

# 有田焼とナノテクノロジー

勝 木 宏 昭

## I. はじめに

わが国の先端産業と言われ、国際競争力の高い技術であるロボット、自動車、半導体に代表されるナノテクノロジーが江戸時代の先端技術である「からくり人形」、「陶磁器」、「金箔」産業に源流を持っており、それぞれの産業の「強み」がこれまで世界と対等に渡り合うことが出来る「現代のモノづくり」に活かされている<sup>1)</sup>。

江戸時代の前期からオランダ東インド貿易会社により、東南アジア、インド、南アフリカを經由してヨーロッパに至る海のシルクロードにより遠くヨーロッパの諸国に輸出されて、異国の王侯、貴族達の魂を奪い、模造品まで作らせた栄光の日本磁器。その創業は1616年（元和二年）に有田に遡る。桃山時代の英雄、豊臣秀吉が国内統一という大事業を完了して眼を大陸に向け、当時の大帝国明王朝と対峙しようと目論んだ時に発案されたのがその足懸りとすべき朝鮮半島への進攻策（文禄・慶長の役、1592～1615年）であったと言われている。政治的には何らの成果はもたらさなかったこの無謀な画策も、日本のその後の陶磁器産業には偉大な福音をもたらした。この役に参加した九州地方の諸大名はこぞって朝鮮半島の陶工を招聘して窯を築かせている。鍋島直茂が連れ帰ってきた陶工（柿右衛門家古文書では高麗焼職人150名とされている）の一人、李參平を名乗る人物が1616年（元和二年）に佐賀県有田町の泉山と呼ばれている小さな山で白磁の鉾石を発見して、日本で初めて磁器の製造を行なっている。

桃山時代の美濃焼が成就させた黄瀬戸、志野、織部などに代表される色物陶器の製造技術と比較すれば、江戸時代の初期に完成された有田磁器はハイテク要素（成形性、不純物制御、カラフルな加飾技術、大型品、肉薄品など）が凝縮されており、明治期以後の工業製品（磚子、プラグ、タイルなど）の製品開発に大きく貢献した。有田焼は1616年以前に中国や朝鮮で既に確立されていた磁器製造技術の影響を受けているが、江戸中期までには固有の技術や匠の技を有田で生み出しており、製造技術の再評価が各方面で実施されている。現在のように高度な製造機械、分析機器が無い時代に、人間の経験と感性によって製造された有田焼には多くのナノテクノロジーが潜んでいる。

有田焼の文化的、美術的、歴史的な解説は多くの書籍などで詳しく紹介してある<sup>2)-9)</sup>ので、本稿では技術的な側面から有田焼を紹介する。

## II. 磁器原料と成形

磁器の製造プロセスの概要を図1に示す。日本では磁器の製造方法が江戸初期に有田で確立されたが、基本プロセスは現在も利用されている。磁器の磁器たる特色は、素地（胎土）が高度に緻密化（ガラス化）している点にあり、これに均一に透明性の釉薬が施され、吸水率は極めて低く叩くと金属的な音がするのが特色である。素地として利用される原料は、骨材となる石英粒子（SiO<sub>2</sub>）、ロクロ成形のための可塑性を生み出すケイ酸塩鉱物（カオリナイト、セリサイト）、焼成時に組織が熔融してガラス化し

緻密化を促進するための長石鉱物から主に構成されている。有田の泉山で李參平によって発見された磁石はこれらの鉱物を全て含んでおり、石を砕いて粘土化することによってロクロ成形が可能である。泉山の石には硫化鉄鉱が含まれているが、これを十分に除去しないと微量の残存する鉄により白色の磁器は得られにくい。粉碎した陶石を長時間水中に保存することにより硫化鉄が加水分解して鉄成分が除去される。現在、有田地区では陶芸家によりロクロ成形技術が行なわれているが、技術の習得には時間がかかり、後継者が育ちにくい。量産性の場合には機械ロクロ、石膏型による鑄込み成形で成形が行なわれている。表1に現在の有田焼の白色磁器素地と江戸初期に有田で製造された白色磁器素地の化学成分を示す。

現在の磁器に利用される陶土は化学処理により高度に精製してあるので不純物である鉄成分( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ )含有量は0.4wt%以下であるが、江戸時代の磁器中の $\text{Fe}_2\text{O}_3$ の含有率は0.8～1.3wt%である。 $\text{Fe}_2\text{O}_3$ の含有率が多いと1300℃焼成で

は磁肌が灰色になりやすく、白磁は得られにくい。また、表1の結果から江戸初期の有田焼には高温でガラス化を促進しやすい $\text{Na}_2\text{O}$ や $\text{K}_2\text{O}$ が多量含まれているので、現在のような高温焼成(1300℃)が困難であった可能性がある。

### Ⅲ. 染付け磁器

成形したままの素地には水分が含まれているので、乾燥工程が必要になる。乾燥後、900℃前後で一度焼成される(素焼き工程)。これはビスケット程度の強度を付与して作業効率を高めることと、筆による下絵加飾の容易さ、釉薬粉末の均一コーティングを効率よく行なうためである。素焼きにより成形体は多孔質(気孔率:35%, 平均気孔サイズ:0.25 $\mu\text{m}$ )になり、吸水性を持つ。この素焼き体の表面にコバルト系の顔料(呉須)で加飾され、釉薬がコートされる。乾燥後、1280～1300℃で焼成される。焼成後、呉須は青～藍色を呈し、釉薬は熔融しガラス化する。呉須で加飾して焼成された磁器を「染付

図1 磁器の製造工程図

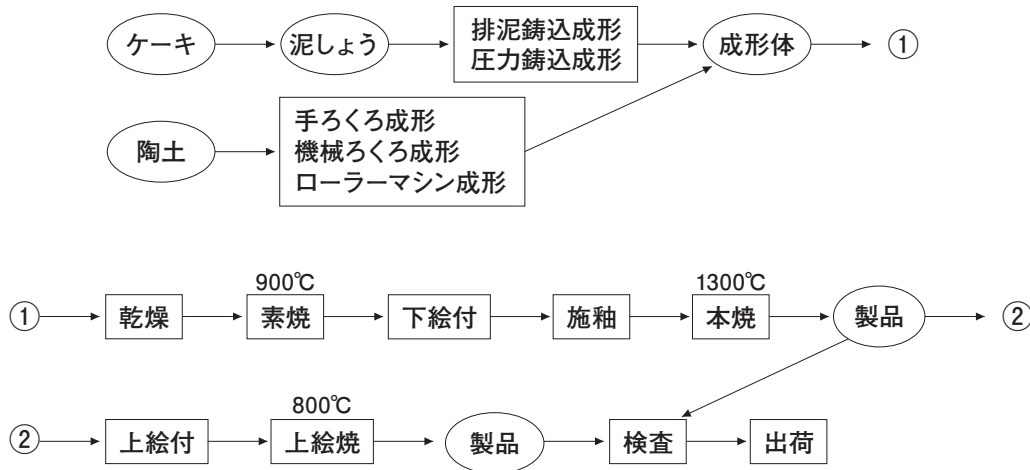


表1 江戸初期と現在の有田焼の化学成分の比較 (単位:重量%)

試料	$\text{SiO}_2$	$\text{Al}_2\text{O}_3$	$\text{Fe}_2\text{O}_3$	$\text{TiO}_2$	$\text{CaO}$	$\text{MgO}$	$\text{Na}_2\text{O}$	$\text{K}_2\text{O}$	強熱減量
現在の有田焼	79.5	16.45	0.42	0.02	0.07	0.07	0.29	2.77	0.1
江戸初期の有田焼	72.2	19.38	0.93	0.04	0.25	0.1	0.94	5.62	0.11

け磁器」とも言う。焼成時の窯の雰囲気（酸素濃度）が焼き上がりの呉須と釉薬の色に大きく影響を及ぼす。呉須成分のCoは1300℃の加熱下で釉薬のガラス熔体中に溶けてイオン化して拡散し、ブルーの色を呈するようになる。加熱中の窯の酸素濃度の変化によりブルーの色が影響を受ける。コバルトは日本では産出しなかったため、江戸時代の呉須は主に中国から長崎出島を経由して有田へ輸入されていたと言われている。明治期になるとヨーロッパで製造された合成呉須が輸入されるようになった。釉薬は本草系の灰が利用されており、釉薬成分の調合により焼き上がりの釉薬の透明度、光の屈折度、白色度が大きく変わる。焼成後の磁器の断面組織を図2に示す。

素地の厚さは5～6mmで、釉薬層の厚さは約800 $\mu$ mである。焼成後の素地は石英粒子、クリストバライト(SiO<sub>2</sub>)粒子、針状ムライト、熔融ガラスから構成されている。微細な針状ムライトが熔融ガラス中に交錯して存在しており、これが磁器の強度と高温下での熔融変形防止の発現に大きく寄与している。粒子—針状結晶—熔融ガラスで構成された見事な複合材料である。

#### IV. 色絵磁器

1300℃付近の高温で焼成された白磁または染

付け磁器の表面に赤、黄、緑、青、紫の五色顔料で絵付けしたものを色絵磁器と言う。柿右衛門様式、鍋島様式の磁器も色絵磁器に含まれる。顔料としての発色剤には $\alpha$ -Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>（赤、15～25wt%）、 $\alpha$ -Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>（黄、1～2wt%）、CuO（緑、1～10wt%）、CoO（青、1～5wt%）、MnO<sub>2</sub>（紫、1～5wt%）が用いられ、750～850℃で熔融する透明性と光の屈折率が高い珪酸質のガラス熔剤（フリット）と混合されて絵具が調合される。この絵具粉末に膠（にかわ）と水が添加されたペースト状の絵具が白磁又は染付け磁器表面に筆で加飾され、最終的には800℃前後で焼き付けられる。初代柿右衛門（1596～1666年）は色絵磁器の製造方法を長崎の中国人から習得したと思われるが、その後、鍋島藩により保護された赤絵職人集団による技術の高度化や国産顔料の開発等により色絵磁器製造技術が17世紀半ばまでには完成した。

柿右衛門様式の色絵磁器は温かみのある乳白色の磁肌（濁し手）、日本画の持つ左右非対称の構図と赤色に特徴がある（柿右衛門窯公式サイト参照 <http://www.kakiemon.co.jp>）。初代柿右衛門は色絵顔料の調合と焼付けに種々挑戦し、1643年に赤絵付けに成功している。当時の赤絵技術の詳細は明らかでなく柿右衛門窯では「赤絵具覚（他見無用）」として伝承されている。色絵の具の中でCuO、CoO、MnO<sub>2</sub>は800℃に加熱されたフリット中では容易に

図2 有田焼の断面構造写真

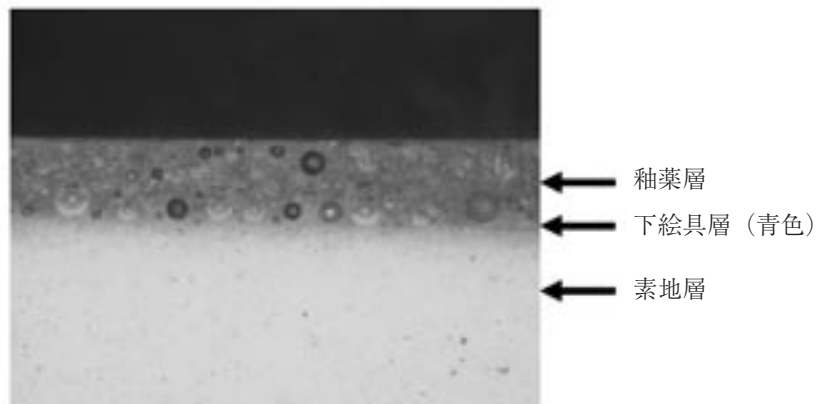
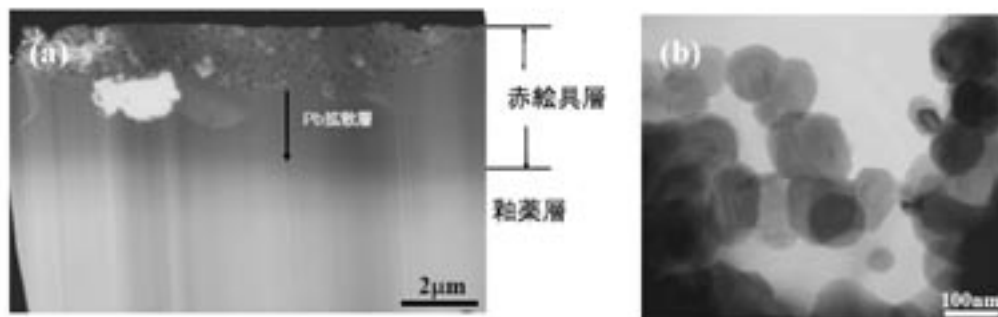


図3 赤絵具層の断面組織 (b) は (a) の拡大組織



イオン化して色ガラス状に発色しやすいが、 $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ はイオン化しにくく粒子サイズや形態、フリット中での分散状態が赤色の色彩に大きく影響を及ぼす。特に粒子サイズにより赤味が変化することは江戸時代から経験的に分かっていたようで、有田では赤絵具の作り方が窯元や絵具メーカーで伝承されている。赤絵具の技術が完成した江戸中期の $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ 顔料粉は現在有田に現存しないが、赤絵具で加飾された発掘古陶磁器破片の分析から当時利用されていた顔料粉を種々の化学的分析により評価することが可能である。図3は初期柿右衛門様式の赤絵具層の断面組織である<sup>10)</sup>。赤絵具層の厚さは約 $5\mu\text{m}$ であり、 $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ 粒子のサイズは $50\sim 150\text{nm}$ である。丸みを帯びている $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ 粒子が多く微粒化処理したことが推察され、満足する赤絵具を求めて先人もナノテクノロジーに果敢に挑戦していたと考えられる。

## V. 世界を魅了した有田焼

17世紀初頭、磁器生産の先進国であった中国では、オランダの東インド貿易会社（VOC）の発注により大量の磁器が生産されヨーロッパに輸出されていた。1604年から1657年には約300万個の製品が輸出されたと言われている。1644年の明王朝滅亡に伴う内乱で多くの窯が破壊され、ヨーロッパでの磁器の需要に対する生産能力の低下が低下したため、VOCは貿易磁器を他国に求めていた。当時、既に有田磁器

は中国磁器と同等の技術レベルに達しており、1646年には初代柿右衛門が赤絵物を売り始めていた。1650年には有田で磁器の生産が軌道に乗り始め、長崎出島からVOCにより有田焼が東南アジアへ始めて輸出されている。1659年から大量に中東やヨーロッパへ輸出されヨーロッパの王侯貴族を魅了し続けた。当時のヨーロッパの王侯貴族は宮殿などの加飾による権威誇示のために有田焼を競って買い続けたと言われている。その後、1684年には中国景德鎮窯が再興されて、生産・輸出が再開されるにしたがい、有田焼は厳しい価格競争に晒されるようになった。1710年にはベトガーがドイツマイセン窯で良質のカオリンを利用した高火度白色硬質磁器の開発に成功し、さらに1725年には同じくマイセン窯で色絵磁器を独自に完成させている。その後、マイセンでは柿右衛門様式磁器のコピー製品も簡単に出来るような技術レベルに達した。この様に有田焼の国際市場競争力の低下、ヨーロッパ磁器生産の確立による有田焼の優位性の低下、江戸幕府による輸出品制限などにより、最終的には1757年にオランダ東インド貿易会社による有田焼の輸出が打ち切られている。

中国磁器や有田焼に刺激されてマイセンで1710年に開発された磁器の製造技術は、その後、図4の様にヨーロッパ各地に広まり王侯貴族の庇護の下に現在まで続く名窯品を数々生み出している。イギリスでは磁器の白色度向上のための試行錯誤の結果、牛骨灰が添加され

たボーンチャイナがウェッジウッド等で開発され、有田磁器とは地肌の色合いが異なった高級品へと発展していった。

## VI. 大槻眞一先生と有田焼

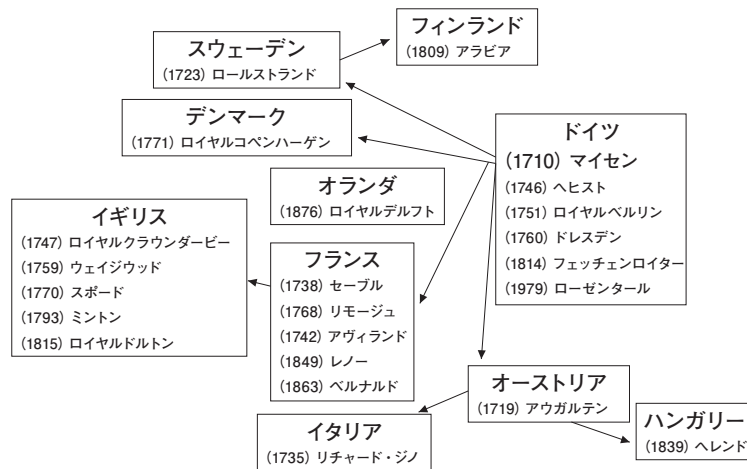
大槻眞一先生は佐賀県窯業技術センター（当時は窯業試験場）に平成元年4月1日に赴任され平成3年5月31日まで勤務された。佐賀県窯業技術センターや陶磁器業界の発展のためにグローバルな視点で数々の素晴らしい業績を残された。ここでは地域産業の発展に大きな影響を残された先生の代表的なご功績を紹介する。

第一は地方の公設研究機関における研究成果の知的財産化・権利化である。陶磁器技術は約400年前に確立された技術であり、長年に渡る地域固有の共有財産として認識されてきたため（誰でもいつでもどこでも）自由に利用できると考えられてきた。そのために、新しい陶磁器製造技術や関連の素材開発がされても知的財産権としての権利化が認識されずにモノづくりのノウハウとして伝承、利用され続けてきた。中国や東南アジアの安価な陶磁器が生産されるとともに、有田焼の生産は平成2年から低下し始めた。今後、有田焼が海外や国内他産地の陶磁器製品と競争して生産を拡大するには、有田焼

にも特許権、意匠権が必要であると力説され、研究成果の特許化促進、企業への技術移転、共同研究、技術指導などのシステム作りにも貢献された。平成元年にはセンターが開所されて始めての特許（陶磁器顔料の製造技術）が出願され、その後佐賀県内の企業に長年に渡って利用され、新製品開発に繋がった。現在まで、陶磁器、ファインセラミックス技術に関して国内外に特許をこれまでに36件出願し、24件が権利化され多くの企業（44社）に活用されている。

第二は先端技術の利用促進に大きな功績を残された。大槻先生は当センターをご退職後も有田を度々訪問され将来の佐賀県産業の発展に必要なとなる新技術の紹介や導入に貢献された。佐賀県主催の新技術普及セミナーにも参加していただき、当時、兵庫県（Spring-8）、滋賀県（立命館大学SR）に設置され始めた放射光利用の素晴らしさと佐賀県における将来的利用の必要性を力説され、多くの事例を示しながら講演していただいた。その後、佐賀県鳥栖市に佐賀県立九州シンクロトロン光研究センターが設立され、XAFS、XPS、XRDなどの最先端の分析や材料開発が行なわれている（<http://www.saga-ls.jp>）。現在、当センターは有田焼の発色のメカニズム解明と材料開発に放射光を利用している。大槻先生の永年のご支援により稼動し

図4 ヨーロッパにおける硬質磁器技術の伝播経路



ている放射光技術を利用して、再度世界の人々に愛される「次世代の有田焼」の開発を推進しているところである。

#### 参考文献

- 1) 平成 17 年度地域における「ものづくり」の強みに関する調査研究報告書, 社団法人 日本機械工業連合会, 社団法人 三菱総合研究所発行 (2006 年 3 月)
- 2) 有田町史 (陶業編 I), 有田町発行 (1985 年)
- 3) 日本磁器 400 年展一名品でたどる栄光の歴史一, 矢部良明, 源 弘道監修, 朝日新聞西部本社発行 (1985 年)
- 4) 有田窯業の流れとそのあしあと (香蘭社百年の歩み), 香蘭社社史編纂委員会発行 (1980 年)
- 5) 世界の中の有田, 深川 正著, 西日本新聞社発行 (1975 年)
- 6) 日本の赤絵, 磯野風船子, 永竹 威監修, 朝日新聞西部本社発行 (1979 年)
- 7) 白磁の美 (中国・朝鮮・日本・現代), 佐賀県立九州陶磁文化館発行 (1986 年)
- 8) 古伊万里探求, 野田敏雄著, 創樹社美術出版 (1995)
- 9) ヨーロッパ名窯図鑑, 講談社発行 (1988)
- 10) 勝木宏昭, 金子賢治, 化学と工業, Vol.61, p.142-144 (2008)