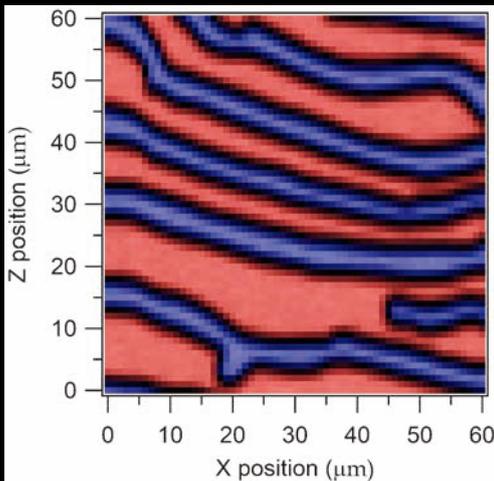


Materia Japan

まてりあ Vol.63

MTERE2 63 (7) 449 ~ 526 (2024)

No.7
2024



・ 金属素描 ~ストロンチウム~

特集

「大型放射光施設 SPring-8 における構造解析技術の最前線」

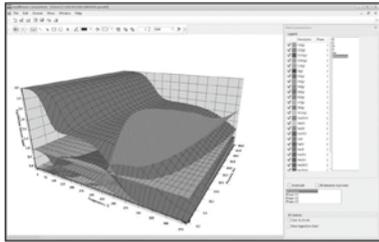
- ・ 金属の微視組織と巨視的力学応答特性
- ・ ナノ粒子表面形態変化の同一視野観察
- ・ 思い出の教科書, この一冊!
- ・ はばたく
- ・ スポットライト

科研費関連機器・製品申請ガイド

〈ソフトウェア・書籍・サービス〉

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

約28,000種についてのエンタルピー、エントロピー、熱容量のデータベースを基に化学反応の計算やGIBBSルーチンによる化学平衡を計算します。反応、熱平衡、分子量計算などの一般的なモジュールの他、電気化学セル平衡と相安定性、腐食の研究に使われるEh-pH（プルベ）状態図の作成などユニークなモジュールを持ち合わせています。計算結果のテーブルと状態図はクリップボードにコピーできます。SIM Flowsheetモジュールもあり、複数のユニットプロセスからなるプロセス全体のシミュレーションとモデリングができます。Ver.9.4から3元状態図作成のツールが付いています。



年間使用料(税込)
¥418,000(一般)
¥165,000(教育)

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

株式会社 デジタルデータマネジメント

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

〈ソフトウェア・書籍・サービス〉

約33,000件のセラミックス状態図データベース ACerS-NIST Phase Equilibria Diagrams, Version 5.2

定価(税込) ¥330,000
(シングルユーザー)
アップグレード価格有り



- データソース: Phase Equilibrium Diagrams for Ceramics, Vol. 1 - (対応書籍) XIV. Annual 91-93, High-Tc Superconductors I - II, Zirconium and Zirconia System, Electric Ceramics I
- 検索項目: 元素、成分系、コメントテキスト、PED Volume、Figure Number、刊行年、Authors
- 検索条件: Inclusive、Exact、Not (partially)
- データ出力: PDF、PNG (Portable Network Graphics)
- システム構成: Windows 8/10、Java 7 Runtime Environment、PDF Reader (Javaはサムネイル画像の拡大に必要) (American Ceramic Society)

株式会社 デジタルデータマネジメント

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

〈ソフトウェア・書籍・サービス〉

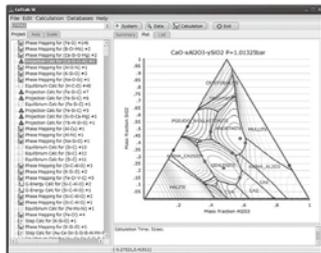
熱力学平衡計算・状態図計算ソフトウェア CaTCalc

【CaTCalc】産総研で開発された熱力学平衡計算ソフトで、純物質熱力学データベースや各種の溶体熱力学データベースに基づいて化学反応計算や熱力学平衡計算、および状態図計算を行うCALPHAD系のソフトです。金属のみならず、セラミックスやガスを含む複雑な系の計算も安定して計算可能です。

【専用データベース】 Pure (純物質、標準添付)、Sol (汎用合金系)、Ceram (セラミックス) などの各種データベースを用意

【仕様】 動作環境: Windows11以降の64bit版OS

*計算に考慮する元素数、相の数などに制限は無く、大局的最小化機能も装備。正則・準正則溶液モデル、副格子モデル、擬化学モデルなどの各種相モデルをサポート。



CaTCalc SE
永久ライセンス(税込)
¥539,000(一般)
¥429,000(公設研)
¥209,000(教育)

*溶体データベースは別売です。
下記のサイトをご参照下さい。
価格はお問合せ下さい。

株式会社 計算熱力学研究所

〒841-0016 佐賀県鳥栖市田代外町674-18
TEL 0942-80-0547 FAX 0942-82-9217
<https://www.rictsystems.com>

〈ソフトウェア・書籍・サービス〉

第3巻「永久磁石の保磁力と 関連する技術課題」

第1巻、第2巻に引き続きモータ技術者、磁気測定技術者向けの永久磁石の第3巻技術図書。

今回は元日立金属勤務で電気学会マグネティクス調査専門委員会等で長年磁石業界に従事されてきた徳永雅亮氏に共著頂いた。

主な内容:

- ・保磁力の結晶粒径依存性
- ・異方性磁界と保磁力
- ・保磁力と結晶粒界
- ・永久磁石の着磁性
- ・残留磁束密度と保磁力の角度依存性
- ・電気抵抗と渦電流

著者: 徳永雅亮、山本日登志

B5版、118頁

価格: ¥2,300 + 送料

ご注文はHPの書籍注文書から申し込みをお願いします。



ネオジコンサル(京都市内在)

TEL 090-2204-7294 <https://hitoshiad26.sakura.ne.jp>
e-mail: hitoshiad_0330@yahoo.co.jp

7

2024
Vol.63
No.7

まてりあ

金属素描 No. 35 ストロンチウム(Strontium) 竹田 修 小原 学449

特集「大型放射光施設 SPring-8 における構造解析技術の最前線」

企画にあたって 鈴木賢紀 川西咲子 竹田 修 佐々木秀顕 永井 崇 田辺栄司450

放射光 X 線を用いた二体分布関数解析の現状と金属材料への展開 山田大貴452

放射光粉末回折装置の紹介とその場観測システムの利用事例

河口彰吾 小林慎太郎457

SPring-8 におけるダイヤモンドアンビルセルと放射光 XRD を組み合わせた研

究・開発の“今” 河口沙織462

硬 X 線吸収・発光分光ビームライン BL39XU 河村直己 東 晃太郎468

SPring-8 における共用硬 X 線光電子分光ビームライン 高木康多474

解説 微視組織の影響下における金属材料の加工硬化のモデリングと結晶塑性解析

大橋鉄也479

金属微視組織中のメゾレベル変形現象と巨視的な力学応答特性を数理モデルと結晶塑性解析によって接続する試みについて解説。

新進気鋭 走査型電子顕微鏡を用いた同一視野観察による白金合金ナノ粒子の溶解機構解析

大井 梓487

新しい教科書、この一冊! 新版カリティ X 線回折要論 B.D.Cullity(著) 松村源太郎(訳) 小笹良輔493

はばたく 通電熱加工技術の高度化を目指して 鈴木絢子494

広島県立総合技術研究所における地元企業への支援および研究活動 市川皓基495

スポットライト 銅の煮色着色における大根のおろし汁の役割 依田明理497

イチゴによるアルミニウムの溶解(2)

山脇佳奈 田中 楓 藤井妃奈乃 金古雄大 川口拓真 上田悠人499

本会記事 会告502 次号予告519

掲示板516 新入会員522

会誌・欧文誌 7 号目次519 行事カレンダー523

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 GdFeCo 薄膜における Gd L₃-吸収端での XMCD による 2 次元磁区構造. 青・赤は互いに反対向きの磁石の N 極・S 極を意味している. なお, XMCD では磁区の向きを元素選択的に測定することも可能である. 現状のシステムでは, 空間分解能 100 nm での測定が可能となっている. (河村直己 東 晃太郎 472 頁 図 6 より掲載)

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

複写をご希望の方へ

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

Materia Japan

Volume 63 Number 7 July 2024

Contents

Sketch of Metals	No. 35 Strontium	Osamu Takeda and Gaku Obara	449
Special Issue on Latest Techniques of Structural Analysis Using SPring-8 Synchrotron Radiation Facility			
Preface	Masanori Suzuki, Sakiko Kawanishi, Osamu Takeda, Hideaki Sasaki, Takashi Nagai and Eishi Tanabe		450
X-ray Pair Distribution Function Analysis and Its Application to the Metals		Hiroki Yamada	452
Introduction of Synchrotron X-ray Powder Diffraction System and Demonstration of <i>In-Situ</i> Observation System		Shogo Kawaguchi and Shintaro Kobayashi	457
High-pressure Research and Development Combining Diamond Anvil Cell and Synchrotron XRD at SPring-8		Saori Kawaguchi-Imada	462
Hard X-ray Absorption and Emission Spectroscopy Beamline BL39XU		Naomi Kawamura and Kotaro Higashi	468
Public Hard X-ray Photoelectron Spectroscopy Beamlines at SPring-8		Yasumasa Takagi	474
Regular Articles			
Review			
Modeling and Crystal Plasticity Analysis of Strain Hardening in Metallic Materials under the Influence of Microstructure		Tetsuya Ohashi	479
Emerging Young Researchers			
Analysis of the Dissolution Mechanism of Platinum Alloy Nanoparticles Through Identical-location Scanning Electron Microscopy Observation		Azusa Ooi	487
My Memorial TextBook			
“Elements of X-ray diffraction” by B. D. Cullity		Ryosuke Ozasa	493
Portrait of Young Researchers			
Development of Advanced Spark Plasma Sintering Technology		Ayako S. Suzuki	494
Support and Research Activities for Local Manufacturing Companies in the Hiroshima Prefectural Technology Research Institute		Koki Ichikawa	495
Spotlights			
Role of Grated Japanese Radish Juice in Chemical Patination, a Traditional Japanese Technique of Coloring Copper		Akari Yoda	497
Pitting Corrosion of an Aluminum Cup by a Strawberries (Part 2)		Yoshina Yamawaki, Kaede Tanaka, Hinano Fujii, Yudai Kaneko, Takuma Kawaguchi and Yuto Ueda	499

Published by THE JAPAN INSTITUTE OF METALS AND MATERIALS

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

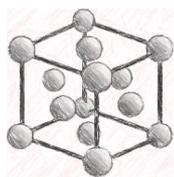
<https://www.jim.or.jp/journal/m/> (in Japanese)

©2024 The Japan Institute of Metals and Materials

How to Obtain Permission

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

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



シリーズ「金属素描」

No. 35 ストロンチウム (Strontium)

東北大学 竹田 修 明治大学 小原 学



元素名：Strontium，原子番号：38，原子量：87.62，電子配置：[Kr] 5s²，密度：2.583 Mg·m⁻³(298 K)，結晶構造：面心立方 (~521 K)，六方最密(521~887 K)，体心立方(887~1047 K)，融点：1047 K，沸点：1639 K⁽¹⁾，地殻存在量：320 μg·g⁻¹⁽²⁾
【写真】(a)純ストロンチウム塊，(b)フェライト磁石(株式会社プロテリアル 写真提供)。

第63巻 第1号の本コーナーにおいて、アルカリ土類金属のカルシウム(Ca)が取り上げられた⁽³⁾。本稿では、同族のストロンチウム(Sr)を取り上げる。

1787年、スコットランドのストロンチアンにある鉛鉱山で未知の鉱物が見つかった。1790年、ロンドンの医師 Adair Crawford は、当該鉱物は炭酸バリウムに似ているが、バリウムと異なる元素が含まれていることを発見し、ストロンチウムと命名した(当該鉱物は炭酸ストロンチウムであった)。1808年、ロンドンの王立研究所の Sir Humphry Davy は、酸化ストロンチウムを熔融塩に溶解させ、水銀カソードで還元析出させ、得られたアマルガムから水銀を蒸留除去し、金属ストロンチウムを単離することに成功した。この研究には、スウェーデンの Jöns Jacob Berzelius と Magnus Martin Pontin による研究・助言が大きく貢献したとされている。

ストロンチウムは相変態が多く、室温では面心立方構造であるが、昇温すると521 Kで六方最密構造に、さらに昇温すると887 Kで体心立方構造になる。

ストロンチウム化合物の原料として使用されるのは天青石(SrSO₄, Celestine)やストロンチアン石(SrCO₃, Strontianite)である。ただし、ストロンチアン石の埋蔵量は非常に少なく、商業利用は限定的である。2023年における世界の鉱石生産量(主に天青石)は、スペイン(20万t)、イラン(20万t)、中国(8万t)、メキシコ(3万5千t)、アルゼンチン(700t)と報告されている⁽⁴⁾。鉱石から主要中間製品として炭酸ストロンチウムを生産する。その生産方式には還元焙焼法(ブラックアッシュ法)と湿式法(ソーダ法)がある。塩化物やその他の化合物は、炭酸ストロンチウムから製造する。

金属ストロンチウムは、古くは塩化ストロンチウムと塩化カリウムの混合塩を、熔融塩電解することで生産されていた⁽⁵⁾。現在は、炭酸ストロンチウムから高純度な酸化ストロンチウムを合成し、金属アルミニウム細粒と混合、団鉱にする。密閉容器に装入し、真空下、高温(1000℃以上)で酸化ストロンチウムを還元する。蒸気として生成したストロンチウムを低温部に導き、凝縮させて金属ストロンチウムを得る⁽⁶⁾。

ストロンチウム化合物は、その赤色燃焼性を利用して花火や発煙筒などによく用いられる。そのほかガラス材料に対す

る添加物にも使用されているが、重要な用途の一つとしてフェライト永久磁石が挙げられる。ストロンチウムを用いたフェライト永久磁石は基本組成式が SrFe₁₂O₁₉ で表され、モル比で見るとストロンチウムが陽イオンに占める割合は1割にも満たない。しかし、遷移金属イオンに比べて大きなイオン半径を有しているストロンチウムイオンは、結晶構造中において最密構造を形成する酸素イオンの一部に置き換わり、永久磁石の重要なパラメータである「保磁力」を発生させるための「磁気異方性」を生み出す結晶ブロックの形成に一役買っている。

フェライト磁石は、金属系磁石に比べると最大エネルギー積は及ばないが非常にコストパフォーマンスが良く、また化学的にも安定しており、吸着用途だけでなく小型モータにも多く使用されている。例えば現在の自動車にはワイパーや電動シートをはじめとして、多くのフェライト磁石モータが搭載されており、フェライト磁石なくして自動車の生産は難しいと言っても過言ではないほどである。

ストロンチウム系フェライト磁石が1960年代前半にアメリカで発表されて以来⁽⁷⁾世界中で実用化に向けた開発競争が行われた中、勝ち上がったのが日本のメーカーであった。1990年代以降、La-Co置換ストロンチウムフェライト⁽⁸⁾⁽⁹⁾などのさらなる高性能フェライト磁石も開発され、現在でもフェライト磁石に関しては、日本のメーカーが一日の長を有している。自動車産業だけに留まらず、多くの産業分野にとって、フェライト磁石について日本が今後も世界を牽引していくことは重要であろう。

文 献

- (1) 金属データブック改訂4版：日本金属学会，丸善，(2004)。
- (2) R.L. Rundnick and S. Gao: "The Crust", Elsevier Ltd., (2004), 1-64.
- (3) 大内隆成：まてりあ，**63**(2024)，5。
- (4) USGS, Mineral commodity summaries 2024 (2024), 170-171.
- (5) C.L. Mantell: Rare metals handbook 2nd ed., (1961), 15-31.
- (6) 竹田 修：レアメタル便覧 Vol. I, 丸善，東京(2011)，210-230.
- (7) A. Cocharde: J. Applied Physics, **34**(1963)，1273-1274.
- (8) Y. Ogata *et al.*: IEEE Trans. Magn., **35**(1999)，3334-3336.
- (9) K. Iida *et al.*: J. Magn. Soc. Japan, **23**(1999)，1093-1096.

次回！ 金属なんでもランキング！
No.25 銅における不純物拡散係数の活性化エネルギー

未来を先導する領域を開拓し、世界に発信する

2024年秋期
第175回
講演大会

公益社団法人

日本金属学会

The Japan Institute of Metals and Materials

2024年

会期

9月18日(水) ▶▶ 20日(金)・25日(水)

会場

大阪大学 | 豊中キャンパス

25日のみ
オンライン

〒560-0043 大阪府豊中市待兼山町1



講演申込
締切

●一般 ●公募シンポジウム
●共同セッション ●ポスターセッション

●高校生・高専生ポスター

2024年 7月5日(金) 17時

2024年 7月12日(金) 17時

公募シンポジウム

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

企画シンポジウム

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

国際シンポジウム

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

事前参加申込締切: 2024年 8/30(金)

参加方法の詳細はホームページで公開



★詳細は、まてりあ5号会告(337頁)または
本会ホームページをご覧ください。

~皆様のご参加をお待ちしております。~

問
合
先



公益社団法人
日本金属学会 講演大会係

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

詳しくは
ホームページをご覧ください <https://jimmm.jp/>

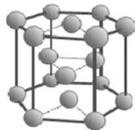


までりあ企画

「金属素描」「金属なんでもランキング！」

2019年1月から「までりあ」に掲載している「金属素描」と「金属なんでもランキング！」が https://jimm.jp/around_metal/ranking.html より閲覧できます。

金属素描



金属の物理的・化学的特徴、製法、用途等について紹介しています。意外に知らない事実だけでなく、読んで楽しく、かつ、具体的に役立つ情報を纏めています。

- No.1 チタン
- No.2 ジルコニウム
- No.3 ハフニウム
- No.4 コバルト
- No.5 クロム
- No.6 マグネシウム
- No.7 ナトリウム
- No.8 マンガン
- No.9 ガリウム
- No.10 インジウム
- No.11 鉄
- No.12 アルミニウム
- No.13 銅
- No.14 タングステン
- No.15 ネオジム
- No.16 モリブデン
- No.17 白金
- No.18 ニオブ
- No.19 タンタル
- No.20 ルテニウム
- No.21 イリジウム
- No.22 パラジウム
- No.23 ニッケル
- No.24 レニウム
- No.25 亜鉛
- No.26 金
- No.27 銀
- No.28 ロジウム
- No.29 ビスマス
- No.30 鉛
- No.31 パナジウム
- No.32 カルシウム
- No.33 サマリウム
- No.34 シリコン
- No.35 ストロンチウム

金属なんでもランキング！



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

- No.1 地殻存在量
- No.2 密度
- No.3 融点・沸点
- No.4 電気伝導度
- No.5 熱伝導度
- No.6 比熱
- No.7 デバイ温度
- No.8 イオン化エネルギー
- No.9 宇宙の元素組成
- No.10 磁化率
- No.11 電気陰性度
- No.12 電子半径
- No.13 超伝導転移温度
- No.14 中性子散乱長
- No.15 融解熱
- No.16 蒸発熱
- No.17 純物質液体の表面張力
- No.18 海水中の元素存在量
- No.19 月の元素組成
- No.20 純金属液体の粘度
- No.21 酸化物の標準生成ギブス自由エネルギー
- No.22 窒化物の標準生成ギブス自由エネルギー
- No.23 純金属の拡散係数の活性化エネルギー
- No.24 硫化物の標準生成ギブス自由エネルギー

企画にあたって

鈴木賢紀¹ 川西咲子² 竹田 修³
佐々木秀顕⁴ 永井 崇⁵ 田辺栄司⁶

材料の特性、物理的性質の起源を理解する上で、材料の微視構造を詳細に調べることは非常に重要である。SPring-8 (Super Photon ring-8 GeV)は、アンジュレータ主体の挿入光源を多数設置することによって、世界最高性能の放射光を生み出すことができる大型放射光施設である。同施設は、1997年から大学、公的研究機関や企業等に広く提供され、これまで様々な研究成果を創出してきた。

放射光は連続した波長分布を持つ電磁波の集まりであるが、光子エネルギーと波長は反比例の関係にあるため、目的とする光子エネルギーに応じた電磁波を取り出すことにより、様々なスケールの構造解析に適用できる。SPring-8は、硬 X 線から軟 X 線(最大 300 keV~最小 170 eV)の広いエネルギー範囲で世界最高レベルの輝度を持つ放射光を利用可能であり(SPring-8 ホームページ参照)、様々な分光手法、イメージング技術などへの放射光の適用によって、原子スケールからサブミクロンスケールに至るまでの構造解析を実施できる施設として発展してきた。

近年、SPring-8 放射光の特性改良ならびにビームラインの再編成が行われ、材料分野においても一層高い精度、かつ、動的な現象をも含めた広範囲な構造解析の可能性が拓かれている。そこで本特集では、「大型放射光施設 SPring-8 における構造解析技術の最前線」という題目を掲げ、SPring-8 ビームラインに直接携わる(公財)高輝度光科学研究センターの研究者として最先端の構造解析研究に携わる方々より、最新の分析技術の動向と適用事例について解説頂くことで、金属を始めとする様々な材料に対する構造解析の新たな可能性を認知することを目的とした。

図 1 は、(公財)高輝度光科学研究センターによる SPring-

8 の HP (<http://www.spring8.or.jp/ja/>)より引用した、SPring-8 で使用される放射光光源の明るさ(輝度)と光子エネルギー、波長の関係を示すスペクトル図へ、本特集でご紹介頂いた X 線構造解析の種類とビームラインで扱う光子エネルギーの範囲を追記したものである。具体的には、まず山田大貴氏より、(1)「放射光 X 線を用いた二体分布関数解析の現状と金属材料への展開」と題して、SPring-8 研究設備と本特集で取り上げる構造解析手法について簡潔に紹介頂いたのち、中距離範囲の原子配列構造の理解に有用である二体分布関数(Pair distribution Function, PDF)を用いた放射光 X 線構造解析の原理、設備性能ならびに高温酸化物融体への適用事例について詳細に解説頂いた。次に、河口彰吾・小林慎太郎両氏より、(2)「放射光粉末回折装置の紹介とその場観測システムの利用事例」と題して、高輝度な放射光 X 線を用いた粉末 X 線回折(X-ray Diffraction, XRD)による高分解能な結晶構造評価の実際および、各種反応その場(in situ)解析への適用事例を解説頂いた。さらに河口沙織氏より、(3)「SPring-8 におけるダイヤモンドアンビルセルと放射光 XRD を組み合わせた研究・開発の“今”」と題して、特殊測定環境の一種である、1 万気圧以上のもの超高压下での XRD 計測を主軸として、SPring-8 の極めて高い輝度と高エネルギーな X 線の利用による、各種金属系材料の高圧構造物性の精密評価について解説頂いた。一方、元素毎の電子状態、短距離範囲の配位状態を調べる分析手法については、河村直己・東 晃太郎両氏より、(4)「硬 X 線吸収・発光分光ビームライン BL39XU」と題して、X 線吸収分光(X-ray Absorption Spectroscopy, XAS)や X 線発光分光(X-ray Emission Spectroscopy)による解析手法を取り上げて頂いた。

¹ 大阪大学大学院工学研究科

² 京都大学大学院エネルギー科学研究科

³ 東北大学大学院工学研究科

⁴ 愛媛大学大学院理工学研究科

⁵ 千葉工業大学工学部先端材料工学科

⁶ 広島県立総合技術研究所西部工業技術センター

Preface to Special Issue on Latest Techniques of Structural Analysis Using SPring-8 Synchrotron Radiation Facility; Masanori Suzuki¹, Sakiko Kawanishi², Osamu Takeda³, Hideaki Sasaki⁴, Takashi Nagai⁵, Eishi Tanabe⁶

Keywords: high energy X-ray, synchrotron radiation facility, pair distribution function, X-ray diffraction, X-ray absorption structure, X-ray emission spectroscopy, X-ray photoelectron spectroscopy

2024年 5月10日受理[doi:10.2320/materia.63.450]

放射光 X 線を用いた二体分布関数解析の 現状と金属材料への展開

山田大貴*

1. はじめに

SPring-8 (Super Photon ring-8 GeV) は、世界最高性能の放射光を生み出すことができる大型放射光施設であり、平成9年から大学、公的研究機関や企業等のユーザーに広く提供されこれまで様々な研究成果を創出してきた。本特集では、「大型放射光施設 SPring-8 における構造解析技術の最前線」という題目で、金属材料に対する SPring-8 のビームラインを用いた解析として適している手法を紹介する。具体的には、平均構造を見る粉末 X 線回折 (X-ray Diffraction, XRD)、特殊測定環境の一種であるダイヤモンドアンビルセルを使用した高圧 XRD、局所構造の理解に有用な二体分布関数解析 (Pair distribution Function, PDF)、そして元素選択的な分析である X 線吸収微細構造解析 (X-ray Absorption Fine Structure, XAFS) および硬 X 線光電子分光法 (Hard X-ray photoelectron spectroscopy, HAXPES) について取り上げさせていただく。個別の手法紹介に関しては各記事で詳細に解説されているので、本稿ではこの手法の中でも PDF について取り上げ解説する。

2. PDF 解析とは？

本節ではまず PDF 解析の概要に関して簡潔に記述する。PDF はある原子を中心としたときに特定の距離に存在する他の原子の存在確率を表す関数⁽¹⁾であり、分子動力学 (Molecular Dynamics, MD) などの手法を用いた原子シミュレーションの領域をはじめとした分野で広く用いられている。この PDF を用いた評価を実施することで、結晶のような周期的な秩序を有するような物質ではないガラスや液体などにおいても短距離から中距離 (~数 10 Å) までの局所構造

の特徴を理解することが可能になる。近年では結晶材料においてもその局所的な歪み等を解析する目的で「結晶 PDF 解析」などの名称で構造評価に用いられることも増えてきている。金属材料においてもハイエントロピー合金⁽²⁾や金属ガラス⁽³⁾といった一般的な金属と比べて「乱れた」材料系に対する構造解析において PDF は特に威力を発揮する分析でありこれまで多くの研究で活用されてきた。

この PDF は、シミュレーションだけでなく、放射光から得られる高エネルギー X 線や中性子線の全散乱パターンを用いて実験的にも算出することが可能である。具体的には、得られた散乱パターンを波数ベクトル Q ($Q = 4\pi \sin \theta / \lambda$) を用いて変換した後にバックグラウンドや非干渉性散乱などを除去し干渉性散乱成分のみを抽出、その後規格化処理を行うことにより構造因子 $S(Q)$ を、さらにフーリエ変換を実施することで PDF の 1 つである $G(r)$ が最終的に実験データから得られる⁽⁴⁾ (図 1)。

$$G(r) = 4\pi r [p(r) - p_0] \\ = \frac{2}{\pi} \int_{Q_{\min}}^{Q_{\max}} Q [S(Q) - 1] M(Q) \sin(Qr) dQ \quad (1)$$

$$M(Q) = \frac{\sin(Q\Delta r)}{Q\Delta r} \text{ for } Q < Q_{\max} \quad (2)$$

(1)の式を $M(Q) = 1$ として計算した場合に理論上最も分解能の高い PDF が得られるが、実際に実データの計算を行う際には実験ノイズ等の影響を低減する目的で(2)のような Lorch 関数⁽⁵⁾と呼ばれる窓関数を使用したノイズ低減処理を基本的には適用する必要がある。計算式(1)からわかるようにフーリエ変換を用いて PDF は導出されるため、理論上は Q_{\max} を無限大まで測定することができれば理想的な分解能の PDF が得られるはずであるが、測定可能な Q_{\max} は実験セットアップ、特に使用する量子ビームの波長による制約を受け PDF の分解能も Q_{\max} に応じて悪化する。この

* 公益財団法人高輝度光科学研究センター；主幹研究員，島根大学：客員助教(〒679-5198 兵庫県佐用郡佐用町光都 1-1-1) X-ray Pair Distribution Function Analysis and Its Application to the Metals; Hiroki Yamada (SPring-8 Kouto 1-1-1, Sayo-gun, Hyogo) Keywords: high energy X-ray total scattering, pair distribution function, high-throughput measurement, levitation, amorphous materials 2024年4月1日受理[doi:10.2320/materia.63.452]

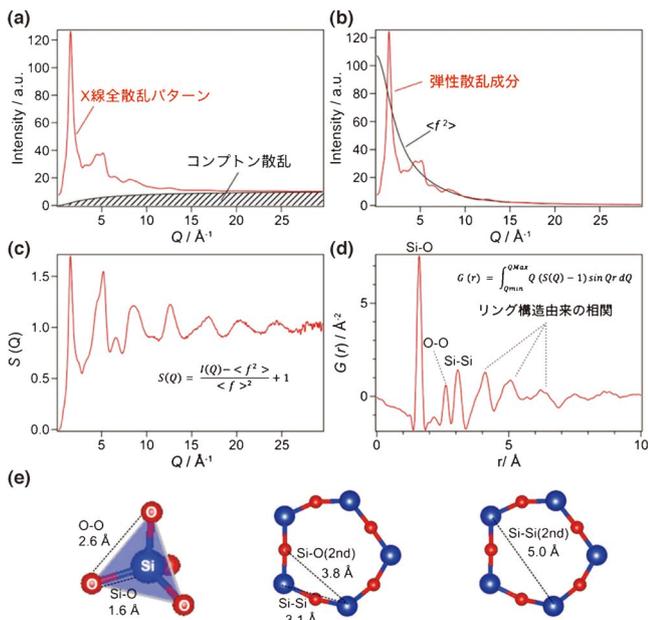


図1 シリカガラスの高エネルギーX線全散乱法を用いたPDF解析結果。(a)放射光全散乱パターン。(b)弾性散乱成分と $\langle f^2 \rangle$ の比較。(c)構造因子 $S(Q)$ 。(d)二体分布関数 $G(r)$ 。(e)シリカガラス中に存在する代表的な相関とリング構造。(オンラインカラー)

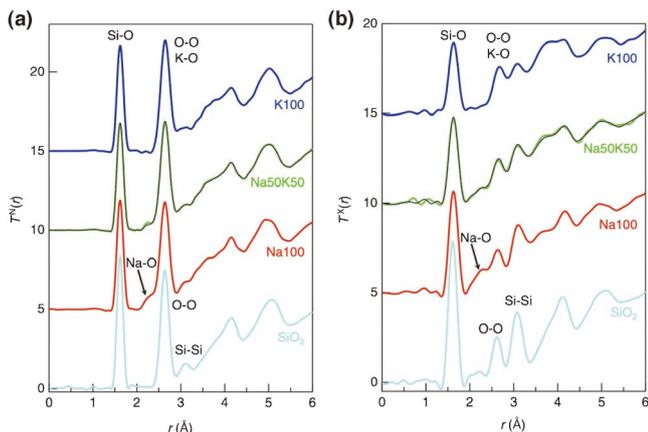


図2 X線と中性子線から得られたPDFの比較。(a)中性子全散乱測定から計算されたガラスのPDF。(b)X線全散乱測定から計算されたガラスのPDF。図は文献⁽⁶⁾から引用。(オンラインカラー)

ことから、大型量子ビーム施設を使用してなるべく高い Q 領域まで高統計で測定を実施するのが肝要である。日本では大型放射光施設としてSPring-8、大型中性子施設としてJ-PARCがあるため比較的アクセスが容易な恵まれた環境にあるといえる。

この方法で計算されたPDFはX線の場合は原子散乱因子、中性子線の場合は散乱長の違いによる元素ペアごとのコントラストが付いたパターンとして得られる。誤解を恐れずに簡潔に言えばX線の場合は原子番号が大きい重元素由来の相関が強く、中性子線の場合は軽元素が相対的に見えやすい傾向にあるとすることができる。このX線と中性子線の散乱

能の違いを活用することで、図2のように異なる原子コントラストが付いたPDFを得られるため材料の組成によっては必要に応じて多角的な解析を実施することが可能になる⁽⁶⁾。

3. SPring-8でPDF測定可能なビームライン

2章で示されている通り、PDF解析を用いることで「乱れた」材料系の原子レベルの定量的な構造情報が得られる。このようなPDF解析を実施することができるSPring-8の共用ビームラインとしては現状BL04B2、BL08W、BL13XUの3つがある。BL04B2においては低バックグラウンドが特徴の汎用的なPDF測定システムが常設されており、ガス浮遊法を用いた超高温溶融体測定環境やハイスループット装置による温度可変測定といったオプションが現状利用可能である。一方、BL08Wのハッチ内には巨大なサンプル空間を有し様々な実験装置を持ち込んだ*in situ* PDF測定が可能になっている。そしてBL13XUにおいては超高分解能のXRDが測定可能なシステム(高分解能粉末回折装置)を活用した長距離領域(~ 100 Å以上)まで正確に評価可能なPDF測定が実施可能である。現状はこれらのビームラインを実験の必要性に応じて適宜使い分けている状況である。BL13XUに関してはXRDの項目で詳細な説明があるのでここでは割愛させていただき、BL04B2、BL08Wを用いた実験の概略を以下に記す。

(1) BL04B2

BL04B2は偏向電磁石を光源としたビームラインであり、2種類のモノクロメータからそれぞれ61 keV (Si(220))、113 keV (Si(511))の2種類の高エネルギーX線を利用可能なセットアップになっている。現在は実験ハッチ上流部に検出器7連装PDF解析装置、下流部にハイスループットPDF測定装置が常設されており、目的やサンプルの形状、組成に応じて使い分けられている。

実験ハッチ上流側に設置されている検出器7連装PDF解析装置は図3のようなセットアップであり、7個のポイント型半導体検出器を用いた 2θ スキャンによってX線全散乱測定が可能になっている⁽⁷⁾。本システムは検出器としてエネルギー分解可能な半導体検出器を使用しているため、入射X



図3 SPring-8のBL04B2の検出器7連装PDF解析装置。図は文献⁽⁷⁾から引用。(オンラインカラー)

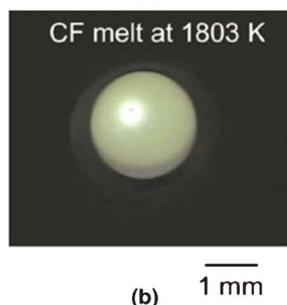
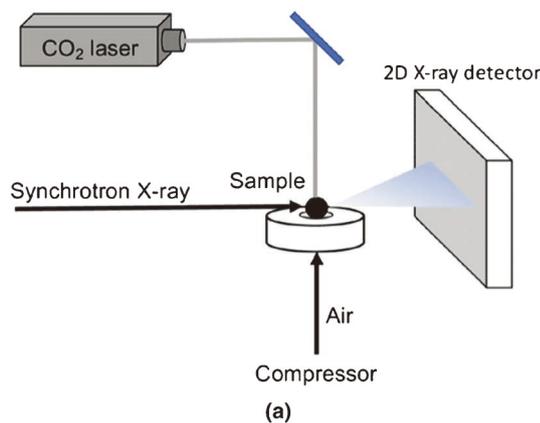


図4 ガス浮遊法を用いた高温融体測定のご概略図。空気やアルゴンガスを用いて溶融体を浮遊させレーザーを照射し加熱する。図は文献⁽⁹⁾から引用。(オンラインカラー)

線によって励起されたサンプル由来の蛍光 X 線成分を選択的に除去し全散乱成分のみを抽出することが可能である。この特徴から Pb や Bi といった重元素を含むような材料においても吸収・蛍光の影響を極小化し X 線全散乱パターンを正確に取得できるといった特徴を有する。また、一般的に放射光粉末 XRD や全散乱測定はキャピラリーに封入された粉末サンプルを測定することが多いが、本装置はガラスなどのバルク試料そのものの測定や液体等の測定も実施可能である。

また、本装置は上述の通りガス浮遊法を用いた超高温溶融体測定環境のオプションを有している⁽⁸⁾。CO₂ レーザーによる加熱機構を用いてガス浮遊したサンプルを加熱することで、無容器状態で高温融体を作り出すことが可能になっている⁽⁹⁾(図4)。この加熱システムを使用して金属材料を含む様々な高温融体のその場測定が行われている⁽¹⁰⁾。このシステムには大気下で不安定なサンプルの測定用に Ar ガス等の不活性ガスで置換された雰囲気中でガス浮遊測定を実施するアタッチメントも用意されており、操作に熟練したユーザーはそちらのセットアップも使用することができる。

一方、実験ハッチ下流側に設置されているハイスループット PDF 測定装置は図5のような装置であり、サンプルチェンジャーや高温/低温吹き付け装置、そしてこれらのサンプル環境と連携した2台の2次元検出器を用いた新しい測定システム(ハイスループット PDF 測定装置)である。本システムで使用される二次元 CdTe 検出器(LAMBDA CdTe 750 K)は広くこれまで使用されてきたフラットパネル型検出器と比べピクセルサイズが小さく、光子計数型であり短時間で高 S/N 比を有するデータの取得が可能である。これにより

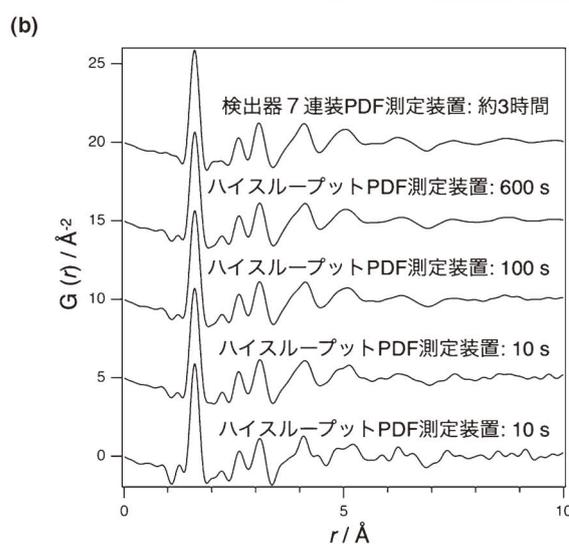


図5 BL04B2 下流部に設置されたハイスループット PDF 測定装置。(a) 装置の簡単な説明。(b) シリカガラスの PDF 測定結果。(オンラインカラー)

温度変化等の PDF 測定が容易に実施可能になるとともに既存の装置での測定と比較して最大100倍の測定の高速度が実現した。本システムを用いることで、これまでアプローチが困難であった組成・合成条件が異なる材料系の網羅的な構造情報の取得が可能になっており、2023年の10月から本格運用が開始されている。

代表的な金属材料の一つである Ni 粉末の実際の加熱 PDF 測定の実験および PDFgui⁽¹¹⁾を用いたフィッティングを実施した結果を図6に示す。本結果はそれぞれ10分の露光時間と 20°C/min の昇温時間のみで測定から得られたものであり、系統的な温度変化に関する PDF が100データ/日以上のかんりのスループットで測定可能であることが示されている。温度としては-173°Cから800°Cまでの低温から高温までの範囲がカバーされている。

(2) BL08W

BL08W はウィグラー光源の X 線を使用可能なビームラインであり、高フラックスかつ高エネルギー X 線を必要とす

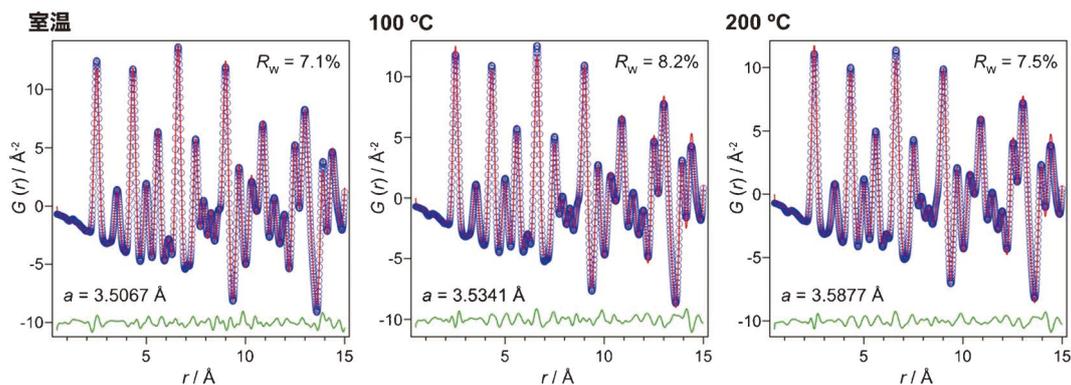


図6 ハイスループット PDF 測定装置を使用した Ni のプロットおよびフィッティング結果. 室温, 100°C, 200°C の格子定数および fitting 値が記載されている. 青丸が実験データ, 赤がシミュレーションパターン, 緑が残差を示す. (オンラインカラー)

る実験であるコンプトン散乱実験や PDF 実験, 蛍光 X 線実験などが主に実施されている. 現状では第一ハッチでコンプトン散乱, 第二ハッチでは磁気コンプトン散乱実験と PDF 測定が実施可能なセットアップが常設されている.

この BL08W では主に 115 keV, 182 keV の 2 種類のエネルギーの X 線を主に使用することができ PDF 解析においては 115 keV の X 線が活用されている. 先述の通り PDF 解析を実施する上でなるべく高い Q 領域まで全散乱パターンを測定することが求められるが, 115 keV の X 線を使用した場合 $2\theta = 20^\circ$ 程度の角度範囲でも Q_{\max} が 20 \AA^{-1} 程度の全散乱パターンが取得可能になる. 本ビームラインには縦 400 mm, 横 400 mm を超える高エネルギー X 線を大型のフラットパネルディテクターが備え付けてられており, 高エネルギー X 線とこの大面積検出器により PDF 解析に十分な角度領域の全散乱測定を高速で実施することができる. サンプル環境としても本ビームラインには広い空間が用意されており, 様々な持ち込み装置を使用した特殊環境での PDF を実施することが可能になっている⁽¹²⁾.

実際の測定環境の写真を図 7 に示す. このサンプルステージは最大で 50 kg の対荷重を有し, 様々なその場測定システムを設置した状態で鉛直方向におおよそ $\pm 50 \text{ mm}$, 水平方向に $\pm 150 \text{ mm}$ の範囲で電動ステージを使用した移動を外部から制御可能である. 測定の際にはその場測定システムを設置しおおよその位置まで目視で移動後, X 線を照射し実際の散乱パターンを確認しながらこれらの電動ステージを用いて正しい照射位置になるよう微調整して測定を行う.

4. PDF を用いた解析の例

上記のように様々なビームラインおよびセットアップが SPring-8 のビームラインには用意されており, 必要性に応じて使い分けることで多くの実験に対応可能になっている. 金属に関連する実材料の PDF を用いた解析として, 「鉄鋼精錬過程で生じるスラグの構造」を例に取り上げる. カルシウムフェライト (CF) の粘度と構造の相関を理解するために BL04B2 のガス浮遊装置を使用して高温その場 PDF 測定を実施した⁽⁹⁾ (図 8). CF 融液が空気中で融解する際の粘度低

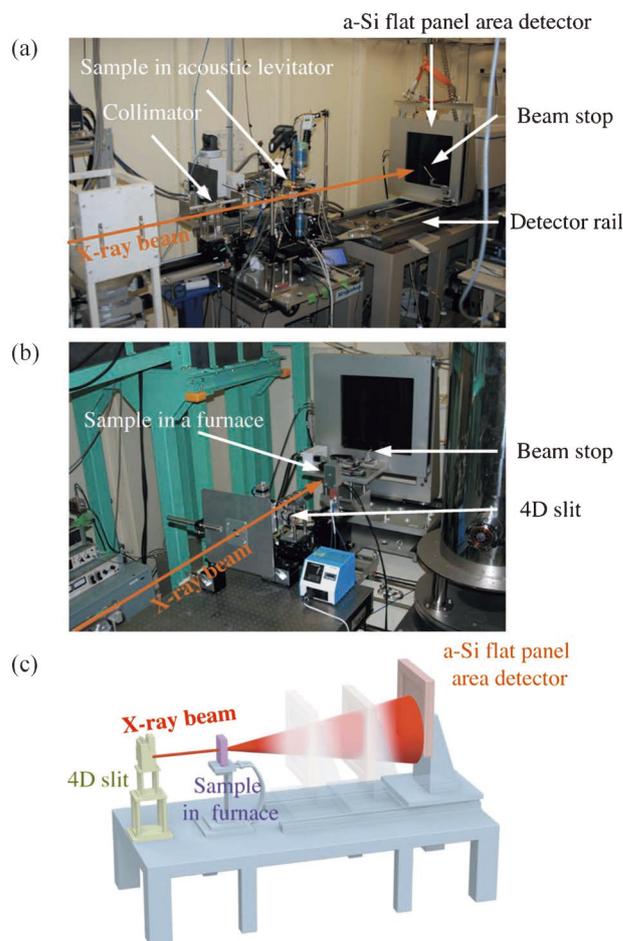


図7 BL08W に設置されている時分割 PDF 測定装置. (a) 音波浮遊装置を使用した際の写真 (b) 電気炉を設置した際の写真 (c) 装置のイメージ図. 本図からわかるように大きなサンプル空間, ディテクターが備え付けられているため, 様々な持ち込み装置に対応したその場実験を実施可能である. 図は文献⁽¹²⁾から引用. (オンラインカラー)

下の原理を説明可能な仮説として, Fe^{3+} 近傍の短距離構造の変化と Fe 酸化還元状態の変化の 2 つがこれまで考えられてきた. この研究ではガス浮遊法によって浮遊させた CF 溶融体 (1803 K) のその場放射光 X 線全散乱パターンを確認し,

放射光粉末回折装置の紹介と その場観測システムの利用事例

河 口 彰 吾¹⁾ 小 林 慎 太 郎²⁾

1. はじめに

粉末回折測定は物質の同定と材料機能の発現メカニズムを解明する上で不可欠な手段である。放射光を利用した計測では、角度分解能が高く、広い逆空間の粉末回折データの短時間取得が可能であり、多くの放射光粉末回折ビームラインが世界中に存在している。本稿では、金属関連材料に対する様々な計測のニーズを考慮しながら、大型放射光施設 SPring-8 の粉末結晶構造解析ビームライン BL02B2 と、X 線回折・散乱 I ビームライン BL13XU の第 3 ハッチ (EH3) に設置されている高分解能粉末回折装置について説明する。加えて、これらの粉末回折装置を利用したその場観測実験を中心として利用事例を紹介する。

2. BL02B2/BL13XU EH3 の放射光粉末回折装置

1999年に供用開始された SPring-8 の BL02B2 は (図 1 (a)), 偏向電磁石光源からの高い輝度を持つ放射光 X 線と大型デバイセラーカメラを利用して、高分解能の粉末回折データを得るための基盤となるビームラインとして開発され、これにより数多くの成果が創出された⁽¹⁾。BL02B2 の粉末回折装置と BL13XU の高分解能粉末回折装置では通常、内径 0.1–0.5 mm の範囲のガラスキャピラリーに少量の粉末試料を詰め (図 2(a)), 透過法により X 線回折データを取得する。X 線のエネルギー (BL02B2: 12–37 keV) やキャピラリーの直径は、試料に含まれる元素種や密度に応じて選択し、X 線吸収効果による回折強度の角度依存性が無視できるほど小さい条件下では、Rietveld 法による精密結晶構造解析が容易になる。

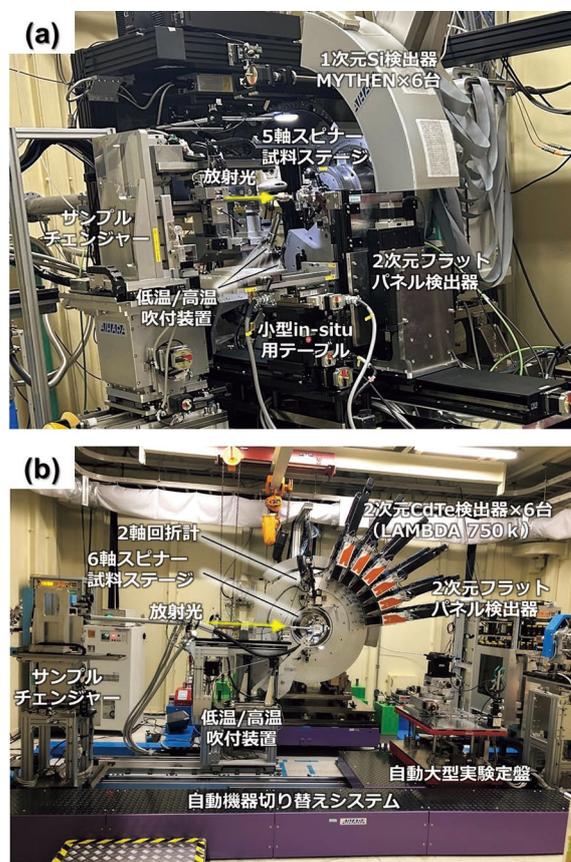


図 1 (a) BL02B2 の粉末回折装置 (b) BL13XU EH3 の高分解能粉末回折装置. (オンラインカラー)

一方で、多数の試料の温度可変かつ効率的な粉末回折データの測定はもちろん、様々な *in-situ* 計測のニーズが増大し、新たな回折データ検出システムの構築を必要となってい

* 公益財団法人高輝度光科学研究センター; 1) 主幹研究員 2) 研究員 (〒679-5198 兵庫県佐用郡佐用町光都 1-1-1)
Introduction of Synchrotron X-ray Powder Diffraction System and Demonstration of *In-Situ* Observation System; Shogo Kawaguchi and Shintaro Kobayashi (Japan Synchrotron Radiation Research Institute, Sayo-gun, Hyogo)
Keywords: synchrotron radiation, x-ray, powder diffraction, *in-situ* measurements
2024年4月1日受理 [doi:10.2320/materia.63.457]

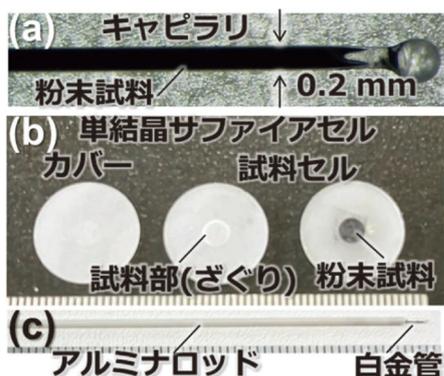


図2 高温粉末回折測定で利用可能な試料セル。(a)ガラスキャピラリ、(b)単結晶サファイアセル、(c)白金管。(オンラインカラー)

た。そこで、2015年以降、ユーザーフレンドリーかつ多様なニーズに応えられるビームラインの整備を目指し、オンラインでX線を検出可能な1次元検出器と2次元検出器の導入をはじめとする計測システムの再構築を開始してきた⁽²⁾。これらの開発により、計測自体が高速化されつつ、角度分解能の向上が実現し、数十秒でRietveld解析が可能なレベルのデータが取得可能になるなど、スループットが格段に向上した。しかし、測定のスループットが向上するにつれて、試料交換、試料位置の調整、機器・光学調整等の時間の、ビームタイムに占める割合が増大していた。そこで、サンプルチェンジャー等の導入および各種調整の自動化を進めた。これらの自動化はスループットの向上とともに実験における人的なエラーを避けることができ、データの質の向上に貢献している。

上述の1次元および2次元検出器は、秒～サブ秒オーダーの速度での回折データの計測を可能とし、この時間分解能を活かした、粉末回折による各種試料環境下での*in-situ*計測が近年展開されている。具体的には、材料が生成される固相反応⁽³⁾、水溶液中の物質の吸着やイオン交換反応⁽⁴⁾、超臨界水熱合成反応⁽⁵⁾、ボールミルによるメカノケミカル反応⁽⁶⁾のその場観測など多岐に渡る。中でも、リモートガスハンドリングシステムの開発およびビームラインへの常設により、実験ハッチ外からのバルブの開閉と圧力の制御・読取によりキャピラリ内のガス・蒸気雰囲気制御が容易となり、加えてこれらの操作と検出器制御システムとの同期も実現した⁽⁷⁾。本システムの開発は、サブ秒オーダーで進行するCO₂やCH₄などのガス吸着・分離過程⁽⁸⁾、触媒材料の水素インターカレーション合成反応⁽⁹⁾、金属・酸化物材料の酸化・還元反応⁽¹⁰⁾の時分割計測等へと広く展開されている。

一方で、より広い $Q(Q=4\pi\sin\theta/\lambda)$ 領域($Q>30\text{ \AA}^{-1}$)の粉末回折データの短時間計測、ミリ秒オーダーの高精度な粉末回折データ取得、様々なその場観測実験を行うための広い試料空間の確保、機器切り替えを含めより高度な自動化の達成等が課題として残っていた。上記の課題を解決しつつ、様々なユーザーのX線回折・散乱を用いた分析における多様な

試料環境下でのプロセス解明など、多岐に渡るニーズに対応することを目的として、X線回折・散乱IビームラインBL13XUのEH3に高分解能粉末回折装置を開発してきた。本装置と、挿入光源からの高輝度かつ高エネルギーX線(16–72 keV)が利用可能であり、BL02B2と比較して100倍以上の輝度のX線の利用が可能である。さらに、高エネルギーX線利用に対応した6連装の2次元CdTe検出器LAMBDA750kが搭載されている(図1(b))⁽¹¹⁾。本計測システムを用いて、kHzオーダーの時間分解計測やより高い角度分解能の粉末回折パターンの計測を行うことで、これまで観測が困難であった高速の結晶構造・相変化、材料の動作挙動の計測が可能となる。また、透過力の高い高エネルギーX線の特徴を活かすことで、電池や実試料の合成に用いる容器の内部の結晶相情報の取得が可能となる。加えて、高精度の広いQ領域のデータ取得により、結晶構造や電子密度解析に加えて、結晶性材料からナノ粒子に至るまでPair Distribution Function(PDF)解析による局所原子配列構造の評価も実施されている。自動機器切り替えシステムも搭載され、自動大型定盤ステージと広い試料空間を利用した様々な*in-situ/operando*実験が展開されている。

試料環境の開発にも力を入れており、試料温度は約5–1900 K、N₂やAr等の不活性、O₂、H₂ガス等の圧力制御(約1 Pa–1000 kPa)、ガス導入しながら試料の回転が可能なスピナー、400 MPa/180°CまでのMPaオーダーの圧力精密制御下での計測などを実現する装置を開発しており、これら装置の組み合わせにより多様な試料環境下での計測が実施できる。これらの試料環境を用いた時分割計測を行うために、多連装検出器を2θ軸の正負方向へ非対称に配置して回折データを取得する“シングルステップモード”を導入し、正負の角度範囲のデータを組み合わせて多連装検出器間のギャップ領域のデータを補完することで、BL02B2では百ミリ秒オーダー、BL13XUではミリ秒オーダーで2θ範囲の欠落なく、2θで0.6–38°までの回折データの取得が可能である。これらの放射光粉末回折装置の詳細は、文献をご参照いただきたい⁽²⁾⁽¹¹⁾。

3. その場観測を実現する多彩な高温試料環境

放射光粉末回折実験において、温度変化下での回折パターンの計測は頻繁に行われている。本誌に関連する金属関連材料についても、相転移挙動、アニール熱処理、溶融・凝固過程など実験のターゲットとなる材料や温度範囲も広い。これらの各種ニーズに合わせて、多様な加熱機構(図3)やそれに適した試料セルの開発を進めている。

放射光粉末回折測定において用いられる、石英製のキャピラリは、最大1100°C程度の加熱下で使用可能である。キャピラリ試料を、ビームラインに常設された高温N₂ガス吹付装置や電気炉を用いて加熱することで、それぞれ最高800°C、1100°C程度の加熱下での粉末回折パターンを取得できる。特に、高温吹付装置は、サンプルチェンジャーとの併用や低

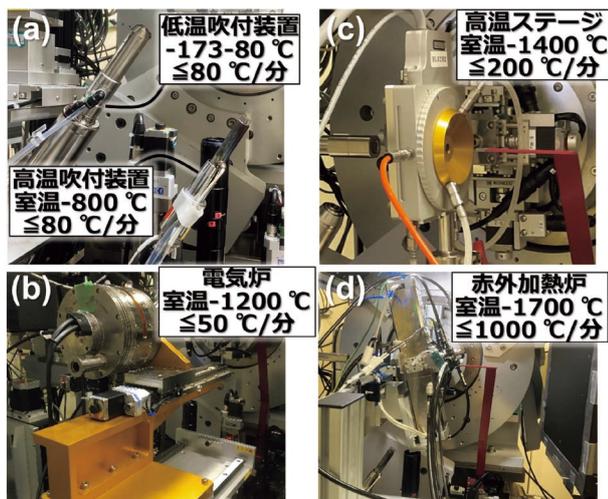


図3 BL02B2/BL13XU EH3で利用可能な(a)低温/高温吹付装置, (b)電気炉, (c)高温ステージ, (d)赤外加熱炉。(オンラインカラー)

温 N_2 ガス吹付装置との自動交換により, BL02B2 では最大50試料, BL13XU EH3 では100試料の, -173°C から 800°C の温度範囲の全自動測定が実施できる⁽²⁾⁽¹¹⁾.

一方で, 1000°C 以上の温度域では, 石英キャピラリの軟化・破損や測定試料と石英の高温接触反応が, 計測の妨げになることがある. 多様な材料の幅広い温度域でのその場観測を実現するために, ガラスキャピラリを使用しない粉末回折用試料セルとそれに合わせた加熱機構の開発も進めている⁽¹²⁾. その1つは, 図2(b)に示す単結晶サファイアセルである. ザグリ部に粉末充填を行い, カバーで挟むだけの簡便な試料マウントにより利用可能である. 酸化・還元ガス雰囲気下での実験用途に合わせて, ガス流通穴を設けたカバーも用意されている. 本セルを使用した際の最高加熱温度は, 高温ステージを使用した場合は常用 1300°C (最大 1400°C), 赤外加熱炉を用いた場合は, 1700°C である. これらの加熱装置は, 加熱速度も優れており, それぞれ $200^\circ\text{C}/\text{分}$, $1000^\circ\text{C}/\text{分}$ で昇降温可能である. また, 大気, O_2 , 不活性, Ar/H_2 ガスフロー (900°C 以下) 等の雰囲気制御を行うことができる. 加熱装置に, ガスクロマトグラフィ分析計や質量分析計を接続することで, 加熱時の排出ガス成分分析を行いながら, 粉末回折データを取得するオプションも用意されている. 加えて, BL13XU EH3 では, 60 keV 程度の高エネルギー X 線を利用することで, 金属管内部の粉末試料の高温下の粉末回折パターンが取得可能である. 図2(c)に示す極薄の白金製のキャピラリ (内径 0.45 mm , 外径 0.5 mm) と赤外加熱炉を用いることで, 最高 1700°C 程度までの加熱測定が可能である. 本システムでは, スピナー機構を用いて試料を連続回転させながら計測することにより, 結晶粒成長が進行する高温下においても, 比較的均一なデバイリングを取得できる. これらの加熱機構に加えて, BL02B2 に常設されたヘリウム吹付装置の利用により最低 30 K の, クライオスタット冷凍機を用いることにより最低 5 K の極低温の回折測定が実施可能である.

4. その場観測の計測事例

(1) 圧電結晶材料の短時間温度変化測定

低温・高温吹付装置を利用した計測事例として, 圧電結晶材料として知られている KNbO_3 の結晶相の温度変化の測定結果を紹介する. KNbO_3 は昇温により菱面体晶から正方晶, 正方晶, 立方晶へと多段階の構造相転移を示す⁽¹³⁾⁽¹⁴⁾. 今回は, BL13XU EH3 において, これらの構造相転移に伴う粉末回折パターンの変化を, シングルステップモードにより計測した⁽¹¹⁾. 各温度での露光時間は 1 秒 とし, 昇温速度は $80^\circ\text{C}/\text{分}$ とした.

図4(a)に KNbO_3 の粉末回折パターンの温度変化を示す. 最大角度 38° まで回折ピークが, 高い S/N 比で観測されている. 加えて, -20°C , 233°C , 433°C において, 構造相転移に対応した回折ピークの変化が観測された. これらの温度は, 先行研究で報告された相転移温度とよい一致を示す⁽¹³⁾. 各相の粉末回折パターンは, 菱面体晶の空間群 $R3m$, 正方晶の $Amm2$, 正方晶の $P4mm$, 立方晶の $Pm-3m$ の結晶構造モデル⁽¹⁴⁾ で再現可能であり, Rietveld 解析において良好なフィッティング結果が得られた. 図4(b)に格子定数の温度依存性と各相の結晶構造を示す. 結晶構造の描画には VESTA ソフトウェアを使用した⁽¹⁵⁾. 構造変化に伴う格子定数の変化が明瞭に確認されている. 本測定は, わず

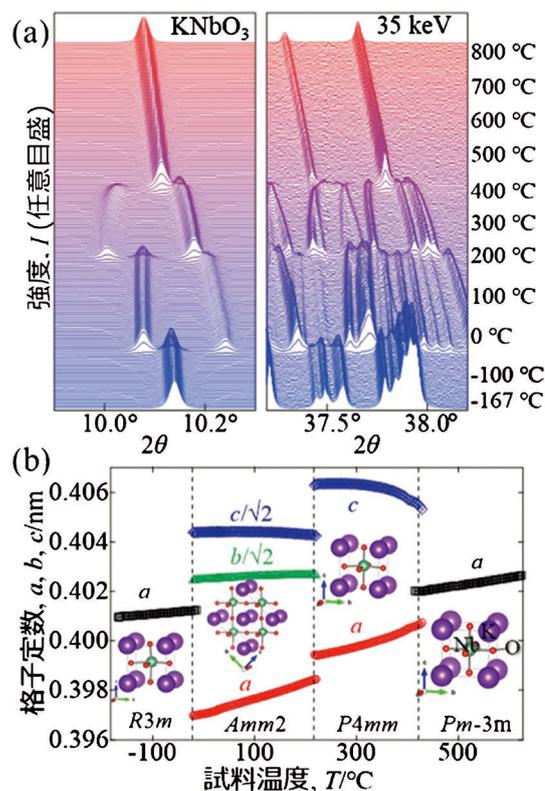
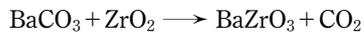


図4 KNbO_3 の(a)粉末回折パターンと(b)格子定数の温度依存。(オンラインカラー)

か20分程度で完了しており、約300点におよぶ幅広い温度の結晶構造データの短時間取得が実現されている。本計測法は、固溶量の異なる材料の温度・組成相図作成、熱量分析・物性測定や材料合成の条件に合わせた昇降温速度での結晶相変化の計測などを短時間で実現する強力な解析手法となりうる。

(2) プロトン伝導性酸化物における高温環境下での合成過程評価

BaZrO₃は、元素添加により、数百度の温度域で高いプロトン伝導性を示すことから、固体酸化物燃料電池の候補として注目されている⁽¹⁶⁾。合成には、1100°C以上での加熱が必要であり、かつ合成原料であるBaCO₃は高温域で石英と反応するため⁽¹⁷⁾、キャピラリを用いた高温計測は困難である。また、BaZrO₃の生成は、BaCO₃およびZrO₂を原料として、以下の化学反応式のもと進行すると考えられる。



つまり、CO₂の発生を伴うBaCO₃の分解反応が合成時に進行する。本実験では、Arガスフロー下で昇温過程の回折パターンを取得し、同時にガスクロマトグラフィ分析計により排出されるCO₂の検知を試みた⁽¹²⁾。サファイアセルを用いることで、原料と試料セルの高温反応を軽減させ、かつ高温ステージを用いることで1100°C以上の加熱を行った。

図5に粉末回折パターンの温度変化を示す。800°C以下では、原料であるBaCO₃とZrO₂により、すべての回折ピークは帰属された。850°Cおよび1000°Cの、BaCO₃の回折パターンが変化しているが、これはBaCO₃の逐次相転移に起因する。さらに高温では、7°付近において、BaZrO₃で帰属されるブロードな回折ピークが現れ、温度上昇とともにその強度が増大した。図5右に、ガスクロマトグラフィ分析計で算出したCO₂由来の信号強度の温度依存を示す。7°のブロードな回折ピークが観測され始める温度域で、CO₂の信号

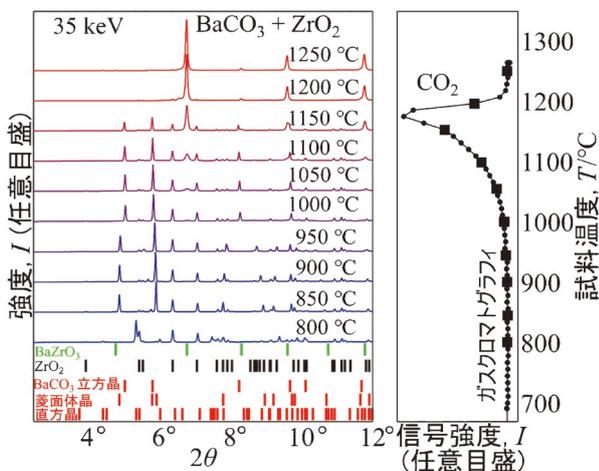


図5 BaCO₃とZrO₂の混合粉末試料の粉末回折パターンとガスクロマトグラフィ分析計で観測したCO₂由来の信号強度の温度依存。AIP Publishingの許諾を得て文献⁽¹²⁾から転載。(オンラインカラー)

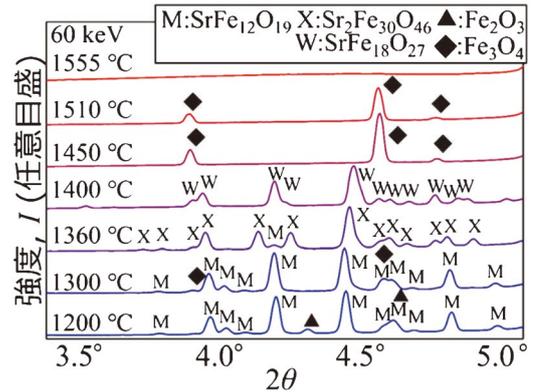


図6 M型フェライト材料とFe₂O₃混合試料の粉末回折パターンの温度依存。(オンラインカラー)

強度が増大していることが分かる。つまり、BaCO₃の分解反応が起きた直後に、BaZrO₃相が生成されることが確認された。実験レイアウトや解析の詳細は、文献をご参照いただきたい⁽¹²⁾。

(3) フェライト磁石材料の高温結晶相変化観測

最後に、フェライト磁石材料を題材に、超高温加熱下の結晶相変化観測を行った。フェライト磁石は重量比率でトップシェアを占める磁石であり、近年は、その高性能化を目指して、現在主流のM相フェライトをベースとしたものだけでなく、X型やW型フェライトなどの他構造の磁石の研究開発も行われている⁽¹⁸⁾。これらの結晶相は1300°C以上の高温で生成される高温安定相であり⁽¹⁹⁾、その相生成条件を直接検証することは困難である。

本研究では、X型やW型フェライト等の高温生成過程の直接観測を目的とし、BL13XU EH3にて赤外加熱炉を用いた粉末回折測定を行った。M型フェライトSrFe₁₂O₁₉とヘマタイトFe₂O₃を重量比9:1で混合した粉末を、白金管内に充填し、20°C/分の速度で加熱しながら回折データを取得した。

図6に粉末回折パターンの温度変化を示す。白金に由来した回折ピークも観測されたが、表示領域には存在していない。1200°Cの回折パターンは、原料であるM型フェライトとFe₂O₃で帰属可能である。その後温度を昇温すると、1360°CにおいてはX型フェライトが、1400°CにおいてはW型フェライトが、1450°CにおいてはFe₃O₄が主相として観測された。その後1555°Cにおいては白金以外の回折ピークが観測されず、試料が熔融したことが考えられる。これらの結果は、先行研究の相図⁽¹⁹⁾と矛盾しない。このように、赤外加熱炉を用いることで、1300°Cを超える温度域での結晶相変化の直接観測に成功した。

5. おわりに

本稿では、BL02B2/BL13XU EH3の粉末回折装置とその

SPring-8 におけるダイヤモンドアンビルセルと放射光 XRD を組み合わせた研究・開発の“今”

河 口 沙 織*

1. はじめに

圧力は温度とならび、重要な物理パラメータのひとつである。そのため、高圧力条件下における物質の性質を調べることは、根源的な学問上の価値を有する。また、物質へ圧力を印加することにより、原子間距離が縮まり、原子や分子の配列が著しく変わる。圧力が印加された物質は、時に常圧下では想像もつかないような物性を示すこともあり、高圧下における魅力的な物質合成現象、物理現象を解明すべく研究が盛んに行われている。特に、1 万気圧以上の超高圧力を試料に与える手法は大別して二つある。大容量高圧プレス装置、そしてダイヤモンドアンビルセルを用いる静的圧力発生法と、火薬銃、ガス銃やレーザーによる衝撃圧縮を利用した動的圧力発生法である。これら高圧発生装置は手法、程度に差はあれ、静的圧縮実験における試料の小ささ、衝撃圧縮実験においてはその現象の高速変化を捉えるため、放射光 X 線と組み合わせた研究開発が長きに渡り行われてきた。なかでもダイヤモンドアンビルセル(DAC)は、実験室レベルで1 万気圧を超える超高圧を容易に発生させることが可能であり、非常に小型で汎用性が高い。高輝度放射光施設 SPring-8 においても、X 線回折法、X 線散乱法のみでなく X 線イメージング、X 線非弾性散乱、X 線磁気円二色性や X 線吸収などの分光測定など、様々な測定手法のもとで用いられている。本稿では、大型放射光施設 SPring-8 における DAC による高圧その場 X 線回折計測に特化したビームライン(BL)である BL10XU の概要、およびそこで行われている最新の研究、計測技術開発についてご紹介させていただく。

2. ダイヤモンドアンビルセル(DAC)

高圧発生装置 DAC は、一対の対向するダイヤモンドアンビルの先端に試料を挟み込み、両側から荷重をかけることで試料部に0.1~500 GPa以上(1 GPa \approx 1 万気圧=10 トン/cm²)の高圧力を印加することが可能な装置であり、多様なデザインの DAC があるが、どれも等しく手のひらに乗るほど小型で軽量であることが最大の特長である。プリリアントカット(宝飾用カット)された単結晶ダイヤモンドの先端を、平に削り取ったキュレット面をもつアンビルを用いることが多い。DAC の試料室は、金属板(ガスケットと呼ばれる)にドリルや放電加工、レーザーなどで穴を開けることで作製され(厚み0.5-0.02 mm 直径1.0-0.01 mm)、試料室穴が空いたガスケットを両側からダイヤで挟みつける形で圧力発生させる。ガスケットの役割は、加圧時に試料を封じ込めること、圧力を保持することである。割れにくく粘り強い材質の金属であるステンレスやレニウム、タングステンなどが用途に応じて使い分けられている。実験に応じて、X 線透過率の高いベリリウムやセラミックガスケットを用いることもある。可視光、および X 線を利用した試料の観察のため、ダイヤモンドアンビル材を支えるための台座にはスリットまたはコーン状の開口部が設けられているが、アンビルを保護するため、それら開口角は大抵40-60度、最大でも90度以下に制限されてしまう。高圧装置そのものが与える荷重には上限があるため、発生圧力はキュレット面サイズで決まる。例えば先端径0.5 mm のダイヤモンドアンビルでは、最大発生圧力は40 GPa 程度であり、300 GPa を超す超高圧発生を目指す場合、そのキュレット面を直径数10 μ m 以下まで小さくなくてはならない。いずれの手法を利用する場合にも、DAC

* 公益財団法人高輝度光科学研究センター 放射光利用研究基盤センター 回折・散乱推進室；主幹研究員(〒679-5198 兵庫県佐用郡佐用町光都 1-1-1)

High-pressure Research and Development Combining Diamond Anvil Cell and Synchrotron XRD at SPring-8; Saori Kawaguchi-Imada (Diffraction and Scattering Division, Japan Synchrotron Radiation Research Institute, Sayo-gun, Hyogo)

Keywords: *high pressure, diamond-anvil cell, in-situ observation, synchrotron x-ray diffraction, BL10XU/SPring-8*

2024年4月1日受理[doi:10.2320/materia.63.462]

内の試料に対してはマイクロ～サブミクロンオーダーのサイズのプローブが必須であることは明らかである。試料に均質な圧力(静水圧)を印加するため、試料よりも柔らかい圧力媒体で試料を挟み込むことがほとんどである。圧力媒体は、メタノール+エタノール混合液、NaClやKCl粉末、SiO₂ガラス、試料組成のゲル、Arガス、Heガス、Neガスなどが一般的に使用される。試料と反応しない物質を選択することが重要である。また、試料を高圧下レーザー加熱などで融解する場合、ダイヤモンドアンビルと試料間の反応を防ぐため、サファイア単結晶板や酸化アルミニウム粉末で試料を挟み込むこともある。圧力媒体は試料とほぼ同様の厚みで試料室に封入されているほか、ダイヤモンドアンビルは試料と比較し、100-1000倍の厚みを有する。DACを用いたXRD計測を行う場合、その微小な試料量、および圧力媒体、アンビル材による吸収やバックグラウンドの影響を考慮しなくてはならない。これらDACの実験的困難さを踏まえ、DAC内の高圧試料のXRD計測を実現すべく、1997年にBL10XUの共用が開始された。

3. 高圧構造物性 BL10XU

SPring-8のBL10XUは、DACを用いた高圧かつ微小試料をターゲットとしたその場X線回折(*in-situ* XRD)測定による構造可視化に特化したBLである。挿入光源の光を利用することで、極めて高い輝度と高エネルギーX線(6-62keV)の利用が可能である。DACを用いた高圧*in-situ*

XRD計測において、SPring-8の高輝度かつ高エネルギーX線の重要度はとても高く、実際、我々はXRD計測において、30 keV以上のX線を利用することがほとんどである。図1にDAC内の試料室の概略図と、各エネルギーのX線を利用した際の12.7 GPaにおける、hcp構造をとる純鉄のXRDパターンのシミュレーション結果を示した。開口角60°(±30°)の台座を有するDACを用いた場合、12.4 keVのX線を利用すると2本の回折線のみが観察される。一方で、30 keV-62 keVのX線を利用した場合、解析により構造を推定するに足る情報を得ることが可能である。また、2 mmのアンビル材を1対利用し、加圧軸方向にXRD計測を行った場合、12.4 keVのX線を利用した場合、アンビル材のX線吸収は80%以上であるが、30 keV以上のX線を利用すると、吸収は10%以下となる。高圧XRD計測において、高エネルギーX線の利用は不可欠である。一方、DAC中の試料は微小であり、サイズは数百μmから数μmと、様々な大きさの試料を扱わねばならない。BL10XUでは集光光学系を切り替えることで、ミリサイズからサブミクロンサイズ(最小0.8 μm(H)×0.8 μm(V), FWHM)までのX線集光ビームを提供している。BLの詳細はSPring-8 Webページを参照いただきたい。

BL10XUでは実験ハッチを2つ有しており、実験ハッチ1では4K GM冷凍機を用いた極低温下(>7 K)における単結晶・粉末X線回折測定を、実験ハッチ2では室温下およびヒーター材を利用した抵抗加熱システム(<1500 K)、もしくはレーザー加熱・輻射温度測定システム(<6000 K)を利用しての高温下におけるXRD測定と、サブミクロン微小径X線を利用した超高圧下におけるXRD測定を行っている。4K GM冷凍機(クライオミニ, 岩谷瓦斯)は、DAC内の試料サイズが小さいことを考慮し、振動が10 μm以下となるようホルダー形状を設計している⁽¹⁾⁽²⁾。

抵抗加熱装置として、バンドヒーター、およびヒーター材そのものをDAC内部に設置する外部抵抗加熱DACを利用可能である。2023年度には、これら外部抵抗加熱装置と、XRD計測システムを組み合わせた自動計測基盤開発を行い、事前に目的温度リストをエクセルシートに記入することで、目的温度に到達するごとに自動でXRD計測を行うことが可能である。

レーザー加熱システムには最大出力100 Wのファイバーレーザー(SPI Lasers社, SP-100C)2台が搭載されており、試料両面からレーザーを照射することで、試料内の温度勾配を軽減するシステムとなっている⁽³⁾。レーザー加熱システムにおける試料観察用の光学系には無限遠補正光学系を採用しており、対物レンズとして焦点距離80 mm、結像レンズとして焦点距離1058 mmのレンズを用いている。これらのレンズは、600~800 nmの波長域の収差を低減すべく、設計したものである(Opt Sigma社)。材料合成を目的とするようなレーザー加熱システムを用いた高温実験では、試料組成の均一性および物性測定データの精度は、どれだけ均一に試料を加熱できるかに強く依存する。そのため、最近、

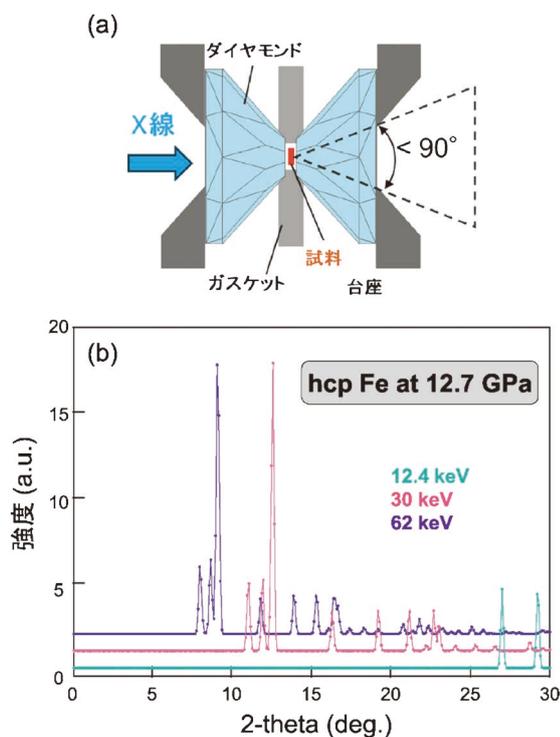


図1 (a) DACと試料構成の概略図、(b)12.7 GPaの高圧下における純鉄の各X線エネルギーにおけるXRDパターンのシミュレーション結果。(オンラインカラー)

BL10XUでは、フラットトップ加熱を実現するために、フォーカル π シェーパー(Focal- π Shaper 9_1964, AdlOptica)とレーザーエキスパンダーの組み合わせによる光学系を設計した。フォーカル π シェーパーは集光レンズを用いることで焦点位置でのフラットトップ加熱を実現する光学系である。図2(a), (b)は白金箔を試験加熱した際の温度測定結果である。これらの装置を組み合わせることで、試料位置で直径15~100 μm までのフラットトップ加熱が実現されている。レーザーの出力、レーザー加熱サイズは、実験ハッチ外からリモート制御が可能である。

また、圧力制御に関しては、ガス圧メンブレン駆動DACによるリモート圧力制御を実現している。メンブレン駆動DACとは、DACのピストン側にメンブレン(金属風船のようなもの)を取り付け、メンブレンにガス圧をかけると、ピストンが駆動して試料を加圧する仕組みであり、2系統のガス圧制御システム(株式会社プレテック)を開発した。ガスボンベからのガス圧は、ガス圧制御装置内のガス圧レギュレーターとマスフローコントローラーにより目標圧力まで減圧され、所定の流量でDACに供給され、最大18 MPaのガス圧を安全に供給することができる。

XRD計測用検出器として、両実験ハッチには大面積イメージングプレート(IP)検出器(読み取り分解能0.1 mm, エリ

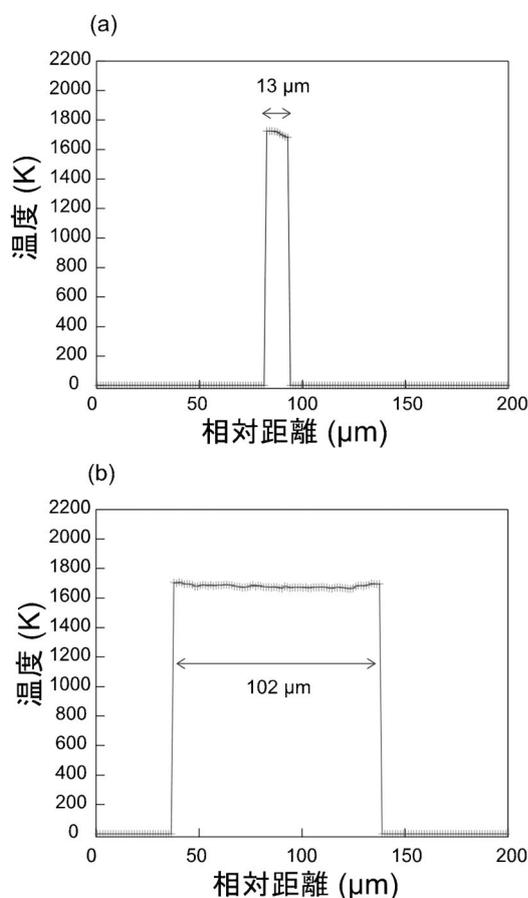


図2 (a), (b)レーザー加熱システムによる最小、および100 μm 以上のサイズのレーザースポット径で白金箔を試験加熱した際の温度測定結果。

アサイズ300×300 mm^2)と、実験ハッチ2にはX線フラットパネル検出器(FPD)(ピクセルサイズ0.1 mm×0.1 mm, エリアサイズ約410×410 mm^2)が搭載されている(図3(a))。IPは、大面積で読み取り分解能が高く、ダイナミックレンジが広いが、読み取り時間に数分を要する。一方、FPDは、高感度で数~数十 Hz という高速撮像が特徴であり、BL10XUでは0.01°に相当する高角度分解能を実現する。図3(b)は、30 keVにおいて水平垂直方向ともに10 μm 以下まで集光したマイクロビームを用い取得した CeO_2 (厚み80 μm)のXRDデータに対し、精密構造解析を行った結果である($\pm 5^\circ$ 揺動×2周, 測定時間約60秒)。試料揺動ステージと同期させることで、従来イメージングプレートを用いて10分以上かかっていた構造解析を目的としたXRD測定が、約1分で完了するようになった。さらに2020年度からは、CdTeハイブリッドピクセルアレイX線検出器(X-Spectrum社, LAMBDA CdTe 750k, ピクセルサイズ55 μm × 55 μm , エリアサイズ512×1528ピクセル)が導入され、こ

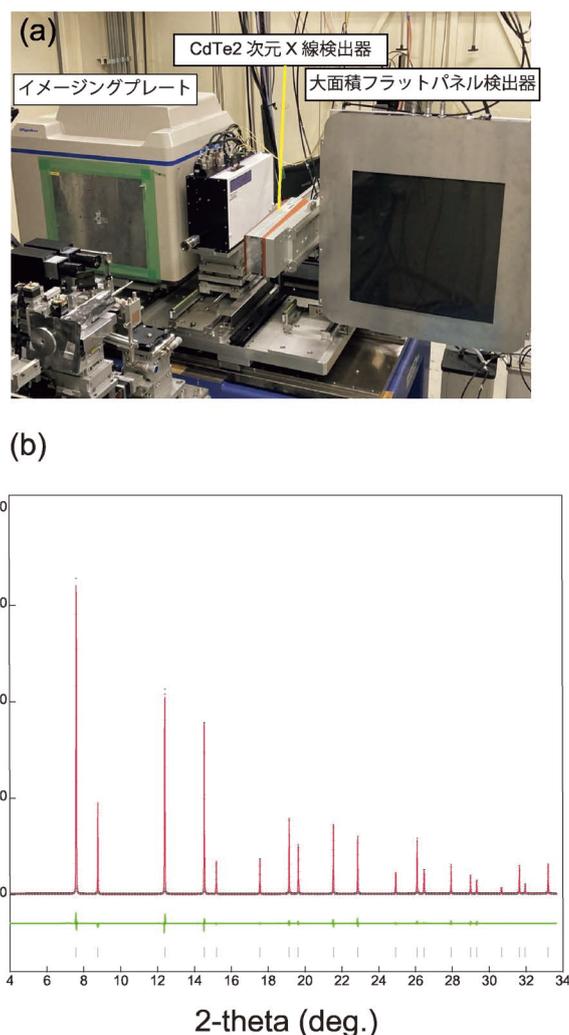


図3 (a)BL10XUの実験ハッチ2における検出器, (b)FPD検出器を用い取得した CeO_2 の精密構造解析結果。(オンラインカラー)

れにより最大 2 kHz までの高速測定が可能となった。この高速検出器を用いた計測基盤システムと研究例について、本稿の最後にご紹介させていただく。

ここまで、BL10XUにおけるXRD計測の概要をまとめたが、BL10XUの最たる特色はXRD測定と他の測定技術の組み合わせにあり、中でもラマン分光測定、電気抵抗測定はその代表と言えよう。特にラマン分光測定による試料の格子振動や分子振動に関するデータは、X線回折による結晶構造解析に対し相補的な情報を供する。さらにダイヤモンドアンビルのラマンスペクトルや試料室内に試料と共に封入したルビーの蛍光スペクトルを測定することで、圧力変化に伴う波数や波長のシフトから圧力を算出することも可能である。実験ハッチ1には、カーボンミラー式の長焦点光学ユニットを備えたラマン分光システムが導入されており、試料のX線回折とラマン分光を同時に測定できる設計になっている。実験ハッチ2には、より高い位置分解能を有する共焦点ラマンシステムが導入されており、2~3 μm の高い位置分解能および35 μm 以下の深さ解像度を実現している。

このように、BL10XUではXRD計測を主軸として、DAC中の微小な高圧試料の情報を最大限に引き出すための基盤整備が行われてきた。次項では、BL10XUにおける計測基盤を活用した最新の研究例をいくつかご紹介したい。

4. 進化するDACを用いた高圧放射光XRD計測基盤と利用研究の最前線

BL10XUは、1997年の運用開始以来、SPring-8の高輝度と高エネルギーX線を駆使し、DACを活用した極限条件下でのX線回折測定を中心に、多くの科学的発見を促してきた。この施設で扱われる研究領域は、基礎物理学から材料科学、地球惑星科学に及ぶ広範囲に渡る。ここでは、特にBL10XUで行われている金属関連材料をターゲットとした最新の研究事例を紹介する。

高圧物性研究といえば、超伝導体をターゲットとした研究はいつでも注目の的である。上にBL10XUはXRDと複合計測が強みと記した通り、電気抵抗測定とXRDの同時複合計測基盤を最大限活用した研究分野のひとつとも言える。これまで、BL10XUを利用することで、例えば220 GPaという超高压下では29 Kと高い超伝導転移温度をもつCa⁽⁴⁾などの単体元素をはじめとし、多彩な試料を対象に研究が行われてきた。なかでも、水素は500 GPa以上の極高压下で室温超伝導体になることが理論的に予言されている⁽⁵⁾⁽⁶⁾。水素の室温超伝導体化が予言されてから約60年が経過し、かつては静的圧縮実験における500 GPa超の高压発生が夢物語とされていた時代もあった。しかし、2012年にDubrovinskyら⁽⁷⁾によって、先端サイズを10 μm 程度にまで整形したマイクロアンビルを利用しての600 GPaを超える超高压を実現する実験が報告されて以来、マイクロアンビルの設計に関する世界的な取り組みが加速している。この流れの中で、日本もこの超高压技術の開発に積極的に挑戦して

いる。境ら⁽⁸⁾を筆頭に、国内の研究チームは高压発生技術の革新を目指し、マイクロアンビル設計の最適化に取り組んでいるが、その際BL10XUにおけるサブミクロンビームの利用が重要な役割を果たしている点を付け加えておきたい。

近年では、より低い圧力でも高温超伝導が期待される水素化合物に焦点が当てられている。Drozdovら⁽⁹⁾は硫化水素が150 GPaで203 Kで超伝導となることを発見したが、その後BL10XUで行われた高精度のX線回折実験と電気抵抗測定により、硫化水素の超伝導相とその結晶構造が解明された⁽¹⁰⁾。その後、約200 GPa程度で250~260 Kの高温の超伝導転移温度を示すLa水素化物、LaH₁₀が報告された⁽¹¹⁾⁽¹²⁾。BL10XUを利用した研究グループからも、La水素化物に注目した成果が次々に報告されている。例えばSemenokら⁽¹³⁾はLaH₁₀に磁性を持つNd原子をドーピングさせることで、その超伝導特性が著しく抑制されることを明らかにした。三元系ではじめて実験した。Songら⁽¹⁴⁾は、これまで二元系のみ限定されていた超伝導体水素化物の探索を三元系へと拡張し、LaBeH₈の超伝導を観察した。LaBeH₈で観察された110 Kという超伝導転移温度はLaH₁₀のそれを上回ることはなかったものの、この成果は重要な進歩である。言わずもがな、室温超伝導体の探求は現代科学の大きな目標の一つであり、BL10XUは引き続きその一助であり続けたいと考えている。

更に室温超伝導体の探求やその発現メカニズムの解明のみならず、多機能材料の開発を視野に入れた物質材料研究も盛んにおこなわれている。水口ら⁽¹⁵⁾は、遷移金属ジルコナイド超伝導体CoZr₂に圧力をかけることで、体積熱膨張率が負になることを明らかにした。この実験は、これまでユーザー技術依存であったヒーターを用いた加熱システムと、XRD計測基盤を組み合わせた自動計測基盤を利用しての初めての結果であり、BL10XUとしても新たな歴史の幕開けといえる成果である。

このように、昨今の技術発展によりDAC用いた静的な圧力発生のもと、放射光X線を活用して数多くの研究が成されてきた一方、DAC中の試料の温度・圧力などのパラメータを変化させながらの動的構造計測技術は世界的に未だ着手され始めたばかりである。高性能新奇材料探査を目的とする研究において、試料合成パスの確立方法を明らかにし、生成メカニズム解明のため高温・高压下におけるその場・動的変化観察による反応過程の可視化が強く求められている。そこで我々はBL10XUにおいて、DACを用いた複合動的環境下におけるサブミリ秒XRD計測技術の開発を行った⁽³⁾。デジタル遅延パルス発生器による外部トリガ制御により、最高2 kHzでの高速撮像が可能である2次元X線検出器LAMBDA 750k(X-spectrum社)とレーザー加熱・温度測定システム、ガス圧制御システムを同期させることで、レーザー加熱による瞬間加熱の制御、高速加減圧実験中における試料の結晶構造変化の可視化を実現した。本稿では、なかでもミリ秒パルスレーザー加熱に関する計測結果をご紹介したい。

レーザー発振器のアナログ入力によるパワー制御はファン

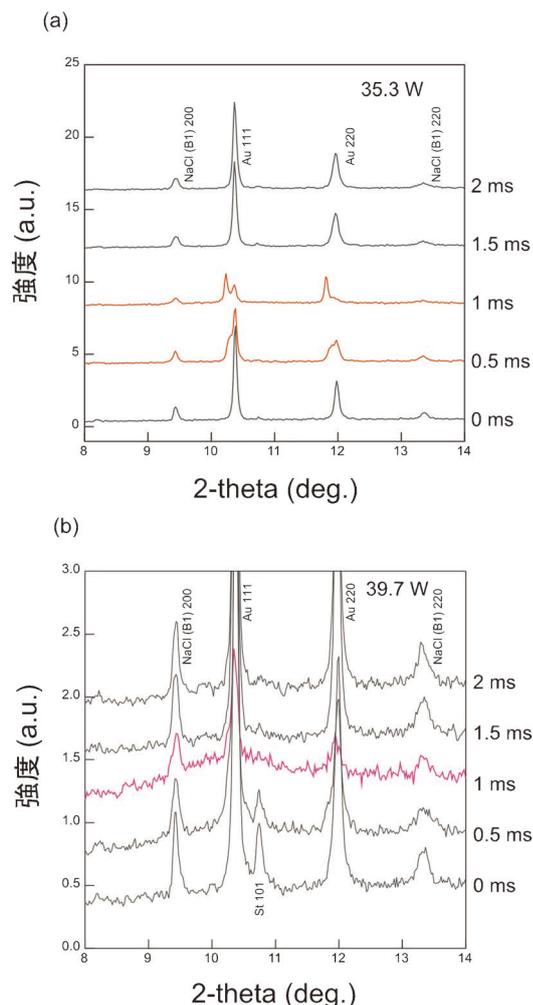


図4 SiO₂ペレット, Au箔を圧力媒体であるNaClペレットで挟み込んだ状態で充填し, 20.3 GPaまで加圧後, 1ミリ秒のパルスレーザー加熱と同時に, 0.5ミリ秒の連続XRD計測を行った結果. それぞれのレーザー出力は(a)35.3 W, (b)39.7 Wである. (オンラインカラー)

クシオンジェネレーター(Keisight社, EDU33210A)を用いることで, マイクロ秒レベルまでの加熱パルス幅を実現可能としている. Re板を厚み40 μm程度まで予備加圧し, 放電加工により穴径100 μmの試料室を整形した. 整形した試料室内に, SiO₂ペレット, Au箔を圧力媒体であるNaClペレットで挟み込んだ状態で充填し, キュレットサイズ300 μmのダイヤモンドアンビルを用いて室温で20.3 GPaまで加圧した. レーザー加熱スポットの直径は30 μm以上に設定しており, 本実験での集光X線ビームサイズ(9.5 μm(H)×6.5 μm(V), FWHM)と比較し十分に広い領域を加熱している. 図4(a)は, 上下流合わせたレーザーパワー出力が35.3 W, かつ1ミリ秒のパルスレーザー加熱と同時に, 0.5ミリ秒の連続XRD計測を行った結果である. 1ミリ秒パルスのレーザー加熱に対し, Auの111および220ブラッグ反射由来するXRDピークが, 加熱によってスプリットしていることがわかる. さらに加熱後, それぞれのブラッグ反射ピーク的位置は元の散乱角位置へと戻った. このことは, レーザー

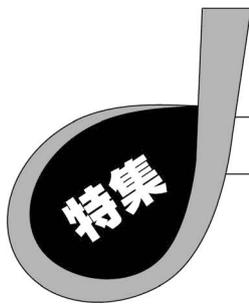
加熱によって試料に熱が均一に拡散する前に加熱プロセスが終了したことを示唆している. さらに, より高いレーザー出力で加熱を行った実験ではハローパターンが観察され, 1ミリ秒のパルス加熱でAuを溶融できていること, さらに, 試料に依存するが, 固体由来のXRDパターンと比較して微弱な液体のハローパターンがしっかり撮像されていることが示されている. この実験では, 加熱開始から2ミリ秒後に試料が完全に冷却固化した(図4(b)).

レーザーによる瞬間加熱実験は, 加熱時間を変化させての試料合成パス制御を目的とする実験のみでなく, アンビルや圧力媒体との化学反応を防ぐためにも有用性が高い. 加熱時間の精緻な制御はBL10XUにおけるDACを用いた高圧下でのレーザー加熱実験の可能性を大きく広げるものであると言えよう. 今回ご紹介したパルスレーザー加熱実験は, サブミリ秒XRD計測基盤の一例に過ぎず, 実際はレーザー加熱のみでなく, 上記ご紹介したガス圧制御装置と同期しての急激加減圧実験が可能である. 加えて, 本計測基盤の第一の利点はその汎用性にあり, 例えば電気抵抗測定に代表されるような物理的特性に関わる測定など, 多様な測定手法を組み込むことが可能である. 共用開始から, 多機能材料合成に関わる研究, また, 隕石の再現や, 地球の液体外核をターゲット⁽¹⁶⁾とした地球惑星科学に関わる研究など, 多岐分野に渡るユーザーの皆様にご利用いただいております. 素晴らしい成果が創出されていることを嬉しく思う.

5. おわりに

DACを用いた高圧実験はその試料サイズの小ささ, 試料充填や実験時の調整などの複雑さから, 高いスキルと多くの経験を必要とされてきた. しかし, DACは多様性が高く, とても魅力的なツールである. BL10XUでは, 初心者ユーザーも含めた全てのユーザーの皆様が簡便操作のもと先進的な測定環境を利用できることを目指し, ユーザーフレンドリーな計測基盤開発を進めている. さらに, DACを利用すること自体のハードルを下げるべく, 不安を抱える初心者ユーザー向けには, 複数回のレクチャーを提供している. BL10XUの利用をご検討の皆様は, 是非お気軽にご相談いただければ幸いです.

今後は, SPring-8-IIのアップグレード計画が進行中であることに伴い, アップグレードされる高輝度・高エネルギーX線を存分に活用するための計測基盤の開発をさらに加速していく予定である. このアップグレードにより, 従来の100倍のフラックスを持つ集光X線ビームが提供可能となる. これまでより小さなサイズまで集光したX線を使ったナノプローブ解析を可能にし, また, 計測基盤の効率化を図ることで高速で大量のデータを簡単に収集できる体制を整えていきたいと考えている. 高圧科学の分野のみでなく, これまで高圧実験を専門としていなかった幅広い分野へ貢献が出来るビームラインでありたいと願っている.



硬 X 線吸収・発光分光ビームライン BL39XU

河村直己¹⁾ 東晃太郎²⁾

1. はじめに

X 線吸収分光(X-ray absorption spectroscopy: XAS)は、内殻軌道から非占有電子状態への電子の励起を伴う際に生じる X 線の共鳴吸収を利用した分光法の 1 種である⁽¹⁾。この手法では、元素の種類や電子軌道によって異なる吸収端(Absorption edge)を利用するため、「元素選択性」と「電子軌道選択性」の特長を有している。また、吸収過程で放出された電子と周囲の原子に散乱される電子との干渉効果によるスペクトルの構造変化を観測することで、対象とする元素に対する電子状態、価数、および結合状態に関する情報に加え、その周囲の配位状態(配位数、結合距離)に関する情報が得られる。さらに、X 線エネルギーが比較的高い硬 X 線領域では、物質への高い透過能の利点から窓材やコート材、積層材の制約が低いため、高圧力や温度、電場・磁場などの外場環境の自由度が高く、様々な試料環境下での測定が可能となる。

XAS 測定は、現状では実験室系の X 線発生装置の進化に伴い、放射光でなくても利用することができる⁽²⁾。放射光による XAS 測定の利点は、大強度、低エミッタンス(高輝度)、偏光特性であり、本稿で紹介する SPring-8 のビームライン BL39XU ではその特長を利用した 3 つの手法、①複合極限環境下 X 線分光(実験ハッチ 1)、② X 線発光分光(実験ハッチ 2)、③ X 線ナノ分光(実験ハッチ 3)が構築されている。いずれの手法も実験室系の X 線発生装置と比較して分解能や精度、スルーputの面で優れており、第三代放射光施設の特長を活かしたものとなっている。

本稿は、2 章において BL39XU の X 線光学系とその特長について、3 章において上述のそれぞれの X 線分光法について、利用事例と併せて簡単に紹介する。

2. X 線吸収・発光分光ビームライン BL39XU

BL39XU は、アンジュレータという挿入光源から放射された高輝度硬 X 線ビームラインである。SPring-8 の中では、比較的広エネルギー領域で水平・垂直直線・円偏光の制御が可能なビームラインであり、ビームライン建設当初から主として磁性材料を対象とした X 線磁気円二色性(XMCD)分光が利用されてきた⁽³⁾。一方、低エミッタンスというアンジュレータ光源の特性を活かすため、近年では集光光学系の整備が進み、上流側の実験ハッチでは XMCD 分光に加え高圧力下での X 線分光、光源から約 78 m に位置する下流側の実験ハッチでは 100 nm の集光を実現する X 線ナノ分光が利用されてきた⁽⁴⁾。

ビームラインの老朽化が進んでいることに加え、蓄積リングの次期光源へのアップグレード(SPring-8-II)計画に伴い、2023年7月から、ビームラインのアップグレードが進められている。2024年1月からアップグレードに対するコミッションが行われているが、この解説記事が出版されるタイミングでは新たなビームライン BL39XU として利用が再開されていると思われる。以下、アップグレード後の BL39XU について紹介する。

図 1 に、ビームライン全体像の概略図を示す。上流側から順番に、光学ハッチ、実験ハッチ 1~3 で構成されている。光学ハッチでは、基本的には実験で必要とされる X 線光学系の条件が設定される。X 線分光法では、特殊な場合を除き、単色 X 線が必要とされるため、アンジュレータから放出された様々なエネルギーを含む X 線は、二結晶分光器によって単色化される。二結晶分光器では、完全結晶(Si)による Bragg 回折(Si 111/220)が利用されており、少なからず

* 公益財団法人高輝度光科学研究センター；1)主幹研究員 2)研究員(〒679-5198 兵庫県佐用郡佐用町光都 1-1-1)
Hard X-ray Absorption and Emission Spectroscopy Beamline BL39XU; Naomi Kawamura and Kotaro Higashi(Japan Synchrotron Radiation Research Institute, Sayo)
Keywords: X-ray absorption spectroscopy (XAS), X-ray magnetic circular dichroism (XMCD), X-ray emission spectroscopy (XES), High-Energy Resolution Fluorescence Detection (HERFD)
2024年4月1日受理[doi:10.2320/materia.63.468]

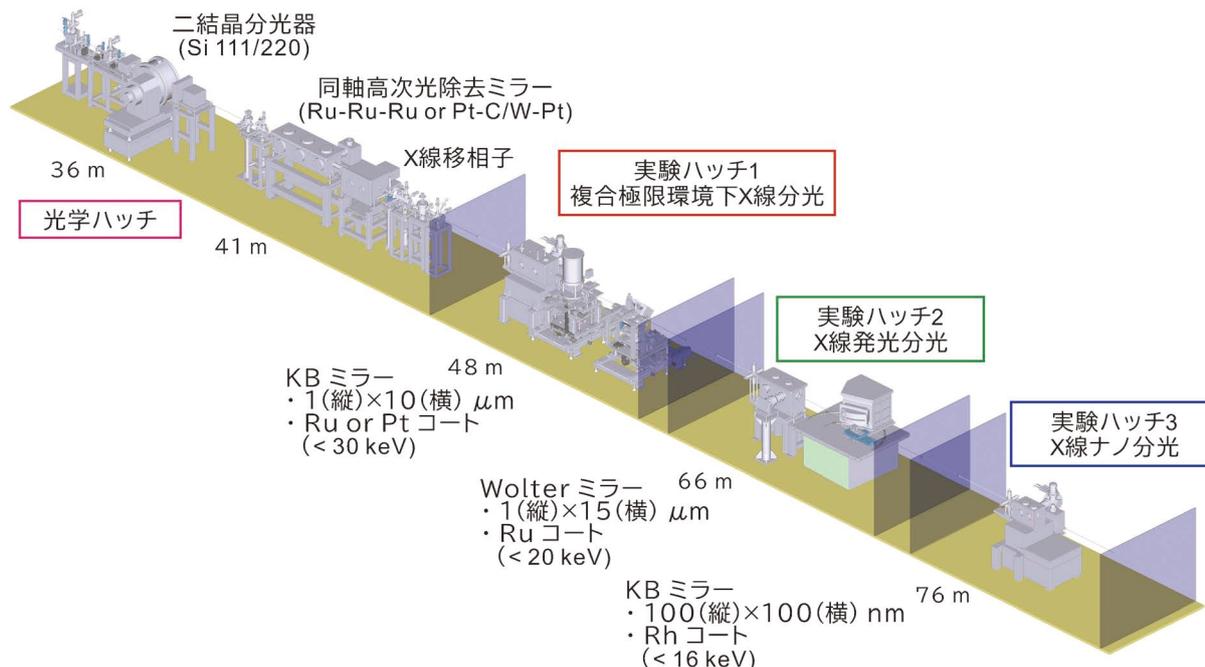


図1 BL39XUの概略図。図中の距離を示している数値は、光源(アンジュレータ)からの距離を示している。(オンラインカラー)

高次の反射が混入し完全に単色化されないため、その下流には高次光を除去するためのミラーが設置される。この高次光除去ミラーは、視射角を変更した場合においても二結晶分光器の下流の光軸を維持するような3回反射型を採用しており、上限30 keVまで利用可能な仕様となっている。その下流には、偏光制御を可能とするダイヤモンド単結晶のX線移相子(XPR)が設置されている⁽⁵⁾。アップグレード前は、4.92~23 keVのエネルギー範囲に対して1枚のXPRによって水平直線偏光を円偏光および垂直直線偏光に変換していたが、今回のアップグレードでは2枚のXPRを装備することによって、直線偏光の偏光度の向上と偏光面の自由度を与えるものとなっている⁽⁶⁾。

光学ハッチで利用するX線光学系の条件を設定し、各実験ハッチにそのX線が導入される。今回のアップグレードでは、各実験ハッチに目的に応じた集光光学装置が常設されている。表1には各実験ハッチに設置されたX線集光光学系の仕様が示されている。実験ハッチ1には、2枚の楕円形状ミラーによって横・縦方向のX線に対して別々に集光を行うKirkpatrick-Baez(KB)集光ミラー⁽⁷⁾が設置されている。集光ミラー直前のX線をほぼ取りこぼすことなく集光できるため、高圧力下でのX線分光計測を高効率で行うことが可能である。焦点位置での集光サイズは縦1×横10 μm²であり、次期光源へのアップグレードが完了すれば、横方向の集光サイズも数μm程度に縮小される予定である。将来的にX線分光とX線回折(XRD)の複合計測を視野に入れ、利用可能なエネルギーの上限が30 keVとしている。また、大型電磁石の利用が可能となるように、ワークディスタンスも750 mmとなっている。

実験ハッチ2には、1枚の集光ミラーによって横・縦方向

表1 BL39XUのX線集光光学系の仕様。

	実験ハッチ1	実験ハッチ2	実験ハッチ3
集光素子	KB ミラー	Wolter ミラー	KB ミラー
開口サイズ 縦×横(mm)	0.93×1.08	2.0×1.1	0.76×1.2
集光サイズ 縦×横(μm)	1×10	1×15	0.1×0.1
上限エネルギー (keV)	30	20	16
光子数(photons/s)	1×10 ¹³	1.5×10 ¹³	~10 ¹¹
ワークディスタンス (mm)	750	1,300	100
コート材	Ru or Pt	Ru	Rh

を同時に集光するWolter型集光ミラー⁽⁸⁾が設置されている。このミラーも実験ハッチ1と同様に集光ミラー直前のX線をほぼ取りこぼすことなく集光できるため、X線発光分光計測を高効率で行うことができる。焦点位置での集光サイズは縦1×横15 μm²であるが、次期光源へのアップグレードが完了すれば、横・縦方向が同程度のビームサイズに縮小される予定である。高効率・高感度X線発光分光計測とイメージング利用も視野に入れており、利用可能なエネルギーの上限が20 keVとなっている。

実験ハッチ3ではX線ナノ分光、特に磁気イメージングを実現するためKB集光ミラーが設置されている⁽⁹⁾。焦点位置での集光サイズは横・縦ともに100 nmとなっており、次期光源へのアップグレード完了後には集光サイズの大幅な縮小は見込まれないものの、光子数が1~2桁向上する見込みである。

3. BL39XU 実験ステーション

(1) 複合極限環境下 X 線分光(実験ハッチ 1)

BL39XU の最上流に位置する実験ハッチ 1 には、強磁場・低温・高圧力下といった複合極限環境下での X 線分光 (XAS および XMCD) が利用可能である⁽³⁾⁽¹⁰⁾。表 2 には、現状での外場環境に関する情報をまとめたものが記されている。個々の条件によって、複合環境として利用可能な装置が異なるが、圧力固定型の小型ダイヤモンド・アンビル・セルの利用で温度 3 K、圧力 40 GPa での X 線分光計測が可能となっている。また、超伝導磁石は発生可能な磁場の最大値は 7 T ではあるが、無冷媒型を採用しており、高価で入手困難な液体ヘリウムが不要なため、定常的に磁場を発生することができる。このような外場環境による複合計測によって、構造相転移や磁気相転移に伴う電子状態・磁気状態と結晶構造との相関を調べることができ、電子状態といったミクロな視点から相転移メカニズムの解明に寄与することができる。アップグレード後には、X 線分光法と XRD との同時・同条件計測を実現することで、構造相転移に伴う電子状態変化との相関を調べることが可能となるだろう。

複合極限環境下 X 線分光の例として、 EuFe_2As_2 での結果の一部を紹介する⁽¹¹⁾。図 2 に XAS および XMCD スペクトルの 1.7 GPa と 22.7 GPa における温度 15 K での結果を示すが、常圧の Eu^{2+} 状態から圧力印加とともに Eu は価数揺動状態となり、XAS スペクトルの高エネルギー側に Eu^{3+} 成分が観測されるようになる。XAS スペクトルの解析の結果から、22.7 GPa での Eu 平均価数は 2.5 価と見積もられる。1.7 GPa、15 K では EuFe_2As_2 は反強磁性のため XMCD 信号は本来観測されないが、磁場印加とともに Eu の磁気モーメントが磁場方向に傾くことが知られており⁽¹²⁾、それによって XMCD 信号が観測されるとともに、その磁場依存性が磁場に対して直線的に変化する。一方、22.7 GPa では、XAS の Eu^{2+} と Eu^{3+} 成分に対する XMCD 信号が観測されるとともに、その磁場依存性に磁気ヒステリシスを生じている⁽¹¹⁾。これは明らかに高圧力下で EuFe_2As_2 の磁気状態が

表 2 BL39XU 実験ハッチ 1 での外場環境。

磁場発生装置	磁場 (T) [磁極間距離 (mm)]	冷凍機	温度 (K)	圧力セル	圧力 (GPa)
	3.5 [10]	—	300	—	A.P.
電磁石	2.0 [20]	ヘリウムフロー型	11~330	Mini	40
	1.5 [45]	—	300	Box DXR-GM	>170
なし	—	パルスチューブ型	3~300	Mini	40
超伝導磁石	7 [30]	VTI	2~300	Mini	40

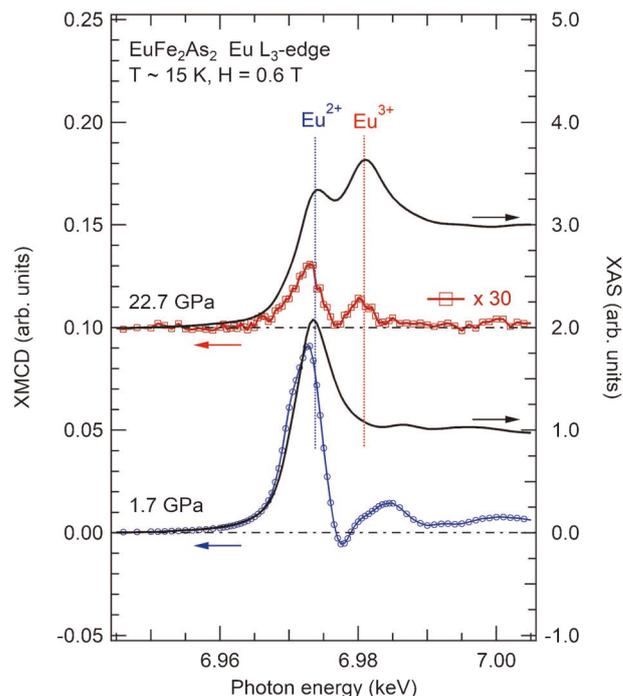


図 2 EuFe_2As_2 の Eu L_3 -吸収端での XAS (黒実線) および XMCD (青丸または赤四角) スペクトルの例。温度 15 K、磁場 0.6 T の条件下での圧力 1.7 GPa および 22.7 GPa での結果。(オンラインカラー)

変化し、強磁性秩序状態が発現していることを意味している。このように XAS および XMCD はそれぞれ高圧力下での価数と磁気状態に関する知見が、元素選択的に同条件下で得られる有用な手法といえる。一方で、このような磁気相転移に対して、結晶構造との相関を調べることも重要であり、将来計画として掲げている XAS・XMCD+XRD 計測の実現によって相転移メカニズムの解明が進むと期待される。

ここでは詳細は述べないが、高圧力下での XAS・XMCD 計測の精度とスループットを飛躍的向上させた技術の一つとして、ナノ多結晶ダイヤモンド (NPD) アンビルの開発がある⁽¹³⁾⁽¹⁴⁾。また、結晶構造と電子状態・磁気状態の相関を調べた成果がいくつかあるので、興味がある方はそちらを参照していただきたい⁽¹⁵⁾⁻⁽¹⁷⁾。

(2) X 線発光分光(実験ハッチ 2)

光源から 66 m の位置に新設された実験ハッチ 2 には、X 線発光分光 (XES) を実現するためのスペクトロメータが設置される。XES はエネルギー分解能が入射 X 線のエネルギー分解能に加え、発光点の大きさで決まることもあるが、ミクロンオーダーのイメージングも目指しており、その実現を可能にする Wolter 型の集光ミラーが常設されている。ワークディスタンスが 1,300 mm と大きいものにも関わらず、ミラーで受ける X 線をすべて縦 $1 \times$ 横 $15 \mu\text{m}^2$ に集光することによって高分解能でかつ高効率な XES 計測を実現できる。

近年、XES を利用した高エネルギー分解能蛍光 X 線検出 (HERFD) による高エネルギー分解能 XAS が世界的に盛ん

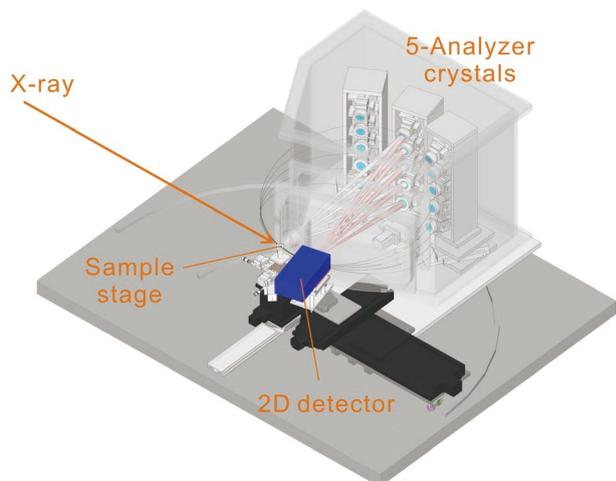


図3 BL39XU 実験ハッチ 2 に設置されている高感度型 XES 装置の概略図。蛍光 X 線を分光するためのアナライザークリスタル 5 枚で構成されるタワーが、真空チェンバー内に 3 機搭載されている。試料(発光点)、アナライザークリスタル、および検出器の位置は、直径 $R_w = 820$ mm のローランド円上に載っている。(オンラインカラー)

に行われている。これは1991年に Hämäläinen らによって見出されていた手法である⁽¹⁸⁾。従来型 XAS スペクトルの分解能は、原理的に内殻正孔の「寿命」を超える分解能での計測は不可能である。重元素の内殻ほど XAS 過程で生じた正孔の寿命が短く、エネルギーのぼやけが生じている。XAS の脱励起過程で発生する蛍光 X 線を、分光結晶などを利用して高エネルギー分解能で検出することで内殻正孔の寿命幅を抑制でき、これを HERFD-XAS と呼んでいる⁽¹⁹⁾。原理の詳細については他の文献に譲る⁽²⁰⁾が、BL39XU では2016年度の高性能化の一環で、図3で示されるような分光結晶を多数搭載可能な高感度型 XES 装置を導入した⁽²¹⁾。その結果、BL39XU の XES 装置の利用者数が増加し、全体の30~40%を占めるに至っている。今回のアップグレードでは、XES 装置の利便性向上と利用拡大に向けて、新しく実験ハッチ 2 の建設を行い、そこに XES 装置を移設している。XES/HREFD-XAS 測定においては、エネルギー分解能を重視していることもあり、二結晶分光器は主として Si 220 を利用することで、XES 装置でのエネルギー分解能は0.5~2.0 eV (4.4~24 keV) を実現している。

図4に希土類酸化物 CeO_2 および Tb_2O_3 における L_3 -吸収端での HERFD-XAS スペクトルの例を示す。 $2p_{3/2}$ 内殻正孔の寿命幅は Ce および Tb でそれぞれ3.4 eV および3.8 eV 程度であるため、従来型 XAS スペクトルではブロードなピークとサテライト肩構造が観測される程度であるが、HERFD-XAS スペクトルでは、終状態での $3d$ 内殻正孔の寿命幅が Ce および Tb でそれぞれ0.9 eV および1.3 eV 程度と抑制されるため、white-line と呼ばれる主吸収ピーク ($2p_{3/2} \rightarrow 5d$) が鋭く立ち上がっていると同時に、個々のスペクトルの微細構造も明瞭になっているのがわかる。吸収端の低エネルギー側の裾の小さいピークは、 $2p_{3/2} \rightarrow 4f$ (E2) 遷移

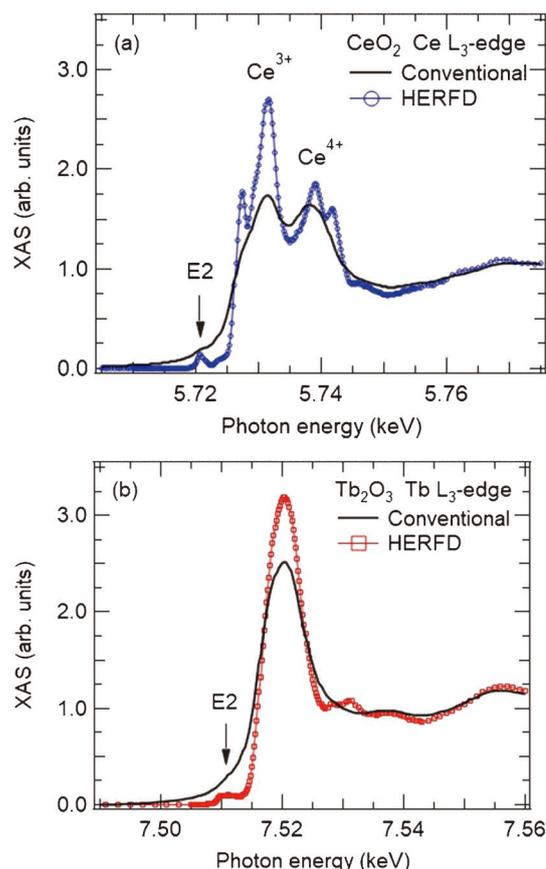


図4 (a) CeO_2 における $\text{Ce } L_3$ -吸収端、および(b) Tb_2O_3 における $\text{Tb } L_3$ -吸収端での HERFD-XAS スペクトルの例。比較のために、従来型 XAS スペクトルを併せて示している。(オンラインカラー)

に起因することが知られており、そのピークの分裂も含めてスペクトルに微細構造が観測されている。このように HERFD-XAS はスペクトル構造の明瞭化に伴い、相転移や化学反応による変化の様子をより詳細に調べることが可能となり、今後のさらなる利用拡大が期待されている。

XES の利点は他にもある。信号強度は微弱であるが、価電子帯からの XES (VtC-XES) スペクトルは、対象としている元素の配位環境の相違に伴う化学状態の変化に敏感である⁽²²⁾⁽²³⁾ため、結合状態だけでなく分子吸着の相違を調べることができる。また、分光結晶による蛍光 X 線の分光は、これまで主要元素に埋もれていて観測が困難であった微量元素の観測を実現するだけでなく、その高分解能スペクトルを取得可能にする⁽²⁴⁾。このように XES や HERFD-XAS は、元素選択的な電子状態の研究ツールとして、今後、様々な分野での利用が期待されている。

(3) X 線ナノ分光(実験ハッチ 3)

光源から76 m の位置には、100 nm 以下の集光を実現するための KB ミラーが設置されている⁽⁹⁾。幾何光学的な縮小比でナノビーム集光を実現しているため、ワークディスタンスが100 mm と短く、試料空間を大きく確保できない問題は

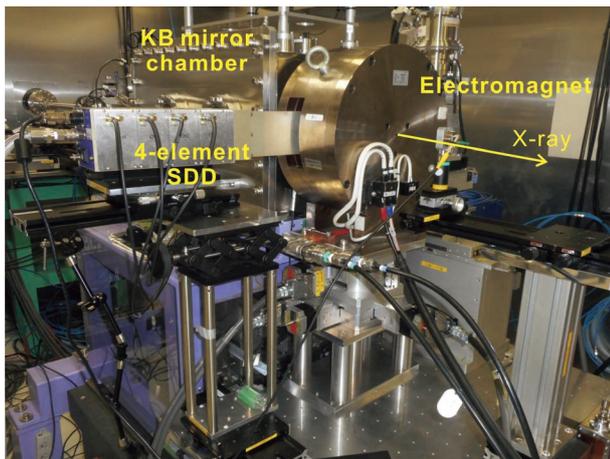


図5 BL39XU実験ハッチ3におけるナノXMCD計測装置の写真。(オンラインカラー)

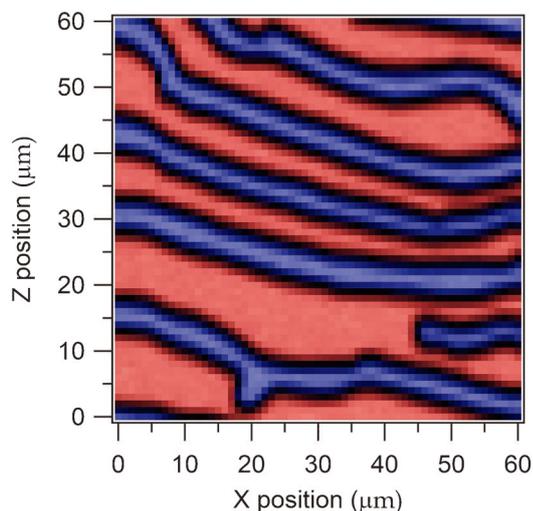


図6 GdFeCo 薄膜における Gd L_3 -吸収端での XMCD による 2 次元磁区構造. 青・赤は互いに反対向きの磁石の N 極・S 極を意味している. $60 \mu\text{m} \times 60 \mu\text{m}$ の領域を $1 \mu\text{m}$ ステップで計測しており, 約 15 分程度の時間で XMCD-2D 像を取得できている。(オンラインカラー)

あるものの, 図5のセットアップで見られるような専用の電磁石の導入によって最大 2.4 T の磁場印加が可能な XMCD イメージングを実現している⁽⁹⁾. ナノビームを利用した XMCD イメージングの例として, 図6に GdFeCo 薄膜における Gd L_3 -吸収端近傍の XMCD 信号が最大となるエネルギーで取得された 2 次元の磁区構造の観測結果を示す. 走査型イメージングの手法として, 円偏光変調法と on-the-fly スキャンを組み合わせた手法を採用することで, 高速かつ高感度な 2D イメージングを実現している⁽²⁵⁾. XAS および XMCD は元素選択的な手法であるため, 蛍光 X 線 (XRF) イメージングとの併用により, 機能性発現の起点となる要因の特定が可能となる.

最近では, XMCD 走査型イメージングと Computed Tomography (CT) の手法を組み合わせた XMCD-CT による

3 次元磁気状態観察の開発が行われ, 磁石材料の内部の磁区構造⁽²⁶⁾やスカーミオンの観測⁽²⁷⁾にも成功している. 次期光源である SPring-8-II のアップグレードによって 100 nm 集光ビームの光子数が 2 桁程度向上することが見込まれており, さらに高感度化や計測の高速化によるスループット向上が期待される.

4. おわりに

本稿では, 低エミッタンス光源と偏光特性を有する SPring-8 BL39XU で実施可能な X 線分光法について概説した. XAS および XMCD をはじめ, XES や HERFD-XAS は元素選択的および電子軌道選択的な電子状態・磁気状態に関する知見が得られる手法であり, その高精度・高感度・高分解能計測の実現は様々な相転移現象や状態変化に対するミクロな視点からの知見を提供する. 特に, 硬 X 線の高い透過能では窓材の制約が少なくなるため, 様々な外場環境下での計測や実環境セルによる反応場計測, X 線回折やマクロ物性との複合計測など, X 線分光法を利用する上での拡張性は高い.

一方で, 現在, 放射光施設の次期光源へのアップグレードが世界各国で推進されている. 回折限界光源リングへの変革によって, 放射光実験は新たなフェーズへと進むと考えられる. 利用ニーズに強く依存する面もあるが, 空間コヒーレンスの高い極低エミッタンス光を活かした新たな X 線分光法の開発による電子状態研究を通して新物質・材料創成へ繋がればと期待する.

ここで紹介された内容の一部は, 電気通信大学の松林和幸准教授, 愛媛大学の石松直樹教授, 関西学院大学の鈴木基寛教授, 日本大学の塚本新教授との共同研究によるものです. ここに感謝いたします. また, 本稿の執筆にあたり, 特にビームライン・アップグレードに関して, 光学系機器の設計・開発・設置ならびに調整において理化学研究所・放射光科学研究センターおよび JASRI・ビームライン光学技術推進室の多くの方々のご助力をいただきました. ここに感謝いたします. また, これらの研究は SPring-8 利用研究課題 (課題番号 2023A2374, 2023A2309, 2023B2434) の下で推進されたものである.

文 献

- (1) 日本 XAFS 研究会編: XAFS の基礎と応用, 講談社サイエンスフィク, (2017).
- (2) P. Zimmermann, S. Peredkov, P. M. Abdala, S. DeBeer, M. Tromp, C. Müller and J. A. van Bokhoven: Coord. Chem. Rev., **433**(2020), 213466.
- (3) H. Maruyama, M. Suzuki, N. Kawamura, M. Ito, E. Arakawa, J. Kokubun, K. Hirano, K. Horie, S. Uemura, K. Hagiwara, M. Mizumaki, S. Goto, H. Kitamura, K. Namikawa and T. Ishikawa: J. Synchrotron Rad., **6**(1999), 1133-1137.
- (4) M. Suzuki, N. Kawamura, M. Mizumaki, Y. Terada, T. Uruga, A. Fujiwara, H. Yamazaki, H. Yumoto, T. Koyama, Y. Senba,

SPring-8 における共用硬 X 線光電子分光 ビームライン

高木 康多*

1. はじめに

光電子分光(photoelectron spectroscopy: PES)は励起光を物質に照射し、光電効果により放出される光電子の運動エネルギー E_k を検出する手法である。図 1 のようにエネルギー保存則により、 E_k は励起光のエネルギー $h\nu$ から電子の束縛エネルギー E_b と仕事関数 ϕ を引いた値になり、式で表すと以下ようになる。

$$E_k = h\nu - E_b - \phi \quad (1)$$

ここで電子の束縛エネルギー E_b は元素や分子によって固有のエネルギーを持つため、この E_b を求めることで測定対象の状態を分析することができる。

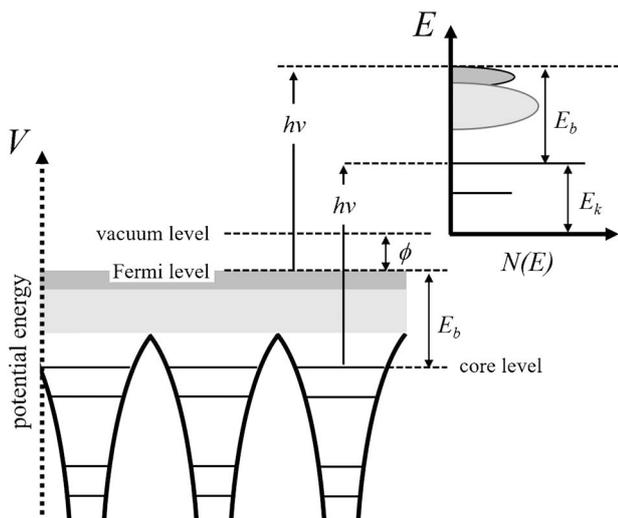


図 1 固体からの光電子放出の模式図。

PES は表 1 励起光のエネルギーの大きさによって大まかに分類される(表 1)。式(1)でもわかるように、PES で用いる励起光のエネルギーは光電子を発生させるために仕事関数(一般的には 6~7 eV)よりも高い必要がある。その値よりも少し高いエネルギー(~10 eV)のレーザー光を用いて行う PES がレーザー励起光電子分光である⁽¹⁾。この手法はレーザーが持つ高いエネルギー分解能を利用してフェルミ準位付近の電子状態の詳細な分析に利用されている。一方、励起光のエネルギーが数十 eV 程度の紫外光を光源として用いた場合には紫外光光電子分光(Ultraviolet Photoelectron Spectroscopy: UPS)と呼ばれ、実験室光源としては He 放電管の He I 線(20.22 eV)などが光源として使われる。この場合、生成する光電子のエネルギーは数 10 eV 程度となるが、この時の光電子の脱出深さは 1 nm 程度と非常に短くなる。このため測定で観測される光電子のほとんどが表面からの生成したものになり、したがって UPS は非常に表面敏感な測定手法と言える。それよりも高いエネルギーの X 線を励起光として用いると内殻準位の電子の束縛エネルギーを測定することができる。この値は元素固有であるため、測定で得られたピークのエネルギーを分析することにより測定対象の元素分析が可能になる。これは X 線光電子分光(x-ray photoelectron spectroscopy: XPS)と呼ばれる。またこの手法はピ

表 1 光電子分光の種類。

名 称	光	光のエネルギー
レーザー光電子分光(Laser-PES)	レーザー	数 eV
紫外光光電子分光(UPS)	紫外光	~50 eV
X 線光電子分光(XPS)	軟 X 線	50~2000 eV
硬 X 線光電子分光(HAXPES)	硬 X 線	2000 eV~

* 公益財団法人高輝度光科学研究センター；主幹研究員(〒679-5198 兵庫県佐用郡佐用町光都 1-1-1) Public Hard X-ray Photoelectron Spectroscopy Beamlines at SPring-8; Yasumasa Takagi(Japan Synchrotron Radiation Research Institute, Sayo, Hyogo)
Keywords: synchrotron radiation, hard x-ray photoelectron spectroscopy, beamlines, micro focusing, high-throughput, ambient pressure
2024年4月3日受理[doi:10.2320/materia.63.474]

ークのシフトにより原子の化学状態についての情報を得られるため、ESCA (electron spectroscopy for chemical analysis) と呼ばれることもある。実験室光源としてはアルミニウムやマグネシウムの $K\alpha$ 線などの 1~1.5 keV 程度のエネルギーを持つ軟 X 線を用いることが多い。さらに高いエネルギーの硬 X 線 (2 keV 以上) を用いた光電子分光が硬 X 線光電子分光 (hard x-ray photoelectron spectroscopy: HAXPES) である⁽²⁾。励起光のエネルギーが高くなることにより発生する光電子のエネルギーも高くなるため、物質からの脱出深度が深くバルク敏感な測定が可能となる。例えば、通常の Al $K\alpha$ 線を用いた XPS では検出深度が数 nm であるのに対し、HAXPES ではその数倍から数十倍も深い領域の状態分析ができる。

上記のような実験室の光源の代わりに、励起光として放射光を用いることでより高精度の測定ができる。放射光は X 線管に比べて何十倍も高輝度であるため、短い測定時間で精度のよい測定結果が得られる。また入射光のエネルギーも可変なため、内殻準位のエネルギーに合わせた共鳴測定やオージェ電子の影響を避けた測定などが実施できる。さらには、入射光をミラーなどによりマイクロメートル以下に集光することもでき、微小領域からの信号を選択的に得る顕微測定も可能である。本稿ではこれらの PES の中でも大型放射光施設 SPring-8 での HAXPES について紹介する。

2. HAXPES

HAXPES は硬 X 線を励起光として用いる光電子分光である。励起される光電子の運動エネルギーが高いことが特徴であり、以下のような利点がある。

深い検出深度：電子の運動エネルギーが高くなると物質内の平均自由行程が長くなり、物質内部で生成した光電子も検出できるようになる。その結果、検出した信号のうちで表面領域からの割合が減り、より深い領域 (バルク) からの成分が主となる。つまり、試料表面の酸化膜やコンタミの影響を受けずバルク本来の情報を得ることができる⁽³⁾。また薄い保護膜や帯電対策として導電膜を表面に作成した試料の測定や⁽⁴⁾、多層膜の界面の測定などにも利用できる⁽⁵⁾。

光電子の高い透過力：光電子の平均自由行程が長いということは、光電子の透過力が高いとも言換えることができる。例えば、グラフェンや窒化シリコンなどの軽元素からなる 10 nm 程度の厚さの膜ならば透過することができ、その膜を用いることでアナライザーのある真空槽と試料雰囲気環境を切り離すことが可能である。例えば、窒化シリコン薄膜を窓材として試料を閉じ込める容器を作り、その中の気体や液体からの光電子を窓材から透過させ HAXPES 測定を行うことが可能である⁽⁶⁾。また一方で、ガス雰囲気下でも動作が可能な差動排気型のアナライザーも開発されている。このアナライザーを利用する場合にも高いエネルギーを持つ光電子はガス中の散乱を受けにくいいため、XPS 領域の装置と比べて HAXPES 領域の装置では大気圧以上の高いガス雰囲気下で

の測定が可能になる⁽⁷⁾⁽⁸⁾。

試料環境の自由度の増加：従来の XPS 測定は試料表面の汚染に弱く超高真空環境が必須であった。しかし HAXPES では表面の影響が少ないという点から、逆に試料周囲の真空度が低くても良いことになる。その結果、試料周りに使用できる素材やチェンバー内の設備の制限が減り、試料環境の自由度が増すことになる。

外場影響の抑制：HAPES では光電子の運動エネルギーが高く外場の影響を受けにくいいため、従来の XPS では難しかった環境での測定も可能になる。例えば磁場中では光電子が運動するとローレンツ力を受け軌道が曲がってしまう。しかしながら運動エネルギーが高ければその曲がりは小さくなり、適切な補正をかければ測定ができるようになる⁽⁹⁾。また高温の試料ではエネルギーの低い熱電子が発生しノイズとなるが、高い運動エネルギーを測定する場合には、それらの影響を受けにくくなり比較的容易に高温試料の測定が可能になる。

HAXPES には上記のような利点があるが、その一方で HAXPES 測定を実現するためには通常の XPS にはない困難もある。例えば、光電子の運動エネルギーが高いためにエネルギー分析するアナライザーの電極に高電圧を印加する必要がある。また X 線のエネルギーが高いために物質との散乱断面積が低くなってしまいうため、十分な信号強度を得るためには高輝度な入射光が必須であった。これらの困難は、高耐電圧のアナライザーの開発やアンジュレーターやミラーなどの進歩による高輝度光源の利用により克服され、近年では HAXPES が世界各国の放射光施設に重要な測定手法として数多く導入されている⁽¹⁰⁾。日本においても兵庫県にある大型放射光施設 SPring-8 に多くの HAXPES 装置が導入されており国内外のユーザーに利用されている。特に 2020 年以降、HAXPES 測定に最適化された 2 本の共用ビームラインが整備され供用利用が開始されたのでここで紹介する。

3. HAXPES ビームライン

(1) 概要

2020 年までにも SPring-8 に導入された HAXPES 装置は数多くあったが、どれもひとつのビームラインに XAFS や XRD などの装置と相乗りしているものであった。このため光学系やハッチ環境に制限が出たり、また場合によっては実験ごとに光軸上の装置を入れ替える必要があった。そこで 2020 年からの SPring-8 のビームラインの再編のひとつとして、SPring-8 にあるそれぞれ特徴の異なった 4 つの HAXPES 装置をふたつのビームラインに集約し、それぞれの実験ハッチ (experimental hutch: EH) 1 と EH2 にひとつずつの HAXPES 装置を設置することとした。例として図 2 に BL46XU のビームラインレイアウトを示す。これらのビームラインは HAXPES 装置のみが設置されているため、光学系や測定システムなどを HAXPES 測定に最適化して整備することが可能になった。2021 年 10 月から先行して BL09XU の運用が始まり⁽¹¹⁾、続いて 2023 年 7 月から

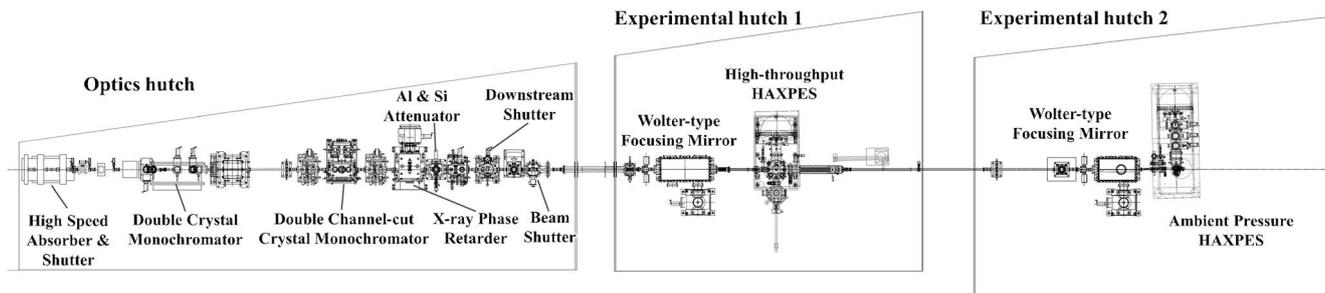


図2 SPring-8のBL46XU(HAXPES II)のビームラインレイアウト。

BL46XUの運用が始まった。これら2本のビームラインは共用ビームラインとして実験課題が公募されており、国内外のユーザーが利用できるようになっている。

(2) 光学系

光学系の機器はビームライン上流の光学ハッチに收容されている。SPring-8の2本のHAXPESビームラインは両者とも同じような構成になっている。アンジュレーターから出た光は二結晶分光器(double crystal monochromator: DCM)によって分光された後、後方のダブルチャンネルカット結晶分光器(double channel-cut crystal monochromator: DCCM)によってさらに分解能をあげられる。このDCCMにはSi(311)およびSi(220)の結晶が用意され、高い分解能が必要な実験ではSi(311)、大きなフラックスが必要な場合にはSi(220)というように実験にあわせて適した方を選択する。さらにBL09XUにはSi(111)のチャンネルカット結晶分光器(channel-cut crystal monochromator: CCM)も用意されており、エネルギーに合わせてSi333, Si444, Si555の反射面を選択してDCCMよりも高いエネルギー分解能の光を利用することもできる。

分光器の下流にはダイヤモンド位相子が配置されており、アンジュレーターから出てきた水平偏光の光を縦偏光や円偏光に変えられる。特にBL09XUには位相子が2枚あり、広いエネルギー範囲で高い偏光度の光を利用できる。また光の強度を下げるためのAlとSiの薄板を用いたアッテネーターも導入されている。入射光強度が強すぎて試料に照射ダメージがある場合やチャージアップの影響が大きい場合には、適切な厚さの膜をビームパスに導入して、光の強度を減衰させて測定を実施できる。

集光ミラーについては光学ハッチ内にはなく、各HAXPES装置があるEH内に設置されている。それぞれの装置に合わせた焦点距離や集光後のビームサイズなどを考慮して設計されたミラーが導入された。BL09XUのEH1およびBL46XUのEH1とEH2ではモノリシックWolterミラー⁽¹²⁾を用いており、BL09XUのEH2についてはKirpatrick-Baez(KB)ミラー⁽¹³⁾を使っている。

(3) BL09XU(HAXPES I)⁽¹¹⁾

BL09XUには光学ハッチの下流にふたつのEHがタンデ

ムに配置されており、EH1に「高エネルギー分解能HAXPES装置」、EH2に「3次元空間分解HAXPES装置」がある。これらは同じビームパス上にあるため同時にビームを利用することはできず、上流のEH1の装置を使う場合には下流のEH2まではビームは来ず、下流のEH2の装置を使う場合にはEH1の装置をビームパスから退避させ、EH2までビームを通してEH2の装置の実験を行うことになる。

今回紹介するふたつのビームラインにある4台のHAXPES装置の光電子分光アナライザーはすべてシエンタオミクロン社製のR4000アナライザーをベースにしたものである。その中でEH1の高エネルギー分解能HAXPES装置は12 keVまでの高耐電圧のアナライザーを備えた装置であり、他のHAXPES装置よりも高い運動エネルギーの光電子の測定を行うことができる。またこのアナライザーは高いエネルギー分解能も備えており、加えて本装置は液体ヘリウムにより試料を極低温まで冷却しての測定が可能なので、物質の電子状態の高エネルギー分解能解析を行うことが可能となる。

EH2の3次元空間分解HAXPES装置は通常の光電子アナライザーの前段に広取込角対物電子レンズ⁽¹³⁾が取り付けられており、広い出射角の範囲の光電子をアナライザーに取り込むことが可能である。従来のアナライザーの取り込み角は $\pm 7^\circ$ であるのに対して本装置は $\pm 32^\circ$ の取り込み角になる。これは表面に対する光電子の出射角依存性を測定するときに有利である。

PESの角度分解測定(angle-resolved photoemission spectroscopy: ARPES)は価電子帯を測定してバンド分散を求めるものが有名であるが、HAXPESの場合では出射角によって検出深度が変化する。出射角が浅い場合には、試料中での光電子の飛行距離が長くなるため深い部分から放出された光電子は減衰し、結果表面付近の情報のみが得られる。一方、出射角が深い場合にはバルク側の情報が主となる。よってHAXPES測定では価電子帯に限らず内殻のスペクトルの出射角方向の依存性を測定することによって試料の深さ方向の情報を得ることができる⁽¹⁴⁾。

EH2の装置の場合、約 60° の取り込み角があるため、例えば図3のように、アナライザーに対して試料表面の法線を 55° に合わせて配置すれば、光電子の表面平行方向から浅い角度の斜出射から、 65° までの広い出射角の光電子を一度に

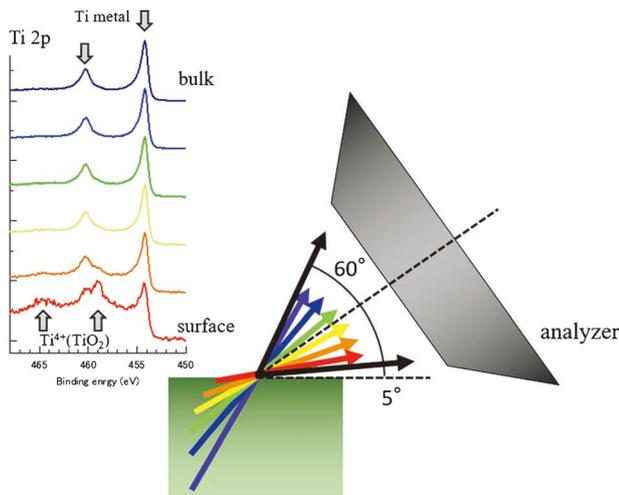


図3 深さ分解 HAXPES 測定の様式図。(オンラインカラー)

測定することができる。図3内のスペクトルはチタン薄膜の角度分解 HAXPES 測定による表面からバルクにかけて深さ分解されたスペクトルの一例を示している。出射角が深いバルクのスペクトルは金属チタンの状態を示し、出射角が浅い表面からのスペクトルにはケミカルシフトした4個のチタンのピークが現れている。これは、チタン薄膜において表面付近の領域のみが酸化して二酸化チタンになり、バルクは金属成分が残っている状態であったことを示している。

一般的な HAXPES 装置は取り込み角が狭いため、角度分解 HAXPES 測定を行う場合には、試料を回してアナライザーとの角度を変更する必要がありビームの照射位置も動いてしまうことが多かった。しかしながら本装置では試料を動かす必要がないため固定されたビームの照射領域の深さ方向の分析ができる。加えて EH2 の集光ミラーとして KB ミラーが設置されており、試料位置でのビームサイズは横 $10\ \mu\text{m}$ × 縦 $1\ \mu\text{m}$ 程度になる。さらに水平方向の出射スリットを狭くすることで、ビームの強度は落ちるが横方向のビームサイズは $1\ \mu\text{m}$ まで絞ることができる。つまり縦横約 $1\ \mu\text{m}$ のビームにより試料の微小領域の情報を得られ、さらに測定中に試料を走査してビームの照射位置を変化させながらスペクトルを得ることによっての2次元のマッピングが可能となる。加えて上記の光電子出射角の角度依存性も含めて分析することによって、試料平行方向および深さ方向の3次元的な状態分析を行うことができる⁽¹¹⁾。

(4) BL46XU (HAXPES II)

もうひとつの共用の HAXPES ビームラインである BL46XU にもふたつの EH がタンデムに配置されており、それぞれの EH にひとつずつ HAXPES 装置が設置されている。EH1 には「ハイスループット HAXPES 装置」があり、EH2 には「大気圧 HAXPES 装置」がある。BL09XU と同じく EH1 を使用する場合には EH2 までビームは使えず、EH2 を使う場合には EH1 のチャンバー内を通して EH2 ま

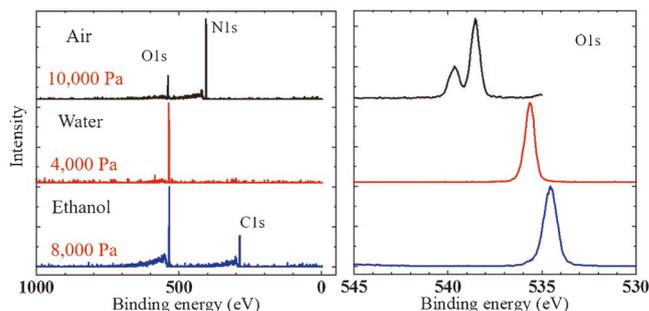


図4 空気、水蒸気、エタノールの HAXPES スペクトル。(オンラインカラー)

でビームが入射される形となる。

EH1 に設置されているハイスループット HAXPES 装置では標準的な HAXPES 測定が可能であり、その他にイオン銃も備えており、表面をスパッタしながらの測定も可能である。その他、近年の HAXPES 測定の需要の増加に対応できるように、測定のハイスループット化を目指した計測の自動化の開発を進めている。試料ホルダが複数個収納できるストッカーを用意し、測定チャンバー下部にそのストッカーを複数本設置できるロードロックチャンバーを取り付ける。マニピュレーターを用いて、このロードロックからストッカーを自動的に取り出し、測定位置に目的の試料を移動して位置調整をした後 HAXPES 測定を行う。これらの搬送、測定の行程を繰り返し、最終的には大量の試料の連続測定を自動的に実行することを目指す。また制御系から計測系まで統一的に扱うアプリケーションの開発も進めている。

一方、EH2 にはガス雰囲気下の試料の測定が実施できる大気圧 HAXPES 装置がある⁽⁷⁾。一般的な XPS 装置は真空下の試料しか測定できないが、本装置はアナライザー先端の小径アパーチャーとアナライザー前段の差動排気部により、試料の周囲のガス圧を上げてもアナライザー内の真空度が維持できるため、試料を設置した測定チャンバーにガスを導入することが可能になる。雰囲気ガス圧の上限はアパーチャーの大きさに依存し、本装置では $\phi 30\ \mu\text{m}$ のアパーチャーを用いることで大気圧雰囲気下までの測定に対応できる。

ガス下での測定ができるということは、これまで真空中の固体試料が主であった HAXPES 測定とは異なり、気体、液体、固気・固液界面など広い範囲が測定対象となる。例えば、真空チャンバーの中にガスを導入してガスそのものの HAXPES 測定を行い、ガス分子の電子状態の分析を行うことができる。図4は空気、水蒸気、エタノールを導入した時の HAXPES 測定である。各構成元素のピークが観察でき、また O1s ピークでは各ガス種の酸素原子の化学状態に対応してピークシフトが起こっていることが観察できる。

また、第2章で HAXPES の特徴として超高真空環境の不要を挙げたが、本装置はさらに進み真空環境そのものが不要となった。すなわち、場合によっては真空チャンバーを取り除くことが可能であり、大型の試料処理機構などを組み込むなど試料周りの自由度大きく取ることができる。

微視組織の影響下における金属材料の 加工硬化のモデリングと結晶塑性解析

大橋 鉄也*

1. はじめに

加工硬化は金属材料が示す力学特性の中でも特に重要なものの一つである。金属の塑性変形は多くの場合転位の運動を伴うすべり変形によって生ずるが、その転位の運動は材料中の応力、もしくは熱力学的な駆動力によって駆動される一方、すでに蓄積した転位および金属の微視組織などによって抑制される。純金属単結晶の場合、微視組織と明瞭に認識されるような物理的な実態がないために、多くの検討課題は単純化される。実際歴史的に、加工硬化現象の研究の多くは転位そのものに関する研究と表裏一体となって単結晶材料を対象として進められてきた。しかしそれらの研究の中で明らかになってきたことのひとつが、変形帯として現れる変形の不均一性が加工硬化現象に及ぼす大きな影響であった⁽¹⁾。すなわち、一見均一と考えられる単結晶材料であっても、加工硬化現象においては何らかの不均一性が大きな役割を果たしていたのである。

材料中に結晶粒界、異相界面、析出粒子などの明瞭な微視組織構造がある場合、その中に形成される応力場は一般に不均一であり、それによって転位の運動は抑制または促進される。材料中に明瞭な微視組織構造が無くても一部領域に相変態や酸化などが生じて周囲とは異なる eigen ひずみが発生した場合にも不均一な応力場が形成されるが、本解説では eigen ひずみのことには立ち入らず、変形の不均一性を生じさせるものが微視組織中にある場合について検討する。

結晶材料のすべり変形に伴う加工硬化をモデル化する場合、すべり変形を生じさせるために必要な「臨界分解せん断応力」をいかに書き表すかということが主要な作業の一つに

なるが、我々はそれを Taylor の研究⁽²⁾を源流としたモデルから始める。Taylor モデルの原型は、

$$(\text{臨界分解せん断応力}) = \alpha \mu b \sqrt{\rho} \quad (1)$$

と書くことができる。ここで α は 0.1 オーダーの数値係数、 μ はせん断弾性係数、 b はバーガースベクトルの大きさ、 ρ は転位の密度である。式(1)によれば加工硬化(または軟化)は変形とともに転位の密度が変化することによって生ずる。そしてこの転位密度の発展に寄与するのが、転位の蓄積速度に関する「平均自由行程」と転位密度の回復に関する「対消滅距離」である。これらのうち転位の平均自由行程はすでに蓄積している転位だけではなく、材料の微視組織そのものによっても制限される。一方転位密度の低下が顕著に生じれば、それも力学特性に重要な役割を果たす。本解説では数理モデリングや数値解析の詳細には立ち入らずに、最初に変形の適合性要求によって微視組織中に発生する応力とそれに関連する現象について検討し、次に転位の蓄積に焦点を当てて数理モデルの原型と拡張形を示し、結晶粒界の効果、微細析出物の効果、パーライトなどの微細層状構造のもたらす効果に関する結晶塑性解析例を紹介する。最後に今後の展開などについて検討する。

2. 変形の適合性要求を満たすために発生する応力と関連する現象

(1) 界面でひずみ成分が満たさなければならない条件

図1(a)のように結晶粒 A と B が結晶粒界を挟んで接合して双結晶を形成している場合を考え、これに負荷が加わるとする。A と B の結晶方位が異なっている場合、負荷に対する変形応答は一般に A と B で異なるので、相互拘束が生ず

* 北見工業大学；名誉教授

Modeling and Crystal Plasticity Analysis of Strain Hardening in Metallic Materials under the Influence of Microstructure; Tetsuya Ohashi (Professor emeritus, Kitami Institute of Technology, Kitami)

Keywords: stress arising from compatibility requirements, dislocations, density evolution, modeling and numerical analysis, mean free path, characteristic length scale, lamellar structure, precipitate

2024年3月5日受理[doi:10.2320/materia.63.479]

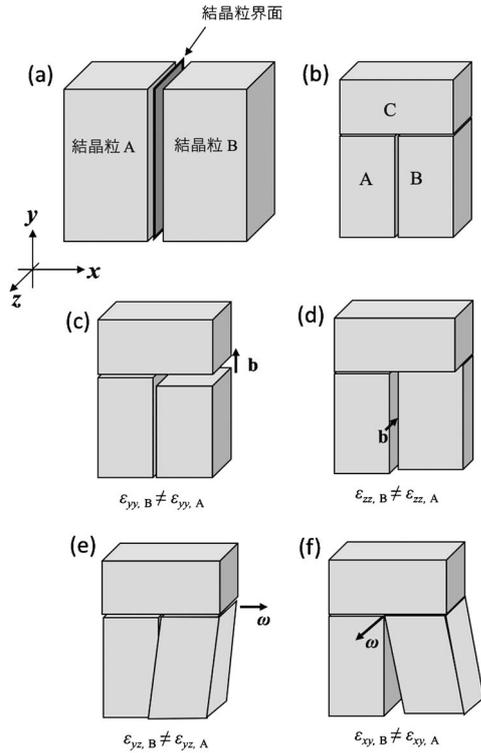


図1 双結晶, 3重結晶の変形と変位の食い違い.

る. 粒界面の変形を記述するひずみ成分は y および z 方向の垂直ひずみと粒界面をせん断変形させるようなせん断ひずみである. したがって, 粒界面で満足しなければならない条件は,

$$\epsilon_{yy, A} = \epsilon_{yy, B} \quad (2)$$

$$\epsilon_{zz, A} = \epsilon_{zz, B} \quad (3)$$

$$\epsilon_{yz, A} = \epsilon_{yz, B} \quad (4)$$

である⁽³⁾⁽⁴⁾. 次に図1(b)のように結晶粒Cを追加した三重結晶を考えよう. 3つの結晶粒が接合されていない状態でそれぞれの結晶粒が荷重を受けた時を想像すると, 式(2)が満たされない時は図1(c)のような変位の食い違いが生ずる. 同様に式(3)または(4)が満たされない時にはそれぞれ図1(d)および(e)のような食い違いが生ずる. 図1(f)では結晶粒AとBに生ずるせん断ひずみ成分 ϵ_{xy} が一致しない時に生ずる変位の食い違いを描いた. 双結晶の時には ϵ_{xy} が一致する必要はなかったが, 結晶粒A, B, Cが形成する粒界3重線の近傍で変位の食い違いが生じないためには,

$$\epsilon_{xy, A} = \epsilon_{xy, B} \quad (5)$$

も満たさなければならない.

3つの結晶粒が接合されている場合, 式(2)-(5)を満たすために結晶粒は相互に変形を拘束し, そのために余計な応力が発生する. この応力は変形の適合性を満たすために生ずる応力であるが, 省略して適合応力 (compatibility stress) と呼ぶこともある.

(2) 変位の食い違いを打ち消す仮想転位の連続分布と回位

図1(c)-(f)に描いたような仮想的な変位の食い違いがあ

るときに, 界面で接合された試料では食い違いが生じないように弾性変形が付加的に生ずるとしよう. このときに生ずる応力場は一般に複雑であるが, 次のような把握は可能である. すなわち, 界面で生ずるであろう変位の食い違いをちょうど打ち消すような変位の食い違いを定義すると, その食い違いに伴う転位密度テンソルを求めることができる⁽⁵⁾⁽⁶⁾. これらの転位を導入すれば変位の食い違いは解消され, 代わりに転位に伴う応力場が粒界や粒界の接合箇所の近傍に形成される. 図1(e)の場合, そのような転位は粒界面AB上に等密度で分布する z 軸方向に平行な刃状転位列であることがわかる⁽⁷⁾⁽⁸⁾. ただしここで転位列と言うのは孤立した結晶転位の列ではなく, 粒界面上に連続分布する転位のことである. 転位列と言う場合, 以下も同様である. 刃状転位列が等密度で粒界面上に分布し, その一端(この場合は粒界3重線の箇所)で途切れている場合, それらが作る弾性場はねじり回位が作るものと等価である. この回位のフランクベクトルの向きを図1(e)に ω で示した.

同様にして, 図1(c)の場合, 変位の食い違いを打ち消すために必要な転位列は z 軸に平行で y 軸方向のバーガースベクトルを持つ刃状転位列になる. 図1(f)の場合は同じく z 軸に平行で x 軸方向のバーガースベクトルを持つ刃状転位列になる. この図1(f)の場合は粒界3重線にくさび形回位がある時に形成される応力場と等価な応力場を作る. 図1(d)の場合には粒界面AB上に y 軸に平行な刃状転位列が得られ, これと同時に, 粒界面BC上には x 軸に平行な刃状転位列が得られる. これらの転位のバーガースベクトルはともに z 軸に平行方向である.

結晶粒A, Bの界面でひずみ成分が満たさなければならない条件を式(2)-(5)に示したが, これを荷重との関係で考える時に注意しなければならないことがある. それは弾性変形ではポアソン効果, 塑性変形では体積一定条件があるために生ずることである. 例えば y 軸方向の荷重によって垂直ひずみ ϵ_{yy} が生ずる時, 一般にそれと同時に ϵ_{xx} と ϵ_{zz} が生ずる. そのため, これらのひずみ成分の不適合によって生ずる仮想的な変位の食い違いも打ち消すために別の転位列が同時に必要になる. すなわち, 結晶粒A, Bの界面には y 軸および z 軸に並行な刃状転位の網目構造が仮想転位分布になる.

さらにもう一步踏み込んで一般の弾性異方性の場合には, たとえ荷重が単軸であっても荷重方向およびそれに垂直方向の垂直ひずみが生じると同時にせん断ひずみも生ずる. 塑性すべりの場合にも, 一般的には単軸荷重のもとで垂直ひずみ3成分の他にせん断ひずみ3成分が生ずる. これらのひずみ成分が結晶粒ごとに異なれば, 図1(c)-(f)に示したような仮想的な変位の食い違いが同時に起こる. それを補償するような(変位の食い違いが起こらないようにするような)弾性変形が粒界近傍で生ずるならば, このときに形成される応力場はここで述べたような転位の網目構造が重なった時に作られるものと等価なはずである.

結晶粒界面やその接合する箇所の近傍に形成される応力場が粒内の転位の運動に及ぼす効果を直感的に把握することは

一般には難しいが、上に述べたように粒界に仮想的に分布する転位列を考え、それと運動転位とがピーチ・ケーラー力を及ぼしあうと考えれば、微視組織中に形成される複雑な力学場の効果を想像することができる場合がある⁽⁷⁾。

(3) 弾性異方性の効果

多結晶体の幾何学的な構成要素の基本的なものは結晶粒界、粒界3重線および粒界4重点である⁽⁹⁾⁽¹⁰⁾。図2(a)(b)に3つの結晶粒界の会合する線としての粒界3重線、4本の粒界3重線が会合する点としての粒界4重点の模式図を示す。多結晶体は図2(c)に示すように粒界4重点が粒界3重線で結ばれる粒界ネットワークであると単純化して考えることができる。図2(d)に示す5重結晶⁽¹¹⁾は多結晶体の幾何学的な構成要素を含みかつ、最も単純なものの一つである。

多結晶体が負荷を受けると、塑性変形が開始する前に結晶の弾性異方性に起因して不均一な応力場が形成される。ごく単純化した場合を考えよう。立方晶の場合、単位ベクトル $(\alpha \beta \gamma)$ の方向のヤング率を $E_{[\alpha\beta\gamma]}$ とすると、

$$1/E_{[\alpha\beta\gamma]} = s_{11} - s_{44}(A-1)(\alpha^2\beta^2 + \beta^2\gamma^2 + \gamma^2\alpha^2) \quad (6)$$

$$A = 2(s_{11} - s_{12})/s_{44} \quad (7)$$

である。ここで s_{11} , s_{12} , s_{44} は結晶基準軸方向の弾性コンプライアンスであり、 A は弾性異方性の強さを代表する弾性異方性比と呼ばれる量である。ミラー指数 $[l m n]$ を使うとすると、式(6)は次のように書き直すことができる。

$$1/E_{[lmn]} = s_{11} - s_{44}(A-1) \frac{(l^2m^2 + m^2n^2 + n^2l^2)}{(l^2 + m^2 + n^2)^2} \quad (8)$$

図3は $[100]$ および $[111]$ 方向のヤング率の比をいくつかの材料についてプロットした結果である⁽¹¹⁾。例えばAu, Ag, Cuの場合、ヤング率の比は約3である。

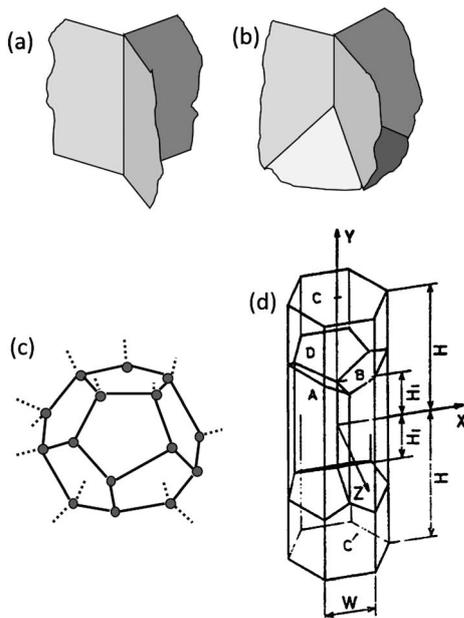


図2 (a) 粒界3重線, (b) 粒界4重点, (c) 粒界ネットワーク, (d) 5重結晶のモデル. (a)-(c)は文献⁽¹⁰⁾を参考にして描き直した。

図4は図2(d)に示した5重結晶のモデルに y 軸方向の引張負荷を加えた時に粒界4重点の近傍に生ずる応力場を調べた例である⁽¹¹⁾。単純化のために各結晶粒の弾性的性質は等方で、ヤング率がそれぞれ異なるという単純化した条件を用いた。モデル中の2つの粒界4重点を結ぶ粒界3重線に注目し、その近傍を通る y 軸に平行な直線($x/W=0.03$, $z/W=0.02$ を通り、結晶粒BとCを貫通している)の上で観察した y 軸方向垂直応力を示した。変形は $y=0$ の面に関して対称なので、結果は $y \geq 0$ の領域についてのみ示している。

結晶粒A, B, C, C' およびDのヤング率の比を $E^B/E^A=2$, $E^D/E^A=1.5$ とし、 $E^C/E^A=0.5, 1.5$ 、および4の場合について解析した。ただし、 $E^C=E^C$ とした。粒界4重点および粒界3重線の近傍に生ずる応力には、それを構成している3または4個の結晶粒のヤング率の大きさに依存して、平均値よりも大きくなる場合も小さくなる場合もあることがわかる。式(6)または(8)に示したようにヤング率は結晶方位によって決まるので、応力分布は負荷方向に対する結晶粒の配置とその結晶方位によって変化することになる。またここ

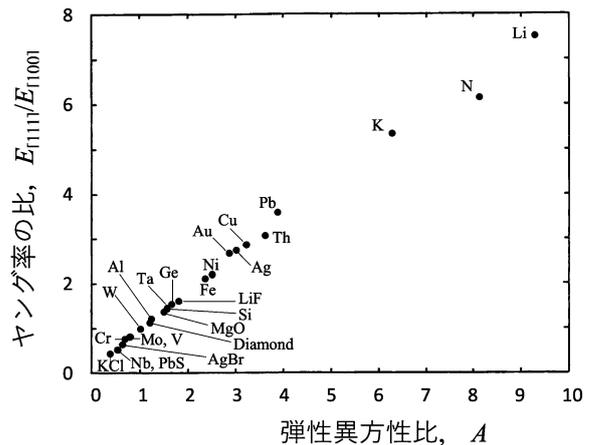


図3 弾性異方性比に対する $\langle 111 \rangle$ と $\langle 100 \rangle$ 方向のヤング率の比. 文献⁽¹¹⁾に掲載の図をもとに一部を描き直した。

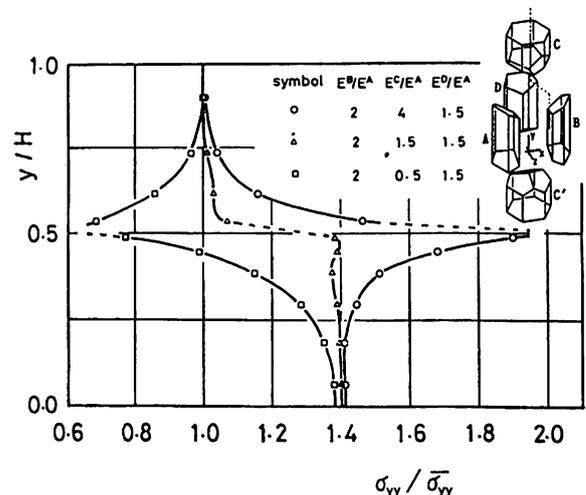


図4 粒界4重点近傍での弾性応力の分布の例。

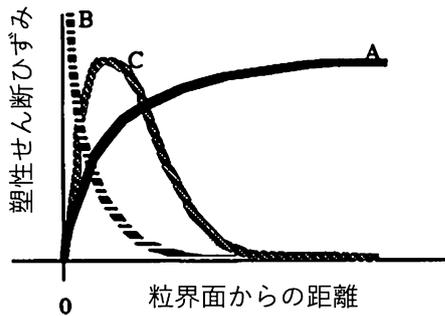


図5 結晶粒界近傍における主および2次すべり系に生ずる塑性せん断ひずみ分布の模式図。

では示していないが、応力場そのものが多軸化する⁽¹¹⁾。そのため塑性変形応答はさらに複雑化する。

(4) 塑性変形応答

前項では式(2)-(5)の条件に表れるひずみが「弾性」ひずみであるとして考えたが、塑性変形も生じていれば、式(2)-(5)は塑性成分を含んだ全ひずみ(ひずみの弾性成分と塑性成分の和)が満たさなければならない条件である。簡単のために弾性範囲では式(2)-(5)が満たされ、そこから負荷がわずかに増加した時に生ずる塑性ひずみ増分に仮想的な不適合が生ずる場合を想像しよう。この時に生ずる応力場は前項で考察した応力場と類似のものになるだろうが、その応力場に応じて生ずる変形は、応力値がすでに塑性すべりを生じさせるほどの大きさに達しているため、局所的にすべり変形が促進されたり抑制されたりする他に、粒内で活動するすべり系とは異なったすべり系が粒界近傍で活動することもあろう。すなわち粒内で主すべり系として活動するすべり系が結晶粒界やその接合箇所の近傍では活動を抑制され、他のすべり系が主すべり系に先立って活動する場合もある。このことは双結晶を用いた実験および計算で確認されている⁽³⁾⁽⁴⁾⁽¹²⁾⁽¹³⁾。このようにして粒界やその接合箇所の近傍ではすべりが多重化する可能性が生まれる。

すべりが多重化すると、次節に述べる転位の平均自由行程が粒内と異なったものになるので、結果として転位の蓄積速度に変更が生じて加工硬化の挙動も変わる。図5は結晶粒界近傍における主すべり系と2次すべり系の活動を模式的に描いたものである。多重すべりの生じた層状の領域が粒界近傍に形成される。この多重すべり層の厚さが粒径に依存しない、または粒径が大きいほど相対的に薄くなると仮定すれば、多重すべり層の存在が多結晶体の降伏応力や塑性流動応力の粒径依存性をもたらすことになる⁽¹⁴⁾。また多重すべり層では加工硬化率が変わるだけでなく、例えば圧延再結晶における核発生箇所となる可能性も高くなることが想像される⁽¹⁵⁾。

3. 塑性すべりにともなう転位蓄積と臨界分解せん断応力のモデリング

(1) SS 転位と GN 転位

塑性すべりにともなう転位の密度発展は次のようなモデルで記述される⁽¹⁶⁾。

$$d\rho = \frac{1}{b} \left(\frac{c}{L} - D\rho \right) d\gamma \quad (9)$$

ここで ρ と γ は転位の密度と塑性せん断ひずみであり、暗黙のうちに $\rho > 0$, $d\gamma \geq 0$ が仮定されている。式(9)右辺にある L , D および c は転位の平均自由行程と対消滅距離および数値係数である。右辺第1項は平均自由行程 L が小さいほど転位の蓄積が加速されること、右辺第2項は対消滅距離 D が大きいほどまた、すでに蓄積している転位の密度 ρ が高いほど転位の消滅速度が大きいことを表している。右辺第2項は変形とともに転位密度が減少する効果を与えているので、動的回復項と呼ばれる。式(9)は転位密度増分が塑性せん断ひずみの増分に比例し、転位の平均自由行程と対消滅距離がその速度に関与するようにモデル化されている。また上に述べたように密度が高いほど消滅もしやすいとモデル化されている。このように評価される転位を「統計的に蓄積する転位: statistically stored dislocations, SS 転位」と呼ぶ。

以下の近似

$$L = \frac{c^*}{\sqrt{\rho}} \quad (10a)$$

$$D = D_0 > 0 \quad (10b)$$

のもとで式(9)を積分すると、

$$\rho = \left[\frac{c}{D_0 c^*} + \left(\sqrt{\rho_0} - \frac{c}{D_0 c^*} \right) \text{Exp} \left(-\frac{D_0}{2b} \gamma \right) \right]^2 \quad (11)$$

$$\rho_{\text{sat.}} = \left(\frac{c}{D_0 c^*} \right)^2 \quad (12)$$

が得られる。ここで ρ_0 と $\rho_{\text{sat.}}$ は初期転位密度と飽和転位密度である。臨界分解せん断応力 (Critical resolved shear stress: CRSS と略す) が式(1)で与えられるとすると、式(11)の結果を用いて、

$$\text{CRSS} = a\mu b \left[\sqrt{\rho_{\text{sat.}}} + \left(\sqrt{\rho_0} - \sqrt{\rho_{\text{sat.}}} \right) \text{Exp} \left(-\frac{D_0}{2b} \gamma \right) \right] \quad (13)$$

となるので、 $\rho_0 < \rho_{\text{sat.}}$ ならば変形とともに硬化するが、 $\rho_0 > \rho_{\text{sat.}}$ ならば軟化する。後者のことはたとえばマルテンサイトラスのように初期転位密度が極めて高い場合に、ラスの方向と負荷軸方向との関係によっては起こりうる⁽¹⁷⁾。変形とともに軟化する場合、その領域単体では塑性変形が不安定化、局在化することを意味するが、マルテンサイト組織には軟化の生ずるラス方向と生じない方向の領域が混在している。変形中に一部の領域が軟化する可能性があることがマルテンサイト組織全体としての力学応答特性にどのような効果をもたらしているのか、興味深い研究課題である。なお式(10b)で $D_0 = 0$ 、すなわち動的回復が生じない場合、式(9)の積分結果は異なり、軟化は起こらない。

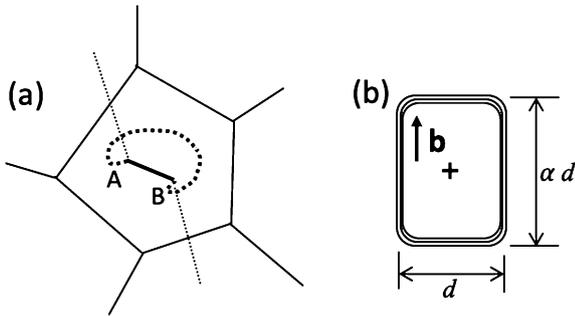


図6 結晶粒内での転位ループの放出 (a) と蓄積 (b).

SS 転位密度の増分は式 (9) のように評価したが、これを 3次元空間中にさまざまに配置する個々のすべり系ごとに評価するために、以下のように拡張する。

$$d\rho_S^{(n)} = \frac{1}{b^{(n)}} \left(\frac{(1+\alpha)^2}{2\alpha} \cdot \frac{1}{L^{(n)}} - D^{(n)} \rho_S^{(n)} \right) \cdot |dy^{(n)}| \quad (14)$$

物理量の右肩につけた (n) はすべり系を識別するための番号である。式 (9) では暗黙のうちに $dy \geq 0$ が仮定されていたが、3次元空間中ではすべり系の定義の仕方によって塑性せん断ひずみ増分は正にも負にもなりうる。式 (14) では塑性せん断ひずみ増分の正負にかかわらずに SS 転位の密度増分が与えられることを明示的に定義した。α は転位源から転位ループが放出される時のアスペクト比 (図 6) であり⁽¹⁸⁾、蓄積する SS 転位のらせん成分と刃状成分の比であると考えられることも可能である。転位の対消滅に伴って原子空孔が放出されることをモデル化する時にこの因子 α は一定の役割を果たす⁽¹⁹⁾ ⁽²⁰⁾。

幾何学的に必要な転位は塑性せん断ひずみの空間的な分布に変動があるとき、そこになければならない転位である⁽²¹⁾。塑性ひずみの空間的な勾配から刃状成分、らせん成分および密度ノルムが次のように求められる⁽¹⁸⁾ ⁽²²⁾。

$$\rho_{G, \text{edge}}^{(n)} = -\frac{1}{b} \frac{\partial \gamma^{(n)}}{\partial \xi^{(n)}}, \quad \rho_{G, \text{screw}}^{(n)} = \frac{1}{b} \frac{\partial \gamma^{(n)}}{\partial \zeta^{(n)}} \quad (15)$$

$$\|\rho_G^{(n)}\| = \sqrt{(\rho_{G, \text{edge}}^{(n)})^2 + (\rho_{G, \text{screw}}^{(n)})^2} \quad (16)$$

ここで ξ⁽ⁿ⁾ と ζ⁽ⁿ⁾ はすべり系 n のバーガースベクトル **b**⁽ⁿ⁾ の方向および、すべり面上で **b**⁽ⁿ⁾ に垂直な方向である。

(2) 転位の平均自由行程と臨界分解せん断応力の拡張モデル

式 (10a) で与えられた転位の平均自由行程モデルの拡張にはいくつかの可能性があるが⁽²³⁾、我々は次のモデルを用いている、

$$L^{(n)} = \text{Min} \left[\frac{c^*}{\sqrt{\sum_m (w_S^{(nm)} \rho_S^{(m)} + w_G^{(nm)} \|\rho_G^{(m)}\|)}}, d_1^{*(n)}, d_2^{*(n)}, \dots \right] \quad (17)$$

Min は四角括弧 [...] 中に列記した引数の中で最小のものを取り出す関数である。式 (17) 右辺の第一の引数は式 (10a) を 3次元空間に拡張しかつ GN 転位の寄与も取り入れたものである。w_S^(nm) と w_G^(nm) はすべり系 m に蓄積した SS および GN 転位がすべり系 n を運動する転位の平均自由行程の決定に寄与する重みを与える。例えば m と n すべり系が同じす

べり系 (m=n) または互いに共面系であったならば転位の切り合いは生じないので、この組み合わせに関する重みを 0 とする、などとすることができる。運動転位と相互作用する蓄積転位の平均間隔の c* 倍が平均自由行程を決定する第 1 引数となっている。この第 1 引数を有効転位間隔と呼ぶこともある。c* の値は 10 から 100 程度が提案されてきたが⁽²⁴⁾、これについてはさらに詳細を検討する必要があると思われる。

第 2 引数以降は微視組織に内在する特徴長さまたは変形中に発達する特徴長さであり、たとえば結晶粒径や双晶界面の間隔などが平均自由行程に寄与する。これらのいくつかの特徴長さのうちの最小のものが転位の平均自由行程となるモデルである。図 7 にこのことを模式的に示した。

臨界分解せん断応力は以下のように拡張した。

$$\theta^{(n)} = \theta_0^{(n)} + \sum_{m=1} \Omega^{(nm)} a \mu b^{(n)} \sqrt{\rho_S^{(m)}} + 3\beta \frac{\mu b^{(n)}}{d^{(n)}} \quad (18)$$

θ⁽ⁿ⁾ がすべり系 n の臨界分解せん断応力であり、右辺第 1 項は格子摩擦項、第 2 項は式 (1) に示した Taylor 項をすべり系ごとに展開した項で、Ω^(nm) はすべり系 n と m の相互作用行列である⁽¹⁸⁾。第 3 項は我々は Orowan 項と呼んでいる。この項は Frank-Read 型の転位源から転位ループが放出される時、転位線の運動可能な領域が制限されるとループ放出に必要な応力が増加すること由来する。図 8 にその一例を示した。転位源に Orowan 応力 (μb/λ 程度：ここで λ は転位源のピン留め点間の距離) 以上の応力が加えられると図 8(a) のように転位弧が発達するが、図 8(b) の段階まで進むと矢印で示した箇所の転位弧の曲率が大きくなりすぎて、応力をさらに大きくしなければこれ以上運動が進まない。すなわち、転位源から閉じた転位ループが放出されるために必要な応力

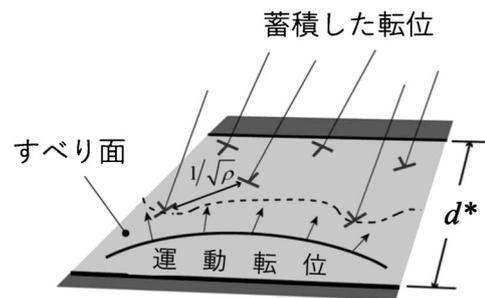


図7 転位の平均自由行程のモデル化。

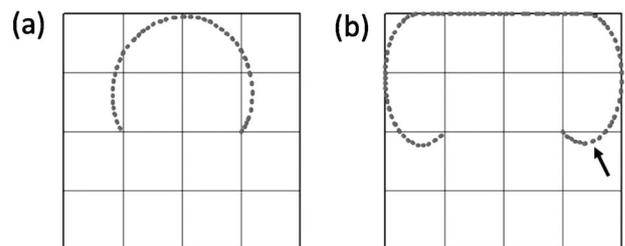


図8 制限された空間における転位ループの放出。拡張の初期 (a) および拡張が停止した時 (b) の転位弧の形状。

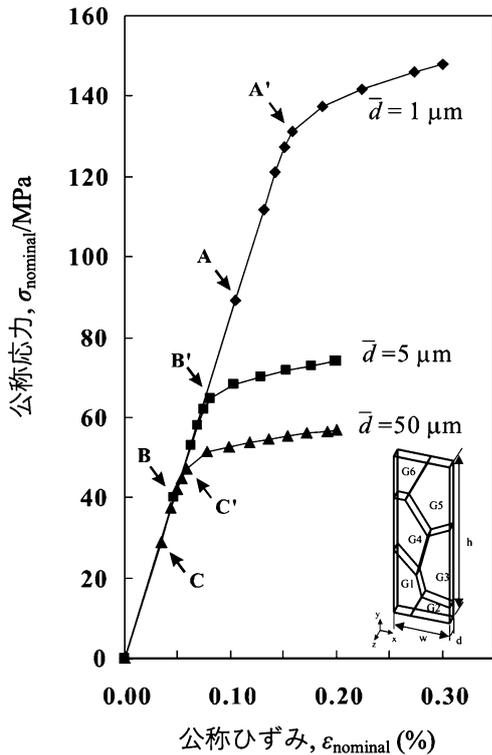


図9 6個の結晶粒からなるCu多結晶板の引張変形曲線. 初期転位密度は $\rho_{0, total} = 1.2 \times 10^{12} \text{ m}^{-2}$ とした.

は、転位源の寸法だけではなく転位が運動する微視組織の寸法にも依存し、これが特徴長さとなる。組織が微細になればこの特徴長さが重要な効果をもたらす。式(18)の第3項はこのことを表している。 β は1程度の値である。

図9は6個の結晶粒からなる薄い純銅多結晶板の引張変形を解析して得られた公称応力-公称ひずみ曲線である⁽²⁵⁾。各結晶粒の体積を求め、それと同じ厚さ、同じ体積を持つ円柱の直径を結晶粒径とし、それを式(17)(18)の特徴長さとした。粒径に依存して式(18)右辺第3項の寄与の大きさが変わるために、粒径が小さいほど降伏応力が高くなる。また、粒径が小さいほど式(17)の関数Minの第2引数が小さくなるために転位の平均自由行程も小さくなり、式(14)の転位蓄積項が大きくなって加工硬化率が高くなる。

4. 検討例

(1) 析出物分散合金の加工硬化⁽²⁶⁾

図10(a)は直径約39nmの硬質な球状バナジウム炭化物がフェライト母相中に分散する合金の一部を数値モデル化したもので、分散粒子の体積分率は約1.24%である。この合金の巨視的な加工硬化特性を評価するためにこの微視組織に内在する特徴長さを定義し、それを式(17)および(18)に用いることにする。特徴長さを求めるために、図10(b)に示すように試料中の注目する点を含みかつ、すべり面に平行な薄い領域を切り出し、注目する点の周囲にある析出物間の距離(図10(c))を計測した。図10(d)は(c)のようにして求めた距離

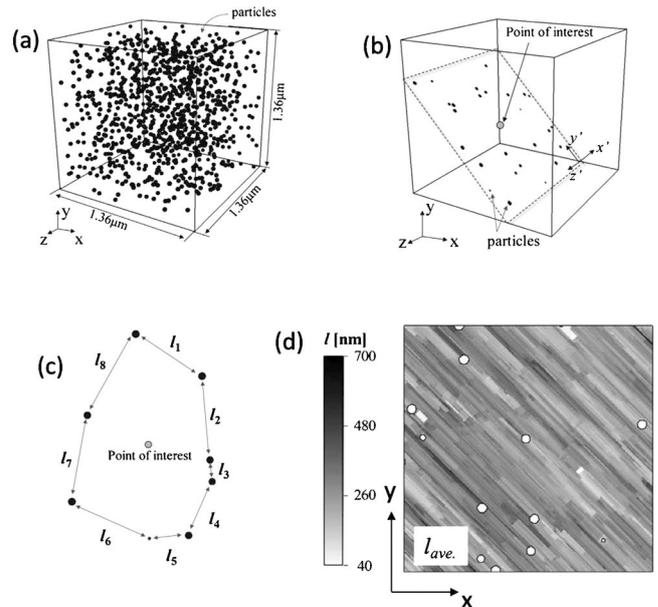


図10 硬質な析出物が分散している材料の力学応答解析。(a) 解析した試料, (b), (c) 転位の平均自由行程の決定方法。(d) 組織中の特徴長さの空間分布。

の平均値 l_{ave} の試料中での分布、図11(a)は l_{ave} の頻度分布である。頻度分布は正規分布に類似し、最小値、最大値および平均値はそれぞれ、46, 627および263nmであった。変形解析にあたって、臨界分解せん断応力の評価に用いる特徴長さには l_{ave} を用い、転位の平均自由行程の評価に用いる特徴長さには $2l_{ave}$ を用いた。図10(d)と図11(a)に示されているように l_{ave} は微視組織中で大きく変動し、塑性変形の開始タイミングと加工硬化の大小が材料中で異なる。

図11(b)は応力ひずみ曲線の解析結果とImanamiらによる実験結果⁽²⁷⁾を示す。0.2%耐力の73%の応力レベルで、母相体積のうちの6.6%にすでに塑性すべりが生じ、このすべりの生じた場所は特徴長さ l_{ave} の大きい場所だった。その後0.2%耐力に達した時には母相体積の83%~87%で塑性すべりが生じていたが、残りの10%程度の領域では塑性すべりがまだ開始していなかった。

図12(a)(b)は公称引張ひずみ ϵ_{nom} がそれぞれ0.314%および5%の時に主すべり系に生じた塑性せん断ひずみの分布である。変形の初期($\epsilon_{nom} = 0.314\%$)ではすべり面に沿った方向に伸びる縞状の領域で相対的に大きなすべりが生じていた。変形が進み $\epsilon_{nom} = 5\%$ の時にはすべり面にほぼ垂直な方向にもひずみ値が高い領域が広い幅で伸びている。図13(a)(b)は $\epsilon_{nom} = 5\%$ の時の引張負荷方向(y軸に平行)の垂直応力の分布および、主すべり系に蓄積したGN刃状転位密度の分布である。応力が高くなっているのは、ほとんどの析出物およびそれらからすべり面に平行な方向に伸びる縞状の領域とすべり面に垂直方向に細く伸びる領域である。GN刃状転位の高密度領域はすべり面に垂直方向に発達しているが、多くは正負の刃状転位壁が組となっており、単結晶で見られたキンク帯⁽¹⁾と類似の構造であった。このキンク帯構造も加工

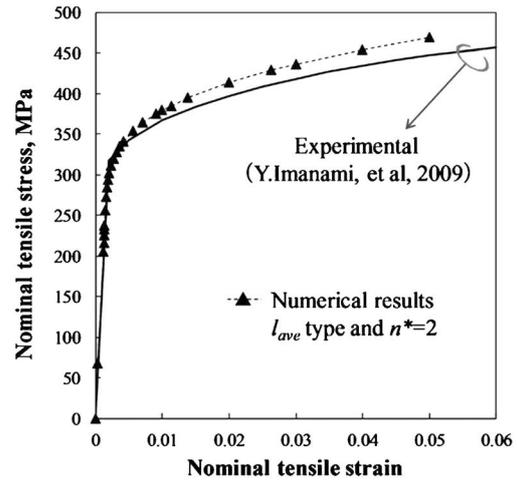
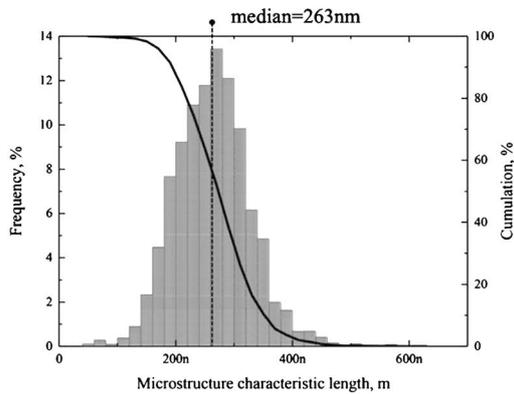


図11 (a) 硬質析出物分散合金モデルの特徴長さ l_{ave} の頻度分布, (b) 巨視的応力ひずみ関係および実験結果との比較.

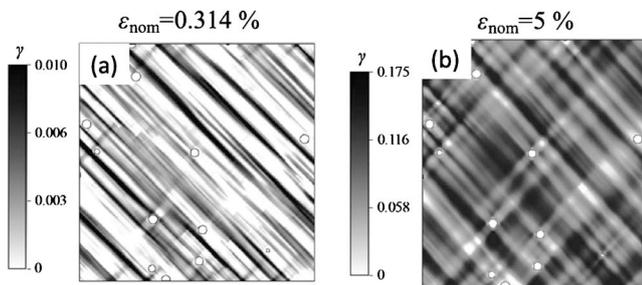


図12 主すべり系における塑性せん断ひずみの発展.

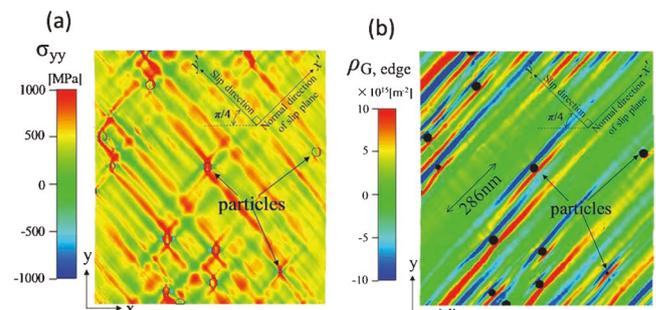


図13 公称ひずみが0.05の時の (a) 引張荷方向 (y 軸に平行) の垂直応力の分布および, (b) 主すべり系に蓄積した GN 刃状転位密度の分布.

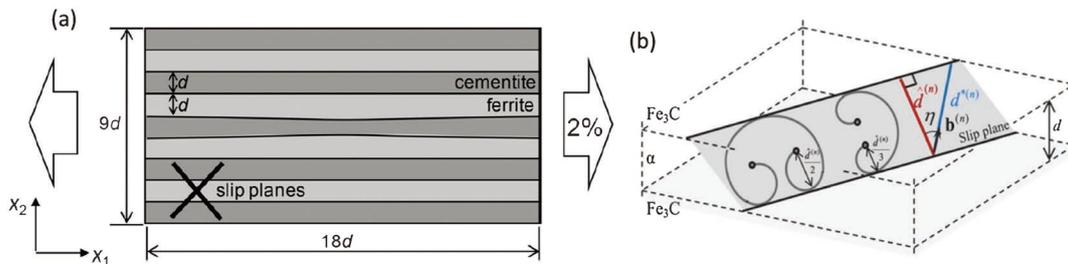


図14 パーライト積層構造体のモデル (a) よび, フェライト相のうすい層の中で変形に関する幾つかの寸法因子.

硬化に寄与しているものと考えられる.

(2) パーライト積層構造体におけるフェライト層の加工硬化⁽²⁸⁾

パーライト積層構造の構成相の一つであるセメンタイト相 (θ 相) は単体では脆性的であるがパーライト構造中ではある程度の延性を示す. その理由の一つは, パーライト構造中のフェライト相 (α 相) の加工硬化率が十分高ければセメンタイト相中に生じた塑性変形が局在化しにくいからである⁽²⁹⁾.

セメンタイトの層に挟まれたフェライト層の加工硬化特性を検討するために, 図14(a)に示すモデルを作り, これに引張荷を加えた時のフェライト層の挙動を調べた. ここで問題となる微視組織の特徴長さは図14(b)に示した d (α 相の層

厚さ), $\hat{d}^{(n)}$ (α 相のすべり面が α - θ 界面で切られたリボン状領域の幅) および, $d^{*(n)}$ (α 相中のすべり面上パーガスベクトル方向の直線が α - θ 界面で切られる長さ) である. また, α - θ 界面の原子構造に依存して, α 相中を運動して来た転位は界面に吸収される場合があり⁽³⁰⁾, 界面の転位吸収能力も検討すべき因子の一つである. ここでは臨界分解せん断応力に寄与する特徴長さを $\hat{d}^{(n)}$ とし, 転位の平均自由行程を決める特徴長さは $d^{*(n)}$ または, 界面に転位吸収能力がある場合を想定して $d^{*(n)}$ の定数倍 (ここではその定数を β で表す. 式(18)の β とは異なる) とした.

厚さ d を100および500 nmとして得られた α 相の応力ひずみ関係を図15に示す. $d=500$ nmでは塑性変形は応力が

走査型電子顕微鏡を用いた同一視野観察による 白金合金ナノ粒子の溶解機構解析

大井 梓*

1. はじめに

この度、第33回日本金属学会奨励賞を受賞でき、大変光栄に存じます。栄誉ある本賞を受賞できたのは、東京工業大学 水流徹名誉教授、西方篤名誉教授、および多田英司教授からの継続的なご指導の賜物です。先生方並びに研究活動を支えてくださった研究室の皆様、心より感謝申し上げます。また、本紙面に寄稿する機会を与えてくださった本会関係者の皆様にも感謝の意を表します。

2024年4月に東京工業大学 科学技術創成研究院に異動し、新たな研究室を立ち上げ、研究・教育活動をスタートいたしました。本稿では、今回の受賞題目であり筆者のライフワークでもある「ナノスケールでの金属溶解機構解明に関する研究」について、これまでの研究成果を振り返りつつ、今後の研究の方向性についても言及します。金属材料の溶解(腐食)劣化現象は、多くの工業プロセスや製品の耐久性に直結しています。そのため、金属材料の溶解機構を解明することは、腐食科学の進展はもちろん、広範な産業分野への応用が期待されます。本稿が、読者の皆様にとって有益な情報を提供し、少しでもお役に立てることを願っています。

2. 燃料電池触媒の溶解劣化とその評価手法

金属材料は、その用途の広さと多様性により、現代の工業社会において不可欠な素材である。周期表の約80%の元素が金属であり、これらはエネルギー・建築・運輸など様々な分野で中心的な役割を果たしている。特に、固体高分子燃

料電池(PEFC)では、正極触媒が極めて重要でありその性能が電池の発電効率に大きく影響する。本稿では、筆者が学部4年生で研究室に配属されて以来取り組んできた、「PEFC用正極触媒の溶解機構解明」に関する研究について紹介する。

PEFCは、自動車や定置用燃料電池としての利用が期待されているが、その広範な普及には幾つかの課題が存在する。その中でも、正極の酸素還元反応(ORR)を促進する白金(Pt)触媒の高コストは大きな障壁となっている。この問題を解決するために、Ptより安価な代替元素(M:コバルト(Co)、鉄(Fe)、ニッケル(Ni)、銅(Cu)など)を含むPt-M合金触媒が開発されている。これらの合金は、純Pt触媒に比べて高いORR活性を示すことが知られており⁽¹⁾⁻⁽⁴⁾、コスト削減と性能向上の双方が期待されている。しかし、PEFC作動環境下では、添加されたMがPtに比べて熱力学的に溶解しやすいという課題がある。この現象は触媒の早期劣化を招き、長期的な耐久性に悪影響を与える可能性がある。したがって、触媒の溶解挙動を正確に理解し、それに基づき触媒耐久性を向上させることが、PEFCの実用化に向けて不可欠である。

Pt-M合金触媒におけるMの溶解を課題として前述したが、PEFCが低pHと電位変動のある過酷な環境で作動することを考慮すると、通常熱力学的に安定とされるPtの溶解も無視できない問題である。特に、比表面積を増大するためにナノ粒子化されたPtは、溶解が促進される傾向にある⁽⁵⁾。一般的に宝飾品として使用されるPtが数10年もの長期間にわたってその美しさを保つのは対照的に、PEFC作動環境では超微量のPtが溶解する可能性がある。これは、実際にPEFCの性能低下に直結するため、極めて少量のPt

* 東京工業大学科学技術創成研究院；准教授(〒226-8503 横浜市緑区長津田町4259-R2-28)

Analysis of the Dissolution Mechanism of Platinum Alloy Nanoparticles Through Identical-location Scanning Electron Microscopy Observation; Azusa Ooi(Institute of Innovative Research, Tokyo Institute of Technology, Yokohama)

Keywords: identical-location scanning electron microscopy observation, platinum-copper nanoparticles, electro-deposition, dissolution, polymer electrolyte fuel cells

2024年4月16日受理[doi:10.2320/materia.63.487]

溶解を正確に検出する技術の開発が急務となっている。

金属 (Me) の溶解反応は、一般的に以下の反応式で示される。



この反応から金属の溶解量は、3つの物理量で評価可能である：①金属 (Me) の重量減少量、②溶解種 (Me^{n+}) のイオン濃度、③金属の溶解に伴う電流 (e^-)。ただし、Pt-M 合金触媒の場合、③の測定は副反応 (酸化物の形成・還元など) による電流が大きく困難である。この問題を打開するために、我々の研究グループでは、①を評価するために電気化学水晶振動子マイクロバランス法⁽⁶⁾を、②を評価するためにチャンネルフロー電極法⁽⁷⁾⁽⁸⁾やオンライン誘導結合プラズマ質量分析 (ICP-MS) 法⁽⁵⁾⁽⁹⁾を適用した。詳細は原著論文に説明を委ねるが、これら手法は極めて微量な Pt の溶解速度を検出可能である。例えば、オンライン ICP-MS 法において、Pt の検出限界は約 $0.13 \text{ pg cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ (5 ppt) である。

本稿では、これらの方法とは別に、溶解に伴う表面状態の変化や粒径減少を電子顕微鏡で直接観察し、ナノスケールで Pt-Cu 合金の溶解挙動を調査した例を紹介する。

3. Pt-Cu 合金の溶解挙動と表面形態変化

PEFC 作動環境を模擬した $0.5 \text{ M H}_2\text{SO}_4$ 溶液中における電位サイクル試験を、バルク材 Pt-50 at% Cu (Pt-50Cu) および Pt-75Cu に対して1000サイクル実施した⁽¹⁰⁾。この試験は、電位範囲 $0.05 \sim 1.4 \text{ V vs. SHE}$ (標準水素電極基準)、スキャン速度 100 mV s^{-1} で行った。100サイクル毎の溶解量は、ICP-MS によって定量され、Pt-50Cu および Pt-75Cu の Pt 溶解量 (Δm_{Pt}) はサイクルに関わらずほぼ一定であった (図 1(a))。特に、Pt-75Cu ではより大きな Δm_{Pt} であった。しかし、Cu の溶解量 (Δm_{Cu}) には顕著な差が見られた (図 1(b))。Pt-50Cu では、サイクル数の増加に伴い Δm_{Cu} は減少し、最終的にはほぼ一定値に安定した。対照的に Pt-75Cu では、 Δm_{Cu} は Δm_{Pt} と同様にサイクル依存性が見られなかった。両合金の最終的な Δm_{Cu} は大きく異なり、Pt-50Cu は約 40 ng cm^{-2} 、Pt-75Cu は $340 \text{ } \mu\text{g cm}^{-2}$ であった。したがって、Pt-50Cu と Pt-75Cu 合金の溶解挙動には大きく違いがあることが示唆される。さらに、 Δm_{Cu} が Δm_{Pt} より大きいことから、両合金において Cu が選択的に溶解していることが確認された。

電界放出型走査型電子顕微鏡 (FE-SEM) による観察によれば、Pt-50Cu は電位サイクル試験前後で表面形態にほとんど変化がなかった (図 2)。これは、Cu が選択溶解し、表面に Pt が濃化することで Pt 濃縮層が形成したため、Cu のさらなる溶解が抑制されたためと考えられる (図 1(b))。その結果、表面形態の変化が顕著になるほどの Pt と Cu の溶解は起こらなかった。一方、Pt-75Cu ではわずか100サイクル後に表面形態が大きく変化し、直径約 3 nm の無数の孔が形成したことが確認された (図 3)。この変化は Δm_{Cu} が Δm_{Pt} より極めて大きいことに起因し、多量の Cu が溶解した結

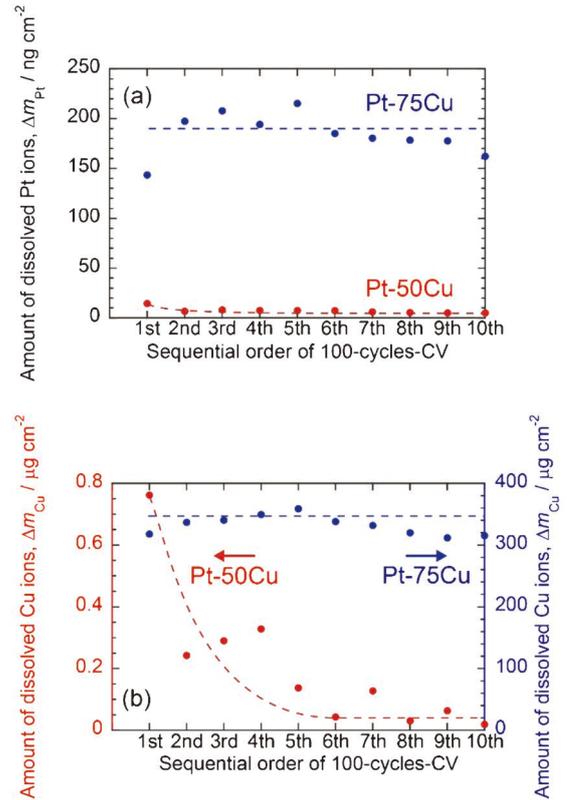


図 1 電位サイクル試験100サイクル毎の (a) Pt および (b) Cu 溶解量⁽¹⁰⁾。(オンラインカラー)

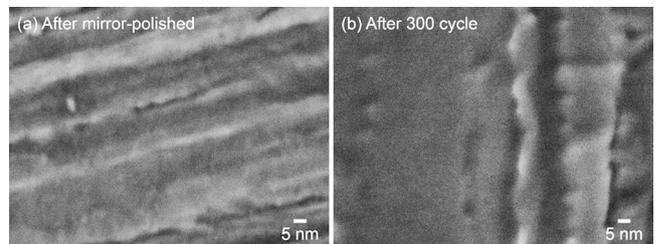


図 2 Pt-50Cu 表面の高倍率 FE-SEM 像：(a) 鏡面研磨後、(b) 300回の電位サイクル後⁽¹⁰⁾。

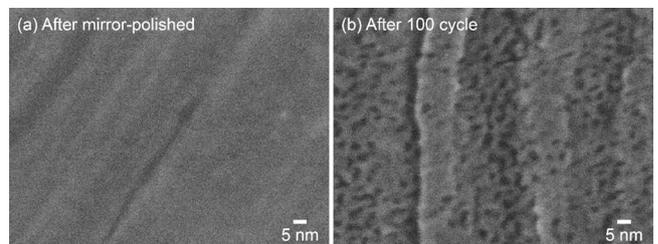


図 3 Pt-75Cu 表面の高倍率 FE-SEM 像：(a) 鏡面研磨後、(b) 100回の電位サイクル後⁽¹⁰⁾。

果、表面がポーラス構造化したと考えられる。これらの結果から、合金組成が溶解後の表面形態に与える影響が大きいことが明確になった。

4. Pt-Cu 合金ナノ粒子の溶解挙動と表面形態変化

(1) Pt-35Cu(Pt-rich)ナノ粒子

Pt-Cu 合金ナノ粒子の溶解挙動を詳細に調査するために、FE-SEM を用いて試験前後の同一視野 (IL) 観察を試みた⁽¹¹⁾。まず、試験基板上に Pt-Cu 合金ナノ粒子を電析し、その後、基板にピンセットを使用して X 型の印を付け、この印を目印として観察対象のナノ粒子を選定した (図 4)。次に、電位サイクル試験によりナノ粒子を溶解劣化させ、試験後も目印を参考に同一のナノ粒子を正確に特定し、IL 観察を実施した。この手法により、ナノ粒子の溶解前後の表面形態変化を捉えられる。

まず IL 観察とは別の試料を用いて、電位サイクル試験で Pt-35Cu ナノ粒子から溶解した Pt と Cu を ICP-MS で定量した (図 5)。溶解量 ($\Delta m_{\text{Pt, Acc.}}$, $\Delta m_{\text{Cu, Acc.}}$) は、試料作製時の電析量で正規化し、特定のサイクルまでの溶解した割合として表した。 $\Delta m_{\text{Pt, Acc.}}$ はサイクルに伴いほぼ直線的に増加し、5000 サイクル後に約 40% の Pt が溶解したことがわかった。一方、Cu はサイクル初期で約 30% が溶解し、この選択溶解によりナノ粒子表面に Pt 濃縮層 (Pt シェル) が形成したことが推察される。その後も Cu の溶解は継続しているが、初期と比較して溶解速度は徐々に低下した。これは、Cu の選択溶解により形成した Pt シェルが次第に溶解し、表面に露出

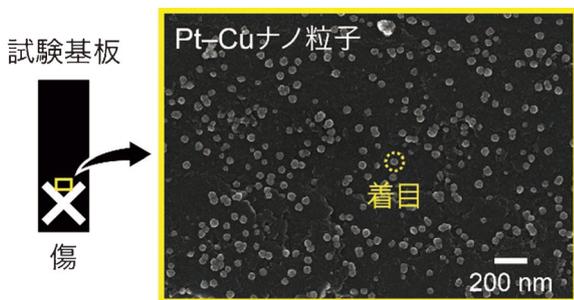


図 4 FE-SEM を用いた同一視野観察の実施方法概要。(オンラインカラー)

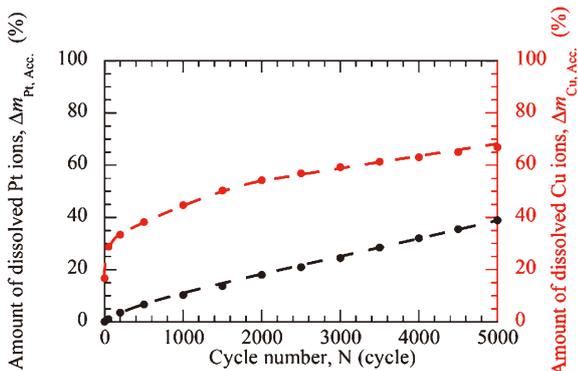


図 5 電位サイクル試験中に Pt-35Cu ナノ粒子から溶解した Pt および Cu 溶解量⁽¹¹⁾。(オンラインカラー)

した Cu が溶解する過程を反映していると推察される。

図 6 は Pt-35Cu ナノ粒子の FE-SEM 像を示しており、(a), (c), (e) は電位サイクル試験前 (電析後)、(b), (d), (f) はそれぞれ 50, 1000, 5000 サイクル後の同一視野像を示している。理想的には、同一のナノ粒子で連続して IL 観察をすることが望ましい。しかし、SEM の電子線照射によるナノ粒子の損傷により、複数回の IL 観察が困難であったため、特定のサイクル前後でナノ粒子の表面形態を比較した。電位サイクル数の増加に伴い、Pt-35Cu ナノ粒子の表面から徐々に凹凸が消滅し、滑らかになることが確認された。初期段階で、試験液がナノ粒子間の隙間に浸透し、1 次粒子が独立して溶解したと推察される。その後、Pt の溶解/再析出が進行して 1 次粒子の微細構造が崩壊し、より滑らかな 2 次粒子を形成した。ICP-MS の結果も、5000 サイクルにわたる電位サイクルの間に Pt と Cu が著しく溶解したことを示しており、これによりナノ粒子の平均粒径が約 55 nm から 38 nm へと著しく減少した。

(2) Pt-75Cu(Cu-rich)ナノ粒子

図 7 は、電位サイクル試験を通じて Pt-75Cu ナノ粒子から溶解した Pt および Cu の量を ICP-MS で定量した結果を示している⁽¹²⁾。縦軸の Δm_{Int} は、図 5 の $\Delta m_{\text{Pt, Acc.}}$ や $\Delta m_{\text{Cu, Acc.}}$ と同じ定義の値である。図 7 によると、Pt-75Cu ナノ粒子からの Pt および Cu の溶解の傾向は、Pt-35Cu ナノ粒子とはほぼ同様であった。5000 サイクルの電位サイクル試験を経て、初期電析量の約 65% に相当する Pt が溶解した。一方、Cu は試験初期に初期電析量の約 40% が溶解し、

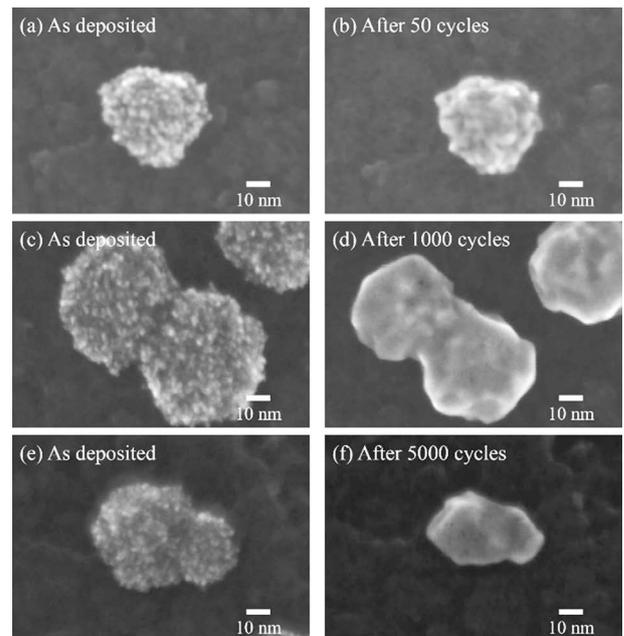


図 6 Pt-35Cu ナノ粒子の IL-SEM 像 : (a), (c), (e) は電析後、(b) 50 回の電位サイクル後、(d) 1000 回の電位サイクル後、(f) 5000 回の電位サイクル後。(a) と (b), (c) と (d), (e) と (f) は同一ナノ粒子を示す⁽¹¹⁾。

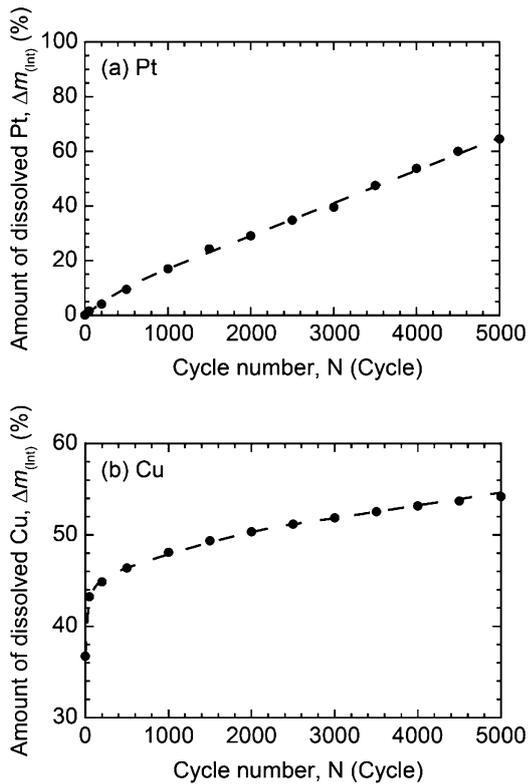


図7 電位サイクル試験中にPt-75Cuナノ粒子から溶解した (a) Pt および (b) Cu 溶解量⁽¹²⁾.

これがナノ粒子表面のPtシェル形成を示唆している。サイクル後期でも、Cuの溶解量は直線的に増加し続け、5000サイクル時点でもその抑制は見られなかった。したがって、Cu-richなナノ粒子でも、電位サイクルに伴うPtシェルの溶解が進むことで、Cuが表面に露出し溶解が続くことがわかった。

図8は、電位サイクル試験前後にPt-75Cuナノ粒子をFE-SEMでIL観察した結果を示している。わずか50サイクル後には、ナノ粒子表面の平滑化が進行していることが確認できる。電位サイクルが進むにつれて、この平滑化はさらに進行し、1000および5000サイクル後には、ナノ粒子に存在していた1次粒子の構造がPtの溶解/再析出により完全に消滅した。5000サイクルの電位サイクル試験を終えた時点で、PtとCuはそれぞれ約65%および約54%溶解しており、これらの溶解がナノ粒子の粒径を著しく減少させる主要因と考えられる。5000サイクル後のIL観察(図8(e), (f))によれば、粒径減少は約25%であり、この変化はICP-MS測定の結果から予想される粒径減少ともよく一致した。したがって、PtとCuの溶解はナノ粒子の粒径減少と強く相関していることは明らかである。

ここで観察されたナノ粒子の構造変化の中で最も注目すべき点は、ナノ粒子からCuが選択溶解するにも関わらずに、ポーラス構造を形成しなかった点である。第3章で示したように、同じPt-75Cu組成を持つバルク材では、Cuの選択溶解が進行すると合金表面に無数の孔が形成する。この結果

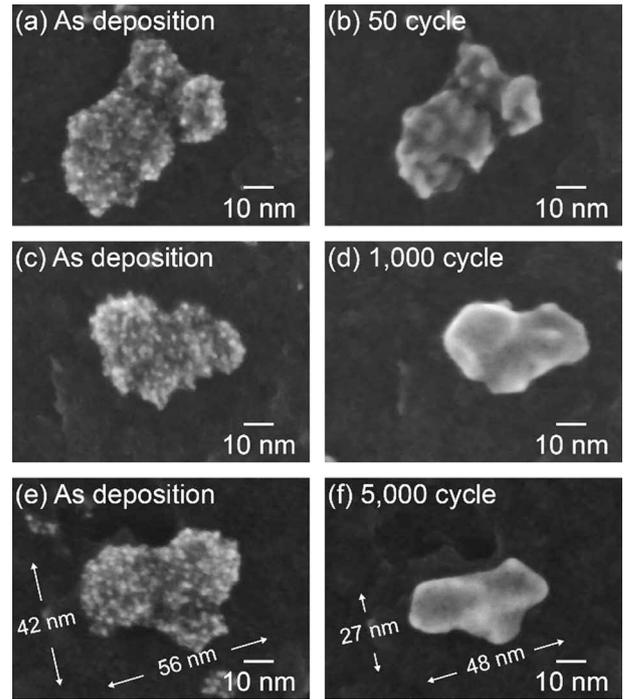


図8 Pt-75Cuナノ粒子のIL-FE-SEM像：(a), (c), (e)は電析後、(b) 50回の電位サイクル後、(d) 1000回の電位サイクル後、(f) 5000回の電位サイクル後。(a)と(b)、(c)と(d)、(e)と(f)は同一ナノ粒子を示す⁽¹²⁾。

は、ナノスケールとマクロスケールでPt-Cu合金の溶解挙動に違いがある可能性を示唆している。この違いは、ナノ粒子が持つ高い表面エネルギーが原因と推察される。

(3) Pt-75Cu(Cu-rich)ナノ粒子への熱処理の影響

電析後の複雑な粒子構造を単純化する目的で、Pt-75Cuナノ粒子に水素雰囲気下で熱処理を施した⁽¹²⁾。熱処理後のSEM像(図9(a), (c))から、電析直後に存在していた小さな1次粒子構造が消滅し、面心立方構造の低指数面($\{100\}$, $\{110\}$, および $\{111\}$)で構成される多面体形状にナノ粒子表面が再構成されたことが観察された。50サイクル後のPt-75Cuナノ粒子では、熱処理を施さない場合には見られなかった約3nmの小さな孔が表面に多数形成した(図9(b))。これらの孔は、1,000サイクル後には数が減少し、ナノ粒子の粒径も同時に小さくなっていくことが確認された(図9(d))。このように、熱処理の有無がCuの選択溶解とそれに伴う表面形態の変化に大きく影響を及ぼしていることが明らかになった。

このような変化が現れた理由を以下に述べる。電析後のナノ粒子は、1次粒子($< 3\text{ nm}$)が凝集して2次粒子を形成している(図10(a))。初期の電位サイクルにおいて、非熱処理のPt-75Cuナノ粒子からCuが選択的に溶解する。ナノ粒子表面に孔が形成しなかったのは、1次粒子の粒径が極めて小さいため、Cuが選択溶解してもPtの表面拡散速度が非常に速く、ナノ粒子の表面エネルギーを低下させるように形成した孔が消滅するためと考えられる⁽¹³⁾。したがって、非

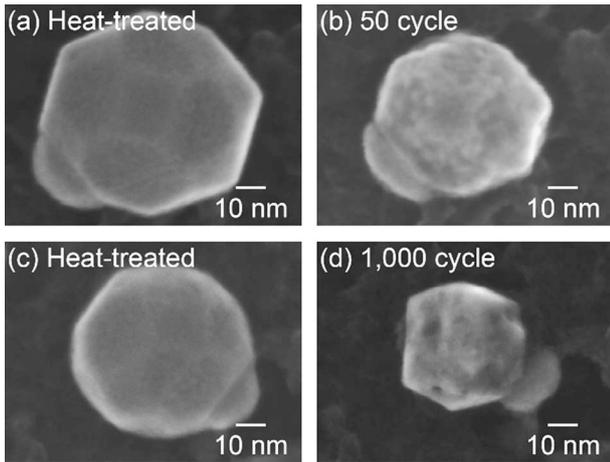


図9 熱処理を施した Pt-75Cu ナノ粒子の IL-FE-SEM 像：(a), (c) は電析後, (b) 50 回の電位サイクル後, (d) 1000 回の電位サイクル後. (a) と (b), (c) と (d) は同一ナノ粒子を示す⁽¹²⁾.

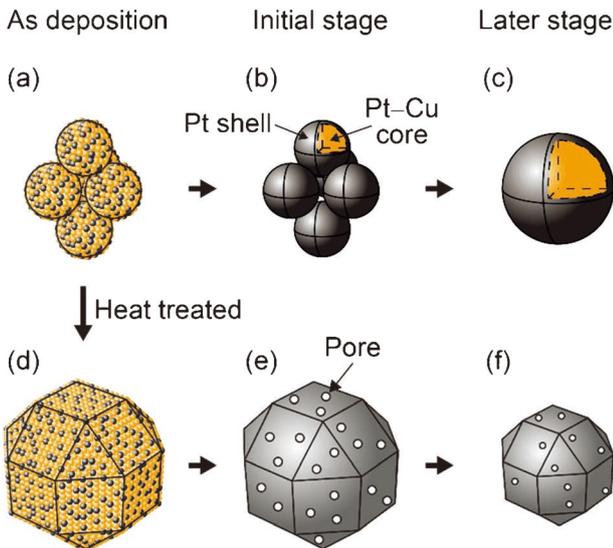


図10 電位サイクル試験における Pt-75Cu ナノ粒子の溶解メカニズムと表面形態変化の模式図⁽¹²⁾. (オンラインカラー)

熱処理の Pt-75Cu ナノ粒子は, Cu の選択溶解により各 1 次粒子が独立してコア/シェル構造を形成していると考えられる(図10(b)). コア/シェル構造を持つナノ粒子は, さらなる電位サイクルに伴う Pt の溶解/再析出により, 1 次粒子同士が徐々に併合合体していく. 最終的には, 1 次粒子の構造が完全に消滅し, 大きな単一のナノ粒子(2次粒子)へと変化する(図10(c)). 一方で, Pt-75Cu ナノ粒子に熱処理を施すと, 表面再構成により微細な 1 次粒子の構造が消滅し, 均質化した大きなナノ粒子が得られる(図10(d)). このため, 電位サイクル試験の初期段階でのナノ粒子からの Cu の選択溶解は, バルク材の挙動を示す. 結果として, 図10(e)に示すように無数の孔がナノ粒子表面に形成した. これらの孔は, さらなる電位サイクルによる Pt の溶解/再析出に伴い

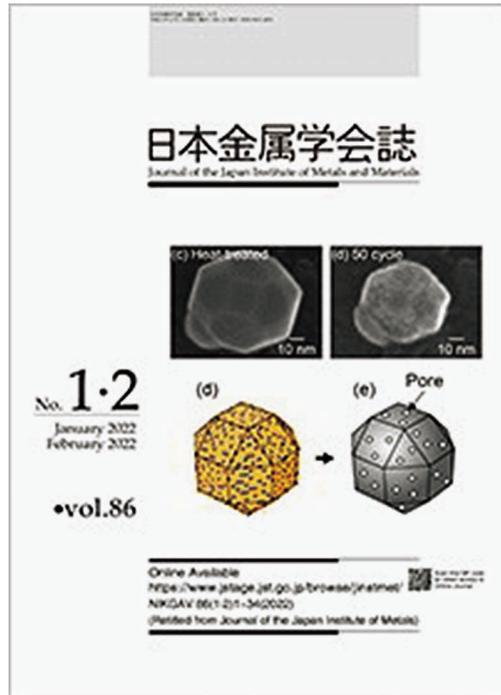


図11 日本金属学会誌86巻(2022年)の表紙. (オンラインカラー)

多孔質構造が崩壊し(図10(f)), 最終的には非熱処理のナノ粒子と類似した表面形態に変化することが予測される.

これらの成果が, 第 1 回 日本金属学会新進論文賞および本会誌の86巻(2022年)の表紙(図11)に選出されたことは, 筆者にとって研究活動の大きな励みとなっている.

5. おわりに

本稿では, FE-SEM を用いた IL 観察技術を活用し, Pt-Cu ナノ粒子の溶解挙動およびそれに伴う表面形態の変化に関する知見を紹介した. ICP-MS による溶解量の定量評価は, 電析後のナノ粒子群全体の平均的な情報を提供するが, IL 観察によりナノ粒子 1 つ 1 つの溶解挙動を直接観察できるようになった意義は大きいものと思われる. 本稿では, 紙面の都合上で割愛した内容も多数存在するため, 詳細な議論に興味のある方は原著論文をご一読いただければ幸いである.

限られた金属材料資源を効率的に活用するための 1 つの方法として, ナノ粒子化が挙げられる. ナノ粒子化により, 使用量を大幅に削減し, 比表面積の増加と化学的反応性の向上を図れる. したがって, ナノ粒子化は産業界全体で広範に応用され, 貴重な資源の有効活用が可能となる. FE-SEM を用いた IL 観察は, 本稿で紹介した数 10 nm 程度のナノ粒子には有効であるが, より小さな粒子に対しては分解能に限界がある. 現在は, 透過型電子顕微鏡と IL 観察の組み合わせにより, 数 nm オーダーのナノ粒子の溶解挙動を直接評価する新たな手法を検討している. 本技術が, 「金属材料のナノスケールでの溶解機構の解明」に役立つことを期待するとともに, 今後も様々な測定技術開発を基に腐食科学の研究発

思い出の教科書、この一冊!

“新版カリティ X線回折要論”

B. D. Cullity (著), 松村源太郎 (訳)
アグネ承風社 1980年

大阪大学大学院工学研究科 小笹良輔

著者は主に“生体用金属材料”，“ハイエントロピー合金”などの金属種，その創製プロセスとして“金属 Additive Manufacturing (AM)”をキーワードとして教育・研究活動を行っており，その推進にはX線を用いた構造解析や結晶方位の理解が不可欠となる。こうした著者の原点ともいえる“思い出の教科書”が本書である(図1)。

著者が本書に初めて出会ったのは2010年の春，学部2年次に開講された“基礎材料科学I”の講義である。本講義担当の中野貴由教授(現在著者が所属する研究室の主宰)よりX線回折による金属研究のバイブルとして本書が紹介された(現在は「X線構造解析 原子の配列を決める(早稲田嘉夫，松原英一郎 著，内田老鶴圃)」が教科書として指定されているようである)。本書は，1年次の一般教養科目や基礎的な理系科目を中心としたカリキュラムを経て，著者が初めて手にした専門書である。当時の著者は，X線という目に見えない電磁波の物理現象を扱う学問の書籍であること，他の教科書よりも1頁あたりの文字数と頁数が多い(全516頁)などの理由により，本書を用いた習学に少し気後れした記憶がある。一方で，学生時代サッカーに打ち込んでいた著者は，負傷するたびにレントゲンやCTといったX線検査技術に触れる機会が多かった。講義に沿って本書を読み進める中で，レントゲン・CT検査がX線吸収を基本原理とした評価法であることを学び，それを何度か実践する(検査を受ける)ことで，身をもってX線技術の有用性を実感した。こうした経験が習学のモチベーションへとつながり，著者がX線構造解析の習学に没頭し，材料研究の世界に足を踏み入れる端緒となった。本書は，学生時代の著者のような初学者を対象としたX線の性質や発生原理に始まり，X線回折を用いた金属材料の材質(結晶構造，格子定数，結晶の配向状態，化合物の析出・晶出状態，相変態など)や残留応力にいたる種々の解析・応用までを一冊で学ぶことのできる充実した内容となっている。

さて，本書の構成と内容についてであるが，大きく，基礎(第1~4章)，実験法(第5~7章)，応用(第8~16章)の3部と付録より構成されている。基礎は，「第1章：X線の性質」，「第2章：結晶の幾何学」，「第3章：回折I・回折ビームの方向」，「第4章：回折II・回折ビームの強度」の全133頁から構成されている。出身大学の学部2年次には，こ



図1 印象的なオレンジ色の表紙と背表紙(著者が学生時代から使い続けているもの)。ISBNコード：978-4-900508-57-6

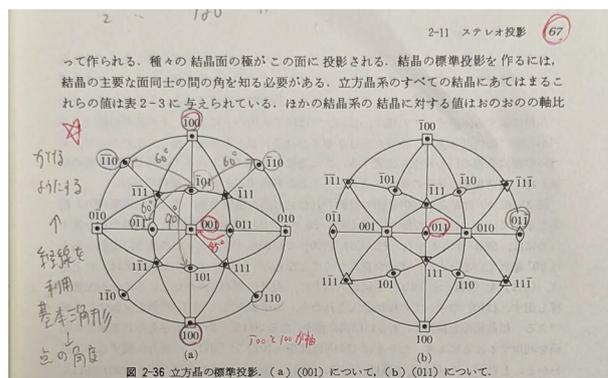


図2 ステレオ投影と学生当時の著者による書き込み。

のパートを中心とした講義が展開され，結晶学の基礎やステレオ投影の使い方，X線回折現象，構造因子の導出方法などについての理解を深めた(図2)。実験法は，「第5章：Laue写真」，「第6章：粉末写真」，「第7章：ディフラクトメーターおよび分光計の取扱い」の全76頁から構成されている。応用は，「第8章：単結晶の配向と特性」，「第9章：多結晶集合体の構造」，「第10章：結晶構造の決定」，「第11章：精密な格子定数の測定」，「第12章：状態図の決定」，「第13章：秩序-無秩序変態」，「第14章：X線回折による化学分析」，「第15章：X線分光法による化学分析」，「第16章：残留応力の測定」の全234頁から構成されている。これらのパートは，例えば筆者がLaue法による単結晶の結晶方位解析やディフラクトメーターによる結晶配向解析を実施する際の参考書として事前に学習するために用いた。

本書の価格(当時税込み6,825円。2024年現在税込み8,030円)は，当時学生の著者にとって少々手が出しづらいものであったが，本書は著者が研究者としての道を歩むきっかけともいえる書籍であることを考えると，本書への先行投資は十分に価値あるものだったといえる。将来の金属材料の研究者・技術者を目指す本誌の若い読者にも，自身の人生にポジティブな影響を与える“思い出の教科書”に出会えることを心から願っている。著者自身は，教科書として残された先人たちの知見や成果を参考にしつつ，自らも教科書に残るような研究成果を創出できるよう鋭意教育・研究活動に打ち込む次第である。

(2024年3月8日受理)[doi:10.2320/materia.63.493]

通電熱加工技術の高度化を目指して

エス・エス・アロイ株式会社 技術営業部
鈴木 絢子

1. はじめに

私は2019年3月に島根大学大学院総合理工学研究科博士前期課程を修了し、同年4月に同学博士後期課程に進学すると同時に、エス・エス・アロイ株式会社に入社しました。博士後期課程は2021年3月に修了しました。本稿では、私のこれまでの研究内容と会社での仕事内容について紹介します。そして最後に、将来の展望について述べさせていただきます。

2. 島根大学での研究

私は2013年4月に島根大学総合理工学部に入学し、2016年より材料研究を本格的にスタートしました。研究内容は、熱電変換材料として有名な Bi_2Te_3 系熱電変換材料の製造プロセス技術の開発です。本材料は異方性が強いことが知られ、強く結晶配向した微細組織とすることが熱電特性向上の一つの手段として挙げられます。私の研究では、エス・エス・アロイ株式会社が開発した通電焼結時に周期的に圧力を印加することができる装置を用いることで、上記組織の実現を目指しました。その結果、圧力を周期的に印加して焼結すると、通常行われる一定加圧の場合と比較して、結晶粒が粗大化するものの、結晶配向性が強くなることがわかりました。この結晶配向に伴う移動度の増加による電気抵抗率の低減が熱電性能向上につながることを示しました⁽¹⁾。この研究成果については、島根大学大学院総合理工学研究科博士前期課程在学中に日本金属学会をはじめ、粉体粉末冶金協会や日本熱電学会で発表いたしました。

3. エス・エス・アロイ株式会社での研究

エス・エス・アロイ株式会社は広島県東広島市にあり、通電熱加工装置“プラズマン”を設計から製造まで行うメーカーです。通電熱加工装置をお客様の要望に合わせて完全カスタマイズで製造することを特徴としています。詳細は弊社ホームページ⁽²⁾をご覧ください。私はエス・エス・アロイ株式会社に2019年4月に入社し技術営業部に配属されました。また、入社と同時に、島根大学大学院総合理工学研究科博士後期課程に入学しました。会社員としての務めと博士号取得の両立のため、熱電変換材料の研究をさらに発展させるとともに⁽³⁾、メーカー的な視点からも研究立案を行い、前述の周



図1 連続通電熱加工装置の外観(左)と通電部(右)⁽²⁾。(オンラインカラー)

期的加圧が可能な通電焼結装置を用いてチタンの低温緻密化⁽⁴⁾を図りました。これらの研究は弊社技術を様々な材料に適用することにより、放電プラズマ焼結(SPS)技術と材料の可能性を広げたいという思いで取り組みました。2021年3月に博士後期課程を修了した後は、技術営業部長として実験や装置に関する技術相談に加え、装置開発および材料研究に携わっています。まだまだ学ぶことは多いのが現状ですが、幸運にも大学や大学院での研究と通電熱加工技術という点で重なる部分があったため、大学時代から現在までに培った材料やその加工に関する知識を活かし、お客様への対応に懸命に取り組んでいます。

私が開発に携わった装置を一つ紹介いたします。図1に連続通電熱加工装置を示します。本装置の特徴は、通常は平面形状であるパンチ電極の材料との接触部が図1(右)に示すようなロール形状となっていることです⁽²⁾。この特徴的な構造により、薄板状の材料を連続的に送り出しながら、通電加熱を利用した材料加工が実現できます。まだ開発途中ではありますが、現在までにいくつかの金属材料で本装置を用いた拡散接合が短時間で可能なことを確認しています。

4. 今後の展望

通電熱加工技術は長い歴史を持ち、様々な材料開発に貢献してきました。現在、学界はもちろん産業界にも普及しつつある技術ではありますが、取り扱う材料が多様となり、また、要求される性能が向上する中、まだまだ開発途上であるともいえます。

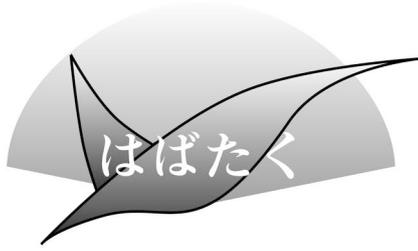
このような中、我々はお客様の要望に合わせた装置を製造するだけでなく、扱う材料に合わせて議論をすることにより、材料特性に合わせた装置製造を可能にしていきたいと思えます。このような取り組みは通電焼結市場の拡大につながり、さらには材料の開発を推進することにも寄与します。これらが、装置メーカーの研究者として私たちができる材料科学分野への社会貢献であると考えています。

文 献

- (1) A. Suzuki, H. Kitagawa, S. Ido, A. H. Pham, S. Morito, T. Etoh and K. Kikuchi: *J. Alloys Compd.*, **742**(2018), 240–247.
- (2) エス・エス・アロイ株式会社ホームページ: <https://www.s-s-alloy.com/>
- (3) A. Suzuki, H. Kitagawa, A. H. Pham, S. Morito and K. Kikuchi: *Materialia*, **14**(2020), 100914.
- (4) 鈴木絢子, 菊池光太郎, 中野皓介, 北川裕之: 粉体および粉末冶金, **67**(2020), 525–528.

(2024年3月11日受理) [doi:10.2320/materia.63.494]

(連絡先: 〒739-0046 東広島市鏡山3-13-26
広島テクノプラザ180号室)



広島県立総合技術研究所における 地元企業への支援および研究活動

広島県立総合技術研究所 東部工業技術センター
加工技術研究部；研究員
市川 皓基

1. はじめに

私は、2022年3月に島根大学大学院自然科学研究科理工学専攻物理・マテリアル工学コースの修士課程を修了し、同年4月に広島県立総合技術研究所東部工業技術センター(図1)に入庁しました。現在は研究員として、地元企業に貢献するための研究活動と、地元企業支援活動に取り組んでいます。この度はご縁があり、「はばたく」執筆の貴重な機会をいただきましたので、現在までの自身の研究活動や地元企業支援活動について紹介いたします。

2. 研究活動について

基礎研究に近い研究が行われている大学とは異なり、弊所では幅広い製品へと応用展開が可能な技術を新たに獲得するための研究開発が求められております。特に弊所は「県立」であることから、地元企業のニーズに寄り添い、弊所で開発した技術を広く使用していただけるよう、共同研究等を通じた新たな技術の開発に加え、人材育成や技術力の向上に向けて活動しています。

私は大学および大学院時代、パルス通電焼結法を用いて、①パソコン等の冷却用素子として知られるペルチェ素子の構成要素の一つであるp型BiTe系熱電変換材料の性能向上を目的とし、結晶粒成長による熱伝導率の増加を抑制する試みとしてセラミックス粒子を分散させる研究や、②電車の抵抗器等への適用を想定した、セラミックス粒子と扁平化させた金属粒子を分散させた高い電気抵抗率を有する複合材料の開発研究をしていました。高抵抗の複合材料については、分散させる金属粒子を扁平状にすることで、焼結時に金属粒子の長軸が面内方向へ整列し、球状の金属粒子を分散させた場合よりも再現よく高抵抗化が行えます。焼結体の面内方向では分散させる金属の濃度を変化させることで電気抵抗率を制御出来るものの、更に高抵抗化させるために金属の濃度を低下



図1 広島県立総合技術研究所東部工業技術センター。

させると再現性が低下する問題があるため、高抵抗化と高い再現性の両立に向けた研究をしていました。また、焼結体の厚さ方向における電気抵抗率は明らかにされていなかったため、厚さ方向に長い焼結体($\phi 5\text{ mm} \times 15\text{ mm}$)を作製するなどして研究していました。加えて、企業との共同研究として、多数個の焼結体を同時に作製する技術の開発なども行っていました。そのような中、将来も引き続きこのような比較的実用化に近い領域について研究していきたいと思いつき、現在の職場への就職を決意いたしました。

現在は、合金化溶融亜鉛めっき鋼板(GA鋼板)とアルミニウム合金A5052の点接合において高い強度を実現するべく、摩擦アンカー接合⁽¹⁾と呼ばれる手法を用いて検討を進めています。自動車産業等の輸送機械へのマルチマテリアル化が求められている中で、良好な接合手法を是非とも確立させたいと考え、日々研究に努めています。

3. 地元企業支援活動について

弊所のもう一つの主な役割である地域企業の支援について、紹介いたします。地元企業から持ち込まれる相談案件として、製品等の性能に関する試験や製品トラブルの原因調査があります。その中でも私は電界放出(Field Emission: FE)式走査型電子顕微鏡はじめ各種装置を用いて、組織観察や成分分析、そして材料強度試験を主に担当しています。一般的な定型の強度試験については依頼試験という形で日本産業規格(JIS)に則って試験を実施し、試験結果を成績書に纏めてお伝えしています。一方、非定型のご相談内容については、技術的課題解決支援事業(通称：ギカジ)という形にて、他社への提示用や自社でデータを蓄積して保有しておくことを主な目的に依頼いただいています。様々な材質・形状の製品について、異物の分析や腐食・破損原因の調査、性能試験等の多種多様な依頼内容に対応するために試験方法を選択しながら実施しており、第三者が見ても試験方法を判別しやすいよう、試験風景の写真等も含めて、結果をレポート形式に纏めてお渡しするなどの形で対応しています。

また、企業の方には装置を開放する設備利用と呼ばれる方

法でも弊所をご利用いただいております。新規製品の開発や品質の確認等を目的とされて、装置をご自身で操作して試験を実施していただいております。これに関連して、弊所では、装置の操作方法や試験の実施に当たって必要となる基礎的な知識を習得していただくための講習会を設けています。外部講師を招聘するなどして講義と実習形式にて学んでいただく技術者研修を、毎年テーマを変えながら開催しています。以上のように、地元企業の抱えている問題の解決や技術力の向上に役立てるよう、日々活動しています。

最後になりますが、この場をお借りして、日頃ご助力いただいております企業の皆様に厚く御礼申し上げます。

文 献

- (1) 大石 郁, 坂村 勝, 大田耕平, 藤井英俊: 溶接学会論文集, **32**(2014), 1-7.

(2024年3月22日受理) [doi:10.2320/materia.63.495]
(連絡先: 〒721-0974 福山市東深津町三丁目 2-39)



銅の煮色着色における 大根のおろし汁の役割

東京都立日比谷高等学校(2024年3月卒業)

依田明理

1. はじめに

日本の伝統的な金属着色技法の一つに、煮色着色という手法があります。これは一般に工芸品の表面処理などに用いられる技法で、煮色溶液の中で煮込みながら酸化被膜を生成し、銅および銅合金を特徴的な赤褐色に着色します⁽¹⁾。興味を持ってその手順を調べたところ、煮色操作の中に大根のおろし汁を用いる工程があり驚きました。同時に、大根のおろし汁を使う理由やその作用に疑問を持ちましたが、実験を踏まえて根拠を述べている文献はありませんでした。そこで、煮色着色における大根のおろし汁役割を解明したいと考えました。

本研究の目的は、大根のおろし汁について、その状態の違いによる着色の様子の違いに着目して実験と考察を行い、煮色着色での働きを探ることです。

2. 実験方法

用いた試料は市販の純銅で公称純度は99.9%のものです。これを3 cm×4 cm×0.5 mm に切り出して使用しました。表面処理は市販の研磨剤(商品名:ピカール)で研磨し重曹と活性炭(いずれも粉状)で表面を脱脂した後、水道水で洗浄し青首大根のおろし汁に1分ほどつけました。その後煮色溶液で1時間煮込みました。煮色溶液の組成は水道水100 mL に対して硫酸銅(Ⅱ)五水和物 $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$:0.300 g, 炭酸銅(Ⅱ) CuCO_3 :0.168 g, 水酸化銅(Ⅱ) $\text{Cu}(\text{OH})_2$:0.132 g です⁽²⁾。

着色の様子を数値化して比較するために、スマートフォンのカメラで撮影した試料の写真を Web 上の色抽出ツール⁽³⁾を用いて RGB 値を測定するという手法をとりました。写真は全て同環境(蛍光灯のある室内)で銅板全体を撮影しました。

実験1では、煮色溶液で煮込む前に銅板を大根のおろし汁に浸漬する場合と無浸漬の場合の着色の違いを比較しました。

実験2では、使用直前におろした大根のおろし汁とおろしてから冷蔵庫で密封せず3日保管した大根のおろし汁を使用した場合の着色の違いを比較しました。

実験3では、実験2で得た結果を踏まえて大根のおろし汁の代わりに0.0120%のアスコルビン酸水溶液を用いた場合の着色の違いを調べました。

3. 実験結果と考察

実験1では、大根のおろし汁に浸漬した銅板は、大根のおろし汁に無浸漬の銅板に比べて全ての RGB 値が増えました。また、目視でも大根のおろし汁に浸漬した銅板は、より赤みがかって見えました(図1-(b)(c), 表1, 2)。

実験2では、おろしてから3日経った大根のおろし汁を用いた銅板の RGB 値は大根のおろし汁に無浸漬の銅板と同程度であることから、おろしてから時間が経つと大根のおろし汁では銅板表面の RGB 値の上昇効果が低下することがわかりました(図1-(c)(d), 表2, 3)。ここから、大根のおろし汁のうち、時間経過で減少する成分が煮色の反応に関わっているのではないかと仮説を立て、該当する成分を調査しました。候補が上がったのは、主栄養素のアスコルビン酸と辛味成分のイソチオシアネートです。アスコルビン酸の酸化されやすい性質と検証の難易度から、本研究ではアスコルビン酸に焦点を絞って調査を進めました。

実験3では、アスコルビン酸水溶液を用いた銅板は大根

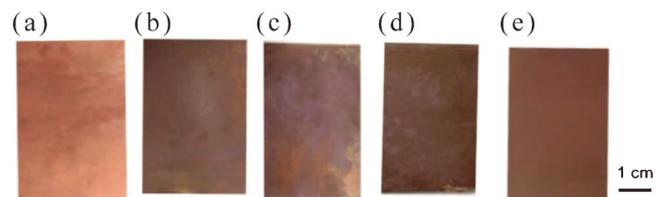


図1 煮色着色前後の銅板外観。(オンラインカラー)

- (a)煮色着色前
(b)大根のおろし汁無浸漬後煮色着色
(c)使用直前に作成した大根のおろし汁に浸漬後煮色着色
(d)おろしてから3日経過した大根のおろし汁に浸漬後着色
(e)アスコルビン酸水溶液に浸漬後着色

表1 大根のおろし汁に無浸漬で煮色着色した銅板表面の RGB 値.

	R	G	B
1回目	94	57	51
2回目	103	67	63
3回目	98	62	47
平均	98	62	54

表2 使用直前におろした大根のおろし汁に浸漬して煮色着色した銅板表面の RGB 値.

	R	G	B
1回目	128	85	78
2回目	129	92	90
3回目	132	113	107
平均	130	97	92

表3 おろしてから3日経過した大根のおろし汁に浸漬して煮色着色した銅板表面のRGB値.

	R	G	B
1回目	104	72	64
2回目	100	69	57
3回目	93	55	41
平均	99	65	54

表4 アスコルビン酸水溶液に浸漬して煮色着色した銅板表面のRGB値.

	R	G	B
1回目	126	84	66
2回目	124	78	62
3回目	130	92	77
平均	127	85	68

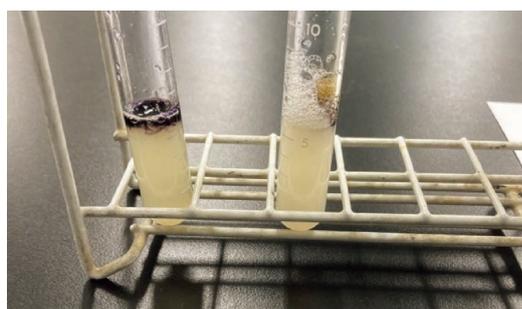


図2 おろしてから3日経った大根のおろし汁(写真左)と使用直前におろした大根のおろし汁(写真右)のアスコルビン酸含有量の簡易滴定。(オンラインカラー)

のおろし汁を用いた銅板と同等のRGB値が測定されました(図1-(c),(e),表2,4). このことから, 大根のおろし汁に含まれるアスコルビン酸が特に反応に関与していると考えられます. 実際に, おろしてから3日経った大根のおろし汁と使用直前におろした大根のおろし汁のアスコルビン酸含有量を調べるために, アスコルビン酸の還元力を利用して, 酸化剤として3%ヨウ素液を使用し, 指示薬としてデンプン水溶液0.38 mLを用いて簡易滴定を行ったところ, 終点までに要したヨウ素液の量はそれぞれ1.1 mLと1.7 mLでした(図2).

これらの結果を踏まえて, 考察を行いました. まず, 煮色着色後の銅板表面の赤みは主に Cu_2O によるものです⁽¹⁾. 実験の結果より, 使用直前におろした大根おろしを使用した場合全てのRGB値が増し, 濃く着色されることから, 大根おろしには Cu_2O の生成量を増やすはたらきがあり, 中でもア

スコルビン酸が主に作用していると考えました. 次に, 実験中の観察から銅板を煮色溶液に入れるとすぐに着色され始めることがわかりました. これは, 煮色溶液及び液中の溶存酸素が銅板表面で直ちに反応して酸化被膜が形成されるためです⁽⁴⁾. ここから, 銅板表面が反応場であり, 銅板の表面状態が着色において重要だと考えました. 一方で研磨後活性化された銅板表面には空気中の酸素との反応によって直ちに薄い酸化被膜が生成されてしまいます⁽⁵⁾. これでは, 溶液中での着色を伴う酸化反応を阻害しかねません. そこで, 水洗後すぐに大根のおろし汁につけることで還元剤であるアスコルビン酸が銅板表面の空気中での酸化進行から保護しているのではないかと考えました.

4. 結 論

以上より, 煮色着色における大根おろしのはたらきの一つとして, 大根おろし中のアスコルビン酸が, 煮色溶液中で煮色に有意に影響を与えると結論づけました.

今後の課題は, 大根のおろし汁に含まれる他の成分の影響です. 例えば先にも挙げた辛味成分のイソチオシアネートはアスコルビン酸と同等の含有量⁽⁶⁾で, かつ時間経過により減少し抗酸化作用も確認されている⁽⁷⁾など, アスコルビン酸と同時に煮色に影響する可能性があります. この煮色着色の操作の科学的な分析は, 本来職人技であり個人の技術により完成度に差ができてしまう伝統技法の再現性を高め, 職人でない人でも手軽に楽しめるようになるなど伝統工芸がより身近なものになるのではないかと考えています.

今回の大会において, たくさんの質問だけでなく非常に有意義なご意見を頂きました. それだけでなく, 自身の研究を多くの方に知っていただく機会を得られたことはとてもいい経験となりました. これを糧に今後も邁進していきたいです.

文 献

- (1) 一般社団法人日本銅センター: 書籍・出版物: 銅の資料集: 書籍: 銅板の人工着色法 http://www.jcda.or.jp/Portals/0/resource/center/shuppan/b_chakushokuhou.pdf (2024年3月6日閲覧)
- (2) 特定非営利活動法人日本杓目金研究所: 色金の煮色着色方法 (2022), 私信
- (3) <https://color.adobe.com/ja/create/image> (2024年4月4日閲覧)
- (4) 北田正弘: 日本金属学会誌, **69**(2005), 1069-1076.
- (5) 宮沢薫一, 三宅淳司, 波多野隆紹, 佐久間健人: 回路実装学会誌, **11**(1996), 423-428.
- (6) 江崎秀男, 小野崎博通: 栄養と食糧, **33**(1980), 161-167.
- (7) 中村俊之: 日本家政婦学会誌, **70**(2019), 448-454.

(2024年3月7日受理)[doi:10.2320/materia.63.497]

スポットライト

～第10回「高校生ポスター日本金属学会賞」～

イチゴによるアルミニウムの溶解(2)

兵庫県立宝塚北高等学校 化学部

山脇佳奈 田中 楓 藤井妃奈乃
金古雄大 川口拓真 上田悠人

1. 動機・目的

ステンレス製の弁当箱内で、朝にイチゴを入れたアルミニウム製のカップ(以下、アルミカップ)に、昼には孔が開いていたという現象を発見し、この現象の化学的な解明を目指した。前報では以下(1)、(2)の可能性について報告している⁽¹⁾。

(1) 酸成分がアルミニウム酸化被膜を破壊し、塩化物イオン Cl^- がこれを促進している可能性

(2) (-)アルミニウム|イチゴ|ステンレス(+)電池の形成が孔の生成に関わっている可能性

そこで本報では、本現象の化学的解明について上記可能性を検証し、より詳細な検討を系統的に行ったので報告する。

2. 実験

[材料]

イチゴは、市販の冷凍イチゴを乳鉢ですり潰して、すり潰し冷凍イチゴとして使用した。イチゴの電解液(イチゴ液)として、すり潰し冷凍イチゴ:精製水=1:3(質量比)の懸濁液を使用した。また、塩化ナトリウム(NaCl)、クエン酸、L-アスコルビン酸(ビタミンC)をイチゴの成分モデルとして、それぞれの0.1 mol/Lの水溶液をモデル液 NaCl (pH7.0)、モデル液クエン酸(pH2.0)、モデル液ビタミンCとした。それぞれのモデル液とモデル液 NaCl を1:1の体積比で混合した水溶液をモデル液 NaCl /クエン酸(pH2.0)、モデル液 NaCl /ビタミンC(pH2.5)とした。また、pH3.4に調整したクエン酸水溶液(濃度0.001 mol/L)とモデル液 NaCl を1:1の体積比で混合することでpH3.5のモデル液 NaCl /クエン酸を調整した。

アルミカップは株式会社 seria 販売、直径100 mm、厚み0.01 mmの厚手アルミケース8号を用いた。pHの測定には、HANNA INSTRUMENTS 製卓上型水質計 edge HI 2002-01を使用した。

実験1: 孔生成をもたらす成分と要因の探索

孔の生成をもたらすイチゴ中の成分と要因を系統的に探索し、それらの孔形成への働きについて検討した。直径120

mmのシャーレ中で、すり潰し冷凍イチゴまたは各種モデル液を含ませたろ紙をアルミカップ上に置き、これらを繋ぐようにステンレス板を置き(図1)、一日静置し観察した。

結果と考察1

結果を表1および図2に示した。表1より、24時間以内の短期間での孔の生成には、ステンレス板の存在が必要である⁽¹⁾ことを確認した(No. 1, 2, 5, 6)。また、 NaCl のみ、クエン酸のみでは孔を生じず(No. 3, 4)、さらに NaCl 水溶液に一晩漬したアルミカップをモデル液クエン酸に一晩浸したが、孔の生成は見られなかった(No. 8)。つまり、孔の生成において酸と NaCl とが共存する必要がある。加えて、同じ成分のモデル液 NaCl /クエン酸でもpHが高い場合は孔を生じなかった(No. 7)ことより、pHの低さも孔の生成に重要であることが示された。これらは酸がpHを下げ、 Cl^- によるアルミニウム酸化被膜を破壊する孔食を促進する⁽²⁾ためと考えられる。そして、アルミカップ、ステンレス板を電極、イチゴ液を電解液とした電池の形成によりアルミニウムが溶解することで局部腐食が進行し、孔を生じたものと考えられる。さらに、酸化防止剤として知られるL-アスコルビン酸(ビタミンC)をモデル液 NaCl /ビタミンCとして用いた場合も孔を生じた。この場合、ビタミンCは酸として作用したと考えられる。

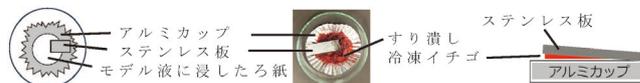


図1 アルミカップの孔の生成モデル実験。アルミカップとステンレス板はそれらの一部分で接する。(オンラインカラー)

表1 孔生成をもたらす成分と要因の探索結果。

No.	イチゴまたはモデル液	pH	Cl^-	ステンレス板	孔生成
1	すり潰し冷凍イチゴ	3.4	あり	あり	あり
2				なし	なし
3	NaCl	7.0	あり	あり	なし
4	クエン酸	2.0	なし	あり	なし
5				あり	あり
6	NaCl / クエン酸	2.0	あり	なし	なし
7		3.5	あり	あり	なし
8	NaCl → クエン酸*	2.0	なし	あり	なし
9	NaCl / ビタミンC	2.5	なし	あり	あり

* NaCl 水溶液に一晩漬したアルミカップをクエン酸水溶液に一晩静置

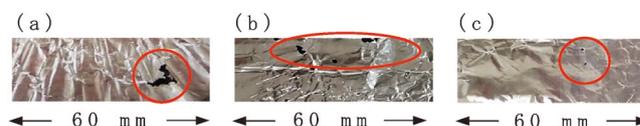


図2 表1において孔を生成したアルミカップの観察結果。(a) No.1, (b) No.5, (c) No.9 (オンラインカラー)

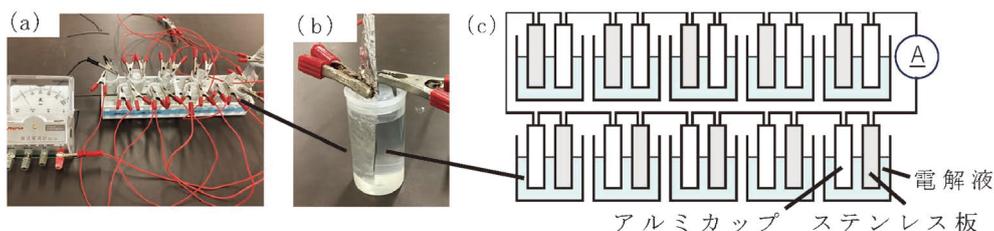


図3 (a)電流値測定時の写真, (b)モデル電池ユニット, (c)電流値測定装置モデル図. (オンラインカラー)

実験2：(-)アルミカップ|イチゴ液|ステンレス(+)電池の確認

前報⁽¹⁾では微弱で検出できなかった電流の検出を試みた。

図3の装置を作りフィルムケース内に電解液としてイチゴ液やNaCl水溶液またはpH 2.0のNaCl/クエン酸水溶液を満した。これを10個直列に繋ぎ電流値の測定を試みた。

結果と考察2

各電解液を用いたモデル電池ユニットにおける電流値を測定した結果を図4に示し、測定された平均電流値とアルミカップの質量変化、電解液中のAl量を測定後のアルミカップの外観と共に表2に示した。

イチゴ液の場合において微弱ながらも電流を検出できた。NaCl/クエン酸水溶液の場合に最も電流が生じた。NaClの場合は初期にごく微量の電流を生じたのみであった。そして、電流の大きさに応じてアルミカップに孔が生成した。NaClの場合は目視では孔を確認できなかった。さらにアル

ミカップの質量減少に近い量のアルミニウムを電解液中に検出した。これらのことから、電池の形成によりアルミカップのAlが電解液中に溶解し孔を生じたと考えられる。

実験3：カソード反応の考察

アルミニウムの腐食では次のカソード反応の進行が律速となることがある⁽²⁾。



そこで、酸素が少ない雰囲気ではカソード反応の進行が抑制され、結果アノード反応が遅延化し、孔の生成が抑制されるのではないかと考えた。

実験2の図3(b)に示したモデル電池ユニット1個を用いて、真空デシケーターを東京理科機器製真空ポンプNVP1000で5分間真空引きとした後密閉し、一晩静置し、アルミカップの孔の生成の程度を比較した。この間に水溶液量が幾分減少した。

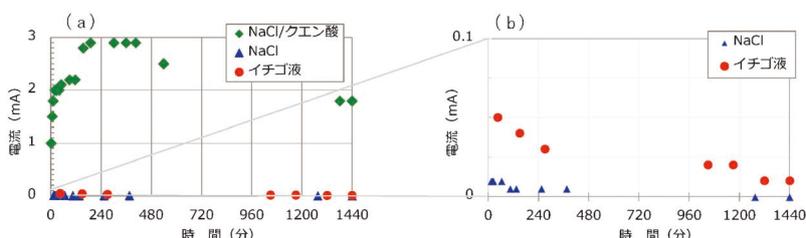


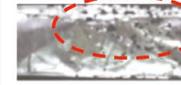
図4 (a)各電解液を用いた電流値の時間変化, (b)NaCl水溶液またはイチゴ液を電解液に用いた電流値の時間変化. (オンラインカラー)

表2 各電解液を用いたモデル電池ユニットにおける平均電流値とアルミカップの外観および質量変化. (オンラインカラー)

電解液	イチゴ液	NaCl/クエン酸	NaCl
平均電流値 [mA]	0.025	2.1	0.011
アルミカップの観察			
アルミカップの質量変化 [g]	-0.069	-0.194	-0.009
電解液中のAl量* [g]	0.048	0.198	0.013

* ICP発光分光分析による定量

表3 低圧雰囲気下での孔の生成。(オンラインカラー)

No.	1	2	3	4
電解液	イチゴ液		NaCl / クエン酸	
pH	3.4		2.0	
雰囲気	大気圧下	低圧下	大気圧下	低圧下
アルミカップの観察				
孔	多	少	多	少

結果と考察 3

表3に示すように低圧雰囲気下では、電解液としてイチゴ液を用いた場合およびNaCl/クエン酸水溶液を用いた場合のいずれの場合も孔の生成が抑制された。これらの結果は、酸素不足雰囲気下ではカソード電極での反応が抑制され、その結果アノード電極でのアルミニウムの酸化によるアルミカップの溶出が抑制された可能性を示唆した。このことから、カソード電極では、酸性条件下であることを踏まえて次の反応式で表される反応が進行したと考えられる。



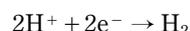
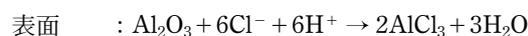
また、電極付近に見られる気泡(図3(b))に炎を近づけることにより緩やかな破裂音を伴い燃焼したことより、この気泡は水素であると判断された。

3. ま と め

イチゴ液中のCl⁻ および酸がアルミニウム酸化被膜を破壊し、(-)アルミカップ|イチゴ液|ステンレス(+)電池の形成が孔の生成を促進した。また、各部での反応式を次のとお

り提唱した。

• アルミカップ



• ステンレス : $\text{O}_2 + 4\text{H}^+ + 4\text{e}^- \rightarrow 2\text{H}_2\text{O}$, $2\text{H}^+ + 2\text{e}^- \rightarrow \text{H}_2$

ICP 発光分光分析にご協力頂いた公益財団法人東洋食品研究所の方々に深く感謝申し上げます。

文 献

- (1) 岸田 純, 笹部祐也, 川口拓真, 岡部矩史, 志手銀河: まてりあ, **62**(2023), 483-485.
- (2) 大谷良行, 小山高弘, 児島洋一: UACJ Technical Reports, **3**(2016), 52-56.

(2024年1月31日受理)[doi:10.2320/materia.63.499]
(連絡先: 〒665-0847 宝塚市すみれガ丘 4-1-1)

本 会 記 事

会 告 外国会員の定義の見直しおよび会費改定のお知らせとお願い	502
2024年秋期(第175回)講演大会参加申込について	503
2024年秋期講演大会 各種シンポジウムのご案内	504
第12回「高校生・高専学生ポスター発表」募集	505
2024年秋期講演大会日本金属学会・日本鉄鋼協会合同懇親会 開催・参加募集	505
2024年秋期講演大会会場周辺のご案内	506
第22回 World Materials Day Award 募集	507
2024年秋期講演大会会期中の託児室設置のお知らせ	507
2024年秋期講演大会関連広告および付設展示会、誌上展示会 募集	508
2025年度若手研究グループ新規申請募集	509
「研究会」新規・更新申請募集	510
各種研究費申請比較表	512
2025年春期講演大会公募・企画シンポジウムテーマ提案募 集	513
2025年度金属学会シンポジウムのテーマ募集	514
研究集会	515
欧文誌編集委員会からのお知らせ	515
掲示板	516
オンライン教育講座	520
会誌・欧文誌7号目次	519
新入会員	522
次号予告	519
行事カレンダー	523

◎本会へのお問合せは下記URLを
ご利用下さい。
<https://jimm.jp/contact/>

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

会 告(ホームページもご参照下さい)

外国会員の定義の見直しおよび会費改定のお知らせとお願い

2024年7月1日

公益社団法人日本金属学会会長 榎 学

2024年(令和6年)年4月25日に開催された定時社員総会におきまして、外国会員の定義見直しと会費改定が決議されたのでお知らせいたします。

これまで、外国会員は「この法人の目的に賛同し、事業を賛助する外国籍の個人」としておりましたが、今後は、「この法人の目的に賛同し、事業を賛助する外国在住の個人」といたします。

また、本会における会員サービスの拡充と物価上昇に伴う経費負担増の一部を補うため、2025年(令和7年)1月より正員(31歳以上)および外国一般会員(31歳以上)の皆様の会費を20%値上げさせていただくことといたしました。なお、その他の皆様の会費につきましては据え置きとしております。

今回の会費改定に伴い、2025年(令和7年)1月から会員全員が Materials Transactions の電子ジャーナルを無料で閲覧できるようにいたします。さらに、講演大会で開催するハイブリッドセッションの無料聴講、過去のセミナーテキストや「まてりあり」講義ノート集の電子データの無料閲覧サービスを実施してまいります。

会員の皆様にはご負担をおかけいたしますが、以上の事情と趣旨をご理解いただき、引き続き本会活動にご協力いただきますようお願い申し上げます。

会費改定の内容

会 員 種 別		改定前の会費	改定後の会費 (2025年1月より)
正 員	(31歳以上)	10,000円	12,000円
	(30歳以下)	5,000円	5,000円
学生員		4,000円	4,000円
外国一般会員	(31歳以上)	10,000円	12,000円
	(30歳以下)	5,000円	5,000円
外国学生会員		4,000円	4,000円

2024年秋期(第175回)講演大会参加申込について

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

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

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

～講演大会日程～

日 時	行 事
9月18日(水) 9:00～9:40 10:00～17:30 10:00～17:30 18:30～20:30	開会の辞, 贈呈式 ポスターセッション, 高校生・高専学生ポスターセッション シンポジウム講演(一般講演は行いません) 懇親会(千里阪急ホテル 西館 2F「仙寿」505頁参照)
9月19日(木) 9:00～18:00	学術講演
9月20日(金) 9:00～17:00	学術講演
9月25日(水)午後	高校生・高専学生ポスターセッション(オンライン)

- ◆懇親会 開催日時：2024年9月18日(水)18:30～
開催場所：千里阪急ホテル 西館 2F「仙寿」505頁参照

◆申込の種別と申込期間

- (1) 事前申込(8月30日(金)をもって事前参加申込完了となります)

申込期間：2024年5月27日(月)～2024年8月30日(金)

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

決済方法：クレジットカード, コンビニ支払, 銀行振込



- (2) 後期(当日)申込

申込期間：2024年9月6日(金)～9月25日(水)

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

決済方法：クレジットカード



- (3) 相互聴講(鉄鋼協会に参加する本会非会員のみ 現地申込のみ)

申込期間：2024年9月18日(水)～20日(金)

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

決済方法：クレジットカード

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

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

会 員 資 格	事前参加申込	後期(当日)申込	相互聴講	登壇費
正員	10,000円	13,000円	—	—
非会員の維持員会社社員	10,000円	13,000円	—	10,000円
非会員のシンポジウム共催・協賛の学協会会員	10,000円	13,000円	—	10,000円
2024年3月1日時点で65歳以上の個人会員*1	無 料	無 料	—	—
学生員*2	6,000円	7,000円	—	—
ユース会員*3(中高生会員, 高専専科1年生以下, 大学3年生以下)	無 料	無 料	—	—*3
非会員*4 一般	24,000円	27,000円	—	10,000円
非会員*4 学生(大学院生含む)	14,000円	16,000円	—	5,000円
鉄鋼協会講演大会参加者(一般, 学生問わず) 講演者は選択できません。	—	—	6,000円	—

- お支払後の取消は、ご返金できませんのでご了承ください。
- 領収書は、決済完了後に申込画面(「講演大会 MyPage」)からダウンロードし、印刷して下さい。

- *1 **65歳以上の個人会員** : 会員情報に生年月日の登録がない場合は課金されます。会員情報に生年月日を登録していない方は、**参加申込みの前に annualm@jimm.jp まで**会員番号・氏名・連絡先・生年月日をお知らせ下さい。
- *2 **学生員** : 卒業予定変更等により登録されている会員種別が実際と異なる場合は、**事前に会員種別の変更手続きを行う**てから、大会参加を申込み下さい。会員情報に登録された卒業年次を超えると、自動で正員に変更されています。
- *3 **ユース会員が高校生ポスター発表以外で発表する場合は、登壇費5,000円が必要です。**
- *4 非会員は講演申込サイトの各講演種別の「非会員はこちら」をクリックして、講演申込みして下さい。非会員の参加申込者には、1年間の会員資格を付与します。ただし特典は重複して付与しません。

◆参加証

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

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

◆講演概要の閲覧・ダウンロード

公開場所：講演大会ウェブサイト(ログイン必要)

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

ログイン：ログイン用のIDとパスワードが必要です。

(事前参加申込の方) 参加費を納入済みの方に、概要公開日にログイン用のIDとパスワードを配信します。

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

◆講演概要集の購入

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

◆相互聴講について

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

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

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

問合せ先 講演大会係 E-mail: annualm@jimm.jp

2024年秋期講演大会 各種シンポジウムのご案内

公募シンポジウム9テーマ

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

企画シンポジウム5テーマ

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

日本金属学会2024年秋期(第175回)講演大会
第12回「高校生・高専学生ポスター発表」募集

申込締切日：2024年7月12日(金)

学会名 日本金属学会2024年秋期(第175回)講演大会
行事名 「第12回高校生・高専学生ポスター発表」
開催方法 9月18日(水)大阪大学豊中キャンパスおよび9月25日(水)オンライン
開催日時 2024年9月18日(水)午後または9月25日(水)午後2時間程度を予定
対象者 高校生および3年以下の高専学生
発表方法 9月18日(水)に大阪大学豊中キャンパス、または9月25日(水)にオンラインのいずれか一方で発表
テーマ 材料に限定せず、フリーテーマです。(課題研究の成果、科学技術の取組等)
ポスター発表資料：作成要領は別途連絡
講演申込 <https://www.jim.or.jp/convention/2024autumn>
講演概要原稿 不要
詳細はまてりあ6号424頁 or ホームページをご覧ください。

2024年秋期講演大会
日本金属学会・日本鉄鋼協会合同懇親会開催・参加募集

2024年秋期講演大会における懇親会を日本鉄鋼協会と合同で下記の通り開催いたします。ご参加を希望される方は期日までに下記要領にてお申し込み下さい。

開催日時 **2024年9月18日(水)18:30-20:30**

開催場所 千里阪急ホテル 西館 2F「仙寿」(〒560-0082 豊中市新千里東町 2-1 ☎ 06-6872-2211)

参加費 予約申込 一般10,000円 同伴者(配偶者同伴の場合)5,000円
当日申込 一般12,000円 同伴者(配偶者同伴の場合)5,000円

予約申込期間 **2024年7月1日(月)～8月23日(金)**

申込方法 <https://www.jim.or.jp/seminersymposium/index.php?k=37> (7月1日より受付開始)

※講演大会参加申込とは別になります。

支払方法 ※お支払後の取消はご返金いたしかねますのでご了承下さい。

予約申込 上記申込サイトで登録後、登録受理通知メールに記載のサイトにてクレジットカード決済またはコンビニ決済の手続きをして下さい。受理通知に記載のURLより請求書をダウンロードすることができますので、振込支払いも可能です。(ただし、**8月23日着金**です)
領収書は決済後、支払い通知メールに記載のURLよりダウンロードできます。

当日申込 現金のみでのお支払い

当日の参加方法について

〈予約申し込みの方〉

開催当日に懇親会会場の金属学会受付にお越し下さい。参加証と参加者名簿をお渡しいたします。

〈当日申込をされる方〉

開催当日に懇親会会場の当日受付にてお申込みとお支払いをして下さい。お支払いは現金のみとなりますのでご留意下さい。参加証と参加者名簿をお渡しいたします。

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 講演大会係 ☎ 022-223-3685 ☎ 022-223-6312 E-mail: annualm@jim.jp

2024年秋期(第175回)講演大会会場周辺のご案内

2024年秋期講演大会 実行委員長 中野貴由

今年の秋期(第175回)講演大会を、9月18日(水)から9月20日(金)までの3日間にわたり、日本鉄鋼協会と合同で大阪大学豊中キャンパスにて開催いたします。大阪大学では2016年秋期(第159回)講演大会以来8年ぶりの開催となります。大阪大学は11学部、15研究科および6附置研究所からなる総合大学で、大阪の北摂エリアに位置する吹田市、箕面市および豊中市にある3つのキャンパスにおいて教育と研究が行われています。講演会場となる豊中キャンパスには、学部学生が入学からともに学ぶ共通教育を実施する全学教育推進機構や、文学部、法学部、経済学部、理学部および基礎工学部の建物があり、講演会場は共通教育が実施される全学教育講義棟および大講堂に集約し講演会場間の移動が便利になっております。また、ポスターセッション会場も講演会場から数分の位置にある大阪大学会館に配置されます。

豊中キャンパスへのアクセスは阪急電鉄、北大阪急行電鉄、地下鉄、モノレールなどをご利用いただくこととなります。これら公共交通網が比較的良好に整備されており、大阪市中心部からは地下鉄御堂筋線(途中、江坂駅にて北大阪急行電鉄に接続)にご乗車後、千里中央駅で大阪モノレールに乗り換えます(今年の3月23日に北大阪急行が延伸され、千里中央駅が終着駅ではないので、ご注意下さい)、豊中キャンパス最寄りの柴原阪大前駅まで6分程度で到着します。同駅から豊中キャンパス正門を経て会場まで徒歩で10分程度です。大阪市北部に位置する梅田からは阪急電車宝塚線を利用すると、最寄りの石橋阪大前駅まで約20分、阪大坂、石橋門を経て会場まで徒歩約15分で到着です。また豊中キャンパスから約3kmの位置に大阪国際空港(伊丹空港)があり、空港前からモノレールにご乗車後、柴原阪大前駅まで2駅ですので、遠方から参加される方にとってもアクセスしやすくなっております。

懇親会は千里阪急ホテルにて催されます。講演会場から懇親会会場へのアクセスもよく、大阪モノレール柴原阪大前駅より千里中央駅まで移動し、そこから徒歩約5分でホテルに到着します。また千里中央駅からモノレールで1駅先には日本最大級の大型複合施設EXPOCITYがあり、講演後のひと時を楽しむこともできます。水族館、動物園や美術館を融合したミュージアム「ニフレル」、大阪の街並みや夜景を楽しむことができる大観覧車「オオサカホイール」は特にオススメです。また明治の森箕面国定公園内にある、日本の滝百選にも選定されている箕面大滝を眺めながら夕涼みを楽しむこともできます。大阪市内から、京都や神戸へ30分程度で移動できますので、講演大会前後の日程を利用して、関西周辺をお楽しみ下さい。皆様のご参加をお待ち申し上げます。



豊中キャンパス正門.



全学教育講義棟.



大阪大学会館.

～ご来場お待ちしております。～

第22回 World Materials Day Award 募集

応募期間：2024年7月1日～8月23日

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。日本では、11月6日(水)に顕彰いたします。尚、本年は下記日程にて展示および審査を行いますのでご確認の上、多数のご応募をお待ちしております。

募集要項

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)

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)。高校生・高専学生も可
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。

展示方法

日本金属学会秋期講演大会(2024年9月18～20日、大阪大学)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。

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。

授賞

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

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。

申込方法 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して下さい)

参考

過去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・問合せ先 〒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 Award 募集係
☎ 022-223-3685 FAX 022-223-6312
E-mail: stevent@jimmm.jp

～ ご応募お待ちしております。～

2024年秋期講演大会会期中の託児室設置のお知らせ

2024年秋期講演大会会期中、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程をご確認の上「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
2024年9月18日(水)	8:30～18:00
2024年9月19日(木)	8:30～18:00
2024年9月20日(金)	8:30～17:00

場所 9/18～20 大阪大学豊中キャンパス内(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～小学校低学年 無料です

利用シッター会社：㈱ポピンズファミリーケア

申込方法

・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程をご確認の上、「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、ポピンズファミリーケアより返信メールをお送りします。

申込期間：2024年8月1日(木)～8月30日(金)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：㈱ポピンズファミリーケア大阪支社
担当)竹内・西田
☎ 06-6367-2100(代表)
E-mail: order-osaka@poppins.co.jp

*託児室利用規程・託児室利用申込書はホームページよりダウンロードして下さい。



2024年秋期講演大会
大会ホームページ・バナー広告, 大会プログラム広告(まてりあ9号付録),
付設展示会, 誌上展示会(まてりあ11号)各募集要領

本会2024年秋期講演大会は、9月18日(水)～20(金)の3日間、大阪大学・豊中キャンパスにて開催いたします。本講演大会にて、各種広告、付設展示会の出展を募集いたします。

■大会ホームページ・バナー広告

掲載期間 2024年7月～(会期終了後もアーカイブで閲覧できます)

アクセス数 195,701アクセス(約2ヶ月, 前回参考値)
サイズ タテ80ピクセル×ヨコ160ピクセル(静止画)
データ形式 静止画のPNG(.png), JPEG(.jpg),

GIF(.gif)

リンク先アドレスも合わせてご指定下さい。
バナーデータ(+リンク先指定)入稿後, 1週間程度で掲載いたします。

掲載料金 1枠50,000円(税別)

※バナーデータ制作費は別途です。

※本会維持員様, プログラム広告掲載会社様,
付設展示会出展社様は50%OFF。

申込 随時受付

申込最終締切 8月20日(火)

■付設展示会

展示会会期 9月18日(水)～20日(金)9:00～17:00

※20日は, 13:30まで(予定)

搬入日: 9月17日(火)

14:00～16:00(予定)

展示会場 大阪大学・豊中キャンパス

〈機器・書籍展示〉

研究開発用機器, 書籍, ソフトウェア等の出展を募集いたします。

1コマ 間口1,800mm, 奥行き900mm(予定)
展示台(テーブル), バックパネル(高さ2100mm×幅1800mm), 椅子をご用意します。

※電気使用容量を制限する場合がございます。
(例: 1コマ200Wまで)

出展料金 機器展示: 1コマ 140,000円(税別)

書籍展示: 1コマ 90,000円(税別)
(出版社様限定です)

申込締切 8月20日(火)

※規定数に達し次第, 先着順に締切ります。

〈カタログ展示〉

展示部数 2点(A4サイズ, 8頁以内)につき, 30部以内

出展料金 2点につき30,000円(税別)(1点増すごとに10,000円(税別)追加)

申込締切 8月20日(火)

■まてりあ11号・誌上展示会

付設展示会のフォローアップ広告を募集致します。

発行予定日 11月1日(水)

掲載料金 1枠(1/4頁) 28,000円(税別)

申込締切 9月26日(木)

広告原稿締切 9月26日(木)

※本広告企画は, 付設展示会に出展されていない企業様も出稿できます。

上記の他, ランチョンセミナー, 学生キャリアサポート企画等の協賛メニューは, 企画ができ次第ご案内いたします。

下記までお問い合わせ下さい。

■申込・問合せ先

株式会社 明報社

(担当: 月岡太郎 または, 営業担当者まで)

☎ 03-3546-1337 FAX 03-3546-6306

E-mail: tsukioka@meihosha.co.jp

(または営業担当のアドレスまで)

URL: <http://www.meihosha.co.jp>

※日本金属学会発行誌広告掲載も上記問合せ先の
(株)明報社にご連絡下さい。

公益社団法人日本金属学会
「2025年度若手研究グループ」新規申請募集

申請締切：2024年9月2日(月)

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)

【実施要領】

- (1)概要 要 • 新たな研究会の設立、新規研究テーマの開拓やフロンティア助成研究の申請に向けた研究課題の抽出や研究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。
- 本研究グループの活動を、日本金属学会フロンティア研究助成申請時の審査の参考情報とする。
 - 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。
- (2)対象者 • 申請者および構成員は申請時(9月2日時点)に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。(適当なメンバーがいない場合は、申請時に企業メンバーの推薦を該当分科の調査研究委員会委員等に依頼すること。)
 - 活動開始時には、非会員の構成員は会員になること。
- (3)活動費 年間50万円を上限とする。(税金分を含む)
- (4)活動期間 2025年3月1日～2027年2月28日の2年間とし、原則として延長は認めない。
- (5)活動報告 • 研究成果報告として、講演大会において講演(若手研究グループの企画セッション等が望ましい)を行う。
- 1年経過後および活動終了後に報告書A4版1枚(2,200字程度)を調査研究委員会に提出する(必要な場合は説明いただく)。提出された報告書は、本会ホームページおよび会報「まてりあ」に掲載する。
- (6)採択件数 • 5件以内とする。
- (7)応募方法 • 名称、申請代表者、構成員、申請理由、活動の概要、活動計画、予算、成果の報告予定、関連分野を記載した申請書を下記申込専用サイトに必要事項を入力の上、アップロードし提出する。なお、ファイルはMS-Word形式として下さい。
- <https://data.jim.or.jp/jim/wakate/tou/>

- (8)審査 • 調査研究委員会で審査の後、理事会で決定する。必要に応じ、面談等を行うことがある。
- (9)備考 • その他は研究会の規程に準ずる。
- 活動費の使途は、会議費(会場費、会議中のお茶代・弁当代)、旅費交通費、通信運搬費、消耗品費、印刷製本費等の運営費用および分析や調査等の外注委託費とする。
 - 本会規程に基づく旅費・交通費の支給は可とする。ただし、講演大会中および講演大会と連続する日程で開催される構成員の会議等の旅費は不可。
 - 会計担当者を置き、年度予算の消化状況の管理を行なう。
 - 会計担当は、活動費の残金および参加等収入等の現金ならびに領収書を管理する。
 - 会計処理方法の詳細は会計マニュアルに定める。
- (10)審査基準 • 研究会への発展や新規研究テーマの開拓に貢献できるか。
- 研究会に類似のテーマはないか。
 - 構成員は適切であるか。
 - 必要性が高いか。
 - 目的や目標が明確にされているか。
 - 成果を広く周知する活動報告が計画されているか。

2024年度活動中の若手研究グループ(2グループ)

No.	名称	活動期限	代表世話人
8	原子力エネルギー用材料研究グループ	2023年3月～2025年2月	岡 弘(北大)
9	非鉄金属材料の水素侵入・水素脆化研究グループ	2023年3月～2025年2月	土井康太郎(NIMS)

これまで活動した若手研究グループ

No.	名称	活動期限	代表世話人
1	鉄鋼メタラジ研究グループ	2018年3月1日～2020年2月28日	中田 伸生(東工大)
2	Additive Manufacturing(付加製造)による超高耐食性金属材料の開発研究グループ	2018年3月1日～2020年2月28日	堤 祐介(物・材機構)
3	多様な先端観察・測定法を用いた組織の定量と力学特性解析への適用	2018年3月1日～2020年2月28日	宮嶋 陽司(金沢大)
4	量子ビーム散乱測定による金属組織形成過程のマルチスケール解析研究グループ	2018年3月1日～2020年2月28日	諸岡 聡(日本原子力研究開発機構)
5	次世代高性能磁性材料研究グループ	2019年3月1日～2022年2月28日 ※新型コロナの影響で1年延期対応。	松浦 昌志(東北大学)
6	生体用金属・セラミックス材料の生体外評価に関する標準化検討グループ	2019年3月1日～2022年2月28日 ※新型コロナの影響で1年延期対応。	上田 恭介(東北大学)
7	CO ₂ ゼロエミッション社会に向けた耐環境構造金属材料研究グループ	2022年3月1日～2024年2月29日	井田駿太郎(東北大学)

問合せ・照会先 (公社)日本金属学会 若手研究グループ係
E-mail: stevent@jim.jp
☎ 022-223-3685

公益社団法人日本金属学会
「研究会」新規・更新申請募集

申請締切：2024年9月2日(月)

研究会の登録を希望される方は研究会実施要領および下記規則をご参照の上、お申込下さい。

新規申請の研究会は新規申請用紙、継続延長申請の研究会は継続更新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)

【実施要領】

研究会の目的 研究会は先端領域又は学術領域における研究会を効率的に推進するために活動することを目的とする。

- (1) **年間運営費** 100,000円
- (2) **活動期間** 新規申請の場合1期5年間以内、継続更新の場合は、延長期間1期3年以内。
最長活動期間は2期8年以内
- (3) **新規申請書の内容** ①研究会名称、②活動目的、③活動期間、④代表世話人、⑤世話人(複数可)、⑥構成員名簿
- (4) **継続更新申請書の内容** ①研究会名称、②継続理由、③延長期間、④代表世話人、⑤世話人、⑥構成員、⑦これまでの成果報告、⑧今後の活動計画書
- (5) **年間採択数** 新規2件以内、継続(延長)申請は2件以内
- (6) **研究会の審査** 調査研究推進委員会で1次審査をし、理事会で最終審査を行う。
- (7) **審査基準**
 - ・学術貢献出来る研究会が望ましい。
 - ・類似の研究会に属しない。
 - ・構成員は適切か。
 - ・そのテーマの研究会が必要か。
 - ・研究会活動期間中に講演大会公募シンポジウムや金属学会シンポジウムを計画しているか。
- (8) **現在活動中の研究会の留意事項**
 - ・2025年2月に終了する研究会で、過去に継続(延長)の申請をしている研究会は、現在の活動期間で終了となります。
 - ・2025年2月に終了する研究会で、これまで継続(延長)の申請をしていない研究会は、1期3年の継続(延長)の申請が出来ます。ただし、研究会の審査により2件以内の採択となります。
- (9) **申込方法** 作成した申請書を下記申込専用サイトに必要事項を入力の上、アップロードし提出して下さい。なお、ファイルはMS-Word形式として下さい。

<https://data.jim.or.jp/jim/kenkyukai/tou/>

問合せ・照会先 (公社)日本金属学会 研究会係
E-mail: stevent@jimm.jp
☎ 022-223-3685

公益社団法人日本金属学会 研究会規則

(規則の目的)

第1条 この法人の研究会規程を公正かつ適切に運用するため、調査研究委員会の決議により、この規則を定める。

(運営費)

第2条 研究会規程第14条第1項によるこの法人の運営費の限度額は100,000円とする。

- 2 この法人の運営費以外の運営は参加費等収入で充当する。
- 3 企業からは原則として分担金を徴収しない。
- 4 前項に定める同系統のテーマで継続的活動を目的とする更新申請の承認にあたっては、会告や会場の手配などの支援はするが活動支援金を提供しない場合もある。

(研究会の申請)

第3条 研究会の新規申請書ならびに継続更新申請書は9月上旬までに調査研究委員会に申請するものとする。

- 2 調査研究推進委員会は申請書を審査の上、調査研究委員会の議を経て、理事会の承認を得るものとする。
- 3 研究会の年間採択数は新規は2件以内、継続更新は2件以内とする。
- 4 新規に採択された研究会は3年経過後に継続する目処がたたなくなった場合は研究会を解散することが出来る。
- 5 研究会は活動期間中に、1回以上春秋公募シンポジウムを開催しなければならない。

(研究会の新規申請)

第4条 新規申請は代表世話人が所定の研究会申請書を期日までに調査研究委員会委員長に提出する。

- 2 新規応募の申請書に記載する事項は次の通りとする。
 - (1) 研究会の名称および活動目的
 - (2) 代表世話人(氏名、所属、役職名、TEL、E-mail)
 - (3) 世話人の名簿
 - (4) 構成員の名簿
 - (5) 活動期間は1期5ヵ年以内とする

(更新申請)

第5条 1期5年終了後、さらに活動を継続する場合、代表世話人は更新申請書を期日までに調査研究委員会に提出する。

- 2 更新申請に記載する事項は次の通りとする。
 - (1) 研究会の名称および継続理由
 - (2) (2)代表世話人(氏名、所属、役職名、TEL、E-mail)
 - (3) 世話人の名簿
 - (4) 構成員の名簿
 - (5) これまでの成果報告書
 - (6) 今後の活動計画書
 - (7) 延長期間1期3ヵ年以内とする
 - (8) 最長活動期間は2期8ヵ年以内とする

(研究会の構成員)

第6条 この法人の会員は当該代表世話人に申し込むことで、その研究会の定常的構成員になることができる。

- 2 代表世話人は新たに参加した構成員を事務局に通知する。

- 3 研究会の定常的構成員は少なくともその2/3以上をこの法人の会員で構成されなければならない。
- 4 同一人が複数の研究会に登録しても差し支えないものとする。

(研究会の審査)

第7条 研究会の新規および継続更新の審査は、下記による。

- 2 調査研究推進委員会で1次審査をし、理事会で最終審査を行う。
- 3 研究会の審査は次の基準による。
- (1) 十分な学術貢献が期待出来るか
 - (2) 既存の研究会と類似していないか
 - (3) 構成員は適切か
 - (4) そのテーマの研究会が必要か
 - (5) 本会の講演大会公募シンポジウムや金属学会シンポジウムを開催出来るか

(研究集会の開催)

第8条 研究集会を催す場合は、下記による。

- 2 研究集会は、会告により会員に公開する。ただし、緊急の会合の場合は前項の定常的構成員のみに通知することもあり得る。
- 3 春秋大会会期中の研究集会は、原則として開催は認めない。

(研究会の運営)

第9条 研究会の運営に関する事務処理は代表世話人のもとで行う。

- 2 研究会が内外の学協会と共催または協賛のもとにシンポジウムまたは国際会議等を開催しようとする場合は、研究会の代表世話人が所定の手続きを経て理事会に申請するものとし、その可否は理事会の決議を要する。

(研究会の活動および成果報告)

第10条 研究会の活動および成果報告は、下記による。

- 2 活動期間中の研究会の代表世話人は2月中旬までに、その年度の活動報告書を調査研究委員会に提出しなければならない。また、2月中旬までにその年度の経費の使用明細書(領収書添付)を事務局に提出しなければならない。
- 3 研究会を終了する代表世話人は2月中旬までに成果報告(A4版1頁:講演大会やシンポジウム開催報告)を調査研究委員会に提出し、金属学会ホームページに公表しなければならない。
- 4 最終成果報告書は欧文誌、会誌の投稿または、まてりあ特集号に掲載しなければならない。

(委員会の関与)

第11条 この規則に疑義が生じた場合は、調査研究推進委員会で協議する。

(規則の改廃)

第12条 この規則を改廃する場合は、調査研究委員会の決議を要する。

2024年度活動中の研究会

8 テーマ研究会			
No.	名 称	活動期限	代表世話人
1	81* 材料機能特性のアーキテクチャー研究会	2018年3月～2025年2月	木村 好里(東 工 大)
2	82 微小領域の力学特性評価とマルチスケールモデリング研究会	2019年3月～2025年2月	大村 孝仁(物・材機構)
3	83 高温材料の変形と破壊研究会	2020年3月～2026年2月	澤田 浩太(物・材機構)
4	84 ソフト磁性研究会	2020年3月～2026年2月	遠藤 恭(東 北 大)
5	85 状態図・計算熱力学研究会	2021年3月～2026年2月	阿部 太一(物・材機構)
6	86 結晶性材料の結晶配向評価および結晶方位解析技術研究会	2022年3月～2027年2月	長谷川 誠(横 浜 国 大)
7	87 水素が関わる材料科学の課題共有研究会	2022年3月～2027年2月	浅野 耕太(産 総 研)
8	88 高温構造用材料の水蒸気酸化に関する基礎科学研究会	2022年3月～2027年2月	上田 光敏(北 大)

* 期間延長研究会

これまで設置された研究会

1. 高融点金属基礎研究会	(1977.2～1982.3)
2. 高温質量分析研究会	(1977.9～1982.3)
3. アモルファス金属に関する研究会	(1977.9～1982.3)
4. チタン研究会	(1977.9～1982.3)
5. マルテンサイト変態に関する研究会	(1978.2～1983.3)
6. 核融合炉研究会—総合評価のための—	(1978.5～1983.3)
7. 材料照射研究会	(1978.5～1983.3)
8. 磁石材料研究会	(1978.5～1983.3)
9. 結晶粒界研究会	(1981.2～1986.3)
10. 高温変形および破壊研究会	(1981.9～1986.3)
11. 金属間化合物の機械的性質研究会	(1983.2～1988.3)
12. 材料重照射研究会	(1984.2～1989.3)
13. ステンレス鋼研究会	(1984.2～1989.3)
14. 形状記憶合金の基礎と応用に関する研究会	(1985.2～1990.3)
15. エレクトロニクス材料の物理化学研究会	(1985.2～1990.3)
16. 気相急冷非平衡合金研究会	(1985.2～1990.3)
17. 計算機支援による材料設計研究会	(1986.2～1991.3)
18. 金属とセラミックスの接合研究会	(1986.2～1991.3)
19. 高温強化研究会	(1987.3～1992.2)
20. 高純度金属研究会	(1988.3～1991.2)
21. 破壊の物理と化学研究会	(1988.3～1991.2)
22. ベイナイト研究会	(1988.3～1991.2)
23. 結晶粒界研究会	(1991.3～1994.2)
24. 水素機能研究会	(1991.3～1994.2)
25. 照射材料評価研究会	(1992.3～1995.2)
26. 金属と社会研究会	(1992.3～1997.2)
27. めっき膜の構造および物制御研究会	(1993.3～1998.2)
28. 高純度ベースメタル研究会	(1993.3～1998.2)
29. 集合組織と材料特性研究会	(1994.3～1999.2)
30. 相安定性・相変態研究の新技法研究会	(1994.3～1999.2)
31. 金属系バイオマテリアル研究会	(1994.3～1998.2)
32. 結晶性材料の高温強度特性研究会	(1995.3～2000.2)
33. チタン合金の基礎物性研究会	(1995.3～2000.2)
34. コンピュータシミュレーションによる原子・電子レベルでの材料創成研究会	(1995.3～2000.2)

35. 界面の原子論研究会	(1996.3~1999.2)
36. 拡散研究会	(1998.3~2003.2)
36. ハイパフォーマンス・バイオマテリアル研究会	(1998.3~2001.2)
38. 超高純度金属研究会	(1998.3~2003.2)
39. 材料集合組織研究会	(1999.3~2002.2)
40. 高温材料設計研究会	(2003.3~2005.2)
41. ストラクチャーダイナミクス研究会	(2000.3~2003.2)
42. 機能的薄膜研究会	(2000.3~2003.2)
43. 可逆的インターコネクション研究会	(2001.3~2004.2)
44. ナノプレーティング研究会	(2002.3~2005.2)
45. 水素新機能研究会	(2002.3~2005.2)
46. エキゾチック金属間化合物の構造・相安定性と物性研究会	(2003.4~2005.2)
47. 強ひずみ加工微細組織制御研究会	(2004.3~2008.2)
48. 照射場材料制御研究会	(2004.3~2009.2)
49. 次世代軽負荷マグネシウム研究会	(2004.3~2009.2)
50. 超高純度ベースメタル研究会	(2004.3~2007.2)
51. 先進材料の高温強度と組織研究会	(2005.3~2009.2)
52. ベリリウム金属間化合物研究会	(2005.3~2008.2)
54. ナノプレーティング研究会	(2006.3~2013.3)
56. 結晶方位と組織の制御研究科	(2006.3~2011.2)
57. 変位型相変態を利用した構造・機能的材料研究会	(2007.3~2012.2)
58. 機能的ポラス材料研究会	(2008.3~2013.3)
59. 機能的チタン合金研究会	(2008.3~2013.3)
60. 格子欠陥制御工学研究会	(2008.3~2013.3)
61. 核融合システム・材料統合研究会	(2009.3~2012.2)
62. 励起反応場を用いた低次元ナノ材料創成研究会	(2009.3~2015.2)

63. 計算材料科学研究会	(2009.3~2012.2)
64. 触媒材料研究会	(2009.3~2015.2)
65. 高温強度と組織形成の材料科学研究会	(2010.3~2015.2)
66. 熱電変換材料研究会	(2011.3~2014.2)
67. 結晶と組織の配向制御による材料高性能化研究会	(2011.3~2017.2)
68. シンクロ型 LPSO 構造研究会	(2011.3~2014.2)
69. エレクトロニクス薄膜材料研究会	(2013.3~2018.2)
70. プラズマに基づく変形現象研究会	(2013.3~2022.2)
71. グリーンエネルギー材料のマルチスケール創製研究会	(2013.3~2018.2)
72. 水素化合物に関わる次世代学術・応用展開研究会	(2014.3~2023.2)
73. 水素誘起超多量空孔研究会	(2014.3~2019.2)
74. チタン製造プロセスと材料機能研究会	(2014.3~2019.2)
75. キンク研究会	(2015.3~2024.2)
76. 高温変形の組織ダイナミクス研究会	(2015.3~2020.2)
77. 高度超塑性成形研究会	(2016.3~2022.2)
78. 触媒材料の金属学研究会	(2017.3~2023.2)
79. 金属・無機・有機材料の結晶方位解析と応用技術研究会	(2017.3~2022.2)
80. 高エネルギー環境用材料評価研究会	(2018.3~2024.2)
81. 材料機能特性のアーキテクチャー研究会	(2018.3~2025.2)
82. 微小領域の力学特性評価とマルチスケールモデリング研究会	(2019.3~2025.2)
83. 高温材料の変形と破壊研究会	(2020.3~2026.2)
84. ソフト磁性研究会	(2020.3~2026.2)
85. 状態図・計算熱力学研究会	(2021.3~2026.2)
86. 結晶性材料の結晶配向評価および結晶方位解析技術研究会	(2022.3~2027.2)
87. 水素に関わる材料科学の課題共有研究会	(2023.3~2028.2)
88. 高温構造用材料の水蒸気酸化に関する基礎科学研究会	(2023.3~2028.2)

日本金属学会各種研究費申請比較表

◎応募検討の際、ご参照下さい。

	研究会	若手研究グループ	フロンティア研究助成
目的	先端領域又は学術領域における研究会を効率的に推進するために活動することを目的とする	若手および調査・研究事業を活性化することを目的とする。新たな研究会の設立、新規研究テーマの開拓やフロンティア助成研究の申請に向けた研究課題の抽出や研究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。	教育・研究機関での金属及びその関連材料分野の学術研究及び技術研究の発展や若手研究者の育成や奨励を主な目的として、金属及びその関連材料分野に関連する材料又はプロセスに関する研究に助成金を交付する
対象者	代表世話人および世話人は会員であること。代表世話人は調査研究委員であることが望ましい。構成員は必要に応じて外部の専門家(非会員)でも可。他	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。 <ul style="list-style-type: none"> 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。 	応募者(代表者)は、応募年4月1日時点で45歳以下の日本の教育機関または公的研究機関に所属し、日本国内で研究に従事する者(学生・大学院生および企業との兼務者を除く)であること。ただし、共同研究者は国外でも可とする。他
研究期間	5年間(申請により最長8年可)	2年間(延長なし)	2年間
支給金額	年間運営費 10万円 用途は、会議費、旅費交通費、通信運搬費、消耗品費、印刷製本費等の運営費用とする	年間50万円を上限 用途は、会議費、旅費交通費、通信運搬費、消耗品費、印刷製本費等の運営費用とする	150万円以下 用途は、研究等に直接必要な費用及び所属組織の必要最低限の間接経費とする
審査	調査研究委員会にて審査後、理事会にて承認	調査研究委員会にて審査後、理事会にて承認	調査研究委員会にて審査後、理事会にて承認
採択上限	新規2件、継続2件	5件程度	15件以下
活動報告	研究会活動期間中に講演大会公募シンポジウムや金属学会シンポジウムを計画すること。	講演大会において講演(若手研究グループの企画セッション等が望ましい)を行う。 1年経過後および活動終了後に報告書A4版1枚を調査研究委員会に提出し、会報および本会ホームページにも掲載する。	研究終了6ヶ月後までに、終了報告書(A4様式1枚)及び成果報告書を日本語(専門語等で部分的に外国語を使用することは可)で作成。 研究成果は研究開始時から研究完了後1年までの間に本会の講演大会における発表2件及び本会の欧文誌又は会誌に論文を投稿すること。
募集期間	例年7月会告 締切9月初旬	例年7月会告 締切9月初旬	3号会告 募集期間3月1日~4月末日

2025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：2024年9月2日(月) 期日厳守

会員の研究活動の一層の活性化を図ることを目的として、春秋大会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。明年の春期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うえ、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。)

【募集対象の大会】

2025年春期講演大会(東京都立大学)

【実施要領】

- 境界領域を取り込むもの、最新の情報を含むもの、適時な討論展開ができるもの。
 - 一般会員、若手・中堅研究者の、斬新なアイデアによる提案を期待する。
 - これまでの金属学会になかったテーマを歓迎する。一つのシンポジウムの講演件数は10件以上であることを目安とする。
 - 採択したテーマは、公募シンポジウムとして、講演申込を募集会告する。
 - 採択された場合、提案者(企画責任者)はテーマ責任者として、積極的に講演募集を行い、また講演プログラムを編成する。シンポジウムの企画に積極的な方々が将来、調査研究・講演大会などで主導的に活躍されることを期待する。
- 講演の種類 基調講演と応募講演
 - 提案書の内容 ①テーマ、②テーマ英語名、③趣旨、④基調講演の予定題目と講演者、⑤推定講演数、⑥希望会場広さ・開催希望日、⑦提案者所属・役職/氏名、⑧通信先住所・TEL・FAX、E-mail
 - 提案書送付先 下記宛てE-mailで送付して下さい。2、3日過ぎても受理返信通知のない場合はご連絡下さい。
 - テーマの選定 講演大会委員会で選定し、結果は提案者に通知します。
 - 採択テーマの告知と講演募集 「まてりあ」11号2025年春期大会講演募集会告ならびに本会ホームページで行う。
 - 講演申込締切日 2024年12月末頃予定
 - 講演プログラム テーマ責任者がプログラム編成し、講演大会委員会へ提出する。
 - 講演時間
応募講演 15～25分(+討論時間5～10分=合計20～35分)
基調講演 30分(+討論時間10分=合計40分)
 - 講演概要原稿分量 A4判1ページ(応募講演、基調講演とも)

【公募シンポジウム企画の採択基準】

- 企画責任者(シンポジウム chair)およびテーマ責任者(シンポジウム co-chair)
 - 企画責任者は会員であること。
 - テーマ責任者は複数テーマを兼任しないこと。
 - 企画責任者またはテーマ責任者には、了解を得た講演大会委員が入っていること。
 - 講演大会委員(専門分野)リストはHPに掲載し、連絡先等は事務局に問合せする。
- 講演大会委員会でテーマ責任者(代理者可)は企画提案の説明を行うこと。
- 継続テーマの採択条件(上記に追加)
今後も同一テーマのシリーズ化で公募シンポジウムを希望する場合は、会員の研究活動一層の活性化を図ることを目的とした下記の採択基準の条件を満たす提案が求められます。
 - 全講演数の半数以上の応募講演数が見込まれること。
 - 基調講演の非会員枠は原則、1～2件とし、会員の発表の場とすること。
 - 提案書の趣旨にどのような科学的知見が得られるかの記載があること。
 - 継続テーマ提案が採択条件を満たさない場合、採択を否決する。
否決テーマに対しては、一般講演を容認することもある。

[参考] 2024年春期講演大会における公募テーマ

S1	マルテンサイト変態「温故知新」
S2	特異反応場における時間/空間応答を利用した新奇材料構造創成V
S3	超低損失軟磁性材料の開発動向～パワー半導体との共創による革新的パワーエレクトロニクスシステムの実現に向けて～
S4	材料機能特性のアーキテクチャー構築シンポジウムVーさまざまな格子欠陥・相界面のアナロジー体系化による学理の再認識ー
S5	材料表面の化学Iーめっき・耐食性・耐酸化性・触媒研究の新展開ー

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

2025年春期講演大会 企画シンポジウムテーマ募集

提案期限：2024年9月2日(月)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(応募)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うえ、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)

【募集対象の大会】

2025年春期講演大会(東京都立大学)

【実施要領】

1. 企画責任者 企画責任者は会員であること
2. 共同責任者 共同責任者は、公募シンポジウムの co-chair と重複してもよいが、同時期開催の企画責任者(代表者)と重複しないこと。
3. 講演の種類 依頼講演および基調講演(一般会員からの講演募集は行わない)
4. 講演時間 依頼講演(15分, 20分, 25分), 基調講演(25分~30分)
5. 質疑応答時間 5分または10分
6. 概要原稿 A4 サイズ1枚(他の講演種別と同じ)または提出不要
7. 非会員講演者の取扱い 参加費, 交通費, 謝金は公募シンポジウムに準ずる。
8. テーマの決定 講演大会委員会において採択を決定し、結果は提案者に通知します。
テーマ責任者(代理者可)は、講演大会委員会でご提案の説明を行うこと。
9. 採択テーマの案内 「あたりあ」ならびに本会ホームページで行う。
10. 講演プログラム 企画責任者がプログラム編成し、講演大会委員会へ提出する。

11. 提案書送付先 下記あて E-mail で送付して下さい。2, 3日過ぎても受理通知のない場合は、ご連絡下さい。

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

各締切日等：下記表参照

	2025年春期大会
企画募集案内	7月1日(7号会告)
応募締切	2024年9月2日
企画テーマの決定	2024年9月下旬
講演者リスト提出期日	2024年11月25日頃予定
プログラム提出期日(講演登録締切)	2025年1月初旬予定
講演大会企画委員会(会場決定)	2025年1月下旬予定
プログラム公開	2025年2月初旬予定

○講演時間(討論時間)：15分~30分(5分~10分)

○非会員の取扱い(参加費, 交通費, 謝金)：公募シンポジウムに準ずる

○プログラム編成および送付方法：テーマ責任者が MSWord で作成し事務局にメール添付で送付する。

2025年度 金属学会シンポジウム*のテーマ募集

提案期限：2024年10月7日(月) 厳守

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

(*講演大会時のシンポジウムとは異なります。)

シンポジウムの開催趣旨

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

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

提出書類 (提案書の様式はホームページ(<https://jimm.jp/event/symposium/>)よりダウンロードして下さい。)

提案締切 2024年10月7日(月)

研究会 No. 82

2024年度 微小領域の力学特性評価とマルチスケールモデリング研究会

2024年度の「微小領域の力学特性評価とマルチスケールモデリング研究会」を下記のとおり開催いたします。本研究会は、多様な材料を対象とする微小領域の力学特性を議論し、それらを素過程とするマクロスケールの機械的性質の発現機構について明確化することを目的としています。今年度は、高温材料の長寿命化・高強度化のための原理・原則解明を目的として活動している「高温材料の変形と破壊研究会」(代表世話人 物質・材料研究機構 澤田浩太)と共同で開催いたします。また、金属学会第4分科と共催いたします。皆様どうぞ奮ってご参加下さい。

代表世話人 物質・材料研究機構 大村孝仁

日 時 **2024年9月11日(水)午後～9月13日(金)昼頃**
 会 場 小京都の湯 みくまホテル(<https://mikuma.jp/>)
 大分県日田市隈1-3-19 ☎ 0973-23-3000
 参加費 7,000円(税込)
 ※定員に達した場合は申込をお断りさせていただく場合がございます。
 交流会費 3,000円(税込)
 宿泊費 11,000円(1泊, 税込)
 講演申込
<https://docs.google.com/forms/d/e/1FAIpQLSd65tOC3DCtUh3V008SsZ3lD7wZ3uJRdYcPo-4ZgRqZZQg4RQ/viewform?vc=0&c=0&w=1&flr=0>
 聴講申込 同上
 申込〆切 **2024年7月19日(金)**
 問合せ先 物質・材料研究機構 構造材料研究センター
 井口利江
 E-mail : iguchi.rie@nims.go.jp

※講演発表者以外の共同研究者(共著者)が研究会への参加を希望される場合は、別途参加申し込みが必要です。

※聴講のみのご参加も歓迎いたします。



特集企画の投稿募集

下記特集企画の投稿論文を募集いたします。

■**Special Issue on Development and Functionality of Titanium and Its Alloys as Structural, Biocompatible, and Energy Materials**(構造材料, 生体適合性材料, エネルギー材料としてのチタンおよびその合金の開発と機能性)

この特集号は、日本金属学会(JIMM)とインド金属学会(IIM)の会員の協力により企画されており、チタンおよびその合金の開発と機能性に関する最近の進歩を取り上げています。これらの材料は、構造材料や生体適合性材料として様々な分野で応用されています。また、チタン合金を用いた水素貯蔵技術は、カーボンニュートラルの観点からも重要な取り組みです。高性能なチタンおよびその合金を実現するには、合金組成、製造方法、加工技術の設計と制御が重要です。これらの要因は、結晶構造や微細組織に影響を与え、その結果としてチタンとその合金の機能を決定します。最近では、 ω 相の利用、格子間元素のドーピング、ハイエントロピー合金の開発、積層造形技術の利用などに関する研究が活発に行われています。また、計算科学では、現象の解明にとどまらず、新たな合金組成を探索するための大規模計算が取り組まれています。機械的特性の向上だけでなく、耐食性、耐酸化性、耐熱性も重要なテーマです。したがって、本特集号では実験的および計算的アプローチによるチタンおよびその合金の開発と種々の特性について扱います。

上記テーマに関する特集を、Materials Transactions 66巻5号(2025年5月発行)に予定しております。多数ご投稿下さいますようお願いいたします。

掲載予定号：第66巻第5号(2025年)

原稿締切日：**2024年11月1日(金)**

- 投稿に際しては、Materials Transactions 投稿の手引・執筆要領(本会 Web ページ)に従うこと。
- 通常の投稿論文と同様の審査過程を経て、編集委員会で採否を決定する。
- 著者は、投稿・掲載費用をご負担願います。

問合せ先 〒980-8544 仙台市青葉区一番町1-14-32

(公社)日本金属学会欧文誌編集委員会

☎ 022-223-3685 ☎ 022-223-6312

E-mail: sadoku@jimm.jp

<https://jimm.jp>

掲 示 板

〈公募類記事〉

有料掲載：1/4頁(700～800文字)程度。

「まてりあ」とホームページに掲載；16,500円

ホームページのみ掲載；11,000円

〈新刊案内〉

会員による出版案内(書誌情報の掲載)

〈その他の記事〉原則として有料掲載。

原稿締切・掲載号：毎月1日締切で翌月号1回掲載。

原稿提出先：電子メール(受け取りメールの確認をして下さい)

E-mail: materia@jimmp.jp

公 募

◇東北大学大学院工学研究科教員公募◇

公募人員 教授 1名

所 属 知能デバイス材料学専攻 情報デバイス材料学講座
先端マグネト材料学分野
(2024年7月1日付で「スピン情報材料学分野」から名称変更予定)

専門分野 金属・セラミックス・高分子などの磁気機能を基礎として、材料特性の向上や新機能の開拓に関する教育と研究を行う。

応募資格 博士の学位を有し、当該分野の研究・教育に意欲があり、日本語と英語で講義のできる方

担当授業科目 「学部」：磁性材料学，電磁気学，物性学基礎，材料科学総合学実験，材料科学総合学基盤研修，材料科学総合学卒業研修等

「大学院」：(前期)磁気デバイス材料学，知能デバイス材料学修士研修等，(後期)知能デバイス材料学博士研修等

任 期 なし

公募締切 **2024年8月20日(火)17:00**

着任時期 2025年4月1日(火)

提出書類 (1)履歴書，(2)学位論文題目，(3)研究業績概要(A4版2頁以内)，(4)主要論文5編の別刷り(コピー可)，(5)研究業績リスト：学術論文，参考論文，著書，特許(出願件数：申請中を含む，登録件数，主要特許10件前後のリスト(特許出願・公開・公告No，発明者氏名，発明題目))等，(6)獲得外部研究資金(科研費等)一覧(大学や公的研究機関所属の場合)，(7)受賞，(8)招待講演等，(9)教育業績(担当科目等)，(10)所属学会，(11)学会活動歴(委員会等)，(12)研究活動，(13)社会活動等に関する一覧表，(14)今後の研究計画(A4版2頁以内)，(15)教育活動に関する抱負(A4版2頁以内)，(16)照会可能な方2名の氏名と連絡先(住所，電話，E-mail)，(17)応募者の連絡先(住所，電話，E-mail)，(18)応募者の研究業績等に関するデータベースのURL(Scopus, KAKEN等)

書類送付先 東北大学大学院工学研究科 マテリアル・開発系長 武藤 泉

E-mail: depthead@material.tohoku.ac.jp

問い合わせ先 東北大学大学院工学研究科知能デバイス材料学専攻長 須藤祐司

☎/FAX 022-795-7338

E-mail: ysutou@material.tohoku.ac.jp

※件名を「教員公募書類(知能デバイス材料学専攻 情報デバイス材料学講座 先端マグネト材料学分野 教授)」として電子メールで送付して下さい。

※詳細：https://www.material.tohoku.ac.jp/news/files/jobs_20240606.pdf

◇National University Corporation Tohoku University Graduate School of Engineering Call for Applicants◇

1. Number of positions and job title: We are seeking one professor
2. Affiliation: Advanced Magneto-Materials
The name will be changed from “Magnetic and Spintronics Materials” on July 1, 2024.
3. Duties: Successful candidates will be engaged in research and education for graduate students and undergraduate students in the Department of Metallurgy, Materials Science, and Materials Processing. Candidates shall be responsible for the research and education on improving material properties and developing new functions based on the magneto-functionality of metals, ceramics, polymers, and so on. The administration of the school is also included.
4. Required Qualifications and Conditions:
Candidates must have a doctoral degree.
Candidates must be motivated and enthusiastic about education and research in the field.
Candidates must be able to lecture in Japanese and English.
5. The main areas for which the successful candidate will be responsible:
At Graduate School level
Magnetic Device Materials, Research for Master’s Thesis in Materials Science, Research for Doctoral Thesis in Materials Science, etc.
At Undergraduate level
Magnetic Materials, Electromagnetism, Introduction to Solid State Physics, Materials Science and Engineering Laboratories, Seminars, Bachelor Thesis Research, etc.
6. Start Date: April 1, 2025
7. Application Deadline
Application documents must arrive by 17:00 (JST) on August 20, 2024
8. Address to which applications should be sent
By e-mail to Prof. Izumi MUTO.
Applicants should submit their application, together with

the above 18 documents in PDF format, to the following address: depthhead@material.tohoku.ac.jp

9. Contact Details

Prof. Yuji Sutou

E-mail Address:ysutou@material.tohoku.ac.jp

See below for details on salary, benefits, application documents, etc.

https://www.material.tohoku.ac.jp/english/pdf/jobs_20240606_EN.pdf

集 会

◇レアメタル研究会◇

- 主 催 レアメタル研究会
- 主 宰 者 東京大学生産技術研究所 教授 岡部 徹
- 協 力 (一財)生産技術研究奨励会(特別研究会 RC-40)
- 共 催 東京大学マテリアル工学セミナー
レアメタルの環境調和型リサイクル技術の開発研究会
東京大学生産技術研究所 持続型エネルギー・材料統合研究センター
東京大学生産技術研究所 非鉄金属資源循環工学寄付研究部門(JX 金属寄付ユニット)
- 協 賛 (公社)日本金属学会 他
- 開催会場 東京大学生産技術研究所
An 棟 2階 コンベンションホール
〒153-8505 東京都目黒区駒場 4-6-1
(最寄駅: 駒場東大前, 東北沢, 代々木上原)
- 参加登録・問い合わせ: 岡部研 学術専門職員 宮寄智子
(参加登録: okabelab@iis.u-tokyo.ac.jp)
(問い合わせ: tmiya@iis.u-tokyo.ac.jp)

《2024年度 レアメタル研究会等の今後の予定》

- 第111回 2024年7月26日(金)(2024年度 第1回)←次回
(関連イベント: 2024年9月20日(金)★寄付研究部門主催
関連イベント★)(会場: 生産技術研究所コンベンションホール)
- 第112回 2024年9月27日(金) (2024年度 第2回)
- 第113回 2024年11月15日(金) (2024年度 第3回)
★チタンシンポジウム(第8回)★(合同開催)
(関連イベント: 2024年11月22日(金)★日本学術会議主催
公開シンポジウム★)(会場: 日本学術会議講堂)
- 第114回 2025年1月10日(金) (2024年度 第4回)
★貴金属シンポジウム(第12回)+新年会★(合同開催)
- 第115回 2025年3月21日(金) (2024年度 第5回)

令和6年度 レアメタル研究会のご案内

(2024.4.18現在)

- 第111回 2024年7月26日(金)14:00~
An 棟 2F コンベンションホール
リアル講演会+講演のネット配信(Zoom Webinar & YouTube)のハイブリ

ッド研究会

テーマ: EV は、本当に環境にやさしいのか?

午後2:00~ 講演【敬称略】

- EV等の環境性能評価(仮)(50分)
日本メタル経済研究所 特任アナリスト 武井泰典
- EVは、本当に環境にやさしいのか?(30分)
東京大学 生産技術研究所 教授 岡部 徹
- EVとLIBの現状と課題(仮)(50分)
早稲田大学 ナノ・ライフ創新研究機構 研究院客員教授
宇恵 誠
- EVの最近の状況(仮)(50分)
ニデック株式会社 顧問, 東京大学 名誉教授 小関敏彦
総合討論:
司会: 東京大学 生産技術研究所 教授 岡部 徹
パネリスト
東京大学 生産技術研究所 准教授 八木俊介
日本メタル経済研究所 特任アナリスト 武井泰典
早稲田大学 ナノ・ライフ創新研究機構 研究院客員教授
宇恵 誠
ニデック株式会社 顧問, 東京大学 名誉教授 小関敏彦
東京大学 生産技術研究所 特任教授 黒川晴正

午後6:00~

研究交流会・意見交換会 @An 棟 2F ホワイエ

■第112回 2024年9月27日(金) 14:00~

An 棟 2F コンベンションホール

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

テーマ: バッテリーメタルの現状と将来

午後2:00~ 講演【敬称略】

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

レアメタル研究会ホームページ

https://www.okabe.iis.u-tokyo.ac.jp/japanese/rc40_j.html

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

- 主 催 東京大学 生産技術研究所 非鉄金属資源循環工学寄付研究部門(JX 金属寄付ユニット)
- 協 力 (一財)生産技術研究奨励会(特別研究会 RC-40)
- 共 催 レアメタル研究会
東京大学マテリアル工学セミナー
レアメタルの環境調和型リサイクル技術の開発研究会
東京大学生産技術研究所 持続型材料エネルギーインテグレーション研究センター
- 協 賛 (一社)軽金属学会 他
- 開催会場 東京大学 生産技術研究所 An 棟 2F コンベンションホール
〒153-8505 目黒区駒場 4-6-1
(最寄駅:駒場東大前, 東北沢, 代々木上原)
- 会 費 参加費(シンポジウム)無料
- 参加登録・問合せ 非鉄金属資源循環工学寄付研究部門ホームページ
<http://www.metals-recycling.iis.u-tokyo.ac.jp>
東京大学生産技術研究所 岡部研究室
特任研究員 池田 貴
E-mail : t-ikeda@iis.u-tokyo.ac.jp

2024年度 関連研究会の予定

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

産学連携と人材育成に関するシンポジウム

(2024.4.22現在)

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

■講演会プログラム【敬称略】

- 司会 東京大学 生産技術研究所
非鉄金属資源循環工学寄付研究部門
特任教授 岡部 徹
- 先端技術と人をつなぐデザイン, それを担う人材(40分)
東京大学 特別教授
東京大学 生産技術研究所
非鉄金属資源循環工学寄付研究部門 特任教授 山中俊治
- 産学連携と人材育成の課題 ―産・学を経験して― (仮)
(20分)
東京大学 生産技術研究所
非鉄金属資源循環工学寄付研究部門 特任教授 黒川晴正

- 大学という場での新しい価値創造の在り方(仮)(30分)
東京大学 生産技術研究所
非鉄金属資源循環工学寄付研究部門 特任教授 菅野智子
- 私の考える理想の技術開発のかたち(30分)
東京大学 生産技術研究所
非鉄金属資源循環工学寄付研究部門 特任講師 大内隆成
- 日本版サーキュラーエコノミーの実現を目指した産学連携と人材育成(30分)
早稲田大学 理工学術院 教授
東京大学大学院 工学系研究科 教授
東京大学 生産技術研究所
非鉄金属資源循環工学寄付研究部門 特任教授 所 千晴
- JX 金属の学生に向けた活動と社員アイデア創出プラットフォーム『Idea Seed Bank』活動の紹介(30分)
JX 金属株式会社 技術本部技術戦略部
オープンイノベーション担当課長 主席技師 山岡利至
- 午後5:00~ 総合討論
統括と講評
JX 金属株式会社 取締役副社長執行役員 菅原静郎

写真撮影

午後6:00~

研究交流会・意見交換会 @ An 棟 1F レストラン・アーペ

◇掲示板は、本会ホームページにも掲載しておりますのでご利用下さい。
<https://jimm.jp/> → 掲示板 です。

日本金属学会誌掲載論文
Vol. 88, No. 7 (2024)

—論文—

配向Ti₃SiC₂焼結体の高温圧縮変形挙動における結晶方位依存性 白紙悠之 池田賢一 三浦誠司 森田孝治 鈴木 達 目 義雄

Materials Transactions 掲載論文
Vol. 65, No. 7 (2024)

—Overview—

Electron Microscopy on Mechanism of Voidage and Cracking in Si by Injection of a Permeable Intra-Red Laser Hiroyuki Iwata and Hiroyasu Saka

—Regular Article—

Materials Physics

Atomic Environment of Pt in Quasicrystal-Forming Zr₇₀Cu₂₉Pt₁ Metallic Glass Shinya Kudo and Akihiko Hirata

Microstructure of Materials

A Comparative Study of Fe-NbC Composites by a Spark Plasma Sintering: Sintering Behavior, Mechanical Property and Oxidation Bum-Soon Park, Hyoung-Seok Moon and Hyun-Kuk Park

Synthesis of TiC-Ti Composites via Mechanical Alloying/Spark Plasma Sintering Using Ti and C Powders Ryo Tsukane, Kazuhiro Matsugi, Yong-Bum Choi and Hiroyasu Tamai

Mechanics of Materials

Influencing Factors on Fatigue Strength in Self-Pierce Riveting Joint of Non-Combustible Mg-4% Al-1%Ca-0.2%Mn Alloy Based on Failure Mechanism Analysis

Xuanyi Shao, Moriaki Ogido, Taiki Nakata, Bui Phuong Thao, Nan Zhang, Yukio Miyashita and Shigeharu Kamado

Strain Evaluation Method around Triple Junctions Using Electron Backscatter Diffraction

Masahito Omiya and Yohei Sakakibara

Hydrogen Induced Debonding of Mg₂Si Particle/Aluminum Interface in Al-Mg-Si Alloy

Hiroyuki Toda, Hiro Fujihara, Kyosuke Hirayama, Kazuyuki Shimizu, Yafei Wang, Sharma Bhupendra, Jianwei Tang, Akihisa Takeuchi and Masayuki Uesugi

Effect of Strain Rate on the Extremely Low-Cycle Fatigue of Fe-15Mn-10Cr-8Ni-4Si Bidirectional-TRIP Steel

Fumiyoshi Yoshinaka, Nobuo Nagashima and Takahiro Sawaguchi

Materials Chemistry

Invasion/Permeation Hydrogen in Cathodic Charged SUS316 Columnar Crystals Evaluated with a Scanning Kelvin Probe Force Microscope

Yoshiharu Murase and Hideki Katayama

Advancing Thermal Conductivity Prediction of Metallic Materials by Integrating Molecular Dynamics Simulation with Machine Learning

Qi Kong and Yasushi Shibuta

Materials Processing

Investigation on Cold Drawing Process of Unequal-Wall-Thickness Battery Shell Based on 3003 Aluminum Alloy Extruded Blanks

Heng Li, Kai Xu, Yuerong Qian, Wenchao Shi, Xiaoyong Zhu and Yucheng Wu

Engineering Materials and Their Applications

Creep Properties of a Binary Mg-14Ca Hypoeutectic Alloy

Yuji Okada, Kohei Ikeno and Yoshihiro Terada

Enhancing Stability and Electrical Properties in Silver Nanowire Transparent Conductive Electrodes by Coating Platinum on Silver Nanowires

Dang Tuyen Nguyen, Thi Hong Nhung Nguyen, Quoc Hoan Tran, Thanh Tung Duong, Quang Tri Doan, Thi Lan Nguyen and Duy Cuong Nguyen

Environment

A Trial Evaluation of Rock Core DCDA Absolute Shear Stress Measurement for Routine Quantitative Mining Hazard Assessment in Deep Underground High Stress Mines

Hiroshi Ogasawara, Yoshihiro Mima, Akimasa Ishida, Siyanda Mngadi, Mitsuya Higashi, Yasuo Yabe, Akio Funato, Takatoshi Ito, Masao Nakatani and Raymond Durrheim

Announcement

まてりあ第63巻8号 予告

[金属なんでもランキング!]

No. 25 銅における不純物拡散係数の活性化エネルギー

[最近の研究] レーザ積層造形が生み出すアルミニウム合金の非平衡組織・準安定相の多元素化による制御

.....名大 高田尚記

[最近の研究] 界面やバルクにおける電気的スピン変換技術

.....九工大 福岡康裕

[新進気鋭] TiCの利活用への拡大に向けたMo-Ti-C三元系における凝固組織および非化学量論TiCの弾性率の研究

.....東北大 井田駿太郎

[トピックス] 電子顕微鏡における遠隔観察・遠隔操作の現状

.....大阪産技研 平田智丈

—他—

編集の都合により変更になる場合がございます。

日本金属学会オンライン教育講座 開催案内

『結晶学の基礎』

日 時 一日目 2024年8月26日(月)13:00~16:30
二日目 8月27日(火)13:00~16:30

講義概要

本講座では、一定の周期で配列した原子あるいは分子からなる物質の構造、すなわち「結晶構造」を理解する上で必要な知識とこの結晶構造を明らかにするための最も一般的な実験ツールである X 線回折について学びます。

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

プログラム

2024年8月26日(月)13:00~16:30

13:00~14:00 結晶の幾何学(結晶系, 単位胞, ブラベー格子)
14:00~14:15 一休憩—
14:15~15:15 結晶構造と結晶面(ミラー指数)・結晶方位の記述法
15:15~15:30 一休憩—
15:30~16:30 X線の基本的性質(電磁波, X線発生, X線吸収)

2024年8月27日(火)13:00~16:30

13:00~14:00 原子による散乱, 結晶からの回折強度
14:00~14:15 一休憩—
14:15~15:15 非結晶物質(気体, 液体, ガラス, アモルファス)への応用
15:15~15:30 一休憩—
15:30~16:30 その他の応用の紹介: 小角散乱・異常散乱

受講方法 オンライン(Zoom)

講師紹介 早稲田大学ナノ・ライフ創新研究機構客員教授, 京都大学名誉教授 松原英一郎先生

1977年3月京都大学工学部冶金学科卒業。1984年8月ノースウエスタン大学 Ph.D. 東北大学助手・同大学講師・京都大学助教授を経て、1999年9月東北大学金属材料研究所教授。2005年4月京都大学工学研究科教授。2020年4月より現職。

コーディネーター 株式会社プロテリアル 部長 西内武司

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

申込締切 2024年8月19日(月)

受講料

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

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

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

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

受講料支払方法 ①カード決済 ②コンビニ決済 ③銀行振込

問合せ先 〒980-8544 仙台市青葉区一番町 1-14-32

(公社)日本金属学会 セミナー・シンポジウム参加係

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

協賛予定

応用物理学会, 軽金属学会, 資源・素材学会, 自動車技術会, ステンレス協会, 電気化学会, 電気学会, 日本 MRS, 日本化学会, 日本機械学会, 日本材料科学会, 日本材料学会, 日本磁気学会, 日本自動車工業会, 日本セラミックス協会, 日本塑性加工学会, 日本チタン協会, 日本鉄鋼協会, 日本物理学会, 日本分析化学会, 粉体粉末冶金協会

オンデマンド配信：日本金属学会オンライン教育講座 「金属製錬の熱力学」

配信：2024年8月1日(木)～8月30日(金)

金属製錬は、鉱石から酸素や硫黄、不純物を除去して目的の金属を得る技術として、現代社会の構築に大きく貢献してきました。資源の枯渇や地球温暖化が進み、低品位鉱石や都市鉱山の活用が求められ、カーボンニュートラルに向けて様々な取り組みがなされる中、その重要性はさらに高まっています。

本講義では、高温反応での乾式製錬に焦点をあて、その原理となる化学熱力学における化学ポテンシャル、相平衡、状態図などの基礎概念や法則について解説します。さらに、不純物除去のためのスラグ—金属—気体間平衡反応など製錬プロセス解析への化学熱力学の活用について解説します。これらは同様に化学熱力学を活用する湿式製錬や電解精錬を学ぶ上での基礎にもなります。

2022年11月17日および18日に開催した当該講座の録画をオンデマンドで視聴いただきます。配信期間中は好きな時間に聴講できます。

講師紹介

東京大学名誉教授 月橋文孝 先生

1977年3月東京大学工学部金属工学科卒業。1982年3月東京大学大学院工学系研究科金属工学専門課程博士課程修了、工学博士。1982年4月東京大学工学部金属工学科助手、1986年10月東京大学講師、1988年1月東京大学助教授を経て、1999年4月東京大学大学院新領域創成科学研究科物質系専攻教授。2020年3月東京大学定年退職。2020年6月東京大学名誉教授。

コーディネーター 大阪大学教授 小泉雄一郎、東京大学准教授 松浦宏行

- カリキュラム 1 時限目：熱力学変数
2 時限目：化学ポテンシャルと平衡
3 時限目：状態図と相平衡
4 時限目：製錬プロセスへの適用

視聴期間 2024年8月1日(木)～8月30日(金)

視聴方法 オンデマンド配信システム UIshare から視聴いただきます。

視聴方法および資料のダウンロードの方法は受講申し込み者にメールで案内します。

資料は同システムのウェブサイトからダウンロードいただけます。

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

申込締切 2024年8月8日(木)

受講料

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

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

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

受講料支払方法 ①カード決済 ②コンビニ決済 ③銀行振込

問合せ先 〒980-8544 仙台市青葉区一番町 1-14-32

(公社)日本金属学会 セミナー・シンポジウム参加係

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

協賛予定

エネルギー資源学会、エレクトロニクス実装学会、応用物理学会、化学工学会、環境資源工学会、金属系材料研究開発センター、軽金属学会、軽金属製品協会、合金状態図研究会、資源・素材学会、ステンレス協会、スマートプロセス学会、素形材センター、電気化学会、電気学会、日本アルミニウム協会、日本 MRS、日本化学会、日本ガスタービン学会、日本機械学会、日本混相流学会、日本材料科学会、日本材料学会、日本磁気学会、日本伸銅協会、日本セラミックス協会、日本塑性加工学会、日本チタン協会、日本鋳造工学会、日本鉄鋼協会、日本熱物性学会、日本物理学会、日本分析化学会、日本マグネシウム協会、日本溶接協会、熱処理技術協会、廃棄物資源循環学会、粉体粉末冶金協会、溶接学会

新 入 会 員

(2024年4月23日～2024年5月20日)

正 員

小林 靖和 国立研究開発法人産業技術総合研究所
高山 雄介 群馬工業高等専門学校
土田 良恵 NTN株式会社
桃園 由美 日本製鉄株式会社
山内 崇史 三菱重工業株式会社

学 生 員

阿部 悠弥 北海道大学
金井 瑠偉 横浜国立大学
杳 掛 健 東 名古屋大学
永 沼 龍 海 北海道大学

外国一般会員

SHARMA ABHISHEK 大阪大学
Rishabh Shotri 大阪大学

ユース会員

北岡 柁 翠 兵庫県立大学



～欧文誌オンラインジャーナル フリーアクセスのお知らせ～

◆掲載後半年経過した論文のフリーアクセスのお知らせ

Materials Transactions 誌では、掲載後半年経過したすべての論文に会員、非会員を問わず誰でも無料でアクセスならびにダウンロードができるサービスを行っております。

◆Materials Transactions 論文フリーアクセス公開サービス(Open Choice)について

Materials Transactions 誌では、『公開後すぐに、できるだけ多くの読者に読んでもらいたい!!』というご要望に応えるため、投稿・掲載費用に、追加費用(33,000円(税込))をお支払いいただければ、半年間の認証期間を設けることなく、公開即フリーダウンロードを可能とするサービス(Open Choice)がございます。

～是非、ご活用下さい。～



2024年度オンライン教育講座 今後の予定

- ・結晶学の基礎(開催日：2024年8月26日(月)，27日(火))
- ・マルチスケール材料科学(開催日：2024年10月28日(月)，29日(火))
- ・構造材料(2) 非鉄材料編(開催日：2024年11月28日(木)，29日(金))

オンデマンド配信：オンライン教育講座 今後の予定

- ・金属材料の耐環境性(2)高温酸化・高温腐食の基礎—熱力学・速度論・高温強度—(配信：2024年7月1日(月)～7月31日(水))
- ・金属製錬の熱力学(配信：2024年8月1日(木)～8月30日(金))
- ・工業材料の応力・歪測定 (配信：2024年10月1日(火)～10月30日(水))
- ・構造材料(1) 鉄鋼材料編 (配信：2024年11月5日(火)～12月2日(月))

～ご参加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
2024年7月				
1～31	オンデマンド配信：オンライン教育講座「金属材料の耐環境性(2) 高温酸化・高温腐食の基礎-熱力学・速度論・高強度-」(5号353頁)	日本金属学会	TEL 022-223-3685 meeting@jimm.jp	7.8
3～5	第61回アイソトープ・放射線研究発表会(東京)	日本アイソトープ協会	TEL 03-5395-8081 happyoukai@jrias.or.jp https://www.jrias.or.jp/seminar/cat11/	
5	令和6年度 本多光太郎記念講演会	東北支部	makoto.ohtsuka.d7@tohoku.ac.jp	
5	熱測定講習会2024(オンライン)	日本熱測定学会	TEL 03-6310-6831 netsu@mbd.nifty.com https://www.netsu.org/	
11～12	令和6年度中性子産業利用報告会(東京)	J-PARCセンター他	TEL 029-284-3105 https://neutron.cross.or.jp/ja/events/24071112/	
11～12	第55回トライボロジー入門講座(東京+オンライン開催)	日本トライボロジー学会	TEL 03-3434-1926 jast@tribology.jp http://www.tribology.jp/	
12	2024年度 日本金属学会・日本鉄鋼協会両北海道支部合同サマーセッション	北海道支部・日本鉄鋼協会北海道支部	jim_hokkaido@eng.hokudai.ac.jp	
18	第64回塗料入門講座 後期(東大生産技研)	色材協会関東支部	TEL 03-3443-2811 adminr@jscm.or.jp http://www.shikizai.org/	定員 100名
18～19	第58回 X線材料強度に関するシンポジウム(名城大)	日本材料学会	TEL 075-761-5321 jimmu@office.jsms.jp https://www.jsms.jp/meeting/xsym_regist.html	
19	熱測定講習会2024(オンライン)	日本熱測定学会	TEL 03-6310-6831 netsu@mbd.nifty.com https://www.netsu.org/	
22～26	第12回対称性・群論トレーニングコース英語講座(つくば)	日本結晶学会	TEL 029-864-5196 tyoshimi@post.kek.jp http://pfwww.kek.jp/trainingcourse/	
25～26	講習会「粉末 X線解析の実際」(東工大)	日本結晶学会	crsj-xray@conf.bunken.co.jp http://analytsci.org/xrd2024/	定員 200名
26	レアメタル研究会(東大生産技研/ハイブリッド開催)(本号517頁)	レアメタル研究会	TEL 03-5452-6314 tmiya@iis.u-tokyo.ac.jp https://www.okabe.iis.u-tokyo.ac.jp/japanese/index_j.html	
26	第438回講習会「測長の基礎から応用-精密光計測技術」(中央大)	精密工学会	TEL 03-5226-5191 https://www2.jspe.or.jp/form/koshukai/koshukai_form2.html	定員 60名
29～31	第30回結晶工学スクール(2024年)(上智大)	応用物理学会	TEL 03-3828-7723 divisions@jsap.or.jp https://annex.jsap.or.jp/kessho	参加 7.12
29～8.2	第12回対称性・群論トレーニングコース日本語講座(つくば)	日本結晶学会	TEL 029-864-5196 tyoshimi@post.kek.jp http://pfwww.kek.jp/trainingcourse/	
31	第94回技術セミナー「腐食を理解するための電気化学入門」(東京)	腐食防食学会	TEL 03-3815-1161 naito-113-0033@jcorr.or.jp https://www.jcorr.or.jp/	7.24
2024年8月				
1～30	オンデマンド配信：オンライン教育講座「金属製錬の熱力学」(本号521頁)	日本金属学会	TEL 022-223-3685 meeting@jimm.jp	8.8
2	第132回シンポジウム「カーボンニュートラルに対応する自動車へのアルミニウム活用最前線」(芝浦工大)	軽金属学会	TEL 03-3538-0232 https://www.jilm.or.jp/	定員 120名
5	第29回日本磁気学会初等磁気工学講座(講義と演習による基礎講座)(東京+オンライン)	日本磁気学会	TEL 03-5281-0106 msj@bj.wakwak.com https://www.magnetics.jp/education/fs_029/	7.5
6～8	第47回日本磁気学会サマースクール(東京+オンライン)	日本磁気学会	TEL 03-5281-0106 msj@bj.wakwak.com https://www.magnetics.jp/education/ss_047/	7.5
8～9	表面分析実践講座2024～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/	7.11
19～20	金属第64回 鉄鋼第67回 中国四国支部講演大会	中国四国支部・日本鉄鋼協会中国四国支部	tatara@riko.shimane-u.ac.jp	
19～21	第261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)(オンライン)	日本塑性加工学会	http://www.jstp.or.jp	定員 60名
26	日本鉄鋼協会東北支部 地区講演会および若手研究者フォーラム	日本鉄鋼協会東北支部	goro.miyamoto.e8@tohoku.ac.jp	
21～22	第54回初心者のための有限要素法講習会第1部(演習付き)(京都)	日本材料学会	TEL 075-761-5321 jimmu@office.jsms.jp https://www.jsms.jp/	8.5
26～27	オンライン教育講座「結晶学の基礎(オンライン)」(本号520頁)	日本金属学会	TEL 022-223-3685 meeting@jimm.jp https://jimm.jp/event/online/2024/group_002.html	8.19
27	第8回統合的先端研究成果発表会(ハイブリッド開催)	軽金属奨学会	TEL 06-6271-3179 grant@lm-foundation.or.jp http://www.lm-foundation.or.jp/	

開催日	名称・開催地・掲載号	主催	問合せ先	締切
27	熱測定講習会2024(東京理科大)	日本熱測定学会	TEL 03-6310-6831 netsu@mbd.nifty.com https://www.netsu.org/	
29~30	第54回初心者のための有限要素法講習会第2部(演習付き)(神戸)	日本材料学会	TEL 075-761-5321 jim@office.jsms.jp https://www.jsms.jp/	8.5
30	2024茨城講演会(茨城大)	日本機械学会関東支部	ibarakiconf24@jsme.or.jp https://www.jsme.or.jp/conference/ibarakiconf24/index.html	
30	第262回塑性加工技術セミナー「有限要素法 入門セミナー」(日大)	日本塑性加工学会	http://www.jstp.or.jp	定員 50名
2024年9月				
2~3	第18回水素若手研究会(北大)	水素若手研究会	hydrogen.wakate@gmail.com https://sites.google.com/view/hydrogen-wakate/	7.19
5~6	SPring-8 シンポジウム2024(九大+オンライン)	SPring-8 ユーザー 協同体 (SPRUC) 他	TEL 0791-58-2785 sp8sympo2024@spring8.or.jp http://www.spring8.or.jp/ja/science/meetings/2024/sp8sympo2024/	
6~8	2024年度工学教育研究講演会(九大伊都キャンパス)	日本工学教育協会 他	TEL 03-5442-1021 kawakami@jsee.or.jp http://www.jfes.or.jp/	
10~12	第37回秋季シンポジウム(名大)	日本セラミックス協会	TEL 03-3362-5232 fall37@ceramic.or.jp https://fall37.ceramic.or.jp/	
11~13	2024年度高温材料の変形と破壊研究会(日田市)(6号428頁)	研究会No.83	saruta.mamiko@nims.go.jp	7.19
11~13	2024年度 微小領域の力学特性評価とマルチスケールモデリング研究会(日田市)(本号515頁)	研究会No.82	iguchi.rie@nims.go.jp	7.19
12~14	第26回日本感性工学会大会(東京)	日本感性工学会	TEL 03-3666-8000 jske@jske.org https://www.jske.org/taikai/jske26	
13	第358回塑性加工シンポジウム「金型寿命向上に有効な表面処理技術の最前線」(名城大+オンライン)	日本塑性加工学会	http://www.jstp.or.jp	定員 80名
17~19	日本実験力学会2024年度年次講演会(山形大学)	日本実験力学会	TEL 025-368-9310 office-jsem@clg.niigata-u.ac.jp https://jsem.jp/event/Annual24/index.html	事前 7.21
18~19	第36回疲労シンポジウム(函館)	日本材料学会	TEL 075-761-5321 jim@jsms.jp http://fatigue.jsms.jp	講演 6.14
18~20	日本金属学会秋期講演大会(大阪大学豊中キャンパス)(本号503頁)	日本金属学会	TEL 022-223-3685 annualm@jimm.jp	講演 7.5 高校生ポスター 7.12
24	第12回「高校生・高専学生ポスター発表」(オンライン)(本号505頁)			
20	産学連携と人材育成に関するシンポジウム(東大+オンライン)(本号518頁)	東京大学 生産技術研究所 非鉄金属資源循環工学寄付研究部門(JX 金属寄付ユニット)	t-ikeda@iis.u-tokyo.ac.jp http://www.metals-recycling.iis.u-tokyo.ac.jp	
26~27	第16回「役に立つ真空技術入門講座」(大阪公立大+オンライン)	日本表面真空学会 関西支部	TEL 072-247-6162 syoin-yakunitatsu@jvss-kansai.jp https://www.jvss.jp/	定員 200名
26~28	第60回熱測定討論会(京都府立大)	日本熱測定学会	TEL 03-6310-6831 netsu@mbd.nifty.com https://www.netsu.org/60touron/index.html	
27	レアメタル研究会(東大生産技研/ハイブリッド)(本号517頁)	レアメタル研究会	TEL 03-5452-6314 tmiya@iis.u-tokyo.ac.jp https://www.okabe.iis.u-tokyo.ac.jp/japanese/index_j.html	
2024年10月				
1~30	オンデマンド配信 オンライン教育講座「工業材料の応力・歪測定」	日本金属学会	TEL 022-223-3685 meeting@jimm.jp	
2~4	第43回電子材料シンポジウム(EMS-43)(榎原)	電子材料シンポジウム運営・実行委員会	ems43-query@ems.jpn.org http://ems.jpn.org/	
2~4	ADMETA Plus 2024(Advanced Metallization Conference 2024: 33rd Asian Session)(東大+オンライン)	応用物理学会	TEL 03-5821-7120 jimukyoku@admeta.org https://www.admeta.org/	
8~9	第6回EBSD法による損傷評価講習会(京都+オンライン)	日本材料学会	TEL 075-761-5321 jim@office.jsms.jp http://www.jsms.jp/	9.11
8~9	第14回材料の衝撃問題シンポジウム(京都)	日本材料学会	http://www.jsms.jp impact14@office.jsms.jp	講演 6.28
8~10	第10回材料 WEEK(京都)	日本材料学会	TEL 075-761-5321 jim@office.jsms.jp http://www.jsms.jp/	
16, 30	第253・254回西山記念技術講座「最新シミュレーション技術の進歩と鉄鋼業への展開」(大阪)(東京)	日本鉄鋼協会	TEL 03-3669-5933 educact@isij.or.jp https://isij.or.jp/event/event2024/nishiyama253.html	
18~20	第37回計算力学講演会(仙台)	日本機械学会	TEL 03-4335-7610 https://www.jsme.or.jp/conference/cmdconf24/index.html	
20~24	The 10th International Symposium on Surface Science (ISSS-10)(北九州)	日本表面真空学会	TEL 03-3812-0266 iss10@jvss.jp https://www.jvss.jp/conference/iss10/	

開催日	名称・開催地・掲載号	主催	問合せ先	締切
23～24	第52回日本ガスタービン学会定期講演会(高松)	日本ガスタービン学会	TEL 03-3365-0095 gtsj-office@gtsj.or.jp http://www.gtsj.or.jp/	
28～29	オンライン教育講座「マルチスケール材料科学」	日本金属学会	TEL 022-223-3685 meeting@jimm.jp	
29	公開シンポジウム「バイオマテリアル・生体医工学の研究開発戦略」(仙台)	日本学術会議材料工学委員会他	jsb_symposium2024.com	
2024年11月				
5～12.2	オンデマンド配信 オンライン教育講座「構造材料(1)鉄鋼材料編」	日本金属学会	TEL 022-223-3685 meeting@jimm.jp	
6～7	NIMS AWARDシンポジウム2024(つくば)	物質・材料研究機構	TEL 029-859-2240 https://www.nims.go.jp/nims-award-symposium/	
8～10	軽金属学会第147回秋期大会(群馬大)	軽金属学会	https://www.jilm.or.jp/	
8～10	第75回塑性加工連合講演会(琉球大)	日本塑性加工学会	TEL 03-3435-8301 http://www.jstp.jp/	
13～15	第65回高圧討論会(盛岡)	日本高圧力学会	TEL 070-5545-3188 tounonkai65@highpressure.jp http://www.highpressure.jp/new/65forum/	参加事前 9.13
15	レアメタル研究会(東大生産技研/ハイブリッド)(本号517頁)	レアメタル研究会	TEL 03-5452-6314 tmiya@iis.u-tokyo.ac.jp https://www.okabe.iis.u-tokyo.ac.jp/japanese/index_j.html	
15	第26回ミレニアム・サイエンスフォーラム(東京)	ミレニアム・サイエンス・フォーラム	TEL 090-8024-7568 msf@oxinst.com http://www.msforum.jp/	
17～22	15th International Symposium of Atomic Level Characterizations for New Materials and Devices '24(ALC'24)(松江)	日本表面真空学会	TEL 03-3812-0266 office@jvss.jp https://www.jvss.jp/division/mba/alc/alc24/	
21	第75回白石記念講座 データ駆動型材料開発の最前線とその適用例(東京)	日本鉄鋼協会	TEL 03-3669-5933 educact@isij.or.jp https://www.isij.or.jp/event/event2024/shiraishi75.html	
22	日本学術会議公開シンポジウム「サステナブル社会への移行における資源循環の役割」(東京)	日本学術会議 材料工学委員会, 総合工学委員会, 環境学委員会他	TEL 03-5286-3320 info@mmij.or.jp	
25～27	第45回 超音波エレクトロニクス基礎と応用に関するシンポジウム(東京)	超音波エレクトロニクス協会	TEL 03-3259-0766 use-sponsor-app@iuse.or.jp https://www.use-jp.org/	
28～29	オンライン教育講座「構造材料(2)非鉄材料編」	日本金属学会	TEL 022-223-3685 meeting@jimm.jp	
2024年12月				
9～11	第50回固体イオニクス討論会(豊中)	固体イオニクス学会	TEL 022-217-5341 ssij@ssj-j.org https://www.ssi-j.org/symp/ssij50/	
11～13	Asian Thermal Spray Conference 2024(アジア溶射会議2024)(東北大)	日本溶射学会	TEL 06-6722-0096 jtss@jtss.or.jp	
2025年1月				
10	レアメタル研究会(東大生産技研/ハイブリッド)(本号517頁)	レアメタル研究会	TEL 03-5452-6314 tmiya@iis.u-tokyo.ac.jp https://www.okabe.iis.u-tokyo.ac.jp/japanese/index_j.html	
2025年3月				
8～10	日本金属学会春期講演大会(東京都立大学南大沢キャンパス)予定	日本金属学会	TEL 022-223-3685 annualm@jimm.jp	63-11 会告予定
21	レアメタル研究会(東大生産技研/ハイブリッド)(本号517頁)	レアメタル研究会	TEL 03-5452-6314 tmiya@iis.u-tokyo.ac.jp https://www.okabe.iis.u-tokyo.ac.jp/japanese/index_j.html	
2025年9月				
17～19	日本金属学会秋期講演大会(北海道大学)	日本金属学会	TEL 022-223-3685 annualm@jimm.jp	64-5号 会告予定



まてりあ 第63巻 第7号(2024) 発行日 2024年7月1日 定価1,870円(本体1,700円+税10%)送料120円

発行所 公益社団法人日本金属学会

〒980-8544 仙台市青葉区一番町一丁目14-32

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

発行人 谷山 明

印刷所 小宮山印刷工業株式会社

発売所 丸善雄松堂株式会社

〒160-0002 東京都新宿区四谷坂町 10-10

日本金属学会誌投稿の手引き

日本金属学会誌への投稿は、次の要件を満たさなければならない。

- (1) 和文であり、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(日本金属学会誌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) 軍事研究であると判断される内容を含んでいないこと。
- (5) 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。
- (6) 論文の著作権を本会に帰属することに同意すること。
- (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. 日本金属学会誌に投稿可能な論文

(1) 学術論文(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。

Materials Transactionsの Regular Article または Rapid Publication に Web 掲載後2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、和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) レビュー(原則15頁以内)

各専門分野の研究開発の背景や最近の状況およ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。Materials Transactions に Web 掲載後2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、Materials Transactions 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。なお、論文題目中に「レビュー」等を含めることが望ましい。

(3) オーバービュー(原則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。Materials Transactions に Web 掲載後2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、Materials Transactions 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。なお、論文題目中に「オーバービュー」等を含めることが望ましい。

(4) 技術論文(10頁以内)

金属及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、及び関連する事柄の調査、試験結果を報告した原著論文。

Materials Transactions に Web 掲載後2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、和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) 最近の研究動向(10頁以内)

特集企画や受賞論文等を対象にした最近の研究動向について、関連論文を引用し、Graphical Abstract 等を利用しながら、その概要をわかりやすく紹介する論文。

(6) 速報論文(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。

(7) オピニオン(2頁以内)

日本金属学会誌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。

(8) その他理事会で決議した分類

2. 投稿の方法

日本金属学会誌への投稿は <https://data.jim.or.jp/cgi-bin/jim/jentrytest1.cgi> にて原稿を提出する。

英文掲載済み論文の和訳論文の場合には、英文掲載済み論文 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その後に各別紙の表・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[1,2]、あるいは[3-6]のように表し、本文の末尾に一括記載する。著者名、タイトル、誌名はすべて英語表記する(特に決まっていないものはローマ字表記する)。

4. 審査

投稿された論文は会誌編集委員会の独自の審査を経て会誌に掲載される。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・掲載費用は、無料とする。(別刷の寄贈はありません。)

6.2 カラー図掲載を希望する場合は実費を負担する。(1図表当り1,100円税込み)

※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 学術論文の迅速掲載費用:11,000円(税込み)

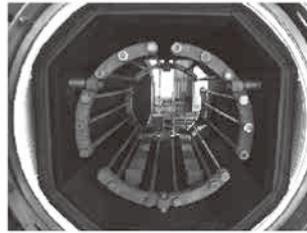
6.4 別刷購入希望の場合は、別途費用を負担する。

高断熱+省エネ

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

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

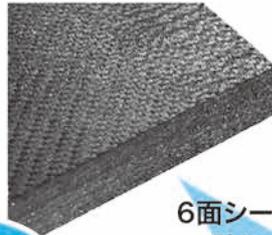
高温真空炉



カーボンヒーター



シール



6面シート
貼り



カーボンフェルト

CO₂削減



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



★ 大同特殊鋼



CMはコチラ!



**研磨機・切断機
期間限定キャンペーン中!!**
詳細はお問い合わせください。



自動研磨機 SCANDIMATIC 33305

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



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

精密切断機 MINICUT 4000

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



試料埋め込み材料、アクセサリ



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

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

カタログおよび価格表は弊社にお問い合わせください

フリツシュ・ジャパン株式会社

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

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

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