

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成24年 6月15日現在

機関番号：84604

研究種目：基盤研究（A）

研究期間：2009年度～2011年度

課題番号：21240073

研究課題名（和文） ミリ波およびテラヘルツ波を用いた文化財の新たな非破壊診断技術の開発研究

研究課題名（英文） Development of non-destructive diagnosis technique with using of millimeter wave and terahertz wave for cultural properties

研究代表者

高妻 洋成 (KOHDZUMA YOHSEI)

独立行政法人国立文化財機構奈良文化財研究所・埋蔵文化財センター・保存修復科学研究室長

研究者番号：80234699

研究成果の概要（和文）：

ミリ波およびテラヘルツ(THz)波を用いた文化財の非破壊非接触診断技術の開発研究をおこなった。THz 波については種々の材料の THz 分光スペクトルを取得し、材料分析のための基礎データを作成した。彩色文化財に対して THz 波イメージングおよびミリ波イメージングを応用するための基礎実験をおこなうとともに、木製彩色文化財および漆喰壁画に対してイメージングを実施した。ミリ波および THz 波は文化財の表層にある程度侵入して、その内部構造を可視化することが可能である。さらに THz イメージングでは、パルス波を用いることで、時間領域分光法により断面構造や任意の深さにおける平面的なイメージングも可能である。障壁画などの彩色層下にあつてある程度の厚みをもつ下地漆喰などの状態や表具や額装などの絵画の構造について、従来、得ることのできなかった情報を非破壊で知ることが可能となった。

研究成果の概要（英文）：

The non-destructive and non-touched diagnosis methods with using of millimeter wave and terahertz (THz) wave for cultural properties have been developed. THz spectra of different materials were obtained as basic data for material analysis. Millimeter wave imaging and THz wave imaging were experimented basically for painted cultural properties, and also applied to some wooden painted objects and mural paintings. It is possible to visualize the inner structure at near surface of wooden object by imaging with millimeter wave and THz wave. In THz wave imaging with pulsed wave, it is possible to obtain the tomogram and two-dimensional image at a given depth from the surface of material by time domain spectroscopy. It is possible to visualize the structure of foundation layer and flame of paintings by THz-TDS method.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	19,900,000	5,970,000	25,870,000
2010年度	6,900,000	2,070,000	8,970,000
2011年度	7,509,310	2,252,793	9,762,103
年度			
年度			
総計	34,309,310	10,292,793	44,602,103

研究分野：総合領域

科研費の分科・細目：文化財科学、文化財科学

キーワード：材質分析

1. 研究開始当初の背景

ミリ波と THz 波を用いた調査分析技術は顔料やバインダーなどの絵画などの美術品に対して応用されているに過ぎず、広く文化財全般に対する応用開発プロジェクトは展開されていない。研究代表者は、文化財用の携帯型のマルチレーザーラマン分光分析装置の開発、石造文化財の劣化診断に対する打音試験装置の開発、文化財のひずみや変形のモニタリングのためのアコースティックエミッション法の応用など、文化財の調査・研究・保存において有効となる調査技術の応用開発に取り組んできた。ミリ波の透過特性を利用するならば、車載レーダーに代表されるように小型でしかも簡便・迅速に文化財の内部構造などを調査することが可能となるであろうし、また、THz 分光スペクトルの取得により、完全な非破壊的な手法により化合物を特定することが可能となる。この他にも文化財全般にわたる材質分析、劣化程度の診断、内部構造の調査、保存修復処理などの種々の分野においてもミリ波と THz 波を応用できる範囲が多岐にわたっているといえる。

2. 研究の目的

文化財の調査・研究・保存においては、電磁波を利用する分析技術が活用されている。これは貴重な文化財に対して、非接触かつ非破壊で調査をおこなうことが可能となるからである。これまで文化財の調査分析に用いられてきた電磁波は、赤外線、可視光線、紫外線、X線、ガンマ線であり、その波長帯は 4 μm 以下であった。これらの波長帯の電磁波は便宜上光波と呼ばれている。一方、いわゆる電波として放送・通信等に利用されている電磁波の波長帯は 1cm 以上のものである。ちょうどこの光波と電波の間にある THz 波（波長 30 μm ～1 mm）とミリ波（1 mm～10 mm）の領域の電磁波の利用についてはその技術的な応用開発がおこなわれていなかった。近年、ミリ波と THz 波の「電波のように不透明なものでも透過する」という性質と「光のように物質特有の吸収スペクトルを得ることができる」という性質を利用して、「空港での隠匿危険物検出」、「封筒内の禁止薬物検査」、「薬品の結晶多形の分析」、「車載レーダー」、「構造物診断」、「地雷探査」など、いわゆる「安心・安全」を追求する分野において多くの応用技術が開発されてきている。THz 波およびミリ波のエネルギーは、室温程度であり、実用上完全非破壊として取り扱うことができる。特に THz 波はその周波数に対する物質の応答が分子そのものの性質を反映するため、X線や赤外線などの分光技術と比べ、物質固有の情報が得られやすい。

また、有機物、無機物の混合物であったり、

表面に汚損物質が堆積する状況もある文化財の分析にも適しているということが期待できる。生活の「安心・安全」の技術は観点を変えれば、文化財に対する「安心・安全」の技術としても利用することができることから、本研究では、この THz 波とミリ波を利用した新たな分析調査技術を文化財の調査・研究・保存に応用するための開発的な研究をおこなうことを目的とした。

3. 研究の方法

物質に THz 波を照射して得られる THz 分光スペクトルは、物質に固有のスペクトルを示すことが明らかとなっている。文化財や美術品に用いられている材質はその種類がきわめて多いが、顔料の THz 分光スペクトルのデータベースはすでに福永により構築されており、本研究では木製彩色文化財に用いられる材料の標準スペクトルの収集をおこなった。THz 分光スペクトルは日本分光株式会社製フーリエ変換遠赤外分光光度計 VIR-F を用い、波数分解能 2 cm^{-1} で 680 cm^{-1} から 40 cm^{-1} までスキャンして取得した。

また彩色文化財へのミリ波および THz 波イメージングを応用するための基礎実験をおこない、基礎データの収集をおこなった。THz 波によるイメージングには、Picometrix 社製 T-ray 4000 を用いた。一方、ミリ波イメージング装置は文化財用に試作したものをを用いた。

イメージングに関して得られた基礎的な知見をもとに、解体修理がおこなわれている建造物の彩色および漆喰壁画に対し、THz 波イメージングを応用した。

4. 研究成果

4. 1 彩色に用いられる材料の THz 分光スペクトル

スペクトルを取得した材料は、ベンガラ、赤土、岱赭、辰砂、黄土、鉛白、胡粉、漆喰、炭酸カルシウム、明礬、地の粉、砥の粉、菜種油煙練合赤呂漆、切粉地錆地本朱練合赤呂漆、ベンガラ練合赤呂漆、酸化鉄黒練合赤呂漆、砥の粉下地松脂入り煮荏油練合赤呂漆、砥の粉下地荏油練合赤呂漆、赤漆、赤チャン、チャン油、ベンガラ練合チャン油、菜種油煙練合チャン油である。

このうち、代表的な事例として、ベンガラの THz 分光スペクトルを図 1 に示す。

4. 2 彩色の THz イメージングのための基礎実験

紙上にドウサ引きおよび彩色を施した後、人工的に劣化させて剥離および亀裂を生じさせた試料に対して THz イメージングをおこなった。図 2 は周波数領域、時間領域とも

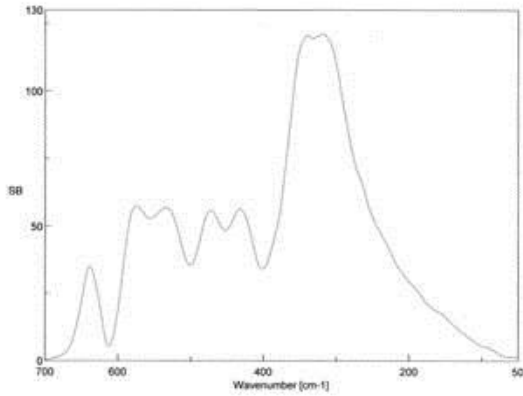


図1 ベンガラの THz 分光スペクトル

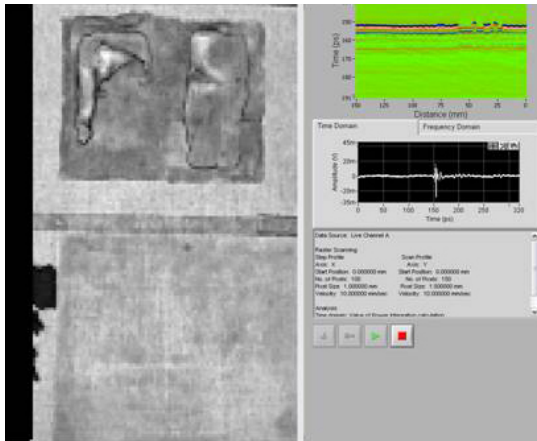


図2 人工劣化彩色試料の THz イメージング

制限していない信号のパワー積分値でのイメージング結果（全画像）を示したものである。イメージング結果から亀裂および剥落が明瞭に観察できる。

時間領域分光法（TDS法）により得られた断面図をみると、絵の具層、顔料の剥落している部分などを観察することができ、THz-TDS法により、彩色各層の劣化状況を知ることが可能であることが明らかとなった。

木造文化財（建造物）における彩色の技法の中で、置上彩色、平彩色、無地彩色、生彩色および胡粉塗りを5（放射方向）cm×8.3（繊維方向）cm×1.7（接線方向）cmのヒノキ材に施した。各試料にTHz波を走査して得られたイメージを図3に示す。実験結果から、全試料に関して彩色層の塗り重ねの境界をイメージングすることができた。

漆喰壁面のTHzイメージングにおいては、THz波が透過する漆喰層の厚み、壁画表面を被覆する泥の粒度と厚みの違いによるTHz波の透過性などについても検討を加えなければならない。2cm（放射方向）×2cm（接線方向）×5cm（繊維方向）に調製したスギ木材試片の板目面に、水銀朱を用いて試料番

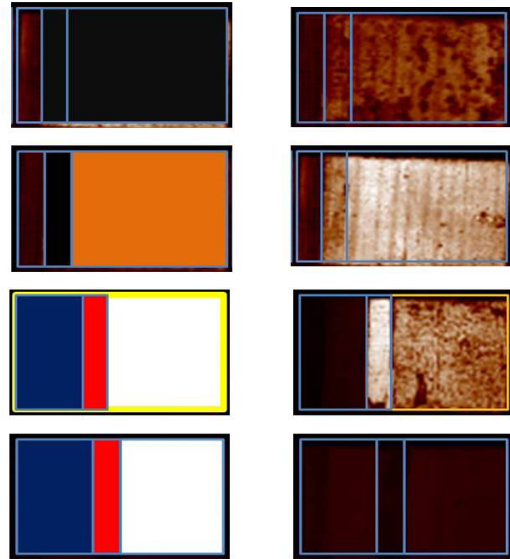


図3 各種彩色技法の THz イメージング

号を記入し、彩色層とした。さらに、その上に粒度を調整した土（粒径 840-177 μm 、177-37 μm 、37 μm 以下）を被覆層として厚さ 2 mm および 6 mm にそれぞれ塗り重ねた。また、漆喰を被覆層として 1~5 mm の間で 1 mm おきに厚みを変えて塗布した試験片も調製した。図4に試験片の写真と得られた THz-TDS 法により得られた画像の一部をそれぞれ左から順に示す。土を被覆層とした場合、粒径が 840-177 μm および 177-37 μm の土の場合、彩色層としての水銀朱の数

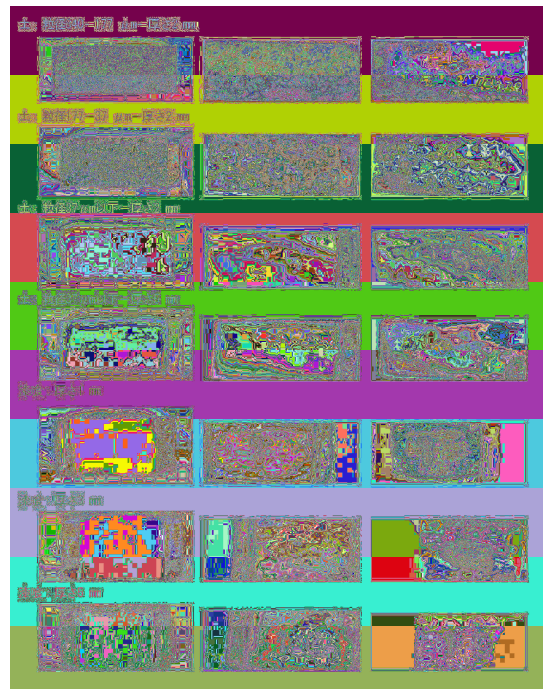


図4 THzイメージングに及ぼす漆喰厚みと泥の厚みの影響

字を確認することができなかった。これに対し、粒径が $37\ \mu\text{m}$ 以下の場合には、塗布厚さが $2\ \text{mm}$ の時に彩色層を確認することができ、さらに塗布厚さが $5\ \text{mm}$ の場合には時間帯を予測して断面データを得て画像を再構築したところ、明瞭に彩色層を確認することができた。以上のことから、用いたTHz波の波長よりも土の粒径が十分小さい場合には、THz波の散乱が生じないため、良好なイメージングができるものと考えられる。また、粒径が $37\ \mu\text{m}$ 以下でTHz波の波長よりも細かい土の場合には、その被覆層が $5\ \text{mm}$ 程度であってもイメージングが可能であるといえる。

一方、厚さを変えて塗布した漆喰を被覆層とした場合、 $5\ \text{mm}$ までの層厚ではいずれの場合もイメージングをおこなうことが可能であった。このことは、漆喰を下地層とする壁画の場合、時間領域分光法を用いることにより、その断面データから漆喰層中の状態を推測することが可能となることを示すものである。

4. 3 ミリ波イメージング装置の試作

Gunn 発信器によって発振された $76\ \text{GHz}$ のミリ波がアンテナに送られ、そこから空气中に発信される。空气中に放射されたミリ波信号の一部は物体を透過してしまうが、一部は物体から反射されて片凸レンズによって集められ、センサーがこれを受信する。ショットキーダイオードで受信された信号は直流信号に変換され、電圧計で読み込まれる。したがって、反射強度が高い場合、得られる直流信号の電圧は高くなる。なお、現場で調査をおこなうことができるように、可搬型とした。装置は $50\text{cm}\times 50\ \text{cm}$ のフレームに固定されている。発信器の走査範囲は大きく 3 パターン ($9\ \text{cm}\times 15\ \text{cm}$ 、 $18.5\ \text{cm}\times 18.2\ \text{cm}$ 、 $20\ \text{cm}\times 25.5\ \text{cm}$) に設定することができる。

1 ラインの走査時間は 1 秒から 19 秒まであり、縦方向において 300 ラインまで走査することができる。例えば、 20×25.5 範囲の画像を得るためには、1 ライン 4 秒の最速の時間



図 5 試作したミリ波イメージング装置

の場合、約 16 分で、1 ライン 19 秒の最大時間の場合は約 93 分程度の時間を要する。得られた画像は全て 300Pixel で表わされるため、小さい範囲をイメージングした場合には解像度が低下する。

4. 4 76GHz のミリ波による木造文化財彩色の劣化調査のための基礎実験

2 枚のカッターの刃を平行に配置し、隙間を 0 から $6\ \text{mm}$ まで変化させながらミリ波イメージングをおこなった (図 6)。画像の右側にはそれぞれ任意の位置での反射強度を示す。 $1\text{mm}\sim 2\ \text{mm}$ までの隙間は検出されず、 $3\ \text{mm}$ 以上で隙間が検出された。検出された隙間の反射強度の分布をみると、隙間幅 $3\ \text{mm}$ では、幅約 $1\ \text{mm}$ の太さに反射波の谷が、隙間幅 $4\ \text{mm}$ では、 2mm の太さに反射波の谷が、隙間幅 $5\ \text{mm}$ では約 $3\ \text{mm}$ の太さに反射波の谷が表れている。隙間幅 $6\ \text{mm}$ の時ようやく隙間幅と同じ $6\ \text{mm}$ 幅の谷を検出することができた。したがって、今回の実験条件から、 $3\ \text{mm}$ 幅のクラックを検出することができるものの、クラック幅を定量的に検出するには $6\ \text{mm}$ 以上の幅である必要があることが明らかとなった。

THz 波の基礎実験に用いた人工劣化試料に対してミリ波イメージングをおこなった (図 7)。ミリ波が表面を被覆する彩色層を透過して、内部に侵入し、亀裂、内部の空隙および剥離の情報を可視化できることが明らかとなった。しかしながら、金箔および胡粉などのように、表層にミリ波を強く反射する層が存在する場合、あるいは黄土のようにミリ波を強く吸収するような層が存在する場合には、ミリ波が内部に到達することができないため、内部の構造を可視化することは不可能である。

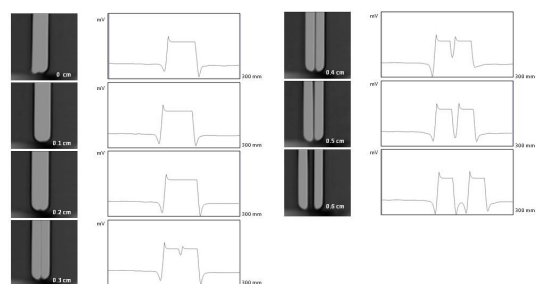


図 6 ミクラック幅の検出基礎実験

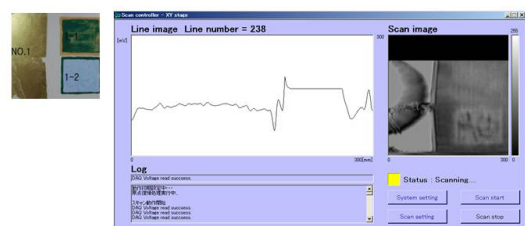


図 7 人工劣化試料のミリ波イメージング

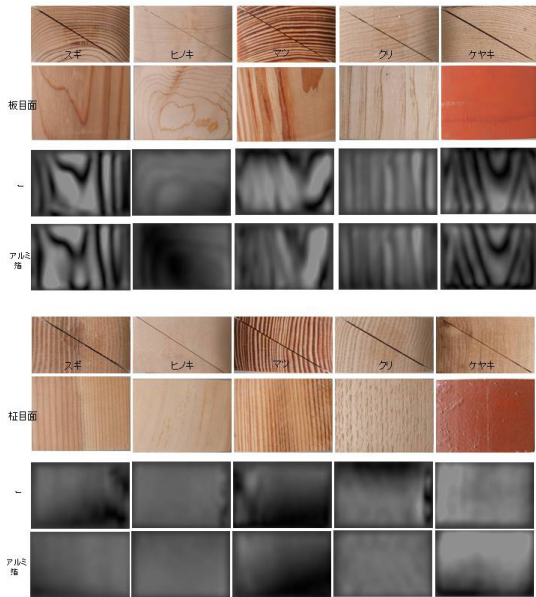


図 8 木材のミリ波に対する反射特性

76 GHz のミリ波に対する木材の反射特性を調べるために、各試料の対角線状に反射強度が強いアルミ箔を入れ、深さ方向での強度を調べた(図 8)。柾目材では、ミリ波が吸収されにくいことが明らかとなった。これは年輪の周期性によると考えられる。板目材では、5種類の樹種(左から、スギ、ヒノキ、マツ、クリおよびケヤキ)ですべてにおいて内部構造のイメージングが可能であった。

4. 5 THz 波を用いた彩色文化財のイメージング

4. 5. 1 中国・内モンゴル自治区大召寺壁画

大召寺の壁画片を THz 分光イメージングしたところ、壁体内部の亀裂を明確にとらえることができた。また、反射率(Reflection)の違いは材料の違いを反映していることから、「腕輪」、「裳」の橙色と腹部の曲線の橙色とは他とは異なる材質であることが明らかとなった(図 9)。

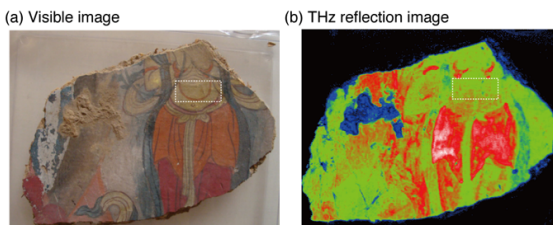


図 9 中国大召寺壁画の THz イメージング

4. 5. 2 談山神社蔵嘉永年間大修理塗装手板資料

談山神社に所蔵されている嘉永年間の大修理に際して作られた塗装手板資料の THz イメージングをおこなった。反射率の高い金箔

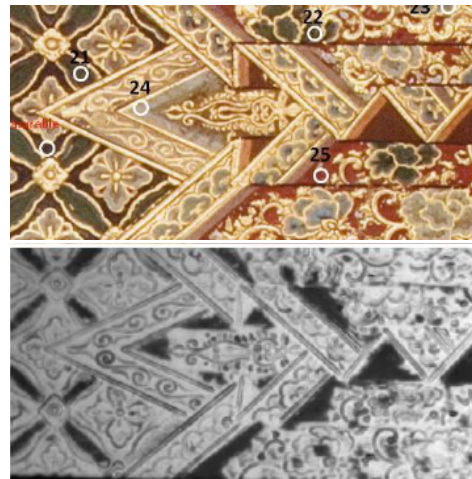


図 10 談山神社蔵嘉永年間大修理塗装手板資料の THz イメージング

が下層に貼られ、その上に彩色が施されていることが明らかとなった。

4. 5. 3 高松塚古墳壁画

高松塚古墳壁画の漆喰の劣化状態を把握するため、THz イメージングをおこなった。図 11 は、画面向かって左側中央部のデータをもとにした断面図、図 12 は各層の面情報である。図 11 の点線 A の断面は比較的状态が良いと思われる領域であり、端部には浮きが認められる。点線 B の断面をみると漆喰層内部から様々な反射があり、この部分がポーラスになりつつあることが推測される。点線 C の断面には、表面に再結晶した炭酸カルシウムと思われる層の強い反射が認められる。漆喰が欠損している部分は最表層の反射がなく、一見すると断面のようになっている。

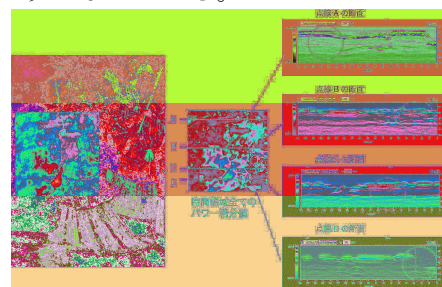


図 11 画面向かって左側中央部のデータをもとにした断面図

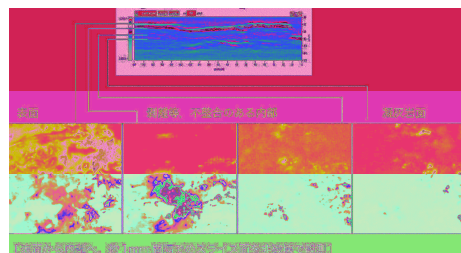


図 12 各層の面情報

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 5 件)

- ①高妻洋成, 福永香; テラヘルツ分光・イメージングによる文化財の調査, 光アライアンス, vol.23, 30-34, 2012 年 5 月 1 日
- ②福永香, 高妻洋成, 神庭信幸; テラヘルツイメージングを用いた壁画・屏風の非破壊調査, 応用物理, vol.81, 329-331, 2012 年 4 月 10 日
- ③K. Fukunaga, I. Hosako, Y. Kohdzuma, T. Koezuka, M.-J. Kim, T. Ikari, X. Du; Terahertz analysis of an East Asian historical mural painting, *Journal of the European Optical Society Rapid Publications*, vol.5, No.10024, 2010 年 5 月 4 日

[学会発表] (計 14 件)

- ①M.-J. Kim, Y. Kohdzuma, and K. Fukunaga; Application of electromagnetic waves for the degradation mechanisms of painted wooden cultural properties, *Advanced Electromagnetic Symposium 2012*, Paris, 2012 年 4 月 16 日
- ②K. Fukunaga, J. Labaune, M. Picollo; Comparison of preparation layers of panel paintings by using time domain THz imaging, *Advanced Electromagnetic Symposium 2012*, Paris, 2012 年 4 月 16 日
- ③高妻洋成, 降幡順子, 脇谷草一郎, 佐野千絵, 福永香, 建石徹, 宇田川滋正; テラヘルツ分光イメージングによる高松塚古墳壁画の漆喰の状態調査, *文化財保存修復学会第 33 回大会*, 奈良県新公会堂, 2011 年 6 月 4 日
- ④高妻洋成, 金旻貞, 福永香, 碓智文, 脇谷草一郎, 降幡順子, 藤原裕子, 藤井義久; ミリ波およびテラヘルツ波の文化財への応用 I - 層構造調査へのテラヘルツ波イメージング技法の基礎研究 -, *日本文化財科学会第 27 回大会*, 関西大学, 2010 年 6 月 26 日

6. 研究組織

(1) 研究代表者

高妻 洋成 (KOHZUMA YOHSEI)
独立行政法人国立文化財機構奈良文化財研究所・埋蔵文化財センター・保存修復科学研究室長
研究者番号: 80234699

(2) 研究分担者

降幡 順子 (FURIHATA JUNKO)
独立行政法人国立文化財機構奈良文化財研究所・都城発掘調査部・主任研究員
研究者番号: 60372182

脇谷 草一郎 (WAKIYA SOICHIRO)
独立行政法人国立文化財機構奈良文化財研究所・埋蔵文化財センター保存修復科学研究室・研究員
研究者番号: 80416411
福永 香 (FUKUNAGA KAORI)
独立行政法人情報通信研究機構・社会還元促進部門技術移転推進室・マネージャー
研究者番号: 20358956

(3) 連携研究者

佐野 千絵 (SANO CHIE)
独立行政法人国立文化財機構東京文化財研究所・保存修復科学センター・保存科学研究室長
研究者番号: 40215885
吉田 直人 (YOSHIDA NAOTO)
独立行政法人国立文化財機構東京文化財研究所・保存修復科学センター・主任研究員
研究者番号: 80370998
犬塚 将英 (INUZUKA MASAHIDE)
独立行政法人国立文化財機構東京文化財研究所・保存修復科学センター・主任研究員
研究者番号: 00392548
小川 雄一 (OGAWA YUICHI)
京都大学・大学院農学研究科・准教授
研究者番号: 20373285
大谷 知行 (OTANI CHIKO)
独立行政法人理化学研究所テラヘルツイメージング研究チーム・チームリーダー
研究者番号: 50281663
林 伸一郎 (HAYASHI SHINICHIRO)
独立行政法人理化学研究所・テラヘルツ光応用研究チーム・研究員
研究者番号: 70360188
水野 麻弥 (MIZUNO MAYA)
独立行政法人情報通信研究機構電磁波計測研究所・主任研究員
研究者番号: 90360643