

第4章 自然科学分析の成果

第1節 松原21号墳出土ガラス小玉の科学的調査

1 はじめに

松原21号墳第3主体部より出土したガラス小玉55点の材質及び製作技法等について、奈良文化財研究所、肥塚隆保氏に指導をいただいた。その際、同研究所において、実体顕微鏡観察、蛍光X線分析、CR (Computed Radiography)法によるX線透過撮影を実施することができた。ここでは各分析結果を掲載するとともに、抽出し得たガラス小玉の特性について若干の考察を試みることにする。

2 調査資料

全体的にガラス小玉の遺存状態は良好であったが、一部を欠損するものが5点、内部まで亀裂が及ぶものが数点見受けられた。ガラス小玉の色調と透明度を目視で観察した結果、青色半透明32点、淡青色透明13点、緑色半透明3点、紺色半透明3点、青色透明3点、淡青色不透明1点、黄色半透明1点に分類された。また外観の形状は全体的に丸みを帯びる丸型と、側面形が筒状を呈す筒型に大別された。こうしたガラス小玉の色調、透明度、形状の特徴を踏まえて、蛍光X線分析では全ての組み合わせのタイプが網羅的に分析できるよう試料を選定した。

3 調査方法

(1) 実体顕微鏡観察

ガラス小玉55点を対象に製作技法や表面の劣化の状態を調査するため、落射光及び透過光による顕微鏡観察を実施した。顕微鏡観察にあたっては、外観的形狀、孔の形状、気泡の配置や形状、小玉表面及び孔壁面の加工痕跡等に着目して調査を行った。

(2) CR法

欠損が孔まで及んでいないガラス小玉50点について、材質の推定と内部構造の把握を目的として実施した。使用した装置は、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 μ FX-1000)、イメージングアナライザー(富士フィルム社製BAS-5000)、使用したイメージングプレートはSR2025である。撮影条件は、電圧20 kV、電流30 μ A、露出時間60秒、実効焦点8 μ mである。なお、CR法による画像は巻末図版(PL.94)に掲載している。

(3) 蛍光X線分析

ガラス小玉の化学成分について検討するため、蛍光X線分析を実施した。分析試料は、青色半透明10点、緑色半透明3点、淡青色透明3点、紺色半透明3点、淡青色不透明1点、青色透明1点、黄色半透明1点の合計22点である。分析条件は、管電圧20 kV、管電流30 μ A、測定時間300秒、ターゲットはモリブデン(Mo)、測定雰囲気は真空である。実施した蛍光X線分析のスペクトル表は、第88図から第95図に掲載している。

4 調査結果

(1) 顕微鏡観察

ガラス小玉の表面観察の結果、外観的形狀は丸型(丸型? 1点も含む)37点、筒型(短筒状1点も含む)18点であった。また、孔に平行して気泡が直線状に配置するもの53点、比較的大きな気泡が含まれかつ気泡が散在するもの1点(J 55)、内部まで亀裂が及び気泡の配置が確認できないもの1点(J 51)が



写真5

確認された。端面の加工は、ガラス管を切断後に端面を研磨して平坦面を形成するもの26点(写真5)、再加熱して端面を丸く整形するもの29点が認められた。孔形は、歪な円形を呈するもの12点、楕円形を呈するもの9点のほかは全て円形であった。孔の内壁は平滑な場合が多く、内壁に凹凸があり荒れが認められるタイプは5点(J 7、J 12、J 13、J 34、J 55)にとどまった。端面を研磨する小玉には、丁寧な研磨により端面に形成される平坦面と側面の境界部分に明瞭な稜を有するもの(写真5)と、研磨は行われるものの端面に形成される平坦面はわずかで、側面との境界がやや不明瞭で甘い稜を形成するにとどまるものが存在する。比較的、筒型の小玉には前者が多く、丸型の小玉には後者が多く見受けられた。

(2) CR法

CR法においても顕微鏡観察結果と共通する特徴が確認された。ガラス小玉の外観が筒型と丸型に分類できる点、端面に明瞭な平坦面を有するものが存在する点、ほとんどの小玉に気泡及び内存在物が孔に対して平行する方向に直線状に引き伸ばされている点、孔の内壁が平滑である点が認められた。その他に両端面の孔径がほぼ一致していること、鉛ガラスに代表されるような高濃度に鉛を含有し、X線の吸収度が大きい材質のものは見受けられないことも確認できた。

(3) 蛍光X線分析

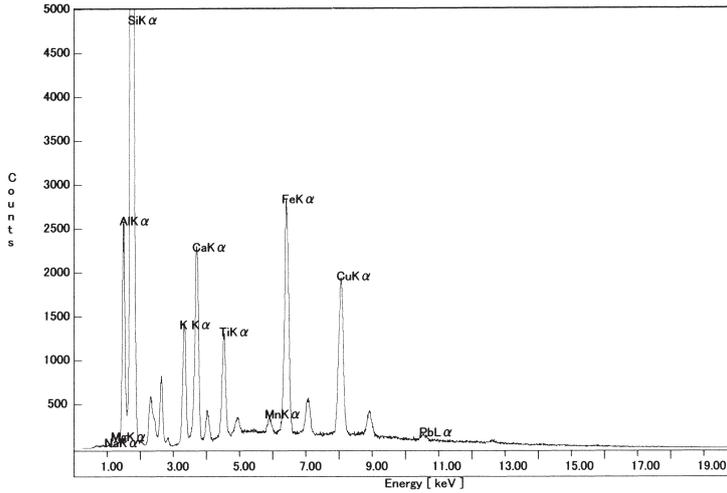
蛍光X線分析の結果、実施した22点全点ソーダ石灰ガラス製であることが判明した。また着色剤として、鉄、銅、鉛、コバルト、マンガンの金属イオンの使用が推定された。さらにJ 55については、特徴的にマンガンを高濃度に含有するという結果が得られた。

4 考察

各分析結果を総合的に検討した結果、21号墳第3主体部出土ガラス小玉の特性は以下のとおりにとめられた。形状は丸型、筒型の2種類に大別され、色調は青色系、緑、黄色で、かつ透明、半透明のガラス両方が利用される。製作技法では引き伸ばし法と鋳型法が認められ、気泡の観察できないJ51、鋳型法が推定されるJ55の2点を除いた53点は全て引き伸ばし法によるものであった。引き伸ばし法は、ガラス管切断後の端面処理に2種類の加工方法が確認できた。端面に研磨を施す方法と、再加熱をして端面を丸める方法である。半透明な小玉には前者が多用され、後者は比較的少ない。一方、透明な小玉は全て後者によって製作される。J55はきれいな丸みを帯び、全体の形状が均整がとれかつ歪みがない点、孔の内壁に荒れが目立つ点、小玉全体に気泡が散在する点から、鋳型法の可能性が推定される。しかし内部まで深い亀裂が及んでいるため、破碎されたガラス片の分布等は確認できなかった。また、蛍光X線分析を実施した22点は全てソーダ石灰ガラス製であった。

このたびガラス小玉について科学的調査を実施する機会を得たが、21号墳第3主体部出土のガラス小玉は古墳時代後期のガラス小玉の特性を良好に反映していると考えられる。しかしながらJ55(紺色半透明・ソーダ石灰ガラス製)については鋳型法が推定されるものの、破碎されたガラス片を確認できていない点、高濃度にマンガンを含有する調査結果が得られた点を踏まえ、製作技法と材質面から追加調査を実施し再評価を行う余地があると思われる。

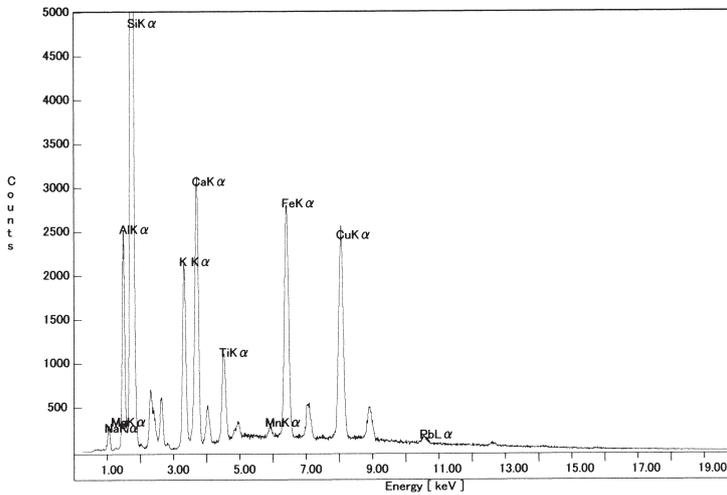
J2



Quantitative Results			
Element	Inte	Weight%	Atomic%
Na2O	0.52	0.88	0.91
MgO	1.14	0.60	0.96
Al2O3	75.51	12.44	7.86
SiO2	705.39	78.79	84.45
K2O	48.24	2.24	1.53
CaO	83.64	2.11	2.42
TiO2	44.52	0.69	0.55
MnO	7.63	0.09	0.08
Fe2O3	117.16	1.11	0.45
CuO	90.69	0.92	0.75
PbO2	3.76	0.13	0.03

Stage X: 69.19 Y: 71.44 Z: 87.14

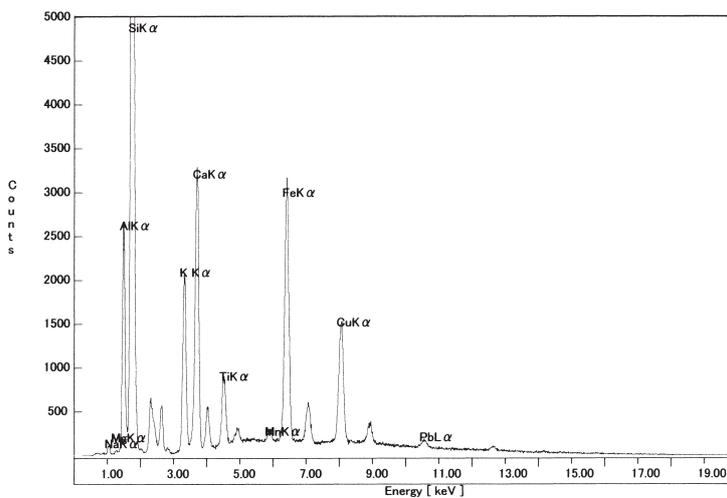
J5



Quantitative Results			
Element	Inte	Weight%	Atomic%
Na2O	7.49	12.20	12.80
MgO	1.10	0.65	1.04
Al2O3	70.99	12.92	8.24
SiO2	543.59	65.13	70.49
K2O	72.54	3.24	2.24
CaO	110.69	2.74	3.18
TiO2	38.57	0.59	0.48
MnO	4.70	0.06	0.05
Fe2O3	117.10	1.10	0.45
CuO	118.57	1.20	0.98
PbO2	5.08	0.18	0.05

Stage X: 48.47 Y: 67.88 Z: 87.35

J6

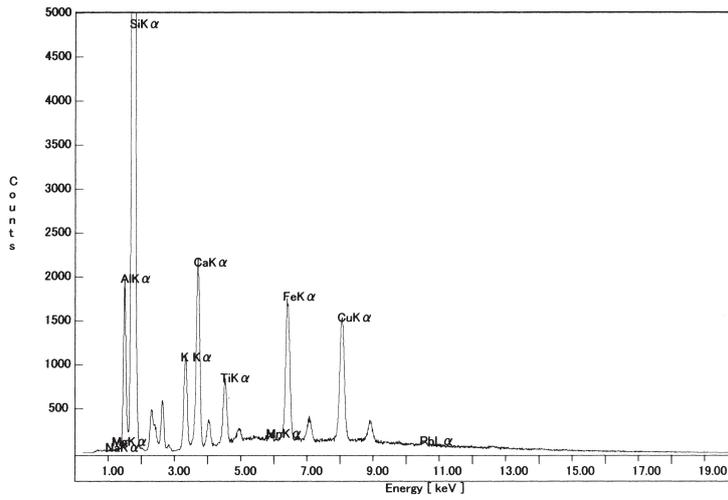


Quantitative Results			
Element	Inte	Weight%	Atomic%
Na2O	2.85	4.87	5.11
MgO	1.12	0.63	1.01
Al2O3	77.57	13.52	8.63
SiO2	610.52	71.83	77.78
K2O	70.90	3.31	2.29
CaO	117.10	3.04	3.53
TiO2	31.47	0.51	0.41
MnO	5.22	0.07	0.06
Fe2O3	129.42	1.28	0.52
CuO	69.95	0.75	0.61
PbO2	5.65	0.20	0.06

Stage X: 63.32 Y: 61.57 Z: 87.37

第88図 ガラス小玉の蛍光X線スペクトル(1)

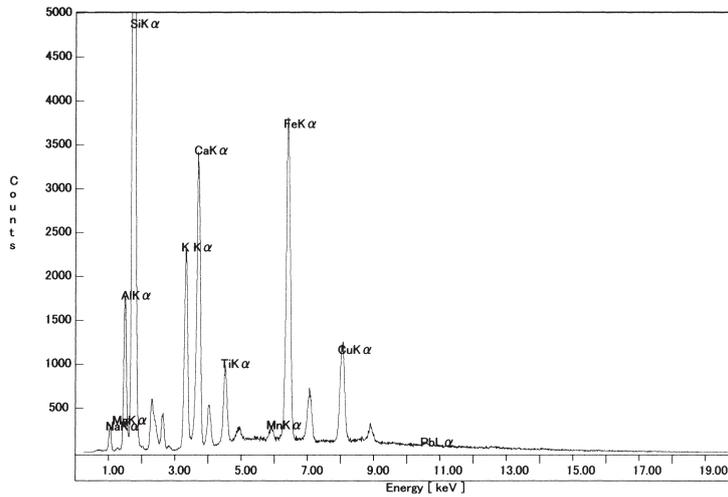
J7



Quantitative Results			
Element	Inte	Weight%	Atomic%
Na2O	0.34	0.64	0.66
MgO	0.66	0.39	0.61
Al2O3	55.44	10.13	6.31
SiO2	676.84	82.37	87.12
K2O	37.97	1.99	1.34
CaO	78.29	2.21	2.50
TiO2	31.06	0.54	0.43
MnO	5.62	0.07	0.07
Fe2O3	72.38	0.76	0.30
CuO	70.87	0.79	0.63
PbO2	2.90	0.11	0.03

Stage X: 28.88 Y: 61.77 Z: 88.23

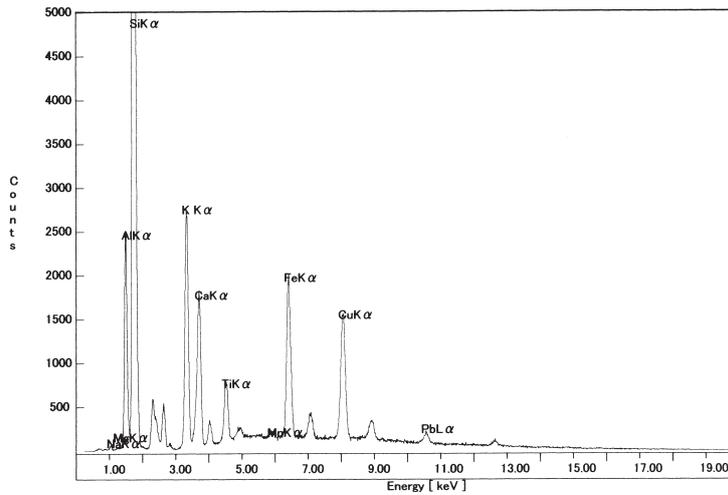
J14



Quantitative Results			
Element	Inte	Weight%	Atomic%
Na2O	7.33	12.74	13.25
MgO	0.87	0.55	0.88
Al2O3	51.94	10.09	6.38
SiO2	534.23	66.64	71.49
K2O	79.58	3.78	2.58
CaO	121.42	3.23	3.72
TiO2	32.81	0.55	0.44
MnO	6.34	0.08	0.07
Fe2O3	161.13	1.65	0.67
CuO	56.07	0.63	0.51
PbO2	1.85	0.07	0.02

Stage X: 61.39 Y: 57.15 Z: 88.18

J15

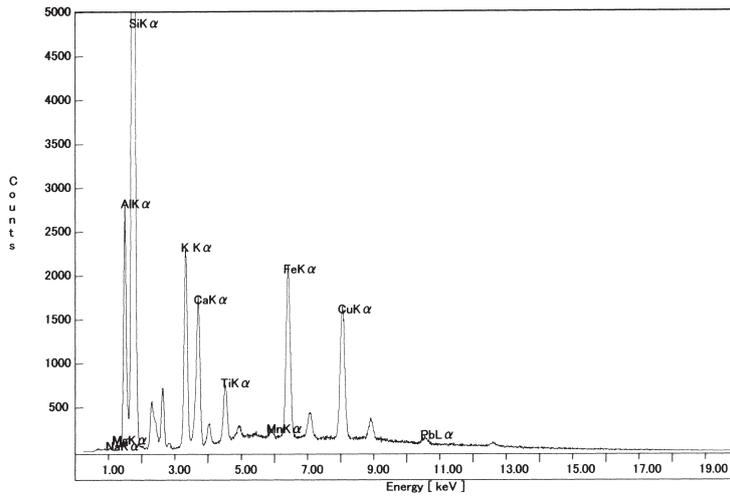


Quantitative Results			
Element	Inte	Weight%	Atomic%
Na2O	1.07	2.00	2.11
MgO	0.59	0.35	0.57
Al2O3	73.38	13.41	8.61
SiO2	600.18	74.69	81.36
K2O	96.29	4.95	3.44
CaO	64.84	1.90	2.22
TiO2	30.94	0.55	0.45
MnO	6.76	0.09	0.09
Fe2O3	82.90	0.91	0.37
CuO	73.01	0.85	0.70
PbO2	7.47	0.29	0.08

Stage X: 57.88 Y: 56.49 Z: 88.30

第89図 ガラス小玉の蛍光X線スペクトル(2)

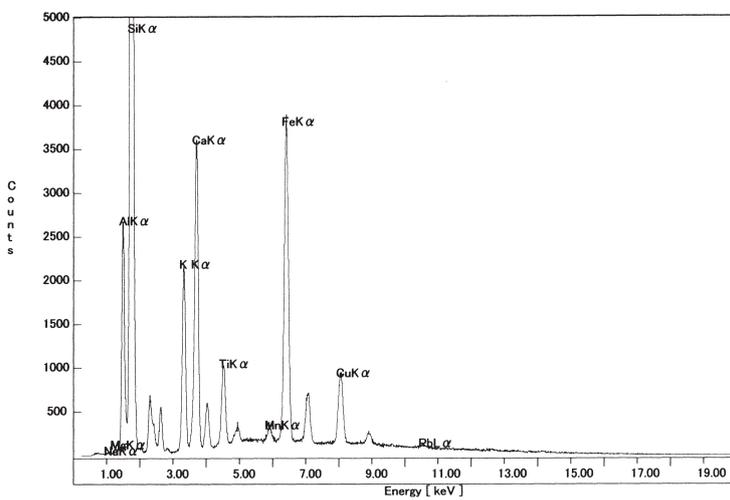
J17



Quantitative Results			
Element	Inte	Weight%	Atomic%
Na2O	0.57	1.01	1.06
MgO	1.35	0.74	1.20
Al2O3	80.68	13.86	8.84
SiO2	648.33	76.43	82.76
K2O	78.88	3.84	2.65
CaO	61.83	1.68	1.95
TiO2	28.64	0.47	0.38
MnO	7.24	0.09	0.08
Fe2O3	88.40	0.89	0.36
CuO	76.39	0.82	0.67
PbO2	4.67	0.17	0.05

Stage X: 73.44 Y: 72.28 Z: 87.14

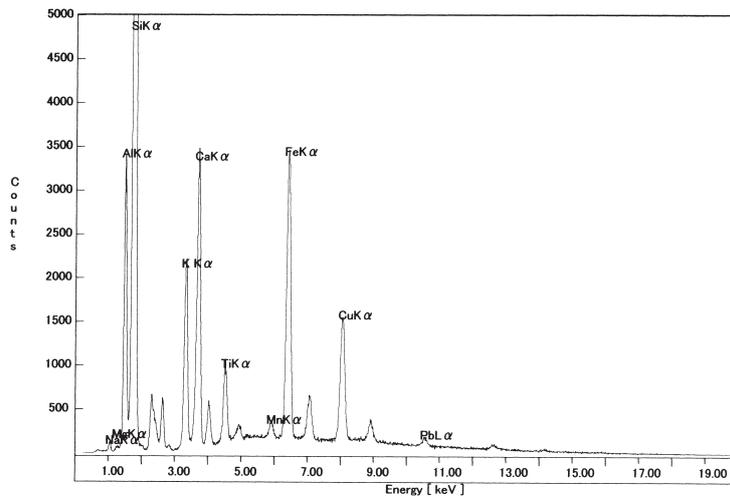
J18



Quantitative Results			
Element	Inte	Weight%	Atomic%
Na2O	0.37	0.66	0.69
MgO	1.89	1.03	1.65
Al2O3	79.42	13.50	8.60
SiO2	646.87	74.95	81.00
K2O	73.52	3.49	2.40
CaO	129.99	3.44	3.98
TiO2	36.74	0.61	0.50
MnO	7.90	0.10	0.09
Fe2O3	162.58	1.67	0.68
CuO	41.91	0.47	0.38
PbO2	2.51	0.09	0.03

Stage X: 49.80 Y: 55.85 Z: 88.17

J19

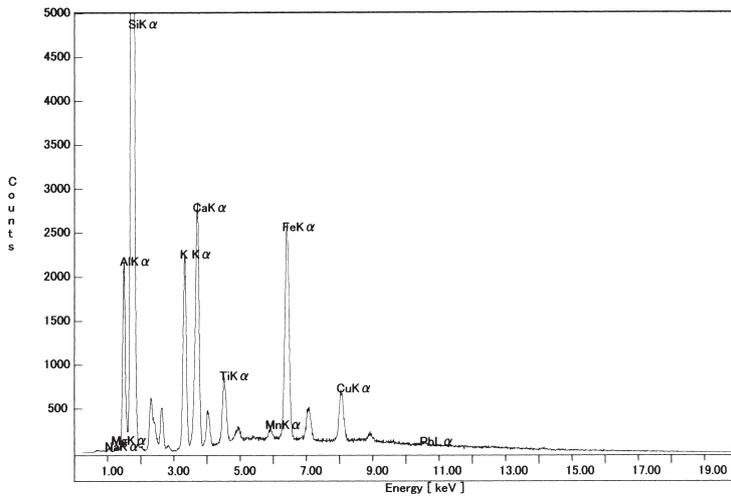


Quantitative Results			
Element	Inte	Weight%	Atomic%
Na2O	3.20	5.02	5.31
MgO	2.23	1.15	1.87
Al2O3	97.64	15.79	10.15
SiO2	621.34	69.03	75.30
K2O	76.21	3.27	2.28
CaO	123.00	2.93	3.42
TiO2	34.55	0.51	0.42
MnO	7.96	0.09	0.08
Fe2O3	145.50	1.32	0.54
CuO	71.33	0.70	0.58
PbO2	5.60	0.18	0.05

Stage X: 46.60 Y: 54.98 Z: 87.39

第90図 ガラス小玉の蛍光X線スペクトル(3)

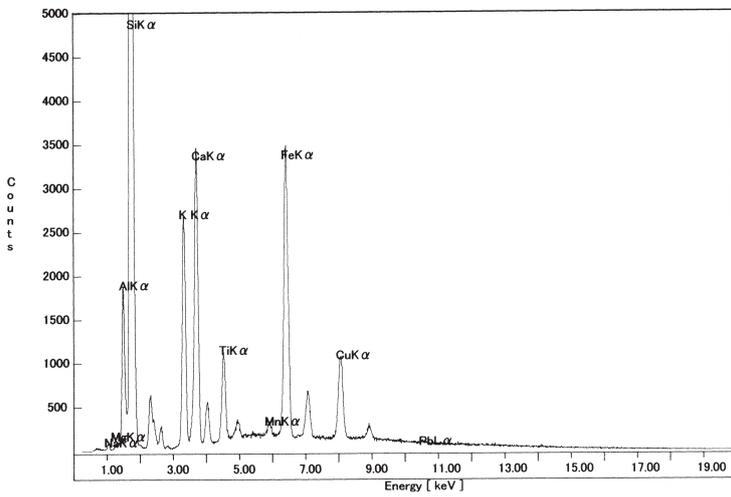
J25



Quantitative Results			
Element	Inte	Weight%	Atomic%
Na2O	1.10	2.03	2.10
MgO	1.13	0.66	1.05
Al2O3	63.08	11.43	7.22
SiO2	634.62	76.99	82.46
K2O	75.32	3.82	2.61
CaO	102.16	2.90	3.33
TiO2	29.24	0.52	0.41
MnO	5.02	0.07	0.06
Fe2O3	108.92	1.18	0.47
CuO	28.29	0.32	0.26
PbO2	2.25	0.08	0.02

Stage X: 52.61 Y: 67.91 Z: 88.84

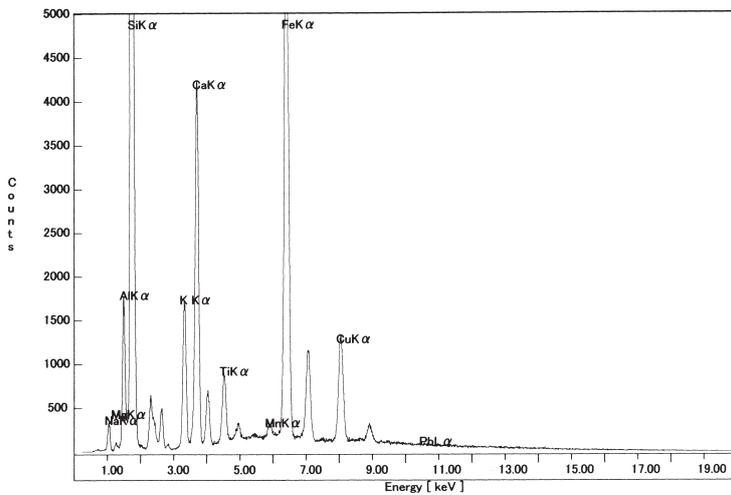
J26



Quantitative Results			
Element	Inte	Weight%	Atomic%
Na2O	1.71	2.75	2.83
MgO	1.35	0.69	1.09
Al2O3	56.37	8.98	5.62
SiO2	749.93	77.87	82.74
K2O	92.39	4.05	2.75
CaO	123.16	3.04	3.46
TiO2	37.27	0.57	0.46
MnO	7.11	0.09	0.08
Fe2O3	148.75	1.41	0.56
CuO	48.20	0.49	0.39
PbO2	1.60	0.05	0.01

Stage X: 52.25 Y: 55.23 Z: 88.46

J32

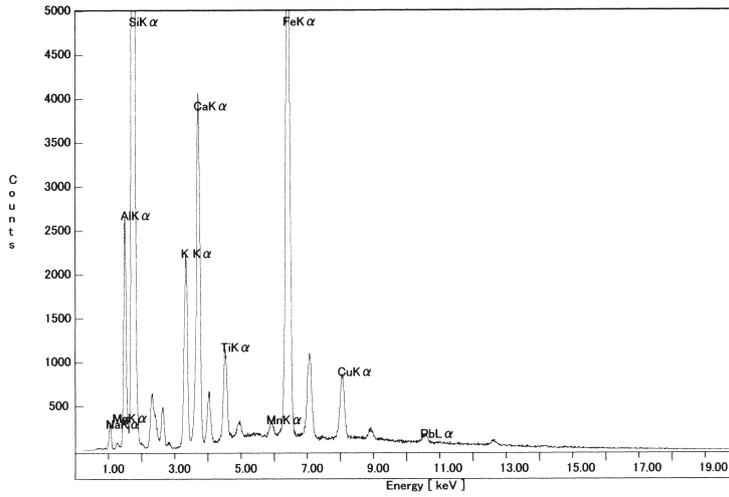


Quantitative Results			
Element	Inte	Weight%	Atomic%
Na2O	8.79	13.50	13.92
MgO	2.71	1.52	2.41
Al2O3	52.52	9.20	5.76
SiO2	596.21	66.19	70.40
K2O	58.82	2.44	1.66
CaO	151.35	3.44	3.91
TiO2	30.49	0.43	0.35
MnO	7.34	0.08	0.07
Fe2O3	289.49	2.57	1.03
CuO	60.42	0.60	0.48
PbO2	0.95	0.03	0.01

Stage X: 43.94 Y: 56.07 Z: 88.69

第91図 ガラス小玉の蛍光X線スペクトル(4)

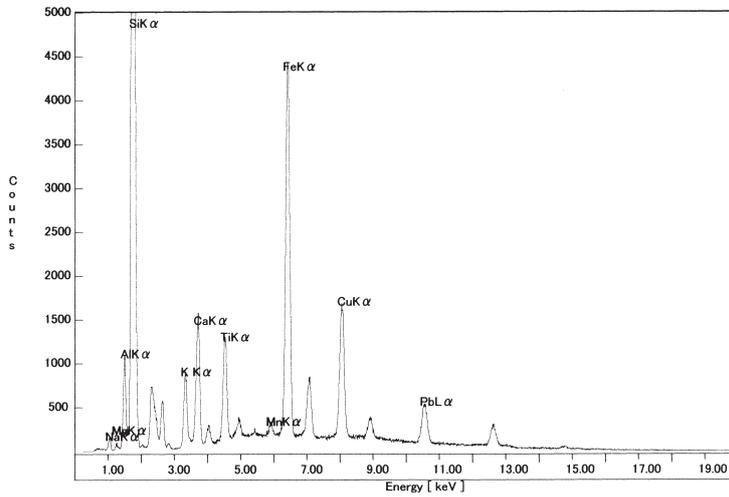
J33



Quantitative Results			
Element	Inte	Weight%	Atomic%
Na2O	7.50	11.92	12.59
MgO	2.00	1.14	1.85
Al2O3	75.14	13.30	8.54
SiO2	540.86	63.07	68.75
K2O	75.59	3.25	2.26
CaO	143.26	3.42	4.00
TiO2	39.80	0.60	0.49
MnO	7.12	0.08	0.08
Fe2O3	280.56	2.63	1.08
CuO	36.16	0.38	0.31
PbO2	5.96	0.21	0.06

Stage X: 45.25 Y: 67.50 Z: 89.07

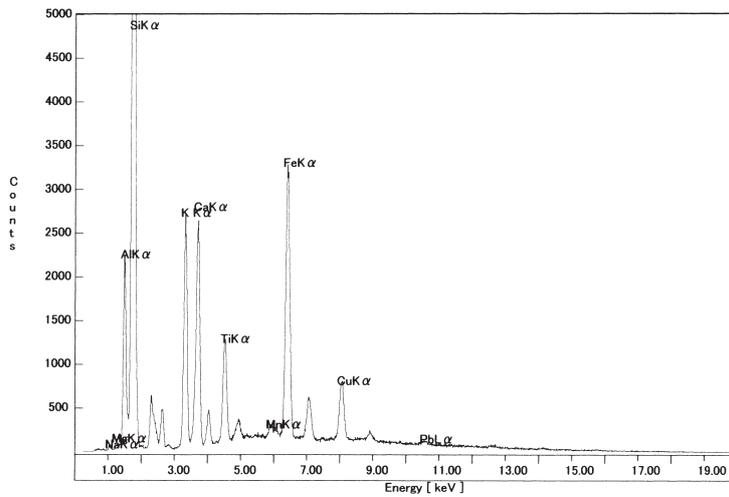
J34



Quantitative Results			
Element	Inte	Weight%	Atomic%
Na2O	3.72	5.97	6.05
MgO	1.57	0.84	1.30
Al2O3	30.72	5.10	3.14
SiO2	782.48	81.36	85.08
K2O	29.55	1.33	0.89
CaO	54.09	1.29	1.45
TiO2	45.73	0.66	0.52
MnO	5.39	0.06	0.05
Fe2O3	190.45	1.70	0.67
CuO	76.25	0.74	0.59
PbO2	28.22	0.95	0.25

Stage X: 42.01 Y: 67.78 Z: 88.62

J35

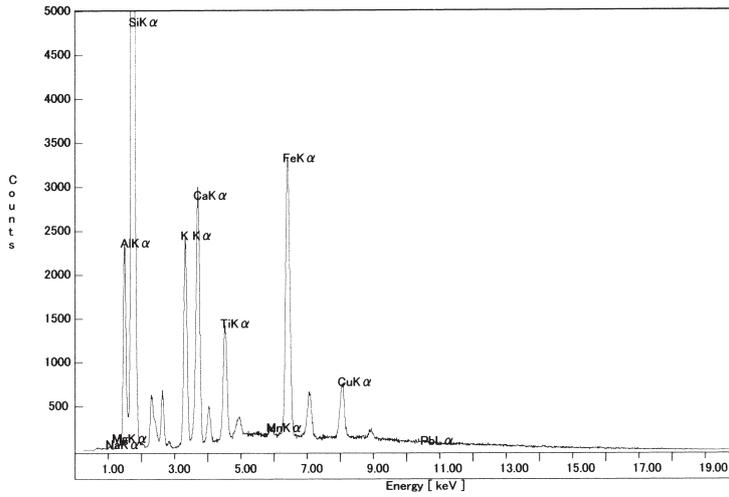


Quantitative Results			
Element	Inte	Weight%	Atomic%
Na2O	0.88	1.56	1.62
MgO	1.53	0.85	1.36
Al2O3	66.16	11.45	7.25
SiO2	661.80	76.60	82.33
K2O	89.15	4.31	2.95
CaO	91.69	2.50	2.88
TiO2	46.31	0.78	0.63
MnO	6.15	0.08	0.07
Fe2O3	135.55	1.41	0.57
CuO	33.60	0.37	0.30
PbO2	2.51	0.09	0.02

Stage X: 66.32 Y: 66.11 Z: 88.61

第92図 ガラス小玉の蛍光X線スペクトル(5)

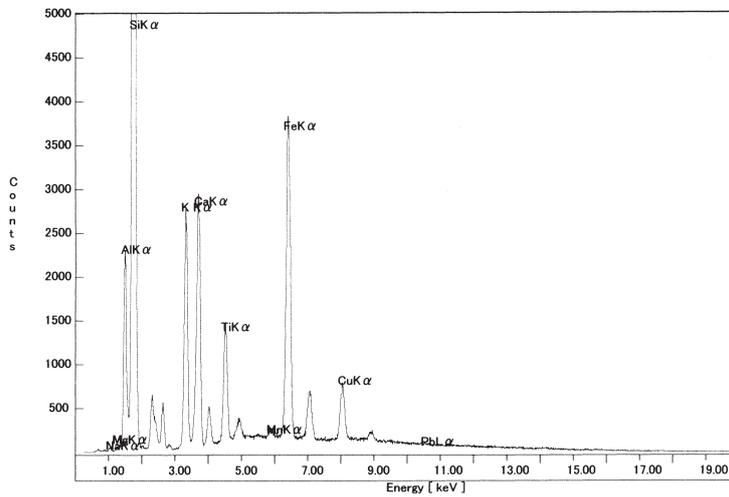
J36



Quantitative Results			
Element	Inte	Weight%	Atomic%
Na2O	0.87	1.48	1.54
MgO	1.49	0.80	1.28
Al2O3	70.31	11.71	7.41
SiO2	687.23	76.81	82.46
K2O	81.39	3.79	2.59
CaO	105.15	2.74	3.15
TiO2	51.55	0.83	0.67
MnO	3.85	0.05	0.04
Fe2O3	141.92	1.42	0.57
CuO	31.25	0.33	0.27
PbO2	1.47	0.05	0.01

Stage X: 64.33 Y: 66.43 Z: 88.83

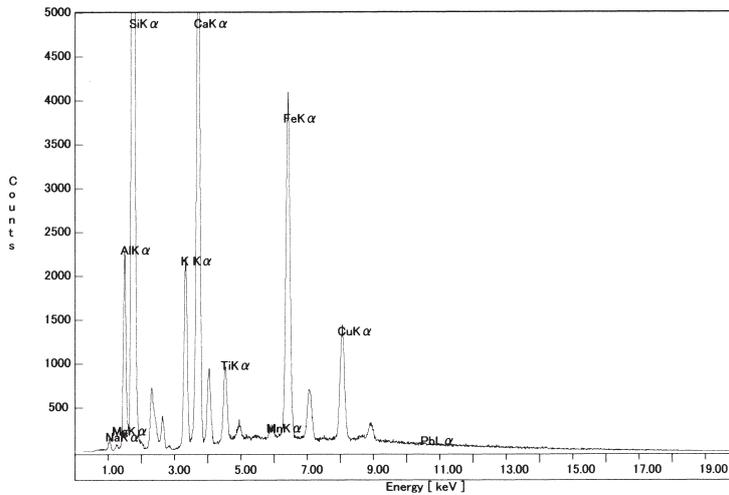
J37



Quantitative Results			
Element	Inte	Weight%	Atomic%
Na2O	0.96	1.60	1.67
MgO	1.23	0.64	1.03
Al2O3	67.56	10.98	6.95
SiO2	711.62	77.08	82.77
K2O	92.26	4.19	2.87
CaO	105.34	2.70	3.10
TiO2	50.43	0.80	0.65
MnO	4.41	0.05	0.05
Fe2O3	160.76	1.58	0.64
CuO	30.45	0.32	0.26
PbO2	1.42	0.05	0.01

Stage X: 61.56 Y: 66.06 Z: 88.39

J39

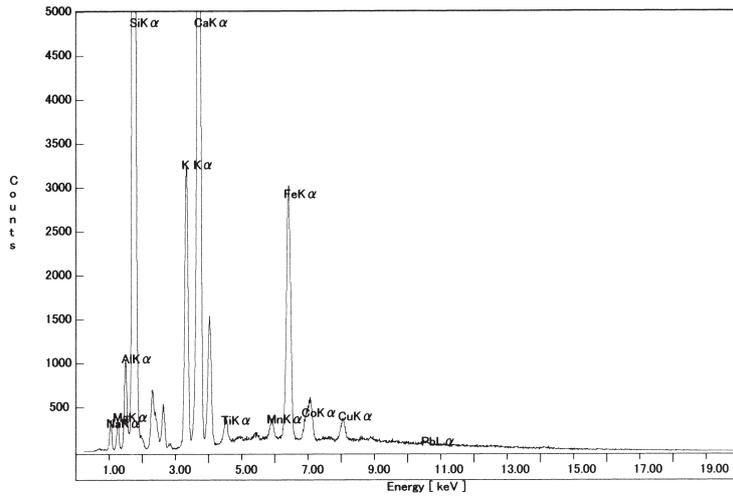


Quantitative Results			
Element	Inte	Weight%	Atomic%
Na2O	3.46	6.22	6.50
MgO	1.62	0.97	1.55
Al2O3	66.48	12.36	7.84
SiO2	550.98	67.74	72.97
K2O	73.23	3.49	2.40
CaO	219.51	5.90	6.81
TiO2	34.07	0.60	0.49
MnO	5.75	0.08	0.07
Fe2O3	169.37	1.85	0.75
CuO	63.18	0.76	0.61
PbO2	0.84	0.03	0.01

Stage X: 57.87 Y: 67.37 Z: 89.40

第93図 ガラス小玉の蛍光X線スペクトル(6)

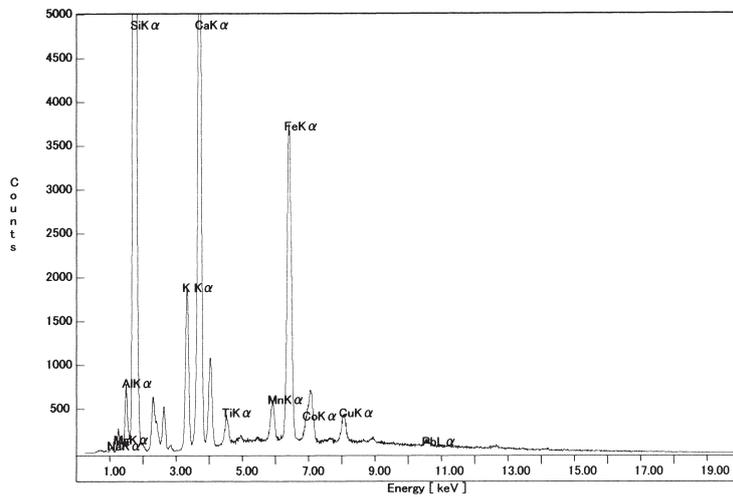
J53



Quantitative Results			
Element	Inte	Weight%	Atomic%
Na2O	8.62	12.39	12.28
MgO	8.42	4.35	6.63
Al2O3	30.53	5.07	3.05
SiO2	632.55	63.88	65.32
K2O	112.58	4.35	2.84
CaO	367.65	8.23	9.02
TiO2	10.13	0.15	0.12
MnO	9.43	0.11	0.10
Fe2O3	126.85	1.19	0.46
CoO	10.85	0.09	0.08
CuO	12.68	0.13	0.10
PbO2	1.78	0.06	0.01

Stage X: 39.37 Y: 67.42 Z: 88.65

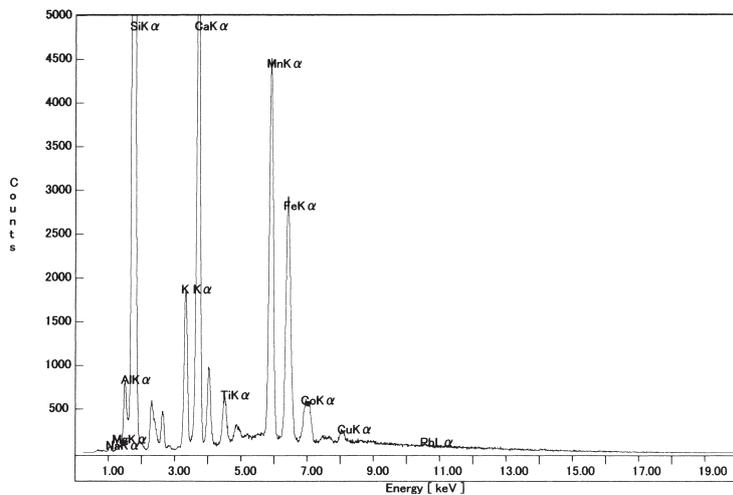
J54



Quantitative Results			
Element	Inte	Weight%	Atomic%
Na2O	1.61	2.85	2.81
MgO	7.03	3.98	6.03
Al2O3	22.13	4.03	2.42
SiO2	685.70	76.79	78.15
K2O	63.70	3.02	1.96
CaO	252.38	6.71	7.31
TiO2	11.98	0.21	0.16
MnO	18.07	0.25	0.21
Fe2O3	158.69	1.73	0.66
CoO	11.65	0.12	0.09
CuO	16.27	0.19	0.15
PbO2	3.29	0.13	0.03

Stage X: 54.92 Y: 56.68 Z: 88.48

J55

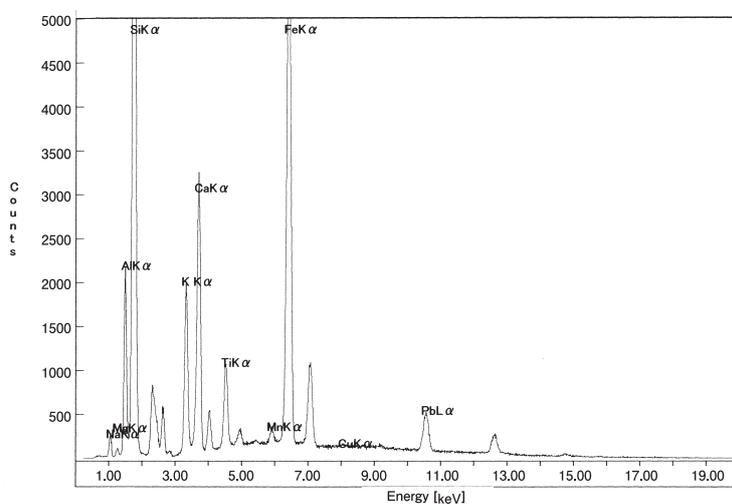


Quantitative Results			
Element	Inte	Weight%	Atomic%
Na2O	1.61	2.89	2.91
MgO	1.79	1.02	1.57
Al2O3	26.33	4.65	2.84
SiO2	710.19	77.99	80.85
K2O	64.49	3.02	2.00
CaO	224.51	5.88	6.53
TiO2	21.30	0.37	0.28
MnO	189.29	2.60	2.28
Fe2O3	113.88	1.24	0.48
CoO	18.06	0.19	0.16
CuO	6.74	0.08	0.07
PbO2	1.72	0.07	0.02

Stage X: 54.91 Y: 56.19 Z: 88.64

第94図 ガラス小玉の蛍光X線スペクトル(7)

J56



Quantitative Results			
Element	Inte	Weight%	Atomic%
Na2O	7.10	11.65	12.22
MgO	3.01	1.77	2.85
Al2O3	59.98	11.04	7.04
SiO2	547.04	65.08	70.39
K2O	66.94	3.05	2.10
CaO	114.89	2.89	3.35
TiO2	40.87	0.64	0.52
MnO	12.15	0.15	0.14
Fe2O3	277.55	2.74	1.11
CuO	1.50	0.02	0.01
PbO2	26.64	0.98	0.27

Stage X: 55.35 Y: 66.75 Z: 88.10

第95図 ガラス小玉の蛍光X線スペクトル(8)