

平成28年度研究開発成果概要書

採択番号：16501

課題名：電磁波を用いた建造物非破壊センシング技術の研究開発

副題：建造物評価用3次元イメージングレーダ技術の開発

(1) 研究開発の目的

在来工法による木造家屋の健全性評価には、強度部材である、柱、梁、筋交いなどの状態を正確に把握することが求められる。これらの部材は、壁面の（内壁もしくは外壁）内部にあるため目視等による検査は不可能である。コンクリート構造でよく利用される打音検査や超音波検査などの非破壊検査手法は、壁面と構造部材との間に空間が存在するため、適用できない。X線を利用する手法は可能であるが装置が大型化し、また周囲への影響を考慮すると使用しにくい方法である。これに対して電波は空気層を含む建材を容易に透過することから、こうした目的に最も適していると考えられる。

電波を用いた非破壊検査装置として地中レーダ(GPR)及びその応用機器が実用化されているが、これらはその主な対象が地中埋設物やコンクリート構造体であった。電波は媒質の電気的な性質によって伝搬、反射・散乱特性が大きく変化する。従って、木造家屋の健全性評価には、目的に適應した周波数を利用する新しい装置の開発が必要である。

個々の研究開発項目として

- 木造建築物用部材の電気的特性計測
- アレイ型GPRの単体性能検証
- 高精度位置追尾装置の試作
- データ統合システムの開発

以上の4項目を実施することにより、プロトタイプの基本構成要素を確立させ、最終年度におけるプロトタイプ製作の足掛かりとする。

(2) 研究開発期間

平成24年度から平成28年度9月末（4年間半）

(3) 実施機関

国立大学法人 東北大学<代表研究者>、三井造船（株）

(4) 研究開発予算（契約額）

総額 405百万円（平成28年度 4百万円）

※百万円未満切り上げ

(5) 研究開発項目と担当

研究項目1：木造建築用部材の電気的特性の計測

（国立大学法人 東北大学、三井造船（株））

研究項目2：高精度3次元イメージングレーダの開発

1. 高精度イメージング技術（国立大学法人 東北大学）

2. 3次元イメージングレーダ技術（三井造船（株））

3. 疎行列アレイレーダ（SPA）システム設計・試作（三井造船（株））

4. 疎行列アレイレーダ（SPA）システム評価（国立大学法人 東北大学）

研究項目3：高精度3次元イメージングレーダに関する実証実験

(28-1)

1. 高精度イメージング技術の実証（国立大学法人 東北大学）
 2. 3次元イメージングレーダの実証（三井造船（株））
- 研究項目4：診断助力システムの構築と評価
1. 診断助力システムの基本技術（国立大学法人 東北大学）
 2. 診断助力システムの詳細技術（三井造船（株））
- 研究項目5：開発した装置の電波利用に関する検討
1. 計測による評価（国立大学法人 東北大学）

(6) これまで得られた成果（特許出願や論文発表等）

		累計（件）	当該年度（件）
特許出願	国内出願	3	0
	外国出願	1	0
外部発表	研究論文	5	0
	その他研究発表	33	1
	プレスリリース・報道	4	0
	展示会	11	0
	標準化提案	0	0

(7) 具体的な実施内容と成果

研究項目1：木造建築用部材の電気的特性の計測（平成26年度実施済）

1. 計測器、計測場所の提供

マイクロ波帯からミリ波帯におよぶ周波数範囲で計測を実施することを計画した。周波数帯によって使用する機器が異なるため、マイクロ波帯とミリ波帯の2つに分けて計測を行った。マイクロ波帯に関しては東北大学東北アジア研究センター 佐藤教授の研究室にて実施した。また、ミリ波帯の測定に関しては、NICT 福永上席研究員より、愛媛県産業技術研究所技術開発部を計測場所・計測機器の整った環境として紹介していただいた。

2. 計測の実施

マイクロ波を用いた木材の電気的特性の計測は同軸管法にて計測を行った。ターゲットとして檜、杉、柾（トガ）、合板の4種類を選定した。厚さ10mmのターゲットを同軸管中に挿入し、透過した電磁波の強度から誘電率を求めた。またミリ波を用いた木材の電気的特性の計測は自由空間法にて実施した。

計測結果を総括すると、乾燥状態においては、周波数に関わらず誘電率、減衰率共に大きな変化は見受けられない。一方湿潤状態においては水の誘電率の変化に起因するものと思われる、誘電率の減衰が観測される。しかしこの減衰も20GHz程度の周波数帯において影響は殆どないと考えられる。（誘電率は十分高い値を維持している。）これらの結果より現在選定している10～20GHz帯域は分解能、コストなどを総合的に勘案してほぼ最適の値と考えられる。

研究項目2：高精度3次元イメージングレーダの開発

1. 高精度イメージング技術（平成27年度実施済）

イメージングレーダに適した高精度位置追尾システムとして、光学カメラ方式と超音波方式の装置を検討した。光学カメラ方式は比較的安価に使用できる利点がある反面、屋外では誤動作が多く

なる問題のあることがわかった。そこで当面超音波方式のシステムをレーダに取り付けて壁面を走査し、電磁波による壁面内部計測と同時に走査した方向を記録できることを確認した。

スパースアレイレーダは、リニアアレイレーダに比べてレーダ位置計測の精度が要求されないことから、レーダシステムの開発に合わせた計測技術を選定した。

2. 3次元イメージングレーダ技術（平成27年度実施済）

10~20GHz帯の電磁波を用いたイメージングレーダを開発するため、三井造船製のマルチパスリニアアレイ技術を用いたレーダを基本に、高周波化（高分解能化）を図った。また高周波帯域の減衰を抑えるために以下の2点を新たに開発した。

- ・VCO および Auto Gain Control 回路（AGC 回路）。
- ・部品部と伝送線路部が一体となった SP32T スイッチ。

このような技術を組み込む木造家屋の健全性評価に適しており、広く平らな構造の壁面に対して使用できる実用装置を完成させた。

3. 疎行列アレイレーダ（SPA）システム設計・試作

2次元配列したアンテナをまばらに配置し、壁面を走査する必要なしに、3次元画像をほぼリアルタイムに得ることができる装置を目指した。26年度に実施した試作1号機の実験結果を反映させた2号機用の高周波回路について設計および試作を27年度に実施した。レーダ方式としてはステップ周波数方式を採用しながら、周波数帯域を4~8GHz（試作1号機）から0.1~8GHz（試作2号機）へと拡張し、チャンネル数を送信8ch、受信8ch（試作1号機）から送信16ch、受信16ch（試作2号機）へと増加させた。

4. 疎行列アレイレーダ（SPA）システム評価

新たに製作した送受16Ch対の疎行列アレイレーダ（SPA）についてシステム評価を進めた。まず送受信機としての周波数振幅、位相特性がほぼ正確であることを確認した上で、より精度を上げるためのキャリブレーションを行った。

その上で、20GHzまでの動作を確認したスパイラルアンテナを製作し、スパースアレイを構成した。送受信アンテナは平面上に配置するが、送受信対の中心点が仮想的な焦点となるので、それができるだけ一様に分布するようなアンテナ配置を決定した。試作したスパースアレイのイメージング性能を確認するため、金属球をアンテナ前面に置き、その位置を変えて計測したデータを使ったイメージングを行った。図に示すとおり、アレイの前面の範囲で、金属球の位置に依らずほぼ同じ精度でのイメージングが行えることを確認した。

研究項目3：高精度3次元イメージングレーダに関する実証実験

1. 高精度イメージング技術の実証

10-20GHz帯域を利用して、実物大家屋模擬試験体を対象とするデータを取得した。研究項目2-1で開発した高精度イメージング技術の検証を進めた。フルポーラリメトリの計測システムを使い、8種類の資料について計測を行った。

開発したシステムによるイメージングは分解能が高く、構造内部の些細な様子を観測できる。また円偏波と直線偏波によるイメージングの結果は対象物の形状によって、強調される部分が非常に異なり、特徴抽出に利用できることが明らかになった。

更にスパースアレイのアンテナ配列を最適化する研究を進めた。現時点で、送受信8chずつのシステムを利用して、1m四方程度の領域を一度に計測できることを実験的に確かめた。

2. 3次元イメージングレーダの実証（三井造船（株））

32chのアレイ型GPRのプロトタイプを用いて実証試験を実施した。研究機関の前半では、み

(28-1)

やぎ復興パーク、東松島市（宮城県）にある地区センター、関西大学リサーチアトリエなどの場所を借用して試験を実施した。研究期間の後半では東北大学青葉山キャンパスに設置した壁モデルおよび家屋模擬試験体のイメージングの実証を行った。石膏ボードなどの内壁材を透過して内部構造材の明瞭な映像を得ることに成功した。この結果を研究項目 4 で開発した診断助力システムに利用した。また、神奈川県にある一般の木造住宅についてもプロトタイプレーダを適用した。これらの試験を通じてイメージングアルゴリズムの有用性を実証することが出来た。

研究項目 4 : 診断助力システムの構築と評価（平成 27 年度実施済）

1. 診断助力システムの基本技術

診断をアシストするための機能として診断助力システムを構築し評価した。耐震診断の流れにおけるレーダ装置適用の役割をつかむために、木材関連の専門家の意見を取り入れた結果、レーダの画像から壁面内部の筋交いの位置、太さを把握することが重要であるとの結論を得た。

こうした目的に対しては、高分解能のレーダイメージは必ずしも必要なく、リニアアレイレーダによる粗い計測、またスパースアレイレーダによる 2 次元計測が有効であると考えている。

2. 診断助力システムの詳細技術

研究項目 4-1 で得られた結論に沿って、レーダ計測によって得られたデータを 3 次元画像としてだけでなくイメージング結果を数値データ（反射強度）として取り込むこととした。取り込まれたデータをシステムに統合することで、筋交い木材に関する情報の認知度合いを高めることに成功した。また本システムを耐震診断ソフトウェアと併用することで、試験的な機能評価システムを構築することが出来た。

研究項目 5 : 開発した装置の電波利用に関する検討

1. 計測による評価

レーダ装置からの空中への漏洩電波の電界強度が電波法で規定されている微弱無線局の許容値以下であることを正確に計測するために、ROHDE&SCHWARZ 社の EMI テストレシーバである R&S ESR の導入を検討し、計測に利用できることを確認した。