

**研究成果展開事業
研究成果最適展開支援プログラム（A-STEP）
産業ニーズ対応タイプ**

**技術テーマ「セラミックスの高機能化と
製造プロセス革新」**

技術テーマ事後評価用資料

令和３年６月

目 次

1. 技術テーマ	3
2. プログラムオフィサー (P0)	3
3. 採択課題	4
4. 技術テーマのねらい (目標)	8
(1) 技術課題解決に向けた考え方	8
(2) P0 の目標	8
(3) 「産学共創の場」の活用方針	9
5. 研究課題の選考について	10
(1) 選考の方針	10
(2) 採択課題の構成	10
6. アドバイザーの構成について	12
(1) 人選にあたっての考え方	12
7. 技術テーマのマネジメントについて	13
(1) P0 の運営方針	13
(2) 技術テーマの進捗状況の把握	13
(3) 技術テーマの研究計画の見直しの有無、概要	14
(4) 研究課題の評価と指導	15
(5) 課題中間評価における評価基準 (研究計画の見直し、研究中止、研究継続の根拠) ..	16
(6) 研究費の配分	16
(7) 「産学共創の場」の推進と活用	17
(8) アウトリーチ活動	17
8. 技術テーマとしての産業競争力強化につながる技術の確立状況	19
(1) 課題評価結果を踏まえた最終目標の達成状況 (産業界で共通する技術的課題「技術テ マ」の解決に資する成果創出)	19
(2) 産業競争力強化につながる技術の確立に資する成果 (特に、技術のブレークスルー (新 指導原理、開発技術)、社会・経済の発展に繋がる重要な成果、派生して生まれた技術、等)	19
(3) 個別の産学共同研究への発展状況	28
(4) 技術テーマとしての成果を産業化に繋げるための方策・課題等	29
(5) 今後のプログラム運営への提言	30
9. 総合所見	32

1. 技術テーマ

「セラミックスの高機能化と製造プロセス革新」（平成 28 年度～令和 2 年度）

セラミックスは軽量で優れた耐熱性・耐久性・耐食性・機械的特性・電気的特性等の特徴を備えており、多くの分野で使われ、様々な産業を支えている。セラミックス部材の 2018 年の生産総額は 3.2 兆円で、世界の生産額の 40 %を占める。内訳は、「電磁気・光学用」部材が総額の 7 割を占め、「熱・半導体関連」部材、「化学・生体」部材も売り上げを伸ばしている。これは、スマートフォンをはじめとする情報通信、自動車の電装化・電子化の進展による電子部品や半導体の需要拡大による。高度な情報化社会、人工知能の発達、環境・エネルギー分野等先端セラミックスの重要性は増していくと予想されている。日本のセラミックス産業が競争力を失うと、日本全体の産業競争力の減退につながりかねない。

セラミックスは様々な優れた特性を持ちながら、高価であることや突然の破壊・割れの発生する場合があること等が、普及を妨げている。これらは、**複雑な製造工程や高温焼成によるエネルギー多消費、製品の内部構造の不均一性**に起因する。これらの課題を解決するためのプロセス研究は十分に行われてきたとは言えず、**革新的なプロセス研究を通してコスト競争力の向上、用途拡大につながる高機能化や新機能創出**が求められている。

本技術テーマは、原料粉の合成から後加工までセラミックス製造工程全体を見直して上記欠点を克服する基盤技術を基礎科学に立脚して確立し、製造プロセスのブレークスルーを目指した。これにより、製品の競争力向上や従来品の機能を凌駕するさまざまな特性を実現すると共に、新たな用途の可能性を検討し、優れた特徴を持つセラミックスを社会に広めるための学理構築を目標に掲げた。また、企業での製造に直結することを念頭に、**原料粉の製造・成形・焼結・後加工までの製造技術全体を見通し、目視と勘と職人芸に頼る部分を廃し、科学的な観点から生産性の向上と機能向上のための「技術の体系化」に挑戦した。**

2. プログラムオフィサー（P0）

目 義雄（国立研究開発法人物質・材料研究機構 特命研究員、令和 3 年 4 月より参事役）

3. 採択課題

本技術テーマでは、「1. 技術テーマ」に記したように、原料粉の合成から後加工までセラミックス製造工程全体を見直し、セラミックスの欠点を克服する基盤技術を基礎科学に立脚して確立し、製造プロセスのブレークスルーを目指した。これにより、製品の競争力向上や従来品の機能を凌駕するさまざまな特性を実現すると共に、新たな用途の可能性を検討し、優れた特徴を持つセラミックスを社会に広めるための学理構築を目標に掲げた。セラミックス産業界に共通する技術課題解決のための基盤的研究開発として、11件の研究課題を採択した。研究課題は、①新材料・粉体製造技術、②粉体成形技術、③無焼成・低温作製技術、革新的焼結技術、④革新的加工技術、⑤革新的評価技術、の原料粉の合成から後加工までの素技術を網羅している。本技術テーマを通して、科学的な見地から革新的なプロセス研究がなされ、産業界にフィードバックされることにより、製造工程の革新、コストダウンや従来品を超える特性の実現を目指した。

以下に、採択した11課題の概要を略記する。

・採択課題01の「セラミックスプロセスチェーン最適化を目指した構造形成過程のリアルタイム3次元OCT観察法による理解とその制御因子の科学的解明」では、光コヒーレンストモグラフィー(OCT)を用いたセラミックスプロセス中の構造形成過程のリアルタイム3次元観察による理解と、粒子界面設計およびマスターシンタリングカーブを基軸として構造形成過程の制御因子の科学的解明を行い、セラミックスプロセスチェーンの最適化を目指す。得られた成果を活用して、具体的なセラミックスとして透明体、配向体、積層体を実現する。

・採択課題02の「セラミックス粉体の超微粉碎技術の確立と革新的粉体プロセスの開発」では、セラミックスの品質向上とコスト低減の基盤である超微粉碎の制御技術は、いまだに十分に確立されていない。そこで、粉碎時の媒体ボール等の運動状態のシミュレーションによって実験結果を解析し、粉碎限界粒子径、凝集粒子形成を支配する制御因子を体系的に明らかにする。また、このシミュレーションを用いて不純物混入を抑制する粉碎方法の提案ならびに、粉碎粉を活用する高品質コロイド調製技術や粉碎技術の新展開として非加熱のナノ粒子合成プロセスを開発する。

・採択課題03の「非鉛圧電配向体の焼結しない低温作製法の確立 ～IoTセンサーおよびエネルギーハーベスター応用に向けて～」では、サブミリメートル厚さの非鉛圧電配向体を、水熱法を基にしたプロセスにより焼結することなく、KやNa成分等の熱揮発を生じることなく作製する。センサーや発電機の性能指数を結晶配向性と材料組成の制御によって最大化し、高性能圧電材料の利用を通じて環境にやさしい非鉛圧電体を用いたInternet of Things (IoT) 用センサーおよびエネルギーハーベスター応用を目指す。

・採択課題04の「フラッシュ焼結の学理構築と革新的焼結技術への展開」では、強電場を印加することで、大気中無加圧下で低温・短時間焼結を実現する新たな焼結法であるフラッシュ焼結法を確立させ、セラミックス焼成プロセスの革新的省エネルギー化を達成すると共に、フラッシュ接合技術の開発も行う。粒界・界面の先端ナノスケール計測と理論計算シミュレーションを連携させて強電場下の素過程を解明する。フラッシュ焼結の基礎学理を構築すると共に、産業展開のためのプロセス設計指針を示すガイドラインを整備する。

・採択課題05の「セラミックススラリーの新規分散評価技術を中心としたスラリー特性の

完全定量化による湿式成形プロセスの高度化」では、スラリー中の粒子分散状態を的確に評価できる簡便・安価な方法および装置を開発する。粒子間相互作用の直接測定法および新規シミュレーション法との融合により、経験と勘によらない最適スラリー調製を実現する。さらに、微粒子の良分散・高濃度スラリー調製を可能にするスラリー高濃縮装置を開発し、セラミックス成形プロセスの高度化に貢献する。

・採択課題 06 の「ナノブロック高次秩序化による配向性ナノ構造体の開発と表面ドーピングによる高機能化」では、各次元の高比表面積ブロックとして 2 次元シート、1 次元ニードル、0 次元粒子を合成し、高次秩序化により配向性ナノ構造体を開発する。ナノブロックの表面ドーピングにより表面電子物性等を変調し、高機能化・高活性化を図る。特に、常温、常圧、水溶媒での自己組織化により、産業基盤部材となる高比表面積・高活性ナノ構造体の開発を行う。ナノ構造制御に加え、低コスト製造、有機材料との複合化、大面積化を図る。

・採択課題 07 の「単結晶ナノキューブの自己組織化を利用した新成形技術の開発」では、誘電体単結晶ナノキューブの自己組織化に特化したシート成形や印刷技術等の開発により、ナノキューブ三次元規則配列集積膜の配列領域を現在のマイクロメートルサイズからミリメートルサイズへの大面積化を達成する。また、静電噴霧技術やレーザー照射による従来の高温焼成を経ない新しい成膜プロセスとナノキューブ界面形成技術の開発を行い、新規デバイス作製手法を確立する。また、ナノキューブ界面の微構造と誘電特性との相関について、高分解能電子顕微鏡を用いた直接観察およびシミュレーションの両観点から明らかにし、ナノ構造から導き出される特性デザインの指針を得る。

・採択課題 08 の「無焼成セラミックスプロセスの解析とそれに基づく革新的材料の創生」では、セラミックス製造におけるエネルギーの半分以上を消費する焼成工程が不要な無焼成セラミックスは、エネルギー的観点からのみでなく、難焼結性セラミックスの固化、ポリマーや金属との複合化等の革新的プロセスとなる可能性が高い。ところが、その強度発現メカニズムの解析は十分ではなく、職人芸的要素が高い。そこで、この部分をセラミックス成形前プロセス解析技術とシミュレーションを用いて材料設計可能なレベルに底上げする。

・採択課題 09 の「磁気科学プロセスによる単結晶性セラミックスの創出」では、セラミックスの機能性向上に資する磁場配向法による擬似単結晶セラミックスの創出および鑄込み成形やシート成形に合わせた磁場印加方法を開発する。特に、希土類 RE123 系高温超伝導分野に着目し、性能コストを低減した大送電容量をもつ超伝導線材の創出を目標とする。

・採択課題 10 の「反応性プラズマを援用したセラミックス材料のダメージフリー形状創成・仕上げ加工技術の開発」では、硬脆難加工材料である機能性エンジニアリングセラミックス材料に対して、反応性プラズマを援用した「プラズマナノ製造プロセス」の適用により、高能率かつダメージフリーに目的形状を得るプロセスを開発する。本プロセスにより、従来の機械加工技術では不可避であった機械的・熱的・化学的な特性を低下させるマイクロクラック等の加工変質層の形成を回避できるため、金型の作製等に応用すれば寿命の飛躍的な増大が期待できる。

・採択課題 11 の「レイヤード結晶シェルによる“単一結晶面粒子”の創製とその超精密機能化」では、従来のセラミックス粒子の概念を凌駕する「単一結晶面粒子を有するコアシェル粒子」の基盤技術の確立を行い、医療・ライフサイエンス用途に向けた単一結晶面に由来する機能特性を有するコアシェル粒子を創製する。また再生医療用材料として展開するため

に新規ペプチドゲルによる 3 次元構造化プロセスを確立、再生医療用材料のような柔らかい材料の力学物性を評価する手法を開発し、産業化へ繋げる。

表 1 採択課題

終了 年度	課題番号 末尾 2 桁 (項番)	プロジェクトリーダー (所属 役職)	研究課題名
R02	01	多々見 純一 (横浜国立大学 大学院環境情報研究院 教授)	セラミックスプロセスチェーン最適化を目指した構造形成過程のリアルタイム 3 次元 OCT 観察法による理解とその制御因子の科学的解明
R02	02	加納 純也 (東北大学 多元物質科学研究所 教授)	セラミックス粉体の超微粉碎技術の確立と革新的粉体プロセスの開発
R02	03	舟窪 浩 (東京工業大学 物質理工学院 教授)	非鉛圧電配向体の焼結しない低温作製法の確立 ～ I o T センサーおよびエネルギーハーベスター応用に向けて～
R02	04	山本 剛久 (名古屋大学 大学院工学研究科 教授)	フラッシュ焼結の学理構築と革新的焼結技術への展開
R02	05	森 隆昌 (法政大学 生命科学部 教授)	セラミックススラリーの新規分散評価技術を中心としたスラリー特性の完全定量化による湿式成形プロセスの高度化
R02	06	増田 佳文 (産業技術総合研究所 極限機能材料研究部門研究グループ長)	ナノブロック高次秩序化による配向性ナノ構造体の開発と表面ドーピングによる高機能化
R01.9	07	三村 憲一 (産業技術総合研究所 極限機能材料研究部門主任研究員)	単結晶ナノキューブの自己組織化を利用した新成形技術の開発
R02	08	藤 正督 (名古屋工業大学 先進セラミックス研究センター 教授)	無焼成セラミックスプロセスの解析とそれに基づく革新的材料の創製
R01.9	09	堀井 滋 (京都先端科学大学 工学部機械電気システム工学科 教授)	磁気科学プロセスによる単結晶性セラミックスの創出
R02	10	山村 和也 (大阪大学 大学院工学研究科 教授)	反応性プラズマを援用したセラミックス材料のダメージフリー形状創成・仕上げ加工技術の開発
R02	11	永田 夫久江 (産業技術総合研究所マルチマテリアル研究部門 研究グループ長)	レイヤード結晶シェルによる“単一結晶面粒子”の創製とその超精密機能化

※採択年度は全て平成 28 年度

※項番 09 は、応募時に研究開発期間を令和元年度末迄と設定

※項番 07、09 は、平成 30 中間評価時に研究中止の評価を受けて平成 30 年度末で研究開発を

終了したが、令和元年度 9 月末までの半年間を研究成果のとりまとめ期間として、学会参加、論文投稿費用を支給

4. 技術テーマのねらい（目標）

（１）技術課題解決に向けた考え方

セラミックスの欠点は、複雑な製造工程や高温焼成によるエネルギー多消費、製品の内部構造の不均一性に起因する割れ欠けの発生、低い歩留まり、高コスト等である。これらの欠点（技術課題）を解決するための基礎研究を含む革新的プロセス研究は、十分に行われてきたとは言えず、これらの研究を通してコスト競争力の向上や用途拡大につながる基盤技術の形成が求められている。本技術テーマに基づく研究が、セラミックス普及のネックとなっている技術課題をブレークスルーすれば、性能面だけでなくコスト面においても日本のセラミックス産業の優位性を際立たせられる。この基盤技術は、セラミックスに共通する課題の解決を目指すものであり、従来からあるセラミックス製各種電子部品、センサー、圧電・蓄電・熱電変換等エネルギー変換素子、水処理用濾過材、等の全てのセラミック部材のコストダウンや高機能化に役立つ。また、自動車、ロボット、航空宇宙、半導体製造装置等構造用部品材料の軽量化、省エネルギー化、メンテナンスフリー化、さらに、新しいセラミックスの応用分野として期待されている次世代エレクトロニクス・パワーエレクトロニクス、エネルギー、環境浄化、医療・ライフサイエンス、等の様々な分野で、日本の技術的優位を確実にして世界市場をリードする武器となり得る。

本技術テーマは、セラミックス製造プロセス全体で、目視と勘と職人芸に頼る部分を廃し、科学的な観点から、コストダウンと特性向上のための技術の体系化を目指すものである。特に、成形体の密度と均質性は、焼結挙動に大きな影響を及ぼし、部材の性能とコストを決める重要な要因であり、現状の技術レベルを超える飛躍が望まれている。具体的な基盤技術として、

- ① 焼結前粉体プロセスの革新による高機能セラミックス、複合材料の作製
- ② 新規焼結理論、革新的焼結技術
- ③ 革新的複合化、接合、界面改質技術
- ④ 革新的検査、評価技術

があるが、従来の製造技術にとらわれない新しいプロセス研究も歓迎した。また、革新的な特性を有する目標製品の製造に適したプロセスに関する研究や、革新的プロセスを基に革新素材創製に挑戦するという観点の研究も歓迎した。

（２）P0 の目標

大学・公的研究機関では、運営交付金の減額等によって安定的な研究資金を確保しにくくなり、長期的な視野に立った基礎・基盤的な研究課題に対する取り組みが難しくなっている。また現状は、研究者の個人的興味で研究を行っている傾向があり、技術の体系化はなされておらず産業界のニーズと十分整合しているとはいえない実状である。本技術テーマを通して、大学・公的研究機関等で科学的な見地から研究し、将来、その成果を産業界にフィードバックすれば、各企業は自社製品に適用して、コストダウンや製造工程の革新、従来品を超える特性を実現することになり、日本の産業競争力の強化にもつながる。

本技術テーマの下で生まれた技術を実用化するには、その技術の達成度や適用可能範囲によって、本技術テーマ終了後に個別企業が引き取って研究を続ける場合、個別企業と大学らとの共同研究に進む場合、あるいは複数の企業と大学らが集まるコンソーシアムで共同研究を行う場合、等が想定される。将来、本技術テーマで築いた共通の土台が核となって、革新的な製造プロセス、高機能セラミックスの創製に発展することを念頭に、本技術テーマで研究を推進した。

（３）「産学共創の場」の活用方針

産学共創の場には、各種セラミックス部材の製造メーカー、自動車や航空宇宙分野の企業でセラミックスの製造工程や機能特性とその活用に造詣の深い方々に参加して頂いた。具体的な参加企業および参加者は、主に、日本ファインセラミックス協会の会員企業の研究開発担当者と、また、POの推薦の他、アドバイザーの方々にも紹介頂いた。

「共創」は、共に生きるという意味の共生をヒントに考え出された佐々木正氏（元シャープの副社長）の造語である。１人の天才では手に負えないほどの広がりを見せている現代産業は、多くの人々が一体となって新しいものを創っていく共創の時代に入っている。共創の条件の一つは安易に妥協しないことで、同じ考えの人間ばかり集まっても意味が無く、異なる考え、専門を持った人のブレインストーミングが重要である。共創が成功するには「場」が必要である。

このような観点から、産学共創の場を活用した。具体的には、各プロジェクトリーダーの発表に対して提供された意見は、会議後に集約し、計画変更や研究の加速化に対する意見としてプロジェクトリーダーに提供した。産学共創の場は、各研究課題の計画方針の妥当性の確認、計画の変更に反映させて頂いた。

5. 研究課題の選考について

(1) 選考の方針

本技術テーマは、セラミックス製造プロセス全体で、目視と勘と職人芸に頼る部分を廃し、科学的な観点から、コストダウンと特性向上のための技術の体系化を目指すものである。本技術テーマが開始されるに当たり研究課題を公募したところ、70件のご応募を頂いた。応募頂いた研究課題は公募の趣旨を良く反映し、①新材料・新粉体製造技術、②無焼成・低温作製技術、③革新的焼結技術、④革新的加工技術、⑤革新的分析技術、⑥新プロセス、と分類され、非常に多岐にわたった。産業ニーズ対応タイプとして、

- ① 技術テーマの解決に資する課題内容であること
- ② 課題解決に向けた目標・計画が具体的かつ明確であり、実現性が高いこと
- ③ 研究開発体制が適切に組織されており、また研究に必要な設備等の環境が整備されていること
- ④ 産業競争力強化につながる技術の確立が期待でき、新しい産業の創出、産業競争力強化、雇用拡大等日本経済発展に貢献し、社会・経済への独創的で大きなインパクトが期待できること

を評価基準とした。特に、合成、評価、理論・シミュレーション技術の連携した異分野の研究者が集まった研究チームによる提案を歓迎した。なお、戦略的イノベーション創造プログラム（SIP）革新的設計生産技術および革新的構造材料プロジェクトで研究開発が進められているセラミックスコーティング、3D造形技術は、本技術テーマでは取り上げないこととした。

審査に当たっては、多様な申請課題の専門性をカバーするために産業界・アカデミアからなる全10名のアドバイザーの協力のもとに、書面審査と面接審査を行った。応募頂いた研究提案はいずれも魅力的な研究だったが、特に、広く産業化が期待できる革新的なプロセスであることを重視し、最終的に11件を採択した。不本意ながら不採択とさせて頂いた研究課題も、優れた研究提案が多数含まれていたことを、ここに特記させて頂く。

(2) 採択課題の構成

採択した11件の研究課題は、原料粉の合成から後加工までの素技術を網羅しており、その構成は表2に示す通りである。粉体プロセスの粉体作製・結合体化技術が4件、無焼成・低温焼成技術が2件、成形・焼結・加工技術が5件である。

表2 要素技術による採択課題の分類

要素技術	項番	プロジェクトリーダー (所属 役職)	研究課題名
粉体作製・結合 体化技術	02	加納 純也（東北大学 多元物質科学研究所 教授）	セラミックス粉体の超微粉碎技術の確立と革新的粉体プロセスの開発
	11	永田 夫久江（産業技術総合研究所マルチマテリアル研究部門 研究グループ長）	レイヤード結晶シェルによる“単一結晶面粒子”の創製とその超精密機能化
	07	三村 憲一（産業技術総合研究所 極限機能材料研究部門 主	単結晶ナノキューブの自己組織化を利用した新成形技術の

		任研究員)	開発
	06	増田 佳文(産業技術総合研究所 極限機能材料研究部門 研究グループ長)	ナノブロック高次秩序化による配向性ナノ構造体の開発と表面ドーピングによる高機能化
無焼成・低温焼成技術	08	藤 正督(名古屋工業大学 先進セラミックス研究センター 教授)	無焼成セラミックスプロセスの解析とそれに基づく革新的材料の創生
	03	舟窪 浩(東京工業大学 物質理工学院 教授)	非鉛圧電配向体の焼結しない低温作製法の確立 ～I o T センサーおよびエネルギーハーベスター応用に向けて～
成形・焼結・加工技術	01	多々見 純一(横浜国立大学 大学院環境情報研究院 教授)	セラミックスプロセスチェーン最適化を目指した構造形成過程のリアルタイム3次元OCT観察法による理解とその制御因子の科学的解明
	05	森 隆昌(法政大学 生命科学部 教授)	セラミックススラリーの新規分散評価技術を中心としたスラリー特性の完全定量化による湿式成形プロセスの高度化
	09	堀井 滋(京都先端科学大学 工学部機械電気システム工学科 教授)	磁気科学プロセスによる単結晶性セラミックスの創出
	04	山本 剛久(名古屋大学 大学院工学研究科 教授)	フラッシュ焼結の学理構築と革新的焼結技術への展開
	10	山村 和也(大阪大学 大学院工学研究科 教授)	反応性プラズマを援用したセラミックス材料のダメージフリー形状創成・仕上げ加工技術の開発

6. アドバイザーの構成について

(1) 人選にあたっての考え方

本技術テーマで委嘱したアドバイザーは、表 3 に示すとおりであり全 11 名である(なお、社内の人事異動により、1 名は途中で交代、1 名は中間評価まで)。アドバイザーの人選に当たっては採択課題が多岐にわたることから、それぞれのアドバイザーの専門性と経験を考慮した。学界からの人選においては、粉体の製造、成形、焼結および TEM 等のキャラクターゼーション技術に深い造詣を有する方を委嘱した。産業界からのアドバイザーに関しては、産学共創の場に参加して頂いた方と同様に、各種セラミックス部材の製造メーカー、自動車や航空宇宙分野の企業でセラミックスの製造工程や機能特性とその活用に造詣の深い方々を委嘱した。

表 3 アドバイザー

氏名	所属 役職	任期
伊吹山 正浩	デンカ(株) 新事業開発部 シニアテクニカルアドバイザー	平成 28 年 10 月～令和 03 年 03 月
加藤 一実	産業技術総合研究所 理事	平成 28 年 10 月～令和 03 年 03 月
久保寺 紀之	(株)村田製作所 執行役員、技術・事業開発本部 マテリアル技術センター長	平成 28 年 10 月～令和 03 年 03 月
後藤 孝	東北大学 名誉教授、未来科学技術共同研究センター 客員教授	平成 28 年 10 月～令和 03 年 03 月
篠崎 和夫	東京工業大学 名誉教授、特命教授(教育・国際連携本部)	平成 28 年 10 月～令和 03 年 03 月
須山 章子	東芝エネルギーシステムズ(株) エネルギーシステム技術開発センター シニアエキスパート	平成 28 年 10 月～令和 03 年 03 月
仲川 彰一	京セラ(株) 研究開発本部 デバイス研究開発統括部長 兼 先進マテリアルデバイス研究所長	平成 28 年 10 月～令和 03 年 03 月
中野 裕美	豊橋技術科学大学 教育研究基盤センター 教授、学長特別補佐(ダイバーシティ推進担当)	平成 28 年 10 月～令和 03 年 03 月
中村 賢治	トヨタ自動車(株) 第 2 材料技術部 機能材料室 室長	令和元年 07 月～令和 03 年 03 月
森 信義	(株)IHI 航空・宇宙・防衛事業領域 瑞穂工場修理部修理技術グループ 部長	平成 28 年 10 月～平成 30 年 12 月
神戸 義隆	トヨタ自動車(株) 基盤材料技術部 企画総括室 室長	平成 28 年 10 月～令和元年 06 月

7. 技術テーマのマネジメントについて

(1) P0 の運営方針

産学共創の場およびサイトビジットは、進捗状況の把握と研究計画の方向性について議論する場として、極めて有用であった。ここでは、アドバイザー間および課題担当者の意見が対立する場面もあった。この場合、両者の意見を尊重し、納得する解決方法をとるように努めた。例えば、課題 04 の「フラッシュ焼結の学理構築と革新的焼結技術への展開」では、電気化学的知見を取り入れた理論構築が不十分との指摘に対し、中間審査後の継続の条件として、理論シミュレーション技術において電気化学の専門家を研究体制に入れるよう指示した。また、課題 11 の「レイヤード結晶シェルによる“単一結晶面粒子”の創製とその超精密機能化」では、粒子の名称を誤解のないように「単一結晶面を有するコアシェル粒子」とし、その生成メカニズムを明らかにすることを求めた。一方、課題 07 の「単結晶ナノキューブの自己組織化を利用した新成形技術の開発」および課題 09 の「磁気科学プロセスによる単結晶性セラミックスの創出」では、中間評価時点までの目標は達成しており、A 評価としたが、本技術テーマの狙いである産業応用の基盤形成が不十分であり、残念ながら研究期間の延長は行わないと判断した。なお、研究終了に向けて、それまでに本技術テーマで得られた研究成果の取りまとめ等に必要最小限の経費措置を講じた。

また、セラミックスプロセスに関する研究課題間の連携の促進を図った。具体的な連携を PL 名毎に以下に示す。

- ① 多々見 PL は、藤 PL、加納 PL、森 PL と OCT に関連して共同研究を進めている。特に、加納 PL からは粉碎されたスラリー等の提供がありその OCT 観察を行っている。また、森 PL とは乾燥に関する共同研究を行っている。
- ② 加納 PL は、粉碎して作製したアルミナ粉体スラリーを多々見 PL に提供し、鑄込み成形過程の粒子挙動を OCT で評価した。また、藤 PL において遊星ボールミルを使用しており、そのボールの運動のシミュレーションを加納 PL が行い、それを基に議論を行った。
- ③ 舟窪 PL において、圧電体は、電気エネルギーと機械的なエネルギーの変換デバイスであることから、発電デバイスを考える場合、これまで行ってきた評価に加えて、歪みに対する機械的な強度の評価が不可欠である。そこで、多々見 PL とサブミリ以下の圧電体の機械的強度の評価方法の共同研究を計画し、新型コロナによる移動制限が緩和されれば、取り組む予定を立てている。
- ④ 森 PL は、開発した濡れ性評価技術の妥当性を検証するために、藤 PL に水蒸気吸着量の測定を依頼した。これは、製法が様々な炭酸カルシウム粒子の水に対する接触角がアルミナ粒子よりも小さいのか、大きいのかを客観的に示す根拠がなかったため、水蒸気吸着量の違いを測定することで水への親和性を評価し、接触角と比較することで測定の確からしさを検証したというものである。
- ⑤ 森 PL は、沈降静水圧測定により得られた知見として、スラリー調製直後は見かけ粘度が低く分散しているスラリーが、濃縮によって粒子が凝集することで成形体密度が低くなる場合があることを見出した。このメカニズムを別角度からも検証するため、多々見 PL の保有技術である OCT によるスラリー乾燥過程の内部構造変化の直接観察を実施した。

(2) 技術テーマの進捗状況の把握

本技術テーマは、平成 28 年度から 5 年間の予定で実施した。初年度の平成 28 年(2016 年)8 月 26 日から 10 月 5 日の期間で研究課題を公募した。その後、11 月 6 日に書面審査、11 月 21 日に面接審査を行って 11 件の採択課題を決定した。初年度内の平成 29 年 2 月 6 日には、第 1 回の産学共創の場を本技術テーマのキックオフミーティングと位置付けて開催し、各研究

課題の研究開発計画を詳細に把握すると共に、本技術テーマの提案に関与した企業を中心とした出席者から研究計画の方向性についてご意見を頂いた。

その後は、サイトビジットを毎年度実施し、産学共創の場合については、2年目はセラミックス産業が多い名古屋地区（名古屋工業大学）で2日間と東京（JST）とで年2回、3年目は中間評価までに名古屋地区（名古屋工業大学）で2日間かけて開催した。サイトビジットではアドバイザーと共に装置を前にして進捗状況の把握、アドバイス、研究計画の見直しを提言した。また、産学共創の場合では進捗状況の把握と研究計画の方向性について産業界からの参加者から貴重な意見を頂いた。

平成30年5月粉体粉末冶金協会春季大会において企画セッションとして「セラミックスの高機能化と製造プロセスの革新」を取り上げ、テーマ担当者全員の招待講演による研究紹介を行い、本技術テーマに参加していない学および産業界の研究者から意見を聞く機会を設けた。

令和2年度以降は新型コロナウイルス感染防止のため、サイトビジットおよび産学共創の場合はビデオ会議で実施し、進捗状況の把握に努めた。

（3）技術テーマの研究計画の見直しの有無、概要

産学共創の場合およびサイトビジットにおける議論に基づいて、複数の研究課題で研究計画の見直し・変更を行った。また、研究計画の変更に伴い、新たな研究協力者・施設が必要な場合には予算状況の許す範囲内で研究費の増額を措置した。以下、計画変更の実際を箇条書きに記す。

- ・課題番号01の「セラミックスプロセスチェーン最適化を目指した構造形成過程のリアルタイム3次元OCT観察法による理解とその制御因子の科学的解明」では、OCTの実力を示すための数値目標の設定に関するコメントがあり、これに基づいてマイルストーンに数値目標を追加、さらにOCT像の明瞭化のための機械学習による画像処理にも発展し、OCT観察の意義を明確にすることができた。また、企業研究者から提示された意見に基づいて、鋳造成形過程および脱脂過程のOCT観察も計画変更して本研究の内容に追加し、OCT研究の幅を広げることができた。

- ・課題02の「セラミックス粉体の超微粉碎技術の確立と革新的粉体プロセスの開発」では、産業界から、機械的手法による材料合成の一般化、EPDにおいてアルミナのみならずその他の材料に関しても展開、液中のみならず空気中においてもシミュレーションの実施の要望があり実施した。特に、転動ミルや遊星ミルのみならず、媒体攪拌型ビーズミルにも展開を図って欲しいという要望に対しては、研究計画に新たに追加し実施した。

- ・課題03の「非鉛圧電配向体の焼結しない低温作製法の確立 ～IoTセンサーおよびエネルギーハーベスター応用に向けて～」では、(K, Na, Li)(Nb, Ta)O₃等の多成分系への対応に関する企業側からの指摘および要望が多く、当初予定になかった東北大グループも参加することとした。より短時間で合成の可能性のあるマイクロ波加熱の研究と、産業界から要望が多かった有機基材を含めた各種機材上までの非鉛圧電体の作製にも着手した。研究開発項目として、バッファ層導入による結晶配向性制御、および材料組成制御による最適組成探索、を追加した。

- ・課題04の「フラッシュ焼結の学理構築と革新的焼結技術への展開」では、産業展開への姿勢を強くするようというコメントを受けて、モデル結晶を用いたフラッシュ実験および環境型超高圧電子顕微鏡を用いたフラッシュ過程のその場観察実験から印加電界波形の検討

へ研究資源を振り分けたことにより、非常に均一な焼結体の作製方法やサイズ効果、さらには、新たなフラッシュ焼結法の開発と特許出願に繋がった。理論シミュレーション技術においては、電気化学的知見を取り入れた理論構築が重要で、電気化学の専門家を研究体制に入れた。

・課題 06 の「ナノブロック高次秩序化による配向性ナノ構造体の開発と表面ドーピングによる高機能化」では、常温、常圧、水溶媒での自己組織化により、産業基盤部材となる高比表面積・高活性ナノ構造体の開発を行う目標であったが、単なる数値目標ではなく、ナノ構造体膜の創製機構の解明、対象ガスの検知においてセンサー機能の機構解明、ガス選択性等検証を行った。

・課題 07 の「単結晶ナノキューブの自己組織化を利用した新成形技術の開発」は、単結晶ナノキューブ濃厚液から割れのないミリサイズの大表面積膜を作製し、ナノ材料デバイス化を目指した挑戦的な課題である。グラビア印刷やシート成形等既存技術、レーザー照射および静電噴霧技術等外部エネルギー投与による単結晶ナノキューブ規則配列膜作製を試み、大面積化は達成していないが、比較的良好な膜の作製には成功した。しかしながら、割れのない膜を作製するための指導原理を明らかにすること最優先であり、本技術テーマの狙いである産業応用の基盤形成が不十分であり、残念ながら研究期間の延長は行わないと判断した。

・課題 08 の「無焼成セラミックスプロセスの解析とそれに基づく革新的材料の創生」では、高強度セメントやジオポリマー系に対する無焼成セラミックスの位置づけを検証し、目標設定の妥当性を求めた。また、窒化ケイ素、窒化アルミ、炭化ケイ素等の難焼結性物質、シリカと金属、テフロン、炭素材料との複合材料について、実用化に向けてプロセスと機能特性の両面から産業界との連携を期待した。

・課題 09 の「磁気科学プロセスによる単結晶性セラミックスの創出」では、超伝導体をターゲットに置くより、他材料の三軸配向の実現による機能向上や擬単結晶セラミックスの可能性を検討するべきである。例えば、樹脂と誘電体粒子の複合体や光学材料等への展開、また、三軸配向体の特性がどの程度優れているかの実証を期待した。挑戦的な課題であり成果は十分評価できるが、基礎研究の域を脱しておらず、本技術テーマの狙いである産業応用の基盤形成が不十分であり、残念ながら研究期間の延長は行わないと判断した。

・課題 10 の「反応性プラズマを援用したセラミックス材料のダメージフリー形状創成・仕上げ加工技術の開発」では、前倒して試作したプラズマ援用研磨装置を足掛かりに、多様な硬脆難加工材料である機能性エンジニアリングセラミックスの展開を図ると共に、企業ニーズに応えるためのデモ加工を期待した。

・課題 11 の「レイヤード結晶シェルによる“単一結晶面粒子”の創製とその超精密機能化」では、粒子の名称を誤解のないように「単一結晶面を有するコアシェル粒子」とし、その生成メカニズムを明らかにすることを求めた。また、ソフトマターの力学物性評価手法開発は急ぐべきである、との助言により、前倒して研究費を配分し研究を開始した。

（４）研究課題の評価と指導

産学共創の場およびサイトビジットにおいて、アドバイザーと P0 が個々の研究課題を評価した。具体的には、産学共創の場ではプロジェクトリーダー、サイトビジットではプロジェクトリーダーと分担者の研究経過報告、および研究計画書に記された達成目標とチェックポ

イント(CP)に基づき、その研究課題の期間内の進捗状況、成果の創出状況、研究計画の変更・見直しの必要性の有無を判断した。サイトビジットの場合は、アドバイザーと P0 の意見交換・意見集約を行い、文書(サイトビジットメモ)としてプロジェクトリーダーに伝えた。産学共創の場合は、アドバイザーと P0 に加えて、企業参加者、他の課題担当者からのコメントを集約し、プロジェクトリーダーに伝えた。新たに共同研究者の紹介や装置が必要な場合には、P0 の責任で対応した。

なお、研究課題の中間評価と事後評価は下記の日程で実施した。

平成 30 年(2018 年) 10 月 17 日、18 日 中間評価面接評価

令和 3 年(2021 年) 1 月 21 日 事後評価面接評価 (on-line)

※いずれも面接評価の前に、それぞれ中間成果報告書、完了報告書による書面評価を実施

(5) 課題中間評価における評価基準(研究計画の見直し、研究中止、研究継続の根拠)

研究課題の評価は、JST により用意された評価実施要領と審査表の項目に従って、全アドバイザーと P0 が各研究課題に対して、書面評価および面接評価により個々に評価し、全体会議で意見交換・意見集約を行い、統一評価を取りまとめた。具体的には、本技術テーマの狙いである産業応用の基盤形成が十分かどうかを考慮した上で、研究計画に記された達成目標と CP に基づき、その技術的妥当性および進捗状況を見て、研究期間の延長を行うか否か、また研究計画の変更・見直しが必要か否かを判断した。特に、課題 07 の「単結晶ナノキューブの自己組織化を利用した新成形技術の開発」および課題 09 の「磁気科学プロセスによる単結晶性セラミックスの創出」は、挑戦的な研究課題であり成果は十分評価できたが、本技術テーマの狙いである産業応用の基盤形成が不十分であり、中間評価の段階で、研究期間の延長は行わないと判断した。

(6) 研究費の配分

提案された研究計画に伴う研究費に関し、初年度(平成 28 年度)は、提示された予算額の範囲内であったため、特別な変更を必要としなかった。しかし、2 年目以降、産学共創の場やサイトビジットでの提案による研究計画の変更に伴って発生する予算要求については、予算の許す範囲内で追加配分あるいは研究費の前倒しを行った。具体的には、研究費増額等の対応を課題担当者名と分担者の所属機関名を括弧内に以下に示す。

① 平成 29 年度

- ・ 増田 PL (物質材料研究機構) : 早急に Si ナノ粒子の電池性能を提示すべきという指摘に基づき、電池セルを組み立てるためのグローブボックスを整備した。
- ・ 増田 PL (産業技術研究所) : 色素増感型太陽電池評価を実施するため色素増感型太陽電池評価システムの整備のため、研究費の前倒しを行った。
- ・ 藤 PL (岐阜県セラミックス研究所) : セメントやジオポリマー等の無焼成セラミックスのトップデータを調査すると共に、これらに用いる材料を表面磨砕して提案技術の効果を定量的に把握するための恒温恒湿装置(スペックアップ)の整備や材料購入費を支援した。
- ・ 舟窪 PL (上智大学) : プロセス時間短縮および配向体の高品質化を目指した新規材料合成手法の導入のためのマイクロ波合成反応装置を整備した。
- ・ 山本 PL (名古屋大) : 焼結体の均一性を向上させるためには交流環境下でフラッシュ焼結を行う必要があるとの判断から、直流環境下と同様の収縮過程の計測を行うための熱膨張計を整備した。

② 平成 31 年度（中間評価後、年度当初に上積み）

- ・ 増田 PL（物質材料研究機構）：LIB 負極研究のため購入予定の X 線回折装置分を増額し、増額分を人件費等に充当した。
- ・ 永田 PL（産業技術研究所）：顕鏡インデンテーションの温度拡張に必要な経費を上積みした。
- ・ 森 PL（法政大学）：作製装置の改良を加速するために必要な経費を上積みした。
- ・ 多々見 PL（横国大、KISTEC）：OCT 解像度向上のために必要な経費を上積みした。
- ・ 山本 PL（名古屋大、東大）：雰囲気炉等の整備、焼結を伴わない電場の影響を観察する実験、電気化学的取り組みに対して必要な経費を上積みした。

（７）「産学共創の場」の推進と活用

本技術テーマの開始初年度の 2 月にキックオフミーティングとして開催した第 1 回から、最終年度の第 6 回まで毎年開催（2 年目は 2 回開催）した。各回のプログラムには特別講演の枠を設け、アドバイザーの方々に本技術テーマに関連の深い話題、特に本技術テーマへの期待についてご講演を行って頂いた。特に、中間評価後の第 5 回では、特別講演の時間帯に、個々の研究課題に対する技術相談の機会を別室に個別に設け、より深い技術情報議論の場とした。各プロジェクトリーダーの発表に対して提供された意見は、会議後に集約し、計画変更や研究の加速化に対する意見としてプロジェクトリーダーに提供した。産学共創の場は、各研究課題の計画方針の妥当性の確認、計画の変更、さらに将来の企業との共同研究の端緒としても重要な場であった。

（８）アウトリーチ活動

セラミックスでは日本最大規模の「高機能セラミックス展」（毎年関西および東京で開催）において、本技術テーマの紹介を行った。

- ① 平成 30 年 5 月 9 日～11 日、関西で開催され、6 件の技術セミナー講演（森 PL、多々見 PL、舟窪 PL、三村 PL、堀井 PL、山本 PL）を行った。
- ② 平成 30 年 12 月 5 日～7 日、東京で開催され、全研究課題を出展した。その時の様子を下に示す。

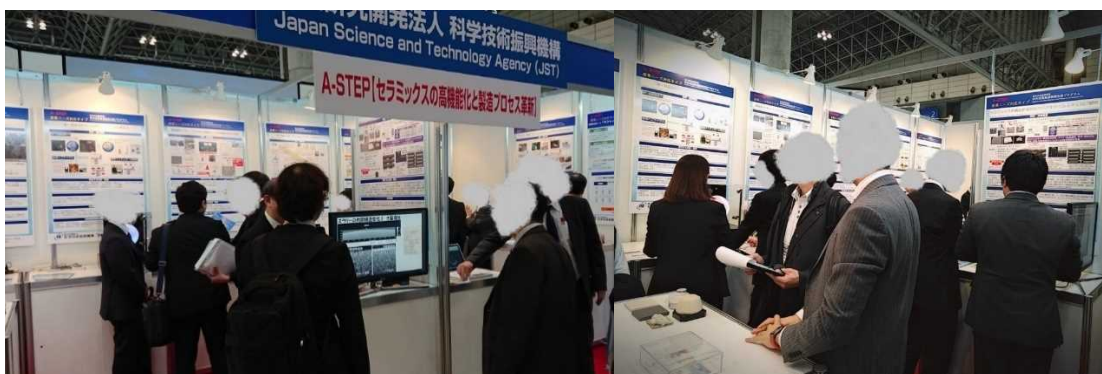


図 1 平成 30 年度高機能セラミックス展出展の様子

- ③ 平成 29 年～令和 2 年の期間、東京および関西で開催された「高機能セラミックス展」の日本ファインセラミックス協会の展示ブースにおいて、パネルおよびパンフレットで当プログラムをご紹介頂いた。

また、本技術テーマに関連する国内外の学協会で本技術テーマの紹介を行った。平成 30 年

5 月粉体粉末冶金協会春季大会において企画セッションとして「セラミックスの高機能化と製造プロセスの革新」を取り上げ、プロジェクトリーダー全員の招待講演による研究紹介を行うと共に、粉体粉末冶金誌の特集号として平成 30 年 10 月号にプロジェクトリーダー全員の解説・論文が掲載された。

P0 の国内外の招待講演により本技術テーマの紹介も行った。国内では、①平成 29 年 5 月に開催された粉体工学会産学連携シンポジウム、②平成 29 年 9 月に開催された日本セラミックス協会秋季シンポジウム、③平成 30 年 10 月に開催された粉体粉末冶金協会秋季大会。

国外では、④平成 29 年 10 月米国 ピッツバーグで開催された Materials Science & Technology 2017、⑤平成 30 年 6 月イタリアで開催された 14th International Ceramics Congress、⑥令和元年 5 月中国で開催された 11th International Conference on High-Performance Ceramics。

この他、大学や研究所でのプレスリリースを積極的に行うことを奨励し、新聞等に多く紹介された。詳細は、テーマ事後評価添付資料「10. 情報公開（主なプレスリリース、新聞・雑誌・テレビ、イベント等）」に記載した。

8. 技術テーマとしての産業競争力強化につながる技術の確立状況

(1) 課題評価結果を踏まえた最終目標の達成状況（産業界で共通する技術的課題「技術テーマ」の解決に資する成果創出）

日本のセラミックス産業は、世界のセラミックス部材生産額の4割を占めており、今後も成長分野として発展が期待されている。特に、誘電体、磁性体、圧電体等の電子セラミックス分野、点火プラグ、酸素センサー等各種のセンサーは自動車用セラミックスとして、日本の電子産業機器や自動車産業の高い競争力を下支えしてきた。しかし、近年、電子産業分野では韓国、中国、台湾の追い上げが激しく、電子製品の多くは既に日本を追い越しており、電子セラミックス部材の技術の優位は保っているものの、その競争力を維持するには製造プロセスの革新を続けていく必要がある。

本技術テーマ全体を通して、科学的な見地から革新的な様々なプロセス研究がなされ、産業界にフィードバックされることにより、製造工程の革新、コストダウンや従来品を超える特性を実現しようとするものである。本技術テーマでは、粉末の製造、粉体プロセスから焼結体の後加工まで、セラミックスプロセス全体を網羅している。

本技術テーマでは11件の研究課題を採択し、個々の研究課題毎の目標設定は異なる。中間評価では本技術テーマの狙いである産業応用の基盤形成も考慮した。S評価の5件は大きく目標を上回る成果が得られた。A評価の6件は目標を達成したが、そのうち2件は中間評価時において当初目標は達成していても、産業応用の基盤形成が不十分で課題の研究期間延長は行わないと判断した。従って、課題07,09を除く9件の研究課題が令和2年度末迄、研究開発を継続した。

(2) 産業競争力強化につながる技術の確立に資する成果（特に、技術のブレークスルー（新指導原理、開発技術）、社会・経済の発展に繋がる重要な成果、派生して生まれた技術、等）

産業競争力強化につながる顕著な例を、①粉体作製・結合体化技術、②無焼成・低温焼成技術、③成形・焼結・加工技術、の要素技術毎に、以下紹介する。また、表4には、貢献が期待される技術のブレークスルーとなる要素項目を研究課題毎に箇条書きで記す。

1) 粉体作製・結合体化技術

・課題番号02の「セラミックス粉体の超微粉碎技術の確立と革新的粉体プロセスの開発」では、産業界では経験的に言われてきた「より微細に粉碎しコンタミを減らすための粉碎ボールの条件」を、シミュレーションと実験から明確に示した。また、粉碎挙動を解析・予測するシミュレーションツールソフトをリリース、36件を配布し、さらなる課題の抽出により、今後のバージョンアップを期待する。さらに、超微粉碎技術を応用した新規非加熱粒子合成プロセスにおける機構の解明、新規開発の無機バインダーの添加によりEPDの可能性が広がる成果が得られた。



図2 粉碎シミュレーションツールのリリース

・課題番号 11 の「レイヤード結晶シェルによる“単一結晶面粒子”の創製とその超精密機能化」では、新しい構造の粒子である「単一結晶面を有するコアシェル粒子」の生成メカニズムを明らかにし、細胞導入材料として、また薬剤担持能力も優れ、薬物送達システム (DDS) として有望であることを定量的に評価した。新規ペプチドとの複合体の作製に成功し、安定した強度特性、チクソトロピー性を有することから、3次元足場材料として再生医療に有用であることを示した。ソフトマテリアルの力学評価として開発した顕微インデントは 300℃ まで測定可能となり、様々なソフトマテリアルへの応用展開が大いに期待できる。

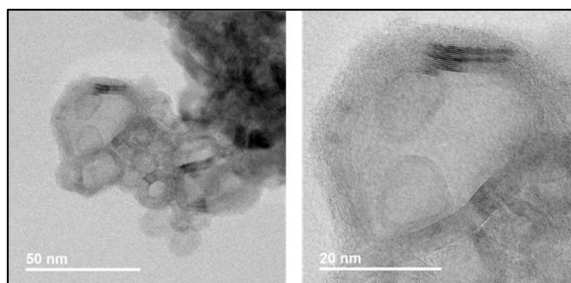


図 3 シェルの結晶性を向上させて得られた”コアシェル粒子”の TEM 写真

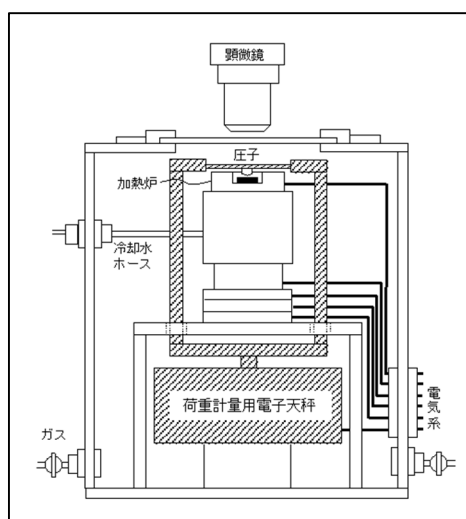
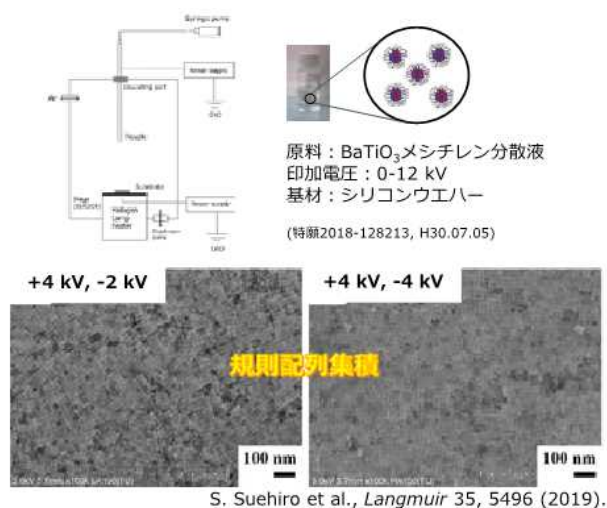


図 4 加熱冷却機能付き顕微インデントの模式図

・課題番号 07 の「単結晶ナノキューブの自己組織化を利用した新成形技術の開発」では、単結晶ナノキューブ濃厚液から割れない大面積膜を作製しナノ材料デバイス化を目指した挑戦的な課題であり、電場印加静電噴霧による集積膜の新技术開発では、最終目標とする割れの無いミリサイズの大面積化は達成していないが、比較的良好な膜の作製に成功している。



も適用し、元素毎に無焼成固化のメカニズムと最適化したプロセスを示すことは先導的研究として意義がある。また、工業的に無焼成固化体を効率よく得るための原料設計指針を「二粒子間固体架橋強度の評価装置及びそれを用いた評価方法」として示し、簡便に原料選定、反応条件最適化、材料設計が可能となった。

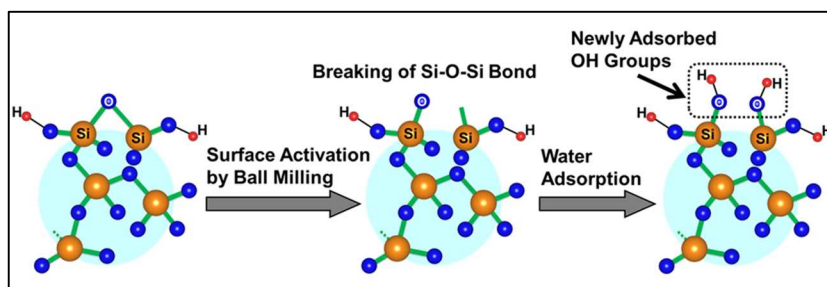


図 8 転動ボールミル活性化メカニズムの概略図

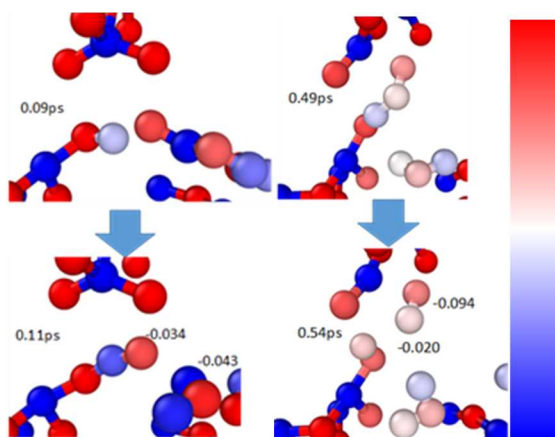


図 9 無焼成反応における電荷の時間的变化（計算結果）

0.09ps から 0.11ps への変化では、より大きい負電荷 (-0.043) を持った O 原子、に H 原子が引き寄せられることによる水分子の解離が確認できた。0.49ps から 0.54ps への変化でも原子の一部に同様の現象が確認できた。

・課題番号 03 の「非鉛圧電配向体の焼結しない低温作製法の確立 ～IoT センサーおよびエネルギーハーベスター応用に向けて～」では、IoT 社会構築に向けて非鉛圧電体の圧電特性を飛躍的に向上させる配向体を、水熱法を用いることで焼結することなく低温で作製する方法を確立した。産業力強化に資する基礎的な研究として、機能材料を低温で作製する世界的な流れの中で、独自の技術としてマイクロ波加熱や連続合成法の展開、有機基材上等へのセラミックス機能性材料の集積、従来のアクチュエーターやセンサーといった応用に加え、振動発電や医療応用への将来の展開も期待する。

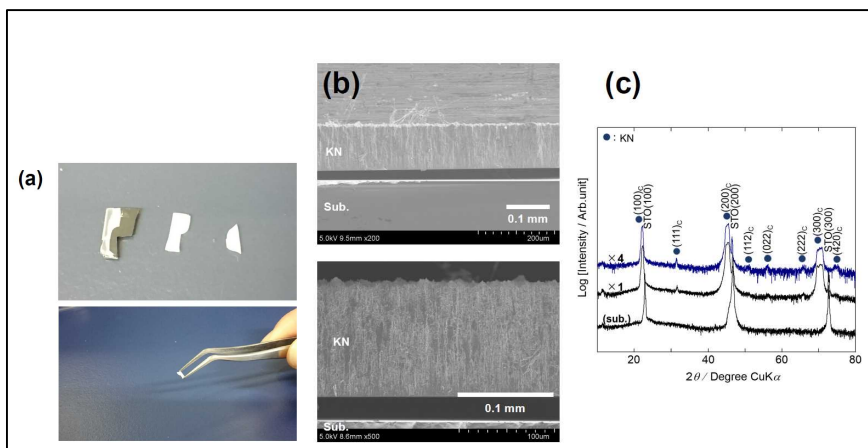


図 10 マイクロ波加熱式水熱合成の繰り返しにより得られた KNbO_3
(a) 試料外観, (b) 断面微細構造, (c) XRD θ - 2θ 回折図形

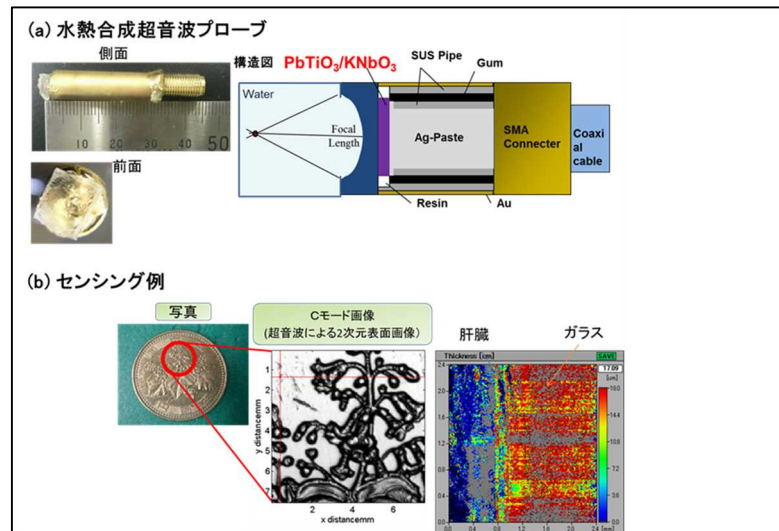


図 11 (a) 超音波顕微鏡の構造, (b) 測定例

3) 成形・焼結・加工技術

・課題番号 01 の「セラミックスプロセスチェーン最適化を目指した構造形成過程のリアルタイム3次元OCT観察法による理解とその制御因子の科学的解明」では、OCT による、乾式成形過程、スラリーの乾燥過程、脱脂過程および焼結過程のリアルタイム3次元観察の成果は大きく、ブラックボックスとされてきた製造プロセスにおける構造形成過程の科学的知見の深化、それによるセラミックスプロセスチェーンの最適化と様々な機能材料の創出に繋がった。ハード、ソフトの両面から改良が進んで OCT 観察が容易になれば、今後の製造プロセスラインのインラインモニタリングへの展開も見込まれる。また、機器の普及は多くの知見の蓄積につながり、セラミックス分野の研究開発に貢献、我が国のセラミックス産業の競争力強化の礎となり得ると大いに期待する。

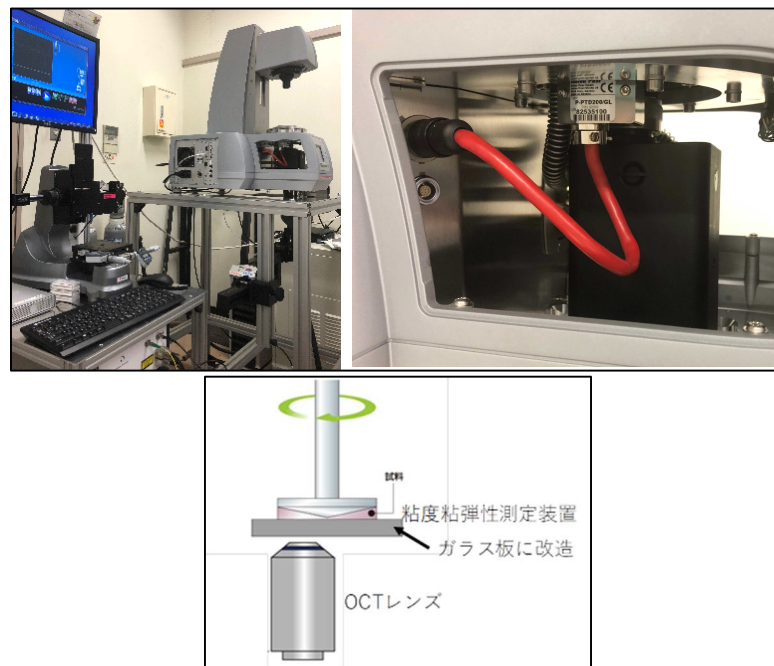


図 12 レオメーターに設置した OCT カメラ

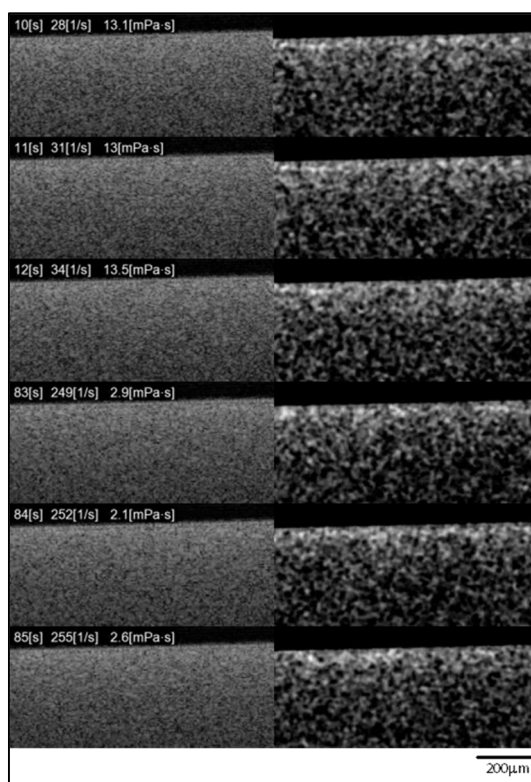


図 13 セン断場を印加しながら OCT 観察して得られたスラリーの内部構造
(左)OCT 原画像, (右)左の原画像を画像処理した後の画像

・課題番号 05 の「セラミックスラリーの新規分散評価技術を中心としたスラリー特性の完全定量化による湿式成形プロセスの高度化」では、「良いスラリー」とは成形プロセスによって異なり、スラリーの充填性が成形体の密度制御には重要であることを、評価方法と評価基準から提示し、経験と勘に頼っていた濃厚系スラリー評価が科学的に裏打ちされた評価指標により制御・管理できるようになってきた。今後は、開発した浸透圧測定装置や濡れ性評価装置が簡便な評価装置として現場で広く使われるように、評価指標の確立、信頼性のある装置としての進展を期待する。

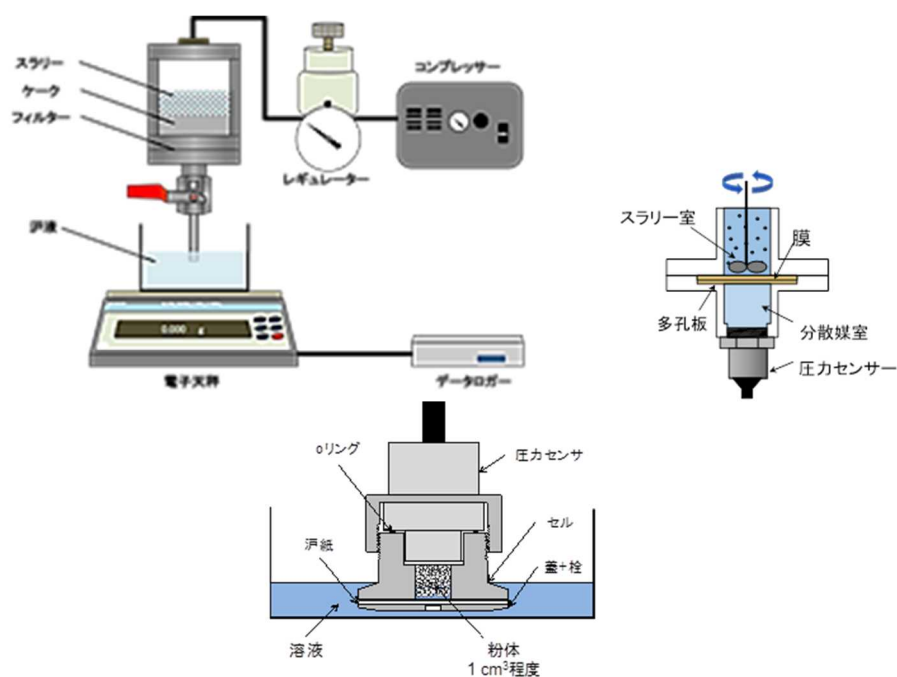


図 14 (左上)スラリー定圧濾過装置, (右上)縦型浸透圧測定装置, (下)濡れ性評価装置

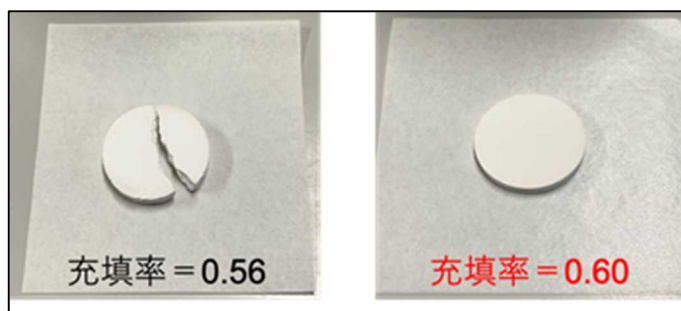


図 15 成形体の外観（いずれも約 80mass%）
（左）超音波攪拌により混合したスラリー，（右）濾過濃縮スラリー

・課題番号 09 の「磁気科学プロセスによる単結晶性セラミックスの創出」では、新規な磁場印加方式の開発に成功し、三軸結晶配向プロセスの体系化において大きな進展があったが、産業応用の基盤形成のためには三軸配向の実現による機能向上や擬単結晶セラミックスの可能性等基礎研究が必要である。

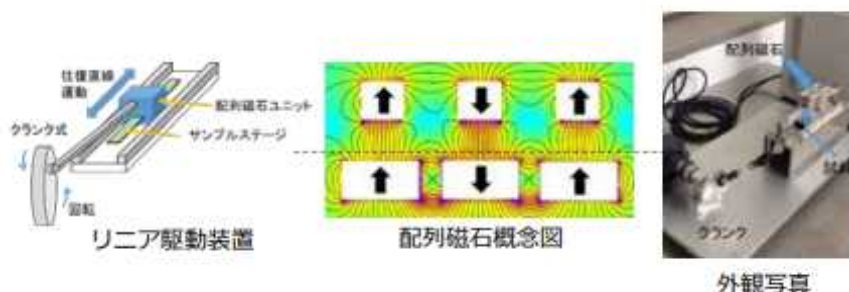


図 16 リニア駆動型回転変調磁場発生装置

・課題番号 04 の「フラッシュ焼結の学理構築と革新的焼結技術への展開」では、フラッシュ焼結において、電界を直流から交流にし、周波数を変化させ、さらに、一定の収縮になるように電流を制限した焼結法を提案し、高密度焼結体が得られることを示した。また、交流周波数を広げることで接合条件が広がり、焼結体強度の 80% を接合体で達成する等、接合に使えるプロセスになってきた。作成したフラッシュ焼結技法のガイドラインは、試験装置が入手しやすくなれば研究のすそ野が広がり、実用化の手引きとなると期待する。

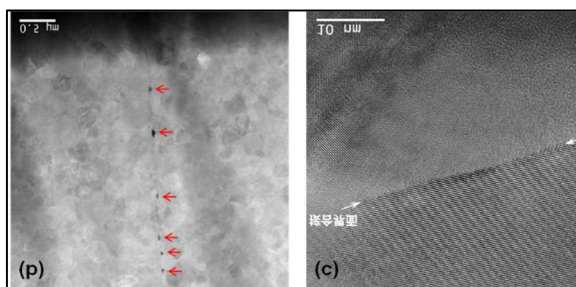
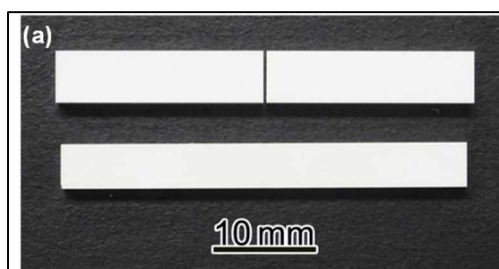


図 17 (a) 3Y-TZP 焼結体（緻密体）の接合前（上）および接合・研削加工後（下）の試料外観
(b) 接合界面の HAADF-STEM 像（黒い点列は残留ポアを示す），(c) 接合部の HRTEM 像



図 18 人工歯形状に成型された圧粉体を用いて交流電界 1000Hz においてフラッシュ焼結を実施した例

・課題番号 10 の「反応性プラズマを援用したセラミックス材料のダメージフリー形状創成・仕上げ加工技術の開発」では、SiC、AlN、GaN 等の硬脆難加工エンジニアリングセラミックスをターゲットとし、大気圧プラズマプロセスをベースとしたオールドライ高能率ダメージフリー形状創成・表面仕上げプロセスの開発において、表面粗さが 10nm 程度に研磨する技術を開発した。研磨速度を大きくできないところが難点であるが、研磨粗さが 10nm は極めて平滑であり、半導体基板の集積化を可能にする研磨技術として産業競争力の強化に大きく貢献することを期待したい。立形プラズマ援用研磨装置の試作を行っており、企業からのデモ加工に対応することで将来の実用化を見据えた取り組みも行っている。

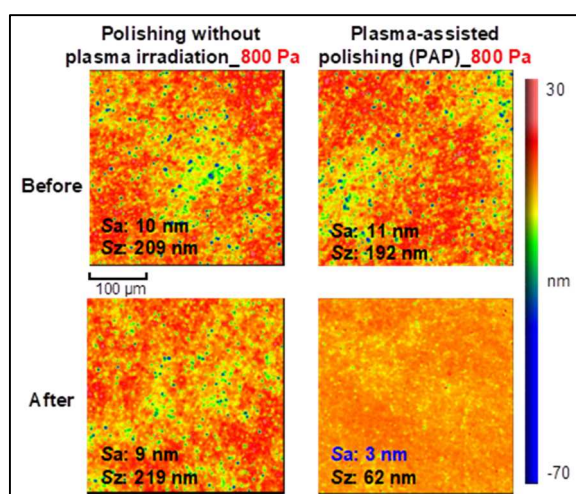


図 19 CMP 面に対する研磨結果

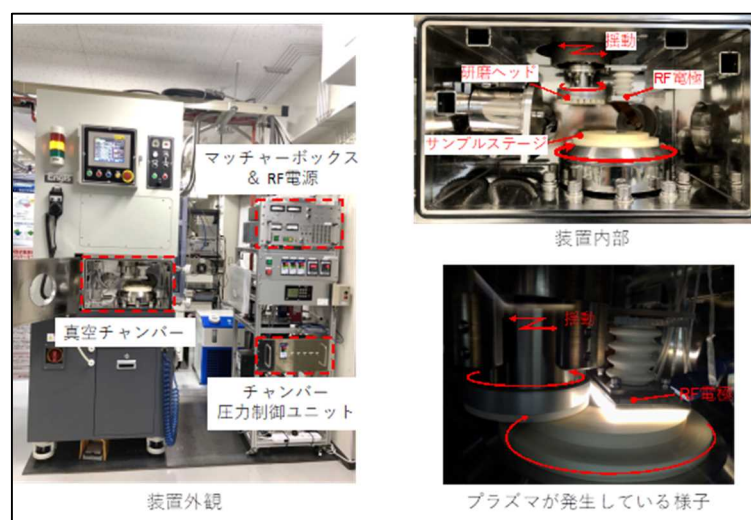


図 20 雰囲気圧力の制御が可能な PCVM・PAP 複合加工装置の試作

表 4 技術のブレークスルー（新指導原理、開発技術）等

要素技術	項番	プロジェクトリーダー（所属 役職）	研究課題名	技術のブレークスルー（新指導原理、開発技術）等
粉体作製・結合体化技術	02	加納 純也（東北大学 多元物質科学研究所 教授）	セラミックス粉体の超微粉碎技術の確立と革新的粉体プロセスの開発	・粉砕挙動を解析・予測するシミュレーションツールの開発 ・機械的手法によるナノ粒子の非加熱合成 ・電気泳動堆積法のための新規スラリーの調整とそのマニュアルの作成
	11	永田 夫久江（産業技術総合研究所マルチマテリアル研究部門 研究グループ長）	レイヤード結晶シェルによる“単一結晶面粒子”の創製とその超精密機能化	・単一結晶面を有するコアシェル粒子の創製とその新規ペプチドとの3次元構造化 ・ソフトマターの力学特性を評価する顕微インデンターの開発
	07	三村 憲一（産業技術総合研究所 極限機能材料研究部門 主任研究員）	単結晶ナノキューブの自己組織化を利用した新成形技術の開発	・単結晶ナノキューブ高分散液の作製と単結晶ナノキューブ規則配列膜作製
	06	増田 佳丈（産業技術総合研究所 極限機能材料研究部門 研究グループ長）	ナノブロック高次秩序化による配向性ナノ構造体の開発と表面ドーピングによる高機能化	・ナノシート集積型ナノ構造体の形成・形態制御・機能発現における新たな学術的知見を創出 ・シングルナノ粒子に特異的に現れる量子性や高比表面積を利用することで、従来にないあるいは従来の機能を凌駕した0次元ナノ粒子集積型ナノ構造体の開発に成功
無焼成・低温焼成技術	08	藤 正督（名古屋工業大学 先進セラミックス研究センター 教授）	無焼成セラミックスプロセスの解析とそれに基づく革新的材料の創生	・メカノケミカル表面活性による固化メカニズムを解明 ・無焼成固化体を効率よく得るための原料設計指針を「二粒子間固体架橋強度の評価装置及びそれを用いた評価方法」として提示
	03	舟窪 浩（東京工業	非鉛圧電配向体の焼	・水熱法による配向体

		大学 物質理工学院 教授)	結しない低温作製法 の確立 ～ I o T セ ンサーおよびエネル ギーハーベスター応 用に向けて～	合成法の開発(マイク ロ波加熱による短時 間合成法、連続合成 法) ・水熱法独自の特徴を 有する電子セラミッ クスの提案
成形・焼 結・加工技 術	01	多々見 純一 (横浜 国立大学 大学院環 境情報研究院 教 授)	セラミックスプロセ スチェーン最適化を 目指した構造形成過 程のリアルタイム3 次元OCT観察法に よる理解とその制御 因子の科学的解明	・セラミックス構造形 成過程のリアルタイ ム3次元 OCT 観察法 の開発
	05	森 隆昌 (法政大学 生命科学部 教授)	セラミックススラリ ーの新規分散評価技 術を中心としたスラ リー特性の完全定量 化による湿式成形プ ロセスの高度化	・濃厚系スラリーの科 学的評価方法と評価 基準の提示 ・浸透圧測定装置や濡 れ性評価装置の開発 と普及
	09	堀井 滋 (京都先端 科学大学 工学部機 械電気システム工 学科 教授)	磁気科学プロセスに よる単結晶性セラミ ックスの創出	・連続プロセスに対応 した三軸磁場配向法 の開発
	04	山本 剛久 (名古屋 大学 大学院工学研 究科 教授)	フラッシュ焼結の学 理構築と革新的焼結 技術への展開	・AC 電界印加、緻密化 速度制御によるフラ ッシュ焼結法の確立 と接合等への応用展 開 ・フラッシュ焼結技法 のガイドライン作成 と実用化への手引き
	10	山村 和也 (大阪大 学 大学院工学研究 科 教授)	反応性プラズマを援 用したセラミックス 材料のダメージフリ ー形状創成・仕上げ加 工技術の開発	・反応性プラズマを援 用した「プラズマナノ 製造プロセス」の開 発と表面粗さ 10nm 程 度の研磨技術の実証 ・立形プラズマ援用研 磨装置の試作

(3) 個別の産学共同研究への発展状況

産学共創の場や学会発表等を通じて、各研究課題は企業との共同研究を積極的に進め、産業界の関心の高さが窺えた。企業との共同研究の詳細は機密情報につき公表できないが、可能な範囲でテーマ事後評価添付資料「6. 産学共同研究等への展開状況」に記載した。

代表的な産学協同研究への発展事例を以下、紹介する。

・課題番号 01 の「セラミックスプロセスチェーン最適化を目指した構造形成過程のリアルタイム3次元OCT観察法による理解とその制御因子の科学的解明」では、戦略的基盤技術高度化支援事業（サポイン事業）に、令和2年度に採択され「高機能ファインセラミックス用噴霧凍結造粒乾燥装置の研究開発」（研究実施期間：令和2～令和4年度）の研究を民間企

業と進めている。

https://www.kanto.meti.go.jp/annai/hodo/data/20200622sapoin_press.pdf

・課題番号 06 の「ナノブロック高次秩序化による配向性ナノ構造体の開発と表面ドーピングによる高機能化」では、NEDO「IoT 社会実現のための超微小量センシング技術開発（研究開発項目〔2〕超微小量センシング信頼性評価技術）に、令和元年度に採択され（研究実施期間：令和元年度～令和 5 年度）研究を進めている。

https://www.nedo.go.jp/koubo/EF3_100141.html

・課題番号 10 の「反応性プラズマを援用したセラミックス材料のダメージフリー形状創成・仕上げ加工技術の開発」では、JST A-STEP シーズ育成タイプ「大面積ダイヤモンド基板のダメージフリー平坦化・平滑化一貫プロセス技術の開発」に、平成 30 年度に採択され（研究期間：平成 30 年 10 月～令和 4 年 3 月）、企業との共同研究を進めている。

<https://www.jst.go.jp/pr/info/info1335/besshi1.html>

・課題番号 11 の「レイヤード結晶シェルによる“単一結晶面粒子”の創製とその超精密機能化」では、AMED に 2 件採択される等、基礎研究と共に、単一結晶面を有するコアシェル粒子の細胞に対する親和性等 DDS 担体としての有用性を確認し、その応用展開について企業との共同研究を行っている。特に、顕微インデント装置については、すでにベンチャーを創業しており、産業界の声を直接聞きながら進展させていく。本装置は、材料の種々の力学物性を正確かつ迅速に測定することのできるオンリーワンの装置であり、将来にわたって日本の材料開発における国際競争力を支えるイノベーションプラットフォームづくりに貢献できるものと期待する。

（４）技術テーマとしての成果を産業化に繋げるための方策・課題等

技術テーマとしての成果を産業化に繋げるための方策・課題等について、代表的な事例を以下紹介する。

・課題番号 01 の「セラミックスプロセスチェーン最適化を目指した構造形成過程のリアルタイム 3 次元 OCT 観察法による理解とその制御因子の科学的解明」では、OCT によるセラミックスの内部構造の動的観察は産業界からも高い期待が寄せられている。OCT 研究は、各企業の試料の評価を基本とする個別の競争領域の成果を得るための共同研究に発展しており、研究開発関連部署でのセラミックスプロセスの本質解明だけでなく、製造プロセスのインラインモニタリングへの展開等広く展開が可能となると考えられる。これを確固とするためには、現在の成果に基礎研究を積み上げて骨太のシーズとすることが重要であり、産学連携を生み出す産学の対話は本研究を発展させるために重要であり、プロジェクト終了後も、積極的に行って頂きたい。

・課題番号 02 の「セラミックス粉体の超微粉碎技術の確立と革新的粉体プロセスの開発」では、粉碎機器メーカー・ユーザーによって構成される、我が国唯一の粉碎に特化したコミュニティである一般社団法人日本粉体工業技術協会粉碎分科会と連携を提案した。第一回の情報交換会（平成 30 年 7 月）で本プロジェクトを紹介した結果、多数の要望が寄せられ、緊密に連携していくことになった。その一環として、平成 30 年 10 月にはシミュレーションの成果の一部を紹介した。シミュレーションツールは転動ミル、遊星ミルに対応しているが、さらに振動ミルや媒体攪拌型ミル等にも対応できるよう展開し、さらに産業界で使って頂き、その声を反映させてバージョンアップを図って頂きたい。

・課題番号 03 の「非鉛圧電配向体の焼結しない低温作製法の確立 ～ IOT センサーおよびエネルギーハーベスター応用に向けて～」では、低温作製法で、表面反応を用いるという水熱プロセスの特徴を利用した圧電体材料の製造に取り組んでいる。具体的には、圧電体/樹脂材料の複合体からなる軽量かつ柔軟性に富んだ圧電デバイスの創製（振動発電、感圧・超音波センサー等）、(Bi,K)TiO₃ 系等揮発成分を含んだ材料での圧電デバイス製造、複雑形状の素子から構成される圧電センサー/アクチュエーターデバイスの創製（レンズ型超音波トランスデューサ、バイオプリンタ用ヘッド素子、水中アクチュエーター駆動素子等）への展開を期待する。

・課題番号 04 の「フラッシュ焼結の学理構築と革新的焼結技術への展開」では、この研究課題で作成したフラッシュ焼結技法のガイドラインをもとに、フラッシュ焼結を実施できるプロトタイプの設備を作製し、試験装置が入手しやすくなれば、研究のすそ野が広がる。焼結装置メーカー、およびセラミックスメーカーとの共同研究を引き続き行い、本技術の産業化に繋げて頂きたい。

・課題番号 05 の「セラミックススラリーの新規分散評価技術を中心としたスラリー特性の完全定量化による湿式成形プロセスの高度化」では、新規分散評価法（沈降静水圧測定法、定圧濾過法、浸透圧測定法、濡れ性評価技術）は、スラリー工学研究所（法政大学）の活動を通して、より多くの企業に、実プロセスへの応用展開を図って頂きたい。特に、電池電極材料等の実プロセスへの応用の可能性については、2 社の企業の受託研究を通して、スラリーの評価・最適化を実施し、現場の技術者の視点からの評価を受け、分散状態をより統一的に表す「分散度」の指標の有効性を実証している。

・課題番号 06 の「ナノブロック高次秩序化による配向性ナノ構造体の開発と表面ドーピングによる高機能化」では、本技術テーマの期間中、共同研究 6 件、サンプル・ノウハウの提供 2 件、共同研究に向けて協議 9 件、を行っている（件数は実施済みも含む）。様々な展示会への出品（国際ナノテクノロジー総合展・技術会議、高機能セラミックス展（関西、および東京）、国際粉体工業展、次世代ものづくり基盤技術産業展、テクノブリッジフェア）を積極的に行い、シーズの提供は重要である。

・課題番号 08 の「無焼成セラミックスプロセスの解析とそれに基づく革新的材料の創生」では、産学共創の場等を通して、多くの企業との共同研究等のコネクション作りができ、これをさらに発展させている。セラミックス産業にこだわらず無焼成という技術のオリジナリティを発揮できる製品のアイデア発掘や性格の異なる企業（原料、製造、プラント）を組織して具体的な製品を造るためのコンソーシアムを構築し JST や NEDO プロジェクトに提案し、産業化に繋げて頂きたい。

・課題番号 10 の「反応性プラズマを援用したセラミックス材料のダメージフリー形状創成・仕上げ加工技術の開発」では、試作した形状加工用のプラズマ CVM 装置、ならびに表面仕上げ用のプラズマ援用研磨装置を用いて、各種材料の加工特性を論文等で発表、展示会への出展、ホームページへの掲載等を通じて広く発信すると共に、企業等から依頼されたサンプル加工を精力的に行い、実用化のための共同研究の実施へと展開して頂きたい。

（５）今後のプログラム運営への提言

A-STEP 産業ニーズのプログラムの設定に関して、5 年間の期間および予算額の総額はおお

むね妥当であった。多くの分担者からなり、それ自体でプロジェクトとみなせるような研究課題もあり、分担者で割ると予算額としては少ないにもかかわらず、真摯に取り組んで頂いた。提案された研究計画に伴う研究費に関し、初年度(平成 28 年度)は、提示された予算額の範囲内であったため、特別な変更を必要としなかった。しかし、2 年目以降、産学共創の場やサイトビジットでの提案による研究計画の変更に伴って発生する予算要求については、予算の許す範囲内で追加配分あるいは研究費の前倒しを行った。

サイトビジットは直接装置を見学しながら、問題点等の指摘が可能で大変有用な場であった。また、産学共創の場では、企業から率直な意見を(特にアンケート)頂き、研究の方向性の妥当性を検証する場にもなった。サイトビジットおよび産学共創の場での指摘に真摯に取り組み、計画の変更や参加機関の追加を含めて、研究計画の追加等が行われ、多くの研究課題で当初の計画を上回る成果が得られた。

産学共創の場では、企業研究者との接点が密に取れ、特に討論会終了後の意見交換会の場では具体的な共同研究につながったケースもあるように聞いている。また、大勢の場では具体的な研究内容に踏み込んだ議論が難しいという意見を基に、事務局の配慮で、4 年目の産学共創の場では、課題担当者に個別の打ち合わせができるような場を設けたのは好評であった。

新型コロナの影響で、最終年度はサイトビジット、産学共創の場、事後評価は全て on-line で行った。最終年度ということもあり、既に装置については知識を共有しているため、on-line により交通移動の時間が省略でき、サイトビジット等少人数の場合は却って on-site より良かったかもしれない。しかしながら、産学共創の場等は会場の雰囲気、また直接顔を合わせることが重要で、さらに予定していたポスターセッションも中止を余儀なくされ、それができなかった点では残念であった。

事務局の方々は、産学共創の場でのアンケートの集計と研究計画への反映、サイトビジットの日程調整、指摘事項の伝達等、迅速に対応して頂き大変感謝している。

9. 総合所見

産学共創の場合およびサイトビジットは、進捗状況の把握と研究計画の方向性について議論する場として、極めて有用であった。ここでは、アドバイザー間および課題担当者の意見が対立する場合もあった。この場合、両者の意見を尊重し、研究計画の変更、研究項目の追加、特定の専門分野の研究者の加入による研究体制の強化等、納得する解決方法をとるように努めた。また、中間評価時点までの目標は達成しており、A 評価としたが、本技術テーマの狙いである産業応用の基盤形成が不十分であり、残念ながら研究期間の延長は行わないと判断した課題も 2 件ある。

日本のセラミックス産業は、世界のセラミックス部材生産額の 4 割を占めており、今後も成長分野として発展が期待されている。特に、誘電体、磁性体、圧電体等の電子セラミックス分野、点火プラグ、酸素センサー等各種のセンサーは自動車用セラミックスとして、日本の電子産業機器や自動車産業の高い競争力を下支えしてきた。しかし、近年、電子産業分野では韓国、中国、台湾の追い上げが激しく、電子製品の多くは既に日本を追い越しており、電子セラミックス部材の技術の優位は保っているものの、その競争力を維持するには従来の職人芸に頼る研究手法では限界にきている。それを打ち破るサイエンスに裏打ちされた製造プロセスの革新が求められている。

また、経済産業省がまとめた「新産業構造ビジョン」において、現在を第 4 次産業革命と認識し、その先は 5.0 超スマート社会が到来するとしている。ここでは、人工知能や IoT の進展、各種センサー、アクチュエーター、発電素子等の高度化が期待される。一方、地球温暖化対策として、ゼロエミッションに対応した、自動車などの輸送機器、環境・エネルギー材料の研究開発は、世界で激しい研究開発競争が行われている。これらは、一企業が取り組むにはあまりにも大きな課題で、産学独が協力した取り組みが求められている。これを可能にするには、セラミックスプロセスの各要素における大学や公的機関が有する基盤技術の充実が不可欠である。

本技術テーマにおいて、産業競争力強化につながる顕著な例を、粉体作製・結合体化技術、無焼成・低温焼成技術、成形・焼結・加工技術、の要素技術毎に紹介した。特に、セラミックス製造工程における経験と勘に頼る手法から科学的知見に基づくアプローチを可能とした例として、①新しく OCT 観察法をブラックボックスとされてきたセラミックス製造プロセスにおける構造形成過程に適用し、乾式成形過程、スラリーの乾燥過程、脱脂過程および焼結過程等の科学的知見の深化に大きく寄与（多々見 PL）、②経験と勘に頼っていた濃厚系スラリーの評価を科学的に裏打ちされた評価指標により制御・管理できるようにした（森 PL）、③産業界では経験的に言われてきた「より微細に粉碎しコンタミを減らすための粉碎ボールの条件」を、シミュレーションと実験から明確にし、粉碎挙動を解析・予測するシミュレーションツールソフトをリリース（加納 PL）、が挙げられる。新規な製造プロセスの確立と新機能材料の提案例として、①実験室レベルの焼結法であったフラッシュ焼結法を交流電界の採用等により、複雑形状の均質な焼結体作製や接合にも適用可能な実用的な焼結・接合技術へ展開（山本 PL）、②電子セラミックスの作製法としては懐疑的であった水熱法を、焼結することなく低温で作製する手法として確立し、独自の特徴を有する電子セラミックスの提案（舟窪 PL）、等が挙げられる。また、本技術テーマに参加した研究者のうち、5 人が准教授から教授に昇格し、公的研究機関においては 4 人がグループリーダー等に昇格する等、人材育成にも効果があった。各研究課題間の連携、基礎基盤技術の普及による日本全体の技術力の高度化と拠点研究機関の形成、新たな学理の構築、これらを核とした企業との共同研究を通して、多くのセラミックスの高機能化と製造プロセスの革新が達成され、新たな産業創出にも繋がることを期待する。

以上