

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

建築外皮の湿害に対する評価手法の開発 その2

PROGRESS OF WOOD DECAY AND VERIFICATION OF PREDICTION MODEL
UNDER ISOTHERMAL CONDITIONS

Part 2 Development of assessment procedure for moisture damage of building envelopes

齋藤宏昭*¹, 福田清春*², 澤地孝男*³, 庄司秀雄*⁴*Hiroaki SAITO, Kiyoharu FUKUDA, Takao SAWACHI
and Hideo SHOUJI*

This study focuses on clarification of wood decay process and verification of a prediction model under isothermal conditions. After moisture properties of decayed wood were investigated, wood decay tests considering moisture balance were implemented with the following conditions; one is stable test with multi-layer wood samples under constant relative humidity; the other is dynamic test with single-layer wood samples under variable relative humidity. Progress of the wood decay for the internal direction was demonstrated in the stable test, and impacts of grain on the moisture distribution of the multi-layer wood samples were observed. The results of the dynamic test indicated that wood decay process was temporarily suspended during hygroscopic conditions. The calculation results by the prediction model could simulate aforementioned phenomena related to both mass loss and moisture content of the wood samples. Additionally, accuracy of the prediction model was discussed in comparison to the results of the decay tests.

Keywords: Wood Decay, Laboratory Experiment, Prediction Model, Isothermal Condition

木材腐朽, 実験室実験, 予測モデル, 等温条件

1. 序

建物のサステナビリティの向上や中古住宅市場の活性化の観点から住宅の長寿命化の検討がなされており¹⁾、50年、100年といった期間の躯体耐久性の確保や、定期的な修繕計画を考慮した評価法の確立が求められている。特に木造住宅に関しては、省エネ性能や耐震性能向上に伴い多様な材料や工法が開発されており、仕様の変遷に対応しうる評価手法が必要とされている。これらの環境、材料分野双方の課題検討には熱水分移動解析を応用したモデルの適用が有用と考えられ、水分蓄積だけでなく材料の劣化機構のモデル化に踏み込んだ検討が着手されつつある^{2), 3)}。木材の劣化現象に着目すると、これまでは実態調査や木材保存剤の評価を目的とした検討が多いものの^{4), 5)}、近年は Nofal らの木材腐朽進行の推定式と熱水分同時移動方程式を統合したモデル⁶⁾や、岩前らの含水率を指標とした数値モデル⁷⁾が提案されており、長期優良住宅などの施策の観点からもこの種の研究の重要性は高まりつつある。

筆者らはこれらの背景を勘案し、外皮の内部結露や漏水による湿害リスクを予測し、設計計画へ反映させることを目的とした、熱水分移動と生物劣化を統合した非構造モデルを提示している⁸⁾。このモデルは、木材のセルロースが分解される過程で生じる水分を勘案して水分収支を計算し、長期的な木材腐朽進行の予測を試みるもの

である。しかし、既報⁸⁾では深さ方向への腐朽進行などは検証されておらず、実験結果との整合を重ねることが、モデルの信頼性を高めるうえで不可欠である。これまで、木材の腐朽試験に関しては農学系の分野で多くの蓄積があるものの、ほとんどがカルチャーボトルや培地上での実験であるため⁵⁾、水分収支との関係が考察できず、既存の知見のモデル検証への適用は困難である。さらに、腐朽進行によって変化する湿気物性値や材料内部の腐朽度と含水率分布の関係を示したデータも乏しい状況にある。

そこで本研究では等温条件下において、腐朽進行と水分収支に着目した予測モデルの検証を行うとともに、実験と解析結果より木材の腐朽プロセス解明に資する以下の知見を得ることを目的とする。

- 腐朽による湿気物性値の変化
- 材料内部への腐朽進行と含水率変化
- 腐朽進行に対する木目の影響
- 雰囲気湿度の変化が腐朽進行に及ぼす影響

2. 木材腐朽による湿気物性値の変化

木材腐朽は菌糸の分泌酵素による加水分解と好氣的完全分解の2段階の生化学反応により、セルロースが水と二酸化炭素に分解され、絶乾密度が低下する。写真1は、腐朽操作を施した木片の断面写真

本論文は、平成20年度及び21年度の日本建築学会大会^{[1][2][3]}における既発表論文の内容をもとに加筆・修正し、まとめたものである。

*¹ 独立行政法人建築研究所 専門研究員・博士(工学)

Research Specialist, Dept. of Environmental Engineering, Building Research Institute, Dr. Eng.

*² 東京農工大学環境資源共生科学部門 教授・農博

Prof., Division of Ecosciences, Tokyo Univ. of Agriculture and Technology, Dr. Agr.

*³ 独立行政法人建築研究所 環境研究グループ長・工博

Director, Dept. of Environmental Engineering, Building Research Institute, Dr. Eng.

*⁴ 財建材試験センター中央試験所

Central Laboratory, Japan Testing Center for Construction Materials

であり、右側の木片から腐朽が進行するに従い木材の構成成分が消失し、左側の木片では年輪の判別が困難な状況に至ったことがわかる(写真中の数字は表1の腐朽度に対応)。このような腐朽による木材の物理的、化学的変化は湿気伝導率などの物性値を変化させ、結果として結露時の含水率分布等へ影響を及ぼす可能性がある。そこで本節では、腐朽操作を施した試料を用い、質量減少率と湿気物性値の関係を明らかにし、後述する解析に用いる物性データを収集する。ただし、腐朽による木材の熱物性値の変化は、湿気物性値に比べて結露に及ぼす影響が小さいと考えられるため、本稿では湿気物性値のみを検討対象とした。

2.1 試料

測定に用いる試料は既報⁸⁾で用いた木片であり、低耐久性樹種の赤松辺材(試料寸法は40×20×5mm)をオオウズラタケ(*Fomitopsis palustris*)によって腐朽操作を行った後、菌糸による水分生成等の影響が生じないように、乾燥・滅菌処理を施している。試料は表1のように質量減少率によって4水準の腐朽度に分類・選別し、各試験に供した。試料の概要を表1に示す。各試験に供する試料の数量はn=3とした。

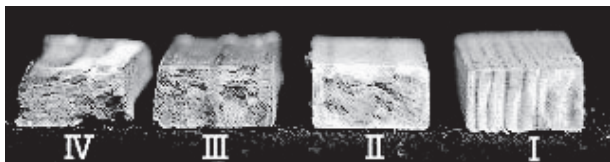


写真1 腐朽による木材内部の変化

(腐朽操作後に切断・撮影、ローマ数字は表1の腐朽度に対応)

表1 物性試験の試料概要

樹種	赤松(辺材)			
木目	柾目			
試供菌	オオウズラタケ (<i>Fomitopsis palustris</i>)			
寸法(mm)	40×20×5			
腐朽度	I	II	III	IV
質量減少率(-)	0 ~ 0.017	0.02 ~ 0.05	0.15 ~ 0.25	0.35 ~ 0.50

2.2 試験方法

(1) 透湿係数

透湿係数は、JIS A 1324(建築材料の透湿性測定方法)⁹⁾のカップ法に準拠して行った。試験体は写真2に示すように、樹脂製の型枠に試料を3個組み合わせ隙間をエポキシ樹脂でシールし作製した。カップはガラス製のシャーレを用い、シャーレ内の相対湿度の調整は飽和塩水溶液により行った。湿度条件は表2に示す3水準とし、平均相対湿度(シャーレと試験室内の相対湿度の平均値)に対応した透湿係数を測定した。また、湿流は柾目方向とした。

(2) 平衡含水率

平衡含水率の測定は、JIS A 1475(建築材料の平衡含水率測定方法)¹⁰⁾に準拠して行った。試験は吸湿過程のみとし、表3に示す湿度条件とした。

(3) 水分拡散係数

液水移動に影響する水分拡散係数については、吸水係数をISO 15148¹¹⁾(Hygrothermal performance of building materials and products - Determination of water absorption coefficient by partial immersion)に準拠した試験方法により測定し、(1)式により換算し求めた¹²⁾。試

験は、試料の側面をアルミテープでシールし、試験時の水位は試料の底面より2±1mmに調整して行った。また、湿流は透湿係数と同様、柾目方向とした。

$$D_w = \frac{\pi}{4} \left(\frac{A_w}{w_c} \right)^2 \quad (1)$$

ここで、 D_w :水分拡散係数(m²/s)、 A_w :吸水係数(kg/[m²・s^{0.5}])、 w_c :毛細管飽和含水率(kg/m³)、 π :円周率

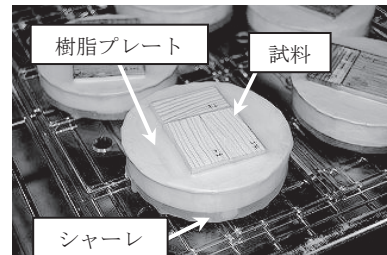


写真2 透湿抵抗試験実施状況

表2 試験条件(透湿抵抗試験)

試験室内温度(°C)	23		
試験室内湿度(%)	50		
シャーレ内相対湿度(%)	25	75	93
平均相対湿度(%)	37.5	62.5	71.5
使用した塩類	KC ₂ H ₃ O ₂	NaCl	KCl

表3 試験条件(平衡含水率試験)

温度(°C)	23				
相対湿度(%)	33	53	75	93	100
使用した塩類	MgCl ₂	Mg(NO ₃) ₂	NaCl	KCl	蒸留水

2.3 腐朽度と湿気物性値との関係

(1) 透湿係数

図1に透湿係数の試験結果を示す。図中の凡例は測定時の平均相対湿度である。一般に、透湿係数は相対湿度の上昇に伴い増大するが¹³⁾、腐朽材についても健全材と同様の湿度依存性が確認された。また、図1では質量減少率に対する透湿係数の勾配がほぼ等しく、平均湿度が異なっても腐朽による透湿係数増加の程度は同じであった。(2)式は、これらの関係から得られた近似式である。

$$K'_{\phi,L} = K'_{\phi,0} + 2.05 \times 10^{-9} L \quad (2)$$

ここで、 $K'_{\phi,0}$ は相対湿度 ϕ における健全材(質量減少率=0)の透湿係数(kg/m²sPa)、 L は質量減少率(-)である。図2に、(1)式による推定値と観測値の比較結果を示す。決定係数は0.99であった。

(2) 平衡含水率

図3に質量減少率と平衡含水率の関係を示す。相対湿度93%以下では平衡含水率に対する質量減少率の影響は僅かであった。しかし、飽和点付近では質量減少率の上昇とともに、平衡含水率も若干増加する傾向が示されている。図4に、今回用いた試料の平衡含水率と相対湿度の関係を示す。

(3) 水分拡散係数

吸水係数から算出した水分拡散係数と質量減少率の関係を図5に示す。水分拡散係数の結果も他の物性値と同様に、質量減少と共に変化する傾向が示されている。水分拡散係数は、腐朽の進行によって5~10倍程度の変化の生じることが読み取れる。

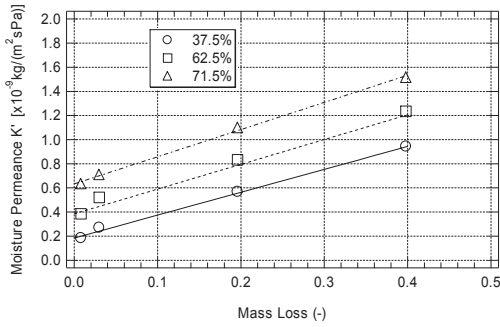


図1 質量減少率と透湿係数の関係

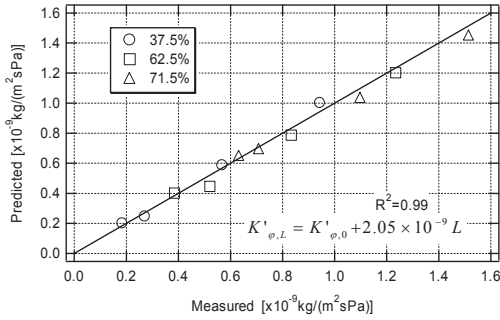


図2 透湿係数の推定値と観測値の関係

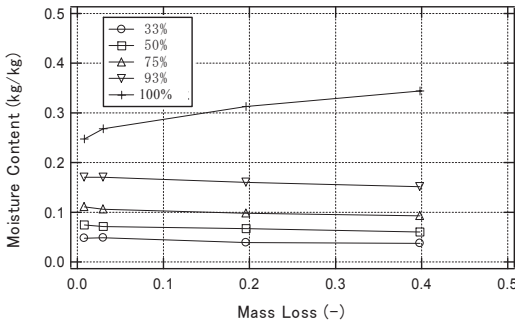


図3 質量減少率と平衡含水率の関係

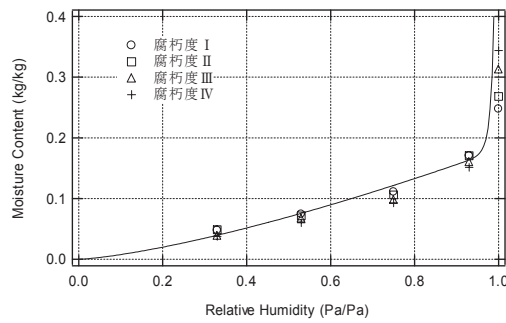


図4 平衡含水率と相対湿度の関係

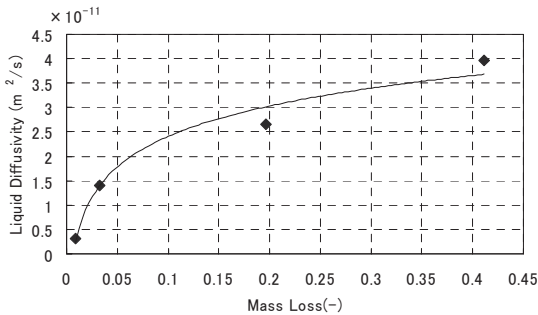


図5 質量減少率と水分拡散係数の関係

3. 等温条件下における腐朽進行に関する実験概要

腐朽進行に関する実験では、試料となる木片を任意の湿度条件下で一定期間曝露し、木材含水率と質量減少率の変化を測定する。各Caseの目的は以下の内容であるが、測定結果は後述する解析結果との比較検討にも用いる。

①実験に用いる菌糸活性の把握 (Case0)

予測モデルによる計算結果を実験結果と比較検証するにあたり、移植元の菌株や培養条件などの影響を受ける供試菌の活性を把握する。活性の程度はモデルに用いる諸係数に反映させる。

②材料内部への腐朽進行と含水率変化の検証 (Case1, Case2)

材料表面から内部へ進行する腐朽の過程と、木材分解に伴う含水率の変化を測定する。また、木目による腐朽進行及び含水率分布への影響を考察する。

③雰囲気湿度の変化が腐朽進行に及ぼす影響 (Case3, Case4)

湿潤と乾燥が1~2ヶ月の比較的長い周期で繰り返す条件下における、腐朽進行と含水率性状を測定し、雰囲気湿度の変化が腐朽進行に及ぼす影響を考察する。

3.1 試料

試料に供する木片は、新たに切り出した赤松の辺材とし、木目の間隔や、病気・カビの痕跡の有無などを目視により慎重に吟味し選別した。試料寸法、木目、曝露後の採取時期等を表4に示す。また、試料はCase別に以下のシール処理を行った(図6参照)。

・Case0, Case3, Case4

雰囲気湿度の変化に対する応答を早める目的から、厚さ5mmの矩形木片を試料とした。各試料は側面のみエポキシ樹脂でシールした。湿流は、Case0-a, Case3, Case4は柎目方向、Case0-bは木口となる。

・Case1, Case2

深さ方向の質量減少率や含水率分布を把握できるように、φ30×5mmの円柱状の木片を4層に積層した試料を用いた。各層の側面に加え、最下部の4層目底面もエポキシ樹脂を塗布した。さらに側面にシールテープを巻いて、側面と底面から菌糸が侵入しないよう処理を行い、上面からの1次元方向に水分拡散と腐朽進行が生じるよう配慮した。湿流はCase1が柎目方向、Case2が木口方向である。

表4 試料概要

試料名	形状	木目	寸法(mm)	n数	採取時期
Case0-a	矩形	柎目	40×20×5	5	1,2,3,6ヶ月
Case0-b		木口			
Case1	円形積層	柎目	φ30×5	5	1,3,6ヶ月
Case2		木口			
Case3	矩形	柎目	40×20×5	7	1,3,6,9ヶ月
Case4					

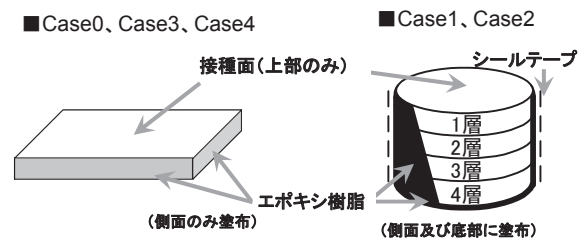


図6 試料のシール処理

3.2 実験方法

供試菌はオオウズラタケとし、試料への菌糸接種は寒天培地上に広がった菌叢に前述したシール処理を施した試料を投入し行った(写真3)。培地上には滅菌したテフロンメッシュ(メッシュ幅約5mm)を挿入し、このメッシュ上に滅菌した試料を設置し、試料と培地が密着しないように工夫した。また、Case1及びCase2の積層試料は曝露面と菌叢が接するよう投入した。試料は、表面に菌糸が目視確認できた後に菌叢から切り離し、樹脂製の容器に無菌箱内で移設した。容器及びデシケータ内に入れ(写真4)、23℃、50%の試験室内に設置した。容器及びデシケータ内部は、蒸留水または飽和塩水溶液(NaCl)により任意の相対湿度に調整した。試料は曝露開始後所定期間で取り出し、菌糸を丁寧に剥がし105℃で24時間乾燥させ秤量し、含水率及び質量減少率を算出した。ただし、底部の木片はエポキシ樹脂の塗布量が多いため、これを補正して算出した。

曝露時の温湿度設定を表5に、雰囲気湿度の変化を伴うCase3及びCase4の設定条件を図7に示す。なお、Case3、Case4では、デシケータ及び樹脂容器内の調湿皿を定期的に交換し、雰囲気相対湿度を変化させた。

試験前の試料の水分性状については、高圧蒸気滅菌を行ったため、菌糸接種直前の含水率はおおよそ0.2kg/kgであった(数個の試料を常温に戻してから測定)。また、菌糸接種時は密閉された樹脂製容器内の菌叢上(培地上)に試料を設置したため、雰囲気はほぼ飽和状態であった。なお、雑菌混入を避けるため、調湿容器への移設直前の含水率測定は行っていない。

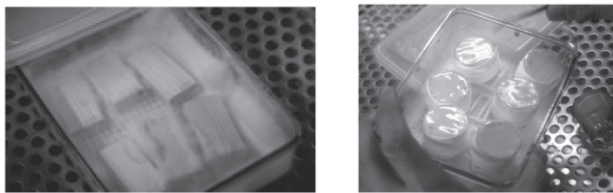


写真3 菌糸の接種状況(左: Case0-a, 右: Case1)

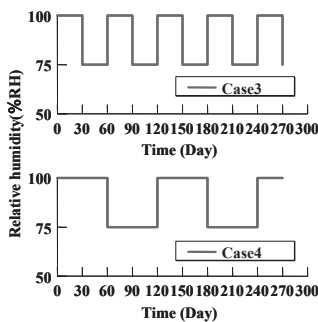


図7 相対湿度の設定条件 (Case3、4)



写真4 曝露状況

表5 曝露時の温湿度設定

試料名	温度	相対湿度
Case0~Case2	23℃	100% (蒸留水)
Case3		100% (蒸留水) → 75% (NaCl) 1ヶ月ごとに変更
Case4		100% (蒸留水) → 75% (NaCl) 2ヶ月ごとに変更

4. 腐朽進行の解析方法

4.1 基本式

本研究では木材の水分収支と質量減少に着目した解析を行う。基本式は、質量減少率、水分生成、熱水分移動に関する(3)~(9)式で構成される。本モデルでは、(4)、(5)式の判別条件を満たす場合に腐朽が進行し、質量減少率 L の変化が反応速度定数 k_m により定まるものとしている。反応速度定数は菌糸活性に影響されるため温度に依存するが、本稿では等温場が解析対象であるため一定値として扱う。また、反応速度定数は材料中の菌糸周りのセルロース濃度が一定とみなせる対数増殖期への適用を想定している。式の導出過程は既報⁸⁾を参照されたい。

$$\frac{dL}{dt} = k_m \quad (3)$$

$$\text{材料表面 } (x=0) : \varphi_i > \varphi_c \quad (4)$$

$$\text{材料内部 } (x>0) : L_{i-1} \text{ or } L_{i+1} > 0, \varphi_i > \varphi_c \quad (5)$$

ここで、 L : 質量減少率(-)、 t : 時間(s)、 k_m : 反応速度定数(1/s)、 φ_i : 計算対象セルの相対湿度(-)、 φ_c : 腐朽進行に必要な相対湿度の閾値(-)

木材分解による水分生成を加味した多孔質材内の熱水分同時移動方程式を(6)、(7)式に示す。また、質量減少率に対する水分生成率 h 及び水分生成量 W_L は(8)、(9)式で定義される。

$$\rho_m c \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot \{ (\lambda + r \lambda'_{Tg}) \nabla T + r \lambda'_{rg} (\nabla \mu - n g) \} \quad (6)$$

$$\rho_w \frac{\partial \psi}{\partial \mu} \frac{\partial \mu}{\partial t} = \nabla \cdot (\lambda'_{\mu} (\nabla \mu - n g) + \lambda'_T \nabla T) + W_L \quad (7)$$

$$h = \frac{d\psi}{dL} \quad (8)$$

$$W_L = h \rho_w \frac{dL}{dt} \quad (9)$$

ここに、 ρ_m : 材料密度 (kg/m³)、 c : 比熱 (J/kgK)、 t : 時間 (s)、 T : 絶対温度 (K)、 λ : 熱伝導率 (W/mK)、 r : 潜熱 (J/kg)、 λ'_{Tg} : 温度勾配による気相水分伝導率(kg/msK)、 λ'_{rg} : 水分化学ポテンシャル勾配による気相水分伝導率(kg/ms[J/kg])、 λ'_{μ} : 水分化学ポテンシャル勾配による水分伝導率(kg/ms[J/kg])、 λ'_T : 温度勾配による水分伝導率(kg/msK)、 W_L : 水分生成量 (kg/[s·m³])、 h : 水分生成率(-)、 L : 質量減少率(-)

4.2 諸係数の設定

(1) 腐朽進行に関する係数

腐朽速度は接種時の菌糸活性や試料に定着した菌糸密度に影響を受ける。ゆえに、腐朽進行に関する係数は、前述したCase0の実験結果から算出した。

反応速度定数は、図8に示す質量減少率と時間の関係より算出した。Case0では試料寸法が小さいこともあり、Case0-aとCase0-bの木目による差異は生じていない。後述する計算における分割幅はCase0の試料厚さ5mmより十分小さく、ゆえに計算では木目によらず同一の反応速度定数を用いることとした。水分生成率については、図9に示すCase0の質量減少率と容積基準含水率の関係より算出した^{注1)}。計算に使用する反応速度定数と水分生成率を表6に示す。

(2) 湿気物性値

湿気伝導率に関しては相対湿度に対応した健全材の値 $\lambda'_{\varphi 0}$ を(10)

式で求め、さらに腐朽度に応じた値を (11) 式により算出した。

$$\lambda'_{\phi,0} = 1.87 \times 10^{-11} \phi^{2.40} \exp(-0.789[1 - \phi^{1.147}]) \quad (10)$$

$$\lambda'_{\phi,L} = \lambda'_{\phi,0} + 1.03 \times 10^{-11} L \quad (11)$$

(11) 式は透湿係数と質量減少率の関係式である (2) 式を換算したものである。また、木口方向の湿気伝導率は、別途健全材に対して行った測定結果を考慮し、柁目方向の 10 倍とした。平衡含水率については腐朽度の影響を無視し、(12) 式により求めた値を採用した。水分拡散係数は、文献値¹⁴⁾を参考に健全材の値 (図 10) を (13) 式で求め、図 5 に示した質量減少率との関係を反映させた (14) 式により算出した。

$$u = 1.58 \phi^{2.088} \exp(-1.879[1 - \phi^{616.2}]) \quad (12)$$

$$D_{w,0} = \exp(-29.716 + 3.9534u - 0.051058u^2) \quad (13)$$

$$D_{w,L} = D_{w,0} \times (3.797 \ln(L) + 18.89) \quad (14)$$

ここに、 λ'_{ϕ} : 湿度依存性を考慮した湿気伝導率 (kg/msPa)、 ϕ : 相対湿度 (-)、 L : 質量減少率 (-)、 u : 質量含水率 (kg/kg)、 D_w : 水分拡散係数 (m²/s)

4.3 計算方法

計算は、熱水分移動及び腐朽進行を 1 次元方向のみと仮定し、時間分割 1(min) の陰解法を適用して行った。境界条件は実験と同様に Case1、Case2 は上面のみ伝達面とし、Case3、Case4 は上下両面を雰囲気開放した。積層試料を用いる Case1、Case2 では、積層した木片間に接触抵抗が存在するが、本計算ではこれを無視した。なお、接触抵抗については室内側や外気側の湿気伝達率を接触抵抗として考慮した計算を別途行い、実験値との比較に対する影響は僅かであることを確認した。また、腐朽開始の閾値は 98%RH とし、対象とするセルが閾値を越えた後、設定反応速度定数で腐朽が進行するとした。木材の熱伝導率、比熱等を表 6 に併記する。

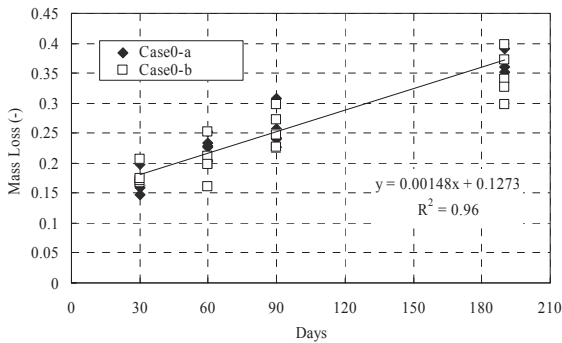


図 8 質量減少率の時間変化 (Case0)

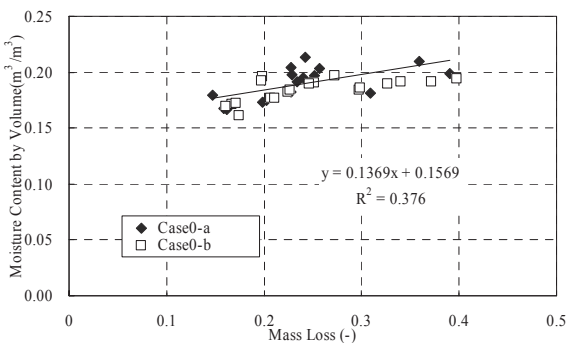


図 9 質量減少率と容積基準含水率の関係 (Case0)

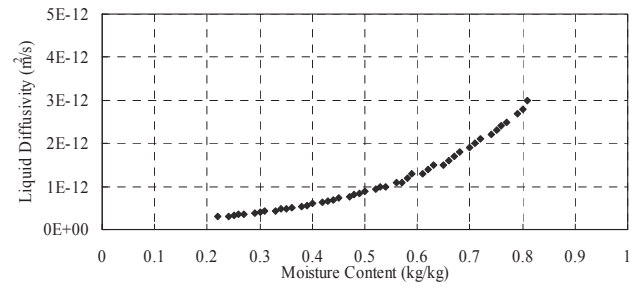


図 10 計算に使用した水分拡散係数

表 6 計算に用いた諸係数

反応速度定数 k_m	1.71×10^{-8} (1/s)	熱伝導率 λ	0.0952 (W/[m·K])
水分生成率 h	0.137 (-)	密度 ρ	460 (kg/m ³)
腐朽開始のセットポイント	98.0(%RH)	比熱 c_m	1880 (J/[K·kg])

5. 実験結果及び解析結果の考察

5.1 材料内部への腐朽進行と含水率変化 (Case1、Case2)

積層試料を用いた Case1、Case2 における含水率と質量減少率の断面分布を図 11～図 14 に示す。測定値は各試料の平均値と標準偏差を示しており、座標 17.5mm が容器内の空気に接する 1 層目、2.5mm が底部である 4 層目の試料の結果である。

(1) 実験結果

はじめに、白抜きプロットの実験結果について考察する。柁目方向に木片を積層した Case1 は、1 層目から 4 層目までほぼ一様に腐朽が進行しており、1 ヶ月目を除けば質量減少率の勾配はあまり変わらない (図 11)。これに対し、木口方向に木片を積層した Case2 は、Case1 に比べ 2、3 層目の腐朽進行が顕著であった (図 12)。Case2 の 6 ヶ月目では 2～4 層目の質量減少率が空気に接する 1 層目を上回っており、木目による差異が明確に表れている。

また、Case1 の質量減少率 (図 11) では 1 層目の標準偏差が大きく、特に 1 ヶ月目は 2 層目との差が大きい。一般に、培地上の菌叢による接種時は、菌糸を経由した養分供給がなされ¹⁵⁾、木口に比べ水分や物質拡散が遅い柁目では、接種面において試料設置状況や菌糸活性の影響を受け易く、含水率や腐朽速度の差異が顕著になる可能性がある^{注2)}。ゆえに Case1 の 1 層目は、菌糸接種時の要因によりバラツキが生じたものと考えられる。

図 13、図 14 の含水率は質量減少率にほぼ比例する分布となり、図 3 の蒸留水により調湿された際の平衡含水率より高い値であった。また通常、含水率は水分供給面である 1 層目が高い分布となるが、本実験ではむしろ内部の含水率が高い結果となり、木材分解に伴う水分生成の影響が示唆された。含水率分布に関しても、質量減少率と同様に木目による差異が読み取れ、木口方向の含水率分布を示した図 14 では 6 ヶ月目における 2～4 層目の上昇が顕著であった。

写真 5 に曝露 1 ヶ月後の Case1 各層表面の目視状況を示す。写真の白い部分が菌糸であり、1 層目は菌糸接種の段階で全面が菌叢に覆われている。2 層目以降も所々に菌糸が見られ、4 層目までの菌糸到達が確認できる。

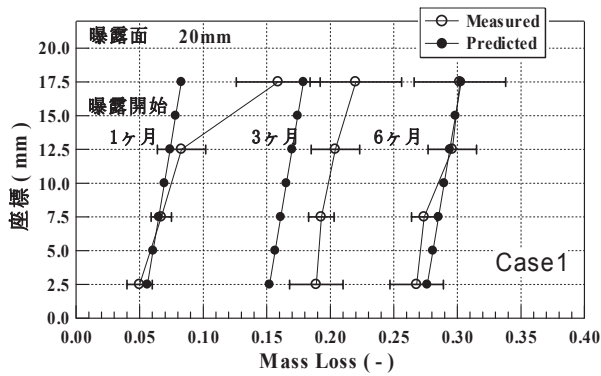


図 11 質量減少率の断面分布 (Case1: 柁目方向)

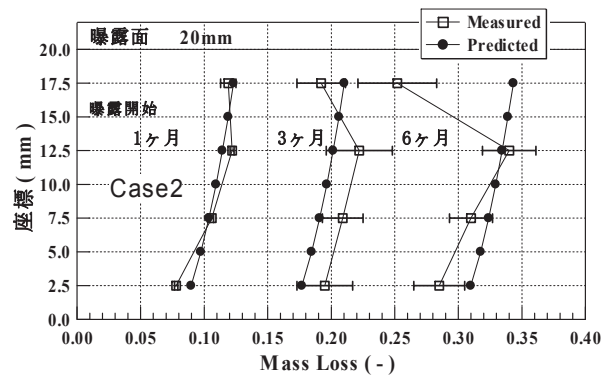


図 12 質量減少率の断面分布 (Case2: 木口方向)

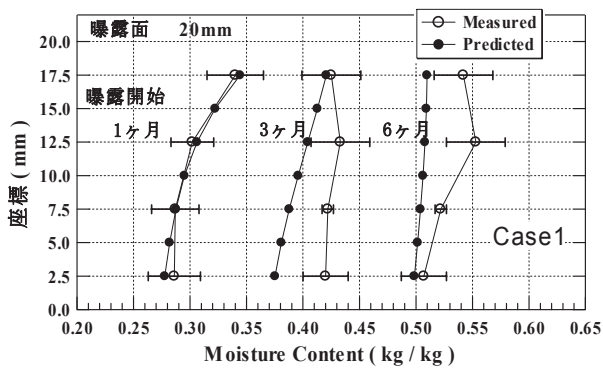


図 13 含水率の断面分布 (Case1: 柁目方向)

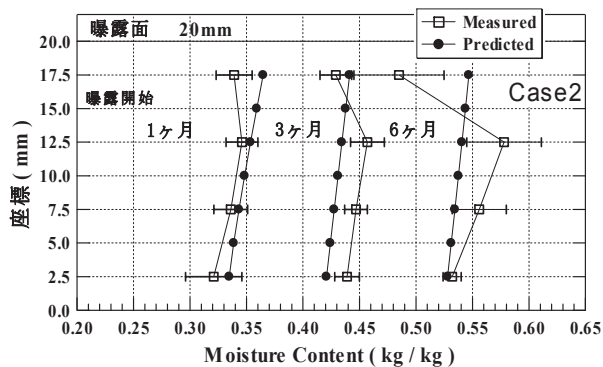


図 14 含水率の断面分布 (Case2: 木口方向)

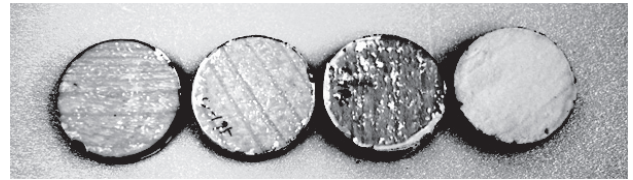


写真 5 曝露 1 ヶ月後の各層表面の状況 (Case1、左から 4,3,2,1 層目)

(2) 解析結果との対応

解析では曝露 1 ヶ月目の含水率と質量減少率の測定値を勘案した初期条件 (表 7) を与え計算を行った。なお、矩形試料 (Case0、Case3、Case4) は、菌叢上での接種期間が積層試料に比べ若干長くなった影響で、質量減少率と含水率の初期値が高く設定された。

図 11～図 14 によれば、計算値は実験値と若干の乖離が見られるものの、質量減少率、含水率ともに測定値の傾向を再現できている。Case1 の 1 層目の誤差 (図 11、1 ヶ月) は、実験結果において述べた菌糸接種時の影響と推測される。

一方、Case2 の計算値と実験値の差異は、木目による影響が推測される (図 12、図 14)。Case2 の質量減少率の実験値に着目すると (図 12)、3 ヶ月目から 6 ヶ月目の変化量が層ごとに異なっており、計算結果とはやや異なる傾向を示している。前述したように本モデルは等温場の反応速度定数を一定としているため、このような現象は再現できない。しかしながら、現行のモデルでも材料内部の腐朽進行と含水率分布の傾向は予測可能であることが、実験結果との比較により確認されたと言える。

表 7 計算における試料の初期条件

試料名 項目	Case0 Case3, Case4 (矩形)	Case1* (円形[柁目])	Case2* (円形[木口])
質量減少率 (-)	0.12	0.035 0.030 0.021 0.013	0.075 0.071 0.061 0.048
初期含水率 (kg/kg)	0.42	0.262 0.256 0.247 0.240	0.308 0.303 0.296 0.290

*積層試料は上面から各層それぞれの値を掲載した。

5.2 雰囲気湿度の変化が腐朽進行に及ぼす影響 (Case3、Case4)

図 15 及び図 16 に、曝露開始から 1、3、6、9 ヶ月における測定値 (プロット) と計算値 (実線及び破線) の比較結果を示す。湿度変動は Case3 が 1 ヶ月、Case4 が 2 ヶ月ごとに乾燥 (75%RH)・湿潤 (100%RH) を繰り返す設定となっている (図 7 参照)。なお、計算値は厚さ方向に 5 分割して解析した各計算ポイントの値を加重平均した、試料全体の平均である。

周期 1 ヶ月である Case3 の実験結果は (図 15)、30 日付近の含水率がやや高いことを除けば、雰囲気湿度と平衡する含水率 (図 4 参照: 乾燥時 0.15kg/kg、湿潤時 0.30kg/kg) に相当し、計算結果もこの傾向を再現している。図 16 の Case4 では、初期の湿潤期間が長いことが影響し、90 日の含水率が 0.22kg/kg 程度と、計算値に比べ若干高めであった。

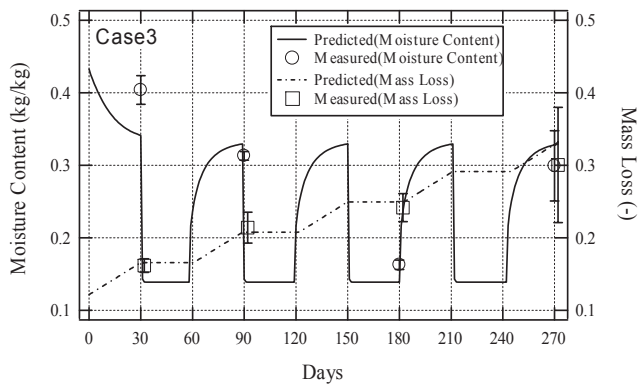


図 15 湿度変動時の含水率及び質量減少率 (Case3: 周期 1 ヶ月)

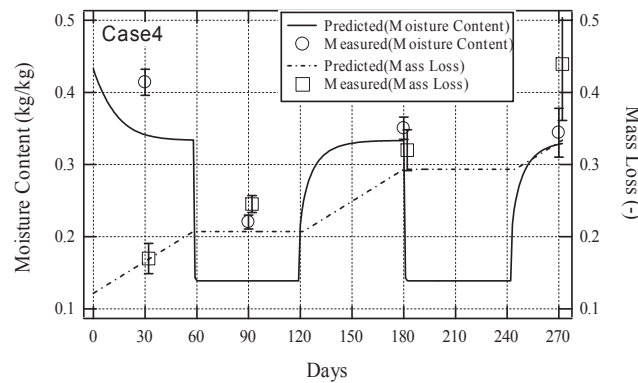


図 16 湿度変動時の含水率及び質量減少率 (Case4: 周期 2 ヶ月)

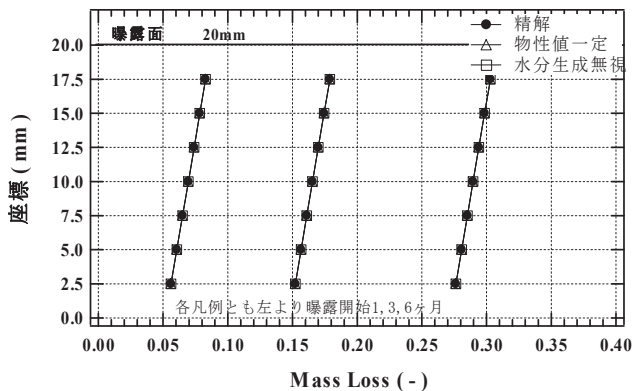


図 17 計算条件による質量減少率の断面分布の差異

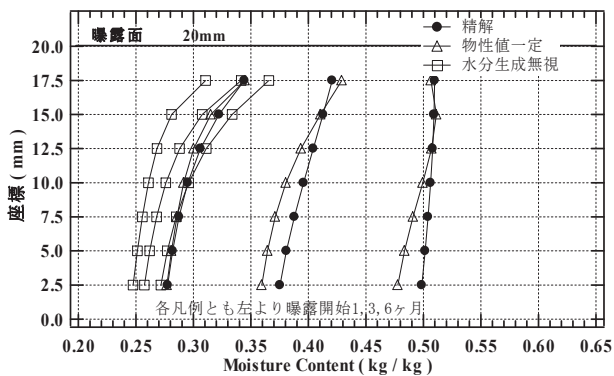


図 18 計算条件による含水率の断面分布の差異

質量減少率については、計算値は測定値をほぼ追従しており、計算では湿潤時のみ腐朽が進行した結果となった。実験値も、湿潤時の曝露時間 1 ヶ月に対し質量減少率がおおよそ 0.05 増加したと読み取れ、既に図 8 で示した湿度一定 (Case0) とほぼ等しい腐朽速度であったと推測される。これらは、モデルの前提条件である細孔内に自由水が生じる湿潤時のみ腐朽進行が生じることを示唆する結果と言えよう。さらに、一旦木材内部に菌糸が蔓延し腐朽が始まると、1 ヶ月程度の乾燥 (75%RH) では腐朽菌の活性は低下せず、水分を得ると再び腐朽が進行することを示唆している。

5.3 腐朽による物性値変化が予測結果に及ぼす影響 (Case1)

Case1 を対象に、腐朽進行に伴う物性値の変化が予測精度に及ぼす影響について考察する。図 17 に質量減少率、図 18 に含水率の計算結果を示す。図中の凡例は、腐朽による物性値の変化を考慮した 5.1 の計算結果を「精解」(●)、物性値変化を無視した「物性値一定」(△)、比較対象として物性値変化と水分生成双方を無視した「水分生成無視」(□)に対応する。ただし、ここでの物性値変化の無視は腐朽進行による影響を意味しており、湿気物性値の湿度依存性は全ての条件で考慮した。なお、与条件である雰囲気及び初期条件等は前述した Case1 と同じである。

Case1 は初期段階から腐朽が生じ経過時間のみで腐朽度が定まる条件設定のため、質量減少率の差異は生じていない (図 17)。しかし、含水率に関しては精解と物性値一定で 0.02kg/kg 程度の差が生じている。また、腐朽による水分生成を無視した場合 (凡例: □)、6 ヶ月の期間を経ても試料底部の含水率が 0.30kg/kg 以下であり、精解とは大きく異なる結果となった (図 18)。木材分解に伴う水分生成の影響は既報⁸⁾で述べているが、本計算結果は腐朽に伴う湿気物性値変化の影響が水分生成の有無に比べて小さいことを示唆している。

6. まとめ

本稿では、木材腐朽による湿気物性値の変化を示すとともに、水分収支に着目した実験と計算により、等温条件下における材料の深さ方向への腐朽進行や湿度変化による影響について考察した。本研究で得られた知見を以下に示す。

- 1) 腐朽材の透湿係数については、腐朽度の影響に加え健全材と同様の湿度依存性が確認された。ただし、平均湿度が異なっても質量減少率に対する透湿係数増加の程度は同じであった。平衡含水率に関しては、相対湿度 93%以下では腐朽の影響は僅かであった。しかし、飽和点付近では質量減少率の上昇とともに、平衡含水率も若干増加する傾向が示された。
- 2) 柁目方向の腐朽は、厚さ 20mm 程度では材料内部もほぼ一様に進行することが確認された。木口方向では表面より内部の腐朽が若干促進され、木目により異なる質量減少率及び含水率分布が形成される結果となった。また、水分供給面である表面に比べ内部の含水率が高い結果となり、木材分解に伴う水分生成の影響が示された。
- 3) 雰囲気湿度が変化する条件下では、モデルの前提条件である細孔内に自由水が生じる湿潤時のみ腐朽進行が生じることを示唆する結果が得られた。また、一旦木材内部に菌糸が蔓延し腐朽が始まると、1~2 ヶ月程度の乾燥 (湿度 75%RH 程度)

では腐朽菌の活性は低下しないことが示された。

- 4) 等温場においては、水分収支を考慮した木材腐朽の予測モデルが、深さ方向への腐朽進行や、雰囲気湿度の変化に対して、実験結果をおおよそ再現できることを確認した。ただし、木目によっては若干の差異が生じる結果となった。
- 5) 腐朽による湿気物性値の変化は、含水率の予測結果に若干影響を及ぼすが、木材分解に伴う水分生成に比べれば、その程度は小さい傾向が見られた。

上述の知見は、褐色腐朽菌であるオオウズラタケと赤松の組合せによる室内腐朽試験で得られたものであり、他の組合せへの予測モデル適用に関しては反応速度定数や水分生成率を予め求める必要がある。また、実験では木目による菌糸活性の差異等の影響が若干見られ、予測精度向上に対する課題が示唆された。

謝辞

本研究は、国土技術政策総合研究所研究課題「既存住宅の省エネルギー性能向上支援技術に関する研究」、独立行政法人建築研究所研究課題「室内空气中揮発性有機化合物の低減に資する発生源対策と換気技術の開発」の研究の一環として実施した。また、本研究の一部は平成 18～21 年度科学研究費補助金基盤研究 (A) (課題番号 18206063 研究代表者 澤地孝男) によるものである。

注

- 注 1) 水分生成率は、本文中の (8) 式からわかるように、質量減少率に対する容積基準含水率の勾配に相当する。本稿では、100%の雰囲気中の試料からの水分蒸発が無視できると仮定し、Case0 の質量減少率と容積基準含水率の関係を線形近似し、得られた勾配を水分生成率とした。
- 注 2) 福田ら¹⁵⁾は木材腐朽菌が腐朽初期の段階で外部 (培地等) から得る窒素供給量により、腐朽速度が異なることを実験により確かめている。菌糸接種面は菌糸を経由した養分供給が為されるため、これらの影響を受け易く、吉村ら¹⁷⁾の検討によれば、培地上の菌叢と試料間の隙間数 mm の差によって、室内腐朽試験における試料の質量減少率増加の程度が異なることを示唆している。

本論文に関連する既発表論文

- [1] 庄司秀雄、齋藤宏昭、大島明、澤地孝男、瀬戸裕直：水分収支を考慮した木材腐朽予測モデルの構築 その 1 多層試料を用いた材料内部への腐朽進行、日本建築学会大会学術講演梗概集 D-2、pp. 347～348、2008. 9
- [2] 村上哲也、庄司秀雄、齋藤宏昭、大島明、澤地孝男、瀬戸裕直：水分収支を考慮した木材腐朽予測モデルの構築 その 2 木材腐朽進行による湿気物性値への影響、日本建築学会大会学術講演梗概集 D-2、pp. 349～350、2008. 9
- [3] 齋藤宏昭、福田清春、澤地孝男：水分収支を考慮した木材腐朽予測モデルの構築 その 3 室内腐朽実験に基づく予測モデルの検証、日本建築学会大会学術講演梗概集 D-2、pp. 311～312、2009. 9

参考文献

- 1) 国土交通省：長期優良住宅の普及の促進に関する基本的な方針 (平成 21 年国土交通省告示第 208 号)、pp. 1～17、2009. 2

- 2) 岸本嘉彦、銚井修一、原田和典、高田 暁：壁体内の熱水分移動を考慮した中性化進行予測モデル、日本建築学会構造系論文集、第 595 号、pp. 17～23、2005. 9
- 3) 伊庭千恵美、和中 龍、銚井修一、小椋大輔：仕上げ層をもつ屋根瓦の水分移動特性に関する研究、日本建築学会計画系論文集、第 640 号、pp. 693～699、2009. 6
- 4) 松岡昭四郎、雨宮昭二、庄司要作、井上衛、阿部寛、内藤三夫：各樹種の野外試験による耐久性調査結果、林試研報 232 号、pp. 109-135、1970. 6
- 5) 吉村貢、山名元：木材腐朽に関する研究Ⅲ 腐朽試験における諸条件の検討、三重大学農学報 33 号、pp. 69-75、1966.
- 6) Mostafa Nofal, Kumar Kumaran : On Implementing Experimental Biological Damage-Functions Models in Durability Assessment System, Proceedings of Japan-Canada Housing R&D Experts Working Group Meeting Building Envelope, pp. 111-124, 2000.
- 7) 岩前篤、鈴木大隆、北谷幸恵、永井久也、小南和也：温湿度等の環境条件と木材腐朽菌生育過程の関係に関する研究、日本建築学会大会学術講演梗概集 D-2、pp. 345-346、2008.
- 8) 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、第 630 号、pp. 971～978、2008. 8
- 9) JIS A 1324 -1995 建築材料の透湿性測定方法、日本規格協会
- 10) JIS A 1475 -2004 建築材料の平衡含水率測定方法、日本規格協会
- 11) ISO 15148 : Hygrothermal performance of building materials and products - Determination of water absorption coefficient by partial immersion, 2002.
- 12) Hugo Hens: Building Physics - ,Heat, Air, and Moisture, Ernst&Sohn, 2007.
- 13) Kumaran, M.K 著 日本建築学会訳：建築材料の熱・空気・湿気物性値、2001.
- 14) Kumar Kumaran, John Lackey, Nicole Normandin, David van Reenen, Fitsum Tariku: Hygrothermal Properties of Several Building Materials, Summary Report from Task 3 of MEWS Project (NRCC-45369), pp.1-68, 2002.
- 15) 福田清春、水谷小百合、原口隆英：木材に対する微小菌類の挙動 (第 6 報) 木材腐朽に対する窒素要求性、木材学会誌、Vol.31、No.4、第 17 号、pp.294～300-55、1985.
- 16) 鈴木大隆、北谷幸恵、岩前篤、永井久也、小南和也、坂本雄三：定常条件下における各種木材の含水率と腐朽の関係 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)、日本建築学会環境系論文集、第 627 号、pp. 591～597、2008. 5
- 17) 吉村貢：木材腐朽試験における諸条件の検討 試験支持ガラス棒の影響、17 回木材学会大会発表要旨、p. 62、1967.

(2010年1月8日原稿受理、2010年5月27日採用決定)