

木造住宅における打診による劣化診断判定の科学的根拠の解明

—木造住宅打音診断システムの開発—

主査 岡崎 泰男*¹
委員 佐々木 貴信*², 中村 昇*³

本研究は、木造住宅における打診による劣化診断判定の科学的根拠を明らかにすること、および、その結果に基づく劣化診断システムを構築することを目的としている。腐朽した木材、および、腐朽した木材を床・壁仕上げ材で覆った木造住宅の床・壁モデル試験体に対する打音測定および振動解析を行った結果、それぞれの仕様について、腐朽部位の振動特性についての知見を得ることができた。次いで、モデル試験体の結果を用い、健全確率という概念を導入した劣化診断システムを構築し、健全な木造建築に対する検証実験を行った結果、その誤検出率は実用に耐え得るレベルであった。

キーワード : 1) 打診, 2) 生物劣化, 3) 劣化診断, 4) 振動解析, 5) 木造住宅, 6) 腐朽

ELUCIDATION OF SCIENTIFIC GROUNDS OF THE BIODETERIORATION DIAGNOSIS JUDGEMENT BY TAPPING SOUND ANALYSIS IN THE WOODEN HOUSE

—Development of biodeterioration diagnosis judgement system for wooden house by tapping sound analysis—

Ch. Yasuo Okazaki
Mem. Takanobu Sasaki, and Noboru Nakamura

This study is intended clarifying the scientific grounds of the biodeterioration diagnosis judgement by tapping sound in the wooden house and to build the biodeterioration diagnosis judgement system based on the result. The knowledge about vibration properties of the decayed parts was obtained about each specification. As a result of inspection experiment for the wooden construction using the biodeterioration diagnosis system built in this study, the ratio of false diagnosis was able to confirm that it was a level to endure practical use.

1. はじめに

木造住宅は腐朽・蟻害等の生物劣化を受け、当初の設計耐用年数よりも短い年数で建て替えを余儀なくされるケースがある。生物劣化被害を防ぐために、土台等の生物劣化を受けやすい部位には防腐処理を施した材料を使うことが義務づけられ、生物劣化を受けにくくするための構造的な工夫もなされてはいるが、残念ながら完全な予防は現在の技術では不可能であると言わざるを得ない。したがって、生物劣化を早期に発見し、補修・部材交換等を行うことによって延命するという「維持管理」の仕組みを確立することが木造住宅にとっては極めて重要である。木造住宅の維持管理の中核をなすのは劣化診断技術であるが、大がかりな機器を用いた劣化診断は現実的ではなく、また住宅の場合、下地や仕上げをできるだけ破壊せずに隠れた不具合を診断することも重要となる。

そのような診断法の代表的なものとして打診と呼ばれる方法がある。これは柱、土台等の構成部材を直接、もしくは、内外壁の上からハンマー等で打撃し、発生した音(打音)の異常から劣化を診断するという非常に簡易な手法で

ある。住宅性能表示制度においても、既存住宅の現況調査の中の「特定現況検査(腐朽等・蟻害)」にも組み込まれているポピュラーな劣化診断法であり、調査研究での報告も多い(例えば^{文1,2)})。しかし、元々が熟練した大工や診断者等の経験と勘に頼った手法であり、周波数分析等を行って科学的に解析した研究もいくつか報告されているが^{文3-5)}、健全部位と劣化部位でどのような振動特性の違いがあるのか、その違いに対してどのような判定基準を適用して劣化診断を行っているのかという点については明らかにされないまま、慣習的な手法として実施されているのが実情である。こうした技能を持つ熟練者は減少の一途をたどっていること、また、木造住宅の仕様も昔とは異なり、大壁造となって木材が頭しになった部分が減った上に、硬い窯業系のボードが使われるようになってきたため、そもそも打音による診断が困難になって来ていることを考え合わせると、現状の経験と勘に頼る診断手法を今後も続けていくことは、困難であると言わざるを得ない。

本研究は、以上に述べた状況を鑑み、熟練技能者でなくても、打診による劣化診断が行えるようなシステムを構築

*¹ 秋田県立大学木材高度加工研究所 准教授 *² 同 教授 *³ 同 教授

することを最終的な目標としたものである。そのためにはまず、現状で木造住宅に対して行われている打診による劣化診断の科学的根拠を明らかにしなければならない。そこで本研究では、まず、生物劣化被害を受けた木材と健全な木材の間にどのような打音特性の違いがあるのか、また、劣化の発生位置、程度、材料の固定法がその特性にどのように影響しているのかを明らかにすることを目的として、腐朽させた木材に対して打音測定および振動解析を行った。次いで、木造住宅の床・壁内で生物劣化が発生した場合を想定し、仕上げ材の上から打撃した場合の劣化部位の打音特性の違いを明らかにすることを目的として、腐朽させた木材を仕上げ材で覆った床・壁モデル試験体およびコントロール試験体に対し、打音測定および振動解析を行った。最後に、以上の実験で得られた打音特性を使用したソフトウェアシステムの構築、および実際の木造建築物を対象とした実証実験を行った。なお実験および解析には、筆者らが独自に開発した打音収録・解析システムシステムを使用した。

2 打音収録・解析システム

本研究で使用した打音収録・解析システムでは、木材を打撃した時の音をマイクロフォンで収録し、これに対して各種信号処理を行って自己相関関数、パワースペクトル等を求め、さらにそれぞれの特性値を自動的に算出するシステムであり、その概要は図2-1に示した通りである。打音の収録は、マイクロフォンを材表面近くにあてた状態で、その近傍をプラスチックハンマー等で打撃、発生した打音波形を、データロガーを通してコンピュータにデジタルデータとして取り込む形で行う。測定時のサンプリング周波数は20480Hz、データ数は8192、プレトリガは10%。マイクロフォンにはリオン（株）製、UC-53A（測定周波数範囲10～20000Hz）、プリアンプには同社製NH-17（測定周波数範囲10～100000Hz）、データロガーには（株）コンテック

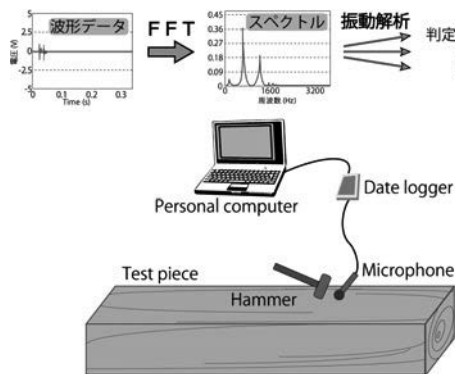


図 2-1 打音収録・解析システムの概要

製AI-1608AY-USBを使用している。

打音による劣化診断の科学的な根拠は判っておらず、どのような信号処理、信号処理によって得られた特性値が、劣化診断に有効であるかはわからない。そこで本システムでは、得られた打音波形に対して一般的に行われているあらゆる信号処理を行い、それぞれの結果に対して思いつくりの特性値を算出するという手段をとっており、これまでの予備的な実験の結果から、木材の腐朽部と健全部で違いが出る可能性が認められた130個の特性値を「腐朽診断指標値」と呼称し使用している。その解析フローおよび算出される腐朽診断指標値は図2-2に示した通りである。なお、各種信号処理方法の詳細については、^{文6,7)}等を参照されたい。

3 腐朽させた木材の打音測定および解析

3.1 目的

生物劣化被害を受けた木材と健全な木材の間にどのような打音特性の違いがあるのか、また、腐朽の発生位置、腐朽の程度、材料の固定法がその特性にどのように影響しているのかを明らかにすることを目的とし、2章に示した打音収録・解析システムを使用して実験を行った。

3.2 実験および解析方法

腐朽させた断面寸法約40×88mm、長さ約1mのスギ材の両端に直径約14mmの穴を設け、そこにM12 ボルトを挿して写真3-1に示した治具にナットで留め付けた後、幅40mmの面の中央部を端部から100mm 間隔で直径32mmのプラスチックハンマーで打撃（上下2面）し、発生した打撃音を打音収録・解析システムで収録した。サンプリング条件は2章に記した通りであった。固定条件が振動特性に及ぼす影響を見るために、① ナットをレンチで完全にしめた場合（固定）、② ボルトを軽く手締めした場合（半固定）、③ ナットを全くしめない場合（自由）の3条件で試験を行った。測定終了後、打撃部分の腐朽状態を取得するために、試験体を打撃位置で切断し、図3-1に示した手順で打撃位置の

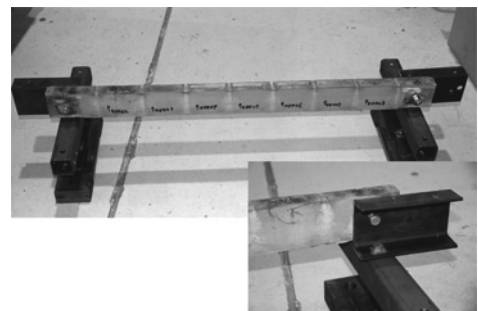


写真 3-1 試験体の固定方法

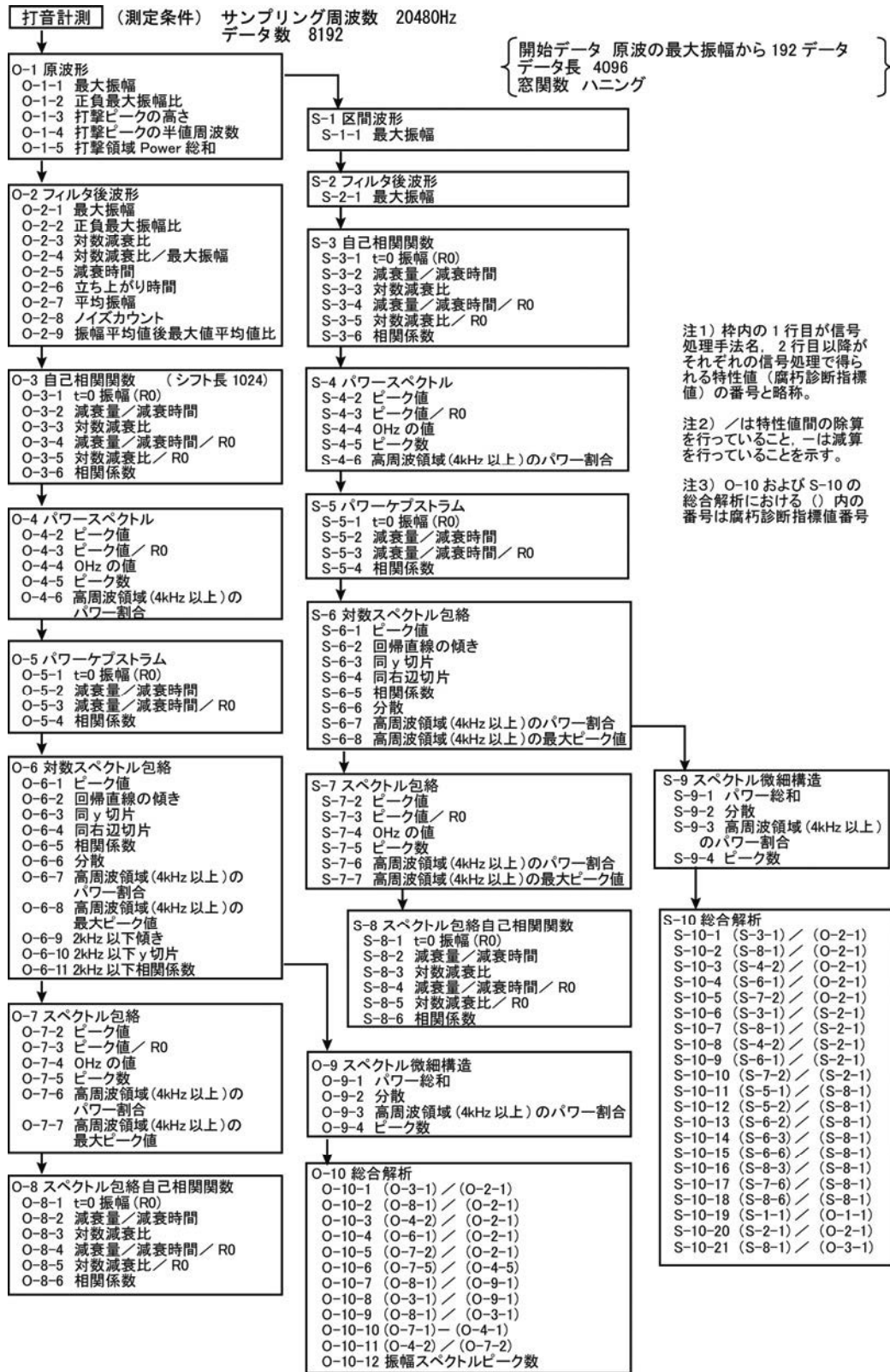


図2-2 信号処理のフロー

腐朽状態をデジタルデータとして取得した。得られた腐朽状態に基づき、打撃部位を腐朽部位と健全部位に分類して、腐朽部位については、腐朽発生位置(表面からの深さ)、腐朽面積比(断面積に占める腐朽部分の割合)を求めた。

図2-2に示した130個の腐朽診断指標値に対し、腐朽部位

と健全部位との間で、有意水準0.1%で平均値の差の検定を行った。腐朽が発生した場所の表面からの深さの影響を明らかにするために、腐朽部位については、腐朽発生位置が打撃位置の表面から0mm、0-20mm、20-40mm、40-60mm、60mm以上の部位に分類し、それぞれについて健全部位との

間で検定を行った。また、固定条件の影響を見るために、腐朽部位と健全部位を分けずに固定-半固定条件間、固定-自由条件間の平均値の差の検定を有意水準0.1%で行った。

検定結果から、各腐朽診断指標値の腐朽検出特性および固定条件の影響特性を定めた。腐朽検出特性は、腐朽発生位置0mmで有意差があり、かつ20mm-40mm以上の区分で有意差がない指標は表面腐朽に対してのみ有効(記号Sと表記)、0mmで有意差がなく、0mm-20mm以上のいずれかの区分で有意差がある指標は内部腐朽に対してのみに有効(同I)、0mm、および0mm-20mmで有意差があり、かつ20mm-40mm以上のいずれかの区分で有意差がある指標は表面および内部腐朽両方に有効な指標(同A)、それ以外の指標は腐朽検出能なし(同N)とした。固定条件の影響については、固定-半固定間、固定-自由間のいずれかで有意差がある指標を固定条件の影響あり(同R)、どちらも有意差がない指標を固定条件の影響なし(同C)と定めた。

さらに、腐朽進行程度が振動特性に及ぼす影響を明らかにするために、内部腐朽に対して有効な指標については、腐朽面積比(打撃点を中心とした幅30mmの領域に含まれる腐朽面積の割合)が0-0.1, 0.1-0.2, 0.2-0.4, 0.4-0.6, 0.6以上の部位に分類し、それぞれについて健全部位との間で、有意水準0.1%で平均値の差の検定を行った。

なお検定を行うに際し、連続値を取る指標値についてはt検定を、離散値を取る指標値についてはマン・ホイットニーのU検定を行った。

3.3 結果および考察

表3-1に各腐朽診断指標値の健全部位-腐朽部位間の平均値の差の有意差検定結果、および固定条件間の検定結果、およびこれらの結果から得られた各指標値の検出特性を示した。また、表3-2には表3-1の結果から内部腐朽に対して有効であると判定された指標値についての、腐朽面積比区分ごとの平均値の差の検定結果を示した。結果は以下の通りであった。

- 1) 検討した130個の腐朽診断指標値のうち、表面腐朽に対して有効な指標値は71個、内部の腐朽のみに有効な指標値は16個、表面および内部に有効な指標値は3個であり、合計90個の指標値が有効であった。
- 2) 内部腐朽に対して有効な腐朽診断指標値は19個であり、そのうち、表面から40mm以上離れた腐朽に対して無効な指標値が15個、表面から60mm以上で無効な指標値が4個であった。また、腐朽部分の面積比が20%以上でないと有効にならない指標値が12個、60%以上でないと有効になら

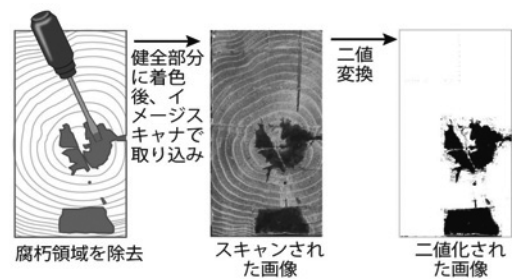


図3-1 腐朽状態測定手順

ない指標値が2個あった。この結果より表面からの深さ40-60mmまで、断面積に対する腐朽面積が20%以上あたりが、打診による内部腐朽の検出限界と考えられる。

3) 内部腐朽に対して有効な腐朽診断指標値は、主に減衰量に起因するもの(指標番号:0-2-3, 0-2-5, 0-3-2, 0-3-3, 0-5-2, 0-5-3, S-3-2, S-3-3, S-8-2)、および高周波領域に現れるスペクトルピークの違いに起因するもの(同0-9-3, 0-10-9, S-9-3, S-10-21)であった。この結果より、内部腐朽が存在すると打音の高周波領域にノイズ的なピークが発生し、減衰時間が長くなると考えられる。

4) 表面腐朽に有効な腐朽診断指標値は、非常に多数存在するためその共通性を見出すことはできなかった。しかし、実際に測定を行った際の波形観察では、最大振幅の差に起因しているケース、自己相関関数の時刻0の振幅に起因しているケース等が見られた。以上の結果を踏まえ、今後、腐朽の発生状況を分類して検討を行うことにより、主要因を明らかにしていく必要がある。

5) 固定法が腐朽診断指標値に及ぼす影響を検討した結果、130個の腐朽診断指標値のうち、半固定と固定で差がある指標値が53個、自由と固定で差がある指標値が79個存在し、腐朽診断指標値は固定法の影響を大きく受けることが明らかになった。結果として、表面腐朽に対して有効な腐朽診断指標値のうち、固定法の影響を受けない腐朽診断指標値は12個、内部腐朽に有効な腐朽診断指標値で固定法の影響を受けない腐朽診断指標値は1個だけであり、固定法が異なる場合の劣化診断が困難であることを示唆する結果となっている。ただし、固定法の違いの影響を受けるが腐朽の有無に対して無効な指標値は13個存在し、これらの指標値を固定法の判定指標として用いることで固定法が異なる場合でも、腐朽検出はある程度可能になると考えられる。

4 床・壁モデル試験体の打音測定及び解析

4.1 目的

現代の木造住宅中で使用される木材は、壁・床・天井に

隠されて見えない状態で使われることが多い。土台や床根太、梁桁については、床下、天井裏等に入り込むことで直接打診を行うことが可能な場合もあるが、実際に作業を行

う労力は多大なものがあり、配管工事や断熱工事の仕様によっては近づけない、近づけても叩けない場合もある。大壁造の柱、モルタル壁下の木ずり、サイディング壁の受

表 3-1 各指標値の健全部位-腐朽部位間の平均値の差および固定条件間の平均値の差の有意差検定結果、および検定結果から得られた各指標値の検出特性

| 腐朽診断指標値番号 ^{*1)} | 検定結果 | | | | | | 検出特性 ^{*3)} | 腐朽診断指標値番号 ^{*1)} | 検定結果 | | | | | | 検出特性 ^{*3)} | | |
|--------------------------|------------------------------|-------|-------|------|---|-------|---------------------|--------------------------|------------|------------------------------|------|---|---|-------|---------------------|-------|--------|
| | 健全部位-腐朽部位間 | | | | | 固定条件間 | | | 健全部位-腐朽部位間 | | | | | 固定条件間 | | | |
| | 腐朽発生位置区分 (mm) ^{*2)} | | | | | 固定-自由 | | | 固定-半固定 | 腐朽発生位置区分 (mm) ^{*2)} | | | | | | 固定-自由 | 固定-半固定 |
| 0 | 0-20 | 20-40 | 40-60 | 60以上 | 0 | | 0-20 | 20-40 | | 40-60 | 60以上 | | | | | | |
| O-1-1 | ○ | | | | | ○ | | S-R | O-10-10 | | | | | | | | N-C |
| O-1-2 | | | | | | | | N-C | O-10-11 | ○ | ○ | | | ○ | ○ | | I-R |
| O-1-3 | ○ | | | | | ○ | ○ | S-R | O-10-12 | | | | | ○ | ○ | | N-R |
| O-1-4 | ○ | | | | | ○ | ○ | S-R | S-1-1 | ○ | | | | ○ | | | S-R |
| O-1-5 | ○ | ○ | | | | ○ | ○ | S-R | S-2-1 | ○ | | | | ○ | | | S-R |
| O-2-1 | ○ | | | | | ○ | | S-R | S-3-1 | ○ | ○ | | | ○ | | | S-R |
| O-2-2 | | | | | | | | N-C | S-3-2 | | ○ | ○ | | | ○ | | I-R |
| O-2-3 | | ○ | ○ | ○ | | ○ | ○ | I-R | S-3-3 | ○ | ○ | ○ | | | | | A-C |
| O-2-4 | ○ | ○ | | | | ○ | | S-R | S-3-4 | ○ | | | | | | | S-C |
| O-2-5 | | ○ | ○ | ○ | | ○ | ○ | I-R | S-3-5 | ○ | ○ | | | ○ | | | S-R |
| O-2-6 | ○ | | | | | | | S-C | S-3-6 | | | | | | | | N-C |
| O-2-7 | ○ | | | | | ○ | ○ | S-R | S-4-2 | ○ | ○ | | | ○ | ○ | | S-R |
| O-2-8 | | | | | | | | N-C | S-4-3 | | | ○ | | ○ | ○ | | I-R |
| O-2-9 | | | | | | | | N-C | S-4-4 | | | | | | | | N-C |
| O-3-1 | ○ | | | | | ○ | ○ | S-R | S-4-5 | | | | | ○ | ○ | | N-R |
| O-3-2 | | ○ | ○ | | | ○ | | I-R | S-4-6 | ○ | | | | ○ | ○ | | S-R |
| O-3-3 | | ○ | ○ | | | | ○ | I-R | S-5-1 | | | | | | | | N-C |
| O-3-4 | ○ | | | | | ○ | | S-R | S-5-2 | | | | | | | | N-C |
| O-3-5 | ○ | | | | | ○ | | S-R | S-5-3 | | | | | ○ | ○ | | N-R |
| O-3-6 | ○ | | | | | | | S-C | S-5-4 | ○ | | | | | | | S-C |
| O-4-2 | ○ | | | | | ○ | | S-R | S-6-1 | ○ | | | | | | | S-C |
| O-4-3 | | | | | | | | N-C | S-6-2 | | | | | | | | N-C |
| O-4-4 | | | | | | | | N-C | S-6-3 | ○ | | | | ○ | ○ | | S-R |
| O-4-5 | | | | | | ○ | ○ | N-R | S-6-4 | | | | | ○ | ○ | | N-R |
| O-4-6 | ○ | | | | | | | S-C | S-6-5 | | | | | | | | N-C |
| O-5-1 | ○ | | | | | | | S-C | S-6-6 | ○ | | | | ○ | | | S-R |
| O-5-2 | | | | ○ | | ○ | | I-R | S-6-7 | ○ | | | | ○ | ○ | | S-R |
| O-5-3 | ○ | ○ | ○ | | | ○ | | A-R | S-6-8 | ○ | | | | ○ | ○ | | S-R |
| O-5-4 | | | | | | ○ | | N-R | S-7-2 | ○ | | | | ○ | | | S-R |
| O-6-1 | ○ | | | | | ○ | | S-R | S-7-3 | | | | | | | | N-C |
| O-6-2 | | | | ○ | | | | I-R | S-7-4 | | | | | | | | N-C |
| O-6-3 | ○ | | | | | ○ | ○ | S-R | S-7-5 | | | | | | | | N-C |
| O-6-4 | ○ | | | | | ○ | ○ | S-R | S-7-6 | ○ | | | | ○ | ○ | | S-R |
| O-6-5 | | | | | | ○ | ○ | N-R | S-7-7 | | | | | ○ | ○ | | N-R |
| O-6-6 | | | | ○ | | | | I-C | S-8-1 | ○ | | | | ○ | | | S-R |
| O-6-7 | | | | | | | | N-C | S-8-2 | | | ○ | | ○ | ○ | | I-R |
| O-6-8 | ○ | | | | | ○ | ○ | S-R | S-8-3 | ○ | | | | ○ | | | S-R |
| O-6-9 | ○ | | | | | ○ | ○ | S-R | S-8-4 | ○ | | | | ○ | | | S-R |
| O-6-10 | ○ | | | | | ○ | ○ | S-R | S-8-5 | ○ | | | | ○ | | | S-R |
| O-6-11 | ○ | | | | | ○ | ○ | S-R | S-8-6 | | | | | ○ | ○ | | N-R |
| O-7-2 | ○ | | | | | ○ | | S-R | S-9-1 | | | | | | | | N-C |
| O-7-3 | | | | | | ○ | ○ | N-R | S-9-2 | | | | | | | | N-C |
| O-7-4 | | | | | | | | N-C | S-9-3 | | ○ | ○ | | ○ | ○ | | I-R |
| O-7-5 | | | | ○ | | | ○ | I-R | S-9-4 | | | | | ○ | ○ | | N-R |
| O-7-6 | ○ | | | | | ○ | | S-C | S-10-1 | ○ | ○ | | | ○ | ○ | | S-R |
| O-7-7 | ○ | ○ | | | | ○ | | S-R | S-10-2 | ○ | ○ | | | ○ | | | S-R |
| O-8-1 | ○ | | | | | ○ | ○ | S-R | S-10-3 | | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | | I-R |
| O-8-2 | | | | | | | | N-C | S-10-4 | ○ | | | | ○ | ○ | | S-R |
| O-8-3 | | | | | | | | N-C | S-10-5 | | | | | | | | N-C |
| O-8-4 | ○ | | | | | ○ | ○ | S-R | S-10-6 | ○ | ○ | | | ○ | ○ | | S-R |
| O-8-5 | ○ | | | | | ○ | ○ | S-R | S-10-7 | ○ | ○ | | | ○ | | | S-R |
| O-8-6 | | | | | | | | N-C | S-10-8 | ○ | ○ | | | ○ | ○ | | S-R |
| O-9-1 | | | | | | | | N-C | S-10-9 | ○ | | | | ○ | | | S-R |
| O-9-2 | | | | | | | | N-C | S-10-10 | ○ | | | | ○ | ○ | | S-R |
| O-9-3 | | ○ | ○ | | | ○ | ○ | I-R | S-10-11 | ○ | | | | ○ | | | S-R |
| O-9-4 | | | | | | ○ | | N-R | S-10-12 | ○ | | | | ○ | | | S-R |
| O-10-1 | ○ | | | | | ○ | | S-R | S-10-13 | ○ | | | | ○ | | | S-R |
| O-10-2 | ○ | | | | | ○ | ○ | S-R | S-10-14 | ○ | | | | ○ | ○ | | S-R |
| O-10-3 | ○ | ○ | | | | | ○ | S-R | S-10-15 | ○ | | | | ○ | | | S-R |
| O-10-4 | ○ | | | | | ○ | | S-R | S-10-16 | ○ | | | | ○ | | | S-R |
| O-10-5 | ○ | | | | | | | S-C | S-10-17 | ○ | | | | ○ | | | S-C |
| O-10-6 | | | | | | ○ | | N-R | S-10-18 | ○ | | | | ○ | | | S-R |
| O-10-7 | ○ | | | | | | | S-C | S-10-19 | | | | | | | | N-C |
| O-10-8 | ○ | | | | | | | S-C | S-10-20 | | | | | | | | N-C |
| O-10-9 | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | | ○ | A-R | S-10-21 | | ○ | ○ | ○ | | ○ | | I-R |

注) 表中の○：有意水準 0.1%で有意差あり

*1) 各指標値の詳細については図 2-1 を参照されたい、*2) 打撃位置の表面から腐朽が発生した位置までの距離、*3) ーの左の記号が腐朽検出特性を示し、右が固定法の影響特性を示す。それぞれの記号の意味は以下の通り。S：表面腐朽に対してのみ有効、I：内部腐朽に対してのみ有効、A：表面および内部腐朽両方に有効、N：腐朽検出能なし。R：固定法の影響を受ける、C：固定法の影響を受けない。

表 3-2 内部腐朽に対して有効な指標値の腐朽面積比区分ごとの平均値の差の有意差検定結果

| 腐朽診断指標値 ^{*1)} | 腐朽面積比区分 ^{*2)} | | | | |
|----------------------------|------------------------|---------|---------|---------|-------|
| | 0-0.1 | 0.1-0.2 | 0.2-0.4 | 0.4-0.6 | 0.6以上 |
| O-2-3 対数減衰比 | | ○ | ○ | ○ | ○ |
| O-2-5 対数減衰比／最大振幅 | | ○ | ○ | ○ | ○ |
| O-3-2 減衰量／減衰時間 | | ○ | ○ | ○ | ○ |
| O-3-3 対数減衰比 | | ○ | ○ | ○ | ○ |
| O-5-2 減衰量／減衰時間 | | | | ○ | ○ |
| O-5-3 減衰量／減衰時間／R0 | | | | | ○ |
| O-6-2 回帰直線の傾き | | | | | |
| O-6-6 分散 | | | | | |
| O-7-5 ピーク数 | | | | | |
| O-9-3 高周波領域(4kHz 以上)のパワ一割合 | | ○ | ○ | ○ | ○ |
| O-10-9 (O-8-1)／(O-3-1) | | ○ | ○ | ○ | ○ |
| O-10-11 (O-4-2)／(O-7-2) | | ○ | ○ | ○ | ○ |
| S-3-2 減衰量／減衰時間 | | | | | |
| S-3-3 対数減衰比 | | ○ | ○ | ○ | ○ |
| S-4-3 ピーク値／R0 | | ○ | ○ | ○ | ○ |
| S-8-2 減衰量／減衰時間 | | | | | |
| S-9-3 高周波領域(4kHz 以上)のパワ一割合 | | ○ | ○ | ○ | ○ |
| S-10-3 (S-4-2)／(O-2-1) | | ○ | ○ | ○ | ○ |
| S-10-21 (S-8-1)／(O-3-1) | | ○ | ○ | ○ | ○ |

注) 表中の○: 有意水準 0.1% で有意差あり

*1) 各指標値の詳細については図 2-1 を参照されたい, *2) 打撃点を中心とした幅 30mm の領域に含まれる腐朽面積の割合

け材等の部材については壁を剥がさない限り直接打撃するのは不可能である。したがって、現実的には壁材や床材の上から、その下の部材の劣化状態の診断が可能であることが望ましい。そこで、本研究では腐朽させた木材を異なる仕様の仕上げ材で覆った床・壁モデル試験体を作成して打音収録・解析システムを用いた測定を実施、健全材を使用した同仕様の床・壁モデル試験体との比較検討を行うことにより、壁材や床材の上からの打診による生物劣化の検出が可能か否か、検出可能な場合、劣化部位がどのような打音特性を持っているのかを明らかにすることを目的と



写真 4-1 フレームモデル

※ フレームのみでは壁が不安定であるため、側面に9mm厚の構造用合板を貼って固定している。

して実験を行った。合わせて、仕上げ材を張る前のフレーム状態で測定を実施、単体の木材で有効であった腐朽診断指標値が、構造物として組み立てた状態でも有効であるか否かの検証を行った。

4.2 実験および解析方法

腐朽させたスギ材を、柱（断面寸法 105mm×105mm）、間柱（同 105mm×45mm）、大引き（同 105mm×105mm）、床根太（同 45mm×45mm）、木ずり（同 12×90mm）、横枘（同 105mm×45mm）サイズに加工し、写真 4-1 のように組み立てたフレームモデルを作成した。同時に、健全なスギ材を用いて同じフレームモデルを作成した。この状態で腐朽状態の目視による評価および打音収録・解析システムを用いた測定を実施した。測定は材の端部から 100mm 間隔で測定を行い、幅 105mm の面については 2 箇所（両縁から 20mm の位置）測定した。なお、大引きの裏面等打撃できない場所の測定は行っていない。腐朽状態の目視による評価は森林総合研究所の 6 段階評価法^{文 8)}に準じ、測定部位の状態が健全な

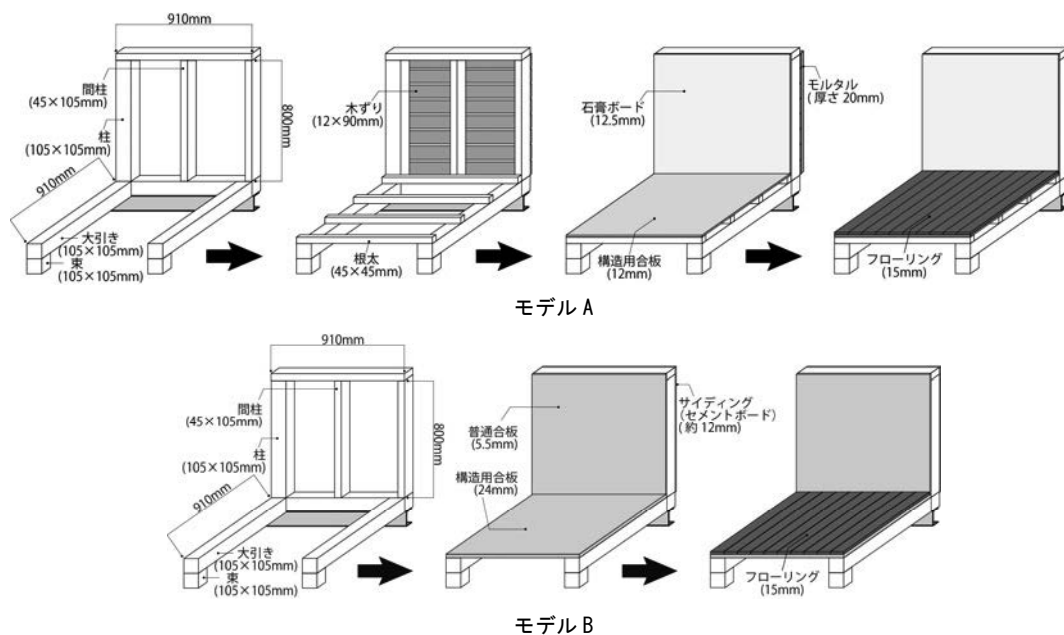


図 4-1 床・壁モデル試験体とその仕様

場合が劣化被害度0, 部分的に軽度の腐朽を1, 全面的に軽度の腐朽を2, 部分的に激しい腐朽を3, 全面的に激しい腐朽を4, 腐朽により形がくずれれる状態を5とした。打音収録・解析システムを用いた測定は3.2と同じ方法で行った。解析は目視評価結果に基づき測定部位を健全部位(被害度0)と腐朽部位(被害度1以上)に分け, 健全試験体の測定結果(全て健全部位)と合わせて, 130個の腐朽診断指標値について腐朽部位-健全部位間の有意差検定を行った。この際, 連続値を取る腐朽診断指標値についてはt検定を, 離散値を取る腐朽診断指標値についてはマン・ホイットニーのU検定を行った。検定の結果, 有意水準0.1%で有意差があった腐朽診断指標値を有効な指標値であると判定した。

次いで, フレームモデルに下地材, 仕上げ材を貼った壁・床モデル試験体を作成した。その仕様は図4-1に示した通りであり, モデルAは, 床は床根太の上に下地材として厚さ12mmの構造用合板を貼り, 厚さ15mmの合板下地フローリングで仕上げ(以下, 「フローリング根太」と呼ぶ), 内壁は厚さ12.5mmの石膏ボード, 外壁は木ずりの上に厚さ約20mmのモルタルで仕上げた仕様であり, モデルBは, 床は大引きに直接厚さ24mmの構造用合板を張り, 厚さ15mmの合板下地フローリングで仕上げ(以下, 「フローリングネダレス」と呼ぶ), 内壁は厚さ5.5mmの普通合板, 外壁は厚さ約12mmのセメントボードのサイディングで仕上げた仕様である。それぞれのモデルについて, フレームのみの状態で打撃した部位と同じ部位を打撃し, 打音収録・解析システムを用いた測定を行った。ただし, 2章の実験では直径約32mmのプラスチックハンマーを打撃治具として使って実験を行ってきたが, 予備的検討を行った結果, 仕上げ材の上から打撃する場合, 打撃治具の影響を受けて結果が変化することを示唆する結果が得られた。そこで, プラスチックハンマーに加え, 市販の金属製の打診棒(玉径17φ), ショックレスハンマー(直径30mm), ゴムハンマー(直径32mm)で打撃して比較検討を行うこととした。

解析は床, 壁を構成する仕上げ材ごとに行った。また, モデル試験体の実験では, 腐朽診断指標値によっては, 試験体間の個体間差の影響を受けて有意差が生じるものが見られたため, その影響を除くために, 以下の手順に従って指標値の有効性の評価を行った。まず, 目視評価結果に基づき測定部位の下にある木材を健全部位(被害度0)と腐朽部位(被害度1以上)に分け, a) 腐朽材を使ったモデル試験体の中での健全部位と腐朽部位の間の有意差検定を実施, ついで, b) 健全材を使ったモデル試験体の測定結果(全て健全部位)と合わせた場合の健全部位と腐朽部位の間の有意差検定を実施, 最後に, c) 腐朽材を使っ

たモデル試験体の健全部位と健全材を使ったモデル試験体の健全部位との間の有意差検定を行い, a)で有意水準5%で有意差があり, かつb)で有意水準1%で有意差があり, かつc)で有意差が無い腐朽診断指標値を有効とみなすこととした。木材部を直接打撃した実験の解析と比較して有意水準のレベルを落としているが, これはモデル試験体の場合は測定部位数が少ないためである。

4.3 結果および考察

1) 劣化被害度

腐朽材を使用した試験体の打音測定位置の劣化被害度評価結果を, 仕様ごとにまとめた結果を表4-1に示す。例えばFL-Jは使用した床根太(4本)の打音測定箇所の数, FL-Lは大引き(2本)の打音測定箇所の数意味する。腐朽発生位置及び程度をコントロールすることは不可能であるため, 仕様ごとに平均被害度および腐朽部位数が大きく異なる結果となった。

2) フレーム試験体の打音測定・解析結果

有効と判定された腐朽診断指標値は91個であった。このうち3章で得られた表面腐朽に対して有効な指標値と一致する指標値は45個, 内部の腐朽に対して有効な指標値と一致する指標値は14個であった。表面腐朽診断指標値の一致度が高くない理由としては, 目視により劣化被害度評価を行っているため, 打撃位置と腐朽部位がずれてしまったこと, 使用部位により固定法が異なるため, その影響を受けたこと等が考えられ, それらの点を考慮すれば腐朽させた木材の測定結果と概ね一致していると言える。

表 4-1 床・壁モデル試験体の腐朽部位数, 健全部位数と平均劣化被害度(仕様別)

| | 床モデル | | 壁モデル | | | |
|----------------|------|------|------|-----|-----|-----|
| | FL-J | FL-L | GB | PL | SD | MR |
| N _s | 11 | 7 | 10 | 7 | 19 | 40 |
| N _d | 25 | 29 | 29 | 24 | 9 | 32 |
| DD avg. | 2.5 | 2.4 | 2.7 | 3.1 | 1.2 | 1.3 |

N_s: 健全部位数, N_d: 腐朽部位数, DD avg.: 平均劣化被害度, FL-J: フローリング根太, FL-L: フローリングネダレス, GB: 石膏ボード, PL: 普通合板, SD: サイディング, MR: モルタル

表 4-2 床・壁モデル試験体において有効と判定された腐朽診断指標値の個数

| 打撃治具 | 床モデル | | 壁モデル | | | |
|------|------|------|------|----|----|----|
| | FL-J | FL-L | GB | PL | SD | MR |
| PH | 1 | 0 | 1 | 3 | 1 | 0 |
| HS | 7 | 19 | 4 | 3 | 1 | 12 |
| SH | 2 | 3 | 11 | 9 | 10 | 4 |
| GH | 1 | 0 | 0 | 13 | 11 | 5 |

PH: プラスチックハンマー, HS: 打診棒, SH: ショックレスハンマー, GH: ゴムハンマー
FL-J, FL-L, GB, PL, SD, MR: 表 4-1 と同じ

表 4-3 床・壁モデル試験体で有効と判定された腐朽診断指標値

| 腐朽診断指標値 ^{*1)} | | 床モデル ^{*3)} | | 壁モデル ^{*4)} | | | |
|------------------------|-----------------------|---------------------|---------------|---------------------|---------------|-------------|--------------|
| 番号 | 検出特性 ^{*2)} | FL-J | FL-L | GB | PL | SD | MR |
| O-1-1) | S-R | | ● | | | | |
| O-1-5) | S-R | | ● | | | | |
| O-2-1) | S-R | | ● | | | | |
| O-2-4) | S-R | | ● | | ● | | |
| O-2-5) | I-R | | | | | | ■ |
| O-2-7) | S-R | | | | ● | | |
| O-3-1) | S-R | | ● | | ● | | |
| O-3-2) | I-R | ■ | | | | | ■ |
| O-4-6) | S-C | | | ○ | | | |
| O-5-1) | S-C | ○ | | | | | |
| O-5-3) | A-R | ■ | | | | | |
| O-5-4) | N-R | | | | | | ▲ |
| O-6-1) | S-R | | ● | | ● | ● | |
| O-6-3) | S-R | | ● | | | | |
| O-6-4) | S-R | | | ● | | | |
| O-6-5) | N-R | | | | ▲ | | |
| O-6-6) | I-C | | | □ | | | |
| O-6-8) | S-R | | | ● | | | |
| O-6-9) | S-R | ● | | | | | ● |
| O-6-11) | S-R | ● | | | | | ● |
| O-7-2) | S-R | | | | ● | | |
| O-7-5) | I-R | | | | | ■ | |
| O-7-6) | S-C | | | ○ | | | |
| O-8-1) | S-R | | ● | | ● | | |
| O-8-2) | N-C | | | | | | △ |
| O-8-3) | N-C | | | | | △ | |
| O-8-6) | N-C | | | | | △ | |
| O-10-1) | S-R | | ● | | | | |
| O-10-2) | S-R | | ● | | ● | ● | |
| O-10-3) | S-R | | | | | | ● |
| O-10-6) | N-R | | | | | | ▲ |
| O-10-9) | A-R | ■ | | | | | |
| O-10-11) | I-R | | | | | | ■ |
| S-1-1) | S-R | | ● | | ● | | |
| S-2-1) | S-R | | ● | | ● | | |
| S-3-1) | S-R | | ● | | ● | | |
| S-4-2) | S-R | | ● | | | | |
| S-4-6) | S-R | | | ● | | | |
| S-6-1) | S-C | | ○ | | | ○ | |
| S-6-3) | S-R | | ● | | ● | | |
| S-6-4) | N-R | | | ▲ | | | |
| S-6-6) | S-R | | | ● | | ● | |
| S-6-8) | S-R | | | ● | | | |
| S-7-2) | S-R | | | | | ● | |
| S-7-6) | S-R | | | ● | | | |
| S-8-1) | S-R | | ● | | ● | | |
| S-8-2) | I-R | | | | | | ■ |
| S-8-3) | S-R | | | | | ● | |
| S-10-5) | N-C | | | | | △ | △ |
| S-10-7) | S-R | | | | | ● | |
| S-10-10) | S-R | | | | | | ● |
| S-10-12) | S-R | | ● | | | | |
| S-10-17) | S-C | | | ○ | | | |
| S-10-18) | S-R | | ● | | | | |
| S-10-21) | I-R | ■ | | | | | |
| 計 | | 7 | 19 | 11 | 13 | 11 | 12 |
| 各検出特性と一致する指標の合計 | S or A I or A R | 3 4 6 | 19 0 18 | 9 1 7 | 12 0 13 | 7 1 7 | 4 4 10 |

注) 表中の○, ●, □, ■, △, ▲は検定の結果有効と判定されたことを意味し, ○は検出特性がS-C, ●はS-R, □はI-CまたはA-C, ■はI-RまたはA-R, △はN-C, ▲はN-Rであることを意味する。

*1) 各指標値の詳細については図2-1を参照されたい, *2) 3章で定めた検出特性。記号の意味は表3-1を参照されたい, *3,4) 床モデルおよび壁モデルの仕様記号については表4-1を参照されたい

したがって、床下、小屋裏等の木材が顕しになっている部分の打診による劣化診断判定は、内部腐朽については、高周波域に生じるノイズ的なピークの発生およびそれに伴う減衰時間の変化を根拠とし、表面腐朽については、様々な打音特性の違いを複合的な組み合わせで総合的に判断していると考えられる。

3) 床パネル、壁パネル試験体の打音測定・解析結果

打撃治具を変えて測定を行った結果は表4-2に示した通りであった。表中の数値は、それぞれのモデル仕様と打撃治具について、有効と判断された腐朽診断指標値の合計である。モデル仕様によって有効な打撃治具は異なっていた。結果を見ると、表面が比較的硬くたわみにくいものに対しては打診棒が、表面が比較的柔らかい材料に対してはショックレスハンマーが有効と思われるが、今回の実験の測定数は少ないため、この結果だけで判断することは困難であり、この点については、今後の検討課題となる。

最も有効指標値が多かった打撃治具で有効と判定された腐朽診断指標値は表4-3に示した通りであった。モデル試験体の仕上げ状態は、腐朽した木材の上に健全な材料を貼った状態になるため、3章で、内部腐朽に対して有効と判断された腐朽診断指標値（検出特性IまたはA）が有効になるのではないかと予想していたが、フローリングー根太仕様の床、およびモルタル仕様の壁で4個一致した（表4-3中の■, □）ものの、それ以外の仕様ではほとんど一致していなかった。実際に測定した際の観察では、特に被害度が大きな腐朽が存在する測定部位については、釘等の接合が緩くなりがつきがる測定部位については、釘等の接合が緩くなりがつきが生じて、その音を異常と感ずることがあった。そこで3章で求めた固定法の違いの影響を受ける腐朽診断指標値（検出特性R）との関係について検討を行った。その結果、石膏ボード壁以外は比較的高い一致を見た（表4-3中の■, ●, ▲）。石膏ボード壁は表面が柔らかいことが影響して異なる結果になったものと考えられるが、今回の実験から判断することは困難であり、この点についても、今後検討を行う必要がある。

以上の結果より、仕上げ材上から打診を行った場合の劣化診断判定は、木材表面を打撃した場合と異なり、釘の緩み、木材との間に生じた隙間等によって生じるがつき等の音に基づいて行われていると考えられる。

5 木造住宅の劣化診断に適応した打音診断システムの構築および検証実験

5.1 木造住宅の劣化診断に適応した打音診断システムの構築

4章までの結果を踏まえ、以下に示した考えに従って、木造住宅の劣化診断に適応した打音による劣化診断システムの構築を試みた。劣化診断を行うには、打音の解析結果に基づいて、劣化が発生しているか否かを判定する必要がある。これまで検討してきた腐朽判定指標の中から、図5-1（上）に示したような分布を持ったものを見出すこと

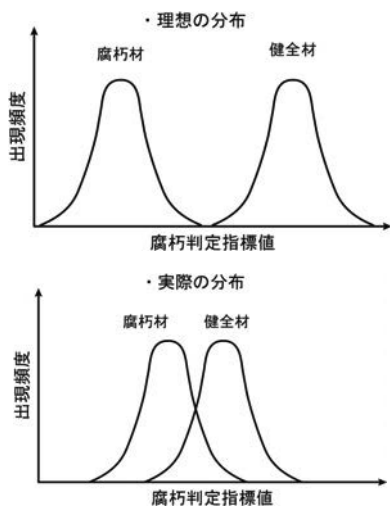


図 5-1 腐朽診断指標値の分布形状

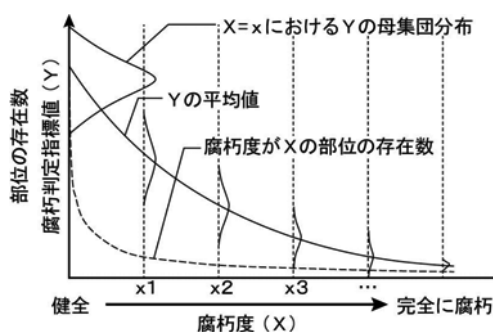


図 5-2 木材の腐朽度 X と腐朽判定指標値、部位存在数の関係のモデル

ができれば、その指標値を使ったYes-No判定が可能となる。しかし、実際には算出した腐朽診断指標値の分布は図5-1 (下) に示したように重なってしまうケースがほとんどであり、Yes-No判定を行おうとすると、ほとんどが判定不能という結果になってしまい劣化診断システムとして成立しない。しかし分布が重なった部分についても、劣化が発生している可能性(確率)を推定することは可能である。そこで、本研究では確率論的な概念を導入し、以下の仮定に従って劣化診断を行うこととした。

木造住宅において、腐朽診断指標値は、設置からの時間が経過し、腐朽が進行するのにしたがって変動していくと考えられる。また、経過時間を無限大に設定すれば劣化度が高い(劣化の進行具合が激しい)部位の数は劣化度が中程度の部位よりも多くなることになるが、実際には耐用年数が過ぎた住宅、劣化が激しい住宅は除却される、すなわち一定時間で観測が打ち切られることになるため、劣化度が高い部位の存在数は劣化度が低い部位の存在数よりも少なくなると考えられる。これらを模式的に表すと、図5-2 のようになる。腐朽度Xは本来連続変数であるが、ここでは考えやすくするために離散数として扱うこととする。いま、指標値Yがyである時に腐朽度Xが $X=x_i$ となる確率を

$p_i(y)$ とする。腐朽度Xが $X=x_i$ の部位の指標値Yが $Y=y$ になる確率を $f_i(y)$ 、腐朽度が x_i である部位の存在数を n_i とすると、 $p_i(y)$ は式(1)で表すことができる。

$$p_i(y) = \frac{m_i f_i(y)}{\sum m_i f_i(y)} \quad (1)$$

ただし、 $m_i = \sum n_i$

ここで m_i は、腐朽度 $X=x_i$ の部位の全ての部位に対する存在割合に相当する。

指標値Yが $Y=y$ である時に腐朽度Xが $X=x_0$ となる確率 $p_0(y)$ は、測定部位の指標値Yが $Y=y$ である時に腐朽していない確率、すなわち測定部位が健全である確率(以下、「健全確率 $p_s(y)$ 」と呼ぶ)に相当する。ここで腐朽度Xが健全、腐朽の二つの値しか取らないと考えれば、式(1)をさらに単純化することができ、健全確率 $p_s(y)$ は式(2)で与えられる。

$$p_s(y) = \frac{m_s f_s(y)}{m_s f_s(y) + (1 - m_s) f_d(y)} \quad (2)$$

ここで、 $f_s(y)$ は健全部位の指標値Yが $Y=y$ になる確率、 $f_d(y)$ は腐朽部位の指標値Yが $Y=y$ になる確率、 m_s は健全部位の存在割合である。 m_s および各腐朽診断指標値の $f_s(y)$ 、 $f_d(y)$ が判れば、測定の結果得られた腐朽判定指標の値から、その部位が健全である確率を求めることができる。本研究の腐朽診断システムでは、この健全確率を測定部位が生物劣化を起している可能性を示す指標として用いて劣化判定を行う。

$f_s(y)$ 、 $f_d(y)$ は、腐朽部位と健全部位に分けて実際に打音を測定した結果として得られる腐朽判定指標値の分布から求めることが可能であるが、 m_s については現実に測定することは不可能であり、現状では適当な値を定めるしかない。本研究では、建物が完成してからの経過時間tにおける平均腐朽度 $\bar{X}(t)$ が時刻tにおける腐朽部位の存在割合 $m(t)$ と比例関係にあると仮定し、さらに、tと $\bar{X}(t)$ の間には式(3)で示したロジスティック関数の式が成り立つ(tと $\bar{X}(t)$ 関係: 図5-3)と仮定、 $\bar{X}(t) = 0.01$ 、すなわち腐朽

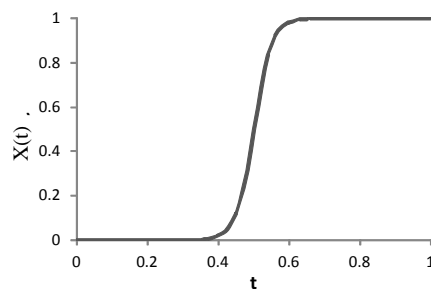


図 5-3 仮定した平均腐朽度 $\bar{X}(t)$ とtの関係

部位数が0となる時の時刻 T_0 , $\bar{X}(t)=0.99$, すなわち, 全ての木材が完全に腐朽する時刻 T_{max} を求め, その比の値 T_0/T_{max} の値(0.744)を m_s の値として用いることとした。なお, 式(3)で示したロジスティック関数は0, 1に収束する関数であるので, $\bar{X}(t)$ の値として0, 1ではなく0.01, 0.99という値を用いて計算を行った。

$$\bar{X}(t) = \frac{1}{1 + \exp\left(-\frac{t-\mu}{\sigma}\right)} \quad (3)$$

$\mu = 0.05, \sigma = 0.025$

5.2 木造建築物を対象とした検証実験

1) 実験目的および実験方法

5.1で構築した劣化診断システムの有効性を検証するため, 木造建築物に対する打音測定を実施した。対象とした木造建築物は秋田県立大学木材高度加工研究所内にある, 築18年の木造の小屋(木造平屋, 床面積約20m², 軒高約3.5m: 写真5-1)である。実際に腐朽・蟻害等の生物劣化が発生している木造建築物を探し出すのは困難であること, 人が住んでいる木造住宅の測定には様々な制約があること, この小屋の場合は, 異常を検出した部位については, 実際に床, 壁を剥がして確認できるというメリットがあること等の理由から測定対象としてこの小屋を選択した。建物の仕様は, 外壁が木質系の防火サイディング, 内壁が石膏ボード(9mm), 床がピッチ303mmの床根太(断面寸法45mm×45mm, 樹種:スギ)の上に合板フローリング(厚さ12mm)を張った仕様であった。土台, 大引き, 柱, 根太の配置は図5-4の床伏せ図に示した通りである。実際には455mm間隔で間柱が入り, 内外壁はそこに釘で留めつけられている。建物の状態を目視によりチェックした限りにおいては, 外壁のサイディングの一部にゆがみ, ひび割れは確認できたものの, 腐朽・蟻害等の生物劣化が起きている兆候は確認できなかった。したがって, 実験の性格としては, 構築した劣化診断システムが健全部位を誤って劣化していると診断してしまう割合の発生率を検証する実験

となった。実験は, 外壁(木質系サイディング), 内壁(石膏ボード), 床(フローリング-床根太, 下地合板仕様)を対象とし, 外壁については土台, および柱・間柱の地上からの高さ約750mmの部位を, 内壁については, 柱・間柱の床面からの高さ約200mmの部位を, 床については, 端部から1番目, 2番目の根太部位を455mm間隔で打撃した。測定箇所は図5-4に示した通りであり, 実際の使用状況および仕様上の関係で打撃できない部分については, 測定を行わなかった。また, 4章の結果に基づき, 外壁はゴムハンマー, 内壁はショックレスハンマー, 床は打診棒を用いて打撃した。測定の結果, 異常が有る可能性が高い部位で外見からその要因が特定できない部位については, 内壁の石膏ボードを剥がして目視で状態を確認した。なお, 研究計画書ではレジストグラフを用いて妥当性の検証を行うとしていたが, 目視による劣化状態の確認が可能となったので, レジストグラフによる測定は行わなかった。

2) 健全確率の算出

4章で求めた, 壁・床各仕様に対して有効な腐朽診断指標値(表4-3参照)を用い, 各測定部位についてその健全確率を算出した。その具体的手順は, 以下の通り。

① 4章のモデル試験体の実験結果を用い, 有効な腐朽診断指標値の腐朽部位の確率密度関数 $f_d(y)$, 健全部位の確率密度関数 $f_s(y)$ を, それぞれ推定した。確率分布関数には, 負の値を取る指標値については3パラメータワイブル分布を, 正の値しか取らない指標値については2パラメータワイブル分布を用いた。3パラメータワイブル分布の確率分布関数の式は式(3), 確率密度関数の式は式(4)の通りであり, ここで $\gamma=0$ とすると2パラメータワイブル分布の式となる。モデル試験体の実験で得られた, 腐朽診断指標値の腐朽部位の累積分布および健全部位の累積分布からパラメータ α, β, γ を最尤推定法により推定した^{文9)}。

表 5-1 床・壁モデル試験体および小屋の健全確率推定結果

| 仕様 | 健全部位 | | | | | | 腐朽部位 | | | | | |
|--------------|------|------|------|----------|----------|----------|------|------|------|----------|----------|----------|
| | 平均値 | 最小値 | 最大値 | ≥0.6 (%) | ≥0.7 (%) | ≥0.8 (%) | 平均値 | 最小値 | 最大値 | <0.6 (%) | <0.7 (%) | <0.8 (%) |
| 床・壁モデル試験体 | | | | | | | | | | | | |
| 床(フローリング-根太) | 0.78 | 0.61 | 0.92 | 100.0 | 85.1 | 44.7 | 0.64 | 0.23 | 0.88 | 28.0 | 68.0 | 92.0 |
| 内壁(石膏ボード) | 0.80 | 0.49 | 0.95 | 89.4 | 74.5 | 57.4 | 0.61 | 0.37 | 0.88 | 48.3 | 62.1 | 93.1 |
| 外壁(サイディング) | 0.80 | 0.54 | 0.91 | 93.8 | 84.6 | 61.5 | 0.59 | 0.46 | 0.79 | 77.8 | 77.8 | 100.0 |
| 小屋試験体 | | | | | | | | | | | | |
| 床(フローリング-根太) | 0.80 | 0.66 | 0.89 | 100.0 | 88.9 | 61.1 | — | — | — | — | — | — |
| 内壁(石膏ボード) | 0.87 | 0.65 | 0.97 | 100.0 | 96.0 | 80.0 | — | — | — | — | — | — |
| 外壁(サイディング) | 0.77 | 0.56 | 0.91 | 99.0 | 86.8 | 41.2 | — | — | — | — | — | — |

≥0.6: 健全確率0.6以上の測定部位の割合, ≥0.7: 同0.7以上, ≥0.8: 同0.8以上, <0.6: 健全確率0.6未満の測定部位の割合, <0.7: 同0.7未満<0.8: 同0.8未満

$$F(y) = 1 - \exp\left[-\left(\frac{y-\gamma}{\beta}\right)^\alpha\right] \quad (4)$$

$$f(y) = \frac{\alpha}{\beta} \left(\frac{y-\gamma}{\beta}\right)^{\alpha-1} \exp\left[-\left(\frac{y-\gamma}{\beta}\right)^\alpha\right] \quad (5)$$

② 5.1で定めた m_s の値および①で推定した確率密度関数を用い、式(2)から、各仕様に対して有効な腐朽診断指標値全ての健全確率値を算出した。③ ②で求めた健全確率の平均値を取り、その測定部位の健全確率とした。

3) 結果および考察

小屋試験体の各仕様および床・壁モデル試験体の同一仕様の健全確率推定結果は表5-1に示した通りであった。床・壁モデル試験体については、健全部位の健全確率が腐朽部位の値よりも大きくなり、その値は、健全部位では平均0.8程度、腐朽部位では0.6と概ね妥当な値となった。この結果は、健全確率を推定するために5.1で示した仮定の妥当性を示している。次いで、床・壁モデル試験体の結果を用いて、小屋測定の際の劣化判定基準を定めた。床・壁モデル試験体の健全確率の最小値と最大値の差は大きく、部位による健全確率のばらつきは大きい。しかし、健全部位のうち健全確率が0.6以上の部位が全健全部位の90%~100%、腐朽部位のうち健全確率が0.8未満の部位が全腐朽部位の90%~100%を占めるという結果となっており、健全確率が0.8以上であればほぼ異常なし、健全確率が0.6未満であれば何らかの劣化がほぼ確実に存在すると判断することができる。この結果に基づき、小屋の測定では余裕を見て健全確率0.65以下の部位は異常とみなし、内壁・床を剥がして部材の状態を確認することとした。測定の結果、小屋試験体で健全確率0.65以下となった測定箇所は図5-4で白抜き記号および←で示した箇所であり、床は0箇所、内壁は1箇所、外壁は土台部分で3箇所、柱部分で3箇所であった。また、土台部分で1箇所0.6未満の値を取る箇所があり、この箇所は柱部分も健全確率が0.65以下であった。該当する箇所の内壁を剥がして内部の状態を確認したところ、いずれも生物劣化被害は確認されなかった。ただし、上述した健全確率0.6未満の箇所では、間柱が木喰い虫に食われた跡が確認された(写真5-2)。ただし、これは製材前の樹木の状態で食われたものであり、生物劣化には相当しない。さらに、写真では確認できないが、アンカーボルトの位置が間柱の位置と重なっており、そのため端部の切り欠き加工がなされていた。この箇所ではこれらの影響を受けて健全確率が低くなったと考えられる。また、外壁については所々サイディングに割れやゆがみが生じている箇所があり、その影響で健全確率が低い部分が多くな



写真 5-1 実験対象とした木造建築物（小屋）

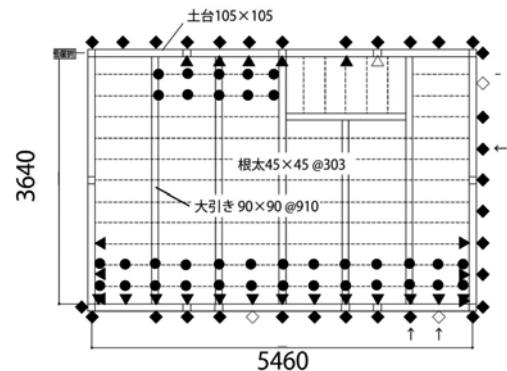


図 5-4 小屋の床伏図および打音測定箇所

●：床の測定箇所，▲，△：内壁 同，◆，◇，←：外壁 同，ただし，△は健全確率が0.65未満の内壁の箇所，◇は同外壁（土台部分），←は同外壁（柱部分）

ったと考えられる。全体としての結果は、外壁は健全確率がやや低くなっているが平均値はいずれも0.8前後であり、健全確率0.7の箇所が全体の85%以上を占めていた。

以上の結果より、構築した劣化診断システムを健全な木造建築に対して適用した場合の誤診断発生率は十分実用に耐え得るレベルであることが確認された。

6. まとめと今後の課題

本研究は、木造住宅における打診による劣化診断判定の科学的根拠を明らかにすることを目的として、腐朽させた木材、および、腐朽させた木材を仕上げ材で覆った床・壁モデル試験体に対し打音測定および振動解析を行った。そして、以上の実験で得られた打音特性を使用したソフトウェアシステムを構築し、実際の木造建築物を対象とした実証実験を行った。本研究で得られた結果をまとめて以下に示す。

1) 腐朽させた木材に対する測定では、表面腐朽（表面から深さ20mmまで）に対して有効な腐朽診断指標値が71個、内部の腐朽のみに有効な指標値が16個、表面および内部に有効な指標値が3個得られた。また、指標値は固定法の影響を大きく受けることが明らかになった。ただし、固定法の違いの影響を受けるが腐朽の有無に対して無効な指標値は13個存在しており、これらの指標値を固定法の判定

指標として用いることで固定法が異なる場合でも、腐朽検出はある程度可能になると考えられる。

2) 内部腐朽に対して有効な指標値の検出限界は、表面からの深さ40~60mmまで、断面積に対する腐朽面積が20%以上程度であった。また、得られた指標値の傾向より、内部腐朽が存在すると高周波領域にノイズ的なピークが発生して、減衰時間が長くなると考えられる。

3) 表面腐朽に有効な腐朽診断指標値の性質は特定できなかった。今後、腐朽の発生状況を分類して検討を行うことにより、主要因を明らかにしていく必要がある。

4) フレーム試験体の結果は、概ね腐朽させた木材の結果と一致していた。したがって木材が顕しになっている部分の打診による劣化診断判定は、内部腐朽については、高周波域に生じるノイズ的なピークの発生およびそれに伴う減衰時間の変化を根拠とし、表面腐朽については、様々な打音特性の違いを複合的な組み合わせで総合的に判断していると考えられる。

5) 床・壁モデル試験体の測定では、仕様により最適な打撃治具が異なることが明らかとなった。今回の実験結果だけでは、その傾向を特定することは困難であり、今後更なる検討を行う必要がある。

6) 最適な打撃治具を用いた床・壁モデル試験体の試験では、石膏ボード壁以外の仕様については、固定法の違いの影響を受ける腐朽診断指標値と比較的高い一致を見た。したがって、仕上げ材上から打診を行った場合の劣化診断判定は、木材表面を打撃した場合と異なり、釘の緩み、木材との間に生じた隙間等によって生じるがたつき等の音に基づいて行なわれていると考えられる。

7) 健全確率の概念を導入し、床・壁モデル試験体の測定結果を基とした劣化診断システムを構築し、健全な木造建築物を対象とした検証試験を行った結果、得られた健全確率は0.7の箇所が全体の85%以上、0.6以上の箇所がほぼ100%を占めており、健全な木造建築に対して適用した場合の誤診断発生率は十分実用に耐え得るレベルであることが確認された。



写真 5-2 はく離した壁内部の様子

今回の研究の主要な目的である、打診による劣化診断の科学的根拠の解明については、木材を直接打撃するケースでは、内部腐朽の診断根拠をほぼ特定することができたが、表面腐朽については特定には至らず、さらにデータを詳細に解析して要因を絞り込んでいくことが今後の課題となる。表面仕上げ材を張った場合については、今回の実験の結果からは釘の緩み等によって生じるがたつき音等が診断根拠になっていると考えられるが、あくまでも限定されたサンプルに対する結果であり、打撃治具の種類の影響も含め、今回の結果をベースにして、今後さらに検討を行っていく必要がある。

もう一つの目的である劣化診断システムの構築については、健全な木造建築物が健全であることを実証することはできたが、実際に腐朽が生じた場合に確実に検出できるかの検証は今後の課題となる。また、今回構築したシステムでは、仕上げ材の仕様ごとにデータを収集して確率密度関数を推定する必要がある、データ数が少ないと精度に問題が出てくる等の問題が残されている。類似の仕様について、共通の腐朽診断指標を抽出することでこの問題の解決は可能であり、これも今後の課題となる。

謝辞

実験の実施およびデータ分析にあたって協力して頂いた当研究所の元嘱託職員の長岐佳奈子氏に心より御礼申し上げます。

<参考文献>

- 1) 渡辺浩, 土居修一, 伊藤良介, 瀧内浩: ポンゴシ材の健全度診断の方法とその評価, 木材工業, Vol. 58, No. 2, p. 66-70, 日本木材加工技術協会, 2003. 2
- 2) 栗崎宏, 中谷浩: 15年経過した木製歩道橋の劣化調査事例, 富山県農林水産総合技術センター木材研究所研究報告, No. 1, p. 29-37, 富山県, 2009
- 3) 有馬孝礼, 丸山則義, 早村俊二, 岡崎光: 木造住宅の現場劣化診断のための打撃音の周波数分析, 材料, Vol. 34, No. 383, p. 979-984, 材料学会, 1985.
- 4) 有馬孝禮, 上杉基, 岩崎新二, 荒武志朗: 外構木材の劣化非破壊検査への打撃音分析, 日本木材学会大会研究発表要旨集 (CD-ROM), Vol. 61st, 日本木材学会, 2011.
- 5) 野口昌宏, 宮澤健二: シロアリ被害を受けた木質部材の打撃音診断法とそのめり込み性能評価, 日本建築学会構造系論文集, Vol. 75, No. 647, p. 137-146, 日本建築学会, 2010. 4
- 6) 森下巖, 小畑秀文: 信号処理, コロナ社, 1982.
- 7) 本郷哲, 菅野裕佳, 田中達彦: デジタル信号処理の基本と応用, ソフトバンククリエイティブ, 2008
- 8) 雨宮昭二: 浅川実験林苗畑の杭試験(1) 杭の被害程度を評価する方法, 林試研報, No. 150, p. 143-156, 農林省林業試験場, 1963. 3
- 9) 堀江和美, 中村昇, 飯島泰男: 限界状態設計法のための強度データ解析(第1報) 強度分布特性値におよぼす確率・統計手法の影響, 木材学会誌, Vol. 45, No. 2, p. 103-110, 1999. 3.