

白杵磨崖仏で観察される彩色表現について(2)

－ 屋外彩色文化財の現地分析法の展開 －

朽津 信明

1. はじめに

大分県白杵市に位置する国宝・特別史跡白杵磨崖仏では、屋外石造文化財としては異例なほど多彩な彩色が現在でも残されていることが知られており、その色のバリエーションについては既に報告が行われている¹⁾。しかしながら国宝に指定されている白杵磨崖仏では、たとえ僅かな量といえどもサンプリングは許されるような状況にはなく、実験室における厳密な分析に基づいて顔料を特定することは、倫理的側面から困難な状況であった。その一方で、近年では科学分析機器の進歩に伴い、機械の方を現地に持ち込んで、その場で分析を行う試みも見られ始めている²⁾が、磨崖仏という山の崖面に刻み込まれた立地状況で、しかも複雑に凹凸が入り組んでいる状態の仏像面に対して現地で化学分析を行うことは、技術的側面からこれまでは非常に困難であった。このためかつての報告では、主として分光光度計による可視光反射スペクトル測定に基づき、その波形から一部の使用顔料が推定されるに留められていた。

これに対し本稿では、従来から行われている顔料の現地分析法³⁾を改良することにより、白杵磨崖仏における彩色表現を改めて捉え直すことを試みたので、新たに得られた知見を、その分析法と伴にここに紹介する。

2. 問題点の整理

朽津¹⁾によれば、白杵磨崖仏において現在確認される彩色は、赤、オレンジ色、黄色、緑、白、黒、クリーム色、茶色の各顔料と、それぞれの重ね塗りなどによるさらなるオプションがあることが報告されている。これらのうち、反射スペクトルの波形に基づいて、赤はベンガラ、黄色は黄土、オレンジ色は赤と黄色の混色、クリーム色は黄色とは異なるタイプの黄土かあるいは黄色と白の混色、茶色は黄色と黒の混色ではないかと、それぞれ推定されていた。しかしながら、元素分析が困難であったことから、これらの考察はあくまでも推定の域を出ず、何らかの異なる方法でクロスチェックする必要性が訴えられていた。さらに白と黒については、そもそも可視域における反射率の起伏が極めて乏しいため、スペクトルだけでは顔料を推定することは困難であり、元素



図1 堂ヶ迫石仏第4龕における調査ポイント(白杵市⁸⁾と朽津¹⁾を基に加筆)数字は、今回の測定ポイント。(朽津論文¹⁾の番号に対応させてあるため、今回測定を行っていないものは欠番となっている。)



図2 古園石仏における調査ポイント(白杵市⁸⁾と朽津¹⁾を基に加筆)数字は、今回の測定ポイント。(原則としては朽津論文¹⁾の番号に対応させてあるため、今回測定を行っていないものは欠番となっている。ただし、大日如来の顔(朽津論文¹⁾のNo. 1)については、検出器を近づけることが不可能な位置にあったため、肉眼的に同様の色と判断された二の腕部分を新たにNo. 27として設定した。)

情報が必要不可欠と判断された。また緑については、可視域の範囲内のスペクトルだけでは厳密な吸収位置が特定しにくいいため、顔料を推定するためには近赤外域まで含めた反射率情報が求められた。

今回は、こうした情報を新たに得ることにより、推定が困難であった各色の顔料を推定するとともに、従来から推定されていた顔料についてもその推定が妥当なものかどうかの検証を試みる。調査対象は、図1, 2に示すように、ホキ石仏第一群(以下、俗称である「堂ヶ迫」と呼ぶ)の第四龕と、古園石仏において、記載されている各色のバリエーションを網羅するように設定した。

3. 新たに試みた分析法

3-1. ファイバー型分光光度計の展開

朽津¹⁾の報告では、カメラ型の分光光度計によって可視光反射スペクトルが計測されていたが、その後ファイバー型の分光光度計により、より簡易に任意の場所のスペクトルをリアルタイムでモニターしながら調査が行える方法も紹介されている⁴⁾。その報告では、ファイバー分光計は380~780nmの間の可視域のスペクトル測定に限定されて用いられていたが、今回は計測範囲を1000nmまで広げることにより、近赤外域(780~1000nm)における緑色顔料の

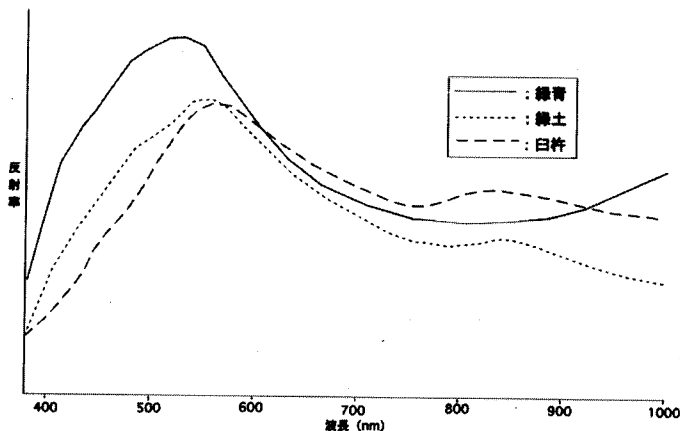


図3 緑土と緑青の反射スペクトルの比較
830nm付近の波形が異なり、白杵磨崖仏(No.16)の緑色顔料は、明らかに緑土のスペクトルと類似する。

吸収を特に観察することを試みた。光源はハロゲンランプを用いてそれを白色板で校正し、分光計はオーシャンオプティクス社のファイバーマルチチャンネル分光システムを用い、電源は単三電池八本から供給しながらAC電源を用いずに分光分析を行った。なお、朽津他⁵⁾で報告されている緑色顔料のスタンダード試料を今回の方法で測定すると、緑土では830nm付近の反射率曲線が上に凸の波形を示すのに対し、緑青では同部分が明瞭に下に凸の波形を示すことから、両者の違いは容易に示されることが確認された(図3)。そこで、堂ヶ迫石仏において緑色顔料が残存する部分(No.15, 16)については、この方法によって反射スペクトルを計測した。

3-2. 低レベル放射線源を用いた簡易元素分析法の展開

X線を発生させる代わりに、法律の規制値以下の弱い放射線を発する放射性同位元素を利用することで、装置の軽量化と測定の手軽化を図った元素分析装置については、発想はNASAによって火星探査の時に試みられており、文化財分析においても既に報告が行われている⁶⁾。しかしながらこの方法を用いたこれまでの報告では、短い場合でも測定時間が10分以上に設定されており、いずれも検出器を三脚に固定して、測定対象に近づける(WD=約5mm)ことで測定されている。ところが、白杵磨崖仏では立地の面から三脚を安定して立てることはそれ程容易ではなく、また測定対象となる顔料が、仏像という複雑な形状で入り組み奥



図4 本研究で開発された分析器
小型かつ軽量の装置で、すぐに構成
元素を確認できる。

まった場所にある場合が少なくなく、測定器先端部を対象に近づけて安定に固定することは非常に困難と判断された。また、この方法は原則としてはAC電源を利用して装置を動かすように設定されており、朽津他³⁾ではそれをバッテリー駆動させることを試みてはいるものの、その時点ではバッテリー(約2kg)だけで装置全体の大きさ・重さの少なからぬ部分を占めているような状態であり、測定の簡便性を考えた場合には電源システムの見直しが期待された。

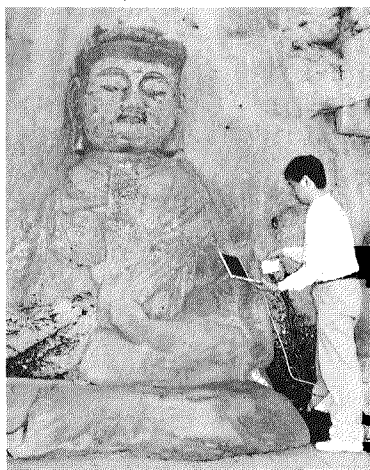


図5 現地測定風景
検出器を手持ちの状態
で測定。

そこで今回は、従来のセイコーイーザーアンドジー社によるシステム³⁾を基にしながら、測定時間の短縮化により、先端部を固定しなくとも手持ちで元素分析を行えるように試みるとともに、電源システムを改善し、さらに小型化・軽量化された装置で現地測定が行えるようにすることを目標とした。具体的には、線源を法律の規制値ギリギリの100マイクロキュリーのAm241とし、また検出器素子のサイズを従来の7mmから13mmとすることにより、検出感度の向上を図った。さらに、MCAにOrtec社のdigiDARTを使うことで電源系統を全面的に変え、通常のビデオ装置用小型

バッテリーにて稼働するようにしたため、バッテリーや検出器まで含めた全体の大きさが13×16×25cm以内で、重さが約2kg（うち検出器部約400g）、そしてAC電源無しで5時間以上は連続測定することが可能となった（図4）。（写真は生データを装置自身にて表示しているが、ノート型パソコンからのコントロールにより、その場でピークサーチ等の定性分析も可能である（図5）。）

試みに、方解石（ CaCO_3 ）の単結晶について、従来の方法³⁾により先端部を三脚で固定してAC電源を用いて10分間計測した結果と、今回開発した方法によりバッテリー駆動で先端部を手持ちの状態での測定対象に近づけ（WD=約5mm）2分間計測した結果とを図6, 7に示す。今回の方法でも、明瞭に $\text{CaK}\alpha$ 線のピーク（3.69keV）を検出できていることが分かる。そこで、現地における元素分析では、この装置を用いて検出器を手持ちの状態、それぞれの顔料が最も広く厚く分布する箇所近づけ（WD=約5mm）、各ポイント当たり2分間計測した（図5）。また、近傍の岩体が露出している部分（バックグラウンド）を同様に何点か測定して、顔料が残存する部分の結果と比較した。

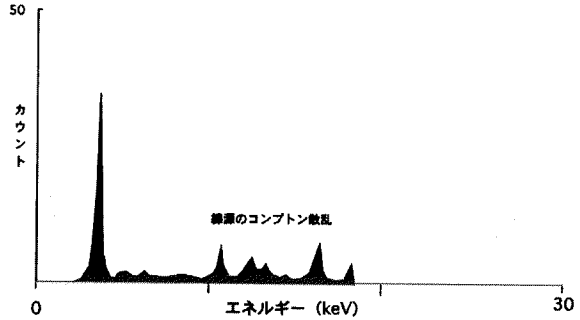


図6 従来の分析法による、方解石（ CaCO_3 ）の分析結果
線源：Am241（50マイクロキュリー）、測定時間600秒。

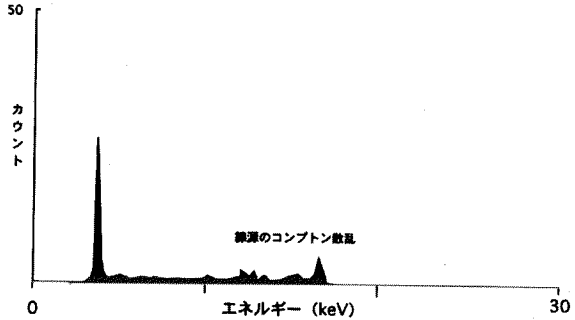


図7 今回の分析法による、方解石（ CaCO_3 ）の分析結果
線源：Am241（100マイクロキュリー）、測定時間120秒。
図6に遜色なく、 $\text{CaK}\alpha$ 線（3.69keV）が検出される。

4. 調査結果

測定結果を表1に示す。

4-1. 反射スペクトル分析

残存する緑色顔料部分（No.15, 16）では、いずれも830nm付近が上に凸の波形を示し、明らかに緑土のスペクトルの特徴と類似した（図3）。

4-2. 元素分析

各色ごとに、検出された元素組成の特徴を、以下に記載する。

赤

No.8, 18ともに、バックグラウンドの岩石のパターンに比べて、 $\text{FeK}\alpha$ 線と見られる6.40keVのカウント数（以下「鉄」と表現する）が高めに検出され、水銀や鉛などの元素は検出されなかった（図8）。

オレンジ色 No.7,19ともにバックグラウンドの岩石に比べて、鉄が高めに検出され、水銀や鉛などの元素は検出されなかった。

黄色 No.5,10,17ともにバックグラウンドの岩石に比べて、鉄がかなり高めに検出され、砒素や金などの元素は検出されなかった(図9)。

緑 No.15,16ではバックグラウンドの岩石との違いは明瞭ではなく、少なくとも銅は全く検出されなかった。

白 No.11ではバックグラウンドの岩石との違いは明瞭ではなく、少なくともカルシウムや鉛のような元素は検出されなかった(図10)。

黒 No.9ではバックグラウンドの岩石との違いは明瞭ではなく、少なくともマンガンのような元素は検出されなかった。

クリーム色 No.27ではバックグラウンドの岩石との違いは明瞭ではなかった。

茶色 No.6ではバックグラウンドの岩石との違いは明瞭ではなかった。

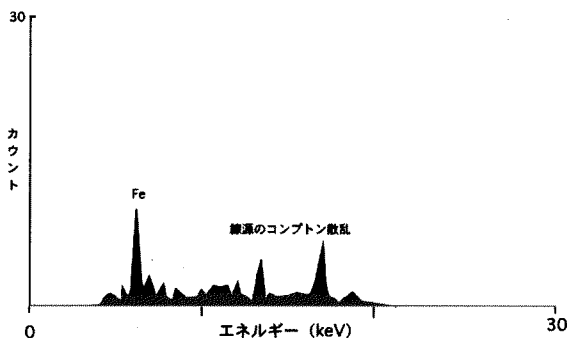


図8 古園石仏の赤色顔料(No.8)の元素分析結果線源のコンプトン散乱に比べて、明らかに鉄のカウントが多い。

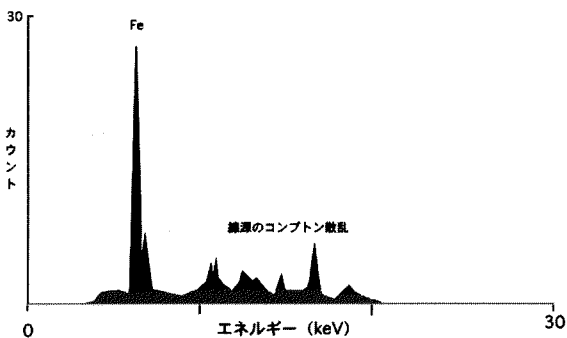


図9 古園石仏の黄色顔料(No.5)の元素分析結果図8に比べて、明らかに鉄のカウントが多い。

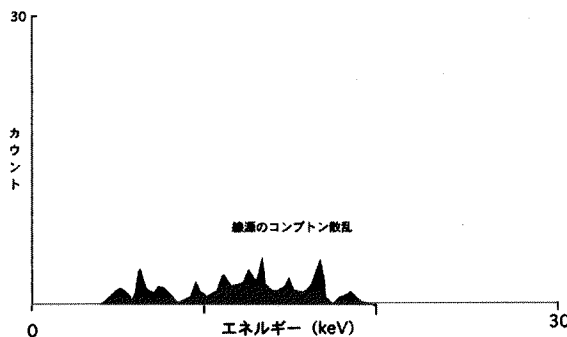


図10 古園石仏の白色顔料(No.11)の元素分析結果線源のコンプトン散乱に比べて、鉄のカウントはそれ程多くない。

5. 考 察

5-1. 使用顔料の推定

白杵磨崖仏で現在観察される彩色が、果たしていつの時点で施されたものであるのかについては今回までの調査では特定できていないため、顔料が石仏製作時の一連の作業の中で用いられた同時期のものであるかどうかは言及できない。従って、以下の考察では、あくまでも現時

点で石仏表面に観察される彩色ということ、その使用時期を特定せずに議論を進める。

まず、スペクトルから既に顔料が推定されていた、赤、黄色、オレンジ色、クリーム色、茶色については、今回の元素分析結果によってその妥当性が支持されたと考えられる。すなわち、成分の面からも赤はベンガラ、黄色は黄土である可能性が強く示唆されるものである。また、同様にオレンジ色については赤と黄色の混色、クリーム色は黄色とは異なるタイプの黄土かあるいは黄色と白の混色、そして茶色は黄色と黒の混色ではないかという推定は、元素分析結果でもこれと矛盾するデータが認められないことから、一応は支持されるに至った。

次に、スペクトルだけでは顔料の推定が困難だった色については、今回の分析の結果、新たに使用顔料が推定されるに至った。まず、緑については、スペクトルの面からも元素の面からも、緑青ではなく緑土であると推定される。また白については、今回のデータだけで顔料を特定することは困難であるが、もしもカルシウムや鉛を大量に含んだ顔料であれば、実験室のデータ(図7)から今回の方法でも検出可能なはずであり、それが岩石部分と区別がつかない結果から推定すると、少なくとも漆喰や胡粉などのカルシウム系白色顔料や鉛白などの鉛系白色顔料である可能性は考えにくく、消去法で白土である可能性が想定される。黒色顔料については、少なくとも一部の装飾古墳で見られる⁷⁾ようなマンガン土のようなものとは考えにくく、消去法で炭素のような、今回の方法では検出できない物質で表現されている可能性が示唆される。

5-2. 使用推定顔料の評価

今回の元素分析の結果、いずれの石仏群においても、黄色顔料部分では赤色顔料部分に比べて鉄のカウント数が高めに検出された(表1, 図8, 9)。むしろ今回の分析は検出器を手持ちで行っており、測定距離に厳密な再現性はないことから、カウント数そのものをもって鉄の含有量と即断することはできない。しかしながら、それぞれにおいて線源から与えられるコンプトン散乱と比較した場合の、同一の測定者・方法・条件による一連の測定結果に基づく相対的な比較として考えるならば、臼杵磨崖仏の場合には、赤色顔料よりも黄色顔料の方が相対的に鉄に富んでいる可能性を検討する必要があるであろう。黄色顔料の「黄土」とは、黄色を呈する粘土の様な物質と考えられる場合があるが、もしもそうであるならば、通常「ベンガラ」と呼ばれる赤鉄鉱に比べれば鉄の検出は低くなるはずである。従って臼杵磨崖仏では、赤色顔料として用いられている「ベンガラ」というのが、純粋な赤鉄鉱ではなく鉄を含んだ赤色粘土

表1 分析結果一覧

No.	石仏群	像	箇所	色	元素	顔料	
5	古園	右如来	顔	黄色	Fe	黄土	
6			顔下地	茶色	(Fe)	黄土+黒?	
7			普賢	宝冠	オレンジ	Fe	ベンガラ+黄土?
8				宝冠	赤	Fe	ベンガラ
9				髪	黒	-	(炭素の可能性あり)
10				天冠台	黄色	Fe	黄土
11		顔		白	-	白土?	
27		大日	二の腕	クリーム色	(Fe)	黄土または黄土+白土	
15		堂ヶ迫	地藏	衣(褌衫)	緑	(Fe)	緑土
16				十王	衣(肩)	緑	(Fe)
17			衣(肩)	黄色	Fe	黄土	
18	衣(袖)		赤	Fe	ベンガラ		
19	衣(袖)		オレンジ	Fe	ベンガラ+黄土?		

のようなものであると考えるか、あるいは黄色顔料として用いられている「黄土」が、粘土というよりは針鉄鉱などの鉱石に近いような、かなり鉄分に富んだ顔料であると考えたのか、いずれかまたは両方の解釈が検討される必要がある。

次に、臼杵磨崖仏で観察される緑色顔料は、今回緑土と推定されるに

至ったが、大分県下の石仏では、既に古羅漢石仏において緑土の使用が指摘されている⁸⁾。今回臼杵磨崖仏でも同様の状況であったことから、大分県下の石仏では今のところ共通して緑土が検出され、緑青の使用例は見あたらないことになる。朽津・山田⁹⁾は、大分県下の石仏における使用顔料の特徴を、富貴寺などの同時代の屋内板絵に比べれば、装飾古墳のような時代の異なる屋外石造文化財の傾向に近いと指摘しているが、臼杵磨崖仏においても緑青の使用は認められず、その意味では臼杵磨崖仏の状況も今のところは指摘された傾向の範囲に収まっていると解釈される。

最後に朽津¹⁾の報告では、古園石仏の伝普賢菩薩像の顔部分(No.11)が、黄色ではなく白色顔料で表現されている可能性を指摘しながらも、表面の汚れなどに起因すると見られる吸収があることから、現在のスペクトルだけからこれを他の如来像などの顔の色と異なる色と断定するのは容易ではないとされていた。これに対して今回の元素分析結果では、少なくとも同群中の如来像の顔部分(No.5)とは明瞭に鉄のカウント数が異なっている(図9, 10)ことから、伝普賢菩薩像の顔には、この如来像とは成分的に異なる顔料が用いられている可能性が極めて高いことが確認されたことになる。本研究の目的は、あくまでも臼杵磨崖仏で用いられている彩色材料のバリエーションを捉えることにあり、個々の石仏に対する細かい技法や表現を議論することはその目的を逸脱するため、ここではこれ以上の言及は差し控えるが、このようにして本研究で試みられた分析法を用い、より細かい調査を重ねることにより、個々の仏像の個々の部位についても、用いられている材料に関する多くの情報を今後引き出すことができると期待される。また同様に、これまでは分析が困難であったような様々な他の不動産文化財に関しても、サンプリングを行うことなく現地で簡便にデータを得ることができることから、今回の方法が文化財分析一般にも貢献し得ることが期待される。

6. ま と め

ファイバー分光計の計測範囲を広げ(380～1000nm)、低レベル放射線源を用いた簡易元素分析装置をさらに小型化・軽量化すると共に、測定時間を短縮化し検出器を手持ちで測定可能としたことによって、従来は困難であった磨崖仏現場における顔料調査を試みた。その結果、臼杵磨崖仏の現地において、磨崖仏には全く触れることなく、用いられている顔料に関して多くの情報を引き出すことができた。

謝 辞

本研究における現地調査に当たっては、臼杵市教育委員会の梅田忠邦氏と神田高志氏(調査時)、大分県立歴史博物館の山田拓伸氏、東京文化財研究所の森井順之氏にご協力いただいた。また、本稿をまとめるに当たり、文化庁美術学芸課の奥健夫氏に様々な有益な情報をいただいた。以上を記して御礼申し上げます。

引用文献

- 1) 朽津信明: 臼杵磨崖仏で見られる彩色表現について, 保存科学, 40, 52-63 (2001)
- 2) 早川泰弘, 平尾良光, 三浦定俊, 四辻秀紀, 徳川義崇: ポータブル蛍光X線分析装置による国宝源氏物語絵巻の顔料分析, 保存科学, 39, 1-14 (2000)
- 3) 朽津信明, 下山進, 川野邊渉: 熊本県下の装飾古墳の緑と青の顔料について, 熊本県立装飾古墳館研究紀要, 4, 27-39 (2001)
- 4) 朽津信明, 霜村紀子: 幕末期の絵馬における青色顔料の変化について—一岩手県中部地方に伝わる「供養絵

額」の例一, 保存科学, 41, 121-130 (2002)

- 5) 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)
- 6) 下山進, 野田裕子: 低レベル放射性同位体を線源として用いる簡易携帯型蛍光X線分析装置及び日本古来の絵馬に使用された無機着色料の非破壊分析への応用, 分析化学, 49, 1015-1021 (2000)
- 7) 山崎一雄: 装飾古墳の化学的研究, 古文化財之科学, 2, 8-14 (1951)
- 8) 朽津信明, 山田拓伸: 大分県下の石仏の彩色について, 保存科学, 39, 33-42 (2000)

キーワード: 顔料 (pigments); 彩色 (color); 臼杵磨崖仏 (Usuki Stone Buddhas); 現地分析 (*in situ analysis*); 緑土 (Terre verte)

Colors Observed at Usuki Stone Buddhas,
Oita Prefecture, Japan (2)
- Development of *in situ* Analyses
of Outdoor Colored Cultural Properties -

Nobuaki KUCHITSU

It was very difficult to analyze the pigments of rock-cliff sculptures even by a portable X-ray fluorescence spectrometer because the detector cannot be easily stabilized on a cliff. Thus, in this study, ^{241}Am (3.7MBq) was used as radiation source, and the weight of the new machine including both battery and detector has become ca. 2kg. This new method has realized non-destructive analyses of pigments by a detector held by hand. Accordingly analysis can be carried out almost anywhere on a cliff. A fiber spectrometer system was also revised and the reflectance spectrum of “*terre verte*” has become easily distinguishable from that of malachite. Using these new methods, colors of Usuki Stone Buddhas were researched again and pigments used there have been estimated.