

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 10 月 3 日現在

機関番号：14301

研究種目：基盤研究(A) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25242032

研究課題名(和文) FMCWレーダによる木造建築の構造と劣化の非破壊診断技術の開発

研究課題名(英文) Development of FMCW radar apparatus for scanning of wooden-wall to evaluate inner structure and bio-degradation non-destructively

研究代表者

藤井 義久 (Fujii, Yoshihisa)

京都大学・(連合)農学研究科(研究院)・教授

研究者番号：10173402

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 32,400,000円

研究成果の概要(和文)：電磁波を用いて非接触・非破壊で住宅の壁体内の構造や劣化(腐朽や虫害)を診断する反射型の2次元イメージング装置を開発した。20GHzを中心周波数とし、数GHzの掃引幅を有するFMCW方式の反射型レーダ装置を試作した。装置はアンテナ、VNA、XYステージ、コントローラ、計測制御用のPCからなる。大壁モデルの内部構造(間柱、金物、筋違など)や劣化状態の検出性能を検討した。時間軸信号に現れる反射ピークの位置や強度から、壁の層構造や内部の部材の有無や種類が判定できた。また接合金具などの金属系部品、筋違や間柱が確認でき、さらに壁体内の木部腐朽を誘発する結露水や高含水率の木部の位置や範囲を特定できた。

研究成果の概要(英文)：A nondestructive and small FMCW radar apparatus for scanning of the wooden wall to evaluate inner structure and bio-degradation progressed in the wall was developed. The parts in the wall such as wooden posts and beams, metal plate connectors were recognized as 2D and 3D images. The moist area was also recognized, and this suggests that the area of potentiality of bio-degradation can be detected by this apparatus.

研究分野：木質科学

キーワード：診断・回生・維持管理 非破壊検査 木造建築 生物劣化 耐震性能

### 1. 研究開始当初の背景

住宅や社寺建築などの木造建築物は重要な社会資本のひとつであり、これを地震などの災害から護るための制度や技術の整備は多方面から検討されている。また今後の住宅行政にとっては国内の5千万戸を越える既存住宅ストックの整備・長寿命化と流通促進が大きな課題とされている。

一方、既存の木造建築の整備に必須となる維持管理技術は、診断と補修のプロセスからなるが、これらのうち診断に関する技術開発については十分な発達がみられないのが現状である。そのため正確な耐震診断や耐震性を損なう建築物の劣化の診断や対策ができず、不動産の評価が適切にできない状態にあり、このことが既存ストックの整備に基づく社会基盤の整備を妨げている。

### 2. 研究の目的

本研究では、主として木造建築物の内部で進行する腐朽や虫害などの生物劣化、劣化を誘発する結露や木部含水率の状態、さらには筋交いや金具などの構造の状態を、非破壊・非接触で、定性的および定量的に診断する小型の装置を開発する。

検出には周波数がサブミリ波帯の電磁波をもちいた FMCW 方式レーダ技術を援用する。装置の開発を通じて、サブミリ波帯における木材の誘電特性を明らかにし、3次元で高分解能の可視化のためのアンテナ、検波回路などのハードと、信号分析と画像解析と自動診断のためのソフトなどを考究する。

### 3. 研究の方法

本研究では、FMCW レーダ方式による木造建築物に適した非破壊診断装置の開発(試作)とその性能評価を実施するとともに、サブミリ波帯における木材の誘電特性を明らかにする。

平成25および26年度は、既往の研究代表者らの研究成果を参照しながら、装置を設計・試作しその基本性能を評価し、改良した。既往の研究では、原理確認を含めた試行的な装置の制作にとどまり、また可視化精度も低かったため、本研究では、アンテナ特性、検波方式と信号処理について木質を含む多様な構造体に適した可視化性能を有するものを製作した。

平成27年度は、装置の設計を適切に行うため、種々の木造建築物の仕様や劣化状態に関するデータの収集、評価用の木造建築の部材や部分構造体モデルの構築を行った。

具体的には以下の手順を進めた。

FMCW レーダ装置の試作と基本性能評価

中心周波数 20GHz、帯域 10GHz の FMCW 方式の検出装置を軸に、走査範囲 500mm 角の軽量の操作ユニットを有し、この範囲を 200 秒程度で操作し、走査面内の可視化画像の分解能が 5 から 10mm、奥行方

向が 1mm 程度の診断装置を試作する。また測定画像はほぼリアルタイムで表示されるものとした。

木材・木質構造体の誘電特性の評価  
各種木質建材、金属やプラスチック、窯業系建材について、その誘電率とその異方性、密度や水分依存性を明らかにした。

構造診断に関する性能評価  
壁体などの構造体内部の部材や部品の位置、形状、材質などの判定精度を評価した。

劣化診断に関する性能評価  
構造体内部における腐朽や虫害の存在、劣化による断面欠損の評価精度を調べた。

可視化での木材の誘電特性の異方向考慮  
木造建築における可視化では、木材の誘電特性の異方性の影響が非常に大きい。この影響を避け、かつ木質部分の評価を的確に評価するという相矛盾した要求を満たすため、直交2方向に設定した2種類の電場のモードによる計測結果(強度分布と位相分布)のデータから木質部分を排除して構造を評価する計測と、木質の部分のみを評価する手法を検討した。

アンテナ設計条件と検波回路特性と到達可能分解能の見極め

様々な誘電特性を有する木質構造体の非破壊診断において、到達可能な可視化の分解能について、理論的考察を行い、実際の評価との相違を検討した。

以上の研究に関連する課題として、木材や木造の生物劣化特性、劣化と部材強度の関係、シロアリなど生物劣化因子の分布、伝統的な木造の劣化に関する研究、X線やAEモニタリングによる非破壊的な検出手法と本法との比較などの研究を行った。

### 4. 研究成果

本装置を用いて大壁モデル試験体の内部構造(間柱、金物、筋違、断熱材などの部材の有無や配置)や劣化状態の検出性能を検討した。その結果、時間軸信号に現れる反射ピークの位置と反射強度から、壁の層構造や内部の部材の有無や種類が判定できることがわかった。また壁体内の接合金具などの金属系部品、筋違や間柱、断熱材に貼りつけた金属フィルムなどの存在が確認できることも明らかになった。さらに壁体内の木部腐朽を誘発する結露水や高含水率の木部の位置や範囲を特定できることがわかった。

検討結果の一例を下記に記す。

試験体として寸法 500×610mm の合板(厚さ 12mm)または石膏ボード(同 13mm)2枚から成る簡易大壁モデルを用いた。2枚の板の間隔は 105mm とした。検出対象は含水率 0-80% の間で 10 段階に調製した 50(R)×67(L)×0.65(T)mm のミズナラ単板をポリエステルフィルムで密封したもの、およびアルミプレート(50×100×0.50mm)とした。これらの検出対象物は、壁(手前)また

は壁(奥)の前面または背面のいずれか1か所に貼付けて検出を試みた。電磁波は壁(手前)の前面側からのみ照射した。また、壁(手前)の前面側に15, 20または25 mmの空間(通気層)を設けて窯業系外壁ボードを設置し、壁(手前)の前面に貼付けた試料を外壁ボードと通気層を介して検出することを試みた。外壁ボードは表面に異なる凹凸パターンを有する厚さ15, 18または21 mmの3種類の窯業系サイディングとした。

壁(手前)を合板、壁(奥)を石膏ボードとし、含水率80%の試料を壁(手前)の背面に貼付けたときのZ方向272 mmにおける反射強度分布を検討した。その結果、モデルに用いる板の種類によらず、壁(手前)の前面あるいは背面に貼り付けた試料は、周囲よりも反射強度の高い領域として検出された。ただし、壁(手前)が合板の場合は試料の形状が不明瞭であった。壁(奥)の背面に試料を貼付けた場合、壁(手前)が石膏ボードの時のみ、すべての試料の存在を確認することができた。しかし、その場合でも金属以外の試料の形状は不明瞭であった。これは、複数の単板が繊維方向を変えて積層されている合板に比べて石膏ボードのほうが均質でボードを透過する際に散乱が起こりにくいためと考えられた。

壁(手前)を合板または石膏ボード、壁(奥)を合板とし、壁(手前)の前面または背面に含水率の異なる試料を貼付けたときの含水率と試料中央付近の反射強度(SWR)の関係を検討した。その結果、試料の貼付け位置および壁板の種類に関わらず、含水率が高いほど反射強度が強い傾向が認められた。

外壁ボードを設置して測定したときの、使用した外壁ボードとボード表面の位置に対応する2次元反射波強度分布を検討した。その結果、外壁ボードの種類によらず、2次元イメージには外壁ボードの凹凸に対応した強度分布が認められた。含水率80%の湿潤試料を壁(表)前面に貼付けた場合、外壁ボードの厚みが15mmと18mmの条件で試料中心部に相当する部分が周囲よりやや反射強度が高く検出されたが、その形状は不明瞭であった。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計30件)

H. Watanabe, Y. Yanase, Y. Fujii, Relationship between the movements of the mouthparts of the bamboo powder-post beetle *Dinoderus minutus* and the generation of acoustic emission Journal of Wood Science, 査読有, 62, 2016, 85-92

栗崎宏、藤井義久、築瀬佳之、西川智子、中野ひとみ、瀬川真末、清水秀丸、伝統的木構造で使用される銅金物の劣化抑制への寄与(第I報) - 京都三条大橋欄干の蛍光X線分析 -、木材保存、査読有、

41、256-263、2015

H. Watanabe, Y. Yanase, Y. Fujii, Evaluation of larval growth process and bamboo consumption of the bamboo powder-post beetle *Dinoderus minutus* using X-ray computed tomography, Journal of Wood Science, 査読有, 61, 171-177, 2015

築瀬佳之、森 拓郎、吉村 剛、藤原裕子、藤井義久、鳥越俊行、今津節生、アメリカカンザイシロアリ食害材の空隙率と残存曲げ強度の関係、材料、査読有、63、320-325、2014

森拓郎、田中圭、河野孝太郎、中畑拓巳、築瀬佳之、栗崎 宏、腐朽したスギ材に打込まれた釘の一面せん断耐力の推定、材料、査読有、63(4)、314-319、2014

Y. Fujii, Y. Fujiwara, Y. Yanase, T. Mori, T. Yoshimura, M. Nakajima, H. Tsutsumi, M. Mori, H. Kurisaki, Development of Radar Apparatus for Scanning of Wooden-wall to Evaluate Inner Structure and Bio-degradation Non-destructively, 査読有 Advanced Materials Research Vol. 778, pp 289-294, doi:10.4028 /www. scientific.net/AMR. 778.289, 2013

S. D. Panjaitan, F. Diba, F. Hadary T. Yoshimura, Electrical Performance and Effect of Frequency Electromagnetic Waves on Subterranean Termites *Coptotermes curvignathus* Holmgren. 査読有 Journal of Electromagnetic Analysis and Applications, 6, 1-7, doi.org/10.4236/jemaa. 2014.61001, 2014

〔学会発表〕(計43件)

辻本綾香、藤原裕子、藤井義久、サブミリ波を用いた大壁構造内部の高含水率部位および金属の非破壊検出、第66回日本木材学会大会、2016.3.27-29、名古屋

H. Watanabe, Y. Yanase, Y. Fujii, Observation of Boring Process of Larvae of the Bamboo Powder-post Beetle (*Dinoderus minutus*) Using X-ray Computer Tomography, the 45th Int Res. Group on Wood Protection Annual Meeting, 2014.5.11-15, St George, Utah

T. Mori, K. Tanaka, T. Nakahata, K. Kawano, Y. Yanase, H. Kurisaki, Estimation of Shear Strength of Nail Driven into Decayed Wood, WCTE 2014, 2014.8.10-14, Quebec

T. Yoshimura, W. Ohmura: Termite infestation in the urban landscape of Japan, IUSI 2014.

7.13-18, Cairns

S. K. Himmi, T. Yoshimura, Y. Yanase, M. Oya, T. Torigoe and S.Imazu, Evaluation of nest-founding behavior of primary reproductives of the invasive drywood termite *Incisitermes minor* (Hagen) (Isoptera: Kalotermitidae) by X-ray tomography. The 3rd International Symposium for Sustainable Humanosphere (ISSH) – a Forum of the Humanosphere Science School (HSS), 2013.9.17-18, Bengkulu

〔図書〕(計1件)

H. Togo, S. Oka, Y. Fujii, Y. Fujiwara, Springer Verlag, Integrated Imaging and Vision Techniques for Industrial Inspection, 2015, 536

〔産業財産権〕

○出願状況(計0件)

○取得状況(計0件)

〔その他〕

ホームページ：京都大学大学院農学研究科森林科学専攻林産加工学研究室  
<http://h3news1.kais.kyoto-u.ac.jp/index-j.htm>

6. 研究組織

(1)研究代表者

藤井 義久 (FUJII, Yoshihisa)  
京都大学・大学院農学研究科・教授  
研究者番号：10173402

(2)研究分担者

栗崎 宏 (KURISAKI, Hiroshi)  
富山県農林水産総合技術センター・  
同木材研究所・副研究主幹  
研究者番号：20446644

清水 秀丸 (SHIMIZU, Hidemaru)  
富山県農林水産総合技術センター・  
同木材研究所・研究員  
研究者番号：70378917

堤 洋樹 (TSUTSUMI, Hiroki)  
前橋工科大学・工学部・准教授  
研究者番号：00329088

中島 正夫 (NAKAJIMA, Masao)  
関東学院大学・建築・環境学部・教授  
研究者番号：70172319

森 拓郎 (MORI, Takuro)  
京都大学・生存圏研究所・助教  
研究者番号：00335225

森 満範 (MORI, Mitsunori)

地方独立行政法人北海道立総合研究機構・森林研究本部林産試験場・部長  
研究者番号：60446341

築瀬佳之 (YANASE, Yoshiyuki)  
京都大学大学院・農学研究科・助教  
研究者番号：00303868

吉村 剛 (YOSHIMURA, Tsuyoshi)  
京都大学・生存圏研究所・教授  
研究者番号：40230809

(3)連携研究者  
なし