

〔報文〕 蛍光X線分析による国宝吉祥天像の彩色材料調査

早川 泰弘

1. はじめに

奈良県薬師寺に所蔵される国宝「吉祥天像」は奈良時代に描かれた麻布画で、現在は額装に仕立てられて保管されている。縦53.0cm、横31.7cmと決して大きな絵画ではないが、数少ない奈良時代の本格的な絵画作品として名高いものである。麻布を基底材として使う古典絵画は奈良時代を中心に見られるが、良好な状態で現存しているものは数少なく、貴重な作例の一つである。

東京文化財研究所では、奈良国立博物館と共同で、この吉祥天像の彩色材料調査を行う機会に恵まれた。調査はすべて非破壊・非接触手法によるものであり、高精細デジタル画像撮影、反射赤外線画像撮影、可視光励起蛍光画像撮影、X線透過画像撮影、ならびに蛍光X線分析が行われた。本報では、この中から蛍光X線分析による調査結果の概要を報告し、吉祥天像に関する彩色材料について考察する。

2. 蛍光X線分析による彩色材料調査

調査に使用した機器は、平成11年に東京文化財研究所が中心となって開発したポータブル蛍光X線分析装置（セイコーインスツルメンツ（株）SEA200）である。これまでに国宝『源氏物語絵巻』（徳川美術館、五島美術館）¹⁾ や国宝『平等院鳳凰堂板壁絵』（平等院）²⁾ などの絵画、あるいは国宝『普賢菩薩騎象像』（大倉集古館）³⁾ や国宝『金錯銘鉄剣』（さきたま資料館）⁴⁾ の材質調査に適用し、十分な実績を上げているものである。今回の彩色材料調査に際して設定した測定条件は以下の通りである。

X線管球： Rh（ロジウム）

管電圧・管電流： 50kV・100 μ A

X線照射径： ϕ 2 mm

測定時間： 1ポイント100秒

装置先端から資料までの距離： 約10mm

直径2mmに絞り込んだX線を装置先端から発射し、作品の所定の位置に照射する。X線が当たった箇所では、そこに存在している元素とX線との相互作用が生じ、元素に応じた二次的なX線（蛍光X線）が発生する。これを検出することで、その部分の元素の種類と存在量を非破壊・非接触で求める調査手法である。ただし、この方法はすべての元素を測定できるわけではない。大気中での測定では、大気中に存在している窒素や酸素の影響で、軽元素を検出することができず、原子番号19のK（カリウム）より重い元素でないと信頼に足る分析を行うことは困難である。これより軽い元素、例えばAl（アルミニウム）やSi（珪素）といった無機元素、あるいは有機化合物の主構成元素であるH（水素）、C（炭素）、N（窒素）、O（酸素）などについてはほとんど情報を得ることができない。Kよりも重い元素については、その多くを検出することが可能であるが、元素によって検出感度が異なることに注意する必要がある。例え

ばFe（鉄）やCu（銅）といった遷移金属元素に対しては感度が非常に良く、一般には原子番号が大きくなるほど感度が低下する傾向にある。今回の測定条件の下では、Ag（銀）やSn（錫）などの金属はCuに比べて1/20以下の感度であり、Au（金）やPb（鉛）についても1/10程度の感度しか有していない。といっても、これらの重元素についてさえ、資料中の存在量として1 %前後の含有率を有していれば、全く問題なく検出することが可能である。

また、蛍光X線分析では深さとして数十～数百 μm 程度の厚みの分析が行われる。このため、重ね塗りなどが行われている箇所では、上層および下層の材料の両方が検出され、両者に含まれる元素の種類と量が総合された形として検出されることになる。

3. 吉祥天像の調査結果

蛍光X線分析の測定ポイントを図1に、その測定結果を表1に示す。以下に、この測定結果を参照しながら、吉祥天像に用いられている彩色材料を色別に考察する。

（1）白色について

白色部分からはPbが主成分として検出された。Pbを主成分とする白色顔料は現在数種類の材料が知られているが、もっとも広く知られているのは鉛白（ $2\text{PbCO}_3 \cdot \text{Pb}(\text{OH})_2$ ）である。白色の顔（04,21,65,66,70,71）や手（75,76,97,98,100）、あるいは天衣（101,103）などから大量のPbが検出されている。顔については、上半分のほうが、下半分あるいは首部分に比べて蛍光X線強度がわずかに大きい結果が得られている。

また、Pbは白色でないほとんどの肉身部分からも検出された。その検出強度は測定箇所によって異なるが、Hg強度が大きい箇所（例えば01,06,36など）やCu強度が大きい箇所（18,38,40,78,96など）ではPb検出強度が小さくなる傾向があり、Pb系白色材料は彩色層の下地色料として使用されていることを示唆している。ただし、頭光頂部（02,49,63,64）や頭部の鬘（29）、髻（73）、簪（74）、さらには背後にたなびく裙帯（19,20）からはPbがまったく検出されず、これらの部分にはPb系白色材料の下地は存在していないと判断できる。また、右肘の赤衣部分（07,52,55）からもPbがまったく検出されず、衣の中でこの赤色部分だけPb系白色材料の下地が存在していないことが明らかになった。

白色顔料としては、Pb系の鉛白以外に、Caを主成分とした胡粉（ CaCO_3 ）やAl、Siを主成分とした白土（ $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ）などもよく知られているが、今回の調査では、これらの材料の存在を示す結果は得られなかった。

（2）赤色について

赤色部分からはHgが主成分として検出された箇所が多い。Hgを主成分とする赤色材料としては、辰砂（HgS）が最もよく知られており、絵画への適用例も多数報告されている。前述したように肉身部には彩色下地としてPb系白色材料が存在しており、多くの赤色部分からHgと同時にPbが検出されている。彩色層の赤色材料が厚く存在している箇所ほど、下地層のPb検出量が少なくなり、唇（01）や飾帯（06）では赤色材料が厚く存在していることがわかる。一方、Hgが検出されると同時に、下地層からのPb検出量以上のPbが検出されている箇所も見出された。左襟（09）、花簪（27）、衣文様（80）、裳（108）などである。これらの箇所は薄赤色から淡紅色に近い色調の部分が多く、Hg系赤色材料とPb系白色材料の両方が彩色材料として併用されていると考えられる。Hg系赤色材料とPb系赤色材料の併用も可能性の一つとして考えなければならないが、高精細画像の観察ではこれらの顔料が併用されている箇所は見出されなかった。

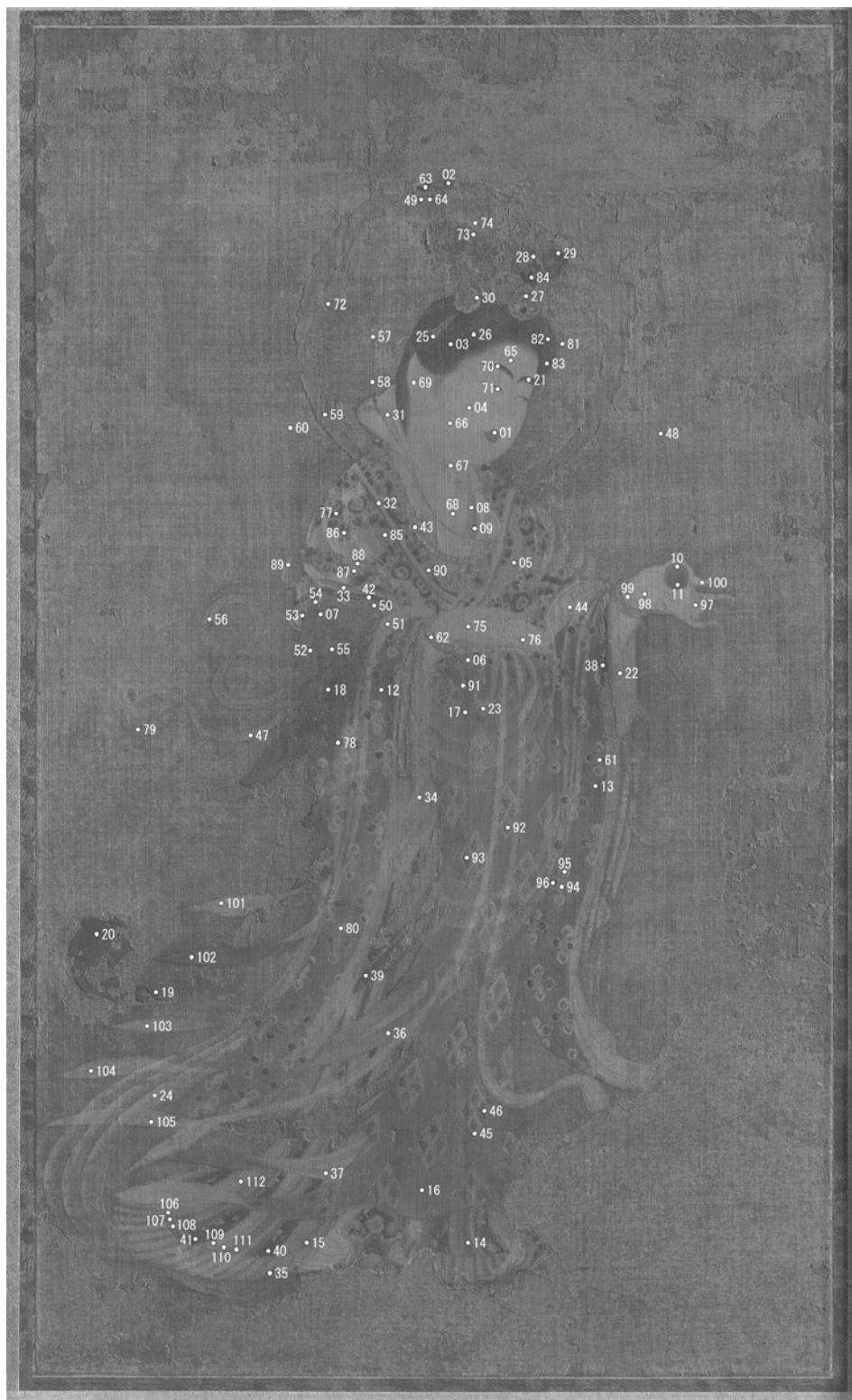


図1 国宝吉祥天像の蛍光X線分析ポイント（画像撮影：城野誠治）

表1 国宝吉祥天像の蛍光X線分析結果

No.	測定箇所	色	蛍光X線強度 (cps)					
			カルシウム	鉄	銅	金	水銀	鉛
			(Ca-K α)	(Fe-K α)	(Cu-K α)	(Au-L β)	(Hg-L β)	(Pb-L β)
01	上唇 中央	赤	0.2	4.3			111.9	30.9
02	頭光 周縁部	黒	7.8	6.7	7.3			
03	髪	黒	1.7					83.8
04	右頬	白	0.1					110.3
05	背子左胸	ピンク	1.1	2.4				104.5
06	飾帯	赤		5.8			112.2	16.5
07	右肘	赤	2.4	6.2			113.1	0.3
08	內衣 左襟	ピンク					91.3	12.1
09	內衣 左襟	ピンク		2.9			14.9	114.3
10	宝珠 上部	赤	1.0				23.1	95.3
11	宝珠 下部	濃赤		47.6	0.2		42.4	80.2
12	右袖	紫	2.4	6.7	136.5			48.5
13	左袖	紫	2.8	6.0	112.3			38.7
14	裳 左足前	紫	2.5	65.2	4.3			82.5
15	裳 右足横	紫		52.3	4.4			127.0
16	前掛	緑	2.4	9.2	281.0			49.1
17	前掛 上部	緑	1.4	10.3	317.2			64.2
18	右袖	濃緑	5.6	7.9	346.3			10.6
19	裙帯	濃緑	9.3	9.9	299.4			
20	裙帯	濃緑	6.8	11.2	511.2			
21	左眉	黒/緑		4.1	101.1			90.2
22	左袖口	白	3.2	3.6	2.0			35.5
23	帯	白	4.2	4.4	4.8			47.8
24	天衣	白	4.0	3.9	2.2			49.7
25	右の簪	ピンク	2.3	1.8				105.5
26	右の簪	緑	2.2	2.1	40.5			82.2
27	中央の花簪 最外部	ピンク		53.5			24.2	125.1
28	頭上の花簪 最外部	紫	2.4		2.5		12.8	69.4
29	髻	黒	7.3	6.8				
30	右の花簪 最外部	紫		18.2			28.2	99.6
31	襟	白	3.3	3.5				45.7
32	背子の切替	紫		4.1	2.2			88.2
33	背子の縁	紫		1.8	2.8		16.9	108.9
34	蔽膝の鰭	紫	2.6	4.3			13.6	82.9
35	下裳	濃紫	3.4	24.7	1.9			60.6
36	蔽膝の鰭 上3段目	赤紫	3.0	7.3	1.5		99.3	21.7
37	蔽膝の鰭 上5段目	紫	0.2					116.9
38	左袖口	深緑	6.4	11.6	646.5			4.3
39	蔽膝の鰭 上2段目	緑	6.9	9.9	169.5			11.9
40	裳 右足横	青	3.3	83.4	520.5			36.0

No.	測定箇所	色	蛍光X線強度(cps)					
			カルシウム	鉄	銅	金	水銀	鉛
			(Ca-K α)	(Fe-K α)	(Cu-K α)	(Au-L β)	(Hg-L β)	(Pb-L β)
41	裳 右足横	緑		6.7	366.6			77.2
42	背子の縁	青	0.3	6.2	215.2			45.4
43	瓔珞	金	2.1	3.3		41.5	30.2	7.8
44	左腕 袖口	白	2.3	2.6				46.9
45	四菱文様 左足前	ピンク	1.8	6.6	141.7			95.2
46	四菱文様 左足前	紫	3.5	4.3	70.7			34.3
47	天衣 右肘下	白	3.0	3.8				64.4
48	地	薄茶	6.7	7.1				
49	頭光 内部	薄茶	7.2	5.4	2.5			
50	右肘上	赤	2.6	3.6			42.9	24.3
51	右袖	白	1.9					39.2
52	右袖	赤	0.3	4.6			51.5	
53	右肘	暗緑/白		2.9	198.2			38.2
54	右袖	赤	2.6	0.2	2.9	8.6	12.2	13.8
55	右袖	赤	1.9	3.9			81.7	
56	天衣	白	3.4					20.6
57	簪	金/赤	5.2	5.3		14.8	18.2	
58	頭光の内部	薄茶	8.9	4.8				
59	頭光	薄茶	3.4	18.4				
60	麻地	薄茶	8.8	5.5				
61	左袖文様	金/紫	2.8	5.8	119.2	9.6		50.1
62	右腕釧	金/赤	2.2	3.7		28.9	39.5	18.7
63	頭光周縁部	黒	7.9	10.6	3.0			
64	頭光内部	薄黒	10.1	5.7	2.0			
65	額	白					9.3	86.4
66	右頬	白		2.3			7.7	86.3
67	顎の下	白		1.8			7.5	60.5
68	胸	白					8.8	83.2
69	右耳	白					10.5	89.0
70	右眉	黒/緑			45.8			91.9
71	右目	黒						81.7
72	補麻	茶	3.3	21.4				
73	髻	薄黒	10.0	7.7				
74	簪	金/赤	3.0	4.9		23.0	22.0	
75	右手	白		0.4			10.5	81.8
76	右手指	白					8.3	88.3
77	右肩文様	茶/青		23.0	511.7			54.3
78	右袖文様	暗青	2.4	8.1	650.7			38.5
79	天衣	白	6.5	4.0				11.4
80	衣文様	赤	3.0	6.2	16.1		14.7	172.1

No.	測定箇所	色	蛍光 X 線強度 (cps)					
			カルシウム	鉄	銅	金	水銀	鉛
			(Ca-K α)	(Fe-K α)	(Cu-K α)	(Au-L β)	(Hg-L β)	(Pb-L β)
81	簪	薄赤	1.7					179.9
82	簪	緑	3.2	7.4	671.4			54.7
83	髪	黒	2.2					67.3
84	花簪	暗緑	3.6	63.6	679.5			25.4
85	右肩衣	薄赤		2.6	4.5		10.2	90.2
86	右肩文様	青	2.0	10.5	301.3			31.5
87	右肩衣	白	1.5	3.0	2.9			100.5
88	右肩衣	白(剥落)	2.9	3.9		8.2	11.7	50.5
89	天衣	白	6.0	3.3				42.0
90	胸前文様	暗赤	2.6	4.2	4.7		13.0	107.3
91	胸前文様(剥落)	金/赤	4.3	6.2	80.3	0.1	2.7	17.6
92	菱形文様	薄赤/緑			25.8			129.2
93	菱形文様	紫/白		5.7	98.3			84.6
94	左袖文様	金/紫	2.5	5.8	95.9	10.9		38.3
95	左袖文様	暗赤			14.0			140.4
96	左袖文様	緑		9.8	651.9			31.9
97	左手中指	白	2.2	1.4			6.4	68.6
98	左手掌	白	2.1	1.2			8.5	89.2
99	左手首	白		2.9			7.5	75.8
100	左手親指	白	1.7	1.6			10.3	100.3
101	天衣	白	4.2	3.8				41.7
102	天衣	緑	6.2	10.2	243.1			27.9
103	天衣	白	3.9	3.8				84.7
104	天衣	白	5.3	3.1			2.2	25.6
105	天衣	薄赤	2.6	1.7			5.3	55.2
106	裳	薄赤					8.5	100.3
107	裳	紫		32.0			7.9	101.6
108	裳	ピンク	1.9	11.8			10.5	113.4
109	裳	白	2.0	2.1			8.7	95.7
110	裳	薄赤	2.4	4.0			9.3	111.2
111	裳	紫	2.0	108.9	2.0		6.7	94.8
112	裳	薄赤	3.0	3.4			8.0	77.0

右袖部分 (07,52,55) だけは、前述したように、Pbがまったく検出されず、Hgだけが検出されている。

赤色部分でHgがまったく検出されず、Pbだけしか検出されない箇所もある。右の簪 (25)、四菱文様 (45)、簪 (81)、左袖文様 (95) などである。これらの箇所に使われている材料としては二通りの可能性が考えられる。一つはPb系白色材料と赤色の有機染料を使っている場合、もう一つは鉛丹のようなPb系赤色 (橙色) 顔料を用いている場合である。四菱文様 (45,46) 部分の高精細画像を詳細に観察すると、橙色の粒子を多数確認することができ、このことからPb系赤色顔料が使用されている可能性が高い。

赤色顔料としては、Hg系、Pb系以外にFeを主成分とするベンガラ (Fe_2O_3) もよく知られている。左手に持つ宝珠の赤色は上側は明るく、下側は暗く描かれている。暗赤色の下側 (11) からはFeが顕著に検出されるのに対し、上側 (10) からはFeはまったく検出されない。下側にのみFe系赤色顔料を用いて暗い色調を描き出している可能性がある。また、後述するように、現在は紫色として認識できる部分でFeが検出されている箇所がいくつかあり、これらの部分についてもFe系赤色顔料が使われている可能性を考える必要がある。

(3) 緑色、青色について

緑色および青色部分から主として検出されている元素はCuである。Cuを主成分とする緑色顔料としては緑青 ($\text{CuCO}_3 \cdot \text{Cu(OH)}_2$) が、また青色顔料としては群青 ($2\text{CuCO}_3 \cdot \text{Cu(OH)}_2$) がたいへんよく知られている。両顔料ともに蛍光X線分析ではCuだけしか検出されないため、この結果だけで青色の群青か緑色の緑青かを判断することは困難である。緑青も群青も粒度を変えることで薄い緑色・青色から濃い色までを作り出すことができる。

右袖 (18)、裳 (41)、花簪 (84) などの緑色部分、あるいは裳 (40)、背子 (42)、右袖文様 (78) などの青色部分から大量のCuが検出されている。緑色や青色が確認できない部分からCuが検出された箇所もある。例えば、黒色に見える眉 (21) からCuが検出され、高精細画像で確認すると、確かに緑色粒子が存在していることを認めることができる。また、裳 (41) や背子 (42) では目視でも緑色や青色を確認することはできるが、高精細画像で確認すると、暗い色の材料の下層に鮮やかな緑色や青色の粒子が存在していることを確認することができる。頭光頂部 (02,49,63,64) からもCuがわずかに検出されており、現在は黒色に見えるが緑色や青色の顔料が存在していた可能性を考える必要がある。裙帯 (20) についてもCuが大量に検出されているが、この部分については高精細画像で見ても粒子が認められず、緑青や群青といった顔料が存在しているとは考えにくい結果が得られた。

(4) 紫色について

紫色については、科学的な調査によっても材料の特定が困難な場合が少なくない。紫色を着色できる無機顔料の存在はほとんど知られておらず、有機染料ないしは有機染料の褪色・変色によって現在の色に至っているとする説も数多く提出されている⁵⁾。

本画像においては紫色といっても何種類かの色調を確認することができ、蛍光X線分析によっても大きく3種類に分類できる結果が得られた。一つはCuが大きく検出される部分であり、右袖 (12)、左袖 (13)、左袖文様 (61)、菱形文様 (93)、左袖文様 (94) などで見られる。Cu以外にも下地に由来すると考えられるPbが同時に検出され、さらに微量のCa、Feも検出される。二つ目はFeが大きく検出される部分で、裳 (14)、裳 (15)、下裳 (35)、裳 (111) などで見られる。これらの部分ではPbと微量のCa、Cuも同時に検出されている箇所が多い。三

つ目はCu, Feがほとんど検出されず, Pbだけが大きく検出される部分である。背子 (32), 蔽膝 (37), 裳 (107) などで見られる。以上のいずれの部分についても、蛍光X線分析だけで使われている材料を特定することはたいへん難しいが、どの部分についても無機顔料だけで紫色が着色されているとは考えにくく、有機染料の併用を考えざるを得ない。一つ目のCuが検出される部分についてはCu系青色材料（群青）に赤色染料を併用したもの、二つ目のFeが検出される部分はFe系赤色材料（ベンガラ）に藍のような青色染料を併用したもの、三つ目のPbだけが検出される部分はPb系白色材料（鉛白）に紫色染料ないしは青・赤染料両方を併用したものを使用材料として推定することができる。赤色、青色、紫色の染料については、その材料を特定することは容易なことではないが、何らかの有機染料を併用することでさまざまな色調の紫色が描き出されていることは間違いないであろう。

（5）黒色について

本画像の中で黒色をはっきり認識できる部分は髪、眉、目などである。これらの部分から検出されているのは主としてPbであり、これは彩色下地および顔の白色を描くために使われているPb系白色材料（鉛白）を検出しているものである。黒色材料としては墨を用いていると考えられ、その主成分のCは今回の調査ではまったく検出することができない。髪 (03,83), 目 (71) からはPbだけしか検出されていないが、左眉 (21), 右眉 (70) からはPbとともにCuが大きく検出されている。高精細画像では両眉に緑色粒子が多数存在していることをはっきり確認することができ、Cu系緑色材料（緑青）が使われていることがわかる。現在は髪や目と同じような黒色に見えるが、当初は明らかに異なる色調をしていたことを裏付ける結果である。

（6）金色について

金色材料は左右の手首の腕釧 (62) や胸元の瓔珞 (43) に特徴的に使われている他、簪 (74) や衣の文様 (61,88,94) などにも用いられている。腕釧 (62) や瓔珞 (43), あるいは簪 (74) から検出されているAu強度は比較的大きい。蛍光X線分析の結果だけで、金箔か金泥かを判断することはできないが、金箔が使われているとするとかなり厚いものと考えなければならず、高精細画像の観察からもこれらの箇所では金泥が使われていると考えられる。また、Auが検出されている箇所から、AgやCuはほとんど検出されておらず、使われている材料は不純物をほとんど含まない純金に近いものであると判断できる。

（7）薄茶色の背景について

現在、背景は全体に薄茶色に近い印象を受けるが、画面右下や右上には大きな欠損があり、図像が描かれている部分とは異なる麻布が用いられていることを確認することができる。他にも、頭光や簪あるいは裾帯、天衣などの部分にも欠損を認めることができる。背景については、蛍光X線分析では1箇所 (48) しか測定しなかったが、検出されたのは微量のCaとFeだけであった。高精細画像で背景を詳細に観察しても、どこにも粒子は認められず、顔料が塗られていた痕跡は見出されない。染料によって麻布が何らかの色に着色されていた可能性は否定できないが、今回の調査ではそれらに関する情報を得ることはできなかった。

4. まとめ

以上、薬師寺所蔵国宝吉祥天像に関する彩色材料について、蛍光X線分析による調査結果を簡単にまとめた。蛍光X線分析の結果だけでは軽元素や有機物を主体とした彩色材料に関する

情報を得ることは難しいが、並行して行われた反射赤外線画像撮影、可視光励起蛍光画像撮影の結果と併せて考察することで、吉祥天像に使われている彩色材料の全体観が明らかになるものと期待される。これらの結果については、近く刊行される予定の調査報告書に掲載される予定である⁶⁾。また、今回の調査結果の一部は、大河原典子氏による吉祥天像の復元模写製作の際に参考とされた⁷⁾。科学的調査結果に裏付けられた復元として、当初の色彩や図像を知る上で重要な研究として位置づけられる。今後も、これらの調査データが絵画史研究に少しでも貢献できれば幸いである。

参考文献

- 1) 早川泰弘, 三浦定俊, 四辻秀紀, 徳川義崇, 名児耶明: 国宝源氏物語絵巻にみられる彩色材料について, 保存科学, 41, 1-14 (2002)
- 2) 早川泰弘, 津田徹英: 蛍光X線分析を用いた平等院鳳凰堂中品中生図の彩色材料調査, 鳳翔学叢, 第2号, 15-24 (2005)
- 3) 早川泰弘: 大倉文化財団普賢菩薩騎象像の表面彩色の蛍光X線分析, MUSEUM, 574, 32-36 (2001)
- 4) 早川泰弘, 三浦定俊, 大森信宏, 青木繁夫, 今泉泰之: 埼玉稲荷山古墳出土金錯銘鉄剣の金象嵌銘文の蛍光X線分析: 保存科学, 42, 1-18 (2003)
- 5) 秋山光和, 柳沢孝, 田口栄一, 田口マミ子: 科学的方法による東洋絵画の材質・技法に関する研究, 「考古学・美術史学の自然科学的研究」日本学術振興会 古文化財編集委員会編, 302-317 (1980)
- 6) 「国宝 吉祥天像」東京文化財研究所, 奈良国立博物館編, 中央公論美術出版(2008)
- 7) 大河原典子「薬師寺吉祥天画像に関する研究—奈良時代の麻布画—」, 東京藝術大学大学院美術研究科博士後期課程論文

キーワード: 吉祥天像 (*Kichijo-ten*) ; 蛍光X線分析 (X-ray fluorescence spectrometry) ; 材質調査 (material analysis) ; その場分析 (*in situ* analysis)

Analysis of the Painting Materials Used in *Kichijo-ten*, a National Treasure

Yasuhiro HAYAKAWA

The *Kichijo-ten*, a National Treasure, collected at the Yakushiji temple in Nara prefecture is a late 8th century painting on hemp. The National Research Institute for Cultural Properties, Tokyo and the Nara National Museum cooperatively investigated painting materials and drawing techniques of the painting. In this paper, some of the analytical results of X-ray fluorescence spectrometry are presented.

The following new information about the painting materials was obtained from the present analysis.

(1) White-colored material

One pigment containing Pb, lead white, was only used for the face, hands and white robe. This pigment was also used for the under-layer of coloring.

(2) Red-colored materials

Pigments containing Hg (cinnabar) and Pb (red lead) were found from the lip and clothes respectively. A pigment containing Fe (red iron oxide) was found from a bead on the hand.

(3) Green-colored material

A pigment containing Cu as major component, malachite green and azurite blue was found respectively.

(4) Purple-colored materials

Three kinds of materials were used for drawing various purple color on the cloth. All materials include a pigment and some organic dyes.

(5) Black-colored material

Black ink was used in many places.

(6) Gold-colored material

Pure gold dust paint was used for the decoration on arms and pectoral.

Objective discussion of the painting materials of the *Kichijo-ten* based on the data presented in this paper is expected.