

美術作品に対する自然科学的調査
——非接触調査法を中心に

高嶋美穂、阿部善也、寺島海、高橋香里、村串まどか、谷口陽子

1. はじめに

1-1. 本論の目的

近年では、美術館や博物館における作品および資料の調査や、遺跡など屋外での現地調査において、自然科学的な手法が用いられる機会が増えてきており、それにより画期的な成果が発表されることも多くなってきた。国立西洋美術館においても、海外の研究者から所蔵作品の赤外線反射画像やX線透過画像の閲覧希望が寄せられるようになり、国内の研究者からも自然科学的調査についての問い合わせが増えてきた。その一方で、日本の美術館においてはまだ、「自然科学的調査は作品の保存・修復処置に付随して修復の専門家や保存科学者が行うもの」という認識が強く、美術史学や芸術学を専門とする研究者の関心が低いようにも感じる。しかしこうした調査は、作品の内部構造や劣化状態についての情報、あるいはオリジナル部分と後補部分を判別するための情報などをもたらすことで保存・修復処置の際に修復専門家にとって役に立つ情報を与えるだけではなく、作品の材料・技法研究、制作年代の決定、帰属問題、真贋問題といった美術史学・芸術学の分野における課題に対しても、重要な、ときに劇的な情報を与えることができるものである。日本の美術館においても、自然科学的な調査が「美術史学的な目的をもった独立した調査」として認識されるようになり、積極的に実施され、作品研究が進んでほしいと願う。そこで今回、自然科学的調査法のうちでも利用しやすい非接触（非破壊）の方法を中心に、自然科学的な調査法になじみが薄い美術史学や芸術学などを専門とする研究者の方々に向けてその概要を簡単にまとめることにした（table 1）。手法の説明を簡略化するにあたり、調査対象は原則として絵画作品（油彩）とし、できるだけ専門用語を省いてわかりやすく簡潔にまとめた。また調査例としては、できるだけ当館の所蔵作

table 1 本稿で扱う非接触調査法

照射する電磁波	検出する電磁波	調査法	調査対象、わかること
X線	X線	X線透過撮影	内部構造、材料・技法（顔料の推定、ペンティメントや後世に行われた塗りつぶし）、劣化状態（亀裂、欠損）
		蛍光X線分析（XRF）	材料・技法（顔料の推定・同定）
紫外線	紫外線	紫外線反射撮影（UVR）	材料・技法（ワニスの濃淡、分布）
	可視光線	紫外線励起蛍光撮影（UVL）	材料・技法（ワニス・補彩・オーバーペイントの有無、顔料・染料の推定）
可視光線	可視光線	可視反射撮影（VIS）	材料・技法（顔料・染料の推定、インパストや筆跡）、劣化状態（亀裂、欠損、変褐色）
		可視透過撮影	材料・技法（地塗り・絵具層の厚み）、劣化状態（亀裂、欠損）
		斜光線／側光線撮影	材料・技法（テクスチャ、凹凸）、劣化状態（亀裂、浮き上がり）
		顕微鏡観察	材料・技法（顔料・染料の推定・同定）、劣化状態（亀裂、欠損、変褐色）
	赤外線	可視光励起赤外線蛍光撮影（VIL）	材料・技法（顔料の推定・同定）
赤外線	赤外線	赤外線反射撮影（IRR）	材料・技法（下描きやペンティメント、顔料の推定）、劣化状態（欠損）
可視光線～近赤外線	可視光線～近赤外線	ラマン分光分析	材料・技法（顔料・染料・ワニスの同定）

品を取り上げて説明するようにした。本稿はあくまでも自然科学的調査法を知るための入口という位置づけであるので、本稿を読まれた後には、参考文献にあげているような詳細が書かれた書籍や論文を参考にいただければ幸いである。

1-2. 自然科学的調査法の分類と歴史

自然科学的調査法には、一般的に非接触（非破壊）調査法と、微小試料の採取を伴う調査法がある。前者はX線、紫外線、可視光線、赤外線などの電磁波を利用した方法が多く、日本では「光学的方法（光学的研究）」ともいわれている^[1, 2]。これらの方法では、電磁波が物質に当たると反射（散乱）、吸収、透過されるという性質を利用して、絵画の下描きのように表面からは目に見えない内部構造や、絵具を構成する顔料の元素の分布や密度などの情報を得る。電磁波は、fig.1に示すように分類される。絵画作品（油彩）を調査の対象としたとき、それぞれの電磁波による調査のイメージを簡単に示したのがfig.2である。

一方で後者は、きわめて微量とはいえ試料採取を必要とする調査であり、カンヴァス、地塗り、彩色層、ワニスといった絵画の層構造を調べたり、有機質のワニスやメディウム（絵具の展色材）の成分を調べたりするときなどに行われる調査法である。

1895年にヴィルヘルム・レントゲンが初めてX線を用いて金の指輪をした妻の手やアルベルト・フォン・ケリカー博士の手を撮影したことは有名であるが、その年のうちに絵画にも初めてのX線透過撮影が行われた^[3]。20世紀になると、美術館・博物館において自然科学的な調査を行う研究組織や実験室の設置が始まり、1928年にハーバード大学付属フォッグ美術館に科学技術研

fig. 1
電磁波の種類

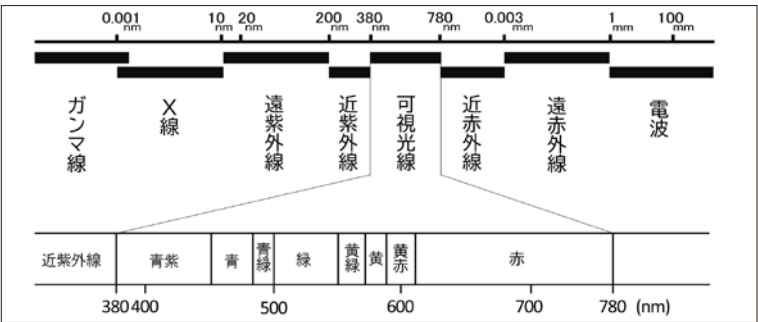
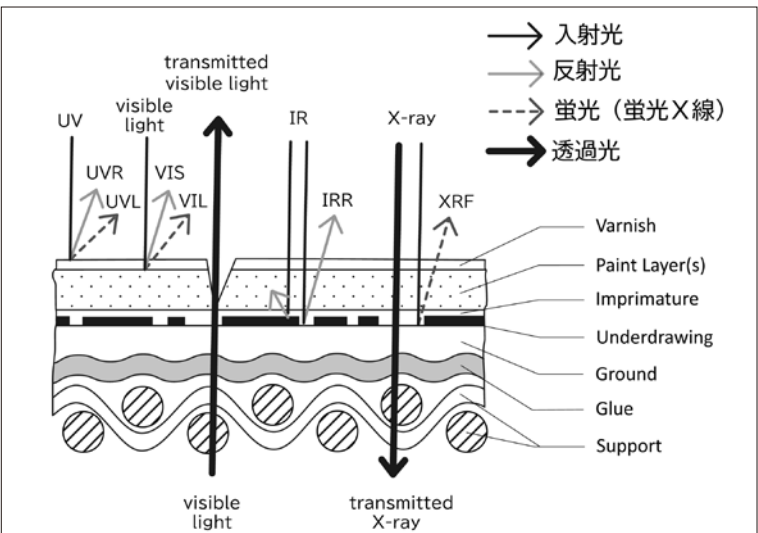


fig.2
各種の電磁波を使用した調査法のイメージ。各種の調査法によって、油彩画のどの層からの情報を得ることができるかを図示してある。UVR: 紫外線反射撮影、UVL: 紫外線励起蛍光撮影、VIS: 可視反射撮影、VIL: 可視光励起赤外線蛍光撮影、IRR: 赤外線反射撮影、XRF: 蛍光X線分析（ここでは地塗り層までX線が達する様子を記したが、XRFでの分析深度は照射するX線のエネルギーに依存する）



究所が開設され^[4]、1931年にルーヴル美術館研究所^[5]、1934年にロンドン・ナショナル・ギャラリー科学部^[6]、1948年にベルギー王立文化財研究所^[7]が設置され、光学的方法是美術作品の調査に次々に取り入れられてきた。このころ行われていたのは、拡大鏡や顕微鏡による鑑識、X線・紫外線・赤外線による鑑識などである^[8]。日本では1936年に、法隆寺壁画の写真撮影に初めて赤外線写真が応用され^[9]、1930年代からX線、赤外線、紫外線、拡大写真などを用いた古美術品の研究方法が探られるようになった^[10]。1947年に東京国立博物館には保存修理課保存技術研究室が設置され、その後の東京国立文化財研究所保存科学部（現在の東京国立文化財研究所保存科学センター）へと発展している^[11]。

2. 非接触調査法 ― その1 (画像診断法)

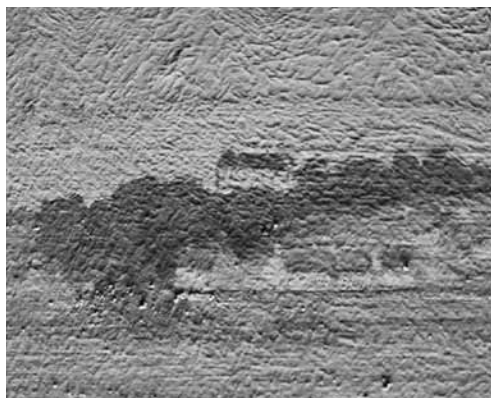
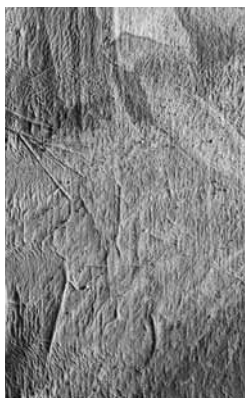
2-1. 可視光による調査：可視反射・透過撮影、斜光線／側光線撮影、顕微鏡観察

可視光による調査には、作品の正面側から照明を当てて反射光を観察・撮影するほかに、作品の表面に対して斜めの角度から照明を当てて反射光を観察・撮影する方法（斜光線／側光線観察・撮影）や、作品の裏側から照明を当てて透過光を観察・撮影する方法がある。

斜光線／側光線による観察・撮影では、正面から当てた光では見えにくい画面のテクスチュア（肌理）、凹凸、絵具層の浮き上がりなどが強調される^[12]（fig.3）。透過光による観察・撮影では、作品裏側からの光は亀裂や割けや欠損、あるいは絵具層が薄くなった部分を透過しやすいため、これらの部分が判別しやすくなる^[13]。光源としては、従来はハロゲンランプや蛍光灯を使用してきたが、最近ではLEDライトを使用することが多い。斜光／側光や透過光による調査は作品の劣化状態を調べるために行われることが多いが、たとえばヴァラフ・リヒャルト美術館で行われた一連の印象派・後期印象派の作品の調査では、斜光や透過光による調査が技法の解明のために効果的に使用された^[14]。近年では、作品に可視光を照射して赤外線蛍光を検出することで顔料を推定・同定する方法も行われている（2-4. マルチスペクトルイメージングによる調査、参照）。

作品の細部の観察・撮影には、最近では従来の実体顕微鏡にかわってデジタルマイクロスコープが使用されることが多い。デジタルマイクロスコープでは、機種によっては1台で20倍から5～6,000倍ほどまで拡大することができるうえに、観察距離（対象物からレンズの先端までの距離）が長くとれる

fig. 3
斜光線画像（中央：左方向からの斜光線画像、右：下方向からの斜光線画像）と、正面からの可視反射画像（左）。カミーユ・ピサロ《収穫》（1882年、膠テンペラ・カンヴァス、国立西洋美術館所蔵、P.1984-0003）。修復前。全面に現れている細かい皺（右）や折れ跡（中央図の左側）により水性地塗りであることが推定できた。微小の試料採取を伴う自然科学的調査（GC-MS、ELISA）を併用することにより、膠をメディウムとする水性地塗りの上に、膠をメディウムとした絵具で描いていることがわかった（註58）。



ために、作品表面から安全な距離を保ちつつ観察することができるというメリットがある^[15]。実体顕微鏡と比べて被写界深度（レンズで立体物を写したときのピントの合う幅）も深く、さらにデジタル合成もできる機種があり、凹凸のある対象物、たとえば絵画表面の亀裂の観察なども容易である。持ち運ぶことが容易なものも利用されており、作品を展示室の壁に掛けた状態のままで観察できるという利点もある。

2-2. 紫外線による調査：紫外線励起蛍光撮影

紫外線励起蛍光撮影は、作品に紫外線を照射し可視域の発光（蛍光）を検出する撮影法である。この方法で撮影された写真は、日本では簡単に「紫外線蛍光写真」と呼ばれることが多い。この方法では、ワニスの有無やその種類を推定したり、後世のリタッチ（補彩）やオーバーペイント（画家本人以外の者による加筆）の箇所を明らかにしたりするなど、絵画表面の情報を得ることができる^[16, 17]。紫外線を当てると、天然のワニスのうちダンマル樹脂やマスチック樹脂は緑色を帯びた黄色、シェラックは明るい黄みがかったオレンジ色の蛍光を生じるためにワニスの存在を確認できる。また、これらのワニスの上に補彩やオーバーペイントがなされていた場合、この部分でのみ紫外線がワニスに届くのが遮られるために、この部分は濃い青色や紫色などに浮かび上がり、他と区別できる（fig.4）。ただし、補彩やオーバーペイントがなされたあとに再び厚くワニスがかかけられた場合には、この厚いワニスからの蛍光により補彩などの箇所の判別が困難になることが予想されるため、この方法ですべての補彩やオーバーペイントを把握できるわけではない。

蛍光が生じる仕組みは、以下のとおりである。紫外線が物質に照射されると、その一部は物質を構成する分子に吸収され、残りは表面で反射される。紫外線を吸収した分子は励起され（励起とは、原子・分子の基底状態に対して高いエネルギーを持つ電子状態をいう）、余剰のエネルギーを再び電

磁波として放出して元の安定した状態に戻るが、このとき吸収した電磁波の波長よりも長い波長の光を放出する。この現象が「蛍光」である。このため、絵画表面に照射する紫外線は肉眼では見えないが、絵画表面から検出された蛍光は紫外線よりも波長が長くなり可視光になるので肉眼で見ることができる。蛍光を発する物質は主にワニスや乾性油や染料などの有機物が多いが、ジンクホホワイトや、カドミウムを含む無機顔料でも、特徴的な蛍光を発することが知られている（fig.6のUVL）^[18, 19]。また、天然のマダーレーキ（西洋アカネの根から採った染料を原料とするレーキ顔料）は強いオレンジピンク色の蛍光を生じるため、これが同定の助けとなる^[20]。なお、紫外線が物質に照射された際に表面で反射された紫外線を観察する調査法もあり、これについては後述する（2-4. マルチスペクトルイメージングによる調査、参照）。

紫外線励起蛍光撮影は、基本的には暗室にて行い、

fig. 4
紫外線励起蛍光画像。16世紀エミリア派《ヴィーナスとキューピッド》（油彩・カンヴァス、国立西洋美術館所蔵、P1962-0003）修復前。画面全体からワニスによる蛍光が認められた。また、画面全体にわたって、補彩とオーバーペイント（濃い青～黒色部分）がなされていることがわかった。水色の四角部分は、和紙が貼られている部分である。



紫外線の発生源として蛍光灯型紫外線灯、メタルハライド、LEDライトなど365 nmを中心とした波長を放射する照明器具を使用することが多い^[21]。カメラのレンズには紫外線カットフィルター（420 nm以下の波長をカット）を装着し可視領域の光のみとらえる。通常、調査で暴露する紫外線は絵画作品を傷めるほどではないと考えられるが、照射時間を最低限にしたうえで、調査を実施する人は保護メガネや手袋を装着する必要がある^[22]。

2-3. 赤外線による調査：赤外線反射撮影

赤外線反射撮影は、作品に赤外線を照射し赤外領域の反射を検出する撮影法である。この方法では、肉眼では見えない下描きやペンティメント（絵画が描かれる過程でなされた画家本人による構図の変更）などを明らかにすることができる（fig.5）。可視光付近の電磁波においては、波長が短いものは散乱しやすく波長の長いものは散乱にくいという性質があるために、赤外線は可視光に比べて顔料などによる散乱が少なく絵具層に侵入しやすく、また、赤外線は多くの物質を透過するからである。絵具層に侵入した赤外線は、下描きに使用されるチャコール（木炭）やグラファイト（石墨、黒鉛）など赤外線を吸収しやすい物質に吸収され、その部分では赤外線の反射強度が弱くなる。一方で、白亜（天然の炭酸カルシウム）地塗りなど赤外線を反射する物質にあたった箇所では反射強度が強くなる（fig.2のIR参照）。この強度差を白黒のコントラストで表すことで、下描きが浮かび上がる^[23]。赤外線でも



fig. 5
赤外線反射画像（InGaAsセンサを搭載したカメラによる撮影。撮影協力：ニコン株式会社）（左）と可視反射画像（右）。ルカス・クラナハ（父）《ゲッセマネの祈り》部分（1518年頃、油彩・板、国立西洋美術館所蔵、P.1968-0001）。特に人物の顔や衣部分で、下描きの線がはっきりと表れた。



fig.6
マルチスベクトルイメージング。クロード・モネ《睡蓮》部分（1916年、油彩・カンヴァス、国立西洋美術館所蔵、P.1959-0151）。紫外線励起蛍光画像（UVL）（左上）において、花卉の赤色がオレンジピンク色の蛍光反応を示したことから、マダーレーキを使用していると推測できた。また可視光励起赤外線蛍光画像（VIL）（左下）において、花卉や葉の黄色部分が蛍光して白く写ったことから、カドミウムイエローの使用が推測できた。右は可視反射画像。



の程度下描きが生じ得るかは、絵具層に用いられた顔料の種類・厚さ^[24]、下描きに使用された材料の種類、そしてベース（地塗りや支持体）とのコントラストに依存することになる^[25]。したがって赤外線を用いた調査で、作品に下描きが見えないといっても、必ずしも下描きがないということを意味しない。下描きが赤外線を吸収しない物質（たとえば赤チョーク）で描かれた場合や彩色層が厚い場合には当然、下描きは見えないし、茶色など有色の地塗りが用いられている場合には、地塗りにおいても赤外線が吸収されてしまうために下描きとのコントラストが低下し下描きが生じにくくなる。そのほか、赤外線反射撮影では、絵具層や地塗りにある欠損も明らかにすることができる。

赤外線反射撮影は、ハロゲンランプや赤外線投光器から発生させた赤外線を絵画表面に照射し、その反射光を赤外線専用のデジタルカメラ、ビジコンカメラ、InGaAs（インジウム・ガリウム・ヒ素）センサを搭載した化合物半導体カメラなどで撮影する。赤外線デジタルカメラは感度が700-1,100 nm程度^[26]なので透過力は弱い、一度に大きな面積を撮影できる。一方、ビジコンやInGaAsセンサを搭載したカメラは700-1,700 nm程度^[27]まで感度があるので、デジタルカメラでは明らかにできなかった下描きが判別することも多い。しかし解像度が低いため一度に小さな面積しか撮影することができず、作品全体を写すためには何枚もの画像にわけて撮影したうえでこれらの画像を合成する必要がある、特に大きなサイズの作品では時間と手間がかかってしまうというデメリットもある。当館ではここ数年の間にInGaAsセンサを用いたカメラで数点の作品の調査を行ったが、たとえば作者不詳《聖ヤコブ伝》(P.2017-0048)では、人物の顔や手の部分に作者による多くの描きなおが見つかったほか、もとはこの作品と同じ祭壇画を構成していたと推定されるグローニグ美術館所蔵作品と下描きの線の特徴においても、顔や手の部分に描きなおが多い点においてもよく似ていることがわかった^[28]。また、fig.5に示したルカス・クラーナハ（父）《ゲッセマネの祈り》(P.1968-0001)では細かい下描きまで明瞭に撮影することができたので、特に特徴がある顔部分や衣の襷の表現などを、今後、他のクラーナハ作品と比較することで、当館作品の位置付け（制作年代など）を科学的に裏付けることができるのではないかと考えられる。

2-4. マルチスペクトルイメージングによる調査

マルチスペクトルイメージングとは、作品を照らす光源と、カメラに装着するフィルターの組み合わせを変えて撮影することで、複数の波長帯における作品の反射画像を得る調査法である。画像の撮影には、光源、特殊なカメラ、各種のフィルターが必要となる。光源は、可視光や赤外線や紫外線のほか、サーマルラディエーションというような、熱放射領域の波長を用いることもある。もともと軍事用や、農業の土地利用、植生分析の分野で利用されてきた手法であり、美術品や文化財の調査に応用されてきたのは比較的最近のことである。日本ではまだ一般的とは言えないが近年、技術の発展により光源とフィルターの組み合わせが増え、欧米では非常に注目されている。このマルチスペクトルイメージングでは、数10～数100 nmの波長帯ごとに反射画像を得ることで、絵画の顔料・染料の推定・同定や下描き調査を行うことができる^[29]。最

近では、2, 3 nmもしくはそれ未満の波長帯ごとに画像を得るハイパースペクトルイメージングも使用され始めている^[30]。しかし本稿では、比較的容易に実行できるマルチスペクトルイメージングの一例として、大英博物館が公開している方法^[31]を紹介する。この方法は、従来から頻繁に行われて来た赤外線反射画像 (Infrared-reflected images: IRR)、可視反射画像 (Visible-reflected images: VIS)、紫外線励起蛍光画像 (Ultraviolet-induced luminescence images: UVL) に加えて、紫外線反射画像 (Ultraviolet-reflected images: UVR)、可視光励起赤外線蛍光画像 (Visible-induced infrared luminescence images: VIL^[32]) を撮影し、各々の画像を比較することで対象物に対する総合的な情報を得ようとするものである (fig.2, table 1 参照)。ここではこれまでの記述で触れていない紫外線反射画像 (UVR) と、可視光励起赤外線蛍光画像 (VIL) の撮影法について、大英博物館が公開しているマニュアルに沿って述べる。

紫外線反射撮影 (UVR) は、作品に紫外線を照射し紫外領域の反射を検出する撮影法である。この方法では、表面に塗布された絵画材料の情報を得ることができる。従来から撮影されてきた紫外線励起蛍光撮影でもワニスの有無などを観察することができるが、紫外線反射撮影ではワニスの濃淡や分布など、さらに表層の情報を得られることが特徴である。紫外線は波長が短く物体の表面で吸収されやすいため、表面から反射した光のうち可視領域の光 (蛍光) を除去することで、ごく表層の反射のみを観察できるからである。暗室にて紫外線を作品に照射し、400 nm 以下の波長のみを透過するフィルターをカメラのレンズに装着して紫外領域 (約 200-400 nm) の反射のみを撮影する。

可視光励起赤外線蛍光撮影 (VIL) は、作品に可視光線を照射し赤外領域の蛍光を検出する撮影法である。この方法は、エジプシャンブルー (カエルレウムとも呼ばれる。カルシウム銅ケイ酸塩 ($\text{CaCuSi}_4\text{O}_{10}$) の顔料で、紀元前 3000 年頃からエジプト、ギリシャ・ローマで利用されている)、ハンブルー (漢ブルー。ケイ酸バリウム銅 ($\text{BaCuSi}_4\text{O}_{10}$) に相当)、ハンパープル (漢パープル ($\text{BaCuSi}_2\text{O}_6$)。ハンブルーに比べ、よりケイ酸分が少ない。ハンブルーより利用が遅く、紀元前 400 年頃に中国で用いられている)、カドミウム含有顔料の同定に有用な調査方法である (fig.6)。この撮影方法で特徴的な蛍光を示す顔料は上記に限られているが、エジプシャンブルー、ハンブルー、ハンパープルに関しては、かなり微量な粒子でも顕著な蛍光反応を捉えることができる。撮影は、暗室にて可視領域の LED ライトを作品に照射し、可視領域での反射光を除去するため 700-1,100 nm の赤外領域の光のみを透過するフィルターをカメラのレンズに装着する。日常生活で使用する蛍光灯や白熱電球などは紫外線や赤外線を含むため、光源として好ましくない。

この大英博物館版・マルチスペクトルイメージングでは、用いるカメラは 1 台のみで、装着するフィルターや作品を照らす光源を交換することによって手早く 5 種類以上の画像を撮影することができること、これらの画像を見比べることでワニスや補彩の有無、顔料・染料の推定・同定などが可能であるため、調査対象とした作品においてさらに調査が必要な項目を迅速に明確

に絞りこむことができることが利点である。たとえば、顔料のおおまかな推定ができれば、後述する蛍光X線分析やラマン分光分析を行うべき箇所を把握することが可能となる。

2-5. X線による調査：X線透過撮影

X線透過撮影は、作品にX線を照射し、透過したX線を検出する撮影法である。X線透過撮影では、肉眼では見えない美術作品の内部構造やペンティメント、後世になされた塗りつぶし、あるいは絵具層の欠損や亀裂などの劣化状態を明らかにすることができる。X線がどの程度、物を透過するかは、1) 物の材質、2) 物の厚さ、3) 照射するX線のエネルギーの大きさ、の3つの要素に左右される。X線が物を透過する程度の差を画像コントラストとして表したのがX線透過画像である。1)については、原子番号が大きくかつ密度が高い物質ほどX線が透過しにくい(すなわち、物質にX線が吸収されやすい)。したがって、金属はX線が透過しにくく、紙や布など有機質でできた文化財はX線が透過しやすい。2)については、厚みが厚くなるほど透過しにくくなり、3)については、照射するX線のエネルギーが小さいと透過しにくく、エネルギーが大きくなるほど物質を透過しやすくなる。

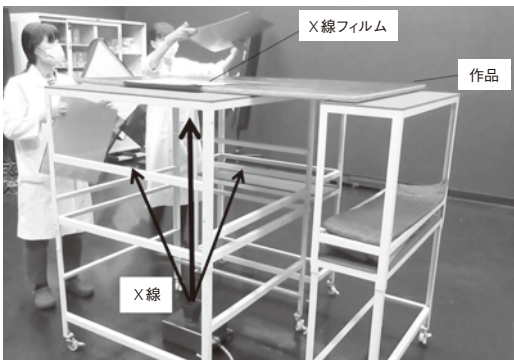
X線透過撮影は、絵画作品表面(もしくは作品裏面)に銀塩フィルムやイメージングプレート(有機フィルム上の片面に輝天性蛍光体粉末を塗布した板)をおき、下(もしくは上)からX線を照射して撮影する(fig.7)。フィルムによる撮

影では、作品のX線が透りにくい部分ではフィルムが感光せずに白く残り、X線が透りやすい部分ほど感光して黒色になる。したがって作品上で鉛白や水銀朱やカドミウムレッド・カドミウムイエローといった重元素(元素番号が大きい元素)を含む顔料が使用されている箇所や、厚く塗られている箇所ではX線が透過しにくいいためフィルムでは白く明るく写る。一方で、白亜や天然ウルトラマリンブルー(ラ

ビスラズリ(方ソーダ石グループの鉱物を主成分とする岩石)から作った顔料)やカーボンブラックなど軽元素からなる顔料が使用されている部分ではX線が透過しやすいため、フィルムでは黒く写る(figs.8, 9)。デジタルの手法で得られたX線透過画像も、これと同様の濃淡の表示がなされることが多い。

X線透過画像では、絵画中のすべての層が重なった画像として得られるために、作品の裏側にも絵画が描かれている場合や、板絵で裏に格子張り(クレードル)などの補強材がある場合には、すべてが重なった複雑な画像になってしまう解釈が難しいことがある(figs.8, 9においても、作品裏側にある画枠の棧などが重なって写っている)。また、最適な画像を得るためには撮影距離、X線の管電圧・電流、露光時間などの撮影条件を適切なものにすることが必要だが、美術作品の場合、作品ごと、あるいは同じ作品でも部位ごとに構成している物質や厚さ(支持体や絵具層の材料組成や厚さなど)が異なるので、撮影に最適な条件を探るのが難しいという問題がある。目的とする対象物(たとえば、表面に現れているのとは異なる構図の下絵)が明確に撮影される最適な条件を探るために、通常、本撮影の前にいくつかのテスト

fig. 7
X線透過撮影の様子。専用の台の上に作品をおき、作品表面にX線フィルムを載せて、下からX線を照射する。





折り込まれた痕 ↑

fig. 8
X線透過画像（X線フィルムによる撮影）（右）。ヴァンチエツォ・カデーナ《聖母子と幼い洗礼者聖ヨハネ》（テンペラ・板、国立西洋美術館所蔵、P2011-0001）。人物の顔や体の白色には白亜、聖母の青衣には天然ウルトラマリンブルー（ラピスラズリ）が使用されているので黒く写った。これに対して、背景の白色や衣のハイライト部分には鉛白、緑色部分には銅を含んだ顔料が使用されているため白っぽく写った。また、板の裏側にある棧や釘や封蝋（sealing wax）が表の画像に重なって写った。

fig. 9
X線透過画像（X線フィルムによる撮影）（右）。マリー＝ガブリエル・カベ《自画像》、（1783年頃、油彩・カンヴァス、国立西洋美術館所蔵、P. 2001-0002）。人物の顔や体および衣装のハイライト部分には鉛白が使用されているため白く写り、筆跡がはっきりと表れた。また、カンヴァスの画枠の棧や釘が表の画像に重なって写った。オリジナルのカンヴァスを張ったときに使用した釘穴が作品周縁部に認められることから、現在の作品寸法はオリジナルの寸法よりもひとまわり大きくなっていることがわかった。さらに、作品向かって右端部にはカンヴァスが折り込まれた跡があることから、オリジナル寸法よりも幅が短くなっていた時期があったことが推測された。

撮影を行う。たいいていの場合、透過X線撮影はX線の漏洩がない専用の撮影室で行うため、X線が照射されている最中に部屋に出入りしなければ、撮影者が被ばくするおそれはない。美術史研究者が撮影に立ち会うことも可能である。X線透過画像を利用した新しい調査法として、ゴッホ美術館所蔵作品を中心として進められているThe Thread Count Analysis Project（カンヴァスの目の詰まり具合や癖を調べて、同じカンヴァスロールから切り取って制作されている作品を明らかにすることで作品どうしの関係性を調べ、作品の制作年代を推定するプロジェクト）があり、当館もゴッホ《ばら》（P.1959-0193）のX線透過画像を提供している^[33]。

3. 非接触調査法 — その2（機器分析による調査法）

美術作品の研究に利用される機器分析法には様々なものがあるが、その一部は可搬型の装置が開発・実用化されており、絵画作品を展示室や収蔵庫から移動することなく、現地（オンサイト）で分析を実施できる。ここでは、可搬型装置が普及しており、かつ非破壊・非接触で利用可能な蛍光X線分析とラマン分光分析という2種類の分析法について紹介する。

3-1. 蛍光X線分析

蛍光X線分析（X-ray Fluorescence Spectrometry：XRF）は、物質に含まれる元素の組成、すなわち化学組成を調べるための分析手法である。X線の波長は物質を構成する分子や原子の大きさ、あるいはその結合の長さと同程度であるため、物質にX線を照射することで様々な相互作用を生じる。

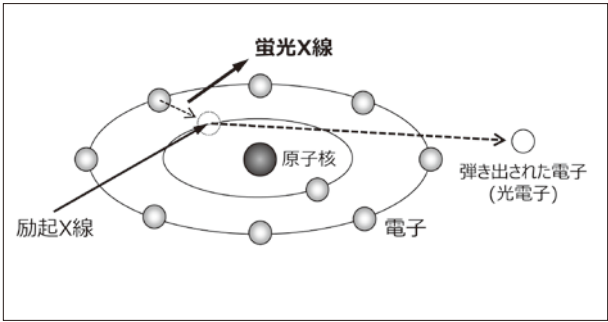


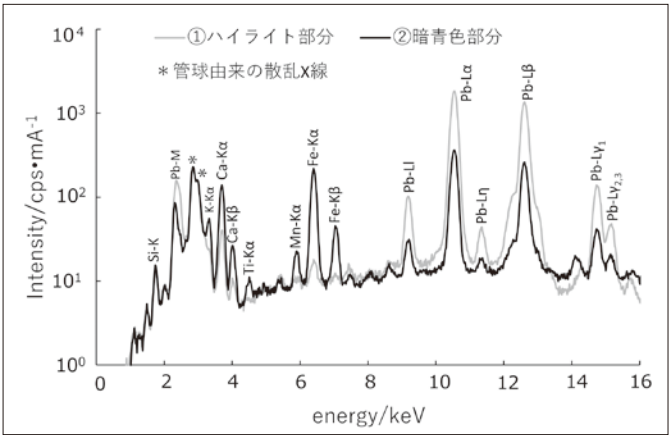
fig. 10
蛍光X線の発生原理

物質とX線との相互作用を利用した様々な分析技術が存在し、先述したX線透過撮影や、ここで紹介する蛍光X線分析法はそのひとつの例である。物質を構成する原子は、fig.10に示すように原子核の周りに1つないし複数の電子が周回した構造をしている。ここにX線を照射すると、

X線の持つエネルギーによって、原子中の電子が弾き飛ばされることがある。電子はいくつかの軌道に分かれて原子核の周りを回っているが、原子核は正の電荷、電子は負の電荷を持ち、静電的に引き合っているため、より内側の軌道の方がエネルギー的に安定する。よって、安定な内側の軌道を周回していた電子がX線によって弾き出された場合、より高いエネルギーにある外側の軌道の電子が、この空いた軌道に入っていくとする。その際、差分のエネルギーを外に放出する必要があるが、これを光（電磁波）の形で放出した場合が蛍光X線である。蛍光X線は元素の種類によって固有のエネルギー（波長）を持つ。そのため、物質から放出された蛍光X線を分光・検出し、解析することで、物質の化学組成を調べることができる。

たとえば絵画の分析においては、この手法は組成データに基づく材質の識別、主に無機化合物を主成分とする顔料の同定に利用されることが多い。この方法により、当館のカルロ・ドルチ《悲しみの聖母》(P.1998-0002)における印象的な聖母の青いベールには、銅を主成分とするアズライトではなく天然ウルトラマリンブルーが使用されている可能性が高いことが明らかになった（fig.11）。ただし、先述したX線透過撮影と同様に、この手法の分析データには絵画を構成する複数の層からの情報が含まれることに注意が必要である（fig.1参照）。また、炭素などの軽元素はこの手法では分析できないため、カーボンブラックなど炭素を主成分とする顔料や、インディゴ ($C_{16}H_{10}N_2O_2$) など特徴的な金属元素を含まない染料は同定できない。絵画に利用される無数の顔料の中には、この手法で得られる組成データのみでは識別できないものも数多く存在するため（たとえば、絵画の緑色の部分から銅が検出されたとして、それが、マラカイト ($Cu_2(CO_3)(OH)_2$) であるのか、ヴェルディグリ ($Cu(CH_3COO)_2 \cdot H_2O$ など) であるのか、判別することは困難である）、信頼性の高い顔料の同定を行うためには、後述するラマン分光分析などを併用す

fig. 11
蛍光X線分析 (XRF) による各測定点のスペクトル。カルロ・ドルチ《悲しみの聖母》(1655年頃、油彩・カンヴァス、国立西洋美術館所蔵、P.1998-0002)。青いベール部分では共通して銅 Cu (Ka: 8.0 keV) は検出されず、ケイ素 Si (Ka: 1.7 keV) が検出された。そのため、Cuを主成分とするアズライト ($Cu_3(CO_3)_2(OH)_2$) ではなく、天然ウルトラマリンブルー（ラピスラズリ:主成分はラズライト: $(Na,Ca)_8(AlSiO_4)_6(SO_4,S,Cl)_2$) を粉末化して得られる青色）が使われている可能性が高い。また、ハイライト部分では鉛 Pb (La: 10.6 keV など) が強く検出されたことから、鉛白 ($Pb_3(OH)_2(CO_3)_2$) を混合していると考えられる。非接触（作品表面との距離約 5 mm）で実施した分析であるため、Na, Al, S, Clといった軽元素の蛍光X線は空気によって減衰され、検出できていない。



ることや、層構造や粒子の状態の把握のためクロスセクション（4.その他の非接触調査法および微小試料の採取を伴う調査法、参照）を用いて分析を行うことが望ましい。

蛍光X線分析装置は構成が簡単であるために小型化しやすく、「ハンドヘルド型装置（ポータブル型蛍光X線装置 pXRF）」と呼ばれる片手で取り扱い可能なものも市販されている（ただし、文化財や美術作品の分析においては当然のことながら、作品の安全のために両手で取り扱う必要がある）。絵画を測定する際には、絵画をイーゼルや壁に固定した状態にしたうえで、装置側も専用のスタンドなどに固定して測定することが多い。スペクトルの取得には1点あたり30秒もあれば十分であるが、実際の測定時間は研究目的（どの元素をどれくらいの精度・感度で分析したいのかなど）に応じて決定する。市販の装置の多くには測定データ（蛍光X線スペクトル）を自動で解析する機能が備わっており、分析法に関する専門的な知識を持ち合わせずとも、簡易かつ迅速に分析対象の化学組成データを取得できる^[34]。しかしながら、データの正しい解釈のためには専門家によるチェックが必須である。また、分析対象ないし装置を専用の電動スタンドに固定して縦横にスキャンしながら測定を行うことで、作品表面、場合によっては作品の内部も含めた元素の2次元的な分布を可視化する「蛍光X線イメージング（マッピング）」^[35]と呼ばれる手法も文化財分野で活用されている^[36]。従来は大型の実験施設でのみ実施可能な手法であったが、近年では持ち運び可能な専用装置も市販されており、欧米の研究グループによって活発に絵画の分析へと応用されている^[37]。測定に必要となる時間は対象の大きさ、あるいは測定の点間隔（ステップ幅）の設定によって異なるが、大型の作品全体に対して詳細な分析を行う場合、半日あるいは丸一日かかる場合もある。ただし、測定範囲を指定した完全な自動測定が可能であるため、測定者がX線被ばくの危険に晒され続けることはない。また、イメージング分析の場合には1点ごとに長時間の積算を行う必要がなく、単位面積あたりに照射されるX線の量はハンドヘルド型装置などを用いたピンポイントの分析よりも少ない。

3-2. ラマン分光分析

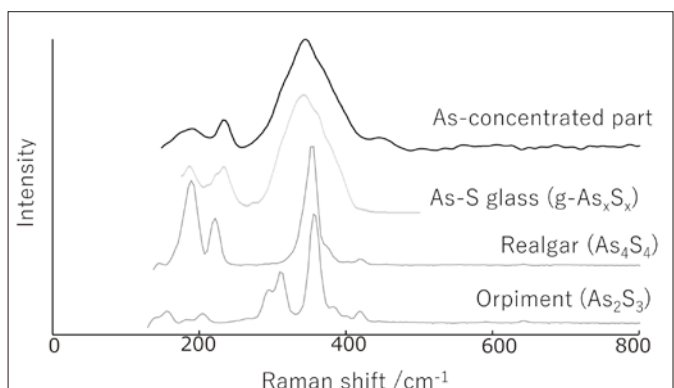
ラマン分光分析（Raman Spectroscopy）は、物質に可視光またはその前後の波長領域の光を照射し、物質表面から発生した「ラマン散乱光」を分光・検出することで、分子レベルの構造を解析する手法である。物質に光を照射すると、分子や原子によって散乱される。散乱光の大部分は照射光と同じ波長を持つが（レイリー散乱光）、照射した光とはわずかに波長（エネルギー）が異なる散乱光も微弱ながら発生し、これをラマン散乱光と呼ぶ。レイリー散乱光とラマン散乱光のエネルギー差は、物質を構成する分子の振動のエネルギーと対応している。そのため、ラマン散乱光を分光・検出することで得られるラマンスペクトルには、物質を構成する分子の化学結合に関する情報が反映されている。

この手法と同様に分子の結合状態の情報を得る分析手法として赤外吸収分光分析法が知られるが、分子振動による赤外線の吸収とラマン散乱光の発生は仕組みが異なるため、両手法で検出できる分子振動には差がある。

そのため、一般的にはこれら2種類の分光分析法を相補的に利用することで、未知物質の化学結合に関する詳細な解析が可能になるとされる。しかしながら、絵画の分析を含めた文化財分野におけるこの手法の利用は、スペクトル上に検出された各ピークから化学結合情報を読み解くのではなく、得られたスペクトルを指紋のように活用し、既知のスペクトルと比較・照合することで材質同定を行う場合がほとんどである^[38]。こうした目的の場合、ラマン分光分析を単独で実施しても十分な威力を発揮する。また、この手法の強みとして、顕微鏡と組み合わせることで100 μm 以下の微小領域の非破壊・非接触分析が可能になるという利点があげられる。絵画の分析においては、顔料1粒子レベルでの同定も可能となる。膨大な量のラマンスペクトルデータが書籍や論文、あるいはオンラインのデータベースなどの形で公開されており^[39]、その中には古代から現代までの顔料をまとめたスペクトルデータ集^[40]など、文化財分野に特化したものも存在する。前述の蛍光X線分析と異なり、この手法は無機物・有機物の双方に対して（つまり、無機顔料、染料、メディウム、ワニスなどすべてについて）利用可能である。測定に必要とする時間は試料や目的により異なり、後述する蛍光の影響がある場合には数分程度の積算が必要となるが、ラマン散乱を生じやすい化合物の場合には、数秒で明瞭なスペクトルを得ることもできる。顕微ラマン分光分析による顔料同定の例として、アムステルダム国立美術館所蔵のレンブラント・ファン・レイン作の油彩画《ユダヤの花嫁（イサクとリベカ）》において、非破壊オンサイトの分析を実施した成果^[41]をfig.12に示す。

fig.12
非接触オンサイト顕微ラマン分光分析による顔料の同定例：註41）。レンブラント・ファン・レイン《ユダヤの花嫁（イサクとリベカ）》（1665-69年頃、油彩・カンヴァス、アムステルダム国立美術館所蔵）。MA-XRF（マクロ-XRF）を実施した結果、絵画左側に立つイサクの黄色い衣服の一部において、ヒ素Asを含む黄色顔料が使用されていることが明らかになった。この黄色顔料を同定するため、XRFでAsが検出された点に対して顕微ラマン分光分析を実施したところ、一般的にAsを含む黄色顔料として知られる石黄（orpiment: As_2S_3 ）ではなく、Asと硫黄Sから成るガラス状物質であることが明らかとなった（右）。まさしく、XRFでは識別できない顔料を別の手法によって同定した好例と言える。

ラマン分光分析を実施する際の注意点の一つが、レーザー光の照射による熱ダメージである。ラマン散乱光の強度はレイリー散乱光の百万分の一程度であるため、一般的なラマン分光分析装置では高出力のレーザーを照射光源に用い、レイリー散乱光のみを遮断するフィルターを取り付けることで、微弱なラマン散乱光の信号の検出を可能としている。測定対象が光を吸収しやすい物質（照射光に対して補色の関係となる色を持つ物質、または黒色の物質）、あるいは熱を放出しづらい物質の場合には、特に注意が必要である。また、照射したレーザー光によって蛍光が発生し、微弱なラマン散乱光の検出が困難になる場合もある。油彩画の分析においては、ワニスによる蛍光が大きな問題となる。これは照射光の波長を変更することで改善されるが、可搬型のラマン分光分析装置で複数の光源を搭載しているものは少ない。熱ダメージ、あるいは蛍光による妨害の有無について、実際の絵画の分



析に先立ち、モデル試料などを用いた検証を行うことが望ましい。

4. その他の非接触調査法および微小試料の採取を伴う調査法

上述以外でよく使用される非接触調査法（機器分析による調査法）としては、光ファイバーを用いた方法があげられる。ファイバーオプティクス反射分光法（Fiber Optic Reflectance Spectroscopy：FORS）は、光ファイバーを通して紫外～可視領域の光（270–820 nm）（近赤外域の光まで含む場合もある）を作品表面に照射し、その反射光を光ファイバーで集めて分光器に導入し検出して反射スペクトルを得る方法で、顔料や染料の推定・同定ができる^[42,43,44]。入射光を紫外線（254–333 nm）にした場合にはファイバーオプティクス蛍光分光法（Fiber Optic Fluorescence Spectroscopy：FOFS）も可能で、主にワニスやメディウムや染料など有機物の推定ができる^[45]。また同様にして、赤外領域の光（4,000–900 cm^{-1} （波長2,500–11,000 nm））を照射し反射光を干渉計で分析する方法は中赤外光ファイバーオプティクス分光法といわれ、顔料・染料、メディウム、ワニスなどの情報が得られる^[46]。一方、新しい画像診断法としては、0.1–10THz（波長30 μm –3 mm）という長波長の電磁波を用いるテラヘルツイメージング法という方法がある。この方法ではジョット・ディ・ボンドーネのテンペラ画において、従来の透過X線撮影では明らかにすることができなかった内部構造（下から、板、石膏層、麻布、石膏層、彩色層と重なっていることなど）を示すことができた事例^[47]がある。

美術作品の調査においては、これまで述べてきた非接触の調査を優先して行うことが大原則だが、調査目的によっては微小試料の採取が必要になる。以下に、微小試料の採取を伴う調査法のいくつかを簡単に紹介する。油彩画のように層構造が複雑なものに対しては、微小サンプルを樹脂包埋して断面を表出させ（このように処理した試料は「クロスセクション」と呼ばれる）、光学顕微鏡やエネルギー分散型X線分光分析装置（Energy Dispersive X-ray Spectroscopy：EDXまたはEDS）付属の走査型電子顕微鏡（Scanning Electron Microscope：SEM）を使って、層の重なりの様子や顔料粒子の形状・大きさを観察する調査がよく行われる^[48]。EDXで化学組成を調べることにより、絵具層ごとに含まれる顔料を推定・同定することができる。さらにこのクロスセクションを顕微フーリエ変換赤外分光分析装置（Micro Fourier Transform Infrared Spectroscopy： $\mu\text{FT-IR}$ ）で分析することで、各層に含まれている顔料やメディウムやワニスを推定・同定することが可能な場合もある。

これまで述べてきたように、非接触調査法により絵画表面から得られた情報は、下に重ねられた複数の層からの情報が総合されたものであるために層ごとの材料組成や厚みを判断することは難しく、このクロスセクションの調査と各種非接触調査法を併用することで絵画の構造や材料・技法や劣化状態などについての総合的な理解が得られることが多い。そのため多くの作品の調査において、非接触調査に加えて、数個のクロスセクションが作成され調査されてきている^[49]。クロスセクションの作成に必要な試料量は、10～数100 μg 、大きさにして0.5 mm四方にも満たない量である。

当館ではかつて、X線透過撮影、赤外線反射撮影、クロスセクションの観察といった自然科学的調査を含めた詳細な調査により、ペーテル・パウル・ルーベンス作とされていた《ソドムを去るロトとその家族》(P.1978-0006)を、ヤーコプ・ヨルダーンス(に帰属)と変更した。この作品と同一構図であるリングリング美術館の作品(ルーベンスとその工房作、と結論された)では、女性の服に天然のウルトラマリンが使用されているのに対して当館の作品ではインディゴが使用されていること、また、リングリング作品ではスマルト(コバルトを含む青色のガラスを粉末にした顔料)に水性のメディウムを使うことで変色を防いでいるのに対して、当館作では乾性油を使用しているためにスマルトに著しい変色が生じていることなど、用いた材料・技法の質に明らかな差があったことを、そのひとつの根拠とした^[50]。

近年は、放射光を用いた分析も利用されることがある。放射光は電磁波の一種であるが、円形粒子加速器の中を、高エネルギーの電子や陽電子が磁場によって曲げられ円運動をするときに、軌道の中心のほうへ加速度を受けて進行方向側に発せられるきわめて明るい電磁波である。指向性に優れた放射光は μm レベル以下にまで細く絞ることができ、これを用いたマイクロ粉末X線回折法(Micro X-ray Powder Diffraction: μXRD)、 μXRF 、 $\mu\text{FT-IR}$ など微小部位の多様な分析が可能であり、薄い層構造ごとの分析も可能である^[51]。放射光利用のハードルも年々下がってきており、今後は欧米のように美術作品への利用が増えていくものと思われる。

絵具のメディウムやワニスの同定には微小試料の採取が必要となることが多い。これら有機物のクラス分け(樹脂、脂質、蛋白質、多糖類といった分類)は非接触調査法でも可能なことがあるが、物質を同定することは多くの場合、困難である。これは、メディウムやワニスに混合されている顔料あるいは経年のために劣化していることや、数種類の有機物が混合されている場合があることなどによる。これらの同定には微小試料を採取して、ガスクロマトグラフ/質量分析装置(Gas Chromatography - Mass Spectrometry: GC-MS)や高速液体クロマトグラフ装置(High Performance Liquid Chromatography: HPLC)による分析を行うことが一般的であり、蛋白質の種類(アルブミン(卵の主成分)、コラーゲン(膠の主成分)、ミルクカゼインなど)、乾性油の種類(亜麻仁油、けし油、胡桃油など)および加工状態(生の油、ボイル油、サンシクンド油など)、樹脂の種類(ダンマル樹脂、マスチック樹脂、松脂など)、植物ガムの種類(アラビアガム、トラガカントガムなど)の同定などが可能である^[52,53]。蛋白質については、近年ではマトリックス支援レーザー脱離/イオン化-タンデム飛行時間型質量分析装置(Matrix Assisted Laser Desorption / Ionization-Time-of-Flight / Time-of-Flight Mass Spectrometry: MALDI-TOF / TOF-MS)や液体クロマトグラフ-タンデム質量分析装置(Liquid Chromatography / tandem Mass Spectrometry: LC-MS / MS)による分析などにより、蛋白質の種類と同定の精度が上がっただけでなく、その由来動物種まで探ることができるようになった^[54,55,56]。また、抗体を用いたELISA法(酵素結合免疫吸着法)^[57,58]による同定も行われている。メディウムやワニスの同定は、これら何種類かの分析法を併用して

クロスチェックを行うのが一般的である。これらの調査において必要となる試料量は、数100 μg ~ 1 mg、大きさにして1 mm×1 mm 程度（彩色試料の場合^[59]）である。

5. まとめにかえて

近年、各国において、美術館や大学などに所属する美術史学の研究者、修復専門家、保存科学者、各種の自然科学的な分析を専門とする研究者などが協力して美術作品の研究を進めることが増えてきており、次々と新しい成果が発表されている。非接触の調査法の種類が増えたことや、可搬型の分析機器の開発が進んだことにより、作品を移動させるリスクを冒すことなく展示室や収蔵庫においてオンサイトで安全に調査を行うことが可能になったことも、自然科学的な調査を実施するためのハードルを低くしていると思われる。2019年、ロンドン・ナショナル・ギャラリーにおいて、本稿でも紹介した赤外線反射撮影、蛍光X線イメージング（マッピング）、ハイパースペクトルイメージングを組み合わせた方法により、レオナルド・ダ・ヴィンチ《岩窟の聖母》に隠された、現在の構図とは異なる最初の構図の下描きが明らかになったこと^[60]などは、自然科学的調査法によってもたらされた画期的な成果のひとつと言えるだろう。

冒頭にも記したように、日本においてはまだ、こうした自然科学的調査は「作品の保存・修復処置に付随して行われ処置の際に役立てられるもの」という認識が強いようだが、美術史学・芸術学の分野における課題に対しても答えを導き出す可能性を持っているゆえに、有効な研究手法のひとつとして常態的に利用されることが望ましい。当館においても、自然科学的調査が「美術史学的な目的をもった独立した調査」としても認識されて、美術館の責務として、積極的に取り組むべき時期に来ていると思われる。

[1] 三浦定俊. 光学的方法の歴史. 文化財保存修復学会誌. 2006; 50: 53-74.

[2] 東京国立文化財研究所光学研究班（著）. 『光学的方法による古美術品の研究』. 吉川弘文館; 1955. (この本の中で「光学的方法」、「光学的な研究方法」という言葉は何度も使用されているが、たとえばp. 21には「光学的研究」についての説明がなされている)。

[3] Stoner JH. Changing Approaches in Art Conservation: 1925 to the Present. In: National Research Council 2005. Scientific Examination of Art: Modern Techniques in Conservation and Analysis. Washington, DC: The National Academies Press; 2005. p. 43.

[4] 註3)に同じ。p. 41.

[5] マドレーヌ・ウール, 秋山光和. ルーヴル研究所における美術品の科学的研究. 美術研究. 1953; 168: 30-40.

[6] Thomson G, Mills JS, Plesters J. The Scientific Department of the National Gallery. Natl Gallery Tech Bull. 1977; 1: 18-28.

[7] Royal Institute for Cultural Heritage のHP. <http://www.kikirpa.be/EN/9/305/About+KIK-IRPA.htm> (accessed Jan. 2nd, 2021).

[8] 山崎一雄, 秋山光和. 1. 海外における研究の沿革と現状. 註2)に同じ。p.1-12.

[9] 山崎一雄. 2. 我国に於ける研究の沿革. 註2)に同じ。p.13, 22など。

[10] 田中一松. 光学的鑑識法の意義. 註2)に同じ。p.13, xxii など。

[11] 第1章 1-5. 研究組織. 沢田正昭（著）. 『文化財保存科学ノート』. 近未来社; 1997年初版, 1999年3刷発行, p.28-29.

[12] “Behind the Scenes in Conservation: Raking light”. Cincinnati Art Museum. <https://www.cincinnatiartmuseum.org/about/blog/conservation-blog-1312019> (accessed Sept. 16th, 2020).

- [13] “Lighting techniques for examination, Condition Reporting – Paintings. Part II: Examination Techniques and a Checklist” Canadian Conservation Institute (CCI) Notes 10/7. <https://www.canada.ca/en/conservation-institute/services/conservation-preservation-publications/canadian-conservation-institute-notes/condition-reporting-paintings-examination-techniques.html> (accessed Jan. 5th, 2021).
- [14] Wallraf-Richartz-Museum & Fondation Corboud in Cologne, the online publication of the research project “Painting Techniques of Impressionism and Postimpressionism”. <https://forschungsprojekt-impressionismus.de/default.aspx?kat=&id=&iid=&lang=en> (accessed Nov. 12th, 2019)にあるManet, *Asparagus Still life*, Monet, *Fishing Boat*, Gogh, *The Langlois Drawbridge*の調査など。たとえば透過光での観察により、マネ《アスパラガス、静物》では、アスパラガス部分において灰色の地塗りが見えている箇所、すなわちマネが意図的に絵具を塗っていない箇所がかなりあることがわかった。
- [15] キーエンスのHP. <https://www.keyence.co.jp/products/microscope/digital-microscope/> (accessed Nov. 12th, 2020).
- [16] “Ultraviolet”. In: Doherty T, Woollett TA, editors. Looking at Paintings: A Guide to Technical Terms. Revised Edition. JP Getty Trust Publications; 2009. p. 81-82.
- [17] “Ultraviolet fluorescence” Glossary. National Gallery, London. <https://www.nationalgallery.org.uk/paintings/glossary/ultraviolet-fluorescence> (accessed Aug. 9th, 2020).
- [18] De la Rie ER. Fluorescence of paint and varnish layers (part 1). Stud Conserv. 1982; 27(1): 1-7.
- [19] De la Rie ER. Fluorescence of paint and varnish layers (part 2). Stud Conserv. 1982; 27(2): 65-89.
- [20] 註18)に同じ。
- [21] 鈴鴨富士子. 紫外線を用いた絵画の調査——紫外線蛍光反応から見える油彩画——. 歴博特集. 光でみる歴史資料. 2015; 190: 6-10.
- [22] UV-Induced Fluorescence Photography. In: Piqué F, Verri G, editors. Organic Materials in Wall Paintings: Project Report. The Getty Conservation Institute; 2015. p. 17-19.
- [23] 赤外線反射画像による下描き研究としては、たとえば: Bomford D, editor. Art in the Making: Underdrawings in Renaissance Paintings. National Gallery Company, distributed by Yale University Press; 2002.
- [24] JRJ van Asperen de Boer. Reflectography of Paintings Using an Infrared Vidicon Television System. Stud Conserv. 1969; 14 (3): 96-118. <https://doi.org/10.2307/1505392>
- [25] 三浦定俊, 石川陸朗. 最近の赤外線テレビカメラの利用. 保存科学. 1980; 19: 21-28.
- [26] たとえばPENTAXの赤外線カメラ. <http://www.ricoh-imaging.co.jp/japan/products/kp-ir/> (accessed Nov. 13th, 2020).
- [27] Dyer J, Verri G, Cupitt J. 1. Introduction to Multispectral Imaging. In: Multispectral Imaging in Reflectance and Photo-induced Luminescence modes: A User Manual, Version 1.0. The British Museum; 2013. p. 1-7.
- [28] 高嶋美穂. 《聖ヤコブ伝》(作者、制作年不詳)に見られる技法について. 国立西洋美術館研究紀要. 2019; 23: 35-46.
- [29] Ricciardi P, Delaney JK, Facini M, Glinsman L. Use of Imaging Spectroscopy and in situ Analytical Methods for the Characterization of the Materials and Techniques of 15th Century Illuminated Manuscripts. JAIC. 2013; 52(1): 13-29. <https://doi.org/10.1179/0197136012Z.00000000004>
- [30] de Viguier L, Rochut S, Alfeld M, Walter P, Astier S, Gontero V, Boulch F. XRF and reflectance hyperspectral imaging on a 15th century illuminated manuscript: combining imaging and quantitative analysis to understand the artist's technique. Herit Sci. 2018; 6,11. <https://doi.org/10.1186/s40494-018-0177-2>
- [31] 註27)に同じ。
- [32] Visible-induced infrared luminescence images: VILについては、確立した和訳がないので、筆者らが和訳した。
- [33] van Tilborgh Louis, Meedendorp T, Hendriks E, Johnson DH. Weave matching and dating of Van Gogh's paintings: An interdisciplinary approach. The Burlington magazine. 2012; 154(1307): 112-122.
- [34] 野上太郎, 牟田史仁. ハンドヘルドXRFの機能向上と産業, 環境, 学術研究分野における役割の拡大. X線分析の進歩. 2015; 46: 145-158.
- [35] 特に大面積のイメージングを行う場合、「Macro X-ray fluorescence scanning (MA-XRF)」と呼ばれることが多い。
- [36] たとえば: Smieskaa LM, Twilley J, Wolla AR, Schaferc M, DeGalanc AM. Energy-optimized synchrotron XRF mapping of an obscured painting beneath *Exit from the Theater*, attributed to Honoré Daumier. Microchem J. 2019; 146: 679–691. <https://doi.org/10.1016/j.microc.2019.01.058>
- [37] Alfeld M, Pedroso JV, van Eikema Hommes M, der Snickt GV, Tauber G, Blaas J, Haschke M, Erler K, Dik J, Janssens K. A Mobile Instrument for in situ Scanning Macro-XRF Investigation of Historical Paintings. J Anal At Spectrom. 2013; 5: 899-909.
- [38] た と え ば: Casadio F, Daher C, Bellot-Gurlet L. Raman Spectroscopy of cultural heritage Materials: Overview of Applications and New Frontiers in Instrumentation, Sampling Modalities, and Data Processing. Topics in Current Chemistry. 2016; 374: #62.

- [39] たとえば: The RRUFF™ Project(<https://rruff.info/>)では膨大な量の鉱物のラマンスペクトルや粉末X線回折パターンが掲載されており、掲載データの中には顔料同定に役立つものも多く存在する。他にも、ユニバーシティ・カレッジ・ロンドンによる顔料のラマンスペクトルライブラリ (<http://www.chem.ucl.ac.uk/resources/raman/>) など。
- [40] たとえば: Burgio L, Clark RJH. Library of FT-Raman spectra of pigments, minerals, pigment media and varnishes, and supplement to existing library of Raman spectra of pigments with visible excitation. *Spectrochimica Acta. Part A* 2001; 57: 1491–1521.
- [41] van Loon A, Noble P, Krekeler A, der Snickt GV, Janssens K, Abe Y, Nakai I, Dik J. Artificial orpiment, a new pigment in Rembrandt's palette. *Herit Sci.* 2017; 5: #26.
- [42] Cosentino A. FORS Spectral Database of Historic Pigments in Different Binders. *e-conservation.* 2014(2) :53-63. <https://doi.org/10.18236/econs2.201410>
- [43] Fiber Optic Reflectance Spectroscopy (FORS). 註22)に同じ。p. 29-31.
- [44] Bacci M, Picollo M, Trumpy G, Tsukada M, Kunzelman D. Non-invasive identification of white pigments on 20th-century oil painting by using fiber optic reflectance spectroscopy. *JAIC.* 2007; 46:27-37.
- [45] Fiber Optic Fluorescence Spectroscopy (FOFS). 註22)に同じ。p. 32-34.
- [46] Mid-FTIR Fiber Optic Spectroscopy. 註22)に同じ。p. 35-37.
- [47] Fukunaga K, Cucci C, Montagner C, Picollo M, Bracci S, Magrini D, Chiantore O. Diagnostic and Analytical Study of the Badia Polyptych with Non-invasive and Micro-invasive Techniques, In: A. Tartufer, editor. *Giotto. Il restauro del Polittico di Badia (The Restoration of the Badia Polyptych)*, Firenze: Mandragora; 2012: 151-175.
- [48] たとえば: 註28)。
- [49] 最近注目された調査では: van der Snickt G, Dooley KA, Sanyova J, Dubois H, Delaney JK, Gifford EM, Legrand S, Laquiere N, Janssens K. Dual mode standoff imaging spectroscopy documents the painting process of the Lamb of God in the Ghent Altarpiece by J. and H. Van Eyck. *Science Advances.* 2020; 6 (31)eabb3379, 2020. <https://doi.org/10.1126/sciadv.abb3379>
- [50] Kawaguchi K. A Comparison of Three Versions of *The Flight of Lot and his Family from Sodom*. および Kamba N. A Comparison of the Ground, Pigment and Painting Techniques Used in Three Versions of *The Flight of Lot and his Family from Sodom*. In: Nakamura T, editor. *Rubens and his Workshop: The Flight of Lot and his Family from Sodom*. The National Museum of Western Art, Tokyo; 1994. p.47-67, p.69-94.
- [51] 谷口陽子. 中央アジア・バーミヤーン仏教壁画の分析 (2): GC/MS, ELISA 法による有機物質の同定. 国立歴史民俗博物館研究報告. 2012; 177: 81-106.
- [52] High-Performance Liquid Chromatography (HPLC). および Gas Chromatography-Mass Spectrometry (GC-MS). 註22)に同じ。p. 49-56.
- [53] 註51)に同じ。
- [54] 河原一樹, 中沢隆, 川崎英也, 浅井重博, アフメド・シュエイブ, アーデル・アカリシュ, 吹田浩, 荒川隆一. MALD 質量分析法による壁画に使用された接着剤原料の検出. 日本文化財科学学会大会研究発表要旨集. 2012; 29: 26-27.
- [55] Mazurek J, Svoboda M, Maish J, Kawahara K, Fukakusa S, Nakazawa T, Taniguchi Y. Characterization of Binding Media in Egyptian Romano Portraits using Enzyme-Linked Immunosorbant Assay and Mass Spectrometry. *e-Preservation Science.* 2014; 11: 76-83.
- [56] Kumazawa Y, Yuki Taga Y, Takahima M, Hattori S. A novel LC-MS method using collagen marker peptides for species identification of glue applicable to samples with multiple animal origins. *Herit Sci.* 2018; 6: 43. <https://doi.org/10.1186/s40494-018-0209-y>
- [57] 高嶋美穂. 酵素結合免疫吸着法 (ELISA) による美術作品中の蛋白質および植物ガムの同定. 文化財保存修復学会誌. 2018; 61: 12-37.
- [58] 高嶋美穂. カミーユ・ピサロ《収穫》に見られる技法について. 国立西洋美術館研究紀要. 2012; 16: 35-45.
- [59] ワニスや接着剤など、顔料が混じっていないサンプルであれば、これよりはるかに少量で同定が可能である。
- [60] “Unlocking Leonardo”. National Gallery, London. <https://www.nationalgallery.org.uk/exhibitions/past/leonardo-experience-a-masterpiece/unlocking-leonardo> (accessed Jan. 4th, 2021). “The hidden Leonardo”. National Gallery, London. <https://www.nationalgallery.org.uk/paintings/learn-about-art/paintings-in-depth/the-hidden-leonardo> (accessed Jan. 4th, 2021).

美術品の自然科学的調査の成果が発表されており、特に参考になると思われる雑誌を以下にあげる。

- ・National Gallery Technical Bulletin: 1977 年から毎年出版されており、所蔵作品の自然科学的調査の結果や保存修復処置が発表されている。科学的調査の結果が美術史的な考察まで結び付けられている点が秀逸。
- ・Heritage Science: 美術作品や文化遺産について、最新の調査結果が発表されている。誰もが知る有名な作品の分析結果が発表されることも多い。
- ・ICOM-CC Triennial Conference Preprint: 美術作品や文化遺産に対しての保存修復処置や自然科学的調査について発表される国際会議 (3 年に一度開催) のプレプリント。世界的美術館における調査事例の発表も豊富。

TAKASHIMA Miho, ABE Yoshinari, TERASHIMA Kai,
TAKAHASHI Kaori, MURAKUSHI Madoka, TANIGUCHI Yoko

This article provides a short summary of non-invasive techniques used in scientific research on works of art. It includes discussions of visible reflected photography, transmitted visible photography, raking light photography, microscopic examination, UV-induced visible fluorescence photography, infrared reflectography, multispectral imaging, X-radiography, X-ray fluorescence spectrometry (XRF) and Raman spectroscopy. Simple explanations for each technique are given with test results from works of art from the National Museum of Western Arts (NMWA) collection showing: what information may be gathered through each technique, what equipment and analytical instruments are needed, and what points should be carefully considered. Brief descriptions of invasive techniques requiring micro-sampling are also given. Scientific research on works of art offers information on the internal structure and the condition of the work, while also providing information on which areas are original and which were later retouched. This data is useful for practitioners in charge of conserving or restoring the works of art. The research is also important for art historical and art research studies of artwork materials and methods, determining dates of production, and answering questions of attribution and authenticity. The NMWA recognizes that practitioners must now actively embrace scientific research as not simply “a mode of inquiry in service of conserving and restoring works of art” but rather “a mode of inquiry that, in its own right, carries art historical aims.”