

〔報告〕 ハイパースペクトルカメラによる博物図譜の 彩色材料と使用方法の評価

紀 芝蓮・秋山 純子・犬塚 将英・寺島 海・高木 敬子*

1. はじめに

反射分光分析は分析対象の反射スペクトルを既知の材料と比較することで、材料の同定を行う分析手法であり、文化財の科学調査に適用されてきた。従来の反射分光分析ではポイント分析が多く、特定の箇所から得られた情報が全体を代表するものであるかは常に注意が必要であった。しかし、ピクセル毎に反射分光スペクトルのデータを記録することができるハイパースペクトルカメラを使用することにより、2次元の位置情報と反射分光スペクトルの情報を同時に取得することが可能になった。さらに、線形判別分析などの解析手法を用いることにより、類似した反射スペクトルの分布を示すマッピング画像を生成することができる^{1,2)}。

本研究では、高松松平家伝来の博物図譜を対象に、ハイパースペクトルカメラで得られた反射スペクトルのデータを解析した。既知の材料で作成した手板資料から得られた反射スペクトルを基に、線形判別分析によって生成したマッピング画像を用い、作品に使用された彩色材料とその面的な広がりを検討した。

2. 調査対象

本研究の対象は、香川県立ミュージアムが保管する高松松平家伝来の博物図譜である。この博物図譜は、江戸時代中期、高松藩5代藩主松平頼恭の命により、当時高松藩に仕えていた平賀源内らが関与し制作されたと考えられている³⁾。この図譜は、「衆鱗図」、「衆禽画譜」、「衆芳画譜」、「写生画帖」の4種類13帖から成り立っており、それぞれ魚類や水生生物、鳥類、植物や野菜を描いている³⁾。これらの図譜は、非常に細かく、精細に、多彩な色彩で描かれており、江戸時代に制作された博物図譜の中でも貴重な作品群とされている。今回は、分析調査を実施した9点の中から「きやうちさ」（図1：画面右側）の使用材料と色の表現についての結果と考察を報告する。

3. 調査方法

本研究では、エバ・ジャパン社製ハイパースペクトルカメラ NH-1S を使用し、香川県立ミュージアムにて非破壊・非接触の現地調査を実施した。調査時の風景を図2に示す。カメラを撮影用のスタンドに固定し、作品の直上20 cm の距離に設置した。この条件では、1回の撮影での視野範囲は横7 cm ×縦5 cm、1ピクセルの大きさは約0.01 cm となる¹⁾。光源として、河北ライティングソリューションズ社製の高色温度ハロゲンランプを2台使用した。また、白色補正にはスフィアオプティクス社製の標準白色板ゼニスライト SG3151（反射率ラインナップ95%）を使用した。撮影は、スキャンレート（1秒間に撮影するライン数）を5 Line/s、ゲイン（信号の増幅率）を30、露光時間を150 ms という条件に設定し、400 nm から1000 nm

*香川県立ミュージアム

の波長領域における反射分光分析¹⁾を行った。

選定した解析領域から得られた反射スペクトルを、既知の材料で作成した手板資料から得られた反射スペクトルと比較することにより、使用された彩色材料に関する検討を行った。今回の解析に使用した手板資料は現在市販されている彩色材料のうち、日本において古代から近世まで使用されていたものを用いて作成したものである。手板資料の種類には、顔料単独⁴⁾のもの、染料同士や染料と白色顔料（胡粉）を組み合わせたものを使用した。

また、反射スペクトルデータは、解析ソフトウェア（Igor Pro）で Savitzky-Golay 法⁵⁾に基づいたスムージング*と二次微分を行った後、データの評価を行った。

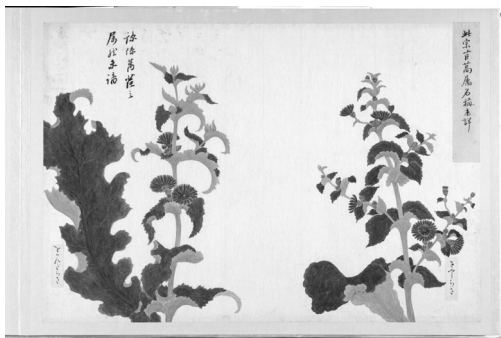


図1 博物図譜の写生画帖の一部(画面右側:「きやうちさ」)

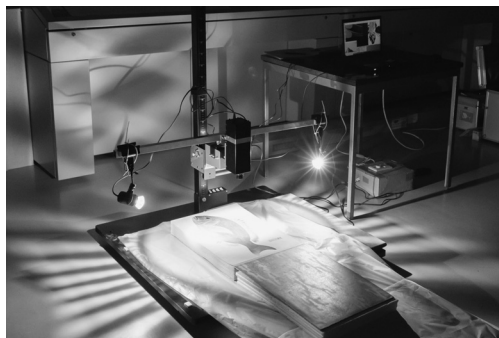


図2 ハイパースペクトルカメラ NH-1S を用いた博物図譜の調査風景

4. 調査結果および考察

4-1. 目視観察による葉と花の色表現

図3に「きやうちさ」の調査範囲を白枠破線で示し、図4にハイパースペクトルカメラで撮影した画像を示す。図中の番号(①～⑤)の白枠は、反射分光分析の解析データとして取得した領域を示す。

作品の色調に着目すると、葉の部分は全体に彩度の低い緑色で、葉の裏側(①)は明るい緑色であり、表側(②)は裏側よりもさらに暗い緑色で描かれている。また、裏側の暗い緑色は本紙がみえるほど薄く塗られ、表側の明るい緑色は白みがかっており、彩色層に少し厚みがあると観察された。花の部分は花卉全体が青色を呈しているが、その一部に赤色が薄く塗布されている。そのため、花卉の外側(③)は青色で、内側(④)に向かうほど赤みが増し、紫色に見える。また、二重花卉の縁(⑤)には明るい青色が確認された。これらの箇所については、いずれも目視で粗い粒子は確認されなかった。

4-2. 葉と花から得られた反射スペクトル

図4に示した葉の部分(①と②)から得られた反射スペクトルを図5に、花の部分(③、④、⑤)から得られた反射スペクトルを図6に示す。それぞれの反射スペクトルは実線で、二次微

*隣接する $2N+1$ 点のデータに対して、 m 次多項式($f(x)=a_0+a_1x+a_2x^2$)による近似を行い、 $2N+1$ 点の中央の値を近似した多項式の値に置き換えていく。今回は5つのデータ点($N=2$)を用いて2次多項式($m=2$)に当てはめた。フリーパラメータである多項式の係数(a_0 、 a_1 、 a_2)は、最小二乗法により求めた。



図3 「きやうちさ」の全図(白枠破線はハイパースペクトルカメラの調査範囲)



図4 ハイパースペクトルカメラで撮影した画像(番号の白枠は解析データ取得箇所)

分データは破線で示す。また、これらの反射スペクトルの特性から彩色材料を考察するため、顔料単独の手板資料⁴⁾のうち緑青・白緑(粒子が細かい緑青)、群青・白群(粒子が細かい群青)、ブルシアンプルー、水銀朱、鉛丹、弁柄の反射スペクトルデータを取得した。これらの反射スペクトルを図7と図8に示す。

葉については、①と②の両方が520 nm を中心に波長のピーク幅が広い反射を示しており、これは緑色が黄色味を帯びていることを示唆している。また、680 nm 付近で吸収が見られ、その後反射率が上昇し、740 nm より長波長側で高い反射率を示した。二次微分データでは、これらに対応するピークとして、図中に枠で示した波長域において、690 nm 付近の上向きのピークと740 nm の下向きのピークが明確に見られた。

図7の実線で示した緑青・白緑の反射スペクトルとそれらの二次微分データを葉のデータと比較してみると、①と②はどちらも緑青・白緑の反射スペクトルの形とは異なることが分かった。日本の伝統的な彩色材料では、緑青を使わずに緑色を作り出すためには、青色と黄色の彩色材料を組み合わせることが一般的である。したがって、葉の緑色の部分には青色と黄色の彩色材料を組み合わせている可能性がある。また、①と②を比較すると、反射スペクトルの形状は同じであるが、①の反射率は全波長域で高いことから、②に対し①には反射率を上昇させる材料(例えば、白色顔料)が添加されている可能性があると考えられる。

花の3箇所(③、④、⑤)においては、いずれも680 nm 付近で吸収がみられた後反射率が

上昇し、740 nm より長波長側で高い反射率を示した。二次微分データでは、690 nm 付近に上向きのピークと740 nm に下向きのピークが明確に見られた。これは葉の2箇所の結果と類似しており、花と葉で共通の材料が用いられた可能性が示唆される。また、③と④はともに500 nm よりも短波長側で反射率の上昇が見られ、これは紫がかった青色を示している。③と④の短波長側をさらに比較すると、④は③よりも反射率が低く、図中に矢印で示した540 nm と580 nm で小さな吸収が見られ560 nm に小さな反射が見られた。二次微分データでも、④において540 nm と580 nm での吸収と560 nm での反射に由来するピークが明確に確認できた。また、⑤では、480 nm を中心になだらかな反射がみられ、これは青色を帯びていることを示している。⑤の全波長域での反射率の高いため、青色の彩色材料に高反射率の特性をもつ材料が添加された可能性があると考えられる。

図7に破線で示した群青・白群および点線で示したプルシアンブルーの反射スペクトルとそれらの二次微分データを比較した結果、花の3箇所のいずれの反射スペクトルも、長波長領域で高い反射率を示している様相は群青とプルシアンブルーとは異なることが分かった。また、花卉で見られた紫色の部分(④)は青色の部分(③)の上に赤色が塗布されて紫色に見えることが目視で確認された。赤色の彩色材料が使われていたと推定すると、540 nm と580 nm で吸収を示すものである可能性が考えられ、これは図8に示した赤色顔料の水銀朱、鉛丹、弁柄の反射スペクトルの特徴とは異なっていることがわかる。

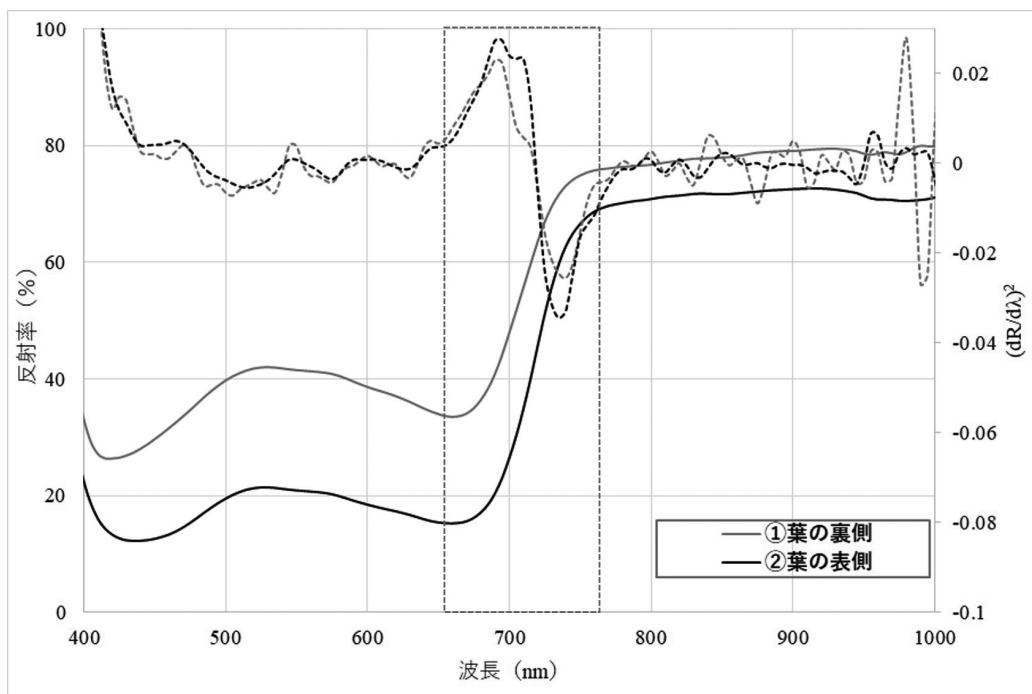


図5 葉の部分(①と②)から得られた反射スペクトルとそれらの二次微分データ

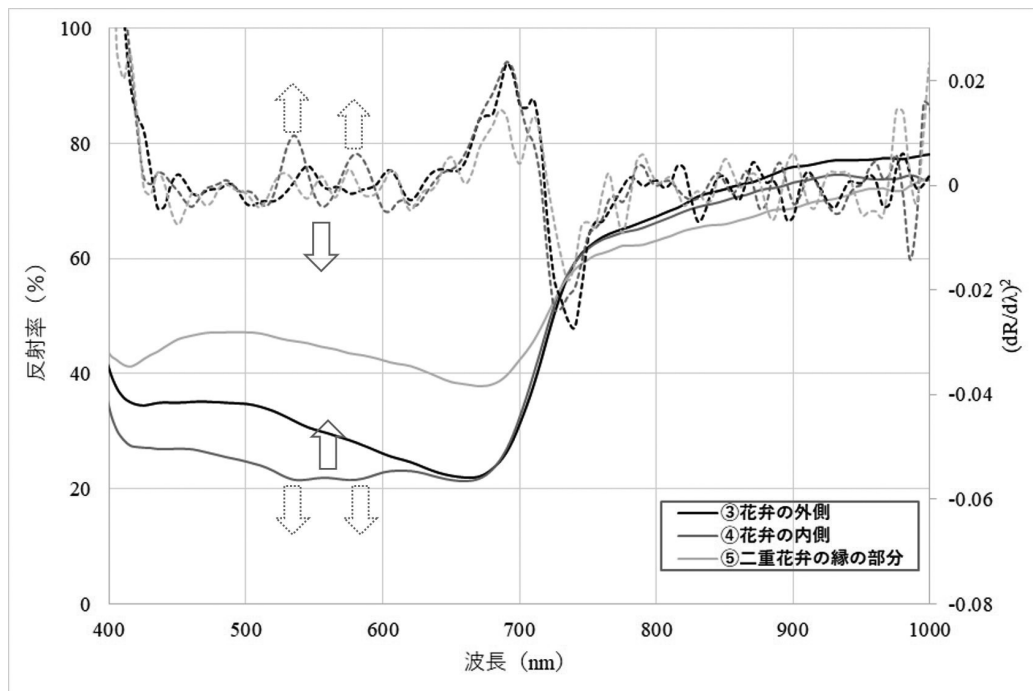


図6 花の部分(③、④、⑤)から得られた反射スペクトルとそれらの二次微分データ

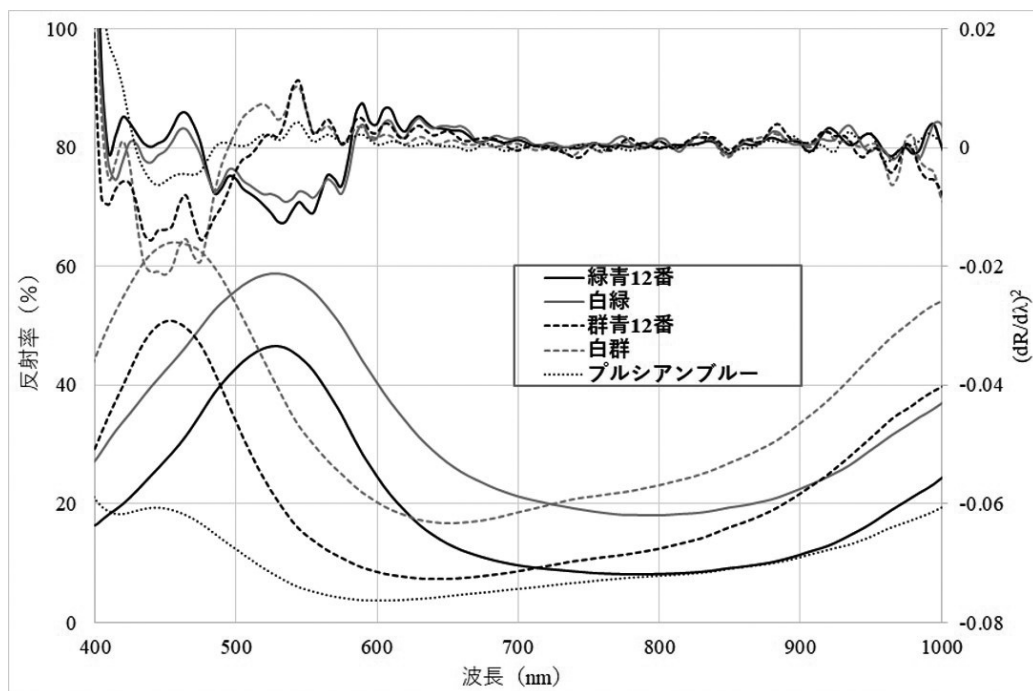


図7 緑青・白緑、群青・白群、プルシアンブルーの反射スペクトルとそれらの二次微分データ

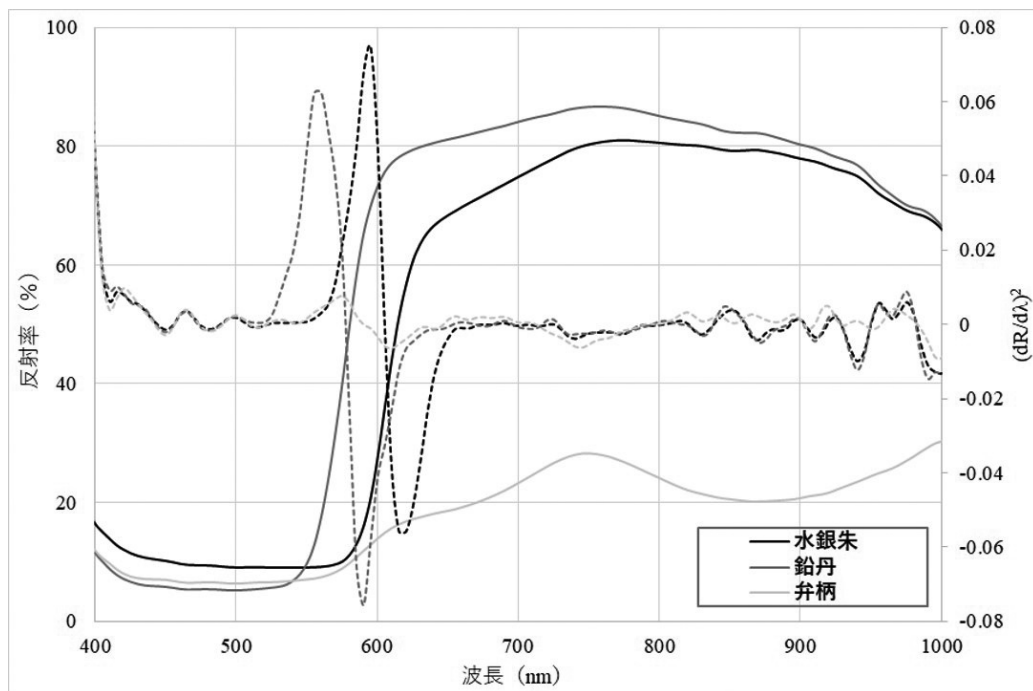


図8 水銀朱、鉛丹、弁柄の反射スペクトルとそれらの二次微分データ

4-3. 葉と花の材料解析：既知材料の反射スペクトルに基づくマッピング画像

4-2の結果と考察に基づき、葉の緑色部分は青色と黄色、花卉の紫色部分は青色と赤色の彩色材料を組み合わせで表現されていると推測される。これらの彩色材料は緑青、群青、プルシアンブルーなどの顔料由来ではないことが確認された。また、一部では白色顔料も併用されている可能性がある。したがって、彩色材料をさらに検討するため、染料の組み合わせを用いた手板資料の一部を使用した。具体的には、図9に示した青色染料の藍に赤色染料の胭脂、蘇芳、紅花、茜、黄色染料の藤黄と黄檗を塗り重ねたものおよびこれらと胡粉を組み合わせた手板資料を使用した。手板資料に使用した材料は、すべて京都放光堂から入手した。藍は藍棒、胭脂は胭脂綿、藤黄は藤黄の塊、蘇芳、紅花、茜、黄檗はいずれも植物から抽出した染料を使用した。これらの彩色材料から得られた反射スペクトルを教師データとして線形判別分析を実施した。線形判別分析により教師データに類似したスペクトルを有する箇所を同色で色付けし、図4の調査範囲の2次元的な分布を示すマッピング画像（図10）を生成した。

マッピング画像の結果から、葉の表側全体は、緑色で表示され、藍と藤黄の組み合わせの反射スペクトルに類似していた。一方、葉の裏側の一部分は黄緑色で表示され、藍と藤黄に胡粉を加えた組み合わせの反射スペクトルに、その他の部分は黄色で表示され、藍と黄檗に胡粉を加えた組み合わせの反射スペクトルに類似していた。花に関しては、花卉の多くの部分が青色で表示され、藍の特徴を有する反射スペクトルが得られた。一部の紫色に見える箇所では、赤色で表示され、藍と胭脂と胡粉の組み合わせの反射スペクトルに類似していた。花卉の縁の明るい青色の彩色は藍のみの反射スペクトルと比べ、水色で表示される藍と胡粉の組み合わせの反射スペクトルに類似していた。

マッピングの結果の正確性を評価するため、使用した教師データの反射スペクトルと作品の



図9 教師データとして使用した手板資料の一部の画像

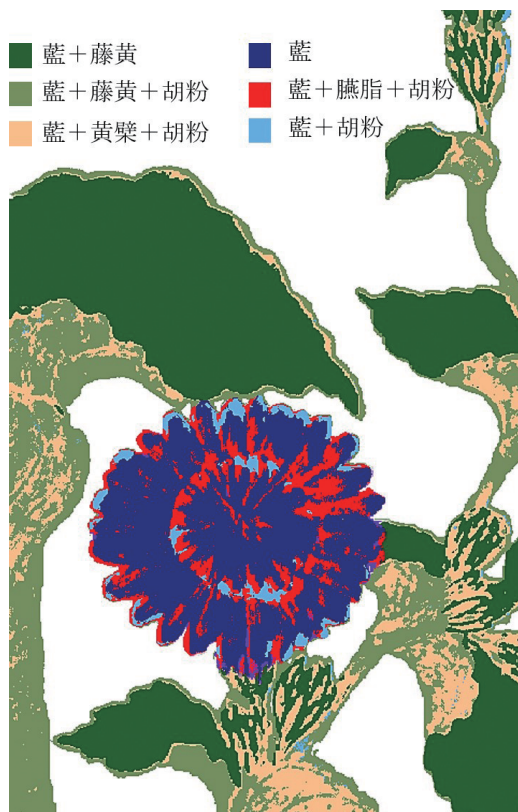


図10 既知材料の反射スペクトルを基にしたマッピング画像

①～⑤から取得した反射スペクトルとの比較を行った。

緑色を作り出すための彩色材料として、藍、藤黄または黄檗、胡粉を組み合わせた材料から得られた反射スペクトルを図11に示す。これらの反射スペクトルを比較すると、藍と藤黄を組み合わせた場合の方が、藍と黄檗を組み合わせた場合より520 nm 付近のピークが長波長側にシフトしている様相を呈したが、それ以外の大きな違いは認められなかった。今回の解析では、黄色の彩色材料を明確に区別することは難しく、マッピング結果の正確性については今後検討が必要である。

藍単独の場合と藍と胡粉を組み合わせた材料から得られた反射スペクトルを図12に示す。③と⑤から得られた反射スペクトルをこれらの反射スペクトルと比較すると、③と⑤のほうが短波長側でのピーク位置が430 nm よりも長波長側に、反射率の立ち上がりが680 nm 付近より短波長側にシフトしていた。作品には青色材料として藍が主に使用されていたと推定されるが、手板資料による吸収域と反射域とは違いがあり、その違いは今後の検討課題の一つである。また、胡粉を併用した場合は、胡粉のない場合よりも全波長域での反射率が高くなることが確

認められた。しかし、③と⑤の反射率はどちらも、手板資料の藍のみの反射率よりも高かったため、花卉の部分にも白色顔料が使用されていた可能性がある。反射率の違いがマッピングの結果に影響を与える可能性があるため、白色顔料の添加があったかどうかを検討する際には慎重さが求められる。

藍と各種の赤色染料、胡粉で作られた材料から得られた反射スペクトルを図13に示す。藍と胭脂を組み合わせた材料から得られた反射スペクトルでは、530 nm と570 nm での吸収と、550 nm での小さな反射が確認できた（図中に矢印で示す）。これらのピークは二次微分データでも明確に示されている。作品の④の反射スペクトルとその二次微分データを比較した結果、全体的に短波長側にシフトしていたが、他の赤色染料である蘇芳や紅花、茜と比較すると、藍と胭脂の組み合わせから得られた反射スペクトルの方が作品のデータに類似していた。

以上の結果から、線形判別分析を用いたマッピング画像から作品の色表現と反射スペクトルの特性から推測される使用材料の面的な分布を評価でき、「きやうちさ」の葉の緑色を呈する部分では、主に藍と黄色染料が使用され、花の青色の色調を呈する部分では主に藍、紫色を呈する部分では藍と胭脂が使用されたと推定される。さらに、葉の裏側や花卉には白色顔料が併用された可能性がある。

5. まとめ

本研究では、高松松平家伝来の博物図譜のうち「きやうちさ」の葉と花に使われた彩色材料について、ハイパースペクトルカメラを用いた分析を行った。

反射スペクトルを評価した結果、葉の緑色の部分では藍と黄色染料が使用され、花の青色の色調を呈する部分では藍、紫色の部分では藍と胭脂が主要な彩色材料として使用されていると推定される。また、葉の裏側や花卉には白色顔料が併用されている可能性がある。線形判別分

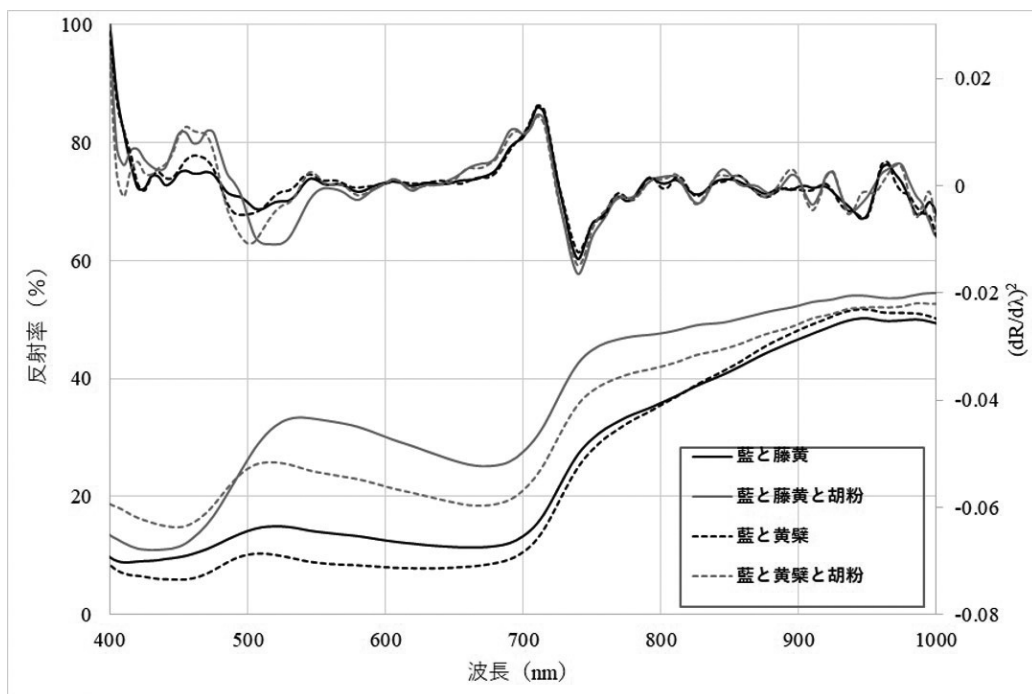


図11 藍、藤黄または黄檗、胡粉を組み合わせた材料の反射スペクトルとそれらの二次微分データ

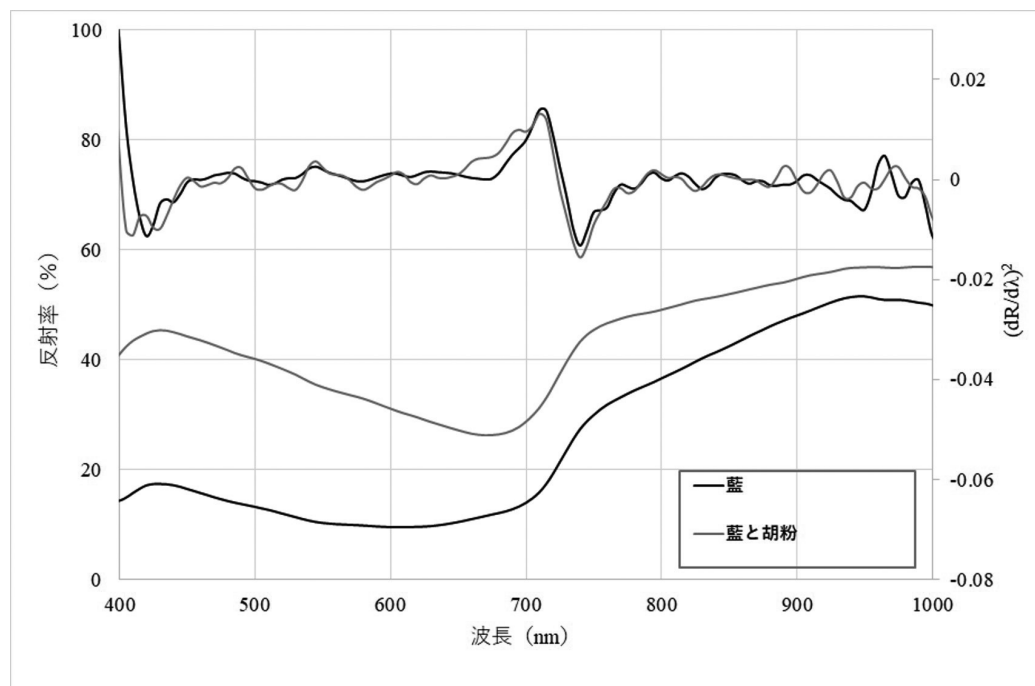


図12 藍単独の場合と藍と胡粉を組み合わせた材料の反射スペクトルとそれらの二次微分データ

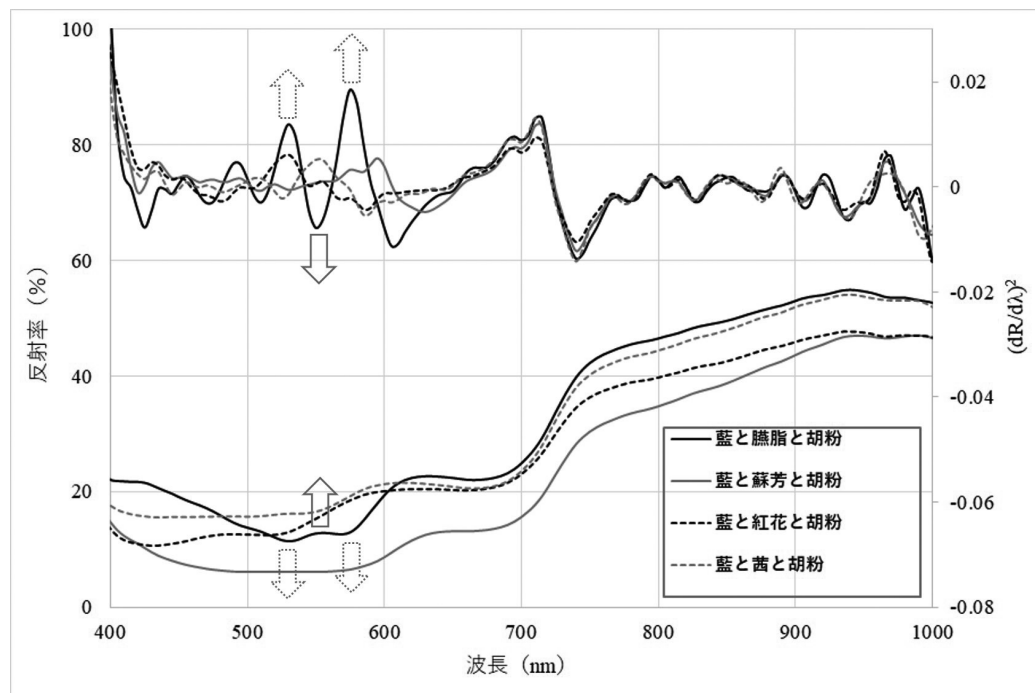


図13 藍と各種の赤色染料、胡粉で作られた材料の反射スペクトルとそれらの二次微分データ

析を用いたマッピング画像からは、作品の色表現と反射スペクトルの特性から推測される使用材料の面的な分布を評価することができた。今後は高松松平家伝来の博物図譜の他の作品にも同様の手法を応用し、作品群の色表現と使用材料の関連性をさらに探求し、彩色材料についてもさらに多くの顔料と染料の組み合わせについて詳しく調査していく予定である。

謝辞

本研究は公益財団法人松平公益会のご協力を得て実現しました。また、本文中に掲載している作品の写真は東京文化財研究所保存科学研究センター修復技術研究室・千葉毅研究員により撮影されたものです。ここに記して感謝申し上げます。本研究は JSPS 科研費 JP 15K01144、JP 19K01136の助成を受けたものである。

参考文献

- 1) 紀芝蓮・犬塚将英：文化財の2次元的な分光分析を行うためのハイパースペクトルカメラの性能評価、保存科学、61、93-107 (2022)
- 2) 紀芝蓮・犬塚将英・米沢玲・安永拓世・江村知子・高橋佳久：光明寺所蔵羅漢図に使用された彩色材料、保存科学、62、85-98 (2023)
- 3) 高松松平家博物図譜 | 高松市-高松市公式ホームページ (<https://www.city.takamatsu.kagawa.jp/kurashi/kosodate/bunka/bunkazai/shiteibunkazai/kaiga/matsudaira.html>) (2023年11月20日参照)
- 4) 秋山純子・三好賢子・高木敬子：赤外線画像を使った彩色材料の面的調査、日本文化財科学会第33回大会要旨集、280-281 (2017)
- 5) Savitzky, A., and M.J.E. Golay, Smoothing and differentiation of data by simplified least squares procedures, Analytical Chemistry, 36, (8), 1627-1639 (1964)

キーワード：ハイパースペクトルカメラ (Hyperspectral camera)；可視光-近赤外領域反射分光法 (Visible and near-infrared reflectance spectroscopy)；彩色材料 (coloring materials)；博物図譜 (Illustrated Book on Natural History)

Evaluation of Coloring Materials and Usage Methods in an *Illustrated Book on Natural History* Using a Hyperspectral Camera

CHI Chih lien, AKIYAMA Junko, INUZUKA Masahide,
TERASHIMA Kai and TAKAGI Keiko*

Reflectance spectroscopy is one of the scientific methods used to analyze cultural heritage materials, identifying materials by comparing the reflected spectra of the analysis subject with known materials. Previously, point analysis predominated, requiring caution in determining whether information obtained from specific points represented the entirety. However, today, by using a hyperspectral camera, it is possible to record the reflectance spectrum data for each pixel and to simultaneously obtain two-dimensional positional information and reflectance spectrum information. Furthermore, by using analytical methods such as linear discriminant analysis, it is possible to generate mapping images that show the distribution of similar reflectance spectra.

In the present study, the reflectance spectrum data of an illustration from *Illustrated Book on Natural History* was obtained by the hyperspectral camera and analyzed. The book, which depicts fish, birds, and plants in fine and colorful detail, was produced in the middle of the Edo period and in the possession of the Takamatsu Matsudaira family. This study focused on the coloring materials used in the leaves and flowers of the plant-illustration titled “Kiyauchisa,” compared the data from a hyperspectral camera and the reflectance spectra obtained from sample boards made from known coloring materials, and examined the coloring materials used in the work and their planar spread using mapping images generated by linear discriminant analysis.

As a result, it is estimated that indigo and yellow dyes were used in the green parts of the leaves, indigo was used in the blue hues of the flowers, and indigo and enji were used as the main coloring materials in the purple parts of the petals. In addition, there is a possibility that white pigments were also used on the back of the leaves and the petals. From the mapping images created using linear discriminant analysis, it was possible to evaluate the planar distribution of the materials inferred from the color expression of the work and the characteristics of the reflectance spectrum. In the future, the same method will be applied to other works of the Takamatsu Matsudaira family’s *Illustrated Book on Natural History*, and the relationship between the expression of various color combinations and the materials used will be explored.

*The Kagawa Museum