

# 電磁波伝播特性を用いた木造大壁躯体の含水率の評価に関する基礎的研究

## その1 計測方法の確認とその計測結果

木材	大壁	含水率	準会員	○宇都宮 佑太*1	正会員	有木 彩乃*2
電磁波レーダ	樹種		正会員	森 拓郎*3	正会員	馬場 祐*4
			正会員	高橋 一聡*5		

### 1. はじめに

#### 1.1 背景と目的

近年、木造住宅の長寿命化が求められている。木造住宅における劣化として、雨漏りや漏水、結露などにより木材が水分を多く含み、腐朽や強度低下につながるということが挙げられる。これらの劣化を診断する方法は、散水調査や壁などの一部破壊を伴う調査など、時間や費用のかかるものが一般的である。一方、RC造の分野では電磁波レーダ法を用いた非破壊検査が進められており<sup>1)</sup>、その適用範囲や解析手法に関する報告がされている<sup>2),3)</sup>。しかし、木造の分野では非破壊検査の検討はまだ少く、高周波含水率計<sup>4)</sup>や超音波を用いた計測器などが試されている。ところが、高周波含水率計は測定深度が不十分であり、超音波は空気中を伝播しにくいいため、空気層を有する木造大壁を対象とした計測は難しい。その点、電磁波レーダは十分な測定深度があり、空気層があっても計測が可能である。また、電磁波の反射波を利用するため、壁の屋内側もしくは屋外側一方向からの計測が可能であり、簡単な操作で検査ができる。

本報では、木造大壁躯体の含水率を非破壊で診断する方法について検討した。実大壁モデル屋内側から含水率操作を施した試験体を挿入し、屋外側から本計測器を用いて計測を行い、本計測器の測定環境が結果に及ぼす影響、また試験体の含水率と電磁波の反射量の関係について検討したので報告する。

#### 1.2 測定原理

電磁波レーダ（以下、計測器）は、電磁波が媒質中を各媒質固有の速度で直進し、異なる媒質が接する境界面で反射、透過する性質を利用している。コンクリート中の鉄筋の深度を測定する場合、コンクリートと鉄筋の比誘電率の差によって電磁波が反射される。このときの電磁波の送信から受信までの時間と、コンクリート内部における電磁波伝播速度から鉄筋深度が算出される。計測器（KEYTEC社製 SIR-EZ XT）では、測定結果が白黒の画像として表示され、山型の波形（以下、山）の頂部を確認することで、鉄筋の位置と深度が計測できるようになっている。この白黒は、電磁波が反射する際、媒質の比誘電率の差が大きいほど濃く表示される。また、電磁波

が比誘電率の小さい媒質から大きい媒質に当たって反射した場合は上白下黒の山、大きい媒質から小さい媒質に当たって反射した場合は上黒下白の山が表示される。

木造大壁の場合、壁体がコンクリート、木材が鉄筋に相当する（図1）。各媒質の比誘電率は、空気が1、木材が2~6、水が80であり、水を多く含んでいる木材、すなわち含水率が高い木材ほど、電磁波の反射量は大きく、画像表示においても白黒が濃く表される。

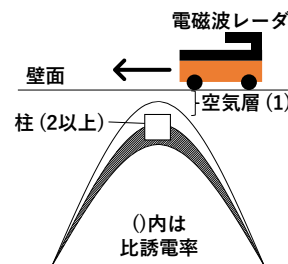


図1 木造大壁における柱の画像表示

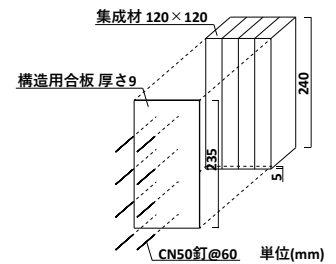


図2 試験体概要



写真1 実大壁モデル概要

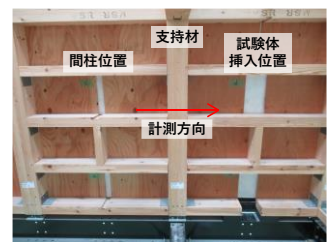


写真2 実大壁モデル（屋内側）

### 2. 実験概要

#### 2.1 試験体概要

図2に試験体概要、写真1、写真2に実大壁モデルの写真を示す。本壁モデルを用いて間柱試験体を用いた検討も行われたが、本報では下記の試験体を用いた検討について報告する。試験体は、スプルス（W）、オウシュウアカマツ（R）、秋田スギ（AS）、吉野スギ（YS）、飼肥スギ（OS）、東濃ヒノキ（TH）、美作ヒノキ（MH）、道産カラマツ（DK）の8樹種、各6体の計48体の集成材（b=120mm、h=240mm、l=120mm）を用い、積層面に直交するように厚さ9mmの構造用合板を釘打ち（CN50）した。試験体を切り出す際に、初期含水率測定用の木材を採材し、全乾法により各試験体の初期含水率と全乾比重

を求めた。水中養生により試験体を一度高含水状態にし、徐々に含水率が低くなるように自然乾燥させながら3回に分けて目標含水率を設定した（2022/7/29 は 40~90%、2022/9/16 は 25~40%、2022/11/2 は 15~25%）。各日程での試験直前に重量を計測し、初期重量との差から試験時の推定含水率（以下、含水率）を算出した。

## 2.2 試験方法

写真2の合板が切り抜かれた位置に、壁モデルの合板面と試験体の合板面を合わせるようにはめ込み（写真3）、計測器を木製のガイドに沿わせながら計測した。

## 2.3 解析方法

計測により得られたデータを数値として取得し、試験体の山の頂部付近における、電磁波の反射量の最大値（以下、Max 値）を白色部分から取り出し（図3）、比較、検討した。

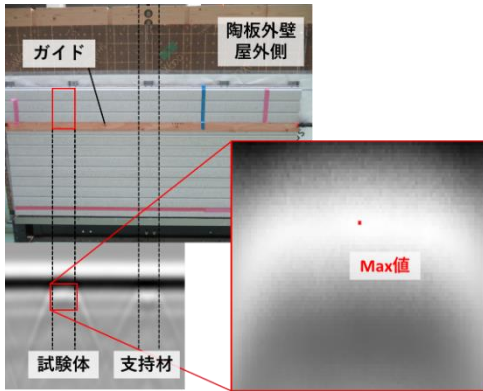


図3 Max 値の取り出し

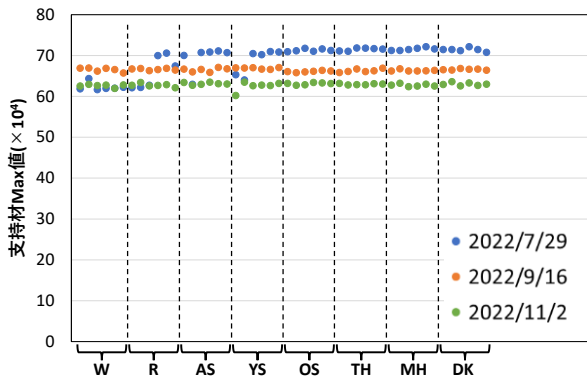


図4 各試験日程における支持材 Max 値

## 3. Max 値評価方法の決定

### 3.1 測定誤差について

試験体を測定する際に壁モデルの構造を支える部材である支持材も含めて計測し、試験体と同様に Max 値を比較することで測定誤差を確認した。

図4に各試験時における支持材 Max 値を示す。樹種ごとに、左から試験体番号順に並べている。測定日ごとに平均的な値が異なっているが、これは試験室の湿度に伴って支持材の含水率が若干の変動があったためであると考えられる。また、7月のみ値が少しばらついた。この原因として計測器本体の温度が安定していなかったことが

考えられる。しかし、これを除いて概ね支持材 Max 値は測定日ごとに安定しており、本計測器の測定誤差は小さいことが確認できた。

### 3.2 測定環境が Max 値に及ぼす影響

測定環境の変化が計測値に及ぼす影響を調べるため、以下の3条件についても AS 試験体を用いて検討した。

#### ① 間柱位置を含む・含まない（写真4）

試験体を挿入しない間柱位置（写真2）を含めた場合と含まない場合を比較した。試験体に対して電磁波の反射率の小さい間柱位置の含む・含まないを比較することで、計測値が絶対値であるか、対象物の反射率によって変動する相対値であるかを検討した。

#### ② 測定方向（写真5）

通常は壁に向かって右から左に測定するが、逆方向に計測した場合との比較をした。電磁波の反射率の異なる試験体と支持材のどちらを先に計測するかで計測値に違いが表れるのかを検討した。

#### ③ ガイドの種類（写真6-8）

本計測器は手に持って計測するため、測定位置のずれを防ぐためにガイドを使用した。このガイドが計測値に及ぼす影響について木材ガイド、金属（アルミ）ガイド、ガイド無しの3条件で検討した。



写真3 試験体挿入時の壁モデル（屋内側）

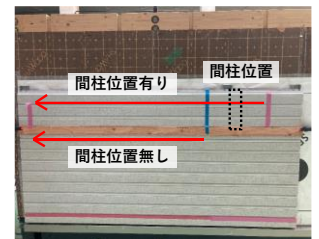


写真4 間柱位置を含む・含まない

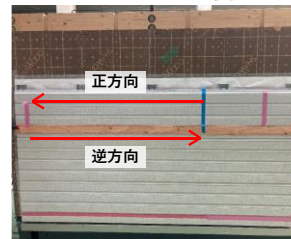


写真5 測定方向

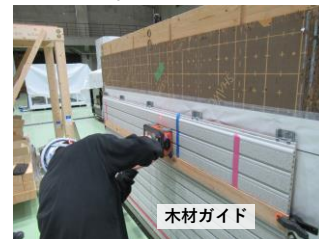


写真6 木材ガイドを用いた計測



写真7 金属ガイドを用いた計測



写真8 ガイド無しでの計測

次に、それぞれの測定条件における結果と考察を示す。

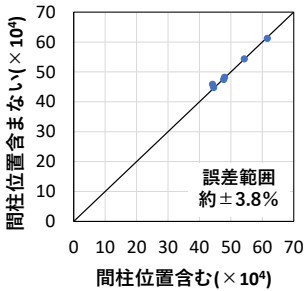


図5 間柱位置  
含む・含まない

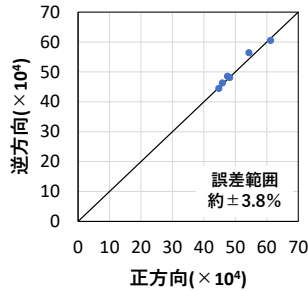


図6 正方向・逆方向

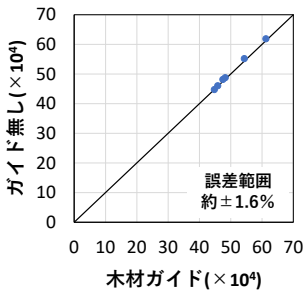


図7 木材ガイド  
有り・無し

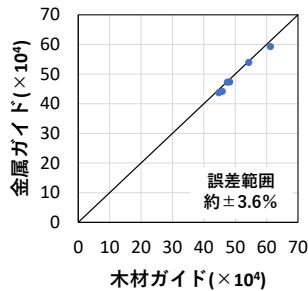


図8 木材・金属ガイド

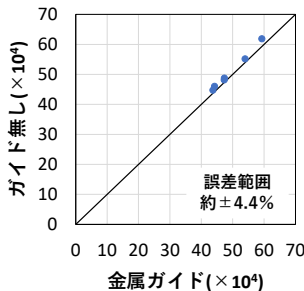


図9 金属ガイド有り・無し

① 間柱位置を含む・含まない

間柱位置を含めて計測した値を横軸、含めず計測した値を縦軸として図5に示す。両者の値の誤差範囲は約±3.8%と小さいことから、計測値は絶対値であることが確認できた。

② 測定方向

正方向（外壁面に向かって右から左）で計測した値を横軸、逆方向（外壁面に向かって左から右）で計測した値を縦軸として図6に示す。両者の値の誤差範囲は約±3.8%と小さいことから、電磁波の反射率の異なるものを計測する場合、どちらを先に計測しても同様の結果が得られることが確認できた。

③ ガイドの種類

木材ガイドを用いて計測した値を横軸、ガイド無しで計測した値を縦軸として図7に示す。両者の値の誤差範囲は、約±1.6%と小さかった。木材ガイドを用いて計測した値を横軸、金属ガイドを用いて計測した値を縦軸として図8に示す。両者の値の誤差範囲は、約±3.6%と小さかった。金属ガイドを

用いて計測した値を横軸、ガイド無しで計測した値を縦軸として図9に示す。両者の値の誤差範囲は、約±4.4%と小さかった。

よって、ガイドが計測値に及ぼす影響はほぼないことが確認できた。

以上のことから試験体 Max 値の比較にはできるだけ簡便かつ正確に計測するため、正方向・木材ガイド有り・間柱位置を含まない、という条件を採用することとした。また、得られた試験体 Max 値そのままに含水率を評価することとした。

4. 計測結果と考察

4.1 全試験体を通しての Max 値の推移

図10に全日程における含水率と試験体 Max 値の推移及びスギ・ヒノキ全体とオウシュウアカマツの線形近似を示す。どの樹種においても正の相関が見られる。また、産地に関わらずスギを橙色、ヒノキを緑色で示しているが、それぞれ樹種ごとに分布が偏っているのがわかる。表1に試験体の全乾比重の平均値を示す。図10のプロットの分布の偏りと表1より、同じ含水率でも比重の大きい樹種ほど Max 値、すなわち電磁波の反射量は大きいと考えられる。ただし、含水率 60%近辺はオウシュウアカマツがヒノキを下回っている。スギ・ヒノキを比較すると比重の大きいヒノキの方が近似直線の傾きは大きい、この2樹種より比重の大きいオウシュウアカマツは8樹種の中で最も近似直線の傾きが小さく、必ずしも比重と近似直線の傾きに相関があるとは言えない結果となった。

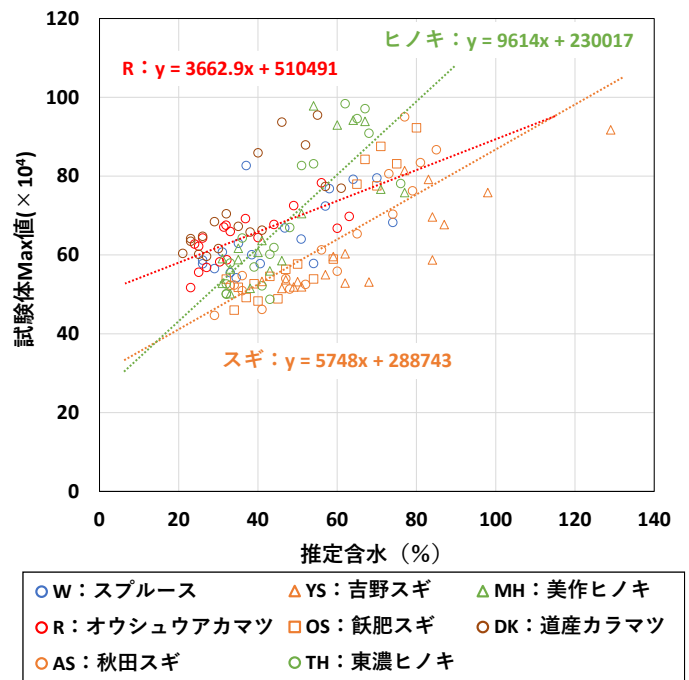


図10 推定含水率と試験体 Max 値の推移及びスギ・ヒノキ・オウシュウアカマツの線形近似

表 1 平均全乾比重

樹種	平均全乾比重	樹種	平均全乾比重
W	0.43	OS	0.38
R	0.50	TH	0.44
AS	0.33	MH	0.44
YS	0.36	DK	0.51

4.2 全乾比重と試験体 Max 値の相関

図 11 に含水率 21~40%、41~60%、61~80%ごとの試験体の全乾比重と試験体 Max 値の関係及びその線形近似を示す。21~40%に 2 点突出したプロットがあったため今回はこれを除いて近似している。これにより、含水率が低いほど全乾比重と試験体 Max 値の相関は高く、含水率が高いほど相関が低いことがわかる。これは、含水率が高くなるにつれて電磁波は水の影響を強く受け、比重によって生じる差が小さくなるためであると考えられる。逆に、含水率が全乾に近いほど、木材の繊維の密度差による影響が強く表れると考えられる。

しかし本実験では、低含水率を目標としていた 11 月の計測時で、最も低かった試験体でも 21%までしか下げられなかった。そのため、この影響は顕著に現れず、比重と図 10 の近似直線の傾きの関係が上手く現れなかった推測する。

今後、全乾状態に近い状態での計測を行い、比重と Max 値の推移の関係について検討する。

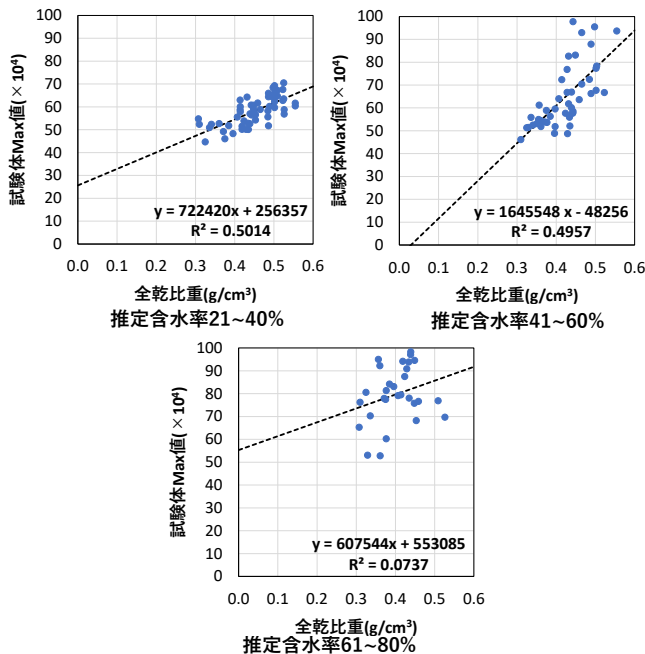


図 11 全乾比重と試験体 Max 値及びその線形近似

5. まとめ

本研究では電磁波レーダを用いて、含水率を操作した試験体を実大壁モデル越しに計測し、Max 値を用いて比較、検討した。

まず、測定環境が Max 値に及ぼす影響について 3 条件で比較した。いずれの条件においてもばらつきはかなり小さく、これらの条件が変化したとしても計測結果にはさほど影響はないことがわかった。また、支持材 Max 値は概ね安定していたため、本計測器の測定誤差は小さいことがわかった。そのため、正方向・木材ガイド有り・間柱位置を含まない、という条件を採用し、得られた試験体 Max 値と含水率を比較できると考えた。

その結果、全ての試験体を通して含水率と Max 値に正の相関が見られた。また、比重が大きいほど Max 値が大きい傾向が見られた。各試験体の全乾比重と試験体 Max 値を含水率 21~40%、41~60%、61~80%ごとに比較すると、含水率が高いほど相関が低くなった。これは、含水率が高いほど電磁波が水の影響を強く受けたためであると考えた。本実験では、目標含水率ほど試験体の含水率が下げられなかったため樹種による差は顕著に現れなかった。

今回、ある程度高含水率の木材であれば検知可能であることがわかった。しかし、プロットのばらつきが大きいため、木材の健全、不健全を判別できるようにするには 10~20%程度における、より詳細な検討が必要となる。

今後全乾状態での計測を行い、比重と Max 値の推移の関係について検討する。

謝辞

本研究は、積水ハウス株式会社との共同研究として実施した。

【参考文献】

- 1) 朴錫均, 魚本健人: レーダ法による多層コンクリート床版の非破壊検査のシミュレーション解析, 土木学会論文集 No. 538 / V-31, pp.95-104, 1996.5
- 2) 西尾荘平, 他 3 名: 電磁波レーダ法によるコンクリートの内部探査に関する有限時間領域差分法解析, 日本建築学会構造系論文集 第 557 号, pp.29-36, 2002.7
- 3) 黒川善幸, 他 3 名: 電磁波レーダ法によるコンクリート内部探査画像の改善手法に関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol. 25, No. 1, pp.1691-1696, 2003
- 4) 黒塚ひとみ, 他 3 名: 高周波含水率計を用いた壁内構造材の腐朽劣化の見える化, 日本木材保存協会 第 35 回年次大会, p-20, 2019

\*1 広島大学 学部生  
 \*2 広島大学 大学院生  
 \*3 広島大学 准教授・博士 (工学)  
 \*4 積水ハウス (株) 修士 (工学)  
 \*5 積水ハウス (株) 修士 (農学)

\*1 Student, Hiroshima Univ.  
 \*2 Graduate Student, Hiroshima Univ.  
 \*3 Assoc. Professor, Hiroshima Univ., Dr. Eng.  
 \*4 Sekisui House, Ltd. Master Eng.  
 \*5 Sekisui House, Ltd. Master Agr.