

以下是该 PDF 文件的全文中文翻译:

【第 1 页】

用于定量预测木材腐朽的数值分析模型研究

Study on Numerical Wood Decay Model for Quantitative Prediction

地方独立行政法人 北海道立综合研究机构 建筑研究本部 北方建筑综合研究所

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

【第 2 页】

概要 Abstract

用于定量预测木材腐朽的数值分析模型研究 Study on Numerical Wood Decay Model for Quantitative Prediction

远藤 卓 * Suguru Endo *

关键词: 木材、腐朽、数值计算、耐久性 Keywords: Wood, Decay, Numerical Analysis, Durability

1. 研究概要

1) 研究背景

国家于平成 22 年 (2010 年) 颁布了《公共建筑物等木材利用促进法》，北海道于平成 23 年 (2011 年) 施行了《北海道地区木材利用推进方针》等，从森林资源活用的观点出发，社会要求积极利用木材作为建筑材料。为了确保木结构及木质化建筑物的耐久性，有必要防止作为主要劣化因素的腐朽和虫害。作为腐朽和虫害的对策，通常进行药剂处理，但其效果期间有限，这些灾害屡禁不止的现状依然存在。

着眼于木材腐朽，腐朽的发生及进展很大程度上取决于材料的湿润状态。因此，虽然已开发出许多技术来保护木结构构件免受潮湿和结露的影响，但要完全防止这些仍然很困难，而且对于外装材等构件来说，暴露在水分中是不可避免的。因此，虽然可以考虑通过通风进行干燥，并采用允许一定程度、短时间水分的设计方法，但

由于无法定量地把握木材腐朽在何种环境下发生、以何种速度进行，因此实际上无法明确把握”何种程度的高含水状态是允许的”。

2) 研究目的

开发用于通过数值分析预测木材腐朽的模型。通过实验阐明该模型中表示木材腐朽特性的各种系数，以及腐朽的进行与木材物理性质值变化之间的关系。

2. 研究内容

1) 用于木材腐朽预测的理论模型的探讨 (2012 年度)

- 目标：基于文献及以往研究，探讨木材腐朽的理论模型。整理理论模型中需要实验值的项目，制定 2) 的详细实验计划。
- 试验项目等：文献调查

2) 为掌握木材腐朽特性及腐朽对木材物理性质值变化影响的实验 (2012 ~ 2015 年度)

- 目标：将落叶松试件暴露在温湿度可控的环境中，掌握各种环境条件对腐朽发生及进展的影响。测量腐朽木材的热传导阻力及透湿阻力等物理性质值，明确其与腐朽程度的关系。
- 试验项目等：恒温恒湿箱中的暴露实验

【第 3 页】

3) 用于木材腐朽预测的数值计算方法的构建 (2013 ~ 2015 年度)

- 目标：将实验结果应用于 1) 中创建的理论模型，构建木材腐朽预测模型。对简单的试件进行数值分析，验证其有效性。
- 试验项目等：数值分析模型构建、数值分析

3. 研究成果

1) 用于木材腐朽预测的理论模型的探讨 (2012 年度)

基于文献调查等，将木材腐朽预测模型的基本思路整理并公式化如下：

① 将木材腐朽现象建模并纳入热水分（水分子化学势）同时移动方程。② 腐朽程度通过质量减少率进行量化，并将质量减少率与其他物理性质值相关联。③ 以腐朽开始前的期间、腐朽开始后的质量减少速度、木材内部腐朽范围的扩大作为腐朽现象的指标。

2) 为掌握木材腐朽特性及腐朽对木材物理性质值变化影响的实验 (2012 ~ 2015 年度)

- 为了掌握针对非特定菌种的腐朽状况，进行了以菌床为未灭菌土壤的实验，在 10 种稳态温湿度条件下，暴露总计约 1100 个试件，测量了其质量减少率（图 1）。虽然观察到试件个体差异，但确认在相对湿度接近 100% 的环境中出现质量减少，在温度约 27°C 时质量减少率增高。实验开始 64 周后，观察到最大约 26% 的质量减少率。在相对湿度 90% 以下的条件下，虽然观察到霉变发生，但未发现因腐朽导致的质量减少（图 2）。
- 通过比较不同长度试件的质量减少率，推算了试件深度方向的质量减少率分布（图 3）。
- 测量了质量减少后的木材的透湿系数和热导率。确认透湿系数随着质量减少现象而增大。热导率与质量减少之间未发现明确的相关关系。

3) 用于木材腐朽预测的数值计算方法的构建 (2013 ~ 2015 年度)

基于 2) 的实验结果，整理了 1) 中列举的指标值，构建了木材腐朽预测方法。与非稳态温湿度条件（以 4 周为周期变动）的实验结果进行比较，得到了大致再现质量减少分布倾向的计算结果（图 4）。

(图示略)

暴露情况

图 1 实验方法概要

图 2 因腐朽导致的质量减少

图 3 腐朽向深度方向的扩大

图 4 实验与计算结果的比较

4. 未来展望

本研究成果将作为开发新工法的工具加以利用。关于作为设计方法实用化所面临的课题（因树种导致的腐朽性状差异、木材个体差异的评价等），今后将进一步探讨。

【第 4 页】

目录

1. 引言… 1
2. 腐朽模型思路的整理… 2

3. 腐朽实验… 7
4. 数值分析模型的提案… 15
5. 数值分析的有效性验证… 17
6. 总结… 18

【第 5 页】

1. 引言

(1) 背景

国家于平成 22 年（2010 年）颁布了《公共建筑物等木材利用促进法》，北海道于平成 23 年（2011 年）施行了《北海道地区木材利用推进方针》等，从森林资源活用的观点出发，社会要求积极利用木材作为建筑材料。

本机构在战略研究《“新居住”与森林资源循环形成的可持续地区发展》（平成 22~26 年度）等中，也提出了将地区木材用于建筑用途的方案。

为了确保木结构及木质化建筑物的耐久性，有必要防止作为主要劣化因素的腐朽和虫害。其中，为了抑制因腐朽导致的劣化，需要选择耐腐性高的树种、使用木材防腐剂、采取保护木材免受水分侵害的结构措施，或者组合使用以上多种对策。

考虑保护木材免受水分侵害的结构措施，虽然可以通过保持木材始终处于低湿状态来防止腐朽，但对于木质外墙和结构构件等会暴露于潮湿或临时高湿状态的部位，可以说尚未确立预测腐朽损害的方法。铃木等人 1), 2) 指出，高含水状态持续一定时间会导致腐朽发生（关于以往研究，将在 2. (1)中详述），但现状是在定量预测腐朽损害方面仍存在问题。

图 1.1 研究的构成

【第 6 页】

2. 腐朽模型思路的整理

(1) 文献调查

为了整理腐朽预测模型的思路，调查了相关文献。

关于木材腐朽的以往研究，有很多农学领域的研究，例如木材防腐剂的开发、效果分析、促进试验方法的探讨、着眼于腐朽木材强度降低等，但尝试预测建筑物暴露环境下的腐朽损害的研究很少。在此，整理建筑领域关于腐朽的既往研究成果。

1) 铃木等人的研究 1) 2)

通过实验室实验，明确了自然腐朽（使空气中自然存在的孢子定着于木材的方法）中，各种树种腐朽菌发生的条件（含水率范围、暴露期间）。

传统的设计思路是不允许高含水状态，但研究表明腐朽发生需要一定的高含水期（图 2.1）。

此外，暗示了在低含水状态下存在菌活动减退的条件，以及在非稳态条件下，一定含水状态的时间累积会导致腐朽发生。

图 2.1 防止腐朽的思路

2) 斋藤等人的研究 3) 4)

提出了将腐朽扩大视为扩散现象的数值计算模型与热水分同时移动相关联进行分析的方法。此外，还提出了将伴随腐朽分解产生的水分纳入数值计算的模型。

3) Viitanen 等人的研究 5) 6)

通过实验室针对 Scots pine 和 Norway spruce，使用 *Coniophora puteana*（典型菌种）、*Serpula lacrymans*（耐干燥菌种）进行的促进试验，掌握了腐朽开始后的质量减少速度。此外，还给出了腐朽菌死亡所需的干燥条件（温度、湿度、时间）。

可以说这是明确了温湿度与质量减少率关系的先驱性研究。

4) Nofal 等人的研究 7)

总结了关于木材腐朽的既往研究成果，将质量减少速度表示为温湿度等的函数。提出了将腐朽预测用于设计的方法。

5) 总结

作为定量把握木材腐朽发生及进展的指标，既往文献中使用质量减少率。也有研究探讨了质量减少率与强度等的关系。

虽然也有为了提高实验再现性而采用接种培养菌的方法，但一般认为这比实际环境对木材更严酷。

既往研究中未提出能正确捕捉木材内部腐朽分布的腐朽模型。

木材腐朽被认为存在 1) 腐朽开始前的阶段、2) 腐朽进行、3) 腐朽菌死亡的阶段，需要针对每个阶段建立模型。

(2) 理论模型的提案

1) 腐朽模型考虑的对象因子

首先，腐朽活动在①养分（木材）、②氧气、③孢子供应充足的条件下，若④水分、⑤温度条件齐备就会发生。

此外，pH 值在一定范围、紫外线在一定值以下等也被认为是腐朽活动的条件 8)，但本研究不考虑这些条件。

另外，在建筑环境下的木材中，①养分（木材）、②氧气总是存在的。经过防腐处理的木材对腐朽菌来说没有适当的养分，并且根据树种，腐朽性状也有很大差异，但本研究首先以未经处理的特定树种为对象进行探讨。关于③孢子的供应，虽然腐朽性状因菌种而异，但由于建筑环境下的木材难以预测定着的菌种，因此决定对暴露于非特定菌种的实验（参考下一章）获取各种数据，并将其用于腐朽模型。

图 2.2 整理了影响因素的思路。

木材腐朽受④水分和⑤温度的影响，但实际木材中会产生温度和水分分布。因此，本研究将其作为应用于网格分割区域的数值解析方法进行提案。

整理了木材腐朽预测模型的基本思路，如图 2.3 所示。决定将木材腐朽现象建模并纳入热水分（水分化学势）同时移动方程。

腐朽通过质量减少率进行定量化，并将质量减少率与其他物理性质值相关联。此外，还决定将腐朽导致的质量减少引起木材物理性质变化的相互作用也纳入模型。

另外，根据以往研究，可以认为木材腐朽分为：①腐朽开始前的阶段、②腐朽进行的阶段、③因干燥等导致腐朽活动减退的阶段。其中，对于①和②，本研究通过实验调查指标值，对于③，则参考既往文献的探讨结果来构建模型。

腐朽模型的概念如图 2.4 所示。以下分别阐述各阶段模型的想法。

图 2.2 对象因子的思路

图 2.3 热水分同时移动与腐朽模型

图 2.4 腐朽的阶段

2) 腐朽开始前的阶段

在存在菌供应的环境中，暴露一定期间 R（取决于温湿度条件）后，腐朽开始。在非稳态情况下，认为从暴露开始时刻 t 开始，到腐朽开始所需期间的倒数（1/R）与时间步长乘积的累积超过 1 的时刻（t+τ），材料表面开始腐朽（式(2.2.1)）。

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

通过实验，获取取决于温湿度的指标值 R。

3) 腐朽进行的阶段

腐朽开始后，足够小材料的质量减少速度 w_s 是温湿度的函数。

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

通过实验，获取取决于温湿度的指标值 w_s 。

【第 8 页】

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

w: 质量减少率 [-] t: 时刻 [s] T: 温度 [°C] φ : 相对湿度 [%] w_s : 质量减少速度 [-/s]

图 2.5 足够小材料的腐朽进行

对于有扩展的材料，认为腐朽从某一点的腐朽开始逐渐扩大范围。在通常的建筑环境下，是与空气或土壤接触的材料表面。

在本研究中，设腐朽范围扩大的速度为 R_v 。 R_v 是温湿度的函数，并且根据木纹方向而异。使用这个 R_v ，对于表面以外的某个网格开始腐朽的条件是，从相邻网格腐朽的时刻 t_1 开始，经过满足式(2.2.3)的时间 t_2 。

4) 腐朽减退的阶段

对于腐朽活动已经开始的材料，即使给予短期的干燥条件，在干燥期间腐朽的进行会停止，但如果湿度升高，腐朽菌的活动会在那时重新开始。

然而，如果干燥期间较长，腐朽菌会死亡，因此为了进行腐朽，必须再次满足 2) 项所述的腐朽开始条件。

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

本研究也决定采用 Viitanen 等人 5)提出的腐朽菌死亡函数 (图 2.7)。

腐朽开始后的质量减少率设定为与式(2.2.2)同样计算。这个概念如图 2.6 所示。

通过实验，获取取决于温湿度和木纹方向的指标值 R_v 。

图 2.6 有扩展材料的腐朽进行

(a) 温湿度条件

(b) 至死亡的时间
图 2.7 腐朽菌死亡的条件

【第 9 页】

(3) 实验方法的探讨

1) 既往的实验方法

在腐朽实验中，如何将木材暴露于腐朽菌以及腐朽菌如何定着非常重要。本节基于文献调查等探讨实验方法。

首先，菌的给予方式大致可分为四种方法。

JIS K1571《木材防腐剂－性能标准及其试验方法》规定了三种试验方法（实验室加速试验、实验室真菌 cellar 试验、野外试验）。JIS K1571 规定的试验如表 2-1 所示。其中，真菌 cellar 试验和野外试验是 2004 年添加到试验方法中的。

但是，JIS K1571 是木材防腐剂的试验方法，试验对象终究是防腐处理方法。因此，不能用该试验结果来论述经过防腐处理的木材（或未处理木材）的耐久性。

表 2.1 JIS K1571 规定的试验

试验方法	项目	性能值
室内试验（注入处理用）	质量减少率 (%)	3 以下
室内试验（表面处理用）	质量减少率 (%)	3 以下
真菌 cellar 试验（注入处理用）	质量减少率 (%)	3 以下
野外试验（注入处理用）	耐久比	3 以上

① 实验室加速试验

在受控的温湿度环境下，针对代表性菌种（如奥氏蜜环菌、云芝等）对木材片进行试验。由于使用纯培养菌进行试验，这与多种菌种混入的实际环境相比，对菌的繁殖更有利，已有报告称其结果与野外试验不同。这是除了前述部分既往研究 3)-6) 之外，也用于评估木材防腐剂效果的比较试验等方法。

② 实验室自然腐朽

在受控的温湿度环境下，让空气中存在的孢子自然定着在木材片上使其腐朽的实验方法。比①更接近建筑的实际环境，但由于受空气中存在孢子的影响，认为实验再现性存在问题。这是前述部分既往研究 1)-2)使用的方法。

③ 实验室真菌 cellar 试验

在受控的温湿度环境下，让未灭菌土壤中存在的孢子定着在木材片上使其腐朽的实验方法。被认为比①更接近建筑的实际环境，并且能确保比②更稳定的暴露环境。

④ 野外试验

将木桩长期暴露于室外土壤中的试验。是让土壤中存在的孢子定着在木材上使其腐朽的实验方法。比①更接近土木/建筑的实际环境，但由于环境不受控，难以把握温湿度对腐朽的影响。这是用于评估木材防腐剂效果的比较试验等方法。

此外，在农学领域的以往研究中，多按照实验室加速试验或野外试验方法进行实验。但是，这些研究多作为评估防腐剂效果的比较试验进行，与本研究的目的是不同的。

【第 10 页】

2) 本研究中的实验对象

在本研究中，采用以未灭菌土壤为菌床的实验，探讨了温度和水分条件对腐朽的影响。树种和木材防腐剂的影响作为今后的研究课题，并提出了将实验结果应用于腐朽预测模型的方法。

此外，关于三个腐朽阶段，即 1)腐朽开始前、2)腐朽进行、3)腐朽菌死亡中的 3) 温湿度条件，也有 Viitanen 等人 6)的报告。本研究针对 1)和 2)进行实验。

【第 11 页】

3. 腐朽实验

(1) 实验方法

1) 概要

按照符合本研究目的的方式，对 JIS K1571 的真菌 cellar 试验方法进行了修改，并进行了实验。

2) 暴露方法

以未灭菌土壤（森林 A 层）为菌床，在恒温恒湿箱内暴露试件。在托盘上铺上约 3cm 厚的未灭菌土壤，在其上放置的金属网上放置试件。设置金属网是为了防止土壤附着在试件上，导致质量测量不准确。

对于未灭菌土壤（森林 A 层），参考 JIS K1571 进行了以下处理：① 去除粒径 4mm 以上的颗粒（照片 3.1）② 测量最大持水状态及绝干状态下的质量（最大持水状态：过滤土壤（12 小时）去除多余水分后，再用吸引器吸出多余水分）（绝干状态：105 °C，干燥 24 小时）③ 计算最大持水量（%）④ 准备所需量的最大持水状态土壤。（照片 3.2）

另外，为了维持土壤中菌的活性，实验期间大约每两个月更换一次土壤。实验情况如照片 3.3 和照片 3.4 所示。

（图示略）

照片 3.1 去除粒径 4mm 以上的颗粒

照片 3.2 最大持水状态的土壤

照片 3.3 实验情况 1

照片 3.4 实验情况 2

3) 试件

基本试件尺寸为 20×20×10 mm。为了意图使腐朽沿一维方向进行，除一面外，所有面均用铝箔密封，防止水分传导和菌的定着（图 3.1、照片 3.5）。针对纤维方向和垂直于纤维的方向，设想腐朽的进行方向制作了试件。树种选择腐朽后仍能保持原形的落叶松，从边材采集试件。每个条件设置 4 个样本。

另外，为了测量腐朽范围的扩大，除了基本试件厚度 10mm 外，还进行了厚度为 5mm, 20mm, 40mm, 60mm, 80mm, 100mm 的实验（图 3.2、照片 3.6）。不同厚度的试件在温度 23°C 相对湿度 70%、温度 23°C 相对湿度 100%、温度 40°C 相对湿度 97.5% 三种条件下进行。

【第 12 页】

（图示略）未灭菌土壤 → 腐朽菌定着 · 腐朽进行 20mm 下面（暴露面）20mm 侧面（绝湿）侧面（绝湿）上面绝湿 ※ 上图与实际试件上下相反 图 3.1 基本试件 照片 3.5 基本试件

图 3.2 不同厚度试件示例 照片 3.6 不同厚度试件示例

4) 质量减少率的测量

腐朽的程度通过质量减少率 w_1 进行定量化。质量减少率由暴露前后的绝干质量差求得（式(3.2.1)）。

$$w_1 = \frac{m_{10} - m_1}{m_{10}} \quad (3.2.1)$$

绝干质量是将试件在 60 °C 下干燥 48 小时后测量的。式(3.2.1)中的质量不包括铝箔的质量。

由于测量结果会产生偏差，每次测量取 4 个试件进行测量，取其平均值。

另外，如果将暴露后的试件置于绝干状态进行质量测量，预计定着在木材上的菌的活性会发生很大变化。因此，在本实验中，并非使用同一个试件获取相同温湿度条件下质量减少率随时间的变化，而是在不同个体上进行测量。

5) 温湿度条件

共在 10 种恒温恒湿条件下进行了实验。恒湿状态在恒温槽中控制，恒定湿度状态通过饱和盐水溶液控制。实验条件汇总于表 3.1。

表 3.1 温湿度条件

温度 [°C]	相对湿度(%)	10	23	27	30	40
70	(饱和盐化学式/预测湿度)	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		蒸馏水	蒸馏水			

- 各栏上段：用于控制相对湿度条件的饱和盐的化学式
- 各栏下段：通过饱和盐控制的相对湿度预测值
- 空格单元格的条件不实施。

本研究为了获取腐朽模型的指标值，在稳态条件下进行实验，但为了验证数值计算，也进行了非稳态条件的实验。温度固定为 23°C，相对湿度以 4 周为周期在 100%和 70%之间循环。实验条件示于表 3.2。

【第 13 页】

表 3.2 非稳态实验条件

	0~4 周	4~8 周	8~12 周	12~16 周	...
温度[°C]	23	23	23	23	...

	0~4 周	4~8 周	8~12 周	12~16 周	…
相对湿度[%]	100	70	100	70	…

【第 14 页】

2) 实验结果

1) 各温湿度条件下质量减少率随时间变化

按温湿度区分的质量减少率随时间变化如图 3.3 (使腐朽沿纤维方向进行的试件) 和图 3.4 (使腐朽沿垂直于纤维方向进行的试件) 所示。虽然观察到因取样时期不同导致的结果偏差, 但大致可以确认质量减少率随时间推移而增加的趋势。如前所述, 即使在相同温湿度条件的实验中, 由于取样时期不同, 试件也不同, 因此认为时间变化也会受到个体偏差的影响。比较暴露面的影响, 将端面暴露、使腐朽沿纤维方向进行的试件, 比使腐朽沿垂直于纤维方向进行的试件, 确认到更高的质量减少率。

温度 23℃、相对湿度 100%的实验中, 实验后暴露期间与外观变化的照片如照片 3.7 所示。即使温湿度条件不同, 在相同的质量减少率下也观察到类似的外观。

在观察到腐朽的实验条件下, 暴露开始后约 16~24 周开始出现显著的质量减少。这被认为是腐朽发生前的期间。

暴露开始后 24 周、32 周、48 周、64 周后的质量减少率如图 3.5~图 3.8 (使腐朽沿纤维方向进行的试件)、图 3.9~图 3.12 (使腐朽沿垂直于纤维方向进行的试件) 所示。与针对培养菌的以往报告 (Viitanen 等人 5) 测量结果示例, 图 3.13) 相比, 质量减少率较低, 但确认在温度 30℃左右、相对湿度接近 100%的条件下观察到较高的质量减少率, 趋势相近。此外, 尽管存在树种差异和个体差异, 但质量减少率有高于自然腐朽 1) 的趋势。在相对湿度 90%以下的条件下, 几乎没有观察到质量减少。在相对湿度 90%时, 木材的含水率未达到纤维饱和点, 不存在自由水, 因此认为未能获得腐朽所需的水分。

(图示略)

图 3.3 质量减少率随时间变化 (纤维方向腐朽试件)

图 3.4 质量减少率随时间变化 (垂直于纤维方向腐朽试件)

照片 3.7 实验后试件的外观

【第 15 页】

(图示略)

图 3.5 24 周后的质量减少率 (纤维方向腐朽试件)

图 3.6 32 周后的质量减少率 (纤维方向腐朽试件)

图 3.7 48 周后的质量减少率 (纤维方向腐朽试件)

图 3.8 64 周后的质量减少率 (垂直于纤维方向腐朽试件)

图 3.9 24 周后的质量减少率 (垂直于纤维方向腐朽试件)

图 3.10 32 周后的质量减少率 (垂直于纤维方向腐朽试件)

【第 16 页】

2) 腐朽向深度方向的扩大

通过比较不同厚度试件的质量减少率, 推算了试件深度方向的质量减少率分布。深度方向质量减少率分布的推算方法见表 3-3。

在三种条件下进行的实验中, 温度 23℃相对湿度 70%几乎没有观察到质量减少, 因此这里展示温度 23℃相对湿度 100%、温度 40℃相对湿度 97.5%的结果 (图 3.14)。所有厚度实验结果均为 4 个试件测量结果的平均值。

表 3.3 深度方向质量减少率分布的推算方法

试件厚度	计算质量减少率的范围	中心位置	质量减少率计算方法
(a) 5mm	0~5 mm	2.5 mm	(a)的质量减少 / (a)的暴露前质量
(b) 10mm	5~10 mm	7.5 mm	[(b)的质量减少 - (a)的质量减少] / [(b)的暴露前质量 - (a)的暴露前质量]
(c) 20mm	10~20 mm	15 mm	[(c)的质量减少 - (b)的质量减少] / [(c)的暴露前质量 - (b)的暴露前质量]
(d) 40mm	20~40 mm	30 mm	[(d)的质量减少 - (c)的质量减少] / [(d)的暴露前质量 - (c)的暴露前质量]
(e) 60mm	40~60 mm	50 mm	[(e)的质量减少 - (d)的质量减少] / [(e)的暴露前质量 - (d)的暴露前质量]
(f) 80mm	60~80 mm	70 mm	[(f)的质量减少 - (e)的质量减少] / [(f)的暴露前质量 - (e)的暴露前质量]
(g)	80~100 mm	90 mm	[(g)的质量减少 - (f)的质量减少] / [(g)的暴露前质量 - (f)的暴露前质量]

试件厚度	计算质量减少率的范围	中心位置	质量减少率计算方法
100mm	mm	mm	的暴露前质量]

(图示略)

- (a) 腐朽沿纤维方向进行、温度 23℃ · 相对湿度 100%
- (b) 腐朽沿纤维方向进行、温度 40℃ · 相对湿度 97.5%
- (c) 腐朽沿垂直于纤维方向进行、温度 23℃ · 相对湿度 100%
- (d) 腐朽沿垂直于纤维方向进行、温度 40℃ · 相对湿度 97.5%

图 3.14 深度方向的质量减少率分布 (推断)

无论哪种结果，都显示出靠近表面的位置质量减少率更高的趋势，确认了质量减少范围从表面向深度方向随时间扩大的情况。比较腐朽的进行方向，确认与垂直于纤维方向相比，沿纤维方向进行腐朽时，靠近表面的位置质量减少率更高，向深度方向的扩大也更快。

【第 17 页】

3) 热导率与透湿阻力

测量并确认了因腐朽导致的质量减少对热导率和透湿系数的影响。

测量结果如图 3.16 所示。确认透湿系数随着质量减少现象而增大，即随着腐朽，湿气更容易通过。

① 热导率

热导率使用快速热导率计测量。试件尺寸为 100 × 60 × 20mm。

虽然使用保护热板法或 HFM 法（热流计法）比快速热导率计能期望获得更高精度的测量结果，但由于无法制作大尺寸的腐朽试件，因此本研究使用快速热导率计。

以腐朽前的试件以及质量减少率达到 5%、10%、15%的试件为对象进行试验。用于质量减少率试验的单个试件（最大尺寸：100 × 20 × 20mm）尺寸太小，无法进行快速热导率测量，因此将三个观察到相同质量减少率程度的试件连接起来，制作了热导率试件（100 × 60 × 20mm）。热流方向为木材纤维方向。每个质量减少率条件进行 1 次测量。测量在温度 23℃、相对湿度 50%下进行。

测量结果如图 3.15 所示。热导率与质量减少之间未发现明确的相关关系。

(图示略)

图 3.15 热导率测量结果

图 3.16 透湿系数测量结果

② 透湿系数

透湿系数使用杯式法测量。试件尺寸为 $60 \times 60 \times 10\text{mm}$ 。

与热导率测量相同，以腐朽前的试件以及质量减少率达到 5%、10%、15%的试件为对象进行试验。用于质量测量的试件尺寸为 $20 \times 20 \times 10\text{mm}$ ，对于测量透湿系数来说截面太小，因此将 3×3 个试件组合起来制作了试验体。湿流方向为木材纤维方向。每个质量减少率条件进行 1 次测量。测量在温度 23°C 、相对湿度 50%下进行。

(3) 实验总结

为了掌握针对非特定菌种的腐朽状况，进行了以菌床为未灭菌土壤的实验，在 10 种稳态温湿度条件下，暴露总计约 1100 个试件，测量了其质量减少率。

虽然观察到试件个体差异，但确认在相对湿度接近 100%的环境中出现质量减少，在温度约 27°C 时质量减少率增高。实验开始 64 周后，观察到最大约 26%的质量减少率。在相对湿度 90%以下的条件下，虽然观察到霉变发生，但未发现因腐朽导致的质量减少。

此外，还掌握了腐朽范围的扩大以及腐朽导致的物理性质值变化。

【第 19 页】

4. 数值分析模型的提案

(1) 热水分同时移动与腐朽模型的结合

如图 2.3 (第 3 页) 所示，提出结合热水分同时移动方程与腐朽模型的数值计算方法。

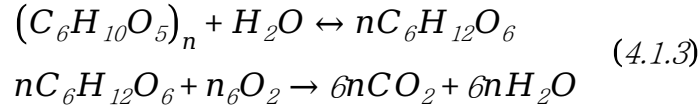
热水分同时移动方程的基本式如下：

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

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

与通常材料中的热水分移动方程的不同点如下所述。

在式(4.1.2)右边的最后一项中，有水分发生项 W_R 。木材腐朽会因纤维素分解而产生水分。该项考虑了水分的产生。根据既往文献 1)，质量减少可用以下化学式表示。



比较反应前后的纤维素 $(C_6H_{10}O_5)_n$ 的分子量与水的分子量，可知木材绝干质量减少 162g，会产生 90g 的水分。

此外，对伴随腐朽的木材物理性质值进行建模。关于热导率，根据上一章的实验，未发现伴随腐朽的变化（式 4.1.4）。关于透湿系数，即湿气传导率，根据上一章的实验，确认每 1% 的质量减少率，该值比腐朽前增大 7.8%（式 4.1.5）。

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

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

(2) 腐朽的建模

根据图 3.3 和图 3.4，观察质量减少随时间的变化，虽然实验结果存在偏差，但几乎不受温度和木纹的影响，质量从 16 周左右开始减少。但是，在相对湿度 90% 以下的试件中，未观察到质量减少。基于此，设定相对湿度 97.5% 以上且累积经过 16 周作为腐朽开始的条件（式(4.1.6)）。

$$R_s = 9,676,800[\text{sec.}] \quad (4.1.6) \text{但是, RH 阈值在 97.5\% 以上}$$

将此代入式(2.2.1)，判定腐朽的开始。但是，在时间累积满足式(2.2.1)条件之前，如果满足 2.(2)4)所示的菌死亡条件，则将在该时刻将腐朽开始前的时间累积值重置为 0。

观察图 3.5~图 3.8 等，在腐朽开始后，质量减少的速度因温湿度而异。根据实验结果，将质量减少速度 w_s 建模如下。该模型系数是将质量减少开始的第 16 周到第 64 周的质量减少率的平均值（作为从实验结果得到的值）近似为温度的二次函数。式的近似曲线如图 4.1 所示。

腐朽沿纤维方向进行时

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

腐朽沿垂直于纤维方向进行时

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

【第 20 页】

(图示略) (a) 腐朽沿纤维方向进行时 (b) 腐朽沿垂直于纤维方向进行时 图 4.1 质量减少速度的近似曲线

(b) 腐朽沿垂直于纤维方向进行时 图 4.2 腐朽的扩大速度

接下来，对腐朽向深度方向的扩大进行建模。这是基于图 3.14 的结果进行探讨的。由于测量结果存在偏差，将观察到质量减少率 2% 以上的部分作为从实验得到的腐朽开始的深度长度，并探讨了表示该长度的扩大速度 R_v 。

用于确定 R_v 的实验仅实施了三种温湿度条件，但假设函数形状与质量减少速度相同，制作了近似式。

腐朽沿纤维方向进行时

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

腐朽沿垂直于纤维方向进行时

$$R_v = \begin{cases} - (0.00283T^2 + 0.168T - 0.106) \times 10^{-9} & (RH \geq 97.5\%) \\ 0 & (RH < 97.5\%) \end{cases} \quad (4.1.9) \text{ (应为(4.1.10))}$$

【第 21 页】

5. 数值分析的有效性验证

(1) 与稳态实验的比较

进行了与稳态实验相比较的数值计算。计算期间至暴露开始后 48 周。计算的边界条件与实验相同。但是，腐朽仅从试件暴露于未灭菌土壤的一面开始，其他面完全绝湿，孢子供应也仅限一面。计算时间步长设为 1 分钟。

关于不同时间质量减少率的分布，实验与计算结果的比较如图 5.1 和图 5.2 所示。

得到了大致再现实验结果的质量减少率计算结果。但是，实验结果存在偏差，需要注意计算结果有时会比实验得到的质量减少率评估得偏低。

(图示略)

温度 23℃、相对湿度 100%

图 5.1 稳态实验与计算结果比较 其 1

温度 40℃、相对湿度 97.5%

图 5.2 稳态实验与计算结果比较 其 2

(2) 与非稳态实验的比较

进行了与非稳态实验相比较的数值计算。计算期间至暴露开始后 64 周。实验条件为温度 23℃，相对湿度以 4 周为周期在 100%和 70%之间循环，如表 3.2 所示。计算的边界条件与实验相同。边界条件的设定思路与稳态计算相同。计算时间步长设为 1 分钟。

关于不同时间质量减少率的分布，实验与计算结果的比较如图 5.3 所示。

虽然在 48 周时的 20~50mm 范围存在差异，但得到了大致再现质量减少分布倾向的计算结果。与稳态情况一样，由于实验结果存在偏差，有时会产生差异。

(图示略)

图 5.3 非稳态实验与计算结果的比较

【第 22 页】

6. 总结

基于文献调查等，整理了木材腐朽预测模型的思路、以及实验中应获取的腐朽模型指标值。实施了以未灭菌土壤为菌床的实验，在 10 种稳态温湿度条件下，整理了经过时间与质量减少率的关系。通过实验，明确了腐朽发生所需的温湿度与时间条件、腐朽发生时取决于温湿度的质量减少速度、以及腐朽向材料内部扩大的速度等。基于实验获取的数据，构建了定量预测木材腐朽的数值计算方法，并将其与非稳态温湿度条件（以 4 周为周期变动）的实验结果进行比较，得到了定性再现实验结果的质量减少率计算结果，从而确认了方法的有效性。

本研究中提出的数值解析方法，可以作为开发允许一定程度湿润或临时高湿状态的新工法的工具。

本研究针对特定树种（落叶松边材）进行了探讨，但可以预想，由于树种不同或使用木材防腐剂，腐朽的指标值会与本研究所获得的值不同。此外，数值计算虽然大致再现了实验得到的质量减少趋势，但未能评估试件的偏差。关于这些点，为了作为设计方法投入实用，需要今后进一步探讨。

【第 23 页】

参考文献

1. 鈴木大隆 等：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 等：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 等：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 等：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 brown 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

符号

c : 材料比熱 [J/(kgK)] G : 木紋 m₁₀ : 腐朽开始前的质量 [kg] m₁ : 腐朽开始后的质量 [kg] m_s : 材料的质量 [kg] r : 水の凝結熱 [J/kg] R_s : 恒定温湿度下腐朽开始所需的时间 [s] R_v : 腐朽范围扩大的速度 [m/s] w₁ : 质量减少率 [-] T : 温度 [°C] t, τ : 时刻 [s] t : 时刻 [s] T : 温度 [K] W : 树种与材料表面因子 w₁ : 质量减少率 [-] w_s : 质量减少

少速度[-/s] α : 热传递率 [W/(mK)] α' : 绝对湿度传递率 [W/(mK)] (应为[kg/m²/s] 或类似单位, 原文有疑) λ : 热导率 [W/(mK)] λ'_{-T} : 温度梯度引起的水分传导率 [kg/m/s/K] λ'_{-Tv} : 温度梯度引起的水蒸气传导率 [kg/m/s/K] $\lambda'_{-\mu}$: 水分化学势梯度引起的液态水传导率 [kg/m/s/(J/kg)] $\lambda'_{-\mu v}$: 水分化学势梯度引起的水蒸气传导率 [kg/m/s/(J/kg)] μ : 水分化学势 [J/kg] ρ_s : 材料密度 [kg/m³] ρ_w : 液态水的密度 [kg/m³] ψ : 体积含水率 [m³/m³] Δx : 网格宽度 ϕ : 相对湿度 [%]