

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 3 年 6 月 28 日現在

機関番号：84604

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2017～2020

課題番号：17K12964

研究課題名（和文）彩色文化財のTHz Imaging及び μ FocusX線CTを用いた非破壊界面調査

研究課題名（英文）Application of Terahertz wave imaging technique and micro-focus X-ray CT for surveying of surface layer structure of the painting cultural properties

研究代表者

金 旻貞 (Kim, MinJung)

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・客員研究員

研究者番号：60755784

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,200,000円

研究成果の概要（和文）：彩色文化財の保存を考える際に、現在、得られる内部構造情報を正確に把握する方法とその技術の確立が不可欠である。そこで本研究では、彩色文化財の構造を表面の彩色層のみならず、その下にある下地層、紙などの支持体に至るまで、電磁波を用いることで、非破壊非接触での構造を把握するとともに、モニタリングから損失や損傷をいち早く発見し、資料の取り扱いに関する基準を提案する。

研究成果の学術的意義や社会的意義

彩色文化財とは、軸装、幀装、帖装や板絵等の形態で描かれているものであり、その劣化メカニズムは同じ材料で同じ劣化因子でも、劣化因子の強弱や露出時間によって異なりを見せる。彩色文化財の内部構造調査を目的とした従来のX線透過法では、透過した情報しか得られず、また、赤外線と紫外線は、表層部分のみのデータしか得ることができない問題点があった。これまで彩色文化財に対して非破壊非接触での正確な診断調査が不足している技術的な問題があげられる。

本研究によって彩色文化財における劣化診断が可能となれば、保管環境中での保存状態が管理できるほか、修理を検討する上でも、極めて有効な知見をもたらすものと考えられる。

研究成果の概要（英文）：Considering the preservation of the properties of pigmented heritage materials, it is important to establish a technical method that can accurately grasp the current situation. Therefore, in this research, we will comprehensively analyze assess the structure of the painting cultural properties materials in a non-destructive and non-contact manner using electromagnetic waves, and at the same time, grasp the degree of deterioration by monitoring. Furthermore, we tried feasibility as a management method of future materials.

研究分野：文化財 保存科学

キーワード：構造調査 テラヘルツ波イメージング

様式 C-19、F-19-1、Z-19(共通)

1. 研究開始当初の背景

彩色文化財の彩色には、「塗装」、「装飾」、「意匠」、「鑑賞」といった役割があり、塗装された建造物、漆塗り資料、色料で彩られた器物、古墳に描かれた装飾壁画、紙本などに描かれている絵画などがあげられる。図像や色は、自然環境下でも少しずつ劣化が進行する。彩色層は変褪色や剥離及び剥落を生じ、全体として本来あったであろう姿とは大きく異なっていることが多い。その劣化メカニズムは同じ材料で同じ劣化因子でも、劣化因子の強弱や露出時間によって異なりを見せる。

これらの彩色文化財は、必要に応じて随時おこなわれる修理を通して今日まで保存と継承がなされてきた。しかしながら、活用の頻度が高いものほど修理がおこなわれる傾向が高い。すなわち、調査や研究、展示などで利活用する際には、目視による状態観察が行われるに過ぎず破損のリスクが高くなること、利活用の機会の多い資料ほど資料の状態回復や安全性確保が望まれることから、修理の頻度が高くなるものと考えられる。いっぽう、状態が悪い資料、あるいは材料の耐久性が低い資料でも環境の安定した収蔵庫において長期間保管できる可能性がある。また、収蔵庫の保存環境に関しても、環境を整えることで劣化を遅らせる助けにはなるが、劣化そのものを止めることはできない。

また、収蔵環境ですべての資料の状態を注意深く観察できたとしても、目視によるモニタリングは最表層の情報ほとんどであり、下層の彩色層、下地及び支持体の劣化状態まで判断することは難しい。その他、資料に対する非破壊非接触での正確な診断方法が不足している技術的な問題もあげられる。

以上のことから、これまで彩色文化財に対してその劣化状態を非破壊非接触で調べることで、ならびに材料の耐久性に応じた修理のシステム化は困難であったと言える。本研究によって彩色文化財における劣化診断が可能となれば、保管環境中での保存状態を確認及び管理できることや、修理を検討する上でも、極めて有効な情報をもたらすものと考えられる。

2. 研究の目的

本研究は、彩色文化財の内部構造を可視化することを目的としている。彩色文化財をモニタリングすることによりその劣化程度を把握、可視化し、修理の優先順位を予測するシステム構築を試みる。彩色文化財の損傷度を調べる機器としては奈良文化財研究所で開発したテラヘルツ波イメージングシステム¹を用いた。これまでの先行研究を踏まえて、彩色の技法と材料がテラヘルツ波イメージングにどのように反映されるのかということを検討するため、測定に大きく影響を及ぼす因子を把握し、最も文化財の損傷度を表すことのできる測定条件を検証した。

3. 研究の方法

研究は大きく3つのアプローチから構成される。1)テラヘルツ波は、材料に応じて侵入深さや分解能が異なる。そのため、彩色文化財の彩色劣化の種々の現象を調査するには、調査目的に対応した最適な条件の設定を定める必要がある。これまでの先行研究を踏まえて、多様な彩色の技法と材料がテラヘルツ波イメージングにどのように反映されるのか検討を行った。次いで、文化財の内部構造調査にテラヘルツ波のデータを活用するためには、文化財の損傷度調査に対するテラヘルツ波のデータの信憑性や正確性を確かめる必要がある。そこで、マイクロフォーカスX線CTを用いて比較検証を行った。2)1)によって得られたテラヘルツ波の基礎的な知見を基に、これまで確認することが困難であった彩色層から下地層および基底材に至る深さ方向での情報を彩色文化財へ適用し、テラヘルツ波イメージングによる彩色文化財の界面情報を明らかにした。最後に、3)測定結果を踏まえてイメージング解析を行い、損傷度を推定した。

実験に用いたテラヘルツ波イメージング装置は、パイオニア製ポータブルテラヘルツスキャナである。0.1~1.7THz発振帯域の仕様で、深さ方向の空気中での分解能は $180\mu\text{m}\sim 200\mu\text{m}$ である。パルス光源と検出器をユニットとしたX-Yステージを用いることで1度に約 $300\text{mm}\times 300\text{mm}$ の測定範囲をスキャンすることができる。測定原理を図1(左)に示す。テラヘルツ波を試料(単層構造)に入射させると、屈折率の不連続点である表面(空気-表面境界①)及び試料裏面(内部-基底材境界②)でテラヘルツエコーパルスがそれぞれ反射される。これらのテラヘルツエコーパルスの時間波形を観測すると、各境界からのテラヘルツエコーパルスが時間分離されて戻ってくる。次に、測定試料を2次元で走査することにより得られた結果を図1(右)に示す。

マイクロフォーカスX線CT装置(以下、X線CTと略す。BRUKER、skycan1272)は様々な撮影条件の設定が可能である。今回は内部構造調査に適用するための基礎的な研究として管電圧と管電流を変化させて撮影を行った。次いでテラヘルツ波から得られた画像に含まれている損傷

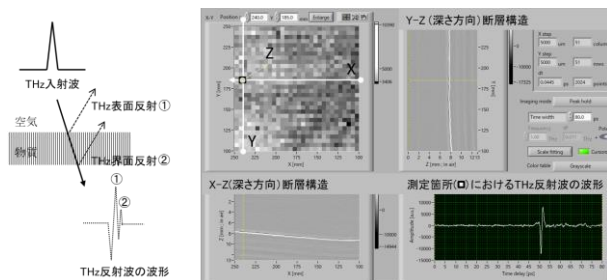


図1 測定原理とTHzイメージ測定結果:断層構造と波形

度の定量化をイメージプロセッシングソフトウェア (PicMan, WaferMasters, Inc. 以下、イメージング分析) を用いて評価した。イメージング分析は、WaferMasters, Inc., California, USA と共同で行った。

4. 結果と考察

(1) 彩色文化財に対するテラヘルツ波を用いたパターン認識

テラヘルツ波イメージングは、東洋における彩色材料を想定した測定試料に対しておこなった。顔料のテラヘルツ分光スペクトルのデータベースは先行研究²で構築されており、本研究では装潢文化財を想定した基礎データとして、40種類の和紙の基本波形、および下塗がある基本波形として白土、胡粉、鉛白を下地として施した後に19種類の単一色彩色を施した「基底材—下地層—彩色層」の3層構造の基本波形57種類と、下地層がない「基底材—彩色層」の基本波形19種類について測定を行った。また、「基底材を楮紙」—彩色層のみの試料59点で、紙を支持体とする基本波形として総計135種類のパターンをデータベース化した。

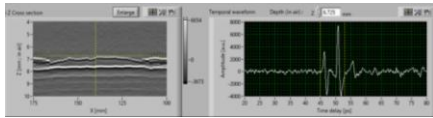


図2 楮紙 彩色なし

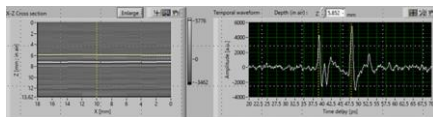


図3 楮紙 白群1層塗り

このうち、代表的な事例として紙の上に彩色1層のみ施した資料の波形を図2-3に示す。紙のみの試料の場合、断面の状態を示す画像は表面の平滑性が影響を与えるという結果が得られた。紙自体の特徴は波形から読み取ることができることがわかった。ただし、平滑性を向上させ光沢をつけた一部の試料ではこの規則性は当てはまらないことがわかった。特に、打紙の加工を施した紙試料に関しては多重反射信号が、雁皮、金属箔金銀箔を用いた試料については表面反射が大きいことがわかった。

次に、彩色の基本波形の各特徴は大きく3つのA~Cタイプに分類されることが明らかとなった。紙から彩色層まで

断層を画像や反射波形から推定できるAタイプ、断層の判別は難しいが、反射ピークの波形と周波数信号 (time domain spectrum) のパルス信号を用いることで推定できるBタイプ、断層を調べるのが難しいCタイプである。Cタイプは、テラヘルツ波イメージング調査には適切ではない。BタイプとCタイプでは、色料の屈折率が周波数依存性と深く関係しており、内部構造の確認が難しい。また、Bタイプについて、絵具の粒子が大きい場合、テラヘルツ波の散乱が著しく、内部構造の確認が難しい。

(2) テラヘルツ波とマイクロフォーカス X線CT (以下、X線CT) を用いた比較研究

非接触リモートによるテラヘルツイメージングの彩色文化財の構造調査の有効性は(1) 彩色材料の基礎パターンの測定より確認できた。一方、テラヘルツ波を彩色文化財の内部構造調査に活用するためには、情報を合理的に評価することが必要である。本研究では、テラヘルツイメージングのデータの信憑性を確かめるため、X線CTを用いて比較検証を行うことで内部の亀裂、空隙および剥離の情報の評価基準を定めることができた。X線CT画像の濃淡は密度の差異に対応するものであるため、層間の材料の違いがX線CT画像に反映される。同様にテラヘルツ波断層も不均質な層構造が確認でき、その欠陥の寸法はテラヘルツ波イメージングから算出し、これをX線CTで確認したところ、ほぼ一致した(図4)。

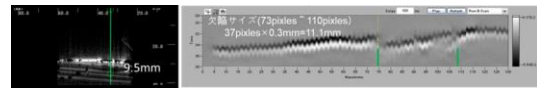


図4 X線CT断面画像(左)、THz イメージ断層(右)

また、絹本著色における彩色の構造を比較研究したところ、テラヘルツ波イメージングでは紙本彩色と同様に支持体の影響よりも彩色層である絵具の粒径が大きく測定因子に影響を及ぼすことを再確認することができた。また、層間の界面で粒径差が存在する場合、わずかな浮き、空隙が存在しているように反映されることも確認できた。2つの調査技術の利点と欠点から、テラヘルツイメージング調査の特性を理解することができ、調査法の実用化が可能となった。

(3) テラヘルツ波イメージングのグレースケール画像からRGBカラーマスク処理

本研究は文化財の修理に役立てるものであるため、文化財の所有者や修理技術者を中心に結果をわかりやすく伝える必要がある。一方で、テラヘルツ波イメージングは、屈折率の不連続点である彩色層の表層、層間、界面でテラヘルツ波がそれぞれ反射された強度をグレースケール画像で示される。グレースケールの輝度は0(黒)から255(白)であるが、中間色の差を画像上で判別するのは経験が必要である。そのためテラヘルツ波から得られている画像に対し、0(黒)と1(白)の画素値の差のみ認識され理解されることも多い。従って、より認識しやすい画像への変換が必要であった。そこで、イメージプロセッシングソフトウェアを併用し、画像の輝度をRGBチャンネルに分けて色を定量的に扱ったことで、テラヘルツ波イメージングへの理解力が高まる結果となった。以上のように、人間の視覚における色の空間分解能は、明るさの空間分解能と比較して低くなっている問題点を、誰もがわかるような損傷状況が分かる画像に改善した。一方で、用いるテラヘルツイメージング画像の分解能は走査距離(テラヘルツパルスの時間幅)と材料の屈折率によって制限されるため、どの条件で得られたデータを用いるかを明確にすることは、そのデータを解釈する際に重要となる。例えば胡粉で一色塗られている場合は、RGBカラーマスク処理した画像から塗りムラ分布がより区別しやすい。色の差が現れるところを中点的に断面や波形から把握す

ることで、その原因が膜厚からか、剥離などの劣化が原因なのか確認することができる。

(4) 修理前後の内部構造調査結果の比較研究

次に、可搬形式のテラヘルツ波を用いたイメージングには、試料と測定環境は大きく影響を受けないので多様な彩色技法や材料に応じた正確な解析を行うため、(2)の比較研究と並行してさらに絵画資料の測定データの蓄積を進めていく必要がある。

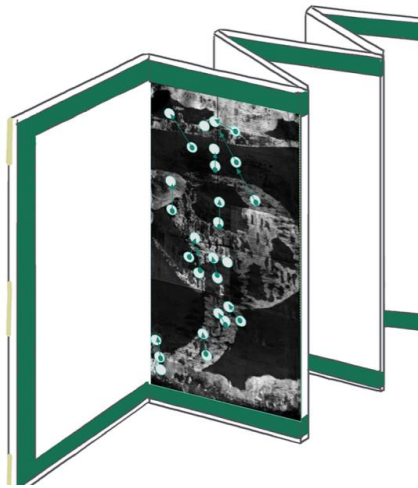


図5 修理前の THz 波イメージ欠陥記録図

代表的な事例として「知恩寺所蔵紙本金地著色天橋立図屏風」の調査結果を報告する。面からは観察できない下層の亀裂、浮き、山折れ、空隙層等の欠陥が確認できた。また欠陥部の大きさ、位置の把握や過去の修理痕跡として本紙の裏から補修紙が補填されていることが断面情報で確認できた。そのうち、目視では判断がほとんどできてないところを円状に配置した画像を図5に示す。これらは浮き、山折れ、空隙層等剥離への損傷が進行していると判断できる特徴的な箇所、27か所確認できた。位置を画像に表記したところ、表面は縦方向の凹凸がより著しく、損傷具合は分布図をみると、奥尾背(谷折り部分)に向かってマークされている箇所が多いことから、屏風の開閉の際に力がかかって、本紙が引っ張られることにより内部劣化が生じた使用由来の劣化原因が最も考えられる。

次に、同条件で修理前と修理後にもテラヘルツ波パルスを走査してテラヘルツイメージング画像を得た。はじめに得られたデータを周波数領域、時間領域とも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。次に、イメージングソフトウェアを用いて得られたモノクロ画像データを任意の7段階に輝度を分け、RGBカラーマスク処理したテラヘルツ波イメージング画像が図6である。材料の吸収量の違いが反映されたコントラストの差で修理後の成果が一目瞭然と確認できる。当然のことながら修理後は浮きや空隙層などのような内部の空気層がなくなり、彩色層が密着されているため反射強度がより強くなる。点線の円で囲った部分が、修理後、欠陥が直され反射強度が強くなった部分になっている(断層画像1参照)。修理前後の想定している結果が観測されるのに対し、直線の四角に配置したところは修理後に吸収量が大きく変わっていた。このような吸収量の違いが生じた箇所は、断層や波形から確認することが必要である。その結果、各所で見られた吸収量が大きい部分は修理前と修理後に違いがなく、平滑になっている断層からも欠陥部の確認はできなかった(断層画像2参照)。このような吸収量の違いから推測できるのは、2つある。金箔の影響と修理前より、修理後の金箔のテラヘルツエコーパルスが高いことである。得られたテラヘルツ波イメージングの反射率は、相対的な大小により物質を推定できるため、10THz程度までの反射率が98%である金属が用いた場合には、修理後の金箔の反射強度がより高いことで、相対的に修理前より得られる情報が箔の影響を受け、制限されたと考えられる。さらに、金箔が貼られている部分に対しては彩色部が金属の反射にカットされ、情報を得ることができなかった。

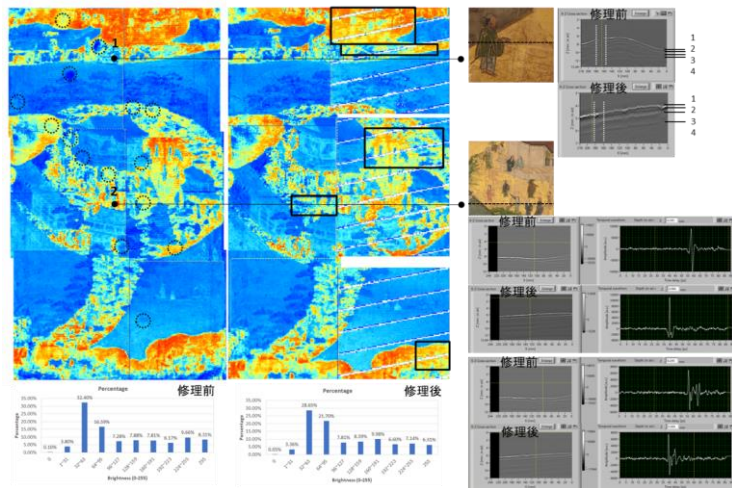


図6 任意の7段階でRGBカラーマスク処理したTHz波イメージ画像と断層画像(左_修理前、右_修理後)

(5) 点検・診断・モニタリング技術

京都大学所蔵慶陵東陵の西壁面人物画像は、1922年に発掘され(田村 1977)、2006年の展示をきっかけに専門家による保存状態の確認がおこなわれ、表面クリーニングと補修を経て公開に至った経緯が簡略ながら報告されている(京都大学文学部 2006)。額縁で仕立てて壁画の周りには石膏ボードで固めて補修された状態で現在まで保管室(室内、温湿度制御なし)にて長期保管されている。本資料は、目視及びテラヘルツ波イメージ画像、X、Yのどの断面からも確認されるとおり表面の凹凸が激しい。そのため、資料表面と検出部の走査距離が変化し、得られる情報に歪曲が生じる可能性が高い。現在得られる情報を正確に把握するため、技術的に補完したところは、表面高さごとに、分割して測定を行ったことである。計18分割して、最終的に1枚の

画像に再構築することで問題点を解消した。図7に測定結果の一部を示す。壁画を補強している石膏は全画像では白色に現れるところで、断面で見ると良好な状態だが、平滑ではないことが観察された。次に、石膏ボードと壁画の界面で充填されたところは、吸水率が大きく現れるがこれは界面に接している材料の違いから由来するもので、断面から確認したところ、大きな欠損(隙間)は確認できなかった。一方で壁画からは亀裂箇所が多く、損傷部の寸法や位置について情報を得ることができた。特に亀裂、空隙が顔部分に集中しており、細かいひび割れが進行すると深い溝状の亀裂になりやすく、最終的に剥離剥落に繋がる恐れがあるので管理に特に注意が必要だと考えられる。テラヘルツ波イメージングでは材料の定性はできないため、蛍光X線分析調査と基本データベースを参照して、反射の違いを区別することができた。

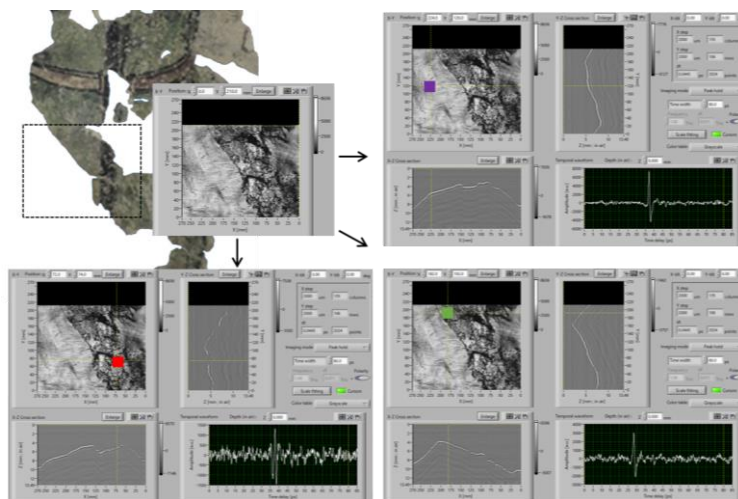


図7 THz波イメージ画像:石膏(紫色)、亀裂など欠陥(赤色)、漆喰(緑色)

彩色文化財の点検や診断において、テラヘルツ波イメージング技術とイメージプロセッシングソフトウェアの使用を検討する場合、以下の条件を満たさなければならない。

1つ目の条件は、資料の表面からテラヘルツ波検出部の距離が異なる場合、得られるテラヘルツ波の強度は変化する。資料の表面は、たわみが生じていることが多く、調査距離を一定にすることは難しい。そこで、輝度を一定にするため、表面の高さごとに分割撮影を行う必要がある。本装置を用いた場合は、試料表面からテラヘルツ検出部までの距離が4cmの位置で最も検出感度が良い。

2つ目の条件は、幅広い領域の周波数を利用して調査を行うことである。1~1.7THzに設定すると金を除く大部分の彩色材料は透過する。例えば、1THz付近の周波数に設定すると、朱、辰砂、群青、緑青等の代表的な絵具を透過しないため、内部構造の検討が難しい。メンテナンスや点検のように短時間で面的な調査が必要な場合は、幅広い領域の周波数帯域を任意に設定する必要がある。

3つ目の条件は、イメージ解析に用いるテラヘルツ波データを一定にすることである。テラヘルツ波として得られたイメージングの反射率は、相対的な大小によって、256階調の中で表現される。測定画面に反射率が最も高い標準試料(金箔)と低い標準試料を同時に走査することで、複数の対象での輝度差を縮めることが望ましい。

上記の3つの条件が整った場合でも、目視できない部分(絵具層間、絵具と紙の間)での反射光とそれに干渉する場合があるため、一つ一つ波形から確かめる必要がある。

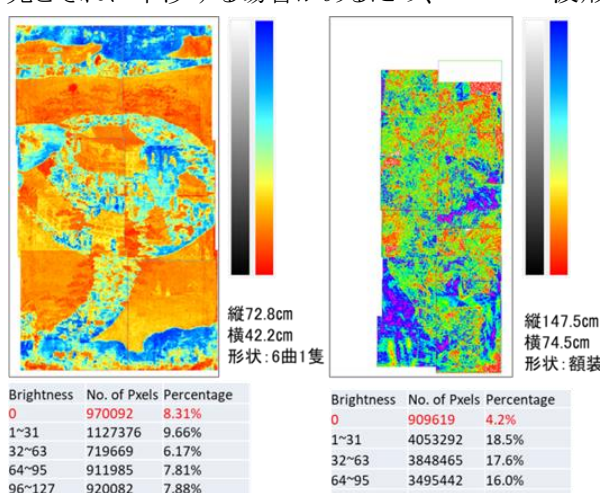


図8 空隙層の欠陥率確認:資料4(左)、資料5(右)

仮定すれば、空隙は20.57%と推定される。これらの推定された空隙が占める数値を「管理指標値」とすれば、管理指標値が大きいほど劣化が著しいことを示し、修理の優先順位とすることができる。

以上の3つの条件が整い、かつ目視できない部分についての構造確認等を経た上で、空隙などの劣化部分を抽出することを目的としたイメージ処理結果を図8に示す。

テラヘルツ波画像で黒色(0)として表示される部分は、断面および波形情報でも確認したように、空気層であることが判明した。それによって、彩色文化財における剥落進行性、つまり明確な空気層の確認ができれば、点検を速やかに行うことができる。その他、異なる輝度を解釈するには、材料特性、彩色層間、基底材(紙など)の複合的な因子の由来が考えられるため、作品ごとに検討することが望ましいと考えられる。資料(4)は、空隙が全体の8.31%、資料(5)は調査部分だけで4.2%を占める。ただし、資料(5)の未測定部分(白色)を健全であると

¹ 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、研究代表者 高妻洋成、2009年度~2011年度、課題番号 21240073

² <http://thzdb.org/> 国立研究開発法人情報通信研究機構と理化学研究所のデータベースと統合、公開。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計8件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 3件）

1. 発表者名 金旻貞、オドファー アンガラグスレン、古松崇志、松川 節、高妻洋成
2. 発表標題 慶陵東陵の西壁面人物画像のイメージング分析法による劣化損傷の評価
3. 学会等名 日本文化財科学会第36回大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 OHNO Kyoko, KIM Minjung, UTSUNOMIYA Masaki, KOHDZUMA Yohsei
2. 発表標題 Application of Terahertz wave imaging technique for surveying of surface layer structure of the painting cultural properties (3)
3. 学会等名 International Symposium on Conservation of Cultural Heritage in East Asia. (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 KIM Minjung, OHNO Kyoko, UTSUNOMIYA Masaki, KOHDZUMA Yohsei
2. 発表標題 Application of Terahertz wave imaging technique for surveying of surface layer structure of the painting cultural properties (2)
3. 学会等名 International Symposium on Conservation of Cultural Heritage in East Asia. (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 金旻貞
2. 発表標題 テラヘルツ波イメージングによる 彩色文化財の界面調査のための技術的検討
3. 学会等名 彩色材料分析WG 第4回研究会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 金旻貞
2. 発表標題 智恩寺 紙本金地著色天橋立図屏風の非破壊界面調査
3. 学会等名 第35回日本文化財学会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 金旻貞
2. 発表標題 電磁波を用いた彩色文化財の調査
3. 学会等名 奈良文化財研究所 総合研究会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 金旻貞, 高妻洋成
2. 発表標題 テラヘルツ波イメージング技術を用いた彩色文化財の界面調査_1
3. 学会等名 第34回日本文化財科学会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Min-jung Kim, Yohsei Kohzuma
2. 発表標題 application of terahertz wave imaging technique for surveying of surface layer structure of the painting cultural properties
3. 学会等名 Symposium of Conservation of Cultural Heritage in East Asia in Shanghai (国際学会)
4. 発表年 2017年

〔図書〕 計1件

1. 著者名 工楽善通先生の傘寿をお祝いする会	4. 発行年 2018年
2. 出版社 雄山閣	5. 総ページ数 341 p
3. 書名 構築と交流の文化史 工楽善通先生傘寿記念論集	

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------