

# Materia Japan

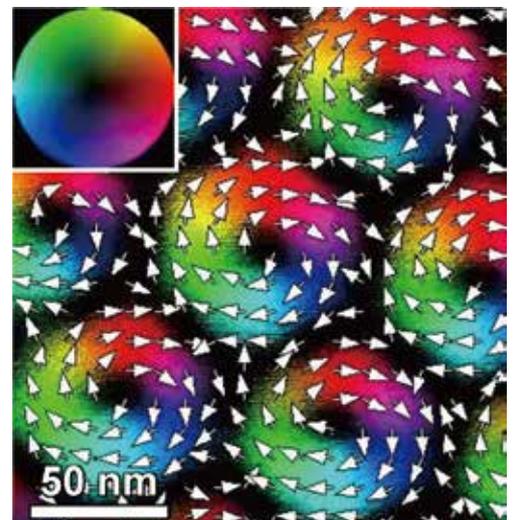
- 温故知新で未来につなぐ木目金
- 金属なんでもランキング!
- 大学における産学官連携の取り組み
- DPC STEM による局所電磁場の直接観察
- 酸化物系ナトリウムイオン伝導体
- 入門講座 放射光による工業材料評価  
~2. 放射光による回折・散乱測定~
- 先達からのお便り 村上正紀先生 (京都大学名誉教授)

# まてりあ

Vol.58 MTERE2 58 (8) 421~486 (2019)

2019

8



# マテリアルズインフォマティクスによる材料ゲノムの解析との連携！ 効率的な材料内部組織の三次元可視化！

全自動シリアルセクションング3D顕微鏡 **Genus\_3D**  
Fully-automated serial sectioning 3D microscope

HDR機能  
新搭載！

**新搭載！ 設定条件ライブラリー**

設定値、動作設定、消耗品の自動選定

**全自動！ 電解エッチング**

チタン、アルミ、ニッケル、ステンレス等

**NEW！ 純正消耗品**

逐次研磨像

3D

Nakayamadenki Co.,Ltd.



組織特徴の数値化

**材料情報統合システム“MIPHA”販売開始！**



高度な材料組織形態解析と順・逆解析を搭載

3D ・粒径 ・体積率 ・表面積 ・数密度 ・連結性 ・分岐性 ・曲率 等  
2D ・粒径 ・面積率 ・真円度 ・凸度

国内総発売元



株式会社 新興精機

大阪営業所

大阪府吹田市広芝町7-26 米澤ビル第6江坂301号

TEL : 06-6389-6220 FAX : 06-6389-6221

http://www.shinkouseiki.co.jp

営業窓口 : 池内 oosaka@shinkouseiki.co.jp

世界の材料科学・工学をリードする第一線の研究者・技術者に向けて

**付設展示会  
大会プログラム広告  
ランチョンセミナー**

**募集のご案内**



付設展示会（機器・ソフトウェア・書籍）

・1コマ ¥140,000（税別）

大会プログラム広告

・1色1頁 ¥70,000（税別）

・1色1/2頁 ¥40,000（税別）

ランチョンセミナー

・1枠 ¥100,000（税別）

※付設展示会ご出展の場合は、1枠 ¥20,000（税別）

日本金属学会・講演大会 開催予定

**2019年秋期（第165回）講演大会**  
9/11（水）～9/13（金）  
岡山大学 津島キャンパス

**2020年春期（第166回）講演大会**  
3/17（火）～3/19（木）  
東京工業大学 大岡山キャンパス

ご出展・広告掲載のお問い合わせ・お申込み

**MEIHOSSHA**  
ADVERTISING AGENCY

株式会社 明報社

〒104-0061 東京都中央区銀座七丁目12-4 友野本社ビル

TEL (03) 3546-1337 FAX (03) 3546-6306

E-mail info@meihosha.co.jp ホームページ www.meihosha.co.jp

# 8

2019  
Vol.58  
No.8

# まてりあ

◎会告原稿締切：毎月1日  
(翌月号(1日発行)掲載です.)

巻頭記事	温故知新で未来につなぐ木目金	421
金属なんでもランキング! No. 4	電気伝導率	425
フロムナード	大学における産学官連携の取り組み 正橋直哉 大学は産業界とどのように連携すればよいか	427
最近の研究	DPC STEMによる局所電磁場の直接観察 柴田直哉 材料・デバイス内部の電磁場分野を超高分解能観察できる DPC STEM 法を紹介. 原子内部電場の可視化にも成功!	433
	次世代電池にむけて再注目される酸化物系ナトリウムイオン伝導体 林 克郎	440
	セラミック電解質の革新電池への展開を紹介. NaS 電池に始まり, ハイブリッド型空気電池, 全固体電池の鍵材料に.	
新進気鋭	機械学習を活用したアーク溶接現象数法則式の導出と知識抽出 北野萌一	449
入門講座	放射光による工業材料評価 ~2. 放射光による回折・散乱測定~ 廣沢一郎	453
	種々の X 線散乱測定技術の例と, X 線による材料分析手法の代表である放射光を用いた粉末 X 線回折測定を行う際の試料準備, 測定条件選択の勘所を紹介.	
新技術・新製品裏話	低温焼成用ジルコニア粉末の開発 松井光二	458
研究所紹介	東北大学金属材料研究所・新素材共同研究開発センター 梅津理恵	461
先達からのお便り	人口減少はイノベーション創出の絶好のチャンスでもある! 村上正紀	462
はばたく	本当にそうか? 何故そうなるのか? 権藤詩織	466
本会記事	会告 467 新入会員 480 共催・支部行事 475 次号予告 480 掲示板 476 金属学会シンポジウム 481 訂正 477 行事カレンダー 483 会誌・欧文誌 8 号目次 478	

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

**今月の表紙写真** 磁気スキルミオン格子の DPC STEM 観察結果(本論文文献(15)参照). 像は DPC 像から構築した磁場ベクトルカラーマップ. (柴田直哉 433頁 図6より改変)

表紙デザイン: 北野 玲  
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.

# 温故知新で 未来につなぐ 木目金

もく め がね



木目金とは、色の異なる金属を幾重にも重ね合わせたものを丹念に鍛え、美しい木目状の文様を作り出す金属工芸技術である。

作り手の思いと偶然性が重なり合って現れる金属の表情には深い味わいがある。

江戸時代に生まれた木目金は武士の刀の鐔などに施されていたが、廃刀後に伝承が途絶えた。

しかし現代になって復元のための研究が進み、

ジュエリー・デザインの一つとして新たな魅力を発信している。

## 江戸時代初期、刀装具職人によって誕生した木目金

無機質な金属も、人の知恵と技が加わることで温もりのある表情へと姿を変える。その名の通り、年輪のような美しい木目文様を生み出す木目金は、どこか懐かしいのに新しく、平面的な文様ながら立体的な印象を覚えるのも不思議だ。その歴史や文化を知れば知るほど、金属が持つ可能性の奥深さに引き込まれていく。

木目金の歴史は今から約400年前の江戸時代初期、刀装具の職人だった出羽秋田住（出羽ノ国、現在の秋田県在住）正阿弥伝兵衛が考案した、「グリ彫り」の鐺に始まると伝えられている<sup>(1)</sup>。グリ彫りとは、色の異なる金属を幾重にも重ね合わせたものに、唐草や渦巻きの文様を彫ったものである。その起源は諸説あるが、中国で宋から明の時代に作られた「屈輪」が発祥との説が一般的だ。朱、黒、黄などの色漆を何層にも塗り重ね、蕨型の曲線を彫り入れる技法で、寺院建築の意匠などに用いられた。日本には室町時代に輸入され、茶道具として珍重された。

グリ彫りの凹凸部分を叩いたり、ねじったりして平らに延ばせば、独特の文様が生まれるかもしれない——。そのことに気づいた正阿弥伝兵衛が、素材の漆を金属に変えて試してみたことから、木目金という技法が

### 刀の鐺

戦国時代は鉄製で簡素であった刀装具も、江戸時代になると華やかな装飾に姿を変えた。



グリ彫り鐺 高橋興次作

興次作のグリ彫りは端正ながら肉置きもたっぷりしていて堂々とした立体感がある。



印籠と根付(漆 江戸時代後期)

最も典型的な形状のグリ彫りの印籠。根付もひょうたん型の中では基本的な形。

生まれたのではないかとされている。

正阿弥伝兵衛によって生まれた木目金の技術を完成させたのは江戸時代中期、グリ彫りの得手として活躍した高橋正次の門弟、高橋興次である。以来、木目金は矢立や煙管などの実用品に用いられて江戸の民衆文化に浸透し、印籠や煙草入れなどの小物に施されるようになった。しかし明治9年に廃刀令が公布されると、武器としての刀の製作は禁じられ、刀工たちは廃業に追い込まれた。

木目金の伝承も途絶え、一時は「幻の技術」と呼ばれるようになったが、熱意ある研究者や職人たちの手によって再び技術をよみがえらせることができた。そして今、木目金はジュエリー・デザインの世界でも魅力ある存在として人気を博している。

## 使用する金属の種類に見られる幾多の変遷

そもそも江戸時代に木目金の素材として使われていたのは、銅、銀、金と、銅に銀や金を混ぜた銅合金のみであった。銅と銀を3:1で混ぜ合わせたものを「四分一」といい、銅と金を100:3で同様にしたものを「赤銅」と呼んでいた。日本では「煮色着色」と呼ばれる伝統的な仕上げ方法が用いられた。通常水1Lに対して硫酸銅と緑青を3gずつ入れ、沸騰させた液の中に脱脂した金属を浸し煮込む方法である。金属によって煮込む時間はさまざまだが、約40分で銅は朱色に、赤銅は黒く、四分一はグレーに

変化する。煮込む液の成分により微妙に異なる何種類もの色を得ることができ、銅、赤銅、金、銀と合わせると日本独特の多彩な表現が可能となった。

とはいえ、煮色着色は金属の表面が変色するだけであり、材質そのものが変化するわけではない。着色層は非常に薄く、絶えず何かに触れるようなものには使用できない。そのため装飾品などに用いられる現代の木目金には、ピンクゴールドやイエローゴールド、ホワイトゴールド、シルバーやプラチナといった元来色の異なる金属が使用されている。

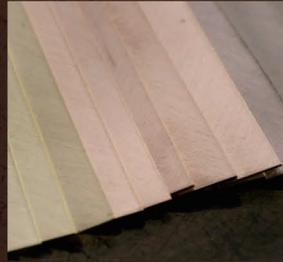
## 金属を原子レベルで密着させる「拡散接合」

木目金の制作工程は、何種類もの金属を重ね合わせたミルフィーユ状の地金を作ることから始まる。

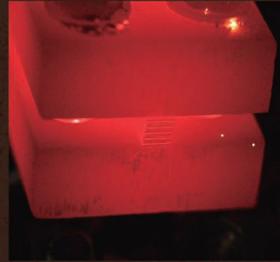
金属は溶接しなくても平坦で清浄な面同士を密着させれば接合できる。しかし、金属材料の表面には原子サイズの凸凹があり、汚れていたり、厚い酸化皮膜で覆われたりする場合もある。このような面を突き合わせて接合するには、いかに接合面上の酸化

## 木目金の制作工程

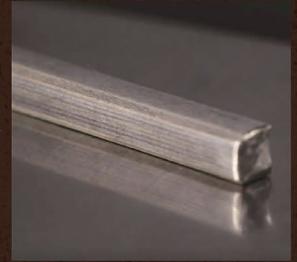
色の異なる金属板を接合し、彫りやねじり加工を施し平らにすることで木目文様となる。



素材の金属板



拡散接合



接合した金属板



ねじる



彫る



延ばす



木目金板

皮膜を取り除き、接合させるかが大きなポイントとなる。木目金の地金を作る際に用いられるのは「拡散接合」である。金属板の表面を炭研ぎして平滑にし、入念に脱脂・洗浄作業を行った上で加熱及び加圧を施し、原子の拡散を利用して接合する。出来上がった木目金に金属の積層が明瞭に現れるのは、接着剤を使用しない拡散接合技術によるところが大きい。

木目金の最も一般的な文様の制作方法は彫りによるものである。始めに、鑿たがねを使って地金をすくい取るように何層か掘り起こす。その後、地金を徐々に薄く打ち延ばし、丹念に鍛え、さらに彫りを加えたり、ねじっ

たり、曲げたりなどの作業を繰り返し、再び平らに打ち延ばすことで、凸凹のない美しい文様が出来上がる。

## 復元研究制作で往時の作り手の思いを追体験

日本発祥の木目金は世界でも「Mokume Gane」として知られ、ポストン美術館やデンマーク工芸博物館などでも作品が所蔵されている。日本が世界に誇る伝統金属工芸技術を現代に活かしたいとの思いで、その復元研究制作に取り組んだのは

高橋正樹氏（(株) 杳目金屋代表取締役、NPO法人日本杳目金研究所を立ち上げた美術研究者）。復元のための研究の題材となったのは、最古の木目金と言われる出羽秋田住正阿弥伝兵衛作の小柄をはじめ、吉野川の桜や竜田川の紅葉を描いた高橋興次作の鐺などである。

高橋氏は完成物そのものよりも、江戸時代の職人が制作工程の中で何を考え、どのように素材と対話をしながら制作に取り組んだのかを追体験できることに意義を見出した。それは、単に金属の表面に独特な文様を作り出す加工技術だけが木目金本来の価



### 様々な加工によって表情を変えていく木目金

(上) ねじり加工で作る文様も基本的な加工の一つ。万力を使い地金を焼きながら、ねじる。(中) 彫り加工。(下) 平坦に延ばした地金。

### 竜田川図鐺 高橋興次作

木目金の文様を効果的に地紋として取り入れた作品。復元研究の題材の一つにもなった。



# 偶然が生み出す文様に魅せられて

SCIENCE & INNOVATION



値ではないと考えるからだ。金属素材の変化を感じ取った制作者の思いや気持ちが、そのまま文様に現れることも木目金の魅力となっている。

## 唯一無二の文様を活かした結婚指輪

文様の美しさもさることながら、手作りであるがゆえに同じ文様を二度と再現できないのが木目金の特徴である。その唯一無二の文様を活かし、高橋氏は結婚指輪を制作した。一つの指輪を新郎新婦となる二人

の手で二つに分けて作るフルオーダーの結婚指輪だ<sup>(2)</sup>。木目金を単なる伝統工芸として扱うのではなく、人の営みと関連させて技術を伝承していることが興味深い。古きを温ねて新しきを知る“温故知新”の精神で木目金が追求されている。約400年前に誕生した木目金は、これからも人々の生活や文化に寄り添いながら、作り手の思いを載せて未来へとつながっていく。

(取材協力、画像提供：(株) 杵目金屋, NPO法人日本杵目金研究所)

### 文 献

- (1) 木目金の教科書【新装版】企画・監修 高橋正樹+日本杵目金研究所
- (2) 株式会社杵目金屋ホームページ：<https://www.mokumeganeya.com/>

### 復元制作された木目金

秋田県指定有形文化財 小柄 金銀地杵目鍛 銘 正阿弥伝兵衛  
江戸時代中期 金、銀、赤銅、素銅  
復元制作 高橋正樹



### 木目金を施した結婚指輪

新郎新婦となる二人の手で一つの指輪を二つに分けて作る結婚指輪「つながるカタチ」。2015年グッドデザイン賞、2016年、2017年のドイツのRed Dot Design Award、2018年 iF Design Awardを受賞している。

## INTERVIEW

### 新しい価値や魅力を発信できるモノゴトづくりへ

未だに詳細な研究がなされていない木目金のミステリアスな部分にロマンを感じている。また、一般的な金属加工は、作り手の行為がそのまま文様を含めた姿形に反映されるため、基本的に自分の技術を超えるものを作ることはできないが、木目金の場合にはそこに“偶然性”がある。したがって、自分の想像を超えるような出会いがあり、素材と対話することによって、作業工程ごとにさまざまな発見ができる。それがとても刺激的だ。

自分の我を通すだけでは良い作品は生まれない。素材がスムーズに形状を出せるよう、こちらがサポートするような形で作業を進めていくことが大切だ。その意味で、復元のための研究は重要な意味があった。当時の職人もいろいろと試行錯誤を重ねていたと思う。だからこそ、後世に残る素晴らしい作品が誕生したのだということを確認し、理解することができた。単に古いものと同じものを作るのとは全く別の次元のものだった。

結婚指輪を考案したのは、オリジナリティのある、世界に一つの指輪を提供したいと考えたからだ。そこで、もともとつながっていた文様を二人で

分かち合う体験の記憶が指輪に痕跡として残るデザインを開発した。お客様にとっても我々にとっても意義のある作品になったと思う。

今後は手作りだけに甘んじることなく、テクノロジーを取り入れ新しい木目金の世界を創造していきたい。江戸時代の作品の技術解明や資料の編さんにもより一層力を入れていこうと思う。これからの日本には、スペックだけを考慮したモノづくりというよりは、何か新しい価値や魅力を発信できるようなモノゴトづくりが重要だ。また、それをできるのが日本である。私は江戸時代から続く木目金を一つの“道”ととらえ、その神髄をさらに究めていきたいと考えている。



高橋 正樹 さん  
株式会社杵目金屋  
代表取締役 博士 (美術)

### 人気の婚約指輪

結婚指輪にぴったりと重なる婚約指輪「恋風」。



# TEST 2019 JAPAN TESTING TECHNOLOGY SHOW 2019

## 第15回総合試験機器展

2019年9月11日(水)～13日(金)  
東京ビッグサイト 南ホール

<http://www.jtma.jp>

### 【開催概要】

**名 称:** TEST2019 [第15回総合試験機器展]  
**テ ー マ:** 未来につなぐ試験と計測 “見せる信頼—確かな品質”  
**会 期:** 2019年9月11日(水)～13日(金) 3日間  
**開催時間:** 10:00～17:00  
**会 場:** 東京ビッグサイト 南ホール  
**主 催:** 一般財団法人日本試験機工業会  
**後 援:** 経済産業省(申請中)  
**特別協力:** フジサンケイ ビジネスアイ  
**協 賛:** 独立行政法人製品評価技術基盤機構(NITE)、  
 公益財団法人日本適合性認定協会(JAB)、  
 一般財団法人日本品質保証機構(JQA)、  
 一般社団法人日本機械工業連合会、  
 日本材料試験技術協会、  
 日本電気計器検定所(JEMIC)  
**展示会事務局:** (株)シー・エヌ・ティ

### 【出展内容】

- ◇材料試験機
- ◇構造物試験機
- ◇動力・釣合い試験機
- ◇環境試験装置
- ◇振動・衝撃試験機
- ◇非破壊検査・試験機
- ◇画像入力/画像処理/画像解析/3次元計測
- ◇受託試験・委託試験・レンタル・校正業務
- ◇計測評価・その他試験機
- ◇試験解析ソフト(DIC技術など)/試験分析/HILS

### 【開催記念セミナー】

聴講無料、事前申込制(8月上旬～公式サイトにて)

9月11日(水)	<b>基礎セミナー K1</b> 10:15～11:00 <b>「硬さ試験」の基礎</b> 日本試験機工業会 材料試験技術委員会 硬さ試験分科会
	<b>基礎セミナー K2</b> 11:45～12:30 <b>金属材料のシャルピー式衝撃試験機の基礎講座</b> 日本試験機工業会 材料試験技術委員会 疲れ・靱性試験分科会
	<b>基礎セミナー K3</b> 13:45～14:30 <b>「衝撃・落下試験」の基礎</b> 日本試験機工業会 環境装置技術委員会 機械環境分科会
	<b>応用セミナー S1</b> 15:00～16:10 <b>ISO破壊じん性試験規格に関わる日本の取組み</b> ISO/TC 164/SC 4/WG 3(破壊試験) エキスパート
9月12日(木)	<b>基礎セミナー K4</b> 10:15～11:00 <b>「引張・圧縮試験」の基礎から最新の試験例を紹介</b> 日本試験機工業会 材料試験技術委員会 静的強度試験分科会
	<b>基礎セミナー K5</b> 11:45～12:30 <b>ゴム材料の最新規格情報とゴム材料用試験機</b> 日本試験機工業会 環境装置技術委員会 耐候性分科会
	<b>基礎セミナー K6</b> 13:45～14:30 <b>「耐候性試験」の基礎</b> 日本試験機工業会 環境装置技術委員会 耐候性分科会
	<b>基礎セミナー K7</b> 15:15～16:00 <b>「腐食試験」の基礎と現状と今後の展開</b> 日本試験機工業会 環境装置技術委員会 腐食環境分科会
9月13日(金)	<b>基礎セミナー K8</b> 10:15～11:00 <b>「疲労試験」の基礎講座</b> 日本試験機工業会 材料試験技術委員会 疲れ・靱性試験分科会
	<b>基礎セミナー K9</b> 11:45～12:30 <b>「環境試験」の基礎</b> 日本試験機工業会 環境装置技術委員会 気象環境分科会
	<b>基礎セミナー K10</b> 13:45～14:30 <b>「振動試験」の基礎(仮)</b> 日本試験機工業会 環境装置技術委員会 機械環境分科会
	<b>応用セミナー S2</b> 15:15～16:00 <b>加速試験</b> 日本試験機工業会 環境装置技術委員会 委員長

### 【展示会に関する問い合わせ先】

(株)シー・エヌ・ティ 担当:岩崎・吉田  
Tel. 03-5297-8855 Fax. 03-5294-0909 E-mail: test2019@cnt-inc.co.jp



# 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。



容器がセットされる様子。

## 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併せて  
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。



▲P-5/4

世界で初めて容器ひとつで  
遊星運動に成功した  
昨年度のベストセラー機種



▲P-6

少量試料を対象にした  
パワフルな機種



▲P-7

### 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、窒素ケイ素、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の国際安全基準をクリアー

## 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7-12-5

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

**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。

## フリツ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7-12-5

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

# 金属なんでもランキング!

## No.4 電気伝導率

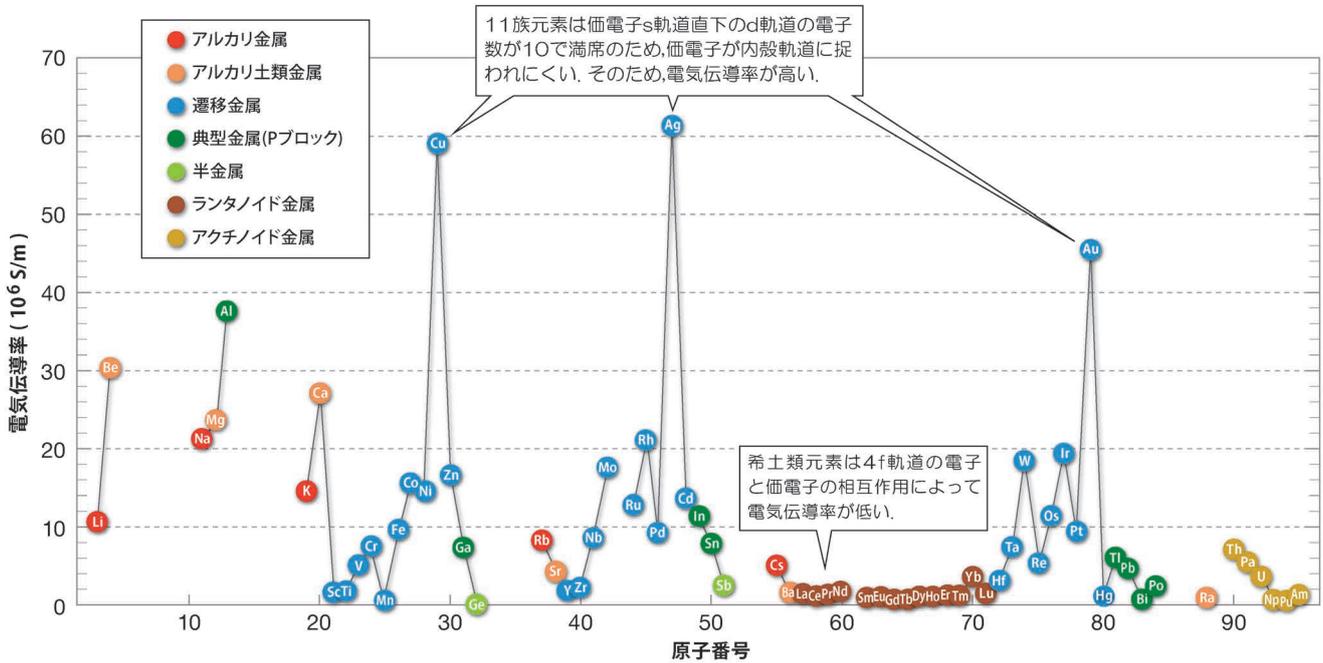


図1 各元素の電気伝導率。

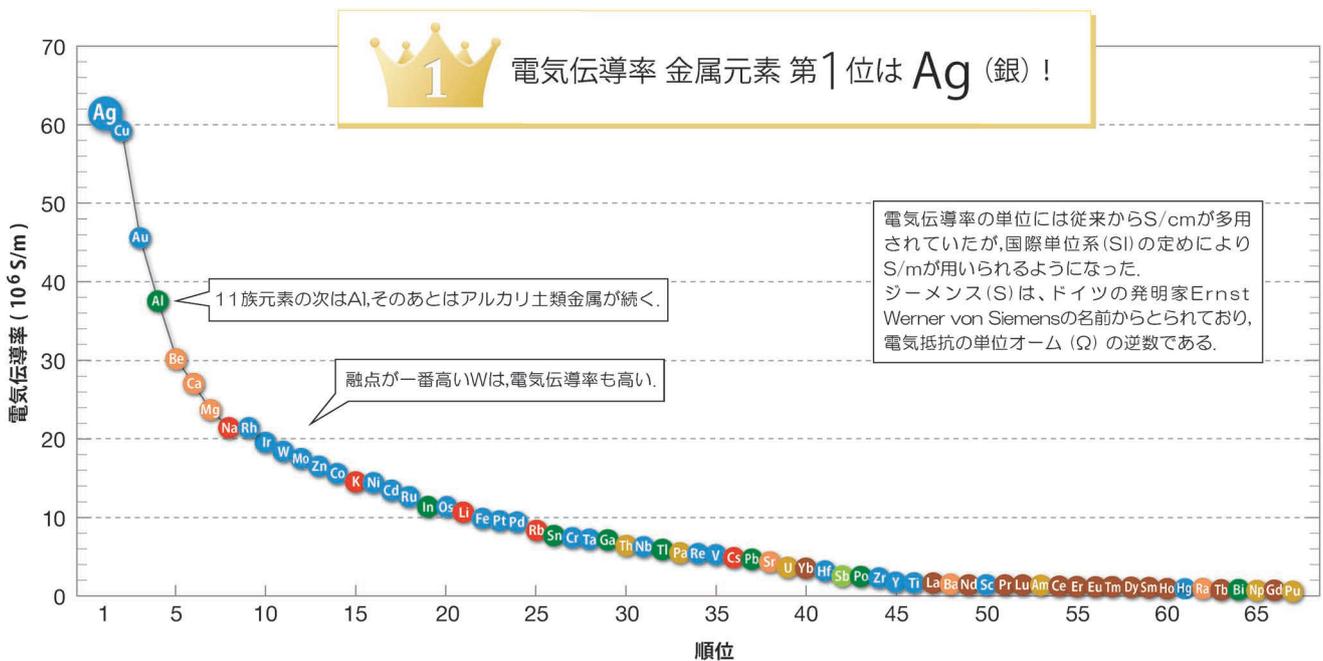


図2 金属元素の電気伝導率ランキング(67位まで)。

- 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) Chemistry of the Elements, 2nd Edition: N. N. Greenwood, A. Earnshaw, Butterworth-Heinemann (1997).  
 (3) N. F. Mott: Proc. R. Soc. A, **153**(1936), 699.

次号！金属素描 No. 5 クロム

公益社団法人 The Japan Institute of Metals and Materials

# 日本金属学会

未来を先導する領域を開拓し、  
世界に発信する

## 2019年 秋期 第165回 講演大会

会期 2019年 9月11日(水)~13日(金)

会場 岡山大学 津島キャンパス

講演概要がWEB公開に変わります!(DVDは廃止となります。)  
「参加証引換券」は参加申込者が各自ダウンロード印刷して頂き、  
大会受付へ提出となります!



主なシンポジウムテーマ

- S1: ハイエントロピー合金の材料科学 II
- S2: 材料変形素過程のマルチスケール解析 (II)
- S3: キンク強化の材料科学 II
- S4: 水素エネルギー材料—Ⅳ
- S5: 先進ナノ構造解析に基づく材料科学の新展開 II
- S6: ナノ・マイクロスペーステイリング II
- S7: 医療・福祉のための Additive Manufacturingの材料科学 III
- S8: マテリアルズ・インテグレーション (III) —順問題から逆問題へ—
- K1: 高性能軟磁性材料の現状と課題
- K2: 若手科学者へ贈る研究のヒント II —未踏領域へ到達するために—
- K3: 自動車の大変革に貢献する材料技術の最新動向  
(自動車技術会・日本鉄鋼協会との合同シンポジウム)

演題登録締切日

2019年 7月5日(金)

事前参加予約締切日

2019年 8月27日(火)

問合せ

公益社団法人 日本金属学会 講演大会係  
〒980-8544 仙台市青葉区一番町1丁目14-32  
TEL:022-223-3685 E-mail:annuaim@jim.or.jp

詳しくはホームページをご覧ください

<https://jim.or.jp/>



# 大学における産学官連携の取り組み

正橋直哉\*

## 1. はじめに

昨今「産学連携」を耳にする機会が増えている。連携の意義は、技術革新や社会問題の解決促進を通して社会の発展に寄与することだが、背景には、我が国の経済・財政・外交・科学等における国際競争力の低下の打開として、大学等が保有する知的基盤の活用や強化がある。また、大学による社会貢献への期待や独立行政法人(独法)化に伴う厳しい財政、産業界でのオープンイノベーションへの意識改革も関与しよう。国は1998年8月に「大学等技術移転促進法(TLO法)」, 1999年8月に「産業活力再生特別措置法」, 2000年4月に「産業技術力強化法」を立法し産学連携を推進した。2004年4月には国立大学の独法と共に、大学は自己責任による運営が任せられ、国からの資金は第三者機関が行う評価に基づいて配分されることとなった。交付金は、2011年以降「大学改革促進係数」が一般経費に課せられて、毎年1~1.6%減額となり(図1)<sup>(1)(2)</sup>, 国はその補填として科学研究費補助金(科研費)を始めとした競争的資金と、産業界からの資金獲得を促した。2006年12月の新教育基本法では、研究成果の社会還元を大学の使命と記され、教育・研究に続く3つ目の使命と明示された。そして2016年6月、「2025年度までに大学・国立研究開発法人に対する企業の投資額をOECD諸国平均の水準を超える現在の3倍とする」と記す「日本再興戦略2016」が発表された。以上の様に、我が国の産学官連携は政府主導で進む感がある。一方、これまで大学における産業界との関わりは、教員が企業と行う個々の共同研究に収斂し、組織としての実績は多くない。教員は企業との共同研究を教育と研究の合間に実施するため、十分な時間を割くことが適わなかったが、独法化による管理運営業務の増加は、この傾向に拍車をかける。

筆者が所属する東北大学金属材料研究所(金研)は、創設者

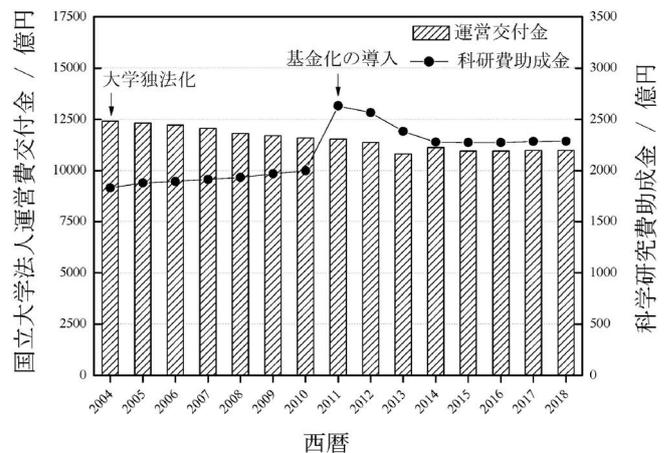


図1 運営交付金と科研費助成金の推移。(文献(1),(2)より作図)



図2 金研との連携協定を発表する太田房江元大阪府知事(2005年)。

の本多光太郎博士の意向を反映し、産業や社会に役立つ研究への意識が高い。2005年、金研は大阪府と連携し、文部科学省「革新的産業基盤材料研究教育拠点形成事業」を開始し(図2), 爾来、関西を中心に産学官連携活動に取り組む(現在の事業母体は金研産学官広域連携センター)。本稿では金

\* 東北大学金属材料研究所; 教授(〒981-8577 仙台市青葉区片平2-1-1)  
 Industry-Academia-Government Collaboration in Universities; Naoya Masahashi(Institute for Materials Research, Tohoku University, Sendai)  
 Keywords: industry-university-government collaboration, human resource development, university knowledge, technological innovations, joint research  
 2019年5月7日受理[doi:10.2320/materia.58.427]

研の産学官連携の取り組みを参考に、大学における「産学官連携」の課題と在り方を紹介する。

## 2. 現状の分析

政府の掲げる産学官連携の施策は、我が国の発展を考える上で極めて重要な意義を持ち、大学への期待は大きい。一方、独法化後の大学は減額された交付金の補填なしに、いかなる活動の実施も覚束ない。自ら稼ぐ経験のなかった大学は、競争的資金獲得を励行すると共に、企業との共同研究やシーズの技術移転を目指し、企業出身のコーディネーターの雇用や広報の充実、成果出展に加え、TLOとの連携を強化する。産業界は従来型の社内での研究開発から、社外リソース活用も含む弾力的な取組みに踏み出すが、製品製造責任への社会要請や、安全・安心への社会的関心の高まりにより、トラブル発生時の原因究明や再発防止にこれまで以上に力を入れるようになった。その結果、企業と大学との産学連携規模(共同研究・受託研究・臨床試験・知的財産収入)は2004年の264億円から2017年には960億円と増加し、共同研究件数も資金も増加する(図3)<sup>(3)(4)</sup>。国は大学シーズの産業利用を促し、2012年に「官民イノベーションプログラム」を設け、高い研究力と共同研究実績のある4つの国立大学に1000億円を出資した。2013年には国立大学法人法の改正により、国立大学法人から認定特定研究成果活用支援事業者への出資が可能となり、大学発ベンチャー企業が続々と設立されている。

一方、大学で学位を取得しても、研究を活かしたポストが不足するため、工学系では博士課程入学者は2003年をピークに減少している。RU11(旧7帝大、筑波大学、東京工業大学、慶応大学、早稲田大学)では、任期無し教員数は2007年が19,304人、2013年が17,876人で、6年間で1,428人(12.0%)減少したが、任期付き教員数は両年度間で4,331人増加し、全教員の39.2%が任期付きである<sup>(5)</sup>。日本学術振興会特別研究員の採用者数はDC1に限ると、2015年度以降の採択率(人数)が、21.9%(752人)、21.8%(727人)、20.7%

(692人)、20.6%(695人)、19.2%(691人)と年々減少する。研究成果の一つである論文に眼を向けると、論文数は1994-1996年の3年間の平均が52,601で米国に次いで2位だったが、2014-2016年は63,330で中国とドイツに抜かれて4位となった。論文の質の評価に用いられるTop 10%論文(被引用数が各分野の上位10%に入る論文のうち、実数が論文数の1/10となる論文)は1994-1996年の3年間の平均が3,631で米国、英国、ドイツに次いで4位だったが、2014-2016年は4,081で9位となった(分数カウント法による統計)<sup>(6)</sup>。ちなみに材料科学では、2014-2016年の我が国の論文数の世界シェアは4.2%で4位だが、Top 10%論文の世界シェアは2.7%で6位である。我が国ではノーベル賞受賞者がそろって研究の現状に危機感を表明するが、我が国の科学技術関係予算は諸外国より低い水準を続けている。

## 3. 大学における産学連携

### (1) 共同研究

各大学では大学が保有するシーズの実用化(技術移転)を目指す。製造現場を持たない大学が目標を達成するには、パートナーの企業を探さなければならない。大学の実験室で「世界最高」性能を確認しても、企業はいたって冷静である。その理由は、大学の研究の多くが、①先行・競合技術の調査がない、②量産やスケールアップを考慮していない、③コスト試算がない、④マーケット調査を行っていない、⑤関連する法律・規則を調べていない、⑥実用環境を想定していない、の6つの「ない」に集約できる。こうした業務が得意ではない大学が、日常的に当該業務に取り組む企業と連携することこそ、技術移転成功への道筋であり、大学が見出した「芽」を企業と育てることに共同研究の有意性がある。

一方、教員の研究や専門性に着目して企業が共同研究を打診する場合、企業は初めから上述の①から⑥の業務を実施し、教員や大学への負担は低い。企業から教員への共同研究の打診は、当該教員が自社の製品開発に貢献すると考えるからで、その様に評価されるためには、教員は社会が何を期待しているかを普段から知ることが望ましい。大学がニーズに合わせて活動することは大学の独自性を損なうという指摘があるが、大事なことは、研究テーマ策定には、教員の持つ好奇心に加え、社会の求めることが何かを知っておくことである。どのような研究でも「何のための研究か」を検討しているはずで、その目標が社会ニーズに関係する時、企業はその研究に関心を示す。企業は我が国の大学との共同研究として、高度な分析や理論的裏付けを依頼することが多いが、その場合、大学に流れる金額は僅かで、固定費の高い企業にとってこの種の共同研究は大歓迎である。一方、産業界から高額な資金獲得を目指すのであれば、海外の大学の様にシーズを活かした製品製造にコミットする共同研究が理想である。

図4は大学の知的財産権等収入の年度別推移だが、年々増加していることが判る<sup>(7)</sup>。たとえ実用化に至らなくても、企業との共同研究により得られたアイデアや技術の権利化は大学

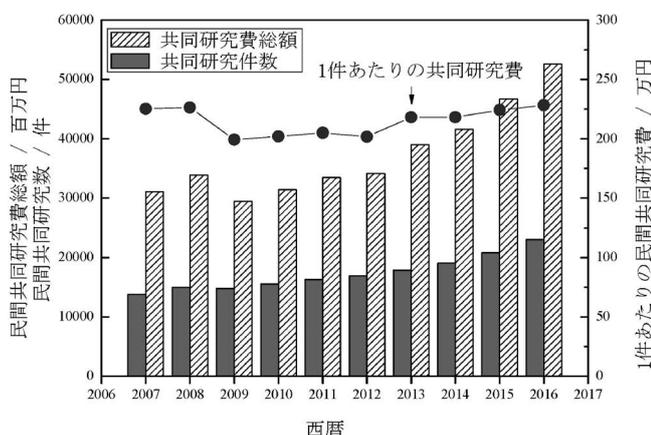


図3 共同研究費と件数の推移(文献(3),(4)より作図)。

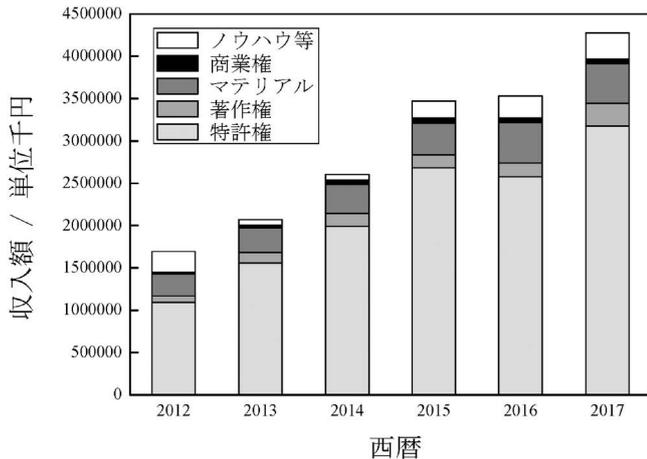


図4 知的財産権等収入額の内訳の推移(7)。

の収入に繋がるだけでなく、将来の実用化の要になる可能性がある。金属素材企業ではアイデアから実用化まで最低10年かかると言われているが、その間に得た知見の権利化にも力を入れる。大学が産業界と有意な連携を築きたいのであれば、知財化への意識を高めることが必要であろう。

### (2) 人材育成

資源が少なく国土が狭隘な我が国が今後も国際的なプレゼンスを維持するには、人知と技術が鍵であり、教育がその両方を支える。労働集約型産業では、成長著しいアジア諸国が今後ますます力を発揮すると予想するが、地道な研究を積み重ねて結実させた技術に基づく製品製造は一朝一夕では成し得ない。我が国が科学立国であり続けるには、弛まない技術革新が不可欠であり、そのためには、創造力・技術力・応用力を備えた人材が不可欠である。産業界は人材育成の必要性を認識しつつも、足下課題への対応や価格競争に疲弊し、そこに割く余力は充分とは言えない。また、分業制が進んだ結果、従業員は自らが関与しない業務への関心が低くなり、全体を俯瞰する力に乏しく、自社の製品の弱点克服やトラブル対応力が不足しているという。ここで期待されるのが、大学による企業人教育(図5)である。教育を日常業務とする大学教員が、企業人への教育スキルを身につけることで、企業の人材育成に貢献できると期待する。ポイントは企業人教育の進め方で、その企業がどのような教育を望むか、企業人がどの程度の素養を有するかを把握することで、学生向けの講義ノートの流用はご法度である。筆者の所属するセンターには、企業から金属材料やプロセス技術の基礎についての授業依頼を時々頂く。上述の事前準備には相当の時間を要するが、教育を受けた技術者は課題解決力や創意工夫力を学び、企業の技術力向上を担うことが期待され、大学による有意な社会貢献となろう。

### (3) 技術相談

筆者の所属するセンターでは年間数百件の技術相談を企業



図5 金研夏期講習会での実習。

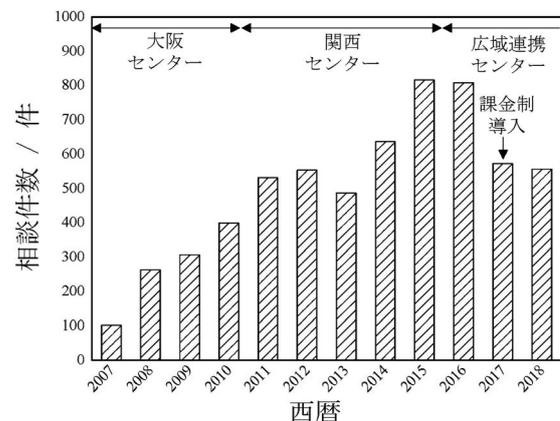


図6 産学官広域連携センターが受ける技術相談件数。

から受けるが(図6)、教員の知識だけで対応できる案件は少なく、むしろ産業界から教えてもらうことが多い。企業が長年従事してきた技術者が解決できない案件を、大学教員が即答できないのは当然だが、企業は期待が大きいだけに、大学の力を知り落胆する。しかし、出会いがそこで終わるわけではなく、そこから担当教員と企業担当者の根競べである。私たちのセンターでは時間を頂いて周辺状況を調べ、対応策や考察を纏め、後日企業に回答する。それに対して再度、企業から質問を頂くというやりとりを繰り返すため、一件の相談に対し数回の連絡を交わす。その過程で、企業が大学の貢献が高いと判断した場合、大学に共同研究や委託研究を打診する。つまり、技術相談は企業が大学の力量を試す場とも言える。この過程で教員は実業の課題を学び、自身の研究テーマを立案する際に参考とする。企業経験のない大学教員にとって、企業の相談は時として難解であり、受け答えがかみ合わないことが多々見受けられる。教員にありがちな学術コメントをマシンガントークしても、相談者は煙にまかれるだけで、その企業が二度と相談に来ることはないであろう。私共のセンターはできるだけ企業の目線での対応を心掛け、上述の様に一度相談を預かって検討してから回答することで、期待に応える様に努める。時間も労力もかかる作業だが、こうしたことの積み重ねが企業の言う、大学の「高い敷居」を下げることとなり、ひいては産学連携を深めると考える。

## 4. 大学における産学官連携の課題とその対応

### (1) 社会が求めるところを知る

日本の企業が海外の大学と共同研究契約を締結する場合、その契約額が高額であることはよく知られている。企業はその理由として「海外の大学の方が研究水準が高い」「研究ネットワークの形成、その後の研究活動への影響を考えると海外の大学の方が魅力的」「日本の大学では同様の研究が行われていない」を上げる<sup>(8)</sup>。研究水準は分野により違いがあるものの以前に比べ国内外の差は小さくなったと考えるが、他の理由は日本の大学の本質に関わり重篤である。日本の大学は共同研究を締結しても、企業が求める成果(実用化)への関心は高いとは言えず、いわゆる共同研究のアフターケアへのコミットは小さい。何より、国内の大学があまり社会ニーズを顧みないことは以前から指摘され<sup>(9)</sup>、3.(1)で記したように、教員は社会が何を求めているかを知ることが望ましい。科研費等の競争的資金の審査をしていると、「実用化」や「開発」の文言が申請書を彩るが、研究室の実験結果をそこまで高めるのは容易ではない。この風潮は学生にも伝わり、学会発表での導入説明を聞いて思わず苦笑することがある。夢を持つことは結構だが、TPOをわかまえることも必要であり、何より装飾過多な夢が現実を曇らせる発表が多いことが気になる。図7は応用物理学会での発表件数の推移であるが<sup>(10)</sup>、大企業からの発表件数は減少するものの全発表件数の変化は小さいため、全発表件数に対する大企業からの発表件数の割合は年々減少している。応用物理学会は、企業の業績低迷による学会離れから、学会発表の多くが産業や市場の興味から乖離した大学等の研究機関に占有され、更なる企業の学会離れを助長していると分析した。この現状を打開するために、2015年1月「産学協働・産学連携それ自体を一つの学問として議論する場を提供」と「産学協働の方向性を示し、その端緒となる場を具体的に提供」を目的に、産学協働研究会を立ち上げた。研究会の分析から「まず大企業の論文

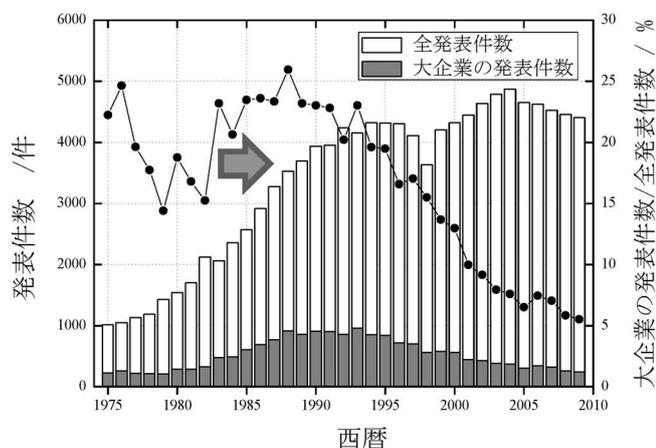


図7 応用物理学会での大企業の発表件数の推移。  
(文献(10)から作図)

数が減り、次いで物理学関連の博士数が減り、それを追って物理学全体の論文数が減少している」という結論が見出された<sup>(11)</sup>。学会の使命は学会ごとに異なるため、応用物理学の事例を日本金属学会に即座にあてはめることはできないが、日本金属学会も企業会員や講演大会での企業参加者が減少しているのは間違いのないであろう。それでも構わないという選択もあるが、工学系の学協会が大学等公的研究機関の研究者と学生だけの集まりの場となった時、大学の研究成果の社会貢献への道は限りなく狭まる。学問を深めることは崇高な考えであり学会がその一助になることに全く異論はないが、自身の研究の目的と社会との関わりを今一度自問することも必要ではないだろうか。

### (2) 産学連携を実施する仕組み作り

産業界では、人材・設備・資金を、目標達成に必要な「経営資源」と称する。大学が産学官連携を進める上で、この三要素をどの程度整備しているかを考えると残念ながら心許ない。大学と企業は、同じ分野(例えば「金属」)であっても、取り組み方やゴールは異なり、政府が描く vision 通りに進めるのは容易ではない。従来、大学や教員は質の高い研究や教育を実施することを使命としていたが、社会貢献が三つ目の使命となり、その中核に「産学連携」が取り上げられたものの、具体的な実践方法を記した教科書はどこにもないため、自らで創り上げなければならない。しかし、10年足らずで「産学連携」は資金獲得の手段と見なされるにおよび、教員や大学における混乱は小さくない。一方、企業の使命は実用化で収益を得て経済活動を活性化することにあり、突き詰めるとステークホルダーの株主を満足させることである。異なる価値観を備えた「産」と「学」が連携して成果を出すには、相互を理解する「人材」の役割が大きい。現在の大学にはそのような「人材」は極めて少ない。各大学は産学連携組織を設けるが、大半は事務職と若干の URA やコーディネーターで構成され、専任教員を配する大学は少なく、新たに育てる必要がある。同時に、産学官連携業務を大学がどのように進めるかの戦略を築かなければならないが、産業界での職場経験がないほとんどの教員から構成される大学は、大学勤務の経験のないほとんどの産業界の声を抛り所にする。この交流は産学連携の深化に有意ではあるが、双方の意見が平行線を辿っているのが現実である。繰り返になるが、円滑な産学官連携活動を推進する上で、相互を理解する「人材」が必要である。

そして、こうした「人材」の業績を公平に評価するシステムを構築しなければ、産学連携に従事したい教員は確保できない。金研は、産学官連携業務に専従する教員を14年前から擁するが、未だに当該教員の評価指標が定まっておらず、折角、産学官連携業務に励んでも、研究・教育が主務の大多数の教員より低い評価となっている。産学官連携業務を単なる「資金獲得」の手段とするのであれば、その業務へのモチベーションを教員に期待することは不可能である。知財や実用化等の産学官連携の業務成果を、論文や学会発表と同様

に評価するようなシステムが必要であり、そのようにして評価された人材が大学の枠を超えて循環することで、初めて国として産学連携の体制ができあがる。

### (3) 企業との交渉と情報管理

筆者が在籍した企業は、社内の重要課題の情報閲覧は限られた社員しか許されず、大学との共同研究テーマになることはありえない。今でも多くの企業は、大学の役割を人材提供と見るが、背景には大学が産業界との関わり方を確立してこなかったことに尽きる。とりわけ企業は、海外と比べ国内大学の情報管理の脆弱を指摘する。共同研究の締結自体を秘匿と考える企業に対し、大学は「うちの部屋は〇〇会社と共同研究を行っている」と教員や学生が日常的に会話する。極めつけは、不特定多数が参加する学内会議の資料に記載されることで、これでは企業が重要テーマを大学との共同研究課題にすることはありえず、お付き合い程度の少額資金しか大学に流れないのは当然である。それに対し、契約重視の欧米では、共同研究の発掘や推進を担当する部署が契約にコミットするため、情報管理は徹底し、大学が得る資金は高額である。我が国では教員は研究を担当するだけでなく、企業との交渉も担うことが多いが、概して教員は交渉下手で知財や情報管理に疎い。企業との協議には契約や知財の専門職員の同席が望ましいが、大学にはそのような職員が不足するため教員頼みとなる。その結果、企業は大学との共同研究を実施する上での問題を知り、着地点を探す。ここで登場するのがTLOである。例えば、東大TLOでは、教員の研究成果を日頃からウォッチし、企業化の可能性を見出すと知財対策を行うと共に、成果に興味を持つ企業を発掘して共同研究契約に結び付けるといふ。基本特許は大学単独で出願し、企業と共同研究を契約後に周辺特許を共同出願するため、「日の目をみない大学の発明」が少なくなるだけでなく、大学の収入増につながる。TLOが関与する共同研究では、企業からの資金は平均2,000万円と教員が交渉して締結する共同研究資金の6倍になるそうである。産学連携のエキスパートのいない大学は、産業界との橋渡し役としてTLOに業務委託をすることで円滑な業務を遂行できよう。文部科学省と経済産業省が承認したTLOは、大学内部に設けられた15機関と外部設立の20機関を併せ、国内に35機関存在し(図8)、今後も我が国の産学官連携の発展に寄与するであろう。

## 5. 最後 に

1916年に金研を創設した本多光太郎博士は、「学問のあるところに技術は育つ、技術のあるところに産業は発展する、産業は学問の道場である」という言葉を残し、金属学の発展に尽力すると同時に、産学官連携活動に取り組んだ。当時、金属製品の製造企業が集積していた大阪府で企業支援を行う一方、地元宮城県で金研シーズの技術移転による企業設立に尽力した。また企業人に金属学を伝えることで、良質な製品製造に役立ててもらふことを目的に開講した夏期講習会は、



図8 2018年3月時の国内承認TLO(白は内部型, 黒は外部型)。

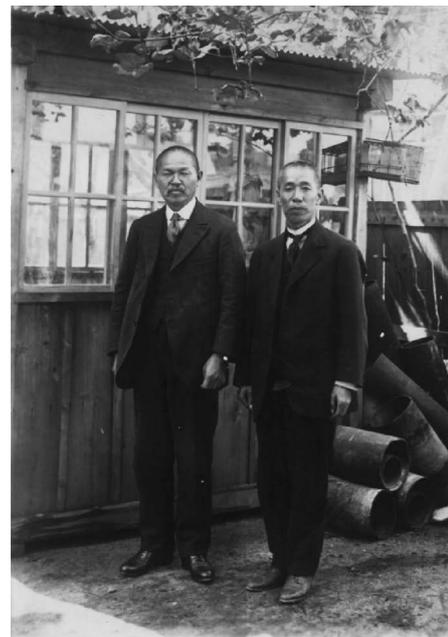


図9 本多氏と東研サーモテック創業者 木村延一氏<sup>(12)</sup>。

今年で89回を数える。図9は、大正15年(1926年)、本多氏が技術指導に赴いた大阪の熱処理企業の創業者との写真である<sup>(12)</sup>。本多氏をはじめ金研の教員は現場に赴き、企業が直面する課題やニーズを聞いて活動に従事したが、そこには政府の関与は一切なかった。翻って、現在は、政府主導で産学官連携が進められるが、大学は実施方法が判らないだけでなく対応できる人材が少ないため困惑しつつ試行錯誤する。トップダウン施策を成功に導くには、考案の過程で現場の状況を的確に分析することが必要であり、制度を作るだけでは成功しない。そして、産学官連携を推進する上での大学にとっての今一つの課題は、任期制の導入である。任期付き教員は

雇用期間内での論文等の実績が任期更新に必要なが、発表制限を設ける企業との共同研究は足枷となる。外国の様に共同研究による高額資金の獲得や、高い社会的影響が期待できない我が国の現状では、この点に限ると任期制は産学官連携に逆行し、産学官連携を行えない環境を自ら作り出しているとも言える。

筆者の属するセンターでは、企業からの支援依頼が途切れることがない。とりわけ製品製造に直結する、溶解・鋳造・溶接・塑性加工等の技術相談は多いが、日本金属学会がこうした分野を講演大会セッションで縮小あるいは閉鎖して久しい。背景には当該分野を専門とする研究者数の激減があるが、世の中のニーズとマッチしていない点は皮相的である。当センターでもこうした分野の相談に対応できないことが多く、最近は学協会のコンサルタントに助けて頂いている。金属の分野では大学の研究と社会(実業)の要望(ニーズ)との乖離が甚だしく、産学官の関係組織が一致協力して取り組まなければ、我が国の金属の発展は期待できないであろう。金属学は物理や化学といった学問とは異なり、実業との関連性が高いため「実学」色の強い学問で、産業との交流を疎かにすることは得策ではない。現場を知らない経営者が経営に成功しないように、産学官連携においても現場を知ることは重要であり、100年前の本多博士の取り組みは良いお手本である。

東大の TLO 活動を紹介いただいた、東京大学 TLO 代表取締役社長 山本貴史氏に深く感謝する。

## 文 献

- (1) 日本学術振興会ホームページ: [https://www.jsps.go.jp/j-grantsinaid/27\\_kdata/index.html](https://www.jsps.go.jp/j-grantsinaid/27_kdata/index.html).
- (2) 国公立大学振興議員連盟第11回総会国立大学協会資料.
- (3) 「平成28年度 大学等における産学連携等実施状況について」, 文部科学省 科学技術・学術政策局, 2018.2.16.
- (4) 「我が国の産業技術に関する研究開発活動の動向-主要指標と調査データ- 第16版」経済産業省産業技術環境局技術政策企画室, 2016.6.
- (5) 文部科学省ホームページ「大学における工学系教育の在り方について(中間まとめ)について」.
- (6) 科学技術・学術政策研究所ホームページ: [http://www.nistep.go.jp/sti\\_indicator/2018/RM274\\_42.html](http://www.nistep.go.jp/sti_indicator/2018/RM274_42.html).
- (7) 「平成29年度 大学等における産学連携等実施状況について」文部科学省 科学技術・学術政策局, 2019.2.27.
- (8) 「アンケート調査から見た 日本企業による国際産学共同研究の現状」文部科学省 科学技術・学術政策研究所, 2015.9.
- (9) 「学士課程教育の構築に向けて 答申」, 中央教育審議会, 2008.10.29.
- (10) 山口栄一: 応用物理, **79** (2010), 1077-1083.
- (11) 産学協働研究会設立シンポジウム報告書 [https://annex.jsap.or.jp/IAP/symposium/2015s\\_symposium\\_report.html](https://annex.jsap.or.jp/IAP/symposium/2015s_symposium_report.html).
- (12) 「熱処理の東研50年史」1990.1.



正橋直哉

★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★  
1987年 東北大学大学院工学研究科博士後期課程修了(工学博士)  
1987年 株式会社新日本製鐵  
1993-1995年 Cambridge University 客員研究員  
1999年 東北大学金属材料研究所助教授  
2006年- 現職  
専門分野: 金属組織学  
◎相平衡や拡散を駆使した組織制御に取組み, エネルギー材料・環境材料・生体材料等の研究を行うと共に, 産学官連携活動に従事。  
★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★

# DPC STEM による局所電磁場の直接観察

柴田直哉\*

## 1. 緒言

材料、デバイス内部の電磁場分布を可視化することは、その機能特性そのものを可視化することに近い。最先端の材料、デバイスはその内部に無数の微細構造、例えば界面、表面、点欠陥などを内包しているが、そのような局所構造がどのように局所場と関連するのかわかると直接観察することができれば、微細構造に伴う材料特性発現メカニズムを直接的且つ直観的に明らかにすることができるかもしれない。微分位相コントラスト法(Differential phase contrast: DPC)は、走査型透過電子顕微鏡法(Scanning Transmission Electron Microscopy: STEM)の一手法であり、入射電子が材料中の電磁場から力を受けて偏向する現象を利用して、電磁場分布を高い空間分解能で直接可視化する手法である。この手法は、通常の環状暗視野(ADF)STEMや明視野(BF)STEMとの同時取得が可能であるため、局所構造と局所場との相関性をダイレクトに観察できる可能性を有している。DPC法の歴史は古く、提案されてから既に40年以上が経過しているが<sup>(1)-(3)</sup>、最近までごく一部の研究者のみに利用される(主に中低倍の磁場観察)特殊な手法であった。ところが、近年のSTEM装置の超高分解能化、高機能化及びDPC法に対応できる検出器開発の急速な進展に伴い、DPC法は特殊な手法からADF法やBF法のような一般的な観察手法になりつつある。筆者らのグループでは、これまで10年以上にわたってDPC観察に対応できる分割型STEM検出器の開発とそれを用いた材料局所場解析を中心に研究を進めてきた。本稿では、DPC法の現状と様々な材料観察に応用した例、更には今後の展望について議論する。

## 2. DPC STEM法の結像原理

STEM法は、磁界レンズによって細く絞り込んだ電子線

を試料上で走査し、各走査点からの透過散乱電子を試料下部の検出器で検出し、その強度をモニター上に表示する電子顕微鏡法である。そのため、その空間分解能は基本的に試料上の電子プローブサイズによって決定される。図1(a)に一般的なSTEM法を模式的に示す。STEM法では、円状あるいは円環状の検出器を逆空間に挿入して像を形成するが、その大きさや配置によって性質の異なる像を同時形成することが可能である。例えばADF法では、高角散乱された電子を選択的に円環状検出器で一括検出することで、構成元素の原子番号に敏感な像を形成することができる<sup>(4)</sup>。一方、BF法では、透過電子のみを小さな円状検出器で検出することで、平行照射の高分解能TEMと同等な像を形成することができる<sup>(5)</sup>。DPC法も同様に逆空間上に検出器を挿入して結像するが、DPC像を形成するためには、検出面を複数のセグメントに分割した分割型検出器もしくはピクセル型検出器を用いる必要がある。ここでは、直感的な理解が可能な分割型検出器を用いた場合を例に、結像メカニズムを説明することにする。図1(b)にDPC法の模式図を示す。DPC法では、試料内部に存在する電磁場によってクーロン力もしくはローレンツ力を受けて偏向した透過電子を結像に用いる。図に示すように、まず4分割された検出セグメント上に明視野ディスクを配置するよう光軸を調整する。更に真空領域もしくは場が均一とみなせる試料領域で各4つのセグメントが同一信号量を検出するよう、明視野ディスク位置を微調整する。この時、 $x$ 及び $y$ 方向に配置された2つの対角検出セグメントは同一の信号を検出するため、その差分像(これがDPC像)にはコントラストが生じない。一方、もし試料上に電磁場が存在し電子線が力を受けて僅かに偏向する場合、検出面上では明視野ディスクが中心からシフトすることになり、2つの対角検出セグメントの強度にアンバランスが生じる。つまり、その差分像には電子線の $x$ 及び $y$ 方向の偏向角に対応するコントラストが発生することになる。このような $x, y$ 方向への偏向角を試料上の各走査点において逐次検出・計算

\* 東京大学大学院工学系研究科総合研究機構; 教授(〒113-8656 東京都文京区弥生2-11-16)

Direct Imaging of Local Electromagnetic Fields by DPC STEM; Naoya Shibata (Institute of Engineering Innovation, The University of Tokyo, Tokyo)

Keywords: DPC STEM, electromagnetic field, interface, domain, charge density

2019年5月15日受理[doi:10.2320/materia.58.433]

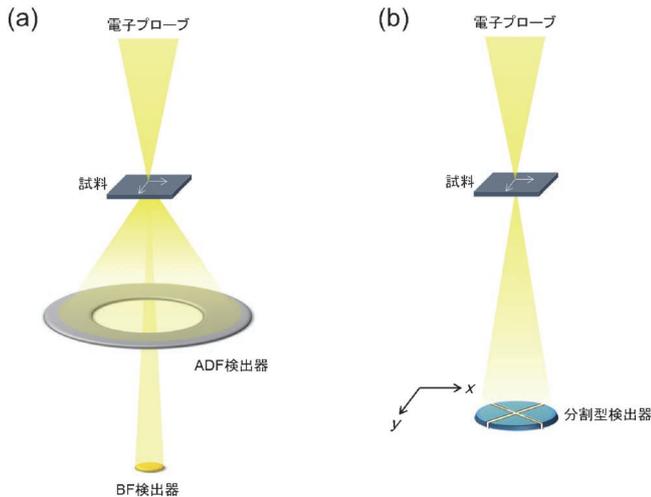


図1 (a) 一般的なSTEM法及び(b) DPC STEM法の検出系模式図。

し、2次元の電子線偏向マップを得ることで、試料上に存在する電磁場を可視化することができる(予め用いる電子線の加速電圧がわかっているため、電子線の偏向角と電磁場の強度は試料厚がわかればキャリブレーションできる)。これがDPC法の最もシンプルな説明である。このようなメカニズムで結像するため、通常のSTEMに用いられる円環一括検出型の検出器ではDPC像を得ることは難しく、検出面上を複数セグメントに分割した検出器が必須である。今回の説明は直感的にシンプルなものを心掛けたが、DPC像から局所場を精密に定量観察するためには、明視野ディスクのシフトだけではなく、明視野ディスク内部の強度変化も精緻に検出する必要がある。これは、用いる電子線プローブ径に対して局所場の空間変化が急峻な場合、明視野ディスク内部の強度変化が顕著になるためである。言い換えれば、先述のシンプルなDPC法の説明は、試料上の電子線プローブに対して電磁場分布が十分に均一な場合にのみ成り立つ説明である。実際には、上記2つの状況を纏めて、明視野ディスクの強度重心変化を検出することで、どのような場合であっても(但し試料が位相物体であるという近似が成り立つとすれば)電磁場を定量評価することができる<sup>(6)-(10)</sup>。明視野ディスクの強度重心変化を求めることは、電子線プローブが試料上の局所場によって受けた運動量変化の期待値を求めることに対応する。強度重心検出には2次元電子強度分布をより精密に計測する必要があるため、検出セグメント数が多ければ多いほどその正確性が増す。つまり、DPC像の定量性に関しては分割型検出器よりもピクセル型検出器が原理的に有利である。この辺りのDPC法の詳細な理論に関しては、既に詳しい解説があるので興味のある読者はそちらも参照して頂きたい<sup>(11)</sup>。

### 3. DPC STEMによる局所電磁場観察

本節では、DPC STEMを用いた局所電磁場観察の例をい

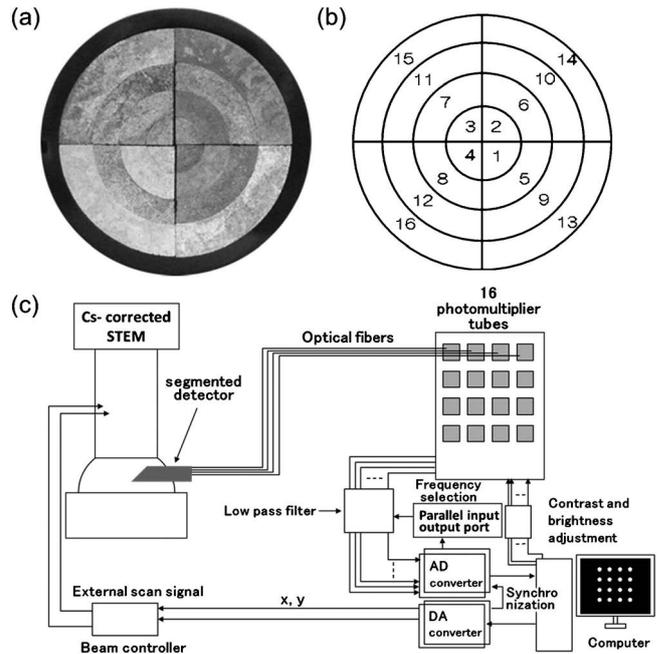


図2 分割型検出器の構造<sup>(12)</sup>。(a) 分割型検出器の断面写真。(b) 分割形状の模式図。(c) 本検出器システムの全体構成ダイアグラム。

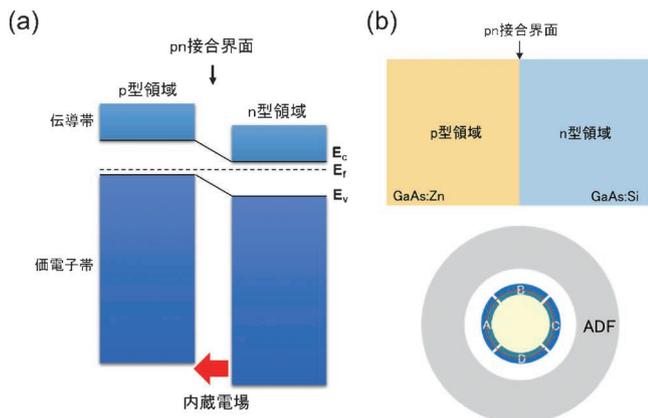
くつか紹介する。これらのDPC観察には、本体として収差補正STEMを、検出器として筆者らが開発した16分割型検出器を用いている<sup>(12)</sup>。この分割型検出器の模式図及び実機の写真を図2に示す。この検出器は円形検出面を16個のセグメントに分割した構造を有しており、その一つ一つをファイバーによって光電子増倍管(PMT)と接続したシステムである。各検出セグメントに入射する電子はシンチレータにより一度光に変換され、ファイバーにより転送された後PMTにより検出される。PMT信号はA/D変換後、PC上で信号処理され、DPC像、電磁場ベクトル像、電磁場強度像などに逐次演算、表示される。PMT方式は信号検出・処理を高速に行うことが可能なため、スキャンしながらDPC像をそのままライブ観察することが可能である。この特徴は、光軸調整や収差補正、試料探索、その場観察などに極めて有利な特徴である。先述のように、分割型検出器を用いて明視野ディスクの強度重心を精密に検出することは困難であるが、近似的に強度重心を求める手法<sup>(7)</sup>や位相コントラスト伝達関数を用いた補正手法<sup>(13)</sup>により電磁場の定量性を大幅に向上できることが示されており、分割型検出器の様々な利点を活かしつつ電磁場定量観察を行うことが可能になりつつある。

まず、材料中の電場観察に応用した例として、半導体GaAs中に形成されたpn接合観察結果を紹介する<sup>(14)</sup>。一般的に半導体のpn接合は、単結晶領域にp型ドーパント(この場合、Znを濃度 $1 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ 添加)とn型ドーパント(この場合、Siを濃度 $1 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ )が微量ドーパされた領域の界面であり、構造的な界面ではなく電気的な界面である。このため、局所歪みに敏感な回折コントラストを利用する通常

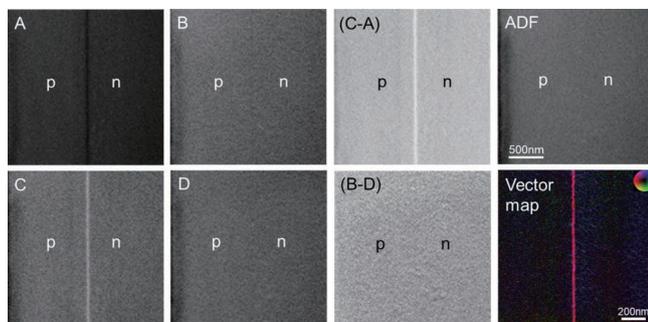
の(S)TEM法では観察することが極めて難しい界面である。一方、**図3(a)**に模式的に示すように、この界面にはp型領域とn型領域のポテンシャル差に起因した局所電場が形成されている。よって、DPC法を用いれば局所電場変化としてpn接合界面を実空間観察できる可能性がある。そこで**図3(b)**のように、pn接合界面と分割型検出器の角度関係を調整して、A~Dの4つの検出セグメント及びADF検出器で同時にpn接合領域を観察した結果を**図4**に示す。ADF像ではpn接合界面近傍に明瞭なコントラストは確認できず、pn接合界面の観察は不可能であることがわかる。一方、分割型検出器では、pn接合界面に対して垂直方向に位置するA, Cの検出セグメント像では、p領域のn領域の境界部分に明瞭な線状コントラストが観察されている。更に、AとCではコントラストが逆転していることも大きな特徴である。本結果は、pn接合界面の電場が界面垂直方向に形成されていることを示しており、界面電場によって電子線がA→C方向に偏向された結果、Aではバックグラウンドに対して信

号強度が低くなり、Cでは高くなったためにコントラスト反転が起こったと解釈することができる。一方、B, Dの検出セグメントからの像にはほとんどコントラストがない。これはpn接合界面と平行方向の電場成分がほとんどないことを意味している。更に、AとC及びBとDの差分を取った2つのDPC像を示す。この像はC→A及びB→D方向成分の電場を可視化したものに対応する。この2つのDPC像から試料上各点における電場の2次元ベクトルを計算し、ベクトルカラー表示することも可能である(Vector map)。このような像を用いることにより、面内にどのような電場が実空間分布しているかを直感的に捉えることが可能になる。こちらに示した全ての像は、適切なソフトウェアを用いれば瞬時に同時観察が可能である(**図5**)。更にADF像と電場ベクトルマップを同時観察すれば、局所構造と局所場との相関性を可視化することが可能になる。実際にpn接合観察をライブ表示した動画は参考文献<sup>(14)</sup>で見ることができるので興味ある方はそちらも参照されたい。

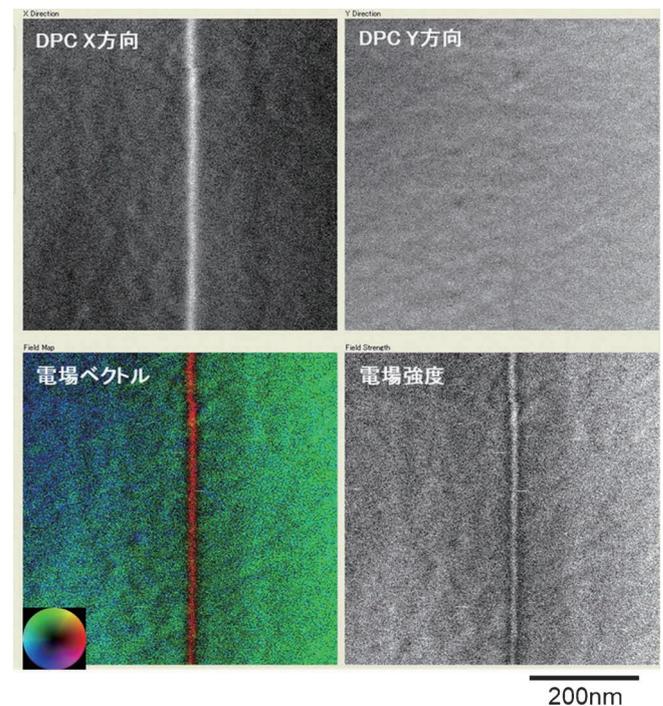
次に、材料中の磁場観察に応用した例を紹介する。材料中に磁場が存在する場合、入射電子線はローレンツ力を受けて偏向する。この偏向方向及び偏向量をDPC法により画像化すれば、電場の場合と同様に実空間の磁場分布を直接可視化できる。一つ目の例は磁気スキルミオンの観察例である<sup>(15)</sup>。磁気スキルミオンは電子スピンの磁気モーメントが作る渦状の磁気構造体であり、条件によって格子状に2次元配列し規則構造を形成する。**図6**に示すように、DPC STEM法により三角格子状の磁気スキルミオンの配列構造



**図3** (a) pn接合界面のバンド構造の模式図。(b) pn接合界面試料(GaAs)と検出器の相対方位関係。分割型検出器上の赤い点線は明視野ディスクのエッジを示す。



**図4** **図3**で示した各検出器セグメント(A, B, C, D)から同時に得られたpn接合界面領域のSTEM像<sup>(14)</sup>。ADF像、(C-A)DPC像、(B-D)DPC像及びDPC像から再構成した二次元電場ベクトルカラーマップ(注:(C-A),(B-D)のDPCとは別条件での観察結果を用いて再構成)を示す。



**図5** 自作のDPCソフトウェアのキャプチャー画像。DPCのx, y方向画像から電場ベクトル及び電場強度を計算し同時表示できる。

を明瞭に観察でき、更に各スキルミオン内部に渦巻く磁場までもが直接観察できている。また、図7に方位の異なる磁気スキルミオン格子が形成するドメイン境界のDPC STEM観察結果を示す<sup>(16)</sup>。図中の赤、黄丸で示したように、ドメイン境界直上のスキルミオンは伸長したり、収縮したり自在に形状を変えながらドメイン間の方位関係の違い(粒界研究で馴染みのある $\Sigma$ 値で表せば $\Sigma 7$ の方位関係)に伴う自由体積変化を緩和しているようすが明らかとなった。このように磁気スキルミオンはトポロジーに保護された構造柔軟性、安定性を有しており、また微小電流密度で駆動することができるなど、次世代省エネ記録デバイスへの応用が期待されてい

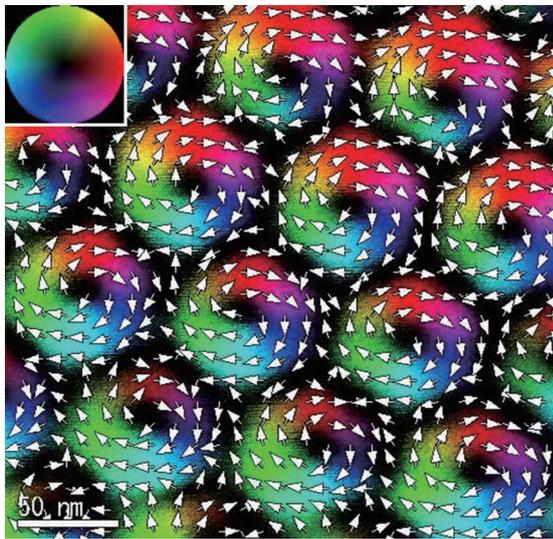


図6 磁気スキルミオン格子のDPC STEM観察結果<sup>(15)</sup>。像はDPC像から構築した磁場ベクトルカラーマップ。

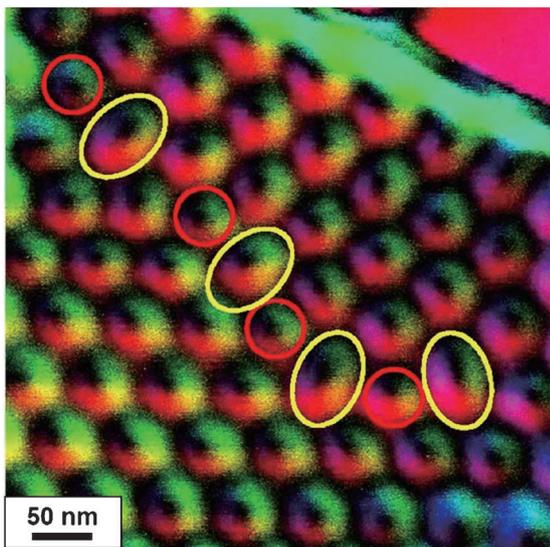


図7 磁気スキルミオンドメイン境界のDPC STEM観察結果<sup>(16)</sup>。像はDPC像から構築した磁場ベクトルカラーマップ。

る<sup>(17)</sup>。しかし、実際の材料中には界面や転位などの欠陥構造が不可避に存在しているため、材料微細組織によって磁気スキルミオンがどのような影響を受けるかを研究することは実用上極めて重要である。よって、DPC STEMによる欠陥構造/磁場構造の同時観察が有力な手段になると考えられる。ここではその一例として、構造的な界面である小角粒界上に形成した磁気スキルミオン格子を直接観察した結果を紹介する<sup>(18)</sup>。図8は同時観察した(a)ADF像及び(b)DPC像をそれぞれ示す。回折図形を用いた方位解析により、ADF像中の黄色の矢印に示すコントラストは $\text{FeGe}_{1-x}\text{Si}_x$  ( $x \sim 0.05$ )中に形成された小角粒界であることがわかった。本観察では、DPCに重畳する回折コントラストを軽減するため試料を意図的に傾けて(結果として界面が少し傾いた状態で)観察している。本研究では、垂直磁場を130 mT程度かけながら95 Kまで冷却してスキルミオンを形成し観察するという実験を繰り返し行ったが、基本的に小角粒界と磁気スキルミオンは共存し、大きな磁気スキルミオンの構造変化を伴わないことがわかった。つまり、小角粒界の磁気スキルミオンに対する影響は基本的には小さいと考えられる。しかし、図8の場合のように、構造的な小角粒界とドメイン境界が相互作用する様子も観察された。この場合、右と左の磁気スキルミオン格子は約30度の方位ずれを起こしており、その方位ずれに起因するドメイン境界が小角粒界直上に重なっている。この場合、あたかも右側の格子を形成する磁気スキルミオンの一部分と左側の格子を形成する磁気スキルミオンの一部分が小角粒界上で接合されたような特異な磁気スキルミオン構造を形成することがわかった、この結果は、磁気スキルミオン格子は結晶の方位とある程度相互作用をしており、小角粒界によって結晶方位が急峻に変化する際、磁気スキルミオン構造もそれに伴って急峻に変化したものと考えられる。しかし、詳細な像コントラスト解析から、この変形した磁気スキルミオンもスキルミオン数(磁気スキルミオンのスピンの向きを表す矢印が球面を覆う回数)は格子内の磁気スキルミオンと同様に1に保たれていることがわかった。つまり、この急峻に変形した磁気スキルミオンも一つの磁気スキルミオンが大きく変形した構造と解釈できる。本結果も磁気スキルミオンの構造柔軟性を示す結果であると考えられる。

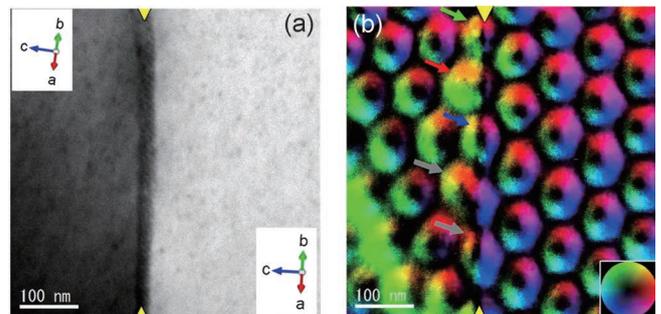


図8 小角粒界における磁気スキルミオン構造<sup>(18)</sup>。(a) ADF像及び(b) DPC像から構築した磁場ベクトルカラーマップ。

次に、マグネタイト ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ) 中に形成された双晶界面の DPC STEM 観察結果を図 9 に示す<sup>(19)</sup>。  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  はフェリ磁性体であり、その内部には磁区が形成される。(a) に示すように、  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  には晶癖面 {111} を有する双晶が形成される。この双晶界面は低倍観察ではどれも同じに見えるが、磁気構造に異なる影響を与えることがわかってきた。(b) に示す BF 像ではすべて同一の双晶界面に見えるが、同時取得した(c) の DPC 像では、A と C の双晶界面では磁区が連続した構造(強磁性的なカップリング)を有している。一方、B の双晶界面では磁区が反平行な構造(反強磁性的なカップリング)になることが明らかとなった。より詳細な原子レベルの界面構造解析の結果、A と C は同一の原子構造を有するが、B は異なる原子構造を有することが明らかとなった<sup>(19)</sup>。更に DFT

計算による理論解析を行った結果、界面における局所的な Fe-O-Fe の結合角度が B と A, C では大きく異なっており、この結合角の変化が界面における磁氣的相互作用の変化を引き起こしていることが示唆される。

このように、DPC による磁場観察は、磁性構造と局所欠陥との相互作用を本質的に理解する上で極めて有利であると考えられる。しかし、これらの磁場観察はすべて電子顕微鏡の対物レンズをオフにした条件での観察結果であり、その空間分解能は数 nm 程度に制限されている。これは、磁性構造や場合によっては試料そのものが、対物レンズの強磁場によって破壊されてしまう危険性を回避するためである。しかし、その代償として空間分解能を著しく損なっている。この問題は電子顕微鏡で磁性材料を観察する上での長年の難題であった。しかし、筆者らはこの長年の問題を根本的に解決すべく新型対物レンズの設計・開発に取り組み、試料を無磁場条件に保った状態での原子分解能観察を可能にする新たな電子顕微鏡の開発に成功した<sup>(20)</sup>。この電子顕微鏡により、他の非磁性材料と同じように電磁鋼板 (Fe-3%Si) の原子構造観察が可能であることを実証している。このような新しい電子顕微鏡と DPC 法を高度に融合することができれば、超高分解能での磁気・磁区構造解析が可能になると期待できる。

#### 4. DPC STEM 法の原子分解能化と今後の展望

筆者らが開発した分割型検出器は、原子分解能 STEM 観察に対応できる性能を有している。そこで、この検出器を用いて DPC STEM 法の原子分解能化に関する研究を世界に先駆けて行ってきた<sup>(21)</sup>。これまでの研究を総括すると、DPC STEM を原子分解能化すると、原子内部の電場を直接観察ができることがわかった。この原子内部の電場とは、原子核と電子雲との間に存在する微小空間の電場である。以下に原子分解能 DPC STEM による原子電場の観察例を示す。

原子と同等の大きさの電子プローブを用いて原子電場を定量観察する場合(すなわち観察する電場分布が用いるプローブ径と同程度の大きさの場合)、先述のように各プローブ位置における電子強度パターンの重心を高精度に計測しなければならない。このような重心検出には 2 次元電子強度パターンを精緻に検出できるピクセル型検出器が最適である。一方、分割型検出器は一般に分割数が少なく分割セグメントが粗いため、電子強度パターンの重心を精密に計測することは困難である。しかし最近では、分割型検出器を用いて強度重心を定量的に検出する手法<sup>(8)(13)</sup>が開発され、これらを用いることで分割型検出器でも定量的な重心検出が可能になった。本稿では、分割型検出器を用いた強度重心検出法を用いて、原子電場を定量観察した結果を紹介する<sup>(22)</sup>。

図 10 に  $\text{SrTiO}_3$  の原子分解能 DPC STEM 像を示す。(a) は ADF 像、(b) は DPC 像から得られた電場ベクトルカラーマップを示しており、(a) (b) は別の検出器を用いているものの同時取得した像である。(a) の像は原子位置を与える参

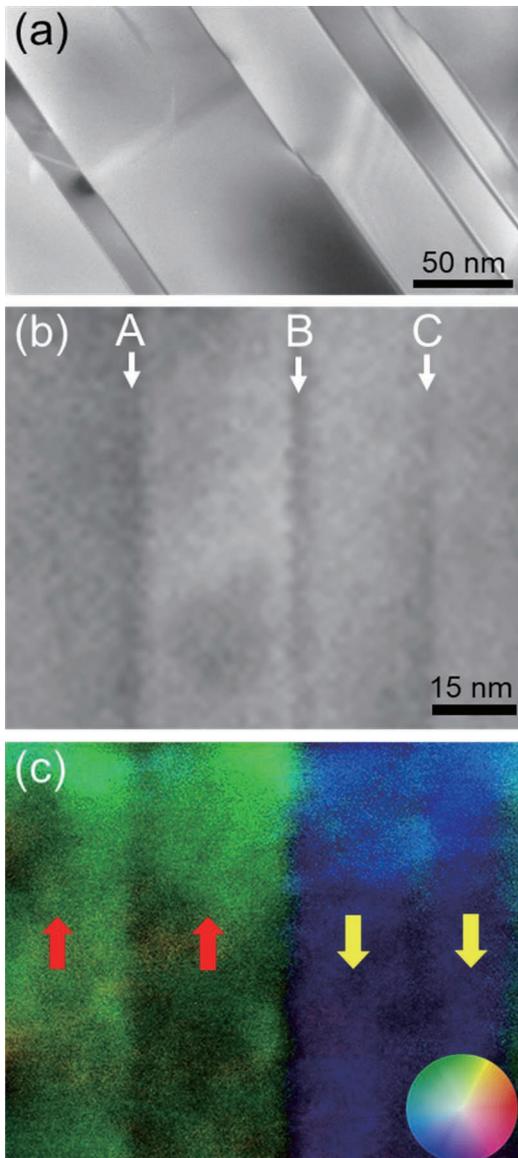


図 9 マグネタイト双晶界面の DPC STEM 観察結果<sup>(19)</sup>。(a) 双晶界面の BF TEM 像。(b) BF 及び(c) DPC 像から構築した磁場ベクトルカラーマップ。

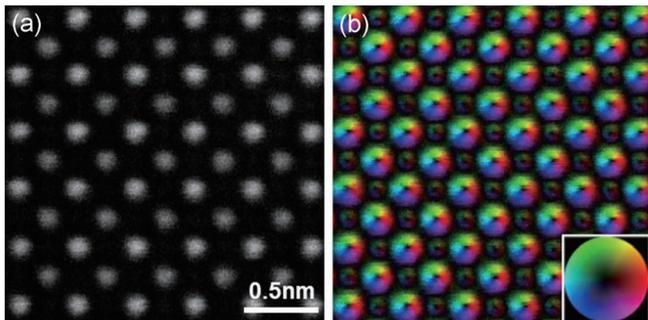


図10 SrTiO<sub>3</sub>単結晶を[001]方向から観察した原子分解能 DPC STEM 像<sup>(22)</sup>. (a) ADF 像. (b) DPC 像から構築した電場ベクトルカラーマップ.

照像と考えて頂きたい. (b)の像より, 原子電場は原子中心から放射状に湧出している. この観察結果は, 原子核の正電荷から電場が全方向に放射状に湧出する様子を直接観察していることに対応する. 原子中心で像コントラストが極小値を示すのは, 原子中心では入射電子の入射方向と原子電場の湧出方向とがちょうど平行/反平行となるため, 偏向しなくなることに起因する. 原子電場強度の定量評価の結果, この原子電場は原子のイオン性に敏感であることもわかった<sup>(21)(22)</sup>. 原子同士は結合することで電荷移動を起こすと考えられるが, 原子電場像にはそのような電荷移動の情報さえも含まれていると考えられる. また, 原子分解能 DPC STEM は, 単原子内部の原子電場さえも観察可能な感度を有しており<sup>(22)</sup>, 2次元材料などへの応用も始まっている<sup>(23)</sup>.

原子内部の電場分布像をマックスウェル方程式に従って電荷密度分布に変換すれば, 原理的には原子内部あるいは原子間の電荷密度分布を実空間で直接観察できる可能性がある(電子は正負電荷両方に敏感であるので, ここではトータルの電荷密度が観察されることになる). この特徴は界面などの局所構造解析に極めて有力になると期待できる. そこで, GaN 単結晶を用いて原子分解能 DPC STEM による電荷密度分布直接観察を行った結果を図11に示す<sup>(24)</sup>. (a)(b)はそれぞれ, 同時取得した ADF 像及び電場ベクトルカラーマップを示す. (c)は(b)を電荷密度マップに変換した像を示す. ADF では Ga 原子が明瞭に観察できているのに対して(N 原子は不明瞭である), 電場ベクトルマップでは Ga に加えて N 原子までもが電場として明瞭に観察できている. SrTiO<sub>3</sub>の原子分解能 DPC STEM 像と同様に, 原子中心から電場が放射状に湧出している様子が観察できている. 一方, 電荷密度マップでは, 各原子カラム位置に正電荷が集中した像が得られている. これは原子核の有する正電荷に対応しており, Ga の方が N に比べて原子番号が大きい分より高い正電荷密度を示している. 更に, 弱いコントラストではあるが Ga 原子カラム中心の正電荷周囲に負の電荷密度を示すコントラストが観察された. 図12に図11(c)の点線に沿ったラインプロファイルを示す. 比較のために, 動力学的回折効果を考慮したマルチスライス計算の結果(DPC 計算を行い, その結果から電荷密度分布に変換したもの)と計算に用いたポテンシ

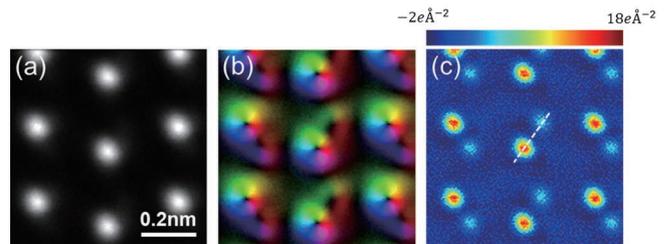


図11 GaN を[11-20]方向から観察した原子分解能 DPC STEM 像<sup>(24)</sup>. (a) ADF 像. (b) DPC STEM から構築した電場ベクトルカラーマップ. (c) (b)を変換して得られた全電荷密度分布像.

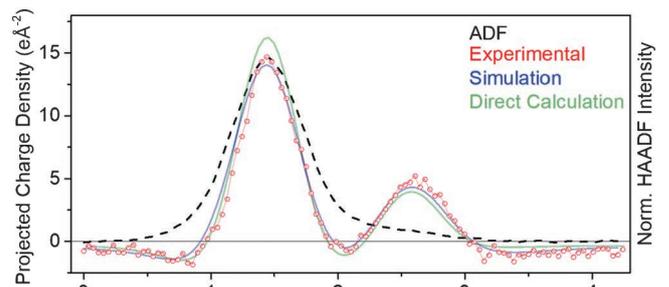


図12 図11の点線に沿ったラインプロファイルと計算結果の比較<sup>(24)</sup>. 赤線が実験値, 青線が計算結果, 緑線がポテンシャルから全電荷密度分布像を直接算出した結果, をそれぞれプロットしている. 黒点線は同時取得した ADF 像のプロファイルを示す.

ルから直接電荷密度を算出した結果を合わせて示す. 実験プロファイルは, マルチスライス計算結果及びポテンシャルからの直接電荷密度プロファイルと定量的に良い一致を示している. 実験で観察された正電荷周囲の負電荷コントラストは, 理論計算によっても再現されている. 更に, モデル構造を用いたシミュレーションによって, この負電荷コントラストは動力学的回折効果による偽像ではないことが示されている<sup>(24)</sup>. つまり, 本実験結果は原子核周囲の電子雲を直接可視化していることに対応すると考えられる. このように原子分解能 DPC STEM を用いて原子電場を定量的に求めることができれば, 原子内部の電荷密度分布, すなわち原子の内部構造を直接観察することが可能になる.

通常の環状検出器では, どんなに電子プローブ径を小さくしたとしても, 結像原理の制約により原子の存在しか結像できない. しかし, DPC STEM 法はその限界を超え, 原子の内部構造や原子間構造の直接観察に新たな道を開く手法になると考えられる.

## 5. 結 言

DPC 法は既存の STEM に分割型検出器もしくはピクセル型検出器を搭載するだけで利用できる手法であり, 従来の STEM では観察できなかった局所場の観察を可能にする手

法である。最近では、各メーカーから分割型検出器やピクセル型検出器が市販されるようになり、特殊な手法からスタンダードな手法へと変貌しつつある。もともとSTEM法は原子レベルの構造観察や分析に優れた手法であるが、更に電磁場観察能力が付加されることによって、STEMによる局所構造解析の幅が大きく広がるものと期待できる。また、前節で紹介したように、DPC法を原子分解能化していくと原子の内部構造までも直接観察できる可能性がある。原子を直接観察することが最大の目標であった電子顕微鏡の次の目標は、原子内部や原子間の電荷分布(=結合)の実空間直接観察になるのかもしれない。原子分解能DPC法はその端緒を開く手法になると期待できる。しかし、その実現には更なる分解能、装置安定性及び検出感度の飛躍的向上が必須であることは言うまでもない。たゆまぬ顕微鏡の追求が同時に材料研究の追求にも繋がると信じる。

本稿で紹介した研究は、東京大学の幾原雄一教授、松元隆夫博士、関岳人助教、石川亮助教、モナッシュ大学のS.D. Findlay博士、Gabriel Sánchez-Santolino博士(現Chalmers大)、秋田大学の肖英紀講師、日本電子㈱の河野祐二氏、沢田英敬博士、古河電気工業㈱の佐々木宏和博士、ソニー㈱の富谷茂隆博士らとの共同研究により遂行された成果です。本研究は、先端計測分析技術・機器開発プログラム、JPMJSN14A1の支援を受けて遂行されました。また本研究の一部は、基盤研究(A)17H01316、特別推進研究17H06094などの助成の下遂行されました。また、本研究の一部は、文部科学省のナノテックプラットフォーム事業の支援を受けた東京大学先端ナノ計測ハブ拠点において実施されました。ここに合わせて謝意を表します。

## 文 献

- (1) N. H. Dekkers and H. D. de Lang: *Optik*, **41**(1974), 452-456.
- (2) H. Rose: *Ultramicroscopy*, **2**(1977), 251-267.
- (3) J. N. Chapman, I. R. McFadyen and S. McVitie: *IEEE Trans. Mag.*, **26**(1990), 1506-1511.
- (4) S. J. Pennycook and D. E. Jessen: *Ultramicroscopy*, **37**(1991), 14-38.
- (5) J. M. Cowley: *Appl. Phys. Lett.*, **15**(1969), 58-59.
- (6) E. M. Waddel and J. N. Chapman: *Optik*, **54**(1979), 83-96.
- (7) K. Müller, F. F. Krause, A. Béché, M. Schowalter, V. Galioit, S. Löffler, J. Verbeeck, J. Zweck, P. Schattschneider and A.

- Rosenauer: *Nature Comm.*, **5**(2014), 5653.
- (8) R. Close, Z. Chen, N. Shibata and S. D. Findlay: *Ultramicroscopy*, **159**(2015), 124-137.
- (9) A. Lubk and J. Zweck: *Phys. Rev. A*, **91**(2015), 023805.
- (10) K. Müller-Caspary, F. F. Krause, T. Greib, S. Löffler, M. Schowalter, A. Béché, V. Galioit, D. Marquardt and A. Rosenauer: *Ultramicroscopy*, **178**(2017), 62-80.
- (11) 関 岳人, Sánchez-Santolino Gabriel, 石川 亮, 幾原雄一, 柴田直哉: *顕微鏡*, **52**(2017), 8-12.
- (12) N. Shibata, Y. Kohno, S. D. Findlay, H. Sawada, Y. Kondo and Y. Ikuhara: *J. Electron Microsc.*, **59**(2010), 473-479.
- (13) T. Seki, G. Sánchez-Santolino, R. Ishikawa, S. D. Findlay, Y. Ikuhara and N. Shibata: *Ultramicroscopy*, **182**(2017), 258-263.
- (14) N. Shibata, S. D. Findlay, H. Sasaki, T. Matsumoto, H. Sawada, Y. Kohno, S. Otomo, R. Minato and Y. Ikuhara: *Sci. Rep.*, **5**(2015), 10040.
- (15) N. Shibata, S. D. Findlay, T. Matsumoto, Y. Kohno, T. Seki, G. Sánchez-Santolino and Y. Ikuhara: *Acc. Chem. Res.*, **50**(2017), 1502-1512.
- (16) T. Matsumoto, Y.-G. So, Y. Kohno, H. Sawada, Y. Ikuhara and N. Shibata: *Sci. Adv.*, **2**(2016), e1501280.
- (17) N. Nagaosa and Y. Tokura: *Nature Nanotech.*, **8**(2013), 899-911.
- (18) T. Matsumoto, Y.-G. So, Y. Kohno, H. Sawada, R. Ishikawa, Y. Ikuhara and N. Shibata: *Sci. Rep.*, **6**(2016), 35880.
- (19) C. Chen, H. Li, T. Seki, D. Yin, G. Sánchez-Santolino, K. Inoue, N. Shibata and Y. Ikuhara: *ACS Nano*, **12**(2018), 2662-2668.
- (20) N. Shibata, Y. Kohno, A. Nakamura, S. Morishita, T. Seki, A. Kumamoto, H. Sawada, T. Matsumoto, S. D. Findlay and Y. Ikuhara: *Nature Comm.*, **10**(2019), 2308.
- (21) N. Shibata, S. D. Findlay, Y. Kohno, H. Sawada, Y. Kondo and Y. Ikuhara: *Nature Phys.*, **8**(2012), 611-615.
- (22) N. Shibata, T. Seki, G. Sánchez-Santolino, S. D. Findlay, Y. Kohno, T. Matsumoto, R. Ishikawa and Y. Ikuhara: *Nature Comm.*, **8**(2017), 15631.
- (23) R. Ishikawa, S. D. Findlay, T. Seki, G. Sánchez-Santolino, Y. Kohno, Y. Ikuhara and N. Shibata: *Nature Comm.*, **9**(2018), 3878.
- (24) G. Sánchez-Santolino, N. R. Lugg, T. Seki, R. Ishikawa, S. D. Findlay, Y. Kohno, Y. Kanitani, S. Tanaka, S. Tomiya, Y. Ikuhara and N. Shibata: *ACS Nano*, **12**(2018), 8875.



柴田直哉

★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★  
 2003年3月 東京大学大学院工学系研究科博士課程修了  
 2003年4月 日本学術振興会海外特別研究員  
 2004年7月 東京大学大学院工学系研究科総合研究機構・助手  
 2011年6月 同 准教授  
 2017年12月- 現職  
 専門分野: 電子顕微鏡材料学  
 ©新規原子分解能電子顕微鏡法の開発と材料界面に関する研究に従事。  
 ★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★

# 次世代電池にむけて再注目される 酸化物系ナトリウムイオン伝導体

林 克 郎\*

## 1. はじめに

再生可能エネルギーの効率利用、電気自動車向け蓄電池などのため、次世代電池には大容量・長寿命低コスト化が求められている。また元素戦略的な観点から  $\text{Li}^+$  イオン以外のキャリアによるナトリウム系やマグネシウム系電池が注目されている。さらに、安全性、寿命とエネルギー密度向上、既存の形態の電池が為し得ない応用展開の観点から、最近では全固体電池および、その鍵となる固体電解質が注目されている<sup>(1)(2)</sup>。ナトリウム系固体電解質に関しては再検討あるいは再評価されているという表現がより適切であるかもしれない。まずその背景から述べる。

古くより  $\text{Na}$  イオンの高速イオン伝導体の代表格としてベータアルミナとナシコンと呼ばれる酸化物系セラミック材料と用途が開発されてきた。まず前者のベータアルミナについては、1960年代に高速  $\text{Na}^+$  イオン伝導体として研究され始め、ナトリウム-硫黄( $\text{Na-S}$ )電池の電解質<sup>(3)(4)</sup>の他に、アルカリ金属熱電変換器<sup>(5)</sup>、ガスセンサー<sup>(6)</sup>などの電解質として検討されている。ベータアルミナの結晶構造の特徴は、スピネルブロックと呼ばれる構造層が、主に  $\text{Na}^+$  イオンからなるイオン伝導面を挟み込んだ層状構造を有していることにある。六方晶系の  $\beta$  相および稜面体晶系の  $\beta''$  相という層の重なり方が若干異なる二つの構造を持ち、後者の基本的な組成は  $\text{Na}_{1+x}\text{Mg}_x\text{Al}_{11-x}\text{O}_{17}$  ( $x=0.59-0.72$ ) である(図1(a))。本稿では、後述の  $\beta$  相および  $\beta''$  相を含めてベータアルミナと称している。 $\text{Na}^+$  イオンがイオン伝導面内を、空孔を介して拡散することから、イオン伝導性には異方性がある。配向制御された多結晶体では、 $\sim 350^\circ\text{C}$  で  $0.1 \text{ S} \cdot \text{cm}^{-1}$  以上の高速  $\text{Na}^+$  イオン伝導性を示す<sup>(3)</sup>。

ベータアルミナを電解質とした  $\text{Na-S}$  電池では、負極に金属  $\text{Na}$  を、正極に硫黄および多硫化ナトリウム  $\text{S}/\text{Na}_2\text{S}_x$  の活物質を、正極溶融塩の集電材としてグラファイトワールを用いている(図1(b))。これらの構成元素は豊富であり他にも高価な部材を必要としないので、大規模な普及を見込む事ができて、資源小国の我が国にとっても最適な蓄電池となり得る<sup>(4)</sup>。典型的な運転温度は、金属ナトリウムと多硫化ナトリウムが溶融し、電解質の伝導度も十分に高い  $300-350^\circ\text{C}$  で、高いエネルギー密度、充放電エネルギー効率と充放電回数を

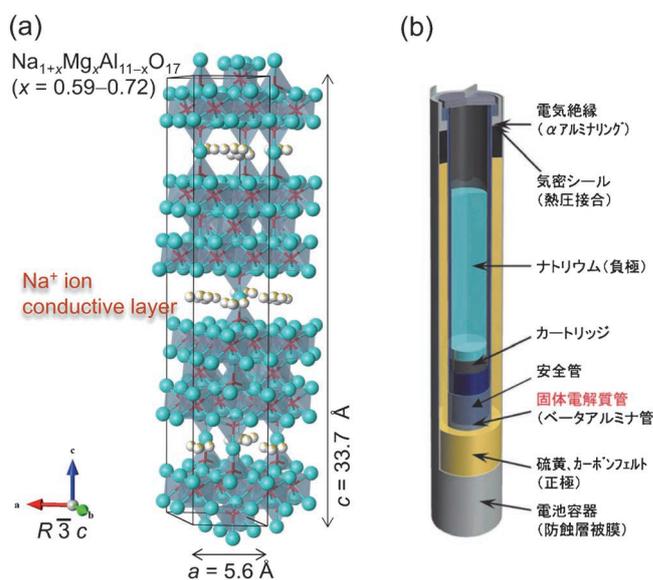


図1 (a)  $\text{Na}_{1+x}\text{Mg}_x\text{Al}_{11-x}\text{O}_{17}$  ( $x=0.67$ ) 組成の  $\beta''$ -アルミナ結晶の単位格胞. (b)  $\text{Na-S}$  電池の単セルの構造<sup>(3)</sup>. (b: 出版元の許可を得て転載©日本セラミック協会)(オンラインカラー)

\* 九州大学工学研究院応用化学部門; 教授 (〒819-0395 福岡市西区元岡744)  
 Revisiting Oxide-Based Sodium Ion Conductors for Next-Generation Batteries; Katsuro Hayashi (Department of Applied Chemistry, Graduate School of Engineering, Kyushu University, Fukuoka)  
 Keywords: beta-alumina, NASICON, hybrid Na-air battery, Na anode, tape casting, oxide-based all solid-state battery  
 2019年5月16日受理 [doi:10.2320/materia.58.440]

特徴とする。2016年より九州電力豊前蓄電池変電所にて、出力50 MW、容量300 MWhの世界最大級の日本ガイシ㈱製 NAS<sup>®</sup>蓄電システムが稼働し、太陽光発電の余剰電力下での電力供給安定化へ貢献しており、文字通り日の目を見ようとしている。

もう一方のナシコンは、1976年に Hong と Goodenough らによって見出され Na Super Ionic CONductor, NASICON と名付けられた<sup>(7)</sup>。Na<sub>1+x</sub>Zr<sub>2</sub>(SiO<sub>4</sub>)<sub>x</sub>(PO<sub>4</sub>)<sub>3-x</sub> (NZSP と略す)で表される組成の中で、特に1.8<x<2.2の組成範囲で単斜晶の構造となり、最も優れた Na<sup>+</sup> イオン伝導性(典型的には室温で~10<sup>-3</sup> S·cm<sup>-1</sup> 台)を示す。NZSP 結晶では、ZrO<sub>6</sub> 八面体と PO<sub>4</sub> 四面体あるいは SiO<sub>4</sub> 四面体が、頂点を共有した化学的に安定な三次元網目構造を形成し、その隙間を Na<sup>+</sup> イオンが移動する。この結晶構造自体は、一般式 A<sub>x</sub>M<sub>2</sub>(TO<sub>4</sub>)<sub>3</sub> で表されるナシコン構造として分類される(図2)。その類縁物質は多様であり、主要な組成に限定しても、A = Na, Li, …, M(八面体席) = Zr, Ti, V, Mn, Cr, Fe, Ni, Al, Ge, …, T(オルト四面体席) = P, Si, As, … など様々な組成が報告されている。その中には、アルカリイオンの挿入脱離に伴う遷移金属イオンの価数変化を起こし、アルカリイオン電池の電極活物質として機能するものも含まれる<sup>(8)-(10)</sup>。本稿でも後ほどナトリウムイオン電池の電極活物質としても有望であるナシコン型 Na<sub>3</sub>V<sub>2</sub>(PO<sub>4</sub>)<sub>3</sub> (NVP) について触れる。

加えて、金属ポリアニオン化合物(リン酸イオン PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>、ケイ酸イオン、SiO<sub>4</sub><sup>4-</sup>、ピロリン酸イオン P<sub>2</sub>O<sub>7</sub><sup>4-</sup> などを含む)は、構造や組成、機能などで多様性を有している<sup>(10)</sup>、ナシコン結晶もその一員である。ここでは、複数のポリアニオンを含む複合ポリアニオン系のみならず、酸フッ化物系など複合アニオン系も近年開拓されている。また、金属ポリアニオン系結晶の化学組成は、丁度ガラス網目形成剤、中間酸化物、網目修飾剤の組み合わせである。例えば NZSP の原料

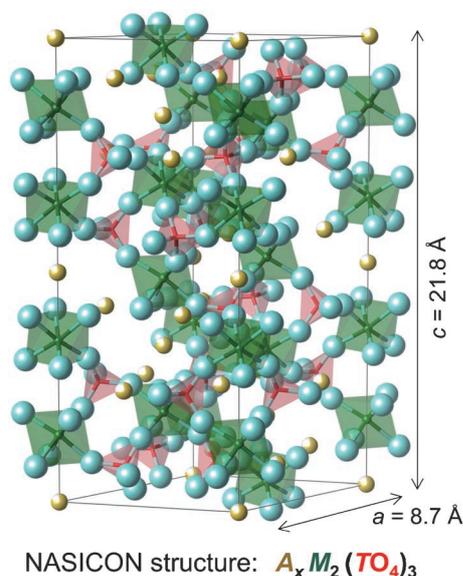


図2 ナシコン構造の単位胞。稜面体晶系  $R\bar{3}c$ ,  $Z=6$  の例。(オンラインカラー)

からみると、SiO<sub>2</sub> と P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> がガラス網目形成剤、ZrO<sub>2</sub> と Na<sub>2</sub>O がそれぞれ中間酸化物と網目修飾剤とみなせる。実際、ナシコン系結晶と等価な組成でのガラス形成が多数研究されている。ガラスから結晶が析出したセラミックス体はガラスセラミックスあるいは結晶化ガラスと呼ばれている。リチウム系のナシコン型 Li<sub>1+x</sub>Al<sub>x</sub>Ti<sub>2-x</sub>(PO<sub>4</sub>)<sub>3</sub> (LATP) は代表的な固体酸化物系の Li<sup>+</sup> イオン伝導体である<sup>(8)</sup>。LATP のガラスセラミック電解質が㈱オハラによって商用化されていて、NZSP より一桁劣る ~10<sup>-4</sup> S·cm<sup>-1</sup> の Li<sup>+</sup> イオン伝導度を有する。

さて、本家の NZSP 組成のナシコンは、Na-S 電池の電解質としても期待されたが動作温度である 350°C 付近において、金属 Na に対する化学的安定性が十分でないため<sup>(11)</sup>、適用は断念されている。一方で、より低い温度領域 (<150°C) や室温では速度論的に、すなわち実用的な時間スケールで金属 Na と共存し得えて、かつ Li 系の競合材料や有機系材料と比べても高い安定性が認められるため、新たな用途の可能性があり、新しい概念の電気化学デバイスや、近年の研究の進展の著しい全固体電池向けに見直す価値があると考えられる。

以下では、固体電解質セラミックスを活用した室温付近で動作させる Na 系ハイブリッド型空気電池や酸化物系全固体電池を目指した、筆者らの最近の取り組みについて述べる。また、その為の基盤となるベータアルミナとナシコン系酸化物の焼結法についても検討してきた経緯も交える。

## 2. バルクセラミックスの焼結

### (1) β''-アルミナ<sup>(14)</sup>

まず、ナトリウム系固体電解質セラミックスの製造方法について触れ、材料面からの現状及び今後の課題を明らかにする。一般的な β''-アルミナの作製法では、α-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> を出発原料とし、MgO や Li<sub>2</sub>O を安定化剤として少量添加して 1600°C 以上で焼結が行われる。非常に高い温度での焼結により Na 成分が揮発し易く、緻密化を阻害し、組成ずれを起こしやすい。このため、ベータアルミナ自身や Na を含む酸化物の粉末によるパウダーベッド法などにより蒸気圧を維持した焼結が必須で、生産性や再現性に困難が生じる。そこで、筆者らは焼結温度の低減と、Na 成分の揮発抑制の効果を期待し、スパークプラズマ焼結 (SPS) 法<sup>(12)(13)</sup> による焼結を試みている。SPS 法を適用することで通常の 1600°C 以上の緻密化温度を 1400°C 程度に低減かつ短時間で焼結できる事を示した。この際、結晶配向性が付与された β''-アルミナの電気伝導度は異方性を示し、SPS での圧力印加方向と結晶の c 軸が揃う事で、導電パスが繋がった「平行試料」においては、伝導率が向上した(図3)。ここで得られた試料の中で、最もイオン伝導度の優れた試料はこれまでに報告されている多結晶体よりも高く、25°C における伝導は 1.9 × 10<sup>-2</sup> S·cm<sup>-1</sup> であり、単結晶に匹敵する値であった<sup>(14)</sup>。

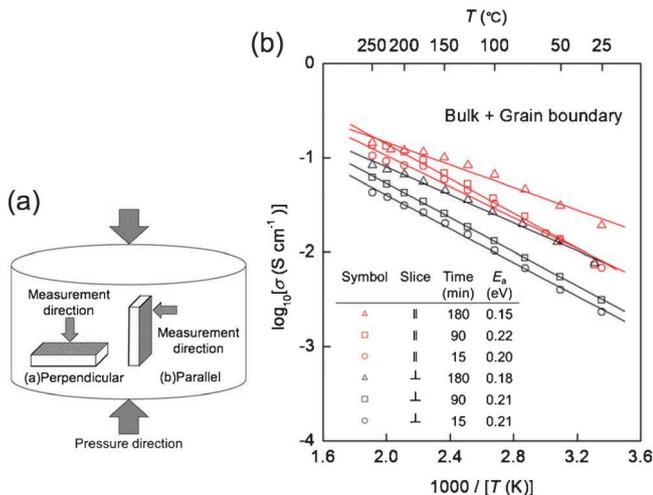


図3 SPSによって作製された結晶配向 $\beta''$ -アルミナにおける、(a)切り出し方向、(b)1400°Cでの焼結時間と切り出し方向による $\text{Na}^+$ イオン電導度の違い<sup>(14)</sup>。(出版元の許可を得て転載©Elsevier)(オンラインカラー)

## (2) ナシコン型 NZSP<sup>(16)</sup>

ナシコン型 NZSP セラミックスの常圧焼結でもやはり、粉末のプレス成型体(グリーン体)を仮焼粉末の中に埋め込んだパウダーベッド法で焼成を行うことで Na や P の酸化物など蒸気圧の高い成分の揮発を防止する。液相を生成する包晶点直下<sup>(15)</sup>の1250°C付近で焼成を行うことで、相対密度98%程度、室温で $1-2 \times 10^{-3} \text{ S} \cdot \text{cm}^{-1}$ の範囲の $\text{Na}^+$ イオン全伝導度を有するものが得られる。緻密な NZSP 焼結体の製造はベータアルミナほど厳しい条件や管理が必要でない。また、主に異相に起因すると考えられる大気や水溶液への感受性においても、ベータアルミナ程不安定ではないため扱いやすい。この特徴を利用して、次節にて、筆者らによる室温付近で動作する非水-水溶液混合系の空気電池の電解質セパレータへ NZSP セラミックスを適用してきた経緯を紹介する。

またバルクセラミックス緻密化には SPS 法も有効であり、緻密化温度の低減と焼結時間の短縮を図りつつ Na の揮発を抑制することができる。筆者らは、NZSP の焼結と電気化学特性に及ぼす SPS 法の効果について明らかにしている<sup>(16)(17)</sup>。また、本間らによって見出されたナトリウムイオン伝導性を有するリン酸ニオブナトリウムガラス( $60\text{Na}_2\text{O}-10\text{Nb}_2\text{O}_5-30\text{P}_2\text{O}_5$ , NNP)<sup>(18)</sup>の添加による緻密化促進の効果を併せて検討した。本組成では、ガラス転移点475°C、結晶化温度 $\sim 500-580^\circ\text{C}$ 、融点が730°Cであった。ガラス無添加で常圧焼結にて95%以上の相対密度を得るためには、1270°Cの焼結温度を有していたのに対して、SPS法とNNPガラス助剤の導入により、焼結温度を200°C以上低下させることができ、とりわけガラス焼結助剤の効果が大きい事を見出している(図4)。1045°CでのSPSによって得られたセラミックスは、室温で $1 \times 10^{-3} \text{ S} \cdot \text{cm}^{-1}$ のNaイオン伝導度と0.32 eVの活性化エネルギーを示し、従来の無添加・常圧

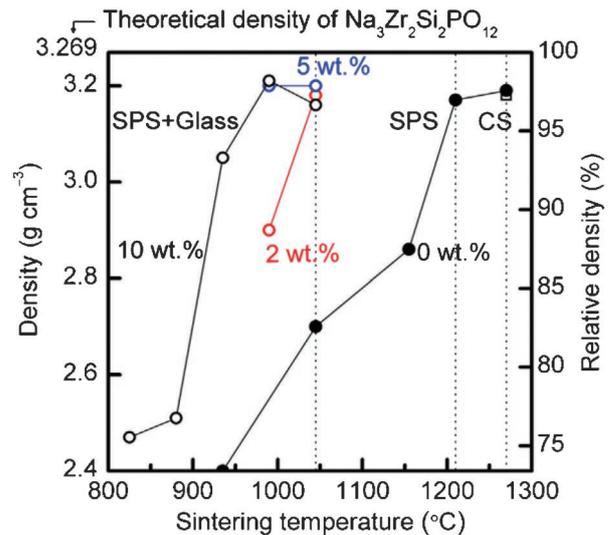


図4 0, 2, 5, 10 wt%  $60\text{Na}_2\text{O}-10\text{Nb}_2\text{O}_5-30\text{P}_2\text{O}_5$  ガラスを添加した $\text{Na}_3\text{Zr}_2(\text{SiO}_4)_2(\text{PO}_4)$ におけるSPSによる焼結温度と密度の関係<sup>(16)</sup>。CSは常圧焼結による。(出版元の許可を得て転載©Elsevier)(オンラインカラー)

焼結のものと遜色ない性能が得られる事を示している。NNPガラスは母相のNZSPと類似した組成を有していることも特徴的な点であり、副反応生成物は、通常生成する $\text{ZrO}_2$ のほか、添加量が多い組成でわずかな量の $\text{NaNbO}_3$ のみであり、主だった電気伝導度への影響は認められなかった。

また近年、焼結助剤として $\text{Li}^+$ イオン伝導体のガーネット型 $\text{Li}_7\text{La}_3\text{Zr}_2\text{O}_{12}$ (LLZO)への $\text{Li}_3\text{BO}_3$ 添加<sup>(19)</sup>、NZSPナシコンへの $\text{Na}_3\text{BO}_3$ 添加<sup>(20)</sup>など、幾つかの焼結助剤による焼結促進と低温化の事例が示されており、古典的であるが焼結助剤の有効性が着目されている。

## 3. ナシコンセラミックスセパレータを用いたハイブリッド電池

### (1) Li系ハイブリッド電池とNa系

商用のリチウムイオン電池のエネルギー密度は、 $100-150 \text{ Wh} \cdot \text{kg}^{-1}$ 程度の範囲にあり、 $\sim 250 \text{ Wh} \cdot \text{kg}^{-1}$ が従来技術の延長線で到達できる限界と認識されている。この限界を破るべくリチウム空気電池が着目されてきた。金属Li自体を負極に用い、有機電解液層を介して多孔質正極で大気から取り込んだ酸素と反応させることで、Li重量換算で、約 $3,500 \text{ Wh} \cdot \text{kg}^{-1}$ の理論容量に基づく大きなエネルギー密度を期待できる。ただし、非水系Li空気電池開発には課題が山積している<sup>(21)(22)</sup>。その一つとして、放電生成物が多孔質空気極の触媒相を覆い目詰まりすることで実効的な容量が制限され、本来のエネルギー密度を十分に発揮できないことがある。この問題への解答の一つが、固体電解質膜と空気極側に水系電解質を導入することで放電生成物を溶解性とした、混合非水-水溶液系Li-空気電池である。この形態の電池は、

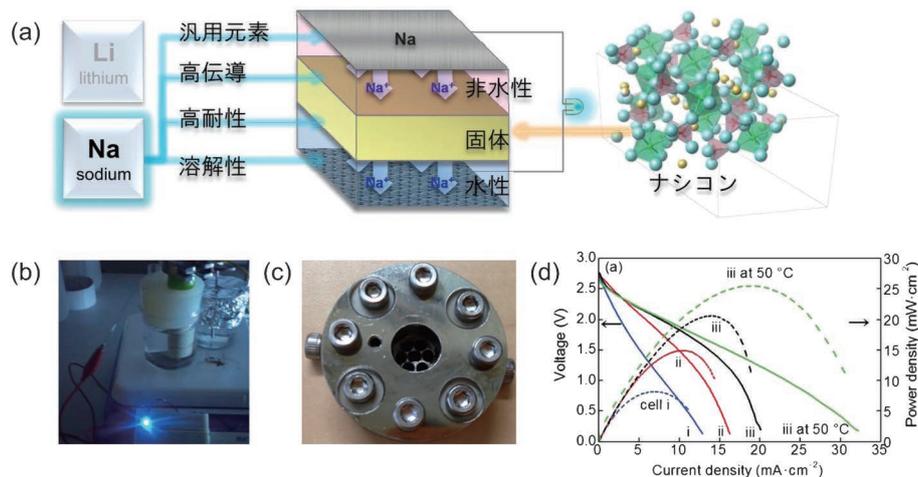
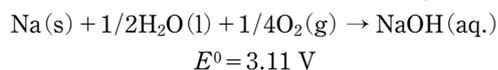


図5 (a)ハイブリッド型Na-空気電池の構造と特徴. (b)初期のピーカー型セルと青色LEDを光らせている様子. (c)  $\text{Mn}_3\text{O}_4$  触媒担持カーボン電極を組み込んだ試験用Na-空気電池セルと (d)室温および50°Cでの出力特性<sup>(34)</sup>. (c, d: 出版元の許可を得て転載©The Electrochemical Society)

その後、ハイブリッド型空気電池<sup>(23)</sup>と呼ばれることが多くなるため、本稿でもその様に称する。ハイブリッド型リチウム空気電池は Visco らにより発案され<sup>(24)</sup>、我が国でも武田と今西<sup>(25)</sup>や周<sup>(21)</sup>のグループを中心に精力的に研究されてきた。ここでの鍵材料が、ガラスセラミックス法により製造された緻密な LATP セラミックスであった。また、稲熊らは  $\text{Li}^+$  イオン伝導性により優れるペロブスカイト型  $\text{Li}_{2/3-x}\text{La}_{3x}\text{TiO}_3$  (LLTO,  $x=0.29$ ) をセパレータとしている<sup>(26)</sup> 他、ガーネット型電解質の利用も提案されている<sup>(23)</sup>。

筆者らは、ハイブリッド Li-空気電池の Na 版であるハイブリッド Na-空気電池を2013年に発表した<sup>(27)</sup> (図5)。その構成を説明する。緻密な NZSP ナシコンセラミックスを、液体電解質を物理的に隔てるセパレータとして用い、金属 Na が配置された負極側にカーボネート系やエーテル系の有機電解液を導入することで出力を向上させ、また正(空気)極側に放電生成物を溶解させる水性電解液を導入できて、非水系空気電池と比較して実効的な放電容量を増大させている。空気極は、典型的には酸化物系の触媒が担持された多孔質の炭素基材電極から構成される。総反応は以下のとおりで、反応生成物換算のエネルギー密度は  $2,080 \text{ Wh} \cdot \text{kg}^{-1}$  である。



NZSP ナシコンには、金属 Na や強アルカリ性溶液との接触にも安定である特徴がある。水性電解液が酸性になるにつれて、ネルンスト式に従って理論電位は上昇し、 $\text{pH} = 0$  基準で  $3.94 \text{ V}$  となる<sup>(28)</sup>。一見して、Na は Li と比較して、重い元素で、碑な標準電位をもつことによる原理的なエネルギー密度の低下、水との即時反応性等の望ましくない要因がある。しかし、水酸化物の水への高い溶解度による実効的理論エネルギー密度の逆転や、固体電解質の1桁高いイオン伝導度による高い出力密度といった、本質的な優位性が示されている。

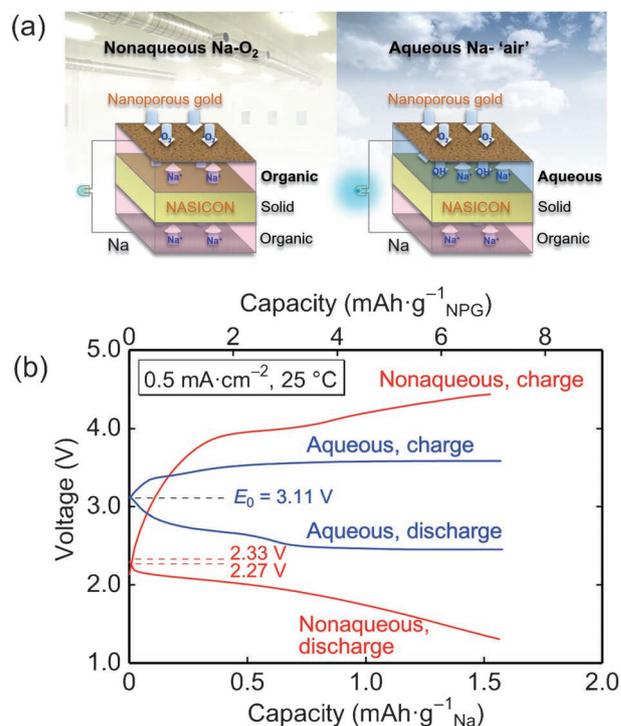


図6 (a) ナノポーラス金空気極の導入と非水系空気極および水系空気極(ハイブリッド系)の直接比較のための電池構成. (b) 水溶液系および非水系での初期充放電特性<sup>(29)</sup>. (出版元の許可を得て転載©Elsevier)

## (2) ナノポーラス金(NPG)空気極を用いた非水系と水系空気電池の直接比較<sup>(29)</sup>

Au-Ag 合金箔の硝酸溶解による脱合金化によって得られる、ナノポーラス金(NPG)は数10 nmの細孔径をもつ高比表面積かつ高伝導性の材料である。非水系 Li 空気電池に

NPG 空気極を導入することで、出力密度、充電時の過電圧、サイクル特性を著しく改善できることが報告されていた<sup>(30)</sup>。筆者らは、NPG をハイブリッド型空気電池へ適用した。腐食性の無い NPG を用いる事で、理想的な比較検討が可能であるとして、水性電解質を有機電解質に置き換えて、同一条件での非水系ナトリウム-空気電池としても電池特性を直接評価した(図 6)。

非水系とハイブリッド系を比較すると、充放電電圧、出力、容量、水分を含む大気への非感受性の全ての面でハイブリッド系優れていることが示された。非水系では NPG 重量当たり  $10 \text{ mAh} \cdot \text{g}^{-1}$  以下に留まり、実際に NPG の空隙体積で容量が制限されていることが確認された。一方、ハイブリッド系での容量は、NPG 重量当たり  $\sim 100 \text{ mAh} \cdot \text{g}^{-1}$  であり著しく増大した。すなわちハイブリッド系を用いる事によって空隙体積で規定されるの容量の制限から解放され、貴金属の最小利用の観点からもより優れていることが示された。また、有機電解液と負極を保護する構造、大気中でも動作する点での優位性を示す結果となった。

### (3) ハイブリッドナトリウム空気電池性能の向上

空気極には、効率的な酸素還元反応(ORR)及び酸素発生反応(OER)反応を起こさせるための高比表面積で適切な構造の触媒担体材料が必要である。その候補として、(1)グルコースを原料用いた水熱炭化法による微少カーボン球(CS)材料<sup>(31)</sup>、(2)メソポーラスシリカテンプレート法で得られるメソポーラスカーボン、(3)液相剥離グラフェン<sup>(32)(33)</sup>、等の検討を行った。また、酸化物系の触媒材料としては、水溶液系 Na-空気電池の原理実証に用いてきた  $\text{Mn}_3\text{O}_4$ <sup>(34)</sup> のほかに、 $\text{MnCr}_2\text{O}_4$  系酸化物触媒<sup>(32)</sup>、Ni 微粒子<sup>(35)</sup> の効果を検証した。 $\text{MnCo}_2\text{O}_4$  を N 添加グラフェンと複合化させた触媒では、Pt/C 触媒よりも優れた ORR および OER 特性を得ることができた<sup>(32)</sup>。

非水系の Li 空気電池は、限定的な出力密度も課題である。電気自動車向けを想定すると、様々な見積もりがあるものの、概ね最大で  $100 \text{ mW} \cdot \text{cm}^{-2}$  程度が目標とされる。ハイブリッド系の複雑な構造であることを差し引いて考えないとないが、本系では室温付近で  $\sim 20\text{--}35 \text{ mW} \cdot \text{cm}^{-2}$  を得ている<sup>(28)</sup>。

### (4) 金属ナトリウム負極

ハイブリッド型電池の金属負極の反応は、密閉系のアルカリ金属電池と共通の課題を抱えている。アルカリ金属を有機電解液に浸漬させた際、実のところアルカリ金属は有機電解液と熱力学的には安定共存できておらず、電解液との反応によって solid-electrolyte interphase (SEI) と呼ばれる生成物が金属表面を覆う事で反応進行が抑制されている。しかし、充電電流密度が高くなり、金属析出反応が拡散律速になると、表面の凸部などで局所的に析出速度が高くなることで樹状析出物(デンドライト)が生ずる。デンドライトから遊離した部位(デッドナトリウム)は電気化学反応に関与せず、電池

容量を低下させる。SEI によって制御された溶解と析出であっても、サイクルを繰り返すにしたがって、新たな SEI の生成を繰り返し、電極平滑性と電解液成分が失われ、また SEI 膜が破壊されていく<sup>(36)–(38)</sup>。

萩原らは、 $\text{Na}[\text{FSA}]-[\text{C}_2\text{C}_{1\text{im}}][\text{FSA}]$  (FSA = bis (fluorosulfonyl) amide,  $\text{C}_2\text{C}_{1\text{im}} = 1\text{-ethyl-3-methylimidazolium}$ ) 二元系イオン液体において、 $0\text{--}90^\circ\text{C}$  における金属 Na の溶解析出挙動を調べ、ナトリウム融点( $98^\circ\text{C}$ )に近い  $90^\circ\text{C}$  において良好な溶解析出が得られる事を示している<sup>(39)</sup>。高温では、Na の析出核が針状ではなく、基板上で液体金属の様に半球状に成長してデッドナトリウムは生成しない。イオン液体による高温動作により溶解析出挙動を制御できる事を示している。

そこでハイブリッド型ナトリウム空気電池系において、イオン液体の効果の検討を行った。イオン液体-水溶液複合系を容易に構成できる事も、セラミックセパレータ分離型構造の特徴である。負極電解液として、室温で液相を維持しつつ高いイオン伝導性が期待できることで、上記と同様の  $\text{Na}[\text{FSA}-\text{C}_2\text{C}_{1\text{im}}][\text{FSA}]$  イオン液体を導入して、負極 Na を 100% の利用効率で負極 Na を放電に用いる事ができた。また、カーボネート系電解液が不安定となる  $70^\circ\text{C}$  の高温領域でも安定に動作できる事を実証した<sup>(40)</sup>。

### (5) ハイブリッド型電池構造の展開

エネルギー密度が最優先されない場合は、金属 Na 負極にこだわる必要はない。2014年頃より、従来型 Na-S 電池と同様にベータアルミナ固体電解質によって金属 Na および多硫化ナトリウムを仕切る構造を活用しつつ、有機電解液を導入する事で低温動作を図る、室温型 Na-S 電池が発表されてきた<sup>(41)</sup>。しかし、上記の金属ナトリウム負極における有機電解液系との間の不安定性を内包していた。その後、2017年にジメチルエーテル(DME)に溶解させた Na ビフェニル(Na-BP)を負極活物質とした Na-S 電池が提案された。1M Na-BP DME 溶液は  $1 \times 10^{-2} \text{ S} \cdot \text{cm}^{-1}$  の高い電子伝導度と  $10^{-3} \text{ S} \cdot \text{cm}^{-1}$  台の  $\text{Na}^+$  イオン伝導度を有し、 $\text{Na}^+/\text{Na}$  に対して、 $0.09 \text{ V}$  のみ碑な酸化還元電位を有すると報告されている。負極、正極共に液体の活物質とすることで、Na 負極の問題を回避して、容量劣化の無い( $< 3,000$  サイクル)の優れた電池特性を得る事に成功している。Na-BP DME 溶液が仮に水と接触しても、その反応は穏やかであり、安全性が高いという<sup>(42)</sup>。液体活物質であるがゆえにフロー型電池への展開の可能性も示唆されている。

筆者の共同研究者の Liang を中心に、これまで検討を行ってきたハイブリッド型 Na-空気電池の形態を利用して、負極活物質として Na-BP DME 溶液を有するナトリウム-空気電池電池を提示している(図 7)。液体アノード溶液中での NZSP ナシコンは腐食されず、長期間の充放電を可能にすることが分かった。電池全体での充放電特性では、 $0.1 \text{ mA} \cdot \text{cm}^{-2}$  の電流密度での充放電間の電圧差は  $0.14 \text{ V}$  に留まり、95% 以上の高い電力効率をもたらすことが示された。さら

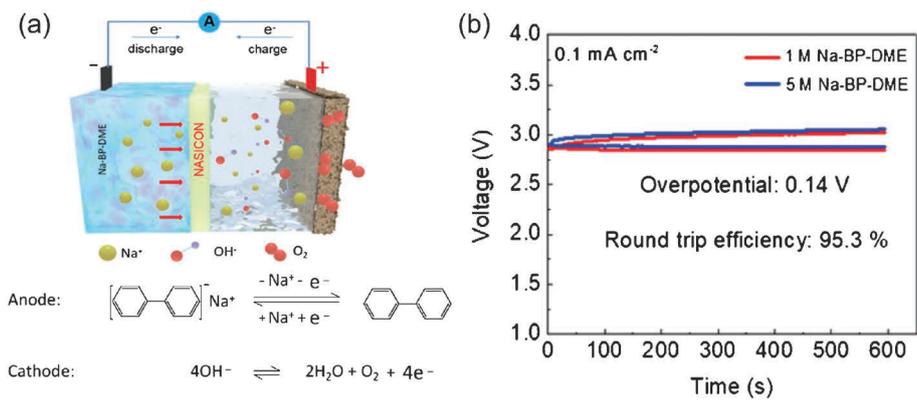


図7 (a)Na-BP-DME 負極溶液を用いたナシコンセラミックセパレータ分離型空気電池の構成と反応. (b)充放電特性<sup>(43)</sup>. (出版元の許可を得て転載©Elsevier)(オンラインカラー)

に、室温での最大出力 $39 \text{ mW} \cdot \text{cm}^{-2}$ を得て、アルカリ系空気電池で最高記録を更新した<sup>(43)</sup>。液体活物質の高い伝導率とナシコン固体電解質との間の界面抵抗の効果的な減少によるものである。

ハイブリッド型 Na-空気電池の別の展開として、Y. Kim らは類似の形態を用いた海水電池を提案している<sup>(44)</sup>。正極(空気極)および空気極室を海水中に浸漬した形態として、海水中の  $\text{Na}^+$  イオンおよび溶存酸素を電池反応に用いるというアイデアである。充放電の安定性も踏まえ、負極は金属ナトリウムではなく、ナトリウムイオン電池と同様の難黒鉛化炭素(ハードカーボン)を用いる形態が有力となっている。用途としては、太陽電池で発電する海洋光ブイ向けの蓄電池などが想定されている。

4. 酸化物系全固体電池にむけたナシコン系緻密シート

(1) テープキャスト膜での緻密化の方策

酸化物系全固体電池のための電解質としても、ベータアルミナやナシコンの注目度が増している。全固体であればリチウムイオン電池などで課題の可燃性を回避できる。また研究が進んでいる硫化物系の全固体電池と比較しても、酸化物系は加水分解による硫化水素の生成がなく、安定性と安全性に優れている。さらに、酸化物系全固体電池の堅固で自立する構造から、電子基板への直接実装、過酷環境やウェアラブルデバイスでの使用など幅広い可能性を有している。

酸化物からなる全固体電池を構成する際は、焼結を経て要素材料が一体化しない事には実用に足る伝導率を発現しない。例えば全固体電池の研究段階の試作には SPS を用いている実例がある<sup>(45)</sup>。しかし生産性を考慮すると、なるべく低温で常圧焼結できる事が重要である。さらに、電解質の薄層化による抵抗低減が望まれる。また、上述したハイブリッド型空気電池では、セラミックセパレータの抵抗寄与がすでに最大成分となっていて、電解質の厚み低減が出力向上に直接的に有効である。実用的な薄層化のためのテープキャスト法の検討は、Li 系固体電解質において、いくつかの検討例

がみられ<sup>(46)</sup>、また上市されている全固体電池の生産プロセスで用いられているが、筆者らの知る限り気密性まで達成している例はなかった。そこで、テープキャスト法による気密 NZSP ナシコンのシートの常圧焼成による作製を試みた。様々な添加剤を伴うテープキャスト法では、バルクセラミックスを作製する場合に比べて、緻密化のための条件がより厳しくなる。そこで、再度 NNP ガラス<sup>(18)</sup>の添加による緻密化促進の効果を検討した。

(2) NZSP ナシコンの電解質シート<sup>(47)</sup>

NNP ガラス粉末を NZSP 粉末に対し 1, 5, 10 wt% 添加し、結着剤、可塑剤、分散剤、消泡剤を含む溶剤と共に遊星ボールミルで混合することでスラリーを得た。このスラリーを、ドクターブレードを用いたテープキャスト法により、離型剤付のポリエチレンシート上に成形した。脱脂熱処理の後、 $900\text{--}1100^\circ\text{C}$  で本焼成を行った。得られた試料について、シートの片側を減圧した際の圧力変化を計測する事で気密性試験を行った。

助剤添加量が多いほど、また、焼結温度が高いほど焼結後の収縮が大きくなった。特に $1100^\circ\text{C}$ で焼結した助剤添加量 5, 10 wt% の試料( $5 \text{ wt}\% \text{--}1100^\circ\text{C}$ ,  $10 \text{ wt}\% \text{--}1100^\circ\text{C}$ )では、焼結シートが半透明化した(図8)。これらのシートの厚さは約 $35 \mu\text{m}$ であった。無添加試料では、 $1230^\circ\text{C}$ の高い焼結温度のため粒成長が促進しているが、空気孔が多く残存していて気密性試験ではガス透過が認められた。一方、助剤を添加した試料では表面・断面共に孔のほとんど無い緻密な構造が確認された。これら緻密な  $5 \text{ wt}\% \text{--}1100^\circ\text{C}$ ,  $10 \text{ wt}\% \text{--}1100^\circ\text{C}$ ,  $10 \text{ wt}\% \text{--}1000^\circ\text{C}$  では、気密性試験でリークが検出されなかった。XRD 測定により、主相として目的とした組成の NASICON が維持されていることが確認された。 $\text{Na}^+$  イオンの全電気伝導度は  $5 \text{ wt}\% \text{--}1100^\circ\text{C}$  が最も高く、 $25^\circ\text{C}$  で  $4.4 \times 10^{-4} \text{ S} \cdot \text{cm}^{-1}$  を示した。

NNP ガラスを焼結助剤として適量添加することにより、種々の有機成分を含むテープキャストによるグリーンシートであっても、ガス透過を許さない(すなわち電解液透過も許

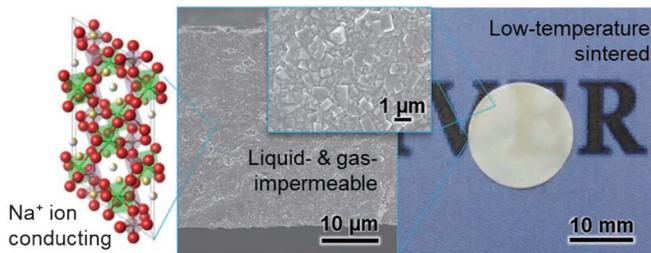


図8 5 wt% 60Na<sub>2</sub>O-10Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub>-30P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> ガラスを添加した Na<sub>3</sub>Zr<sub>2</sub>(SiO<sub>4</sub>)<sub>2</sub>(PO<sub>4</sub>) のテープキャスト膜の焼結体. 焼結温度は1100°C<sup>(47)</sup>. (出版元の許可を得て転載©Elsevier)

さない)緻密化のための焼結温度を1000-1100°Cに低減できることが示された. この温度は, 全固体電池に向けた電極活物質等との共焼結への適用を考えると, 未だ高く, より低温で高品質な電解質膜の作製条件が必要であるが, さらなる最適化で焼結温度の低下も可能であろう.

### (3) NVP ナシコンの電極活物質シート<sup>(48)</sup>

ナシコン構造を有する電極活物質にも, テープキャスト法と低温緻密化が適用可能であるかを検証した. ナシコン型 Na<sub>3</sub>V<sub>2</sub>(PO<sub>4</sub>)<sub>3</sub>(NVP)は, V<sup>4+</sup>/V<sup>3+</sup> と V<sup>3+</sup>/V<sup>2+</sup> の酸化還元による高電位と低電位での電気化学容量を有する電極活物質であり, それぞれ,  $E(V^{4+}/V^{3+})=3.4$ ,  $E(V^{3+}/V^{2+})=1.6$  V vs. Na<sup>+</sup>/Na の酸化還元電位と117, 59 mAh·g<sup>-1</sup> の電気化学容量を有する, Na イオン電池の電極活物質として有力な材料である<sup>(49)</sup>. また興味深い点として, NVP は電子伝導性よりもイオン伝導性が優位であり, 単一相に二つの電極を介して電圧を印加すると, 両電極でそれぞれの酸化還元反応が生じ, 理論起電力(3.4-1.6=)1.7 V の単一相電池として動作し得る事がある<sup>(50)</sup>.

テープキャスト法による NVP 膜作製条件を検討し, 最適条件(5 wt% NNP ガラス添加, 920°C焼結)では, 厚さ約30 μm, 相対高密95%で, ガス透過性がほぼ無い自立型シートを得ている. また, 室温での全電導度は $2.9 \times 10^{-5}$  S·cm<sup>-1</sup>であり, NVP バルク体の既報に比べ約3桁高い伝導度が得られる事を示した. Pt|NVP|Pt 構造の単相電池では, 電圧掃引により, 1.7 V を中心に酸化還元電流を観測し, NVP シート内の二つの電極近傍領域で酸化還元反応が起きている(図9). この際の充電容量は NVP の活物質としての利用率~30%に相当し, シート化により既報の NVP セラミックバルク体<sup>(50)</sup>に比べて飛躍的に利用率を高める事ができている.

緻密化が困難になりがちなテープキャスト法膜形成において, 類似の組成を持った適切なガラス系焼結助剤により材料自体の性能を落とさずに焼結能を補填する方法論は, 固体電解質, 電極活物質, 電極からなる積層体による酸化物系全固体電池の製造にも有効であろう.

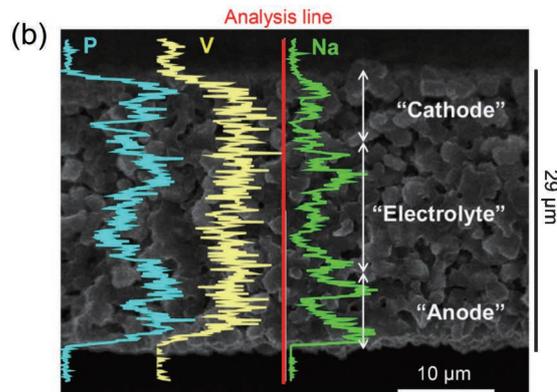
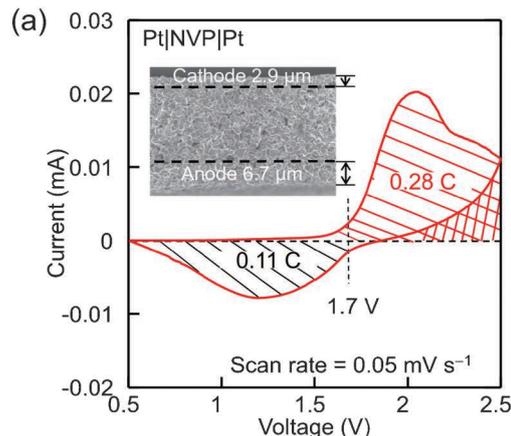


図9 5 wt% 60Na<sub>2</sub>O-10Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub>-30P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> ガラスを添加した Na<sub>3</sub>V<sub>2</sub>(PO<sub>4</sub>)<sub>3</sub> のテープキャスト膜の焼結体を用いた, 単相セルのサイクリックボルタグラム. (b)充電後のセルの破断面における SEM-EDS によるナトリウム分布の観察<sup>(48)</sup>. (出版元の許可を得て転載©Elsevier)

## 5. まとめと展望

高温熔融型 Na-S 電池向けとして想定されていたベータアルミナと NZSP ナシコンを, 室温付近で動作する Na<sup>+</sup> イオンをキャリアとする次世代電池の電解質として用いるアプローチについて, 背景と研究動向を交えて, 筆者らの最近の研究を記した. Na 系ハイブリッド型空気電池では, 電解質イオン伝導度の優位性によりアルカリ金属電池系で最も高い面積出力密度を得る事が出来た. 有機電解液界面との金属 Na 負極の不安定性の問題については現状で根本的な解決には至っていない. 当初の高いエネルギー密度への目標からは逸れるものの, 液体活物質の利用は期待が持てる. 全固体電池へ酸化物ナトリウムイオン伝導体の適用については, 酸化物系の堅固で安定な特徴を最大限に生かすため, 積層体の共焼結に則る製造法が望ましい. その為のテープキャスト法の検討では, 焼結助剤の効果により, 従来よりも低温焼成条件で十分に緻密なナシコン型 NZSP および NVP の圧膜を得られる事を示した.

現在, 全固体電池の研究についての課題の一つは, アルカ

り金属負極と固体電解質の界面での安定した析出溶解とデンドライト(フィラメント)の成長貫通による短絡の抑止である<sup>(36)(37)(51)</sup>。固体電解質は有機電解液から見ると魅力的ともいえる安定性を有する。ただしナシコン型 LAMP は Li と直接接触させると還元劣化を起こすため、古くから非晶質 LiPON のコーティングなどが検討されている<sup>(24)</sup>。金属 Li との直接接合ではガーネット型 LLZ が主に研究の対象となっている。本編では触れなかったが、筆者らは、緻密な NZSP ナシコンセラミックスと金属ナトリウムの圧着界面の評価も行っている。圧力30 MPa での接合界面の面積抵抗率 ( $14 \Omega \text{ cm}^2$ ) は、金属 Na と有機電解液との間の一般的な SEI の抵抗と比較しても 1-2 桁低い値であり、Li 系と比較しても十分低い値であった。しかし、NZSP ナシコンであっても他系と同様に短絡(室温で  $0.4 \text{ mA} \cdot \text{cm}^{-2}$ ) を抑止することができなかった<sup>(52)</sup>。概して、短絡抑止には高密度、低エネルギー界面(濡れ性)、高温が有効で、平滑で均質な界面により局所的な電流密度を集中させない事が鍵の様である<sup>(36)(37)(51)</sup>。この点において非晶質やガラス電解質も有望である。

アカデミアの動向とは別に、昨年来より TDK<sup>(株)</sup> および FDK<sup>(株)</sup> より、表面実装向けの全固体電池チップが本年にかけてサンプル出荷が始まっており、酸化物系で先に全固体電池事業が確立されつつある。また他社でも上市に向けて研究開発が進展している。電解質としてナシコン型の LAMP や  $\text{Li}_{1+x}\text{Al}_x\text{Ge}_{2-x}(\text{PO}_4)_3$  (LAGP) などが好まれている<sup>(53)-(56)</sup>。製造過程の例としてはテープキャスト成型一次焼成体、固体電解質を含む溶液を含浸後二次焼成などが導入されているようであり、焼結技術が鍵であることが伺える。ガラス転移領域における軟化流動を利用して、ガラス前駆体の活物質相と固体電解質相を一体化させて界面抵抗を下げる様なガラスセラミック的手法も提案されている<sup>(57)</sup>。

ガラスセラミック法や本編でも触れてきた焼結助剤による緻密化は、セラミックの分野で古典的な方法論である。ただし、従来の比較的単純な組成系(例えば、 $\text{Y}_2\text{O}_3$  助剤添加  $\text{Si}_3\text{N}_4$ ) と比較すると、今回のリン酸塩ガラス添加ナシコン系などは相当複雑な組成であり、案外上手く行ったというのが実情かもしれない。今後、裏支えする学理の再構築が必要である。以上、散漫な記述となったが、ナシコン系を中心としたポリアニオン化合物は、ここに記載した要素の全てを受け止めるプラットフォームである様に思われ、引き続き魅力的な材料系であると筆者には感じられる。

## 6. 終わりに

本稿では、筆者らの最近および少し遡った研究を軸としたが、読者の興味や今後の方向性提示にとって必ずしも最適でないと考え、周辺の背景と現状をなるべく取り込もうとしたが、達成できたとは言いがたい。これは、ことに筆者の浅学によるものである。加えて当該分野は、多様な蓄電池の形態、材料、物理化学現象の相乗的な絡みで文字通り爆発的に研究

が展開していて、これらを的確にまとめる事は筆者の能力を超えている。引用文献には、筆者らが執筆した論文に加えて、最近の本格的な総説(固体電解質を用いた革新電池<sup>(1)</sup>、ナシコンおよびポリアニオン類縁材料<sup>(8)-(10)</sup>、ナトリウム金属負極の問題<sup>(36)(37)</sup>、全固体電池研究開発の最新動向<sup>(55)(56)</sup>) も取込んだので、参照されたい。

本稿で紹介した研究の多くは、中国昆明科学技術大学准教授の梁 風 博士(前 東京工業大学 研究員)のグループとの共同研究による。また、JSPS 科研費 基盤(A)JP19H00828・基盤(B)JP26289235、新学術領域研究(研究領域提案型)JP16H06438・JP16H06440・JP16K21724、文部科学省元素戦略プロジェクト産学連携型・拠点形成型の助成によって実施されたものであり、ここに謝意を表する。

## 文 献

- (1) A. Manthiram, X. Yu and S. Wang: Nat. Rev. Mater., **2**(2017), 16103-1-16.
- (2) 高村 仁: までりあ, **56**(2017), 135-139.
- (3) 美馬敏之: セラミックス, **42**(2007), 613-615.
- (4) 福島英史: 大河内賞ケース研究プロジェクト, 一橋大学イノベーション研究センター, (2008).
- (5) S.-Y. Wu, L. Xiao and Y.-D. Cao: Int. J. Energy. Res., **33**(2009), 868-892.
- (6) J. W. Fergus: Sens. Actuators B. Chem., **134**(2008), 1034-1041.
- (7) J. B. Goodenough, H. Y.-P. Hong and J. A. Kafalas: Mat. Res. Bull., **11**(1976), 203-220.
- (8) Z. Jian, Y.-S. Hu, X. Ji and W. Chen: Adv. Mater., **29**(2017), 1601925-1-16.
- (9) S. Chen, C. Wu, L. Shen, C. Zhu, Y. Huang, K. Xi, J. Maier and Y. Yu: Adv. Mater., **29**(2017), 1700431.
- (10) P. Barpanda, L. Lander, S. Nishimura and A. Yamada: Adv. Energy Mater., **8**(2018), 1703055-1-26.
- (11) H. Schmid, L. C. De Jonghe and G. Cameron: Solid State Ionics, **6**(1982), 57-63.
- (12) 森田孝治: までりあ, **53**(2014), 3-10.
- (13) 鴫田正雄: セラミックス, **49**(2014), 91-96.
- (14) K. Koganei, T. Oyama, M. Inada, N. Enomoto and K. Hayashi: Solid State Ionics, **267**(2014), 22-26.
- (15) R. S. Gordon, G. R. Miller, B. J. McEntire and E. D. Beck, J. R. Rasmussen: Solid State Ionics, **3/4**(1981), 243-248.
- (16) H. Wang, K. Okubo, M. Inada, G. Hasegawa, N. Enomoto and K. Hayashi: Solid State Ionics, **322**(2018), 54-60.
- (17) 林 克郎: 全固体電池のイオン伝導性向上技術と材料, 製造プロセスの開発, 技術情報協会(2017), 第5章.
- (18) T. Honma, M. Okamoto, T. Togashi, N. Ito, K. Shinozaki and T. Komatsu: Solid State Ionics, **269**(2015), 19-23.
- (19) R.-H. Shin, S.-I. Son, Y.-S. Han, Y.-D. Kim, H.-T. Kim, S.-S. Ryu and W. Pan: Solid State Ionics, **301**(2017), 10-14.
- (20) K. Noi, K. Suzuki, N. Tanibata, A. Hayashi and M. Tatsumisago: J. Am. Ceram. Soc., **101**(2018), 1255-1265.
- (21) F. Li, T. Zhang and H. Zhou: Energy Environ. Sci., **6**(2013), 1125-1141.
- (22) 久保佳実: JIR NEWS, (2018), 14-17.
- (23) A. Manthiram and L. Li: Adv. Energy Mater., **5**(2015), 1401302.
- (24) S. J. Visco and Y. S. Nimon: U.S. Patent 7,645,543 B2 (2010).
- (25) 武田保雄, 今西誠之, 山本 治: GS Yuasa Technical Report, **7**(2010), 1-7.
- (26) Y. Inaguma and M. Nakashima: J. Power. Sources, **228**(2013),



# 機械学習を活用した アーク溶接現象数法則式の導出と知識抽出

北野 萌 一\*

モデルの単純化による知識抽出を試みた結果を報告する。

## 1. はじめに

アーク溶接現象は、mm～cm スケールで固相-液相-気相-プラズマの4つの状態が干渉し合う複雑な現象である。そのため、アーク溶接継手製作における施工条件(材質、溶接条件、継手形状等)と溶接継手特性(溶融部幅・深さ、熱影響領域の幅・深さ、溶接変形、残留応力、継手強度等)の間にある関係も複雑なものとなる。近年、このようなアーク溶接における複雑な入出力関係(施工条件-継手特性関係)を機械学習により整理して、継手特性予測モデルを構築することを目指した研究が進められている<sup>(1)-(5)</sup>。これらの研究で構築された予測モデルを用いることで、予測対象の継手特性を比較的精度良く予測することが可能である。しかし、既存の機械学習法を用いた場合、得られる予測モデルは、入力出力に及ぼす影響を人が理解することが難しいブラックボックスモデルになるという問題がある。ブラックボックス化したモデルから得られる出力値は、その根拠を人が理解出来ないため、工業利用が難しい場合が多い。また、ブラックボックス化したモデルからは新たな知見を得ることができないため、研究用途としても利用が難しい。

近年著者らは、このような問題を解決するために、新たに定義されたニューラルネットワーク構造による学習(RF5法)<sup>(6)</sup>と、最小二乗近似とを組み合わせることで、入出力間の関係を、入力因子の影響がわかりやすい数式(以降、このような数式を数法則式と呼ぶ)として自動的に導出することが可能なLSRF5法(Least Squares-assisted Rule Extraction method Version 5)を提案した<sup>(7)</sup>。本稿では、提案したLSRF5法の概要を述べるとともに、LSRF5法によるモデル構築例を紹介する。さらに、構築モデルの応用方法として、

## 2. LSRF5法の概要<sup>(7)</sup>

LSRF5法では、まず斎藤らが提案したRF5法<sup>(6)</sup>による入出力関係の多項式近似を行い、その後、各項の係数および指数の簡略化、多項式の可読性向上のための最小二乗近似を行うことで、入出力間の関係を、入力因子の影響がわかりやすい数式として導出する。

RF5法では、入出力関係の多項式近似を行うために、 $\mathbf{x}$ を $n$ 次元入力ベクトル、 $y$ を入力 $\mathbf{x}$ に対する出力として、以下の式で表される図1の構成の3層ニューラルネットワークを学習する。

$$y = \sum_{i=1}^h c_i \exp\left(\sum_{j=1}^n w_{ij} \ln(x_j)\right) + c_0 \quad (1)$$

ここで、 $h$ 、 $w_{ij}$ 、 $c_i$ 、 $c_0$ はそれぞれ中間ユニット数、全入力ユニットと中間ユニット $i$ との結合重み、全中間ユニットと出力ユニットとの結合重み、出力層のバイアスである。ニューラルネットワークの学習は、 $h$ を決定した後に、 $\mathbf{x}$ に対して式(1)から得られる $y$ と真の出力値との差を最小化することを目指して、 $w_{ij}$ 、 $c_i$ 、 $c_0$ を最適化することで行われる。ただし、必要であれば適当な値を各入力ベクトルの要素に加えることとして、 $x_j > 0$ とする必要がある。また、学習のためには、種々の入力に対する真の出力値(実験値等)を入出力関係データベースとして取得しておく必要がある。さて、式(1)は $\exp$ および $\ln$ を消去する様に展開すると、定数項と指数が付いた入力同士の積の和から成る、

$$y = \sum_{i=1}^h c_i \prod_{j=1}^n x_j^{w_{ij}} + c_0 \quad (2)$$

で表される多項式と等価である。すなわち、式(1)のニュー

\* 国立研究開発法人 物質・材料研究機構 構造材料研究拠点；主任研究員(〒305-0047 つくば市千現 1-2-1) Numeric Law Discovery and Knowledge Extraction from Welding Phenomena Using Machine Learning Technique; Houichi Kitano (Research Center for Structural Materials, National Institute for Materials Science, Tsukuba)

Keywords: LSRF5 method (least squares-assisted rule extraction method version 5), numeric law, machine learning, welding, weld penetration shape

2019年2月28日受理[doi:10.2320/materia.58.449]

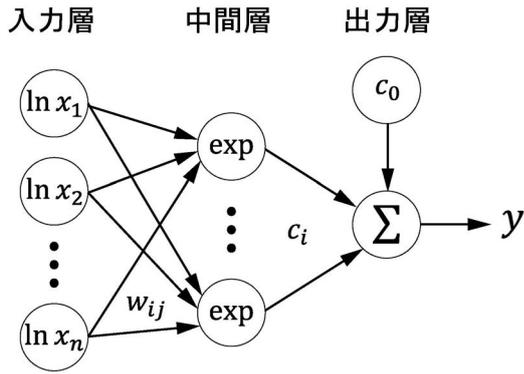


図1 RF5法で用いるニューラルネットワーク(入力層のそれぞれの値  $\ln x_j$  に  $w_{ij}$  を乗じた値の和は、中間層の各ユニット(expで記載)で底がネイピア数の指数関数の値に変換される。その後、出力層の出力ユニット( $\Sigma$ で記載)で各中間ユニットの出力に  $c_i$  を乗じたものと  $c_0$  の和が計算され、最終出力  $y$  となる。)

ニューラルネットワークの学習により、入出力関係は式(2)の多項式で近似できる。学習の際には、 $h$  を予め設定する必要があるが、 $h$  は式(2)からわかるように最終的な多項式の項数を決定する値であり、多項式を使用する目的や目標とする精度に応じて決定する。一般的に、 $h$  が大きい方が近似精度は向上するが、項数が増加するため、式が複雑化し、可読性は低下する。 $h$  が小さい場合にはその逆となる。

以上のRF5法の手順により得られる入出力関係の近似多項式において、 $w_{ij}$  は実数という制約のみで最適化が行われているため、実問題を学習した場合には、必ずしも各因子の役割が明確に表現されるとは言い難い。そこで、LSRF5法では、各因子の役割をより明確にするために、学習後の  $w_{ij}$  を  $b_{ij}/a_{ij}$  ( $a_{ij}$ : 10以下の自然数,  $b_{ij}$ : 整数) により近似する。この時、学習に用いた入出力関係を近似するための適切な  $c_i$ ,  $c_0$  も変化する。そこでLSRF5法では、入出力関係が、

$$y = c'_0 + \sum_{i=1}^h c'_i x_1^{b_{i1}/a_{i1}} \dots x_n^{b_{in}/a_{in}} \quad (3)$$

に従うものとして、 $c'_i$ ,  $c'_0$  の値を最小二乗近似により決定す

る。以上を纏めるとLSRF5法による入出力関係モデルの構築は以下の手順で行われる。

- Step 1:  $h$  を決定し入力  $x_j$  ( $j=1, \dots, n$ ) とそれに対応する出力  $y$  の関係をRF5法により学習する。
- Step 2: RF5法により最適化された、それぞれの  $w_{ij}$  に最も近い  $b_{ij}/a_{ij}$  を計算する。
- Step 3: 取得した  $b_{ij}/a_{ij}$  を用いて、入力  $x_j$ -出力  $y$  関係を式(3)により最小二乗近似することで、 $c'_i$ ,  $c'_0$  を決定する。
- Step 4: 平均絶対誤差率や平均二乗誤差平方根等の誤差指標により、入出力関係モデルから得られる予測出力値の誤差を確認する。
- Step 5: 必要に応じてStep 1で決定した  $h$  より大きな値を  $h$  として再定義し、Step 2~5を繰り返す。

既存の機械学習法の代表として一般的な3層フィードフォワード型のニューラルネットワークとLSRF5法から得られる入出力関係式の概要を図2に示す。この図に示すように、一般的な3層フィードフォワード型のニューラルネットワークでは、入力と出力の関係は複雑である一方で、LSRF5法から得られる入出力の関係は、定数項と簡単な分数で表される指数が付いた入力因子の積の和という簡単な形で表現されており、実問題へ適用した際にも入力が出力に及ぼす影響の理解、解釈が可能である。

### 3. TIG溶接溶融部および熱影響部形状予測モデル構築への適用

LSRF5法によるモデル構築例として、Tungsten Inert Gas (以下TIG)溶接部の溶融部形状予測モデル<sup>(7)</sup>および、熱影響部(Heat Affected Zone, 以下HAZ)形状予測モデルの構築結果を紹介する。ここで言うHAZとは、溶融部の外縁近傍の領域で、溶融中に未溶融であるものの温度上昇の影響を受けて金属組織が変化し、元々の材料とは異なる特性を

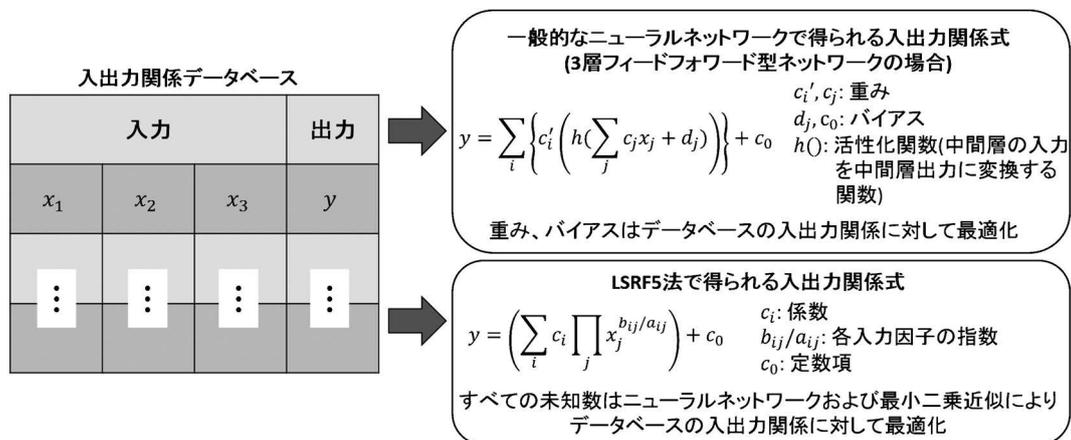


図2 一般的なニューラルネットワークとLSRF5法で得られる入出力関係式の比較。

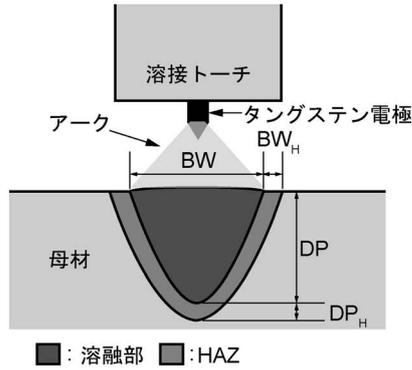


図3 溶融部および熱影響部寸法の定義。

持つ領域である。溶接条件を設定する際に、どの程度の領域が HAZ となるかを理解しておくことは、溶接構造物の健全性や信頼性の確保、性能向上の観点から重要である。学習用入出力関係データベースとして、一般構造用鋼の TIG 溶接における、溶接電流、母材-電極間距離、溶接速度と図3の様に定義した溶融部幅  $BW$ 、深さ  $DP$ 、HAZ 幅  $BW_H$  および深さ  $DP_H$  の関係に関する文献値<sup>(8)</sup>を用い、上記手順の Step 1 で  $h=1$  として、Step 3 まで行って得られる溶融部幅  $BW$ 、深さ  $DP$ 、HAZ 幅  $BW_H$  および HAZ 深さ  $DP_H$  の予測モデルを導出した結果を以下に示す。

$$BW = 1.16 I^{1/2} A l^{3/8} / v^{3/8} + 1.39 \quad (4)$$

$$DP = 0.46 I^{5/9} A l^{1/2} / v^{3/5} + 0.43 \quad (5)$$

$$BW_H = 0.58 I^{1/2} A l^{1/2} / v^{3/8} - 0.31 \quad (6)$$

$$DP_H = 0.14 I A l^{2/5} / v^{5/7} + 0.33 \quad (7)$$

ここで、 $I$ : 溶接電流 (A)、 $A l$ : 母材-電極間距離 (mm)、 $v$ : 溶接速度 (mm) である。予測結果と学習データとの比較例として、学習データとして使用した文献値と式(4)から得られる  $BW$  とを比較した結果を図4に示す。この図より、式(4)から得られる  $BW$  は実際の溶融部幅に対応した値であるといえる。Step 4 において誤差指標として平均絶対誤差  $\epsilon (= \frac{100}{n} \sum_k \left| \frac{y_k - f_k}{f_k} \right|)$  ( $y_k$ : 予測値,  $f_k$ : 実測値,  $n$ : データ数)を採用すると、溶融部幅  $BW$ 、溶融部深さ  $DP$ 、HAZ 幅  $BW_H$  および深さ  $DP_H$  の誤差はそれぞれ2.88%、2.95%、2.91%、3.90%となり、良好な精度が得られていると考えられる。そのため、Step 5 における  $h$  の再定義は行わなかった。

前述の通り、既存の機械学習法を用いた場合、得られる予測モデルは、入力が出力に及ぼす影響を人が理解することが難しいブラックボックスモデルとなるのに対して、LSRF5法により得られた予測モデルである式(4)-(7)からは各種因子の役割、すなわち溶接電流、母材-電極間距離、溶接速度が溶融部幅および溶融部深さに及ぼす影響を理解することができる。例えば、溶融部幅の予測モデルである式(4)から、溶融部幅は溶接電流の1/2乗、母材-電極間距離の3/8

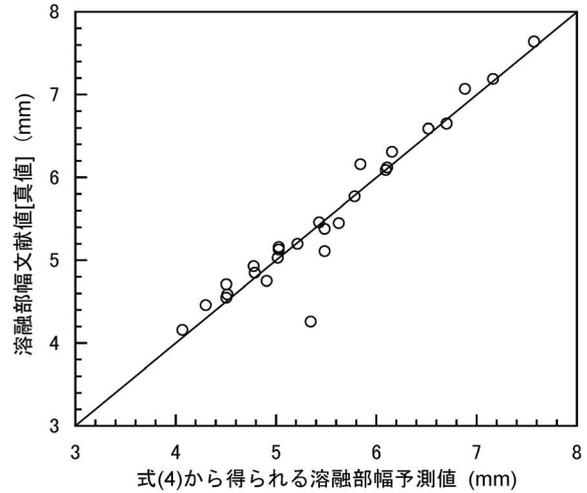


図4 溶融部幅に関する実測値と予測値の比較<sup>(7)</sup>。

乗に比例し、溶接速度の3/8乗に反比例することを理解できる。他の式についても同様である。このように高い予測精度でありながら、各種因子の影響を理解、解釈することが可能な予測モデルを構築できることが、既存の機械学習法に対してLSRF5法が持つ利点である。

#### 4. 溶融部および HAZ 形状統一影響パラメータ抽出

3章で導出した溶融部と HAZ の幅および深さの予測モデルは、それぞれが各種因子の定量的な影響を表すものであり、適正溶接条件の探索等に有効活用できるものである。一方で、式(4)-(7)は物理的な観点による修正と工学的な近似による単純化および統一影響パラメータ抽出の余地がある。まず、式(4)-(7)には定数項が存在するが、第1項が0の場合、すなわち溶接電流が0の場合には、溶融部および HAZ の寸法は0となるはずである。また、式(4)-(7)の溶接電流、母材-電極間距離、溶接速度の指数は、1/2に近い値のため、工学的な近似としては全ての指数を1/2に近似可能であると見込まれる。そこで、実際に式(4)-(7)の定数項を0、全ての指数を1/2として、新たに係数を最小二乗近似により決定した結果を式(8)-(11)に示す。さらに横軸を  $\sqrt{I A l} / v$  として、学習データとして使用した文献値をプロットし、式(8)-(11)から得られる直線を図5に示す。

$$BW = 2.01 \sqrt{I A l} / v \quad (8)$$

$$DP = 0.59 \sqrt{I A l} / v \quad (9)$$

$$BW_H = 0.75 \sqrt{I A l} / v \quad (10)$$

$$DP_H = 0.71 \sqrt{I A l} / v \quad (11)$$

図5より、式(8)-(11)により溶融部と HAZ の幅および深さのおおよその値が予測可能であると言える。これは、溶融部と HAZ の幅および深さは、 $\sqrt{I A l} / v$  という統一的な影響パ



# 放射光による工業材料評価

## ～2. 放射光による回折・散乱測定～

廣 沢 一 郎\*

### 2・1 放射光を用いた散乱・回折

SPring-8に代表される放射光施設においては、格子振動の分散関係を測定するX線非弾性散乱<sup>(1)(2)</sup>、メスバウアー分光法に対応する核共鳴散乱<sup>(3)(4)</sup>、X線ラマン散乱<sup>(5)(6)</sup>、コンプトン散乱<sup>(7)(8)</sup>など散乱X線の光子エネルギーが入射X線のエネルギーと異なる非弾性散乱実験も含め、信号強度が微弱なX線磁気散乱<sup>(9)(10)</sup>や、結晶粒界近傍の局所歪測定<sup>(11)</sup>など高輝度な放射光の特徴を活用した多様な散乱・回折測定が行われている。その一方で、実験室装置で馴染み深い粉末X線回折や小角散乱も活発に利用され、主要な工業材料評価技術としての地位はゆるぎない。このため、粉末X線回折と小角散乱は測定の自動化<sup>(12)</sup>が進み、全くの未経験者でも高品質なデータを短時間に能率よく取得することが可能である。しかし、測定は容易ではあるが、良質なデータを取得するためには幾つかの留意事項がある。本稿では工業材料評価に最も多く用いられている粉末X線回折と、高性能な実験室装置の普及とともに放射光の利用者も増加している微小角入射X線回折(いわゆる薄膜回折)の留意事項を中心に紹介する。

### 2・2 放射光粉末X線回折の特徴と留意事項

#### 2・2・1 測定試料の形状と寸法

第1章の図1.5で示したように、放射光粉末X線回折は高い散乱角分解能(回折ピーク幅が狭い)で広い散乱角範囲の測定が可能であるため、微量に混入する不純物結晶の検出ばかりでなく、精度良い回折強度の測定から結合状態を反映した原子間の電子密度分布の推定が可能な精密な結晶構造解析を

行うことができる<sup>(13)</sup>。

放射光粉末X線回折では受光スリット等を介さずイメージングプレート等を用いて幅広い散乱角範囲のX線回折パターンを同時に検出する装置(Debye-Scherrerカメラ)を用いて行うことが主流である(図2.1)。この場合、測定データの角度分解能は入射光の形状、試料から入射光までの距離、及び検出器の空間分解能など装置仕様で決まる。更に、ガラスキャピラリに封入した試料を測定することから、試料径(キャピラリ径)も角度分解能に直接的な影響を及ぼす。図

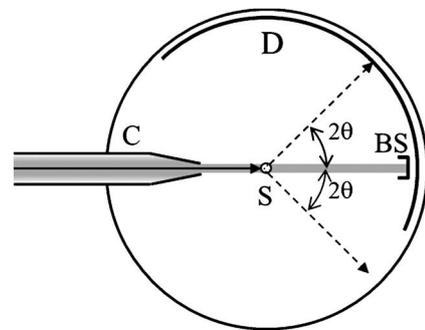


図2.1 Debye-Scherrerカメラの模式図。試料Sからの距離が同じになるように円弧状に配置された検出器D(イメージングプレートやX線フィルムなど。最近では位置敏感半導体検出器を用いた装置もある。)で試料からの回折X線パターンを一度に測定できる。図中の灰色の帯で示されたX線は左から右に進行し、コリメータCで整形されて試料Sに入射する。試料を透過したX線はビームストッパーBSで止められる。破線で示すように、等価な回折は上下両方に発生するが、広い散乱角範囲を測定するために図のように検出器を非対称に配置することも多い。

\* 公益財団法人高輝度光科学研究センター；産業利用推進室長(〒679-5198 兵庫県佐用郡佐用町光都1-1-1) Synchrotron Radiation as Analytical Tools for Industrial Materials ~2. X-ray Diffraction and Scattering Experiments with Synchrotron Radiation~; Ichiro Hirose (Japan Synchrotron Radiation Research Institute (JASRI), Sayo-gun, Hyogo) Keywords: synchrotron radiation, powder diffraction, grazing incidence X-ray diffraction, industrial materials 2018年10月17日受理[doi:10.2320/materia.58.453]

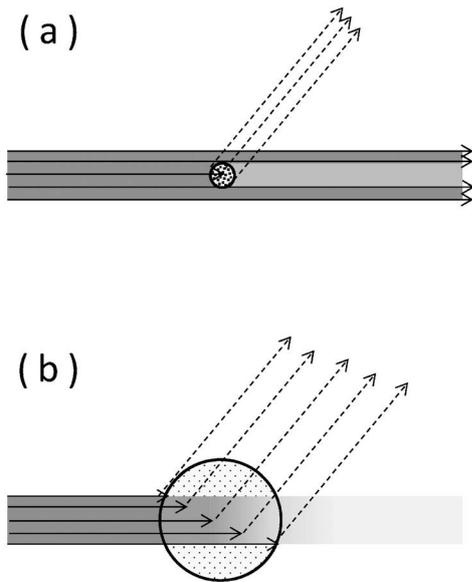


図2.2 粉末試料を封入したキャピラリー径と回折 X 線の幅との関係を示した模式図。中央の円がキャピラリー断面である。水平方向に延びた灰色の帯の濃淡で入射 X 線の強度を示している。下流側(図の右側)の淡い領域は試料による散乱や吸収で X 線強度が減衰することを表している。破線矢印と実線矢印は回折 X 線と対応する入射 X 線を示す。

2.2(a)のようにキャピラリー径が入射 X 線幅よりも小さい場合は、回折 X 線の空間的な幅は全散乱角範囲でキャピラリー径と等しくなるため試料形状由来の角度分解能劣化は発生しない。一方、キャピラリー径が入射光幅よりも大きい場合(図2.2(b))は空間的な回折 X 線幅が入射 X 線幅よりも大きくなるために角度分解能の低下と散乱角に依存した分解能変化が発生する。キャピラリー径が小さいほど高い角度分解能での測定が期待できるが、高い信号強度が必要な場合は、角度分解能を犠牲にしてもキャピラリー径を太くすることになる。しかし、試料内を進む入射 X 線は試料による散乱や吸収によって下流ほど弱くなり(図2.2(b))、散乱された X 線も同様に試料内の進行中に強度を失うため、キャピラリー径ほどには信号強度は増加しない。このため、特別な事情がない限りキャピラリー径が検出器空間分解能(画素サイズ)の2, 3倍以上、入射光幅以下の範囲になるように試料調製を行うことが無難である。

### 2・2・2 試料の粒径

第1章で示したように平行性に優れた放射光を用いると線幅の狭くバックグラウンドが低い回折パターンが得られるが、平行性が高いことから粉末試料の粒径が測定データに与える影響が大きくなる。ここでは粉末試料の粒子径が回折データに与える影響を、方位が完全に揃った結晶子(微細な単結晶の領域)から形成された直径1  $\mu\text{m}$  の球状の結晶粒と直径5  $\mu\text{m}$  の結晶粒からなる2種の粉末を想定して検討する。2種の粉末を直径0.3 mm のキャピラリーに長さ2.0 mm にわた

って充填した場合、結晶粒の数は充填率を74%(球の最密充填)として1  $\mu\text{m}$  粒子は約 $2.0 \times 10^8$ 個、5  $\mu\text{m}$  粒子は約 $1.6 \times 10^6$ 個となる。第1章の図1.4に示した X 線エネルギー20 keV で測定した  $\text{CeO}_2$  粉末の例では、回折角 $13.157^\circ$ の002回折ピークの半値半幅は $0.008^\circ$ なので回折強度の99%がピーク前後の $0.024^\circ$ 内(半値半幅の3倍)にある。このため、002回折が観測される結晶方位の立体角範囲は

$$2\pi \times (1 - \cos(0.024^\circ)) = 5.5 \times 10^{-7} \text{ sr}$$

となり、ランダムに配向した結晶粒の002回折が観測される確率は多重度6を考慮しても

$$5.5 \times 10^{-7} \times 6 / 4\pi = 2.6 \times 10^{-7}$$

に過ぎない。従って、静止したキャピラリーに充填された粉末のうち002の回折条件を満たす結晶粒数は、5  $\mu\text{m}$  粉末では約0.4個、1  $\mu\text{m}$  粉末では52個と見積もられる。このため、5  $\mu\text{m}$  粉末では2回に1回以上の確率で002回折が観測されないが、回折条件を満たした場合は1  $\mu\text{m}$  結晶粒125個分の強度となる。この例が示すように、粒径が大きいほど回折条件を満たす結晶粒の数が少なるため、同じ試料でも測定の度に異なった結果になる可能性が高くなる。粒径分布を有する粉末試料も同様、大きな結晶粒は回折条件を満たす頻度が低い一方で、条件を満たした場合は強い回折を発生させるため、結晶粒径の不均一が大きいほど測定データの再現性が損なわれる懸念が高まる。

一方、入射 X 線が半値半幅で $0.1^\circ$ の発散角を有する場合は回折線幅が $0.1^\circ$ よりも広くなるが、回折条件を満たす立体角範囲が約156倍になり、回折に寄与する粒子数は1  $\mu\text{m}$  が約8100個、5  $\mu\text{m}$  でも約64個となって測定の再現性が高まる。以上のように平行性に優れた放射光をもちいた粉末回折では、実験室装置よりも大きな結晶粒の影響を受けやすいので、良質なデータを得るためには粒径を十分小さくすることが必要となる。

実際の測定ではキャピラリーの軸を中心に試料を回転させるなどして回折に寄与する実効的な結晶粒数を増やし測定強度の平均化を行っている。しかし、単軸回転による平均化には限界があり、平均粒径や粒径分布幅が大きくなるほど平均化が難しくなることがダイヤモンド粉末を用いた測定から実験的に示されている<sup>(14)</sup>。以上のように良好な粉末 X 線回折のデータを得るためには粒径を細かくすることが有効であるが、試料の粉碎作業は1)結晶子径が低下して回折線幅が広がる、2)結晶に発生した欠陥による歪みにより高指数の回折強度が弱くなる、などデータの質に悪影響を与える可能性もあるため、試料調製では測定試料の特徴に対応した注意が必要である。実際、粒径が揃った粉末試料の調製は容易ではないが、微量でも混入した粗大粒の影響は非常に大きいので、粉碎後にメッシュを通すなど一手間加えることでデータの改善が期待できる。

### 2・2・3 波長(X線エネルギー)選択

放射光実験においては X 線エネルギー(波長)を任意に選択できるため、X 線エネルギーが低い(波長が長い)ほど試

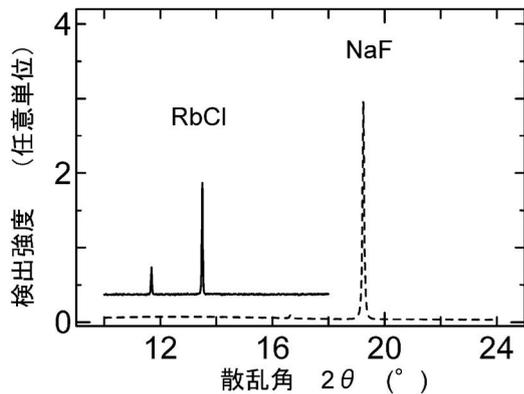


図2.3 SPring-8 BL19B2に設置されていた大型デバイセラーカメラを用いて X 線エネルギー16.2 keV で測定した RbCl(実線)と NaF(破線)の回折パターンの一部(全データは散乱角75°まで0.01°間隔で取得). いずれも試料は直径0.3 mmのガラスキャピラリーに封入した粉末試料である.(この図はイメージングプレートで取得したデータであるため, Rb からの蛍光 X 線によるバックグラウンドがそのまま記録されているが, 現在は一次元ピクセル型半導体検出器を使用しているために, 蛍光 X 線の影響が低減されている.)

料による X 線吸収が大きくなることを考慮して, 重元素を含んだ試料ではエネルギーが高い X 線を選択することになる. しかしながら, X 線エネルギーが高いことが常に有利とは限らない. 図2.3は X 線エネルギー16.2 keV で測定した RbCl と NaF 粉末(いずれも結晶構造は NaCl 型)の002回折近傍のプロファイルである. より重い元素から成る RbCl の方が002の回折強度が強いことが期待されるが, 実際は NaF よりも回折強度が弱くバックグラウンドが高い. RbCl の弱い回折強度は, 入射 X 線のエネルギーが Rb の K 吸収端(15.2 keV)に近いために試料による X 線吸収が大きく, 回折に寄与する実効的な試料体積が少ないことが原因である. 更に, 入射 X 線で K 殻電子が励起された Rb が発する13.4 keV の蛍光 X 線がバックグラウンドを高めている. なお, 吸収端近傍では原子形状因子(散乱能)が大きく変化すること(異常分散効果)を利用して結晶構造をより精密に推定することも行われているが<sup>(15)(16)</sup>, 試料が含む元素のうち X 線吸収が最も多い元素の吸収端よりも若干低いエネルギーで測定することが通常は無難である.

### 2.3 微小角入射 X 線散乱

実験室装置の機能向上により微小角入射 X 線散乱(Grazing-incidence X-ray scattering)は平坦な試料表面や基板上に形成された薄膜の構造評価法として一般的な測定技術となったが, 20年前までは事実上, 放射光光源が必須であった. 現在でも極薄膜<sup>(17)</sup>や時分割測定<sup>(18)(19)</sup>においては放射光を用いた測定が有用である.

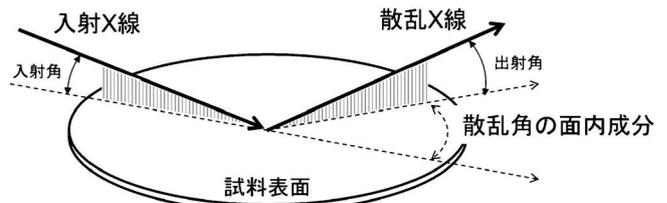


図2.4 微小角入射 X 線散乱のイメージ. 実線矢印で示された入射 X 線と散乱 X 線の試料表面上の方位(試料表面への射影)を破線で示している.

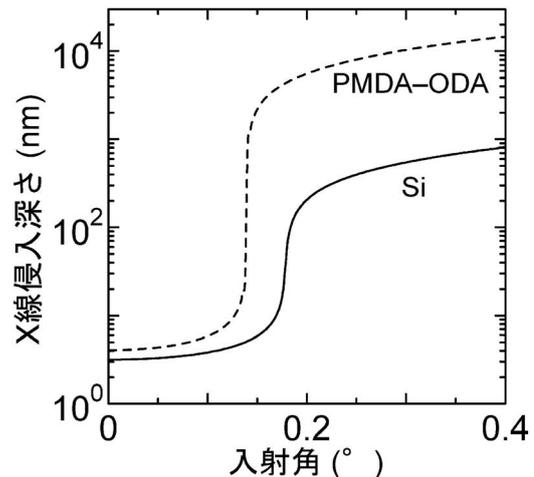


図2.5 シリコン(Si:実線)とポリイミド(PMDA-ODA:破線)に対する10 keV の X 線侵入深さの入射角依存性の図.

微小角入射 X 線散乱は図2.4に示す通り, X 線が全反射を起こすような極く浅い角度(X 線の試料表面に対する角度は入射角の余角であるが, 以下, 本稿では入射角と表現する)で X 線を試料表面に入射した際に発生する X 線散乱(回折)を測定する方法である. 試料内部への入射 X 線の侵入深さは入射角に依存し, 全反射臨界面未満では数 nm となる(図2.5). このように入射角が全反射臨界面よりも小さい場合は, X 線が試料深部に侵入することができないため, 基板内部で発生する散乱や蛍光 X 線によるバックグラウンドが低減され, 信号強度が微弱な試料表面や表面上の極薄膜の構造評価が可能となる. 図2.5に示すように全反射臨界面近傍では入射角に対する X 線侵入深さの変化が大きいため指向性に優れた放射光が有用である.

X 線の侵入深さが入射角や試料組成に依存することを利用して試料面内方向の構造の深さ分布を評価することも可能であるが, 定量的な検討を行う場合は注意が必要である.

図2.6は表面配向処理を施した Si(シリコン)基板上の厚さ約100 nm のポリイミド膜(PMDA-ODA: pyromellitic dianhydride oxidianiline)を入射角0.130°(図2.6上図), 及び0.150°(図2.6下図)で散乱ベクトルが配向処理方向と平行になる条件で測定した微小角入射 X 線散乱プロファイルである. ポリイミドの全反射臨界面角0.148°より浅い入射角

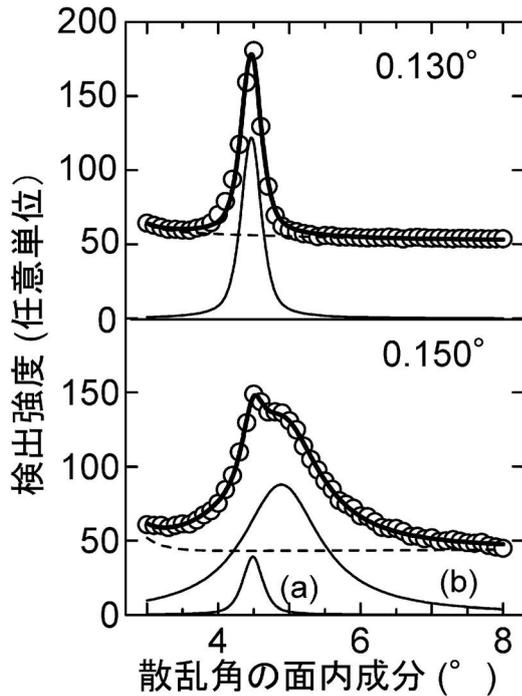


図2.6 入射角0.130°(上)と0.150°(下)で測定したシリコン基板上ポリイミド膜の微小角入射 X 線散乱プロファイルを示す。X 線エネルギーは10 keV, 散乱ベクトルの面内成分が膜の配向処理方向と平行, 入射角と出射角が同じ角度の条件で測定した。ピークを疑似フォークト関数(細い曲線), バックグラウンドを指数関数と定数の和(破線)で近似して得られたプロファイルを太い曲線で示している。0.150°には結晶相に対応した狭いピーク(a)と, 液晶相とされている幅広いピーク(b)が見られる。

0.130°では, 散乱角の面内成分が4.2°付近にポリイミド結晶の002に対応する鋭いピークが観測される一方, 0.150°ではこのピーク(図2.6下図(a))に加えて4.4°にブロードなピーク(図2.6下図(b))を有する液晶相由来の散乱が観測されている。この結果は膜表面付近に結晶相が存在する一方で液晶相は膜の深部にのみ存在していると理解することができる<sup>(20)</sup>。しかし, 結晶相ピークの積分強度が0.130°の方が0.150°よりも強いこと, 更に, 図2.7に見られるように全反射臨界角以上で結晶相ピークの積分強度が入射角に対して周期的に強弱を繰り返すことは, 入射角による X 線の侵入深さの変化だけでは説明することができない。

全反射臨界角以上の入射角において観測された積分強度の周期的変化はポリイミド膜内の X 線の干渉で次のように説明できる。ポリイミド膜の全反射臨界角以上で試料表面に入射した X 線は膜表面で反射するだけでなく一部は膜中を基板に向かって進行する。図2.8のように Si の全反射臨界角未満であればポリイミド膜中を進行した X 線は Si 基板界面で全反射して膜表面に向かう。膜表面に達した X 線の一部は膜中から試料外に出てゆくが, 残りは膜表面で反射されて再び膜中を Si 基板に向けて進行する。以上のように, 膜表面

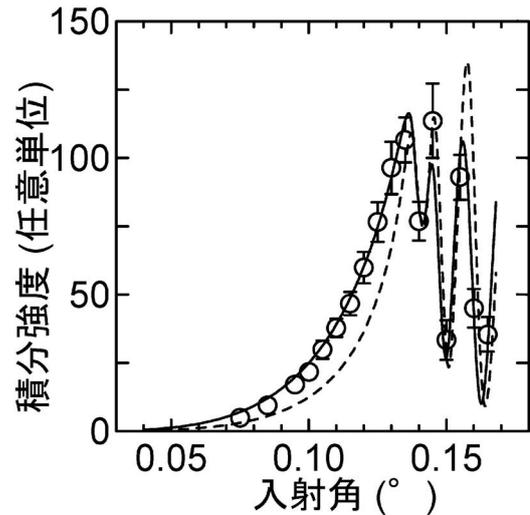


図2.7 10 keV の X 線で測定した配向処理済み Si 基板上ポリイミド膜002回折を入射角と出射角が等しい条件で測定した積分強度の入射角依存の測定結果を白丸(○)で示す。実線は結晶相の膜表面からの厚さが4 nmと仮定した場合の計算結果, 破線は厚さが10 nmと仮定した場合の計算結果である。

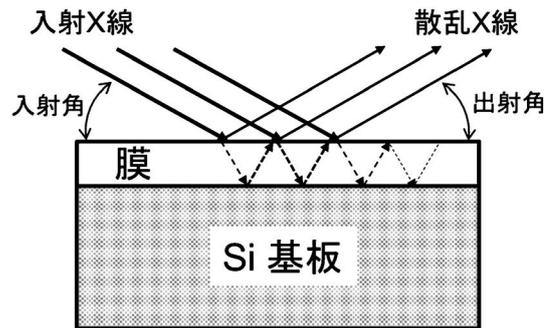


図2.8 膜表面と基板界面での反射で膜内に生じる干渉のイメージ図。

と基板界面で反射される X 線の重ね合わせ(干渉)により膜内部には深さ方向に不均一な X 線の電場強度(電場ベクトルの振幅)分布が発生する。膜内の X 線電場強度分布は膜や基板の密度(反射率に反映される), 膜厚, 及び X 線の入射角に依存し, 注目する散乱・回折(図2.7の場合は面内方向の002回折)の強度は, それに寄与する部分(図2.7の場合は面内方向に c 軸が配向するように結晶化した部分)の X 線電場強度を直接反映するため, 散乱・回折強度の入射角依存性測定から膜厚方向(深さ方向)の構造分布を定量的に推定することができる。図2.7の実線及び破線は, 膜表面近傍のポリイミドが結晶化している部分の厚さを4 nmと10 nmとした計算結果であり, 前者の方が後者よりも測定値との一致がよい。結晶化している部位が膜深部に存在する場合も含めて検討した結果, この試料では膜表面から深さ4 nmの範囲までが結晶化していると結論された<sup>(20)</sup>。なお, ポリイミド膜内の X

線電場強度は文献(21), (22)で提案されている Distorted wave Born Approximation (DWBA)を用いて計算した。この方法は広く受け入れられているので、微小角入射 X 線散乱により深さ方向の構造を定量的に検討する際は採用することを強くお奨めしたい。

微小角入射 X 線散乱の良質なデータを取得するためには X 線侵入深さに敏感な入射角と同様、検出する X 線の試料表面への角度(出射角)の精密な制御にも気を配る必要がある。微小角入射の条件では、目的の信号に加えて表面・界面の roughness に由来する散乱や基板結晶からの回折などバックグラウンドの原因となるものが多数あるため、試料面法線方向の分解能を犠牲にして受光スリット幅を広げることが検出下限の改善にむすびつかないことが多い。更に試料の歪み(反り)は試料面法線方向の分解能劣化の原因となるので試料調製においては細心の注意が必要である。歪の小さい基板の入手が重要であるがこれが案外難しい。Si 基板であれば 8 もしくは 12 インチ基板を劈開したもの、ガラスであれば、LCD 用の無アルカリフロートガラスを用いるのが無難である。これらの基板も不適切な運搬や保管(例えば、基板を斜めに立て掛けた状態で保持するなど)によっても反りや歪が発生することがあるので取り扱いには注意が必要である。

## 2・4 まとめに代えて

放射光を利用した微小域の X 線回折測定を検討される方も多いと思うが、2・2で検討したとおり、無配向多結晶試料では微小域からの回折を検出することが容易ではない。このような試料の微小域測定を行うためには、文献11のように白色 X 線を用いるなどの測定技術開発が必要である。しかし、容易に測定できないからこそ、これまででない新しい知見が得られる可能性が期待できるので、施設職員と共同で測定技術開発に挑戦していただきたい。なお、本稿では紹介できなかったが、X 線散乱による溶液や融体、非晶質固体の原子レベルの構造検討<sup>(23)(24)</sup>や表面形態検討<sup>(25)</sup>等、比較的容易に測定できるにもかかわらず利用が少ない測定技術も多数あるので、各施設のホームページ等で紹介されている利用事例や実施報告等をご覧の上、利用をご検討いただきたい。

## 文 献

- (1) 筒井智嗣：日本結晶学会誌，**59**(2017)，238-245。
- (2) S. Tsutsui, H. Uchiyama, J. P. Sutter, A. Q. R. Baron, M.

- Mizumaki, N. Kawamura, T. Uruga, H. Sugawara, J. Yamaura, A. Ochiai, T. Hasegawa, N. Ogita, M. Udagawa and H. Sato: Phys. Rev. B, **86**(2012), 195115.
- (3) 瀬戸 誠：日本結晶学会誌，**43**(2001)，405-412。
- (4) S. Tsutsui, H. Kobayashi, D. Ishikawa, J. P. Sutter, A. Q. R. Baron, T. Hasegawa, N. Ogita, M. Udagawa, Y. Yoda, H. Onodera, D. Kikuchi, H. Sugawara, C. Sekine, I. Shirotnani and H. Sato: J. Phys. Soc. Jpn., **77**(2008), 033601.
- (5) H. Fukui and N. Hiraoka: Phys. Chem. Mineral., **45**(2018), 211-218.
- (6) N. Hiraoka, H. Fukui and T. Okuchi: High Pressure Research, **36**(2016), 250-261.
- (7) S. Tsutsui, M. Itou, Y. Sakurai, Y. Kobayashi, M. Nakada, Y. Haga, E. Yamamoto, H. Yamagami, S. Nasu and Y. Onuki: J. Phys. Soc. Jpn., **81**(2012), SB022.
- (8) S. Tsutsui, Y. Sakurai, M. Itou, D. Aoki, E. Yamamoto, Y. Homma, Y. Haga, A. Nakamura, Y. Shiokawa and Y. Onuki: J. Phys. Chem. Solid., **68**(2007), 2099-2102.
- (9) N. Hosoito, R. Yamagishi, K. Fukui, S. Hanasaka and S. Amasaki: J. Phys. Soc. Jpn., **87**(2018), 104707.
- (10) M. Lee, R. Takechi and N. Hosoito: J. Phys. Soc. Jpn., **86**(2017), 02470.
- (11) T. Miyazawa, K. Kajiwara, M. Sato, T. Hashimoto, T. Yamada, T. Terachi, T. Fukumura and K. Arioka: Proc. 8th Pac. Rim. Int. Cong. Adv. Mat. Proc.(2013), 3467-3473. (DOI: 10.1002/9781118792148.ch429)
- (12) K. Osaka, T. Matsumoto, K. Miura, M. Sato, I. Hirose and Y. Watanabe: AIP Conf. Proc., **1234**(2010), 9-12. (DOI: 10.1063/1.3463378)
- (13) T. Itoh and H. Imai: Physica B, **532**(2018), 64-70.
- (14) 大坂恵一, 佐藤真直, 松本卓也, 広野等子, 川瀬守弘, 豊川秀訓: SPring-8/SACLA 利用研究成果集, **4**(2016), 75-78. (DOI: 10.18957/rr.4.1.75)
- (15) I. Hirose, J. Mizuki, K. Tanigaki and H. Kimura: Sol. Stat. Commun., **89**(1994), 55-58.
- (16) T. Y. Tashiro, M. Mizuguchi, T. Kojima, T. Koganezawa, M. Kotsugi, T. Ohtsuki and K. Takanashi: J. Appl. Phys., **117**(2015), 17E309.
- (17) N. Kato, K. Yuasa, T. Araki, I. Hirose, M. Sato, N. Ikeda, K. Iimura and Y. Uesu: Phys. Rev. Lett., **94**(2005), 136404.
- (18) T. Watanabe, T. Hosokai, T. Koganezawa and N. Yoshimoto: Mol. Cryst. Liq. Cryst., **566**(2012), 18-21.
- (19) T. Watanabe, T. Koganezawa, M. Kikuchi, H. Muraoka, S. Ogawa, N. Yoshimoto and I. Hirose: Jpn. J. Appl. Phys., **57**(2018), 03EG14.
- (20) I. Hirose, T. Koganezawa and H. Ishi: IEICE Trans. Electron., E97-C(2014), 1089-1092.
- (21) S. K. Sinha, E. B. Sirota, S. Garoff and H. B. Stanley: Phys. Rev. B, **38**(1988), 2297-2312.
- (22) V. Holy, J. Kubena, I. Ohlidal, K. Lischka and W. Plotz: Phys. Rev. B, **47**(1993), 15896-15903.
- (23) T. Tsurumura, T. Tanaka, K. Yagi, M. Morita, Y. Kameda and K. Fujii: J. Mol. Liq., **261**(2018), 468-472.
- (24) F. Utsuno, H. Inoue, Y. Shimane, T. Shibuya, K. Yano, K. Inoue, I. Hirose, M. Sato and T. Honma: Thin Sol. Films, **516**(2008), 5818-5821.
- (25) I. Hirose, T. Watanabe, T. Koganezawa, M. Kikuchi and N. Yoshimoto: Jpn. J. Appl. Phys., **57**(2018), 03EG12.

# 低温焼成用ジルコニア粉末の開発

松井 光 二\*

## 1. 開発の背景

ファインセラミックスの一つとして、イットリア安定化ジルコニア ( $Y_2O_3$ -stabilized  $ZrO_2$ : YSZ) が知られている。その中でも強度・韌性に優れるイットリア安定化正方晶ジルコニア多結晶体 ( $Y_2O_3$ -stabilized tetragonal  $ZrO_2$  polycrystal: Y-TZP) は、1975年、Garvie らの部分安定化ジルコニアによる変態強化の発表<sup>(1)</sup> がきっかけとなり、80年代に入って構造用部材等で実用化された。この Y-TZP は、当時の新素材ブームを牽引する材料として注目されたが、バブル崩壊とともに期待された市場規模の予測とは程遠い年間数百トンでブームは終焉した。しかしながら、90年代の新素材の冬の時期に、粘り強く開発が行われたことで、光接続部品、粉碎メディア、酸素センサー、歯科材料、産業機器材料、生活・日用品、環境・エネルギー製品等で実用化が進み、YSZ の市場規模は年間2000トン台<sup>(2)</sup>へ拡大した。

Y-TZP の高強度・高靱性化メカニズムは、応力下で発生する約 4 vol% の体積膨張を伴う正方晶→単斜晶 (t→m) 相変態が、破壊時のクラック進展を抑制することで説明されている<sup>(3)</sup>。一方、厳しい環境下である 150~400°C の高温大気や 100°C 以上の熱水中に Y-TZP を長時間放置すると、応力が作用しなくても t→m 相変態が自発的に起こるため、体積膨張で発生したクラックの進展によって強度・靱性が低下する<sup>(4)</sup>。この現象は、低温劣化 (Low temperature degradation: LTD) と呼ばれている。このため Y-TZP の用途開発では使用環境での信頼性が重要となり、LTD 加速試験による耐久性評価が必要となる。このように LTD は、Y-TZP の本質的な弱点であり、用途を制限する最大の要因であった。

当社は、YSZ 微細組織の知識<sup>(5)</sup>を基に粉末製造技術<sup>(6)</sup>を応用して、厳しい環境下で使用可能な超高耐久性を特長とする新型 Y-TZP<sup>(7)</sup>の粉末開発に成功した。本稿では、その開発経緯を紹介する。

## 2. LTD 克服の着想

LTD を克服するには、Y-TZP の微細組織を理解することが重要と考え、先ずはその知識を獲得する取り組みから始めた。 $ZrO_2$ - $Y_2O_3$  系の状態図によれば、1500°C で焼結させた従来品の 3 mol% Y-TZP (3Y) は低  $Y^{3+}$  濃度の正方晶 (t) と高  $Y^{3+}$  濃度の立方晶 (c) に相分離した二相組織であり、この微細構造は t と c の結晶粒子からなる二相混合組織<sup>(8)</sup>として提唱されていた。しかし、STEM-ナノプローブ EDS で 3Y 粉末 (東ソー製、TZ-3Y) の焼結時に形成される微細構造を調べると、低密度の 1300°C 以下では  $Y^{3+}$  濃度の均一な t 単相組織、高密度となる 1500°C 以上では結晶粒内に高  $Y^{3+}$  濃度の c 相領域が形成される t-c 二相組織になることが判明した。この事実は、従来品の 3Y が定説として認められていた二相混合組織ではないことを示している。更に、HRTEM-ナノプローブ EDS で粒界近傍を解析すると、結晶粒が直接接合した粒界に nm オーダーで  $Y^{3+}$  が偏析しており、焼結温度の増加とともに偏析量が増大して、粒界から c 相が形成されることが分かった。このことから焼結時の 3Y の微細構造形成過程は、1200°C までは  $Y^{3+}$  濃度の均一な t 単相組織、1300°C で  $Y^{3+}$  が偏析している粒界を起点に t→c 相変態が起こり、粒界に隣接した結晶粒内へ c 相領域が進展して t-c 二相組織となることを突き止め、この粒界から起こる新しい相変態現象に粒界偏析誘起相変態 (Grain boundary segregation-induced phase transformation: GBSIPT)<sup>(5)</sup>と名付けた。

次に、GBSIPT メカニズムを基に LTD を克服するための微細組織仮説を設定した。従来品 3Y の t-c 二相組織は、結晶粒内に高  $Y^{3+}$  濃度の c 相領域が形成されており、それに隣接する t 相領域の  $Y^{3+}$  濃度は、c 相形成のために t 相の  $Y^{3+}$  が c 相領域へ拡散して低くなっている (図 1(a))。これが要因で t 相の安定性が低下して t→m 相変態し易くなると考えると、密度はかなり低いが、1200°C 焼結で得られる  $Y^{3+}$  濃度の均一な t 単相の新組織が LTD 耐性に優れていることになる (図 1(b))。

そこで、この仮説を検証するために、低温焼成用粉末の開

\* 東ソー株式会社 無機材料研究所; 主席研究員 (〒746-8501 周南市開成町4560)

Development of Zirconia Powder for Low Temperature Firing; Koji Mtsui (Tosoh corporation, Inorganic materials research laboratory, Shunan)

Keywords: ultra-degradation-resistant zirconia, powder development, low temperature sintering, grain-boundary segregation, phase transformation, low temperature degradation

2019年5月22日受理 [doi:10.2320/materia.58.458]

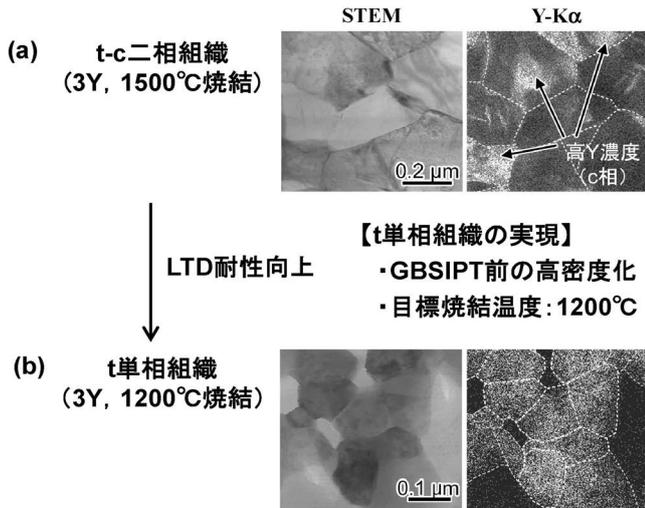


図1 LTD耐性向上の仮説：3YのSTEM像とY-K $\alpha$ 像 (点線は粒界を示す)。

発に着手した。t単相組織の実現課題は、GBSIPT前の高密度化であり、目標の焼結温度は1200°Cである。

### 3. 低温焼成用粉末開発による超高耐久性の実現

当社粉末の3Yは1500°C焼結、3Y-E(東ソー製、TZ-3Y-E)は微量Al効果により1350°C焼結で高密度に到達するが(図2)、1200°C焼結を目指すには、より低温で焼結する粉末が必要である。そこで、当社の粉末製造技術<sup>(6)</sup>を応用して、1250°C焼結で高密度に到達する新粉末3Y-A(東ソー製、TZ-PX-172)を開発し、これに0.25 mass%のGeO<sub>2</sub>を添加(3Y-AG)することで目標の1200°C焼結を達成した(図2)。表1に、3Y-Aの粉末規格値を示すが、3Y-Aの微細構造を精密に制御すると、3Y-Eと同じ規格値の範囲内でも焼結性を高めることが可能である。

この1200°Cで焼結させた3Y-AGは、従来品の3Yに比べて結晶粒径が150 nmと小さく(図2)、結晶粒内のY<sup>3+</sup>濃度が均一であり(図3(a))、更にHRTEM-ナノプローブEDS解析により粒界・粒内ともt相であることが検証され、t単相組織であることを確認した。

微細組織仮説を検証するため、このt単相組織の3Y-AGについて熱水140°CでLTD加速試験を行った(図3(b))。劣化進展の状況は、XRD測定によりt→m相変態に伴う単斜晶の生成率( $f_m$ )として求めた。従来品の3Yは、15時間処理で $f_m=70\%$ 、一方、3Y-AGは1500日処理(4年超)しても $f_m=2\%$ と驚異的なLTD耐性を発現することが判明した。1500日後の焼結体外観も健全である(図3(c))。1250°Cで焼結させた3Y-Aも1500日処理で $f_m=3\%$ であり(図3(b))、3Y-A、3Y-AGとも熱水140°Cで1500日処理してもほとんど劣化しない、従来のY-TZPの概念を覆す注目すべき結果が得られた。

このように低温焼成用粉末の開発により、Y<sup>3+</sup>濃度の均

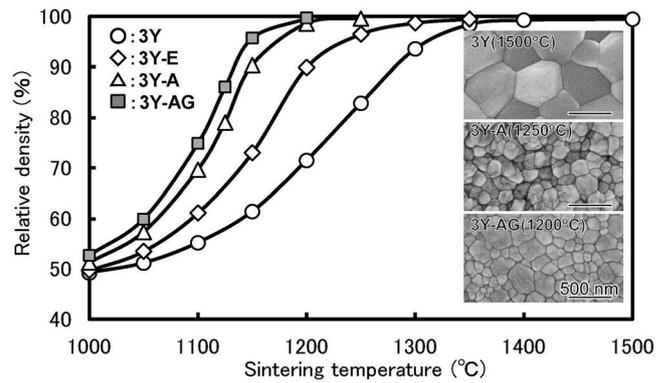


図2 3Y系粉末の焼結挙動と焼結体SEM像。

表1 3Y系粉末の規格値。

粉末名	Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (mass%)	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (mass%)	BET (m <sup>2</sup> /g)
3Y	5.2±0.5	—	16±3
3Y-E	5.2±0.5	0.1~0.4	16±3
3Y-A	5.2±0.5	0.1~0.4	16±3

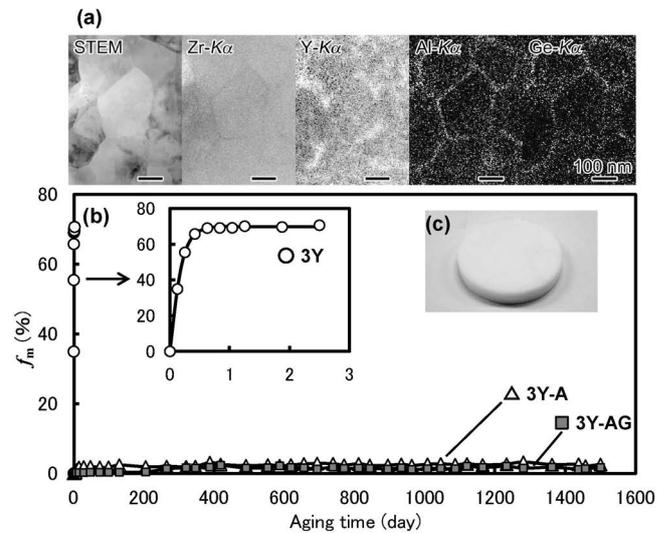


図3 (a) 3Y-AG(1200°C焼結体)のSTEM像と元素マッピング像、(b)LTD評価(熱水140°C)：3Y-AG(1200°C焼結体)、3Y-A(1250°C焼結体)及び3Y(1500°C焼結体)の比較、(c)水熱1500日後の3Y-AG(1200°C焼結体)の外観。

一なナノサイズのt単相組織を実現し、LTDを克服した超高耐久性を特長とする新型Y-TZPの創出に成功した。

### 4. 開発を振り返って

上記のように低温焼成用粉末を開発してきたが、実はその裏には、東京大学大学院工学研究科 幾原雄一教授、吉田英弘教授との出会いがあった。YSZの本質を理解したいとの

強い思いで両教授と共同研究を実施させて頂き、その成果としてYSZの焼結過程で形成される微細組織の全容を究明した<sup>(5)</sup>。この究明があったからこそ克服困難であったLTD解決の方向性が明確となり、産学連携による新型Y-TZPの提案へ繋がった<sup>(7)</sup>。本開発の取り組みからも明らかなように、産学連携は企業のニーズと大学での基礎研究の連携が大事である。更に、低温焼成用粉末の開発に成功したことがきっかけとなり、当社の技術・開発力が評価され、これまでに構築した粉末製造技術が大河内記念技術賞として認められる機会にも巡り合えた<sup>(6)</sup>。このように出会いは重要であり、今後も大切にしていきたいと思う。

新型Y-TZPがどのような用途に展開可能か、3Y-A粉末のサンプル提供を通してマーケティング中である。例えば、高温スラリーでの粉碎機用部材等が期待される。また、厳しい使用条件が求められる医療工学用部品も有望である。ナノ組織制御による技術展開では、低温超塑性やイオン伝導性の応用にも可能性がある。

低温焼成を特長とする新粉末の出現により、これまで制限

されていた厳しい環境下での用途開拓が進み、ジルコニアが更に普及することで産業発展に大きく貢献する材料へ成長していくことを期待したい。

## 文 献

- (1) R. C. Garvie, R. H. Hannink and R. T. Pascoe: *Nature*, **258** (1975), 703-704.
- (2) 神山 勤: *工業レアメタル*, **128**(2012), 40-41.
- (3) T. K. Gupta, F. F. Lange and J. H. Bechtold: *J. Mater. Sci.*, **13** (1978), 1464-1470.
- (4) K. Kobayashi, H. Kuwajima and T. Masaki: *Solid State Ionics*, **3/4**(1981), 489-493.
- (5) K. Matsui, H. Yoshida and Y. Ikuhara: *Int. Mater. Rev.*, **63** (2018), 375-406.
- (6) 松井光二, 大道信勝, 大貝理治, 川上隆昭, 植田邦義: 第65回(平成30年度)大河内賞受賞業績報告書, 公益財団法人 大河内記念会, (2019), 57-76.
- (7) K. Matsui, H. Yoshida and Y. Ikuhara: *Sci. Rep.*, **4**(2014), 4758.
- (8) F. F. Lange: *J. Am. Ceram. Soc.*, **69**(1986), 240-242.

## 東北大学金属材料研究所・新素材 共同研究開発センター

東北大学金属材料研究所；准教授 梅津理恵



図1 東北大学金属材料研究所・新素材共同研究開発センターのスタッフ。

### 1. 新素材共同研究開発センターの概要

新素材共同研究開発センターは、東北大学金属材料研究所を中心として生まれた新物質、新プロセス技術、新評価法等の芽の育成、21世紀の技術革新を支える新素材開発を目的として1987年に新素材開発施設として開設され、その後、新素材設計開発施設、金属ガラス総合研究センターを経て、2013年に現在の名称に改称された。本センターでは、物質・材料を制御・合成する基本的原理や技術を確立し、新物質・新材料を創製するとともに、これらのエネルギー材料、環境材料、構造材料、電子・情報材料、生体福祉材料等の高機能化、多機能化への応用の可能性を検討している。2016年からは、研究部を簡略化して「物質創製」、「機能設計」、「構造制御」、「産学協同」の4つに再編するとともに、「物質合成」、「性能評価」、「結晶作製」の3つのステーションを共同ステーションとして位置付けた。また、2018年に金属材料研究所が「材料科学国際共同利用・共同研究拠点」として認定されたことを受け、今までは国内のみであった共同利用を国外からも受け入れることになった。

現在スタッフは、センター長の正橋直哉教授、梅津理恵准教授、千星聡准教授、吉年規治助教、張岩助教、木村雄太助教に加え、7名の兼任教授、1名の兼任准教授、9名の技術職員、2名の事務職員で構成されている(図1)。センター専任の教員は、自身の研究を遂行しながら、共同利用に供している装置群の維持・管理を技術職員らと協力して行い、共同利用者との共同研究も精力的に展開させている。なお、専任教員の研究内容を以下に列記する。詳細はホームページを参照されたい<sup>(1)</sup>。

- 正橋直哉教授：「構造用金属間化合物」、「生体用インプラント材とその表面改質」、「陽極酸化TiO<sub>2</sub>の光誘起機能」、「放電プラズマ焼結(SPS)を用いた固相接合」
- 梅津理恵准教授：「高スピン偏極強磁性材料の磁気物性」、「磁場誘起マルテンサイト相変態の変態機構」
- 千星聡准教授：「高強度-高導電性銅合金の開発」、「高温構造用Ni基合金の組織制御」
- 吉年規治助教：「無容器凝固法を用いた非平衡単分散粒子の作製とその応用」
- 張岩助教：「低鉄損軟磁性圧粉磁心材料の作製」、「コバルトの添加による高磁束密度低鉄損軟磁性材料の創製」
- 木村雄太助教：「Ti-Ni基合金におけるマルテンサイト変態の前駆現象」、「Ti-Ni基合金における応力誘起マルテンサイト変態の低温異常」

### 2. センターでの共同利用

当センターでは、さまざまな新素材の開発、設計、評価を行う研究者を対象とし、センターの研究部との共同研究及びセンターに設置してある機器・装置等を利用して行う共同利用研究を毎年募集している。公募の期間は、国内の場合は例年11月中旬から12月上旬で、対象となる研究者は、国・公・私立大学及び高等専門学校の教員並びに独立行政法人・特殊法人及び国公立の研究機関に属する常勤の研究者が研究代表者として申請できる。なお、研究組織の中に分担者として教職員、大学院生並びに学部生を含めることができる。共同利用Webシステムを利用した電子申請が行われると、本センターの採択専門委員会及び共同利用委員会の議を経てセンター長が採否を最終決定し、3月下旬ごろに申請者へ通知する。学外の共同利用者は、金属材料研究所までの交通費と滞在費が所より負担される。昨年度(2018年度)の場合、学外の共同利用研究課題が47件、学内が45件であり、合わせて92件の研究課題が採択された。今年度は、さらに国外の共同利用研究が加わることになる。また、共同利用研究の申請時の内容と4月に提出される報告書に対する審査の結果より、優秀な研究成果を挙げた課題1~2件を、「優秀課題」として毎年5月に表彰している。

物質合成ステーションにおいては、多元系反応スパッタ装置や放電プラズマ焼結装置、単ロール液体急冷装置など、金属系バルク材、薄膜、リボン、粉末作製装置からセラミックス製造装置まで、合計13台の装置を共同利用装置として供している。性能評価ステーションでは、構造解析用の各種X線回折装置や試料の定性・定量分析を行う装置群に加え、熱分析や磁気特性評価装置等を含めて合計17台、結晶作製ステーションでは、単結晶育成用の母合金作製装置および合金や化合物などの各種単結晶育成装置を14台供している。装置の詳細な紹介はホームページに掲載されているので、ぜひご覧になって頂きたい。

以上のように、センターの機器・装置等を利用して行う共同利用研究や、センターの研究部との共同研究の遂行だけでなく、大学で得た知見の社会還元を目指して、共同利用・共同研究で得られた研究成果を広く社会に伝えるべく産業界の橋渡しを行い、さらには社会人教育などの人材育成や産学共同活動を目的としたマッチングフェア等の開催も活動の一環としていきたい。

### 文 献

- (1) 東北大学金属材料研究所・新素材共同研究開発センター：  
<http://www.crdam.imr.tohoku.ac.jp/>  
(2019年5月15日受理)[doi:10.2320/materia.58.461]  
(連絡先：〒980-8577 仙台市青葉区片平2-1-1)

# 先達からのお便り

## 人口減少はイノベーション創出の 絶好のチャンスでもある！

立命館大学；学長特別補佐／理事補佐 村上正紀

### 1. ま え が き

校内は入学式を終えた新入生の新生の息吹で溢れかえり、正に春爛漫である。若者の目の輝きは、次世代の日本の輝きに反映することは間違いなしと信じる。さらに輝かせるのは、20世紀の恩恵を授かった我々の責任であり、つくづく人材育成の重要性を実感させられる。同時に毎年のことながら、(米国で言われている)人間の「learning, earning, and giving」段階での最終段階「giving」の年齢に達した事も思い起こされる時期である。

小生は「先達」からはほど遠いが、少しでも人材育成のお役に立てばと思い、限られた紙面を前半と後半に分け、前半では過去の経験から「20年間の米国生活で学んだこと」を中心に書かせて頂く。後半では、現在の日本の人口減少が日本にとって理想的な姿に向かっている考え方を述べさせて頂き、今こそが研究者にとってイノベーション創出のチャンスであることを喚起させていただく。

### 2. 20年間の米国生活で学んだこと

#### (1) 若い時には他人の飯を！

日本では昔も今も「他人の飯を食え！」を言い続けられてきた。昭和の初期までは主に「老舗の跡取」は他人の店での奉公が修行の場であったが、グローバル化の大波が押し寄せている現在は「他人」は「外国」に置き換えねばならない。海外留学に対して、国からの援助が過去に比べ潤沢になされているにも拘わらず、日本での海外への留学生が2004年の8万3千人をピークに、その後は減少し、最近ではピーク時からは3万人も落ち込んでいる。

我々の学生時代(1960年代)は、海外留学に対して国からの支援はほとんどなく、それでも何とかして海外留学の糸口を必死で模索していた。幸いなことに博士後期課程修了(1971)と同時にカリフォルニア大学(UCLA)に留学できた。渡米したのは、特に「錦を飾って帰国する」ためではなく、当時、一般に言われた「アブレ組」であった。大学卒業当時には「末は博士か、大臣か」の言葉はすでに薄れ、「博士号は足の裏にくっついた米粒」に例えられる位、「取っても食えない博士」は珍しくもない時代であった。つまり渡米したのは、外国でしか飯を食べる道はなかったからである。

結局は、カリフォルニア大学(4年間)、ニューヨークのIBMワトソン研究所(16年間)と20年間米国で過ごした。家

内の弁では、この間、小生はアメリカでは主に3つのことだけを習得したらしい。一つ目は、アメリカではお客様を自宅で接待する事が多く、お蔭で「ワインの注ぎ方」を習得したとの事である。二つ目は、よくテントを担いで猛暑の砂漠を一日中車で走り続けたので「車の修理」らしい。三つ目は、日本では「沈黙は金なり」であるが、アメリカではこのようなことは全く通用しなく、「自己主張」であるらしい。

帰国してからはほぼ30年が過ぎた今、振り返ってみるとさらに大切な事もアメリカで習得したと自分なりに自負している。一つ目は、多文化を受け入れる包容力が身に着いた事である。米国は多種多様な人種が共存・共栄し、英語も流暢に喋れなく、ルーツも無い我々のような外国人が楽しく生活するには、異文化を理解し、受け入れる習慣が“自然”と身に付いた事は大変貴重である。(英語も“自然”に身に付いたと言いたいところだが、残念ながら、関西弁が20年間、両耳を塞ぎ続け英語は上達しなかった)。二つ目は、成果主義制度に違和感なく享受できた事である。米国の多くの企業・大学での評価は、メリット・システムを導入し、価値あるものだけが生き残れる制度である。三つ目は、地球の裏側から「母国」を客観的に観られ、地球規模での日本の将来の動向が観察できたことである。この様な環境下で過ごしたことによって、研究のみならず何をするにも「自分のビジョン」を持つ事の必要性が“自然”に身に付いたが四つ目の一番価値ある習得と思える。

#### (2) では、アメリカは自分のビジョンを身に付ける風土なのか？

米国は人種の坩堝(るつぼ)と言われるが如く、世界各国の人種が共存・共栄して成り立っている国である。従って祖国の生活習慣、慣習、宗教等を継承する者、新しい文化を作り出す者等、兎に角、すべてが多様化している。米国に住んでいる者同士で共通するものは、国旗と国歌のみではないかと思われる。この様な多様で、実力のみで生き抜くには、自分自身が「強い主体性」つまり「自分の生きるビジョン」をもたなければならない。必然的に教育姿勢も主体性の強い、個性豊かな(明確なビジョンを持った)人間形成に主眼が置かれる。教師も初等教育からこの姿勢を貫く。絵画の時間でも、教室の教壇にぼつんと置かれた花瓶や人物像等を皆が同じ方向を向いて描くのではなく、教室中で好きな方向を向き自由奔放に自分の頭の中の印象に残ったものを描かせる。ありきたりの花を描いた者より、教師が想像もできない絵を描いた者に教師はお褒めの言葉を与える。

日本では、集団生活を最も大切にし、生き抜くためには「集団に溶け込む」協調精神がなければならない。米国でよくなされる自分の主張を強調するディベート等は最近やっと日本でも短時間であるが授業科目として取り入れられているが、現在でも自己主張することは協調性を乱すとの認識さえある。米国で慣習になっている初等教育の飛び級等も、日本では均一で平等であるべきとの観点から、採用しようとする議論すらなく、落ちこぼれのない人材を育成する事が基本姿勢になっている。一つの科目がずば抜けて優秀な生徒よりは、全ての科目に万遍なく優れた生徒の方が優遇される。

日本と米国のどちらが個性の強い人材を育成する教育姿勢

になっているかは自ずと明らかである。高等教育においても両国の基本的な教育姿勢の違いは引き継がれている。京都大学では大学の校風である「自学自習」を重んじて16年間、教壇に立ったが、自分の特技を伸ばして欲しい、と望んだ学生は誰一人としていなかった。日本の学生の大学への期待は、卒業証書の日も早い授与と就職を斡旋してくれる事だけのようにしか思えない節もあった。これまでは、このような状態でも20世紀までの日本は経済成長を続けたが、グローバル化が叫ばれ、外国人労働者が増加傾向にある日本は21世紀終焉でも経済成長が維持されるであろうかと考える時期である。

### (3) ビジョンを持つ重要性を馬と人の走る速さから学ぶ

次世代の日本を牽引する若者の育成には、“ビジョンの重要性”を教授する姿勢が教師になければならない。図1は、ビジョンの重要性を最も明快に表す。この図は、J. T. Keamey<sup>(1)</sup>が、馬と人間が1マイル走る最高記録時間をほぼ90年間に亘って調査した結果である。馬も人間も技術・道具の進歩により、走る速さは1950年まで向上してきている。しかし、馬は人間以上の道具・調教法の進歩にも拘らず、ここ50年間、速さは向上していない。人間だけが記録を現在も更新し続けている。違いは何か？人間は、走る目的意識(ビジョン)が明確であり、馬には走る目的が全くないためである。

### (4) では日本人学生に Vision を持たせるには何をしなければならないのか？

ずばり、「外国で飯を食う」ことである。留学の機会に恵まれないならば、外国人教師・海外留学生が半数を占める学園の拡大を提言したい。このような大学はすでに数校は日本にも設立されているが、数は焼け石に水である。もっとも肝心な事は、教師には、明治時代の「お雇い外人」のように技術のみ教える教師ではなく、世界観・歴史観を持って、自分の哲学を語る人材を採用する事である。日本人学生にとって異文化の接触と外国語習得の一石二鳥の効果が得られる。

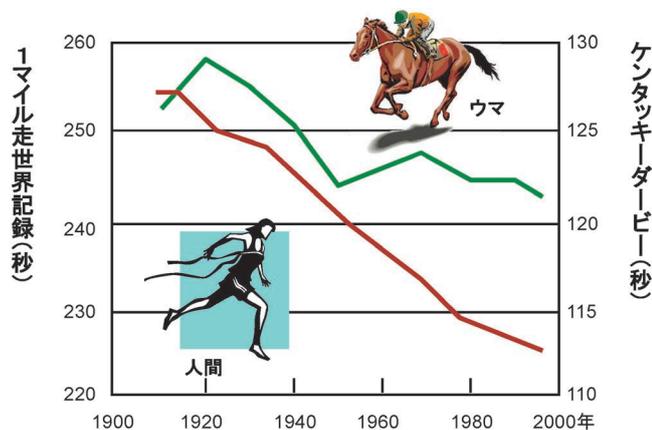


図1 人と馬の走る速さの100年間世界記録の変遷 (文献1)。(オンラインカラー)

## 3. では、現在の若い研究者が持てる Vision は？

上記2.(1)で述べたように、米国滞在中に、地球の裏側(ニューヨーク)から日本を客観的に観ると、日本は先進国と誇らしげであるが、地下資源だけでなく食料も海外に頼り、労働力だけが豊富な国である事が身をもって感じ、先進国として高付加価値の製品を輸出するには一層、教育の重要性を感じた。しかし、21世紀に入り顕著になった少子高齢化の波が日本を襲い、労働力も減少傾向になり、今や如何に21世紀を生き延びるかが最大課題である。京都大学時代までは材料に関する研究に専念し、その足跡は応用物理に掲載<sup>(2)</sup>して頂いたが、定年後は世の中に少しでも貢献できればと思い、「地球の自然回帰」、「人口減少問題」に力をいれている。今回、「人口減少問題」は日本の研究者にとってイノベーションの宝庫であることを若い研究者に紹介したい。

### (1) 持続可能な社会の追及とは？

「地球の持続可能性の追求」とは具体的に何を意味するかを自分なりの考えを示す。一言で言えば「地球上の生態的な供給容量内で、人類をはじめ、多様な生態系が永遠に、生命を持続的に継承できる可能性の追求」である。この持続可能性を決定するのは、主に人類であり、人類の「生活の高度化」と「総人口」の掛け算値が「地球の生態的な供給容量内であるか、否か」で決定される。

まず、「生活の高度化」について議論する。江戸時代の生活レベルは現在とは全く異なり、人はすべて人力や輓獣(ばんじゅう)による動力を利用した時代であり、現在のGDP換算にすると、一人当たりの年間のGDPは\$600での暮らしであったと推定されている。この時代では地域で収穫できる農産物で何の支障もなく生活することができ、すべて「地産地消」での生活が可能であった。僅か150~60年ほど前の話である。

20世紀になり、生活レベルの高度化を追求した結果、生活の高度化の指標となる国民一人当たりのGDPは、今や4万ドル近く(江戸時代の約60倍)である。かつ、「総人口」も江戸時代の終わりではたった3000万人くらいであったが、20世紀を迎えた明治維新以降、人口は急激に増加し、20世紀の終焉には1億2千万人(江戸時代の4倍)に達した。

「地球の持続可能性」は、主に人類の「生活の高度化」と「総人口」の掛け算値で決定される。日本国内に限定した“持続可能性指数”は、江戸時代の指数と比較すると約240倍であり、日本国内の生態的な供給容量だけでは日本人の需要は到底賅えない。当然「他国の生態系の容量」を輸入(借用)せねばならない。このような現在の日本人の高度な生活を全世界の人々に波及すれば、当然、地球一個の生態系容量では賅えず、大体2.3個分の地球(エコロジカルフットプリント)が必要となり、地球の持続可能性が問題視されるのは必然である。

### (2) 持続可能な日本社会にするための道筋

まず、我々が日本国内の生態系供給量内で生活ができる環

境を整えねばならない。そのためには、生活レベルを現在より極端に低下させるか、または、人口を減少させねばならない。多くの国民は当然の事ながら、生活レベルの低下は望まない。自然破壊を回避しつつ、自然の恵みを可能な限り享受して、再生可能なエネルギーなどを創成し「生活レベルの高度化」の可能性の探求し続けている。新エネルギー創成の努力は20世紀の後半から本格的に始動し、その結果、現在、多くの成果が実用に転換されつつある。

日本で人々が高度なレベルを維持しながら、あてがわれた生態系供給量内で生活する事には限界がある。とすると、「人口減少」が一つの解決策の引き金となろう。持続可能性の議論には、前述したように「人口問題」が「生活レベルの高度化問題」と同じ比重で重要である。

単純に考えると現在の日本の人口を「2.3」で割った人数まで人口が減少すれば、日本人は国内の生態系の供給量で生活可能になり、日本人の持続性は可能に近づく。大正時代初期の人口5200万人までに減少すれば良い事になる。この人口になれば、日本国内の生態学的供給容量内で今日の高度な生活の持続可能性が大であり、この人口をここでは、仮に「持続可能な人口」と呼ぶ。2011年以降、日本の人口減少は自然にこの持続可能な人口に向かっており、非常に望ましい傾向と言えよう。

一方、世界の総人口は増加傾向にあり、21世紀の終焉には、110億人に達すると推測されている。世界の人口増加に伴い、一人の人間に与えられる地球上で「生物生産力ある公平割当面積」は、当然、減少し、60億人では、1.8 ha、100億人では1.2 ha と計算されている。減少した公平割当面積で日本人が生活するには、「生物生産力のない陸地」の開拓、および、自然環境を破壊せずに、現状の生産性のさらなる向上を科学の力で達成せねばならない。逆に、この事が「21世紀の科学・技術の挑戦目標」となる。

仮に、現在、日本で人が利用できる生物生産力ある土地面積で生産性の向上(消費低減)が、地球上の総人口増加に伴い、達成できたとすると、「持続可能な人口」が増加する。2060年には日本の「持続可能な人口」が8800万人までに達し、且つ、日本の「総人口」も8800万人にまで減少すると推測されている。2060年で日本の「総人口」と「持続可能な人口」が一致する。食料生産性などの高効率化により2060年以降でも人口の緩やかな増加でも、日本人が生態系供給容量内で生活できる可能性が高くなる。このような状態が冒頭で述べた「日本の人口減少は理想的な姿に向かっている」事であるが2060年でも問題が山積である。

### (3) では、「人口減少による2060年問題」とは何か？

2060年を迎える日本では何が問題となるか？人口減少により、国民の生活レベルの指標となる一人当たりのGDP(GDP/人)の減少の可能性が最大の懸念である。現在の各国の人口と国民のGDP/人の関連を調べ、その結果を図2に示すが、この図からも明らかのように、一般には米国を除くすれば、人口減少により国民のGDP/人の減少は見られず、寧ろ、驚いた事に、GDP/人と総人口は逆比例の関係を示す傾向が読み取れる。

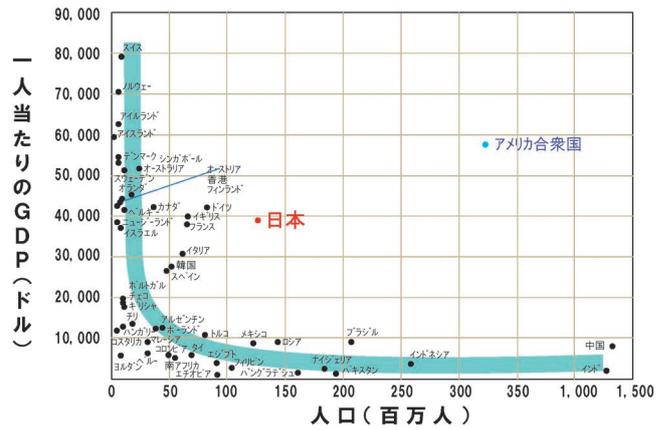


図2 各国の人口と国民一人当たりのGDPの関係。(オンラインカラー)

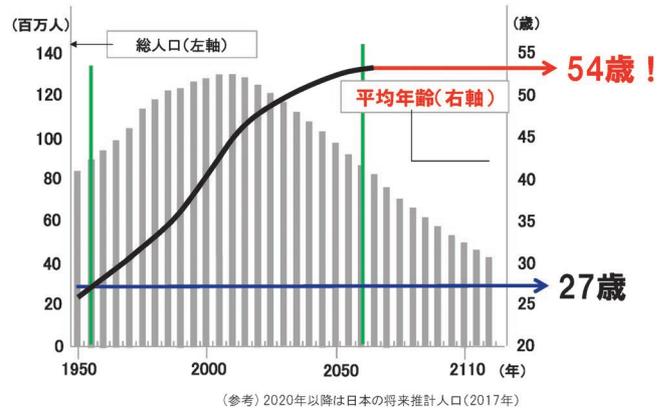


図3 日本の総人口と平均年齢の推移予測。(オンラインカラー)

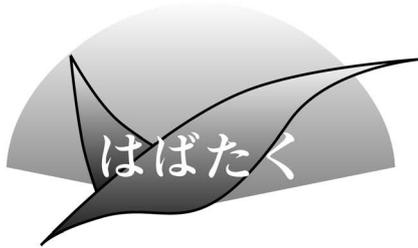
では、生態系の供給容量が赤字から黒字に変換する「2060年」の日本では、何ら問題が生じないであろうか？日本人の総人口8800万人が問題となるのではなく、8800万人の日本人の「年齢構成」に問題が潜む。図3に示すように、2060年の総人口の平均年齢は54歳！であり、65歳以上の高齢者の割合は総人口の40%を占める。経済が右肩上がりであった1955年の日本の総人口は、同じ8800万人であったが、平均年齢は27歳であり、高齢化率はわずか5%であった。大きな問題は、2060年の40%の高い高齢化率の日本人が、1955年の5%の低い高齢化率の時代の右肩上がりと同じ労働意欲を持って就業し、経済の発展に寄与するか？が大きな問題である。これこそが「日本の人口減少がもたらす2060年問題」である。

2060年の高齢化問題の先頭を走るのは生態系供給の主役である「農業」である。高齢化率が高い農業では、1960年の従事者の平均年齢は30歳前後であったが、現在は75歳に達し、農業従事者人口が激減し、至る所に遊休地が散見される。日本の2060年問題への警告である。

### (4) 2060年問題解消について現在、挑戦中の具体的な研究課題

このように2060年に向けて、研究課題は山積している。





## 本当にそうか？ 何故そうなるのか？

国立研究開発法人 産業技術総合研究所；研究員  
権藤詩織

### 1. 伸線加工との出会い

私は2019年3月に早稲田大学大学院 基幹理工学研究科 機械科学専攻にて博士学位を取得し、現在は産業技術総合研究所にて塑性加工の研究に従事しています。この度は「はばたく」への寄稿との大変貴重な機会を賜りましたので、僭越ながら研究活動で直面した壁をどのように乗り越えたか、一部の事例を紹介致します。

学部3年次に塑性加工の研究室であった浅川研究室に希望し配属されました。この研究室では学部3年生の夏季休業期間中に、卒業論文の簡易版を体験する“夏期実験”がありました。ここで出会ったのが、その後博士論文まで続く“伸線加工”です。夏期実験では公表済みの論文の内容を実証しました。卒業論文研究では、高精度な張力・速度制御が可能な伸線機を用いて、後方張力(伸線時に伸線方向と反対方向に負荷する張力)が伸線材の機械的性質に及ぼす影響の解明に取り組みました。「後方張力の低減により伸線に伴う延性の低下を抑制できる」との結果が得られ、もっと知りたいとの純粋な探求心が芽生えるとともに、国際水準で活躍できる研究者になりたいと思うようになりました。

### 2. 難航したマイクロ組織の評価

浅川教授の退職にあわせ、大学院では鈴木研究室に入りました。鈴木教授には無理を申し、卒業論文研究で得られた結果のメカニズム解明との観点で、伸線加工の研究を続けさせていただきました。論文から得た知見を踏まえ、透過型電子顕微鏡(TEM)による組織観察、電子線後方散乱回折法(EBSD)による結晶方位解析などのマイクロ組織の評価に挑みました。しかしながら、TEM像が示す情報は局所的で、機械的性質と観察結果を結びつけられませんでした。また、学内のEBSD装置では試料形態に制約があり、図1に示すような非常に細い鋼線の分析ができず、研究が行き詰りました。そこで、改めて論文を読みあさり、何をどのように評価すべきかを再度検討しました。TEM像は取得済のデータで十分であるとの判断に至り、EBSD解析については現所属先の装置を利用させてもらうことになりました。また、鈴木教授より「何故そうなるのか？のみならず、本当にそうか？(延性低下の抑制を示すデータの信頼性を示すように)」との助言をいただき、引張試験や延性評価法の誤差を生じうる要

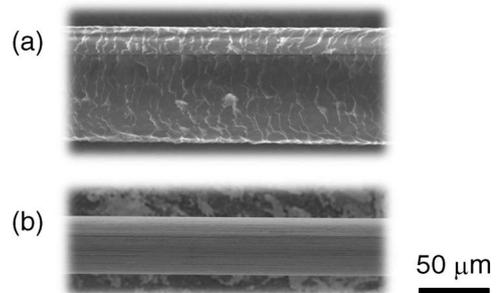


図1 髪の毛(a)と本研究で取り扱った鋼線(b)の走査型電子顕微鏡(SEM)像。

因を検証しました。ダイヤルゲージやハイトゲージなどを使用したローテクな評価でしたが、評価方法の妥当性を明らかにできました<sup>(1)</sup>。

鈴木教授は普段から「折り返し」という言葉をよく仰います。これは、論文を書き上げるにあたり、「実験ばかりやっている」とまとめる時間が不足し、十分な考察ができなくなる」との忠告の意です。この言葉により、博士後期課程2年の夏には論文に必要なデータの大方を揃えられ、この頃から研究に携わる先生方や後輩達と議論する機会を定期的に設け、博士論文の考察を深めていきました。しかしながら、議論が進まるにつれ、再び大きな課題が浮上しました。EBSD解析においてほとんどの試料で中心軸からずれた面を解析しており、データの信頼性を指摘されたのです。議論の末、地道な研磨を基本とした作業ではあるものの、不可能と考えていた極細線の中心を通る断面が解析面となる研磨方法を考案し、再度実験を行いました。解析ソフト上で細かく解析し、極点図を取得し、結晶方位を読み取る作業は非常に手間がかかりましたが、得られたデータを咀嚼し、次のような貴重な知見を得ました。鋼線の伸線初期、内部の構造は一層ですが、その後中心軸側に新たな層が出現し、外側が中心軸側を包み込む二層構造となり、さらに伸線すると外側の層が線全体を占めるようになります。高ひずみ域での表層が薄いほど、格子欠陥量とセメントイト分解(セメントイトから炭素原子が消滅した状態)量が少なくなると考えられ、伸線に伴う延性低下を抑制できます<sup>(2)</sup>。

### 3. 研究活動を振り返って

本稿で執筆した内容はほんの一部にすぎず、沢山のことを学びました。これから「本当にそうか？何故そうなるのか？」の疑問を常に抱き、材料組織制御をキーワードとした研究を通じて、産業の基盤となる素形材加工分野に貢献できるように努めて参ります。最後にこの場を借りて、研究活動における大変重要な基本姿勢をご教授賜りました鈴木教授、退職されてからも修士論文、博士論文にご助言を賜りました浅川名誉教授に、深く御礼申し上げます。

### 文 献

- (1) S. Gondo, S. Suzuki, M. Asakawa, K. Takemoto, K. Tashima and S. Kajino: Int. J. Mech. Mater. Eng., **13** (2018), 5.
- (2) S. Gondo, R. Tanemura, S. Suzuki, S. Kajino, M. Asakawa, K. Takemoto and K. Tashima: Mater. Sci. Eng. A, **747** (2019), 255-264.

(2019年5月27日受理) [doi:10.2320/materia.58.466]  
(連絡先: 〒305-8564 つくば市並木1-2-1 つくば東事業所)

# 本 会 記 事

会 告	2019年秋期(第165回)講演大会ご案内と参加申込について	
	第17回 World Materials Day Award 募集	467
	第8回ランチョンセミナー開催のお知らせ	469
	第9回女性会員のつどい(特別企画)のご案内	469
	2019年度秋季 全国大学材料関係教室協議会講演会	470
	2019年秋期講演大会託児室設置のお知らせ	470
	2020年春期講演大会公募・企画シンポジウムテーマ提案募集	470
	2020年度若手研究グループ申請募集	470
	「研究会」新規・更新申請募集	471
	電子ジャーナル機関購読のご案内	471
	永年会員制度について	471
	第43回技術開発賞募集	472
	第70回金属組織写真賞作品募集	473
	研究集会	474
共催行事	新入会員	480
支部行事	次号予告	480
掲示板	金属学会シンポジウム	481
会誌・欧文誌	8号目次	478
	行事カレンダー	483

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

公益社団法人日本金属学会  
 〒980-8544 仙台市青葉区一番町 1-14-32  
 TEL 022-223-3685 FAX 022-223-6312  
<https://jim.or.jp/>

## 会 告 (ホームページもご参照下さい)

### 2019年秋期(第165回)講演大会ご案内と参加申込について

会 期: 2019年9月11日(水)～9月13日(金)

会 場: 岡山大学津島キャンパス(〒700-8530 岡山市北区津島中 2-1-1)

日 程:	9月11日(水)	各賞贈呈式, 学術講演会, ポスターセッション(高校生ポスター予定), 懇親会(ビュアリティまきび)
	9月12日(木)	学術講演会, 企業ランチョンセミナー
	9月13日(金)	学術講演会, 女性会員のつどい

大会参加予約申込締切: [2019年8月27日(火)] 事前参加申し込みは, すべてインターネット申込となります。詳細は, 申込要領をご覧ください。

開催予定の各種シンポジウム: (プログラム公開中)

#### 公募シンポジウム

- S1 ハイエントロピー合金の材料科学Ⅱ
- S2 材料変形素過程のマルチスケール解析(Ⅱ)
- S3 キング強化の材料科学Ⅱ
- S4 水素エネルギー材料—Ⅷ
- S5 先進ナノ構造解析に基づく材料科学の新展開Ⅱ
- S6 ナノ・マイクロスペースステイラリングⅡ
- S7 医療・福祉のための Additive Manufacturing の材料科学Ⅲ
- S8 マテリアルズ・インテグレーション(Ⅲ)—順問題から逆問題へ—

#### 企画シンポジウム(依頼講演のみ)

##### K1 高性能軟磁性材料の現状と課題

電動自動車の普及拡大などを背景に, 各種磁性材料の高性能化が求められており, 現に永久磁石の高性能化・希少元素低減に関しては, 産業界からの課題提示を反映したナショプロが推進されるなど, 基礎研究を含めた研究開発が活性化している。他方, 軟磁性材料に着目すると, 珪素鋼板・アモルファス材料・ナノ結晶材料・圧粉磁心などの多くの材料が自動車をはじめとした各種製品の高性能化・高機能化に貢献しているものの, これらの材料について応用を踏まえた現状と課題を俯瞰する機会はほとんどない。そこで, 本シンポジウムでは, 実用化されている各種軟磁性材料の現状と課題について主に産業界から話題を提供していただき, 金属学会に関わる研究者が貢献可能な課題を発掘するための一助とする。

##### K2 若手科学者に贈る研究のヒントⅡ～未踏領域へ到達するために～

第2分野提案, 第1分野との共同開催による人材育成を趣旨とする啓蒙的な内容の企画シンポジウムの第二弾。独創的な研究成果に到達するためには, どのような姿勢で研究に臨むべきか。誰もが知る顕著な成果を上げられた著名研究者にご講演頂き, そのヒントを得ることを目的とする。講演では, ご自身の研究に触れつつ, 研究者としての心構えや組織・国からの視点について述べて頂き, シンポジウム全体として独創的な研究成果に到達するための条件を議論する。講演1方向の欠如モデル型だけでなくサイエンス・コミュニケーション型の双方向性の仕掛けとして, 全講演者・聴衆による総合討論も行う。本シンポジウムが, 会員, 特に若手研究者への刺激になれば幸いである。

##### K3 自動車の大変革に貢献する材料技術の最新動向(自動車技術会・日本鉄鋼協会との合同シンポジウム)

近年の自動車を取り巻く環境は, 従来からの課題である環境負荷低減, 軽量化, 燃費などに加え, 電動化, 安全性, 自動運転などに代表される革新技術への対応も求められ, より複雑化, 高度化している。日本金属学会では, 多くの材料を利用し日々進化している自動車技術に焦点を当て, その技術の革新を基盤から支える材料技術における最新の動向について, 日本鉄鋼協会, 自動車技術会と合同でシンポジウムを昨年度から企画してきた。本シンポジウムでは日本金属学会からの講演者に加え, 自動車技術会および日本鉄鋼協会から自動車および鉄鋼メーカーの製造関係者ならびに材料研究者も迎えて最新の研究動向を講演していただき, 自動車用材料技術の方向性を共有するとともに, 講演大会参加者の研究における一助となることを目的とする。

参加費: 本シンポジウムのみの参加者は無料

テキスト有料: 4,000円(消費税込)

## 参加申込要領

インターネットによる事前の大会参加申込みおよび懇親会参加の申込み：〈締切〉 8月27日(火)

大会参加申込み URL <https://www.jim.or.jp/convention/2019autum/>

予約申込締切後、大会参加証、講演概要ダウンロードについては、下記をご参照下さい。なお、領収書は、決済完了後に申込画面から各自印刷して下さい(WEB画面：講演大会 MyPage よりダウンロード)。8月28日以降は当日申込となります。当日申込をご希望の方は、会場受付にて直接お申込下さい。

### ◆大会参加費(講演概要ダウンロード権含む)※年会費とは異なります。

参加費・懇親会の消費税抜については、ホームページ(一覧表 PDF)をご参照下さい。

予約申込締切日	8月27日(火)(申込および入金期日)	
	会員資格	
	予約申込 (インターネット申込・事前支払い)	当日申込 (大会会場受付・現金払いのみ)
正員・維持員会社社員	10,000円	13,000円
学生員※	6,000円	7,000円
非会員 一般	24,000円	27,000円
非会員 学生(大学院生含む)	14,000円	16,000円

• お支払後の取消は、準備の都合上ご返金いたしかねますのでご了承下さい。

※ [学生員]：卒業予定変更等により会員種別に相違がある場合、事前に会員種別の変更手続きを行ってから、大会参加をお申込下さい。

※ 非会員の(有料)参加申込者には、1年間「まてりあ」を寄贈するとともに、会員価格でイベント等(講演大会以外)に参加できる特典を付与いたします。ただし特典は重複して付与いたしません。

### ◆懇親会費(消費税込み)

会場：ビューリティまきび「孔雀の間」(〒700-0907 岡山市北区下石井 2-6-41 ☎ 086-232-0511)

予約申込締切日	8月27日(火)(申込および入金期日)	
	種 別	
	予約申込 (インターネット申込・事前支払い)	当日申込 (懇親会会場受付・現金払いのみ)
一般	6,000円	8,000円
同伴者(ご夫人またはご主人)	4,000円	4,000円

• お支払後の取消は、準備の都合上ご返金いたしかねますのでご了承下さい。

• 懇親会ご参加申込の方には、9月上旬に懇親会参加証を郵送申し上げます。

### ◆支払方法

事前予約のお支払いはクレジットカードおよびコンビニ振込決済をご利用頂けます。また、入金後のご返金は致しかねます。8月27日(火)の入金日をもって予約申込完了となります。

### ◆参加証

事前予約された際の大会マイページにて「参加証引換券」をダウンロード印刷し、会期当日受付で参加証とお引換え下さい。

### ◆講演概要の WEB 公開

講演概要の公開日は、大会2週間前の2019年8月28日(水)です。事前予約をされ、参加費を納入された方には、概要公開日に概要ダウンロード用パスワードを配信いたします。当日申込の方へは受付で概要ダウンロード用パスワードをお渡しいたします。

特許関係のお手続きは、公開日までにお済ませ下さい。尚、公開日より1年後はフリーアクセスとなります。

### ◆講演概要集購入について

今大会より講演概要集 DVD は作成致しません。全講演概要は、本大会 Web サイトで公開をします。これまで概要集 DVD のみ購入をされていた方も、今回より通常の参加登録を頂き、概要の閲覧をお願いします。

#### 参加申込・問合せ先

〒980-8544 仙台市青葉区一番町 1-14-32 (公社)日本金属学会

☎ 022-223-3685 FAX 022-223-6312 E-mail: [annualm@jim.or.jp](mailto:annualm@jim.or.jp)

～ 皆様のご参加をお待ちしております。～

## 第17回 World Materials Day Award 募集

材料系国際学協会連携組織である IOMMMS(International Organization of Materials, Metals and Minerals Societies)では、国際連携活動の一環として、材料系分野のプレゼンス向上のため World Materials Day を制定し(毎年11月の最初の水曜日)、この日に世界同時に、「材料に関する知識とその重要性を社会や若者に啓発する活動」に貢献があった学生を顕彰しております。11月6日(水)に顕彰いたします。

応募締切: 2019年8月30日(金)

### 募集要項

#### 募集要項

1. 対象となる活動: 次の3部門で募集します。  
第1部門: 社会における材料の重要性を示すホームページ  
第2部門: 学園祭やキャンパスオープンデー等での該当する展示物, 作品等  
第3部門: その他(材料教育プロジェクト, 青少年対象の材料実験等)

#### 2. 応募資格者

日本在住の学部学生, 修士課程大学院生(グループも可).  
日本金属学会の会員でなくても応募できるが授賞決定後には会員になることが望ましい。

#### 3. 展示方法

日本金属学会秋期講演大会(2019年9月11~13日, 岡山大学)において, 応募作品を展示する。

- 展示場への作品の搬入および搬出は応募者が行う。
- 展示パネルと電源は準備しますがそれ以外の備品などは応募者各自が準備すること。

#### 4. 審査方法

- 審査員は理事会で決定し, 展示場で審査する。
- 審査の観点: 材料啓発活動への寄与度, 内容の新鮮さ, 表現力, 意欲などの個別項目を5点法で採点し総合点で審査する。

#### 5. 授賞

- ① World Materials Day Award :  
優秀作品1作品(または1グループ)  
副賞5万円

- ② 各部門賞: 各部門1作品に表彰, 賞状のみ。

贈呈は World Materials Day に受賞者の所属する機関で行う。

#### 6. 応募要領

- メールによる申込み記載事項(応募者名, 住所, 所属, 作品名, 応募分野・部門, 展示方法(web, 実物, 写真, ビデオ等), 展示必要スペース・重量などを明記して応募下さい。

**申し込み**: 下記アドレス宛にお申込下さい。

(応募様式はホームページからダウンロード下さい)

#### 7. 参考

昨年の受賞者による体験記事を「まてりあ」に紹介しておりますので, ご参考にして下さい(まてりあ58巻1号~3号)。

申込・問合せ 〒980-8544 仙台市青葉区一番町1-14-32  
(公社)日本金属学会 World Materials Day 募集係  
☎ 022-223-3685 FAX 022-223-6312  
E-mail: gaffair@jim.or.jp



## 第8回ランチョンセミナー開催のお知らせ

秋期講演大会の会期中に, 第8回ランチョンセミナーを開催します。このセミナーは, 参加者の皆様に講演大会の昼食時間を利用して昼食をとって頂きながら, 企業による最新の技術情報を聴講頂く企画です。参加無料です。皆様のご参加をお待ちしております。

主催 (公社)日本金属学会

企画 株式会社 明報社

日時 2019年9月12日(木) 昼休み時間

会場 岡山大学津島キャンパス 日本金属学会講演会場(詳細会場はプログラムをご確認ください。)

参加費 無料 昼食を無料提供いたします。

参加方法 9月11日(水)より参加券を「機器展示会場」にて配布致します。金属学会, または鉄鋼協会の大会参加証をご提示下さい。引換時にご希望のセミナー参加券をお渡しします。時間になりましたら, 参加券をご持参の上, セミナー会場までお越し下さい。

※予定数に達し次第, 配布は終了致します。

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

#### 参加企業

- (1) オックスフォード・インストゥルメンツ(株)
- (2) サーモフィッシャーサイエンティフィック(株)
- (3) TSL ソリューションズ
- (4) NISSHA エフアイエス(株)
- (5) ヴァーダー・サイエンティフィック(株)

日本金属学会・日本鉄鋼協会第9回女性会員のつどい



～特別企画「梅津先生を囲む会」開催～

毎年, 秋期講演大会期間中に女性会員の方々が気軽に意見交換できる「つどい」を行っておりますが, 今回は特別企画として, 優れた女性科学者に贈られる「猿橋賞」を受賞されました梅津理恵先生(東北大学金属材料研究所)を囲む会を開催します。

梅津先生の子育てしながらの研究生活など実体験談のトークを交え, 女性活躍の推進や働き方について, 本音トークを交わしましょう! 男女を問わず会員皆様のご参加をお待ちしております。

主催 日本金属学会・日本鉄鋼協会男女共同参画委員会

日時 2019年9月13日(金) 12:00~13:00

会場 岡山大学津島キャンパス一般教育棟D棟2階D23(金属学会会場)

参加資格 金属学会・鉄鋼協会参加者。(今回は男性会員もO.K.!)学生さん, 子連れもwelcome♪

参加申込 参加を希望される方は, 8月30日(金)までに申込書にご記入の上, お申込み下さい。当日の飛び入り参加も可能です。

期日までに参加申込みいただいた方には, 弁当を無料提供いたします。

8月31日以降の参加申込み・当日参加される方は, 弁当をご持参願います。

参加費 無料

#### 【男女共同参画委員会について】

日本金属学会と日本鉄鋼協会は, 2007年に男女共同参画合同委員会を設置し, 学会期間中の託児室合同設置, 若い会員向けのキャリアパスを考えるランチョンミーティング, 合同ホームページや育児・男女共同参画等の情報交換をするためのメーリングリストの開設を行うなど, 金属・材料分野における女性会員の活動を支援し, 女性会員の増強を目指しています。

問合せ・申込先 男女共同参画委員会係

E-mail: gaffair@jim.or.jp

☎ 022-223-3685

2019年度秋季 全国大学材料関係教室協議会  
講演会ご案内

日時 2019年9月13日(金)15:00~16:00  
場所 岡山大学 津島キャンパス内  
講演会 金属付加製造(AM)における材料特性制御のためのプロセス最適化設計  
大阪大学大学院工学研究科 教授 小泉雄一郎  
聴講料 無料

2019年秋期講演大会会期中の託児室設置のお知らせ

2019年秋期講演大会期間中、日本金属学会と日本鉄鋼協会が共同で託児室を開設いたします。利用ご希望の方はホームページ掲載の託児室利用規約をご確認の上「託児室利用申込書」に記入頂き、下記シッター会社へ直接お申し込み下さい。

■設置期間および利用時間(開始、終了時間は予定です)

設置期間	利用時間
2019年9月10日(火)	13:00~18:30
2019年9月11日(水)	8:30~17:30
2019年9月12日(木)	8:30~17:30
2019年9月13日(金)	8:30~16:30

■場所 岡山大学津島キャンパス内(お申し込みの方へ直接ご連絡いたします)

■対象・利用料金

0歳~2歳 お子様1人につき 2,000円/1日  
3歳~学童まで お子様1人につき 1,500円/1日  
※利用時間外の場合 500円/1時間の追加料金がかかります。  
※兄弟割引あり 下のお子さん(弟もしくは妹)は上記金額の半額  
利用者は利用当日、シッターの方(保育スタッフ)に利用料金をお支払い下さい。なお、申込締切後のキャンセルはキャンセル料を頂く場合がありますので、あらかじめご了承下さい。

■利用シッター会社: 働マイスタイル

■お申込み方法

- 日本金属学会・日本鉄鋼協会ホームページ託児室案内の託児室利用規約をご確認の上、「利用申込書」をダウンロードし、必要事項を記入の上、下記シッター会社へメールにてお申し込み下さい。
- 申込の際は、件名に「秋期講演大会の託児室予約」とご記入の上、利用申込書を添付して下さい。

※申込受領後3営業日以内に、働マイスタイルより返信メールをお送りします。

■申込期間: 2019年8月1日(木)~9月3日(火)16:00まで  
(定員に達し次第締め切らせて頂きます)

■申込・問合せ先: 働マイスタイル

保育サービス事業部マネージャー 家守悠奈(ケモリ)  
☎ 086-226-3043(代表) FAX 086-226-2614  
E-mail: ss@my-style.bz  
URL: <http://www.my-style.bz/> > <http://www.my-style.bz>

\*託児室利用規約・託児室利用申込者は、ホームページでダウンロードする。

2020年春期講演大会 公募シンポジウム  
テーマ提案募集

提案期限: 2019年8月30日(金) 期日厳守

会員の研究活動一層の活性化を図ることを目的として、春秋講演大会において会員からの提案テーマによるシンポジウム講演を実施いたしており、活況を呈しております。明年の秋期講演大会の公募シンポジウムテーマを募集いたします。次の要領をご参照の上、活発な討論が期待できる有益なテーマを積極的にご提案下さい。(提案様式はホームページよりダウンロードして下さい。)  
詳細 までりあ58巻7号408頁またはホームページ→講演大会→お知らせ

問合せ・照会先 E-mail: [stevent@jim.or.jp](mailto:stevent@jim.or.jp)  
☎ 022-223-3685 FAX 022-223-6312  
(公社)日本金属学会 講演大会委員会宛

2020年春期講演大会 企画シンポジウム  
テーマ募集

提案期限: 2019年8月30日(金) 期日厳守

最新の研究や技術を発信し、多くの研究者・技術者が集い交流する魅力ある講演大会を目指して、2017年秋期講演大会より企画シンポジウムを実施しています。従来の公募シンポジウムとは違い、企業の方に積極的に講演頂くため、講演概要原稿の提出は問いません。講演発表は、一般(公募)講演枠は設けず、依頼講演および基調講演に限定いたします。

次の要領をご参照の上、活発な討論が期待できる有益なテーマおよび他学会との連携企画等積極的にご提案下さい。(提案様式はホームページよりダウンロードして下さい)

詳細 までりあ58巻7号409頁またはホームページ→講演大会→お知らせ

問合せ・照会先 E-mail: [stevent@jim.or.jp](mailto:stevent@jim.or.jp)  
☎ 022-223-3685  
(公社)日本金属学会 講演大会委員会宛

公益社団法人日本金属学会  
「2020年度若手研究グループ」申請募集

若手および調査・研究事業を活性化することを狙いとして、若手主体の研究グループを2018年度より設置しております。若手研究グループの登録申請を希望される方は下記を参照の上、若手研究グループ申請用紙でお申込下さい。(申請用紙はホームページよりダウンロードして下さい)

申請締切: 2019年9月2日(月)

【実施要領】

- 概要  
・研究会又は新規研究テーマの開拓に向けた課題の抽出や目標の明確化のための調査の実施や構成員による討論会や会議の開催等を行なう。  
・目的・目標・活動計画を明確にし、機関誌等での活動報告を義務化した上で、活動費を支給する。
- 対象者  
・申請者および構成員は40才以下の研究者であること。申請代表者は正会員であること。  
・申請時には、構成員は5名以上であり、非会員を構成員とすることができるが、過半数は正会員であること。  
・構成員に最低1名は産業界のメンバーが入っていることが望ましい。  
・活動開始時には、非会員の構成員は会員になること。
- 活動費  
年間50万円を上限とする。(税金分を含む)



## 第43回公益社団法人日本金属学会技術開発賞 「新技術・新製品」記事募集

応募締切：2019年11月1日(金)

### [本賞の趣旨]

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

- (注1)本賞は、当該年度の日本金属学会会報「まてりあ」“新技術・新製品”の欄に掲載された記事が、選考対象となる。  
(注2)本賞受賞業績は、日本学術振興会卓越研究成果公開事業/卓越研究データベース「発明と発見のデジタル博物館」(<https://dbnst.nii.ac.jp/>)に登録され、広く周知されます。

### 技術開発賞募集要綱

#### 1. 賞の名称 第43回公益社団法人日本金属学会技術開発賞

#### 2. 対象となる業績と区分など

- 次の部門およびそれらにまたがるものとする。
  - ①材料基礎技術部門, ②素材製造・評価技術部門
  - ③素材応用技術部門, ④新素材開発部門, ⑤その他
- 評価は次の諸点について行われる。
  - ① 独創性
  - ② 技術, システムあるいは製品に関する有用な発明, 考案, 改良(有用性)
  - ③ 技術上の問題解決に役立ち, あるいは新製品の開拓をさらに促す可能性(将来性)
  - ④ 生産実績その他本賞に相当と思われる新技術・新製品の開発に優れた実績があるもの
- いわゆる「金属」のみでなく, その周辺の材料, たとえば燃料, 耐火物, 半導体, 複合材料などに関するものでもよい。
- 応募の時点で, 他の公募制の褒賞(発明協会賞, 大河内賞など)を受けていない斬新な主題であることが望ましい。

#### 3. 応募者の条件

- 1件につき**10名以内**のグループまたは個人  
直接開発に関与した技術者であって, 単なる職制上の管理者や代表者を含まないことが望ましい。
- 応募する時点で本会会員である必要はないが, 本会会員となることが望まれる。

#### 4. 選考

- 受賞者の選考は選考委員会で行う。選考委員は本会理事会が毎年選任し, 会長が委嘱する。
- 理事会が授賞該当無しと認めた場合は, その年度は授賞しない。
- 選考に当たって, 特許係争等が問題となった記事は授賞対象から除外する事がある。

#### 5. 授賞

- 2020年6月末日までに受賞者を内定する。
- 2020年秋期講演大会において授賞する。
- 受賞者には賞状(全員)と副賞(1賞牌)が贈呈される。

#### 6. 技術開発賞受賞記念講演

技術開発賞受賞をより意義深いものとするため, 受賞記念講演をお願いする。

第43回の受賞記念講演は2020年秋期講演大会(富山大学, 9月予定)の折りに行います。

#### 7. 受賞決定までの流れ

応募(11月1日締切)→査読→まてりあ掲載(59巻(2020年)1号から)→選考・受賞決定(2020年6月)→授賞(2020年9月)

### まてりあ「新技術・新製品」記事への応募の方法

#### 1. 応募・原稿締切

- (1) **2019年11月1日(金)**
- (2) 申し込み受理順を参考に会報「まてりあ」に第1号から第3号まで(予定)掲載する。

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

掲載記事が技術開発賞の選考対象となる。

掲載が決まった場合には, 240,000円+税(維持員会社社員の場合は210,000円+税)の投稿料を納入して下さい。

ただし, 掲載号1冊, 掲載記事のPDFファイル, 別刷100部を無料とする。

#### 3. 応募記事の記述に当たっては, 次の各項に留意されたい。

- (1) 社名, 商品名その他, 商業用呼称を用いることは差し支えないが, その内容が一般に理解できるよう説明を付すこと。
- (2) know-howに属する事項を記述する必要はないが, 新技術・新製品の特色などが理解できるようなデータを含める。
- (3) 現在までの実績, 経済性, 特許関係など「技術開発賞」選考に参考となる項目をなるべく含めること。
- (4) 特許関係等についての記述は十分に注意すること。

#### 4. 原稿作成について

- (1) 原稿は本文, 図(写真)および表を含めて**刷り上がり3頁以内(約6,700字)**とする。
- (2) 原稿は図・表の説明を含めて**全て日本語**とする。物理量の単位はなるべくSI単位系による。
- (3) 原稿はレイアウトの体裁にあわせて作成する。
- (4) **応募はホームページから申込下さい。**  
URL <https://gijutsu.jim.or.jp/entry>  
ホームページから直接入力→原稿をZip形式ファイルでアップロード→受理mailの発行→完了。

原稿ファイルの提出; 本文, 図表, レイアウトを別個に作成し, Zip形式でまとめる

- ① **レイアウト用紙**(ダウンロードできます)

- ② 図(写真)・表

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

・写真にはスケールを入れる。

・それぞれキャプションを付すること。

(記述は横軸・縦軸・説明も含めすべて日本語とする。)

・カラー原稿にはカラー印刷の有無を必ず明記する。

・カラー印刷は刷り1頁: 35,000円+税を著者が負担する。

#### 5. 本会では, まてりあに掲載の著作物の著作権を本会に帰属させていただきます。

#### 6. まてりあ一般記事の要領に従うこと。(まてりあ掲載「新技術・新製品」記事を参考にして下さい)

#### 7. 提出資料

- ① レイアウトされた原稿

- ② 本文テキスト

- ③ 図表原稿

◎①～③のデータファイルを上記応募ページでZip形式でアップロードする。

#### 8. 申込・問合せ

〒980-8544 仙台市青葉区一番町 1-14-32

(公社)日本金属学会各賞係

☎ 022-223-3685 E-mail: [award@jim.or.jp](mailto:award@jim.or.jp)

#### 9. 「新技術・新製品」記事の問合せ先

まてりあ係 E-mail: [materia@jim.or.jp](mailto:materia@jim.or.jp)

～とっておきの作品(一枚)を今年もご応募下さい～

光学顕微鏡写真だけでも応募できます

応募期間：2019年8月1日(木)～11月1日(金)

Web フォームによる申込です！！

1. 募集部門

◎下記4部門で行っております。

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

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

「写真賞部門」

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

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

2. 申込要領

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

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

【申込フォーム】

- ①応募部門：4部門の該当する部門を選択する。
- ②題目
- ③作品の説明
- ④学術的価値(新規性，波及効果について世界の情勢に照らして記入)

⑤技術的価値(試料，試料作製，写真処理において新規性，独自性について記入)

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

⑦材料名

⑧試料作製法

⑨観察手法

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

⑪応募者・共同研究者

⑫連絡先

【写真作品】

①写真データの解像度は，A2版サイズを前提に400dpi以上とする。

②写真データは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応募作品数の制限：無し。

⑥他学協会等の同様の賞を受賞していない作品であること。

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 金属組織写真賞係

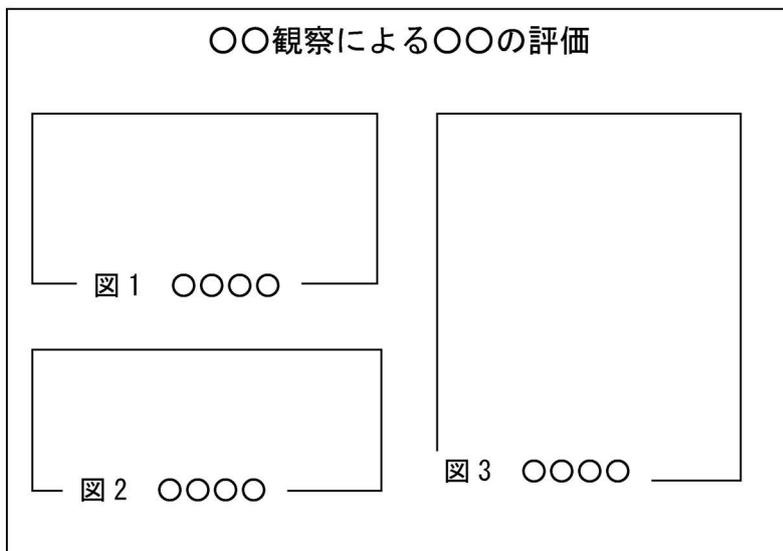
☎ 022-223-3685 FAX 022-223-6312

E-mail: award@jim.or.jp

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

【作成例】写真解像度：A2版サイズを前提に400dpi以上  
(写真見本)

(申込フォーム：入力項目)



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

## 研究会 No. 79

第3回金属・無機・有機材料の結晶方位解析と  
応用技術研究会 参加募集

学会 Website で講演募集しました「金属・無機・有機材料の結晶方位解析と応用技術研究会」を下記の通り開催いたします。

今回が本研究会の第3回の講演会となります。様々な結晶性材料の結晶方位にご興味のある方はふるってご参加下さい。なお、本研究会は軽金属学会「アルミニウムの再結晶集合組織形成モデル化研究部会」、日本鉄鋼協会フォーラム「多結晶材料の異方性の評価と予測技術」との共催により行います。

日時 2019年8月29日(木)～30日(金)

場所 産業技術総合研究所中部センター  
〒463-8560 名古屋市守山区下志段味ヶ洞2266-98  
<https://www.aist.go.jp/chubu/>

29日：名古屋駅前イノベーションハブ  
(<http://www.ekimae-innova.jp/>)

30日：中部センター 会議室

参加費 資料代として当日1,000円をお支払い下さい(学生は無料)。

懇親会 懇親会費：4,000円(参加者)

8月29日(木)17:30～(予定)

申込方法 氏名、所属、連絡先(☎・E-mail)を明記の上、8月19日(月)までに下記世話人宛にご連絡下さい。正式な参加申込書をお送りしますので、ご記入の上、ご返送願います。ただし、研究会のみのお申込(懇親会不参加)に限り、当日でも参加可能です。

申込先 E-mail にて高山までお送り下さい。

宇都宮大学 高山善匡

E-mail: takayama@cc.utsunomiya-u.ac.jp

## プログラム

## 8月29日(木)

13:30～13:35 開会の挨拶 代表世話人 宇都宮大工 高山善匡

13:35～14:35 (1) 【基調講演】物質科学と地震学をつなげるカンラン石の結晶方位解析  
名古屋大 道林克禎

14:35～15:00 (2) AZ31B マグネシウム合金に生ずる高温変形中の組織と集合組織の繰返し変化  
放送大 オストラバ工科大 ○福富洋志

元横浜国大工(院生) 朴 亨均, 釜慶大学校工科大 金 巻熙  
横浜国大工 岡安和人, 長谷川誠

横浜国大工 オストラバ工科大 梅澤 修

15:00～15:25 (3) CoNiCrAlY 合金の高温単軸圧縮変形における組織形成過程

横浜国大工 久保田侑治, 岩下麻依子, ○長谷川誠

— 休憩 —

15:40～16:05 (4) 3104アルミニウム合金冷間圧延板の深絞り・しごき成形による変形集合組織の発達

UACJ R&D セ ○小林亮平, 工藤智行, 田中宏樹

16:05～16:30 (5) 摩擦ロール表面処理後温度勾配焼鈍されたアルミニウムの表面層における優先方位形成

宇都宮大工 ○高山善匡, 荒川卓弥, 濱野龍一, 渡部英男

16:30～16:55 (6) 摩擦攪拌拡散接合されたアルミニウム/チタン箔材断面の結晶方位解析

宇都宮大工(院生) 児玉 崇, ○高山善匡, 渡部英男

17:30～19:30 懇親会(予定)

## 8月30日(金)

9:40～10:05 (7) C方位粒の成長に及ぼすA方位B方位粒の混在度の影響

— 修正 MC 法による結晶粒組織形成のシミュレーション — 東大名誉教授 伊藤邦夫

10:05～10:30 (8) 集合組織制御によるCu-30%Zn合金板の高ヤング率化

大阪府立大工 ○井上博史, (学生)井土史都

10:30～10:55 (9) 黄銅の変形誘起による微細結晶の形成機構と力学的特性への効果

古河電工 ○金子 洋, 藤原英道, 荻原吉章

— 休憩 —

11:10～11:35 (10) 超伝導加速空洞用高純度ニオブの加工・再結晶挙動, 組織制御と高成形性化

同志社大理工(院生) ○泉 拓水, 宮本博之, 湯浅元仁

11:35～12:00 (11) Fe-Mn-Si-C合金の拡散型変態における集合組織形成に及ぼす温度の影響

日本製鉄 ○田中泰明

12:00～12:25 (12) 鉄系材料における冷間圧延に伴う優先結晶方位の発達と粒内ひずみ分布

九大工 ○森川龍哉, 田中将己

— 昼食 —

13:25～13:50 (13) Fe-Mn 基合金の弾性異方性と集合組織

東北大 植村勇太, 打越雅仁, 篠田弘造

茨城大 小貫祐介, 佐藤成男, 東北大 ○鈴木 茂

13:50～14:15 (14) 鉄鋼のFCC-HCPマルテンサイト変態に伴うミクロひずみ形成過程の評価

茨城大理工 ○佐藤成男, 埜 健太

茨城大フロンティア応用原子科学研セ 小貫祐介, 星川晃範

淡路マテリア 大塚広明, 千葉 悠

東北大学多元研 植村勇太, 鈴木 茂

14:15～14:40 (15) 高温オーステナイトの動的再結晶のその場観察

茨城大フロンティア応用原子科学研セ ○小貫祐介

14:50～15:40 研究所内見学

15:50～16:00 ICOTOM19の準備状況と閉会の挨拶

世話人 大阪府大工 井上博史

## 研究会 No. 81

第2回 材料機能特性のアーキテクチャー研究会  
(@南紀白浜)開催のご案内

本研究会では材料のマルチスケールにわたる構造全体をアーキテクチャーとして捉え、ナノの原子配列を起源とする物性からマクロな連続体としての応答まで、機能特性の制御に必要な学理の再構築について議論を深めることを目的としています。構造用や機能性を問わず、多彩な材料を対象として、格子欠陥や異相界面など共通の組織因子にフォーカスした多角的視点からの議論を期待いたします。下記の要領で第2回研究会を開催いたしますので、奮ってご参加いただければと存じます。特に、博士課程の大学院生、ポスドク、企業等の若手研究者の皆さんにご発表いただくことを奨励いたします。多くの皆様にご参加いただけることを心よりお待ち申し上げます。

(研究会代表世話人 東工大 木村好里)

日時 2019年11月26日(火)～28日(木)

※26日は夕方から基調講演と交流会, 27日・28日は研究発表, 28日は昼頃に閉会の予定です。

場所 白浜温泉むさし (<http://www.yado-musashi.co.jp/>)

〒649-2211 和歌山県西牟婁郡白浜町868

(☎ 0739-43-0634)

**参加費** 一般 10,000円, 学生 5,000円(研究会参加費)  
**宿泊費** 夕・朝食込みで 12,000円/名・泊  
**定員** 40名  
**発表** 申込締切 **2019年10月11日(金)**  
 1件につき30分発表15分質疑応答(件数により変動あり)  
 大学院生, ポスドク, 企業等の若手研究者の方々は,  
 Distinguished Paper Award for Young Scientists の受賞  
 選考対象となります。  
**参加** 申込締切 **2019年10月11日(金)**  
**申込方法** 申込フォームをダウンロードして必要事項を記入の上,  
 下記世話人宛に E-mail にてお申込下さい。  
<http://j3www.materia.titech.ac.jp/mishima-kimura/architecture.html>  
**問合せ先** (世話人)中村篤智  
 名古屋大学 大学院工学研究科 物質科学専攻  
 ☎ 052-789-3366 E-mail: anaka@nagoya-u.jp

## 共催行事

### 京都大学 構造材料元素戦略拠点 (ESISM) 公開講演会 構造材料のブレークスルーをめざして ～わが国の基礎研究の挑戦～

共催: ISMA (新構造材料技術研究組合), RCSM (物質・材料研究機構 構造材料研究拠点), (公社)日本金属学会, (一社)日本鉄鋼協会, (一社)軽金属学会

現代社会では, 多種多様な構造材料が国民生活や経済基盤を支えている。わが国が長期的展望に立ち, 国際優位性を担保し続けるためには, 既存材料の改良だけでなく常識を覆すような材料開発が必要である。そのためには構造材料全般に適用できる基礎研究が不可欠である。京都大学構造材料元素戦略拠点 (ESISM) は2012年6月に活動を開始し, 基礎研究分野で多くの成果を上げてきた。本公開講演会では, その成果の一端を紹介する。

**日時** **2019年9月18日(水) 13:00-16:00**  
**場所** 京都アカデミアフォーラム  
 (〒100-6510 東京都千代田区丸の内 1-5-1 新丸の内ビルディング10階)  
**参加費** 無料  
**申込・問合せ** E-mail: [admin@esism.kyoto-u.ac.jp](mailto:admin@esism.kyoto-u.ac.jp)  
 (9月13日締切; 定員80名になり次第, 受付終了)  
 プログラム等の詳細 URL  
[http://esism.kyoto-u.ac.jp/ESISM\\_breakthrough\\_2019.html](http://esism.kyoto-u.ac.jp/ESISM_breakthrough_2019.html)



## 支部行事



### 第18回 日本金属学会東北支部研究発表 大会 講演募集要項 「21世紀を支える構造材料」

**テーマ** 金属材料をはじめとした構造材料の研究や産業は, 近代日本の社会的発展の基盤として, 重要な位置付けを担ってきました。しかし, 現在では IT 技術に見られる新規産業の急成長や深刻化する若年層の理科離れ問題等の社会背景の中で, これら基盤に対する継続性も危惧されています。本研究発表大会では, 「21世紀を支える構造材料」をテーマとして, これらの現状や展望を材料学の視点から考える機会となるよう, 会員の皆様から講演を募集致します。

**日時** **2019年11月16日(土) 13:00~18:00**  
**会場** 仙台高等専門学校 名取キャンパス(総合科学教育棟)  
 (〒981-1239 名取市愛島塩手字野田山48)

**参加費** 無料

**講演・参加申込要項**

**申込締切** **10月5日(金)**  
**募集講演** 頭発表(5件程度)およびポスター(30件程度)  
 ※口頭発表の申込件数が多数の場合, プログラム委員会で発表者を選考させていただきますのでご了承下さい。

**申込方法** 講演申し込みサイトより下記内容をご入力下さい。

○講演題目, ○希望講演(口頭発表・ポスターの別), ○氏名・所属(全員), ○連絡先電話番号, ○E-mail アドレス

**申し込み URL** <https://forms.gle/Sb3rEidZtQFgW5J1A>

**予稿原稿締切** **10月31日(木)**

**予稿原稿作成** A4版1頁(様式は日本金属学会2019年秋期講演大会に準じます)

以下の URL よりテンプレートをダウンロードして下さい。アップロードサイトならびにファイル名は講演申込時の返信メールで指定しておりますので, それに従って下さい。

<https://drive.google.com/file/d/1faPo7xSiObfByrr879krel3VssRfLJZ-/view?usp=sharing>

**口頭発表時間** 発表10分+質疑応答5分

**ポスターサイズ** A0(縦)を超えないこと

**懇親会 会費** 2,000円(学生1,000円)程度を予定しています。

小中学生も参加する予定なのでノンアルコールとなります。

**参加申込締切** **11月11日(月)**

参加のみの方は, 下記の参加申込 URL より申し込みをお願い致します。

<https://forms.gle/ijq62vbCPSFaLz2s5>

**問合せ先** 〒981-1239 名取市愛島塩手字野田山48

仙台高等専門学校 名取キャンパス  
 武田光博(副実行委員長)

☎ 022-381-0378

E-mail: [jim.tohoku2019@gmail.com](mailto:jim.tohoku2019@gmail.com)

〈公募類記事〉

無料掲載：募集人員，締切日，問合先のみ掲載。

有料掲載：1/4頁(700～800文字)程度。

・「までりあ」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：電子メールとFAX両方(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

◇千葉工業大学工学部先端材料工学科 教員公募◇

募集人員 准教授または助教 1名

所 属 工学部先端材料工学科

専門分野 エネルギー関連材料(燃料電池，水素エネルギー，二次電池，高温強度材料，極限材料等)の材料開発(材料シミュレーションを含む)

担当授業科目 エネルギー工学概論，先端材料工学実験，その他の先端材料に関わる専門科目等，大学院においては英語による授業を担当していただく場合があります。

応募資格 (1)博士の学位を有する方

(2)大学院の教育・研究指導を担当できる方

着任時期 2020年4月1日

提出書類 (A4版横書き)

\* (1)から(8)まで紙媒体とPDFを提出。なお、PDFについては各項目別のファイルを1枚のCD-Rにまとめて下さい。

(1)履歴書(写真貼付，連絡先に電話番号とE-mailアドレスを記入)

(2)研究業績リスト(学位論文，著書，有審査論文，国際会議プロシーディングス，解説，特許，外部研究費の実績，受賞歴とその内容，その他などに分類。また，分類ごとに最新のものから記載)

(3)学協会等ならびに社会における活動実績のリスト

(4)英語力を示す資料(民間の英語資格・英語検定のスコア，あるいは海外で英語を使った仕事の経験を示したのもの等)

(5)研究業績に関する概要(1,000字程度)

(6)教育に関する抱負(1,000字程度)

(7)今後の研究計画(1,000字程度)

(8)主要学術論文5編の別刷(コピー可)

応募締切り 2019年10月末日 消印有効

選考方法 第1次選考 書類審査

第2次選考 第1次選考合格者に対する面接審査

書類送付先 〒275-0016 千葉県習志野市津田沼2-17-1

千葉工業大学工学部先端材料工学科

学科長・教授 本保元次郎 宛

E-mail: genjiro.motoyasu@it-chiba.ac.jp

応募書類の封筒には「先端材料工学科教員応募書類」と朱書きの上，簡易書留で郵送して下さい。応募書類は原則として返却致しません。

問合せ先 先端材料工学科 教授 齋藤哲治

☎ 047-478-0315 E-mail: tetsuji.saito@it-chiba.ac.jp

備 考 採用後3年間は年度毎の雇用契約更新制とし，その間の教育研究業績・素行等に問題があると判断された場合には，雇用契約を更新しないことがあります。最終雇用契約期間満了時点で，特に問題なしと判断された場合には，雇用契約期間の定めがない専任教員に身分変更しま

す。雇用契約期間中は，雇用契約期間が定められていること以外，処遇等は雇用契約期間の定めのない専任教員と同一です。詳細はメール等でお問い合わせ下さい。

◇名古屋大学大学院 工学研究科 物質科学専攻 教員公募◇

公募人員 教授1名

所 属 物質科学専攻・ナノ解析物質設計学講座

専門分野 本専攻・ナノ解析物質設計学講座の1グループを主宰する教授を公募します。

先端的計測・分析科学に関する研究の展開，およびそれを活用した新物質(バルク，薄膜，表面・界面，またはナノ構造)の創成。当該分野を開拓，牽引する気概に富み，本専攻のさらなる発展に貢献できる人物を求めます。また，熱意と責任を持って大学院(物質科学専攻)および学部(物理工学科)の教育に携わるとともに，責任と協調性を持って大学組織の管理運営に当たる人物を望みます。

応募資格 博士の学位を有し，上記分野において優れた研究実績を有する方

着任時期 2020年4月1日以降のできるだけ早い時期

任 期 なし

提出書類 以下の書類を印刷物及びそれらのPDFを保存した電子媒体(USBメモリなど)で提出。

(1) 履歴書(写真貼付)

(2) 業績リスト(査読付き学術論文，総説・解説，著書，国際会議プロシーディングス，招待講演，特許，受賞などに分類)

(3) 主要論文別刷(5編以内)

(4) これまでの研究概要(2,000字程度)

(5) 今後の研究計画・教育についての抱負(2,000字程度)

(6) 外部資金の獲得状況とその他特記事項

(7) 意見を求め得る方2名の氏名と連絡先

応募締切 2019年8月30日(金)必着

書類送付先 〒464-8603 名古屋市中種区不老町

名古屋大学大学院工学研究科物質科学専攻 専攻長

浅野秀文

\* 封筒に「物質科学専攻教員応募書類在中」と朱書きし簡易書留で郵送のこと。

問 合 先 名古屋大学大学院 工学研究科 物質科学専攻 浅野秀文

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

☎ 052-789-3568

そ の 他

・女性研究者の応募を奨励します。

本学は業績(研究業績・教育業績・社会貢献・人物を含む)の評価において同等と認められた場合には，女性を積極的に採用します。

・提出書類に含まれる個人情報，選考・採用以外の目的には使用しません。

・応募書類は返却しません。

◇大阪大学 大学院工学研究科 教員公募◇

**公募人員** 教授 1 名  
**所 属** 大学院工学研究科マテリアル生産科学専攻材料物性学講座  
**勤務場所** 吹田キャンパス(大阪府吹田市山田丘 2-1)  
**専門分野** 量子材料物性学  
**職務内容** 教育・研究の内容  
 ハード・ソフトマテリアルにおける結晶構造や電子状態及びそれらの動的挙動と力学的・磁氣的・電氣的・光学的特性等との相関の理解と予測に基づいた新材料創製に資する学術的基盤を、第一原理計算をはじめとする各種計算科学と、量子力学、統計力学、熱力学、力学、電磁気学等の基礎学理と連成・融合して構築する。さらに、データ科学を駆使した所望物性を発現する新材料の探索や、先端的計測手法を用いた実験科学との連携等により材料工学の発展に寄与する教育と研究を行う。  
**担当科目**  
 (学 部)固体物性論, 統計力学など  
 (大学院)(博士前期)量子材料物性論など,  
 (博士後期)材料物性学特論など  
**応募資格** [必須条件]  
 (1)博士または Ph.D. の学位を有すること  
 (2)上記の「職務内容」に記載した専門分野に研究業績があり、大学院博士後期課程の研究指導を担当できること  
**採用日** 2020年1月1日(以降できるだけ早い日)  
**契約期間** 期間の定めなし  
**試用期間** 6 か月  
 勤務形態・給与及び手当・社会保険等の詳細はホームページを参照下さい。  
[http://www.osaka-u.ac.jp/ja/guide/information/joho/files\\_jinji/sk0006](http://www.osaka-u.ac.jp/ja/guide/information/joho/files_jinji/sk0006)  
**応募書類** 応募書類は英語または日本語で記述のこと  
 (1)履歴書(写真添付)  
 (2)業績リスト([1]査読付き研究論文(学術誌等に掲載), [2]国際会議論文, [3]総説・解説, [4]著書, [5]特許, [6]その他に分類し, [1]~[3]については全著者名・題目・雑誌名・巻号・発行年・ページを明記)

- (3)代表的な査読付き研究論文 5 編以内の別刷りまたはコピー  
 (4)所属学会・国際会議・社会における活動状況の説明書  
 (5)受賞とその内容・授与団体の説明書  
 (6)最近 5 年間の各種研究助成金の取得状況(代表・分担の別を明記)の説明書  
 (7)現在までの教育と研究の概要(A4 用紙 2 ページ以内)  
 (8)着任後の教育に関する抱負と研究に関する構想(A4 用紙 2 ページ以内)  
 (9)可能ならば、応募者についての参考意見を求めうる方 3 名とその連絡先リスト

**送付及び問合せ先**

〈書類送付先〉

〒565-0871 大阪府吹田市山田丘 2-1 国立大学法人大阪大学  
 大学院工学研究科マテリアル生産科学専攻 マテリアル科学コース  
 コース長 宇都宮 裕

※応募用紙は、原則として A4 用紙を使用すること

※封筒の表に、「教員応募書類」と朱書きすること。

※簡易書留にて送付すること。(応募書類は返却致しません。)

※なお、応募書類による個人情報、採用者の選考及び採用後の人事等の手続きを行う目的で利用するものであり、第三者に開示致しません。

〈問合せ先〉

宇都宮 裕 ☎ 06-6879-7503

E-mail: [uts@mat.eng.osaka-u.ac.jp](mailto:uts@mat.eng.osaka-u.ac.jp)

**応募期限** 日本時間にて 2019年8月16日 必着

**選考方法** 書類審査による第一次選考の後、必要に応じて面接あるいはセミナーをお願いすることがあります。

※書類審査不合格の連絡は致しませんのでご了承下さい。

※面接のための旅費及び宿泊費等は応募者負担とします。

**その他**

その他の労働条件については国立大学法人大阪大学教職員就業規則等によります。

[http://www.osaka-u.ac.jp/jp/guide/information/joho/kitei\\_shugyou.html](http://www.osaka-u.ac.jp/jp/guide/information/joho/kitei_shugyou.html)

大阪大学では教員・研究員の公募において、意欲のある女性研究者の積極的な応募を歓迎しています。

<http://www.danjo.osaka-u.ac.jp>

《訂正》

まてりあ58巻(2019)第4号224頁(会告)

下記の通り誤りがありましたので、訂正いたします。

**第78回功績賞推薦要領**

(正) 候補者の対象 「工業技術」部門を除いて受賞年度の2020年5月31日時点で45歳以下の方

(誤) 候補者の対象 「工業技術」部門を除いて受賞年度の2019年5月31日時点で45歳以下の方

日本金属学会誌掲載論文

Vol. 83, No. 8 (2019)

—論 文—

**Mg-Al-Zn-Gd 4 元系合金鑄造まま材における LPSO 相の生成挙動**  
正岡和貴 山田忠幸 堀内寿晃  
糸井貴臣 三浦誠司

**種々の初期集合組織を有する AZ31B および AZ80 マグネシウム合金の高温平面ひずみ圧縮変形下での組織と集合組織の形成機構**  
福富洋志 朴 亨均 金 卷煦 岡安和人  
長谷川 誠 梅澤 修

**Sn/Cu 2 層めっき上に発生するウイスカの長さ分布と成長速度に関する研究**  
坂本佳紀 津田和人 山崎 中 志村将臣 石原外美

**Mg-Al-Ca 合金における平盤状 C15-Al<sub>2</sub>Ca 析出相の粗大化過程**  
柏瀬早季子 畝川真梨子 久澤大夢 寺田芳弘

—ラピッドパブリケーション—

**アルミニウムリサイクル材を原料としたポーラスアルミニウム充填アルミニウムパイプの friction stir back extrusion による作製**  
半谷禎彦 小林龍聖 鈴木良祐 松原雅昭 吉川暢宏

Materials Transactions 掲載論文

Vol. 60, No. 8 (2019)

—Special Issue on Recent Advances in Indentation Technique—

**PREFACE** Takahito Ohmura and Nobuaki Sekido

**The Love Equation for the Normal Loading of a Rigid Cone on an Elastic Half-Space and a Recent Modification: A Review (Review)**  
M. Munawar Chaudhri

**Nano-Indentation Measurement for Heat Resistant Alloys at Elevated Temperatures in Inert Atmosphere**  
Jovana Ruzic, Ikumu Watanabe,  
Kenta Goto and Takahito Ohmura

**Application of Modified Optical Indentation Microscopy as New In Situ Indentation Method**  
Takahiro Mineta, Seiji Miura, Kazuhiko Oka and  
Tatsuya Miyajima

**Micro-Photoelastic Evaluation of Indentation-Induced Stress in Glass**  
Keisuke Asai, Satoshi Yoshida, Akihiro Yamada,  
Jun Matsuoka, Andrei Errapart and Charles R. Kurkjian

**In-Situ Raman Measurements of Silicate Glasses during Vickers Indentation**  
Satoshi Yoshida, Thu Huyen Nguyen, Akihiro Yamada and  
Jun Matsuoka

**Raman Spectroscopy through the Indenter Working as an Optical Objective**  
Igor I. Maslenikov,  
Vladimir N. Reshetov and Alexey S. Useinov

**A Plastic Boundary Layer in Wedge Indentation of Aluminum**  
Tatsuya Sugihara, Anirudh Udupa and  
Koushik Viswanathan

**Direct In Situ Observation of Deformation Modes in Wedge Indentation of Metals**  
Anirudh Udupa, Narayan Sundaram, Tatsuya Sugihara and  
Srinivasan Chandrasekar

**Determination of the Yield Radius and Yield Stress in 2198-T3 Aluminum Alloy by Means of the Dual-Scale Instrumented Indentation Test**  
Renato Pero, Giovanni Maizza, Frediano De Marco,  
Piero De Fazio, Roberto Montanari and Takahito Ohmura

—Special Issue on Severe Plastic Deformation for Nanomaterials with Advanced Functionality—  
**Texture Evolution in Severe Plastic Deformation Processes (Review)**  
Satyam Suwas and Soumita Mondal

**Hydrostatic Compression Effects on Fifth-Group Element Superconductors V, Nb, and Ta Subjected to High-Pressure Torsion (Overview)**  
Masaki Mito, Shun Shigeoka, Hirotaka Kondo,  
Nozomi Noumi, Yuichiro Kitamura, Kunihiko Irie,  
Kazuma Nakamura, Seishi Takagi, Hiroyuki Deguchi,  
Takayuki Tajiri, Mamoru Ishizuka, Terukazu Nishizaki,  
Kaveh Edalati and Zenji Horita

**A Comparative Study of Hardness in Nanostructured Cu-Zn, Cu-Si and Cu-Ni Solid-Solution Alloys Processed by Severe Plastic Deformation**  
Takahiro Kunimine and Minami Watanabe

**Phase Transformations Induced by Severe Plastic Deformation (Review)**  
Andrey Mazilkin, Boris Straumal, Askar Kilmametov,  
Petr Straumal and Brigitte Baretzky

**The Effect of Severe Plastic Deformations on Phase Transitions and Structure of Solids (Overview)**  
Vladimir D. Blank, Mikhail Yu. Popov and  
Boris A. Kulnitskiy

**The Characteristics of Creep in Metallic Materials Processed by Severe Plastic Deformation (Overview)**  
Petr Kral, Jiri Dvorak, Vaclav Sklenicka  
and Terence G. Langdon

**Formation Mechanism of Ultrafine Grained Microstructures: Various Possibilities for Fabricating Bulk Nanostructured Metals and Alloys (Overview)**  
Nobuhiro Tsuji, Reza Gholizadeh, Rintaro Ueji,  
Naoya Kamikawa, Lijia Zhao, Yanzhong Tian,  
Yu Bai and Akinobu Shibata

**The Development of Vacancies during Severe Plastic Deformation (Overview)**  
J. Čížek, M. Janeček, T. Vlasák, B. Smola, O. Melikhova,  
R.K. Islamgaliev and S.V. Dobatkin

**Progress in Mechanical Properties of Gradient Structured Metallic Materials Induced by Surface Mechanical Attrition Treatment (Overview)**

Xu Yang, Hongjiang Pan, Jinxu Zhang, Hongliang Gao, Baipo Shu, Yulan Gong and Xinkun Zhu

**Historical Studies by Polish Scientist on Ultrafine-Grained Materials by Severe Plastic Deformation (Overview)**

Krzysztof Bryła and Kaveh Edalati

**Hydrogen Storage in Mg and Mg-Based Alloys and Composites Processed by Severe Plastic Deformation (Review)**

D.R. Leiva, A.M. Jorge, Jr., T.T. Ishikawa and W.J. Botta

**Effect of Cold Rolling on Metal Hydrides (Review)**

Jacques Huot and Manuel Tounsignat

—Regular Article—

**Materials Physics**

**An Enhanced Electrical Steel Sheet Model Integrating the Effects of Rotating Magnetic Properties and DC-Biased Field**

Minxia Shi, Habibur Rehman, Aici Qiu and Junhao Li

**Microstructure of Materials**

**Phase Transformation Control of Powder Metallurgy Super-Elastic Ti-Ni Alloy by Adding Co Element**

Tomoki Eda, Anak Khantachawana, Junko Umeda and Katsuyoshi Kondoh

**Identification and Visualization of Fine Precipitates in a Cr-Mo Steel Based on SEM Contrast**

Takaya Nakamura, Kaoru Sato, Masayasu Nagoshi, Kenji Ogata, Yasuko Kitahara and Tsuguo Sakurada

**Mechanics of Materials**

**Effects of Cerium Addition on Non-basal Slip in Magnesium Single Crystals**

Kosuke Hayashi, Masayuki Tsushida, Hiromoto Kitahara and Shinji Ando

**Effects of Cerium Addition on Fatigue Fracture Behavior of Magnesium Single Crystals**

Kento Inokuchi, Masayuki Tsushida, Hiromoto Kitahara and Shinji Ando

**Development of Ultra-Low Friction Coefficient Films and Their Effect on the Biocompatibility of Biomedical Steel**

Alexis Chino-Ulloa, Mario Hernandez-Alejandro, José L. Castrejón-Flores, Moisés Cabrera-González, Itzel P. Torres-Avila, Julio C. Velázquez, Pablo A. Ruiz-Trabolsi and Enrique Hernández-Sánchez

**Effect of Plastic Deformation on Hydrogen Diffusion Behavior of Martensitic Steel in Hydrogen Absorption Environment**

Hye-Jin Kim, Hyun-Yeong Jung, Tae-Woo Kwon and Yoo-Dong Chung

**Materials Chemistry**

**Evaluation of the Photocatalytic Performance of Nanocomposite Material of TiO<sub>2</sub> and Nanoporous Gold Prepared by Simple Processing Method**

Satoko Kuwano-Nakatani, Joji Fujiwara, Yuta Fujimoto, Yuma Hosoya, Kazuki Obata, Atsushi Horiuchi, Kohei Yoshida, Takuya Ando, Kenta Ohba and Youn-Hee Han

**Improving Corrosion Resistance Properties of Nickel-Aluminum Bronze (NAB) Alloys via Shot Peening Treatment**

Yuting Lv, Bingjie Zhao, Hongbin Zhang, Chunjian Su, Bin Nie, Rui Wang, Lianmin Cao and Fuyan Lyu

**Effect of Active Screen Plasma Nitriding on Fatigue Characteristics of Austenitic Stainless Steel**

Yasuhiro Hoshiyama, Rei Takatera and Tomoki Maruoka

**Materials Processing**

**Center Segregation and Cross-Hatched Surface Pattern of Vertical-Type High-Speed Twin-Roll Cast Al-Si-Mg Alloy Strip Formed by Wide Rolls**

Tomoo Goda and Shinji Kumai

**Estimation of Solid Solution Si Concentration in Al-Si Alloy Castings Based on Dimensional Change during Heat Treatment**

Jun Yaokawa, Yusuke Yagi, Yoshio Sugiyama, Shuxin Dong and Yasushi Iwata

**Electromagnetic Separation of Primary Crystallized Al<sub>3</sub>Fe<sub>4</sub> Phase during Cooling Process of Molten Al-10%Fe Alloy**

Yosuke Tamura, Kentaro Mizuno and Kenzo Takahashi

**High-Entropy Alloys with Hexagonal Close-Packed Structure in Ir<sub>26</sub>Mo<sub>20</sub>Rh<sub>22.5</sub>Ru<sub>20</sub>W<sub>11.5</sub> and Ir<sub>25.5</sub>Mo<sub>20</sub>Rh<sub>20</sub>Ru<sub>25</sub>W<sub>9.5</sub> Alloys Designed by Sandwich Strategy for the Valence Electron Concentration of Constituent Elements in the Periodic Chart**

Akira Takeuchi, Takeshi Wada and Hidemi Kato

**Brazing of Mn-Cu Alloy and 430 Stainless Steel with Cu-34Mn-6Ni-10Sn Filler Metal**

Jing Yang, Yonggang Xu, Song Zhang and Mingyue Zhang

**Engineering Materials and Their Applications**

**Development of High-Strength Bolt Material of Al-Mg-Si Alloy by ECAP and Various Aging Treatments**

Tomoyasu Obata, Yongpeng Tang, Hideaki Iwaoka, Shoichi Hirokawa, Keiki Mouri and Masahiko Shimoda

**Effect of Copper Addition on Precipitation Behavior near Grain Boundary in Al-Zn-Mg Alloy**

Kenji Matsuda, Toru Yasumoto, Arteris Bendo, Taiki Tsuchiya, Seungwon Lee, Katsuhiko Nishimura, Norio Nunomura, Calin D. Marioara, Adrian Levik, Randi Holmestad, Hiroyuki Toda, Masatake Yamaguchi, Ken-ichi Ikeda, Tomoyuki Homma and Susumu Ikeno

**Coercivity of Pulverized ThMn<sub>12</sub> Compounds with a Limited Amount of  $\alpha$ -(Fe,Co) Phase**

Tomoko Kuno, Shunji Suzuki, Kimiko Urushibata, Kurima Kobayashi and Satoshi Sugimoto

**Structural Analysis of 65ZnO-30P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>-5Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub> Invert Glass Using X-ray Photoelectron Spectroscopy**

Patricia S. Sato, Toshiki Watanabe, Hirotaka Maeda, Akiko Obata and Toshihiro Kasuga

**Adsorption of RGD Tripeptide on Au (111) Surface**

Soichiro Deguchi, Masataka Hakamada and Mamoru Mabuchi

**Effects of Multiwalled Carbon Nanotubes on Phase Transformation and Dielectric Properties in Poly(Vinylidene Fluoride-Hexafluoropropylene) Nanocomposites**

Xiaojia Zhao and Chaoqun Li

Announcement

# 新 入 会 員

(2019年5月21日～2019年6月20日)

## 正 員

昆 竜 矢 産業技術総合研究所	朴 ガンヒ POSCO JAPAN 株式会社	吉 田 征 弘 秋田大学
佐 藤 勝 彦 秋田大学	増 村 拓 朗 九州大学	吉 成 彰 裕 信越化学工業株式会社
佐 藤 秀 雄 株式会社アセス	丸 山 晋 平 大阪冶金興業株式会社	李 鴻 美 名古屋大学
佐 山 明 TPR 株式会社	山 崎 理 央 愛知製鋼株式会社	

## 学 生 員

相 川 宗 也 名古屋大学	近 藤 佑 亮 名古屋工業大学	橋 本 晏 奈 群馬大学
青 木 佑 真 九州大学大学院	櫻 井 尚 之 信州大学	濱 崎 恭 考 東京工業大学
Amit Patel 宇宙航空研究開発機構	佐 藤 雄 河 芝浦工業大学	樋 地 あ かり 東京医科歯科大学
飯 村 龍 太 郎 日本大学	塩 入 広 斗 新潟工科大学	平 岩 健 聖 北海道大学
石 川 航 平 早稲田大学	朱 天 齐 名古屋大学	平 野 主 馬 北海道大学
伊 奈 大 輝 大阪府立大学	杉 本 大 成 芝浦工業大学	藤 田 裕 史 東北学院大学
犬 伏 晴 紀 北海道大学	鈴 木 陸 群馬大学	増 田 行 矩 東北大学
大 西 初 美 香川大学	武 輪 裕 之 東海大学	松 井 拓 斗 関西大学
岡 田 倫 足利大学	田 中 拓 真 群馬大学	見 鳥 友 樹 兵庫県立大学
居 石 一 朗 長岡技術科学大学	露 崎 達 也 東京医科歯科大学	村 田 敬 早稲田大学
甲 斐 崇 人 信州大学大学院	土 井 康 平 大阪大学	森 川 智 仁 茨城大学
角 松 惟 史 大阪大学	長 澤 遼 長岡技術科学大学	柳 瀬 裕 太 香川大学
草 竹 佑 哉 長岡技術科学大学	中 野 敬 太 京都大学	吉 川 友 貴 兵庫県立大学
熊 本 光 希 群馬大学	西 岡 亮 平 大阪大学	吉 村 卓 磨 京都大学
小 久 保 亮 汰 茨城大学	錦 織 司 東北大学	和 田 浩 樹 早稲田大学
小 鯖 匠 東北大学	西 脇 賢 茨城大学	和 田 恭 学 兵庫県立大学
後 藤 大 輔 北海道大学	芳 賀 大 泰 室蘭工業大学	

## 外国一般会員

BRANDENBURG JANN-ERIK 熊本大学 Xue Yunlong Shaanxi University of Science and Technology LIU Yanxing 東北大学

## 外国学生会員

MULYAWAN ADE 大阪大学	張 子 瑶 九州大学	王 寧 広島大学
柯 雨 蛟 広島大学	何 倩 京都大学	
SONG YUXIN 大阪大学	馬 氷 総合研究大学院大学	



## まてりあ 第58巻 第9号 予告

### ミニ特集「SIP-MI プロジェクト」

SIP-MI プロジェクト, これまでとこれから ..... 出村雅彦  
 SIP-MI プロジェクトにおける組織予測システムの開発  
 ..... 小山敏幸他  
 SIP-MI プロジェクトにおける性能予測システムの開発  
 ..... 榎 学  
 SIP-MI プロジェクトにおける特性空間分析システムの開発  
 ..... 井上純哉他  
 SIP-MI プロジェクトにおける統合システムの開発  
 ..... 源 聡他

### <一般>

[入門講座] 放射光による工業材料評価  
 3. 放射光による X 線分光 ..... 廣沢一郎  
 —他—

(都合により変更になる場合がございます)

◎下記シンポジウムを開催いたします。皆様のご参加をお待ちしております。

New !!



## ～ハイエントロピー合金の材料科学～

〔協賛予定〕(一社)日本鉄鋼協会, (一社)軽金属学会, (一社)日本チタン協会, (一社)日本機械学会, (一社)日本塑性加工学会,  
(公社)日本材料学会

近年、ハイエントロピー合金と呼ばれる新たな範疇の合金に注目が集まっている。従来合金では達成し得ない強度、延性などに優れた新たな合金開発への期待が高まり、世界各地で立て続けに多数の国際会議が開催されるほど世界的に隆盛な研究分野と成っている。本シンポジウムでは、ハイエントロピー合金に関する最新の研究開発動向を紹介するとともに、新たな用途開拓についても議論を深める。

(企画世話人 京都大 乾 晴行 京都大 辻 伸泰 大阪大 尾方成信 名古屋大 小山敏幸 東北大 加藤秀実 東北大 古原 忠)

日 時 2019年11月11日(月)9:30~17:00

場 所 エッサム神田ホール2号館401(〒101-0047 東京都千代田区内神田3-24-5)

募集定員 120名

受講料・受講資格(テキスト代含む・税込)

受講資格	(テキスト代含む・税込)	
	事前申込	当日申込
正員	10,000円	12,000円
学生	5,000円	6,000円
非会員	15,000円	18,000円

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

申込要領 E-mailでmeeting@jim.or.jp宛お申し込み下さい。申込項目は以下のとおりです。

- ① 送信 subjectに「シンポジウムハイエントロピー合金」と記入,
- ② 氏名・年齢,
- ③ 会員・非会員・学生の区別(本会会員は会員番号も)
- ④ 勤務先・所属,
- ⑤ 通信先住所(テキスト等送付先と電話番号)申込受理確認のE-mailを返信します。

事前申込締切 2019年10月28日(月)着信

テキストの送付 事前に申し込まれた方には、開催10日前までにテキストおよび参加証をお送りいたします。

受講料払込方法 お申込受理後、請求書を送付いたします。

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 シンポジウム参加係

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

プログラム

9:30~9:40 挨拶

9:40~10:20 (1)ハイエントロピー合金研究の現状と展望

京都大 乾 晴行

10:20~11:00 (2)平均価電子濃度による高エントロピー合金の構造制御

東北大 竹内 章

— 休憩 —

11:10~11:50 (3)ハイエントロピー合金における拡散と熱力学

名古屋大 小山敏幸

11:50~12:30 (4)ハイエントロピー合金ナノ粒子の作製と触媒機能への展開

京都大 北川 宏

— 昼 食 —

14:00~14:40 (5)ハイエントロピー合金の力学特性のモデリングとシミュレーション

大阪大 尾方成信

14:40~15:20 (6)加工熱処理によるハイエントロピー合金のナノ/マイクロ組織制御

京都大 辻 伸泰

— 休憩 —

15:30~16:10 (7)強加工と相変態によるハイエントロピー合金の組織制御

物材機構 土谷浩一

16:10~16:50 (8)電子ビーム積層造形によって作製されたハイエントロピー合金の組織と強度

東北大 千葉晶彦

16:50~17:00 挨拶

(各講義には10分程度の質疑応答時間を含む)

## ～陽に陰にオリンピック・パラリンピックを支える材料工学～

日本金属学会「セミナー・シンポジウム委員会」企画

[協賛予定] (一社)日本鉄鋼協会, (一社)軽金属学会, (一社)日本機械学会, (一社)日本計算工学会, 日本学術振興会第176委員会

ご存知のように, 2020年に東京オリンピック・パラリンピックが, 我が国で開催される. スポーツの祭典であるが, 各種素材の最先端を競う場ともみることができる. 特に金属材料は, 歴史的に現在にいたるまで, 陽に陰にオリンピック・パラリンピックを支えてきた材料の一つであろう.

そこで本シンポジウムでは, オリンピック・パラリンピックを, 金属材料を中心とした材料工学の観点からとらえ, 両者の関わりをあらためて問い直し, スポーツ関連材料分野における金属材料の未来の可能性について, 様々な視点から討論を行い, 当該分野が今後進むべき方向性について理解を深めたい. (企画世話人 愛知教育大 北村一浩)

**日 時** 2019年9月20日(金)13:10~17:00

**場 所** エッサム神田ホール1号館301号室(〒101-0045 東京都千代田区神田鍛冶町3-2-2)

**募集定員** 70名

**受講料・受講資格**(テキスト代含む・税込 [半日企画の料金]):

受講資格	(テキスト代含む・税込)	
	事前申込	当日申込
正員	8,000円	10,000円
学生	4,000円	5,000円
非会員	12,000円	15,000円

(本会前維持員会社社員, 協賛学協会会員は会員扱い, 学生は会員, 非会員の区別なし)

**申込要領** E-mail で meeting@jim.or.jp 宛お申し込み下さい. 申込項目は以下のとおりです.

- ① 送信 subject に「陽に陰にオリンピック・パラリンピックを支える材料工学」と記入, ② 氏名, ③ 会員・非会員・学生の区別(本会会員は会員番号も)④ 勤務先・所属, ⑤ 通信先住所(テキスト等送付先と電話番号)を記入の上送信下さい. 申込受理確認のE-mail を返信します.

**事前申込締切** 2019年9月2日(月)着信

**テキストの送付** 事前に申し込まれた方には, 開催10日前までに参加証等を関係資料とともにお送りいたします.

**受講料払込方法** お申込受理後, 請求書を送付いたします.

**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 シンポジウム参加係

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

**プログラム**

13:10~13:15 趣旨説明

愛教大 北村一浩

13:15~13:55 持続可能社会へのレガシーとしての都市鉱山メダル

物質・材料研究機構 原田幸明

13:55~14:35 ゴルフと金属学・チタンの進化

大同特殊鋼 鷲見芳紀

— 休 憩 —

14:50~15:30 スケート競技に貢献する材料科学

物質・材料研究機構 村上秀之

15:30~16:10 材料から眺めたオリンピック・パラリンピック

名大 小山敏幸

16:10~16:50 パラリンピックへのスポーツ工学の貢献

東工大 中島 求

16:50~17:00 総合討論

(各講義には10分程度の質疑応答時間を含む)

～ 皆様のご参加をお待ちしております. ～

# 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
<b>2019年8月</b>				
5	日本学術会議公開シンポジウム「SDGsのための資源・材料の循環使用に関するシンポジウム」(東京)	日本学術会議 材料工学委員会他	TEL 03-3402-0541 info@mmij.or.jp https://www.mmij.or.jp/events/6142.html	7.26
7	機械の日・機械週間記念行事(東京)	日本機械学会	TEL 03-5360-3512 kikainohi@jsme.or.jp https://www.jsme.or.jp/event_project/machine-day/	
9	表面分析実践講座2019～実践!最新走査電子顕微鏡実習 実際の作業を通して身につける最新技術～(東京)	日本表面真空学会	TEL 03-3812-0266 office@jvss.jp https://www.jvss.jp	7.26
18～22	国際会議(PRICM-10)(中国西安)(57-8号405頁)	中国金属学会	pricm10@csm.org.cn http://www.pricm10.com/	
19	第26回高校課題研究フォーラム「高校のできるセラミックス実験」(日大)	日本セラミックス協会	TEL 03-3362-5231 cersj-kyoiku@cersj.org http://www.ceramic.or.jp/ikyoku/kadai_kenkyu_forum.html	定員 20名
20～22	第235回塑性加工技術セミナー「はじめての塑性力学(準備編・基礎編・応用編)」(東京)	日本塑性加工学会	http://www.jstp.or.jp	定員 70名
22	2019年茨城講演会(茨城大)	日本機械学会関東支部	TEL 0294-38-5046 ibakouen@ml.ibaraki.ac.jp	論文 7.1
22～23	2019年度「デジタルラジオグラフィに関する技術講習会」(大阪)	日本溶接協会	TEL 03-5823-6324 http://www.jwes.or.jp/	定員 48名
22～23	第11回「役に立つ真空技術入門講座」(大阪電気通信大)	日本表面真空学会 関西支部	TEL 06-6879-7778 office@jvss-kansai.jp https://www.jvss.jp/	定員 100名
26～27	2019年度「デジタルラジオグラフィに関する技術講習会」(東京)	日本溶接協会	TEL 03-5823-6324 http://www.jwes.or.jp/	定員 48名
26～27	2019年度 JCOM 若手シンポジウム(和歌山)	日本材料学会	TEL 075-761-5321 JCOM2019wakate@jsms.jp http://compo.jsms.jp/	
27～30	第59回真空夏季大学(掛川)	日本表面真空学会	TEL 03-3812-0266 office@jvss.jp https://www.jvss.jp/	定員 100名
29～30	第49回初心者のための有限要素法講習会(演習付き)(京都)	日本材料学会	TEL 075-761-5321 jimu@jsms.jp http://www.jsms.jp/	7.19
29～30	第3回金属・無機・有機材料の結晶方位解析と応用技術研究会(名古屋)(本号474頁)	日本金属学会 研究会 No. 79	<b>takayama@cc.utsunomiya-u.ac.jp</b>	<b>8.19</b>
30～31	SPring-8 シンポジウム2019(岡山)	SPring-8 ユーザー協同体 (SPRUC)他	TEL 0791-58-2785 sp8sympo2019@spring8.or.jp http://www.spring8.or.jp/ja/science/meetings/2019/sp8sympo2019/	
<b>2019年9月</b>				
1～3	日本実験力学学会2019年度年次講演会(徳島大)	日本実験力学学会	TEL 088-656-7387 JSEM2019@ml.tokushima-u.ac.jp http://www.jsem.jp/event/Annual19/index.html	
2～3	2019電気化学セミナー3「初心者のための電気化学測定法一実習編」(東工大)	電気化学学会	TEL 03-3234-4213 ecsj@electrochem.jp https://electrochem.jp/post_seminar/2842/	8.19
2～4	第16回日本熱電学会学術講演会(名工大)	日本熱電学会	http://www.thermoelectrics.jp/conference.html	
2～4	第22回 XAFS 討論会(京大)	日本 XAFS 研究会	TEL 075-753-6850 yamamoto.kentaro.4e@kyoto-u.ac.jp http://www.moleng.kyoto-u.ac.jp/~moleng_04/event/jxafs22/	
3～4	第34回初心者のための疲労設計講習会(東京都市大)	日本材料学会	TEL 075-761-5321 jimu@jsms.jp http://www.jsms.jp	定員 60名
3～4	第35回分析電子顕微鏡討論会(幕張メッセ)	日本顕微鏡学会	TEL 011-706-6768 bunseki@eng.hokudai.ac.jp http://labs.eng.hokudai.ac.jp/labo/LIFM/bunseki/	事前参加 8.30
3～4	第236回塑性加工技術セミナー「伸線(引抜き)加工の基礎技術」(関西大)	日本塑性加工学会	http://www.jstp.or.jp	定員 200名
4	2019年度 日本金属学会関東支部 講習会「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—」(東大)(7号413頁)	日本金属学会関東支部	<b>nakaya@wood3-staff.t.u-tokyo.ac.jp</b>	事前 <b>8.19</b>
4～6	第162回塑性加工学講座「有限要素法入門セミナー」(東京)	日本塑性加工学会	http://www.jstp.or.jp	定員 30名
4～6	2019年度工学教育研究講演会(東北大)	日本工学教育協会	TEL 03-5442-1021 kawakami@jsee.or.jp https://www.jsee.or.jp/	
5～6	第41回安全工学セミナー物質危険性講座(東京)	安全工学会	TEL 03-6206-2840 jsse-2004@nifty.com http://www.jsse.or.jp	
5～6	第44回複合材料シンポジウム(岡山理科大)	日本複合材料学会	TEL 03-5981-6011 jscm@asas-mail.jp https://www.jscm.gr.jp/	
8～10	第13回インキュベーションホール(御殿場)	応用物理学会プラズマエレクトロニクス分科会	TEL 042-677-2749 s-uchida@tmu.ac.jp http://annex.jsap.or.jp/plasma/PE_files/PE_SS_2019	定員 60名

開催日	名称・開催地・掲載号	主催	問合せ先	締切
10~12	日本計算工学会サマースクール2019 in 東京「非線形有限要素法による弾塑性解析の理論と実践」(中央大)	日本計算工学会	TEL 022-795-7417 nonlinearfem@grp.tohoku.ac.jp http://msd.civil.tohoku.ac.jp/ nonlinearfem2019/	8.30
11~13	日本金属学会秋期講演大会(岡山大学津島キャンパス)(岡山)(本号467頁)	日本金属学会	TEL 022-223-3685 FAX 022-223-6312 annualm@jim.or.jp	参加 8.27
12	第8回ランチョンセミナー(岡山大)(本号469頁)	日本金属学会	TEL 022-223-3685 stevent@jim.or.jp	
12~14	第21回日本感性工学会大会(芝浦工大)	日本感性工学会	TEL 03-3666-8000 jske@jske.org https://www.jske.org/taikai/jske21	
13	第87回レアメタル研究会(東大生産技研)	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	
13	日本金属学会・日本鉄鋼協会第9回女性会員のつどい(岡山大)(本号469頁)	日本金属学会	TEL 022-223-3685 stevent@jim.or.jp	
13	2019年度秋季 全国大学材料関係教室協議会講演会(岡山大)(本号470頁)	全国大学材料関係 教室協議会		
16~18	第32回計算力学講演会(東洋大)	日本機械学会	https://www.jsme.or.jp/	
17~21	国際トライボロジー会議2019 仙台(仙台)	日本トライボロ ジー学会	TEL 022-722-1311 itc2019@convention.co.jp http://www.tribology.jp/	
18	京都大学構造材料元素戦略拠点公開講演会「構造材料のブレークスルーをめざして ~わが国の基礎研究の挑戦~」(東京)(本号475頁)	京都大学構造材料 元素戦略拠点 (ESISM)	TEL 077-753-5573 admin@esism.kyoto-u.ac.jp http://esism.kyoto-u.ac.jp/ESISM_ breakthrough_2019.html	締切 9月13日 定員 80名
18~19	第163回塑性加工学講座「板材成形の基礎と応用 ~基礎編~」(東京)	日本塑性加工学会	https://www.jstp.or.jp	定員 80名
18~19	第47回ガスタービン学会定期講演会(函館)	日本ガスタービン 学会	TEL 03-3365-0095 gtsj-office@gtsj.org http://www.gtsj.org/	
19~20	軽金属基礎技術講座「アルミニウムの製造技術」(掛川)	軽金属学会	TEL 03-3538-0232 http://www.jilm.or.jp/	定員 50名
20	金属学会シンポジウム「陽に陰にオリンピック・パラリンピックを支える材料工学」(東京)(本号482頁)	日本金属学会	TEL 022-223-3685 FAX 022-223-6312 meeting@jim.or.jp	事前 9.2
22~27	20th International Symposium on Boron, Borides and Related Materials(第20回ホウ素・ホウ化物および関連物質国際会議)(新潟)	第20回ホウ素・ ホウ化物および関 連物質国際会議組 織委員会	TEL 0258-47-9714 takeda@mech.nagaokaut.ac.jp http://sogalabo.jp/isbb2019	
23~25	高温変形の組織ダイナミクス研究会「2019年度夏の学校」(金沢)(6号279頁)	研究会 No. 76	TEL 0172-39-3643 mineta@hirosaki-u.ac.jp	参加 7.26
23~26	第3回J-PARC国際シンポジウム「宇宙・物質・生命の起源を求めて」(つくば)	J-PARCセンター 他	http://j-parc.jp/symposium/j-parc2019/	
24	第103回金属のアノード酸化皮膜の機能化部会(ARS)例会ープラズマを利用したアノード酸化とその関連技術ー(首都大学東京)	表面技術協会・金 属のアノード酸化 皮膜の機能化部会 (ARS)	http://ars.sjf.or.jp/	9.10
24~26	資源・素材2019(京都)~資源・素材関係学協会合同秋季大会~(京大)	資源・素材学会	TEL 03-3402-0541 info@mmij.or.jp https://confit.atlas.jp/guide/event/ mmij2019b/top?lang=ja	
25	第334回塑性加工シンポジウム「多品種少量生産を支える逐次成形技術の最前線」~高機能・高付加価値製品の成形事例の紹介~(刈谷)	日本塑性加工学会	http://www.jstp.or.jp	定員 80名
26~27	第12回トライボロジー入門西日本講座ー全面リニューラル!進化した入門講座ー(兵庫県立大)	日本トライボロ ジー学会	TEL 03-3434-1926 http://www.tribology.jp/	9.13
<b>2019年10月</b>				
3~4	第10回社会人のための表面科学ベーシック講座(東京理科大)	日本表面真空学会	TEL 03-3812-0266 office@jvss.jp https://www.jvss.jp/	9.26
4	関東支部 工場見学会(さいたま)(7号413頁)	日本金属学会関東 支部	nakaya@wood3-staff.t.u-tokyo.ac.jp	9.2
6	2019年度秋期第74回学術講演会「先端技術・材料にフォーカスした矯正歯科治療のさらなる可能性を探る!」(長崎大)	日本歯科理工学会	TEL 03-3947-8891 gakkai30@kokuhoken.or.jp	
7	2019年度溶接工学専門講座(大阪)	溶接学会	TEL 03-5825-4073 jws-info@tg.rim.or.jp http://www.jweld.jp/	定員 50名
9~11	ADMETA Plus 2019(Advanced Metallization Conference 2019: 29th Asian Session)(東大)	ADMETA委員会・ 吉田	TEL 03-6801-5685 jimukyoku@admeta.org	
9~11	第38回電子材料シンポジウム(EMS-38)(榎原)	電子材料シンポジ ウム運営・実行委 員会	TEL 082-424-7649 ytominag@hiroshima-u.ac.jp http://ems.jpn.org/	
10	第239回西山記念技術講座 資源・環境・エネルギー問題から見た製鉄技術の 進歩と今後の展開(早稲田大)	日本鉄鋼協会	TEL 03-3669-5933 educact@isij.or.jp https://www.isij.or.jp/mun6c7d2k	

開催日	名称・開催地・掲載号	主催	問合せ先	締切
11	第38回エレクトロセラミックスセミナー「超音波周辺技術とその展開」(川崎)	日本セラミックス協会電子材料部会	TEL 0568-76-5953 y-okimura@mg.ngkntk.co.jp	
12~13	第70回塑性加工連合講演会(習志野)	日本塑性加工学会	http://www.jstp.jp/	
17~18	第35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 jimuj@jsms.jp http://www.jsms.jp/	定員 36名
18	第16回 機械・構造物の強度設計, 安全性評価に関するシンポジウム(京都)	日本材料学会	design16@jsms.jp jimuj@jsms.jp http://www.jsms.jp/	講演 7.1
19	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 055-220-8445 tsuyoshi-s@yamanashi.ac.jp http://society.me.yamanashi.ac.jp/jsme/2019/	
19~20	日本銅学会第59回講演大会(関西大)	日本銅学会	TEL 03-6803-0587 dou-gakkai@copper-brass.gr.jp https://www.copper-brass.gr.jp/	
20~25	第12回新物質及び新デバイスのための原子レベルキャラクター化に関する国際シンポジウム(京都)	日本学術振興会 マイクロビームアナリシス第141委員会	alc19@alc.jsps141.org https://alc.jsps141.org/alc19	
23~25	第9回構造物の安全性・信頼性に関する国内シンポジウム(東京)	日本学術会議	TEL 075-761-5321 jimuj@jsms.jp	
23~25	第60回高圧討論会(札幌)	日本高圧力学会	TEL 070-5545-3188 tounonkai60@highpressure.jp http://www.highpressure.jp/new/60forum/	講演 7.9
24~25	第51回溶融塩化学討論会(北大)	電気化学会溶融塩委員会	072-751-9426 mscj@electrochem.jp http://msc.electrochem.jp/touron.html	
27~11.1	The 13th Pacific Rim Conference of Ceramic Societies (PACRIM13)(沖縄)	日本セラミックス協会	TEL 03-3362-5231 jim-ask@cersj.org http://www.ceramic.or.jp/pacrim13/	
28~30	第40回日本熱物性シンポジウム(長崎)	日本熱物性学会	TEL 03-5734-2435 jstp@op.titech.ac.jp http://jstp-symp.org/symp2019/index.html	事前参加 8.30
30~11.1	第48回結晶成長国内会議(JCCG-48)(阪大)	日本結晶成長学会	TEL 070-5047-3339 jccg-48@jacg.jp http://www.jacg.jp/jp/event/conference.html	
<b>2019年11月</b>				
1~3	軽金属学会第137回秋期大会(東京農工大)	軽金属学会	TEL 03-3538-0232 http://www.jilm.or.jp/	参加予約 9.30
1~4	The 14th International Symposium on Advanced Science and Technology in Experimental Mechanics(つくば)	日本実験力学会	TEL 025-368-9310 office-jsem@clg.niigata-u.ac.jp http://jsem.jp/	
5	2019年度溶接工学企画講座 ~「建築鉄骨を支える最近の溶接技術」~(東京)	溶接学会	TEL 03-5825-4073 jws-info@tg.rim.or.jp http://www.jweld.jp/	定員 50名
6	日本希土類学会第37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	10.16
6	第240回西山記念技術講座 資源・環境・エネルギー問題から見た製鉄技術の進歩と今後の展開(大阪)	日本鉄鋼協会	TEL 03-3669-5933 educact@isij.or.jp https://www.isij.or.jp/mun6c7d2k	
8	微小領域の力学特性評価とマルチスケールモデリング(軽井沢)(6号342頁)	日本金属学会研究会 No. 82	https://www.nims.go.jp/group/sdg/micromech-jim/	
11	金属学会シンポジウム「ハイエントロピー合金の材料科学」(東京)(本号481頁)	日本金属学会	TEL 022-223-3685 FAX 022-223-6312 meeting@jim.or.jp	事前 10.28
15	第88回レアメタル研究会(東大生産技研)	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	
16	第18回日本金属学会東北支部研究発表大会「21世紀を支える構造材料」(名取)(本号475頁)	日本金属学会東北支部	TEL 022-381-0378 jim.tohoku2019(at)gmail.com	講演 10.5 参加 11.11
11~14	NACE EAP Conference 2019 腐食科学と防食技術(横浜)	NACE EAP	http://www.nace-tokyosection.org/	
17~22	国際ガスタービン会議2019Tokyo (IGTC2019 Tokyo)(東京)	日本ガスタービン学会	http://www.gtsj.org/english	
20~22	第19回破壊力学シンポジウム(福島)	日本材料学会	TEL 075-761-5321 jimuj@jsms.jp http://www.jsms.jp/	
21~22	電気加工学会全国大会(2019)(金沢大)	電気加工学会	TEL 0538-45-0127 goto.akihiro@sist.ac.jp http://www.jseme.or.jp	
22	第22回ミレニアム・サイエンスフォーラム(東京)	ミレニアム・サイエンス・フォーラム	TEL 03-6732-8966 msf@oxinst.com http://www.msforum.jp/	
25~27	第40回 超音波エレクトロニクス基礎と応用に関するシンポジウム(明大)	超音波エレクトロニクス協会	TEL 042-443-5166 h.nomura@uec.ac.jp	講演 8.9
25~27	EcoDesign 2019国際会議(横浜)	エコデザイン学会連合他	ecodesign2019_secretariat@ecodenet.com http://ecodenet.com/ed2019/	

開催日	名称・開催地・掲載号	主催	問合せ先	締切
26~27	第29回 傾斜機能材料シンポジウム(大阪大)	傾斜機能材料研究会	fgms2019@jwri.osaka-u.ac.jp http://www.fgms.net/?p=1722	11.1
26~28	第45回固体イオニクス討論会(九大)	日本固体イオニクス学会	TEL 092-802-6711 atakagak@cstf.kyushu-u.ac.jp http://www.cstf.kyushu-u.ac.jp/~ishihara-lab/ionics/	
26~28	第2回 材料機能特性のアーキテクチャー研究会 (@南紀白浜)開催のご案内(本号474頁)	日本金属学会 研究会 No. 81	TEL 052-789-3366 anaka@nagoya-u.jp http://j3www.materia.titech.ac.jp/ mishima-kimura/architecture.html	10.11
28	第71回白石記念講座 地震と鋼材 —阪神・淡路大震災から25年を過ぎて—(東京)	日本鉄鋼協会	TEL 03-3669-5933 educact@isij.or.jp https://www.isij.or.jp/mu8ne0d9y	
28~29	粉末冶金基礎・実用講座(京都工芸繊維大)	粉体粉末冶金協会	TEL 075-721-3650 info@jspm.or.jp	
28~30	第46回炭素材料学会年会(岡山大)	炭素材料学会	FAX 03-5227-8632 tanso-desk@bunken.co.jp http://www.tanso.org/contents/event/ conf2019/	
<b>2019年12月</b>				
3~4	溶接構造シンポジウム2019「デジタル技術が拓く溶接構造化技術の革新」(阪大)	溶接学会溶接構造研究委員会	TEL 03-5825-4073 s_kogure@tt.rim.or.jp http://www.jwri.osaka-u.ac.jp/~conf/ wmd2019/	
10~14	日本 MRS 創立30周年記念国際会議(横浜)	日本MRS	TEL 045-263-8538 info_mrm2019@jmru.org https://mrm2019.jmru.org	
<b>2020年1月</b>				
10	第89回レアメタル研究会(東大 鉄門記念講堂)	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	
28~29	第26回『エレクトロニクスにおけるマイクロ接合・実装技術』シンポジウム(横浜)	スマートプロセス学会他	TEL 06-6878-5628 mate@sps-mste.jp http://sps-mste.jp/mate2020/src/	
<b>2020年3月</b>				
6	第90回レアメタル研究会(東大生産技研)	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	
8~11	COMPSAFE2020(第3回安心・安全・環境に関する計算理工学国際会議)(神戸)	COMPSAFE2020 実行委員会	secretary@compsafe2020.org http://www.compsafe2020.org	
17~19	日本金属学会春期講演大会(東京工業大学大岡山キャンパス)(東京)	日本金属学会	TEL 022-223-3685 FAX 022-223-6312 annualm@jim.or.jp	
<b>2020年6月</b>				
29~7.3	PTM2020(8th International Conference on Solid-Solid transformations in Inorganic Materials)(中国西安)	中国金属学会	ptm2020@csm.org.cn http://www.ptm2020.com	
<b>2020年10月</b>				
19~22	The 8th conference of Crystal Growth and Crystal Technology (CGCT8)第8回アジア結晶成長・結晶技術国際会議(宮崎)	アジア結晶成長および結晶技術学会他	TEL 06-6879-8730 yamanoi-k@ile.osaka-u.ac.jp https://www.opt.miyazaki-u.ac.jp/hikari/	
<b>2020年12月</b>				
8~29	Mate2020第26回『エレクトロニクスにおけるマイクロ接合・実装技術』シンポジウム(横浜)	スマートプロセス学会他	TEL 06-6878-5628 mate@sps-mste.jp http://sps-mste.jp/mate2020/src/	

## 《お知らせ》

◎本会、副会長およびフェローであります蔡安邦教授(東北大学)が5月25日に訪問先の台中でご逝去されました。蔡安邦先生のご冥福を心よりお祈り申し上げます。

まてりあ 第58巻 第8号 (2019) 発行日 2019年8月1日 定価(本体1,700円+税)送料120円  
年間機関購読料金52,400円(税・送料込)

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

# Materials Transactions 投稿の手引き

Materials Transactions (Mater. Trans.)への投稿は、次の要件を満たさなければならない。

- (1) 英文であり、未掲載および他のジャーナルに投稿中でないことかつオリジナリティがあること (Materials Transactions 審査及び査読規程に定める範囲において、重複を認める場合がある)。
- (2) 金属とその関連材料の学術および科学技術の発展に寄与するものであること。
- (3) 投稿規程に合致するものであること。
- (4) 別に定める執筆要領に準拠して作成された原稿であること。
- (5) 論文の著作権を本会に帰属することに同意すること。
- (6) 掲載が決定した場合は、この規程に定める投稿・掲載料を支払うこと。
- (7) 研究不正行為および研究不適切行為をしないことならびに研究不正行為をした場合は本会の定めるところにより処分を、研究不適切行為をした場合は本会の定めるところにより措置を受けることに同意すること。
- (8) 投稿原稿を作成する基となった生データ、実験・観察・研究ノート、実験試料・試薬等の研究成果の事後の検証を可能とするものを論文掲載後5年間保存することに同意すること。

## 1. Mater. Trans. に投稿可能な論文

### (1) Regular Article (10頁以内)

金属及びその関連材料の理論、実験並びに技術などに関する学術上の成果を報告し、考察した原著論文で、科学・技術的に質の高い、新規な興味ある内容(結果、理論、手法等)が十分含まれている論文。

日本金属学会誌の学術論文または速報論文に Web 掲載後1年以内であれば、著者および内容が基本的に同一の場合に限り、英訳した論文を投稿できる。その事を脚注に明記する。ただし査読の結果、返却もあり得る。

なお、著者が迅速掲載を希望し、追加費用を負担する場合は、査読期間短縮を含め迅速掲載のための処理を行う。

### (2) Review (15頁以内)

各専門分野の研究開発の背景や最近の状況及び今後の展望等について、重要な文献を引用して、各専門分野の専門家のみならず他分野の専門家や学生等も対象に、その概要を公正にかつわかりやすく解説する論文。日本金属学会誌およびまてりあに Web 掲載後1年以内であれば投稿ができる。その事を脚注に明記する。また、日本金属学会誌およびまてりあ掲載論文と異なる部分がある場合は、その事を脚注に明記する。

### (3) Overview (15頁以内)

単なる一般的な review ではなく、執筆者独自の考えに立って review し、取り上げた問題点の中において自説の位置付けを明確にした論文。ただし、事前に「タイトル」「氏名」「要旨」を編集委員会に提出し、了承を得た後、投稿する方式とする。日本金属学会誌およびまてりあに Web 掲載後1年以内であれば投稿ができる。その事を脚注に明記する。また、日本金属学会誌およびまてりあ掲載論文と異なる部分がある場合は、その事を脚注に明記する。

### (4) Technical Article (10頁以内)

金属およびその関連材料の実験技術、製造技術、設備技術、利用技術など、技術上の成果、基準、標準化、データベースなど、および関連する事柄の調査、試験結果を報告した原著論文。

日本金属学会誌もしくはまてりあに Web 掲載後1年以内であれば、著者および内容が基本的に同一の場合に限り、英訳した論文を投稿できる。その事を脚注に明記する。ただし査読の結果、返却もあり得る。

### (5) Express Rapid Publication (4頁以内)

速報を要する短い論文。すなわち、新規性のある研究成果、技術開発に関する新知見、新アイデア、提案等。最短2週間で審査を完了する。迅速掲載のための費用を負担しなければならない。

### (6) Opinion (2頁以内)

Materials Transactions に掲載された論文に対する意見、討論またはそれに対する著者からの回答とする。科学・技術的な発展に貢献できる内容であること。

### (7) その他理事会で決議した分類

## 2. 投稿の方法

Mater. Trans. への投稿は <https://mc.manuscriptcentral.com/matertrans> にて原稿を提出する。

和文掲載済み論文の英訳論文の場合には、和文掲載済み論文 PDF も送付する。

## 3. 原稿

執筆要領に従って原稿を作成し指定のファイル形式に変換したものを提出する。

### 3.1 記載内容

①題目・著者名・研究機関、②英文概要・Keywords、③本文、④謝辞、⑤文献、⑥Appendix、⑦表・図説明一覧、⑧その後各別紙の表・図を添付する。

### 3.2 単位

SI 単位を使用する。

### 3.3 引用文献・脚注

通し番号で<sup>1,2)</sup>、あるいは<sup>3-6)</sup>のように表し、本文の末尾に一括記載する。著者名、誌名はすべて英語表記する(特に決まっていなものはローマ字表記する)。

## 4. 審査

投稿された論文は欧文誌編集委員会の独自の審査を経て欧文誌に掲載される。編集委員会から原稿の修正を求められ、あるいは返却されることがある。

## 5. 校正

初校は著者の責任で行う。著者校正は原則として1回とし、誤植の修正に限る。

## 6. 投稿者負担金

6.1 投稿・掲載費用を支払う(公開日から1年間有効の電子ジャーナル購読権 ID/Password を寄贈)。

6.2 カラー図表掲載を希望する場合は実費を負担する。(1図表当り1,000円)

※オンラインジャーナルのみ(冊子・別刷はすべてモノクロ表示)。

6.3 Regular Article の迅速掲載費用: 1万円。

# ALLOYS & METALS

品名	純度	形状	品名	純度	形状	品名	純度	形状
<b>純金属</b>			<b>高純度金属</b>			<b>中間合金</b>		
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	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	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	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	Mg 50%	約800gインゴット
銀	99.99%	粒状	ビスマス	〃	約100g塊	クロム	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	Te 50%	〃
ボロンアモルファス	95~97%	粉末	無酸素銅	99.99%	10X10X1mm	コバルト	Co 10%	〃
コバルト粒(ロシア産)	99.99%	針状	鉄(マイロンSHP)	99.99%	25X25X2mm	ニッケル	Ni 30%	〃
電解コバルト(従来品)	99.9%	針状	ガリウム	99.9999%	粒状25g入	鉄	Fe 10%	〃
電解コバルト(FB)	99.9%	フレーク状	ゲルマニウム	99.999%	約50g塊	チタン	Ti 25%	〃
電解クロム	99%	約25X25X10mm	インジウム	99.999%	粒状100g入	ジルコニウム	Zr 50%	〃
電解クロム	99%	塊状	インジウム	〃	約100g塊	ボロン	B 2%	粒状
クロム粉	99%	薄片状	マンガン	99.999%	薄片状	アルミニウム	Cu 40%	約5~7kgインゴット
電気銅	99.99%	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
電解鉄(アトミロンMP)	99.99%	約25X50X10mm	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YL)	〃	小片状	アンチモン	99.9999%	粒状100g入	アルミニウム	Ni 20%	〃
電解鉄(アトミロンFP)	〃	小片状25kg入	アンチモン	〃	約100g塊	アルミニウム	Cr 5%	〃
電解鉄(アトミロンXL)	〃	〃	テール	99.9999%	約100g塊	アルミチタン	Ti 5%	約4~5kgインゴット
電解鉄粉	99%	粉末1kg入	テール	〃	約100g塊	アルミシリコン	Si 25%	〃
ハフニウム	99.6%	スポンジ小塊	亜鉛	99.99%	粒状100g入	アルミコバルト	Co 5%	〃
インジウム	99.99%	塊状	亜鉛	〃	約100g塊	アルミモリブデン	Mo 5%	〃
マグネシウム	99.9%	約200g塊	鉛	99.9999%	粒状100g入	アルミタングステン	W 2.5%	〃
電解マンガン	99.9%	薄片状	鉛	〃	約100g塊	アルミベリリウム	Be 2.5%	約50gインゴット
モリブデン粉	99.9%	粉末	亜鉛	〃	約100g塊	アルミ鉄	Fe 50%	塊状
ニオブグラニュー	99.9%	3~10mm小塊	亜鉛	〃	約100g塊	アルミジルコニウム	Zr 5%	約5kgインゴット
ニオブ粉	〃	粉末	チ	99.9%	5φX150mm	アルミボロン	B 4%	約200gインゴット
電気ニッケル	99.99%	25X25X10mm	<b>レアアースメタル</b>			アルミバナジウム	V 50%	小塊状
ニッケルペレット	99.97%	6~12mm球状	イトリウム	99.9%	塊状、削状、粉状	アルミストロンチウム	Sr 10%	約100gインゴット
レニウム粉	99.99%	粉末	ランタン	〃	〃	アルミカルシウム	Ca 10%	約2.5kgインゴット
ルテニウム粉	99.9%	〃	プラセオジウム	〃	〃	ニッケルボロン	B 15%	塊状
アンチモン	99.9%	塊状	ネオジウム	〃	〃	ニッケルニオブ	Nb 60%	〃
金属シリコン	99%	〃	サマリウム	〃	〃	ニッケルマグネシウム	Mg 50%	約1.5kgインゴット
錫	99.99%	約1kgインゴット	イッテルビウム	〃	〃	コバルトボロン	B 15%	塊状
タンタル塊	99.9%	粒状	テルビウム	〃	〃	燐	P 5%	インゴット
タンタル粉	〃	3~10mm小塊	ジスプロシウム	〃	〃	<b>Uアロイ(低融点合金)</b>		
タニール	99.99%	粉末	ホルミウム	〃	〃	Uアロイ 47	融点47±2℃	約500gインゴット
スポンジチタン	99.7%	小球状	エルビウム	〃	〃	Uアロイ 60	60±2℃	〃
チタン板	JIS 1種	スポンジ塊	ガドリニウム	〃	〃	Uアロイ 70	70±2℃	〃
バナジウム	99.7%	250X250X1mm	ツリウム	〃	〃	Uアロイ 78.8	78.8±2℃	〃
バナジウム粉	99.7%	3~10mm小塊	ルテチウム	〃	〃	Uアロイ 91.5	91.5±2℃	〃
タングステン粉	99.9%	粉末	セリウム	〃	塊状のみ	Uアロイ 95	95±2℃	〃
タングステンクラップ	99%	板状	ユーロピウム	〃	〃	Uアロイ 100	100±2℃	〃
亜鉛	99.99%	約2kgインゴット	ミッシュメタル	TRE > 97%	5.4φX6mm 200g入	Uアロイ 124	124±2℃	〃
亜鉛粒	〃	粒状	<b>フェロアロイ</b>			Uアロイ 150A	150±2℃	〃
ジルコニウム	>99.5%	スポンジ塊	フェロモリブデン	Mo 60%	塊状			
			フェロニオブ	Nb 60%	〃			
			フェロバナジウム	V 80%	〃			
			フェロボロン	B 20%	〃			
			カルシウムシリコン	Ca30%Si60%	小塊状			

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

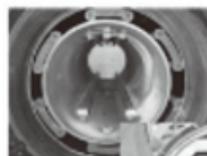
商品の詳細はホームページでご覧になれます。  
<http://1921seizaemon.jp/>

●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

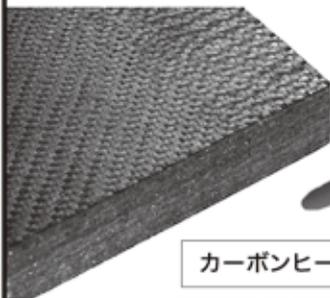
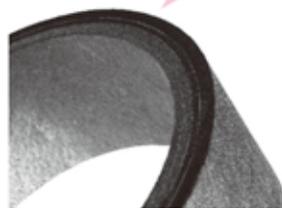
URL: <http://www.mechanical-carbon.co.jp/>

- 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



6面シート  
貼り



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。



## 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](mailto:mck@mechanical-carbon.co.jp)

## 日本金属学会発行誌 広告のご案内

### まてりあ(会報)

前付) 1色1P ¥100,000 1/2P ¥60,000

後付) 1色1P ¥95,000 1/2P ¥55,000

※表紙回り、カラー料金等お問い合わせ下さい。

### 春・秋期講演大会プログラム

後付) 1色1P ¥70,000 1/2P ¥40,000

広告ご掲載についてのお問い合わせ・お申込み

株式会社 明報社

〒104-0061 東京都中央区銀座7-12-4 友野本社ビル

TEL(03)3546-1337 FAX(03)3546-6306

E-mail [info@meihosha.co.jp](mailto:info@meihosha.co.jp) HP [www.meihosha.co.jp](http://www.meihosha.co.jp)

# ◆◆ 新型 赤外線導入加熱装置 GVL298N

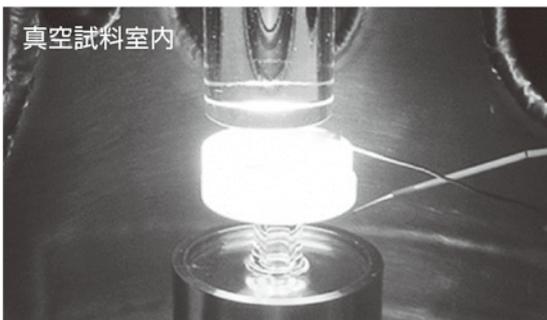
## 赤外線導入加熱装置とは……

新材料物質の試験・研究用の熱処理装置で、大気側にある熱源・赤外線を特殊な導入機構を介し、真空中試験試料へ照射、最高1500℃まで昇温します。

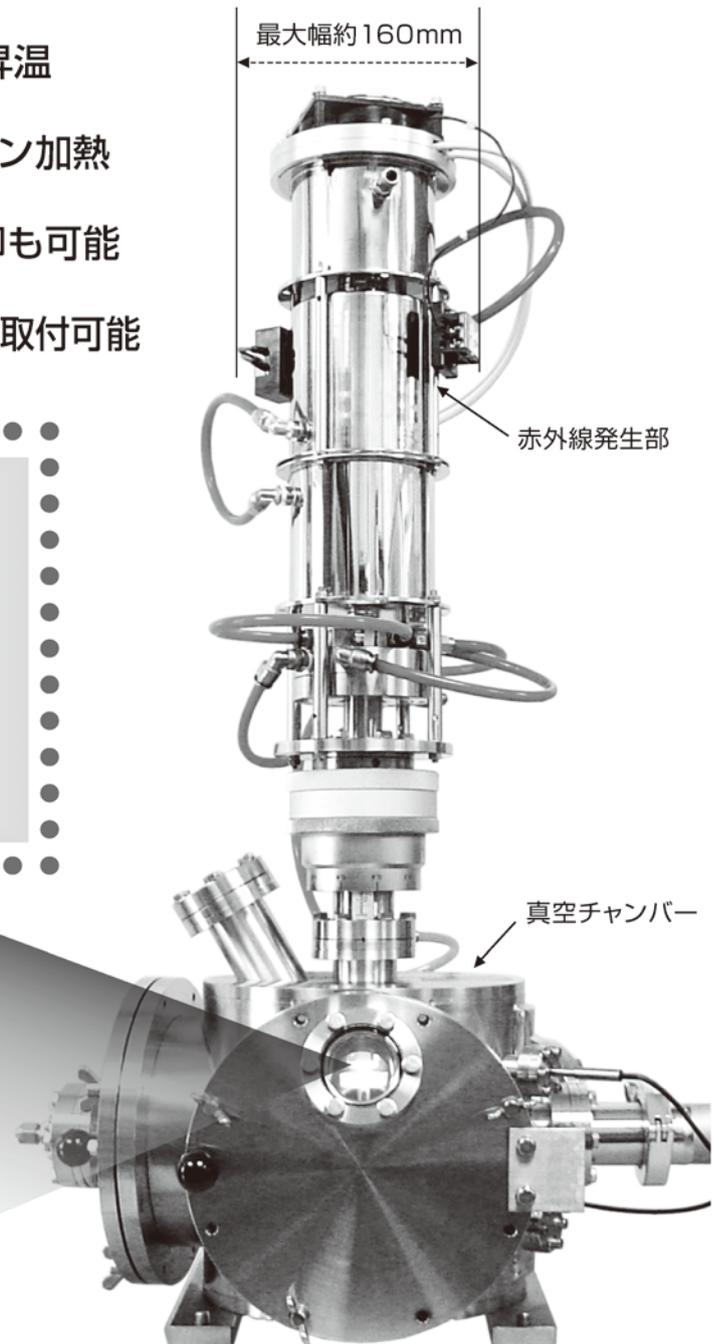
- 1 急速昇温 1500℃まで1分で昇温
- 2 周りを加熱せず試料のみクリーン加熱
- 3 熱源と試料は非接触。強制冷却も可能
- 4 XPS等、研究室内真空システムに取付可能

### ★ 改良ポイント ★

- ◆ 冷却機構の改良で **小型化** に成功！  
狭いスペースへの製品取り付けが可能
- ◆ 冷却力向上により、  
赤外線ランプの **長寿命化** に成功
- ◆ 漏洩光の減少により、  
装置周辺の **安全性の向上**



【用途】 Si、SiC、カーボンナノチューブ等の  
清浄雰囲気中熱処理



日本金属学会付設展示会 2019年9月11日(水)～13日(金) [岡山大学] 出展

熱と共に歩む

 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  
<http://www.thermo-r.co.jp/>  
E-mail: sekigai@thermo-r.co.jp

詳細・HP

