

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 22 日現在

機関番号：87106

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2012～2014

課題番号：24501265

研究課題名(和文) 赤外線撮影法による彩色材料調査の有効性に関する研究

研究課題名(英文) The investigation of the effectiveness of infrared photography method for the analysis of painting materials

研究代表者

秋山 純子 (AKIYAMA, Junko)

独立行政法人国立文化財機構九州国立博物館・学芸部博物館科学課・研究員

研究者番号：10532484

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,000,000円

研究成果の概要(和文)：彩色材料は当時の社会情勢や世界との交流の歴史を解明する上で重要な要素のひとつである。近年の分析装置の発展により非破壊で多くの情報が得られるようになったが、絵画の彩色材料の解明には、非破壊で簡便な「面」の広がりを持った総合的な判断要素となる科学分析が必要である。

本研究では、赤外線撮影法が彩色材料の面的調査に有効な方法となりうるか検証した。その結果、赤外線画像の濃淡だけで顔料の種類を特定することは難しいが、同じ彩色材料の使用範囲や染料と顔料の組み合わせの様相など技法的な部分を面的に推察するのに有効であることが明らかとなった。

研究成果の概要(英文)：Painting material is one of the most important elements that reflects the social situation and the nature of international exchange of the past. We are able to obtain a detailed information about painting materials thanks to recent developments of non-destructive spot analysis tools. Nonetheless, these tools are not sufficient for a comprehensive understanding of a painting. Simple but scientific method that can judged an entire surface of a picture is needed. In this study, the author attempted to verify whether infrared imaging method is effective in surface investigation of painting materials. The result suggests that this method was effective in measuring the distribution of a certain pigment and a presence or absence of a certain combination of dyes and pigments. However, this method was not able to identify specific pigment types. Thus, a combination of spot analysis methods along with this new infrared imaging method should be used for a comprehensive study of paintings.

研究分野：保存科学

キーワード：面的調査 赤外線画像 彩色材料 絵画調査

## 1. 研究開始当初の背景

彩色材料は当時の社会情勢や世界との交流の歴史を解明する上で重要な要素のひとつである。しかしこれまでは非破壊での分析が難しく、科学的に彩色材料を分析、解明するには限界があった。近年の分析装置の発展により、非破壊で多くの情報が得られるようになってきたが、絵画の彩色材料の解明には、非破壊でもっと簡便な「面」の広がりを持った総合的な判断要素となる科学調査が必要である。

これまで彩色材料の科学調査には、非破壊で簡便に調査できる蛍光 X 線分析が主流であったが、元素情報からのみ彩色材料を判断するのは非常に困難である。また元素分析は「点」の情報しか得られず、作品全体を見通した分析はできない。

そこで本研究では、非破壊で簡便な面的調査に赤外線画像を活用できないか検討することにした。

赤外線を活用する利点は、絵画の光学的調査で主に使用される X 線、紫外線、可視光線と比較し、波長が長いためエネルギーが一番弱く、作品に対して非常に安全な光であること、デジタルカメラで簡便に時間をかけず、撮影が可能であること、非破壊で面的な情報が得られることが挙げられる。

赤外線画像を利用した調査は墨線などの下描きや文書を読み解いた事例に関して数多く報告されているが、画像そのものを材質の観察や絵具の推定に利用した事例はほとんど報告されていない。近赤外線画像を利用して絵画や土器などの材質の特徴を明らかにした報告、日本画や浮世絵の調査で赤外線撮影法を使って顔料を推定した事例、ルノワール作品の絵画技法の変化を捉えた事例が報告された程度である。しかしいずれも個別の事例報告にとどまり、赤外線画像の有効性は示唆しているが、絵具の特徴を押さえた系統的な研究は行われていない。

## 2. 研究の目的

絵画の彩色材料分析には、非破壊で簡便な「面」の広がりを持った総合的な判断要素となる手法が必要である。そのために本研究では、赤外線撮影法で見分けられる絵具を特定し、彩色材料の面的調査方法としての有効性を明らかにする。絵画で一般的に使用される絵具に関して同系色のグループごとにデジタルカメラによって赤外線画像を撮影し、見分けられる有効な赤外線フィルターの組み合わせを確定する。赤外線撮影法を用いた簡便で確実な彩色材料調査の有用条件を明らかにするとともに、確実な彩色材料調査を行う拠りどころとなる画像データをまとめる。以上、3 点について研究を進め、赤外線撮影法による面的調査の有効性を明らかにすることが目的である。

## 3. 研究の方法

### (1) 基準となるカラーチャートの作製

九州国立博物館(以下、九博)の絵画担当の研究員3名と連携して、どのような彩色材料が使われている可能性があるのか話し合いながら、標準試料となる顔料を選定した。選定の元になった絵画は九博所蔵の「唐船・南蛮船図屏風」である。江戸時代以前までに一般に入手可能であった主な顔料をピックアップした。選定した顔料は群青(8番、12番)、白群、緑青(8番、12番)、白緑、辰砂(10番、14番)、鎌倉朱赤口、丹、弁柄、岱赭、藤黄、日本黄土、鉛白、白土、胡粉、墨の14種類である。また、修復の専門家による彩色材料についての意見を下に、顔料を膠で溶いて均一に帯状に塗布した赤外線調査の基本となるカラーチャート(図1、図2)を作製した。また裏彩色など彩色が重ねられている場合も想定し、彩色を重ねたカラーチャート(図3、図4)を作成した。裏彩色とは絹などの透ける支持体に描く場合裏側にも彩色をし、表に透ける効果を狙った技法である。短冊状にそれぞれ彩色した上に90度回転して同様に短冊状に塗り重ねた。

### (2) 赤外線画像の撮影

赤外線画像を均一に高精細に撮影するため、非接触大型画像取得装置Niji-H(高精細スキャナ、株式会社サビア製)を使って撮影した。高精細スキャナは一定の光と間隔で対象をスキャンすることができるため、ムラのない一枚の画像を得ることができる。赤外線撮影はモノクロカメラ(レンズMicro Nikkor 55mm f2.8、絞り5.6)を用いて、可視光に近い近赤外領域の赤外線で行った(IR-LED光源、紫外線吸収フィルターSC70)。

また、より簡便な手法を検討するためデジタルカメラを用いた赤外線撮影を行った。使用したデジタルカメラはPENTAX製中判デジタル一眼レフカメラ654Dである。カメラ本体は赤外線カットフィルターが内蔵されていない赤外線撮影用のカメラなので、リコー製IRカットフィルターを取り付けて通常の撮影を行った。赤外線撮影にはガラスフィルターのKenko製赤外線撮影専用PRO1 Digital R72を使用した。

### (3) 彩色材料の科学分析

赤外線撮影法で見分けられる彩色材料を特定するためには、彩色材料の基本的な情報(成分、組成、形状、構造など)を事前に確認する必要がある。そこで蛍光X線分析装置で成分を把握し、購入した彩色材料の基礎データを収集した。蛍光X線分析では成分分析しかできないが、赤外線画像と分析結果を照らし合わせるには顔料分析においても非破壊調査が求められるため、今回は簡易型の蛍光X線分析装置(オリンパス製、デルタハンドヘル

ド蛍光X線分析計Premium、Rh管球、分析ソフトウェア:岩石鉱石モード、型式:DP-4000)を使用した。実際の絵画の分析を想定しているため、彩色材料そのものではなく、膠で塗布したカラーチャートの分析を行った。

赤外線画像を詳細に検討するために、二次元分光スキャナ装置(JFEテクノロジー株式会社製、イメージング分光器V10C)を使って分光反射スペクトルを測定した。

#### (4) 実際の絵画の調査

今回は主に九博所蔵の絵画および九博で調査した絵画に近い時代や題材の絵画を所蔵しているアメリカメトロポリタン美術館、フリーア美術館、ボストン美術館で調査し、特にメトロポリタン美術館、フリーア美術館所蔵の絵画に対しては赤外線撮影を行い、比較検討することができた。

### 4. 研究成果

#### (1) 作製したカラーチャートの調査結果

高精細スキャナで撮影した赤外線画像とデジタルカメラで撮影した赤外線画像を比較したところ、顔料ごとの濃淡の様相が一致した。高精細スキャナ装置は大掛かりな装置であり、ゆがみのないきれいな画像が得られるが、一般的ではない。そこで本研究の目的の一つである簡便な面的調査にはデジタルカメラによる撮影が適していると判断し、以後デジタルカメラの赤外線画像を使って解析した。

デジタルカメラによる赤外線画像は R72 のフィルターによって、720nm 以下の可視光領域をカットした近赤外領域の画像となる。

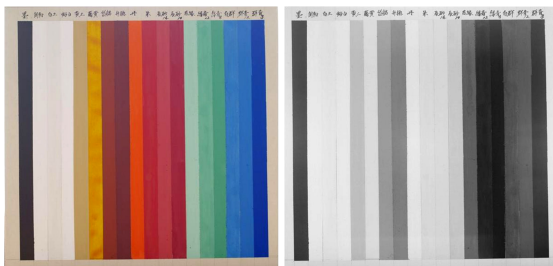


図1 カラー画像

図2 赤外線画像

右から群青(8番、12番)、白群、緑青(8番、12番)、白緑、辰砂(10番、14番)、鎌倉朱赤口、丹、弁柄、岱赭、藤黄、日本黄土、鉛白、白土、胡粉、墨

カラーチャートの赤外線画像(図2)と蛍光X線の結果を合わせて見ると、群青、緑青は濃灰色を呈し、特に粒子の粗い濃色(8番)は黒色に近く、白群と白緑においては多少薄い灰色を示した。いずれも近赤外領域の光を吸収し、群青より緑青の方が濃い灰色を呈することが分かった。赤色部分のうち辰砂、鎌倉朱赤口、丹はどれも同じように白く抜けた。丹は鉛、鎌倉朱赤口と辰砂は水銀を主成分とするが、成分の違いは近赤外領域の反射・吸収に影響は与えず、これらの顔料は近赤外領

域の光を反射し、白く写ることがわかった。岱赭、弁柄はいずれも鉄を主成分とする赤に近い茶色の顔料である。しかし他の赤色顔料とは違い、赤外線画像では濃い灰色を呈し、近赤外領域の光を吸収した。カラーチャートにおける唯一の黄色い染料である藤黄は白く写り、黄色の顔料である黄土は薄い灰色を示した。鉛白は鉛、白土はアルミニウムなどの軽元素、胡粉はカルシウムを主成分とするが、いずれも同じように赤外線画像には白く写った。墨は赤外線をもっともよく吸収し、黒く写った。

二次元分光スキャナ装置でそれぞれの彩色材料が可視・近赤外領域にどのような反射・吸収を持つのか測定した。群青、緑青(図3、4)はいずれも近赤外領域に吸収を持つが、900nm付近から長波長側に反射が見られた。赤外線画像では緑青の方が群青より暗い様相を呈したが、分光反射スペクトルでも緑青の方が反射は小さかった。粒子の大きさが違っても近赤外領域のスペクトルの形状に違いはなかった。朱や丹は600nm以上の波長領域をほとんど反射し(図5)、岱赭・弁柄は同領域の光を吸収する特徴的なスペクトルを示した(図6)。黄土、藤黄は550nm以上の光を反射したが、藤黄はより高い反射を示した(図7)。白色は近赤外領域の光を反射、墨は吸収した(図8)。いずれも赤外線画像の濃淡と一致する結果だった。以上の測定により、彩色材料の赤外線画像の特徴を近赤外領域の分光反射スペクトルで確認することができた。

#### 各塗布試料の分光反射スペクトル

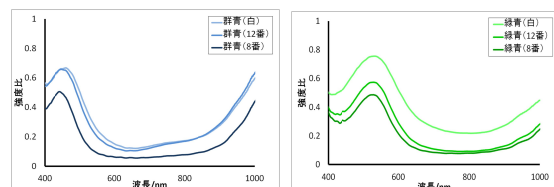


図3 群青

図4 緑青

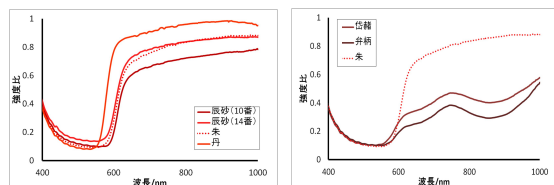


図5 辰砂・朱・丹

図6 岱赭・弁柄・朱

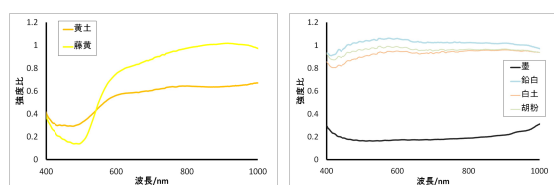


図7 藤黄・黄土

図8 墨・鉛白・白土・胡粉

次に、裏彩色など色を重ねて塗布した場合の赤外線画像を検証するため、彩色を重ねたカラーチャート（図9）を調査した。

赤外線画像を見ると（図10）、重ねた塗膜が厚いためかそれほど下層の彩色の様子が写っていなかった。デジタルカメラは近赤外領域（1000nm以下）の反射光を画像化するため、それほど深くまで光が入り込まない可能性がある。その中で染料である藤黄を重ねた箇所では下層の彩色がそのまま写し出された。また赤色部分はいずれも白く抜けることがこれまでの調査で分かっているが、このカラーチャートでは丹と弁柄が下層の影響を受けた様相を呈した。一方、白色部分も白く写るが、下層の様子は写し出されなかった。このことから、顔料の上に染料が塗布されている場合下層の彩色が赤外線画像に写し出されること、赤色部分は他の彩色部分と比較し、下層の情報が写りやすいことが分かった。墨は赤外線を吸収しやすい性質があるので、上層の塗膜を透過し黒く写ると思われたが、実際は塗膜が厚いためか赤外線が下層まで入り込まず、吸収が見られなかったと思われる。近赤外領域の分光反射スペクトルは赤外線画像の濃淡と合った反射・吸収を示した。

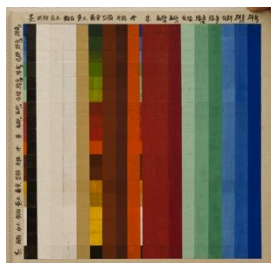


図9 カラー画像

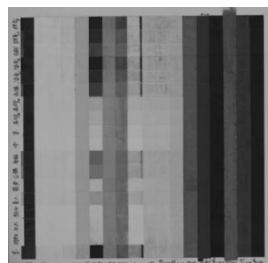


図10 赤外線画像

蛍光X線分析の結果、上層の顔料成分によって強度に違いが生じた。鉛白が下層にある場合、胡粉、朱、辰砂、緑青、群青は上層の顔料成分の方が強度は高かった。また弁柄、代赭は鉄と鉛が同じ強度を示し、白土、黄土は軽元素なため、鉛の方が強く検出された。一方、胡粉が下層の場合、鉛白、鉛丹、朱、辰砂、緑青、群青は上層の成分の方が強度は高く、代赭、弁柄、白土、黄土は下層のカルシウムが主成分として検出された。以上のことから、赤外線画像による面的な情報と機器分析による点の情報を組み合わせることで、裏彩色に使用されている材料を推測することが可能ではないかと考える。

## (2) 実際の絵画の調査結果

実際の絵画の調査事例として、以下の2作品について述べる。一つは九博所蔵の「紙本着色金胎仏画帖断簡（金剛歌菩薩）」（平安時代、12世紀、1幅、本紙：縦25.0cm 横14.0cm）である（図11、12）。この作品は一

見したところ彩色は少ないが、基本的な緑、黄、赤、青が彩色されている墨の線の綺麗な仏画である。アメリカメトロポリタン美術館にも同題材の金胎仏画帖（平安時代、12世紀、1幅、本紙：縦25.4cm 横14.0cm）が所蔵されており、赤外線画像を撮影し、比較検討することができた。



図11 金胎仏画帖断簡

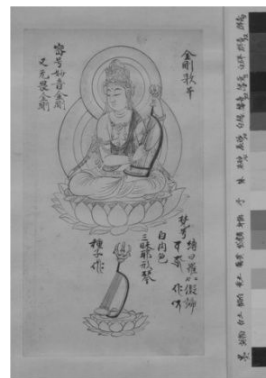


図12 赤外線画像

この絵画の赤外線画像を見ると（図12）、菩薩の肩から下がる緑色の布や顔部分の光輪に薄く塗られた青色部分が比較的濃い灰色を呈し、緑青、群青であることを示した。蛍光X線分析の結果、両箇所から銅が検出された。また、赤色で塗られた唇、体部分の光輪と画面右下の赤い文字はすべて白く抜けた。光輪部分の分析から水銀が検出され、おそらく他の2カ所も同様の顔料が使用されていると思われる。その他、冠、光輪、組んだ足の布部分に黄色が使用されているがいずれも白く抜けた。

仏画の緑色、赤色部分の反射スペクトルをカラーチャートのそれと比較すると、緑色部分（図13）はカラーチャートの緑青（図4）が530nm辺りに反射のピークを示すのに対し、580nm辺りに反射のピークがあった。赤外線画像を詳細に観察すると、黄緑色の淡い部分も白く抜けることなく灰色に写っていることから、黄色が重ねられているのではなく、顔

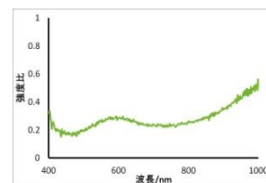


図13 胸の緑色部分（ ）

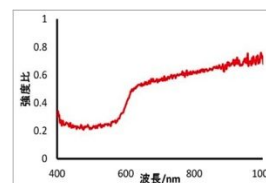


図14 唇の赤色部分（ ）

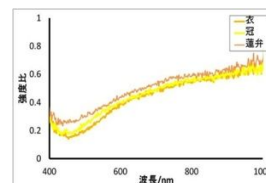


図15 冠・衣の黄色部分（ ）、蓮弁の茶色部分（ ）

料自体が黄色味がかっているため、反射スペクトルのピーク位置が長波長側へシフトしたと考えられる。また、近赤外領域の反射は少ない。一方、赤色部分はすべてにおいて600nm以上の波長領域で反射を示した(図14)。黄色部分は450nm付近から立ち上がり、近赤外領域は赤色と同様の反射であった(図15)。実際の絵画でも近赤外領域の分光反射スペクトルは赤外線画像と一致する結果だった。

二つ目は解体修理の際に裏彩色の存在が明らかになっている、九博所蔵の「絹本着色羅漢図」(陸信忠筆、中国・南宋時代、13世紀、1幅、縦54.1cm 横36.5cm)である(図16、17)。羅漢図は緑と白の内衣に団花文のある赤い衲衣をまとう羅漢が玉座に坐し、後方には緑や桃色、金色からなる甲冑を身につけた神将形が描かれている。この絵画に使用されている彩色は金、白、青、緑、赤と少ないが、裏彩色の存在が赤外線画像にどのような影響を与えるか確認するため調査対象に選んだ。



図16 羅漢図



図17 赤外線画像

赤外線画像はカラーチャート同様、白色および赤色部分は赤外線を反射し白く写り、緑色、青色、黒色部分は暗く写った。人物箇所は裏彩色が施されており、肌色部分は白色が塗布され、赤い衣服の裏面も赤色で塗られている。裏彩色の影響で人物箇所は背景よりも少し明るい様相を呈していると思われる。また羅漢の赤い衣装には金色で模様が描かれているが、赤外線画像では写し出されていない。一方、神将形の白地に金で描かれた模様ははっきりと写っている。蛍光X線分析の結果、人物箇所からは共通して鉛が検出された。赤色部分は水銀が、青色と緑色部分からは銅が鉛より多く検出された。肌色部分からは鉛と鉄が多く検出され、裏と表の彩色材料の成分がそれぞれ検出されたと推測される。また赤い衣服の団花文からは金が出なかったが、白地に金の部分からは金が検出された。このことは赤外線が金の存在を明らかにするのに有効であると示唆しているが、さらに検証を進める必要がある。

本研究では、カラーチャートの赤外線画像の解析結果をふまえ、実際の絵画について彩

色材料の分析結果とあわせて赤外線画像を検討した。今回の基礎的な研究から、赤外線画像の濃淡だけで彩色材料の種類を特定することは難しいが、同じ彩色材料の使用範囲や染料や顔料の組み合わせ、彩色の重なりなど技法的な部分を面的に推察するのに有効であることが明らかとなった。今後はさらに彩色材料の種類を増やし、赤外線画像の有効性を検討していきたい。

## 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[学会発表](計3件)

秋山純子、森實久美子、赤外線撮影法による彩色材料調査の有効性に関する研究 3、日本文化財科学会、2015年07月11日~2015年07月12日、東京学芸大学(東京都小金井市)

秋山純子、森實久美子、赤外線撮影法による彩色材料調査の有効性に関する研究 2、日本文化財科学会、2014年07月05日~2014年07月06日、奈良教育大学(奈良県奈良市)

秋山純子、森實久美子、赤外線撮影法による彩色材料調査の有効性に関する研究 1、文化財保存修復学会 第35回大会、2013年07月20日~2013年07月21日、東北大学百周年記念会館川内萩ホール(宮城県仙台市)

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

秋山 純子 (AKIYAMA, Junko)

独立行政法人国立文化財機構九州国立博物館・学芸部・博物館科学課・研究員

研究者番号：10532484

### (2) 研究分担者

畑 靖紀 (HATA, Yasunori)

独立行政法人国立文化財機構九州国立博物館・学芸部・文化財課・主任研究員

研究者番号：80302066

森實 久美子 (MORIZANE, Kumiko)

独立行政法人国立文化財機構九州国立博物館・学芸部・企画課・研究員

研究者番号：70567031

鷲頭 桂 (WASHIZU, Katsura)

独立行政法人国立文化財機構九州国立博物館・学芸部・企画課・研究員

研究者番号：90590448