題名	人工物の科学と技術
Title	The Science and Technology of Made Things
著者名	W・デービッド・キンガリー
Author(s)	W. David Kingery
言語 Language	日本語・英語　Japanese, English
書名	稲盛財団：京都賞と助成金
Book title	The Inamori Foundation: Kyoto Prizes & Inamori Grants
受賞回	15
受賞年度	1999
出版者	財団法人 稲盛財団
Publisher	The Inamori Foundation
発行日 Issue Date	12/25/2000
開始ページ Start page	100
終了ページ End page	124
ISBN	978-4-900663-15-8

人工物の科学と技術

W・デービッド・キンガリー

一般聴衆の方々にお話しするに際しては、まず「セラミック材料科学とは一体何か？」という、私がよく受ける質問から始めるのが適切であろうかと存じます。その答を知るには、私たちの暮らしているこの世界が、自ら作り出した物質と経験で得た知識・能力によって成り立っているのだということを、最初にしっかりと認識していただく必要があります。我々は、人工物の世界に生きております。それが何よりもまず、私たちと他の動物種を区別し、また人類誕生以前の世紀と誕生以後を峻別するものであります。

現代の生活にあっては、人工物の生産と使用、あるいは急増する人工的な経験の生産と使用こそが、本質的な活動であります。我々は多くがこの状況に慣れ切ってしまい、至極当然のこととしてとらえていて、気にも留めずにいます。しかし、ちょっと想像してみてください。電気や電灯、テレビ、写真、ビデオ、カメラ、パソコン、自動車、列車、飛行機、核兵器、電話、Eメール、ファックス、電子レンジ、本、映画、ワクチン、アスピリン錠剤、高速道路、橋梁、口紅、宝飾類、食器、ナイフ等々のない私たちの暮らしとは、一体どのようなものでしょうか？ いま例示したものは、全て人が開発した材料でできております。そのような材料の進歩がなければ、技術の進歩もあり得ないわけであります。

材料科学は、材料の構造と特性を扱うものです。ボーアの原子モデルとして皆様もご承知のように、原子というのは、正電荷を帯びた小さな原子核の周りを、負電荷の電子のクラウドが取り囲む形状になっております。この電子の配列が、物質のほとんどの特性を決定いたします。鉄やアルミといった金属の場合は、電子が原子核を離れて自由に動ける状態になっています。シリコンのような半導体では、温度を上げたり添加剤を加えたりすることで電子が動けるようになります。またセラミックスやプラスチックにおいては、電子が原子にくっついて正イオンや負イオンを作ったり、原子間に固定して共有結合を形成したりします。材料というものは、以上のように大きく分けることができるわけですが、中でも様々な点で最も興味深いのが、無機のセラミックスと、大半の自然材料を構成する有機のポリマーでありましょう。どちらの材料も2種類以上の原子を持ち、何千通りもの原子の組み合わせにより、何百万通りもの構造と特性を持ち得るものであります。

図1で示す通り、材料技術とは、用途を絞った人工材料の設計・製造・利用に関係する科学・工学の一分野であります。人工物の科学とは本質的に単純なものであり、構造と組成、また、それらによって決定される特性ということに尽きます。しかし、

THE SCIENCE AND TECHNOLOGY OF MADE THINGS

W. David Kingery

For a general audience it is perhaps appropriate to begin with a question I often hear: “What exactly is Ceramic Materials Science?” To understand the answer to that question it is necessary to fully comprehend that we live in a world surrounded by things and experiences that we ourselves have produced. We live in a world of *made* things. That is what distinguishes humans from other animal species and *our* era from previous times.

Our production and our use of made things, and increasingly of made experiences, are the principle activities of modern life. This fact is so commonplace, so taken for granted, so much an unremarkable truth that most of us give it not a passing thought. But imagine what our life would be without electricity, electric lights, TVs, photography, VCRs, cameras, PCs, automobiles, trains, airplanes, nuclear weapons, telephones, e-mail, telefax, microwave ovens, books, movies, vaccines, aspirin tablets, highways, bridges, lipstick, jewelry, dishes, knives and on and on. All of these things are made of contrived materials; without advanced materials there would be no advanced technology.

Materials science is concerned with the structure and properties of materials. We are all familiar with the Bohr atom comprised of a tiny positive inner nucleus surrounded by a cloud of negative electrons. The configuration of these electrons determines most of the properties of matter. In metals, like iron and aluminum, the outer electrons are free to move; in semi-conductors, like silicon, outer electrons become mobile as the temperature increases or additives are present; for ceramics and plastics the outer electrons are attached to atoms and form positive and negative ions or fixed between atoms and form covalent bonds. These are the main classes of materials. In many ways the most interesting of these materials are the inorganic ceramics and the organic polymers which make up almost all natural materials. These classes of materials are constructed of two or more kinds of atoms which can be arranged in thousands of different ways to form millions of different structures and properties.

Materials technology is that branch of science and engineering which is concerned with the purposeful design, production and use of man-made materials as shown in Fig 1. At its core the science of made things is simple – structure, composition and resulting properties are the things we need to know. But the purposeful production of made things requires a series of activities, each with operational principles (how they work) worthy of study, and uses, how made things perform. Newly invented or improved made things, newly invented or improved

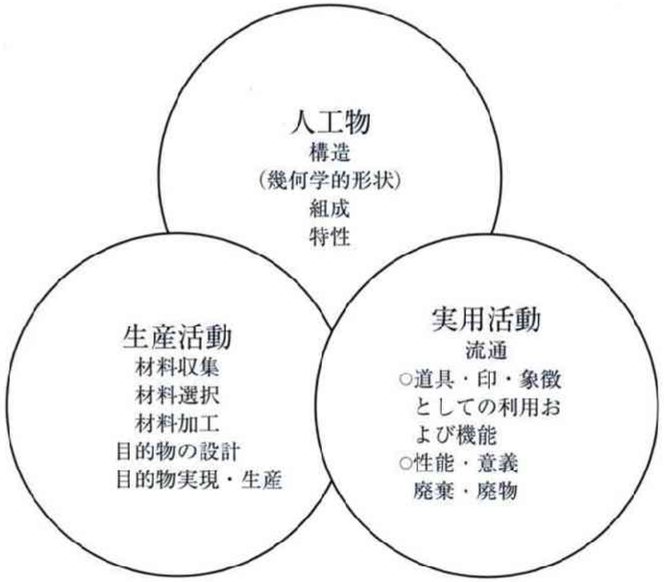

図１　先端技術とは、上記の３つの円が重なり合った部分において最も適切に説明し得るものである。種々の活動の結果生産された、特殊な組成、構造、特性を有する人工物は、様々な状況で流通し、使用され、その役割を果たすこととなる。

用途を絞って人工物を製造するには、研究や利用に値する動作原理（いかに機能するか）、つまり人工物がどう役立つか、を踏まえた一連の系統立った活動が必要となります。新たに発明・改良された人工物、新たに発明・改良された生産方法、さらにまた新たに発明・改良された利用方法の３つがあいまって、現代の先端技術の中核をなしているのです。

化学は、材料科学にとって重要な要素であり、材料工学にとっては大切な手段であります。私がこの分野に足を踏み入れることになったのは、無機化学を専攻していた大学時代、基礎科学の卒業論文として「A Spectrophotometric Investigation of Bismuth Thiocyanate Complexes」（分光測光法によるビスマス－チオシアン酸錯体の研究、W. D. Kingery and D. N. Hume, *Journal American Chem. Soc.*, 71, 2393, 1949年）を書いたことが契機となりました。この研究は私にとって興味深いもので、テーマも意欲を掻き立てるものでしたし、化学全般の知識を身につけるのにも役立ちました。夏休みに皮革の研究施設でアルバイトをしているうち、私はもっと意義のある研究をしたいと思うようになりました。幸い奨学金を受けることができ、マサチュ

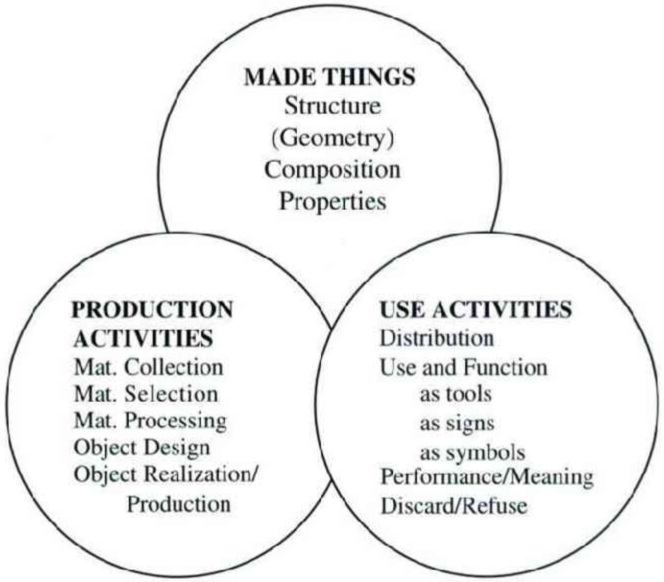

Fig.1 Advanced technology is best envisioned in three spheres. Made things with particular compositions, structures and properties are produced by several activity groups and then distributed, used and perform in a variety of different contexts.

production of made things and newly invented or improved uses of made things comprise the core of modern advanced technology.

Chemistry is an important component of materials science and an important tool of materials engineering. I came into the field as a university student of inorganic chemistry doing an undergraduate thesis in basic science published as "A Spectrophotometric Investigation of Bismuth Thiocyanate Complexes" (W. D. Kingery and D. N. Hume, *Journal American Chem. Soc.*, 71, 2393, 1949). This study was an interesting and challenging problem for me and an overall contribution to chemical knowledge. A summer job in a leather research laboratory whetted my interest in more purposeful research. I was fortunate to receive a stipend as a graduate student working with Professor F. H. Norton at the Massachusetts Institute of Technology. Professor Norton's special field of competence was high temperature refractory materials and with him I completed a Ph.D. thesis on chemical phosphate bonding of refractories. This was published by the American Ceramic Society and led me into the world of ceramic science.

F. H. Norton was an extraordinary person. His SB degree was in physics and

ーセッツ工科大学（ＭＩＴ）の院生として、Ｆ・Ｈ・ノートン教授の下で研究する運びとなりました。ノートン教授が特に得意としていた分野は高温耐熱性材料で、私は教授と共に耐火性のリン酸塩結合に関する博士論文を書き上げました。これをアメリカ・セラミック学会で発表したのが契機となって、私はセラミックス科学の世界に身を置くようになった次第です。

Ｆ・Ｈ・ノートンという人は非凡な方で、物理で理学博士号を取って後、まずＮＡＳＡに入り、それからバブコック・ウィルコックス社に移って、発電所向けの耐熱材の開発に従事するという経歴の持ち主でした。彼がＭＩＴに来たのは1933年のことでした。彼の著書『*Refractories*（耐熱材）』（1942年）の第２版は、往時の産業界のスタンダードとなりました。ＭＩＴでは、もっぱら耐熱材の高温変形および粘土・粘土素地の特性を研究対象としていました。陶芸の天分にも恵まれ、その著書『*Elements of Ceramics*（セラミックス入門）』や『*Ceramics for the Artist Potter*（陶芸作家のためのセラミックス論）』は、既に古典としての地位を確立しています。また引退後も、『*Ceramic Oxides*（セラミック酸化物）』という本を出版する予定でした。ＭＩＴの大学院で彼が中核となって進めたプログラムは、学際的にセラミック科学を扱う、およそ前例のないものでした。学生たちは、例えば、地質学科および物理学科では結晶学とＸ線回折、電気工学科では電気科学、化学科では古典熱力学、物理学科では分光学、化学工学科および冶金学科ではコロイド科学というように、名高い教授陣の指導を受けました。ノートン教授が無口で控えめな人柄であったこともあり、彼が学際的な材料科学の発展のために果たした役割は、十分評価されてまいりませんでした。それゆえ、様々な要素を一つに取りまとめて現代のセラミック科学の体系を作り上げるのは、私の役回りとなりました。

第二次世界大戦中、ＭＩＴの冶金研究所はマンハッタン計画の一端を担っており、ジョン・チップマンがこれを指揮していました。Ｆ・Ｈ・ノートンが先頭となって、ウラニウムやプルトニウム用の高純度かつ安定した耐熱材の開発を進めました。これが、ノートン教授にとって初めての先端的な酸化・硫化・窒化セラミックスの研究となりました。当時、セラミック科学という分野は、まとまっておらず、研究範囲も限られていました。そこで旧原子力委員会がＭＩＴにセラミックス基礎科学課程を設け、ここが以降四半世紀の間、私の大半の研究の拠点となりました。

往時より今日に至るまで、ＭＩＴは、材料科学と先端セラミックス研究の発展に輝かしい貢献をしてまいりました。私のかつての同僚の中では、ロバート・コーブル

his early career was with NASA and then with Babcock-Wilcox Co. developing refractories for power generators. He came to M.I.T. in 1933. The second edition of his book *Refractories* (1942) was a standard for the industry. His interests at M.I.T. focused on high temperature deformation of refractories and on the properties of clays and clay bodies. He was a gifted ceramic sculptor and his books *Elements of Ceramics* and *Ceramics for the Artist Potter* are classics. Later, in retirement, he would publish *Ceramic Oxides.* The graduate program he nucleated at M.I.T. was the first interdisciplinary ceramic science program anywhere. Students studied with a famous distinguished faculty: crystallography and x-ray defraction in the Geology and Physics departments, electrical science in the Electrical Engineering department, classical thermo-dynamics in the Chemistry department, spectroscopy in the Physics department, colloid science in the Chemical Engineering and Metallurgy departments. Norton was a quiet and unassuming man and his role in the development of modern interdisciplinary materials science has not been fully appreciated. It became my task to bring together these various strands and build the structure of modern ceramic science.

During World War II a small part of the overall Manhattan Project was the Metallurgy Lab at M.I.T. under the direction of John Chipman. F. H. Norton directed that part of the program aimed at developing high purity stable refractories for Uranium and Plutonium. This was his first effort in advanced ceramic oxides, sulfides and nitrides. At that time ceramic science was limited and scattered. The Atomic Energy Commission initiated a program of Basic Science of Ceramics at M.I.T. which came to support most of my researches for the next quarter century.

At that time and to this day, M.I.T. has been a wonderful incubator for the development of Materials Science and Advanced Ceramics research. Among my early colleagues Robert Coble (*dec.*), Al Cooper (*dec.*), and Yasumichi Oishi are notable. We worked together on a series of experimental and theoretical developments that provided a foundation for the emerging field of ceramic materials science. In recent years, I have tried to encourage the engineering program at the University of Arizona to recognize that engineering is a social activity, an essentially human activity. That belief began early in my career under the influence of Professor John Chipman, an internationally recognized chemical metallurgist who was head of the M.I.T. Department of Metallurgy. He was enormously helpful to a young colleague trying to get his feet on the ground. By 1960 or so, the various strings of interdisciplinary efforts that F. H. Norton and I had brought together as a program of

(故人)、アル・クーパー(故人)、大石行理などが著名です。我々が力を合わせて成し遂げた一連の実験法や理論の発展が下地となって、セラミック材料科学という新しい分野が誕生したのであります。近年私はアリゾナ大学にあって、工学とは一種の社会活動であり、また本質的に人間的な活動であることを学ぶプログラムの促進に従事してまいりました。私がこのような信念を持つようになったのは、研究生活の初期にジョン・チップマン教授の影響を受けたことにあります。化学冶金学者として国際的に著名なこの教授は、当時、MITの冶金学科の学科長を務めておりました。

自分が専門とする分野に足がかりを求めていた後輩の私にとって、チップマン教授はまことに頼りになる存在でした。1960年頃までには、F・H・ノートン教授と私がセラミック科学として学際的に取り組んできた様々な研究が、一回り大きな材料科学・工学という枠組の中にまとまり始めました。その陣頭に立ったのは、モーリス・コーエン教授(1987年京都賞受賞)と、材料工学調査委員会(COSMAT)の議長、ウィリアム・O・ベーカーでした。2人の指揮の下でまとめた「Summary Report(概要報告書)」が1974年に全米科学アカデミーから発行され、反響を呼びました。

本の執筆は私にとって喜びであり、ためになる体験で、読者よりもむしろ著者の私の方が楽しんでいたのではないかと思います。私は耐熱材の研究に従事していた若かりし頃、最初の自著『*High Temperature Measurements*(高温測定法)』を書きました。出版年は1959年ですが、絶版となって久しい本です。セラミック材料科学という分野が確立されつつあった胎動期には、『*Ceramic Fabrication Processes*(セラミック製作プロセス)』(1958年)の内の一巻の編集作業にあたり、『*Kinetics of High Temperature Process*(高温処理の動力学)』(1959年)を編集したほか、『*Introduction to Ceramics*(セラミックス材料科学入門)』(1960年)の第1版が出版されました。この『セラミックス材料科学入門』において、私は、有益なセラミック技術のための一手段としてのセラミックス科学、という展望を著しました。それまで経験則的な手工芸であったセラミックスに、科学的裏付けを与えたわけです。自らの能力の限りを尽くして取り組むテーマを見つけるべく、分野の垣根を広げようという姿勢を持った様々な人々、大勢の学生、化学者、物理学者、エンジニアたちが、この視点を広く支持してくれるようになりました。『セラミックス材料科学入門』の意義は、後の豊かな成果につながっていく道筋を照らし出したという、その一点にあります。

ここで図1に話を戻しますと、セラミックスを巡る活動を表した3つの円は、いずれもセラミック先端技術の発展を実現させるに欠かせない要素であります。このよう

ceramic science began to coalesce on a larger scale as materials science and engineering. Leadership roles were played by Professor Morris Cohen (Kyoto Prize Laureate in 1987) and William O. Baker, who chaired the Committee on the Survey of Materials Science and Engineering (COSMAT) that prepared an influential "Summary Report" published by the National Academy of Sciences in 1974.

Writing books has been more of a pleasure and learning experience for me than for my readers. Early on as a young man doing research with refractories, I wrote my first book on *High Temperature Measurements*, published in 1959 and now long out of print. During the ferment of ceramic materials science crystallization, I edited a volume on *Ceramic Fabrication Processes* (1958), one on *Kinetics of High Temperature Process* (1959), and published the first edition of *Introduction to Ceramics* (1960). *Introduction to Ceramics* provided a vision of ceramic science as a tool for purposeful ceramic technology. It helped move ceramics along the path from empirical craft to becoming a science-based activity. It came to be a vision attractive to a wide variety of students, chemists, physicists, and engineers ready to have their boundaries extended and within which they could find problems able to test them to their capacity. The importance of *Introduction to Ceramics* lies in its implications for roads toward fruitful results in the future.

Turning back to Fig. 1, each of the three spheres of ceramic activities is essential to the attainment of advanced ceramic technology. This recognition led me to move back and forth between different areas of research affecting the overall progress of the advanced technology of ceramics, from refractory compositions and performance and the underlying science of refractory failure processes in use (thermal shock, corrosion) on the one hand to production activities, particularly those occurring at high temperature, on the other. It was soon after this that one of my models of what a materials scientist should be, Professor Cyril S. Smith, came to M.I.T. Smith was a metallurgist who played an important role in industry and an important role in the Manhattan Project. He was also an insightful metallurgical historian. He convinced me, correctly, that I would have more pleasure in my work and accomplish more if I changed my principal research interest every sabbatical period (7 years) or so and looked at new problems with a fresh viewpoint. I have done so. That philosophy led me to spend a few years thinking of ice as a ceramic. This had previously been attempted on a grand scale by the British during World War II with the purpose of constructing an unsinkable airbase in the north Atlantic. Natural icebergs, natural sea ice and manufactured ice shapes were considered

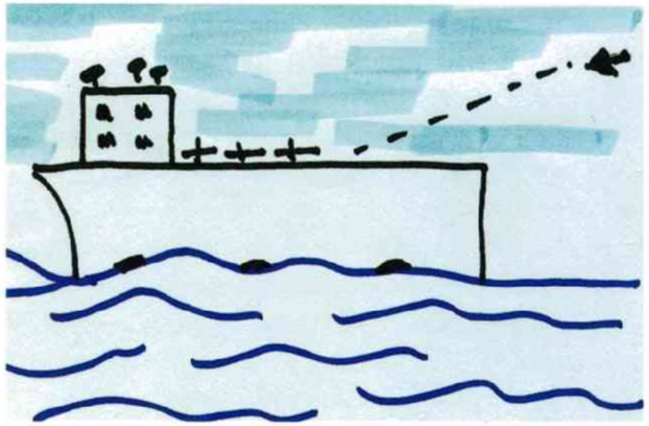

図2　セラミックベースの人工物として計画された過去最大のものは、重さがおよそ200万トンに達するようなものだった。

Fig. 2 The largest conceived ceramic matrix man-made thing was designed to weigh about 2 million tons.

な認識の下、私は、セラミックス技術全体の発展に関わる研究分野であれば、あるところでは、耐熱組織・性能、および使用による耐熱性劣化のプロセス（熱衝撃、溶食）に関する基礎研究、他所では（特に高温下における）製造活動について、といった具合に、その垣根を越えてあちらこちらと渡り歩いてまいりました。その後まもなく、材料科学者とはかくあるべしというお手本のような存在のシリル・Ｓ・スミス教授がＭＩＴにやってまいりました。スミス教授は、産業界、あるいはかのマンハッタン計画においても重要な役割を果たした冶金学者であります。洞察力を備えた冶金学の歴史通でもありました。「サバティカル休暇期間（７年ごと）の度に研究テーマを変え、新たな視点からさらなる課題に取り組めば、より多くの成果をあげられるし、喜びもまた大きいのではないか」と私が考えるに至ったのは、教授の的確な助言に負うところ大であります。私はこれを実行しました。こうした考えのもと、私は、「セラミックスとしての氷」というテーマに数年を費やすことになりました。これと同様の、しかし遥かに壮大な試みとしては、第二次世界大戦中、英国が不沈空母（空軍基地）を北大西洋に作ろうと建策した計画があります。天然の氷山や海氷、あるいは人工的に固めた氷などが検討されましたが、結局どれも不可能との結果が出ました。氷に混ぜるための先端材料が必要だったのです。最初、この浮体基地は、氷を母体として木材繊維で強化した複合物で作られる予定でした。その材料はピクリートと命名されました。ほとんど200万トンという、かのクイーン・エリザベス二世号の26倍にも達するような重さの代物が設計されました（図２）。全般的には優れた設計ではありましたが、いかんせん製造可能性という点で難がありまして、結局建造には至りませんでした。私が

図3　石膏と貝殻でできた、有名なエリコの新石器時代の彫像（写真提供：イスラエル博物館）。W. David Kingery, Pamela B. Vandiver and Tamar Noy, Materials Research Society Bulletin, p.46, January 1992 参照。

Fig. 3 The famous Neolithic Jericho sculpture made of plaster and shell (Courtesy Israel Museum Archive). See W. David Kingery, Pamela B. Vandiver and Tamar Noy, Materials Research Society Bulletin, p.46, January 1992.

but found unacceptable. An advanced ice alloy material was required. The floating base was to be made of an ice matrix composite strengthened with wood fiber: This material was called Pycrete. The visionary design was to have weighed nearly 2 million tons, 26 times that of the Queen Elizabeth II (Fig. 2). It was a good design in all aspects except manufacturability. It was never constructed. My much more modest efforts with ice were more successful. We landed the entire inventory of U.S. airplanes on ice at Thule, Greenland and observed their behavior on reinforced ice alloy parking areas we had constructed to test static fatigue-strength. An ice-matrix composite does in fact constitute a satisfactory ceramic material.

A few years later, Cyril Smith nucleated a new interest when he handed me a few ceramic shards he had recovered on a trip to Iran. Ceramic shards form the great mass of artifacts collected at an archaeological site as they are rather easily broken but almost immune to corrosion in earthy surroundings. A group of graduate students and I applied a variety of tests to determined how and from what they had been made. I later was able to infer that Egyptian copper smelting was done in day furnaces and that one of humankind's earliest made materials was the thermochemical transformation of limestone rock into completely new shapes made from lime plaster. This new made material, unknown in nature, was widely used in Neolithic times as an architectural material as well as for Neolithic jewelry and Neolithic sculpture. The sculpture, shown as Fig. 3, is an early example of prehistoric advanced materials technology. I became convinced and remain convinced that a full understanding of modern advanced technology requires an

氷を相手に手がけた、ずっとささやかな研究の方は、より多くの成果をあげることができました。我々はグリーンランドのテューレで静疲労強度を調べるために強化氷合金の駐機場を建造し、ありとあらゆる型の米空軍機をその上に氷上着陸させて、各航空機がどのような挙動を示すか観察しました。氷を母体とした複合物は、確かにセラミック材料としての条件を充分備えているのです。

その数年後、新たな研究に着手するにあたり、シリル・スミス教授はイランの旅先で見つけてきたという焼き物（セラミックス）の破片を幾つか私に手渡しました。そのかけらは、ある遺跡発掘調査の現場で採集された山のような遺跡の一部で、壊れやすくはありましたが、土中に埋もれていてもほとんど侵食を受けていなかったのです。院生グループと私とで様々な試験をして、この焼き物のかけらがどのようにして作られたのか、また、何でできているのかを調べました。後になって私は、エジプトにおける銅精錬は地表炉で行われていたのではないか、あるいは人類最古の人工材料は、石灰石に熱化学的成分置換を行って作られた、石膏性の全く別物の物質なのではないかと、推測するに至りました。新たに生まれたこの新材料は、それまで自然界には存在しなかったもので、新石器時代の建材や装身具、さらには彫像に盛んに用いられておりました。図3に示した彫像は、先史時代の先端材料技術を示す初期の一例です。現代の先端技術をしっかり理解するには、先端技術の歴史という流れの中での位置付けを把握しなくてはならない、と私は確信するようになり、今もなおその確信に変わりはありません。私はこの、技術の歴史的位置付けというテーマに取り組んでまいりました。

セラミック材料科学と先端技術の歴史は、第二次世界大戦中の兵器研究に伴って転機を迎えます。ジェットエンジン、マイクロ波装置、原子力、半導体通信装置、そして電子計算機が進歩し、手ごろな値段で一般に普及するようになって、世の中は明らかに大きく変容しました。こうしたことが起こったのは、大部分、先端技術を可能にした先端材料があったことに拠ると言えましょう。図4は、先端技術において先端材料が担う役割がどう拡大したのかを示すもので、斎藤進六教授の著書『ファインセラミックス』からの引用です。1983年当時、セラミック材料が様々な先端技術に採り入れられていた状況がわかります。用途の数は、今では当時の倍になっているのではないでしょうか。

上記の各用途、あるいはその他より多くの用途のためにも、先端材料科学・技術が果たしている重要な役割がご理解いただけると思いますが、ここでは、もっと時代を

understanding of advanced technology in its historic and prehistoric context, studies that I have undertaken.

The history of ceramic materials science advanced technology reached a turning point with weapons research during World War II. It was clear that advances in jet engines, microwave devices, nuclear power, semiconductor communication devices and electronic computing would transform the world as they became available to a wide range of user groups at affordable prices. That occurred and it was due in large part to the advanced materials which made these advanced technologies available. The expanded critical role of advanced materials in advanced technology is illustrated in Fig. 4, taken from *Fine Ceramics* by Professor Shinroku Saito, showing the wide variety of advanced technical applications of ceramic materials in 1983. The number of applications has probably doubled since then.

The key role played by advanced materials science and technology could be illustrated for any one of these applications and many more. It seems preferable to discuss a more remote historical example. I'd like to tell you about the advanced ceramic technology embedded in the production and use of high technology Italian story-telling *istoriato* maiolica some 500 years ago.

During the period 1485-1550 there developed in central and northern Italy a new advanced technology for ceramic glazes that was accompanied by a new painterly technique that transformed the nature of advanced ceramics. This new advanced technology occurred in the context of monumental changes in the economics, social structure and culture of Western Europe. During the 13th and 14th centuries the main strengths of the Italian economy came to be commerce, banking and specialized manufacture. The growth of commerce led to the development of large capital cities that were commercial and banking centers. In this environment a new wealthy middle class and urban patricians substituted taste and refinement for aristocratic genealogy, feudal estates, military accomplishments and the trappings of chivalry. The urban nouveau rich, who were extra establishment, subsumed the old establishment, which later joined the urban patricians in the development of new conceptions and standards of taste and culture.

Tin oxide glazed pottery was being made in Italy by the 13th century. It was mostly decorated with copper green and manganese brown-purple designs. These are "solution" colors that dissolve and diffuse through the glaze such that edges of drawings cannot be kept crisp and clear. In the 15th century the top-of-the line ceramics were imported from Valencia as illustrated with this beautiful winged vase

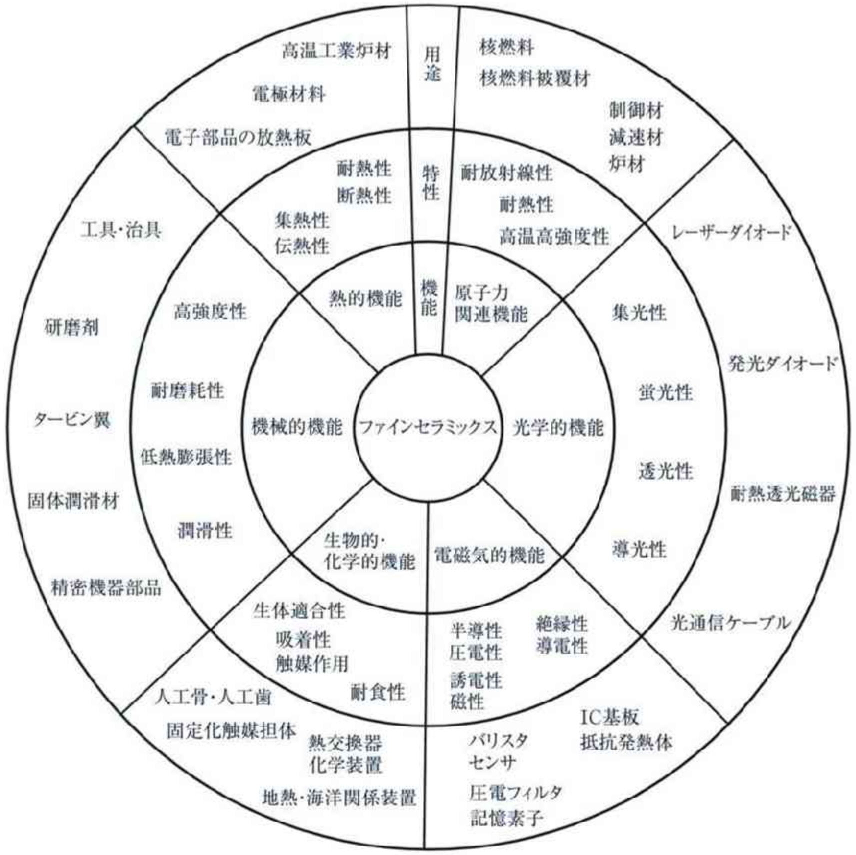

図4　ファインセラミックスの機能と用途例（斎藤進六著・1983年4月（社）日本ファインセラミックス協会刊『ファインセラミックス技術開発動向および関連機器の開発状況調査』より。*Fine Ceramics*, Elsevier Pub. Co., NY（1985）参照）

遡った例を挙げるのが良いように思われます。約500年前、イストリアートと呼ばれる物語の絵を施したイタリアの陶器、マヨリカの製造に、先端セラミック技術が採り入れられていたというお話をしたいと思います。

1485年から1550年にかけて、イタリア中央部および北部で、焼き物の釉薬の新技術が開発されました。この先端技術が生まれた背景には、当時の西欧における経済、社会構造、文化の画期的な変革があります。13世紀から14世紀のイタリア経済は、商業や金融、専門的手工業等によって支えられておりました。商業規模の拡大に伴い、商業と金融の中心地として大都市が発展しました。このような状況の中、新たに登場し

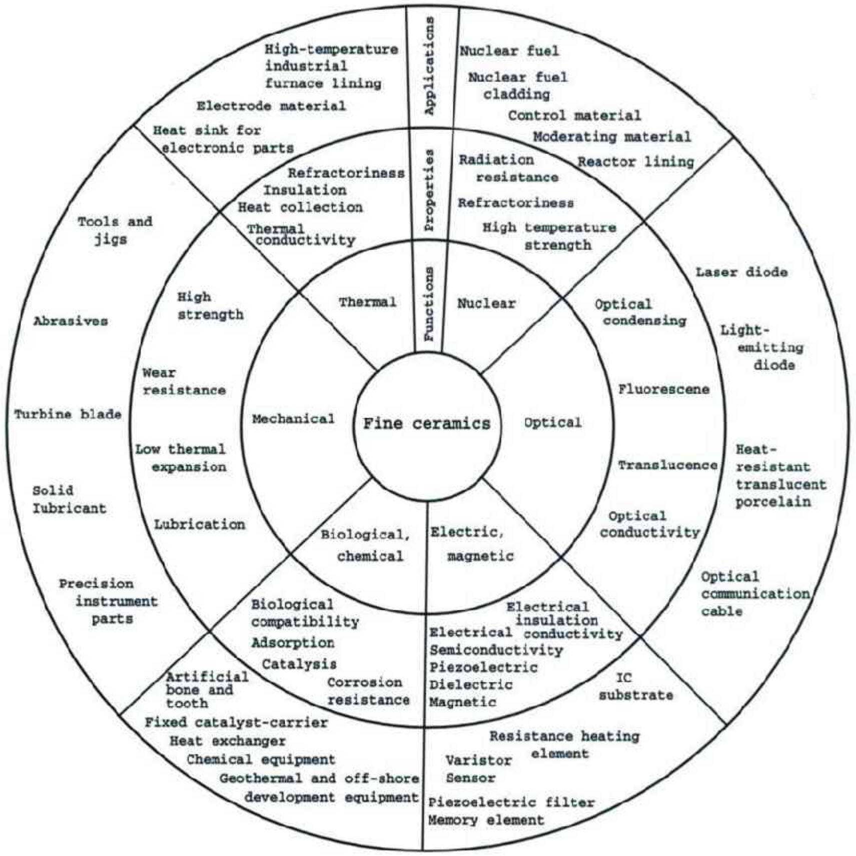

Fig. 4 Some functions and applications of fine ceramics (from Japan Fine Ceramics Assoc., "Survey of Trends in Development of Fine Ceramics Technologies and Situation of Development of Related Equipment," April 1983, see Shinroku Saito, *Fine Ceramics*, Elsevier Pub. Co., NY (1985).

(Fig. 5). Drawing was an important constituent of the Italian art skills. The new revolutionary advanced ceramics combined this skill with new technical development to produce ceramic works of art such as the Perseus and Andromeda plate shown in Fig. 6. This plate, 27 centimeters in diameter with a sunken center and broad flat border, is now at the Boston Museum of Fine Arts. Painted in the center are the arms of Gonzaga impaling those of Este supported by two *putti*. The candelabra on a shield hanging from the tree on the right and musical pause below the coat of arms are personal devices of Isabella d'Este. As with many *istoriato* plates, the inspiration comes from Ovid's *Metamorphoses*, popular tales in the Renaissance and

図５　バレンシアからイタリアに輸入された15世紀の翼壷（写真提供：大英博物館）

Fig. 5 Fifteenth century Winged Vase imported to Italy from Valencia (Courtesy of the Trustees of the British Museum).

た豊かな中産階級や都市貴族たちは、貴族の血統や封建制度下の領地、戦での手柄、騎士的装飾といった事柄を捨て去って、趣味の良さや洗練を重んじるようになります。かつては既成体制の主流層の添え物的存在であった都市の新富裕層が、旧体制主流派を呑み込んでしまい、その後、趣味や文化についての新しい概念や標準が発達するに伴って、都市貴族の仲間入りをしていったわけであります。

イタリアでは、13世紀には既に酸化錫釉の陶器が作られておりました。そのほとんどが銅の緑とマンガンの茶紫で彩色されていたのですが、この顔料には、焼成時に釉薬に溶解・拡散されるので、図柄の輪郭がぼやけてしまうという難点がありました。15世紀に入ると、最高級の焼き物としてバレンシアからの輸入品が出回りました。その一例がこの見事な翼壷（図５）です。描画技術は当時のイタリア美術を語る上で欠かせない要素ですが、さらに全く新しい焼き物技術が入ってきたことで、描画の技能と陶器製作技術の進歩が結びつき、図６の＜ペルセウスとアンドロメダ絵皿＞のような作品が生み出されるようになりました。直径が27センチで、中央部がくぼみ、縁部分は広く平らになったこの絵皿は、現在ボストン美術館に所蔵されております。中央に描かれているのは、２人のプットー（天使の絵のような、裸の子供）が掲げるゴンザーガ家とエステ家の紋章の組み合わせです。右手の木から下がる燭台（カンデラブラ）模様の盾と紋章の下の楽譜の延声記号は、イザベッラ・デステの印章です。

イストリアートの絵皿に多く見られるように、オヴィディウスの『変身物語』に題

図６　＜ペルセウスとアンドロメダ絵皿＞ イザベッラ・デステの依頼により製作されたエステ＝ゴンザーガ家用セットの中の１枚。ニコラ・ダ・ウルビーノの1525年の作品。中央にゴンザーガ家とエステ家の紋章の組み合わせが入っている。宙に浮かんだペルセウスは、ヘルメスの靴をはきアテネの盾を持っており、さらに、その顔を見たものを石にしてしまうというメドゥーサの首を手にしている。岩につながれたアンドロメダは、このあと解き放たれペルセウスと結婚する。絵付けの下に「ビアンコ」と呼ばれる白色下地層があり、表面には「コペルタ」という、気泡を含んだ珪酸鉛の上掛けが施されている。釉焼きの際に皿の縁部分をピンでとめた形跡があるが、ピン跡は平らに削って処理してある。糸底と縁の黄色の帯模様はウルビーノ製品の典型。表と裏の両面に小さな孔がある。（ボストン美術館オーティス・ノークロス基金　カタログ番号41.105）

Fig. 6 Plate with Perseus and Andromeda from the Este-Gonzaga service made for Isabella d'Este ca. 1525 by Nicola da Urbino. The arms of Gonzaga impaling Este are in the center. Perseus is shown flying with the boots of Hermes, carrying Athena's shield, and also holding Medusa's head, which will turn the monster to stone as he gazes at it. Andromeda, chained to a rock, will soon be free to marry Perseus. There is a layer of white bianco ground under the painting and a lead-silicate coperta surface coating which contains a number of bubbles. For glost firing the plate was set with pins near the edge; pin marks have been ground off to give a flat surface. There is a yellow band at the foot and edge, typical of Urbino production, and a number of pinholes on both obverse and reverse. (Museum of Fine Arts, Boston, Otis Norcross Fund, catalog no. 41.105)

richly illustrated with woodcuts; the woodcut shown in Fig.7 is from a 1501 Venice edition. This particular painting is not at all a slavish imitation; Nicola has manipulated and placed the images to maintain balance on the circular form and interpreted the scene in his own style. The vast majority of *istoriato* paintings are much more closely derived from—indeed copied from—drawings, engravings, and paintings, as were many of Nicola's.

The painting technique used both blue and green diffusing colors typical of traditional ceramic decorative motifs, along with white, yellow, orange, and black that stay in place and permit fine detail and even *impasto*. A magnified view of

図７　オヴィディウス著『変身物語』1501年ベニス版の木版画。ペルセウス、メドゥーサ、アンドロメダ、お化け鯨が登場する冒険譚。

Fig. 7 Woodblock version of the adventures of Perseus, Medusa, Andromeda, and the dragon Cetus, from a 1501 Venetian edition of Ovid's Metamorphoses.

材を得ています。ルネサンス期に人気を博したこの書物には、木版画がふんだんに盛り込まれていました。図７の木版画は1501年のベニス版のものです。この皿の絵に限っては、木版画の盲目的な模倣とは全く異なります。陶画家ニコラは、円形上に絶妙な構図をとり、独自のスタイルでこの場面を表現しています。イストリアート文様の大多数は、ニコラの他の作品もそうですが、実際には丸写しといっていいほど忠実に既存の絵画や彫刻を模倣しているのと好対照です。

絵付けには、伝統的な陶器装飾モチーフに用いられてきた青と緑の拡散性顔料のほか、焼成してもくずれることなく細かい模様を表現でき、さらには盛り上げ効果まで生み出せる白、黄色、オレンジ、黒といった顔料が使われています。お化け鯨の頭部の拡大図（図８）では、バックの緑色が均等に流れ出ているのがわかります。これとは逆に、不溶性の白、黄色、オレンジの部分は少しも滲んでおらず、くっきりと筆跡が現れています。顕微鏡で見ると、上掛け層に気泡が観察されます。全体像と拡大像を比べ見ると、ニコラ・ダ・ウルビーノの描画センスに加え、新しい作陶技術があったからこそ生まれた独特の彩色法がよくわかります。1557年に出版された、チプリアーノ・ピッコルパッソーによる陶器製作法に関する書物では、陶芸の技法や手順、用具などが解説されていますが、全体の半分以上が釉薬、色、陶画デザインの説明に費やされており、この新技術の重要性を物語っています。

この新しい製陶技術と新しい画法の秘密は、図９に示す３層構造にあります。素焼きの下地に半透明の乳白錫釉「ビアンコ」が下塗りしてあり、その上に物語の場面が絵付けしてあります。使われている色のうちの少なくとも一部は、最低限の結合材を

図８　ニコラ・ダ・ウルビーノによるエステ家・ゴンザーガ家用セットの一部＜ペルセウスとアンドロメダ絵皿＞のお化け鯨の頭部拡大図。透明な「コペルタ」層ごしに、盛り上がった筆跡がはっきりと見える。

Fig. 8 Enlarged versions of Cetus's head on the Nicola da Urbino Perseus and Andromeda plate for the Este-Gonzaga service. Brush strokes in relief are clearly visable under the transparent *coperta* surface layer.

Cetus's head (Fig. 8) shows a background green that flows out uniformly. In contrast, brush work done with the insoluble white, yellow, and orange are clearly visible without any sign of flowing. Under the microscope, bubbles can be seen in a covering *coperta* layer. In combination, the overall view and the magnified portions illustrate the painterly technique made possible by the new technology as well as the skill and sensitivity of Nicola da Urbino's painting. An indication of the importance of the new technology is that more than half of Piccolpasso's 1557 text on pottery making, which describes the skills, methods, and equipment used, was devoted to the preparation of glazes, colors, and painted designs.

The essence of the new technology and the new painting technique is the three-layer *system* illustrated in Fig.9. Over the fired bisque body, an unfired white translucent tin-opacified *bianco* ground glaze was applied on which the narrative scene was painted. At least some of the paints consisted of insoluble pigment particles with a minimal binder content. These colors do not flow during firing, thereby allowing a hitherto unattainable precision of drawing to be achieved. Over the paint, a lead silicate *coperta* surface film wets out the irregular pigment layer and forms a bright smooth reflective surface. This three-layer glaze allowed the firing of hundreds of pieces in one setting of the kiln.

The considerations important for the development of this new class of advanced technology are shown in Table 1. Purposes and goals of the design change arise from a new social and economic context in the Italian Renaissance and denote an enhanced role of pottery as a social indicator. The normal configuration

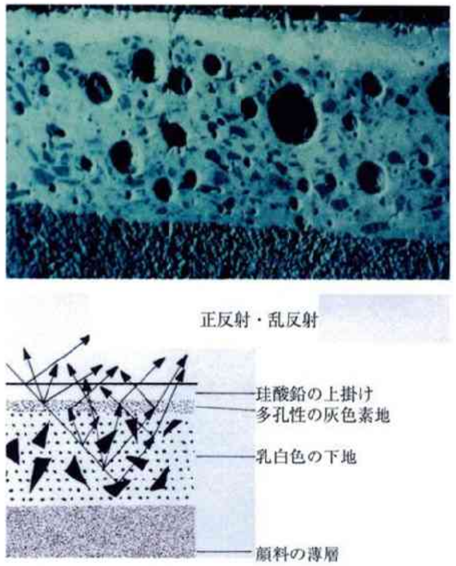

図9　(上)16世紀中頃のペザロ産マヨリカの黄色部分断面像(電子顕微鏡写真)。灰色がかった不透明な素地を、砂粒や気泡入りの乳白錫釉「ビアンコ」層が覆っている。薄い顔料層に上掛けした珪酸鉛は、顔料粒子の隙間に完全にしみ通っている。(下)断面概要図。表面ではね返される光もあれば、顔料層ではね返るものもあり、さらにその下のビアンコ下地まで達する光もある。

表1　イストリアート様式色絵マヨリカの意匠上の必要要素

目的　　　　　：財産形成／生活の質／社会指標（ステータスシンボル）

標準的構成要素：装飾タイル／薬壷／皿等

変革後の構成要素：物語画／３層釉掛け

一般的概念　：永続的土台に高品質の絵付けを施す

機能　　　　：高級焼き物と、絵画表現による社会・文化的識別要素との一体化

性能特性　　：性能／美観／機能／社会的・文化的位置付け／製造性／妥当なコスト

含んだ不溶性顔料紛から成っています。これらの色は焼成時に流れ去るということがないので、それまで不可能であった細かな線の描画が可能となったのです。彩色の上から施した「コペルタ」という珪酸鉛の上掛けは、不揃いな顔料層に染み通り、透明で滑らかな、つやのある表面を形成しています。この３層掛けにより、一度に何百という数の製品を窯入れして焼くことが可能となりました。

この新種の先端技術の発達に関する重要な考察点を、表１に挙げました。デザインの変化は、イタリア・ルネサンスという社会・経済状況の中から必然的に生まれたも

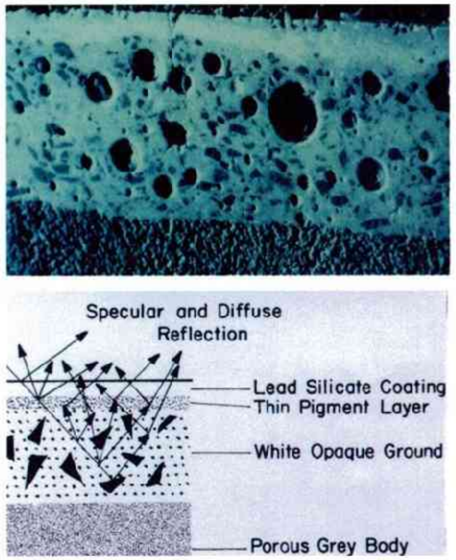

Fig. 9　(*Top*) Electron micrograph of polished cross section of yellow painted area of mid-16th-century Pesaro maiolica. The opaque grayish body is coated with a tin-opacified *bianco* ground in which sand grains and bubbles are present. The thin pigment layer is covered with a lead silicate *coperta* that completely wets and penetrates between the pigment particles. (*Bottom*) Schematic cross section illustrates how some light is reflected from the surface, some from the pigment layer, and some from the underlying *bianco* ground.

TABLE 1. DESIGN REQUIREMENTS FOR *ISTORIATO* MAIOLICA PAINTED WARE

PURPOSE: Wealth creation; quality of life; social indicator

NORMAL CONFIGURATION: Decorated tiles, pharmacy jars, plates, etc.

MODIFIED CONFIGURATION: Narrative drawing; three-layer glazes

NORMAL EXPECTATION: Quality paintings on permanent ceramic ground

OPERATIONAL PRINCIPLES: Incorporate pictorial socio/cultural identifiers in luxury ceramics

PERFORMANCE CHARACTERISTICS: permanence, aesthetics, functional, social and cultural identifier, manufacturable, moderate cost

ので、陶器は一種の社会的地位の指標として、より高度な役割をも担うようになりました。器の形状や実用的用途の一般的なあり方はさほどに変わりませんでしたが、物語の場面を描写する手法は、それ以前に普通とされた装飾形態とは大きく異なっております。これを可能ならしめたのは、図9で示したような、顔料と釉薬が新たな塗り重ね構造の形成によってであります。図案を細かく描き込むために用いられた着色材は、(油絵の具のような) 不溶性の顔料紛を含んだ艶のあるもので、焼成時にも滲んだり拡散することなく、あるべき場所にきちんと留まるよう、必要最低量のバインダ (結合材) が配合されていました。かくして、細かな描き込み、盛り上げ塗り、濃淡の調整といったテクニックが使えるようになったわけです。釉薬と顔料の特性のこうした点が、陶芸の変化の実質的な中身でした。ピッコルパッソーは、1557年の著書『陶芸三書』の半分以上を割いて、釉薬と顔料について述べています。取り扱い技術については、「上記の色が初期の焼成段階で流れ去ってしまうことが多いが、それは即ち調合の不首尾によるものである」とあり、そのような場合には再調合・再焼成が必要であるとしています。

陶画についての人々の常識は、大きく覆りました。技術革新により、焼き物は、多彩な物語や歴史的・神話的場面を描くためのキャンバスとなったのです。この新技法は、他の土台に描かれた絵画や図柄を基礎として発展したものと考えられます。元来、別々の工芸の「種」であったものが一つに組み合わさったこの結合は、ある意味で自然に逆らったものであり、それまでの自然淘汰的、進化論的技術革新による推測には当てはまらない異質な出来事であったと言えましょう。

この新技術の動作原理を考えると、一つの視点が、図9に示した正反射と乱反射を眺める視点となり得ます。結合した複数の動作原理が顔料粒子と釉薬の混合に関係して、拡散を防ぎ、かつ描画の緻密さを維持する役目を果たします。結合された動作原理の一つ一つが、特定の社会的背景における趣味・財産・地位・権力の象徴として、絵の主題がもたらす効果、色彩の鮮やかさ、描画技術、美学および「芸術品」としての形状等を備えなければなりません。一つの人工遺物の中に、このような動作原理が複数、織り込まれているのです。

このマヨリカの性能特性には、表1の設計概要に挙げたように、複数の要素があります。表2ではこれをさらに細分化して、この特性を強調したり変化させたりするならどのような可能性があるかを考えてみました。ざっと27の性能特性が並びましたが、これを見ただけで、設計プロセスの大筋がいかに単純であろうとも、実際に作ら

of ware shapes and utilitarian purposes are not much changed but the narrative depictions are quite different from the previous normal decorative configurations, a change made possible by the novel geometry of pigments and glaze shown in Fig. 9. For precise drawing of the pictorial design, glaze paints were used which had insoluble pigment particles (like oil paints) and just enough binder to hold them in place during firing without diffusion or spreading. Precision drawing, *impasto* and controlled shading became possible. This focus on glaze and color properties was a substantial change in the potter's craft. Cipriano Picollpasso devoted more than half of his 1557 work *Three Books of the Potter's Art* on glazes and color. As to technique, he says, "If any of the said colors run in the first baking, as they often do, and so are not good" they must be remixed and rebaked.

The normal expectation of pottery painting was transformed. Technological change made pottery a ground for colorful narrative, historical and mythical scenes. The normal expectations of the new techniques are derived from paintings and drawings on other grounds. We have a coupling of what had been two distinct craft species in a way not permitted by nature and foreign to analogies of technical change with evolutionary theories of natural selection.

In thinking about operational principles of the new technology, one viewpoint may be that of the specular and diffuse reflections illustrated in Fig. 9. Associated operational principles are related to mixing of pigment particles and glaze to avoid diffusion and maintain drawing precision. A companion operational principle has to do with the effectiveness of subject matter, color brightness, painting skill, aesthetics and formal "art" structure as signs of taste, wealth, position and power within a particular social context. More than one operational principle is embodied in a technical artifact.

The performance characteristics associated with this object fall into a number of categories as shown in the design summary of Table 1. In Table 2 we have divided these in ways that could have been emphasized or varied by the designer. Just listing some 27 performance characteristics leads us to understand that no matter how simple the design process may be in principle, it can be extremely complex in practice for even the simplest made thing. The success of the described design is testified by the fact that such decorative wares have survived in the market place and continued to be produced for five hundred years or so.

In my view the pattern of how advanced materials technology enhanced and revolutionized the *istoriato* ceramics of the Italian Renaissance is typical. Advanced

表２　性能特性

性能
　メンテナンスが容易
　色褪せ防止加工
　耐食性に富む
　丈夫さ

社会的・文化的位置付け
　描写（古典的物語）
　紋章
　風変わりな代物

美観
　図柄の奥行き
　形状
　表面の光沢
　色の鮮明さ
　地の白さ
　半透明

製造性
　原材料が必要
　形成が容易
　乾燥が容易
　釉薬がけが容易
　絵付けが容易
　焼成が容易
　仕上げ加工が必要

機能
　不浸透性
　水洗可能
　耐熱性
　耐衝撃性
　安全無害

妥当なコスト

れる人工物は、最も簡単なものでさえ、実際にはとてつもなく複雑になり得るということがわかります。この設計が成功だったことは、この手の装飾的な容器が市場から消えることなく、約500年もの間製造され続けてきたことによって立証されております。

ルネサンス期イタリアにおいて、先端材料技術がイストリアート様式の焼き物を磨き上げ大変革をもたらした過程は、典型的なパターンではないかと思われます。先端材料技術は、言わば可能性を引き出す技術なのです。結果として生まれる各種技術の進歩こそ、20世紀も終わろうとしている今日の我々の暮らしを特徴づける最も重要な

TABLE 2: PERFORMANCE CHARACTERISTICS

PERMANENCE
　Easy maintenance
　Fade resistant
　Corrosion resistant
　Fracture resistant

SOCIAL AND CULTURAL IDENTIFIER
　Depiction (classical story)
　Personal devices
　Extraordinary object

AESTHETICS
　Depth of image
　Form
　Surface reflectance
　Color brilliance
　White ground
　Translucence

MANUFACTURABLE
　Raw materials required
　Ease of shaping
　Ease of drying
　Ease of glazing
　Ease of painting
　Ease of firing
　Finish required

FUNCTIONAL
　Impermeable
　Washable
　Thermal shock resistant
　Impact resistant
　Non-poisonous

MODERATE COST

materials technology is an enabling technology that makes possible the outflowing of technological change that is the most important characteristic of our life in these closing days of the twentieth century.

As a final thought, I must add that parenting, like advanced material technology, is an enabling activity. My father, Dr. Lisle B. Kingery and my mother, Margaret Reynolds Kingery, instilled by word and example that accomplishment resulted from continued effort in the face of difficulties. "Pull up your socks and get on with it." They provided a quite happy and normal childhood and encouraged my unbridled curiosity and avid reading. Indeed my last word of appreciation should probably go to the American system of free public libraries available to all.

点でありましょう。

最後に触れておきたいのは、育児についてであります。親として子供を育てることも、先端材料技術と同様、可能性を引き出す仕事と言えます。私の父、ライル・B・キンガリー博士と、母であるマーガレット・レイノルズ・キンガリーは、言葉によって、また自ら手本となることで、困難に直面しても努力を続ければ道は開けることを教えてくれました。「がんばってやり遂げなさい」ということです。両親のおかげで、私は実に幸福で順調な子供時代を送り、奔放な好奇心を膨らませ、本をむさぼるように読みました。全くのところ、私の最後の感謝の言葉は、誰でも無料で利用できるアメリカの公立図書館に捧げるべきでありましょう。

稲盛財団1999——第15回京都賞と助成金

発　　行　2000年12月25日

制　　作　財団法人稲盛財団

京都市下京区四条通室町東入函谷鉾町88番地　〒600－8009

電話〔075〕255－2688

ISBN4-900663-15-8 C0000