す。これを見ると両者はよく一致しているといえる。そのため、まず水分移動に関する係数  $e$  を 240 としてシミュレーションを実行することとした。

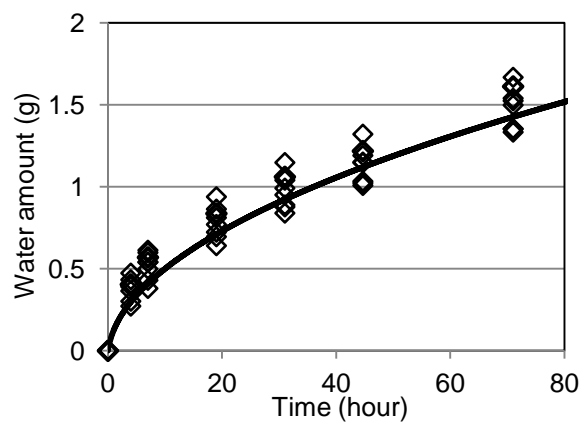


Fig. 4-7 吸水試験の結果と吸水シミュレーション結果

#### 4.4 結果と考察

##### 4.4.1 白色腐朽菌を用いたシミュレーション結果の検討

まず、白色腐朽を用いた腐朽試験について上述した条件で行ったシミュレーション(w-1)について述べる。試験体全体の残存率の経時変化を Fig. 4-8 の実線部分に示す。これを見ると、腐朽期間が 12 週間を超えた部分で実際の残存率が低下しているのに対してシミュレーションによる残存率の低下速度が遅くなっていて一致していない。Fig. 4-9 に含水率の経時変化を示すが、含水率についても、腐朽期間が 5 週間で 200% 近くまで上がるほど早く上昇しており、実際の実験結果とは異なっていた。

この原因として、Fig. 4-10 に示すようにシミュレーションから得られた試験体全体の水分量が実測値を大きく上回っていることが挙げられる。この原因としては浸透係数  $e$  が過大であったことが考えられる。このシミュレーションでは浸透係数  $e$  に吸水試験の結果を用いているが、実際には培地と試験体の間に腐朽菌が介在しており、腐朽菌の存在が浸透係数に影響を与えた可能性がある。

そこで、浸透係数  $e$  を  $40\text{mm}^2/\text{s}$  としたシミュレーションを w-2 として実施した。Fig. 4-8 の点線部分に残存率の変化を示すが、この場合の残存率は 12 週間まで完全に一致しており、15 週間と 18 週間についてはシミュレーションから求めた残存率が実測値を若干下回っていることがわかる。また、シミュレーションで得られた試験体の含水率について Fig. 4-9 の実線部分に示すが、これについても実際の含水率の変化をよく表わすことができている。また Fig. 4-10 に示す水分量に示すが、水分量についても実験結果とよく一致していた。

この両者の残存率分布の経時変化を Fig. 4-11, Fig. 4-12 に示す。これを見ると w-1 の結果では全体的に腐朽が進行していない一方で、w-2 の結果では実験結果でみられた培地から 20–40mm 離れた部分で最も腐朽が進行していることも表せており、w-2 のシミュレーション結果は実験結果と良く一致していることがわかる。ただし、15、18 週間後の結果で見られる試験体上端における腐朽進行の低減の影響はシミュレーションでは評価できていな

い。これがシミュレーションから得た試験体重量が 15 週間後と 18 週間後において実測値を下回った原因の一つと考えられる。

以上より、白色腐朽菌の試験条件については吸水による水分分布から求めた腐朽シミュレーションによって評価することが可能であることがわかった。

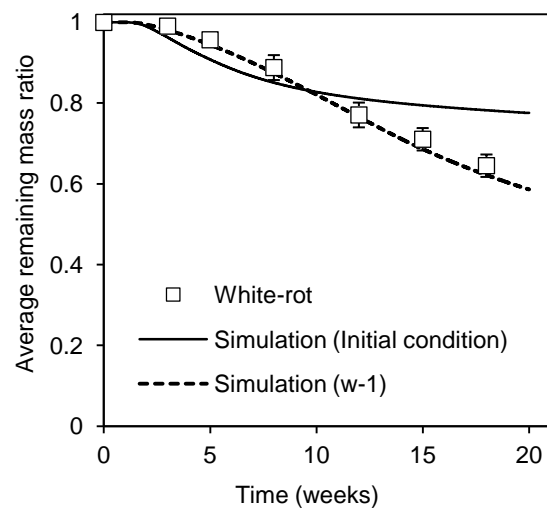


Fig. 4-8 白色腐朽菌の残存率とシミュレーション結果

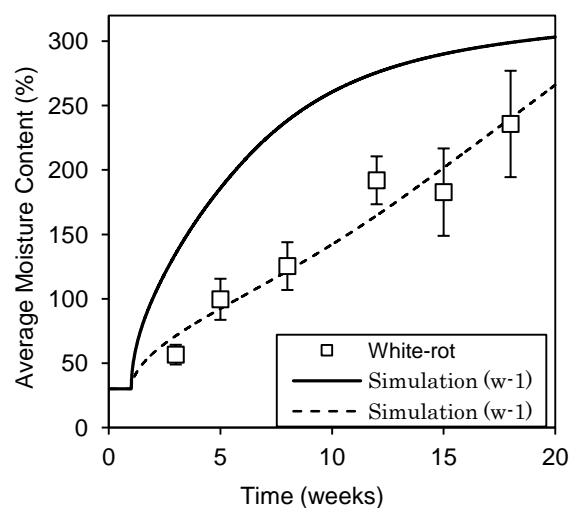


Fig. 4-9 白色腐朽菌の含水率経過



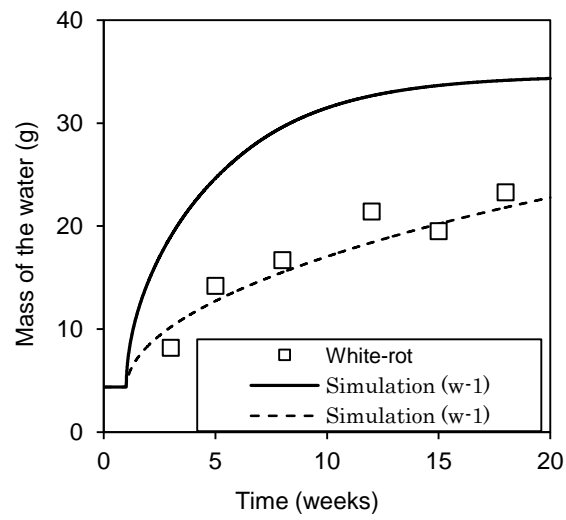


Fig. 4-10 水分量の経時変化

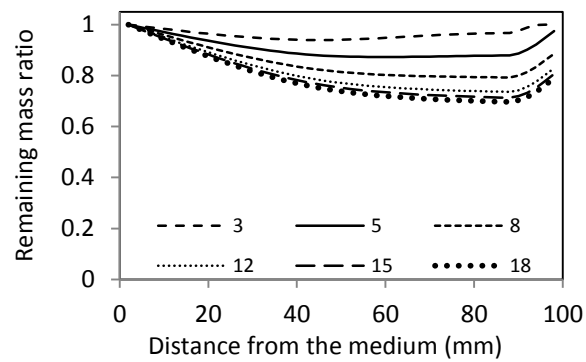


Fig. 4-11 シミュレーション結果(w-1)

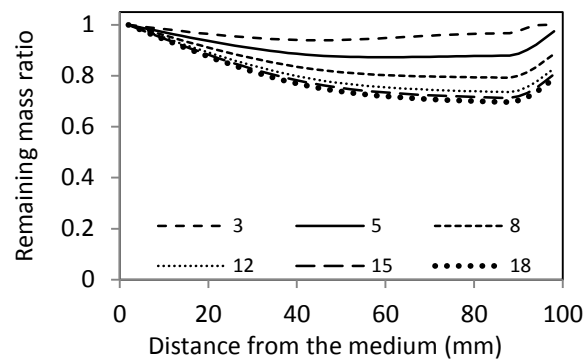


Fig. 4-12 シミュレーション結果(w-2)

#### 4.4.2 褐色腐朽菌を用いたシミュレーション結果の検討

褐色腐朽菌の場合の吸水試験の結果を用いたシミュレーション(b-1)の結果から得られた試験体の残存率の経時変化を Fig. 4-13 に示す。これを見ると腐朽期間が長くなるにつれてシミュレーションによる重量減少が実際の重量減少より大きくなっており、両者があまり一致していないことがわかる。Fig. 4-14 に含水率の経時変化を示すが、含水率に関しては実際の値の2倍以上とまったく実験結果と合致しておらず、Fig. 4-15 に示すように水分量も実際の結果を大きく上回っている。これらの結果より、白色腐朽菌の場合から境界条件を変えたにもかかわらずあまりシミュレーションが機能していない。褐色腐朽菌の条件では基本的に含水率が  $u_{opt}$  を上回らないので、水分量が実測値を上回るということは腐朽速度が実際の値よりも早くなるということを意味する。そのため、この不一致の原因は白色腐朽菌の場合(w-1)と同様に、試験体全体の水分量が実測値を大きく上回っていることであると考えられる。

そのため、水分移動に関する係数  $e$  を  $10\text{mm}^2/\text{s}$  として改めてシミュレーションを試みた(b-2)。この結果を見ると、試験体重量、含水率ともに実測値に非常に近い値となっていることがわかる。水分量についても b-1 に比べると実測値に近づいたが、このシミュレーションでは腐朽初期に水分量が急激に増えているのに対して実際には腐朽初期にはそこまで水分量は増加していない。今回の境界条件では培地からの水の供給は試験体下端の含水率が  $u_{opt}$  になるように無制限に行われる。しかし菌糸による水の供給速度には上限があると考えると、シミュレーションにおける培地からの供給速度がこの上限を超えていた場合はシミュレーション結果の水分量が過大なものとなる。

この影響を考察するため、培地からの水分供給速度の最大値を設定した場合のシミュレーション( $10\text{g}/\text{m}^3$ ) (b-3) を試みた。ただし、この場合は木材内の水分量が少なくなる補正を多く受けており、腐朽初期の腐朽速度が遅くなってしまう傾向がみられたので、腐朽速度を少し速くする補正も施したうえでシミュレーションを行った。この結果を見ると、試験

体重量、含水率ともに b-2 と同様に実測値に近くなっている。それに加え、水分量については b-2 の場合と異なり腐朽開始後は余り増加せず、時間がたつにつれて増加しており実測値とよく一致していた。

シミュレーションから得られた残存率分布の経時変化については Fig. 4-16, Fig. 4-17, Fig. 4-18 に示す。b-2 と b-3 については試験体全体の残存率は同じぐらいであったが、残存率分布としてみると両者の間には違いがみられる。b-2 は腐朽初期においても培地近傍の残存率は急激に低下しており、試験体の中央部分の残存率は培地近傍の残存率に比べて高くなっていた。これは実際の残存率分布の経時変化とよく一致している。それに対して b-3 は腐朽初期の培地近傍の残存率減少は見られず、腐朽が進行した後の試験体中央部分の残存率は培地近傍の残存率とほぼ同じであるなど、実際の残存率分布とは若干異なっている。

以上より、木材内の腐朽菌による水分輸送と菌糸による培地からの水分移動の制限の双方を考慮することで褐色腐朽菌の試験条件の場合の水分量の変化をシミュレーションで表わせることがわかった。

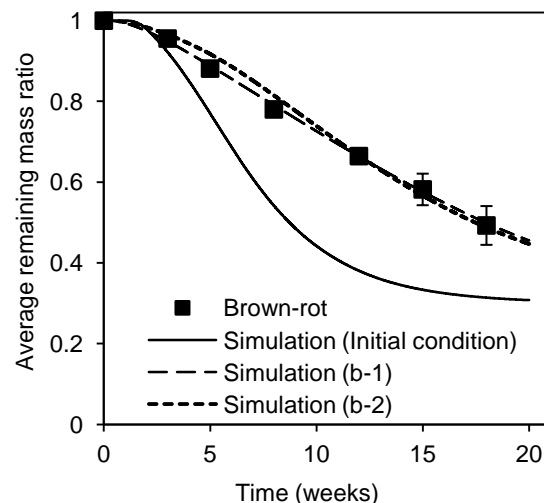


Fig. 4-13 残存率の経時変化 (褐色腐朽)

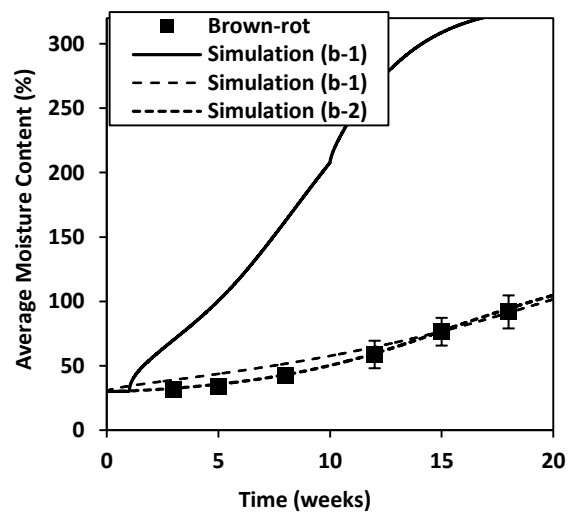


Fig. 4-14 含水率の経時変化 (褐色腐朽)

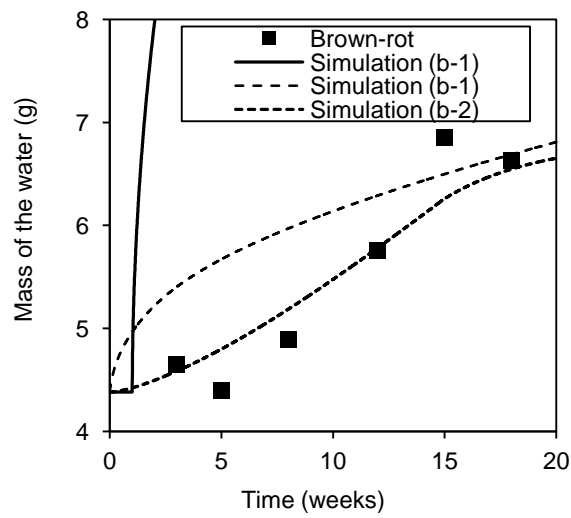


Fig. 4-15 吸水量の経時変化 (褐色腐朽)

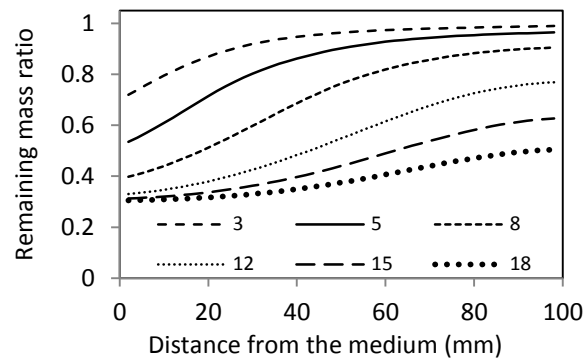


Fig. 4-16 シミュレーション結果 (b-1)

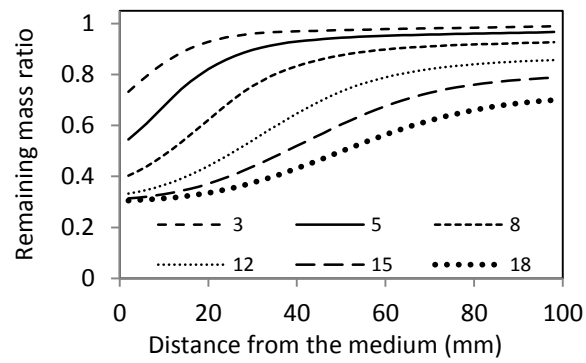


Fig. 4-17 シミュレーション結果 (b-2)

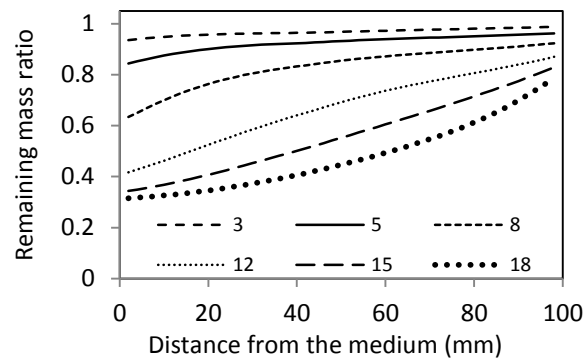


Fig. 4-18 シミュレーション結果 (b-3)

#### 4.4.3 シミュレーションによる圧縮強度評価

シミュレーションから得られた残存率分布に初期密度をかけて密度分布とし、その密度分布に第 3 章で求めた密度と強度の関係を適用して圧縮強度分布を求めた。シミュレーション結果には、密度分布を比較的よく表すことができていた w-2, b-2, b-3 を用い、初期密度を  $0.37\text{g/cm}^3$  とした場合の圧縮強度分布の経時変化を Fig. 4-19, Fig. 4-20, Fig. 4-21 に示す。

まず白色腐朽菌について 8 週間後の結果とシミュレーション結果を比較したものを Fig. 4-23 に示す。実際の強度分布は培地から少し離れた部分の強度が低くなっている。この結果はシミュレーション結果と一致する。また、全ての実験結果についてシミュレーションとの比較を試みた。これを見ると実測値とシミュレーション結果の両者の間には直線関係がみられる。また褐色腐朽菌についてもいえることであるが、実測値の方がシミュレーション結果よりも大きな値を示している。これは圧縮試験時の試験体の寸法が異なるためだと考えられる。以上より白色腐朽菌の条件に関しては腐朽菌による水分移動を考慮することで圧縮強度を評価できることがわかった。

次に褐色腐朽菌について 5 週間後の結果とシミュレーション結果を比較したものを Fig. 4-22 に示す。この場合、培地近傍の強度が激しく低下していることがわかる。このことは培地からの吸水量に与える腐朽菌の影響を考慮した場合のシミュレーション(b-3)の場合は表現されていない。また、全ての実験結果についてシミュレーションとの比較を試みたが、強度が低下している部分でのシミュレーション結果のばらつきが非常に大きくなっている。一方、木材内の腐朽菌の水分輸送のみを考慮した場合のシミュレーション(b-2)の場合は培地近傍の強度低下が表現されている。全ての結果による比較についても両者の間に明確な直線関係がみられ、(b-3)よりも明らかに圧縮強度を評価することができている。

以上の結果より、褐色腐朽菌の条件では実際の吸水量に合うように調整したシミュレーション結果よりも単純に拡散の式を用いた式の方が良い結果を示した。この結果は、水分移動を腐朽進行の決定要因とした腐朽シミュレーションよりも良いシミュレーションが存

在することを意味する。このシミュレーションの腐朽進行の決定因子としては、培地中に存在する拡散方程式が適用可能な栄養分 (N 等) が考えられる。一方白色腐朽菌の条件では実際の吸水量と密度分布、強度分布がきちんと評価できていた。そのため、高含水率領域においては水が腐朽進行の決定因子となっていたと考えられる。

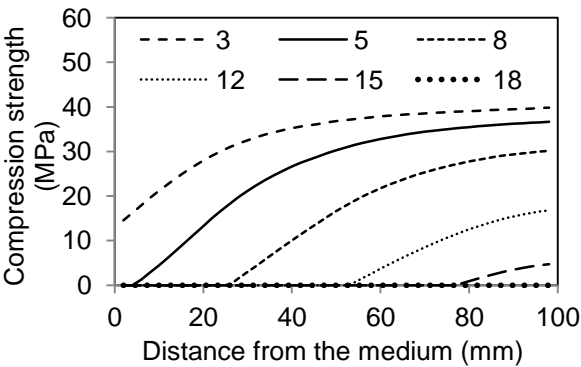


Fig. 4-19 シミュレーションから求めた圧縮強度分布 (b-2)

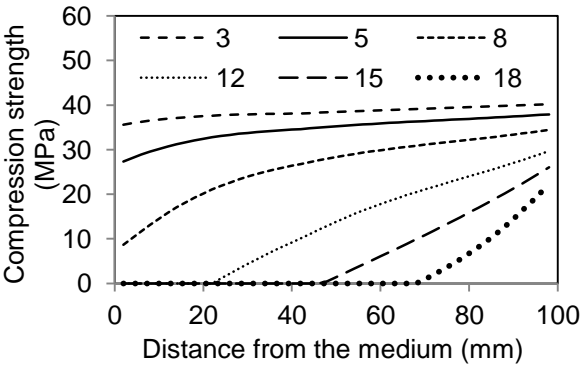


Fig. 4-20 シミュレーションから求めた圧縮強度分布 (b-3)

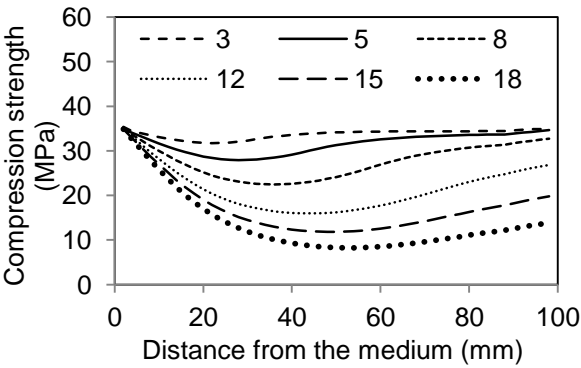


Fig. 4-21 シミュレーションから求めた圧縮強度分布 (w-2)

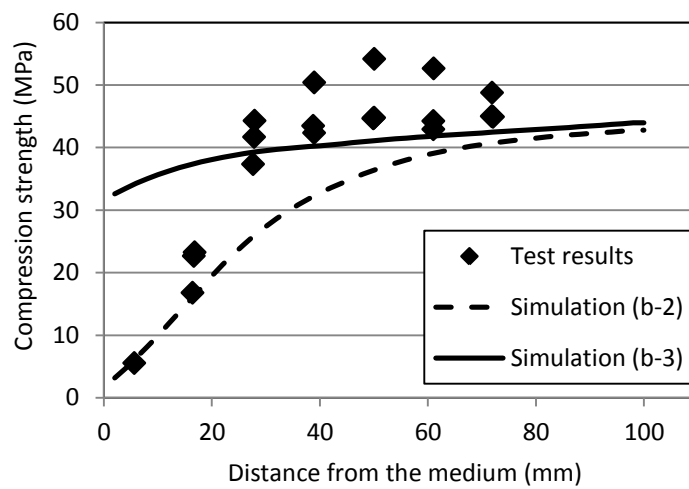


Fig. 4-22 褐色色腐朽菌のシミュレーション結果から求めた圧縮強度と実測値の関係

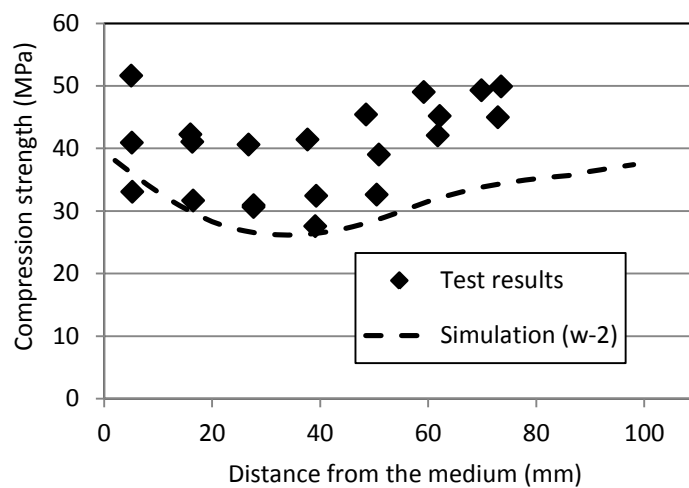


Fig. 4-23 白色腐朽菌のシミュレーション結果から求めた圧縮強度と実測値の関係



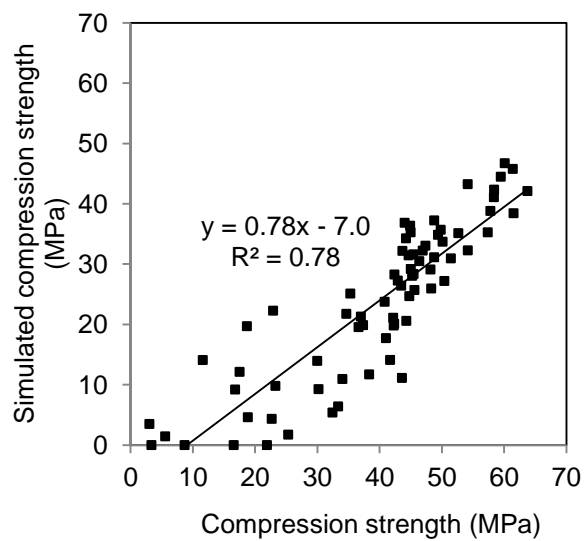


Fig. 4-24 シミュレーション結果と圧縮強度の関係 (b-2)

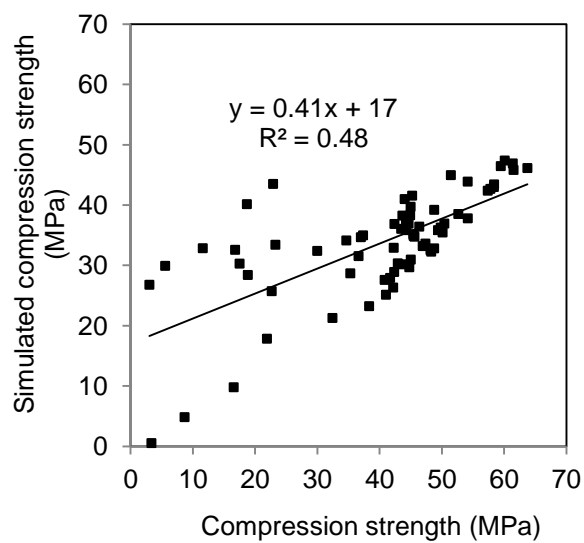


Fig. 4-25 シミュレーション結果と圧縮強度の関係 (b-3)

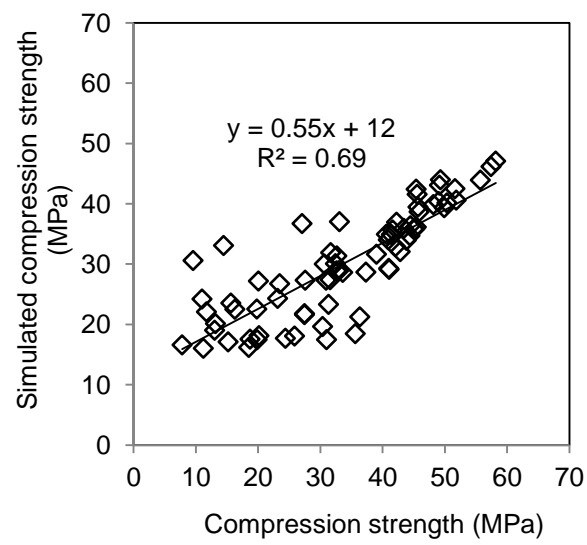


Fig. 4-26 シミュレーション結果と圧縮強度の関係 (w-2)

#### 4.5 まとめ

本章では密度についての腐朽進行モデルを構築し、その妥当性について腐朽試験の結果を用いて評価した。その結果、培地と木材間の水分移動に腐朽菌の影響を考慮することで密度分布の経時変化をよく表すことができた。ただ褐色腐朽菌の腐朽条件の場合、密度分布と強度分布を最もよくあらわすことのできたシミュレーション結果と水分条件を最もよく表すことのできたシミュレーション結果が異なっており、水以外の要素を考慮する必要があることもわかった。

## 第5章 腐朽進行の異方性に関する研究

### 5.1 はじめに

この章では、第4章で構築した繊維方向への腐朽進行モデルをほかの方向へも拡張するために腐朽進行の異方性についての研究を行った。

### 5.2 実験方法

試験体は、スプルースのフリッチの心材部から L 方向試験体は 100(L)×20(R)×20(T)mm、R 方向試験体は 20 (L)×100(R)×20(T)mm, T 方向試験体は 20(L)×20(R)×80(T)mm の無欠点試験体をそれぞれ 72 体ずつ(T 方向は 66 体)切り出した。T 方向試験体の T 方向の寸法であるが、割れの影響で 100mm 取ろうとすると必要数の試験体を取ることができなかったので 80mm とした。

Table 5-1 腐朽試験体の試験体の条件

Decay progress direction	Fungi invasion plane	Specimen size (mm)	Oven dried density (g/cm <sup>3</sup> )	Sample number (n)
Longitudinal	RT	20 × 20 × 100(L)	0.46 ~ 0.56	72
Radial	LT	20 × 20 × 100(R)	0.45 ~ 0.51	72
Tangential	LR	20 × 20 × 100(T)	0.45 ~ 0.48	66

各試験体の寸法測定後、60℃2 日間の条件で乾燥処理後、乾燥重量を測定した。その後実験室に放置し気乾状態に達した後に気乾重量を測定し、エポキシ樹脂を 20×20mm の面以外の 4 面(L 方向試験体では木口面以外、R 方向試験体では板目面以外、T 方向試験体では柃目面以外)に塗布(Fig. 5-1)し、硬化後重量を測定した。塗布したエポキシ樹脂の量は両者の差をとって求めた。

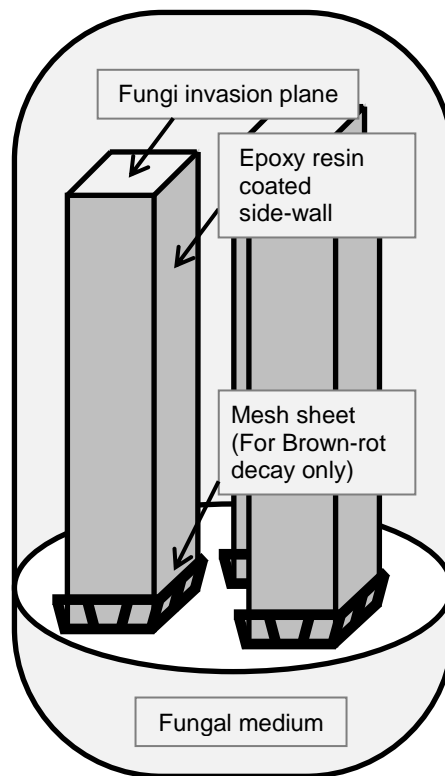


Fig. 5-1 腐朽試験の模式図

その後、後述する方法で X 線 CT 画像を各培養瓶につき 1 体ずつ撮影後、森林総合研究所にて滅菌処理（オートクレーブ処理とエチレンオキサイドガス処理）をおこなった。

1%麦芽抽出物と 0.5%ペプトンを含む溶液 200ml と寒天 4g を 850ml 容の培養瓶に入れ、121℃30 分の条件でオートクレーブ処理を行った後、自然冷却によって寒天が固めたものを腐朽菌の培地とした。本実験で使用した腐朽菌は第 2 章と同様の 2 種類である。

- ・ オオウズラタケ(褐色腐朽菌) *Fomitopsis palustris* (Berk.et Curt.) Gilbn.et Ryv. FFPRI 0507
- ・ カワラタケ(白色腐朽菌) *Trametes versicolor* (L.:Fr.)Pilat FFPRI 1030

これらの腐朽菌はあらかじめ培地作製の 1 週間前に PDA 培地上で培養を行い、その培地をコルクボーラーで打ち抜いて培養瓶中の寒天培地植え付けた。その後蓋をして恒温恒湿室(26℃70%RH)に 1 週間放置して菌糸を培地に充満させた。

その後、試験体を培養瓶 1 本に 2、3 体の割合で 20×20mm の面が培地に接するように入れた。その際、褐色腐朽菌の場合は Fig. 5-1 に示すように試験体と培地の間にプラスチック

製のメッシュシートを挟んだ。その後培養瓶の蓋をして Table 5-2 にしめした期間恒温恒湿室(26°C±2°C)に放置した。

Table 5-2 腐朽試験体の試験体の条件

Decay progress direction	Decay period (weeks)
Longitudinal	3,6,9,12,15,18
Radial and Tangential	4,8,12,16,20,24

所定の腐朽期間が経過後、培養瓶から試験体を取りだし菌糸などを取り除いて乾燥前の CT 画像撮影を行い、60°C2 日間の条件で乾燥処理を行った。全乾重量を測定後実験室に放置し、気乾状態に達した後に全試験体の X 線 CT 画像を撮影した。

### 5.3 結果と考察

#### 5.3.1 重量減少率の異方性

Fig. 5-2 に褐色腐朽菌の場合の重量減少率を示す。褐色腐朽菌の場合、繊維方向腐朽の場合、腐朽期間が長くなるにつれて重量減少が進行していたことがわかる。接線方向、放射方向への腐朽の場合は腐朽が進行していた試験体とそうでない試験体で差が大きかった。放射方向の腐朽試験の場合、あまり重量が減少せず腐朽が進行しなかった試験体では晩材部分で腐朽進行が停止していた。接線方向と放射方向への腐朽試験において、腐朽がよく進行していた試験体の場合は、培地近傍が激しく割れていて割れの先端部分あたりまで腐朽が進行している様子であった。

Fig. 5-3 に白色腐朽菌の場合の重量減少率を示す。白色腐朽菌の場合、繊維方向への腐朽試験の場合は褐色腐朽菌の場合と同様に腐朽期間が長くなるにつれて重量減少が進行していた。腐朽速度は第 2 章の場合と同様に褐色腐朽菌よりも遅かった。白色腐朽菌の場合、繊維方向と放射方向への腐朽試験において腐朽が見られた試験体はほとんど存在しなかった。

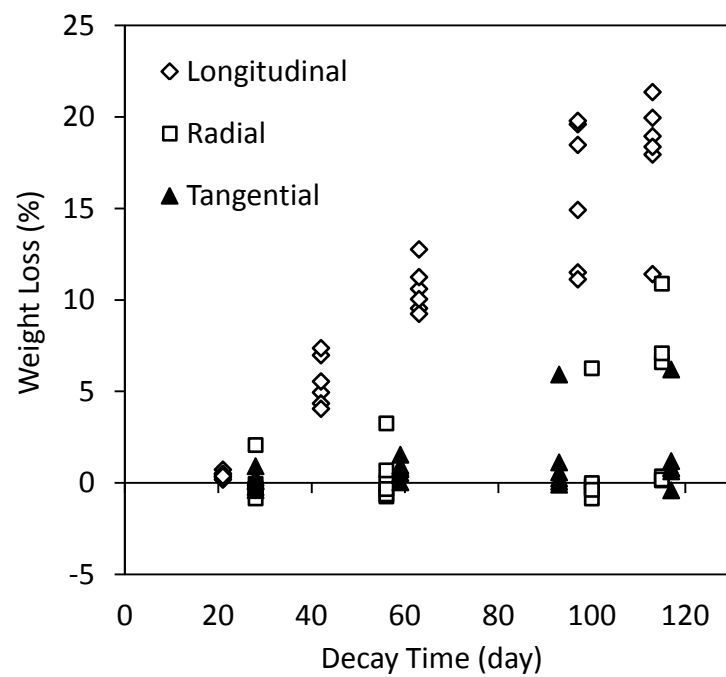


Fig. 5-2 褐色腐朽菌の場合の重量減少率

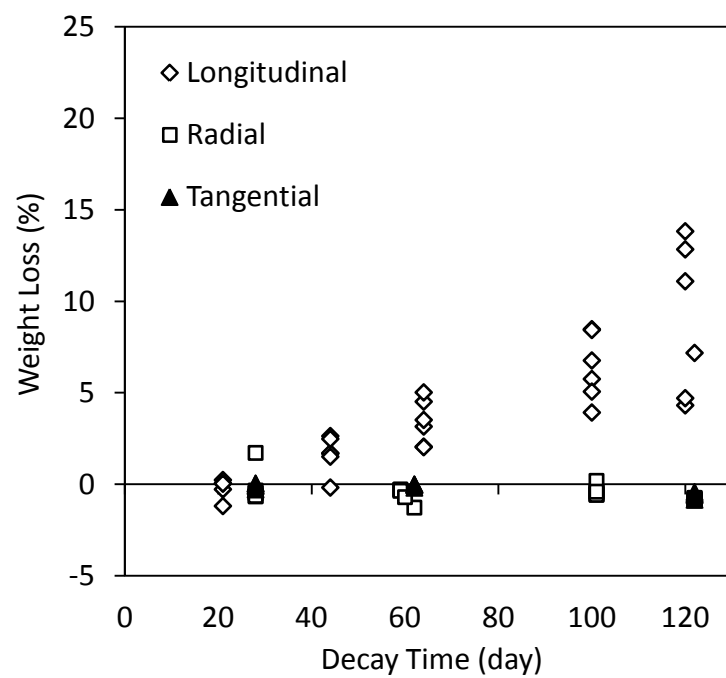


Fig. 5-3 白色腐朽菌の場合の重量減少率

## 5.4 X線 CT 画像作成方法

### 5.4.1 はじめに

第2章で扱ったX線デンシトメトリーでは、試料をある決まった角度から撮影し、透過量の多寡が画像の濃淡として表される透過画像から密度分布を求めた。この方法で求めた密度分布は、X線の照射方向における情報が平均化されている。試料がX線の照射方向に対して薄くこの方向に対しての密度分布が無視できる場合はこの手法で問題は無いが、第3章で述べた腐朽進行に伴う強度変化を考慮するためにはこの方向の分布についても評価をし、3次元密度分布で評価することが必要である。そこで本研究では3次元密度分布計測の手法としてX線CTに着目した。本章ではX線CTスキャナによる木材の密度分布計測のための問題点の解消を試みた。

### 5.4.2 CT スキャンの原理

CTにおいては、カメラ(あるいは試料)の位置を試料が中心になるように回転させながら画像を撮影することで、通常の透過画像撮影に比べて詳細なデータを得ることを可能とし、そのデータを再構成することで通常の透過画像で平均化されていた照射方向における情報を得ることを可能にしている。この項ではその再構成の原理を以下に示す。

試料のX線透過率を以下のように表わす。

$$f = f(x, y) \quad \text{Eq. 5-1}$$

上の式はFourierの反転公式  $f = \mathcal{F}_{\xi, \eta}^{-1}(\mathcal{F}_{\xi, \eta}(f))$  より、

$$f(x, y) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \mathcal{F}_{x, y}(f)(\xi, \eta) e^{i(x\xi + y\eta)} d\xi d\eta \quad \text{Eq. 5-2}$$

が成り立つ。ここで2変数のFourier変換  $\mathcal{F}f$  と逆Fourier変換  $\mathcal{F}^{-1}f$  は以下に示すとおりである。

$$\mathcal{F}f(\xi, \eta) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} dy \int_{-\infty}^{\infty} f(x, y) e^{-i(x\xi + y\eta)} dx \quad \text{Eq. 5-3}$$

$$\mathcal{F}^{-1}f(x, y) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} d\eta \int_{-\infty}^{\infty} f(\xi, \eta) e^{i(x\xi + y\eta)} d\xi \quad \text{Eq. 5-4}$$



ここで、CT の撮影方法を考慮して 5-2 式の極座標変換を  $d\xi d\eta = r dr d\theta$  より実行すると、

$$\begin{cases} \xi = r \cos \theta \\ \eta = r \sin \theta \end{cases} (r \geq 0, 0 \leq \theta < 2\pi) \quad \text{Eq. 5-5}$$

$$\begin{aligned} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \mathcal{F}_{x,y}(f)(\xi, \eta) e^{i(x\xi + y\eta)} d\xi d\eta \\ = \int_0^{2\pi} d\theta \int_0^{\infty} \mathcal{F}_{x,y}(f)(r \cos \theta, r \sin \theta) e^{ir(x \cos \theta \xi + y \sin \theta)} dr \end{aligned} \quad \text{Eq. 5-6}$$

より以下のようになる。

$$f(x, y) = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} d\theta \int_0^{\infty} \mathcal{F}_{x,y}(f)(r \cos \theta, r \sin \theta) e^{ir(x \cos \theta \xi + y \sin \theta)} dr \quad \text{Eq. 5-7}$$

実際の CT 画像撮影においては、この xy 座標を回転させた座標において撮影された画像がデータとして得られる。そのデータと  $\mathcal{F}_{\xi, \eta}(f)$  の関係について考えるために、xy 座標を反時計回りに  $\theta$  だけ回転させた uv 座標を考える。この時の座標変換は

$$\begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \theta & -\sin \theta \\ \sin \theta & \cos \theta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} u \\ v \end{pmatrix} \quad \text{Eq. 5-8}$$

で得られ、u 軸上に試料を投影したと考えると点  $(x, y) = (u \cos \theta, u \sin \theta)$  にて得られる投影データは

$$(Rf)(u, \theta) = \int_{-\infty}^{\infty} f(u \cos \theta - v \sin \theta, u \sin \theta + v \cos \theta) dv \quad \text{Eq. 5-9}$$

の右辺となる。これの左辺は試料の吸収率分布  $f(x, y)$  の Radon 変換と呼ばれる。

ここで、中央断面定理によりこの Radon 変換を Fourier 変換したものは、線減弱係数分布の 2 次元 Fourier 変換の内の直線の一つを表わしていることが知られており、全ての  $\theta$  に対して Radon 変換を求めることで 2 次元 Fourier 変換を求めることが理論的に可能である。

$$\mathcal{F}_u(Rf)(u, \theta) = \sqrt{2\pi} \mathcal{F}_{x,y}(f)(r \cos \theta, r \sin \theta) \quad \text{Eq. 5-10}$$

実際に X 線透過画像から  $f(x, y)$  を再構成する手法はいくつか存在する。その手法の一つに逆投影変換がある。これはある点  $(x, y)$  における  $f(x, y)$  を求める際に、全ての  $(x, y)$  を通る投影を足し合わせる、というものである。本実験で使用するソフトウェアで用いられる手法はフィルター補正逆投影法と呼ばれ、まず得られたデータの Fourier 変換に対して「フ

ィルターをかける」と呼ばれる操作を行い、その後得られたデータを半径  $r$  について逆 Fourier 変換する。こうして得られたデータを逆投影することで CT 画像が求められる。

(その他の手法としては中央断面定理を利用して透過データから分布の 2 次元 Fourier 変換を求め、これを逆 Fourier 変換する手法も考えられる)

$$Q(r, \theta) = |r| \mathcal{F}_u(Rf)(u, \theta) \quad \text{Eq. 5-11}$$

$$P(z, \theta) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} Q(r, \theta) e^{izr} dr \quad \text{Eq. 5-12}$$

$$BP(x, y) = \frac{1}{2\pi} \int_0^{\pi} P(x \cos \theta + y \sin \theta, \theta) d\theta \quad \text{Eq. 5-13}$$

今回の装置では X 線源は点光源であり、X 線はファンビーム(3 次元的にはコーンビーム)として照射されるため、Feldkamp 法と呼ばれる補正が行われている。実際には他にも X 線源が白色 X 線であることによる式 5-1 のずれの補正 (Beam Hardening の影響)等の様々な処理を加えることで CT 画像が求められている。

#### 5.4.3 X 線 CT 画像の作成手順

今回 X 線 CT 画像作成に用いた装置は、SKYSCAN1172 (SKYSCAN 社製) である。この装置は X 線源や透過 X 線強度検出器は固定されており、試料を回転させながら X 線透過画像を撮影する。試料はバルサ、スギ、ナラ、カシ、コクタンを用いた。寸法は  $20 \times 20 \times 30$  (L) (mm) で、木口面が下を向くようにして試料台に両面テープを用いて固定した。X 線透過画像の撮影条件は管電圧 50kV、管電流  $800\mu\text{A}$  とした。試験体を 1 度回転させるごとに撮影をし、試験体が 1 周したら撮影を終了した。つまり、一つの試験体につき 360 枚の透過画像が得られた。その後得られた透過画像から再構成ソフトを用いて CT 画像を再構成した。

#### 5.4.4 Beam Hardening の補正

Fig. 5-4 にアクリル製円柱の CT 画像を示す。左側は特に補正をかけなかった場合の CT 画像であるが、明らかに外周の輝度値が高く、中央部分の輝度値が低くなっていることがわかる。アクリル製円柱内の密度が外周と中心で極端に異なるとは考えられないため、この CT 画像では同じ密度の内側と外側で異なる CT 値が割り当てられていることになる。

この原因は X 線透過画像にあると考えられたため、X 線の透過質量と X 線透過強度の関係を調べることにした。まず Fig. 5-5 に示すようにアクリルの角柱を設置し、その X 線透過画像を撮影した (Fig. 5-6)。この時、X 線の透過質量は角柱の端からの距離  $x$  に比例する。また第 2 章で述べたように理論上透過 X 線強度の対数は透過質量に比例する。そこで、今回は X 線透過質量と透過 X 線強度の関係を、 $x$  と透過画像の輝度値の対数の関係から求めることにした。Fig. 5-7 に両者の関係を示す。これを見ると透過質量と透過 X 線強度の対数が直線関係になっておらず、透過質量が小さい場合の X 線吸収量が、透過質量が大きい場合と比べて比較的大きくなっていることがわかる。この現象は **Beam Hardening** (線質硬化) と呼ばれている。ある物質の線吸収係数は X 線の強度ごとに異なるので、強度が単一でない白色 X 線を物質に透過させると、透過 X 線の強度分布が入射 X 線の強度分布から変化する。具体的には吸収されやすい強度の X 線の割合が低下し、吸収されにくい強度の X 線の割合が増加することになる。そのため見かけの線吸収係数は低下することになる (全体でみると X 線を吸収しにくくなる)。そのため Fig. 5-7 のような関係がみられることになる。そこで、本実験では次の補正式を透過画像に適用してから CT 画像を作成することとした。

$$y = -0.3x^5 - 3.5x^4 + 29.7x^3 - 19.5x^2 + 41.0x - 1.6 \quad \text{Eq. 5-14}$$

ここで  $x$  は X 線透過画像から得られた輝度値、 $y$  は補正して得られた輝度値である。この補正を行った場合のアクリル製円柱の CT 画像を Fig. 5-4 の右側に示すが、左側に比べると外周に CT 値が極端に高いなどの現象がみられなくなっており、この補正の効果を示している。

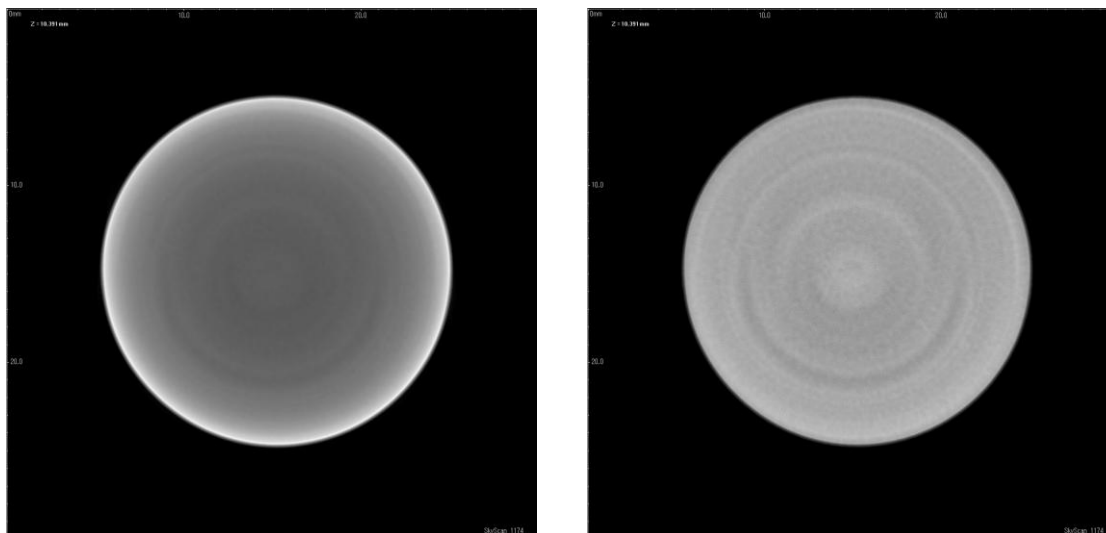


Fig. 5-4 アクリル製円柱の CT 画像(左 : BHC 無し、右 : BHC 済み)

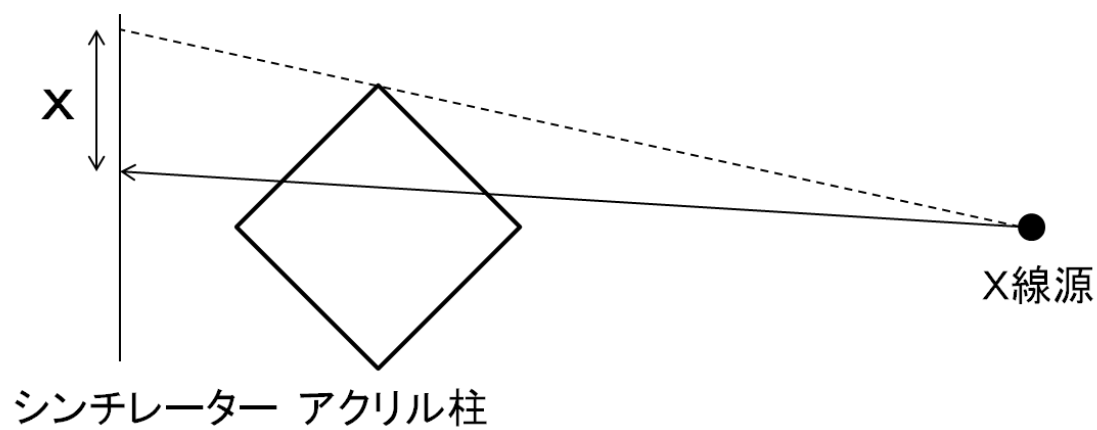


Fig. 5-5 BHC 補正式作成のための試験体の設置方法

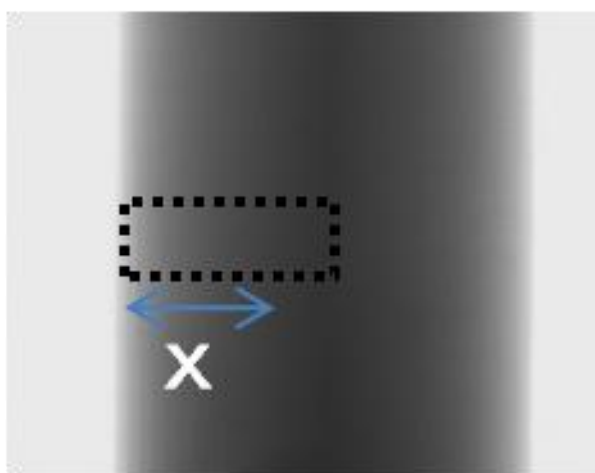


Fig. 5-6 Fig. 5-4 のアクリル柱の X 線透過画像

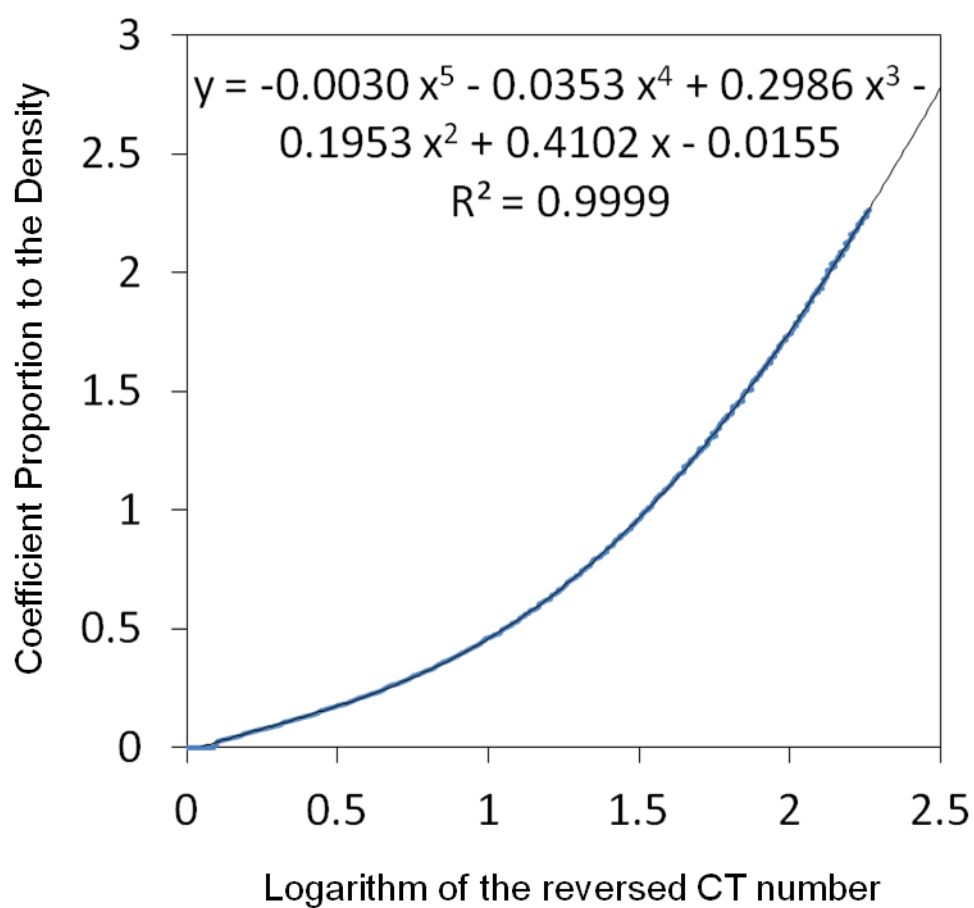


Fig. 5-7 透過質量と輝度値の対数の関係

#### 5.4.5 CT 値と密度の関係

CT 画像の輝度値と密度の関係を調べるため、バルサ、ヒノキ、チーク、カシ、コクタン  
の  $20 \times 20 \times 30$  (L) (mm) の試験体を用意し、CT 画像を撮影してその輝度値と密度の関係を  
求めた。Fig. 5-8 にその結果を示すが、両者の間には直線関係がみられた。そのため、この  
手法で求めた CT 値から密度分布を求めることが可能であることが確認された。

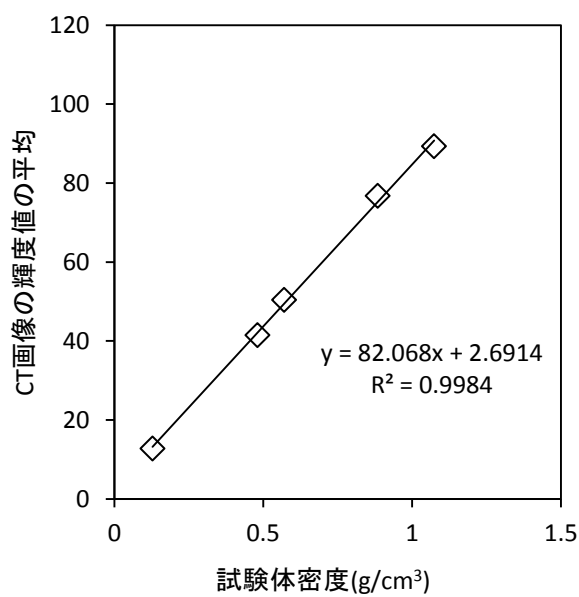


Fig. 5-8 試料の密度と輝度値の関係

## 5.5 腐朽材の X 線 CT 画像作成

### 5.5.1 褐色腐朽菌の場合の繊維方向の腐朽試験の試験体

Fig. 5-9 に繊維方向への腐朽試験を 153 日受けた試験体の CT 画像を示す。この画像を見ると、腐朽後乾燥後の試験体は培地からの距離に関わらず全領域で収縮が生じていることがわかる。その収縮の程度は培地からの距離に近いほうが激しく、培地近傍については激しく割れが生じていることがわかる。この割れがよく見られたのは年輪界と年輪に垂直な方向(R 方向)によく見られていた。腐朽後乾燥前の CT 画像では、培地からの距離が 14.5mm については試験体中央部分が暗くなっており、密度低下を示唆しているようにみられる。

この CT 画像のうち培地からの距離が 66.5mm のものについての密度分布の変化を (Fig. 5-9 の赤線) を Fig. 5-10 に示す。このグラフでは晩材の密度がピークの位置を揃えるというやり方で位置の補正を行っている。これを見ると、早材と晩材の間で特に水分量や密度低下の様子に違いは見られない。このグラフによると腐朽後の密度の減少量は微々たるものであることがわかる。これは乾燥時の収縮によってもとの体積よりも収縮しているため、密度はそこまで低下していないと考えられる。その一方で培地からの距離が 14.5mm での CT 画像では割れている部分以外も腐朽前に比べて暗く、密度低下が生じていることがわかる。このように、密度低下と収縮の関係は場所によって異なっている。これを調べるため異なる腐朽期間の試料について、L 方向の平均密度分布、断面積分布を求めた。

Fig. 5-11 に繊維方向試験体の密度分布例を示す。これらの試験体の初期密度は 0.46~0.47 である。このグラフをみると、63 日腐朽を受けた試料は培地からの距離が 30mm 程度より手前で密度の低下が生じており、97 日腐朽を受けた試料に関しては培地からの距離が 30mm より手前では明らかに密度低下がみられ、50mm ぐらいまでは密度低下が見受けられる。113 日間の腐朽処理を受けた試験体は培地からの距離が 50mm 以内で密度低下が生じている。また、密度低下のあまり生じていない部分の密度の値が初期密度よりも高くなっている。この原因は 2 つ考えられる。一つは、このグラフでの密度算出には側面に塗布されたエポ

キシ樹脂の輝度値も用いられており、エポキシ樹脂の部分の輝度値は本実験では晩材部と同等かそれ以上に高かったので、ここでの密度の値は実際の密度の値よりも大きな値となっている可能性がある。また、もう一つの理由として収縮の影響が考えられるが、これは後述する。

Fig. 5-12 にこれらの試験体の断面積の分布を示す。ここでの断面積には内部の割れの領域は含まず、純粹に試料部分の面積を表している。腐朽試験開始前の断面積は  $400\text{mm}^2$  であったので、すべての試験体のすべての領域で収縮が生じているといえる。その中でも 63 日と 97 日に関しては培地からの距離が 10~20mm 以下の部分で、113 日に関しては培地からの距離が 30mm 以下の部分で断面積が顕著に低下している。これらを比べると、褐色腐朽菌の場合、そもそも腐朽処理を受けること自体で断面が 1 割ほど収縮していることがわかる。重量減少が生じていないのに収縮が生じると当然密度の上昇をもたらすと考えられるので、これが前述した密度が初期密度より高い減少の理由の一つと考えられる。また、断面積が急激に低下している領域が、密度が急激に減少している領域に比べて 10mm 程度培地に近い領域ということがわかる。

Fig. 5-13 に上で得られた断面積と密度を掛け合わせて求めた重量の分布を示す。このグラフが第 2 章での残存率分布を表したグラフに対応しており、第 2 章の結果と同様の重量分布を示している。



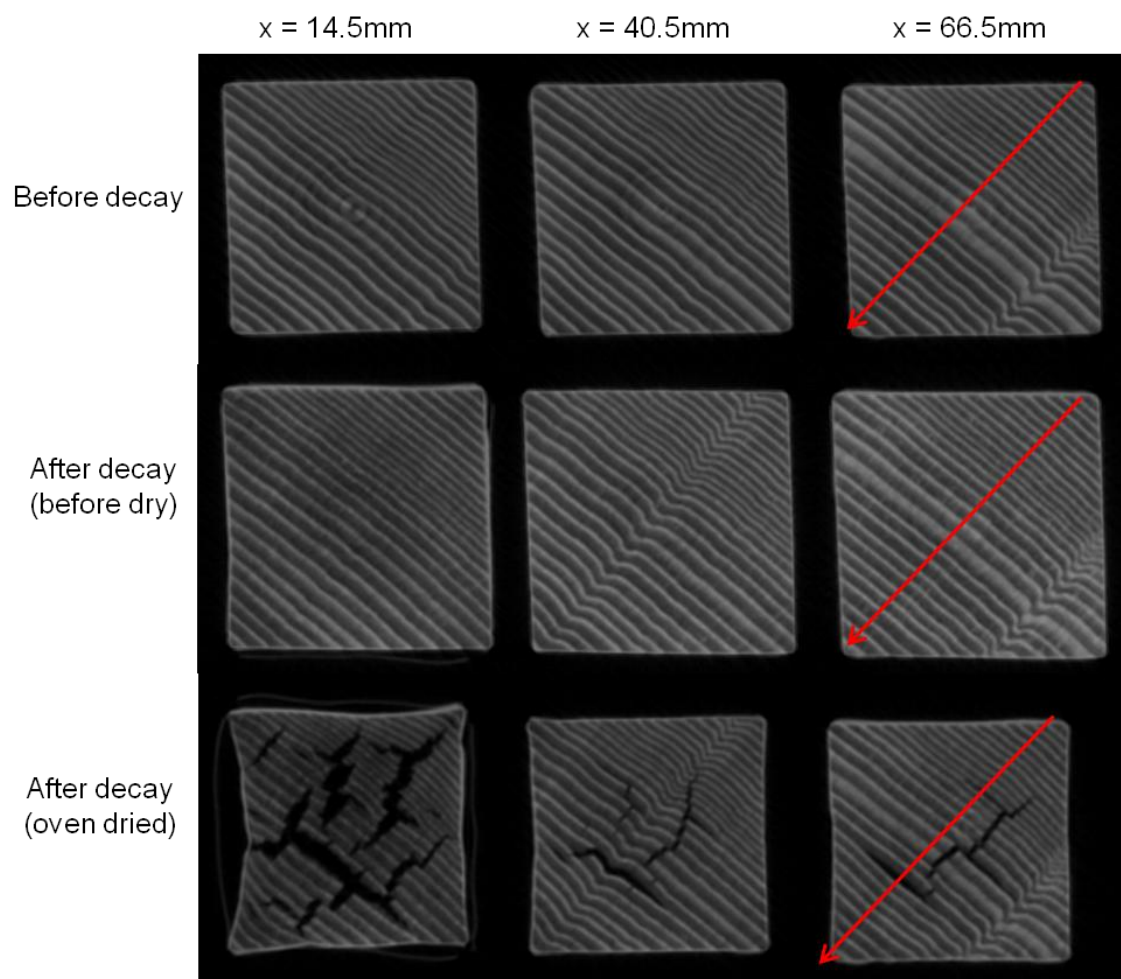


Fig. 5-9 繊維方向への腐朽試験を受けた試験体の CT 画像

赤矢印 : Fig. 5-10 における密度分布を作成した部分

(腐朽期間 153 日、重量減少率 20%)

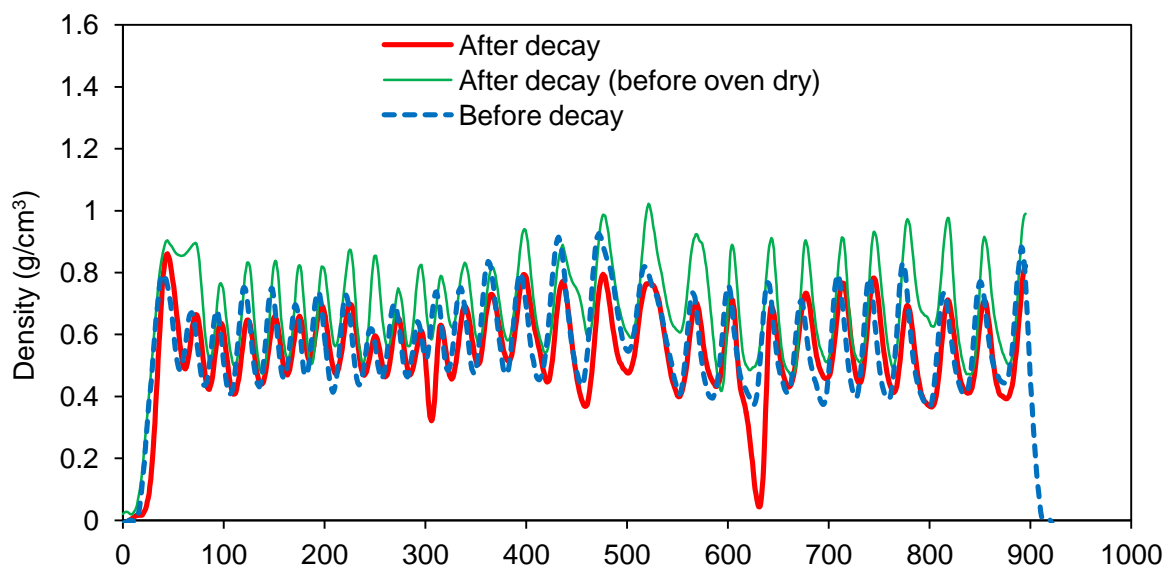


Fig. 5-10 CT 画像内の密度変化  
(腐朽期間 153 日、重量減少率 20%)

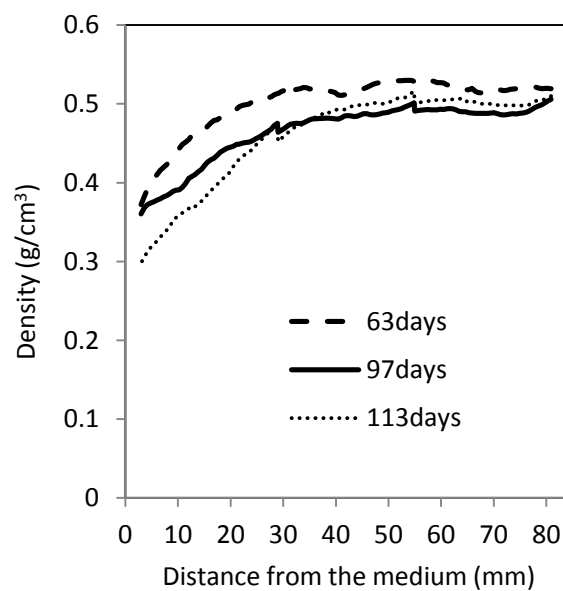


Fig. 5-11 L 方向への腐朽試験を受けた試験体の密度分布

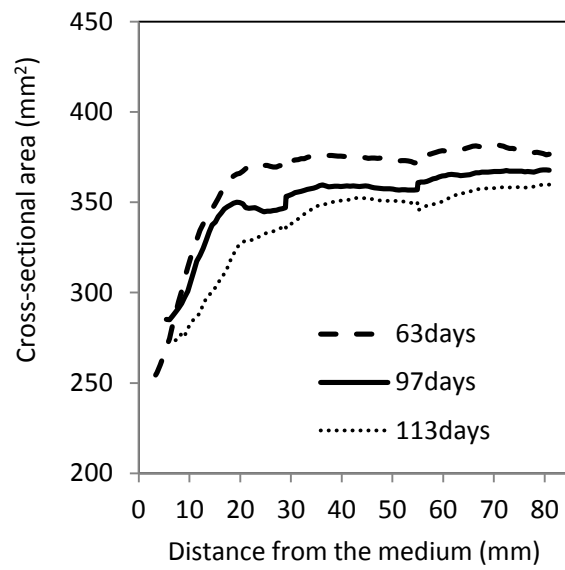


Fig. 5-12 L 方向への腐朽試験を受けた試験体の断面積の分布

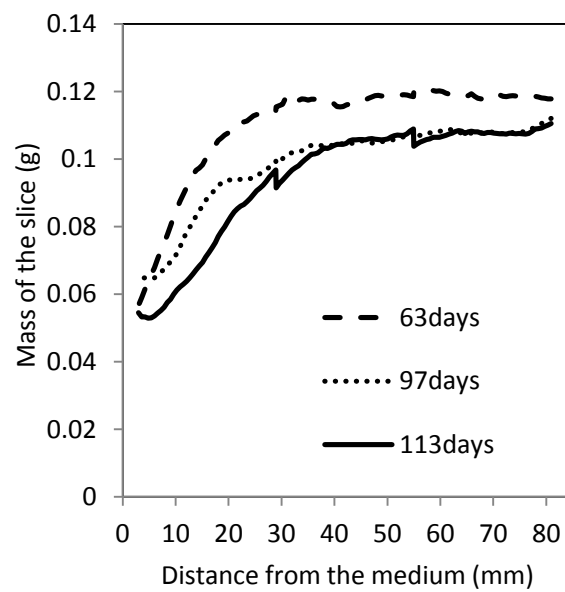


Fig. 5-13 L 方向への腐朽試験を受けた試験体の各断面ごとの重量の分布

### 5.5.2 褐色腐朽菌の場合の放射方向の腐朽試験の試験体

放射方向への腐朽試験を受けた試験体の CT 画像を Fig. 5-14 に示す。この画像の中央部分がぼやけていることや、左の図の上部に縦に入っている筋のようなものは試験体の様子を表しているのではなく、リングノイズが現れてしまっている。この試験体はとてもよく腐朽が進行した試験体であるが、繊維方向の収縮は培地からおよそ 10mm 程度の範囲で観察された。接線方向の収縮は培地から 30mm の範囲で観察された。また、培地からの距離が 10mm の範囲は密度現象も生じていて、年輪構造がはっきりわからないほどであった。

Fig. 5-15 に同じ試験体の 3D 画像を示す。a をみると試験体の形状をよく表している。b はこの画像から表面部分を切り取った 3D 画像を表している。この画像を見ると、割れの進展が L, R, T の 3 方向に沿って進展していることがわかる。a の画像から低い密度の部分のみを取り出したものが c である。これを見ると、培地近傍の密度が早材と晩材に関わらず減少していることがわかる。一方で腐朽があまり進行しなかった試験体の場合は腐朽進行が晩材部分で止まっているものがほとんどであった。このように放射方向への腐朽の場合は、腐朽がよく進行した試験体とそうでない試験体がみられた。この違いがみられた原因であるが、腐朽がよく進行した試験体の場合、放射組織が腐朽した可能性が考えられる。

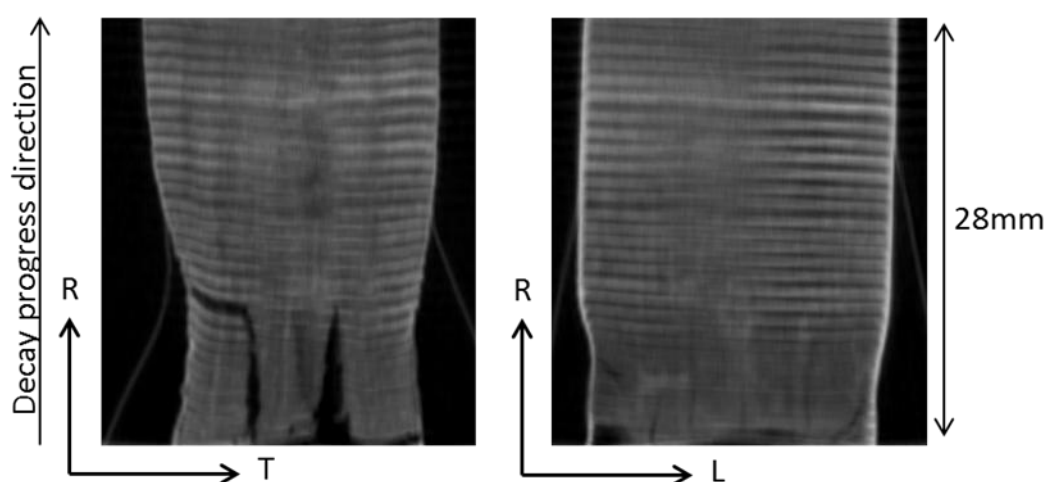


Fig. 5-14 放射方向に 115 日間腐朽処理を受けた試験体の CT 画像(重量減少率 11%)

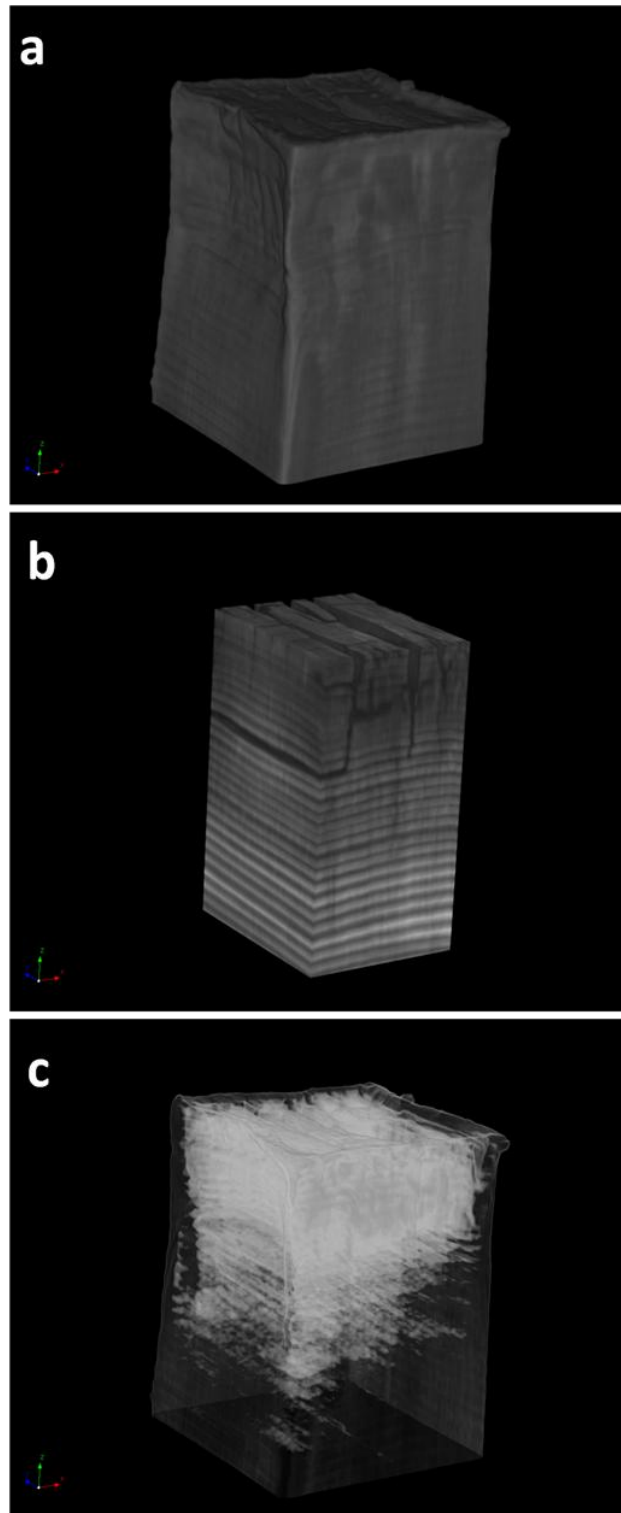


Fig. 5-15 放射方向に 117 日間腐朽処理を受けた試験体の CT 画像から作成した 3D 画像  
a: Surface rendering, b: a から表面を削除した画像, c: 低い密度の部分を取り出した画像  
(重量減少率 11%)

### 5.5.3 褐色腐朽菌の場合の接線方向の腐朽試験の試験体

接線方向への腐朽試験を受けた試験体の CT 画像を Fig. 5-16 に示す。接線方向への腐朽試験で重量減少が大きかった試験体は培地から離れた部分で重量減少が生じており、エポキシ樹脂と試料の間やエポキシ樹脂の隙間から菌糸が侵入したと考えられる。そのため、今回試験体には接線方向への腐朽試験を受けた試験体の中ではあまり腐朽が進行していない試験体を用いた。この場合、培地から 2mm 程度の範囲は割れが生じていたが、ほかには培地から離れた部分で収縮がみられている。密度についてはこの部分を除いてほとんど減少していなかった。

Fig. 5-17 に同じ試験体の 3D 画像を示す。a を見ると培地に接していた部分だけ収縮していることがわかる。a の画像から低い密度の部分のみを取り出した c を見ると、培地周辺を含めてほとんど密度の低い部分が存在しておらず、培地から離れた部分だけが密度現象が生じていることがわかる。これは前述したようにこの部分から腐朽菌が侵入したと考えることができる。そのため、放射方向の腐朽は 16 週間程度で 2mm 進行したといえることができる。

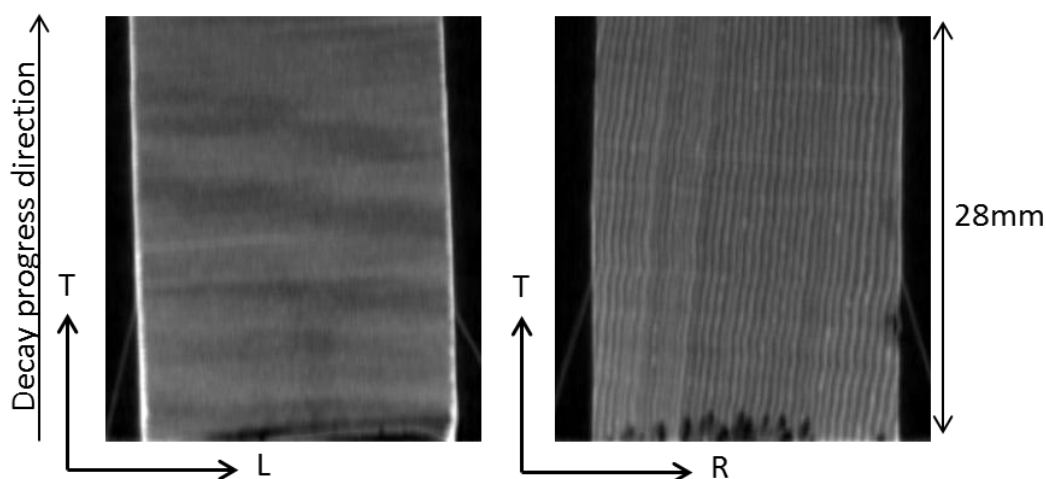


Fig. 5-16 接線方向に 117 日間腐朽処理を受けた試験体の CT 画像 (重量減少率 1.2%)

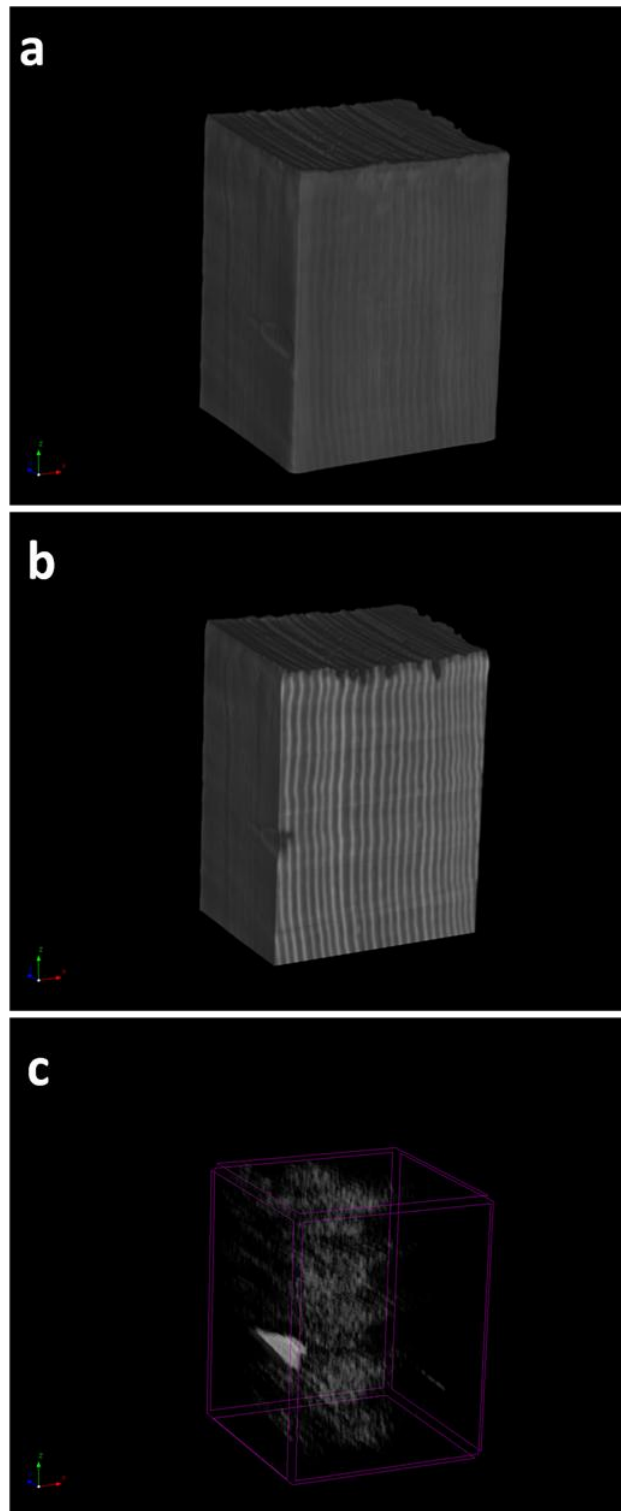


Fig. 5-17 接線方向に 117 日間腐朽処理を受けた試験体の CT 画像から作成した 3D 画像  
a: Surface rendering, b: a から表面を削除した画像, c: 低い密度の部分を取り出した画像  
(重量減少率 1.2%)

#### 5.5.4 腐朽進行方向が腐朽しやすさに与える影響 (褐色腐朽菌)

腐朽進行方向による腐朽進行のしやすさとしては、Fig. 5-2 に示したように繊維方向が他の 2 方向に比べて 10 倍程度腐朽しやすいことがわかる。腐朽進行方向による腐朽進行の違いについては、松岡<sup>47)</sup>が繊維方向、接線方向、放射方向の順に腐朽が進行しやすいという結果を示しているが、繊維方向と他の 2 方向の関係については今回の結果は松岡の報告と一致している。接線方向と放射方向の関係については、以下に述べるようにこれらの腐朽進行方向の場合における早晚材の腐朽しやすさの違いによると考えられる。

早晚材の違いによる腐朽しやすさの違いについては、繊維方向の腐朽の場合は Fig. 5-10 に示したように早材と晩材の間で特に腐朽しやすさに違いは見られなかった。それに対して、放射方向の場合で腐朽があまり進行しなかった試験体は腐朽進行が晩材部で止まり、接線方向の場合は早材部のほうが明らかに腐朽しているといったように早材部よりも晩材部のほうが腐朽しにくいという結果がみられた。繊維方向の腐朽については木口面から菌糸が侵入するため、仮道管に沿って菌糸が侵入する。そのため早材と晩材のどちらにも菌糸が侵入できたため腐朽のしやすさが変わらなかった。その一方で放射方向と接線方向の腐朽では、菌糸は細胞壁を超えて侵入しなければならず、細胞壁の厚い晩材のほうが早材よりも菌糸が侵入しにくかった。この違いが早晚材の腐朽しやすさの違いとなっていると考えられる。

極端な例として早材のみで腐朽が進行すると考えると、放射方向の腐朽の場合には 1 つの年輪の早材のみが腐朽するのに対して接線方向の腐朽の場合には腐朽進行面に接する全ての早材が腐朽することになるため、接線方向のほうが腐朽が進行するという結果になると考えられる。ただし、今回の実験では放射方向の腐朽の際に放射組織の影響が疑われる結果も見られた。松岡の結果では放射組織の影響は特に見られなかったもので、この点についてはさらなる検討が必要であると考えられる。



#### 5.5.5 白色腐朽菌の場合の繊維方向の腐朽試験の試験体

Fig. 5-18 に繊維方向への腐朽試験を 157 日受けた試験体の CT 画像を示す。この画像を見ると、白色腐朽菌の場合は褐色腐朽菌の場合と異なり腐朽前後での収縮は見られないことがわかる。それに対して密度は腐朽前と腐朽後で明らかに違いを見せている。この場合は培地からの距離に近いほうが密度低下している部分の密度が低くなっていることがわかる。また、同じ CT 画像内でも腐朽後の密度現象の程度は非常にばらついていることがわかる。腐朽後の乾燥前後をくらべると、乾燥後に密度が低下していない部分は、乾燥前の CT 画像内で白くなっており、早晚材の区別がほとんどつかないほどである。この傾向は培地からの距離が異なっても同じように観察されている。

この CT 画像のうち、培地からの距離が 14.5mm のものについての密度分布の変化を (Fig. 5-18 の赤線) Fig. 5-19 に示す。このグラフでも Fig. 5-10 の場合と同様に晩材の密度がピークの位置を揃えるというやり方で位置の補正を行っているが、腐朽後乾燥前に関して右側は早晚材の区別がつかなくなっているため、この部分の補正は行っていない。

まず腐朽後乾燥後に着目すると、このグラフの左側は腐朽前後で明らかに密度減少が生じていることがわかる。この際の減少量は早晚材の間で特に違いは見られない。それに対して右側では左側に比べてあまり密度減少が生じていない。右側と左側の違いは腐朽後の乾燥前の時点でも観察できる。左側では早晚材の密度差が明らかに観察されているが、右側では年輪構造がほとんど観察できないほど水分が多くなっている。左側の晩材部の密度と右側の早材部の密度はほぼ等しいので、この腐朽試験では乾燥前の早材部の密度が晩材部の密度と等しい場合は密度減少が生じていないということが出来る。

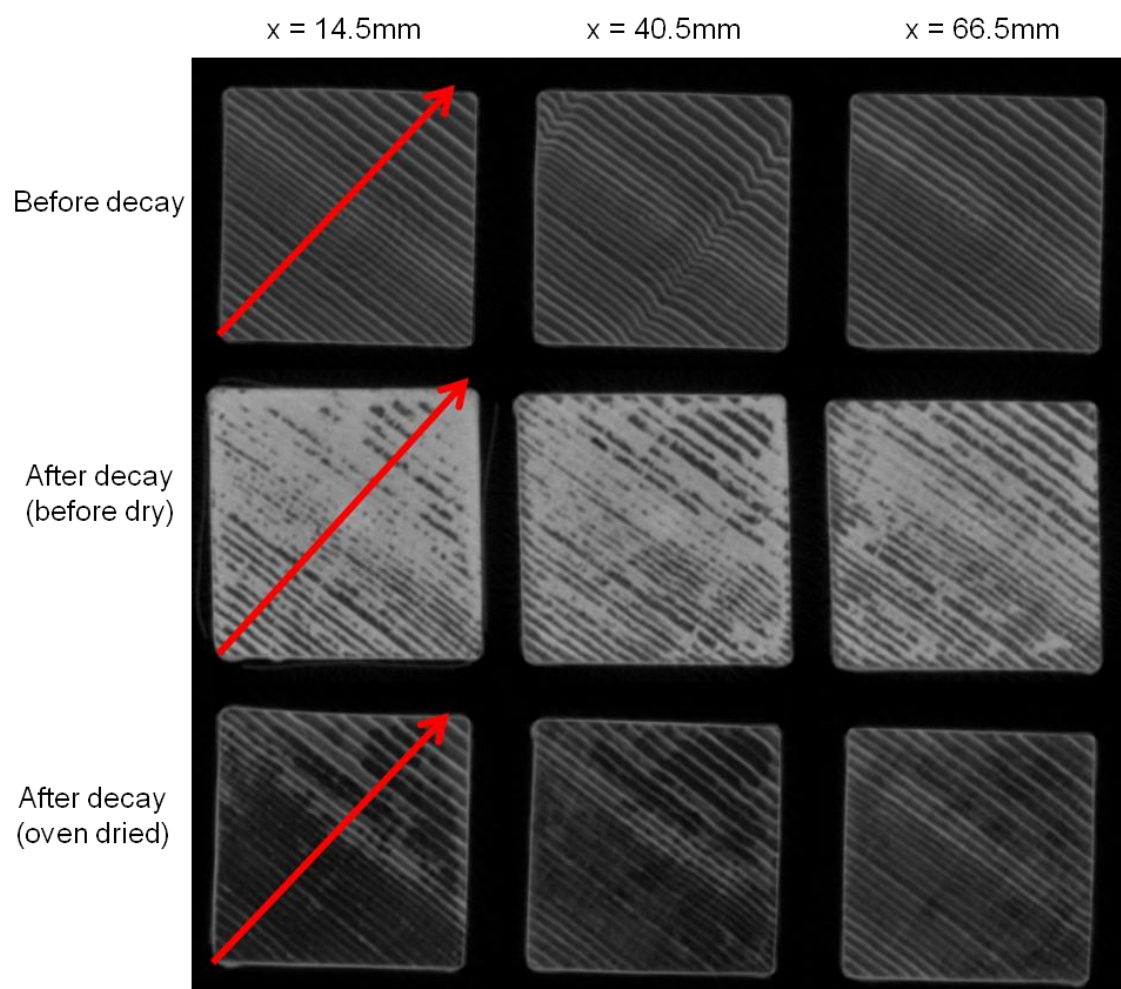


Fig. 5-18 繊維方向への腐朽試験を受けた試験体の CT 画像  
(腐朽期間 157 日、重量減少率 22%)

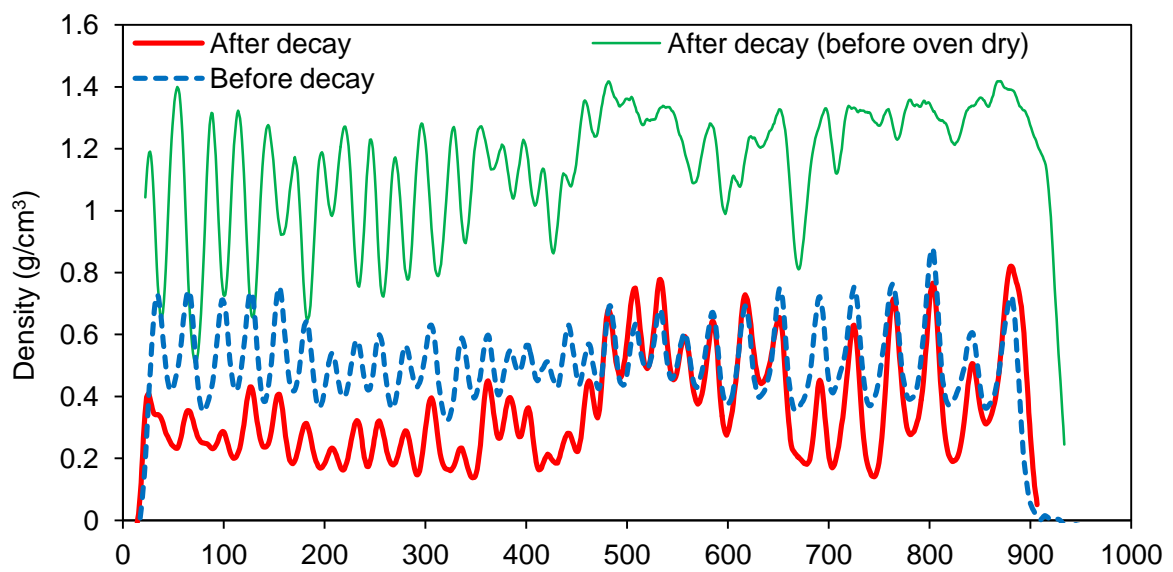


Fig. 5-19 CT 画像内の密度変化  
(腐朽期間 157 日、重量減少率 22%)

## 5.6 まとめ

本章では腐朽進行の異方性を評価するための腐朽試験を行い、得られた腐朽材の CT 画像を撮影した。その結果、褐色腐朽菌の場合繊維方向以外の腐朽速度は重量減少率で繊維方向の 10 分の 1 以下、腐朽が生じた領域にするとそれ以上に遅いことがわかった。白色腐朽菌の場合は繊維方向以外の方向の腐朽は生じなかった。腐朽材の CT 画像からは腐朽材の収縮の様子や腐朽前の水分量と腐朽進行の様子についての知見が得られた。

## 第6章 結論

本論文から得られた知見を以下にまとめる

第 2 章では、腐朽進行のモデル化の第一段階として、繊維方向への強制腐朽試験を行い、腐朽進行に伴い密度分布がどのように変化するかを調べた。X 線デンストメトリーを用いて推定した繊維方向における密度分布を検討したところ、腐朽材の密度分布の経時変化の様子は褐色腐朽菌と白色腐朽菌の場合で異なり、褐色腐朽菌の場合は培地近傍が最も早く腐朽が進行したのに対して、白色腐朽菌の場合は培地近傍の重量減少がみられず、そこから少し離れた部分が最も腐朽が進行した場所となった。

白色腐朽菌の試験条件では腐朽時に木材と培地が直接接していたため、褐色腐朽菌の場合よりも吸水しやすいと考えられ、実際に試験体の水分量も褐色腐朽菌の場合より多く、白色腐朽菌の場合に培地近傍で腐朽が進行しなかったのは、この高含水率が腐朽菌の活動が妨げられたためであると推測された。

また、密度の分散と重量残存率の関係を調べたところ、重量残存率が 80%を切るまでは重量減少に伴って密度の分散が大きくなる結果が得られた。

第 3 章では、強度分布と密度分布の間にどのような関係がみられるのかを評価するため、圧縮強度と引張強度に関して強度と密度の関係性と、強度分布と密度分布の関係性の 2 点についての検討を行った。強度と密度の関係性については、密度既知の小試験片を腐朽材から作成し、強度試験を行って密度と強度の関係を調べた。その結果、圧縮強度と試験体の平均密度の間には強い相関がみられたが、引張強度に関しては破壊部分の平均密度との間の相関は認められなかった。

強度分布と密度分布の関係性については、圧縮強度分布については、密度分布に上で得られた密度と圧縮強度の関係式を適用することで得られる圧縮強度分布との比較を試みた

ところ、両者には良い相関がみられ、密度分布によって圧縮強度分布を評価することが可能であると推定された。引張強度分布については密度分布との比較が試みられたが、平均密度に関しては小試験体を用いた時と同様、両者の間には特に関係性が見いだせなかった。しかし、X線透過画像の最小値の分布と引張強度分布を評価したところ、平均密度の場合と異なり引張強度分布が低下している部分で最小値の分布も低下していた。この結果から、引張強度を推定する際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。

第4章では、第2章と第3章で得られた知見をもとに、腐朽進行のモデル化を試みた。腐朽速度が含水率に依存すると仮定したモデルを作成したところ、水分拡散係数の決定の際に水分移動に腐朽菌が影響を与えることを考慮して行ったシミュレーションは実際の密度分布とよく表すことに成功した。褐色腐朽菌の場合は、培地から木材への水分移動速度が一定量以下となる条件を加えてシミュレーションを行うことで実験結果をよく表すことができた。このシミュレーション結果から求めた圧縮強度分布は実験で求めた圧縮強度分布との間に直線関係がみられ、圧縮強度についてもこのシミュレーションで評価することが可能であると分かった。

第5章では、得られた腐朽モデルを繊維方向以外への腐朽にも拡張するため、腐朽進行の異方性についての検討を行った。その結果、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、放射方向の腐朽進行は腐朽材ごとのばらつきが大きかった。接線、放射方向への腐朽を受けた材のうち、木口面からの侵入が無かった場合の重量減少率は繊維方向の10分の1程度であった。白色腐朽菌の場合は接線方向や放射方向への腐朽試験では重量減少は見られなかった。

また、5章では同時に腐朽進行のばらつきを評価するため、腐朽材のCT画像を作製した。

その結果、腐朽試験に用いた褐色腐朽菌、白色腐朽菌のいずれの場合も、乾燥処理前には収縮等の腐朽を示唆するものは見つけることが出来なかった。一方で乾燥処理後の腐朽材については、褐色腐朽菌の場合は密度の低下に先んじて収縮が生じていることがわかった。白色腐朽菌の場合、乾燥前の CT 画像内で年輪構造がわからないほど含水率が高い部分では乾燥後の密度が低下していなかった。

## 参考文献

1. 内閣府：環境問題に関する世論調査 2012 年 6 月
2. 林野庁：平成 24 年度森林及び林業の動向
3. 土井正, 宮野道雄, 北本裕之, 呂恒俟: “阪神・淡路大震災における木造家屋被害に関する検討：その 1. 神戸市東灘地域における構造部材の蟻害・腐朽の影響等について”, 日本建築学会近畿支部研究報告集. 構造系 35, 221-224 (1995)
4. 軽部正彦, 宮武敦, 鈴木憲太郎, 加藤英雄: “ボンゴシ材を用いた公園用木橋の落下調査報告”, 日本建築学会技術報告集 12, 89-92 (2001)
5. Walter h. Snell, Nathaniel O. Howard, Myron U. Lamb: “The relation of moisture contents of wood to its decay.”, Science 62, 377-379 (1925)
6. JIS Z-2101: “木材の試験方法”, 日本工業規格 (2009)
7. K. St. G. Cartwright, W. G. Campbell, F. H. Armstrong: “The Influence of Fungal Decay on the Properties of Timber. I.--The Effect of Progressive Decay by *Polyporus hispidus*, Fr., on the Strength of English Ash”, Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences 120, 76-95 (1936)
8. F. H. Armstrong, J. G. Savory: “The Influence of Fungal Decay on the Properties of Timber”, Holzforschung 13, 84-89 (1959)
9. Jerrold E. Winandy, Jeffrey J. Morrell: ”Relationship between incipient decay, strength, and chemical-composition of Douglas-Fir heartwood” Wood and Fiber Science 25, 278-288 (1993)
10. 藤田誠, 村口良範, 飯島泰男: “腐朽ボンゴシ材の残存強度”, 木材学会誌 48, 32-37 (2002)
11. J. Gonzalez, J. Morrell: “Effects of environmental factors on decay rates of selected white- and brown-rot fungi”, Wood and Fiber Science 44, 343-356, (2012)



12. 藤平眞紀子, 中村嘉明, 磯田憲生, 疋田洋子: “桝組壁工法構造用木材の耐朽性と曲げ強度性能の変化”, 木材学会誌 43, 589-594 (1997)
13. 十代田三郎: “木材の腐朽に依る重量減少と強度減少との関係に就て”, 建築学会大会論文集 昭和 14 年 4 月, 1-7, (1939)
14. Benny Green, P. David Jones, Darrel D. Nicholas, Laurence R. Schimleck, Rubin Shmulsky: “Non-destructive assessment of *Pinus* spp. wafers subjected to *Gloeophyllum trabeum* in soil block decay tests by diffuse reflectance near infrared spectroscopy”, Wood Science and Technology 45, 583-595 (2011)
15. Miha Humar, Bojan Bučar, Franc Pohleven: “Brown-rot decay of copper- impregnated wood”, International Biodeterioration & Biodegradation 58, 9-14 (2006)
16. 水本晋: “The effect of decay caused by *Gloeophyllum trabeum* on the strength properties of Japanese red pine sap-wood”, 日本林學會誌 48, 7-11, (1966)
17. R. W. Kennedy, G. Ifju: “Applications of Microtensile Testing to Thin Wood Sections”, Tappi 45, 725-733 (1962)
18. W. Wayne Wilcox: “Review of literature on the effects of early stages of decay on wood strength”, Wood and Fiber 9, 252-257 (1978)
19. 本間智恵美, 寺西真隆, 佐々木義久, 平井卓郎: “既存木造住宅におけるせん断補強パネルを用いた劣化軸組の耐震補強”, 木材学会誌 54: 123-131 (2008)
20. Sawata K, Sasaki T, Doi S, Iijima Y: “Effect of decay on shear performance of dowel- type timber joints”, Journal Wood Science 54: 356-361 (2008)
21. 戸田正彦, 森満範, 大橋義徳, 平井卓郎: “木材腐朽が釘接合部のせん断性能に及ぼす影響”, 木材学会誌 56: 41-47 (2010)

22. Bütler R, Patty L, Le Bayon R-C, Guenat C, R Schlaepfer: “Log decay of *Picea abies* in the Swiss Jura Mountains of central Europe”, *Forest Ecology and Management* 242, 791-799 (2007)
23. 山本幸一, 藤井智之: “軟X線顕微密度測定法による腐朽木材の2次元密度減少の定量的評価方法”, *木材学会誌* 33, 151-156 (1987)
24. Rinn F, Schwingruber FH, Schär E: “Resistograph and x-ray density charts of wood comparative evaluation of drill resistance profiles and x-ray density charts of different wood species”, *Holzforschung* 50, 303-311 (1996)
25. Bucur V, Garros S, Navarrete A, de Troya MT, Guyonnet R: “Kinetics of wood degradation by fungi with X-ray microdensitometric technique”, *Wood Science and Technology* 31, 383-389 (1997)
26. Macchioni N, Sabrina P, Rozenberg P: “Measurements of fungal wood decay on Scots pine and beech by means of X-ray microdensitometry”, *Wood Science and Technology* 41, 417-426 (2007)
27. 森徹, 浅野猪久夫: “木材防腐防虫の研究 (第1報) 木材の腐朽速度の関する研究 (其の1)”, *古文化財の科学* 1, 44-49 (1951)
28. Viitanen HA (1997) Modelling the time factor in the development of brown rot decay in pine and Spruce sapwood – The effect of critical humidity and temperature conditions. *Holzforschung* 51:99-106
29. 斎藤昇, 上林博雄: “木材腐朽進行の定量化の試み”, *日本建築学会論文報告集* 63, 9-12 (1959)
30. 齋藤宏昭, 福田清春, 澤地孝男, 大島明: “水分収支を考慮した木造外皮の耐久性評価のための木材腐朽予測モデル : 建築外皮の湿害に対する評価手法の開発 その1”, *日本建築学会環境系論文集* 73, 971-978 (2008)

31. Jerrold E. Winandy, Patricia K. Lebow: “Modelin strength loss in wood by chemical composition. Part I. An individual component model for southern pine”, Wood and fiber science 33, 239-254 (2001)
32. 福田清春, 岡安祐司, 原口隆英: “木材腐朽菌の生育と腐朽能力に及ぼす温度の影響”, 東京農工大学農学部演習林報告 17, 49-55 (1980)
33. 水本晋: “Relation of moisture content of wood and relative humidity in an atmosphere to the decay of Japanese Red Pine wood, Due to the attack of four species of *Gloeophyllum*”, 日本林學會誌 46, 9-13 (1964)
34. 鈴木大隆, 北谷幸恵, 岩前篤, 永井久也, 小南和也, 岩本雄三: 日本建築学会環境系論文集 73, 591-597 (2008).
35. Lazarescu C, Watanabe K, Avramidis S: “Density and Moisture Profile Evolution during Timber Drying by CT Scanning Measurements” Drying technology 28, 460-467 (2010)
36. Watanabe K, Lazarescu C, Shida S, Avramidis S: “A Novel Method of Measuring Moisture Content Distribution in Timber During Drying Using CT Scanning and Image Processing Techniques”, Drying technology 30, 256-262 (2012)
37. 服部芳明, 金川靖: “医療用 X 線 CT スキャナによる含水率分布の非破壊測定(第 1 報)推定精度と誤差の要因”, 木材学会誌 31, 974-982 (1985)
38. 金川靖, 服部芳明: “医療用 X 線 CT スキャナによる含水率分布の非破壊測定(第 2 報)乾燥過程における含水率分布の変化”, 木材学会誌 31, 983-989 (1985)
39. 近藤佳秀: “X 線 CT を用いたトドマツ水食いの観察”, 木材工業 67, 102-107 (2012)
40. 古山安之, 金川靖: “木材中の水分拡散係数の含水率依存性”, 材料 38, 752-757 (1989)
41. Van den Bulcke J, Matthieu B, Van Acker J, Van Hoorebeke L: “Three-Dimensional X-Ray Imaging and Analysis of Fungi on and in Wood”, Microscopy Microanalysis, 15, 395-402 (2009)

42. Petutschnigg A. J, Flach M, Katz H: “Decay recognition for spruce in CT-Images”, Holz als Roh- und Werkstoff 60, 219–223 (2002)
43. Fuhr M J, Stuhk C, Munch B, Schwarze Fwmr, Schubert M: “Automated quantification of the impact of the wood-decay fungus *Physisporinus vitreus* on the cell wall structure of Norway spruce by tomographic microscopy”, Wood Science and Technology 46, 769-779 (2012)
44. Olaf Schmidt: “Wood and Tree fungi”, Springer Berlin (2006)
45. 高橋旨象: “きのこと木材”, 築地書館 東京, 20-21 (1989)
46. Zabel R, Morrell J: “Wood Microbiology: Decay and Its Prevention”, Academic Press (1992)
47. 松岡昭四郎: “木材の耐朽性に関する研究 (第3報) 繊維, 半径, および接線3方向の腐朽の難易について”, 林産試験場研究報告 188, 175-183 (1966)

## 謝辞

本研究を行うにあたって、多大なる御教授、御指導を下さられた生物材料物理学研究室の太田正光教授、信田聡准教授に心から感謝いたします。

太田正光教授には、研究テーマの決定から実験の方向性、論文の作成まで本研究全般を通じて幅広い御指導をいただきました。信田聡准教授には試験体の材料の手配をしていただくなど研究進行の手助けをしていただきました。

また、森林総合研究所の桃原郁夫氏には、腐朽試験全般について御教授いただき、忙しい中で実験操作の御指導をしていただきました。ここに深く感謝いたします。

生物材料物理学研究室をはじめとする生物材料科学専攻の先輩諸氏には、試験装置の使用方法やデータの解析方法、研究生活を送る上での心構えなど様々な御指導をいただき、何より研究室での日常を楽しいものとしていただけたことを深く感謝いたします。

生物材料科学専攻の同期の方々に、研究中に苦しいことがあった時などに励ましていただいたことは忘れることができません。

最後に、好き勝手の学生生活を送ってきた中でも辛抱強く見守っていただいた家族に感謝します。本当にありがとうございました。

平成 25 年 1 月 前田 啓