

木材腐朽の定量的な予測のための
数値解析モデルに関する研究

Study on Numerical Wood Decay Model
for Quantitative Prediction

地方独立行政法人北海道立総合研究機構
建築研究本部 北方建築総合研究所

Local Independent Administrative Agency Hokkaido Research Organization
Building Research Department Northern Regional Building Research Institute

概要 Abstract

木材腐朽の定量的な予測のための数値解析モデルに関する研究 Study on Numerical Wood Decay Model for Quantitative Prediction

遠藤 卓 *
Suguru Endo *

キーワード : 木材、腐朽、数値計算、耐久性
Keywords : Wood, Decay, Numerical Analysis, Durability

1. 研究概要

1) 研究の背景

国では平成 22 年に「公共建築物等木材利用促進法」が、道では平成 23 年に「北海道地域材利用推進方針」が施行される等、森林資源活用等の観点から、建築材料として木材を積極活用していくことが社会的に求められている。木造・木質化建築物における耐久性を確保するためには、主たる劣化要因である腐朽や虫害を防止する必要がある。腐朽や虫害の対策としては薬剤処理が一般的になされるが、その効果期間にも限度があり、これらの被害が後を絶たないのが現状である。

木材の腐朽に着目すると、腐朽の発生及び進行は材料の湿潤状態に大きく左右される。そのため、木質構造材を濡れや結露から守るための技術が多く開発されてきているもののこれらを完全に防ぐことは未だ困難である上、外装材等の部材においては水分に晒されることが避けられない。そこで、通気による乾燥を図った上で、ある程度の量で短期間の水分は許容する設計手法も考えられるが、木材の腐朽についてはどのような環境下で発生し、どの程度の速度で腐朽が進行していくかについての把握が定量的にできていないために、実際に、高含水状態が「どの程度であれば許容されるのか」について明確に把握できていない。

2) 研究の目的

木材腐朽を数値解析によって予測するためのモデルを開発する。このモデルにおける木材腐朽特性を示す諸係数及び腐朽の進行と木材の物性値の変化の関係を実験により明らかにする。

2. 研究内容

1) 木材腐朽予測のための理論モデルの検討 (H24 年度)

- ・ねらい：文献及び既往の研究を基に木材腐朽理論モデルを検討する。理論モデルの中で実験値が必要な項目を整理して、2) の詳細な実験計画を策定する。
- ・試験項目等：文献調査

2) 木材の腐朽特性及び腐朽が及ぼす木材の物性値変化の把握のための実験 (H24~H27 年度)

- ・ねらい：カラマツの試験体を温湿度が制御された環境内に曝露し、各種環境条件が及ぼす腐朽の発生と進行に対する影響を把握する。腐朽した木材の熱伝導抵抗及び透湿抵抗といった物性値を測定し、腐朽度合いとの関係性を明らかにする。
- ・試験項目等：恒温恒湿槽における曝露実験

* 環境研究部環境グループ研究職員

* Researcher of Building Environment Group

3) 木材腐朽予測のための数値計算手法の構築 (H25~H27 年度)

- ・ねらい：1) で作成した 理論モデルに、実験結果を適用して木材腐朽予測モデルを構築する。単純な試験体を対象とした数値解析を行い、妥当性を検証する。
- ・試験項目等：数値解析モデル構築、数値解析

3. 研究成果

1) 木材腐朽予測のための理論モデルの検討 (H24 年度)

文献調査等を基に、木材腐朽予測モデルの基本的な考え方を以下の通り組み立て、定式化した。

- ① 熱水分（水分化学ポテンシャル）同時移動方程式に、木材腐朽現象をモデリングして組み込む。
- ② 腐朽は質量減少率により定量化し、質量減少率と他の物性値を関係づける。
- ③ 腐朽開始するまでの期間、腐朽開始後の質量減少速度、木材内部の腐朽範囲の拡大、を腐朽現象の指標とする。

2) 木材の腐朽特性及び腐朽が及ぼす木材の物性値変化の把握のための実験 (H24~H27 年度)

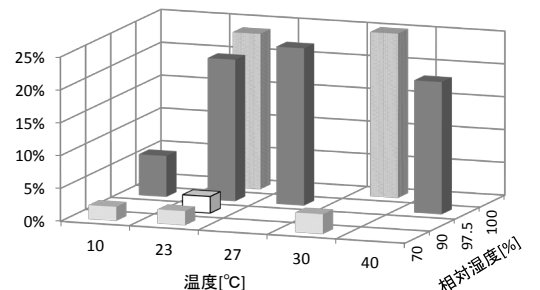
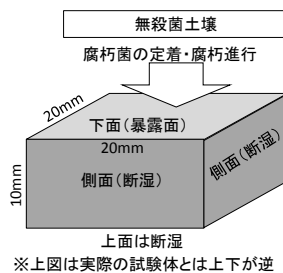
- ・不特定菌種に対する腐朽状況を把握するため、菌床を無殺菌土壌とする実験を実施し、10 通りの定常状態の温湿度条件で、計約 1,100 体の試験体を暴露し、その質量減少率を測定した (図 1)。試験体の個体差が見られたが、相対湿度が 100%に近い環境で質量減少が見られ、温度 27℃程度で質量減少率が高くなることが確認できた。実験開始後 64 週間では最大 26%程度の質量減少率が見られた。90%以下の条件ではカビの発生が見られたが、腐朽による質量減少は見られなかった (図 2)。

- ・長さが異なる試験体の質量減少率の比較から、試験体の奥行き方向の質量減少率の分布を推定した (図 3)。

- ・質量減少した木材の透湿係数や熱伝導率を計測した。透湿係数は、質量現象に応じて値が大きくなることが確認できた。熱伝導率は、質量減少との明確な相関関係を見ることができなかった。

3) 木材腐朽予測のための数値計算手法の構築 (H25~H27 年度)

- 2) の実験結果を基に 1) に挙げた指標値の整理を行い、木材腐朽予測手法を構築した。非定常の温湿度条件 (4 週間サイクルで温湿度が変動) とした実験との比較を行ったところ、質量減少分布の傾向を概ね再現する計算結果が得られた (図 4)。

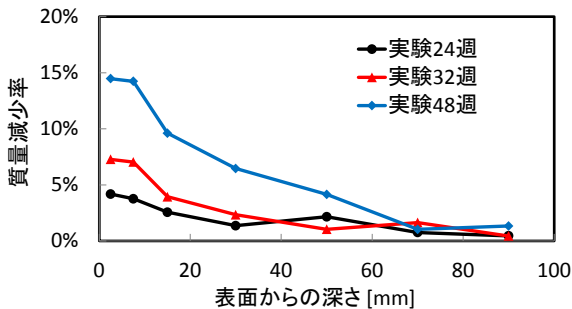


暴露の様子

試験体概要

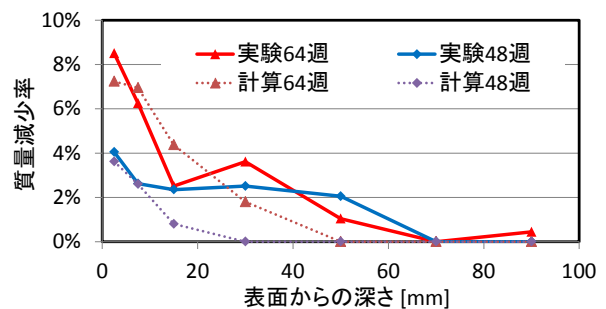
図 1 実験手法の概要

図 2 腐朽による質量の減少



温度 23℃ 相対湿度 100%

図 3 奥行き方向への腐朽の拡大



[温度 23℃ 相対湿度 100%] [温度 23℃ 相対湿度 70%]を 4 週間ごとにサイクル

図 4 実験と計算結果の比較

4. 今後の見通し

本研究の成果は、新たな工法開発のツールとして活用を図る。設計手法としての実用化に向けた課題（樹種による腐朽性状の違い、木材の個体差に対する評価など）については、今後さらに検討を進める。

目 次

1.	はじめに 1
2.	腐朽モデルの考え方の整理2
3.	腐朽実験7
4.	数値解析モデルの提案15
5.	数値解析の妥当性検証17
6.	まとめ18

1. はじめに

(1) 背景

国では平成 22 年に「公共建築物等木材利用促進法」が、道では平成 23 年に「北海道地域材利用推進方針」が施行される等、森林資源活用等の観点から、建築材料として木材の積極活用が社会的に求められている。

当機構でも戦略研究『「新たな住まい」と森林資源循環による持続可能な地域の形成』（平成 22～26 年度）等において、地域の木材の建築用途への活用を提案してきた。

木造・木質化建築物における耐久性を確保するためには、主たる劣化要因である腐朽や虫害を防止する必要がある。このうち、腐朽による劣化を抑えるためには、耐朽性の高い樹種の選択、木材保存剤の使用、水分から木材を保護する構法的対策のいずれか、もしくは複数の対策の組み合わせが必要となる。

水分から木材を保護する構法的対策について考えると、木材を常に低湿状態に保つことで腐朽を防止できるが、濡れや一時的な高湿状態に晒される木質外装や構造材において、腐朽被害を予測する手法が未確立と言える。鈴木ら^{1), 2)}によって、高含水状態が一定程度持続することによって腐朽が発生することが示されるなどしているが（既往の研究については、2. (1)で詳しく述べる）、定量的な腐朽被害の予測の面で、課題があるのが現状である。

(2) 目的

本研究では、木材腐朽を数値解析によって予測するためのモデルを開発する。

(3) 研究の構成

研究の構成を図 1.1に示す。

第 2 章では、文献調査を行い、既往研究の成果を整理した上で、提案する腐朽予測モデルの考え方を整理する。また、そのモデルにおいて、実験で取得必要な指標値の整理を行う。

第 3 章では、実験を実施し、腐朽に関する指標値の取得を行う。また、腐朽に伴う木材物性の変化を測定する。

第 4 章と第 5 章では、数値計算手法の構築を行う。まず第 2 章、第 3 章の検討を基に、数値計算手法を提案し（第 4 章）、数値計算の試行結果と実験結果との比較を行い、数値計算の妥当性を検証する（第 5

章）。

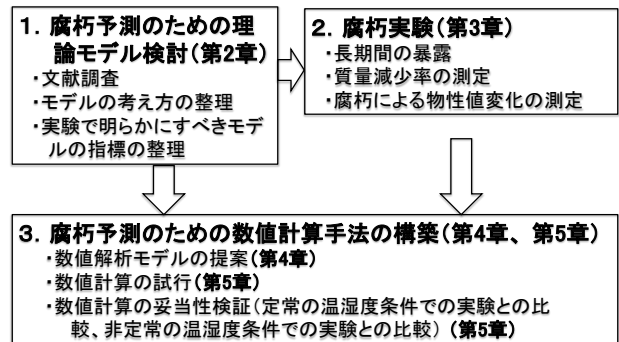


図 1.1 研究の構成

2. 腐朽モデルの考え方の整理

(1) 文献調査

腐朽予測モデルの考え方を整理するため、関連文献を調査した。

これまでの木材腐朽に関する研究としては、木材保存剤の開発や効果の分析、促進試験方法の検討、腐朽した木材の強度低下に着目した、農学系の研究例は多く見られるが、建物が晒されるような環境における腐朽の被害予測を試みた研究は数少ない。ここでは、建築分野の腐朽に関する既往の研究成果を整理する。

1) 鈴木らによる研究^{1) 2)}

自然腐朽（自然な空气中に存在する孢子を木材に定着させる手法）による様々な樹種の腐朽菌の発生条件（含水率の範囲、暴露期間）を実験室実験で明らかにした。

従来の設計の考え方は、高含水状態を許容しないものであったが、腐朽が発生するまでには一定の高含水の期間を要することを示した（図 2.1）。

また、低含水状態では菌の活動が減退する条件があること、非定常状態では一定の含水状態の時間が累積することで腐朽が発生することを示唆した。

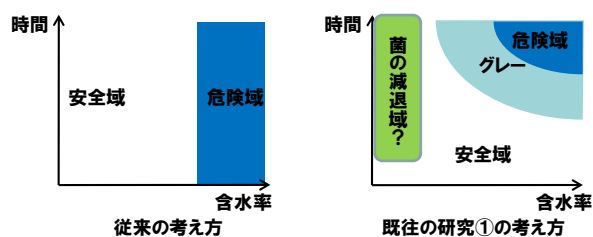


図 2.1 腐朽防止の考え方

2) 齋藤らによる研究^{3) 4)}

実験室での、主にアカマツを対象とした、オオウズラタケによる促進試験によって、腐朽開始後の質量減少速度の低下速度を把握した。

腐朽拡大を拡散現象として捉える数値計算モデルと熱水分同時移動を関連付けて解析する手法を提案した。また、腐朽分解に伴う、水分の生成を数値計算に組み込むモデルを提案した。

3) Viitanen らによる研究^{5) 6)}

実験室での、Scots pine と Norway spruce を対象とした、Coniophora puteana（典型的な菌種）、Serpula

lacrymans（乾燥に強い菌種）による促進試験によって、腐朽開始後の質量減少速度を把握した。また、腐朽菌が死滅するのに必要な乾燥条件（温度・湿度・時間）を示した。

温湿度と質量減少率の関係を明らかにした、先駆的研究と言える。

4) Nofal らによる研究⁷⁾

木材腐朽に関する既往の研究成果を取り纏め、質量減少速度を温湿度等の関数として示した。腐朽予測を設計で用いる手法として、提案を行った。

5) まとめ

木材腐朽の発生及び進行を定量的に把握する指標として、既往の文献では質量減少率が用いられている。質量減少率と強度等の関係を検討した既往の研究もある。

実験の再現性を高めることを目的として、培養菌を接種する方法が取られる例もあるが、実環境より木材にとって厳しいものであると考えられる。

木材内部の腐朽の分布を正しく捉える腐朽に関するモデルは、既往の研究では提案されていない。

木材腐朽は、1)腐朽開始までの段階、2)腐朽進行、3)腐朽菌死滅の段階があるとされており、それぞれに対してモデルが必要である。

(2) 理論モデルの提案

1) 腐朽モデルで対象とする因子

まず、腐朽活動は、①養分（木材）、②酸素、③孢子の供給が十分にある状態で、④水分、⑤温度の条件がそろえば起こる。

そのほかにも pH が一定範囲、紫外線が一定以下であることなどが腐朽活動の条件とされる⁸⁾が、本研究では、これら条件は考慮しない。

また、建築環境下の木材では、①養分（木材）、②酸素は常にある。保存処理されている木材は、腐朽菌にとって適切な養分がない状態であり、樹種によっても腐朽の性状は大きく異なるが、本研究ではまず、未処理の特定樹種を対象として検討することとした。③孢子の供給については、菌種によって腐朽の性状が異なるが、建築環境下の木材では、定着する菌種の予測が困難であることから、不特定菌種に

対して暴露を行った実験（次章参照）で各種データを取得し、それを腐朽モデルに利用することとした。

図 2.2に影響因子の考え方を整理した。

木材の腐朽は④水分と⑤温度の影響を受けるが、実際の木材では材の中で温度と水分の分布が生じる。そこで本研究では、メッシュ分割した領域に適用する数値解析手法として提案する。

木材腐朽予測モデルの基本的な考え方を整理し、図 2.3に示す。熱水分（水分化学ポテンシャル）同時移動方程式に、木材腐朽現象をモデリングして組み込むこととした。

腐朽は質量減少率により定量化し、質量減少率と他の物性値を関係づける。また、腐朽による質量減少によって、木材の物性が変化する相互作用もモデルに組み込むこととした。

また、既往の研究から、木材の腐朽は、①腐朽開始までの段階、②腐朽進行の段階、③乾燥等によって腐朽活動が減退する段階に分けることができると考えられる。このうち①、②については、本研究で実験を行って指標値の調査を行うが、③は既往の文献の検討結果を参考にモデルを組み立てることとした。

腐朽モデルの概念を図 2.4に示す。腐朽のそれぞれの段階のモデルの考え方を以下に述べる。

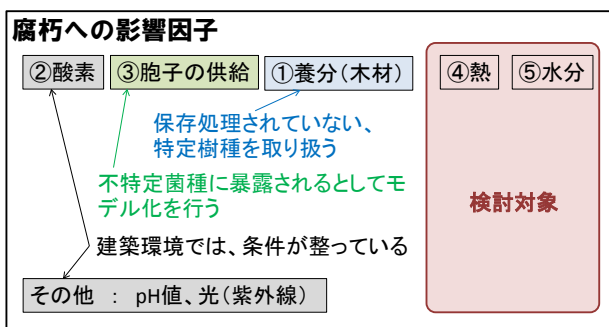


図 2.2 対象とする因子の考え方

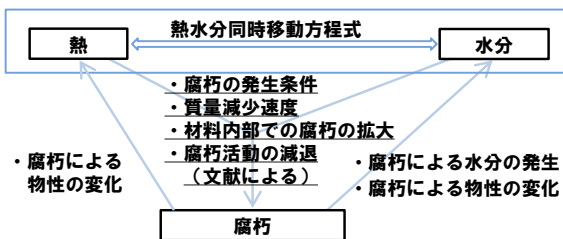
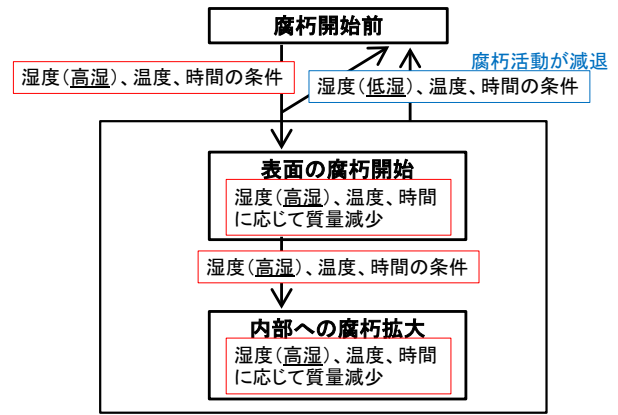


図 2.3 熱水分同時移動と腐朽モデル



既往文献の実験結果の数値を用いる。 本研究で実験を行い、数値モデルを提案

図 2.4 腐朽のステージ

2) 腐朽開始までの段階

菌の供給がある環境内で、温湿度条件に応じた一定期間 R_s の暴露を行うと、腐朽が開始する。非定常状態のときは、暴露開始時刻 t_0 から、腐朽開始までの期間の逆数 ($1/R_s$) と時間刻みの積の累積が 1 を超える時刻 ($t_0 + \tau_1$) から材の表面は腐朽を開始するものとする ((2.2.1)式)。

$$\int_{t_0}^{t_0 + \tau_1} \frac{1}{R_s(T(t), \varphi(t))} dt > 1 \quad (2.2.1)$$

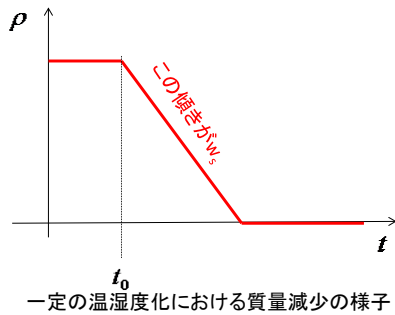
実験によって、温湿度に応じた指標値 R_s を取得することとする。

3) 腐朽進行の段階

腐朽開始後の十分に小さな材の質量減少速度 w_s は温湿度の関数である。

$$\frac{dw_t}{dt} = w_s(T, \varphi) \quad (2.2.2)$$

実験によって、温湿度に応じた指標値 w_s を取得することとする。



$$\frac{dw_l}{dt} = w_s(T, \varphi)$$

w_l : 質量減少率 [-]
 t : 時刻 [s]
 T : 温度 [°C]
 φ : 相対湿度 [%]
 w_s : 質量減少速度 [-/s]

図 2.5 十分に小さな材の腐朽の進行

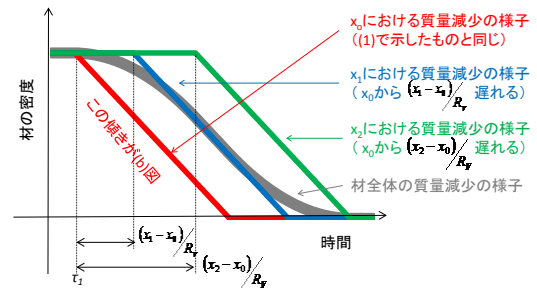
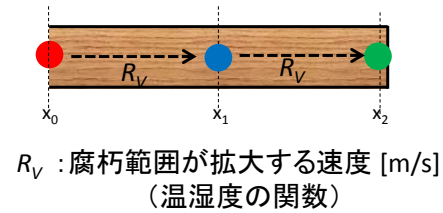


図 2.6 拡がりのある材の腐朽の進行

拡がりのある材の場合は、ある一点の腐朽から徐々に腐朽範囲が拡大していくものと考えられる。通常の建築環境下では、空気もしくは土に接する材の表面である。

本研究では、腐朽範囲が拡大する速度を R_v とする。 R_v は温湿度の関数であり、木目によって異なることとする。この R_v を用いて、表面以外のあるメッシュが腐朽開始するためには、隣接メッシュが腐朽した時刻 t_1 から、(2.2.3)式を満たす時間 t_2 が経過することを条件とする。

$$\int_{t_1}^{t_1+t_2} R_v(T(t), \varphi(t), G) dt > \Delta x \quad (2.2.3)$$

腐朽開始後の質量減少率は(2.2.2)式と同様に算出されることとする。この概念を図 2.6に示す。

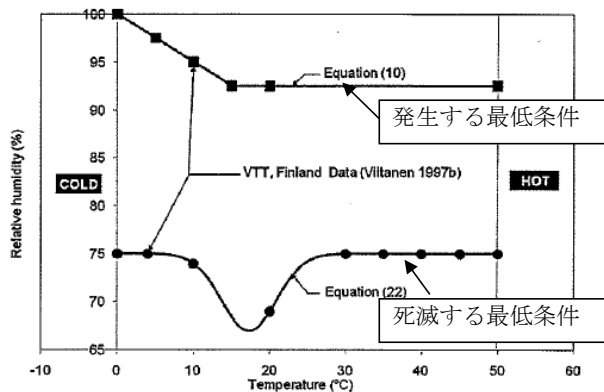
実験によって、温湿度や木目方向に応じた指標値 R_v を取得することとする。

4) 腐朽減退の段階

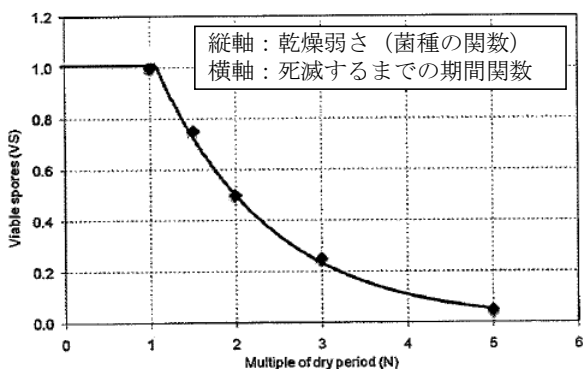
既に腐朽活動が始まっている材に対しては、短い期間の乾燥条件を与えても、乾燥している間は腐朽の進行が停止するが、高湿になればその時点で腐朽菌の活動が再開する。

しかし、乾燥の期間が長い場合、腐朽菌が死滅するため、腐朽が進行するためには、2)項で述べた腐朽が開始するための条件を再度満足しなければ、腐朽が進行しない。

Viitanen ら⁵⁾による、腐朽菌の死滅の関数(図 2.7)を、本研究のモデルでも取り入れることとした。



(a) 温湿度の条件



(b) 死滅までの期間

図 2.7 腐朽菌死滅の条件

(3) 実験方法の検討

1) 既往の実験方法

腐朽実験では、木材を腐朽菌に対してどのように暴露し、腐朽菌がどのように定着するかが重要である。本節では文献調査等を踏まえ、実験方法を検討していく。

まず、菌の与え方は大きく分けて4つの方法が考えられる。

① 実験室での促進試験

制御された温湿度環境下で、木材片に対して代表的菌種（オオウズラタケ、カワラタケ等）を対象として実験を行う。純粋な培養菌で実験を行うため、多様な菌種が入り込む実環境よりも菌の繁殖に有利な条件となり、野外試験と結果が異なることも報告されている。前項で述べた一部の既往研究^{3)~6)}のほか、木材保存剤の評価のための比較試験等で用いられる手法である。

② 実験室での自然腐朽

制御された温湿度環境下で、木材片に対して空气中に存在する胞子を自然に木材に定着させ、腐朽させる実験方法である。①よりも建築の実環境に近いが、空气中に存在する胞子の影響を受けるため、実験の再現性に課題があると考えられる。前項で述べた一部の既往研究^{1)~2)}で用いられた方法である。

③ 実験室でのファンガスセラー試験

制御された温湿度環境下で、木材片に対して無殺菌土壌に存在する胞子を木材に定着させ、腐朽させる実験方法である。①よりも建築の実環境に近く、かつ②よりも安定した暴露環境を確保できると考えられる。

④ 野外試験

木材杭を、屋外土壌に長期間暴露する試験である。土壌に存在する胞子を木材に定着させ、腐朽させる実験方法である。①よりも土木・建築の実環境に近いが、制御された環境下ではないので、温湿度が腐朽に及ぼす影響は把握しにくい。木材保存剤の効果の評価のための比較試験等で用いられる手法である。

JIS K1571「木材保存剤—性能基準及びその試験方法」では、3種類の試験方法（実験室での促進試験、実験室でのファンガスセラー試験、野外試験）が規定されている。JIS K1571で規定される試験を表2-1に示す。このうちファンガスセラー試験と野外試験は、2004年に試験方法に加えられた。

しかし、JIS K1571は木材保存材の試験方法で、試験対象はあくまで保存処理方法である。そのため、この試験結果を持って保存処理された木材（または未処理木材）の耐久性を論ずることはできない。

表 2.1 JIS K1571に規定される試験

項目	性能値		
室内試験	注入処理用	質量減少率(%)	3以下
	表面処理用	質量減少率(%)	3以下
ファンガスセラー試験	注入処理用	質量減少率(%)	3以下
	注入処理用	耐久比	3以上
野外試験	注入処理用	耐久比	3以上

なお、農学系の既往の研究では、実験室での促進実験や野外試験方法に準じて、実験を行うことが多い。ただし、これらの研究は、保存剤の効果を測定

するための比較試験として行われることが多く、本研究の目的とは異なる。

2) 本研究における実験の対象

本研究では、菌床を無殺菌土壌とする実験で、温度と水分条件が腐朽に及ぼす影響を検討した。樹種や木材保存剤の影響は今後の検討課題とし、実験結果の腐朽予測モデルへの適用方法を提案する。

また、3つの腐朽段階すなわち、1)腐朽開始までの段階、2)腐朽進行、3)腐朽菌死滅のうち、3)に関しても温湿度条件を検討した Viitanen ら⁶⁾の報告がある。本研究では1)と2)を対象として実験を行う。

3. 腐朽実験

(1) 実験方法

1) 概要

JIS K1571 のファンガスセラ試験方法を、本研究の目的に沿うように変更を加えた方法で実験を行った。

2) 暴露方法

菌床を無殺菌土壌（森林 A 層）とし、恒温恒湿槽内で試験体を暴露した。パッドに 3cm 程の厚みの無殺菌土壌を詰め、その上に設置した金属網の上に試験体を置いた。金属網を設置するのは、試験体に土壌が付着し、質量計測に不正確さが生じるのを防ぐためである。

無殺菌土壌（森林 A 層）には、JIS K1571 を参考にして、以下の処理を行った。

- ① 4mm 以上粒径を除去（写真 3.1）
- ② 最大水保持状態及び絶乾状態での質量測定
（最大水保持状態：土壌をろ過（12 時間）し余剰水を取り除いた後、さらにアスピレータで余剰水を吸引）
（絶乾状態： 105℃、24 時間で乾燥）
- ③ 最大水保持量（%）を算出
- ④ 最大水保持状態の土壌を必要量準備する。（写真 3.2）

なお、土壌中の菌の活性を維持するため、実験期間中のおおよそ 2 ヶ月に一度、土壌の交換を行った。実験の状況を写真 3.3 と写真 3.4 に示す。



写真 3.1 4mm 以上粒径を除去



写真 3.2 最大水保持状態の土壌



写真 3.3 実験の状況 1



写真 3.4 実験の状況 2

3) 試験体

基本試験体は、20×20×10 mm のサイズとした。腐朽を一次元方向に進行させることを意図し、1 面以外は全てアルミシールによって断湿、菌の定着を防止した（図 3.1、写真 3.5）。繊維方向と繊維直角方向について、腐朽の進行方向を想定し試験体を製作した。樹種は腐朽後も原型を保つものとしてカラマツとし、辺材から試験体を採取した。各条件につき 4 体のサンプルを設けた。

また、腐朽範囲の拡大を計測することを意図して、基本試験体 10mm 厚みのほかに、5mm, 20mm, 40mm, 60mm, 80mm, 100mm の厚みの実験も行った（図 3.2、写真 3.6）。厚みが異なる試験体は、温度 23℃ 相対湿度 70%、温度 23℃ 相対湿度 100%、温度 40℃ 相対湿度 97.5% の 3 条件で実施した。

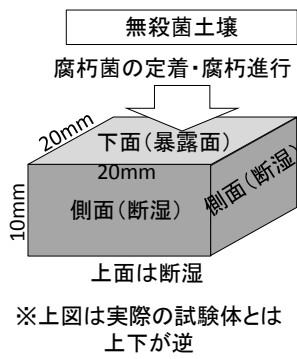


図 3.1 基本試験体



写真 3.5 基本試験体

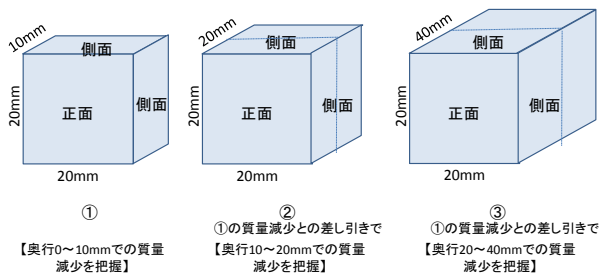


図 3.2 厚みが異なる試験体の例

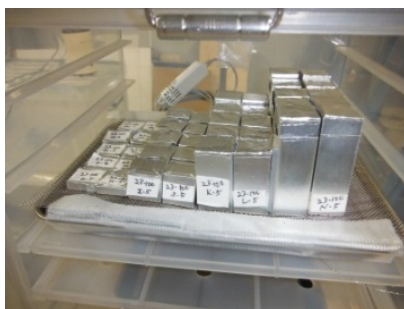


写真 3.6 厚みが異なる試験体の例

4) 質量減少率の計測

腐朽の程度は、質量減少率 w_l で定量化することとした。質量減少率は、暴露前後の絶乾質量の差から求めた ((3.2.1)式)。

$$w_l = \frac{m_{t0} - m_t}{m_{t0}} \quad (3.2.1)$$

絶乾質量は、試験体を 60℃で 48 時間で乾燥後計測した。なお、(3.2.1)式の質量にはアルミシールの質量は除いた。

計測結果にはばらつきが発生するので、1 回の測定につき 4 つの試験体の計測を行い、平均値を求めることとした。

なお、質量計測のため暴露後の試験体を絶乾状態にすると、木材に定着した菌の活性が大きく変化すると予想される。そのため本実験では、同条件の温湿度の質量減少率の時間変化を同一試験体で取得しているわけではなく、異なる個体で測定を行っているものである。

5) 温湿度条件

計 10 種類の定常温湿度条件で実験を行なった。恒温状態は恒温槽で、一定湿度状態は飽和塩水溶液によって制御した。

実験条件を表 3-1 にまとめる。

表 3.1 温湿度条件

		温度[℃]				
		10	23	27	30	40
相対湿度 [%]	70	KL 72.11%	KL 69.28%		SrCl ₂ 69.12%	
	90		(NH ₄) ₂ SO ₄ 81.13%			
	97.5	K ₂ CrO ₄ 97.88%	K ₂ SO ₄ 97.42%	K ₂ CrO ₄ 95.40%		K ₂ SO ₄ 96.41%
	100	-	蒸留水		蒸留水	-

- ・各欄の upper 段が相対湿度条件に制御するための飽和塩の化学式
- ・各欄の lower 段が飽和塩で制御される相対湿度の予測値
- ・空欄セルの条件は実施しない。

本研究では、腐朽モデルの指標値を得るために定常条件での実験を行うが、数値計算の検証用に非定常条件の実験も行った。温度を 23℃で固定し、相対湿度を 4 週間ごとに、100%と 70%にサイクルさせた。実験条件を表 3-2 に示す。

表 3.2 非定常実験の条件

	0～4 週間	4～8 週間	8～12 週間	12～16 週間	・・・
温度[°C]	23				
相対湿度 [%]	100	70	100	70	・・・

(2) 実験結果

1) 各温湿度条件における質量減少率の時間変化

温湿度別の質量減少率の時間変化を図 3.3 (繊維方向に腐朽を進行させた試験体) 及び図 3.4 (繊維垂直方向に腐朽を進行させた試験体) に示す。採取時期による結果のばらつきが見られるものの、経過時間に応じて質量減少率が高くなる様子が概ね確認できた。前節で述べた通り、同じ温湿度条件の実験においても、採取時期によって試験体が異なるため、時間変化にも個体のばらつきの影響が出るものと考えられる。暴露面の影響を比較すると、木口面を暴露させ、繊維方向に腐朽を進行させた試験体の方が、繊維垂直方向に腐朽を進行させた試験体よりも、高い質量減少率が確認できた。

温度 23°C、相対湿度 100%の実験における、実験後の暴露期間と外観変化を写真 3.7に示す。温湿度条件が異なっても、同等の質量減少率では同様の外観が見られた。

腐朽が見られる実験条件においては、暴露開始後およそ 16~24 週間程度で顕著な質量減少が見られはじめた。これが腐朽発生までの期間と考えられる。

暴露開始後 24 週、32 週、48 週、64 週間後の質量減少率を図 3.5~図 3.8(繊維方向に腐朽を進行させた試験体)、図 3.9~図 3.12 (繊維垂直方向に腐朽を進行させた試験体) に示す。培養菌を対象とした既往の報告 (Viitanen ら⁵⁾による測定結果の一例を図 3.13に示す。) と比べると質量減少率が低い、温度 30 °C 付近、相対湿度 100%に近い条件で高い質量減少率が観測され、傾向としては近いことが確認できた。また、樹種の違いと個体差があるものの、自然腐朽¹⁾よりは、質量減少率が高い傾向がある。相対湿度 90%以下の条件では、質量減少があまり見られなかった。相対湿度 90%では、木材の含水が繊維飽和点まで達せず、自由水が存在しないため、腐朽に必要な水分が得られなかったと考えられる。

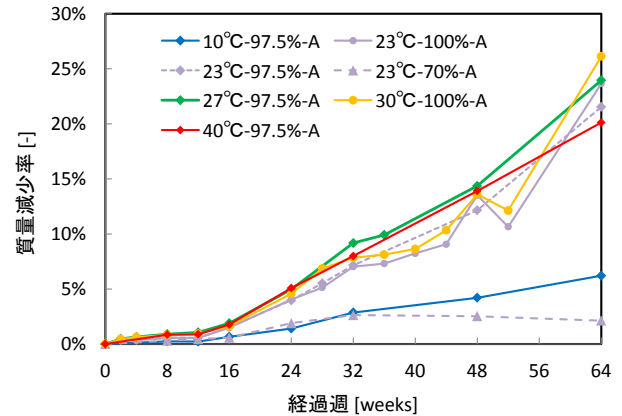


図 3.3 質量減少率の時間変化 (繊維方向に腐朽試験体)

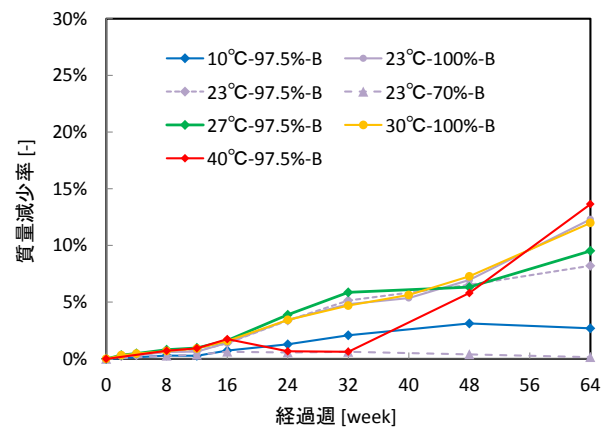


図 3.4 質量減少率の時間変化 (繊維垂直方向に腐朽試験体)

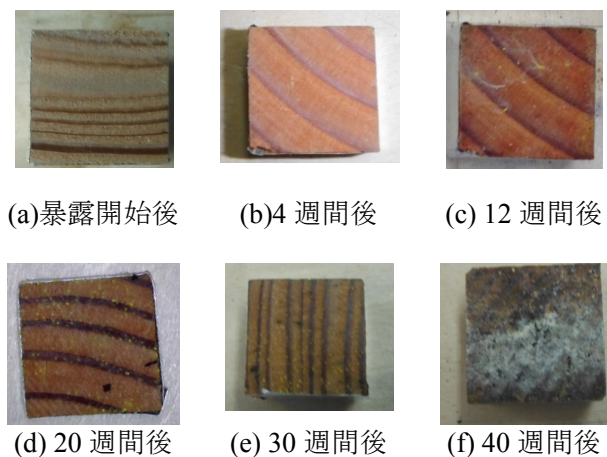


写真 3.7 実験後の試験体の外観

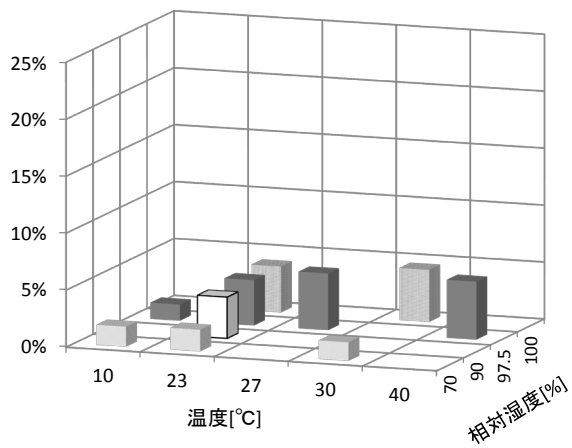


図 3.5 24 週経過後の質量減少率
(繊維方向に腐朽試験体)

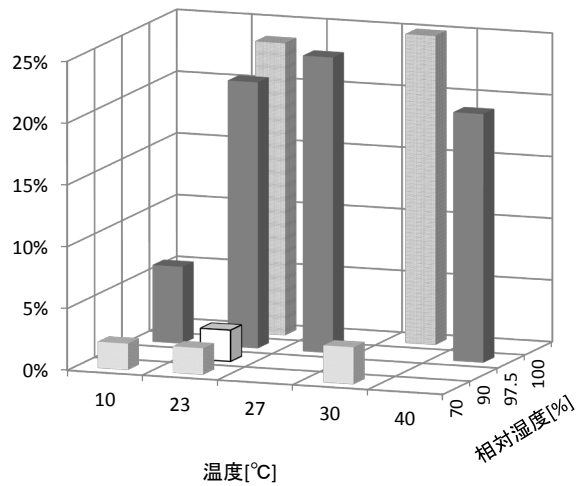


図 3.8 64 週経過後の質量減少率
(繊維垂直方向に腐朽試験体)

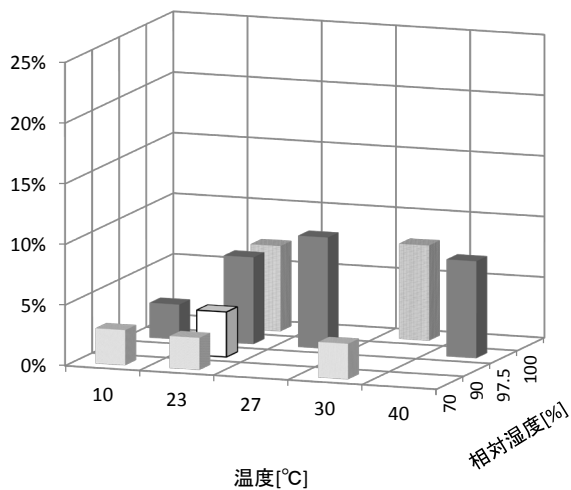


図 3.6 32 週経過後の質量減少率
(繊維方向に腐朽試験体)

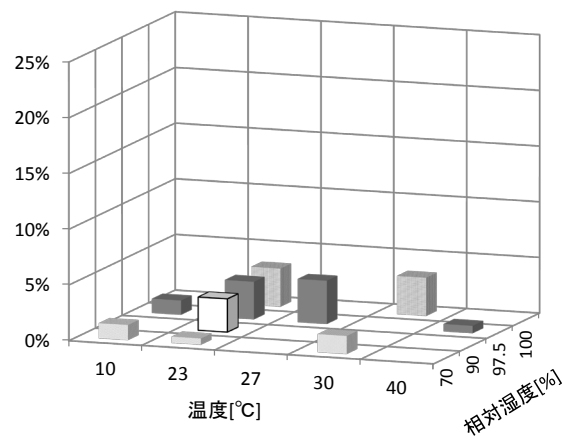


図 3.9 24 週経過後の質量減少率
(繊維垂直方向に腐朽試験体)

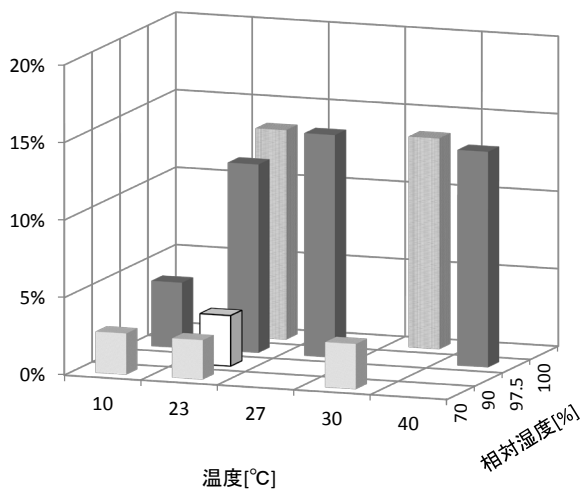
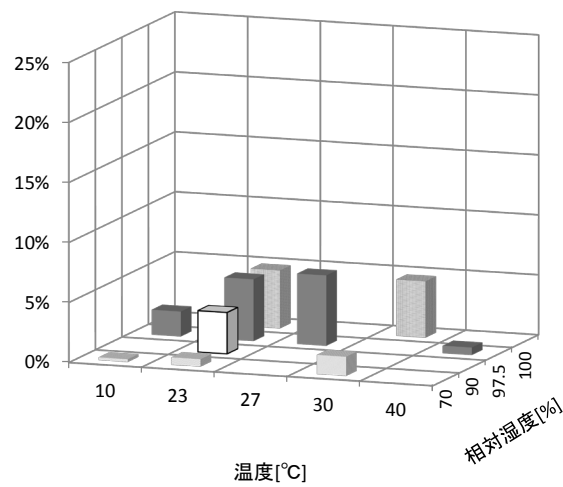


図 3.7 48 週経過後の質量減少率
(繊維方向に腐朽試験体)



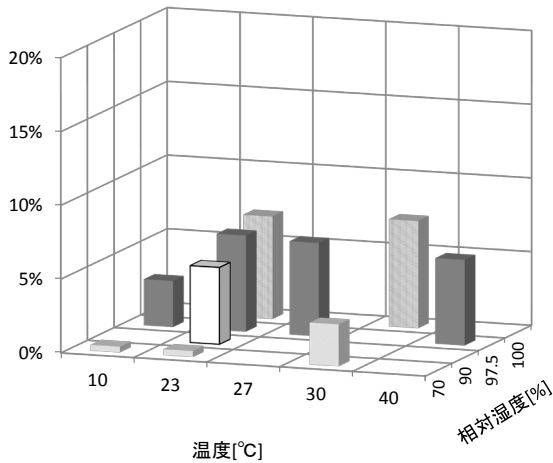


図 3.11 48 週経過後の質量減少率
(繊維垂直方向に腐朽試験体)

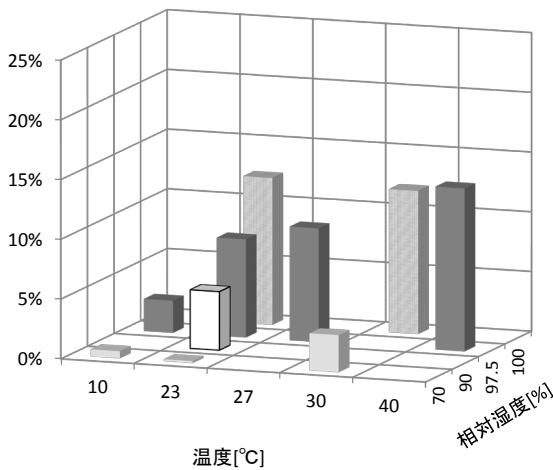


図 3.12 64 週経過後の質量減少率
(繊維垂直方向に腐朽試験体)

2) 奥行方向への腐朽の拡大

厚みが異なる試験体の質量減少率の比較から、試験体の奥行き方向の質量減少率の分布を推定した。奥行き方向の質量減少率の分布の推定手法は表 3-3 による。

3 条件で実施した実験のうち、温度 23°C 相対湿度 70% については質量減少がほとんど観測されなかったため、ここでは、温度 23°C 相対湿度 100%、温度 40°C 相対湿度 97.5% の結果を示す (図 3.14)。なお、いずれの厚みの実験結果とも、4 つの試験体の測定結果の平均値を示した。

いずれの結果とも、表面に近い位置の方が高い質量減少率の傾向となり、表面から質量減少する範囲が時間とともに拡大していく様子が確認できた。腐朽の進行方向で比較すると、繊維方向に腐朽を進行させる方が、垂直方向よりも、表面に近い位置で質量減少率が高く、奥行き方向への拡大も早いことが確認できた。

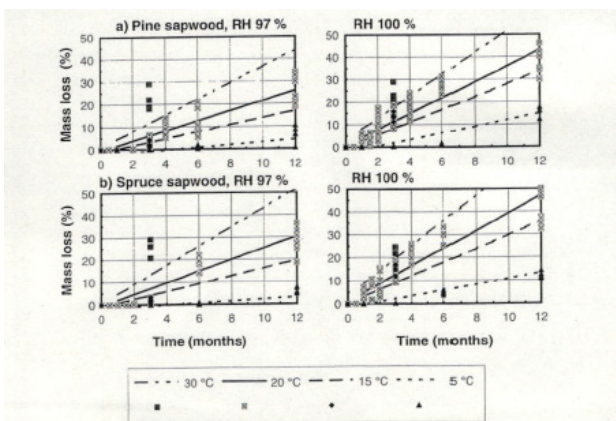
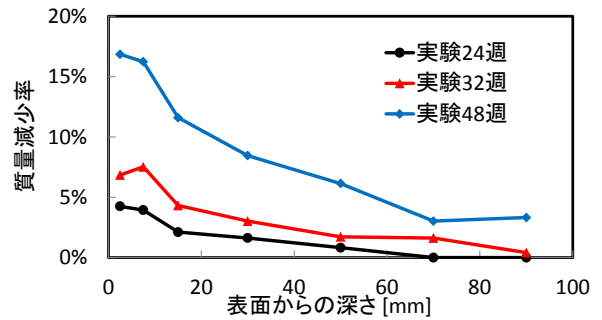
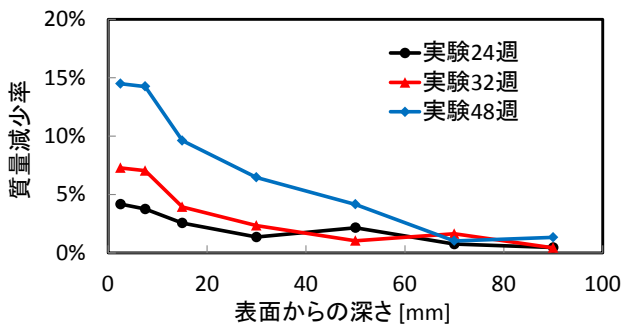


図 3.13 既往の研究による質量減少率の測定例

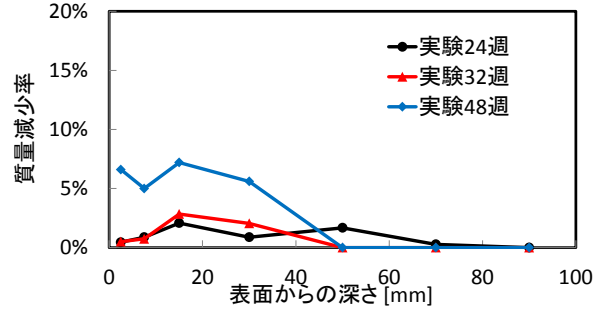
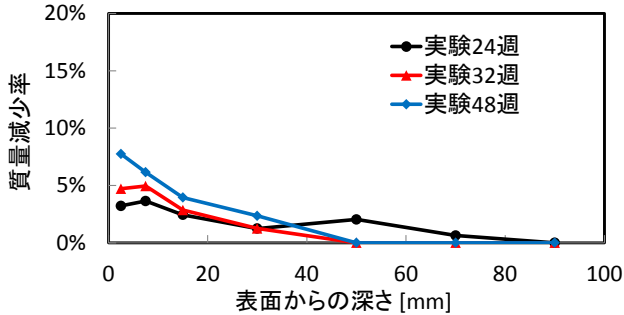
表 3.3 奥行き方向の質量減少率の分布の推定手法

試験体厚み	計算する質量減少率の範囲	中心位置	質量減少率の計算方法
(a)	5mm	0～ 5 mm	$\frac{(a)の質量減少}{(a)の暴露前質量}$
(b)	10mm	5～ 10 mm	$\frac{(b)の質量減少 - (a)の質量減少}{(b)の暴露前質量 - (a)の暴露前質量}$
(c)	20mm	10～ 20 mm	$\frac{(c)の質量減少 - (b)の質量減少}{(c)の暴露前質量 - (b)の暴露前質量}$
(d)	40mm	20～ 40 mm	$\frac{(d)の質量減少 - (c)の質量減少}{(d)の暴露前質量 - (c)の暴露前質量}$
(e)	60mm	40～ 60 mm	$\frac{(e)の質量減少 - (d)の質量減少}{(e)の暴露前質量 - (d)の暴露前質量}$
(f)	80mm	60～ 80 mm	$\frac{(f)の質量減少 - (e)の質量減少}{(f)の暴露前質量 - (e)の暴露前質量}$
(g)	100mm	80～100 mm	$\frac{(g)の質量減少 - (f)の質量減少}{(g)の暴露前質量 - (f)の暴露前質量}$



(a) 繊維方向に腐朽進行、温度 23℃・相対湿度 100%

(b) 繊維方向に腐朽進行、温度 40℃・相対湿度 97.5%



(c) 繊維垂直方向に腐朽進行、温度 23℃・相対湿度 100%

(d) 繊維垂直方向に腐朽進行、温度 40℃・相対湿度 97.5%

図 3.14 質量減少率の分布

3) 熱伝導率と透湿抵抗

腐朽による質量減少が及ぼす熱伝導率及び透湿係数への影響を測定して確認した。

① 熱伝導率

熱伝導率は、迅速熱伝導率計を用いて計測した。試験体サイズは $100 \times 60 \times 20\text{mm}$ とした。

迅速熱伝導率計よりも、保護熱板法や HFM 法（熱流計法）による方が高い精度の測定結果が期待できるが、大きなサイズの腐朽した試験体を作成することができないので、本研究では迅速熱伝導率計を用いた。

腐朽前の試験体と、質量減少率が 5%、10%、15% となった試験体を対象として試験を行った。なお、質量減少率の試験を行った試験体単体（最大サイズ： $100 \times 20 \times 20\text{mm}$ ）では、迅速熱伝導率を実施するにはサイズが小さいので、同程度の質量減少率が観測された試験体を 3 個連結させて熱伝導率試験体（ $100 \times 60 \times 20\text{mm}$ ）を作成した。熱流は木の繊維方向とした。各質量減少率の条件に対して 1 個の測定を行った。測定は温度 23°C 、相対湿度 50%で行った。

測定結果を図 3.15 に示す。熱伝導率は、質量減少との明確な相関関係を見ることができなかった。

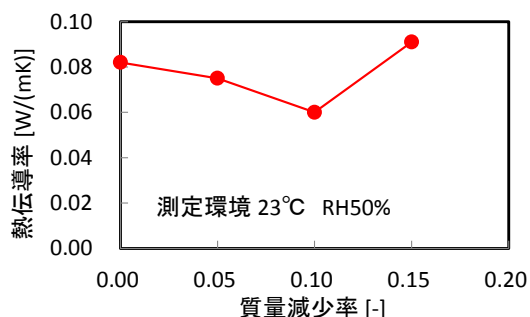


図 3.15 熱伝導率の測定結果

② 透湿係数

透湿係数は、カップ法で計測した。試験体サイズは $60 \times 60 \times 10\text{mm}$ とした。

熱伝導率の計測と同じく、腐朽前の試験体と、質量減少率が 5%、10%、15% となった試験体を対象として試験を行った。質量計測用の試験体は $20 \times 20 \times 10\text{mm}$ で、透湿係数を測定するには断面が小さいので、これを 3×3 個で結合させて試験体を製作した。湿流は木の繊維方向とした。各質量減少率の条件に対して 1 個の測定を行った。測定は温度 23°C 、相対湿度 50%で行った。

測定結果を図 3.16 に示す。透湿係数は、質量現象に応じて値が大きくなる、つまり腐朽に伴って湿気が通りやすくなる傾向ことが確認できた。

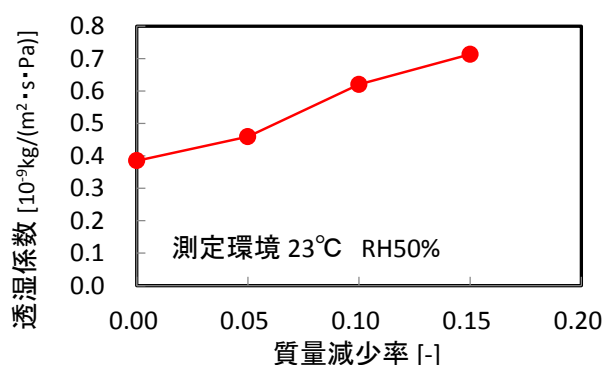


図 3.16 透湿係数の測定結果

(3) 実験のまとめ

不特定菌種に対する腐朽状況を把握するため、菌床を無殺菌土壌とする実験を実施し、10 通りの定常状態の温湿度条件で、計約 1,100 体の試験体を暴露し、その質量減少率を測定した。

試験体の個体差が見られたが、相対湿度が 100% に近い環境で質量減少が見られ、温度 27°C 程度で質量減少率が高くなることが確認できた。実験開始後 64 週間経過後では最大 26% 程度の質量減少率が見られた。90% 以下の条件ではカビの発生が見られたが、腐朽による質量減少は見られなかった。

また、腐朽範囲の拡大や腐朽による物性値の変化について把握できた。

4. 数値解析モデルの提案

(1) 熱水分同時移動と腐朽モデルの組み合わせ

図 2.3 (3ページ) で示したように、熱水分同時移動方程式と腐朽モデルを組み合わせる数値計算手法を提案する。

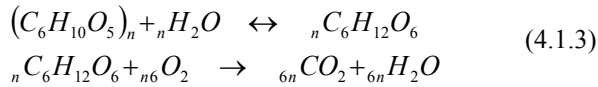
熱水分同時移動方程式の基礎式は以下の通りである。

$$c\rho_s \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla(\lambda + r\lambda'_{Tv})\nabla T + \nabla r\lambda'_{Tv}(\nabla\mu - ng) \quad (4.1.1)$$

$$\rho_w \frac{\partial \psi}{\partial \mu} \frac{\partial \mu}{\partial t} = \nabla(\lambda'_{Tv} + \lambda'_{Td})\nabla\mu - ng + \nabla\lambda'\nabla T + W_R \quad (4.1.2)$$

通常の方法中の熱水分移動方程式と異なる点を以下に述べる。

(4.1.2)式の右辺の最終項に、水分発生項 W_R がある。木材腐朽は、セルロースの分解によって水分が発生する。その水分発生を、この項で考慮することとした。既往文献¹⁾によると、質量減少は以下の化学式で表せる。



反応前後のセルロース $(C_6H_{10}O_5)_n$ の分子量と水 H_2O の分子量を比較すると、162g の木材の絶乾質量減少に対して、90g の水分発生があることが分かる。

また、腐朽に伴う木材の物性値をモデル化する。熱伝導率については、前章の実験で、腐朽に伴う変化が見られなかった (4.1.4 式)。透湿係数、つまり湿気伝導率については、前章の実験で、1%の質量減少率につき、腐朽前よりも値が 7.8%大きくなることが確認できた (4.1.5 式)。

$$\lambda = \lambda_{before} \times (1 - w_l \times 0) \quad (4.1.4)$$

$$\lambda'_{Tv} = \lambda'_{Tv, before} \times (1 - w_l \times 7.8) \quad (4.1.5)$$

(2) 腐朽のモデル化

図 3.3 と図 3.4 により、質量減少の時間変化を見ると、実験結果のばらつきがあるが、温度・木目の影響はあまり受けず、16 週目前後から質量が減少し

始める。ただし、相対湿度 90%以下の試験体においては、質量減少が見られなかった。これを基に、相対湿度 97.5%以上で累積 16 週間経過が腐朽開始の条件とした ((4.1.6)式)。

$$R_s = 9,676,800[\text{sec.}] \quad (4.1.6)$$

ただし、RHの閾値が97.5%以上

これを(2.2.1)式に代入することで、腐朽の開始を判定した。ただし、時間の累積で(2.2.1)式の条件を満たす前に、2. (2)4)で示した菌の死滅の条件を満たせば、その時点で腐朽開始までの時間の累積値を 0 とすることとした。

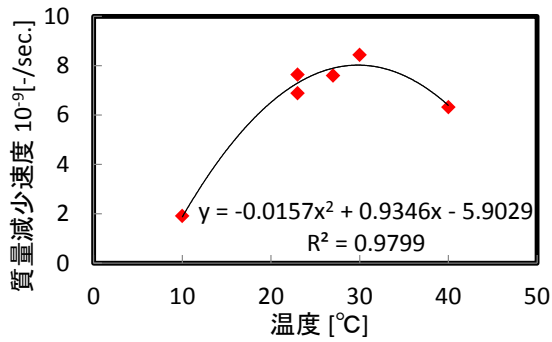
図 3.5～図 3.8などで、腐朽開始後に着目すると、質量減少の速度は温湿度によって大きく異なる。実験結果から、質量減少速度 w_s を以下のようにモデル化した。このモデル係数は、質量減少が開始する 16 週目から 64 週目までの質量減少率の平均値を、実験から得られる結果とし、それを温度の二次関数として近似したものである。式の近似曲線を図 4.1に示す。

繊維方向に腐朽が進行する場合

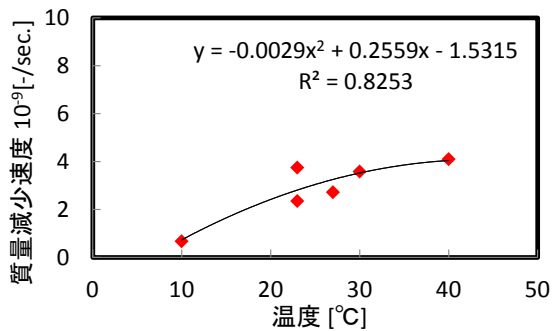
$$w_s = \begin{cases} (-0.0157T^2 + 0.935T - 5.90) \times 10^{-9} & (RH \geq 97.5\%) \\ 0 & (RH < 97.5\%) \end{cases} \quad (4.1.7)$$

繊維垂直方向に腐朽が進行する場合

$$w_s = \begin{cases} (-0.0029T^2 + 0.256T - 1.53) \times 10^{-9} & (RH \geq 97.5\%) \\ 0 & (RH < 97.5\%) \end{cases} \quad (4.1.8)$$

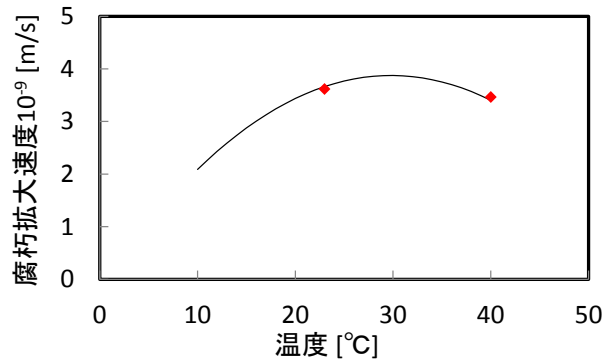


(a) 繊維方向に腐朽が進行する場合

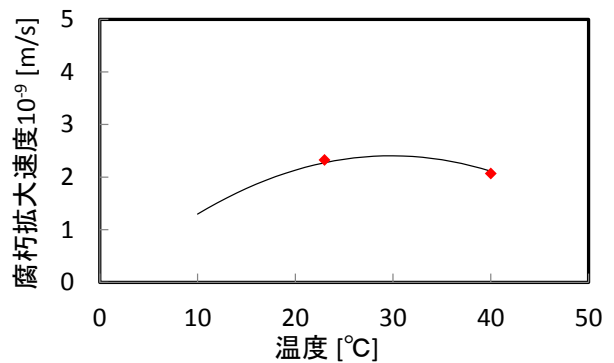


(b) 繊維垂直方向に腐朽が進行する場合

図 4.1 質量減少速度の近似曲線



(a) 繊維方向に腐朽が進行する場合



(b) 繊維垂直方向に腐朽が進行する場合

図 4.2 腐朽の拡大速度

次に、奥行方向への腐朽の拡大のモデル化を行った。これは、図 3.14の結果を基に検討した。測定結果のばらつきもあるので、質量減少率 2%以上が観測された部分までを、実験から得られた腐朽が開始している奥行長さとし、それを表す拡大速度 R_v を検討した。

R_v を同定するための実験は、3つの温湿度条件のみ実施したが、関数の形状は質量減少速度と同様になるものと仮定し、近似式を作成した。

繊維方向に腐朽が進行する場合

$$R_v = \begin{cases} (-0.00455T^2 + 0.271T - 0.171) \times 10^{-9} & (RH \geq 97.5\%) \\ 0 & (RH < 97.5\%) \end{cases} \quad (4.1.9)$$

繊維垂直方向に腐朽が進行する場合

$$R_v = \begin{cases} (-0.00283T^2 + 0.168T - 0.106) \times 10^{-9} & (RH \geq 97.5\%) \\ 0 & (RH < 97.5\%) \end{cases} \quad (4.1.9)$$

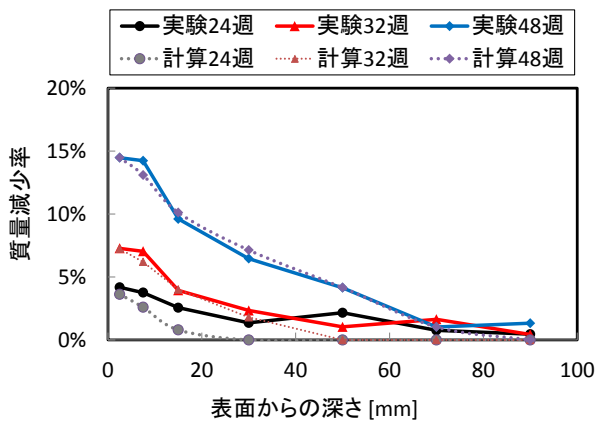
5. 数値解析の妥当性の検証

(1) 定常状態の実験との比較

定常状態の実験と比較する数値計算を行った。計算期間は、暴露開始後 48 週間までとした。計算の境界条件は、実験と同様である。ただし、試験体の無殺菌土壌に暴露する面側からのみ、腐朽が開始することとし、その他の面は完全断湿で、孢子の供給も 1 面のみとした。計算の時間刻みは 1 [min.]とした。

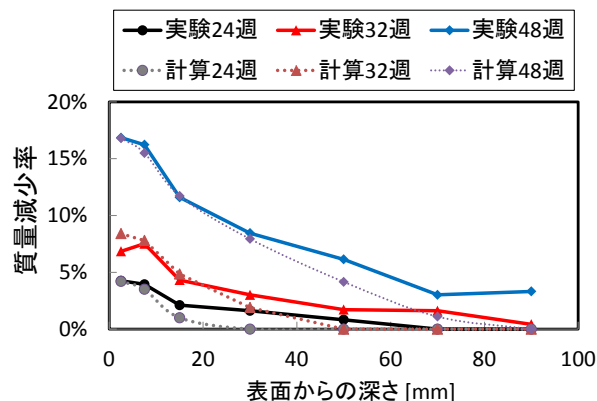
時間経過別の質量減少率の分布について、実験と計算結果の比較を図 5.1 と図 5.2 に示す。

概ね実験結果を再現する質量減少率の計算結果が得られた。ただし、実験では結果のばらつきが見られ、計算結果は、実験で得られるよりも、実験では質量減少率が小さく評価することもあるので注意が必要である。



温度 23°C、相対湿度 100%

図 5.1 定常状態の実験と計算結果の比較 その 1



温度 40°C、相対湿度 97.5%

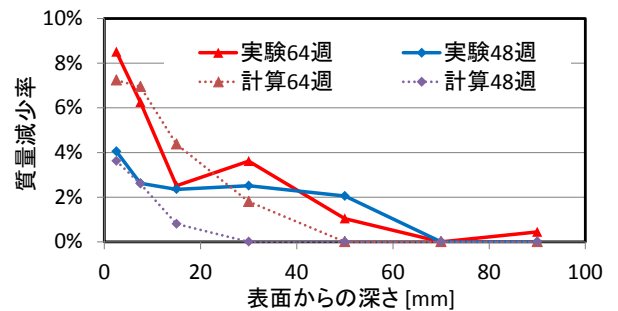
図 5.2 定常状態の実験と計算結果の比較 その 2

(2) 非定常状態の実験との比較

非定常状態の実験と比較する数値計算を行った。計算期間は、暴露開始後 64 週間までとした。実験条件は、温度が 23°C、相対湿度が 4 週間サイクルで 100%と 70%、表 3.2 に示したとおりである。計算の境界条件は、実験と同様である。境界条件の考え方は定常計算と同様である。計算では時間刻みは 1 [min.]とした。

時間経過別の質量減少率の分布について、実験と計算結果の比較を図 5.3 に示す。

48 週目の 20~50mm の範囲に差が見られるものの、質量減少分布の傾向を概ね再現する計算結果が得られた。定常状態と同様、実験結果がばらつくことにより、差が発生することがある。



[温度 23°C・相対湿度 100%], [温度 23°C・相対湿度 70%]
を 4 週間ごとにサイクル

図 5.3 非定常状態の実験と計算結果の比較

6. まとめ

文献調査等を基に、木材腐朽予測モデルの考え方、実験で取得すべき腐朽モデルの指標値を整理した。菌床を無殺菌土壌とする実験を実施し、10通りの定常状態の温湿度条件下で、経過時間と質量減少率の関係を整理した。実験から、腐朽発生のための温湿度と時間の条件、腐朽が発生するときの温湿度に応じた質量減少速度、材料内部への腐朽拡大速度等を明らかにした。実験で取得したデータを基に、木材腐朽を定量的に予測する数値計算手法を構築し、非定常の温湿度条件（4週間サイクルで温湿度が変動）とした実験との比較を行ったところ、実験結果を定性的に再現する質量減少率の計算結果が得られ、妥当性が確認できた。

本研究で提案した数値解析手法は、一定程度の濡れや一時的な高湿状態を許容する新たな工法開発のツールとして活用できる。

本研究では特定樹種（カラマツ辺材）での検討を行ったが、樹種の違いや木材保存剤使用により、腐朽の指標値は本研究で得たものと異なることが予想される。また、数値計算は実験で得られる質量減少傾向を概ね再現するが、試験体のばらつきを評価できていない。これらの点については、設計手法としての実用化に向け、今後さらなる検討を要する。

[参考文献]

- 1) 鈴木大隆ら: 木質系建築材料における腐朽現象の定量化とダメージの数学的予測モデルに関する研究 (第1報) 定常条件下における各種木材の含水率と腐朽の関係, 日本建築学会環境系論文集 No.627, pp.591-597, 2008.5
- 2) 永井久也ら: 木質系建築材料における腐朽現象の定量化とダメージの数学的予測モデルに関する研究 (第2報) 非定常条件下における各種木材の含水率と腐朽の関係, 日本建築学会環境系論文集 No.683, pp.457-463, 2009.4
- 3) 齋藤宏明ら: 建築外皮の湿害に対する評価手法の開発その1 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, 日本建築学会環境系論文集 No.655, pp.807-814, 2010.9
- 4) 齋藤宏明ら: 建築外皮の湿害に対する評価手法の開発その2 等温条件下における木材腐朽の進行と予測モデルの検証, 日本建築学会環境系論文集 No.655, pp.807-814, 2010.9
- 5) Viitanen, H.: Modeling the time factor in the development of Mould Fungi - The effect of critical humidity and temperature conditions on Pine and Spruce Sapwood, International Journal of the Biology, Chemistry, Physics and Technology of Wood. Vol.51, No.1, pp.6-14, 2009.9
- 6) Viitanen, H.: Modeling the time factor in the development of broen rot decay in pine and spruce wood - The effect of critical humidity and temperature conditions, International Journal of the Biology, Chemistry, Physics and Technology of Wood. Vol.51, No.2, pp.99-106, 2009.9
- 7) Nofal M. and Kumaran K.: Biological damage function models for durability assessments of wood and wood-based products in building envelopes, European Journal of Wood and Wood Products vol.69, pp619-631, 2011.11
- 8) 日本木材学会編: 木材の物理, 文永堂出版, 第1版, 2007.6

[記号]

c	: 材料比熱 [J/(kgK)]
G	: 木目
m_{t0}	: 腐朽開始前の質量 [kg]
m_t	: 腐朽開始後の質量[kg]
m_s	: 材の質量 [kg]
r	: 水の凝縮熱 [J/kg]
R_s	: 一定温湿度で腐朽開始までに要する時間 [s]
R_V	: 腐朽範囲が拡大する速度 [m/s]
w_l	: 質量減少率 [-]
T	: 温度 [°C]
t, τ	: 時刻 [s]
t	: 時刻 [s]
T	: 温度 [K]
W	: 樹種と材表面ファクター
w_l	: 質量減少率 [-]
w_s	: 質量減少速度[-/s]
α	: 熱伝達率 [W/(mK)]
α'	: 絶対湿度伝達率 [W/(mK)]
λ	: 熱伝導率 [W/(mK)]
λ'_T	: 温度勾配による水分伝導率 [kg/m/s/K]
λ'_{Tv}	: 温度勾配による水蒸気伝導率 [kg/m/s/K]
$\lambda'_{\mu l}$: 水分化学ポテンシャル勾配による液水伝導率 [kg/m/s/(J/kg)]
$\lambda'_{\mu v}$: 水分化学ポテンシャル勾配による水蒸気伝導率 [kg/m/s/(J/kg)]
μ	: 水分化学ポテンシャル[J/kg]
ρ_s	: 材料密度 [kg/m ³]
ρ_w	: 液水の密度 [kg/m ³]
ψ	: 容積含水率 [m ³ /m ³]
Δx	: メッシュ幅
ϕ	: 相対湿度 [%]