

米国のセラミックス研究（日本との比較）

大司達樹*,**

* 名古屋工業大学先進セラミックス研究センター
〒 507-0071 岐阜県多治見市旭ヶ丘 10-6-29

** 国立研究開発法人 産業技術総合研究所
〒 463-8560 名古屋市守山区桜坂 4-205

Ceramic R&Ds in US (Comparison with Japan)

Tatsuki Ohji*,**

*Advanced Ceramics Research Center, Nagoya Institute of Technology
10-6-29, Asahigaoka, Tajimi, Gifu, 507-0071, JAPAN

**National Institute of Advanced Industrial Science and Technology (AIST)
4-205, Sakurazaka, Moriyama-ku, Nagoya, Aichi, 463-8560, JAPAN

Abstract

This article first will give an overview on history, structure, and activities of the American Ceramic Society, which is one of the key organizations on ceramic R&Ds in US and over the world. Next, the current status, strength and weakness of ceramics R&Ds in US and Japan are characterized and the differences between the two countries are discussed. The strength of Japan is the superiority of extracting excellent performance of products through optimized design of devices and components and proper combination of different materials on the basis of correct understanding of material's processing, structure and properties. Finally future outlook of ceramic R&Ds and industry of Japan will be addressed.

Keywords: Ceramics, R&Ds, Industry, US, Japan, Strength, Weakness

1. 緒言

筆者は、2019年10月より1年間、米国セラミックス学会の会長職に携わる榮譽を得た。米国セラミックス学会は米国のみならず及び世界のセラミックス研究の中核組織の一つとなっている。この学会の会長選考過程を簡単に紹介すると、会長候補者は **Nominating Committee** により推薦され理事会で承認され、会員の信任投票で、次期会長に選出される。**Nominating Committee** の選考内容は公開されていないので、筆者がどうして選考されたかは筆者自身も知り得ない。しかし、米国セラミックス学会の会員は約40%が米国以外の国際会員であり、今後増える傾向にある事から、米国人以外の会長を選出するべきであるとの議論があった。このため国際会員が一番多い欧州から2016～2017年に英国 Imperial College の William Lee 先生が初めて米国以外の会長として選出され、その後、今度は国際会員が二番目に多いアジアから会長を出すべきだとの意見があった。会長は理事もしくは理事経験者から選出される不文律があり、当時それに該当するのが筆者しかいなかったため、筆者が推薦されたとの話を聞いたことがある。本稿では、まず、この米国セラミックス学会の沿革、

組織、活動状況について紹介する。

次に米国のセラミックス研究、材料研究、研究者の特質、強みや弱み、それらと比較し、日本のセラミックス研究、材料研究、研究者の特質について述べる。米国と比較した日本の材料研究の強みとしては、「材料のプロセス-構造-特性の関係を基に、部材の最適設計、異なる材料の適正な組み合わせなどにより、優れた性能を引き出す事に卓越している」事などが上げられるが、ここではその背景について考察する。さらに、ファインセラミックスの研究開発、我が国のファインセラミックス産業等に関する今後の展望についても言及する。

2. 米国セラミックス学会について

米国セラミックス学会は、耐火物、ガラス、タイル、衛生陶器、テーブルウエア、セメント、煉瓦などのセラミックスを科学的に追求するために、1898年、オハイオ州立大学教授 Edward Orton, Jr. 博士（図1）らにより設立された。博士はその後、長らく会長を務め学会の発展に尽力されている。



Fig. 1. Dr. Edward Orton, Jr.
(Reproduced with a permission of ACerS. All rights are reserved)

1899年、第1回の年会在コロンバスで開催され、同年、学術誌 *Journal of the American Ceramic Society* を創刊されている。また、1922年には会員誌 *Ceramic Bulletin* が創刊され、今年で100周年を迎えている。Orton博士は1932年にお亡くなりになるが、翌年、その功績を讃えて博士の名を冠した *Orton Lecture* が創設され、毎年年会で開催されている。

図2に米国セラミックス学会の組織を示す。現在、会員数は約11,000人で、上述したように会員の約40%は米国以外の国際会員であり、65カ国以上に跨がっている。扱う材料は、上述した従来のセラミックスに加え、先端・基幹産業のキーパーツとなる、複合材料、電子材料、生体材料、光学材料、航空宇宙材料、エネルギー・環境材料など、多岐に渡っている。これらの材料・技術に応じて、基礎科学、電子材料、エンジニアリングセラミックス、ガラス・光学材料、構造粘土製品、バイオセラミックス、製造技術、耐火物、セメント、美術・考古学・保全科学、エネルギー材料・システムの *Science and Technology Division*（科学技術部会）があり、*Division* 独自の国際学会、年会でのシンポジウムの開催などにより、会員の世界的な研究開発のネットワークを形成している。また、17の *US Sections*（国内支部）において、研究集会、教育活動、地域の関連企業との交流などにより地域のネットワークを形成している。さらに、国際会員の増加を考慮し2015年に *International Chapters*（国際支部）の制度が設けられた。これまでに、カナダ、英国、ドイツ、イタリア、スペイン、セルビア、インド、韓国、台湾、タイの各国に *Chapter* ができており、日本においても2021年1月に、*Japan Chapter* が

できている。*Chapter*はその国の会員のネットワーク形成とともに、その国のセラミックスに関する学協会、日本であれば日本セラミックス協会等との融和と相互発展を目的としているため、その活動は主に日本セラミックス学会等の行事と協調して行っている。例えば2023年3月に開催された日本セラミックス協会年会では日本セラミックス協会国際交流委員会と *Japan Chapter* が共催で、国際セッション「*International Symposium on Recent Development of Ceramic Science and Technologies*」を開催している。



Fig. 2. Structure of the American Ceramic Society

米国セラミックス学会は、世界の次世代のセラミックスを担う人材の育成・支援を目的に、2014年にセラミックス関連企業と共同出資し、*Ceramic and Glass Industry Foundation* を設立している。世界各国の企業、個人より寄付を募り、米国のみならず世界各国のセラミックス学会を通じて人材の育成援助をしている。例えば、日本セラミックス協会へは、セラミックス大学 (*CEPRO*)、高校課題研究フォーラム「高校でできるセラミックス実験」などへの援助をしたり、日本に滞在する海外の若手研究者への援助をしたりしている。もう一つあまり知られていない米国セラミックス学会の活動として *Ceramic Arts Network*、略して *CAN* がある。これは、陶芸家を対象とした事業で、世界で130,000人以上の陶芸家が *WEB* ネットワークに利用登録している。陶芸関連の雑誌・ビデオの発行に加え、陶磁器で有名な世界の各地での国際ワークショップの開催や、その地での陶磁器の試作体験の提供などをしており、陶芸家には大変人気の高い活動である。日本でも有田や京都などでワークショップが開催されている。この *CAN* の事業規模は、本体の科学技術事業に匹敵するほどである。

筆者が会長の任期中に行った事に、まず、エネルギー材料・システム (Energy Materials and Systems) Division の設立がある。この Division は学会に元からあった核・環境技術 (Nuclear & Environment Technology) Division が基となり、別組織であった Energy Harvesting Society を吸収する形で誕生したもので、エネルギー分野に関連するセラミックス及びガラス材料とそれらの応用技術を扱う事を目的としている。また、2020年1月にはヨーロッパセラミックス学会と国際協力について覚え書き (MOU) を交わし、共同シンポジウムの毎年開催、国際貢献を顕彰する賞の創設、学生・若手研究者の育成・交流などを決めている。さらに、学会における Diversity and Inclusion の問題を会員が身近に考え、積極的に討論できるように、会員であれ誰もが参加できる Diversity and Inclusion Council を起ち上げ、2020年の米国セラミックス学会年会 (MS&T 2020) では、Diversity and Inclusion Town Hall Meeting を開催した。しかし、筆者の任期中に起こった最も大きな出来事は、何と言っても COVID-19 によるコロナ禍とその学会活動への影響である。ご承知のように、2020年4月頃からコロナ禍は米国においても深刻な状況となり、このためそれ以降の研究集会は全て、延期もしくはオンライン会議に切り替わった。勿論、オンライン会議には、いくつかの長所がある。旅行不要で費用・時間が節約できる事、全ての講演・発表が録画されているので Concurrent Session でも全て聴講できる、また後で何時でも何度でも聞ける事、討論もチャットで自由に行える事などで、コロナ禍沈静後も新しい会議形式としてある程度残るものと思われる。しかし、会員の中には、やはり In Person の会議を望む意見が多くあった。2022年にはコロナ禍もかなり終息し、この年の年会 (MS&T) は10月にピッツバーグで In Person で開催されるなど、コロナ禍前の状態に戻りつつある。

会長は学会が主催する多くの研究集会の冒頭で挨拶をするが、その際、必ず学会の Diversity & Inclusion Policy に言及する事になっている。米国の社会では、これは非常に重要な事である。少し長いが、日本語に訳してみると、「米国セラミックス学会は、人種、性別、国籍、宗教、皮膚の色、年齢、性的指向、性自認、婚姻状態、身体障害、家系、容姿、その他科学的メリットに無関係な事柄には一切関わりなく、全ての会員、参加者に対し、公平な扱いと機会を与え、ハラスメントと差別のない事を保証する責務があります」と言うものである。図3に2019年の年会における米国セラミックス学会の理事会の集合写真を示す。筆者が会長の時はコロナ禍でこのような集合写真を撮るのではできなかったが、米国セラミックス学会の理事会では、一方の性の理事の数は全体の1/3以上かつ2/3以下でなければならないという、暗黙のルールがあり、この写真を見て分かるように、男女の比率はほぼ同数となっている。

3. 米国のセラミックス研究・材料研究

まず、米国の研究の強みと弱みについて、筆者が感じている事を述べる。米国の研究の強みとしては、まず世界中から優秀な人材を引き寄せる事のできる米国の魅力があると考えられる。そして、これは米国の独立宣言に基づく自由・平等主義に由来していると筆者は感じている。また、それらの人材を受け入れる事のできる国家・社会の素地、研究・生活環境、集まる人材の意気込みと Innovation への意欲などが上げられる。さらに、多様な人材が集まり、相互に刺激し合う社会であるため、開発される製品等が世界標準になりやすい事、国防、宇宙開発などの費用は掛かるが波及効果の大きい技術開発を国家が積極的に支援している事なども利点として上げられる。

材料研究に限った事で言うと、まず計算材料科学・AIなどを活用したマテリアルズ・インフォマティクス



Fig. 3. 2018-2019 Board members of the American Ceramic Society
(Reproduced with a permission of ACerS. All rights are reserved)

研究に優れている事が上げられる^[1,2]。Materials Genome Initiative プロジェクト等により多くの大学、公的研究機関で関連する人材の育成、産業界との連携が促進されている。日本においても同様な試みは最近なされているが、これまでの歴史、裾野の広がりという点で大きな違いがあるように感じる。例えば、ノースウエスタン大学、シカゴ大学、国立標準技術研究所、アルゴンヌ国立研究所等が中心となって行っている Center for Hierarchical Materials Design (CHiMaD) では、先進合金材料を原子からマクロレベルでの構造解析、計算材料科学により、短期間、低コストで開発している。材料の信頼性保証においても、計算ツールの活用により、実験量を大幅に減らすことに成功しており、最近では合金に加え有機材料、セラミックスも対象としている。CHiMaD の成功研究事例として、航空機用超高強度・高靱性合金の開発がよく知られている^[3]。計算材料科学を導入し、実験量を大幅に低減することに成功し、従来の合金開発では NASA 規定の航空機部材用技術成熟度 (Aircraft component-level technology readiness levels: TRL) を達成するのに 20 年程度の時間が必要であったが、6 年という驚異的なスピードで実現している。また、ペンシルベニア州立大学、ジョージア工科大学、国利科学財団等が中心となって行っている Center for Computational Materials Design (CCMD) では、将来にわたり計算材料設計を活用できる人材の育成、長期的視野に立った産業界との連携、計算ツールを活用したプロセス-構造-特性-性能の相互関係の把握、データベースの構築に力を入れ、システムに基づく材料設計等も実施している。

次に、「死の谷」の克服に長時間かかる、息の長い研究を計画的に推進する特質があげられる。特に、国防、宇宙開発などの費用の掛かる実用化技術開発には積極的に連邦政府の予算を投入している。セラミックスで言えば、例えば GE での炭化ケイ素長繊維強化炭化ケイ素 (SiC/SiC) セラミックス複合材料による航空機用ガスタービン部材開発では、1990 年代より研究室レベルで開発を開始し、1990 年代後半より 200 時間レベルでの部品リグ試験、2000 年代前半に 1000 時間レベルでの小型エンジン試験、2005 年頃より 5000 時間以上の耐久性実証試験、2008 年より実機搭載試験を行うなど、新材料応用のリスクを回避するために、段階的に進歩する長期の計画的な研究開発を実施し、この間、国防総省やエネルギー省などの米国連邦政府が「死の谷」の克服に必要で巨額の資金を必要とする耐久性実証試験や実機搭載試験に対して積極的な支援を行っている^[4,5]。

図 4 に 2020 年度の米国連邦政府の研究開発予算の内訳を示す^[6]。A が基礎研究（研究室レベル）、B が応用研究・目的基礎研究（研究室レベル）、C が実用化技術開発（統合技術、部材化技術、システム開発、実証試験、

制御技術など）、D 運営システム技術開発（新製品の製造技術など）である。技術開発を含めた全体予算は 20 兆円を越え（1 US ドル = 110 円で換算）、その半分近くが国防総省関係である。上述した SiC/SiC セラミックス複合材料によるガスタービン開発などの実用化技術開発に連邦政府が積極的に予算を投入していることが分かる。ちなみに、基礎・応用研究の分野 (A+B) では連邦政府の研究開発予算の半分近くが国立衛生研究所 (NIH) に流れており、米国のバイオ関係の研究開発の強さを物語っている。

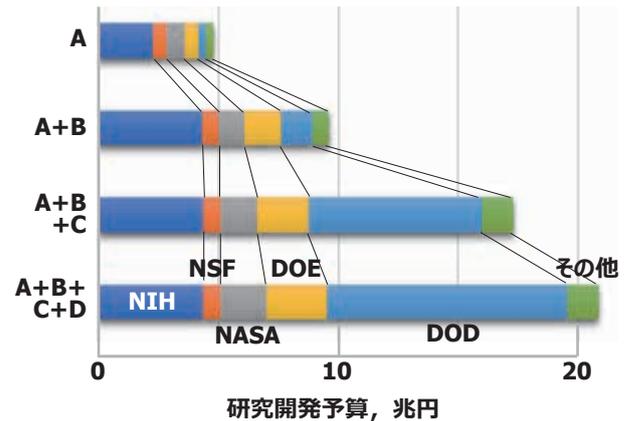


Fig. 4. US Federal Government R&D funding in FY2020. A: Basic research, B: Applied research, C: Application technology development, D: Operational system development. NIH: National Institutes of Health, NSF: National Science Foundation, NASA: National Aeronautics and Space Administration, DOE: Department of Energy, DOD: Department of Defense

一方、米国の研究の弱みについては、多様な人材から成り立っている社会である事に加え、個人の意思を尊重する風気があるため意思統一がされにくい事がある。また、競争が激しく研究提案に多大な労力と時間を要する事、研究予算に中核研究者の人的費が含まれる場合が多いため、予算の削減がその研究者の離職に繋がる事、企業の買収、人材の流出が激しいため、その企業特有の技術が育成・維持しにくい事などが考えられる。また、連邦政府の基礎・応用研究関連の研究開発予算が少ないことも上げられる。上述したように、全体としては 20 兆円を越える研究開発予算を連邦政府は確保しているが、研究室レベルでの基礎・応用研究に関する予算は、米国黄金期の 1965 年と比較すると、連邦政府全体予算に占める割合は半分以下に減少していると言われている。また、その基礎・応用研究関連の予算の半分近くがバイオ領域の国立衛生研究所に行き、材料研究などの他分野に来る研究予算が少ないことも弱点の一つとして上げられる。

4. 日本のセラミックス研究・材料研究

次に、日本の研究、特に材料研究の強みについて考えてみる。筆者は米国セラミックス学会における役職に加え、Acta Materialia, Inc. の理事 (Governor) の職に10年以上前から携わっている。Acta Materialia, Inc. は、金属系の研究者には馴染みが深い Acta Materialia などの学術雑誌を発行する機関で、米国金属学会 (ASM) と鉱物・金属・材料学会 (TMS) が共同出資をして1950年代に設立されている。このため、これまで米国の材料系の学会で指導的立場にいる研究者とお話をする機会に恵まれ、「日本の材料研究の強み」についても色々な方の意見を聞くことができた。それらの中で代表的なものは以下の4つに集約できる。

- プロセス-構造-特性の関係を基に、部材の最適設計、異なる材料の最適な組み合わせなどにより、優れた性能を引き出すことに卓越している。
- 研究論文の質が高い・質の高さが安定している。実験対象、実験方法が妥当で合理的である。実験や測定が精緻で正確であるなど。
- 長期的な視野に立って研究開発を広範に見る傾向がある。Challenging な研究開発にも意欲と理解がある (特に企業における研究開発)
- 特に企業において、自分たちの研究設備だけではほぼ全ての研究開発が完結できると思えるほど研究設備が充実している。

ここでは、一つ目の特長について考えてみる。この、材料のプロセス-構造-特性-性能の関係は材料の4要素と言われ、今では大学の材料工学の入門講座でも教えられるほど定着しているが、この概念は1989年の米国 National Research Council の報告書「Materials Science and Engineering for the 1990s - Maintaining Competitiveness in the Age of Materials -」^[7]において、図5に示すような正四面体を用いて、初めて提唱された。ここで重要なのはプロセス-構造-特性の関係は材料の研究で閉じているのに対し、性能は、部品・部材の設計や他材料との組み合わせなどを経て、材料が製品・システムの一部として使われた際に、例えば寿命、エネルギー効率、コスト、リサイクル性などとして発現する事から、製品・システムの設計者との協業が必要になる事である。そして、優れた性能を引き出す事に卓越していると言う事は、材料の研究者・技術者と製品・システムの設計者の間のすりあわせがうまくいっていると言う事に他ならない。しかし、この日本の技術者の異分野間のすりあわせのうまさはよく知られている事で、例えば、東京大学藤本隆宏先生の「日本のもの造り哲学」^[8]では、「製品分類には、部品の設計を相互調整して製品ごとに最適設計するインテグラル型・すり合わせ型製品と、部品と機能との関係が1対1で部品の接合が標準化しているモジュラー型・組み合わせ型製品があり、前者の代表的な

製品例は自動車で、すりあわせ力に優れる日本企業が得意であるのに対し、後者の代表的な製品例はデスクトップ型パソコンで、個々の力に優れる米国企業が得意である」と言う製品アーキテクチャ論が唱えられている。

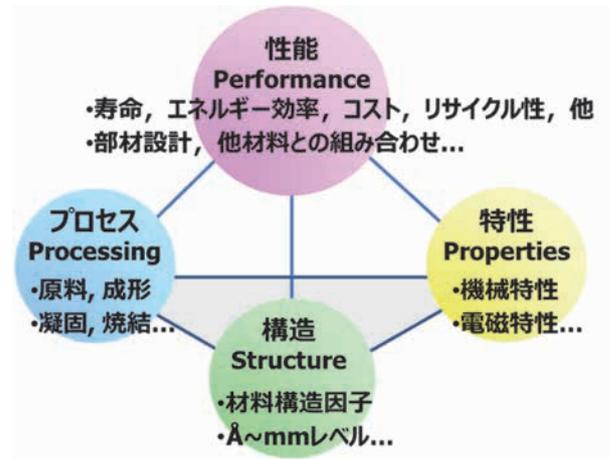


Fig. 5. Material's four elements: Processing, Structure, Properties, & Performance

(Reproduced from Ref. 7 with a permission of the National Academy of Sciences. All rights are reserved)

それでは、ここでどうして日本の研究者・技術者はこの「すりあわせ力」に優れているかという事について少し考察してみる。これには色々な要因があると思うが、筆者はそれらの一つとして、以下のような事が上げられると考えられる。米国の研究者達と一緒に仕事をしてよく感じることであるが、日本人と比較すると、自分の意見を明確に主張する傾向がある。これは、彼らが幼少の頃から、自分の意見を持ち、それを Defense する事の重要性を教えられているからであると言われている。異分野の人と何かの仕事をする際でも、まずは自分の意見を述べ、それを通そうとする傾向がある。このため、例えば米国セラミックス学会の理事会においても、侃々諤々の議論となる場合が少なくない。一方、日本人の場合は、最初から全体目標の達成・チームワークを重視し、個々の意見は後回しにする特質があるように思われる。顧客や他部門の技術者との調整や要求の対応においても、可能なかぎり譲歩し相手を満足させる努力を怠らない。極限まで追求する粘り強さ・忍耐強さ、チームワーク・意志の疎通の力が、日本人の優れた「すりあわせ力」に現れていると考えられる。

次に、日本の研究もしくは研究者の弱みについてであるが、外国の研究者に「日本の研究者の弱みは何か」と聞くと多くの人が「日本の研究者の弱点を探すのは難しい」と言う。しかし、強いて言うなら、自発的な Human Network 造りや積極的な Communication にためらいがある事だろうか? 以前、米国の研究者から「日本人はどうして研究発表以外のところで他の国の人たちと積極的に交わろうとしないのか?」と聞かれた事があ

る。答えに窮した筆者は、「どのような時にそれを感じるのか？」と逆に聞いたところ、「例えば、日本の方は、折角、国際会議に来ているのに、日本人だけで食事に行くよね」と言う答えが返ってきた。国際社会では、国内の社会と同じであるが、**Human Network** や人間同士の信頼関係がもの言う場合が少なくない。日本の研究者の責任感の強さ、誠実さ、信頼感・安心感などは海外の研究者の間でも評価は高いので、それを基としたより広く強い国際的な **Human Network** が形成できれば、様々な分野でより強いリーダーシップを発揮することができ、研究開発のみならず、日本の産業、社会により有益となると思われる。

もう一つの日本の研究の弱点としては、日本の研究開発費の少なさが上げられる。図 6 は日本・米国・中国・EU の 2000 年から 2020 年までの全体研究開発費の推移を示している^[9,10]。研究開発費の対 GDP 比率は日本は 3.6% であり、米国 3.4%、中国 2.4%、EU 2.2% よりも高いにも関わらず、GDP そのものがこの 20 年間伸びていないため、全体研究開発費もほとんど増加していない。一方、中国の研究開発費は 2010 年から 2020 年の 10 年間で約 3 倍となり、2020 年には 58 兆円に達している。これに連動するように、中国の注目論文数（引用回数上位 10%）は 1997~99 年では世界 10 位以下であったのに対し、2017~19 年では、世界 1 位となっている。同じ時期に日本は世界 4 位から 10 位に転落している。

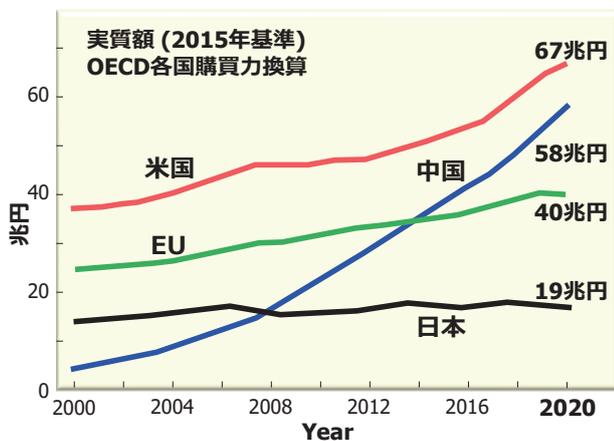


Fig. 6. R&D expenditures of US, EU, China and Japan in 2000-2020

5. 今後の展望

セラミックスは金属や有機材料などの他の材料と比べ、高価である。それでも使われているのは、セラミックスならではの特性があり、多くの先端機器・システムにおいてキーパーツになっているからである。このため、上述した米国金属学会（ASM）や鉱物・金属・材料学会（TMS）などの米国の金属系の学会も、セラミックスを重要な対象材料に加えている。しかし、これらの先端機器・システムにおいては、セラミックスは単独で使

用される事は少なく、金属や有機材料などの他の材料と組み合わせて使われる場合が圧倒的に多いと思われる。この傾向は今後ますます増大し、組み合わせの複雑度も増してくると考えられる。米国セラミックス学会では、他の材料系の学会と多くのシンポジウムなどを共同企画し、異種材料の最適な組み合わせによる **Performance** の向上などを討論している。

筆者は、自動車などの輸送機器の軽量化に貢献すると期待されている鋼材、軽量金属、CFRP などによるマルチマテリアルのプロジェクトにも関与していた。マルチマテリアルの技術には世界的に注目が集まっているが、この技術を最も早くものにするのは日本だろうと言われていている。その理由は、例えば、自動車生産ラインが欧米では一車種専用の生産ラインであるのに対し、日本では、すでに複数種対応の異種材混流の生産ラインであることから、製造プロセスが複雑となるマルチマテリアル化についても比較的容易に対応できるであろうと考えられているからである。上述したように、日本人には複雑事、困難な事をあきらめず、完璧にやり抜こうとする特質がある。上述したように日本の研究者の責任感の強さや誠実さは海外の研究者の間で高く評価されており、例えば、国際学会での急なキャンセルの少なさや、本来の発表者が来られなくても必ず代理の人を用意してくれている事などは、これらを物語っているものと思われる。

日本のファインセラミックス産業は、世界市場の中で総生産額が 3 兆円を超え、その割合は約 40% を占めるまでに成長しており、日本のお家芸とも言われている。セラミックスの製造は原料粉末から最終仕上げまで様々なプロセスからなり、これら全てを厳正に管理しないと特性の信頼性、再現性は保証できない。日本人のきめ細かなプロセス管理と品質向上に対するたゆまぬ努力が、この「お家芸」を支えているのだと思われる。これに加え、今後益々必要とされるであろう、上述したような異種材料の最適な組み合わせ技術は日本の得意分野である。台頭する近隣諸国の追い上げは厳しいものがあるが、日本ならではの高付加価値材料・製品を作り続けられれば、ファインセラミックスのみならず日本の産業の将来はさらに明るいものになると筆者は考える。また、ここに資源のない日本が海外勢力の台頭にどう立ち向かうかの解答があるように思う。

参考文献

- [1] E. Dickey · G. Arthur “Big data meets materials science: Training the future generation” Am. Ceram. Soc. Bull. 96 [6] 40-44 (2017)
- [2] R. Padbury “Data-driven approaches to materials and process challenges” Am. Ceram. Soc. Bull. 99 [6] 24-30 (2020)
- [3] G.B. Olson · C.J. Kuehmann “Materials genomics: From

- CALPHAD to flight” Scripta Materialia 70 [1] 25-30 (2014)
- [4] K. L. Luthra “Emerging Applications and Challenges in Using Ceramics at General Electric” 2nd Ceramic Leadership Summit, The American Ceramic Society (2012)
- [5] J. Steibel, “Ceramic matrix composites taking flight at GE Aviation” 98 [3] 30-33 (2019)
- [6] “Federal Research and Development (R&D) Funding: FY2020” Congressional Research Service, USA (2020)
- [7] “Materials Science and Engineering for the 1990s - Maintaining Competitiveness in the Age of Materials” National Research Council, USA (1989)
- [8] 藤本隆宏「日本のもの造り哲学」日本経済新聞出版 (2004)
- [9] 「科学技術指標 2022」文部科学省科学技術・学術政策研究所 (2022)
- [10] “Main Science and Technology Indicators” OECD (2022)