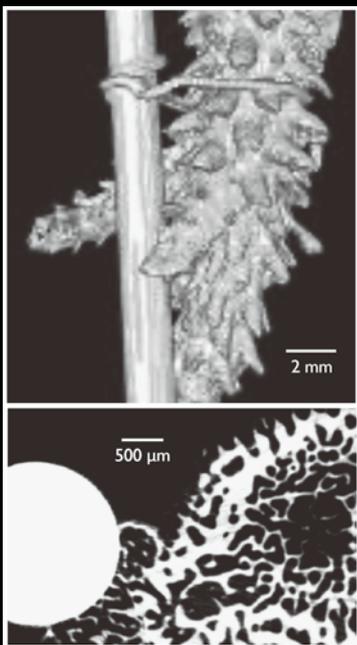
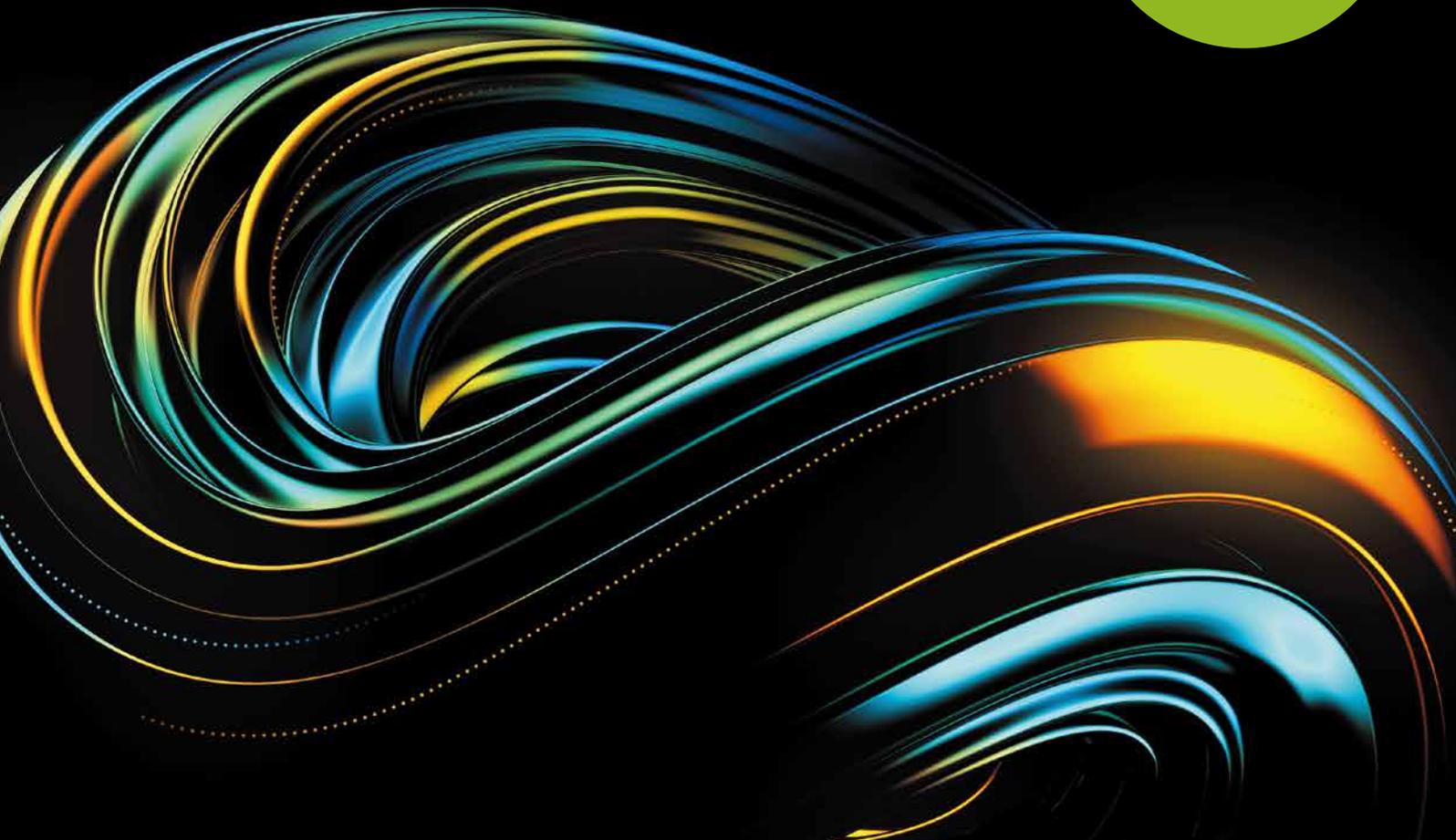


Materia Japan

まてりあ Vol.63

MTERE2 63 (9) 603 ~ 682 (2024)

No.9
2024



・ 金属素描 ～錫～

特集

「“生体環境” に接する 材料表界面の研究最前線」

- ・ 電子誘電体 TmFe_2O_4 の圧電性および強誘電性の実証
- ・ 学会・研究会だより
- ・ “あのころ” のまてりあ
- ・ 思い出の教科書，この一冊！

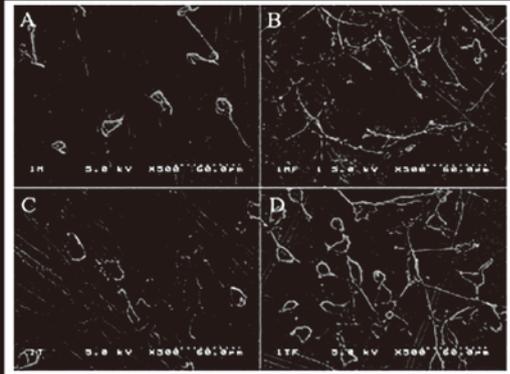
付録 2024 年秋期講演大会プログラム

材料の奥底に、新たな発見を

Tennant20

オスミウムコーティングシステム

より安全に使いやすさを追求した、新型オスミウムコーター
超微細かつ複雑なサンプルでも回り込みよく均一にコートされ、
高分解能 SEM 画像で観察が可能です。



観察倍率：500 倍

資料御提供：日本歯科大学生命歯学部 教授 松野智宣 様



インプラント体チタン

チタン製インプラントは、サンドブラストや酸エッチングなどの表面処理により、骨との接触面積が増え、骨形成に関与する細胞の接着や増殖が促進されます。左図は、 H_2O_2 水熱酸化処理とFGF-2で機能化されたチタン表面のSEM像で、細胞がはやした仮足もちぎれることなく、細胞接着の様子が確認できます。

HPに掲載中！
詳しくはこちら▶



Katana

ブロックフェースイメージングユニット

右の図は、SBF-SEM (Katana を使用) と EDX (EDX 検出器を使用) を同時に実行して得られたアルミニウムのボリュームデータセットです。

Katana を使用することで、アルミニウムの高解像度ボリュームデータを取得でき、その結果、詳細な 3D 空間微細構造と、正確な特性評価およびその分布が得られました。

カラーの EDX 画像、
詳細はこちら



SBF-SEM と EDX の同時測定

Katana は、EDX 測定器を併用することで、3D ボリューム SEM データを取得できるだけでなく、EDX 測定を同時に行うことを可能にしました。

アルミニウム合金



メイワフォーシス株式会社

meiwanet 🔍 検索

本社
TEL (03)5379-0051
FAX (03)5379-0811

〒160-0022
新宿区新宿1-14-2
KI御苑前ビル

JASIS 2024

9月4日(水)~9月6日(金)
@幕張メッセ国際展示場

入場
無料

8ホール

8A-501

Tennant20 / Katanaを
展示いたします。

ご来場の際は是非
お立ち寄りください。

9

2024
Vol.63
No.9

まてりあ

金属素描 No. 36 錫(Tin) 谷ノ内勇樹603

特集「“生体環境”に接する材料表界面の研究最前線」

企画にあたって

- 池尾直子 植木洗輔 上田恭介 小笹良輔 袴田昌高 松垣あいら 山中謙太 李 誠鎬605
- ソフト材料と生体表界面 山本雅哉606
- 生体内におけるマグネシウムの分解と反応 池尾直子 向井敏司611
- 骨組成(炭酸アパタイト)バイオセラミックス 石川邦夫615
- チタン表面におけるサンゴの石灰化と安定化 上田正人 上坂菜々子623
- 計算科学とAIに基づくCAD/CAM用歯科材料設計の試み 山口 哲628
- 微生物学を利用した金属組織制御分解 若井 暁633

最近の研究 電子誘電体 $TmFe_2O_4$ の圧電性および強誘電性の実証
漆原大典 小西伸弥 浅香 透 田中勝久638

電子誘電体が圧電性と強誘電性を示すことを実証。物性測定および結晶構造解析により強誘電性の発現機構を解明。

学会・研究会だより 第18回本会派遣 JIM/TMS Young Leader International Scholar 出張報告
鈴木飛鳥646

“あのころ”のまてりあ 談話室「雑感—10年後の技術予測—」20巻1号(1981), 61頁 竹田 修647

思い出の教科書、この一冊! 最新機械工学シリーズ 5 金属材料学(第3版) 高橋 昇, 浅田千秋, 湯川夏夫(共著)
八田武士650

研究助成成果報告 第2回日本金属学会フロンティア研究助成成果報告(2)651

本会記事 会告653 次号予告676

支部行事672 新入会員677

掲示板673 行事カレンダー679

会誌・欧文誌9号目次675

付録 2024年秋期講演大会プログラム別冊

まてりあ・会誌・欧文誌の投稿規定・投稿の手引・執筆要領, 入会申込書, 刊行案内はホームページをご参照下さい。
<https://jim.jp/>

【今月の表紙写真】 表面修飾を施した純Ti棒に接触させたサンゴ断片(ミドリイシ)とその界面に形成された骨格の μ CT像(Day22).
(上田正人 上坂菜々子 著 625頁 図7より掲載)

表紙デザイン: ビーコン コミュニケーションズ株式会社 グラフィックスタジオ

複写をご希望の方へ 本会では, 複写複製に係る著作権を学術著作権協会に委託しています。日本を除く国・地域で当該利用をご希望の方は, 学術著作権協会ホームページ (<https://www.jaacc.org/en/>) にて, 申請先をご確認下さい。複写以外の許諾(著作物の引用, 転載, 翻訳等)に関しては, 本会へ直接お問い合わせ下さい。

Materia Japan

Volume 63 Number 9 September 2024

Contents

Sketch of Metals No. 36 Tin	Yuki Taninouchi	603
Special Issue on Research Frontiers in Materials Interfaces in Contact with “Biological Environment”		
Preface		
Naoko Ikeo, Kousuke Ueki, Kyousuke Ueda, Ryousuke Kozasa, Masataka Hakamada, Aira Matsugaki,	Kenta Yamanaka and Sungho Lee	605
Soft Materials and Biointerfaces	Masaya Yamamoto	606
<i>In vivo</i> Degradation and Reaction of Magnesium	Naoko Ikeo and Toshiji Mukai	611
Bone Composition (Carbonate Apatite) Bioceramics	Kunio Ishikawa	615
Calcification and Stabilization of Coral on Titanium Surfaces	Masato Ueda and Nanako Kosaka	623
Design of Dental Materials for CAD/CAM by Computational Science and AI	Satoshi Yamaguchi	628
Microbiology-based Metallographic Degradation	Satoshi Wakai	633
Regular Article		
Recent Research		
Experimental Evidence of Piezoelectricity and Ferroelectricity in Electronic Dielectrics TmFe_2O_4	Daisuke Urushihara, Shinya Konishi, Toru Asaka and Katsuhisa Tanaka	638
News · Report		
Report on The 18 th JIM/TMS Young Leader International Scholar	Asuka Suzuki	646
Materia Japan in Those Days		
Small Talks—Technology Prospect of 10 Years from Now—, vol. 20, issue 1 (1981), p.61	Osamu Takeda	647
My Memorial Text Book		
‘KINZOKUZAIRYOU GAKU’, Third Edition	Noboru Takahashi, Chiaki Asada and Natsuo Yukawa (Co-author)	Takeshi Hatta 650
Research Grant Report		
Report on the Results of the Second JIMM Frontier Grants (2)		651

Published by THE JAPAN INSTITUTE OF METALS AND MATERIALS

1-14-32, Ichibancho, Aoba-ku, Sendai 980-8544, Japan

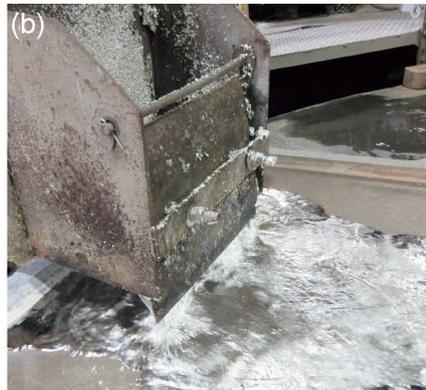
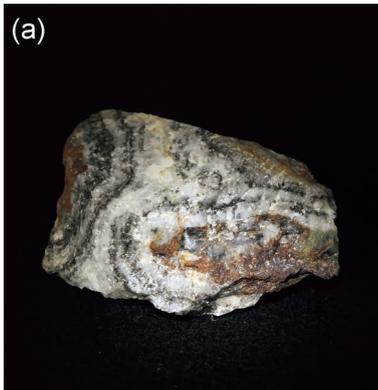
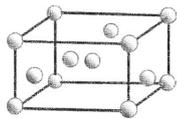
<https://www.jim.or.jp/journal/m/> (in Japanese)

©2024 The Japan Institute of Metals and Materials

How to Obtain Permission

The Japan Institute of Metals and Materials authorized Japan Academic Association For Copyright Clearance (JAC) to license our reproduction rights of copyrighted works. If you wish to obtain permissions of these rights in the countries or regions outside Japan, please refer to the homepage of JAC (<https://www.jaacc.org/en/>) and confirm appropriate organizations.

For obtained permission to quote, reproduce; translate, etc., please contact the Japan Institute of Metals and Materials directly in advance.



元素名：Tin, 原子番号：50, 原子量：118.71, 電子配置：[Kr] 4d¹⁰5s²5p², 密度：7.285 Mg·m⁻³(298 K), 結晶構造：正方晶 (室温～融点), 融点：505.063 K, 沸点：2753 K⁽¹⁾, 地殻存在量：1.7 μg·g⁻¹⁽²⁾ 【写真】(a)明延産の錫鉱(生野銀山文化ミュージアム写真提供), (b)錫溶湯および(c)錫ボール(三菱マテリアル株式会社写真提供)。

錫は人類がもっとも古くから使用してきた金属のひとつであり、その歴史は紀元前まで遡る⁽³⁾。柔らかすぎて道具や武器に向かない銅に、おなじく柔らかい金属である錫をまぜると、硬い合金「青銅」が得られる。当初は、錫鉱物を多く含んでいた銅鉱石から、青銅がたまたま得られていたものと考えられる。しかし、少なくとも紀元前1000年ごろには、金属銅と金属錫を出発原料として青銅の鑄造が行われていた。青銅器時代という言葉に示されるように、錫はエジプトやメソポタミア、中国、南米の古代文明を支えた金属元素である。

錫は、毒性の低さや耐食性・加工性の良さから、食器やブリキを含め様々な製品に用いられてきた。また現代社会では、錫はエレクトロニクス産業を支えている。電子部品の実装のためのはんだや、コネクタ端子の電気的信頼性を保つためのめっきが、錫の需要の多くを占めている⁽⁴⁾。また、液晶ディスプレイや有機 EL の電極には、電気伝導性と透明性に優れることからインジウムと錫の複合酸化物(ITO)の薄膜が用いられている。ICT や車の電動化の進展にともない、錫の需要は今後高まる可能性がある。

錫の主要な鉱石は、錫石(cassiterite, SnO₂)である。製錬の基本的な流れは次の通りである。まず、比重選鉱などの物理的な選別法によって精鉱を得る。次に、コークスを用いた還元溶錬によって粗錫を得るが、精鉱中に共存する物質によっては事前に焙焼を行うことも多い。その後、乾式法あるいは湿式電解法によって、用途に応じた純度の錫を得る。過去には、国内で錫鉱石が採掘され、その製錬処理が活発に行われていた。そのため我が国には、錫の抽出冶金に関して優れた知見・技術が蓄積されている。例えば、東北大学そして岩手大学で教鞭をとられた渡辺元雄教授が執筆された書籍「錫製錬」⁽⁵⁾は、錫の元素抽出や電析に関わる現在の技術者・研究者にとっても必読の一冊となっている。錫は低融点かつ

コークスで還元できるため製錬が容易と言われることが多いが、被還元性が近いため不純物として混入する鉄を還元溶錬にて分離除去することは難しい。本書や先達の技術開発をみると、「如何にして、錫の回収ロスを最小限にしつつ、不純物である鉄を分離除去するか」など、産業的なモノづくりの工夫に感銘を受ける。残念ながら、国内の錫鉱山はすべて閉山した。また、海外から輸入した錫精鉱の製錬も現在は行われていない。しかし、国内の複数の製錬所では、蓄積された知見や技術を活かして2次原料からの錫の回収が行われており、錫の資源供給を支えている。

錫は、ニッケルと同程度に高価である。またその天然資源の供給は、中国やインドネシアといった限られた国が担っている。錫は利用の歴史の古さ故、レアメタルとして扱われないことが多い。しかし、現在の需要量や用途、産業重要性を踏まえると、レアメタルとして扱う方が適当と思われる。エレクトロニクス製品を持続的に利用する上で、錫もまた重要な金属元素のひとつである。その資源循環を高度化するために、電気的信頼性や接合強度だけでなくリサイクルし易いことを特徴とするはんだ材料や、廃電子基板からのより効率的なりサイクルプロセスなど、様々な面での技術開発が今後も望まれる。

文 献

- (1) 金属データブック改訂4版, 日本金属学会, 丸善, (2004).
- (2) R. L. Rundnick and S. Gao: "The Crust", Elsevier Ltd., (2004), 1-64.
- (3) 元素大百科事典: 渡辺 正(監訳), 朝倉書店(2007).
- (4) 石油天然ガス・金属資源機構 金属資源情報, 鉱物資源マテリアルフロー2022, 4., 錫(Sn), (2022).
- (5) 渡辺元雄: 錫製錬, 錫製錬出版をまもる会, (1979).

次回! 金属素描 No. 37 スカンジウム

未来を先導する領域を開拓し、世界に発信する

2024年秋期
第175回
講演大会

公益社団法人

日本金属学会

The Japan Institute of Metals and Materials

2024年

会期 **9月18日(水) ▶▶ 20日(金)・25日(水)**

会場 **大阪大学 豊中キャンパス** 25日のみ
オンライン
〒560-0043 大阪府豊中市待兼山町1



～日本金属学会・日本鉄鋼協会合同懇親会開催・参加募集～
2024年9月18日(水) 18:30～20:30 千里阪急ホテル 西館 2F「仙寿」
当日申込 12,000円

公募シンポジウム

- S1: 特異反応場における時間/空間応答を利用した新奇材料構造創成 VI**
Tailoring of novel-structured materials using spatio-temporal responses under exotic reaction fields VI
- S2: ハイエントロピー合金の材料科学 (XI)**
Materials Science and Technology in High-Entropy Alloys (XI)
- S3: 計算科学および新規腐食解析に基づく腐食現象の解析・可視化と機械学習による腐食予測 II**
Analysis, Visualization and Prediction of Corrosion Phenomena via Computational Science, Machine Learning and Novel Characterization Techniques II
- S4: 極限環境対応構造材料のためのマテリアルDX (II)**
Materials DX for the research and development of structural materials for extreme environment (II)
- S5: 材料変形素過程のマルチスケール解析 (VII)**
Multi-scale analysis of elementary processes in plasticity (VII)
- S6: 超温度場材料創成学II: Additive Manufacturingによる材料科学の新展開**
Creation of Materials by Super-Thermal Field II: Innovation in Materials Science through Additive Manufacturing
- S7: ワイドギャップ結晶の材料学と高温プロセスVI**
Materials Science and high temperature processing of widegap materials VI
- S8: 機能コアの材料科学V**
New Materials Science on Nanoscale Structures and Functions of Crystal Defect Cores, V
- S9: データ創出・活用による磁性材料の研究開発II**
Digital Transformation Initiative R&D for Magnetic Materials II

企画シンポジウム

- K1: 材料化学におけるイノベーションの役割と工業製品への展開IV**
Innovations in materials chemistry and their effects on industry IV
- K2: 金属材料研究者のセカンドライフを考える**
Second Life of Metals and Materials Researchers
- K3: 自動車技術会・日本鉄鋼協会・日本金属学会共催・第6回自動車関連材料合同シンポジウム「モビリティの未来に貢献する材料技術の最新動向」**
Recent Trends in Materials Technology Contributing to the Future of the Mobility Society
- K4: サーキュラーエコノミーの加速に必要な材料科学の課題**
Materials Science challenges for accelerating the Circular Economy
- K5: 構造材料開発のための精錬技術
～カーボンニュートラル社会における構造材料発展～**
Metal Making Technique for Structure Materials

国際シンポジウム

Advanced science and technology in magnesium and magnesium alloys (仮)

後期(当日)参加申込締切: 2024年9/25(水)

参加方法の詳細はホームページで公開



★詳細は、まてりあ本号付録プログラムまたは
本会ホームページをご覧ください。

～皆様のご参加をお待ちしております。～

問
合
先



公益社団法人
日本金属学会 講演大会係

〒980-8544 仙台市青葉区一番町1丁目14-32
TEL:022-223-3685 E-mail:annualm@jimm.jp

詳しくは
ホームページをご覧ください <https://jimm.jp/>



企画にあたって

池尾直子¹ 植木洗輔² 上田恭介³ 小笹良輔⁴
袴田昌高⁵ 松垣あいら⁴ 山中謙太⁶ 李 誠鎬⁷

近年、医療福祉デバイスの創成にむけて、「バイオアダプティブ材料」という概念が新たに提案され、疾患等により失われた生体組織の代替のみならず、生物学的機序の理解に基づき、生体内において能動的に機能しうる材料の開発が求められている。その実現には生体環境と接する材料の安定化から分解まで、材料の表界面で生じる現象の理解が必要不可欠であり、2024年春期講演大会では企画シンポジウム「生体界面での材料の分解・劣化・安定化」が開催された。そこで本特集では、生体組織およびそれを構成する細胞をはじめとして、海洋、微生物まで様々な“生体環境”と材料の相互作用に関する研究の最前線に携わっている研究者の方々に、最新の研究や将来展望についてご執筆いただいた。山本雅哉先生(東北大学)には、「ソフト材料と生体表界面」と題して、生体材料として使用されるソフト材料について概説いただくとともに、培養幹細胞の機能制御を見据えた、材料表面へのタンパク質の配向固定化技術と、マイクロプラスチックに対する生体応答について解説していただいた。池尾直子先生、向井敏司先生(神戸大学)には、「生体内におけるマグネシウムの分解と反応」と題して、生体吸収性材料であるマグネシウムの留置環境に依存した分解反応と、それに基づく生体吸収性マグネシウム合金製デバイス設計における課題について解説していただいた。石川邦夫先生(九州大学)には、「骨組成(炭酸アパタイト)バイオセラミックス」と題して、生体骨組織の無機組成に基づく、生体骨へのリモデリングが可能なバイオセラミックスの開発について解説いただくとともに、構造制御による骨組織回復能の向上やチタン製デバイスへの被覆例について解説していただいた。上田正人先生、上坂菜々子氏(関西大学)には、「チタン表面におけるサンゴの石灰化と安定化」と題して、海洋生物であるサンゴと脊椎動物の骨格形成機序の類似性、および生体材料の研究成果を利用したサンゴ礁再生の試みについて解説していただいた。山口哲先生

(大阪大学)には、「計算科学とAIに基づくCAD/CAM用歯科材料設計の試み」と題して、歯科領域における計算科学に基づく材料設計についての概説と、機械学習の活用による優れた機械的性質を示すCAD/CAM用コンポジットレジンの開発について解説いただいた。若井暁先生(海洋研)には、「微生物学を利用した金属組織制御分解」と題して、微生物が存在する環境中で発現する微生物腐食の機序と、ステンレス鋼における微生物腐食に関する最新の知見に関して解説いただいた。

本特集でご紹介したとおり、“生体環境”というキーワードを生物の体内に限定することなく、様々な切り口から広義に捉えることで、材料科学をベースとして、微生物学、情報科学や海洋資源学などの多様な分野との融合研究が進められつつあり、医療・福祉技術のみならず、環境問題や社会基盤整備などへの展開が見据えられている。医療・福祉分野を専門としていない会員の皆様にとっても、“生体環境”を新たな研究の糸口としてご興味を持っていただければ幸いである。



池尾直子



植木洗輔



上田恭介



小笹良輔



袴田昌高



松垣あいら



山中謙太



李 誠鎬

¹ 神戸大学大学院 工学研究科(〒657-8501 神戸市灘区六甲台町 1-1)

² 近畿大学理工学部機械工学科

³ 東北大学大学院工学研究科

⁴ 大阪大学大学院工学研究科

⁵ 京都大学大学院 エネルギー科学研究科

⁶ 東北大学金属材料研究所

⁷ 産業技術総合研究所

Preface to Special Issue on Research Frontiers in Materials Interfaces in Contact with “Biological Environment”

Keywords: *biomaterial, interface, ceramic, polymer, metal, biological environment*

2024年7月30日受理[doi:10.2320/materia.63.605]

ソフト材料と生体表界面

山本 雅哉*

1. はじめに

生体は異物を排除する様々な仕組み(異物反応)をもっている。治療のために体内に埋植して使用する材料も例外なく、生体にとって異物である。すなわち、体内に埋植した材料を機能させるためには、この異物反応を考慮する必要がある。異物反応を引き起こす要因は様々であるが、材料そのものに加えて、材料由来の分解物・溶出物などが挙げられる。これらが細胞や生体組織などに直接作用する場合もあれば、材料と生体との界面特性が原因となる場合もある。一方、異物反応の理解に基づいて、体内あるいは体外を区別せず生体に対して機能する材料の開発も進められている。ここで、生体とは、臓器・生体組織・細胞・細菌・ウイルスからタンパク質・核酸・脂質・糖などの生体分子まで、広い意味の生体由来の“モノ”を指す。したがって、生体にとって異物となる材料、あるいは生体に対して機能する材料、いずれもこの生体由来の“モノ”との相互作用を考える必要がある。

ソフト材料は金属やセラミックスなどのハード材料と対比されるが、プラスチックのみを意味するわけではない。すなわち、ソフトマターやソフトマテリアルは、液晶、高分子、ゲル、コロイド、界面活性剤など、やわらかい物質の総称である。ソフト材料の主たる構成単位は分子であり、これらは分子間力を介して凝集あるいは自己組織化している。さらに、生体そのものもソフト材料のひとつと考えることができるため、生体由来の“モノ”とソフト材料との相互作用は、介在する分子やそれぞれを構成する分子間にはたらく。

この介在する分子や生体を構成する分子は、主として、タンパク質であり、タンパク質は、水和水や対イオンに取り囲まれている。したがって分子間の相互作用を考える場合、水和水や対イオンを考慮しなければならない。このようなタン

パク質が材料表面に吸着することによって、細胞接着などを媒介する。近年、材料表面の水和状態に不凍水、自由水に加えて、中間水の存在が見いだされ、中間水の存在が生体親和性に重要であることが明らかにされている⁽¹⁾。例えば、血液適合性が求められるような医療機器では、この中間水の制御により血液中のタンパク質吸着を抑制し、血栓形成を回避する試みがある⁽²⁾。一方、タンパク質には立体的な高次構造があり、この高次構造が損なわれるとタンパク質の生理活性が失われる、すなわち変性する場合がある。さらに、材料表面への吸着や化学固定によりタンパク質が変性することもある。このように、材料と生体との界面における分子の振るまいを理解することは、異物反応のみならず、生体に対して機能する材料を設計するためにも必要不可欠である。

生体由来の“モノ”であるタンパク質を利用して生体に対して機能する材料を設計する場合、タンパク質の生理活性を損なわない固定化方法が求められる。本稿では、これらを踏まえ、筆者が開発してきた幹細胞培養のためのソフト材料表面に関する研究例について紹介する。

2. 高分子表面改質

20世紀の医療機器開発は、血液適合性を有する人工臓器の開発から始まったとする考察がある。すなわち、血液中のタンパク質の吸着を抑制することにより血栓形成を回避する技術開発である。材料そのものの研究に加えて、血液凝固を抑制する生理活性を有するヘパリン、細胞膜の脂質に存在するリン脂質極性基を導入した poly(2-methacryloyloxyethyl phosphorylcholine) (MPC ポリマー)⁽³⁾、中間水をもつとされている poly(2-methoxyethyl acrylate) (PMEA)⁽⁴⁾ など、抗血栓性を示す分子をコーティングした材料開発が行われて

* 東北大学大学院工学研究科材料システム工学専攻；教授(〒980-8579 仙台市青葉区荒巻字青葉 6-6-02) Soft Materials and Biointerfaces; Masaya Yamamoto(Department of Materials Processing, Graduate School of Engineering, Tohoku University, Sendai)
Keywords: *soft materials, hydrogel, protein immobilization, stem cell culture, molecular orientation*
2024年6月14日受理[doi:10.2320/materia.63.606]

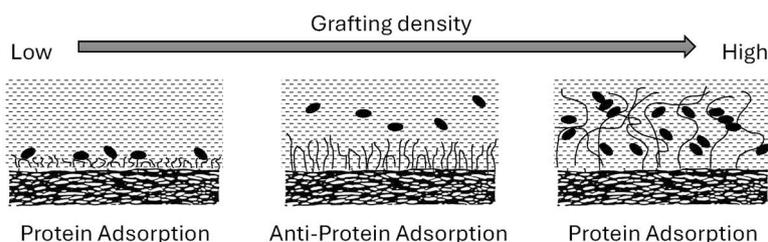
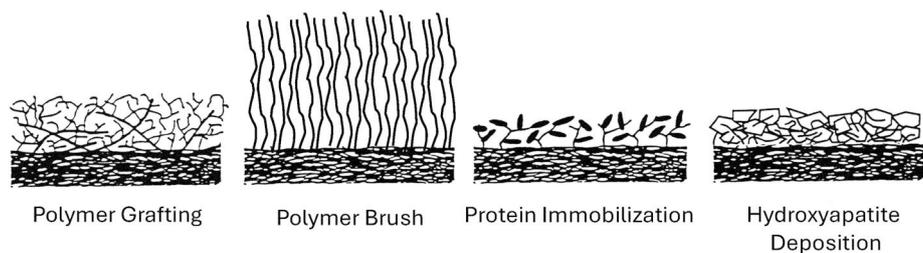


図1 高分子の表面グラフト化.

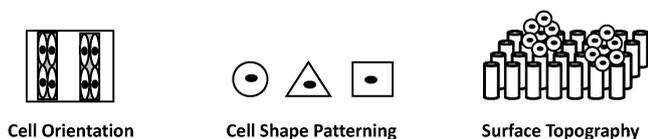


図2 微細加工を利用した細胞機能修飾の例.

きた。一方、材料と生体との界面特性に関する研究の進展とともに、軟組織や硬組織などの生体組織との接着性をもつ高分子を材料表面に導入する高分子グラフト化⁽⁵⁾や高分子のグラフト密度を高めることによりタンパク質吸着を抑制する濃厚ポリマーブラシ⁽⁶⁾などの表面改質技術の開発も進められてきた(図1)。例えば、筆者は、ポリエステル表面に対してリン酸基を有する2-methacryloyloxyethyl phosphate からなるポリマーをグラフト化することによって、ハイドロキシアパタイトが沈着し、骨結合性を示すことを細胞レベルで明らかにした⁽⁷⁾。

このような化学的なアプローチに加えて、表面に凹凸を導入することにより接着した細胞の機能を修飾する試みや微細加工と化学的なアプローチとを組み合わせた方法により細胞の接着形態や機能を修飾する試みも行われてきた(図2)。

3. 生理活性タンパク質の配向固定化技術

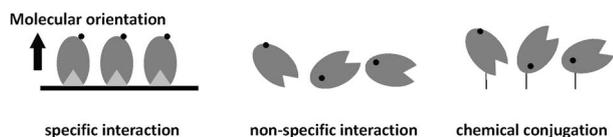
近年、再生医療が注目され、人工多能性幹細胞(iPS細胞)に代表される、幹細胞というポテンシャルの高い細胞を利用するための細胞培養技術が急速に発展している。この細胞培養技術では、幹細胞の機能を制御する生理活性タンパク質を含めた生理活性物質が必要不可欠である。

細胞膜は脂質二分子膜から構成されており、一部の脂溶性の低分子を除いて、イオンや水分子でさえ透過することができない。ここで、生理活性タンパク質は巨大な分子であるこ

とから、細胞膜を透過することができない。このため、細胞外から作用する生理活性タンパク質の多くは、細胞膜に存在する受容体と結合することにより細胞機能を制御する。細胞外から作用する生理活性タンパク質は、溶解して遊離しているタンパク質(細胞外)と細胞膜上(細胞膜内)や細胞外マトリックス上(細胞外)に存在するタンパク質とに大別される。いずれの場合も、細胞膜に存在する受容体を介して細胞内にシグナルが伝達される。細胞との接触を通じて細胞外から作用する生理活性タンパク質のほとんどが、脂溶性のドメインを細胞膜に貫通させて細胞膜内に存在している。細胞膜に存在する生理活性タンパク質は、細胞間の直接的な相互作用に寄与する。特に、細胞膜に存在する生理活性タンパク質を幹細胞の細胞培養に利用するためには、細胞間の直接的な相互作用を模倣した材料表面に対する生理活性タンパク質の固定化技術が必要である。

生理活性タンパク質を材料表面に固定化する方法として、吸着法と化学固定化法の2種類が知られている⁽⁸⁾。前者では、生理活性タンパク質を材料表面に吸着させる。一方、後者では、材料表面に導入した反応基を介して生理活性タンパク質を化学固定する。しかし、いずれの方法でも、固定化された生理活性タンパク質の生理活性が損なわれる場合が少なくない。この問題を解決する方法のひとつとして、タンパク質の特異的相互作用を利用した生理活性タンパク質の固定化方法が研究されている⁽⁸⁾(図3)。さらに、細胞間相互作用を介した細胞シグナルでは、細胞膜上の受容体分子に結合する生理活性タンパク質の配向性が重要であり、両者が相互作用するように配置されて初めて細胞間の特異的相互作用が達成される。したがって、材料表面に生理活性タンパク質を配向固定化することができれば、細胞シグナルを効率よく活性化することができると考えられる(図3)。そこで、筆者らは、免疫グロブリンの一つであるIgGがもつFcドメインとproteinAとの特異的相互作用を利用した生理活性タンパク質の

(a) Protein immobilization



(b) Cell Membrane Protein

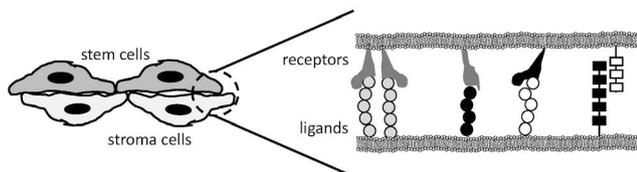


図3 生理活性タンパク質の固定化.

配向固定化について検討した⁽⁹⁾. FcドメインはIgG抗体のC末端側にある結晶化できる性質をもつ領域であり, N末端側にある抗原タンパク質を認識する部位(Fabドメイン)とは異なる. 一方, proteinAは黄色ブドウ球菌の細胞壁に存在するタンパク質であり, Fcドメインと特異的に結合することが知られている. そこで, Fcドメインと生理活性タンパク質とをタンデムにつないだキメラタンパク質を用いて, ガラス表面に化学導入した proteinA を介して生理活性タンパク質を配向固定化した. proteinA を化学導入するために用いたリンカーの鎖長や proteinA 導入率を最適化することによって, 生理活性タンパク質を単層吸着させることができた. 一方, proteinA 導入率が低い場合, 非特異的な吸着が起り, 逆に proteinA 導入率が高い場合, 生理活性タンパク質の固定化量は減少した. この結果は, 生理活性タンパク質間の立体反発と Fcドメインと proteinA とが特異的に相互作用できる導入率とのバランスで配向固定化が可能となることを示している.

次に, 実際に配向固定化した生理活性タンパク質の生理活性について, Notch シグナルのリガンド分子の一つである Jagged1 を利用して検討した. Jagged1 は, 血液細胞のもとになる造血幹細胞を体外で増幅させるために重要な生理活性をもつことが知られている⁽⁹⁾. そこで, Jagged1 と Fcドメインとからなるキメラタンパク質(Jagged1-Fc)を, proteinA を固定化したガラス表面に配向固定化した. マウスの骨髄から単離した造血幹細胞を含む細胞画分を培養したところ, Jagged1 が配向固定化されたガラス表面でのみ造血幹細胞が増幅されていることがわかった(図4). この結果は, 配向固定化された Jagged1 が, 造血幹細胞を増殖する活性をもっていることを示している.

この例では, 末端にアミノ基との反応性をもつ *N*-ヒドロキシスクシンイミド(NHS)活性エステル基を有するシランカップリング剤を用いており, シラノール基と反応する金属であれば, 同様の方法によりタンパク質を材料表面に配向固定化することも可能であろう.

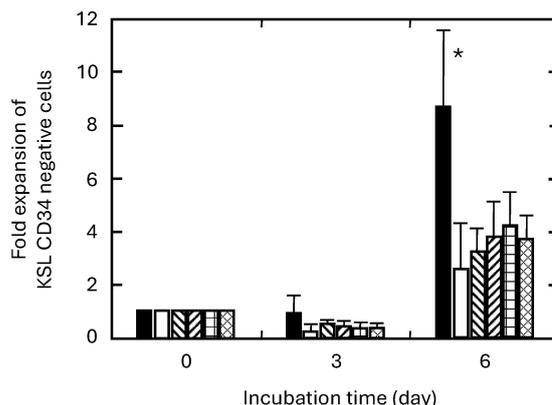


図4 造血幹細胞を含む細胞画分(KSL CD34 negative)の増幅.
Jagged1配向固定化(■), Jagged1配向固定化+Notchシグナル阻害剤(□), Jagged1コーティング(▨), フィブロネクチンコート+Jagged1添加(▤), フィブロネクチンコート(▥), 未処理(▧). * $p < 0.05$; 有意差あり.

4. ハイドロゲルへの生理活性タンパク質の配向固定化

ゲルは, 「あらゆる溶媒に不溶の三次元網目構造をもつ高分子およびその膨潤体」と定義される. 溶媒が水であれば, 接頭辞として水を意味する「ハイドロ」をつけてハイドロゲルとよぶ. 近年, ハイドロゲルの硬さが幹細胞から体を構成する機能をもつ細胞への変化(分化)⁽¹⁰⁾や幹細胞からのミニ臓器(オルガノイド)形成⁽¹¹⁾に影響を及ぼすことが報告されている. ここで, ハイドロゲルの硬さは, 架橋密度を変化させることによって, 容易に制御することができる. 例えば, Englerらは, 間葉系幹細胞(MSC)を用いて, 硬いハイドロゲル上では骨を造る骨芽細胞へ, 軟らかいハイドロゲル上では神経細胞へ, それぞれ分化しやすくなることを示した⁽¹⁰⁾. 一方, Lutolfらは, ハイドロゲルに固定化する細胞接着ペプチドの濃度やハイドロゲルの硬さが, 小腸上皮細胞からのオルガノイド形成に対して影響を及ぼすことを示した⁽¹¹⁾. さらに, 筆者らも, ハイドロゲルの機械的特性が人工多能性幹細胞(iPS細胞)の心筋細胞への分化を修飾することを見いだしている⁽¹²⁾. これらの知見は, 細胞の周辺環境の機械的特性が, 幹細胞の運命決定に対して重要な役割をもつことを示唆している.

これらを踏まえ, 生理活性タンパク質の配向固定化とハイドロゲルの機械的特性とを考慮した三次元細胞培養法として, 筆者らは生理活性タンパク質を配向固定化したハイドロゲルを用いたサンドイッチ培養法を開発した. すなわち, 異なる機械的特性をもつハイドロゲルに対して生理活性タンパク質を配向固定化した生体機能性ハイドロゲルを用いて, 幹細胞を上下から挟み込む方法である.

生体不活性な polyacrylamide (PAAm) からなるハイドロゲルを異なる架橋密度になるように調製することによって, せん断弾性率が 0.7 kPa (soft-PAAm), 3.5 kPa (mid-

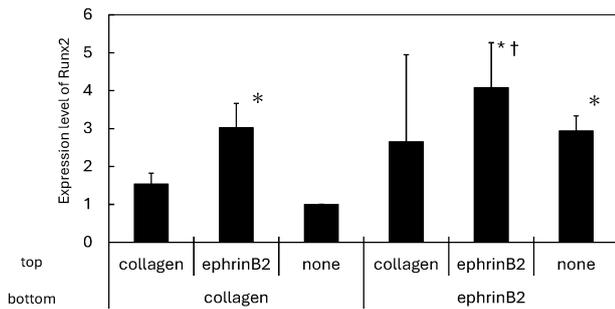


図5 MSCのサンドイッチ培養によるRunx2遺伝子発現。上部ならびに下部にephrinB2配向固定化ハイドロゲル(mid-PAAm)ならびにコラーゲン固定化ハイドロゲル(mid-PAAm)を組み合わせた場合、あるいは下部のみにephrinB2配向固定化ハイドロゲル(mid-PAAm)ならびにコラーゲン固定化ハイドロゲル(mid-PAAm)を用いた場合。
* p<0.05; コラーゲン固定化ハイドロゲルに対する有意差。
† p<0.05; 上部ならびに下部両方にコラーゲン固定化ハイドロゲルを用いた場合に対する有意差。

PAAm), ならびに 68 kPa (stiff-PAAm) のハイドロゲルを作製した。次に、幹細胞としてMSCを用いて、その骨分化を指標として、開発した三次元細胞培養法について検討した。生理活性タンパク質として、骨分化を誘導するEphシグナルのリガンドの一つであるephrinB2⁽¹³⁾を用いた。ephrinB2をハイドロゲル表面に配向固定化するために、ephrinB2とFcドメインとからなるキメラタンパク質であるephrinB2-Fcをハイドロゲル表面に固定化したproteinAと特異的に相互作用させた。

骨を作る骨芽細胞に特異的なRunx2遺伝子を調べたところ、貯蔵弾性率3.5 kPaのハイドロゲル上にephrinB2を配向固定化した場合、ephrinB2ランダム固定化ハイドロゲルと比較して、有意にRunx2遺伝子の発現量が増加した。一方、Ephシグナルの活性化により発現が低下するRhoA活性は減少していた。これらの結果は、ephrinB2を配向固定化したハイドロゲル上では、Ephシグナルの下流にあるRhoAシグナルが関与して、Runx2遺伝子の発現が誘導されたことを示している。すなわち、ハイドロゲルの貯蔵弾性率と固定化ephrinB2の配向性との両方がMSCのRunx2遺伝子の発現量に対して影響をおよぼしていることを示している⁽¹³⁾。

最後にephrinB2配向固定化PAAmハイドロゲル(mid-PAAm)を用いてサンドイッチ培養を行った。その結果、MSCの下部、あるいは上部にPAAmハイドロゲルがあることによりMSCの骨分化が促進された(図5)。生体機能性ハイドロゲルを用いたサンドイッチ培養により、細胞接着面だけでなく細胞上部からも細胞シグナルが作用することがわかった。

5. 生体表界面に対する考察を環境問題へ

近年、環境問題として、ヒトを含めた生きものが、直径5 mm以下のプラスチック片と定義されるマイクロプラスチック(MP)に非意図的に脅かされていることが懸念されている。例えば、ヒトの動脈硬化疾患で患部におけるMPの存在とその人体への影響について研究が進められている⁽¹⁴⁾。さらに、MPのサイズや形状に加えて、汚染物質や生体分子などの表面吸着が、MPと生体との相互作用に対して影響を及ぼすことは、上述の異物反応に対する研究から明白である。一方、自然環境に放出されたプラスチックは、紫外線(UV)による光酸化分解、微生物による生分解、物理的衝撃による機械的破壊などにより細片化されたMPとなる。このMPの特徴として、不規則な形状であること、表面が酸化されていることなどが挙げられる。筆者らは、光酸化分解と機械的破壊とのプロセスに着目し、UV照射および超音波(US)処理を組み合わせることにより分解・劣化MPモデルを作製した。得られた分解・劣化MPモデルを利用して、ヒト単球系白血病細胞株(THP-1)から誘導したマクロファージなどの生体バリアに対するMPの応答について検討を進めている。例えば、poly(ethylene terephthalate)(PET)からなるMPモデルを作製しマクロファージに曝露したところ、UV/US処理により分解・劣化させたPETでは炎症性サイトカインのひとつであるIL-1βの分泌量が有意に増加し、炎症反応が誘導されることがわかった(図6)⁽¹⁵⁾。酸化による表面電荷の変化、結晶化度の変化による機械的特性の変化など、様々な物性も変化し、それらが炎症反応に対して影響を及ぼしたことが示唆された。また、最近の研究から、MPのサイズ、結晶化度、形状、高分子の種類など、様々な要因が生体影響に関与することを示唆するデータが得られている。人工関節から生じる摩耗粉に対する炎症反応やナノ粒子やマイクロスフェアを用いたドラッグデリバリーシステムなど、医療に関連した微粒子と細胞との相互作用に関する知見が、環境問題の考察へ発展していくことが期待される。

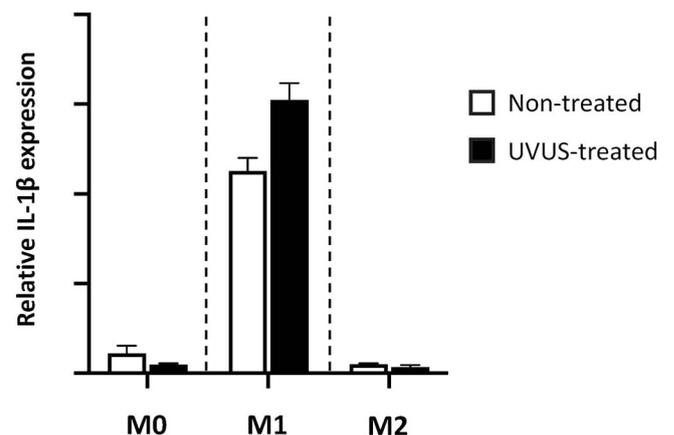
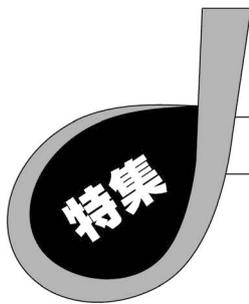


図6 PET欠片に対するマクロファージの免疫応答。



生体内におけるマグネシウムの分解と反応

池尾直子¹⁾ 向井敏司²⁾,**

1. はじめに

現在の外科的治療では、止血のために血管を結紮(さつ)するクリップや組織を縫合するステープルが用いられており、手術時間の短縮が実現されている。特に腹腔鏡下手術やロボット支援下手術の普及によって、血管やリンパ管、胆管などの脈管の処理には、縫合糸による結紮よりも簡便な外科クリップが使用されることが多く、様々な種類のクリップが開発され、広く用いられるようになってきている。これらの体内に埋植されるデバイスの素材には、強度-塑性変形能のバランスに優れ、かつ生体適合性が高いチタン系合金が多く用いられている。一方、チタン系合金は体内で不動態皮膜である酸化物を容易に形成するため、体内でイオン化しにくく、長期にわたり残留する。その結果、異物として他の臓器との癒着を生じたり、膿瘍形成のリスクになるなど合併症の懸念がある。また、CTやMRI等の術後画像によるフォローアップの際には、金属アーティファクト形成による診断能の減弱などがしばしば問題となっている⁽¹⁾。

以上の理由から、体内で安定な不溶性金属に代わる材料として、徐々に分解され、疾患の治癒後に完全に分解、消失する生体吸収性材料が医療の現場から望まれている。生体吸収性材料の例として、体内で加水分解されるPLLA(ポリ-L-乳酸)が挙げられる⁽²⁾。しかし、PLLAなど高分子系材料はチタンよりも機械的強度が低いことや、加工硬化しないため、医療用クリップなどに適用するためには締結方法を工夫する必要がある⁽³⁾。そこで、体内の水分と反応して分解するマグネシウムや亜鉛が新たな生体吸収性材料として注目されている⁽⁴⁾⁻⁽⁶⁾。以下では医療応用を目的としたマグネシウム

合金の例を示すとともに、体内における分解と反応の例について紹介する。

2. 生体吸収性材料としてのマグネシウム

マグネシウムは生体必須元素であり、ヒトが1日に摂取できる量はカルシウムの次に多く、安全性が高いと考えられる。そのため、生体吸収性および生体適合性を有するマグネシウムは疾患の治癒後に分解・消失する医療用デバイスへの応用が期待されている。純マグネシウムはhcp構造に起因する異方性によってすべり系が制限されるために室温での成形性が乏しく、チタンに劣る。しかし、溶質元素の添加や結晶組織の制御により、機械的強度、加工硬化性、および成形性や靱性の改善が可能である。そのため、マグネシウムを合金化することで機械的性質の改善を試みる研究が数多く行われている。特にマグネシウムにイットリウムなど希土類元素を添加し、内部組織を制御した合金は延性が大きく改善することが報告されている⁽⁷⁾。一方で、イットリウムは一日に許容される摂取量が小さく、生体吸収性材料に適さない⁽⁸⁾。したがって、マグネシウムの合金化には生体に毒性反応を引き起こさない元素の選択が必須となる。また、純度の低い純マグネシウムは水と反応して急激に分解し、デバイスの体積減少を生じるため、組織の把持力などデバイスに要求される強度が維持できない。そのため、各種デバイスが適用されている期間中にある程度体積が減少しても要求性能を満足するように、素材の機械的強度を高くしたり、分解速度を遅くするなどの改善が必要である⁽⁹⁾。耐食性の改善にも合金化が有効である。Mg-Al系合金は耐食性を有するマグネシウム合金として輸送機器などに広く利用されている。これに対して、

* 神戸大学大学院工学研究科機械工学専攻; 1) 准教授 2) 教授 (〒657-8501 神戸市灘区六甲台町 1-1)

** 神戸大学大学院医学研究科医療創成工学専攻; 教授

In vivo Degradation and Reaction of Magnesium; Naoko Ikee* and Toshiji Mukai** (*Graduate School of Engineering, Department of Mechanical Engineering, Kobe University, Kobe. **Graduate School of Medicine, Department of Medical Device Engineering, Kobe University, Kobe)

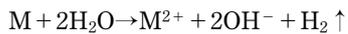
Keywords: biodegradable metal, magnesium alloy, *in vivo* degradation, surgical clip, bone nail, body fluid, urine

2024年7月23日受理[doi:10.2320/materia.63.611]

鉄、銅やニッケルなどは不純物としてマグネシウムの耐食性を低下させる⁽¹⁰⁾。これらの元素は単体あるいはマグネシウムとの金属間化合物を形成し、腐食を促進する。よって、マグネシウム合金から医療用デバイスを作成する場合には、添加元素の選定および不純物濃度には十分な注意を要する。安全性の面ではカルシウムは骨や歯に含まれる元素として体内の含有量が多く、添加元素として適している⁽⁸⁾。また、カルシウムはマグネシウムに添加することにより耐食性を改善することが報告されており、分解速度の制御も期待できる⁽¹¹⁾。その他、生体必須元素の一つであり、安全性が高いと考えられる亜鉛も機械的性質の改善および分解速度制御の面から有望な元素である⁽¹²⁾。第一原理計算により、亜鉛およびカルシウムはマグネシウムの非底面すべりを活性化するため、異方性の低下につながることを示唆する結果が報告されており、強度のみならず成形性などの機械的性質改善にも有効である⁽¹³⁾。

3. 骨周辺におけるマグネシウムの分解と反応

マグネシウムおよび亜鉛などの生体吸収性材料(M)は、体液中に存在する酸素と反応して酸化するとともに、体内で水との接触により分解反応が生じる。水との反応は下記のように記述できる。



実際に、ウサギの頭蓋骨に貫入した Mg-Zn-Ca 合金の表面をEDSにより分析した結果は、埋入初期にはデバイス周囲に水酸化マグネシウムおよび水酸化マグネシウムの脱水反応により生じる酸化マグネシウムが堆積することを示している⁽¹⁴⁾。一方で、溶出した金属イオンは、上記の水酸化物イオンだけではなく、体内に存在する塩化物イオンやリン酸イオン、炭酸イオンと反応し、デバイス表面には酸化物、水酸化物だけではなく、塩化物、リン酸塩、炭酸塩の堆積も生じることが考えられる。実際に、埋入期間が長期化すると、分解生成物層と骨組織の界面ではリンとカルシウムおよび炭素の濃度が上昇している⁽¹⁴⁾。これは、生体/デバイス界面でのリン酸塩および炭酸塩の形成を示唆する。リン酸カルシウム層の形成と分解速度の低減時期は一致しており⁽¹⁴⁾、不溶性の分解生成物形成がマグネシウム製デバイスの分解速度に極めて大きな役割を果たすことが推察される。したがって、平衡反応による分解生成物の形成にも影響する水やリン、カルシウムなどの流入/流出速度は、生体内分解速度に大きな影響を与えるといえる。すなわち、血液をはじめとする体液の存在量や流速が異なる生体内での埋入部位に依存して、デバイスの分解速度は異なる。

実際に、マグネシウム合金を動物の生体骨に埋入した場合には、分解速度の部位依存性が確認された⁽¹⁴⁾。また、頭蓋骨の外側、内側という狭い範囲であっても、血流等の環境の差異により、ネイルは異なる分解挙動を示した⁽¹⁵⁾。胴部の短いネイルを、下穴を開けた頭蓋骨に直接貫入したモデル(貫入モデル)および胴部の長いネイルを用いて自家移植骨を頭蓋骨に固定したモデル(移植モデル)のいずれにおいても、骨髄に接触していた先端部および胴部が、頭蓋骨より外頭側

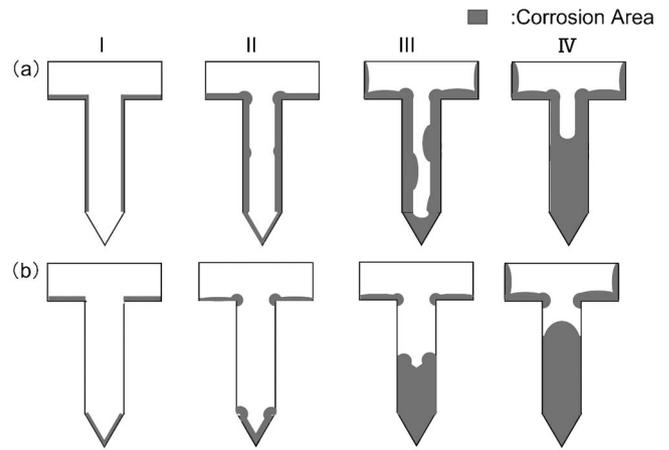


図1 生体内でのマグネシウム合金製ネイルの分解挙動；(a) 円周方向からの分解、(b) 長手方向に沿った分解⁽¹⁵⁾。

に露出した頭部よりも優先的に分解した。ネイル全体の体積残存率は24週間経過後の貫入モデルでは10%、移植モデルでは40%程度であったが、両モデルともに、24週間経過後には胴部は完全に分解し、頭部のみが残る結果となった。このようなネイルの部位依存的な分解の進行は、胴部円周方向からネイル長手方向と垂直方向へ進行するものと先端部からネイル長手方向に沿ったものの2通りに大別できる(図1)。貫入モデルでは骨髄液との接触が、移植モデルでは血液や組織液の既存骨と移植骨界面への流入が、胴部における分解促進要因であると考えられるが、分解の進行形態にモデル依存性は認められなかった。以上の結果から、生体内での分解速度を踏まえた骨固定用デバイスの開発においては、埋入位置における骨髄の有無やその接触形態、血液や骨髄液など組織液の流動性などを考慮したデバイスの設計としてマクロ形状のみならず表面皮膜などマイクロ表面形態の重要性が改めて確認できる。

このような生体からマグネシウム合金製デバイスへの作用、すなわち生体環境によるマグネシウム合金製デバイスの分解は、逆に生体組織への作用につながる。一例として、デバイス周囲への骨誘導や新生骨の形成促進が複数の論文で報告されている⁽¹⁶⁾⁽¹⁷⁾。特に、マグネシウムイオンの放出は骨芽細胞の活性、増殖、分化に影響を与え、新生骨の形成を促進すると期待されている⁽¹⁶⁾。しかしながら、図1に示す両モデルでは骨形成の促進が確認できなかった。両モデルの挙動観察から、形成が生じなかった原因として血流障害による影響や局所的なpH変動、圧受容器刺激などの影響も考えられ、詳細についてはさらなる検討が必要である。

4. 腹腔内におけるマグネシウムの分解と反応

骨髄液との接触の有無により不均一分解が生じた骨組織へ埋植した場合は異なり、体液が豊富に存在する腹腔内に埋入した Mg-Zn-Ca 合金製クリップは、動物種によらず均一に分解が進行した⁽¹⁸⁾⁽¹⁹⁾。現在医療現場で使用されるチタン製クリップをコントロールとして、マグネシウム合金製クリップの結紮性能を評価したラットの肝臓切除モデル⁽¹⁸⁾およ

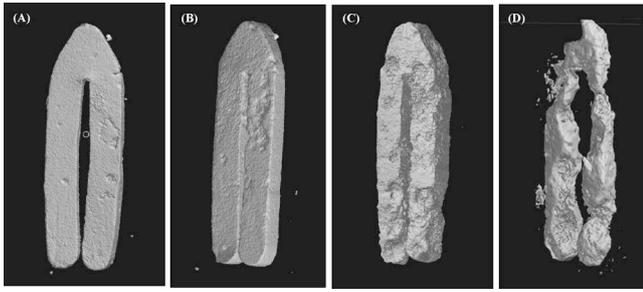


図2 ラット腹腔内でのMg-Zn-Caクリップの分解挙動；(A) 1週経過後，(B) 4週経過後，(C) 12週経過後，(D) 24週経過後⁽¹⁸⁾。

びイヌの胆嚢摘出モデル⁽¹⁹⁾においては、埋入後12週目までクリップは比較的均一に分解し、局所分解により分断される細分化は認められなかった。in vitro 環境では残留ひずみによるマグネシウムの分解速度の上昇が報告されており⁽²⁰⁾、クリップ細分化の一因として残留ひずみの不均一分布が考えられる。クリップの閉鎖を模擬した有限要素解析において、相当塑性ひずみは屈曲部周辺で高い値を、平行部で低い値を示した⁽²¹⁾。ラットから摘出したクリップ外観の代表例を図2に示す。埋入初期には、屈曲部周辺で局所分解による凹部の形成がわずかに認められた。しかしながら、埋入後12週以降でのクリップの分解は屈曲部ではなく、平行部中央で大きく生じた。以上の結果は、残留ひずみは埋入初期には分解を促進するものの、埋入の長期化にともないその影響は低下する可能性があることを示唆している。その要因として、呼吸などの日常動作によりクリップ平行部で生じる荷重負荷が疲労破壊を誘起した可能性が考えられる。ただし、管状軟組織を結紮するために必要な期間は1~3週間程度といわれているため、図2(D)に示すような24週経過後の大きな分解はクリップとしての機能を損なうものではないといえる。

マグネシウム合金製クリップの体積は単調に減少し、ラットおよびイヌいずれも36週経過後の体積残存率は15%程度であった。静的なin vitro 環境での長期浸漬試験では、先述したとおり、不溶性の分解生成物層の堆積が分解反応を抑制するため、分解速度は浸漬期間の長期化にともない低下する。しかしながら、図3に示すとおり、腹腔内では浸漬期間の長期化にともなう分解速度の低減は認められなかったことから、一年以内にクリップが完全に分解するものと推察される。このような分解挙動を示す両モデルでは、クリップの埋入によるALTやASTなどの肝臓や腎臓の機能を示すマーカーおよびマグネシウムイオン濃度の有意な増加は生じなかった。さらに、イヌの胆管ではチタン製クリップの胆管への癒着が見られたのに対して、マグネシウム合金製クリップでは癒着は認められなかった。以上の結果から、開発したマグネシウム合金は適切な分解速度を示すだけでなく、現行材のチタンよりも周囲組織への負担は少ないものと考えられる。また、現行のチタンクリップを埋入した場合には、クリップを中心にアーティファクトが観察された一方で、マグネシウムクリップを埋入した場合には、クリップの周囲にはアーティファクトは認められなかった(図4)。チタンは体内で

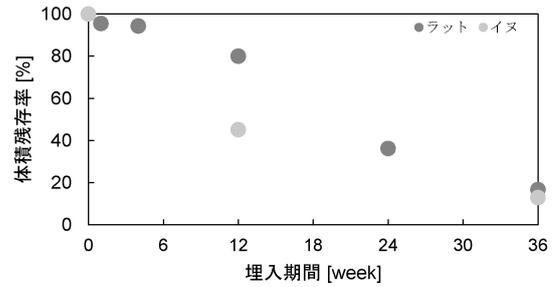


図3 腹腔内におけるマグネシウム合金クリップの経時に伴う体積残存率の変化⁽¹⁸⁾⁽¹⁹⁾。

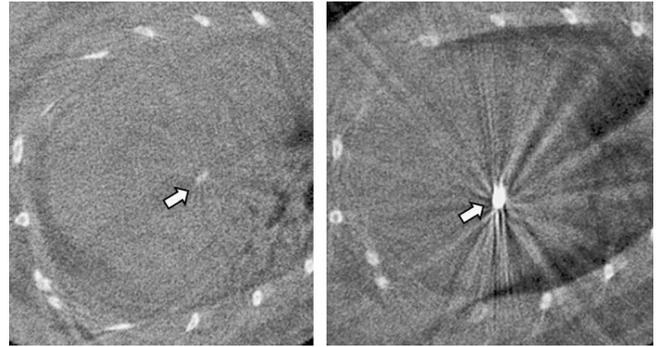


図4 ラットの腹腔内に埋植したクリップのCT画像。(左：マグネシウム合金，右：チタン)

難溶性を示すため、チタンクリップ周囲のCT値は250HU前後を示し続ける。一方、マグネシウムクリップは50~60HU程度であり、これは正常肝のCT値とほぼ同程度である⁽¹⁸⁾。以上の結果は、X線吸収係数の低いマグネシウムの適用は、CTによる予後観察を容易にすることを意味する。

5. 尿路におけるマグネシウムの分解と反応

骨組織や腹腔内に存在する体液のpHが7.4程度であるのに対して、健康なヒトの膀胱内部に滞留する尿のpHは4.5~8.0と大きく異なる⁽²²⁾。骨や腹腔とは体液の組成が大きく異なる尿路では、生体内で分解反応を生じる金属製デバイスとは異なる応答を示す。リング状に加工した純マグネシウム線材をラットの膀胱内に4週間留置した結果を図5に示す⁽²³⁾。膀胱内へマグネシウムを留置することにより、粗大

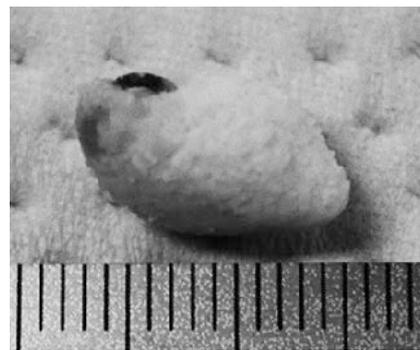


図5 ラットの膀胱内に3ヶ月留置した後に純マグネシウムリング(外径4.6 mm)の周囲に生成した結石の様子。

骨組成(炭酸アパタイト)バイオセラミックス

石川 邦夫*

1. 我が国の間違った教育と間違ったアパタイト系バイオセラミックス

「骨の無機主成分は水酸(ハイドロキシ)アパタイト[HAp: $\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6(\text{OH})_2$]である。骨の無機主成分と同じ組成の水酸アパタイト焼結体は優れた骨伝導性(骨に近接して材料を埋植した際に材料表面に骨が形成される性質)を示す。」と教育を受けた方が多いと思う。筆者もそのように教育を受け、教員になってからは、事実を確認することなく、そのように教えてきた。私にとって猛反省すべき過去である。

図1は水酸アパタイト人工骨, 水酸アパタイトセメント, 水酸アパタイト被覆システムの例である。水酸アパタイトが, バイオセラミックスとして広く臨床応用されているのは事実である。図2は水酸アパタイト焼結体を骨に埋植した際の透過型電子顕微鏡像である。この例では, 骨と水酸アパタイトが結合している。すなわち, 水酸アパタイトが骨伝導性を示すのも事実である。

水酸アパタイト焼結体は1970年代に発明された⁽¹⁾。水酸アパタイト焼結体の発明以前には骨伝導性を示す材料はなか

ったのも事実であり, 水酸アパタイト焼結体の発明は画期的であり, 水酸アパタイトがバイオセラミックスの礎であったのは間違いない。

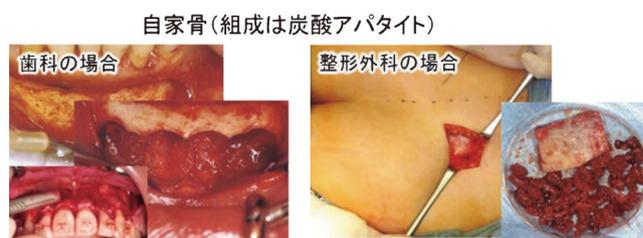
一方で, 医師は「自家骨移植(自分の骨を採取して骨欠損部に移植する手法)には自家骨採取に伴う健全部への侵襲という重篤な問題があるが, 骨再建術の第一選択は自家骨移植。水酸アパタイト人工骨は新しい骨に置換されないし, 骨伝導性も限定的である。」と言う(図3)。



図2 水酸アパタイト焼結体歯根を骨に埋入した際の透過型電子顕微鏡像。(オンラインカラー)



図1 左: 水酸アパタイト人工骨, 中央: 水酸アパタイトセメント, 右: 水酸アパタイト被覆システム。(オンラインカラー)



患者自身から採取(自家骨採取に伴う健全部への侵襲等の問題)

図3 自家骨採取術。(オンラインカラー)

* 九州大学大学院歯学研究院 口腔機能修復学講座; 教授(〒812-8582 福岡市東区馬出3-1-1) Bone Composition (Carbonate Apatite) Bioceramics; Kunio Ishikawa (Department of Biomaterials, Faculty of Dental Science, Kyushu University, Fukuoka)
Keywords: bone, carbonate apatite, bone remodeling
2024年4月1日受理[doi:10.2320/materia.63.615]

表1 ヒトの骨組成例.

組成	含有量(mass%)
Ca	34.8
CO ₃	7.4
PO ₄ as P	15.2
Na	0.9
Mg	0.72
K	0.03
Cl	0.13
F	0.03

なぜ、自家骨と水酸アパタイト焼結体の生体挙動がここまで違うのであろうか。答えは単純で骨の無機組成が水酸アパタイトではないためである⁽²⁾。

表1に骨の無機組成例を示す。そもそも、他の結晶構造解析などから骨は炭酸基を6~9%含む炭酸アパタイト[CO₃Ap: Ca_{10-a}(PO₄)_{6-b}(CO₃)_c]であることは昔から知られていた。

では、なぜ間違った教育が行われたのであろうか。残念ながら人工骨の開発によって事実が曲げられたのである。先に述べたように1970年代に水酸アパタイト焼結体が人工骨として開発された。歴史的な、偉大な発明であったことは間違いないが、骨の無機組成は炭酸アパタイトであるにも関わらず、水酸アパタイト焼結体の性能を誇張するため、骨の無機成分が水酸アパタイトであると宣伝してしまったことは決して許されることではない。

では、なぜ骨の無機組成である炭酸アパタイト焼結体を検討しなかったのか。検討しないはずがない。もちろん検討している。しかしながら、6~9%の炭酸基を備える炭酸アパタイトは焼結温度で熱分解されてしまう。そのため、比較的熱分解されにくい水酸アパタイト焼結体が発明されたというのが経緯である。

骨はしなやかな組織であり、造血機能などの生物学的機能を備える。また、材料は感染に弱い。とすれば、水酸アパタイト人工骨ではなく、新しい骨に置換される自家骨移植が第一選択であるとする医師の判断は間違っていない。間違っているのは、骨の無機組成が水酸アパタイトであると教授した我が国の教育、水酸アパタイト焼結体を人工骨として臨床応用したことである。

2. 骨に学ぶ、生体に学ぶ、進化論に学ぶ溶解析出法

骨の無機組成は炭酸アパタイトである。骨に学び、骨の組成である炭酸アパタイトを組成とする人工骨を創製する必要がある。歴史的には、炭酸アパタイトが焼結できないため、水酸アパタイト焼結体が人工骨として臨床応用されたが、そもそも生体は骨を電気炉ではなく、生体内(生体の60%は水)で造っている。また、無脊椎動物の骨格組成は炭酸カルシウムであるが、進化して脊椎動物の骨格組成は炭酸アパタイトへと変遷している。

これらに学んだ炭酸アパタイトブロックの製造方法が溶解析出法である⁽³⁾。

溶解析出法は水溶液中に前駆体を浸漬した際におこる、継続的な溶解反応と析出反応を利用して、前駆体のマクロ形態を維持したまま組成を変換する手法である。前駆体である炭酸カルシウム(無脊椎動物の骨格組成)ブロックを水溶液に浸漬すると、炭酸カルシウムが微量溶解してCa²⁺とCO₃²⁻が遊離される(溶解反応)。水であれば、すぐに飽和平衡に達する。ところが、水溶液中にリン酸イオンが含まれている場合、溶液は炭酸アパタイトに対して過飽和となりCa²⁺、CO₃²⁻とPO₄³⁻は炭酸アパタイトとして析出する(析出反応)。この溶解反応と析出反応が継続的に進行し、析出した炭酸アパタイト結晶が絡まり合うため、前駆体である炭酸カルシウムブロックのマクロ形態が維持されたままで組成は炭酸アパタイトに変換される。

3. 骨組成(炭酸アパタイト)バイオセラミックス

焼結ではなく、溶解析出法で骨の無機組成である炭酸アパタイトは製造できた。ただ、重要なことは炭酸アパタイトが製造できるか否かではなく、製造できた炭酸アパタイトが自家骨と同じ機能を示すか否かである。

骨の機能に関して重要な役割を担っているのが骨リモデリングである(図4)。骨リモデリングは、破骨細胞による骨吸収と骨芽細胞による骨形成からなり恒常的に行われている。ヒトが脱皮することなく骨格成長できるのは骨リモデリングのおかげである。また、骨リモデリングにおいて破骨細胞と骨芽細胞の機能に差異が発生すると骨粗鬆症などになってしまう。

そして、この骨リモデリングによって、自家骨は新しい骨に置換される。

図5左は骨、水酸アパタイト、炭酸アパタイトの表面で破骨細胞を培養した場合の走査型電子顕微鏡像である。当然、骨は破骨細胞によって吸収される。骨組成である炭酸アパタイトも破骨細胞によって吸収される。ところが、水酸アパタイトは破骨細胞によって吸収されない。吸収されない水酸ア



図4 骨リモデリングの概念図。(オンラインカラー)

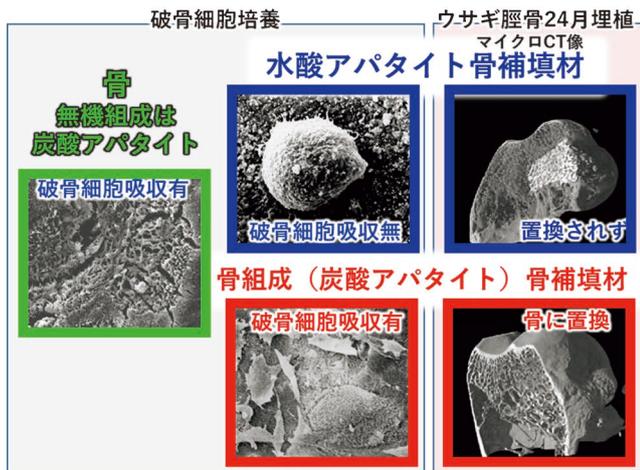


図5 試料表面で破骨細胞を培養した場合のSEM像およびウサギ脛骨欠損を再建した24ヶ月後のマイクロCT像。(オンラインカラー)

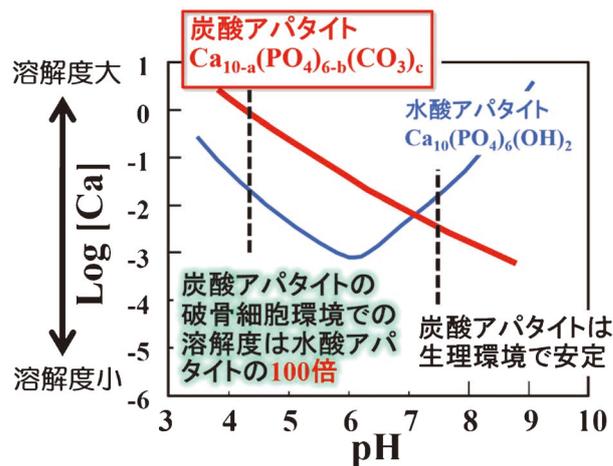


図7 アパタイトの溶解度に関するpH依存性。(オンラインカラー)

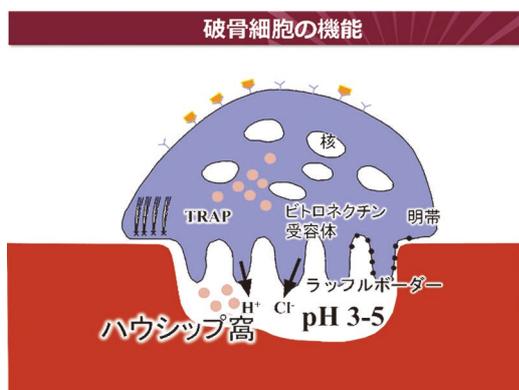


図6 破骨細胞の模式図。(オンラインカラー)



図8 破骨細胞と骨芽細胞の間の細胞間情報伝達の模式図。(オンラインカラー)

アパタイトが新しい骨に置換されることはありえない。図5右はウサギ脛骨欠損を水酸アパタイトおよび炭酸アパタイトで再建した場合の24ヵ月後のCT(コンピュータ断層撮影)像である。骨および骨組成である炭酸アパタイトは新しい骨に置換されるが、水酸アパタイトは新しい骨に置換されないことがわかる。ちなみに、臨床的にも水酸アパタイトは少なくとも10年間は骨に置換されないことが報告されている。

なぜ、水酸アパタイトは破骨細胞に吸収されず、炭酸アパタイトは破骨細胞に吸収されるのであろうか。図6に破骨細胞の機能に関する模式図を示す。破骨細胞は骨や人工骨に接着し、ラッフルボーダーの内部を酸性にして、骨や人工骨を吸収し、ハウシップ窩と呼ばれる吸収窩を形成する。すなわち、破骨細胞が形成する酸性環境で溶解されるか否かが、破骨細胞が骨や人工骨の吸収の可否に係る。

図7は炭酸アパタイトと水酸アパタイトの溶解度のpH依存性をまとめた図である。ハウシップ窩のpHにおける炭酸アパタイトの溶解度は水酸アパタイトの100倍であることがわかる。生命体の生体内システムは進化によって構築されている。そして、進化によって、ヒトを含む脊椎動物は、骨格組成として炭酸アパタイトを選択した。生体内で骨と同じ機

能を期待する場合には生体に学ぶ必要がある。

破骨細胞と骨芽細胞とは細胞間情報伝達で互いに連絡を取り合っている。骨や炭酸アパタイトを吸収した破骨細胞はClastokinesによって骨芽細胞を活性化する(図8)。その結果、破骨細胞によって吸収される炭酸アパタイトは人工骨として臨床応用されている水酸アパタイト、 β 型リン酸三カルシウム[β -TCP: $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$]、ウシ焼成骨などに比較して圧倒的な骨形成能を示す(図9)。骨形成能に劣る水酸アパタイトなどの人工骨はインプラントなど荷重部への適用は禁忌であったが、炭酸アパタイトは適用制限がない歯科用の人工骨として我が国で初めて薬事承認された。炭酸アパタイト人工骨は日米で臨床応用されており、国内ではトップシェアである。

ちなみに、炭酸アパタイトの次に骨形成量が多いのは β 型リン酸三カルシウムである。 β 型リン酸三カルシウムも破骨細胞によって吸収されるが、単純溶解も受ける。海外では過剰吸収が問題視され、ほとんど臨床応用されていない。

4. 垂直的骨造成と炭酸アパタイトハニカムブロック

自家骨に対する人工骨の優位性は組成制御と構造制御が可

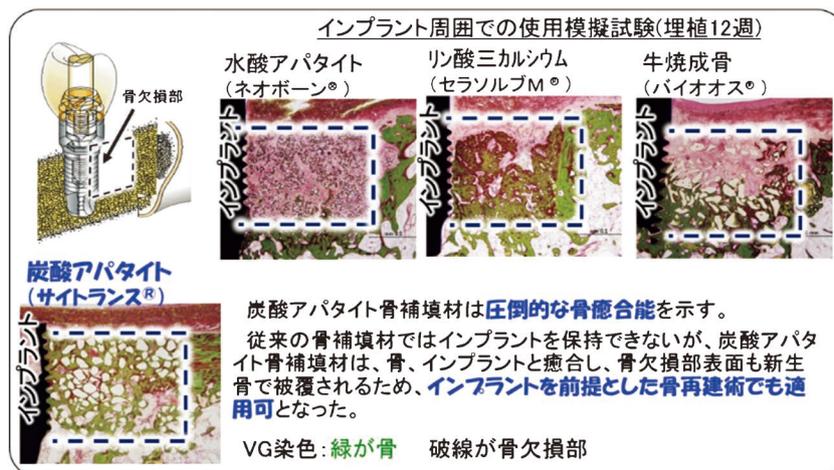


図9 ビーグル犬顎骨インプラント隣接部骨欠損の再建実験結果。術後12週。ピラスエバゴールドナー染色；緑が骨。(オンラインカラー)



図10 サドルグラフトの模式図。(オンラインカラー)

トを行う。図11はウサギ頭蓋骨を用いた垂直的骨造成の検討結果である。炭酸アパタイトハニカムブロックを用いると術後4週でハニカムの気孔内全面に新しい配向した骨が形成されるだけでなく、血管形成も確認され、構造制御が骨形成に極めて有用であることがわかる。

5. 変形性膝関節症の根治療法に用いられる炭酸アパタイトハニカムブロック

変形性膝関節症の推計有病者数は2000～2500万人、有症状患者数も600～800万人である(図12)。我が国の医薬品・医療機器研究開発を主導する国立研究開発法人日本医療研究開発機構(AMED)は「医療機器開発の重点化に関する検討委員会」報告書(2019年3月)においては5つの重点分野を定めており、その一つが整形外科系疾患である。整形外科系疾患の課題整理においては、二次予防の最重要課題として「保存療法が画一的なため重症化する例がとても多い。」治療の最重要課題として「骨切り術などのインプラントを挿入する際の手技はまだ医師の力量が反映される状態であり、個別化(3Dプリンタ活用)や精度向上が必要」と指摘されている。すなわち、変形性膝関節症の治療として施されるヒアルロン酸注射は、本質的な治療ではないため、重症化がとても多い。重症化すると人工膝関節置換術が必要となり、関節が温存されなくなる。根治療法は骨切り術であるが、癒合不全が4.5%も報告されている。

現在、骨切り術で用いられている人工骨はβ型リン酸三カルシウムである。先にも述べたがβ型リン酸三カルシウムは単純溶解されるため過吸収が問題視され、海外ではほとんど臨床応用されていない。また、炭酸アパタイトに比較して骨癒合能も限定的である。さらに現在90%の市場シェアであるβ型リン酸三カルシウムは発泡法(泡立てて気孔を形成する手法)で製造されているため、基本的には独立気孔が多い。

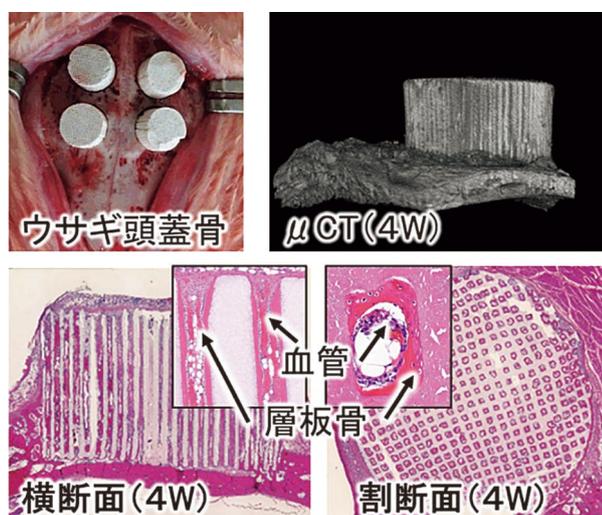


図11 ウサギ頭蓋骨に炭酸アパタイトハニカムを設置した術後4週目のμCT像および病理組織像(HE染色)。(オンラインカラー)

能なことであり、構造制御の重要性を示す一つの例がハニカムブロックである(4)。内側性骨欠損(周囲に骨がある骨欠損)の再建・再生は容易であるが、垂直的骨造成は困難であった。図10に垂直的骨欠損再建であるサドルグラフトの概念図を示す。歯が抜けて抜歯窩保存術を施さない場合、周囲の骨量が減ってしまう。当該部位にインプラントする場合には骨の幅と高さを確保する必要がある。その際にサドルグラフ



図12 変形性膝関節症の現在の治療と根治療法である骨切り術の課題。(オンラインカラー)

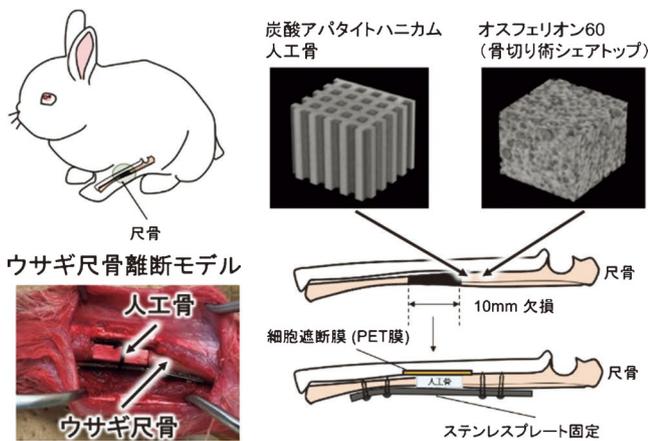


図13 ウサギ尺骨離断モデルの模式図。(オンラインカラー)

炭酸アパタイトハニカムは、骨癒合能が高く、さらに、一軸連通気孔を呈する。そのため、骨切り術に用いられる人工骨補填材として極めて有用である。図13にウサギ尺骨骨離断モデルによる比較検討手法をまとめる。骨切り術においては完全に骨を離断させることがないが、より厳しい条件で検討するため、完全骨離断系で比較評価を行った。

ウサギ尺骨骨離断モデルによる人工骨補填材の比較検討の結果概要を図14にまとめる。まずは骨癒合であるが、 μ CT像から明らかなように β 型リン酸三カルシウムの場合は癒合不全が認められるのに対し、炭酸アパタイトハニカムの場合には骨癒合している。圧倒的な差は人工骨中央部における骨形成である。現行品では術後12週でも中央部には骨が全く形成されない。一方、炭酸アパタイトハニカムの場合には術後4週で旺盛な骨が形成されている。当然、新生骨量にも圧倒的な差がある。中央部における骨形成量の差は組成の差より、構造の差に原因があると考えられる。自家骨に対する人工骨の優位性は組成と構造であり、構造の最適化にも留意する必要がある。

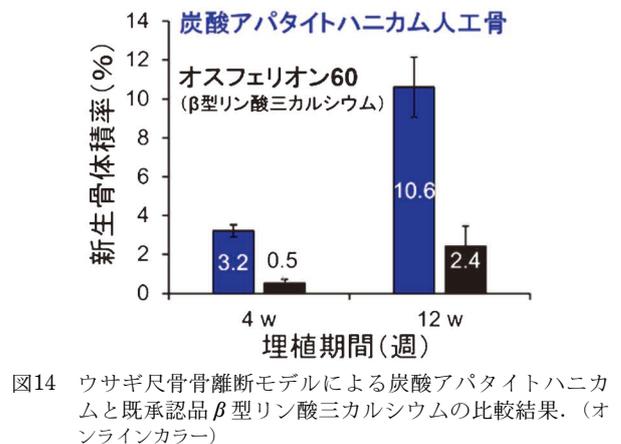
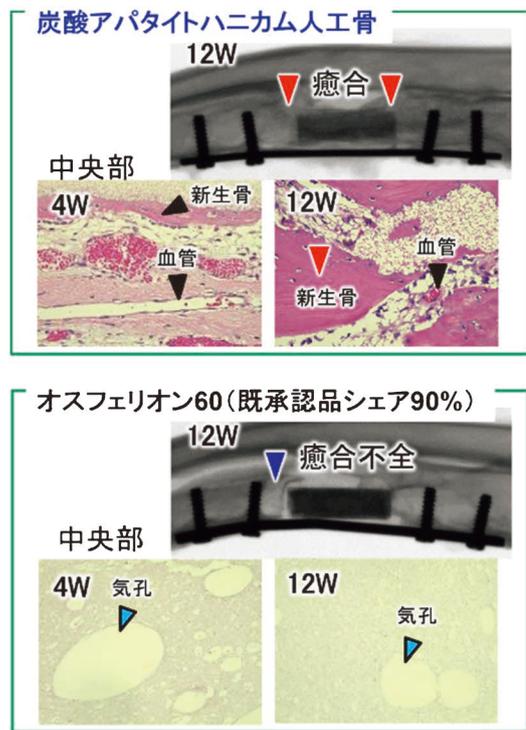


図14 ウサギ尺骨骨離断モデルによる炭酸アパタイトハニカムと既承認品 β 型リン酸三カルシウムの比較結果。(オンラインカラー)

6. 炭酸アパタイト被覆チタン

セラミックスであるアパタイトは脆性材料であり、骨伝導性や組織親和性に優れるものの機械的強度には難点がある。一方、金属材料は機械的強度に優れるが組織親和性や骨結合性(材料と骨が直接結合する骨伝導性とは異なり、繊維性結合組織を介して材料と骨が結合する性質)を示すチタンでもアパタイトと比較すると組織親和性や骨との結合能力は劣る。とすれば、チタン表面をアパタイトで被覆するアパタイト被覆チタンが有用であるのは自明の理であり、様々な用途で実用化されている(図15)。

アパタイト被覆チタンの成否の鍵の一つは骨伝導性に優れる骨組成(炭酸アパタイト)か骨伝導性に劣る水酸アパタイトを選択するかであるが、被覆手法も重要である。なんと現在の水酸アパタイト被覆チタンはプラズマ溶射やフレイム溶射で製造されている(図16)。

プラズマ溶射においてはセラミックス粉末を瞬時に10,000~12,000°Cとして、セラミックスを材料表面に被覆する。炭酸アパタイトは熱分解されるため、焼結できないと述べた。比較的熱分解を受けない水酸アパタイトは焼結できるが、それでも1300°Cを超えると熱分解される。瞬時とは言え、10,000~12,000°Cでは熱分解は不可避であり、図16に示したように、水酸アパタイト粒子間には熱分解生成物が形成され



図15 水酸アパタイト被覆チタンの例 左：大腿骨頭置換術用のステム，中央：ペディクルスクリュー，右：歯科用インプラント体。(オンラインカラー)

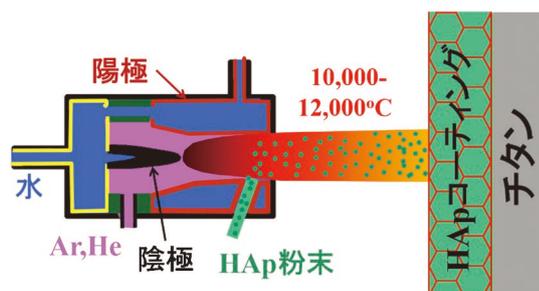


図16 プラズマ溶射による水酸アパタイト被覆チタン製造の模式図。(オンラインカラー)

る。また、超高温プロセスであり、熱履歴の問題も不可避である。ここで最大の問題は、体液は水酸アパタイトに対して過飽和であるが、熱分解組成物に対しては不飽和であることである。すなわち、熱分解組成物は経時的に体液で溶解される。当然、水酸アパタイト被膜は剥離する(図17)。

すなわち、溶射によるアパタイト被覆チタンの製造は原理的に無理なのである。ではどうすべきか。

ここでも溶解析出法で炭酸アパタイト被覆チタンが製造できる⁵⁾。プラズマ溶射装置という超高価な装置も必要ない。

水酸アパタイトは体内で骨に置換されないが、炭酸アパタイトは体内で骨に置換されるため、骨とチタンとの結合力も考える必要がある。そのため、まず、チタン表面を粗面化する(図18)。粗面処理チタンに例えば、硝酸カルシウム水溶液を塗布し、二酸化炭素中で加熱すると炭酸カルシウム被覆チタンが製造できる。この炭酸カルシウム被覆チタンをリン酸塩水溶液に浸漬するだけで、炭酸カルシウムは炭酸アパタイトに組成変換されるため、炭酸アパタイト被覆チタンが製造できる。ISO ではアパタイト被覆チタンにおいて、チタンとアパタイトの接着強度が15 MPa以上であることが求められている。熱履歴がない炭酸アパタイト被覆チタンの場合、チタンと炭酸アパタイトとの接着強度は 76.8 ± 16.1 MPaであり、ISO 基準より圧倒的に高い接着強度を備える。

炭酸アパタイトは骨伝導性に優れるため、当然、骨との接着強度も高い。図19はウサギ脛骨において炭酸アパタイト被覆チタンと骨との接着強度を検討した結果をまとめたものである。炭酸アパタイトで被覆されているため、術後4週目に炭酸アパタイト被覆チタンと骨とは骨癒合している。この時点での炭酸アパタイト被覆チタンと骨との接着強度は約40 MPaであり、粗面処理チタンと骨との接着強度の約5倍である。

溶解析出法で製造する炭酸アパタイト被覆チタンは溶射で製造する水酸アパタイト被覆チタンと比較して圧倒的に優れた材料であると自負しているが、高価な溶射装置を導入し、水酸アパタイト被覆チタンで薬事承認を得ている企業にとって炭酸アパタイト被覆チタンへの変更はハードルが高いよう

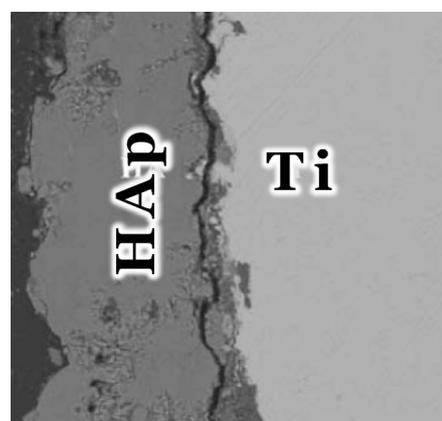
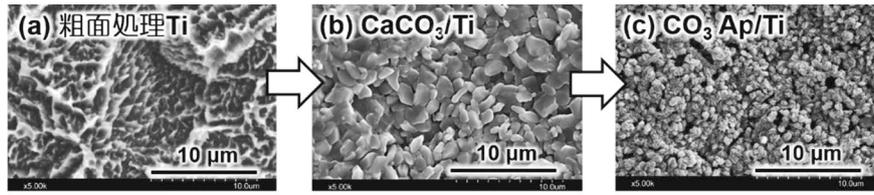


図17 プラズマ溶射で製造した水酸アパタイト被覆チタンの剥離症例。



接着強度 $76.8 \pm 16.1 \text{MPa}$ (ISO > 15MPa)

図18 炭酸アパタイト被覆チタンの製造に関する表面 SEM 像.

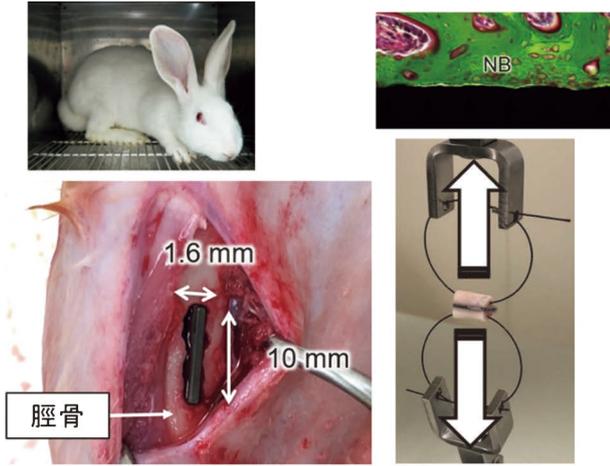


図20 アクリル樹脂である骨セメントの一例。(オンラインカラー)

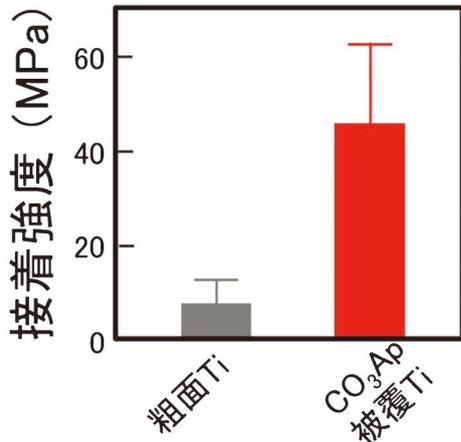


図19 炭酸アパタイト被覆チタンと骨との接着強度試験の概要。(オンラインカラー)



図21 水酸アパタイトセメントペーストの注射器からの填入。(オンラインカラー)

である。

炭酸アパタイト被覆チタンは実用化されていない。製品化に興味がある企業の方は、是非、連絡頂きたい。

7. 炭酸アパタイトセメント

昔の骨セメントはアクリル樹脂の一種で、もともと歯科において義歯(入れ歯)作成に用いていたものを人工股関節の固定に応用したものである。基本的にはメタクリル酸メチルとポリメタクリル酸メチルを混合し、重合させる(図20)。この骨セメントを用いて大腿骨頭置換術において、ステム(図

15)を大腿骨に固定する。骨セメント使用による血圧の急速な低下は年間少なからず起こっており、急変しそのまま亡くなってしまう症例も報告されている。筆者は過渡的な製品であると考えている。

硬化して水酸アパタイトになる水酸アパタイトセメントが臨床応用されている。セメントであれば注射器から骨欠損部にセメントペーストを填入することも可能であるため、低侵襲治療も可能になる(図21)。しかし、水酸アパタイトは骨に置換されない。硬化性を示すセメントは有用であるが、硬化反応で形成される水酸アパタイトが骨に置換されないのが問題である。とすれば、硬化して炭酸アパタイトになるセメントを創ればよい。図22は炭酸アパタイトセメントでウサギ大腿 $\phi 6 \text{ mm}$ 骨欠損を再建した場合の術後12週の HE 染色像で

チタン表面におけるサンゴの石灰化と安定化

上田 正人* 上坂 菜々子**

1. はじめに

サンゴ礁は地球表面の0.2%の面積を占めるに過ぎないが、9万種類もの多様な生物が生息し、人類を含めた多くの生物に多大な恩恵を与えている。近年、急激な気候変動などによって、サンゴ礁は破滅的な状況に曝されている⁽¹⁾。従来、サンゴ礁の保全は、天敵であるオニヒトデの駆除、陸域からの赤土流入の削減など、対症的な方法で行われてきたが、近年は、サンゴの断片を海底の岩盤などに固定し、増殖させる積極的な増殖方法(断片移植、クローニング)も試行されている⁽²⁾。しかしながら、いずれにおいても画期的な成果が得られていないのが現状である。

断片移植の発展形として、サンゴ片を固定した鉄鋼製基盤に陸地から直流電流を通電することで、それらの固定化を促進するBiorock⁽³⁾がある。陸地より送電線を介して通電するため、莫大な設備・維持費用がかかり、適用領域は沿岸部に限定される。そのため同手法に関する研究は低調気味であるが、そのメカニズムはサンゴの骨格形成、サンゴ断片の固定化促進の理解に役立つ(図1)。サンゴの骨格は炭酸カルシウム(CaCO₃)であり、その生成に関して、海水中では式(1)が成立し、pHが8.2より高くなると平衡は左方向に移動する。



海水のpHは、地域や季節、海洋の条件によって若干変化するが、通常、海面近傍において約8.1である。つまり通常の状態においてはCaCO₃の析出が著しく進行することはない。Biorockでは、鉄鋼製基盤に微弱電流を通電することで、その表面近傍にOH⁻を発生させ、CaCO₃の析出を促進させる。pHがわずかに高くなり、式(1)の平衡が左方向に

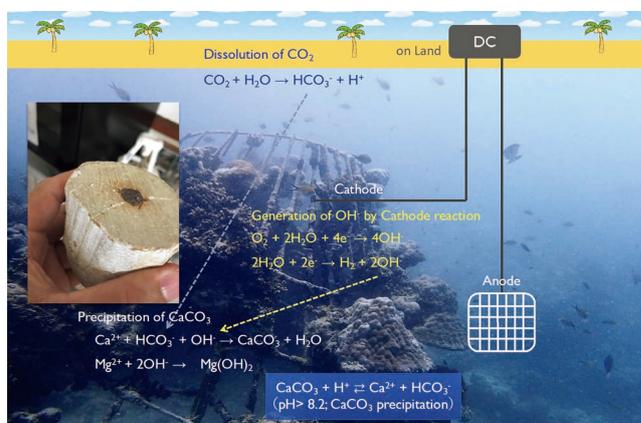


図1 Biorockの全体像と関連する化学反応。(オンラインカラー)

移動すると考えることもできる。これはいわゆるCaCO₃の電解析出であり、微弱電流通電を続けると図1の中に示す写真のように鉄鋼製基盤(鉄筋)はCaCO₃に覆われる。鉄鋼製基盤はサンゴの骨格と同じCaCO₃に覆われるため、固定したサンゴも密着しやすくなると考えられる。

筆者の研究領域は、海洋生物ではなくバイオマテリアルであるが、2015年からこのサンゴの研究チームに参画し、微弱電流通電によるサンゴの基盤密着促進などのプロジェクトを進めてきた。現在はそれに加え、バイオマテリアルの知見や技術をサンゴの高効率増殖に繋げる研究を進めている。本稿では、そのコンセプトと研究の経過を紹介する。

2. サンゴの石灰化

サンゴ骨格のμCT像を図2に示す。一般的にサンゴの骨

* 関西大学化学学生命工学部; 教授(〒564-8680 吹田市山手町 3-3-35)

** 関西大学大学院・理工学研究科; (現職)ハイレックスコーポレーション)

Calcification and Stabilization of Coral on Titanium Surfaces; Masato Ueda* and Nanako Kosaka** (*Faculty of Chemistry, Materials and Bioengineering, Kansai University, Suita. **Graduate School of Engineering, Kansai University, Suita)

Keywords: titanium, titanium dioxide, polyp, calcium carbonate, skeletal formation, osteoblast, carbon neutral

2024年7月12日受理[doi:10.2320/materia.63.623]

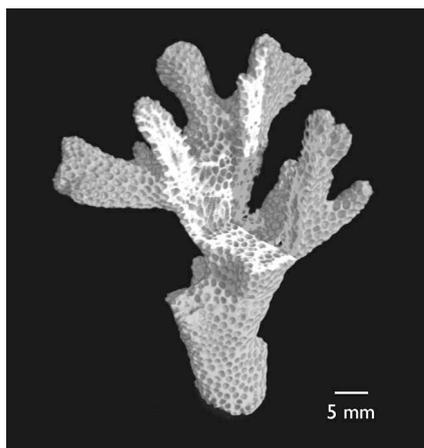


図2 ハナヤサイサンゴの μ CT像.

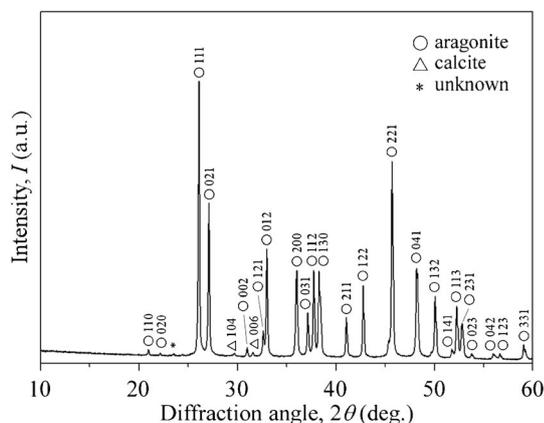


図3 サンゴ骨格のXRDプロファイル.

格は多孔質であり、例えば、ハナヤサイサンゴでは100~1000 μ mの細孔が表面だけでなく内部にも分布している。この骨格を大気乾燥させた後、乳鉢・乳棒で粉碎した粉末のXRDプロファイルを図3に示す。CaCO₃には、カルサイト構造、アラゴナイト構造、バテライト構造の3種の型が存在し、常温・常圧下ではカルサイトが最も安定な型であることが知られている。その中でサンゴの骨格はアラゴナイト型である。

純チタン(Ti)板、ならびに陽極酸化処理(リン酸水溶液、80 V)により酸化チタン(TiO₂)をコーティングした純Ti板をサンゴ断片に接触させた状態、ならびに接触させていない状態で人工海水中に浸漬し、所定の期間静置した。31日間の静置後、それらの表面状態を調べたところ、サンゴ断片の有無に関わらず、すべてのサンプル表面に藻類が付着していた。また、サンゴ断片を接触させたサンプル表面には微細な球状析出物が放射状に規則的に観察された。それらサンプルのTF-XRDプロファイルを図4に示す。サンプルは、純水で洗浄せずに空气中で乾燥させたため、塩化ナトリウム(NaCl)のシャープなピークが現れている。さらに、サンゴ断片を接触させたサンプルでは、CaCO₃のピークが観察さ

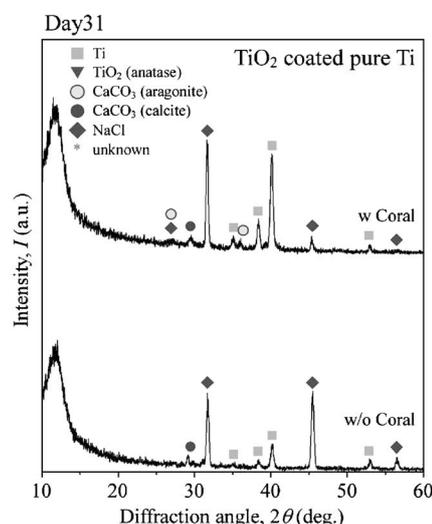
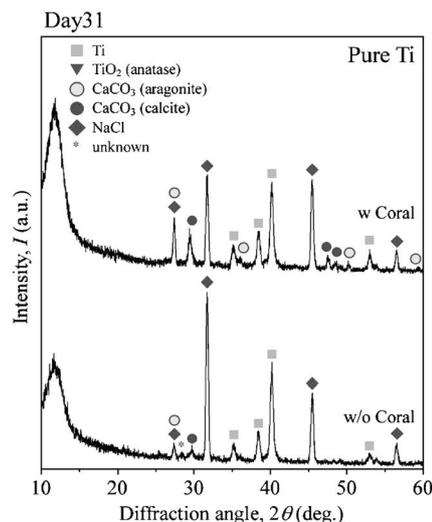


図4 純チタン板、ならびに陽極酸化処理(リン酸水溶液、80 V)により酸化チタンをコーティングした純チタン板をサンゴ断片に接触させた状態(w Coral)、ならびに接触させていない状態(w/o Coral)で人工海水中に31日間浸漬したサンプルのTF-XRDプロファイル.

れた。カルサイト型に加え、アラゴナイト型も明瞭に表れていることが興味深い。アラゴナイト型CaCO₃の析出は共存させたサンゴ断片が影響していると考えている。

3. 脊椎動物とサンゴの骨格形成メカニズムにおける類似性

筆者らは、脊椎動物とサンゴの骨格形成過程における興味深い類似性に着目している(図5)。脊椎動物では、骨芽細胞が産生したコラーゲンにリン酸カルシウムが沈着し、結晶化することでハイドロキシアパタイトからなる骨格を形成する。一方、サンゴは、刺胞動物(イソギンチャクやクラゲなど)に分類され、ポリプと呼ばれる軟組織に存在する造骨細胞から分泌された有機基質にCaCO₃が沈着することで骨格を形成する。骨格の物質こそ異なるが、形成メカニズムは同

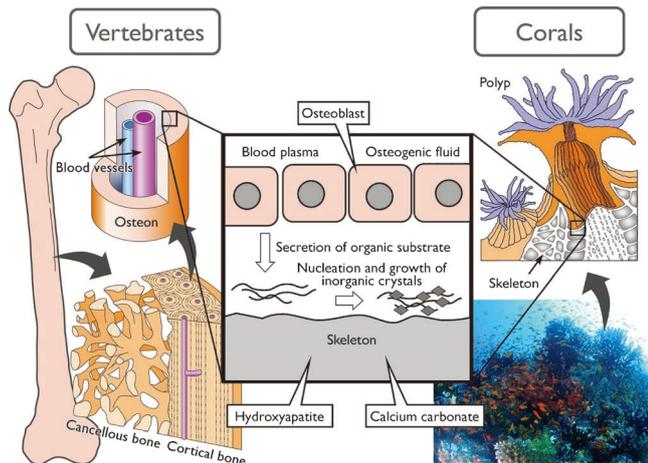


図5 脊椎動物とサンゴの骨格形成における類似性。(オンラインカラー)

じである。

骨形成・再生に関しては、基礎から応用まで詳細かつ多彩な研究が多数報告されている。例えば、インプラント表面の骨形成においては、化学組成の影響のみならず表面粗さの影響、官能基の影響、また、生体骨そのものにおいては、密度や構造、結晶の配向化における細胞の役割、外場の影響など、非常に詳細な知見が得られている⁽⁴⁾⁻⁽⁶⁾。これらの知見を利用して、極めて効果的な治療が実現されている。そこで我々の研究グループでは、既に確立されている骨形成・再生手法をサンゴに転用し、新規なサンゴ骨格形成促進手法を開発できないかと考えた。

4. チタン表面における軟組織の密着と骨格形成

現在、サンゴの断片移植に利用されている基盤のほとんどはモルタル(セメント+砂)製である。自然界に最も近い人工材料であり、非常に安価であることが選択されている理由である。セメントの主要な成分は、酸化カルシウム(CaO)、酸化ケイ素(SiO₂)、酸化アルミニウム(Al₂O₃)及び酸化鉄(Fe₂O₃)であり、硬化過程でCa(OH)₂が生成され、pH 12~13となる。硬化後も初期はそのアルカリ性が維持され、軟組織の接着には適さない。ある程度時間が経ち、海水に溶けたCO₂とカルシウムイオンが反応し、CaCO₃が析出することで表面が中性化するとサンゴの軟組織も密着しやすくなる。

モルタルにおけるこのpHの課題は、基盤にチタンを使用することで回避できる。純Ti板にアザミサンゴの断片を接触させ、研究室の水槽で飼育した。Day150におけるサンプルの外観とμCT像を図6に示す。ここで、基盤に固定した断片はCorallite(中央に見える円筒状の骨格)とそこに住むポリプ1個体からなる。なお、図中の矢印は無性生殖により増殖したポリプである。ポリプは基盤表面に旺盛に拡張し、無性生殖が活発に生じていることがわかる。水平面のμCT像は、ポリプと基盤の界面位置のものである。固定し

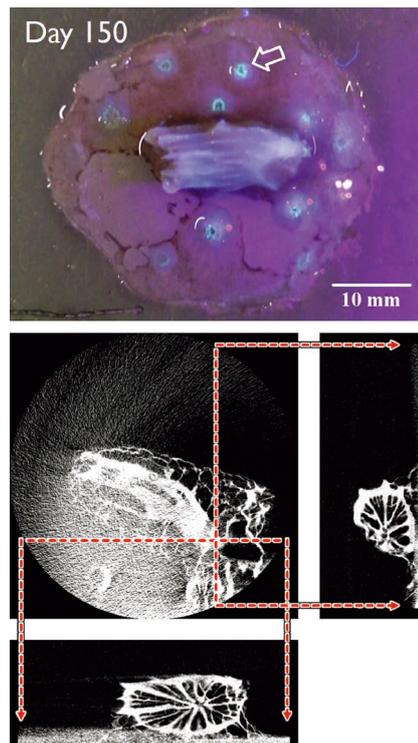


図6 純Ti板に接触させたサンゴ断片(アザミサンゴ)とその周囲に形成された骨格のμCT像。(オンラインカラー)

たサンゴ断片を中心に基盤表面には骨格が形成されていた。塊状に析出していたわけではなく、ネットワークを形成し、密着しているポリプに起因して析出した骨格であることは明白である。

リン酸水溶液中で陽極酸化処理を施した純Ti棒(直径2 mm)をサンゴ断片(ミドリイシ)に接触させた。1週間程度で、その表面にポリプが旺盛に拡張する様子が観察された。一方、サンゴ断片を純Ti棒に固定しているステンレス鋼(SUS304)製ワイヤー上にはほとんど拡張しなかった。これは骨芽細胞などが示す傾向と同じである。さらに、サンゴ/Ti界面近傍をμCTで観察すると新たな骨格の形成も観察された(図7)。その骨格は純Tiに直接接触していることが興

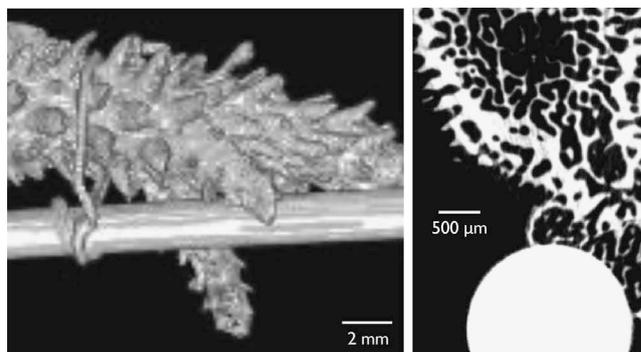


図7 表面修飾を施した純Ti棒に接触させたサンゴ断片(ミドリイシ)とその界面に形成された骨格のμCT像(Day22)。

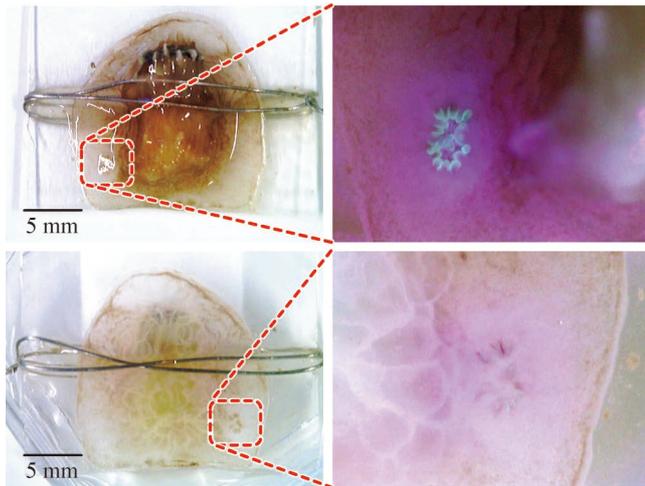


図8 ホウケイ酸ガラスに固定したサンゴ断片(アザミサンゴ)を上方・下方から観察した実体顕微鏡像。(オンラインカラー)

味深い。

純 Ti, 陽極酸化した純 Ti(TiO₂)において, 接触させたサンゴ断片からポリプが旺盛に拡張したのは, 表面粗さなど複数の要素が関与しているはずであるが, 表面 OH 基, それに起因する表面チャージの影響は比較的強いと考えている。そこで等電点の観点から同様にネガティブチャージの発生が期待されるホウケイ酸ガラスにサンゴ断片を固定し, その接触面の状態変化を観察した。同材料は無色透明であるため実体顕微鏡, 光学顕微鏡による下方(背面)からの観察も可能である。サンゴ断片固定後1ヶ月程度経過すると, 基盤表面におけるポリプの拡張, ならびに骨格形成が観察された(図8)。無性生殖により増殖したポリプの直下で観察された析出物は, ポリプの形態を反映した多角形を呈し, これは莢壁の基本構造と考えられる。また, これらはホウケイ酸ガラス上に直接析出していることがわかる。

これらより, 骨形成・再生の研究で蓄積された知見や技術を巧みに利用し, サンゴの増殖基盤を設計・作製すれば, 新規で効果的なサンゴ礁の再生が実現できると確信した。

5. 再生医療技術を利用したサンゴの高効率増殖

サンゴの生活史を図9に示す。サンゴは年1回の成熟期に産卵し, その受精卵は1~3日でプラナラ幼生となる。数日~数週間の浮遊生活の後, 適切な底質を選んで着床し, ポリプとなる。ポリプは自らの下に骨格をつくりながら分裂・出芽を繰り返し, クローンである新しいポリプをつくる(無性生殖)。これを繰り返して多数のポリプが連結し, サンゴ群体を形成する。一部の種類では折れたサンゴ片が岩礁などに固着して, 新たな群体をつくることもある。

現在, 実施されているサンゴの増殖法は, (i)受精卵・プラナラを起点, (ii)骨格を含むサンゴ断片を起点とする方法である。前者では, 自然に放出された受精卵・プラナラ幼生を着床前に捕集し, 人工基盤に固定する。受精卵・プラナラ幼生の多くは漂流中, 魚に捕食されてしまうため, タイミングを見計らって, それらが分散する前のスリック(带状の集合体)状態時に効率よく捕集する必要がある。多数のサンゴ発生起点を形成できる点で非常に優れているが, 実施できるのは年に1~2回のみであり, 経験も必要である。一方, 後者では, サンゴから断片を採取し, 移植・増殖させる。わかりやすい方法で実施の実績も多く, 蓄積されたデータも多い。ただ, 1断片が1個体にしかならず, その設置もダイバーの手作業に頼らざるを得ない方法で効率が良いとは言えない。また, ドナーとなるサンゴ群集の弱体化も懸念される。このように現行のサンゴ増殖法は一長一短である。

再生医療分野では, 基礎から応用まで詳細かつ多彩な研究が多数報告されている。生体内の患部に細胞を注入したり, 培養した細胞シートを貼付したり, 組織から単離した細胞の利用は, 医療にパラダイムシフトをもたらせた。バイオマテリアルの研究で培われた知見や手法をサンゴの増殖に転用する研究を進めている中, ポリプのストレス忌避反応に出会った。周囲の環境が悪化すると, そのストレスによりポリプが剥離・脱離する“ポリプバイルアウト”と呼ばれる現象である⁽⁹⁾⁻⁽¹³⁾。我々は, この軟組織の環境応答を人工的に誘発して, サンゴ断片から採取したポリプを基盤に固定し, それらを起点にサンゴを増殖する手法を開発している。白化の原因である褐虫藻の放出と同様, ネガティブな現象であるため,

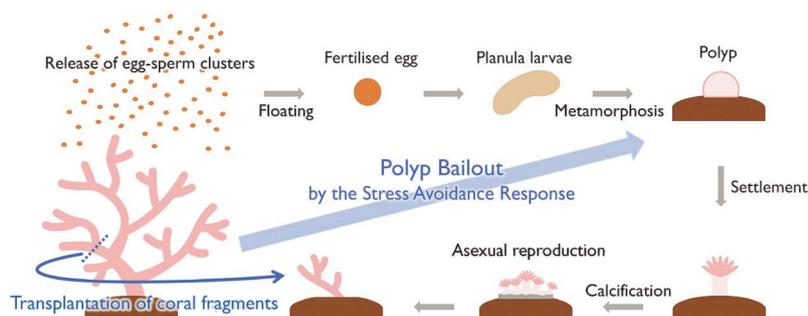
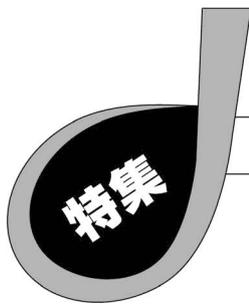


図9 サンゴの産卵~着床~骨格形成のプロセスにおける断片移植とポリプバイルアウトの位置付け。(オンラインカラー)



計算科学と AI に基づく CAD/CAM 用 歯科材料設計の試み

山口 哲*

1. CAD/CAM 技術の発展と歯科材料の課題

歯科領域における CAD/CAM 技術は、1980年代後半から Mörmann⁽¹⁾, Duret⁽²⁾, Rekow⁽³⁾⁽⁴⁾などのパイオニア達の研究の積み重ねによって磨き上げられ、過去40年の間に歯科材料の機械的特性を大幅に進化させた。これらの材料には、イットリウム安定化ジルコニウム⁽⁵⁾⁽⁶⁾、ニケイ酸リチウム含有ガラスセラミックス⁽⁷⁾、および CAD/CAM 用コンポジットレジン⁽⁸⁾が含まれる。

なかでも、CAD/CAM 用コンポジットレジン⁽⁹⁾は、従来の充填用コンポジットレジン⁽⁹⁾と比べて、高温・高圧下で重合することで、大幅に機械的特性が向上する⁽¹⁰⁾。2014年には、Okada ら⁽¹¹⁾がフィラープレス/モノマー含浸法を提案し、ナノフィラーの含有量を増加することに成功し、さらに機械的特性が向上した。その後、日本では2014年から CAD/CAM 用コンポジットレジンを使用した小臼歯の治療が保険適用になり⁽¹²⁾、2017年に第一大臼歯の治療、2020年には前歯の治療にまで拡大された。

一方、CAD/CAM 用コンポジットレジンおよびその製造技術が進化したにもかかわらず、当時、かぶせ物(クラウン)の破折やチッピングが発生することが報告されており⁽¹²⁾⁽¹³⁾、さらなる改良が期待されていた。また、ヒトの象牙質上に接着された初期の CAD/CAM 用コンポジットレジン製のクラウンは、6ヶ月以内に脱離を引き起こしたとの報告がある⁽¹²⁾。4年間の後ろ向きコホート研究によれば、362個のクラウンのうち106個が問題を引き起こし、それぞれ、クラウンの脱離(74.5%)、次いでクラウンの破折(4.7%)、チッピング(1.9%)であったと報告されている⁽¹²⁾。後続研究⁽¹⁴⁾では、脱離の主な要因は、形成後の歯(支台歯)の垂直

的な高さ、支台歯のテーパー、およびクラウンのかみ合わせ(咬合)面の厚さであったと結論付けられている⁽¹⁴⁾。さまざまな咬合荷重と CAD/CAM 用コンポジットレジンの低い弾性率、あるいは不十分な咬合厚さなどの条件が複雑に組み合わせられた結果、クラウンと歯質の境界(マージン)が横方向に広がり、接着界面の破壊、次いでクラウンの脱離につながると考えられている⁽¹⁵⁾⁽¹⁶⁾。したがって、CAD/CAM 用コンポジットレジンの機械的特性を改善することは、極めて重要な課題である。

本稿では、CAD/CAM 用コンポジットレジンの機械的特性を改善するために、著者がこれまでに取り組んできた計算科学と AI に基づく歯科材料設計の試みについて概説し、得られた知見をまとめる。

2. 歯科における計算科学と AI に基づくアプローチ

所望の特性を有する材料を試作するために必要な構成要素を効率よく探索する方法として、コンピュータシミュレーションを利用した計算科学的アプローチがある。特に、実験で得られた結果との整合性を考慮しながらコンピュータシミュレーションを活用することで、これまでの試行錯誤的に実験を繰り返すアプローチと比べて、材料の無駄な使用を減らし、探索にかかる時間を大幅に削減できることが期待できる。

著者は、各種材料の物理的特性や挙動を異なるスケールで分析するために提案されたマルチスケール解析で、これまでに CAD/CAM 用コンポジットレジンの機械的特性の分析を行ってきた⁽¹⁷⁾。マルチスケール解析は、大きく分けて、均質化解析、マクロ解析と局所化解析の3つのフローで構成されている(図1)。まず、均質化解析では、非均質なマイクロ構造モデルを作製し、数値材料試験を行い、その試験データ

* 大阪大学大学院歯学研究所 歯科生体材料学講座；准教授(〒565-0871 吹田市山田丘1-8)
Design of Dental Materials for CAD/CAM by Computational Science and AI; Satoshi Yamaguchi (Department of Dental Biomaterials, Osaka University Graduate School of Dentistry, Suita)
Keywords: *computer-aided design/computer aided manufacturing, resin composites, artificial intelligence, finite element analysis, fatigue*
2024年5月2日受理[doi:10.2320/materia.63.628]

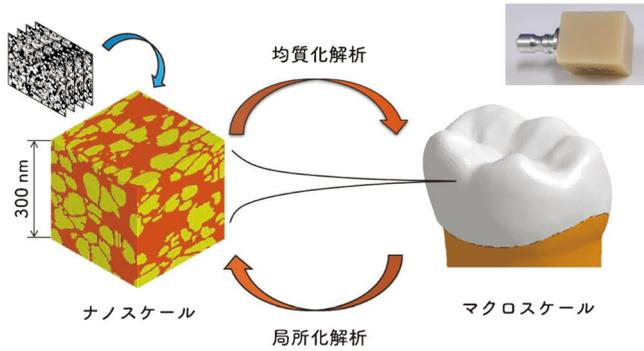


図1 マルチスケール解析の概要。(オンラインカラー)

をもとに材料物性値を同定する。次に、マクロ解析では、同定された材料物性値をマクロ構造モデルに適用して解析する。最後に、局所化解析では、マクロ構造解析から一部の領域を切り出して結果を拡大し、ミクロ構造内の結果分布を評価する。著者は、CAD/CAM用コンポジットレジン構成要素であるガラスフィラーのサイズ、組成、およびガラスフィラーとマトリックスレジンとの結合割合などの要因が機械的特性に及ぼす影響を評価するために、マルチスケール解析を利用してきた。局所化解析を用いれば、マクロスケールでのCAD/CAM用コンポジットレジンの応力またはひずみ分布に基づき、ナノスケールでの破壊の起始点を予測することが可能となる。

一方、有限要素解析は、応力またはひずみ分布を評価することが可能な強力なツールで、著者はCAD/CAM用コンポジットレジン製のクラウンの破壊の起始点を予測するために、活用してきた⁽¹⁸⁾。しかしながら、従来の静的な有限要素解析や走査型電子顕微鏡での観察に基づく破面解析(フラクトグラフィ)のみでは、亀裂の進展や破壊の順序などの挙動を分析することができなかった。そこで、著者は、3点曲げ試験で観察された破壊挙動を模倣する非線形動的有限要素解析を用いた分析手法を確立した⁽¹⁹⁾。このような実験と計算科学を融合したアプローチは、さまざまな歯の形態、荷重負荷条件、および咬合条件に供されるCAD/CAM用コンポジットレジン製のクラウンの破壊挙動を分析するために有用である⁽²⁰⁾。

ところで、人工知能(Artificial Intelligence: AI)技術は、社会で広く受け入れられ、歯科領域においても活用が始まっている⁽²¹⁾⁽²²⁾。機械学習はAIの小領域(図2)であり、大規模なデータから規則性を見つけることを得意とする強力なツールである。

AIを用いれば、これまでに実験したことのない未知の組成から機械的特性を正確に予測することが可能となる⁽²³⁾。近年、機械学習は、マテリアルズインフォマティクスの研究分野で主要なツールとなっており、未知の特徴(組成や実験条件など)から機械的特性を予測するために使用されている⁽²⁴⁾。著者は、機械的特性を改善した新規のCAD/CAM用コンポジットレジンを開発することを目指し、機械学習を



図2 人工知能(AI)の概略。(オンラインカラー)

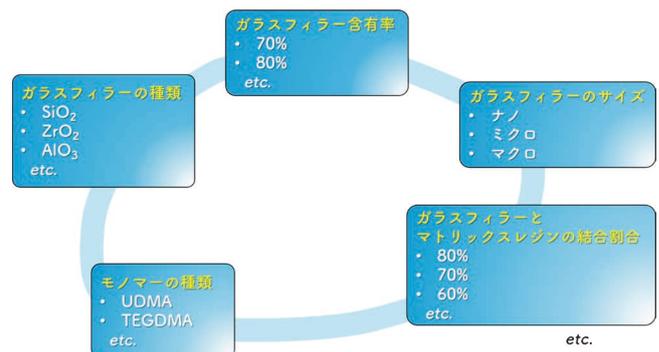


図3 CAD/CAM用コンポジットレジンの各種構成要素。(オンラインカラー)

活用した材料設計に取り組んできた。

3. CAD/CAM用コンポジットレジンの構成要素の分析

CAD/CAM用コンポジットレジンの機械的特性に影響を与える要因として、ガラスフィラーのサイズ、ガラスフィラーとマトリックスレジンとの結合割合、ガラスフィラー含有率、およびガラスフィラーとモノマーの組成などが挙げられる(図3)。

著者は、ガラスフィラーのサイズと、ガラスフィラーの表面に修飾されマトリックスレジンとの結合を可能にするシランカップリング剤の結合割合が、CAD/CAM用コンポジットレジンの機械的特性に与える影響について、前述の均質化解析と局所化解析を用いて、ナノ/マクロスケールで明らかにすることに成功した。すなわち、ガラスフィラーの直径が減少する(100 nm から 20 nm へ)と、マクロスケールでの弾性率と圧縮強度が増加し、ポアソン比が減少することを明らかにした⁽¹⁷⁾。ナノスケールでは、ガラスフィラーの直径が小さくなるほど、最大主ひずみの最大値が減少することが分かった⁽¹⁷⁾。

さらに、シランカップリング剤の結合割合(すなわち、ガラスフィラーの表面被覆率)が減少する(100%から75.5%へ)と、弾性率と圧縮強度が減少することが分かった⁽²⁵⁾。シランカップリング剤の結合割合と圧縮強度の関係は非線形であり、シランカップリング剤の結合割合を94.4%以上に増加

することができれば、圧縮強度を向上できる可能性があることを突き止めた⁽²⁵⁾。例えば、チオウレタンシランでガラスフィラーを機能化することは、歯科で一般的に使われている3-メタクリロキシプロピルトリメトキシシラン(γ -MPS)よりもガラスフィラーの表面被覆効率を高くすることが報告されており⁽²⁶⁾、CAD/CAM用コンポジットレジン⁽²⁷⁾の機械的特性を向上するうえで有用であると考えられる。

著者は、CAD/CAM用コンポジットレジン(カタナアベンシアブロック、クラレノリタケデンタル株式会社、新潟)を水中に7日間浸漬した後、マルチスケール解析に基づき予測したシランカップリング剤の結合割合が78.2%から68.4%に減少し、シランカップリング層の9.8%が加水分解された可能性を確認した⁽²⁷⁾。CAD/CAM用コンポジットレジン⁽²⁸⁾の劣化を防ぐためには、疎水性のシランカップリング剤⁽²⁸⁾の採用も有用であると考えられる。

ガラスフィラーの含有率について、Nguyenら⁽²⁹⁾は、ガラスフィラー含有率の増加が機械的特性を改善させることを試作品で確認している。Lingら⁽³⁰⁾は、比較的高い含有率(82.5 mass%)でガラスフィラーを填入したブロックを作製すると、曲げ強さが増加することを報告している。ガラスフィラーは、Si, O, Al, Ba, Zr, Cなどの各元素をさまざまに組み合わせられて構成されている⁽³¹⁾⁻⁽³³⁾。これらの組成は、文献や製造社から提供される技術情報に基づいて収集することが可能であるものの、特定のガラスフィラーの種類がCAD/CAM用コンポジットレジン⁽³⁴⁾の機械的特性に与える影響を探究した研究はこれまでになかった。モノマーの組成については、Nguyenら⁽²⁹⁾は、ガラスフィラー含有率を一定に保った場合に、ウレタンジメタクリレート(UDMA)を単独で使用した場合の曲げ強さの方が、UDMAとトリエチレングリコールジメタクリレート(TEGDMA)を異なる比率で混合した場合と比較して高くなることを報告している。さらに、Szczerboら⁽³⁴⁾は、UDMA/エトキシ化ビスフェノールA-グリコールジメタクリレート(Bis-EMA)/TEGDMAのモノマー混合物を使用した場合に、UDMA/TEGDMAを使用した場合と比較して、高い曲げ強さを示すことを確認している。著者は、ガラスフィラーの種類、ガラスフィラーの含有率、モノマーの種類からCAD/CAM用コンポジットレジン⁽²³⁾の曲げ強さを正確に予測可能なAIモデルを開発し、曲げ強さに影響を与える有効成分を特定することに成功した⁽²³⁾。開発したAIモデルを用いて考えられ得るすべての組成の組み合わせを網羅的に探索し、どの組成が機械的特性に影響を及ぼしているのかを分析した結果、269.5 MPaの曲げ強さを達成するためには、次に示すような組成の組み合わせが重要であることを突き止めた。

ガラスフィラーの種類：SiO₂, ZrO₂, バリウムガラス, メタクリレート混合フィラー, (AlO₃)

モノマーの種類：UDMA

ガラスフィラーの含有率：82 mass%~85 mass%

各種構成要素(ガラスフィラーの種類、ガラスフィラーの含有率、モノマーの種類)とCAD/CAM用コンポジットレジン⁽³⁵⁾の曲げ強さとの関係は、単調増加ではなく非線形であることが分かったため、今後さらなる検証を積み重ねていく予定である。AIを活用した歯科材料設計は、十分なデータが利用可能であれば、CAD/CAM用コンポジットレジン⁽³⁶⁾の機械的特性を改善するための有効成分を特定するために、極めて強力なツールになる可能性を秘めている。

4. 破壊解析

CAD/CAM用コンポジットレジン⁽³⁷⁾の破壊挙動の検証には、破面解析⁽³⁸⁾が使用されてきたが、これは主に歯のすり減り(咬耗)と疲労破壊の結果を走査型電子顕微鏡で観察するのみである。一方で、臨床的な失敗の原因を突き止めるには、破壊の起始点とその動的な進展を決定することが必要となる。著者は、実験と計算科学を融合したアプローチにより、CAD/CAMコンポジットレジン製のクラウンの破壊の起始点と亀裂生成の順序を明らかにすることに成功した⁽²⁰⁾。このアプローチは、臨床を想定したさまざまな歯の形、荷重負荷条件、および咬合接触状態を考慮した破壊挙動の分析を可能にすることから、今後さらに活用されるものと考えられる。

さらに、破壊の起始点は、下顎右側第一大臼歯をCAD/CAM用コンポジットレジン製のクラウンで修復する場合において、舌側に引張応力が集中することにより引き起こされていることが分かった。その後、ただちに舌側のセメント層が破壊されていくことを確認した。ただし、破壊の順序は、CAD/CAM用コンポジットレジン⁽³⁹⁾の各構成要素によって異なるため注意が必要である。非線形動的有限要素解析は、実験で使用する装置の測定周期よりも早い計算周期で実施することが可能なため、CAD/CAM用コンポジットレジン製のクラウンの破壊の起始点の兆候を検出できるという点で有用である。

弾性率は、非線形動的有限要素解析を行うために必要な材料パラメータの一つである。CAD/CAM用コンポジットレジン⁽⁴⁰⁾の場合、市販されているブロックの寸法が限られているため、曲げ強さを評価するためには一般的に3点曲げ試験が行われる。しかしながら、3点曲げ試験の結果から得られる「曲げ弾性率」は、有限要素解析に必要な引張試験から得られる「弾性率」とは異なるため、注意が必要である。著者は、CAD/CAM用コンポジットレジン製のクラウンの圧縮試験体を構成する各要素の破壊挙動を再現するコンピュータモデルを確立した⁽²⁰⁾。実験と計算科学を融合したアプローチは、3点曲げ試験のみならず、破壊靱性試験⁽⁴¹⁾、二軸曲げ試験⁽⁴²⁾、微小引張試験⁽⁴³⁾、あるいはせん断試験⁽⁴⁴⁾にも適用可能であることを実証している。このアプローチは、エッジ強度⁽⁴⁵⁾など、臨床でのクラウンの挙動を特徴づける特性を評価するためにも活用できる可能性がある。Academy of Dental Materialsから発行されているガイドライン⁽⁴⁶⁾は、CAD/CAM用コンポジットレジンに関するさらなる検討を

行うための参考資料としてぜひ参考にされたい。これらの試料をコンピュータ内で再現することは、これまでの実験的なアプローチのデジタルトランスフォーメーションを進めるうえで、重要であると確信している。

加速疲労試験は、口腔内の運動および滑りながら接触する状況を模倣し、オールセラミッククラウン⁽⁴⁰⁾、イットリア安定化ジルコニア製のクラウン⁽⁴¹⁾、およびCAD/CAM用コンポジットレジン製のクラウン⁽⁴²⁾の疲労寿命(信頼性および故障モード)を分析するために有用である。著者は、ナノフィラー(62 mass%/55 vol%)を含む大白歯用のCAD/CAM用コンポジットレジン製のクラウンの疲労寿命が、マトリックスレジン含有率が高い方が長くなることを明らかにした⁽¹⁸⁾。CAD/CAM用コンポジットレジンの弾性率は、イットリア安定化ジルコニウムやニケイ酸リチウム含有ガラスセラミックスと比べて低いものの、マトリックスレジンの含有率が高いことから、咬合荷重を受けるとクラウンのマージンが広がり、接着界面の破壊につながる横方向の変位を引き起こしてしまう⁽¹⁵⁾⁽¹⁶⁾。一方で、破壊靱性は向上するためCAD/CAM用コンポジットレジンそのものに生じる破壊の起始点が進展することは抑制される。このトレードオフは、CAD/CAM用コンポジットレジンの長期寿命を改善するためにさらに検討されるべき課題である。このトレードオフを解決するためには、ベイズ最適化を用いた適応的実験計画法や、Rosaら⁽⁴³⁾によって提案された田口メソッドと遺伝的アルゴリズムの組み合わせなど、マテリアルズインフォマティクスアプローチ⁽²⁴⁾が有用であるものと考えられる。つまり、実験で得られた結果に基づきAIモデルを構築し、このAIモデルが提案した組成で試作した試料を用いて実験を行う。さらに実験で得られた結果を構築したAIモデルへフィードバックすることで、AIモデルの予測精度が向上するため、このプロセスを繰り返せば、トレードオフの範囲内で期待する性能を達成する組成を探索できる(図4)。

AIモデルの学習に用いた入力データの範囲内、すなわち内挿領域のみならず、外挿領域に隠された未知の組成の組み

合わせを発見できれば、新たな知見を生み出すことにもつながる。このようなAIモデルから信頼性の高い予測結果を得るためには、ISO, ASTM, ANSI/ADA, DINなどの世界標準規格の定義に従って、実験条件(例えば、試験片寸法や試験速度)を統一した入力データをAIモデルの学習に利用することが重要となる。

5. 高い破壊靱性の応用例

CAD/CAM用コンポジットレジンが有する高い破壊靱性は、小児歯科領域においては大きなメリットとなる。この分野では、従来、大きなむし歯のある乳臼歯は、コンポジットレジンと比較して優れた機械的特性を持つステンレススチール製の既製金属冠で修復されてきた。しかしながら、その非審美的な外観であるがゆえに、子供の親が既製金属冠での修復を避ける傾向があった。

著者は、S-PRGフィラー⁽⁴⁴⁾と呼ばれる6つのイオンを徐放可能なバイオアクティブなガラスフィラーを含む乳歯用のCAD/CAM用コンポジットレジン製のクラウンを試作し、これが乳歯冠として十分に機能する物理的特性と耐摩耗性を示し、市販のCAD/CAM用コンポジットレジンおよび乳歯用に設計された2つの充填用コンポジットレジンよりも優れた破壊靱性と耐摩耗性を示すことを確認した⁽⁴⁵⁾。

このCAD/CAM用コンポジットレジンの高い破壊靱性は、特に乳歯冠の薄い部分に有効である。さらに、日々の臨床で既製金属冠の接着に多用されているグラスアイオノマーセメントを使用した場合でも、臨床的に受け入れられる疲労挙動と接着性能を発揮することを明らかにした⁽⁴⁶⁾。

6. ま と め

本稿では、CAD/CAM用コンポジットレジンの機械的特性を改善するために、著者がこれまでに取り組んできた実験と計算科学を融合したアプローチにより得られた知見を概説

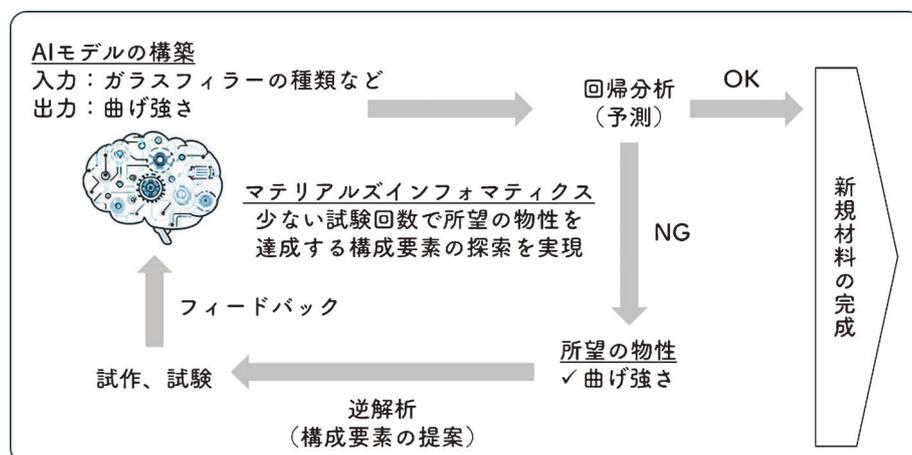
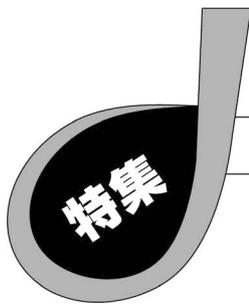


図4 マテリアルズインフォマティクスアプローチに基づく新規材料設計の概略。(オンラインカラー)



微生物学を利用した金属組織制御分解

若井 暁*

1. はじめに

金属材料は水、土壌、生体など様々な環境にさらされており、それぞれの環境中で微生物とも接触している。特に、水環境中では、金属材料表面にバイオフィームと呼ばれる微生物の集合体が形成され、金属と液体の固液界面と金属と微生物細胞の固液界面が混在し、様々な反応が起こり得る。金属材料の腐食反応については、液体中での腐食反応、すなわち、固液界面での腐食反応の情報が蓄積されているが、微生物存在下での腐食反応については、不明な点も多い。本稿では、微生物による金属腐食反応について最新の知見を解説すると共に、微生物反応および電気化学反応を用いて金属材料の一つであるステンレス鋼を組織選択的に溶解させる反応の可能性について展望を述べる。

2. 微生物による金属腐食(微生物腐食)

金属材料の多くは、使用環境の物理化学的な条件に基づいて腐食・劣化するが、微生物が関与することでこの腐食反応が異常に加速される現象は微生物腐食(Microbiologically Influenced Corrosion: MIC)と呼ばれている。微生物腐食の研究の歴史は古く、20世紀初頭には現象が確認されており⁽¹⁾、1934年には水素利用性の硫酸塩還元細菌(SRB)の代謝が腐食反応と結び付けられたモデルが提案されている⁽²⁾。一方で、水素利用性のSRBが存在する環境でも著しい腐食が発生しない場合やSRBが存在しない環境で激しい腐食が発生する場合が確認されており、このモデル以外にも重要な微生物腐食反応が存在すると考えられてきた。

最初の微生物腐食反応モデルの提唱から70年後の2004年

に、重要な微生物腐食反応が発見されている⁽³⁾。以前からの多くの研究では、SRBを培養する際に有機栄養塩を添加した上で金属鉄の腐食反応を観察していたが、有機栄養塩を排除し、微生物代謝に供給できる唯一の電子供与体に金属鉄を用いることで金属鉄の腐食反応に連動したエネルギー代謝を行うSRBの獲得に成功している。この論文ではその代謝様式から金属鉄から電子を受け取って硫酸塩還元反応に利用するモデルが提唱されているが、後にこの反応はEMIC(Electrical MIC)と呼び、以前の反応モデルをCMIC(Chemical MIC)と呼ぶことが提唱されており⁽⁴⁾、広く受け入れられている。

微生物腐食に関連する微生物や腐食に関連する反応の詳細を解説する前に、なぜ微生物腐食が問題なのかを述べる。微生物腐食という現象は、前述のように金属材料が物理化学的な条件から推測される腐食速度から逸脱して急速に進行する。また、使用環境において初期には問題がない場合でもある日突然発生することがあるためその制御が非常に難しい。微生物腐食を制御するためには、腐食が発生ないようにコントロールする防食と腐食を早期に捉えるための診断が必要である。しかしながら、特に診断技術が未熟であり、発生した腐食が微生物腐食であるかどうかを的確に判断することも難しい。これまでの多くの腐食現場において、使用環境の物理化学的な条件から考えられない腐食反応が生じた際に、その腐食は微生物腐食であったと結論付けられることが多かった。このような状況は、ヒトが罹患する微生物感染症に置き換えて考えると、発熱等の何かしらの症状が出て診断する際に、よく分からないけど多分微生物感染症と判断するようなものであり、そのような状況で微生物感染症がコントロールできないことは容易に想像がつかだろう。著者はこのような微生物腐食の現状を踏まえて、微生物腐食という現象は金属

* 国立研究開発法人海洋研究開発機構；主任研究員(〒237-0061 横須賀市夏島町 2-15)
Microbiology-based Metallographic Degradation; Satoshi Wakai (Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology (JAMSTEC), Yokosuka)
Keywords: *microbiologically influenced corrosion, extracellular electron transfer, microorganisms, electrochemically active microorganisms*
2024年4月24日受理[doi:10.2320/materia.63.633]

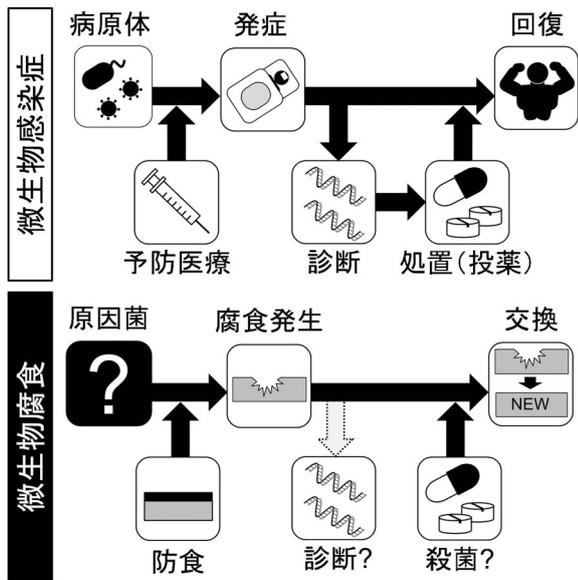


図1 微生物感染症と微生物腐食の比較による問題の抽出。

材料が罹患する微生物感染症であり、早急に診断技術の開発を進めなければならないと以前から言及している(図1)⁽⁶⁾。

3. 腐食性微生物

微生物腐食の原因微生物が網羅的に特定できていない状態が現状であるが、近年、様々な腐食性微生物の報告があり、少しずつ全体像が見えてきている。特に、先述のCMICとEMICの概念は非常に重要であり、筆者はこの考え方を大事にしている。微生物腐食診断には必ずしも全ての原因微生物を特定する必要はなく、腐食反応メカニズムに基づいた生体機能での分類が必要であるだろう。ここでは、CMICとEMICの反応についてそれぞれ紹介する。

(1) CMICを引き起こす微生物代謝

CMICは、微生物の代謝反応により生じた物質により腐食が進行することから間接的な腐食と考えると比較的容易に理解し易い。

最も有名で腐食環境から度々検出される微生物としてSRBが存在する。SRBは、硫酸塩還元反応を駆動する電子供与体が存在すれば、その代謝反応において金属腐食性の硫化水素を生じる。SRBは系統分類的な名称ではなく、硫酸塩還元反応をエネルギー代謝に利用する微生物の総称であるため、様々な種のSRBが存在し、それらの微生物が利用する電子供与体も有機物(有機酸など)から無機物(水素)まで様々である。SRBは多くの嫌気的な環境には普遍的に存在するだけでなく、好気的な環境においても潜在的に存在しており、好気環境の中に部分的に嫌気環境が形成された場合にその挙動が活発化することも多い。

同じく嫌気的な環境において存在し得る微生物として硝酸塩還元細菌(NRB)が存在する。硝酸還元能を持つ微生物は

数多く存在するが、NRBの中でも不完全硝酸還元、すなわち、亜硝酸を蓄積するNRBの腐食性が高いようである。日本国内の石油タンクの底に溜まっている水から分離された*Prolixibacter denitrificans*というNRBは、金属鉄(Fe^0)を酸化する能力はないが、二価鉄イオン(Fe^{2+})を酸化して硝酸イオンを亜硝酸に還元可能である⁽⁶⁾。この微生物の特徴として、金属鉄が存在しない場合、硝酸還元反応は亜硝酸を生じる反応までで止まるが、金属鉄が存在する場合は、亜硝酸がさらに還元されたアンモニアが蓄積する⁽⁷⁾。すなわち、金属鉄の酸化を担うのは亜硝酸であり、微生物の代謝が腐食反応に影響しているが、エネルギー代謝に共役していない。

これらの他にも、周辺環境のpH低下を引き起こす硫酸酸化細菌や腐食性の分子状ヨウ素を生産するヨウ素酸化細菌⁽⁸⁾など様々な微生物代謝が金属腐食に影響することが報告されている。いずれの微生物が関与にしているにしても、CMIC様式で腐食反応が生じる場合は、腐食性物質を生産するための代謝反応を駆動する電子供与体の供給量が重要である。例えば、水溶性ガス田のかん水のようなヨウ化物イオン濃度が高濃度の環境(海水の約2000倍)ではヨウ素酸化細菌による腐食が駆動するかもしれないが、通常環境で本菌が腐食反応に寄与することはほとんどないと考えられる。すなわち、腐食性物質を生み出す微生物の能力と環境のポテンシャルが揃わなければ深刻な腐食反応は進行しないと考えられる。

(2) EMICを引き起こす微生物代謝

EMICは、金属腐食のアノード反応とカソード反応において、カソード反応を微生物が直接的に担うことから直接的な腐食と考えると比較的容易に理解し易い。

混乱を招くかもしれないが、あるタイプのSRBはCMICだけでなくEMICを引き起こす。CMICは代謝産物が腐食に影響するが、EMICでは微生物のエネルギー代謝の出発とカップリングしている。EMIC反応を起こすためには、細胞外電子伝達(Extracellular electron transfer: EET)反応を担うことのできる生体分子を持っている必要がある。一般的な微生物のエネルギー代謝は基本的に細胞内で生じており、細胞の外側にある物質がエネルギー源になるためには細胞内に取り込まれる必要がある。しかしながら、金属鉄は固体であるため微生物細胞内に取り込むことができない。そのため、微生物細胞表面で金属鉄を反応し、アノード溶解と共役して消費されなければならない電子が生体分子に渡されて、生体分子間の電子伝達によって細胞の内側での反応で消費される。したがって、EMICを引き起こすSRBには、一部のSRBだけが持っている細胞外電子伝達に必要な生体分子⁽⁹⁾と全てのSRBが持っている硫酸塩還元反応を担う生体分子の両方が必要となる。1934年に発表されたSRBの反応モデルでは、硫酸塩還元反応がカソード反応とカップリングしているように見えるが、水素発生の反応を挟んでおり、この点がCMICとEMICの大きな分岐点となっている(図2)。水素発生を挟むことで、アノード反応とカップリングするカソード反応はあくまでも水素発生反応であり、この場合、

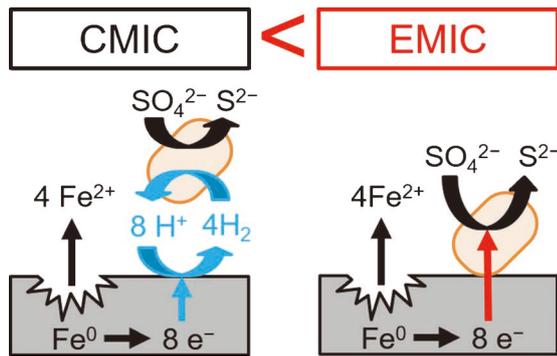
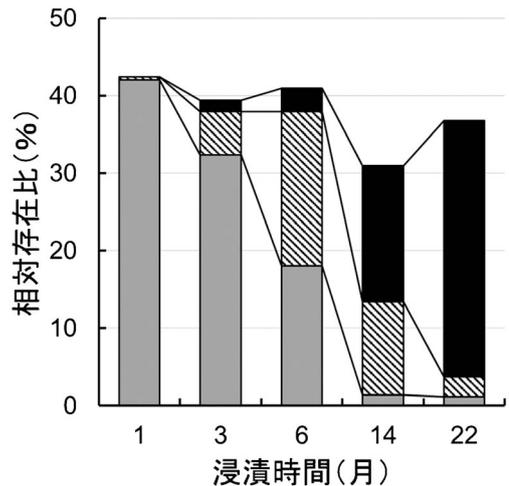


図2 SRBによる腐食で見えるCMICとEMICの違い。(オンラインカラー)



■ 鉄酸化細菌 □ 鉄還元細菌 ■ 硫酸塩還元細菌
図3 腐食進行に伴う腐食生成物中の主要微生物の遷移。

SRBは発生した水素を消費しているだけとなり、水素発生速度以上の腐食速度には至らない。これは、2004年のDinhらの発表に加えて、Moriらも確認している⁽¹⁰⁾。

また、DinhらとMoriらの両グループにおいて、無生物的水素発生速度よりかなり速い速度で金属鉄の電子を消費して腐食を誘導するメタン菌が分離されており、鉄腐食性メタン生成菌に関する詳しい研究が、その後UchiyamaらとTsurumaruらによって報告されている⁽¹¹⁾⁽¹²⁾。筆者は、これまでに様々な環境試料を用いて微生物腐食試験を実施しているが、腐食速度は大きく二つのパターンに分かれる。一つは、無生物的な腐食の2~5倍程度で、もう一方は、10~数十倍になる。鉄腐食性メタン生成菌の腐食速度は後者に相当し⁽¹³⁾、おそらくこのタイプの腐食速度を示すものが、EMICの反応ではないかと考えている。

4. 実環境での腐食は複合微生物系で生じる

前項で分離培養微生物の腐食能について言及したが、実環境では単独の微生物が存在することはほとんどなく、基本的には複雑微生物系として存在する。複雑微生物系の中では、競合関係や促進関係などが生じて、その現象の理解はかなり複雑である。筆者らは、微生物腐食の発生が疑われている環境に様々な金属試験片を長期間浸漬し、その腐食挙動と微生物群集構造を明らかにすることで、腐食進展中の腐食生成物中の微生物群集構造の変化を捉えること⁽¹⁴⁾や耐食性を持つはずのステンレス鋼が腐食した際の特異的な微生物群集構造⁽¹⁵⁾を明らかにしている。

(1) 炭素鋼等の非耐食性材料の腐食⁽¹⁴⁾

河川水由来の工業用水を使用しているプラントにおいて、炭素鋼、鋳鉄、ステンレス鋼などの各種金属材料において異常な形態を示す腐食が発生しており、微生物腐食の可能性が危惧されていた。この環境に炭素鋼や鋳鉄を浸漬し、1~22カ月間で腐食生成物を回収して微生物群集構造を解析した結果、工業用水中の微生物とは明らかに異なる微生物群集構造が形成されており、時間と共にその微生物群集構造は変化し

ていた。酸素の存在する環境であるため初期の腐食は酸素を酸化剤としたケミカルな腐食反応と考えられるが、浸漬一カ月目の時点で腐食生成物中の検出遺伝子の4割が硝酸還元性鉄酸化細菌で占められており、その割合は時間と共に減少した。一方で、硝酸還元性鉄酸化細菌の減少と並行して鉄還元細菌の割合が一時的に増え、6カ月目以降は鉄還元細菌の割合も減少して、最終的にはSRBが約4割を占める微生物群集構造に変化した(図3)。実環境で腐食した試料の微生物群集構造の解析に関する論文は多数存在するが、その多くは腐食が顕在化した後の一点の調査に留まることが多く、SRBが多く検出されるケースや鉄酸化細菌が多く検出されるケースなど、ケースバイケースの微生物群集構造が報告されており、なぜそのような結果になっているのか解釈が難しかったが、筆者らの研究結果に当てはめると解析した腐食ステージの違いを見ていた可能性が考えられる。実環境では、様々な微生物が共存しており、腐食に伴い金属材料の再表面である腐食生成物内の環境が変化するため、その場を好む主要な微生物種が変化していると考えられる。この知見は、腐食生成物内の微生物群集構造を解析することで現状の腐食ステージを評価することにも使えるかもしれない。

(2) 健全ステンレス鋼表層と腐食ステンレス鋼の比較⁽¹⁵⁾

ステンレス鋼には様々な種類が存在し、汎用ステンレスでオーステナイト系ステンレス鋼であるSUS304やSUS316は、同環境での浸漬試験において腐食を生じなかったが、マルテンサイト系ステンレス鋼のSUS403では局部腐食が発生した。最も腐食孔の進展速度が速かったものは浸漬3カ月目で引き揚げた試験片であり、その腐食孔深さは2mmを超えており、孔食腐食速度として8mm/yを超える非常に深刻な腐食度に達していた。耐食性のあるステンレス鋼は、炭素鋼などに比べると薄い肉厚で設計されることが多く、この異常に速い腐食速度は、実機において数カ月単位でその機能

を損失するものであり、淡水環境の物理化学的要因では説明できず、微生物の影響が強く示唆される。

腐食したステンレス鋼の微生物群集構造を解析した結果、硫黄酸化細菌の高い相対存在比が確認され、特に異常な腐食速度が見られた3カ月目の試料では、電気化学活性細菌の顕著な濃縮が観察された(図4(a))。硫黄酸化細菌は、還元型硫黄化合物の酸化能力を有する微生物の総称であるが、中でも不完全硫黄酸化により元素状硫黄(S⁰)を形成する微生物の近縁種が特異的に検出された。元素状硫黄はそれ自身が強い腐食性を示すこと⁽¹⁶⁾が分かっており、本菌の形成した元素状硫黄顆粒がステンレス鋼の不働体被膜破壊に影響した可能性が考えられる。これに加えて、筆者が最も注目しているのが、3カ月目に特に検出された電気化学活性細菌である。腐食反応は、必ず金属元素がイオン化するアノード反応と電子が消費されるカソード反応のカップリングが必要である。ここで検出された電気化学活性細菌は、電気培養槽においてカソードに集積することが知られている微生物種であり⁽¹⁷⁾、本菌がマルテンサイト系ステンレス鋼の腐食反応におけるカソード反応を担っていた可能性が高い(図4(b))。

健全なステンレス鋼においても別途実施した電位測定において電位の上昇(電位貴化)が確認されており、金属表面に形

成された微生物の活動が電位貴化に影響したと考えられる。健全ステンレス鋼表面に形成されたバイオフィルムを回収して微生物群集構造を解析した結果、工業用水とは明らかに異なる微生物群集構造になっており、浸漬槽の底に溜まっている堆積物中の微生物と似た微生物群集構造になっていた。しかしながら、ステンレス鋼表面上のバイオフィルムでは、堆積物中では見られない傾向として、亜硝酸酸化細菌が浸漬時間と共に増加し、最終的に全体の1/4程度を占めるほど増加していた。ダム湖水を用いた以前の研究において、電位貴化を示す鋼材表面において同様の亜硝酸酸化細菌が検出されており、電位貴化反応と亜硝酸酸化細菌の関係に興味を持たれている⁽¹⁸⁾。

5. 微生物腐食現象の応用展開

前項で述べたように微生物腐食現象は、耐食性のあるステンレス鋼においても生じる。ステンレス鋼の微生物腐食において以前から特徴的な腐食形態として組織選択的溶解によるスケルトン様の残留構造が確認されている。この知見と微生物電気化学反応を組み合わせて考えると、微生物を用いてステンレス廃材から有用金属元素の選択的溶解反応を導ける可能性がある。日本は地下資源に乏しく、その多くを海外に依存しており、国内に存在する廃材等を有効に活用する金属資源循環システムを構築することは、金属資源獲得戦略として重要である。現在、ステンレス鋼は非常に高効率でリサイクルが進められているが、廃材をステンレス鋼の原料として使うことはできても、ステンレス鋼廃材から有用金属元素を抽出してアップサイクルする技術は存在しない(図5(a))。その様な新しい金属資源循環技術の種として、微生物の持つ金属溶解(腐食)能力に期待したい。

また、EMICを引き起こす微生物については、近年注目されている二酸化炭素からのモノづくりに利用できる可能性が示されている。EMICを引き起こす微生物のほとんどが、炭素源として二酸化炭素を利用する能力(炭酸ガス固定能力)を有しており、太陽電池等の再生可能エネルギーに由

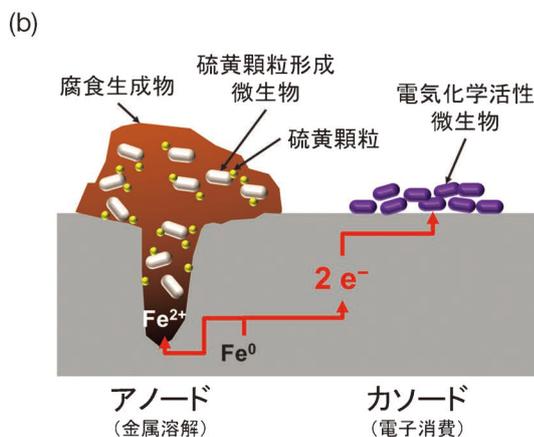
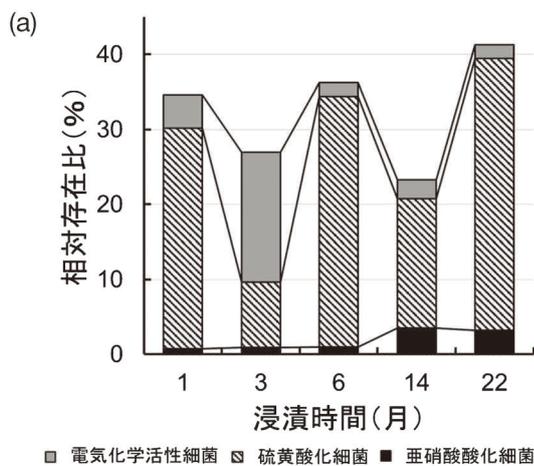


図4 ステンレス鋼腐食に見られる特異的な微生物群集(a)と推定腐食メカニズム(b)。(オンラインカラー)

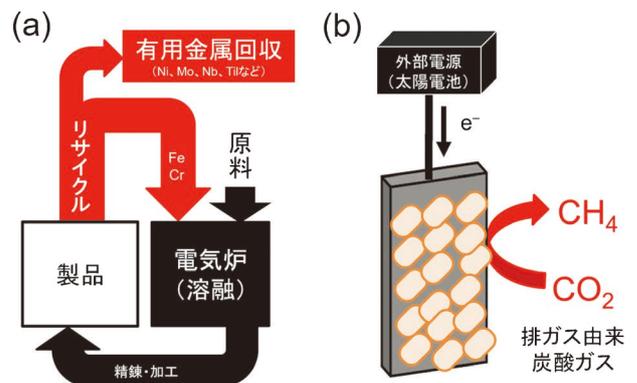


図5 有用金属回収を目的とした金属資源循環サイクル(a)と鉄腐食性微生物による微生物電気化学炭酸ガス固定(b)。(オンラインカラー)

電子誘電体 TmFe_2O_4 の圧電性および 強誘電性の実証

漆原大典¹⁾ 小西伸弥¹⁾* 浅香 透²⁾ 田中勝久²⁾**

1. はじめに

(1) 電子強誘電体

強誘電体は結晶構造中に電荷の空間的な偏り(分極)をもち、その分極を外部電場に応答して反転させることができる。このような極性構造に起因して強誘電体は圧電性や焦電性を併せもつため、センサー、キャパシター、アクチュエーター、メモリーなどの様々な工業製品に活用されている⁽¹⁾。応用面での研究だけではなく、強誘電性の発現機構など基礎的な内容も含めて幅広く研究されている。

最も一般的な強誘電性の発現機構はイオン変位に起因した機構であり⁽¹⁾、 BaTiO_3 などが代表的な物質である。ペロブスカイト型構造(ABO_3)をもつ BaTiO_3 は室温下で TiO_6 八面体中の Ti^{4+} イオンが c 軸方向と平行に変位することで電荷の偏りが生じ、極性構造となる。 B サイトを占有する d^0 イオンの二次ヤーン・テラー効果と A サイトを占有する孤立電子対をもったイオン(Pb や Bi イオン)の作用によりイオン変位を生じるため、イオン変位の機構をもつ強誘電体は特定のイオン種のみに限られている。近年ではDion-Jacobson相やRuddlesden-Popper相などの層状ペロブスカイト化合物においてハイブリッド間接型強誘電体と呼ばれる新たな機構をもつ強誘電体が発見された⁽²⁾⁻⁽⁸⁾。 A サイトと B サイトのイオン半径比や価数が起源となって金属-酸素八面体の回転や傾斜が生じることで強誘電性を発現する。複数の非極性な八面体の回転が結合することで極性構造を示す物質群であり、 $\text{Ca}_3\text{Ti}_2\text{O}_7$ 、 $\text{Sr}_3\text{Zr}_2\text{O}_7$ などの新規強誘電体が報告されている⁽⁹⁾⁻⁽¹²⁾。この機構を用いることで B サイトに d^0 イオン以外の遷移金属イオンを用いることが可能になる。イオン種の

制約がなくなるため、磁性イオンを B サイトに適用することも可能になり、強磁性と強誘電性を兼ね備えた新規マルチフェロイック物質の合成指針となりえる。

上記の二つの機構はどちらも陽イオンもしくは陰イオンの変位に基づいた極性構造および分極反転であるのに対し、全く異なる発現機構の強誘電体として電荷秩序に起因した強誘電体が報告されている⁽¹³⁾。電荷が秩序配列することで電子分極を生じる機構であり、イオン変位を伴う必要がないことが特徴である。そのため、外場に対する高速応答性など従来の強誘電体とは異なる特徴が期待できる。これらの物質群は電荷分布が誘電性を支配すると考えられることから電子強誘電体と呼ばれている。 Fe イオンの電荷分布を用いた電子強誘電体の候補物質として RFe_2O_4 ($\text{R}=\text{Ho-Lu, Y, In}$)が報告されている⁽¹⁴⁾。2005年に LuFe_2O_4 の強誘電性に関する報告⁽¹⁵⁾がなされて以来、精力的に研究が実施されている。

(2) RFe_2O_4 の特徴

RFe_2O_4 は混合原子価化合物であり、 Fe イオンの平均価数は2.5価となる。すなわち、2価と3価の Fe イオンが同数存在した化合物である。図1に RFe_2O_4 の結晶構造を示す。基本構造を示す高温相の空間群は三方晶 $R\bar{3}m$ であり、稜共有した FeO_5 三方両錐の二重層と RO_6 八面体層が c 軸方向に交互に積層した構造を示す。 Fe イオンの配位環境に着目すると、2層の Fe イオンの三角格子が近接した構造とみなすことができる。電荷秩序相において同数の Fe^{3+} と Fe^{2+} が三角格子を占有し、図1のように一方の層には過剰な Fe^{3+} が存在し、もう一方の層には過剰な Fe^{2+} が存在する電荷秩序モデルが提案されている⁽¹⁵⁾。このような Fe イオンの配置に起因して2層の三角格子間に誘電分極が生じ、極性構造

* 名古屋工業大学大学院工学研究科; 1)助教 2)准教授(〒466-8555 名古屋市昭和区御器所町)

** 京都大学大学院工学研究科; 1)研修員 2)教授

Experimental Evidence of Piezoelectricity and Ferroelectricity in Electronic Dielectrics TmFe_2O_4 ; Daisuke Urushihara*, Shinya Konishi**, Toru Asaka* and Katsuhisa Tanaka** (*Division of Advanced Ceramics, Nagoya Institute of Technology, Nagoya. **Department of Material Chemistry, Kyoto University, Kyoto)

Keywords: *electronic ferroelectrics, piezoelectricity, rare-earth iron oxide, charge ordering, phase transition*

2024年3月25日受理[doi:10.2320/materia.63.638]

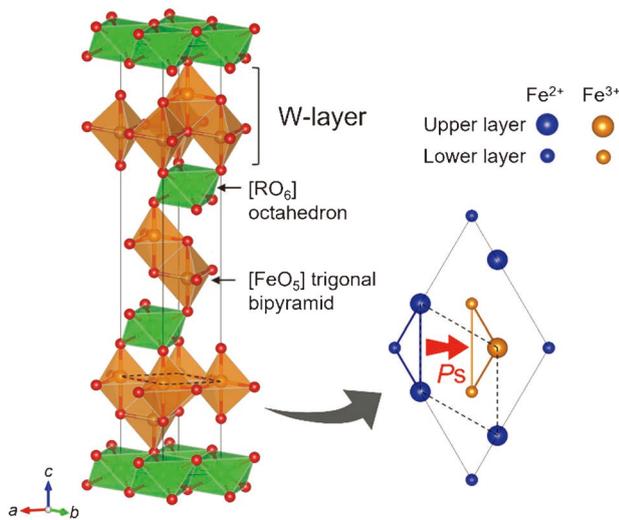


図1 $R\text{Fe}_2\text{O}_4$ の結晶構造モデル。 Fe^{2+} と Fe^{3+} の電荷秩序パターン。結晶構造モデル中の黒点線部分と対応する Fe イオンの規則配列に応じて自発分極 (P_s) が生じる。(オンラインカラー)

となる。

Ikeda らは LuFe_2O_4 の単結晶試料を用いた焦電気測定を行い、外部電場を反転させることで焦電流の方向が反転することを明らかにした。更に共鳴 X 線散乱から Fe^{2+} および Fe^{3+} の秩序配列を観測したことから、 LuFe_2O_4 が Fe イオンの電荷秩序を起因とした電子強誘電体であると結論付けた⁽¹⁵⁾。一方で、Groot らは単結晶を用いた X 線回折実験により LuFe_2O_4 の基底状態は反強誘電体(反極性物質)であることを報告した⁽¹⁶⁾。超構造反射を用いた構造解析から Fe^{3+} および Fe^{2+} の電荷秩序は存在するが、局所誘電分極が全体で打ち消しあうように反平行の配置(反極性構造)で安定化するため、本質的に強誘電性を示さないと主張している。また、Yang らは単結晶の LuFe_2O_4 に対してプローブ顕微鏡を用いてドメイン観察を行い、試料表面の電荷を検出することができる静電気力顕微鏡(EFM)を用いた観察では表面電荷の異なるドメイン構造を観察することができた一方で、圧電性に起因した試料表面の変位を検出する圧電応答顕微鏡(PFM)ではドメイン構造を観察できないことを報告した⁽¹⁷⁾。EFM および PFM による観察結果から LuFe_2O_4 は電荷秩序を起源とした強誘電性を示すが、格子の変位を伴う圧電性は示さないと結論付けた。

LuFe_2O_4 に対する様々な実験結果や議論に対して、マクロな強誘電性を実証する電場—誘電分極ヒステリシスループの取得が盛んに試みられている。しかし、 $R\text{Fe}_2\text{O}_4$ において明確に分極反転を示した電場—誘電分極ヒステリシスループは室温で得られていない^{(18)–(22)}。この原因は $R\text{Fe}_2\text{O}_4$ が比較的高い電子伝導性を示し、誘電分極測定中のリーク電流を避けることができないためである。

(3) 研究の目的

ここまで述べてきたように $R\text{Fe}_2\text{O}_4$ が極性構造をもつ

か、更には強誘電性を示すかは明らかになっておらず、電子強誘電体の実現しているか否かについては明確な結論が得られていない。本研究では $R\text{Fe}_2\text{O}_4$ の強誘電性を明らかにするために、希土類サイトを Tm とした TmFe_2O_4 の単結晶を研究対象とした。 LuFe_2O_4 や YbFe_2O_4 に比べて、単結晶の合成が困難であることから TmFe_2O_4 に関する結晶構造や誘電特性に関する報告例は少なく^{(23)–(24)}、十分に評価がなされていない。結晶学的な特徴として Tm は Lu に比べてイオン半径が大きいため、 RO_6 八面体の配位環境に対して不安定な構造となることが予想される。このような不安定な構造に対して詳細な評価を行うことで電子強誘電体 $R\text{Fe}_2\text{O}_4$ に関する新たな知見が得られると期待される。

本研究では、 TmFe_2O_4 の誘電特性の評価および構造解析から電子強誘電性を実証することに成功した。スイッチング分光圧電応答顕微鏡(SS-PFM)と走査非線形誘電率顕微鏡(SNDM)を活用することで、 TmFe_2O_4 が室温において強誘電性と圧電性を示すことが明らかとなった。また、ダブルレーザー干渉変位計および LCR メーターを用いることで圧電定数および静電容量の電場依存性を評価し、電荷秩序が強誘電性と密接に関連していることを見いだした。さらに、透過型電子顕微鏡法および単結晶 X 線回折法による詳細な構造解析により、 TmFe_2O_4 は室温において極性構造をもつことを明らかにした。この極性構造については第一原理計算を用いてその安定性を評価した。本稿では上記のような実験および計算結果を得ることで、 $R\text{Fe}_2\text{O}_4$ の強誘電性に関する論争を部分的に解決することができたので、その詳細について紹介する⁽²⁵⁾。

2. TmFe_2O_4 の物性評価

(1) 強誘電性

$R\text{Fe}_2\text{O}_4$ のマクロな物性評価を困難にしている要因として、試料の絶縁性が挙げられる。これまで、 $R\text{Fe}_2\text{O}_4$ の強誘電性を実証するために従来の電氣的な測定方法を用いて電場と誘電分極の関係からヒステリシスループを得る試みがなされてきたが、混合原子価化合物である本系では、特に電場が強くなると電流が流れたため従来法では誘電分極の評価が困難になる。そこで、これまでの電気測定とは異なる手法としてプローブ顕微鏡である SS-PFM および SNDM を用いて評価を行った。SS-PFM は電場の印加と無印加を繰り返しながら測定することで各測定点におけるヒステリシスループを取得し、圧電性と強誘電性を評価する手法である。共振周波数でプローブを振動させるため、微弱な圧電応答や分極反転に対しても感度良く測定することが可能である。

SS-PFM 測定に用いる試料はフローティングゾーン(FZ)法により作製した TmFe_2O_4 の単結晶とした⁽²⁶⁾。熱重量測定により算出した酸素量から見積もられた組成は $\text{TmFe}_2\text{O}_{3.93}$ であり、わずかな酸素欠損が存在するが、簡便のため以降も TmFe_2O_4 と記載する。得られた単結晶はラウエカメラにより方位を決定し、図1の結晶構造の C_h 面(図中黒点

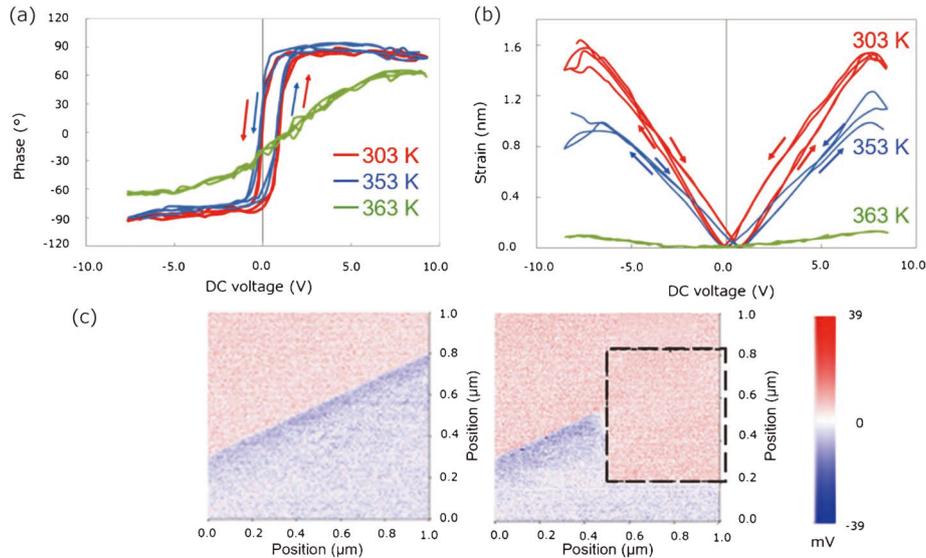


図2 TmFe₂O₄の強誘電性と圧電性. (a) 誘電分極の位相と (b) カンチレバーの c_h 軸方向への変位の直流電圧依存性. (c) 走査非線形誘電率顕微鏡により得られた強誘電ドメインのマッピング. 赤と青の領域で反平行の自発分極を示す⁽²⁵⁾. (オンラインカラー)

線と平行な面)が出るように試料を加工した. 後述の構造解析で示すように室温相は単斜晶系であり, 高温相は三方晶系である. 以降の説明では単斜晶系と三方晶系の2種類の結晶学的な軸を用い, 添え字の m は単斜晶系に対応し, h は三方晶系に対応する. 実空間の C_h 面および C_m 面は互に対応する面である.

図2(a), (b)にSS-PFMで観測した誘電分極の位相およびカンチレバーの変位を示す. 厚さ約1 mmに加工した単結晶試料の C_h 面の一方に銀ペーストを塗布して金属板を単結晶試料に固定し, 測定を行った. 電圧はTmFe₂O₄の c_h 軸に平行な方向に印加した. カンチレバーの変位は c_h 軸方向へのひずみに対応している. 分極の位相およびカンチレバーの変位はどちらも303 Kにおいて明確なヒステリシスループを示した. 分極の位相は2 V近傍で飽和し, -2 Vの際には180°反転した位相が観察された. 飽和分極の位相の変化は分極方向が外部電場によって反転可能であることを示しており, TmFe₂O₄が強誘電体であることを示唆する. 更に, この結晶の c_h 軸に対して垂直な方向に電圧を印加した測定も行い, 平行方向と同様に分極の位相反転およびヒステリシスを観測している. c_h 軸に平行な方向のみならず, c_h 軸に垂直な方向にも自発分極成分が生じていることを示しており, 結晶系が m の点群をもつ単斜晶系であることに対応した結果である.

図2(c)に示すように c_h 軸に平行な方向の分極反転をSNDMからも検証した. SNDMでは誘電率の電場依存性から非線形誘電率を検出し, 非線形誘電率の奇数項の符号が分極方向と対応することをを用いて, 強誘電ドメインを観察することができる. この手法はSS-PFMとは分極方向の検出方法が異なっているため, 複数の方法で強誘電性の有無を検証したことになる. 図2(c)の左図はTmFe₂O₄の初期状態の分

極状態を示している. 青色と赤色の領域は非線形誘電率の奇数項の符号が反転している領域である. すなわち, c_h 軸に関して反平行な自発分極をもつドメイン構造を表している. 右図は点線で囲まれた領域に10 Vの直流電圧を印加した後にSNDMを用いて同じ領域のドメイン構造を観察した結果である. 電圧を印加した領域が青色から赤色に変化していることから, 外部電圧にตอบสนองして分極反転が生じていることが分かる. TmFe₂O₄は極性構造をもつだけでなく, 外場による分極反転が可能であることがSNDMからも確認できた. この結果はSS-PFMにおいてTmFe₂O₄が303 Kにおいて電場により位相反転を示したことと対応した結果である. SS-PFMおよびSNDMの二つの評価手法により, TmFe₂O₄が強誘電体であることが実証された.

図2(a)の分極の位相の電場(電圧)依存性に見られるヒステリシスループは測定温度の上昇に伴って不鮮明となり, 363 Kではヒステリシスが消滅した. TmFe₂O₄は363 K近傍で強誘電体相から常誘電体相へと相転移したと考えられ, この温度は単結晶X線回折で電荷秩序に起因した反射が消失する温度と一致している. また, 図2(b)に示したカンチレバーの変位の電圧依存性では, 室温から353 Kまでは圧電体に典型的なバタフライ曲線が観測されたが, 昇温により363 Kになると放物線状の曲線へと変化した. この放物線的な挙動は常誘電相でみられる電歪効果が生じていることを表している. このような温度依存性は強誘電体相(圧電体相)から常誘電相への相転移を支持する結果である. 以上のようにSS-PFMおよびSNDMの結果から, TmFe₂O₄が室温で強誘電性および圧電性を示し, 363 K近傍で強誘電-常誘電相転移を示すことが明らかになった.

(2) 圧電定数の測定

TmFe_2O_4 が圧電性を示すことが明らかとなったため、物性値である圧電定数を求めることが必要となる。圧電定数テンソルの成分の一つである d_{33} を測定することで、 TmFe_2O_4 の圧電体としての位置づけが明確になる。SS-PFM は測定感度が高く、強誘電性および圧電性の検出に有効な評価手法であるが、定量的な圧電定数の評価には不向きである。SS-PFM のセットアップでは試料の下部電極とカンチレバーの先端のサイズが大きく異なるため、カンチレバー先端の接触している箇所均一な平行電場を印加することが困難ある。そのため、正確な試料内電場を求めることができず、圧電定数を算出することができない。 TmFe_2O_4 の圧電定数を定量的に評価するために電場印加時の変位をダブルレーザー干渉変位計を用いて計測した。ダブルレーザー干渉変位計は入射光と反射光の干渉を用いることで高精度に変位を計測することができ、精度良く圧電定数 d_{33} を算出することができる。

測定試料は SS-PFM で使用した単結晶と同じ FZ 法で得た試料から切り出し準備した。 C_h 面の両面に金電極を蒸着して -4.5 から $+4.5$ V/mm の電場の範囲において圧電定数を計測した。図 3 に圧電定数 d_{33} の直流電場依存性を示す。この値は TmFe_2O_4 単結晶の c_h 方向に平行に直流電圧を印加した際の c_h 方向のひずみに対応する。同様の測定を α 石英に対しても行い、 α 石英の d_{33} を参照値として TmFe_2O_4 の d_{33} を算出した。 d_{33} は -2.5 から $+2.5$ V/mm の範囲では電場に依存せず、ほぼ一定の値を示したが、 2.5 V/mm を超えると急激に減少し、圧電性を示さなくなった。一定になった際の d_{33} は 64 pm/V であり、 BaTiO_3 (190 pm/V)⁽²⁷⁾ や $\text{Pb}(\text{Zr}, \text{Ti})\text{O}_3$ (223 pm/V)⁽²⁸⁾ に比べると小さい値であるが、 PbTiO_3 (51 pm/V)⁽²⁹⁾ や $(\text{Ba}_{0.5}\text{Na}_{0.5})\text{TiO}_3$ (66 pm/V)⁽³⁰⁾ に匹敵する値である。

(3) 電場誘起相転移

図 3 に示すように TmFe_2O_4 に 2.5 V/mm より大きな電場が印加されると急激な圧電定数の低下が観察される。これは電場により Fe^{2+} と Fe^{3+} の電荷秩序が融解し、電子状態が絶縁体(半導体)相から伝導体相へと変化したことを示唆して

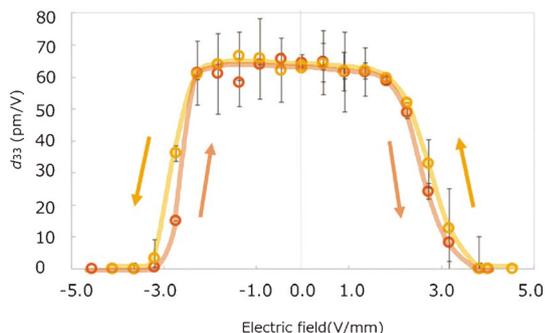


図 3 圧電定数の電場依存性⁽²⁵⁾。(オンラインカラー)

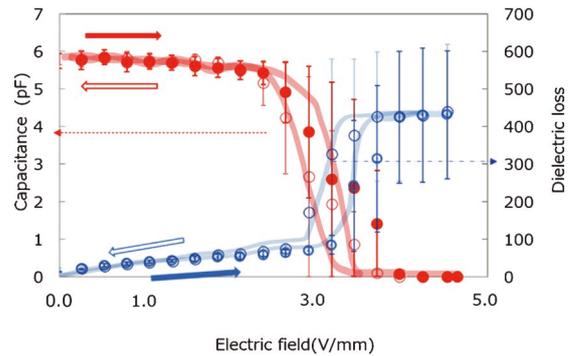


図 4 静電容量および誘電損失の電場依存性⁽²⁵⁾。(オンラインカラー)

いる。電場が低下すると結晶は再び強誘電体相に戻る。すなわち、この変化は可逆的である。このような外部電場に起因した絶縁体(半導体)から伝導体への可逆的な変化は、絶縁破壊による強誘電性の消失ではなく、電荷の秩序状態の無秩序化に対応していると考えられる。 LuFe_2O_4 や YbFe_2O_4 の単結晶、多結晶および薄膜試料でも同様の変化が観察されており、電場誘起の電荷秩序-無秩序転移は RFe_2O_4 の本質的な性質であると言える⁽³¹⁾⁻⁽³⁶⁾。

図 4 に 303 K における静電容量および誘電損失の直流電圧依存性を示す。ダブルレーザー干渉変位計を備え付けた LCR メーターを用いて、直流および交流電場を c_h 軸に平行に印加しながら測定を行った。静電容量は直流電場が 2.5 V/mm を超えると急激に減少し、それに対応して誘電損失が急激に上昇した。この変化も可逆的であり、圧電定数の電場依存性と同様の挙動である。静電容量の変化からも電場誘起での強誘電体相から伝導体相への変化が強く示唆される。

(4) TmFe_2O_4 が示す誘電特性

SS-PFM および SNDM を用いることにより TmFe_2O_4 の強誘電性および圧電性を実証した。更に、電場誘起での可逆的な絶縁体(半導体)相から伝導体相への相転移を観測した。絶縁体(半導体)相における圧電定数、静電容量は強誘電性を強く示唆することから、 TmFe_2O_4 の強誘電性は電荷秩序と強く相関していると考えられる。これらの測定により TmFe_2O_4 は温度および電場に起因して安定相が変化し、室温においては強誘電体であることが明らかとなった。 RFe_2O_4 における圧電性の存在は電荷秩序に伴う格子定数の変化を示唆しており、電子の移動に伴う構造変化が生じていると考えられる。それらの相関については次節の TmFe_2O_4 の結晶構造解析において詳細に考察する。

3. TmFe_2O_4 の結晶構造解析

(1) TmFe_2O_4 の結晶構造

結晶学的な評価には X 線回折法および透過型電子顕微鏡法を用いた。X 線回折と電子回折は散乱体と線源の相互作用が異なるため、異なる情報が得られる。X 線回折は時間

的空間的な平均構造の定量分析に適しており、透過型電子顕微鏡は局所構造の直接観察や動力的回折効果を用いた対称性の評価に適している。構造評価には単結晶 X 線回折法、制限視野電子回折 (SAED) 法、収束電子線回折 (CBED) 法、ナノビーム電子回折 (NBED) 法、暗視野法、高角度環状暗視野走査透過型電子顕微鏡 (HAADF-STEM) 法を用いることで詳細な結晶構造を明らかにした。

室温の結晶構造は反転対称性のない C_m の空間群で、これは単結晶 X 線回折データを用いて決定した。構造解析に用いる単位胞を決定するために単結晶 X 線回折に加え NBED を使用した。X 線回折で得られたパターンは散漫散乱を示すため (図 5(a))、超構造の長距離秩序が発達していないことが予想される。そのため、NBED 法により微小領域の回折パターンを得ることで単位胞を決定した。NBED は電子線を数ナノメートルまで絞ることで微小領域における回折パターンを得る手法である。得られた NBED パターン (図 5(c)) は単斜晶系の格子の b_m 軸方向に 3 倍の超構造を示した。NBED パターン上の超構造反射は変調波数ベクトル $q = (1/3)b_m^*$ を示し、 c_m^* 軸に 120° 回転した際のシミュレーションパターンとよく一致している (図 5(d))。図 5(b) に単結晶 X 線回折における $02l$ の散漫散乱の強度分布を示す。 b_m 方向に 3 倍の大きさとなる超構造を設けた場合の指数付けにおいて、 $02l/3$ の位置に $02l/6$ よりも大きな強度が観察された。この結果は RFe_2O_4 の安定相を反強誘電体相と主張する論文で観測されている変調波数ベクトル $q = (1/3)b_m^* + (1/2)c_m^*$ の超構造反射と異なり⁽¹³⁾、本系については $q = (1/3)b_m^*$ が妥当であることを示している。以上の結果から、 $TmFe_2O_4$ の超構造の格子定数を $a = 6.0269(2) \text{ \AA}$, $b = 10.4388(3) \text{ \AA}$, $c = 8.5898(3) \text{ \AA}$, $\beta = 103.534(2)^\circ$ と決定した。図 5(e)-(h) に $[001]$ 晶帯軸 CBED パターンを示す。CBED パターンは動力的回折効果を含むため、点群や反転対称性

の有無などの詳細な結晶学的な情報を得ることができる。bright-field pattern および whole pattern は鏡映面 (m) の対称性を示し、 \pm dark-field pattern は対称性をもたず、互いに鏡映の関係を示した。これらの回折パターンを解析することにより、回折群は m となり、 $[001]$ 晶帯軸入射において点群が m であることを一義的に決定できた⁽³⁷⁾⁽³⁸⁾。点群 m では分極ベクトルは $(x, 0, z)$ の成分をもち、SS-PFM において c_h 軸に平行と垂直の両方の方位で分極成分を示したと矛盾しない。これらの点群および消滅則から空間群が単斜晶 C_m であることを一義的に決定した。

前述の格子定数に基づいて積分強度を抽出し、回転双晶を仮定して結晶構造の精密化を行った。この双晶構造は高温相である三方晶 $R\bar{3}m$ から単斜晶 C_m に構造相転移する際に 3 回回転対称性と反転対称性が破れることで生じる。高温相では 3 倍の超構造反射が消えた $R\bar{3}m$ の構造が現れることを高温 X 線回折から確認している。得られた室温での構造モデルを図 6(a) に示す。 $TmFe_2O_4$ の独立な二つの Tm サイトに原子分割モデルを採用した。採用した原子分割モデルは、時間的空間的に Tm サイトが c_h 軸に沿った大きな原子変位と複数の安定サイトをもつことを示している。図 6(b) に $[100]$ 晶帯軸 HAADF-STEM 像を示す。最も明るい輝点が Tm 原子に対応し、わずかに明るい輝点が Fe 原子に対応する。O 原子は軽元素であり、HAADF-STEM 像には現れていな

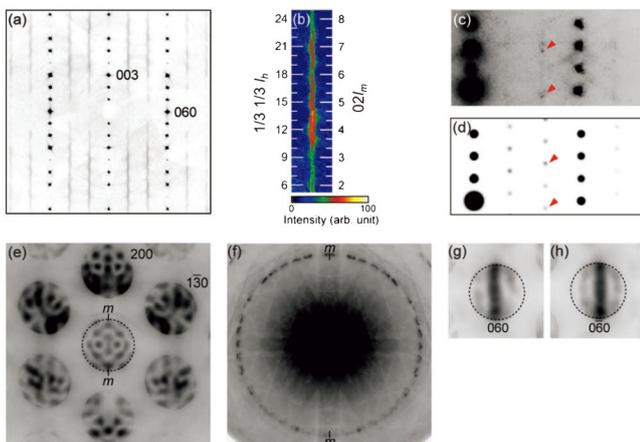


図 5 (a) 単結晶 X 線回折パターンと (b) 強度プロファイル。 (c) ナノビーム電子回折と (d) シミュレーションパターン。収束電子線回折の (e) bright-field pattern, (f) whole pattern, (g), (h) \pm dark-field pattern⁽²⁵⁾。(オンラインカラー)

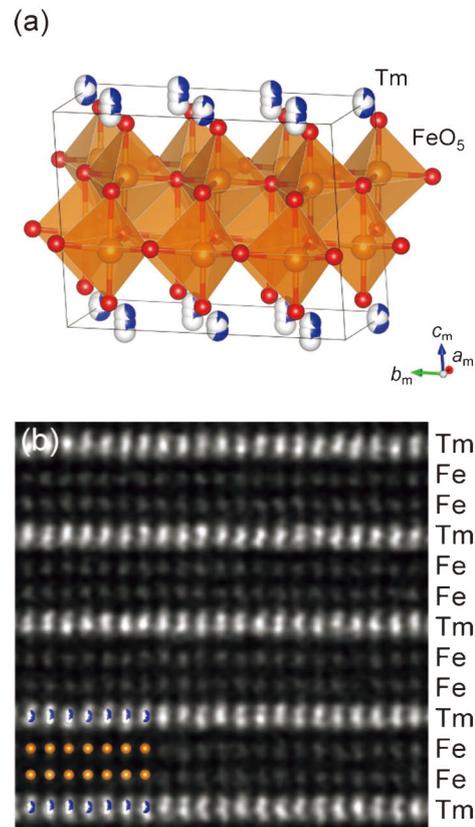


図 6 (a) $TmFe_2O_4$ の強誘電体相の結晶構造モデル。 (b) $[100]$ 晶帯軸高角度環状暗視野走査透過型電子顕微鏡像⁽²⁵⁾。(オンラインカラー)

い。結晶構造解析と同様に Fe の二重層が Tm 原子の層に挟まれていることを直接観察した。Tm 原子に対応した明るい輝点は c_h 軸方向に伸びた楕円形を示した。一方、Fe 原子は丸い形状のコントラストを示していることから、Tm 原子の c_h 軸方向へのずれは測定条件に起因したものではなく、本質的な変位と考えられる。この Tm 原子の c_h 軸に沿った平均位置からの構造的な乱れは単結晶 X 線回折により得られた原子分割モデルに対応するものである。HAADF-STEM による実空間観察は精密化した構造モデルの特徴と矛盾しない結果であり、 TmFe_2O_4 が特徴的な Tm 原子の変位を示すことが明らかとなった。本構造解析は散漫散乱から超構造の回折強度を抽出しているため、十分な解析とは言えないが、それでも強誘電性や圧電性の結果と矛盾のない構造モデルが得られている。

(2) 微細組織観察

単結晶 X 線回折の散漫散乱の起源について組織観察から検証した。一般的に散漫散乱は長距離秩序が発達していないことに起因している。そのため、暗視野法を用いてドメイン構造の観察を行った。 TmFe_2O_4 は常誘電体相である $R\bar{3}m$ から強誘電体相の Cm に構造相転移するため、3 重回転対称性が失われることに起因した 120° の双晶構造が現れることが推定される。図 7(a)–(c) に $[100]$ 晶帯軸 SAED パターンと暗視野像を示す。図 7(b) は 020 の超構造反射を用いて結像しており、超構造に起因した領域が白色のコントラストとして示されている。白色のコントラストを示す領域は約 3~5 nm 程度であり、長距離秩序が発達していないことが分か

る。一方、基本反射である 002 を用いた暗視野像を図 7(c) に示す。組織は全体的に明るいコントラストを示しているが、組織全体に格子状の回折コントラストが現れていることが分かる。このような組織はツイード構造と呼ばれ、ナノドメインが生成する際に母構造との格子の不整合に起因して生じる⁽³⁹⁾。

図 7(d)–(g) に 120° の双晶構造の概略図と双晶を仮定した際の各方位のシミュレーションパターンを示す。重ね合わせたシミュレーションパターン(図 7(h))の基本反射は双晶パターンを仮定してもすべて重なっているが、超構造反射は c_h^* 方向に沿って重ならず存在している。シミュレーションパターンは長距離秩序を仮定しているため、短距離秩序でのブロードな反射を想定することで c_h^* 軸に沿った散漫散乱(図 7(i))を説明することができる。したがって、暗視野像で観察した組織は 120° 双晶に起因したドメインがナノサイズで存在していることを示している。透過型電子顕微鏡法による組織観察および X 線結晶構造解析の結果から TmFe_2O_4 の示す散漫散乱の起源を明らかにすることができた。

(3) 電荷秩序モデル

TmFe_2O_4 の電荷秩序モデルを確認するために、4 つの独立した Fe サイトの価数をボンドバレンスサム(BVS)により評価した。BVS は $BVS = \sum_j \exp(l_0 - l_{ij}/0.37)$ で表される。 l_0 はボンドバレンスパラメーターと呼ばれる陽イオン i と陰イオン j の結合距離に関する経験的な定数であり、 l_{ij} は構造解析により得られた結合距離である。配位多面体のすべてのボンドバレンスを足し合わせることで、イオン i の価数を見積もることができる⁽⁴⁰⁾。 FeO_5 の三方両錐は一般的な多面体ではないため、得られた BVS は全体的に 2 価に偏った値を示しているが、各サイトでわずかな電荷の差を示している。明確な 2 価と 3 価ではなく $2.5 + \delta$ および $2.5 - \delta$ で表すことができる電荷秩序状態と考えられる。高い価数を示す二つの Fe サイトと低い価数を示す二つの Fe サイトの電荷秩序モデルを図 8(a) に示す。このモデルは Ikeda らにより報告されている LuFe_2O_4 の電荷秩序モデル(図 1)⁽¹⁵⁾ と定性的に一致している。

図 8(b) に Tm イオンの位置を占有率の加重平均を用いて示したモデルを示す。原子分割モデルで表現されていた Tm サイトを 1 つのサイトとして示している。Tm は二つの独立したサイトを持ち、黒と赤色の矢印で示したように上下への変位を示している。ここで緑色とオレンジ色の Tm サイトの Wyckoff 位置は $2a$ と $4b$ である。この Tm イオンの規則的なイオン変位は $\text{Fe}^{2.5-\delta}$ および $\text{Fe}^{2.5+\delta}$ の配列に起因すると考えられる。すなわち、Fe イオンの電荷秩序との静電相互作用により Tm イオンが協奏的に変位を生じていることを示唆している。ここで得られた構造モデルおよび電荷秩序モデルは Mundy らが第一原理計算によって導出した電荷秩序をもつ極性構造モデルとよく一致している⁽⁴¹⁾。我々も密度汎関数に基づいた第一原理計算から TmFe_2O_4 において空間群 Cm が最も低いエネルギーをとることを確認した。第

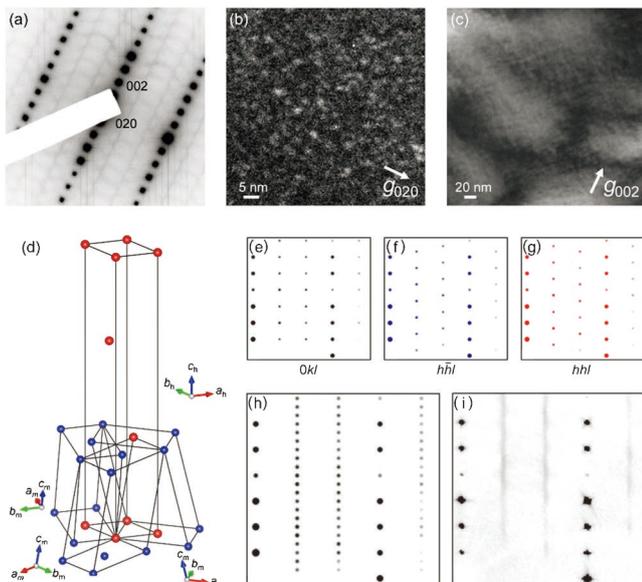


図 7 (a) $[100]$ 晶帯軸制限視野電子回折パターン。(b) 020 と (c) 002 反射を用いて結像した暗視野像。(d) 三方晶系と単斜晶系の関係性を示した 120° ドメイン構造の概略図。(e)–(g) 各指数のシミュレーションパターンと (h) 重ね合わせたパターン。(i) X 線回折で得られた $0kl$ の逆格子面⁽²⁵⁾。(オンラインカラー)

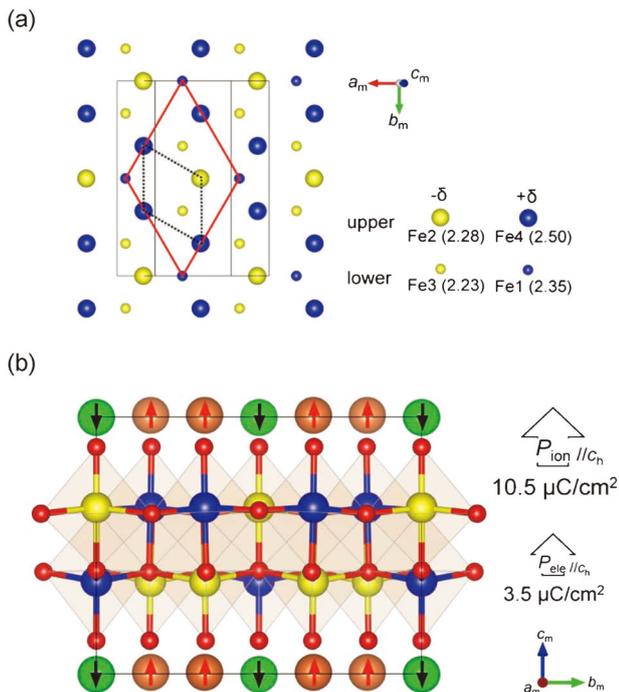


図8 (a) TmFe_2O_4 の Fe イオンの電荷秩序モデル. (b) 加重平均で示した構造モデル. 緑とオレンジ色で示した Tm イオンが矢印の方向に上下に変位している⁽²⁵⁾. (オンラインカラー)

一原理計算によると、この極性構造に非常に近いエネルギーで反強誘電体相の構造(空間群 $C2/m$)が安定化することから、酸素欠陥などの化学組成の不定比性に起因して容易に反強誘電体相が現れることも予想された。

更にイオン変位と電荷秩序に起因する c_h 軸に平行な自発分極を点電荷モデルにより計算した。イオン変位に起因した自発分極は対称中心をもつ構造からの変位に起因した分極である。図8(b)で示したように、 c_h 軸に沿った Tm イオンの変位が反転対称性を破り、極性構造の起源となっている。したがって、 $R\text{Fe}_2\text{O}_4$ 中の希土類イオンは自発分極に対して重要な役割を担っている。電荷秩序に起因した自発分極は Fe イオンの電荷分布によって形成される電気双極子から計算することができる。イオン変位と電荷秩序に起因した分極はそれぞれ $10.5 \mu\text{C}/\text{cm}^2$ ならびに $3.5 \mu\text{C}/\text{cm}^2$ と見積もることができた。この見積りは点電荷モデルを用いているため厳密な値ではないが、自発分極の主要な寄与が Tm イオンの変位と Fe イオンの電荷秩序であることを示唆している。

(4) TmFe_2O_4 の結晶学的特徴

X線回折法および透過型電子顕微鏡法を用いることで TmFe_2O_4 の結晶構造および微細組織を明らかにした。 b_m 軸に沿って3倍の超構造を示し、空間群は単斜晶 Cm である。この空間群は SS-PFM により得られた分極方向と一致している。構造解析の結果から Fe イオンはわずかな電荷不均化を示し、その際の電荷秩序に起因して Tm イオンの変位が誘起されていると考えられる。したがって、 TmFe_2O_4

の強誘電性は Fe の電荷分布と静電相互作用により誘起された Tm イオンの変位の二つの寄与により現れることが明らかとなった。

4. おわりに

電子強誘電体の候補物質である TmFe_2O_4 の強誘電性および圧電性を実験的に明らかにした。電場誘起の強誘電体相から伝導体相への相転移から Fe イオンの電荷秩序と強誘電性の相関が強く示唆された。 TmFe_2O_4 において Fe イオンの電荷秩序および Tm イオンの変位が強誘電性および圧電性を生じる起源であり、イオン変位を伴う電子強誘電体であることを明らかにした。

本稿では詳細な説明を割愛したが、 $R\text{Fe}_2\text{O}_4$ は三角格子をもち、なおかつ Fe イオンが電荷秩序を示すことでフラストレーションが生じるため、スピングラスなどの特徴的な磁性を示す⁽⁴²⁾。また、誘電率の温度依存性からも散漫な誘電率の変化など興味深い挙動が得られている。スピングラスやリラクサーのような散漫な挙動は微小領域の存在が寄与することが知られており、本系のスピングラス挙動にも微細組織観察により得られたナノドメインが重要な役割を果たしていると考えている。 $R\text{Fe}_2\text{O}_4$ の示す微細組織と電荷秩序の相関が明らかとなれば、結晶構造のみではなく、組織制御からの機能探索も期待できる。

長年の課題であった $R\text{Fe}_2\text{O}_4$ の強誘電性の有無を明らかにし、その発現機構について一定の結論が得られた。しかし、希土類イオンのサイズの影響や化学組成の不定比性など $R\text{Fe}_2\text{O}_4$ には検討すべき課題が残されている。第一原理計算による構造安定性から示されているように、わずかな条件の違いで結晶構造の安定相や誘電特性が変化することも予想される。本研究にて得られた知見をもとに電子強誘電体の研究が発展するとともに、実用的な材料としての応用や機能的な特徴が明らかになることを期待している。

本研究は JSPS 科研費 JP17H01320, JP19KK0124, JP21K03431, JP21K04641, JP21H0469, およびナノテクプラットフォームの支援を受けたものです。本研究の遂行にあたり、東京工業大学東正樹先生、九州大学北條元先生、赤松寛文先生、名古屋工業大学福田功一郎先生、オックスフォード・インストゥメンツ株式会社石井孝治博士、京都大学卒業生の直田哲明氏、岡田真理氏、名古屋工業大学卒業生の早川達也氏には共同研究者として様々な視点から有益なご助言を頂きました。ご協力、ご支援を頂いた皆様に心より感謝申し上げます。

文 献

- (1) M. E. Lines and A. M. Glass: Principles and applications of ferroelectrics and related materials, Oxford university press, (1977), 1-15, 559-607.

第18回本会派遣JIM / TMS Young Leader International Scholar 出張報告

名古屋大学大学院工学研究科 物質プロセス工学専攻；助教
鈴木飛鳥

この度、第18回JIM/TMS Young Leader International Scholar に選定いただき、米国フロリダ州のオーランドで開催されたTMS2024 Annual Meeting & Exhibition への参加および受賞記念講演とアメリカ国内の大学訪問の機会をいただいた。本稿ではその出張報告を行う。

この度のアメリカ国内の訪問先としては、シカゴのノースウェスタン大学を選択した。ホストを務めていただいたDavid C. Dunand 教授(図1)は、筆者が現在研究を行っている金属積層造形やセル構造体に関して多数の先駆的な成果を上げておられる第一人者であり、訪問先として申し分無い。TMS2024の会期の前週に大学を訪問することになったことから、シカゴには2月28日に到着した。到着して最初感じたことは、とにかく寒いということであった。最低気温が -5°C 以下であり、名古屋の感覚で着用していた防寒装備は歯が立たなかった。そして、翌29日にノースウェスタン大学を訪問した。最初に、Center for Hierarchical Materials Design(CHiMaD)⁽¹⁾主催のセミナーにおいて、筆者の研究内容を紹介する機会を設けてくださった。発表の内容は、積層造形した金属材料に関して組織制御や複雑形状化による高機能化を目指した研究を行う中で、筆者が活用している有限要素法や機械学習などについてであった。セミナーでの発表後、Dunand 教授やCHiMaDのCo-DirectorであるPeter Voorhees 教授といった著名な研究者や若手研究者たちと30分ずつ議論を行う機会をいただいた。これらの議論を午前中から夕方まで、昼食やCHiMaDの施設見学を挟みながら行ったため、非常に濃密な時間を過ごすことができた。昼食では学生と過ごす機会をいただき、日本とアメリカの研究室体制やキャリアパスおよび研究内容などについて会話したが、彼らが何事に対しても“interesting!”と楽しそうに反応していたことが印象的であった。CHiMaDの施設見学では、金属積層造形装置、ガスアトマイズ装置、アーク溶解など金属材料製造関連の装置を見せていただいた。夜にはDunand 教授、Ian McCue 助教、Ping Guo 助教らとシーフードレストランでディナーをご一緒するなど、至れり尽くせりの饗応

に感銘を受けた。

3月2日に、シカゴからオーランドへ移動した。3月初旬でありながらオーランドは最高気温が 25°C を超える暑い気候であり、今度は防寒装備が全て不要になった。3月3日にはTMSのRegistrationを済ませ、ここで筆者のホストを務めていただいたミシガン大学のYue Fan 准教授と昼食をご一緒した。3月4日から、各セッションがスタートした。筆者の発表は、この日の午前にAdditive Manufacturing Modeling, Simulation, and Machine Learning: ML/AIのセッションに組まれていた。発表は、金属積層造形のプロセスパラメータ・複雑形状設計における機械学習の活用に関する内容であった。発表には、Fan 准教授、本会の谷山事務局長、川崎准教授(オレゴン州立大学)などが来られていた。また、韓国のKIM Young Leaders International ScholarのJahyun Koo 准教授とも、互いの発表を聴講し合って、親交を深めた(図2)。3月4日の夜にはTMS招待者のみによる少人数制のパーティーが催され、筆者は2023年のTMS PresidentであるBrad L. Boyce氏をはじめとする方々とお話した。Boyce氏は非常に気さくな方で、筆者と肩を組んでの写真撮影にも快く応じてくださった(図3)。3月6日の夜に開催された表彰式では、Boyce氏から直接、賞状を授与された(図4)。

筆者の研究分野である金属積層造形に関して、TMSでは非常に盛んであり、トピックスが異なる5つ以上のセッションがほぼ常時同時進行して、プロセス、組織、特性に関する研究を網羅していた。よって、筆者一人では全てをカバーしきれなかったが、スマートフォンのアプリで興味のある発表を検索して聴講予定を立てることで、有意義に情報収集できた。

以上の通り、筆者の研究分野の最先端を体感できただけでなく、国外での研究ネットワーク構築の助けとなり、非常に有意義な派遣となった。最後に、このような貴重な機会を頂いたことに御礼を申し上げる。また、TMSおよび本会事務局のサポートに心より感謝する。さらに、ノースウェスタン大学においてホスト、アレンジをくださったDunand 教授、E. Begum Gulsoy 博士、Iustitia Ko 氏、および議論をしていただいた全ての研究者・学生に深く感謝申し上げる。

文 献

- (1) <https://chimad.northwestern.edu>[2024年7月30日閲覧]
(2024年4月11日受理)[doi:10.2320/materia.63.646]
(連絡先: ☎464-8603 名古屋市千種区不老町1)

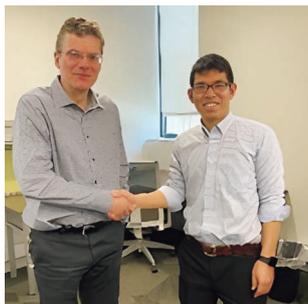


図1 Dunand 教授と。



図2 Koo 准教授と。



図3 Boyce 氏と。



図4 表彰式。

“あのこと”のまてりあ

『雑感—10年後の技術予測—』

談話室 中島耕一 著 日本金属学会会報 第20巻(1981)第1号 61頁

案内人 東北大学 竹田 修

本記事が掲載されたのは、1981年(昭和56年)1月のことである。日本金属学会会報「まてりあ」が創刊されて21年目、本会が発足して44年目のことである。世の中を見ると、同年、科学界においては京都大学の福井謙一教授がノーベル化学賞を受賞している。著者は主に企業において研究開発をされてきたと思われるが、産と学の両者に跨がる立場で、技術と科学の発展について考察をしている。

著者は考察の対象として、「10年後の技術予測」というテーマを設定している。おそらく、「10年」というのは、時間単位としてちょうどよい物差しの一つであって、「将来の技術予測」と読み替えても大きな間違いではないと思われる。

著者は、戦後、技術・科学の分野が細分化され、狭い専門領域で研究開発がなされてきたこと(著者は縦割り型の技術開発と記している)を問題視している。異分野に跨がる、つまり、境界領域にある問題に対しては、特定の専門家の集団だけでは解決できないことを指摘している。その上で、

Technology transfer(技術転移)という言葉を紹介し、ある分野で発展した技術を別の分野に活かす、横方向への技術転移を勧めている。そして、これ以降10年ほどは技術転移が重要な要素になるであろうと予測している。

著者はトライボロジーの専門家とみられ、トライボロジーが境界領域の問題を対象とすること、また、その問題解決のアプローチが技術転移の良い例であると指摘し、日本人の思考法に適合するであろうと推察している。ただし、技術転移に基づく研究の評価は、評価者によって大きく異なり、普遍的な評価の難しさを指摘している。その上で、研究発表において酷評を受けた発表者にエールを送っている。悲観しなくてもよい、専門外の連中にも簡単に分かってしまうほど君の研究は底の浅いものではない、と。

さて、この記事を読み、案内人は身につまされる思いがした。10年前には、世の中の状況が、現在のようになっていると、全く予想ができなかったためである。地球温暖化の

表1 記事掲載年(1981年)以後、10年おきの各トピックの状況。

年	まてりあ	地球温暖化対策 ^{a)}	人工知能(AI) ^{b)}	チタン(Sponge)生産 ^{c)}
1981	20巻	1988年 気候変動に関する政府間パネル(IPCC)設立	1980~1987年 第2期ブーム 1987~1993年 第2期停滞期	1981年 世界生産 9.1万t 日本生産 2.5万t 中国生産 0.2万t
1991	30巻	1992年 環境と開発に関する国際連合会議(リオ・サミット) 1997年 COP3において「気候変動に関する国際連合枠組条約の京都議定書」採択	コンピューターの性能向上に伴い、個別のアプリ(チェス等)発展	1991年 世界生産 8.2万t 日本生産 2.2万t 中国生産 0.2万t
2001	40巻	2001年 COP6 再開会合でボン合意 2005年 京都議定書発効	2006年~ 第3期ブーム 2006年 ディープラーニング開発 2010年 ビッグデータ提唱	2001年 世界生産 5.5万t 日本生産 2.0万t 中国生産 0.2万t
2011	50巻	2015年 国連サミット SDGs 採択 2015年 COP21においてパリ協定採択 2020年 京都議定書失効	2012年 大規模ディープラーニングの進展	2011年 世界生産 18.6万t 日本生産 5.6万t 中国生産 6.0万t
2021	60巻	2021年 COP26でグラスゴー気候合意	2022年 ChatGPT 公開	2021年 世界生産 21.0万t 日本生産 3.5万t 中国生産 12.0万t

a) 全国地球温暖化防止活動推進センター HP<<https://www.jccca.org/global-warming/trend-japan/history>>[2023年11月30日閲覧]

b) 人工知能の歴史, Wikipedia<<https://ja.wikipedia.org/wiki/%E4%BA%BA%E5%B7%A5%E7%9F%A5%E8%83%BD%E3%81%AE%E6%AD%B4%E5%8F%B2>>[2023年11月30日閲覧]

c) 西山 孝, 前田正史, 鉱物資源データブック(2012); Mineral commodity summaries 2002, 2012, 2022.

問題は10年前にも認識はされていたが、現在のようにカーボンニュートラルへ向かった世界の大きな潮流が生まれようとは、予想していなかった。また、人工知能(AI)の能力がある種の人間の仕事を奪うまでに高まろうとは、予想していなかった。

せっかくの機会なので、自らの反省も兼ねて、本記事が掲載されてからの各トピックの展開を表1にまとめた。同表には、案内人の専門領域であるチタン製錬の発展の推移(スポンジチタンの生産量)も合わせて記した。地球温暖化対策に関しては、1988年に気候変動に関する政府間パネル(IPCC)が設立されたことが大きな転機であったと考えられる。その後、1997年の気候変動枠組条約第3回締約国会議(COP3)での「気候変動に関する国際連合枠組条約の京都議定書(通称、京都議定書)」の採択は具体的な対策として大きな前進であったであろうし、2015年のCOP21でのパリ協定の採択によってほぼ全世界に対して強い対策が課せられたと理解している。地球温暖化はありとあらゆる分野を巻き込まなければ解決できない問題であり、究極的に異分野に跨った問題である。本会の会員諸氏においても、研究・技術開発に全力で取り組んでおられる方が多いと推察する。ぜひ、「まてりあ」誌面上でもその開発の成果をご報告頂き、本会の智慧を集集、共有して頂きたいと願う。カーボンニュートラルに対する本会の寄与は大きいと信ずる。

研究開発に対するAIの活用は、本会諸氏の得意分野であろう。既に多くの研究者が、金属を主体とする材料の研究に適したAIおよび周辺技術の開発から利活用に至るまで、広範に導入していると推察する。特性の予測から、プロセスの改善、分析・解析の高度化など、AIが活躍する場面は多岐に渡ると思われる。人間の機能を拡張するだけでなく、これまでできなかったことを可能にする飛躍的展開を期待したい。

さて、案内人の専門領域であるチタン製錬の分野に目を移す。電子機器などの発展のスピードから考えると、牛歩の如くである。初期のムーアの法則では、集積回路当たりの部品数が毎年2倍になると予測したそうだが、スポンジチタンの世界生産量は40年かけてやっと2倍強になった。ただし、近年の中国での生産量の増加は顕著である。2001年に0.2万tであったものが2021年には12万tになった。単純平均で1年当たりおよそ23%の成長率に相当する。今後も同じような成長が続くとは考えにくい、この分野としては飛躍的な発展であった。日本での生産量は必ずしも増加していないが、世界情勢が複雑化する中、高品質なチタンの供給者としての責務は増大している。製造プロセスの革新による日本のチタン製錬の飛躍的発展が望まれる。

案内者の雑感ばかりとなってしまった。ご容赦願いたい。

(2023年12月22日受理)[doi:10.2320/materia.63.647]





談話室



雑感——10年後の 技術予測——

中島 耕一

(株式会社豊田中央研究所)

さまざまな問題に対する未来予測が著名な評論家、学者によって語られる。なるほどと感心しながらその著書を読む。SFもどきの小説?として楽しむ分には、大変結構なことと思うのだが…。10年後の技術予測、10年とまでいわずともその予測は、企業にとって極めて重大なことである。しかし本当にそれができるならば、我々の研究テーマ選びも悩むことはなにもない。

10年後の技術予測を取り上げる前に、一体10年前はどうだったろうか。10年前に現在を予測したとしたら、どんなことになるだろうか。必要にせまられ、私なりに調べたことがある。しかし驚くことに一言でいえば、なにも変わったことがないという結論でしかなかった。

従来、特に戦後における技術革新は、専門分野それぞれの領域内において遂行されてきた、と考えるのが妥当なようである。こうした縦割り型の技術開発が壁にぶち当たったり、はかばかしい進展が期待できなくなったことなどが、技術予測を盛んにさせたに違いない。

企業内において、技術上におけるある種の問題が発生する。その道の専門家と目される研究技術者らにとっても難問であり、なかなか解決につながらない。そんな時監督者は業を煮やし、専門家という頭のかたい連中を見捨て、もっと頭の柔い素人集団に検討させる。

問題解決とまでは行かずとも、結果として大変な進展を見る場合がある。専門家といわれる人達にとり、これほどプライドを傷つけられる事件はあるまい。しかしこの場合の立役者らは、果たして素人集団なのだろうか。

重要なことは、もたらされた問題がいわゆる境界領域的内容のものであり、単独分野の問題として取り扱われるべき性質のものでないことにある。一見素人集団と目されるほどに関連の薄い専門分野の人達の技術が、その問題解決の糸口を作ったと見るべきであろう。ここまで

くると、Technology Transfer(技術転移)という言葉が躍如として生き物のように感じられる。

Technology Transferという言葉が使われ始めたのは、最近のことである。ある分野に育ち、そしてそこに蓄積されてきた技術を別の分野に転移する。つまり技術転移は、これを受け入れる分野にとって技術開発の重大な原動力となり得る場合がある。

このような動きによる問題解決への発展は、極めて重要な意味を持つ。上述の縦割り型から横方向への技術転移こそ、今後10年における技術発展の素因をなすのではないだろうか。

トライボロジ(Tribology)と称し、境界領域的な問題を対象とする学問形態がある。これについては筆者も本誌に紹介したので説明は割愛する。トライボロジの研究指向、つまり現在技術の集大成とそれによる問題解決はまさに Technology Transfer のための有力な手段となるであろう。こうした研究指向は、どうやら日本人の思考過程によく合致しているのではないだろうか。筆者は、この一文を書きながら僧沢庵が説く千手観音の千手千眼を思い出さずにはおられなかった。

トライボロジの研究指向にもとづく研究への評価、これが実は評価される側にとり大変なことである。その評価は、評価者によってまちまちであり、非常に大きく割れる場合が多いからである。分野を異にするそれぞれの専門家にとって、トライボロジの研究指向は理解され難いことによるものであろうか。というよりは、それぞれの専門家が自己の分野の部分に限って評価を加えると、甚だ物足りないことのためにと考えるべきであろうか。縦割り型から横方向への技術転移が、思うほどに簡単でないのはこの辺の事情が微妙に関連しているようである。加えて、科学技術には放置しておけば細分化の道を独り歩きする特質のあることも、技術転移を困難とする原因に挙げられよう。

酷評をうけてしょんぼりする研究発表者に、私はいう。君悲観し賜うな。皆から等しく賞賛される研究よりは、まだまだだよ。将来性があるのだ。何故なら、専門外の連中にも簡単に分かってしまうほど君の研究は底の浅いものではないのだから。

まさに雑感というところである。

“最新機械工学シリーズ 5 金属材料学(第3版)”

高橋 昇 浅田千秋 湯川夏夫(共著)
森北出版株式会社 1989年

大同特殊鋼株式会社 八田 武士



■図1 本書表紙.

本書は、「機械工学シリーズ」という題目が示す通り、機械構成要素の一つである金属材料について、金属材料を構成部品として適切に使用・選定する視点で、基礎(組織・構造・状態図)から実用的な内容(強じん化方法など)までを系統立てて学ぶことができる教科書である。理論の部分は肝が押さえられた上で、平易な文章で分かりやすく解説されている。また、実学的な部分は実験や経験則に基づく豊富なデータが示されており、ハンドブック的な用途としても使用することができる。実と学がバランスよく構成されており、金属材料の研究者や技術者をめざす若い読者に向けた実践的な金属材料学の入門書の一つとして紹介したい。

本書と出会ったのは約20年前の入社当初の新入社員時代に、当時の上司に勧められた教科書としてであった。筆者は当時から現在に至るまで特殊鋼の研究開発業務に携わっているが、入社当初は特殊鋼の加工・熱処理プロセスの開発業務に携わっていた。特殊鋼は機械構造用鋼からステンレス鋼、耐熱合金など鋼種の幅が広く、加工・熱処理プロセスの開発対象は多岐にわたる。求められる特性(強度や加工性など)を得るためのプロセスの考え方は各種合金系によって異なるため、各種合金系の材料特性や強化機構の理解に四苦八苦していた頃に本書を手にとった。

本書は、森北出版株式会社が発行している「最新機械工学シリーズ」の第5巻として出版されており、知識の習得だけでなく金属材料をどのように使用するかが具体的にイメージしやすい内容となっている。本書は3編で構成されており、金属材料学の基礎、鉄鋼材料、非鉄金属材料について体系的に解説されている。第1編 基礎では、金属材料学の基礎となる組織や結晶構造、状態図、変形機構、強じん化、破壊に関する理論が豊富な図表と平易な文章で説明されている。第2編 鉄鋼材料では、鉄鋼材料の製造方法や代表的な状態図、熱処理が網羅的に解説され、また具体的な鉄鋼材料の性質や合金の分類や使用用途が章ごとに詳説される形がと

られている。取り上げられているのは、圧延鋼板から、機械構造用鋼、ばね用鋼、軸受鋼、工具鋼、ステンレス鋼、耐熱鋼、鋳鉄に至るまで150ページ以上にわたって豊富なデータが引用されながら幅広く解説されている。第3編 非鉄金属材料では、銅、ニッケル、チタン、アルミニウム、マグネシウムの各種合金や、低融点合金、高融点合金についてもそれぞれの特性や用途について解説されている。各種合金の実用的な熱処理方法、強じん化方法の具体的な条件や、強化機構の原理がくまなく網羅されており、現在でも本書を手にとって必要に応じて見返している。

近年、CASEやSDGs、グリーンエネルギー、AI・半導体といったキーワードに象徴されるように、社会・技術トレンドが大きく変わりつつあるなかでも、金属材料は構造部材・機能部材など社会基盤材料として、また先端技術を支える基盤材料として変わらず重要な位置づけを担っている。その重要な位置付けを勝ち取るために、新しい機能・特性を有する金属材料の研究・開発が日々続けられている。研究・開発を行う基盤は、金属材料学の基礎的な理論・原理と応用の考え方であると感している。

約20年前、筆者は本書を手に取り新人の金属材料技術者として駆け出した。現在も金属材料の可能性と奥深さを感じながら金属材料の開発に日々奮闘しているが、基盤となる知識・考え方は本書から得られた部分が大きく、筆者にとっての座右の書となった。本書は第1版初刷(1971年)から既に半世紀以上が経ち、残念ながら現在では購入が困難な状態であるが、本書に類する金属材料学の教科書は種々出版されている。これから金属・材料の研究者や技術者をめざす若い読者においても、本書のような座右の書に出会い研究者・技術者としての一歩を踏み出されることを願い、筆をおくこととした。

(2024年8月5日受理)[doi:10.2320/materia.63.650]

日本金属学会フロンティア研究助成は、教育・研究機関での金属及びその関連材料分野の学術研究及び技術研究の発展や若手研究者の育成や奨励を主な目的として2020年度に設立されました。第2回フロンティア研究助成受給テーマ10件の研究期間終了に伴い、その成果をまてりあで報告しております。63巻3号および4号でも報告しております。

「金属材料表面構造による細胞制御に基づく生体骨機能化材料の創製」成果報告書

1. 研究期間：2021年10月～2023年9月(2年間)
2. 研究の概要

金属材料は無機物でありながら、その構造制御により、生体組織と有機的に相互作用することで生物機能をもコントロール可能な高機能材料である。代表者らは、構造材料としての生体骨の機能化を支配するのは「骨配向性(アパタイトの結晶集合組織)」であることを示し、骨配向化誘導のためには金属材料表面制御による骨芽細胞配列化制御が必須であることを見出してきた。とりわけ、チタン合金表面のナノ構造制御により、従来の科学的常識を根底から覆し、細胞方向に垂直に配向化した骨基質を形成する(「直交性骨配向化現象」)ことを発見し、生体材料学のトップジャーナルであるBiomaterials誌に発表している。本研究では、チタンによる骨の積極的な配向化誘導を目指し、ナノオーダー～マイクロオーダーまで、その表面構造の微細制御による骨配向化機序の理解に基づき、健全な再生骨誘導を可能とする新たなチタン骨代替材料の創製を目的とする。代表者らが世界に先駆けて発見した「直交性」および「平行性」骨配向化機構を解明することができれば、部位や種類に応じて様々な配向方向・配向度を示す骨の配向性を自由自在にコントロール可能となり、既存の骨医療では解決が困難であった骨疾患治療・骨医療デバイス開発に飛躍的進展をもたらすと期待される。

3. 研究実施の概要

本研究では、材料工学と細胞生物学の融合的アプローチに基づき、金属材料が生体組織の高機能化をもたらす仕組みを理解することで、骨機能化を誘導する新しい骨代替材料の創製を目指した。具体的には、以下の項目について実施し、金属材料表面形状のスケールに応じて選択的に発動する「平行性」「直交性」配向化に着目し、骨配向化を決定する金属材料表面構造の制御と、そのメカニズム解明に取り組んだ。

(i) チタン合金表面形状制御：超短パルスレーザーによる自己組織的な微細周期構造導入を駆使することで、細胞スケール

の空間分解能をもつナノ～マイクロオーダーの一方方向性表面構造を制御した。具体的にはTi-6Al-4V合金表面にフェムト秒レーザーの波長依存的にナノメートルスケールの微細周期構造を形成した(図1)。

(ii) (i)の金属表面構造による細胞・基質配向化解明：細胞体や接着斑との相互作用に着目し、溝形状に応じた細胞接着形態・伸展制御の機序解明に取り組んだ。周期構造に対して骨芽細胞は溝方向へと伸展・優先配列化した(図2)。興味深いことに、特定のナノサイズ配向溝に沿った配列化細胞は、細胞伸展に直交方向にコラーゲン基質を形成した。こういった特異な「直交性骨配向化」現象は、マイクロメートルスケールの一方方向性溝の場合にみられる細胞方向への骨基質配向化とはまったく異なり、ナノオーダーの溝形状への特異的応答現象として見出された。直交配向化のみられた溝幅およそ500 nmは、ストレスファイバーやフィロポディアなどの細胞骨格関連オルガネラの大きさに対応し、細胞サイズに相当するマイクロメートルスケールの表面形状との間に、材料表面の形状サイズに依存した骨基質配向化の選択的制御の閾値が存在することが示唆された。実際に、直交配向化を形成する骨芽細胞では、ナノ配向溝に沿って成熟した接着斑が発達しており、平行・垂直の選択的骨配向化現象は、細胞-材料界面の相互作用に基づき遺伝子レベルから制御されることが予想された。

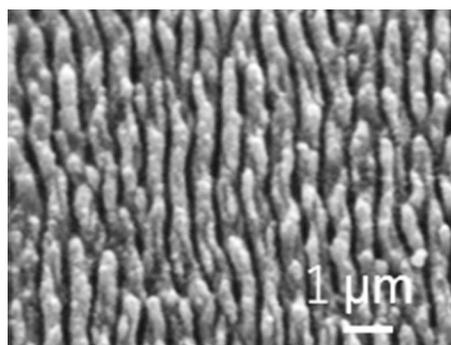


図1 超短パルスレーザーによるTi-6Al-4Vへの微細周期構造導入。

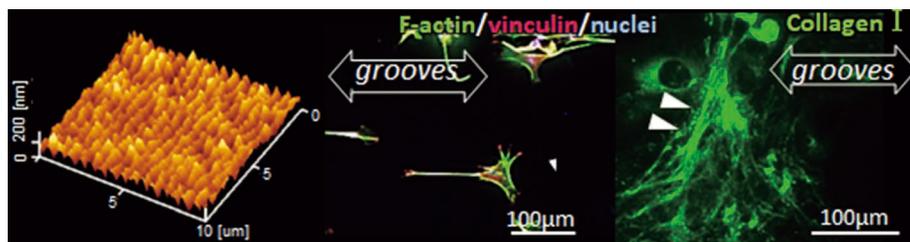


図2 ナノ配向溝構造上での直交性骨基質配向化。(オンラインカラー)

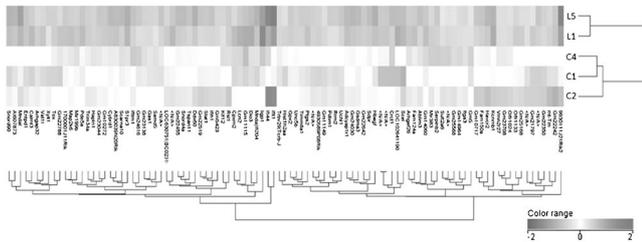


図3 ナノ配向導入による遺伝子発現変動。

(iii) 配向化を制御する細胞・遺伝子機序の同定：次世代シーケンシングを用いた網羅的な遺伝子発現解析により、チタン表面形状に対する細胞応答を遺伝子レベルから解明し、金属材料がもたらす遺伝子レベルでの生体反応解明に取り組んだ。細胞伸展に平行・垂直の骨基質配向化を決定する分子機序について、遺伝子スクリーニングにより材料⇄細胞間での分子授受を解析することで配向化機構の一端が明らかになった。配向性をもたない基板として rough 基板(表面粗さを保持)および鏡面基板、ナノ配向溝構造を有する nanogrooved 基板を作製し、材料表面での骨芽細胞の遺伝子発現について RNASeq 法を駆使することで、配向化により発現変動する遺伝子群を抽出した。これらは、インテグリンのクラスター化により接着斑構造・機能を制御し、接着斑成熟化を介して骨芽細胞—骨基質の直交配向化を制御する配向化機構が明らかになった(図3)。さらには材料を活用した遺伝子機序の人為的活性化に基づき、こうした骨配向化誘導のための材料工学的細胞制御方法論を見出し、骨配向化を積極的に促進し、初期から長期での固定を実現する骨バイオマテリアルの基本概念確立へとつながった。

今回の成果は、人工関節等の骨系医療デバイス表面にナノ配向溝構造を与えることで、人工関節周囲に形成する新生骨組織の微細構造までを健全化できる可能性を示しており、遺伝子レベルから骨配向性を自由にコントロールできる可能性を示している。配向化骨誘導により半永久的に機能発現可能な次世代の骨医療デバイス確立につながるものと大いに期待される。



4. 成果の発表

1. 松垣あいら, 松本峻, 中野貴由:「骨異方性誘導のための免疫応答評価とその機序解明」, 日本金属学会2022年春期講演(第170回)大会, オンライン, 2022年3月16日
2. 松垣あいら, 田中健嗣, Gokcekaya Ozkan, 中野貴由:「骨機能化誘導のためのチタン表面構造による幹細胞制御」, 日本金属学会2022年秋期講演(第171回)大会, 福岡工業大学, 2022年9月21日
3. 松垣あいら, 田中健嗣, Gokcekaya Ozkan, 中野貴由:「チタン表面構造による幹細胞分化制御と骨基質配向化」, 日本金属学会2023年春期講演(第172回)大会, 東京大学, 2023年3月10日
4. Aira Matsugaki, Takayoshi Nakano, Review-Metal Additive Manufacturing of Titanium Alloys for Control of Hard Tissue Compatibility, Materials Transactions, 64 [1], (2023), 25-30. DOI: <https://doi.org/10.2320/matertrans.MT-MLA2022012>, 2023年1月号掲載
5. 本研究終了後の計画等

材料工学に生物学的観点を取り入れた本研究ならではのアプローチにより、金属材料/生体界面での分子機序理解とその人為的制御を可能とした。本成果は、生体機能化金属材料学とも言える新たな学術的展開の可能性を拓くものであり、基礎的観点からは細胞制御メカニズム解明に基づいた生体用金属材料の高機能化、応用的側面からは骨再建のためのデバイス設計へと深化させたい。さらに金属積層造形法等の最先端技法を用いることで金属/生体界面の3次元制御をも可能になると見込まれる。金属材料学的方法論を駆使することで、こうした界面現象の生物学的理解と併せて生体用金属材料研究を展開する計画である。

6. 研究代表者：松垣あいら(大阪大学大学院工学研究科・准教授)
7. 研究協力者：中野貴由(大阪大学大学院工学研究科・教授)

本 会 記 事

会 告	会費の自動振替制度のご案内	653	
	シニア会員制度について	653	
	永年会員制度について	653	
	終身会員制度について	654	
	ユース会員制度について	654	
	2024年秋期講演大会参加申込みについて	654	
	ランチョンセミナー開催のお知らせ	656	
	学生キャリアサポート・企業展示&カタログ展示	656	
	付設展示会開催のお知らせ	656	
	第13回女性会員のつどいのご案内	657	
	令和6年秋期全国大学材料関係教室協議会講演会のご案内	657	
	2025年度金属学会シンポジウムのテーマ募集	658	
	2025年春期講演大会の外国人特別講演および招待講演募集	658	
	2025年度新規「産学協創研究会」の申請募集	659	
	第48回技術開発賞「新技術・新製品」記事募集	660	
	第75回金属組織写真賞作品募集	661	
	2025年度講演大会委員候補者推薦のお願い	662	
	日本金属学会オンライン教育講座 開催案内	666	
	オンデマンド配信：オンライン教育講座 開催案内	669	
	金属学会セミナー(特別講座)開催案内	670	
支部行事	672	次号予告	676
掲示板	673	新入会員	677
会誌・欧文誌9号目次	675	行事カレンダー	679

◎本会へのお問合せは下記URLをご利用下さい。

<https://jimm.jp/contact/>

- 投稿規程・出版案内・入会申込はホームページをご利用下さい。
- 支部行事、掲示板、研究集会等の情報はホームページにも掲載しております。

会 告 (ホームページもご参照下さい)

会費の自動振替制度のご案内

- 2025年度の会費自動振替のご案内を申し上げます。
ホームページからのお手続きを宜しくお願いいたします。
- ホームページ：入会・会員→会費支払方法
 - 2025年度会費自動振替申込締切 **2024年10月2日(水)**

問合せ・申込書送付先

〒980-8544 仙台市青葉区一番町1-14-32
(公社)日本金属学会 会員サービス係 宛
☎ 022-223-3685 ☎ FAX 022-223-6312
E-mail: member@jimm.jp

シニア会員制度について

65歳以上の正員の会費を半額とする「シニア会員」制度を設けています。
シニア会員には「まてりあ」の冊子は送付せず、電子ジャーナルの閲覧のみが可能ですが、冊子希望者は実費相当額の3,000円をお支払いいただければ冊子を購読することができます。シニア会員を希望される方は申し出が必要ですので、

2024年11月29日(金)までに、会員マイページで生年月日を登録していることを確認した上で、「シニア層会員種別変更」から申請をして下さい。

問合せ先 (公社)日本金属学会 会員サービス係

☎ 022-223-3685 E-mail: member@jimm.jp

永年会員制度について

本会では長年にわたり本会の発展に尽された会員の労に報いるため、永年会員制度を設けております。自己申告制となっておりますので、該当すると思われる方は、会員マイページで生年月日を登録していることを確認した上で、「シニア層会員種別変更」から申請して下さい。

申し出られた方について調査確認し、該当者については理事事に諮り、承認の上ご案内申し上げます。

永年会員制度 会員歴が継続して40年以上でかつ満71才以上の会員に対し「永年会員」の称号を贈る。
永年会員は正員会費を免除する。

受付締切 毎年9月30日

永年会員資格付与 毎年1月1日

問合せ先 (公社)日本金属学会 会員サービス係

☎ 022-223-3685 E-mail: member@jimm.jp

終身会員制度について

入会歴が40年に満たないために永年会員となっていた方だけには、満60歳以上満65歳以下の会員が70歳までの会費を前納いただくことで終身会員の称号を贈り、以降の会費を免除いたします。前納会費の額は70歳までの会費の総額に比べて割安となっておりますので、ぜひご利用下さい。

年齢(該当する年の1月1日)	前納会費	70歳までの通常会費
60歳	80,000円	110,000円
61歳	70,000円	100,000円
62歳	65,000円	90,000円
63歳	55,000円	80,000円
64歳	50,000円	70,000円
65歳	40,000円	60,000円

ご希望される方は、お手元に届いた会費の請求書は使用せず、**2024年11月29日(金)**までに、会員マイページで生年月日を登録していることを確認してから、「シニア層会員種別変更」から申請をして下さい。前納会費の請求書をお送りします。

問合せ (公社)日本金属学会 会員サービス係
☎ 022-223-3685 E-mail: member@jim.or.jp

ユース会員制度について

若い世代の皆さんに金属材料に関する研究や開発の世界に触れてもらい、金属材料の面白さを知ってもらうことを目的に、次世代を担う若い人たちを対象とした会費無料の「ユース会員」を設けています。会員の皆様のご子弟の方々にお知らせしていただき、ユース会員になっていただけるようにお勧めいただければ幸いです。

対象 中高生、高専専科1年生以下、大学3年生以下
※対象上限の学年になるまで自動継続されます。

入会金・会費 不要

※入会には保護者または教員の同意が必要です。

特典

- ユース会員証の発行
- 金属学会特製缶バッジの贈呈
- まてりあ電子ジャーナルの無料閲覧
- 金属学会刊行の電子書籍の無料閲覧
- 講演大会への無料参加(発表は有料)
- ユース会員向けイベントの無料参加
- 会員価格でのイベント参加や書籍購入

入会申込 ユース会員への入会は随時受け付けています。本会ホームページの「新規入会申込み」ページから申し込んで下さい。

2024年秋期(第175回)講演大会参加申込みについて

2024年秋期講演大会を、**9月18日(水)から20日(金)まで**、大阪大学豊中キャンパスで開催します。

高校生・高専学生ポスターセッションは、**9月18日(水)**に大阪大学豊中キャンパスで、**9月25日(水)**にオンラインで開催します。(選択された発表方法により開催日が変わります。)

参加申込みは、すべてインターネットでの申込みです。詳細は、下記参加申込要領をご確認下さい。

～講演大会日程～

日 時	行 事
9月18日(水) 9:00～9:40 12:00～17:30 10:00～17:30 18:30～20:30	開会の辞、贈呈式 ポスターセッション、高校生・高専学生ポスターセッション シンポジウム講演(一般講演は行いません) 懇親会(千里阪急ホテル 西館 2F「仙寿」)
9月19日(木) 9:00～18:00	学術講演
9月20日(金) 9:00～17:00	学術講演
9月25日(水)午後	高校生・高専学生ポスターセッション(オンライン)

- ◆懇親会 開催日時：2024年9月18日(水)18:30～20:30
開催場所：千里阪急ホテル 西館 2F「仙寿」
当日申込(現金のみ)：12,000円 同伴者(配偶者同伴の場合)5,000円

◆申込の種別と申込期間

(1) 後期(当日)申込

申込期間：2024年9月6日(金)～9月25日(水)

ウェブサイト URL：https://www.jim.or.jp/convention/2024autumn_after/

決済方法：クレジットカード



(2) 相互聴講(鉄鋼協会に参加する本会非会員のみ 現地申込のみ)

申込期間：2024年9月18日(水)～20日(金)

ウェブサイト URL：https://www.jim.or.jp/convention/2024autumn_after/

決済方法：クレジットカード

◆大会参加費(講演概要ダウンロード権含む)および登壇費 ※年会費とは異なります。

参加費・懇親会の消費税の取扱いは、ホームページ(一覧表 PDF)をご参照下さい。

会 員 資 格	後期(当日)申込	相互聴講	登壇費
正員	13,000円	—	—
非会員の維持員会社社員	13,000円	—	10,000円
非会員のシンポジウム共催・協賛の学協会会員	13,000円	—	10,000円
2024年3月1日時点で65歳以上の個人会員*1	無 料	—	—
学生員*2	7,000円	—	—
ユース会員*3(中高生会員, 高専専科1年生以下, 大学3年生以下)	無 料	—	—*3
非会員*4 一般	27,000円	—	10,000円
非会員*4 学生(大学院生含む)	16,000円	—	5,000円
鉄鋼協会講演大会参加者(一般, 学生問わず) 講演者は選択できません。	—	6,000円	—

•お支払後の取消は、ご返金できませんのでご了承下さい。

•領収書は、決済完了後に申込画面(「講演大会 MyPage」)からダウンロードし、印刷して下さい。

*1 **65歳以上の個人会員**：会員情報に生年月日の登録がない場合は課金されます。会員情報に生年月日を登録していない方は、**参加申込みの前に annualm@jimm.jp** まで会員番号・氏名・連絡先・生年月日をお知らせ下さい。

*2 **学生員**：卒業予定変更等により登録されている会員種別が実際と異なる場合は、**事前に会員種別の変更手続きを行ってから**、大会参加を申込み下さい。会員情報に登録された卒業年次を超えると、自動で正員に変更されています。

*3 **ユース会員が高校生ポスター発表以外で発表する場合は、登壇費5,000円が必要です。**

*4 非会員は講演申込サイトの各講演種別の「非会員はこちら」をクリックして、講演申込みして下さい。非会員の参加申込者には、1年間の会員資格を付与します。ただし特典は重複して付与しません。

◆参加証

「講演大会 MyPage」で「参加証」を印刷し、当日持参して会場に入して下さい(受付は不要です)。

*「日本金属学会ロゴ入りストラップ付参加証ケース」をお持ちの方はご持参下さい。ストラップ、ケースが必要な方には受付で配布します。

◆講演概要の閲覧・ダウンロード

公開場所：講演大会ウェブサイト(ログイン必要)

公開日：大会2週間前の**2024年9月4日(水)**(特許関係の手続きは、公開日までに済ませて下さい。)

ログイン：ログイン用のIDとパスワードが必要です。

(後期(当日)申込の方) 参加申込受理通知に記載の「登録番号」および「パスワード」がログイン用のIDとパスワードです。

◆講演概要集の購入

講演概要集は作成していません。全ての講演概要は、講演大会ウェブサイトで公開をします。これまで概要集のみを購入されていた場合は、大会への参加登録をして、講演大会ウェブサイトから概要を閲覧して下さい。

◆相互聴講について

本会非会員で鉄鋼協会の講演大会に参加された方は、相互聴講料金で本会の講演大会を聴講できます。

申込方法：講演大会当日に鉄鋼協会講演会場の受付で参加証を受け取った後に、金属学会相互聴講申込サイトで申込みおよび決済完了後、決済済み画面と鉄鋼協会講演大会の参加証を日本金属学会受付に提示して下さい。確認後、参加証に「相互聴講」の押印をします。

(注) 鉄鋼協会講演大会の相互聴講は事前申込みとなっています。金属学会の講演大会参加申込を完了した後、鉄鋼協会の相互聴講申込サイトで相互聴講の申込みと決済を行って下さい。

問合せ先 講演大会係 E-mail: annualm@jimm.jp

ランチョンセミナー開催のお知らせ

秋期講演大会にて、ランチョンセミナーを開催いたします。本セミナーは、参加者の皆様に講演大会の昼食時間を利用して昼食をとって頂きながら、企業による最新の技術情報を聴講いただく企画です。参加無料です。多くの皆様のご参加をお待ちしております。

主催 公益社団法人 日本金属学会

企画 株式会社 明報社

日時 2024年9月19日(木) 12:10~12:50

会場 大阪大学・豊中キャンパス 金属学会講演会場

参加費 無料 昼食(ドリンク付)を無料提供いたします。

～ 皆様のご参加をお待ちしております!! ～

参加方法 9月18日(水)8:30より参加券を「付設展示会場」にて配布いたします。

日本金属学会、または日本鉄鋼協会の大会参加証をご提示下さい。引き換えにご希望のセミナー参加券をお渡しいたします。時間になりましたら、参加券をご持参の上、セミナー会場までお越し下さい。

※予定数に達し次第、配布は終了いたします。(参加券をお持ちでない場合でもご聴講頂ける場合がございます。)

※ランチョンセミナーは同業者様等のご入場(セミナー参加券をお持ちの場合でも)をお断りする場合がございます。予めご了承下さい。

参加予定企業

9/19(木) 12:10~12:50

・オックスフォード・インストゥルメンツ㈱: C会場(全学教育推進機構講義 A 棟 1階 A102)

「パターンマッチングを使った指数付け機能 MapSweeperの解析事例と最新 EBSD 分析システムのご紹介」

(オックスフォード・インストゥルメンツ株式会社)

・日本電子㈱: E会場(全学教育推進機構講義 B 棟 1階 B108)

「ハイスループット化を実現した EPMA のご紹介」

(日本電子株式会社 SA 事業ユニット技術開発部第3グループ 上條 稔)

・(国研)物質・材料研究機構: F会場(全学教育推進機構講義 B 棟 1階 B118)

「オープンサイエンス時代の日本発材料科学ジャーナル STAM——現状と戦略」

学生キャリアサポート・企業展示&カタログ展示

秋期講演大会・付設展示会場にて、学生キャリアサポート・企業展示&カタログ展示を開催いたします。本企画は、学生参加者の皆様に、各社の展示ブースにて、各社の会社概要、今後の採用情報、インターンシップ募集情報、研究開発動向等を紹介解説するものです。学生参加者の皆様には、是非ご来場頂き、リクルート活動にお役立て下さい。参加・見

学無料です。多くの皆様のご参加をお待ちしております。

主催 公益社団法人 日本金属学会

企画 株式会社 明報社

日時 2024年9月18日(水)~20日(金) 9:00~17:00
(20日は、13:30まで)

会場 付設展示会場(全学教育講義棟 1F・2F)

参加・見学: 無料

参加予定企業(7月末現在)

- ・石福金属興業㈱
- ・日本軽金属㈱
- ・㈱大阪チタニウムテクノロジーズ
- ・福田金属箔粉工業㈱
- ・産業技術総合研究所
- ・大和工業㈱
- ・㈱豊田中央研究所

カタログ展示: ・合同製鐵㈱

付設展示会開催のお知らせ

秋期講演大会にて、付設展示会を開催いたします。金属材料関連各社の製品やサービスを紹介いたします。

また、展示会場では、ランチョンセミナーのチケット配布(無料)、コーヒー無料サービスも実施する予定です。

是非、展示会場へご来場下さい!(大会ホームページでも出展情報を掲載いたします)

開催期間 2024年9月18日(水)~20日(金) 9:00~17:00
(20日は14:00まで)

展示会場 大阪大学・豊中キャンパス 全学教育講義棟 1F・2F

出展予定企業(7月末現在)

- ・アドバンスソフト㈱
- ・アメテック㈱
- ・㈱池上精機
- ・茨城県中性子ビームライン
- ・㈱エイゾス
- ・SK メディカル電子㈱
- ・オックスフォード・インストゥルメンツ㈱
- ・㈱新興精機
- ・電子科学㈱
- ・東芝ナノアナリシス㈱
- ・NISSHA エフアイエス㈱
- ・日本電子㈱
- ・㈱日本放電技術
- ・㈱ニューメタルスエンドケミカルスコーポレーション
- ・㈱モルシス
- ・㈱UNICO
- 他



日本鉄鋼協会・日本金属学会 第13回女性会員のつどいのご案内

日本鉄鋼協会と日本金属学会は、2007年に男女共同参画合同委員会を設置し、学会期間中の託児室合同設置、若い会員向けのキャリアパスを考えるランチョンミーティング、合同ホームページや育児・男女共同参画等の情報交換をするためのメーリングリストの開設を行うなど、金属・材料分野における女性会員の活動を支援し、女性会員の増強を目指しています。この機会を利用して女性会員同士、気軽に意見交換をして楽しいひとときを過ごしませんか。学生さんもどうぞご参加下さい。

- 主催** 日本鉄鋼協会・日本金属学会男女共同参画委員会
日時 2024年9月20日(金)12:00~13:00
会場 大阪大学豊中キャンパス
 全学教育推進機構 講義A棟3階A315
内容 女性会員の交流・人脈作り。キャリアデザイン意見交換。職場の環境や人間関係で困ったこと等本音トーク。学会への要望。などなど
参加資格 鉄鋼協会・金属学会女性会員、学生さん
参加申込 申込みは不要です。直接、会場へお越し下さい。ささやかですがお菓子を準備してお待ちしています。お弁当・お茶の用意はございませんので、必要な方はご持参下さい。
問合せ先 日本鉄鋼協会・日本金属学会
 男女共同参画委員会委員長 西畑ひとみ
 E-mail: nishibata.qz8.hitomi@jp.nipponsteel.com

～ご参加お待ちしております！～

令和6年秋季 全国大学材料関係教室協議会 講演会のご案内

- 日時** 2024年9月20日(金)15:00~16:00
場所 大阪大学豊中キャンパス スチューデント・コモンズ
 2階セミナー室B
聴講料 無料
講演会 「マテリアル/ストラクチャーのインテグリティ」
 東京大学大学院工学系研究科教授 榎 学先生

2024年秋期講演大会 日本金属学会・日本鉄鋼協会合同懇親会開催

- 開催日時** 2024年9月18日(水)18:30~20:30
開催場所 千里阪急ホテル 西館2F「仙寿」(〒560-0082
 豊中市新千里東町2-1 ☎06-6872-2211)
当日申込 現金のみでのお支払い

2024年秋期講演大会 各種シンポジウムのご案内

公募シンポジウム9テーマ

- S1 特異反応場における時間/空間応答を利用した新奇材料構造創成 VI
 S2 ハイエントロピー合金の材料科学(XI)
 S3 計算科学および新規腐食解析に基づく腐食現象の解析・可視化と機械学習による腐食予測 II
 S4 極限環境対応構造材料のためのマテリアル DX(II)
 S5 材料変形素過程のマルチスケール解析(VII)
 S6 超温度場材料創成学 II: Additive Manufacturing による材料科学の新展開
 S7 ワイドギャップ結晶の材料科学と高温プロセッシング VI
 S8 機能コアの材料科学 V
 S9 データ創出・活用による磁性材料の研究開発 II

企画シンポジウム5テーマ

- K1 材料化学におけるイノベーションの役割と工業製品への展開 IV
 K2 金属材料研究者のセカンドライフを考える
 K3 自動車技術会・日本鉄鋼協会・日本金属学会共催・第6回自動車関連材料合同シンポジウム
 K4 サーキュラーエコノミーの加速に必要な材料科学の課題
 K5 構造材料開発のための精錬技術～カーボンニュートラル社会における構造材料発展～



2025年度 金属学会シンポジウム*のテーマ募集

提案期限：2024年10月7日(月) 厳守

会員の研究活動の一層の活性化を図ることを目的として、春秋大会とは別に個別にシンポジウムを実施しております。この度、広く会員からシンポジウムのテーマを募集することにいたしました。つきましては、2025年度開催のシンポジウムテーマ(講演大会とは別)を募集いたします。セミナーシンポジウム委員会で協議のうえ、採否を決定いたします。
(*講演大会時のシンポジウムとは異なります。)

シンポジウムの開催趣旨

金属学会シンポジウムは、話題性のあるトピックス等の特定のテーマに関心をもつ研究者が集まって、講演発表、相互討論を行い、問題への共通認識を深め、今後の研究の発展に資することを目的として実施する。

今回募集するシンポジウムの開催時期 2025年度(2025年3月1日～2026年2月28日)内に実施

応募要領

提出書類：提案書を下記提出先に送付して下さい。(提案書の様式はホームページよりダウンロードして下さい。)

提案締切：2024年10月7日(月)

応募から実施までの流れ

募集締め切り(10月)⇒セミナーシンポジウム委員会にて採択決定(10月頃)⇒事務局から採択通知と具体的実施準備の連絡⇒講師・プログラム・会場の決定(開催6か月前に確定必要)・会告⇒講師依頼⇒テキスト作成(開催2か月前に原稿必要)⇒参加者募集⇒開催

<世話人>

1. 講演者への内諾(内諾後、事務局から正式依頼いたします。)
2. プログラム日程案作成・会場手配(事務局と相談)
3. 開催当日の司会・進行

<講師>

事前の予稿集原稿(4頁程度)執筆と予稿

<事務局>

1. 費用支払い(会場費、旅費謝礼、昼食費等)
2. 予稿集編集・印刷
3. 講師依頼状配信
4. 関係学協会への協賛依頼

提案書提出先・問合せ先

下記宛てにE-mailで送付して下さい。2,3日過ぎても受理の通知が届かない場合はご連絡下さい。

日本金属学会 セミナーシンポジウム委員会宛

E-mail: stevent@jimmm.jp ☎ 022-223-3685 FAX 022-223-6312

2025年春期講演大会の外国人特別講演および 招待講演募集

春秋大会における外国人研究者による特別講演と招待講演については会員からの推薦をもとに、国際学術交流委員会において審議採択し、講演実施細目については講演大会委員会で決定いたします。2025年春期講演大会の特別講演と招待講演を募集いたしますので、下記要領によりご推薦下さい。

特別講演・講演者：著名な外国人研究者とする。

- 講演時間：30分(討論10分)
- 採択件数：3～4件
- 滞在費補助：10,000円×5日(上限日数)(現地開催の場合)
- その他：大会参加費免除、懇親会招待

招待講演・講演者：有益な講演が期待される国内に滞在する外国人研究者とする。

- 講演時間：15分(討論5分)
- 採択件数：5件程度
- 滞在費補助：なし

- その他：大会参加費免除

推薦用紙 所定様式(ホームページからダウンロード下さい)により、下記メールアドレス宛に「外国人特別講演推薦」と明記しお送り下さい。送信後2～3日過ぎても受理メールの無い場合はお問合せ下さい。

推薦書提出期日 2024年11月18日(月)

照会・推薦書提出先

〒980-8544 仙台市青葉区一番町1-14-32
(公社)日本金属学会 国際学術交流委員会宛
☎ 022-223-3685 FAX 022-223-6312
E-mail: stevent@jimmm.jp

2025年度新規「産学協創研究会」の申請募集

申請締切 2024年11月29日(金)

本会では、分野を超えた取り組みを強化すべき課題に対して産・学・官が連携して取り組んでいくことを目的とした「産学協創研究会」を新設いたしました。

登録を希望される方は下記の実施要領および規則を参照の上、申請書を提出して申請下さい。

【産学協創研究会実施要領】

1. 目的

分野を超えた取り組みを強化すべき課題に対して産・学・官が連携して取り組んでいくことを目的とする。

2. 組織・構成員

- 組織は以下の通りとする。
 - 代表世話人：1名
 - 副代表世話人：1名(必要に応じておくことができる)
 - 世話人：数名
 - 構成員：数名
- 代表世話人は会員の中から選任すること。
- 必要に応じて副代表世話人を置くことができる。
- 代表世話人、副代表世話人、世話人のいずれかは民間企業から選任すること。
- 構成員は主に会員の中から選任するが、必要に応じて外部の専門家から選任することができる。
- 原則として、構成員の三分の一以上を民間企業から選任すること。

3. 活動期間・構成員の任期

- 本研究会の活動期間は1期4年以内とする。
- 本研究会の構成員の任期は、当該研究会の活動期間とする。
- 必要に応じ、理事会の決議により、活動期間を1期4年以内で延長することができる。

4. 設置

- 本研究会は、理事会によって設置するもののほか、公募する。
- 応募されたものの審査は、企画委員会で第1次審査を行い、理事会で最終審査して、設置を決定する。
- 理事会によって設置するものは、理事会で審査して、設置を決定する。
- 審査基準
 - 目的が明確か
 - 分野を超えたテーマや取り組みとなっているか
 - 産・学・官が連携して取り組んでいるものとなっているか
 - 類似の研究会はないか
 - 代表世話人、副代表世話人、世話人のいずれかが民間企業から選任されているか
 - 構成員は適切か
 - 活動は適切か
 - 本会のシンポジウム等を開催できるか

5. 費用

- 年間500,000円を上限として、費用を負担する。
- 活動費の用途は、会議費(会場費、会議中のお茶代・弁当代)、旅費交通費、通信運搬費、消耗品費、印刷製本費、業務委託費等の運営費用とする。

6. 申請

- 新規申請書ならびに継続申請書は11月末までに本会事務局を通じて企画委員会委員長に申請する。
*申請書は下記の問い合わせ先に請求下さい。
- 新規応募の申請書に記載する事項
 - 研究会の名称
 - 代表世話人(氏名、所属、役職名、TEL、E-mail)
 - 副代表世話人(選任した場合のみ)
 - 世話人の名簿
 - 構成員の名簿
 - 活動目的
 - 活動期間(1期4年以内)
 - 活動計画(活動の概要及び各年度の活動計画、活動案)
 - 予算(各年度の見込み)
 - 特記事項(申請者の要望等)
- 継続申請に記載する事項
 - 研究会の名称
 - 代表世話人(氏名、所属、役職名、TEL、E-mail)
 - 副代表世話人(選任した場合のみ)
 - 世話人の名簿
 - 構成員の名簿
 - これまでの成果報告
 - 継続理由
 - 延長期間(1期4年以内)
 - 今後の活動計画(活動の概要及び各年度の活動計画、活動案)
 - 予算(各年度の見込み)
 - 特記事項(申請者の要望等)

7. 活動

- 研究集会の開催
- 金属学会のシンポジウム(公募、企画、金属学会)の開催
- 調査

8. 報告

- 毎年度末までに、活動報告書および収支報告書を提出する。
- 当該活動期終了ごとに(終了研究会は終了時、継続研究会は1期終了時)、成果報告を提出する。成果報告は、本会ホームページおよびまてりあに公表する。
- 成果報告には、研究集会やシンポジウム等の開催記録、得られた知見、今後の展開等を記載する。

9. 問合先・申請先

日本金属学会 事務局長
E-mail: secretary_gen@jimm.jp
☎ 022-223-3685

第48回公益社団法人日本金属学会技術開発賞 「新技術・新製品」記事募集

応募締切：2024年11月1日(金)

[本賞の趣旨]

本会は創意あふれる開発研究を推奨する目的で、金属工業に関する獨創性に富む新技術・新製品の技術開発に優れた実績を収めた技術者に対し、本賞を授賞するものである。

(注1)本賞は、当該年の日本金属学会会報「まてりあ」“新技術・新製品”の欄に掲載された記事が、選考対象となる。

技術開発賞募集要綱

1. 賞の名称 第48回公益社団法人日本金属学会技術開発賞

2. 対象となる業績と区分など

(1) 次の部門およびそれらにまたがるものとする。

- ①材料基礎技術部門
- ②素材製造・評価技術部門
- ③素材応用技術部門
- ④新素材開発部門
- ⑤その他

(2) 評価は次の諸点について行われる。

- ①獨創性のある技術か
- ②技術、システムあるいは製品に関する有用な発明、考案、改良(有用性)であるか
- ③技術上の問題解決に役立ち、あるいは新製品の開拓をさらに促す可能性(将来性)があるか
- ④新技術・新製品の開発に優れた実績があるか
- ⑤生産実績や適用実績はあるか

(3) いわゆる「金属」のみでなく、その周辺の材料、たとえば燃料、耐火物、半導体、複合材料などに関するものでもよい。

(4) 応募の時点で、他の公募制の褒賞(発明協会賞、大河内賞など)を受けていない斬新な主題であることが望ましい。

3. 応募者の条件

(1) 1件につき10名以内のグループまたは個人直接開発に関与した技術者であって、単なる職制上の管理者や代表者を含まないことが望ましい。

4. 選考

(1) 受賞者の選考は選考委員会で行う。選考委員は本会理事会が毎年選任し、会長が委嘱する。

(2) 理事会が授賞該当無しと認めた場合は、その年度は授賞しない。

(3) 選考に当たって、特許係争等が問題となった記事は授賞対象から除外する事がある。

5. 授賞

(1) 2025年6月末日までに受賞者を内定する。

(2) 2025年秋期講演大会において授賞する。

(3) 受賞者には賞状と副賞(楯)を贈呈する。受賞者が非会員の場合には、会員資格を与える。

6. 技術開発賞受賞記念講演

技術開発賞受賞をより意義深いものとするため、受賞記念講演をお願いする。

第48回の受賞記念講演は2025年秋期講演大会(9月予定)の折りに行う。

7. 受賞決定までの流れ

応募(11月1日締切)→まてりあ掲載(64巻(2025年)1号から)→選考・受賞決定(2025年6月)→授賞(2025年9月)

まてりあ「新技術・新製品」記事への応募の方法

1. 応募・原稿締切

(1) 2024年11月1日(金)

(2) 申し込み受理順を参考に会報「まてりあ」に第1号から第3号まで(予定)掲載する。

2. 応募記事は編集委員会の査読を経て、日本金属学会会報「まてりあ」に掲載する。

掲載記事が技術開発賞の選考対象となる。

掲載が決まった場合には、刷り上がり1ページ当たり28,000円の投稿料を納入すること。

ただし、掲載号1冊、掲載記事のPDFファイルを無料とする。

3. 応募記事の記述の留意事項

(1) 社名、商品名その他、商業用呼称を用いることは差し支えないが、その内容が一般に理解できるよう説明を付すこと。

(2) know-howに属する事項を記述する必要はないが、新技術・新製品の特色などが理解できるようなデータを含めること。

(3) 現在までの実績、経済性、特許関係など「技術開発賞」選考に参考となる項目をなるべく含めること。

(4) 特許関係等についての記述は十分に注意すること。

4. 原稿作成について

(1) 原稿は本文、図(写真)および表を含めて刷り上がり3頁以内(約6,700字)とする。

(2) 原稿は図・表の説明を含めて全て日本語とする。物理量の単位はなるべくSI単位系による。

(3) 原稿はレイアウトの体裁にあわせて作成する。

(4) 応募は、下記Webサイトから申込む。

URL <https://data.jimm.jp/jim/shou/gikai/sui/>

ホームページから直接入力→原稿をZip形式ファイルでアップロード→受理mailの発行→受付完了。

原稿ファイルの提出；本文、図表、レイアウトを別個に作成し、Zip形式(ファイルサイズ上限は50MB)でまとめる。

① レイアウト用紙(Webサイトにてダウンロード可能)

② 図(写真)・表

・図と写真は区別せず図1、図2…のように、表は、表1、表2…のようにそれぞれ通し番号とする。

・写真にはスケールを入れる。

・それぞれキャプションを付すること。

(記述は横軸・縦軸・説明も含めすべて日本語とする。)

・カラー原稿にはカラー印刷の有無を必ず明記する。

・カラー印刷は刷り1頁あたり35,000円を著者が負担する。

5. 掲載された記事の著作権を本会に委譲すること。

6. まてりあ一般記事の要領に従うこと。(まてりあ掲載「新技術・新製品」記事を参考にすること)

7. 提出資料

①レイアウトされた原稿 ②本文テキスト ③図表原稿

◎①～③のデータファイル(Zip形式でアップロードする。)

8. 申込・送付先

(公社)日本金属学会各賞係

☎ 022-223-3685 E-mail: award@jimm.jp

9. 「新技術・新製品」記事の問合せ先

まてりあ係 E-mail: materia@jimm.jp

第75回金属組織写真賞作品募集

Web フォームによる申込です !!

～ にとっておきの作品(一枚)を後世に ～

応募期間：2024年8月1日(木)～11月1日(金)

1. 募集部門

下記4部門で行っております。

各部門とも試料、方法、結果などにオリジナリティーのある高い学術的価値が認められるもの、試料処理、写真処理他において技術的価値が高く、また、オリジナルな技術が含まれるもの、教材や写真集の編集などの際に利用できるような典型的な組織写真であるものを選考対象とします。

優秀賞および奨励賞作品を選考授賞し、特に優れた作品について最優秀賞を贈ります。ただし、該当する作品がないときは授賞しないことがあります。

「写真賞部門」

1. 光学顕微鏡部門
2. 走査電子顕微鏡部門(分析, EBSD等を含む)
3. 透過電子顕微鏡部門(STEM, 分析等を含む)
4. 顕微鏡関連部門(FIM, APFIM, AFM, X線CT等)

注：光学顕微鏡と透過電子顕微鏡写真、走査電子顕微鏡と透過電子顕微鏡写真等の組写真を応募する場合、応募者が最も適切と判断する部門を選択して下さい。

2. 申込要領

応募は、下記URLの申込フォームにより説明文を入力し、写真作品データを提出して下さい。

【申込フォーム】

- ①応募部門：4部門の該当する部門を選択する。
- ②題目
- ③作品の説明
- ④学術的価値(新規性、波及効果について世界の情勢に照らして記入)
- ⑤技術的価値(試料、試料作製、写真処理において新規性、独自性について記入)

⑥組織写真の価値(組織写真作品としての新規性や優れた点など、特記事項を記入)

⑦材料名

⑧試料作製法

⑨観察手法

⑩作品の出典(作品はオリジナルまたは本会所属の写真で使用許可のあるものに限る.)

⑪応募者・共同研究者

⑫連絡先

【写真作品】

①写真作品データの解像度は、A2版サイズを前提に400dpi以上とする。

②写真作品データはPDFまたは画像ファイル(jpg, png, tiff, bmp)として作成したもの(ファイルサイズ上限は100MB)をアップロードする。

③写真と図の組み合わせでも提出は可(写真、図への挿入文字は小さすぎないこと)。

④作品には、応募者名、共同研究者名を記載しない。

⑤応募作品数には制限を設けない。

⑥他学協会等の同様の賞を受賞していない作品であること。

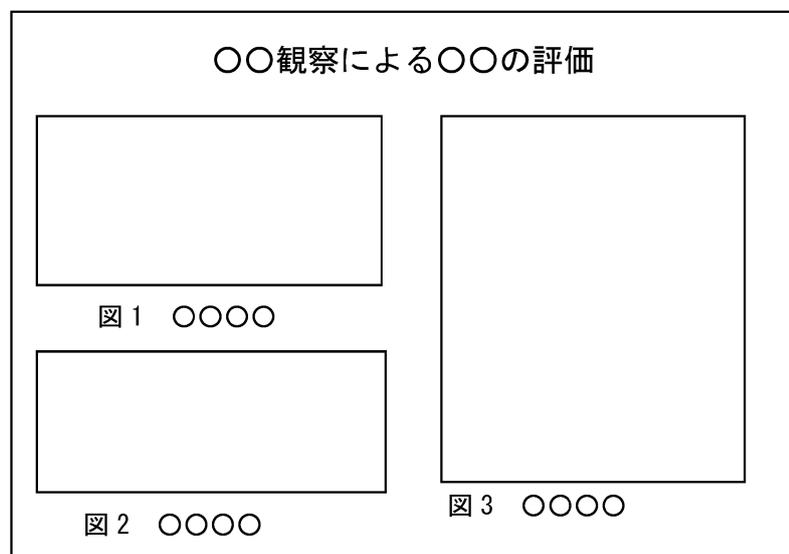
⑦作品を春期講演大会の会場等で展示すること、およびWebサイトで紹介することについて同意すること。

送付・問合せ 〒980-8544 仙台市青葉区一番町1-14-32
(公社)日本金属学会 金属組織写真賞係
☎ 022-223-3685 ☎ 022-223-6312
E-mail: award@jimm.jp
URL : https://data.jimm.jp/jim/shs/sui/

【作成例】写真解像度：A2版サイズを前提に400dpi以上

写真見本

申込フォーム：入力項目



- ①応募部門 (1. 2. 3. 4.)
- ②題目
- ③作品の説明
- ④学術的価値
- ⑤技術的価値
- ⑥組織写真の価値 (特記事項等)
- ⑦材料名
- ⑧試料作製法
- ⑨観察手法
- ⑩作品の出典
- ⑪応募者・共同研究者
- ⑫応募者連絡先

2025年度講演大会委員候補者推薦のお願い

講演大会委員および調査研究委員は、2025年4月の定時社員総会日が交替時期となっており、学会活動の一層の活性化を図るため、各界から積極的にご協力いただける気鋭の人材を求めています。以下の要領で、次期講演大会委員候補者の推薦を募集いたします。

1. 講演大会委員選出：約170名程度を選出します。
2. 構成員の任期：2025年定時社員総会当日から2年後の定時社員総会終了時まで。
3. 組織の体制(講演大会委員会、調査研究委員会)

講演大会委員会	調査研究委員会	分類
1分野	1分科	材料と社会および先進機能材料
2分野	2分科	物性および電気・磁気関連材料
3分野	3分科	組織および計算科学
4分野	4分科	力学特性
5分野	5分科	材料化学
6分野	6分科	材料プロセッシング
7分野	7分科	生体・医療・福祉
8分野	8分科	構造材料
9分野	9分科	エネルギー関連材料

4. 講演大会委員会の構成員

- (1) 委員長 1名
- (2) 副委員長 1名
- (3) 各分野の委員長 1名
- (4) 各分野の副委員長 1名
- (5) 各分野の幹事 数名
- (6) 各分野の委員 数名
- (7) その他理事会の決議による構成員 数名

5. 調査研究委員会組織の構成員

- (1) 委員長 1名
- (2) 副委員長 1名
- (3) 各分科の委員長 1名
- (4) 各分科の副委員長 1名
- (5) 各分科の幹事 数名
- (6) その他理事会の決議による構成員 数名

6. 委員候補者の資格 金属学会正員であり、2025年4月末時点で45歳以下の方

7. 推薦資格 現講演大会委員または2名以上の正員の連名による推薦(自薦も可)自薦の場合も、上記の推薦者は必要です。

8. 推薦用紙記入方法

所定の推薦用紙で以下を明記の上、金属学会事務局宛(下記メール宛)に推薦下さい。

推薦された方は、講演大会企画委員会において次期委員候補者を協議いたします。

推薦用紙はHPよりダウンロード出来ます。

①候補者氏名 ②生年月日 ③推薦分野(分科) ④勤務先・職名 ⑤連絡先住所・電話・E-mail

9. 候補者推薦締切 2024年10月3日(木)

問合せ・送付先 〒980-8544 仙台市青葉区一番町1-14-32
(公社)日本金属学会講演大会委員会 担当係
☎ 022-223-3685 E-mail: stevent@jimm.jp

講演大会セッション（委員専門分野）

新分野	大分類	中分類	No	セッションキーワード	キーワード	
1分野	1.材料と社会	材料と社会	1.1	教育	専門教育、共通教育、企業での教育、生涯教育、小・中・高校生への教育、カリキュラム、授業の実際、教材・教育の評価、社会人教育	
			1.2	歴史・材料考古学	金属学・材料科学の歴史、金属技術の歴史・変換、材料考古学、文化財保存	
			1.3	技術革新・技術伝承	IoT、マテリアルインターフェース、マテリアルソフトウェアエンジニアリング、材料情報、知的所有権、その他の金属学・材料学に関連した新分野・境界分野	
			1.4	環境	LCA、リスクマネジメント、資源経済、環境・資源政策、材料の環境信頼性評価、製造物責任、環境低負荷材料、易リサイクル材料・設計、易解体設計、マテリアルセレクト、省材料設計、高寿命材料・設計、材料のリサイクルシステム、材料資源環境システム、再資源化用途開発、土壌浄化、環境修復	
			1.5	ダイバーシティ	男女共同参画、LGBTI、国際化、学際協力、世代間・業種間融合	
			1.6	新領域・その他		
	12.先進機能材料	先進機能材料	12.1	萌芽材料		
		12.2	新領域・その他			
2分野	2.物性	物性	2.1	磁気機能・磁気物性	磁気的性質、磁気光学的性質、電子状態、熱磁気効果（スピンゼーベック効果、異常ネルスト効果、磁気熱量効果、磁気ハイパーサーミア等）、核物性等	
			2.2	半導体機能・電気物性	誘電的性質、光学的性質、電子輸送、薄膜・表面・界面物性、熱的性質（ゼーベック効果、ペルチェ効果等）、原子輸送、金属絶縁体転移等	
			2.3	構造物性	結晶成長、結晶構造、準結晶構造、非晶質固体構造、格子ダイナミクスと安定性、相転移（変態）、不整合・整合構造、格子欠陥、粒界等	
			2.4	物性評価	照射効果、ナノスケール量子効果、トンネル効果、メスパウアー効果、核磁気共鳴、分光・発光・回折一般等	
			2.5	新領域・その他		
	9.電気・磁気関連材料	電気・電子・光関連材料		9.1	伝導・実装材料	電気伝導材料、電極材料、電子実装材料、配線材料、マイクロ接合材料、フラーレン、カーボンナノチューブ、熱伝導材料等
				9.2	半導体・誘電体材料	半導体材料、誘電体材料、圧電体材料、センサー材料、太陽電池、High-k材料、低次元物質、ナノ粒子・（超）微粒子、原子クラスター等
				9.3	光・電磁波関連材料	光学結晶材料、光記録材料、液晶材料、光ファイバー材料、光学ガラス材料、テラヘルツ等
				9.4	強相関電子系材料	超伝導材料、トポロジカル絶縁体、強相関電子系材料、マルチフェロイック材料等
		磁性材料		9.5	ソフト・ハード磁性材料	ソフト磁性材料（高透磁率材料（合金系、フェライト系、アモルファス、ナノ結晶等）、永久磁石材料（希土類系、合金系、フェライト系等）、電波吸収体・ノイズ抑制体材料等
				9.6	スピントロニクス・ナノ磁性材料	磁気抵抗効果（AMR、GMR、TMR等）材料、スピンメモリー・センサー材料、スピンカロリトロニクス材料、スピン注入技術、スピン流制御技術、スピン（軌道）トルク制御技術、磁気記録・磁気デバイス用材料、磁性（超）薄膜・多層膜・磁性金属人工格子、磁気スキルミオン等
				9.7	磁気機能材料	磁歪材料、磁気冷凍材料、フラストレーション材料、反強磁性材料、相転移誘起材料（磁場誘起相変態等）等
				9.8	新領域・その他	
3.組織	相安定性・相変態		3.1	熱力学・状態図・相平衡	熱力学、状態図、相平衡、準安定、非平衡、相転移、金属間化合物、規則-不規則転移、磁気転移等	
			3.2	拡散・相変態	拡散、偏析、析出、拡散変態、規則-不規則変態、不連続析出、粒界・相界面上析出等	
			3.3	マルテンサイト変態・変位型相変態	マルテンサイト変態、変位型相変態（ヘイナイト変態含む）、形状記憶・超弾性材料、磁性形状記憶合金、TWIP・TRIP、エージング・テンリング、双晶変形、熱・応力・磁場・電場誘起相変態、組織制御、組織形成と機械的性質、プロセス（粉末冶金・複合材料含む）、SMAアクチュエータ・応用、マルテンサイト変態に関わる材料機能（タンピング、磁気・弾性熱量効果等）	
			3.4	合金・アモルファス・準結晶	アモルファス、金属ガラス、準結晶、高エントロピー材料等	
	組織制御		3.5	組織制御技術	時効・析出、熱処理、加工、加工熱処理、合金元素添加、急冷凝固、メカニカルアロイング、界面接合強さ、複合化、多層化、薄膜、積層造形、ミルフィユ構造、コーティング、シミュレーション等	
			3.6	再結晶・粒成長・集合組織	回復・再結晶、集合組織、粒成長、粒界、異相界面、双晶等	
	分析・解析・評価		3.7	組織観察・分析	電子顕微鏡、STM、AFM、FIM、3次元アトムプローブ、X線・中性子線回折、EPMA、XPS、イメージング・マッピング技術、放射光等	
			3.8	計算材料科学・材料設計	理論、シミュレーション等	
			3.9	新領域・その他		
11.計算科学	構造・組織・特性・物性		11.1	計算材料科学・材料設計	計算材料科学・材料設計、第1原理電子論計算、分子シミュレーション、分子動力学法、モンテカルロ法、CALPHAD法、フェーズフィールド法、有限要素法、境界要素法、セルラーオートマトン、マルチスケール解析、マルチフィジックス解析等	
			11.2	データ科学	マテリアルズインフォマティクス、マテリアルズインテグレーション、機械学習、深層学習、強化学習、転移学習、逆問題、データ同化、ニューラルネット、最適化、データベース、ビッグデータ、人工知能等	
			11.3	新領域・その他		

新分野	大分類	中分類	No	セッションキーワード	キーワード
4分野	4.力学特性	力学特性の基礎	4.1	強度・力学特性	力学（格子欠陥、弾性、塑性、破壊力学、有限要素法、分子動力学、マイクロメカニクス等）、転位の基本的特性（運動、増殖、相互作用等）、転位と各種格子欠陥の相互作用、変形（弾性、擬弾性、塑性、粘性、粒界、粒界、変形双晶等）、各種強化機構、破壊機構（き裂やポイド発生・成長・合体等）
			4.2	塑性・疲労・破壊	延性、韌性、静的および動的破壊、破壊靱性値、疲労、応力腐食割れ、水素脆性、遅れ破壊、寿命
			4.3	高温変形・クリープ・超塑性	高温変形、クリープ、クリープ疲労、超塑性
			4.4	力学特性評価	力学特性の評価法、力学的挙動の予測（応力-ひずみ曲線、クリープ曲線等の予測、寿命予測等）、合金設計、複合材料（材料システム）設計、データベース
		力学特性と組織	4.5	欠陥と組織	転位組織、転位セル、変形帯、強加工、双晶、ポイド、亀裂
			4.6	多結晶組織	粒成長、再結晶、双晶、偏析、粒界析出、粒界反応型析出
			4.7	金属間化合物	金属間化合物、規則相、高温変形
			4.8	超微細粒組織	微細粒、バルクナノメタル、強化機構
			4.9	新領域・その他	プラストン、キック変形、ディスクリネーション、ミルフィーユ構造
5分野	5.材料化学	耐食性・耐酸化性	5.1	腐食・防食	水溶液腐食、電気化学測定、表面皮膜、腐食環境解析、孔食、すき間腐食、応力腐食割れ、大気腐食、高温高圧水腐食、水素脆化、異種金属接触腐食、エロージョン・コロージョン、腐食事例、耐食合金、耐食コーティング、腐食抑制・防錆剤、電気防食、等
			5.2	高温酸化・高温腐食	高温ガス腐食、溶融塩腐食、水蒸気酸化、エロージョン・コロージョン、超臨界環境等、耐熱材料、耐熱コーティング、超合金、金属間化合物、セラミクス材料、酸化物の特性
		表面・界面・触媒	5.3	湿式表面処理・湿式めっき	電解・無電解めっき、アノード酸化、エッチング、化成処理、イオン液体、電気化学的な成膜、ぬれ性、摩擦・摩耗・潤滑等
			5.4	気相プロセス・薄膜・厚膜作製技術	PVD、CVD、スパッタリング、プラズマプロセス、イオン注入・イオン打込み、イオンミキシング、コーティング、クラスター制御、表面処理、表面改質等、エッチング、アッシング、リソグラフィ、マイクロ・トライボロジー、マイクロ・マシニング、マイクロ・ボンディング、ケミカルメカニカルポリッシング（CMP）、溶射、肉盛り、拡散浸漬処理、ぬれ性、摩擦・摩耗・潤滑等
			5.5	表界面反応・分析	表面物性・反応、表面の構造と結晶学、吸着・脱離、表面の熱・統計力学、表面の電子状態およびエネルギー・計算科学、電気化学反応、表面・界面の作製技術、表面分析法（各種化学分析・機器分析、極微量分析、極小領域分析、状態分析、プローブ顕微鏡、顕微分光、環境やプロセスのその場分析、成分画像解析等、各種分析装置の開発、化学センサー、モニタリング法等）、コロイド材料
			5.6	触媒材料・触媒反応	触媒材料（貴金属・卑金属触媒、金属間化合物触媒、ナノ構造触媒、規則性多孔体、有機金属、光触媒等）、触媒反応（酸化、水素製造、C-H活性化、クロスカップリング、界面分子変換、排気ガス浄化等）、触媒技術と反応プロセス開発、触媒理論
			5.7	新領域・その他	
6分野	6.材料プロセス	環境・リサイクルプロセス	6.1	環境・リサイクル技術	LCA、リスクマネジメント、資源経済、環境・資源政策、材料の環境信頼性評価、製造物責任、事故解析、材料安全など、環境低負荷材料、易リサイクル材料、易リサイクル設計、易解体設計、マテリアルセレクション、省材料設計、高寿命材料、高寿命設計など、分離プロセス、再資源化プロセス、材料のリサイクルシステム、材料資源循環システム、リサイクル化学、クローズドプロセス、再資源化用途開発など、
		溶融・凝固プロセス 高温プロセス	6.2	製・精錬の物理化学	資源・原料、各種および新製・精錬法、冶金熱力学、化学反応工学、移動速度論、高温プロセス解析、数値流体力学、高純度化、分離・回収・精製、環境・リサイクル等
			6.3	融体・高温物性	熱力学的諸量、融体物性、モデリング等
			6.4	凝固・結晶成長・鑄造技術	結晶成長、過冷却、非晶質、準結晶、輸送現象、高純化、鑄造、鋳物、ダイキャスト、単結晶製造技術、半溶融加工、溶射、反応性溶射、溶射素過程、等
		固相プロセス 固相・溶接プロセス	6.5	塑性変形・塑性加工技術	塑性加工、高ひずみ速度加工、強加工プロセス、極限環境プロセス等
			6.6	粉末・焼結・造形技術	粉体製造、超微粉、粉体成形・粉末冶金（焼結プロセスを含む）、メカニカルアロイング、焼結合成プロセス、粉末射出成形（金属射出成形、セラミック射出成形）、3次元造形（3Dプリンター）、コールドスプレー、スプレーフォーミング、エアロソルデポジション、アトマイズ等
			6.7	接合・溶接・実装・接着・複合技術	メカニカルプロセス、常温接合、拡散接合、超音波接合、摩擦圧接、摩擦攪拌接合、爆発圧接、電磁圧接、溶接、ろう付け、接着、精密接着、メッキ・プロセス、はんだ付け、実装、マイクロ接合、力学特性、信頼性等
		材料評価、プロセス評価技術	6.8	材料評価技術	非破壊検査、非破壊定量評価、残留応力解析、センシング技術、信頼度評価等、各種プロセス・シミュレーション、テラヘルツ
		6.9	新領域・その他		

新分野	大分類	中分類	No	セッションキーワード	キーワード
7分野	7.生体・医療・福祉	生体材料基礎・生体応答	7.1	細胞機能・組織再生	細胞機能、細胞間相互作用、シグナル伝達、細胞・生体組織評価、細胞増殖・分化、組織修復 (Tissue Engineering)、DDS (Drug Delivery System)、ゲノム解析・編集、細胞適合性、細胞配向、代謝回転、恒常性、石灰化、各種臓器、骨・歯牙、血管、骨芽細胞、破骨細胞、OCY (オステオサイト)、骨系細胞、細胞外基質、がん、細胞小器官、RNA、DNA、遺伝子組み換え、細胞培養、骨形態計測法、染色法、足場材料、機能性タンパク質等
			7.2	構造生体機能化	機能発現、バイオメカニクス、計算科学、金属組織・組織制御、弾性・塑性変形機構、力学機能発現 (弾性率、強度、延性、疲労、破壊)、スキャフォールド、インプラント、双晶変形、生体組織、組織配向性、人工関節、人工歯根、熱処理、多孔化、機能・組織評価法、Co-Cr合金、ステンレス鋼、生体用セラミックス、リン酸カルシウム系材料、PEEK、整形外科用材料等
			7.3	表界面生体機能化	生体/材料界面、表面修飾、ナノ表面・界面、感染防御・制御、表界面機能、骨伝導・骨誘導、バイオセンサー、抗菌性、タンパク質吸着、コーティング、化学処理、表面分析・評価、PVD、CVD、コーティング材料等
		生体材料設計開発・臨床	7.4	生体・医療・福祉材料	バイオマテリアルサイエンス、生体情報・計測、リハビリテーション医学、ユニバーサルデザイン、バリアフリー、生体機能代替、福祉用具・支援機器、ウェアラブル、IoT、AI、非磁性・低磁性、低弾性・高弾性、生体活性ガラス、生分解性材料、耐摩耗性材料、歯科用合金、生体用ハイエントロピー合金等
			7.5	生体用Ti・Ti合金	Ti・Ti合金、低弾性率、形状記憶、超弾性、オッセオインテグレーション、集合組織、人工骨・関節、相変態・組織制御、機能評価法、電子顕微鏡、β型Ti合金、ユビキタス元素、計算機シミュレーション等
			7.6	Additive Manufacturing・テララード医療材料	付加製造、3Dプリンタ、金属積層造形、金属粉末、異方性/等方性、形状/組織制御、力学特性、残留応力、生体モデリング、形状計測、格子構造、薬物送達システム、マイクロマシン、マスカスタマイゼーション、テララード医療、遠隔地診療、レーザービーム、電子ビーム、順シミュレーション・逆問題解析、溶融池シミュレーション、リアルタイムモニタリング等
			7.7	生体安全性・有効性評価	医用画像・バイオイメージング、生体シミュレーション、レギュラトリーサイエンス、生体情報・計測、医療技術倫理、細胞毒性、疾病、代謝異常、骨吸収、金属アレルギー、耐食性、疲労、疾病治療、医療機器、臨床研究、臨床応用、GLP等
			7.8	新領域・その他	
8分野	8.構造材料	金属材料	8.1	Fe・Fe合金	Fe・Fe合金の原理・原則、鉄鋼材料、ステンレス合金、相変態 (パーライト、ベイナイト、マルテンサイト、マッヅ等)、組織制御、力学特性、計算材料科学
			8.2	Cu・Cu合金	Cu・Cu合金の原理・原則、配線材料、熱伝導材料、相変態、組織制御、力学特性、計算材料科学
			8.3	Ti・Ti合金	Ti・Ti合金の原理・原則、相変態、組織制御、強化機構、成型性、ゴムメタル、耐食性、表面処理、計算材料科学
		軽金属材料	8.4	Mg・Mg合金	Mg・Mg合金の原理・原則、相変態、長周期積層構造、組織制御、強化機構、シグナル変形、ミルフィュー構造、成型性、集合組織、耐食性、計算材料科学
			8.5	Al・Al合金	Al・Al合金の原理・原則、相変態、GPゾーン、クラスター、組織制御、強化機構、成型性、集合組織、耐食性、計算材料科学
		セラミックス材料	8.6	セラミックス材料	セラミックス材料の原理・原則、相変態、構造転移、焼結、組織制御、機能材料、強化機構、破壊、成型性、耐熱性、計算材料科学
		耐熱材料	8.7	ジェットエンジン・ガスタービン耐熱材料	耐熱鋼、超合金、耐熱合金、高融点金属、金属間化合物、セラミックス、超高温材料、金属基複合材料、金属間化合物基複合材料、セラミックス基複合材料、プラスチック基複合材料、炭素繊維強化型複合材料、SiC繊維強化型複合材料、ジェットエンジン、ガスタービン、コーティング、組織制御、相安定性、状態図、拡散、粒界、クリープ、疲労、破壊、寿命予測、高温酸化・腐食、鍛造、粉末冶金、積層造形、熱間プロセス、計算材料科学、データベース
			8.8	蒸気発電耐熱材料	耐熱鋼、超合金、耐熱合金、蒸気タービン、コーティング、組織制御、相安定性、状態図、拡散、粒界、クリープ、疲労、破壊、寿命予測、高温酸化・腐食、鍛造、粉末冶金、積層造形、熱間プロセス、計算材料科学、データベース
			8.9	耐熱特性	耐熱合金、耐熱セラミックス、超高温材料、耐熱複合材料、コーティング、組織制御、相安定性、状態図、拡散、粒界、クリープ、疲労、破壊、寿命予測、高温酸化・腐食、熱機関、燃焼、熱伝導、熱膨張、熱衝撃、熱遮蔽、鍛造、粉末冶金、積層造形、熱間プロセス、計算材料科学、データベース
		機能性構造材料	8.10	機能性構造材料	アモルファス材料、金属ガラス材料、準結晶材料、制振材料、インテリジェント・スマートマテリアル、積層造形、計算材料科学
		複合材料	8.11	複合材料	複合材料、スポーツ用品材料、積層造形、接合、組織制御、トポロジー最適化、力学特性、熱特性、電磁気特性、計算材料科学
			8.12	ポーラス材料	ポーラス材料、積層造形、接合、組織制御、トポロジー最適化、力学特性、熱特性、電磁気特性、計算材料科学
		8.13	新領域・その他		
9分野	10.エネルギー関連材料	原子力材料	10.1	原子力材料	原子炉材料、核融合炉材料、ビーム関連材料、照射損傷、照射効果
		熱電材料	10.2	熱電材料	熱電変換、熱電素子、ゼーベック効果、ペルチエ効果、熱伝導、電気伝導、など
		水素・電池関連材料	10.3	電池材料・イオン伝導材料	電極材料、電解質材料、イオン伝導材料、電池設計、電池関連物性、など
			10.4	水素化合物・水素貯蔵・水素透過・水素関連物性	金属水素化合物、錯体水素化合物、水素貯蔵、水素透過、水素脆化、水素利用、水素関連物性、機能・プロセス、金属-水素相互作用、同位体効果、など
		新領域・その他	10.5	新領域・その他	センサー材料、熱伝導材料、など

日本金属学会オンライン教育講座 開催案内

New!!

『構造材料(2) 非鉄材料編』

日時 一日目 2024年11月28日(木) 13:30~16:45
二日目 2024年11月29日(金) 13:30~16:45

講義概要 鉄および鋼以外のすべての金属を非鉄金属といい、数えきれないほどの種類の非鉄金属が活用され、現代社会を支えています。本講座では、代表的な非鉄金属である、銅合金、チタン合金、アルミニウム合金、マグネシウム合金について基礎から解説を行います。

プログラム

2024年11月28日(木)

13:30-15:00 銅合金(講師:門前亮一先生)
15:00-15:15 一休憩—
15:15-16:45 チタン合金(講師:新家光雄先生)

2024年11月29日(金)

13:30-15:00 アルミニウム合金(講師:里 達雄先生)
15:00-15:15 一休憩—
15:15-16:45 マグネシウム合金(講師:鎌土重晴先生)

受講方法 オンライン(Zoom)

講師紹介

金沢大学名誉教授 門前亮一先生

1977年3月 東京工業大学工学部金属工学科卒業;1979年3月 東京工業大学総合理工学研究科材料科学専攻修士課程修了;1982年12月 東京工業大学総合理工学研究科材料科学専攻博士課程修了,工学博士取得(東京工業大学);1983年1月 金沢大学工学部機械工学科助手;1987年12月 金沢大学工学部機械システム工学科助教授;1998年11月 金沢大学工学部機能機械工学科教授;2008年4月 金沢大学理工研究域機械工学系教授;2020年3月 同退職(金沢大学名誉教授),現在に至る。

大阪大学特任教授, 東北大学名誉教授 新家光雄先生

1973年3月 名古屋大学工学部金属学科卒業;1975年3月 名古屋大学大学院工学研究科金属工学及び鉄鋼工学専攻修士課程修了;1978年3月 名古屋大学大学院工学研究科金属工学及び鉄鋼工学専攻博士課程後期満了退学;1978年4月 名古屋大学大学院研究生;1979年5月 豊橋技術科学大学生産システム工学系教務職員;1979年7月 工学博士取得(名古屋大学);1980年4月 豊橋技術科学大学生産システム工学系助手;1988年6月~1989年5月 カーネギー・メロン大学客員助教授;1989年4月 豊橋技術科学大学生産システム工学系助教授;1995年4月 豊橋技術科学大学生産システム工学系教授;1998年7月~1998年12月 デイトン大学 客員教授, 米国国防総省ライトパターソン材料研究所外国人研究員;2003年12月 博士(歯学)取得(愛知学院大学);2005年10月 東北大学金属材料研究所生体材料学研究部門教授;2009年11月~2014年3月 東北大学金属材料研究所所長;2014年4月~2015年4月 日本金属学会会長;2016年3月 東北大学定年退職(名誉教授);2016年4月 大阪大学特任教授;2021年4月 日本チタン学会会長,現在に至る。

東京工業大学名誉教授, ㈱神戸製鋼所顧問 里 達雄先生

1974年3月 東京工業大学工学部金属工学科卒業;1979年3月 東京工業大学大学院理工学研究科金属工学専攻修了,工学博士取得(東京工業大学);1979年4月 東京工業大学工学部金属工学科助手;1988年5月 英国マンチェスター大学客員研究員;1991年4月 東京工業大学工学部金属工学科助教授;1999年8月 東京工業大学工学部金属工学科教授;2012年4月 東京工業大学精密工学研究所先端材料部門教授;2015年3月 同退職(東京工業大学名誉教授);2015年4月 ㈱神戸製鋼所顧問,現在に至る。

長岡技術科学大学教授・学長 鎌土重晴先生

1980年3月 豊橋技術科学大学工学部生産システム工学課程卒業;1982年3月 豊橋技術科学大学大学院工学研究科修士課程修了;1991年3月 工学博士取得(豊橋技術科学大学);1982年4月~1991年3月 津山工業高等専門学校金属工学科および情報工学科にて研究教育に従事;1991年4月 長岡技術科学大学工学部機械系助手;1992年4月 長岡技術科学大学工学部機械系助教授;2004年10月 九長岡技術科学大学工学部機械系教授;2015年9月 長岡技術科学大学理事・副学長;2021年4月 長岡技術科学大学学長,現在に至る。

コーディネーター 熊本大学教授 山崎倫昭, JEF テクノリサーチ㈱経営企画部長 船川義正

申込方法 <https://www.jim.or.jp/seminersymposium/> よりお申込み下さい。

申込締切 2024年11月21日(木)

受講料

対象者	受講料	2講座目以降の受講料*
正員	20,000円	15,000円
学生	8,000円	6,000円
非会員	40,000円	30,000円

- 本会維持員会社社員, 協賛学協会会員は正員扱い.
- 学生は会員, 非会員の区別なし

※本年度開催のオンライン教育講座を2講座以上受講する場合, 2講座目からは割引料金となります.

※本会の維持員社員は正員と同額の受講料です. さらに, 維持員が同一講座に3名以上が申込みすると受講料がさらに25%オフとなります(申込前にご相談下さい). ただし, 複数受講との重複割引はありません.

受講料支払方法 ①カード決済 ②コンビニ決済 ③銀行振込のいずれかをご利用下さい.

問合先 〒980-8544 仙台市青葉区一番町 1-14-32

(公社)日本金属学会 セミナー・シンポジウム参加係

E-mail: meeting@jimm.jp ☎ 022-223-3685 ☎ 022-223-6312

協賛予定

エネルギー資源学会, 応用物理学会, 金属材料研究開発センター, 軽金属学会, 軽金属製品協会, 合金状態図研究会, 資源・素材学会, ステンレス協会, 素形材センター, 電気化学会, 電気学会, 日本アルミニウム協会, 日本MRS, 日本化学会, 日本ガスタービン学会, 日本機械学会, 日本材料科学会, 日本材料学会, 日本磁気学会, 日本セラミックス協会, 日本塑性加工学会, 日本チタン協会, 日本鋳造工学会, 日本鉄鋼協会, 日本物理学会, 日本分析化学会, 粉体粉末冶金協会, 腐食防食学会, 表面技術協会, 日本チタン学会, 日本歯科理工学会, 日本人工臓器学会, 日本バイオマテリアル学会, 生体医工学会



『マルチスケール材料科学』

日 時 一日目 2024年10月28日(月)13:00~16:10
 二日目 10月29日(火)13:00~16:10

講義概要

材料の諸現象は電子、原子の振る舞いに端を発し、内部組織の形成を経て、強度や機能の発現に至るマルチスケール現象である。従って諸現象の素過程は電子・原子のスケールにあるが、これを単純に集積するだけではマクロな現象を理解することはできない。素過程が集まり、事象や現象を発現するときには、素過程の中で支配的なものが選択され、又、素過程の足し算以上のプラス α が現れる。cross-scaleあるいはtrans-scaleに伴う選択則やプラス α の正体を明らかにし系統化することがマルチスケール材料科学の課題である。本講義ではこのようなことを念頭において、ミクロからマクロに至る種々の素過程の原理を復習し、材料科学/材料工学特有のマルチスケール性を学ぶ。

本講座では、当日に受講できない方や理解を深めたい受講者の方のために、開催後に講義のオンデマンド配信を行います。受講申し込み者は追加料金なしに視聴できます。

プログラム

2024年10月28日(月)

13:00~14:30 離散格子上の統計熱力学
 14:30~14:40 一休憩—
 14:40~16:10 連続体における内部組織の形成

2024年10月29日(火)

13:00~14:30 強度や機能発現の素過程と支配過程
 14:30~14:40 一休憩—
 14:40~16:10 順問題・逆問題と cross-scale

受講方法 オンライン(Zoom)

講師紹介 北海道大学名誉教授 毛利哲夫先生

1976年北海道大学工学部金属工学科卒業、1982年 University of California, Berkeley, PhD コース修了、同年 Lawrence Berkeley Laboratory, University of California, Assistant Research Engineer、1985年北海道大学工学部講師、1986年北海道大学工学部助教授、1996年北海道大学大学院工学研究科教授、2013年東北大学金属材料研究所教授、2017年-2020年同特任教授、2019年-2020年 JST シニアフェロー、2014年北海道大学名誉教授 現在に至る(この間1994年 Forschungszentrum, Juelich 客員研究員、1997年-1998年ウイーン大学物理学科 Guest professor、2016年 University of Texas, Austin 客員教授等)

コーディネーター 東北大学 特任准教授 寺田弥生、物質・材料研究機構 主幹研究員 井 誠一郎、
 物質・材料研究機構 主幹研究員 戸田佳明

申込方法 <https://www.jim.or.jp/seminarsymposium/> よりお申込み下さい。

申込締切 2024年10月21日(月)

受講料

対象者	受講料	2講座目以降の受講料※
正員	20,000円	15,000円
学生	8,000円	6,000円
非会員	40,000円	30,000円

※本会維持員会社社員、協賛学協会会員は正員扱い。
 ※学生は会員、非会員の区別なし

※本年度開催のオンライン教育講座を2講座以上受講する場合、2講座目からは割引料金となります。

※本会の維持員社員は正員と同額の受講料です。さらに、維持員が同一講座に3名以上の申込みをすると受講料がさらに25%オフとなります(申込前にご相談下さい)。ただし、複数受講との重複割引はありません。

受講料支払方法 ①カード決済 ②コンビニ決済 ③銀行振込のいずれかをご利用下さい。

問合せ先 〒980-8544 仙台市青葉区一番町 1-14-32

(公社)日本金属学会 セミナー・シンポジウム参加係

E-mail: meeting@jim.jp ☎ 022-223-3685 FAX 022-223-6312

協賛予定

エネルギー資源学会、応用物理学会、金属材料研究開発センター、軽金属学会、軽金属製品協会、合金状態図研究会、資源・素材学会、ステンレス協会、素形材センター、電気化学会、電気学会、日本アルミニウム協会、日本MRS、日本化学会、日本ガスタービン学会、日本機械学会、日本材料科学会、日本材料学会、日本磁気学会、日本セラミックス協会、日本塑性加工学会、日本チタン協会、日本鋳造工学会、日本鉄鋼協会、日本物理学会、日本分析化学会、粉体粉末冶金協会、腐食防食学会、表面技術協会、日本チタン学会、日本バイオマテリアル学会



オンデマンド配信：日本金属学会オンライン教育講座 「工業材料の応力・歪測定」

配信：2024年10月1日(火)～10月31日(木)

製造工程，形状に起因する残留応力・歪及び集中応力は，物理・化学・機械的特性に大きな影響を与えることが多く，定量的に把握することが求められています。工業製品を構成する材料は，金属，無機・有機材料，半導体，結晶学的にも多結晶・単結晶と多様化し，大きさも極小化する時代となっています。万能な応力・歪測定法はなく，X線・電子線・中性子・放射光・レーザー光・超音波などを用いて個々考案し適用してきました。本講座ではこれらの手法を基礎から解説し測定事例とともに紹介します。Table-top型X線機器を用いた応力測定の実演も行っています。

2023年10月26日および27日に開催した当該講座の録画をオンデマンドで視聴いただきます。配信期間中は好きな時間に聴講できます。

講師紹介

東北大学名誉教授 田中俊一郎先生

1980年3月東北大学大学院工学研究科博士課程修了，工学博士。1993年10月-1999年3月JST-ERATO「田中固体融合プロジェクト」総括責任者。1999-2000年東京大学工学系研究科客員教授。2002年2月名古屋工業大学工学部教授。2005年7月東北大学多元物質科学研究所教授。2015年4月東北大学名誉教授，NICHe教授。2018年4月東北大学μSIC。現在に至る。

コーディネーター 東北大学准教授 森戸春彦， 大阪大学教授 小泉雄一郎

カリキュラム 1：応力・歪測定の意義

- 2：応力測定法概論
- 3：破壊を伴う測定法，
- 4：結晶材料の応力・歪測定(X線法)
- 5：結晶材料の応力・歪測定(中性子線，放射光，電子線)
- 6：高分子材料・セラミックス・ガラスの応力・歪測定
- 7：応力・歪測定の実際(多様な場での応力・歪測定，卓上型X線cosα法の概要)
- 8：応力・歪測定の実際(卓上型X線装置による応力測定の実演)
- 9：応力・歪測定の総括

視聴期間 2024年10月1日(火)～10月31日(木)

視聴方法 オンデマンド配信システムUIshareから視聴いただきます。

資料は同システムのウェブサイトからダウンロードいただけます。

申込方法 <https://www.jim.or.jp/seminersymposium/> よりお申込み下さい。

申込締切 2024年10月8日(火)

受講料

対象者	1講座基本料金	2講座目以降割引料金※
正員	20,000円	15,000円
学生	8,000円	6,000円
非会員	40,000円	30,000円

※本会維持員会社社員，協賛学協会会員は会員扱い。
※学生は会員，非会員の区別なし

※本年度開催のオンライン教育講座を複数申込される場合，2講座目からは割引料金となります。

受講料支払方法 ①カード決済 ②コンビニ決済 ③銀行振込のいずれかをご利用下さい。

問合せ先 〒980-8544 仙台市青葉区一番町1-14-32

(公社)日本金属学会 セミナー・シンポジウム係

E-mail: meeting@jimm.jp ☎ 022-223-3685 FAX 022-223-6312

協賛予定

エネルギー資源学会，応用物理学会，金属材料研究開発センター，軽金属学会，軽金属製品協会，合金状態図研究会，資源・素材学会，ステンレス協会，素形材センター，電気化学会，電気学会，日本アルミニウム協会，日本MRS，日本化学会，日本ガスタービン学会，日本機械学会，日本材料科学会，日本材料学会，日本歯科理工学会，日本磁気学会，日本セラミックス協会，日本塑性加工学会，日本チタン協会，日本チタン学会，日本鋳造工学会，日本鉄鋼協会，日本バイオマテリアル学会，日本物理学会，日本分析化学会，腐食防食学会，粉体粉末冶金協会，表面技術協会



New!!

相平衡と相変化の計算科学：凝固現象編

日本金属学会「セミナー・シンポジウム委員会」企画

実用材料における微視組織の形成過程を理解するためには、平衡状態図と凝固現象に関する基礎的知見と熱力学の基本原則に対する理論的知見が必要です。本セミナーでは、熱力学の基本原則について詳細に説明し、同基本原則に基づく CALPHAD 法等による状態図計算と凝固現象のシミュレーションについてわかりやすく解説します。

「相平衡の熱力学」では、実験科学と最も親和性の高い熱力学的な基本関係式が Gibbs エネルギーであることを導出します。熱力学の第一法則と第二法則によると、恒温・恒圧の平衡状態における物質では、Gibbs エネルギーが最小値に達し、物質全体にわたって化学ポテンシャルの値が均一になります。ここで、化学ポテンシャルは、Gibbs エネルギーに対する Euler の一次形式と最も整合性の高い示強変数です。また、平衡状態では、Gibbs-Duhem の関係式によって全示強変数の束縛関係が規定されます。

「CALPHAD 法による相平衡計算」では、多元系物質のモル Gibbs エネルギーを適切な数学関数で表すための手法について詳細に説明します。また、上記の数学関数を用い、熱力学の基本原則に基づいて多元系物質の平衡状態図や物性値を精度良く評価するための計算技法について解説します。

「凝固の熱力学と凝固伝熱解析」では、熱力学的な観点より凝固学の基礎を紹介し、巨視的な凝固現象に対する解析手法である凝固伝熱解析について説明します。一方、「フェーズフィールド法による凝固解析」では、微視的な凝固現象を理解するために不可欠な凝固溶質偏析の解析モデルと凝固条件との関係を説明し、任意の凝固条件に対する偏析計算が可能なフェーズフィールド法について解説します。

本セミナーが、凝固現象を事例とする相平衡と相変化の計算科学に対する理解を深めるための一助となれば幸いです。

開催日時 1 日目：2024年11月7日(木)10:00~16:30

2 日目：2024年11月8日(金)10:00~16:30

開催方式 対面とオンラインのハイブリッド形式。オンラインは Zoom にて実施します。

対面開催会場 エッサム神田ホール1号館 6階 中会議室1(601)(東京都千代田区鍛冶町3-2-2)

(<https://www.essam.co.jp/hall/>)

募集定員 対面参加50名。オンライン参加100名。

プログラム

【1 日目】11月7日(木)10:00~16:30

9:30~10:00 受付

10:00~11:30 「相平衡の熱力学1」 講師 梶原正憲

11:30~12:50 一昼食一

12:50~14:20 「相平衡の熱力学2」 講師 梶原正憲

14:20~14:30 一休憩一

14:30~16:00 「CALPHAD 法による相平衡計算1」 講師 阿部太一

16:00~16:30 質疑応答

【2 日目】11月8日(金)10:00~16:30

9:30~10:00 受付

10:00~11:30 「CALPHAD 法による相平衡計算2」 講師 阿部太一

11:30~12:50 一昼食一

12:50~14:20 「凝固の熱力学と凝固伝熱解析」 講師 大出真知子

14:20~14:30 一休憩一

14:30~16:00 「フェーズフィールド法による凝固解析」 講師 大出真知子

16:00~16:30 質疑応答

テキスト 講義資料を pdf ファイルで配布する予定です。

基礎的知見に対するさらに詳細な解説については、以下の図書をご参照下さい。なお、受講料には図書代は含まれておりません。

(1)梶原正憲；相平衡の熱力学 一熱力学体系の理解のために一、コロナ社(2021)

(2)阿部太一；計算状態図入門、内田老鶴圃(2024)

講 師 東京工業大学 名誉教授 梶原正憲, 物質・材料研究機構 グループリーダー 阿部太一,
物質・材料研究機構 主任研究員 大出真知子

企画世話人 物質・材料研究機構 グループリーダー 阿部太一, 物質・材料研究機構 主幹研究員 井誠一郎

申込方法 <https://www.jim.or.jp/seminarsymposium/> よりお申込み下さい。

申込締切 2024年10月30日(水) *当日申込みは対面参加のみ。

受講料

受講資格	事前申込	当日申込
正会員・維持員社員	15,000円	18,000円
学 生	8,000円	10,000円
非会員	23,000円	25,000円

(協賛学会の会員は正会員とみなし,
学生は会員と非会員の区別はありません)

受講料支払方法 ①カード決済 ②コンビニ決済 ③銀行振込のいずれかをご利用下さい。

※当日申込みはカード決済のみ。

問 合 先 〒980-8544 仙台市青葉区一番町 1-14-32

(公社)日本金属学会 セミナー・シンポジウム係

E-mail: meeting@jimm.jp ☎ 022-223-3685 ☎ 022-223-6312

協賛予定

合金状態図研究会, エネルギー資源学会, 金属材料研究開発センター, 素形材センター, 資源・素材学会, 軽金属学会, 日本铸造工学会, 日本塑性加工学会, 日本鉄鋼協会, 日本チタン協会, 日本材料学会, 日本材料科学会, ステンレス協会, 日本アルミニウム協会, 軽金属製品協会, 日本ガスタービン学会, 日本機械学会, 日本 MRS, 日本物理学会



2024年度オンライン教育講座 今後の予定

- マルチスケール材料科学 (開催日: 2024年10月28日(月), 29日(火))
- 構造材料(2) 非鉄材料編(開催日: 2024年11月28日(木), 29日(金))

オンデマンド配信: オンライン教育講座 今後の予定

- 工業材料の応力・歪測定 (配信: 2024年10月1日(火)~10月31日(木))
- 構造材料(1) 鉄鋼材料編 (配信: 2024年11月5日(火)~12月2日(月))

◇お申込みは, 下記 URL よりご案内しております。

<https://jimm.jp/event/online/index.html>

~ご参加お待ちしております。~





第21回 ヤングメタラジスト研究交流会 開催のご案内

ヤングメタラジスト研究交流会は、関東支部内の大学や企業に所属する若手研究者の交流を目的とし2004年に第1回目が開催されて以降、今年で第21回目を迎えます。支部内の若手研究者と研究に熱意ある学生が研究活動の報告を通じて互いに交流し、連携を深めることで、関東支部の金属材料研究がより一層活性化することを目指しております。本年度は、日本製鉄株式会社 技術開発本部(富津市)を会場とし、製鉄所見学、招待講演、およびポスターセッションを対面で開催いたします。皆様のご参加をお待ちしております。

日時 2024年11月21日(木) 9:40~17:30

スケジュール (参加者数に応じて変更の可能性があります)

- 9:40-12:20 東日本製鉄所(君津地区)見学(希望者のみ)
- 12:20-13:30 移動, 昼食
- 13:30-15:30 ポスターセッション
- 15:40-17:00 招待講演
- 17:00-17:30 閉会挨拶, ポスター賞表彰式
- 17:30-18:00 移動(富津→木更津)
- 18:00-20:00 交流会(木更津ワシントンホテル)

講演プログラム

- 15:40-16:20 「日本, フランス, イギリスでの耐熱材料研究」
物質・材料研究機構 構造材料研究センター 宇多田悟志
- 16:20-17:00 「パーライト鋼のき裂形成に及ぼすラメラ組織の影響」
日本製鉄 技術開発本部 鉄鋼研究所 手島俊彦

参加費 無料(交流会では別途1,000円の参加費を申し受けます。)

場所およびアクセス

製鉄所見学

- 場所: 日本製鉄 東日本製鉄所(君津地区)
- アクセス: アクアライン高速バス(木更津-東京線)または市内バス「君津製鐵所」

研究会(ポスターセッション以降)

- 場所: 日本製鉄 技術開発本部 REセンター 本館ホール
- アクセス: JR 君津駅北口より無料バス

参加申込方法

交流会に参加をご希望の方は**10/24(木)17:00**までに氏名, 所属, E-mailなどを下記リンクの申し込みフォームからご登録下さい。

<https://forms.gle/1K9da9FC8wQZVj5x5>



製鉄所見学では、参加人数に上限を設けます。先着順に約40名としますので、希望する方はお早めの申し込みをお願いします。(見学参加者には、昼食にお弁当(無料)が提供されます。)

また、製鉄所見学には参加せずにポスターセッションからの参加も可能です。

ポスター発表希望者はアブストラクトの提出をお願いします。

- ポスターアブストラクト提出締切: **11/7(木)17:00**

申し込みフォームにフォーマットへのリンクを掲載していますので、ダウンロードしてご作成下さい。(提出先はフォーマットに記載されています。)

詳細な実施方法は、申込み頂いた方へ改めてご案内する予定です。

問合せ先 E-mail: miyazawa.t.ab@m.titech.ac.jp

東京工業大学 物質理工学院 宮澤知孝

E-mail: nonaka.hb6.yohsuke@jp.nipponsteel.com

日本製鉄 技術開発本部 鉄鋼研究所 野中洋亮

会誌2024年秋期大会講演精選論文原稿募集

欧文誌 Selected Papers from JIMM Fall Meeting (2024)原稿募集

下記の投稿論文を募集いたします。多くのご投稿をお待ちしております。

◎日本金属学会誌「2024年秋期大会講演精選論文」89巻4号および5号(2025年)掲載

◎Materials Transactions「Selected Papers from JIMM Fall Meeting (2024)」66巻4号および5号(2025年)掲載

原稿締切 **2024年11月11日(月)**

予備登録, 投稿および審査方法は、一般投稿論文に準ずる(ホームページ: 会誌・欧文誌投稿の手引き・執筆要領参照)。

欧文誌掲載論文は投稿掲載費用を必ず負担する。(会誌掲載論文は投稿掲載費用無料)

問合せ先 会誌・欧文誌編集委員会 E-mail: sadoku@jimm.jp

掲 示 板

〈公募類記事〉

有料掲載：1/4頁(700～800文字)程度。

「まてりあ」とホームページに掲載；16,500円

ホームページのみ掲載；11,000円

〈新刊案内〉

会員による出版案内(書誌情報の掲載)

〈その他の記事〉原則として有料掲載。

原稿締切・掲載号：毎月1日締切で翌月号1回掲載。

原稿提出先：電子メール(受け取りメールの確認して下さい)

E-mail: materia@jimm.jp

公 募

◇核融合科学研究所 教授/准教授/助教公募◇

公募人員 ①教授, 准教授, 助教若干名(最大10名程度)

②教授, 准教授, 助教(女性限定) 1名程度

所 属 研究部

研究・業務内容 核融合科学研究所は, 核融合エネルギーを私たちが利用できる形で実現するために必要となるプラズマ物理をはじめ, ミクロな量子プロセスや材料科学, 装置を構成する機器の工学技術まで, さまざまな研究課題を総合的に推進しています。独創性ととも高いコミュニケーション能力をもち, 大学共同利用機関の一員として国内外の共同研究に積極的に取り組むことによって, 核融合科学の学際的展開を先導できる研究者を募集します。

希望事項 ①博士の学位を有すること(助教応募者のみ, 取得見込みでも可) ②これまでの専門分野における研究実績を活かし, 学際領域を含む核融合科学の研究に取り組む意欲がある者(助教応募者のみ, 学際領域を含む核融合科学の研究に取り組む意欲のある者) ③国内外の共同研究に積極的に取り組み, リーダーシップを発揮すること(助教応募者のみ, 国内外の共同研究の推進に意欲のある者) ④(教授, 准教授応募者のみの希望事項)学生の教育に意欲があること

応募締切 令和6年11月12日(火)17時(必着)

就任時期 採用決定後のなるべく早い時期

提出書類 ①履歴書 ②これまでの研究内容 ③就任後の抱負 ④研究業績発表論文リスト ⑤論文別刷(直近3年間に出版された3編を含む, 計5編程度)(助教応募者のみ, 計3編程度) ⑥⑤の論文概要等 ⑦推薦書2通以上(海外の研究者からの推薦書を含めることが望ましい)(助教応募者のみ1通)

提出先 核融合科学研究所管理部総務企画課人事係
(nifs-jinji@nifs.ac.jp)
上記書類PDFデータを添付しE-mailで送付すること。

推薦書のみ郵送も可。(〒509-5292 岐阜県土岐市下石町322-6)

問合せ先 上記提出先と同じ, ☎ 0572-58-2013

詳細については, 本研究所のホームページに掲載しておりますので, ご覧下さい。

URL <https://www.nifs.ac.jp/jinji/index.html>

集 会

◇レアメタル研究会◇

■主 催 レアメタル研究会

■主 宰 者 東京大学生産技術研究所 教授 岡部 徹

■協 力 (一財)生産技術研究奨励会(特別研究会 RC-40)

■共 催 東京大学マテリアル工学セミナー

レアメタルの環境調和型リサイクル技術の開発研究会
東京大学生産技術研究所 持続型エネルギー・材料統合研究センター

東京大学生産技術研究所 非鉄金属資源循環工学寄付研究部門(JX 金属寄付ユニット)

■協 賛 (公社)日本金属学会 他

■開催会場 東京大学生産技術研究所

An 棟 2階 コンベンションホール

〒153-8505 東京都目黒区駒場 4-6-1

(最寄駅: 駒場東大前, 東北沢, 代々木上原)

■参加登録・問い合わせ: 岡部研 学術専門職員 宮寄智子
(参加登録: okabelab@iis.u-tokyo.ac.jp)

(問い合わせ: tmiya@iis.u-tokyo.ac.jp)

《2024年度 レアメタル研究会等の今後の予定》

■第112回 2024年9月27日(金) (2024年度 第2回)

■第113回 2024年11月15日(金) (2024年度 第3回)

★チタンシンポジウム(第8回)★(合同開催)

(関連イベント: 2024年11月22日(金)★日本学術会議主催
公開シンポジウム★)(会場: 日本学術会議講堂)

■第114回 2025年1月10日(金) (2024年度 第4回)

★貴金属シンポジウム(第12回)+新年会★(合同開催)

■第115回 2025年3月21日(金) (2024年度 第5回)

令和6年度 レアメタル研究会のご案内

(2024.7.26現在)

■第112回 2024年9月27日(金) 14:00～

An 棟 2F コンベンションホール

リアル講演会+講演のネット配信(Zoom Webinar & YouTube)のハイブリッド研究会

テーマ: バッテリーメタルの現状と将来

午後2:00～ 講演【敬称略】

- レアース、リチウム、ニッケルなどの現状と将来展望 (仮) (60分)
豊田通商株式会社 金属資源部 技術チーム チームリーダー
兼)リバースサプライチェーン事業部 バッテリー3Rグループ
守山 武
- バッテリーメタルの現状と将来(40分)
東京大学 生産技術研究所 教授 岡部 徹
- コバルトの現状(資源, 製錬, 用途)と将来展望について (仮) (60分)
東京大学 生産技術研究所 特任教授 黒川晴正
〈このあと総合討論を予定〉
午後6:00~
研究交流会・意見交換会 @An棟2F ホワイエ

■第113回 2024年11月15日(金) 14:00~
An棟2F コンベンションホール

- ★チタンシンポジウム(第8回)★(合同開催)
リアル講演会+講演のネット配信(Zoom Webinar & YouTube)のハイブリッド研究会
テーマ:チタンの現状と将来
午後2:00~ 講演【敬称略】
- チタンの現状と将来(仮) (60分)
株式会社 大阪チタニウムテクノロジーズ 代表取締役社長
川福純司
 - チタンの製錬プロセスについてのこれまでの研究とこれから挑戦したいこと(仮) (40分)
岩手大学工学部 助教 関本英弘
 - 溶融チタンから低酸素濃度のチタンを直接製造する革新的技術の開発(仮) (40分)~チタン製品の爆発的普及へと期待~
東京大学 生産技術研究所 教授 岡部 徹
 - 当社チタン事業の変遷(仮) (60分)
東邦チタニウム株式会社 常務執行役員 チタン事業部長
三戸武士
- 〈このあと総合討論を予定〉午後6:00~
研究交流会・意見交換会 @An棟2F ホワイエ

レアメタル研究会ホームページ
https://www.okabe.iis.u-tokyo.ac.jp/japanese/rc40_j.html

◇東京大学 生産技術研究所
非鉄金属資源循環工学寄付研究部門
(JX 金属寄付ユニット)主催
産学連携と人材育成に関するシンポジウム◇

- 主催 東京大学 生産技術研究所 非鉄金属資源循環工学寄付研究部門(JX 金属寄付ユニット)
- 協力 (一財)生産技術研究奨励会(特別研究会 RC-40)
- 共催 レアメタル研究会
東京大学マテリアル工学セミナー
レアメタルの環境調和型リサイクル技術の開発研究会
東京大学生産技術研究所 持続型材料エネルギーインテグレーション研究センター
- 協賛 (一社)軽金属学会 他

- 開催会場 東京大学 生産技術研究所 An棟2F コンベンションホール(〒153-8505 目黒区駒場4-6-1)
(最寄駅:駒場東大前, 東北沢, 代々木上原)
- 会費 参加費(シンポジウム)無料
- 参加登録・問合せ 非鉄金属資源循環工学寄付研究部門ホームページをご参照下さい。
<http://www.metals-recycling.iis.u-tokyo.ac.jp>
東京大学生産技術研究所 岡部研究室
特任研究員 池田 貴
E-mail: t-ikeda@iis.u-tokyo.ac.jp

2024年度 関連研究会の予定
★2024年9月20日(金)★ 寄付研究部門主催 本イベント
(会場:生産技術研究所コンベンションホール)

★産学連携と人材育成に関するシンポジウム★
(2024.7.10現在)

■2024年9月20日(金)An棟2F コンベンションホール
および Zoom Webinar + YouTube
13:30 ~ 受付開始 14:00 ~ 講演会
17:00 ~ 総合討論 18:00 ~ 研究交流会(要参加登録)

■講演会プログラム【敬称略】
司会 東京大学 生産技術研究所
非鉄金属資源循環工学寄付研究部門
特任教授 岡部 徹

- 先端技術と人をつなぐデザイン, それを担う人材(40分)
東京大学 特別教授
東京大学 生産技術研究所
非鉄金属資源循環工学寄付研究部門 特任教授 山中俊治
- 産学連携と人材育成の課題一産・学を経験して一(仮) (20分)
東京大学 生産技術研究所
非鉄金属資源循環工学寄付研究部門 特任教授 黒川晴正
- 大学という場での新しい価値創造の在り方(仮) (30分)
東京大学 生産技術研究所
非鉄金属資源循環工学寄付研究部門 特任教授 菅野智子
- 私の考える理想の技術開発のかたち(30分)
東京大学 生産技術研究所
非鉄金属資源循環工学寄付研究部門 特任講師 大内隆成
- 日本版サーキュラーエコノミーの実現を目指した産学連携と人材育成(30分)
早稲田大学 理工学術院 教授
東京大学大学院 工学系研究科 教授
東京大学 生産技術研究所
非鉄金属資源循環工学寄付研究部門 特任教授 所 千晴
- JX 金属の学生に向けた活動と社員アイデア創出プラットフォーム『Idea Seed Bank』活動の紹介(30分)
JX 金属株式会社 技術本部技術戦略部
オープンイノベーション担当課長 主席技師 山岡利至
午後5:00~ 総合討論
統括と講評
JX 金属株式会社 取締役副社長執行役員 菅原静郎
写真撮影
午後6:00~
研究交流会・意見交換会 @ An棟1F レストラン・アーベ

日本金属学会誌掲載論文

Vol. 88, No. 9 (2024)

——特集「超温度場材料創成学」——

レーザー粉末床溶融結合法のプロセスパラメータの効率的最適化に向けた **Deposited Energy Density** へのハッチ間隔の導入 國枝真衣 鈴木飛鳥 高田尚記 加藤正樹 小橋 眞

レーザー粉末床溶融結合法により製造した **AlSi10Mg/SiC** 複合材料の相構成と機械的性質の階層的特性評価 柳瀬裕太 宮内 創 松本洋明 横田耕三

レーザービーム粉末床溶融結合法により作製した **Ti-6Al-4Nb-4Zr** のクリープ挙動

御手洗容子 井上恭史 黒田知暉 松永紗英 戸田佳明 松永哲也 伊藤 勉 小笹良輔 石本卓也 中野貴由

選択的レーザー溶融付加製造における複数トラック・複数層走査時のエピタキシャル成長組織予測のための **multi-phase-field** フレームワーク

高木知弘 高橋侑希 坂根慎治

316L ステンレス鋼の急冷における非平衡凝固のマルチフェーズフィールドシミュレーション

瀬川正仁 山中晃徳

μ -Helix スキャンストラテジーと狭ピッチ走査レーザー粉末床溶融結合による **316L** ステンレス鋼単結晶の育成とプロセスモニタリング

柳 玉恒 能勢和史 奥川将行 小泉雄一郎 中野貴由

Additive Manufacturing 製 **Ti-48Al-2Cr-2Nb** 合金の微細組織および引張特性に及ぼす熱源走査速度の影響 趙 研 坂田将啓 安田弘行 當代光陽 上田 実 竹山雅夫 中野貴由

レーザー照射によるナトリウムイオン伝導性 β -**NaFeO₂** の溶融凝固と結晶成長

平塚雅史 本間 剛 小松高行

凍結乾燥パルス圧力印加オリフィス噴射法で作製した **MoSiBTiC** 粉末の特性に及ぼすプラズマ球状化処理の影響 周 振興 加藤駿平 周 偉偉 野村直之

デジタル画像相関法と高分解能電子線後方散乱回折法の併用による微視・局所的な応力-ひずみ曲線情報のマッピング 山崎重人 松尾啓史 森川龍哉 田中将己

ホットスタンプ用 **Zn-Ni** めっき鋼板の疲労特性に及ぼすマイクロクラック深さの影響

中川功一 中垣内達也 中島清次 名越正泰 玉井良清 平本治郎 吉武昭英

Materials Transactions 掲載論文

Vol. 65, No. 9 (2024)

——Special Issue on Materials Science on High-Entropy Alloys II——

PREFACE

Haruyuki Inui

Origin of Excellent Strength-Ductility Balance Unique to FCC High-Entropy Alloys: A Plaston-Based Mechanism Derived from Electronic Structure Calculations

Tomohito Tsuru

Search for Significant Short-Range Ordering in Medium-Entropy Alloys Tr-Co-Ni (Tr = Cr, Mn, and Fe)

Saiki Futami, Yoichi Ikeda, Hong-Fei Zhao, Yoshihiko Umemoto, Takashi Honda and Masaki Fujita

Effective Atomic Radii of Constituent Elements and Their Temperature Dependence in Quaternary and Ternary Subset Alloys Derived from CrMnFeCoNi High-Entropy Alloy

Kiichi Nakano, Daijiro Takeuchi, Takeshi Teramoto and Katsushi Tanaka

Crystal Plasticity Finite Element Simulation Considering Geometrically Necessary Dislocation Distribution for Reproducing Mechanical Anisotropy of Rolled CrMnFeCoNi High-Entropy Alloy

Nomun Gerel-Erdene and Yoshiteru Aoyagi

Effect of Deformation and Subsequent Heat Treatment on Sigma-Phase Precipitation and Mechanical Property of CoCrFeMnNi High Entropy Alloy

Tetsuya Yamashita, Reza Gholizadeh, Shuhei Yoshida and Nobuhiro Tsuji

Relationship between Lattice Strain and Ordering Tendency in Medium-Entropy Alloys

Masanori Enoki and Hiroshi Ohtani

Fcc-Based Superstructure in CrCoNi System Induced by Annealing of Amorphous Cr-Co-Ni-Si-B-P Alloy

T. Kawamata, T. Ban, M. Shibata, H. Murayama, A. Yasuhara, K. Yubuta and K. Sugiyama

Alloy Design and Solidification Microstructure of Ti-Zr-Hf-Ag-V Multi-Component Alloys with a Dual Bcc Structure

Takeshi Nagase, Mitsuharu Todai, Satoshi Ichikawa, Aira Matsugaki and Takayoshi Nakano

Formation of Stacking Fault Tetrahedra and Diffuse Streaks along $\langle 111 \rangle$ in the Equiatomic Cr-Co-Ni Medium-Entropy Alloy

Le Li, Zhenghao Chen, Kyosuke Kishida and Haruyuki Inui

Strain Rate Dependence of Slip Persistence in TiZrNbHfTa Investigated with Microcantilever Bending Tests

Masaki Tanaka, Shigeto Yamasaki and Tatsuya Morikawa

——Regular Article——

Materials Physics

Conduction Mechanism in Amorphous NbTe₄ Thin Film

Yi Shuang, Daisuke Ando and Yuji Sutou

Microstructure of Materials

Conditions for Cuprous Chloride Ultrathin Film Formation on Silicon Substrate by Molecular Beam Epitaxy

Masayoshi Ichimiya, Keita Funai and Junichi Yanagisawa

Mechanics of Materials

Fundamental Study on Fracture Process Analysis of Rocks under Quasi-Static Loading Based on Hybrid FEM-DEM Using Extrinsic Cohesive Zone Model

Yutaro Maeda, Sho Ogata, Daisuke Fukuda, Toru Inui, Hideaki Yasuhara and Kiyoshi Kishida

First-Principles Study of Generalized Stacking Fault Energy in Mg-Zn-Y Alloy with Long-Period Stacking-Ordered Structures

Naoki Uemura, Suraj Singhaneke and Ryosuke Matsumoto

Influence of Planar Anisotropy on Stress Corrosion Cracking of Extruded AZ31 Magnesium Alloy Plate

Xinsheng Huang, Isao Nakatsugawa and Yasumasa Chino

Measurement of Internal Residual Stress of Three-Directional Components and Estimation of Inherent Strain in Carburized Steel for Large Rolling Bearings by Combining the Contour Method and XRD Method

Masako Tsutsumi, Shota Yamagami, Kunio Narasaki, Daisuke Watanuki, Yuji Miyamoto and Ninshu Ma

Deformation Analysis of Moving Aluminum Sheet in Magnetic Pulse Welding

Keigo Okagawa, Riku Fukagawa, Masaki Ishibashi and Takaomi Itoi

Materials Chemistry

Inverting Single Crystal Elastic Constants of Polycrystals with Metallographic Measurement and Modified Ultrasonic Backscatter Mode

Xia Zhang and Xiongbing Li

First-Principles Study of Adsorption of Atomic Oxygen on PdZn(111) Surface

Kazuya Iwamura, Yusuke Otani, Yuki Takahashi, Yasushi Ishii and Kazuki Nozawa

The Effect of Tungsten Addition on Steam Oxidation Behavior of the Fe-20Cr-35Ni (at%) Alloy at 1073 K

Kaito Ogawahara and Mitsutoshi Ueda

Effect of Structure of Organic Additives on Electrodeposition Behavior of Zn from Alkaline Zincate Solution and Its Crystal Morphology

Tomoki Imatani, Satoshi Oue, Yu-ki Taninouchi, Yasunori Aoki and Hiroaki Nakano

Engineering Materials and Their Applications

Design and Analysis of CsPbI₃-Based Tandem Perovskite Solar Cells with Carbon as Metal Electrode

Ankit Mishra, K P Yadav and Md. Mustafa Kamal

Measurements of Thermoelectric Properties of Identical Bi-Sb Sample in Magnetic Fields and Influence of Sample Geometry

Masayuki Murata, Mari Suzuki, Kayo Aoyama, Kazuo Nagase, Hironori Ohshima, Atsushi Yamamoto, Yasuhiro Hasegawa and Takashi Komine

Evaluation of Dislocation Density and Dislocation Strengthening Mechanism in Ultra Low-Carbon Martensitic Steel

Osamu Idohara, Yoshitaka Misaka and Setsuo Takaki

—Current Trends in Research—

Recent Development of Joining Materials, Methods of Reliability Evaluations and Conductive Materials for Electronic Components

Tatsuya Kobayashi, Toshihiro Kuzuya and Tetsuya Ando

Selected Papers from “The 18th International Conference on Aluminium Alloys (ICAA18) (September 4–8, 2022)”

Shoichi Hirose



まてりあ第63巻10号 予告

[インタビュー]

[最近の研究] 偏光観察によるパワーデバイス SiC 基板の結晶欠陥可視化名大 原田俊太 村山健太
高耐熱性ハイエントロピー合金の特異な力学特性の起源

.....日本原研 都留智仁 ロブゼンコ イバン 京大 韓 恕 陳 正昊 乾 晴行

室温成形可能であり放熱や耐食性に優れた新マグネシウム合金の開発産総研 Bian Mingzhe 千野靖正

[実学講座] 実学講座 2章 特性の計測評価 2-3 磁気特性の計測と解析

2-3-2 磁気測定的基础: 動的磁化測定茨城高専 小野寺礼尚 茨城大名誉教授 喜多義治

—他—

編集の都合により変更になる場合がございます。

新 入 会 員

(2024年6月21日～2024年7月22日)

正 員

石川 歩 実	スカイワークスフィルターソリューションズジャパン株式会社	角 慎一郎	日本軽金属株式会社	松岡 聡	大平洋製鋼株式会社
石田 卓	大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構	遠山 諒	日本精工株式会社	宮田 全 展	国立研究開発法人産業技術総合研究所
枝根 和也	株式会社ツチヨシ産業	名取 理嗣	大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構	安富 良輔	DOWA ホールディングス株式会社
小谷 岳生	鳥取大学	廣田 夕貴	東北大学		

学 生 員

青木 涉	東京工業大学	上山 魁	東北大学	篠原 維月	長岡技術科学大学
赤尾 海星	九州大学	河合 航平	早稲田大学	渋谷 尚希	兵庫県立大学
秋 駿志	大阪大学	川添 蒼嗣	東北大学	嶋田 翔	早稲田大学
朝倉 悠介	東京工業大学	河中 孔明	大阪大学	島田 祐貴	大阪大学
東 祐輝	九州大学	河原 優太	関西大学	清水 優斗	山形大学
安部 鈴佳	東京工業大学	菊地 圭太	東北大学	下川 貴大	京都大学
安部 知哉	関西大学	木島 麻衣	横浜国立大学	下 萬祐暉	芝浦工業大学
阿部 将大	東北大学	北澤 慶太	北見工業大学	市山 陽大	京都大学
安藤 大介	芝浦工業大学	北村 海	島根大学	白井 理也	東北大学
飯森 歩	関西大学	木俣 拓海	大阪大学	水谷 建太	長岡技術科学大学
池田 賢太	京都大学	木戸 颯成	大阪公立大学	末吉 由育	鹿児島大学
池田 皇士郎	岡山大学	木村 拓未	東京大学	菅野 弘将	富山大学
池淵 遼平	島根大学	木村 嘉希	熊本大学	菅谷 龍	筑波大学
石井 裕貴	東京工業大学	喜屋武 香也	弘前大学	杉浦 凌介	大阪大学
石井 利穩	芝浦工業大学	工藤 港	東北大学	杉山 翔	九州大学
石田 響揮	岩手大学	久保 樹	東北大学	鈴木 祥太	神戸大学
石塚 終土	京都大学	久保紀洋子	奈良女子大学	鈴木 晟瑠	長岡技術科学大学
磯貝 祐希	名古屋大学	窪田 安晃	九州大学	鈴木 花実	東京都立大学
一戸 嘉允	弘前大学	熊井 宏樹	北海道大学	鈴木 政人	長岡技術科学大学
市村 嘉健	熊本大学	藏内 貴也	大阪大学	須藤 裕一	早稲田大学
井出 駿平	筑波大学	栗田菜々子	東北大学	砂川 暁洋	秋田大学
伊藤 慎梧	東北学院大学	栗原 健輔	芝浦工業大学	住田 一真	東京工業大学
伊藤 萌恵	岩手大学	黒井 遥翔	東北大学	諏訪 智巳	東北大学
井上 凌輔	東京工業大学	黒岡 隼人	大阪大学	瀬川 千香	岩手大学
今岡 大地	大阪大学	小出 隼司	北海道大学	堰本 純生	大阪公立大学
岩崎 大誠	北海道大学	河野 圭希	大阪大学	世山 将大	大阪公立大学
岩崎 太洋	大阪大学	小枝 泰也	大阪大学	田内 海都	東北大学
白井 喜紀	早稲田大学	小坂元 英基	熊本大学	高木 優朋	九州大学
榎田 海斗	関西大学	小島 嘉文	東京大学	高島 大空	大阪大学
遠藤 久典	東北大学	小谷 慧	北海道大学	高野 翔大	大阪大学
王 敏安	東京大学	樹神 海斗	名古屋工業大学	高橋 希陽太	東北大学
大川 将司	東京工業大学	後藤 圭太	名古屋工業大学	高橋 壮	早稲田大学
太田 竜資	九州大学	小林 奎介	北海道大学大	高橋 浩輝	芝浦工業大学
大竹 竜史	早稲田大学	小林 龍真	信州大学	高橋 諒	岩手大学
大谷 直輝	芝浦工業大学	小堀 龍一	芝浦工業大学	高橋 怜平	仙台高等専門学校
大泊 龍貴	信州大学	小松原 佑仁	久留米工業高等専門学校	高橋 怜士	岩手大学
大森 令央奈	東北大学	齐 悦	東北大学	高原 光平	大阪大学
岡 涼太郎	福井大学	佐伯 采音	奈良女子大学	高良 耕平	九州大学
岡田 幸樹	東北大学	坂上 舜	群馬大学	嶽 修平	高知工科大学
岡本 拓巳	名古屋大学	坂谷 有彩	東北大学	武尾 遼	東京工業大学
奥山 侑希	早稲田大学	櫻井 ひかり	東北大学	田代 康真	長岡技術科学大学
音成 航希	東北大学	笹田 智也	京都大学	田中 岳陽	九州大学
海藤 皇成	東北大学	佐田 一海	熊本大学	田中 洸史朗	名古屋大学
柿沼 司	金沢大学	里 祐磨	九州大学	田中ダイチ	熊本大学
片上 俊太郎	名古屋大学	佐藤 魁翼	東北大学	田中 大翔	筑波大学
加藤 馨子	京都大学	佐藤 龍行	東北工業大学	田邊 開世	関西大学
加藤 壮大	金沢大学	佐藤 希	東北大学	谷口 幸暉	京都大学
加藤 広晃	長岡技術科学大学	佐藤 遥太	東京工業大学	田上 陽己	九州大学
兼清 竜圭	大阪大学	佐藤 良亮	龍谷大学	田原 慧佑	東北大学
金田 裕大	名古屋工業大学	里見 優太郎	早稲田大学	長 洸太	芝浦工業大学

長者亮佑	大阪大学	橋本颯太郎	熊本大学	水口広太	東北大学
辻拓巳	東北大学	長谷川凱土	大同大学	緑川翔	東京工業大学
土谷惇人	九州大学	長谷川修哉	熊本大学	宮内健太郎	立命館大学
恒川直諒	弘前大学	長谷川丈	横浜国立大学	宮崎楓芽	熊本大学
坪井丈一郎	東京工業大学	畠中蒼太	豊橋技術科学大学	宮原舜	信州大学
鶴岡涼	東京工業大学	花坂啓太	室蘭工業大学	宮本裕貴	近畿大学
弦木健太郎	東北大学	濱田悠成	芝浦工業大学	三輪颯也	名古屋工業大学
鶴田卓也	東北大学	早川樹	大阪公立大学	村形幸作	東北学院大学
寺本真優	宇部工業高等専門学校	早川涼介	九州大学	村上奨大	関西大学
唐博聞	東北大学	林航太	大阪大学	村田偉誠	兵庫県立大学
徳江幸太郎	金沢大学	林田倫昂	名古屋工業大学	森颯大	群馬大学
徳重颯	大阪大学	樋口暁亮	千葉工業大学	安澤颯介	東京工業大学
常井翔矢	東北大学	樋口竜太郎	熊本大学	矢竹結稀	熊本大学
戸崎杏珠	群馬大学	平石遥輝	早稲田大学	山内輝	北海道大学
戸塚駿介	群馬大学	平澤綾大	大阪大学	山口創大	大坂大学
永井悠	東北大学	平田健人	室蘭工業大学	山崎健太	岩手大学
中川諒紀	東京大学	晝間悠斗	東京工業大学	山崎大瑚	芝浦工業大学
中川了太	群馬大学	廣岡巧真	熊本大学	山下真我	京都大学
長草生真	東北大学	広富伊織	島根大学	山田晃雅	横浜国立大学
中澤真一朗	九州大学	深田快地	名古屋大学	山村拓夢	東京大学
永島康太郎	神戸大学	福島希真	大阪大学	山本晃大	富山県立大学
長嶋柗司	兵庫県立大学	福田英	島根大学	山本仁平	関西大学
永嶋直樹	長岡技術科学大学	福田幹久	東北大学	山本皓貴	大阪大学
長野和歩	熊本大学	藤井太一	群馬大学	吉岡慶起	神戸大学
永野大勢	筑波大学	藤野匡	東京工業大学	吉迫大輝	東北大学
中村慎之介	早稲田大学	藤本彬仁	大阪大学	吉澤広樹	筑波大学
中村苑香	関西大学	藤本樹	東京工業大学	吉田啓貴	神戸大学
中易奨貴	東北工業大学	佛圓大河	大阪公立大学	吉田陸人	東北大学
梨木祐真	芝浦工業大学	星島颯太	滋賀県立大学	吉見俊紀	東京工業大学
縄田涼馬	宇部工業高等専門学校	細川俊吾	神戸大学	吉本阜龍	芝浦工業大学
難波司	神戸大学	細木康平	名古屋工業大学	米内直矢	岩手大学
南部孝尚	筑波大学	堀田千尋	早稲田大学	米倉大貴	群馬大学
西原誠也	名古屋工業大学	町田裕紀	東北大学	米田健	東京工業大学
根城響子	八戸工業高等専門学校	松田康矢	弘前大学	劉墨翰	東北大学
野尻幹太	熊本大学	松本隆佑	九州大学	渡辺俊介	東北大学
萩原照也	京都大学	三浦時瑛	東北大学	王侯	福井大学
橋爪琳	群馬大学	三浦大典	宇部工業高等専門学校		

外国一般会員

Chi Xu	Jiangsu Province Yancheng Institute of Technology	YU HAYOUNG	Korea Institute of Industrial Technology	パク ガンジエ	国立研究開発法人産業技術総合研究所
Jianian Hu	Jiangnan university	EDWARDS Thomas E. J.	国立研究開発法人物質・材料研究機構	HOEFLER THOMAS	国立研究開発法人物質・材料研究機構
Qiang Zhou	Beijing Institute of Technology				
Xiang Chen	JIANGNAN UNIVERCITY				

外国学生会員

Galiegue Louis	東京大学	じゃぶり あみら	長岡技術科学大学	鄭陽	東京大学
GUO lipeng	東北大学	JIN Lu	芝浦工業大学	PUMISUTTAPOL THANAKORN	仙台高等専門学校
KIM Kibeom	東京大学	蘇昊澤	東北大学	卞篠	東北大学
Kim Seokhyeon	Pukyong National university	SONG Yuxin	東北大学	Magalhaes de Melo Freire Rafael	東京大学
XUE Qingyan	北海道大学	Song Kerui	東北大学	袁成	東京工業大学
YEOM Jinseok	Pukyong National University	TRAKULDIT Supicha	早稲田大学	葉夏桐	東北大学
GUO WENHENG	金沢大学	張惟喬	東北大学	叶思宇	芝浦工業大学
カマルアイマン	シャリフデン 東京大学	趙宏飛	東北大学	楊超	東京大学
柴振邦	東京工業大学	陳正龍	早稲田大学	LIU JIAYAN	東北大学

ユース会員

荒川瑛希	栃木高校	加藤大幹	兵庫県立宝塚北高校	佐古悠真	津山高専
岩本脩	兵庫県立宝塚北高校	加藤椋惺	兵庫県立宝塚北高校	笹部祐也	兵庫県立宝塚北高校
内田有香	兵庫県立宝塚北高校	金古雄大	兵庫県立宝塚北高校	高野悠惺	兵庫県立宝塚北高校
岡本守生	兵庫県立宝塚北高校	川口拓真	兵庫県立宝塚北高校	竹原浩太	滋賀県立大学

行事カレンダー

太字本会主催(ホームページ掲載)

開催日	名称・開催地・掲載号	主催	問合せ先	締切
2024年9月				
2～3	第18回水素若手研究会(北大)	水素若手研究会	hydrogen.wakate@gmail.com https://sites.google.com/view/hydrogen-wakate/	7.19
3～4	第43回初心者のための疲労設計講習会(オンライン開催)	日本材料学会	TEL 075-761-5321 jimuj@office.jsms.jp https://www.jsms.jp/	
3～4, 10.1～9	初心者のための電気化学測定法-実習編(現地開催/東京理科大+オンデマンド配信)	電気化学会	TEL 03-3234-4213 sekine@electrochem.jp https://www.electrochem.jp/seminar/	
5～6	SPring-8 シンポジウム2024(九大+オンライン)	SPring-8 ユーザー協同体(SPRUC)他	TEL 0791-58-2785 sp8sympo2024@spring8.or.jp http://www.spring8.or.jp/ja/science/meetings/2024/sp8sympo2024/	
6～8	2024年度工学教育研究講演会(九大伊都キャンパス)	日本工学教育協会他	TEL 03-5442-1021 kawakami@jsee.or.jp http://www.jfes.or.jp/	
10～12	資源・素材2024(秋田)-2024年度資源・素材関係学協会合同秋季大会(秋田大)	資源・素材学会	TEL 03-3402-0541 info@mmij.or.jp	
10～12	第37回秋季シンポジウム(名大)	日本セラミックス協会	TEL 03-3362-5232 fall37@ceramic.or.jp https://fall37.ceramic.or.jp/	
11～13	2024年度 高温材料の変形と破壊研究会(日田市)(6号428頁)	研究会No.83	saruta.mamiko@nims.go.jp	7.19
11～13	2024年度 微小領域の力学特性評価とマルチスケールモデリング研究会(日田市)(7号515頁)	研究会No.82	iguchi.rie@nims.go.jp	7.19
12～14	第26回日本感性工学会大会(東京)	日本感性工学会	TEL 03-3666-8000 jske@jske.org https://www.jske.org/taikai/jske26	
13	第34回安全管理の最新動向講習会(大阪)	安全工学会	TEL 03-6206-2840 jsse-2004@nifty.com https://www.jsse.or.jp/	
13	第358回塑性加工シンポジウム「金型寿命向上に有効な表面処理技術の最前線」(名城大+オンライン)	日本塑性加工学会	http://www.jstp.or.jp	定員 80名
17～19	日本実験力学会2024年度年次講演会(山形大学)	日本実験力学会	TEL 025-368-9310 office-jsem@clg.niigata-u.ac.jp https://jsem.jp/event/Annual24/index.html	事前 7.21
18～19	第36回疲労シンポジウム(函館)	日本材料学会	TEL 075-761-5321 jimuj@jsms.jp http://fatigue.jsms.jp	講演 6.14
18～20	日本金属学会秋期講演大会(大阪大学豊中キャンパス)(本号657頁)	日本金属学会	TEL 022-223-3685 annualm@jimm.jp	
25	第12回「高校生・高専学生ポスター発表」(オンライン)(7号505頁)			
20	日本鉄鋼協会・日本金属学会 第13回女性会員のつどい(阪大)(本号657頁)	日本金属学会・鉄鋼協会	TEL 022-223-3685	
20	令和6年秋季 全国大学材料関係教室 協議会講演会(阪大)(本号657頁)			
20	産学連携と人材育成に関するシンポジウム(東大+オンライン)(本号674頁)	東京大学 生産技術研究所 非鉄金属資源循環工学寄付研究部門(JX 金属寄付ユニット)	t-iked@iis.u-tokyo.ac.jp http://www.metals-recycling.iis.u-tokyo.ac.jp	
20～21	第49回複合材料シンポジウム(豊橋)	日本複合材料学会	TEL 03-5981-6011 jscm@asas-mail.jp http://www.jscm.gr.jp/	
24	第95回技術セミナー「大気腐食の評価技術と予測」(東京)	腐食防食学会	TEL 03-3815-1161 naito-113-0033@jcorr.or.jp https://www.jcorr.or.jp/yotei/95.html	
24～26	第21回 日本熱電学会学術講演会(TSJ2024)(産総研つくば)	日本熱電学会	TEL 092-583-7948 suekuni.koichiro.063@m.kyushu-u.ac.jp https://www.thermoelectrics.jp/conference.html	
26～27	第24回アコースティック・エミッション総合コンファレンス(佐賀大)	日本非破壊検査協会	TEL 03-5609-4015 yasoshima@jsndi.or.jp https://www.jsndi.jp/	
26～27	第16回「役に立つ真空技術入門講座」(大阪公立大+オンライン)	日本表面真空学会 関西支部	TEL 072-247-6162 syojin-yakunitatsu@jvss-kansai.jp https://www.jvss.jp/	定員 200名
26～28	第60回熱測定討論会(京都府立大)	日本熱測定学会	TEL 03-6310-6831 netsu@mbd.nifty.com https://www.netsu.org/60touron/index.html	
27	レアメタル研究会(東大生産技研/ハイブリッド)(本号673頁)	レアメタル研究会	TEL 03-5452-6314 tmiya@iis.u-tokyo.ac.jp https://www.okabe.iis.u-tokyo.ac.jp/japanese/index_j.html	
30	腐食防食部門委員会第356回例会(大阪)	日本材料学会	jimuj@office.jsms.jp	9.20
2024年10月				
1～31	オンデマンド配信 オンライン教育講座「工業材料の応力・歪測定」(本号669頁)	日本金属学会	TEL 022-223-3685 meeting@jimm.jp	10.8

開催日	名称・開催地・掲載号	主催	問合せ先	締切
2～4	第43回電子材料シンポジウム(EMS-43)(榎原)	電子材料シンポジウム運営・実行委員会	ems43-query@ems.jpn.org http://ems.jpn.org/	
2～4	ADMETA Plus 2024(Advanced Metallization Conference 2024: 33rd Asian Session)(東大+オンライン)	応用物理学会	TEL 03-5821-7120 jimukyoku@admeta.org https://www.admeta.org/	
4	第34回安全管理の最新動向講習会(東京)	安全工学会	TEL 03-6206-2840 jsse-2004@nifty.com https://www.jsse.or.jp/	
8～9	第6回EBS法による損傷評価講習会(京都+オンライン)	日本材料学会	TEL 075-761-5321 jimuj@office.jsms.jp http://www.jsms.jp/	9.11
8～9	第14回材料の衝撃問題シンポジウム(京都)	日本材料学会	http://www.jsms.jp impact14@office.jsms.jp	講演 6.28
8～10	第10回材料 WEEK(京都)	日本材料学会	TEL 075-761-5321 jimuj@office.jsms.jp http://www.jsms.jp/	
10～11	第185回塑性加工学講座(Web開催)「板材成形の基礎と応用～基礎編～(オンライン開催)」	日本塑性加工学会	http://www.jstp.or.jp	定員 50名
13～17	2024年粉末冶金国際会議(略称: WORLD PM2024)(横浜)	日本粉末冶金工業会、(一社)粉体粉末冶金協会	worldpm2024@jtbcom.co.jp https://www.worldpm2024.com/cfp.html	
14～18	第4回J-PARCシンポジウム「J-PARCの将来とJ-PARCが創る未来」(水戸)	J-PARCセンター	https://j-parc.jp/symposium/j-parc2024/	
16, 30	第253・254回西山記念技術講座「最新シミュレーション技術の進歩と鉄鋼業への展開」(大阪)(東京)	日本鉄鋼協会	TEL 03-3669-5933 educact@isij.or.jp https://isij.or.jp/event/event2024/nishiyama253.html	
16～17	第46回安全工学セミナー(東京+オンライン)	安全工学会	TEL 03-6206-2840 jsse-2004@nifty.com https://www.jsse.or.jp/	
17	No. 24-100 日本機械学会 クリープおよび高温疲労・熱疲労の基礎(オンライン)	日本機械学会	TEL 03-4335-7610 https://www.jsme.or.jp/event/24-100/	
18～19	第96回塑性加工技術フォーラム「塑性加工技術と金型高度化の最前線」(岡谷)	日本塑性加工学会他	http://www.jstp.or.jp	定員 50名
18～20	日本銅学会第64回講演大会(宇都宮)	日本銅学会	TEL 03-6803-0587 dou-gakkai@copper-brass.gr.jp https://www.copper-brass.gr.jp/?p=7483	
18～20	第37回計算力学講演会(仙台)	日本機械学会	TEL 03-4335-7610 https://www.jsme.or.jp/conference/cmdconf24/index.html	
20～24	2024年日本表面真空学会学術講演会(北九州)	日本表面真空学会	taikai2024@jvss.jp https://pub.confit.atlas.jp/en/event/jvss2024 https://www.jvss.jp/conference/iss10/	
20～24	The 10th International Symposium on Surface Science (ISSS-10)(北九州)	日本表面真空学会	TEL 03-3812-0266 iss10@jvss.jp https://www.jvss.jp/conference/iss10/	
23～24	第52回日本ガスタービン学会定期講演会(高松)	日本ガスタービン学会	TEL 03-3365-0095 gtsj-office@gtsj.or.jp http://www.gtsj.or.jp/	
24	第64回「現場の硬さ試験」講習会-基礎とその活用-(東京)	日本材料試験技術協会	TEL 047-431-7451 gyomu2@ystl.jp http://www.mtraj.jp	10.17
25	AM研究会第10回委員会・セミナー(東大生産研)	日本金属学会AM研究会	https://ji-am.jp TEL 06-6879-4448	
26	日本機械学会関東支部山梨講演会(山梨大)	日本機械学会関東支部	TEL 055-220-8455 http://society.me.yamanashi.ac.jp/jsme/2024/	
28～29	オンライン教育講座「マルチスケール材料科学」(本号668頁)	日本金属学会	TEL 022-223-3685 meeting@jimm.jp	10.21
28～30	第45回日本熱物性シンポジウム(長岡市)	日本熱物性学会	TEL 03-5452-6218 jstp@iis.u-tokyo.ac.jp http://jstp-symp.org/symp2024/index.html	
29	公開シンポジウム「バイオマテリアル・生体医工学の研究開発戦略」(仙台)	日本学術会議材料工学委員会他	jsb_symposium2024.com	
29～31	第49回コロージョンセミナー 主題: 様々な腐食・劣化に対応できる腐食防食研究者・技術者を目指して(名古屋)	腐食防食学会	TEL 03-3815-1161 naito-113-0033@jcorr.or.jp	参加 10.21
31～11.1	第60回X線分析討論会(高知)	日本分析化学会X線分析研究懇談会	TEL 079-267-4929 murama@eng.u-hyogo.ac.jp https://xbun.jsac.jp/conference/no60.html	
2024年11月				
1～3	第31回機械材料・材料加工技術講演会(M & P 2024)(富山大)	日本機械学会	https://jsmempd.com/conference/mpdconf/2024/	
5～12.2	オンデマンド配信 オンライン教育講座「構造材料(1)鉄鋼材料編」	日本金属学会	TEL 022-223-3685 meeting@jimm.jp	
6～7	NIMS AWARDシンポジウム2024(つくば)	物質・材料研究機構	TEL 029-859-2240 https://www.nims.go.jp/nims-award-symposium/	
7～8	金属学会セミナー 相平衡と相変化の計算科学: 凝固現象編(東京+ハイブリッド)(本号670頁)	日本金属学会	TEL 022-223-3685 meeting@jimm.jp	事前 10.30
8	日本希土類学会第42回講演会(横浜)	日本希土類学会	TEL 06-6879-7352 office@kidorui.org https://www.kidorui.org/lecture.html	参加 10.18

開催日	名称・開催地・掲載号	主催	問合せ先	締切
8～10	軽金属学会第147回秋期大会(群馬大)	軽金属学会	https://www.jilm.or.jp/	
8～10	第75回塑性加工連合講演会(琉球大)	日本塑性加工学会	TEL 03-3435-8301 http://www.jstp.jp/	
12～13	第46回安全工学セミナー(東京+オンライン)	安全工学会	TEL 03-6206-2840 jsse-2004@nifty.com https://www.jsse.or.jp/	
13～15	第65回高圧討論会(盛岡)	日本高圧力学会	TEL 070-5545-3188 touronkai65@highpressure.jp http://www.highpressure.jp/new/65forum/	参加事前 9.13
13～15	第71回材料と環境討論会(那覇)	腐食防食学会	TEL 03-3815-1161 ysm.hng-113-0033@jcorr.or.jp https://www.jcorr.or.jp/yotei/71.html	
14～15	第186回塑性加工学講座「板材成形の基礎と応用～応用編～」(Web開催)	日本塑性加工学会	http://www.jstp.or.jp	定員 50名
15	レアメタル研究会(東大生産技研/ハイブリッド)(本号673頁)	レアメタル研究会	TEL 03-5452-6314 tmiya@iis.u-tokyo.ac.jp https://www.okabe.iis.u-tokyo.ac.jp/japanese/index_j.html	
15	第26回ミレニアム・サイエンスフォーラム(東京)	ミレニアム・サイエンス・フォーラム	TEL 090-8024-7568 msf@oxinst.com http://www.msforum.jp/	
17～22	15th International Symposium of Atomic Level Characterizations for New Materials and Devices '24(ALC'24)(松江)	日本表面真空学会	TEL 03-3812-0266 office@jvss.jp https://www.jvss.jp/division/mba/alc/alc24/	
18～20	第53回結晶成長国内会議(JCCG-53)(工学院大)	日本結晶成長学会	jccg-53@jacg.jp https://www.jacg.jp/jp/event/2024/jccg-53/	
21	第21回ヤングメタラジスト研究交流会(東京)(本号672頁)	関東支部	miyazawa.t.ab@m.titech.ac.jp	参加 10.24
21～22	第62回高温強度シンポジウム(姫路)	日本材料学会	TEL 075-761-5321 jimu@office.jsms.jp https://www.jsms.jp/	参加 11.1
21	第75回白石記念講座 データ駆動型材料開発の最前線とその適用例(東京)	日本鉄鋼協会	TEL 03-3669-5933 educact@isij.or.jp https://www.isij.or.jp/event/event2024/shiraishi75.html	
22	日本学術会議公開シンポジウム「サステナブル社会への移行における資源循環の役割」(東京)	日本学術会議 材料工学委員会, 総合工学委員会, 環境学委員会他	TEL 03-5286-3320 info@mmij.or.jp	
25～27	第45回 超音波エレクトロニクスの基礎と応用に関するシンポジウム(東京)	超音波エレクトロニクス協会	TEL 03-3259-0766 use-sponsor-app@iuse.or.jp https://www.use-jp.org/	
28～29	第56回溶融塩化学討論会(千葉)	電気化学会溶融塩委員会	https://msc.electrochem.jp/symposium/symposium.html	
28～29	オンライン教育講座「構造材料(2)非鉄材料編」(本号666頁)	日本金属学会	TEL 022-223-3685 meeting@jimm.jp	11.21
2024年12月				
2～4	The 22nd Asian BioCeramics Symposium (ABC2024)(第22回アジアバイオセラミックス会議)(北九州)	日本セラミックス協会生体関連材料部会	TEL 093-695-6025 tmiya@life.kyutech.ac.jp http://www.ceramic.or.jp/bseitai/ABC2024/index.html	
5～6	電気加工学会全国大会(2024)(姫路)	電気加工学会	TEL 086-251-8037 shinonaga@okayama-u.ac.jp http://www.jseme.or.jp/	
9～11	第50回固体イオニクス討論会(豊中)	固体イオニクス学会	TEL 022-217-5341 ssij@ssj-j.org https://www.ssi-j.org/symp/ssij50/	
11～13	Asian Thermal Spray Conference 2024(アジア溶射会議2024)(東北大)	日本溶射学会	TEL 06-6722-0096 jtss@jtss.or.jp	
20～21	第35回信頼性シンポジウム—安心・安全を支える信頼性工学の新展開—(電通大)	日本材料学会	TEL 075-761-5321 RESYMPO2024@office.jsms.jp http://www.jsms.jp/	
2025年1月				
10	レアメタル研究会(東大生産技研)(本号673頁)	レアメタル研究会	TEL 03-5452-6314 tmiya@iis.u-tokyo.ac.jp https://www.okabe.iis.u-tokyo.ac.jp/japanese/index_j.html	
17	AM研究会第11回委員会・セミナー(阪大中之島センター)	日本金属学会AM研究会	https://ji-am.jp TEL 06-6879-4448	
23～24	第46回安全工学セミナー(東京+オンライン)	安全工学会	TEL 03-6206-2840 jsse-2004@nifty.com https://www.jsse.or.jp/	
28～29	第31回「エレクトロニクスにおけるマイクロ接合・実装技術」シンポジウム(Mate2025)(横浜)	スマートプロセス学会他	TEL 06-4798-2078 mate@glm-p.com https://glm-p.com/mate2025/index.htm	
2025年3月				
8～10	日本金属学会春期講演大会(東京都立大学南大沢キャンパス)予定	日本金属学会	TEL 022-223-3685 annualm@jimm.jp	63-11 会告予定

開催日	名称・開催地・掲載号	主催	問合せ先	締切
21	レアメタル研究会(東大生産技研/ハイブリッド) (本号673頁)	レアメタル研究会	TEL 03-5452-6314 tmiya@iis.u-tokyo.ac.jp https://www.okabe.iis.u-tokyo.ac.jp/ japanese/index_j.html	
2025年 6 月				
15~19	第41回熱電変換国際会議および第7回アジア熱電変換国際会議(仙台)	第41回熱電変換国際会議組織委員会他	ict2025@intergroup.co.jp https://ict2025.jp	事前 3.31
2025年 7 月				
1~4	COMPSAFE2025(第4回安心・安全・環境に関する計算理工学国際会議)(神戸)	日本計算工学会他	compsafe2025@compsafe2025.org	
2025年 9 月				
17~19	日本金属学会秋期講演大会(北海道大学)	日本金属学会	TEL 022-223-3685 annualm@jimm.jp	64-5号 会告予定



書籍紹介

- 「新 SDGs 論—現状・歴史そして未来をとらえる—」 田中治彦著
四六判並製 192頁 人言洞 本体1,900円+税
- 「古代青銅鏡の DNA = 鋸歯文 青銅鏡に刻まれた古代人のメッセージを読み解く」 前 義治 田岸昭宣著
B6判 192頁 星雲社 本体1,000円+税



会員情報のご変更手続きのお願い

本会への会員情報のご登録は、最新のものになっておりますでしょうか。

[本会ホームページ](#) → [入会・会員](#) → [会員マイページ](#)より確認ができますので、ご利用下さい。



2023, 2024年度会報編集委員会 (五十音順, 敬称略)

編集委員長	田中 秀明					
編集副委員長	鈴木真由美					
委員	李 誠 鎬	池尾直子	石川史太郎	井田駿太郎	岩岡 秀明	植木 洸輔
	上田恭介	宇部卓司	大塚 誠	岡 弘	小笹良輔	川崎由康
	川西咲子	河野義樹	木口賢紀	北原弘基	北村一浩	國枝知徳
	小嶋隆幸	小島淳平	小山元道	齊藤雄太	佐々木秀顕	佐藤豊人
	篠原百合	新里恵多	鈴木賢紀	高橋弘樹	高山直樹	竹田 修
	田辺栄司	Chang Tso-Fu Mark	塚田祐貴	圓谷貴夫	寺西 亮	土井康太郎
	豊木研太郎	永井 崇	永瀬丈嗣	袴田昌高	長谷川 誠	八田 武士
	藤井 進	細川明秀	本間智之	松浦昌志	松垣あいら	松本洋明
	三井好古	宮崎秀俊	宮部さやか	森谷智一	諸岡 聡	山田 亮
	山中謙太	山本知一	横井達矢	吉年規治	米田鈴枝	

まてりあ 第63巻 第9号(2024) 発行日 2024年9月1日 定価1,870円(本体1,700円+税10%)送料120円

発行所 公益社団法人日本金属学会

〒980-8544 仙台市青葉区一番町一丁目14-32

TEL 022-223-3685 FAX 022-223-6312

発行人 谷山 明

印刷所 小宮山印刷工業株式会社

発売所 丸善雄松堂株式会社

〒104-0033 東京都中央区新川 1-28-23

分子／結晶模型モデル (組み立て用キット)

プラスチックの原子と結合を使った教育学習用の分子／結晶構造の模型です。原子は色で区別され、正しい角度に設定された分枝を持ち、決められた長さの結合長で繋ぎ合わされます。直径1cmと6mmの原子を使う2種類のモデルサイズがあります。

基本セット

- Basic Structure (1cmモデル) Class Set ¥11,000.-
硫酸、塩化ナトリウム、ダイヤモンド、グラファイト、金属、酸と塩基、洗剤、ナイロン、アモルファス構造の学習用(原子 515 個)
- Lattice (1cmモデル) Class Set ¥11,550.-
ダイヤモンド、グラファイト、塩化ナトリウム、8および12配位金属、塩化セシウム、セ閃亜鉛鉱、ウルツ鉱、ルチル、氷構造の学習用(原子380個)
- Organic and Inorganic Chemistry (1cmモデル) Class Set ¥11,550.-
アルカン、アルケン、アルキン、環構造、酸素／窒素／硫黄／リンの官能基、ベンゼン環、ポリマー、複素結晶の学習用(原子 500 個)



結晶セット

- Carbon Nanotube (原子150個) ¥3,960.-
- Diamond (原子450個) ¥8,800.-
- Beta-Quartz (原子1,400個) ¥17,160.-
- Mica (原子1,550個) ¥31,680.- その他、多数あり

(製作 : Cochranes of Oxford Ltd.)

化学プロセス用の物性データベース

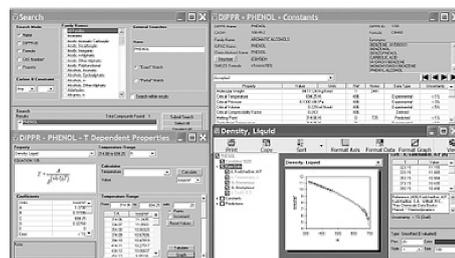
DIPPR with DIADEM Elite (Design Institute for Physical Property Data)

価格 ¥572,000.- / ¥82,500.- (一般 / 教育)

2,280化合物についての49種類の熱物性値(実測値)、複数の推算式、文献データと15種類の温度依存物性には推算式の係数などのデータベースです。AIChE推奨のインターフェイスソフトウェア(DIADEM)付きのスタンドアロンシステムです。

おもな機能 (DIADEM/Elite)

- 検索対象 : Name, Formula, CAS番号、物性データ
- 物性値 : 実測値、推算式による予測値
- データ表示 : テーブルとグラフプロット
- 複素化合物データの重ね合わせプロット
- MDL Chimeプラグインによる構造式の立体表示
- ユーザーデータベースの作成



システムプラットフォーム :
Windows 8/10/11 (AIChE DIPPR Project 801)

30,000件のセラミックス状態図データベース Phase Equilibria Diagrams, Version 5.1 (ACerS-NIST)

新規購入価格 ¥330,000.-

(シングルユーザー用 / マルチユーザー用)

Version 4.1/4.2/4.3/4.4/4.5からのアップグレード価格あり (¥220,000~¥66,000)

検索条件

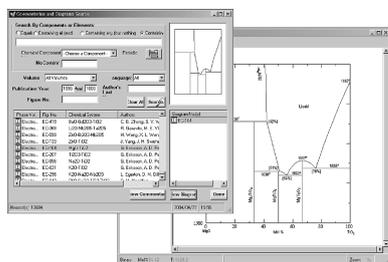
■元素記号、成分系 ■著者名、出典書誌名、出版年 ■状態図番号

収録物質系

- 酸化物とその混合系 ■カルコゲナイド(硫化物、セレン化物、テルリド)
- ブニド類(第15族元素) ■炭化物類、炭酸塩類、ケイ化物類、ケイ酸塩類
- アクチノイドおよび希土類 ■半導体材料 ■第3族元素 ■塩類とその混合系

データソース / Phase Diagrams for Ceramists他の1898年以降のACerSとNISTの刊行物

*Version 5ではすべての図がPDFで収録され、このバージョンではJAVAは不要です。

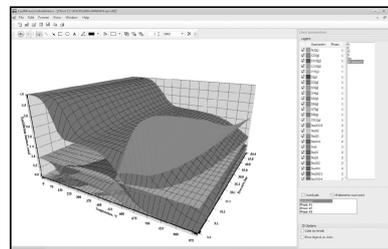


システム要件 : Windows 7~10、2GB RAM、ディスク空き容量4GB 媒体 : USB

化学反応／平衡計算ソフトウェア HSC Chemistry for Windows, Ver.10.x

年間使用料 ¥418,000.- / ¥165,000.- (一般 / 教育)

約28,000種についてのエンタルピー、エントロピー、熱容量のデータベースを基に化学反応の計算やGIBBSまたはSOLGASMIXのルーチンによる化学平衡を計算します。反応、熱平衡、分子量計算などの一般的なモジュールの他、電気化学セル平衡と相安定性、腐食の研究に使われるEh-pH(プールバ)状態図の作成などユニークなモジュールを持ち合わせています。計算結果のテーブルと状態図はクリップボードにコピーできます。SIM Flowsheetモジュールもあり、複数のユニットプロセスからなるプロセス全体のシミュレーションとモデリングができます。



システムプラットフォーム : Windows /8/10/11
(Autototec Research Oy. 製作)

※表記の価格は税込です。

株式会社 デジタルデータマネジメント

東京都中央区日本橋茅場町1-11-8 紅萌ビル 〒103-0025
TEL.03-5641-1771 FAX.03-5641-1772 <http://www.ddmcorp.com>

日本金属学会会報「まてりあ」への投稿について

会報「まてりあ」をより多くの皆様にご活用していただけるよう投稿記事を歓迎いたします。
投稿規程、執筆要領および下記要領によりご投稿下さい。

～会報編集委員会～

(1) 種別(規定掲載頁)(規定字数内)

- 1. 入門講座**(4頁)(9,340字)
金属のみならずセラミックス、高分子を含めた材料一般に関して境界領域の材料や物づくりの実際などの講義を通して広く会員に情報を提供する。
- 2. 講義ノート**(6頁)(14,500字)
材料に関係する基礎学問分野についてわかりやすく講義してもらう。
- 3. プロムナード**(4頁)(9,340字)
金属・材料に関する話題にかぎらず、社会、経済、歴史などを含む多くの分野からの「比較的短くて分かりやすく」「会員が教養として知って置くべき事柄」「提言」「トピックス的な話題」など。
- 4. 解説**(7頁)(17,100字)
新しい特定の問題を取り上げて、専門外の会員にも分かるように解説したもので、さらに勉強しようとする人のために参考となる文献も示しておく。
- 5. 最近の研究**(8頁)(19,700字)
最近の重要な研究のうち、比較的せまい範囲のテーマを取り上げて、国内外の最近の研究成果を紹介する。各分野の現状、現在の問題点などを取り上げて、総括的に分かり易く記述したもので、その分野の研究を進める上で参考となる内容とする。
- 6. 技術資料**(8頁)(19,700字)
直接実務に利用できるもので、実際に行う場合に必要となる条件、装置の説明、あるいは技術的データの収集等により参考資料として役立つもの。
- 7. 集録**(9頁)(22,300字)
文献を主眼として問題点を論じ、批判するもので今後の方針を示唆することをねらいとする。文献のみを集録し解説を行うものも含む。
- 8. 実学講座**(4頁)(9,340字)
特許取得、ベンチャー企業の設立、研究開発マネジメント、教育法、学習法などについて記事にする。
- 9. 材料科学のバイオニアたち**(5頁)(11,900字)
材料科学に携わった先人たちの偉業を紹介する。
- 10. 新進気鋭**(4頁)(9,340字)
“はばたく”は大学院修士課程修了者以上を対象とし、ここでは30歳前後の若手研究者を対象として研究・仕事の紹介と将来展望について紹介してもらう。執筆は単独名とする。
- 11. 材料教育**(4頁)(9,340字)
材料教育に関する話題。
- 12. トピックス(制限頁;2頁)**(4,150字)
最近の情報を手短かに紹介するもので、話題は限定しない。
- 13. 物性・技術データ最前線**(4頁)(9,340字)
形式は問わず、情報量は少なくとも、多く読者が必要とするタイムリーな最新の物性、技術データを紹介する。
- 14. 材料ニュース**(2頁)(4,150字)
新聞で発表された材料関連ニュースを新聞内容よりは詳しくできるだけ迅速に記事にする。
- 15. プロジェクト研究報告(有料)(原則35頁)**
特定研究A、B、未来開拓、戦略基礎などの公的資金補助によるプロジェクト研究成果を有料掲載する。

- 16. 産官学交差点**(1頁)(2,200字)
材料に関係した産官学の情報交流の場を設ける。
- 17. 材料発ベンチャー**(2頁)(4,150字)
材料関連ベンチャー企業の経験者に経験談等を記事にしてもらう。
- 18. 新技術・新製品裏話**(2頁)(4,150字)
金属学会新技術・新製品技術開発賞を獲得したグループに開発にあたっての苦労、裏話を紹介してもらう。
- 19. 談話室**(1頁)(2,200字)
気軽な意見の発表、学会に対する質疑応答、情報交換等。
- 20. はばたく**(1頁)(2,200字)
大学院生など新鋭の方々が、著者自身の研究への取り組み方などについて述べる。
- 21. 紹介**(1頁)(2,200字)
組織変更・改革、産業界の動向その他。
- 22. 学会・研究会だより**(1頁)(2,200字)
- 23. 研究室紹介**(1～2頁)(2,200～4,700字)
- 24. 委員会だより**
- 25. スポットライト**

(2) 投稿の方法

- 種別の1～15については、執筆要領に定める方法で作成し、制限頁以内にまとめた原稿とその論文または記事のねらい(200字～300字)をフォーマット用紙に記述して会報編集委員会までご送信下さい。審議の上、受付の可否を決定します。
- 種別の16～25については、執筆要領に定める方法で作成し、制限頁以内にまとめた原稿をお送り下さい。但し、原稿の採否や掲載号は会報編集委員会にご一任下さい。

(3) 投稿の要件

- 和文であり論文又は記事として未投稿、未掲載でかつオリジナリティがあること、規定頁を超えないこと、金属とその関連材料の学術および科学技術の発展に寄与するものであること等、ホームページに掲載している会報投稿規程を参照して下さい。

(4) 著作権の帰属

- 会報に投稿された論文および記事の著作権は、この法人の著作権規程により、この法人に帰属します。

(5) その他留意事項

- 原稿は、専門外の読者にも分かるようにご執筆下さい。
- 原稿は、会報編集委員会にて審査いたします。その結果、場合によっては掲載をお断りする場合があります。また、掲載号等についても、本編集委員会が決定いたします。
- 図表の引用に関しては、著作権者への転載許可手続きを著者ご自身で行ってください。
- 詳細は会報投稿規程をご覧ください。

(6) 会報投稿規程と執筆要領

- ホームページ：[「まてりあ」](#) → まてりあへの投稿 をご覧ください。

(7) 原稿送付・問合せ先

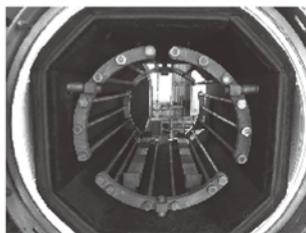
〒980-8544 仙台市青葉区一番町 1-14-32
公益社団法人日本金属学会 会報編集委員会
☎ 022-223-3685 FAX 022-223-6312 E-mail: materia@jimm.jp

高断熱+省エネ

URL:<http://www.mechanical-carbon.co.jp/>

- 高純度カーボングラファイト部品(純度5ppm以下)
- C/C(カーボン・カーボン)材による精密加工
- カーボン成形断熱材、カーボンフェルト
- 回転式アルミ脱ガス装置用ローター
- 高温真空炉 炉内メンテナンス、カーボンヒーター
- メカニカルシール、パッキン等の摺動部品修理・改造

高温真空炉



カーボンヒーター

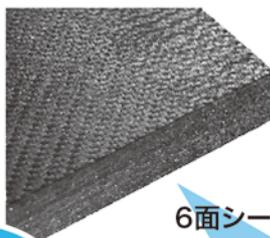


シール



CO₂削減

6面シート
貼り



カーボンフェルト



メカニカルカーボン工業株式会社

本社:247-0061 神奈川県鎌倉市台5-3-25 TEL.0467-45-0101 FAX.0467-43-1680
工場:新潟工場・本社工場・野村工場(愛媛)・広見工場(愛媛) 事業所:郡山・東京・大阪・松山・周南・福岡
お問い合わせEメール mck@mechanical-carbon.co.jp



公益社団法人

日本金属学会

The Japan Institute of Metals and Materials

2024年
秋期 第175回講演大会

2024年9月18日(水)~20(金) 大阪大学・豊中キャンパス (全学教育推進機構講義B棟)

学生キャリアサポート・企業展示会 (全学教育推進機構講義B棟1F・2F)

- 石福金属興業(株) ●(株)大阪チタニウムテクノロジーズ ●産業技術総合研究所 ●(株)豊田中央研究所
- 日本軽金属(株) ●福田金属箔粉工業(株) ●大和工業(株) (カタログ展示) ●合同製鐵(株)

付設展示会 (全学教育推進機構講義B棟1F・2F)

- アドバンスソフト(株) ●アメテック(株) ●(株)池上精機 ●茨城県中性子ビームライン ●(株)エイゾス
- SKメディカル電子(株) ●オックスフォード・インストゥルメンツ(株) ●(株)新興精機 ●大亜真空(株) ●電子科学(株)
- 東芝ナノアナリシス(株) ●NISSHAエフアイエス(株) ●日本電子(株) ●(株)日本放電技術
- (株)ニューメタルスエンドケミカルスコーポレーション ●(株)モルシス ●(株)UNICO 他

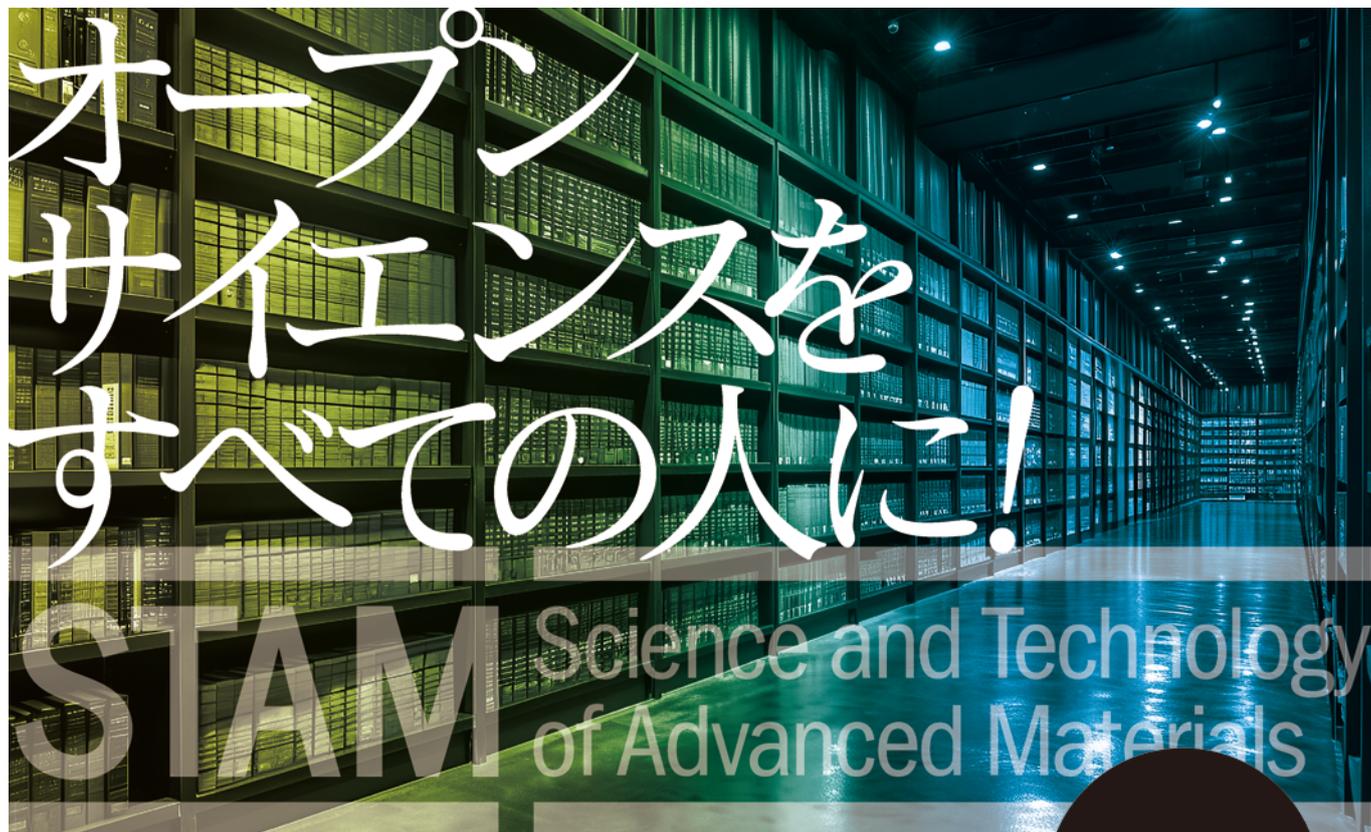
ランチョンセミナー (講演会場内)

9/19(木) 12:10~12:50

- オックスフォード・インストゥルメンツ(株) ●日本電子(株) ●物質・材料研究機構

※参加予定企業は、何れも7/未現在。

問合せ: 株式会社 明報社 TEL: 03-3546-1337 www.meihosha.co.jp



IF:7.4

STAM 掲載料無料キャンペーン

〈プラチナオープンアクセス〉

論文の掲載料(APC)高騰が世界的な課題となる中、物質・材料研究機構(NIMS)はスイスの国立研究所 Empaと共同で、材料科学専門の国際論文誌『STAM』(Impact Factor 7.4)のAPC無料化を支援しています。STAM創刊25周年となる2025年3月31日まで、通常131,000円のAPCが免除され、無料でオープンアクセス出版が可能となります。NIMSは、STAMのAPC無料キャンペーンを通じて、オープンサイエンスの拡大に貢献します。

STAM編集委員 乾 晴行 氏
京都大学 教授

『STAM』は高分子、半導体、無機材料など多様な物質・材料を掲載対象としていますが、金属材料も重要な掲載対象です。先端金属材料開発などの応用研究だけでなく、金属材料の様々な基礎研究の成果を掲載できます。我が国が出版する材料科学専門の国際雑誌『STAM』への投稿を歓迎します。

STAM編集委員長 宝野 和博
物質・材料研究機構 理事長

『STAM』は、2000年に日本金属学会の名誉会員である増本健先生らによって創刊された、日本発の材料科学分野の国際学術誌です。また、日本で初めてのオープンアクセスの材料科学系学術誌としての発展を遂げています。皆様からの論文の投稿を心よりお待ちしております。

2025
3.31 投稿分まで



詳しくはSTAM公式ウェブサイトへ

STAM tandfonline

