

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)

THE RELATIONSHIP BETWEEN WATER CONTENT AND DECAY OF VARIOUS WOODS
UNDER HYGROTHERMAL STEADY STATEStudies on the quantification of decay phenomenon in wood-base building material
and its mathematical prediction mode (Part 1)鈴木大隆*¹, 北谷幸恵*², 岩前 篤*³, 永井久也*⁴
小南和也*⁵, 坂本雄三*⁶*Hiroataka SUZUKI, Yukie KITADANI, Atsushi IWAMAE,
Hisaya NAGAI, Kazuya KOMINAMI and Yuzo SAKAMOTO*

There are two points of view for the prevention design of moisture problem in the building insulated envelope. One is the strictly prevention of high moisture condition in the insulated wall cavity. The other one is the permission of short-term high moisture condition, condensation and high moisture content of the wooden material as long as keeping physical durability. If the later standpoint were chosen, the insulated envelope design of every variety for Japan would be possible. Nevertheless, there are no criteria to estimate the damage of physical durability of wood by the biological factors related high moisture condition.

The points of this paper are as follows:

- 1) The importance of estimation damage of woods by the moisture problems is describes.
- 2) 2 case of hygrothermal steady state experiments were done to get basic acknowledge of woods damage by biological factors considering term, water content, temperature and humidity, physical durability.

Keywords : Building insulated envelope, Hygrothermal steady state, Water content, Wood strength, Wood decay,

断熱壁体, 定常状態, 含水率, 木材強度, 木材腐朽

1. はじめに

断熱壁体の湿害評価に関しては、壁内の温湿度性状のみならず種々の環境条件下に晒される木材等の壁体構成材料も含めた湿害評価を行うことが重要といえる。しかし、後者に対する既往の知見が乏しいため、これまでは、壁内では一時的な結露や高湿度・高含水な状況は容認しないという考え方にに基づき評価・開発されることが多い。一方、土壁造住宅や地盤防湿を行わない床下構造等、温暖多湿・多雨なわが国の伝統的外皮の中には、材料が初期的に保有する水分の発湿による初期的な高湿環境、結露は許容しながら長期的な耐久性を保つという考え方の上に成立してきた技術も少なくない。また、ある一定の環境下では「結露や高湿度な壁内環境は許容しない」という考え方にに基づき開発された断熱外皮においても、竣工当初は材料が初期的に保有する水分や施工中の降雨水などの影響、運用開始後は室内温湿度性状や雨水・設備漏水の影響により、壁内で初期結露や一時的な高湿度な状況に維持される危険性は十分にある。

湿害防止を目的した断熱外皮開発では、「わずかな結露・高湿な状態も許容しない」という考え方を前提にした研究や技術構築も重要だが、外皮が晒される様々な環境を勘案すると、その実現は必ずしも容易なことではない。むしろ、初期結露を含む一時的結露や高湿な状態は「どこまで許容されるのか」、すなわち、寒冷地の初期の断熱住宅で生じた内部結露による湿害、我が国の住宅・建築で数多く発生している降雨水や設備配管の漏水などによる湿害など、木造住宅の構造安全性に支障を与えるような「許容できない結露」の条件を明らかにした上で、「耐久上支障の無い結露は容認する」という

考え方を前提に外皮設計を行う方が、壁体の湿害安全性は高くなり、実用的といえる。建築材料の中では、金属やコンクリート材料等の無機系材料や断熱材に関しては、使用環境条件と長期性能（発錆や中性化による物性変化）に関する知見は整備されつつあるが、建築躯体内に晒される木質材料の腐朽菌類等による生物劣化予測に関する既往研究は少ないのが現状である。例えば、純粋培養菌を木片に付着し強制腐朽させて耐久性を予測する方法^{例えば 1)}は、実際の条件より腐朽の進行は早いと予想される。また、空气中の胞子を木片に自然付着し腐朽させるという実験もいくつか試みられている^{例えば 2,3)}、実験条件が限られており、建築分野の耐久性予測にそのまま適用するのは難しい。

本研究は、主に木造建築で用いられる各種木材及び合板等の構造用面材などの木質系材料を対象に、各材料の物理強度の低下をもたらす腐朽現象に着目し、どのような建築環境条件[材料の重量含水率、温湿度(定常・非定常)、水分量、経過時間など]下で、どの程度の確率で生じるのかを実験的に明らかにし、対象材料毎に生物劣化による物理強度が低下する危険性を、上記環境条件をパラメーターとしながら確率的に表現する関数式を開発することを主な目的とする。

本報(第1報)では、本研究における断熱壁体の湿害防止に対するリスクコントロールの概念を述べ、この概念に基づき実施した各種木材試験体を用いた木材耐久性実験の全体概要、及び定常条件下での実験結果について報告を行う。

2. 湿害防止に対するリスクコントロールの考え方と実験計画

2-1 湿害防止に対するリスクコントロールの考え方

本稿は既往発表文献1~4, 6, 7に、新たな実験結果などを加筆、修正したものである。

*¹ 北海道立北方建築総合研究所 主任研究員・博士(工学)

*² 北海道立北方建築総合研究所 研究職員・工修

*³ 近畿大学理工学部建築学科 准教授・博士(工学)

*⁴ 三重大学大学院工学研究科建築学専攻 准教授・博士(工学)

*⁵ 財団法人建築総合試験所試験研究センター 室長代理

*⁶ 東京大学大学院工学系研究科建築学専攻 教授・工博

Senior Research officer, Hokkaido Northern Regional Building Research Institute, Dr. Eng. Researcher, Hokkaido Northern Regional Building Research Institute, M. Eng. Assoc. Prof., Dep. of Architecture, Faculty of Engineering, Kinki Univ., Dr. Eng. Assoc. Prof., Div. of Architecture, School of Engineering, Mie Univ., Dr. Eng. Deputy Head, General Building Research Corporation of Japan Prof., Div. of Architecture, School of Engineering, Tokyo Univ., Dr. Eng.

結露・湿害の防止を目的とした断熱技術開発に関連する既往の取り組み方には大きく2つのアプローチがある。一つは、各種壁体を実物大で実験・評価し、どちらかといえば定性的な比較から壁体設計への知見を導き出そうとする方法である。もう一つは、実験はシミュレーション手法の検証と精度を高めるために行い、壁体評価や壁体設計の情報を数値シミュレーションで導き出そうとする方法である。液水現象や壁体のモデリング、物性値等に課題はあるにしても、壁体内部の温湿度性状や構成部材の水分状態の予測に用いるシミュレーションの実用性は高まってきており、最近の断熱壁体開発や評価は、どちらかといえば後者によるアプローチが多い。

いずれの場合でも、壁体評価する際には、前述の通り判断基準、すなわち「閾値を設定するか」を明確にすることが重要である。これまで防露・湿害防止上の判断に用いられる一般的な指標としては、①壁体内の温湿度性状・発生頻度等、②カビ・木材腐朽菌^{注1)}の生育条件に関する既往研究^{例えぼ1~4)}などを基にした指標などのほか、③数値計算で得られた木材等の構成材料の含水率経年変化から判断する方法^{例えぼ5)}などがある。しかし②や③に関しては、既往研究で明らかとなっている知見は断熱壁体内の環境条件の一部を対象としているに過ぎなく参考値として扱い、多くは①をベースとしているのが現状である。一方、土壁住宅やRC造建物に代表されるような竣工初期に高含水率な構成材料を使用した建築技術、近年の断熱壁体でも一時的に起こり得る現象も対象に壁体構築をしていくには、上記とは異なる湿害防止に関するリスクコントロールの考え方が必要である。

上記の観点から、図1は3つのリスクコントロールの考え方を概略示したものである。

Aは、壁内での高湿化及び内部結露はいずれ木材腐朽等の生物的劣化に結びつく危険性が高いので、実害の防止には、Step1(壁内の高湿化)もしくはStep2(結露の発生)を評価指標とし、「僅かな結露も容認しない」という考え方である。一見、この考え方は最も安全率の高いアプローチだが、前述の初期結露などの一時的結露現象まで含めて考えると、現在普及展開されている様々な断熱技術を、この考え方で説明することは難しいだろう^{例えぼ5)}。仮に、一次的結露現象まで含めて、この考え方に基づいた壁体構築ができたとしても多くの技術的制約条件が伴うほか、壁体設計の自由度は現状よりもさらに制約されることになる。

Bは、壁内が高湿になる、あるいは一時的に液水で湿潤化することを容認するが、カビの発芽・生育・定着は防止するという考え方である。カビの発生自体は、直接躯体の耐久性にダメージを与えないまでも、居住空間の空気質を悪化させる危険性は高く、湿害の一つである。しかし、一年のある時期、外気条件そのものがカビの生育条件に属するわが国の気候条件、数千種以上にも及ぶ菌類の存在を勘案すると、断熱外皮設計上の閾値とするには多くの課題がある。また、健康害の原因となるカビの発生は、断熱外皮技術と換気・空調の方法や生活様式とのコンビネーションで対応する方がはるかに現実的であることを考えると、現時点で断熱外皮設計上の直接的な評価指標とはなり得ないと考えられる。

Cは、僅かな結露は容認するが、躯体が保有すべき物理強度へのダメージは回避するという考え方である。しかし、**B**と同様、断熱外壁内におかれた木材や鉄材の劣化性状と構造性能との関係を明らかにした既往研究は殆どなく、それを閾値とすることは難しいのが

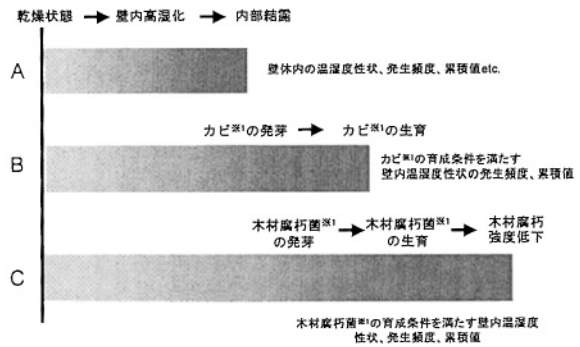


図1 断熱壁体の湿害防止のリスクマネージメントの考え方

現状である。

いずれにしても、**B**や**C**は、「一時的な結露は容認する、建築安全性や健康安全性に害がなければそれは容認しても構わない」という考え方が前提となるもので、**A**に比べ壁体設計の自由度が拡大するとともに、実情に即していることは明らかといえる。

以上の観点から、本研究では外皮技術の湿害防止のリスクコントロールとして**C**のアプローチによる劣化の数学的予測モデルを目指すこととした。

2-2 実験概要

(1) 実験条件

木造建築の構造躯体内に存在する木材や木質材料は、以下のような環境条件下に存在していると考えられる。

- ① 床組材等のように長期間にわたって比較的安定した温湿度環境
- ② 外壁構成材や小屋組材等のように日周期で変動する温湿度環境
- ③ ①の条件下で毎日繰り返し生じる多少の結露水に晒される環境
- ④ ②の条件下で毎日繰り返し生じる多少の結露水に晒される環境
- ⑤ 設備漏水・外部漏水等により、一時的に多量の液水に晒される環境

上記の5つの環境条件を想定した実験計画の概要を表1に示す。実験A1~3は上記①の環境条件、実験B2, B4, B5は②、③及び④の環境条件、実験E1は①および⑤の環境条件を想定している。なお、ここで日周変動を対象としたのは定常実験との差異を明確にするためである。周囲条件が変化することによって、定常実験とどのような結果に違いが出るかを見ることを主目的とした。

(2) 本研究で用いる劣化評価指標

図2、表2は、木材重量含水率と強度の関係を概略示したものである。重量含水率と各種強度の一般的な関係は、既往文献^{7~11)}などから概ね以下のとおり整理される。

- ・木材は、重量含水率数%から概ね繊維飽和点までは含水率が低いほど物理強度は高く、その関係は反比例関係にある。また含水率が1%減少すると、表2に掲げる割合で強度が増加する。
- ・木材繊維の損傷または腐朽等がない場合は、繊維飽和点以上では、含有水分の多少は物理強度にほとんど影響を及ぼさず、強度は概ね一定と考えてよい。

カビ、木材腐朽菌等の生物的要因による木材へのダメージの度合いを、目視で判断するのは容易ではない。しかし、前述したような含水率と物理強度の一般的な関係を参考にすれば、比較的簡単に生物劣化の定量的な評価が可能となる。

以上から、本研究では表2に掲げる物理強度のうち、特に測定が

表1 実験概要

実験 No.	実施場所		環境条件				樹種	試験体数 (表中の数値は試験体数)		実施期間
			温度	湿度	重量含水率	水分滴下		縦圧縮強度用	曲げ試験用	
A1	京都	定常条件	30℃	なりゆき	0~120%wt	なし	ベイツガ	85	—	2000.6-2001.7
A2	京都	定常条件	30℃	95%RH	20~70%wt	なし	ベイツガ	60	—	2003.1-2004.1
A3	三重大		30℃	95%RH	30~50%wt	なし	ベイツガ、スギ、ヒノキ、エゾマツ、トドマツ、カヤマツ、7カマツ	—	245	2005.8-2007.2
B2	北総研	非定常条件	27℃95%RH~26℃70%RH		15~45%wt	0,0.4,0.8,1.6g/日	ベイツガ	42		2001.10-2004.3
B4	北総研	日変動	27℃95%RH~26℃70%RH		30~70%wt	1.6,2.4g/日	ベイツガ	40		2003.1-2007.9
B5	北総研		27℃95%RH~26℃70%RH		30~50%wt	約1.2,2.0g/日	ベイツガ	90		2005.7-2007.9
E1	三重大	非定常条件 長期変動	30℃	60%RH	10~70%wt	1回/2週間	ベイツガ ベイツガ	40		2003.1-2004.4
F	近畿大	定常	30℃	95%RH	45~55%wt ⇄30%wt	なし	ベイツガ	108		2007.8

網掛けの部分
が本稿で報告
する実験
内容

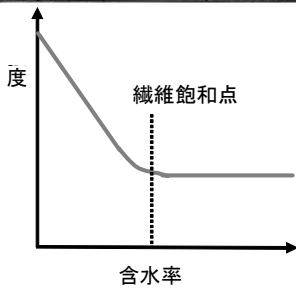


図2 重量含水率と強度の関係⁷⁾

表2 繊維飽和点未満の含水率減少1%当たりの強度増加率⁷⁾

各種機械的性質	増加率
曲げ強さ	5%
曲げヤング率	2%
縦圧縮強さ	6%
横圧縮比例限度	5.5%
繊維方向せん断強さ	3%
縦引張強さ	1%
横引張強さ	1.5%

表3 代表的な樹種の心材耐久性区分¹⁰⁾

耐久性区分	樹種
D-1 耐久性が高い樹種	ヒノキ、ヒバ、ケヤキ、クリ、スギ、カラマツ、クスギ、ミズナラ、ベイヒ、ベイスギ、ベイヒバ、レッドウッド、ベイツガ、ダブリカカラマツ、バンキライ、カブール、セラランガンバツ、クルイン、ケンバス
D-2 耐久性が低い樹種	アカマツ、クロマツ、トドマツ、エゾマツ、ベイモミ、ベイツガ、ラジアタマツ、スプルース、ライトレッドメランチ、イエローメランチ、ホワイトメランチ、ターミナリア、レッドラワン、アルストニア、ラミン

簡易で生物劣化により強度低下が生じる縦圧縮強度と試験体を破壊することなく強度測定が可能な曲げヤング係数に着目して以下の検討を行った。

3. A1及びA2実験

A1及びA2実験は、例えば床下等、比較的温湿度が安定した環境下にある木材、あるいは雨水や設備漏水等の何らかの不具合等が発生したことより高含水状態に置かれた木材の重量含水率と劣化の関係を捉えることを主目的に実施した実験である。温湿度一定(腐朽菌の育成可能範囲)、重量含水率を3段階に設定し、先に述べた環境条件と木材腐朽の関係をシンプルに把握することを主なねらいとしている。

3-1 実験概要

(1) 試験体

試験体に用いた樹種は木造住宅の構造材として一般的なベイツガ辺材及びベイツガ辺材である。表3は各樹種の心材の耐久性区分を示したものの、特にベイツガは耐久性区分D-2に属し、構造材として用いられる木材の中では、耐久性は低い部類に属する。また、心材に比べ辺材の耐久性は低い。従って、実験で用いた木材は、木材の中でも腐朽しやすいカテゴリーに属するものといえる。試験体寸法は60mm×50mm×20mm、木口は長辺方向にある(写真1)。

(2) 実験方法

試験体数はA1、A2実験合わせて145個あり、試験体を絶乾状態にした後、表4示す方法によって、重量含水率を概ね30%wt未満、30~70%wt、70%wt以上の3段階に設定した。

次に、試験体をプラスチックケース(写真2)または密閉可能なポリエチレンフィルムケースに格納し、40%wt以上の試験体は2000年6月、30%wt以下の試験体は2000年9月より室温30℃、A1実験では湿度なりゆきの恒温槽、A2実験では相対湿度95%一定となっている恒温恒湿室内に設置した。そして10週経過後から概ね2~4週

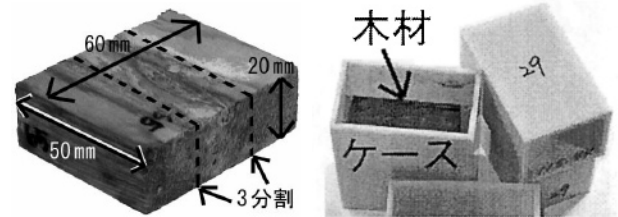


写真1 試験体概要

写真2 試験体格納状況

表4 実験手順 (A1・A2)

実験手順	概要
① 絶乾重量測定	60℃の状態にて48時間乾燥させた後に重量を測定する。
② 試験体の重量含水率の調整	含水率 含水率調整方法
	20~30%wt 試験体を、純水を満たした密閉容器内に水に触れないよう設置し、容器内の相対湿度100%の空気に平衡させることで設定する
	30~70%wt 密閉デシケーター内で液水に試験体を浸す
③ 恒温恒湿槽に設置	密閉デシケーター内で液水に試験体を漬けた上で、全体を負圧にすることで吸水を促進させる。
	試験体をそれぞれプラスチックケース(写真2)もしくはポリエチレンフィルムケースに入れる。30℃、95%一定に保った恒温室内に設置する。
④ 縦圧縮試験	2週間もしくは1ヶ月毎に試験体を取り出す。試験体を3分割(写真1)し、JISZ2101-1994に準拠して縦圧縮強度を測定する。
⑤ 絶乾重量の測定	①と同じ

毎に試験体を取り出し、材料繊維方向の縦圧縮強度を測定し、再度、絶乾重量を測定した。なお、実験期間中、試験体の目標とする重量含水率を維持するため147日目と198日目の2回、恒温恒湿槽から試験体を取り出し、気中で試験体の重量含水率を初期値まで戻す調整を行なった^{注2)}。

3-2 実験結果と考察

図4は、恒温室内に設置していた間の試験体の重量含水率推移を示したものである。同じ条件で含水率調整しても、個体差の影響等に

より、初期的にも実験開始後も、試験片に含水率の推移に差がみられ、高含水率で長期維持するのはかなり難しいことがわかる。

表5は実験期間中の重量含水率、縦圧縮強度及びカビ・腐朽菌等の目視観察結果を示したものである。図5は強度試験時の重量含水率と縦圧縮強度の関係を示したものである。図中では、縦圧縮強度が10[N/mm²]以下に低下し、木材腐朽菌が目視で確認された試験体を点線で囲っている。また、建築基準法で定められたベイマツの基準強度（縦圧縮強度） $F_c=18.0$ [N/mm²]¹²⁾を破線で示す。

いわゆる「健全な木材」の重量含水率と縦圧縮強度の関係は、図2に示したように、一般的に10~30%wtまでは直線的に変化し、それ以上になるとほぼ縦圧縮強度が一定となることが知られている。

表5及び図5から、基準強度を下回った試験体は、重量含水率が概ね30%wt以上で十数週以上経過しており、特に木材腐朽菌が確認でき縦圧縮強度が10[N/mm²]以下となった4つの試験体は、いずれも恒温室内で18週（約4ヶ月）以上経過し、この間の重量含水率が40~80%wtの範囲で保たれていた試験体であることがわかる。また、カビや腐朽菌等は10週目以降に抽出した試験体から確認され、カビに関しては恒温室内で重量含水率が20%wt程度以上、腐朽菌は重量含水率が30%wt以上で推移していた試験体で発生していた。一方、重量含水率が概ね15%wt以下あるいは概ね70%wt以上で推移していた試験体では、経過時間の多少に係わらずカビ・腐朽菌等が生じる割合は少なかった。

以上のことから、既往の木材腐朽防止の目安として一般的に知られている「重量含水率を20%以下に保つこと^{例えば7.8)}」は必ずしも妥当とは言えず、これよりもかなり高い重量含水率で長期間暴露された場合に目視及び物理強度上の異常が発生するケースが殆どであることが確認された。

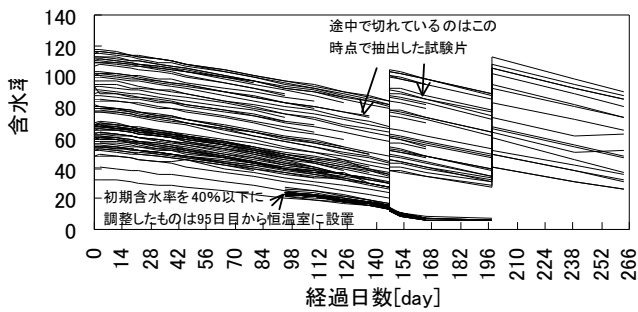


図4 実験開始後の試験体の重量含水率変化

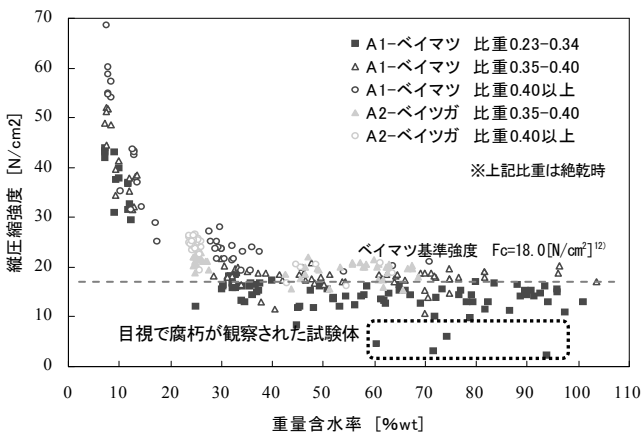


図5 試験体の平均重量含水率と縦圧縮強度の関係

表5 A1実験 各試験体の実験結果

経過週	試験体番号	初期	恒温恒湿室	抽出時の観察	試験体3分割後					備考*5			
					絶対比重A [g/cm ³]	設置期間の平均含水率 [%wt]	カビの発生*1	縦圧縮強さ*2 [N/mm ²]			絶対比重B [g/cm ³]	比重B / 比重A *4	
								試験体①	試験体②				試験体③
試験前	111	0.49	—		54.6	58.7	68.4	60.6	0.48	0.97			
	112	0.44	—		57.3	54.2	60.2	57.2	0.43	0.98			
	113	0.39	—		51.6	51.8	48.5	50.7	0.38	0.97			
10	11	0.46	22	有	43.7	43.1	38.4	41.8	0.46	0.99			
	33	0.34	21	有	35.3	31.4	32.6	33.1	0.34	0.99			
	1	0.34	21	有	37.9	36.7	37.0	37.2	0.34	0.99			
	15	0.41	22	有	42.5	38.2	43.3	41.3	0.41	0.99			
	27	0.30	16	有	43.2	37.6	28.1	36.3	0.29	0.98			
14	13	0.38	16	有	34.5			34.5	0.37	1.00	※		
	9	0.35	16	有	37.9	41.4	39.8	39.7	0.34	0.99			
	20	0.35	16	有	39.6			39.6	0.35	1.00	※		
	98	0.41	53	有	20.9	23.2	23.6	22.6	0.41	0.98			
	52	0.45	52	有	16.8	19.4	21.3	19.2	0.43	0.96			
	48	0.37	61	有	16.4	17.6	18.6	17.5	0.37	0.98			
	73	0.39	61	有	20.0	18.0	18.4	18.8	0.38	0.99			
	79	0.37	89	有	18.4	17.7	18.2	18.1	0.36	0.98			
	80	0.31	106		14.2	15.1	15.3	14.9	0.30	0.98			
	88	0.35	86	有	13.8	13.9	15.7	14.5	0.35	0.98			
16	96	0.33	105	有	15.6	15.4	16.3	15.8	0.32	0.98			
	60	0.36	51	有	17.9	17.0	18.8	17.9	0.36	0.99			
	45	0.36	59	有	18.2	17.3	16.5	17.3	0.35	0.98			
	38	0.35	56	有	16.8	15.1	16.4	16.1	0.34	0.98			
	43	0.35	47	有	18.1	16.1	16.7	17.0	0.35	0.98			
	78	0.35	97	有	16.4	16.8	16.9	16.7	0.34	0.98			
	99	0.41	100	有	20.3	19.2	17.2	18.9	0.40	0.98			
	89	0.37	80	有	17.0	18.3	17.1	17.5	0.37	0.98			
	85	0.40	83	有	19.7	21.1	18.7	19.8	0.39	0.98			
	18	91	0.44	46	有	24.1	24.2	23.7	24.0	0.44	0.97		
64		0.42	45	有	20.7	21.6	21.6	21.3	0.42	0.97			
67		0.38	57	腐朽菌	6.2	4.7	11.7	7.5	0.33	0.85			
58		0.30	55	有	15.3	16.3	16.2	15.9	0.30	0.97			
68		0.34	71	有	14.5	12.2	12.7	13.1	0.34	0.97			
100		0.38	76	有	18.4	18.4	18.4	18.4	0.37	0.97			
83		0.35	104	有	16.1	15.7	15.5	15.8	0.34	0.97			
81		0.31	103		14.7	14.4	15.4	14.8	0.30	0.97			
97		0.49	46	有	27.1	24.1	23.2	24.8	0.48	0.97			
93		0.45	45	有	25.2	25.2	28.1	26.1	0.45	0.97			
20	37	0.36	55	有	18.4	19.6	18.9	19.0	0.35	0.97			
	56	0.35	57	有	18.2	16.7	11.9	15.6	0.34	0.96			
	70	0.32	67	有	12.7	11.7	13.4	12.6	0.32	0.96			
	72	0.31	68	有	15.8	15.3	14.2	15.1	0.30	0.97			
	107	0.36	91	有	16.2	17.8	18.7	17.6	0.36	0.97			
	94	0.36	92	有	17.6	17.7	17.8	17.7	0.36	0.97			
	29	0.35	12						0.35	0.99	※		
	2	0.35	12		44.6	49.0	44.1	45.9	0.35	1.00			
	36	0.41	13	有	51.3	52.2	54.8	52.8	0.41	0.99			
	24	19	0.33	12		43.3	43.1	42.0	42.8	0.33	0.98		
40		0.36	49	腐朽菌	19.1	13.5	16.2	16.3	0.34	0.95			
57		0.39	53	有	19.1	19.9	18.6	19.2	0.39	0.99			
39		0.36	57	腐朽菌	2.2	3.1	3.8	3.0	0.27	0.74			
46		0.35	63	腐朽菌	10.0	10.1	11.1	10.4	0.31	0.88			
106		0.38	88		18.0	19.2	18.7	18.6	0.37	0.98			
108		0.38	107		18.8	18.8	20.2	19.3	0.37	0.98			
76		0.32	107		14.2	12.9	13.0	13.4	0.32	0.98			
75		0.35	84		14.4	14.5	14.8	14.6	0.34	0.97			
28		49	0.39	37	腐朽菌	18.3	20.2	21.7	20.1	0.39	0.99		
	82	0.46	39	有	23.8			23.8	0.46	0.99	※		
	59	0.36	46	腐朽菌	17.5	18.3	15.5	17.1	0.34	0.96			
	51	0.36	51	腐朽菌	16.5			16.5	0.36	0.98	※		
	54	0.32	65		12.9	13.2	13.1	13.1	0.31	0.98			
	71	0.30	64		14.2			14.2	0.30	0.99	※		
	74	0.30	81		13.7	14.4	14.3	14.1	0.29	0.98			
	102	0.38	85		14.6			14.6	0.37	0.99	※		
	65	0.44	54	腐朽菌	10.8			10.8	0.37	0.84	※		
	38	47	0.36	60	腐朽菌	12.3	11.2	10.5	11.3	0.33	0.92		
104		0.41	55	?	19.3			19.3	0.40	0.98	※		
66		0.30	54	?	16.6	15.9	16.1	16.2	0.30	0.97			
53		0.35	82	腐朽菌	5.8			5.8	0.28	0.81	※		
69		0.36	118	?	15.2	17.2	18.8	17.1	0.35	0.98			
87		0.34	105	?	13.0			13.0	0.33	0.99	※		
84		0.33	106	?	11.4	12.9	12.5	12.3	0.33	0.98			
40		18	0.41	13		31.7			31.7	0.48	1.02	※	
		22	0.41	12		35.2			35.2	0.41	0.99	※	
		23	0.32	12		29.6			29.6	0.33	1.01	※	
	34	0.34	12	有	30.9			30.9	0.34	1.01	※		
	42	0.35	49	腐朽菌	12.2			12.2	0.33	0.95	※		
	44	0.37	54	腐朽菌	13.0			13.0	0.36	0.98	※		
	50	0.47	27	?	32.2			32.2	0.47	1.00	※		
	61	0.37	48	腐朽菌	8.4			8.4	0.32	0.86	※		
	62	0.41	32	?	25.3			25.3	0.42	1.00	※		
	86	0.49	32	?	37.1			37.1	0.49	1.00	※		
54	103	0.44	41	?	29.0			29.0	0.44	1.00	※		
	77	0.31	90		13.8			13.8	0.31	1.00	※		
	95	0.34	95		15.2			15.2	0.34	1.00	※		
	101	0.38	79		17.2			17.2	0.38	1.00	※		

*1 カビ、腐朽菌の判定は（独）森林総研鈴木憲太郎氏による目視調査により行なった。腐朽菌は主に白色腐朽菌と推定される。?はカビか腐朽菌か特定できないが何らかの異常が観察された試験体、また空欄は目視ではカビや腐朽菌の発生が確認できなかった試験体を示す。
 *2 縦圧縮強さの空欄部は欠測を示す。 *3 絶対比重 B は縦圧縮強度測定実施直後に測定した。 *4 比重 B は圧縮試験実施後、比較的立方体形状に保たれていた試験体の体積・質量から求めたものであり、測定精度にばらつきがあるため参考値とする。
 *5 備考欄※は3分割せずに圧縮強度を計測した試験体を示す。空欄の試験体は写真1に示すとおり3分割した後、各部分の強度を測定した。

4. A3実験

A3実験は、A1・A2実験の温湿度環境状態を基本にした日周変動を想定した周期的定常条件下における実験である。A1、A2実験は劣化の評価指標に縦圧縮強度を用いたが、縦圧縮強度の測定は破壊試験であることから、同一材種の個体差の判断は容易ではない。また、恒温室容積の関係から同時に養生できる試験体数に限りがあるため、材種はベイツマツ、ベイツガの2種類に限定していた。そこで、A3実験では、非破壊での強度確認が可能な曲げヤング係数を腐朽判断指標とする小断面の試験体をも作成し、合計7種類の樹種を対象に実験を行った。

4-1 実験概要

(1) 試験体 (表1)

試験体に用いた樹種はA1、A2実験のベイツガ辺材に加えアカマツ、エゾマツ、カラマツ、スギ、トドマツ、ヒノキの7種とした。試験体寸法は2mm×12mm×50mm、試験体数は245個(35個×7樹種)である。各材種35個の試験体のうち10個は両端(木口面)をエポキシ樹脂のシールで断湿している(以下、シールありと称す)。これは木口面から腐朽菌の進入が起こる可能性を考慮し、両端シールなしの場合と比較するためである。

(2) 実験方法

A1、A2実験同様に、絶乾重量を測定した後、表6に示す方法によって重量含水率を概ね30wt%~70wt%設定した。試験体は材種毎にステンレスレイに並べ(写真3)、室温30℃、相対湿度95%一定の恒温恒湿室内に設置した。そして1ヶ月あるいは2ヶ月毎に全試験体を取り出し、日本建築総合試験所(大阪府吹田市)に輸送し、曲げヤング係数及び重量含水率を測定した。

木材試験体の含水率は、週末、祝日等を除く平日に毎日一回、霧吹きにて純水を数回噴霧することにより調整した。なお、全実験期間に対する含水率調整日の割合は6~7程度である。

図6に、霧吹き給水前後のベイツガ試験体含水率測定結果の一例を示す。本実験試験体は薄板形状であり、24時間毎の給水であっても、図に示すように24時間後には設定含水率の30wt%を下回ることから(20wt%を下回ることはない)、含水率調整を行う平日においても4、5時間程度は設定含水率を下回る。以上のことから、A3実験における設定含水率維持時間は、全実験時間の約5割程度の時間であると推察される。

A3実験では、写真4に示すような曲げ強度実験から求めたヤング係数と試験時の重量含水率の関係から考察する。含水率の算出式は、以下の通りである。ただし、シールありの試験体については、シールの重量を含むため、算出式は以下の通りになる。

$$\Psi = \frac{\omega - \omega_1}{\omega_0} \quad (1)$$

ここで、 ϕ : 重量含水率[%]

ω : 試験体の重量[g]

ω_0 : 試験体の絶乾重量(シールなし)[g]

ω_1 : 試験体の絶乾重量(シール含む)[g]

また、ヤング係数は次式で算出する。

$$E = \frac{\Delta PL^3}{48I\Delta y} \quad (2)$$

表6 実験手順 (A3実験)

手順	手法	
① 絶乾重量測定	60℃の状態では48時間乾燥させた後に重量を測定する。	
② 試験体の重量含水率の調整	含水率	含水率調整方法
	30~70wt%	試験体をステンレストレイに並べ、一日に一度、純水を霧吹きにて噴霧する。
③ 恒温恒湿	ステンレストレイに並べて、30℃、95%一定に保った恒温室内に設置する(写真3)。	
④ 縦圧縮試験	1ヶ月もしくは2ヶ月毎に全試験体を取り出し、日本建築総合試験所に輸送し、含水率測定および曲げ強度試験を実施する(写真4)。曲げ試験はJISZ2101-1994に準拠し実施。	
⑤ 含水率の測定	一週間に一度、重量含水率を測定する。	

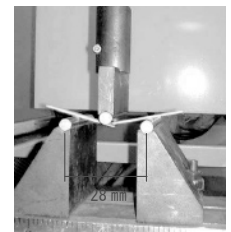


写真3 A3実験の試験体設置状況 写真4 曲げ試験実施状況

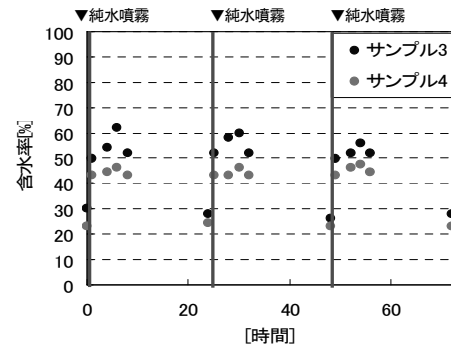


図6 曲げ試験用試験体の重量含水率の日変動例

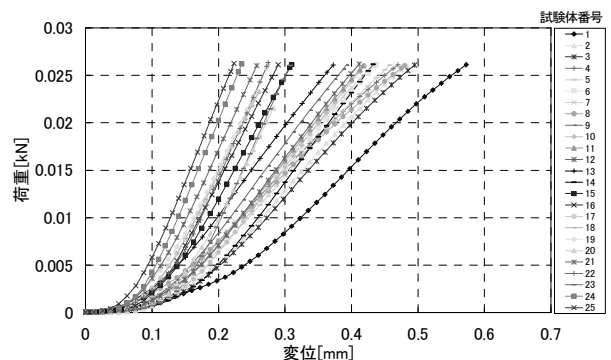


図7 スギの曲げ試験結果の一例 (変異-荷重関係)

ここで、 ΔP : 比例域における上限荷重と下限荷重との差[kN]

L : 支点間距離[cm] (=2.8cm)

Δy : ΔP に対するスパン中央のたわみ[cm]

I : 断面2次モーメント[cm⁴] (0.0008cm⁴)

L の支点間距離とは実験機器で設定された支点間距離を指し、本実験では2.8cmと設定した(写真4)。荷重面は、保存時に上部となる面に統一し、荷重は試験体の中央にかける。載荷速度は1mm/sで、荷重は0.025kN(これは事前の曲げの破壊試験によって得られた破壊荷重の2/3程度から決定したものである)とした。図7のスギにおける荷重・変位関係に示す例のように、 ΔP は、おおよその比例域を決定し、その区間の上限荷重と下限荷重との差によって求めた。

4-2 A3実験の結果と考察

曲げ強度実験は実験開始の2005年8月から2006年12月までの期間で合計9回実施した。第1回目は2005年10月12日(実験開始2ヶ月, 11週目), 第2回目2005年11月17日(実験開始3ヶ月, 16週目), 第3回目2005年12月14日(実験開始4ヶ月, 20週目)以降は2ヶ月に一度実施した。但し, 3回目の実験に関しては, 実験途中に試験機が故障したため, ヒノキ, スギシールなし, エゾマツシールなしの一部しか行えなかった。また, 第一回目の2005年10月の含水率測定は一部の試験体のみしか計測できていない。

図8に全7材種の各試験体ヤング係数の変化率及び各材種の平均変化率を示す。なお, 曲げ試験は三重から大阪に輸送し実施しており, 試験時毎に試験体の含水率が異なること(15~25%wt程度)や各試験体の個体差を考慮し, 第2回(実験開始2ヵ月後, 2005年11月)の各試験体ヤング係数を基準とし, 表2に示す含水率補正後の変化率を示している。また, 両端をシールした試験体とシール無しの試験体には特に差異がなかったため, ここでは, シール無しの試験体の結果を示した。

図に示すように, ヒノキを除く全ての材種で実験開始8ヶ月後(35週, 2006年4月)には平均ヤング係数が基準の値から10%以上(11~22%)低下している。ヒノキについては, 実験開始8ヶ月後の平均のヤング係数低下率は4%程度であったが, それ以前の変化率が逆に8%程度増加しており, 直前の値からの低下率では, 他の材種と同程度であった。なお, 実験開始10ヶ月後には目視による観察でも一部腐朽が確認されている。本実験試験体は極めて小さな試験体であり, その測定誤差や曲げ試験実施間隔が2ヶ月に一度程度であること等を考慮すれば, 強度低下による腐朽開始時期を明確に判断することは困難であるが, 上記の考察から, 全ての材種において実験開始8ヶ月~10ヶ月後程度の間には腐朽が始まったと判断してよかろう。

曲げ試験によるヤング係数

を腐朽判断指標としたA3実験の結果は先のA1, A2実験の結果と比較すると腐朽あるいは強度低下の開始がかなり遅くなっているが, 先に述べたように, A3実験全期間中で含水率が30%wt以上に維持されている期間が, 全期間の半分程度であることを考慮すると, 全ての材種において30%wt以上となっている累積時間が17~26週程度間で強度低下が開始していることになり概ねA1・A2実験の期間と一致する。このことは, 大略20~30%wtの含水状態の期間は強度低下等に見れる腐朽の進行は生じない期間であるという可能性を示していると言えよう。

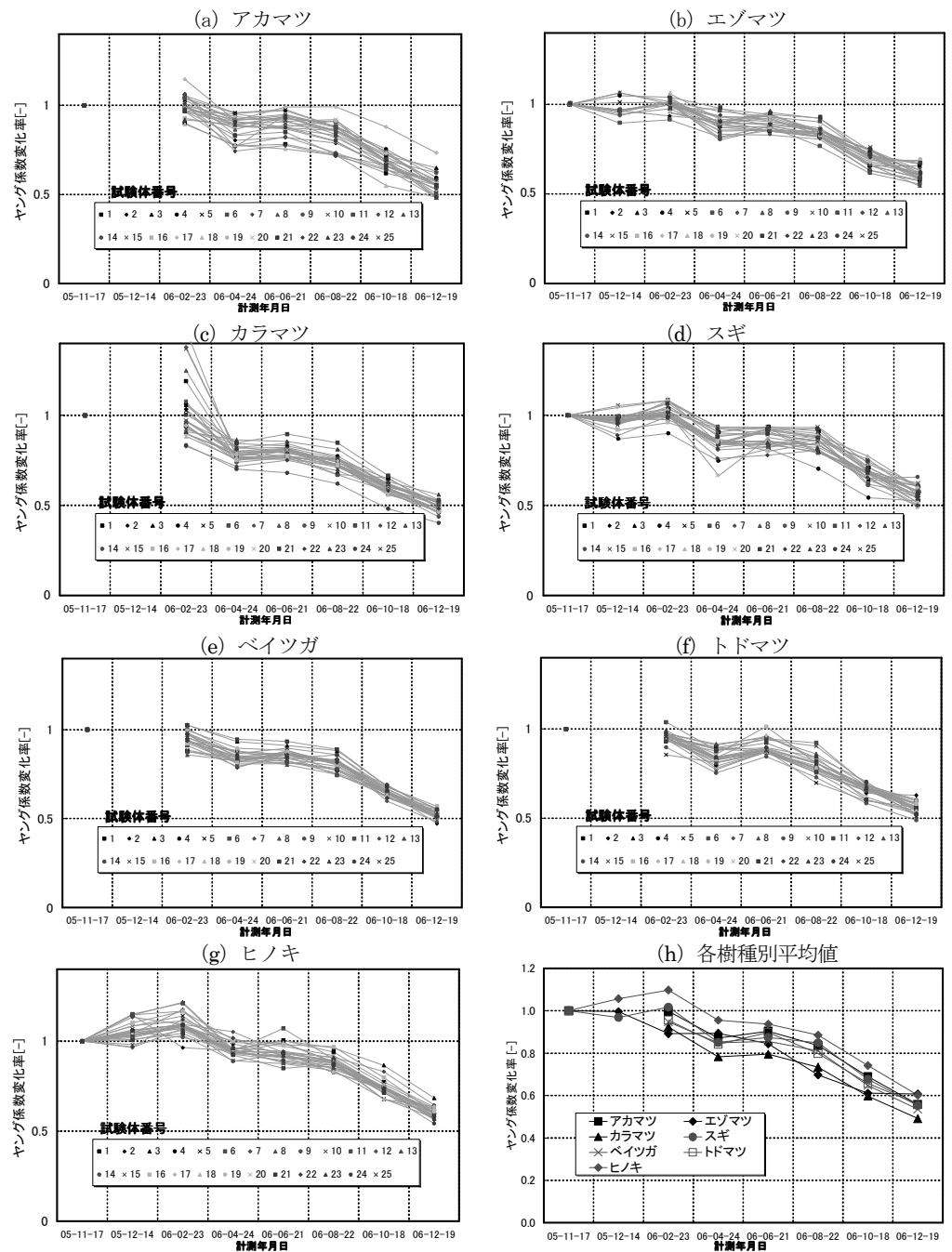


図8 ヤング係数変化率

5. まとめ

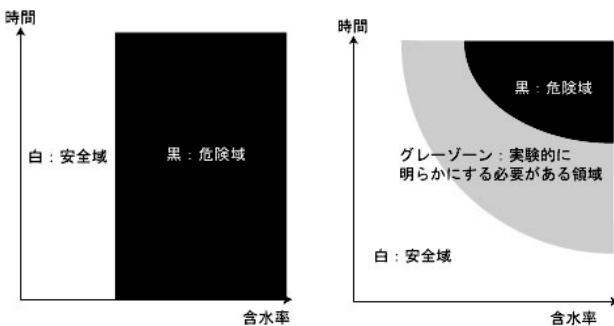
本報告では、2で述べたような湿害防止のための評価指標開発を目的として、建築に用いられる木材の中からからベイツガを始めとする様々な汎用樹種を対象に、雰囲気温湿度や試験体含水率を一定範囲に維持する定常条件下において実験的検討を行った。

本報で得られた主な知見をまとめると以下の通りである。

- (1) ベイツガ・ベイマツを試験体に用いたA1・A2実験から、特定の含水率範囲で一定の時間経過と共に腐朽菌の生育が確認され、縦圧縮強度の低下が生じた。重量含水率は30~70wt、経過時間は約16週から18週の間に推測される。この含水率域は従来言われている腐朽の目安となる含水率よりも高い。
- (2) 薄板試験体を用いたA3実験から、7樹種全てのヤング係数が、実験開始後35週程度から低下が始まった。これは、(1)の結果に比して倍程度の期間であるが、本実験における試験体の30wt~70wt維持時間は概ね全実験期間の半分程度であることから、含水率30wt未満の期間を除けば、上記(1)の期間と概ね一致すると考えられる。
- (3) (2)の結果から、20~30wtの含水状態の期間は強度低下等に見られる腐朽の進行に寄与しない可能性がある。また、変動する条件下で腐朽が観察されたことは今後の腐朽条件の更なる明確化に対して大きな意味を持つと考えられる。

本報で示した実験結果から得られた知見は、これまでの‘木材腐朽’の発生条件に関する知見とは異なるものといえる。その違いを概念的に示すと図9のようになる。図(a)は、これまでの考え方を示したもので、重量含水率が一定レベル(20~30wt)以上に保たれ、ある一定温度以上になると、時間軸には関係なく木材は腐朽する危険性が高いというものである。一方、本報により得られた知見は、図(b)に示すように木材腐朽は重量含水率と環境条件(図では経過時間のみ示す)に大きく左右されるという結果となっている。定量的かつ実用的なダメージの数学的予測モデルを構築していくには、ダメージを受けない条件(図bでは【白】と記した部分)、ダメージを受ける条件(図bでは【黒】と記した部分)に関して再検証を目的とした実験を行いより信頼性の高いデータを得るとともに、まだ明らかとなっていないグレーゾーンを明らかにする必要がある。また同様の考え方に基づき、外壁内部等の温湿度変化の大きな環境条件(非定常)を想定した実験も進めていく必要がある。

なお、本実験から得られた知見は、未だ限定した実験条件から得られたものであり、現時点では実建物の木材腐朽の判断・予測に適



(a) 既往の考え方 (b) 本報で得られたイメージ

図9 木材の湿害危険域の概念

用されるべきではないと考えている。今後は、実建物における観察結果等を参照し、数量的な表現に関する調整を行う必要がある。また、上記の関連から既にいくつかの実験・分析が進行中であり、それらの検討結果については、次報にて報告する所存である。

謝辞

本研究グループのメンバーであった故・鈴木憲太郎先生(森林総合研究所)には有益なご意見を多数頂いた。ここに記して深甚の謝意を表すると共にご冥福をお祈りしたい。また、本実験遂行およびデータ整理にあたり、三重大学工学部建築学科環境系研究室および近畿大学理工学部建築学科環境系研究室の大学院生・学部生に多大な協力を頂いた。ここに記して謝意を表する。なお、本研究の一部は平成16年度~平成18年度科学研究費補助金・基盤研究(B)(1)(課題番号:16360286, 研究代表者:坂本雄三)による。

注

- 注1)木材に付着・生育する菌として主に表層で発生し木材の強度等には重大な影響が及ばないものと、木材に含まれるリグニン・セルロース・ヘミセルロースなどを積極的に分解して物理強度の低下や比重・質量変化をもたらすものがある。本稿では一般的な呼称にならない前者をカビ、耐久上の支障をもたらす後者を木材腐朽菌と称している。
- 注2)実験当初は恒温恒湿槽内の相対湿度を100%RHの状態に維持することを意図したが、恒温恒湿槽の制御機構の問題から安定維持できる相対湿度は95%RHであったため、試験片の含水率調整を人為的に行なうこととした。また既往の研究で用いられる密閉容器で含水率を維持する方法は、初期の空気成分の及ぼす影響が高まり、特定菌のみを対象とした実験結果となり、研究の目的に即さない危険性も考えられたため、試験片を密閉容器内で養生する方法は採らなかった。

本論文に関連する主な既往発表文献

- 1 鈴木大隆, 岩前篤, 永井久也, 本間義規, 北谷幸恵ほか: 2つの環境条件下において生物的要因が木材の物理的性能に与える影響-主に断熱壁体の内部温湿度環境と湿害の観点から-, 日本建築学会環境工学委員会 熱環境小委員会第31回熱シンポジウム「湿気研究の新たな進展」梗概集, pp41-46, 2001.10
- 2 北谷幸恵, 鈴木大隆, 岩前篤, 鈴木憲太郎ほか: いくつかの環境条件下における生物的要因が木材の物理的性能に与える影響 (その1) 定常条件に置かれた木材の含水率と腐朽の関係, 日本建築学会大会学術講演集 D-2, PP.279-280, 2001
- 3 鈴木大隆, 北谷幸恵, 岩前篤, 鈴木憲太郎, 永井久也, 近田智也ほか, 同名論文(その2) 非定常条件に置かれた木材の含水率と腐朽の関係, 日本建築学会大会学術講演集 D-2, PP.277-278, 2002
- 4 鈴木大隆, 北谷幸恵, 永井久也, 梅野徹也, 岩前篤, 鈴木憲太郎ほか, 同名論文 (その3) 各種条件下に置かれた木材の腐朽, 日本建築学会大会学術講演集 D-2, PP.491-492, 2004
- 5 鈴木大隆; 寒冷地における断熱外皮の技術動向と今後の展望-主に木造断熱外皮の耐久性向上を目的とした技術・研究動向-, 第54回日本木材学会大会(札幌)生物劣化研究会, 2004年8月
- 6 鈴木大隆, 北谷幸恵, 岩前篤, 永井久也, 鈴木憲太郎, 坂本雄三: 断熱壁体中の木材のダメージファンクション開発に向けて-主に断熱壁体の湿害防止の観点から-, 日本建築学会環境工学委員会 熱環境運営委員会第35回熱シンポジウム「湿気研究の実用的展開」, pp141-144, 2005年11月
- 7 Hirotaka Suzuki, Yukie Kitadani, Kentaro Suzuki, Atsushi Iwamae, Hisaya Nagai; Development on Damage Functions of Wood Decay for Building Envelope Design, THE INTERNATIONAL RESEARCH GROUP ON WOOD PRESERVATION Section5 Environmental aspects, 2005.4.28

参考文献

- 1) Kentaro Suzuki: Effect of Cyclic Change of Temperature on Fungal Growth and Mass Loss, The International Research Group on Wood Preservation, Document No.IRG/WP 94-10065, 1994年
- 2) Paul I Morris, Jerrald E Winandy: Limiting Conditions for Decay in Wood System, The International Research Group on Wood Preservation, Document No.IRG/WP 02-10421, 2002年
- 3) 鈴木憲太郎: 含水率範囲毎のベイツガ材の腐朽について, 第36回木材学会大会要旨集, p26, 1986.4
- 4) 阿部恵子: カビによる環境測定法, カビは空気環境を認識するセンサーである, 空気調和・衛生工学 69巻, pp.519-525, 1995
- 5) 大澤元毅, 瀬戸裕直, 鈴木大隆: 夏季条件における壁体の温湿度性状とその評価に関する検討, 5th Canada-Japan Housing RD Workshop Proceedings, pp.241-254, 1999年8月
- 6) 本間義規, 鈴木大隆, 坂本雄三: 梅雨期を含む夏期の基礎断熱床下空間の温湿度環境-温暖地における基礎断熱工法に関する研究その2, 日本建築学会計画系論文集 No.530, pp25, 2000年4月
- 7) 浅野猪久, 杉山英男, 大熊幹章, 岡野健: 木材と住宅 学会出版センター, 1979
- 8) 建設省住宅局住宅生産課監修: 木造住宅-耐久性向上の手引き, 丸善出版社, 1982
- 9) 農林水産省林産試験場監修: 木材工業ハンドブック改訂3版, 丸善, 1982
- 10) 今村祐嗣ほか: 建築に役立つ木材・木質材料学, 東洋書店, 1997
- 11) 鈴木憲太郎: 防腐・防蟻対策と最新技術, 住宅と木材 2001年3月号, (財)日本住宅・木材技術センター
- 12) 建築基準法に基づく主要な告示「木材の基準強度を定める件(平成12年5月31日建告第1452号)
- 13) 木材軸組工法住宅の許容応力度設計, (財)日本住宅・木材技術センター, 2002.6

(2007年9月10日原稿受理, 2008年2月13日採用決定)