

収めた顕微鏡写真の番号と対応している。これら第1～6連のガラス小玉は、すべての個体について製作技法の推定と化学組成の分析調査を実施した。

ガラス小玉には、上述の第1～6連以外に、個別に保管されている資料が1209点以上（完形995点、破片214点以上）存在する。これらについては、可能な限り製作技法の推定を実施したうえで、第1～6連に含まれていない種類のガラス小玉を中心に、飛鳥寺塔心礎出土ガラス玉に出現するすべての種類を網羅できるよう注意して選別した81点（完形77点、破片4点）について材質分析を実施した。分析を実施した資料には、個別の分析番号を与えた（その他01～その他35-02、その他57-01、その他57-02、その他58）。

小玉以外のガラス製品としては、勾玉が1点およびトンボ玉が3点（トンボ玉1～3）出土している。勾玉は半分以上が欠損しており、頭部のみ残存している。トンボ玉については、紺色透明を呈する母体に黄緑色半透明および黄色不透明のガラスを象嵌しているもの2点と、紺色透明の母体に半円弧形の金属線が象嵌されているもの1点が出土している。他に、個別保管資料中に紺色透明を呈する無孔の半球状品が2点確認された。

3-2. 調査の方法

顕微鏡観察ならびにX線透過撮影をおこない、製作技法を検討した。X線透過撮影には、マイクロフォーカスX線拡大撮像システム（富士フィルム社製μFX-1000）とイメージングプレート（IP）を用いたCR法と、硬X線透過撮影装置（リガク社製250EGS2）とフィルムを用いた撮影を併用した。CR法の撮影条件は、管電圧40-60kV、管電流40-60μA、露光時間60-120秒の範囲内である。硬X線透過撮影の撮影条件は、管電圧150kV、管電流5mA、露光時間150秒である。

ガラスの成分分析には蛍光X線分析を適用した。測定結果は、測定試料と近似する濃度既知のガラス標準試料（CG-A、SG5、SG7、SGT5、NIST620）を用いて補正したFP法により、検出した元素の酸化物の合計が100%になるように規格化した。測定に用いた装置は、エネルギー分散型蛍光X線分析装置（エダックス社製EAGLEⅢ）である。励起用X線源はMo管球、管電圧は、FP法を用いたガラスの定量分析では20kVに設定し、一部の資料については20keV以上のスペクトルを検出するため、50kVに設定した。管電流は100μA、X線照射径は112μm、計数時間は300秒とし、測定は真空中で実施した。ただし、ガラス玉に象嵌された金属線の材質分析においては、管電圧40kV、管電流30μAに設定した。

ガラス玉に含まれる顔料などの結晶物質の同定には、ラマン分光分析（ラムダビジョン社製microRAM-300Ⅱ）を適用した。励起レーザーには波長532nmのダイオードレーザーを使用した。レーザー強度は26mW、パルス時間は1秒、積算回数は10回であった。

4. 調査結果

4-1. 製作技法

（1）ガラス小玉

ガラス小玉について、完形品および製作技法が検討可能な程度残存している破片資料あわせて約2926点以上について調査した結果、引き伸ばし法（完形1959点、破片210点以上）、変則的な引き伸ばし法（完形535点、破片1点）、鋳型法（完形214点）、連珠法（重層）（破片2点）、二次的な巻き付け法（完形4点、破片1点）の5種類の製作技法が確認できた。内訳の詳細は表1に示す。

引き伸ばし法は、軟化したガラスを引き伸ばしてガラス管を作り、それを分割して小玉を得る方法で、分割後に加熱整形することで丸味を帯びた端面が形成される。孔壁面が平滑で、孔と平行方向に並ぶ気泡列または気泡筋が認められるのが特徴である（写真2上）。本資料中で最も多く、全体（分析対象の1798点



写真2 ガラス小玉の製作技法（上：引き伸ばし法、中：変則的な引き伸ばし法、下：鋳型法）

と観察のみの完形品 918 点の合計 2716 点) のうち 72.1%に達する。

変則的な引き伸ばし法は、孔と平行方向に気泡列が認められる点で引き伸ばし法の一種と考えられるものの、一方の端面の角が丸みをもち、両端面が非対称となる特徴的な形状を呈する(写真2中)。孔が中心ではなくやや偏る場合もある。丸みの強い端面側の開孔部周辺に気泡が集中していることが多い。孔壁面がやや荒れているものも存在することから、芯棒を利用した可能性も考えられるが、現状では具体的な製作技法の復元には至っていない。一部に両端面が非対称とはならないものや、再加熱の程度が低く、管状の形態を残すものなども含むが、孔内がやや荒れることや孔が偏る点などから変則的な引き伸ばし法によるものと判断した。全体の 19.7%を占める。

次に多いのが鋳型法によって製作されたガラス小玉で、全体の 7.9%を占める。鋳型法で製作されたと判断される資料は、孔壁面や開孔部周辺に凹凸が顕著で、不規則な色ムラや溶解しきらなかったガラス片と考えられる突起が認められることが多い(写真2下)。微細なガラス片を鋳型に詰め、鋳型ごと加熱することにより破片を溶着させて小玉を得たと推察される。そのため、これらのガラス小玉は、異なる種類のガラスが混合されている場合があり、化学組成の検討には注意を要する。鋳型法による小玉生産に利用された素材ガラスについては、未加工ガラスの流通が確認されていないため、製品として大量に流通していたガラス小玉の破損品などを利用したと考えられる(大賀 2010b)。

以上3種類の製作技法で全体の 99.7%に達するが、少数の特殊な資料について述べておく。まず、微細破片のなかに連珠法によって製作された重層ガラス玉の破片を2片確認した(その他 12-1、その他 12-2)。同一個体かどうかは明らかでない。重層ガラス玉とは、ガラスとガラスの間に金属箔または空気層を挟むことで視覚的效果を高めるという特殊な技術を用いて製作されたガラス玉である。本資料では金属箔は認められない。金属箔が挟まれない事例も確認されているため、もともと金属箔を伴わないタイプであったのか、埋蔵中に失われてしまったのかは明らかでない。他に、巻き付け法で製作されたと考えらえるガラス小玉および破片が5点認められた。表面が研磨されている。先行研究において、舶載品のガラス小玉(または破損

表1 ガラス小玉の製作技法、基礎ガラス、色調、着色剤の内訳(未分析資料の材質は目視による推定)

小玉 内訳	製作技法	基礎ガラス	色調	着色剤	分析済								未分析		
					第1連 完形	第2連 完形	第3連 完形	第4連 完形	第5連 完形	第6連 完形	個別 完形	個別 破片	個別 完形	個別 破片	
一次的	引き伸ばし	Group PI	紺	コバルト	2	17	2	1	1					36 ^{*1}	+
	引き伸ばし	Group SIIB	淡青	銅	140	131	5	8	5	5				98	
	引き伸ばし	Group SIIB	濃青	銅+マンガン	3	29	331	24	14	8	1			348	180+
	引き伸ばし	Group SIIB	黒①	銅+マンガン		17					1			3	
	引き伸ばし	Group SIIB	黒②	鉄		36		2		1	18			1	+
	引き伸ばし	Group SIIB	黄褐	鉄	1	2		1			1				10+
	引き伸ばし	Group SIIB	紫褐	マンガン	10						4				
	引き伸ばし	Group SIIB	黄	錫酸鉛	99	136	1	15	4	1				186	20+
	引き伸ばし	Group SIIB	黄緑	銅+錫酸鉛	20				2	2	2	1		103	+
	引き伸ばし	Group SIIB	橙	酸化銅コロイド				1		1	15				
	引き伸ばし	Group SIIB	赤褐	金属銅コロイド							2				
	引き伸ばし	Group SIIB	白	不明							10				
	引き伸ばし	Group SIIB	紺	コバルト	1		1								
	引き伸ばし	Group SIIIB	紺	コバルト	16	12	2							8 ^{*2}	+
	引き伸ばし	Group SIV	紺	コバルト	8		1							2 ^{*2}	
二次的	変則的引き伸ばし	Group SIIIC	紺	コバルト	447	8		17	4	5				17	
	変則的引き伸ばし	Group SIIIC	濃緑	銅			1		1	2	22				
	変則的引き伸ばし	Group SIIIC	紫褐	マンガン	4		1								
	変則的引き伸ばし	Group SIIIC	黄	錫酸鉛	3				1		1				
	変則的引き伸ばし	Group SIIIC	黄緑	銅+錫酸鉛							1				
	変則的引き伸ばし	Group SIIIC	淡青	銅		1									
	重層連珠	Group SIII	黄褐	鉄								2			
	鋳型	—	淡青	—	3	3									
	鋳型	—	濃青	—	1		1								
	鋳型	—	黒①	—		13									
	鋳型	—	黒②	—		2	3	1			1		25		
	鋳型	—	紺	—	25	9	31	3	2	1			90		
	二次的巻き付け	—	紺	—	3								1		
	二次的巻き付け	—	濃青	—									1		

*1 AR 法によりカリガラスであることを確認している。

*2 AR 法によりソーダガラスであることを確認しているが、引き伸ばし法による紺色のソーダガラスは Group SIIB、Group SIIIB および Group SIV に存在し、誤認の可能性を残す。

品)などを利用した二次的な生産の可能性が高いと考えられているもの(大賀 2002)に相当すると思われる。

(2) トンボ玉・勾玉ほか

トンボ玉は、斑点紋をもつものが2点（トンボ玉1およびトンボ玉2）と金属線が象嵌されたものが1点（トンボ玉3）出土している（写真3）。トンボ玉1・2は、紺色の母体に黄色不透明と黄緑色半透明のガラス片を象嵌する。母体は5～6片のガラス片を積み上げて融着したと推定される。斑点紋部分は、ガラス小玉もしくはガラス小玉片を象嵌したと考えられる。一方、トンボ玉3の母玉には境界面が認められない。全体に気泡が少なく、製作技法の特定には至らなかった。

トンボ玉3の金属線については、報告書には「銅線」と記載されているが、蛍光X線分析を実施した結果、銀(Ag)と銅(Cu)が強く検出され、測定箇所によってこれらの元素の強度比は著しく異なる。銀製品や銅製品が同時に出土しており、両成分とも他の遺物由来の汚染の可能性があるため、表面分析では材質の特定が困難であった。そこで、X線透過撮影を実施し、厚さ約1mmの各種の金属板とX線の透過率を比較した（写真4）。その結果、金属線は厚さ約1mmの銅板よりもX線の吸収が大きいことが分かった。金属線は幅が1.2mm前後であるが、X線透過画像で見ると板状で、厚みは1mmよりも薄いと考えられる。以上のことから、トンボ玉3に象嵌された金属線は銀製の可能性が高い¹⁾。

勾玉は頭部以外が欠損しており、製作技法の詳細は不明である。気泡は少なく透明感が高い。孔については冷却状態での穿孔ではなく、ガラスを加熱して軟化させた状態で孔を作出している。

紺色透明を呈する無孔の半球状品2点については、ガラス小玉やその破片などを利用した二次的な生産によるものと判断している。

4-2. 基礎ガラスと着色剤

蛍光X線分析の結果に基づき、ガラス玉類の基礎ガラスの種類および着色剤について述べる。種類ごとの平均値は表2に、個々の資料の蛍光X線分析結果は文末の付表に示す。基礎ガラスや着色剤は製作技法との間に一定の相関が認められ、これらを組み合わせて理解することが重要である。そこで、以下では製作技法ごとに述べる。ただし、鋳型法などの二次的な製作技法によるガラス玉は、化学組成による分類対象には含めず、別途考察する。また、報告書には、トンボ玉の母玉部分や多くのガラス小玉が「鉛ガラス」製と報告されているが、本調査の結果、すべてアルカリケイ酸塩ガラスであり、鉛を融剤としたガラスは含まれていないことが明らかとなった²⁾。

(1) 引き伸ばし法によるガラス小玉

① カリガラス

分析資料のうち、カリガラスは23点確認された³⁾。いずれも紺色～紫紺色透明でコバルト着色である（写

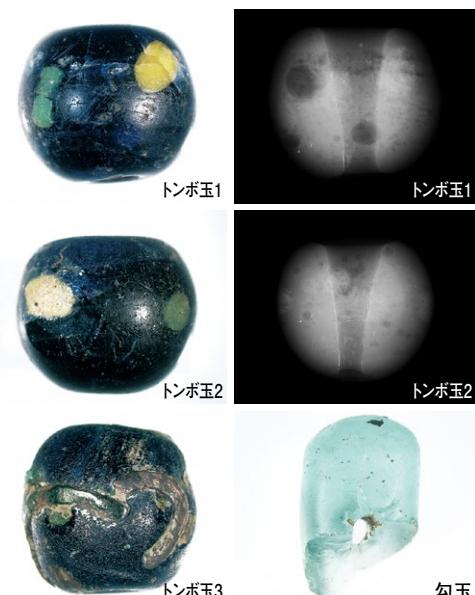


写真3 トンボ玉・勾玉の顕微鏡写真
(倍率不同) およびX線透過画像

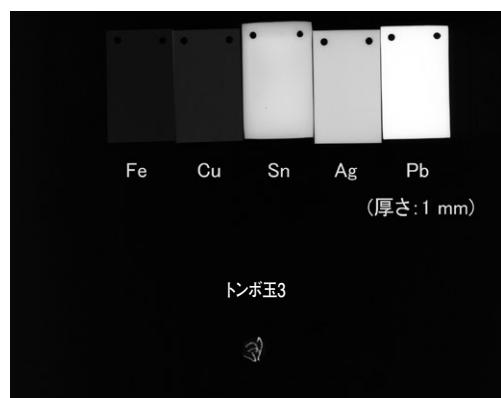


写真4 トンボ玉3と各種金属板の
X線透過画像

真5)。日本列島で出土するカリガラスは、 Al_2O_3 と CaO の含有量から大きく二種類に分類されるが、本資料はいずれも Al_2O_3 含有量が相対的に少なく CaO が多いタイプのカリガラス (Group PI) であった⁴⁾。

②ソーダガラス

Group SII これらは、 MgO - K_2O のグラフ上で MgO が少なく K_2O が多く、かつ、 CaO - Al_2O_3 のグラフ上で比較的 Al_2O_3 の多い ($\geq 4\%$) 特徴を有する。他にも TiO_2 の含有量が他の

グループに比べて相対的に多い。従来、高アルミナタイプのソーダガラスと呼ばれてきたものにおおむね対応する。Group SII は着色剤や流通時期から Group SIIA と Group SIIB に分けられるが、本資料はすべて Group SIIB に帰属する。最も多様な色調が認められる。

淡青色半透明～透明のもの (写真 6 ①) は、 CuO を 0.6% 前後含有し、銅イオンが主な着色因子である。少数の例外を除き、着色剤の銅原料には鉛、錫が伴わない。濃青色透明～半透明のもの (写真 6 ②) は、銅とマンガンによって複合的に着色されている。 MnO と CuO の含有量に相関がみられるため(図 2)、銅とマンガンは別々に添加されたのではなく、同起源の可能性が高い。 PbO はきわめて少ない⁵⁾。飛鳥寺塔心礎出土のガラス玉全体の中でも最も多い⁶⁾。黒色は着色剤の種類によって 2 種類に分かれる。ひとつは、銅とマンガンによる着色 (写真 6 ③) で、わずかに透明感があり、透過光下で濃灰色を呈する (黒①)。上述の濃青色のガラス小玉と着色剤の特徴が類似するが、 MnO の割合が明らかに多く (図 2)、マンガンを別途追加している可能性がある。黒色には他に鉄着色によるものがある (写真 6 ④) (黒②)。落射光下では不透明だが、透過光下で濃褐色を呈する。何らかの還元剤が添加されている可能性が考え

られるが、本調査では特定できなかった⁷⁾。鉄着色の黒色不透明と関連するものとして、鉄によって着色された黄褐色～褐色透明のガラス小玉が 5 点確認された (写真 6 ⑤)⁸⁾。 Fe_2O_3 の含有量が非常に多い (4% 前後)。黄褐色～褐色透明と黒色不透明は同じ鉄着色でも単純な着色成分の濃淡ではなく、それぞれ異なる着色技法であると考えられる。 TiO_2 を 0.7% 前後と比較的多く含む点は注意される。紫褐色透明のものは、 MnO を 0.5% 前後含有するのが特徴である (写真 6 ⑥)。マンガンイオンは、酸化状態でガラスを紫色に着色することから、マンガンが単独で着色剤として利用されたと考えられる。黄色不透明のガラス小玉 (写真 6 ⑦) は、人工の黄色顔料である錫酸鉛 (PbSnO_3) による着色である。Group SIIB の中で二番目に多い。黄緑色半透明のもの (写真 6 ⑧) にも錫酸鉛の黄色不透明粒子が含まれ、黄色不透明と共に着色技法が用いられている。これらは、さらに CuO を 0.8% 前後含有しており、銅イオンと錫酸鉛で複合的に着色されている。橙色不透明のガラス小玉 (写真 6 ⑨) は、銅を多量に含有することと (CuO : 4.62-10.75%)、橙色不透明という特徴的な色調から、酸化銅のコロイド着色によると考えられる。 CuO で 5 - 6% の値となるもの (15 点) と 10% 以上含むもの (2 点) に分かれる。後者は Fe_2O_3 も多い。さらに、前者は PbO を 0.4% 前後、 SnO_2 を



写真 5 Group PI

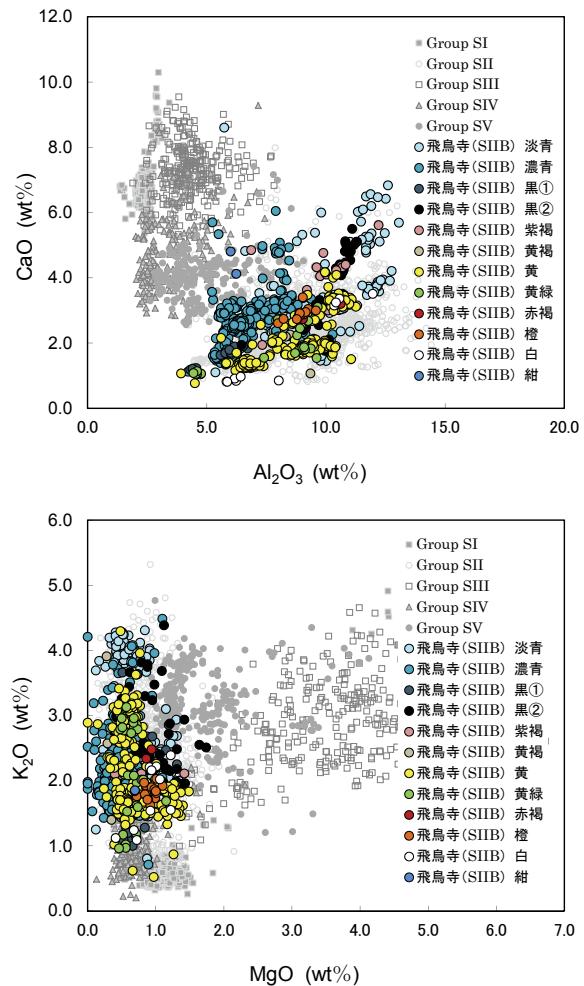


図 1 Group SIIB の色調別の材質的特徴
(上： Al_2O_3 - CaO 、下： MgO - K_2O)

0.2-0.3%伴うのに対し、後者はこれらの成分が極めて少ない一方、 Ni_2O_3 を0.06%、 ZnO を0.13-0.14%含む点で相違が認められる。着色剤としての銅原料の差異を反映していると考えられる。橙色不透明と類似の着色技法のものとして、赤褐色不透明のガラス小玉が2点確認された（写真6⑩）。着色に関与する成分として、 CuO を1%程度含有している。金属銅のコロイドによる着色である⁹⁾。さらに、白色半透明を呈するガラス小玉が10点認められた（写真6⑪）。 Fe_2O_3 を1.8%前後含有するにもかかわらず、鉄イオンによる発色が抑えられている。鉄の発色を抑える何らかの消色技法が適用されていると考えられるが、消色剤として一般的に知られるMnやSbなどの成分は検出されなかった。発色機構の解明は今後の課題である。最後に、紺色透明を呈するガラス小玉が2点検出された（写真6⑫）。コバルト着色だが、 MnO が少なく、 CuO と PbO をわずかに含有する点で、上述のGroup PI（紺色カリガラス）のコバルト原料とは異なる。

以上、Group SIIBのガラス小玉には着色剤の異なる12種類の色調のバリエーションが認められ、既往研究で知られるGroup SIIBの着色剤と色調のパターンがすべて含まれていることが分かった。特に、橙色不透明や白色半透明のガラス小玉は出土事例や流通時期が限定されることから、流入経路が注目される。



写真6 Group SIIB の各種色調（倍率不同）

Group SIII このタイプのソーダガラスは、一般的に MgO および K_2O の含有量が1.5%よりも多く、かつ、低アルミナ($\text{Al}_2\text{O}_3 < 5\%$)高カルシウム($\text{CaO} > 5\%$)であることを特徴とする典型的な植物灰ガラスである¹⁰⁾（図3）。Group SIIIは、流通時期や製作技法などの違いによって、Group SIIIA～Cにわけられるが、通有の引き伸ばし法によるものはGroup SIIIBに該当する（写真7）。いずれもコバルト着色の紺色ガラス小玉である。 MnO 含有量が少なく、 CuO および PbO を0.1%前後含有する点で、上述のGroup SIIBの紺色ガラス小玉とコバルト原料の特徴が共通する。

Group SIV MgO および K_2O の含有量が比較的少ないソーダガラスで、一見Group SI（ナトロンガラス）と類似の化学組成であるが、典型的なGroup SIと比較すると K_2O の含有量が多いことや、 CaO 含有量が少ない傾向が認められる（図3）。コバルト原料の特徴も典型的なGroup SIとは異なり、Group PIのカリガラスと共通する。製作技法も典型的なGroup SIとは異なり、Group PIやGroup SIIなどの南～東南アジア起源のガラスと共通する。したがって、これらは典型的なナトロンガラスとは区別すべき一群であり、筆者らがこれまで便宜的に「ナトロン主体」タイプと呼んできたものである（写真8）。

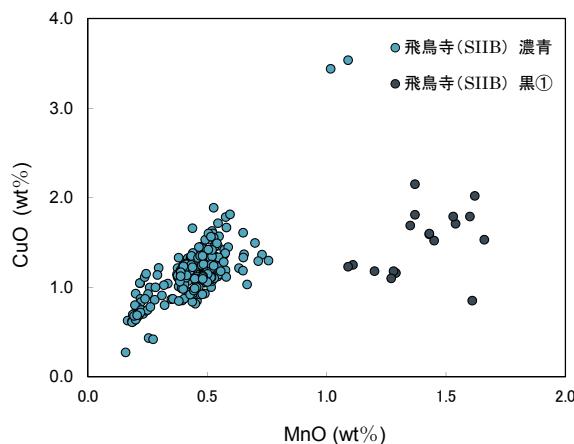


図2 銅とマンガンで着色されたGroup SIIB の濃青色および黒色①の着色成分の特徴



写真7 Group SIIIB



写真8 Group SIV

(2) 変則的な引き伸ばし法によるガラス小玉

Group SIII 変則的な引き伸ばし法によるガラス小玉は、色調にかかわらず、すべて典型的な植物灰ガラスであった¹¹⁾。これらは、通有の引き伸ばし法による Group SIIIB の植物灰ガラスとは製作技法や着色剤、日本列島での出現時期などが異なることから、Group SIIIC と呼んで区別している。化学組成についても、Group SIIIB と比較すると、MgO の値が高く、ほとんどが 4 % を超える。一方、K₂O の含有量は、紺色の個体に限って 4 % 前後と 2.5 % 前後の 2 群に大きく分かれることが分かった（図 3）。一方、紺色以外の色調では K₂O は中間的な値に比較的まとまって分布する。化学組成の凝集性が高い点で、同じ植物灰ガラスの Group SIIIB とは異なる。

色調には紺色透明が最も多いが、通有の引き伸ばし法による Group SIIIB が紺色透明に限られるのに対し、変則的な引き伸ばし法による Group SIIIC は、比較的多彩な色調が認められる。紺色透明以外に、濃緑色透明、紫褐色透明、黄色不透明、黄緑色不透明、淡青色半透明を確認した。

紺色透明を呈するもの（写真 9 ①）はコバルトが主な着色剤であるが、他のコバルト着色のガラスに比べると CoO の濃度がやや低い（0.4 % 前後）。コバルト原料の特徴は、MnO が低く、CuO と PbO を少量含む点で Group SIIIB の紺色ガラス小玉と類似するが、PbO の含有量が Group SIIIB に比べて多い。

紺色透明の次に出土数の多い濃緑色透明のもの（写真 9 ②）は、CuO を 1.6 % 前後含有するのに加えて、PbO を 1 % 前後含有する。酸化鉛が多いと銅イオンは濃緑色を呈する。紫褐色透明のものは、マンガンによる着色である（写真 9 ③）。この色調のものは PbO の含有量が極めて少ないとから、鉛は基礎ガラスに伴うものではなく、それぞれの着色剤に伴う成分と考えられる。黄色不透明のガラス小玉（写真 9 ④）については、以前にも報告したことがある（田村 2011）。これらの黄色不透明ガラス小玉は人工黄色顔料の錫酸鉛で着色されており、同色の Group SIIIB と共に着色技法が適用されている。黄緑色不透明のもの（写真 9 ⑤）は、銅イオンと錫酸鉛で複合的に着色されている。やはり、同色の Group SIIIB と同じ着色技法である。淡青色半透明のもの（写真 9 ⑥）は CuO を 0.91 % 含有しており、CuO が主要な着色要因である。比較的高濃度の PbO（0.32%）と SnO₂（0.46%）を含有し、不透明感に関係する可能性がある。



写真 9 Group SIIIC の各種色調（倍率不同）

(3) 重層ガラス玉

重層ガラス玉の破片 2 点は、いずれも植物灰ガラス製（Group SIII）であった。Group SIII の中でも MgO 含有量が多く、MgO が K₂O よりも多い傾向が確認された。黄褐色透明を呈し（写真 10）、発色に関与する

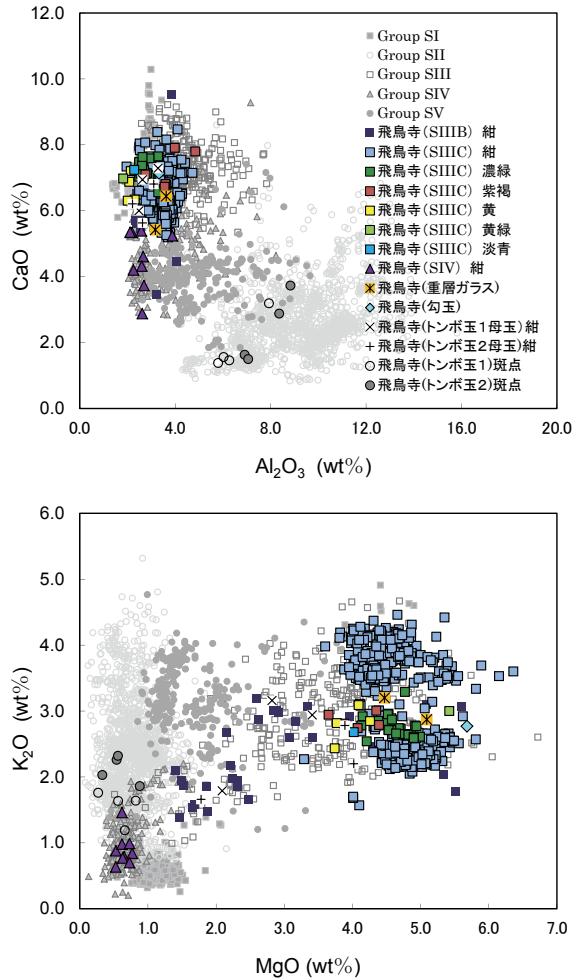


図 3 Group SIIIB、SIIIC、SIV、重層ガラス玉、勾玉、トンボ玉の材質的特徴
(上：Al₂O₃-CaO、下：MgO-K₂O)

成分としては Fe_2O_3 を 4 % 前後含有する。

(4) 鑄型法によるガラス小玉

鑄型法によるガラス小玉は、製品として流通していたガラス小玉（の破損品）を二次的に再生したものと考えられる。ここでは、ガラスの混合に注意しつつ、鑄型法によるガラス小玉の化学組成を検討する。

鑄型法によるガラス玉には、紺色透明のもの（紫色味の強いものを含む）71点、黒色半透明のもの13点、黒色不透明のもの7点、淡青色透明のもの6点、濃青色透明のもの2点に大まかに分類できる。基本的に類似の色調のガラス片が選別されているが、徹底されていないものも多い。

紺色透明のものには、濃青色系統の色むらを含む個体が比較的多く、明らかに異なる色調のガラスが混合されている。このような色むらの特徴をもつガラス小玉は、コバルト着色の Group SIIIB と類似する一方で、着色成分としては Co に加えて Mn や Cu が顕著に検出される。色調と化学組成の特徴から、これらのガラス小玉は、Group SIIIB の紺色ガラスを主体としつつ、Group SIIB の濃青色ガラス小玉片が混合されている可能性が高い。一方で、色むらの少ない個体もあり、これらは化学組成の特徴が Group SIIIB と類似することから、Group SIIIB を主要な素材として再生されたと推測される¹²⁾。鑄型法で製作されたものの中では最も多い。やや紫色味の強い紺色を呈するものには、Group PI のカリガラスを主体として再生されたと考えられるものが1点認められた。一方、Group SIIIB と Group PI が混合された可能性の高いものも1点検出した。

黒色半透明を呈するものは、銅とマンガンで着色された同色の Group SIIB のガラス小玉と化学組成が類似し、これらの破損品を主体として再生したと考えられる。一方、黒色不透明のもの（写真 11）は、 Fe_2O_3 と CuO の含有量がきわめて多く、引き伸ばし法による黒色不透明のガラス小玉には知られていない化学組成である。化学組成の特徴が最も類似するのは、Group SIIB の橙色不透明のガラス小玉である。特に、CuO が 8-10% 含まれるようなガラスは、上述の引き伸ばし法による Group SIIB の橙色不透明のガラス小玉以外には例がない。橙色不透明ガラス小玉は、酸化銅のコロイド着色であり、鑄型法で再生する際に加熱されることで、コロイド構造が失われ、色調が黒色化した可能性を想定することができる。

淡青色透明および濃青色透明のものは、それぞれ引き伸ばし法による Group SIIB の淡青色ガラス小玉および濃青色透明のガラス小玉と類似の化学組成を有する。色むらも比較的少ないとから同色の Group SIIB のガラス片を選択的に利用していると考えられる。

鑄型法によるガラス小玉には異なる種類のガラスが混合されているものと、比較的同質のガラスを利用して再生しているものが認められたが、古墳時代後期末以降の資料にしばしば認められるような鉛ガラスが混合された個体は確認されなかった。このことは、蛍光 X 線分析を実施しなかった個体も含め、X 線透過画像によって確認している。

(5) トンボ玉・勾玉

トンボ玉 1・2 の母玉部分は複数箇所について測定した結果、いずれも植物灰ガラスであった。測定箇所によって化学組成にばらつきが認められたが、MgO と K₂O は、Group SIIIB のばらつきの範囲と重複する。コバルト原料の特徴も Group SIIIB と共通することから、これらのトンボ玉の母玉の製作には、Group SIIIB の紺色ガラス小玉が二次的に利用されたと考えられる。一方、トンボ玉 1・2 の斑点部分は、Group SIIB の黄色不透明および黄緑色半透明ガラス小玉のソーダガラスと類似の化学組成であり、これらのガラス小玉または破片を象嵌した可能性が高い。トンボ玉 3 の母玉については異なる 2 箇所を分析した結果、Group SIIIB と同種のガラスであった。

勾玉の基礎ガラスの種類は典型的な植物灰ガラスで、かつ MgO > K₂O の傾向が顕著であった。色調に関与する成分は少なく、0.66% 含まれる Fe_2O_3 によって淡い青緑色を呈する。製作技法の詳細は不明であった



写真 10 重層ガラス玉



写真 11 鑄型法によるガラス小玉 (Fe_2O_3 および CuO を多量に含む黒色) No.4-060

が、気泡が少なく均質なガラスであることから、異なる種類のガラスの二次的な混合はなされていないと考えられる。

上記以外に、二次的な巻き付け法と考えらえる紺色の小玉3点と濃青色の小玉1点の分析を実施した。化学組成の類似性より、紺色のものはGroup SIIIBもしくはGroup SIIC、濃青色のものはGroup SIIBのガラスが主要な素材となっていると考えられるが、混合の可能性もあるため、これ以上の議論は行わない。

表2 各種ガラス小玉の化学組成の平均と標準偏差

製作技法	基礎ガラス	色調	着色剤		重量濃度(%)														
					Na ₂ O	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	K ₂ O	CaO	TiO ₂	MnO	Fe ₂ O ₃	CoO	CuO	PbO	Rb ₂ O	SrO	ZrO ₂
引き伸ばし	PI	紺	コバルト	平均(n=23) 標準偏差(σ)	0.9 0.4	0.6 0.2	3.1 0.6	80.1 5.2	9.1 4.9	1.9 1.1	0.25 0.06	2.29 0.51	1.38 0.43	0.08 0.03	0.06 0.04	0.03 0.02	0.03 0.01	0.03 0.01	0.09 0.04
引き伸ばし	SIIB	淡青	銅	平均(n=294) 標準偏差(σ)	18.5 2.8	0.7 0.2	9.4 1.6	63.2 3.0	2.8 0.9	0.41 1.2	0.07 0.07	1.32 0.44	0.02 0.01	0.59 0.18	0.05 0.03	0.01 0.01	0.04 0.01	0.11 0.05	
引き伸ばし	SIIB	濃青	銅+マンガン	平均(n=410) 標準偏差(σ)	17.6 3.8	0.5 0.2	6.5 1.0	66.9 4.4	2.0 0.5	2.6 0.7	0.46 0.12	0.44 0.10	1.32 0.28	0.02 0.01	1.16 0.27	0.04 0.19	0.02 0.03	0.03 0.06	0.11 0.05
引き伸ばし	SIIB	黒①	銅+マンガン	平均(n=18) 標準偏差(σ)	9.2 7.1	0.8 0.2	5.6 1.0	73.8 4.4	2.1 0.8	1.6 0.3	0.67 0.08	1.40 0.17	2.64 0.42	0.01 0.01	1.51 0.34	0.34 0.10	0.02 0.01	0.04 0.02	0.17 0.06
引き伸ばし	SIIB	黒②	鉄	平均(n=57) 標準偏差(σ)	12.5 3.1	0.9 0.3	10.2 0.9	67.0 2.9	2.5 0.7	3.7 1.0	0.66 0.17	0.08 0.02	1.92 0.45	0.02 0.03	0.06 0.06	0.03 0.02	0.02 0.01	0.05 0.02	0.16 0.07
引き伸ばし	SIIB	黄褐	鉄	平均(n=5) 標準偏差(σ)	17.2 4.1	0.4 0.1	8.6 0.4	63.5 4.7	2.6 0.8	1.9 0.4	0.74 0.09	0.04 0.02	4.39 0.87	0.04 0.02	0.12 0.11	0.02 0.01	0.02 0.01	0.04 0.02	0.13 0.06
引き伸ばし	SIIB	紫褐	マンガン	平均(n=14) 標準偏差(σ)	19.0 2.3	0.7 0.3	9.8 1.3	61.7 2.2	1.8 0.2	4.1 0.8	0.45 0.08	0.50 0.12	1.54 0.21	0.01 0.01	0.06 0.04	0.02 0.01	0.02 0.01	0.05 0.01	0.10 0.05
引き伸ばし	SIIB	黄	錫酸鉛	平均(n=256) 標準偏差(σ)	17.6 1.4	0.7 0.3	8.3 1.6	65.5 4.7	2.0 0.6	2.0 0.8	0.49 0.14	0.06 0.02	1.32 0.45	0.02 0.01	0.03 0.02	1.17 0.40	0.01 0.01	0.03 0.07	0.09 0.15
引き伸ばし	SIIB	黄緑	銅+錫酸鉛	平均(n=27) 標準偏差(σ)	17.3 1.1	0.7 0.1	8.1 1.8	65.6 2.5	2.2 0.7	1.9 0.6	0.47 0.10	0.07 0.02	1.28 0.34	0.02 0.01	0.81 0.21	0.99 0.28	0.01 0.01	0.03 0.04	0.10 0.10
引き伸ばし	SIIB	橙	酸化銅クロイド	平均(n=17) 標準偏差(σ)	14.4 1.4	0.9 0.1	8.9 0.4	61.2 1.5	1.8 0.1	2.9 0.2	0.46 0.03	0.08 0.02	2.44 0.80	0.06 0.06	5.78 1.79	0.34 0.09	0.01 0.01	0.05 0.01	0.12 0.08
引き伸ばし	SIIB	赤褐	金属銅クロイド	平均(n=2) 標準偏差(σ)	16.1 2.1	0.9 0.0	9.8 0.8	63.5 0.9	2.4 0.1	3.0 0.2	0.65 0.15	0.10 0.01	1.92 0.25	0.04 0.01	0.99 0.01	0.08 0.01	0.03 0.01	0.12 0.01	0.12 0.07
引き伸ばし	SIIB	白	不明	平均(n=30) 標準偏差(σ)	15.2 2.8	0.9 0.2	8.2 2.3	69.2 4.9	1.8 0.5	1.8 1.2	0.61 0.19	0.07 0.01	1.85 0.26	0.03 0.01	0.04 0.02	0.04 0.02	0.02 0.01	0.03 0.02	0.11 0.05
引き伸ばし	SIIB	紺	コバルト	平均(n=2) 標準偏差(σ)	16.9 2.0	0.7 0.0	6.1 0.1	67.5 1.8	1.8 0.0	4.5 0.3	0.35 0.08	0.19 0.06	1.38 0.06	0.09 0.01	0.10 0.01	0.04 0.01	0.01 0.01	0.05 0.00	0.11 0.03
引き伸ばし	SIIB	紺	コバルト	平均(n=30) 標準偏差(σ)	15.7 5.1	3.0 1.3	2.9 0.4	67.3 4.9	2.3 0.6	6.5 1.1	0.21 0.07	0.24 0.13	1.37 0.28	0.09 0.03	0.14 0.05	0.08 0.03	0.01 0.01	0.04 0.01	0.07 0.05
引き伸ばし	SIV	紺	コバルト	平均(n=9) 標準偏差(σ)	15.2 1.3	0.6 0.1	2.6 0.5	72.6 1.5	0.9 0.2	4.6 0.8	0.25 0.08	1.72 0.45	0.94 0.29	0.08 0.02	0.03 0.01	0.01 0.01	0.04 0.01	0.09 0.02	
変則引き伸ばし	SIIC	紺	コバルト	平均(n=481) 標準偏差(σ)	16.8 1.2	4.7 0.4	3.4 0.4	63.5 1.3	3.1 0.7	6.4 0.5	0.12 0.02	0.35 0.04	1.01 0.14	0.04 0.01	0.23 0.09	0.01 0.01	0.03 0.01	0.07 0.04	
変則引き伸ばし	SIIC	濃緑	銅	平均(n=26) 標準偏差(σ)	13.9 0.7	4.6 0.2	2.9 0.5	63.7 0.7	2.7 0.3	7.2 0.3	0.12 0.02	0.35 0.12	0.91 0.07	0.01 0.01	1.65 1.14	0.91 0.19	0.01 0.01	0.03 0.01	0.09 0.06
変則引き伸ばし	SIIC	紫褐	マンガン	平均(n=5) 標準偏差(σ)	13.4 1.4	4.1 0.3	3.7 0.7	65.1 0.4	2.9 0.1	7.3 0.5	0.17 0.04	2.06 0.42	0.98 0.14	0.01 0.00	0.08 0.06	0.05 0.01	0.02 0.01	0.04 0.01	0.11 0.06
変則引き伸ばし	SIIC	黄	錫酸鉛	平均(n=5) 標準偏差(σ)	14.1 0.8	4.2 0.5	2.2 0.1	65.6 1.4	2.8 0.2	6.8 0.4	0.09 0.01	0.05 0.00	0.58 0.46	0.01 0.01	0.05 0.03	2.39 0.16	0.01 0.01	0.04 0.01	0.07 0.03
変則引き伸ばし	SIII C	黄緑色	銅+錫酸鉛	n=1	16.2	5.4	1.8	63.3	3.0	7.0	0.07	0.05	0.46	0.01	0.54	1.36	0.00	0.03	0.00
変則引き伸ばし	SIII C	淡青色	銅	n=1	13.2	4.0	2.3	67.6	2.7	7.2	0.09	0.02	0.68	0.01	0.91	0.32	0.01	0.04	0.06

5. 考察

本調査では、これまで部分的にしか明らかになっていなかった飛鳥寺塔心礎出土のガラス玉の全貌を明らかにすることができた。ここでは、既往研究 (Oga and Tamura 2013) を参考にしつつ、これらのガラス玉の生産地や流入経路について考察してみたい。

Group PIの紺色カリガラス小玉については、製作技法や化学組成が類似するガラス小玉の分布から、現状では南インド産の可能性が最も高いと考えている (Oga and Taumra 2013)。

ソーダガラスについては、Group SIIIB、Group SIIIC、Group SIVのそれぞれで生産地が異なると考えている。Group SIIIBは、高 Al₂O₃ 低 CaO という化学組成の特徴から、製品の分布が濃密でガラス小玉の生産遺跡も発見されている南～東南アジア地域が生産地と考えられる。Group SIVは、コバルト原料がGroup PIと共に、日本列島における流通時期もGroup PIと重なることから、南インドもしくは東南アジアで生産された可能性が高い。

一方、植物灰ガラス (Group SIIIB、Group SIIIC、重層ガラス玉、勾玉の素材) は、メソポタミア地域ないしは中央アジア地域で生産されたガラスの特徴とされる (Lankton et al.2006、Liu et al.2012 など)。この