

# 中央アジア・バーミヤーン 仏教壁画の分析(1)

シンクロトロン放射光を用いた  
SR- $\mu$ FTIR, SR- $\mu$ XRF/ SR- $\mu$ XRD分析

Constituent Material Analysis of the Bamiyan Buddhist Wall Paintings  
in Central Asia (1) : Using Synchrotron-based  $\mu$ FTIR,  $\mu$ XRF/ $\mu$ XRD Analyses

谷口陽子

TANIGUCHI Yoko

はじめに

- ① 彩色研究の課題と現状
- ② 西のフレスコ, 東のセッコ技法
- ③ 中央アジア壁画の技法研究の背景
- ④ シンクロトロン放射光を用いた分析
- ⑤ 分析の結果
- ⑥ バーミヤーンからみた油彩技法の起源と展開

まとめ

## 【論文要旨】

5世紀初頭から9世紀末まで仏教が栄えたバーミヤーン遺跡には、50窟の石窟に壁画が残されている。東の中国、西のイランおよび地中海世界、南のインドと北の遊牧文化、オアシス世界等さまざまな地域との交流の影響の痕跡が残されており、壁画にもその間に技法的、材料的な変容があったと考えられる。本稿では、ESRF（欧州シンクロトロン放射光施設）との共同研究として行っている、バーミヤーン仏教壁画の製作技法・彩色材料および劣化機構に関する顕微レベルの有機/無機物質の分析から得られた基礎的データのうち、油彩技法にかかわる3つの事例から得られた結果を提示するとともに、バーミヤーン遺跡における仏教壁画群の材質と技法について、広く東西文化交流の視点から考察を試みた。微小領域に絞ったビームでも高いS/N値が得られる放射光を用いたSR- $\mu$ XRF, SR- $\mu$ XRDの同時分析, SR- $\mu$ FTIR分析を組み合わせることによって、複数の数 $\mu$ m厚の彩色層を重層的に持つ壁画試料を、層毎に分析することを可能とした。とくに、同じ個所をSR- $\mu$ XRF/ SR- $\mu$ XRDによって同時測定することにより、層中の個々の顔料粒子の同定ができるところが、彩色文化遺産の研究において極めて有効性が高い特徴であった。

バーミヤーン仏教壁画は、練り土壁に有機物質を膠着材とした絵具を重層的に塗り重ねて描く技法で描かれており、7世紀半ばからは、鉛白を白色下地とし、層ごとに油、樹脂、タンパク質、多糖類など異なる様々な有機物を含む一群が存在することが明らかになった。これは、現時点では最古の油彩技法の事例と位置付けられる。彩色層に含まれる乾性油の一部は、鉛石鹸へ変性していることも確認された。また、色付けをしたスズ箔の使用や鉛白、鉛丹など人造の無機顔料の利用とも関連させて解釈すると、地中海世界のメッカ技法や正倉院にも伝わる密陀絵とも関わる彩色技法が想起され、広く東西交流の視点から検討すべき技法であることが明らかとなった。

【キーワード】 彩色材料, 重層構造, SR- $\mu$ FTIR, SR- $\mu$ XRF/SR- $\mu$ XRD, イメージング

## はじめに

シンクロトロンで高いエネルギーを与えられた荷電粒子を、円軌道で加速しながら周回させると、連続スペクトルを持つ極めて輝度の高い放射光を得ることができる。これを、シンクロトロン放射光と呼ぶ。このような高エネルギーX線を線源とするシンクロトロン放射光を用いた文化遺産の測定は、およそ10年前から事例が増加している。日本では、中井らがSPring-8のシンクロトロン放射光を用いた蛍光X線分析(SR-XRF)を試み、非破壊で微量元素、希土類が検出できることから、地質学や考古学分野でも有効であることを示したのが最も早い例だろう[Nakai et al 2001]。

他にも、遺跡から出土した絹繊維やその劣化機構の解明のための測定例[奥山 他 2010]や、エジプトのファイアンスの測定例[吉田・山花 2006]も見られる。

シンクロトロン放射光は、加速されている軌道の接線方向に光が集中し、著しく指向性の高い強力な光となることが特徴である。シンクロトロン放射光を用いた分析の利点は、例えば、従来の蛍光X線と比較すると、飛躍的に高感度の微量元素分析、微小領域分析が可能になることである。シンクロトロン放射光は、直線偏光特性をもっているために、バックグラウンドとなる散乱X線を大幅に抑制することができる。また、放射光は連続スペクトルをもっているため、求めるエネルギー(波長の)X線を自由に選択することができ、その結果、求める分析元素の励起効率を最も良くすることが可能になる。つまり、微小領域に絞ったビームでも高いS/N値が得られるため、絵画や壁画のような数 $\mu\text{m}$ 厚の彩色層を複数持つ微小試料を高精度、高感度で分析するために極めて有効である[Cotte et al 2010]。このような事例として、中世スペインの絵画の顔料と膠着材の分析を行った分析[Cotte et al 2008]をはじめ、本稿で報告する一連のアフガニスタン・バーミヤーン石窟に描かれた仏教壁画群の分析等がある[谷口 他 2007; 谷口・コット 2008a; Cotte et al 2009]。

シンクロトロン放射光を用いたX線回折(SR-XRD)、フーリエ変換型赤外分光分析(SR-FTIR)も利用可能であるため、これらの分析手法を組み合わせることによって、さまざまな無機/有機物質、非晶質/結晶質の物質、主成分、微量成分、経年による変性、数 $\mu\text{m}$ の層からなる重層構造といったように、複雑な状態から成り立つ彩色文化遺産の分析に大変有効であるといえる。微小領域のイメージング分析も可能であるため、物質の元素分析、分子構造、結晶解析とその分布をみることも優れている。

本稿では、ESRF(欧州シンクロトロン放射光施設)との共同研究として行っている、バーミヤーン仏教壁画の製作技法、彩色材料および劣化機構に関する顕微レベルの有機・無機物質の分析から得られた基礎的データのうち、油彩技法にかかわる3つの事例から得られた結果を提示するとともに、バーミヤーン遺跡における仏教壁画群の材質と技法について、広く東西文化交渉の視点から考察を試みたい。

なお、本稿で報告する研究内容は、2003年～2007年にアフガニスタン情報文化省と東京文化財研究所、奈良文化財研究所が行った「バーミヤーン遺跡保存事業」の調査[山内(責任編集)2005; 2006b, 山内(編集)2006c]のうち、とくに壁画の保存修復の枠組みで実施した調査とその成果に基づいている。

## ①……………彩色研究の課題と現状

彩色とは、色でモノを彩ることであり、その際に使用する「絵具」は絵画材料の代表的なものである。絵具とは、色の粒子である顔料と接着効果のある、おもに有機物質である膠着材を合わせ練ったものである。色を用いて、ある面（壁もしくは、キャンバスや板といった支持体）に何かを描くためには、絵具に対する知識と経験が不可欠である。例えば、「色」の主体となる顔料とは、それぞれ特有の色を備えた粉末であり、天然の鉱物や、ある種の土、人工的に合成した金属塩、有機染料などさまざまな物質からなる。オーカーや辰砂（水銀朱）など様々な色の砂や石から作られる無機顔料と、茜、臙脂、藍やガンボージなどの動植物を原料とする有機顔料に大別される。

無機顔料の中には、岩群青や辰砂といった天然の鉱物を砕いて有色の粉末を得る天然の無機顔料が良く知られているが、とくに、青や緑、黄色など鮮やかな深い色を備えた鉱物は貴重で、入手することは非常に困難なことであったと想定される。キプロスの緑土や、アフガニスタンのバタフシャーン地方、コクチャ川流域のラピスラズリのように、ある地域でのみしか産出しないという希少性が顔料の価値を高めていたこともあった。どの地域からはどのような色が入手できるか、あるいは、何と何を混ぜればどんな人工的な顔料が合成できるのかといった知恵や錬金術師的な技術については、遡ってローマ時代に、既に記録が残されていることから、古代エジプト、ギリシア、ローマ時代の画工たちにとって、極めて関心の高いことがらであったろうことが想像される。そのため、数多くの天然鉱物以外にも、その代わりとして無機・有機合成顔料が使用されてきた（表1）。

例えば、ウィトルウィウスや大プリニウスは、ロードスにおいて、鉛の塊に酢をかけて桶を閉じておくことにより鉛を化学的に反応させて白色の粉末である鉛白（プシミティウム）が製造されていること、それをさらに燃焼して赤色の粉末である鉛丹を製造する方法や、鉛の代わりに銅を入れることによって緑色のヴェルディグリ（酢酸銅）を製造する方法について述べている [Caley・Richards 1956；プリニウス 1986；Vitruvius 1999]。また、入手の困難な有色の天然鉱物を模して人造の青色ガラスを作り、それを砕くことによって青い粉末としたハンプルー（漢ブルー）やエジプト青という顔料として利用したり、また、鮮やかな赤色を呈す貴重な天然の辰砂（水銀朱）を利用する代わりに、硫黄と水銀を加熱することで人工的なヴァーミリオン（水銀朱）を生み出したりしてきた。さらに、顔料は、ある種の顔料と混ぜたときに、化学的な相性が悪いために変色してしまったり、屈折率など光学的な問題から効果的な色が得られなかったりすることがある。したがって、画工には、顔料の物質の性質に関する知識と経験も重要であった。

このような、天然鉱物を用いたり、金属やガラスを人工的に有色の物質に変化させたりして使用する無機合成顔料がある一方で、動植物由来の有機顔料も、広く利用されてきたことが良く知られている。有機顔料は、コチニール、サフラン、茜などレーキ顔料として知られるような動植物由来の有色の染液を、体質顔料（無機基質：カルサイトやアルミナなど）に沈着させて得られる不溶性の有機金属の複合体である。その抽出や精製方法、さらには固着させる物質によって、さまざまな色が作り出され、絵画、工芸品や染織品に利用されてきた。しかしながら、アジアにおいては、顔料といえば数種の天然の無機顔料ばかりが目立され、実際には遥か古くから利用されてきた人造の

無機顔料や有機顔料に関する研究は限られていた。

顔料を絵具として使用するためには、次に、それを画面の上に固定するための接着剤、すなわち、膠着材(バインダー、展色剤、媒剤)が必要である(表2)。石灰モルタルが空気中の二酸化炭素によって炭酸塩化する現象を利用して、その結果生じる石灰石を膠着材とするブオン・フレスコ技法や、水溶性のアラビアゴムを膠着材として使用する水彩技法、卵や動物膠、カゼインなどタンパク質を利用するテンペラ技法、蜜蝋を用いる蜜蝋画技法(エンカウスティック)、空気と触れることにより酸化重合が起こり、乾燥する種類の油(乾性油)を用いる油彩技法などに分類することができる。鉱物や合成金属塩、土系物質など無機顔料を多用し、動物膠を膠着材として紙や絹の上に彩色する、いわゆる「日本画」なども、広義においてテンペラ技法に分類される。

絵具は、顔料と膠着材の屈折率の関係や、彩色塗膜の厚みの均一さなどによる発色や色相の違いを考慮して作られており、絵具中に、各種の添加物や、白色粒子からなる体質顔料(無機基質)などを加えることもある。また、例えば赤色といってもさまざまな色相をもつ赤を重ねて塗ったり、混ぜたりすることによって、多様な赤色を作り出すことができる。求める色相や、画工が採用している絵画技法に基づいて、最適な絵具が調整されて初めて画工の「パレット」が完成するものといえる。つまり、彩色とは、顔料とそれをつなぐ膠着材、さまざまな添加物、塗り方、といった複雑な技法・技術によって作り出されるものといえる。

壁画の技法材料に関する先行研究は、とくに、アジア地域のものについては、その殆どが彩色の顔料に関するものである。なかでも、鉱物顔料を主とした無機顔料に関する元素分析に関しては多くの事例報告があるものの、多様な有機色料や膠着材、有機金属塩、グレーズ、緩衝層、サイジング(目止め、すなわち絵具が壁にしみ込まないようにし、筆すべりを良くするための準備層)といった有機物質に関する調査例については、分析の技術的な難しさから極めて少ない。そのため、絵画の製作技術を論じるために必要な当時の画工集団のパレットについては、十分な研究と解釈がなされていないのが現状である。

したがって、無機顔料の同定だけではなく、さまざまな有機物質の分析を始めとして、絵具と支持体との関係、顔料粒子の状態、膠着材との関係、層構造の解析、彩色に用いた道具や描く順序、劣化の状態などを包括的に調査することにより、はじめて彩色の技法や技術を明らかにすることができるといえよう。

我が国では、明治時代以降に作られた「伝統的」概念により、絵画における膠着材とはすなわち膠だと考えられてきた経緯がある。したがって、膠着材の分析に関する関心が比較的低かったため、分析事例が非常に限定されていた。膠着材の殆どが有機物質であるゆえに、技術的に理化学的分析が困難であったことも大きな要因であると思われる。しかし、近年では、分析手法の進展とともに、研究事例も格段に増加し、絵画の技法や材料に関する研究は、この10年あまりで大きく進んでいる。それは、とくに有機物質など微小試料を分析することができる機器を文化遺産の調査に応用する機会が増えたこと、無機物質についても、微小領域を高精度に分析する手法が応用され始めたことによるといえる。

そういった分析手法が、彩色文化財の調査に応用されはじめた背景には、例えば、欧州連合が国境を越え、さまざまな学術研究のための複合領域的な調査母体を形成し、広く物理、化学、生物と

いった、より専門的な研究組織との連携を深めて文化遺産のための分析化学的な調査を実施していることがあるように思われる。また、さまざまな分析機器や、マルチスペクトルイメージングなど光学的な調査法の進展に負うことにより、資料に触らず、簡便に、しかも、速やかにたくさんの箇所を調査することができる非接触（Non-invasive）な調査法が主流になってきたこととも関係があるだろう。

しかし、精度が高まったとはいえ非接触分析法では、得ることのできるデータには方法論的な限界もあるため、場合によっては、微小試料を用いた分析の併用も必要である。わずかに数 $\mu\text{g}$ といえども、そういった微小試料を用いた分析がもたらしてくれる情報量は莫大である。

とくに、優れた発色や色の深みを得るための、色の塗り重ねや、顔料粒子の調整の技術については、表面からの非接触的な元素分析だけでは得ることが難しい情報である。微小試料の分析から、そういった顔料の化学的、物理的特性や、劣化の程度、有機物質、屈折率など光学的な特徴、層の塗り重ねや顔料の調整の方法など、実にさまざまな情報を引き出すことができる。したがって、非接触的な手法と微小試料を用いた手法の両方の分析手法の併用こそが、文化遺産の研究手法の基本として必要であろうと考える。

例えば、キジル千仏洞やベゼクリク千仏洞の壁画を現在見ると、鮮やかなラピスラズリの青色と、アタカマイトの緑色、強い「くまどり」のようなこげ茶色と白色の絵画であるような印象を受ける。しかし、絵画の調査や分析から、実際には殆どの黄色が変褪色し、赤色が暗色化しているために、変色が少ない部分、すなわち、青／緑／暗褐色／白といった色の組み合わせが、現在目にみえるだけであることが明らかになっている。つまり、化学的に安定な無機顔料は現在でも比較的良好に残っているが、不安定な無機顔料や多くの有機物質は、経年とともに変褪色しているために、表面を観察しただけでは本来の色を再現することが困難なのである。しかし、最近の科学技術を駆使して、有機物質の存在や変褪色してしまったある種の無機顔料が確認されることによって、もともとは鮮やかな黄色や赤色で描かれていたことがわかってきた。

このように、今見える色彩の姿は、本来、キジル千仏洞を描いた画工たちが意図したものではない。同じように、バーミヤーン遺跡のN(a)窟の壁画でも、一見、赤色ばかり目立つ千仏図像のようにみえるが、実際には、キジル千仏洞のように、黄色は変褪色したものであり、緑色は暗色化した結果によるものであることがわかってきた。バーミヤーン遺跡では変色しにくかった赤色が使用され、キジル千仏洞では変色しやすい赤色が使用されただけに過ぎない。それは、色彩の残りが良いと言われている敦煌莫高窟 285 窟でも同様である。さまざまな有機物質やヒ素化合物の痕跡が存在していることから、現在観察される色よりさらに大きなバリエーションを持つ彩色が施されていたことが明らかになりつつある [高林 他 2007]。このように、現在では、さまざまな技術を用いて分析を行うことにより、もともと、どのように意図されて鮮やかに彩色が施されたのかということ、詳しくなすることが可能になってきている。

欧米以外の地域においては、最近まで無機顔料の分析に比較的重点がおかれていたため、有機顔料や膠着材を同定することはなかなか難しい状況にあった。しかし、近年の研究から、天然の鉱物を砕いて粉にしたものだけが顔料であり、膠液に溶いて絵を描くことだけがアジアの絵画の源流ではないことが、徐々に明らかになってきている。実際は、アジアの色彩は、地中海世界と同様に、

バリエーションに富む多様な色相を持つ材料を、さまざまな膠着材とともに、複雑な技術を駆使して使用したものである。

また、ヨーロッパにおける「西洋」絵画に対する先入観もまた、中央アジアやアジア諸国の彩色、彩色技術に対する印象や、美術史における絵画の解釈に強い影響を与えている。事実、初期中世の絵画技法にまつわる処方など、その殆どが古代ローマ人、ギリシア人工人らによってラテン語やギリシア語で書かれたものであるが、それらに登場するさまざまな物資や技術は、さまざまな商人たちの手を経て、多くはイラン世界やインド世界に源流をみるものである。彩色に関する歴史認識は、長くヨーロッパの歴史認識を背景にしてきた経緯があるけれども、いまや、さまざまな彩色に関わる分析事例の蓄積を受け、絵画技術が古代や初期中世においても西方から東方へという一方的な流入であったという固定観念から解放されるべき時期に到達したのかもしれない。

したがって、本稿では、彩色技法の研究が単に顔料研究にとどまらず、古代の画工の技術研究や東西の文化的交流まで視座に入れた広がりをもつものとしての視点から、パーミヤーン遺跡の仏教壁画について検討を試みたいと思う。

## ②……………西のフレスコ, 東のセッコ技法

壁画を描く技法を表現する際、一般的に「フレスコ」、「テンペラ」といった用語が使用されることが多いが、そういった用語はしばしば混同され、正確な材質や技法を反映していないことがある。

初期中世のユーラシア大陸の中央アジアより東側に広く見られる壁画の製作技法と同様に、パーミヤーン遺跡の仏教壁画は、土製の下塗り層の上にいわゆるセッコ技法 (*a secco*) によって彩色された壁画である。セッコ技法とは、セッコ＝「乾いた」壁面に、乾性油、卵白、植物性多糖類、樹脂といった有機質の膠着材と顔料を混ぜて絵画を描く方法であり、フレスコ技法とは異なる。

いわゆるテンペラ技法とは、本来、動物性膠、植物性多糖類（ガム）、卵など様々な有機質の膠着材を用いて描かれた絵画を指すが、今日では、語意の範囲は狭められ卵を使用する絵画のみを指すことが多い。そのような意味で、中央アジアの壁画は広義のテンペラ技法によって描かれたと言っても間違いではないが、本稿では、卵テンペラとの混同を避けるため、セッコ技法による壁画と呼ぶ。このような練り土の壁にセッコ技法によって絵を描く事例は、インドのアジャンター石窟、チベット、東トルキスタンのキジル千仏洞、クムトラ千仏洞、ベゼクリク千仏洞、敦煌莫高窟、法隆寺金堂壁画など、広くアジアに見ることができる。

一方のフレスコ (*affresco*) 技法は、フレスコ＝「新鮮な」、つまり、石灰モルタルを塗った直後、まだ石灰モルタルが湿った状態の壁面上に、顔料を水に緩めたもので彩色をするものである。石灰モルタルの消石灰が空気中の二酸化炭素と結合して炭酸塩化する性質を利用して、顔料が画面に定着される。フレスコ技法は、黒海沿岸、西アジア、地中海沿岸に広く見られる技法である。代表的な模式図を図1に示す。セッコ壁画の場合、乾いた壁に絵具を塗布するため、彩色層は独立して存在する。一方、フレスコ絵画の場合、石灰モルタル製のイントナコ層が半乾きの状態で顔料を塗布するため、顔料粒子はイントナコ層の中まで入り込む。

フレスコ技法により壁画を製作するためには、支持体の原料となる消石灰が大量に必要とされる。

消石灰を作るためには、石灰石、大理石、貝殻など炭酸カルシウムを主成分とする原料を焼成し、消化（つまり水酸化）することによって生石灰を生成する必要がある。また、堅牢なモルタルを作るために石灰に加える混和材として、海砂、川砂、土器を砕いたもの等を使用する技術が古代ローマ時代から知られている [Vitruvius 1999]。その配合比や素材は、現代使用される石灰モルタルにも共通している。

現実的に考えて、貴重で高価な顔料は、交易や画工の移動にともない遠隔地から移動しうるのに対し、壁の支持体として使用する石灰は、重量のある石灰石を大量の燃料を用いて焼成した後、水を用いた消化工程等を必要とするため、モルタルを使用しようとする場所の近郊から入手するのが自然であろうと考えられる。したがって、西アジアや地中海沿岸地域のように、地質的に石灰岩が得られる地域では石灰モルタルを支持体としていたのに対し、石灰岩の少ない地域では、練り土によって壁を作って支持体とし、そこへセッコ技法によって絵を描く技法が採用されたことが自然ではないかと考えられる。

ギリシア・ローマ時代の壁画の多くは石灰モルタルを支持体として描かれている。石灰モルタルの上にフレスコ技法で描かれている壁画が多いが、セッコ技法が採用されているものもある。とりわけ、板絵、壺絵、大理石製品については、さまざまな有機物を膠着材として用いたセッコ技法によって彩色が施されていることが多い。

現在までに分析により同定された膠着材として、蜜蝋やガムアラビック、卵などがみられる。例えば、蜜蝋画技法（エンカウスティック）は、エジプト・ファイユームから出土した「ミイラ・ポートレート」（ミイラに付属する板に描かれる肖像画）（1～4世紀）に使用されている [Newman・Serpico 2000]。ギリシアの赤像式陶器などの表面には、植物性ガムを膠着材として使用したのを見つかっている [Scott・Taniguchi 2002]。

ユーラシアにおいて現在までに知られている最東端のフレスコ技法は、ブリハーディーシュヴェラ寺院（インド、タンジャープール）の壁画であり、練り土の壁にセッコ技法で絵を描いている最西端の例は、サーサーン朝のイランなどに見られる。ギリシア・ローマ的なモチーフ、画面構成にもかかわらず、石膏と土によってストゥッコ技法を作り上げるような両者の融合的な技法は、ヒンドゥークシュ山脈南麓にあるベグラム遺跡、カーブル川中流域にあるハッダ遺跡、中国の西域南道の東方にあるミーラーン遺跡などに見られる。

ハッダ仏教遺跡の壁画の事例は、現在、ギメ東洋美術館（フランス）に収蔵されている壁画資料に見ることができる。それは、仏龕内の仏像を、花綱を持った一対の有翼天使が飾っているものであり、ギリシア・仏教（Greco-Buddhique）様式と呼ばれる。

イタリアで行われた分析によれば、ハッダ仏教遺跡出土の壁画片のうち、立仏像が描かれた壁画片（MG17451）などは石灰を下地としたフレスコ技法で描かれたものだという [カンボン 2007]。ヘレニズムの影響を強く示すギリシア・仏教様式で描かれた壁画に、石灰を用いたフレスコ技法が混淆している様相は、まさに東西の融合を示す事例として重要である。

同じくギリシア・仏教様式の代表的な遺跡であり、花綱を持つ人物像や有翼天使像の壁画があるミーラーン仏教壁画の分析を行ったアーサー・チャーチ卿によれば、ミーラーンの壁画は、スサを混ぜた練り土からなる下塗り層に、石膏を白色下地として塗布してから、セッコ技法により彩色を

施したものであり、ヨーロッパに見られるフレスコとは異なると結論づけている [Church 1921]。

すなわち、シルクロード沿線に見られる壁画に関して言えば、アフガニスタン近郊を境に、中央アジアより西の石灰によるフレスコやセッコ技法と、東の練り土によるセッコ技法と大きく区分することができよう(図2)。石灰あるいは練り土といった大量の材料を必要とする壁作りの材質に、土地それぞれの地質的な特徴や彩色技法の本質が表れていると考えられる。

### ③……………中央アジア壁画の技法研究の背景

分析対象とする中央アジア・アフガニスタンのバーミヤーン遺跡は、東の中国、西のイランおよび地中海世界、南のインドと北の遊牧文化、オアシス世界、これらを結ぶ東西南北の交通路のなかでもやや外れた位置にあった仏教都市のひとつとして知られる。

バーミヤーンは、バーミヤーン溪谷、フォーラーディー溪谷、カクラク溪谷の三つの溪谷からなるオアシスであり、南側にインドを抱えるヒンドゥークシュ山脈と、コヒ・ババ山脈に挟まれ、標高2500mほどの東西に細長い盆地である。

バーミヤーン遺跡には、それぞれの溪谷に石窟群があり、東西大仏と同じ崖面に開鑿されたバーミヤーン石窟群、フォーラーディー石窟群、カクラク石窟群、バーミヤーン溪谷からやや西に位置するコリ・ジャラル石窟群からなる。祠堂や伽藍として利用された石窟以外にも、仏僧の居住、倉庫として使用されたと考えられる石窟も合わせると、バーミヤーン遺跡には1,000近い石窟が残されている。

名古屋大学年代測定総合研究センターとの共同研究によれば、壁画の練り土に含まれる藁スサの<sup>14</sup>C年代測定から、およそ5世紀の初頭にバーミヤーンで仏教僧院である石窟群が開鑿されて以来、その地で仏教が終焉を迎える9世紀末まで、およそ5世紀にわたり描かれ続けたものであることが明らかにされている [山内(責任編集)2006a]。数百年におよぶ石窟寺院の開鑿は、断続的に行われたものであり、したがって、それぞれの時期に受容された仏教や、交易・交流のあった地域などの違いによって、石窟に描かれた壁画にも技法的、材料的な変容があったと考えるのが自然であろう。

バーミヤーン遺跡の仏教壁画をはじめとして、東トルキスタン(現在の中国・新疆ウイグル自治区)のキジル千仏洞、ベゼクリク千仏洞などの壁画に関するさまざまな美術史、考古学的な調査研究により、これらの壁画技法が、インド、ペルシア、ヘレニズム・ローマ、中国の影響を受けて成立したあと、経済的あるいは文化的な交流のある周辺地域を基盤としてシルクロードを通じて次第に広がっていた様相が明らかになりつつある。なかでもアフガニスタンは、「ギリシア文化の東漸とインドの仏教文化の西漸、そして両者の混淆した仏教美術の中国への伝播ルート上のミッシング・リンク」[宮治2002]と位置づけられよう。それだけに、文化的に複雑な様相を呈する。インドから西方へと流伝した仏教が、中央アジア経由で中国へという西から東へのルートだけではなく、近年は、バーミヤーン初期窟の壁画のモチーフが後の中国西域との関連を示唆するものであることから、仏教が中国西域経由で中央アジアへもたらされた可能性についても議論がなされている [岩井2008]。まさにアフガニスタンは非常に錯綜した背景を伴う地域と言える。



ここで扱う仏教壁画には、それぞれの国において仏教僧院や伽藍の造営を行った寄進者たちが経済力を背景に集めた画工集団や芸術家集団によって駆使された技術の粋が反映されている。とくに、採用された絵画材料や道具、描画方法等にそれらが端的に表われていると考えられる。

壁画材料は、シルクロードを通じ、さまざまな物資とともに東西各地の諸地域からもたらされ、さらに広大な地域へと移動していたと考えられる。顔料や壁画材料をどのように採用したかについては、個別の遺跡の詳細な分析に加え、中央アジアの地理的状况、原材料の原産地、古代における物質の交流ルートという視点からも考察が必要である。

バーミヤーンや東トルキスタンにみられる石窟壁画の絵画技法について、当時の画工たちによる直接的に記述された古代の技法書などの文字記録は残されていない。そのため、当時の技法や彩色材料について知るためには、壁画そのものを直接的に材質分析や技法調査する必要がある。

また、当時の彩色材料に関して考察を加えるためには、テオプラストス（紀元前4世紀）の『石類論 *De Lapidus*』、ウィトルウィウス（紀元前1世紀）の『建築十書 *De Architectura libri decem*』、ディオスコリデス（紀元1世紀）の『薬物誌 *De Materia Medica libri quinque*』や大プリニウス（紀元1世紀）の『博物誌 *Naturalis Historia*』など古代ローマ人による顔料の種類や産地に関するさまざまな記述やインド・グプタ朝の絵画経「チトラ・スートラ *Citrasūtra*」などが参考となる。

ローマ人たちによる記述は、鉱物や植物に関する地誌的な情報に加え、建築、医学、錬金術的な工人らの製造技術など、絵画材料に深く関連した内容を含んでいる。中央アジアで石窟壁画が作られるようになった時期よりも数百年遡って書かれたものであるが、これらの記録にあらわれる物質や技術は、東西交渉のなかですでに中央アジアやより東方世界にも知られていた可能性が高い。

インド世界についても、絵画技法に関する記述が残されている。インドの代表的な芸術論は、『ヴィシュヌプラーナ *Vishnupurāna*』の附録である7世紀に編纂された『ヴィシュヌダルモッタラ *Vishnudharmottara*』であるが、そこには、賢者たちによる絵画形式に関する対話が記されている[上野 1973; 定金 1988]。この中の絵画経、「チトラ・スートラ」[Sivaramamurti 1978; 定金 1988]に、絵画の製作技法についての重要な言及が見られる。絵画経は、ヒンドゥー的な精神が復興したグプタ時代（320～600年）の芸術的見解に基づいている点が留意されなければならない[上野 1973]。

地誌的かつ技術的な情報を多く含むギリシア・ローマ時代の各記述に対し、インドに残る芸術論は、仏教やヒンドゥー教のコンテキストにおいて、神々の神性を表す呪術的な瞑想に基礎づけられた規範であり、一方、具体的な材料や技術に関する内容に乏しい。しかし、石灰や大理石の上に絵画を描く方法について述べるギリシア・ラテン語の技法書に対し、練り土の壁の上に絵画を描く技法について記載しているのは、この「チトラ・スートラ」だけである。

## ④……………シンクロトロン放射光を用いた分析

### 4-1 シンクロトロン放射光を用いた分析の原理

円形加速器であるシンクロトロンで高いエネルギーを与えられた荷電粒子を、円軌道で加速しながら周回させると、連続スペクトルを持つ極めて輝度の高い放射光を得ることができる。これを、

シンクロトロン放射光と呼ぶ。シンクロトロン放射光は、加速されている軌道の接線方向に光が集中し、著しく指向性の高い強力な光となることが特徴である。また、微小領域に絞ったビームでも高いS/N値が得られるため、壁画のような数 $\mu\text{m}$ 厚の彩色層を複数持つ微小試料を高精度、高感度で分析するために極めて有効である [Cotte et al 2010]。

シンクロトロン放射光を用いた分析の利点は、例えば、従来の蛍光X線と比較すると、飛躍的に高感度の微量元素分析、微小領域分析が可能になることである。シンクロトロン放射光は、直線偏光特性をもっているために、バックグラウンドとなる散乱X線を大幅に抑制することができる。また、放射光は連続スペクトルをもっているため、求めるエネルギーの（波長の）X線を自由に選択することができ、その結果、求める分析元素の励起効率を最も良くすることが可能になる。

一般に、放射光施設には、その放射光を利用したさまざまな挿入光源があり、それぞれの挿入光源で各種の分析装置を利用することができる。

本研究では、ESRF との共同研究として、バーミヤーン壁画試料の製作技法および劣化機構について顕微レベルの有機・無機物質の分析を行っている。ESRF は日本の SPring-8 と類似した大型放射光施設であり、ビームエネルギーは約 60 億 eV (6GeV)、ビーム強度は約 200mA である。

本稿ではシンクロトロン放射光を用いた微小領域における有機物質、無機物質の FTIR, XRF, XRD 分析を、それぞれ SR- $\mu$ FTIR, SR- $\mu$ XRF, SR- $\mu$ XRD と呼ぶことにする。本研究では、挿入光源 ID21 において SR- $\mu$ FTIR, SR- $\mu$ XRF, また、挿入光源 ID18F において SR- $\mu$ XRF, SR- $\mu$ XRD の測定を行った (図 3)。

## 4-2 試料および顕微鏡観察のための試料調製

およそ 1,000 窟にのぼるバーミヤーン、フォーラーディー、カクラク、コリ・ジャラール石窟群のうち、かつて彩色が確認された石窟はおよそ 50 窟であるが、現在明らかに彩色が残るもの（あるいは、内戦期に破壊された壁画片を各石窟の床から回収した壁画片の中に彩色が残るもの）は、バーミヤーン 23 窟、フォーラーディー 5 窟、カクラク 2 窟、コリ・ジャラール 1 窟の合計 31 窟であった。そのうち、彩色された時期が異なる可能性がある D 窟の前室部分、I 窟の仏龕と右繞道をそれぞれ別に試料採取した。試料数は、バーミヤーン石窟群および東大仏、西大仏から 201 点、フォーラーディー石窟群から 60 点、カクラク石窟群から 11 点、コリ・ジャラール石窟から 7 点、合計 279 点である。

試料の多くは、石窟の床に散乱していた小さな破片を回収したものから優先的に採取したため、ほとんどのものについて、石窟内のどの位置に描かれていたものであったのか、原位置を確認することは困難であった。壁画片のインヴェントリー作成中に、それらの破片を観察・記録し、色別に分類したうえで、代表的なものを選択している。石窟の壁面に十分な壁画が残存している場合は、代表的な各色から微小試料を採取し、採取位置を記録した。本稿では、採取箇所の明らかな試料を用いて報告する。

各試料は、アフガニスタン情報文化省の許可のもと日本に持ち帰り、実体顕微鏡 (Olympus 社製 BX51) 下において通常光および紫外線蛍光による観察、撮影した後、得られた特徴を観察表へ記載した。観察倍率は 40 ~ 100 倍で、とくに彩色表面の亀裂等の状態、彩色材料の色調や質感、

含有物質の有無等に留意しながら観察を行った。

観察・記載作業ののち、各微小試料の一部は、ポリエステル系樹脂 (Struers 社製冷間埋込樹脂 No.105) を用いて包埋した。クロスセクション作成時にこれを研磨するにあたって、試料には水溶性の膠着材や水分に敏感な顔料が含まれている可能性があったため、4,000～12,000 メッシュの研磨剤を使用する段階では Micro Surface 社製のマイクロ・メッシュを用いて試料表面の乾式鏡面研磨を行った。

クロスセクションは、実体顕微鏡 (Olympus 社製 BX51) の偏光モードにおいて、通常光および紫外線蛍光を光源として観察・記載および撮影を行った。観察方法については Plesters [Plesters 1956] に準じている。これらの壁画構造や光学的な顕微鏡観察結果については、別稿に述べている [谷口他 2006]。

各微小試料の一部は、シンクロトロン放射光を用いた各分析、GC/MS や ELISA による有機物質の分析のため、樹脂包埋せずそのまま利用するために残した。

#### 4-3 シンクロトロン放射光を用いた各分析のための試料調製

SR- $\mu$ FTIR 分析のため、壁画から得られた微小試料の一部を、双眼実体顕微鏡下でマニュアルスライスし、層構造が残るような方向に置いてダイヤモンドセル間で圧縮した (図 4)。

試料が脆弱で、そのままスライスすると崩れてしまうような場合は、微小試料の一部をポリエステル樹脂に包埋後、マイクロトームを用い、層構造が観察できるような方向で 5～50 $\mu$ m の数段階の厚みが得られるように薄片化した。そして、圧縮試料と薄片試料両方を透過法によりポイント分析およびマッピングに供した。

SR- $\mu$ XRF と SR- $\mu$ XRD 分析では SR- $\mu$ FTIR 分析で作成したのと同様に、マイクロトームを用いた薄片試料と微小粉末を利用した。それぞれの試料片は、将来的に別の手法で分析調査することができるように、回収した後、保管している。

#### 4-4 シンクロトロン放射光を用いたSR- $\mu$ FTIR分析

ID21 に付属した FTIR (Thermo Nicholat 社製 Continuum 顕微鏡を付属した Nexus 赤外分光装置) を用い、透過法で行った。

この光源では通常の IR 光源と比較して、15 $\mu$ m 以下の小さい領域の測定ではとくに、非常に高い輝度、極めて高い S/N 値を得ることが可能であり、絵画などの試料分析には非常に有効である。4000～800 $\text{cm}^{-1}$  の範囲で、10 $\mu$ m 径のビームを用い、計 16 のスペクトルを 10 $\mu$ m のステップサイズとしてマッピングを行った。スキューンは計 32 回行った。可動ミラーの移動速度は 1.8988 $\text{cm}^{-1}$ /秒であり、解像度は 8 $\text{cm}^{-1}$ 、Happ-Genzel アポダイゼーションを用いた。データ取得と解析は、Nicholat 社製の Omnic ソフトウェアを使用した。

#### 4-5 シンクロトロン放射光を用いたSR- $\mu$ XRD/ SR- $\mu$ XRF同時分析

マイクロトームでスライスした試料を、2枚の薄いポリエチレンシートで挟んだ上、スライドマウントを用いて作成した小さなウィンドウにそれぞれ並べた。2x18 $\mu$ m のビームにより ID18F に付

属したX線回折（反射モード）と蛍光X線両方の検出器を用いて同時測定を行った。これにより、同じ場所の回折データと元素情報が同時に入手できることになる。この方法で、試料をスキャンし、一試料あたり約300ポイントの分析を行った。SR- $\mu$ XRD測定は28KeV、反射モードでおこなった。併置したSR- $\mu$ XRFにより、元素情報も同時に得た（図5）。検出器はGeである。得えられたデータは、ESRFで作成されたフリープログラムPyMcaを用いてフィッティングおよび解析を行った[Cotte et al 2010]。

## ⑤……………分析の結果

採取した279点の微小試料のうち、ESRFにおいてSR- $\mu$ FTIR、SR- $\mu$ XRD、SR- $\mu$ XRF分析を行った試料は合計51点である。そのうち、バーミヤーンに7世紀半ば以降登場する油彩技法にかかわる3つの事例を取り上げ、以下にまとめたい。

### 5-1 事例1：N(a)窟天井に見られる動物と融合した唐草文について

#### 5-1-1 動物と融合した唐草文様

N(a)窟は、バーミヤーンに7世紀半ば以降出現する方形組み上げ天井を模した構造を有する石窟群のひとつである。N(a)窟の壁画は、名古屋大学年代測定総合センターによる<sup>14</sup>C年代測定によっても、7世紀後半(calAD 644-672年)と位置づけられている[中村 2006]。N(a)窟の天井は、中心部に方形区画、その四方に三角形区画、またその外周に4つの三角形区画、合計3重の区画帯を持つ(図6)。

そのうち2重目の三角形の内側側面は、およそ幅6cm、長さ40～50cmの帯状の唐草文様で飾られている。中央四角形区画の内側側面には、6羽ずつ4面(計24羽)に描かれた、リボンをくわえる鳥の文様帯(ハンサ列)が見られる。

天井の梁は、黒色のスス状物質で覆われていたため唐草文様の図像が不明瞭であった。しかし、保存修復作業の中で洗浄が行われたことよって、梁の側面部分に描かれた赤色を背景とする動物と唐草の文様が判読できるようになり、さらに、動物の部分には金色を呈する物質が僅かに残っているのが確認された[大竹 他 2007]。

それぞれの唐草文様の中央には常に1対の動物図像が描かれ、それらは自然に唐草に融合する形式となっている。もしこれらがすべて現存すれば、合計12対(24体)の動物が存在するはずであるが、すでにそのおよそ半分が損傷し失われている。確認された動物・唐草文様は、南側の2重目の三角形区画において、その側面の西北面から雄牛とグリフィン、東北面からは猪と獅子、西側の2重目の三角形区画において、南西面から未確認の動物と犬、北西面から猿と半身の人間の図像が確認された(図7)。ここで描かれているのが人間の上半身であるのか、あるいはトリトンやケンタウロスのような半人半獣の生き物の上半身であるのか[山内 2006]、図像が破損しているため不明瞭である。

このような赤色の地を背景に動物図像に唐草文様が融合した文様は、インドのアジャンター遺跡17窟にも類例が見られ、グプタ朝美術に起源するものと考えられる[肥塚・宮治 編 1999]。

この文様帯の肉眼観察によれば、まずその文様帯全体に銀色の金属箔が貼られており、その上に細い黒色の線で唐草と動物が描かれている。そして、これらの背景部分を埋めるように赤色が施され、動物と唐草を表す輪郭線の内側は塗り残されている。また、梁の隅には、箔の貼り皺と見られる凹凸も観察された。詳細に材質を明らかにするため、エネルギー分散型蛍光X線分析装置付走査型電子顕微鏡（SEM-EDS）を用いた元素分析と、SR- $\mu$ XRF、SR- $\mu$ XRD および SR- $\mu$ FTIR による分析を行った [谷口 他 2007]。

### 5-1-2 動物・唐草文様部分の観察

N(a)窟の動物・唐草文様部分から採取した試料のうち、金色光沢を呈する部分 [試料番号：BMM184]、猪の文様部分 [試料番号：BMM186] を実体顕微鏡下で観察したところ、金属箔は細かいうろこ状に亀裂を生じていたが、あたかも金箔であるかのような色を呈していた。

しかし、クロスセクションの通常光および紫外線蛍光観察から、実は、その金色は、実際には金箔ではなく、約 20 $\mu$ m 厚の銀色に光る箔の上に、透明な黄色のワニス状の有機物が塗布されているために、文様や図像が金色の輝きを呈していることが明らかになった [試料番号：BMM177, 図 8, 9；試料番号：BMM186, 図 11, 12]。

また、銀色の箔は、白い下地層の上に白い蛍光を発する有機質の接着剤（モルダント）を用いて貼られていることも確認された。白い下地層と練り土からなる下塗り層の間にも、白い蛍光を発する有機物と青白い蛍光を発する薄い有機質の物質が見られた。下地層自体は、白色の蛍光を発している。

### 5-1-3 SEM-EDSによる金属箔の元素分析

SEM-EDS を用いて、クロスセクション [試料番号：BMM186] の分析を行った (図 13)。試料は炭素蒸着し、高真空下で、加速電圧は 15kV において観察、測定を行った。EDS については元素濃度の定量分析における補正法としてファンダメンタルパラメータ (FP) 法を使用した。まず、下地の白色層から鉛が検出された。銀色の金属箔部分からは、スズと鉛が検出されたため、部分的に鉛を含むスズ箔であると考えられる。当時のスズの精錬技術が、鉛を除去するまでに至っていなかったことを裏付けるものと言える。

SR- $\mu$ XRF でも EDS 分析と調和的な結果が得られた (図 10)。箔部分にもカルシウムが含まれているようにみえるが、これはスズの  $L\beta$  がカルシウムの  $K\alpha$  の位置と重なっていることに起因する。見かけ上のものであるので除外することができる。

黄色透明の有機物の層の最表面にカルシウムの薄い層が検出された。これは、箔を覆う黄色透明の層の上に後世付着した物質に伴うものと考えられる。

### 5-1-4 SR- $\mu$ FTIRによる有機物質の分析

N(a)窟天井梁の猪と唐草の文様部分から得られた試料 [試料番号：BMM178] の一部を、マイクロトームで薄片化したものと、微量の試料粉末を層構造が残るようにダイヤモンドセル間で圧縮したものの両方を透過法でポイント分析およびマッピングに供した。

各ポイントで得られたスペクトルを図14に示す。スペクトルのうち、特徴的な吸収 [a], [b], [c] を選択し、マッピングを行った。

マッピングで測定した箇所は、箔を貼るモルダント、白色下地層とその下の有機物の層である。モルダント(A)から得られたスペクトルは、強く鋭い吸収  $\nu(\text{C-H})$  [a] および  $\nu(\text{C=O})$  [b],  $\delta(\text{C-H})$ ,  $\nu(\text{C-O})$  [c] を示しているため、油を主成分とする材料であると考えられる。分析データ上は、ここに天然樹脂が混和していても判別できないため、油と樹脂が混合していることも可能性としては否定できない。このモルダントは5~20 $\mu\text{m}$ 程度の厚みのある層を形成している。一般的にモルダントとして使用される乾性油を用いることでも、酸化重合により固化するため、こういった厚みのある層を作り出すことが可能である。

白色下地層の下に見える透明な黄色の層もまた、(A)と極めて類似したスペクトルを示しており、こちらも乾性油であると考えられる。

また、練り土と白色下地層の間に塗布されている有機物の層のスペクトルにはアミド I, II の吸収が見られることから、膠や卵白などのタンパク質が、彩色を施す前に土壁に目止めとして塗布されたと考えられる。

白色下地層(B)には3535 $\text{cm}^{-1}$ の鋭い  $\nu(\text{O-H})$  にともなう吸収 [d] が見られる。これは、鉛の水酸化物塩に特有である。1400 $\text{cm}^{-1}$ 付近の炭酸塩の吸収 [e] も見られる。また、同様の箇所に、1520 $\text{cm}^{-1}$ の強い吸収 [f] が分布している。これは、 $\nu\text{AS}(\text{C=O})$  に代表されるカルボキシル基、鉛石鹼に特徴的な吸収である。したがって、この白色下地層は、鉛白と鉛石鹼であることを示しているといえる。

鉛石鹼は、鉛白に油を加えて加熱すると生成しやすい物質であり、そこに水を加えることで白く懸濁したペーストを得ることができる [Cotte et al 2006]。しかしながら、鉛白と油と水を用いて意図的に鉛石鹼を作ったものなのか、あるいは、鉛白と油を混ぜて使用したものが、結果的に自然に鹼化したのかは不明である。

スズ箔表面に塗布された透明な黄色の有機物質については、[試料番号:BMM184]から得られたスペクトル(C)から、天然樹脂になんらかの黄色染料を添加したものではないかと想定されるが、明確な同定までにはいたっていない。

また、透明な黄色を呈するワニス状の層の表面部分からは1320 $\text{cm}^{-1}$ にシュウ酸カルシウムに特徴的な吸収が見えており、SEM-EDSによるカルシウムの検出結果とも整合性が見られる。このシュウ酸カルシウムは、透明黄色の有機物の層の表面が、微生物やバクテリア等の何らかの影響により分解され生じたカルボン酸などにより生じた劣化生成物ではないかと考えられる。

#### 5-1-5 動物・唐草文様部分の層構造

上記の結果をまとめると、N(a)窟天井梁に見られる動物・唐草文様は、以下のような構造で製作されたものと考えられる(表3, 図15)。

まず、練り土の壁にタンパク質を含んだ目止め層を施した後、乾性油を主成分とするもので層を作り、その上に、鉛白と乾性油からなる白色下地層を塗布している。この白色下地層には鉛石鹼が含まれている。これは、鉛白と油を混ぜてペースト状にしたものが反応して結果的に鉛石鹼となっ

たものなのか、意図的に鉛白、油、水を熱して白い鉛石鹸を作ったものかは不明である。

この上に、乾性油を主成分とする物質をモルダントとして用いて、梁側面全体にスズ箔を貼り付けている。このスズ箔は、20 $\mu$ mの厚みを持ち、不純物として鉛を含んだものである。

貼り付けたスズ箔の上に、黒線で文様を描き、赤色顔料（ヴァーミリオン）で背景を塗りつぶしている。塗り残したスズ箔の部分には、黄色味を帯びた（あるいは黄色に色づけした）天然樹脂を塗布し、あたかも金箔による装飾であるかのような効果を与えたと考えられる。このような「みかけの金箔」をつくる方法は、中世ヨーロッパの板絵等に使用されたスズ箔や銀箔の上に黄色に着色した樹脂を塗布する「メッカ技法」を想起させる。

## 5-2 事例2：N(a)窟東壁の樹神像の緑色について

### 5-2-1 N(a)窟東壁の樹神像について

N(a)窟の東壁北側中央部に、樹神像と考えられる図像が描かれている。体部から赤い蔦状の幹と枝が広がり、緑の菩提樹のようなハート形をした葉が連なったものである。

内戦時に破壊を受けたため、現在では、樹神像の大部分は失われており、図像のごく僅かが残っているのみである（図16）。

1970年代に名古屋大学が調査した当時は、樹神像が明確に残存していた（図17）。黒地を背景に、赤い幹や枝が広がり、この葉の部分は、深い光沢のある緑色を呈している。葉と葉の間には、白い小さな花卉状のものが描かれている。樹神像は全体的に細かく描きこまれており、厚みがあり、絵筆の小さなストロークも観察することができる。この緑の葉の部分から試料〔試料番号：BMM035〕を採取し、分析に供した。

### 5-2-2 SR- $\mu$ XRFを用いた樹神像緑色部分の元素分析

クロスセクションの観察によれば、葉の緑色部分は、練り土の下塗りの上に黄色透明の層、白色下地層、黒色の有機物を含んだ層があり、その上に、緑色の彩色層と黄色透明のグレーズの層が塗布されている。黄色透明の層は青白い紫外線蛍光を発生し、白色下地層は、強い白色の蛍光を発生する。黒色の有機物を含んだ層も紫外線蛍光を発生し、層のなかに大量の黒色粒子を含んでいる〔試料番号：BMM035〕（図18, 19）。

ID21におけるSR- $\mu$ XRFのマッピング結果を示す（図20）。緑色部分には、緑色顔料としてならんかの銅化合物が使用されているのではないかと想定された。しかし、このビームラインでは、FeのK殻端付近のエネルギーで励起しているため、銅を励起するには不十分であった。

まず、最表面の黄色のグレーズ部分からはカルシウムやカリウム、塩素が、また、緑色の彩色層からは、アルミニウムやカリウムなどに加えて鉄と珪素、鉛が顕著に検出されている。次に、この緑色の層だけではなく、黒色の層、白色下地層からも、同様に鉛が検出されている。白色下地層では、鉛がより高濃度に検出されている。黒色の層に含まれている粒子であるが、カーボンブラックかアイボリーブラックなどのリン酸カルシウムを焼成して作る黒色物質である可能性があったが、リンが黒色の層から検出されないことから、アイボリーブラック、ボーンブラックである可能性は低く、むしろカーボンブラックやランプブラックであろうと考えられる。

銅などの元素を検出するため、よりビーム強度の高いビームライン ID18F における SR- $\mu$ XRF のマッピングを行った (図 21)。ビームサイズが  $2 \times 18 \mu\text{m}$  のため、横長なシグナルの集積になっているが、緑の層には銅、塩素、鉛が共に検出された。緑色の層であるにもかかわらず、銅の検出量は比較的低い。また、黒色および白色の層からは、塩素と鉛が検出されている。

### 5-2-3 SR- $\mu$ XRDを用いた樹神像緑色部分の分析

ID18 において、SR- $\mu$ XRF 分析と同時に得られた SR- $\mu$ XRD の回折パターンの解析を行った。

図 22 は、1 試料あたり約 300 ずつ得られている回折パターンがあるうちの 1 つ、緑色の層の解析の例である。

緑色の層から、鉛白と呼ばれる顔料のうち、ハイドロセルサイトとセルサイトの両方が同定された。さらに、石英とクリソコラが検出された。クリソコラはケイ酸銅である緑色の鉱物であり、緑色顔料として用いられたものと考えられる。かつて、1920 年代にゲッテンスが分析した東大仏周辺窟の壁画の緑色顔料からクリソコラを検出しているが [Gettens 1938]、ここでも、ゲッテンスの分析結果に調和的な結果が得られた。

SR- $\mu$ XRF では、緑色彩色層中に塩素が検出されているため、塩基性塩化銅であるアタカマイトの存在が想定されたが、今回の SR- $\mu$ XRD 分析では、アタカマイトを特定できなかった。

この緑色彩色層は、鉛白をベースとした絵具に、緑色のクリソコラの粉末によって色付けしたものと考えることができる。

### 5-2-4 SR- $\mu$ FTIRを用いた樹神像緑色部分の分析

次に、ID21 において行った同じ試料の SR- $\mu$ FTIR による分析結果について見てみたい (図 23)。この緑色部分は、複数層が塗り重なった重層構造からなる。

試料を、層構造が損なわれないように注意して薄くマニュアルでカットし、ダイヤモンドセル間で薄く圧縮した。この部分を透過モードで測定し、マッピングをした結果、層の各位置においてそれぞれ異なる吸収スペクトルが得られた。そこで、それぞれの官能基のうち他の吸収に重ならないような特徴的な波長部分を抜き出してマッピングを行った (図 24)。

例えば、5 番の褐色の層からは、アミド I, II, III など特徴的な吸収とシュウ酸塩の吸収が見られた。

また、最表面の黄色透明の層、緑色の層、黒色の層、白色下地層すべてからはエステル結合が、また、緑色、黒色、白色下地層からは金属石鹼とハイドロセルサイトの吸収が見られた。ハイドロセルサイトは、 $3530\text{cm}^{-1}$  付近に特有の OH の吸収を持つことが知られている。黒色の層と最表面の黄色透明の層からは、樹脂酸などカルボン酸に特徴的な  $1705\text{cm}^{-1}$  の吸収が見られる。さらに、最表面の黄色透明層と緑色の層のごく一部からは  $1323\text{cm}^{-1}$  付近に特徴的なシュウ酸塩の吸収も見られる。

そこで、まずこの黄色透明の層は、樹脂酸などとエステル結合を持ったなんらかの天然樹脂のようであり、また、黒色の層もまた、同様の樹脂状の物質に加え、鉛白と金属石鹼、エステル結合を持ったものからなる、すなわち、鉛白と乾性油、鉛石鹼、樹脂などの混合物からなるものであると想定される。次に、白色下地層であるが、 $1730\text{cm}^{-1}$  付近のエステル結合、金属石鹼、ハイドロセルサイトに特有な OH の吸収が見られることから、鉛白と乾性油、その一部が鉛石鹼になっているも



のであると考えられる。

一番下の褐色透明の層については、金属石鹼の吸収などと重複していない領域に位置するアミド I 吸収帯がこの部位に集中していることから、この層は、動物膠や卵白などのタンパク質を主成分とするものであろうと考えられる。この部分からも、シュウ酸塩の吸収が多く見られることから、一部はシュウ酸カルシウムなどの物質に変質している可能性がある。

N(a)窟の緑色顔料からは、シュウ酸銅の可能性のあるスペクトルが得られた。これは、樹脂酸銅などなんらかの有機酸銅塩に変質したものと想定される。

### 5-2-5 樹神像緑色部分の層構造

以上、SR- $\mu$ XRF、SR- $\mu$ XRD、SR- $\mu$ FTIRの結果を総合して考察すると、N(a)窟の北壁に描かれた緑色の植物の葉部分については、次のようにまとめることができる(表4, 図25)。

まず、土壁の上に、おそらく絵を描きやすくするための目止めを目的として動物膠や卵白などのタンパク質を主成分とするものを塗布している。このことは、GC/MSによるアミノ酸分析でも、調和的な結果が得られている(本号「中央アジア・バーミヤーン仏教壁画の分析(2)」参照)。

目止め層の上に、鉛白と乾性油からなる白色下地層を塗布している。この白色下地層は、鉛石鹼を含んでいる。黒色の層は、主になんらかの天然樹脂におそらくランプブラックなどの炭素を主成分とする顔料を混ぜたものであり、なかには、鉛白と乾性油、鉛石鹼も含まれていることがわかった。ランプブラックのように軽量の顔料は、油と混ぜたときに浮いてしまい、よく混ざらないということが知られている。そのため、分散を良くするために、樹脂を使用したのではないかと推測される。

緑色については、非常に複雑ではあるが、主だった材料は、鉛白と乾性油であり、やはり他の部分と同様、一部が少なくとも鉛石鹼になっている。GC/MSの結果から、この乾性油はP/S値がおよそ3であるため(本号「中央アジア・バーミヤーン仏教壁画の分析(1)」参照)、ケシ油あるいはクルミ油が使用されたと考えられる。この絵具層には、銅の珪酸塩であるクリソコラといったわずかな銅系の鉱物系粒子が含まれており、緑色として目に見えているということが確認された。

また、黄色を呈する鉄を含む粒子が確認されていることから、イエローオーカーも、この緑色の層に含まれていると考えられる。また、SR- $\mu$ XRDでは確認できなかったが、SR- $\mu$ XRFでは緑色の層に塩素が含まれていることが確認されたことから、銅の塩化物であるアタカマイトが含まれている可能性もある。

また、SR- $\mu$ FTIRのポイント測定から、シュウ酸銅と考えられる吸収が得られたことから、銅系の鉱物顔料が、樹脂や乾性油といった有機物と接していることで、樹脂酸銅や脂肪酸銅へ変化し、さらにそれがシュウ酸銅へ変質している可能性についても指摘しておきたい。

## 5-3 事例3:フォーラーディー4窟の緑色とその変色生成物について

### 5-3-1 分析対象とした試料について

次に、フォーラーディー4窟(図26, 図27)の壁画のうち、緑色部分を例として検討したい。フォーラーディー4窟の緑色は、他の石窟の緑色とは異なって、白緑色を呈しており細かいうろこ状の亀裂を生じている。

フォーラーディー4窟は、パーミヤーンN(a)窟と同様に、方形持ち送り天井を持つ石窟形式であり、フォーラーディー4窟の壁画は、名古屋大学年代測定総合センターによる<sup>14</sup>C年代測定によって、7世紀末～8世紀後半(天井北側西隅のスサ calAD691-778年, 北壁西側のスサ calAD692-775年, 天井西側のスサ calAD691-773年)と位置づけられている [中村 2006]。

フォーラーディー4窟は、現在では人為的な破壊行為により、その多くの壁画が失われてしまっている。多くの壁画片が、切り取られてアフガニスタン国外に流出してしまっているが、小さな破片は、切り取りが行われた際に石窟の床に落ちて散乱したままの状態であった。ここで分析対象とした壁画片は、フォーラーディー4窟の床から回収され、インヴェントリーに登録されたもの(No.0891)である。分析に供した緑色部分の試料 [試料番号: FDM055] は、その一部である。

この緑色部分は、クロスセクションを見ると、土壁の上に、透明な目止め層、黄色透明の目止め層、白色下地層の上に、赤色、白色、緑色からなる重層構造によって描かれている (図28)。この重層構造には、下方の補色 (赤色) と入射光の反射 (白色) による光学的作用によって、緑色を深く鮮やかに見せる効果があると考えられる [谷口・コット 2008a]。

### 5-3-2 SR-μFTIRを用いた緑色部分の分析

この試料を、SR-μFTIRを用いて分析を行った。試料の層構造が残るように薄くスライス、その切片をダイヤモンドセル間で圧縮し、それぞれの層の測定を行ったところ、緑色の彩色層から白色下地層まで、脂肪酸とエステル結合の吸収が見られた。すなわち緑色の彩色層から白色下地層まで、何らかの油に関連する物質が含まれていることが明らかになった (図28, 29)。

各層の赤外分光吸収スペクトルを見てみると、まず、彩色表面の明緑色層 (1) からは、アタカマイトあるいはパラタカマイト (緑塩銅鉱: 塩基性塩化銅) に特徴的な吸収と、おそらく変色生成物のひとつである銅の有機鉱物、ムールーアイト (シュウ酸銅) の吸収が見られる (図30)。これは、銅系の緑色顔料と、有機物質からなる膠着材が、微生物やバクテリアなどのカルボン酸の影響を受けて変成して生成したものであると考えられる。

次に、緑色の彩色層 (2) からは、乾性油由来の脂肪酸のひとつであるパルミチン酸と、銅との反応生成物であろうパルミチン酸銅の吸収と、鉛白と乾性油から生じたと考えられる鉛石鹸の吸収がみられた (図31)。

緑色の彩色層 (2) と赤色の彩色層 (3) の間には、本来白色の層が見られるはずであるが、微小試料をダイヤモンドセル間で圧縮した際に、白色部分が見えなくなってしまったと考えられる。

赤色の彩色層 (3) からも、乾性油由来の脂肪酸のひとつであるパルミチン酸の吸収と、鉛白と乾性油から生じたと考えられる鉛石鹸の吸収がみられた。赤色の彩色層 (3) から緑色の彩色層 (2) の吸収を引いたものをみると (図32)、ゲーサイト (褐色の酸化鉄) の吸収と、パルミチン酸銅、パルミチン酸鉛の吸収を確認することができる。

白色下地層 (4) からは  $3535\text{cm}^{-1}$  に鋭い  $\nu(\text{OH})$  にともなう吸収がみられた。そこで、鉛の水酸化物塩であるヒドロセルサイトを含んだセルサイト (塩基性炭酸鉛)、すなわち鉛白であると考えられる (図33)。

黄色透明の目止め (サイジング) 層 (5) からは、特徴的なアミドの吸収が見られるとともに、

1050cm<sup>-1</sup>付近に多糖類の吸収が見られる(図34)。この層は、動物膠や卵白などのタンパク質と、桃膠やアラビアゴムなどのガム(植物性多糖類)両方を含んでいると考えられる。

次に、最下層の透明な目止め層には、樹脂酸に由来する吸収が見られる(図35)。したがって、なんらかの天然樹脂からなる層であると考えられる。

最後に、それぞれの物質に特徴的な吸収の波長領域を選択して、マッピングしたものを図36に示す。乾性油、タンパク質、樹脂、植物性多糖類すべてが1試料に含まれていることがわかる。

### 5-3-3 SR-μXRFとSR-μXRDを用いた緑色部分の分析

同じ試料を薄くスライスし、ポリエチレンシート間に挟んだものに対して、SR-μXRFとSR-μXRDの同時分析を行った。SR-μXRDのマッピングを図37に、SR-μXRFの元素マッピングを図38にそれぞれ示す。この分析手法では、連続的に、1μm x 4μm程度の微小範囲で、それぞれ元素分析と結晶構造の分析を同時に行うことができる。

SR-μXRF分析の結果、下地層から彩色層にかけて鉛が、赤色の彩色層に鉄が、また、緑色の彩色層に銅が検出された。SR-μXRD分析では、緑色の彩色表面部分からはムルーアイトとアタカマイト、白色下地層からはセルサイトと hidroセルサイト、赤色の彩色部分からはゲーサイトとミニウム(鉛丹)が検出された。

赤色部分のSR-μFTIR分析では、ゲーサイトのみ検出され、鉛白が存在している中に含まれる鉛丹を検出することができなかったが、SR-μXRD分析により、この赤色層の中に、ミニウム(鉛丹)と鉄系の赤色(オーカー:ゲーサイト)両方が含まれていることが確認された。この分析により、前述のSR-μFTIRの分析結果を追証する結果を得た。

### 5-3-4 緑色部分の層構造

以上の結果をまとめると、フォーラーディー4窟の場合、壁画の彩色構造は以下のようになっていたと考えられる(表5, 図39)。

まず、練り土による土壁の表面に、有機質の糊状の物質が2層塗布されている。多孔質で吸水性の土壁の上に、水溶性の絵具で絵画を描くと、筆の水分が奪われ滑らかな線を描くことができないため、まず土壁表面に目止めを施す必要がある。これらは、そういった目止めを目的としたもの、あるいは緩衝のための層であると考えられる。

下の透明薄黄色な層は天然樹脂からなり、上の透明黄色な層は、動物膠あるいは卵白といったタンパク質と、ガムなどの植物性多糖類を混ぜたものである。

白色下地層は、鉛白(セルサイトを含む hidroセルサイト)と乾性油からなる絵具で作られている。

彩色層は、上から、緑色、白色、赤色であり、それぞれ、アタカマイト、鉛白、鉛丹+オーカー(ゲーサイト)を顔料としたものである。すべての層が油を膠着材としているため、その油が、部分的に金属系の顔料と反応してパルミチン酸銅やパルミチン酸鉛といったカルボン酸塩を生じている箇所も観察された。緑色に関しては、アタカマイトが検出された。正倉院宝物等から類例が見られるように[成瀬2004]、アジアの彩色において緑色部分からアタカマイトが検出される事例は散見され

るが、アタカマイトが、緑色の天然鉱物として採取され顔料として使用されたものなのか、海水等を用いて人工的に合成したものなのか、あるいは、銅系の顔料が何らかの二次的な要因によりアタカマイトに変質した結果なのか、明らかではない。

また、緑色の彩色層最表面から、ムールーアイト（シュウ酸銅）が検出された。これは、おそらく長年屋外におかれてきた環境や経年変化の結果として、アタカマイトと有機物質（この場合、膠着材である乾性油など）が反応し、一部カルボン酸銅などに変成していたものが、微生物やバクテリアなどが出す有機酸の影響を受け、さらに一部がムールーアイトに変成したせいではないかと考察される。

この分析結果は、アタカマイトと有機物質が混合していた個所の一部が、ムールーアイトに変化している例を示した、貴重な事例となった。

## ⑥……………バーミヤーンからみた油彩技法の起源と展開

### 6-1 膠着材としての乾性油

以上、油彩技法を用いた壁画のうち、バーミヤーン N(a) 窟とフォーラーディー 4 窟を取り上げて考察を行った。それぞれ、各層にさまざまな有機物を含んだ複雑な重層構造を持つことが明らかになった。油や樹脂など有機物が適所に採用されており、絵具の成分である無機顔料と反応することにより、さまざまな劣化生成物へ変化している状態についても、確認することができた。

今回取り上げたのは、バーミヤーン遺跡の壁画群の中でも、7世紀半ば～9世紀に登場する油彩技法を用いた壁画のうち、2つの石窟の事例である。5世紀にさかのぼる壁画群は、タンパク質や植物性ガムを膠着材に用いた壁画が描かれており、時期によって、使用される膠着材に差異があることが分かってきている [谷口 他 2008b]。

今回取り上げた油彩技法を持つ壁画の一群は、単に膠着材が乾性油というだけではなく、壁の準備や色の塗り重ね、表面の仕上げなどに極めて複雑な工程を採用したものと言える。この油彩技法は、計画的に材料が選択され、技法的にも熟練を要したものであろうと想定され、技法として既にかなり確立されたものがバーミヤーンへ導入されたものと考えられる。

現在までに知られる乾性油を膠着材として用いた彩色は、12世紀末のヘムセ教会のキリスト磔刑の像の彩色（スウェーデン・ゴットランド島）[Tångeberg 2006]に分析事例が知られるだけである。西洋においては、スカンジナビア半島に最古の油彩技法が登場したのち、15世紀にフランドル派によって卵テンペラ技法に代わって、油彩技法が確立されたと考えられてきた。

現存する絵画で、バーミヤーンの壁画まで遡る古い乾性油使用の事例は現在まで知られておらず、中央アジアのバーミヤーンと北ヨーロッパでさかんに使用された油彩技法の間には、400年以上の年代差と大きな地域差が生じている。この2つの相関について、現在までの美術史や技法史研究からはまったく明らかにされていない。

フランドル派は、白い下塗りとし、樹脂を混ぜた亜麻仁油を膠着材とした薄塗りの絵具を使用したことが特徴である。しかしこれは、バザーリの記録 [Eastlake 2001] がそのまま検証されずに伝え

られているためであり、実際は、フランドル派を中心に体系的に乾性油を用いた絵画技法が確立されるようになったのであって、乾性油を絵画へ用いる試みの開始時期は15世紀よりはるかに遡る。

油彩技法の起源については、今後研究事例の増加を待って再度検討すべき大きな主題であるが、ここでは、乾性油そのものの使用について書物に登場する事例を見てみたい。

乾性油自体は少なくともギリシア・ローマ世界に古くから知られており、最古の乾性油は、医薬品として書物に登場するものである。ローマの植物学者ディオスコリデス（1世紀）は、『薬物誌』のなかで、クルミ油（1-178）、ケシ油（4-65）など各種の植物性油を医薬品として紹介している [Dioscorides 2000]。プリニウスも、オリーブ、ヒマ等から搾る主要な油以外にも、多くの植物性油について言及している。なかでも、ビターアーモンドから搾る油（アミュグダリヌム）、クルミのナッツから搾る油（カリュイヌム）などの乾性油についても記述しているが、基本的には、洗浄や血色を良くする等の医薬品としての用途を目的としたものである [大槻 責任編集 2009]。

乾性油を彩色、工芸品に使用する例としては、ギリシア人の医者アエティウス（5世紀末～6世紀）の医学書に登場する例が最古のものと考えられている [Eastlake 2001]。潰すか圧搾することにより得られるクルミ油は、ここでは医薬品としての用途とは別に、「金箔職人やエンカウスティック画家に使用された。クルミ油は乾燥するので、金箔やエンカウスティック画を長期間にわたって保護する」と伝えられている。

ここから、当時にはすでに、クルミ油が時間とともに乾燥（酸化重合）する性質を持つことが知られており、その特徴を生かして金箔やエンカウスティック画等の美術工芸品の保護層として使用されていたと考えられる。

このような保護ワニスには、黄色や赤色の染料や樹脂を加えることにより黄金ワニスとなり、中世ヨーロッパで多用されたスズ箔や銀箔をあたかも金箔のようにみせる技法、「メッカ技法」を想起させるものである。

N(a)窟天井の動物文様の分析結果（5-1）でも触れたように、このような黄金ワニスの材料や技法について、ラテン語やギリシア語などさまざまな処方書に記載が残されている。

度重なる追加や訂正によりオリジナルのテキストが書かれた年代や著者は不明であるが、およそ8世紀のものと考えられる『ルッカ手稿』には、亜麻仁油、ガルバナム、バルサム樹脂、サフランなどを混ぜたものを明るいワニスとして絵画材料に用いる処方が残されている [Burnam 1920]。他にも、亜麻仁油、テレピン、カラマツ樹脂、フランキンセンス（オリバナム乳香）、ミルラ、乳香、カッコウチョロギ（ベトニー）樹液、桃膠、ポプラの花、アーモンドのガム、バルサム樹脂を混ぜたものから絵画のワニスを作る方法なども挙げられている [Burnam 1920]。植物性多糖類や各種の樹脂と並んで、乾性油である亜麻仁油が登場している。

また、画家エラクリウスの『ローマ人の顔料と技術について *De Coloribus et Artibus Romanorum*』（13世紀後半）でも、*auripetrum* と呼ばれる黄金ワニス製法の項に、「亜麻仁油、(vesprum)の樹皮、ミルラ、アロエ、サンダラックあるいは琥珀」を混ぜて熱する工程が見られる [Merrifield 1967]。共通して、乾性油を単体として用いるのではなく、さまざまな植物性の樹脂や多糖類とともに混ぜて使用している特徴がみられる。

バーミヤーン壁画の有機物に関する分析結果の解釈が困難となっている原因として、このように、

多様な有機物が同時に使用されていることが関連している可能性がある。

黄金ワニスとしてだけでなく、彩色の膠着材として使用するための材料として乾性油に言及している例は、同じく『ローマ人の顔料と技術について』や、修道士テオフィルスの『さまざまな技能について *On Divers Arts*』（11～12世紀）[Theophilus 1979] など、中世ヨーロッパにおいて著されたさまざまな処方書に見られる。

他にも代表的な例として、イタリアの画家チェンニーノ・チェンニーニが著した『絵画術の書 *Il Libro dell'Arte*』（1400年頃）[Thompson 1956；チェンニーニ 1991] が挙げられるが、そこには、亜麻仁油の調製法、顔料を亜麻仁油で練り合わせる方法、油性グレーズを卵テンペラの上にかけて絵を仕上げる方法などが記載されている。

一方、東方の絵画に関する文献の中では、乾性油の使用に関する事例は知られていない。

インドの「チトラ・ストラ」では、顔料を固着するための材料として、「獣皮の煎汁（膠）〔或いは〕バクラ (bakula) 樹の樹脂 (40章29偈) 〕について述べている。

バクラ樹が具体的にどの植物を指すのか明らかではないが、そこから得られる樹脂は、植物性多糖類あるいは樹脂であろうと考えられる。

東方においても、クルミを絞ることにより油が得られることは古くから知られており、シノ・イラニカの中でも「胡桃油」[Laufer 1967] に関する記載がみられる。油自体は、ランプ油や食用油の目的で知られていたが塗料としての使用については言及されていない。クルミ（胡桃）、すなわち「胡（＝イラン系民族）」の桃は現在のイランや中央アジアに多く自生している。同様に、亜麻やケシについても、中央アジアやインドに自生しており、利用可能な植物であった。

中央アジア付近の乾性油を使用した技法については、化学的な分析事例が殆どないために不明である。しかし、正倉院に伝わる西方の御物群のなかに、乾性油を用いた工芸品が知られている。

バーミヤーン仏教壁画に見られる油彩技法には、直接的にギリシア・ローマの美術工芸品や医薬品に用いられた乾性油と結びつく証拠が現在のところ見られない。今後、周辺地域の壁画や工芸品、木造建造物の部材等の調査分析を行う必要がある。

## 6-2 「密陀絵」と「油色」について

ここでは、バーミヤーン壁画に見られるような油彩技法の起源をめぐりさらに試論を進め、西域由来の伝世品資料から、日本列島に伝わる飛鳥、奈良時代の油彩技法について検討を行いたい。

正倉院宝物の一群に、「密陀絵」と呼ばれる工芸品が知られる。いわゆる、油と顔料を混ぜたものにより彩色をしたものの呼称として現在一般的に使用されている用語であるが、その名称の由来や起源について、はっきりとした定説がなかった。

現在までの密陀絵に関する研究は、1950～53年にかけて行われた上村六郎、亀田孜、木村康一、北村大通、山崎一雄といった漆芸の専門家、化学者らによる文献と化学分析を用いた嚆矢的な調査に負うところが大きい。この研究は、正倉院の「密陀絵」に対し歴史と自然科学的な手法を用いたおそらく唯一の総合調査事例として極めて重要である。

上村の調査によれば、正倉院宝物を「密陀絵」と呼ぶ背景として、江戸時代末期から明治時代に作られていた油と密陀僧（マシコット）[一酸化鉛：PbO] を混ぜて作る「密陀絵」と称するもの

と正倉院宝物の一群が外見的に類似していたために、近世の工芸品に関する知識を基に、「密陀絵」の名称が用いられることになったのではないかと述べている [上村 他 1954]。

明治11年(1878年)に黒川真頼によって書かれた『工芸志料』の「漆工」の部に「城端(じょうはな) 漆画」の項があり、続いて「密陀画」という名称があるという。上村の調査によれば、黒川は京都今宮神社所蔵の密陀絵の食籠に「密陀絵食籠」の名称が付けられており、そこに記されていた「黒漆ノ上ニ五彩ノ密陀僧ヲ以テ画ク」という説明を引用したようだとする。

そもそも、江戸末期から明治時代のこの種の漆画風のもの、漆の代わりに荏の油と顔料を混ぜて絵具を作り、漆地塗りの器物などに絵を描いたものである。

既に述べたように、荏の油は荏胡麻から採取される乾性油である。黄色の粉末である密陀僧を加えて煮て濾過すると、密陀僧に含まれる鉛が油に溶けだし、油中で乾燥促進剤として働くため、この油が早く乾燥・固化することが知られていた。古くは、『武陵雑筆』(1660年)にも、桐油または荏の油に密陀僧を加えて煮る手法が詳しく記されているという [上村 他 1954]。これらの文献史料から、上村は、江戸末期から明治時代の初めに密陀僧を入れた油を使った工芸品を「密陀絵」と称するようになったと結論づけている。

関野貞もまた、「漆にて塗らるる面に朱、丹、黄土、緑青等の顔料に、油と密陀僧(油の乾燥剤として用ふ)を混じたる者を以て草花や動物の絵文を描く」密陀絵が、飛鳥時代以降登場し、法隆寺橋夫人厨子の扉の内外や正倉院宝物、東大寺蔵品に現存することを述べている [関野 1949]。

しかし、関野はその時点において、正倉院の資料に関する材質について、その正確な名称も、乾性油や密陀僧が使用されていたかも明らかにしうる手段を持っていなかったため、単に、近世の「密陀絵」との外観の類似性から、上記のように論じていたのであろうと思われる。

これとは別に、上村は、着色した油を彩色や金属の上に塗布する技法、いわゆる「油色」についても検討を行っている。「油色」技法は、日本列島において奈良時代から見られる。上村は、例えば、「油衣」(『甲可寺造物所帳』(747年))、「油笠」(『住吉大社神代記』)は着色していない油を塗布したものである可能性があるが、「青油笠」(『日本書紀』齊明天皇の条)、「緋油衣」(『住吉大社神代記』)、「烏油」(『東大寺献物帳』)、「烏油腰帯」(『衣服令』757年)などは、明らかに色づけされた油を用いたものであろうと想定している。

以上のように、上村は、少なくとも奈良時代には、文献上から近世の「密陀絵」技法ともいうべき油と顔料を混ぜた彩色と、表面だけに油の層を塗布する「油色」に大きく分けて2つの技法の存在があったのではないかと指摘している。

### 6-3 密陀僧について

次に、「密陀絵」に乾燥促進剤として使用されたとされる、密陀僧について考えてみたい。

密陀僧は、淡い黄色の粉末で、化学的な組成は一酸化鉛(PbO)である。鉱物として産するものを入手したこともあれば、鉛丹の合成と同様に、鉛を酸化することによって人工的に生成することもできたと思われる。正方晶系の $\alpha$ 型と、斜方晶系の $\beta$ 型があり、それぞれリサージ(litharge)、マシコット(massicot)と呼ばれ、両者とも顔料として使用されてきたが、その顔料としての歴史については不明なことが多い [EStaugh et.al 2004]。

鉛は反応性が高いため、分子内に不飽和脂肪酸基を有する乾性油に添加されて熱せられると、油の重合化が進み鉛石鹸を形成する。その結果として油塗膜の形成が促進される。乾燥促進剤として必要とされる鉛の量は微量なため、乾性油中に密陀僧を入れて熱することによって作られた油は、ほとんど無色透明である。

東洋学者で中国とイランの語彙の比較研究を行ったラウファーによれば、「密陀僧」という名称が現れるのは唐代になってからであるが、この密陀僧 (m'it(m'ir)-da-san) という言葉は mirdā-sang, また、没多僧 (mut(mur)-ta-san) は murdāsang など、ペルシア語に由来するものであるという (『證類本草』)。

また、唐本草 (『本草綱目』) の校訂者である蘇恭は、「密陀」と「没多」はともにイランの言語であり、「この物質がペルシャの所産で形は竜の歯に似ているがもっと強固で重たいもの」だと述べているという。また、密陀僧には、雲南の大理石にみられるような石紋のある白色のものもあるとしている [Laufer 1967]。黄色の一酸化鉛の粉末の名称が、ペルシア語に起源をもつ言葉である「密陀僧」として古代中国および日本に知られていたということは、注目に値する。

さらに、顔料としてだけでなく、乾性油を早く乾燥させて安定した塗膜を作るための促進剤としての密陀僧が用いられていたとすれば、「乾性油」と「密陀僧」がセットとしてイラン世界に起源をもつものであろうという可能性を示唆するものとして重要である。パーミヤーン壁画の乾性油を含む彩色層中から多く検出されている鉛化合物が、「密陀僧」のように、乾燥促進剤として意図的に添加されたものかどうか、今後も検討が必要である。

#### 6-4 正倉院宝物と法隆寺玉虫厨子にみられる油彩技法

ここでは、正倉院宝物と法隆寺玉虫厨子に見られる乾性油の利用と鉛化合物について先行研究を振り返ってみたい。

1950年代に正倉院宝物資料27点について、上村六郎や山崎一雄らが美術工芸史、化学、薬学といった視点から技法材料の調査を行っている [上村 他 1954; 山崎 1999]。この中で、薬学者である木村康一は、さまざまな有機物が紫外線下において異なる蛍光反応を示すという特徴から、正倉院の資料に、油の存在を確認している。動物膠は青白色の強い蛍光、荏の油 (または密陀油) は黄色の蛍光、動物性樹脂であるラックは強い橙色の蛍光を発するという特徴を示すことが知られている。

化学者である山崎一雄は、神護景雲2年 (768年) 御願経の経軸の一部を分光分析法で分析し、油中に含まれる鉛の存在を確認した。山崎は、この油を調整するにあたり、乾燥促進剤として密陀僧が用いられたことを示唆している [山崎 1999]。同じ資料が、その後成瀬正和らによって調査されている [成瀬・飯田 2005]。

軸の端部には、白、赤、緑の彩色と油状の塗膜層が観察される。白密陀と呼ばれる白色部分から炭酸鉛、水酸化塩化鉛などの鉛系白色顔料 (鉛白) が検出され、赤密陀と呼ばれる赤色部分からは、鉛丹による彩色と、含酸化鉄赤色顔料 (報告中では「ベンガラ系」と表現されている) によるものが検出されている [山崎 1999]。含酸化鉄赤色顔料によって彩色されている部分からは、鉛の元素が検出されている。また、緑色の部分からは、マラカイトと鉛の元素が検出されている。

このことから、含酸化鉄赤色顔料によって彩色されている部分と緑色の部分から検出された鉛が、



乾燥促進剤として油に加えられた鉛であることの傍証となると考えられる。

鉛白や鉛丹が顔料として使用された場合、たとえ油中に鉛を含んだ乾燥促進剤が使用されていたとしても、顔料の成分である鉛と重複してしまうため、分析から判別することが困難である。そのため、鉄や銅を主成分とする鉛を含まない顔料が使用された部分からも鉛が検出されたことは、鉛を主成分とする物質が油とともに使用されたことを傍証する根拠として重要である。

山崎らの調査は、1950年代当時において最先端の分析手法を用いたものではあるが、油の種類などについて判別するためには手法的な限界があった。そのため、ここで検出されている油が、荏の油であるのか、桐油であるのか、あるいは全く別の乾性油であるのかわからない。また、油中に含まれる鉛の由来についても、密陀僧であるのか、鉛白や鉛丹といった他の鉛化合物であるのか正確なところは不明である。ここで「密陀絵」「油色」とするのは、油に類似した紫外線蛍光反応と、鉛の元素が検出されたことと、歴史的な文献史料からの総合的な判断によるものである。そのため、より詳細な化学的な検証が望まれて久しいが、非破壊分析を主流とする現在の状況においては、試料採取を伴う有機物質に関する分析が行われにくいのが現状である。

さて、山崎らによる27点の資料の調査から、油と顔料で絵具を作って描く近世の「密陀絵」のような技法で製作されたものが7点(307号破陣楽太刀鞘(第3号)、452号密陀彩絵箱、607号密陀絵盆17枚中4枚、757号漆花形皿29枚中1枚)、膠絵の上に油またはラック入りの油をかけた、いわゆる「油色」と呼ぶべき手法のものが17点、同定されている。

このうち、正倉院南倉に17枚と破片が若干伝わっている「密陀絵盆」は、樹下人物像など、図像的には唐代の流れをくむものである。ケヤキ材で轆轤挽き成形を行った後、器の内外とも全面に黒漆を塗布してから内面は全体を鉛白で塗布し、黄色顔料で絵を描いてから油性の薄い塗膜をかけたものと考えられる。外面では4枚に油を顔料に練りこんで絵を描く「密陀絵」の技法をとるものだが、残りは、絵を描いた上に乾性油を全面塗布する「油色」の技法で製作されたものといえる〔奈良国立博物館2007〕。

また、1953年に法隆寺玉虫厨子の須弥座に描かれた捨身飼虎図についても山崎が紫外線による調査を行っている〔山崎1985:1999〕。これは、黒色を呈する漆地の上に赤、緑、黄色(淡褐色に変色)で描かれたものであり、緑、黄色の部分が局所的に蛍光反応を示している。蛍光反応を示す部分は、なんらかの油と顔料を混ぜた絵具で彩色されたものと想定されている。玉虫厨子の彩色は、正倉院宝物に見られる「密陀絵」と極めて類似した技法により描かれたものであると言える。両者のもう一つの共通点は、木胎の上に直接黒色を呈した漆を塗り、その上に彩色が施されているという部分である。

このような成果を受け、上村は、正倉院宝物に用いられる「密陀絵」という名称は、近世になって使用され始めたものであろうということから適当ではないとし、さらに、密陀僧という乾燥促進剤が用いられているかどうかということよりむしろ、それが油で描かれたものだというのが重要なのだとして、名称を「油画」とするほうが適当ではないかと提案している〔上村他1954〕。

玉虫厨子や密陀絵盆に関する調査の結果をもとに、上村らは、西欧より古く東アジアに最古の油絵が存在することを確認したとし、油の使用の起源を中国の殷代、秦代、漢代に見られるような油と炭素を練り合わせたもので彩色をする黒陶の技法に求めている。『後漢書』『輿服志』には、「大

貴人貴人公主妃封君, 油画駟車云々」との記載があること、『晋書』『輿服志』には「赤油」「緑油」「青油」等の油色に関する記載がみられることから、古代中国に「密陀絵」や「油色」の起源を想定している〔上村 他 1954〕。

乾性油の乾燥促進剤として使用される密陀僧は、ペルシア語の音訳として中国で作られたものであり、飛鳥時代、少なくとも奈良時代以前に、正倉院宝物に代表されるような現物とともに日本列島に伝えられたものと考えられる。

しかし、これらの手法は、顔料を乾性油と練り合わせたものを絵具として使用しているという点では、確かに油彩技法ではあるものの、あくまで局所的な彩色に留まるものであり、例えば、乾性油を用いた下地や重層的な彩色といった構造は見られない。その点で、バーミヤーンや中世以降のヨーロッパに見られる油彩技法とは一線を画するものであるかもしれない。

以上、ギリシア・ローマ時代以降の絵画技法書と、飛鳥、奈良時代に日本列島に伝えられた油彩技法について、乾性油と乾燥促進剤としての密陀僧の使用の視点から、先行研究をもとに検討を行った。本稿で取り上げたバーミヤーンの油彩技法、日本列島に伝えられた「密陀絵」「油色」の技法、ギリシア・ローマ時代以降の処方書に見られる黄金ワニスなど乾性油を含んだ有機物によって表面に塗装を施す技法、そして、北部ヨーロッパを中心に広がったいわゆる「油絵」である油彩技法は、それぞれ乾性油を使用するという共通点があるものの、それぞれの間直接的な影響関係を示す証拠は現在のところ何も見つかっていない。

## まとめ

バーミヤーン遺跡の壁画に用いられた技法と材料について、もう一度整理してみたい。

バーミヤーンのN(a)窟天井にみられるスズ箔の上には、一部にマスティック樹脂(乳香)に類似した透明な黄色の樹脂が確認されており、文様や図像を金色に輝かせる効果を与えていたと考えられる。この装飾技法と「メッカ技法」との比較をしてみると、両方とも、スズ箔の上に天然樹脂や油と何らかの有機物を加えて黄色あるいは赤色に色付けしたものを塗布して、視覚的にあたかも金箔であるかのように見せているところが共通している。

このような技法の初出は、8世紀のものと考えられる『ルッカ手稿』であり、亜麻仁油、ガム、バルサム樹脂、サフランなど多様な植物性材料を混ぜたものを金色仕上げ用のワニスとして絵画材料に用いる処方が残されている〔Burnam 1920〕。

保護層としての乾性油の利用に関する記述はもう少し古く、ギリシア人の医者アエティウス(6世紀)の『医学書』に、蜜蠟を膠着材として用いるエンカウスティック画や金箔を長期間にわたって保護するための保護層として使用するためのクルミ油が登場している。

バーミヤーンの油彩技法においてはクルミ油あるいはケシ油が同定されているため〔谷口・マズレック 2008b〕、地中海世界におけるクルミ油の使用やスズ箔の使用といった点で、材料的な共通点が見られる。

さらに、中国や正倉院宝物に見られる色つきの油を用いた表面塗装技法としての「油色」も想起されるが、ここで登場する油は、歴史史料から荏の油あるいは桐油と考えられており、亜麻仁油や

---

クルミ油、ケシ油といった名称は見られない。しかし、これらの資料に対してGC/MS等を用いた乾性油の分析事例が殆どないため、東アジアにおける乾性油の種類が同定がなされておらず、地中海や中央アジアの事例と直接的に比較することができないのが現状である。

次に、バーミヤーンの油彩技法と正倉院宝物に見られる「密陀絵」との共通性を検討してみたい。

まず、基本的な相違点として、法隆寺玉虫厨子や密陀絵盆など正倉院宝物には、黒色を呈した漆地の上に彩色が施されており、鉛白下地に彩色を施すバーミヤーン壁画の事例とは大きく異なっていることが挙げられる。

黒漆を下地とする技法の起源については、兵馬俑の彩色や青銅鏡の彩色等、東アジア的な材料や中国大陸の事例にその相関を求めうるものであるため、ここでは論を留めておきたい。

また、もう一つの相違点として、「密陀絵」の手法は、顔料を乾性油と練り合わせたものを絵具として使用しているという点では、確かに油彩技法ではあるものの、あくまで局所的な彩色に留まるものである。その点で、複数の層を乾性油と顔料からなる絵具で構成し、全面的に塗布しているバーミヤーンや中世以降のヨーロッパに見られる油彩技法とは異なる。

一方で、バーミヤーン壁画と「密陀絵」の両者とも、乾性油と顔料を混ぜて絵具を作り彩色するものであるところに主要な共通点がある。

バーミヤーンの壁画の場合、油彩技法をもつ壁画には下地に鉛白が使用されていることが特徴である。また、N(a)窟天井の動物文様部分に見られるように、スズ箔の接着材（モルダント）としては乾性油を、また、白色の下地部分には鉛白と乾性油を混ぜたものを利用していたことが明らかになっている。

その他の彩色層についても、鉛白とその他の顔料（アタカマイトやクリソコラなど）を混和して使用している。「密陀絵」についても、白色部分は、鉛白など鉛系白色顔料を、赤色部分には鉛丹を用いている部分があるなど、鉛系顔料が使用されている。

「密陀絵」においては、油の乾燥促進剤として効果がないと考えられるが、微量の密陀僧 [PbO] あるいは何らかの鉛系の物質が使用されている。密陀油の製法は、乾性油に微量の密陀僧を加え、熱してからその油を濾過するものである。そのため、油中に密陀僧の粒子が残存していないことが多く、油中の鉛の由来が一体何であるのか明らかにすることは難しい。

バーミヤーン壁画の油彩部分のうち、密陀僧の使用を示すような積極的なデータは得られていないが、油中に鉛が多く含まれていることは事実である。それは、バーミヤーン壁画の油彩部分の多くから、鉛石鹼が生じていることから確認される。しかし、油彩部分の多くは鉛白や鉛丹を使用しているため、鉛石鹼が鉛白と乾性油を混ぜたことにより生じたものであるのか、あるいは密陀僧などととも油を熱することにより生じたものであるのか、その由来は不明である。

顔料として鉛白や鉛丹が使用されている場合には、そこに密陀僧由来の鉛が微量に含まれているかどうか、分析によって判別することは困難であり、ここでバーミヤーン壁画に密陀僧が添加されていたか否か、議論することはできない。

バーミヤーン壁画に含まれる鉛が鉛白や鉛丹由来であったにせよ、密陀僧が意図的に加えられた結果であるにせよ、バーミヤーン壁画に使用された油絵具は少なくとも描くのに適したものであったと考えられる。

---

さらに、鉛白を下地材料や彩色材料に添加することの特徴として、鉛白と油を練って絵具とする場合、石灰や石膏などカルシウム系の白色顔料と異なり吸油量が低いため、必要とされる油量が少なく済むということが挙げられる。たとえ、仮に石灰や石膏と油を練った場合、屈折率の問題から、石灰や石膏は透き通ってしまい、白色としての機能を果たすことができない。鉛白を用いることで、塗膜の上塗り及び下層に対する接着性が良く、亀裂の発生が少なくなるという利点もある。鉛白と乾性油の組み合わせは、材料の観点から必然的な選択の結果であったろうと考えられる。

現状では、鉛石鹸を同定するような分析手法が採用されている事例が少ないため、中央アジアのみならず、東アジア、南アジアでも現時点において鉛石鹸が検出されている壁画、彩色の類例は存在しない。今後の周辺地域の分析事例の増加を待ちたい。

上述のように、シンクロトン放射光を用いた各種分析法を利用することによって、重層構造を持つ彩色について、各層ごとに無機・有機物質の分析を行うことが可能となった。とくに、同じ個所をSR- $\mu$ XRF/SR- $\mu$ XRDによって同時測定できることにより、重層構造中の個々の顔料粒子の同定ができるところが、彩色文化遺産の研究において極めて有効性が高い特徴であろうと考えられる。

そこから、7世紀半ば以降の壁画の事例として、重層的な油彩技法の利用を確認することができた。練り土製の壁に乾性油を用いたセッコ技法で仏教絵画を描いた事例として極めて重要な位置づけとなるため、今後も周辺地域の類例の調査が必要である。

さらに、これらのバーミヤーン壁画と正倉院宝物などに見られる「密陀絵」との共通項として、乾性油の使用と、鉛白や鉛丹等の鉛系の顔料の多用を挙げることができた。鉛白や鉛丹は、金属鉛を人為的に反応させることにより得られる無機化合物である。こういった無機化合物の精製技術と乾性油との組み合わせにより、油彩技法が成立したと言えるだろう。一方で、地中海世界との共通項として、クルミ油の使用の可能性や色付けをしたスズ箔の使用といった点で材料的な共通点が見られる。

以上、これらすべての事例が6世紀から8世紀にかけて見られるものである。したがって、この中で、バーミヤーンの油彩技法が最古の事例であるとも、正倉院に見られるような東アジアの密陀絵の技法が最古の油彩であるとも言い難い。

油彩技法が技術、材料的に成立した背景には、植物性の油を人工的に生み出した鉛系の顔料とともに使用することにあった。しかし、中央アジアから東アジアにかけての地域において、彩色に使用された膠着材を調査した事例は極めて少なく、傍証たる根拠を得るには至っていない。また、密陀僧の言葉の起源であるイランに、乾性油とともに密陀僧が使用された事例もまだ明らかにはなっていない。

そのため、油彩技法の源流をめぐる、ユーラシア大陸東西における技法材料の側面における関連性の探求は、今後取り組むべき壮大な課題といえるだろう。

#### 【謝辞】

本研究の遂行に際して、文部科学省科学研究費補助金（若手研究（B））〔課題番号 18700680 ジェルクリーニング剤を用いたセッコ壁画表面の保存処理法に関する研究（研究代表者：谷口陽子）〕

の補助を得た。また、本稿に報告した ESRF における分析は、研究課題 Combination of Micro-X-ray Diffraction and Micro-Infrared Spectroscopy for the Study of Multi-Layered Buddhist Mural Paintings from Bamiyan (課題番号 EC101 Y. Taniguchi, M. Cotte, E. Checroun) として採択された研究の一部として実施されたものである。研究協力者である Marine Cotte (European Synchrotron Radiation Facility, France) に感謝します。なお、図中に引用した FTIR の比較に用いたスペクトルは、IRUG (Infrared and Raman Users Group) による IRUG database (www.irug.org) から引用したものである。記して感謝します。

---

#### 註

レファレンスとした FTIR スペクトルは、IRUG データベースから引用した (IRUG 2007)。

(1) — アタカマイトの FTIR スペクトル。Philadelphia Museum of Art, 2000. “IMP00198 Atacamite, natural”, およびパラタカマイトの FTIR スペクトル。“IMP00166 Paratacamite”。

(2) — ゲーサイトの FTIR スペクトル。Philadelphia Museum of Art, 2000. “IMP00188 Goethite”。

(3) — セルーサイトの FTIR スペクトル。Philadelphia Museum of Art, 2000. “IMP00268 Cerussite”。

(4) — ハイドロセルーサイトの FTIR スペクトル。Philadelphia Museum of Art, 2000. “IMP00121 Hydrocerussite”。

(5) — マスティックの FTIR スペクトル。British Museum, 2000. “INR00067 Mastic”。

---

#### 引用文献

- Burnam, J. M. (1920) *A Classical Technology edited from Codex Lucensis 490*, R.G. Badger-the Gorham Press, Boston.
- Caley, E. R., Richards, F. C. J., (1956) *Theophrastus on stones: introduction, Greek text, English translation, and commentary*. The Ohio State University.
- Church, A. (1921) Examination of certain specimens of mural painting and plaster from Ak-Terek, Kara-Sai, Khādalik, Mirān, 'Ming-Oi' and Tun-Huang. *Serindia, III*, 1390-1391.
- Cotte, M., Checroun, E., Susini, J., Dumas, P., Tchoreloff, P., Besnard, M., Walter, Ph. (2006) Kinetics of oil saponification by lead salts in ancient preparations of pharmaceutical lead plasters and painting lead mediums, *Talanta*, **70**, 1136-1142.
- Cotte, M., Susini, J., Solé, V. A., Taniguchi, Y., Chillida, J., Checroun, E., Walter, P. (2008) Applications of synchrotron-based micro-imaging techniques to the chemical analysis of ancient paintings, *Journal of Analytical Atomic Spectrometry*, **23**, 820-828.
- Cotte, M., Checroun, E., Mazel, V., Solé, V. A., Richardin, P., Taniguchi, Y., Walter, P., Susini, J. (2009) Combination of FTIR and X-Rays Synchrotron-Based Micro-Imaging Techniques for the Study of Ancient Paintings. A Practical Point of View, *e-Preservation Science*, **6**, 1-9.
- Cotte, M., Dumas, P., Taniguchi, Y., Checroun, E., Walter, P., Susini, J. (2010) Recent Applications and Current Trends in Cultural Heritage Science Using Synchrotron-Based Fourier Transform Infrared Micro-spectroscopy, *Comptes Rendus Physique*, **41**, 590-600.
- Dioscorides (2000) *De material medica*, Ibdid press.
- Eastlake, C. L. (2001) *Methods and Materials of Painting of the Great Schools and Masters*, vol. 1, Dover Publications.
- Estaugh, N., Walsh, V., Chaplin, T., Siddall, R. (eds.) (2004) *Pigment Compendium: A dictionary of historical pigments*, Elsevier; Butterworth-Heinemann.
- Gettens, R. J. (1938) The materials in the wall paintings of Bamiyan, Afghanistan. *Technical Studies in the field of the fine arts*, **6**, 186-193.

- 
- IRUG (2007) Infrared and Raman Users Group Spectral Database, In Price, B. and Pretzel, B. (eds), *IRUG*, Philadelphia.
- Laufer, B. (1967) *Sino-Iranica: Chinese contributions to the history of civilization in ancient Iran*. Ch'eng-wen Publishing company.
- Merrifield, M. (1967) *Eraclius De Cooribus et Artibus Romanorum (XLIV), Medieval and Renaissance Treatises on the Arts of Painting*, Dover Publications.
- Nakai, I., Terada, Y., Itou, M., Sakurai, Y. (2001), Use of highly energetic (116 keV) synchrotron radiation for X-ray fluorescence analysis of trace rare-earth and heavy elements. *J. Synchrotron Rad.* 8, 1078-1081.
- Newman, R., Serpico, M. (2000) 19. Adhesive and Binders, In Nicholson, P. T., Show, I. (eds.), *Ancient Egyptian Materials and Technology*, 475-494, Cambridge.
- Plesters, J. (1956) Cross-sections and Chemical Analysis of Paint Samples, *Studies in Conservation*, 2, 110-131.
- Scott, D., Taniguchi, Y. (2002) Archaeological Chemistry: a case study of a Greek polychrome Pelike, In Tiverios, M.A., Tsiafakis, D.S.(eds.), *Color in Ancient Greece: the role of color in Ancient Greek Art and Architecture (700-31 B.C.): Proceedings of the conference held in Thessaloniki, 12th-16th April, 2000. Organized by the J. Paul Getty Museum and Aristotle University of Thessaloniki*, 235-244.
- Sivaramamurti, C. (1978) *Chitrasutra of the Vishnudharmottara*, Kanak Publications.
- Tångeberg, P. (2006) The crusifix from Hemse. In Nadolny, J., Kollandsrud, K, Sauerberg, L., Froysaker, T. (eds.), *Medieval painting in Northern Europe: techniques, analysis, art history*, 1-10. Archetype Publications.
- Theophilus (1979) *On Divers Arts* (Hawthorne, J. G., Smith, C. S. trans.), Dover Publications.
- Thompson, D. V. (1956) *The Materials and Techniques of Medieval Painting*, Dover Publications.
- Vitruvius (1999) *Vitruvius: Ten Books on Architecture*. (Rowland, I. D., Howe, T. N. (eds.), Cambridge University Press.
- 岩井俊平 (2008) 「パーミヤーン初期窟壁画の源流」『西南アジア研究』68, 63-81。
- 上野照夫 (1973) 『インド美術論考』, 平凡社。
- 上村六郎, 亀田 孜, 木村康一, 北村大通, 山崎一雄 (1954) 「正倉院密陀絵調査報告」『宮内庁書陵部紀要』4, 1-18。
- 奥山誠義, 佐藤昌憲, 赤田昌倫, 森脇太郎 (2010) 放射光顕微赤外分光分析法による出土繊維文化財の材質同定及び劣化状態の解析、分析化学 (BUNSEKI KAGAKU), 59, 513-520。
- 大竹秀実, 谷口陽子, 青木繁夫 (2007) 「パーミヤーン仏教壁画の保存修復(2) — I窟およびN(a)窟における保存修復 —」『保存科学』46, 189-200。
- ピエール・カンボン (2007) 「ハッダの仏塔再考 — 国立ギメ東洋美術館における復元作業を終えて —」(大竹秀実訳) 『仏教芸術』293, 79-105。
- 肥塚孝, 宮治昭 (編) (1999) 『世界美術大全集 東洋編 13 インド (1)』, 小学館。
- 定金計次 (1988) 『サンスクリット絵画論とインド古代壁画 — 理論と実際 —』(昭和63年度科学研究費補助金 一般研究 (C) 研究成果報告書)。
- 関野貞 (1949) 「寧楽時代の工芸」『仏教芸術』5, 104-117。
- 高林弘実, 趙林毅, 李燕飛, 于宗仁, 范宇權 (2007) 「携帯型蛍光 X 線分析による第285窟壁画に使用された色料の同定」『敦煌壁画の保護に関する日中共同研究 2007』, 38-53, 独立行政法人国立文化財機構東京文化財研究所・敦煌研究院。
- 谷口陽子, 大竹秀実, 前田耕作 (2006) 「パーミヤーン仏教壁画の材質分析 (1) — クロスセクションによる彩色技法の調査 —」『保存科学』45, 1-8。
- 谷口陽子, マリーヌ・コット, エミリー・シェクーン, 大竹秀実 (2007) 「パーミヤーン仏教壁画の材質分析 (2) — シンクロトロン放射光を用いたN(a)窟における錫箔を用いた技法の分析 —」『保存科学』46, 181-188。
- 谷口陽子, マリーヌ・コット (2008a) 「パーミヤーン仏教壁画における油彩技法について」『佛教藝術』298, 13-30。
- 谷口陽子, ジョイ・マズレック (2008b) 「パーミヤーン仏教壁画の材質分析 (3) — ガスクロマトグラフィー/質量分析法を使用した有機物の分析: B(d)窟 —」『保存科学』47, 79-88。
- チェンニーノ・チェンニーニ (1991) 『絵画術の書』(辻茂編訳, 石原靖夫, 望月一史訳), 岩波書店。
- プリニウス (1986) 『プリニウスの博物誌』(第I~III巻)(中野定雄, 中野里美, 中野美代訳), 雄山閣。
- 中村俊夫 (2006) 「第4章 パーミヤーン遺跡の仏教壁画に関連するスサおよび木材のAMSによる放射性炭素年代
-

- 
- 測定』『バーミヤーン仏教壁画の編年—放射性炭素による年代測定—』（アフガニスタン文化遺産調査資料集 第2巻）（独）文化財研究所国際保存修復協力センター／名古屋大学名古屋大学博物館編），117-129，明石書店。
- 成瀬正和（2004）「正倉院宝物に用いられた無機顔料」『正倉院紀要』26，13-60。
- 成瀬正和，飯田剛彦（2005）「X線分析による神護景雲二年御願経の軸端に用いられた顔料の調査」『正倉院紀要』27，69-82。
- 奈良国立博物館（2007）『第59回「正倉院展」目録 [平成19年]』，社団法人仏教美術協会。
- 山内和也（責任編集）（2005）『バーミヤーン遺跡の歴史と保存』（アフガニスタン文化遺産調査資料集 第1巻），明石書店。
- 山内和也（2006）「よみがえる仏教壁画—バーミヤーン N(a)窟—」『佛教藝術』289，95-99。
- 山内和也（責任編集）（2006a）『バーミヤーン仏教壁画の編年—放射性炭素による年代測定—』（アフガニスタン文化遺産調査資料集 第2巻），明石書店。
- 山内和也（責任編集）（2006b）『アフガニスタン流出文化財の調査：バーミヤーン仏教壁画の材料と技法』（アフガニスタン文化遺産調査資料集 第3巻），明石書店。
- 山内和也（編）（2006c）『バーミヤーン遺跡保存事業概報—2006年度（第6・7次ミッション）—』（アフガニスタン文化遺産調査資料集 概報第2巻），アフガニスタン情報文化省 独立行政法人国立文化財機構 東京文化財研究所・奈良文化財研究所。
- 山崎一雄（1985）「密陀絵と法隆寺玉虫厨子」『古文化財之科学』30，37-40。
- 山崎一雄（1999）「正倉院密陀絵，絵画，材質などの特別調査について」『正倉院紀要』21，31-41。
- 吉田茂生，山花京子（2006）「古代エジプト新王国時代のファイアンス遺物の放射光分析—最先端科学による考古学遺物の分析研究とその結果の歴史的解釈」*Civilizations*，9，53-67，東海大学文明研究所。

（筑波大学人文社会系，国立歴史民俗博物館共同研究員）

（2011年7月14日受付，2011年11月11日審査終了）

## Constituent Material Analysis of the Bamiyan Buddhist Wall Paintings in Central Asia (1): Using Synchrotron-based $\mu$ FTIR, $\mu$ XRF/ $\mu$ XRD Analyses

TANIGUCHI Yoko

Approximately 50 caves at the Bamiyan site, once a vast Buddhist monastic complex, were decorated with wall paintings between the early 5<sup>th</sup> and late 9<sup>th</sup> centuries AD. These wall paintings reveal a variety of cultural, technical and material influences from China, Iran, the Mediterranean, India and northern nomadic cultures. Minute painting samples were analysed at the European Synchrotron Radiation Facility (ESRF) in a collaborative research project using synchrotron-based  $\mu$ FTIR and  $\mu$ XRF/ $\mu$ XRD analyses in order to identify constituent materials (both organic and inorganic) and alteration products. Results derived from three samples presented the newly-discovered use of drying oils as binding media. These results were then studied from wider cultural interactions between the West and East along the Silk Road. Synchrotron-based analysis carries the advantage of having a high S/N and small beam size. Simultaneous analysis of SR- $\mu$ XRF/ SR- $\mu$ XRD combined with SR- $\mu$ FTIR analysis enabled the individual analysis of multiple layers within paintings, even where layers were only a few  $\mu$ m thick. It also enabled the identification of each particle within such thin layers.

The Bamiyan wall paintings were made using the *a secco* technique, which involves applying organic binding media mixed with pigments onto earthen rendering layers. Oil painting techniques with a lead white ground appeared in Bamiyan after the mid-7<sup>th</sup> century AD. Fatty acids, resins, amid acids, and polysaccharides were detected within each layer. At this point in time, the wall paintings stand as the oldest example of oil painting techniques in the world. Some layers containing drying oils have changed into lead soaps. The presence of some metal leafs with yellowed varnish, as well as the usage of artificial pigments such as lead white and minium, suggest links with the '*mecca*' technique of medieval Mediterranean art and the '*mitsuda-e*' technique of Shōsōin, which shall be addressed upon reviewing wider cultural interactions between the East and West in the 7<sup>th</sup> century AD.

Key Words: Painting materials, multi-layered structure, SR- $\mu$ FTIR, SR- $\mu$ XRF/ $\mu$ XRD, imaging



表 1 中央アジアの彩色に利用される彩色材料一覧 (顔料の通称名, 鉱物名, 化学組成)

色	顔料・色材名			鉱物名	化学組成
白系	石膏	石膏	gypsum	ジブサム	CaSO <sub>4</sub> ·2H <sub>2</sub> O
	石膏(無水石膏)		anhydrite		CaSO <sub>4</sub>
	石灰白	白亜	chalk	チョーク	CaCO <sub>3</sub>
	鉛白	鉛白	lead white	ハイドロセルーサイト/セルーサイト	2PbCO <sub>3</sub> ·Pb(OH) <sub>2</sub>
	白土	白土	kaolinite	カオリナイト	Al <sub>2</sub> Si <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (OH) <sub>4</sub>
黄系	イエローオーカー(含酸化鉄黄色顔料)	黄土	goethite (yellow ochre)	ゲーサイト	α-FeO(OH)
	オーピメント	石黄(雌黄)	orpiment	オーピメント	As <sub>2</sub> S <sub>3</sub>
	マシコット		massicot	マシコット	PbO
	リサーチ	密陀僧	litharge	リサーチ	PbO
	ガンボージ	ガンボージ	gamboge		natural resin from Guttiferae trees
赤系	鉛丹		minium (lead red)	ミニウム	Pb <sub>3</sub> O <sub>4</sub>
	レッドオーカー(含酸化鉄赤色顔料)	弁柄	haematite (red ochre)	ヘマタイト	α-Fe <sub>2</sub> O <sub>2</sub>
	シナバー	水銀朱(天然)	cinnabar	シナバー	HgS
	ヴァーミリオン	水銀朱(人工)	vermillion	シナバー	HgS
	リアルガー	雄黄	realgar	リアルガー(鶏冠石)	α-As <sub>4</sub> S <sub>4</sub>
マダーレーキ	茜	madder lake		C <sub>14</sub> H <sub>8</sub> O <sub>4</sub>	
青系	ラピスラズリ	ウルトラマリン(天然)	lapis lazuri (ultramarine)	ラズライト、(不純物としてバイライト、カルサイト)	Na <sub>7</sub> Al <sub>6</sub> Si <sub>6</sub> O <sub>24</sub> S <sub>3</sub>
	アズライト	岩群青	azurite	アズライト	2CuCO <sub>3</sub> ·Cu(OH) <sub>2</sub>
	藍	藍	indigo		C <sub>16</sub> H <sub>10</sub> N <sub>2</sub> O <sub>2</sub>
緑系	マラカイト	岩緑青	malachite	マラカイト	CuCO <sub>3</sub> ·Cu(OH) <sub>2</sub>
	アタカマイト(/パラタカマイト)		atacamite(/paratacamite)	アタカマイト(緑塩銅鉱)/パラタカマイト	Cu <sub>2</sub> Cl(OH) <sub>3</sub> /Cu <sub>2</sub> (OH) <sub>3</sub> Cl
	ヴェルディグリ	酢酸銅	verdigris (copper acetate)		Cu(C <sub>2</sub> H <sub>3</sub> O <sub>2</sub> ) <sub>2</sub> ·2Cu(OH) <sub>2</sub>
	ヴェルディグリ	樹脂酸銅	verdigris (copper resinate)		Cu(C <sub>19</sub> H <sub>29</sub> COO) <sub>2</sub>
	クリソコラ	クリソコラ	chrysocolla	クリソコラ(硅孔雀石)	(Cu,Al) <sub>2</sub> H <sub>2</sub> Si <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (OH) <sub>4</sub> ·n(H <sub>2</sub> O)
	緑土	緑土	celadonite (green earth)	セラドナイト	K(Mg,Fe)(Fe,Al)Si <sub>4</sub> O <sub>10</sub> (OH) <sub>2</sub>
	緑土	緑土	glauconite (green earth)	グルーコナイト(海緑石)	(K,Na,Ca) <sub>1.2-2.0</sub> (Fe <sup>+3</sup> ,Al,Fe <sup>+2</sup> ,Mg) <sub>4</sub> (Si <sub>7-7.6</sub> Al <sub>1-0.4</sub> O <sub>20</sub> )(OH) <sub>4</sub> ·7nH <sub>2</sub> O
黒系	ボーンブラック	骨炭	bone black		C + Ca <sub>3</sub> (PO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub>
	チャコールブラック(カーボンブラック)	木炭	charcoal black (carbon black)		C
	ランプブラック	油煙炭	lamp black		C
	マグネタイト		magnetite	マグネタイト	Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub>
金属箔	金箔	金箔	gold leaf	金	Au
	錫箔	錫箔	tin leaf	錫	Sn + Pb (impurity)

表2 膠着材(有機物質)の種類と彩色技法の関係

膠着材(有機物質)の種類		代表的な彩色技法
植物由来分泌物	a ガム(多糖類):アラビアゴム、トラガカントガムなど b ガム樹脂:アカシアガム、スモモ膠、桃膠など c 樹脂	水溶性 弱水溶性 酒精など有機溶剤に可溶
タンパク質	・動物性膠 ・卵 ・ミルク ・カゼイン	日本画など 卵テンペラ
乾性油	亜麻仁油、ポピー油、胡桃油、桐油など	油彩画
植物由来粘性物質	・でんぷん	
蜜蝋	・蜜蝋	エンカウスティック

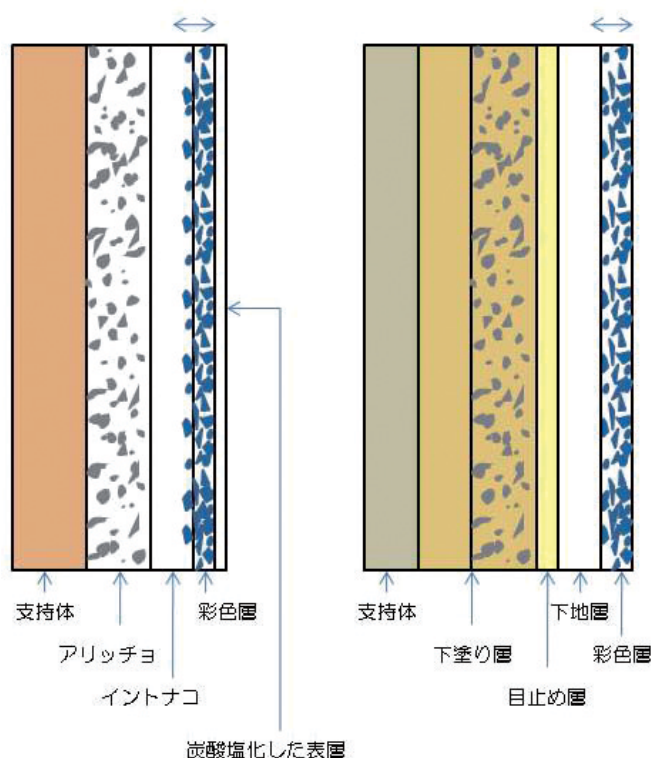


図1 フレスコ壁画(左)と練り土壁を支持体とするセッコ壁画(右)の断面模式図

ブオン・フレスコの場合、岩壁やレンガ等の支持体の上に、石灰と砂からなる石灰モルタルの下塗り(アリッチョ)層を塗布し、オーカーによる下描き(シノビア)を描き、その上に石灰モルタル(イントナコ)層を塗り彩色を施す。中央アジアのセッコ壁画の場合、岩壁やレンガ等の支持体の上に、砂や藁スサ等を混ぜた下塗り層を複数回塗布し、絵具の浸み込みを抑制するために有機物質からなる目止め層を施す。さらに、白色の下地層を塗布して画面を作成したうえで下描きおよび彩色を施す。

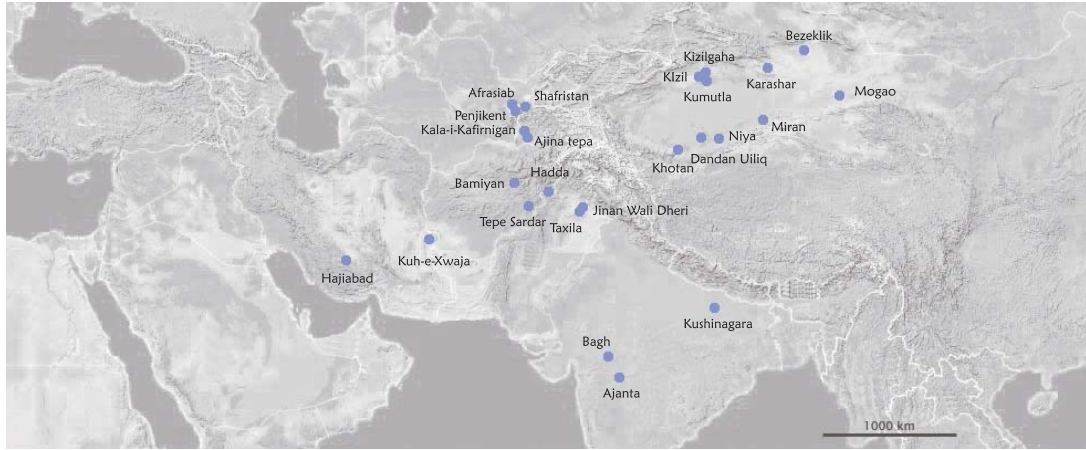


図2 バミヤーン遺跡と4～9世紀のセッコ壁画が見られる主要な遺跡の位置

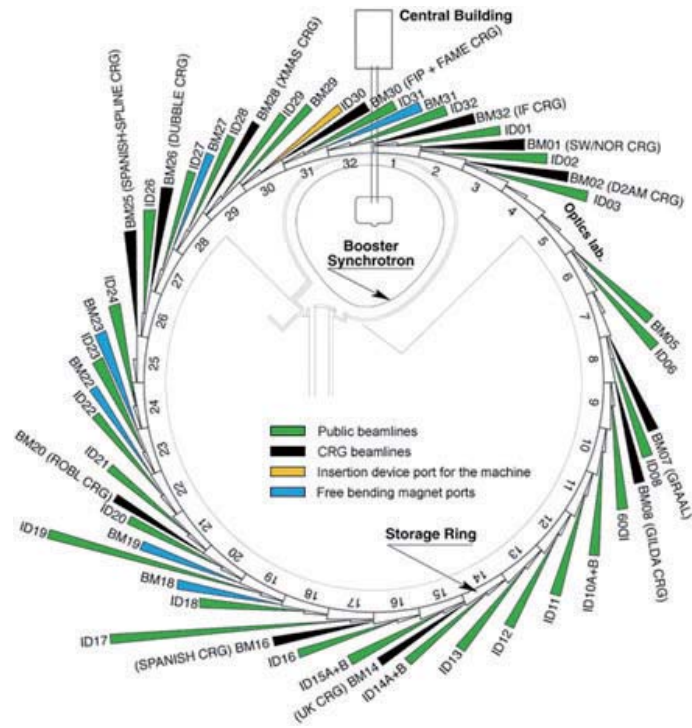


図3 ESRFにおけるビームライン

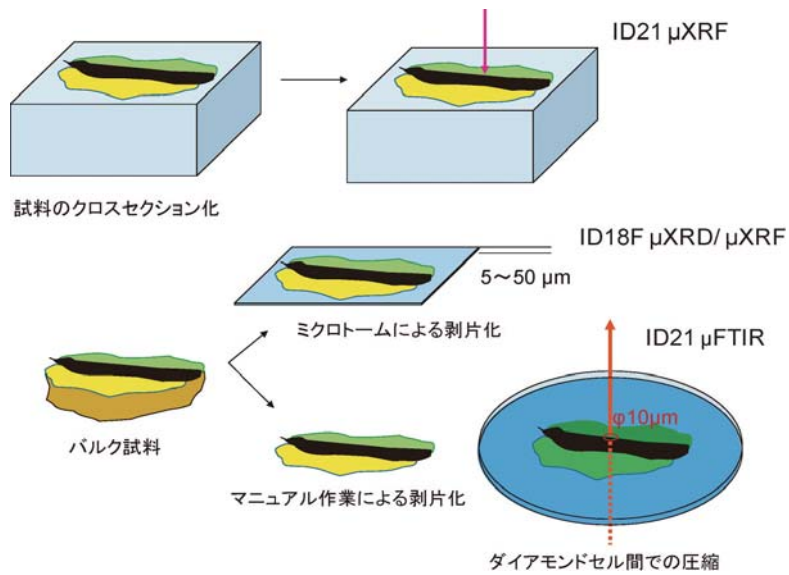


図4 シンクロトロン放射光を用いた各分析のための試料調製

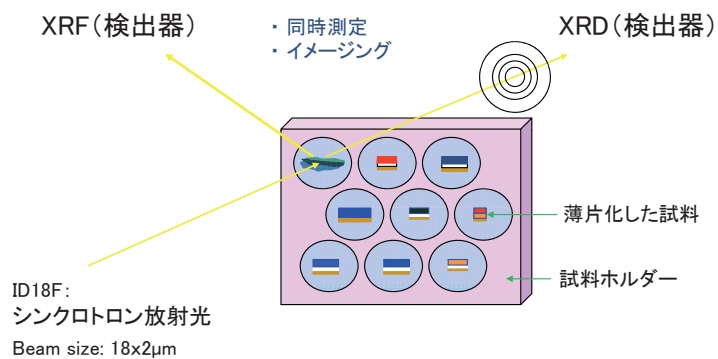


図5 シンクロトロン放射光を用いた $\mu$ XRF/ $\mu$ XRD同時測定の設定

N(a) 窟天井見上げ図

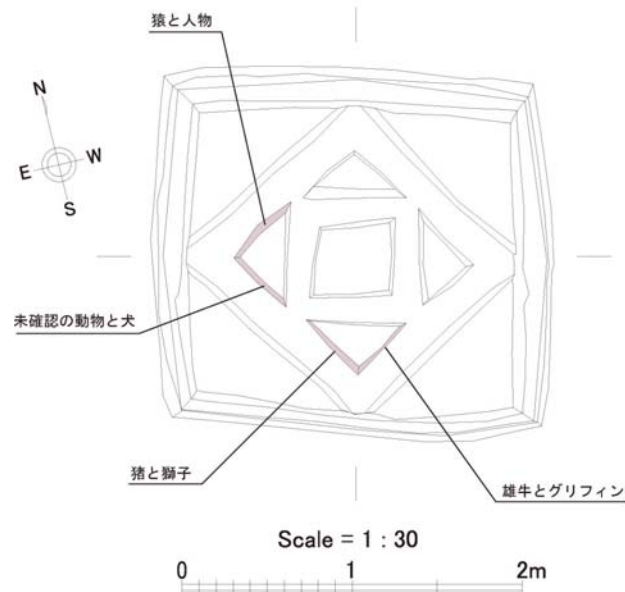


図6 N(a)窟で確認された動物・唐草文様の位置

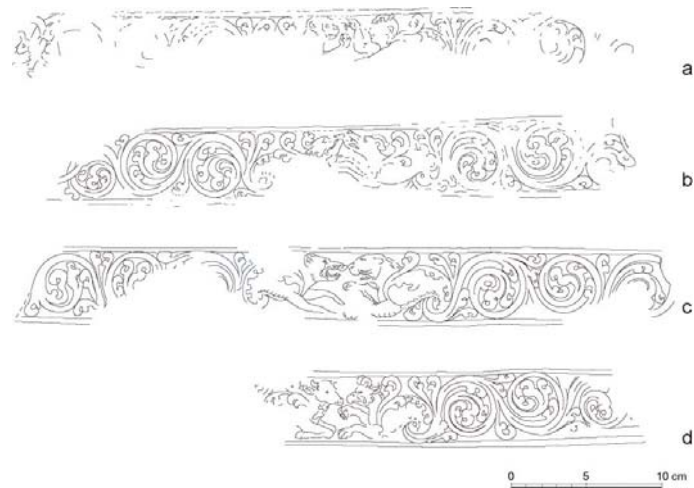


図7 N(a)窟で確認された動物・唐草文様

(a. 猿と人物, b. 未確認の動物と犬, c. 猪と獅子, d. 雄牛とグリフィン)

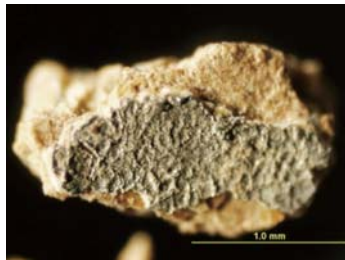


図8 実体顕微鏡像 (BMM177)

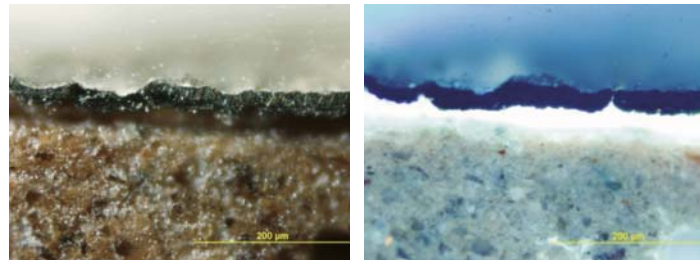


図9 クロスセクションの偏光顕微鏡像 (BMM177)  
(左: 通常光源, 右: 紫外線)

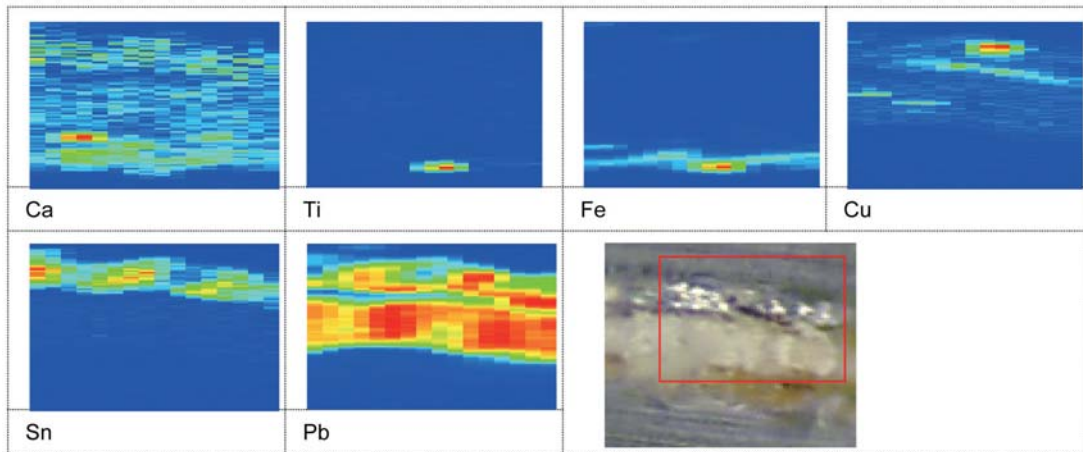


図10 SR-μXRFマッピング (PyMCA: ID18)  
(BMM177)

map 100×150μm<sup>2</sup> Step 1×10μm<sup>2</sup>

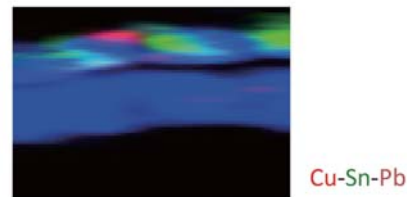


表3 各層から検出された元素と想定される顔料 (BMM177)

層番号	部位	色	主要同定元素	想定される顔料名、変色生成物・含有物
1	グレース	青黄色	Cu, K, Ca, Cl	塩化銅/シュウ酸銅/シュウ酸カルシウム
2	彩色層	銀色	Sn, Pb	錫箔 (鉛含む)
3	モルダント	黒色		
4	下地	白色	Pb, Ca	鉛白 (ハイドロセラーサイト>セラーサイト)、 フランボナクライト ( [Pb <sub>5</sub> O(OH) <sub>2</sub> (CO <sub>3</sub> ) <sub>3</sub> ] )、 ラズライト
5	目止め	褐色	Ca	石英、カルサイト

註) ID21におけるXRFデータとID18におけるXRDデータを統合して解析を行った

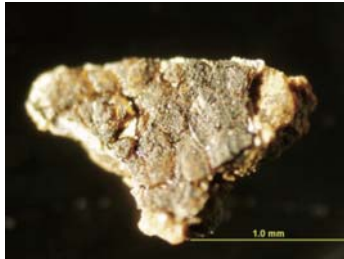


図11 実体顕微鏡像 (BMM186)

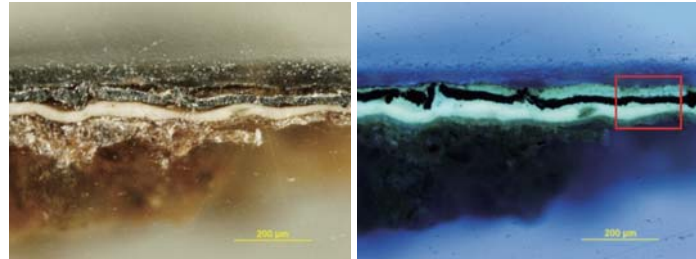


図12 クロスセクションの偏光顕微鏡像 (BMM186)  
(左: 通常光源, 右: 紫外線) 赤線枠はマッピング範囲

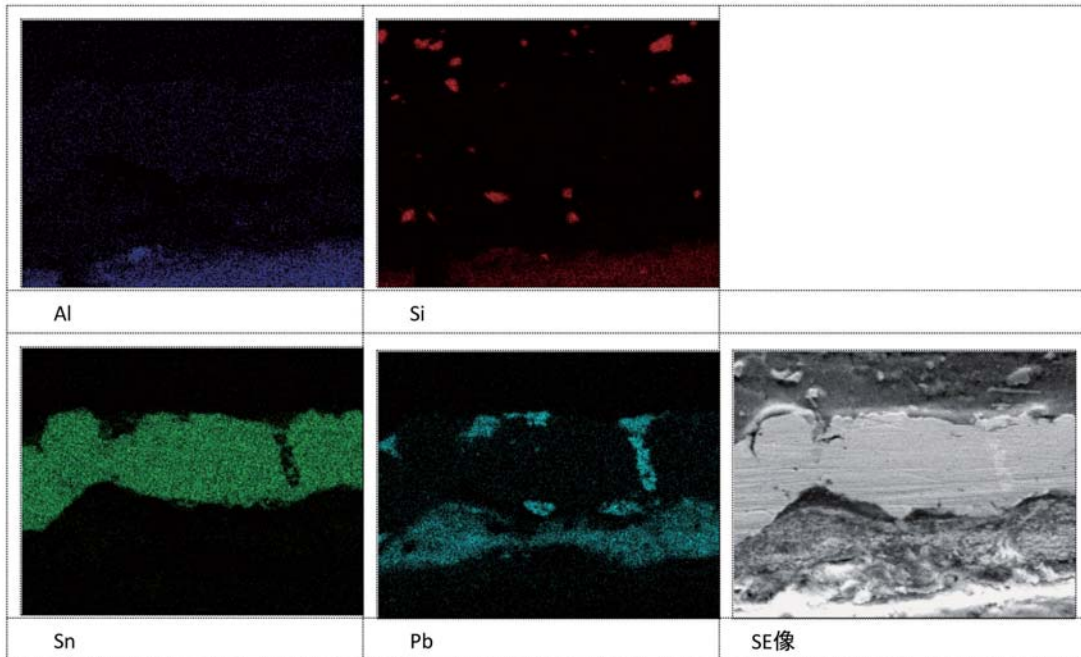


図13 SEM-EDSマッピング (BMM186)

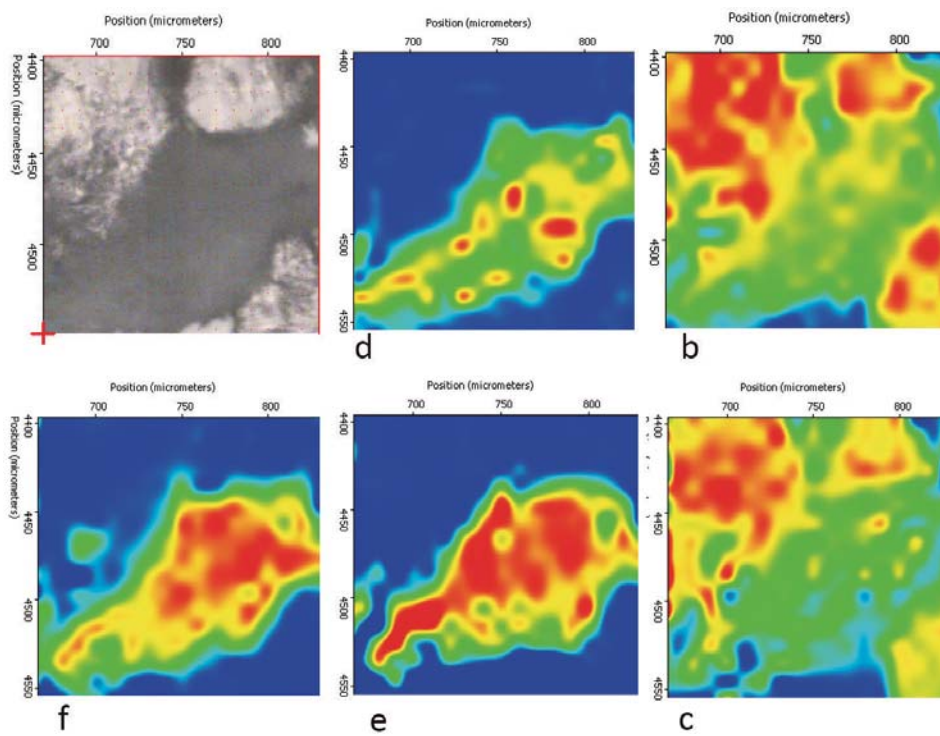
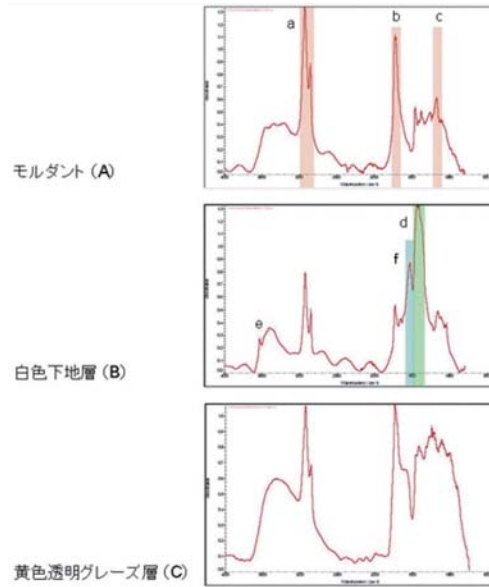
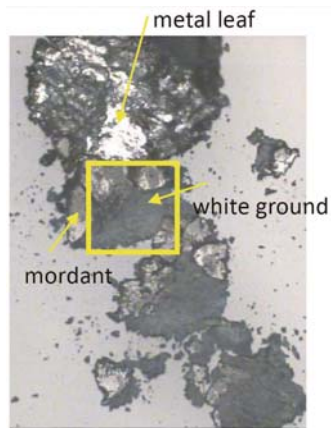


図14 SR- $\mu$ FTIRによる分析範囲とFTIRイメージング (ID21)(BMM178)



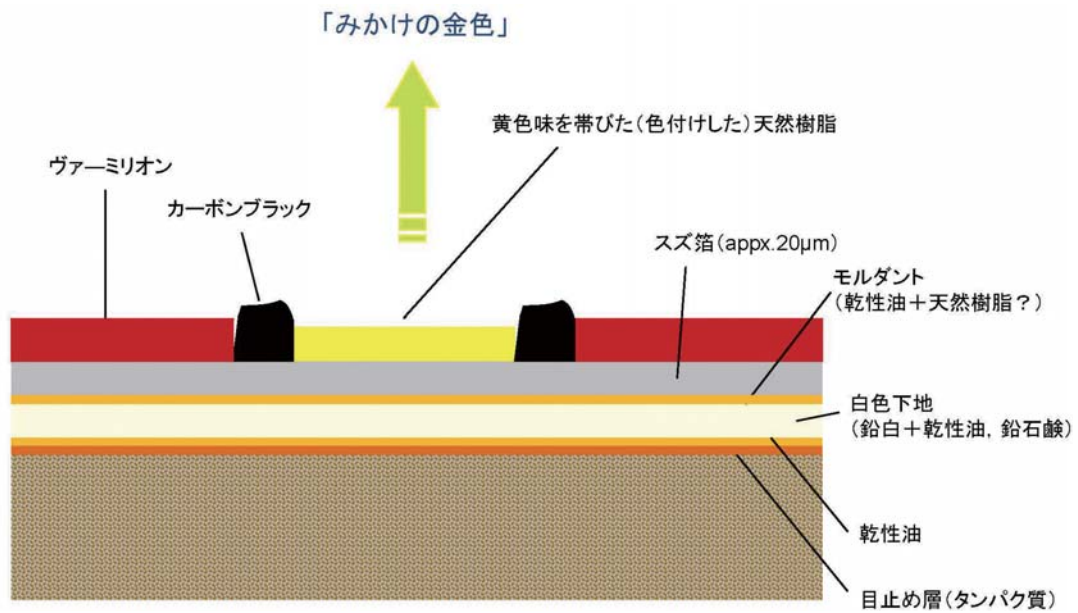


図15 N(a)窟天井梁部分におけるスズ箔を用いた壁画装飾技法の模式図



図16 N(a)窟東壁樹神像の全体像(内戦による破壊後): 黄色丸印は試料[BMM035]を採取した部分



図17 破壊前のN(a)窟東壁樹神像 (1970年前田耕作撮影)



図18 実体顕微鏡像(BMM035)

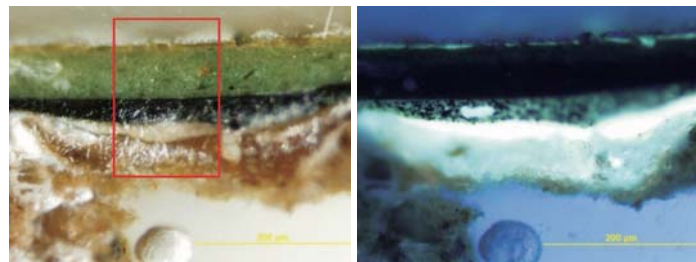


図19 クロスセクションの偏光顕微鏡像(BMM035) (左:通常光源, 右:紫外線) 赤線枠はマッピング範囲

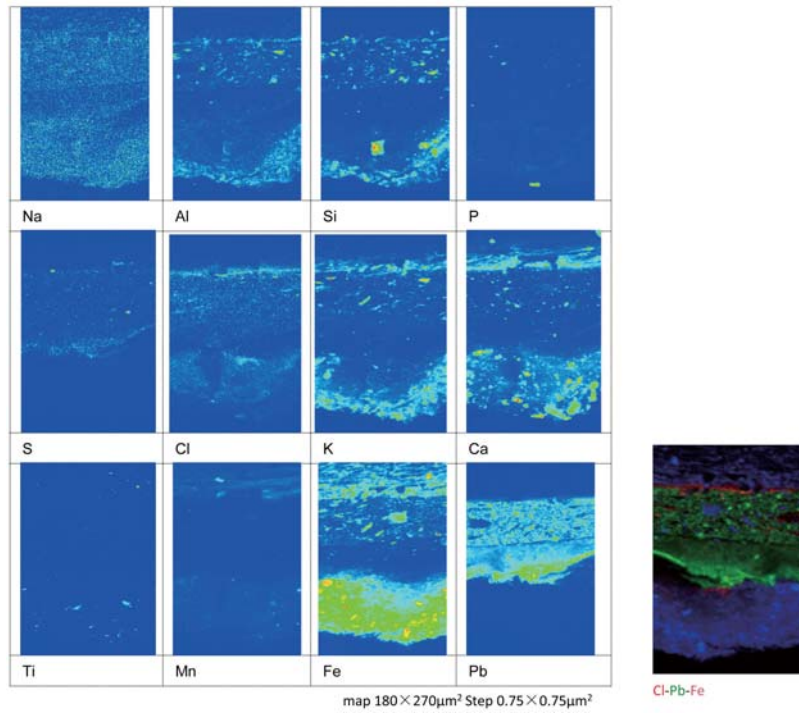


図20 SR-μXRFマッピング (PyMCA : ID21) (BMM035)

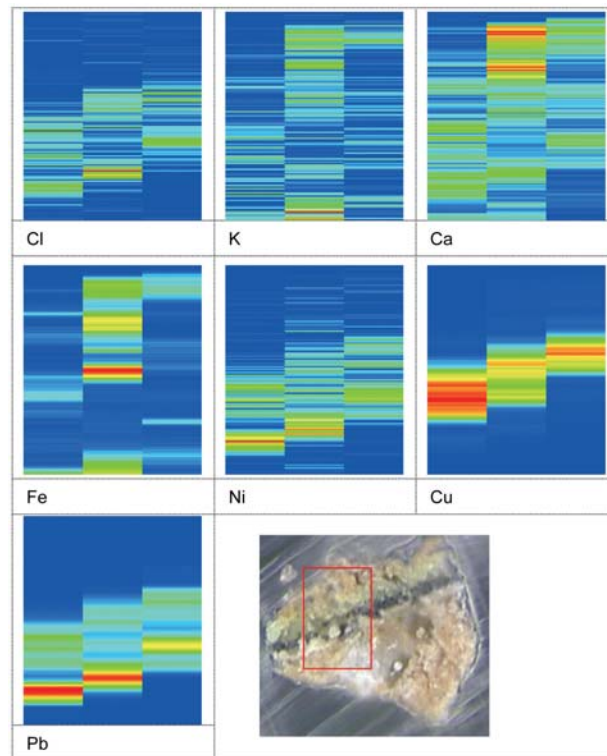


図21 SR-μXRFマッピング (PyMCA : ID18) (BMM035)

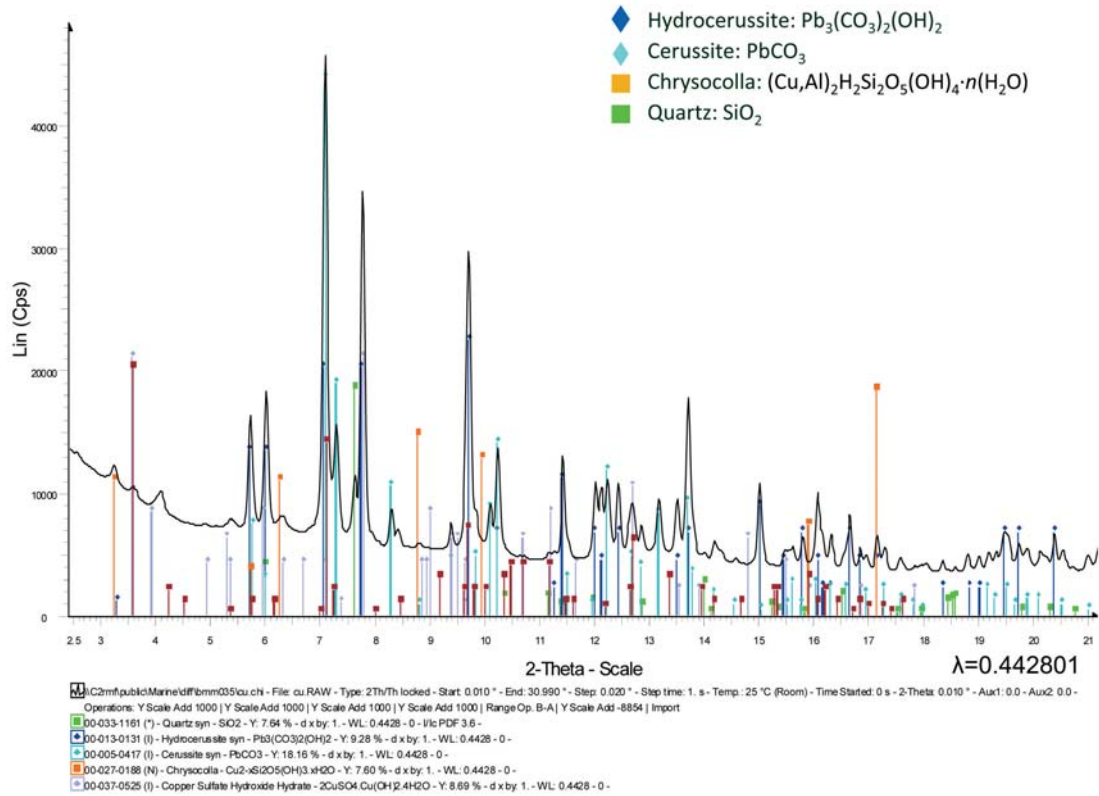


図22 緑色(彩色層)のX線回折パターン(BMM035)

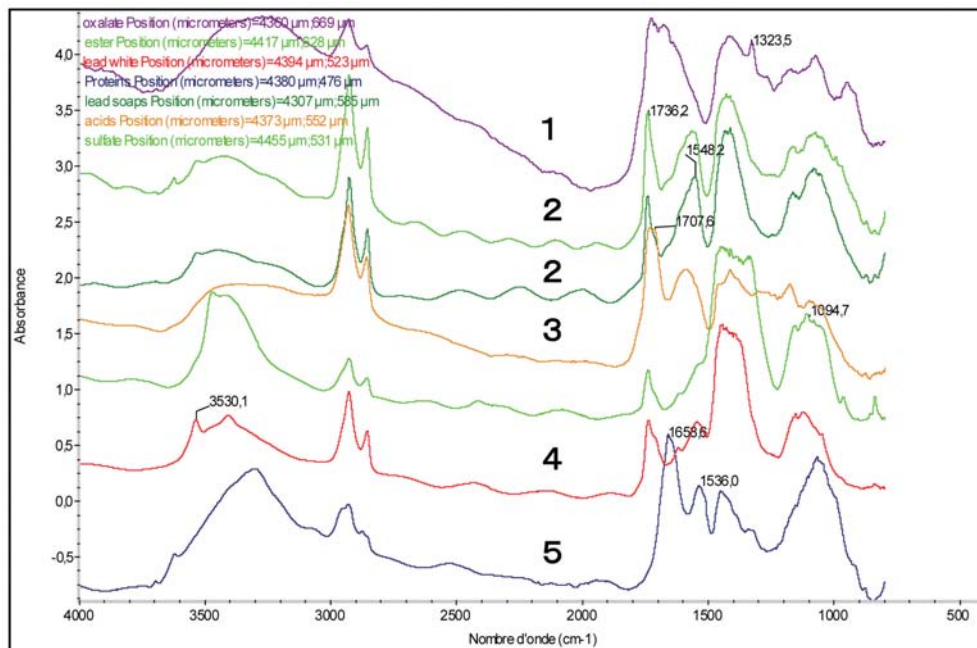
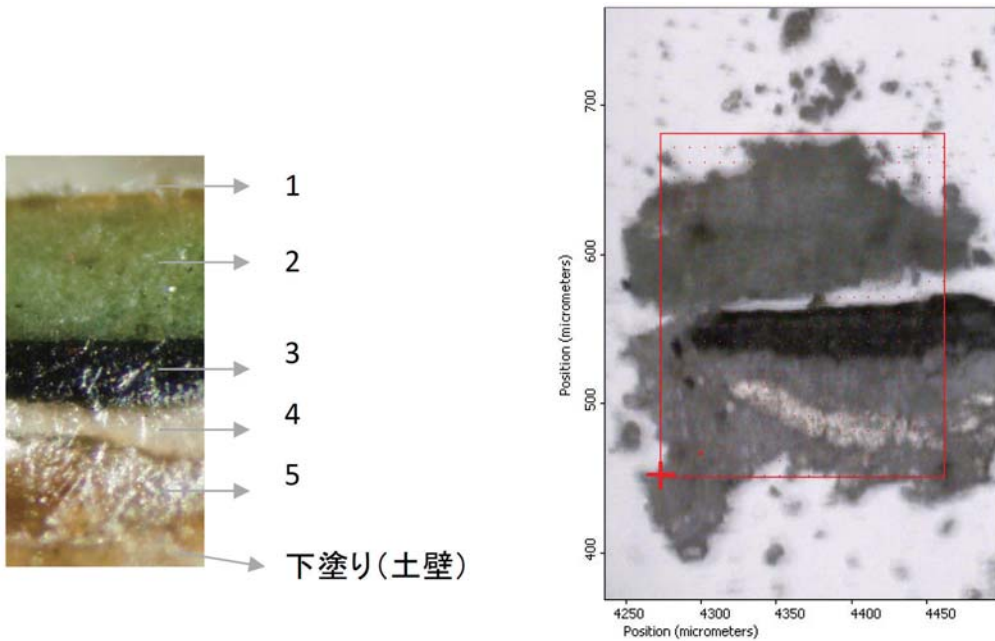
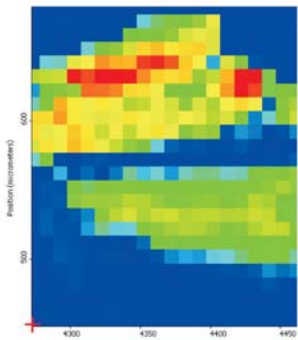


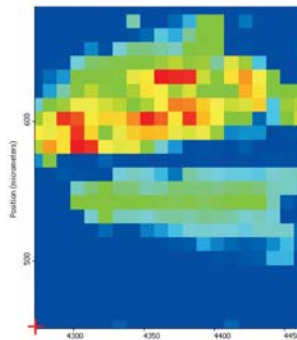
図23 各層から得られたFTIRスペクトル(BMM035)



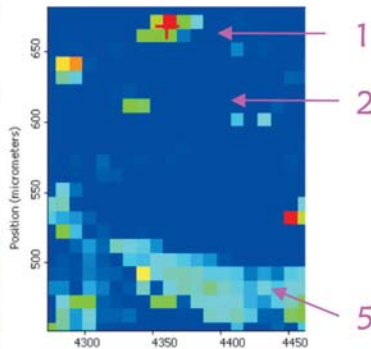
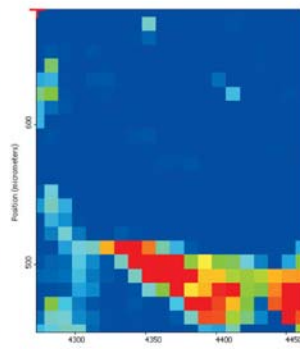
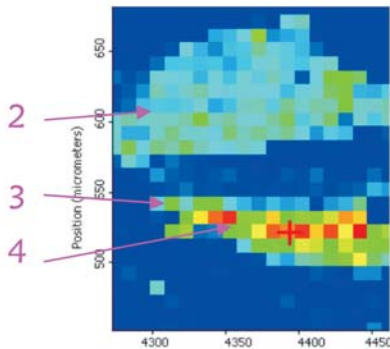
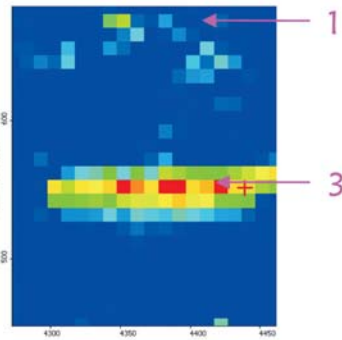
**Esters**  
(1747/1722;1752/1722 $\text{cm}^{-1}$ )



**Metal Soaps**  
(1564; BS:1622/1500 $\text{cm}^{-1}$ )



**Acids**  
(1727/1707;1727/1702 $\text{cm}^{-1}$ )



**Hydrocerussite**  
(3563-3502 $\text{cm}^{-1}$ )

**Amide I**  
(1667/1637;1672/1637 $\text{cm}^{-1}$ )

**Oxalates**  
(1341-1308 $\text{cm}^{-1}$ )

図24 SR-μFTIRによる分析範囲とFTIRイメージング (ID21) (BMM035)

表4 各層から検出された元素と想定される顔料、有機物質 (BMM035)

層番号	部位	色	主要同定元素	想定される顔料名、変色生成物・含有物
1	表面付着物	淡黄色	Ca, K	シュウ酸カルシウム
2	グレース	透明黄色	Al, Ca, Fe, K, Mn, Si, Cl	有機物質 (樹脂)
3	彩色層	緑色	Cu, Cl, Pb, Fe, Si	銅系緑色顔料 (クリソコラ: ケイ酸銅、アタカマイド (?), シュウ酸銅)、鉛白 (ハイドロセルーサイト、セルーサイト)、イエローオーカー、乾性油
4		黒色	Pb	鉛白、カーボンブラック、樹脂、乾性油
5	下地層	白色	Pb, Cl	鉛白、乾性油
6	目止め	褐色	Fe, K, Mn, Al, Si, Ca	有機物質 (タンパク質)、シュウ酸カルシウム

註) ID21 と ID18 における XRF, XRD, FTIR データを統合して解析を行った

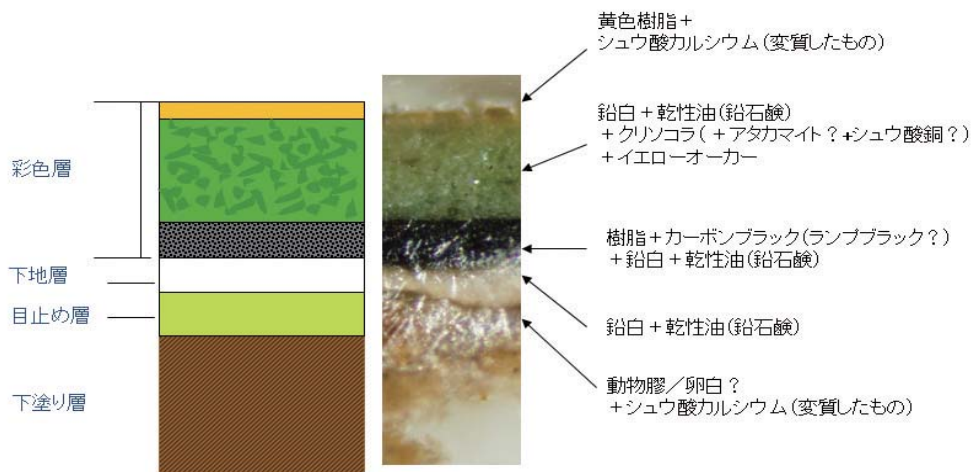


図25 N(a)窟東壁樹神像の緑色部分の層構造模式図 (BMM035)



図26 フォーラーディー4窟天井壁画の全体 (2007年撮影)



図27 フォーラーディー4窟天井壁画の断片  
現在は、流出文化財保護日本委員会にて保管されている  
[写真: 流出文化財保護日本委員会/東京藝術大学]

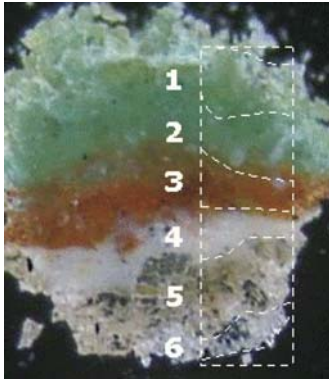


図28 ダイヤモンドセル間で圧縮した試料。彩色が重層構造になっていることが観察される (FDM055)

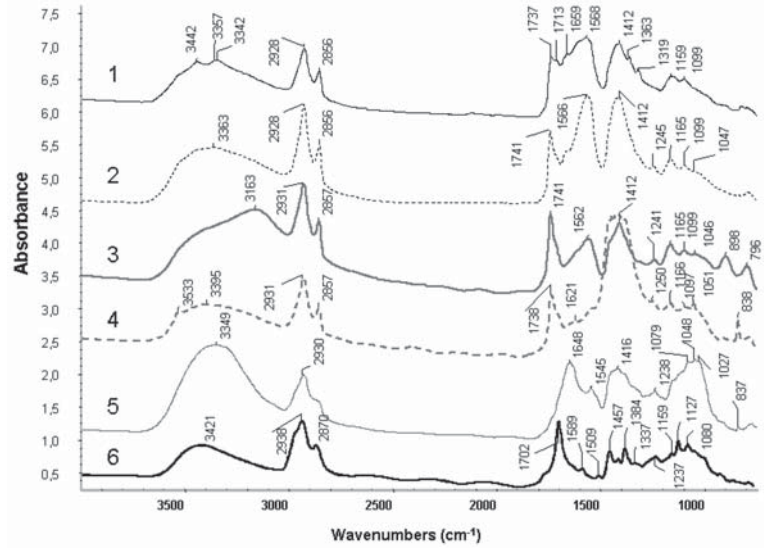


図29 各層から得られたFTIRスペクトル(左図の層番号と対応)(FDM055)

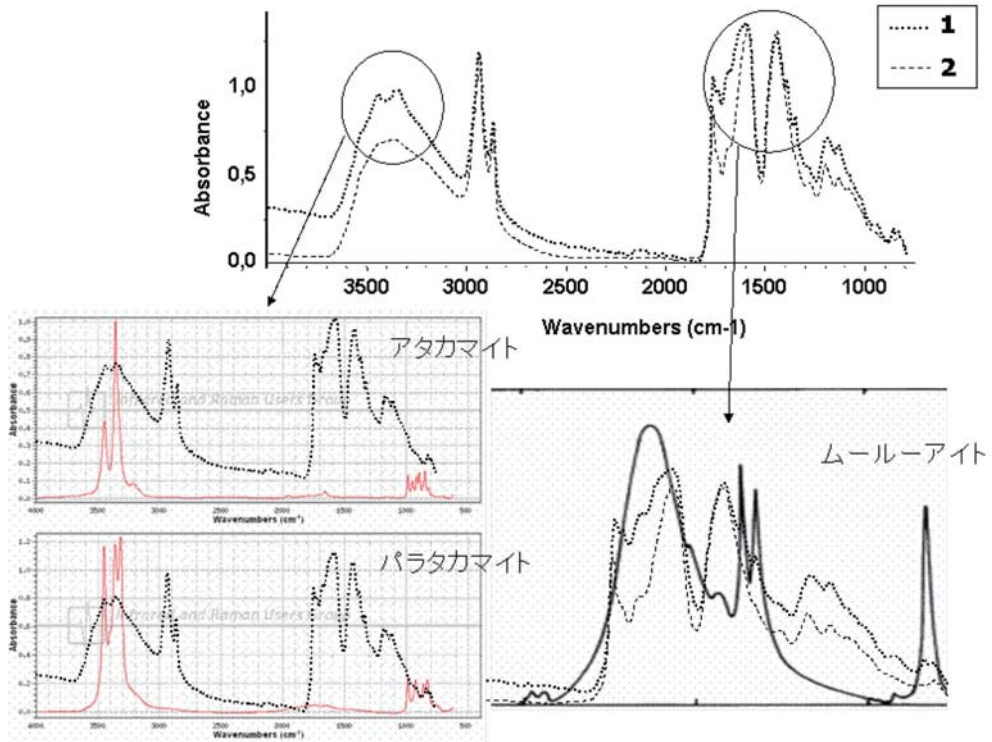


図30 彩色表面の明緑色部分(1)と緑色の彩色層(2)と、アタカマイト・ムルーアイトのスペクトルとの比較 (FDM055) 註1)

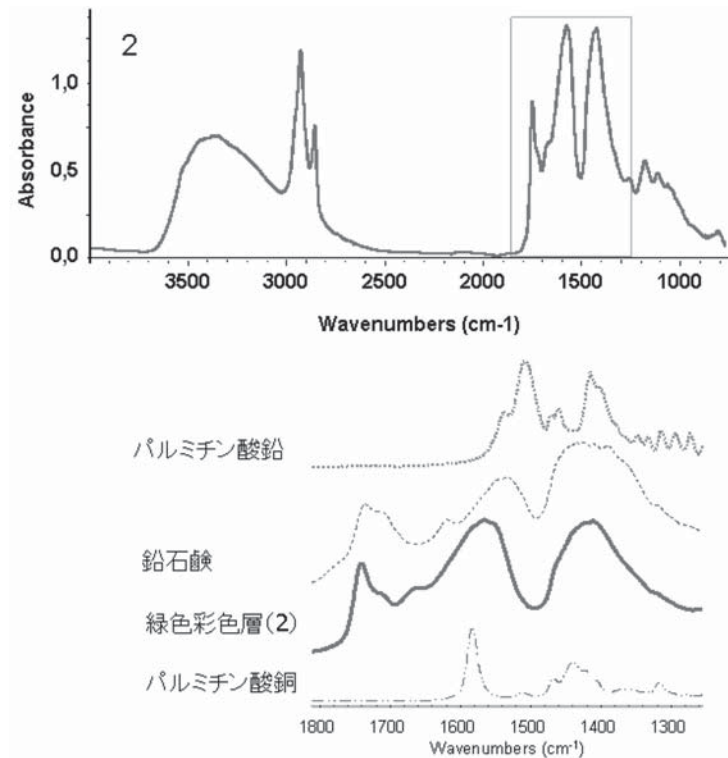


図31 緑色の彩色層(2)のスペクトルと、顔料由来の銅・鉛と油との反応生成物である有機金属塩との比較 (FDM055)

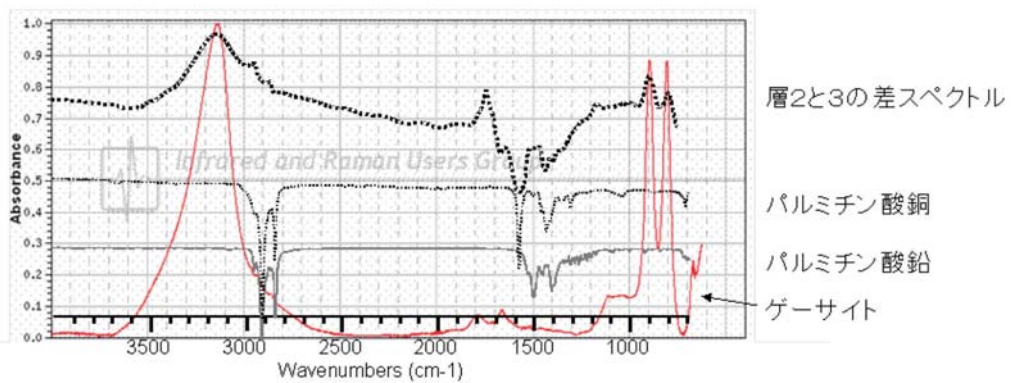
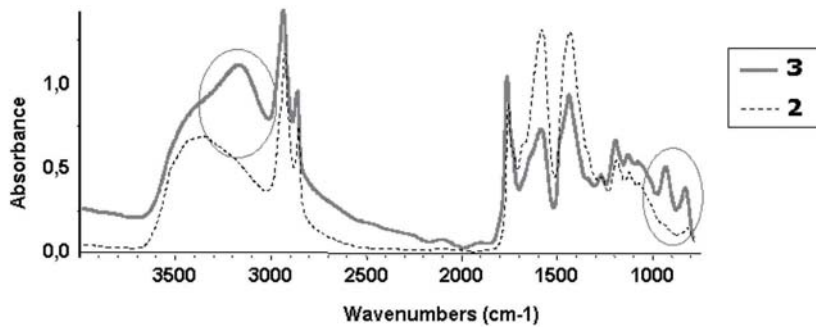


図32 赤色の彩色層(3)と緑色の彩色層(2)の差スペクトルとゲージサイト註2), 有機金属塩のスペクトルとの比較 (FDM055)

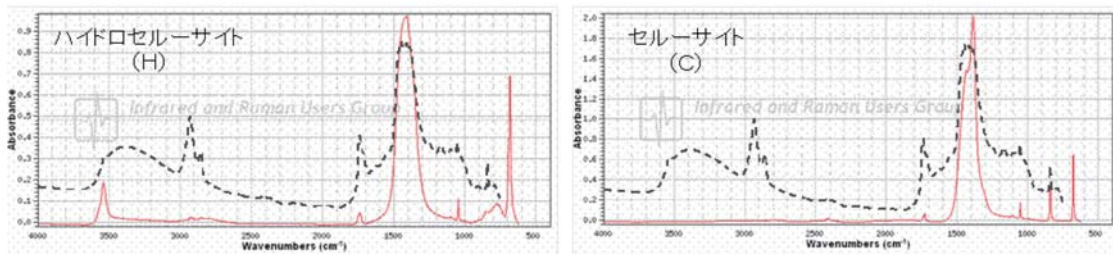
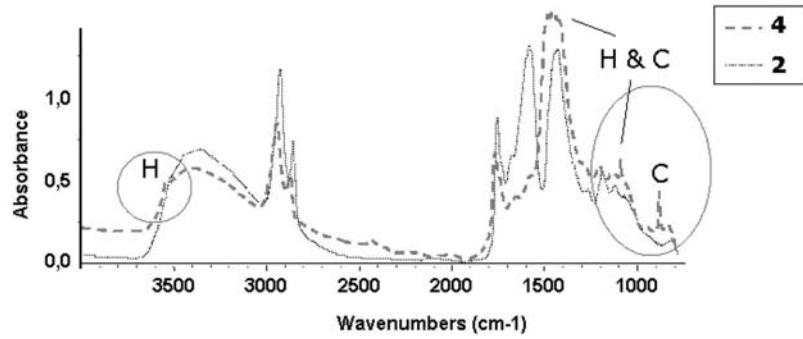


図33 白色下地層(4)と緑色の彩色層(2)と鉛白(ハイドロセルーサイト註3とセルーサイト註4)のスペクトルとの比較(FDM055)

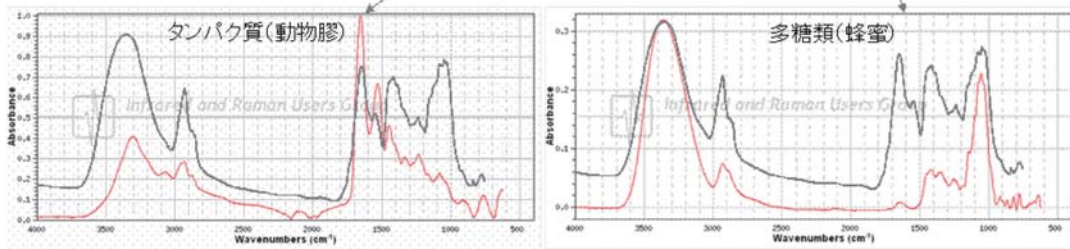
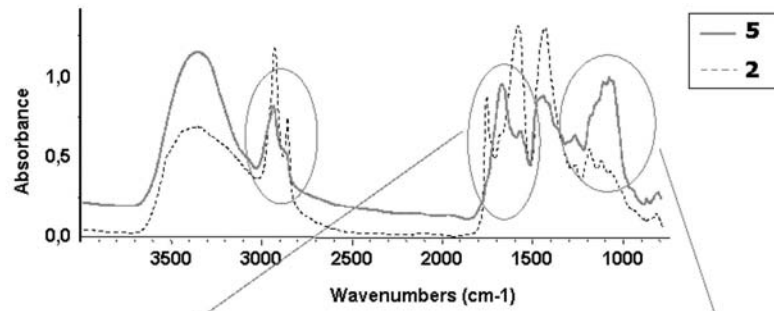


図34 黄色透明のサイジング層(5)とタンパク質(参考:動物膠), 多糖類(参考:蜂蜜)のスペクトルとの比較(FDM055)



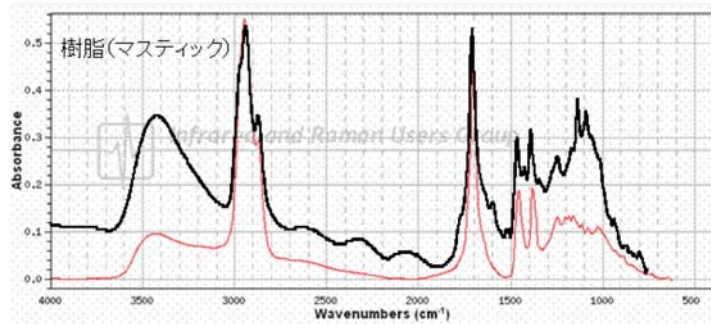
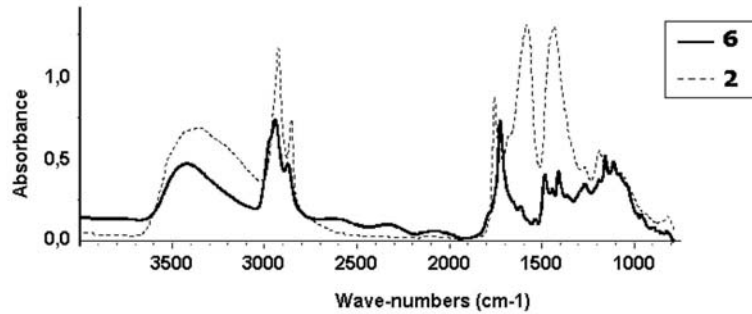


図35 透明なサイジング層(6)と天然樹脂(参考:マスティック樹脂註5)のスペクトルとの比較(FDM055)

表5 各層から検出された元素と想定される顔料, 有機物質, 膠着材 (BMM055)

層番号	部位	色	主要同定元素	想定される顔料名、変色生成物・含有物
1	変色生成物	白緑色	Cu, Cl, Ag, (K)	シュウ酸銅 (ムールーアイト)
2	彩色層	緑色		アタカマイト、カルボン酸銅/鉛、乾性油
3		白色	Pb, Cl, Ca, Mn, As	鉛白 (ハイドロセラーサイト>セラーサイト)、オーピメント、カルボン酸鉛、乾性油
4		赤色	Pb, Ca, Fe, Co, As	鉛丹、レッドオーカー (ゲーサイト)、カルボン酸鉛、乾性油
5		下地層		白色
6	目止め	透明黄色		タンパク質、多糖類
7		透明薄黄色		樹脂
8	下塗り層	褐色	K, Mn, Ti, Fe	土系、石英

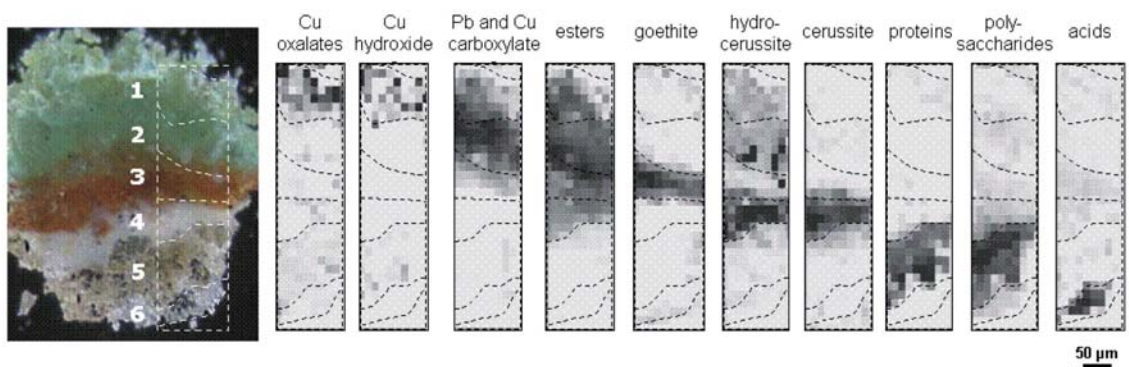


図36 SR-μFTIRによって得られた、それぞれの物質に特徴的な吸収の波長領域を抽出して得られたマッピング (FDM055)

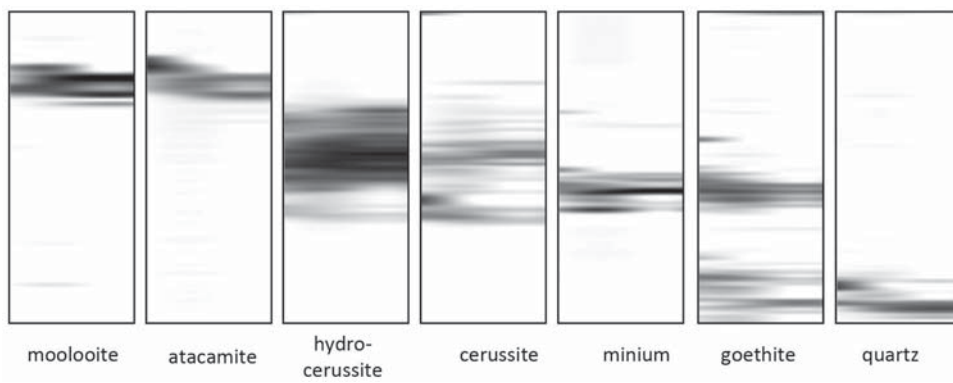


図37 SR-μXRDによる鉱物分析の結果のマッピング (BMM055)

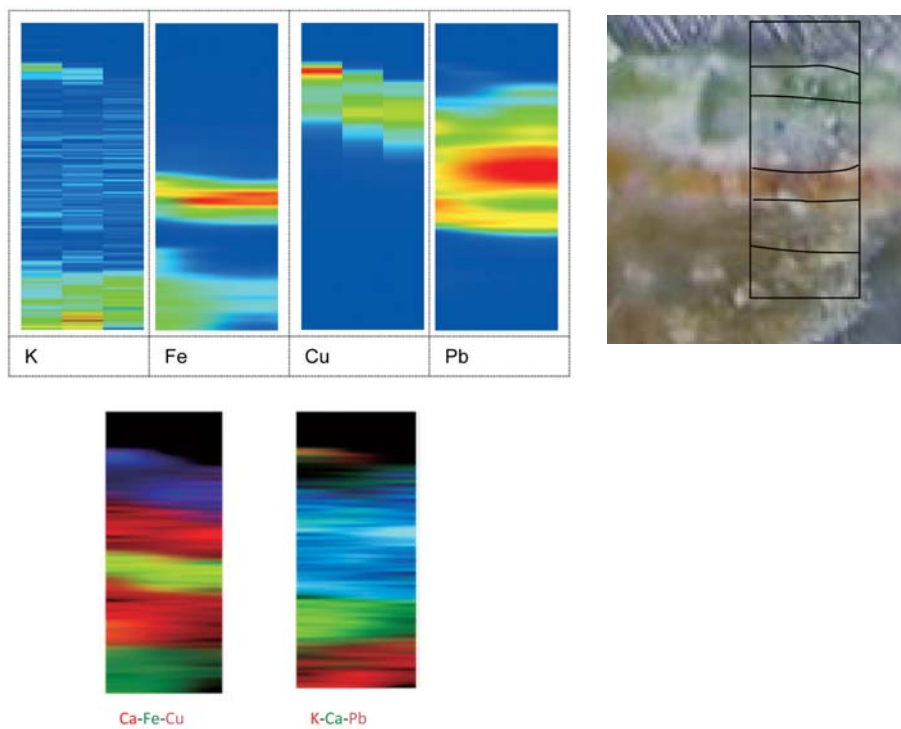


図38 SR-μXRFマッピング (PyMCA : ID18) (BMM055)

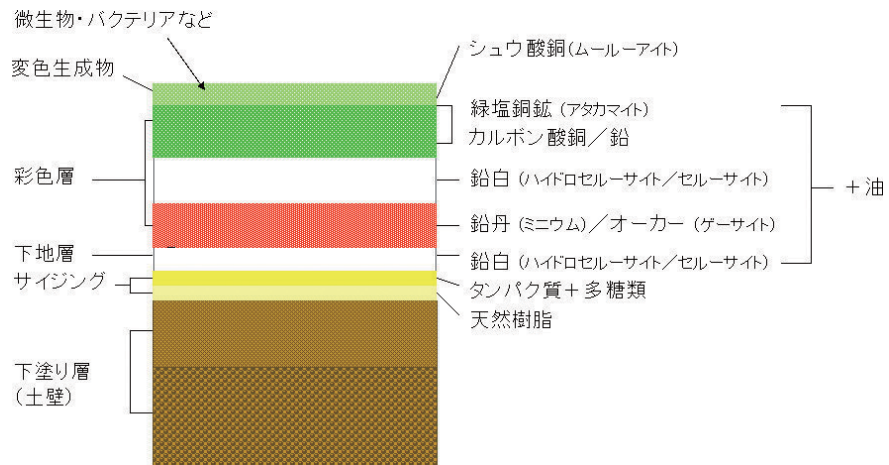


図39 フォーラーディー4層緑色部分の層構造

