

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 29 年 6 月 7 日現在

機関番号：11501

研究種目：基盤研究(A) (一般)

研究期間：2013～2016

課題番号：25242023

研究課題名(和文)文化財建造物の健全度調査に用いる超音波音速CT装置の開発

研究課題名(英文) Development of Ultrasonic Time-of-Flight Computed Tomography System for Inspection of Buildings with Cultural Values

研究代表者

足立 和成 (Adachi, Kazunari)

山形大学・大学院理工学研究科・教授

研究者番号：00212514

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 18,900,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、文化財建造物の健全度調査のためその構造部材内部の異常部を非破壊で可視化する、可搬性があり容易に取扱いができる実用的な超音波音速CT装置の開発を行った。具体的には、あらゆる音響特性の探査対象に強力かつ鋭い超音波パルスを打ち込める小型音源の設計・製造方法の確立、超音波の波動性を考慮した画像再構成手法の開発、及び、現場での調査作業を容易にする堅牢かつ軽量で一体化された超音波音速CT用機器の開発、調査現場における音波伝搬時間測定の自動化を実現した。しかし、小型強力超音波音源の開発とその装置への組み込みと調査現場における画像処理の自動化までは達成できなかった。

研究成果の概要(英文)：In this research project, we have accomplished the development of a portable and easy-to-handle ultrasonic time-of-flight (TOF) computed tomography (CT) system which can practically visualize anomaly parts inside the structural members of buildings with cultural values for on-site structural inspection of them. The followings are the specific achievements: The methods for designing and manufacturing small high-power sound sources, which can emit sharp and intense ultrasonic pulses into the object to be inspected with any sound properties, have been concretely established. The image reconstruction technique, in which ultrasound wave propagation is taken into account, has been devised. Mechanically robust and light-weight TOF-CT instruments have been developed, and on-site automatic TOF measurement system has been realized in order to make the inspection works easy. However we have not accomplished integration of the newly developed sound sources into the system and on-site imaging.

研究分野：超音波工学

キーワード：保存科学 文化財建造物 超音波音速CT

### 1. 研究開始当初の背景

我国には、法隆寺などの人類共通の遺産とも言える世界最古の木造文化財建造物や、江戸期から明治期にかけての石造や煉瓦造あるいはコンクリート造の文化財建造物が数多く存在する。文化財としてのそれらの価値を守るためにはできる限りその原状を維持すべきだが、世界有数の地震国である上に四季の変化に富む日本の環境は、それらの保存・維持の観点からは恵まれた条件ではなく、必要最低限の補修は行わざるを得ない。従って、最低限度の補修に必要なそれらの構造部材内部の腐朽や劣化、亀裂等の異常部の大きさや部位を、非破壊で正確に知る必要がある。

従来そうした探査は、熟練技能者の経験と勘に頼った外観検査や打音検査によって行われており、文化財の保存・維持の観点からの要請には十分応えられない。そのため研究代表者らは、基盤研究B(展開研究)(平成13～16年度)において、文化財建造物の構造部材内部の異常部を、その現場において非破壊で安全かつ容易に可視化する図1のような文化財建造物探査用の超音波音速CT(計算機援用断面画像)の実験装置を世界で初めて試作した。図2は、この装置を用いて穴をあけたケヤキの丸太の断面像を可視化した例で、音速の遅い部分が暖色で表示されている。この手法は、図3のように探査したい柱や梁等の構造部材断面外周に多数の測定点を設定し、そこに超音波パルスの送受波器を押し当て、測定点間の伝搬時間を計測することで、当該断面を超音波の伝搬速度(音速)分布の形で非破壊的に可視化するのであり、放射線や電磁波を用いた類似の他手法に比べて、格段に安全で取扱いが容易な上、構造部材断面内の初期異常による微妙な変化を可視化できる。

しかし、簡易な実験装置は完成したが、実際の文化財建造物の健全度調査に使用できる実用的な装置の開発には、解決しなければならない多くの技術的課題が残っていた。そこで研究代表者らは、それらの解決のための知見を得るべく、奈良・東京文化財研究所や文化財建造物保存技術協会、木造文化財建造物の保存技術の豊富な研究実績を誇る韓国国立ソウル大学農学部木材保存学教室のイ・ジョンジェ教授らの研究グループ等の協力を得て、さらに多くの文化財建造物の構造部材断面等を可視化する調査実験を行い、多様な現場での調査実験で得た技術的知見と文化財保存技術者の意見を、蓄積してきた。

### 2. 研究の目的

本研究の目的は、文化財建造物の健全度調査のためその構造部材内部の異常を非破壊で可視化する、可搬性があり安全かつ容易に取扱いができる実用的な超音波音速CT装置の開発である。研究代表者らが過去に蓄積してきた技術的知見や文化財保存技術者の意見を、そうした超音波音速CT装置の実用



図1 試作された超音波音速CTの実験装置を構成する機器群(専用輸送ケースに格納された状態)

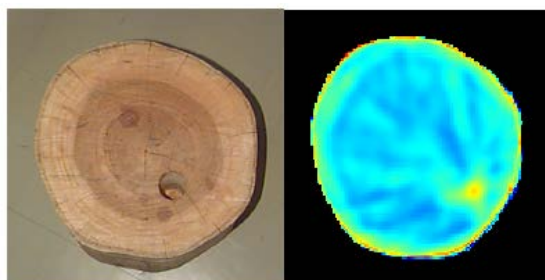


図2 穴をあけたケヤキの丸太の断面像(左)とその超音波音速CTによる再構成画像(右)

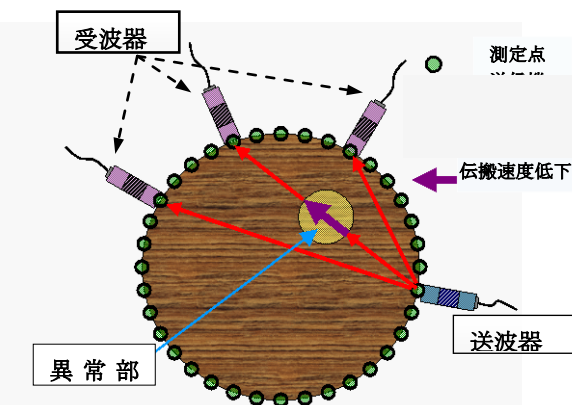


図3 調査対象の断面外周に配した多数の測定点間の超音波伝搬時間を測定し、断面を音速分布の形で可視化するのが超音波音速CT。

化に結実させるべく、次の四つの技術的課題を実用的な水準で解決することを目指した。即ち、多種多様な構造部材の断面を可視化するための(1)あらゆる音響特性の探査対象に強力かつ鋭い超音波パルスを打ち込める小型音源の開発、及び(2)超音波の波動性を考慮した画像再構成手法の開発、さらに調査現場での作業を容易にするための(3)装置の一体化による堅牢化と軽量化、及び(4)調査現場における画像信号処理の自動化、である。

さらに、個別の文化財建造物の探査実験から得た保存科学上の知見を明らかにするとともに、製作した超音波音速CT装置を文化財建造物の保存修復にあたる組織に無償で貸し出すことを念頭に、この装置を現場で使用する文化財保存担当者のための使用技術の手引書などを整備することも目指した。

### 3. 研究の方法

まず技術的開発においては、本研究の研究代表者である足立和成が、システムの全体設計と研究の統括を、研究分担者である柳田裕隆が計測システム全体の制御と画像・信号処理を受け持った。音波減衰の著しい構造部材内部に強力な超音波パルスを打ち込める小型超音波音源の設計・試作には、拓殖大学の渡辺裕二が参画した。前述の展開研究とは異なり、本研究では石造やコンクリート造等の文化財建造物も探査対象とするため、コンクリート工学の専門家である西脇智哉がそれら探査対象を模擬したコンクリート試料を調製する役割を担った。各種手法・音源の開発初期段階での実験的検討は、その再現性を確保すべく全て西脇が調製したコンクリート試料を用いて行った。

こうした体制による技術開発の流れと並行して、文化財建造物の超音波探査実験を、その時点での最新の技術的成果を取り入れて構成された装置を用いて行っていった。そして、それら探査実験等から新たな技術的知見を得たら、それに基づいて実用可能な超音波音速CT装置を構成する各モジュールを逐次試作・改良し、装置の実用化をはかった。各モジュールの試作・改良に際しては、万全を期すべく研究参加者の知見と能力を結集し、協力機関としてこの装置製作を請負う超音波機器にメーカーとも、緊密な協議を行なった。また、文化財建造物の探査実験から得たその保存・修復に資する情報は、逐次レポートにまとめ、協力して頂いた社寺や財団法人文化財建造物保存技術協会に提供した。

### 4. 研究成果

追加採択の研究計画であったため、初年度の研究期間が4カ月しかなく、それによる研究の遅れが最後まで完全には解消できなかったが、研究計画を見直すことで、一部を除いて当初の研究目的は達成できた。図4に最終年度にまでに実現できた超音波音速CTシステムの構成図、図5にその写真を示す。

スイッチボックスと信号発生器、デジタルオシロスコープの3つ機器は、PCによりUSBを介して統合的に自動制御される。図6、7には超音波プローブの外観とその内部構造、図8、9には18本の超音波プローブを探査対象であるモルタル円柱（直径約50cm）の周囲に専用ホルダーとワイヤーによって固定して行なった探査実験の様子を示した。雨天での使用に備えて、各超音波プローブのコネクター部には、アクリル製の専用防滴カバーが装着できるようになっている。今般の研究で新たに開発・製作されたのは、この①防滴カバーと、②18本の超音波プローブ専用のUSBインターフェースを備えた18chのスイッチボックス、③USBインターフェース利用の統合的な機器制御用PCプログラム、④TOF同定のための信号処理用PCプログラム、である。

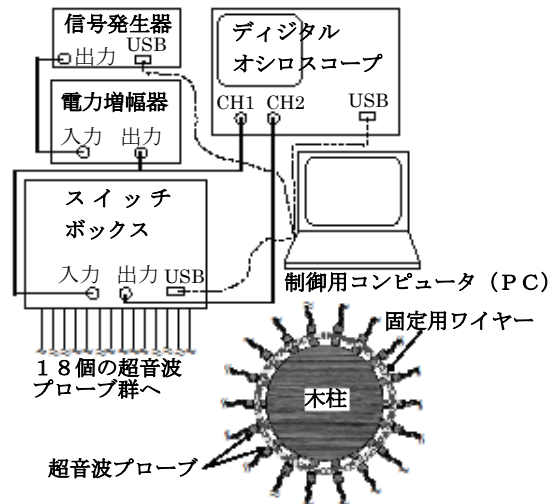


図4 開発された文化財建造物探査用超音波音速CTシステムの構成図。制御用コンピュータがUSBインターフェースを介して測定系を統合的に自動制御している。



図5 開発された超音波音速CTシステムを構成する機器群（運搬用ジュラルミンコンテナの上に置かれている）。デジタルオシロスコープ（左側上段）、スイッチボックス用電源ユニット（左側中段）、18chスイッチボックス（左側下段）、信号発生器（中央）、制御用コンピュータ（右側上段）、電力増幅器（右側下段）。



図6 超音波プローブの外観。コネクター部の電極以外のモジュールはプローブ内に密閉収納されており、防滴構造になっている。

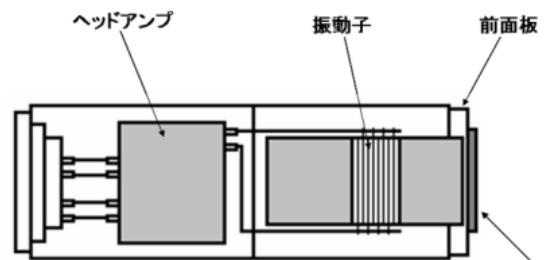


図7 超音波プローブの内部構造。



図8 探査実験の様子。モルタル円柱の周囲に18本の超音波プローブが専用ホルダーとワイヤーとで固定されている。



図9 超音波プローブをモルタル円柱に固定されている様子。ホルダーのバネによってシリコンゴムキャップの取り付けられたプローブ先端が円柱表面に押し付けられている。コネクタ部（キャノン4P）には専用のアクリル製防滴用カバーが装着できる。

次に「2. 研究の目的」で述べた技術及び研究課題毎の成果を述べる。

#### (1) 小型強力超音波音源の開発

この超音波音速CTシステムに用いる振動子に要求される特性は、①画像の解像度を良くするため高周波音源であるという事、②対象物に鋭いパルスを打ち込むため、共振尖鋭度 $Q$ を下げ、その動作周波数を広帯域化する事、③物理定数が不明な測定対象にも強力な超音波パルスを打ち込める事、④小型かつ堅牢であるということ、などである。図10に、そうした要求を概ね満たす振動子として開発されたBLT（ボルト締めランジュバン型振動子）の構造を示す。このBLTは、低い駆動電圧でも強力な超音波パルスを探査対象に打ち込めるように、薄い圧電セラミックス（厚さ1mm）を電極板（リン青銅製）と交互に各8枚積層させ、金属ブロックとボルトで締め付けて圧縮与圧をかけ、その引張応力への弱さを補ないつつ、一体化させた頑丈なものである。こうした構造にすることで、大振幅を得やすくすると共に、界面の数を増やすことで機械的損失を増加させ、共振尖鋭度 $Q$ が低くなるように設計されている。

有限要素法による数値解析によって、共振周波数で圧電セラミックスに生じる振動応力と、ボルトによる締め付けによってそれに

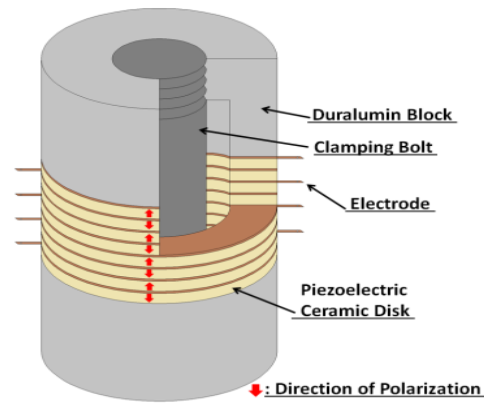


図10 超音波音速CT装置用に開発された小型ボルト締めランジュバン型振動子（BLT）の構造。

加える圧縮与圧（静的接触応力）の分布を検討した結果、最適な形状として、図11のような形状（対称性からその全体の4分1を表示している）を見出し、ジュラルミンブロック間の相対的な締め付け回転角度 $2\theta$ （片側あたり $\theta$ ）を60度として組み立てることが妥当との結論を得た。さらに回転角法レンチを使用して締め付けによる組立工程を管理することで、振動子としては複雑な構造を持ちながら、ほぼ同じ特性のBLTを何個でも再現性良く作製できるようになった。また、その特性を数値解析結果と対照させながら、よりよい構造を模索していくことも可能になった（学会発表⑧）。BLTの最終的な形状は、直径20mm長さ25mmの小さな円筒形状で、その共振周波数は約62.3kHzとなった。

当初はこうして新たに開発したBLTを実際に使用されている超音波プローブに、図7のような形で組み込む予定であったが、研究期間内に必要な18個以上を製造するには至らず、果たせなかった。今回完成させたシステムでは、以前の研究で製作されたBLTをそのまま使用している。

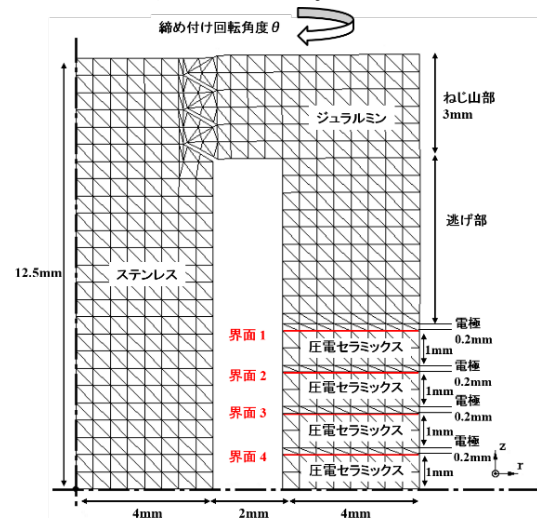


図11 コンピュータシミュレーション（有限要素解析）のためのBLTの要素分割（上下・軸対称のため全体の4分1の部分だけ表現）。各部の寸法は、シミュレーションを繰り返した結果、最終的に最適と判断された値。

## (2) 画像再構成手法の開発

この超音波音速CT装置では、図3のように超音波プローブの一つから超音波パルスを打ち出し、その最速のバルク波(縦波)の成分が他のプローブに受信されるまでの透過伝搬時間(TOF:Time of Flight)を多数の伝搬経路について計測して、当該断面を音速分布の形で可視化する。従ってTOFの妥当な同定手法が、適切な画像再構成の実現の鍵になる。だが、受信波形には最速のバルク波よりはるかに大振幅の剪断波や表面波等の信号も含まれており、本質的にTOFを正確に同定することが難しい上、実際には回折や散乱、境界でのモード変換等により発生する、多種の波動の偶発的な干渉の影響が無視できず、図2の再構成画像のように、異常部が実際の位置よりも外周寄りに表示されたり、外周部に実際にはない低音速部が画像化されてしまう等の問題が生じる。その解決のために、新たなTOF同定手法として「振幅二乗総和方式」を考案し、採用した。この手法は、受波した超音波の積算エネルギーにTOF同定のために小さな閾値を設定することで、波動性による偶発的な干渉などによる影響を抑圧する手法である。その結果、この手法は波動伝搬シミュレーションにおいては極めて有効なことが示されたが、実測においてはウィンドウタイム及びエネルギー閾値の設定方法にまだ問題を残しており、それらの設定によっては、却って再構成画像の質を悪くなる場合があることが判明している。(雑誌論文①、学会発表⑦)。

## (3) 装置の一体化による堅牢化と軽量化

以前は、機械式スイッチによって6本の超音波プローブの送受モードの切り替えを行う6chのスイッチボックス3台を並列接続して使用し、全部で18本の超音波プローブの切り替え作業を全て手動操作で行っていた。そのため、探査実験の現場においては、それらスイッチボックス及び信号処理系入力との間を多数の同軸ケーブルを接続する必要がある上、その操作自体も複雑で、接続や操作の間違いが絶えなかった。そこで本研究では図4のように、そうした操作の殆どを、制御用コンピュータ(PC)からの指令で自動的に行える、マルチプレクサ機能を持った18chのスイッチボックスを開発し、受信信号によって信号発生器の送波信号の大きさを自動調節する機能もPC上のソフトウェアで実現した。これにより、システムを構成するモジュールや配線用の同軸ケーブルの数が大幅に減り、システムの一体化と軽量化、そして堅牢化がはかれた(学会発表⑥)。

## (4) 調査現場での画像信号処理の自動化

信号計測の自動化は、上述のPCによるUSBインターフェース経由での装置制御で、完全に達成された。接続ミスや操作ミスなどは激減し、測定時間も従来の半分程度に短縮された。しかし市販の機器であるPCや信号発生機などにおいて原因不明の不具合が現

場で発生しており、まだその安定性には不安が残っている。ただ、PCについてはフィールドワーク専用の機種を導入することでほぼ解決できたのではないかと考えている。

画像処理については(2)で述べた画像再構成手法、なかんずくTOF同定手法におけるパラメータの設定にまだ問題が残っているため、現場での可視化を自動的かつ安定的に行える状況にまでは至らなかったが、並列処理を含むそのための基本的な方策は確立できた(学会発表④、⑤、⑦)。

## (5) 探査実験で得られた保存科学上の知見

探査実験の対象になった主な文化財建造物は、山形県米沢市の旧米沢高等工業学校本館(国重文)の中央屋根部屋の柱(学会発表①)、岩手県二戸市の天台寺本堂(国重文)の柱(学会発表②)、山形県鶴岡市の旧鶴岡警察署庁舎(国重文)の柱及び梁、島根県出雲市の出雲大社内の会所(国重文)の柱及び梁、素鷲社(そがのやしろ)(国重文)の柱、勢溜(せいだまり)の鳥居の柱(学会発表⑥)などである。それら探査対象となった構造部材については、探査結果をその都度報告書にまとめ、修復作業にあたっている財団法人文化財建造物保存技術協会の担当者らに提供してきた。特に、柱や梁の補修の必要性については、探査結果に基づいた客観的な情報を提供している。

ここではそれらの典型的な例として、出雲大社素鷲社の柱の探査実験とその結果(学会未発表)について紹介する。この探査実験は、平成26年12月9日と10日の両日に亘って行われた。素鷲社の南東角の床下柱の上部と下部2つの断面を探査している。上部断面は柱が床板を支える梁の底面を基準にして30cm下の位置、下部断面は柱の土台の上面を基準にして10cm上の位置である。図12はプローブの設置状況を示す。この探査実験の時点では、まだ振幅二乗総和方式によるTOF同定手法が確立されていなかったため、受信波形の最大値の5~15%の範囲で閾値を設定し、信号の瞬時値がそれを越えた時を波動到達時点として断面の画像再構成を行った。図13に閾値を10%に設定した時の下部断面の音速分布の形で再構成画像を示す(右側が柱の北側)。画像中、音速の小さい部分が暖色で、大きい部分が寒色で表現されている。柱の断面は正確には円形ではないが、迅速な判定のために円形と近似した。

上部断面については、閾値を変化させると、その再構成画像中の相対的な音速分布が大きく変化した。下部断面については、閾値を変化させても、その再構成画像中の低音速部(異常部と見られる)などの位置と大きさは全く変わらなかった。このことから、上部断面については明確な異常部(腐朽や虫害など)は特定できないが、下部断面については、画面右下の低音速部(赤色)には何らかの異常があるものと推定された。

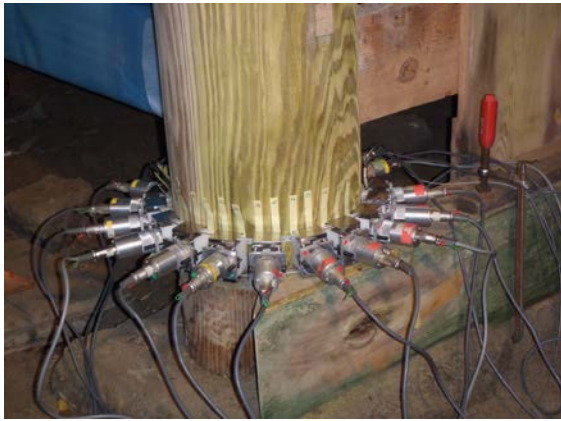


図1.2 素鷲社の南東角床下柱下部への超音波プローブの設置作業状況（信号用のケーブルが接続されている状態。）。

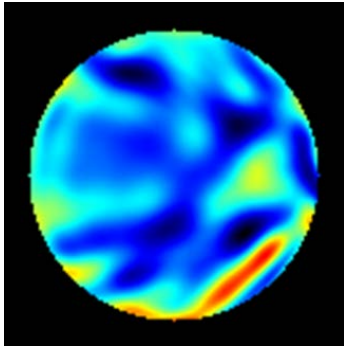


図1.3 素鷲社床下柱下部断面の音速分布に基づく再構成画像（閾値：最大振幅の10%）。閾値に依らず、右下に顕著な異常部が現れる。

(6) その他の成果

開発した超音波音速CTシステムを現場で使用する文化財保存技術者らのためのその使用手引書（A4版16頁）を作成した。ただ、画像処理の現場での完全自動化が達成できていないため、現場の担当者だけで正確な画像診断ができるようにはなっていない。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕（計 1件）

- ① Hiroya FUJII, Kazunari ADACHI, Hiroataka YANAGIDA, Tomoki HOSHINO, Tomoya NISHIWAKI, Improvement of the Method for Determination of Time-of-Flight of Ultrasound in Ultrasonic TOF CT, SICE Journal of Control, Measurement, and System Integration, 査読有、Vol. 8、No. 6、2015、pp. 363–370、November 2015

〔学会発表〕（計 8件）

- ① 倉林和希、足立和成、吉川遼太郎、鈴木康平、建造物探査用の超音波音速CT装置の開発—小型強力音源の開発—、2017年日本音響学会春季研究発表会、2017年3月17日、明治大学生田キャンパス（神奈川県・川崎市）
- ② 武田雄大、足立和成、柳田裕隆、高田一樹、伊藤秀一、建造物探査用の超音波音速CT装置の開発（画像再構成手法の改

良）、2017年日本音響学会春季研究発表会、2017年3月17日、明治大学生田キャンパス（神奈川県・川崎市）

- ③ 足立和成、柳田裕隆、高田一樹、吉川遼太郎、武内貴裕、武田雄大、倉林和希、渡辺裕二、出雲大社勢溜の鳥居の柱の超音波探査、日本文化財科学会第33回大会、2016年6月5日、奈良大学（奈良県・奈良市）
- ④ 高田一樹、足立和成、柳田裕隆、武内貴裕、武田雄大、建造物探査用の超音波音速CT装置の開発—画像再構成手法の改良—、2016年日本音響学会春季研究発表会、2016年3月10日、桐蔭横浜大学（神奈川県・横浜市）
- ⑤ 吉川遼太郎、足立和成、渡辺裕二、倉林和希、建造物探査用の超音波音速CT装置の開発（小型強力音源の開発）、2016年日本音響学会春季研究発表会、2016年3月10日、桐蔭横浜大学（神奈川県・横浜市）
- ⑥ H. Yanagida, Y. Wada, K. Adachi, T. Takahashi, Y. Tamura, Improvement of throughput rate of three-dimensional ultrasound imaging by parallel calculations、12<sup>th</sup> Western Pacific Acoustics Conference 2015、2015年12月8日、Singapore（Singapore）
- ⑦ 足立和成、藤井尋也、柳田裕隆、高田一樹、吉川遼太郎、今田大夢、大越智之、岩手県二戸市の天台寺本堂の木柱の超音波探査、日本文化財科学会第32回大会、2015年7月12日、東京学芸大学（東京都・小金井市）
- ⑧ 足立和成、藤井尋也、柳田裕隆、星野智紀、西脇智哉、渡辺裕二、重要文化財「旧米沢高等工業学校本館」の中央屋根部屋の柱の超音波探査、日本文化財科学会第31回大会、2014年7月6日、奈良教育大学（奈良県・奈良市）

6. 研究組織

(1) 研究代表者

足立 和成 (ADACHI, Kazunari)  
山形大学・大学院理工学研究科・教授  
研究者番号：00212514

(2) 研究分担者

柳田 裕隆 (YANAGIDA, Hiroataka)  
山形大学・大学院理工学研究科・准教授  
研究者番号：80323179

渡辺 裕二 (WATANABE, Yuji)  
拓殖大学・工学部・教授  
研究者番号：30201239

西脇 智哉 (NISHIWAKI, Tomoya)  
東北大学・大学院工学研究科・准教授  
研究者番号：60400529