

テラヘルツ分光・イメージングによる漆喰の状態調査

奈良文化財研究所 高妻洋成
情報通信研究機構 福永 香

1. はじめに

高松塚古墳とキトラ古墳の壁画は漆喰の上に描かれているという特徴を有している。これらの漆喰壁画の保存修復にあたっては、絵画層（絵具層）の安定化のみならず支持体である漆喰層をどのように取り扱っていくかを検討しなければならない。

現在、高松塚古墳の壁画については、修理技術者による詳細な観察に基づき、損傷マップが作成され、クリーニング作業が実施されているところである。高松塚古墳の壁画およびキトラ古墳の壁画の漆喰を詳細に観察すると、漆喰が亀甲状に細かく割れている部分、漆喰の崩落部の断面の粗鬆化、表面の陥没などが存在していることが分かる。表面からのこれらの観察により得られた情報に加え、さらに表面観察のみでは得ることのできない漆喰層内部の状態に関する情報を壁画全体に対して詳細に得ることは、漆喰壁画の保存修復にきわめて大きな意義をもつものである。

一般に、文化財の内部の構造や状態を観察する方法としては、X線透過試験およびX線CTなどがある。漆喰層ごと取り外された状態にあるキトラ古墳の壁画に対しては、X線透過試験は有効な情報をもたらすことが期待されるものの、得られる情報は3次元の情報が2次元のフィルムなどに重ね合わせられて得られるものであり、漆喰の厚さ方向での情報を必ずしも正確に把握できるものではない。X線CTは、壁画の形状・大きさなど幾何学的な制約が大きく、その実施はきわめて困難である。

最近、このような漆喰壁画のような文化財の材質構造調査に対して、テラヘルツ分光・イメージングが極めて有効であることが明らかとなっている。このテラヘルツ分光・イメージングを高松塚古墳およびキトラ古墳の漆喰壁画に対して実施するための技術的検討をおこなうとともに、高松塚古墳西壁女子群像に対して測定を実施した。今回は、これらの技術的検討と高松塚古墳西壁女子群像に対して得られた結果を報告する。

2. テラヘルツ分光・イメージングについて

テラヘルツ(THz)波は、中赤外線（光）とミリ波（いわゆる電波）の間の周波数帯域を呼び、一般的に振動数 $0.1 \text{ THz} \sim 10 \text{ THz}$ （波数： $3 \sim 300 \text{ cm}^{-1}$ ；波長： $30 \mu\text{m} \sim 3 \text{ mm}$ ）である。THz帯の電磁波は、電波のように不透明な物質にも透過し、物質固有の吸収スペクトルが得られるため、隠匿危険物（封筒内の禁止薬物等）の検査技術として、世界中で技術開発が進められている。

分光法として利用する場合の特徴としては、中赤外分光(FT-IR)の延長として、さらに弱いエネルギーの結合（分子振動、水素結合、結晶の格子振動等）に応じたスペクトルが得られるため、有機・無機の複合材料の評価などへの応用が進められている。

さらに非破壊検査法として有効な方法が、THz波帯のパルス波を利用したイメージングで、NASAにおいてはスペースシャトルの耐熱パネルの検査や、石油パイプラインの検査などにも利用されている。THz波パルスを用いたイメージングでは、THz波に対する屈折率の差のある界面の検出が容易で（たとえば、石と漆喰の間の空気層など）、壁画の内部状態を非破壊非接触

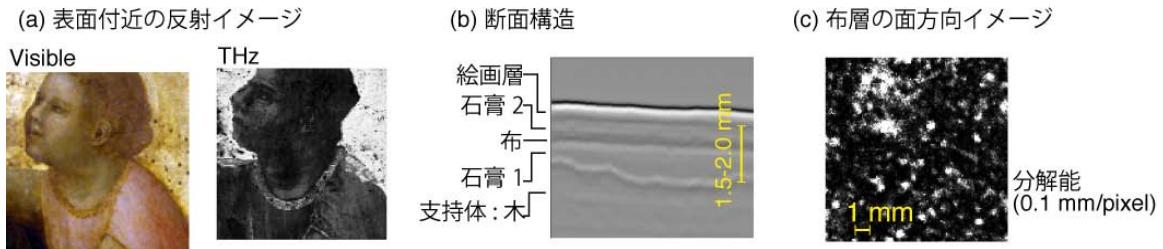


図1 Giotto 作テンペラ画 (Uffizi 美術館所蔵) の THz イメージング

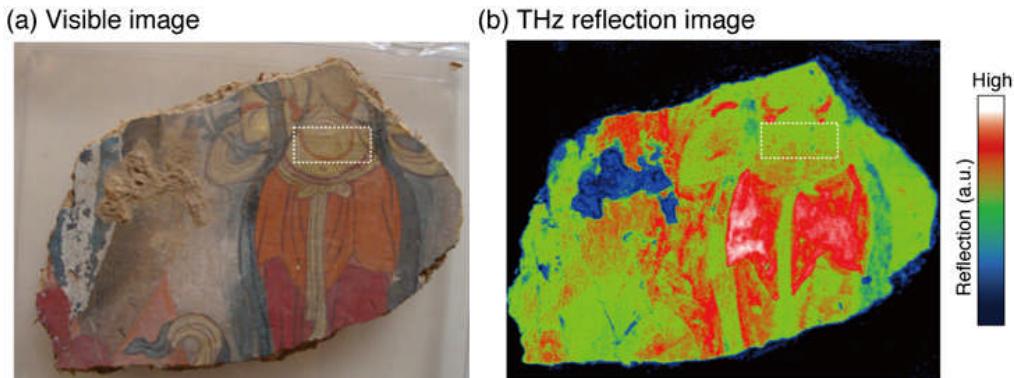


図2 大召寺（内モンゴル自治区）壁画片の THz イメージング

反射率(Reflection)の違いは材料の違いを反映している。「腕輪」、「裳」および腹部の曲線は橙色であるが、腹部の橙色は他とは異なる材質であることがわかる。

で観測できると考えられる。一方、現在市販されているイメージング装置の周波数範囲は 0.1~3 THz 程度であるため、物質の同定に必要な指紋スペクトルを得ることは難しい。特に反射スペクトルは、表面状態に影響されるため、反射率の相対的な大小から物質を推定できる程度である。現時点での THz 分光技術では、材料の分析手段としては不十分で、蛍光 X 線等との併用が不可欠である。

文化財の非破壊非接触検査に THz 波反射イメージングを適用した例を図1および2に示す。図1は、Uffizi 美術館所蔵の Giotto 作テンペラ画で、支持体の木から絵画層までの断面、さらに各断面の面情報を観測した例である。図2は内モンゴル大召寺の壁画の例で、橙色には2種類の材料が用いられていることがわかる。所要時間は 10 分程度であることから、詳細分析の前の大まかな材料の分布を把握するのに有効と考えられる。

3. THz イメージングによる古墳壁画測定のための技術的検討

前述したように THz イメージングを壁画などに応用することにより、材質およびその内部構造に関する情報を得ることが可能であるが、高松塚古墳およびキトラ古墳の壁画に対して、この測定技術を適用するにあたっては、壁画に対する安全性の確保が絶対的に必要となる。また、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。以下に、高松塚古墳およびキトラ古墳壁画を THz イメージングにより測定するための技術的な検討をおこなった結果を述べる。



図3 「装置用の乗り板」(左)とセンサユニット相当錘の落下実験

3. 1 安全性の確保

高松塚古墳壁画は壁画の描かれた面を上にして水平に置かれている。一方、キトラ古墳の壁画も仮修理が終了したものは額装され、やはり壁画面を上にして水平に保管されている。したがって、これらを測定しようとする場合、装置そのものが壁画の上部に位置することになるため、安全性を確保しなければならない。

現在、材料調査班で用いている分析用フレームの利用も検討したが、THzイメージングではリアルタイムに位置情報と試料からの信号を記録していく必要があるため、既存のXYステージを使用せざるを得なかった。そこで、修復技術班がその修復作業において修理技術者が使用している「乗り板」に、測定窓を取り付けた「装置用の乗り板」を製作した(図3)。

測定窓にはTHz波の透過率が高く、耐衝撃性等に優れた高密度ポリエチレンシートを利用した。XYステージに取り付けられたセンサユニットは複数のボルトで固定されており、測定中に落下することはまず考えられないものの、万が一の事態を想定し、「装置用の乗り板」を製作後、センサユニット相当の錘(1kg)をセンサユニットの高さ相当の位置(50mm)から落下させる試験を行った。その際の高密度ポリエチレンシートのたわみは最大でも約10mmであり、それ以上離れていれば、センサユニットが落下しても壁画面に影響のないことが確かめられた。

現在の測定装置の光学系としては、焦点距離が1インチ(2.54 cm)と3インチ(7.62 cm)のレンズが用いられている。これまでの材料調査班の蛍光X線元素分析や修復作業における乗り板下面と壁画との距離を考慮すると、1インチのレンズの使用も可能であると思われたが、今回はTHzイメージングの古墳漆喰壁画への適用可能性を検討するという段階のものもあるため、より安全性を重視して3インチ焦点距離のレンズを使用することとした。実際に、この焦点距離は得られるイメージの解像度に深く関わっており、その解像度の違いについては後述することとする。

3. 2 透過漆喰層の厚みと被覆土層の粒度と厚みの検討

2 cm(放射方向) × 2 cm(接線方向) × 5 cm(繊維方向)に調製したスギ木材試片の板目に、水銀朱を用いて試料番号を記入し、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。

用いた装置はPicometrix製T-Ray 4000である。図4に試験片の写真、得られた時間領域分光

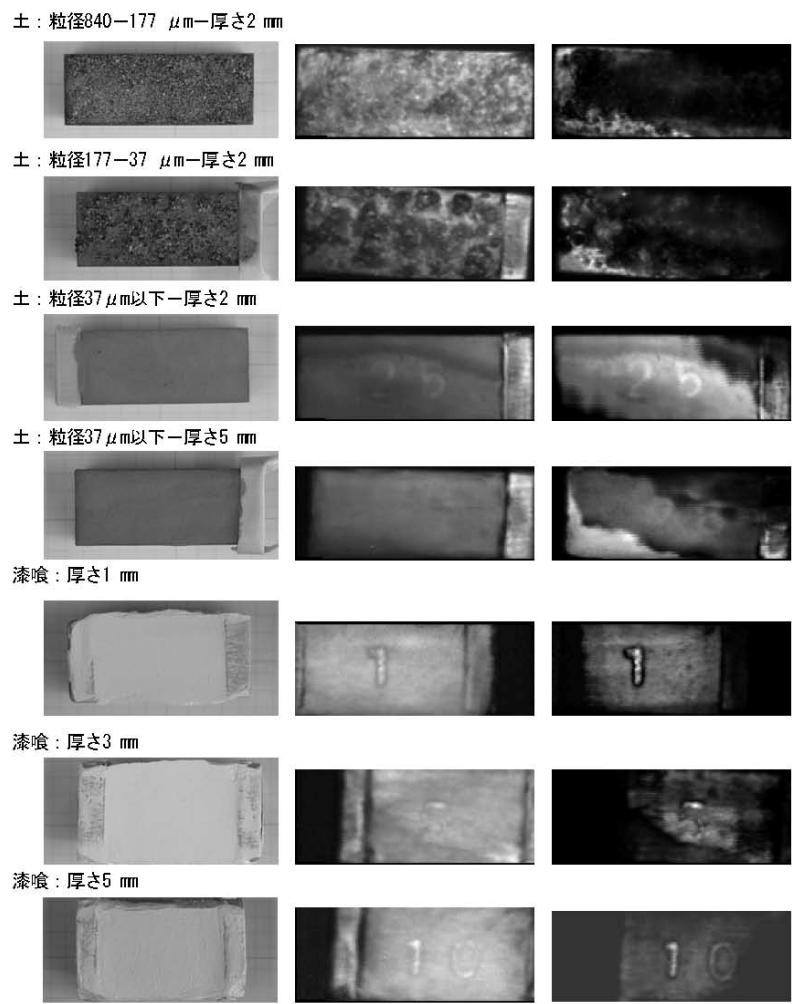


図4 泥の粒度と厚み、漆喰層の厚みを変えて得られたTHzイメージング

左から試料の写真、THzイメージ、時間領域分光法により再構築した画像

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 $840\text{-}177 \mu\text{m}$ および $177\text{-}37 \mu\text{m}$ の土の場合、イメージングにより彩色層としての水銀朱の数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 mm の時にイメージングにより彩色層を確認することができ、さらに塗布厚さが 5 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、土の粒径が用いたテラヘルツ波の波長よりも十分小さい場合には、テラヘルツ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 $37 \mu\text{m}$ 以下でテラヘルツ波の波長よりも細かい土の場合には、その被覆層が 5 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 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面の場合、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。

3. 3 顔料の検出と被覆層の影響に対する予備実験

ドーサ処理した画用和紙に緑青、群青、ベンガラおよび黄土を膠で塗布したサンプル上に、土を載せたものを、漆喰上に並べ、イメージング実験をおこなった（図 5）。

まず焦点距離 1 インチのレンズで観測した結果を図 6 に示す。顔料上の土の影響は若干あるものの、下の漆喰との差は充分検出できる。土の影響は粒度にも依存し、たとえばテラヘルツ領域の波長（ $1 \text{ THz} = 300 \mu\text{m}$ ）とほぼ等しくなると散乱が大きくなり検出が難しくなる。今回の表土は若干荒めで、 $0.6 \text{ THz} \sim 1.5 \text{ THz}$ のみの信号を用いた場合には、表土の影響が大きく現れる。一方 $0.1 \sim 0.5 \text{ THz}$ の場合には、位置分解能は低下するが、土の影響は少なくなる。

次に、西壁女子群像の測定で用いる測定窓を介して、3 インチのレンズで同一のサンプルを測定した。図 7 のように、分解能、感度ともに著しく低下するが、顔料の存在は確認できる。

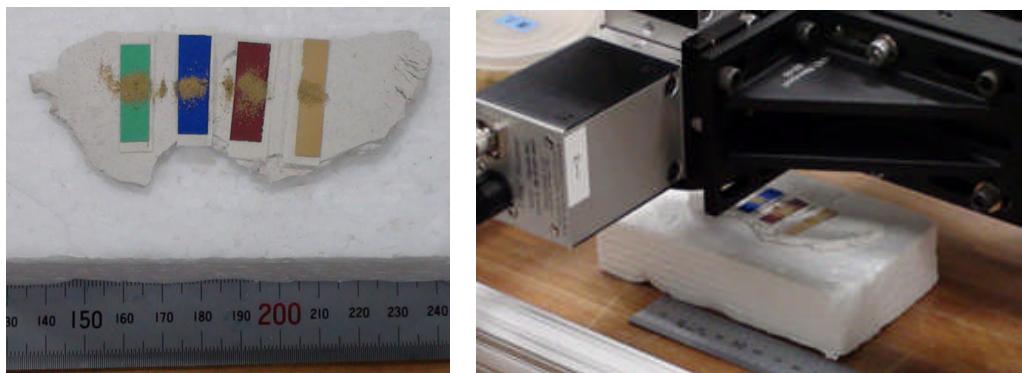


図 5 漆喰、顔料および土が重なり合った状況でのイメージング実験（レンズ焦点：1 インチ）

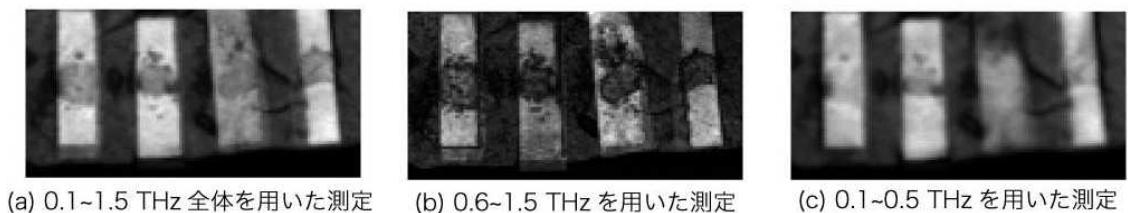


図 6 漆喰、顔料および土が重なり合った状況での THz イメージング

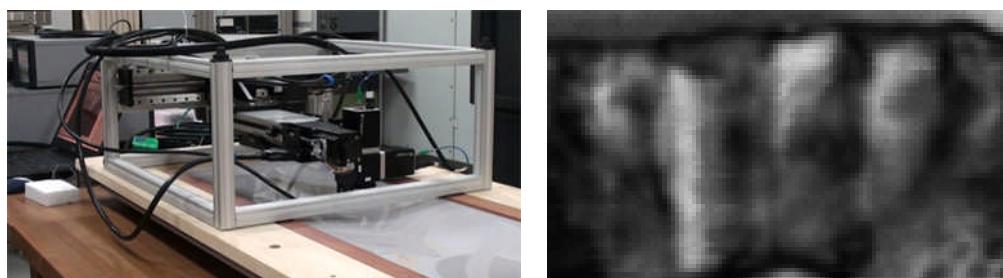


図 7 焦点距離 3 インチのレンズを用いて、「装置用の乗り板」を介しておこなったイメージング

4. 西壁女子群像の THz イメージングによる調査

「装置用の乗り板」に、スキャンフレームを図 8 のように固定し、ケーブル部分が壁画面に影響しないよう、取り回しに注意の上、メインの測定システムは修復用のフレーム外部のワゴン上に配置した（図 9）。測定箇所の変更は、一旦、修復用のフレームごと安全な場所に移動させ、スキャンフレームの位置を変更することでおこなった。

焦点距離 3 インチのレンズを用いて、女子群像の絵として認識できる部分を全て含む領域で、現有のスキャナーの可動範囲 180 mm × 180 mm を 1 フレームとし、9 フレームについてイメージング調査を実施した。まず、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（全体像）を図 10 に示す。可視画像と THz 画像を比べると、中央の袴部分の反射が特に強い。これは炭酸カルシウムの再結晶化が顕著な領域と一致しており、結晶化した炭酸カルシウムによる反射が大きくなったものと推定され、今後、方解石などを用いた確認実験が必要と考えられる。

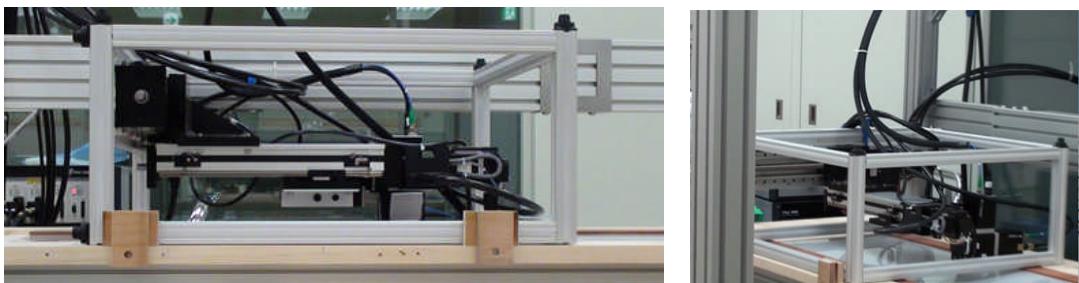


図 8 「装置用の乗り板」上へのスキャンフレーム（装置本体）のセッティング



図 9 制御システム部の配置（ワゴン上）

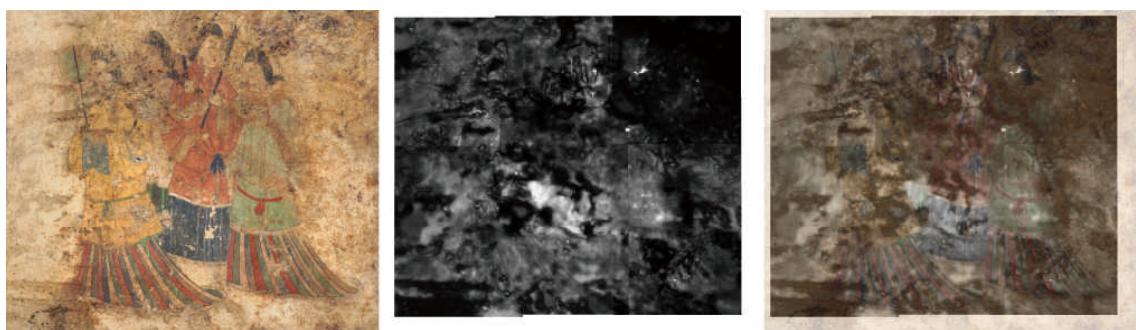


図 10 周波数領域、時間領域とも制限していない信号のパワー積分値でのイメージング結果（全体像）

図 11 に全データを重なり部分を重ねず並べた結果を示す。ここでは各領域での最大最小に応じたイメージとなっている。厳密には出力信号のマトリックスデータに戻り、全体のスケールをあわせる必要がある。ここで、右の 3 フレームは、1mm ステップ、他は 2mm ステップで計測したものである。

断面情報は、各測定点での信号を並べ直すだけで概略は把握できるが、各層での面情報を得るために、出力信号を時間領域で制限し、画像化する。図 12 に手法を示す。

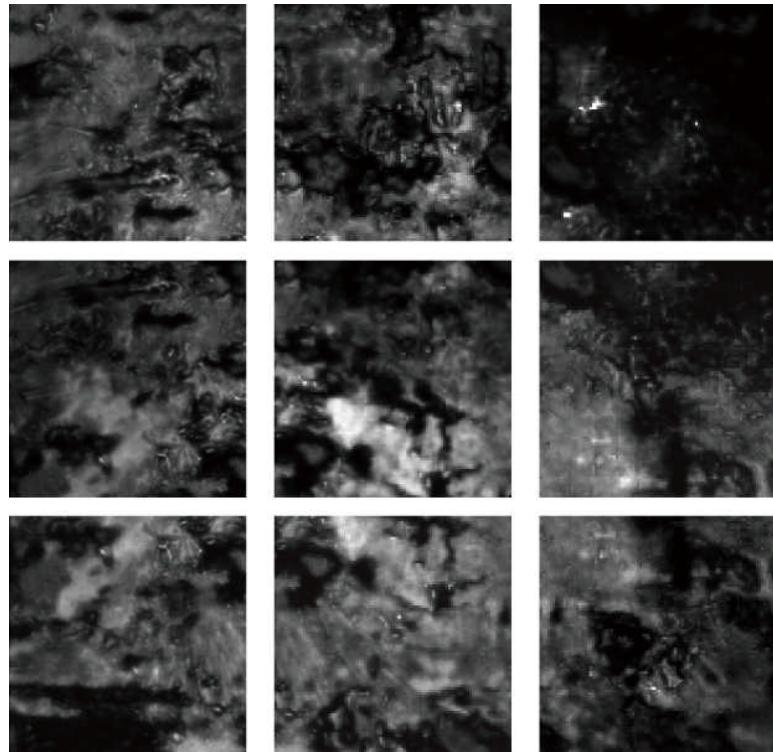


図 11 全データを重なり部分を重ねず並べた結果

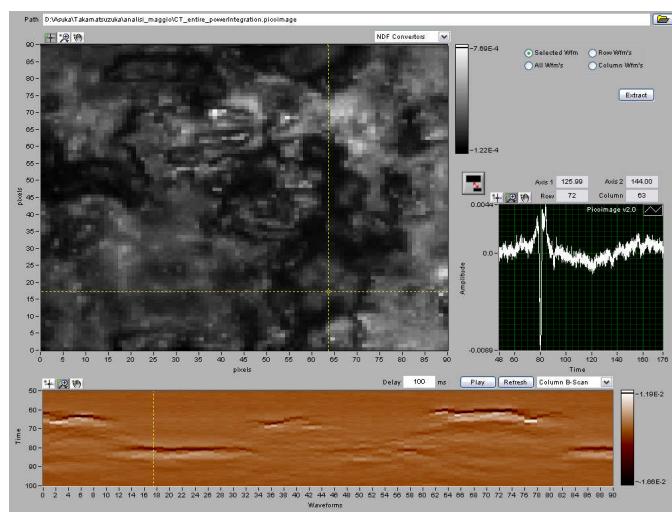


図 12 時間領域分光法による画像の再解析

画面は、中央上部のデータで（注：ここで THz のイメージは 90 度回転している）、黄点線の交点での出力波形が右横のグラフで、下の断面は、縦の黄点線に沿った断面である。ここはちょうど凝灰岩が露出している部分で、断面のイメージからも、表面から 20~30 ps (3~4 mm 程度) から強く反射していることがわかる。実際の出力波形でも、表面が欠損しているため、凝灰岩からより先の信号は現れていない。この波形での時間だけに制限して、測定データを描画したものを図 13 に示す。これが凝灰岩の露出した部分のマップとなっている。

可視画像と、表面、中央部、凝灰岩表面からの信号による画像の比較を図 14 に示す。表面での反射が強い部分は、下部まで THz 波が充分到達しないため、情報が失われる可能性が高い。

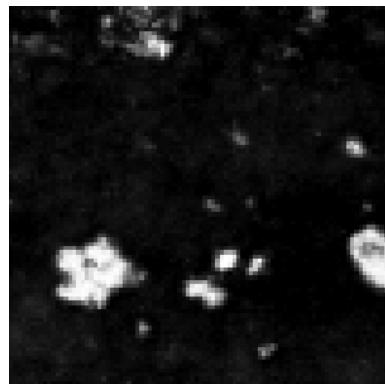


図 13 凝灰岩が露出した部分の時間領域分光法によるイメージ

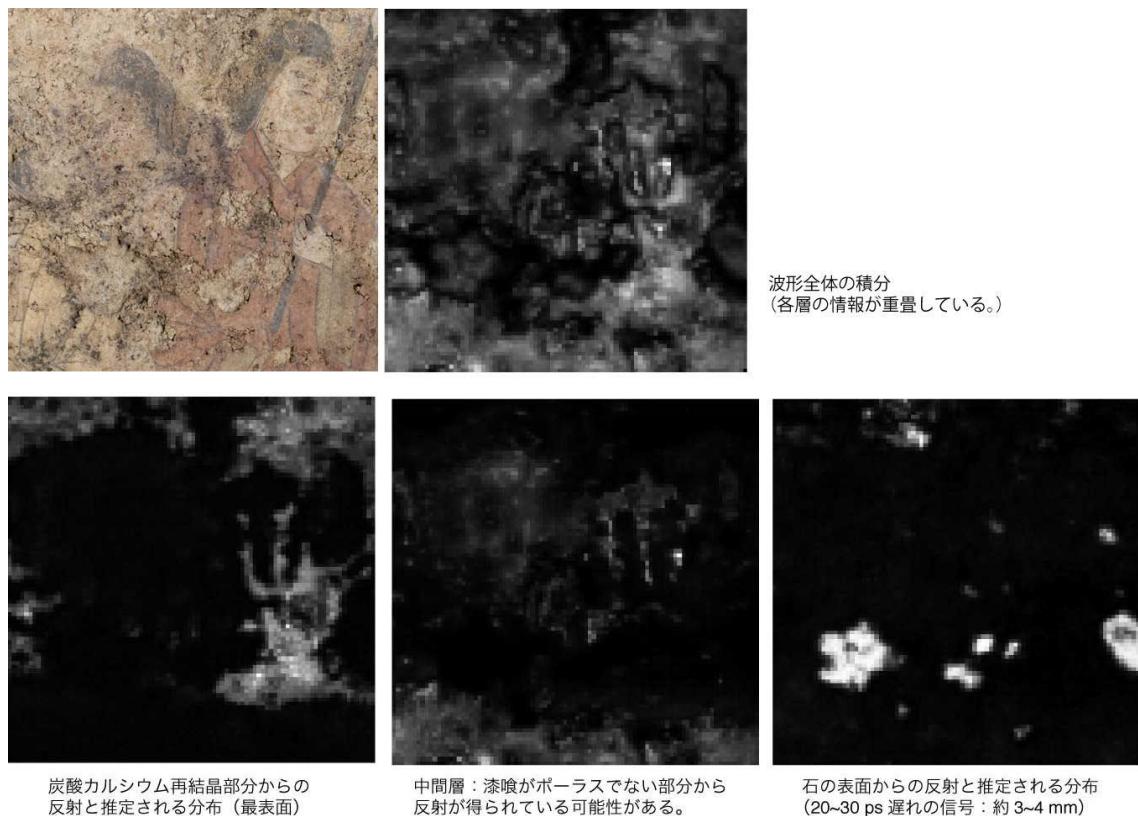


図 14 表面、中央部および凝灰岩表面からの信号による画像の比較

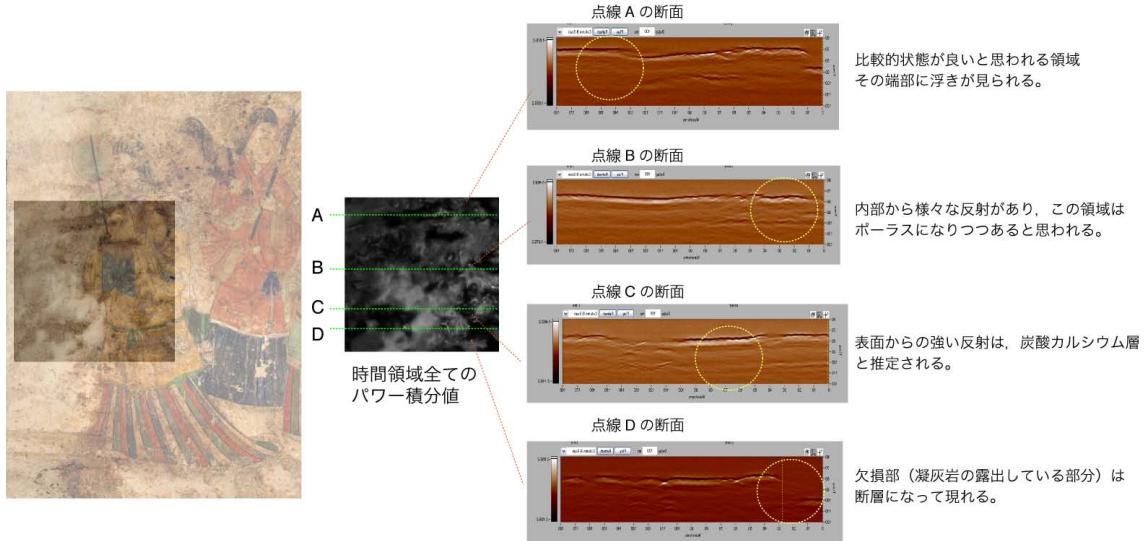
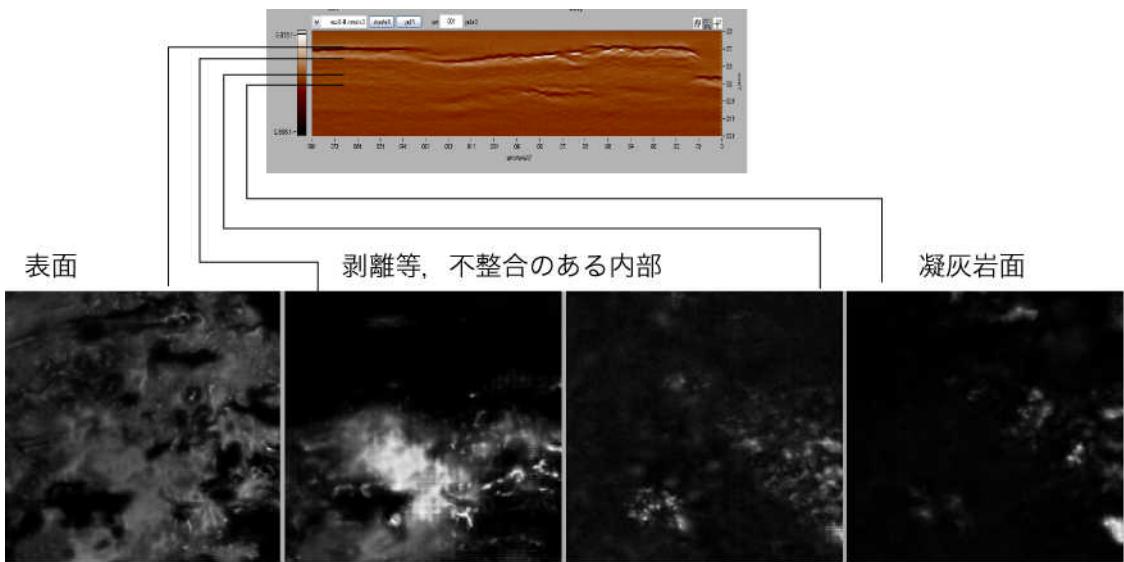


図 15 画面向かって左側中央部のデータをもとにした断面図



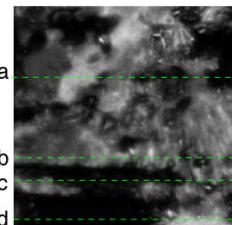
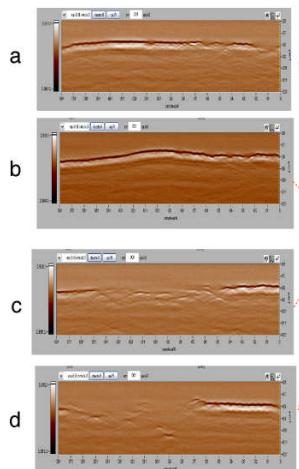
[表面から内部へ、約 1mm 間隔でのスライス面を非破壊で観測]

図 16 各層の面情報

次に断面画像について考察した一例を紹介する。図 15 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 16 は各層の面情報である。

比較的状態の良いと思われる面は、図 17 のように層構造に乱れないと思われるが、さらなる検討が必要である。図 18 に、今回測定した領域で最も反射の強かった部分を取り上げる。各断面情報で、表面と凝灰岩面の両方から反射波が得られる箇所が見られた。これは漆喰層がポーラスではなく（散乱体になっていない）、凝灰岩面上からの反射（例えば空気層の存在）が得られる場合が考えられる。

比較的良好な状態と思われる箇所 (a, b)



a
b
c
d
大きな傷でえぐられている
箇所 (c, d)

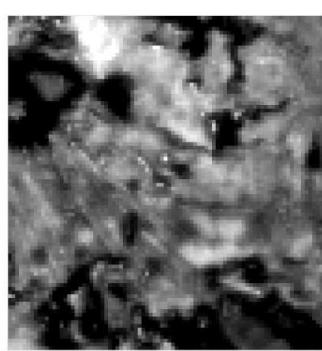


図 17 比較的良好な状態と思われる部分の断面情報

(a) 可視画像



(b) THz 全反射波のパワー積分画像



(c) 可視、THz の重畠画像



*2日目は、修復施設内で、測定箇所を記録しながら分析した

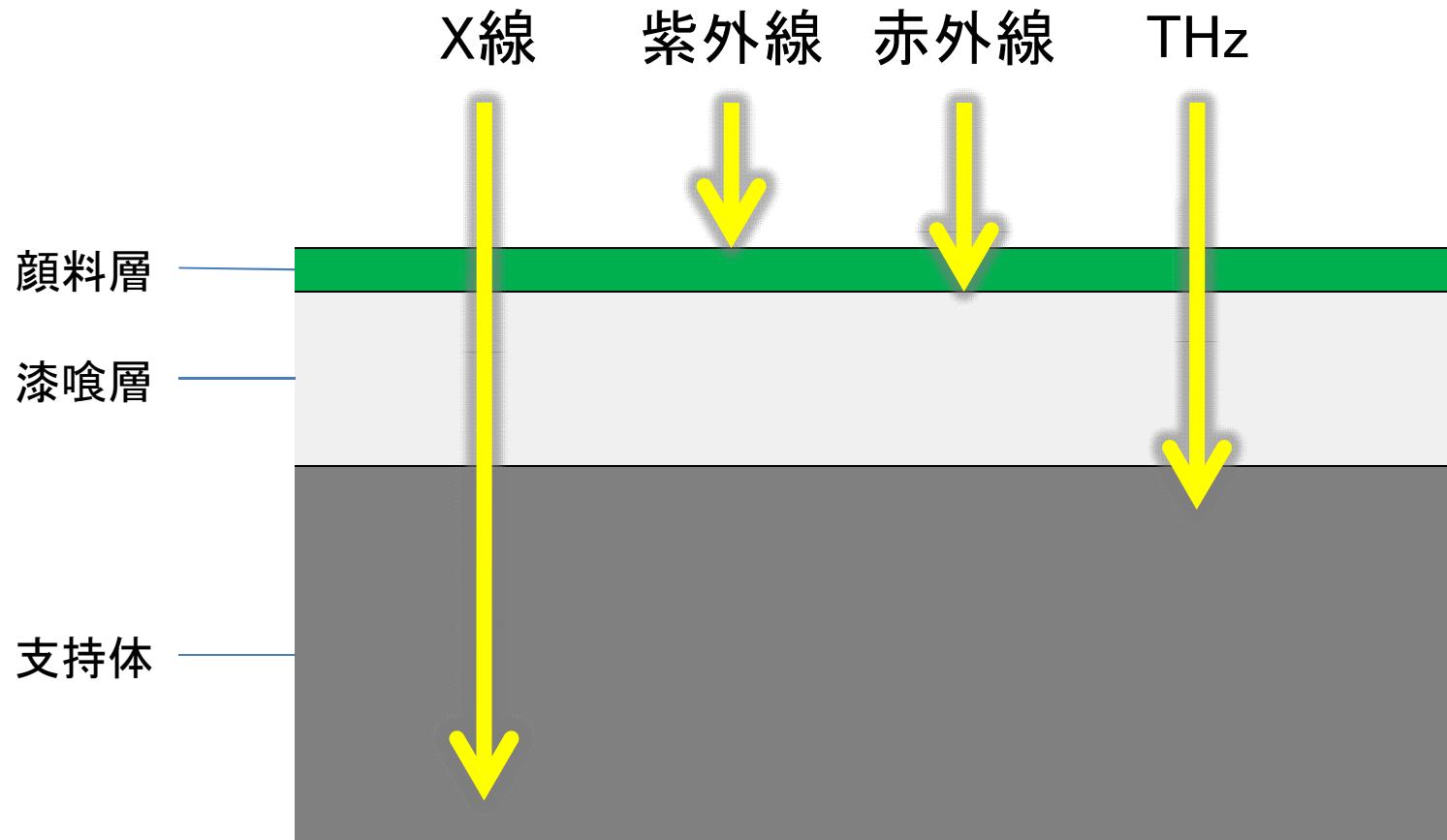
図 18 最も反射の強かった部分の THz イメージング



テラヘルツ分光・イメージングによる 漆喰の状態調査

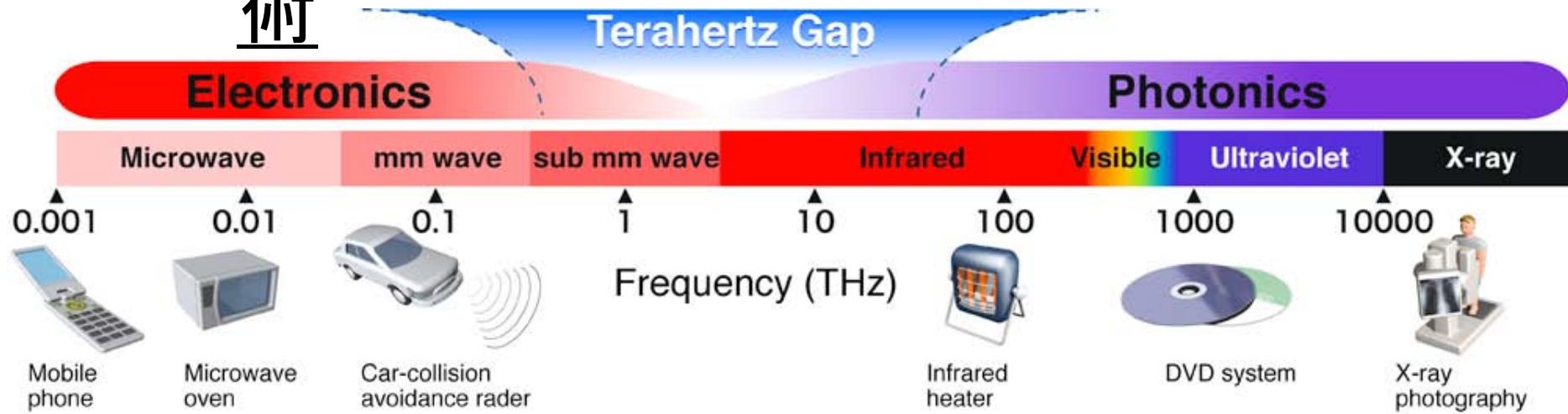
奈良文化財研究所 高妻 洋成
情報通信研究機構 福永 香

漆喰壁画



古墳壁画を保存修復する際には漆喰層と支持体(石材)についてもその状態を把握し、必要に応じて対策を講じる必要がある。

テラヘルツ分光・イメージング技術



THz帯の電磁波は、電波のように不透明な物質にも透過し、物質固有の吸収スペクトルを得ることができる。



分光分析(材質同定)

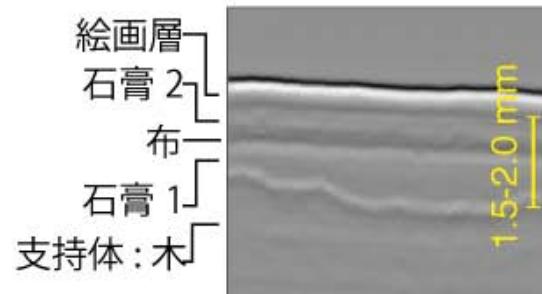
イメージング(内部構造調査)

Giotto作テンペラ画(Uffizi美術館所蔵)のTHzイメージング

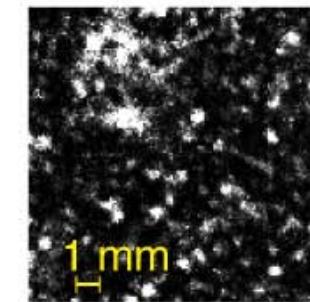
(a) 表面付近の反射イメージ



(b) 断面構造



(c) 布層の面方向イメージ



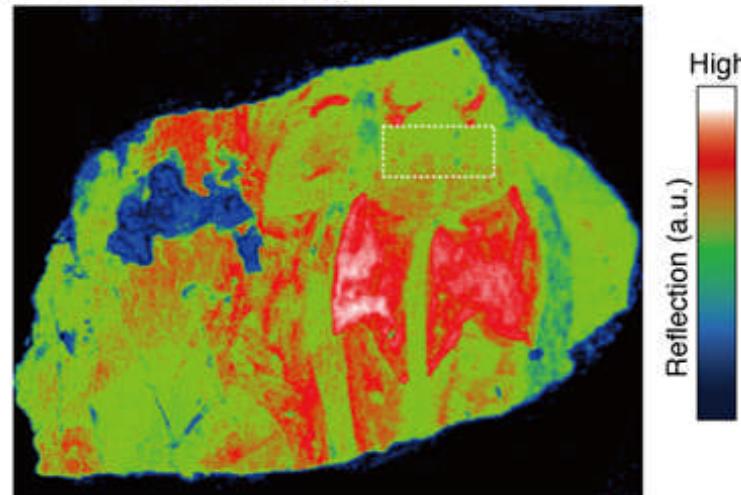
分解能
(0.1 mm/pixel)

大召寺(内モンゴル自治区)壁画片のTHzイメージング

(a) Visible image



(b) THz reflection image



THzイメージングによる古墳壁画測定のための技術的検討

- ・安全性の確保

- 「装置用乗り板」の作製

- 測定窓の材質と強度等の検討

- 壁画と測定装置の距離

- ・透過漆喰層の厚み

- 5 mm厚の漆喰層をTHzは透過するか？

- ・被覆土の粒度と厚み

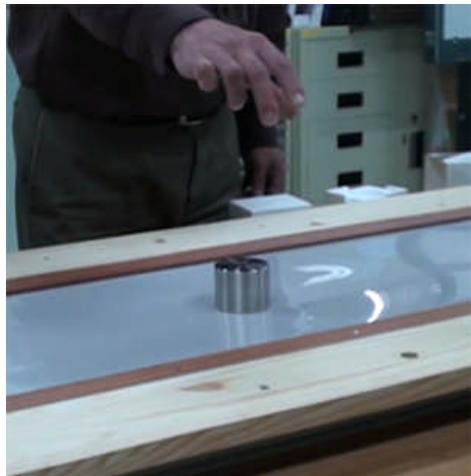
- 粒度の違いでTHzの透過性は異なるか？

- どのくらいの厚みまでTHzは透過するか？

安全性の確保



「装置用乗り板」の作製

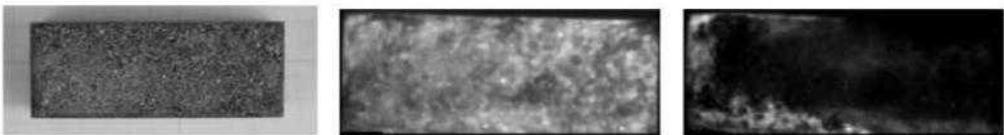


測定窓には、センサユニットが落下した時のこと考慮して、高強度のポリエチレンシートをはめている。1kgの錘を落としてみたところ、そのたわみは最大で1cmであった。

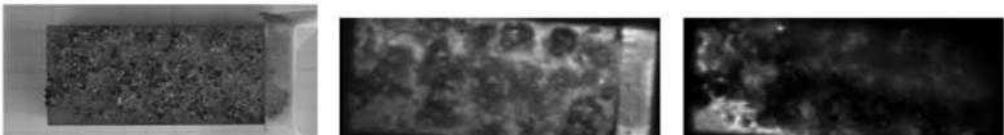
壁画と測定装置の距離はレンズの焦点距離にも依存する。現在、焦点距離が1インチと3インチのレンズがあるが、今回はより安全性を重視して3インチを使用。「装置用乗り板」を改良することで1インチのレンズも使用可能である。

被覆土の粒度と厚み

土：粒径840–177 μm —厚さ2 mm



土：粒径177–37 μm —厚さ2 mm



土：粒径37 μm 以下—厚さ2 mm



土：粒径37 μm 以下—厚さ5 mm



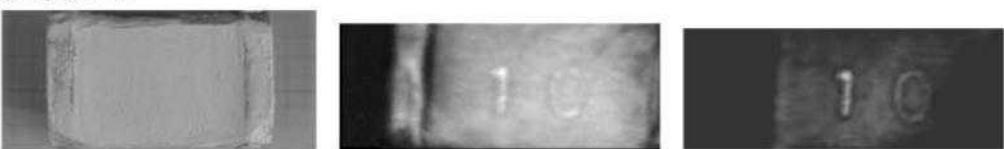
漆喰：厚さ1 mm



漆喰：厚さ3 mm



漆喰：厚さ5 mm

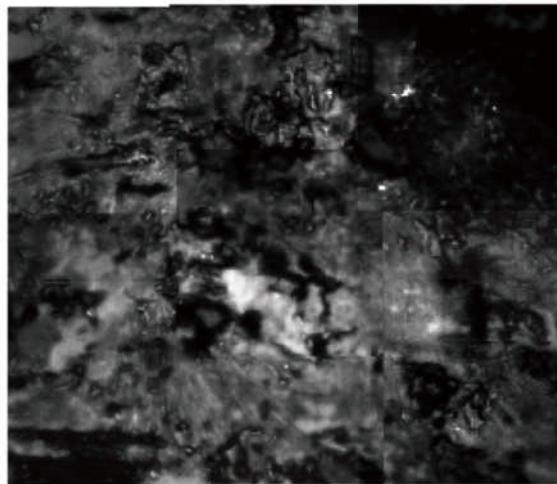


透過漆喰層の厚み



THz分光イメージングによる西壁女子群像の下地漆喰の状態調査

-1

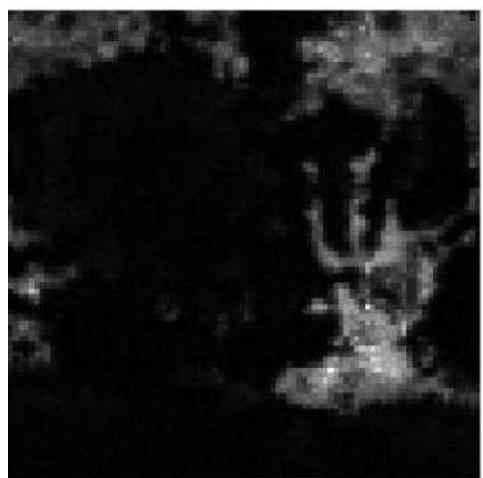
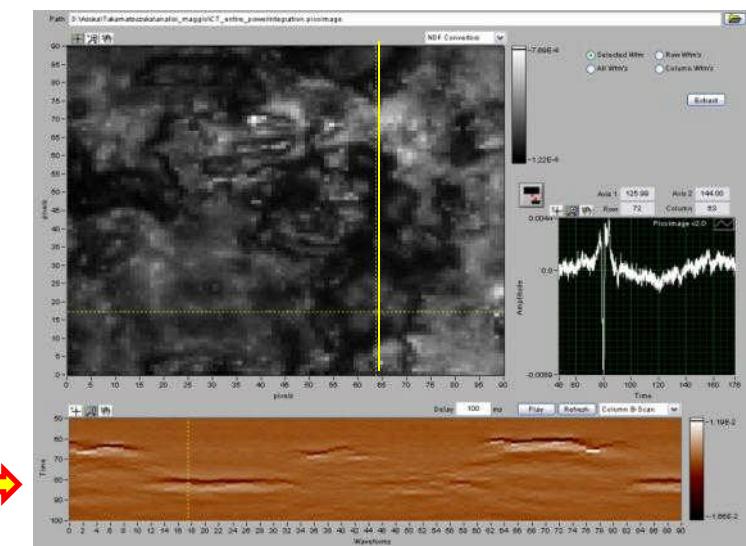
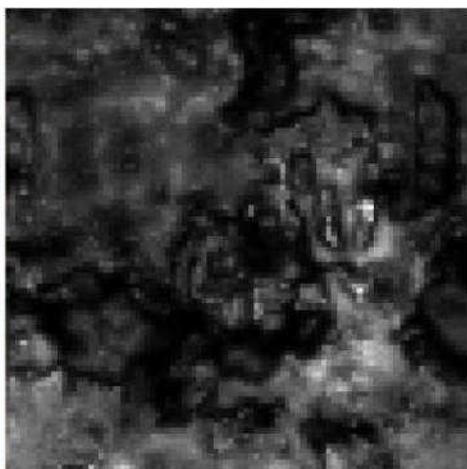


周波数領域、時間領域とも制限していない信号のパワー積分値でのイメージング結果(全体像)

可視画像とTHz画像を比べると、中央の袴部分の反射が特に強い。これは炭酸カルシウムの再結晶化が顕著な領域と一致している。

THz分光イメージングによる西壁女子群像の下地漆喰の状態調査 -2

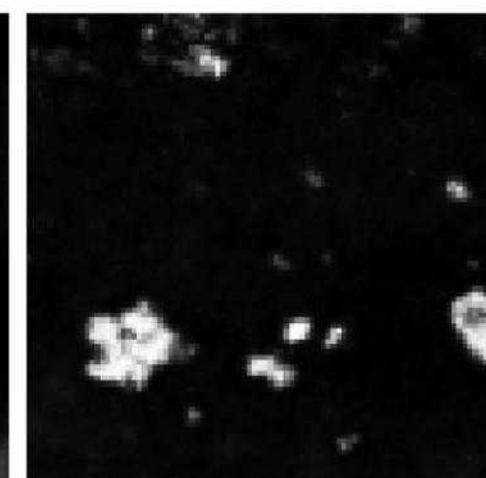
時間領域分光法によるトモグラフィ



炭酸カルシウム再結晶部分からの反射と推定される分布（最表面）



中間層：漆喰がポーラスでない部分から反射が得られている可能性がある。



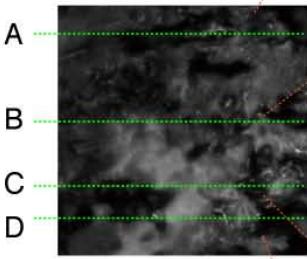
石の表面からの反射と推定される分布
(20~30 ps 遅い信号：約 3~4 mm)



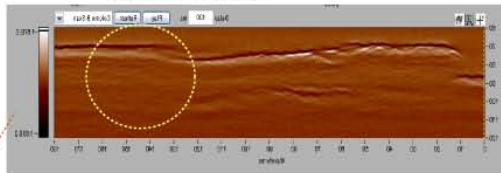
THz分光イメージングによる西壁女子群像の下地漆喰の状態調査 -3



時間領域全ての
パワー積分値

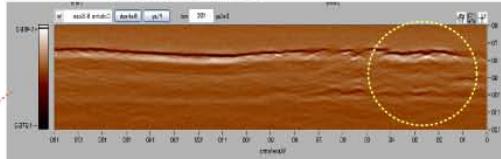


点線 A の断面



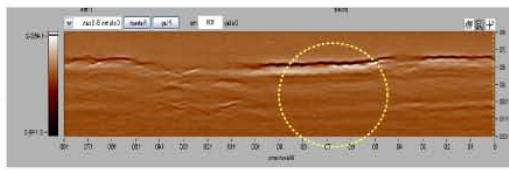
比較的状態が良いと思われる領域
その端部に浮きが見られる。

点線 B の断面



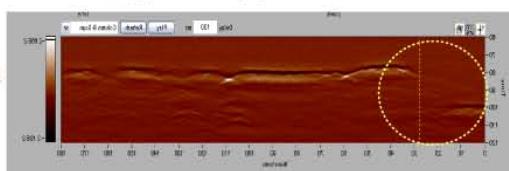
内部から様々な反射があり、この領域は
ポーラスになりつつあると思われる。

点線 C の断面



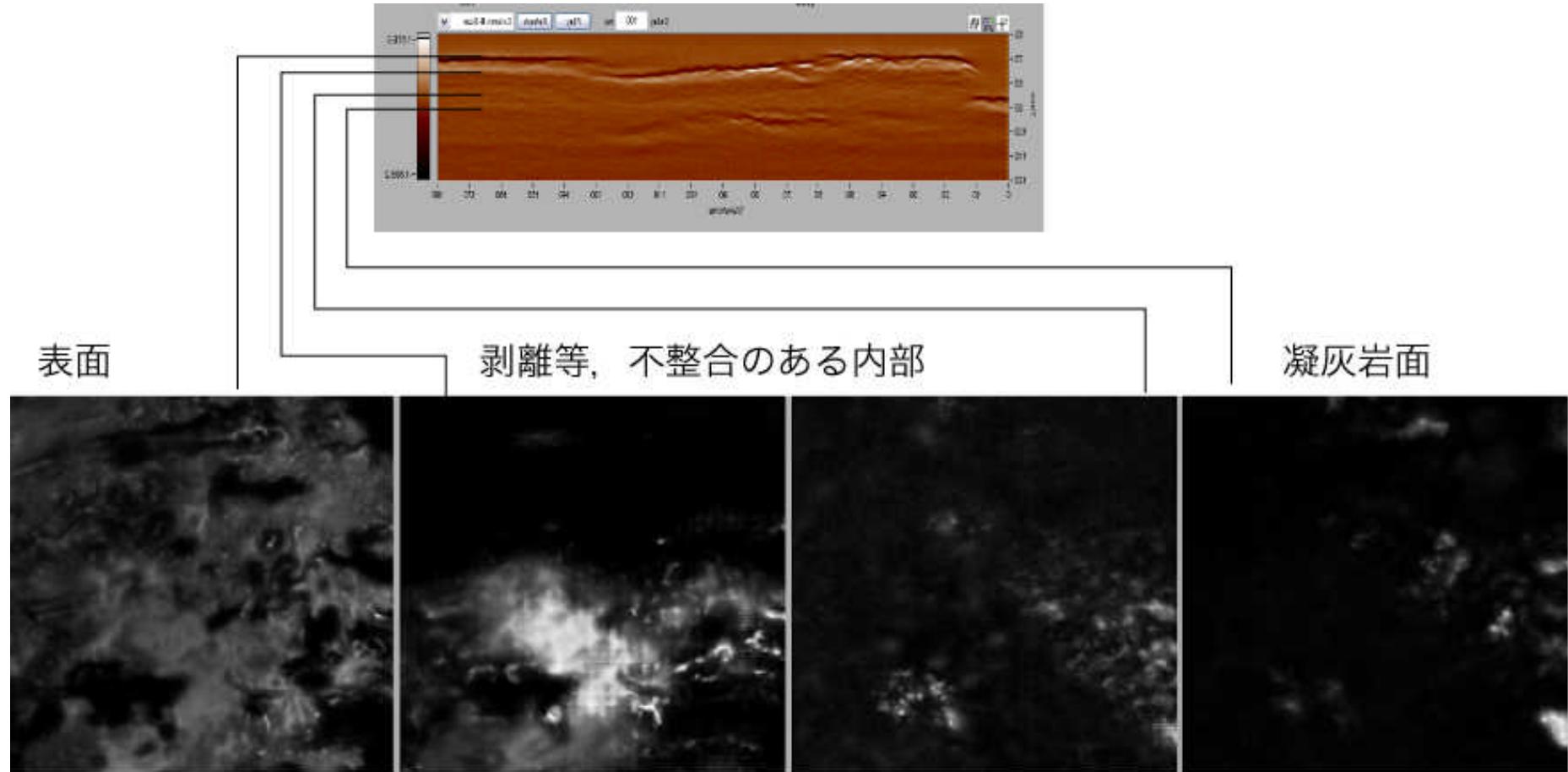
表面からの強い反射は、炭酸カルシウム層
と推定される。

点線 D の断面



欠損部（凝灰岩の露出している部分）は
断層になって現れる。

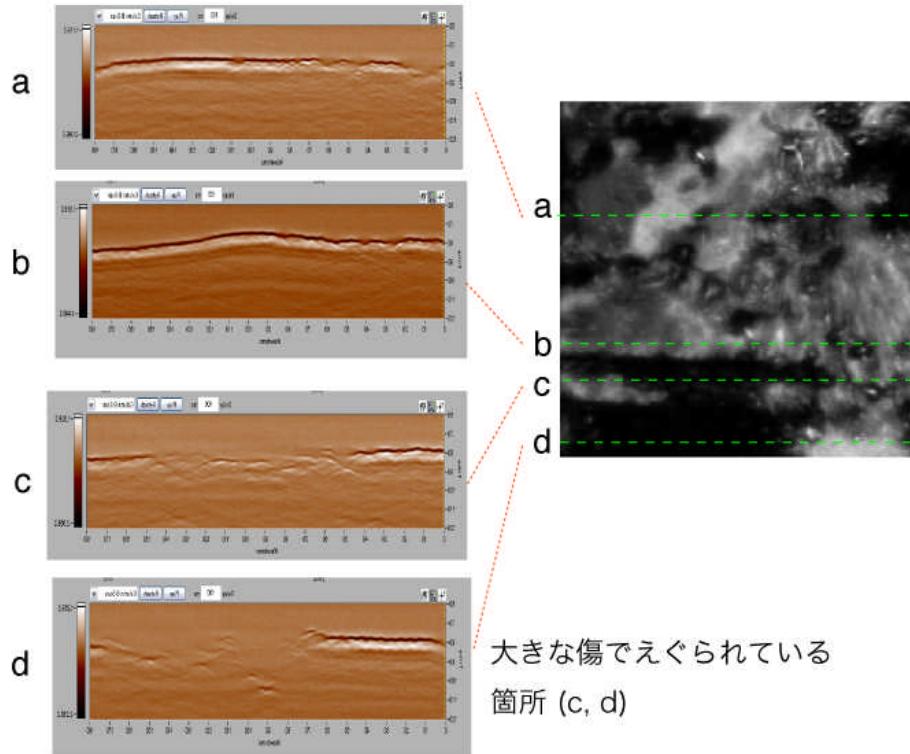
THz分光イメージングによる西壁女子群像の下地漆喰の状態調査 -4



[表面から内部へ、約 1mm 間隔でのスライス面を非破壊で観測]

THz分光イメージングによる西壁女子群像の下地漆喰の状態調査 -5

比較的良い状態と思われる箇所 (a, b)

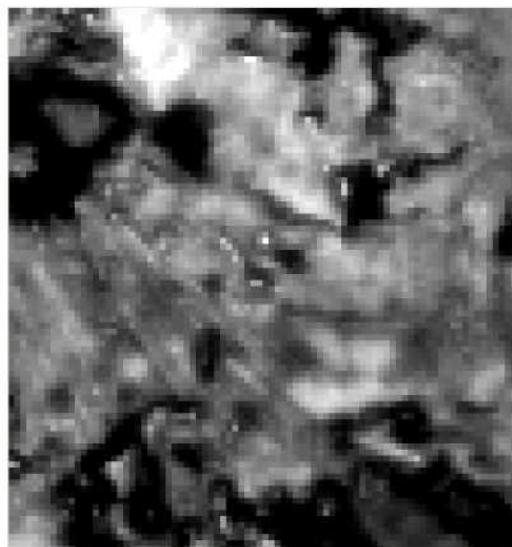


THz分光イメージングによる西壁女子群像の下地漆喰の状態調査 -6

(a) 可視画像



(b) THz 全反射波のパワー積分画像



(c) 可視, THz の重畠画像

