初期および中期ラスター彩陶器白色釉薬の化学組成

新免　歳靖
総合研究大学院大学　文化科学研究科　日本歴史研究専攻

岡野　智彦
中近東文化センター附属博物館

二宮　修治
東京学芸大学　文化財科学研究室

10世紀から13世紀にかけてイラク･エジプト･イランで製作されたと推定されるラスター彩陶器片40点を対象とし、白色釉薬の化学組成を比較するために、エネルギー分散型蛍光Ｘ線分析を行った。その結果、すべての資料には錫鉛釉薬が用いられていたことがわかった。また、クラスター分析の結果、釉薬の化学組成に応じて大きく4群に分類された。この分類は胎土分析の分類結果とほぼ同一の結果となった。また、釉薬の化学組成については、産地の移動に伴ってPbOの濃度に変動が認められ、低濃度から高濃度へ変化し、再び減少に向かう変遷が明らかとなった。これらの結果から釉薬の化学組成によってもラスター彩陶器の生産地推定が可能であることが明らかとなった。

キーワード：ラスター彩陶器、白色釉薬、イラク、エジプト、イラン、
エネルギー分散型蛍光X線分析、クラスター分析、化学組成

1. はじめに
2. 分析資料
3. 分析方法
　3.1　蛍光Ｘ線分析
　3.2　クラスター分析
4. 結果および考察
　4.1　クラスター分析による分類
　4.2　化学組成の検討
5. おわりに

1. はじめに

筆者らは、イラン、イラク、エジプトなどの中近東地域で製作された陶磁器を対象とし、製作技術の年代的な変遷や地域的な特徴の把握を目的として科学分析を実施してきた［二宮ら2007、新免ら2007・2008、岡野ら2009など］。本誌に掲載した前報では、初期および中期ラスター彩陶器についてICP発光分光分析による胎土分析を行い、胎土の化学組成の変遷を明らかにした［新免ら2010］。今回は、ラスター彩陶器研究の第二報として釉薬に焦点をあて、科学分析を実施した。以下に報告を行う。

釉薬は、ケイ石・ケイ砂、粘土、植物灰、鉛などの金属類といった原料を一定の配合のもとに混合し、焼成することで生じるガラスの層である。やきものの素地を覆い、耐久性や清浄性をもたらすとともに、原料の種類や焼成方法によって釉薬の色調や質感、透明性などの外観を自在に変えることができる。逆に言うと、釉薬の材質を調査することによって、原料の種類やその調合、着色法、装飾法、焼成技術など様々な製作技術に関する多くの情報を得ることが可能となるのである。そこで、本研究では複数の生産地で焼成されたラスター彩陶器の白色釉薬について、蛍光X線分析による材質分析を行い、釉薬の化学組成から産地間における技術的な差異や年代的な変遷を明らかにすることを目的とした。

ラスター彩陶器は、白色釉薬の上にラスター彩と呼ばれる金属光沢の文様装飾が施された、イスラーム陶器を代表する高級陶器である。王侯貴族の庇護の元に専門の陶工集団によって独占的に扱われ、9世紀にイラクで誕生して以降、10世紀にエジプト、12世紀にシリアやイランと、時と場所を変えながら生産されたと考えられている［Watson 2006など］。ラスター彩陶器には多くの研究成果があり、その全てに言及することはできないが、その中でもMasonらによる錫白釉薬の研究は代表的なものである［Masonら1997、Mason 2004］。Masonらは、9～12世紀のラスター彩陶器などのイスラーム陶器に使用された錫白釉薬の分析を行い、含有する鉛や錫の濃度の変遷を明らかとした。ここで対象とする資料とほぼ同時期の資料を分析しており、筆者らが本研究でラスター彩陶器の釉薬の化学組成を明らかにすること自体には必ずしも新規性はない。しかし、一つの陶器資料において胎土と釉薬、両者の化学組成を明らかにしている事例は多くはない。そのため、本報では釉薬の化学組成についてクラスター分析による分類を行い、その結果を前回の胎土の分類結果と比較検討する。

2. 分析資料

分析資料は、中近東文化センターが所蔵するラスター彩陶器である（表1）。前報［新免ら2010］で使用した資料と同一であるため詳細は省略する。分析資料はA～Dの4グループ、各10点の合計40点である。A・Bグループは、エジプトのフスタート遺跡から出土した単色ラスター彩陶器で、10世紀のイラク産と推定される（図1①・②）。AグループがBグループよりも古い資料と位置づけられている。Cグループもフスタート遺跡から出土した単色ラスター彩陶器（ファーティマ朝ラスター彩陶器）である（図1③）。10世紀から12世紀前半のエジプト産と考えられる。Dグループは、イランのサーヴェ遺跡から出土した単色ラスター彩陶器である（図1④）。12世紀から13世紀のイラン産と考えられる。各資料の分析番号は、前報［新免ら2010］の番号を踏襲する。分析資料の大半は不透明な白色釉薬（乳白色）であるが、C008は乳紫色、C009とC010は乳青色釉薬の資料である。

3. 分析方法

3.1 蛍光X線分析

分析装置には、東京学芸大学文化財科学研究室設置の微小部エネルギー分散型蛍光X線分析装置SEA5120S（SII・ナノテクノロジー社製）を

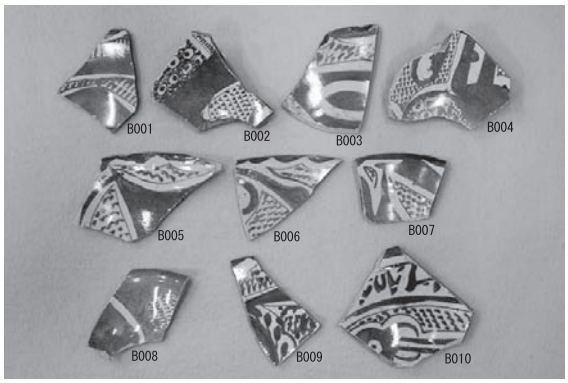
表 1　分析資料一覧

No.	出土遺跡	生産国	年代	釉薬	器種
A001	フスタート（エジプト）	イラク？	10世紀	乳白色	鉢
A002	フスタート（エジプト）	イラク？	10世紀	乳白色	鉢
A003	フスタート（エジプト）	イラク？	10世紀	乳白色	鉢
A004	フスタート（エジプト）	イラク？	10世紀	乳白色	鉢
A005	フスタート（エジプト）	イラク？	10世紀	乳白色	鉢
A006	フスタート（エジプト）	イラク？	10世紀	乳白色	鉢
A007	フスタート（エジプト）	イラク？	10世紀	乳白色	盤
A008	フスタート（エジプト）	イラク？	10世紀	乳白色	鉢
A009	フスタート（エジプト）	イラク？	10世紀	乳白色	鉢
A010	フスタート（エジプト）	イラク？	10世紀	乳白色	鉢
B001	フスタート（エジプト）	イラク？	10世紀	乳白色	鉢
B002	フスタート（エジプト）	イラク？	10世紀	乳白色	鉢
B003	フスタート（エジプト）	イラク？	10世紀	乳白色	鉢
B004	フスタート（エジプト）	イラク？	10世紀	乳白色	鉢
B005	フスタート（エジプト）	イラク？	10世紀	乳白色	鉢
B006	フスタート（エジプト）	イラク？	10世紀	乳白色	鉢
B007	フスタート（エジプト）	イラク？	10世紀	乳白色	鉢
B008	フスタート（エジプト）	イラク？	10世紀	乳白色	鉢
B009	フスタート（エジプト）	イラク？	10世紀	乳白色	鉢
B010	フスタート（エジプト）	イラク？	10世紀	乳白色	鉢
C001	フスタート（エジプト）	エジプト（ファーティマ朝）	10 ～ 12世紀前半	乳白色	鉢
C002	フスタート（エジプト）	エジプト（ファーティマ朝）	10 ～ 12世紀前半	乳白色	鉢
C003	フスタート（エジプト）	エジプト（ファーティマ朝）	10 ～ 12世紀前半	乳白色	鉢
C004	フスタート（エジプト）	エジプト（ファーティマ朝）	10 ～ 12世紀前半	乳白色	鉢
C005	フスタート（エジプト）	エジプト（ファーティマ朝）	10 ～ 12世紀前半	乳白色	鉢
C006	フスタート（エジプト）	エジプト（ファーティマ朝）	10 ～ 12世紀前半	乳白色	鉢
C007	フスタート（エジプト）	エジプト（ファーティマ朝）	10 ～ 12世紀前半	乳白色	鉢
C008	フスタート（エジプト）	エジプト（ファーティマ朝）	10 ～ 12世紀前半	乳紫色	鉢
C009	フスタート（エジプト）	エジプト（ファーティマ朝）	10 ～ 12世紀前半	乳青色	壷
C010	フスタート（エジプト）	エジプト（ファーティマ朝）	10 ～ 12世紀前半	乳青色	鉢
D001	サーヴェ（イラン）	イラン	12 ～ 13世紀	乳白色	鉢
D002	サーヴェ（イラン）	イラン	12 ～ 13世紀	乳白色	鉢
D003	サーヴェ（イラン）	イラン	12 ～ 13世紀	乳白色	鉢
D004	サーヴェ（イラン）	イラン	12 ～ 13世紀	乳白色	壷
D005	サーヴェ（イラン）	イラン	12 ～ 13世紀	乳白色	鉢
D006	サーヴェ（イラン）	イラン	12 ～ 13世紀	乳白色	壷
D007	サーヴェ（イラン）	イラン	12 ～ 13世紀	乳白色	鉢
D008	サーヴェ（イラン）	イラン	12 ～ 13世紀	乳白色	壷
D009	サーヴェ（イラン）	イラン	12 ～ 13世紀	乳白色	鉢
D010	サーヴェ（イラン）	イラン	12 ～ 13世紀	乳白色	鉢

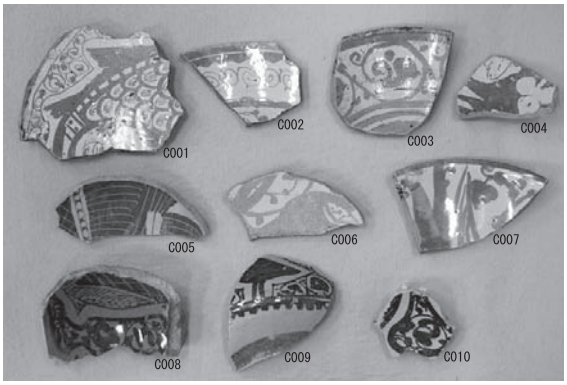
使用した。蛍光X線分析法は、分析資料にX線を照射し、発生する特性X線（蛍光X線）のエネルギー強度を測定して、資料中の元素の種類や濃度を調べる分析法である。

今回は、異なる励起電圧下で2回測定し、その結果を合成するマルチ分析モードで行った。分析条件は、管電圧：15kV・45kV、管電流：124 ～ 248μA（15kV）・8 ～ 24μA（45kV）、コリメーター径：1.8mmϕ、試料室雰囲気：真空、測定時間：180秒×2回である。測定元素は、Si（ケイ素）・Ti（チタン）・Al（アルミニウム）・Fe（鉄）・Mg（マグネシウム）・Ca（カルシウム）・Na（ナトリウム）・K（カリウム）・Pb（鉛）・Sn（スズ）・Cu（銅）・Mn（マンガン）・Zn（亜鉛）・Rb（ル

①Aグループ（イラク産？）



②Bグループ（イラク産？）



③Cグループ（エジプト産）

④Dグループ（イラン産）

図1　分析資料写真

ビジウム）・Sr（ストロンチウム）の15元素で、各元素の酸化物の合計が100％となるように規格化した。定量分析は、標準試料を用いないファンダメンタルパラメーター（FP）法によって行い、同一箇所を3回測定した値の平均値を用いた[1)]。そのため、本方法で求めた定量値は、各元素のX線強度をもとに本装置内蔵のデータ解析プログラムによって理論値から計算された半定量分析結果であることに注意が必要である。また、陶磁器は土中で水分などの影響によってアルカリ元素などが釉薬表面から抜け出すことが知られている［岡野ら2009］。資料本来の化学組成を求めるために、ミニターによって表面風化層を除去、新鮮面を検出し、測定箇所（5mm^{2}程度）とした。

3.2　クラスター分析

資料の化学組成の特徴を明らかにするために、求めた元素存在量によるクラスター分析を実施した。クラスター分析は、異なる性質のものが混合している集団（対象）中から、似たものを集めてグループ（クラスター）を作り、対象を分類する方法の総称である。

クラスター分析にはSPSS社製多変量解析ソフトSPSS14.0Jを使用した。距離尺度には標準化ユークリッド平方距離、分類手法にはWard法を選択した。クラスター分析の変数には大半の資料から検出されなかったZnを除く14元素を用いた。各変数はZ得点で標準化を行うことによって、存在量が異なる元素を一緒に論じても統計処理上の問題は生じない。

表2　蛍光X線分析による分析結果

No.	Oxide concentrations (%)														
	SiO_2	TiO_2	Al_2O_3	FeO	MgO	CaO	Na_2O	K_2O	PbO	SnO_2	MnO	CuO	ZnO	Rb_2O	SrO
A001	69.3	0.06	3.8	0.7	2.8	2.8	4.7	2.8	7.5	5.3	0.16	0.03	nd	0.03	0.05
A002	67.5	0.04	3.6	0.7	2.7	2.6	5.5	2.5	8.5	6.2	0.11	0.03	nd	0.03	0.05
A003	64.7	0.04	3.4	0.7	3.9	2.5	6.7	2.5	9.5	5.8	0.06	0.05	nd	0.03	0.07
A004	67.3	0.01	2.9	0.6	3.6	2.2	9.1	2.6	6.2	5.4	0.16	0.02	nd	0.02	0.05
A005	68.8	0.01	3.4	0.7	2.6	1.9	4.7	1.9	8.5	7.2	0.13	0.04	nd	0.03	0.05
A006	64.1	0.04	3.4	0.9	2.9	2.6	7.2	1.5	9.8	7.4	0.10	0.03	nd	0.03	0.06
A007	67.6	0.06	4.0	0.6	4.2	3.9	7.3	3.5	4.7	3.9	0.11	0.03	nd	0.02	0.06
A008	69.1	0.01	3.6	0.6	2.8	3.2	5.5	3.0	7.6	4.6	0.12	0.04	nd	0.02	0.05
A009	69.2	0.04	3.8	0.8	2.8	3.2	5.4	2.9	7.0	4.6	0.13	0.06	nd	0.03	0.05
A010	62.9	0.05	3.3	0.8	3.5	2.9	5.6	2.4	10.3	8.0	0.15	0.03	nd	0.03	0.06
B001	72.5	0.04	4.0	0.8	3.6	3.8	6.0	3.1	3.9	2.0	0.17	0.02	nd	0.02	0.05
B002	67.1	0.02	3.2	0.6	3.2	2.3	6.2	2.7	8.6	5.8	0.17	0.01	nd	0.03	0.05
B003	67.4	0.07	3.9	0.7	3.6	3.8	7.4	3.2	6.3	3.2	0.30	0.05	nd	0.03	0.06
B004	68.4	0.01	3.3	0.6	2.8	2.1	6.5	2.5	7.6	6.0	0.10	0.02	nd	0.02	0.04
B005	67.0	0.04	4.2	0.8	3.2	3.3	6.4	3.2	7.1	4.3	0.19	0.09	nd	0.03	0.06
B006	69.1	0.05	3.6	0.9	3.0	3.3	7.6	2.6	6.4	3.2	0.15	0.03	nd	0.02	0.05
B007	67.9	0.05	3.7	0.7	3.1	3.4	6.2	2.3	7.6	4.6	0.15	0.02	nd	0.02	0.05
B008	66.9	0.02	3.4	0.7	3.0	3.2	7.3	3.3	7.6	4.3	0.16	0.00	nd	0.03	0.05
B009	66.9	0.01	3.5	0.7	3.4	3.5	5.9	2.6	8.2	5.0	0.14	0.02	nd	0.03	0.05
B010	69.2	0.06	4.2	0.7	3.6	3.5	7.2	3.2	5.5	2.5	0.02	0.02	nd	0.02	0.06
C001	57.1	0.18	3.9	0.5	0.1	nd	4.7	1.1	23.2	9.0	nd	0.02	nd	0.06	0.05
C002	57.5	0.15	3.9	0.6	nd	nd	3.6	1.1	24.9	8.1	nd	0.05	nd	0.07	0.05
C003	55.0	0.18	3.6	0.6	nd	0.6	2.3	2.1	29.2	6.2	nd	0.05	nd	0.09	0.09
C004	55.4	0.25	3.9	0.6	nd	nd	4.4	0.9	29.7	4.6	nd	0.02	nd	0.08	0.07
C005	56.7	nd	2.1	0.4	1.5	1.5	7.4	1.2	23.5	5.5	nd	0.06	nd	0.06	0.06
C006	59.6	0.20	4.0	0.5	0.1	nd	2.1	1.0	26.2	6.3	nd	0.03	nd	0.07	0.06
C007	54.9	0.16	3.8	0.5	nd	nd	3.9	1.0	28.2	7.4	nd	0.04	nd	0.08	0.06
C008	59.4	0.06	2.0	0.8	0.5	0.4	6.4	0.8	22.6	6.1	0.70	0.08	nd	0.06	0.07
C009	58.5	0.01	2.0	0.8	0.7	2.0	6.0	0.7	23.8	4.7	nd	0.56	0.09	0.07	0.06
C010	61.6	0.09	2.5	1.2	0.9	0.5	8.0	0.4	18.9	5.6	nd	0.22	nd	0.05	0.05
D001	63.9	0.01	2.6	0.8	1.9	1.5	7.6	0.7	15.9	5.0	0.03	0.05	nd	0.04	0.07
D002	59.6	0.06	3.1	0.8	3.0	2.7	8.6	1.1	15.1	5.6	0.02	0.03	nd	0.04	0.09
D003	57.9	0.01	2.3	0.5	2.1	0.9	9.7	0.9	18.9	6.8	0.02	0.05	nd	0.05	0.07
D004	62.7	0.02	2.6	0.6	1.9	1.5	8.2	1.5	14.6	6.2	nd	0.03	nd	0.04	0.07
D005	62.4	0.03	2.9	0.6	3.2	2.1	10.5	1.3	14.2	2.7	0.02	0.03	nd	0.04	0.07
D006	63.1	0.06	2.7	0.8	3.5	2.1	9.3	1.5	13.1	3.7	0.03	0.04	nd	0.04	0.13
D007	59.8	0.05	3.0	0.9	2.7	2.5	8.0	1.2	15.7	6.0	0.03	0.04	nd	0.04	0.08
D008	67.2	0.05	2.9	1.0	2.9	3.1	9.2	1.8	8.3	3.3	0.03	0.10	0.02	0.02	0.09
D009	61.2	0.08	3.1	0.9	2.5	2.4	9.3	1.5	12.8	6.1	0.02	0.05	nd	0.04	0.07
D010	61.6	0.02	2.7	0.8	1.9	1.2	7.9	1.0	16.9	5.8	0.03	0.06	nd	0.05	0.07

nd：検出限界以下

4. 結果および考察

4.1　クラスター分析による分類

蛍光X分析によるラスター彩陶器白色釉薬の分析結果を表2に示す。元素存在量（濃度）の単位は%である。

釉薬は、基質となるケイ酸成分（SiO_2）を溶かす原料（溶融剤）を中心に、含有する特徴的な原料によって分類するのが一般的である。筆者らは、イスラーム陶器では「鉛釉」と「アルカリ釉」、両者を含んだ「アルカリ鉛釉」の3種類に分類してきた［二宮ら2007、新免ら2007］[2)]。ここで分析した資料は、いずれも一定濃度の鉛とアルカリ元素（特にナトリウム）を含んでいることからアルカリ鉛釉に分類される。また、

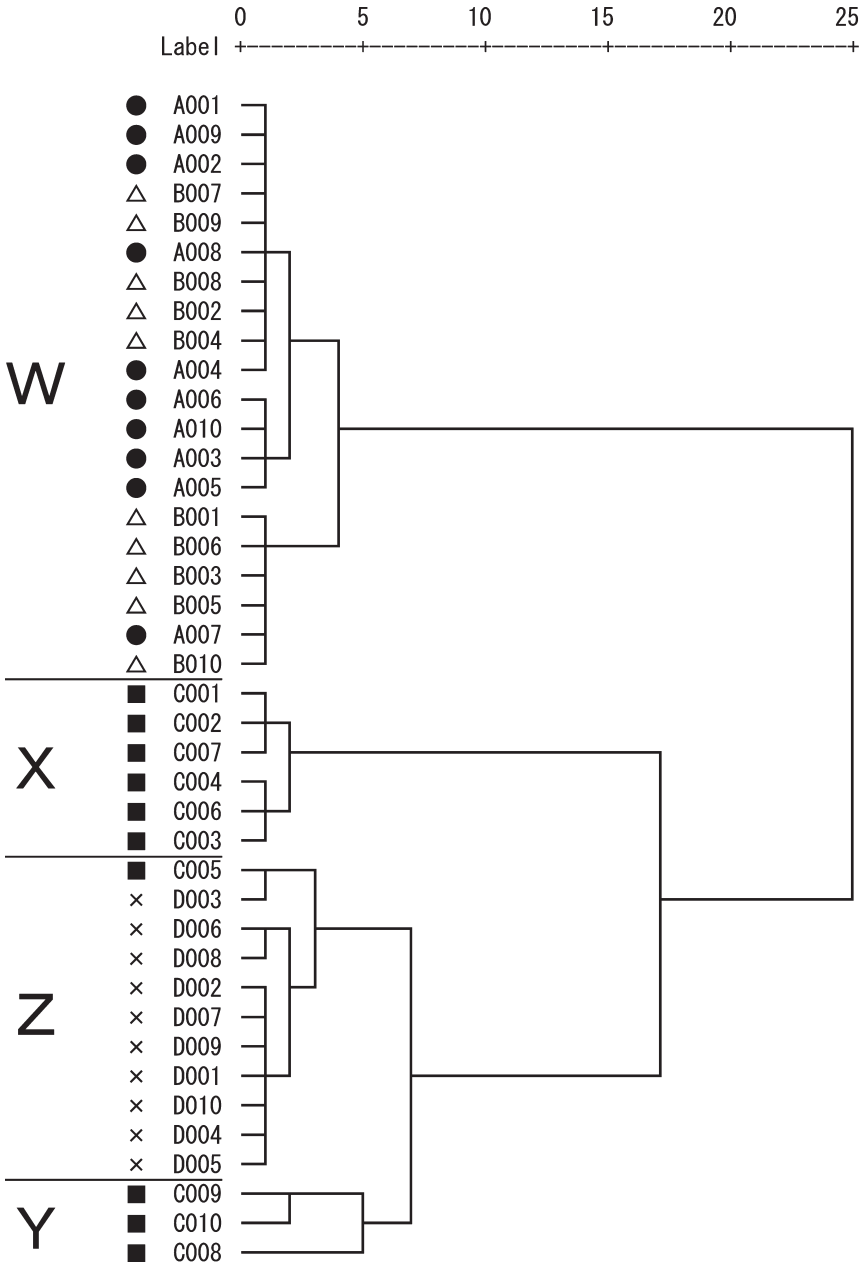


図2　クラスター分析による釉薬の分類結果
（●：Aグループ、△：Bグループ、■：Cグループ、×：Dグループ）

全ての釉薬からはスズが検出されたため、スズによって白濁化された錫白釉薬であることが判明した[3)]。

本研究では、分析資料を釉薬の元素濃度に応じて分類し、製作年代や地域間での特徴を明らかにすることを目的としている。そこで、より客観的に識別・分類するためにクラスター分析を行った。分析結果をデンドログラム（樹状図）として図2に示す。本図の併合距離は分析資料間の類似度を示し、併合距離が小さいほど類似度が高いことを表している。

クラスター分析の結果、大きくWからZの4群に分類された。全体的に見ると、まずZ群とY群が結合し、そのまとまりにX群、W群の順で結合する結果となった。このクラスター分析の配置に応じて、分析値を並べ直したのが表3であ

表３　分析結果の再配置一覧

クラスター分析による釉薬の分類	No.	Oxide concentrations（%）															クラスター分析による胎土の分類*
		SiO_2	TiO_2	Al_2O_3	FeO	MgO	CaO	Na_2O	K_2O	PbO	SnO_2	MnO	CuO	ZnO	Rb_2O	SrO	
W群	A001	69.3	0.06	3.8	0.7	2.8	2.8	4.7	2.8	7.5	5.3	0.16	0.03	nd	0.03	0.05	Ⅰ群
	A009	69.2	0.04	3.8	0.8	2.8	3.2	5.4	2.9	7.0	4.6	0.13	0.06	nd	0.03	0.05	Ⅰ群
	A002	67.5	0.04	3.6	0.7	2.7	2.6	5.5	2.5	8.5	6.2	0.11	0.03	nd	0.03	0.05	Ⅰ群
	B007	67.9	0.05	3.7	0.7	3.1	3.4	6.2	2.3	7.6	4.6	0.15	0.02	nd	0.02	0.05	Ⅰ群
	B009	66.9	0.01	3.5	0.7	3.4	3.5	5.9	2.6	8.2	5.0	0.14	0.02	nd	0.03	0.05	Ⅰ群
	A008	69.1	0.01	3.6	0.6	2.8	3.2	5.5	3.0	7.6	4.6	0.12	0.04	nd	0.02	0.05	Ⅰ群
	B008	66.9	0.02	3.4	0.7	3.0	3.2	7.3	3.3	7.6	4.3	0.16	0.00	nd	0.03	0.05	Ⅰ群
	B002	67.1	0.02	3.2	0.6	3.2	2.3	6.2	2.7	8.6	5.8	0.17	0.01	nd	0.03	0.05	Ⅰ群
	B004	68.4	0.01	3.3	0.6	2.8	2.1	6.5	2.5	7.6	6.0	0.10	0.02	nd	0.02	0.04	Ⅰ群
	A004	67.3	0.01	2.9	0.6	3.6	2.2	9.1	2.6	6.2	5.4	0.16	0.02	nd	0.02	0.05	Ⅰ群
	A006	64.1	0.04	3.4	0.9	2.9	2.6	7.2	1.5	9.8	7.4	0.10	0.03	nd	0.03	0.06	Ⅰ群
	A010	62.9	0.05	3.3	0.8	3.5	2.9	5.6	2.4	10.3	8.0	0.15	0.03	nd	0.03	0.06	Ⅰ群
	A003	64.7	0.04	3.4	0.7	3.9	2.5	6.7	2.5	9.5	5.8	0.06	0.05	nd	0.03	0.07	Ⅰ群
	A005	68.8	0.01	3.4	0.7	2.6	1.9	4.7	1.9	8.5	7.2	0.13	0.04	nd	0.03	0.05	Ⅰ群
	B001	72.5	0.04	4.0	0.8	3.6	3.8	6.0	3.1	3.9	2.0	0.17	0.02	nd	0.02	0.05	Ⅰ群
	B006	69.1	0.05	3.6	0.9	3.0	3.3	7.6	2.6	6.4	3.2	0.15	0.03	nd	0.02	0.05	Ⅰ群
	B003	67.4	0.07	3.9	0.7	3.6	3.8	7.4	3.2	6.3	3.2	0.30	0.05	nd	0.03	0.06	Ⅰ群
	B005	67.0	0.04	4.2	0.8	3.2	3.3	6.4	3.2	7.1	4.3	0.19	0.09	nd	0.03	0.06	Ⅰ群
	A007	67.6	0.06	4.0	0.6	4.2	3.9	7.3	3.5	4.7	3.9	0.11	0.03	nd	0.02	0.06	Ⅰ群
	B010	69.2	0.06	4.2	0.7	3.6	3.5	7.2	3.2	5.5	2.5	0.02	0.02	nd	0.02	0.06	Ⅰ群
X群	C001	57.1	0.18	3.9	0.5	0.1	nd	4.7	1.1	23.2	9.0	nd	0.02	nd	0.06	0.05	Ⅱ群（Ⅱa）
	C002	57.5	0.15	3.9	0.6	nd	nd	3.6	1.1	24.9	8.1	nd	0.05	nd	0.07	0.05	Ⅱ群（Ⅱa）
	C007	54.9	0.16	3.8	0.5	nd	nd	3.9	1.0	28.2	7.4	nd	0.04	nd	0.08	0.06	Ⅱ群（Ⅱa）
	C004	55.4	0.25	3.9	0.6	nd	nd	4.4	0.9	29.7	4.6	nd	0.02	nd	0.08	0.07	Ⅱ群（Ⅱa）
	C006	59.6	0.20	4.0	0.5	0.1	nd	2.1	1.0	26.2	6.3	nd	0.03	nd	0.07	0.06	Ⅱ群（Ⅱa）
	C003	55.0	0.18	3.6	0.6	nd	0.6	2.3	2.1	29.2	6.2	nd	0.05	nd	0.09	0.09	Ⅱ群（Ⅱa）
Z群	C005	56.7	nd	2.1	0.4	1.5	1.5	7.4	1.2	23.5	5.5	nd	0.06	nd	0.06	0.06	Ⅱ群（Ⅱb）
	D003	57.9	0.01	2.3	0.5	2.1	0.9	9.7	0.9	18.9	6.8	0.02	0.05	nd	0.05	0.07	Ⅳ群
	D006	63.1	0.06	2.7	0.8	3.5	2.1	9.3	1.5	13.1	3.7	0.03	0.04	nd	0.04	0.13	Ⅳ群
	D008	67.2	0.05	2.9	1.0	2.9	3.1	9.2	1.8	8.3	3.3	0.03	0.10	0.02	0.02	0.09	Ⅳ群
	D002	59.6	0.06	3.1	0.8	3.0	2.7	8.6	1.1	15.1	5.6	0.02	0.03	nd	0.04	0.09	Ⅳ群
	D007	59.8	0.05	3.0	0.9	2.7	2.5	8.0	1.2	15.7	6.0	0.03	0.04	nd	0.04	0.08	Ⅳ群
	D009	61.2	0.08	3.1	0.9	2.5	2.4	9.3	1.5	12.8	6.1	0.02	0.05	nd	0.04	0.07	Ⅳ群
	D001	63.9	0.01	2.6	0.8	1.9	1.5	7.6	0.7	15.9	5.0	0.03	0.05	nd	0.04	0.07	Ⅳ群
	D010	61.6	0.02	2.7	0.8	1.9	1.2	7.9	1.0	16.9	5.8	0.03	0.06	nd	0.05	0.07	Ⅳ群
	D004	62.7	0.02	2.6	0.6	1.9	1.5	8.2	1.5	14.6	6.2	nd	0.03	nd	0.04	0.07	Ⅳ群
	D005	62.4	0.03	2.9	0.6	3.2	2.1	10.5	1.3	14.2	2.7	0.02	0.03	nd	0.04	0.07	Ⅳ群
Y群	C008	59.4	0.06	2.0	0.8	0.5	0.4	6.4	0.8	22.6	6.1	0.70	0.08	nd	0.06	0.07	Ⅲ群
	C009	58.5	0.01	2.0	0.8	0.7	2.0	6.0	0.7	23.8	4.7	nd	0.56	0.09	0.07	0.06	Ⅲ群
	C010	61.6	0.09	2.5	1.2	0.9	0.5	8.0	0.4	18.9	5.6	nd	0.22	nd	0.05	0.05	Ⅲ群

nd：検出限界以下、＊クラスター分析による胎土の分類は過去のデータ［新免ら2010］を使用

る。以下、各群の内訳を見る。

W群：イラク産と推定される初期ラスター彩陶器のA・Bグループ20点からなる。群内は、両者が混合するクラスター、Aグループのみからなるクラスター、Bグループが主体となるクラスターの3種類で構成されている。表3から化学組成の傾向を見ると、SiO_2・PbO・SnOなどの濃度によって、クラスターがまとまる傾向が認められた。しかし、全体的には併合距離が小さい段階で併合しており、群内における釉薬の化学組成の類似性は高い。

X群：Cグループのエジプト産ラスター彩陶器の中で、6点がX群としてクラスターを形成した。本群内は二分されるが、全体的に化学組成の類似性が高く、クラスターごとの傾向は把握しづらい。

Y群：Cグループのエジプト産ラスター彩陶器の中で、白色以外の有色釉薬の3点がY群としてクラスターを形成した。乳青色釉薬の2点（C009・C010）が併合後、乳紫色釉薬（C008）が併合している。C008の乳紫色釉薬の着色剤にはマンガン（濃度0.70％）、C009・C010の乳青色釉薬の着色剤には銅（濃度0.56％、0.22％）の使用が確認できた。

Z群:イラン産中期ラスター彩陶器のDグループ10点と、CグループのC005からなる。本群は3つのクラスターに分類される。Dグループの資料の化学組成は多少のばらつきはあるものの、比較的よくまとまっている。一方、C005はDグループの資料に比べ、SiO_2が約57％と低く、PbOが約23％と高い値を示している（DグループのSiO_2平均濃度は約62％、PbO平均濃度は約15％）。この点については後述する。

このように釉薬のクラスター分析では、Z群に分類されたC005を除き、同グループの資料がクラスターを構成、または比較的近距離で併合し、同一の生産地資料によってまとまる結果となった。この点は、前報［新免ら2010］の胎土のクラスター分析結果と同様である。また、釉薬のW群が胎土のⅠ群、同X群が同Ⅱ群（Ⅱa群）、同Y群が同Ⅲ群、同Z群が同Ⅳ群にほぼ完全に対応し、構成する資料の内訳も同一となった（表3）。

Cグループでは、前回の胎土分析では粘土胎土（Ⅱ群：C001～007）と複合胎土[4]（Ⅲ群：C008～010）という胎土の種類によってクラスターが分離したが、釉薬においても（C005を除き）同様の分類結果となった。したがって、粘土胎土から複合胎土への変化と同時に釉薬の化学組成も変化していたことが伺える。

唯一C005が釉薬と胎土のクラスター分析において異なる分類結果となった。胎土分析ではCグループの資料と同群（Ⅱ群）となっていたが、今回の釉薬分析ではDグループと同じZ群となっている。この点をC005の釉薬の化学組成から検討すると、SiO_2・PbO・TiO_2の濃度ではCグループに近いが、CaO・MgO・Na_2Oなどの濃度がDグループに近いため（Cグループの資料はMgO・CaOをほとんど含まない）、後者の元素の組成に引きずられ、Dグループとなったと考えられる。また、C005は、胎土ではCaO濃度が高く、他のCグループの資料とは異なる化学組成であった。釉薬ではより一層、化学組成の差異が際立っており、Dグループと併合する結果となったとも考えられる。

このような例外もあるが、今回の分類は胎土の分類結果と整合性のあるものであり、基本的に釉薬も化学組成によって生産地を推定できる可能性を示している。あくまでも現段階における生産地とは国レベルの産地であり、各国内の窯業地ごとの分別までは至っていない。ただし、ラスター彩陶器は生産された窯が限られると考えられているため、他とは異なる特別な釉薬である可能性もある。今後、同時期の他の種類の陶器に使用された白色釉薬の化学組成と比較することによって、ラスター彩陶器釉薬の特殊性が明らかになると考える。

4.2　化学組成の検討

4.1では、ラスター彩陶器白色釉薬の化学組成についてクラスター分析による分類を行い、W～Zの4群にクラスタリングされた。ここではこの各群の釉薬の特性を元素濃度から検討する。白色釉薬では主成分のPbO、SnO_2濃度に特徴があるので、これらの元素濃度分布図を作成し、図3に示す。

図3のSnO_2－PbO元素濃度分布によると、全体的な傾向としては各群でまとまって分布する傾向が認められた。そこで、各群の分布する範囲を目視によって任意の点線で括った。

W群の10世紀のイラク産と推定されるラスター彩陶器では、PbOとSnO_2に強い正の相関関係が認められた。PbO濃度が約4～10％（平均約7％）、SnO_2濃度が2～8％（平均約5％）の範囲に分布し、鉛と錫がほぼ一定の割合で混合さ

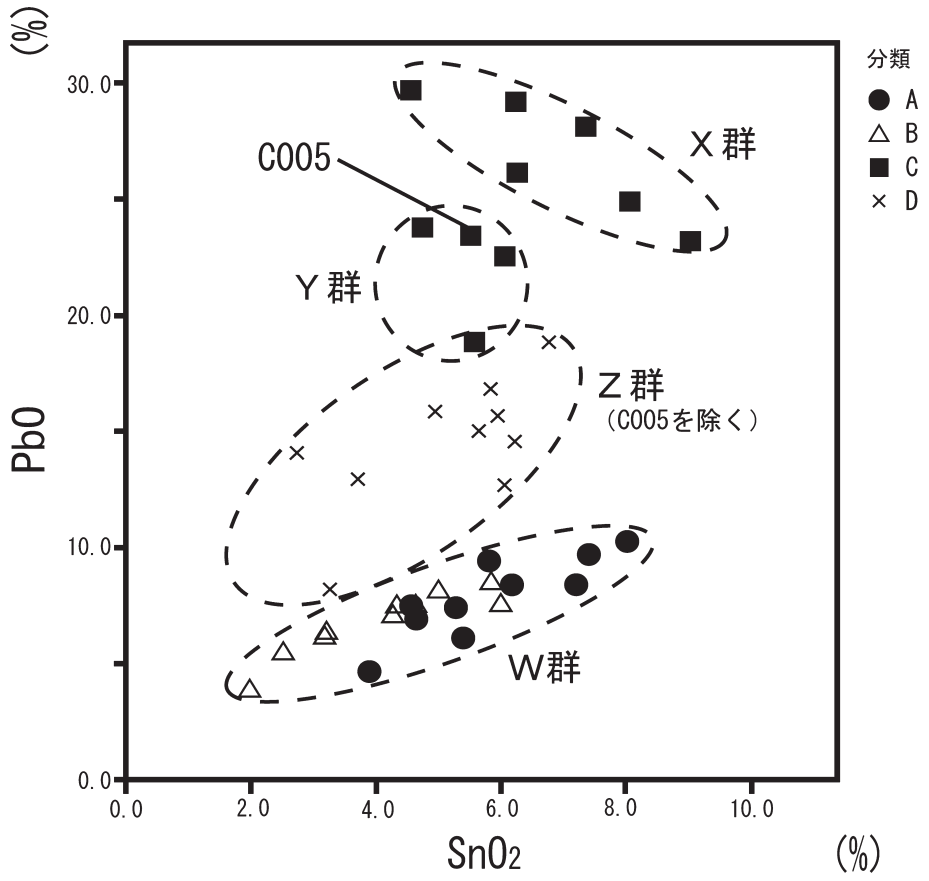


図３　SnO_2 － PbO の元素濃度分布図

れていた可能性もある。また、Ａグループの資料の方がＢグループに比べ、両元素の含有量が高い傾向にあることが看取できる。Ａ･Ｂグループには、製作年代に差があるとされているが、この傾向が年代的な特徴といえるのかは今後分析事例を増やし検討する必要があろう。

イラク産に後続する10 ～ 12世紀のエジプト産ラスター彩陶器のＸ・Ｙ群について見ると、比較的まとまって分布しているが、特にＸ群において両元素間に負の相関があることが読み取れる。各元素の濃度を前のW群の資料と比較すると、SnO_2濃度にはあまり違いがないが（5 ～ 9%、平均約7%）、PbO濃度が約20 ～ 30%と高いことがわかる。群ごとに見ると、Ｘ群がPbO濃度23 ～ 30%（平均27%）であるのに対し、Ｙ群ではPbO濃度19 ～ 24%（平均約22%）とやや低い。Ｙ群の資料は釉薬が紫や青色に着色された複合胎土の資料で、Ｘ群の白色釉薬の粘土胎土資料よりも年代的に新しい資料と考えられている。したがって、時代を下ると鉛の含有量を減ずる方向に向かったと想定できよう。ちなみに、クラスター分析で別群となったC005もPbOとSnO_2の濃度ではＹ群の中に分布していることから、Ｙ群と同時期に製作された資料の可能性もある。

この流れは、さらに後続するＺ群のイラン産ラスター彩陶器にも引き継がれており、PbO濃度が8 ～ 19%（平均約15%）とより一層減少する。この結果に鑑みると、前のＹ群は、Ｘ群のエジプト産ラスター彩陶器からＺ群のイラン産ラスター彩陶器へ移行する過渡期の資料と位置付けることもできる。

以上の結果をまとめると、ラスター彩陶器に用いられた白色釉薬は、10世紀のイラクの段階では、PbOが約4 ～ 10%と比較的低濃度の鉛釉

薬であったのが、エジプトではPbO約23～30%と高濃度の鉛釉薬に移行する。しかし、年代を経て、複合胎土が誕生した時期にはPbO濃度が19～24%と減少し、イランでは8～19%とさらに減少する方向に進んだことが明らかとなった。この結果については、すでにMasonらが報告している分析結果と、多少の数値の異同はあるものの、PbO濃度の変遷としてはほぼ同様の軌跡を描いており［Masonら1997］、追認する結果となったといえる[5)]。ただし、本報では、資料全体をクラスター分析によって分類したことで、グループとしての変遷がより明確になったと考えている。

このような釉薬の化学組成の変化は、釉薬原料の調合割合や種類の変化に応ずるものだが、どのような要因によってもたらされるものかは今後の重要な課題である。特に、鉛の濃度は、釉薬がガラス化する温度、つまり焼成温度に影響する。使用する窯の構造やその構築材の耐火度、燃料材の種類などの焼成技術によって、焼成温度が大きく変化したと考えられ、釉薬中の鉛の割合を変えることで、釉のガラス化を調整した可能性も考えられる。ラスター彩陶器を焼成した窯自体の発掘調査が行われていない中では、ラスター彩陶器の焼成技術を把握することは困難であるが、釉薬の化学組成、胎土の鉱物組成といった情報から焼成温度を推定し、様々な陶器に用いられた焼成技術を比較することも重要な課題である。

5. おわりに

本研究では、初期および中期のラスター彩陶器について、蛍光X線分析によって釉薬の化学組成を求め、検討を行った。その結果、すべてはスズを乳濁剤とするアルカリ鉛釉薬であった。また、クラスター分析の結果、大きく4群に分類され、イラク、エジプト、イランという生産地ごとに釉薬の化学組成がまとまった。この分類結果は胎土の分類結果とほぼ同一の結果であった。釉薬の化学組成については、産地の移動に伴ってPbOの濃度に変動が認められ、低濃度から高濃度へ変化し、再び減少に向かう変遷が明らかとなった。このような結果から、ラスター彩陶器については釉薬の化学組成によっても生産地の推定が可能となると考えられる。

今後は、ラスター彩陶器以外の陶器に用いられた白色釉薬の科学分析を行い、それぞれが類似しているのか、または異質なものであるかを明らかにすることによって、陶磁器製作における技術や原料の共有または専有がより明確なものになると考えられる。

注

1）分析資料は全体的に釉層が非常に厚く、資料によっては1mmを超える資料もあった。蛍光X線分析では管電圧や電流にもよるが、その分析深さは数十μm程度であるため、胎土層の影響はほとんどないと考えられる。また、一資料中の釉薬の不均一性をみるために、数点の資料について複数箇所の分析を行った。その結果、各箇所には大きな差異は認められなかった。そのため、今回の分析では1箇所を分析箇所とした。

2）ただし、鉛釉中にも微量のアルカリ元素が含まれ、アルカリ釉にも微量の鉛が含まれることがあるため、どの位の濃度で分類するのか、明確な数値で線引きすることは難しい。また、釉薬の分類にカルシウム（CaO）を加える場合もあり、研究者によっても様々で、統一した基準があるわけではない。

3）白色釉薬（白濁釉薬）を作り出すには、透明釉薬の中に気泡、石英や長石、錫などを加え、微粒子による光の散乱によって白色化する。

4）複合胎土は、中近東地域に特徴的な胎土で、フリット胎土やストーンペーストなどとも呼ばれる。石英を主成分とし粘土やガラスなどと混合して焼成される胎土である。

5）SnO_2の含有量についてはMasonらの報告では、エジプト産ラスター彩陶器で10%を超える資料が報告されている［Masonら1997］。我々が分析していない種類の資料の可能性もあり、検討の余地がある。

参考文献

Mason, R. B.
2004　*Shine Like the Sun*. MAZDA.

Mason, R. B., Tite, M. S.
1997　The Beginnings of Tin-opacification of Pottery Glazes. *Archaeometry*, 39, pp. 41–58.

二宮修治・新免歳靖・佐藤香子・松崎広子
2007　「ペルシア陶器を科学する―釉薬の科学分析―」『魅惑のペルシア陶器』pp. 28–33、中近東文化センター附属属博物館。

岡野智彦・新免歳靖・河嵜由美子・二宮修治
2009　「イランの遺跡採集イスラーム陶器片の科学分析」『扶桑　田村晃一先生喜寿記念論文集』pp. 577–591、青山考古学会。

新免歳靖・岡野智彦・二宮修治
2010　「初期および中期ラスター彩陶器の胎土分析による生産地推定」『総研大文化科学研究』6、pp. 99–116、総合研究大学院大学文化科学研究科。

新免歳靖・佐藤香子・伊東　聡・三浦麻衣子・二宮修治
2008　「ペルシア陶器を科学するPart 2―ミナイ手陶器を中心として―」『煌めきのペルシア陶器』pp. 26–32、中近東文化センター附属博物館。

新免歳靖・佐藤香子・松崎広子・伊東　聡・岡野智彦・足立拓朗・二宮修治
2007　「イランにおける紀元前2千年紀から9・10世紀の陶器紬薬の分析科学的研究」『日本文化財科学会第24回大会発表要旨集』pp. 178–179、日本文化財科学会。

Watson, O.
2006　Ceramics from Islamic Lands. Thames & Hudson.

The Chemical Composition of the White Glaze of Early- and Middle-Period Lusterware

SHINMEN, Toshiyasu

The Graduate University for Advanced Studies,
School of Cultural and Social Studies, Department of Japanese History

OKANO, Tomohiko

The Museum of the Middle Eastern Culture Center in Japan

NINOMIYA, Shuji

Research Laboratory for Scientific Studies on Cultural Properties, Tokyo Gakugei University

Forty shards of lusterware produced in Iraq, Egypt and Iran from the 10th to 13th century were examined by energy dispersive X-ray fluorescence analysis in order to compare the compositions of their white glazes. All wares were shown to have used tin-lead-glazes. The results of cluster analysis indicated that they can be classified in four groups according to the chemical compositions of their white glazes. The cluster analysis classification of glazes were supported by classification by body analysis. The chemical composition of the glaze, with the movement of the provenance to change the concentration of PbO, was observed to vary from low concentrations to high concentrations, and was found to decrease again. These results reveal that it is possible to estimate the provenance of lusterware by examining the chemical compositions of their pottery glazes.

Key words: Lusterware, Iraq, Egypt, Iran, Energy Dispersive X-ray Fluorescence Analysis, Cluster Analysis, Chemical Composition