

〔資料〕 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

紀 芝蓮・犬塚 将英

1. はじめに

文化財の保存と活用を考える上で、文化財の材質、構造、劣化状態を調べるための科学調査は重要な役割を担っている¹⁾。他の分野における分析調査と比較すると、文化財の調査では非破壊・非接触を前提とした手法を要求されることが多いことに加えて、文化財の移動の困難さから現地調査を余儀なくされることが多い等の特有の事情がある。これまでに保存科学研究センター分析科学研究室では可搬型分析装置及び分析手法の開発を行い、蛍光X線分析²⁻⁶⁾、X線回折分析^{2,7,8)}、X線透過撮影^{2,9)}等の現地調査を実施してきた。

一方、X線を用いた分析では材料の特定が難しい染料などの有機材質の分析には、反射分光分析などが主な調査法として挙げられる¹⁰⁾。反射分光分析では、分析対象から得られた反射スペクトルを既知の材料から得られた反射スペクトルと比較することにより、材料の種類の同定を行う^{10,11)}。従来の反射分光分析では、光源からの入射光を絞って評価したいポイントに照射し、それらの分析ポイントからの反射スペクトルを評価することにより分析が行われていた。しかし、このように特定のポイントから得られた分析結果には、「それが本当に調査対象を代表する分析結果なのか」という疑問が付きまとう。この点について、近年の分光技術の著しい進歩により、1画素ごとに分光情報を取得することができるハイパースペクトルカメラが開発され、国外では文化財の調査においても利用が盛んになってきている¹²⁾。ハイパースペクトルカメラを用いると、2次元の位置情報と反射分光スペクトルのデータを一緒に集積することができるので、例えば絵画で類似した彩色材料が用いられている箇所のマッピングや補修箇所の視覚化を実現した事例も報告されている¹³⁾。

分析科学研究室では従来のX線を用いた分析手法に加えて、反射分光分析による現地調査も実施するために、2019年度にハイパースペクトルカメラを導入した。ここでは、今後の文化財調査への適用を念頭に置き、この装置の性能評価及び分析条件の設定を行うための基礎実験の結果を報告する。

2. ハイパースペクトルカメラと分析手順

本研究で評価を行ったのは、エバ・ジャパン社製ハイパースペクトルカメラ、NH-1Sである(図1)。このカメラで取得できる画素数は $752 \times 480 =$ 約36万画素である。各画素において仕様上の計測可能な波長領域は350 nm～1100 nmであり、その波長分解能は5 nmである。カメラ本体は軽量(1030 g)であるので、調査現場への搬送が容易である。また、内蔵分光スキャニング技術が採用されていることから、外部可動装置を用いて装置本体もしくは調査対象の資料を動かさなくても分析可能であることが本装置の特徴である。

分析調査を行う時には、USBケーブルを用いて専用ソフトウェアがインストールされているPCに接続し、画像及び信号強度を確認しながら、各調査時におけるピント、スキャンレート、露光時間、ゲイン(信号の感度を増幅させる倍率)等を調整する。次節以降で説明する全



図1 ハイパースペクトルカメラ (NH-1S)

での実験において、スキャンスピードを10 (Line/s)、ゲインを50、露光時間を最大値である99.96 (ms) の条件で撮影を実施した。調査時に用いる光源としては、短波長側の強度が十分に強い高色温度のハロゲンランプ (河北ライティングソリューションズ社製 JR-AKW/5EZ-47K) を選定し、調査時には資料表面に対して45°の角度から2台のランプを用いて照射を行うことにした¹³⁾。

また、暗電流に起因するダークノイズの補正 (黒レベル補正) 及び白色補正を行うためのデータを事前に取得しておく必要がある。黒レベル補正用には、レンズにキャップをした状態でデータを取得する。白色補正用には、寸法が200 mm × 200 mm × 12 mm、反射率が95%である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) を用いてデータを取得することにした。

そして、分析装置に付属している解析専用ソフトウェアを用いて、分析データに対して黒レベル補正と白色補正を施し、各画素中の各波長における反射率を算出する。さらに、これらのデータに対して線形判別分析等の手法を適用することにより、類似した反射スペクトルを有する画素のマッピングを行うことも可能である。

以上のような分析装置を用いて、本研究では解像度、分析可能な波長領域、反射スペクトルの妥当性を評価するための基礎実験を行ったので、その結果を次節以降で報告する。

3. 分析条件の検討

3-1. 資料とカメラ間の距離と分解能

ハイパースペクトルカメラの画素数は決まっているため、資料とカメラとの間の距離を長くすると1回で撮影することができる面積は広がるが、画像の空間分解能は低下する。資料とカメラとの間の距離と分解能の関係を明らかにするために、ここでは、1 mm 間隔のJIS A4サイズ (297 mm × 210 mm) の方眼紙を被写体として用い、方眼紙とカメラとの間の距離を変えた時の視野範囲、及び方眼紙の目盛りの見え方を評価した。

距離を変えた時の視野範囲と得られた可視画像を表1の第2と第3列に示す。一般的に、被写体の大きさの識別に必要な最小画素数は4とされている¹⁴⁾。4画素の幅に相当する最小検出サイズを表1の第4列に示す。例えば、1 mm 程度の大きさの識別が求められる調査では、資料とカメラの間の距離は55 cm 以内にすべきであることがわかった。

表1 方眼紙とカメラとの間の距離による視野範囲および解像度の評価

被写体とカメラとの距離(cm)	視野範囲		距離を変えた時に得られた可視画像の一部	最小検出サイズ
	X	Y		X
	(mm)	(mm)		(mm)
15	55	36		0.29
20	71	47		0.38
25	87	57		0.46
30	105	68		0.56
35	124	82		0.66
40	136	90		0.72
45	154	102		0.82
50	169	113		0.90
55	189	123		1.01
60	203	134		1.08
65	220	148		1.17

3-2. 分析可能な波長領域

今回評価を行ったハイパースペクトルカメラは各画素において計測可能な波長領域は350 nm~1100 nm という仕様である。しかし、文化財の調査を行う時の条件において、信頼に値する反射スペクトルが得られる波長領域を把握しておく必要がある。ここでは白色補正用の標準白色板を用いて評価を行った。この時、被写体（白色板）とカメラとの間の距離を50 cmにした。

波長領域が350 nm~1100 nm における白色板の反射スペクトルを図2に示す。波長が400 nm 以下および1000 nm 以上の場合、測定結果は不安定であり、算出された反射率は95%を超

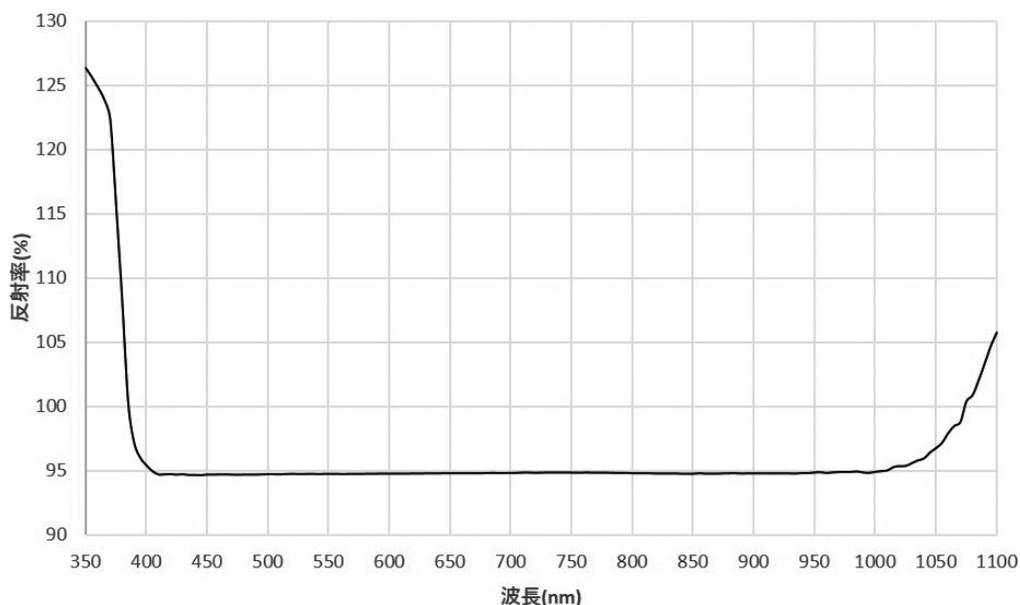


図2 標準白色板の波長領域の反射スペクトル

えていた。波長が400 nm 以下では光源ランプからの光量が十分でないこと、1000 nm 以上では検出器の感度が十分でないことが原因であると考えられる。以上の結果から、今後の私たちの分析調査では波長領域が400 nm～1000 nm のデータを使用することにした。

4. 彩色材料を用いた反射スペクトルの測定例

ハイパースペクトルカメラで得られる反射スペクトルから材料の同定を行うためには、既知の試料から得られた反射スペクトルとの比較を行う必要がある。ここでは、今後ハイパースペクトルカメラで分析調査を実施する際の基準となるデータを蓄積するために、彩色材料の分光分析を行った。

4-1. 方法

近世までの日本の絵画や壁画などの彩色材料として用いられたことが知られている天然鉱物もしくは人造で合成した無機顔料等の市販顔料を可能な限り入手し分析に供した(表2)。これらの試料について事前に蛍光X線分析(XRF)、X線粉末回折(XRD)を用いて、化学組成の確認を行った。分析に用いられた装置および分析条件は表3に示し、分析結果に基づいて推定された試料の主要な鉱物名および化学組成は表2の第2列に示す。

以下では、いくつかの試料についての説明を補足する。緑土は、今回の調査では海緑石ではなく、緑土の原料の一つ¹⁵⁾として用いられたセラドナイト(celadonite)から作られたものにした。また、花紺青(スマルト)という商品名で販売されている試料は、XRFでSi, K, Coが検出され、XRDで非結晶質のハローが得られたことで、コバルト着色による青く発色するガラス質の材料であるスマルト(一般式 $\text{SiO}_2 \cdot \text{K}_2\text{O} \cdot \text{CoO}$)であると推定できた。今回入手した水干本藍は粉末インディゴを用いたが、XRFでBa, Ca, Sが検出され、XRDで硫酸バリウムの回折パターンが得られたので、硫酸バリウムを主要な体質顔料として作られたものと

表2 市販顔料（試料）における蛍光X線分光分析（XRF）、X線粉末回析（XRD）による分析結果およびハイパースペクトルカメラによるスペクトルの特徴

色	顔料名	分析結果に基づく推定された 主要な鉱物名と化学組成	特徴的な反射	主要吸収
青色 顔料	群青	Azurite ($\text{Cu}_3(\text{OH})_2(\text{CO}_3)_2$)	450 nm	>500 nm
	焼群青	Azurite ($\text{Cu}_3(\text{OH})_2(\text{CO}_3)_2$)	450 nm	>500 nm
	真黒焼き群青	Azurite ($\text{Cu}_3(\text{OH})_2(\text{CO}_3)_2$)	*1)	*1)
	白群	Azurite ($\text{Cu}_3(\text{OH})_2(\text{CO}_3)_2$)	470 nm	640 nm
	焼白群	Azurite ($\text{Cu}_3(\text{OH})_2(\text{CO}_3)_2$)	480 nm	640 nm
	真黒焼き白群	Azurite ($\text{Cu}_3(\text{OH})_2(\text{CO}_3)_2$)	*1)	*1)
	ラピスラズリ	*2) Lazurite ($\text{Na}_{8-10}\text{Al}_6\text{Si}_6\text{O}_{24}\text{S}_2$), Phlogopite ($\text{Mg}_3\text{AlSi}_3\text{O}_{10}(\text{OH})_2$) など複数の鉱物	450付近, >750 nm	500~700 nm
	ウルトラマリン	*2) Lazurite ($\text{Na}_{8-10}\text{Al}_6\text{Si}_6\text{O}_{24}\text{S}_2$), Kaolinite ($\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_7(\text{OH})_2$), Quartz (SiO_2)	450付近, >750 nm	500~700 nm
	水干本藍	Barite (BaSO_4), *5) 有機成分	>780 nm	<710, 880 nm
	プルシアンブルー	($\text{Fe}_4(\text{Fe}(\text{CN})_6)_3 \cdot (\text{H}_2\text{O})_{14}$)	*1)	*1)
	花紺青(スマルト)	*3) ケイ素, カリウム, コバルト を含む非結晶質	<480, >750 nm	520~680 nm
	新岩群青	*3) 鉛, ケイ素などを含む非結晶 質	>750 nm	480, 530~660 nm
緑色 顔料	緑青	Malachite ($\text{Cu}_2(\text{OH})_2(\text{CO}_3)$)	530 nm	>600 nm
	焼緑青	Malachite ($\text{Cu}_2(\text{OH})_2(\text{CO}_3)$)	540 nm	>600 nm
	真黒焼き緑青	Malachite ($\text{Cu}_2(\text{OH})_2(\text{CO}_3)$)	*1)	*1)
	白緑	Malachite ($\text{Cu}_2(\text{OH})_2(\text{CO}_3)$)	530 nm	800 nm
	焼白緑	Malachite ($\text{Cu}_2(\text{OH})_2(\text{CO}_3)$)	550 nm	800 nm
	真黒焼き白緑	Malachite ($\text{Cu}_2(\text{OH})_2(\text{CO}_3)$)	*1)	*1)
	セラドナイト (緑土)	*2) 鉄ケイ酸塩鉱物など複数の鉱 物	520, 830 nm	710 nm
	新岩緑青	*3) 鉛, ケイ素などを含む非結晶 質	520, >780 nm	580~680 nm
黄色 顔料	稲荷黄土	*2) 鉄ケイ酸塩鉱物など複数の鉱 物	460, >580 nm	500 nm
	雌黄(石黄)	Orpiment (As_2S_3)	>600 nm	440 nm
	密陀僧	Massicot (PbO)	>480 nm	425 nm

表2 つづき

色	顔料名	分析結果に基づく推定された 主要な鉱物名と化学組成	特徴的な反射	主要吸収
赤色顔料	天然辰砂	Cinnabar (HgS)	>640 nm	<580 nm
	赤口朱	Cinnabar (HgS)	>640 nm	<580 nm
	黄口朱	Cinnabar (HgS)	>640 nm	<570 nm
	天然岱赭	Hematite (Fe ₂ O ₃)	620, 750 nm	<570, 670, 870 nm
	弁柄	* ²⁾ Hematite (Fe ₂ O ₃), Calcite (CaCO ₃)	620, 750 nm	<570, 670, 870 nm
	鉛丹	Minium (Pb ₃ O ₄)	>600 nm	<540 nm
	雄黄 (鶏冠石)	Realgar (AsS)	>600 nm	<530 nm
白色顔料	鉛白	2PbCO ₃ Pb(OH) ₂	* ⁴⁾	* ⁴⁾
	胡粉	Calcite (CaCO ₃)	* ⁴⁾	* ⁴⁾
	方解末	Calcite (CaCO ₃)	* ⁴⁾	* ⁴⁾
	田原白土	* ²⁾ Orthoclase (KAlSi ₃ O ₈), Quartz (SiO ₂), Kaolinite (Al ₄ Si ₄ O ₁₀ (OH) ₈)	* ⁴⁾	* ⁴⁾
	雲母	Muscovite (K _{3.52} Na _{0.44} Al _{11.36} Fe _{0.24} Mg _{0.08} Si _{12.32} O ₄₈ H ₈)	* ⁴⁾	* ⁴⁾
黒色顔料	ラスコーブラック	* ²⁾ 酸化マンガンなど複数のマンガン化合物	* ¹⁾	* ¹⁾
	墨	* ⁵⁾ C	* ¹⁾	* ¹⁾

*¹⁾ 測定波長域全体で吸収されており、反射率が極めて低い

*²⁾ XRD で複数鉱物もしくは複数の化合物が同定された試料

*³⁾ XRD による結晶構造の同定が不可能の試料

*⁴⁾ 測定波長域全体で吸収が見られず、反射率が極めて高い

*⁵⁾ XRF と XRD で顔料試料を有する有機成分の検出および同定が不可能の試料

表3 分析に用いられた装置および条件

分析方法	使用装置	分析条件
蛍光X線分析 (XRF)	ブルカー社製の蛍光X線分析装置 (M4 TORNADO)	測定雰囲気：大気 照射X線管球：Rh (ロジウム) 管電圧・管電流：50 kV・200 μA X線照射径：20 μm 測定時間：ライブタイム60秒
X線粉末回折 (XRD)	パナリティカル社製X線回折分析装置 (X'Pert PRO)	使用装置：測定雰囲気：大気 照射X線管球：Cu θ/2θ スキャン：2θ = 5° - 70° 管電圧・管電流：40 kV・40 μA ステップ角度Δθ：0.02°

考えられ、近世までに使われた藍の化学組成とは異なることがわかった。また、日本画の伝統的な彩色材料には、種類や絵具の色目が限られているので、色目を増やす方法としては、群青・緑青を焼くことがあると知られている。本研究では、市販の焼群青、焼緑青、焼白緑も分析対象の試料とした。さらに、それらを絵皿に入れた状態で電気コンロの上に置き、加熱しながら粉末をかき混ぜて、試料の色が灰黒になるまでにゆっくり焼くことにより、真黒焼きの群青、緑青、白緑の試料を作成した。焼白群は入手することができなかったため、市販の白群を前述した方法で3分間、10分間の加熱することにより焼白群、真黒焼き白群の試料を作成した。そのほか、合成無機顔料のウルトラマリン、人造の赤口朱および黄口朱、新岩群青および新岩緑青のような釉薬と金属酸化物を高温焼成して製造される着色ガラスの塊を粉碎し粒子分けをして作られた近代以降に現れてきた材料、方解末、雲母も分析対象の試料とした。

上記の試料を細かく砕いた粉末をリガク社製の微量粉末試料板 RS540-10 に充填した状態で反射スペクトルの測定を行った。カメラは試料から 50 cm の距離に設置した。

4-2. 分析結果

それぞれの試料から得られた反射スペクトルを色ごとに図3～図10に示し、各スペクトルの特徴の概略を表2の第3列と第4列に示す。

4-2-1. 青色顔料

藍銅鉱を主成分とする青色顔料の反射スペクトルを図3に示す。群青は、450 nm 付近に上に凸となる特徴的な反射を示し、それ以外の反射率はさほど高くならない。焼群青は、群青の反射スペクトルの波形に類似するが、特徴的な波形を示す450 nm 付近の反射率は群青より低くなる。真黒焼き群青は、450 nm 付近で強い反射を示さず、測定波長領域全体にわたって反射率が極めて低い。粒子が細かい白群は、群青と比較すると全体の反射率が上がり、特徴的な

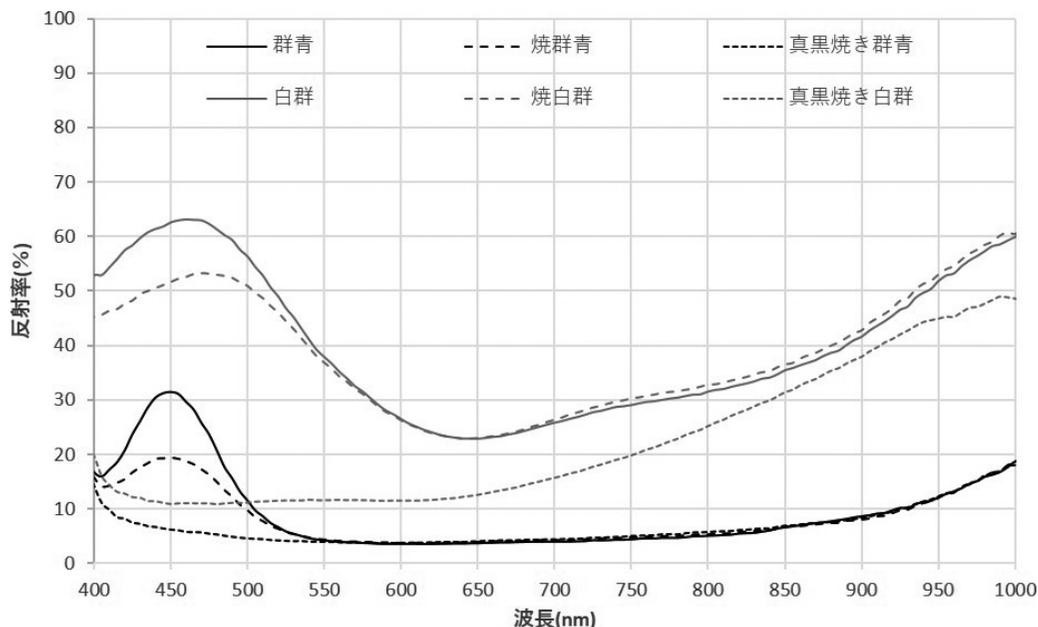


図3 藍銅鉱を主成分とする青色顔料の波長領域の反射スペクトル

反射位置は長波長側にシフトしていて、反射帯の幅が広がっている。また、640 nm 付近に吸収帯がある。焼白群は、白群の反射スペクトルの波形に類似するが、特徴的な反射の反射率は白群より低く、反射位置はさらに長波長側にシフトしていく。真黒焼き白群は、白群の特徴な反射が現れず、650 nm 以降の反射率が徐々に上がっていく右上がりのスペクトルである。

そのほかの各種青色顔料の反射スペクトルを図4に示す。ラピスラズリとウルトラマリンは、互いのスペクトルの波形が類似し、450 nm 付近と750 nm より長波長で反射率が高く、それ以外の波長領域は反射率が低い。水干本藍は、710 nm より短波長で低い反射率を示し、それ以降の反射率が上がり780 nm より長波長で高い反射率を示す特徴がみられるが、今回の試料では880 nm 付近に小さい吸収もみられた。プルシアンブルーは測定波長領域全体にわたって低い反射率を示す。花紺青（スマルト）は、480 nm より短波長側に向けて反射率が上がっていく傾向がみられ、およそ520 nm～680 nm に吸収帯があり、それ以降の反射率が極端に上がり750 nm で最も高い反射率を示すが、それ以降の反射率は徐々に下がっていく。新岩群青は、花紺青の反射スペクトルの波形に類似するが、吸収帯は狭く反射率の立ち上がり始めの波長位置は短波長側にシフトする。500 nm より短波長は反射率が20%程度の波長域であるが、480 nm にごく小さい吸収もみられた。

4-2-2. 緑色顔料

各種緑色顔料の反射スペクトルを図5に示す。緑青は、530 nm 付近に上に凸となる特徴的な反射を示し、それ以外の反射率はさほど高くない。焼緑青は、緑青のスペクトルとはほとんど同様の波形が得られたが、特徴的な波形を示す530 nm 付近の反射率は緑青より低く、反射位置は長波長側にシフトしている。真黒焼き緑青は、特徴な反射が現れずに全体の反射率が極めて低い。粒子の細かい白緑は、緑青と比較すると全体の反射率が上がり、特徴的な反射帯の幅が広がっている。また800 nm 付近に吸収帯がある。焼白緑は、白緑のスペクトルの波

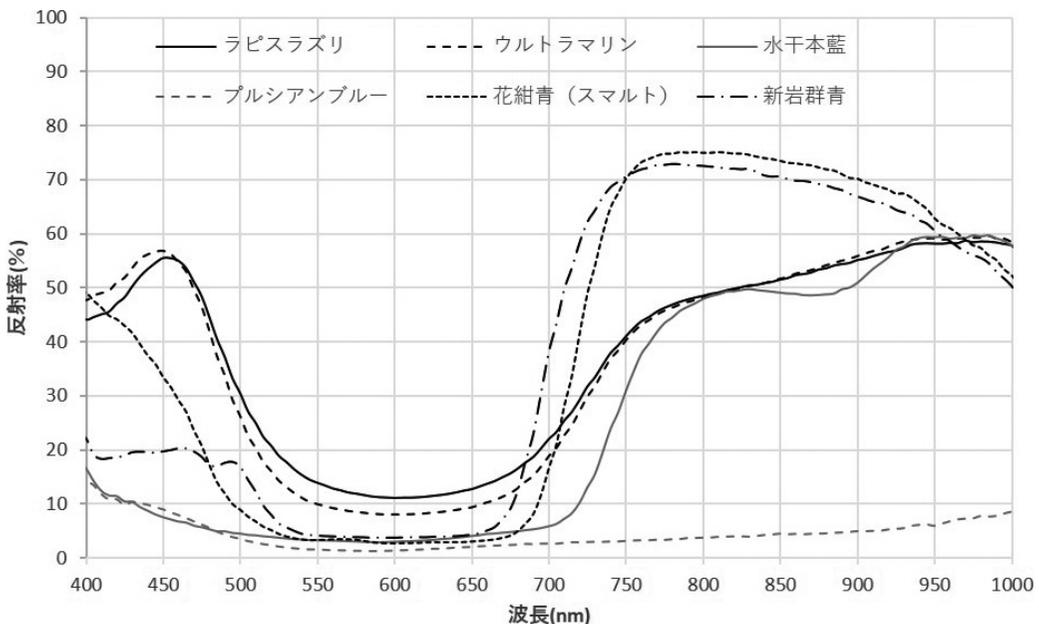


図4 各種青色顔料の波長領域の反射スペクトル

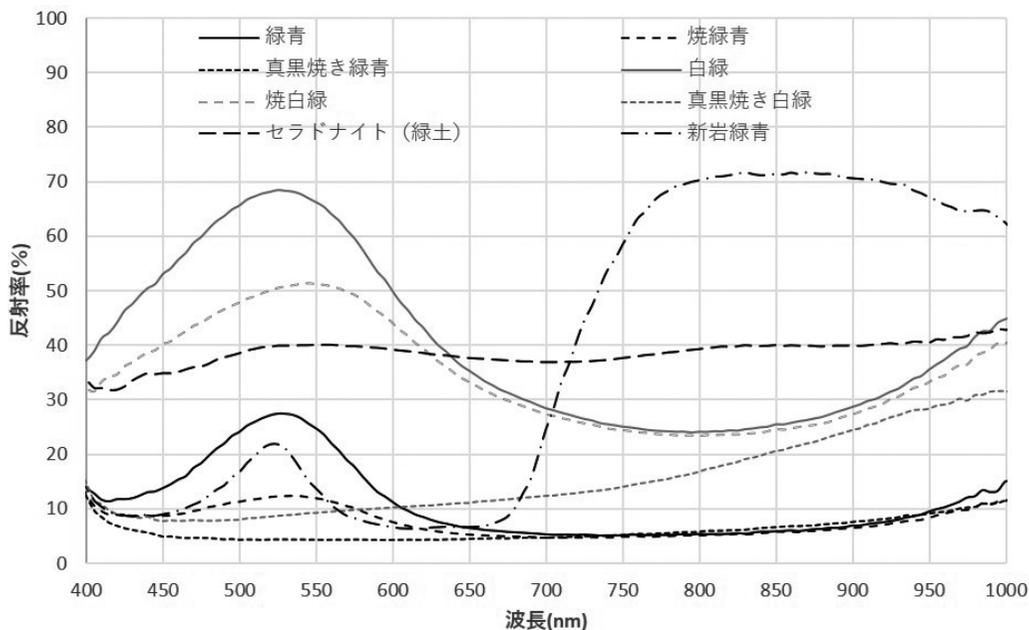


図5 各種緑色顔料の波長領域の反射スペクトル

形と類似するが、特徴的な反射の反射率は白緑より低く、反射位置は長波長側にシフトしている。真黒焼き白緑は全体の反射率が低く、右上がりのスペクトルである。

セラドナイト（緑土）のスペクトルは波形がはっきりしていなく起伏が小さいが、520 nmと830 nm付近に小さい反射を示す。新岩緑青は、520 nm付近に特徴的な反射を示し、緑青と比較すると反射帯の幅が狭い。また、780 nmより長波長で高い反射率を示し、緑青の特徴とは異なる。

4-2-3. 黄色顔料

各種黄色顔料の反射スペクトルを図6に示す。稲荷黄土は、460 nm付近にごく小さい反射を示し、それ以降の反射率が徐々に上がり580 nmより長波長で反射を示しつつ、750 nm付近にブロードな小さい反射もみられる。雌黄（石黄）は、440 nm付近に吸収を持ち、それ以降の反射率が徐々に上がり600 nmより長波長で高い反射率を示す。密陀僧は、425 nm付近に吸収を持ち、その以降の反射率が上がり640 nmより長波長で高い反射率を示す。

4-2-4. 赤色顔料

天然辰砂、赤口朱および黄口朱が得られた反射スペクトルを図7に示す。天然辰砂と赤口朱が得られたスペクトルの波形は互いに類似し、580 nmより短波長で低い反射率を示し、640 nmより長波長で高い反射率を示す。黄口朱は、前述の2つの試料と比較すると、反射率の立ち上がり始めの波長位置は短波長側にシフトし、反射帯の反射率はより高い。

そのほかの各種赤色顔料の反射スペクトルは図8に示す。天然岱赭と弁柄の反射スペクトルの波形は互によく類似し、どちらも620 nm付近に小さな反射、750 nm付近にさらに大きな反射を示すが、870 nm付近に吸収を持つため、600 nm以上の波形が二段階の山になる特

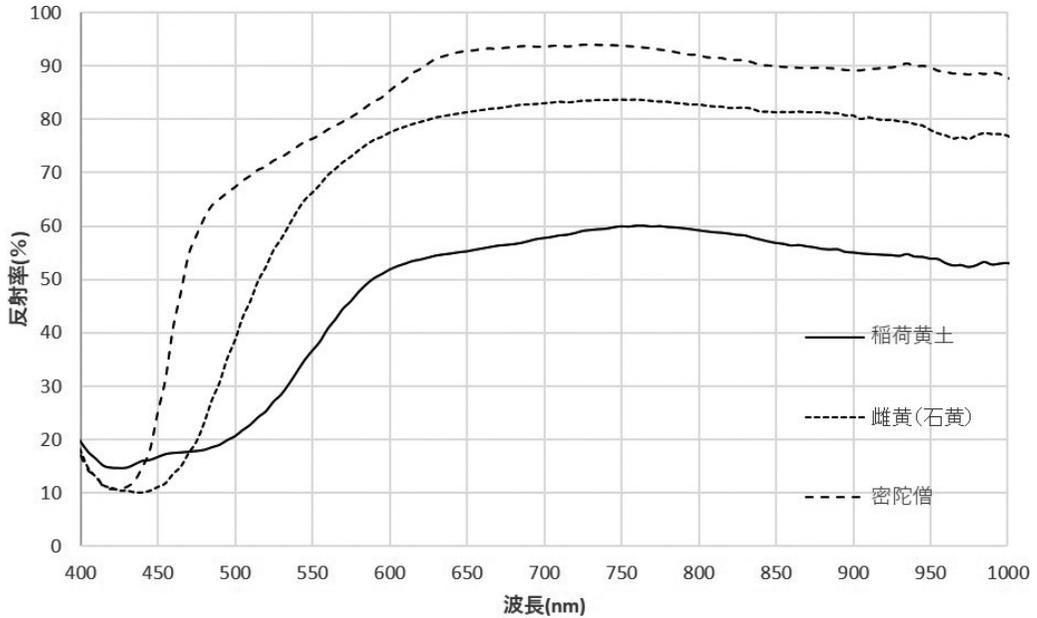


図6 各種黄色顔料の波長領域の反射スペクトル

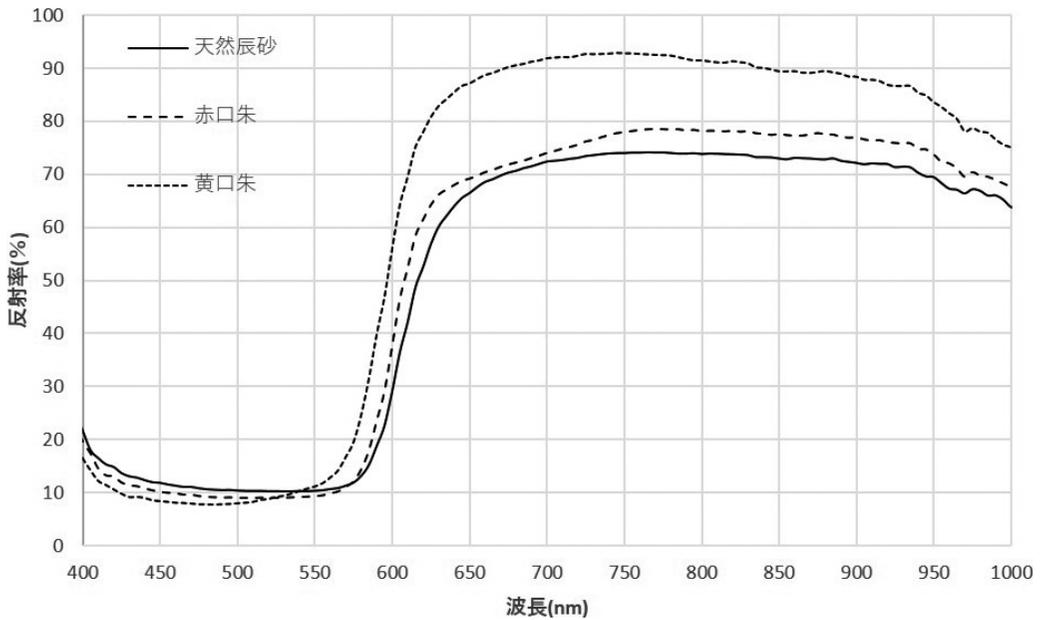


図7 天然辰砂、赤口朱および黄口朱の波長領域の反射スペクトル

微を有するスペクトルである。鉛丹は、540 nm より短波長で低い反射率を示し、その以降の反射率が極端に上がり600 nm より長波長で高い反射率を示すスペクトルである。雄黄（鶏冠石）は、鉛丹のスペクトルの波形が若干類似するが、反射率の立ち上がり始めの波長位置は少し短波長側にシフトし、反射帯の反射率は鉛丹より低い。

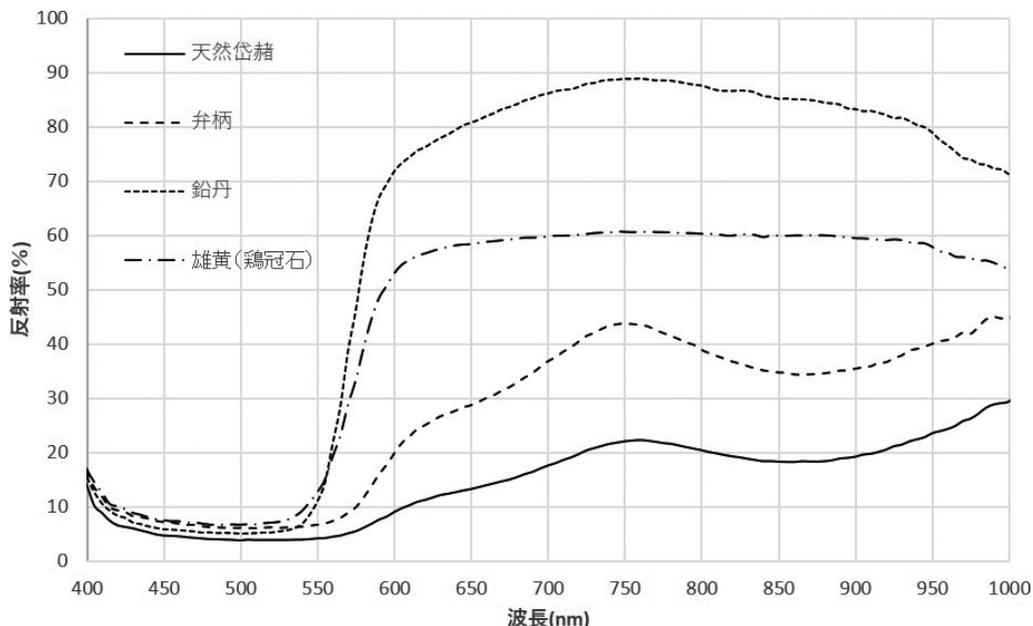


図8 各種赤色顔料の波長領域の反射スペクトル

4-2-5. 白色顔料

各種白色顔料の反射スペクトルを図9に示す。鉛白，胡粉，方解末はいずれも全体の反射率が高く，目立った吸収はほとんどない。田原白土と雲母は，反射率が高く，吸収はほとんど見られないが，前述した試料と比較すると，550 nm より短波長側の反射率が下がっている傾向が見られる。

4-2-6. 黒色顔料

黒色顔料の反射スペクトルも図10に示す。マンガン化合物からなるラスコーブラックと墨は，どちらも測定波長域全体で吸収されており，反射率が極めて低いため特徴がはっきりしない。

4-3. 考察

今回の反射分光分析の結果のうち可視光領域については，既往の報告^{11,16)}と矛盾の無い結果が得られた。そして今回の分析で得られた近赤外域（780 nm～1000 nm）のデータは，今までの研究結果を補充することができると思われる。

今回の分析結果から新たに得られた知見として，粒子の粗い群青と緑青を焼いた場合（焼群青と焼緑青），焼いていない状態と比較すると特徴な反射の反射率が下がった。焼緑青は，反射位置が少し長波長側にシフトすることも確認された。粒子の細かい白群と白緑を焼いた試料（焼白群と焼白緑）は，焼いていない状態と比較して特徴な反射の反射率が下がるともに反射位置は長波長側にシフトしたことも確認された。

硫酸バリウムが体質顔料として含まれている水干本藍の反射スペクトルの全般的な特徴は既往の研究^{11,16)}で報告されている藍の結果に類似しているが，420 nm 付近のブロードな反射は今回の試料では再現できなかった。青色顔料の中に，藍，ラピスラズリまたはウルトラマリン，

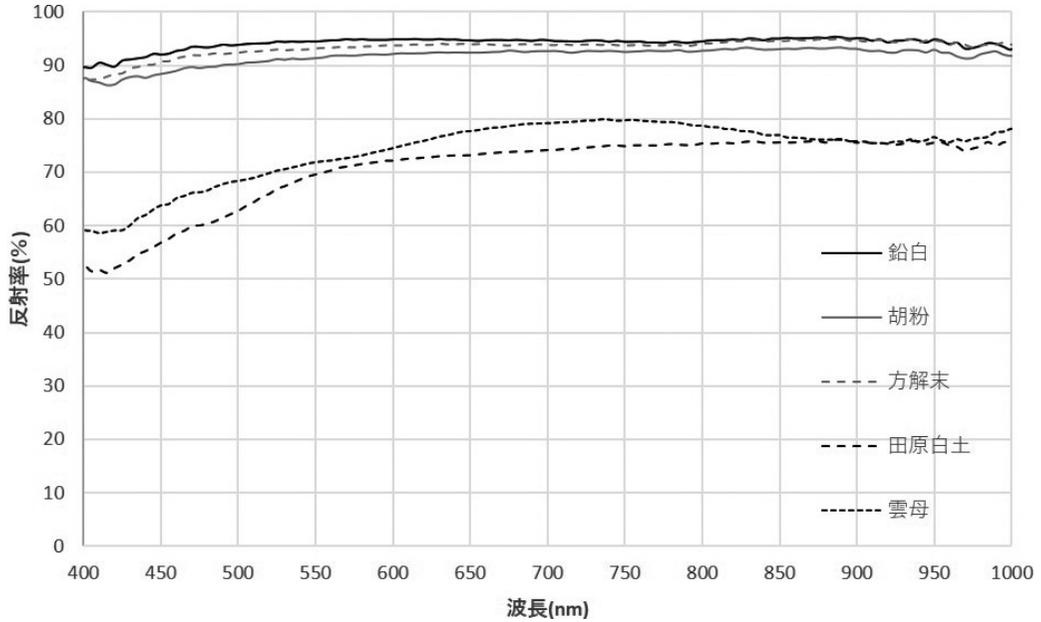


図9 各種白色顔料の波長領域の反射スペクトル

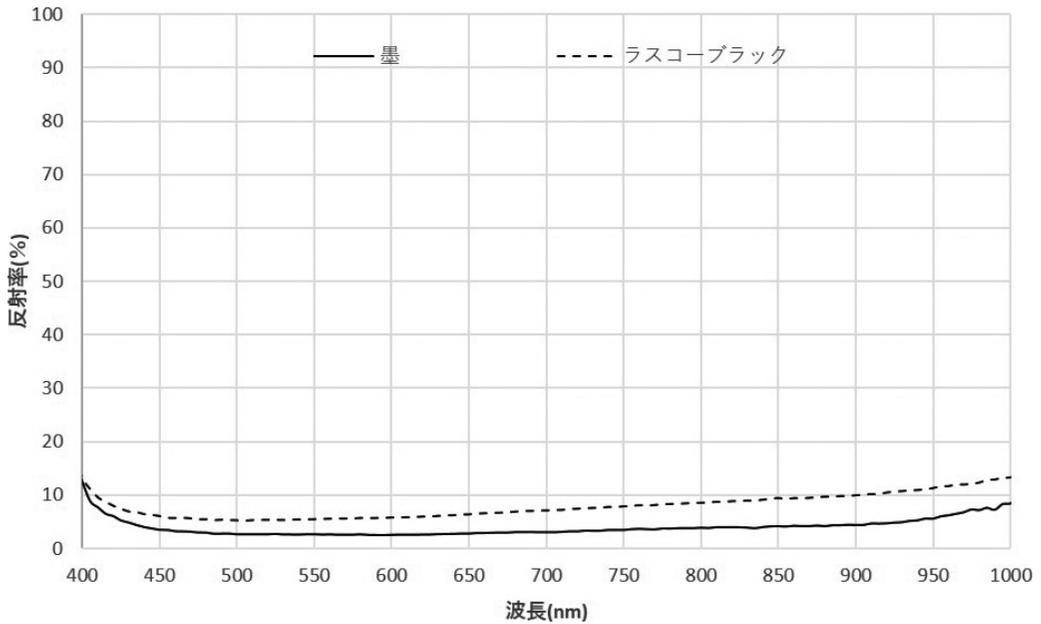


図10 黒色顔料の波長領域の反射スペクトル

スマルト、新岩群青は780 nm～1000 nm で高い反射率を示す特徴は共通しているが、それぞれの反射および吸収位置は互いに異なる点によって識別可能になると考えられる。また、この特徴により、長波長域の反射率が低い天然の鉱物を砕いて作られた群青または緑青との識別が可能になると考えられる。

5. まとめと今後の予定

近年、ハイパースペクトル画像はスペクトル情報の取得と、平面的なピクセル配置の組み合わせにより、材料の特性評価に多くの可能性をもたらすことから、文化財の修復や材質などの分析のための有望な測定手法として注目されつつある。本研究では、ハイパースペクトルカメラの性能評価及び分析条件の設定を行うための基礎実験を行った。

エバ・ジャパン社製ハイパースペクトルカメラ NH-1S と河北ライティングソリューションズ社製ハロゲンランプ (JR-AKW/5EZ-47K) を用いた場合、距離を変えた時の視野範囲と得られた可視画像の調査結果によると、1 mm 程度の大きさの識別が求められる調査では、資料とカメラの間の距離は55 cm 以内にすべきであることがわかった。反射率95%の白色板を用いた測定結果から、今後は波長領域が400 nm~1000 nm のデータを分析に用いることにした。ハイパースペクトルカメラで得られた市販顔料の反射スペクトルの妥当性を評価した結果としては、従来の調査で報告されている材料の可視光領域における反射分光データを良く再現した。さらに、今回得られた近赤外域 (780 nm~1000 nm) のデータは、今までの研究結果を補充することができると思われる。

今後は、染料などの有機材料の反射スペクトルの取得のほか、接着材と混ぜて支持体に塗布している状態、複数種類の彩色材料の混合などが得られた反射スペクトルに与える影響などについて、さらに検討していく予定である。

謝辞

本研究の初期の段階にて、修復計画研究室の朽津信明室長からは分析系全般に関するご指導をいただきました。文化財防災センターの黄川田翔氏からは光源ランプの選定及び設置方法に関するご助言をいただきました。また、本研究で用いた試料のうち、雌黄、雄黄は東京文化財研究所の早川泰弘氏所蔵の中国の画材を利用させていただきました。ここに記して感謝致します。

参考文献

- 1) 三浦定俊：『古美術を科学する』、廣済堂出版、(2001)
- 2) 『文化財の材質・構造・状態調査に関する研究 平成28~令和2年度 研究成果報告書』、東京文化財研究所 (2021)
- 3) 早川泰弘：国宝慈光寺経における真鍮泥の利用について、保存科学、56、49-63 (2017)
- 4) 早川泰弘、城野誠治：国宝信貴山縁起絵巻の蛍光X線分析、保存科学、57、91-100 (2018)
- 5) 早川泰弘、城野誠治：国宝日月四季山水図の蛍光X線分析—日本絵画における白色顔料の特殊な利用例一、保存科学、58、83-93 (2019)
- 6) 早川泰弘、城野誠治：国宝久能寺経における真鍮泥の利用について、保存科学、60、73-83 (2021)
- 7) 犬塚将英、早川泰弘、皿井舞、藤岡稜：可搬型X線回折分析装置を用いた銅造釈迦如来坐像(飛鳥大仏)の材質調査、保存科学、56、65-75 (2017)
- 8) 佐々木淑美、犬塚将英：煉瓦造文化遺産の保存環境と塩類析出に関する調査—INAX ライブミュージアム「窯のある資料館」を事例に一、保存科学、56、175-187 (2017)
- 9) 犬塚将英、早川泰弘：X線透過撮影による伊豆長八の作品の調査、保存科学、55、115-124 (2016)
- 10) 中村力也：文化財の有機材質分析における最近の成果、考古学と自然科学、65、25-47 (2015)

- 11) 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)
- 12) Christian Fischer and Ioanna Kakoulli: Multispectral and hyperspectral imaging technologies in conservation: current research and potential applications, *Reviews in Conservation*, 7, 3-16 (2006)
- 13) John K. Delaney et al.: Visible and infrared imaging spectroscopy of paintings and improved reflectography, *Heritage Science* 4, Article number: 6 (2016)
- 14) 株式会社キーエンスのFAの画像処理を「基礎から学べる」サイト <https://www.keyence.co.jp/ss/products/vision/visionbasics/> (2021年12月31日参照)
- 15) 朽津信明、中牟田義博、三木孝：日本における緑色顔料「緑土」の使用について、考古学と自然科学、46、日本文化財科学会誌、55-66 (2003)
- 16) 吉田直人：可視反射スペクトルと二次微分スペクトルによる青色色材の判別に関する検討、保存科学、50、207-215 (2011)

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 (VNIR) spectroscopy)；非破壊分析 (non-invasive analysis)；反射スペクトル (reflection spectrum)

Performance Evaluation of a Hyperspectral Camera for the Two-dimensional Spectroscopic Analysis of Cultural Objects

CHI Chih lien and INUZUKA Masahide

For the conservation and utilization of cultural properties, scientific investigations play an important role in determining their materials, structure, and state of deterioration. For this purpose, analytical methods that are non-invasive, compatible with a wide variety of chemicals, and easily interpretable are necessary. In recent years, hyperspectral imaging has emerged as a promising measurement method for the restoration of cultural properties and the analysis of materials. The combination of position and spectral information offers many possibilities for material characterization. The present reports the results of basic experiments to evaluate the performance of the hyperspectral camera and to set up the analysis conditions. The content of the basic experiment is to evaluate the spatial resolution, the analyzable wavelength range, and the validity of the reflection spectra.

According to the results of the investigation of the viewing range and the obtained visible images at different distances, it was found that the distance between the material and the camera should be no more than 55 cm for investigations that require discrimination of sizes as small as 1 mm. From the results of measurements using a white plate with a reflectance of 95%, reliable reflection spectra can be obtained between 400 nm and 1000 nm. As a result of evaluating the validity of the reflectance spectra of the commercial pigments obtained by the hyperspectral camera, it was found that the spectra were mostly consistent with the reflectance spectral data of the materials reported in previous studies in the visible light region. In addition, the spectral information in the near-infrared region obtained in this study supplements the research results.