

---

# グリーンソサエティーを実現する 3D先端材料プロセス

---

2018年度～2021年度法政大学研究プログラム  
研 究 成 果 報 告 書

2022年5月

法 政 大 学  
サステナビリティ実践知研究機構  
マイクロ・ナノテクノロジー研究センター  
研究代表者 センター長・石垣 隆正  
(法政大学 生命科学部 環境応用化学科・教授)

# 目 次

|                                     |    |
|-------------------------------------|----|
| マイクロ・ナノテクノロジー研究センターの研究展開<br>.....   | 1  |
| 自己評価の実施結果と対応状況.....                 | 5  |
| 外部（第三者）評価の実施結果.....                 | 7  |
| 研究成果概要 .....                        | 9  |
| シンポジウムの開催報告                         |    |
| ・ 成果報告会（2022 年 1 月 22 日） .....      | 62 |
| セミナー等の開催報告                          |    |
| ・ グリーンテクノロジーセミナー（第 1～12 回）<br>..... | 64 |

## マイクロ・ナノテクノロジー研究センターの研究展開

法政大学マイクロ・ナノテクノロジー研究センターは、文部科学省の「私立大学学術研究高度化推進事業」ハイテク・リサーチ・センター整備事業に採択されたのを受けて、2003 年度に設立されました。以来、本研究センターは、法政大学の「自由と進歩」の建学の精神の基に、従来の技術の限界を超える可能性のある新技術の 1 つとして、ナノテクノロジーを根幹の共通技術として精力的な研究を行ってきました。2016 年 4 月、法政大学にサステナビリティ実践知研究機構が設立され、本研究センターは、サステナビリティ実践知研究機構マイクロ・ナノテクノロジー研究センターとして科学・技術研究を推進する重要な役割を果たしています。

文部科学省の「私立大学学術研究高度化推進事業」ハイテク・リサーチ・センター整備事業では、ナノテクノロジーを根幹の共通技術として、3 つの研究プロジェクト、「高機能ナノマテリアルおよびマイクロ・ナノメカトロデバイスの研究」、「耐環境ナノ電子デバイスの研究」、「生命情報と生体機能のナノバイオロジー」を中心に精力的な研究を行いました。

2008 年度からは、「マイクロ・ナノテクノロジーによる細胞内部操作技術と生体機能模擬技術の開発」をテーマとした研究が、文部科学省の「私立大学戦略的研究基盤形成支援事業」に採択され、5 年間の研究開発を行いました。

2013 年度からは、「グリーンテクノロジーを支える次世代エネルギー変換システム」を研究テーマとした研究が、前プロジェクト同様、「私立大学戦略的研究基盤形成支援事業」に採択され、新たなステップを踏みだしました。このグリーンテクノロジープロジェクトでは、産業の発展と住み良い社会が両立した持続可能社会を実現するために、エネルギー問題を解決し、限りある資源を有効利用する成果を発信しました。3 つの基本テーマ、「エネルギー獲得・低環境負荷技術の開発」、「資源再生利用・環境浄化技術の開発」、および「プラント実現のためのエコソリューション技術の活用」に関する研究開発を行ってきました。安全、安心に人類が生活できる社会環境を形成保持し、産業の発展と住み良い社会の実現の持続可能社会を実現するために、エネルギー問題を解決し、限りある資源を有効利用することを目指しました。

2018 年度より本研究センターの新たな方向として学内研究プロジェクト、「グリーンソサエティーを実現する 3D 先端材料プロセス」を遂行し、「A: Additive Manufacturing」、「B: Biologically mediated (inspired) Control」、「C: Chemically mediated Control」という 3 つの基本テーマのもと研究を進めました。先立つ 5 年間で培われたグリーンテクノロジー技術を活用して、安全、安心に人類が生活できる社会環境を形成保持し、産業の発展と持続可能なグリーンソサエティーの形成をめざしました。エネルギー枯渇問題、環境問題の解決、さらに、資源再生利用技術を確立して、循環型社会の創出に資する多くの成果を発信することができました。

2022 年度からは「ポストコロナのサステナブルな社会実現に資する 3D 先端材料プロセス」に関する研究プロジェクトを開始します。優れた潜在能力を有する学生による研究に最先端の研究設備を有効に活用し、得られた研究成果を学部・大学院での教育に反映させます。この展開を通して、本学理工系ブランドの中心となることを目指します。

# マイクロ・ナノテクノロジー研究センター

(2003年度設立)

Research Center for  
**Micro-Nano  
Technology**

法政大学マイクロ・ナノテクノロジー研究センター

## ナノテクノロジーを根幹とする 共通技術の開発;

高機能ナノマテリアルの開発  
マイクロ・ナノメカトロデバイスの研究  
分散型耐環境ナノ電子デバイスの研究  
生命情報と生体機能のナノバイオロジー

2004年6月26日(日経・朝刊)

法大がナノテク  
研究拠点を開設  
東京都小金井市に  
法政大学は超微細加工  
技術(ナノテクノロジー)  
の研究拠点(法政大学マ  
イクロ・ナノテクノロジー  
研究センター)を東京  
都小金井市に開設した。  
新素材開発やICの微細  
化技術の確立に取り組  
む。拠点内に法大の技術  
移転機関(TLO)を設  
置する構想もあり、企業  
との共同研究や研究成果  
の産業界への移転にも取  
り組む。

化学  
機械  
電気  
バイオ

HOSEI

## 文部科学省の研究プロジェクトの推進

・文部科学省「私立大学学術研究高度化推進事業」ハイテク・リサーチ・センター整備事業  
**ナノテクノロジーを根幹とする共通技術の開発**;(2003~2007年度)

・「**マイクロ・ナノテクノロジーによる細胞内部操作技術と生体機能模擬技術の開発**」

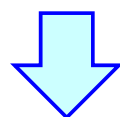
(文部科学省「私立大学戦略的研究基盤形成支援事業」、2008~2012年度)

細胞内手術のために重要なナノバイオデバイスの創製;細胞内物質輸送、細胞内環境  
観測、細胞内局所物質導入などのシステム。

・「**グリーンテクノロジーを支える次世代エネルギー変換システム**」

(文部科学省「私立大学戦略的研究基盤形成支援事業」、2013~2017年度)

エネルギー獲得・低環境負荷技術の開発、資源再生利用・環境浄化技術の開発、プラ  
ント実現のためのエコソリューション技術の活用に関する研究開発。



## ブランディングの形成

3期15年にも及ぶマイクロ・ナノテクノロジー分野の研究成果は  
社会的にも広く周知・評価され、ブランド力を構築してきた。

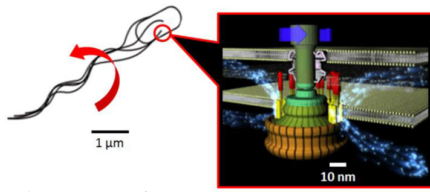


# 「グリーンテクノロジーを支える次世代エネルギー変換システム」

(2013～2017年度)

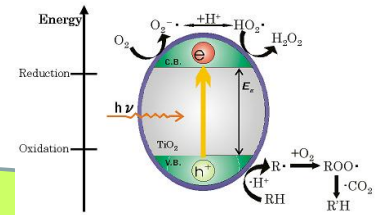
## 持続可能な社会の実現

人類・自然環境  
社会貢献



分子モーター

## 環境浄化光触媒



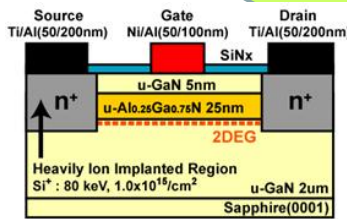
## エネルギー獲得技術の開発

マイクロ電池  
太陽電池  
光合成、分子モーター  
エンジン浄化触媒

## 資源再生利用技術の開発

バイオマス  
細菌応答  
環境浄化光触媒

## マイクロポンプ



省エネデバイス

## エコソリューション技術の開発

マイクロプラットフォーム  
マイクロクーリング  
マイクロターボ

マイクロ・ナノテクノロジー研究センター15年で得られた成果のブランド発信  
(研究成果・人的ネットワーク)

2017年度でその研究期間を終了したグリーンテクノロジープロジェクトの後に、私立大学戦略的研究基盤形成支援事業の後継事業である「私立大学研究ブランディング事業」への2018年度申請を行うための準備を進めた。

プロジェクトタイトルを「グリーンソサエティを実現する3D先端材料プロセスの発信」として、マイクロ・ナノテクノロジー研究で得られた成果を社会実装することにより本学理工系発のブランドとして社会に発信することを目的とした。しかしながら、2018年4月12日付の文科省の通知により、2017年度に同事業に採択された課題を有する法政大学からは本事業への申請ができないことになった。

**グリーンソサエティを実現する**  
**“ABC+3D”先端材料プロセスの発信**  
2018年度から学内プロジェクトとして活動開始

# グリーンソサエティ

グリーンテクノロジー技術を活用する社会：  
安全、安心に人類が生活できる社会環境を形成  
保持し、産業の発展と持続可能な社会。

エネルギー枯渇問題、環境問題の解決、さらに、  
資源再生利用技術を確立して、循環型社会の創  
出に資する技術発展。

法政大学サステナビリティ実践知研究機構 マイクロ・ナノテクノロジー研究センター

## グリーンソサエティを実現する “ABC+3D”先端材料プロセスの発信

### Additive Manufacturing

- 「マルチマテリアル3Dプリンティングによる高機能スマート機械部品の実現」(理工・御法川 学)
- 「高度積層造形技術を実現する超高精度デジタル直接制御技術の開発」(理工・安田 彰)
- 「製品製造に適した革新的な多次元制御方式による積層造形技術の開発」(理工・田中 豊)
- 「3D先端材料プロセスを活用したターボ機械の新たな高性能化技術の開発」(理工・辻田 星歩)
- 「付加積層技術を用いた3D複雑形状を有する多機能セラミックス系傾斜機能構造体の作製」(理工・塚本 英明)

### Biologically mediated (inspired) Control

- 「心筋細胞ネットワークによる心臓3D構造の再構成」(生命・金子 智行)
- 「細菌胞子の積層構造の解析と応用」(生命・佐藤 勉)
- 「生物ナノマシン設計原理の理解と新機能付加」(生命・曾和 義幸)
- 「光合成装置の安定化の研究」(生命・水澤 直樹)
- 「細菌由来の人工機能を付加した新規加工材料の開発」(生命・山本 兼由)
- 「ナノ構造を制御した無機イオン交換体を用いた新規土壌浸透浄化システムの開発」(生命・渡邊 雄二郎)
- 「高機能生物設計-人工内耳・神経補綴装置」(理工・鳥飼 弘幸)

学部・学科を越えた  
連携

### Chemically mediated Control

- 「セラミック粒子の積層実装による合金の表面改質プロセスの開発」(生命・明石 孝也)
- 「マイクロ・ナノ構造体中の有機-無機ハイブリッド化合物の物性制御とエネルギーデバイスへの応用」(生命・緒方 啓典)
- 「酸化物・水酸化物微粒子の3D構造制御合成と環境・エネルギー材料への応用」(生命・石垣 隆正)
- 「光反応型ソフトマテリアルの開発」(生命・杉山 賢次)
- 「高耐圧GaN縦型p-n接合ダイオードの開発・評価」(イオンビーム・三島 友義)
- 「シリコン量子ドット発光材料の高効率生成プロセスの開発」(理工・中村 俊博)

## ＜自己評価の実施結果と対応状況＞

本学大学評価室による自己点検評価の総評と当センターの対応は以下の通りである。

2018 年度の大学評価委員会報告書には、「マイクロ・ナノテクノロジー研究センターは、2003 年の設立以来、大型の競争的資金を原資として研究が進められ、2017 年度をもって 5 年間の研究プロジェクトが終了した。プロジェクト期間中の研究活動の活発さ、第三者評価をはじめとした質の点検・保証への取り組み、研究員同士の連携、外部機関との連携など、研究プロジェクトや研究センターに求められ、また期待される大半の活動要素を、質・量ともに高いレベルで遂行してきたことは高く評価できる。しかし 2018 年度は大型の競争的資金が欠け、ポストドクターが雇用できない状態での運営となるため、早期の大型資金確保に向けて、研究員の総力の結集を期待したい。」との所見があった。この評価に対する対応は以下の通りである。文科省補助金、私立大学戦略的研究基盤形成支援事業の後継事業である「私立大学研究ブランディング事業」への 2018 年度申請を行うための準備を進めたが、文科省の通知により、同事業に法政大学からの申請ができないことになった。2018 年度からは、学内プロジェクトとして、「グリーンソサエティーを実現する 3D 先端材料プロセス」の研究を進め、文科省の後継事業への申請の準備とした。また、競争的外部資金の獲得をめざして、比較的大型の外部資金への申請を積極的におこなった。

2019 年度の大学評価委員会報告書には、「マイクロ・ナノテクノロジー研究センターは、設立以来、研究が積極的に推進されてきた。2018 年度から新たな学内プロジェクトの研究が進められたことは評価できる。更に、対外的なセミナーが開催され、研究成果が数多くの論文や学会等において発表されたことは、高く評価できる。センターでの研究が社会的評価を受けていることも忘れてはならず、こちらも高く評価できる。今後の課題としては、中期目標に掲げられている社会連携・社会貢献に対する取り組みが挙げられる。今後の学内外に向けた活動展開に期待したい。」との所見があった。この評価に対する対応は以下の通りである。文科省の私立大学助成の大型研究資金に関しては、プログラムの募集が途切れた。センターとしてのポストドクターの雇用ができなかったにもかかわらず、研究が活発に行われたことを示した。社会連携・社会貢献に対する取り組みのため、第 1 回法政科学技術フォーラム、当学外展示会に出展した。公開セミナーであるグリーンソサエティーセミナーの学外への開催通知を積極的に行い、外部参加者の増加に努めた。

2020 年度の大学評価委員会報告書には、「社会連携・社会貢献に対する取り組みとしては、法政科学技術フォーラム、学外展示会に出展したことを高く評価する。また、研究成果の効果的アピールは特に高く評価できる。研究活動を遂行しつつ、積極的に外部資金の獲得をめざしながら、学部生・院生の教育、研究の場として活用するという目標は極めて重要と判断する。年報の定期的刊行、ホームページの継続的な更新を行うとともに、公開型セミナーやシンポジウムを積極的に開催するという目標設定は、研究成果を広く一般の人たちに公開する重要な活動と考える。」との所見があった。この評価に対する対応は以下の通りである。

競争的大型資金の獲得をめざし、比較的大型の外部資金への応募申請を積極的に行った。COVID-19の影響による研究活動の制限下、論文発表は過去5年間の高い水準を維持し、メディアから注目される発表もあった。社会連携・社会貢献に対する取り組みのため、オンライン開催された第2回法政科学技術フォーラム、外部の産学連携事業における講演を積極的に行った。公開セミナーであるグリーンソサエティーセミナーを開催では、講演会場における「三密」を避けるためセミナーをオンライン開催し、学内参加、学外者参加の人数が大幅に増加した。

2021年度の大学評価委員会報告書には、「マイクロ・ナノテクノロジー研究センターの陣容・規模を勘案すれば、学術論文・講演などの研究発表、外部資金の獲得はきわめて多数かつ高水準を維持しており高く評価される。年報は定期的に刊行され、公開セミナーや法政科学技術フォーラムでは経年的な改善が続けられ発展的に継続されている。明快に位置づけられた研究戦略の下で活動を展開するという大学の付置研究センターとして理想的な運営形態をとっており、ミッション再定義が継続的かつ実質的に進められている。当センターの活動目標は国の科学技術戦略と整合しており、各分野をリードする学内教員から編成された研究組織によって物理－生物－化学を横断するマイクロ・ナノテクノロジーの学術体系化が進められ、当センターの整備・充実は早い段階に完了するものと期待される。一方、センター自身が目指す重要なミッションの一つとして、社会貢献・連携をより実質化するためには、当センターの全体像や研究体系を学外に発信すること、公開セミナーへの一般からの参加者をさらに増加することなどが課題として上げられる。マイクロ・ナノテクノロジーの日常生活・社会への実装、平易な用語によるマイクロ・ナノテクノロジーの広報のために一般市民を対象としたコンテンツをHPに追加したり、市民セッションを意識したコンテンツを公開型セミナーに追加したりなどの策を講じることを期待したい。」との所見があった。この評価に対する対応は以下の通りである。学内プロジェクトとして2018年度から4年間取り組んできた「グリーンソサエティーを実現する3D先端材料プロセス」の最終年度のまとめを行った。論文発表は過去5年間の高い水準を維持した。学術雑誌に発表した多くの論文が引用され、引用数がさらに増加した。外部資金の獲得件数も多く、研究の発展に寄与した。プロジェクトの終了にあたり、2022年3月に外部評価委員に依頼して第三者評価を受けた。情報発信を確実にするため、ホームページの表現の統一をはかった。プロジェクト内の連携、研究経過の発信、外部連携を目的として定期的に開催している公開セミナーに加えて、公開シンポジウムを行った。開催の学外周知に関して検討を行い、近隣機関、センター員の関係する外部教育・研究機関へのポスター送付とともに、オンライン開催の参加者増加を意図して電子メールによる情報発信を行い、一定の成果を得た。また、公開シンポジウムでは、学外からの一般参加者の興味を引くコンテンツとして、科学技術と社会・市民のつながりを意識した平易な言葉による市民プログラムを加えた。

## ＜外部(第三者)評価の実施結果＞

プロジェクトの終了にあたり、2022 年 3 月に外部評価委員に依頼して、第三者評価を受けた。評価委員（敬称略）：吉田和弘（東京工業大学／科学技術創製研究院 教授）、重岡成（近畿大学／付属農場 農場長・特任教授・評議員）、真庭豊（神奈川大学／工学研究所 客員教授）。

### 評価報告のまとめ

#### 1. 研究目標

- ・よく考えられている。

社会に強く要請されているグリーンソサエティーを実現するための研究目標を設定したもので、妥当なものと評価する。様々な大きさ・階層の3次元（3D）構造体を作り、現代社会が直面する重要課題に挑戦する興味深い研究プロジェクトである。持続可能な社会形成を大目標として、エネルギーや環境問題、そして持続可能な循環型会の創出を目指すものであり、基礎、応用および実学的な研究視点から推進できる目標設定となっている。特に、個々のテーマにおいて、新規性・先導性そして独自性も認められる研究内容となっており、評価に値する。

#### 2. マネジメント（研究組織、基本テーマ間連携、外部との共同研究の有効性）

- ・よく考えられている。

多岐にわたる分野の教員を兼任研究員とし、研究分野を「Additive Manufacturing」、「Biologically Mediated (inspired) Control」、「Chemically Mediated Control」に分類し、多角的に研究を進める実施体制は有効であると評価する。大きな3つのテーマに、理系三学部から広範かつバランスよくメンバー構成がなされ、研究が遂行している。グリーンソサエティーというキーワードで、専門分野的には、かなり広い範囲での研究内容であり、テーマを超えての協力は、かなり難しいとも思えるが、一方で、お互いを意識しながら、テーマそして個々のメンバーで確実に成果を挙げていく研究体制となっていると思われる。2020年からのコロナ禍にて、研究室の維持・管理（卒論生、院生の 指導）、成果発表の仕方など、多面に渡り、これまでと根本的に異なる体制での取り組みとなり、個々にプロジェクトの目標達成に真摯に取り組んでいる姿勢は、評価に値する。期間内でのセミナーの開催もオンラインも含めて、コンスタントに開催されている。セミナーや研究への多数の学生の参加がみられ、有用な教育効果があったものと推測される。企業との共同研究もおこなわれている。また、今後の共同研究の可能性に期待できる成果が得られている。

#### 3. アウトプット

- ・平均的水準より優れる。（論文、学会発表等の直接の成果。）

3つのテーマにおいて、バランスよく論文、発表（特に国際学会）がなされている。論文として、レベルの高い、かつ注目度の高い内容の発表があり、特許申請された研究成果も見

受けられ、平均的水準より優れた研究成果をあげているものと評価する。個々のメンバーにおいて、大学院生による多くの研究発表、学会での成果発表がなされており、特に後半のコロナ禍での実績としても大いに評価できるものである。得られた基礎的な成果は、それらの利活用としての応用面を強化し、世の中にもっとアピールすることを期待する。

4. 総合評価（研究全体に対する総合的な所見を記入して下さい。また、その他のアウトカム、波及効果など、上記設定評価項目に含まれないその他の評価ポイントがあれば追加してコメントして下さい。）

- ・総合的に優れている。目標は十分達成された。

本プロジェクトは、現代社会が直面する問題を解決する、新規性質をもつ3D構造材料を目指して、3D構造材料創製プロセスを開発することであると理解した。多岐にわたる分野の教員を結集し、これまでの研究プロジェクトの成果を基に発展させ、社会に強く要請されているグリーンソサエティーを実現するための研究目標を設定し、高く評価されたものを含む多くの研究成果をあげ、学術論文、学会発表等で積極的に公表している。開発された新しいプロセスは、さまざまな方向へ展開可能と思われ、今後、3D構造制御によりどのような材料が創製されるのか大変興味深い。その成果には、社会的に大きなインパクトを与えうる可能性も感じられ、さらなる展開に期待したい。学生への教育効果も評価できる。グリーンソサエティセミナーおよび公開シンポジウムによる情報収集、情報発信を行っており、社会への波及効果が期待できる。したがって、総合的に優れており、目標は十分に達成されたと評価する。本プロジェクトの研究成果は、基礎から応用までの範囲に及ぶものであるが、一部の研究では、今後の展望、副次的効果とは、まだ距離のあるある成果が見受けられるのも事実である。本プロジェクトの基本姿勢である、社会への還元・寄与という視点から、得られた基礎的な成果から、実学的研究へ、そして社会実装へと進展することを重視し、それに対応できる研究メンバーで、次のプロジェクトへと進まれることを期待する。SDGs的な思考、すなわち持続可能な取組を計画段階から強く意識して、得られた成果が社会貢献に繋がるかということを常に目標とする設定、アプローチを前面に出して強く推進していく必要があると思われる。今後、研究テーマ間、研究員間の連携の充実により、本研究センターの組織の特徴を活かした、より一層の成果が期待できる。

## 担当テーマと研究分担者

### **Additive Manufacturing**

- ・マルチマテリアル 3D プリンティングによる高機能スマート機械部品の実現  
チーフ・御法川 学（理工学部 機械工学科・教授）
- ・高度積層造形技術を実現する超高精度デジタル直接制御技術の開発  
安田 彰（理工学部 電気電子工学科・教授）
- ・製品製造に適した革新的な多次元制御方式による積層造形技術の開発  
田中 豊（デザイン工学部 システムデザイン学科・教授）
- ・3D 先端材料プロセスを活用したターボ機械の新たな高性能化技術の開発  
辻田 星歩（理工学部 機械工学科・教授）
- ・付加積層技術を用いた 3D 複雑形状を有する多機能セラミックス系傾斜機能構造体の作製  
塚本 英明（理工学部 機械工学科・教授）

### **Biologically mediated (inspired) control**

- ・心筋細胞ネットワークによる心臓 3D 構造の再構成  
金子 智行（生命科学部 生命機能学科・教授）
- ・細菌胞子の積層構造の解析と応用  
佐藤 勉（生命科学部 生命機能学科・教授）
- ・生物ナノマシン設計原理の理解と新機能付加  
曾和 義幸（生命科学部 生命機能学科・教授）
- ・光合成装置の安定化の研究  
水澤 直樹（生命科学部 生命機能学科・教授）
- ・細菌由来の人工機能を付加した新規加工材料の開発  
チーフ・山本 兼由（生命科学部 生命機能学科・教授）
- ・ナノ構造を制御した無機イオン交換体を用いた新規土壌浸透浄化システムの開発  
渡邊 雄二郎（生命科学部 環境応用化学科・教授）
- ・高機能生物設計—人工内耳・神経補綴装置  
鳥飼 弘幸（理工学部 電気電子工学科・教授）

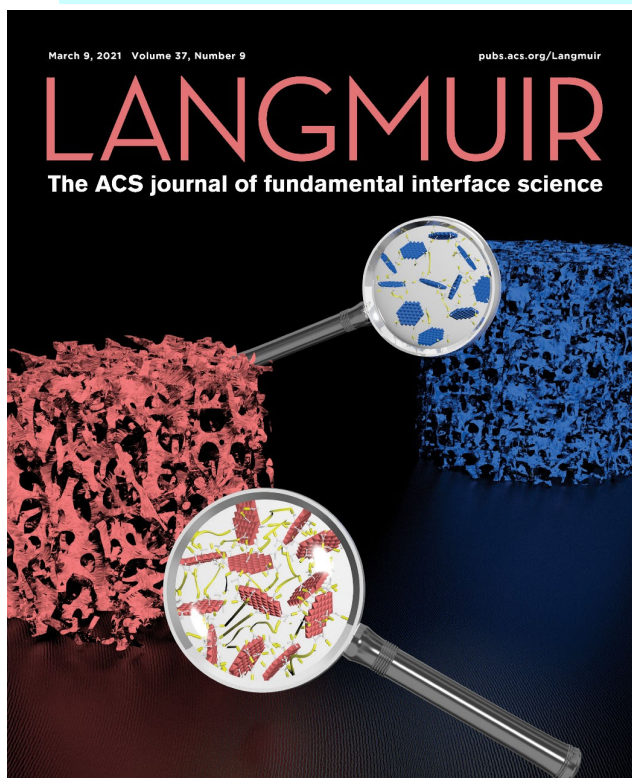
### **Chemically mediated control**

- ・セラミック粒子の積層実装による合金の表面改質プロセスの開発  
明石 孝也（生命科学部 環境応用化学科・教授）
- ・マイクロ・ナノ構造体中の有機-無機ハイブリッド化合物の物性制御とエネルギーデバイスへの応用  
チーフ・緒方 啓典（生命科学部 環境応用化学科・教授）
- ・酸化物・水酸化物微粒子の 3D 構造制御合成と環境・エネルギー材料への応用  
石垣 隆正（生命科学部 環境応用化学科・教授）

- ・ 光反応型ソフトマテリアルの開発  
杉山 賢次（生命科学部 環境応用化学科・教授）
- ・ 高耐圧 GaN 縦型 p-n 接合ダイオードの開発・評価  
三島 友義（イオンビーム工学研究所・教授）
- ・ シリコン量子ドット発光材料の高効率生成プロセスの開発  
中村 俊博（理工学部 電気電子工学科・教授）



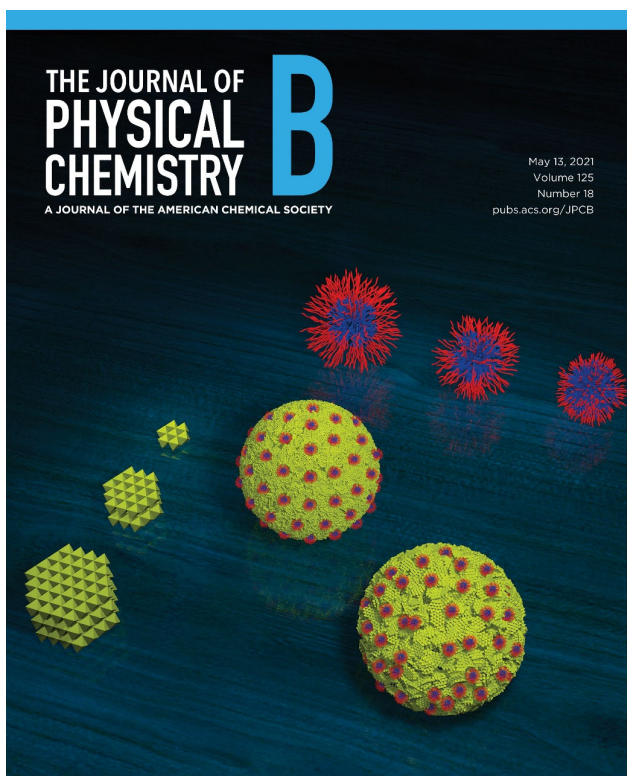
著名なJournalの表紙に取り上げられました。



ACS Publications  
Most Trusted. Most Cited. Most Read.

*Langmuir*, **37**, 2884-2890(2021).

www.acs.org



ACS Publications  
Most Trusted. Most Cited. Most Read.

*J. Phys. Chem. B*, **125**, 4883-4889(2021).

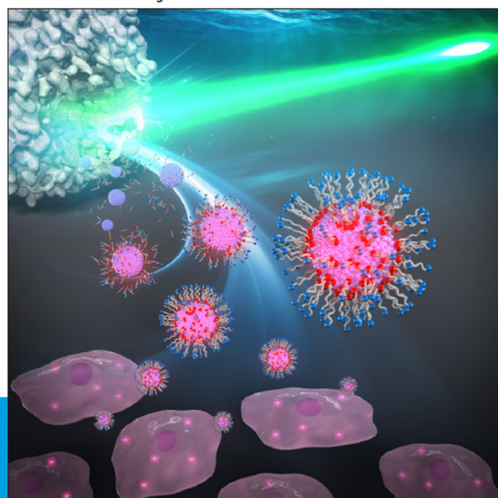
www.acs.org



**CHEMNANOMAT**

CHEMISTRY OF NANOMATERIALS FOR ENERGY, BIOLOGY AND MORE

www.chemnanomat.org



9/05  
2019

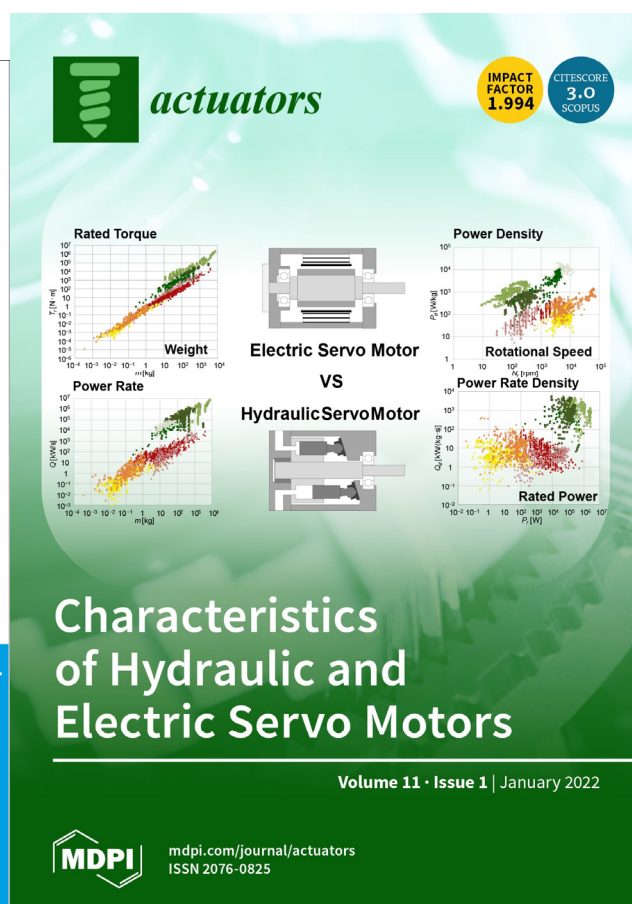
A Journal of  
**ACES**  
Asian Chemical  
Editorial Society

A sister journal of Chemistry – An Asian Journal  
and the Asian Journal of Organic Chemistry

Front Cover:  
Toshihiro Nakamura et al.  
Facile Formation of Stable Water-Dispersed Luminescent Silicon  
Nanocrystals by Laser Processing in Liquids Toward Fluorescent  
Labeling for Bio-imaging

WILEY-VCH

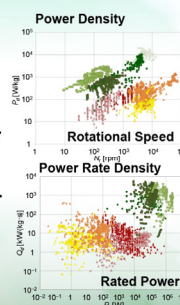
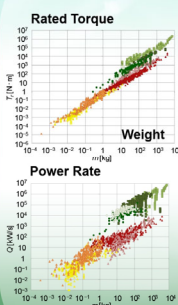
*ChemNanoMat*, **5**, 1137-1143 (2019).



**actuators**

IMPACT  
FACTOR  
1.994

CITESCORE  
3.0  
SCOPUS



Characteristics  
of Hydraulic and  
Electric Servo Motors

Volume 11 · Issue 1 | January 2022

MDPI

mdpi.com/journal/actuators  
ISSN 2076-0825

*Actuators*, **11**, 00011 1-18 (2022).



# Photo-electro-chemical deep trench etching in GaN

Researcher hope for new device structures for power electronics, achieving trenches with 7.3 aspect ratio and 24.3µm depth.

**S**CIOS Co Ltd and Hosei University, both of Japan, have reported progress in using photo-electro-chemical (PEC) etching for deep high-aspect-ratio trenches in gallium nitride (GaN) [Fumimasa Horikiri et al, Appl. Phys. Express, vol11, p091001, 2018]. The team hopes that the technique will open up new device structures for power electronics, using GaN's high breakdown field and high electron drift velocity in high fields. Deep etching is needed to create 'superjunction' structures with columns of p- and n-type material that, when incorporated into lateral field-effect transistors, enable breakdown voltages of more than 10kV. Vertical devices can also benefit from superjunction drift regions and other deep-etched structures. High-quality fast etch-rate processes are also desired for ridge fabrication of laser diodes, wafer-dicing applications, and micro-electro-mechanical systems (MEMS). PEC has already been applied to mesa, gate-recess, and vertical-cavity surface-emitting laser (VCSEL) fabrication processes.

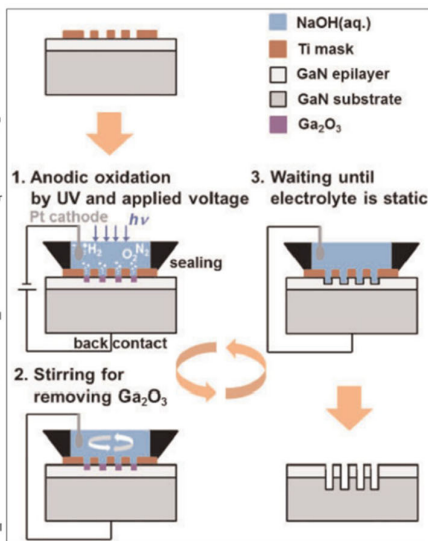


Figure 1. PEC etch scheme.

According to Horikiri, the work was supported by a big budget from Japan's Ministry of the Environment.

semiconductor TODAY Compound & Advanced Silicon • Vol. 13 • Issue 8 • October 2018

www.semiconductor-today.com

**Semiconductor TODAY**  
2018年8月

## Perfecting trenches in GaN with photo-chemical etching

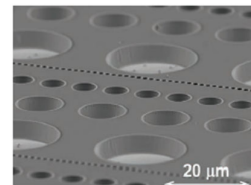
Photo-chemical etching of GaN yields deep trenches with smooth sidewalls and a high aspect ratio

A VERY PROMISING architecture for GaN power devices is the vertical superjunction. Simulations suggest devices with this design, which sports p-n columns, can combine a very high breakdown voltage with a minimal on-resistance.

Fabrication of a GaN superjunction device has not followed, due to the lack of a process to produce trenches in the n-type layer with an aperture of a micron or so, and an aspect ratio of more than ten – but this could now change, thanks to the development of a process for GaN photo-chemical etching by a partnership in Japan between SCIOS and Hosei University.

This collaboration uses a sodium hydroxide electrolyte to etch GaN at a rate of about 25 nm/min. The trenches that result have smooth sidewalls, a depth that can exceed 20 µm, and an aspect ratio of more than seven. After using the process developed by this team.

Photo-chemical etching produces circular trenches with a depth of 7.7 µm and diameters of 1 µm, 5 µm, 10 µm and 20 µm in GaN Schottky barrier diode epilayers.



completion of superjunction devices could be realised by backfilling the trenches with HVPE-grown GaN, which can provide p-type conduction without the need for a magnesium activation process.

GaN can also be etched with an inductively coupled plasma. But, according to the team, this is not suitable for forming deep, narrow and uniform trenches in GaN. That's because it causes damage to the material, and there is low etching sensitivity between the GaN and the etching mask.

Switching to either neutral-beam etching or atomic-layer etching eliminates the damage caused by the plasma, but etching rates are too low for forming deep trenches. The team developed and refined its process by etching

trenches in free-standing, 2-inch GaN substrates with epitaxial structures for Schottky barrier diodes (a 5.8 µm-thick layer of n-type GaN doped with silicon to a level of  $1.5 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ ) and p-n junction diodes (formed by growing a 2 µm-thick n<sup>+</sup> interlayer in GaN, followed by a 10 µm-thick n drift layer, doped with silicon to a level of  $2 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ ; and then 500 nm-thick and 20-nm thick layers doped with magnesium to levels of  $5 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$  and  $2 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ , respectively). To form an etching mask, 50 nm-thick layers of titanium were deposited by vacuum evaporation, before electron-beam evaporation and lift-off enabled selective removal of material.

To form the trenches, the engineers etched GaN in a 0.01M sodium hydroxide solution, using a platinum counter electrode for the cathode and the GaN epitaxial surface for the anode. Etching took place using a 1 V bias between the anode and cathode, under illumination of 9 mW/cm<sup>2</sup>, provided by a mercury-xenon lamp.

The team found that etching at 24.9 nm/minute produced a smooth surface, but at 175.5 nm/minute, it gave a rough etched surface. However, the rough surface would still be acceptable for wafer-dicing.

Corresponding author Fumimasa Horikiri says that the team's process is almost optimised for obtaining flat etched surfaces for Schottky barrier diodes. "From the view point of the etching rate, I think that it can be improved about two order magnitude." This can be done, to propel etching rates to speeds comparable with dry etching, by replacing the 0.01M solution of sodium hydroxide with a 1M variant.

Horikiri and his co-workers have etched a variety of trenches in both types of epilayer (see Figure for an example). Their highest aspect ratio of 7.3 came from a trench with a 3.3 µm width and a depth of 24.3 µm.

One of the next goals for the team is to scale up its set-up for photo-electrochemical etching so that it is suitable for processing 2-inch to 4-inch wafers. "We will [also] demonstrate that this technique has capability for N-polar face selective etching or wafer dicing," added Horikiri.

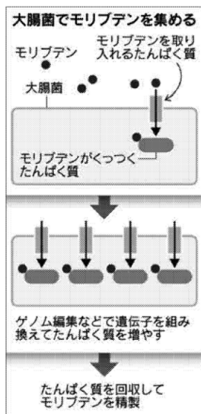
**COMPOUND SEMICONDUCTOR**  
Connecting the Compound Semiconductor Community

60 WWW.COMPOUNDSEMICONDUCTOR.NET | OCTOBER 2018 | COPYRIGHT COMPOUND SEMICONDUCTOR

**COMPOUND SEMICONDUCTOR**  
2018年10月

## レアメタルためる大腸菌

法政大、ゲノム編集などで作製



**金属回収、簡単・効率的に**  
レアメタルは埋蔵量が少なく、採掘が難しく、環境への影響も大きい。法政大学の山本康由教授らは、レアメタル（希土類）であるモリブデンを蓄積する能力が高い大腸菌を培養し、そこからモリブデンを回収する技術を開発した。この技術は、レアメタルの回収に大きく貢献する。また、ゲノム編集などによって遺伝子を組み換え、大腸菌がレアメタルを蓄積する能力を高めることも可能である。

大腸菌は、レアメタルを蓄積する能力が高い。この能力は、ゲノム編集によって強化できる。また、ゲノム編集によって、大腸菌がレアメタルを蓄積する能力を高めることも可能である。この技術は、レアメタルの回収に大きく貢献する。また、ゲノム編集によって、大腸菌がレアメタルを蓄積する能力を高めることも可能である。

レアメタルは、レアメタルを蓄積する能力が高い。この能力は、ゲノム編集によって強化できる。また、ゲノム編集によって、大腸菌がレアメタルを蓄積する能力を高めることも可能である。この技術は、レアメタルの回収に大きく貢献する。また、ゲノム編集によって、大腸菌がレアメタルを蓄積する能力を高めることも可能である。

**日経産業**  
2018年5月16日

## 読売新聞 オンライン

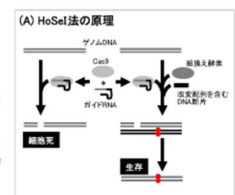
ニュース

ニュースリリース

**新しいゲノム編集技術HoSel法を開発 – HoSel法により細菌適応増殖は複数遺伝子が相互作用するエピスタシス現象であることを実証 – 法政大学**

2020年2月28日

本学生命科学部・理工学研究科・マイクロナノテクノロジー研究センターの山本康由教授、三宅裕司准教授（理工学研究科生命機能学専攻）は、ゲノム上の複数遺伝子の相互作用を解析する新しいゲノム編集技術HoSel（Homologous Sequence Integration）法を開発し、環境に適合した細菌の増殖（適応増殖）がゲノム上の複数遺伝子が関与するエピスタシス現象であることを、大腸菌をモデルに実証しました。開発したHoSel法は、抗生物質耐性遺伝子などの生物由来の遺伝子マーカーを利用しない高い安全性、ゲノム上のDNA配列において一塩基レベルでの改変、繰り返し行うことでゲノム上に複数の改変導入の3つの特徴をもちます。HoSel法は、細菌や古細菌の基礎生物学研究だけでなく、合成生物学のような応用研究で活用することも可能です。



生物の親から子へと遺伝する性質情報である遺伝子はDNAの塩基配列としてコードされ、その総体はゲノムとよばれます。大腸菌ゲノムには約5千個の遺伝子が含まれており、大腸菌が示す生命現象の多くは複数遺伝子の相互作用によるエピスタシス現象と予想されています。しかし、遺伝子マーカーを用いる既存のゲノム編集技術ではゲノム上に導入する変異数に限りがあり、それらの分子遺伝学的解析が困難でした。

本研究では、CRISPR-Cas9システムと相同配列DNA組み換えシステムを用い、他の生物から由来する遺伝子マーカーを導入することなく、大腸菌ゲノム上の目的DNA配列に数塩基変異を導入する新しいゲノム編集技術HoSel法を開発しました。これを繰り返し行うことにより、ほとんどの細菌ゲノムで共通に存在する大腸菌ゲノム上の14種類の環境応答システム遺伝子を対象として、大腸菌ゲノム上の複数遺伝子に変異導入させ複数の遺伝子機能を欠失させた株も含めた30以上の変異株を取得しました。さらに一細胞分析から、大腸菌が環境の変化を感じ、応答し、そして環境に適応することで発現する「適応増殖」でompR、phoB、phoD遺伝子のうち任意の2つの組み合わせが重要な役割を示すユニークなエピスタシス現象を発見しました。

地球上には生存するにも関わらず培養できない未知の細菌が極めて多く存在します。本成果はこれら難培養細菌の増殖メカニズムの解明に役立つと考えられています。

【発表雑誌】

- 雑誌名: Scientific Reports (オンライン版: 2020年2月27日 [英国時間])
- 論文タイトル: Epistatic Effect of Regulators to the Adaptive Growth of Escherichia coli
- 著者: Yukari Miyake & Kaneyoshi Yamamoto
- DOI番号: https://doi.org/10.1038/s41598-020-60353-3

▼本件に関する問い合わせ先

(研究に関すること)

生命科学部生命機能学専攻 教授 山本康由

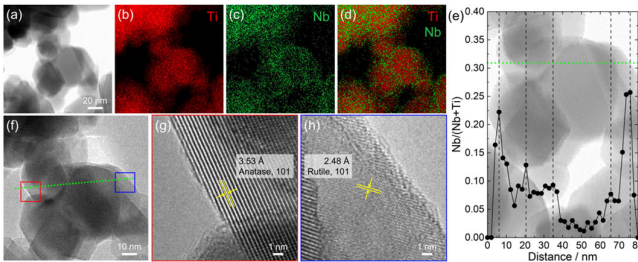
**読売新聞オンライン**  
2020年2月27日



## メカノケミカル法を用い、 精密に光触媒を合成するプロセスを開発 ー環境低負荷で簡便なプロセスによる、 可視光活性光触媒の合成を実現ー

法政大学生命科学部、大学院理工学研究科、マイクロ・ナノテクノロジー研究センター 石垣 隆正教授らは、広島大学 大学院先進理工系科学研究科 榎谷 直紀（法政大学マイクロ・ナノテクノロジー研究センター 客員研究員）、国立研究開発法人物質・材料研究機構（NIMS）機能性材料研究拠点 打越 哲郎（グループリーダー（法政大学マイクロ・ナノテクノロジー研究センター 客員研究員））との共同研究により、メカノケミカル法という低環境負荷で簡便なプロセスを制御して、可視光活性が高、温熱処理で上昇する新しいタイプの光触媒を精密に合成するプロセスを開発しました。酸化チタン光触媒の機能を高めるために行ったニオブ添加光触媒を対象とし、メカノケミカル効果を直接観察して、機能発現メカニズムを提案しました。

本研究は、文部科学省 私立大学戦略的研究基盤形成支援事業「グリーンテクノロジーを支える次世代エネルギー変換システム」、法政大学プログラム「グリーンソサエティを実現するSD先端材料プロセス」などの支援を受けて実施しました。



図の説明：電子顕微鏡で観察した粒子形態(a)と、この領域の元素分布 (b)-(d)。チタン Ti の分布(b)とニオブ Nb の分布(d)を重ね合わせた図(c)を見ると、ニオブが微粒子の外殻領域に偏在していることがわかります。

同じ領域で線上に化学分析した結果(a)を示します。各粒子を観察した図(f)で示した赤い枠中にはアナターゼ相酸化チタン(g)、青い枠中にはルチル相酸化チタンが認められ、隣接していることがわかります。また(f)中の緑色の点線上で化学組成を定量的に測定した結果が(e)に示されています。微粒子の外側で Nb/(Nb+Ti) 量が大きく、粒子外殻領域にニオブが偏在していることを定量的に示しました。

## 肥料じわり放出 法政大ゼオライト培地開発 水だけで生育

法政大学は、水供給  
するだけで植物に必要な  
栄養成分を放出する、  
新しい培地を開発した。  
ゼオライトは細かな穴  
の開いた構造で、水に  
浸すと、その穴から、  
ウレイドやリン酸、  
カリウムなどの養分を  
放出する。この培地を  
用いて、水だけで生育  
する植物の開発が可能  
になる。法政大学は、  
この培地を用いて、  
水だけで生育する植物  
の開発に取り組んでいる。  
この培地は、水だけで  
生育する植物の開発に  
役立つ。法政大学は、  
この培地を用いて、  
水だけで生育する植物  
の開発に取り組んでいる。

日刊自動車新聞

3月23日 (月曜日)

法政大学 理工学部 電気電子工学科 安田研究室

研究キーワード

デジタル駆動技術、デジタル直接駆動、マルチコイルモーター/高効率化/高精度駆動技術/低電圧高出力/安全、フェルセーフ/デジタル直接駆動スピーカ(デジタルスピーカ)/高効率化/高精度駆動技術(レーダー、携帯電話関連)/超高速高精度アナログデジタル変換技術(オーディオ、測定機器)

独自のマルチコイルモーター技術

高効率で精密なデジタル制御活用

要求パワーに応じ使用数増減

デジタル駆動技術など研究

ドローンの安全性確保も

大学/研究

電動車の消費電力低減へ

成果概要

## **Additive Manufacturing**

# マルチマテリアル 3D プリンティングによる高機能スマート機械部品の実現

(理工学部・機械工学科) 御法川 学

## 【目的】

近年、3Dプリンタの基本特許切れにより、世界中で3Dプリンタの試作開発が進んでいる。最も汎用的なFDM方式による3Dプリンタは、ABSやPLA等の樹脂（フィラメント）を供給し、ノズルで熱溶解させて吐出し積層造形する原理であるが、異種材料への適用も検討されている。本研究では、セメント系材料を用いたME（Material Extrusion）方式小型3Dプリンタ開発の一環として、最適な造形パラメータの検討と評価を行った。

また、近年、輸送手段の高速化が一段と進み、それに伴う騒音増大の懸念がある。従来の防音壁による遮音に加えて、道路面や軌道表面の吸音性能を向上させる必要があり、アスファルトやコンクリートのような多孔性材料による吸音性能に加えて、3D構造による低周波数域の騒音防止にはさらなる工夫が必要と考えられる。

## 【成果概要】

本研究では、本研究で試作したノズル直径 10mm 程度、造形範囲 600mm×600mm×600mm のセメント系材料 ME 方式 3D プリンタで得た知見をもとに、造形範囲 1m×1m×1m 程度の 3D プリンタを新たに試作して、ノズル送り速度と積層ピッチの最適値を材料が過不足なく供給される条件の下で定義した。ここでは、積層ピッチをノズル径よりも小さくするオーバーラップ積層を基本として、材料が潰れることによって積層面を平滑にして積層性を格段に向上させる方法に関して、その有効性を確認した。本研究で試作した 3D プリンタは、共同研究先の企業にて、高機能セメント系材料の積層特性を試験する装置として活用されている。

また、セメント系材料を用いたインクジェット方式 3D Printing を用い、連結したヘルムホルツ共鳴器を製作して低周波数域に効果的なセメント系材料の消音ブロックを提案した。その基礎実験として吸音孔を有する試料での吸音特性を評価したところ、①同一試料を直列に連結した場合、連結数が多いほど共鳴周波数付近の吸音特性が広がる、②同一試料を 4 個連結した場合、孔数が多い試料ほど広い周波数で吸音効果がある、③異なる試料の組み合わせでは、直列する順番により吸音特性が変化する、などの知見を得た。

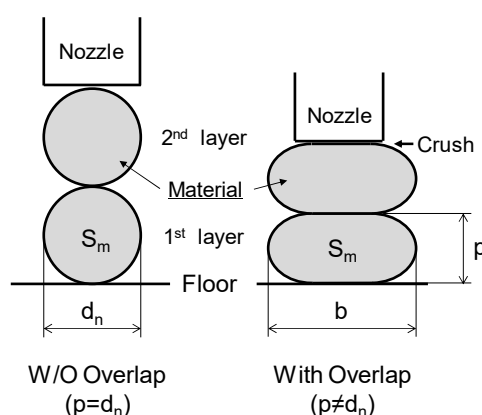


図1 ME方式プリンタの積層原理

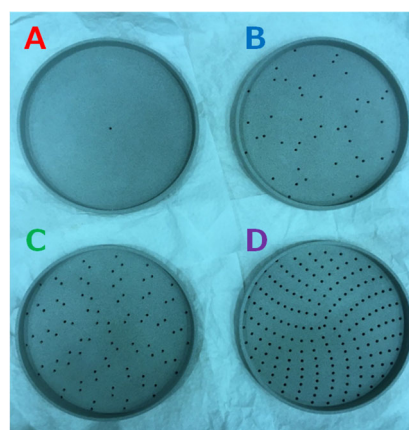


図2 セメント材連結共鳴器



### 【優れた成果が上がった点】

セメント系材料を用いた ME (Material Extrusion) 方式小型 3D プリンタ開発の一環として、最適な造形パラメータの検討と評価を行い、ノズル送り速度と積層ピッチの関係を材料が過不足なく供給される条件の下で定義した。ここでは、積層ピッチをノズル径よりも小さくするオーバーラップ積層を基本として、材料が潰れることによって積層面が平滑になり、積層性が格段に向上することを目指した。本研究により得られた知見は、受託研究先との特許出願 1 件に繋がった。

上記の成果が、年報に記載されている、どの論文・研究発表にどの内容が含まれるか。

論文の記載はなし。

### 【課題となった点とその克服法】

セメント系材料の積層性は、材料の流動性（チクソ性）と経時的な材料の硬化特性をバランスさせる点にある。その克服法は材料性状を改善する方法と積層方法を工夫する方法があるが、ここでは後者に関して、オーバーラップ積層による最適な材料押し出し速度を見出した。

### 【研究終了後の展望】

今後、展開が期待されるセメント系材料の積層造形の基本的な知見を得たので、応用が期待できる。

### 【研究成果の副次的効果】

- ・ 実用化したら、どのような応用につながるか：セメント系材料の積層造形により、複雑形状の構造物を低コストで作成することが可能となる。3D プリンティングによる住宅、意匠造形物、構造物など。
- ・ 特許申請の可能性：特許申請 1 件済み。

# 高度積層造形技術を実現する超高精度デジタル直接制御技術の開発

(理工学部・電気電子工学科) 安田 彰

高度積層造形技術を実現するには、積層物を生成する機械部分に加え、これを駆動する電気系の高精度化が不可欠である。従来のアナログ方式に代えデジタル信号で直接アクチュエータを駆動することにより、電気系および機械系の製造ばらつき等に起因する誤差要因の影響を低減することができれば、全体システムの精度を高めることが可能となる。本研究はデジタル信号で直接アクチュエータを駆動し、高精度積層造形を実現する方法の開発を目的とする。

まず、ブラシレス3相同期モータの回転トルクの変動を抑える手法として、ループの安定性向上させた3相間のコイルのマッチングの影響を低減する方法（FDTMM）を提案した（図1）。次に、ロータの回転数の高回転化に伴い問題となる、ロータ質量や機械負荷の回転軸に対するアンバランスによる振動の抑制できるマルチコイル・モータを提案した。提案手法では、従来のカウンタウエイトを用いた機械的方法ではなく、モータ本体を用いて低振動化を実現できる。ステータコイルを複数に分割し、分割された各コイルを個別に制御する。各コイルが発生させる回転軸に垂直方向の力を利用し、回転トルク生成とのための駆動コイルの選択と回転軸に垂直方向の力を同時に生成するコイル選択方法を提案した（図2）。これにより振動の高精度な低減が可能となった（図3）。

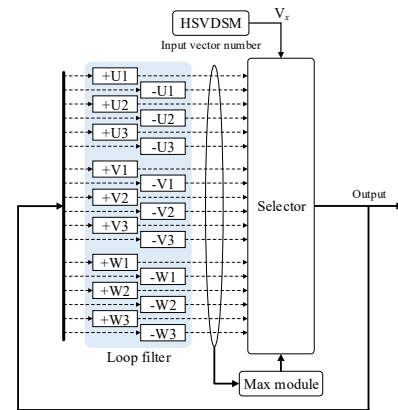


図1 FDTMM

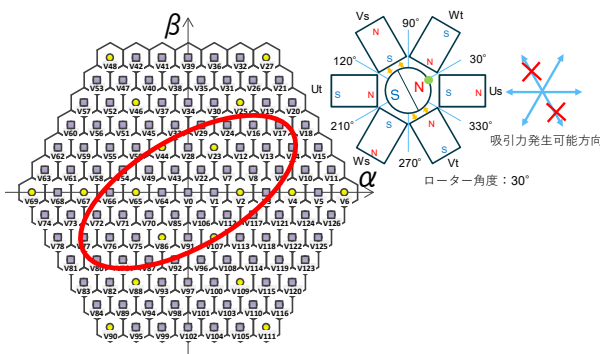


図2 回転磁界と軸方向力の同時生成法

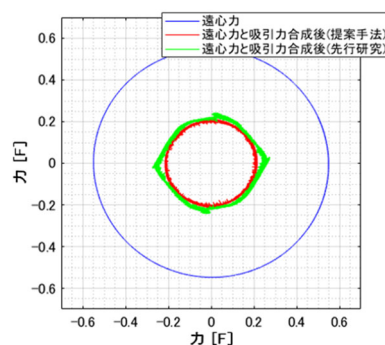


図3 振動低減効果

### 【優れた成果が上がった点】

ロータの回転数の高回転化に伴い問題となる、ロータ質量や機械負荷の回転軸に対するアンバランスによる振動の抑制できるマルチコイル・モータを提案した。提案手法では、従来のカウンタウエイトを用いた機械的方法では無く、モータ本体を用いて低振動化を実現できる。ステータコイルを複数に分割し、分割された各コイルを個別に制御する。各コイルが発生させる回転軸に垂直方向の力を利用し、回転トルク生成のための駆動コイルの選択と回転軸に垂直方向の力を同時に生成するコイル選択方法を提案した。これにより振動の高精度な低減が可能となった。

上記の成果が、年報に記載されている、どの論文・研究発表にどの内容が含まれるか。

Tatsuya Yamamoto, Tomokazu Kobayashi, Akira Yasuda, Axial Vibration Reduction Method using Multi-Coil-Motor, International Conference on Analog VLSI Circuits, Oct.28-30, 2019.

Yoshida, Takeru, Fumito Masuko, and Akira Yasuda. "Efficiency improvement method for low output of Multi Coils Motor." IECON 2020 The 46th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society. IEEE, 2020.

DOI: 10.1109/IECON43393.2020.9254339.

に記載されている。

### 【課題となった点とその克服法】

モータおよびその駆動系における振動を低減する方法として、従来からカウンタウエイトを用いた方法が用いられてきている。しかし、この方法では、モータや負荷のアンバランス分を相殺するカウンタウエイトを配置する必要があった。また、その質量は、測定が必要で、場合によってはカットアンドトライでの調整が必要であった。経年変化などでアンバランス成分が変動した場合は、その都度調整も必要となった。本提案手法では、モータ本体を用いて低振動化を実現できる。通常、モータの軸方向（ラジアル方向）には力が発生しないようにモータは設計されている。マルチコイルモータでは、モータ内部のコイルを個別に駆動することができ、これを用いることで軸方向の力を生成することも可能である。この力を利用することで、軸周りの振動を動的に制御することを実現した。

### 【研究終了後の展望】

本提案方式を用いることで、モータに軸方向の力を生じさせ、振動を生成することが可能となった。これを振動アクチュエータと使用し、振動センサを用いたフィードバック系を構成することにより、機器の振動を低減することが可能となる。今後は、この提案するモータを用いたシステム全体を構築することで機器の性能向上を図ることが可能となる。

### 【研究成果の副次的効果】

- ・本提案方式を用いることで、モータを用いた機器の振動を低減し、高精度な制御が可能となる。3D プリンタ等での xyz ステージの駆動においても、この振動はヘッドの揺れを



生じさせ問題となる。本提案を適用することにより、3Dプリンタでの生成物の精度の向上が期待される。

- ・ **特許申請の可能性**：本提案手法に関しては、先行事例が見当たらないことから特許化の可能性はあると考える。

## 製品製造に適した革新的な多次元制御方式による積層造形技術の開発

(デザイン工学部・システムデザイン学科) 田中 豊

モノづくりの革新技術として AM (Additive Manufacturing: 付加製造) 技術が注目されている。AM 技術のひとつである 3D プリンティングは、レイヤーごとに材料を積み重ねて立体物にする積層造形法である。中でも材料噴射型 (material jetting) は、フルカラー化が容易であること、高精度な造形が可能であること、多様な材料が扱えることなどの特徴があり、技術の発展と用途の拡大が期待されている。しかし従来の積層法による立体の造形は、モデル材の他に形状を保持するサポート材が必要であり、積層造形後にこのサポート材の除去が必要となり、この作業に多くの時間を要していた。さらに従来の積層造形方式は、材料噴射型ヘッドを可動式にして、固定あるいは上下方向にのみ可動する平面ステージ上に積層造形を行う方式が一般的である。しかしフルカラー化を指向するためには多色ヘッドに大がかりで複雑な可動機構が必要となり、可動速度にも限界がある。本研究プロジェクトでは、新たな積層造形技術の開発と AM 装置の試作、およびそれらを用いた積層付加造形品や小形機械要素の試作を目指した。

図 1 と図 2 に試作した AM 装置を示す。2018～2019 年度で装置の試作や基本技術の検討を行い、平行メカニズムを用いて造形ステージを可動させる装置の有効性を確認した。2020～2021 年度では、これらの装置を用いた積層付加造形や小形機械要素の試作などを行った。本手法を用いることで様々な立体形状への付加造形や加飾印刷が実現できることを示した。

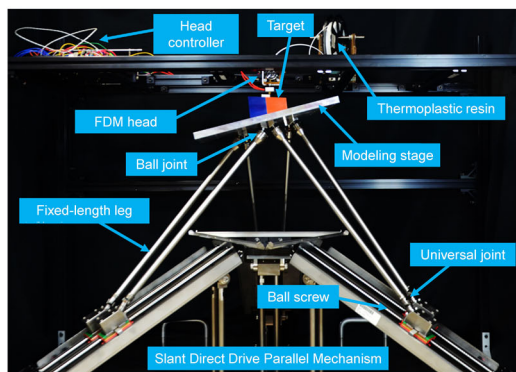


図 1 傾斜直動案内形六脚平行メカニズムを用いた AM 装置

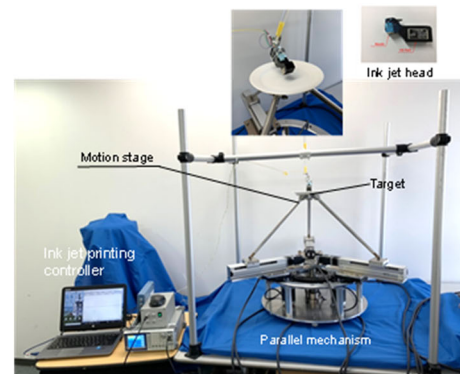


図 2 回転運動形三脚平行メカニズムを用いた AM 装置

### 【優れた成果が上がった点】

機械装置に使用される作動油中の気泡は機器の稼働に悪影響をおよぼす。研究プロジェクト内で継続して研究を進めている「油中の微小気泡の分離制御除去技術」に関して、競争的外部資金（科研費 2018～2020 年度）「作動油に含有する気泡量の高精度制御に関する研究（基盤研究(C)一般 課題番号：70179795）」や受託研究費（2017～2018 年度）「油中の気泡量・気泡径の計測と気泡の生成技術の開発」「気泡除去装置のベントコントロールによるエア含有率のコントロールに関する研究」等の支援で実施した研究成果をまとめ、国際会議 JFPS Hakodate2020 で発表した“Control of Air Bubble Content in Working Oil by Swirling Flow”，が GFPS (Global Fluid Power Society) の最優秀論文賞を受賞した。またこれらの研究の成果は「気泡含有量調整システム（特願 2019-239249）」として特許申請された。

上記の成果が、年報に記載されている、どの論文・研究発表にどの内容が含まれるか。

以下の 4 件の論文および国際会議での発表が上記の研究成果と関連した内容を含んでいる。

- 1) Sayako Sakama, Yutaka Tanaka, Yasuhiro Koderu, Yoshiaki Kitamura, “Control of Air Bubble Content in Working Oil by Swirling Flow,” Proceeding of the 11th International Symposium on Fluid Power HAKODATE 2020, GS6-04, Oct. 12-13, 2021. GFPS Best Paper Award.
- 2) Yutaka TANAKA, “Bubble elimination technology toward high performance of hydraulic systems”, Proc. The 8th International Conference on Fluid Power and Mechatronics (FPM2019), 2019-04-12, p.17 (Invited Lecture).
- 3) Ryo Takamizawa, Ryosuke Funachi, Sayako Sakama, Yutaka Tanaka, “Performance Evaluation for Bubble Eliminator with CFD -Effect of Computational Model and Mesh-“, Proceedings of The 8th International Conference on Manufacturing, Machine Design and Tribology (ICMDT2019), TH-PO-15, April 24-27, 2019, Kagoshima, Japan (Best Poster Award).
- 4) Sayako Sakama, Yuki Kitazawa, Yoshiki Sugawara, Yutaka Tanaka, “Estimating the Air Volume Fraction in Hydraulic Oil by Measuring the Effective Bulk Modulus”, 11th IFK International Conference Proceedings, Vol.3, pp. 79-85, 2018-03-21. (査読有) DOI: 10.18154/RWTH-2018-224357.

### 【課題となった点とその克服法】

液体中に分散して含有する気体（気泡）は、高い圧力下では液体中に溶解し、低い圧力では析出するため、その分離や除去の制御は難しい。研究プロジェクトでは、独自に開発した旋回流を用いた簡易な手法を用いた「気泡分離除去装置」を使って、液体と気体の分離や除去の調整制御を実現している。

### 【研究終了後の展望】

機械システムに用いられる作動油中には、空気が気泡の形で分散・含有している。こうした気泡は機器やシステムのトラブルの原因となる。しかし気泡含有量とトラブルとの因果関係は定量的に明らかとなっていない。これは作動油中の気泡含有量を実時間で精確にモニタリングしたり、任意に精度よく調整したりすることが極めて難しいためである。本研究で得られた成果を用いて、作動油中の気泡量制御システムを実用化し、油中気泡が機械システムにおよぼす影響を定量的に解明し、システムや要素機器の故障診断モデルやメンテナンスに活用できることが期待される。

#### 【研究成果の副次的効果】

- ・**実用化したら、どのような応用につながるか**：本手法は機械システムの作動油だけでなく、多くの液体中に分散含有する気体の分離調整に応用できる。例えば、医療に用いる流体（血液や薬品など）に混入する気体を分離除去したり、含有量を調整したりできる。
- ・**特許申請の可能性**：研究の成果は「気泡含有量調整システム（特願 2019-239249）」としてすでに特許申請済みである。また気泡分離装置の基本特許も「気泡分離除去装置のパラメータ設定法（特許 6461623）」「気泡分離除去装置（特許 6503330）」として取得済みである。

## 3D 先端材料プロセスを活用したターボ機械の 新たな高性能化技術の開発

(理工学部・機械工学科) 辻田 星歩

地球温暖化防止のために効率の向上が急務とされているガスタービンの分野では、3D 積層造形技術の利用により可能となる新たな空気力学的性能向上技術の開発が進められている。一方、分散型電源のマイクロガスタービンのタービン段には、高い膨張比を有するが翼の薄いラジアル型の羽根車が採用されているため、冷却技術の適用による高効率化は困難な状況にある。本研究では、高膨張比でかつマイクロ多孔質冷却構造の適用が可能な、厚翼中空の超高負荷軸流タービン翼(UH LTC)の開発を目的としている。

本研究は、小型円環翼列風洞と大型直線翼列風洞を用いた実験と、CFD による数値解析の両手法により実施した。円環翼列試験では、最大翼厚の増加に伴う翼間流路後半部分での増速率の増加と、翼端間隙高さの減少に伴う漏れ流れと漏れ渦の低減が空力損失の抑制に効果的であると同時に、流出角の増加によりトルク性能を向上させる等の効率向上のための重要な知見が得られた。また、この向上を引き起こす流動現象のメカニズムの詳細は、直線翼列風洞試験と数値解析により明らかにした。さらに、実機作動条件に近い遷音速条件下での UH LTC の空力特性を数値解析により調査した。一方、UH LTC では、二次流れ損失が総損失に占める割合が高いため、その低減技術の適用は不可欠である。その技術の一つである前縁フィレットを適用し(図 1)、その効果を数値解析と直線翼列風洞試験により調査し、損失( $C_{ptt}$ )低減に対する有効性を確認した(図 2)。

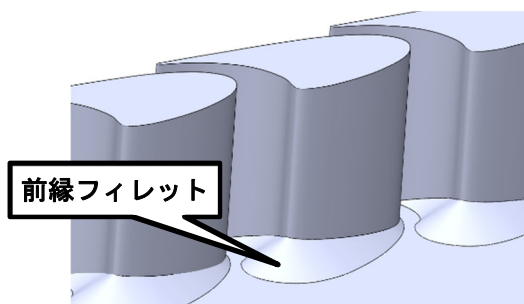


図1 前縁フィレット

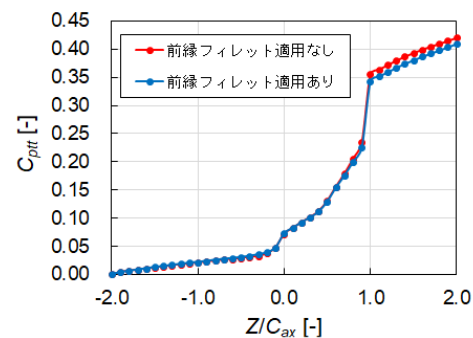


図2 損失  $C_{ptt}$  の軸  $Z/C_{ax}$  方向分布



### 【優れた成果が上がった点】

マイクロガスタービンの実稼働条件に近い小型円環翼列風洞試験において、最大翼厚の増加による翼間流路後半部分での増速率の上昇と、翼端間隙高さの減少に伴う漏れ流れの低減が空力損失の抑制において効果的であると同時に、流出角の増加によりトルク性能と共に効率向上が可能となることを明らかにした。また、亜音速および遷音速流れ場における超高負荷軸流タービン翼列内の損失生成を引き起こす流動現象のメカニズムの詳細を主に数値解析的手法により解明した。

上記の成果が、年報に記載されている、どの論文・研究発表にどの内容が含まれるか。

遷音速流れ場における超高負荷軸流タービン翼列内の損失生成のメカニズムについては、  
「H. Tsujita, M. Kaneko, “Influence of Incidence Angle on Two-Dimensional Aerodynamic Performance of Ultra-Highly Loaded Turbine Cascade at Transonic Condition”, Proceedings of the 14th International Symposium on Experimental Computational Aerodynamics of Internal Flows, ID69(2019-7).」

「H. Tsujita, M. Kaneko, “Profile Loss of Ultra-Highly Loaded Turbine Cascades at Transonic Condition”, Proceedings of ASME 2019 Turbo Expo, GT2019-91264(2019-6).」

に記載されている。

小型円環翼列風洞試験による翼端間隙高さの減少に伴う効率の向上については、  
「陳子豪，張驥軒，辻田星歩，“小型円環翼列風洞による超高負荷軸流タービンの空力性能評価(翼端間隙高さの影響)”，ターボ機械，48(6), 345-351(2020-6).」

に記載されている。

### 【課題となった点とその克服法】

超高負荷軸流タービン翼列では、二次流れによる損失が総損失に占める割合が高いため、更なる効率向上のためには二次流れ低減技術の適用が不可欠である。現在適用可能な各種の低減技術の有効性について直線翼列試験と数値解析により調査中である。

### 【研究終了後の展望】

二次流れ低減技術の適用により空気力学的に高効率化された超高負荷軸流タービン翼列に対して、中空翼の冷却機構等を適用し、冷却効率の観点から主に数値解析手法により研究を展開する予定である。

### 【研究成果の副次的効果】

・実用化したら、どのような応用につながるか：分散型電源のマイクロガスタービンのタービン段には、薄翼のラジアル型の羽根車が採用されているため、冷却技術の適用による高効率化は困難であるが、本研究の対象である高膨張比でかつ空気冷却構造の適用が可能な厚翼中空の超高負荷軸流タービン翼は、この問題の解決に貢献するものと考えられる。

・特許申請の可能性：マイクロ多孔質冷却構造など、適用する空気冷却技術の種類によっては特許に繋がる可能性がある。

# 付加積層技術を用いた 3D 複雑形状を有する多機能セラミックス系 傾斜機能構造体の作製

(理工学部・機械工学科) 塚本 英明

【目的】昨今、3Dプリンタ（積層造形）技術は著しい進歩を遂げている。特に、対象素材としてプラスチックのみならず、金属・合金、セラミックスに至るまで、多種、多様な材料を用いた造形が可能になってきている。また、造形手法も、局所的レーザー溶融・焼結法をはじめ、バインダージェットティング、マテリアルージェットティング等、様々な方法が開発されてきている。本研究では、3Dプリンタに応用できる焼結技術および対象となる材料そのものの開発の両面からのアプローチを行っており、さらにこれらのシナジー効果を目指して研究を遂行してきている。

【成果概要】3Dプリンタに応用できる焼結技術に関して、次の3つの手法に着目して研究を行ってきている。[1]放電プラズマ焼結（SPS）法、[2]マイクロ波焼結法、[3]高性能ガスバーナー焼結法である。これらの焼結法の3Dプリンタ（局所焼結法、バインダージェット法等）への適用を見据えて、どのような素材に対して最も効果的に成形可能であるかを実験的に調査してきている。一方、焼結手法の開発と合わせて、セラミックス-金属系傾斜機能材料（FGMs）をはじめとする、種々の多相混合系の作製法及び作製した試料に関する詳細な調査を行ってきている。具体的には、部分安定化ジルコニア（PSZ）/Ti、Ni SUS系FGMs、カーボンナノチューブ（CNT）分散Al基FGMs、CNT分散Mg基ハイブリッド複合材料等、多岐にわたる。特に、セラミックス基複合材料、もしくは、セラミックス系FGMsにおいては、生来の低靱性を改善すべく種々の高靱化機構の開発を試みている。これに関しては、実験的アプローチに加えて、連続体力学に基づく理論解析も併用して行い、焼結成形の有効性に関して、考察してきている。以下、研究結果として2例を示す。1つは、遠心カスラリー法とSPS法のコンビネーションによるセラミックス-金属系傾斜機能材料の作製、もう1つは、低融点金属Snを添加したCNT分散Mg基複合材料の開発である。図1は、遠心カスラリー・SPS法により作製したPSZ/SUS系FGMsのSEM・EDX元素分析マッピング結果（FGMsの組成傾斜（板厚）方向）である。この図より、効果的に連続組成傾斜が得られていることがわかる。図2は、Sn添加CNT分散Mg基複合材料の引張強度の結果を示している。Sn添加がCNT分散Mg基複合材料本来の性能を引き出し、著しい性能向上に寄与している。このように、3Dプリンタにおける新たな焼結技術の開発は、逆に、3Dプリンタを用いた、もしくは、3Dプリンタを用いることでしかできない革新的な新素材・構造開発へと展開しつつある。

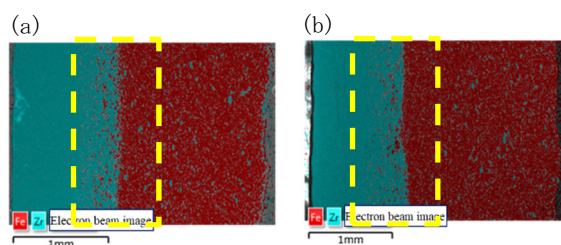


図1 分散剤量 ((a) 1wt. %, (b) 5wt. %) の組成傾斜に及ぼす影響

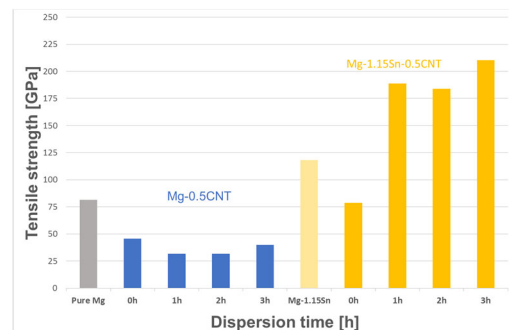


図2 Sn添加CNT分散Mg基複合材料の引張強度に及ぼすCNT分離・分散処理時間の影響

### 【優れた成果が上がった点】

3D プリンタ（積層造形）技術への応用を念頭に置き、セラミックス-金属系傾斜機能材料（FGMs）の焼結法として、放電プラズマ焼結法、マイクロ波焼結法、高性能ガスバーナー焼結法の3種に着目した。特に、放電プラズマ焼結（Spark Plasma Sintering, SPS）法と遠心カスラリー法を組み合わせることにより、任意の“連続”組成傾斜を有する FGMs の作製に成功した。すでに、種々の材料系の FGMs を作製し、そのミクロ構造、熱的・機械的性質等、様々な特性の評価を通して、焼結法を含めた作製技術の有効性を検証してきている。

上記の成果が、年報に記載されている、どの論文・研究発表にどの内容が含まれるか。

カーボンナノチューブ（Carbon Nanotube, CNT）を強化材とした、CNT 分散型金属基複合材料の作製を種々の焼結法を用いて行った。この研究成果は、特に、金属母相の複合材料構造物を 3D プリンタを用いて作製する際に重要となる。① H. Tsukamoto, “Tribological Characterization of Carbon Nanotube/ Aluminum Functionally Graded Materials Fabricated by Centrifugal Slurry Methods”, Journal of Composites Science, **5**, 254 (2021). ② H. Tsukamoto, “Enhanced Mechanical Properties of Carbon Nanotube-Reinforced Magnesium Composites with Zirconia Fabricated by Spark Plasma Sintering”, J Compos Mater, (2021). ③ H. Tsukamoto, “Enhanced mechanical properties of carbon nanotube/ aluminium composites fabricated by powder metallurgical and repeated hot-rolling techniques”, Journal of Composites Science, (2020). 等の研究成果に示されているように、CNT は、強い凝集性があり、この性質が、CNT の優れた特性を複合材料に活かすことを妨げている。CNT の分離・分散に用いる溶媒・分散剤等は、その後、混合する母相となる金属・合金（Al, Mg 等）により最適なものが異なる。本研究では、粉末混合後の、ボールミル処理、焼結後の圧延等の機械的処理を考慮した CNT 分散型金属基複合材料の作製技術を構築した。

### 【課題となった点とその克服法】

セラミックス-金属系傾斜機能材料（FGMs）の作製技術に関しては、遠心カスラリー法における厳密な“連続的”組成傾斜を得るための技術構築、および、分散剤の選定に多くの労力を費やした。SPS 法は、焼結技術として大変優れており、この技術の 3D プリンタへの応用は、この分野の大きな進展につながると考えている。

CNT 分散型金属基複合材料の作製に関しては、CNT の分離・分散に用いる溶媒・分散剤の選定は、その後、混合する複合材料の母相となりうる金属・合金（Al, Mg 等）に大きく依存しており、この母相自体の性質、母相と CNT との相性を考慮した最適選定が必要となる。さらに、CNT の母材中での分散性を評価するための適切な技術を構築し、迅速かつ精度よく分散性を判断できるようにすることが重要である。この行程の良否が、高性能 CNT 分散型複合材料の効率的な最適設計・開発、しいては、この種の複合材料を用いた 3D プリンタ技術の構築に大きく影響すると考えられる。本研究では、電子顕微鏡（SEM, TEM）イメージおよび元素マッピング画像を特殊な画像解析手法を通して、これらの課題を克服し、機械的性質に

優れた高強度・高靱性 CNT 分散型金属基複合材料およびその構造体を作製するための革新的な技術を提示している。この技術は、積層造形成形物に対しても適用可能である。

#### 【研究終了後の展望】

本研究で構築した焼結技術、材料・構造作製技術は、金属・セラミックスを対象とする 3D プリンタ（積層造形）技術の進展に大きく寄与するだけでなく、逆に、3D プリンタの造形技術を用いた、もしくは、3D プリンタ技術を用いることでしかできない新たな新素材・構造開発へと展開・発展できると考えている。

#### 【研究成果の副次的効果】

- ・ **実用化したら、どのような応用につながるか**：3D プリンタに応用できる焼結技術に関して、次の 3 つの手法に着目して研究を行ってきた。[1]放電プラズマ焼結（SPS）法，[2]マイクロ波焼結法，[3]高性能ガスバーナー焼結法である。これらの焼結法の 3D プリンタ（局所焼結法，バインダージェット法等）への応用を見据えており，実用化も可能であると考えている。さらに，どのような素材に対して最も効果的に成形可能であるかも実験的に調査してきている。
- ・ **特許申請の可能性**：本研究では，特許に結びつく多くの成果が得られており，今後の検証実験等を通して，特許申請計画を進めることを考えている。新たな焼結技術の開発，3D プリンタへの応用法，新たな新材料の作製手法の構築等，多岐にわたる。

## 成果概要

### **Biologically mediated (inspired) Control**



## 心筋細胞ネットワークによる心臓3D 構造の再構成

(生命科学部・生命機能学科) 金子 智行

【目的】心臓は血液を体中の臓器に送り出すための重要な器官であり、心筋細胞や線維芽細胞等が規則正しく整列した三次元(3D)構造をしている。この心臓の3D構造を再構成するためには、心臓組織の特性を知り、心筋細胞や線維芽細胞をネットワーク状に配置することが必要である。そこで、我々が開発した微細加工技術であるアガロースマイクロチャンバ(AMC)を多電極電位計測(MEA)システム上に形成し、ネットワーク状に配置した心筋細胞の細胞外電位を計測し、心臓と同等の電位変化を示す細胞ネットワークの構築を目指している。

【成果概要】これまで、MEAシステム上に直線状や環状のAMCを作製し、それぞれの心筋細胞ネットワークにおける細胞外電位の伝播方向と伝播速度を測定した。その結果、ある一定のペースメーカー領域から二方向(左右または上下方向)に細胞外電位が伝播し、環状の場合は反対側で対消滅するような正常伝導が観察された。この伝導は直線状の心筋細胞ネットワークでは幅が狭くなるほど細胞外電位伝播速度が速くなることがわかり、心臓と同程度の伝播速度を実現するためには、一細胞レベルでの細胞間相互作用の制御が必要であるとの知見を得た。さらに、環状の心筋細胞ネットワークに後加工領域を作ることにより線維芽細胞の多い領域を作製すると、ペースメーカー領域から片方向にしか細胞外電位が伝播せず、一方向に伝播した細胞外電位がペースメーカー領域に戻ってくる現象や、ペースメーカー領域の位置が変化する現象が観察された(図1)。ペースメーカー領域の位置が変化的ることにより、ネットワーク中のまったく同じ経路において伝導方向が異なる伝播が観察されたが、その伝導速度は同じ経路にもかかわらず伝導方向によって異なるものであった。この伝導速度の違いは、伝導方向の違いによる細胞外電位の伝播経路の違いによるものなのか調べるためには、やはり一細胞レベルで細胞配置を制御する必要がある。今後は、環状心筋細胞ネットワークの幅を変化した場合における伝導方向や伝導速度の違いについて調べることや、一方向の伝導が環状ネットワークを一周して戻ってくる場所に一方向にのみ伝導する何らかの仕組みを施すことにより、不整脈の原因の一つであるリエントリーを人工的に発生させることにも挑戦していきたいと考えている。

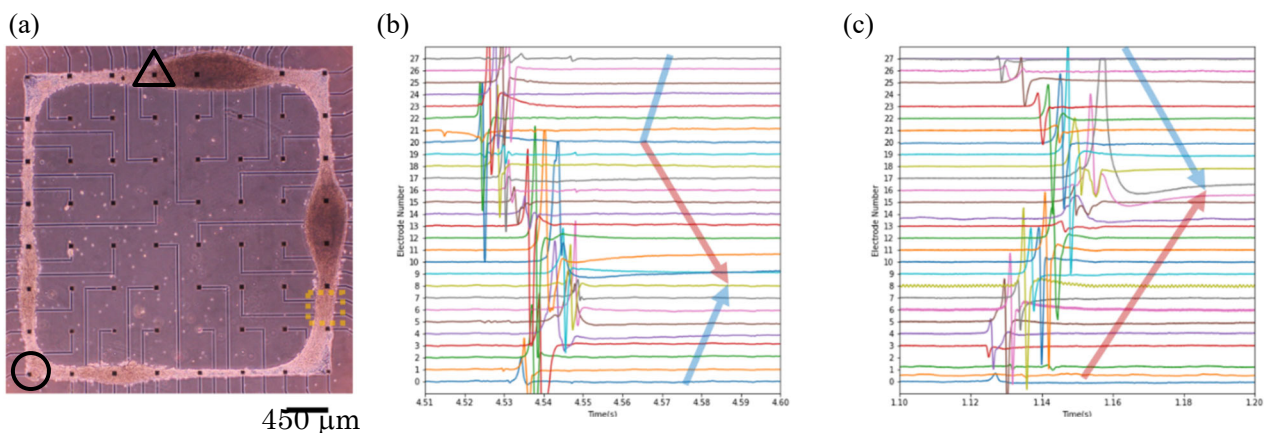


図1. 環状心筋細胞ネットワークの細胞外電位伝播。(a) MEA 基板上に作製した環状心筋細胞ネットワークの位相差像。点線四角は後加工部位を示す。(b, c) 各電極における細胞外電位波形。同一のネットワークで(a)の丸の領域(b)と三角の領域(c)をペースメーカーとした二方向伝導を観察。

### 【優れた成果が上がった点】

多電極電位計測(MEA)システムを用いて、MEA 基板上に心筋細胞を直線状や環状に配置することにより、心筋細胞ネットワーク中の細胞外伝播方向や伝導速度の測定を可能にした。直線状の心筋細胞ネットワークではネットワークの幅が狭くなるほど伝導速度が上昇し、一細胞レベルで制御することにより心臓と同等の伝導速度が実現できる可能性を示した。環状の心筋細胞ネットワークでは、ペースメーカー領域から二方向に伝導する正常伝導と一方向のみに伝導する異常伝導が観察され、不整脈の原因となるリエントリーモデルを再構成できる可能性を示した。

上記の成果が、年報に記載されている、どの論文・研究発表にどの内容が含まれるか。

直線状心筋細胞ネットワークの伝導速度については、2018年9月16日に日本生物物理学会学生発表賞を受賞した吉田鉄郎さんの演題「Analysis of Conduction Velocity Depending Width of Line-Networked Cardiomyocytes」(発表者:T. Yoshida, K. Fujii, T. Kaneko)で発表した。

環状心筋細胞ネットワークの伝導方向とリエントリーモデルの構築については、2020年9月24日に日本生物物理学会学生発表賞を受賞した江村光司さんの演題「Construction of conduction abnormality model by circular cardiomyocyte network using agarose microfabrication technology」(発表者:K. Emura, M. Hayashi, T. Kaneko)で発表した。

### 【課題となった点とその克服法】

心筋細胞の活動電位の伝播方向と伝導速度はこれまで電位感受性色素やパッチクランプ法が用いられていたが、長期間安定して高時間分解能で測定することが困難であった。しかし、MEAシステムを用いることにより、簡便に高時間分解能(0.1ms)で長期間(数日)測定することが可能になり、細胞ネットワーク中の細胞外電位の伝播方向と伝導速度の測定が可能となった。

細胞ネットワークの形状はこれまでMEMSやマイクロプリンティングで行われていたが、一度決めた形状を変更するのが困難であった。我々は寒天(アガロース)が細胞非接着性であり温度変化によりゾル・ゲル変換が起こる性質を利用して、アガロースマイクロチャンバー(AMC)を作製することにより、細胞ネットワークの形状を制御することに成功した。これにより、細胞培養中に赤外レーザーを照射することに局所加熱部位がゲルからゾルに変換され、新たな細胞接着部位を作製することが可能となった。

### 【研究終了後の展望】

直線状心筋細胞ネットワークの細胞外電位を測定することにより、心臓と同等の伝導速度を再現する可能性を示せたので、今後はこれを実現するための一細胞レベルでの配置制御を行い、MEA基板上での1細胞レベル心筋細胞ネットワークの細胞外電位伝導速度を測定することにより、心臓と同等の心筋細胞ネットワークの構築が期待できる。

**【研究成果の副次的効果】**

- ・ **実用化したら、どのような応用につながるか**：心臓と同等の心筋細胞ネットワークが作製できれば、これまでヒト iPS 細胞等を用いたランダムな分散培養の心筋細胞シート等を心臓に移植していた再生医療も、心臓と同等の機能を有した心筋細胞シートを移植できるようになり、直接的な心機能回復を促すことができるようになる。

環状心筋細胞ネットワークを用いたリエントリーモデルが作製できれば、新薬開発等で行われている心毒性検査を簡略化することができ、心臓に関する毒性を短期間で安価に検査することができるようになる。

- ・ **特許申請の可能性**：人工的に作製したリエントリーモデルが作製できれば、新規の心毒性検査技術として特許申請可能である。

## 細菌胞子の積層構造の解析と応用

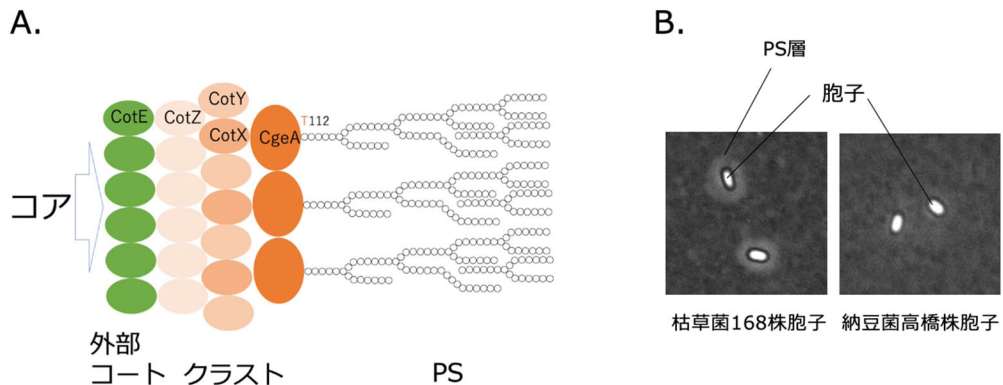
(生命科学部・生命機能学科) 佐藤 勉

### 【目的】

細菌胞子に見られる内部構造を保護するための強固な積層構造は、ナノレベルの強固な構造物を作る際のモデル系となる。本研究は細菌胞子の構築過程を解明し、積層技術の発展への貢献を目指した。1) クラスト層と呼ばれる胞子表層タンパク質の構築過程を解明した。2) クラスト層を包むポリサッカライド (PS) 伸長の仕組みを解明した。3) 胞子の積層構造から応用への道筋を模索する。

### 【成果概要】

枯草菌を代表する細菌の胞子は、中心部にDNAを含むコアが存在し、その外側には内部フォアスポア膜、コルテックスと呼ばれる糖を骨格としたペプチドグリカン層、さらに外部フォアスポア膜が配置されている。さらに、内部コート、外部コート、クラストとよばれる、合わせて100種以上のタンパク質が順番に積層されている。1) クラストの構成タンパク質 (CotVWXYZ, CgeAB) との各GFP融合株を作製し、それぞれの遺伝子変異株でのGFP蛍光を観察することで、CotZを中心にクラストが形成され、CgeAが最終局在タンパク質であることを明らかにした。2) クラストの外側の最外層に位置するPSの基質となる糖は*spsA-L*オペロンおよび*spsM*により合成される。このうち*spsM*のSP $\beta$ プロファイルによる遺伝子再編成の仕組みを解明した。さらにクラストタンパク質の中で、CgeAを糖鎖結合領域を有するPSのアンカータンパク質として推定し、遺伝子の欠失解析により、局在に必要なドメインと糖鎖結合に関与するドメインを見出した。また、アミノ酸置換により、112番目のThrが糖鎖の結合部位であることを明らかにした。さらに、グリコシルトランスフェラーゼドメインを持つCgeBがこの部位の糖転移に関与していることを明らかにした。3) 胞子のクラストより内側は疎水性のタンパク質が積層されることにより、強固な胞子ができる。一方、最外層は親水性のPSでできている。つまり強固でかつ水流に乗って移動可能な構造となっている。表層の構造は、有孢子細菌種・株によって異なることに注目した。例えば、一部の納豆菌の胞子はPSが一部欠損していることを見出した。納豆菌は納豆の主成分であるポリグルタミン酸を生産する一方で、納豆を原材料とした食品製造過程に胞子として混入する可能性がある。胞子PS合成の抑制により、胞子の移動を制御することができる。



枯草菌胞子最外層の構造 (A) および枯草菌株と納豆菌株の位相差顕微鏡像 (墨汁染色) (B)

### 【優れた成果が上がった点】

熱や薬剤に高度に耐性を示す枯草菌胞子の構造とその構築過程を解明した。特に胞子最外の構造に着目し、クラストと呼ばれるタンパク質層を構成する CgeA タンパク質を起点にポリサッカライドが構築されることを明らかにした。一方この解析過程で、ウイルス DNA を介した胞子形成遺伝子の再編成が起こることを明らかにした。また、その DNA 組換え機構は互換性があることを見出した。

### 【課題となった点とその克服法】

枯草菌の胞子形成過程については、古くから細胞分化のモデル系として世界の研究者により解明が行われてきた。現在までの解析により、胞子形成遺伝子の発現調節機構については、ほぼ全体像が捉えられている。一方で、胞子表層の構造については未解明の部分が多い。本研究は、胞子クラスト層とその外側のポリサッカライド層に着目し、その構築過程の全容解明を試みた。クラスト層については、ニューヨーク大学の Patrick Eichenberger 博士らとの共同で研究を進め構成するタンパク質の相互作用と構築順序を明らかにすることができた。それぞれの研究技法を組み合わせることが解明につながった。

最外層であるポリサッカライドを構成する糖の成分は、HPLC などを用いた研究によりほぼ明らかになっていたが、ポリサッカライドを繋ぐアンカーとなるクラストタンパク質は明らかになっていなかった。CgeA を糖タンパク質と推定し、欠失解析と部位特異的変異導入により、糖転移部位を特定することができた。

解析の過程で、一部の胞子形成遺伝子は細菌に感染するウイルス（ファージ）が仲介する遺伝子再編成により発現調節が行われていることが分かった。細胞分化（胞子形成）という生物が持つ重要なプロセスに、ウイルスが貢献していることを示す一例となった。

### 【研究終了後の展望】

枯草菌胞子の構築過程については、ほぼ全容が解明できた。他の有胞子細菌の胞子形成過程についても枯草菌をモデルに解明が促進されると期待される。特に類縁の納豆菌については、身近な食品としてその製造過程に欠かせないため、解明が期待されると考えられる。

細胞分化にウイルスが関与する例は多くない。枯草菌をモデルにウイルスが生物システムに貢献する例が見出されることが期待される。

### 研究成果の副次的効果】

- ・ 実用化したら、どのような応用につながるか：納豆菌の改良による納豆産業への貢献、ミクロレベルでの素材の強化、ウイルス一般の防御。

## 生物ナノマシン設計原理の理解と新機能付加

(生命科学部・生命機能学科) 曾和 義幸

生物ナノマシンであるべん毛モーターは、大きさ数ナノメートルの多種多様なタンパク質素子が自己組織化することで構築される。このモーターの機能的な特徴は、イオン流を高効率に回転トルクへと変換すること、超高速回転が可能であること、回転方向切り替え機構をもつことなどがあげられる。モーター構築機構と回転機構の理解は、ナノ材料を積層して構造および機能を制御する次世代テクノロジー基盤技術の創出につながると期待できる。

本研究では、モーター構築機構と回転機構を理解するための研究ツールの開発を中心に研究をおこなった。まず、べん毛モーター分子構築原理の解明するために、モーター駆動部の基盤構造である回転子リングについて緑色蛍光タンパク質（GFP）による蛍光可視化および分子計数による重合過程の解析系を構築した。さらに、全反射照明と通常の落射照明を組み合わせ、高いS/N比でモーター内の分子構成数の計測をおこない、モーター機能解析システムと同時に実現した。つぎにモーター回転機能を操作する方法として光駆動型ポンプを用いて、細胞システムとしての新機能付加を目指して研究をおこなった。ポンプによるイオン濃度の操作を実現できたため、細胞内のイオン濃度や膜電位を正確に計測し、モーター入力エネルギーと出力の応答性を決定した。低負荷で駆動するモーターの特性は回転機構を知るうえで重要であるが、計測の困難さから研究報告例が少ない。本研究では、直径60 nmの金ナノ粒子を目印として用い、極低負荷条件下で駆動するべん毛モーターの動きを、金ナノ粒子からの散乱光を記録して高精度で検出する装置を構築した。このシステムを用いて、モーター回転制御の鍵となるFliLタンパク質の機能の一端を明らかにできた。今後、これら基盤技術を用い、べん毛モーターを含めた生物ナノマシンの構築基本原理が次々と明らかになると期待される。

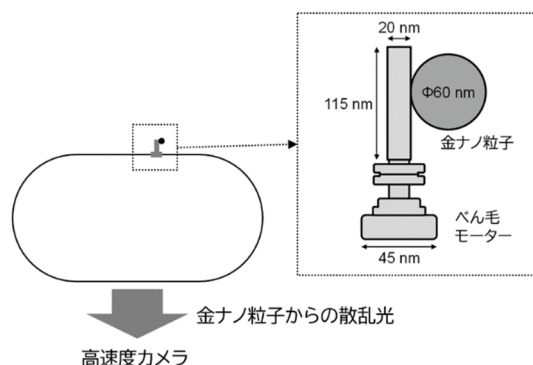


図1. 金ナノ粒子を用いた低負荷計測



### 【優れた成果が上がった点】

無負荷条件に近い極低負荷条件下で駆動するべん毛モーターの回転計測を可能にするシステムを構築した。他の計測方法と組み合わせて、あらゆる負荷条件下でモーター特性を評価することが可能になった。このシステムを用いて、モーターが駆動するモーター制御因子 FliL の機能の一端を明らかにした。

上記の成果が、年報に記載されている、どの論文・研究発表にどの内容が含まれるか。

ポスター発表賞を受賞した次の研究発表に含まれる。

優秀ポスター賞受賞 第1回 発動分子科学研究会 (2021.6.11)

ポスター演題：石田翼，吉多美祐，南野徹，曾和義幸．大腸菌 FliL は低負荷領域でべん毛モーターの回転を支援する

ポスター発表賞受賞 第17回 21世紀大腸菌研究会(2021.8.20)

ポスター演題：石田翼，吉多美祐，南野徹，曾和義幸．大腸菌 FliL は低負荷条件下でべん毛モーターの回転速度を調節する

### 【課題となった点とその克服法】

べん毛モーターは直径 45 nm ほどの小さなタンパク質集合体であるので、その動きを計測するためには目印をつけて観察する。ただし、無負荷条件で駆動する条件での計測には、シグナルを得ることが難しい微小な目印を用いる必要がある。金ナノ粒子からシグナルを取得する計測装置とモーターに金コロイドを効率よく付着させる技術によって、問題点を克服した。

### 【研究終了後の展望】

本研究では、生物がもつナノスケールの回転モーターの構築機構と回転機構を理解するための研究ツールの開発した。特に、無負荷条件で効率よく計測するための装置と試料についての改良によって、モーターが駆動するあらゆる負荷条件下での解析が可能になった。今後、これら基盤技術を用いて、べん毛モーターを含めた生物ナノマシンの構築基本原理が次々と明らかになると期待される。

### 【研究成果の副次的効果】

- ・特許申請の可能性：モーター回転計測を効率よくおこなう手法の開発から派生して、下記の特許を出願した。田中裕人，小嶋寛明，富成征弘，田中秀吉，川岸郁朗，曾和義幸．微生物分析装置及び微生物分析方法，出願人；学校法人法政大学，国立研究開発法人情報通信研究機構，特許第 6631771，登録日；2019 年 12 月 20 日．

## 光合成装置の安定化の研究

(生命科学部・生命機能学科) 水澤 直樹

### 【目的】

天然の光合成装置を産業的に利用するためには、光合成生物から光合成装置を単離し、安定な状態で保存することが必要である。本プロジェクトでは、光エネルギーを用いて水を分解し酸素を発生する光合成色素タンパク質複合体である「光化学系II」という光合成装置に主に着目し、これを光合成生物から無傷で単離し、単離した標品を用いてその構造と機能を明らかにすると同時にそれらを安定化する技術を開発することを研究の目的とする。

### 【成果概要】

新規導入した細胞破碎装置を用いて、中温性シアノバクテリアの *Anabaena* sp. PCC 7120 と *Synechocystis* sp. PCC 6803 の細胞破碎条件を検討し、従来法よりも高効率で細胞を破碎することが可能になった。新規装置で破碎した *Synechocystis* 細胞から光化学系II標品を単離したところ、従来法より高い酸素発生活性が得られた。今後は単離した標品の安定性を評価する。

光化学系IIには脂質の一種ホスファチジルグリセロール (PG) が結合しており、光化学系IIの構造と機能およびそれらの安定化に関わる (図)。本研究では、光化学系IIに結合する 5 分子の PG のうち、PG714 (図の円で囲った部分) の機能に着目した。PG714 と相互作用するアミノ酸残基を、(配位できないように) 部位特異的に置換した D1-R140 変異株と D2-T231 変異株を用いて解析を進め、これらの変異株では光化学系 II 還元側に位置する  $Q_A \rightarrow Q_B$  の電子伝達の遅延や複合体の不安定化を始め、光化学系 II 複合体内の各所で異常が起こることを見出した。すなわち、PG714 は光化学系II複合体内の複数の異なる部位において、構造的・機能的に重要な役割を担っていることが明らかになった。

研究期間後半には、光合成に用いる光質にも着目した。陸上植物では可視光域の光を用いて光合成を駆動する。赤色光より低エネルギー光である遠赤色光は単独では光合成を駆動しないため、光合成に対する遠赤色光の効果は調べられてこなかった。可視光の強さが頻繁に変化する変動光環境下においては、遠赤色光が陸上植物の光合成効率を上昇させることを明らかにした。一方、陸上植物に比べ、シアノバクテリアは多様な光合成色素をもっているため、多様な光質環境下で増殖する。クロロフィル *a* に加え、より長波長の光を吸収する光合成色素であるクロロフィル *f* をもつシアノバクテリアで

は、遠赤色光を効果的に光合成に用いていることを明らかにした。これらの研究をさらに進めることにより、遠赤色光を利用した光合成装置の開発への展開が期待できる。

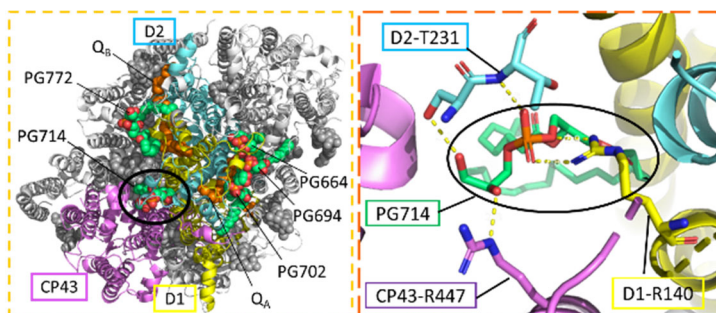


図. 光化学系II全体 (左) と PG714 周辺 (右) の構造

### 【優れた成果が上がった点】

遠赤色光は、単独では光合成を駆動しないため、その光合成への影響は研究されてこなかった。光合成を駆動できる波長域の光の強さが頻繁に変化する変動光環境下において、遠赤色光が光合成の効率を上昇させることを明らかにした。

上記の成果が、年報に記載されている、どの論文・研究発表にどの内容が含まれるか。

2019 年度にニュースリリースした内容であり、「M. Kono, H. Kawaguchi, N. Mizusawa, W. Yamori, Y. Suzuki, I. Terashima, “Far-Red Light Accelerates Photosynthesis in the Low-Light Phases of Fluctuating Light”, *Plant Cell Physiol.*, **61**, 191-202, DOI: 10.1093/pcp/pcz191, (2020)」に掲載されている。

「光合成を駆動しない遠赤色光が光合成を促進する」との題目で東京大学、法政大学、神奈川大学の 3 大学で共同ニュースリリースした（2019 年 10 月 16 日）。

### 【課題となった点とその克服法】

遠赤色光の変動光照射下での植物生葉の光合成活性を正確に効率的に測定するのが課題であった。当研究センターの所持する光合成電子伝達反応解析システムを用いることで、その実現が可能となった。

### 【研究終了後の展望】

光合成を駆動しないとされてきた遠赤色光が、変動光下の光合成の調節に有効であることを明らかにした本研究成果は、陸上植物の光合成機構を理解する上で遠赤色光を考慮することが必須であることを意味する。今後は、遠赤色光による光合成促進機構の分子機構の解明を目指す。

### 【研究成果の副次的効果】

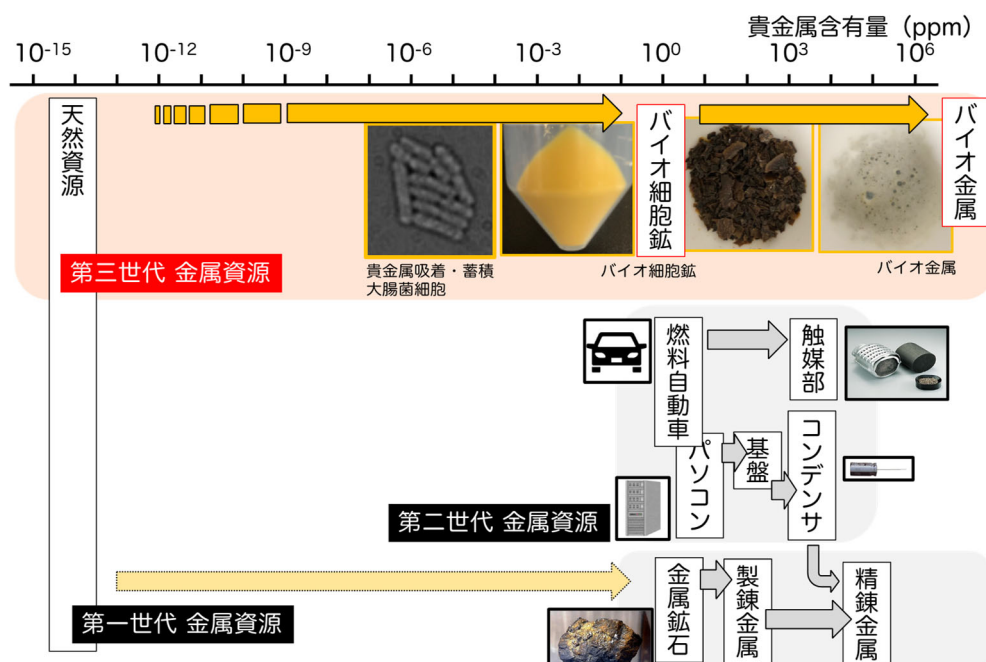
- ・ **実用化したら、どのような応用につながるか**：遠赤色光単独では光合成を駆動できないため、遠赤色光は植物工場においてあまり注目されてこなかった。遠赤色光の役割をさらに詳しく調べることにより、食料不足問題の解決に向けた光合成能増大作物の創出に新たな可能性を与えることが期待される。
- ・ **特許申請の可能性**：光合成反応を最適化するために、より効果的に働く遠赤色光の変動パターンがわかれば、特許申請に結びつくことができるかもしれない。

## 細菌由来の人工機能を付加した新規加工材料の開発

(生命科学部・生命機能学科) 山本 兼由

【目的】持続可能な社会を実現する循環型経済システムの構築には、原材料の安定供給が不可欠である。包括的に理解された生物機能バイオプロセスは合成生物学的なゲノムデザインを可能とし、産業上の低環境負荷・省エネルギー・低コストのメリットから様々な分野での活用が期待される。金属資源は、地球時間のなかで形成された高有価金属含有鉱石（第一世代金属資源）から、循環型社会構築の視点から高有価金属含有廃棄物（第二世代金属資源）へ変遷してきた。これらの有限な金属資源に対して、無限な第三世代の金属資源をバイオ細胞鉱の創出を目指した。

【成果概要】貴金属資源化に向けたバイオアブソープションやバイオアキュムレーションで活用できる大腸菌デザインを行った。（１）ランタノイドを含む希土類元素は、その希少性からレアアースと称されている。ランタノイドのテルビウムは蛍光体や磁性体に利用され、精密機器産業上重要な材料である。テルビウムと結合するアミノ酸配列モチーフを見出し、大腸菌の細胞壁に存在する OmpC を介し細胞外に提示する大腸菌形質転換体を創出した。この大腸菌形質転換体は溶液中のテルビウムを吸着し、レアアースの回収・資源化するバイオアブソープション技術開発の基盤を確立した。（２）白金族金属のパラジウムは、燃焼系自動車の排気ガス触媒などに利用され、自動車産業上重要な材料である。元来生体で利用されないとされてきたパラジウムが、大腸菌細胞で蓄積し、その恒常性に関する金属輸送システムの知見を得た。独自に開発したゲノム編集技術 HoSeI (Homologous Sequence Integration) 法を用いた大腸菌ゲノムの複数編集で、パラジウムを細胞内に蓄積させるゲノム編集大腸菌を創出し、白金族金属の回収・資源化するバイオアキュムレーション技術開発の基盤を確立した。



本研究で創出した大腸菌による貴金属バイオアブソープションやバイオアキュムレーション技術は、自然界の未利用な ppq オーダー溶存貴金属を ppm オーダーまで濃縮し、それらの大腸菌細胞を第三世代金属資源バイオ細胞鉱として利用することが期待できる。

### 【優れた成果が上がった点】

ゲノム上の複数遺伝子の改変を迅速に操作する新しいゲノム編集技術 HoSeI (Homologous Sequence Integration) 法を開発し、環境に応答した細菌の増殖(適応増殖)がゲノム上の複数遺伝子が関与するエピスタシス現象であることを、大腸菌をモデルに実証しました。開発した HoSeI 法は、抗生物質耐性遺伝子など他の生物由来の遺伝子マーカーを利用しない高い安全性、ゲノム上の DNA 配列において一塩基レベルでの改変、繰り返し行うことでゲノム上に複数の改変導入の 3 つの特徴をもちます。HoSeI 法は、細菌や古細菌の基礎学術研究だけではなく、合成生物学のような応用研究で活用することも可能です。実際、白金族金属パラジウムを蓄積させるゲノム編集大腸菌を創出し、白金族金属の回収・資源化するバイオアキュムレーション技術開発の基盤を確立した。

上記の成果が、年報に記載されている、どの論文・研究発表にどの内容が含まれるか。

新しいゲノム編集技術 HoSeI (Homologous Sequence Integration) 法開発については、2020 年度にプレス発表を行った内容であり、「Miyake, Y. and Yamamoto, K., (2020) Epistatic effect of regulators to the adaptive growth of Escherichia coli. Sci. Rep. 10(1):3661.」に記載されている。

「新しいゲノム編集技術 HoSeI 法を開発 - HoSeI 法により細菌適応増殖は複数遺伝子が相互作用するエピスタシス現象であることを実証」をプレスリリースした(2020 年 2 月 27 日)。

また、白金族金属のバイオアキュムレーション技術開発については、2020 年度に発行した総説「山本兼由, 渡邊宏樹 (2020) 微生物バイオプロセスを用いたレアメタル資源の確保 クリーンテクノロジー Vol.30 No.1, 43-49.」「山本兼由, 渡邊宏樹 (2020) ゲノム編集 HoSeI 法をもちいた大腸菌バイオプロセスを活用するレアメタル資源化 月刊 化学工業 2020 年 12 月号 Vol.71 No.12, 753-760.」に記載され、「山本兼由, 渡邊宏樹 白金族金属を蓄積する微生物 PCT/JP2021/042757 (2021. 11. 24)」として特許出願中である。

### 【課題となった点とその克服法】

(1) ランタノイドを含む希土類元素は、その希少性からレアアースと称されている。ランタノイドのテルビウムは蛍光体や磁性体に利用され、精密機器産業上重要な材料である。テルビウムと結合するアミノ酸配列モチーフを見出し、大腸菌の細胞壁に存在する OmpC を介し細胞外に提示する大腸菌形質転換体を創出した。この大腸菌形質転換体は溶液中のテルビウムを吸着し、レアアースの回収・資源化するバイオアブゾープション技術開発の基盤を確立した。

(2) 白金族金属のパラジウムは、燃焼系自動車の排気ガス触媒などに利用され、自動車産業上重要な材料である。元来生体で利用されないとされてきたパラジウムが、大腸菌細胞で蓄積し、その恒常性に関与する金属輸送システムの知見を得た。独自に開発したゲノム編集技術 HoSeI (Homologous Sequence Integration) 法を用いた大腸菌ゲノムの複数編集で、パラジウムを細胞内に蓄積させるゲノム編集大腸菌を創出し、白金族金属の回収・資源化するバイオアキュムレーション技術開発の基盤を確立した。

### 【研究終了後の展望】

- ① 無限な第三世代の金属資源としてバイオ細胞鉱の創出を提案した.
- ② レアアースバイオ細胞鉱創出のため、テルビウムのバイオアブゾープション技術開発の基盤を確立した.
- ③ 白金族金属バイオ細胞鉱創出のため、パラジウムのバイオアブゾープション技術開発の基盤を確立した.

### 【研究成果の副次的効果】

- ・ 実用化したら、どのような応用につながるか：(1) 高有価金属含有鉱石（第一世代金属資源）、高有価金属含有廃棄物（第二世代金属資源）の有限な金属資源に続く、新しい低コスト・低環境負荷型の金属資源化概念を提供し、発展的な循環型経済システムに貢献する。(2) パラジウムが数 ppq 含有する海や河川・湖沼の天然資源から、パラジウムを数 ppm 含有するバイオ細胞をバイオ細胞鉱として提供する.
- ・ 特許申請の可能性：次の特許出願した。山本兼由，渡邊宏樹 白金族金属を蓄積する微生物 PCT/JP2021/042757 (2021. 11. 24)



# ナノ構造を制御した無機イオン交換体を用いた新規土壌浸透浄化システムの開発

(生命科学部・環境応用化学科) 渡邊 雄二郎

無機イオン交換体の層状粘土鉱物やゼオライト、メソ孔やマイクロ孔を持つケイ酸塩であるメソポーラスシリカや珪藻土はその層間や細孔を利用した様々な有害物質の吸着能を有する。本研究では、これらの特性を応用した新規汚水浄化システム（土壌浸透浄化法）の開発に関する検討を行った。以下に主な成果を示す。

1. Si/Al モル比を 0.8 になるようにオルトケイ酸ナトリウムと塩化アルミニウムを調整し、pH7、98℃で反応させることにより、ハスクレイ（非晶質アルミニウムケイ酸塩）を効率良く合成でき、得られたハスクレイは高いアンモニウムイオン( $\text{NH}_4^+$ )とリン酸イオン( $\text{PO}_4^{3-}$ )の吸着能を示した。

2. 層状粘土鉱物（モンモリロナイト）層間に  $\text{Al}^{3+}$  やポリカチオンを導入し、球状化することにより、水に膨潤せず良好な浸透と  $\text{NH}_4^+$ 、 $\text{PO}_4^{3-}$  及びメチレンブルー (MB) の吸着を示す吸着材になることが明らかになった。

3. 珪藻土を所定条件でアルカリ水熱処理することで、珪藻土のマイクロ細孔を保持したままナノ細孔を持つゼオライトを複合化することに成功し、その複合体は高い  $\text{NH}_4^+$ 、MB 及びフミン酸の吸着能を示した。図 1 に複合体の作製法を示す。

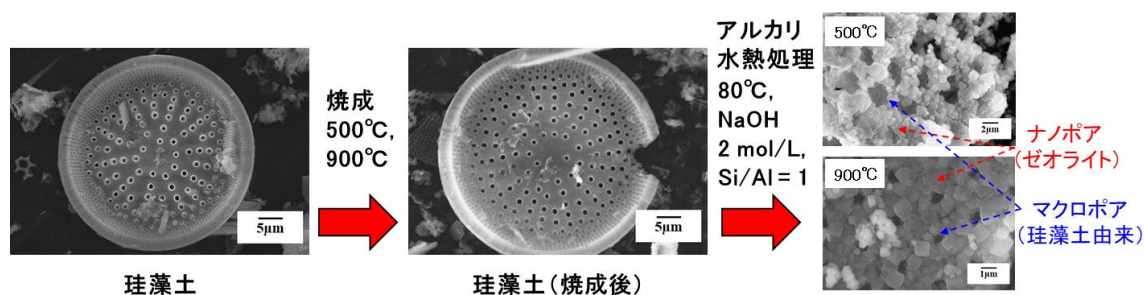


図 1 複合体の作製法

4. 地熱水中のシリカを用いたメソポーラスシリカ (MS) の合成に成功した。得られた MS は高い比表面積 ( $800 \text{ m}^2/\text{g}$ ) と均一なメソ細孔 (約 2.8 nm) を示すことが明らかになった。図 2 に得られた MS の TEM 像を示す。

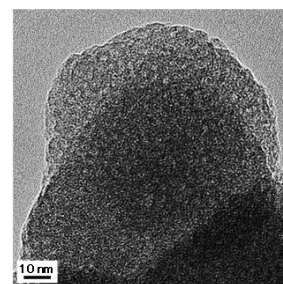


図 2 地熱水中のシリカから合成された MS の TEM 像

### 【優れた成果が上がった点】

ナノ構造を制御した無機イオン交換体を用いた新規土壌浸透浄化システムの開発研究の中で、地熱発電所の地熱水中のシリカから効率的にメソポーラスシリカを合成することに成功した。得られたメソポーラスシリカは  $800 \text{ m}^2/\text{g}$  の比表面積を有することが明らかにした。

### 【課題となった点とその克服法】

- ①上記特に優れた研究成果について：地熱発電所から持ち帰った地熱水中の希薄なシリカからメソポーラスシリカの合成は難しく、生成物は非晶質シリカであった。この原因は時間が経過した地熱水では、モノマーシリカが減少（ポリマーシリカが増加）したためであり、アルカリへの制御や水熱分解などを行う必要があった。しかし、現地でモノマーシリカの状態にある地熱水を用いることでこれらの処理を行わずに簡便にメソポーラスシリカを合成できることを見出した。
- ②珪藻土／ゼオライト複合体の作製：珪藻土のアルカリ水熱処理によるゼオライト化では、珪藻土の性質を保持できず、珪藻土のマイクロ細孔を利用できていなかった。本研究では珪藻土のマイクロ細孔を保持したままゼオライト化する水熱処理条件を詳細に検討し、マイクロ孔を有する珪藻土とナノ孔を有するゼオライトのマイクロ／ナノ多孔体を作製することに成功した。また、得られた複合体が有害有機物と陽イオンを除去できる水浄化材として有用であることを明らかにした。
- ③窒素とリン除去用ハスクレイの合成：ハスクレイは陽イオンと陰イオンの同時吸着能を有するが、これらの水溶液中のアンモニウムイオンやリン酸イオンの除去能に関する検討はされていなかった。本研究ではアンモニウムイオンとリン酸イオンの高い除去能を有するハスクレイの合成条件を明らかにした。
- ④層間制御にした層状粘土鉱物の作製と水浄化材料としての評価：これまでに、層状粘土鉱物を用いた水浄化システム（土壌浸透浄化法）が提案されている。しかし、層状粘土鉱物は膨潤・微粒子化して水中に分散し、フィルタの目詰まりを引き起こすことが問題であった。また、水質汚染物質であるアンモニウムイオンとリン酸イオンの同時除去は難しいとされていた。本研究では、アルミニウム等で層状粘土鉱物の層間制御を行うことで透水性とアンモニウムイオン・リン酸イオンの吸着能を有する新規水浄化材料を開発した。

### 【研究終了後の展望】

- ①特許、メソポーラスケイ酸の合成方法及び合成装置、並びに地熱発電装置（特願 2020-158947）を出願しており、触媒関係の企業、地熱発電所関係企業と連携し、地熱水からのメソポーラスシリカの製造方法を確立する。
- ②珪藻土／ゼオライト複合体の成形体（フィルタ）を作製し、実用化を目指す。
- ③ハスクレイは  $\text{CO}_2$  吸着材として市販化されているため、水溶液中の有害物質除去能の詳細な評価を行い、水浄化材としての市販化を目指す。
- ④層状粘土鉱物の層間制御や固定により硝酸イオン選択性の向上を目指す。

### 【研究成果の副次的効果】

・実用化したら、どのような応用につながるか：①メソ細孔を利用した触媒、イオン交換性も有するため各種吸着材。②水質浄化材料（有機物・窒素・リンの除去）。③水質浄化

材料（窒素・リンの除去）、④水質浄化材料（窒素・リンの除去）。

・特許申請の可能性：①に関してはすでに特許を申請しているため、地熱水から合成した生成物の特徴（例えば環境浄化材料としての特徴）を明らかにすることで、関連した特許が取得できる。

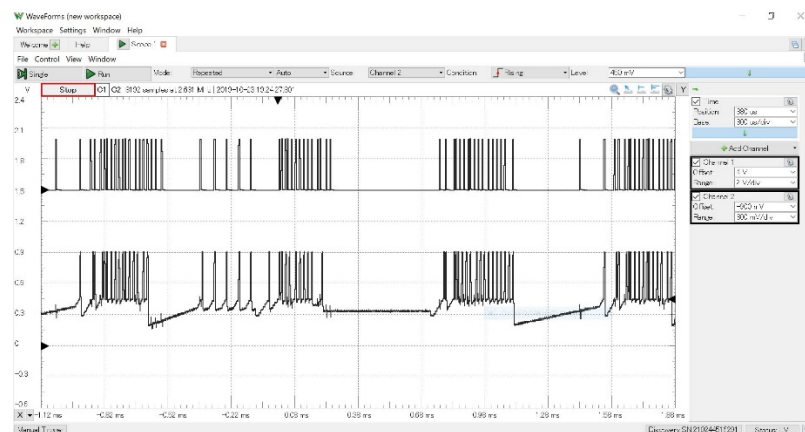
②～④に関してもこれらの材料を用いたフィルタ化等に関心を持っている企業があるので連携して特許取得を目指す。

## 高機能生物設計－人工内耳・神経補綴装置

(理工学部・電気電子工学科) 鳥飼 弘幸

【目的】近年、生物の感覚系や中枢神経系の動作を模倣する集積回路と、それらの神経補綴への応用が盛んに研究されている。感覚系の神経補綴装置の代表例として人工内耳が挙げられる。また、近年、中枢神経系を対象にした補綴装置の開発も始まっている。例えば、脳の一部の部位の機能が失われた場合に、その部位の動作を模倣する集積回路を用いて脳機能の回復を目指す神経補綴装置が開発されている。本研究では、従来モデルに比べて高性能な人工内耳及び脳の神経補綴装置を実現するための設計論の構築を目的とする。

【成果概要】①聴覚系の主要な構成要素である蝸牛は複雑な非線形動力学を有し、様々な非線形音声信号処理を実行していることが知られている。しかし、現行の人工内耳は主に線形システム理論を用いて設計されており、それ故、蝸牛の非線形音声信号処理を十分模倣することができない。そこで本章では、蝸牛の非線形動力学を非同期順序回路として効率的に実装する手法を提案した。理論解析と数値解析の両面から、提案蝸牛モデルが哺乳類の蝸牛が示す典型的な非線形音声信号処理の特性を模倣できることを示した。また、Field Programmable Gate Arrayを用いて提案蝸牛モデルを実装し、その動作を実機実験で確認させた。さらに、従来の蝸牛モデルと比較して、提案モデルが少数の回路素子で実装可能であり、低消費電力で動作可能であることを示した。②非同期順序回路を用いた神経細胞モデル及び同細胞モデルの非線形動力学の解析手法を提案した。そして、同解析手法を用いて、提案細胞モデルが典型的な神経細胞が示す非線形応答特性を模倣できることを理論と数値実験の両面から示した。次に、同神経細胞モデルを用いて、生物の短期記憶や眼球運動の制御において重要な役割を果たしている神経細胞ネットワークである神経積分器の集積回路モデルを提案した。緻密な数値解析の結果、提案ネットワークが生物の神経積分器の非線形応答特性を模倣できることを示した。さらに、提案ネットワークが従来モデルに比べて少数の回路素子で実装可能であり低消費電力で動作可能であることを示した。



集積回路実装上に実装した非同期順序回路神経細胞モデルの動作をオシロスコープで測定した例。  
(上)ラットの脳の神経細胞の測定波形の例。(下)提案神経細胞モデルの測定波形の例。

### 【優れた成果が上がった点】

本研究課題では、人工内耳や神経補綴装置などへの応用を目指した生物模倣ハードウェアの設計、解析、実装、検証などに取り組んでいる。脳は神経細胞の結合系で構成されており、神経細胞はその部位や種類に依存して様々な非線形動力学を持つ。本研究課題では、非線形力学系理論や複雑系理論を駆使して神経細胞ネットワークの集積回路モデルを設計することにより、従来モデルに比べて少数のトランジスタで実装でき、かつ低消費電力なニューラルネットワーク回路を設計した。特に、生物の運動を制御・補助するニューラルネットワークの効率的な集積回路化手法を開発した。

上記の成果が、年報に記載されている、どの論文・研究発表にどの内容が含まれるか。

以下の論文に内容が含まれている。

[K. Takeda and H. Torikai, “A Novel Asynchronous CA Neuron Model: Design of Neuronlike Nonlinear Responses based on Novel Bifurcation Theory of Asynchronous Sequential Logic Circuit”, IEEE Trans. CAS-I, Vol. 67, No. 6, pp. 1989 – 2001, 2020]

また、本研究では、非線形力学系理論や複雑系理論を駆使した人工蝸牛集積回路を設計し、同回路が従来の人工蝸牛回路に比べて少数のトランジスタで実装でき、かつ低消費電力であることを示した。それらの結果は以下の論文に内容が含まれている。

[K. Takeda and H. Torikai, Two-Tone Distortion Products in Hardware-Efficient Cochlea Model based on Asynchronous Cellular Automaton Oscillator, IEICE Electronics Express, 2021 (accepted)]

### 【課題となった点とその克服法】

人工内耳や神経補綴装置などへの応用を目指した生物模倣ハードウェアの設計においては、内耳や神経細胞が持つ非線形動力学を効率的に集積回路に実装する必要がある。本研究では、この課題を、非同期順序回路を用いることで克服した。

### 【研究終了後の展望】

人工内耳に関する研究については、研究終了後も引き続き内容を発展させ、従来モデルに比べて格段に高性能な人工内耳の開発を目指す。神経補綴装置に関する研究についても引き続き内容を発展させ、ヒトの脳を対象にした神経補綴装置の実用化に貢献する。

### 【研究成果の副次的効果】

- ・ **実用化したら、どのような応用につながるか**：本研究の成果は、現在実用化されている人工内耳の性能を本質的に凌駕する高性能な人工内耳の実用化に貢献できる。また、脳の補綴装置の実用化において、その小型化・低消費電力化に貢献できる。
- ・ **特許申請の可能性**：神経補綴用集積回路を含む「多岐にわたる非線形動力学を有する集積回路の小型化・低消費電力化」に関して特許申請の可能性がある。

成果概要

## **Chemically mediated Control**



## セラミック粒子の積層実装による合金の表面改質プロセスの開発

(生命科学部・環境応用化学科) 明石 孝也

様々な分野で摩擦を低減させるために用いられる軸受をターゲットとして、セラミック粒子の積層実装の手法を用いて、軸受用鋼の摺動性と耐摩耗性を向上させるための表面改質プロセスを開発している。

2019年度までの研究で、ゾル-ゲル法を用いたナノ  $\text{CeO}_2$  粒子分散イットリア部分安定化ジルコニア (YPSZ) 層を積層させる工程において、スピコート後の還元雰囲気焼成により亀裂のない膜を形成させ、その後の酸化雰囲気熱処理により、膜にマイクロクラックを導入させた。これにより、軸受鋼の摩擦係数を低減させた。

2020年度の研究では、電気泳動を利用したナノ  $\text{CeO}_2$  粒子分散 YSZ 層の新規製膜法の開発に着手した。この成膜法は、金属アルコキシドを含む有機溶媒中にセラミックス粒子を分散させた懸濁液を、電圧を印加したアルコール中に滴下することにより、セラミックスコンポジット膜を作製する方法である。この新規成膜法をゾル滴下電気泳動堆積法 (ゾル滴下 EPD 法) と名付けた。

2021年度は、ゾル滴下 EPD 法の電気泳動堆積条件と堆積膜の焼成条件の最適化を行った。YSZ 固体粒子と金属アルコキシド由来の YPSZ の割合が 8 : 2 になるように前駆体溶液を調整し、ゾル滴下 EPD 法における印加電圧を 200 V とし、堆積膜を空气中で焼成した場合に、図 1 に示すようにナノ  $\text{CeO}_2$  粒子分散 YPSZ の粒子堆積層を軸受鋼球に均一に被覆することができた。この球状試料を用いたボールオンディスク法の摩擦摩耗試験により、図 2 に示すように摩耗に至るまでのスライド距離は 2.31 m となり、従来のスピコートを用いた場合の値 (0.46 m) の 5 倍の値となった。

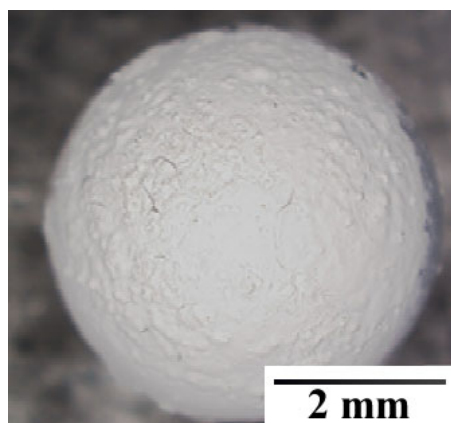


図 1 ゾル滴下 EPD 法によりナノ  $\text{CeO}_2$  粒子分散 YPSZ コーティングを施した軸受鋼球の外観。

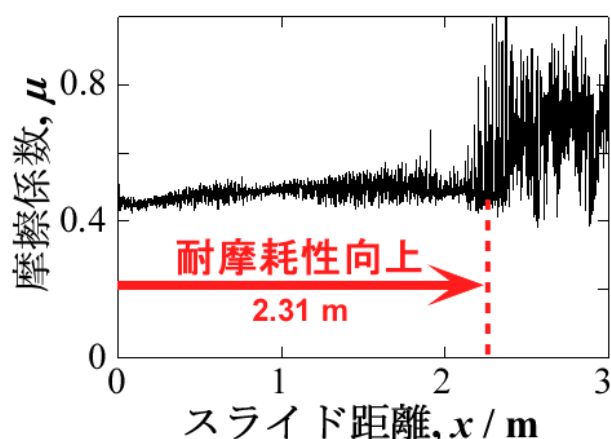


図 2 ゾル滴下 EPD 法によりナノ  $\text{CeO}_2$  粒子分散 YPSZ コーティングを施した軸受鋼球の摩擦摩耗試験結果。

### 【優れた成果が上がった点】

新規電気泳動堆積法（ゾル滴下電気泳動堆積法と命名）を用いて、高炭素クロム軸受鋼（SUJ-2）の表面にナノ粒子分散セラミックスの厚い粒子堆積膜を形成することに成功した。このセラミックコーティングを施すことにより、軸受鋼球のステンレス鋼板に対する摩擦係数を半減させた。また、従来のスピコートを用いた方法よりも、摩耗摩擦試験時に摩擦係数が上昇するまでのスライド距離を5倍にまで延長させ、耐摩耗性を大幅に向上させることに成功した。

上記の成果が、年報に記載されている、どの論文・研究発表にどの内容が含まれるか。

梶優介，明石孝也，「ゾル滴下電気泳動堆積法による高炭素クロム軸受鋼へのナノセラリア分散イットリア部分安定化ジルコニア膜の形成」，第60回セラミックス基礎科学討論会，熊本大学黒髪南キャンパス，2022年1月8-9日，講演番号2B11。

### 【課題となった点とその克服法】

軸受鋼球表面へのセラミックコーティングに対する課題は、亀裂の少ない厚い膜を形成することにあった。通常の電気泳動堆積法ではセラミック膜の形成時に1200℃以上の高温で焼成する必要があった。また、ゾル-ゲル法では、焼成温度を700℃程度にまで下げることができるものの、亀裂の少ない厚い膜を形成することが困難であった。そこで、新規の電気泳動堆積法としてゾル滴下電気泳動堆積法（「セラミックスコンポジット膜の形成方法」，特願2021-212652，法政大学，明石孝也）を開発し、亀裂の少ない厚い粒子堆積層を形成させることに成功した。

### 【研究終了後の展望】

ベアリングは、回転や往復運動を行う機器の摩擦を低減するために不可欠な部材であり、自転車・モーターサイクル・障害者スポーツ用の機材に使用されている。また、機械の摺動部の摩擦低減は、環境や省エネルギーの問題にも貢献する。さらに、機材の滑らかな動きはその機材の安全・安心に貢献し、生活の質の向上に寄与する。よって、本研究で扱う課題は、機械技術・機械工学の広範囲に波及することが期待される。

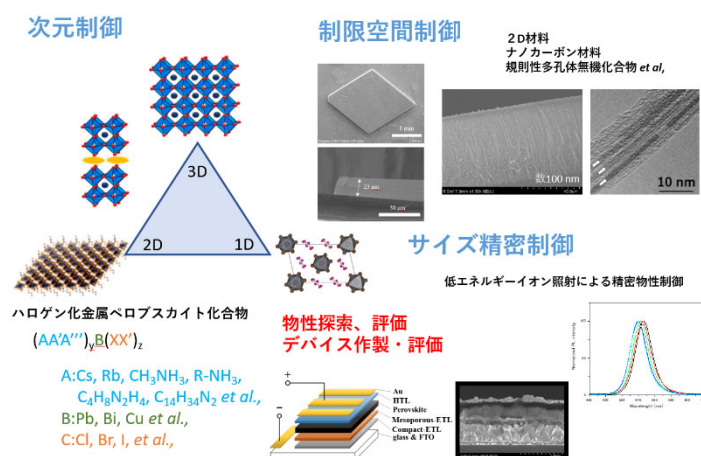
### 【研究成果の副次的効果】

- ・ 実用化したら、どのような応用につながるか：「ナノトライボロジーコートベアリング（NTCB）」（仮称）と称して、高い摺動性を有する付加価値の高いベアリングを社会に送り出し、関連する産業分野を活性化させることが、本研究の応用展開で目指す姿である。最初のターゲットには、競技用の自転車への応用を置き、その後、付加価値を求められる価格帯の自転車（電動アシスト車など）へと展開させたい。
- ・ 特許申請の可能性：2021年12月27日に「セラミックスコンポジット膜の形成方法」，出願人：法政大学，発明者：明石孝也，特願2021-212652を出願済みである。

# マイクロ・ナノ構造体中の有機-無機ハイブリッド化合物の 物性制御とエネルギーデバイスへの応用

(生命科学部・環境応用化学科) 緒方 啓典

本研究では、ナノメートル( $10^{-9}$ m)からマイクロメートル( $10^{-6}$  m)にわたる広範囲なサイズの制限空間内に成長した結晶を用いた新しい機能性材料の開発および物性開拓, それらを用いたエネルギーデバイスへの応用を目指して研究を行った。具体的には、ペロブスカイト太陽電池の電子輸送層として使用されている金属酸化物の中で、 $\text{TiO}_2$ に注目し、その成膜方法として電着法(Electrodeposition:ED), スプレー熱分解法(spray pyrolysis:SP), スピンコート法(spin-coating:SC)を用いた場合の電荷輸送特性および太陽電池特性に与える効果を系統的に調べた。その結果、電着法により作製した $\text{TiO}_2$ は他の方法で作製した $\text{TiO}_2$ に比べて、表面積が大きく、高い正孔遮蔽効果、高い表面被覆率、高い電子輸送特性および高いエネルギー変換効率を示すことを明らかにした。また、電子輸送層として $\text{ZnO}_2$ ,  $\text{SnO}_2$ ,  $\text{Nb}_2\text{O}_5$ 等について取り上げ、各電子輸送層の作成方法、表面の酸処理が各種金属酸化物の電子輸送特性に及ぼす影響について系統的に調べた。2. ハロゲン化金属ペロブスカイト半導体薄膜への低エネルギーイオン照射によるバンドギャップエネルギー精密制御の可能性を明らかにした。また、荷重印加下における空間制限逆温度結晶化法により有機無機ハイブリッドペロブスカイト単結晶薄膜の膜厚制御が可能であることを明らかにした。また、ハロゲン化銅ペロブスカイト化合物薄膜およびハロゲン化ビスマス系ペロブスカイト化合物薄膜の成膜条件と電子物性の関係を明らかにした。また、様々なサイズのナノカーボン材料について、その構造の特徴を生かした複合体の新たな合成方法を開発し、電気二重層キャパシター、熱電材料特性、可視光触媒の可能性を鑑賞した。



### 【優れた成果が上がった点】

ナノカーボン材料の新たな精密電荷制御技術を提案し、それを単層カーボンナノチューブに適応し、有機半導体ナノ結晶との複合材料において光触媒の可能性を明らかにした。

上記の成果が、年報に記載されている、どの論文・研究発表にどの内容が含まれるか。

次世代太陽電池の候補として注目されているペロブスカイト太陽電池の光活性層への低エネルギーイオン照射による電子状態制御の可能性を明らかにした。学会発表した

Hironori Ogata, Tomohiro Watanuki, Keitaro Kikuchi and Tomoaki Nishimura, “Effect of low energy ion irradiation on the optoelectronic properties of lead halide perovskite films”, The International Chemical Congress of Pacific Basin Societies 2021(Pacificchem2021), 2021 年 12 月 20 日, 口頭発表, オンライン開催。  
を投稿中。

### 【課題となった点とその克服法】

荷重印加下における空間制限逆温度結晶化法により、有機-無機ハイブリッドペロブスカイト単結晶薄膜の膜厚制御が可能であることを明らかにした。一方で、太陽電池デバイス等への応用に向けては、さらなる大表面積化が必要である。この課題解決のためには、精密な温度制御および詳細な混合溶媒の選択による最適化が必要である。

### 【研究終了後の展望】

これまでに得たナノカーボン材料、有機無機ハイブリッド半導体薄膜の構造および電子状態制御に関する研究成果を基にさらに基礎研究を発展させ、企業との共同研究等を通して社会実装化に結び付けたい。

### 【研究成果の副次的効果】

- ・実用化したら、どのような応用につながるか：太陽電池、熱電素子、光触媒、電気二重層キャパシタへの応用が期待される。
- ・特許申請の可能性：下記の 2 件の発明について特許出願および出願審査請求を行った。さらに、今年度行った研究成果に関連した 1 件の特許出願を行う準備中である。カーボン材料の電荷特性制御方法 特開 2019-77608。有機系の微小構造体 特開 2019-130524。

## 酸化物・水酸化物微粒子の 3D 構造制御合成と環境・エネルギー材料への応用

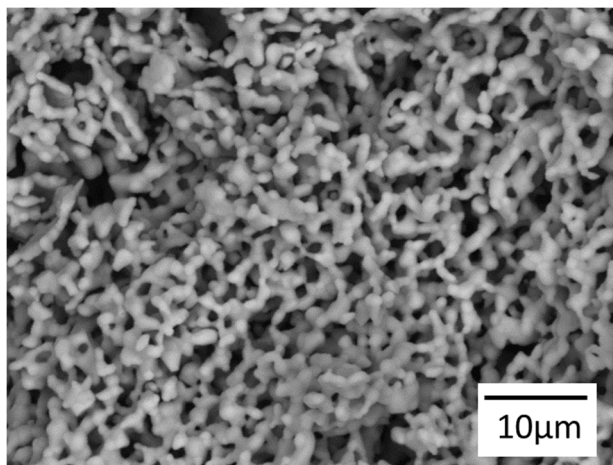
(生命科学部・環境応用化学科) 石垣 隆正

【目的】 酸化物,あるいは水酸化物微粒子の 3 次元配置により,多孔体構造を制御し,環境・エネルギー機能を有する材料の作製をめざした. ①可視光活性な複合酸化チタン系微粒子光触媒を基材へのコーティングをして,実用的な光触媒材料の作製をめざした. ②デンプンの糊化・老化現象を利用してマイクロ・メソ・マクロ階層構造多孔体の作製を行った. ③水酸化物微粒子の 3 次元配置により,メソ多孔体を作製し,さらに構造強化をはかった.

【成果概要】 ①高温熱処理により可視光下の光触媒活性を発現するニオブドープ酸化チタン触媒粉末をプラズマ法により調製して,ミクロン～ミリオーダーの細孔からなる三次元構造を持った炭化ケイ素セラミックス多孔体に担持して,空気浄化フィルターへの応用をめざした. さらに,環境低負荷で,大量合成可能なメカノケミカル法においても高温熱処理により発現する可視光活性な光触媒材料を調製した.

②マイクロ・メソ・マクロ階層構造多孔質体の作製にあたり,造孔材としてデンプンに着目した. デンプンを水に添加して加熱すると水和して糊状になる糊化現象と,その糊状物を冷却すると脱水し,結晶化する老化現象を利用した. 高い酸素透過速度が期待される酸化物イオン・電子混合伝導性セラミックス材料である Ba-Sr-Co-Fe 系酸化物(BSCF),水浄化フィルターの性能向上に資するためのハイドロキシアパタイト(HAp),VOC 吸着剤として期待できるゼオライト多孔体を作製した. BSCF, HAp ではポスト焼結処理により,ゼオライトではポスト水熱処理により,連通したマクロ孔と使用に十分な強度を有する多孔体となった. それぞれ,酸素分離フィルター,ウィルス吸着除去フィルター,セラミックハニカム担体を必要としない VOC 吸着剤への応用が期待できる.

③層状構造を有する遷移金属水酸化物の一種である  $\text{Ni}(\text{OH})_2$  ナノドットを種結晶として溶解-再析出現象によって積層方向あるいは面内方向への結晶成長度合いを制御したメソ多孔体を調製した. ナノサイズのビルディングブロックの架橋に用いたアクリレート重合反応で,機械的強度の高い多孔体となった. 電気エネルギーの生成・貯蔵が可能な電気化学キャパシタ材料の高性能化が期待される.



**ハイドロキシアパタイト多孔質体.** ウィルスは主に負に帯電しているため,正に帯電した *ab* 面を露出させることでウィルスを吸着除去可能である. また,マクロ多孔構造にすることで,内部まで処理水を浸透させることができ,フィルター特性の向上が見込まれる.

### 【優れた成果が上がった点】

グリーンソサエティプロジェクトに先立つグリーンテクノロジープロジェクトで得られた代表的成果、500℃以上の高温熱処理によって出現する従来に見られないタイプの可視光活性酸化チタン光触媒を、環境低負荷なメカノケミカル法により合成することができた。このTiO<sub>2</sub>にニオブを添加した光触媒は、従来プラズマ合成により作製していたが、環境低負荷なメカノケミカル法の利点を活かして応用の期待が大きくなった。

上記の成果が、年報に記載されている、どの論文・研究発表にどの内容が含まれるか。

2021年度にプレス発表を行った内容であり、「N. Tarutani, R. Kato, T. Uchikoshi, T. Ishigaki, "Spontaneously formed gradient chemical compositional structures of niobium doped titanium dioxide nanoparticles enhance ultraviolet- and visible-light photocatalytic performance", *Sci. Rep.*, 11, 15236, 1-11(2021).」に記載されている。「メカノケミカル法を用い、精密に光触媒を合成するプロセスを開発ー環境低負荷で簡便なプロセスによる可視光活性光触媒の合成を実現ー」をプレスリリースした(2021年8月2日)。

### 【課題となった点とその克服法】

- ①高温熱処理により可視光下の光触媒活性を発現するニオブドープ酸化チタン触媒のメカノケミカル法合成においては、光触媒活性を評価する色素の光脱色反応の観測実験手法の改良を行った。それまでは、一定時間毎に実験系から試料を採取し、紫外可視分光光度計で測定するバッチ式でおこなっていた。連続的に脱色過程を計測できる反応容器の改良と、吸収スペクトルの時間変化の解析法を改良した。一連の改良により、脱色反応速度の測定精度が上昇した。精度の高い触媒活性データと試料の精密なキャラクタリゼーションデータを組み合わせて、メカノケミカル法によって合成により作製した光触媒の特徴を見出し、さらに合成プロセスにフィードバックして特性向上につながった。
- ②ミクロ・メソ・マクロ階層構造多孔体の作製においては、造孔材としてデンプンに着目した。デンプンを水に添加して加熱すると水和して糊状になる糊化現象と、その糊状物を冷却すると脱水し、結晶化する老化現象を利用した。
- ③遷移金属水酸化物Ni(OH)<sub>2</sub>メソ多孔体を調製においては、Ni(OH)<sub>2</sub>ナノドットを種結晶として溶解ー再析出現象によって積層方向あるいは面内方向への結晶成長度合いを制御した。また、メソ多孔体の堅牢化をめざして、ナノサイズのビルディングブロックの架橋に用いたアクリレートの重合反応を行って機械的強度の高い多孔体を得た。

### 【研究終了後の展望】

- ①メカノケミカルプロセスは、環境低負荷なプロセスであり、また大量合成可能な合成法である。
- ②環境低負荷な溶液合成法により、さまざまなサイズの多孔体合成も行ったので、この多孔体中の物質移動をよりフレキシブルにすることにより、エネルギー材料、ドラッグデリバリー、発光材料の合成に結びつくことを期待している。



**【研究成果の副次的効果】**

- ・**実用化したら、どのような応用につながるか：**①高温熱処理により可視光活性を発現する光触媒材料：空気清浄機，水浄化（循環式農業用水等），防汚コート．②ミクロ・メソ・マクロ階層構造多孔質体：大気中の酸素を分離するフィルター，ウィルスを吸着除去する水浄化フィルター，セラミックハニカム担体を必要としない VOC 吸着剤．③ $\text{Ni(OH)}_2$  メソ多孔体：電気化学キャパシタ材料．
- ・**特許申請の可能性：**ニオブドープ酸化チタン光触媒に関する成果は，すでに特許申請を行っているので，他の機能性材料，例えば発光材料の環境低負荷合成により新たな特許申請に結びつくことが期待できる．

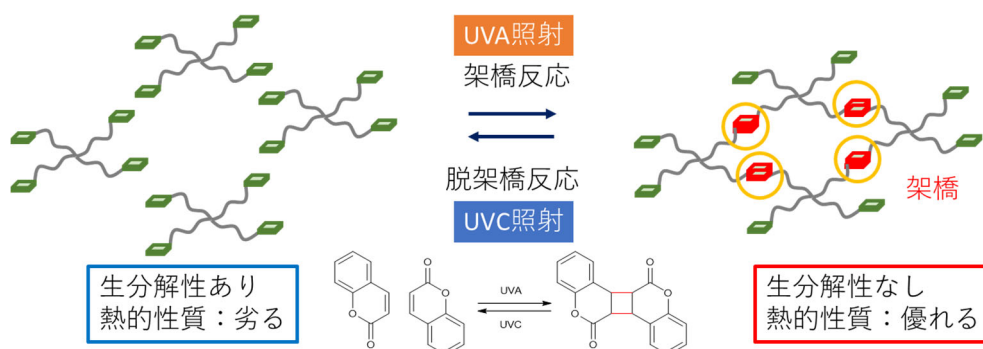
## 光反応型ソフトマテリアルの開発

(生命科学部・環境応用化学科) 杉山 賢次

【目的】光反応性基は紫外光の照射により、選択的な二量化反応を起こす。この反応は添加剤が不要で、反応後も極性基が生成しない等、クリーンで環境に優しい点で優れている。本研究では、光反応性基をポリマー鎖の架橋反応点として利用することで、ソフトマテリアル（有機系ポリマー）の集合形態の安定化や熱的性質の向上を試みる。

【成果概要】①光反応性基であるシンナモイル基を含む一次構造が厳密に規制された両親媒性ブロック共重合体の合成と、得られたブロック共重合体を用いた水中での高分子ミセル形成、およびイブプロフェンをモデル薬物とした高分子ミセル中への薬物封入について検討した。通常、封入量は1週間で35%まで大きく減少するが、紫外線 UVA 照射によるシンナモイル基の光二量化反応を行うことで、封入量は1週間後も85%を維持し、高分子ミセルを用いたドラッグデリバリーシステムにおいて課題となっている内包薬物の保持力の向上に成功した。

②代表的な生分解性プラスチックの一つであり、天然由来の乳酸を原料とすることからカーボンニュートラルの観点で注目されているポリ乳酸（PLA）に、可逆的な光反応性を示すクマリン基を導入した。このポリマーに紫外線 UVA を照射すると、クマリン基の二量化による PLA 鎖間の架橋反応が起こり、ポリマーのガラス転移温度  $T_g$  が上昇、耐熱性が向上した。ただし、ポリマー鎖の分子運動性が低下したことで生分解性は失われた。しかしながら、架橋ポリマーに紫外線 UVC を照射すると、クマリン基の脱二量化とともにポリマー鎖間の脱架橋反応が起こり、 $T_g$  が低下、生分解性が復元されたことから、PLA の耐熱性と生分解性の制御に成功した。



クマリン基の可逆的光二量化反応による架橋・脱架橋反応を利用したポリ乳酸の耐熱性・生分解性制御の概念図

③光反応性基であるアントラセニル基を生分解性プラスチックとして知られるポリカプロラクトン（PCL）や PLA に導入したポリマーを合成した。このポリマーに紫外線 UVA を照射することで架橋反応が進行し、耐熱性の向上と生分解性の低下が起きた。さらに、架橋ポリマーを加熱条件下で処理することで脱架橋反応が進行し、生分解性が復元することを確認した。

④光反応性基であるフェニルマレイミド基を  $\alpha$  末端、撥水・撥油性を示すパーフルオロアルキル（Rf）基を  $\omega$  末端に有する末端官能基化 PCL を合成した。通常、ポリマーフィルム最表面は Rf 基が濃縮することで撥水・撥油性を示す。しかし、主鎖の PCL が親油性であるため、オイルと接していると Rf 基と PCL 主鎖が入れ替わる表面再構築が起こり、撥水・撥油性が低下してしまう。そこで、このポリマーフィルムに紫外線 UVA を照射してフェニルマレイミド基を光二量化することで、ポリマー鎖の分子運動性を低下させ、Rf 基の表面濃縮を維持し、長時間の撥水・撥油性の保持に成功した。

### 【優れた成果が上がった点】

代表的な生分解性プラスチックの一つであり、天然由来の乳酸を原料とすることからカーボンニュートラルの観点で注目されているポリ乳酸（PLA）に、可逆的な光反応性を示すクマリン基を導入した。このポリマーに紫外線UVAを照射すると、クマリン基の二量化によるPLA鎖間の架橋反応が起こり、ポリマーのガラス転移温度 $T_g$ が上昇、耐熱性が向上した。ただし、ポリマー鎖の分子運動性が低下したことで生分解性は失われた。しかしながら、架橋ポリマーに紫外線UVCを照射すると、クマリン基の脱二量化とともにポリマー鎖間の脱架橋反応が起こり、 $T_g$ が低下、生分解性が復元されたことから、PLAの耐熱性と生分解性の制御に成功した。

上記の成果が、年報に記載されている、どの論文・研究発表にどの内容が含まれるか。

杉山賢次, “生分解, バイオマスプラスチックの開発と応用”, 技術情報協会, pp.140-152 (2020)」に、耐熱性と生分解性について述べている。

### 【課題となった点とその克服法】

従来、ポリマーの耐熱性向上には架橋反応が有効であることが知られていたが、これを生分解性プラスチックに適用すると、耐熱性向上と引き換えに生分解性が失われてしまうことが問題であった。本研究では可逆的光二量化反応を示すクマリン基を生分解性プラスチックに導入することで、耐熱性と生分解性の両立に成功した。

### 【研究終了後の展望】

耐熱性と生分解性の両立に向けた概念を示すことができたので、材料としての実用化に向けた更なる機能性の向上を目指す。

### 【研究成果の副次的効果】

- ・ 実用化したら、どのような応用につながるか：従来の使い捨てのプラスチック製品から耐熱性と生分解性を両立した再生可能プラスチックへの転換を期待する。
- ・ 特許申請の可能性：新規の再生可能プラスチックの製造法としての申請が期待される。

(イオンビーム工学研究所) 三島 友義

【研究概要】ウェットエッチングは、試料に光照射とパルス電圧印加による光電気化学 (PEC) エッチングを GaN に最適化・高度化することで初めて可能となった。図 1 のようにアスペクト比の高いトレンチ構造に対応する深堀も可能である。この技術を適用したメサ型 p-n ダイオードではエッチング面の平坦性が改善し、従来のドライエッチングを用いたものより耐圧の向上と大幅なばらつき改善が可能となった (図 2)。

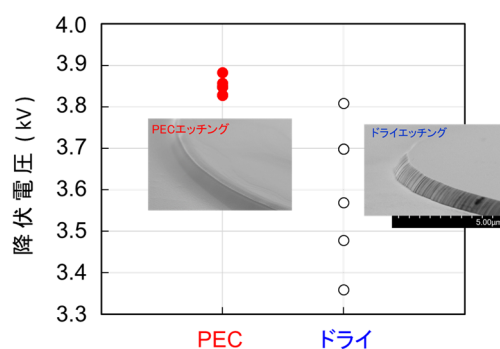


図2. エッチング方法によるダイオードの  
降伏電圧のばらつきの違い

**2段メサ構造**

全メサ幅:  $X = 15 \mu\text{m}$   
 フィールドプレート電極:  $5 \mu\text{m}$   
 p-GaN:  $\text{Mg} = 1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ ,  $500 \text{ nm}$   
 3層ドリフト層 ( $> 5 \text{ kV}$  耐圧設計)  
 400 nm  
 1  $\mu\text{m}$

**従来型1段メサ構造**

アノード電極:  $\text{Mg} = 2 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ ,  $30 \text{ nm}$   
 p<sup>+</sup>-GaN:  $\text{Mg} = 2 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ ,  $30 \text{ nm}$   
 SiO<sub>2</sub> 200 nm  
 SOG 400 nm  
 15  $\mu\text{m}$   
 un-GaN:  $5.5 \mu\text{m}$   
 n-GaN:  $\text{Si} = 9 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ ,  $22 \mu\text{m}$   
 n-GaN:  $\text{Si} = 1.6 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ ,  $5.5 \mu\text{m}$   
 n-GaN:  $\text{Si} = 2 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ ,  $2 \mu\text{m}$   
 n-GaN 基板  
 カソード電極

56

### 【優れた成果が上がった点】

これまで実用的には不可能とされてきた GaN 結晶に対するウェットエッチングを光電気化学(PEC)エッチングにより実現し、初めて高耐圧メサ構造 GaN p-n ダイオードに適用した。従来のドライエッチングに対してダメージレスであることから、耐圧の向上と大幅な特性バラツキの低減を実証した。新規に考案した 2 段メサ構造を世界最高耐圧の GaN p-n ダイオードに適用し、繰返し降伏試験にも耐える高い破壊耐量を実現した。

上記の成果が、年報に記載されている、どの論文・研究発表にどの内容が含まれるか。

半導体の技術プレス SemiconductorTODAY 誌 13 巻 8 号に Technology Focus として紹介された。「Fumimasa Horikiri, Hiroshi Ohta, Naomi Asai, Yoshinobu Narita, Takehiro Yoshida, and Tomoyoshi Mishima, "Excellent potential of photo-electrochemical etching for fabricating high-aspect-ratio deep trenches in gallium nitride", Applied Physics Express, 11, 091001(2018).」に記載されている。

### 【課題となった点とその克服法】

- ①GaN に光アシスト電気化学エッチングを適用し、パルス電圧等の条件の最適化からアスペクト比の高い深いトレンチ構造を形成することに初めて成功した。これまで活性イオン照射によるドライエッチングでしかなし得なかった構造をダメージフリーで作製でき、縦型パワーデバイスの開発に重要なツールとなることを示した。
- ②上記をパルス光に切り替えることで電極フリー化を実現し、大口径基板にも対応できる拡張性・生産に優れた技術を開発した。UVC 光と電解液に K<sub>2</sub>S<sub>2</sub>O<sub>8</sub> を用い従来のドライエッチと同等のレートでダメージフリーにエッチングが可能である。さらに、TMAH 処理を追加することで側壁の垂直化や転位によるエッチング残差の除去も可能である。
- ③高耐圧 GaN p-n ダイオードのメサ端での電界集中を、ナノスケールで加工した 2 段メサ構造にすることで、表面電荷やダメージの影響を受けない結晶内部に移動させることにより、高い破壊耐量を可能とした。

### 【研究終了後の展望】

縦型 GaN パワーデバイスは、これまでの Si デバイスはもとより近年高効率パワーデバイスとして登場した SiC デバイスに比べても電力変換時のエネルギー損失を半分に減らせる。本研究は、バイポーラ型のパワートランジスタなどにも適用可能であることから、多様な構造の高効率パワーデバイスの研究開発に発展できる。

### 【研究成果の副次的効果】

- ・実用化したら、どのような応用につながるか：本研究の成果は、環境省のプロジェクト「GaN 技術による脱炭素社会・ライフスタイル先導イノベーション事業」に参画した大手電気メーカーにも展開されており、超高効率インバーター等への適用が期待されている。
- ・特許申請の可能性：すでに住友化学の子会社であるサイオクス社と共同出願してきた特許

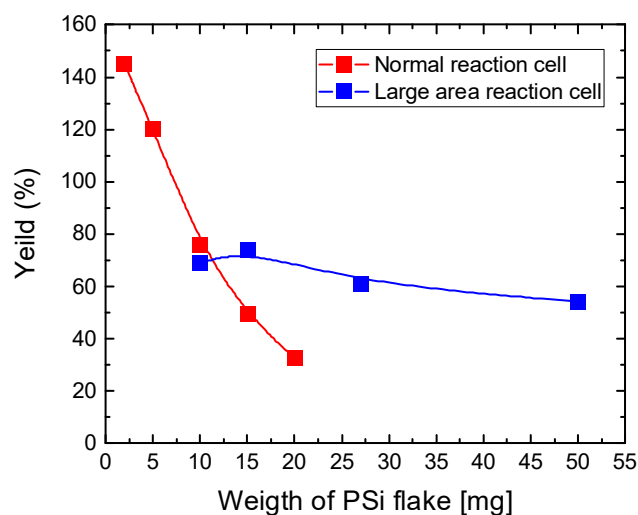
群が国内，米国，中国等で成立して来ている．



## シリコン量子ドット発光材料の高効率生成プロセスの開発

(理工学部・電気電子工学科) 中村 俊博

シリコン量子ドットは環境に優しく安価であるにもかかわらず量子サイズ効果による制御可能な発光色を示す発光材料である。研究担当者は、これまで陽極化成法を用いて作製したポーラス（多孔質）シリコンを前駆体とした量子ドット高効率生成プロセスの開発を進めてきた。今年度は、液中低温加熱粉碎法を用いた大量生成プロセス技術確立のために、プロセス当たりのシリコン量子ドット生成収率の最大化を検討した。具体的には、異なる底面積を持つ2種の生成反応容器を用いて、原料多孔質シリコンの重量に対して収率がどのように依存するかを調べた。収率は、多孔質シリコン原料の重量に対する生成されたシリコン量子ドットの重量の比として定義した。評価を行った結果を図のグラフに示す。図のとおり、通常の容器を用いた場合は、10mg までは80%程度の収率が維持できることが、原料を増やすにつれて、急激に収率が減少することがわかった。一方、大型容器の場合、収率は70%前後で推移し、安定した収率となることが判明した。以上のことから、適切な反応容器サイズと原料の量の組み合わせが存在することが明らかになった。



図：多孔質シリコン原料の重量に対する生成収率の依存性。異なる底面積を持つ反応容器において検討を行った結果を示す。

### 【優れた成果が上がった点】

多孔質シリコンをターゲットとした液中レーザー照射法によりバルクターゲットに比べて著しく高効率にシリコン量子ドットを生成に成功し、溶媒種やレーザー照射により自在に発光色や溶媒への溶解性を制御できる技術を確立した。さらに、その技術を発展させ、液中レーザー照射法に比べてより低いエネルギーコスト処理である、低温加熱粉碎技術によっても同様に高効率かつ制御性の高いシリコン量子ドットを得るプロセス技術の開発にも成功した。

上記の成果が、年報に記載されている、どの論文・研究発表にどの内容が含まれるか。

液中レーザー照射法の溶媒制御性に関する研究成果は、2019 年報の「Z. Yuan, T. Nakamura, S. Chinnathambi, Y. Pu, N. Shirahata, K. Matsuishi “Facile Formation of Stable Water-Dispersed Luminescent Silicon Nanocrystals by Laser Processing in liquid: Toward Fluorescent Labeling for Bio-imaging”, ChemNanoMat 5, 1137 (2019).」に記載されている。

低温加熱粉碎技術に関する研究成果は、2020 年報の「T. Nakamura, N. Koshida, Z. Yuan, J. Otsubo, “High-yield green fabrication of colloidal silicon quantum dots by low-temperature thermal cracking of porous silicon”, APL Mater.. 8, 081105 (2020).」に記載されている。

### 【優れた成果が上がった点】

大量生産手法により作製したシリコン量子ドットは、試料間の表面終端の不均一性などのばらつきが生じるので、生成された量子ドットの表面分子の排除、精製が必要であった。そのためのサイズ排除クロマトグラフィー・遠心分離・透析技術等を駆使し、精製粒子の表面分子の排除・精製を行うことができた。

### 【研究終了後の展望】

これまでの研究により、赤色領域の発光エネルギーでのシリコン量子ドットに関する大量生成・低コストプロセスの開発の目処はついた。そこで、今後の目標として黄色から青色領域のより高井バンドギャップエネルギー範囲（2～4eV）のシリコン量子ドットの生産プロセスの開発に展開していきたい。そして、今回の研究と同様に、2～4eV の範囲でのシリコン量子ドットにおいても大量生成、低コストを実現したい。

### 【研究成果の副次的効果】

- ・**実用化したら、どのような応用につながるか**：本技術が実用化した場合、フルカラーシリコン発光材料としての発光デバイスへの応用展開が期待できる。さらに、将来的には環境安全性を担保した半導体量子ドット材料生産が簡易に行うことができるため、シリコン材料のプリンタブル光デバイスへの応用分野で際だった存在感を示すことも期待できる。
- ・**特許申請の可能性**：多孔質シリコンを原料としたシリコン量子ドットの高効率生成プロセスに関する成果は、すでに特許申請を行っているが、今後、さらなる発光色の制御範囲の

拡張技術などは新たな特許申請に結びつく可能性がある。

## グリーンソサエティ公開シンポジウム開催記録

日時：2022年1月22日（土） 15：10～17：00

Zoom を利用したオンラインシンポジウム

成果報告

グリーンソサエティを実現する  
先端材料プロセスの発信  
—ABC+3D“プロセス”—

参加費無料  
要事前申込



# 公開シンポジウム

法政大学サステイナビリティ実践知研究機構  
マイクロ・ナノテクノロジー研究センター

2022年1月22日(土)  
13:00~17:00

開催方法:

## Zoomによる開催

申込方法:

下記サイトにアクセスして、申込を行ってください。  
開催日までに登録したメールアドレスにシンポジウムの  
配信リンク先をご連絡します。

<https://www.hosei.ac.jp/nano/>

申込期限:

2022年1月20日(木) 13:00締切



シンポジウム実行委員

御法川 学 (法政大学理工学部機械工学科 教授)  
山本 兼由 (法政大学生命科学部生命機能学科 教授)  
緒方 啓典 (法政大学生命科学部環境応用化学学科 教授)

事務局・連絡先

法政大学マイクロ・ナノテクノロジー研究センター  
TEL: 042-387-5120  
E-mail: nanotech@hosei.ac.jp  
URL: <https://www.hosei.ac.jp/nano/>

### プログラム

挨拶 金井 敦 (法政大学常務理事・サステイナビリティ実践知研究機構 機構長)  
石垣 隆正 (法政大学マイクロ・ナノテクノロジー研究センター センター長)

#### 基調講演

大学におけるデータサイエンスに関する産学連携とDX人材教育  
中岩 浩巳 (名古屋大学数理・データ科学教育研究センター 特任教授)

#### 市民プログラム

持続可能な未来のための科学技術と社会・市民のつながり  
辻本 昭彦 (法政大学生命科学部生命機能学科 准教授)

#### 各基本テーマからの報告

- Additive Manufacturing 基本テーマ: 御法川 学  
金属・セラミックス粉末成形技術の3Dプリンタへの応用  
塚本 英明 (法政大学理工学部機械工学科 教授)
- Biologically mediated(inspired) Control 基本テーマ: 山本 兼由  
高機能生物設計—人工内耳・神経補綴装置  
鳥飼 弘幸 (法政大学理工学部電気電子工学科 教授)
- Chemically mediated Control 基本テーマ: 緒方 啓典  
窒化ガリウムを用いた高耐電圧パワーダイオードの研究  
三島 友義 (法政大学イオンビーム工学研究所 教授)

ポスターセッション ※ブレイクアウトルームを利用して実施

## グリーンソサエティセミナー開催記録

### 第1回

日時：2018年7月4日（水） 15:10～17:00

場所：法政大学小金井キャンパス 西館1階 遠隔・視聴覚室

講演1：準1次元親水性ナノ細孔をもつ分子結晶に閉じ込められた巨大水クラスターの構造と機能化

田所 誠（東京理科大学 理学部第一部 化学科・教授）

講演2：ナノ構造を制御した新規ケイ酸塩系環境浄化材料の開発

渡邊 雄二郎（法政大学 生命科学部 環境応用化学科・准教授）

### 第2回

日時：2018年11月27日（火） 17:00～19:10

場所：法政大学小金井キャンパス マルチメディアホール

講演1：深層学習でモデルを作る

松原 崇（神戸大学・助教）

講演2：生物模倣ハードウェアの数理とデバイス実装

鳥飼 弘幸（法政大学 理工学部 電気電子工学科・教授）

講演3：深層学習を用いた応用研究紹介

彌富 仁（法政大学 理工学部 応用情報工学科・教授）

### 第3回

日時：2019年1月29日（火） 15:10～17:00

場所：法政大学小金井キャンパス 西館2階 W202

講演1：光合成における脂質の機能と光合成の安定化

水澤 直樹（法政大学 生命科学部 生命機能学科・教授）

講演2：生体分子を用いた新たな光エネルギー変換と人工光合成

鞆 達也（東京理科大学 理学部 第一部教養学科・教授）

### 第4回

日時：2019年5月16日（木） 15:10～17:00

場所：法政大学小金井キャンパス 東館1階 E113

講演1：セラミック材料の孔と穴

打越 哲郎（国立研究開発法人 物質・材料研究機構・機能性材料研究拠点 微粒子工学グループ・グループリーダー／法政大学大学 マイクロ・ナノテクノロジー研究センター・客員研究員）

講演2：微粒子のナノ・ミクロ集積技術と次世代ものづくりへの展開

武藤 浩行（豊橋技術科学大学大学院 工学研究科 電気・電子情報工学系・教授）

#### 第5回

日時：2019年10月9日（水） 17:00～18:40

場所：法政大学小金井キャンパス 西館1階 遠隔・視聴覚室

講演1：低侵襲な外科手術を支援するロボット

川嶋 健嗣（東京医科歯科大学 生体材料工学研究所・教授）

講演2：流体を用いたマイクロアクチュエータの研究動向

田中 豊（法政大学 デザイン工学部 システムデザイン学科・教授）

#### 第6回

日時：2019年12月19日（木） 17:00～18:40

場所：法政大学小金井キャンパス 東館1階 E101

講演1：お椀形状微粒子を応用した1細胞計測技術の開発

金 賢徹（産業技術総合研究所 バイオメディカル研究部門・主任研究員）

講演2：アガロースマイクロチャンバーを用いた1細胞配置計測技術

金子 智行（法政大学 生命科学部 生命機能学科・教授）

#### 第7回

日時：2020年7月15日（水） 15:10～17:00

場所：Zoom を利用したオンラインセミナー

講演1：二酸化炭素を原料とする高分子の合成と機能材料への応用

富永 洋一（東京農工大学 工学研究院 応用化学部門・教授／法政大学大学院  
理工学研究科応用化学専攻・客員教授）

講演2：生分解性ポリエステルへの機能性付与

杉山 賢次（法政大学 生命科学部 環境応用化学科・教授）

#### 第8回

日時：2020年10月14日（水） 15:10～17:00

場所：Zoom を利用したオンラインセミナー

講演1：ミニマルファブの概要と横河ミニマルアプリケーションラボの果たす役割

柴 育成（横河ソリューションサービス株式会社 半導体サービスセンター ミ  
ニマル部）

講演2：ミニマルファブによる半導体事業の民主化

土屋 忠明（株式会社ロジックリサーチ）

#### 第9回

日時：2020年12月8日（水） 15:00～16:30



場所：Zoom を利用したオンラインセミナー

講演 1：生体分子モーターの高効率なエネルギー変換機構

鳥谷部 祥一（東北大学大学院 工学研究科 応用物理学専攻・准教授）

講演 2：細菌べん毛モーターのトルク発生ユニット数と回転特性の関係

曾和 義幸（法政大学生命科学部生命機能学科 准教授）

## 第 10 回

日時：2021 年 5 月 18 日（火） 17:00～18:40

場所：Zoom を利用したオンラインセミナー

講演 1：ナノ粒子の液相合成とメソ・マクロ多孔体構築への利用

樽谷 直紀（広島大学大学院 先進理工系科学研究科 応用化学プログラム・助教／法政大学 マイクロ・ナノテクノロジー研究センター・客員研究員）

講演 2：材料科学、環境科学における粘土鉱物

田村 堅志（国立研究開発法人 物質・材料研究機構 機能性材料研究拠点 機能性粘土材料グループ・グループリーダー）

## 第 11 回

日時：2021 年 7 月 21 日（水） 15:00～16:40

場所：Zoom を利用したオンラインセミナー

講演 1：セラミックス/金属系傾斜機能材料の作製と評価

塚本 英明（法政大学 理工学部 機械工学科・教授）

講演 2：超音波細胞学 ～ 培養細胞を利用した再生医療や創薬に機械工学ができること ～

竹村 研治郎（慶應義塾大学 理工学部 機械工学科・教授）

## 第 12 回

日時：2021 年 11 月 2 日（水） 17:00～18:40

場所：Zoom を利用したオンラインセミナー

講演 1：鹿児島県喜界島のアリモドキゾウムシ根絶にむけた技術開発

佐野俊夫（法政大学 生命科学部 応用植物科学科・教授）

講演 2：微生物を活用した循環型社会の構築：カーボンニュートラルな植物資源からつくる新しいバイオプラスチック

川口秀夫（神戸大学大学院科学技術イノベーション研究科／先端バイオ工学研究センター・特命准教授）