

会員限定

先進セラミックス (Advanced Ceramics)

**市場分析、トレンド及び予測
(Market Analysis, Trends, and Forecasts)**

2018年版

一般社団法人日本ファインセラミックス協会

(注) 本レポートは、Global Industry Analysts 社の “Advanced Ceramics, Market Analysis, Trends, and Forecasts (2018 年 3 月発行、356 頁)” の概要版です。詳細は原本を参照下さい。

目 次

頁

【業界概要】

- 04 アドバンスドセラミックスーセラミックスワールドの再定義
- 06 現状と将来の分析
- 06 従来 of 収益貢献者
- 07 新興市場が high 利益を得るチャンスを生み出す
- 08 モノシリックセラミックスー最有力セグメント
- 09 航空宇宙及び自動車部門から成長を引き出すセラミックコーティング
- 09 セラミックス複合材料 (CMC) ー最速の成長を遂げるセグメント
- 09 電気及び電子ー主要な最終用途市場
- 11 競合

【市場のトレンドと課題】

- 13 業界からの注目度が高まるイノベーティブな材料の製造・加工
- 14 電子セラミックスの採用を後押しする材料技術の進歩
- 15 大きな機会を創出するマイクロエレクトロニクス
- 16 ウェアラブル端末ー大きな可能性を秘めた将来有望な市場
- 18 センサー技術におけるアドバンスドセラミックス
- 19 需要を後押しし続ける消費者向け電子機器
- 20 機会を後押しする圧電セラミックス部品
- 21 アドバンスドセラミックスの需要をさらに喚起するエネルギー部門
- 22 非常に大きな可能性が期待できる燃料電池
- 23 アドバンスドセラミックスの新たな機会を後押しする超伝導体
- 24 無線インフラの用途での利用が増加するアドバンスドセラミックス
- 25 セラミックス複合材料ーR&D の成長分野
- 27 航空宇宙産業における用途の増加
- 28 アドバンスドセラミックスの重要な最終用途分野として出現する医療用途
- 30 ニューロモデュレーションの新たな領域
- 30 整形外科手術における窒化ケイ素セラミックス
- 31 高齢化ー間接的な成長の牽引役
- 32 歯科用途が拡大するアドバンスドセラミックス
- 33 自動車におけるアドバンスドセラミックス
- 35 自動車での用途に拍車をかける厳しい燃料効率基準と排ガス規制基準
- 36 自動車エレクトロニクスーセラミックス部品にとって限りない可能性に満ちた市場

要旨

業界概要

アドバンスドセラミックス – セラミックスワールドの再定義

テクニカルセラミックス、ハイテクセラミックス、高性能セラミックスとしても知られるアドバンスドセラミックスは、今日の最も魅力的な材料の一つである。アドバンスドセラミックスの優れた生物学的、化学的、電氣的、物理的特性が今なお広範な用途の牽引役であり続けているが、その一方で、製品の寿命を延ばす能力を持ち合わせていることも、環境保護や自動車、防衛、医療、航空宇宙、光ファイバー通信等の産業で幅広く利用される主な理由である。セラミックスの利用は、人間の居住地で土器や粘土彫刻が当たり前のように作られていた古代に遡る。従来タイプのさまざまなセラミックスが、特に高温環境で好ましいパフォーマンスを示しているが、有効な材料とはみなされていない。その主な理由は、使用中に重大な不具合を引き起こす可能性のある硬くて脆い性質である。高純度の原材料から生産されるアドバンスドセラミックスは、そのような制約を克服している。これらのセラミックスは、従来のセラミックスよりも相対的に高いレベルの熱的、機械的、電氣的パフォーマンスを発揮することができ、また、耐酸化性や耐腐食性にも優れている。この新しいタイプのセラミックスは、優れた靱性、耐腐食性、高温安定性を示すことにより、性能や耐衝撃性、環境保護、エネルギー効率の向上、および運用コストの低減が要求される、幅広い用途において有益であることが証明されている。アドバンスドセラミックスの主な用途は、産業用加工設備、発電、航空推進システム、E/Oパッケージング、個人用保護具等である。

世界のアドバンスドセラミックス市場は、従来の用途分野と新たな用途分野の両方で成長を続けている。従来の用途分野で成長を牽引しているのは、補助的な役割を果たす、もしくはこれまでの材料の代用品として使用されることによるパフォーマンスの強化である。一方、新たな用途分野では、アドバンスドセラミックスが、これまで実現不可能であった特定のパフォーマンスを発揮するという重要な役割を担っている。このような理由から、アドバンスドセラミックスをブレンドすることで得られるユニークな材料ソリューションは、産業界にとって成長の原動力となっている。品質、性能、運用コスト、生産性の改善は、アドバンスドセラミックスの使用によってもたらされる主要な利点である。テクニカルセラミックスは生物学的に不活性であり、また高い耐摩耗性を有していることから、膝関節や腰部、脊椎間板の置換術等に用いられる整形外科用

器具での使用に好適である。一方、切削工具では、強い耐摩耗性、優れた硬度、高い融点といった特徴があることから、高性能セラミックスが高速切削を可能にする非常に有効な材料となっている。こうしたセラミックス材料の魅力的な特性は、自動車業界にもいくつかの利点をもたらしている。ストレス耐性や耐久性への要求が強まる中で驚異的な技術開発が行われた結果、並外れた特性を持つ材料の需要が高まった。そうした材料の用途として挙げられているのは、自動車エレクトロニクス、エンジン領域、最新型の車両照明、さらには、車両の装甲処理といった特殊な分野である。また、最高レベルの耐久性、電気絶縁性または熱絶縁性、熱伝導率、耐熱性、耐摩耗性・引裂き抵抗性、および優れた耐腐食性と合わせて、類まれな硬度や寸法安定性を有する軽量材料に対する需要が存在している。

アドバンスドセラミックスは、非常に複雑で、純度が高く、また細かな微細構造が組み合わさったものであることから、その製造工程は従来のセラミックスよりもはるかに複雑である。従来のセラミックスの場合に必要な使用前の機械加工および熱加工に加え、アドバンスドセラミックスではさらに、鉱石から上質な材料を分離する、あるいは、前駆体から変換するための化学的前処理が必要となる。特に、セラミックスの破壊特性に関する技術の向上や、新しい高温繊維系セラミックス複合材料の進化といった要因が、成長の機会をもたらしている。例えば、新世代の化学結合セラミックスは、橋梁やプレハブ住宅、ビル等の建設用途を含むあらゆる最終用途市場で幅広く使用されるプラスチックや金属に、徐々に取って代わろうとしている。化学結合セラミックスは、電気器具や壁パネル、フロア、ルーフトイル、キャビネット、パイプといった最新のセメント系建築製品で幅広く使用されている。特に、自動車用熱機関（ディーゼル部品やガスタービン）、産業用熱交換器、電気化学機器、医療用インプラント／機器の分野で、アドバンスドセラミックスの用途が広がると予測されているが、このことは、中長期的観点から市場にとって良い兆候である。

コーティングされた機械部品の広範な利用、高度なコーティングに対する今後の強い需要、蒸着プロセスの飛躍的進歩によって、セラミックコーティングのビジネスチャンスと呼び込むことが期待されている。産業機器の分野では、工業炉やガスタービンエンジン、産業用コジェネレーション、流動床燃焼用のセラミック熱交換器の人気の高まることにより、市場の需要が刺激されることが期待されている。安定的かつ長期的な機会を前提として、アドバンスドセラミックス業界は引き続き、セラミックス製造工程の研究開発、最適化、技術的に優れた加工および品質管理設備の導入、対象となるマーケティング戦略の調整

に資源と投資を集中させている。

現状と将来の分析

2017年に610億米ドルと推定された世界のアドバンスドセラミックス市場は、2024年までに933億米ドルを超えると予想されており、2016～2024年の分析期間では年平均成長率（CAGR）6.3%で規模が拡大すると見込まれている。米国は単独で、アドバンスドセラミックス最大の地域市場を形成しており、2017年の市場規模は170.2億米ドルと推定され、2024年までに231億米ドルに達すると予測されている。アジア太平洋地域は最速の成長を遂げている市場であり、当該の分析期間を通じて7.4%のCAGRで拡大し、2024年までに505億米ドルに達すると見込まれている。

セラミックス材料は特に、産業機械、自動車、電気機器、航空機、電子部品といったさまざまな製品の生産に幅広く使用されていることから、今後も、アドバンスドセラミックスの需要は製造部門によって左右されると考えられる。世界市場の成長については、特に、耐腐食性や耐熱性、高い機械的強度といったさまざまな利点に対する認識が深まることにより、新たな最終用途分野でのセラミックス材料の利用や、既存の用途での使用の増加によって牽引されることが予想される。機会を後押しするのは技術の進歩とイノベーションであり、それらを通じて、セラミックス材料は、市場において代替材料と効率的に競合することが可能になる一方で、同時に、その利用範囲を新たな最終用途まで広げることになる。アドバンスドセラミックスの市場成長パターンに影響を及ぼすその他の要因として特に挙げられるのは、環境や規制の問題、軍事活動のレベル、価格設定のパターン、代替材料との競合等である。

従来 of 収益貢献者

日本は、携帯電話、ポケットベル、電子ゲーム機等の電子機器で世界をリードする生産国であることから、必然的に、これらの機器に用途があるアドバンスドセラミックスにとって、可能性に富んだ市場となっている。エレクトロニクス産業がアドバンスドセラミックスにとって最大の最終用途市場であるという事実が、この市場で日本を他の地域よりも有利な立場に立たせている。京セラや村田製作所、TDKといった世界の主要なアドバンスドセラミックスメーカーも日本企業である。米国は、重負荷用途に使用されるセラミックス基複合材料（CMC）をはじめとするセラミックスの主要開発・生産国であり、主にNASAと国防総省（DoD）から資金拠出を受けている。アドバンスドセラミックス材料の傑出した機械的抵抗性や耐熱衝撃性は、米国の軍事用途において大きな需

要を創出している。米国市場でアドバンスドセラミックスの成長基盤を築く可能性が高いのは、軽量防護服、赤外線ミサイルドーム、航空機エンジン、および各種宇宙用途でのアドバンスドセラミックスの利用である。しかしながら、市場がその可能性を最大限に発揮するには、信頼性や高い製造間接費といった問題に取り組まなければならない。

欧州もアドバンスドセラミックスにとって大きな市場である。製品用途の観点から見ると、米国市場と欧州市場におけるアドバンスドセラミックスの市場力学には大きな違いがある。例えば、欧州は、セラミックス製の人工股関節の使用に関して、米国にかなりの遅れを取っているが、セラミックス製装甲品の生産では米国より上位にランクされている。アドバンスドセラミックス業界内では、自動車用触媒担体の市場が主要なセグメントの一つとして台頭してきている。市場の成長は、欧州および米国で、すべての自動車への排気触媒の装備が義務付けられたことに関連する厳しい環境規制によって、さらに拍車がかかると思われる。Euro 6C 規制の施行により、ヘビーデューティディーゼルエンジンの排気系に使用されるフィルターの需要が、堅実な成長を示し続けている。さらに、欧州のさまざまな都市に設けられた低排出区域が、セラミックス製排気フィルターの売上増加に繋がっている。発電所の高温ガス流用フィルターや溶融金属用フィルター、食品・飲料での限外ろ過または精密ろ過のセラミック膜、焼却炉、石油化学、およびその他の産業ユニットといった、各種の浸食性環境で、ディーゼル微粒子捕集フィルターに加え、セラミックフィルターの使用が増えている。

新興市場が高い利益を得るチャンスを生み出す

世界の電子部品市場で、生産シナリオの中心となっているのが、世界の生産量のほぼ半分を占めるアジア地域である。アジアで生産される全受動部品の大部分が、遠距離通信やコンシューマエレクトロニクス、コンピュータ、石油・ガス向けエレクトロニクス、自動車といった産業分野で使用される電子機器の生産に供給されている。この10年間で、アジア各地で電子部品の生産が急増しているが、特に際立っているのが中国、韓国、台湾である。これらの国・地域では、大手の電子機器メーカーが存在することで、地元のメーカーや国際的なメーカー数社が集まることになり、生産設備が建設されてきた。特に、中国と台湾は、日本の後を引き継ぐ世界の電子部品の新たな生産拠点になっている。電子生産の成長基盤であるだけでなく、アジア太平洋地域では、特に、インドと中国における急速な産業化やそれに続く製造拠点の拡充、安定した自動車生産のトレンド、高い消費支出によって、成長が牽引されている。

アジアが突出した存在になりつつあるという現状は、電子機器の高度化に伴って、既存の用途だけでなく新たな用途においても、セラミックス材料が採用される機会が増えるという意味からも、アドバンスドセラミックス市場にとって好ましい傾向である。

モノリシックセラミックス – 最有力セグメント

製品に関して言えば、市場で最大のセグメントを構成しているのはモノリシックセラミックスで、2017年のシェアは77.9%であった。このセグメントは、当該の分析期間を通じてリーダー的位置付けを維持すると予想されており、主に医療分野での利用の増加により利益が得られると思われる。2017年に475億米ドルと推定された市場は、2024年までに710.3億米ドルを超えると予想されており、2016～2024年の分析期間では5.9%のCAGRで規模が拡大すると見込まれている。自動車や機械、電子および電気製品といったいくつかの最終用途市場の復活も、市場における今後の成長を後押しするだろう。モノリシックセラミックスは、高温抵抗性等の特性が備わっていることから、輸送分野でのセンサーやセキュリティシステム、エンジン部品の製造に使用することができる。エレクトロニクス分野では、半導体や電子部品の製造にモノリシックセラミックスが使用されている。発電分野では、タービンブレードやエンジン部品、コンデンサにモノリシックセラミックスが使用されている。ところが、市場の成長は、防護服セグメントでの需要の低迷、およびセラミックス基複合材料やコーティングセグメントでの競争激化により、ある程度制約されることになるとと思われる。アドバンスドセラミックスの二大最終用途市場を形成する電子および電気製品の成長は、機械や自動車での電子部品の使用の増加や、永久磁石や絶縁体等の製品に対する需要の増大によって加速すると予測されている。電子部品の小型化が進むことにより、市場には新たな機会が生まれる可能性がある。触媒担体としてのモノリシックセラミックスの需要については、自動車生産の成長が牽引するとみられている。しかしながら、この用途は既に成熟の域に達しているため、将来の成長はかなり限定的なものになるだろう。フィルターの製造におけるモノリシックセラミックスの需要も、ディーゼルエンジンで粒子状物質低減フィルターの使用が増加していることを考慮すると、高くなると予想される。自動車および産業機械の生産が増加していることも、摩耗部品用途でのモノリシックセラミックスの成長を促進することになるだろう。一方、防護服用途では、兵士の安全性を重視する風潮の高まりが、今後の需要を牽引すると予想される。モノリシックバイオセラミックスの需要については、これまでよりも速いペースで成長することが期待されている。その主な根拠は、埋め

込み型装置を必要とする高齢者である。

航空宇宙および自動車部門から成長を引き出すセラミックコーティング

セラミックコーティングの需要に拍車をかけるのは、航空宇宙機器生産の増加と自動車生産の回復だろう。セラミックコーティングは一般的に、耐摩耗性、高温抵抗性、耐腐食性が要求される用途で採用されている。

工具の耐久性を高めることを目的とした、切削工具へのセラミックコーティングが普及しているが、これにより、市場の成長がさらに後押しされるだろう。摩耗や腐食に対する保護を可能にするセラミックコーティングの性能は、摩耗部品用途での需要を促進するものである。また、発展途上国における消費者製品の需要増加、および、低コストなセラミックコーティングソリューションに対する需要を喚起し続けている機械加工設備の高効率化や生産性向上への関心の高まりが、成長を促すと思われる。

セラミックス基複合材料（CMC） — 最速の成長を遂げるセグメント

当該の分析期間中、8.7%の CAGR で成長したセラミックス基複合材料は、アドバンスドセラミックス市場で最速の成長を遂げる製品セグメントである。いずれかの繊維強化材を含有するセラミックマトリックスを含むセラミックス基複合材料（CMC）は、脆性問題を克服するための理想的なソリューションとして台頭してきた。一般的な基材は、グラファイト、炭化ケイ素、および酸化アルミニウムを含むいくつかの酸化物である。一方、使用される繊維はシリコン繊維、炭素繊維、または酸化物繊維である。こうした複合材料は、破壊靱性を高めるとともに、温度安定性や優れた剛性を保持することができる。このセグメントでは、高温用途や高い腐食率を伴う用途での使用の増加から需要を引き出している。カーボンナノチューブで強化した CMC も、全体的な需要の伸びに貢献することが期待されている。

電気および電子 — 主要な最終用途市場

2017 年のシェアが約 44.2%と推定される電気および電子は、世界的に、アドバンスドセラミックスにとって最大の最終用途部門である。この部門の売上は、2016～2024 年の分析期間における CAGR5.8%を反映して、2017 年の推定 270 億米ドルから、2024 年までに 400 億米ドルを超えると予測されている。その技術特性により、アドバンスドセラミックスは、医療機器や家庭用電気製品、携帯電話、送電網等、さまざまな電子および電気用途で使用されている。このセグメントで過半数のシェアを占めているのが、アルミナセラミックスである。

携帯電話やゲーム機、携帯用 PC 等の電子機器に対する需要がアジア太平洋地域のような発展途上市場を中心に世界全体で伸びていることを受け、コンデンサや半導体をはじめとするセラミックを使用した電子部品の需要が増加傾向にある。言い換えれば、アドバンスドセラミックス市場にとって大きなチャンスが生まれようとしているのである。近年、アドバンスドセラミックスは、特に、自動車エレクトロニクスや医療機器関連エレクトロニクス、最新の兵器を含む防衛および航空宇宙関連電子機器、産業機器といった、その他のエレクトロニクス市場セグメントで、多くの機会を獲得している。製品およびサービスのイノベーションと開発は、電子部品に多くの機会を創出しており、結果的に市場の需要にとって好ましい傾向を生み出している。例えば、消費者向けエンターテインメントのデジタル化をきっかけに、MP3 プレーヤーやメディアサーバー、DVD、ブルーレイプレーヤーといった、製造工程で電子部品の使用が必須とされるデジタルメディア機器が急速に普及し、アドバンスドセラミックスの採用を後押しする結果となっている。また、次世代携帯電話にセラミックを使用する傾向が強まっていることから、ハンディタイプの携帯用機器分野での需要が著しい拡大を続けている。

エレクトロニクス産業で新たな用途が生まれ続ける限り、今後もエレクトロニクス用セラミックは、世界のアドバンスドセラミックス市場において、最大の製品セグメントであり続けるだろう。現在の用途市場は、単純なコンデンサや受動部品、絶縁体、アクチュエータ、トランスデューサー、センサー、遠距離通信システムから、電解質を動力とする最新式の燃料電池や携帯電話用の誘電体セラミックフィルターまで、多岐にわたっている。原材料およびスタッキング技術に関する研究が、コンデンサ市場における研究開発費全体の 50% を占めており、金属やセラミックス・ナノテクノロジーを使用した、より高性能で、ますます薄くなる誘電層の開発を可能にしている。積層セラミックコンデンサの場合、特に、電気調理器具や乾燥機、食洗機、冷蔵庫といった家庭用電気製品で需要が増加している。光ファイバーコネクタの製造では、ポリマー複合材料とジルコニアセラミックスが幅広く好まれている。

90 年代後半以降、アドバンスドセラミックス市場のよりどころとなる二大分野と言えば、情報技術とエレクトロニクス産業である。これらの産業では、今なお、高性能エレクトロニクスやコンピューティングデバイス、通信機器の需要の増大、およびモノのインターネット (IoT) の急速な普及が、アドバンスドセラミックス組成物の大規模な採用を後押ししている。分野横断的な用途がもた

らず相乗効果もまた、アドバンスドセラミックスに、より新しくより高度な用途の機会を提供する一助となっている。

競合

アドバンスドセラミックスの世界市場は断片化が進んでおり、幅広い製品を提供する多様性に富んだ大規模な多国籍企業や、取り扱う製品数が比較的少ない小規模な企業等、数多くの企業が共存している。この業界の企業は、機能材料、構造材料、コーティング材料、原材料からなる 4 つのカテゴリの 1 つ以上に当てはまる製品を製造している。大規模な組織は通常、構造材料用途と機能材料用途で分かれているか、あるいは垂直統合されており、完成品だけでなく原材料の生産も行っている。多額の研究開発費を必要とするため、市場の参入障壁はかなり高い。大規模な多国籍企業では、新製品の研究開発、および新製品市場の開拓に相当な費用を支出している。アドバンスドセラミックス製品の生産・加工に必要な機械類が一般に高額なため、生産コストも市場参入を制限する要因となっている。

構造セラミックスに関する最先端の研究を行う企業は業界内で数社に限られており、これらの企業もまた、R&D 情報の管理を徹底させ、他社の意欲や能力を削ぐことにより参入を阻止している。1980 年以降、主に航空宇宙産業に分類される大企業が、構造セラミックスで 8,000 件以上の特許を取得している。この業界では多くの買収・合併も行われており、能力が統合されるという結果をもたらしている。構造セラミックス産業には多数の企業が存在しているが、企業同士が協力し合うことはあまりない。

現在事業を展開している企業が直面するもう一つの課題が、顧客ロイヤルティの維持である。より新しい製品に切り替えるようエンドユーザーを誘導するのは容易なことではない。なぜなら、特に、セラミックスの脆性が何よりも懸念される用途では一般に、十分に試行され、テストされた製品が選ばれるからである。顧客がそうした用途で新製品を試すというリスクを冒すことは滅多にない。従って、世界レベルで事業を展開するための資源、幅広くさまざまな業界や用途で通用する技術ノウハウ、市場で他の企業と効率的に競合するための規模の経済を持つことが、この市場で成功するための秘策となる。

市場をリードする上位 6 社、京セラ、村田製作所、Morgan Advanced Materials、CoorsTek、Ceradyne、CeramTec で市場の 25% 超を占めている。京セラは、金属やプラスチック等の他の材料に比べて高い耐腐食性、耐摩耗性、耐熱性を示

すファインセラミックスを製造している。ファインセラミックスをさまざまな高精度部品に非常に適した材料にしているのが、この耐熱性、物理的安定性、強度である。同社の応用セラミックス製品は、製造（切削工具）、ヘルスケア（医療および歯科医療）、環境保護、太陽光発電、さらにはファッション業界等、さまざまな業界で幅広く利用されている。この市場でもう一つの大手企業とされる CoorsTek は、最適なパフォーマンスを実現する一方で、**過酷な**条件に耐えることのできる多種多様なテクニカルセラミックスを開発・生産している。アドバンスドアルミナ、カーバイド、ジルコニア、ジルコニア混合物、StateSafe™ESD 耐性セラミックス、窒化物は同社の主力製品の一部である。2012 年の買収により 3M の子会社となった Ceradyne は、アドバンスドテクニカルセラミックスの垂直統合されたメーカーである。同社の製品は、自動車からエレクトロニクス、医療、原子力まで、多様な業界で使用されている。

市場のトレンドと課題

業界からの注目度が高まるイノベーティブな材料の製造・加工

使用時、もしくは部品の製造加工時の極限的な条件に耐えることのできる、新しいタイプの高性能セラミックス材料に対するニーズを、エレクトロニクス業界と自動車業界が後押ししているという状況下で、アドバンスドセラミックスの開発に注目が集まっている。アドバンスドセラミックス業界では、製品イノベーションに加えて、質の高い製造工程の開発も進んでいる。2016年、Schunk Carbon Technology が、非常に硬く寸法安定性に優れたセラミックス材料である、炭化ケイ素から複雑なモノリシック部品を 3D プリンターで生産することを初めて可能にした IntrinSiC®というプロセスを発表した。このプロセスにより、剛性の高い複雑な部品を、伝統的な従来の技術を用いた場合に比べて少ない材料を使って高速生産することができるようになった。同じ年に、Ceramco は、0.05 g という非常に小さなセラミックスパーツの大量生産を可能にする MicroPIM（マイクロ粉末射出成形）技術を導入した。CoorsTek は、ガスから液体への直接の非酸化変換を目的とする、イノベーティブなセラミック膜を採用した新たなプロセスを発表した。これにより、複数の工程段階を省略し、二酸化炭素の排出を抑制することができるようになった。この開発には、セラミック膜反応器を使って、原油ではなく天然ガスから化学薬品や燃料を生産できる可能性が秘められている。

2016年に新たに導入された製品の中に、赤外線ヒーターや赤外線ラジエーター等の高温用途に対応できる SCHOTT の NEXTREMA®ガラスセラミックがある。このセラミックス材料は、最高 1,740°F という高い耐熱性を示すとともに、1,470°F までの熱衝撃に耐えることができる。Morgan は、自社の高性能な窒化ケイ素結合炭化ケイ素材料を使った新製品シリーズを発表した。半導体業界が、より高速かつ強力なチップを開発するために高度な加工技術に焦点を当てる状況の中、より小型のセラミックユニットに対する需要が、近い将来、さらに伸びると期待されている。京セラクリスタルデバイス株式会社は、ウェアラブル端末やスマートフォンをはじめとする電子機器に使用できる世界最小サイズの水晶振動子（1.0 x 0.8 mm）を開発した。水晶振動子は、デジタル回路でリファレンス信号を作成するために使用される。ウェアラブルデバイスの小型化は、電気的特性に関して妥協することなく優れた機能性を発揮する小型の水晶振動子に対するニーズに拍車をかけている。このような新しい技術は、自動車エレクトロニクスや無線ネットワーク基地局、IoT デバイス、5G モバイル通信といった用途に使用される、新たな低周波発振器、高周波発振器、高精度発振器の

開発において、京セラをサポートするものになると期待されている。さらに、2016年には、Microban Internationalが、セラミックスの抗菌殺菌技術で特許を取得している。この技術を製造工程でセラミックス製品に組み込むことにより、その製品は無制限な微生物の増殖を抑制することができるようになる。

全く新しいセラミックナノ複合材料の開発もまた、高性能かつ高耐久性の複合材料に対する需要が伸びていることを受けて、注目を集めている。このような新しい複合材料については、航空宇宙、自動車、エネルギー、建設産業等の分野で提示される要件を満たすことができるよう、取り組みが行われている。研究の中心となっているのは主に、各種材料の機械的・電気的特性を強化することを目的とした、カーボンナノチューブ（CNT）ベースのセラミックナノ複合材料の開発である。この業界ではまた、センサーやマイクロバッテリー、医療エレクトロニクス、LED基板、太陽光発電（PV）、OLEDフレキシブルエレクトロニクスといった複数のハイボリューム市場で使用するための、超薄型セラミック膜の開発も行われている。

電子セラミックスの採用を後押しする材料技術の進歩

卓越した圧電、誘電、絶縁、光学、磁気、および超伝導特性が備わっていることから、アドバンスドセラミックスは、特に、テレビやコンピュータ、携帯電話といった従来型または最先端の電気機器および電子機器に融合するための理想的なプラットフォームを形成する。電子セラミックスまたはエレクトロセラミックスとしても知られるこれらのセラミックスは、ランダムに配向された結晶粒子から構成された無機固体と関連がある。これらのセラミックスは一般に、ポリマーや金属と結合させることにより、さまざまな最終用途の要件を満たすことができる。電子セラミックスは、高温や高電界といった過酷な環境下でも効率的に機能することが求められる。近年、材料技術が進歩したことにより、さまざまな誘電性能や圧電性能、純度、粒子径および粒子分布を特徴とする多種多様な金属グレードが実現した。超高純度や、ニオブ前駆体およびタンタル前駆体材料のカスタマイズ可能な粒子径が後押しとなって、電子セラミックスのセグメントは優れたパフォーマンスの実現に向けて歩みを進めており、高度な電子や光電子、通信設備における機器の小型化を可能にする重要なセグメントとなりつつある。集積回路技術の進歩は、特に、マイクロ電子パッケージやコンデンサ用の金属や誘電電極の互層を構成する積層セラミックスの加工・生産の強化に繋がっている。積層パッケージングや積層コンデンサが電子セラミックス市場において需要のかなりの部分を占めていることから、このことは市場にとって好都合なものとなっている。**多機能 3D のセラミック配列**である

MMC の開発と出現は、コスト効率が高く堅牢な電子製品の実現を可能にする小型化トレンドの継続を促している。

バリウムチタン酸塩、ジルコン酸鉛チタン酸塩 (PZT)、フェライト (ハードおよびソフト) は、各種の電子製品で最も一般的に使用されるセラミックスである。ジルコニウムも有望株であり、大規模かつ高度な商業用途に向けた準備が進んでいる。今後、ジルコニアは、主に自動車用燃料電池に使用され、燃焼を必要とすることなく燃料電池から動力を生み出すための固体電解質として機能することが期待されている。強誘電体セラミックスもまた、室温赤外線センサー、トランスデューサー、機械センサーに広範な用途があるエレクトロセラミックスに分類されており、さらに、コンピュータの不揮発性メモリに使用できる可能性があることから、現在研究が進められている。

大きな機会を創出するマイクロエレクトロニクス

消費者の家庭やオフィスをはじめ、生活のあらゆる場面でデジタル革命が進展し、強力でよりスマートな小型化した電子機器の需要が上昇を続けている状況下で、マイクロエレクトロニクス産業は、著しい需要の急増に直面している。モバイルでウェアラブルなコンピューティングデバイスおよび通信機器、パーソナルコンピュータ、高解像度薄型テレビ、高密度データストレージドライブ、インターネット、高性能ネットワークング・ソリューション、高速プロセッサ & サーバ、衛星通信、およびデジタルカメラや PDA といった高度な消費者向け電子製品に対するエンドユーザーの需要が増加していることから、マイクロエレクトロニクス産業の活動量が格段に増加している。エレクトロニクス産業では、小型化が今なお最も注目されるトレンドの一つであり続けている。このトレンドの主要な原動力となっているのが、これまでよりもさらに小さな PCB のスペースにますます多くの機能を詰め込むことに対する要求である。高アルミナや窒化アルミニウム、クォーツ、フェライト、誘電体等のアドバンスドセラミックスは、特に、センサーや大規模集積回路、高周波モジュール、ハイブリッド回路といったマイクロエレクトロニック・デバイスに用いる能動および受動電子部品に使用されている。マイクロエレクトロニクスでの用途に関して、アドバンスドセラミックスにはプラスチックや金属に比べ優れた利点がある。アドバンスドセラミックスは、高い電気抵抗率や絶縁耐力、高い熱伝導率、高強度、厳密な寸法制御、放射抵抗、高電気絶縁性、温度変化耐性、高い断熱性といった特性に加え、高温にて完全な寸法安定性を発揮するため、広範なエレクトロニクス用途と機械的用途で、理想的な材料となっている。最終用途製品の小型化が進んでいることから、受動部品の超小型版に対する需要が高まって

いる。デバイスやモジュール、部品に使用されるセラミックス材料における技術の進歩は、サブアセンブリや部品の縮小化に貢献している。しかし、集積回路のトランジスタ密度が日々増加していることが、電子製品や電子システム小型化の主な原因であると考えられている。

2017年以降、特に、製造、自動車、ヘルスケア、軍事、航空宇宙、エネルギーといった産業全般で、新しい最先端のデジタル技術に関心が集まることによって裏付けられた、安定した状態が訪れると予想されている。破壊的デジタルテクノロジーおよび電子技術がニューエコノミーで生き残るための鍵となりつつある。さらに、こうした状況が、マイクロエレクトロニクス、ひいてはアドバンスドセラミックスの需要を牽引することが期待されている。マイクロエレクトロニクスや半導体の需要を牽引する要因には、例えば以下のようなものがある。スマートフォンやタブレット、デジタルテレビ、コンピュータ、およびその他のスマート電子機器の販売の急増；ワイヤレスネットワークの普及と、それに続くネットワークハードウェアの需要；自動車の電子化の進展と、それに続く、その背景にある最新のスマートカーにエレクトロニクスが組み込まれる機会の増加；産業オートメーションやホームオートメーション、スマートファクトリーへの関心の高まりと、それに続く産業用半導体需要の伸び；電子医療機器の技術開発。ウェアラブルデバイスやウルトラモバイルデバイス、電気自動車の急速な技術革新は、半導体部品のニーズにさらに拍車をかけるだろう。電子機器の小型化トレンドは、今後市場を刺激すると予想されている。小型MLCCを使用すれば、スペース確保の必要性が低減し、機器が軽量化されるだけでなく、静電容量を高めることもできる。このようなことから結果的に、MLCCの生産者は、MLCCの小型化、軽量化をさらに進め、高い静電容量を実現することにますます注力するようになっている。

モノのインターネット（IoT）、スマートグリッド、スマートシティといった時代の到来は、機器が相互接続された世界を創り出すことによって、今後10年間でマイクロエレクトロニクスや半導体の重要性をさらに高めることになるだろう。インテリジェンスが埋め込まれたIoT時代、およびIoTエコシステムでセンサーが不可欠とされる状況は、半導体やマイクロエレクトロニクス産業における大量生産の原動力となり、結果的にアドバンスドセラミックスの需要を後押しすると期待されている。

ウェアラブル端末 — 大きな可能性を秘めた将来有望な市場

セラミックスは長年にわたり、主に見た目を良くするために消費者向け電化製品の一部として利用されてきたが、一方で、セラミックス材料は現在、スマ

スマートフォンやウェアラブルテクノロジーで超小型部品として使用される用途が増えてきている。アドバンスドセラミックスは、高性能や耐久性といった優れた特徴を有していることから、金属等の従来の材料に代わるより良い材料として進化を遂げている。超小型のセラミックス部品は、コンパクトな設計空間が要求されるウェアラブルデバイスを支えている。コンシューマデバイスが激しい摩耗を受け、また温度変動にさらされるため、セラミックスは、激しい摩滅の影響を軽減する優れた特性を備えていることがきっかけとなって、理想的な選択肢として台頭している。ジルコニア等のアドバンスドセラミックスで作られたパーツには、微粒子が存在していることから、研磨による鏡面仕上げが可能である。OnePlus や Xiamoi といった企業は既に、自社のモバイルデバイスにセラミックスを組み込んでいる。Xiami の新しい Mi MIX フォンは、従来よりも耐久性に優れたガラスと一体化したセラミックス製のボディを特徴とし、スマートフォンに使用される他の材料よりも高い耐摩耗性を誇っている。

ウェアラブルテクノロジーは、アドバンスドセラミックスにとって確かな機会に恵まれた市場を作り出している。ウェアラブルテクノロジーとして第一に挙げられるのが、センサーを組み込んだテキスタイルやデバイスである。低出力の無線チップや新たなセンサー、高度な通信技術が開発されたことにより、かつては商業用途や産業用途で使用されていた電子ガジェットに、新たに、リアルタイム接続が不可欠とされる健康・医療分野での用途が生まれている。ウェアラブル市場は現時点では初期段階にあるが、アーリーアダプターの段階を経て、今後 2~3 年で幅広い領域に拡大していくと期待されている。3D プリンティングといった新たな製造技術の開発はさらに、性能特性で妥協することなく、ウェアラブルデバイスに使用できる、これまでよりも小型で耐久性のあるセラミックス部品の開発を可能にしている。ジルコニアのようなアドバンスドセラミックスは、軽量だけでなく靱性や高い耐摩耗性といった特性を特徴とするデバイスの製造を可能にする。京セラクリスタルデバイス株式会社は、ウェアラブル端末やスマートフォンをはじめとする電子機器に使用できる世界最小サイズの水素振動子 (1.0 x 0.8 mm) を開発した。

ウェアラブル端末の中でも、スマートウォッチはアドバンスドセラミックスに非常に大きな可能性をもたらす分野として台頭し始めている。2016 年、Apple は、ジルコニアともう一種、アルミナをセラミックスとして使用した新しいアップルウォッチシリーズ 2 を発表した。これら 2 種類のセラミックス材料は要求される硬度と耐摩耗性を実現し、さらに、消費者向けウェアラブル端末の耐久性に不可欠な耐引掻性を備えている。アルミナセラミックスとジルコニアセ

ラミックスの硬度は、ステンレス鋼の 4 倍と言われている。また、別のウェアラブルテクノロジー企業である Amazfit が、新世代の ADI センサーを収納するためのケースに酸化ジルコニウムセラミックスを使用した、セラミックス製のアクティビティトラッカーを発表した。スマートウォッチはモバイル通信における次の進化段階を代表するものであり、『ウェアラブルウェブ』現象の鍵となる要素として進化を続けており、モバイル通信の世界に革命を起こすことが期待されている。これらのデバイスは、ブルートゥースまたはニアフィールドコミュニケーション（NFC）に接続することでスマートフォンと同期し、多機能時計、アンドロイドのアプリケーションインターフェース、通知エージェントとして、またスマートフォンの遠隔操作に使用することができる。スマートウォッチによって実行される数多くの機能のうち、幅広い採用を促している機能がいくつかあり、例えば、特に、以下のようなものが挙げられている。心拍数や血圧、体温、睡眠パターン、消費カロリー、体内水分量および血液酸素量の記録と保存；着信チェック、ソーシャルメディア通知、テキストメッセージ、気象情報の更新；フィットネストラッカー、タスクリマインダー、オーガナイザー、スマートフォンロケーター、GPS ナビゲータ。

今後、スマートウォッチをはじめとするウェアラブル端末市場は、ワイアレスのフィットネスデバイスやスポーツデバイスの堅調な需要に後押しされて、着実に成長していくと予想されており、アドバンスドセラミックスの需要も増大すると思われる。消費者の健康意識が高まり、情報化世代が年齢を重ねることによって、業界全体がヘルスケアの主軸を病院から家庭へ、さらにはパーソナルケアへと移す傾向がある。もう一つ、重要な成長の原動力となっているのが、世界全体でのスマートフォンの急速な普及で、ウェアラブル端末革命の実現を可能にする最も重要な要因である。スマートウォッチ市場にとって、以下のような状況はプラスに働くと予想されている。価格の下落、デザインや使いやすさの向上に伴うハードウェアの改善；アプリ開発者によるソフトウェアソリューションの改善；当該市場に進出する企業の増加。

センサー技術におけるアドバンスドセラミックス

アドバンスドセラミックスは、超高感度圧力・温度センサーから化学センサーまで、各種のセンサーに使用することができる。これらのセンサーには、静電容量検出素子やピエゾ抵抗素子、高度検出素子が搭載されており、特に、医療や自動車エレクトロニクス、遠距離通信、産業等、さまざまな最終用途市場で使用されている。センサーは、現在生産されているほとんどのテクノロジー製品にとって最重要要素である。センサーがコントローラーやコンピュータ制御

システムに極めて重要な情報を提供することにより、自動意思決定プロセスの基盤が形成される。センサーの応用分野は、最も基礎的な家庭用電気製品のパーツである単純なスイッチや温度感知装置から、先端的な製造設備やファクトリーオートメーションシステムで使用される高度なセンサーに至るまで多岐にわたっている。テクニカルセラミックスは、酸素伝導性、高い曲げ特性、およびセンサー技術関連用途に対応するマイクロ波特性を示す。静電容量圧力センサーは、熱安定性および長時間安定性に関して、顕著な利点を示す。高い誘電効果の特徴とする圧電セラミックスは、特に、超音波センサー、衝撃センサー、加速度センサー、ノックセンサーに使用されている。商用エレクトロニクスや医療機器、自動車サブシステムでの使用の拡大は、セラミックセンサー市場の今後の見通しを後押しすると期待されている。市場は特に、小型化トレンドから利益を得ると見られ、今後も静電容量センサーの用途における可能性は広がり続けると思われる。また、PCAP または PCT としても知られる投影型静電容量検出技術の人気の高まりも、静電容量センサーの需要にとってプラスに働くことが期待されている。さらに、ポリマー由来セラミックス（PDC）も、高温センサー用途において、将来性のある材料として頭角を現しつつある。PDC とは、高分子前駆体の熱分解によって生産される高温セラミックスである。その特徴には、高いpiezo抵抗性以外に、高温安定性、耐クリープ性、耐腐食性等の優れた構造的・機能的特性がある。医療機器市場では、金属酸化物系セラミックスが、CO 検知器およびアルコール呼気分析装置に使用されている。疾病マーカーの検出を目的としたセラミックナノセンサーの研究が進行中である。

需要を後押しし続ける消費者向け電子機器

世界のコンシューマエレクトロニクス（CE）業界は現在、急速な変革的成長の真っ只中にあり、デジタル化や小型化、モビリティといったトレンドが市場における成長の主要な推進力となっている。セラミックスは、半導体特性や超伝導性、絶縁特性、圧電特性、磁気特性等さまざまな電気的特性を有していることから、携帯電話やコンピュータ、テレビといった各種の電気機器に使用されている。特に、HDTV や DVD プレーヤー、ブルーレイプレーヤー、ホームメディアサーバー、家庭用オーディオ機器といったインタラクティブなデジタルアプリケーションが消費者市場に進出し、従来のテレビやカセットビデオプレーヤー／レコーダーに取って代わりつつある状況の中、デジタル技術が、コンシューマエレクトロニクス市場の様相を一変させようとしている。より速いデータ速度を有するより小さくてより軽く、より薄いコンシューマデバイスへの需要が高まっていることと、それに続く電子部品の小型化の進展が、アドバンスドセラミックスの需要を牽引し続けている。このようなセラミックス材料は、

より多くの機能をコンパクトな製品やシステムに搭載することを可能にすることから、さらに広く受け入れられつつある。これらの機器に対する需要の増加に対応できるよう、電子機器メーカーは生産能力を高めており、その製造に使用される電子部品から利益が生まれると期待されている。例えば、プリント基板は、コンシューマエレクトロニクスデバイス等、商業的に生産される電子機器のほとんどで使用されており、従来の**タグタイプの回路**を使用した組み立て工程では不可能だった組み立て工程の完全自動化を可能にしている。積層セラミックコンデンサについては、特に、電気調理器具や乾燥機、食洗機、冷蔵庫といった家庭用電気製品で需要が増加している。タンタルコンデンサはデジタルビデオカメラに使用されている。

コンシューマエレクトロニクス業界は、アドバンスドセラミックスにとって主要な最終用途市場であるため、とりわけ発展途上市場における電子機器需要の急増は、アドバンスドセラミックスのグローバル市場にとっての重要な牽引役になると期待されている。アドバンスドセラミックスをセンサーに使用するケースが増えている。コンシューマデバイス市場の拡大はセンサーにとって好ましい傾向であることから、長い目で見れば、アドバンスドセラミックスにとっても好都合なものとなる。スマートTVやゲーム機、スマートウェアラブルデバイス、PC、特にオールインワンPC、ラップトップPCが利用される機会が増えており、コンシューマエレクトロニクス産業の成長は加速するばかりである。

表 1 : 2015～2018 年までの種類別モバイル機器の全世界出荷数 (単位 : 100 万台)
(省略)

表 2 : 2016～2018 年までの世界の電子部品市場および半導体 CAPEX (単位 : 10 億米ドル)
(省略)

機会を後押しする圧電セラミックス部品

圧電効果は、結晶構造において機械的な圧力を加えると、電圧または電荷を生成するという、一部のセラミックス材料が有する特徴的な特性である。セラミックス材料によって生成される電圧は、加えられた機械的圧力に比例する。これとは逆に、電界の用途では、材料が変形し、次元構造の変化を示す。圧電材料の例としては、天然水晶のクォーツやトルマリンといった結晶材料、チタン酸ジルコン酸鉛 (PZT) やチタン酸バリウム等のセラミックスが挙げられる。圧

電セラミックスは、高強度、耐薬品性、温度／圧力変化に対する高い耐性といった特性を特徴とする。圧電セラミックス部品は、電気エネルギーの機械エネルギーへの変換、またはその逆を促進する電気機械トランスデューサで幅広く利用されている。圧電セラミックス市場の成長を牽引しているのは、高い圧電活性や、材料をバーやシートシリンダー、プレート等さまざまな形状およびサイズに容易に成形できるといった特性である。圧電セラミックスは、さらに工学的に処理することにより、大型のリングや球体等のサイズの大きな構造物を形成することが可能である。圧電セラミックスの種類として、チタン酸ジルコン酸鉛（PZT）やチタン酸バリウム、チタン酸ビスマス、メタニオブ酸鉛、チタン酸鉛、ニオブ酸ナトリウムカリウム等を挙げることができる。現時点で最も幅広く利用されている種類は、ジルコン酸鉛とチタン酸鉛を混ぜた PZT 系の圧電セラミックス材料である。

産業オートメーションや、携帯電話、カメラ等高度な電子機器に対する消費者需要、ホームオートメーション市場の進化といったトレンドに起因する圧電デバイスの需要の増加が、圧電セラミックス市場を後押しすると予想されている。その他、圧電セラミックスの成長分野には、医療エレクトロニクスやセンサー等がある。半導体やバイオメディカル、航空宇宙、オートメーション市場における圧電アクチュエータの需要が、近い将来に機会を後押しすることが期待されている。他の市場には、ナノインプリンティング、マイクロリソグラフィ、走査顕微鏡等がある。距離センサーでは、信号受信機や信号発生器として機能する圧電セラミックディスクが重要な役割を果たしている。ノックセンサーでは、圧電セラミックリングが信号ピックアップや信号システムとして機能している。自動車部門では、圧電セラミックスは、インテリジェント・エンジンマネジメントのために各種のエンジニアリングセンサーで使用されている。これらの圧電セラミック材料は、特に、加速度センサーやジャイロスコープ、ノックセンサー、レベルセンサー等に利用することができる。これらのセラミックスはまた、非破壊材料試験を含む機械工学や機械設備の分野でも使用されている。

アドバンスドセラミックスの需要をさらに喚起するエネルギー部門

エネルギー部門は、今後、アドバンスドセラミックスの新たな機会を創出することになると思われる。アドバンスドセラミックス材料は、二酸化炭素排出量が少なく、分散型発電のための最も重要かつ費用対効果の高いリソースであることが確認されている。発電用ガスタービン／熱機関でアドバンスドセラミックスを利用することにより、燃料消費量が著しく減少し、また放出率の低下に

伴う出力の向上が実現している。アドバンスドセラミックスは、一般にガスタービンのブレードや羽根に使用される金属合金に代わる材料として利用するのに適している。アドバンスドセラミックスを使用することで、タービンブレードの内部冷却の必要性が軽減もしくは排除されるため、資本コストや発電コストが低減する。その結果、燃焼システムを低温で機能させ、NOx 排出量を減少することができるようになる。こうしたことが可能な理由は、他の金属よりも高い壁面温度での運転が可能であるという特性にある。また、風力タービンの部品にセラミックコーティングを施せば、過酷な環境からの保護に役立つ。こうした可能性を見据えて、アドバンスドセラミックスの将来の利用に向けた多くの研究開発活動やプロジェクトが、太陽光発電や地熱発電、風力発電、バイオエネルギー発電、およびその他の熱発電技術の分野で始まっている。

エネルギー需要が世界的に高まっていることから、現在の需要を満たすだけでなく将来のニーズに応えるためにも、エネルギー生産の増加が急がれている。電力需要の上昇、従来型エネルギーのコスト増、天然資源の枯渇、従来型エネルギーの利用に伴う環境問題の深刻化は、風力エネルギーや太陽光エネルギー等の再生可能エネルギー源を含む、さまざまな代替エネルギー源の探求という結果をもたらしている。その中でも、太陽光エネルギーは近年、この分野での技術的発展によってエネルギーの生産コストが低下したこともあり、世界的に大きな注目を浴びている。太陽光エネルギーが従来型エネルギー源に取って代わることを実現するための鍵となる要因が、有用性と持続可能性である。世界の風力エネルギー産業は、現在世界で生産される再生可能エネルギー全体の35%を風力が占めていることからわかるように、この20~30年で著しい発展を遂げてきた。広大なウィンドファームに建てられた何百基もの風力タービンが、強風を利用して発電を行っており、電力伝送ネットワークの助けを借りて蓄電・送電されている。

非常に大きな可能性が期待できる燃料電池

自動車メーカーは、より環境に優しい未来の探求を現実に変えるため、アドバンスド材料に大きな期待を寄せている。酸化イットリウム安定化酸化ジルコニウム (YSZ) や、ニッケルサーメット、クロム酸ランタン、マンガン酸ランタンといったアドバンスドセラミックスは、燃料電池、特に、固体酸化物形燃料電池において水素燃料発生を触媒作用によって促進する電解質溶液やインターコネクタ、電極として採用されており、これらのアドバンスドセラミックスにとって、燃料電池は急成長している市場である。さらに、合成ガスの生成を可能にするセラミックスベースの触媒やセラミック膜は、燃料電池におけるアド

バンスドセラミックスの他の重要な用途領域を構成する。世界的な商品化が待ち望まれていることから、燃料電池はその生産量が急増し、それに伴って、アドバンスドセラミックス材料の使用も増加すると予想されている。

燃料電池の世界的な出荷は、太陽光やバイオガス、風力といった他の技術と燃料電池の融合が進展することによる恩恵を今も受け続けている。燃料電池と水素技術の開発のみに従事してきた企業で、製造される燃料電池全体の約3分の1を占めている。現在の燃料電池の商業生産は、低温型の直接メタノール形燃料電池、プロトン交換膜（PEM）、および電解質に偏る傾向が見られる。最速の成長を遂げる電池カテゴリーは、固体酸化物形燃料電池（SOFC）である。SOFCの電解質は、高い酸素イオン伝導性を特徴とする固体酸化物セラミックで構成されている。使用される主要成分は、イットリア安定化ジルコニア（YSZ）である。電池の陽極は Co-ZrO₂ または Ni-ZrO₂ サーメット、陰極は Sr ドープ LaMnO₃ である。SOFC の場合は、高温であることから、燃料から水素を抽出するために改質器を必要としない。SOFC は、**中央発電所**等の高エネルギー用途、および産業用途での選択肢となる可能性がある。SOFC の自動車での利用に焦点を当てた研究も進行しており、SOFC を使用した燃料電池の補助動力装置（APU）の生産を目指している。SOFC には、ディーゼルや天然ガス、ガソリン、ケロシンといった現時点でより安価とされる化石燃料を汎用的に利用できるという優れた機能が備わっているため、大手自動車メーカー数社がこの分野に強い関心を示している。燃料電池に固体セラミックス材料を使用すれば量産が可能になり、大幅なコスト削減に繋がると予想されている。試験導入は、固定の燃料電池ユニットを設置した場合のインセンティブが必要とされる段階まで来ている。

アドバンスドセラミックスの新たな機会を後押しする超伝導体

アドバンスドセラミックス業界にとって、『超伝導性』は、今よりも環境に優しい景観を予見させる新たな機会である。強化セラミックスは、伝送距離に関係なく電気のコンダクタンスに優れていることから、高いコストと送電損失に悩む世界の配電産業に大きな機会をもたらしている。送電効率の悪さを解消することを最重要目標に掲げる電力業界は、超効率的なコイルやマグネット、電力コンポーネント、セラミックスベースのワイヤ製伝導体といった用途にアドバンスドセラミックスを大々的に採用することにより、経済的利益と環境に優しい技術を融合させるための準備を進めている。使用される典型的なセラミックス材料には、YBCO や、イットリウム酸化物・バリウム・銅の混合物、BiSSCO、およびピスマス酸化物・ストロンチウム・銅の混合物等がある。

超伝導性とは、純粋な伝導体として挙動するために、特定の温度以下に冷却されると、伝導性材料の抵抗が消失する状態を指す。超伝導特性を最初に発現した材料は液化ヘリウムで、絶対零度で抵抗率がゼロになった。超伝導体は、距離に関係なく、直流電流（DC）が止まることなく流れることを可能にする。超伝導性材料を構成するのは、特に、窒化チタンやホウ化イットリウム、ニオブチタン、ニオブスズ、ニホウ化マグネシウム、ジルコニウム、オスミウム、鉛、水銀、ガリウムといった二元合金、化合物、金属である。超伝導性の有望な特性として、磁束量子化や完全な反磁性、完璧な伝導性、また、ジョセフソン効果が挙げられる。長年、超伝導体は、ヘルスケア（MRI 画像および核磁気共鳴（NMR））や医療機器、研究所、無線通信、コンピューティングといった隙間的な用途で幅広く利用されてきた。超伝導体を使用する用途の数はここ数年増え続けており、この傾向は今後も続くと思われられる。超伝導体の他の用途には、同期コンデンサや粒子線治療、磁気式ビレットヒーター、セルラー通信システム用 HTS フィルター、機上発電機、指向性エネルギー兵器、デガウシングケーブル等がある。超伝導体の利点に関する認識が高まるにつれ、さまざまな用途で、超伝導体技術に対する需要が創出されるだろう。同期コンデンサは、送配電ネットワークの調整だけでなく動的力率制御を可能にする特殊回転機のカテゴリーに分類される。近い将来、成長を牽引するのは、電気エネルギー発生や伝送、変換、貯蔵における応用超伝導分野でのイノベーションと飛躍的進歩だろう。この点で、超伝導体は、費用対効果があるだけでなく、環境上の利点ももたらすような現在および将来のシステムを設計する準備が整っている。超伝導技術の将来も、新たな超伝導材料の開発に照準を合わせた R&D プロジェクトに対する政府の支援が継続するか否かによって、大きく左右されると思われる。その第一の理由は、材料ベースの技術開発はリスクレベルが高く、15~20 年という長いリードタイムを要し、さらには、非常に資本や投資集約的になることである。従って、超伝導体用途の増加と拡大が、今後のアドバンスドセラミックス市場を牽引することになると予想されている。

無線インフラの用途での利用が増加するアドバンスドセラミックス

商業用の無線技術は、無線データ転送や GPS、モノのインターネットの導入に伴い、この 25 年間で重要な過渡期を迎えることとなった。セラミックス材料は、セルラー基地局をはじめとする無線インフラの分野に用途を見出している。2G システムのための自動同調コンバイナの主要部品を構成するマイクロ波誘電体セラミックフィルターは、高度な LTE や 4G ベースのシステムでも使用されており、こうした動向には、多重送信のためにより多くのフィルターを必要とす

るキャリアアグリゲーションも含まれている。無線インフラで進行する並行開発によって、今日の携帯電話機が極小スペースでより多くの機能性を発揮できるようになったことから、さらなる小型化を目指す、優れた誘電率を有する材料の設計に弾みがついている。セルラー基地局では、信号方向性のメンテナンスが重要であり、サーキュレータやアイソレータを使用しなければならない。サーキュレータやアイソレータには、非伝導性のセラミックフェライトが用いられている。これらの機器は、無線周波数（RF）信号を制御し、また RF 電力の他のエリアへの漏電を防止するために分岐する磁気旋光性に依存している。広い回転磁気共鳴線幅を有する磁性酸化物材料は、誘電損失の低下を促すことから、このような用途に理想的とされている。金属が、隣接する金属原子間にスピン相互作用を発現するのに対して、酸化物は、超交換として知られる磁気相互作用を示す。サーキュレータやアイソレータの用途では、多結晶イットリウム鉄ガーネット（YIG）が頻繁に利用されている。ガーネット相セラミックスは、立方結晶構造を有し、回転磁気共鳴を示すことから、広い帯域幅での利用が可能となっている。サーキュレータまたはアイソレータのサイズをさらに縮小するには、より高い誘電率を持つ材料が必要となるため、ガーネットではビスマス材料も採用されている。

ハイブリッドモジュールや小型部品の機能統合、機能実装が進んでいることが、次世代技術の重要な側面になると考えられる。ポイントツーポイント無線、ポイントツーマルチポイント無線、および衛星通信モジュールには、酸化ベリリウム（BeO）セラミックス材料も使用されている。進行中の研究が目標としているのは、幅広くさまざまな磁化に、優れた誘電率に相当する機能を加えて、より完全な状態にすることである。このような技術が実現すれば、可同調フィルター等、その他の用途が生まれる可能性がある。こうしたセラミックスの分野では、セラミックス材料の設計にイノベーションをもたらすことにより、成長を遂げる商業市場において、デバイスの機能性の向上が可能となる。

セラミックス複合材料 — R&D の成長分野

セラミックス基材に組み込まれたセラミック繊維から作られるセラミックス基複合材料は、セラミックスを採用できない用途において、構造材料に最も近い代替材料となっている。CMC は、ポリマーマトリックス複合材料（PMC）よりも優れた強度、剛性、耐熱性、吸湿性、電気／熱伝導率、耐摩耗性を有するハイテク材料を構成する。複合材料はスチールやアルミニウムといった材料に比べ高価ではあるが、特に、軽量で耐腐食性があり、燃料節約も可能であるといった、重要なパフォーマンス上の利点が不可欠とされるさまざまな最終用途で、

好んで利用されるようになってきている。セラミックス基複合材料は、厳しい熱的・機械的要件を満たさなければならない用途で重要な材料とされている。これらの材料は、金属硬化や炎管、保護タイル、熱交換器、ガスタービンのバッチ運搬装置で、また、各種の高温ホルダーで使用されている。高い耐摩耗性と摩擦特性を備えていることから、CMCは滑り接触ベアリングやブレーキ、クラッチプレートといった用途でも使用されている。

複合材料は現在、建設業界だけでなく、自動車や航空宇宙、海洋、風力エネルギー、軍事／防衛、スポーツ用品等の幅広い最終用途セグメントで使用されている。優れた能力を備えた最新の複合材料は特に、建設業界の用途に限らず、自動車のボディやパーツ・部品、風力発電用部品、水泳プール用パネル、ボートの船体、浴槽、シャワー室、貯蔵タンク、パイプ、大理石キッチンシンク、模造花崗岩、カウンタートップといった製品の生産でも使用されている。高度なコンポーネントの主な最終用途市場と言えば、輸送や防衛、エネルギー、エレクトロニクス等である。最も高度な複合材料については、軍事および航空宇宙部門に、(強度および耐久性の観点から)高度なミサイルや航空機がテスト環境で機能しなければならないという要件があり、そうした複合材料ならばその要件を満たすことができるため、これらの部門で使用されている。

産業界では、フェイルセーフなハイテク世界への高まり続ける要求を満たすために、全く新しい材料の必要性が叫ばれている。イノベーションを推進するには、ユニークな特性や強化された特性を有する新規材料の発見と設計を可能にするような生産工程が欠かせない。新たな部品のコンピュータによる設計は、CMC需要の主要な牽引役となる。例えば、FEでは、高い異方性負荷のような複雑な技術要件の実現を、シミュレーションによって容易にすることができる。現在、CMC部品の性能向上に役立つよう、マイクロスケールおよびメソスケールで、SMC構造を調べる研究が進められている。アドバンスドセラミック繊維や自由形状繊維を扱う新規企業が焦点を当てているのは、低コストな関連技術の開発であり、そうした技術が非常に破壊的な技術になることが期待されている。このような開発に従事する企業は、構造セラミックスに伴う問題を回避することを意図した連続セラミック繊維を生産することができる。これらの材料はまた、GEのような業界を代表する大手企業で採用される生産方法に、そのまま適合させることが可能である。しかしながら、これらの新しい企業は、規模が小さく、収益を計上するに至っていないことから、かなり長期的な開発サイクルの実現に必要な資金として、米国のSBIR助成金に頼っているため、これら企業の事業執行スコアは制限されている。

CMCの成長を支える主な原動力は、米国等先進工業地域における航空宇宙産業および自動車産業からの需要の増加である。燃料効率やより軽量な部品に関心が集まっていることを前提として、航空機用ジェットエンジンに使用するためのCMCの開発が進められている。GEやBoeingといった企業は、航空機向けCMCの進歩に注目している。例えば、GE Aviationでは、新世代のCFM LEAPおよびGE9Xエンジンに炭化ケイ素繊維を使い、低重量で高温耐熱性の炭化ケイ素マトリックスの開発に向けた投資を増やしている。3Dで製作したセラミックス複合材料部品を特徴とするGE SafranのLEAPエンジンが、2016年に導入された。同社は、金額にして780億米ドルを超える6,000件超の発注を受けており、既に成功を収めている。

CMCは、生産が複雑である上に、その重量はPMCより重い。エマルションデトネーション合成(EDS)は、より良い複合材料を設計、開発するための、また、イットリア安定化ジルコニアのようなナノ構造セラミックス粉末の大規模製造を行うための、全く新しい手法となるプロセスの一つである。EDSは、困難な要件を伴うハイテクの高度な用途に、より優れた特性を付与することを可能にするナノ構造セラミックス粉末の製品ポートフォリオの開発に利用されている。こうしたセラミックス粉末を用いたコーティングや部品は、耐久性と硬度に優れているだけでなく、耐熱衝撃性と曲げ強度が強化されている。EDSはまた、より良い複合材料を作るための設計ツールとしても利用されている。このような用途では、エマルションの組成が、生成される材料の種類を決定するプロセスの極めて重要な要因となる。採用される前駆体に基づいて、数種類の材料の可能性を調べることができる。前駆体を選択する際は、かなり柔軟に対応することで、特定の用途に対して最適な特性を有する粉末の設計が可能となる。さらに、EDSの工程管理も非常に重要な要因であり、反応の動力学的観点から見れば、可能性のある新規材料を調べるために、温度や圧力はすべて変更可能となっている。

航空宇宙産業における用途の増加

アドバンスドセラミックスは、寸法安定性や優れた剛性対重量比、良好な耐薬品性、高い機械的強度といった有利な物理的屬性を備えていることから、航空宇宙産業での用途が増えている。窒化アルミニウムや窒化シリコン、アルミナは、さまざまな主要航空宇宙部品の生産に幅広く応用されている。航空宇宙産業において、アドバンスドセラミックスは、低質量であることから、スペースシャトルや軍用機、民間航空機の製造に重宝されている。セラミックスの加工

コストを見れば、セラミックスを、強化された電気活性のような機能のために使用する、あるいは、高温で機能させることが、いかに理想的であるかがわかる。アドバンスドセラミックスは、ジェットエンジンの効率と動力を向上させて、エンジンの運転温度を上げるために、金属の代わりに使用されるケースが増えている。エンジンの高温部でセラミックスが金属に取って代わることにより、結果的に、この分野にとって有益な効果が生まれることが期待されている。これらのセラミックスは、エンジン監視機器用のレベルセンサーやジャイロ스코ープおよび加速度計、火災探知機および抑制機器のディスプレイ、点火装置、衛星測位装置、ミサイル誘導システム、航空計器および航空機制御機器といったパーツの製造に使用されている。セラミック複合ライニングは、エンジンが華氏 2,400 度という高温に耐えることを可能にする。

構造セラミックスは航空宇宙産業で使用され、エンジンの高温部品を被覆するための断熱皮膜を形成するとともに、基材もしくは強化材としても使用されている。軽量特性と耐熱特性を有していることから、構造セラミックスは、ミサイルのノーズコーンやエンジン部品、スペースシャトルの断熱タイル、ロケット排気コーンにおける熱保護装置にとって重要な材料となっている。

アドバンスドセラミックスは、宇宙旅行に必要とされる高度な技術の開発において中心的な役割を担っている。イオンエンジンは、消費燃料の割合が同じ場合に、より速いスピードで航空機を推進する潜在能力があることから、従来の化学推進に代わる効果的な代替手段として売り込まれている。

航空宇宙部門はまた、航空機エンジンや部品、およびその他の航空宇宙関連用途の後押しを受けて、アドバンスドセラミックコーティングの消費量が最も多い部門となっている。熱溶射皮膜は、アドバンスドセラミックコーティング市場において、有力かつ最も成長速度の速いプロセスになると期待されている。化学蒸着（CVD）プロセスおよび物理蒸着（PVD）プロセスが、アドバンスドセラミックス市場全体に占める市場シェアは比較的小さなものになると思われる。

アドバンスドセラミックスの重要な最終用途分野として出現する医療用途

アドバンスドセラミックスは、並外れた電気的特性や固有安定性、耐摩耗性を有していることから、ブリッジやクラウン、およびその他の歯科用インプラント、膝関節・腰部インプラント、埋め込み可能な電子インプラント、診断・手術用器具、再生医療といった、さまざまな歯科、整形外科、内科用途での使用

に理想的な材料である。オールセラミックインプラントは、オッセオインテグレーションや生体適合性の程度が高いことから、中規模から小規模の骨置換では、セラミックポリマーやセラミック金属製のインプラントよりも人気が高まっている。

さまざまな医療分野でのアドバンスドセラミックスの需要は、世界的な高齢化が主要因となって、歯科処置や関節インプラントといった医療処置および医療製品の必要性が増大し続けていることから、伸び続けると予想されている。スマートセラミックスやバイオセラミックスは特に、医療技術分野で成長の機会に恵まれることが期待されている。スマートセラミックスは、高度なドラッグデリバリーシステムを促進し、MRI装置の性能を高める。一方、バイオセラミックスは、人工臓器移植の症例を整形外科から心臓血管外科に至るまで幅広い分野に拡大している。バイオセラミックスは、機能的、構造的に生組織と適合性があり、新たな組織の成長を促進することから、効果的なインプラントとして台頭してきた。バイオセラミックスは、合成ポリマーおよび天然ポリマー系、炭素繊維系、金属系複合材料に、さらには、カーボンナノチューブ系複合材料に組み込むことができるという点からも、有益である。また、金属製インプラントの長期的な生体適合性や性能に関する懸念が高まっていることから、医療用セラミックスの需要も上昇傾向にある。再生医療に使用されるセラミックスは特に、今後、異例の成長を遂げると期待されている。その主な理由は、生体適合性があることからセラミックスが使用される、足場材料誘導組織工学の発展である。さらに、ジルコニアやアルミナといったセラミックス粉末は、骨再建市場での利用が増加すると見込まれている。

高性能セラミックスも、生物学的不活性および高い耐摩耗性により、医療分野での用途が増加すると期待されている。高性能セラミックスがとりわけ適しているのは、膝関節や腰部の置換器具、脊椎ディスク等の整形外科用器具である。整形外科用インプラントに対する需要の増加と急速に進む高齢化が、今後、こうしたセラミックス材料の需要を著しく増大させると予想される。骨足場材料も、医療用セラミックスを使用する機会を見出すことのできる分野である。また、ナノセラミックスや圧電セラミックスといった製品の利用が増加していることも、市場の機会に拍車をかけている。圧電セラミックスは、医療診断機器に使用する圧電モーターやセラミックセンサーでの用途が増えていることから、需要が伸びている。

表 3 : 世界の医療用セラミックス市場 (2016 年) : 用途別収益の内訳 (%)
(省略)

ニューロモデュレーションの新たな領域

アドバンスドセラミックスは、医療機器の分野、特に神経刺激の分野で新たな領域を開拓している。電気信号を使って神経インパルスを遮断するか、あるいは刺激する神経刺激は、主に、高血圧や糖尿病、肥満といったさまざまな症状の治療にこの技術を幅広く応用できるという理由から、近年、大きな注目を集めている。アドバンスドセラミックスはまた、次世代型の埋め込み可能なパルス発生器 (IPG) の開発において、新たな研究分野を切り開いている。IPG とは、体内に埋め込む電池式の機器で、その主な目的は神経系に電気刺激を与えることである。微量の電気パルスが、インパルスを刺激または遮断する IPG によって放出される。現在、神経刺激市場の一般的な傾向として、小型化が求められており、アドバンスドセラミックスが、小型化しても同じ成果を出すための一助となっている。アドバンスドセラミックスは、より多くのリード線を組み込み、単一の装置からより多くの信号を送信することのできる新たな機器の開発を可能にしている。アドバンスドセラミックス材料についてはまた、セラミック射出成形 (CIM) を利用して、IPG のチタン製機器のケーシングに代わる薄肉ケースを製造するための研究が進められている。

整形外科手術における窒化ケイ素セラミックス

エレクトロニクスや自動車、風力発電から宇宙探査に至るまでさまざまな業界で、数多くの用途に使用する材料として、窒化ケイ素 (Si_3N_4) が選択される理由となっている主な特性は、硬度と耐摩耗性である。これらの業界で使用される Si_3N_4 製品には、金属製切削工具やベアリング、絶縁体、ロケットスラスタ一部品、自動車エンジンパーツ等がある。しかしながら、近年、耐久性の高いこの材料は、医療分野、とりわけ整形外科の領域にも急速に進出している。絶えまない技術の進歩に支えられて、椎体間固定インプラントケーシングという形で、世界中の手術室で利用される機会が急速に増えている。窒化ケイ素セラミックス材料は、強度に優れ、摩耗が少ないといった、相対的に有益な特徴をいくつか備えていることから、整形外科用インプラントの作製に使用される従来の材料と比較しても引けを取らない。 Si_3N_4 はまた、インプラント設計において、整形外科用途で非常に重要とされる柔軟性を高めることを可能にしている。材料によって柔軟性が高まれば、アルミナのような従来のセラミックス材料で生じる可能性が非常に高い、脆性破壊のリスクが払拭される。

研究者たちによって、耐摩耗性と強度が不可欠な腰、脊椎、膝関節の固定装置の設計に使用することが可能な、軽量でありながらも強度を維持するマイクロ複合セラミックスに、窒化ケイ素を混合する方法が開発された（ Si_3N_4 製インプラントは、非セラミックス材料を用いたインプラントに比べ、20 倍以上の強度を持つ）。 Si_3N_4 はまた、生体適合性を有し、化学的に不活性であるとともに、変形することがない。さらに、非セラミックス材料と違って、人体がセラミックス製インプラントを異物と認識することはない。というのも、突き詰めれば、セラミックスは身体の一部だからである（骨はリン酸水素カルシウム、すなわち、セラミックスの一種でできている）。この材料が持つ放射線透過性も、手術後および手術中のインプラント留置評価に必要な画像において、境界線を鮮明に映し出すことから、有益な特性となっている。 Si_3N_4 はすでに脊椎固定関連の手術について米国 FDA の承認を受けており、腰置換に関しては現在試験が進められている。近い将来、整形外科における Si_3N_4 の市場は、インプラント設計と材料の多様化の両面から、さらに拡大していくと思われる。

高齢化 — 間接的な成長の牽引役

先進国を中心に、世界全体で高齢者人口が急増している。米国、英国、オーストラリア等の国では、今後 20 年で、人口全体に占める 65 歳以上の割合が 2 倍になると予測されている。総人口に占める高齢者（65 歳以上）の割合は、2000 年に 10%であったが、2025 年までに 15%に達すると見込まれている。こうした増加をもたらしているのは主に、米国や欧州といった先進地域であるが、途上国でも、平均余命が延び、より良い医療サービスを受けることができるようになったことから、高齢者人口が急増している。特に、米国では、第二次世界大戦後の 1945~1965 年に生まれた 6,000 万人を超える団塊の世代の高齢化が急速に進んでいる。2010 年以降、団塊の世代が定年を迎えるようになり、さまざまな創傷管理製品の需要が高まっている。このような裕福で健康意識の高い人々は、現在の財政の不確実性と最近政府が行った医療政策の変更から、国の医療制度をあまり信用しておらず、より質の高い医療サービスを求めている。

年齢を重ねるにつれ、さまざまな病気の発病率が増加する。その結果、骨が劣化すれば、膝や腰の置換が必要となる。このことが、セラミックス製股関節の需要に拍車をかけているのである。特に需要が高いのは、耐用年数の長さからバイオセラミックス製の股関節であり、患者の活動的なライフスタイルの実現を可能にしている。この年齢層では一般に、歯科用インプラントの需要も高く、このことは市場にとって好材料となっている。

表 4：総人口に占める高齢者（60 歳以上）の割合（%）：2012 年と 2050 年の比較
（省略）

歯科用途が拡大するアドバンスドセラミックス

材料技術の進歩は、歯科市場にも多くの便益をもたらしている。この数年、最上位クラスのナノマテリアルやセラミックスが、補綴市場向けに発売されている。また、見た目が自然な補綴部品の開発にも重点が置かれている。新たなセラミックス材料や改良されたセラミックス材料の出現は、歯科における審美性や機能性を高めている。こうしたセラミックスベースのインプラントは、元の歯冠に酷似した色調を出すことができる。ここ何年かの間に、専門歯科と審美歯科の重要性や人気はかなり高まってきており、審美面で優れた結果を提供するだけでなく、回復期間の短縮も可能にするような処置にますます重点が置かれるようになってきている。審美性は、歯科修復においてクラウンの利用を促す主要因にもなっている。失った歯を修復または置換するという単一の機能だけではなく、クラウンは審美的な魅力を高めるためにも使用されている。これは主に、インプラントベースの材料やオールセラミックス材料といった単一材料で一塊に製作するレストレーション技術が、継続的に改良されていることによるものである。さらに、インプラントをベースに単一材料で一塊に製作するレストレーションに対する需要の高まりは、クラウンの販売を助長する可能性が高く、結果的に、歯のレストレーションにおいて審美性に富んだ選択肢を提供することになると考えられる。陶材焼付金属冠（PFM）および全部鑄造冠によるレストレーション費用の高騰は、オールセラミックレストレーション等、低価格な選択肢に対する需要増加の一因となっている。オールセラミック材料には主に、ニケイ酸リチウムとジルコニアの 2 種類がある。オールセラミックレストレーションに対する需要が高まっている理由は、費用だけではない。モノリシックレストレーションの販売が伸びていることも一因である。モノリシックレストレーションの設計は、固体セラミック材料が使用されているという点で、2 層 PFM レストレーションの設計とは異なる。このような設計により、従来の製作技術に比べ、モノリシックレストレーションでは、耐久性がより高く、審美性に優れ、また、強度が改善されている。モノリシックレストレーションの製造方法には 2 種類ある。1 つは、真空プレス機を使用してオールセラミックレストレーションを完成形にワックスで固定し、続いて、ワックスを除去して、ホットプレス法により固体セラミックレストレーションを形成するという方法である。もう一つの製法は、製作工程の自動化のために CAD/CAM 技術

を採用するというもので、歯科技工室の生産性を高める上で重要な役割を果たすことになる。歯科技工室でこうした技術を運用する傾向が強まっていることを考えれば、モノリシックレストレーションの需要を通じて、CAD/CAM 技術の普及率も上昇していくことが望ましいと思われる。

材料強度が著しく改善したにもかかわらず、PFM レストレーションは、破損や欠けを生じる可能性が比較的高い。そのため、ジルコニアモノリシックのようなオールセラミックス材料が、顕著な臨床的成功を収めていることもあり、今も変わらず受け入れられている。Ivoclar Vivadent 社の IPS e.max ニケイ酸リチウムセラミックスは、万能なオールセラミックス材料で、各種の修復用途で使用されている。この材料は、主にガラスセラミックスであり、ヒトのエナメル質に非常に近く、摩耗を最小限に抑えることができるとともに、審美的な結果にも優れている。歯科技工室でこの材料をプレス加工することにより、好みの形状を作り出すことができる。ジルコニア製歯科用インプラントは、歯科用グレードのチタン製インプラントに類似する耐用年数と強度特性を有しているが、有害な副作用を起こすことはない。さらに、ジルコニアベースの歯科用インプラントは米国 FDA の承認を受けており、生存率は 98% を超えると報告されている。この材料は硬度が極めて高く、化学的に不活性であるとともに、耐摩耗性および放射線不透過性にも優れている。この材料が象牙色であることも有益な特徴で、天然歯色に一致することから、歯科用インプラントの理想的な材料となっている。ジルコニアも、光を透過することが可能なことから、歯科用インプラントに使用されるセラミックス材料である。生体適合性を有するジルコニアのセラミックス粒子も、チタン粒子に比べ、骨吸収や炎症反応を誘発する割合が小さく、これまで 30 年以上にわたって、歯科用インプラントの作製に使用されている。

世界的に、歯科用インプラントの需要は増加している。特に、新たに選択できるようになった数種類の置換治療に関する認識が人々の間で高まるにつれ、歯科用インプラントの需要の増加は、ジルコニアのようなバイオセラミックス材料にとって、見通しの明るい市場を生み出すことが期待されている。

自動車におけるアドバンスドセラミックス

ライフスタイルの変化や新たな環境規制、経済的現実が、設計と製造の両面から自動車業界を一変させる要因であり続けている。環境や自動車に乗る人の安全性をめぐる規制が厳しくなるほど、技術変革の推進が進み、結果的に、低燃費車や高度な安全機能、インテリジェントナビゲーションを可能にする技術の

開発へと繋がっている。エンジン技術の開発が進む中、アドバンスドセラミックスは、特に、ターボチャージャー・バルブトレイン部品やグロープラグ、ピストン、キャップシリンダー、排ガストレイン断熱材、ライナー、空気軸受、高温軸受、低摩擦流体、無潤滑軸受といった部品に用途を見出していくと思われる。

エンジンの中で、アドバンスドセラミックスは、燃料および水ポンプとともに、ウェーブやクランクシャフトハウジングのバックギングにおける耐熱性部品として使用されている。このようなセラミックスは、エンジン部品の効率を高め、摩滅の発生を最小限に抑える。このセラミックス材料はまた、エンジン騒音の低減にも役立っている。金属ベースの複合材料で強化されたテクニカルセラミックスは、軽量自動車の設計において、広範な改善の余地を与えるものとなっている。繊維強化セラミックス基複合材料（CMC）は、1,000°C超の高温で低密度であるということも含め、優れた機械的特性を示す。高い耐摩耗性を有していることから、CMC は、高性能な軽量ブレーキシステムにも使用されている。部品だけでなく、CMC は自動車の重量軽減を目的とした用途でも幅広く関心を集めている。今後可能性のある用途分野には、ブレーキローターやエキゾーストシステム、ヒートシールドリング等がある。圧電セラミックスを使用したノックセンサーは、自動車エンジンの振動を感知し、比例する周波数範囲の電気信号を、点火システムをはじめとするプロセスの再調整を促す制御装置に送信する。さらに、アドバンスドセラミックス部品は、最新のLED やキセノンライトシステムにも、今後用途を見出す可能性がある。

アドバンスドセラミックスが各種の自動車部品に使用されるケースが増えていることから、主要市場、特に中国で、自動車の需要が伸び、それに伴って生産量が増加している現状は朗報である。自動車の最終用途部門で、アドバンスドセラミックスは、自動車工学において、また、自動車の費用対効果や快適性、安全性の向上において、非常に重要な役割を果たしている。圧電セラミックス部品は、自動車の電子制御用センサーの役割を果たし、自動車の位置やエンジンの静音作動、方向転換に関する情報をシステムに提供する。セラミックス基板ベースの電子部品がこうした情報に反応し、自動車のモーター管理やエアバッグ展開のタイミング、ASR やABS といった安全システムの動作をモニターし、制御する。クランクシャフトハウジングのバックギングやバルブ部品、燃料および水ポンプ関連のパーツといった、エンジンの耐熱セラミックス部品は、摩滅の低減を促し、効率を高めるとともに、騒音放射を低減する。セラミックス・金属複合材料は、軽量という特徴があることから、自動車業界で現在最も注目

されている分野である、軽量な金属構造の実現を可能にする材料として使用されるようになってきた。弾道飛行体の保護のためにセラミックス製装甲品が採用され、緊急車両や軍用車両に要求される安全性を提供している。一方、セラミックス部品を組み込んだシンプルキセノンやハロゲンまたはLED照明システムは、商用車において、他のシステムに比べ視界性能を向上させている。

表 5：地理的地域／国別世界の乗用車生産数（2010年、2016年、2020年の比較）（単位：1,000台）
（省略）

自動車での用途に拍車をかける厳しい燃料効率基準と排ガス規制基準

自動車の排ガス規制におけるアドバンスドセラミックスの需要は、新たな、または既存の排ガス基準や政策がきっかけとなって、加速度的に増加すると予想されている。自動車の排ガスは、これまで繰り返し、大気環境の悪化の主原因であるとされてきた。また、輸送燃料の燃焼は、二酸化炭素や亜酸化窒素といった温室効果ガス排出の主な原因の一つとされている。自動車や輸送機関が、世界の温室効果ガス排出の16%超を占めており、米国では、排出量全体の30%超となっている。輸送用化石燃料を燃焼させれば、有害な汚染物質が排出され、地球温暖化の一因となることによって、人間の健康や生態系全体に深刻な悪影響を及ぼす可能性がある。非常に懸念されているのが、従来の自動車の排気管からの排ガスで、大気汚染を引き起こす大きな要因となっている。排気管から排出されるガスには、一酸化炭素や炭化水素、窒素酸化物、および、細塵やすすまたはPM10といった、いずれも環境を汚染し、地球温暖化の一因となる粒子状物質等の有害なガスが含まれている。これらの有害ガスは、深刻な呼吸器疾患をはじめとする病気の原因である。これらのガスはまた、環境ガスと反応して、さらに毒性の高いガスを生成する。

ここ何年かの際に大気汚染に対する懸念が高まってきたことを受けて、各国の政府が、自動車の排ガスを低減し、環境保護に貢献するために、自動車メーカーに対して厳しい規制を課すようになった。排ガス規制は、NOx や炭化水素（HC）、一酸化炭素（CO）、PMといった、内燃機関の副産物として自動車から排出されるガスの排出量を削減することを目指している。米国の大気浄化法は、自動車エンジンからの排ガスの削減を目指している。1990年代後半、自動車の排ガスによる有毒な炭化水素成分や地上レベルのオゾンに関連して、国民の健康に対する懸念が払拭されなかったことから、カリフォルニア州大気資源局と米国環境保護庁（EPA）は、いずれも軽量車を対象とした排ガス規制LEV IIおよびTier 2を施行し、2004年より運用が始まった。2015～2025年までのモデ

ルを対象に、LEVⅢプログラムが段階的に導入された。米国 EPA はまた、軽量車の排気管からの排ガス基準をさらに厳格化するために、軽量車基準である Tier 3 を提唱した。米国は、他にも、カリフォルニアの超低公害車（ultra-LEV）基準等の強制的な排ガス規制を採択しており、その結果、工場レベルで、自動車単位で技術的により高度なターボチャージャーが使用されるようになった。2012 年、米国 EPA および米国運輸省道路交通安全局（NHTSA）は、自動車と軽トラックを含む軽量車の 2017～2025 年までのモデルを対象に、温室効果ガス（GHG）排出量をさらに削減し、燃費を改善するために、国家プログラムの延長を可能にする最終ルールを可決した。2016 年、EPA と NHTSA は、新しい中量車、重量車、およびエンジンからの GHG 排出量と燃料消費量の削減を目指す **フェーズ 2 重量車（HD）国家プログラム** のルールを発表した。

自動車を対象にした世界の温室効果ガス排出基準と燃費基準に関するレビュー

米国同様、欧州連合（EU）も、粒子状物質や NOx、CO といった有害な物質の排出を制御、削減するために、Euro 4 や Euro 5 等の独自に設けた一連の基準を適用してきた。さらに、欧州委員会は、直噴ガソリンエンジンを対象に、2014 年 9 月以降に生産された新車からの粒子状物質の排出を制御するために、Euro 6 規制を提唱した。欧州では、ガソリン直噴（GDI）エンジンからの粒子状物質の排出に対する規制をさらに強化することを目的とした Euro 6c 基準が、2017 年 9 月より適用される予定である。

米国と EU に続いて、日本や中国、韓国、台湾といったアジア太平洋のいくつかの国・地域でも、厳しい排ガス基準が適用されており、その結果、法律に従って汚染を減らすための電気燃料ポンプの需要が生まれている。2016 年 12 月には、中国の環境保護部（MEP）が、主にガソリンまたはディーゼルを動力源とする軽量車の排ガスに対する第 6 段階規制および測定法の概要を示した国 6 基準を発表した。この基準は、2020 年 7 月 1 日より発効する。

アドバンスドセラミックス基板は、触媒コンバーターでの用途が増えている。基板の表面積が大きいことから、一酸化炭素等の有害な排出物を害の少ない二酸化炭素排出物に変換する触媒を保持することができる。世界中の政府が、自動車に関して厳しい燃費基準の順守を義務付けており、それに伴って、高効率エンジンシステムの利用が増えているという状況の中、セラミックスを使用し

たパーミッションコントロール製品の需要が、今後高まると予想される。高度な触媒コンバーターは、窒素酸化物の排出や未燃炭化水素を最小限に抑えることもできる。Euro 6c 規制のような、より厳格な燃費基準は、ガソリン車市場において燃費の良い GDI エンジンの需要を喚起することが期待されており、自動車メーカーによるガソリン微粒子フィルター（GPF）の採用に拍車をかけると予想される。

ディーゼル車市場では、スペースが限られるコンパクトカーに、複雑な後処理システムをいかにして搭載するかが大きな課題である。コンパクトディーゼル車の取り込み量は低下しているが、乗用車における SCR システムの採用率の改善が、将来の成長を支えていくと思われる。アドバンスドセラミックスの需要は、新しい GPF 等新製品の拡大、GDI エンジン採用の増加、大型車における選択触媒還元（SCR）技術システム採用の増加によって牽引されるセグメントで、伸びていくと期待されている。ディーゼルエンジン排気に含まれる炭素微粒子が健康に及ぼす影響について懸念が高まっていることから、ろ過効率を高め、耐熱衝撃性を向上させた改良型ディーゼル微粒子捕集フィルター（DPF）システムの需要に、さらに拍車がかかっている。検討される選択肢として、ファインセラミック繊維を含有した DPF 構造を有する全く新しい複合材料の製作がある。このファインセラミック繊維には、破壊靱性とろ過効率を向上させる可能性がある。

表 6：世界の GPF かつストリート（基板）数量（2015～2022 年）（単位：100 万台）
（省略）

自動車エレクトロニクス — セラミックス部品にとって限りない可能性に満ちた市場

設計要件やコンプライアンス要件を満たすために、自動車に電子機器を搭載するケースが増えているが、このことは、アドバンスドセラミックス基板をはじめ、コンデンサ、レジスター、騒音抑制装置、共鳴装置、パワーエレクトロニクス基板、高性能絶縁体、センサーといった、アドバンスドセラミックスを使用する部品の市場に利益をもたらすものである。生産コストを削減する一方で、搭載する安全性機能を向上させ、環境に優しい設計を採用しなければならないというプレッシャーが高まる中、自動車業界では、アドバンスドセラミックスの利用が着実に増え続けている。近年、自動車は機械装置からエレクトロニクスを搭載した統合型の機械へと変化している。テクニカルセラミックスは、特

に、伝動機構や流体制御、エレクトロニクス、スパークグロープラグ、酸素センサー、駐車距離制御、PTC ヒーター、燃料噴射システム、ロックセンサーといった自動車用途で使用されている。圧電特性を有していることから、PZT（チタン酸ジルコン酸鉛）セラミックスは長年にわたって、トランスデューサーやセンサー等の用途で使用されてきた。PZT セラミックスは、アラームシステムやパーキングエイド、点火システム、エンジンロックセンサー、超音波レベルセンサー等の自動車用途で使用することができる。アルミナやジルコニアといったアドバンスドセラミックスは、燃料ポンプシールやインジェクターユニットに使用するシール、バルブプレート等の、過酷な環境下で使用することが可能である。その主な理由は、高い機械的強度や優れた耐薬品性、また、寸法安定性を高温で保つことができるといった、有益な特徴を備えていることにある。当初の娯楽システムからナビゲーション、安全システムに至るまで、電子部品を自動車に組み込む機会が増えてきたことから、アドバンスドセラミックスの需要は自動車部門で今後も伸びていくと期待されている。より小型で高度な電子機器やモジュールの生産に向かう傾向からも、ボディエレクトロニクスやセンサー、乗客娯楽装置、安全エレクトロニクスを用いたエンジン制御ユニットといった各種用途に使用されるアドバンスドセラミックスの大きな需要が生まれると予想される。

さらに、電気自動車（EV）やハイブリッド車の普及が進んでいることから、アドバンスドセラミックス市場の勢いが加速すると予想される。アドバンスドセラミックスのユニークな電氣的特性と物理的特性は、ハイブリッド車によってもたらされた高効率性をはじめとする課題に取り組む能力を伸ばす要素となっている。精密工学を応用したセラミックシャフトやベアリングは、エンジンの電子部品やリチウムイオン電池の冷却のために、自動車の冷却水ポンプに採用されている。グリコール冷却剤に対する優れた耐薬品性や軽量といった特性が、寿命の長さや燃料効率の向上に貢献している。化石燃料を動力源とする自動車が圧倒的に主流であることに世界が反発を強めている現在、EVには、自動車業界にプラスとマイナスの両方の影響を与える破壊的技術イノベーションの主役になる可能性がある。EV がシェアを伸ばすにつれ、内燃機関車の販売に依存する従来の自動車メーカーの時価総額が1兆ドル超急落する可能性が大いにある。現在、EV は世界の自動車業界のニッチ的存在であり、これまではコスト上の問題があり停滞気味であった。しかしながら、今では技術が成熟したことから、より安価で高性能な EV の開発が可能となった。このことは、アドバンスドセラミックス市場にとって、極めて明るい兆しである。