

電子セラミックスの研究動向と将来展望

Research Trends and Future Perspective for Electroceramics
Key-words : Electroceramics, Dielectrics, Nanocrystal, High-temperature

今中 佳彦・佐野 晴信・長田 実・
土屋 哲男・柿本 健一・森分 博紀

Yoshihiko IMANAKA^{*1}, Harunobu SANO^{*2}, Minoru OSADA^{*3}, Tetsuo TSUCHIYA^{*4}, Ken-ichi KAKIMOTO^{*5} and Hiroki MORIWAKE^{*6}
(^{*1}Fujitsu laboratories Ltd., ^{*2}Murata Manufacturing Co., Ltd., ^{*3}National Institute for Materials Science, ^{*4}National Institute of Advanced Industrial Science and Technology, ^{*5}Nagoya Institute of Technology, ^{*6}Japan fine ceramics center)

1. はじめに

電子材料部会は、1981年5月に「電子セラミックスは、未来産業における花形材料として質的および量的に期待される重要材料として、研究開発の方向づけ、技術の改善、付加価値の増大など、会員相互の情報交換と知識の研鑽のため、組織を通じての運用が必要」との判断で設立された。35年を過ぎた今日も、上記理念を守りながら脈々と受け継がれている。これまでの間に、セラミックパッケージ・大型コンピュータ用多層セラミックス回路基板、スマートフォンに代表される民生用電子機器向けのセラミックコンデンサ・フィルター・インダクター、圧電アクチュエータ・ブザー、強誘電体メモリ (FeRAM) など、多くの分野で日本の産業を支えた高付加価値の電子部品を世に送ってきた¹⁾。

本部会は、理念に示されているように、電子セラミックスに関し、材料的な純粋学術から応用製品の特性や信頼性まで、また、原子レベルからマクロな現象までさまざまなフェーズの研究・開発内容を網羅しているために、企業 (産)・大学 (学)・旧国研 (官) の多くの研究者から構成されており、相互に情報交換と知識研鑽が行われている点に大きな特徴がある。

1988年から始まった秋季シンポジウムにおいては、電子材料部会所属のオーガナイザーが企画・運営するセッションを継続的に開催している。今年 (2016年) 9月の第29回のシンポジウムでは、「誘電体材料の新展開－誘電材料・デバイスに関する科学・技術の融合と更なる進化－」、「ナノクリスタルが拓く新しいセラミック技術」、「次世代パワーエレクトロニクス用セラミックス」の3セッションが行われ、多くの学協会と

の協賛のもと、異分野の研究者も招待しながら、活発に学術的、技術的な先進的議論がなされた。以下には、この主要3分野と最近、電子材料部会の中に根付き始めた環境・エネルギー関連材料およびシミュレーション技術の各トピックスについて最近の研究動向と将来展望を示す。(今中佳彦)

2. 誘電体セラミックス

誘電体セラミックスを用いたアプリケーションで、近年、最も成功したもののひとつが積層セラミックスコンデンサ (MLCC) である。コンデンサの世界市場規模は2015年で約1兆8000億円に達し、2017年で2兆円を突破、2020年には2兆2000億円まで拡大すると予想されている。その中で最も市場規模が大きいものがMLCCであり、2015年で9000億円を超えて全体の50%以上を占める。ただし、数量規模で見ると、2015年でコンデンサ全体が約2兆7000億個に対して、MLCCが約2兆6000億個と全体の96%を占め、MLCCが幅広い市場、用途の電子機器に数多く利用されていることがわかる。最近のMLCCでは、スマートフォン、ウェアラブル端末に代表されるモバイルコミュニケーション、自動車、産業機器が3大市場となっている。

モバイルコミュニケーション向けMLCCは、スマートフォンの成長率の低下によりその伸び率も鈍化しているが、電子機器の多機能化、高性能化は進んでおり、部品の実装密度が飛躍的に高まっていることから、0402サイズ～1005サイズといった小型品を対象に大容量化の開発は加速している。図1にMLCCの単位体積当たりの静電容量の推移を示す。2012年には誘電体厚0.6 μ m、単位体積当たりの静電容量が34 μ F/

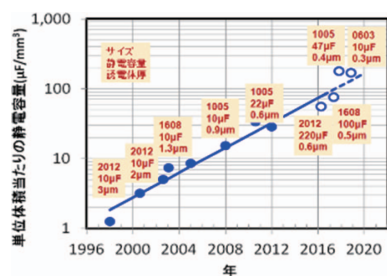


図1 MLCCの単位体積当たりの静電容量

mm³のMLCC（1005サイズ・22μF）が実用化され、2018年には誘電体厚0.4μm、180μF/mm³のMLCC（1005サイズ・47μF）が実用化される予定であり、MLCCにおける誘電体厚の薄層化とそれによる小型大容量化の実現に向けた開発は今後も継続的に進められる。これらの実用化には、その主要材料であるチタン酸バリウムの微粒化、特性向上、信頼性向上などが必要であり、その解決が近年の誘電体セラミックス材料研究の中心課題となっている²⁾。しかしながら、MLCCの誘電体厚の薄層化が進む中、誘電体セラミックスのグレインサイズの微粒化に伴う誘電率の低下、いわゆるサイズ効果の問題が深刻になっている。一方で、最近、10nmを切る、極めて粒径の小さな領域において大きな比誘電率が報告されており³⁾、そのメカニズムの解明とともに更なる進化が期待される。

自動車向けMLCCについては、ハイブリッド車や電気自動車、燃料電池車の登場により、クルマの電動化が進み、高電圧、大電流用途が広がっている。産業機器向けMLCCにおいても、産業用インバータや太陽光発電などのパワーエレクトロニクスの台頭により、高電圧、大電流、さらには200℃を超える高温で使用可能な誘電体材料が渴望されている。こういった新しい課題に対し、CaZrO₃-CaTiO₃⁴⁾、HfO₂⁵⁾、BaTi₂O₅⁶⁾、(K,Na)NbO₃⁷⁾など、チタン酸バリウムとは異なる材料が、サイズ効果フリーや低損失、高耐熱性の観点などから注目を集めている。

一方、第一原理計算による物性予測⁸⁾、また、高压合成⁹⁾や薄膜化¹⁰⁾などの手法を駆使し、これまでにない新規の結晶構造、誘電特性をもつ新しい誘電体材料を探索する動きが活発になっている。現状、実用的な材料が見いだされるまでには至っていないが、磁性や光学特性などとの機能複合化^{11),12)}も含め、誘電体材料の新しい応用分野の開拓が期待される。

(佐野晴信)

3. ナノクリスタル技術

数nmから10nm程度のサイズをもつ単結晶粒子は

ナノクリスタルと呼ばれ、結晶の対称性、晶癖に由来した形状、自形を示し、新しいナノマテリアルとして注目を集めている¹³⁾。電子セラミックスは、ナノクリスタル研究の重要なターゲットであり、バルク材料にはない特異機能が発現し、エレクトロニクス、環境・エネルギー分野の発展に資するものづくり技術として期待されている。

ナノクリスタルの多くは、現在でもセレンディピティ的な発見によるところが大きい¹⁴⁾が、最近では組成、構造の精密設計により新材料を具現化する「テラメード合成」が進展している。特に、近年の合成技術の進展により、サイズ、形態、次元を高次制御したナノロッド、ナノシート、ナノキューブなどの合成が報告され、導電性、半導体性、誘電性、磁性などさまざまな電子材料の開発やその応用が検討されている。例えば、ナノキューブでは、結晶成長時に有機化合物と作用させることにより、結晶構造や対称性に依存した形状制御が可能であり、CeO₂、BaTiO₃、Ba(Zr,Ti)O₃などの精密合成が可能となる¹⁴⁾。また、ナノシートでは、第一原理計算を援用したテラメード合成による機能開発も進められており、酸化チタン、ペロブスカイトの同型置換体では、磁気特性、誘電特性、絶縁特性（バンドギャップ）の自在な制御が可能となる^{15),16)}。また最近では、古くから構造材料として知られる水酸化物、炭化チタンのナノシート化による磁気機能化や電池特性の報告もあり、ナノクリスタル技術は、ありふれたセラミックスをハイテク材料に変貌させる元素戦略技術としても興味深い。

ナノクリスタル単体は特異機能を示す新材料として興味深いところであるが、ナノクリスタルを構築単位として自在に集積・複合化し、2次元～3次元へとナノ構造体のボトムアップ集積が可能となれば、現行技術では到達困難な微小デバイスの開発や高次機能の設計・発現の道が開かれる。その延長線上には革新的な実用材料、デバイスの実現につながる可能性を秘めている。例えば、BaTiO₃ナノキューブにおいては、金属基板上に規則配列して高次の積層構造を形成することで、単結晶を凌駕する巨大な誘電特性（ $\epsilon_r > 4000$ ）が発現することが報告されている¹⁷⁾。また、ナノシート技術では、異なる機能のナノシートをブロックにして人工超格子を作製することで、ナノからメソスケールで構造、階層、空間を設計・制御した高次機能材料を構築することが可能となる。こうした技術は、階層構造やヘテロ接合が機能発現の鍵である電子材料の開発に有効であり、ナノシートをベースとした高容量薄

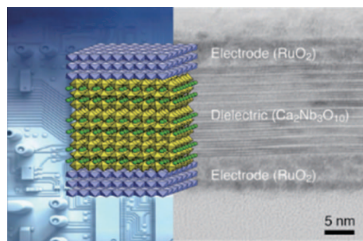


図2 ナノシートの精密集積により作製したオールナノシートキャパシタ¹⁸⁾。導電性 RuO₂ ナノシート、誘電性 Ca₂Nb₃O₁₀ との交互積層により誘電体層、電極層のナノサイズの薄膜化が実現し、トータルの厚みが 30nm 弱と世界最小ながら、高い静電容量 ($\sim 30\mu\text{F}/\text{cm}^2$) を示す。

膜コンデンサ (図2)、磁気光学素子、マルチフェロイック特性、人工アクチュエータなど、数多くの革新的機能やデバイス開発の報告がある^{15), 16), 18), 19)}。こうしたナノクリスタル技術はまだ一部の物質系にとどまっているが、今後の系統的な研究により、ナノクリスタル特有の機能性を活用したエレクトロニクス技術の発展が期待される (長田 実)

4. 高温電子セラミックス

高温で電子機能を発現する「高温電子セラミックス」は、セラミックスの化学的安定性の特徴を活かした新たな展開であり、産業ニーズも高まっている。特に、高耐圧、低 ON 抵抗、高温駆動、高速スイッチングなどの優れた特性を持つ SiC パワー半導体は、225℃前後での高温動作が可能であるため、パワーデバイスの近傍に設置される電子部品にも、高温環境下での長期間の安定動作が要求されている²⁰⁾。たとえば、インバーター応用 (耐圧 1.2kV、電流数 50A 級、スイッチング速度 10kHz) では、高速スイッチングに伴うサージ振動を抑制するため、図3に示すようにスナバ回路に高耐熱抵抗器／コンデンサが必要である。このようなスナバ回路用の抵抗器では、「抵抗値 10Ω 級、定格電力 1W 級の抵抗体において、パワーデバイスの動作温度を考慮した 250℃ までの耐熱温度が要求され、-40～250℃ の温度領域における抵抗値の変動が $\pm 10\%$ 以下、かつ、10MHz までの周波数領域における抵抗値の変動が $\pm 10\%$ 以下」の仕様が必要となっている。しかしながら、スナバ回路では、抵抗器にサージのエネルギーを消費させることが目的であるため、抵抗器自身が発熱する。実際、250℃ でチップ抵抗器に 1W の電力を供給した場合、抵抗器表面温度は、300℃ 程度に到達する。このため、抵抗器は実用化の観点から、この温度域 (300℃) における長期信頼性の確保が必要である。

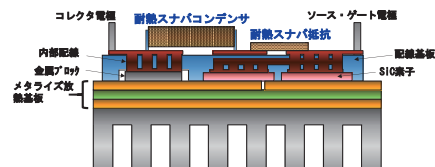


図3 1.2kV-50A 級高温 (225℃) 動作 SiC スwitchングモジュール

こうした課題を解決するため、抵抗器の保護材料や電極材料の改良からスナバ回路の仕様を満たす高耐熱抵抗器が開発されている²¹⁾。一方、高温環境下の長期信頼性は重要な課題であるが、350℃の加速試験では、700 時間で 10% 程度の抵抗値変動が観測されている。本劣化現象は、赤外顕微を用いた局所物性評価等から、電極マイグレーションや抵抗体材料と電極反応、抵抗器に含まれるガラス材料と電極の反応などの寄与が明らかになりつつある。現行のチップ抵抗器は、RuO₂ 厚膜作製のガラス材料や抵抗値および抵抗温度係数を調整するための異種材料が用いられているため、長期信頼性の確保には、単一材料からなる高耐熱抵抗体材料やガラス材料を用いない膜プロセス開発が必要である。これらの課題に対し、Bi₂Sr₂Ca_{1-x}Y_xCu₂O_y 材料に Y を x=0.55 ドーピングすることで、広い温度範囲で抵抗が一定となる電気伝導特性を示す厚膜製造プロセスやハイブリッド溶液光反応を用いた厚膜プロセスの開発が進められている^{22), 23)}。今後も、より高精度・高信頼性の高耐熱性の抵抗器が必要となるため、単一材料で広い温度範囲での抵抗値、抵抗温度係数 (TCR) 性能を満たしつつ長期的に安定な材料の開発や電極構造の開発が必要である。

一方、スナバコンデンサには、耐圧：1kV、静電容量：0.1μF で、-40～+250℃での静電容量の変化率が $\pm 10\%$ 以下という温度安定性や耐熱性が要求される。また、スイッチング周波数の高周波化にともないコンデンサの共振周波数は 10MHz 以上が必要である。このため、材料設計としては、誘電体材料として、高温下で比抵抗の低下が基本的に少ない材料系を選択し、酸素欠陥や不純物といった、高温において抵抗を低下させる要因を低減させる必要がある。

こうした課題に対して、第一原理計算、および、絶縁破壊機構とその温度依存性の結果に基づき、MLCC 用誘電体材料を開発し、①-40～+250℃での静電容量の変化率が $\pm 9.9\%$ 、②耐電圧 1.2kV 以上、③共振周波数 16MHz、④外形：5.7×4.9×1.4mm、体積：39.1mm³、⑤静電容量 91nF の高温スナバコンデンサが開発されている²⁴⁾。

電子部品としてスナバ抵抗器、コンデンサの開発が

すすめられているが、デバイスを多並列駆動させる場合にスイッチングのタイミングを調整するためのゲート抵抗器、誤作動防止のためのゲートコンデンサ、さらにインダクタなどの開発も必要となってくる。また、部品を配線基板に取付けた場合、電子部品と基材との熱膨張係数の違いに起因する故障対策も必要であり、電子部品や電極構造、およびその接合を含む機械的強度の制御も重要な課題である。このように SiC パワーデバイス応用として高耐熱電子部品の研究動向を紹介したが、各種センサなどにおける高温化のニーズもあることから、高温において安定、かつ高特性な電子セラミックスの開発が今後ますます期待される。

(土屋哲男)

5. 環境・エネルギー関連材料

前回の研究技術動向（2006）では、開発ブーム真っ只中の「非鉛圧電体」が取り上げられ、各種候補材料の特性比較や将来展望が述べられたが、そのブームは現在一段落した²⁵⁾。その間に新素材それぞれの長短特徴付けは着実に進み、合成法や材料定数の大小比較といった初期の材料研究から次第に、目的志向型のアプローチによって実環境を想定したセンサ／アクチュエータ特性などの評価研究が多くなっている。特にアクチュエータ用途にも展開が期待されるニオブ系（(Na,K) NbO₃ など）では、チタン酸ジルコン酸鉛（PZT）の 1/3 程度の圧電変位量ながら、セラミックコンデンサで培った積層技術を活かしつつ、薄層化による変位量の増大が図られている²⁶⁾。ニオブ系は、PZT では見込めない Ni 卑金属電極との共焼成が可能で優れており²⁷⁾、ニオブ原料の高コストが問題視されてきた過去と比較すると、現実味を帯びた技術開発が続いている。さらに結晶配向技術の進展と併せて PZT 並みの性能をもつ厚膜もほぼ完成域に達している²⁸⁾。つまり、電子機器における鉛などの使用に関する規制（RoHS など）の例外対象から圧電材が外れるといった将来的な可能性に対する備えと開発意識は今なお旺盛かつ高いレベルを維持していると言える。

一方、社会的要請に端を発したエネルギー関係の環境関連材料の研究開発も進展しており、太陽電池、色素増感電池、燃料電池などの電池関連やエネルギー変換材料において高度なものづくり技術が利用され始めている。例えば、当部会は誘電体を主に研究する会員が多く所属しているが、素材自体の環境調和性だけでなく、さらにエネルギー・環境関連分野へ“機能や多様性を受け渡し”する研究例が近年増えている。磁気構造と電気分極の相関を扱うマルチフェロイクス材

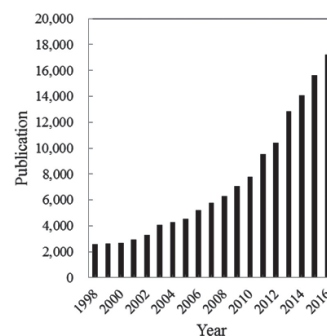


図4 Elsevier Science Direct[®]で“Energy Harvesting”をキーワードに検索ヒットした発表文献数の年代別推移（注：2016 年分は 9 月時点の検索数）

料の代表例ビスマスフェライト（BiFeO₃ など）では、単なる非鉛材の候補としてだけでなく、欠陥分極エンジニアリングによる強誘電体太陽電池への検討²⁹⁾、ドメインエンジニアリングと微小電気機械システム（MEMS）技術を組み合わせた振動発電デバイスへの検討³⁰⁾、が報告されており、素材の特徴を見極めて適切な構造体として改良すれば、他の誘電体組成系も他分野に転用・展開できる内容となっている。

特に、モノのインターネット（IoT）や人工知能（AI）など社会全体を大きく変える新しいテクノロジーの潮流では、各種センサなど電子セラミックスが下支えする分野の裾野拡大が将来的に見込まれる。その結果、爆発的な関連発表文献数（図4）の増加が示す通り、自立給電技術の熱電変換や振動発電を含む環境発電（エナジーハーベスティング）にも関心は及んでいる。そこでは、セラミックス単体だけではなく、フレキシブル性に優れた高分子材料との複合化による材料開発も望まれ³¹⁾、フェロイックな機能の造り込みや医療・健康福祉用途など応用例の多様化も、今後の開発動向となることが予想される。

(柿本健一)

6. 材料シミュレーション技術

近年の計算機性能の向上と第一原理計算技術の発展により、多くの材料特性が第一原理計算により計算することが可能になっている。近年では、従来計算負荷の為困難であった有限温度での材料物性を直接取り扱う「第一原理分子動力学計算」が現実的な研究手法として活用され始めている。また、この第一原理計算をベースとして、情報科学的手法も取り込んで材料開発、材料探索に活用しようとする取り組み、いわゆる「マテリアルズ・インフォマティクス」が広く行われるようになっている。特に米国でこの動きが顕著であり、すでに2011年には年間予算1億ドルのMaterials Genome Initiative（MGI）が発表され、Massachusetts Institute

of Technology (MIT) と Lawrence Berkeley National Laboratory (LBNL) の Materials Project チーム、The National Renewable Energy Laboratory (NREL)、Colorado 大 Boulder 校、Northwestern 大などで構成される Center for Inverse Design チームなどが活発に活動しており、いずれも大規模な資金投入が行われている。欧州では Novel Materials Discovery (NoMaD) Laboratory などの取り組みが開始されており、これらに追従するように中国、韓国のアジア諸国でも同様のプロジェクトが動き出している。これに対して、我が国でも、科研費の新学術領域研究「ナノ構造情報のフロンティア開拓－材料科学の新展開」、物質・材料研究機構 (NIMS) を中心とした「情報統合型物質・材料開発イニシアティブ」などいくつかの国家プロジェクトが立ち上がっており、今後これらの取り組みはますます広がっていくものと考えられる。

電子材料セラミックスへの応用例の一つとして、Li イオン二次電池材料研究において、この第一原理計算と原子分解能構造解析とを連携させることにより、これまで理解されていなかった正極材料中の粒界が電池特性に与える影響を解明した結果³²⁾を解説する。全固体電池構造では、電池材料中の粒界や界面が電池特性に大きな影響を与えるが、実験の困難さのためこれまで明らかにされていなかった。そこで、Li イオン二次電池の正極材料として広く使われている LiCoO_2 薄膜を原子分解能 Cs 補正 HAADF-STEM 法により観察したところ、図 5(a) に示すような粒界が存在することが明らかになった。この構造情報から図 5(b) の粒界構造モデルを構築して、この粒界が電池特性に与える影響を第一原理計算を用いて解析した。その結果、粒界面に沿った方向の Li 伝導と粒界面を横切る方向の Li 伝導の間に粒界に対する方向の顕著な異方性が認められる。粒界面に沿った方向の Li 伝導の活性化エネルギーが図 5(c) に示すように 0.2eV であるのに対して、粒界面を横切る方向の Li 伝導の活性化

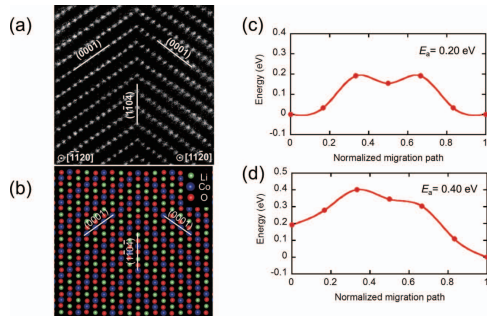


図5 LiCoO_2 薄膜の原子分解能 Cs 補正 HAADF-STEM 法による観察

エネルギーは図 5(d) に示すように 0.4eV と約 2 倍となる。この違いを室温での Li 拡散係数に直すと約 3 ケタの異方性に相当する。つまり、粒界面を横切る方向は粒界面に沿った方向に比較して拡散係数が約 1000 分の 1 になり Li 伝導が大きく阻害されることが明らかになった。このように第一原理計算を活用することにより、これまで窺い知ることのできなかった材料特性の発現機構が原子レベルで解明されるようになっていく。(森分博紀)

7. おわりに

今年度スタートした内閣府第 5 期科学技術基本計画³³⁾では、「情報通信技術 (ICT) を最大限に活用し、サイバー空間とフィジカル空間 (現実世界) とを融合させ、人々に豊かさをもたらす「超スマート社会」を世界に先駆けて実現していく」と謳われている。超スマート社会のプラットフォーム技術 (サイバーセキュリティ、IoT、ビッグデータ解析、AI など) と価値創出のコア技術 (ロボット、センサ、バイオテクノロジー、素材・ナノテクノロジー、光・量子など) の強化が挙げられている。

電子材料部会では、学術的探求と産業的応用とを融合しながら、電子セラミックスの材料技術の発展を推進してきた。図 6 は電子材料部会が考える電子セラミックスの技術ロードマップである。これまで、コア技術として取り組んできた誘電体、高温電子セラミックス、ナノクリスタルとともに環境・エネルギー関連材料も含めて、以降、電子材料部会では、このロードマップをベースとして、社会・時代のニーズの変化に対応しながら、研究開発を推進していきたいと考える。また、このロードマップを実行していく上で人材育成・技術継承は重要であり、グローバルな視点で活躍

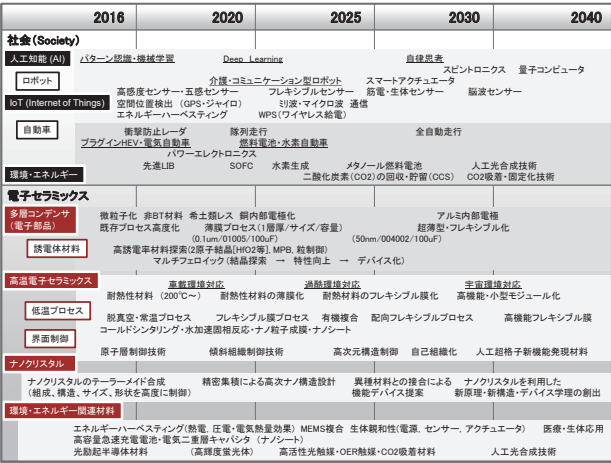


図6 電子材料部会の技術ロードマップ

できる優秀な若手にバトンを渡していくことも必要である。当部会は、文字通り討論を主体としたエレクトロセラミックス研究討論会を毎年企画・実施している。このような会合で、若手研究者が、世界トップレベルの電子セラミックスのベテラン研究者達との議論の中で鍛えられ、育っていくことを期待している。

(今中佳彦)

文 献

- 1) 公益社団法人日本セラミックス協会編, "Advanced Ceramic Technologies & Products", ISBN-10: 4431539131, ISBN-13: 978-4431539131, 2012, XV, Springer Japan, (2012) p.585.
- 2) 中尾修也, 粉体技術, **32**, 952 (2016).
- 3) X.-H. Wang, I.-W. Chen, X.-Y. Deng, Y.-D. Wang and L.-T. Li, *J. Adv. Ceram.*, **4**, 1 (2015).
- 4) 鶴見敬章, 山崎幹夫, 保科拓也, 武田博明, セラミックス, **51**, 666 (2016).
- 5) T. Shimizu, K. Katayama, T. Kiguchi, A. Akama, T. Konno and H. Funakubo, *Appl. Phys. Lett.*, **107**, 032910, 1 (2014).
- 6) Y. Akishige, *Jpn. J. Appl. Phys.*, **44**, 7144 (2005).
- 7) K. Kobayashi, M. Ryu, Y. Doshida, Y. Mizuno and C. A. Randall, *J. Am. Ceram. Soc.*, **96**, 531 (2013).
- 8) H. Moriwake, A. Konishi, T. Ogawa, K. Fujimura, C. A. J. Fisher, A. Kuwabara, T. Shimizu, S. Yasui and M. Itoh, *Appl. Phys. Lett.*, **104**, 242909 (2014).
- 9) M. Azuma, S. Niitaka, N. Hayashi, K. Oka, M. Takano, H. Funakubo and Y. Shimakawa, *Jpn. J. Appl. Phys.*, **47**, 7579 (2008).
- 10) H. Naganuma, S. Yasui, K. Nishida, T. Iijima, H. Funakubo and S. Okamura, *J. Appl. Phys.*, **109**, 07D917 (2011).
- 11) T. Aoyama, K. Yamauchi, A. Iyama, S. Picozzi, K. Shimizu and T. Kimura, *Nature Communications*, **5**, 4927 (2014).
- 12) T. Nagai, K. Tanabe, I. Terasaki and H. Taniguchi, 13th Russia/CIS/Baltic/Japan Symposium on Ferroelectricity and 8th International Workshop on Relaxor Ferroelectrics, 19 (2016).
- 13) 桑原 誠, セラミックス, **51**, 211 (2016).
- 14) 加藤一実, 三村憲一, 馬 強, セラミックス, **51**, 223 (2016).
- 15) M. Osada and T. Sasaki, *Adv. Mater.*, **24**, 210 (2012).
- 16) 長田 実, 佐々木高義, セラミックス, **51**, 230 (2016).
- 17) K. Mimura and K. Kato, *Appl. Phys. Exp.*, **7**, 061501 (2014).
- 18) C. Wang, M. Osada, Y. Ebina, B.-W. Li, K. Akatsuka, K. Fukuda, W. Sugimoto, R. Ma and T. Sasaki, *ACS Nano*, **8**, 2658 (2014).
- 19) B.-W. Li, M. Osada, Y. Ebina, S. Ueda and T. Sasaki, *J. Am. Chem. Soc.*, **138**, 7621 (2016).
- 20) “低炭素社会を実現する新材料パワー半導体プロジェクト事業原簿公開版Ⅲ” (2015) pp. 458-510.
- 21) 山東睦夫, 土屋哲男, 村山宜光, 工業材料, **63**, 35-39 (2015).
- 22) Y. Nakamura, Y. Kitanaka, M. Miyayama, T. Ito, K. Tanaka, T. Nakajima and T. Tsuchiya, Abstract of 25th Annual Meeting of MRS-J, Paper No. A1-O9-011 (2015).
- 23) 土屋哲男, 篠田健太郎, 中島智彦, 中村吉伸, 宮山 勝, “次世代パワー斑同位体実装の要素技術と信頼性” (2016) p.194.
- 24) 鶴見敬章, 保科拓也, 武田博明, 齊藤賢二, “次世代パワー斑同位体実装の要素技術と信頼性” (2016) p.186.
- 25) J. Rödel et al., *J. Eur. Ceram. Soc.*, **35**, 1659-1681 (2015).
- 26) K. Hatano et al., *Jpn. J. Appl. Phys.*, **55**, 10TD03 (2016).
- 27) S. Kawada et al., *Appl. Phys. Exp.*, **2**, 111401 (2009).
- 28) K. Shibata et al., *Jpn. J. Appl. Phys.*, **50**, 041503 (2011).
- 29) R. Inoue, Y. Noguchi, M. Miyayama et al., *Scientific Reports*, **5**, 14741 (2015).
- 30) T. Yoshimura, N. Fujimura et al., *Appl. Phys. Exp.*, **6**, 051501 (2013).
- 31) M. Kato and K. Kakimoto, *Mater. Lett.*, **156**, 183-186 (2015).
- 32) H. Moriwake, A. Kuwabara, C. A. J. Fisher, R. Huang, T. Hitosugi, Y. H. Ikuhara, H. Oki and Y. Ikuhara, *Adv. Mater.*, **25**, 618-622 (2013) DOI: 10.1002/adma.201202805.
- 33) 内閣府, <http://www8.cao.go.jp/cstp/kihonkeikaku/index5.html>

筆 者 紹 介

執筆責任者

今中 佳彦 (いманаか よしひこ)

2016 年度日本セラミックス協会電子材料部会長.

[連絡先] 〒243-0197 神奈川県厚木市森の里若宮 10-1 (株)富士通研究所 デバイス&マテリアル研究所

E-mail: imanaka@jp.fujitsu.com

分担執筆者

佐野 晴信 (さの はるのぶ)

[連絡先] 〒617-8555 京都府長岡京市東神足 1-10-1 (株)村田製作所 コンデンサ技術開発統括部 材料技術開発部 部長

E-mail: sano_h@murata.com

長田 実 (おさだ みのる)

[連絡先] 〒305-0044 茨城県つくば市並木 1-1 (国研)物質・材料研究機構 国際ナノアーキテクトニクス研究拠点 主任研究者

E-mail: osada.minoru@nims.go.jp

土屋 哲男 (つちや てつお)

[連絡先] 〒305-8565 つくば市東 1-1-1 つくば中央第 5 (国研)産業技術総合研究所 先進コーティング技術研究センター 副センター長

E-mail: tetsuo-tsuchiya@aist.go.jp

柿本 健一 (かきもと けんいち)

[連絡先] 〒466-8555 愛知県名古屋市中昭和区御器所町 名古屋工業大学 材料科学フロンティア研究院 教授

E-mail: kakimoto.kenichi@nitech.ac.jp

森分 博紀 (もりわけ ひろき)

[連絡先] 〒456-8587 名古屋市熱田区六野 2-4-1 (一財)ファインセラミックスセンター (JFCC) ナノ構造研究所 計算材料グループ グループ長

E-mail: moriwake@jfcc.or.jp