

紫外線写真撮影による不透明水彩絵具の紫外線反射率推定の試み

大下浩司^{1,2}

デジタル一眼レフカメラで撮影した紫外線写真をもとに、波長 360nm 前後の紫外線の光に対する不透明水彩絵具の反射率を推定する方法を検討した。UV ランプが発光する紫外線の光を不透明水彩絵具に当て、カメラのレンズ前面に紫外線透過可視吸収フィルターを取り付け不透明水彩絵具の紫外線写真を撮影した。Windows 付属のペイントでこの紫外線写真 (JPEG) を開き、スポイトツールで不透明水彩絵具の撮像部の“明るさ”の数値を読み取り、この数値をもとに紫外線の光に対する不透明水彩絵具の反射率を算出する方法を検討した。本法は、UV ランプの照射方法や紫外線写真の撮影方法に課題は残るが、紫外線写真に基づく反射率推定の可能性を見出すことができた。

1 はじめに

絵画の保存修復や復元、技法解明や異同識別のために、絵具に含まれる顔料を同定することがある。この同定は、絵画から絵具を採取し行なうよりも、絵画を傷つけることなく非破壊で行なうほうが望ましい。このため、顔料の固定は蛍光 X 線分析により行なわれることが多い。蛍光 X 線分析では、絵具に含まれる顔料の成分元素を検出し、絵具の色と照らし合わせて顔料を同定する。しかしながら、蛍光 X 線分析の装置は高価であり、測定とデータ解析には専門的な知識や技術を要する。このことから、科学分析の専門家以外には十分に普及していない。

絵画の科学調査は、分析装置のある場所へ絵画を運ぶか、絵画が所蔵・展示される美術館などへ分析装置を運び行なう。絵画を運ぶよりも、分析装置を運び美術館などの現場で科学調査した方が、絵画損傷の危険性を抑えることができるため、可搬型の小型・軽量の分析装置が絵画の科学調査に利用されるようになった。さらには、科学分析の専門家以外の方でも、安全かつ容易に科学調査ができるようになれば、絵画が所蔵・展示される美術館などの現場、あるいは保存修復の現場などでも、学芸員や修復家によって簡易な科学調査を行なえるようになる。このようなことから、本研究では、デジタル一眼レフカメラを用いた絵具の科学分析の方法を検討した。

これまでの研究では、デジタル一眼レフカメラを用いてシルバーホワイト・ジンクホワイト・チタニウムホワイトの白色油絵具の蛍光を撮影し、これら 3 種の白色油絵具を判別する方法を検討した¹⁾。また、R・G・B フィルターを用いた写真撮影により、可視光線の光に対する不透明水彩絵具の反射率を推定する方法も検討した²⁾。このほかにも、光ファイバー分光光度計で測定した可視-近赤外 (波長域 380 ~ 1000nm) の光に対する白色油絵具の反射スペクトルを多変量解析し同定する方法も検討した³⁾。しかし、紫外線の光に対する絵具の反射率の測定やその推定方法については、まだ検討していなかった。このため、本研究では、既報⁴⁾ で検討した不透明水彩絵具について、デジタル一眼レフカメラで撮影した紫外線写真から、紫外線の光に対する反射率の推定方法を検討した。

2 実験

2.1 分析試料

既報⁴⁾で使用したホルベイン製ガッシュ(不透明水彩絵具)16種を用いた。白色の1)ジンクホホワイト・2)パーマネントホホワイト、黒色の3)アイボリブラック・4)ジェットブラック、青色の5)コバルトブルー・6)ウルトラマリンライト、緑色の7)ターコイズグリーン・8)ビリジャン、赤色の9)カドミウムレッド・10)カドミウムレッドパープル、黄色の11)カドミウムイエロー・12)イエローオーカー、茶色の13)ローアンバー・14)バーントアンバー、紫色の15)ライラック・16)コバルトバイオレットを任意に選び、これら16種の不透明水彩絵具を黒色紙に塗布して分析に供した。黒色紙(キャンソン、ミタント、ステイジャンブラック、160g/m²、A4)をニューエコのりパネ(アルテ・A4・厚さ5mm)に貼り、マスキングテープを使って不透明水彩絵具を2cm角に塗布した。塗布後、マスキングテープを剥がし自然乾燥したのち本研究に用いた。

2.2 分析機器と方法

波長域220～400nmの紫外線の光に対する不透明水彩絵具の反射スペクトルの測定では、既報^{4) 5)}の光ファイバー分光蛍光光度計F-2700(日立ハイテクサイエンス・特注品)を使用した。測定は、光ファイバー先端部を分析試料の測定面に対し垂直に向け治具(特注品・テラオカ設備)で固定し行なった。装置は、USBケーブルでコンピュータVersaPro(NEC)と接続し、FL Solutions 4.2プログラム(日立ハイテクサイエンス)を使って操作した。装置の電源を入れ30分待ち、キセノンランプを安定させたのち測定を始めた。光ファイバー分光蛍光光度計を用いた不透明水彩絵具の反射スペクトルの測定・解析は、既報を参考にした⁴⁾。測定条件を表1に示す。測定は、黒色校正と白色校正の後行なった。まず、黒色校正では、光ファイバー先端部を黒色ゴム板で塞ぎ、白色校正では、光ファイバー先端部を白色校正板(ラプスフェア製スペクトラロン標準反射板・白色・USRS-99-010・径1.25インチ・99%)に向け、波長域220～400nmの反射光強度をそれぞれ測定した。その後、波長域220～400nmの光に対する不透明水彩絵具の反射光強度を測定した。各波長の反射率(%)は(分析試料の反射光強度-黒色校正時の反射光強度) / (白色校正時の反射光強度-黒色校正時の反射光強度) × 100の式から、エクセル2013(マイクロソフト)を使って計算し反射スペクトルを描いた。

不透明水彩絵具の紫外線写真の撮影では、デジタル一眼レフカメラはニコンD5100(CMOS1620万画素)を使用し、レンズはニコンAI Nikkor 50 mm F1.2 S(内部レンズ6群7枚)を用いた。カメラのレンズ前面には50×50角フィルターホルダー(アズワン)を用いて紫外線透過可視吸収フィルター(シグマ光機・UTVAF-50S-36U)を取り付けた。使用した紫外線透過可視吸収フィルターは、288～410nmの光(透過光の中心波長:350nm、極大透過波長:およそ360nm)を透過する⁶⁾。撮影は部屋の蛍光灯照明を点灯した状態で行ない、カメラは三脚ULTRA353mini(ベルボン)に固定して、ワイヤレスリモコンML-L3(ニコン)でシャッターを切った。分析試料からカメラレンズ前面まで70cm、分析試料からUVランプまで30cmの位置に配置し、カメラの設定をISO感度400・絞り値1.2に合わせ露出時間のみ順次変えて撮影した。本研究に使用したUVランプ(東芝・ブラックライト・電球形蛍光灯・EFD15BLB-T・15W)は、波長域350～420nm(極大発光波長360nm)の光を発光する

2)。これをスタンド（ヤザワ・CFX607PW）に取り付け使用した。撮影した紫外線写真（JPEG）は、パナソニック製コンピュータ CF-SX3（Windows 7 Professional）にインストールされたペイントで開き、“スポイトツール”を使って紫外線写真に写った不透明水彩絵具の撮像部を選び、“色の編集”で“明るさ”の数値を読み取った。白色校正では不透明水彩絵具の代わりに白色校正板を撮影した紫外線写真、黒色校正では波長 360nm の光に対する反射率の低いアイボリーブラックの紫外線写真から、白色校正時と黒色校正時の“明るさ”の数値をそれぞれ読み取り、波長 360nm 前後の紫外線の光に対する不透明水彩絵具の反射率を算出した。反射率（%）は（分析試料の“明るさ”の数値 - 黒色校正時の“明るさ”の数値） / （白色校正時の“明るさ”の数値 - 黒色校正時の“明るさ”の数値） × 100 の式から、エクセル 2013（マイクロソフト）を用いて計算した。

3 結果と考察

光ファイバー分光蛍光光度計を用いて、波長域 220 ~ 400nm の紫外線の光に対する不透明水彩絵具 16 種の反射スペクトルを測定し、波長 360nm での反射率を求めた。そして、デジタル一眼レフカメラで撮影した紫外線写真から波長 360nm 前後の反射率を算出し、これらを比較・検討した。

光ファイバー分光蛍光光度計で測定した不透明水彩絵具 16 種の反射スペクトルを図 1 に示す。3) アイボリーブラック・4) ジェットブラック・9) カドミウムレッド・10) カドミウムレッドパープル・11) カドミウムイエロー・12) イエローオーカー・13) ローアンバー・14) バートアンバーの 8 種は、220 ~ 400nm の全波長域で反射率が低かった。1) ジンクホワイト・2) パーマネントホワイト・5) コバルトブルー・6) ウルトラマリンライト・7) ターコイズグリーン・15) ライラック・16) コバルトバイオレットの 7 種では、反射率が波長 220nm から 400nm にかけて徐々に高くなり、8) ビリジャンでは、反射率が波長 220nm から 375nm にかけて次第に高くなり、波長 375nm から 400nm にかけて低くなった。このように、波長域 220 ~ 400nm の紫外線の光に対する不透明水彩絵具の反射スペクトル形状や反射率は相互に異なることがわかった。この紫外線の光に対する反射・吸収の特性を調べるために、本研究では、デジタル一眼レフカメラで撮影した紫外線写真から、紫外線の光に対する不透明水彩絵具の反射率を簡易に推定する方法を検討した。

紫外線写真の撮影は、部屋の蛍光灯照明を点灯した明るい室内で行なった。絵画等の科学調査を暗い部屋で行なうと、人や物が転倒して怪我や損傷につながる。このため、照明をつけた明るい室内で、不透明水彩絵具の紫外線写真を撮影する方法を検討した。デジタル一眼レフカメラのレンズ前面に紫外線透過可視吸収フィルター取り付け、部屋の蛍光灯照明が発光する可視光線をフィルターで吸収し、紫外線のみがカメラの撮像素子まで到達するようにし、明るい室内でも紫外線写真を撮影できるようにした。しかし、デジタルカメラの撮像素子は、その前面に紫外線を吸収しやすいフィルターが付けられており、紫外線に対する感度が低い。このため、デジタル一眼レフカメラ（ニコン D5100）に付属される標準レンズ（ニコン AF-S DX NIKKOR 18-55 mm f/3.5-5.6 G VR）の代わりに明るいレンズ（ニコン AI Nikkor 50 mm F1.2 S）を用いて、通常の可視光線写真の撮影時よりも露出時間を長くし、紫外線が撮像素子までなるべく到達するようにして紫外線写真を撮影した。

撮影は、紫外線透過可視吸収フィルター（透過波長：288 ~ 410nm・透過中心波長：350nm・極大透

過波長：およそ 360nm)⁶⁾ をカメラのレンズ前面に付け、UV ランプの光（発光波長：350 ~ 420nm・極大発光波長：360nm)¹⁾ を分析試料に当て行なった。このように、本研究では、極大発光波長 360nm の UV ランプと極大透過波長 360nm の紫外線透過可視吸収フィルターを用いて紫外線写真を撮影した。このため、紫外線写真をもとに算出した不透明水彩絵具の反射率は、波長 360nm 前後の推定値として扱った。

次に、UV ランプの光を不透明水彩絵具に当て、露出時間を 1・5・10・15・20・25・30 秒に順次変え、紫外線写真を撮影した（図 2）。露出時間 1 秒では、不透明水彩絵具の撮像を写真に捉えることができず、露出時間 5 秒以上では、その撮像を捉えることができた。しかし、通常、カメラの焦点は可視光線の光で合わせるため、紫外線の光では焦点を合わせることができなかった。焦点調整に課題は残るが、本研究では、紫外線写真に写った不透明水彩絵具の撮像部の“明るさ”の数値を反射率の計算に用いるため、この紫外線写真を用いて検討を進めた。Windows 付属ソフトのペイントを使って、露出時間 5 ~ 30 秒で撮影した紫外線写真に写った不透明水彩絵具の撮像部から“明るさ”の数値を求め、黒色校正時の“明るさ”の数値を 0 として、前述の計算式から紫外線の光に対する不透明水彩絵具の反射率を算出した（表 2）。表 2 には光ファイバー分光蛍光光度計（3DF）で測定した波長 360nm の光に対する不透明水彩絵具の反射率も記した。紫外線写真から算出した不透明水彩絵具 16 種の反射率は、光ファイバー分光蛍光光度計で測定した反射率よりも高く、1) ジンクホワイトを除く不透明水彩絵具 15 種では、露出時間が長いほど反射率は高くなった。この原因を探るため、白色校正板と 3) アイボリブラックの紫外線写真から、ペイントで読み取った“明るさ”の数値を表 3 にまとめた。白色校正板の“明るさ”の数値は、露出時間が長いほど高くなり、不透明水彩絵具 16 種のうち光ファイバー分光蛍光光度計で測定した反射率が最も低かった 3) アイボリブラック（波長 360nm の光に対する反射率 1.8%）でも、露出時間が長くなると“明るさ”の数値は高くなった。このことから、黒色校正時の“明るさ”の数値を 0 として計算することは誤りであったといえる。このため、検討した不透明水彩絵具 16 種のうち反射率が最も低い 3) アイボリブラックの“明るさ”の数値を、前述した計算式の黒色校正時の“明るさ”の数値として扱い、反射率を再度算出した（表 4）。この結果、表 2 に示した反射率よりも表 4 の反射率の方が、光ファイバー分光蛍光光度計（3DF）で測定した反射率に近く、露出時間が長くても反射率の数値はほぼ一定であった。

露出時間は、長いほうが反射率を精密に算出できる。表 3 から、露出時間 5 秒のとき、白色校正板の“明るさ”の数値は 34 ± 1 、黒色校正板の“明るさ”の数値は 8 ± 0 であり、この差は 26 であった。露出時間 30 秒では、白色校正板の“明るさ”の数値は 148 ± 3 、黒色校正板の“明るさ”の数値は 64 ± 1 であり、この差は 84 であった。この差は、前述した反射率の計算式の分母（白色校正時の“明るさ”の数値 - 黒色校正時の“明るさ”の数値）に当たる。このため、露出時間が長いほどこの差は大きく、反射率を精密に算出できる。

しかし、紫外線写真から計算した反射率は、幾つかの不透明水彩絵具では負の値であった。負の値の反射率が得られた不透明水彩絵具は、光ファイバー分光蛍光光度計（3DF）で測定した反射率が 5.1% 以下のものであった。これは、紫外線写真撮影時、不透明水彩絵具に当てる UV ランプの光の照度にバラツキがあったためと考えられる。撮影時は、常に一定の照度で UV ランプの光を不透明水彩絵具

に当てなければならない。そして、本法で得た 1) ジンクホワイトの反射率 (104 ~ 113%) は、光ファイバー分光蛍光光度計で測定した反射率 (59.3%) よりも 50% ほど高く算出された。図 1 から、他の不透明水彩絵具に比べて 1) ジンクホワイトは、330 ~ 400nm の波長域にわたり反射率が高い。本研究で使用した紫外線透過可視吸収フィルターは 288 ~ 410nm の広い波長域の光を透過しやすいため、紫外線写真から得た 1) ジンクホワイトの反射率は、他の不透明水彩絵具よりも高く算出されたと考えられる。これを解決するためには、狭い透過波長域のフィルターを使用する必要がある。

4 おわりに

紫外線の光に対する不透明水彩絵具の反射率を、紫外線写真をもとに推定する方法を検討した。本法で推定した不透明水彩絵具の反射率は、負の数値が算出されたり、実際よりも大きな数値が得られることもあった。これらを解決するために、不透明水彩絵具に対する UV ランプの照射方法を検討し、さらには、狭い波長域の光を透過するフィルターを用いた撮影方法を検討する必要がある。また、紫外線写真撮影時の焦点合わせにも課題が残る。

本研究の一部は JSPS 科研費 JP15K21544・JP17K01201 の助成を受けたものです。関係の皆様にご心より感謝申し上げます。

文献

- 1) 大下浩司, 津崎みぎは: 文化財情報学研究, 14, pp.35-41 (2017) .
- 2) 大下浩司: 文化財情報学研究, 14, pp.27-33 (2017) .
- 3) 大下浩司, 津崎みぎは: 文化財情報学研究, 14, pp.43-51 (2017) .
- 4) 大下浩司: 文化財情報学研究, 14, pp.17-25 (2017) .
- 5) 大下浩司: 文化財情報学研究, 14, pp.9-15 (2017) .
- 6) https://www.global-optosigma.com/ja/page_pdf/UTVAF.pdf?v=1496608844 (閲覧日 2018.1.30)

所属:

- ¹ 吉備国際大学 外国語学部 外国学科 (〒 700-0931 岡山県岡山市北区奥田西町 5-5)
- ² 吉備国際大学 文化財総合研究センター (〒 716-8508 岡山県高梁市伊賀町 8)

表 1 光ファイバー分光蛍光光度計を用いた反射スペクトル（反射光強度）の測定条件

項目	検討条件	項目	検討条件
測定モード	波長スキャン	励起開始波長	220 nm
スキャンモード	同期スペクトル	励起終了波長	400 nm
データモード	蛍光	励起側スリット	5 nm
スキャンスピード	3000 nm/min	蛍光波長	220 nm
ホトマル電圧	250 V	蛍光側スリット	20 nm
レスポンス	自動	光ファイバー先端部と	3 mm
スペクトル補正	0n	測定点の間隔	

表 2 紫外線写真をもとに推定した波長 360nm 前後の光に対する不透明水彩絵具の反射率

（紫外線写真から求めた反射率は、黒色校正時の明るさの数値に“0”を用いて算出）

分析試料	反射率, %							3DF ^d
	紫外線写真 ^{a, b, c}							
	露出時間/秒							
	1	5	10	15	20	25	30	
白色								
1) ズンクホワイト	—	107±2	109±3	107±3	108±4	107±3	102±1	59.3
2) パーマネントホワイト	—	34±2	34±1	36±3	41±0	46±2	52±1	8.1
黒色								
3) アイボリーブラック	—	24±0	26±1	32±2	32±2	38±2	43±1	1.8
4) ジェットブラック	—	24±0	24±2	28±5	32±2	34±0	41±3	2.1
青色								
5) コバルトブルー	—	57±4	63±2	67±1	69±2	74±2	76±1	36.8
6) ウルトラマリンライト	—	45±2	51±2	54±2	57±3	61±2	66±2	31.0
緑色								
7) ターコイズグリーン	—	25±2	28±2	33±1	36±2	44±3	46±2	11.6
8) ピリジヤン	—	32±0	39±2	41±1	47±2	51±1	55±1	18.5
赤色								
9) カドミウムレッド	—	22±2	24±2	27±1	29±3	34±0	39±2	3.8
10) カドミウムレッドパール	—	24±0	25±1	26±2	28±1	33±2	39±1	3.9
黄色								
11) カドミウムイエロー	—	21±3	23±1	24±2	28±1	31±2	36±1	3.0
12) イエローオカー	—	23±2	21±2	22±2	27±1	31±1	34±1	5.1
茶色								
13) ローズアンバー	—	24±0	24±2	25±1	30±2	36±1	40±1	4.1
14) パーセントアンバー	—	20±2	21±2	22±1	27±2	29±1	35±1	3.3
紫色								
15) ライラック	—	29±3	30±3	34±1	38±1	44±0	47±0	10.0
16) コバルトバイオレット	—	29±3	35±3	36±1	40±1	46±2	51±1	24.3

^a 黒色校正時の“明るさ”の数値は“0”を用いて計算。

^b UV ランプの極大発光波長と紫外線透過可視吸収フィルターの極大透過波長は 360nm。

^c 撮影した 3 枚の写真から計算した平均値±標準偏差。

^d 光ファイバー分光光度計で測定した波長 360nm の光に対する不透明水彩絵具の反射率（図 1 参照）。

表3 白色校正板およびアイボリブラックの紫外線写真から得たの“明るさ”の数値

分析試料	“明るさ”の数値 ^{a, b}						
	露出時間/秒						
	1	5	10	15	20	25	30
白色校正							
白色校正板	7±0	34±1	64±1	94±3	111±1	126±3	148±3
黒色校正							
3)アイボリブラック	—	8±0	16±1	30±2	36±2	48±3	64±1

^a UV ランプの極大発光波長と紫外線透過可視吸収フィルターの極大透過波長は 360nm。

^b 撮影した 3 枚の写真から計算した平均値±標準偏差。

表4 紫外線写真をもとに推定した波長 360nm 前後の光に対する不透明水彩絵具の反射率

(紫外線写真から求めた反射率は、黒色校正時の明るさの数値に“アイボリブラックの明るさの数値”を用いて算出)

分析試料	反射率, %							3DF ^d
	紫外線写真 ^{a, b, c}							
	露出時間/秒							
	1	5	10	15	20	25	30	
白色								
1) ジンクホワイト	—	109±2	113±4	111±4	112±6	111±5	104±2	59.3
2) パーマネントホワイト	—	14±2	11±1	6±4	14±0	13±3	15±1	8.1
黒色								
3) アイボリブラック	—	0±0	0±1	0±2	0±3	0±3	0±1	1.8
4) ジェットブラック	—	0±0	-3±2	-6±7	0±3	-6±1	-5±5	2.1
青色								
5) コバルトブルー	—	44±6	50±2	51±2	55±3	59±3	58±2	36.8
6) ウルトラマリンライト	—	28±2	35±2	32±2	37±5	37±3	40±4	31.0
緑色								
7) ターコイズグリーン	—	3±2	4±2	2±2	6±3	9±6	5±3	11.6
8) ビリジアン	—	12±0	18±2	13±2	22±2	21±2	21±2	18.5
赤色								
9) カドミウムレッド	—	-3±2	-3±2	-8±2	-4±4	-7±1	-7±3	3.8
10) カドミウムレッドハイフル	—	0±0	-1±1	-9±2	-5±2	-8±3	-8±2	3.9
黄色								
11) カドミウムイエロー	—	-4±4	-4±1	-12±2	-5±2	-11±3	-12±2	3.0
12) イエローカー	—	-1±2	-6±2	-16±2	-8±2	-12±2	-16±2	5.1
茶色								
13) ローズアンバー	—	0±0	-3±2	-11±2	-3±3	-3±1	-5±1	4.1
14) パーセントアンバー	—	-5±2	-6±2	-15±2	-7±2	-15±1	-14±2	3.3
紫色								
15) ライラック	—	8±4	6±4	3±1	8±1	10±1	6±1	10.0
16) コバルトハイオレット	—	8±4	12±4	6±2	11±2	13±3	14±1	24.3

^a 黒色校正時の“明るさ”の数値は、アイボリブラックの“明るさ”の数値を用いて計算。

^b UV ランプの極大発光波長と紫外線透過可視吸収フィルターの極大透過波長は 360nm。

^c 撮影した 3 枚の写真から計算した平均値±標準偏差。

^d 光ファイバー分光光度計で測定した波長 360nm の光に対する不透明水彩絵具の反射率 (図 1 参照)。

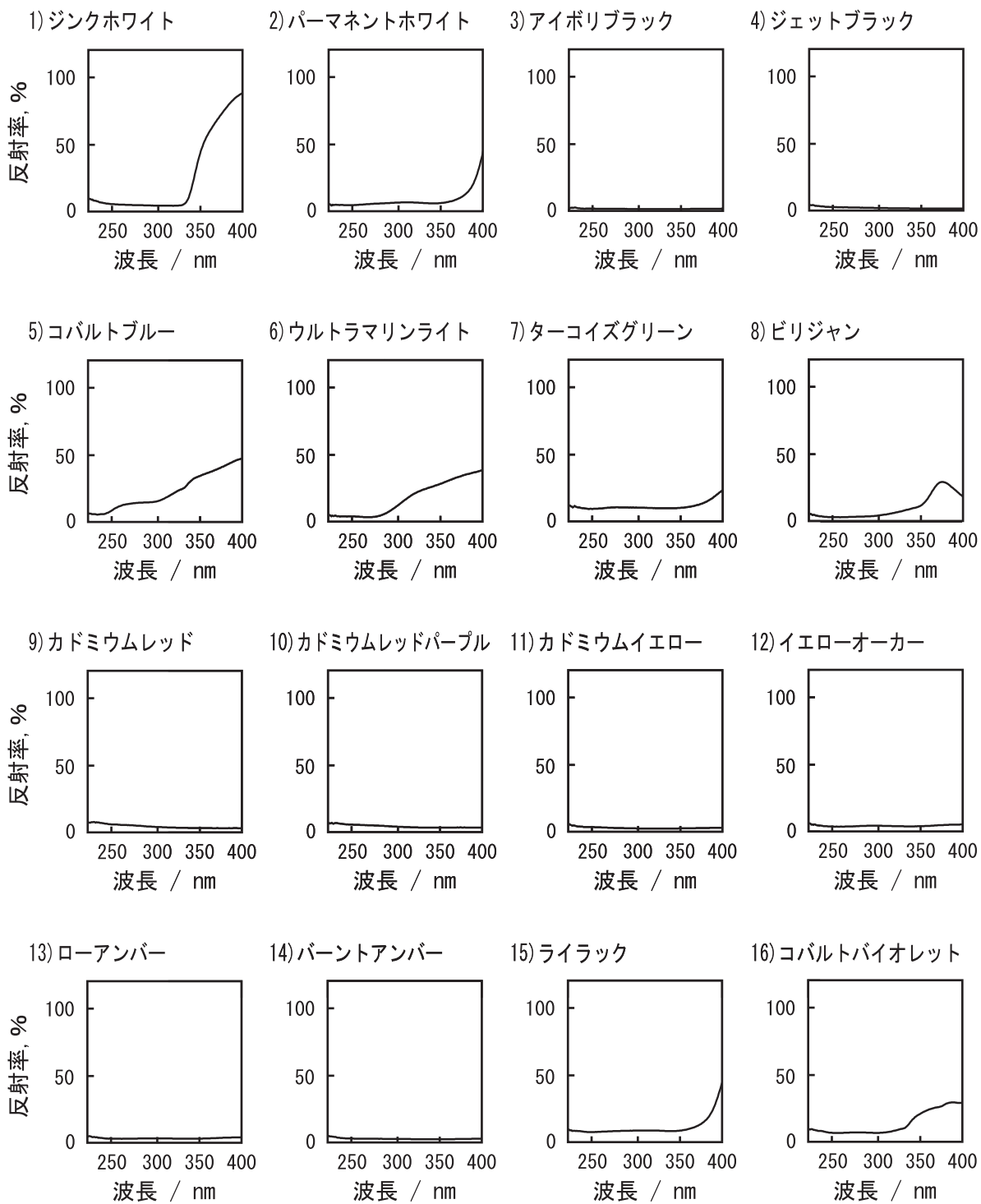


図1 光ファイバー分光蛍光光度計で測定した不透明水彩絵具の反射スペクトル^a

^a 測定条件は表1参照。

分析試料	露出時間/秒						
	1	5	10	15	20	25	30
白色							
1) ゼンクホワイト	—						
2) パーマネントホワイト	—						
黒色							
3) アイボリーブラック	—						
4) ジェットブラック	—						
青色							
5) コバルトブルー	—						
6) ウルトラマリンライト	—						
緑色							
7) ターコイズグリーン	—						
8) ビリジャン	—						
赤色							
9) カトミウムレッド	—						
10) カトミウムレッドパープル	—						
黄色							
11) カトミウムイエロー	—						
12) イエローオカー	—						
茶色							
13) ローズアンバー	—						
14) ハートアンバー	—						
紫色							
15) ライラック	—						
16) コバルトバイオレット	—						

図2 不透明水彩絵具の紫外線写真^{a, b}

^a 紫外線透過可視吸収フィルターを使用し、ISO感度400・絞り値1.2で撮影。

^b ワード2013を用いてトリミングシグレースケールに変換。

