

令和2年度  
「研究助成金」受領者16名・「矢崎学術賞」受賞者2名を決定

公益財団法人 矢崎科学技術振興記念財団(理事長:細川興一、所在地:東京都港区、以下「当財団」)は、令和2年度の「研究助成金」受領者16名・「矢崎学術賞」受賞者2名を決定しました。

当財団は、昭和58(1983)年以来、科学技術の発展を目的として「研究助成」事業を行っています。今年度も、独創的かつその成果が科学技術の発展に大きく貢献すると考えられる研究を対象として選考いたしました。

当財団の「研究助成」は、「新材料」・「エネルギー」・「情報」の各分野を対象領域とし、「一般研究助成」・「奨励研究助成」・「特定研究助成」の三つの助成制度です。また、国際的な学会での研究発表や共同研究をする際の渡航費を支援する「国際交流援助」、過去に当財団から研究助成を受けた研究者の中から優れた業績をあげられた研究者に与える「矢崎学術賞」があります。

【一般研究助成(200万円)】(応募79件)

所 裕子(トコロ ヒロコ) 筑波大学 数理物質系 教授

「高性能蓄熱酸化チタンの開発」 はじめ5件

【奨励研究助成(100万円):原則35歳以下の研究者が対象】(応募48件)

鈴木 弘朗(スズキ ヒロオ) 岡山大学 自然科学研究科 助教

「半導体原子層物質のプラズマを用いた低温・高速合成」 はじめ10件

【特定研究助成(1,000万円):当財団が特定したテーマにふさわしい研究が対象】(応募9件)

本間 格(ホンマ イタル) 東北大学 多元物質科学研究所 教授

「有機電極材料を利用した高エネルギー密度・レアメタルフリー型リチウムイオン電池の開発」

なお、当財団が特定したテーマは以下の通り

1. 「高齢者・身障者への質の高い支援技術に関する研究」
2. 「革新的なモビリティ社会の創出を支える基盤技術に関する研究」

【国際交流援助】(採択なし:新型コロナウイルス感染拡大の影響による国際学会の中止・オンライン開催のため)

該当者なし

【矢崎学術賞】(応募10件)

功績賞:田中 雅明(タナカ マサアキ) 東京大学大学院 工学系研究科 教授

奨励賞(若手研究者を対象):三輪 真嗣(ミワ シンジ) 東京大学 物性研究所 量子物質研究 G 准教授

なお、3月4日に開催を予定していた研究助成金贈呈式は、新型コロナウイルス感染拡大の影響を踏まえ、中止いたしました。

## ◎財団概要

名 称 : 公益財団法人 矢崎科学技術振興記念財団

理 事 長 : 細川 興一

所 在 地 : 〒105-0001 東京都港区虎ノ門1丁目 13 番地 3 号 虎ノ門東洋共同ビル

電 話 : 03-5501-9831

設 立 : 昭和 57 年(1982)12 月 15 日(矢崎総業株)の設立 40 周年を記念して設立)

目 的 : 科学技術にかかる研究開発の助成と振興を図り、公益の増進と活力ある社会の実現に資することを目的とします。

基本財産: 9 億 3,410 万円

主務官庁: 内閣府

U R L : <https://www.yazaki-found.jp/>

＜本件に関するお問い合わせ先＞  
公益財団法人 矢崎科学技術振興記念財団  
TEL. 03-5501-9831  
矢崎総業株式会社 広報部  
TEL. 055-965-3002

## 目次

|                      |    |
|----------------------|----|
| 受領者・受賞者の決定について ..... | 1  |
| 目次 .....             | 3  |
| 一般研究助成 受領者名簿 .....   | 4  |
| 一般研究助成 研究紹介文 .....   | 5  |
| 奨励研究助成 受領者名簿 .....   | 10 |
| 奨励研究助成 研究紹介文 .....   | 11 |
| 特定研究助成 受領者名簿 .....   | 21 |
| 特定研究助成 研究紹介文 .....   | 22 |
| 国際交流援助 受領者名簿 .....   | 23 |
| 学術賞 受賞者名簿 .....      | 24 |
| 学術賞 研究紹介文 .....      | 25 |

## 2020年度(令和2年度)

### 「一般研究助成」受領者名簿

敬称略五十音順

#### 新材料

| 氏名                | 所属機関                          | 役職 | 研究題名                                |
|-------------------|-------------------------------|----|-------------------------------------|
| 高島 義徳<br>タシマ ヨシノリ | 大阪大学<br>高等共創研究院 兼<br>大学院理学研究科 | 教授 | 超分子特有の架橋とネットワーク構築による革新的<br>高分子材料の創製 |
| 所 裕子<br>トコロ ヒロコ   | 筑波大学<br>数理物質系                 | 教授 | 高性能蓄熱酸化チタンの開発                       |
| 根岸 雄一<br>ネギシ ユウイチ | 東京理科大学<br>理学部第一部応用化<br>学科     | 教授 | 精密金属ナノクラスターを構成単位とするシステム機<br>能材料の創製  |

#### エネルギー

| 氏名                 | 所属機関             | 役職 | 研究題名                   |
|--------------------|------------------|----|------------------------|
| 有澤 光弘<br>アリサワ ミツヒロ | 大阪大学<br>大学院薬学研究科 | 教授 | 連続照射マイクロ波を用いた省電力合成法の開発 |

#### 情報

| 氏名                | 所属機関               | 役職  | 研究題名                                  |
|-------------------|--------------------|-----|---------------------------------------|
| 水野 洋輔<br>ミズノ ヨウスケ | 横浜国立大学<br>大学院工学研究院 | 准教授 | 任意波形変調と動画像処理技術の併用による光ファ<br>イバセンサの性能進化 |

## 超分子特有の架橋とネットワーク構築による革新的高分子材料の創製

大阪大学 高等共創研究院 兼 大学院理学研究科  
教授 高島 義徳

近年、資源やエネルギー、環境問題など、人類の存続に係る重大な問題が顕在化しており、高分子材料の耐久性・寿命の改善・環境負荷の低減などは重要な課題です。

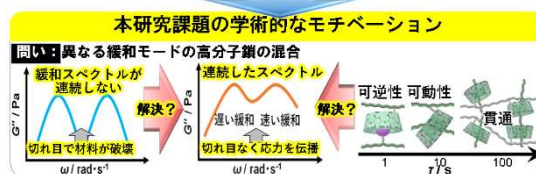
このような課題に対して、今、社会で求められている高分子機能に対して応えるには、新たな高分子材料の設計が必要ではないかと考えております。加えて、高分子化学者と物理学者の連携、さらには、分子シミュレーション学の駆使が重要と考えられます。従来型の共有結合のみの材料設計だけでなく、生体系に見られるような、非共有結合（可逆的な結合）を導入した材料設計が広く試行されています。シンプルに高分子を「ひも」と考え、架橋点はくっついたり離れたりする可逆的な架橋点、または架橋点が動くことができる可動性の架橋点と大きく分類した場合、これらを組み合わせることで新しい架橋設計・ネットワーク設計が提案できるのではないのでしょうか？これには現状の高分子・超分子材料の現状を正確に見極め、構造解析だけでなく、高分子鎖の緩和モードを分析し、複数を組み合わせることが重要と考えられます。この現在の状況と目標とする材料機能との距離感を見つめ、高分子材料設計に繋げることを学術的なモチベーションとしております。

【実用化が期待される分野】

本分子設計は特定の高分子に限定されないため、様々な汎用高分子の機能改良に適用することができます。アクリレート系一次ポリマーやシリコン系一次ポリマーなどは、協力企業により量産を達成しております。これらの一次ポリマーを各企業の要望に応じて異種ポリマーと混合させる方法や各社、独自の重合が考えられ、精密な材料設計が必須です。

要求の高い高ヤング率の高分子材料の破壊エネルギーの向上や再接着性の付与に加えて、自動車関連・電子機器・ディスプレイ関連のコーティング、電池のバインダー、化粧品用途、線膨張率の異なる異種材料接着等への応用が期待できます。現在の状況と目指したい機能、そして、その方法論が確立できれば、目標を達成できるのではないのでしょうか。

### 超分子特有の架橋とネットワーク構築による革新的高分子材料の創製



## 高性能蓄熱酸化チタンの開発

筑波大学 数理物質系

教授 所 裕子

現在、エネルギー問題の解決を目指し、多くの省エネ技術に関する研究が行われている。その中でも蓄熱材料は、エネルギー問題の解決に大きく貢献する可能性が期待されている。本研究者らは 2015 年に、圧力などの外部刺激に応答する特性をもつ新物質・蓄熱酸化チタンを開発し、報告した。この材料は、一般的な蓄熱材料と異なり、蓄えた潜熱エネルギーを永続的に保持でき、圧力印加することにより、希望のタイミングでエネルギーを取り出すことができるというスイッチング特性を備えた新規な蓄熱材料であった。このようなスイッチング型蓄熱材料を実用化できれば、エネルギーを有効に利用できる蓄熱システムの用途がさらに広がり、省エネ技術への貢献が期待される。しかし実用化のためには、蓄熱酸化チタンの特性制御や更なる性能向上が必要である。

そこで本研究では、蓄熱酸化チタンに異種金属置換を行うことで、希望の性能をもつ金属置換型蓄熱酸化チタンを開発することを目的とした。具体的には、異種金属置換型・蓄熱酸化チタンの合成手法の確立、異種金属置換型蓄熱酸化チタンの合成開発と特性評価、金属置換による蓄熱酸化チタンの特性制御メカニズムの理論的考察を計画している。本研究により、異種金属置換による蓄熱酸化チタンの性能制御への足がかりが得られれば、この材料の応用展開が期待でき、例えば、太陽熱や溶鉱炉の排熱エネルギーを材料に蓄えて夜間発電など必要な時に熱エネルギーとして使うなど、本材料の特徴を活用した新しい省エネ技術への貢献が期待される(図 1)。また、学術的には、異種金属置換が相転移スイッチングに及ぼす効果について統計熱力学的な基礎知見が得られ、物理学や材料科学の観点から重要な新知見が期待される。本物質は安価で安全な元素のみからなる単なる酸化チタンであり、元素資源の観点からも地球に優しい材料であり、社会的な期待が高い材料と考えられる。

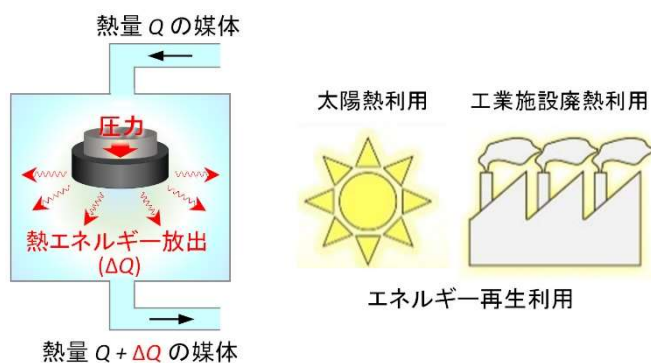


図 1: 圧力印加で発熱する蓄熱酸化チタン材料

### 【実用化が期待される分野】

太陽熱発電システムや工場廃熱用の蓄熱材など、熱エネルギーを再利用するための省エネ技術用素材としての実用化が期待される。

## 精密金属ナノクラスターを構成単位とするシステム機能材料の創製

東京理科大学 理学部第一部応用化学科

教授 根岸 雄一

一人ひとりが便利で持続可能な生活と健康長寿を獲得する上で、現代の科学技術が担うべき役割は大きい。今後 Society 5.0 実現や SDGs 達成をより一層加速するためには、現状物質を遙かに凌駕する革新的材料の創製が我が国にとって必要不可欠である。100 個以下の金属原子が会合した「金属ナノクラスター(金属 NCs)」は、革新的機能性物質の構成単位として高い潜在能力を有している。そうした金属 NCs に関して、近年では、有機分子、有機金属錯体、超分子などを精密に合成するのと同様に、配位子保護金属 NCs を原子・分子レベルにて精密に化学合成することが可能となった。これら精密金属 NCs を規則的に連結させることが出来れば、「連結による新規システム機能の創出」を誘起できるため、精密金属 NCs の特性を活かした新規機能性システム材料の創製が可能になると期待される(図 1)。本研究では、精密金属 NCs の規則的連結とそれによる新規システム機能の創発を実現し、それにより新たな科学技術イノベーションの素地を形成する。

### 【実用化が期待される分野】

構成単位である金属 NCs の特性を考慮に入れると、得られる精密金属 NCs 連結体は次のような新規システム機能材料になり得ると期待される(図 1): 設計可能な電子・発光デバイス; 高活性光触媒; 赤外円偏光発光体; 反応選択的高活性触媒。

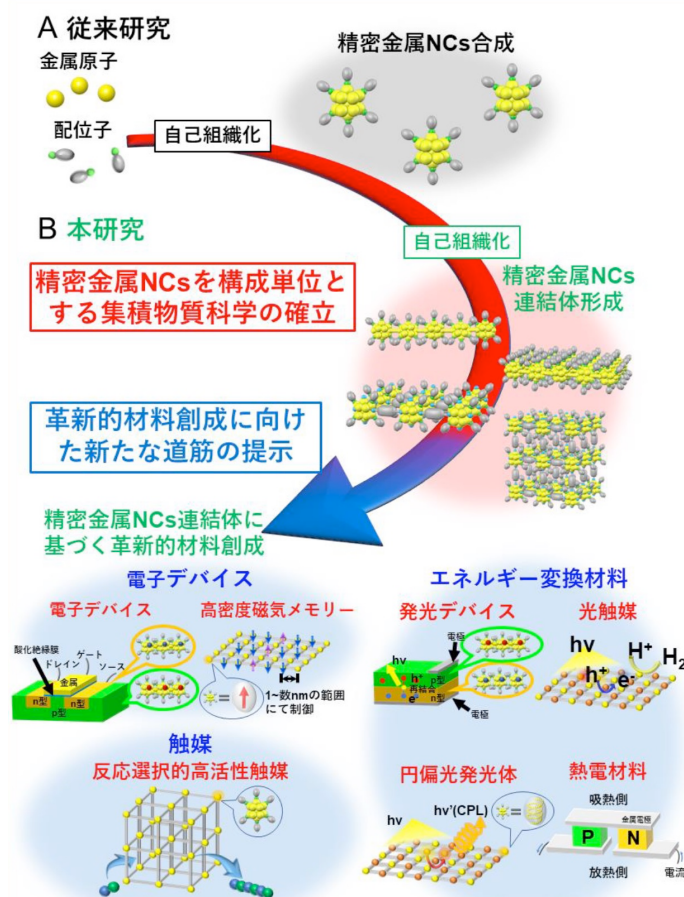


図 1. 精密金属 NCs に関する(A)従来及び(B)本研究の模式図

## 連続照射マイクロ波を用いた省電力合成法の開発

大阪大学 大学院薬学研究科

教授 有澤 光弘

医薬品・農薬・有機EL・色素など機能性材料の合成では反応釜を加熱することが一般的である。それは加熱により、分子の運動速度が速まり、反応が促進されることに起因する。一方、マイクロ波による加熱法は溶媒や基質そのものの分子振動により加熱することから、高効率な加熱方法として近年注目を集めている所であるが、従来のマイクロ波装置ではマイクロ波のエネルギーを有効利用できてないことや加熱による反応促進効果とマイクロ波独自の反応促進効果（いわゆる非加熱効果）との切り分けが困難なことが問題となっていた。

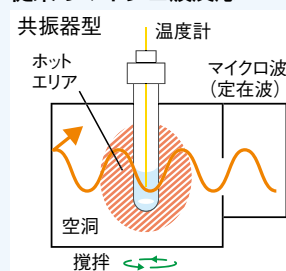
本研究は、申請者らが開発した連続照射マイクロ波の技術を用いて、有用化合物の省電力合成法を確立するものである。

すなわち、つい最近、申請者らはマイクロ波を反応系に連続的に照射することのできる新しい装置（GPS 型マイクロ波装置）の開発に成功した。従来の加熱方法（既存のマイクロ波合成装置含む）では全く進行しなかった反応が、この装置を用いると進行する様になり、目的物を最高 93%の収率で得ることができる（反応例などの詳細は *Green Chem.* **2017**, *19*, 3357. *Green Chem.* **2019**, *21*, 4541-4549 参照）。この GPS 型のマイクロ波反応装置を用いれば、マイクロ波を効率よく利用することが可能になり、これまでにない、斬新な省電力合成法を開発することができる点で、本研究は独創的である。

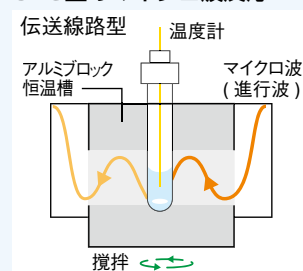
したがって、本研究は、学術的にはマイクロ波の高度利用（従来法では達成できない方法論）という点、社会的にはエネルギーの無駄をなくすという点で意義があり、産学界から必要とされている。



従来のマイクロ波反応



GPS型のマイクロ波反応



### 【実用化が期待される分野】

化学合成：本研究では、連続照射マイクロ波の特性を生かした、連続合成装置および多検体迅速合成装置の作製、さらにはオンサイト・オンデマンド合成の実用化が期待される。

## 任意波形変調と動画像処理技術の併用による光ファイバセンサの性能進化

横浜国立大学 大学院工学研究院 知的構造の創生部門

准教授 水野 洋輔

近年、高度経済成長期に建設された社会インフラの経年劣化や自然災害による損傷が社会問題となっており、インフラに光ファイバを埋め込み状態を監視するシステムの重要性が高まっている。そのため、光ファイバに沿った任意の位置で歪(ひずみ)の大きさや温度を測定できる「分布型光ファイバセンサ」を実現する取り組みが活発である。これまでに我々は、連続光の相関を制御することで歪や温度の位置分解を行う新手法「ブリルアン光相関領域反射計(BOCDR)」を提案した。光ファイバの片端からの光入射で動作し、世界最高の空間分解能と動作速度を兼ね揃える唯一の分布測定技術である。しかし、現状では、その他の性能(測定レンジや測定可能な最大歪の大きさ、精度など)は十分とはいえない。

そこで本研究では、「BOCDR における光周波数変調の波形を正弦波に限らず任意形状にまで拡張し、測定レンジを劇的に向上させること」、および、「散乱スペクトルの分布をより多くの情報をもつ画像として取り扱い、画像処理分野で成熟した雑音除去技術を適用することで、測定可能な最大歪を大きく保持しつつ、精度を向上させること(図 1)」を目指す。

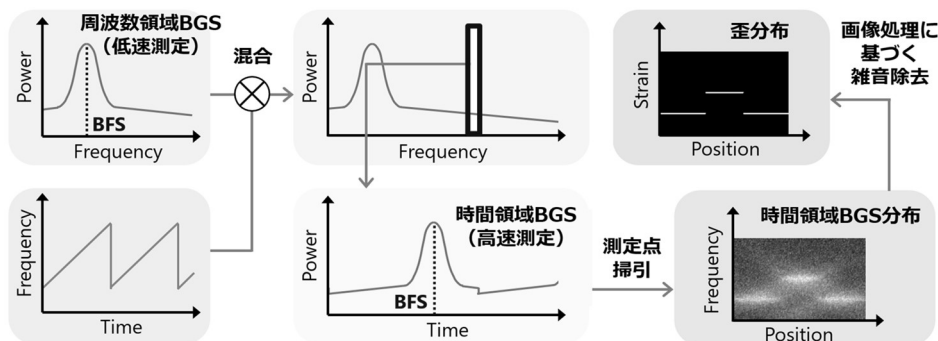


図 1. 画像処理技術に基づく超高速かつ高精度な BOCDR の動作原理。

### 【実用化が期待される分野】

本研究で期待される成果は、光学分野・計測分野のアカデミアから大きな注目を集めるのはもちろんのこと、構造物のヘルスマonitoringに興味をもつ環境・建築・土木分野の企業や、防災・減災を大きな課題と目する政府にも、大きなインパクトを与え得る。また、地震による損傷や経年劣化を自己診断できる機能を備えた材料・構造を求める世の中の要求に応え、防災・環境保護・危機管理技術の拡充を促し、人類の生活の安全性向上に寄与し得る。さらに、例えばアームに巻き付けることで、任意の位置で接触や変形、温度変化を検出するロボットの新しい「神経」として応用できるほか、導路や人工皮膚の健全性診断、深海探査、宇宙開拓、医療などの新たな応用分野を開拓できると期待される。

## 2020年度(令和2年度)

### 「奨励研究助成」受領者名簿

敬称略五十音順

#### 新材料

| 氏名                 | 所属機関                       | 役職   | 研究題名                          |
|--------------------|----------------------------|------|-------------------------------|
| 石割 文崇<br>イシワリ フミタカ | 大阪大学<br>大学院工学研究科           | 講師   | 表裏を持つ二面性二次元高分子ナノシートの創製        |
| 今任 景一<br>イマトウ ケイチ  | 広島大学<br>大学院先進理工系科学<br>学研究科 | 助教   | 熱安定型分子マシンの開発とゲルアクチュエーターへの応用   |
| 呉羽 拓真<br>クレハ タクマ   | 弘前大学<br>理工学部物質創成化学<br>学科   | 助教   | 海洋分解性モデル高分子フィルムの開発と分解メカニズムの解明 |
| 鈴木 弘朗<br>スズキ ヒロオ   | 岡山大学<br>自然科学研究科            | 助教   | 半導体原子層物質のプラズマを用いた低温・高速合成      |
| 中村 貴志<br>ナカムラ タシ   | 筑波大学<br>数理物質系 化学域          | 助教   | 配位捕捉空間を活用した精密多量化反応            |
| 松久 直司<br>マツヒサ ナオシ  | 慶應義塾大学<br>理工学部電気情報工<br>学科  | 専任講師 | 伸縮性エレクトロクロミックディスプレイマトリクス      |

#### エネルギー

| 氏名                               | 所属機関                                                 | 役職  | 研究題名                                                                                            |
|----------------------------------|------------------------------------------------------|-----|-------------------------------------------------------------------------------------------------|
| KHADKA<br>Dhruba B.<br>カダカビ ドウラハ | 物質・材料研究機構<br>エネルギー・環境材料<br>研究拠点                      | 研究員 | Development of Tin-based halide semiconductor materials for high efficiency photovoltaic device |
| 川脇 徳久<br>カワキ トキサ                 | 東京理科大学<br>理学部第一部・応用化学<br>学科                          | 助教  | ヘテロ界面を用いたプラズモニック可視光応答水分<br>解光触媒の高効率化                                                            |
| 土肥 侑也<br>ドイユヤ                    | 名古屋大学<br>大学院工学研究科・物<br>質科学専攻・レオロ<br>ジー物理工学研究グ<br>ループ | 助教  | 新規固体高分子電解質の調製とそのイオン伝導機構<br>解明                                                                   |

#### 情報

| 氏名               | 所属機関                                     | 役職        | 研究題名                                          |
|------------------|------------------------------------------|-----------|-----------------------------------------------|
| 多和田 雅師<br>タダ マサシ | 早稲田大学<br>グリーン・コンピューティ<br>ング・システム研究機<br>構 | 次席研究<br>員 | 組合せ最適化問題から生成されたイジングモデルの<br>逆アセンブルを阻む難読化に関する研究 |

## 表裏を持つ二面性二次元高分子ナノシートの創製

大阪大学 大学院工学研究科

講師 石割 文崇

新しい構造概念を持つ高分子の創成は、これまで様々な分野に大きなインパクトを与えてきた。高分子は従来二次元のひも状物質であるが、最近では、規則的な網目構造を持った「二次元ポリマー」というシート状の高分子の合成が報告されるようになり、その物性・機能に注目が集まっている。本研究では、この二次元ポリマーのさらに一段階上の構造概念を持つ次世代の二次元ポリマーとして、「表裏」という異方性を持つ「二面性」二次元ポリマーを創製し、その物性や機能の解明を目指す。有機高分子材料よりも以前から、無機の二次元物質が注目を集めており、二次元ポリマー以上に様々な二次元物質が開発されている。しかし、その二次元無機物質においても表裏の構造特性を持つものは報告されておらず、本研究の目指す「二面性」二次元ポリマーは明確な新規性を持つ構造体であると言え、その性質は興味深いと考えられる。この二面性二次元ポリマーは、その特異な「表裏」の異方性から、従来の高分子物質では実現が困難であった、特異なコンフォメーション挙動や自己集合化挙動、表面吸着能、ゲスト包摂能、および物質分離特性などを発揮しうると考えられ、環境・エネルギー分野へ貢献できるものと考えられる。

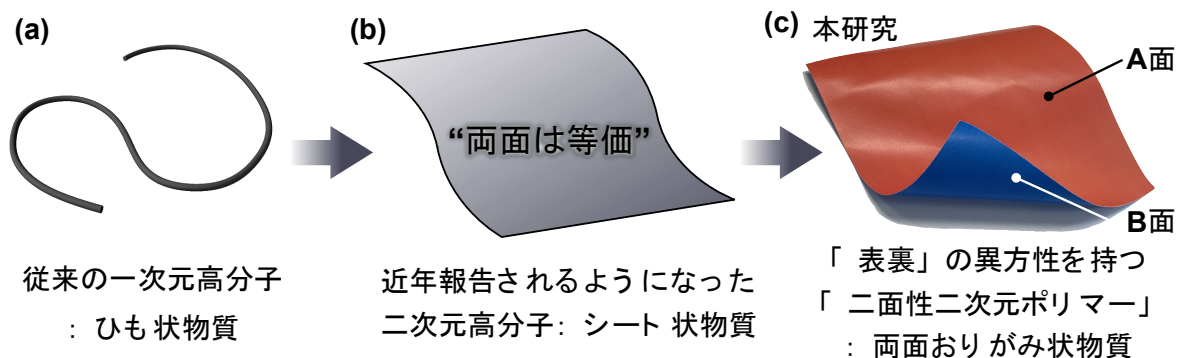


図 1. (a) 従来の高分子と (b) 二次元高分子および二面性”二次元ポリマー”の模式図

### 【実用化が期待される分野】

本研究で開発する二面性二次元ポリマーの開発は、その物性・機能探索を通じ、高機能なプラスチック/フィラー複合材料や、CO<sub>2</sub> の除去につながる高機能な気体分離技術の開発へとつながる可能性があり、自動車産業などに将来的に貢献する可能性があると考えている。また、金属とポリマー間を強力に接着することが可能であれば、誘電損失が大幅に低減される可能性もあり、次世代通信技術である5G 産業にも貢献する可能性もあると考えている。

## 熱安定型分子マシンの開発とゲルアクチュエーターへの応用

広島大学 大学院先進理工系科学研究科

助教 今任 景一

外部刺激のインプットに対して機械的な動きをアウトプットする「分子マシン」は、2016 年のノーベル化学賞の受賞対象にも選ばれ、ミクロスケールの化学が確立されつつある。今後はマクロな材料への応用が期待されている。中でも高分子材料は、軽量・柔軟・易加工などの特徴から社会のあらゆる場所に利用され、最も重要な分子マシンの応用先である。しかし、ゴムやプラスチック、樹脂など、無秩序で分子運動性の高い部分・材料も多い高分子分野において、分子マシンのミクロな動きを材料のマクロな動きに増幅させる分子や材料全体の設計指針はまだ確立できていない。

本研究では、高分子分野における分子マシンに必要な特性を「動きの大きさと安定性(熱安定性・制動性)」と考え、これらを有する新たな光応答性の分子マシン、ヒンダードスチッフスチルベン(HSS、図 a)を開発し、HSS を有する高分子の化学を確立した後(図 c)、ゲルアクチュエーターに応用する(図 d)。従来の代表的な光応答性の分子マシンであるアゾベンゼン(AB、図 b)と異なり、剛直な分子骨格の HSS は熱安定性と制動性に優れ、光照射により高い異性化率で大きな機械的動きを生じる。HSS で駆動する柔らかなゲルアクチュエーターは、近年注目を集めるソフトロボットなどで利用が期待できる。

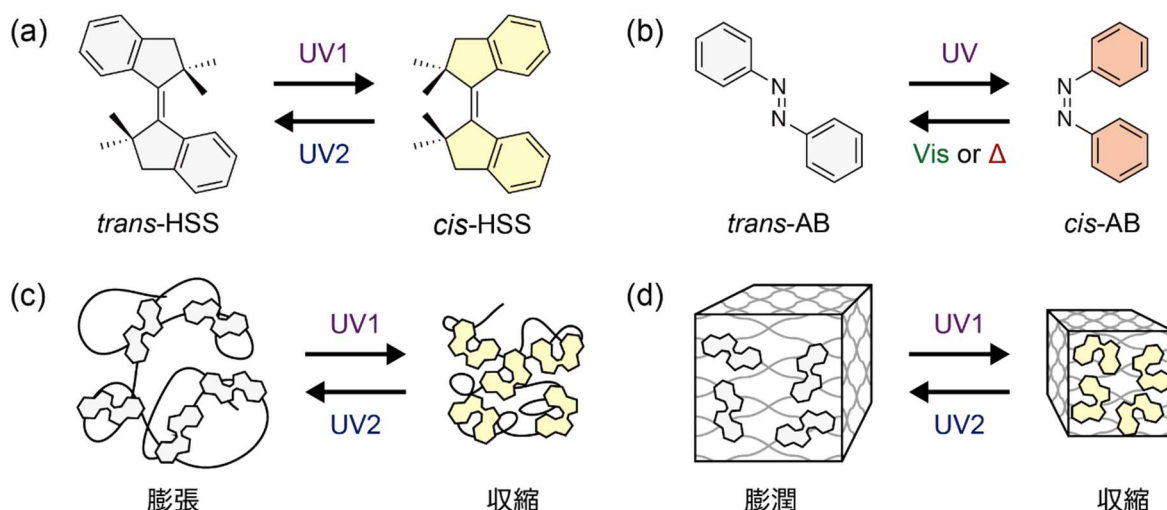


図 (a) HSS の光異性化 (b) AB の光異性化 (c) HSS を有する高分子の構造変化 (d) HSS で駆動するゲルアクチュエーター

### 【実用化が期待される分野】

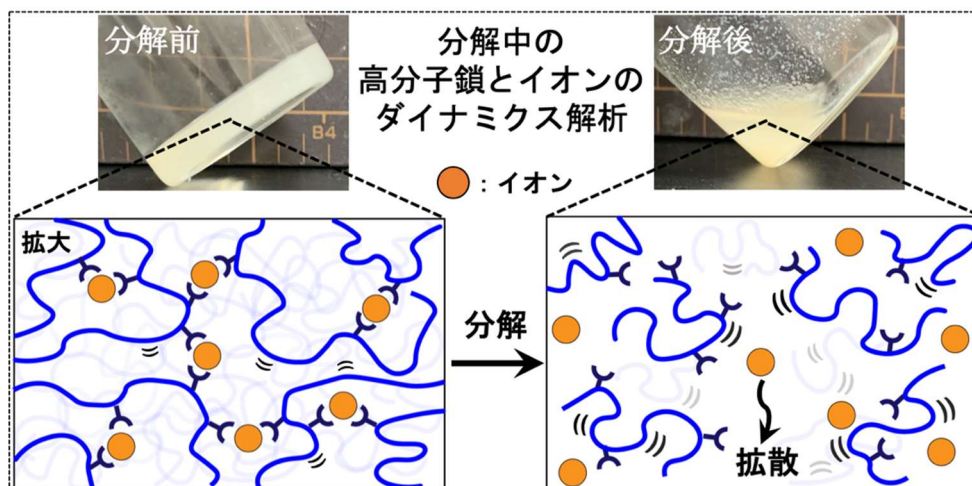
ソフトロボットのアクチュエーター、光接着剤、光修復材料

## 海洋分解性モデル高分子フィルムの開発と分解メカニズムの解明

弘前大学 理工学部物質創成化学科

助教 呉羽 拓真

我々の生活に欠かせないプラスチック(高分子)材料が海洋に蓄積し、生態系や環境に害をもたらす海洋プラスチック汚染が問題となっている。すでにプラスチックの海洋流出を防ぐ廃棄物対策等が進められている中で、高分子科学の観点からは、海水等の水中で速やかに分解され、毒性の無い海洋分解性高分子の開発が解決策の一つとして挙げられている。しかし、分解性高分子材料は、高温多湿条件下や土壌の微生物により分解するものが主流であり、海洋等の水中で分解し、かつ強靱性を伴う高分子種は未だ見出されていない。また、高分子材料が分解挙動をナノスケールの観点で評価する技術はなく、分解メカニズムは未だ不明確である。そこで本研究は、高分子鎖がイオンで架橋された高分子ゲルフィルムを合成し、フィルムの強靱性の支配因子である高分子濃度とイオン架橋密度が制御された種々の分解性モデル高分子ネットワークを構築し、それら強靱性(力学特性)と分解性の相関関係を解明する。また、ネットワークを構成する高分子鎖とイオンの運動を厳密に評価し、分解メカニズムを明らかにする事で、科学的根拠に基づいた水分解性高分子の評価技術と設計指針を確立することを目指す。



### 【実用化が期待される分野】

分解性フィルム・プラスチック材料に関連する化学工業や生体親和性が高い高分子ゲルが適用されている化粧品・接着剤・医療材料などに関連する分野

## 半導体原子層物質のプラズマを用いた低温・高速合成

岡山大学 大学院自然科学研究科

助教 鈴木 弘朗

機械的柔軟性に加え、優れた光学特性と半導体特性を併せ持った原子層物質材料である遷移金属ダイカルコゲナイド(TMDC)は、ヒト・モノ・データ・プロセス等のすべてがインターネットを介して結びつくIoE(Internet of Everything)システムを担う末端デバイスの電子材料として期待されている。TMDCの合成に関する研究は世界中で盛んに行われているものの、合成温度や合成速度は実用化の要件を満たしておらず、実用化に資する合成手法の確立が求められている。この問題の根源は従来用いられてきた熱プロセスでは原料の供給が熱拡散に支配され、合成パラメータの最適化を行ってもプロセスの改善に限界があるという点にある。これに対し、本研究では熱プロセスからの脱却を図り、プラズマを組み合わせた非平衡反応プロセスの開発に取り組む。また申請者が有するプラズマ技術と最先端の有機金属気相化学成長法(MOCVD)を組み合わせ、TMDCの低温下(400℃以下)での高速(従来手法の100倍)合成の実現を目指す。本研究では、プラズマが創る非平衡化学反応場を原料制御性の高いMOCVDに組み合わせることで、従来の合成温度や合成速度の限界を超える革新的な合成手法を世界に先駆けて実現する。熱プロセスが限界に直面している現状に対しプラズマがもつ特異な反応場を熱プロセスに組み合わせることで、従来の合成温度や合成速度の限界を超える革新的な合成手法を世界に先駆けて実現する。

### 【実用化が期待される分野】

TMDCの低温・高速合成手法の確立によって、フレキシブル半導体デバイスの産業応用への道が開け、新しいモバイル・ウェアラブルデバイスの市場への展開が可能になる。TMDCは半導体特性に加え、高い光感度・発光特性をもつため、ウェアラビリティをもつ光電子デバイスの開発に貢献する。

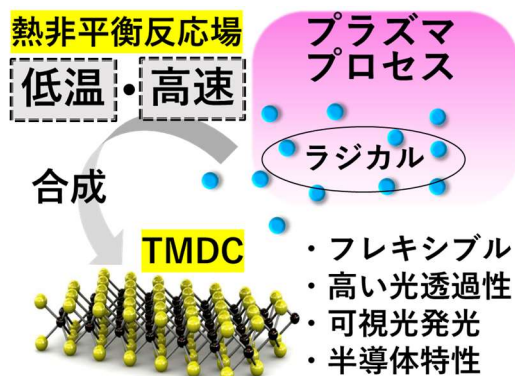


図1: 本研究の概要図。

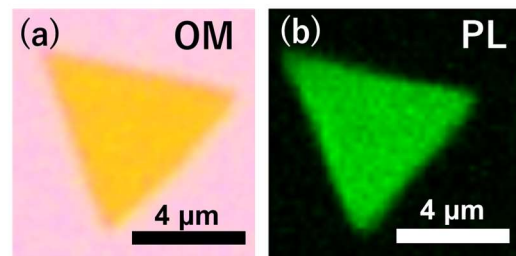


図2: CVD合成した単層MoS<sub>2</sub>の光学顕微鏡(OM)像(a)と発光(PL)マッピング(b)。

## 配位捕捉空間を活用した精密多量化反応

筑波大学 数理物質系 化学域

助教 中村 貴志

金属錯体は配位サイトに基質を捕まえて活性化し、反応を進行させる。配位サイトに結合する基質の数や相対配置を制御することができれば選択的な反応の実現につながると期待されるが、既存の錯体において複数の配位サイトとそれを取り囲む空間とを共に設計に組み込むことはチャレンジングな課題であった。我々は、共有結合でできた大きく剛直な環状骨格の内部に金属を複数固定し、その集積した配位サイトにおいて分子を結合する「配位捕捉空間」をもつ大環状錯体<sup>[1-3]</sup>を開発してきた(Figure)。本研究では、これらの配位捕捉空間を活用して、基質を固定した状態で反応を進行させることで、基質同士の多量化反応を精密に制御することを目指す。

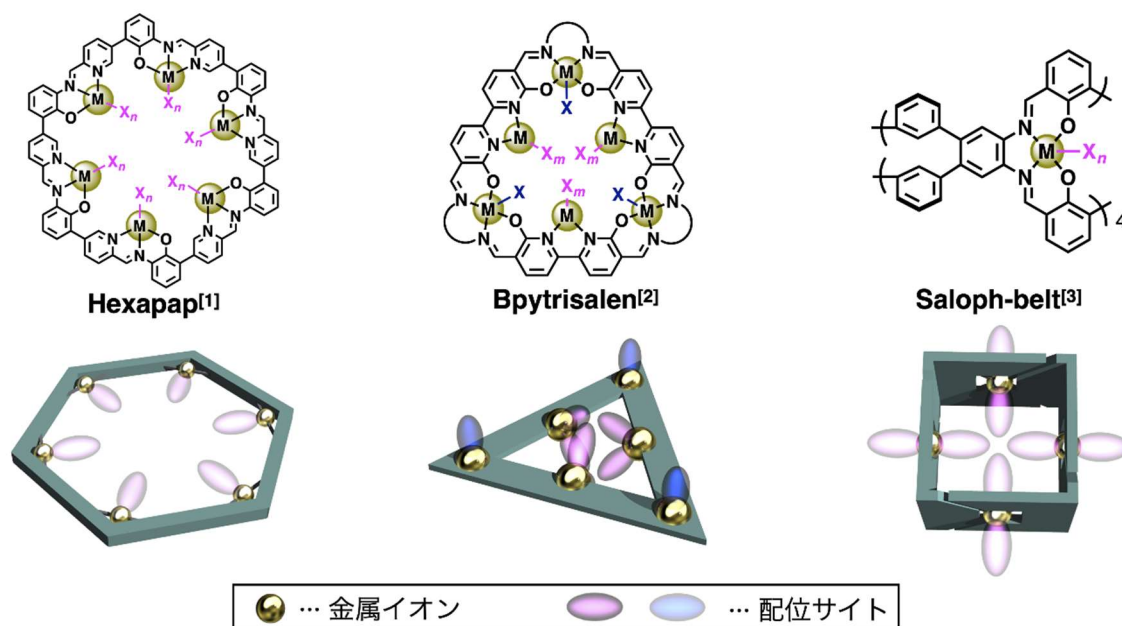


Figure. 配位サイトで分子を捕捉する空間を有する大環状錯体

【実用化が期待される分野】 有機機能材料・金属錯体化学・超分子化学・高分子合成

### 【参考文献】

- [1] a) T. Nakamura, Y. Kaneko, E. Nishibori, T. Nabeshima, *Nat. Commun.* **2017**, 8, 129.  
b) A. Nagai, T. Nakamura, T. Nabeshima, *Chem. Commun.* **2019**, 55, 2421.  
c) T. Nakamura, R. Y. Feng, T. Nabeshima, *Eur. J. Inorg. Chem.* **2021**, 308.
- [2] T. Nakamura, Y. Kawashima, E. Nishibori, T. Nabeshima, *Inorg. Chem.* **2019**, 58, 7863.
- [3] T. Nakamura, S. Tsukuda, T. Nabeshima, *J. Am. Chem. Soc.* **2019**, 141, 6462.

## 伸縮性エレクトロクロミックディスプレイマトリクス

慶應義塾大学 理工学部電気情報工学科

専任講師 松久 直司

医療資源の枯渇が、Covid-19 などの感染症や後期高齢化の進行によって深刻化している。その中で、医療従事者の負担を増やさずに高度な予防医療や遠隔医療を可能にする次世代ウェアラブルデバイスの実現がますます重要となっている。これまでに商用化された Apple watch などは、物理的に小さく堅いため、手首など装着できる部位に限られ、取得・表示できる生体情報は脈拍数と活動量などに限定されてしまっていた。

薄いゴムシートのような柔らかい電子デバイスは、皮膚などの自由曲面に湿布やタイツのように高い追従性を示すため、体全体に長時間装着しても違和感なく詳細な生体情報を取得・表示できる次世代ウェアラブルデバイスとしての応用が期待されている。本研究では、特に伸縮性エレクトロクロミックディスプレイ(ECD)素子の材料とデバイス技術、さらにこれを高密度でアレイ化する技術を開発する。

これまでの先行研究では、伸縮性エレクトロクロミック素子で単一ピクセルのものは開発されてきたが、多点化されたものは実現されていなかった。これは多層構造をとる素子の各層の材料(伸縮性導電性高分子と電解質材料)のパターニングが難しいからであった。これまでの研究で世界最高性能の印刷可能な伸縮性導体などを開発してきた経験を生かし、この問題を解決する。デバイスの開発ができれば、駆動回路の設計も合わせて進め、開発したディスプレイマトリクス素子を使って伸縮性センサなどを用いて得たバイタルデータを詳細に表示できるようにする。



図. 本研究で開発する伸縮性 ECD マトリクス

### 【実用化が期待される分野】

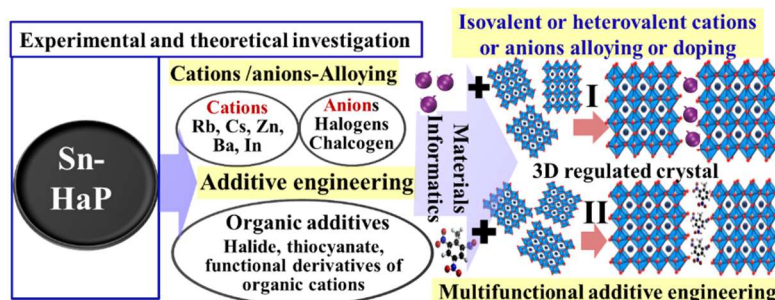
ウェアラブルヘルスケア、スポーツ、ロボティクス(電子人工皮膚)、仮想現実・拡張現実(VR・AR)、ヒューマンコンピュータインターフェース

## Development of Tin-based halide semiconductor materials for high efficiency photovoltaic device

物質・材料研究機構 エネルギー・環境材料研究拠点  
研究員 KHADKA Dhruba B.

Lead halide perovskite (Pb-HaP) based solar cells have demonstrated promising high efficiency for low-cost photovoltaic technology. But the toxicity of Pb in Pb-HaP and poor device stability are two issues to be resolved for its practical application. Multiple approaches have been attempted to transfer the Pb-HaPSCs technology to Pb-free materials but the progress in device performance is not so exciting. The primary reasons for low device efficiency are the fundamental differences in film growth, optoelectronic quality, and multiple structural dimensionalities. In the case of Sn-HaP, though it was considered as one of the promising alternatives in terms of optoelectronic properties, high-quality film growth is challenging due to severe oxidation and poor film morphology

In this proposal, we fabricate a highly efficient Pb-free HaP-based device by optimizing the



optoelectronic quality of Sn-HaP thin film (morphology and optoelectronic properties) adopting additive engineering and structural regulation adopting approach shown in the schematic diagram. We will develop highly efficient devices by interface engineering for optimal band alignment and lattice mismatch at the interface. We believe that the successful completion of the proposed work will pave a way to solve the toxicity and device instability issues of Pb-HaP based photovoltaic device.

### 【実用化が期待される分野】

Highly efficient, low-cost, and non-toxic PV technology is indispensable for the realization of a sustainable low carbon society. The Sn-HaP-based solar cells are the best candidate for eco-environment friendly PV technology. The Sn-HaP based PV device can be used for indoor PV applications. It can be used as a Pb-free HaP top cell for the development of a high-efficiency Si/Sn-HaP tandem device. It can be used as a photodiode, scintillator, and many IoT devices.

## ヘテロ界面を用いたプラズモニック可視光応答水分解光触媒の高効率化

東京理科大学 理学部第一部・応用化学科

助教 川脇 徳久

近年注目されている人工光合成は、光を化学エネルギーに変換する人類の究極のエネルギー生産技術である。光触媒に光を照射すると、水を酸素と水素に分解できる。これを利用すると、豊富な水を用いて、二酸化炭素を排出せずに、エネルギー源となる水素生成が可能となる。さらに、医薬・農薬・化成製品などの中間生成物を水素源から生成できれば、資源としての化石燃料の代替となるため、精力的に研究されている。しかし、問題点として、エネルギー変換効率と耐久性が低いことが挙げられる。

一方で、金や銀などのナノ粒子(NP)は、バルクの金属と異なり、局在表面プラズモン共鳴(LSPR)によって、光を吸収・散乱するため、古くからステンドグラスなどの着色材料として用いられてきた。例えば、金ナノ粒子が分散した溶液は赤に、銀ナノ粒子の場合は黄に呈色する。このような金属ナノ粒子は、そのサイズや形状変化により、光吸収波長を容易に制御でき、吸収効率が色素分子より極めて高いこと、さらに金属ナノ粒子周囲に光の回折限界を超えて集光した強い局在電場(近接場光)を発生するといった特異な性質を示す。そのため、新たな光学材料として、表面増強ラマン散乱、太陽電池の効率増強などに応用されている。これらは、「光学的な要因(太陽電池内部の光吸収量の増大)」だけでなく、LSPRに基づく強い局在電場によって、電子-正孔の分離効率を向上するといった「電磁気学的な増強効果」によってもエネルギー変換効率が向上する。そのため、太陽電池と同様の光誘起反応である人工光合成に展開することで、変換効率の改善が期待できる。本研究ではこのような LSPR を用いた新規可視光応答光触媒の創製を目指す。



**Ag-Ag<sub>2</sub>S-CdS や Au<sub>25</sub> ナノ粒子による水分解水素生成。**  
“JACS 誌カバーピクチャー”および  
“Nanoscale 誌カバーピクチャー”

### 【実用化が期待される分野】

人工光合成反応は、空気中の窒素や二酸化炭素固定、不斉触媒の利用による種々の化合物の高選択的な合成などへ応用できる。高効率化が達成されれば、エネルギー問題の解決だけでなく、環境問題や経済的な側面からも産業全体に革新的な影響を与える。本研究の達成によって、環境・エネルギー問題を解決し、持続的な社会の確立を目指す。

# 新規固体高分子電解質の調製とそのイオン伝導機構解明

名古屋大学 大学院工学研究科・物質科学専攻・レオロジー物理工学研究グループ  
助教 土肥 侑也

固体高分子電解質(SPE)は、従来の有機溶媒から成る液状電解液を固体状高分子に置換した物で、従来の液状電解液に見られた安全性や引火性、漏液性といった問題点を解決し、高いエネルギー密度のため軽量化や高性能化の実現が可能である。現在までSPEに関する多くの研究が行われているが、未だ実用レベルの高い伝導度( $\sim 10^{-3} \text{ Scm}^{-1}$ )が実現されておらず、またその分子レベルでのイオン伝導機構も十分に理解されていない。その理由として、(i) 汎用なポリエチレンオキサイド(PEO; 図1a)を上回る高い伝導度を、他の高分子種を用いて実現できていないこと、(ii) SPE の系の複雑さゆえに、基礎物性の観点からの測定や解析が容易でないこと、の2点が挙げられる。

上記の問題点を解決するために本研究では、(i) PEO でない新規高分子種を用い、高いイオン伝導度を示す SPE を調製し、(ii) そのイオン伝導機構を高分子物性の観点から分子論的に理解することを目指す。具体的には、液状電解液として既に広く用いられるエチレンカーボネート(EC)を高分子化したポリエチレンカーボネート(PEC; 図1b)を合成し、新規 SPE 試料を調製した上で、粘弾性、誘電緩和、中性子散乱といった SPE 中の高分子の構造と運動を分子レベルで理解するための各種測定と解析を行うことで、高いイオン伝導度を示すことが期待される新規 SPE のイオン伝導機構の解明を目指す(図2)。

### 【実用化が期待される分野】

リチウムイオン電池等のエネルギーデバイス分野において、未だ十分に理解されていない SPE のイオン伝導機構を本研究を通じて解明することは、材料設計の観点から高性能新規材料設計のための分子論的指針を提示し、産業的・社会的にも大きく貢献をし得る。

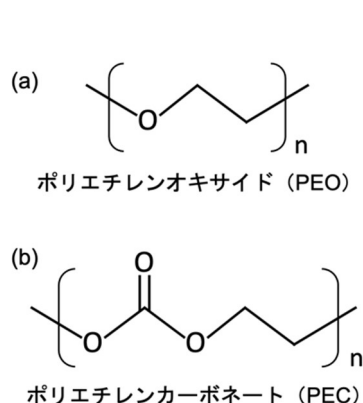
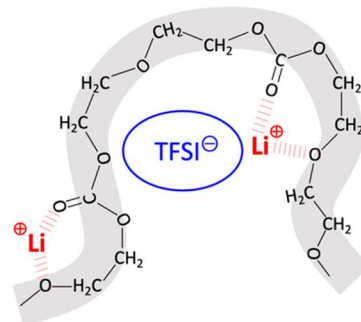


図1. (a) PEO と(b) PEC の化学構造



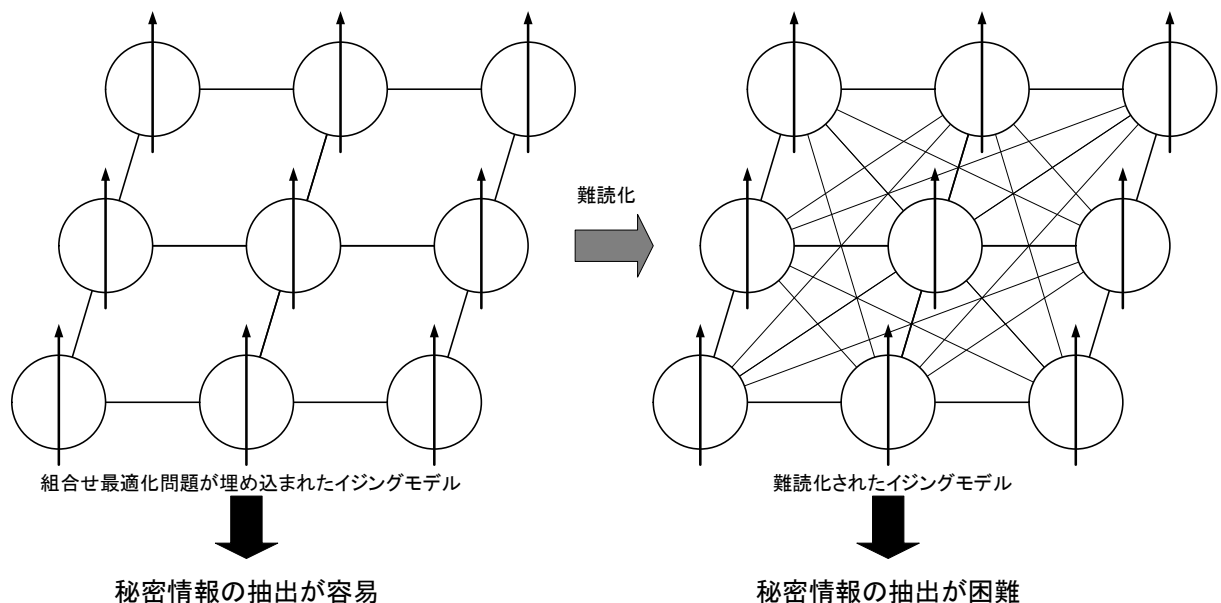
観測対象・スケールの異なる測定手法を複合的に用い、  
高分子の構造・運動の観点から、イオン伝導機構の分子  
論的理解を目指す。

## 図2. PEC 系 SPE の分子描像と本研究の目的

## 組合せ最適化問題から生成されたイジングモデルの 逆アセンブルを阻む難読化に関する研究

早稲田大学 グリーン・コンピューティング・システム研究機構  
次席研究員 多和田 雅師

従来のコンピュータと異なる原理で動作する非ノイマン型コンピュータの 1 種としてイジングマシン（イジング計算機）が注目されている。イジングマシンは組合せ最適化問題をイジングモデルと呼ばれるデータ構造で入力し、もとの組合せ最適化問題の解に相当するデータ構造を出力する。イジングマシンはデバイスそのものを遠隔地に置きインターネットを経由してアクセスするクラウド形式が一般的である。秘密情報を含む組合せ最適化問題をイジングモデルに埋め込みイジングマシンに送信するとクラウドマシンの管理者にもとの組合せ最適化問題の情報が漏えいするセキュリティリスクがある。イジングマシンで実行可能な形式を保ったままイジングモデルを難読化し秘密情報を守る手法を研究する。



### 【実用化が期待される分野】

組合せ最適化

クラウドセキュリティ

## 2020年度(令和2年度)

### 「特定研究助成」受領者名簿

#### 領域b. 革新的なモビリティ社会の創出を支える基盤技術に関する研究

| 氏名              | 所属機関              | 役職 | 研究題名                                      |
|-----------------|-------------------|----|-------------------------------------------|
| 本間 格<br>ホンマ イタル | 東北大学<br>多元物質科学研究所 | 教授 | 有機電極材料を利用した高エネルギー密度・レアメタルフリー型リチウムイオン電池の開発 |

## 助成対象研究の紹介文

# 有機電極材料を利用した高エネルギー密度・ レアメタルフリー型リチウムイオン電池の開発

東北大学 多元物質科学研究所  
教授 本間 格

リチウムイオン電池は現在、スマホ、ノートパソコンや車載用電源として幅広く普及していますが今後の世界的な市場拡大に伴い電極の構成元素であるリチウムやコバルトなどの希少金属資源の逼迫が懸念されています。他方、産業競争力強化の観点からは電池製品の低コスト・高安全・高容量・高出力などの高性能化が求められています。本研究ではレアメタルを全く使用せず金属資源的な制約を受けない革新的蓄電池を目標として、炭素、窒素、酸素、水素等の軽元素のみから成る有機電極材料を開発します。現行のリチウムイオン電池正極に使用されているコバルト等の希少金属元素に比べ、バイオマスからも合成可能な有機材料は資源的には無尽蔵であり、環境負荷も小さく、安価に大量合成可能で、さらに重量当たりの蓄電エネルギー密度が大きいなど多くの利点があります。本研究では有機材料の高い可能性に注目し、有機レドックス分子を活性物質とした高エネルギー密度の電極材料を開発してリチウムイオン電池の低コスト化とレアメタルフリー化を実現します。有機電極材料の分子構造設計を行うことで高いレドックス電位と可逆的な多電子レドックス反応を実現して、現在リチウムイオン電池に使用されている無機系電極材料よりも高い蓄電エネルギー密度の革新的なレアメタルフリー・安価・高性能電極材料を開発します。リチウムイオン電池のレアメタルフリー化を実現して市場急成長が見込まれる電気自動車用電池を開発して資源リスクを回避した産業競争力強化、低コスト化と市場成長に貢献します。

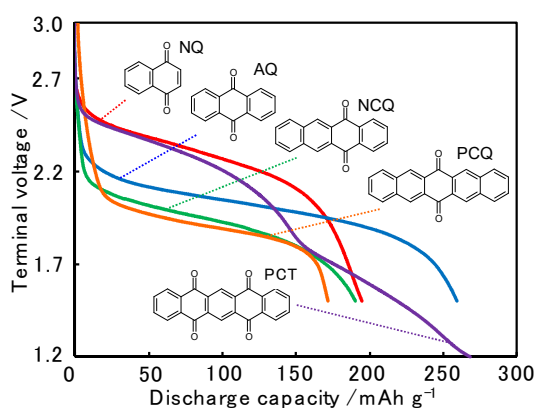


図1 有機分子を用いたリチウムイオン電池電極材料

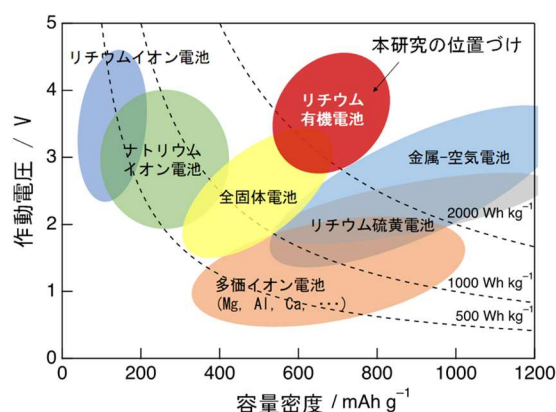


図2 リチウム有機電池の可能性

### 【実用化が期待される分野】

1. レアメタルフリーな電気自動車用高容量型リチウムイオン電池
2. 再生可能電力エネルギーの安価・大型蓄電システム
3. ロボット、ドローン、スマートフォンなど各種移動体用の高性能電源

## 2020年度(令和2年度)

### 「国際交流援助」受領者名簿

本年度は新型コロナウイルスのため、学会が中止もしくはオンライン開催となり、採択件数は0件となりました。

## 2020年度(令和2年度)

### 「学術賞」受賞者名簿

#### 功績賞

| 氏名                | 所属機関              | 役職 | 研究題名                          |
|-------------------|-------------------|----|-------------------------------|
| 田中 雅明<br>タナカ マサアキ | 東京大学<br>大学院工学系研究科 | 教授 | 超低消費電力デバイスのためのスピントロニクス材料の研究開発 |

#### 奨励賞

| 氏名              | 所属機関                         | 役職  | 研究題名            |
|-----------------|------------------------------|-----|-----------------|
| 三輪 真嗣<br>ミワ シンジ | 東京大学<br>物性研究所・量子物質<br>研究グループ | 准教授 | 界面磁性の電界変調に関する研究 |

## 超低消費電力デバイスのためのスピントロニクス材料の研究開発

東京大学 大学院工学系研究科 教授 田中 雅明

微細化による高性能化（ムーアの法則）の限界が迫る中で、従来の電荷を利用した非磁性半導体のみでは将来のエレクトロニクスや情報技術の発展は不可能であり、新しい機能をもつ材料と新原理デバイスの開発が不可欠である。その中でもスピン機能と半導体機能を融合した材料の基礎研究と開発（形成技術、評価、物性制御の研究）が最も有望である。本研究では、ポストムーア時代のデバイスの構成要素として期待される、非磁性半導体に磁性元素(Mn, Fe)を添加した強磁性半導体とそのヘテロ構造、強磁性金属と半導体から成る複合ヘテロ構造を作製し、その評価、物性制御、機能開発、スピン依存伝導現象などの研究を行い、半導体と磁性体の材料科学とデバイス工学の融合に貢献している。特に、室温を超える高いキュリー温度をもつn型およびp型強磁性半導体の創成（長い研究の歴史をもつこれまでの強磁性半導体研究の問題点をほぼすべて解決、新たなデザインルールを創出）、新しい強磁性ヘテロ構造とその新機能の実証、スピントランジスタの作製とその原理動作の実証などの成果を挙げ、学術および工学的に新しい知見をもたらしている。2016 年 4 月以降（～2020 年 12 月）、以上の研究成果を多くの査読付き原著論文 63 編（Nature Physics, Nature Electronics, Nature Communications, Advanced Materials, Physical Review Letters, Physical Review B, Physical Review Materials, Applied Physics Letters, Applied Physics Express などの国際論文誌）、および国際会議 136 件（うち招待講演 40 件）で発表している。

研究助成期間（2016 年 4 月～2019 年 3 月）に行った研究成果を基礎に、2019 年度以降もより発展的な研究を行ってきた。主な研究成果を記載する。

- **p型強磁性半導体(GaFeSb)において、400 K を超える高いキュリー温度  $T_C$  を実現、磁気異方性を制御：** p型強磁性半導体(GaFeSb)において、400 K を超える高いキュリー温度  $T_C$  を実現し、そのバンド構造や磁気異方性を明らかにした。また、歪み、厚さ、温度によって、(GaFeSb) 薄膜の磁気異方性が面内磁化から垂直磁化へ変化させ、制御可能であることを示した。[Phys. Rev. B **99**, pp.014431/1-7 (2019)].
- **n型強磁性半導体(InFeSb)において、385 K の高いキュリー温度  $T_C$  を実現、電界効果により磁性を制御：** n型強磁性半導体(In,Fe)Sb においては、キャリア（電子）誘起強磁性であることを示し、電界効果トランジスタ構造を作製してゲート電圧で磁性を制御することに成功した。これまでの実験結果と実績を基に、Fe 添加 III-V 族強磁性半導体新しいデザインルールを創出した。さらに Fe 濃度を 35%まで高めることによって、高いキュリー温度  $T_C$  (= 385 K)を実現し、応用上重要な垂直磁気異方性も増大できることを示した。[Appl. Phys. Express **12**, pp.103004/1-5 (2019)].
- **強磁性/非磁性半導体ヘテロ接合において新しい巨大磁気抵抗効果を発見、電界効果による変調に成功：** 非磁性半導体(InAs)/強磁性半導体((Ga<sub>0.8</sub>Fe<sub>0.2</sub>)Sb)からなる二層の半導体へ

テロ接合を作製し、新しい電子伝導現象—大きな磁気抵抗効果—を発見した。さらに、この接合を電界効果トランジスタに加工し、ゲート電圧によって InAs 薄膜中の電子状態(波動関数)を変化させ、近接効果による磁気抵抗を大きく変調することにも成功した。[*Nature Physics* **15**, pp.1134–1139 (2019)].

- **強磁性半導体(Ga,Mn)As において高効率・低電流磁化反転に成功:** 垂直磁気異方性をもつ単一の強磁性半導体 GaMnAs 薄膜を作製し電流を流すだけで、スピン軌道相互作用(スピン軌道トルク(SOT))によるきわめて高効率、低電流(従来より 2 桁低い電流密度  $J_c = 3.4 \times 10^5 \text{ Acm}^{-2}$ )で  $180^\circ$  磁化回転(反転)をすることに成功した。[*Nature Communications* **10**, pp.2590/1–6 (2019)]. さらに、SOT による磁化反転の解明を進め、field-like トルクを抑制することによりさらに低い電流密度( $J_c = 4.6 \times 10^4 \text{ Acm}^{-2}$ )で磁化反転を起こすことに成功した。[*Nature Electronics* **3**, pp.751–756 (2020)]. 本研究成果は低消費電力スピndeバイスの実現に向けて重要な進展である。
- **超伝導体(Nb)/強磁性半導体(InFeAs)/超伝導体(Nb)からなるジョセフソン接合を作製、強磁性半導体中にスピン三重項の超伝導電流を流すことに成功:** n型強磁性半導体 (In,Fe)As 薄膜の上に超伝導体 Nb を電極とする超伝導接合(プレーナ型ジョセフソン素子)を作製し、磁性半導体中に超伝導を導入することでスピン三重項の超伝導電流を発生させることに成功した。極低温で温度や磁場を変化させながら詳細に電気伝導特性を調べたところ、1 K 以下で抵抗がゼロとなり、近接効果による(In,Fe)As 中の超伝導と約  $1 \mu\text{m}$  におよぶ長いコヒーレンス距離を見出した。さらに、臨界電流が磁場に対して周期的に増減する干渉効果を観測した。このことは(In,Fe)As を介して Nb 間にジョセフソン効果が生じていることを示しており、磁性半導体中を流れる超伝導電流を観測した初めての成果である。本研究により、磁性、半導体、超伝導をつなぐ、新しい超伝導スピントロニクス・デバイスの開発が進展することが期待される。(東大物性研究所勝本研究室と共同研究) [*Phys. Rev. Lett.* **122**, pp.107001/1–6 (2019)].
- **横型スピバルブ構造を作製、大きな磁気抵抗効果を観測:** (Ga,Mn)As 電極/GaAs チャンネル/(Ga,Mn)As 電極から成る横型スピバルブ構造、および MnAs 電極/Si チャンネル/MnAs 電極から成る横型スピバルブ構造を作製し、強磁性電極の磁化(平行/反平行磁化)の変化による大きな抵抗変化(10 – 70%)を観測した。数百 nm 程度の GaAs および Si チャンネル中をスピン偏極キャリアが伝導をすることを示したもので、横型 Spin-MOSFET 実現に向けて重要な成果である。[*Jpn. J. Appl. Phys.* **59**, pp.SGGI08/1–4 (2020); *Appl. Phys. Express* **11** pp.033003/1–4 (2018); *J. Appl. Phys.* **122**, pp.223904/1–7 (2017)].
- **強磁性電極(Fe)から半導体(Si)へ高効率のスピン注入と検出を確立、室温で動作する Spin-MOSFET を作製、動作実証:** Fe/トンネル障壁/Si からなる種々のスピントネル接合を形成し、界面の構造を系統的に探索・制御することにより、強磁性電極(Fe)から半導体(Si)へ高効率のスピン注入と検出を行う技術を確認した。また、Si 二次元電子チャンネル中の運動量散乱とスピン散乱の関係を定量的に明らかにした。キャリアの運動量緩和機構に依らず、運動量散乱 14000 回に 1 回の割合でスピン散乱が起こることを示した。半導体 FET チャンネルにおけるスピン散乱を定量的に明らかにした研究は、本研究が初めてである。また、Si 二次元電子チャンネル

を有する横型 Spin-MOSFET を作製し、室温動作を示した。[Phys. Rev. B **99**, pp.165301/1-9 (2019)].

- **室温で動作する Spin-MOSFET におけるスピン輸送の解明:** 室温で動作する Spin-MOSFET において、Si (シリコン) 二次元電子チャネルのスピン輸送と散乱現象を解明し、ソース・ドレイン間の横方向電界によって電子スピンの散乱が抑制され、室温で  $10\ \mu\text{m}$  以上も走行すること(スピンドリフト効果)、ソース・ドレイン電極直下の  $n^+$  領域でスピン散乱が起こることなどを示した。[Phys. Rev. B **102**, pp.035305/1-14 (2020)].

### 【実用化が期待される分野】

スピン自由度を用いた新しい材料、物性、デバイスに関する研究分野は、「スピントロニクス」と呼ばれ世界的に盛んになりつつあるが、情報技術(IT)の根幹をなす半導体エレクトロニクスにどのように融合するのか? という極めて重要な点については、本研究代表者らのグループが 2004 年ごろから一連のスピントロニクス・デバイスに関する研究を発表するまで具体的に明示されることはなかった。本研究では、これまでの本申請者グループによる材料物性・デバイス研究の実績をベースとして、従来の半導体デバイスや集積回路では持ち得なかった「不揮発性」と「再構成可能性」の機能をもつ材料とデバイスを創出し、その機能と動作を実証することにより、スピン機能材料とデバイス工学の学術および技術体系を構築しつつある。特に、室温で強磁性を示す  $n$  型および  $p$  型の強磁性半導体の創製と機能実証(これにより強磁性半導体における”ルネサンス”を生み出す)、Spin-MOSFET の作製と動作実証などはこの分野で世界をリードする研究成果である。この研究がさらに発展すれば、波及効果は広範囲にわたり、超高密度・高速の不揮発性メモリ、再構成可能な論理回路、作製した後で再設計可能な”やわらかいハードウェア”をもつリプログラマブル・コンピューティングなど、情報の記録や処理技術においても(スピン自由度と不揮発性の導入による)革新的な低消費電力半導体デバイスや集積回路を実現できる。



## 界面磁性の電界変調に関する研究

東京大学 物性研究所 量子物質研究グループ 准教授 三輪 真嗣

ナノサイズの磁性体、すなわち磁石を利用するエレクトロニクスはスピントロニクスと呼ばれています。スピントロニクスに興味が集まる理由は主に2つあります。1つ目は電子が持つ磁石としての性質である「スピン」を電荷とともに利用することで、これまでの技術では実現できなかった新しい機能を持つ電子デバイスの創出が可能となる点です。電子デバイスの例としてはハード磁気ディスクドライブ用磁気ヘッドや不揮発性磁気メモリMRAMがあります。もう1つは様々な科学分野で電子スピンの物理が重要な研究課題となってきた点です。固体物理、統計物理および量子情報等の物理学のみならず、化学や生物学でもスピンの重要性が認識されています。

本研究課題である界面磁性の電界変調は不揮発性磁気メモリMRAMに関連します。MRAMでは厚さ数ナノメートルの磁性及び非磁性層から構成される人工多層膜を利用したデバイスを持ちます。本デバイスでは多層膜に外部から磁場を印加すると電気抵抗が変化する磁気抵抗効果、そして磁性体の磁化方向を電氣的に制御するスピントルク効果が重要です。産業革命以来、強磁性体の磁化方向は電磁誘導による電流磁場で制御されてきましたが 2000 年にエネルギー消費が小さなスピン流によるスピントルク効果が、そして 2010 年頃には電圧磁気効果によるスピントルク効果が発見されました。電圧磁気効果を用いると、電流磁場より高効率であり現在開発されているMRAMの駆動原理であるスピン流によるスピントルク効果と比較しても 100 倍以上の低消費電力化が可能であり、精力的に研究がされています(図 1(a))。

従来は小さな電圧磁気効果を特定の条件下で用いてスピントルク効果、すなわち磁極の反転等をデモンストレーションする研究が多く、近年は大きな電圧磁気効果、具体的には単位電界辺りの界面磁気異方性エネルギーの大きさを  $1000 \text{ fJ/Vm}$  以上にする材料開発が重要視されています。そこで本研究では巨大な電圧磁気効果の実現に向けた知見を得るため原子層成長技術を駆使した高品質デバイスと放射光 X 線分光を融合させた独自研究を展開しました(図 1(b))。具体的にはスピントロニクスデバイスの基本構造である Fe/MgO、そして Fe/MgO 界面に Co 及び Pt を 1 原子層挿入した多層膜デバイスを放射光実験用に新たに開発しました。そして Fe/Co/MgO 系を用いて磁性を主に担う原子軌道である  $d$  軌道の電子増減に起因する軌道磁気モーメント機構[1]、Fe/Pt/MgO 系を用いて  $d$  軌道の電子再配列に起因する電気四極子機構[2]を見出し、電圧磁気効果を増強させるための材料設計指針を明確にしました[3]。実際に FeIr/MgO 系では Fe/MgO 比 10 倍の電圧磁気効果( $>300 \text{ fJ/Vm}$ )が発見されています。電圧磁気効果への放射光利用は実験設計の困難さから極めて少ないものでしたが、本研究では高度な試料作製技術によりこれを実現させ

てスピントロニクスにおける放射光利用の潮流を生み出しました。本技術はオペランド分光として放射光分野からも注目されています。

最近では上述の単純金属多層膜のみならず、量子物質と呼ばれる新奇材料を用いたスピントロニクス研究も推進しています。例としてトポロジカル磁性体の一種であるカイラル反強磁性体  $\text{Mn}_3\text{Sn}$  を用いたデバイスにおいて新奇スピントルク効果を発見しました[4]。

### 【実用化が期待される分野】

IT機器の低消費電力化は社会生活を豊かにしつつ地球環境を維持する上で重要な課題として認識されています。エレクトロニクス分野でこれを実現するキーテクノロジーのひとつが不揮発性メモリであり、大容量性・高速性・高い耐繰り返し動作性を満たし得る唯一の不揮発性メモリである磁気ランダムアクセスメモリMRAMは世界中で開発が進められています。界面磁性の電界変調による磁化制御技術はMRAMの新たな駆動原理として注目されており、低消費電力化に寄与すると期待されています。

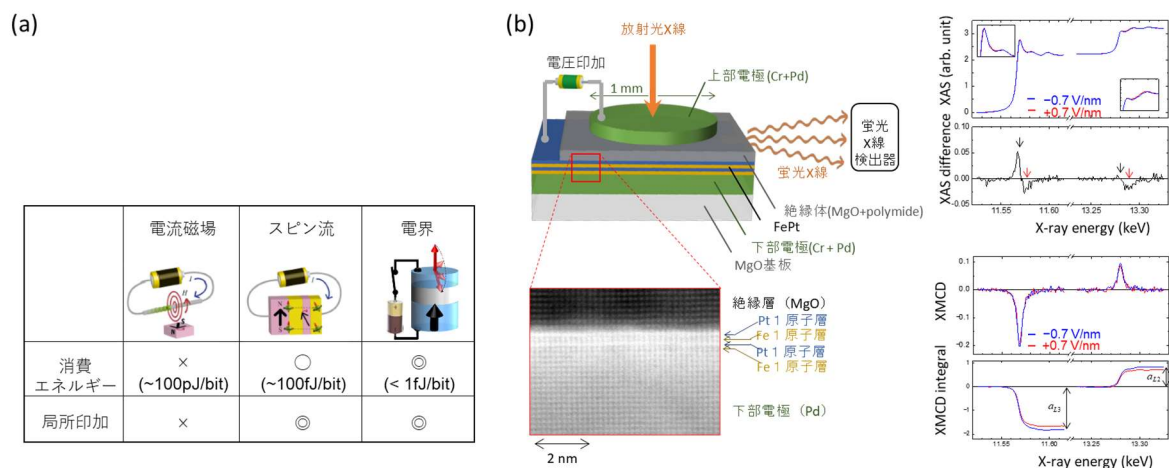


図 1(a) 様々な磁極の制御手法。(b)本研究におけるオペランド X 線分光の実施例。

- [1] T. Kawabe, K. Yoshikawa, M. Tsujikawa, T. Tsukahara, K. Nawaoka, Y. Kotani, K. Toyoki, M. Goto, M. Suzuki, T. Nakamura, M. Shirai, Y. Suzuki, and S. Miwa, “Electric-field-induced changes of magnetic moments and magnetocrystalline anisotropy in ultrathin cobalt films”, *Physical Review B* **96**, 220412(R) (2017).
- [2] S. Miwa, M. Suzuki, M. Tsujikawa, K. Matsuda, T. Nozaki, K. Tanaka, T. Tsukahara, K. Nawaoka, M. Goto, Y. Kotani, T. Ohkubo, F. Bonell, E. Tamura, K. Hono, T. Nakamura, M. Shirai, S. Yuasa, and Y. Suzuki, “Voltage controlled interfacial magnetism through platinum orbits”, *Nature Communications* **8**, 15848 (2017).
- [3] S. Miwa, M. Suzuki, M. Tsujikawa, T. Nakamura, M. Shirai, S. Yuasa, and Y. Suzuki, “Perpendicular magnetic anisotropy and its electric-field-induced change at metal-dielectric interfaces”, *Journal of Physics D: Applied Physics* **52**, 063001 (2019).
- [4] H. Tsai, T. Higo, K. Kondou, T. Nomoto, A. Sakai, A. Kobayashi, T. Nakano, K. Yakushiji, R. Arita, S. Miwa, Y. Otani, and S. Nakatsuji, “Electrical manipulation of a topological antiferromagnetic state”, *Nature* **580**, 608 (2020).