

〔報文〕敦煌莫高窟第 285 窟壁画に使用された 彩色材料の非接触分析

高林 弘実・小瀬戸 恵美*・于宗仁**・范宇権**

1. はじめに

シルクロードの要衝である敦煌の郊外に開かれた仏教石窟寺院遺跡・莫高窟には、数多くの壁画が残されている。しかし、これらの壁画の多くは長い年月を経て制作当初の状態からは大きく劣化している。これらの壁画の図像、彩色材料、製作技法などの包括的研究は、制作当初の壁画の具体相を復元的に提示する。壁画の復元プロセスでは、壁画の劣化プロセスに関する諸情報が同時に得られると考えられるため、壁画の劣化機構の解明と保存技術の確立に有用である。自然科学的方法論からの彩色材料の評価、特に理化学分析による彩色材料の同定は、壁画本来の色彩を知る手がかりとなり、壁画研究において従来から行われている研究手法のひとつである。莫高窟でも既に多くの分析結果が報告されている^{1,2)}。しかし、従来から莫高窟で行われてきた色料同定法は、壁画から採取した試料の分析調査を中心としているため、調査を行える箇所に制約があり、石窟全体について網羅的に調査を行うことは困難であった。本研究は、非接触分析手法による調査を行うことによって、中国西魏時代（6世紀前半）の重要窟とされる莫高窟第285窟の壁画に使用された色料をより網羅的、かつ総合的に評価をすることを目的とする。

2. 調査対象

本研究の調査対象は、莫高窟第285窟壁画である。この石窟は、約6m四方の平面方形の石窟で、伏斗式天井を持つ。北壁に西魏の大統4年（西暦538年）および5年（西暦539年）という紀年銘を持つ発願文を残し、造営年代をほぼそのころと推定することができる石窟であるため、早期莫高窟の編年を考察する上で重要な石窟とされる。壁画は、東西南北の壁および天井のほぼ全面に現存する。写真1および2に第285窟西壁および南壁の正常光写真を各々示す。西壁は、正壁であり、壁面には大小3つの龕が開かれ、中央の主龕には主尊、左右の小龕には比丘の塑像がある。壁面には、上段は青い背景、中段より下および龕内には赤い背景をもつ壁画が描かれている。一方、南壁では壁面全体に白色下地が施されており³⁾、白色の背景をもつ壁画が描かれている。西壁には西域的なモチーフと表現による壁画が、西壁以外の南、北および東壁と天井には中国的影響が色濃い壁画が描かれている。天井には、中国神仙思想のモチーフが描かれている。このように異なる絵画様式およびモチーフが混在する壁画は、美術史研究のみならず、当時の文化交流や宗教の実態を理解する上でも重要であるため、これまでに多くの研究者が注目してきた^{4,5)}。色料に関しても、壁画から採取した試料のX線回折法による無機顔料の分析の報告がある²⁾。



写真1 敦煌莫高窟第285窟西壁の正常光写真

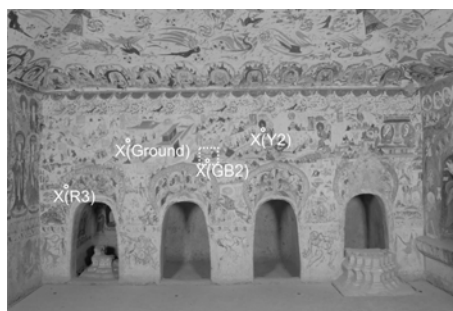


写真2 敦煌莫高窟第285窟南壁の正常光写真

3. 調査方法

壁画に使用された色料を同定することを目的として、(i)可視光下における肉眼観察、(ii)デジタル顕微鏡(キーエンス製VH-5000)による壁画表面の観察、(iii)携帯型蛍光X線分析装置による元素分析、(iv)携帯型ラマン分光分析による材質分析を南壁・西壁に重点をおいて行った。

本研究で使用した蛍光X線分析装置は、放射線源、小型X線検出器、小型マルチチャンネルアナライザ、プリアンプ、パーソナルコンピュータを組み合わせたものである⁶⁾。線源にはAET Technology製の²⁴¹Am密封環状線源(AMRB8774)、X線検出器にはAMPTEK製XR-100CR-0.5 BE-S7)、マルチチャンネルアナライザにはAMPTEK製MCA8000A⁷⁾、プリアンプにはAMPTEK製PX2CRを使用した。壁面と測定ヘッドの距離は2～5 mm程度である。測定時間は1000秒とした。

ラマン分光分析では、Smiths Detection製のResponderを使用した。励起レーザーは785nm、75mW、測定範囲は225～2400cm⁻¹、最大解像度は12cm⁻¹である。測定時間は60秒とした。分析によって得られるラマンスペクトルは測定時の壁面と測定ヘッドの幾何学的条件に敏感であった。しかし、石窟内では分析機器の十分な固定や精密なハンドリングが困難であったため、ラマンバンドが得られたのは分析を試みた箇所の一部であった。また、このような事情からバンドが得られても再現性が低かったため、同一箇所でも複数回の測定を行って、彩色層を持つラマンバンドを評価した。

第285窟では今回の調査に先立ち、東西南北の壁面および天井の全面について写真撮影による光学調査を行っている³⁾。また、南壁では分光光度計(Photo Research製 PR-650)による分光反射率測定を行っている⁸⁾。今回の調査では、まず肉眼観察と光学調査で撮影された紫外線蛍光写真を基に壁画彩色を便宜的に分類し、それら各々についての分析を行うことによって、使用されている色料の全容の把握を試みた。尚、本稿で示す紫外線蛍光写真はデジタルカメラ(ニコン製 D200)を使用し、バラストレス水銀ランプを光源として撮影したものである。レンズはニコン社製のAF-S DX Zoom-Nikkor ED 17-55mm F2.8 G(IF)であり、Kodak社のWratten Gelatin Filter No. 2Eでレンズ内に進入する紫外線領域の光を遮断して撮像している³⁾。以下では、彩色が呈する色ごとに結果を述べる。

4. 結果および考察

4-1. 赤色を呈する色料

4-1-1. 肉眼観察および紫外線蛍光写真に基づく分類

西壁に描かれた壁画の一例として、正龕内壁北側の中段に描かれた供養菩薩群像の一部の正

常光写真を示す(写真3)。ここでは、4体の菩薩が一行に並んで描かれている。この4体の菩薩を向かって右からA, B, CおよびDとする。写真3に示した龕内の壁画の背景は、赤色を基調としている。また、この背景には、菩薩たちが散華した花が空間を埋めるように描かれている。次に、写真3に示した部分の紫外線蛍光写真を示す(写真4)。写真4では、背景の赤色を呈する領域で記録されている蛍光の強度は均一ではなく、黄味を帯びた強い蛍光が記録されている部分と、ほとんど蛍光を発していない領域がある。赤い背景の材質の特徴の詳細を述べるために、写真3および4において破線で囲んだ部分を拡大した写真を示す(写真5)。背景となる領域には、R1と図示した赤褐色を呈している領域、R2と図示したR1よりも黄色味が弱く、より赤味の強い色を呈している領域がある。写真4に記録されている蛍光は、R1では弱く、R2では強い。背景の蛍光強度分布が不均一なのは、壁面表層への付着物などの影響ではなく、発色および蛍光特性が異なる色料が複数使用されているためと考えられる。

菩薩群の彩色に使用されている色料に着目すると、向かって一番右の菩薩Aの頭光、右から二番目の菩薩Bの天衣および右から三番目の菩薩Cが身につけている裙の色は、明度の高い赤色の濃淡によって表現がなされている。これらの部位では白色色料の上に赤色色料が塗布されていることが、赤色色料が剥落している部分の観察で確認できた。また、この赤色色料は透明度が高く、下に塗られている白色色料が透けてみえる。これらの部位の紫外線蛍光写真(写真4)には、黄味を帯びた強い蛍光が記録されている。菩薩Aの頭光の中心部などでは赤色色料が剥落し、下に塗られた白色の塗膜層が露出しているが、この剥落した部分が発する蛍光は赤色部分と比較して微弱である。強い蛍光は赤色色料層に由来するものと考えられる。この透明度の



写真3 正龕北側内壁の正常光写真



写真4 正龕北側内壁の紫外線蛍光写真

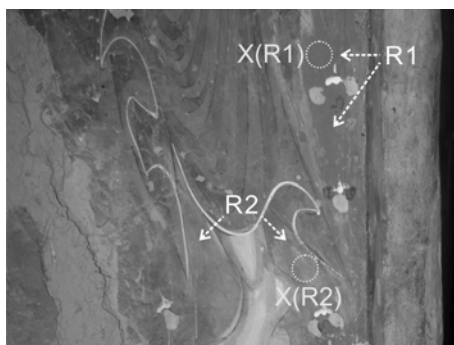


写真5 正龕内壁の赤色を呈する背景

高い赤い色料が塗られた領域を便宜的にR3とする。R3と同様の特徴をもつ領域は西壁以外の壁面でも確認される。例えば、南壁には4つの禅龕があり、龕楣を装飾する文様の一部は赤色を呈する透明度の高い材料によって着色されている。この部分に紫外線を照射すると強い蛍光を発する。発色と蛍光特性が西壁のR3とよく似ており、R3と同様の色料によって彩色がなされていると推察される。R3に使用されている色料は、第285窟壁画制作にあたって基本的な色料のひとつとして使用されていると推察される。

現状で赤色を呈する領域を、肉眼観察および紫外線蛍光写真から、赤褐色のR1、鮮やかな赤色を呈するR2、透明度の高い赤色色料が使用されているR3と分類した。これらの領域には、各々異なる色料が使用されている可能性がある。以下ではこれらの各領域について分析を行った結果を述べる。

4-1-2. 蛍光X線分析

西壁の赤色背景にみられるR1およびR2に使用された色料を明らかにするため、使用されている色料の微視的形態を顕微鏡で観察した。写真5に示した赤色背景で得られた顕微鏡像を写真6に示す。写真6は、R1とR2の境界で撮像したものである。境界の一部を破線で図示した。破線の右側がR1、左側がR2である。R1とR2の境界付近の様相から、R2に相当する領域はR1を覆っていることがわかる。すなわち、赤色の背景はR1層の上にR2層が塗布された積層構造である。R1層には赤褐色の微粒子、無色の粒子、暗褐色の粒子が観察されるが、主要な粒子は赤褐色微粒子である。R2層の表面には多くの亀裂がみられ、表面に白色の微粒子が付着しているため、赤色の発色を担う物質の詳細を観察することは困難であるが、R1層との境界付近では赤色の粒子状の物質を確認できる。以上の観察より、背景には材質の異なる彩色層が少なくとも2層以上あり、写真6では最表層であるR2層が欠損した結果、下に塗布されているR1層が露出していると推察される。R1およびR2には粒子状の物質が観察されたことから、どちらの層にも粒子性の材料である顔料が使用されていると考えられる。

次に、R1およびR2に使用されている色料を同定するために携帯型蛍光X線分析装置による分析(XRF)を行なった結果を述べる。分析は、写真5にX(R1)およびX(R2)と図示した箇所で行った。X(R1)およびX(R2)とした箇所は各々R1およびR2に属する。図1(a)および(b)にX(R1)およびX(R2)で得られた蛍光X線スペクトルを示す。X(R1)のスペクトルには、FeのK α およびK β 線に帰属できるピークがある。Fe以外の元素の目立ったピークは認められず、測定した箇所は主元素としてFeを含む。一方、X(R2)からは、FeのほかにHgに帰属できるピークが検出され、R1とR2では元素組成が異なることが明らかとなった。R1は赤褐色を呈し、かつFeが検出

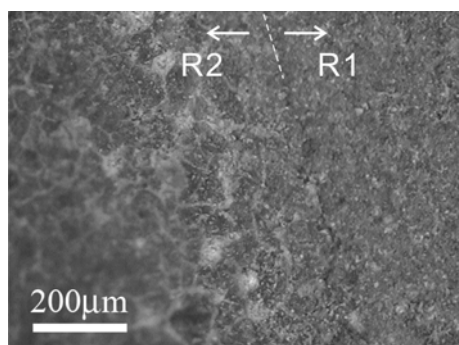


写真6 R1およびR2の顕微鏡写真

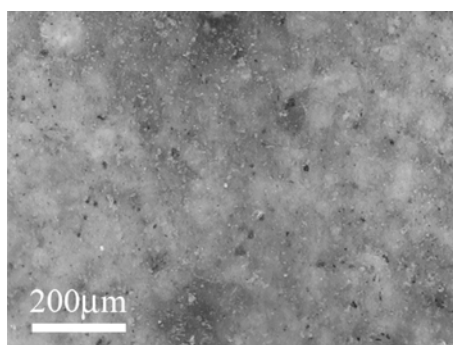


写真7 R3の顕微鏡写真

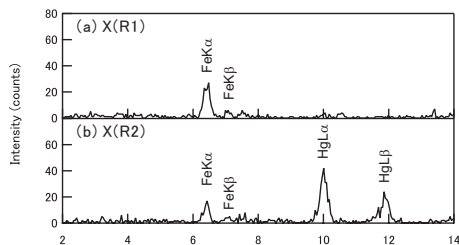


図1 西壁の赤色背景の蛍光X線スペクトル

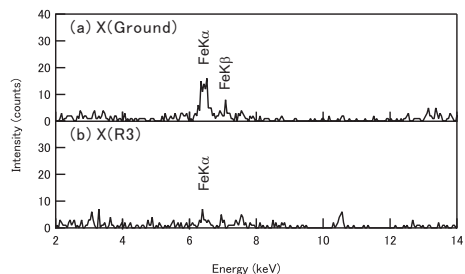


図2 南壁の(a)下地および(b)赤色色料R3の蛍光X線スペクトル

されたことから、R1にはベンガラのような酸化鉄を発色成分とする赤色顔料が使用されていると推察される。R2には、XRFでHgが検出されたことから、HgSを主成分とする朱が使用されていると考えられる。顕微鏡観察およびXRFの結果からは、写真5にみられる赤色の背景は、酸化鉄系の赤褐色顔料を主体とする層の上に、朱を含む層を塗り重ねることで色彩表現がなされていると推察される。尚、X(R2)で検出されたFeについては、R2層より下層にあるR1層や土壁層のみに由来する、あるいはR2層にもFeを含む材料の使用されている可能性などが考えられる。しかし、本分析結果からはその由来を判断することはできない。

R3とした部分の顕微鏡像を写真7に示す。これは南壁の龕楣のパルメット文様で撮像したものである。写真7では、赤色を呈する色料による彩色層が南壁全面に塗られている白色下地層を覆っている。彩色層は半透明で、白色下地層が透けて見えており、透過性のある物質が塗布されていることを確認できる。顕微鏡写真では、赤い発色の原因となっていると考えられる色料粒子の存在は観察されない。

R3に使用された赤色色料の元素組成を明らかにするために、南壁の龕楣に描かれたパルメット文様で蛍光X線分析を行った。比較のため、彩色材料が塗布されていない下地層のみの部分でも測定を行った。各々の分析箇所を写真2にX(R3)およびX(Ground)と図示し、得られた蛍光X線スペクトルを図2に示す。図2(a)の下地層のみの箇所から得られたスペクトルには、FeのK線に帰属できるピークが検出された。検出されたFeは白色下地層およびその下の土壁層に由来する元素と考えられる。X(R3)でも、X(Ground)と同様にFeの微小なピーク以外に目立ったピークはなく、R3を赤色に着色している色料に由来すると考えられる特徴的な元素は検出されなかった。以上の結果をまとめると、顕微鏡で粒子状物質が観察されないため、R3は粒子性の材料である顔料ではなく、可溶性の色素によって着色されている可能性がある。また、蛍光X線では特徴的な元素が検出されなかったことから、着色成分は本分析手法では検出されない軽元素による化合物によると考えられる。すなわち、顕微鏡観察とXRFの結果からは、R3は可溶性の有機色素による着色がなされている可能性が示唆される。

4-2. 緑・青色を呈する色料

4-2-1. 肉眼観察および紫外線蛍光写真に基づく分類

第285窟の壁画には、緑あるいは青色を呈する領域が随所に認められる。写真3に示した菩薩Bの頭光は、外周付近では明るい緑色を呈している。菩薩Cの天衣および菩薩Dが纏う衣の緑も、菩薩Bの頭光と同様の緑色を呈している。緑色を呈するこれらの領域をGB1とする。これに対し、菩薩Bの頭光の内部は鮮やかな青色を呈している。写真3の左部に示されている主尊の光背にも同様の青色を呈する部分がある。この鮮やかな青色を呈する領域をGB2とする。写真

3の菩薩Aの天衣および菩薩Bの裙は、鈍い青色を呈している。この鈍い青色を呈する領域の紫外線蛍光写真（写真4）には、青みを帯びた蛍光が記録されている。この領域をGB3とする。

写真3にみられる色とは異なる緑色を呈する領域について以下で述べる。写真8に北壁の西壁より3番目の龕楣の正常光写真を示す。GB1と図示した領域は、写真3のGB1と同様の緑色を呈するが、GB1とは異なる緑色を呈する部分がある。GB4と図示した領域は、GB1より明るく、黄色味の弱い緑色を呈する。このGB4と同様の色を呈する領域は北壁に多く確認できた。

肉眼観察と紫外線蛍光写真より、緑・青色を呈する領域のうち、特徴的な発色および蛍光特性をもつ領域をGB1～GB4と分類した。特にGB1およびGB2と同様の色を呈する領域は、写真3に示した西壁のほか、北・東・南壁および天井のすべての壁画でも容易に確認でき、これらに塗布されている緑あるいは青色を呈する色料は、第285窟壁画に使用された基本的な色料と考えられる。

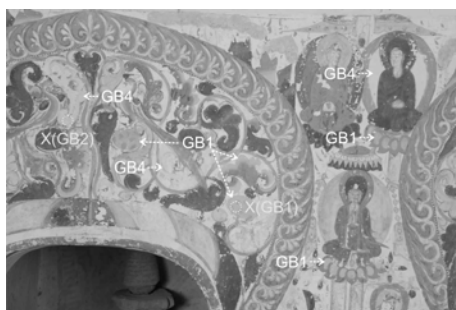


写真8 北壁の正常光写真

4-2-2. 分析調査

緑・青色を呈する領域GB1～GB4に使用されている色料を明らかにするために顕微鏡観察および分析調査を行った結果を以下に述べる。

はじめに緑色のGB1と、GB1と比較的似た色を呈するGB4について述べる。GB1およびGB4の顕微鏡像を写真9および10に示す。GB1には、粒子状の物質が塗布されている様子が観察される（写真9）。粒子の色は単一ではなく、緑色・青色・褐色を呈する粒子などが混在する。粒径も均一ではない。一方、GB4では緑白色の微粒子からなる塗膜が観察される（写真10）。GB1と比較すると粒径は小さく、夾雑物も少ない。次に、GB1およびGB4で得られた蛍光X線スペクトルを図3(a)および(b)に示す。各々の分析箇所は、写真8に図示したX(GB1)およびX(GB4)

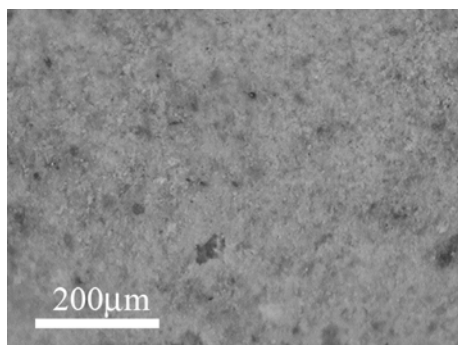


写真9 GB1の顕微鏡写真

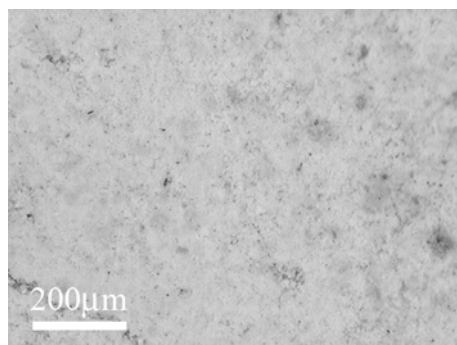


写真10 GB4の顕微鏡写真

である。両者のスペクトルには、Cuの $K\alpha$ および $K\beta$ 線に帰属できる大きなピークとFeの $K\alpha$ 線に帰属できる微小ピークがみとめられる。Cuは彩色層に使用されている緑色色料、Feは下地、土壁層、彩色層に含まれる夾雑物などに由来するものと推察される。顕微鏡観察およびXRFによる結果から、GB1とGB4には共に緑色を呈するCu化合物が使用されている可能性が高いが、その粒子組成は互いに異なっているため、異なる材料が塗布されていると考えられる。GB1とGB4の発色が異なるのは、異なる化合物による色料が使用されているためである可能性、同一化合物によるが粒径が異なる色料が使用されているためである可能性などが考えられる。両者に塗布された化合物の同定を行うことにより、材料・技法の差異を明らかにすることが今後の課題である。

青色を呈するGB2で行った顕微鏡観察およびXRFの結果は、南壁中央の中段に描かれた山岳での結果を例として述べる。写真2において点線で囲った山は、青色と白色の2色を呈しているが、青色の部分はその発色からGB2に分類できる。この山の青色の部分から得られた顕微鏡像および蛍光X線スペクトルを写真11および図4に示す。写真11には、青色と無色粒子の混合物が観察される。粒子性の物質が観察されるため、GB2には青色顔料が使用されていると考えられる。この部分のXRFによる分析では、Feの $K\alpha$ 線と考えられる微小なピークのみしか検出されず(図4)、GB2を特徴的付ける元素は検出されなかった。青色顔料は軽元素を主成分元素としてしていると考えられる。そこで、この軽元素からなる青色顔料の材質の詳細を、本研究に先立って測定されている分光反射率から検討する。図5に、南壁でGB2に分類できる5箇所において測定を行って得られた分光反射率の平均を図5に示す⁶⁾。図示した反射率の100%標準は

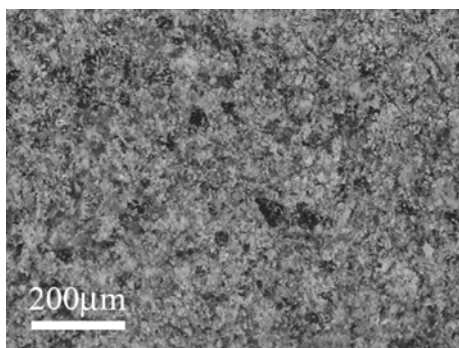


写真11 GB2の顕微鏡写真

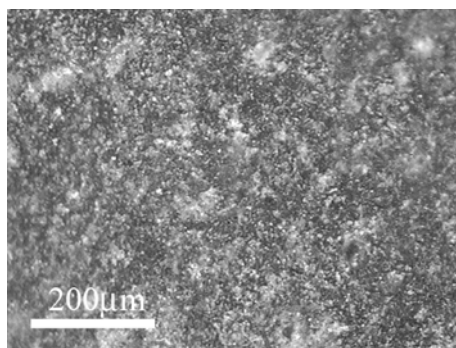


写真12 GB3の顕微鏡写真

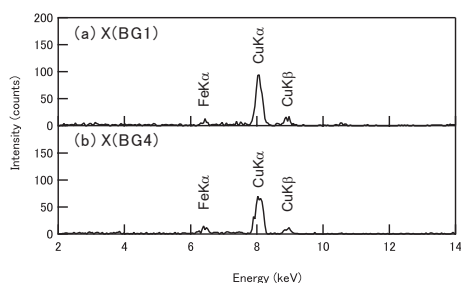


図3 北壁の緑色色料(a) GB1, (b) GB4の蛍光X線スペクトル

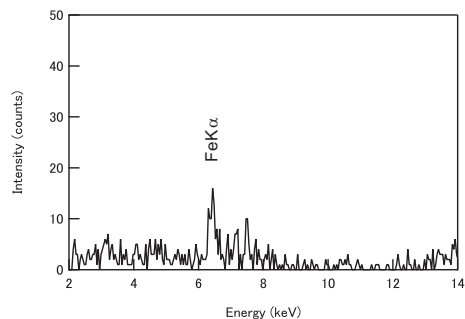


図4 GB2の蛍光X線スペクトル

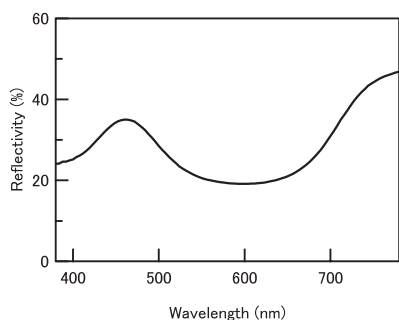


図5 GB2の分光反射率

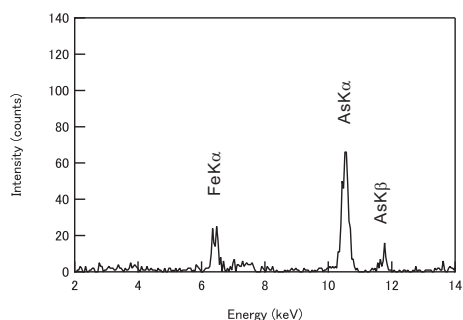


図6 GB3の蛍光X線スペクトル

BaSO₄である。スペクトルの形状より、GB2は600nm付近および紫外線領域に吸収ピークをもつ物質であると考えられる。この反射特性は、従来の研究によって初期莫高窟壁画の青色顔料からXRDによる検出事例が知られるラズライトを含むラピスラズリの反射特性とよく一致する¹⁹⁾。XRDで検出されるラズライトは複数の鉱物からなるラピスラズリとして産出される。ラピスラズリは青色鉱物であるラズライトのほか、無色のカルサイト、金属光沢を持つパイライトなどを含むのが一般的である。写真11でみられる無色粒子はラズライトの共生鉱物であると解釈すれば、粒子組成、元素組成、反射特性からは、GB2にはラピスラズリから作られた青色顔料が塗布されていると考えられる。

鈍い青色を呈するGB3についての分析結果を以下で述べる。菩薩A(写真3)の鈍い青色を呈する天衣で撮像した顕微鏡像を写真12に示す。写真12では、非常に微細ではあるが、粒子状の物質を確認できるため、GB3には顔料が使用されていると考えられる。この顔料を同定するために、写真3にX(GB3)と図示した箇所で行ったXRFの結果を図6に示す。蛍光X線スペクトルにはAsのK α 線およびK β 線に帰属できるピークがある。Asを含む顔料には黄色顔料の石黄や赤色顔料の雄黄などが知られる。いずれもGB3が呈する青色とは発色の異なる顔料である。XRFではGB3が青色を呈する原因となっている物質の構成元素は検出されていないと考えられる。そこで、GB3に使用された色料の材質をより詳細に検討するため、X(GB3)でラマン分光分析を行った。複数回の測定を行った結果、およそ1310、1580および1640cm⁻¹にラマンバンドを確認した。これらは、インディゴが持つラマンバンド(1230.6cm⁻¹、1311.4cm⁻¹、1460.2cm⁻¹、1577.2cm⁻¹、1630.3cm⁻¹)とおおよそ一致するものである。GB3が鈍い青色を呈し、ラマンバンドがおおよそインディゴのそれと一致することから、この部位にはインディゴが使用されている可能性が高い。GB3にはインディゴとAsを含む顔料が併用されている可能性が考えられる。石黄や雄黄は比較的变化しやすい顔料であり、有機材料であるインディゴも堅牢な材料ではない。したがって、GB3の呈する色は、制作の当初とは大きく異なる可能性もある。混色・変色を念頭において、さらなる材料と技法の調査を進めることが今後の課題である。

4-3. 黄色を呈する色料

第285窟の壁画に描かれた菩薩や飛天の多くは首に首飾り、手首には腕釧と呼ばれる装身具を着けている。写真3に示した4体の菩薩も首飾りと腕釧を着けている。これらの装身具の多くは、現状では淡い褐色を呈し、輪郭や細部は鮮やかな赤い色料による線描で描き込まれている。また、淡い褐色を呈する部分は紫外線照射によって青味を帯びた蛍光を発するという光学

的な特徴を持つ(写真4)。この装身具を細部まで詳細に観察をすると、ごく僅かではあるが黄色を呈する部分を確認できる。写真3に示した菩薩Cの腕釧部分の拡大写真を写真13に示す。左右の腕釧の下部に黄色を呈する部分がある。この領域をYとする。黄色を呈する領域の周囲は白色、さらにその周囲は淡い褐色を呈している。このYと同様の色を呈する部位は、西壁の南側小龕の天井、南壁の龕楣など285窟の複数箇所で見られる。肉眼観察により確認できる。



写真13 菩薩Cの腕釧

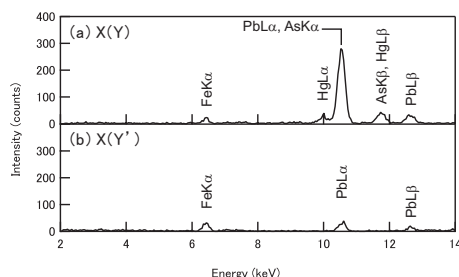


図7 (a) Yおよび(b) Y'のX線スペクトル

このYとした領域の黄色を呈する部分の化学組成を明らかにするため、菩薩Cの腕釧をXRFで分析した。分析箇所は写真3にX(Y)と図示し、得られたスペクトルを図7(a)に示す。黄色を呈する部分は分析面積に対して小さいため、得られたスペクトルには赤色の線描や肌に使われた色料の特性X線が含まれていると考えられる。そこで、比較のために菩薩Cの肌も分析した。分析箇所は写真3にX(Y')と図示し、得られたスペクトルを図7(b)に示す。黄色を呈するX(Y)からは、As、Pb、微量のHgとFeが検出された。菩薩の肌であるX(Y')からはPbおよび微量のFeが検出された。したがって、X(Y)から検出される元素のうち、AsおよびHgは腕釧に由来する元素と考えられる。図7(a)には赤色の線描からの特性X線が含まれていることを考慮すると、Hgは線描に使用された朱に由来する可能性が高い。Asを含む色料には、黄色顔料の石黄・赤色顔料の雄黄があげられる。X(Y)は、黄色を呈する部分から得られたスペクトルであり、線描の赤色には朱が使われている可能性が高いことから、Asは黄色を呈する部分に使用されている石黄に由来するものと判断するのが妥当であろう。すなわち、腕釧には黄色顔料である石黄によって彩色がなされていたと考えられる。石黄は比較的可変色しやすい顔料として知られ、菩薩Cの腕釧の白色および淡い褐色を呈している部位では変色が進行していると考えられる。したがって、285窟に多数描かれた菩薩や飛天の淡い褐色を呈する装身具は、元来は黄色を呈していたが、石黄が劣化により変色したため、現在は褐色を呈している可能性が高い。

このほか、XRF分析によってAsが検出された部分について述べる。南壁には複数の題箋が用意されている。それらはいずれも淡い褐色を呈しており、紫外線照射によって青い蛍光を発する³⁾。南壁中段の「五百強盜帰仏因縁図」に描かれた強盜に説法をする仏の身体も、紫外線照射によって青い蛍光を発し、題箋と同様の光学的特徴を示す。写真2にX(Y2)と図示した題箋、X(Y2')と図示した褐色を呈する身体からはXRFによってAsが検出された。菩薩や飛天の装身具と同様に石黄が使用されているが、現在は変色によって当初とは異なる色を呈している可能性がある。

4-4. 褐～黒色を呈する色料

南壁各龕の龕楣を装飾する図案などには、褐～黒色を呈する領域が多く認められる。写真14に一例を示し、褐～黒色を呈する領域をBと図示する。この龕楣を装飾する図案から得られた顕微鏡像を写真15に示す。写真に示したのは亀裂が生じ、塗膜が浮き上がっている部分であり、塗膜の断面構造が観察できる。浮き上がった塗膜の下面は無色の微粒子からなる。南壁全面に塗布された白色下地層である。下地層の上には赤褐色、黒色および無色の粒子が観察される。亀裂の断面の様子からは、下地層の直上には赤褐色粒子が、表層近くには黒色粒子が多く分布している。また、無色の粒子は微細であり、彩色層の最表層に分布しているものと推察される。写真15にX(R)と図示した箇所でのXRFによる分析を行なった。得られた蛍光X線スペクトルを図8に示す。図8にはPbのL α 線とL β 線に帰属できる大きなピークが検出された。FeのK α 線と帰属できる微小なピークもみられるが、下地層を測定したときと同程度の微小なピークであり、彩色層には主成分元素をPbとする材料の使用が考えられる。Bには赤橙色の顔料である鉛丹が使用されているが、鉛丹は変色しやすいため、その一部が黒く変色していると考えられる。顕微鏡で観察される黒色粒子は変色した鉛丹粒子と考えられる。無色の微粒子は、経年により二次的に付着あるいは生成したものである可能性が考えられる。

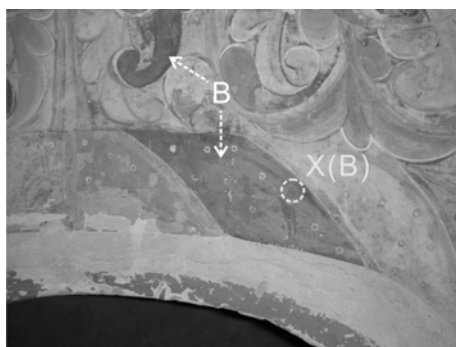


写真14 南壁龕楣にみられる褐～黒色を呈する装飾文様

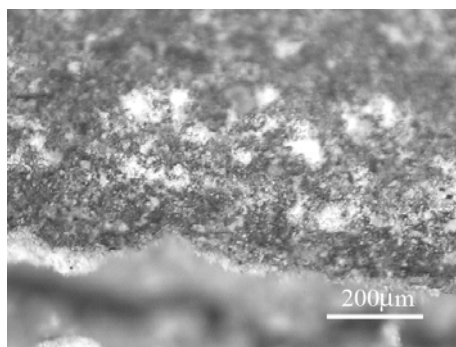


写真15 Gの顕微鏡写真

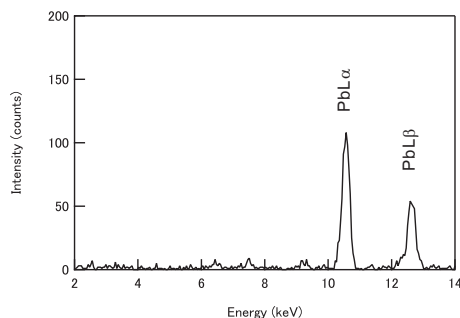


図8 Bの蛍光X線スペクトル

4-5. 従来の調査結果との比較

本研究において、第285窟壁画の彩色を肉眼観察および光学調査から分類し、その各々について非接触分析を行なった結果と、そこから使用が推察される色料を表1にまとめた。従来の

第285窟における分析調査では、X線回折法によってヘマタイト、ラズライト、アタカマイト、アタカマイトとマラカイトの混合物、ミニウムおよびプラトネライトの混合物の検出が報告されている¹⁾。ただし、これらの報告には分析箇所が不明なものも多い。今回の調査結果と比較すると、R1・GB2・Bで使用が推定された酸化鉄系の赤色顔料、ラピスラズリによる青色顔料、鉛丹については、従来の分析調査によって、すでに使用が知られている顔料といえる。従来の調査で検出されたアタカマイトやマラカイトは、GB1あるいはGB4に相当する箇所から検出されたものであろうが、どのように対応するかは分析箇所が明瞭でないため、不明である。今回の分析調査では、従来の調査結果に加え、新たに朱・赤色の有機色料・インディゴ・石黄の使用が確認された。朱は、莫高窟に現存する最初期の石窟のひとつとされる272窟、それ以降の石窟にも使用が知られ、初期莫高窟壁画に広く使用されていることが知られている顔料である。一方、赤色の有機色料・インディゴ・石黄については、初期莫高窟壁画への使用の詳細は従来の研究では十分に明らかにされていない。これら3種の色料は変色しやすい色料でもあるため、現在では本来の色とは大きく異なる色を呈している可能性が高い。

表1 敦煌莫高窟第285窟に使用されている色料

分類	色	検出された主要元素・化合物	使用が推定される色料
R1	赤褐色	Fe	酸化鉄系の赤色顔料
R2	赤色	Hg	朱
R3	赤色	微量のFe	有機色料
GB1	緑色	Cu	Cu化合物による色料
GB2	青色	微量のFe	ラピスラズリ
GB3	濃青色	As・インディゴ	含砒素顔料+藍
GB4	緑色	Cu	Cu化合物による色料
Y	黄色	As	石黄
Y2	淡い褐色	As	石黄(変色)
B	褐～黒色	Pb	鉛丹

5. まとめ

敦煌莫高窟第285窟壁画に使用された色料を把握することを目的として、非接触分析調査を行い、以下の結果を得た。

- 1 酸化鉄系の赤褐色顔料、鉛丹、ラピスラズリによる青色顔料の使用が推定された。これらは従来から285窟への使用が指摘されている顔料である。
- 2 朱、赤色の有機色料、インディゴ、石黄の使用が推定された。これらは従来の調査では使用が指摘されていなかった色料である。赤色の有機色料・インディゴ・石黄が使用された多くの箇所では、制作当初の色から変色をしている可能性がある。
- 3 Cu化合物による緑色色料が2種確認された。

今後、さらにこれらの材料が使用されている部位についての技法を解明し、また劣化の詳細とその機構を明らかにすることによって、莫高窟壁画の制作当初の絵画表現を復元的に評価することが可能になると考えている。

謝辞

本研究は、『敦煌莫高窟壁画の保護に関する日中共同研究』の一環として行われ、多くの方にご協力戴いた。特に、蘇伯民所長をはじめとする敦煌研究院保護研究所の皆様には多大なご助力を賜った。本研究で使用したラマン分析装置は、(株)エス・ティ・ジャパンより拝借した。東京文化財研究所谷口陽子氏には壁画の材料・技法に関する貴重な助言を戴いた。また、東京藝術大学大学院藤澤明氏・佐藤由季氏、筑波大学大学院末森薫氏に作業補助をして戴いた。ご協力に深謝いたします。

参考文献

- 1) 李最雄編著：壁画地仗和彩塑的制作材料及結構，絲綢之路石窟壁画彩塑保護，科学出版社，15-19 (2005)
- 2) 李最雄編著：壁画彩塑顔料分析及其顔料的定性，絲綢之路石窟壁画彩塑保護，科学出版社，27-36 (2005)
- 3) 高林弘実，初井基充，大竹秀実，王 小偉，柴 勃隆，淵田 雄，中村 夏葉，岡田 健：敦煌莫高窟第285窟壁画の光学調査(I)，保存科学，46，161-169 (2007)
- 4) 福井爽人，茂木計一郎，浅井和春，田口榮一：第3章 第285窟（西魏時代）に関する模写および学術調査の成果，敦煌石窟学術調査（第一次）報告書，8-57 (1985)
- 5) 段文傑：第285窟からみた中国と西方芸術との交流，敦煌石窟. 2 (莫高窟第285窟)，文化学園・文化出版局，38-57 (2001)
- 6) 伊藤寛，今村峯雄，神庭信幸：携帯型簡易蛍光X線分析装置の製作および文化財調査への応用，RADIOISOTOPES，48，113-116 (1999)
- 7) 野村美貴，平林幸夫，宮村忠夫，高橋幸嗣，大林和美：ポータブル放射線測定器の最新の進歩，RADIOISOTOPES，47，324-335 (1998)
- 8) 高林弘実，范宇権，于宗仁，李燕飛，趙林毅：「第285窟南壁の分光反射率測定」，『敦煌壁画の保護に関する日中共同研究 2006』，独立行政法人文化財研究所 東京文化財研究所 文化遺産国際協力センター，28-51 (2007)
- 9) 朽津信明，黒木紀子，井口智子，三石正一：顔料鉱物の可視光反射スペクトルに関する基礎的研究，保存科学，38，108-123 (1999)

キーワード：壁画 (mural painting)；莫高窟 (Mogao Grottos)；紫外線蛍光写真 (ultraviolet fluorescence photography)；蛍光X線分析 (X-ray fluorescence spectroscopy)；ラマン分光分析 (Raman spectroscopy)；色料 (colorants)

In-situ Analytical Research of Colorants Used in Mural Paintings in Cave 285, Mogao Grottoes

Hiromi TAKABAYASHI, Emi KOSETO^{*}, YU Zongren^{**} and FAN Yuquan^{**}

The object of this research is to investigate the colorants used in the mural painting of Cave 285, Mogao Grottoes with the aid of *in-situ* analytical research methods. Red color used for the back drop in the painting on the west wall is in layered structure. Investigation shows that the outermost layers contain Hg and that the outer layer directly underneath contains Fe. This result suggests that cinnabar and iron oxide red were used. Other than those colorants, possible use of indigo, orpiment, and some organic based red colorant may be identified with further investigation. Those three colorants appeared to have been widely used in paintings in the Mogao Grottoes, but their use was never researched. In addition, two different green colorants, both of which are Cu compound, were newly found.

