

目次

はじめに	1
組織とメンバー: 2024年度	2
先端エネルギー材料研究紹介	
・表面水分子吸着の利用により高エネルギー密度化したマンガン酸化物ナノシート蓄熱材料	3
・ヘテロエピタキシャル成長による非最密充填コロイド結晶の創製	4
・次世代リチウム金属電池の実現に向けた電解液設計の新指針	5
イベント	
E-IMR Summer Meeting 2025	6
お知らせ	
E-IMRワークショップ	6

はじめに

エネルギー問題と地球温暖化・気候変動問題は世界規模でますます深刻化し、持続可能な社会の構築に向けて、新たなエネルギー源の確保やエネルギー変換・貯蔵技術の開発が喫緊の課題となっています。エネルギー関連材料の革新は不可欠であり、金属材料研究所でも重点分野として総力を挙げて取り組んでいる領域です。

2015年4月に発足した先端エネルギー材料理工共創研究センター(E-IMRセンター)は、本年度で10年目を迎えます。2022年度から開始された第4期中期目標・中期計画に合わせ、センター第2期として組織を再編し、グリーンエネルギーテクノロジー開拓を基軸とする4研究ユニット体制を整備しました。本年度からは、ユニット名称の見直しとして「太陽エネルギー変換材料研究ユニット」を「エネルギー変換材料研究ユニット」へと改称し、太陽光利用に限定されない幅広いエネルギー変換研究を推進してまいります。

また、人的体制も充実しました。これまでE-IMR特任助教として活躍された野澤 純氏が藤原研究室の准教授に、李 弘毅氏が市坪研究室の助教に昇任し、センター内の研究推進力が一層強化されました。国際連携の面では、英国 University College Londonの紅林秀和教授がエネルギー変換材料研究ユニットに新たに加わり、紅林グループの助教としてDion Troy Callum氏も

着任しました。さらに、国際卓越大学の枠組みの一環として、大阪公立大学の林 晃敏教授が金属材料研究所教授を兼任し、蓄エネルギー材料研究ユニットの一員として加わっていただくこととなり、国内外の学術ネットワークが一段と拡大しました。

研究資金・プロジェクトについては、昨年度に引き続き、JSPS科学研究費助成の特別推進研究、基盤研究(S)、JST-GteXおよびALCA-Nextなど複数の大型プロジェクトが進行中です。これらの取り組みを通じて、蓄電池、次世代水素エネルギー、エネルギー変換材料、材料解析技術など多岐にわたる分野で研究が深化しており、センターの方向性と調和しながら精力的な研究開発を続けています。

本センターは今後も、放射光・中性子などの量子ビーム解析、第一原理計算、マテリアルズインフォマティクス(MI)を活用した最先端研究を推進するとともに、異分野融合型の若手人材育成を継続し、革新的エネルギー材料と複合モジュールの創製を通じて、カーボンニュートラル社会の実現に貢献してまいります。

先端エネルギー材料理工共創研究センター
センター長 市坪 哲



センター長

センター長/教授

市坪 哲

蓄電池創製
相変態構造制御
統計熱力学組織形成論



運営委員会

研究支援室

特任教授

佐藤敬浩

研究企画・運営担当



研究戦略室

エネルギー変換材料研究ユニット

教授

藤原 航三

結晶成長
Si多結晶太陽電池



教授(兼)

関 剛斎

磁性薄膜・ナノ構造
スピントロニクス



教授(委嘱)

塚崎 敦

超伝導薄膜
界面物性
トポロジカル物性・
物質 (東京大学)



教授(兼)

Bauer, Gerrit
Ernst-Wilhelm

物性理論物理
スピントロニクス
(材料科学高等研究所)



教授(兼)

紅林 秀和

スピン物性
二次元材料
ニューロモルフィック
コンピューティング
(CSIS)



准教授(兼)

岡本 範彦

透過電子顕微鏡
熱電材料



准教授(兼)

野澤 純

コロイド
結晶成長



助教(兼)

伊藤 啓太

強磁性窒化物
規則合金



助教(兼)

Troy Dion

スピントロニクス
スピン波
マイクロログ計算
(CSIS)



蓄エネルギー変換材料研究ユニット

教授(兼)

宮坂 等

酸化還元活性錯体格子
多機能型ソフトマテリ
アル
機能協奏型二次電池



教授(兼)

折茂 慎一

高密度水素貯蔵材料
超イオン伝導材料
多価蓄電デバイス
(材料科学高等研究所)



教授(兼)

高村 仁

固体酸化物形燃料電池
プロトン伝導性セラ
ミックス
水素製造システム
(工学研究科)



准教授(兼)

佐藤 豊人

水素貯蔵材料
水素関連材料



助教(兼)

李 弘毅

デュアルカチオン電池
金属・合金負極材料開発



材料評価・解析研究ユニット

教授(兼)

藤田 全基

量子ビーム
教相関電子系
結晶成長



教授(兼)

熊谷 悠

計算材料学
マテリアルズインフォ
マティクス
セラミックス



教授(兼)

高橋 幸生

放射光
コヒーレント回折イメージ
ング
微細構造・化学状態解析
(国際放射光イノベーション・
スマートセンター)



准教授

Belosludov,
Rodion V.

機能性ナノポーラス
材料
ガス貯蔵・分離



複合モジュール・社会実装研究ユニット

教授(兼)

加藤 秀実

ナノポーラス金属・半
金属
金属ガラス・
アモルファス合金



教授/センター長

市坪 哲

蓄電池創製
相変態構造制御
統計熱力学組織形成論



特任助教

宋 瑞瑞

脱成分(デアロイン
グ)
多孔質金属/合金
触媒



表面水分子吸着の利用により高エネルギー密度化したマンガン酸化物ナノシート蓄熱材料

岡本 範彦 准教授

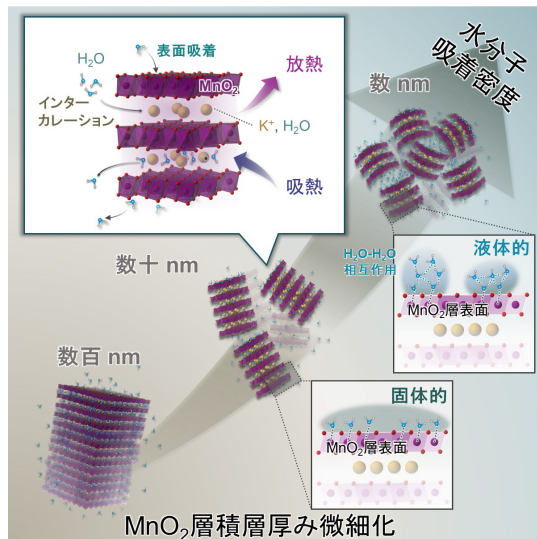
エネルギー変換材料研究ユニット
構造制御機能材料学研究部門

脱炭素社会の実現に向け、工場廃熱などの未利用廃熱の有効活用、特にこれを貯蔵し熱エネルギーのまま再利用する蓄熱材料の開発が求められています。これまでに、層状二酸化マンガンが大気中の水分子を層間に吸収したり層間から放出することで(水分子インターカレーション機構)、可逆的かつ高速に蓄放熱可能な蓄放熱可能な材料であることを見出してきました[1]。熱分解法により作製したサブマイクロメートル(数百nm)サイズの粗大粒の層状二酸化マンガンは、約130°Cで蓄熱することが可能であり、 MnO_2 1モル当たり0.5モルの水分子を吸放することができます。しかしながら、太陽熱をはじめとして、環境に膨大に存在する100°C以下の低温未利用熱をより有効に活用していくためには、蓄熱温度の低温化が不可欠です。本研究では、蓄熱温度域をより低温側へ、そしてより高密度の水分子吸放出ひいては高蓄熱エネルギー密度を達成すべく、数十nm~数nmの厚みに制御した試料を合成し、水分子吸着挙動と蓄放熱特性の結晶サイズ依存性を詳細に調べました。

バルク試料(数百nm厚)では、130°C付近で水分子の層間インターカレーションによる蓄放熱のみが生じる一方、試料を数十nm厚以下にシート化すると、比表面積が大幅に増大し、60°C以下の低温域でも水分子がシート表面に吸着(表面吸着)して明確な熱応答を示すことが分かりました。このように、温度域の異なる二つの水分子吸収・吸着様式①層間バルクインターカレーション(130°C付近)と②表面吸着(60°C以下)が段階的に機能する“二段階蓄熱”メカニズムにより、水分子の吸着(脱離)密度は、バルク状態での MnO_2 1モル当たり0.5モルに比べ1.5倍の0.75モルに増大し、結果的に蓄熱エネルギー密度が MnO_2 1 kg当たり237 kJから298 kJ の約1.3倍に向上しました。こ

れにより、インターカレーション機構のみでは困難だった100°C以下の低温域でも有効な蓄熱動作を実現しました。さらに、インターカレーション水と表面吸着水の收容サイト数と結晶子(シート厚み)の関係を、独自の幾何学モデルを用いて整理し解析した結果、インターカレーション水は固体的、表面吸着水は液体的な状態に近いことが示されました(図)[2]。

本成果は、低温域での蓄熱性能の設計指針を提供すると共に、昼間の太陽熱を利用した夜間暖房や、機械暖気、オフライン廃熱輸送、熱電変換との組み合わせによる場所・時間を選ばない発電など、多様な省エネルギー技術への応用が期待されます。



参考文献

- [1] T. Hatakeyama, N. L. Okamoto, S. Otake, H. Sato, H.Y. Li, and T. Ichitsubo, *Nat. Commun.*, **13**, 1452 (2022).
- [2] H. Yoshisako, N. L. Okamoto, K. Tanaka, and T. Ichitsubo, *Commun. Chem.*, **8**, 169 (2025).

ヘテロエピタキシャル成長による非最密充填コロイド結晶の創製

野澤 純准教授
エネルギー変換材料研究ユニット
結晶物理学研究部門

コロイド粒子が規則正しく配列したコロイド結晶は、光との強い相互作用に基づく多様な光学デバイスやメタマテリアルへの応用が期待されています。中でも、光の伝播を制御できるフォトニック結晶は、光回路、高輝度高出力レーザ、さらには高効率な太陽光発電といった革新的な光エネルギー変換材料創出の中核を担う存在として世界的に注目を集めています。

粒子の自発的な配列(自己組織化)により合成されるコロイド結晶は、汎用的な球状粒子を用いた場合、最密充填構造を取ります。ここで、有用な光学特性を発現するのは、隙間を有していたり、特別な構造(ダイヤモンド構造など)を持った非最密充填構造です。世界的な潮流においてはそのような構造を、形態や化学的性質の不均質な粒子を合成することで達成しようとしています。しかしながら、特殊な不均質粒子を用いる場合、粒子合成の困難さやコスト、多分散性に起因する低い結晶性など、解決すべき課題は多く、応用において重要となる大量生産において大きな障壁となっています。我々は、汎用的に用いられている球状粒子からなるコロイド結晶の構造の多様性を拡張し、多様な非最密充填構造を創製できるようにすることでこの課題を解決しよう、と考えています。

我々は、コロイド結晶の構造の多様性を拡張するため、新規の結晶育成法としてコロイドヘテロエピタキシャル成長法の確立に取り組んでいます。これまで、2元系結晶において多様な構造の結晶育成に成功しています。本手法を球形単一粒子系に適用したところ、多様な非最密充填構造が得られることを発見しました。代表的な非最密充填構造であるkagome格子は、部分的に異なる化学的性質をもった表面を修飾された粒子であるJanus粒子を用いて合成された報告がありましたが、等方的な球形粒子によっては合成例はありませんでした。我々は、kagome格子が複数積層した3次元結晶をコロイド系で初めて合成することに成功しました(図1)[1]。

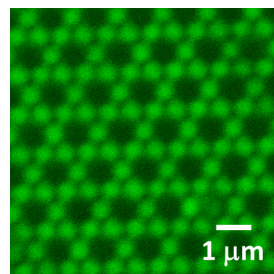


図1 球形コロイド粒子によるkagome格子コロイド結晶

本手法は、既存の手法では得られない多様な構造の結晶育成を可能とします。結晶外形が異なり、互いに30°の角度をなす2種類の相を単一粒子から同時に合成することに成功しています(図2)[2]。この2相は多形の関係にあり、多形転移が核形成や結晶成長のプロセスにおいて重要な役割を果たしていることを明らかにしています。

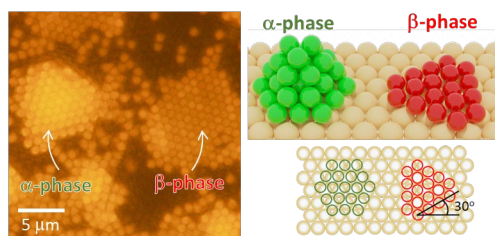


図2 異種結晶基板上に生成したコロイド結晶多形

現在、本手法のメカニズム解明に関する研究[3]と、新規構造のコロイド結晶の創製という2つの側面から研究を進めています。次世代の光変換材料への応用に資するコロイド結晶の創製を目指します。

参考文献

- [1] Nozawa et al., Colloid Interf. Sci. Commun. 64 (2025) 100815.
- [2] Nozawa et al., Commun. Phys. 8 (2025) 134.
- [3] Nozawa et al., Cryst. Growth Des. in press.

先端エネルギー材料研究紹介3

次世代リチウム金属電池の実現に向けた 電解液設計の新指針

李 弘毅助教

蓄エネルギー変換材料研究ユニット
構造制御機能材料学研究部門

本研究グループでは、高いエネルギー密度を有する次世代蓄電池「リチウム金属電池」の実用化に貢献する新たな電解液設計指針を提案している。本稿ではその研究成果を紹介する。

リチウム金属負極の課題：Liデンドライト形成

リチウム金属負極は、現在主流のリチウムイオン電池に用いられる黒鉛負極を遥かに凌ぐ理論容量を持つため、蓄電池の飛躍的な高エネルギー密度化を実現する材料として期待されている。しかしながら、充放電過程において、負極表面にデンドライト（樹枝状結晶）が不均一に析出する問題が存在する。デンドライトの成長は、電池のクーロン効率やサイクル寿命を著しく低下させるだけでなく、セパレータを貫通して正極と短絡（ショート）し、発火・爆発といった熱暴走を引き起こす危険性があり、実用化を阻む主要因となっている。

アルカリ土類金属イオン添加によるリチウムイオンの溶媒和構造制御

上記課題に対し、本研究グループは、電解液への微量の添加剤によってリチウムの電析形態を制御するアプローチに着目した。具体的には、電解液にカルシウム(Ca)やバリウム(Ba)といったアルカリ土類金属イオンを添加することにより、Liデンドライトの形成が顕著に抑制され、平坦なLi析出形態が得られることを見出した。

各種分光分析および理論計算から、これらの多価カチオンの添加が電解液中のLiイオンの溶媒和構造を変化させ、溶媒和分子との結合が弱い溶媒共有イオン対(SSIP)状態から、アニオンと直接結合した接触イオン対(CIP)状態への遷移を誘起することが明らかとなった。このCIP状態のLiイオンは脱溶媒和過程における活性化エネルギーが高いため、電極界面での反応速度が緩和され、結果として均一なLi電析が促進される。

[H. Li, M. Murayama, T. Ichitsubo, *Cell Rep. Phys. Sci.* **3**, 100907 (2022)]

希土類イオン添加による安定な固体電解質界面(SEI)の形成

さらに、添加剤としてランタン(La)やセリウム(Ce)などの希土類イオンを用いることで、Liデンドライト抑制効果に加え、リチウム金属表面に自己形成される固体電解質界面(Solid Electrolyte Interphase: SEI)は化学的・機械的に安定性が向上することを見出した。

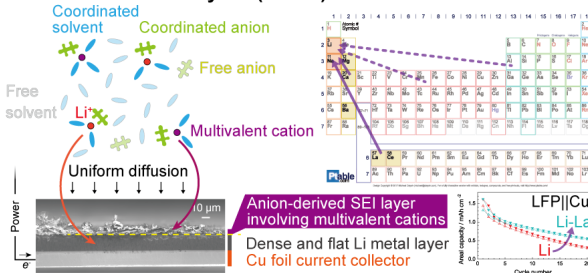
この希土類元素を含むSEIは、高いイオン伝導性と低い電子伝導性を両立し、電解液の継続的な分解反応を効果的に抑制する。これにより、充放電サイクルにおける活性リチウムの損失が最小化され、フルセル基準で電池のサイクル寿命が大幅に向上することが実証された。

[H. Li, T. Ichitsubo et al, *J. Mater. Chem. A* **13**, 3619-3633 (2025)]

今後の展望

本研究で確立された、電解液への微量な多価カチオン添加による溶媒和構造制御およびSEI改質というアプローチは、既存の電解液系に適用可能であり、製造プロセスへの実装も比較的容易である。本設計指針は、安全で長寿命な高エネルギー密度金属リチウム電池の実現を加速させる基盤技術として、今後の蓄電池開発に大きく貢献するものと期待される。

Dual-cation electrolytes (DCEs) for Li metal batteries



多価カチオン塩の添加を用いたLi金属負極のデンドライト成長抑制と可逆性向上

報告

E-IMR Summer Meeting 2025

開催日：2025年6月16日(月) 15:30ー17:30

開催場所:東北大学金属材料研究所 講堂

2025年 6月16日(月)に金属材料研究所講堂においてE-IMR Summer Meeting 2025を開催しました。

このイベントは、本センターで実施されている研究活動をご紹介しますとともに、研究者による講演と今後のセンター活動の意見交換を目的としております。研究発表の部では、古川翔一助教、石黒志准教授、芳野遼助教、伊藤啓太助教、野澤純特任助教、による研究活動紹介を行いました。

E-IMR Summer Meeting 2025 (エネルギー材料研究会) 2025.6.16 (月) 15:30-17:30	
時間	コンテンツ・講演者
15:30 - 15:35	開会あいさつ 市坪 哲 [E-IMRセンター長/金属材料研究所教授]
【研究発表】	
15:35 - 15:55	「室温近傍での水素分子吸着を目指した様々な金属種を有するフタロシアニン系シート型COFの合成」 古川 翔一 [材料科学高等研究所/特任助教]
15:55 - 16:15	「放射光先端顕微分光による電池材料の化学状態イメージング〜X線タイコグラフィとその先〜」 石黒 志 [国際放射光イノベーション・スマート研究センター/准教授]
16:15 - 16:35	「多孔性構造と触媒活性サイトを有する無機-有機ハイブリッド型錯体ゲルを用いた二酸化炭素変換反応の開拓」 芳野 遼 [金属材料研究所/助教]
【休憩・10分】	
16:45 - 17:05	「磁性窒化物における磁気弾性特性の巨大変調」 伊藤 啓太 [エネルギー変換材料研究ユニット/金属材料研究所助教]
17:05 - 17:25	「コロイドヘテロエピタキシャル成長における多段階結晶化プロセス」 野澤 純 [エネルギー変換材料研究ユニット/金属材料研究所特任助教]
17:25 - 17:30	閉会あいさつ 市坪 哲 [E-IMRセンター長/金属材料研究所教授]

『2025年度若手研究者のための革新的エネルギー材料・複合モジュール創製研究助成』の採択課題

先端エネルギー材料理工共創研究センターでは、東北大学内の若手研究チームを対象として、脱炭素社会の実現(2050カーボンニュートラルの達成等)に貢献することを目指す材料科学およびその関連分野の萌芽的研究を支援するため、『若手研究者のための革新的エネルギー材料・複合モジュール創製研究助成』制度を設けています。2025年度は、金属材料研究所 関研究室山崎匠助教「ヘリカルスピンカロリトロニクス現象の開拓」・金属材料研究所 宮坂研究室 西

山 智貴助教「導電性と物質輸送が協奏する多孔性金属錯体格子の創出と光誘起キャリアによる制御」・金属材料研究所 市坪研究室 李 弘毅助教「マグネシウム蓄電池における酸化物正極・電解液界面の反応機構解明」・金属材料研究所 熊谷研究室 Vu Thi NgocHuyen 助教「Screening High-PerformanceEnergy-Harvesting Semiconductors」の4課題を採択しました。

ご案内

毎年12月に開催しているE-IMRワークショップを今年度も下記要領で開催いたします。講演内容の詳細についてはE-IMRのホームページでお知らせいたします、ぜひご参加ください。

【開催日】2025年12月 4日(木)

【開催場所】東北大学金属材料研究所講堂