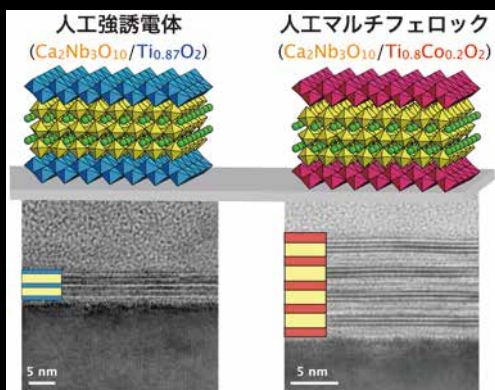


Materia Japan

まてりあ Vol.60

MTRE2 60 (10) 613 ~ 684 (2021)

No.10
2021



- ・ 金属なんでもランキング! ~蒸発熱~
- ・ コンビナトリアル手法を用いた機能性材料の開発
- ・ 無機 2 次元ナノシートが拓く原子層技術

講義
ノート 金属製錬の熱力学 (最終回)

実学
講座 まてりあ 60 巻記念企画: 実学講座
金属材料実験の手引き 1. 組織観察
1-3 走査型電子顕微鏡を用いた分析手法 (EBSD)

・ まてりあ 60 巻記念企画: 支部だより・委員会だより

自動研磨機

Qポル XL

Qポル XL は、Φ 300 ～ 350 mm の作業ホイールを使用できる堅牢な自動研磨およびポリッシング装置です。特に大型サンプルの研磨・ポリッシング作業に適した構造および機能が充実しています。

本体イメージ



特長

- Φ 300 ～ 350mm 作業ホイールの使用が可能なパワフルな行動
- ステンレス鋼で保護された作業領域
- 正確で効率の良い作業を可能にする研削量測定システム
- プロセス中に左右に往復移動可能なポリッシング・ヘッド
- 最適な研磨剤供給システムの構築が可能なモジュール方式
・マグネチック・スターラー
・研磨液量監視
- 大型サンプルに対応できる広範囲の荷重 (50 ～ 750N)
- プロセスの効率化を推進する自動サンプル洗浄システム (オプション)
- 研磨剤を均一に供給する可動式供給アーム
- 自動で開閉する安全フード
- 作業ホイールの汚れを低減させるスピン・サイクル機能
- 装置の状況をモニタリングできるシグナル・タワー (オプション)
- 管理が容易な循環冷却システム / 沈殿槽 (オプション)
- 作業領域内の清掃を容易にするスパイラル式洗浄ホース

仕様

作業ホイール寸法	Φ 300～350mm
作業ホイール数	1 面
回転速度	作業ホイール：50～600rpm ポリッシングヘッド：50～350rpm
回転方向	反時計方向 (ポリッシングヘッドのみ時計方向可)
荷重	中央荷重：20～400N

サンプルホルダー (数)	Φ159 - 204 mm
研磨剤自動供給 (オプション)	4- ダイヤモンド懸濁液、1- 潤滑剤、1- 酸化剤研磨剤
電源	三相 220-240V / 50/60Hz 接続ロード：6kVA
寸法 (W)x(D)x(H)	901x710x265mm
重量	～ 420kg

大型埋込プレス

オパール 480

オパール 480 は、サンプル作製時に必要な樹脂埋込みを行うための加熱加圧埋込プレスです。油圧及び水冷却の方式が採られており、埋込みは設定したプログラムに従って自動的に行われます。埋込リンダーは工具を使わずに簡単に交換できます。

本体イメージ



特長

- 加熱加圧埋込プレス
- 使いやすいスライド式開閉システム
- 大型液晶画面の付いた操作しやすいユーザーインターフェイス
- 埋込工程のプログラムを自由に設定して 18 件保存可能
- 4 種類から選択可能な加圧モード
- 油圧による加圧方式
- 水冷却による作業性の向上
- 工具を使用せずに行えるシリンダー交換
- 30x60 mm または 40x60 mm の四角柱成形が可能
- 強固なアルミニウム筐体と粉体塗装

仕様

加熱温度	20～200℃ (5℃毎可変) 4 x 630W
加圧方式	自動油圧 (加圧範囲：145～310bar (5bar 毎))
加圧時間	0～30 分 (15 秒毎可変)
加圧モード	4 種 (同時 / 段階 / 設定温度到達後 / 冷却開始前)
冷却方式	自動水冷 (冷却モード：通常 / 節水 (10～50%))

シリンダー有効寸法	80mm
開閉システム	スライド
シリンダー寸法 (mm)	Φ 50 / Φ 60 / Φ 70 / 30x60 / 40x60
電源	単相 220-240V / 50/60Hz 接続ロード：3.6kVA 毎
寸法 (W)x(D)x(H)	390x500x450mm
重量	約 68kg

ヴァーダー・サイエンティフィック株式会社

VERDER
scientific

東京本社 〒160-0022 東京都新宿区新宿5-8-8
TEL:03-5367-2651 FAX:03-5367-2652 info@verder-scientific.co.jp

大阪営業所：〒559-0031 大阪市住之江区南港東8丁目2番52号
TEL：06-6655-0003 Fax：06-6629-8080

名古屋営業所：〒460-0003 愛知県名古屋市中区錦2-9-14 伏見スクエアビル5F
TEL：03-5367-2651 (東京本社) Fax：03-5367-2652 (東京本社)

10

2021
Vol.60
No.10

まてりあ

金属なんでもランキング！	No.16	蒸発熱	613
ブロムナード	異分野融合の意味と意義	宮野公樹	615
最近の研究	コンビナトリアル手法を用いた機能性材料の開発	高橋竜太 川嶋一裕	620
	ハライドペロブスカイト、金属、酸化物ベースの薄膜材料のレシピ作りをコンビナトリアル薄膜手法によって最適化したプロセスについて紹介。		
	無機2次元ナノシートが拓く原子層技術	長田 実	628
	無機2次元ナノシートが織りなす多彩な機能とナノシートをベースとした機能材料の構築技術を紹介。無機ナノシートは組成、構造、機能の多様性を具備しており、グラフェンでは実現できない機能が発現！		
新進気鋭	Ni 基耐熱合金に対する金属粉末成形技術の開発	日比野真也	634
講義ノート	金属製錬の熱力学(第4回)	月橋文孝	639
	高温での化学反応によって目的金属を得る金属製錬反応の解析のために必要な化学熱力学の使い方について述べる。第4回は金属製錬反応への熱力学の適用について説明する。		
まてりあ 60巻記念企画			
実学講座	金属材料実験の手引き		
	1. 組織観察 1-3 走査型電子顕微鏡を用いた分析手法		
	1-3-2 後方散乱電子回折法(EBSD)による結晶方位解析	横江大作	645
科学館めぐり	貨幣博物館(東京都中央区)	春本高志	653
まてりあ 60巻記念企画			
支部だより	北海道、関東、北陸信越、東海、関西、中国四国、九州支部	655	
まてりあ 60巻記念企画			
委員会だより	男女共同参画委員会の15年と現在そしてこれから	三浦永理	665
スポットライト	アルミ缶を原料とした人工宝石の合成	廣居桜子 三澤春果 溝井敬大	667
	ルミノール反応における触媒の濃度と照度・発光時間の関係	小倉 紫 石川憂菜 梅原彩奈 小原未夕	669
	種菌の獲得と成長～カンゾウタケの子実体栽培を目指して～	小山佳那 高山奨真 山口勘護	670
本会記事	会告	672	次号予告 681
	支部行事	676	新入会員 681
	掲示板	677	行事カレンダー 682
	会誌・欧文誌10号目次	680	訂正 679

今月の表紙写真 ナノシートの精密集積による高次機能材料・デバイスの創製。
(長田 実著 631頁図8 (c) (d) 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 本会は、本誌掲載著作物の複写に関する権利を一般社団法人学術著作権協会に委託しております。本誌に掲載された著作物の複写をご希望の方は、(一社)学術著作権協会より許諾を受けて下さい。但し、企業等法人による社内利用目的の複写については、当該企業等法人が社団法人日本複写権センター((一社)学術著作権協会が社内利用目的の複写に関する権利を再委託している団体)と包括複写許諾契約を締結している場合にあっては、その必要はありません。(社外頒布目的の複写については、許諾が必要です。)権利委託先 一般社団法人学術著作権協会 〒107-0052 東京都港区赤坂9-6-41 乃木坂ビル3F FAX 03-3475-5619 E-mail : info@jaacc.jp <http://www.jaacc.jp/> 複写以外の許諾(著作物の引用、転載、翻訳等)に関しては、直接本会へご連絡下さい。

**研磨機・切断機
期間限定キャンペーン中!!**

詳細はお問い合わせください。



自動研磨機 SCANDIMATIC 33305

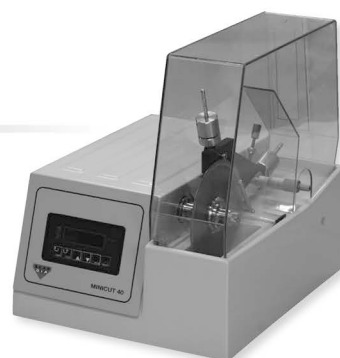
ヨーロッパ伝統の重錘を使った昔ながらのシンプルにして堅牢な研磨機。必要最低限の機能のみを搭載。それが経済的な価格を生み出しました。



- φ200mmの研磨盤対応
- 重錘はφ25mm、φ30mmの試料で3個、φ38mmの試料には2個一度に研磨可能
- 研磨盤回転数は40～600rpm、1rpm毎に設定可能
- 本体、PVC製研磨盤、バフを含めて定価100万円（税別）

精密切断機 MINICUT 4000

- 低速で試料にストレスを与えず
- 50～1,000rpmの広い範囲での設定可能
- 切断位置はマイクロメーターで±0.01mmで設定可能
- ダイヤモンド、CBN、SIC製の切断刃を用意



試料埋め込み材料、アクセサリ



SCANDIA社の消耗品は極めて高い評価をいただいております。その代表作がSCANDIQUICKです。

- 試料への密着性が高い常温硬化剤。硬化時間はわずか5分
 - 構成は粉末硬化剤と液体硬化剤。これを10:6の比率で混合
- その他各種有効な消耗品を用意してございます。

カタログおよび価格表は弊社にお問い合わせください

フリッチュ・ジャパン株式会社

本社 〒231-0023 横浜市中区山下町252
大阪営業所 〒532-0011 大阪市淀川区西中島7-2-7
福岡営業所 〒819-0022 福岡市西区福重5-4-2

info@fritsch.co.jp <http://www.fritsch.co.jp>

Tel (045)641-8550 Fax (045)641-8364
Tel (06)6390-0520 Fax (06)6390-0521
Tel (092)707-6131 Fax (092)707-6131

金属なんでもランキング!

No.16 蒸発熱

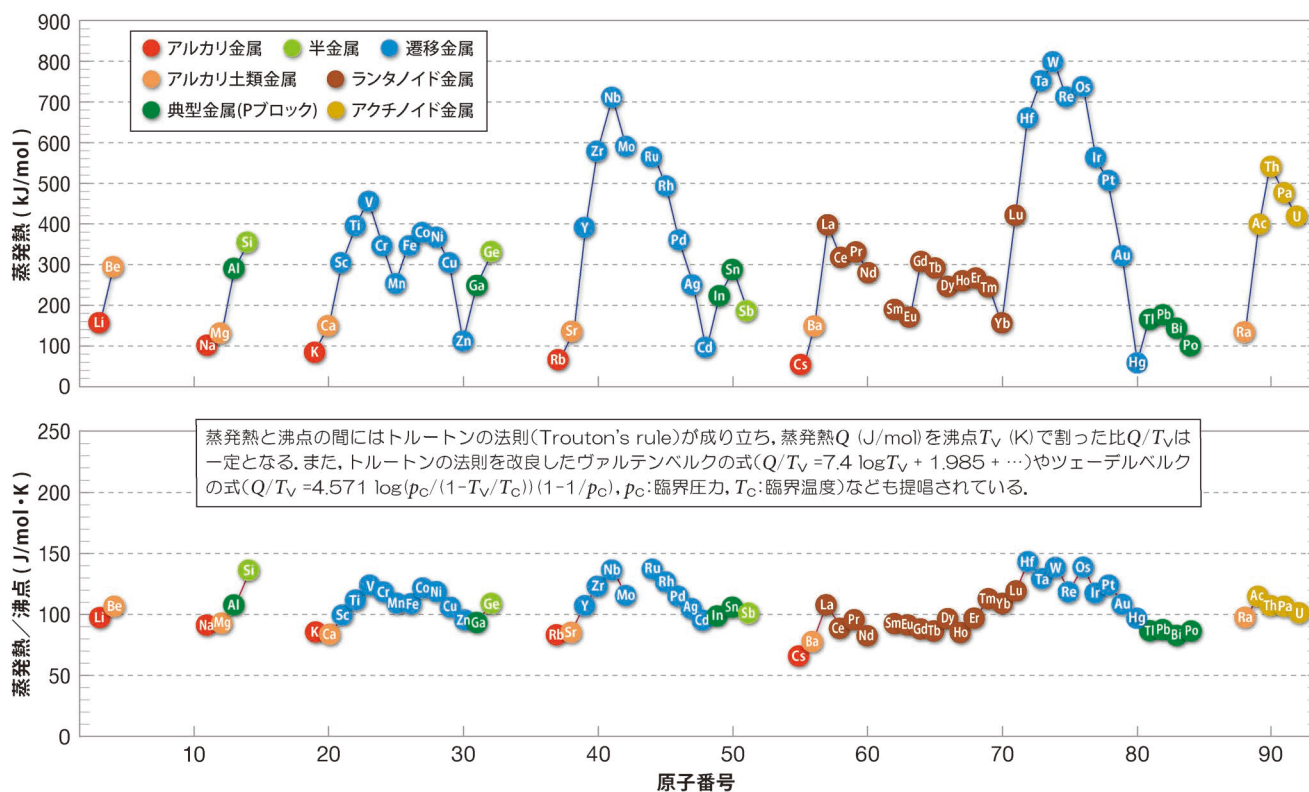


図1 各元素の蒸発熱。

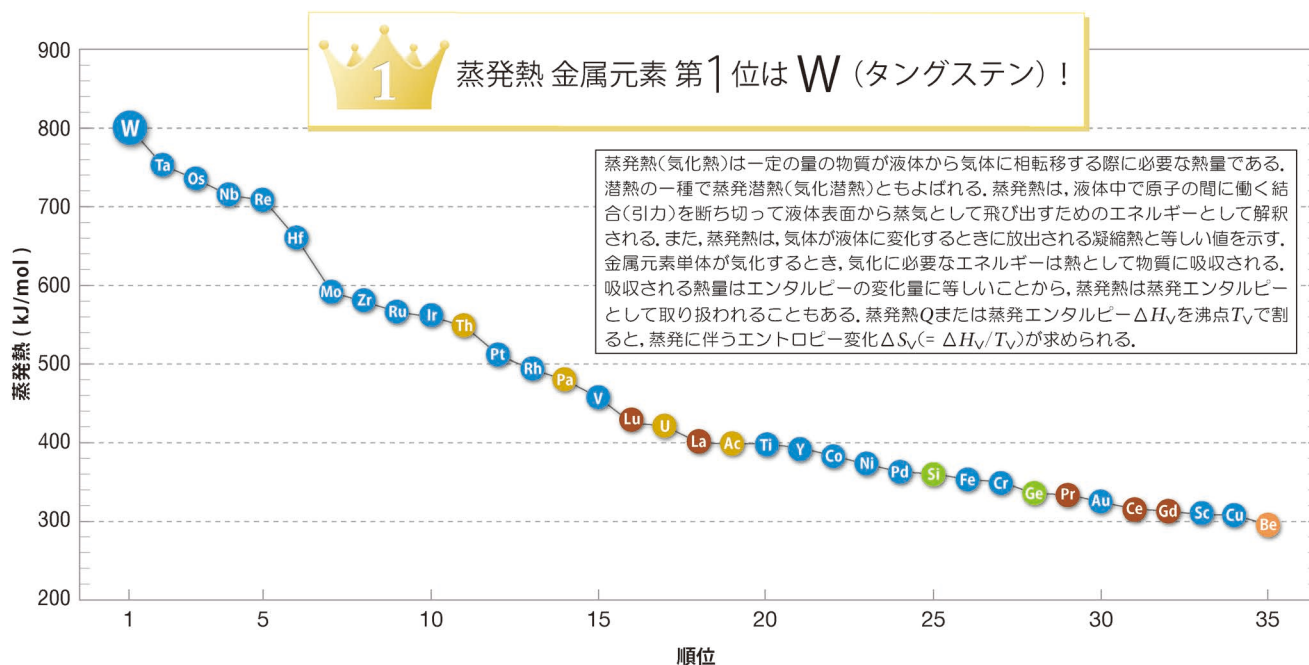


図2 金属元素の蒸発熱ランキング(35位まで)。

- 参考文献：(1) 改定4版金属データブック：日本金属学会編，丸善，(2004)。
 (2) 元素大百科事典：監訳 渡辺 正，朝倉書店，(2007)。
 (3) 法則の辞典：編著 山崎 昶，朝倉書店，(2006)。

次号！金属素描 No.19 タンタル

FRITSCH “NANO 領域”

遊星型ボールミル “PREMIUM LINE”

モデル P-7

新型

特色

1. 従来弊社 P-7 と比べて 250% の粉碎エネルギー UP。
自転公転比：1：-2. Max 1,100/2200rpm
粉碎エネルギー：Max 94G（現状 P-7：46.08G）
2. 容器は本体内に。
外部に飛び出す危険は無し。
3. 搭載容器も 20、45、80ml の3種類。
材質は従来どおり多様。
雰囲気制御容器も各種用意。



従来型ボールミル “CLASSIC LINE”

premium lineと並んで従来どおりの
遊星型ボールミルトリオも合わせて
ご提供いたします。



フリッチュ社が開発した
遊星型シリーズの
パイオニア機種。

世界で初めて容器ひとつで
遊星運動に成功した
ベストセラー機種

少量試料を対象にした
パワフルな機種

全機種共通の特長

- 雰囲気制御容器以外の
通常容器、ボールの材質
は、ステンレス、クローム、
タングステンカーバイド、メ
ノー、アルミナ、ジルコニア、
窒化ケイ素、プラスチック
ポリアミドの8種類。
- 乾式、湿式の両粉碎も可能。
- ISO9001、CE、TÜVの国際基準をクリア



P5



P6



P7

カタログおよび価格表は弊社にお問い合わせください

フリッチュジャパン株式会社

本 社 〒231-0023 横浜市中区山下町252
大阪営業所 〒532-0011 大阪市淀川区西中島7-2-7

URL <http://www.fritsch.co.jp>
E-mail info@fritsch.co.jp

TEL 045-641-8550 FAX 045-641-8364
TEL 06-6390-0520 FAX 06-6390-0521

広い温度領域・各種形状試料・特殊測定に対応します。

等方体や単結晶の弾性率と共に弾性定数 C_{ij} の測定で、最先端研究に大きく寄与

電磁共振式弾性率・弾性定数測定装置

CC II -型 (RT 室温用、HT 高温用、LT 低温用)

○より詳細な力学特性測定

弾性定数(弾性スティフネス C_{ij}) から求めるヤング率、剛性率、ポアソン比は高精度

○新素材研究時の小試料で測定できます。

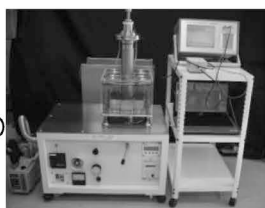
5mm 程度の直方体や円柱の測定。

○単結晶、多結晶

○最高温度 1200℃

○自動解析ソフト開発中

現在、等方体と立方晶の解析まで完成。順次他の結晶に対応します。



室温や比較的低温で最も信頼性の高い装置

自由共振式弾性率、内部摩擦測定装置

JE-型/JG-型 (RT 室温用、HT 高温用、LT 低温用)

○高精度・簡単操作

高再現性・迅速測定

○板状、線材の単純形状

○最高温度：1000℃



弾性率と内部摩擦の高温測定で最高の装置

高温弾性率等同時測定装置

EG-型 (HT 高温用、LT 低温用)

○最も信頼性の高い高温測定

○ヤング率、剛性率、ポアソン比

内部摩擦同時自動測定

○最高温度 1200℃



共振法応用の弾性率や内部摩擦等の物性測定・試験・計測装置の開発専門企業

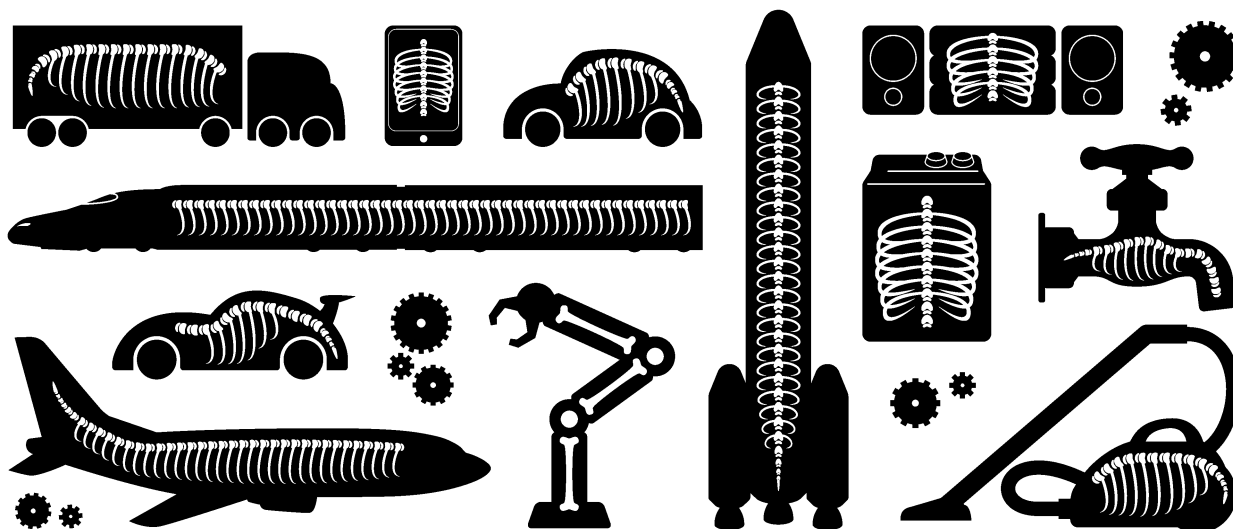
日本テクノプラス株式会社 <http://www.nihon-tp.com/>

06-6390-5993 info@nihon-tp.com 〒532-0012 大阪市淀川区木川東 3-5-21 第3丸善ビル

DAIDO STEEL GROUP

Beyond the Special

外からは見えませんが、骨のある会社です。

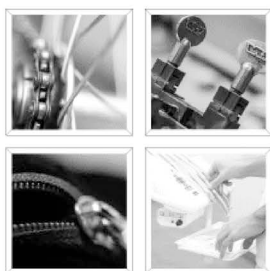


多彩なフィールドで、フロンティアを目指しています。

大同特殊鋼の素材は、暮らしや産業を支える多彩な製品や部品に使われています。

私たちはこれからも、素材の力で新たな価値創造に貢献していきます。

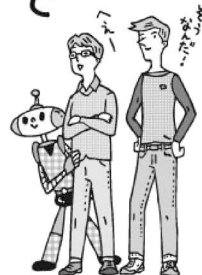
★ 大同特殊鋼



金属は身近なところで 活躍しています

どこで？

身の回りにあふれている金属製品。
だけど、知っているようで知らない事が多いかも！
一緒にのぞいてみよう！



金属の活躍現場
身近なところで活躍。
え！こんなところにも！ [もっと知りたい](#)

金属が製品になるまで！
鉱石▶板▶製品 [もっと知りたい](#)

**性格いろいろ
金属大解剖**
基礎 金属って？
合金って？ [応用 金属を
調べてみよう](#)

現場の声を徹底取材
金属の仕事をしているのはこんな人 [もっと知りたい](#)

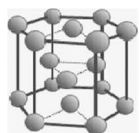
**金属いろいろ
金属素描・金属何でもランキング**

**もっと金属について
詳しく知りたい** [関連 HP へ](#)

「金属素描」「金属なんでもランキング！」

2019 年 1 月から「まてりあ」にそれぞれ隔月で掲載している「金属素描」と「金属なんでもランキング！」が https://jim.or.jp/everyone/top_ranking.html より閲覧できます。

金属素描



金属の物理的・化学的特徴、製法、用途等について紹介しています。意外に知らない事実だけでなく、読んで楽しく、かつ、具体的に役立つ情報を纏めています。合わせて、様々な形態の金属の写真を掲載しています。

金属なんでもランキング！



物性等、金属にまつわる様々な数値をグラフにして「見える化」しています。金属全体に渡ってデータを整理することによって、全体像がわかるようになっています。

- No.1 チタン
- No.2 ジルコニウム
- No.3 ハフニウム
- No.4 コバルト
- No.5 クロム
- No.6 マグネシウム
- No.7 ナトリウム
- No.8 マンガン
- No.9 ガリウム
- No.10 インジウム
- No.11 鉄
- No.12 アルミニウム
- No.13 銅
- No.14 タングステン
- No.15 ネオジム
- No.16 モリブデン
- No.17 白金
- No.18 ニオブ

- No.1 地殻存在量
- No.2 密度
- No.3 融点・沸点
- No.4 電気伝導度
- No.5 熱伝導度
- No.6 比熱
- No.7 デバイ温度
- No.8 イオン化エネルギー
- No.9 宇宙の元素組成
- No.10 磁化率
- No.11 電気陰性度
- No.12 電子半径
- No.13 超伝導転移温度
- No.14 中性子散乱長
- No.15 融解熱
- No.16 蒸発熱

～ See you next metal! ～

異分野融合の意味と意義

宮 野 公 樹*

1. は じ め に

我が国において「学際」や「異分野融合」といった複数分野が協働する研究推進の重要性が本格的に提唱されたしたのは、1996年日本学術振興会の未来開拓事業(複合分野)⁽¹⁾からと言っていい。事実、CiNii(NII 学術情報ナビゲータ)にて、論文タイトルに「学際」という単語を含む論文数を計測すると(図1)、明らかに1990-2000年でその前の10年間の約2倍となっている。次の2000-2010年ではさらに約3倍となるなど、その勢いは増すばかりである。

この「学際」や「異分野融合」の活発化は、どういう経緯と理由で生じているのか。それをどう受け止めればよいのか。筆者は、かつて金属組織学で学位取得後⁽¹⁾、金属材料を

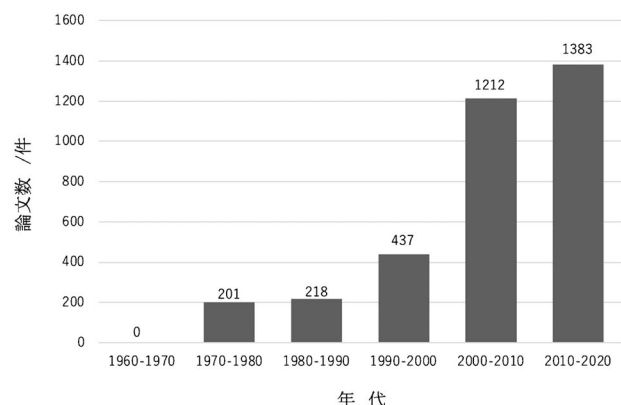


図1 タイトルに「学際」を含む論文数.

活用しつつナノテクノロジーや医工学⁽²⁾へと移り、4年間の文部科学省学術調査官の経験を経て、現在は人文・哲学領域に近い学問論、大学論にて研究活動を行っている⁽³⁾。この経歴のためか、いわゆる人文社会系の方々と相手に理工や政策の話を紹介する機会を頂くこともあるが、今回、プロムナードへの寄稿にあたり、通常とは逆に理工系研究者の方々に対して人文社会系のお話をさせて頂くとする。

2. 専門分野増加の経緯

「学際」活発化の背景には、一層複雑化する課題解決への社会的要望があることは明白である。先に挙げた日本学術振興会未来開拓事業の序文にも「21世紀を展望し、地球規模の問題の解決、経済・社会の発展、豊かな国民生活の実現等を目指し、我が国の未来の開拓につながる創造性豊かな学術研究を大学主導により重点的に推進することを目的としています」とある。内閣府設置法に基づき設置された「総合科学技術会議」が、2014年に「総合科学技術・イノベーション会議」と改称されたことも記憶に新しく、同じく2014年に「文部科学省における研究および開発に関する評価指針」の改定において、「ハイリスク研究、学際・融合領域・領域間連携研究等の推進」が特筆課題の一つとして挙げられた⁽²⁾。

このようなトップダウン的な学際研究の推進だけでなく、様々な大学で学際研究・学際プロジェクトを実施する組織が設立され(著者がざっと検索したところで、全国の様々な大学において47もの「学際的」な学内組織が存在していた)、異分野交流会や分野を超えた学会活動も活発に行われる等⁽⁴⁾、研究者間でも積極的に学際活動が推進されていると言

* 京都大学学際融合教育研究推進センター；准教授(〒606-8501 京都市左京区吉田本町)
The Meaning and Significance of Interdisciplinary Research; Naoki Miyano*(*Center for the Promotion of Interdisciplinary Education and Research, Kyoto University, Kyoto)

Keywords: *interdisciplinary, history of Specialized field, Academic, Professionalism*

⁽¹⁾ 例えば、2001年9月第49回日本金属学会論文賞(金属組織部門)を頂いた。宮野公樹、飴山恵：3次元での Near-coincidence site lattice 解析による2結晶間の結晶学的方位関係と異相界面構造の検討，日本金属学会誌，**64**(2000)，42-49。

⁽²⁾ 例えば、注目度の高い論文を掲載する the RSC's Chemical Biology Research Articles virtual journal に、「N. Miyano, K. Fujii, Y. Inoue, Y. Teramura, H. Iwata and H. Kotera: "Gene transfer device utilizing micron-spiked electrodes produced by the self-organization phenomenon of Fe-alloy", LAB ON A CHIP, **8**(2008), 1104-1109」が選出された。

⁽³⁾ 例えば、宮野公樹：産学連携の形而上学—大学のあり方を添えて—，現代思想2020特集：コロナ時代の大学，**10**(2020)，102-111。が「朝日新聞論壇委員が選ぶ今月の3点」に選出された。

2021年5月24日受理[doi:10.2320/materia.60.615]

える。このボトムアップ的な学際活動の目的は、上で述べた社会的要請の影響もあるが、研究者自らが有するいわゆる「タコツボ化」への危機感を踏まえての活動であることは、各活動の趣旨から読みとれる。

このように、社会的要請と現場的熱望の相互関係が「学際」活発化の背景にあることは確認されたが、さらにその原因にまで射程を広げるなら、それは言うまでもなく「専門分野が過度に増加した」ことに起因する。以下、その経緯について考察する。

(1) 歴史的経緯

専門分野はどう生じ、どう増加してきたか¹⁵。さかのぼれば万学の祖と言われるアリストテレスまでたどり着くのは言うまでもないが、彼が活躍した紀元前300年頃から今日までの歴史を振り返るだけの紙面は許されてはいない。ただ、15世紀の活版印刷の普及後、16世紀に百科全書的な辞書や辞典作りの活動が活発化した点は、専門分野数の増加と強い関係があると言って間違いなさだろう。といっても、現代の我々が考える「専門」と、この時代の「専門」とは異なる。17世紀以降になって、大学では扱いきれない新しい知に対応すべく、文芸や科学のアカデミーが生まれたが、数学と化学と一緒に議論されるなど、明確な専門領域という区分はなかったようだ。18世紀になって自然科学が目覚ましい発展を遂げ、19世紀になってようやく我々がイメージする専門分野ごとの「学会」が誕生した。鉱物学者ウィリアム・ヒューエルが「科学者(Scientist)」という言葉を生んだのもこの頃である。そして、本格的に学会やジャーナルが国際化した20世紀以降は、我々にとって馴染みある科学観、研究観となる。

(2) 現代的経緯

上記の歴史的な経緯は、社会構造の複雑化に伴った専門分野の増加とあっていい。政治、経済、産業の社会の範囲が、民族・種族を基盤にした共同体から、郡や州、そして、国、さらには国際連携へと拡大するにつれ、社会における職種や役割が増加することは想像に難くない。それに伴い、専門分野も増加したと言えるのだ。そして、この根底には、拡大＝繁栄・発展・進展、という進歩史観が横たわる⁽³⁾。18、19世紀の啓蒙時代から現在に至るまで強化され続けているこの思想は、当然ながら、学術界における我々にも無自覚に浸透している。

例えば、かつて「一文字学部」という言葉があったように、大学には、法学部、理学部、工学部、文学部等、学部の前に一文字しかない学部ばかりであった。今日、その学部名

には環境や国際、情報などが接続され長文になっている事実には、データで示すまでも無いだろう。これは、文部科学省や社会的要請の結果にしろ、大学人自らの選択にしろ、新しいこと＝拡大すること＝良いこと、という通念の表顕と言える。我々に馴染み深い「論文」しかり。研究者は論文を書くことが仕事の一つあり、我々研究者は、その「論文」において something new (何か新しいこと)の揭示が必須と教わって育つ。ゆえに、論文一つにつき何か新しいことが誕生し、結果、論文の数だけ何か新しいことが増加することとなり、それが専門分野の増加につながりうる、という単純な構造だ。

その「新しさ」への渴望に加えて、「正しさ」への願望もまた分野を増やす要因である。特に、科学においては、正しさ＝厳密と捉えられやすい⁽⁴⁾。例えば、この金属材料の強度は？という単純な問いに答えるにも、決して「おおよそ」では許されない。実験温度、雰囲気、荷重のかけ方等、ありとあらゆる環境条件の分だけ答えを用意しなければならない。つまり、厳密であろうとする程、環境条件の設定という「場合分け」が必要となり、それが専門分野の増加につながる。極めつけは、「ナンバーワンよりオンリーワン」や「みんな違ってみんないい」等に象徴的なポストモダンの気風である⁽⁵⁾。LGBTの話題を持ち出すまでもなく、個々人の尊重は最重要である。しかし、こと学術界においては、過度な業績競争の進行や大学運営業務の増加も伴い、他者の研究や近隣分野に関心を払うゆとりが無くなった上に⁽⁶⁾⁽⁷⁾、ポストモダンの気風により自分は自分のままでよいことが肯定されると、もはや、ひたすら我が道を行くこと以外にやる事がなくなるのである。すなわち、現代を生きる研究者は、研究に熱心であるほど他者や他分野とのディスコミュニケーションを促進させているという次第なのだ。

3. 「学際」の多角的考察

このような状況の打破を目的として、上にも述べたボトムアップ的な異分野交流会、学際学会が創発されているのだと考えると、我々研究者は良かれと思って自分たちで専門分野を増やし、同時に、その行為を必死に正しくあろうと引き戻す、という矛盾した営みをしているようにも思える。果たして、このような営みは、哲学ないしは学問論的観点からはどう理解されるのか。

(1) 哲学的観点からの学際

言うまでもないことだが、学術分野に限らず、この世において何か(の分野)と何か(の分野)が「融合」していないもの(分野)など、どれ一つとしてない。ゆえに、「学際」や「異分野融合」が大事と叫ぶのは、目先の都合や需要に囚われ、本来の学問の在りようをおろそかにしている証拠とも言える。今日において哲学と呼ばれる紀元前500年頃のソクラテスの「考え」に端を発し、今のこの一連の学問体系があるとすれば、一つの種から育った樹木の枝葉を結合・統合させようというのは、知というものを物的に捉えた極めて操作的

¹⁴ 例えば、日本学術会議サイエンスカフェ (<http://www.scj.go.jp/ja/event/cafe.html>) や超異分野学会 (<https://hic.lne.st/>)、京都大学学際融合教育研究推進センター全分野交流会 (<http://www.cpier.kyoto-u.ac.jp/update/zenbunya/>) 等。

¹⁵ 本段落は次の文献に依拠している。隠岐さやか：文系と理系はなぜ別れたか、星海社新書、(2018)。

な行為、いうなら「ご都合主義」なのだ。確かに、課題解決においては、複数分野の知識は必要不可欠であり、課題の解決という目的のもとに知を使用すればよいが、それは知の活用であり、知を愛し知そのものを問う学問本来の姿とは大きく異なる。学問(≡哲学)なら、樹木の枝葉を結合、統合しようなどとはせず、単に幹をたどって根本(ねもと)に戻ろうとするだろう。そうすれば、自ずと各個別が一つに集約されるのだから。神学者パウル・ティリッヒが学問について語った「すべての専門は唯一の真理に奉仕するものであって全体との関連を失えば消滅してしまう」⁽⁸⁾の含意はここにある。全体との関連を失うとは、枝から離れた葉単体のことであり、それは専門ではなく個別なのだ⁽⁹⁾。すなわち、学問においてはどのような専門であれそれは入り口でしかなく、「学際」および「異分野融合」とは、他の分野との関わりにより自分の立ち位置を確認する行為と理解されるだろう。哲学者三木清はよりラディカルにこう言った、「専門家たるもの、突き詰めればおのずと基礎たる哲学に接触するのは当然とし、自分の専門の意味をその外に立つことによってよりよく反省せんがため、あるいは自分の保持する原理の包括力および影響力を種々の分野において試さんがため、他分野と接触することを余儀なくされるもの」⁽¹⁰⁾と。

先走って本論考の結論を述べるなら、学際および異分野融合の意味と意義は、この三木の言葉に凝縮される。学際および異分野融合が大事と叫ぶ意味(それが指し示す内容)は、各専門から根本ないしは全体への接続を確認することであり、学際および異分野融合が大事と叫ぶ意義(それが指し示す価値)は、自分の問い(研究テーマ)はいかほどのものか、学術にとって、この世にとって(「社会にとって」ではない)、どのような意味があるのかと内省することにある。以上が、哲学的ないしは学問論的な学際および異分野融合の考察である。

(2) 工学という学際

先の文章にて、あえて「社会にとって、ではない」と足したことに理由がある。社会にとって意味があるのかどうかは工学の視点であり、これは別途紙面を割いて補足する必要があると考えたからである。もしかすると、読者のうちに、工学は学問ではないのか、と疑問を持った方もおられるかもしれないが、そうではない。以下、工学の学問性について述べる¹⁶。

一般社団法人八大学工学系連合会に参画している大学(旧七帝大と東京工業大学)における工学部ホームページ上の「工学部・工学研究科の理念」を調査した。そこから読み取れる典型的(あるいは王道的)といえる工学理念は、「社会に貢献する。課題を解決する」といった未来社会の創造を掲げ、そのために「科学(基礎科学)を発展させる」あるいは「科学と技術を結びつける」といった構図をとっている。例えば、「科学と技術の融合による科学技術を通して将来の問

題を先見するとともに現在の社会的要請に応え、人類にとって豊かな社会と自然環境を実現する」といったものである。

しかし、どうも筆者にはこういった工学観がしっくりこない。「工学≡科学技術」はほぼ納得できるとしても、工学を「応用を目指した科学」、あるいは「科学と技術が結合したもの」とする構図には違和感が残る。例えば、「応用を目指した科学」ならば、それは「科学」であろうし、「応用」という営みに重きを置くなら、科学(あるいは学術)の領域まで踏み込む「技術」、ということになる。つまり、工学という矢印の先端(=応用という目的)か基部(=科学という営み)かのどちらかに着目すれば、ことさら工学という言葉を用いなくても説明ができてしまうのではないかと。実は、これは技術哲学者村田純一氏の「道具と機械」の定義を巡る論理をオマージュしている⁽¹¹⁾。村田によると、結局、道具とはあまり自立的でない機械のことであり、機械とは比較的複雑でより自立的な道具であるといった相対的区別しかなく、その区別にこれ以上の実質的意味を与えることは困難、とされている。

だがしかし、工学という言葉がある以上、それは応用を目指した科学とも、学術を用いた技術とも異なるはずである。そこで、二人の人物の言を頼りにし「工学」を考察してみたい。

一人目として、金属物理学者本多光太郎は外せないであろう。本多は、鉄鋼及び金属に関する冶金学・材料物性学の研究の創始者かつ世界的第一人者。本多の有名な言葉の一つに「産業は学問の道場である」がある。この言葉は、基礎研究と応用研究の接続、むしろ基礎研究の最終目的地として産業応用を掲げるという実質的な学問を強調する言として理解されている。これを、より人文学的にその人物の背景や人となりまで迫って考察すると、もう一回り深い理解が可能である。自分の結婚式の日ですら実験室に籠もっていたという実験の虫であった本多は、いったい何にとりつかれていたのか。彼の人生において結局一度も大学という組織から抜けていないことから、彼はいかに実用を目指そうとも「学問」という足場は決して揺らぐものではなかったのではないか。つまり、「産業は学問の道場である」という言葉の主役は「学問」の方にあるのではないか。本多の考えは産業応用に占有されていたのではなく、むしろ学問のことしか考えてない。何においても優先される「学問」というもの。あくまでそれを鍛える場として産業を掲げたのだとあの言葉を読めば、その生涯において学問に関わり続けた本多の態度に、本質的な「工学」のありようが浮かび上がってくるのだ。

そして、工学をまた実学とみれば、次なる人物として福沢諭吉を挙げたくなるのは自然だろう。確かに福沢は読み書きそろばんなどの技術習得を重視した。ゆえに、学問においては実質的、実効的に役立つことを重視し、それを「実学」としたと思われがちであるが、彼が言う自由とは、ほぼ「自立」という意味であることを忘れてはならない。すなわち、実学とは実用の学ではなく実践の学。福沢がいう実践とは対話のことであり、その対話がなされる生活において、固定概念にとらわれず自分の考えを持つことこそが自由(=自立)である

¹⁶ 以降は下記の論考からの抜粋を含む。宮野公樹：科学論の工学的分析、アステイオン、085(2016)。

と強調したのだった。

以上を踏まえ、工学(という学問)の理念は何かと問われたなら、筆者はそれを「目的」としたい。それは、事柄や行為において目ざす(目的)、あるいはその意義を強く意識して思考、行動することである。これはすべての行為を有意味か無意味で判断し、実装や実践に固執することを指すのではない(例えば、無駄を目的とした場合には、思考や行為が無駄であることが合理的に成立するであろう)。ここで言いたいのは、工学を言うにあたり、社会実装や技術応用、課題解決など実益の有効性を掲げるのではなく、その目的の「到達」を重視し、常に現実、現場をその達成過程に置くという考え方、これを「工学的」としたいのである。これは、対象領域や守備範囲を規定する仕方での分野区別ではないため、工学は他のあらゆる学術分野を取り入れることも可となる。すなわち工学が持つ特性は「学際的」といえるのである。こうすることで、工学は「応用を目指した科学」でも「学術まで踏まえる技術」でもなく、他の学術分野を手段として見る現場的で総合的な学問と理解される。

(3) 科学哲学からの考察

筆の流れに任せ、思いがけなく「工学」にまで考えが及んだが、学際や異分野融合を述べる本論考の主旨とは大きくは外れてない結論で幸いである。他方、本論の「3.「学際」の多角的考察」部分は、いわゆる人文的なスタイルで論を進めたが、本誌の読者には違和感を持たれた方もおられるだろう。例えば、本多と福沢の言を元にして「工学」を論じているが、その参照の2人という数と選出した理由は妥当か、といったように。この疑問はまったくそのとおりで、かつて科学から人文へと活動を移した頃の筆者もそのように感じていたが、今はそこまで疑問とはしない。まず数から考えるなら、論理的に考えれば直ちにわかるように、調査対象の母数量の大小で、一定の妥当性はともかく「正しさ」は担保されない。これは対象が物質であろうが精神であろうが社会であろうが、どの専門分野にも共通することである。N数が10の場合と11の場合では後者がより正しいのか。ならば、1,000のほうがもっと正しいわけで、どこまでも続くN数競争の果てに真理はない。況や、N数が絶対的ななら、時間、歴史の一回性を伴う天文学や歴史学はそもそも研究として成り立たない(いうまでもないが科学研究もしかり。全く同条件・同環境下の比較実験は究極的に不可能)⁽¹²⁾。妥当とするN数はその専門分野の歴史的経緯やお作法に依存するものだが⁽¹³⁾、本論考にひきつけて考えれば、人文系は2でよいということか、と問われそうだがそうではない。言いたいのは、つまるところ確固たる「正しさ」や「妥当」というものはありえないもので、どこまでいっても「正しいらしい」や「妥当と言えよう」といった確度の問題なのであり、それを踏まえた極限的な立ち位置から考えたのなら、いったい我々研究者は、何をしようと何ををしていて、そしてそれは何をしていることになるのか、まったくわからなくなるということである。考え詰めた果てにあるこの底が抜けたような感覚を

得たのなら、これが前述した学問の大樹における幹あるいは根に在る証拠である。この位置から、今一度、枝葉(自分)を静かに見つめ、内省し、それでも研究を進めようとするなら、自身の想いや信ずるところを起点とせざるを得ないことに気づくだろう、覚悟と責任と共に。そうして、自身の感動や驚きを、実験や調査や思惟を以てしてより自身の納得するところとし、それを文章にしたものが論考(論文)となるのだ。奇しくもこれは科学ないしは学問の始原の姿であることはお気づきのとおりである。

なお、本多と福沢2名の選出は、もちろん紙面が限られているという理由はあるものの、工学を考察するにあたり筆者自身がその言に強く感動したからである。当然ながら、本多は本誌読者に馴染みあるうえ我が国における工学の大功労者だから等、妥当めいた論理的理由はいくらでも後付はできる。が、大事なものはそこではない。

4. おわりに

今年2021年3月に策定された第6期科学技術基本計画では、「第2章 Society 5.0の実現に向けた科学技術・イノベーション政策」の「2. 知のフロンティアを開拓し価値創造の源泉となる研究力の強化 (1)多様で卓越した研究を生み出す環境の再構築」の「目標」の1つに、「人文・社会科学の厚みのある研究が進み、多様な知が創出されるとともに、国内外や地域の抱える複雑化する諸問題の解決に向けて、自然科学の知と融合した「総合知」を創出・活用することが定着する」があげられている⁽¹⁴⁾。いわゆる人文・社会学との連携に関し、まったく関係ないとする研究者も少なくないかもしれないが、本論考のように、それが「学問」であるなら、どのような分野であれ間違いなく既に接続されたものであり、いわば「地続き」なわけなので、課題解決のための異分野連携(=チームビルディング)ではなく、異分野融合(=他分野と交わり、内省する)の意味合いにて、本来の学問の姿を呼び起こすような全体的な学術界の進展を期待したい。

文 献

- (1) <https://www.jsps.go.jp/j-rftf/main.htm>. (2021年7月1日参照)
- (2) 文部科学省における研究および開発に関する評価指針 https://www.mext.go.jp/a_menu/kagaku/hyouka/1260346.htm. (2021年7月1日参照)
- (3) 干場 薫：進歩史観とベンヤミン：進歩の概念についての一考察、一橋論叢、106(1991)、220-238.
- (4) 吉澤 剛：不定性からみた科学—開かれた研究・組織・社会のために、名古屋大学出版会、(2021)第一章「科学」、5.
- (5) 東 浩紀：情報時代の社会秩序—ポストモダン論の視点から、<https://www.rieti.go.jp/jp/events/bbl/03031301.html>. (2021年7月1日参照)
- (6) 文部科学省「2018年度大学等におけるフルタイム換算データに関する調査報告書」、https://www.mext.go.jp/b_menu/houdou/31/06/_icsFiles/afieldfile/2019/06/26/1418365_02.pdf (2021年7月1日参照)
- (7) 「学際研究イメージ調査」(科研費A「多様な学術研究活動を

- 育むアカデミックデータ・イノベーション成熟度モデルの開発」(代表：梶田将司，分担者：宮野公樹 <https://www.cpiet.info/gakusai-ankeito>).
- (8) パウル・ティリッヒ，清水 正(翻訳)，濱崎雅孝(翻訳)：諸学の体系 学問論復興のために，法政大学出版局，(2012)，1.
- (9) エドワード・W. サイード，大橋洋一(翻訳)：知識人とは何か，平凡社，(1998)．
- (10) 三木 清，大澤 聡(編集)：三木清大学論集，講談社文芸文庫，(2017)，37
- (11) 村田純一：技術の哲学，岩波テキストボックス，(2009)．
- (12) 國吉康夫：ロボティック・サイエンス論：科学における再現性と一回性，といとうとい，0(2021)，94-102.
- (13) 2019年1月開催の第一弾全分野結集型シンポジウム第一弾「真理探求とは何か」.
- (14) <https://www8.cao.go.jp/cstp/kihonkeikaku/6honbun.pdf> (2021年7月1日参照)



宮野公樹

★ ★ ★ ★ ★

2001年 立命館大学大学院理工学研究科博士課程後期
課程修了 博士(工学)

2003年 九州大学応用力学研究所基礎力学部門連続体力学分野 助手

2005年 京都大学工学研究科マイクロエンジニアリング専攻所属 特任講師

2011年— 現職

専門分野：大学論，学問論，政策哲学

◎学際や異分野融合を切り口に学問本来のあり方を追求する研究活動に従事。2021年6月に一般社団法人STEAM Associationを設立し代表理事に。

★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★

コンビナトリアル手法を用いた 機能性材料の開発

高橋 竜太* 川嶋 一裕**

1. はじめに

コンビナトリアル成膜技術は組成や構造の異なる薄膜を多数集積化する薄膜プロセスであり、有機物から酸化物、金属まで幅広い材料開発に応用されている⁽¹⁾⁻⁽³⁾。1回の実験で多種多様なデータが出力され、常に1つのサンプルの中に比較対象を有しているという点で、系統的データを簡便に取得する方法だと、筆者らは考えている。実際、材料研究で論文を執筆しようとする、これまでの常識を覆す新材料が見出された場合を除き、報告されている材料プロセスと比較しながら論文を書かざるを得ない。コンビナトリアル実験で取得したデータは、比較対象が常に含まれ、論文を書きやすくしてくれる方法とも言える。また、大学における学生の指導という点では、混み合う実験装置で、よりたくさんの実験を学生に効率よく行ってもらわなければならない。わかりやすい研究成果を出し、見栄えがいい系統的データを取得できる点において、コンビナトリアルプロセスは学生の卒論、修論研究にも適した材料プロセスと言える。学生目線からみると、1回の実験で、比較対象のある実験データが取れ、実験を多少サボっても多くの実験データが取れる魅力的な方法にも映る。その一方で、得られた多くの実験データをいかにうまく説明するかという、“データ解析”に苦しんでいるのをよく目にする。筆者が学生の時もまた、3.5万点のXRDパターンを解析するように教員に指導され、その解析に1ヶ月を要し、プログラミング初心者であった筆者には当時、大変苦勞させられた思い出がある。この筆者自らの経験からも材料プロセスをコンビナトリアル手法でより高速化するには、データ処理を効率よく実施するための情報処理能力が材料研究

を左右する因子になっている。

本稿では、これまで筆者らが行ってきたコンビナトリアル手法による薄膜研究において、一般的なコンビナトリアル手法を利用した薄膜研究の概要がわかる例として、ハライドペロブスカイト($\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$: MAPbI₃)の太陽電池デバイス研究⁽⁴⁾について紹介する。さらに、コンビナトリアル手法でしか得ることができない、コンビナトリアル手法特有の成果として、Fe-Co合金の結晶相境界を用いた磁歪金属の開発⁽⁵⁾、そして強誘電体 $\text{Bi}_4\text{Ti}_3\text{O}_{12}$ 薄膜の高結晶化に向けたフラックス探索について紹介する⁽⁶⁾⁻⁽¹⁰⁾。3つの異なる材料探索プロセスを通し、コンビナトリアル手法が優れた面と解決すべき点について議論し、現在取り組んでいるインフォマティクス研究についても併せて紹介する。

2. コンビナトリアル製膜手法について

コンビナトリアル薄膜手法のベースとなる2成分組成傾斜薄膜法のプロセスの概要を図1に示す。パルスレーザー堆積法による薄膜合成時に、シャドーマスクを動かしながら薄膜を堆積すると、膜厚が線形に変化した傾斜薄膜が形成する。この膜厚傾斜の高さを結晶構造の1ユニットの厚さとし、2つの材料について逆方向に傾斜膜を高温で堆積する。それぞれの材料が面直方向に拡散し、面内方向には化学組成が線形に変化した組成傾斜薄膜を作ることができる。結晶格子1ユニットの傾斜膜を繰り返す、目的の膜厚まで堆積することにより、数100 nmオーダーの2成分組成傾斜薄膜が生成する⁽²⁾⁽¹¹⁾。シャドーマスクの形を工夫する、または基板を120°回転することによって、図1(b)のような3成分の組成傾斜薄膜を1回の実験で堆積することもでき

* 日本大学工学部電気電子工学科：准教授(〒963-8642 郡山市田村町徳定字中河原1番地)

** 株式会社信光社 結晶開発部；副部長

Combinatorial High-throughput Exploration of Functional Materials; Ryota Takahashi*, Kazuhiro Kawashima** (*College of Engineering, Nihon University, Koriyama. **Shinkosya, Yokohama)

Keywords: Combinatorial high-throughput exploration, Halide perovskite, magnetic striction, ferroelectric materials, flux mediated epitaxy

2021年5月17日受理[doi:10.2320/materia.60.620]

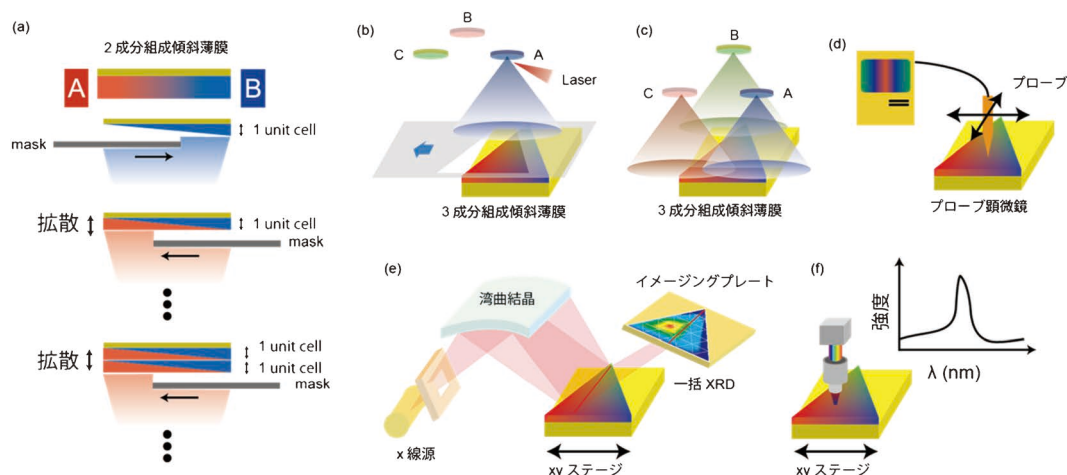


図1 コンビナトリアル手法について、シャドーマスクを用いた2成分組成傾斜薄膜の作成プロセスについて(a)．3成分組成傾斜薄膜について(b)，自然傾斜薄膜を利用した一括成膜(c)，自動ステージ上における，プローブ顕微鏡(d)，X線回折(e)，顕微分光測定(f)による一括評価．(オンラインカラー)

る^{(12)–(17)}．規則的な稼働マスクの動作によって，堆積位置と化学組成が1対1対応したライブラリーが生成し，薄膜合成からその評価まで一貫して行うことも可能になる．合成装置に，マスクを設置できない場合でも，スパッタ法やパルスレーザー堆積法では原料ターゲット近傍と遠方において堆積レートが異なるため，膜厚が自然に傾斜した膜が堆積し，図1(c)のように組成傾斜薄膜を作ることができる^{(18)–(19)}．この場合は，図1(b)のように堆積位置と組成が対応しておらず，追加の化学組成分析が必要となる．

一括合成したコンビナトリアル薄膜試料はプローブ顕微鏡を用いた物性評価(図1(d))^{(20)–(26)}，XRDの構造解析の多点測定(図1(e))^{(6)–(8)–(11)–(27)–(28)}，顕微タイプの光学物性評価(図1(f))^{(11)–(14)–(19)–(29)–(31)}を用いて，簡易に高速評価を実施することができる．特にフォトルミネッセンス，Raman，赤外分光などの光学測定手法は既存の装置をそのまま適用することができ，xyステージ上に試料を乗せることができれば簡易にマッピング測定が可能になる．一方で，SQUIDを用いた磁化測定のように，物性値の“絶対値”を精密に計測することは微小試料において難しく，コンビナトリアル一括評価の弱点である^{(25)–(26)}．たくさんの材料の組成を網羅した薄膜において，走査型プローブ顕微鏡によるスクリーニングから面白い組成の目星を付け，単一の薄膜試料を作り直すというプロセスが不可欠になっている．このような高速評価という点ではまだ改良すべき点も多くあるのが現状である．

3. コンビナトリアル手法を用いたハライドペロブスカイト材料の開発

2成分組成傾斜薄膜の例としてハライドペロブスカイト($\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$:MAPbI₃)の研究成果について紹介する⁽⁴⁾．MAPbI₃はバンドギャップが1.55 eVの直接遷移半導体であり，新しい太陽電池材料として盛んに研究が進められている^{(32)–(34)}．一般的に，溶液に溶かした原料をスピコート

によって基板の上に塗布され，乾燥後，アニールによって結晶化されるウェットプロセスが用いられている．電子輸送層とホール輸送層に挟み込まれたハライドペロブスカイト構造を適切にデザインすることで，20%を超える高い光電変換効率が多いグループから報告されている．

筆者らはこのようなハライドペロブスカイト材料を用いた太陽電池をドライなパルスレーザー堆積手法で作製するべくプロセスの開発を行ってきた．本手法では $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{I}$ (MAI)原料と PbI_2 原料をシリコン粉末と混ぜた原料を室温で交互積層した．シリコン粉末はアブレーションに使用する赤外レーザーを吸収させ，原料を加熱するためのもので⁽³⁵⁾，薄膜の中への混入は観察されなかった．MAPbI₃薄膜の組成最適化にコンビナトリアル手法を適用し，光電変換効率の増強を目的とし実験を行った．

図2(a)にはMAPbI₃の組成傾斜薄膜ライブラリーの構造を示す．あらかじめ電子輸送層の TiO_2 薄膜をスパッタ法でITOガラス基板上に堆積したのち，MAPbI₃の組成傾斜薄膜をコンビナトリアルパルスレーザー堆積法で作製した． PbI_2 薄膜1.4 nmに対し，MAI薄膜を0.2～3.2 nm堆積した傾斜薄膜を1周期とし，合計で300周期の薄膜を堆積することで組成傾斜薄膜を作製した．続けて，Spiro-OMeTADのホール輸送層を堆積した後，XRDによる構造評価，IV特性から太陽電池デバイスとしての機能評価を行った⁽³⁶⁾．

図2(b)には作製した薄膜デバイスのXRDによる構造評価の結果を示す．MAI薄膜が堆積されていない領域では， PbI_2 の001ピークが観察されている．MAI薄膜の組成が増加するにつれ， PbI_2 のピークは小さくなり，ペロブスカイト相の110ピークが強まった．最終的にはペロブスカイト薄膜のみのXRDパターンとなり，MAIが1.4 nm以上において PbI_2 は全てペロブスカイトに変化していると考えられる．

図3(a)には透過率測定から求めた吸収スペクトルの組成依存性を示す．MAI薄膜がほとんど堆積していない領域では PbI_2 のバンドギャップに相当する510 nmの波長で吸収

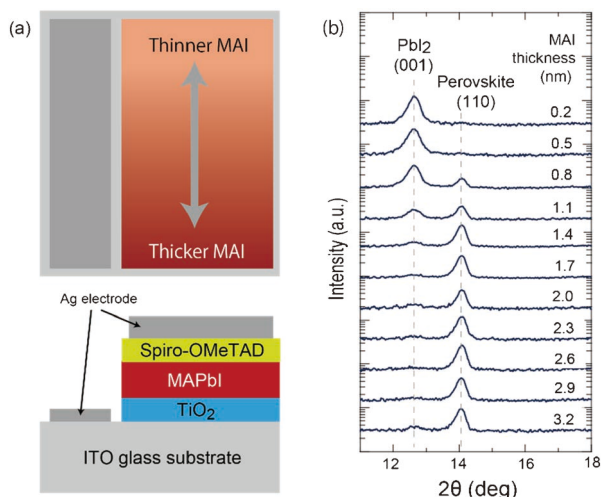


図2 (a) MAPbI₃の組成傾斜薄膜ライブラリーの構造. 面内方向にはMAPbI₃の組成が傾斜し, 面直方向にはMAPbI₃が下部の電子輸送層と上部のホール輸送層に挟まれた構造をしている. (b) MAPbI₃の組成傾斜薄膜ライブラリーのXRDパターン. (オンラインカラー)

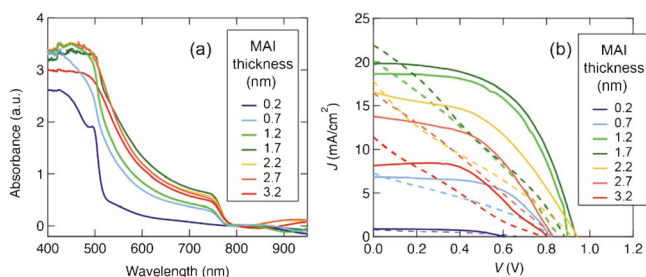


図3 (a) MAPbI₃の組成傾斜薄膜ライブラリーの吸収スペクトル. (b) MAPbI₃の組成傾斜薄膜ライブラリーの太陽電池特性について. 実線は逆方向バイアス, 点線は順方向バイアスで測定を行った. (オンラインカラー)

係数が大きく変化している. MAIがドーピングされていくと, PbI₂の電子構造に起因する特性からMAPbI₃に由来する吸収特性へと変化し, MAPbI₃のバンドギャップは790 nmと見積られる. この波長はMAPbI₃のバンドギャップの報告値⁽³²⁾である1.55 eVと一致している. また, 790 nm以下の波長領域では, MAIのドーピング量が増えるにつれ吸収係数も大きくなり, MAIの膜厚が1.7 nmで吸収係数は最大となった. さらにMAIの組成比が増えていくと吸収係数が下がる傾向が観察された.

このMAPbI₃薄膜ライブラリーの太陽電池としての機能特性を評価するために, AM1.5のソーラーシミュレーター光を照射の下, IV特性を評価した結果を図3(b)に示す. 実線は逆方向バイアス, 点線は順方向バイアスで測定を行なった結果になる. MAPbI₃薄膜が強誘電性を示すだけでなく, 電極界面においてキャリアのトラップも生じるため, バイアスの掃引方向で特性が大きく変化する結果が得られた⁽³⁷⁾⁽³⁸⁾. しかし, MAIの膜厚に対して短絡電流と開放電圧の傾向は掃引方向によらず, それぞれ一致した結果が観察

された. MAIの膜厚の増加に伴い, 短絡電流は大きくなり, MAIが1.7 nmの時, 最大の短絡電流を観察した. さらに, MAIの膜厚が増加すると, 短絡電流は小さくなった. この傾向は図3(a)で観察された吸収係数の結果とも一致し, MAIの膜厚が1.7 nm付近で吸収係数が最も高いこととも関連し, この組成において光電変換効率が最大となる10.2%の効率を得られた.

本実験では組成を連続的に変化させ, 太陽電池デバイスの特性を改善するための研究について紹介してきた. デバイスの機能を最大化するためには必要不可欠な実験であり, 類似した成膜実験は材料研究に常に必要な実験である. 現時点では試料数が少ないため, コンビナトリアル手法のメリットを活かしきれていないが, 同じ実験条件で再現よく系統的なデバイス特性のデータが取得できたという点では, コンビナトリアル手法の優位性がわかる結果と言える.

4. コンビナトリアル手法を用いた金属磁歪材料の開発

コンビナトリアル手法を適用することで材料探索が容易に進む例として, “結晶相境界”を利用した磁歪材料の開発について紹介する⁽⁵⁾. 磁歪材料は磁界を印加すると結晶が歪む現象で, 形状記憶合金⁽²⁸⁾や圧電体⁽³⁹⁾と共に, アクチュエーターやセンサーとして使用されている. この磁歪材料の開発において“結晶相境界”が開発指針の一つになっていることが知られている. 例えば, ガルフェノール(Fe_{1-x}Ga_x)の系では, Fe_{0.8}Ga_{0.2}が400 ppmを超える大きい磁歪定数を示すことが知られている⁽⁴⁰⁾⁽⁴¹⁾. この組成では, bccのA2相の中にDO₃型の秩序相がナノクラスターとして析出し, 二つの結晶相の界面が磁歪定数の向上に強く影響する⁽⁴²⁾⁽⁴³⁾. 同様な例として, TbCo₂-DyCo₂の磁歪材料の系⁽⁴⁴⁾も挙げられる. この系には正方晶と菱面体晶の結晶相境界があり, この組成付近において磁歪特性が著しく向上することが知られている. どちらの磁歪材料でも, “結晶相境界”が歪み特性を向上させる手がかりになっており, 圧電体材料のモルフォロピック相境界(MPB)との関係性が示唆されている. このような相境界を擬似的に作り出すことはコンビナトリアル法が得意としており, その一例として筆者らはFe-Co合金薄膜の組成傾斜薄膜の作製を行い, 2つの結晶の相境界において磁歪特性を大きく増強することに成功した⁽⁵⁾.

Fe-Co合金の磁歪特性については1930年代に報告され, Co_{0.7}Fe_{0.3}が90 ppm, Co_{0.5}Fe_{0.5}が75 ppmとして知られている⁽⁴⁵⁾⁽⁴⁶⁾. その後, アニールしたCo_{0.5}Fe_{0.5}の単結晶試料で150 ppmの磁歪特性が確認され⁽⁴⁷⁾, Fe-Co合金の磁歪材料としての機能はCo_{0.5}Fe_{0.5}付近を中心に研究されてきた. 図4にFe-Co合金の状態図⁽⁴⁸⁾を示すが, Fe-Co合金には状態図中の赤線で示す“fcc Co+bcc Fe”と“bcc Fe”の相境界がある. 筆者らは上記のCoが過剰な相境界付近の組成において磁歪特性の向上を期待し, コンビナトリアル手法によって試料合成, そして磁歪特性の評価実験を実施した.

一般的な薄膜実験では0.5 mm厚の基板上に薄膜を堆積す

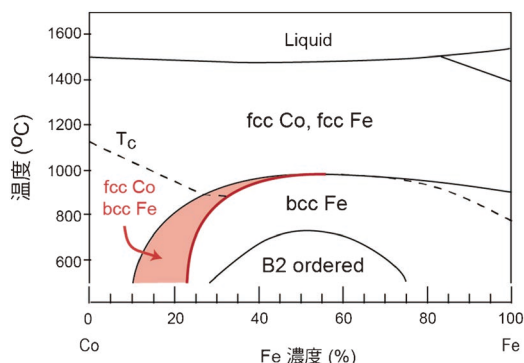


図4 Fe-Co 金属の状態図。(オンラインカラー)

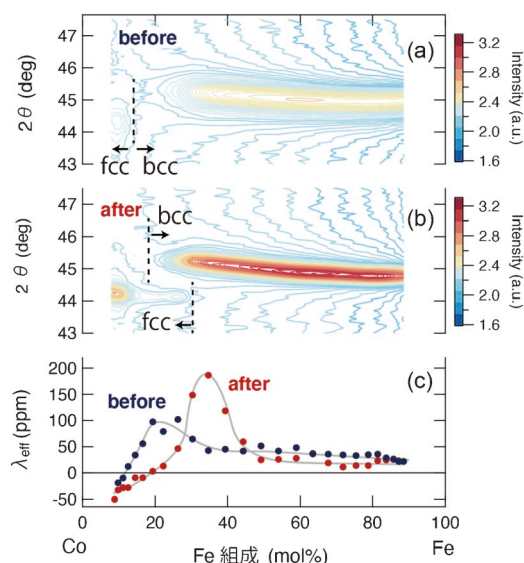


図5 Fe-Co 金属の2成分組成傾斜薄膜のアニール前(a), 800°Cでアニール後(b)のXRDパターン。アニールによって変化する磁歪特性(c)。(オンラインカラー)

るが、この方法では磁界を加えた時に発生する薄膜の歪みを計測することはできない。組成と結晶相の関係を調べるだけでなく、磁界を加えた際に発生する変位量も計測するべく、直径3インチ、厚さ0.5mmのSi/SiO₂基板をカンチレバー加工し、厚さ70μmまで極薄化した基板を本研究では利用した⁽¹⁸⁾⁽⁴¹⁾。この上に、室温においてFe-Co合金の組成傾斜薄膜を堆積した。WDSによる組成分析の結果、Fe:Co=1:9からFe:Co=9:1の組成比まで連続的に化学組成が変化しているのを確認できた。

図5(a)にFe-Co合金の組成傾斜薄膜のXRDマッピングの結果を示す。横軸を化学組成、縦軸に 2θ とし、強度データをマッピングしている。Co側において β -Co 111ピーク、そしてFe側において α -Fe 110ピークが観察された。“fcc Co”と“bcc Fe”の相境界は図中の点線が示すFeが15%付近であると予想される。この薄膜を800°Cの高温で真空アニールし、アニール後のXRDマッピングの結果を図5(b)に示す。アニールによって結晶化が進み、図5(a)に示すアニール前に比べ、全体的に回折強度が高くなっていることがわ

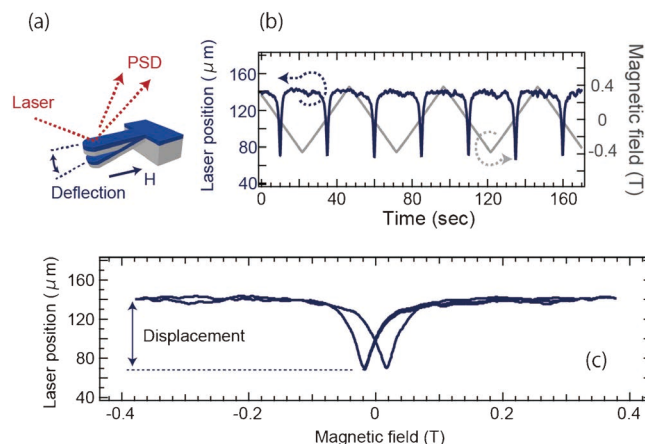


図6 Fe-Co 金属の2成分組成傾斜薄膜ライブラリーの磁歪特性の評価手法について。(a)レーザーをカンチレバー上に照射し、磁界を印加したときの変位量をPSDで計測する。(b)磁界を±0.4Tでスキャンした際の変位量の観察について。(c)測定した変位量を磁界に対するプロットした結果について。(オンラインカラー)

かる。また、アニール処理によって β -Co 111ピークがよりFe過剰の組成でも観測されるようになり、“fcc Co”と“bcc Fe”の相が共存している領域が発生し、相境界がFe過剰の組成にシフトしている。

結晶の相境界と磁歪特性の相関を調べるために、図6の手法でコンビナトリアルカンチレバー試料の磁歪特性の評価を行った。電磁石によって磁界をカンチレバーの面内方向に印加した。カンチレバー上にレーザーを照射し、磁歪によって発生する変位を、PSDで計測した。磁界を連続的に±0.4Tの範囲でスイープした際、変位量は図6(b)のように計測され、変位量を磁界に対してプロットすると図6(c)のようにバタフライカーブが得られた。変位量に加え、基板や薄膜材料のヤング率、厚さ、サイズを考慮した値から、それぞれの組成における磁歪係数を見積もった。その結果を図5(c)に示す。青色がアニール前、赤色がアニール後のデータを示している。Coが過剰な領域では負の磁歪定数を示しているのに対し、Fe組成の増加に伴い磁歪定数の符号が変わり、その大きさは増大していった。アニール前の試料ではFeが20%付近、アニール後の試料では35%付近で最大値となり、さらにFeが過剰の組成になると、磁歪定数が小さくなっていくことがわかる。注目すべき点として、磁歪定数の最大値が得られた合金組成がfcc構造とbcc構造の相境界の組成と一致している。 $\text{Fe}_{1-x}\text{Ga}_x$ ⁽⁴⁰⁾⁻⁽⁴³⁾や $\text{TbCo}_2\text{-DyCo}_2$ ⁽⁴⁴⁾の磁歪材料のように、結晶相境界によって磁歪特性は大きく変化し、コンビナトリアル手法がこのような相境界の合成と検出に強力な手法であることを物語っている。

5. コンビナトリアル手法を用いた酸化物フラックスの開発

コンビナトリアル薄膜手法が未知な材料を見つけ出すのに役立つ実験手法であることを示す例として、“フラックス材

料”の最適化プロセスに適用した例を紹介する。フラックス材料はバルク単結晶合成に使用される添加物のことを言い、高融点材料の単結晶合成、分解熔融型化合物の結晶育成、揮発性物の単結晶合成などに幅広く利用されている。このフラックス材料は経験則に沿った材料の選択指針も報告されている⁽⁴⁹⁾が、予測された材料が必ず結晶成長を促進するフラックスになるとは限らず、トライアンドエラーをしながら実験をしてみないとわからないのが現状である。筆者は強誘電体 $\text{Bi}_4\text{Ti}_3\text{O}_{12}$ 薄膜の結晶成長を促進するフラックス材料を見つけるべく、コンビナトリアル手法で材料のスクリーニングを行った。

$\text{Bi}_4\text{Ti}_3\text{O}_{12}$ - Bi_2O_3 とフラックス添加物となりうる CuO_x , VO_x , BiPO_x , MoO_x , WO_x , BaO_x の3成分組成傾斜薄膜を step 処理した SrTiO_3 基板⁽⁵⁰⁾上に 20 nm 堆積してから、目的とする強誘電体 $\text{Bi}_4\text{Ti}_3\text{O}_{12}$ の薄膜を 500 nm 堆積した。堆積した薄膜は一括 XRD 装置を用いて評価を行った。1つのライブラリー試料は5,000点のフラックス組成点を有し、6つのライブラリーで合計30,000点の XRD パターンが出力された。さらに、フラックスが $\text{Bi}_4\text{Ti}_3\text{O}_{12}$ 薄膜の結晶成長を促進させているのかを調べるために、フラックスを使用せずに合成した薄膜の XRD 解析も併せて5,000点の測定を行った。薄膜の結晶性に対するフラックス材料の効果を簡便に判断するために、図7には、 $\text{Bi}_4\text{Ti}_3\text{O}_{12}$ 0014ピークの強度とピーク位置から計算される c 軸長を計算した結果を示す。フラックスを使用せずに作製した場合、XRD 回折強度は10,000~13,000カウント程度であり、 c 軸長もバルクの値に比べ短いものになった。一方で、 CuO のフラックス材料を用いた場合、回折強度が最も高くなり、 c 軸長はバルクの格子定数とほぼ一致する傾向が観察された。 CuO 以外のフラックス材料を介して堆積した $\text{Bi}_4\text{Ti}_3\text{O}_{12}$ 薄膜の場合、フラックスを使用しなかった時と同程度、もしくは XRD 強度が大きく減少している傾向が観察されており、結晶性が悪くなっていると

判断できる。この結果から、 CuO を含むフラックスを介して $\text{Bi}_4\text{Ti}_3\text{O}_{12}$ 薄膜を堆積すると、結晶成長が促進し、高結晶化することがわかった。

CuO フラックスを介して $\text{Bi}_4\text{Ti}_3\text{O}_{12}$ 薄膜が高結晶化するメカニズムを調べるために、XPS や μAES による分析実験を行ったところ、 $\text{Bi}_4\text{Ti}_3\text{O}_{12}$ 薄膜の堆積している間、 CuO が常に薄膜表面に析出し、界面活性剤として機能していることが判明した⁽⁵¹⁾。成膜条件の最適化をさらに詳しく行った結果、6 Torr の酸素分圧、800°C という高温で薄膜を堆積することによって、結晶性が著しく向上することがわかった。図8

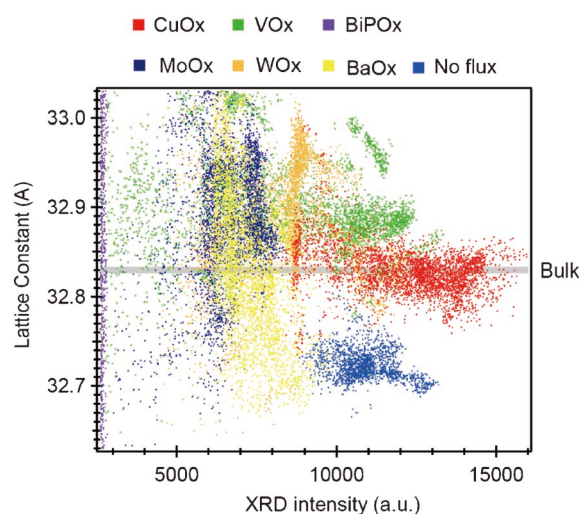


図7 コンビナトリアル手法を用いた $\text{Bi}_4\text{Ti}_3\text{O}_{12}$ 薄膜の結晶性を向上させるフラックス材料の探索プロセス。6種類のフラックスライブラリーの薄膜試料について $\text{Bi}_4\text{Ti}_3\text{O}_{12}$ 薄膜の回折強度と格子定数のマッピングを行った。 CuO を含有するフラックス材料を用いた場合、フラックスを使用しない場合や他のフラックス材料を用いた場合より $\text{Bi}_4\text{Ti}_3\text{O}_{12}$ 薄膜の回折強度は高まり、格子定数は $\text{Bi}_4\text{Ti}_3\text{O}_{12}$ バルクの値に一致する傾向が観察された。(オンラインカラー)

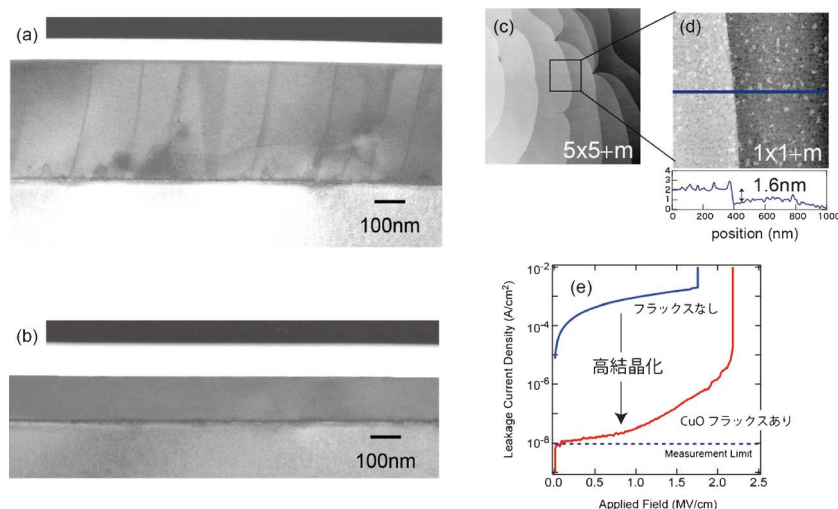


図8 フラックスを使用せずに作製した $\text{Bi}_4\text{Ti}_3\text{O}_{12}$ 薄膜(a)と CuO フラックスを使用して作製した $\text{Bi}_4\text{Ti}_3\text{O}_{12}$ 薄膜(b)の断面 TEM 像。(c), (d) CuO フラックスを使用して作製した $\text{Bi}_4\text{Ti}_3\text{O}_{12}$ 薄膜(b)の表面 AFM 像。(e) $\text{Bi}_4\text{Ti}_3\text{O}_{12}$ 薄膜の IV 特性。 CuO フラックスを利用することでリーク電流が抑制し、絶縁性が向上した。(オンラインカラー)

(a), (b)には結晶性を調べるために測定を行った $\text{Bi}_4\text{Ti}_3\text{O}_{12}$ 薄膜の断面 TEM 像の結果を示す。CuO フラックスを使用せずに作った場合(図 8(a)), $\text{Bi}_4\text{Ti}_3\text{O}_{12}$ 薄膜の中には転位や欠陥が多く含まれる薄膜が成長した一方で, CuO フラックスを使用した場合(図 8(b)), 薄膜や欠陥が μm オーダーの範囲で観察されない, 高い結晶性を有する薄膜を堆積できたと言える。

図 8(c), (d)には CuO フラックスを用いて作製した $\text{Bi}_4\text{Ti}_3\text{O}_{12}$ 薄膜の表面を AFM で測定した結果を示す。5 μm という広い範囲においてステップ構造が観察され, その高さは 1.6 nm であった。この高さは $\text{Bi}_4\text{Ti}_3\text{O}_{12}$ の c 軸長の半分に相当する。図 8(e)には $\text{Bi}_4\text{Ti}_3\text{O}_{12}$ 薄膜の IV 特性の CuO フラックス効果について示している。フラックスを使用しない場合, Bi が欠損するだけでなく, 結晶性も低下し, リーク電流が高くなっているのに対し, CuO フラックスを使用すると, リーク特性が改善していることが明らかである。このようにリーク電流が低減すると自発分極のヒステリシス測定が可能になり, 飽和分極が 3 $\mu\text{C}/\text{cm}^2$ であることがわかっている。この分極値はバルクの値である 4 $\mu\text{C}/\text{cm}^2$ とほぼ一致している。

$\text{Bi}_4\text{Ti}_3\text{O}_{12}$ 薄膜の機能向上はコンビナトリアル手法で見つけられた CuO が界面活性剤として表面に常に析出することによって, 蒸気圧が高い Bi_2O_3 の蒸発を防いでいる役割を担っていることが大きい。さらに, 高温でも安定化した Bi_2O_3 の液滴が薄膜堆積中に表面をマイグレーションしながら $\text{Bi}_4\text{Ti}_3\text{O}_{12}$ 薄膜が堆積する効果もあり⁽⁵¹⁾, AFM や TEM, 電気特性で観察された薄膜の特性向上に繋がっていることも明らかになった。

何故 CuO が $\text{Bi}_4\text{Ti}_3\text{O}_{12}$ 薄膜の界面活性剤として機能するかについてはまだ未知な面も多い。状態図のデータベースを調査した限りでは, CuO が他の不純物フラックス(VO_x , PO_x , MoO_x , WO_x , BaO_x)に比べ, TiO_2 や Bi_2O_3 と化合物を作りにくく, 状態図を見ても中間化合物の数が少ないことが判明した。つまり, Cu が Ti 酸化物や Bi 酸化物と結合を作りにくいいため, $\text{Bi}_4\text{Ti}_3\text{O}_{12}$ 結晶の中に取り込まれず, 薄膜合成中は表面に析出したものであることが予想される。このような未知な現象をうまく検出できるのがコンビナトリアル手法のメリットであり, 今後はデータベースを取り込んだインフォマティクスの技術を多用することでより少ない実験量で類似した実験結果が得られるものと期待される。

6. コンビナトリアル手法を用いたデータ解析

コンビナトリアル手法を用いた実験研究を進めると, 合成も評価も高速に進むため, 膨大な実験データが生み出され, データ整理に悩まされることもある。これまでに紹介した 3 つの事例についても, 測定点が増加するに伴い, 取得するデータの処理の難易度は高まっていった。コンビナトリアル手法が高速合成・評価手法であるにも関わらず, データ処理律速になってはコンビナトリアルプロセスを使う意義がない。



図9 コンビナトリアル手法で得られるデータを管理するネットワークシステム。ワイヤレスを介して, 実験装置から得られたデータをデータサーバーに蓄積するシステムを構築している。(オンラインカラー)

現在, 筆者の研究室では, 筆者自身のこれまでの経験を踏まえ, データ処理をより高速に実行するべく, 得られたデータをすべて試料ごとにワイヤレスネットワークを介しデータサーバーに管理するシステムを構築している(図 9)。サーバーの管理者が頻繁にバックアップをとっていれば, パソコンのトラブルによってデータを失うことはない。また, 大学では学生が卒業するたびに貴重な実験データを失うこともある。例えば, 卒業生のパソコンに貴重なデータが入っていた時は, 教員が卒業生に連絡を取らざるを得ない状況をこれまでにも見てきたが, このようなトラブルも回避できる。

さらに, データサーバーには系統的にデータ処理するためのマクロファイルを保管し, 研究室のメンバーが簡便にコンビナトリアル手法で作製した試料のデータ解析できるシステムを構築している。学生自身がデータ処理に時間と労力をかけることはなく, コンビナトリアル実験に専念できる環境を作り上げている。

ネットワークを介したデータシステムを構築し, データが次々と蓄積するシステムを作ったとしても, ロボットが材料を作るために機械学習させるのに十分なデータを得るまでには至ってはいない。機械学習には少なくとも 1 万点のデータが必要であると言われ, コンビナトリアル手法を適用しても足りないのが現状である。本稿で紹介したデータについては材料の化学組成を変化させただけで, 合成する際の基板温度や酸素圧力, パルスレーザー堆積の場合はレーザーの周波数, エネルギー密度などの諸条件もすべて一定の条件でデータを取得してきた。もし, それぞれの実験条件を全て最適化しようとする, よりたくさんの実験量が必要になり, 情報量もより膨大になる。コンビナトリアル手法だけでは足りない点を, マテリアルインフォマティクスの導入によって補い, DFT 計算のデータをリンクさせる方法を運用する, またはベイズ最適化を取り込んだプロセスパラメーターの最適化手法など, 新しいシステムを取り入れたプロセスも必要になっていると言える。

7. お わ り に

コンビナトリアル材料プロセスによるハライドペロブスカイト太陽電池、結晶相境界を用いた磁歪材料、フラックス材料による強誘電体薄膜に関する研究内容について紹介してきた。3つのどの研究においても、たくさんの組成を有する薄膜ライブラリーを一つの基板上に集積し、一括評価することで系統的データを得ることができた。その結果、デバイスの特性が薄膜の化学組成に大きく依存したり、結晶相境界によって変調する特性の変化を検出でき、目的とする材料の特性・機能を向上させることに繋がっている。その一方で、材料の特性を良くするためのデータだけが有効活用され、特性を悪くする“ダメ”データについては比較データとしてしか利用されていない。今後は“ダメ”なデータも有効活用できるデータベースを蓄積し、取得したすべてのデータを有意義に活用し、新しい材料を見つけ出す材料プロセスのIT化を目指し、システムを拡張していきたい。

本研究は、リップマーミック教授(東京大学物性研究所)、竹内一郎教授(メリーランド大学)、松本祐司教授(東北大学工学研究科)、鯉沼秀臣名誉教授(現在、エスシーティー株式会社)との共同研究成果によるものである。また、本研究の一部は、JST さき が け (JPMJPR16R3)、科 研 費 (20H02622)、安全保障技術研究推進制度(JPJ004596)の助成を受けて行われた。ここに感謝申し上げます。

文 献

- (1) H. Koinuma and I. Takeuchi: *Nat. Mater.*, **3**(2004), 429–438.
- (2) H. Koinuma, R. Takahashi, M. Lippmaa, S.-Y. Jeong, Y. Matsumoto, T. Chikyow and S. Suzuki: *Handbook of Advanced Ceramics: Materials, Applications, Processing, and Properties*, 2nd Edition, Elsevier, (2013), 1103–1124.
- (3) M. L. Green, C. L. Choi, J. R. Hattrick-Simpers, A. M. Joshi, I. Takeuchi, S. C. Barron, E. Campo, T. Chiang, S. Empedocles, J. M. Gregoire, A. G. Kusne, J. Martin, A. Mehta, K. Persson, Z. Trautt, J. Van Duren and A. Zakutayev: *Appl. Phys. Rev.*, **4**(2017), 011105.
- (4) K. Kawashima, Y. Okamoto, O. Annayev, N. Toyokura, R. Takahashi, M. Lippmaa, K. Itaka, Y. Suzuki, N. Matsuki and H. Koinuma: *Sci. Technol. Adv. Mater.*, **18**(2017), 307–315.
- (5) D. Hunter, W. Osborn, K. Wang, N. Kazantseva, J. R. Hattrick-Simpers, R. Suchoski, R. Takahashi, M. L. Young, A. Mehta, L. A. Bendersky, S. E. Lofland, M. Wuttig and I. Takeuchi: *Nat. Commun.*, **2**(2011), 518.
- (6) R. Takahashi, Y. Yonezawa, M. Ohtani, M. Kawasaki, K. Nakajima, T. Chikyow, H. Koinuma and Y. Matsumoto: *Adv. Funct. Mater.*, **16**(2006), 485–491.
- (7) R. Takahashi, Y. Yonezawa, K. Nakajima, T. Chikyow, H. Koinuma and Y. Matsumoto: *Appl. Phys. Lett.*, **88**(2006), 152904.
- (8) R. Takahashi, Y. Yonezawa, M. Ohtani, M. Kawasaki, Y. Matsumoto and H. Koinuma: *Appl. Surf. Sci.*, **252**(2006), 2477–2481.
- (9) Y. Matsumoto, R. Takahashi and H. Koinuma: *J. Cryst. Growth*, **275**(2005), 325–330.
- (10) 高橋竜太, 松本祐司: *セラミックス*, **45**(2010), 724–727.
- (11) T. Fukumura, M. Ohtani, M. Kawasaki, Y. Okimoto, T. Kageyama, T. Koida, T. Hasegawa, Y. Tokura and H. Koinuma: *Appl. Phys. Lett.*, **77**(2000), 3426–3428.
- (12) R. Takahashi, H. Kubota, M. Murakami, Y. Yamamoto, Y. Matsumoto and H. Koinuma: *J. Comb. Chem.*, **6**(2004), 50–53.
- (13) R. Takahashi, H. Kubota, T. Tanigawa, M. Murakami, Y. Yamamoto, Y. Matsumoto and H. Koinuma: *Appl. Surf. Sci.*, **223**(2004), 249–252.
- (14) H. Kubota, R. Takahashi, T.-W. Kim, N. Arai, M. Yoshimura, H. Nakao, H. Furuya, Y. Mori, T. Sasaki, Y. Matsumoto and H. Koinuma: *Appl. Surf. Sci.*, **223**(2004), 241–244.
- (15) Y. Yamamoto, R. Takahashi, Y. Matsumoto, T. Chikyow and H. Koinuma: *Appl. Surf. Sci.*, **223**(2004), 9–13.
- (16) K. Hasegawa, P. Ahmet, N. Okazaki, T. Hasegawa, K. Fujimoto, M. Watanabe, T. Chikyow and H. Koinuma: *Appl. Surf. Sci.*, **223**(2004), 229–232.
- (17) R. Takahashi, Y. Matsumoto and H. Koinuma: *Meas. Sci. Technol.*, **16**(2005), 292–295.
- (18) I. Takeuchi, O. O. Famodu, J. C. Read, M. A. Aronova, K.-S. Chang, C. Craciunescu, S. E. Lofland, M. Wuttig, F. C. Wellstood, L. Knauss and A. Orozco: *Nat. Mater.*, **2**(2003), 180–184.
- (19) R. B. Van Dover, L. F. Schneemeyer and R. M. Fleming: *Nature*, **392**(1998), 162–164.
- (20) Y. Cho, A. Kirihara and T. Saeki: *Rev. Sci. Instrum.*, **67**(1996), 2297.
- (21) S. Okazaki, N. Okazaki, X. Zhao, H. Sugaya, S. Yaginuma, R. Takahashi, M. Murakami, Y. Matsumoto, T. Chikyow, H. Koinuma and T. Hasegawa: *Appl. Surf. Sci.*, **252**(2006), 2615–2621.
- (22) Y. Cho: *J. Mater. Res.*, **26**(2011), 2007.
- (23) R. Takahashi, I. Ohkubo, K. Yamauchi, M. Kitamura, Y. Sakurai, M. Oshima, T. Oguchi, Y. Cho and M. Lippmaa: *Phys. Rev. B*, **91**(2015), 134107.
- (24) R. Takahashi, Y. Cho and M. Lippmaa: *J. Appl. Phys.*, **117**(2015), 014104.
- (25) Y. Matsumoto, M. Murakami, T. Shono, T. Hasegawa, T. Fukumura, M. Kawasaki, P. Ahmet, T. Chikyow, S. Koshihara and H. Koinuma: *Science*, **291**(2001), 854–856.
- (26) Y. Matsumoto, R. Takahashi, M. Murakami, T. Koida, X. J. Fan, T. Hasegawa, T. Fukumura, M. Kawasaki, S. Koshihara and H. Koinuma: *Japan. J. Appl. Phys.*, **40** Part2 (2001), L1204–L1206.
- (27) M. Ohtani, T. Fukumura, M. Kawasaki, K. Omote, T. Kikuchi, J. Harada, A. Ohtomo, M. Lippmaa, T. Ohnishi, D. Komiyama, R. Takahashi, Y. Matsumoto and H. Koinuma: *Appl. Phys. Lett.*, **79**(2001), 3594–3596.
- (28) R. Zarnetta, R. Takahashi, M. L. Young, A. Savan, Y. Furuya, S. Thienhaus, B. Maas, M. Rahim, J. Frenzel, H. Brunken, Y. S. Chu, V. Srivastava, R. D. James, I. Takeuchi, G. Eggeler and A. Ludwig: *Adv. Funct. Mater.*, **20**(2010), 1917–1923.
- (29) T. Makino, C. H. Chia, N. T. Tuanm D. D. Sun, Y. Segawa, M. Kawasaki, A. Ohtomo, K. Tamura and H. Koinuma: *Appl. Phys. Lett.*, **77**(2000), 975–977.
- (30) M. Ohtani, H. Kishida, K. Hirota, H. Sakurada, N. Kawamoto, Y. Murakami, K. Ueno, J. Matsuno, Y. Okimoto, T. Makino, Y. Segawa, Y. Tokura, D. Shindo, H. Okamoto and M. Kawasaki: *Adv. Mater.*, **18**(2006), 2541–2544.
- (31) M. Ohtani, T. Hitosugi, Y. Hirose, J. Nishimura, A. Ohtomo, M. Kawasaki, R. Inoue, M. Tonouchi, T. Shimada and T. Hasegawa: *Appl. Surf. Sci.*, **252**(2006), 2622–2627.
- (32) A. K. Jena, A. Kulkarni and T. Miyasaka: *Chem. Rev.*, **119**(2019), 3036–3103.
- (33) T. Soto-Montero, W. Soltanpoor and M. Morales-Masis: *APL Materials*, **8**(2020), 11903.
- (34) A. Kojima, K. Teshima, Y. Shirai and T. Miyasaka: *J. Am. Chem. Soc.*, **131**(2009), 6050–6051.
- (35) S. Maruyama, Y. Takeyama, H. Taniguchi, H. Fukumoto, M. Itoh, H. Kumigashira, M. Oshima, T. Yamamoto and Y.

- (49) 大石修治, 手嶋勝弥, 宍戸統悦: フラックス結晶成長の話, 日刊工業新聞社, (2010), 15-34.
- (50) S. Kawasaki, E. Holmstrom, R. Takahashi, P. Spijker, A. S. Foster, H. Onishi and M. Lippmaa: J. Phys. Chem. C, **121** (2017), 2268-2275.
- (51) R. Takahashi, Y. Tsuruta, Y. Yonezawa, T. Ohsawa, H. Koinuma and Y. Matsumoto: J. Appl. Phys., **101**(2007), 33511.

川嶋一裕

無機 2 次元ナノシートが拓く原子層技術

長 田 実*

1. は じ め に

近年のナノテクノロジーの進歩は、物質創製に新たな流れを持ち込み、サイズ、形態、次元を制御したナノ物質が研究の表舞台に登場した。中でも、原子数個の厚みを有する 2 次元物質(ナノシート)は重要なターゲットであり、層状化合物の剥離ナノシート化が新物質創製の新しいアプローチと位置付けられ、現在、精力的な研究が世界中で行われている⁽¹⁾。本分野発展の一つの原動力となったのが、炭素の単原子シート「グラフェン」の開発にある。その後、有機、無機、金属に至る広範な物質系において、ナノシートの創成、機能開発が報告され、2 次元物質については今や材料科学の一大分野へと発展している⁽²⁾。

本稿で紹介する無機ナノシートは究極の 2 次元性と共に、グラフェンにはない組成、構造、機能の多様性を具備しており、グラフェンでは実現できない機能発現を目指す「ポストグラフェン研究」の新しい舞台として注目されている。無機ナノシートの歴史は古く、2004 年のグラフェンの報告から遡ること 8 年、1996 年に端を発する。NIMS の佐々木らは 4 級アンモニウムイオンの作用により層状チタン酸化物の単層剥離に成功し、得られた 2 次元酸化物結晶をナノシートと名付けて報告した⁽³⁾。その後、この化学的剥離手法は、イオン交換性を有する様々な層状化合物に適用され、酸化チタン、ペロブスカイトなど多くの機能性ナノシートが開発されている⁽⁴⁾。ナノシートは、層状化合物を構成する最小基本単位である層 1 枚に相当し、厚みは 0.5~3 nm と分子レベルであるに対して、横サイズは μm オーダーの広がりを持った異方性の高い 2 次元単結晶である。このような構造的特徴により、ナノシートでは、高い電子・イオン移動度、柔軟性、透明性、高耐熱など、従来のバルク材料・薄膜とは異なる機能の発現し、エレクトロニクス、環境・エネルギーなど多様な産業分野の未来を先導するシーズ技術として多く

の注目を集めている。本稿では、筆者らの研究例を中心に、無機ナノシートの研究動向、応用、将来展望について紹介したい。

2. ナノシートの合成

無機ナノシートの多くは、層状化合物の単層剥離により合成されており、酸化物、水酸化物、窒化ホウ素、遷移金属カルコゲナイド、炭化チタン系、遷移金属カーバイドなどの報告がある⁽⁴⁾⁻⁽⁶⁾。剥離手法としては、機械的剥離手法、化学的剥離手法の 2 種類に大別される。機械的剥離手法は、スコッチテープ等の粘着テープで層剥離を繰り返す簡便な手法であり、グラフェンの単層剥離の報告以降、様々な層状化合物の剥離ナノシート化に利用されている。特に、層間がファンデル・ワールス的に弱く結合した層状結晶の剥離には好適であり、雲母、六方晶系窒化ホウ素(h-BN)、遷移金属カルコゲナイト(MoS_2 , WS_2 等)、黒リン、 MoO_3 、 $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_8$ などに適用されている。しかしながら、この手法で得られるナノシートの横サイズは数百 nm~1 μm 程度と小さく、また大量合成や実用化に不適であるため、物性研究、微細デバイス作製など基礎研究に留まっている。

他方、化学的剥離手法は、高品位の単層ナノシートをコロイド分散液として大量合成できるため、多くの無機ナノシートの合成に適用されている(図 1)。酸化物などのイオン交換性化合物では、4 級アンモニウムイオンなどの嵩高いゲスト(サイズ: 1.2 nm 程度)のインターカレーション反応を利用した剥離ナノシート化が可能である。これまでに酸化チタン、酸化マンガン、ペロブスカイト、酸化ルテニウム、水酸化物 $\text{M}(\text{OH})_2$ (M: 遷移金属)などの剥離ナノシート化が報告され、導電性、半導体性、誘電性、磁性など、多彩な機能性ナノシートが得られている(図 2)⁽⁴⁾。こうしたナノシートの多くは、出発層状化合物の組成、構造により機能も限定されていたが、最近では第一原理計算を援用した機能設計によ

* 国立大学法人東海国立大学機構名古屋大学未来材料・システム研究所; 教授(〒454-8601 名古屋市千種区不老町)
Atomic Layer Technology Based on 2D Inorganic Nanosheets; Minoru Osada*(*Institute of Materials and Systems for Sustainability, Nagoya University, Nagoya)
Keywords: two-dimensional materials, oxide nanosheets, thin-film technology
2021 年 6 月 8 日受理[doi:10.2320/materia.60.628]

り新物質を開発するテーラメード合成が進展している。例えば、酸化チタン、ペロブスカイトでは、出発層状化合物の組成、構造の精密制御により、磁気特性、誘電特性、絶縁特性（バンドギャップ）の自在な制御が可能となることが示されている⁽⁷⁾⁽⁸⁾。

上記の剥離手法に加え、近年、ボトムアップ合成法の進展が目覚ましい⁽⁹⁾。従来の剥離手法は、層状化合物の利用が前提にあり、多彩な機能を有し、応用上重要である非層状構造の合成には適用できず、得られる材料、機能のライブラリーは限定されていた。これに対して、ボトムアップ法では、組成、構造の自在な設計が可能であり、非層状の酸化物や金属ナノシートの合成も可能となる。これまでに報告されている合成法としては、化学気相成長法、気液界面合成法、界面活性剤やグラファイトの層間をテンプレートとする方法、オストワルト熟成によりナノ粒子の異方的成長を促進する方法、パルスレーザー蒸着により作製したエピタキシャル膜を転写する方法などがある⁽¹⁰⁾。図3に我々の研究例を示す。気相成長法、気液界面合成法の利用により、結晶の対称性、晶癖に由来した形状を付与することができ、サイズ、形状を精密に制御した ZnO, CeO₂, MoS₂, Pt などの合成に成功している⁽¹¹⁾⁽¹²⁾。こうしたボトムアップ合成については、報告例も限られており、様々な物質系への適用による今後の研究展開が期待される。

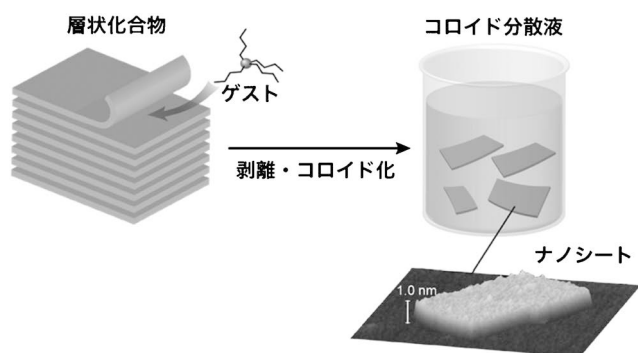


図1 (上)層状化合物の剥離ナノシート化。(下)酸化チタンナノシートの原子間力顕微鏡像。

以上の無機ナノシートは、主に結晶性材料が中心であったが、ここ数年、アモルファスナノシートが注目を集めている⁽¹³⁾⁽¹⁴⁾。これまでに、窒化ホウ素、シリカ、遷移金属カルコゲナイドなど、様々なアモルファスナノシートが合成されている。これらのアモルファスナノシートは、多くの欠陥を内包した2次元原子配列をとり、その原子層単層あるいは原子層がランダムにスタックしたユニークな層状構造を有する。こうした構造的特徴により、アモルファスナノシートは複雑な電子状態をとるが、その一方で、非結晶構造、大面積の均一性などの特徴により、優れたキャリア輸送特性を示すことが報告されている。さらに、アモルファスナノシートは、特異な2次元構造とアモルファス構造の融合により、結晶性ナノシートとは異なる特異な電気特性、機械特性を示し、電子材料、光学材料、エネルギー貯蔵、電極触媒など、様々な分野への応用が期待されている。

3. ナノシートの臨界物性の開拓

無機ナノシートの示す多彩な物性は、ポストグラフェンあるいは新しい電子材料として興味深いものであり、ナノシート単体、複合体として多岐に渡る応用が検討されている。ナノシートでは、3次元から孤立2次元となることで同じ組成でありながら電気特性も変貌を遂げる。例えば、元々の層状化合物が金属的であっても、剥離ナノシートでは電界が容易に透過し、電子密度の変調が可能になるなど、従来の電気的特性の概念が変わる。こうした2次元物性における1つの興味は、2次元極限といえるナノシートで超伝導特性、強誘電特性などの特異物性を実現できるかという点にある。

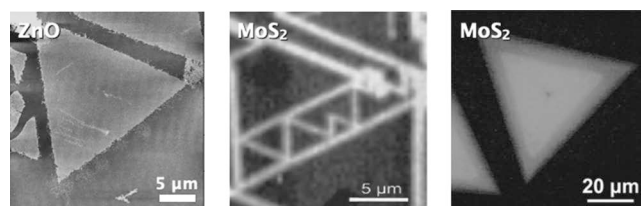


図3 ボトムアップ法によるナノシートの合成例(ZnO, MoS₂)。

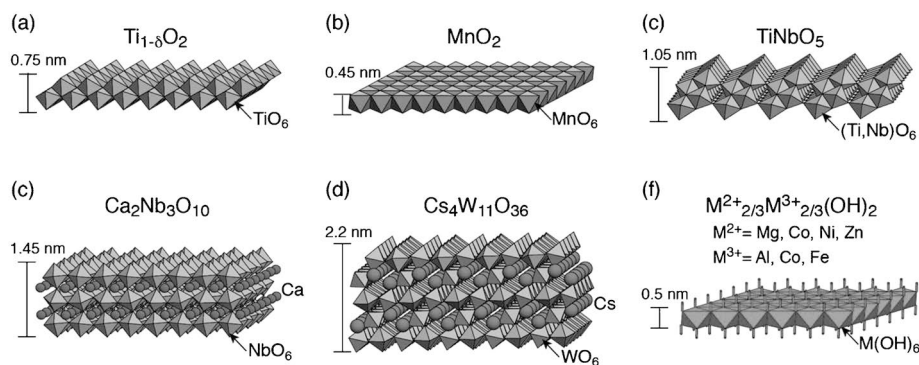


図2 代表的な無機ナノシートの結晶構造。(a) $\text{Ti}_{1-x}\text{O}_2$, (b) MnO_2 , (c) TiNbO_5 , (d) $\text{Ca}_2\text{Nb}_3\text{O}_{10}$, (e) $\text{Cs}_4\text{W}_{11}\text{O}_{36}$, (f) $\text{M}^{2+}_{2/3}\text{M}^{3+}_{2/3}(\text{OH})_2$ ($\text{M}^{2+} = \text{Mg, Co, Ni, Zn}$; $\text{M}^{3+} = \text{Al, Co, Fe}$)。

超伝導特性に関しては、 $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_8$ のナノシート合成と特性評価がなされており、クリーンな表面・界面を実現することにより、4 格子でも超伝導特性が維持されることが報告されている⁽¹⁵⁾。他方、強誘電特性については、酸化物も含め 2 次元系のトピックスとなっている。強誘電体の多くは、薄膜化に伴い誘電特性が著しく低下する「サイズ効果」を示すことが広く知られており、ナノシートは薄膜化限界、臨界物性を検証するモデルケースとなる。筆者らは、ペロブスカイト 1 格子単位 ($\sim 0.4 \text{ nm}$) で厚みを精密に制御したナノシートを合成し、膜厚 $1.5 \sim 3 \text{ nm}$ での強誘電物性の検証を行ったところ、従来の材料で臨界膜厚とされる $\sim 2 \text{ nm}$ でも強誘電特性が維持されることを確認している (図 4)⁽¹⁶⁾。

また、超伝導特性の新しい舞台として、ナノシートのモアレ超格子が注目されている (図 5)⁽¹⁷⁾。例えば、ねじれ 2 層グラフェンでは、原子構造の非整合性 (長周期のモアレ模様) と電子状態変調が発現し、特に、魔法角と呼ばれる角度でグラフェンを重ねた場合、バンド分散が消滅し、それに起因し

て超伝導が発現することが報告されている。2018 年 MIT の J-H. Pablo 教授グループによる超伝導の発見以降、こうした「モアレ超格子」は、電子相制御、新材料開発の新しい手法として注目され、2 次元物質の一大トピックスとして展開している⁽¹⁸⁾。以降、世界中の多くのグループが、検証実験とともに他物質系への拡張実験に取り組み、超伝導だけでなく、モアレ系における励起子・ソリトンの制御、高次トポロジカル絶縁体状態、強誘電特性など、多くの電子相制御を実現している。また、遷移金属カルコゲナイドをベースとしたモアレ超格子では、偏光・磁気秩序を電流制御、磁気相-超伝導相の転移、励起子物性の電場制御など、バレー自由度に起因した特異な物性を示すことも報告されている。以上のように、モアレ超格子は、超伝導、量子スピン液体など、凝縮系物理学、量子デバイスの新しいプラットフォームとして、今後の発展が期待されている。

4. ナノシートの精密集積による機能材料の創製

ナノシート単体は特異機能を示す新材料として興味深いところであるが、ナノシートを構築単位として自在に集積化・複合化し、2 次元 $\sim$ 3 次元へとナノ構造体のボトムアップ集積が可能となれば、現行の材料技術では到達困難な微小デバイスの開発や高次機能の設計・発現の道が開かれる⁽¹⁹⁾。その延長線上には革新的な実用材料、デバイスの実現につながる可能性を秘めている。こうした目的のために、異種ナノシートのレイヤーバイレイヤー集積が注目されており、レゴブロックのようにナノシートを精密に積み上げていくことにより、新しい材料の構築と機能開発が検討されている。

無機ナノシートは、液媒体中に分散したコロイドとして大量合成が可能であり、様々な水溶液プロセスを用いることで多彩なナノ構造体を作り出すことができるというメリットを有する。例えば、ピーカーの中でナノシートを積み木細工のように集積したり、異種物質と複合化することにより、ナノレベルで組成・構造を精密に制御したナノ薄膜やナノ複合体、微粒子、ナノチューブ、ナノカプセルなど多彩な材料を合成できる (図 6)⁽⁴⁾⁽²⁰⁾。

これらの中でも応用の観点から重要なのが、ラングミュア・プロジェクト (LB) 法⁽²¹⁾、スピンコート法⁽²²⁾、ドロップキャスト法⁽²³⁾などの液相プロセスを利用した薄膜作製技術である。これらの集積法では、溶媒、表面圧の最適化により、ナノシートがタイルのように基板表面に隙間なく被覆した単層膜の作製が可能であり、この操作を繰り返すことで 1 nm 単位で膜構造を精密に制御した多層膜、人工超格子を作製することができる。図 7 は LB 法により作製したペロブスカイトナノシート多層膜、超格子の例⁽⁷⁾⁽²⁴⁾である。断面透過型電子顕微鏡像から、基板上にナノシートが原子レベルで平行に累積した積層構造が確認されており、ナノシートの緻密性、平滑性を維持してレイヤーバイレイヤーで積層した高品位多層膜、超格子が実現している。こうしたナノシート膜の大きな特徴が、厚み方向に対しては 1 nm 単位の分子レベ

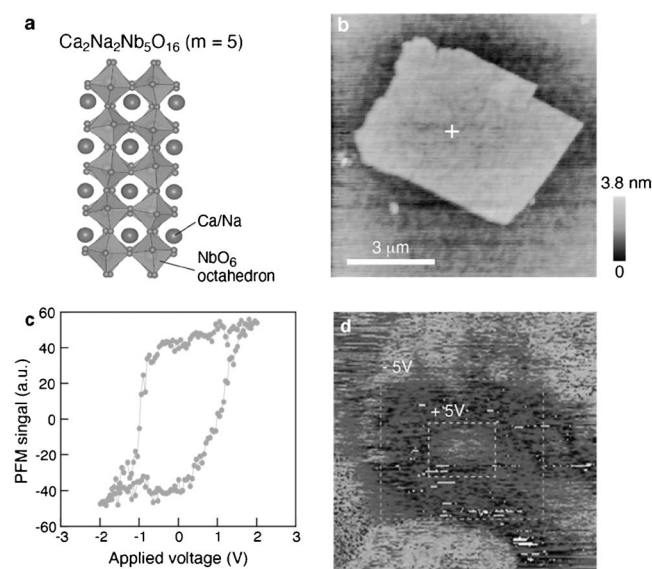


図 4 圧電応答顕微鏡によるペロブスカイトナノシート ($\text{Ca}_2\text{Na}_2\text{Nb}_5\text{O}_{16}$) の強誘電特性. (a) 結晶構造図, (b) 形状像, (c) 強誘電ヒステリシス特性, (d) 分極反転特性. (文献16より転載)。

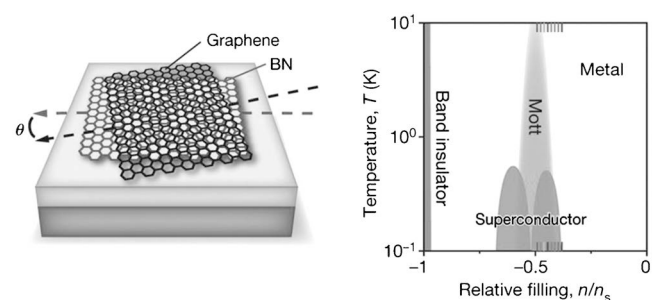


図 5 グラフェン/h-BN のモアレ超格子の模式図 (左) と グラフェン・モアレ超格子の電子相図 (右). 横軸は電子密度. (文献17, 18より転載)。

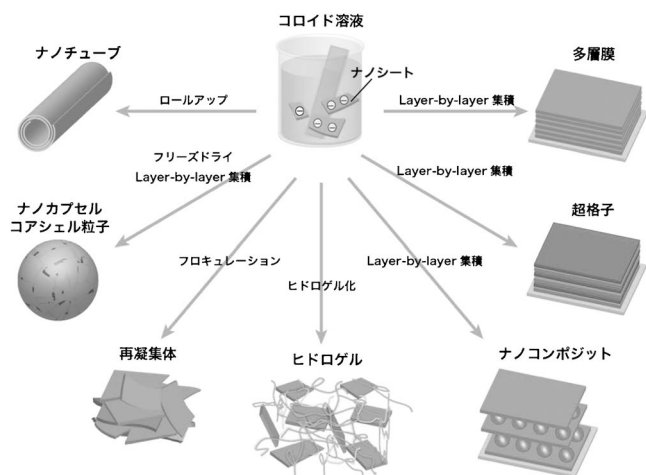


図6 ナノシートの自己組織化反応によるナノ構造体、ナノ薄膜の作製.

ルの制御ができるのに対して、横サイズは通常 μm オーダーの広がりを持っており、数インチサイズの薄膜作製ができる点にある。最近では、大型ナノシートの合成や大面積製膜の報告もあり、実デバイススケールのモノづくりができる点は、ナノとマイクロの2面性を有するナノシートならではの特徴と言える。

こうした精密集積によりナノシートの機能開発、デバイス応用が進められており、原子層 FET デバイス、励起子発光制御素子、誘電体キャパシタ、人工強誘電体、マルチフェロイック材料、巨大磁気光学材料、高効率太陽電池など多彩な機能デザインや応用が示されている(図8)⁽⁷⁾⁽²⁵⁾。ナノシートの超格子アプローチが興味深い点は、ナノからメソスケールで膜構造、階層、空間を設計・制御した高次構造体や従来のプロセスでは実現できない非平衡構造の構築が可能となることにある。これにより、異種ナノシートの単純な機能の足し合わせでなく、積層数や隣接するナノシートの種類に応じて、ナノシート間の相互作用を自在に制御でき、新しい融合機能をデザインすることが可能となる。例えば、 $\text{Ca}_2\text{Nb}_3\text{O}_{10}$

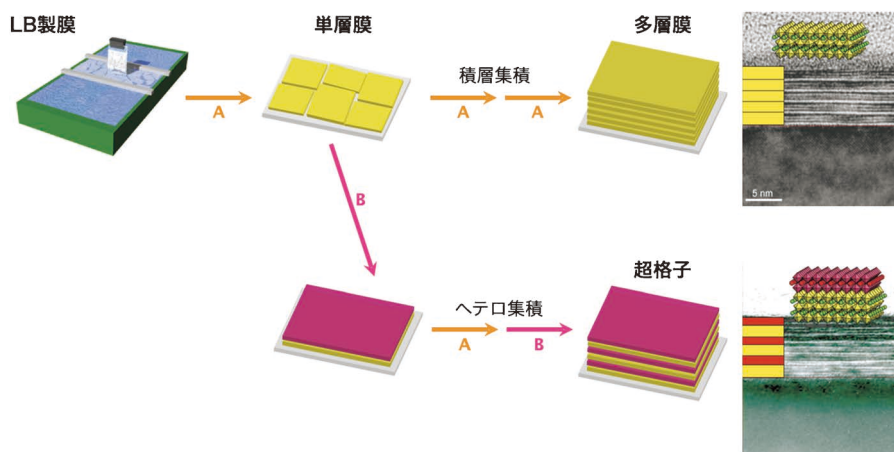


図7 LB法によるペロプスカイトナノシート積層膜および人工超格子の作製。(上) $\text{Ca}_2\text{Nb}_3\text{O}_{10}$ 多層膜, (下) $(\text{LaNb}_2\text{O}_7/\text{Ca}_2\text{Nb}_3\text{O}_{10})$ 超格子. (オンラインカラー)

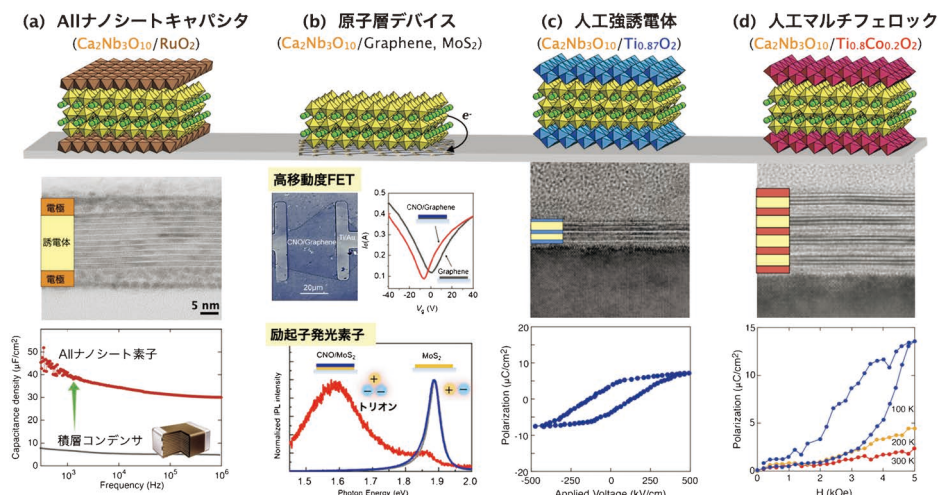


図8 ナノシートの精密集積による高次機能材料・デバイスの創製. (オンラインカラー)

ナノシートは極薄ながら優れた誘電特性を有し、導電性 RuO₂ ナノシートとの交互積層により作製したナノキャパシタでは、誘電体層、電極層のナノサイズの薄膜化が実現し、トータルの厚みが30 nm 弱と世界最小ながら非常に高い静電容量(>30 $\mu\text{F}/\text{cm}^2$)を示す(図 8(a))⁽²⁶⁾⁽²⁷⁾。また高誘電性ナノシート(Ca₂Nb₃O₁₀)と半導体性ナノシート、グラフェンを組み合わせた超格子は、誘電層がゲート絶縁層、半導体性ナノシート、グラフェンがチャンネル層として機能し、オールナノシートの電界効果トランジスタが実現する(図 8(b))⁽²⁸⁾⁽²⁹⁾。例えば、Ca₂Nb₃O₁₀ と MoS₂ のヘテロ構造では、MoS₂ 層への自在な電荷制御が可能であり、励起子発光特性の制御が実現する。さらに高度な機能制御も可能であり、2 種類の誘電性ナノシート(Ca₂Nb₃O₁₀, LaNb₂O₇, Ti_{0.87}O₂)から作製した交代層構造では界面で巨大な分極が発現し、強誘電体として機能する(図 8(c))⁽²⁴⁾⁽³⁰⁾。また、強磁性ナノシート(Ti_{1-x}Co_xO₂, Ti_{1-y}Fe_yO₂)、誘電性ナノシート(Ca₂Nb₃O₁₀)を組み合わせた超格子では、積層数や隣接するナノシートの種類に応じて、電荷移動や層間に働く磁気相互作用の制御が可能であり、磁化率、磁気光学特性、マルチフェロイック特性の自在な制御が可能となることが示されている(図 8(d))⁽³¹⁾⁽³²⁾。

以上はナノシート同士の 2 次元+2 次元の組み合わせであるが、0, 1 次元物質などと組み合わせた高次機能材料の創製が進んでいる⁽³³⁾。こうした異なる次元の組み合わせでは、単純な機能の足し合わせや整数次元で説明できない「超次元」とも呼べる機能が発現することが明らかになっている。例えば、酸化物ナノシートでは、異種原子のドーピング、欠陥導入、ナノ粒子の担持により、伝導性、磁性の付与や、触媒能向上も発現する。他にも、酸化物ナノシートの曲率操作や歪み導入により、2+ α 次元というような特異な結合環境(特殊構造)が実現し、分極特性を利用した強誘電特性、触媒機能が発現する。近年では、無機ナノチューブの曲率制御、グラフェンのヘテロ構造において、電子-格子相互作用の増大から超伝導が発現するなど、単純な組み合わせやバルク材料にはない機能発現が報告されている。こうした低次元ナノ材料のドーピング、欠陥導入、構造変調、積層・接合などは、これまで個別に研究が行われてきたが、これらを体系的にとらえることで、「超次元」機能とも呼べる新しい可能性が広がっている。

5. お わ り に

本稿では、筆者らの研究例を中心に、無機ナノシートの研究動向、応用、将来展望について紹介した。無機ナノシートの母物質となる層状化合物はイオン交換性セラミックスとして古くから知られているものも多いが、ナノシート化とボトムアップ集積により新しい機能材料へと変貌を遂げている。セラミックスの研究は、古くは粉体、焼結体を扱うバルクから始まり、現在のナノ薄膜の研究へと大きく進展している。特に、近年の薄膜技術やナノテクの発展は目覚ましく、原子

層を自在に操り、新しい機能材料・デバイスを開発しようという取り組みが精力的に行われている。我々はナノシートを使って、ピーカーの中で様々な機能のナノ物質を作ったり、並べたりすることで、夢の新材料開発へ向けたモノ作りを進めている。こうした研究の先に、Beyond グラフェンともいえる逸材が潜んでいるものと筆者らは信じている。

本稿で紹介した研究例の多くは NIMS との共同研究の成果である。佐々木高義フェローをはじめとし、NIMS ソフト化学グループのメンバーに深く感謝します。

文 献

- (1) 黒田一幸, 佐々木高義(監修): 無機ナノシートの科学と応用, シーエムシー出版(2005)。
- (2) 2 次元物質の科学, 日本化学会編, 化学同人(2017)。
- (3) T. Sasaki, M. Watanabe, H. Hashizume, H. Yamada and H. Nakazawa: J. Am. Chem. Soc., **118**(1996), 8329-8335.
- (4) R. Ma and T. Sasaki: Adv. Mater., **22**(2010), 5082-5104.
- (5) K. S. Novoselov, D. Jiang, F. Schedin, T. J. Booth, V. V. Khotkevich, S. V. Morozov and A. K. Geim: PNAS, **102**(2005), 10451-10453.
- (6) J. N. Coleman, et al.: Science, **331**(2011), 568-571.
- (7) M. Osada and T. Sasaki: Adv. Mater., **24**(2012), 210-228.
- (8) M. Osada, S. Yoguchi, M. Itose, B.-W. Li, Y. Ebina, K. Fukuda, Y. Kotani, K. Ono, S. Ueda and T. Sasaki: Nanoscale, **6**(2014), 14227-14236.
- (9) C. Tan and H. Zhang: Nat. Commun., **6**(2015), 7873.
- (10) F. Wang, J.-H. Seo, G. Luo, M. B. Starr, Z. Li, D. Geng, X. Yin, S. Wang, D. G. Fraser, D. Morgan, Z. Ma and X. Wang: Nat. Commun., **7**(2016), 10444.
- (11) S. Li, et al.: Nat. Mater., **17**(2018), 535-542.
- (12) S. Li, Y.-C. Lin, X.-Y. Liu, Z. Hu, J. Wu, H. Nakajima, S. Liu, T. Okazaki, W. Chen, T. Minari, Y. Sakuma, K. Tsukagoshi, K. Suenaga, T. Taniguchi and M. Osada: Nanoscale, **11**(2019), 16122-16129.
- (13) G. Wu, X. Zheng, P. Cui, H. Jiang, X. Wang, Y. Qu, W. Chen, Y. Lin, H. Li, X. Han, Y. Hu, P. Liu, Q. Zhang, J. Ge, Y. Yao, R. Sun, Y. Wu, L. Gu, X. Hong and Y. Li: Nat. Commun., **10**(2019), 4855.
- (14) R. Sun, J. Gao, G. Wu, P. Liu, W. Guo, H. Zhou, J. Ge, Y. Hu, Z. Xue, H. Li, P. Cui, X. Zheng, Y. Wu, G. Zhang and X. Hong: Cell Rep. Phys. Sci., **1**(2020), 100118.
- (15) M. Liao, Y. Zhu, J. Zhang, R. Zhong, J. Schneeloch, G. Gu, K. Jiang, D. Zhang, X. Ma and Q.-K. Xue: Nano Lett., **18**(2018), 5660-5665.
- (16) B. W. Li, M. Osada, Y. H. Kim, Y. Ebina, K. Akatsuka and T. Sasaki: J. Am. Chem. Soc., **139**(2017), 10868-10874.
- (17) B. Hunt, J. D. Sanchez-Yamagishi, A. F. Young, M. Yankowitz, B. J. LeRoy, K. Watanabe, T. Taniguchi, P. Moon, M. Koshino, P. Jarillo-Herrero and R. C. Ashoori: Science, **340**(2013), 1427.
- (18) Y. Cao, V. Fatemi, S. Fang, K. Watanabe, T. Taniguchi, E. Kaxiras and P. Jarillo-Herrero: Nature, **556**(2018), 43-50.
- (19) K. S. Novoselov, A. Mishchenko, A. Carvalho and A. H. Castro Neto: Science, **353**(2016), aac9439.
- (20) M. Osada and T. Sasaki: Polym. J., **47**(2015), 89-98.
- (21) K. Akatsuka, M. Haga, Y. Ebina, M. Osada, K. Fukuda and T. Sasaki: ACS Nano, **3**(2009), 1097-1106.
- (22) K. Matsuba, C. Wang, K. Saruwatari, Y. Uesuesuki, K. Akatsuka, M. Osada, Y. Ebina, R. Ma and T. Sasaki: Sci. Adv., **3**(2017), e1700414.
- (23) Y. Shi, M. Osada, Y. Ebina and T. Sasaki: ACS Nano, **14**(2020), 15216-15226.
- (24) B.-W. Li, M. Osada, T. C. Ozawa, Y. Ebina, K. Akatsuka, R.

- (24) Ma, H. Funakubo and T. Sasaki: ACS Nano, **4**(2010), 6673–6680.

(25) M. Osada and T. Sasaki: APL Materials, **7**(2019), 120902.

(26) C. Wang, M. Osada, Y. Ebina, B.-W. Li, K. Akatsuka, K. Fukuda, W. Sugimoto, R. Ma and T. Sasaki: ACS Nano, **8**(2014), 2658–2666.

(27) M. S. Khan, H.-J. Kim, Y.-H. Kim, Y. Ebina, W. Sugimoto, T. Sasaki and M. Osada: Small, **16**(2020), 2003485.

(28) T. Taniguchi, S. Li, L. Nurdwijayanto, Y. Kobayashi, T. Saito, Y. Miyata, S. Obata, K. Saiki, H. Yokoi, K. Watanabe, T. Taniguchi, K. Tsukagoshi, Y. Ebina, T. Sasaki and M. Osada: ACS Nano, **13**(2019), 11214–11223.

(29) T. Taniguchi, L. Nurdwijayanto, S. Li, H. E. Lim, Y. Miyata, X. Lu, R. Ma, D.-M. Tang, S. Ueda, K. Tsukagoshi, T. Sasaki and M. Osada: ACS Nano, **14**(2020), 6663–6672.

(30) Y.-H. Kim, D. Lei, M. Osada, B.-W. Li, Y. Ebina and T. Sasaki: Nanotechnology, **26**(2015), 244001.

(31) M. Osada, Y. Ebina, K. Takada and T. Sasaki: Adv. Mater., **18**(2006), 295–299.

(32) B.-W. Li, M. Osada, Y. Ebina, S. Ueda and T. Sasaki: J. Am. Chem. Soc., **138**(2016), 7621–7625.

(33) 速水真也：セラミックス, **55**(2020), 550–551.

★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★

1998年 東京工業大学大学院総合理工学研究科博士
課程修了

主な略歴 物質・材料研究機構国際ナノアーキテクト
ニクス研究拠点主任研究者

2018年1月- 現職

専門分野：無機材料，ナノ材料化学

◎無機2次元物質の精密合成と電子・エネルギー材
料の応用に従事。

★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★

Ni 基耐熱合金に対する 金属粉末成形技術の開発

日比野 真 也*

1. はじめに

この度は第30回日本金属学会奨励賞(技術部門)に選出だけでしたこと、大変光栄に存じます。奨励賞の技術部門は、企業研究者・技術者を対象として2020年に新設されたものと伺っております。今回、このような寄稿の機会をいただきましたので、当社(川崎重工業)の研究開発方針を概説しつつ、企業に在籍する材料研究者として取り組んでいる研究開発事例を紹介いたします。

2. ガスタービン部品向け金属粉末成形技術

世界的に持続可能な開発目標(SDGs)が掲げられ、社会が大きく変化しようとしている。特に CO₂ 排出削減への社会的要請は強まる一方であり、航空機・モーターサイクル・船舶・鉄道車両等の輸送機器、ならびに、発電用ガスタービン・ガスエンジン・ボイラ等のエネルギー機器を製造する当社においては、CO₂ 排出削減に貢献できる製品開発・技術開発が急務である。中でもエネルギー分野の CO₂ 排出割合はトップを占めており、化石燃料を熱源とするガスタービンにおいては、極限までエネルギー効率を高めることが求められ続けている。それと同時に、燃焼時に CO₂ を排出しない水素焚きガスタービン等の普及も強く期待されている。

このような社会的要請から、高効率化を極限まで追求した構造設計や、水素ガスの安定的な燃焼を実現するための極めて複雑な流路設計等が必要となりつつある。その結果、製造コストが大幅に増大するだけでなく、従来製法の制約によって設計的な妥協をする場面も起こり得る。従って、益々複雑

化する部品設計の要請に応える、製造コストの徹底した低減、さらには、設計自由度の向上が強く求められており、その実現に資する研究開発を推進するのが総合機械メーカーに属する材料研究者である筆者らの責務である。

その一つの解として筆者らは、ガスタービン部品への適用を目指して近年盛んに研究開発が進む金属粉末成形技術に注力している(図1)⁽¹⁾⁻⁽³⁾。具体的には、金属粉末射出成形(Metal Injection Molding; MIM)を用いたタービン静止部(Ni 基耐熱合金)の開発、レーザ粉末床熔融(Laser Powder Bed Fusion; LPBF)を用いた水素焚き燃焼バーナや模擬タービンプレード(いずれも Ni 基耐熱合金)の開発、指向性エネルギー堆積法(Directed Energy Deposition; DED)⁽⁴⁾を用いた圧縮機インペラ(Ti 合金)やシャフトシール部(Co 基合金)の補修技術開発など、様々なプロセス・合金種を対象に研究開発を推進している。このうち本稿では、MIM プロセスと

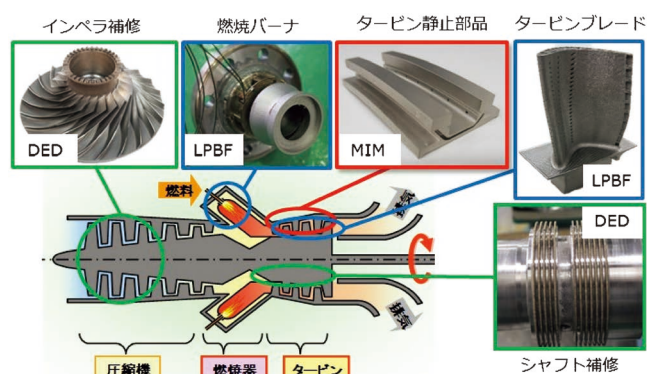


図1 ガスタービン部品を対象とした金属粉末成形技術(オンラインカラー)。

* 川崎重工業株式会社 技術研究所 材料研究部・主任研究員(〒673-8666 明石市川崎町 1-1)
Development of Manufacturing Technology for Ni-Base Superalloys Powder; Shinya Hibino*(*Material Research Department, Technical Institute, Kawasaki Heavy Industries, Ltd., Akashi)
Keywords: gas turbine, metal injection molding, laser powder bed fusion, Ni-base superalloys, creep, grain growth, crystal orientation
2021年3月15日[doi:10.2320/materia.60.634]

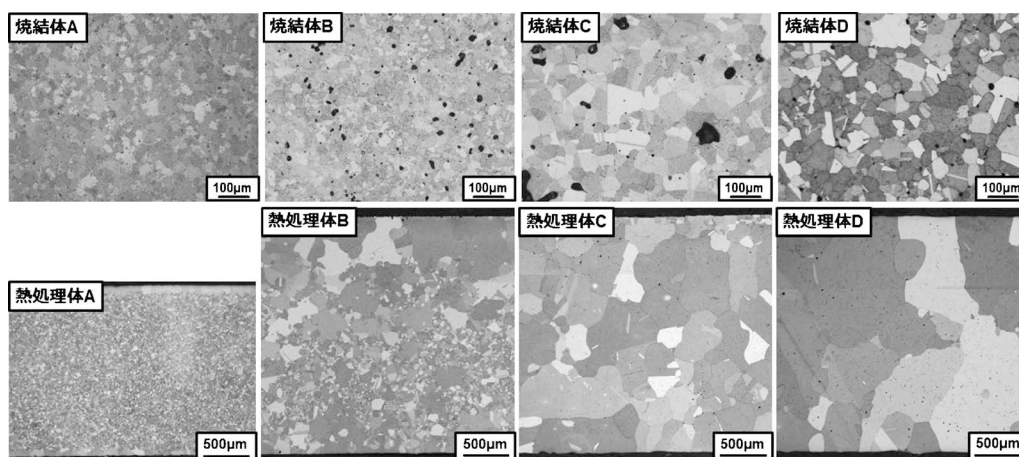


図2 γ' 強化合金(IN713LC)焼結体と熱処理体の組織。

LPBF プロセスに関して、機械的特性向上を実現する材料技術開発、性能向上に資する設計を備えた部品試作、そしてその実証試験までを一貫通貫に取り組んでいる研究開発事例として紹介する。

3. 金属粉末射出成形(MIM)技術の開発

MIM プロセスは、樹脂材料の射出成形と粉末冶金の技法を組み合わせたニアネットシェイプ成形技術である。金属粉末とバインダを混ぜ合わせる混練工程、金型内に充填する射出成形工程、バインダを取り除く脱バインダ工程、そして、緻密化のための焼結工程からなる。短いサイクルでの射出成形とバッチ処理での焼結によって同一形状部品が大量生産できること、また、バインダの流動性と射出成形圧力の高さにより精密鑄造と比べてより微細な構造を製造できることに技術的優位性を有する。

開発対象とするタービン静止部品は1000℃を超える燃焼ガスに長時間晒されるため、高温強度・耐酸化性に優れる γ' 相($\text{Ni}_3(\text{Al}, \text{Ti})$)析出強化型のNi基耐熱合金(以下 γ' 強化合金と略す)が用いられる。しかしながら、MIM プロセスは鉄系材料やチタン合金への適用が主であり、Ni基合金への適用は限定的であった。 γ' 強化合金へのMIM プロセス適用に関する報告は数件なされている⁽⁵⁾⁽⁶⁾が、 γ' 強化合金に求められる重要特性の一つであるクリープ特性が、鑄造材に比べて大幅に低いことが課題である。筆者らは、クリープ特性が劣る理由がMIM 材(焼結体)の微細な結晶粒にあると判断し、クリープ特性の改善を目的とした結晶粒成長技術の開発に取り組んだ⁽⁷⁾⁽⁸⁾。

代表的な γ' 強化合金であるIN713LC相当組成を有する原料粉末として、粉末A(炭素量0.10%，平均粒子径26.9 μm)，粉末B(同0.01%，10.9 μm)，粉末C(同0.01%，30.7 μm)，粉末D(同0.01%，48.0 μm)を用いた。混練、射出成形、脱脂、焼結工程を経て、焼結体A, B, C, Dを得た後、残存気孔除去を目的とした熱間静水圧加圧(HIP)処理1204℃, 4 h と、結晶粒成長を目的とした熱処理1280℃, 12

hを施した。以降、熱処理体A, B, C, Dと呼ぶ。

焼結体A, B, C, Dの金属組織、熱処理体A, B, C, Dの金属組織を図2に示す。焼結体Aと熱処理体Aの結晶粒径は同程度であることが認められ、これは粉末Aの原料粉末サイズとも概ね一致していた。電子線プローブマイクロアナライザー(EPMA)を用いた元素マッピングにより、結晶粒界に偏析するMC炭化物が認められたことから、MC炭化物が結晶粒成長に対するピン止め効果として作用していたことが明らかとなった⁽⁸⁾。熱処理体B, C, Dは、それぞれ焼結体B, C, Dと比較して、いずれも結晶粒成長を示した。熱処理体C, Dには全面的な結晶粒成長が認められるが、熱処理体Bには部分的に微細な結晶粒が残存していた。焼結体B, C, Dの炭素量は、脱バインダ工程での有機成分の残留によって、原料粉末時点の0.01%から、それぞれ0.07%, 0.06%, 0.05%へと増加していた。これは、単位体積あたりの粉末表面積が大きいほど、脱バインダ工程において有機成分の残留が多くなることを示している。その結果、MC炭化物に多寡が生じ、これによるピン止め効果の差異が結晶粒成長の挙動の違いに現れているものと考えている。また、熱処理体Bには、脱バインダされにくい板厚中央付近に特に微細な結晶粒が認められることから、残留した有機成分に由来するMC炭化物によってピン止め効果が作用していたことを示している。

熱処理体に対して溶体化処理・時効処理を施した後、クリープ試験を実施した。負荷応力 σ (MPa)、試験温度 T (K)、クリープ破断寿命 t_f (h)に対して、ラーソンミラーパラメータ $P = (T + 273.15) \times (20 + \log_{10} t_f)$ によって整理したクリープ特性を図3(a)に示す。熱処理体Aは、鑄造材に比べて著しく低いクリープ特性を示した。熱処理体B, C, Dのクリープ破断寿命はいずれも、熱処理体Aより大幅に向上していた。続いて、負荷応力 σ とクリープひずみ速度 $\dot{\epsilon}$ (/s)との関係を図3(b)に示す。熱処理体Dのクリープひずみ速度は、熱処理体Aに比べて、大幅に低下していた。図3(b)の傾きから、熱処理体A, Dの応力指数はそれぞれ2.79, 4.31と求められた。結晶粒成長したことによって、主なクリープ変形

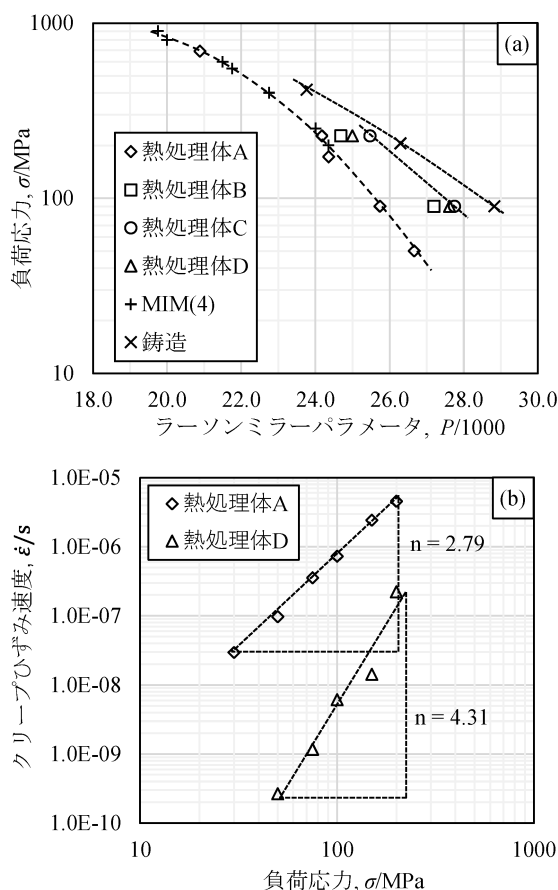


図3 γ' 強化合金(IN713LC)熱処理体の(a)クリープ破断寿命と(b)クリープひずみ速度。

機構が、粒界クリープ(熱処理体A)から拡散クリープ(熱処理体D)へと変化したことを示している⁽⁷⁾⁽⁹⁾。

以上より、MC炭化物によるピン止め効果を低減させ、結晶粒成長を促進することによって、クリープ特性の向上に成功したと結論づけた。依然としてIN713LC鑄造材のクリープ特性⁽¹⁰⁾には及ばず改善の余地は残るものの、本開発の対象であるタービン静止部品においては、強度要求を満たす水準であると判断している。

タービン静止部品の試作にあたっては、部位による板厚差異、すなわち脱バインダ性の違いに起因した局所的な有機成分の残留が起こらないよう留意する必要がある。そこで、結晶粒成長の可否について厚さ依存性を予め把握し、全面的に結晶粒成長が起こると見込まれる板厚の部品を選定した。使用する原料粉末には、平均粒子径が粉末Dよりも小さく、射出成形性に優れた粉末Cを選定した。また、微細構造のニアネットシェイプ成形を実証するため、精密鑄造では実現できない微細な冷却孔や狭いスリットを備えた射出成形用金型を準備した。

実際の試作品の外観は、図1に既に示したとおりである。本試作品の断面観察により、薄肉部から厚肉部に至るまで結晶粒成長が認められた。冷却孔とスリットが良好な精度で形成できたとともに、部品全体の寸法精度についても、

MIMプロセスによるコストメリットを棄損しない僅かな仕上げ加工でタービン静止部品として使用できるレベルである。現在、ガスタービン実機に試作品を搭載する計画を進めており、運転試験後の部品健全性等を検証していく予定である。

今後の展望としては、ニアネットシェイプ成形を極限まで追及することによってコストメリットの最大化を図っていく。加えて、異種材料を用いたインサート射出成形の技法⁽¹¹⁾によって部位の要求特性に応じた材質適用が可能になることも期待されている。ガスタービン部品への積極的なMIMプロセス適用に向け、材料研究者と設計者が一体となって取り組んでいく。

4. レーザ粉末床溶融(LPBF)技術の開発

LPBFプロセスは付加製造(Additive Manufacturing)技術の一つであり、次の3工程を繰り返すことで部品を成形する。

- ①金属粉末を均して粉末床(Powder Bed)を準備する工程
- ②定められた二次元断面を塗りつぶすようにレーザを高速で走査し、局所的に溶融凝固させる工程
- ③1層分降下させる工程

二次元断面を高さ方向(Z方向)徐々に積み重ねる手法であるため、中空の流路構造や有機的な曲面形状などを自由度高く製造できる。この特徴を活かし、水素ガスと空気の混合均一性を高めるための複雑流路を有する水素焚き燃焼バーナや、冷却効率に優れた内部構造を有するタービンプレードなど、様々な部品の高性能化が強く期待されている⁽¹²⁾。

LPBFプロセスでは、鑄造や溶接と比べて極めて早い固液界面移動速度と極めて大きい温度勾配を示しながら凝固が起こる。そして、レーザ照射パラメータの変更により凝固過程を制御することで、単結晶様組織やラメラ組織などの様々な金属組織が得られることが知られている⁽¹³⁾。それは同時に、レーザ照射パラメータの厳密な管理が重要であることを示している。すなわち、意図しない金属組織が形成した場合に所望の機械的特性を発揮せず、部品の破壊に至る恐れがある。従って、ガスタービンの燃焼器部品やタービン部品への適用を目指すうえでは、LPBFプロセスの特徴である金属組織制御を有効に活用すべく、レーザ照射パラメータ-金属組織-機械的特性の相関を正確に把握し、これに基づいた適正な製造条件範囲で部品製造することが特に厳格に要求される。

Ni基耐熱合金IN718を対象に、レーザ照射パラメータとそれによる金属組織の変化を系統的に整理した一例を図4に示す⁽¹⁴⁾。図4中の逆極点図マッピングは、as-built状態のXY面(水平面)を観察し、Z方向(積層方向)出力を行ったものである。体積エネルギー密度 E_{vol} (J/mm³)、線エネルギー密度 E_{line} (J/mm)、走査間隔 d (mm) を変えることによって、結晶方位が大きく変化しており、中でもクリープ特性に優れた(001)方位を有する結晶の面積率の変化が特徴的である。体積エネルギー密度 $E_{vol} = 90$ J/mm³ の3条件に対し、溶体

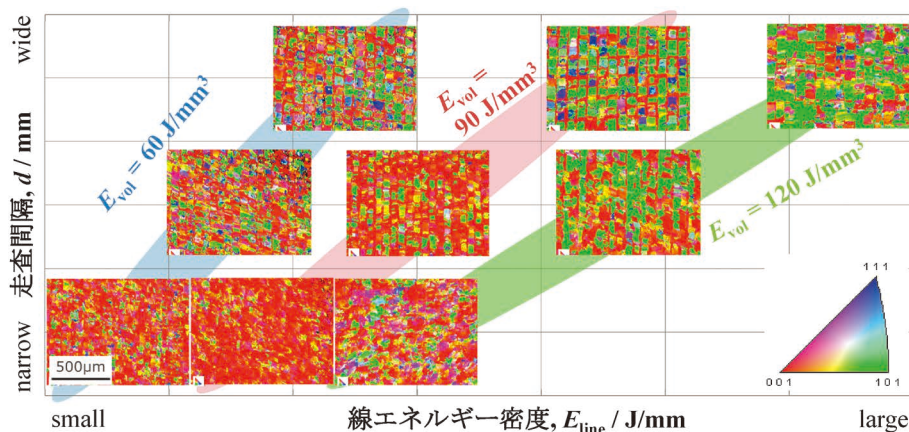


図4 レーザ照射パラメータに伴う Ni 基耐熱合金 (IN718) の組織変化 (オンラインカラー)。

化・時効処理を施した後、Z 方向に荷重を加えるクリープ破断試験を行ったところ、(001) 方位面積率 S の増大に従ってクリープ破断寿命が向上しており (図 5)，LPBF プロセスにおいて、積極的に金属組織制御を行うことの有効性を示す結果であると言える。

現在、 γ' 強化合金に対しても同様に、レーザ照射パラメータ-金属組織-機械的特性の相関を整理しつつある。 γ' 強化合金の難しさは、LPBF プロセスによって内部に多数の微細クラックが生じることにある⁽¹⁵⁾⁽¹⁶⁾。これまでに特定のレーザ照射パラメータの選択によって微細クラック量を大幅に低減できることが確認されており⁽¹⁷⁾，その結果、機械的特性の向上にも成功している⁽¹⁸⁾。なお、 γ' 強化合金に関する詳細な実験結果は、別途論文投稿を計画しているため、後日そちらを参照されたい。

これまで述べたような基礎データを元に決定された適正なレーザ照射パラメータを用い、水素焚き燃焼バーナや模擬タービンプレード試作も進めている (図 1 中に掲載済み)。前者の燃焼バーナの内部には複数の燃料供給流路が備わっているため、従来は機械加工によって複数部品を別々に準備し、溶接やロウ付け等によって接合していたものである。LPBF プロセスでの試作にあたっては、燃焼バーナの基本構造への影響を最小化しつつ、LPBF プロセスでの製造性を勘案した一体構造への設計改良を行った。その結果、組み合わせ誤差が低減することが確認され、部品性能の向上に繋がることが期待されている。本燃焼バーナ試作品を用いた燃焼リグ試験を既に実施済み⁽¹⁹⁾であり、所望の設計性能を満たすとともに、使用後の大きな損傷がないことを確認している。後者の模擬タービンプレードは、前述した (001) 方位への金属組織制御と、精密鋳造では実現できない高効率冷却構造の双方が盛り込まれたものである。金属組織制御に関しては、ほとんどの部位において意図した結晶方位を有しているものの、一部の抜熱環境が異なる部位において意図しない金属組織が形成されており、この課題解決を図っている。内部冷却構造に関しては、微細構造の形状精度や表面粗度の影響の把握を進めている。

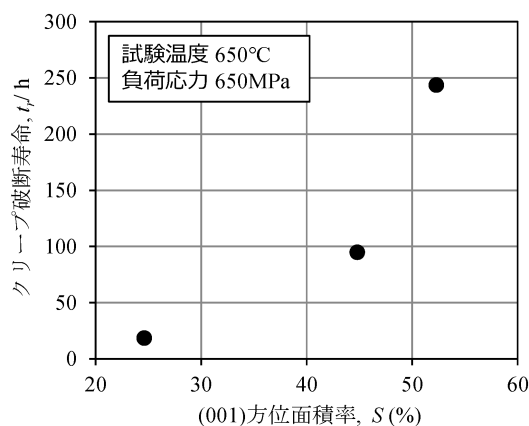


図5 Ni 基耐熱合金 (IN718) における (001) 方位面積率とクリープ破断寿命の関係。

最後に LPBF プロセスを用いた材料技術開発に関する今後の展望を述べる。筆者らは、内閣府戦略的イノベーション創造プログラム (SIP) の第 2 期「統合型材料開発システムによるマテリアル革命」に参画し、マテリアルズインテグレーション (MI) システムでの予測を通じて LPBF プロセス向けに最適化された新しい Ni 基合金の創出とその製造実証に取り組んでいる。本稿では、レーザ照射パラメータ、金属組織、機械的特性に関するデータ蓄積の重要性を述べたが、それらに加えて合金組成についても LPBF プロセスによる特異な凝固現象を念頭において最適化する余地がある。MI システムでの予測によってトライ&エラーの回数を最小化し、短期間で優れた合金を創出することが期待されている。合金組成から機械的特性までの連関を明らかにし、それを活かした部品製造にまで繋げることで、CO₂ 排出削減という社会的要請に応える競争力の高い製品開発に貢献していく。

5. おわりに

本稿では、基礎的な材料技術開発から、設計改良、部品試作、実証試験までを一気通貫に取り組んでいる研究開発事例

本稿で紹介した研究成果の一部は、内閣府総合科学技術・イノベーション会議の戦略的イノベーション創造プログラム(SIP)、第1期「革新的設計生産」(管理法人：NEDO)および第2期「統合型材料開発システムによるマテリアル革命」(管理法人：JST)によって実施されました。この場を借りて謝意を表します。

- (1) 井頭賢一郎：大阪冶金会会誌，**57**(2017)，44-48.
- (2) 井頭賢一郎，野村嘉道：スマートプロセス学会誌，**8**(2019)，74-77.
- (3) 細川恭史，坂根雄斗：日本ガスタービン学会誌，**47**(2019)，78-83.
- (4) 森橋 遼，岩崎勇人：溶接学会誌，**90**(2021)，107-112.
- (5) K. Horke, R. Scherr, A. Meyer, E. Daenicke and R. F. Singer: Proc. PM2016 World Cong., (2016), 3296472.
- (6) A. Meyer, E. Daenicke, K. Horke, M. Moor, S. Muller, I.

- Langer and R. F. Singer: Powder Metall., **59**(2016), 51-56.
- (7) 日比野真也, 藤光利茂, 岡田竜太郎, 野村嘉道, 井頭賢一郎: 粉体及び粉末冶金, **66**(2019), 17-22.
- (8) S. Hibino, K. Fujimitsu, R. Okada, Y. Nomura and K. Igashira: Proc. PM2018 World Cong., (2018), 586-591.
- (9) 丸山公一, 中島英治: 高温強度の材料科学, 内田老鶴圃, (1997), 94.
- (10) C. T. Sims, N. S. Stoloff and W. C. Hagel: Superalloys II, John Wiley & Sons, Inc., (1987), 586.
- (11) 針幸達也, 伊藤芳典, 佐藤憲治, 三浦秀士: 粉体および粉末冶金, **51**(2004), 31-36.
- (12) 野村嘉道, 井頭賢一郎: まてりあ, **54**(2015), 511-512.
- (13) S. H. Sun, T. Ishimoto, K. Hagihara, Y. Tsutsumi, T. Hanawa and T. Nakano: Scr. Mater., **159**(2019), 89-93.
- (14) 岡田竜太郎, 野村嘉道, 井頭賢一郎, 中野貴由: スマートプロセス学会誌, **8**(2019), 106-111.
- (15) L. N. Carter, M. M. Attallah and R. C. Reed: 12th Int. Symp. on Superalloys, (2012), 577-586.
- (16) R. Engeli, T. Etter, S. Hövel and K. Wegener: J. Mater. Process. Technol., **229**(2016), 484-491.
- (17) 岡田竜太郎, 野村嘉道, 井頭賢一郎: 特開2020-147781.
- (18) 岡田竜太郎, 野村嘉道, 井頭賢一郎: 特開2020-147782.
- (19) 井頭賢一郎: 統合型材料開発システムによるマテリアル革命成果報告会2020, (2020).



目比野真也

★ ★ ★ ★ ★ ★ ★ ★ ★ ★ ★ ★ ★ ★ ★ ★

2012年　東京大学大学院工学系研究科修士課程修了
2012年４月－川崎重工工業株式会社において現職
2020年４月－大阪大学大学院工学研究科博士後期課
程在籍中

専門分野：耐熱合金，粉末冶金，金属組織制御，放射
光分析

◎Ni基耐熱合金を対象とした金属粉末成形技術開発
に従事。
材料技術開発，製造技術開発，設計への展開に至
るまで幅広く活動。

★ ★ ★ ★ ★ ★ ★ ★ ★ ★ ★ ★ ★ ★ ★ ★

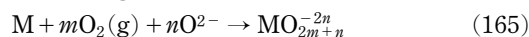
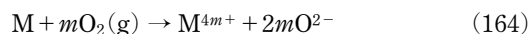
金属製錬の熱力学(第4回)

月橋 文孝*

14. 金属製錬反応とスラグの塩基度

(1) スラグの塩基度

金属製錬反応においては熔融金属中の不純物の除去効率や、熔融金属に添加した合金元素の歩留まりを上げることが必要であり、不純物は熔融スラグに除去される。熔融金属-スラグ間の平衡反応を考えると、これらは系の温度、酸素分圧、スラグの酸化物イオンの活量、スラグ中不純物の活量などに依存する。熔融金属中不純物 M がイオンとしてスラグに移動する反応は式(164)–(166)で表される。



これらの反応を支配するのは温度と酸素分圧(もしくは酸素ポテンシャル $\mu_{O_2} = RT \ln P_{O_2}$)とスラグの酸化物イオンの活量 $a_{O^{2-}}$ である。スラグ中の酸化物イオン O^{2-} 濃度が大きいほどスラグは塩基性になる。

イオン性融体であるスラグの性質から、スラグの塩基性の尺度を表す塩基度は酸化物イオンの活量により、 $RT \ln a_{O^{2-}}$ として定義される。しかし、この値は測定することができないため、実用的に生産現場で用いるのは難しい。塩基度を扱いやすい別の尺度で表すために、遷移金属イオンの酸化還元平衡と組み合わせて指標とすることや、光学的塩基度による指標の定量化が行われている。

スラグの塩基度として様々な定義が提案されているが、とくに生産現場では CaO/SiO_2 重量比(もしくは塩基性酸化物と酸性酸化物の重量比)の値が塩基度の指標として用いられ、しばしば塩基度とよばれる。この値は組成から計算しやすいという利点はあるが、スラグの構造を的確に表していない。

反応(164)では不純物は酸化除去され、酸化性雰囲気でスラグが酸性になるほど反応は右に進行する。反応(165)では

酸化性、塩基性で不純物はスラグに除去される。反応(166)では還元性、塩基性で不純物は除去される。たとえば製鋼精錬反応で、溶銑、溶鋼中のりんはりん酸イオン PO_4^{3-} の形でスラグ中に除去されるので、式(165)の反応の形の脱りん反応が起こる。酸素分圧が高いほど、また塩基度が大きいほど平衡論的には鋼中のりんはスラグに除去されることになる。

(2) スラグのキャパシティー

スラグの不純物の吸収能を定量的に示すために、スラグのキャパシティーが定義され、種々のスラグについて測定されている。キャパシティーとは一定の分圧下でのスラグの不純物吸収能であり、スラグの組成と温度の関数であるスラグ固有の値である。

製錬反応における熔融金属中の不純物である硫黄をスラグ中に除去する脱硫反応を考える。熔融金属とスラグ間の脱硫反応は式(167)で表される。この反応で熔融金属中の硫黄と気相の硫黄の反応(168)および熔融金属中の酸素と気相の酸素の反応(169)を考えると、気相とスラグ相の間の脱硫反応は式(170)となる。この反応の平衡定数は式(171)となるので、この式を変形して、サルファイドキャパシティーとよばれる硫化物イオンの吸収能が式(172)で表される。式(172)中で酸素分圧と硫黄分圧は熔融金属中酸素濃度、硫黄濃度から式(168)および式(169)により得られるので、測定できる量であるスラグ中の硫黄濃度、熔融金属中酸素濃度、硫黄濃度からサルファイドキャパシティーの値を求めることができる。

逆に、ある温度でスラグのサルファイドキャパシティーが報告されていれば、酸素分圧を決めると熔融金属-スラグ間の硫黄の分配比を推算できる。

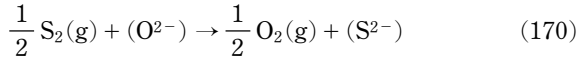
ここで式中の下線は熔融金属中に存在する物質を、()はスラグ中の物質を示す。また、(mass%)は、Gibbs エネルギー値が熔融金属中の元素の 1 mass% を基準とした値であることを示す。

* 東京大学名誉教授

Thermodynamics of Metal Smelting(N); Fumitaka Tsukihashi (Emeritus Professor, The University of Tokyo, Tokyo)

Keywords: thermodynamics, metal smelting, chemical potential, equilibrium, activity, solution, phase diagram, chemical potential diagram, basicity, capacity of slag

2020年10月16日受理[doi:10.2320/materia.60.639]



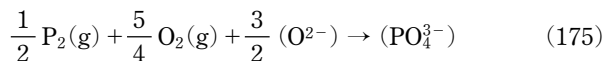
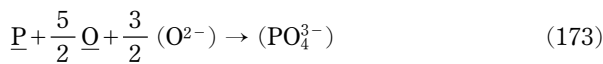
$$K = \frac{f_{\text{S}^{2-}}(\text{mass}\% \text{S}^{2-}) \cdot P_{\text{O}_2}^{1/2}}{P_{\text{S}_2}^{1/2} \cdot a_{\text{O}^{2-}}} \quad (171)$$

$$C_{\text{S}^{2-}} = \frac{(\text{mass}\% \text{S}^{2-}) \cdot P_{\text{O}_2}^{1/2}}{P_{\text{S}_2}^{1/2}} = \frac{a_{\text{O}^{2-}} \cdot K}{f_{\text{S}^{2-}}} \quad (172)$$

熔融金属中の不純物であるりんをスラグ中に除去する脱りん反応についても、フォスフェイトキャパシティーとよばれるりん酸イオンの吸収能が定義できる。

熔融金属とスラグ間の脱りん反応は式(173)で表される。この反応で熔融金属中のりんと気相のりんの反応(174)および熔融金属中の酸素と気相の酸素の反応(169)を考えると、気相とスラグ相の間の脱りん反応は式(175)となる。この反応の平衡定数は式(176)となる。変形して、フォスフェイトキャパシティーとよばれるりん酸イオンの吸収能が式(177)で表される。式(177)中の酸素分圧とりん分圧は熔融金属中酸素濃度、りん濃度から式(169)および式(174)により得られるので、スラグ中のりん濃度、熔融金属中酸素濃度、りん濃度からフォスフェイトキャパシティーの値を求めることができる。

式(172), (177)の右辺はイオン反応式の平衡定数や酸化物イオンの活量など直接測定できない量がまとめられており、これらは温度とスラグの組成のみの関数である。また、酸化物イオンの活量すなわちスラグの塩基度が大きいほどサルファイドキャパシティー、フォスフェイトキャパシティーは大きくなり、塩基度の尺度の一つであるともいえる。



$$K = \frac{f_{\text{PO}_4^{3-}}(\text{mass}\% \text{PO}_4^{3-})}{P_{\text{P}_2}^{1/2} \cdot P_{\text{O}_2}^{5/4} \cdot a_{\text{O}^{2-}}^{3/2}} \quad (176)$$

$$C_{\text{PO}_4^{3-}} = \frac{(\text{mass}\% \text{PO}_4^{3-})}{P_{\text{P}_2}^{1/2} \cdot P_{\text{O}_2}^{5/4}} = \frac{a_{\text{O}^{2-}}^{3/2} \cdot K}{f_{\text{PO}_4^{3-}}} \quad (177)$$

図19, 20には鉄鋼製錬における代表的なスラグ系のサルファイドキャパシティーとフォスフェイトキャパシティーの測定値を塩基性酸化物の組成の関数として示す。スラグが塩基性になるほどサルファイドキャパシティー、フォスフェイトキャパシティーは増加する。

他に、りんを酸化でなく還元反応でスラグに除去する還元脱りん反応に関するフォスファイドキャパシティー(式(179)), 水蒸気吸収能を示すハイドロキシルキャパシティー(式(181)), 炭酸ガス吸収能を示すカーボネートキャパシテ

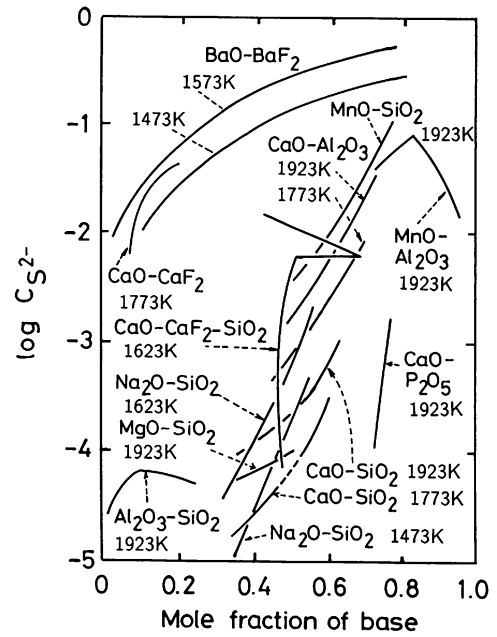


図19 各種フラックスのサルファイドキャパシティー。

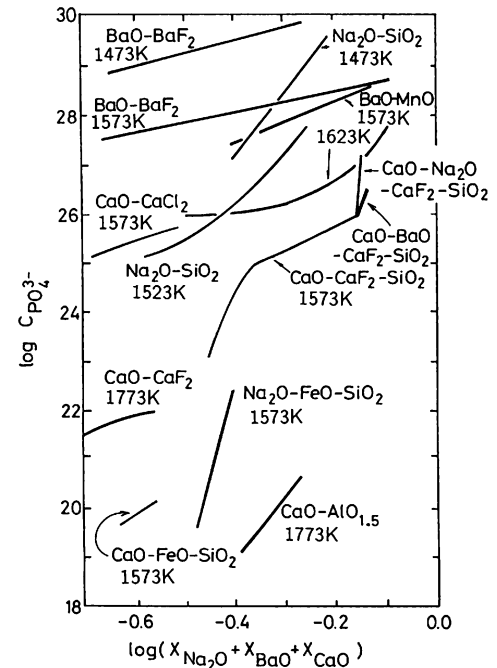
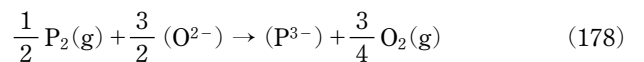
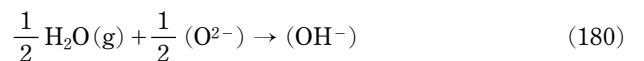


図20 各種フラックスのフォスフェイトキャパシティー。

ィー(式(183)), 窒素吸収能を示すナイトライドキャパシティー(式(185)), サイアナイドキャパシティー(式(187)), 塩素吸収能を示すクロライドキャパシティー(式(189))などが種々のスラグ系について測定されている。



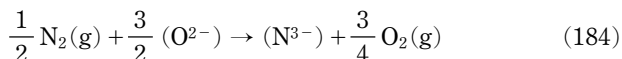
$$C_{\text{P}^{3-}} = \frac{(\text{mass}\% \text{P}^{3-}) \cdot P_{\text{O}_2}^{3/4}}{P_{\text{P}_2}^{1/2}} = \frac{a_{\text{O}^{2-}}^{3/2} \cdot K}{f_{\text{P}^{3-}}} \quad (179)$$



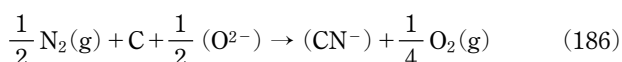
$$C_{\text{OH}^-} = \frac{(\text{mass}\% \text{H}_2\text{O})}{P_{\text{H}_2\text{O}}^{1/2}} = \frac{a_{\text{O}^{2-}}^{1/2} \cdot K}{f_{\text{H}_2\text{O}}} \quad (181)$$



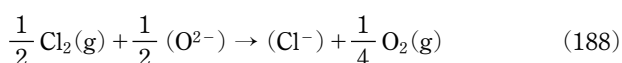
$$C_{\text{CO}_3^{2-}} = \frac{(\text{mass}\% \text{CO}_3^{2-})}{P_{\text{CO}_2}} = K \frac{a_{\text{O}^{2-}}}{f_{\text{CO}_3^{2-}}} \quad (183)$$



$$C_{\text{N}^{3-}} = \frac{(\text{mass}\% \text{N}^{3-}) \cdot P_{\text{O}_2}^{3/4}}{P_{\text{N}_2}^{1/2}} = K \frac{a_{\text{O}^{2-}}^{3/2}}{f_{\text{N}^{3-}}} \quad (185)$$



$$C_{\text{CN}^-} = \frac{(\text{mass}\% \text{CN}^-) \cdot P_{\text{O}_2}^{1/4}}{P_{\text{N}_2}^{1/2}} = K \frac{a_{\text{C}} \cdot a_{\text{O}^{2-}}^{1/2}}{f_{\text{CN}^-}} \quad (187)$$



$$C_{\text{Cl}^-} = \frac{(\text{mass}\% \text{Cl}^-) \cdot P_{\text{O}_2}^{1/4}}{P_{\text{Cl}_2}^{1/2}} = K \frac{a_{\text{O}^{2-}}^{1/2}}{f_{\text{Cl}^-}} \quad (189)$$

ある温度で、ある組成のスラグのキャパシティーが測定されていれば、ある雰囲気での M の熔融金属-スラグ間の平衡分配比 $((\text{mass}\% \text{M}) / [\text{mass}\% \text{M}])$ を求めることができる。

15. 金属製錬プロセスへの適用

これまでに述べてきた事項に基づいて、金属製錬への熱力学の適用例を述べる。以下の例では式(138)

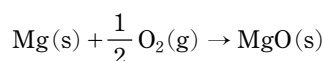
$$\Delta G^\circ = -RT \ln K \quad (138)$$

が多用されている。12節で述べたように、この関係式は、金属製錬プロセスの解析を行う上で、実用的に大変重要な式である。

(1) 不純物酸素の除去

アルゴンガスを加熱したマグネシウムチップ層を通過させることで、式(190)の反応によりアルゴン中の不純物酸素が除去される。873 K で反応させたときのアルゴン中酸素分圧は以下のように計算される。

反応は式(190)で表される。



$$\Delta G^\circ = -6.009 \times 10^5 + 107.6T \text{ J/mol} \quad (190)$$

Mg, MgO が純物質として固相として存在するので、活量を 1 とする ($a_{\text{Mg}} = 1, a_{\text{MgO}} = 1$)。873 K で平衡定数は式(138) ($\Delta G^\circ = -RT \ln K$) から

$$K = \frac{a_{\text{MgO}}}{a_{\text{Mg}} \cdot P_{\text{O}_2}^{1/2}} = \frac{1}{P_{\text{O}_2}^{1/2}} = 2.16 \times 10^{30} \quad (191)$$

よって、 $P_{\text{O}_2} = 2.14 \times 10^{-61} \text{ atm}$ となる。Ellingham 図から読み取ると約 10^{-62} atm となる。これは平衡論で計算される酸素分圧であり、実際にはこのように非常に小さい圧力にはならない。

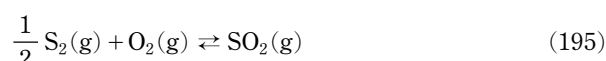
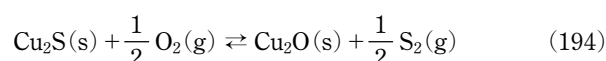
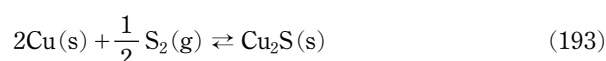
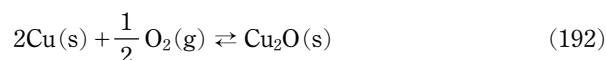
式(190)の反応では、平衡温度が上がると酸素分圧は増加し、温度が下がると酸素分圧は減少する。平衡酸素分圧は低

温ほど下げることができるが、低温で反応速度は小さくなるので、除去は難しくなる。また、反応速度を上げるため、温度を上げすぎると、反応するマグネシウムが溶融し(融点 650°C)、反応面積は小さくなり、酸素除去に不利になる。実際の不純物除去では平衡論と速度論による兼ね合いを考慮する必要がある。

(2) 銅製錬反応の化学ポテンシャル状態図

銅の製錬プロセスの基本の反応は原料である硫化銅と酸素を反応させ、硫黄を二酸化硫黄として除去して銅を得るプロセスである。

図21⁽³⁾は 1473 K での Cu-S-O 系化学ポテンシャル状態図で、Cu, Cu₂S, Cu₂O が安定に存在する酸素分圧、硫黄分圧の領域を示す。安定相の間の反応および SO₂ の生成反応は式(192)–(195)で表される。



図上の点 A の Cu₂S 相が酸素と反応すると、 P_{SO_2} 一定の線に沿って高酸素分圧側への点 B に向かって反応が進み、Cu が安定な領域となる。さらに酸素と反応して硫黄が除去され銅中硫黄が少なくなり、点 C に到達する。精製炉で溶銅中酸素、硫黄を除去して点 D の組成とし、酸化銅が生成する前に反応を終了して粗銅を得ることができる。このように化学ポテンシャル図により、製錬プロセスの解析をすることができる。

(3) 酸化鉄の還元反応平衡

図17に示した酸化鉄の還元平衡図について検討する。データブックに載っている式(196)–(200)の酸化反応の Gibbs

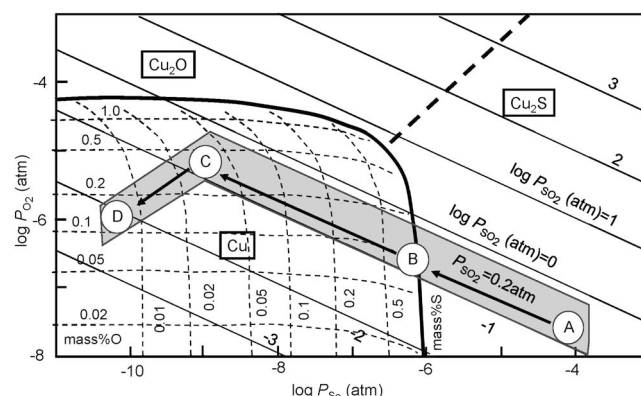
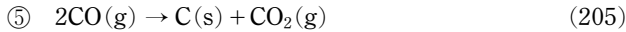
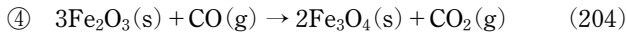
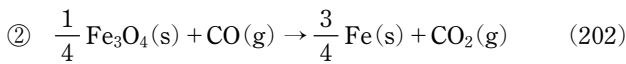
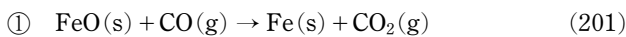
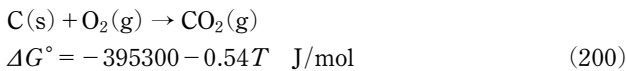
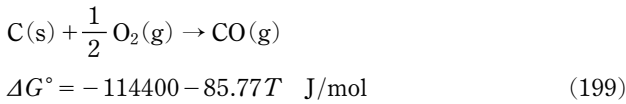
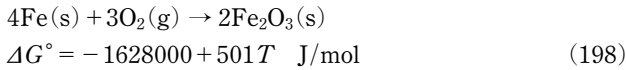
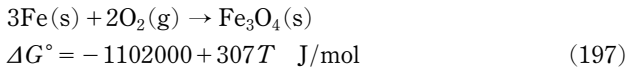
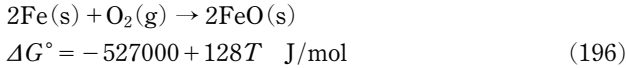


図21 1473 K での Cu-S-O 系化学ポテンシャル状態図と銅製錬プロセス(文献3より)。

エネルギー変化から、図17に示す相の境界線①-⑤を表す反応式(201)-(205)のGibbsエネルギー変化を求める。



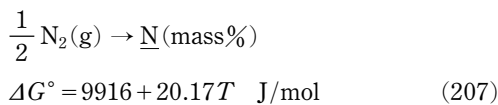
例えば、線③の反応 $\text{Fe}_3\text{O}_4(\text{s}) + \text{CO(g)} \rightarrow 3\text{FeO(s)} + \text{CO}_2(\text{g})$ (g)について、固相は純物質が共存するので活量を1とすると平衡定数は

$$K = \frac{a_{\text{FeO}}^3 \cdot P_{\text{CO}_2}}{a_{\text{Fe}_3\text{O}_4} \cdot P_{\text{CO}}} = \frac{P_{\text{CO}_2}}{P_{\text{CO}}} \quad (206)$$

となるので、温度が決まれば $\frac{P_{\text{CO}_2}}{P_{\text{CO}}}$ 比が決まるので、線③が得られる。他の線も同様に得られる。

(4) 溶鉄中への窒素の溶解度

1873 K で 1 atm の窒素と平衡する溶鉄中の窒素濃度を求める。熔融金属溶液中に二原子分子気体は原子状に溶解することが知られている。溶鉄への窒素の溶解反応は



で表される。(mass%)は、Gibbs エネルギー値が溶鉄中窒素 1 mass% を基準とした値であることを示す。平衡定数は

$$K = \frac{a_{\text{N}}}{P_{\text{N}_2}^{1/2}} = \frac{f_{\text{N}} \cdot [\text{mass}\% \text{N}]}{P_{\text{N}_2}^{1/2}} \quad (208)$$

で表される。Fe-N 二元系溶液で窒素の活量係数 $f_{\text{N}} = 1$ であるので、

$$[\text{mass}\% \text{N}] = K \cdot P_{\text{N}_2}^{1/2} \quad (209)$$

となる。窒素の溶解度は、圧力の $\frac{1}{2}$ 乗に比例する。これは二原子分子が原子状に溶解することによる。Sieverts の法則と呼ばれている。

1873 K での反応の Gibbs エネルギー変化と式(138) ($\Delta G^\circ = -RT \ln K$) より、窒素濃度は $[\text{mass}\% \text{N}] = 0.0468$ となる。

熔融 Fe-N 二元系に第三元素が加わると、第三元素との相

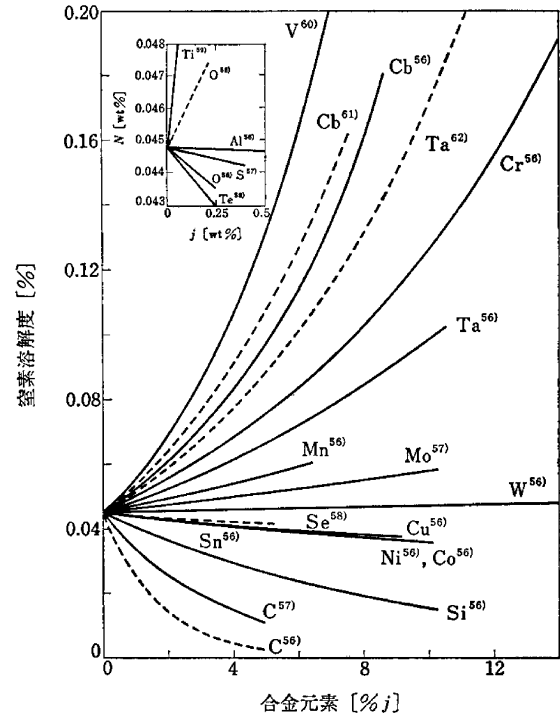


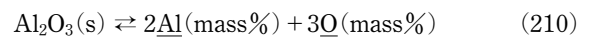
図22 1600℃での溶鉄への窒素溶解度に及ぼす第3元素の影響。鉄鋼便覧 第3版, 第1巻 基礎 図3.26.

相互作用により窒素の溶解度は変化する。図22(2)に1600℃での窒素溶解度に及ぼす第三元素の影響を示す。窒素の活量係数に及ぼす第三元素の影響(相互作用助係数, 相互作用母係数)がわかっているれば、熱力学計算により求めることができる。

(5) 溶鋼の脱酸反応

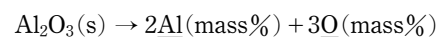
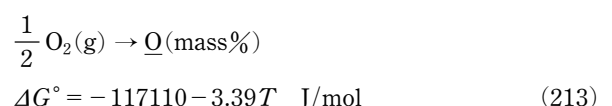
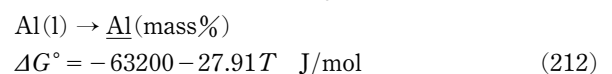
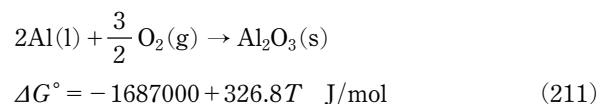
鉄鋼製錬の製鋼プロセスでは、溶鋼中の酸素を除去するために酸素と親和力の大きい金属元素を使って、酸化物として酸素を除去する脱酸反応が用いられる。たとえば酸素と親和力の大きいアルミニウムを用いたときの脱酸平衡を見積もることができる。1873 K でアルミナと平衡する溶鉄中の酸素とアルミニウムの濃度の関係を推算する。

平衡反応は



で表される。

反応(211)-(213)の Gibbs エネルギーデータから式(214)となる。



$$\Delta G^\circ = 1209000 - 392.8T \quad \text{J/mol} \quad (214)$$

平衡定数は

$$K = \frac{a_{\text{Al}}^2 \cdot a_{\text{O}}^3}{a_{\text{Al}_2\text{O}_3}} = \frac{(f_{\text{Al}} \cdot [\text{mass}\% \text{Al}])^2 \cdot (f_{\text{O}} \cdot [\text{mass}\% \text{O}])^3}{a_{\text{Al}_2\text{O}_3}} \quad (215)$$

と表される。固体 Al_2O_3 と溶鉄が平衡しているので、 $a_{\text{Al}_2\text{O}_3} = 1$ とし、1873 K で式(216)となる。

$$2(\log f_{\text{Al}} + \log [\text{mass}\% \text{Al}]) + 3(\log f_{\text{O}} + \log [\text{mass}\% \text{O}]) = \log K = -13.20 \quad (216)$$

溶鉄中で Al と O の相互作用があるので、Al と O の活量係数を求めるには相互作用を考慮しなければならない。相互作用助係数の値

$$e_{\text{Al}}^{\text{Al}} = 0.043, \quad e_{\text{Al}}^{\text{O}} = -1.98, \quad e_{\text{O}}^{\text{Al}} = -1.17, \quad e_{\text{O}}^{\text{O}} = -0.17$$

を用いて、式(217)(218)により活量係数を計算する。

$$\begin{aligned} \log f_{\text{Al}} &= e_{\text{Al}}^{\text{Al}} \cdot [\text{mass}\% \text{Al}] + e_{\text{Al}}^{\text{O}} \cdot [\text{mass}\% \text{O}] \\ &= 0.043 \cdot [\text{mass}\% \text{Al}] - 1.98 \cdot [\text{mass}\% \text{O}] \end{aligned} \quad (217)$$

$$\begin{aligned} \log f_{\text{O}} &= e_{\text{O}}^{\text{Al}} \cdot [\text{mass}\% \text{Al}] + e_{\text{O}}^{\text{O}} \cdot [\text{mass}\% \text{O}] \\ &= -1.17 \cdot [\text{mass}\% \text{Al}] - 0.17 \cdot [\text{mass}\% \text{O}] \end{aligned} \quad (218)$$

以上から式(219)となる。

$$\begin{aligned} -3.42[\text{mass}\% \text{Al}] + 2 \log [\text{mass}\% \text{Al}] \\ -4.47[\text{mass}\% \text{O}] + 3 \log [\text{mass}\% \text{O}] &= -13.20 \end{aligned} \quad (219)$$

解析解は得られないが、これより数値解を求め、溶鋼中 Al 濃度 $[\text{mass}\% \text{Al}]$ と酸素濃度 $[\text{mass}\% \text{O}]$ の関係が得られる。溶鋼中酸素濃度をどの程度まで下げることができるかを見積もることができる。各種脱酸素素についても同様にして、図23⁽²⁾の脱酸平衡の関係が得られる。

(6) 溶鋼-スラグ間のりん分配比の推定

1873 K でフォスフェイトキャパシティー $C_{\text{PO}_4^{3-}} = 10^{18.5}$ の $\text{CaO}-\text{SiO}_2-\text{FeO}-\text{P}_2\text{O}_5$ 系スラグと溶鋼(酸素濃度 0.05 mass%) が平衡しているとき、溶鋼-スラグ間のりん分配比 $\frac{(\text{mass}\% \text{P})_{\text{in slag}}}{[\text{mass}\% \text{P}]_{\text{in steel}}}$ を推算する。

フォスフェイトキャパシティーは式(177)で定義される。

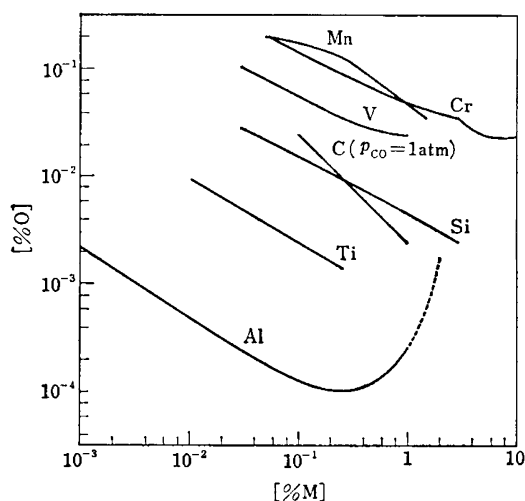
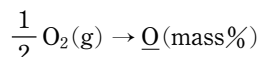


図23 1600℃での溶鉄の脱酸平衡。鉄鋼便覧 第3版, 第1巻 基礎 図3.38。

$$C_{\text{PO}_4^{3-}} = \frac{(\text{mass}\% \text{PO}_4^{3-})}{P_{\text{P}_2}^{1/2} \cdot P_{\text{O}_2}^{5/4}} = \frac{95}{31} \frac{(\text{mass}\% \text{P})}{P_{\text{P}_2}^{1/2} \cdot P_{\text{O}_2}^{5/4}} \quad (177)$$

式(213)より 1873 K での溶鋼中酸素濃度から酸素分圧が式(221)式により得られる。



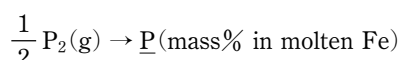
$$\Delta G^\circ = -117110 - 3.39T \quad \text{J/mol} \quad (213)$$

$$K = \frac{f_{\text{O}} \cdot [\text{mass}\% \text{O}]}{P_{\text{O}_2}^{1/2}} = \frac{[\text{mass}\% \text{O}]}{P_{\text{O}_2}^{1/2}} \quad (220)$$

$$P_{\text{O}_2} = 1.299 \times 10^{-7} [\text{mass}\% \text{O}]^2 \quad (221)$$

溶鋼中酸素濃度 0.05 mass% より $P_{\text{O}_2} = 3.25 \times 10^{-10}$ となる。

式(222)(223)式より 1873 K での溶鋼中りん濃度とりん分圧の関係として式(224)が得られる。



$$\Delta G^\circ = -157700 + 5.4T \quad \text{J/mol} \quad (222)$$

$$K = \frac{f_{\text{P}} \cdot [\text{mass}\% \text{P}]}{P_{\text{P}_2}^{1/2}} = \frac{[\text{mass}\% \text{P}]}{P_{\text{P}_2}^{1/2}} \quad (223)$$

$$P_{\text{P}_2}^{1/2} = 7.655 \times 10^{-5} [\text{mass}\% \text{P}] \quad (224)$$

これらを式(177)に代入して、りん分配比 $\frac{(\text{mass}\% \text{P})_{\text{in slag}}}{[\text{mass}\% \text{P}]_{\text{in steel}}}$ は109となる。

16. お わ り に

製錬反応において、熱力学は実験室規模の小さな反応でも製造プロセスでの反応のような大きなプロセスでの反応でも同じ原理で記述でき、金属製錬分野で実際のもの作りに大変大きな役割を果たしてきた。熱力学という言葉を知りただけで拒否反応を示さず、金属製錬反応を扱うときに、実際に使える熱力学となるように具体的な使い方を身につけていただくのに、本稿がお役に立てれば幸いである。

著者が金属製錬熱力学、化学熱力学に初めて接したのは、大学時代の佐野信雄先生(東京大学名誉教授)、増子昇先生(東京大学名誉教授)のお二人の東京大学における講義である。本稿の内容は両先生の講義で勉強した内容とその後のご指導が基になっており、参考にさせていただいたことを両先生に御礼申し上げる。また、本稿の執筆にあたり原稿の準備にお世話になった東京大学大学院工学系研究科准教授松浦宏行先生に感謝申し上げます。(完)

文 献

- (1) 日本金属学会, 金属化学入門シリーズ1 金属物理化学, (1996), 81.
- (2) 日本鉄鋼協会, 鉄鋼便覧 第3版, 第1巻 基礎, 丸善, (1981), 図1.2, 図1.3, 図2.7, 図2.8, 図3.26, 図3.38.
- (3) 日本金属学会, 講座・現代の金属製錬編2 非鉄金属製錬, (1980), 84.

[本稿で熱力学データを引用した文献]

- (1) Steelmaking Data Sourcebook, The Japan Society for the Promotion of Science, The 19th Committee on Steelmaking (日本学術振興会製鋼第19委員会), Gordon and Breach Science Publishers (1988).
- (2) E. T. Turkdogan: Physicalchemistry of High Temperature Technology, Academic Press (1980).

- (1) J. G. Kirkwood, I. Oppenheim(関 集三, 菅 宏訳): 化学熱力学, 東京化学同人(1965).
- (2) I. プリゴジーン, R. デュフェイ(妹尾 学訳): 化学熱力学 1, 2, みすず書房(1966).
- (3) 久保亮五: 大学演習熱学統計力学, 裳華房(1998).
- (4) 松下幸雄, 盛利貞, 不破 祐, 館 充, 森 一美, 瀬川 清: 冶金物理化学, 丸善(1970).
- (5) 増子 昇: 化学ポテンシャル状態図の作り方, 使い方, 電気化学, **38**(1970), 153, 236, 307.
- (6) 大谷正康: 鉄冶金熱力学, 日刊工業新聞社(1971).
- (7) F. D. Richardson, Physical Chemistry of Melts in Metallurgy, vol. 1,2, Academic Press (1973).
- (8) 大谷正康, 水渡英昭, 早稲田嘉夫: 冶金物理化学演習, 丸善(1975).
- (9) C. H. Lupis: Chemical Thermodynamics of Materials, North-Holland (1983).
- (10) O. Kubaschewski, C. B. Alcock and P. J. Spencer: Materials Thermochemistry 6th edition, Pergamon Press (1993).
- (11) E. T. Turkdogan: Fundamentals of Steelmaking, The Institute of Materials (1996).
- (12) 佐野信雄: エリンガム図と化学ポテンシャル状態図, ふえらむ, **1**(1996), 847.
- (13) N. Sano, W. Lu, P. V. Riboud and M. Maeda: Advanced Physical Chemistry for Process Metallurgy, Academic Press (1997).
- (14) H. Lee: Chemical Thermodynamics for Metals and Materials, Imperial College Press, (1999).
- (15) 伊藤公久: マテリアルサイエンスの基礎 熱力学, 八千代出版(2000).
- (16) イリヤ・プリゴジン, ディリブ・コンデブディ: 現代熱力学, 朝倉書店(2001).
- (17) D. askell: Introduction to the Thermodynamics of Materials, Fifth Edition, Taylor & Francis (2008).
- (18) 早稲田嘉夫, 大藏隆彦, 森 芳秋, 岡部 徹, 宇田哲也編: 矢澤彬の熱力学問題集, 内田老鶴園(2011).
- (19) P. Atkins, J. de Paula 著, 中野元裕, 上田貴洋, 奥村光隆, 北河康隆訳, アトキンス物理化学(上)第10版, 東京化学同人

(20) 伊藤公久, 平田秋彦, 山本知之: 基礎材料科学, コロナ社 (2020).

- (1) J. F. Elliott, M. Gleiser and V. Ramakrishna, *Thermochemistry for Steelmaking*, Pergamon Press (1963).
- (2) R. Hultgren, P. D. Desai, D. T. Hawkins, M. Gleiser, K. K. Kelley and D. D. Wagman: *Selected Values of the Thermodynamic Properties of the Elements*, Am. Soc. Metal. (1973).
- (3) R. Hultgren, P. D. Desai, D. T. Hawkins, M. Gleiser and K. K. Kelley, *Selected Values of the Thermodynamic Properties of Binary alloys*, Am. Soc. Metal. (1973).
- (4) G. K. Sigworth and J. F. Elliott: *Metal Science*, **8**(1974), 298.
- (5) O. Knacke, O. Kubaschewski and K. Hesselmann: *Thermochemical Properties of Inorganic Substances Second Edition*, Springer Verlag (1977).
- (6) NIST-JANAF Thermochemical Tables, Fourth Edition, J. Phys. Chem. Ref. Data, Monograph No.9, American Institute of Physics and American Chemical Society, (1998).
- (7) *Steelmaking Data Sourcebook*, The Japan Society for the Promotion of Science, The 19th Committee on Steelmaking (日本学術振興会製鋼第19委員会), Gordon and Breach Science Publishers (1988).
- (8) Y. Kawai and Y. Shiraishi: *Handbook of Physico-chemical Properties at High Temperatures*, Iron Stel Inst. Japan (1988).
- (9) S. Ban-ya and M. Hino: *Chemical Properties of Molten Slags*, Iron Stel Inst. Japan (1991).
- (10) I. Barin, *Thermochemical Data of Pure Substances*, VCH Verlagsgesellschaft mbH (1993).
- (11) M. Hino and K. Ito: *Thermodynamic data for steelmaking*, Tohoku University Press (2010).



月橋文孝

★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★

1982年 3月 東京大学大学院工学系研究科金属工学
専門課程博士課程修了，工学博士

1982年 4月 東京大学工学部金属工学科助手

1986年10月 東京大学工学部金属工学科講師

1988年 1月 東京大学工学部金属工学科助教授

1999年 4月～2020年 3月 東京大学大学院新領域創
成科学研究科物質系専攻教授

2020年 6月 東京大学名誉教授

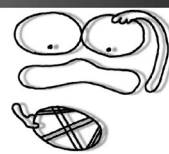
専門分野：金属製錬学，鉄鋼製錬学

◎金属製錬，鉄鋼製錬プロセスの物理化学に関する研
究に従事。

★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★

実学講座

金属材料実験の手引き



1. 組織観察

1-3 走査型電子顕微鏡を用いた分析手法

1-3-2 後方散乱電子回折法(EBSD)による結晶方位解析

横江大作*



1-3-2-1 はじめに

一般に EBSD や EBSP と呼称される後方散乱電子回折法 (Electron BackScattered Diffraction: 電子線後方散乱回折法とも呼ばれます, 以下, EBSD) は, 試料に電子線を照射したときに試料表面から発生する回折パターン (EBSD パターン) を利用して, 電子線照射領域の結晶方位に関する情報を得る分析法です (図 1)。本稿では, EBSD 法の原理や測定条件の考え方, 解析時の注意点などについて解説します。

1-3-2-2 EBSD パターンの取得と方位解析

① EBSD パターンとは⁽⁶⁾⁽⁷⁾⁽¹¹⁾

電子線が試料内に侵入すると, 原子との相互作用により非弾性散乱が生じます。原子から全方向に非弾性散乱した電子のうち, 試料表面方向に向かい試料表面において Bragg 回折条件を満たした電子は上下 1 対の円錐状に広がって飛び出します (図 1(b))。この電子を蛍光板に投影すると, 回折条件を満たす全ての結晶面に対応した複数のバンド状の模様 (EBSD パターン) が現れます (図 1(c))。EBSD パターンは TEM で得られる菊池パターン[†]と良く似た性質を有しているため, 擬菊池パターンとも呼ばれます。EBSD パターンのバンド幅は結晶面間隔に, バンド交点は結晶の晶帯軸に, バンド同士が交わる角度は結晶面間の角度にそれぞれ対応しますので, このパターンを解析することで結晶の方位などの情報を得ることができます。なお, バンド幅は電子線の加速電圧によっても変化します (後述)。

② EBSD パターンの取得

EBSD パターンは, 試料測定面を 60~70°に大きく傾斜させ, その測定面から発生した散乱回折電子を信号として, 入射電子線に対して約 90°の位置に配置した蛍光板へ投影させ, CCD カメラを用いて取り込みます (図 1(a))。電子線を一か所に固定して取得することはもちろん可能ですが, 多くの場合, ある領域に対して走査し, 指定した間隔ごとに連続的に EBSD パターンを取得するマッピング形式での測定が一般的です。総測定点数が非常に多くなることと, EBSD パターンの取得と同時に後述する Hough 変換, パターンの方位解析 (指数付け), オイラー角の算出などを行うため, マッピング測定時には数時間を要します。近年では測定の高速化を目的として, CCD カメラに代わって CMOS (Complementary metal-oxide semiconductor) カメラを用いた EBSD 検出器も開発されています。

③ 良質な EBSD パターンを取得するための信号増幅 (Gain) および露出時間 (Exposure time) の調整⁽⁶⁾

結晶の方位解析などは取得する EBSD パターンの像質 (高いコントラストを有している鮮明な像質) に大きく左右されます (後述するバックグラウンド除去も参照)。EBSD パターン取得時の最適な輝度は信号増幅 (Gain) および露出時間 (Exposure time: Exp) で調整します。この際の Gain および Exp のバランスは EBSD パターンの像質を左右する重要な調整です。Gain を増加すると像質は不鮮明 (ノイジー) になり, Exp を増加するとノイズが減少する傾向になります。Gain を 0 に設定し, Exp を最大まで長くすると, EBSD パターンの像質は高くなりますが, 測定時間は長くなります。

* 非営利・一般財団法人ファインセラミックスセンター (JFCC) ナノ構造研究所 電子顕微鏡基盤 G; 上級技師 (兼) 材料技術研究所 材料評価・試作 G; 1 級技能技師 (〒456-8587 名古屋市熱田区六野 2-4-1)

Keywords: scanning electron microscope, electron backscattered diffraction, Euler angles, orientation imaging microscopy (走査型電子顕微鏡, 後方散乱電子回折法, オイラー角, OIM)

† TEM 観察時に, 比較的試料が厚い結晶試料の電子回折図形を観察すると, 回折斑点の他に白黒の線が観察されます。これを菊池線や菊池パターンと呼びます。発生メカニズムおよびパターンが持つ情報は EBSD パターンと基本的に同様です。違いとしては, 菊池パターンは TEM を用いて逆格子空間に基づいた回折パターンであり, EBSD パターンは SEM を用いた実格子空間で発生しているパターンとなります。また, EBSD パターンは菊池パターンと同様の情報の他にチャネリング信号も含まれています。SEM を用いた実格子で発生するパターンを用いた分析手法としては EBSD 法の他に電子チャネリングパターン法 (Electron Channeling Pattern: ECP) があります。ECP 法はパターン取得時に電子線を 1 点に照射したまま照射角度走査が可能な特殊な電子光学系が必要となります。また, ECP 法の空間分解能は数 μm であり, EBSD 法に比べて二桁程度悪いです。

2021年7月16日受理 [doi:10.2320/materia.60.645]

測定時間を短くするため、Exp を短くして、Gain を増加させて調整します。Gain 調整の検討を行った結果を図 2 に示します。Gain : 0 (図 2(a)) に比べ、図 2(b), (c) のように Gain の割合を大きくすると EBSD パターンがノージーになっていく様子が分かります。目安としては、EBSD パターンの IQ 値 (後述) を確認しながら Gain の割合を 2/3 程度までとして、Exp の値を増加させながら、パターンの輝度を調整します。このときに得られる EBSD パターンの IQ 値は 40000 程度以上が目安となります。像質を適切に調整できない場合には、Gain と Exp を再調整します。また、必要に応じて電子線の加速電圧やプローブ電流を調整して、試料から

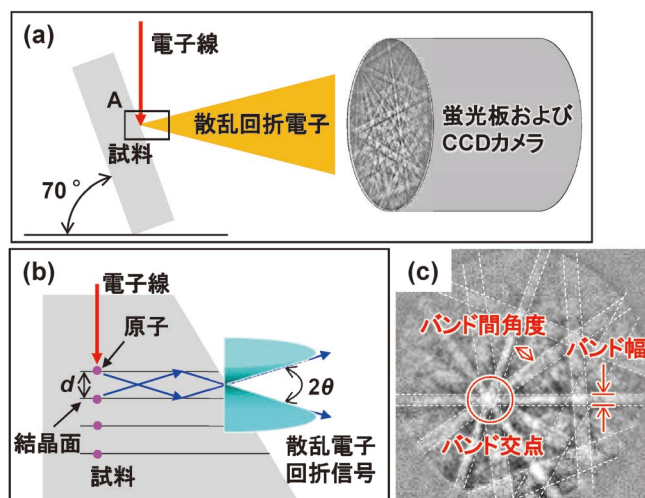


図 1 EBSD 測定時の入射電子線、試料、散乱電子回折信号の模式図および EBSD パターン。(a) 全体模式図、(b) A 領域の拡大模式図、(c) EBSD パターンの例 (Ni 試料)。

(b) より、電子線 (図中赤色矢印) が試料内に侵入し、原子 (図中色丸) との相互作用により非弾性散乱します。原子から全方向に非弾性散乱した電子のうち、試料表面方向に向かった電子が試料表面に存在する粒子の結晶面にて Bragg の回折条件を満たしたとき、回折した散乱電子 (図中青色矢印) は最終的に試料表面から上下 1 対の円錐状に広がって飛び出てきます⁽⁶⁾。飛び出てきた散乱回折電子を、入射電子線に対して約 90° の位置に配置した蛍光板に投影させ、CCD カメラで取り込みます。

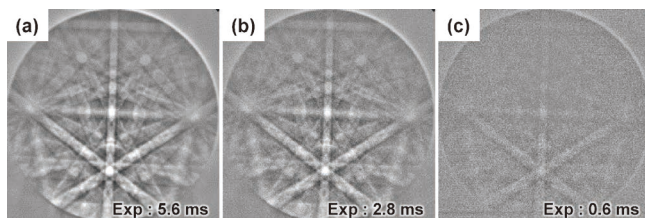


図 2 EBSD パターン取得時の Gain 値の違いによるパターン鮮明度の比較。

(a) Gain : 0, (b) Gain : 50%, (c) Gain : 100%。

Gain の割合が増加するに従い、Exposure time (Exp) は短くなりますが EBSD パターンは不鮮明になっていることがわかります。実際には Gain を 2/3 程度までで抑えて、Exposure time で EBSD パターンの輝度を調整します。その際、EBSD パターンの像質が不鮮明になるようでしたら Gain の割合を下げて Exposure time を再度調整します。

発生する信号量を増やすことも検討しながら条件を決定していきます。IQ 値が低い場合には、まずプローブ電流を増加させます。それでも改善されない場合は測定に影響を及ぼさない範囲で加速電圧を増加させます (プローブ電流や加速電圧の影響については後述を参照下さい)。それでも改善できない場合には、試料調製もしくは試料に問題がある可能性が高いと考えられます。

IQ 値は、EBSD パターンの像質を表すパラメータであり、EBSD パターンを Hough 変換 (後述) した際に Hough 空間上でのバンドを示すピーク強度を数値で表しています。この値が大きいほど像質が高い (適切) EBSD パターンが取得できていることを意味しています。なお、後述する EBSD パターンの指数付けの信頼度は、この IQ 値とともに、信頼性指数 (CI) 値、フィット (Fit) 値が参照値となります。

④ EBSD パターンの解析と Hough 変換⁽⁶⁾⁽⁸⁾

得られた EBSD パターンから直接結晶学的な情報を求めることも可能ではありますが、一般的には、予め試料を構成する結晶の情報を XRD 測定等で確認を行い、得られた結晶情報を参照データとして、取得した EBSD パターンとその参照データとの比較から結晶方位などを解析します。簡潔に述べると、EBSD パターンと整合する参照結晶の方位を探索することとなります。そのためには、まず EBSD パターンに現れているバンドを抽出しなくてはなりません。実験的に得られる EBSD パターンの像質は必ずしも良質であるとは限りませんので、その画像の特徴量を数値化して、参照データと比較する方法が用いられています。この比較には、高い精度だけではなく高速性も求められるため、現在では画像処理で用いられる直線 (ここでは EBSD パターン中のバンド) を抽出するための特徴抽出法の一つである Hough 変換[†] が用いられています (図 3)。EBSD パターンのピクセル座標を (x, y) として、そのピクセルの強度を、以下の式を用いて θ - ρ 平面へ投影していきます。

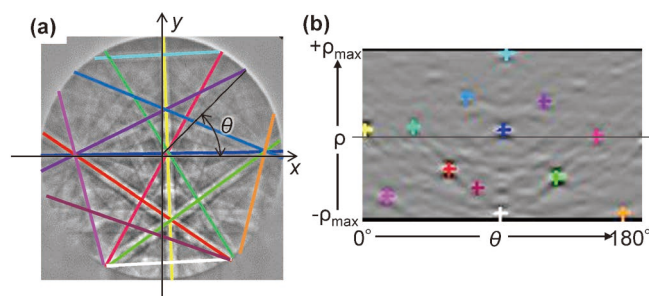


図 3 EBSD パターンと Hough 変換を行った例。

得られた EBSD パターンの各ピクセル座標 (x, y) および θ から ρ を算出して (Hough 変換)、そのピクセルの強度を、(b) のように θ - ρ 上へ画像として投影します。 θ - ρ 画像上での明るい点がバンドの位置に対応します。(a) と (b) の同じ色がそれぞれ対応しています。

[†] デジタル画像処理で用いられる特徴抽出法の一つです。古典的には直線の検出を行うものでしたが、更に一般化されて様々な形態に対して用いられています。

$$\rho = x \cdot \cos \theta + y \sin \theta$$

x, y : EBSD パターンのピクセル座標値

ρ : EBSD パターン中心とピクセル座標点の距離

θ : EBSD パターン中心から座標点を結んだ直線の角度

ここで、 θ - ρ 平面上で θ を $0^\circ \sim 180^\circ$ まで変化させて ρ を描いていくと、正弦曲線が得られます。この正弦曲線は、EBSD パターンの (x, y) で表されるピクセルを含む全ての直線に対応しています。このようにして EBSD パターンの全てのピクセルについて変換していきます。すると、EBSD パターンに現れている直線(バンド)に対応する (θ, ρ) ではコントラストが重なってきます(上述した正弦曲線が重なってくる)ので、より明るい点としてバンドの位置が、 θ - ρ 平面上へ投影されることになります。前述したように EBSD パターンの像質は必ずしも極めて高いコントラストで得られているわけではありませんから、想定されるバンドの位置の確かさは、変換後の θ - ρ 画像におけるコントラスト分布で判断されることとなります。このコントラスト分布の質を表す指標の一つが IQ 値です。IQ 値が高いほど、 θ - ρ 画像でのコントラスト強度比が高いことを意味しています。つまり、バンドに対応する θ - ρ 画像での点のコントラスト強度が高いこととなります。このようにして、EBSD パターンのバンド位置を抽出していきます。上述したように IQ 値は 40000 程度以上が目安となります。結晶の方位には、全てのバンドを必ずしも用いる必要はありません。三角測量ではありませんが、3つのバンドを使用すれば求めることができます。EBSD パターンに現れるバンドの中から最低限必要な3種類のバンドを複数組み合わせると各バンド間角度を測定し、それぞれの組み合わせごとに結晶方位を算出し、その値を比較することで、指数付けの正確さを見積もることができます。この指標を主に反映しているのが CI 値です。CI 値は 0.1 程度以上あれば、指数付けは成功していると判断されます。その他にも、EBSD パターンから指数付けを行った結果から算出したパターンと生データの EBSD パターンとのズレ角を算出したものを反映する Fit 値という指標もあります。ただし、Fit 値は、IQ 値や CI 値が悪い場合や、Hough 変換のパラメータが適切でない場合にも変化しますので、この値だけの判断は適していません。いずれにしても、IQ 値、CI 値、Fit 値を参照し、適切な条件設定を行っていくことが必要です。

⑤ オイラー角⁽⁶⁾

EBSD パターンから求められる結晶方位は、あくまでも EBSD 検出器方向を基準としたときの結晶方位になります。試料に対する方位や結晶間での方位関係などの情報を知るためには、固定座標系を基準とした個々の結晶の方位関係に関する情報が必要となります。オイラー角は、この関係を与える角度です。オイラー角の算出には、Passive 法⁽⁶⁾が用いられます(一般的に用いられている OIM Analysis ソフトで採用されています)。オイラー角は、固定座標軸 XYZ と結晶座標軸 abc のうち3つの回転角で表現します(図4)。例として立方晶を想定します。固定座標軸 XYZ の $[001]$ 方向

に立方晶の (111) 面、同様に $[010]$ 方向に (110) 面が向いているときのオイラー角 $(30.0^\circ, 55.0^\circ, 45.0^\circ)$ の説明を図5に記します。まず、初期位置の XYZ 軸、 abc 軸は図5(a), (e)の状態です。そこから $\phi 1$ (回転中心: Z) の回転を 30° 与えます。その結果、図5(b), (f) となります。この際、Z の回転を与えたことにより、他の軸の方向もそれぞれ変化します。次に Φ (回転中心: X) の回転を 55° 与えます。その結果、図5(c), (g) となります。Z の際と同様に X の回転を与えたことにより、他の軸の方向もそれぞれ変化します。最後に $\phi 2$ (回転中心: c) の回転を 45° 与えます。その結果、図5(d), (h) となります。 $\phi 2$ の回転の時には固定座標軸 XYZ は動きません。このように EBSD パターンで求めた方位をオイラー角に変換して記録していくことで、試料内での方位分布や結晶粒ごとの方位関係などを求めていくことが可能となります。

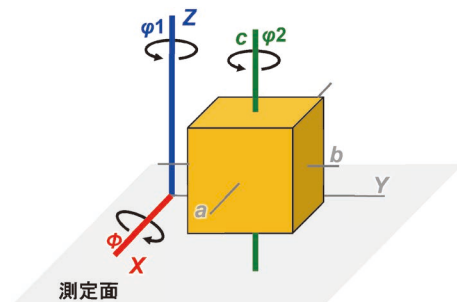


図4 Passive 法によるオイラー角($\phi 1, \Phi, \phi 2$)回転軸の模式図。Passive 法によるオイラー角($\phi 1, \Phi, \phi 2$)は、固定座標軸 XYZ と結晶座標軸 abc のうち3つの回転角で表現されたものです。実際には固定座標軸 Z を回転中心とする $\phi 1$ (青色)、固定座標軸 X を回転中心とする Φ (緑色)、結晶座標軸 c を回転中心とする $\phi 2$ (緑色)にて表記されます。(オイラー角に使用しない軸は灰色で表示しています。)

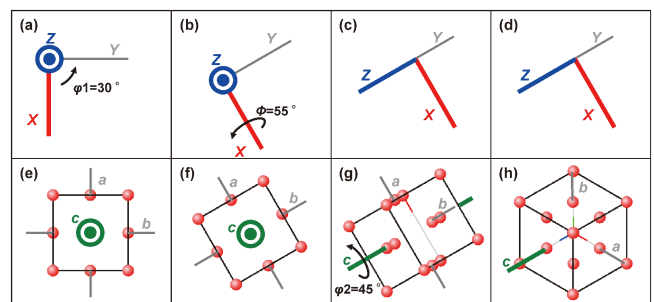


図5 Passive 法によるオイラー角($\phi 1, \Phi, \phi 2$)回転軸の模式図。初期位置の XYZ 軸、 abc 軸はそれぞれ(a), (e)の状態です。そこから $\phi 1$ (回転中心: Z(青色))の回転を 30° 与えます。その結果、(a), (e) から(b), (f) となります。この際、Z の回転を与えたことにより、他の軸の方向もそれぞれ変化します。次に Φ (回転中心: X(赤色))の回転を 55° 与えます。その結果、(c), (g) となります。Z の時と同様に X の回転を与えたことにより、他の軸の方向もそれぞれ変化します。最後に $\phi 2$ (回転中心: c(緑色))の回転を 45° 与えます。その結果、(d), (h) となります。 $\phi 2$ の回転の時には固定座標軸 XYZ は動きません。(オイラー角に使用しない軸は灰色で表示しています。)

1-3-2-3 EBSD 測定時に配慮すべきこと

① 試料表面の形状について

図 6(a)のように試料表面に凹凸がある場合、試料表面から発生した散乱回折電子の一部が凸部に遮られると、図 6(b)のように EBSD パターンの一部が欠落してしまいます。この場合、欠落を含んだパターンでの指数付けとなるので、解析結果に大きな誤差が生じます。そのため、試料表面形状を十分把握したうえで(可能であれば平坦な面で)測定を行う必要があります。

② 測定表面の調製法について⁽⁶⁾

EBSD 測定には、試料表面から 30~50 nm 程度の深さまでの情報が影響するため、試料表面の状態は測定結果を大きく左右します。そのため、切断や不十分な研磨による加工歪み層、異物等の付着、表面の汚染(コンタミネーション、コンタミ)、酸化被膜等の除去が必要です。例えば、材料にも依存しますが、機械研磨では研磨粒子直径の 1/3 程度の深さまで加工歪み層が形成されます。この加工歪み層がある状態だと良質な EBSD パターンの取得が困難となります(図 7)。経験的ではありますが、このような変質層は 10 nm 以下にすることで改善できます。以下に変質層の除去方法について述べます。

電解研磨法：試料材質に適した電解液中に陰極と共に試料を浸し、通電することで陽極である試料表面の原子をイオン化し、試料表面層を除去する手法です。電界条件(電解液の選択、印加電圧、制御電流など)が適切である場合には優れた処理方法となりますが、不適切な条件では、試料表面への酸化被膜の形成や優先エッチングによるピット形成などが生じるため、EBSD パターンを劣化させてしまう原因ともなりますので、注意が必要です。

イオンエッチング法：Ar イオンや Ga イオン等を用いたスパッタによって表面原子を剥離していく研磨手法です。表面変質層を大きく低減できるのが特徴です。また、機械研磨の代わりとしても用いることもできます。表面状態はイオンビームの加速電圧や照射角度で変化します。加速電圧が高い

ほど研磨速度(エッチングレート)が増加しますので、研磨工程は短時間化できます。しかしながらこの時には、イオン打ち込みによるダメージ層が数十 nm 程度形成されることもありますので、加速電圧を~3 kV 程度まで下げた仕上げ研磨を行う方がいいでしょう。また、高加速電圧のイオンビームでは発熱が生じます。目安となりますが、おおよそ 200℃以下で組織変化が起こる材料の場合には、冷却機構を有する装置で実施する等の検討が必要です。エッチングレートの差に起因した表面形状の凸凹化にも配慮する必要があります。試料面に対して高角度でイオンビームを入射すると、エッチングレートの差が顕在化してきます。例えば、結晶粒界がより深く研磨されたり、試料を構成している相ごとに凸凹が顕著となったりすることがあります。このような表面の凸凹は、図 6 示した EBSD パターンの部分的な欠損の原因となることもあります。

コロイダルシリカを用いた振動研磨法：コロイダルシリカを用いた機械研磨法の一つです。図 8 に示すように、研磨盤

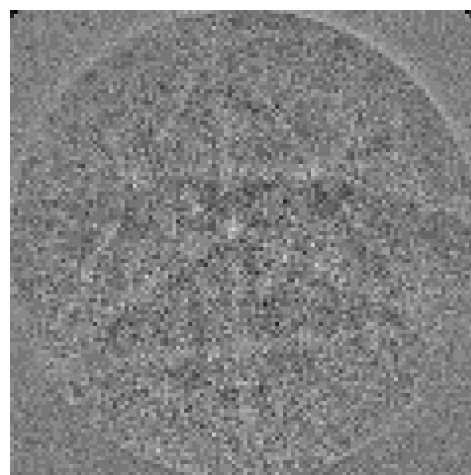


図 7 機械研磨時の歪み層の影響で不鮮明となった EBSD パターンの例。

試料表面に機械研磨時の歪み層があり、取得した EBSD パターンが不鮮明になっています。

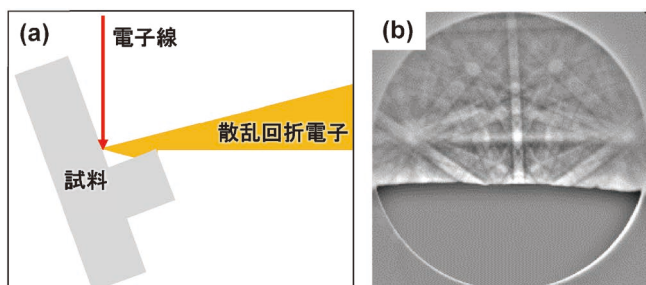


図 6 EBSD パターン検出に及ぼす試料表面の凹凸形状と EBSD 検出器位置の関係。

(a) 試料模式図、(b) 影響を受けた EBSD パターン。

(a)のように試料表面に凹凸がある場合、試料表面より発生した散乱回折電子の一部が凸部に遮られ、(b)のように蛍光板に投影された EBSD パターンの一部が影になり、信号が欠落してしまいます。

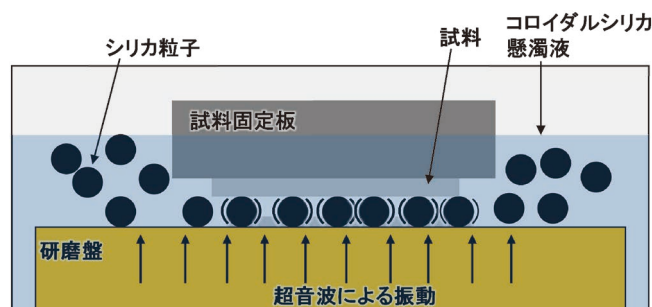


図 8 振動研磨による表面変質層の除去方法。

槽にコロイダルシリカの懸濁液を入れ、試料表面を下向きにして配置します。試料表面と研磨盤との間にシリカの粒子が存在する状態となり、超音波等による振動を与えることで研磨盤上のシリカ粒子が微動し試料表面が研磨されます。研磨盤にはパワ

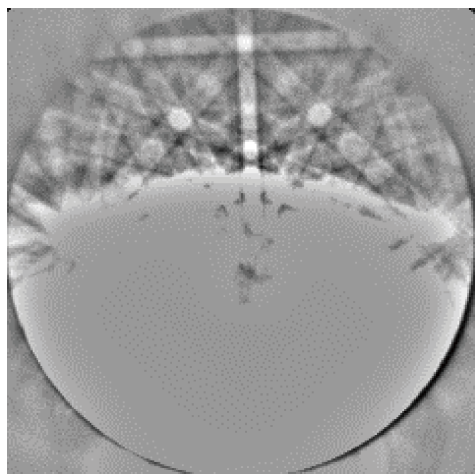


図9 帯電の影響を受けたEBSDパターン例。
帯電の影響で試料表面より発生した散乱電子回折信号の量が局部的に多くなり、信号が飽和してしまって良好なEBSDパターンの取得が困難となっています。

を槽中に設置し、コロイダルシリカの懸濁液を入れ、試料表面を下向きにして配置します。試料表面と研磨盤との間にシリカ粒子が存在する状態で超音波等による振動を与ると、シリカ粒子が微動して試料表面を研磨します。非常にマイルドな研磨方法です。機械的な研磨効果以外にも、コロイダルシリカ懸濁液の弱アルカリ性による僅かなケミカルエッチングの効果も期待できます。

③ 帯電(チャージアップ)の影響とその対策

試料が非導電性材料の場合や樹脂包埋を行った試料の場合には、1-3-1-3-⑦で説明した帯電現象が試料表面に発生することがあります⁽⁴⁾。帯電すると、電子線走査方向にスキャンノイズのようなスジ状のコントラストが現れたり、実際の測定箇所と対応しないマッピング像になったり、一部が欠落したEBSDパターンとなる場合もあります(図9)。EBSD測定時には、EDSマッピング測定時に利用できるドリフト補正機能が使用できないので、帯電対策には特に注意しなくてはなりません。帯電防止策として一般的な導電膜を形成する場合には、その厚さに注意しなければなりません。前述したように、EBSDパターンは表面から50 nm程度の深さまでの情報で形成されますので、導電膜が厚い場合には、導電膜の情報が支配的となってしまいます(図10)。導電膜を形成するときは、数 nm 程度以内にする必要があります。導電膜を使用しない方法として、SEM 試料室を ~ 100 Pa 程度の低真空状態にすることも有効です。低真空状態にすると、残留ガス分子が電子と衝突する確率が増加して、試料室内の陽イオン濃度が増加します。この陽イオンが、試料表面の帯電を中和することで帯電の影響が軽減します⁽¹⁴⁾。ただし、低真空状態ではガス分子による電子の散乱も発生するため、高真空状態と比べると得られるEBSDパターンのS/N比は低下します。良好なEBSDパターンが得られるよう電子線の加速電圧やプローブ電流等で調整を行う必要があります。ただし、加速電圧は最低でも5 kV以上でないとEBSDパターン

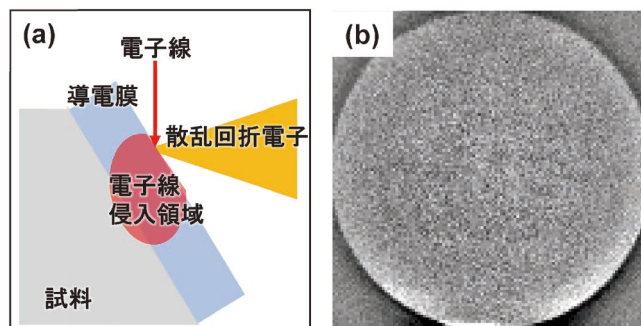


図10 試料表面に導電膜を形成した際のEBSDパターン例。

(a) 導電膜蒸着試料の散乱電子回折信号発生時における模式図、(b) 導電膜の影響を受けたEBSDパターン例。

EBSD測定時の散乱電子回折信号は試料表面より ~ 50 nm程度の深さまでの情報で形成されるため、導電膜が厚い場合には、試料からの情報よりも蒸着膜からの情報が支配的となり、(b)のように試料からのEBSDパターンが検出できなくなります。

のS/N比は劣化します。また、電流量を下げると、S/N比を確保して良好なEBSDパターンを取得するためにGainを下げてExpを長くしなくてはなりません。

④ 試料汚染の影響

コンタミは1-3-1-3-⑧で説明した電子線照射で生じるカーボンを主成分とする汚染膜が試料表面に固着する現象です⁽⁴⁾。コンタミが表面に堆積すると、図10で説明した導電膜の影響と同様にEBSDパターンのS/N比が低下します。そのため、試料表面を清浄な状態に調整しておくことが必要です(1-1-2を参照⁽⁵⁾)。

⑤ 作動距離(Working distance, WD)と試料傾斜角度の影響

前述したようにEBSDパターンは電子線の照射位置から円錐状に発生した散乱回折電子を取得します(図1)。EBSD検出器の幾何学的な位置は決まっていますので、取得されるEBSDパターン形状は、試料表面での電子線の照射位置とその位置からEBSD検出器を見込む角度や距離で変化します。作動距離(Working distance, WD)⁽⁵⁾と試料傾斜角度は、この幾何学的な位置関係に影響します。機種にも依存しますが、WD: 15 mm、試料傾斜角度 70° が推奨値として指定されています。解析ソフトは、この位置関係でEBSDパターンを解析できるように設定されています。図11は、WDの違いとその時に得られるEBSDパターンとの関係を示しています。WD: 15 mm(図11(b))とWD: 20 mm(図11(d))を比較すると、WD: 20 mmではEBSDパターン全体が下方へズレていることが分かります。このWD: 20 mmでのEBSDパターンを、WD: 15 mmとして解析してしまうと、このズレに相当する距離の分だけあたかも結晶方位が下方へ傾いているかのように解析されてしまうこととなります。図12は、試料傾斜角度の影響について示しています。 70° (図12(b))と 60° (図12(d))を比較すると、WDのときと同様に、EBSDパターン位置にズレが生じていることが分かります。試料形状やその他の制限のために、上述した指定値での計測ができない場合には、計測時のWDと試料傾斜角度を

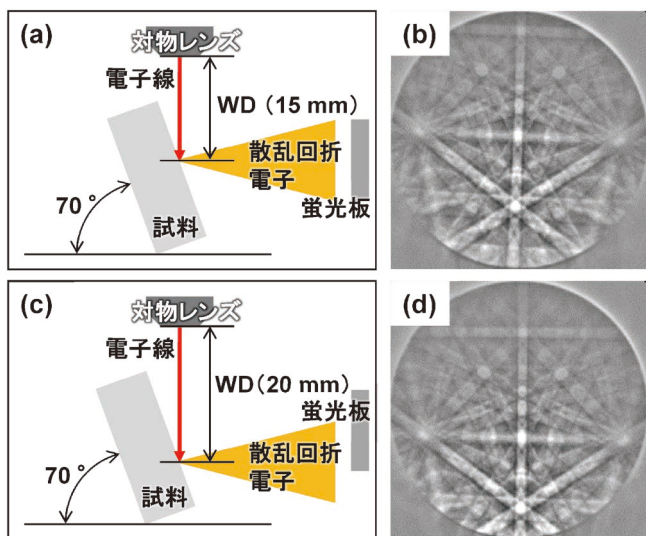


図11 WDの違いと得られるEBSDパターンの例。
(a) WD: 15 mmの際の模式図, (b) (a)の位置関係のときに取得されるEBSDパターン, (c) WD: 20 mmの際の模式図, (d) (c)の位置関係のときに取得されるEBSDパターン。
(b)と(d)とを比較すると, WD: 20 mmでは, EBSDパターン位置が下方にズレていることが分かります。

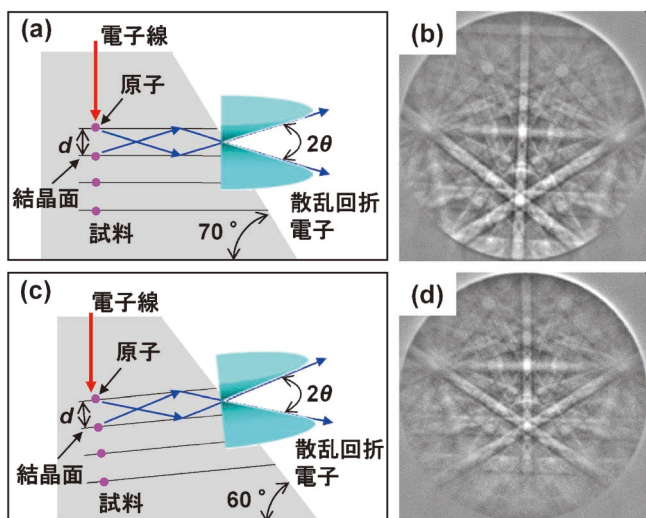


図12 試料の傾斜角度が変化した時のEBSDパターンの比較。
(a) 傾斜角度 = 70°の際の模式図, (b) (a)の位置関係でのEBSDパターン, (c) 傾斜角度 = 60°の際の模式図, (d) (c)の位置関係でのEBSDパターン。
(b)と(d)とを比較すると, EBSDパターン位置が変化していることが分かります。

必ず解析ソフトで修正しておかなければなりません。WDについては操作ソフト上で入力できる場合が多いのですが、傾斜角度の設定変更は、パスワード等で管理されています。

⑥ 加速電圧の選択とその影響⁽⁶⁾⁽⁷⁾⁽¹¹⁾

EBSDパターンのバンド幅は次式の関係から求められる θ の値で決まります(図1)。

$$\lambda = 2d \cdot \sin \theta$$

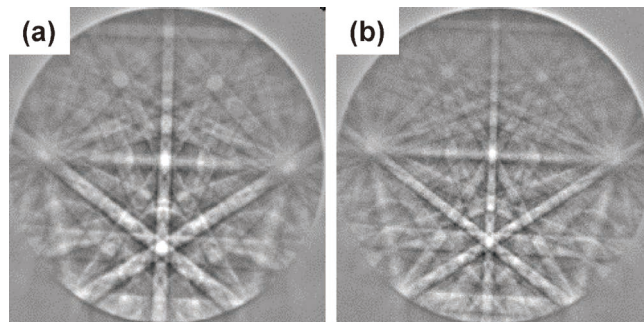


図13 電子線の加速電圧の違いによるEBSDパターン比較。
(a) 加速電圧 15 kV, (b) 加速電圧 30 kVにて取得したEBSDパターン。

電子線の加速電圧が異なるとEBSDパターン中のバンドの幅が変化します。加速電圧が高くなると波長が短くなり、回折角が小さくなるためバンド幅は狭くなります。逆に加速電圧が低くなると波長は長くなり、回折角が大きくなるためバンド幅は広がります。バンドの交点位置や、バンド間の角度は変化しません。

λ : 電子線波長 d : 結晶格子面間隔

θ : 電子線回折角度

加速電圧が高くなると波長が短くなるため、回折角が小さくなりバンド幅は狭くなります。逆に加速電圧が低くなると波長は長くなり、回折角が大きくなるためバンド幅は広がります(図13)。ただし、加速電圧が変化しても、バンドの交点位置やバンド間の角度に違いは生じません。

1-3-2-4 空間分解能について

EBSD測定時の空間分解能は、加速電圧、試料を構成する元素の平均原子番号、電子線プローブ径、測定点の間隔、測定時の観察倍率等の影響を受けます。

① 加速電圧の影響

前述した通り、EBSDパターンは50 nm程度の浅い表面領域を反映しますので、加速電圧が変化しても深さ方向の空間分解能は大きくは変化しません。しかしながら平面(縦横)方向の空間分解能は加速電圧の影響を受けます。図14に加速電圧15 kVと30 kVでEBSD測定を行った時の結晶方位マップを示します。結晶方位マップは、測定点ごとの結晶方位の違いを色で表しています。方位が変化しない結晶粒内では同じ色で表示されます。加速電圧の高い図14(b)では、結晶粒界近傍において左右どちらの表示色にも対応しない測定点が多く確認されているのが分かります。これらの測定点は、誤った指数付けが行われたためにこのように表示されています。これは、試料内での散乱回折電子の発生領域が加速電圧の違いによって変化していることが関係しています。Niを例にとって加速電圧の違いによる電子線侵入領域のモンテカルロ法によるシミュレーション結果を図15(a), (c)に示します(フリーソフト等で可能⁽¹⁵⁾)。加速電圧30 kV(図15(c))では、3倍程度広い領域に広がっているのが分かります。図15(b), (d)は、この広がりが結晶粒界近傍での測定結果に及ぼす影響について示しています。30 kVでは、結晶粒

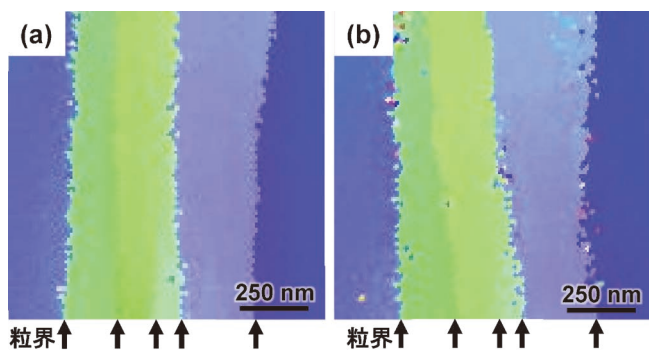


図14 電子線の加速電圧の違いによる結晶方位マップの比較. (a) 加速電圧 15 kV, (b) 加速電圧 30 kV.

二つのデータを比較すると, (b)は図(a)に比べて表示色に変化する粒界(黒色矢印)近傍にて左右どちらの結晶粒にも対応しない色で表示されている測定点が, 数多く確認されています.

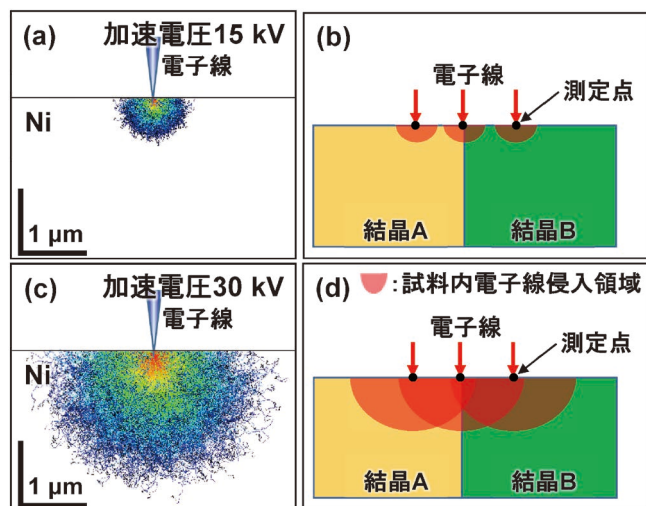


図15 Niに対する電子線侵入散乱領域のモンテカルロシミュレーションおよび結晶粒界近傍での加速電圧の違いによる各測定点での電子線侵入領域の模式図. (a), (b) 加速電圧 15 kV, (c), (d) 加速電圧 30 kV.

(a), (c)より, 加速電圧が高いほど, より広く侵入散乱することが分かります. このようなシミュレーションは, フリーソフト⁽¹⁵⁾等で実施可能です. その結果, (b)に比べて(d)の方が, 結晶粒界近傍の測定点では, 粒界を跨ぐように電子線が侵入してしまう測定点が多くなります.

界近傍において粒界を跨ぐように電子線が侵入していることが確認できます. 粒界を跨ぐ領域から発生したEBSDパターンは, 図16に示すように, それぞれの結晶粒からパターンが重畳したパターン(図16(c))となるため, 指数付け精度が大きく劣化してしまいます. また, EBSDパターンが重畳している場合には, 相対的に発生領域が広く強度の高い結晶が優先的に検出されることにもつながります. そのため, 微小粒子がある場合には, その検出確率が大きく劣化してしまいます(後述の試料の向きの影響も参照).

② 電子線プローブ径の影響

使用するSEMに搭載された電子銃の種類および設定するスポットサイズなどにも依存します. 電子銃としては電界放

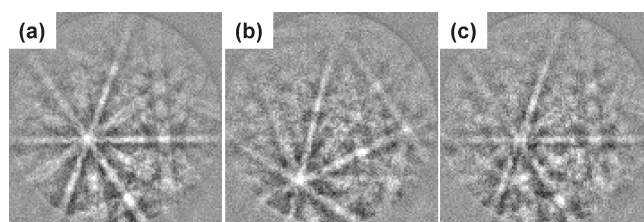


図16 結晶粒界近傍で取得したEBSDパターン. (a) 結晶粒AのEBSDパターン, (b) 結晶粒BのEBSDパターン, (c) 結晶粒AとBの粒界から得られたEBSDパターン.

結晶粒界から取得したEBSDパターンは, 結晶粒Aと結晶粒BのEBSDパターンが重なったパターンとして発生します.

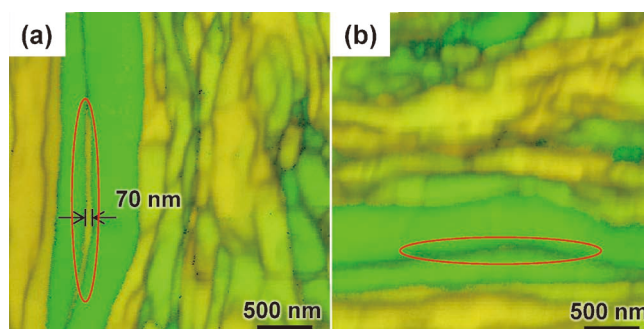


図17 電子線の走査方向に対して結晶粒界の方向が, (a) 垂直, (b) 平行, の時に得られる結晶方位マップの比較.

電子線の走査方向はいずれも図面左右方向. 赤線で示すように, 垂直方向(a)に試料を設置した時には結晶粒界に存在する微細な結晶粒が確認されているが, 平行方向(b)では確認できていない.

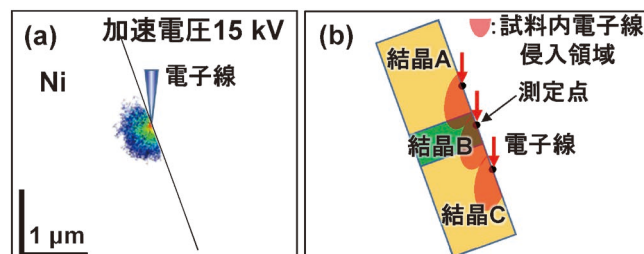


図18 70°に傾斜したNiに対する(a)電子線侵入散乱領域のモンテカルロシミュレーション, (b)結晶粒界近傍の各測定点での電子線侵入領域の模式図.

70°に傾斜した試料表面に対して電子線が侵入散乱すると, 非弾性散乱の発生領域が入射方向へ広がるため, 試料の傾斜方向(縦方向)からのEBSD発生領域が広がります.

射型の方が優れており, スポットサイズについてはEBSDパターンのS/N比を考慮したうえで, 小さいほど効果的です.

③ 試料の向きによるEBSDパターン発生領域と空間分解能の関係⁽⁶⁾

EBSD測定時の空間分解能は試料の傾斜角度の影響も受けます. 試料が70°傾斜した状態で測定するため, 傾斜方向とその直角方向では空間分解能が異なってきます. その例として図17に同じ領域を90°回転させて測定を実施し, 比較し

貨幣博物館(東京都中央区)

文責：東京工業大学 春本高志

(2021年8月訪問)

今回は、東京駅から徒歩数分と交通至便な中央区日本橋にある貨幣博物館を紹介する(図1)。貨幣博物館は、日本銀行創立100周年を記念して設立され、かつての金座：金貨製造拠点であり現在の日本銀行本館⁽¹⁾と道を挟んだ隣(別館内)に位置する。貨幣コレクター田中啓文氏の収集品を基にした、金銀の大判・小判などの他、現在の国内外の貨幣、更には、お金に関する古文書なども展示されている。博物館としての規模はあまり大きくないものの、それ故に、1時間程度の短時間で、日本の古銭・貨幣を中心に、現在に至るまでのお金の移り変わりを網羅的に見ることができ、東京観光の際にはおすすめである。

さて、博物館に入るためには、なんと、空港の搭乗口と同じような金属探知機による検査を受ける必要があり、入口には担当警備員の方が多数待機されておられるため、正直なところ、気軽に入るのには躊躇する。お金は不要である(入館無料)が、代わりに、勇気を要する。しかし、それを通過し、2階の展示室へ行くと、普通の博物館と同じ空気となる。展示品は、紙幣コーナーを除いては、どこを見ても金、銀、銅の貨幣であり、入り口のものものしい検査が保安上必要とすぐに理解できる。多くの展示品の中、美術品として、また、金(Au)そのものとしても圧倒的な存在感・輝きを放っていたのは、微細な紋様が刻まれた高純度 Au の分銅金、並びに、滅多に目にすることのできない本物の黄金大判・小判である。



図1 貨幣博物館の外観。

科学館で見つけた金属材料！

“黄金小判は、実は Au-Ag 合金”

黄金に輝く小判は、その色ゆえに、ほぼ純 Au と暗黙の裡に信じている方が多いと思う(実際、筆者もそうであった)。しかし、実は、純 Au ではなく、金-銀(Au-Ag)合金ということを示すことで知ることになる。

具体的には、小判の Au 純度は、基本的には、時代とともに低下し、反対に Ag の比率が増えていくとのことである(図2)。これは、幕府の財政状況悪化時などに、従来の小判を溶融して、Ag を追加で添加し、小判の枚数を物理的に増やすという「改鑄(かいちゅう)」が行われていたためとの説明書きがあった。今の金融政策と類似している点で、歴史は形を変えて繰り返されているのかもしれない。

しかし、お金としては、見た目(黄金色)も大切であり、「色付け・色揚げ」という工程を通して、見た目を黄金色にする(図3)。博物館学芸員の方にお伺いしたところ、表面処理の一種であり、Ag を選択溶解させ、表面の Au 純度を高

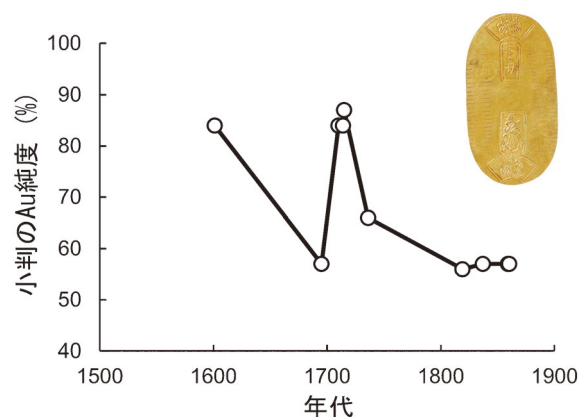


図2 時代と共に変化する小判の Au 純度。写真は、安政小判 (Au 純度：57%)。純度の割に黄金色であることが色付け工程の成果。(貨幣博物館所蔵)



図3 色付け工程を記した金座絵巻。(貨幣博物館所蔵)

める化学的なプロセスとのことである。ある種の脱合金処理と思われるが、ここで、黄金小判の製造プロセスを、刻印・細工や揮毫などの貨幣の制度的・芸術的な工程は別にしてまとめると、金属工学的には、

1. 鋳造
2. 鍛造
3. 脱合金

の3つである。初めの2つは、普通の作り方であるが、最後の3つ目には驚いた。というのも、ラネーニッケル触媒などに代表されるよう、脱合金は、近代に入ってから技術と(少なくとも筆者は)認識していたが、実は、黄金に輝く小判製造技術の一部として、数百年もの昔から行われていたようだ。したがって、昔も今⁽²⁾も、お金の製造には、その時代として、かなり高度な技術が使われてきたのではないかと感じる。しかし、昔は、悪く言うと、Au純度を落としたことをあからさまにしないための技術だった(ある意味、幕府が民をだましていた)のに対し、今は、だまされないための偽造防止であり、技術の使われる方向性が全く異なっている点は興味深い。いずれにしても、金属工学的な観点では、純度が違っているにも関わらず、ほぼ同じ黄金色に見える小判の展示は非常に面白い。是非、足を運んで現品を御覧頂きたい。

博物館では、完成された貨幣だけでなく、作製途中の中間状態の貨幣も見ることができる(図4)。砂型鋳造によって、

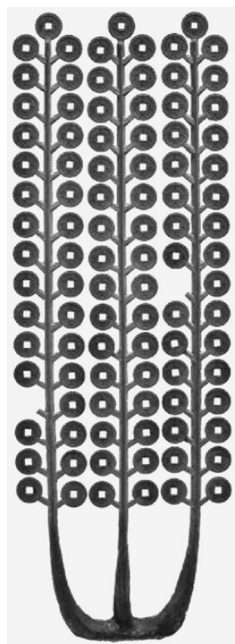


図4 枝銭。(貨幣博物館所蔵)

鋳込んだ直後の銅銭が(実際の鋳込みとは天地が逆になった状態で)「枝銭(えだせん)」として展示されているが、こちらは、かなりの大きさであり、鋳込み技術として高度だったとわかる。品質・形状の揃ったお金を作るために、幕府は努力を続けてきたようだ。現代に至るまでのお金の展示を通して、日々当たり前に使っている硬貨も、実は、長い歴史の中で改良が重ねられ、進化してきた産物と考えさせられる。なお、現代の硬貨は、鋳造で直接鋳込むのではなく、圧延板からの打ち抜きである⁽³⁾。

最後に、お金に関する古文書の1つとして展示されている江戸時代の「人間一生入用勘定」は、人が一生で使用するお金の一覧が記載・計上されており面白い。かなり詳細に記載されているようだが、残念ながら解読はできなかった。しかし、その結論が円グラフとして表示されており、一生の支出のうち、酒代の占める割合は、実はかなり大きいとのこと。江戸時代と現代では物価の状況が異なり単純比較はできないものの、嗜好品にはお金がかかるという点では同じなのかもしれない。お金の博物館だけあって、お金の使い方の勉強にもなった。

文 献

- (1) 金座(きんざ)の歴史, 日本銀行金融研究所貨幣博物館(2015)(銀座の打ち間違いではない).
- (2) 石本卓也: まてりあ, **59**(2020), 448-449.
- (3) 造幣局ホームページ, 貨幣の製造工程(その1).
https://www.mint.go.jp/operations/production/operations_coin_process01.html(2021年8月4日閲覧)
(2021年8月10日受理)[doi:10.2320/materia.60.653]

貨幣博物館へのアクセス

- 地下鉄 半蔵門線 三越前駅(B1出口)から徒歩1分
- 地下鉄 銀座線 三越前駅(A5出口)から徒歩2分
- 地下鉄 東西線 日本橋駅(A1出口)から徒歩6分
- JR 東京駅日本橋口から徒歩8分

(〒103-0021 東京都中央区日本橋本石町 1-3-1

日本銀行分館内)

<https://www.imes.boj.or.jp/cm/>



その他: テレビ番組などで登場する「1億円の重さを体験できます」コーナーは、新型コロナウイルス対策のため、残念ながら現在は休止中とのこと。

支部だより

北の大地発・研究者の育成と材料科学の研鑽

北海道支部 支部長 橋本直幸*

日本金属学会北海道支部は、1947年4月に北海道大学の阿久津國造先生が初代支部長に就任されて以降、現在まで74年の歴史があり、現在は北海道在住の日本金属学会会員、北海道内における大学等の高等教育機関、北海道に拠点を持つ金属・鉄鋼関連企業、学術研究機関などの研究者、各教育機関所属学生を含め、総勢170名の研究者と共に、これまで諸先輩方によって培われた冶金・金属・鉄鋼工学、材料科学及び工学技術の更なる発展のため研鑽を積んでいます。主な研究者所属機関の内訳は、大学(北海道大学、室蘭工業大学、北見工業大学、北海道科学大学)、高等専門学校(旭川高専、苫小牧高専、函館高専)、企業(日本製鐵、日本製鋼所、日本製鋼所 M&E、北海道電力)、研究機関(北海道立総合研究機構)となっており(図1)、教育機関に所属する若い研究者の比率が特に高くなっています。

本支部では日本鉄鋼協会北海道支部と合同で年2回の講演大会(夏季講演大会・サマーセッション、冬季講演大会：共に講演者数40～50件)を北海道大学、室蘭工業大学及び北見工業大学で開催しており、これに合わせて特別講演(2021

年7月：東大・御手洗容子先生、2019年1月：北大・鶴飼重治先生など)及び本多光太郎記念講演(2020年1月：京大・乾晴行先生、2019年1月：阪大・掛下知行先生など)も行っています。この年2回の講演大会では大学院生や企業、研究所に所属する優秀な若手研究者の発表に奨励賞(3名程度)が授与され、道内の金属・鉄鋼工学に携わる研究者は元より、若手にとって大変有意義且つ貴重な成果発表と議論の場となっています。この支部講演大会での経験と実績を活かし、春期及び夏期の全国講演大会や専門分野の国際会議などに参加するケースが一般的で、支部講演大会を若手研究者の登竜門と考えている指導者も少なくないと思います。

本支部会は、この北海道の大地で将来ある若者が大らかに逞しく育ち、道内外・国内外の学術研究機関で優秀な研究者として活躍することを願いながら、日々教育・研究に励んでおります。また、同時に、日本全国・世界各地から北海道を訪れ、共に学術研究に取り組む研究者を心より歓迎いたします。

(2021年8月4日受理)[doi:10.2320/materia.60.655]



図1 北海道支部構成団体のロゴマーク。(オンラインカラー)

* 北海道大学大学院工学研究院材料科学部門；教授

支部だより

日本金属学会関東支部の近況報告

関東支部 支部長 森 田 一 樹*

このたび、まてりあ60巻記念企画として支部活動について寄稿させていただくこととなりました。関東支部の生誕は1960年6月と、まてりあ(日本金属学会会報)よりもやや先輩に当たります。これまで関東地区の会員を主たる対象として、講習会、本多記念講演会、本多記念セミナー、見学会、ヤングメタラジスト研究交流会等の活動を行っており、伊藤公久(早大)前支部長の体制に引き続き、2021年度より森田支部長、阿部副支部長ほか16名の運営委員により企画を進めております。2020年度の活動はコロナ禍のため、オンラインによるヤングメタラジスト研究交流会のみに止まりましたが、今年度開催予定の同研究交流会と講習会について、さらに2019年度に行われた見学会の様子を以下に紹介させていただきます。

ヤングメタラジスト研究交流会は、関東支部内の大学、研究機関、企業に所属する若手研究者および学生の交流を目的として2004年に開始して以来、今年で18回目の開催を迎えることとなりました。本交流会は大学と企業(主に鉄鋼メーカー、重工メーカー)が持ち回りで開催しており、例年、30～60名に参加いただいております。交流会の内容は年度によって推移してきましたが、近年の主なプログラムは、気鋭の若手研究者による講演(3～4件程度)および学生を対象としたポスターセッションの2部構成です。ポスターセッションでは活発に討議が行われ、優秀な発表を行った学生にはポスター賞を授与してきました。企業の施設をお借りして開催した際には、上記に加えて事業所の見学会も企画していただき、大学に所属する研究者・学生にとって工業製品の生産現場を目にする貴重な機会となってきました(図1)。

この交流会を昨年度(図2)に引き続き、今年度もオンラインにより10月6日(水)に開催させていただきます。今回は、オンライン開催の持ち味を活かし、小規模な討論・談話のスペースを設けて「交流」の色合いを濃くする方針です。具体的には、講演者との個別交流会および企業主催の座談会を企画しております。全体の質疑応答では拾えない個別の討論や、産学の研究者間でのフランクなコミュニケーションを活性化することが狙いです。対面での集会在制限されている現状において、本会を若手研究者の貴重な交流の機会として積極的に活用していただければ幸いです。

また、同支部では、1970年度「機械技術者のための金属材料—損傷の防止対策と原因究明の手法—」の第1回を皮切りに、1日集中型の講習会を毎年企画実施してまいりました。



図1 2019年度ヤングメタラジスト研究交流会で行われた事業所見学会の参加者の集合写真(於：JFE スチール(株) 東日本製鉄所 京浜地区)。(オンラインカラー)

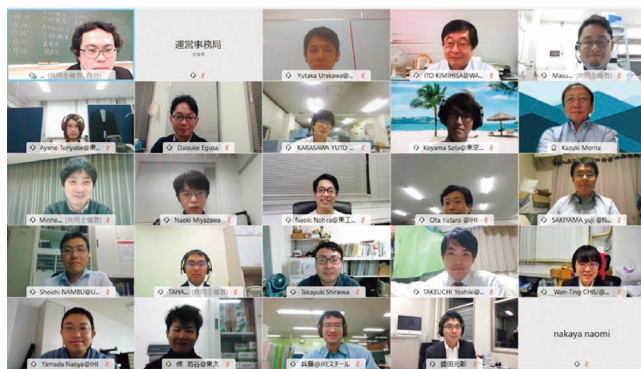


図2 2020年度ヤングメタラジスト研究交流会参加者の集合写真(於：オンライン)。(オンラインカラー)

た。講習会の内容は、「高強度金属材料の機能発現機構—転位論の基礎から材料強度化まで—(2019年度)」、「材料データベースの最前線—何がどこにどれだけあるの?—(2018年度)」、「金属材料強度試験法—より信頼されるデータとは—(2017年度)」など、魅力的なテーマを設定し、基礎から応用、そして最新の技術動向に至る講義を5件程度まとめた形式です。毎回、大学院生を中心とする学生会員、企業の若手技術者等、40名程度の参加者を集めて開催され、講師の先生方の素晴らしい講義内容もあり、それぞれのテーマ内容を短期集中的に学ぶことができる貴重な機会を提供してまいりました。

しかしながら、昨年来のコロナウイルス蔓延の状況において、今年度から講習会の開催方式を大幅に改定することを決定いたしました。リモート環境を積極的に活用し、1日1講

* 東京大学 大学院工学系研究科; 教授



図3 2019年度の工場見学会参加者の集合写真(於：JR 東日本 大宮総合車両センター)。(オンラインカラー)

義ずつ開催するイブニングセミナー形式への変更です。今年度は「水素社会と金属材料の関係」をテーマとして、5回の講義を開催することを予定しております。10月末から11月までの金曜日の夕方(各回17:30-)に1講義ずつ実施することとし、各講義は、録画、保存することで、オンデマンド環境での受講も可能な体制を整備いたします。ただし、オンデマンド形式での受講では質疑応答に参加することはできません。また、この取り組みを継続することで、貴重な講義データのアーカイブを残すことも企画しております。受講申し込みもこれまでのように、シリーズ全部の一括の申し込みだけでなく、講義ごとに受講申し込みが可能な体制に変更し、会員の皆様により受講しやすい環境を提供する予定です。また、リモートでの受講環境とすることで、関東支部の会員用の事業を日本金属学会の全会員向けの事業に発展させて参ります。

一方、当支部では支部会員を対象に見学会を実施しております。図3および図4は2019年10月に東日本旅客鉄道㈱(JR 東日本)の大宮総合車両センターを見学した際のもので、学生、社会人を含む15名ほどの参加がありました。普段はなかなか立ち入ることの出来ない、実際の車両の補修の現場を巡る貴重な機会をいただきました。見学後には活発な質疑応答も行われ、実際の車両設計に必要な金属材料特性に踏み込んだ(マニアックな?)議論にまで展開し、大型輸送機では単に軽くて強い材料だけが求められるわけでは無いことを改めて認識することとなりました。



図4 2019年度の工場見学会の様子(於：JR 東日本 大宮総合車両センター)。(オンラインカラー)

見学会の企画に際しては、産官学にわたる学会員の皆様のご尽力を通して実現されております。広範な分野で活躍される会員の皆様方のご協力の下、コロナ禍が明けた折には今後も見学会を続けて参りたいと思います。

以上のように、現在の感染状況ではそれぞれの活動にはまだまだ大きな制約を伴いますが、コロナ禍により生み出された“どこでも参加”スタイルを鋭意ご活用いただき、関東地区に限らず、全国の日本金属学会会員の皆様方の積極的なご参加をお待ちいたしております。

最後になりましたが、本稿の執筆に当たり、ヤングメタラジスト研究交流会、講習会、見学会について、それぞれ纏めて下さいました増田紘士 助教(東京大学)、中尾 航 教授(横浜国立大学)、阿部英司 教授(東京大学)に感謝の意を表します。

(2021年8月3日受理)[doi:10.2320/materia.60.656]

支部だより

日本金属学会北陸信越支部の活動概要

北陸信越支部 第27代支部長 松田 健二* 第17代支部長 池野 進**

北陸信越支部は、長野、新潟、富山、石川、福井の5県の会員で構成されている。「支部連合講演会」、「本多光太郎記念特別講演会」、および「湯川記念講演会(日本鉄鋼協会北陸信越支部主催、日本金属学会北陸信越支部共催)」は支部全体を対象とする事業であるが、密接な交流を企図して、地区(県)単位での活動を重視している。「材料セミナー」(長野地区)、「たたら製鉄実演」と「学術講演会」(新潟地区)、「材料研究会」と「特別講演会」(富山地区)、「特別講演会」(石川地区)、「材料フォーラム」(福井地区)などの事業をそれぞれ年に2回以上開催している。地区事業はそれぞれの地域の実情に応じて、日本鉄鋼協会北陸信越支部のほか、軽金属学会北陸支部、眼鏡素材研究部会、各県の公設試験研究機関などとの共催で行っている。また、「支部連合講演会」で優れた研究発表を行った学生を表彰する「学生表彰」事業を実施しているほか、長年支部活動を支えてくださった方に「支部功績賞」を贈り、顕彰している。

1. 北陸信越支部概要

設立 1947年7月5日

所属地域 長野県、新潟県、富山県、石川県、福井県

支部事務所(2021年8月現在)

〒930-8555 富山市五福3190

富山大学学術研究部 材料デザイン工学科内

材料組織制御工学講座

Tel/Fax 076-445-6841(担当:松田,李,土屋)

(※2013年度以前は、日本金属学会75周年史(付録CD)54(2015), 264~266.⁽¹⁾参照.)

2. 歴代支部長

代	時期	氏名	所属
第25代	2015年~	小口 昌弘	TPR(株)
第26代	2016年~	門前 亮一	金沢大学
第27代	2017年~	松田 健二	富山大学
第28代	2018年~	佐藤 一則	長岡技術科学大学
第29代	2019年~	福元 謙一	福井大学
第30代	2020年~	柳 和彦	信州大学
第31代	2021年~	岸 陽一	金沢工業大学

3. 日本金属学会、日本鉄鋼協会 全国大会実施実績

2013年 第153回大会 金沢大学

* 富山大学 学術研究部都市デザイン学系;教授

** 富山大学 都市デザイン学部・工学部;シニアアドバイザー(名誉教授)

2020年 第167回大会 富山大学(2023年に延期)

4. 支部講演会および講習会、見学会((一社)日本鉄鋼協会北陸信越支部および他学協会との共催を含む)

- ・特別講演会(石川地区、新潟地区)
- ・講習会;たたら製鉄実演(新潟地区)

5. 支部研究会および見学会

- ・材料研究会(富山地区)
- ・材料フォーラム(福井地区)
- ・材料セミナー(長野地区)

6. 支部連合講演会

2014年12月6日 新潟工科大学
 2015年12月5日 富山大学
 2016年12月3日 金沢大学
 2017年12月2日 福井大学
 2018年12月1日 信州大学
 2019年11月30日 新潟大学
 2020年12月5日 富山大学(概要集で開催)
 2021年12月4日 富山大学(予定)

7. 本多光太郎記念講演会

本多光太郎記念講演会((公財)本多記念会共催)1988年度から開催

2014年12月6日 新潟工科大学
 「材料の熱力学物性の電子論計算と状態図計算への応用」
 大谷博司(東北大学)

2015年12月5日 富山大学
 「金属材料における新たな展開 ―アモルファスからナノマテリアルへ―」
 増本 健(公益財団法人電磁材料研究所)

2016年12月3日 金沢大学
 「バルクナノメタルの興味深い力学特性 強さとねばさの両立に向けて」 辻 伸泰(京都大学)

2017年12月2日 福井大学
 「次世代原子力材料 FeCrAl-ODS 鋼の開発 ―事故耐性燃料被覆管―」 木村晃彦(京都大学)

2018年12月1日 信州大学
 「マルテンサイト変態、拡散変態ならびに一次の磁気転移に及ぼす外場(強磁場、高圧力)の影響とその電子論的解釈」

掛下知行(日本金属学会フェロー, 福井工業大学学長,
大阪大学名誉教授)

2019年11月30日 新潟大学

「力学的生体適合性に着目した骨代替インプラント構成
材料」

新家光雄(日本金属学会フェロー, 名城大学特任教授,
大阪大学特任教授, 関西大学特任教授, 東北
大学名誉教授)

2020年12月5日 本多光太郎記念講演会, 開催なし

2021年12月4日 富山大学(予定)

美濃輪武久(信越化学工業)

8. 支部表彰

① 支部功績賞表彰

2017年度	瀬尾省逸	大平洋製鋼㈱
2018年度	森 克徳	富山大学
2019年度	清水謙一	大阪大学名誉教授, 金沢工業大学教授
2020年度	藤田達生	㈱リケン
2011年度	唐木道雄	㈱不二越
2018年度	滝澤秀一	長野県工業技術総合センター
2019年度	安丸尚樹	福井工業高等専門学校
2021年度	喜多和彦	YKK㈱
	山本有一	大平洋製鋼㈱

② 優秀学生表彰(小田仲彬賞)

2013年度	河井竜太郎(金沢大), 保志雄平(長岡技科大), 杉森太一(富山大), 佐藤誉将(富山大), 竹下哲史(金沢大)
2014年度	牧野慎司(長岡技科大), 根本健史(長岡技科大), 池谷拓哉(富山大), 洞田直人(富山大), 新川敬之(富山大)
2015年度	松本拓也(長岡技科大), 海藤雅裕(富山大), 河合健汰(富山大), 梅田雪磨(信州大), 谷野 光(信州大)
2016年度	霜上裕輔(金沢大), 山西由和(富山大), 広田逸彦(長岡高専), 三津島浩平(金沢大), 灰塚裕平(富山大)
2017年度	平木智也(富山大), 梶谷恭平(富山大), 小林拓也(金沢工大), 板谷剛嗣(長岡技科大), 飯島正彦(富山大)
2018年度	中野晴秋(金沢大), 松本真輝(富山大), 佐藤文哉(長岡技科大), 細矢駿行(富山大), 元女陽介(長岡技科大)
2019年度	前田朋克(富山大), 藤野俊也(富山大), 中瀧佳央(金沢大), 山田朋英(長岡技科大), 川越大典(長岡技科大)
2020年度	三浦柊一郎(福井大), 山崎隼輔(金沢大), 梅垣真理(信州大), 脇山 響(長岡技科大), 櫻井亨彦(富山大)

文 献

- (1) 日本金属学会75周年史(付録 CD)54(2015), 264~266.
(2021年8月3日受理)[doi:10.2320/materia.60.658]



(a)連合講演会風景

(b)優秀学生表彰

(c)交流懇親会

図1 支部活動の様子(2019年11月30日, 長岡技科大にて)。(オンラインカラー)

支部だより

日本金属学会東海支部の活動紹介

東海支部 支部長 野村 一 衛*

日本金属学会が創設された1937年の5年後の1942年に、東海支部は設立されました。東海支部の所轄する岐阜県、静岡県、愛知県、三重県は日本有数の製造業の集積地となっており、全製造業の製造品出荷額においては国内全体の約25%、自動車などの輸送用機械の出荷額においては同約50%を各々占め、非常に高いシェアを誇っています。そして、これらの産業を支える素材産業として、鉄鋼業、非鉄金属業も盛んとなっています。このような地域特性を反映して、東海支部は設立当初から学术界と産業界とが強く連携して活動を進めてきております。その一例として、東海支部では大学と企業から交互に支部長が選出されています。

東海支部の活動ですが、昨年度についてはコロナ禍の影響により活動の多くが停滞し、今年度も不透明な状況が続いています。コロナ禍がいち早く終息することを願うばかりです。ここでは、例年の主な活動について紹介させていただきます。

東海支部の活動は、東海地方の企業の協力の下に(一社)日本鉄鋼協会東海支部との共催で行われており、大きくは講演会、支部研究会、支部主催見学会および支部表彰の4つから成っています。

講演会としては、最新のテーマを選んで「特別講演会」を年2回開催しています。それらに加えて、金属学など学術的に著名な研究者に講演いただく「本多光太郎記念講演会」、および主に企業に所属される著名な技術者、研究者に講演いただく「湯川記念特別講演会」を毎年開催しています。

支部研究会としては、東海支部独自の活動として始めた「学生による材料フォーラム」を開催しています。このフォーラムは、学生が日頃の研究成果をポスター発表し、十二分に議論する場です。一方、高度なテーマについて専門家による議論を重視する場として、「学術討論会」を開催しています。他には、「金属材料談話会」および「材料プロセッシング談話会」が不定期で開催され、国内外の研究者によるホットな情報を地区の研究者・技術者に提供しています。さらに、企業技術者間の交流を図る活動として、「技術交流フォーラム」が実施されています。また、大学および企業の若手中心の研究会である「若手材料研究会」と「若手冶金エンジニア研究会」が活発な活動を展開しています。

支部主催見学会については、将来の材料研究を担う次世代層を意識した「次世代層ものづくり教育」を2008年からス



図1 平成30年度 中高生のための次世代もの作り教室「鉄道車両を支える材料と技術」見学会風景(日本車両製造株式会社 豊川製作所にて)。(オンラインカラー)

タートしました。これは中学生・高校生を対象とした啓発活動であり、金属材料を初歩的に理解いただき、見学会を通じて社会における金属材料の有用性を体感することを狙いとしています(図1)。

支部での表彰としては、「学生による材料フォーラム」での「優秀ポスター賞」、支部活動への功績を労う「支部功績賞」、顕著な研究実績に対する「優秀学生表彰」などがあります。

今後の支部活動の展望ですが、これまで述べましたように、学术界と産業界との強い連携が東海支部の特長の一つと考えています。この東海地方は自動車産業や航空機産業の中心地であり、これまでの発展に金属材料の研究は極めて大きな貢献をしてきました。そして、これら産業の今後の飛躍に対しても、金属材料の研究はますます重要になってくると思います。CASE(Connected, Autonomous, Shared, Electric)と言われる自動車の100年に一度の変革、カーボンニュートラルに向けた新技術開発など、研究すべき対象材料、達成すべき材料特性はますます多様化し、高度化を極めていきます。

日本金属学会東海支部が、より良き未来社会に向けた金属材料の研究促進の一助を担えるよう、これからも会員の皆様と共に活動を推進していきたいと思ひます。

(2021年8月4日受理)[doi:10.2320/materia.60.660]

* 愛知製鋼株式会社；経営役員

支部だより

日本金属学会関西支部の活動

関西支部 支部長 田 中 功* 関西支部 事務局 八尾 秀樹**

関西支部は滋賀，京都，大阪，兵庫，奈良，和歌山の6府県を所管地域として1941年5月に設立され，伝統と進取の気風に富む地域性を生かした活動を行っている．現在は一般財団法人大阪科学技術センターニューマテリアルセンター内に事務局を置き，基本的に全ての事業を一般社団法人日本鉄鋼協会関西支部と共同して行っている．支部会議と支部委員会において，予算・決算の審議や事業企画，支部推薦の検討などを行っている．図1は支部委員会の様子である．

関西支部では例年，産学から講師を招いて，本多光太郎記念講演会，湯川記念講演会，支部講演会を開催し，会員の関心が高いテーマについて講演を頂いている．一例として，支部講演会では2019年2月は児玉憲治様(リガク)に「ファンダメンタルパラメータ法を用いた波長分散型蛍光X線分析装置の最近の進歩」，2018年2月は小溝裕一様(高輝度光科学研究センター/大阪大学)に「Spring-8の産業利用」について講演いただいた．また，関係者の多大なるご支援とご協力の下，関西地区の研究機関や企業の現場の見学会を実施している．これらの講演会や見学会の際に，会員の交流や情報交換の場として，交流会や懇親会を開催している．しかし，残念ながら，新型コロナ感染防止の観点から，2020年度はこれらの行事の実地開催は全て中止せざるを得なかった．2021年度も同様の懸念がある．

関西支部独自の取り組みとして，材料セミナーの開催がある．産学の委員から構成されるセミナー事業運営委員会において，会員の要望の多いテーマを3件程度採り上げて企画している．過去10年の内容は，表1に示したとおりである．2020年度と2021年度はコロナ禍の下，WEB上での開催となった．電子顕微鏡や計算機シミュレーションなどの実地講習ができなかったのは残念であったが，座学については出張の必要がなくなり参加しやすくなったという意見があり，実際に参加者数は増加した．ポストコロナ時代では，WEB開催を上手に採り入れ，他支部や他学協会との共同開催を積極的に進めることも一案となろう．

さらに関西支部では，材料物性工学談話会，鉄鋼プロセス研究会，マテリアルデザイン研究会，関西分析研究会，材料化学研究会の5つの研究会がそれぞれ年に数回の研究会・見学会を実施して，会員の相互啓発に努めている．また，学生を中心とした若手のポスター発表会を併催し，優秀な発表に対する表彰を行っている．



図1 支部委員会風景 (2017年10月，当時の新日鐵住金㈱和歌山製鉄所にて)．(オンラインカラー)

表1 関西支部材料セミナーの内容．

年度	テーマ
2021	①技術者のための鉄鋼材料入門
	②放射光による組織観察・分析の基礎と応用
	③材料科学におけるマテリアルズ・インフォマティクスの最近の発展
2020	①技術者のための鉄鋼材料入門
	②電子顕微鏡による組織観察・分析の基礎と応用
	③材料系のための第一原理マテリアルデザイン入門
2019	①電子顕微鏡による組織観察・分析の基礎と応用
	②材料系のための第一原理マテリアルデザイン入門
	③技術者のための鉄鋼材料入門
2018	①電子顕微鏡による組織観察・分析の基礎と応用
	②技術者のための鉄鋼材料入門
	③材料系のための第一原理マテリアルデザイン入門
2017	①金属材料の腐食損傷の基礎とその評価
	②技術者のための鉄鋼材料入門
2016	①技術者のための鉄鋼材料入門
	②金属材料の腐食損傷の基礎とその評価
	③透過型電子顕微鏡(TEM)による微細組織解析の基礎と応用
2015	①金属材料の腐食損傷の基礎とその評価
	②入門講座：鉄鋼材料の組織と力学特性
2014	①技術者のための鉄鋼材料入門
	②金属材料の腐食損傷の基礎とその評価
	③材料における拡散-基礎および鉄鋼材料における拡散と関連現象
2013	①技術者のための鉄鋼材料入門
	②科学技術者・研究者のためのEBSDによる方位解析技術の基礎と応用
	③透過型電子顕微鏡(TEM)による解析技術の基礎と応用
2012	①技術者のための鉄鋼材料入門
	②科学技術者・研究者のためのEBSDによる方位解析技術の基礎と応用
	③透過型電子顕微鏡(TEM)による解析技術の基礎と応用

(2021年7月30日受理) [doi:10.2320/materia.60.661]

* 京都大学大学院工学研究科；教授 ** 一般財団法人大阪科学技術センターニューマテリアルセンター

支部だより

日本金属学会中国四国支部だより

中国四国支部 第19代支部長 佐々木 元*

日本金属学会中国四国支部は、初代支部長である故・藤原武夫広島大学名誉教授の下、1957年10月10日に設立され、今年で64周年となる。本支部は、鳥取県、島根県、岡山県、広島県、山口県、香川県、徳島県、愛媛県、高知県のいわゆる山陰、山陽、四国地区から構成された広範囲な地区であり、会員も各地区に広く分布している。そのため、移動は大変であり、支部活動の運営もこの距離感をどのように縮めるかが長年の課題である。また、日本金属学会のみでは母体が小さいため、日本鉄鋼協会中国四国支部とはほぼ一体で運営している。更に、軽金属学会中国四国支部とも行事を共催化するなどして、共栄を図っている。現在は広島大学 松木一弘教授を25代支部長とし、各地区から選出された8名の幹事(4名の鉄鋼協会幹事を含む)とともに運営している。その他、支部役員として、支部長の補佐、支部の会務を処理する支部委員(10~20名)、支部会と支部内の各団体との連絡を担う支部地区代表(10~20名)、支部に助言・意見を行う支部顧問があり、支部の活性化のために様々な活動を担っている。支部最大の行事は、例年、日本鉄鋼協会と共同で毎年一回、夏に開催される支部講演会と3月に開催される支部総会である。支部講演会は各県の持ち回りで開催されており、今年は第61回(鉄鋼協会としては第64回)の大会として、オンライン開催ではあるが、山口東京理科大学が当番校となり、8月24日に開催された。61件の一般講演が3会場に分かれてオーラル形式で実施されたほか、本多光太郎記念講演として、富山大学の松田健二先生に「時効硬化型アルミニウム合金の時効析出研究~さらなる高強度化を目指して~」の題目で講演いただいた。コロナ禍以前は毎回60件以上の発表、100名を超える参加があったが、今回はオンライン化のためもあるか、発表件数は若干低下した。支部講演会では毎回、学生を対象に優秀講演発表を選定して3~4件を表彰し、学生の研究の励みとしてもらっている。また、支部における研究調査活動として、材質制御研究会、金属物性研究会、若手フォーラムを、それぞれ年に3、4件程度定期的に行っている(図1・2)。これらの研究会は、支部組織である研究部会が中心となって企画、運営を行っている。中でも、1960年代中頃から活動をしている金属物性研究会は金属材料の基礎的、学術的研究を対象としており、昨年末で136回の開催を数える。材質制御研究会は実用材料や材料加工プロセスの開発研究を対象としており、現在まで70回開催している。また、若手フォーラムは企業や大学の若手研究者や学



図1 第22回若手フォーラムでの本多記念講演会の様子、講師は岡山理科大学 金谷輝人教授(現名誉教授)。(2011年2月23日、於岡山国際交流センター)。(オンラインカラー)

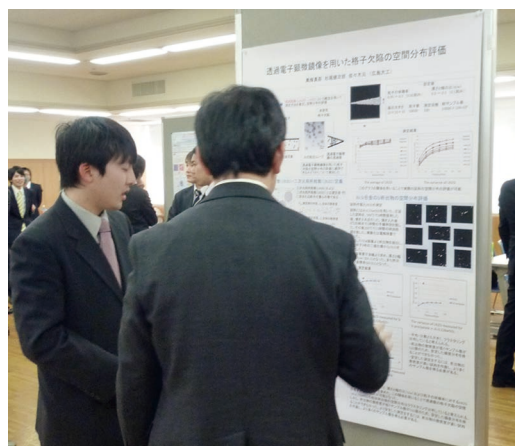


図2 第22回若手フォーラムでのポスターセッションの様子(2011年2月23日、於岡山国際交流センター)。(オンラインカラー)

生(大学院生、大学生、高専生、高校生等)の発表の機会として設定しており、現在まで47回開催している。これらの研究会は、山陰、山陽、四国地区でなるべく均等に開催されるよう配慮されている。中国四国地域では材料系学科に加え、機械系学科の大学や高専の教員、学生の活動が多く、また、鉄鋼や非鉄金属、自動車産業等の製造業も盛んであるため、学術的な視点のみならず、実用化に即した研究開発、材料加工などの実務的な研究開発が盛んに行われており、支部活動の支えとなっている。そのため、本部の活動とは少し方向性が異なると感じる。ただ、日本金属学会の発展には支部活動の活性化が重要であり、支部として常に新たな活動を展開していきたいと考えている。

* 広島大学大学院先進理工系科学研究科；教授

支部だより

「まてりあ」60巻を祝して

—日本金属学会九州支部の活動を顧みて—

九州支部 第22代支部長 東 田 賢 二*

日本金属学会会報「まてりあ」60巻、おめでとうございます。1937年、日本金属学会創設と共に発刊された日本金属学会誌、そして1960年に創刊された Transactions of the Japan Institute of Metals (現 Materials Transactions)に続き、1962年に本会三番目の定期刊行物として発刊された当会報が60巻という記念の区切りを迎えることになりましたこと、衷心よりお慶び申し上げます。また、当会報のためにこれまでご尽力されて来られた多くの皆様方に深く敬意を表します。

当会報の創刊時の会長であられた大日方一司先生は、「日本金属学会会報発刊の辞」の中で、その発刊について「本会創立当時からみまると大きな発展であります、このことはわが国金属関係の科学、技術の進展に即応する必然の企画であるといえましょう」と述べておられます⁽¹⁾。日本金属学会誌が学術論文に統一される一方で、解説や総説、技術資料、学会活動ほか多岐にわたる情報提供を担う会報の役割は極めて重要なものであるといえます。

さて、日本金属学会九州支部は1942年に、今井弘先生(九州帝国大学教授)を初代支部長としてスタートしました(九大冶金学科は1911年設置)。そして、現支部長(第25代)の中島邦彦先生(九州大学教授)に至るまで、九州地区の研究者・技術者の皆様のご協力・ご支援の下、旺盛な活動を続けて来ました。その主なものをご紹介しますと、以下のようです。

まず、日本金属学会、日本鉄鋼協会、軽金属学会各九州支部の合同学術講演会が、毎年6月に開かれています。その開催は、九州大学、九州工業大学、熊本大学が順番に世話役を担当し、毎回200名を超える参加者と共に、シンポジウム講演、一般講演、英語講演、ポスターセッションが行われています(図1参照)。そこでは学生を対象にした口頭発表賞、ポスター賞も授与されます。このような講演大会は、九州地区の大学、高専や企業における研究活動の情報をお互いに共有する場となると共に、特に学生諸君にとっては、自らの研究を他の研究者や技術者に聴いてもらうことを通してその面白さを体感し、大きく成長するきっかけを得る重要な役目を果たしているように思われます。さらに、全国大会に向けて意欲を高める大切な機会ともなっています。

また、毎年3月と10月には、日本鉄鋼協会との合同で春



図1 合同学術講演会でのポスターセッション(2018.6, 北九州国際会議場)。(オンラインカラー)

季講演会、秋季講演会が開催されます。日本製鉄八幡製鉄所、同大分製鉄所、九工大、熊大、長崎大学、鹿児島大学、九大などが持ち回りで世話役を担当しています。その中で、春季は湯川記念講演会(鉄鋼協会九州支部担当)、秋季は湯川記念講演会と本多記念講演会(日本金属学会九州支部担当)が行われます。また、それと合わせて、特定のテーマの下に講演討論会が企画され、複数の講演と共に熱心な討論が展開されています。例えば2019年の春季講演会では「先端の実験と数理解析による材料研究の新たな展開」、同年の秋季講演会では「安心・安全に関する高機能鋼板」など基礎から応用に至る多様なテーマが取り上げられています。

以上のような催しに加えて、「材料科学談話会」そして「材料プロセス談話会」と呼ばれる研究会が不定期に、日本鉄鋼協会九州支部との共催で年に複数回開催されています。そこでは海外からの訪問者を含め多彩なゲストスピーカーを迎えて、盛んな議論が展開されています。

COVID-19の影響を受けて令和2年度の九州支部の活動はほとんど中止されてしまいましたが、令和3年度においては、6月11日に合同学術講演会(一般講演、英語講演、ポスターセッション)がオンラインで無事開催され、例年並みの多くの参加者を得て、活発な議論が展開されました。さらに、秋季講演会も10月25日にオンラインで開催予定であり、支部活動も多くがネット経由ではありますが、確実に回復しつつあります。

日本金属学会初代会長であり「鉄の神様」と言われた本多光太郎先生は、日本金属学会誌の創刊号冒頭の「創刊の辞」において、日本金属学会と日本鉄鋼協会について「両学会は車の両輪の如き関係を有し何れの一つを欠くことも出来な

* 九州大学 鉄鋼リサーチセンター；特任教授(九州大学名誉教授)

い」との言葉を残しておられます⁽²⁾。学問や研究は自由であり、一切の垣根は有りません。時代の流行を徒らに追わず、その一方で真に革新的なものに対しては鋭敏な嗅覚をもって、産と学とが、そして今日の材料系の学会すべてがその境界を越えて真剣勝負の議論を展開して行くことが極めて重要と考えます。その中で日本金属学会、そしてその会報「まてりあ」が中核的な役割を果たして行くことを心より願って止みません。

文 献

- (1) 大日方一司：日本金属学会会報，**1**(1962)，1-2.
- (2) 本多光太郎：日本金属学会誌，**1**(1937)，1-2.
(2021年 8 月 5 日受理)[doi:10.2320/materia.60.663]



男女共同参画委員会の15年と現在 そしてこれから

男女共同参画委員会委員長 三 浦 永 理*

まてりあ60巻発刊とのこと、おめでとうございます。その記念ということで、日本金属学会・日本鉄鋼協会男女共同参画委員会も本誌60巻7号に引き続き⁽¹⁾、再び委員会だよりに掲載の機会を頂きました。

さて、60巻7号の委員会だよりでもご案内致しました通り、2007年に発足の本委員会は2022年で15周年を迎えます。

本委員会のこれまでの歩みは、初期から本学会の男女共同参画活動に携わってこられた日本金属学会の元副会長の御手洗容子氏(東京大学)の記事⁽²⁾に詳しく書かれています。さわりを紹介しますと、本委員会の前身となる男女共同参画活動のためのワーキンググループ(WG)が2003年から始動し(初代委員長：黒田光太郎氏(当時名古屋大学))、啓発活動を目的とするシンポジウム開催や講演大会会期中の託児室の設置、男女共同参画学協会連絡会へのオブザーバー参加等が始まりました。その後、2007年に日本鉄鋼協会との合同にて本委員会を設置することとなり、これまでのWGの活動を引き継ぐと共に、「ランチョンミーティング」や「女性会員のつどい」の大会会期中の開催、また、女子中高生の理系進学を後押しする活動として、関東地区開催の「夏の学校」への参加、関西地区では「関西科学塾」に協力団体としての参加等の活動を行っています。2009年には委員会のロゴマークを策定し(図1)、講演会ははじめイベントの際に使用しています。

私自身は2011年から委員を拝命し、委員会の末席を汚しておりますが、最も思い出深いのは2017年の委員会10周年記念シンポジウムです。北海道大学工学部棟オープンホールにて、秋期講演大会の会期終了翌日9月9日(土)に開催されました(図2、3)。講師の依頼やチラシ作成から広報展開、当日の受付など、何ヶ月もかけて委員と学会事務局で準備を重ね、当日を迎えました。講演内容の詳細については当時の委員長の梅津理恵氏(東北大学)の報告⁽³⁾をご覧くださいと思いますが、「もっと広報を頑張れば良かった」と反省の弁が出るほどに、どの講演も素晴らしく、正副委員長と幹事委員、学会事務局、大会実行委員の皆様のご慧眼とご尽力に頭が下がる思いだったのを記憶しています。それから5年、来年は委員会設立15周年を記念してミニシンポジウムを企画しております。皆様是非ご参加下さい。



図1 本委員会のロゴマーク(山崎壮氏デザイン)。(オンラインカラー)



図2 男女共同参画委員会10周年記念シンポジウムの準備中の様子。(2017年9月9日、北海道大学)(オンラインカラー)



図3 同上。男女共同参画委員会10周年記念シンポジウム講演中の様子。(同上)(オンラインカラー)

工学系学術団体の日本金属学会で男女共同参画やダイバーシティに取り組む必要性について、一つデータを示します。

図4は、2017年の学会員の世代別会員比率です。左端の世代比率を見ると、50代がボリュームゾーン、40代がそれに

* 兵庫県立大学大学院工学研究科

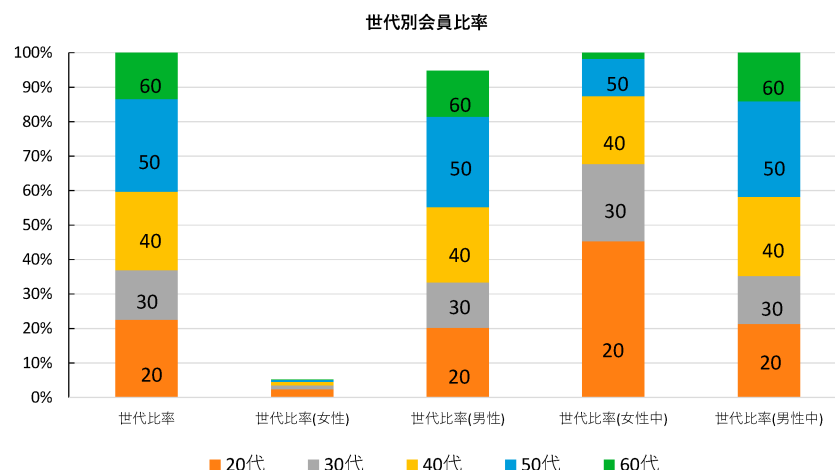


図4 金属学会の世代別会員比率(2017年). 左から; 全会員の世代比率, 全会員中女性会員の比率と各世代比率, 全会員中男性会員の比率と各世代比率, 女性会員のみの世代比率, 男性会員のみの世代比率. (オンラインカラー)

続きます。20代は40代と同程度ですが、約8割が学生会員です。左から2番目の極端に低い棒グラフは全会員に占める女性会員の比率で、5.2%でした。右側の2つ、男女別の世代比率をみると、女性のみの世代比率は男性のそれとは対称的に20代が多いのですが、これは30代以上、つまり正員の女性会員数が少ないためです。すなわち、このまま推移しますと、世代交代に伴い、会員数は減少の一途をたどります。男女問わず、若い世代も魅力を感じる分野であり学会であることが重要です。2017年の女性会員の割合は、学生会員が10.5%、正員は4%、2020年はそれぞれ12%と5%でした。

2015年に国連で採択されたSDGs(持続可能な開発目標)の一つに、「ジェンダー平等」があります。今、世界の潮流は、様々な歪さを抱えながらもLGBTQ(性的少数者)を含むジェンダー平等、そしてダイバーシティ & インクルージョン(D&I)へと視座を上げつつあります。ジェンダーギャップ指数120位の日本でも、東京オリンピックおよびパラリンピック開催を機に、ジェンダー平等やD&Iの機運がようやく高

まりつつあります。近い将来、両学会での男女共同参画やダイバーシティが当たり前になり、本委員会がその役目を終える日が来るのを心待ちにしています。

最後にもう一つ、「女性会員のつどい」に関し、2019年の岡山大学での秋期大会では、「女性会員のつどい」にて、猿橋賞を受賞された梅津理恵氏のお祝いの会がありました⁽⁴⁾。その後はCOVID-19の流行のため、3期続けてやむなく中止となりましたが、2021年秋期講演大会では、大会期間中の9月17日(金)に、皆様のご理解とご協力の下、オンライン形式ながら4期ぶりの開催に至りました。

文 献

- (1) 三浦永理: まてりあ, **60**(2021), 439-440.
- (2) 御手洗容子: まてりあ, **56**(2017), 116-120.
- (3) 梅津理恵: まてりあ, **56**(2017), 711.
- (4) 松岡由貴: まてりあ, **58**(2019), 524.

(2021年8月3日受理)[doi:10.2320/materia.60.665]

スポットライト

～第5回「高校生・高専学生ポスター発表」優秀賞～

アルミニウム缶を原料とした人工宝石の合成

福島県立福島高等学校

廣居桜子 三澤春果 溝井敬大

ルビーは高い硬度と抗切削性から工業的需要が高い一方で産出量が少ないという問題があります。ルビーは酸化アルミニウムの結晶に1質量%程のクロム(Ⅲ)イオンが入ることで生成します。私たちはルビーの主な構成元素がアルミニウムであることに着目して、アルミニウム缶からルビーを合成することができると考えました。前年度、フラックス法⁽¹⁾と、ペルスーイ法⁽²⁾の原理を利用してルビーの合成を試みましたが、どちらも、アルミニウム缶を原料とした酸化アルミニウムからルビーの合成は確認出来ませんでした。しかし、純粋な酸化アルミニウムでは、ペルスーイ法を用いて合成できませんでした。そこで、ルビー合成失敗の原因がアルミニウム缶に含まれる不純物であると考え、研究を進めました。

本研究で使用したアルミニウム缶の胴部分にはアルミニウム-マンガン合金が使われています。アルミニウム-マンガン合金に含まれる不純物の中で割合が高く、比較的取り除きやすい鉄に着目し、その除去を試みました。塗装を削ったアルミニウム缶に水酸化ナトリウム水溶液を加え、アルミニウム缶に含まれるアルミニウムを完全に溶解させました。しかし、その溶液は濁っていたため、溶液を濾別し、その残渣を塩酸に溶かして、ヘキサシアニド鉄(Ⅱ)酸カリウム水溶液とチオシアン酸カリウム水溶液をそれぞれ加えたところ、鉄(Ⅲ)イオン特有の反応が確認できたため、残渣の主体が水酸

化鉄(Ⅲ)であると考えました(図1)。一度の濾別ではまだ溶液に濁りが見られたため、溶液に対して濾別と試薬を用いた鉄成分の確認を繰り返し行いました。5回目の濾別による残渣において、試薬を用いても全く呈色しなかったことから、5回の濾別により、溶液から鉄成分を取り除く事ができたと考えました。以上の操作により、鉄成分を除去したアルミニウム溶液を作製することができ、これを硝酸に溶解後、アンモニア水を用いて沈殿させ、空气中で乾燥することでアルミニウム缶を原料とした酸化アルミニウムを得ました。

次に、電子レンジでのアーク放電の発生条件を特定するために市販の酸化アルミニウムを用いて確認しました。酸化アルミニウムと酸化クロム(Ⅲ)を100:1の質量比で混合し、アルミニウム箔に包んで先端をねじりました。これを、電子レンジの中に立てて加熱しました。私たちが使用している電子レンジでは、手前から10 cm、左端から5 cmの位置で、酸化アルミニウムを包んだアルミニウム箔のねじった部分の長さを3 cmにした時に、アーク放電が安定して発生しました(図2)。

また、確認したアーク放電の発生条件のもと、ペルスーイ法での実験を行いました。純粋な酸化アルミニウムとアルミ



図2 アーク放電発生の様子(酸化アルミニウムと酸化クロム(Ⅲ)を質量比100:1で混合した粉末)。

指示薬	濾別分離の回数				
	1回目	2回目	3回目	4回目	5回目
ヘキサシアニド鉄(Ⅱ)酸カリウム水溶液					
チオシアン酸カリウム					

図1 濾別の回数と指示薬の反応の変化。

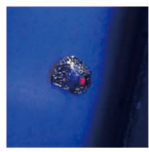
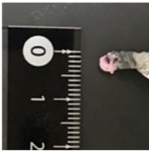
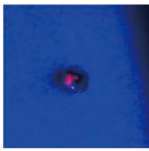
原料	先端	全体	ブラックライト照射時
純粋な酸化アルミニウム			
アルミニウム缶原料の酸化アルミニウム			

図3 生成物の外観およびブラックライトによる発光の比較.

ニウム缶を原料とした酸化アルミニウム、それぞれでルビーの合成を試みました. 合成には酸化アルミニウムと酸化クロム(Ⅲ)の質量比を100 : 1に混合した粉末と500 Wの電子レンジを用いました. また試料によってアーク放電が発生するまでの時間が異なるため、発生してから終わるまでの時間を加熱時間(1~5分程度)としました.

結果として、どちらの粉末でもブラックライトを当てたときに、ルビーと同様の蛍光反応⁽³⁾を示す物質が合成できました. これは、不純物を取り除き酸化アルミニウムの純度が上がったためだと考えられます(図3). しかし、肉眼で見るとほとんどの物質が白色に近いものでした. また、硬度は、どちらも手で砕けてしまうほど脆いものでした. これは単結晶が得られなかったためだと考えられます.

また、これまでは加熱後すぐに結晶を取り出していましたが、冷却時間を長くすることで結晶がより大きくなると考え、アーク放電発生後、試料を電子レンジに置いたまま動かさない時間を5分、10分、15分と比較しました. 結果は私たちの仮説通り、冷却時間が長くなればなるほど結晶の大きさは大きくなることが目視で確認できました.

今回、不純物である鉄を取り除いたことで、ルビーと思われる物質を合成できました. 今後は、今回生成した物質がルビーであるかを偏光顕微鏡で確認し、より大きなルビーの合成を検討しようと考えています.

今回、私たちは、金属学会に初めて参加しました. たくさんの質問をいただき、とても良い経験となりました. 「アルミニウム缶の代わりにアルミニウム箔で行ってみては」という助言のもと、現在、アルミニウム箔での実験を行っています. また、フラックス法でのルビー合成も試みています. 新しい視点からの助言をいただけただけでなく、ポスター賞をいただけてとても嬉しいです. これからも研究に励みたいと思います.

文 献

- (1) 長谷川修三：鉱物学雑誌, **8**(1968), 397-406.
- (2) 中住譲秀：応用物理, **54**(1986), 581-582.
- (3) 池田光治：化学と教育, **55**(2006), 114-115.
(2021年6月18日受理)[doi:10.2320/materia.60.667]
(連絡先：〒960-8002 福島市森合町5-72)

スポットライト

～第5回「高校生・高専学生ポスター発表」優秀賞～

ルミノール反応における触媒の濃度と照度・発光時間の関係

岩手県立水沢高等学校

小倉 紫 石川憂菜 梅原彩奈 小原未夕

私たちは、ルミノール反応における触媒溶液の濃度と最大照度・発光時間の関係をテーマに研究を行っています。私たちは、お祭りやライブでよく見かけるケミカルライトに興味を持ちましたが、費用や設備の関係で実験を行うことが難しかったため、化学発光の一種であるルミノール反応について研究を行いました。そして、今回行った実験結果をケミカルライトに応用し、災害時に利用したいと考えています。

私たちは、ルミノール反応の照度を高くすることと、発光時間を長くすることの2つを同時に達成することができる触媒溶液の濃度を検討することにし、次の3つの仮説を立てました。仮説1：触媒溶液の濃度を高くすると反応速度が高くなるので、発光時間が短くなるのではないかと。仮説2：触媒溶液の濃度を高くすると発光時間が短くなるので、最大照度が高くなるのではないかと。仮説3：発光時間と最大照度は反比例の関係にあるのではないかと。

実験は、次の①～④の手順で行いました。①ルミノール0.1g、水酸化ナトリウム3.0gを濃度3wt%の過酸化水素水150mLに溶かし、ルミノール水溶液を調整した。②濃度1～10wt%のヘキサシアニド鉄(Ⅲ)酸カリウム水溶液を調整し、触媒溶液とした。③①のルミノール水溶液10mLを試験管に移し、②の触媒溶液を1mL加え、試験管ミキサーで攪拌して反応させた。④発光時間と照度を測定した。発光時間は、ルミノール水溶液に触媒溶液を加えてから照度計の値が0になるまでの時間とし、照度の測定はデジタル照度計LX-1108を用いて最大照度を測定した。実験結果は次のようになりました。

図1から、発光時間は約50秒前後で、ほぼ一定であるが、触媒溶液の濃度が4wt%の時に最大になることがわかりました。この結果は、仮説1と矛盾する結果となりました。私たちは、実験結果について次のように考察しました。触媒溶液の濃度が4wt%よりも低い場合には、未反応のルミノールが存在しているのではないかと。そして、触媒溶液の濃度の増加に伴ってルミノールの反応量が増加するのではないかと考えました。また、触媒溶液の濃度が4wt%以上になった場合に発光時間が短くなるのは、ルミノールがすべて反応し、触媒溶液の濃度の増加に伴って反応速度が高くなるからではないかと考えました。このことを確かめるためには、触媒溶液の濃度が1wt%よりも小さい場合について実

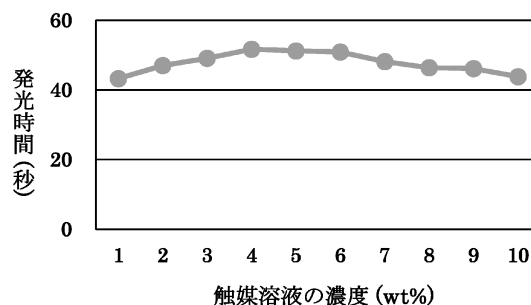


図1 触媒溶液の濃度と発光時間の関係。

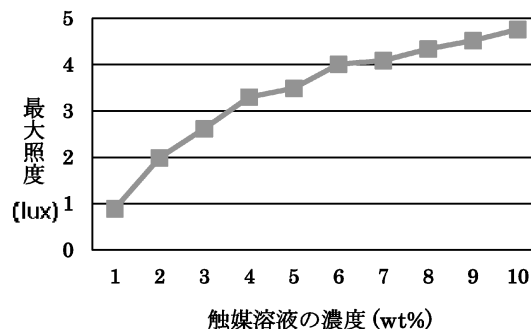


図2 触媒濃度と最大照度の関係。

験することと、未反応のルミノールが存在することを確認し、定量する必要があると考えています。

図2から、触媒溶液の濃度が高くなると最大照度が大きくなることがわかりました。この結果は、仮説2のとおりですが、発光時間が短くなっていないのに最大照度が大きくなる原因ははっきりしていません。また、グラフの傾きが徐々に小さくなっているため、最大照度がこれ以上大きくならない濃度が存在することも考えられます。このことを確かめるためには、触媒溶液の濃度が10wt%以上の場合についても実験を行う必要があると考えています。

仮説3の発光時間と最大照度の関係については、今回のデータからは確かめることができませんでした。今後、実験回数を増やし検討していきたいと考えています。

新型コロナウイルス感染拡大の影響で、多くの研究発表会が中止、あるいは、オンラインでの発表に変更になりました。オンライン発表会への参加は今回が2回目でした。初めて参加したときには、PCの操作に手間取ってしまったり、発表中どこを示せばわかりやすく説明できるか迷ったりしてしまっただけで、うまく説明することができませんでした。今回の発表では、少しですが改善することができました。また、多くの先生方に発表を聴いていただき、数多くの助言をいただくことができました。今回いただいた助言を今後の研究に生かしていきたいと考えています。特に、多くの先生方から、この研究が社会の中でどのように役立つのかを質問していただき、研究の社会的な意義を明確にすることの大切さを感じました。

(2021年6月28日受理)[doi:10.2320/materia.60.669]

(連絡先: 〒023-0864 奥州市水沢龍ヶ馬場5-1)

スポットライト

～第5回「高校生・高専学生ポスター発表」優秀賞～

種菌の獲得と成長

～カンゾウタケの子実体栽培を目指して～

宮崎北高等学校

小山佳那 高山奨真 山口勘護

私たちは、宮崎県に自生するカンゾウタケというキノコについて研究しています。この研究を始めた動機としては、私たちが住んでいる宮崎県は土地面積の7割以上を森林が占めている林業県であり、キノコ栽培が全国2位と盛んですが、現在の宮崎県は林業の衰退が問題となっていて、林業を発展させる手段の一つとしてキノコという特産物を宮崎県でさらに盛んに栽培することを考えたからです。そのため宮崎県近隣で採取でき、まだ栽培方法が確立されておらず、ほどよい酸味があり生でも食べることができるカンゾウタケを研究の対象としてこの研究を始めることにしました。本研究では野生株から種菌を得るまでを目的としました。

私たちは、カンゾウタケの菌糸(キノコの体を構成する糸状の構造)を獲得するために、カンゾウタケの子実体(菌類が孢子形成のために作る塊状の構造)を宮崎市近隣の国有林にて採集しました。採集したキノコを表1に示すようにそれぞれ野生株①、②、③、④として、酸素が十分に供給される状態で持ち帰り、クリーンベンチ内で、カンゾウタケを割いて外気に触れていなかった部分を切り取り、あらかじめ調製した寒天培地に植え付ける植菌を行いました。ここで植菌した寒天培地を、私たちは菌糸培養に無関係な湿度や光を制御せずに気温を参考に容器内の温度を21℃に設定した低温恒温器内で培養しました。培養中にカンゾウタケ以外の菌がみられる混入が起きた場合は、カンゾウタケの菌糸だけを植菌するスクリーニングを行い純粋なカンゾウタケの菌糸のみを獲得しました。私たちは、スクリーニングを行った際にカンゾウタケの菌糸には寒天の上に菌糸が棉のようになって広がっているふわっとした菌糸と寒天に張り付いて広がっている粘着質の菌糸があることを発見しました(図1, 2 参照)。ま

た、それぞれの野生株から得られた菌糸の植菌とスクリーニングの結果は次の通りとなりました。野生株①は植菌した後観察を続けましたが菌糸が生えることはありませんでした。野生株②は植菌を行ったときに、ふわっとした菌糸がみられました(図1)。野生株③は植菌に成功しましたが、カンゾウタケ以外の菌の混入が激しく発生しスクリーニングをすることができませんでした。野生株④は植菌を行ったときに、粘着質の菌糸が見られました(図2)。

採集したカンゾウタケの植菌では野生株4つから植菌したそれぞれの培地でカンゾウタケ以外の菌の混入が発生しました。その原因は、野生株のため多くの菌が付着していたからだと考えられます。またカンゾウタケの菌糸が生えなかったものに関しては、カンゾウタケの組織を切り取る際のメスの温度が高かった、あるいは野生株①の子実体は採集した時期が発生してから1週間ほど経っており腐敗が進んでいた、また子実体自体も小さく菌糸を広げる能力が弱かった、野生株③の子実体は切り取った組織の部分が軸の下部だったため菌糸が生える能力が弱かった、と推定しました。

私たちは植菌によって得られた2種類の菌糸の成長速度に違いがみられたため、スクリーニング後の成長速度を記録しました。野生株④から得られた粘着質の菌糸はスクリーニングしてから平均直径38.2 mmの菌糸が広がり、野生株②から得られたふわっとした菌糸は平均直径31.5 mmで広がりが停止しました。そこで菌糸が直径で50 mmまで伸びるの

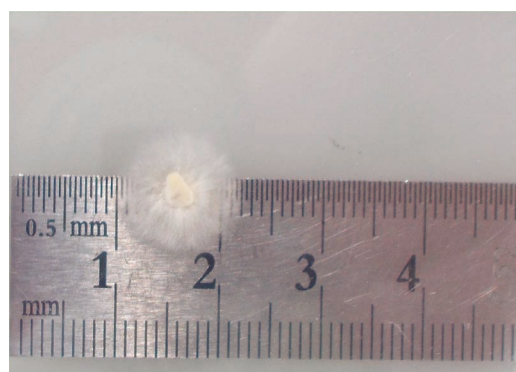


図1 ふわっとした菌糸。(オンラインカラー)

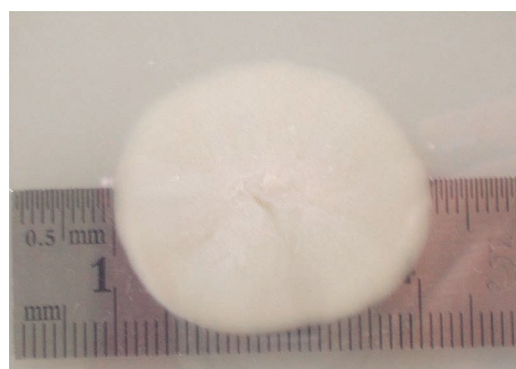


図2 粘着質の菌糸。(オンラインカラー)

表1 採取した野生株.

	野生株①	野生株②	野生株③	野生株④
子実体の横の長さ(cm)	7.5	12	11.0	12.5
子実体の厚さ(cm)	2.0	4.0	1.2	5.0
気温(℃)	21.2	—	21.7	21.5
湿度(%)	73.0	—	72.0	72.0
木の幹の太さ(cm)	287.0	—	133.0	210.0

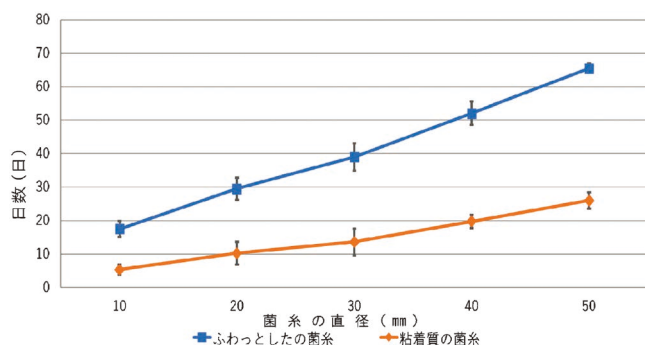


図3 それぞれの菌糸の成長速度。(オンラインカラー)

に要する時間を、50 mm 以上まで成長した粘着質の菌糸 6 つと、ふわっとした菌糸 2 つの各平均値で比較しました。粘着質の菌糸が直径で 50 mm 伸びるまでに要した時間は 3～4 週間で平均 26 日でした。対してふわっとした菌糸は 68 日と 2.5 倍以上の時間を要しました(図 3)。

また植菌実験で粘着質の菌糸とふわっとした菌糸の 2 種類の菌糸が発生しましたが、粘着質の菌糸とふわっとした菌糸の割合は明らかにできませんでした。しかし 2 種類の菌糸の成長速度は明らかに粘着質の菌糸の方が速く、広がりも大きい、このことから子実体を菌床培地で栽培する際には粘

着質の菌糸が優れていると推定しました。

今後は、本研究で得られたカンゾウタケの種菌を用いて菌床栽培の条件や子実体が発生する条件を見つけ出し、カンゾウタケはスダジイ(ブナ科シイ属の常緑広葉樹)によく生えるため、菌床培地にはスダジイのおがくずと、栄養分として米ぬかを使用して、おがくずと米ぬかの配合比率、気温や湿度、光の明るさなどの環境状況を複数のパターンで実験し、子実体の作成を目指します。

今回の金属学会のポスター発表会に参加し、私たちは生物分野の研究を行っており、生物が生きていくうえでナトリウムやカルシウムなどの金属はとても重要なものと改めて感じました。さらに、私たちが研究しているキノコにも生物に必要な不可欠な金属が含まれていることから、この発表を通して金属と生物が密接な関係にあると考えることができました。

文 献

- (1) 令和元年版 森林・林業白書, 林野庁編, (2019), p. 30.
- (2) 上田俊穂: きのこと図鑑, 本郷次雄監修, 保育社, (1985), p. 320.
- (3) 黒木秀一: 宮崎のきのこ, 鉾脈社, (2015), p. 252.

(2021年 6 月 23 日受理)[doi:10.2320/materia.60.670]
(連絡先: 〒880-0124 宮崎市大字新名爪 4567)

本 会 記 事

会 告	本会発行既刊図書類の電子版販売について	672
	2022年春期講演大会の外国人特別講演および招待講演募集	673
	第30回奨学賞の推薦校募集について	673
	第2回フロンティア研究助成の採択	674
	日本金属学会フェロー推薦募集の案内	674
	第45回技術開発賞募集	675
	第72回金属組織写真賞作品募集	675
支部行事	次号予告	681
研究集会	新入会員	681
掲示板	行事カレンダー	682
会誌・欧文誌10号目次		680

事務局 渉外・国際関係: secgnl@jim.or.jp
会員サービス全般: account@jim.or.jp
会費・各種支払: member@jim.or.jp
刊行物申込み: ordering@jim.or.jp
セミナー・シンポジウム参加申込み: meeting@jim.or.jp
講演大会: annualm@jim.or.jp
総務・各種賞: gaffair@jim.or.jp
学術情報サービス全般: secgnl@jim.or.jp
調査・研究: stevent@jim.or.jp
まてりあ・広告: materia@jim.or.jp
会誌・欧文誌: editjt@jim.or.jp

・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。

会 告 (ホームページもご参照下さい)

本会発行既刊図書類の電子版販売について

この度、本会発行の学術図書類を電子版(PDF)で販売することといたしました。第1期として、下記の7タイトルの販売を開始いたしました。丸善雄松堂のKnowledge worker(<https://kw.maruzen.co.jp/nfc/page.html>)で購入することができます。価格は、定価の約7割となっております。

今後も、絶版等で入手できなくなっている図書や絶版予定の図書を電子化していく予定です。

講座・現代の金属学 材料編

第1巻 材料の構造と物性

<https://kw.maruzen.co.jp/ims/itemDetail.html?itmCd=1033630560>

第2巻 ミクロ組織の熱力学

<https://kw.maruzen.co.jp/ims/itemDetail.html?itmCd=1033630561>

第3巻 材料強度の原子論

<https://kw.maruzen.co.jp/ims/itemDetail.html?itmCd=1033630562>

第8巻 原子力材料

<https://kw.maruzen.co.jp/ims/itemDetail.html?itmCd=1033630563>

第9巻 金属表面物性工学

<https://kw.maruzen.co.jp/ims/itemDetail.html?itmCd=1033630564>

第10巻 鋳造凝固

<https://kw.maruzen.co.jp/ims/itemDetail.html?itmCd=1033630565>

講座・現代の金属学 金属工学シリーズ

第8巻 磁性材料

<https://kw.maruzen.co.jp/ims/itemDetail.html?itmCd=1033630566>

2022年春秋講演大会の外国人特別講演 および招待講演募集

推薦書提出期日：2021年11月19日(金)

春秋講演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。2022年春秋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。尚、新型コロナウイルスの感染拡大状況により春秋講演大会がオンライン開催に変更になる可能性もありますこと予めご了承下さい。

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 2021年11月19日(金)

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@jim.or.jp

日本金属学会・日本鉄鋼協会 第30回奨学賞の推薦校募集について

奨学賞はこれまで全国大学材料関係教室協議会参加大学の学部学生を対象にしておりましたが、材料分野の発展の貢献が期待できる多くの優秀な学生を幅広く奨励するため、全国大学材料関係教室協議会参加大学以外の教育機関からも広く募集いたします。

下記要項によりご応募下さい。

奨学賞募集要項

教育機関の募集

- ・国内の材料系の学科又はコース等を有する大学および高等専門学校
- ・同一の教育機関(1校)の応募数は、関係する材料系の学科又はコース等に拘らず1件とします。

教育機関における候補者の対象

- ・大学は学士課程4年に在学する学生。
- ・高等専門学校は専攻科2年に在学する学生。

推薦校の推薦者資格

- ・教育機関の代表専攻長(代表学科主任)
同一教育機関の応募窓口は事前にご調整願います。
- ・下記の全国大学材料関係教室協議会の参加大学には、推薦校の資格が与えられます。

手続き 所定の応募フォーム(<https://data.jim.or.jp/jim/shou/shougaku/form.docx>)をダウンロードし、必要事項を記入の上、ご応募下さい。

応募締切 2021年11月5日(金)

申込問合先 〒980-8544 仙台市青葉区一番町 1-14-32

(公社)日本金属学会 奨学賞係

☎ 022-223-3685 FAX 022-223-6312

E-mail: award@jim.or.jp

2021年全国大学材料関係教室協議会の参加大学(33校)

大 学 名			
1 北海道大学	12 豊橋技術科学大学	23 大阪府立大学	
2 室蘭工業大学	13 名古屋大学	24 兵庫県立大学	
3 岩手大学	14 名古屋工業大学	25 千葉工業大学	
4 秋田大学	15 京都大学	26 東京理科大学	
5 東北大学	16 大阪大学	27 芝浦工業大学	
6 茨城大学	17 島根大学	28 東海大学	
7 東京大学	18 香川大学	29 金沢工業大学	
8 東京工業大学	19 愛媛大学	30 関西大学	
9 横浜国立大学	20 九州大学	31 近畿大学	
10 長岡技術科学大学	21 九州工業大学	32 早稲田大学	
11 富山大学	22 熊本大学	33 群馬大学	

第2回フロンティア研究助成の採択

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目的で設立されました。

第2回フロンティア研究助成の応募結果、下記10件の研究の採択が決定し、助成金を交付することにいたしました。

採択数10件

番号	テ ー マ	活動開始	活動終了	助成金	申請者	所 属
1	超微細粒金属の不均一変形挙動に変形温度がおよぼす影響	2021年4月～2023年2月		1,500,000	宮嶋 陽司	金沢大学理工研究域(准教授)
2	銅/マルテンサイト積層化による強度-導電率バランスの改善と制御	2021年4月～2023年3月		1,500,000	古賀 紀光	金沢大学理工学研究域(助教)
3	電気化学的手法を用いた水素酸化雰囲気制御によるNi基超合金の高温寿命の機構解明	2021年4月～2023年3月		1,500,000	福本 倫久	秋田大学理工学研究科(准教授)
4	菊池バンド幅解析と画像相関法を併用した任意のミクロ領域からの応力-ひずみ曲線取得	2021年4月～2023年2月		1,500,000	山崎 重人	九州大学工学研究院(准教授)
5	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	2021年10月～2023年9月		1,500,000	松垣あいら	大阪大学大学院工学研究科(助教)
6	電子ビーム積層造形法における特異な組織形成機構の理解に立脚した新規TiAl合金の開発	2021年4月～2023年3月		1,500,000	趙 研	大阪大学大学院工学研究科(講師)
7	レーザー熱加工による高生体安全性・高硬度マルテンサイト系ステンレス鋼の開発	2021年9月～2023年8月		1,500,000	堤 祐介	物質・材料研究機構構造材料研究拠点(主席研究員)
8	骨適合性と抗菌性を両立した生体内溶解性バイオアクティブコーティング膜の創製	2021年5月～2023年2月		1,500,000	上田 恭介	東北大学大学院工学研究科(准教授)
9	変形誘起ナノ双晶と酸化物分散強化を利用した高延性高強度アルミナフォーミング CoNiCrAl 合金の創製	2021年3月～2023年2月		1,500,000	余 浩	東北大学原子力材料工学研究部門(助教)
10	金属-誘電体ナノグラニューラ膜のトポロジカルモデルに基づくトンネル効果の最大化	2021年10月～2022年3月		1,000,000	青木 英恵	東北大学学際科学フロンティア研究所(助教)

公益社団法人日本金属学会フェロー推薦募集の案内

推薦締切：2021年11月30日(火)

本会では、本会の代表的会員として、金属およびその関連分野における学術・科学技術・産業、教育・人材育成等に造詣の深い会員であって、自らが積極的に本会の事業に参画・活動することが期待されるものに対して日本金属学会フェローを授与いたします。下記の募集要項をご確認いただき、積極的にご推薦下さい。

推薦要項

[推薦方法]

- ・推薦は、理事、代議員、フェロー、支部長、各分科委員長、維持員(正員資格付与者)、3名の正員による推薦および本人による自薦による。
- ・所定の推薦書に、必要事項を記入の上、提出する。
- ・必要事項は以下の通り。
 - (1) 候補者
 - (2) フェローの責務を果たすことの承諾および活動
注：候補者本人の承諾を得た上、責務を果たすことの確認と果たすことができる責務・活動を記入する。果たすべき責務は下記「責務」に示すとおり。
 - (3) 候補者の略歴
 - (4) 推薦タイトルとカテゴリー
 - (5) 業績や貢献の内容と推薦理由
 - (6) 推薦者

[責務]

- ・フェローを得た会員は、金属およびその関連材料分野を先導し、若手研究者・技術者の目標となることを自覚し、当該分野の発展に一層寄与するとともに、本会の代表的会員として本会事業へ積極的に参画し、本会の目的の達成に率先して努力する責務を負うものとする。
- ・フェローは次のいずれかの活動を行うものとする。
 - (1) 若手研究者および若手技術者の啓発・人材育成
- ・まてりあへの入門講座・講義ノート・実学講座・新製品技術裏話等の啓発記事の執筆
- ・まてりあへの若手研究者・技術者を対象とした論文執筆のコツ・テクニック・注意事項等の啓発記事の執筆
- ・学校・企業等への出前講義等
 - (2) 知識・技術の伝承
- ・本会機関誌へのレビュー・オーバービュー・解説の執筆
- ・教科書等の書籍の執筆

・講演会・講座・セミナー・シンポジウム・チュートリアル
講演等の講師

・フェローは必要に応じて、技術相談、論文執筆相談、機関誌の特集記事の企画提案、研究費申請相談の活動を行うものとする。

・フェローは、当該年度の活動報告および次年度の活動計画を作成するものとする。

・フェローは、本会正員として会費を支払うものとする。

注：フェローとして活動するに際しては、本会の謝礼規程および旅費支給規程に従って謝礼や旅費の支払を受けることができるものとする。

[フェローの要件]

・フェローの対象となる者は、フェローの責務を積極的に負える者であって、金属およびその関連分野における学術・科学技術・産業、教育・人材育成等に造詣の深い会員であること。

[フェローの数]

・フェローの人数は本会正員の1%を上限とする。

[審査・認定]

・フェローの選考は、フェロー選考委員会があたり、理事会で授与候補者を決定する。

・授与を決定した者に、春期講演大会時に開催される表彰式でフェローを授与する。

・授与者にはフェローの認定証書を贈呈する。

・適切な候補者がいない場合は、その年度は授与しない。

[任期]

・フェローの任期は5年とする。ただし、再任することができる。

・フェローが本会会員でなくなったとき、あるいは名誉員や永年会員となった場合はフェローを返上するものとする。

・フェローの責務を果たすことが困難等の理由で、本人から返上の申し出があったときは、フェローの称号の返上を認めるものとする。

申請先 申請書 (<https://data.jim.or.jp/jim/shou/fellow/form.docx> にてダウンロードして下さい) を下記 E-mail アドレスに送付して下さい。2, 3 日過ぎても受理返信通知のない場合はご連絡下さい。

問合せ先 (公社) 日本金属学会フェロー係
E-mail: award@jim.or.jp ☎ 022-223-3685

第45回技術開発賞 「新技術・新製品」記事募集

応募締切：2021年11月1日(月)

賞の名称 第45回日本金属学会 技術開発賞

賞の対象 まてりあ「新技術・新製品」記事に掲載された記事が選考対象となります。

表 彰 2022年9月の秋期講演大会

原稿問合せ先 まてりあ係 E-mail: materia@jim.or.jp

詳 細 まてりあ 8号525頁 or ホームページ：本会賞の募集

申込 URL <https://gijyutsu.jim.or.jp/entry>

技術開発賞の問合せ先

(公社) 日本金属学会各賞係

☎ 022-223-3685 E-mail: award@jim.or.jp

第72回金属組織写真賞作品募集

応募締切：2021年11月1日(月)

賞の名称 第72回日本金属学会金属組織写真賞

募集部門

「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すること。

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する。

[写真作品]

①写真データの解像度は、A2 版サイズを前提に400 dpi 以上とする。

②写真データは PDF または画像ファイル(jpg など)で提出すること。(それ以外はプレビュー表示出来ない)

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ない作品であること。

詳 細 まてりあ 8号526頁 or ホームページ：本会賞の募集

URL <https://picture.jim.or.jp/entry>

送信・問合せ先 (公社) 日本金属学会 金属組織写真賞係

☎ 022-223-3685 E-mail: award@jim.or.jp



2021年度 本多光太郎・湯川記念
合同講演会 開催案内

～物質・材料科学技術：新たなステージへ(材料編)～

日 時 11月16日(火) 13:00～17:00
場 所 オンライン講演会(zoom 会議形式)
主 催 (公社)日本金属学会東海支部
(一社)日本鉄鋼協会東海支部
共 催 名古屋大学工学研究科附属材料バックキャストテクノロジー研究センター, 名古屋大学未来社会創造機構 マテリアルイノベーション研究所(予定を含む)
協 賛 (公財)本多記念会
プログラム
13:00～13:05 開会の挨拶
【基調講演】(本多光太郎記念講演)
13:05～14:15 合金状態図計算法の現在と未来
豊田理化学研究所 フェロー 大谷博司
【特別講演】(湯川記念講演)
14:15～15:15 「ペイナイトの魅力 — Nanocrystalline bainite の可能性 —」
九州大学 教授 高橋 学
15:15～15:30 —休憩—
【特別講演】(湯川記念講演)
15:30～16:30 「材料強靱化原理の新展開 —新規高機能性構造材料開発への挑戦—」
名古屋工業大学 教授 萩原幸司
16:30～17:00 総合討論および閉会の挨拶

参加費 無料

定 員 最大150名程度

参加申込締切 2021年11月10日(水)

参加申込・問合せ先

件名に「本多湯川申込み」と題記し、本文中にお名前、ご所属、連絡先(E-mail)をご記入の上、下記メールアドレス宛にお申し込み下さい。

日本金属学会・日本鉄鋼協会東海支部事務局

☎ 052-789-3372

E-mail: tokai@numse.nagoya-u.ac.jp

2021年度 高温材料の変形と破壊研究会

2021年度の「高温材料の変形と破壊研究会」をオンラインにて開催いたします。本研究会は、様々な材料における高温変形と破壊、また、高い力学特性を生み出す材料の内部組織に注目し、実験的ならびに計算的研究成果について基礎的な観点から討論し、高温材料の長寿命化・高強度化のための原理・原則を改めて見直すことを目的としています。今回は3名の講師の方々および世話人から話題提供いただいた上で、活発な議論を行いたいと考えております。

(代表世話人 物質・材料研究機構 澤田浩太)

日時 2021年11月2日(火)13:00～16:50

場所 オンライン開催

参加費 無料

プログラム

13:00～13:05 開会挨拶 物質・材料研究機構 澤田浩太
13:05～13:35 基調講演 「セラミックス/金属異材接合—ハイブリッドスラスト開発—」
宇宙航空研究開発機構 佐藤英一
13:35～14:05 基調講演 「クリープ曲線の形のはなし—固溶強化合金を中心として—」
弘前大学 佐藤裕之
14:05～14:35 基調講演 「バルクナノメタルの特異な変形特性」
京都大学 辻 伸泰
14:35～14:45 休憩
14:45～15:05 「配向制御したMAX相セラミックス焼結体の力学特性」
北海道大学 池田賢一
15:05～15:25 「ZrSi₂ 基耐酸化コーティング材料の現状」
東北大学 関戸信彰
15:25～15:45 「炭素鋼の長時間クリープに伴う組織変化」
物質・材料研究機構 澤田浩太
15:45～16:05 「マグネシウム基合金の高温変形挙動」
富山県立大学 鈴木真由美
16:05～16:25 「耐熱アルミニウム合金の改良設計と積層造形」
名古屋大学 高田尚記
16:25～16:45 「チタン合金の室温クリープにおける転位すべりと加工硬化」
九州大学 光原昌寿
16:45～16:50 閉会挨拶 九州大学 光原昌寿

参加申込方法 10月25日(月)の17:00までに、①氏名、②所属、③E-mail アドレスを下記申込先までご連絡願います。

申込・問合せ先 物質・材料研究機構 構造材料試験プラットフォーム 猿田真美子
E-mail: saruta.mamiko@nims.go.jp

＜公募類記事＞

無料掲載：募集人員、締切日、問合せ先のみ掲載。

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；15,000円＋税

・ホームページのみ掲載；10,000円＋税

＜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

・原稿提出方法：電子メール(受け取りメールの確認をして下さい)

・原稿送信先：FAX 022-223-6312 E-mail: materia@jim.or.jp

公 募

◇2021年度 後期公募 求人公募広告◇
国立研究開発法人物質・材料研究機構
定年制職員(正職員)公募

公募人数 研究職 物質・材料一般(分野不問)

数名(女性枠あり)

分野指定公募 各1名(2分野)

エンジニア職

分野指定公募 各1名(2分野)

専門分野

研究職

①物質・材料一般(材料工学(構造材料を含む)、応用物性学、材料化学、材料データ科学、他、物質・材料に関する研究であれば分野を問わない。特に、以下を専門とする応募者を歓迎(量子マテリアル、金属材料、蓄電池材料、人工知能材料、テラヘルツ材料、データ科学、有機材料、バイオ関連材料))、②物質・材料一般(女性のみ応募可)、③水素製造用材料技術、④磁気冷凍技術の開発と応用

エンジニア職

①IT インフラエンジニア ②IT サービスエンジニア

公募締切 2021年10月中旬

業務(研究)内容、応募資格、応募方法などの詳細は当機構のホームページを参照。

<https://www.nims.go.jp/employment/permanent-researcher.html>

問合せ先 〒305-0047 茨城県つくば市千現1-2-1

国立研究開発法人物質・材料研究機構

人材部門 人材開発室

☎ 029-859-2555

E-mail: nims-recruit@nims.go.jp

◇滋賀県立大学工学部ガラス工学研究センター
教員公募◇

募集人員 講師1名

教育研究組織 工学部 ガラス工学研究センター(寄附講座)

(工学部 材料科学科 セラミックス材料分

野 兼務)

専門分野 ガラス、スラグ、マグマ、セラミックス、無機固体など

担当科目 化学実験、材料科学実験、物理化学や計算材料科学に関する演習など

応募資格 (1) 博士の学位を有するか、着任時までに取得見込であること

(2) ガラス、セラミックス、スラグ、マグマ、無機固体、界面化学、計算材料科学(無機材料関係)のうち、何れかの分野で研究実績を有すること

(3) ガラスの製造または長期耐久性に関連する基礎物性に興味を持ち、これらについて基礎科学的な視点から研究に取り組めること

(4) 教育、地域連携、大学運営に関する業務にも意欲的に取り組めること

着任時期 2023年4月1日までのできるだけ早い時期

任期 3年(再任制度あり)

応募方法 https://www.usp.ac.jp/campus/kyouin_koubo/に記載。

「研究者人材データベース(JREC-IN)」<https://jrecin.jst.go.jp/>にも登録しています。

応募締切 2021年11月1日(月)必着

書類提出先・問合せ先

〒522-8533 滋賀県彦根市八坂町2500

滋賀県立大学工学部 ガラス工学研究センター

センター長 松岡 純

☎ 0749-28-8365

E-mail: matsuoka.j@mat.usp.ac.jp

九州工業大学 大学院生命体工学研究科
生体機能応用工学専攻 教員募集

募集人員 准教授1名(テニュアトラック)

専門分野 セラミックス(無機材料)あるいは金属材料を基盤とした生体材料科学分野

締切り日 2021年10月15日(金)まで

問合せ先 九州工業大学 大学院生命体工学研究科 生体機能応用工学専攻

宮崎敏樹 E-mail: tmiya@life.kyutech.ac.jp

https://www.kyutech.ac.jp/archives/001/202108/211015_seimeitai.pdf

https://jrecin.jst.go.jp/seek/SeekJorDetail?fn=3&id=D121080253&ln_jor=0

◇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

■参加登録・お問合わせ

岡部研 レアメタル研究会事務担当 宮崎智子
 (tmiya@iis.u-tokyo.ac.jp)

■第98回 2021年11月5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
 ★チタン関係シンポジウム★(合同開催)
 テーマ: チタンの現状, 将来
 午後2:00～
 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
 講演(各30分+5分質疑応答)(敬称略)

※講演順は暫定. 変更する可能性あり※

- ・日本チタン学会とチタンの将来展望(仮)
 日本チタン学会会長 大阪大学特任教授・東北大学名誉教授 新家光雄
- ・中国におけるチタン業界の状況と, 私が取り組んでいるチタン研究
 東北大学大学院 工学研究科 教授, 北京科技大学 教授 朱 鴻民
- ・当社における金属チタン関連技術開発の取り組み(仮)
 東邦チタニウム株式会社 執行役員 技術本部 技術開発センター所長 堀川松秀
 ～休憩～

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 特任講師 大内隆成

- ・当社におけるチタン及びチタン合金粉末事業と技術開発の取り組み
 株式会社大阪チタニウムテクノロジーズ 顧問 大橋善久
- ・チタンを含む金属 3D プリンティングの現状と, 私が取り組んでいるチタン研究(仮)
 大阪大学大学院 工学研究科 マテリアル生産科学専攻 教授 中野貴由
- ・トヨタ燃料電池の技術革新による進化とチタンへの期待
 トヨタ自動車株式会社 トヨタ ZEV ファクトリー商用 ZEV 製品開発部 FC スタック開発室

チーフプロフェッショナルエンジニア(CPE) 水野誠司

午後6:00～

研究交流会・意見交換会(←Webでの開催を企画予定)

■関連シンポジウム 2021年11月26日(金) 14:00～
 An 棟 2F コンベンションホール での開催に変更
 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
 ★日本学術会議 材料工学委員会・総合工学委員会・環境学委員会との合同シンポジウム★

テーマ: SDGs

日本学術会議公開シンポジウム

「なぜ SDGs? —資源・材料循環における SDGs—」

■第99回 2022年1月7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
 ★貴金属シンポジウム(第9回)+新年会★(合同開催)
 テーマ: 貴金属の製錬・リサイクル
 午後2:00～
 例年どおり, 貴金属の製錬・リサイクル技術に関する講演を行う予定
 ※詳細は未定 ※

■第100回 2022年3月11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: 非鉄業界における研究や教育(人材育成)に関する未来
 午後2:00～
 ★第100回記念講演会
 非鉄分野の将来を担うホープが夢を語る★
 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
 東京大学大学院 工学系研究科 システム創成専攻 教授 所 千晴

講演(各25分+5分質疑応答)(敬称略)

- ・国境を飛び越える製錬技術の面白さ, Umicore が取り組む非鉄人材育成(仮)

Umicore, Corporate Research & Development,
 Associate Scientist (Recycling & Extraction Technologies)

八木良平

- ・高効率エネルギー利用と資源循環に向けたコトづくりと人づくり(仮) 東京大学 生産技術研究所 講師 大内隆成
- ・国内外環境変化と非鉄金属, そして研究者としての役割と夢～韓国の非鉄金属分野の事例を中心として～(仮)

Principal Researcher, Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources (KIGAM),

Associate Professor, University of Science and Technology, Korea
 Jungshin Kang

- ・非鉄分野における研究者としての夢とロマン(仮)
 九州大学大学院 工学研究院 材料工学部門 准教授 谷ノ内勇樹
- ・希土類金属製錬学の体系化と展望(仮)
 東北大学大学院 工学研究科 金属フロンティア工学専攻 准教授 竹田 修
- ・私が追い求めてきた夢とロマン(仮)

東京大学 生産技術研究所 教授 岡部 徹

総合討論・意見交換

モデレーター 東京大学 生産技術研究所 特任教授 黒川晴正

東京大学 生産技術研究所 シニア協力員 中村 崇

午後6:00～

研究交流会・意見交換会

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

◇一般財団法人熱・電気エネルギー技術財団
2021年度第29回研究助成テーマ募集◇

当財団では下記の研究助成の募集を行います。

I 通常募集(100万円×10名, 総額1000万円)

・対象分野:

- ①新水素エネルギー技術(常温核融合, 凝集系核科学及びそれらから派生した技術)
- ②熱電変換素子技術
- ③熱エネルギー貯蔵技術
- ④熱・電気エネルギーに関するシステム技術

II 特別募集(300万円×2名, 総額600万円)

・対象分野: 一般募集に同じ

・募集期間: 2021年8月23日～2021年10月25日

・決定時期: 2021年12月10日(助成対象者目録贈呈式あり)

問合せ先 一般財団法人熱・電気エネルギー技術財団
事務局 五十嵐
☎ 03-3503-7722 FAX 03-3503-7799
E-mail: info@teet.or.jp

※詳細は当財団のホームページをご覧ください。

<http://www.teet.or.jp/>



【お詫びと訂正】

まてりあ60巻9号付録秋期講演大会プログラム(冊子版)において, 下記の箇所の記載に誤りがございました。

◇8頁「公募シンポジウム S3: ハイエントロピー合金の材料科学(VI)」テーマ責任者の co-chairs

正しくは, 「京大 乾 晴行 東北大 古原 忠 京大 辻 伸泰 阪大 尾方成信 名大 小山敏幸」

◇44頁講演 No. J4 の共同研究者

正しくは

Inst. Mater. Res., Tohoku Univ ○Chandiran Elango

Inst. Mater. Res., Tohoku Univ, National Inst. Mater. Sci., Japan Miyamoto Goro

Inst. Mater. Res., Tohoku Univ Furuhashi Tadashi

◇44頁講演 No. J5 の共同研究者

正しくは

Department of Materials Science and Engineering, Kyoto University,

Elements Strategy Initiative for Structural Materials (ESISM), Kyoto University,

Department of Materials Science and Engineering, UC Berkley ○Chong Yan

Department of Materials Science and Engineering, Kyoto University Gholizadeh Reza

Department of Materials Science and Engineering, UC Berkley Zhang Ruopeng

Department of Materials Science and Engineering, UC Berkley Minor Andy

Department of Materials Science and Engineering, Kyoto University,

Elements Strategy Initiative for Structural Materials (ESISM), Kyoto University Tsuji Nobuhiro

◇54頁講演 No. 355 の共同研究者

正しくは

WPI-Advanced Institute for Materials Research (WPI-AIMR), Tohoku University,

Department of Materials Science and Engineering, Tohoku University ○Demirskyi Dmytro

National Institute for Materials Science, NIMS, Tsukuba Nishimura Toshiyuki

National Institute for Materials Science, NIMS, Tsukuba Vasyukiv Oleg

Department of Materials Science and Engineering, Tohoku University Yoshimi Kyosuke

以上, お詫びして訂正させていただきます。申し訳ございませんでした。

日本金属学会誌掲載論文

Vol. 85, No. 10 (2021)

——レビュー——

マグネシウム蓄電池用電解液の発展と今後の課題

八木俊介

——論 文——

拡張オーステナイト相の窒素濃度プロファイルが摩耗速度に与える影響

半田祥樹 アブラハペトロス

2元系マグネシウム合金の粒界偏析計算と底面集合組織および室温成形性との関係調査

城 秀幸 鈴木一孝 黄 新胜 塚田祐貴
小山敏幸 千野靖正

Alloy 625の圧延に伴う電気抵抗率とビッカース硬さ、組織の変化の比較

永田知裕 竹田康平 足立大樹 石川和宏 宮嶋陽司

Materials Transactions 掲載論文

Vol. 62, No. 10 (2021)

——Regular Article——

Materials Physics

Theoretical Approach for Long-Ranged Local Lattice Distortion in Al-Rich AlX (X=H~Sn) Disordered Alloys by Kanzaki Model Combined with KKR Green's Function Method

Mitsuhiro Asato, Chang Liu, Nobuhisa Fujima and
Toshiharu Hoshino

Effects of B₂O₃ and CaO/Al₂O₃ on Structure of CaO-Al₂O₃-B₂O₃ System

Shou-lin Huang, Ting Wu,
Jie Lei, Hui Kong, Hai-chuan Wang and Zheng-wei Yu

Microstructure of Materials

Soft X-ray XAFS Analysis of Cluster Formation Behavior during Natural Aging on an Al-Mg-Si Alloy

Serina Tanaka, Hiroki Adachi and Takehiro Nonomura

Immobilization of Silver Nanoparticles on the Surface of Cellulose Nanofibers Using High-Pressure Wet-Type Jet Mill

Mitsuaki Furutani, Eiji Fujii and Kota Ogura

Effect of Different Concentrations of Nano-Cubic Boron Nitride on the Preparation of TiO₂/Ti/Fe Composite Materials by Thermal Sprayed and Micro-Arc Oxidation

Chang-Chiun Huang, Huang-Ming Li, Sheng-Yuan Lin and
Dong-Han Li

Mechanics of Materials

Effect of Plastic Anisotropy on Ironing Formability of 3104 Aluminum Alloy Hard Sheets

Yuji Inoue and Masahiro Yamaguchi

Effects of Grain Boundary Geometry and Boron Addition on the Local Mechanical Behavior of Interstitial-Free (IF) Steels

Kazuki Endoh, Seiichiro Ii, Yuuji Kimura, Taisuke Sasaki,
Sota Goto, Takeshi Yokota and Takahito Ohmura

Materials Chemistry

Numerical Simulation of Tribocorrosion of CoCr Alloy and Ti with Galvanic Coupling in Simulated Body Fluid

Sayaka Miyabe, Norifumi Fujii and Shinji Fujimoto

Recovery of Palladium and Platinum Particles Suspended in the Al₂O₃-CaO-SiO₂ Slag Using Copper-Based Extractants at 1723 K

Takashi Murata and Katsunori Yamaguchi

Combined Effect of Gas Blow Induction Heating Nitriding and Post-Treatment with Fine Particle Peening on Surface Properties and Wear Resistance of Titanium Alloy

Shogo Takesue, Shoichi Kikuchi, Yoshitaka Misaka,
Tatsuro Morita and Jun Komotori

Development of a Powder Wettability Evaluation Technique by Analyzing the Increase in Internal Pressure due to Capillary Suction of Closed Powder Bed -Effect of Powder-Bed-Preparation Method and Powder Surface Area Estimation Method-

Takamasa Mori, Keita Ohno,
Takumi Suzuki, Hiroshi Satone and Junichiro Tsubaki

Negligible Temperature Dependence of Nitrogen Solubility in Molten Silicon-Chromium Alloys at Middle Composition Range

Sakiko Kawanishi, Shogo Hachinoda and Hiroyuki Shibata

Wettability of Pure Metals with Liquid Sodium and Liquid Tin

Jun-ichi Saito, Yohei Kobayashi and
Hideo Shibutani

Reduction of Titanium Dioxide to Metallic Titanium by Thermal Decomposition via Titanium Disulfide

Ichiro Seki

Cobalt Alloying Effect on Improvement of Ni/YSZ Anode-Supported Solid Oxide Fuel Cell Operating with Dry Methane

Nicharee Wongsawatgul, Soamwadee Chaianansutcharit,
Kazuhiro Yamamoto, Makoto Nanko and Kazunori Sato

Materials Processing

Evaluation of Porosity in Gas-Atomized Powder by Synchrotron X-ray CT and Investigation of the Effect of Gas Species

Noriharu Yodoshi, Takahide Endo and Naoya Masahashi

Influence of Chunky Graphite on Fatigue Crack Propagation Characteristics in Heavy Section Spheroidal Graphite Cast Iron

Kohei Wakamatsu, Naoto Shiraki and Ryosuke Fujimoto

Interface Formation Mechanism of Cemented Carbide Dipped in Molten Cast Iron

Akihiro Shibata, Mamoru Takemura, Mitsuaki Matsumuro
and Tadashi Kitsudo

Effects of Reduced Pressure and Casting Design on Mold Filling in Expendable Pattern Casting Process of Thin Wall Aluminum Alloy Castings

Sadatoshi Koroyasu

Spot Forge-Welding for Rapid Dissimilar Joining of Fe to Al to Produce an Intermetallic Compound-Free Interface

Hideki Yamagishi

Engineering Materials and Their Applications

Effect of Glass Composition on Sinterability of Copper Terminal Paste for Multilayer Ceramic Capacitors

Nobuo Nishioka, Yui Hosono, Sohei Sukenaga,
Noritaka Saito and Kunihiko Nakashima

—Current Trends in Research—

Advanced Electron Microscopy for Materials Science

Zentaro Akase, Mitsuaki Higo,
Keiko Shimada, Takafumi Sato, Hideyuki Magara,
Daisuke Shindo and Nobuhiko Ohno

Announcement



～日本金属学会誌, Mater. Trans. へ投稿しませんか?～

◎日本金属学会誌および Mater. Trans. は、会員、非会員問わず投稿することができます。

掲載論文充実化のため、レビュー、オーバービュー、技術論文など多くの種別を取り入れております。

会誌の投稿・掲載費用は無料です。

詳細は、本会ホームページ → [会誌](#) or [Mater. Trans.](#) のページをご覧ください。

皆様のご投稿をお待ちしております。



まてりあ第60巻11号 予告

〔受賞者紹介〕

〔金属素描〕 タンタル

〔最近の研究〕 人工股関節用 β Ti 合金ステムの研究開発

.....東北大名誉教授 花田修治

高圧巨大ひずみ加工によるバルク状 Si および Ge

半導体のナノ結晶化と準安定相創成

.....九大 生駒嘉史

〔新進気鋭〕 結晶学・運動学に基づいたレンズマルテンサイト
の組織解析東工大 篠原百合

〔まてりあ60巻記念企画〕

—他—

—編集の都合により変更になる場合がございます—



(2021年7月21日～2021年8月20日)

正 員

城戸 竜太 公益財団法人広島市産業振興センター 松本 剛 松本工学株式会社

山本 祐治 株式会社アイシン

学 生 員

新井 嗣人 茨城大学

石田 雄士 東京大学

梅田 岳昌 東北大学

林田 大 熊本大学

吉野 哲生 東京大学

外国学生会員

李 炯録 東北大学

唐 国剣 東北大学

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
2021年10月				
5	第7回統合的先端研究成果発表会(ハイブリッド開催)	軽金属奨学会	TEL 06-6271-3179 lm-foundation@nifty.com http://www.lm-foundation.or.jp/	
6	第18回ヤングメタラジスト研究交流会(Web開催)(9号600頁)	関東支部	masuda@material.t.u-tokyo.ac.jp	
7~8	第14回トライボロジー入門西日本講座(Web開催)	日本トライボロジー学会	TEL 03-3434-1926 jast@tribology.jp http://www.tribology.jp/	9.24
7~8	第55回X線材料強度に関するシンポジウム(Web開催)	日本材料学会	TEL 053-478-1035 sakaida.yoshihisa@shizuoka.ac.jp http://www.jsms.jp/	講演 7.23
8	第72回白石記念講座 進化するポリマー自動車における金属材料との共存共栄(Web開催)	日本鉄鋼協会	TEL 03-3669-5933 educact@isij.or.jp https://www.isij.or.jp/	
12~15	ADMETA Plus 2021(Advanced Metallization Conference 2021: 30th Asian Session)(Web開催)	応用物理学会	TEL 03-5821-7120 jimukyoku@admeta.org http://www.admeta.org/	
12~13	第8回フラクトグラフィ講習会(京都・Web開催)	日本材料学会	TEL 075-761-5321 jimu@office.jsms.jp http://www.jsms.jp/	9.30
12~15	第7回材料WEEK(京都)	日本材料学会	TEL 075-761-5325 jimu@office.jsms.jp http://www.jsms.jp/	
13~14	第38回初心者のための疲労設計講習会(京都)	日本材料学会	TEL 075-761-5321 jimu@office.jsms.jp http://www.jsms.jp/	定員 60名
13~14	第49回日本ガスタービン学会定期講演会(福岡)	日本ガスタービン学会	TEL 03-3365-0095 gtsj-office@gtsj.org http://www.gtsj.org/	
15	第87回 塑性加工技術フォーラム「ものづくり現場におけるAI・IoT技術活用の動向と今後の展望」(Web開催)	日本塑性加工学会 他	http://www.jstp.or.jp	定員 60名
18~20	第62回高圧討論会(姫路)	日本高圧力学会	TEL 070-5658-7626 tounonkai62@highpressure.jp http://www.highpressure.jp/new/62forum/	web参加 10.8
19~20	ALC'21 Online (13th International Symposium on Atomic Level Characterizations for New Materials and Devices, Online)(Web開催)	日本表面真空学会	TEL 03-3812-0266 office@jvss.jp	
21	第343回塑性加工シンポジウム「マルチマテリアル化における接合技術の最先線」(Web開催)	日本塑性加工学会	http://www.jstp.or.jp	定員 80名
23~24	日本銅学会第61回講演大会(Web開催)	日本銅学会	TEL 03-6803-0587 dou-gakkai@copper-brass.gr.jp https://www.copper-brass.gr.jp/	
25~27	第42回日本熱物性シンポジウム(北大 or Web開催)	日本熱物性学会	TEL 086-251-8046 jstp@okayama-u.ac.jp http://jstp-symp.org/symp2021/index.html	事前参加 9.10
25~27	第42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(浜松)	超音波エレクトロニクス協会	TEL 042-443-5166 h.nomura@uec.ac.jp	
26	第233回研究会/第92回ナノマグネティックス専門研究会「磁気記録技術の最近の研究動向」(Web開催)	日本磁気学会	TEL 03-5281-0106 https://www.magnetics.jp/event/topical_233/	
26~28	第68回材料と環境討論会(Web開催)	腐食防食学会	TEL 03-3815-1161 ysm.hng-113-0033@jcorr.or.jp https://www.jcorr.or.jp/	
27~29	トライボロジー会議2021 秋 松江(Web開催)	日本トライボロジー学会	TEL 03-3434-1926 jast@tribology.co.jp http://www.tribology.jp/	
27~29	第57回熱測定討論会(Web開催)	日本熱測定学会	TEL 03-5821-7120 netsu@mbd.nifty.com http://chem.ru.dendai.ac.jp/jccta57/	
27~29	第50回結晶成長国内会議(JCCG-50)(Web開催)	日本結晶成長学会	TEL 070-5047-3339 jccg-50@jacg.jp https://www.jacg.jp/jp/event/2021/jccg-50/	
29~30	第72回塑性加工連合講演会(Web開催)	日本塑性加工学会	TEL 03-3435-8301 http://www.jstp.or.jp/	
2021年11月				
1	研究集会「第二回状態図・計算熱力学研究会」(Web開催)(9号600頁)	研究会 No. 85	abe.taichi@nims.go.jp	
2	研究集会「高温材料の変形と破壊研究会」(Web開催)(本号676頁)	研究会 No. 83	TEL 052-789-3372 tokai@numse.nagoya-u.ac.jp	定員 150名
2~19	第419回講習会「高精度高能率加工を支えるオンマシン/インプロセス計測技術～基礎から最先端研究動向・最新の活用事例まで～」(Web開催)	精密工学会	TEL 03-5226-5191 https://www2.jspe.or.jp/form/koshukai/koshukai_form.html	
3~5	2021年日本表面真空学会学術講演会(Web開催)	日本表面真空学会	TEL 03-3812-0266 taikai2021@jvss.jp https://www.jvss.jp/	
3~6	The 16th International Symposium on Advanced Science and Technology in Experimental Mechanics(Vietnam)	日本実験力学会・小林(新潟大)	TEL 025-368-9310 office-jsem@clg.niigata-u.ac.jp http://isem16.imech.ac.vn/	
4~5	第172回塑性加工学講座「板材成形の基礎と応用～基礎編～」(Web開催)	日本塑性加工学会 他	https://www.jstp.or.jp	定員 80名

開催日	名称・開催地・掲載号	主催	問合せ先	締切
4～6	ICMaSS2021持続性社会のための材料とシステムに関する国際会議2021(Web開催)	ICMaSS2021 未来材料・システム研究所	TEL 052-581-3241 icmass2021@intergroup.co.jp http://www.icmass.imass.nagoya-u.ac.jp/	
5, 26	第98回レアメタル研究会関連シンポジウム(東京+ネット配信)(本号678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	
5～6	第57回 X線分析討論会(福岡大)	日本分析化学会 X線分析研究懇談会	TEL 092-871-6631(内線6218) xbun57@fukuoka-u.ac.jp https://xbun.jsac.jp/conference/no57.html	
8	2021年度溶接工学企画講座 ～産業分野のものづくりのトレンド～「自動車関連材料の溶接・接合技術自」～(Web開催)	溶接学会	TEL 03-5825-4073 jws-info@tg.rim.or.jp http://www.jweld.jp/	
9	2021年度 溶接工学専門講座 溶接疲労強度評価の基礎と応用(Web開催)	溶接学会	TEL 03-5825-4073 jws-info@tg.rim.or.jp http://www.jweld.jp/	
10	日本希土類学会第39回講演会(横浜)	日本希土類学会	TEL 06-6879-7352 kidorui@chem.eng.osaka-u.ac.jp http://www.kidorui.org/lecture.html	
12	ものづくりにおける最新の DX/DT～溶接・接合技術への展開～(東京)+(Web開催)	日本溶接協会	TEL 03-5823-6324 http://www.jwes.or.jp/	
12	第242回西山記念技術講座 最近の電気炉技術の進歩—平成30年を振り返る—(Web開催)	日本鉄鋼協会	TEL 03-3669-5933 educact@isij.or.jp https://www.isij.or.jp/	
12～14	創立70周年記念軽金属学会第141回秋期大会(Web開催)	軽金属学会	https://www.jilm.or.jp/	事前 11.11
13	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 055-220-8434 ydc2021-tr@yamanashi.ac.jp http://society.me.yamanashi.ac.jp/jsme/2021/	
15	第247回塑性加工技術セミナー「いまどきの塑性力学—基礎・測定・解析—」(Web開催)	日本塑性加工学会	http://www.jstp.or.jp	定員 50名
15～18	The 7th International Conference on the Characterization and Control of Interfaces for High Quality Advanced Materials (ICCCI2022)(富士吉田)	粉体工学会	http://ceramics.ynu.ac.jp/iccci2022/index.html iccci2022@ynu.ac.jp	
16	2021年度本多光太郎・湯川記念合同講演会(Web開催)(本号676頁)	東海支部	tokai@numse.nagoya-u.ac.jp https://jim.or.jp/INFO/pdf/info_501.pdf	参加 11.10
17	第79回固体イオニクス研究会(Web開催)	日本固体イオニクス学会	TEL 092-802-6967 proton@ifrc.kyushu-u.ac.jp	
17～19	INCHEM TOKYO 2021(東京)	化学工学会, 日本能率協会	TEL 03-3434-1988 INCHEM@jma.or.jp	
22～24	第20回破壊力学シンポジウム(和歌山県西牟婁郡)	日本材料学会	TEL 075-761-5321 jimu@office.jsms.jp http://www.jsms.jp/	
25～26	第59回高温強度シンポジウム(Web開催)	日本材料学会	TEL 075-761-5325 jimu@office.jsms.jp http://www.jsms.jp/	
25～26	第173回塑性加工工学講座「板材成形の基礎と応用～応用編～」(Web開催)	日本塑性加工学会	https://www.jstp.or.jp	定員 80名
25～26	電気加工学会全国大会(2021)(Web開催)	電気加工学会	zaikawa.kouichi@fitc.pref.fukuoka.jp TEL 093-691-0260 http://www.jsme.or.jp/	
28～12.2	The 9th International Symposium on Surface Science (ISSS-9)(高松)	日本表面真空学会	iss9@jvss.jp https://www.jvss.jp/iss9/	
29	研究集会「微小領域の力学特性評価とマルチスケールモデリング」2021(Web開催)(9号600頁)	研究会 No. 82	micromech_jim@nims.go.jp	
30～12.1	シンポジウム「先進自動車製造技術における接合技術2021」(Web開催)	溶接学会軽構造接合加工研究委員会	TEL 075-315-8472 jaaa@secretari.jp https://jaaa.secretari.jp/reg2021/guide/index.html	
2021年12月				
1	経産省・文科省連携磁性材料・高効率モータープロジェクト「MagHEM・ESICMM 合同成果報告会」(東京)	経済産業省(次世代自動車向け高効率モーター用磁性材料技術開発)	TEL 029-851-3354(内線3725) HIROSAWA.Satoshi@nims.go.jp	
1～3	第48回炭素材料学会年会(那覇)	炭素材料学会	TEL 03-5389-6359 tanso-desk@bunken.co.jp http://www.tanso.org/contents/event/conf2021/index.html	
1～3	EcoDesign2021(奈良)	エコデザイン学会連合	ecodesign2021_secretariat@ecodenet.com http://ecodenet.com/ed2021/	
8～10	第47回固体イオニクス討論会(徳島)	日本固体イオニクス学会	TEL 088-656-7577 nakamura.o.koichi@tokushima-u.ac.jp https://www.ssi-j.org/symp/ssi47/index.html	
9～10	第36回分析電子顕微鏡討論会(Web開催)	日本顕微鏡学会	TEL 011-706-6768 bunseki@eng.hokudai.ac.jp https://bunseki-denken.eng.hokudai.ac.jp/	11.30

開催日	名称・開催地・掲載号	主催	問合せ先	締切
9～10	2021年度 溶接入門講座～新入社員・構造部材設計技術者のための～(Web開催)	溶接学会	TEL 03-5825-4073 jws-info@tg.rim.or.jp http://www.jweld.jp/	
9, 10, 16	2021年度計算力学技術者(CAE技術者)1・2級の認定試験	日本機械学会	TEL 03-4335-7616 caenintei@jsme.or.jp http://www.jsme.or.jp/cee/	
9～10	第20回キャビテーションに関するシンポジウム(Web開催)	日本学会会議 第三部(予定)第20回キャビテーションに関するシンポジウム実行委員会	TEL 022-217-5229(直通) cav20-sendai@grp.tohoku.ac.jp http://www.ifs.tohoku.ac.jp/cfs/cav20/index.html	
10	第24回生体関連セラミックス討論会(京大)	日本セラミックス協会	https://www.ceramic.or.jp/bseitai/symposium/24th_Symp.html	
11～12	第33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—(富山)	日本材料学会	TEL 075-761-5321 RESYMPO2021@office.jsms.jp	
13～17	Materials Research Meeting 2021(MRM2021)(横浜)	日本 MRS	TEL 03-6264-9071 info_mrm@jmru.org https://mrm2021.jmru.org/	
2022年 1 月				
7	第99回レアメタル研究会(東大生産技研+Web開催)(本号678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	
8～9	第60回セラミックス基礎科学討論会(熊大)	日本セラミックス協会基礎科学部会	kiso60@chem.kumamoto-u.ac.jp http://www.ceramic.or.jp/bkiso	
2022年 2 月				
1～14	Mate2022 28th Symposium on “Microjoining and Assembly Technology in Electronics”(Web開催)	スマートプロセス学会他	TEL 06-6879-7568 mate@sps-mste.jp http://sps-mste.jp/mate/	
2022年 3 月				
11	第100回レアメタル研究会(東大生産技研+Web開催)(本号678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	
15～17	日本金属学会春期講演大会(東京大学駒場キャンパス)(予定)	日本金属学会	TEL 022-223-3685 FAX 022-223-6312 annualm@jim.or.jp	
2022年 9 月				
4～8	第18回アルミニウム合金国際会議(ICAA18)(富山)	軽金属学会	http://www.icaa18.org/	
21～23	日本金属学会秋期講演大会(福岡工業大学)(予定)	日本金属学会	TEL 022-223-3685 FAX 022-223-6312 annualm@jim.or.jp	

2021, 2022年度会報編集委員会 (五十音順, 敬称略)

委員長	竹田 修						
副委員長	田中 秀明						
委員	池尾直子	石川史太郎	井田駿太郎	植木 洸輔	宇部 卓司	大塚 誠	
	大野直子	岡田周祐	川西 咲子	木口賢紀	北村一浩	國枝知徳	
	小嶋隆幸	小島淳平	小柳 禎彦	小山元道	齊藤雄太	近藤亮太	
	齊藤信雄	篠原百合	佐々木秀顕	佐藤豊人	芹澤 愛	鈴木賢紀	
	鈴木真由美	田辺 栄司	高島克利	高山直樹	堤 祐介	趙 研	
	塚田祐貴	寺本武司	圓谷貴夫	寺西 亮	轟 直人	土井康太郎	
	徳永透子	長岡 亨	豊木研太郎	永井 崇	長谷川 誠	永瀬丈嗣	
	袴田昌高	本間智之	春本高志	藤井 進	松本洋明	松浦昌志	
	松垣あいら	宮崎秀俊	眞山 剛	三井好古	諸岡 聡	宮部さやか	
	盛田元彰	山本剛久	山崎由勝	山中謙太	吉年規治	山本知一	
	横井達矢	李 誠鎬					

まてりあ 第60巻 第10号(2021) 発行日 2021年10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 山村英明

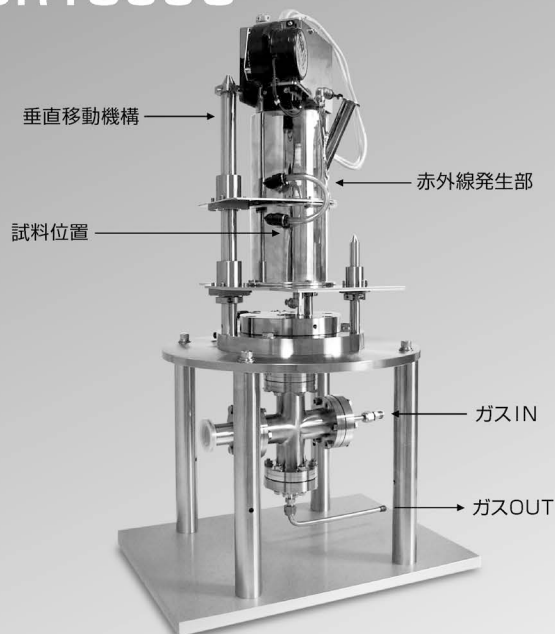
印刷所 小宮山印刷工業株式会社

発売所 丸善雄松堂株式会社

〒160-0002 東京都新宿区四谷坂町 10-10

超高温・高速昇温・超高温複合材料・耐熱合金等の熱処理！

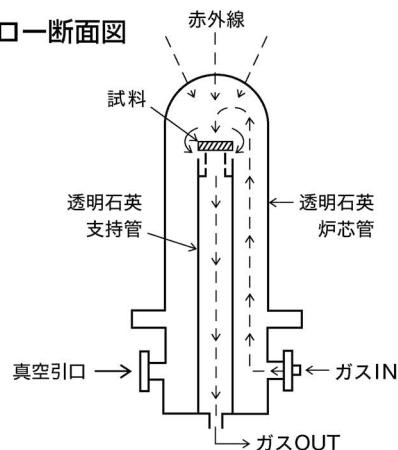
超高温スーパーRTA装置 SR1800G



特長

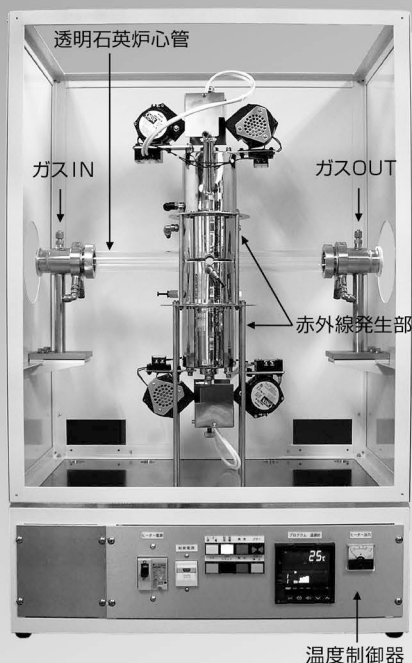
- ◆超高速昇温 1800℃まで1分以内
- ◆真空、ガスパージ、ガスフロー中熱処理
- ◆赤外線ランプ電力わずか2kWの省エネです

ガスフロー断面図



雰囲気ガスの流れは試料表面に放射します。試料は上方から赤外線の集光放射を受け、短時間で超高温度に到達します。

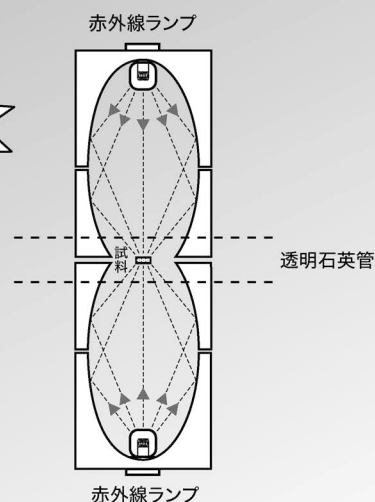
対面照射式 赤外線真空炉 IVF298CV



特長

- ◆超高温・超高速熱処理 1700℃
- ◆立体状試料も均一加熱
- ◆連続昇降温制御可能

MAX
1700℃



透明石英管内試料に上下両面から赤外線を照射・昇温。クリーン加熱ができます。真空・ガス中の昇温もできます。

★昇温試験も受け付けております。詳細はホームページをご覧ください。

サーモ理工

 株式会社 **サーモ理工**

〒181-0013
東京都三鷹市下連雀8-7-3 三鷹ハイテクセンター
TEL.0422-76-2511 FAX.0422-76-2514
<https://www.thermo-r.co.jp/>
E-mail: sekigai@thermo-r.co.jp

<https://www.thermo-r.co.jp/>

<https://www.thermo-r.co.jp/>

ALLOYS & METALS

品名	純度	形状	品名	純度	形状	品名	純度	形状
純 金 属			高 純 度 金 属			中 間 合 金		
高純度アルミニウム	99.99%	約1kgインゴット	アルミニウム	99.999%	粒状100g入	燐 銅	P>14.5%	粒 状
アルミニウム	>99.7%	〃	アルミニウム	〃	約100g塊	シリコン 銅	Si 15%	約1kgインゴット
アルミニウム粒	99.99%	粒状1kg入	銀	99.999%	粒 状	マンガン 銅	Mn 25%	〃
アルミニウム粉	99.7%	粉 末	ビスマス	99.9999%	粒状100g入	マグネシウム 銅	Mg 50%	約800gインゴット
銀	99.99%	粒 状	ビスマス	〃	約100g塊	クロム 銅	Cr 10%	約1kgインゴット
ボロンクリスタル	99.4%	3~8mm小塊	高純度クロム(4N5)	99.995%	薄 片 状	テルル 銅	Te 50%	〃
ボロンアモルファス	95~97%	粉 末	無 酸 素 銅	99.99%	10×10×1mm	コバルト 銅	Co 10%	〃
ビスマス	99.99%	針 状	鉄(マイロンSHP)	99.99%	25×25×2mm	ニッケル 銅	Ni 30%	〃
コバルト粒(ロシア産)	99.3%	粒 状	ガリウム	99.9999%	粒状25g入	鉄 銅	Fe 10%	〃
電解コバルト(従来品)	99.9%	フレーク状	ゲルマニウム	99.999%	約50g塊	チタン 銅	Ti 50%	〃
電解コバルト(FB)	99.9%	約25×25×10mm	インジウム	99.999%	粒状100g入	ジルコニウム 銅	Zr 50%	〃
金属クロム	99%	塊 状	インジウム	〃	約100g塊	ボロン 銅	B 2%	粒 状
電解クロム	99%	薄 片 状	マンガン	99.999%	薄 片 状	アルミ 銅	Cu 40%	約5~7kgインゴット
クロム粉	99%	粉末500g入	錫	99.999%	粒状100g入	アルミマグネシウム	Mg 20%	約2kgインゴット
電気銅	99.99%	約25×50×10mm	錫	〃	約100g塊	アルミマンガン	Mn 10%	約5kgインゴット
電解鉄(アトミロンMP)	99.9%	小片状25kg入	アンチモン	99.9999%	約100g塊	アルミニウム	Ni 20%	〃
電解鉄(アトミロンYL)	〃	〃	アンチモン	〃	粒状100g入	アルミニウム	Cr 5%	〃
電解鉄(アトミロンFP)	〃	〃	テルル	99.9999%	約100g塊	アルミクロム	Ti 5%	約4~5kgインゴット
電解鉄(アトミロンXL)	〃	〃	ル	〃	粒状100g入	アルミチタン	Si 25%	〃
電解鉄粉	99%	粉末1kg入	亜鉛	99.999%	約100g塊	アルミシリコン	Co 5%	〃
ハフニウム	99.6%	スポンジ小塊	亜鉛	〃	粒状100g入	アルミコバルト	Mo 5%	〃
インジウム	99.99%	塊 状	亜鉛	99.9999%	約100g塊	アルミモリブデン	W 2.5%	〃
マグネシウム200	99.9%	約200g塊	亜鉛	〃	約100g塊	アルミタングステン	Be 2.5%	約50gインゴット
マグネシウム100	99.9%	約100g塊	チタン	99.9%	5φ×150mm塊	アルミベリリウム	Fe 50%	塊 状
電解マンガン	99.9%	薄 片 状	高純度シリコンスクラップ	99.999%	塊 状	アルミジルコニウム	Zr 5%	約5kgインゴット
モリブデン粉	99.9%	粉 末	レアアースメタル			アルミボロン	B 4%	約200gインゴット
ニオブグラニュー	99.9%	3~10mm小塊	イットリウム	99.9%	塊状、削状、粉状	アルミバナジウム	V 50%	3~10mm小塊状
ニオブ粉	〃	粉 末	ランタン	〃	〃	アルミストロンチウム	Sr 10%	約100gインゴット
電気ニッケル	99.99%	25×25×10mm	プラセオジウム	〃	〃	アルミカルシウム	Ca 10%	約2.5kgインゴット
ニッケルペレット	99.97%	6~12mm球状	ネオジウム	〃	〃	ニッケルボロン	B 15%	1~30mm小塊状
レニウム粉	99.99%	粉 末	サマリウム	〃	〃	ニッケルニオブ	Nb 60%	塊 状
ルテニウム粉	99.9%	〃	イッテルビウム	〃	〃	ニッケルマグネシウム	Mg 50%	塊 状
アンチモン	99.9%	塊 状	テルビウム	〃	〃	コバルトボロン	B 15%	1~30mm小塊状
金属シリコン(中国産)	99%	〃	ジスプロシウム	〃	〃	燐 錫	P 5%	インゴット
金属シリコン(ブラジル産)	〃	〃	ホルミウム	〃	〃	Uアロイ(低融点合金)		
錫インゴット	99.99%	約1kgインゴット	エルビウム	〃	〃	Uアロイ 47	融点47±2℃	約500gインゴット
錫粒	〃	粒 状	ガドリニウム	〃	〃	Uアロイ 60	60±2℃	〃
タンタル塊	99.9%	3~10mm小塊	ツリウム	〃	〃	Uアロイ 70	70±2℃	〃
タンタル粉	〃	粉 状	ルテチウム	〃	〃	Uアロイ 78.8	78.8±2℃	〃
テルル	99.99%	小 球 状	セリウム	〃	〃	Uアロイ 91.5	91.5±2℃	〃
スポンジタン	99.7%	スポンジ塊	ユーロビウム	〃	〃	Uアロイ 95	95±2℃	〃
チタン板	JIS 1種	250×250×1mm	ミッシュメタル	TRE>97%	5.4φ×6mm 200g入	Uアロイ 100	100±2℃	〃
バナジウム	99.7%	3~10mm小塊	フェロアロイ			Uアロイ 124	124±2℃	〃
バナジウム粉	〃	粉 末	フェロモリブデン	Mo 60%	3~10mm小塊状	Uアロイ 150A	150±2℃	〃
タングステン粉	99.9%	〃	フェロニオブ	Nb 60%	10~30mm 〃			
タングステンスクラップ	99%	板 状	フェロバナジウム	V 80%	3~15mm 〃			
亜鉛インゴット	99.99%	約2kgインゴット	フェロボロン	B 20%	1~30mm 〃			
亜鉛粒	〃	粒 状	カルシウムシリコン	Ca30%Si60%	小 塊 状			
ジルコニウム	>99.5%	スポンジ塊	フェロホスホル(リン鉄)	P20~28%	塊 状			

お問い合わせは、必ず下記事項をご記入の上、FAXしてください。

「社名」または「大学名」、および「所属と名前」、個人の方は「名前」
「郵便番号・住所・電話・FAX」・「商品名・純度・形状・希望数量」
見積・注文でお急ぎの場合は「至急」と明記して下さい。

FAX (03)
3294-9336

株式会社 **平野清左衛門商店**
〒101-0047 東京都千代田区内神田1丁目5番2号 TEL(03)3292-0811

商品の詳細はホームページでご覧になれます。
<http://1921seizaemon.jp/>

●土曜・日曜・祭日休業 ●手形取引はいたしません
●輸出はせず国内取引のみ

高温真空 3000℃への挑戦

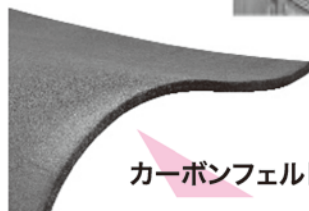
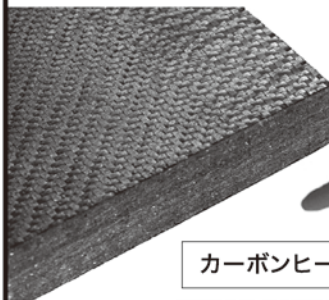
URL: <http://www.mechanical-carbon.co.jp/>

- 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
- MGR回転式脱ガス装置用ローター
- 高温真空炉 炉内メンテナンス
- メカニカルシール、パッキン等の摺動部品修理・改造



炉の改修

ハイブリット成形断熱材



カーボンフェルト

高断熱+省エネ

カーボンヒーター、カーボン断熱材、高温真空炉内治具、消耗品等のご相談はスペシャリストにお任せください。

6面シート
貼り



メカニカルカーボン工業株式会社

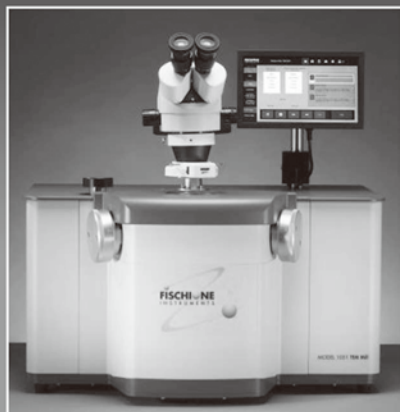
本社: 247-0061 神奈川県鎌倉市台5-3-25 TEL. 0467-45-0101 FAX. 0467-43-1680

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

ダメージのない高品質のTEM/SEM用試料の作製に！

米国E.A.Fischione社製イオンミリング装置 TEM Mill M1051/SEM Mill M1061



<https://www.newmetals.co.jp/cat04/cat0401/list.html>

・加速電圧0.1kV～10kV

各種オプション

- ・真空トランスファーカプセル (M1051用/M1061用共にデモ機有り)
- ・液体窒素素冷却
- ・モーター駆動によるミリング角度の調整

国内デモ機ございます！

お問合せ・お申込み先・・・



株式会社ニューメタルス エンド ケミカルス コーポレーション 機械部

本社: 〒104-0031 東京都中央区京橋1-2-5 京橋TDビル

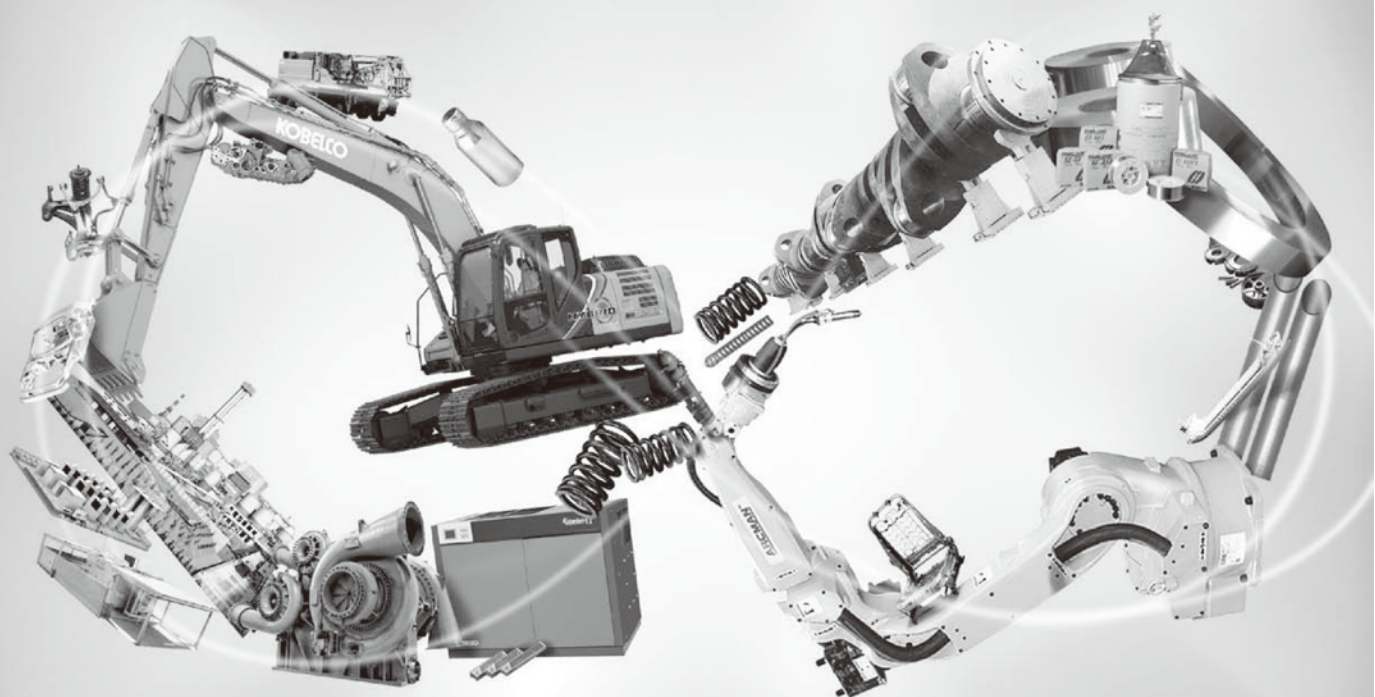
TEL: 03-3231-8600

06-6202-5108

東日本担当 柴田 shibata@newmetals.co.jp

西日本担当 谷野 tanino@newmetals.co.jp

領域を超えると、
可能性は無限大。



乗り物の軽量化。工場の省エネ化。水素ビジネスの推進。電力の安定供給。
人々の暮らしを支え、社会の課題に挑んできた私たちの独創的な「技術力」は、
幅広い事業分野それぞれが持つ、知見を掛け合わせることで磨かれてきました。
これからも、複合経営ならではの領域を超えた開発力を活かし、
「技術」の無限の可能性に挑んでいきます。

「素材」「機械」「電力」で、未来を切りひらく。

KOBELCO
神戸製鋼グループ