テラヘルツイメージング技術による文化財の調査

犬塚将英^{†1}, 滝下俊彦^{†2}, 小林秀樹^{†2}, 高妻洋成^{†3}, 杉岡奈穂子^{†3},
福永 香^{†4}, 建石 徹^{†5}

キーワード：文化財，テラヘルツイメージング，層構造，高松塚古墳壁画

1. まえがき

私たちは美術工芸品，建造物，記念物などのさまざまな文化財を受け継いでいる。そして文化財から私たちは美術，歴史，考古学などについて多くのことを学んでいる。したがって，このような貴重な文化財を活用をしながら良好な状態に保ち，そして次世代の人々に伝えていくことは大切なことである。

そのためには，二つの重要な課題があると言える。一つは文化財を取り巻く温度，湿度，照度，空気環境などの保存環境を良好に保つことである。そしてもう一つは，文化財の材質や構造を科学的に解明することである。科学調査によって得られた文化財に関する情報は，その文化財を修復する際にも重要になってくる。

しかし，文化財の調査に際しては，貴重な文化財に損傷を与えないように，綿密な計画を立てて，細心の注意を払って調査を行わなければならないのは言うまでもない。そして文化財の調査では，試料採取が許されず，非破壊・非接触を大前提とした手法を要求されるケースが多い。これは他の分野における分析調査とは事情が大きく異なっている点であり，文化財の調査における特徴であると言える。

このように文化財の調査では非破壊・非接触手法が求められることが多いため，エックス線，紫外線，可視光線，赤外線，電波などのさまざまな波長の光をプローブとした光学

調査が主な調査方法として実施されてきた歴史がある。

エックス線を用いた文化財の代表的な調査法として，エックス線透過撮影による内部構造の調査を挙げることができる。例えば，木彫の仏像のエックス線透過撮影を行うと，仏像の構造や胎内仏・納入品の有無などを仏像を解体することなく調べることができる。一昔前はフィルムを使った撮影が主流であったが，近年は医療機関などでも用いられているイメージングプレートやフラットパネル検出器などの活用が進んでおり，デジタル化された映像情報として記録されている。また，近年の文化財の調査では，360°の方向から撮影したエックス線透過画像をコンピュータ上で処理をして，3次元的な画像を構築するエックス線CTの導入も進んでいる。奈良文化財研究所や九州国立博物館などで導入され，さまざまな文化財の調査結果が報告されたのを皮切りに，今日，国内の他の博物館等でもエックス線CTを導入して文化財の調査を行っている事例が増えつつあり，このような映像情報はますます重要な位置を占めるようになってきている。

また，墨が用いられている箇所では赤外線の吸収率が高いことを利用して，絵画などの下絵の有無を調べるために，赤外線画像の撮影を行うこともある。そして赤外線画像と可視画像の両者の映像情報を比較することにより，絵画作品について新たな発見がもたらされることもある。

本稿の次節以降で紹介するテラヘルツ波は周波数領域が約0.1から10 THz（約3mmから30 μ mの波長領域に相当する）における電磁波であり，異なる屈折率を有する物質の界面において反射率が高くなる性質がある（図1）。物質に対する透過率はエックス線と赤外線の間での性質を持ち，有機物の場合，典型的には数cm程度の深さまで到達する。文化財の分野ではこのような性質を利用して，テラヘルツ波は油彩画¹⁾²⁾，屏風³⁾，建築部材⁴⁾などの層構造を調べるために用いられた研究成果もある。次節以降で紹介する事例のように，文化財の表面近傍の層構造やその2次元的な分布を図示化した映像情報は文化財の保存や修復のための

^{†1} 東京文化財研究所

^{†2} パイオニア株式会社

^{†3} 奈良文化財研究所

^{†4} 情報通信研究機構

^{†5} 文化庁

"Investigation of Cultural Objects by Terahertz Imaging Technique" by Masahide Inuzuka (Tokyo National Research Institute for Cultural Properties, Tokyo), Toshihiko Takishita, Hideki Kobayashi (Pioneer Corporation, Tokyo), Yousei Kouzuma, Nahoko Sugioka (Nara National Research Institute for Cultural Properties, Nara), Kaori Fukunaga (National Institute of Information and Communications Technology, Tokyo) and Toru Tateishi (Agency for Cultural Affairs, Government of Japan, Tokyo)

有益な情報として脚光を浴びつつある。本稿ではテラヘルツイメージング技術による高松塚古墳壁画の調査について紹介する。

2. テラヘルツイメージング技術による高松塚古墳壁画の調査

高松塚古墳は1972年3月に奈良県明日香村で発見された。発掘調査の結果、墳丘は二段築成の円墳であったと考えられ、墳丘の中には二上山産の溶結凝灰岩を加工した16枚の石材で構成された石室があった。石室の容積は約1.0m×1.1m×2.7mで、石室の内側の壁にしっくい塗りが施されており、そのしっくいの上に極彩色の壁画が描かれていた。壁画のモチーフとしては、四神、日像、月像、星宿図、人物像等が描かれており、これらの壁画は1974年に国宝として指定された。

発見当初、高松塚古墳壁画をどのように保存していくのが議論になったが、1973年に「現地保存方針」が決定され、温度や湿度の急激な変化から壁画を保護すること等を目的として、1976年に高松塚古墳壁画保存施設が竣工された。

しかし、高松塚古墳壁画はカビ等による生物被害の問題等の理由により現地保存が困難になり、2005年に解体修理の方針が決定された。そして、2007年に壁画は石室を構成する石材ごと墳丘から取出され、国営飛鳥歴史公園の敷地内に建設された高松塚古墳壁画仮設修理施設に輸送された。

壁画が置かれている修理作業室内は温度が約21℃、湿度が約55%に保たれており、壁画のクリーニング・修復作業が続けられている。また、このような修復作業と合わせて、壁画、しっくい、石材の状態を把握するために、蛍光X線分析、分光分析、デジタルスキニング等の科学調査も、主に国立文化財機構奈良文化財研究所と東京文化財研究所の保存科学の研究者で構成される材料調査班によって行わ

れている。そして、科学調査の一環として、しっくいの層構造や石材からの剥離箇所を調べるために、テラヘルツイメージング技術を用いた調査も行っている。

3. 調査方法

高松塚古墳壁画のしっくいの状態を調べるために、筆者らは2016年からパイオニア株式会社製の「ハンディヘッド型テラヘルツスキャナー」を用いて調査を行っている。

この分析装置は主に「スキャナヘッド」、「ヘッドスキャンメカ」、「スキャナ本体」、「制御用PC」から構成されている。図2に示すように、スキャナヘッドはヘッドスキャンメカに設置されており、壁画をスキャンするために2次元的に駆動される。テラヘルツ波のパルスはスキャナヘッドから壁画へ照射され、壁画から反射されたテラヘルツ波は再びスキャナヘッドで受信される。そして受信された信号はケーブルを通じてスキャナ本体に送られて、各測定点における断層構造やその情報を2次元的に可視化するために必要な信号処理が行われる。この分析装置の素晴らしい点の一つは、スキャナヘッドとスキャナ本体が1本のケーブルのみで接続されていることである。このように分析装置の構造がシンプルかつ堅牢であることから、貴重な文化財を損傷する事故を引き起こすリスクが格段に低くなり、安全な分析システムであるということが出来る。

本稿では2016年2月29日から3月2日までに上記の分析装置を用いて、高松塚古墳壁画の中で(四神の一つである)青龍が描かれた壁画のしっくいの状態を調査した結果を紹介する⁵⁾。図3にデジタルスキャナによって得られた青龍が描かれた壁画の可視画像を示す。石室の中で青龍は東壁の中央に描かれていた。

高松塚古墳壁画修理作業室では、石室を構成していた石材は壁画が描かれている面を上に向けて保管されている。今回調査を行った青龍が描かれた壁画の寸法は1160mm×910mmである。一方、ヘッドスキャンメカによりスキャ

ナヘッドを安全に駆動することができる領域は250 mm × 250 mmである。壁画をスキャンするにあたって、このような制限があることから、壁画を4×5=20の領域に分けて分析を行った。図4にテラヘルツイメージング分析装置を用いた青龍が描かれた壁画の分析を行っている様子を示す。高松塚古墳壁画の調査専用の大型フレームに、スキャナヘッド、ヘッドスキャンメカ、スキャナ本体が設置されている。ヘッドスキャンメカは分析を行いたい壁画部分の上部に固定され、ヘッドスキャナが移動をしてスキャンが行われる。壁画への安全を考慮して、ヘッドスキャナの移動速度は20 mm/sとした。また、スキャンを行うピッチは2 mmとし、各250 mm × 250 mmの領域を分析するために約1時間の計測時間を要した。

図3 青龍が描かれている壁画の可視画像

図4 青龍が描かれた壁画の調査風景

4. 調査結果

図5には青龍が描かれた壁画における調査箇所を示す。測定箇所Aのしっくい層は堅牢であるが、一方で測定箇所Bではしっくい層が失われており、凝灰岩の面が露出している。また、表面から観察すると測定箇所Cのしっくい層は堅牢であるように見えるが、後述するように、測定箇所Cではしっくい層が凝灰岩から剥離している可能性が示唆された。

図6(a)では測定箇所Aにおけるテラヘルツ反射波の波形を示す。大きな波高で示されている信号はしっくい表面で反射されたテラヘルツ波の波形である。図6(b)では測定箇所Aを含むスキャナヘッドがスキャンした一列での断層構造のイメージを示す。

同様に、図6(c)では測定箇所Bにおけるテラヘルツ反射波の波形を示す。図6(a)の波形と比較すると、反射波は約30ps遅れて到達している。これは大気中では4.5 mmの距離に相当し、この時間差は測定箇所Bにおけるしっくい層の欠落に起因するものであり、ここで観測された信号は凝灰岩表面で反射されたテラヘルツ波の波形である。図6(d)では測定箇所Bを含むスキャナヘッドがスキャンした一列での断層構造のイメージを示す。この図でも、測定箇所Bではしっくい層が欠落している様子を再確認することができる。

図6(e)では測定箇所Cにおけるテラヘルツ反射波の波形を示す。図6(e)中で最初に現れている反射波は図6(a)で観測された反射波と同じタイミングで観測されていることから、この信号はしっくい表面で反射されたテラヘルツ波の波形である。一方、この波形から約20ps遅れて別の信号が観測されていた。図6(f)では測定箇所Cを含むスキャナヘッドがスキャンした一列での断層構造のイメージを示

図5 高松塚古墳壁画の調査箇所の例

図6 測定箇所A～Cにおけるテラヘルツ反射波の波形と断層構造のイメージ

図7 特定の時間領域における各ピクセルでの信号強度を積算して2次的に分布を示した映像情報

す。図6 (f) 中でもしっくい表面の下部に別の強度の小さい反射波が観測されていることがわかる。このような現象が観測される一つ理由として、表面から観察すると堅牢に見えているしっくい層が実は内側では凝灰岩から剥離をしており、その結果、しっくい層と凝灰岩との間に空気層が生じてしまって、図6 (e) と図6 (f) に見られるようなテラヘルツ波が反射した、という可能性を挙げることができる。この反射波の波高値が図6 (c) で観測された凝灰岩表面からの反射波の波高値と比較すると小さいのは、反射波がしっくい層を透過する時に一部吸収されたことによるもの

と考えられる。

測定によって得られたデータには、各2mm×2mmのピクセルにおける波高値が反射時間の関数として記録されている。図6 (a)、図6 (c)、図6 (e) で示された波形を見ると、スキャナヘッドへの到達時間が早い反射波のデータを抽出すると、しっくい表面で反射されたテラヘルツ波による信号だけを調べることができる。図7 (a) は、図5で示した壁画の部分について、反射波が到達する時間が10～40psに相当する時間領域におけるデータを抽出し、各ピクセルでの信号強度を積算して2次的に分布を示した映像情報で

ある。図5と比較すると、図7(a)は堅牢なしっくいが残っている箇所を2次元的な分布を示していることがわかる。同様に、反射波の到達時間が40～70psに相当する時間領域における各ピクセルでの信号強度を積算して2次元的に分布を示したのが図7(b)である。図5と比較すると、しっくい層が失われ、凝灰岩が露出している箇所を2次元的な分布を示していることがわかる。

一方、しっくい層と凝灰岩との間に隙間が生じている場合、図6(e)からこの隙間による反射波は、しっくいの表面からの反射波と凝灰岩の表面からの反射波との中間の時間に到達することが考えられる。図7(c)は、反射波が到達する時間が35～55psに相当する時間領域における各ピクセルでの信号強度を積算して2次元的に分布を示した映像情報である。高松塚古墳壁画の修理を行っている技術者からの聞き取り調査によると、図7(c)で示した分布は、修理作業を行っている時の感覚としてしっくいが浮いていると認識された箇所と良く一致していることが確認できた。このことから、テラヘルツイメージング技術およびその調査から得られる映像情報は、壁画の下地層の剥離箇所を壁画に触れることなく客観的に示すことができる有力なツールであることを確認することができた。

5. むすび

本稿では、テラヘルツイメージング技術を用いた文化財の調査の一例として、高松塚古墳壁画の調査結果の一部を紹介した。この調査の結果、壁画の下地となっているしっくいの層構造と石材からの剥離箇所などを2次元的に示し、壁画の保存修復のために重要な情報を映像情報として記録することができた。これらの結果からも、テラヘルツイメージング技術は文化財の状態を非接触で診断することのできる有力な調査手法の一つであることが確認できた。

テラヘルツ波はそのままでは人間の目では可視化することができない電波である。しかし、テラヘルツ波のように文化財に対して損傷を与えることのないプローブを用いて得られた文化財の状態に関する情報を、映像情報として可視化し記録することは非常に重要なことである。今後もこのような技術の発展とますますの情報の共有を期待するところである。

(2016年11月26日受付)

〔文 献〕

- 1) E. Abraham and K. Fukunaga: "Terahertz imaging applied to the examination of artistic objects", *Studies in Conservation*, 60, 6, pp.343-354 (2015)
- 2) K. Fukunaga, T. Ikari and K. Iwai: "THz pulsed time-domain imaging of an oil canvas painting: A case study of a painting by Pablo Picasso", *Applied Physics A*, 122, p.106 (2016)

- 3) 鈴木晴彦, 米倉乙世, 神庭信幸, 土屋裕子, 荒木臣紀, 和田浩, 福永香, 碓智文, 山本記子, 竹上幸宏, 沖本明子: "柳橋水車図屏風の修理事例", 文化財保存修復学会第34回大会研究発表要旨集, pp.178-179 (2012)
- 4) 福永香, 高妻洋成, 金旻貞, 藤井義久, 藤原裕子: "テラヘルツ波イメージングの文化財建造物調査への応用", 文化財保存修復学会第32回大会研究発表要旨集, pp.38-39 (2010)
- 5) 犬塚将英, 高妻洋成, 杉岡奈穂子, 福永香: "テラヘルツ波イメージング技術による高松塚古墳壁画の層構造調査", 日本文化財科学会第33回大会研究発表要旨集, pp.52-53 (2016)

犬塚 将英 いぬづか まさひろ 1999年、東京大学大学院理学系研究科博士課程修了。日本学術振興会特別研究員(東京都立大学)、東京大学原子核科学研究センター研究機関研究員を経て、2004年、(独)文化財研究所東京文化財研究所(現(独)国立文化財機構東京文化財研究所)入所。博物館や古墳等における文化財の保存環境に関する研究に携わる。現在、分析科学研究室長として、主に文化財の科学調査を担当。理学博士。

滝下 俊彦 たきした としひこ 1982年、長崎大学工学部機械工学科卒業。同年、パイオニア(株)入社。光ディスクシステム、有機エレクトロニクス、光学素子、テラヘルツ分光・イメージングの研究開発に従事。現在、パイオニア(株)研究開発部デバイス担当部長。

小林 秀樹 こばやし ひでき 1992年、電気通信大学電子物性工学科卒業。同年、パイオニア(株)入社。主に光ディスク(DVD, Blu-ray)機器の信号処理の研究開発に従事後、現在、テラヘルツイメージング装置の研究開発に従事。

高妻 洋成 こうずま ようせい 1991年、京都大学大学院農学研究科博士課程単位取得退学。京都芸術短期大学専任講師、京都造形芸術大学専任講師を経て、1995年、奈良国立文化財研究所(現(独)国立文化財機構奈良文化財研究所)入所。現在、保存修復科学研究室長として、遺跡や考古遺物の調査および保存修復に関する研究に携わる。博士(農学)。

杉岡奈穂子すぎおか なほこ 2011年、東京藝術大学大学院美術研究科文化財保存学専攻博士課程修了。日本学術振興会特別研究員、東京藝術大学大学院美術研究科教育研究助手を経て、2014年、(独)国立文化財機構奈良文化財研究所にアソシエイトフェローとして入所。古墳壁画等の文化財の材料調査に携わる。博士(文化財)。

福永 香 ふくなが かおり 1989年、藤倉電線(株)(現(株)フジクラ)入社。1994年、郵政省通信総合研究所(現(国研)情報通信研究機構)入所し、現在に至る。誘電体の高周波特性および電磁波を用いた非破壊検査に関する研究に従事。2013年、武蔵野美術大学造形学部通信課程卒業。博士(工学)。

建石 徹 たていし とおる 1997年、東京学芸大学大学院修士課程(文化財科学コース)修了。東京藝術大学大学院助手(保存科学研究室)を経て、2005年、文化庁に入庁。現在、同庁文化財部古墳壁画対策調査官として高松塚古墳、キトラ古墳の保存対策等を担当。博士(学術)。