

# フィジビリティ研究段階を支援する統計解析

Statistical analysis for supporting to the stage on Feasibility study  
“国宝稲葉天目茶碗の虹彩星紋再現研究を事例として”

森技術士事務所 森輝雄\* 静岡品質工学研究会 杉山圭 田中誠 松岡裕司 山口信次

## 1. はじめに

フィジビリティ研究とし10年にわたり国宝天目茶碗の虹彩再現研究をする中で12種の釉薬中の1種から虹彩が発現した。X線分析から釉薬ごとに得た28化合物のデータからのMTによる因果解析は十分でなかった。材料系のフィジビリティ研究の特性値は「0, 1」, 成分間の強い交互作用, 分析の未検出成分は欠測, と解析は容易でない。適切な統計解析支援からのサジェスチョンを期待したく実験内容とデータを公開する。

## 2. フィジビリティ研究の定義とデータの特徴

フィジビリティスタディ(feasibility study:

以下カタカナ表示)とは, 研究課題の実現可能性を検討することと定義する。一般的には演繹とし研究課題の実現を可能とする具体的な仮説を立て, 帰納とし実験にその発現を確認し再現することを検証する発見をする一連の研究である。例えば, 「材料欠陥をなくせば青色レーザができる」, あるいは「弱酸で刺激すれば万能細胞ができる」などが該当する研究である。

設計定数を変更する因果関係の研究では応答はほとんど連続量になるが, フィジビリティスタディのデータは実現可能性の研究であるからその応答は, 無し[0]と, 有り[1]のデジタル型となる。応答と研究との関係を図1に示す。

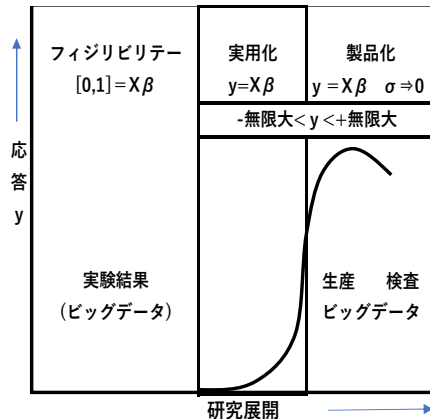


図1 応答と研究展開

フィジビリティスタディの実験は, 想定した仮説の検証であるから, データは応答発現の有無(無[0], 有[1])で0, 0, 0, 0, …, 0, 0, と連続し応答1が出て終わる。この後, 直ちに再現実験がなされる。再現実験は, 発現の繰り返しを含むが演繹-帰納を帰結させるために別条件でも実施される。これは, 偶然性でなく必然性による発現であることを確認できるまで継続される。

また研究方向を確定するために[0, 1]データから因果関係の解析をする。データは[0]が多く[1]が数個であり, 変数が直交していない欠測の多いデータベースとなっている。一般的に技術者は[0, 1]確認後, 1因子法または直交表実験で因果関係を解明していくが交互作用の影響を受ける。条件を変更しての発現[1]は, [0]を構成する因子間との交互作用に起因する。この大きい交互作用をこのデータベースから抽出する統計解析が期待される。

以下にフィジビリティ研究データの特徴をまとめる。

- 1: 応答は[0, 1]で, [0]が多く[1]が少ない。
- 2: データ数より特徴量が多い。
- 3: 変数は直交せずに, 多数の欠測がある。
- 4: データベースに強い交互作用がある。

以下, 国宝稲葉天目茶碗の虹彩紋様の再現事例で解説する。

## 3. 国宝稲葉天目茶碗の虹彩再現研究事例

天目という語は, 鎌倉時代の禅僧が宋に渡って中国浙江省天目山の禅寺で学び, 帰国のときに持ち帰った建盞(けんさん)を天目と呼んだ事から起こった名称である。唐代に盛んだった団茶がすたれ, 宋代になると新たに抹茶が流行するようになり青磁茶碗に代わって抹茶向きに工夫された天目が建窯(福建省水吉県)<sup>1)</sup>で生まれた。

曜変(耀変, 窯変)とは, 他の焼き物と同一の釉薬組成であるが窯位置・製法の違いで稀に起こるもので漆黒の釉薬の内面(見込み)に大小様々な星紋(斑点)が浮かびそのまわりが瑠璃色の美しい虹彩を放っているものを指している。



写真 1:内面(見込み)の紋様

真の曜変天国茶碗は、日本に3点ありいずれも国宝で、その中で静嘉堂文庫(岩崎家コレクション:写真1,2参照)の稲葉天目茶碗が天下随一の名碗とされている。本能寺の変で織田信長の焼失した足利義政の曜変天目<sup>1,4)</sup>に次ぐものが稲葉天目と言われている。

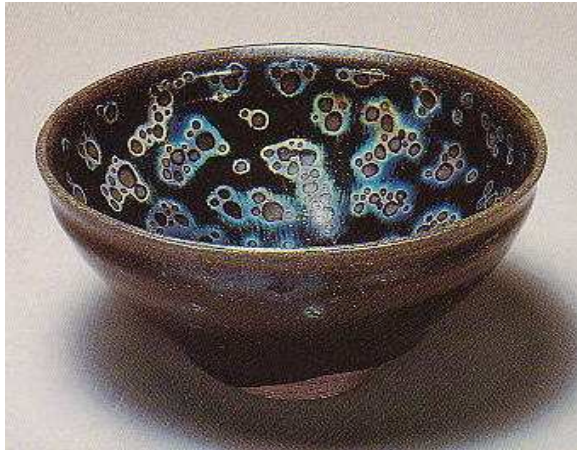


写真 2:側面からのながめ

口径が12.2cm、高さが7.2cm、重さが384gであり南宋時代(11-12世紀)の作である。その紋様の神秘性から再現を試みる対象となる。

#### 4. 稲葉天目茶碗紋様の科学的解析

##### 4.1. 光学的解析

国宝稲葉天目茶碗の文様の神秘性は、科学者の関心の対象になり古代文化財の調査として名古屋大学・山崎一雄らによって解析が実施されている。

茶碗内面の斑点(星紋)は楕円形に近く径1-6ミで光沢がなく内部は黄白色で細かい結晶からなる。その厚さはUVZの反射防止膜から0.1μm程度<sup>2)</sup>と推定されている。「大正名器鑑」では、この斑点は星紋と表現され、光の角度によって変幻する虹色模様は虹彩と称される。この斑点は、見込み(内面)のみに観察され外面にはない。また細かいクラックが存在している。

##### 4.2. 曜変天目材料の化学成分分析

現存する全ての曜変天目茶碗が中国建窯の産で、紋様解析のために化学分析が実施されている。曜変天目切片材料と代表的な日本陶磁器の有田透明釉薬と

岐阜蛙目年度の化学分析結果を表1に示す。

表1 化学分析結果<sup>3)</sup>

比較		ゼーゲル表示		
陶磁器産地	部分	アルカリ成分	アルミナ成分	シリカ成分
建窯 曜変天目	釉薬	0.21(Na <sub>2</sub> O+K <sub>2</sub> O)	0.90(Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	4.44(SiO <sub>2</sub> )
		0.79(CaO+MgO)	0.17(Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	0.03(TiO <sub>2</sub> )
	胎土	0.10(Na <sub>2</sub> O+K <sub>2</sub> O)	0.80(Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	4.46(SiO <sub>2</sub> )
		0.06(CaO+MgO+MnO)	0.20(Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	0.05(TiO <sub>2</sub> )
有田透明釉	釉薬	1.0(KNaO+CaO+RO)	0.5(Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	5.0(SiO <sub>2</sub> )
岐阜蛙目粘土	胎土	0.08(Na <sub>2</sub> O+K <sub>2</sub> O)	0.93(Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	1.61(SiO <sub>2</sub> )
		0.20(CaO+MgO)	0.06(Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	0.02(TiO <sub>2</sub> )

#### 4.3. 建窯の登り窯(龍窯)<sup>2)</sup>

焼成は、陶器製作の最終工程である。天目は約1300度(実際には1230から1270度と思われる)度の還元雰囲気中で焼成されたとされる。窯内の温度が急激に上昇・下降するときに微量の酸化第二鉄は再度溶解され結晶体の周囲に極めて薄い皮膜ができて虹彩が発生するという仮説もある。

#### 4.4. 茶碗内部のパターン分析

写真1,2から内面のパターンが観察できる。陶芸家は、不規則・無秩序としその神秘性に言及する。人工的なものが原因でないことには同意見である。しかし下記2点から虹彩の発生原因にヒントがある。

1)漆黒を海,斑点を雲とすれば偏りがあるように思える。斑点は斜め上方に連続している。

これは職人が轆轤で形状を作製するときの指の上下に関係あるとも思える。技術者としてはあるパターンが存在すると見たい。

2)斑点は茶碗の見込み(内面)のみに存在し外面にはない。これに対する仮説はたくさんあるがまだ検証されていない。碗は重ねて生産されるので外面は下方の碗の内側に触れるから炎中の無機質の降下はない。これらは、観察されない窯内部で偶発的に発生するので確証はないが、仮説として排除はできない。

#### 5. 星紋・虹彩の再現

本論文の目的は、現代にこの稲葉天目の星紋・虹彩を再現することにある。先行情報<sup>5,6)</sup>から釉薬本体から星紋・虹彩が発生するとする仮説を優先し研究した。今回は、この情報に外的要因(外付け要因:制作時の偶然必然条件を含めて)、により発生したとする仮説も同時に検証することにした。



図2 星紋・虹彩の因子関連図

#### 5.1. 星紋発現のための処方

処方自から計量と調合が必要となり実験間誤差が大きい。このために既に調合され実績のある市販の黒色系釉薬12種を採用した。これを表2に示す。

表 2 市販の黒色釉薬 12 種

釉薬	釉薬基礎情報一覧表				焼成条件	
	商品名	販売元	液色	用途	酸化	還元
1	省略		液体 赤褐色	黒天目	1230-1280	1230-1280
2			液体 黒茶	油滴天目	1230-1280	1230-1280
3			液体 黒	柚子白天目	1200-1250	1200-1250
4			液体 黄色	ラテ型		1230
5			液体 赤		1230	
6			液体 黒	油滴天目	1220-1230	
7			液体 褐色	黒天目	1220-1230	
8			液体 褐色	小豆油滴	1200-1230	
9			液体 黒	黒天目	1230	
10			粉末 黒(灰)	225722	1200-1250	1200-1250
11			液体 黒	黒マット	1230-1280	
12			粉末 黒	黒蜜手班	1220-1240	650-750

焼成炉は小型で 2 個まで可能で、焼成終了まで 30 時間となる。このため、前回の結果<sup>6)</sup>から釉薬を表 2 の 1,2,3,4,6,8,11,12 とした。

### 5.2. 星紋発現のための焼成条件と素焼き

前回までの焼成条件を整理し、上昇期間は 7 時間、最高温度を 1270 度に固定、その維持時間を 10 時間から 15 時間とし、目的は、釉薬が液状化し、構成分子が移動できるに十分な時間を与えるためである。

### 5.3. 星紋発現のための外付け補助薬品

星紋発現は、釉薬間の交互作用による内的要因とする仮説と、釉薬表面への外的付着物、または塗布などの人為的要因による外的要因とする仮説とした。そこで、天目茶碗が製造された時代に存在を問わず、現有の融点降下剤 5 種 (表 3 右) に共晶化合物として融点降下が期待できる補助剤酸化チタン TiO<sub>2</sub> を塗布した。従来の結果で確認された補助薬品と融点降下剤はないほうが良いという結果であった。表 3 に原材料と融点 (MP) を示す。

表 3 原材料と融点 (MP)

No	主剤		補助剤		融点降下剤	
1	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2054	ZnO	1975	BaCO <sub>3</sub>	811
2	CaO	2572	CrO <sub>3</sub>	2435	CaCO <sub>3</sub>	823
3	MgO	2800	NiO	1984	CaF <sub>2</sub>	1418
4	SiO <sub>2</sub>	1710	SrO <sub>3</sub>	2430	MgCO <sub>3</sub>	350
5	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1585	SnO <sub>2</sub>	1630	PbCO <sub>3</sub>	315
6	CrO <sub>2</sub>	1900	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1993		
7			TiO <sub>2</sub>	1843		

### 5.4. 多元配置実験と結果

融点降下剤 5 種と補助剤 TiO<sub>2</sub> の多元配置による結果を表 4 に示す。1,4,11,12 は前焼成をした。

表 4 多元配置実験結果 (光沢)

碗No 釉薬	前焼成	上塗り：融点降下剤						
		無	BaCO <sub>3</sub>	CaCO <sub>3</sub>	CaF <sub>2</sub>	MgCO <sub>3</sub>	PbCO <sub>3</sub>	TiO <sub>2</sub>
1	800度	8	8	3	3	2	6	3
2	なし	7	8	3	3	2	4	3
3	なし	9	9	7	7	2	6	10*
4	800度	6	7	8	8	2	6	3
6	なし	8	7	7	7	2	6	1
8	なし	6	7	6	7	3	6	1
11	800度	5	4	4	4	5	6	1
12	800度	5	2	5	5	5	4	1

表 4 は光沢、1 から 10 点満点で、虹彩・星紋は 10\* に該当する。全ての融点降下剤で「無し」がいいが TiO<sub>2</sub> と No3 釉薬との組み合わせで最高点 10\* となっている。これを写真 3 に示す。



写真 3 塗布前(上) 塗布後/焼成前(中) 焼成後(下)

写真 3 の No3 の左側 (9 時付近 : TiO<sub>2</sub> に対応) は色調と外観は再現したい形状に近いと判定した。

### 5.6. 補助剤と星紋の発現

融点降下剤は炭酸物とフッ化物であり融点は低い。TiO<sub>2</sub> は酸化物で単体の融点 (表 3) は高く、表 3 補助剤なら虹彩発現の可能性が高い。そこで補助剤 (Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, ZnO, SnO<sub>2</sub>, SrCO<sub>3</sub> (これのみ炭酸物), MnO<sub>2</sub>) を図 4 のように 2 碗に 4 分割し塗布し焼成した。その結果 TiO<sub>2</sub> の塗布部のみに虹彩 (図 3 : 写真) が出現した。

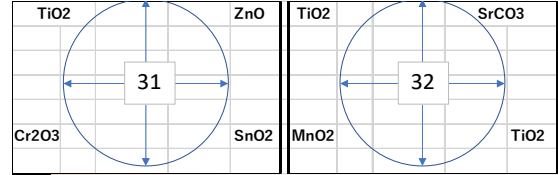


図 3 補助剤位置 (上) と星紋の出現 (下)

表 5 上塗り剤 (補助剤) と星紋

碗No	上塗り剤	星紋
31	TiO <sub>2</sub>	あり*
	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	なし
	SnO <sub>2</sub>	なし
	ZnO	なし
32	TiO <sub>2</sub>	あり*
	MnO <sub>2</sub>	なし
	TiO <sub>2</sub>	あり*
	SrCO <sub>3</sub>	なし

3 度の異なった実験で虹彩を再現できた。

### 6. 虹彩と釉薬元素の因果解析

虹彩の発現確認はできたので、12 種釉薬の元素分析をした。釉薬粉末を表 6、焼成後を表 7 に示す。

表 6 釉薬粉末の元素分析<sup>7)</sup>

No	虹彩 釉薬	無し							
		無し	無し	有	無し	無し	無し	無し	無し
1	CO <sub>2</sub>	11.7	7.81	6.22	12.17	11.1	8.73	9.91	10.4
2	Na <sub>2</sub> O	1.53	2.74	5.34	1.8	2.36	2.37	1.21	1.17
3	MgO	0.257	2.13	1.09	0.507	2.14	1.85	5.95	0.818
4	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	11.2	12.7	13.2	14.9	13.9	13.5	14.2	19.7
5	SiO <sub>2</sub>	48.3	57.7	60	44	55	55.8	47.6	50.3
6	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.0325	0.0481	0.0288	0.254	0.124	0.103	0.0338	0.508
7	SO <sub>3</sub>	0.175	0.139	0.141	0.45	0.0099	0.0302	0.101	0.394
8	Cl	0.0215	0.0342	0.74	0.0348	0.532	0.588	0.049	0.0202
9	K <sub>2</sub> O	4.72	3.23	4.64	9.28	4.62	4.92	3.33	2.78
10	CaO	10.1	4.04	2.7	3.37	4.43	4.29	7.26	8.59
11	TiO <sub>2</sub>	0.0759	0.1	0.0908	*	0.556	0.502	0.146	0.392
12	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.0345	0.0229	0.982	*	*	*	1.38	0.974
13	MnO	0.0196	0.0197	0.419	0.0506	0.0759	0.077	0.051	0.0362
14	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	11.7	8.95	3.53	12.6	4.5	7.09	6.83	3.19
15	NiO	0.008	0.545	0.326	*	*	*	0.0046	0.348
16	CuO	0.0246	0.0211	0.0074	0.0082	0.0081	0.0108	*	*
17	ZnO	0.0064	0.0048	0.0071	0.0281	0.0068	0.005	*	0.0174
18	Rb <sub>2</sub> O	0.021	0.0261	0.0122	0.026	0.0124	0.0128	0.0126	0.0279
19	SiO	0.024	0.0091	0.0161	0.0283	0.0285	0.029	0.0175	0.0071
20	ZrO <sub>2</sub>	0.0189	0.0261	0.0159	0.0107	0.0125	0.011	0.0082	0.0131
21	Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	*	0.0055	0.0003	*	0.0015	0.001	0.0004	0.0017
22	Nb <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	*	0.0023	*	*	*	*	*	0.0024
23	CoO <sub>3</sub>	*	*	0.447	*	0.441	*	1.92	0.389
24	I	*	*	0.0215	*	*	*	*	*
25	BaO	*	*	0.114	*	0.0747	0.0625	*	*
26	PbO	*	*	*	0.146	*	*	*	*
27	As <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	*	*	*	*	*	*	*	*
28	V <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	*	*	*	*	*	*	0.0004	0.0238

表 7 焼成後の元素分析<sup>7)</sup>

No	虹彩 釉薬	元素										
		無し	無し	有	無し	無し	無し	無し	無し	無し	無し	無し
		1	2	3	4	6	8	11	12			
1	CO <sub>2</sub>	5.65	11.4	5.43	0.00	4.01	5.11	3.78	9.41			
2	Na <sub>2</sub> O	1.74	1.66	4.26	2.22	2.41	1.77	1.59	2.52			
3	MgO	0.211	8.99	1.57	0.528	2.25	2.41	4.18	0.774			
4	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	10.7	9.79	9.39	16	13.5	11.9	16	10.8			
5	SiO <sub>2</sub>	56.8	38.4	67.7	54.1	62.4	52	56.6	61.7			
6	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.0427	0.0326	0.0166	0.0612	0.0868	0.093	0.101	0.176			
7	SO <sub>3</sub>	*	0.0326	*	*	0.022	*	0.0107	*			
8	Cl	*	*	*	*	*	*	*	*			
9	K <sub>2</sub> O	5.22	3.08	4.26	10.1	4.85	5.81	4.56	4.39			
10	CaO	9.25	2.7	2.8	3.44	4.05	5.81	5.08	3.51			
11	TiO <sub>2</sub>	*	*	*	*	0.896	1.25	*	4.07			
12	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	*	0.281	0.196	0.0958	*	0.365	1.11	0.203			
13	MnO	*	*	0.388	*	0.0693	0.123	0.0604	*			
14	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	10.3	21.4	3.31	13.3	4.92	15	5.89	1.89			
15	NiO	*	*	0.305	*	*	*	*	0.222			
16	CuO	0.0238	0.128	*	0.0291	*	*	*	*			
17	ZnO	*	*	*	0.0267	*	*	*	0.0664			
18	Rb <sub>2</sub> O	0.0236	0.0478	0.0124	0.0437	0.0124	0.0202	0.0086	0.0234			
19	SrO	0.0225	*	0.0145	0.0275	0.0293	0.0549	0.0103	*			
20	ZrO <sub>2</sub>	0.0213	0.0639	0.0154	*	0.0137	0.0202	0.0126	0.0153			
21	Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	*	0.0087	*	0.0015	*	*	*	0.0072			
22	Nb <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	*	*	*	*	*	*	*	*			
23	CoO	*	1.88	0.374	*	0.468	*	0.965	0.222			
24	PbO	*	*	*	*	*	*	*	*			
25	BaO	*	*	*	*	*	*	*	*			
26	PbO	*	*	*	*	0.0303	*	*	*			
27	As <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.0117	*	*	0.0164	*	0.0283	*	0.0102			
28	V <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	*	*	*	*	*	*	*	*			

蛍光線の元素分析は酸化物で表示され、太文字は原材料としてある元素である。\*印は、検出限界以下であり欠測値とした。ここで釉薬3のみが虹彩を発現しているのをこれを対象空間、他の7釉薬を基準空間としてMT解析をした。元素は原材料の元素17個とし、欠測値は最小値の1/2を代用値とした。特徴量がデータ数より多いので3分割(図4の点線枠)MT解析をした。結果を図4に示す。

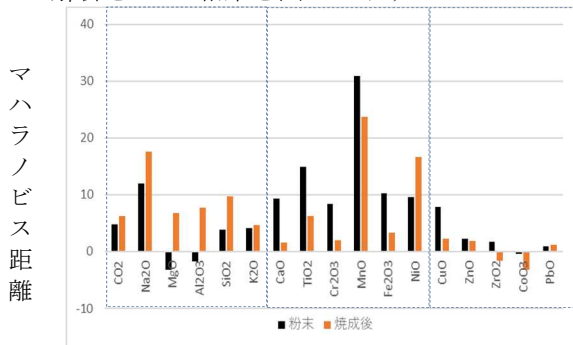


図 4 元素分析 (左:粉末 右:焼成後)

粉末解析では、図4のマハラノビスの距離(MD)が大きいNa<sub>2</sub>O, TiO<sub>2</sub>, MnO, NiOが虹彩と因果関係があると仮定できるが、表6では基準空間の釉薬にほぼ含まれる。焼成後では、Na<sub>2</sub>O, MnO, NiOが大きいNa<sub>2</sub>Oは他のすべて、MnOは3種、NiOは1種に含まれているが虹彩の発現はない。TiO<sub>2</sub>塗布後の焼成で虹彩が発現している。この事実から少なくとも釉薬成分の複数次因子と組成比が関係していると想定できる。

単元素のMT解析は不十分だが、交互作用(積項)を含めて解析すれば虹彩発現に必要な因果関係を捕られることができると仮定できる。

## 7. フィジビリティ研究に対する統計解析への期待

フィジビリティ研究の応答は、[0, 1]で0, 0, 0, ...と継続し[1]が発現し、その再現を確認して終わる。本報告の表7, 8, 9は10年目の最後のデータである。発現が再現すると統計解析への期待が。

- 1: 因果関係の解析

[1]の発生は[0]を構成する因子との交互作用である。本研究では、単元素でなく交互作用を含めた因果関係の解析が必要である。実験で確認するには、1因子ごと外しながら十分条件を確認するが効率的ではない。

## 2: 統計解析による予測の実験

[0, 1]を解析すれば虹彩が表8の未確認の釉薬にTiO<sub>2</sub>を塗布することで発現できるかどうか高い確率で予測できる。

表 8 未確認釉薬の元素分析<sup>7)</sup>

No	虹彩 釉薬No	釉薬粉末				焼成後			
		5	7	9	10	5	7	9	10
1	CO <sub>2</sub>	7.02	12.5	9.96	12.4	8.46	5.08	3.76	7.2
2	Na <sub>2</sub> O	1.5	1.75	1.19	1.66	1.07	1.67	1.32	1.38
3	MgO	1.93	0.128	1.21	0.449	5.91	0.2	1.08	0.927
4	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	11.6	11.5	8.95	11.4	9.86	11.1	9.3	11.8
5	SiO <sub>2</sub>	53	53	55.9	45.8	41.8	62.7	63.2	49.8
6	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.0204	0.014	0.0213	0.0116	*	0.0262	0.0481	0.0213
7	SO <sub>3</sub>	0.601	0.045	0.242	0.0298	0.0277	*	*	*
8	Cl	0.0636	0.399	0.202	0.415	*	*	*	*
9	K <sub>2</sub> O	6.79	5.98	3.83	4.75	6.82	6.27	4.18	4.34
10	CaO	4.62	6.78	7.61	11.1	3.01	5.47	6.81	13.2
11	TiO <sub>2</sub>	0.0598	0.079	0.0586	0.115	*	*	*	*
12	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	*	*	0.159	1.42	0.506	*	*	*
13	MnO	1.47	0.018	0.06	0.0184	2.29	*	*	*
14	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	10	7.72	10.3	9.85	18.1	7.43	10.1	10.8
15	NiO	*	*	*	*	*	*	*	*
16	CuO	*	*	*	*	*	0.0202	*	*
17	ZnO	0.0071	*	*	0.0055	*	*	*	*
18	Rb <sub>2</sub> O	0.0577	0.016	0.013	0.0104	0.0908	0.0152	0.0097	0.528
19	SrO	0.0181	0.016	0.02	0.0233	0.0244	0.0127	0.0118	0.0223
20	ZrO <sub>2</sub>	*	0.013	0.0128	0.000097	*	0.015	0.013	0.0136
21	Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	*	0.001	*	*	*	*	*	*
22	Nb <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	*	*	*	*	*	*	*	*
23	CoO	1.22	*	0.199	0.49	2.06	*	0.159	0.528
24	PbO	*	*	*	*	*	*	*	*
25	BaO	*	*	0.0597	*	*	*	*	*
26	PbO	0.0108	*	*	*	*	*	*	*
27	As <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.0000	*	*	*	*	*	0.0140	*
28	V <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	*	*	*	0.0663	*	*	*	*

## 3: 複数の特性値の制御

表9に12釉薬の表面状態を示す。組成は色調と関連するが外観は焼成時の表面張力(物理特性)に影響される。これらを統計解析すれば、複数の特性値、例えば生地の色と外観を独立に制御できる。

表 9 12 釉薬の表面状態<sup>7)</sup>

		釉薬No											
		1	2	3	4	6	8	11	12	5	7	9	10
表面状態	組成	虹彩発色	無	無	有	無	無	無	無	無	無	未確認	未確認
		黄青面								強	微		
		生地色調	茶	黒		茶	青		青		茶	茶	茶
		斑点				小	大		小		細	小	
外観		光沢面	強		強	弱	強	弱		弱		強	強
		梨地面		強					弱	弱			
		凹み		大	小					中			

## 6. 今後の活動

- 1: 発生した星紋を碗全体に展開する。
- 2: 酸化チタンと釉薬3のみに発現する因果関係を検証する。
- 3: フィジビリティ研究方法の標準化
- 4: 文化財の再現支援。

## 7. 参考文献

1. 大河内風船子:「茶碗百選」(平凡社)
2. 山崎一雄:「古文化財の科学」(思文閣出版)
3. 津坂和秀:「釉薬基礎」(双葉社)
4. 毎日新聞社:日本の名陶10撰「茶碗Ⅲ」
5. QES2011No98 松岡裕司「直交表による国宝・稲葉(曜変)天目茶碗の星紋・虹彩の再現研究」(2)
6. RQES2018SNo 杉山圭「直交表による星紋再現」
7. <http://www02.jet.ne.jp/~i-sada/index.htm>