

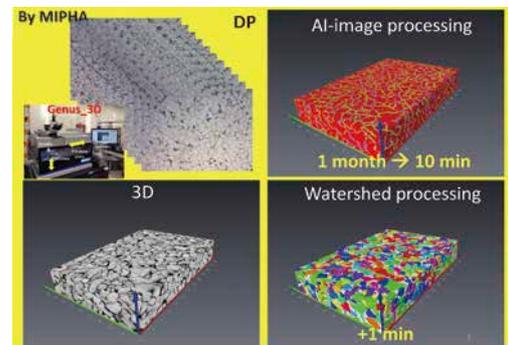
Materia Japan

- 金属素描
- ミニ特集「SIP-MI プロジェクト」
- 入門講座 放射光による工業材料評価
～3. 放射光によるX線分光～
- 秋期講演大会プログラム(別冊付録)

まてりあ

Vol.58 MTERE2 58 (9) 487~540 (2019)

2019 **9**



科研費関連機器・製品申請ガイド

〈構造材料実験機器・製品〉

自動低負荷試料作製システム ISPP-1000

0.5インチまでの小さな試料に対応

小さな部品の研磨での課題は、削り過ぎてしまう、ダレてしまう、面が揃わない、直角・平行が出せない、斜め研磨ができない、人によって仕上がりに差が出ることです。これらの問題を自動化することで、技術者の負担を減らします。



- 研磨量を2 μ m単位のマイクロメータで調節できる
- 研磨時間・回転数・速度・荷重などの条件をレシピ化できる
- ウェイトキャンセラで今までにない低負荷研磨を実現
- 包埋しないで研磨できる試料ホルダ
- 角度・面合わせを調整できるアジャスタ
- 倒立型光学顕微鏡を標準搭載
- 小型省スペース

価格(税別):
2,980,000円~
※オプションは別途です。

株式会社 池上精機

〒223-0057 横浜市港北区新羽町543-1-2F
TEL 045-717-5136 URL: <http://www.ikegamiseiki.co.jp>
e-mail: sales2@ikegamiseiki.co.jp

〈構造材料実験機器・製品〉

自動低負荷試料作製システム ISPP-3000

1.25インチまでの大きな試料に対応

研磨盤サイズを ϕ 230としたことで、1.25インチまでの研磨が可能です。荷重調整、研磨量調整、XYZの3軸で駆動させることを特長としています。



- 多彩なパターンによる研磨条件の作製
XYZの3軸駆動により、花びら・渦巻き・ジグザグ・だ円・直線など、多彩な研磨条件を設定できます。
- VCM(電磁式荷重調整機構)による自動荷重コントロール
荷重のコントロールをVCM方式にすることで、試料に瞬間的にかかる負荷を軽減させることが可能になりました。
- 使いやすいタッチパネルを採用
パネル表示に従って研磨条件を設定できるので、経験が浅い人でも習得しやすい。
- 研磨条件をデータ化できる
研磨条件をメモリに保存することでデータを蓄積・活用できます。

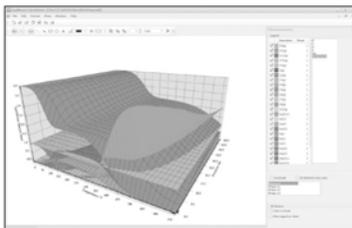
参考価格(税別):
3,980,000円~
※オプションは別途です。

株式会社 池上精機

〒223-0057 横浜市港北区新羽町543-1-2F
TEL 045-717-5136 URL: <http://www.ikegamiseiki.co.jp>
e-mail: sales2@ikegamiseiki.co.jp

〈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. 9.8



定価(税別)
¥650,000(一般)
¥280,000(教育)

システムプラットフォーム:
Windows 7/8/10
(Outotec Research Oy. 製作)

HSC Chemistryトレーニングクラス(講習会)

- 日時** 11月11日 HSC Basicコース
11月12日 Equilibrium Courseコース
11月13日 HSC Sim Basicsコース

会場 コートヤード銀座東武ホテル(マリオット) ロジェドール(B1F)
(東京都中央区銀座 6-14-10 電話 03(3546-0111))

※講師はOutotecのMr. Matti Hietala、日本語の通訳(逐次通訳)付き
※1日終了後に懇親会
※要ラップトップPC(HSC Chemistryのテンポラリーライセンスをトレーニング用に支給)
※参加費用(6万円(500 Euro)/1日あたり/税別)

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〉

28,500件のセラミックス状態図データベース ACerS-NIST Phase Equilibria Diagrams, Version 4.3

定価(税別) ¥160,000
(シングルユーザー)



- 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 7/8/10、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>

科研費関連機器・製品申請ガイド

〈構造材料実験機器・製品〉

透過型電子顕微鏡試料作成装置 『エコポール』 ECO-POL

価格(税込) : 2,500,000円～

薄膜化試料作成装置「エコポール」は、金属材料の微細組織観察に用いる透過型電子顕微鏡において、特に要求される良質で広範囲観察が可能な薄膜試料の作成が可能です。必要最小限の電解液で研磨の出来る試料ホルダーの採用で、廃液は極少量となり多くのお客様から支持を受け活躍しています。



《特徴》

- ・極小電解液量で良質な試料作成
- ・試料表面の画像解析で開孔は勿論、無開孔での自動停止も可能
- ・電解データの記録保存
- ・標準形状以外の試料の電解研磨も可能

株式会社 ケミカル山本

(問い合わせ先) 担当/天野正幸

〒738-0039 広島県廿日市市宮内工業団地1-10

TEL 0829-30-0820 FAX 0829-20-2253

http://chemical-y.co.jp e-mail: h@chemical-y.co.jp

■次回予定

来年4月号には2020年度科学研究費最終選定のための製品ガイドを掲載予定にしております。

2020年度 科研費選定関連 製品ガイド

企画・製作 株式会社 明報社

〒104-0061 東京都中央区銀座7丁目12番4号(友野本社ビル)

TEL 03(3546)1337(代) FAX 03(3546)6306

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

E-mail: info@meihosha.co.jp 担当/後藤

世界の材料科学・工学をリードする第一線の研究者・技術者に向けて

付設展示会 大会プログラム広告 ランチョンセミナー

募集のご案内



付設展示会 (機器・ソフトウェア・書籍)

・1コマ ¥140,000 (税別)

大会プログラム広告

・1色1頁 ¥70,000 (税別)

・1色1/2頁 ¥40,000 (税別)

ランチョンセミナー

・1枠 ¥100,000 (税別)

日本金属学会・講演大会 開催予定

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

2020年秋期 (第167回) 講演大会
9/16 (水) ~ 9/18 (金) (予定)
富山大学

ご出展・広告掲載のお問い合わせ・お申込み

MEIHOSHA
ADVERTISING AGENCY

株式会社 明報社

〒104-0061 東京都中央区銀座七丁目12-4 友野本社ビル

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

E-mail info@meihosha.co.jp 株式会社 明報社 www.meihosha.co.jp

9

2019
Vol.58
No.9

まてりあ

◎会告原稿締切：毎月1日
(翌月号(1日発行)掲載です。)

金属素描 No. 5 クロム(Chromium) 榎木勝徳487

ミニ特集「SIP-MI プロジェクト」

| | |
|--|-----|
| 企画にあたって 出村雅彦 | 488 |
| SIP-MI プロジェクト, これまでとこれから 出村雅彦 小関敏彦 | 489 |
| SIP-MI プロジェクトにおける組織予測システムの開発 小山敏幸 大野宗一 山中晃徳 糟谷 正 塚本 進 | 494 |
| SIP-MI プロジェクトにおける性能予測システムの開発 榎 学 | 498 |
| SIP-MI プロジェクトにおける特性空間分析システムの開発 井上純哉 岡田真人 長尾大道 横田秀夫 足立吉隆 | 503 |
| SIP-MI プロジェクトにおける統合システムの開発 源 聡 門平卓也 伊藤海太 渡邊 誠 | 511 |

入門講座 放射光による工業材料評価～3. 放射光による X 線分光～ 廣沢一郎515
国内の放射光施設で幅広く行われている XAFS の測定法と試料調製法, 及び普及が予想される HAXPES の特徴を紹介。

トピックス 電磁振動プロセスを用いた異方性铸造ネオジム磁石の創製 田村卓也 李 明軍 ...520

はばたく In situ TEM に魅せられて 近藤 隼522

談話室 Diversity for us～社内の女性活躍推進リーダー, 三児の母として～
高橋 円523
梅津理恵先生, 猿橋賞受賞おめでとうございます! 松岡由貴524

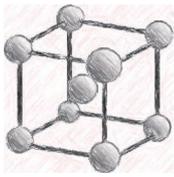
本会記事 会告525 新入会員534
支部行事528 行事カレンダー536
掲示板529 次号予告539
会誌・欧文誌 9 号目次531 金属学会シンポジウム開催案内540
書評533

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】 DP 鋼組織の 3 次元組織再構成と組織抽出(井上純哉, 岡田真人, 長尾大道, 横田秀夫, 足立吉隆 509頁 図10)

表紙デザイン: 北野 玲
複写をご希望の方へ

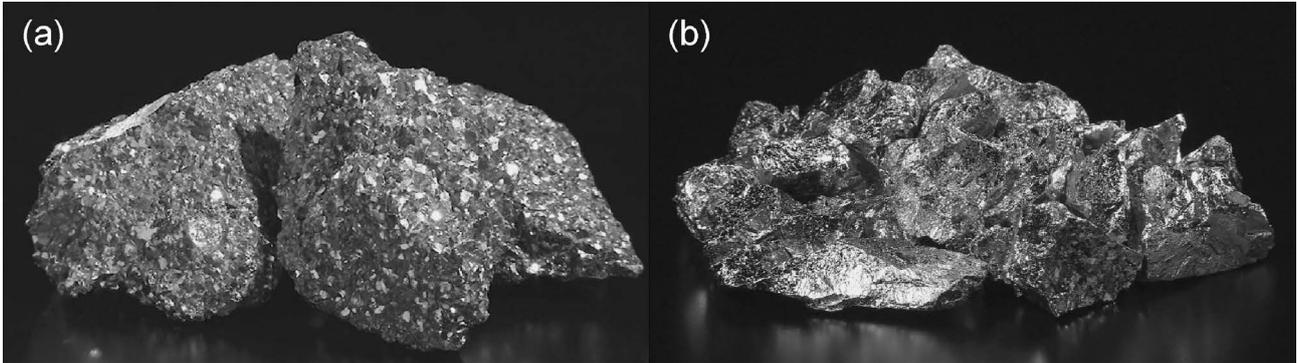
本会は, 本誌掲載著作物の複写に関する権利を一般社団法人学術著作権協会に委託しております。本誌に掲載された著作物の複写をご希望の方は, (一社)学術著作権協会より許諾を受けて下さい。但し, 企業等法人による社内利用目的の複写については, 当該企業等法人が社団法人日本複写権センター((一社)学術著作権協会が社内利用目的の複写に関する権利を再委託している団体)と包括複写許諾契約を締結している場合にあつては, その必要はありません。(社外頒布目的の複写については, 許諾が必要です。)
権利委託先 一般社団法人学術著作権協会
〒107-0052 東京都港区赤坂 9-6-41 乃木坂ビル 3F FAX 03-3475-5619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



シリーズ「金属素描」

No. 5 クロム (Chromium)

東北大学 榎木勝徳



元素名：chromium，原子番号：24，質量数：52.00，電子配置： $[\text{Ar}]3d^54s^1$ ，密度： $7.090 \text{ Mg}\cdot\text{m}^{-3}$ (298 K)，結晶構造：体心立方格子 ($\sim 2180 \text{ K}$)，融点： 2180 K ，沸点： 2944 K ，地殻存在量： $135 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$.⁽¹⁾ 【写真】 (a) 低炭素フェロクロム (約65 mass% Cr)，(b) 高純度金属クロム (純度99.5%以上) (写真提供 JFE マテリアル㈱)

クロムの名前はギリシャ語の色を意味する“chroma”に由来しており、クロムの化合物は美しい色を持つものが多い。例えば、塩化クロム (CrCl_3)：赤紫，酸化クロム (Cr_2O_3)：緑，二クロム酸カリウム (K_2CrO_4)：赤，クロム酸カリウム ($\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$)：黄のように多彩な色を示す。また宝石として知られるルビーの赤色，サファイアの青，エメラルドの緑も微量に存在するクロムに由来する。

クロムはクロム元素を高濃度に含むクロマイト鉱石 ($\text{Fe}_2\text{Cr}_2\text{O}_4$) から採取される。この鉱石はアフリカ大陸の南部，北アメリカ，ロシアのウラル山脈南部，アルプス造山帯に分布する。クロム資源の90%以上は南アフリカとカザフスタンの二カ国に存在し偏在性が高い。日本国内においても，中国山地東部 (鳥取・岡山県境) や北海道日高地方に鉱床が存在するが，1912～1993年までは採掘も行われていたものの現在は閉山しており，国内のクロムの供給はすべて輸入に頼っている⁽²⁾。

クロムは鉄鋼・化学・耐火物の分野で工業的に用いられるが，用途の95%は鉄鋼の分野に利用される。金属クロムの表面は酸化被膜による不動態を形成し，耐腐食性が高い。またクロム量を11～12%以上含有する鉄-クロム合金は高い腐食耐性を示し，大気中でのさびの発生が抑えられる。この材料は，さび/しみ (stain) のない (-less) 鋼としてステンレス (stainless) 鋼と呼ばれ，現代で広く活躍している。ステンレス鋼は金属組織別に分類され，オーステナイト系やマルテンサイト系なども存在するが，鉄-クロム系はフェライト系に

属する。フェライト系の代表合金としては，JIS規格で SUS 430がある。また耐食性や金属光沢を有する特徴から，クロム金属はメッキにも用いられる。メッキ浴には主に六価クロムが用いられるが，六価クロムは毒性が極めて強く，メッキ後の廃液処理が問題となる。そのため，現在では三価クロムのメッキ利用も進められている。

このようにクロムは工業的に広く応用されているが，金属磁性に関する基礎研究の分野においても高い関心が寄せられ，数多くの研究結果が報告されている。金属クロムは $T = 311.5 \text{ K}$ 以下で反強磁性相が現れるが，アップスピンとダウンスピンが交互に配列した単純な反強磁性ではなく，磁気モーメントの大きさが正弦波的に空間変調したスピン密度波と呼ばれる磁気構造をとる。また，この反強磁性は他の遷移金属や不純物を加えることで顕著な変化を示す。このような特徴は，クロム中の電子が作るバンド構造の観点から説明することが可能であり，不純物の存在によりクロムの電子バンドや価電子数が増えるため不純物効果が生じると理解されている⁽³⁾。このように，クロムは金属磁性の理論モデルの試金石としても重要な役割を担っている元素である。

文 献

- (1) 金属データブック改訂4版，日本金属学会，丸善 (2004)。
- (2) 平野英雄：産総研 GSJ 地質ニュース **664** (2009)，37-42。
- (3) 近角聡信ら：磁性体ハンドブック 新装版，朝倉書店 (2006)。

次号 金属なんでもランキング! No. 5 熱伝導率

企画にあたって

出村 雅彦*

本ミニ特集では、内閣府 SIP(戦略的イノベーション創造プログラム)で研究開発が進められてきたマテリアルズインテグレーションについて、プロジェクトの責任者の方々に、成果や今後の取り組みをまとめていただいた。「あたり」編集委員会から、大型のプロジェクトであり読者諸氏の関心も高いのではないかとミニ特集化についてご提案をいただき、プロジェクトのまとまった報告をする機会をいただくことができた。ここに深く感謝するとともに、本企画がそれに応えるものとなっていればと願う次第である。

さて、当該プロジェクトについて述べることは屋上屋を重ねることになるので、ここでは、違った視点で2つほど、このミニ特集をより味わっていただけたいことを願って、サイドストーリーを提供したい。

一つ目は、マテリアルズインテグレーションという用語についてである。その意味するところや狙いについては、小関敏彦先生と筆者が担当した「SIP-MI プロジェクト、これまでとこれから」に述べられているところであるが、「MI」と略した時になかなか混乱を生じさせる状況にある。MI というと、マテリアルズ・インフォマティクスを思い浮かべる読者も多いと思う。筆者も、よく、インフォマティクスとは違うのですかと聞かれることがある。もちろん、違う言葉なので違う概念を表す訳であるが、データ科学の最近の発展を材料開発に取り込んでいくという文脈でいうと志は同じであり、違いを強調してもあまり益がないというのがこれまでの筆者の経験である。あえて分類してみると、物質の探索に変革をもたらすマテリアルズ・インフォマティクスと、材料の実用化を加速するマテリアルズインテグレーションと言えるかもしれない。材料の実用化を加速する際には、プロセスと、これによって様々に変化する材料組織、そして、実際に材料が使用される環境での性能が重要となる。そのため、マテリアルズインテグレーションは材料組織と性能にこだわってプロジェクトが構成されており、それぞれ、小山敏幸先生、榎学先生を筆頭著者として、「組織予測システムの開発」、「性能予測システムの開発」に詳しく説明されている通りである。加えて、様々な手法やデータを自在に活用していくことが必要となるため、専用の統合システムを構築してきた訳であるが、システム的アプローチという特徴については源聡博士らによる「統合システムの開発」に詳しい。一方で、井上純哉先生らによる「特性空間分析システムの開発」で述べられているように、データ科学を積極的に活用していく点も特徴になっており、ここは、まさにマテリアルズ・インフォマティクスと相通ずる点であろう。総じて言えば、どちらの MI もデジタル化で材料研究を大きく変えるものといえ、仲良く MI と略することができることとご理解いただければ幸い

である。MI という新しい流れについては読者各位も様々な思いを持たれていることと想像するが、材料の専門家にとってデジタル化というのは何を意味するのか、本ミニ特集が何がしかの気づきをご提供できたらと願う次第である。

もう一点は、産学官の連携についてである。読者諸氏も日常的に感じられているのではないかと思うが、昨今、企業と大学、国研の間の共同研究が強く求められており、本プロジェクトも例外ではない。そもそも SIP という仕組みの中に産学官連携の促進が謳われており、プロジェクトの組成、運営においても、かなり強く意識されてきたと言えるだろう。ただ、産学官連携そのものは日本が置かれている様々な研究環境から考えて必然的な流れと言えなくもなく、本プロジェクトのみが有する特徴というわけではない。新しい挑戦があったとすると、それは、基盤を構築するタイプの研究開発に複数の企業が参画しているという点ではないかと考える。そのために、必然的に同業種の企業群で構成される、いわば水平型のオープンイノベーションに挑戦することになった訳であるが、この点が本プロジェクトの特徴と言えるかもしれない。ご想像の通り、水平連携はそう簡単ではなく、一にも二にも、高い志と丁寧なコミュニケーションが欠かせない。その意味では、第1期の研究開発ではメンバーに恵まれ、当初の想定以上に産学官連携が上手く運び、本稿で解説されているような様々な成果にたどり着いたと理解している。第2期では企業メンバーも増え、開発した基盤を社会実装していく段階に入った。ここでは、開発してきたシステムやツール群を我が国の共通基盤として利活用できる仕組みづくりが焦眉の急であり、これから「熱心な」議論が交わされることになるだろう。マテリアルズインテグレーションが社会の役に立つものとなるよう、関係各位のさらなる共同作業が期待される。

本企画にあたり、編集委員の榎木勝徳先生には、大変にお世話になりましたこと、この場を借りて厚く御礼申し上げます。また、お忙しい中、執筆をお引き受け下さった先生方に改めて感謝する次第です。



出村雅彦

★★
1995年 東京大学大学院工学研究科修士課程修了
同年 科学技術庁金属材料技術研究所研究員(現 物質・材料研究機構)
2003年 博士(工学), 東京大学
2014年 内閣府総合科学技術・イノベーション会議出向
2015年 東京大学先端科学技術研究センター特任教授
2017年より現職
専門分野: マテリアルズインテグレーション, 材料データ科学, 構造材料, 金属間化合物
◎システムのアプローチとデータ科学を材料研究に活用する試みを進めています。
★★

* 国立研究開発法人 物質・材料研究機構 統合型材料開発・情報基盤部門 (MaDIS); 副部門長(〒305-0044 つくば市並木 1-1)
Preface to Special Issue on SIP Materials Integration Project; Masahiko Demura (National Institute for Materials Science, Tsukuba)
Keywords: materials integration, structural materials, system approach, data scientific approach
2019年7月9日受理 [doi:10.2320/materia.58.488]

SIP-MI プロジェクト,
これまでとこれから

出村 雅彦* 小関 敏彦**

1. はじめに

社会課題の解決に果たす材料の役割はますます大きくなっている。例えば、エネルギー・環境分野では、輸送機器や発電機器のエネルギー効率の向上、CO₂排出量の低減のために、軽く、強く、熱に耐える革新的な構造材料が求められ、要求される性能は年々、高度になっている。厳しい環境で長時間使用される構造材料は、信頼性を担保するための実験検証が必要で、開発は長期に渡る。マイクロ組織という非平衡状態を制御することの難しさも、研究開発が長期化する背景にあるだろう。社会からの要請にいち早く応えるためには、研究開発手法の刷新が求められている。特に、計算機の能力の飛躍的な向上、材料研究における計算科学の充実と広がり、さらに、最近のデータ科学の急速な発展を念頭に置くと、これらサイバー空間の技術を取り込むことで、研究開発を加速していくことが期待される。

このような認識のもと、材料開発をサイバーとフィジカルの融合で行う統合型材料開発システムが内閣府総合科学技術・イノベーション会議によって提案され、Society 5.0を支えるサブシステムとして取り上げられた(統合型材料開発システムについては文献⁽¹⁾⁽²⁾を参考のこと)。これに先立つ形で、内閣府 SIP(戦略的イノベーション創造プログラム)「革新的構造材料」においてマテリアルズインテグレーションというコンセプトが打ち立てられ、基盤となるシステムの開発が組織的に行われてきた。さらに、第2期のSIPでは、逆問題マテリアルズインテグレーションを中心テーマとした「統合型材料開発システムによるマテリアル革命」が課題設定され、材料開発手法の刷新を目指して事業が開始されている。

本稿では、マテリアルズインテグレーションの考え方をまとめ、引き続いて、第1期SIPの成果と第2期SIPにおけ

る研究開発のねらいについて概観する。さらに、国際的な状況を俯瞰した上で、開発するシステムを産学官の連携のためのプラットフォームとする考え方を提案する。

2. マテリアルズインテグレーション(MI)の考え方

材料の研究開発は、プロセス、組織(構造)、特性、性能という4要素の連関をつけることで行われてきた。マテリアルズインテグレーションは、実験、計算、理論、データ科学を融合し、計算機上で材料の4要素の連関をつけ、プロセスから性能までを一気通貫に予測することで、材料開発を加速するという考え方である。インテグレーションという言葉には、全てのメカニズムを理論的に解き明かすことができない中であっても、使えるものは全て使って工学的に役立つ手法を構築するという思いが込められていると、筆者は理解している。例えば、溶接部を含む耐熱部材のクリープ性能(寿命や損傷箇所)を予測したいと考えてみよう。溶接というプロセスには解明できていない点はまだあるものの、母材が経験する熱履歴は現象論的モデルに基づく熱伝導解析によって計算することができる。そして、現象論モデルに含まれるパラメータは、温度計測や溶接部マクロ組織の観察によって得られた実験データに対して合わせ込むことでより妥当な値を推定することができ、例えば、熱影響部のマクロ組織形状の予測に必要なモデルの精度を確保することは十分に可能である。同様に、クリープ現象についても、これまでに提案されているクリープ変形や損傷に関するモデルとデータベースから同定したモデルパラメーターを使用することで、数値シミュレーションによって部材全体のクリープ損傷を計算できる。これらを図1に示すように組み合わせると、全体として、溶接条件から、熱影響部のマクロ組織形状の推定を経て、部材のクリープ損傷を予測できることになる。溶接やクリープ損傷を模擬する数値シミュレーションに、データベ

* 国立研究開発法人 物質・材料研究機構 統合型材料開発・情報基盤部門(MaDIS), 副部門長(〒305-0044 つくば市並木1-1)

** 東京大学教授(現 京都先端科学大学教授)

SIP-Materials Integration Projects; Masahiko Demura*, Toshihiko Koseki**(*Research & Services Division of Materials Data and Integrated System (MaDIS), National Institute for Materials Science, Tsukuba. **The University of Tokyo, Tokyo (Present: Kyoto University of Advanced Science, Kyoto))

Keywords: materials integration, structural materials, integrated computational materials engineering, modules, workflow, data schema, systems approach, data science, inverse design

2019年4月23日受理[doi:10.2320/materia.58.489]

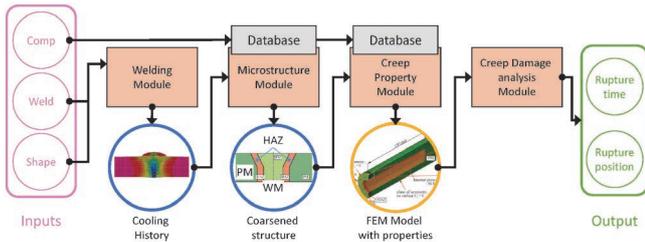


図1 溶接部を含む耐熱構造部材のクリープ損傷性能を予測するためのワークフロー。

スからモデルパラメータを抽出するためのデータ科学手法を組み合わせるなど、様々な手法を自在に統合(インテグレート)することで、プロセスから性能までを予測することができるようになる。これが、マテリアルズインテグレーションの根幹にある考え方である。

マテリアルズインテグレーションの特徴はシステム的なアプローチと予測の実効性を上げるためのデータ科学活用にある。システム的なアプローチによって、対象とする材料開発の中で、どの部分の基礎的な検討が急がれるのかという見通しを持つことができる。これは、基礎研究を担当するセクター(大学・国研等)と材料の実用化を担当するセクター(企業)との有機的な連携に役立つ。また、第2の特徴であるデータ科学の活用によって、貴重で高コストな実験から生まれるデータを有効に、また、合理的に活用する道が開かれる。

3. 第1期SIP「革新的構造材料」における研究開発の概要

SIP「革新的構造材料」の研究開発項目としてマテリアルズインテグレーションが設定され、2014年度から5年間、取り組まれた(プログラムの詳細は、JSTのホームページ⁽³⁾を参考のこと)。図2に本プロジェクトの概要をまとめた。東京大学及び物質・材料研究機構(NIMS)を中心に14の産学官の機関が参画して行われてきた⁽⁴⁾。マテリアルズインテグレーションを具体的に実現するためには、様々な手法をモジュールとして計算機上で実装し、これらを自在につなぎ合わせるための仕組みが必要という仮説のもと、材料開発専用のシステムが開発されることになった。また、構造材料にとって組織が重要な要になることと、疲労やクリープ等の時間に依存する性能を重視する観点から、組織予測と性能予測が研究開発テーマとして設定された。さらに、データ科学の活用を加え、以下の4つのテーマ構成・ユニット体制で開発を行ってきた。すなわち、組織予測、性能予測、特性空間分析(データ科学活用)、統合システムである(図2)。

開発を進めるにあたり、鉄鋼溶接部の疲労、クリープ、脆性破壊、水素脆化が例題として設定され、さらに、これらの成果がアルミニウム合金、チタン合金等に展開された。鉄鋼は様々な変態・析出を高度に組み合わせた組織制御によって性能が引き出されている点で、最も難しい対象であり、これが取り扱える枠組みであれば、広範囲の材料に展開できることが期待できる。また、溶接プロセスは様々な熱サイクル中

マテリアルズインテグレーション (MI) システム1.0の開発

- 内閣府SIP「革新的構造材料」(2014~2018年度)の一領域として実施
- 参画機関: 東京大学、NIMS、JFEスチール(株)、(株)神戸製鋼所、(株)IHI、(株)UACJ、北海道大学、名古屋大学、東京農工大学、鹿児島大学、帝京大学、東洋大学、青山学院大学、理化学研究所
- 様々な材料、プロセスに対応する汎用・総合的なシステムの構築
- 汎用的な展開が見込める高強度鋼溶接部を例題として概念実証

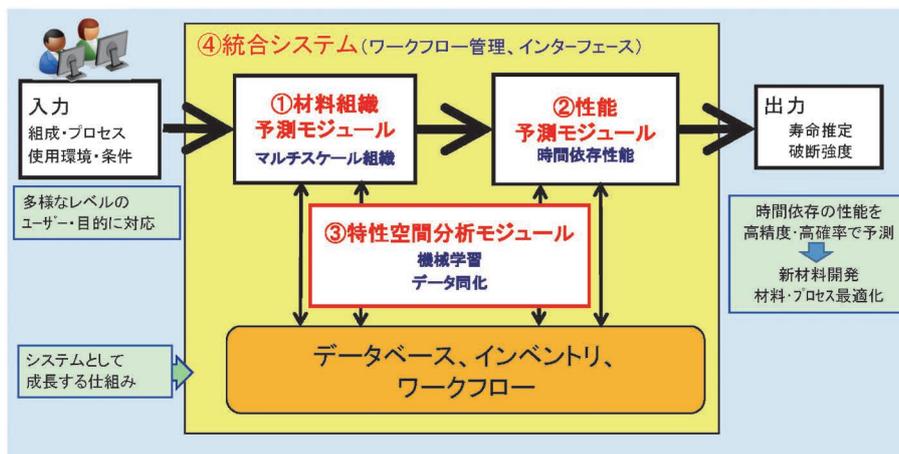


図2 第1期SIP「革新的構造材料」におけるマテリアルズインテグレーションシステムの開発プロジェクトの概要。

の凝固，変態，組織形成を含むため，この問題を扱う枠組みであれば金属材料における熱処理プロセス全般を扱うことができる．このように，汎用的に使用できることを念頭に置きつつ，具体的な例題によって概念実証(proof of concept)することが，第1期SIPにおける開発の目標であった．

実質的に4年半の研究開発の成果として，統合システムが完成し，モジュールを自在に接続するための仕組みが整えられた．組織予測や性能予測のためのモジュールが120個以上開発され，これらをつなぐワークフローも100以上が，統合システム(通称 Mint システム)に実装されている．特性空間分析においては，データ同化やモデル選択といった重要なデータ科学手法の開発が進み，その成果は Mint システムから利用できるライブラリーとして実装されている．また，鉄鋼材料を中心として発刊された各種のデータシートを収集，デジタル化し，20000点以上のデータポイントを有するデータベースを構築した．これらの成果物を用いることで，プロセスから性能を一貫予測できることが例題を通して示され，マテリアルズインテグレーションの概念実証という目標が達成されたと言える．各テーマにおける成果については，本ミニ特集に収録されている記事を参考にしてもらいたい．

4. 第2期SIP「統合型材料開発システムによるマテリアル革命」における研究開発

Mint システムが1.0として完成を迎え，マテリアルズインテグレーションの概念実証が達成されたことを受け，社会実装に向けた研究開発というステージに進むことができるようになった．ここでいう社会実装とは企業の研究開発において

マテリアルズインテグレーションが活用されることであり，これによって社会を変革する革新的な材料が次々と開発されるという将来像を目指すことになる．このような背景のもと，第2期SIPにおいて「統合型材料開発システムによるマテリアル革命」(以下，「マテリアル革命」という.)が課題として設定された．2018年11月には研究開発課題および研究責任者が採択され，2022年度末までの5年間の予定で研究開発が開始された⁽⁵⁾．

社会実装の鍵となるのが，逆問題への対応と先端構造材料・プロセスへの展開である．まず，逆問題への対応について説明する．企業においては，社会(材料ユーザー)からの要請に応じて目標となる性能要求が設定され，これを達成できる新しい材料やプロセスを研究開発するという，まさしく逆問題に常に取り組んでいる．つまり，設定した性能目標から，最適な材料・プロセスを導き出すための道具が求められていると言える．従って，マテリアルズインテグレーションが企業の研究開発の現場で活用されていくためには，日々取り組まれている逆問題に役立つことを実証していく必要がある．そのような認識に立って，逆問題マテリアルズインテグレーションの開発が課題として設定された．

図3に逆問題マテリアルズインテグレーションの開発コンセプトを示す．従来は実験で検証を行っていたために試行錯誤の回数が制限され，そのために試行錯誤の範囲も限定的なものとならざるを得なかった．マテリアルズインテグレーションを活用した新しい開発手法では，試行錯誤を実験から計算機上へと置き換え，試行錯誤のコストを大幅に低減する．その上で，さらに，データ科学を活用して，効率的かつ網羅的な試行錯誤によって，これまで見落としていたより最適な

第2期SIP「マテリアル革命」: 逆問題MIで材料開発手法を刷新

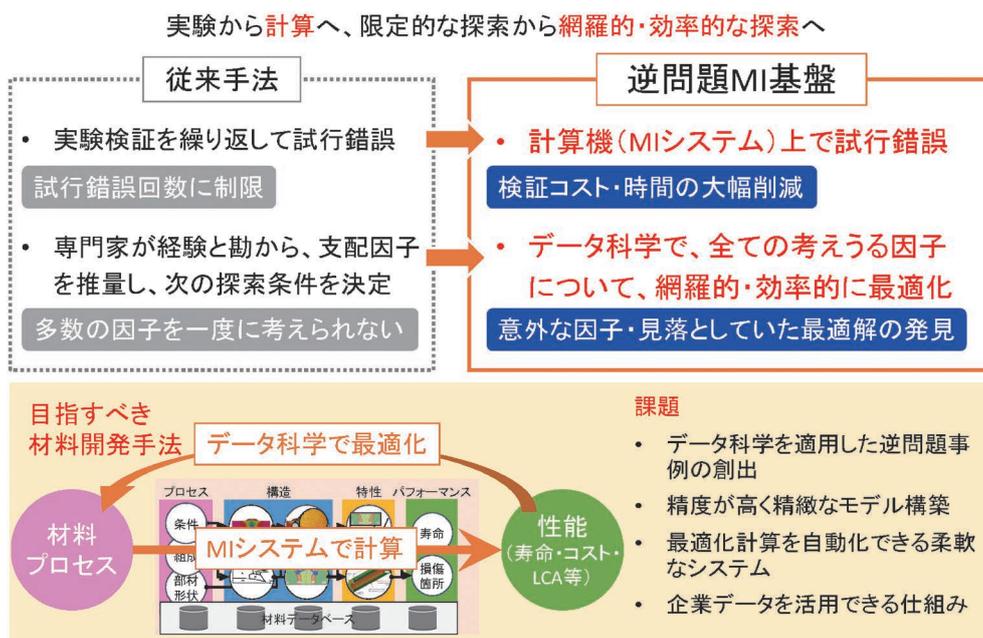


図3 第2期SIPにおける逆問題マテリアルズインテグレーションの考え方.

材料やプロセスをいち早く提案できるようになる。

社会実装する上でもう一つ重要な点は、適用できる材料・プロセスの拡大である。Mintシステムそのものは汎用的に作られているが、実際に様々な材料・プロセスの問題を解いていくためには、その対象を取り扱うためのモジュール、ワークフローの開発が必要となる。適用していく対象としては、我が国が材料上の強みを持つものであって、かつ、材料開発期間が長期化する傾向のある航空機や発電向けの先端的な構造材料及びプロセスを取り上げている。金属系では、航空機エンジンや発電向けタービンに使用される部材に粉末プロセスの適用が始まりつつあることに注目し、耐熱金属材料の粉末プロセスに対応できる逆問題マテリアルズインテグレーションを開発する。具体的には、三次元積層造形プロセス、粉末冶金・鍛造プロセス等である。第1期で開発した鉄鋼向けの数多くのモジュールを有効活用することで、十分に、これらのプロセスに対応できるものと考えている。これに加え、我が国が強みを持つ炭素繊維強化プラスチック(CFRP)についても、マテリアルズインテグレーション技術を開発することになっている。CFRPでは、量子化学計算から、高分子の相分離というメソスケール計算、さらには、繊維を含めた構造体の力学特性に関する予測技術などのシーズ技術を活かして、分子レベルから構造体までをつないで、CFRPの開発に役立つ計算ツール群を構築していく。

逆問題マテリアルズインテグレーションの開発における課題を4つ指摘しておきたい(図3)。まず、データ科学を適用した逆問題事例の創出が重要となる。最適化したい材料・プロセスの因子から目的とする性能までを予測するための順方向計算のワークフローをできるだけ早く通し、データ科学の様々な手法の適用を急ぐ必要がある。次に、精度が高く精緻なモデル構築が重要となる。考慮していない因子は最適化の対象にはできないので、考える因子を可能な限り取り込んだモデリングが望まれる。さらに、最適化計算を自動化できるようにMintシステムを改良する必要がある。また、企業内部で独自にデータを活用できる仕組みも重要であり、ある逆問題を解くときに必要な標準的なデータの記述の仕方を設計することで、企業内データの利活用が促進されると考えている。

なお、「マテリアル革命」全体の構成は、逆問題マテリアルズインテグレーションを開発するA領域、CFRPに展開するB領域、耐熱金属・セラミックスに展開するC領域となっている⁽⁶⁾。A領域は、NIMSと東京大学を中心に28の産学官の機関が連携して開発を行う。

5. 世界の状況とMintシステムの位置付け

サイバー空間で材料を開発していこうという動きは、世界的にも活発である。実際の複雑な材料問題(実課題)に対応するためにマルチスケール・マルチフィジックスにどう取り組むかという観点を縦軸として、世界的な取り組みを整理したものが図4である。SIPで開発したMintシステムは、様々

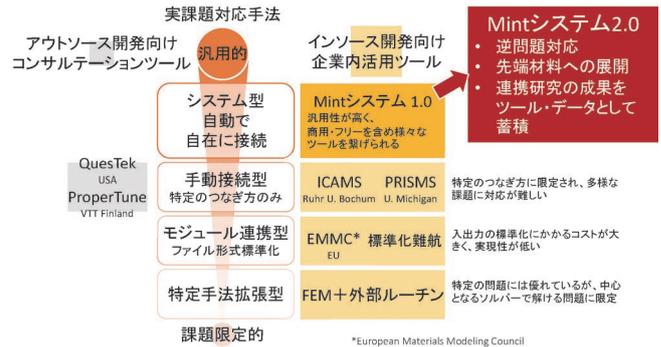


図4 材料の実問題に対応するための計算材料学的なアプローチの国際的な比較。

な計算手法をモジュールとして取り扱った上で、それぞれを接続して複雑な材料問題に対応するという考え方に立っている。類似の取り組みとして、米国ミシガン大学のPRISMS⁽⁷⁾、ドイツ・ルール大学ボーフムのICAMS⁽⁸⁾、米国ペンチャーのQuesTeK⁽⁹⁾、フィンランドの研究機関VTTで開発されているProperTune⁽¹⁰⁾などがある。PRISMSやICAMSは用意されている特定のつながり方に限定され、自在な接続は企図されていない。そのため、それぞれのモジュールの接続は手動である。QuesTekとProperTuneは一般ユーザーの使用が想定されておらず、実際にどのような仕組みで複数のモジュールの接続がなされているかは不明である。ただし、基本的に材料開発や材料課題の解決を請け負うための自社内、組織内で使用するツールとして開発されていることから考えると、自動的な接続を実現するシステムをコストをかけて開発する動機付けは乏しく、開発者がその時の必要に応じて手動で接続しているものと推察される。この他に、EUのコミュニティ(EMMC, European Materials Modeling Council⁽¹¹⁾)を中心として、ファイル形式を標準化してモジュール間のデータの受け渡しを容易にするという発想の活動が行われている。実際には、対象とする材料課題ごとに扱うデータの種類が変わるため一般化が難しく、なかなか標準化が進んでいない。これらモジュール同士を対等な関係で接続していく発想の他に、特定のソルバーを中心において、これに対してサブルーチンを接続し、複雑な材料課題に対応するという戦略もある。具体的には、有限要素解析によるマクロな力学計算を中心に据え、マイクロ組織を計算するメソスケールのサブルーチンを組み込むことで、例えば、鍛造による材質予測を実現するような試みである。これは、特定の問題を解決する方法としては優れたアプローチであり、開発や計算の効率も良いと考えられる。ただし、中心とする計算手法によって解ける問題が限定されるため、汎用性が高いとは言い難い。このように俯瞰してみると、Mintシステムは、自動で自在に接続できる仕組みを実現しているという点で、世界的にみてユニークであると言える。

SIP-MI プロジェクトにおける
組織予測システムの開発

小山敏幸* 大野宗一** 山中晃徳***
糟谷 正**** 塚本 進*****

1. はじめに

本稿では、SIP-MI プロジェクト⁽¹⁾において構築された、鉄鋼材料における溶接部の組織形成シミュレーションシステムについて紹介させていただきたい。特に今回、マテリアルズインテグレーション(以後、MI と記す)の視点に立ってシミュレーションのシステム設計を行ったので、本稿ではこの部分に焦点をあてて説明する。具体的な計算システムや計算理論の詳細については、当該システムのマニュアルや関連論文等(後述)を参照していただきたい。

さて本計算では、鉄鋼材料における溶接部の組織形成を対象に、フェーズフィールド(PF)法⁽²⁾を中心とした一連の組織形成シミュレーション手法を用いて、組織形態形成を計算するシステムの構築を行った。鉄鋼材料の内部組織形態形成のシミュレーションや微視的メカニズム解明に関する研究は、周知のように各国において盛んに進められており、現在も新しい知見が絶えることがない⁽³⁾。これは鉄鋼材料の組織形成が、数ある金属材料の中でも桁外れに複雑かつ多様性を有しているためである。まず今回のシステム構築の基本コンセプト(MI の考え方)として、必要以上に精緻なメカニズムに立ち入ることはせず、将来に渡って拡大する鉄鋼材料の研究知見を容易に取り入れることができるような、ある意味、ロバストな集約システムを目指して設計を行った。具体的な指針は以下のようにまとめられる。

- (I) 近年の計算熱力学⁽⁴⁾の知見を反映できる形式とする。
CALPHAD 法⁽⁵⁾および熱力学データベースの発展はめざましく、この分野と本システムとの連携は必

須であるとした。ただし、単純に PF シミュレーションと CALPHAD 法を連携させると、計算量の急拡大が生じ、実用上計算不可能となるので、これを回避する手法⁽⁶⁾をいくつか考案した(この部分の改良は、現在も進展中である)。

- (II) 組織形成については、PF 法を基本計算手法としてシステムを整備する。ただし、PF 法を対象としたプロジェクトではないため、必要に応じて、PF 法以外の他の組織シミュレーション手法も考慮した。
(III) 優れた組織形成シミュレーションシステムを構築することが目的ではなく、優れたインテグレーションシステムを構築することが MI の目的である。したがって、これまでの溶接現象全体にかかる材料科学・工学的知見を組織形成シミュレーションシステムに集約でき、かつ将来的に成長できるシステム設計とした。

上記(III)が今回のプロジェクトの特徴であろう。従来の多くのプロジェクトでは、シミュレーションシステム自身の高度化が目的となるので、システム性能は、計算によって、どれだけ現実の現象を精度よく計算できるかによって評価される。材料組織形成の研究を対象とした場合、この評価軸は通常困難を極める。平衡状態図ですら、世界中の協力の下、過去50年をかけて、実験とデータベース化を繰り返し、ようやく最近になって実用化してきたことを考えると、普遍的に組織形成を自在に計算するシステムが一朝一夕に実現することはありえない。現在、PF 法の分野を中心に、材料、相変態現象、およびプロセス条件を固定し、かつ限られた仮定の範囲内で、ようやく計算が可能になる分野が1つ1つ増え

* 名古屋大学 大学院工学研究科 材料デザイン工学専攻; 教授(〒464-8603 名古屋市千種区不老町)

** 北海道大学 工学研究院 材料科学部門; 教授

*** 東京農工大学 大学院工学府 機械システム工学専攻; 准教授

**** 東京大学 大学院工学系研究科 マテリアル工学専攻; 上席研究員

***** 物質・材料研究機構 統合型材料開発・情報基盤部門; リサーチアドバイザー

Development of Microstructure Simulation System in SIP-Materials Integration Projects; Toshiyuki Koyama*, Munekazu Ohno**, Akinori Yamanaka***, Tadashi Kasuya**** and Susumu Tsukamoto***** (*Department of Materials Design Innovation Engineering, Graduate School of Engineering, Nagoya University, Nagoya. **Division of Materials Science and Engineering, Graduate School of Engineering, Hokkaido University, Sapporo. ***Department of Mechanical Systems Engineering, Institute of Engineering, Tokyo University of Agriculture and Technology, Tokyo. ****The Department of Materials Engineering, School of Engineering, the University of Tokyo, Tokyo. *****Research and Services Division of Materials Data and Integrated System (MaDIS), National Institute for Materials Science (NIMS), Tsukuba)

Keywords: *materials integration, computational materials science, phase transformation, microstructure, phase-Field method, CALPHAD method, welding, CCT Diagram*

2019年5月20日受理[doi:10.2320/materia.58.494]

始めて来た所である⁽⁷⁾。一方、個々のシミュレーションの高度化は脇において、工学的な観点からは、使える部分からとにかくシステム化し、足らない部分は、周辺の材料学的知見で補って、全体的な統合システムを整備することは重要であろう。特に近年、機械学習による逆問題の活用⁽⁸⁾が材料工学分野でも一般化し始めたので、不明なパラメータやプロセス条件を含んだ統合システムの価値が再認識されている。なぜならば逆問題にて、統合システム内の不確かなパラメータやプロセス条件を決めることが可能になってきたからである。以下では、これらの思想の下、組織シミュレーションがどのように構築されたかについて説明する。

2. 計算対象の組織形成

本研究で計算対象とした、鉄鋼材料の溶接時に現れる組織形成⁽⁹⁾⁻⁽¹¹⁾は、(1)凝固によるデンドライト組織形成、(2)オーステナイト(γ)多結晶粒組織形成、(3)フェライト(α)析出組織形成(アロトリオモルフフェライト、フェライトサイドプレート)、および(4)硬質相組織形成(パーライト変態組織、ベイナイト変態組織)である。なおマルテンサイトに関しては、最後に残存した γ 相がマルテンサイトに移行すると想定し、マルテンサイト自体の形成過程は本システムの対象外とした。

まず上記の(1)~(4)は独立した計算モジュールとして開発され、個別に計算を行うことができるように設計した。さらに(2)~(4)については、同一の部材を対象に、溶接時における温度履歴が共通となる条件にて、一連の組織形成を解析できるシステム設計とした。なお(1)は、現在、世界的に大きく進展している“定量的フェーズフィールド法”に基づくデンドライト成長解析の基本モデル⁽¹²⁾を、直接適用したモジュールであり、計算手法・解析手順等はすでに広く知られているので、以下では、特に後者の(2)~(4)の組織形成の計算システム設計に関して重点的に説明させていただく。

3. 連続冷却変態線図(CCT線図)と組織形成シミュレーションとの連携

本システムの最大の特徴は、連続冷却変態線図(CCT線図)と組織形成シミュレーションの連携である。鉄鋼材料の溶接組織計算のボトルネックは、変態の開始点(温度・時間・場所)の設定であろう。これらを、理論・シミュレーションから推定することは、現代の最先端の理論をもってしても困難である。他方、本SIP-MIプロジェクトにおいて、機械学習を活用することにより、CCT線図が系統的に入手できる環境が整えられた⁽¹³⁾。CCT線図の元データについては、SIP-MIプロジェクト内で測定した実験データに加え、物質・材料研究機構におけるCCT線図データベース⁽¹⁴⁾⁻⁽¹⁶⁾、および日本鉄鋼協会溶接CCT図集⁽¹⁷⁾が集約され、これらCCT線図自体を機械学習することにより、鋼材成分を入力すると、各相の変態開始曲線、冷却終了後の各相

体積分率、および硬さが出力されるCCT線図予測モジュールが製作された(実際のCCT線図予測モジュールでは、降伏点、引張り強度、および応力-ひずみ曲線も同時に出力される)。したがって、本システムでは、CCT線図が既知である前提で、各種の組織形成モジュールを連結させていく方法論を採用した。つまり溶接条件から、部材の各位置における温度履歴がわかり、既知であるCCT線図上で、その温度履歴をたどることによって、各種変態の開始点(温度・時間)が決まる。あとはこのタイミングにあわせて、(2)~(4)の組織形成モジュールを並べれば、一連の組織形成を系統的に解析できることになる。このように設計することによって、従来、計算において設定が極めて困難であった、各種の変態の開始・終了をどこで切り替えればよいかの問題が解消された。CCT線図と機械学習が結びつき、CCT線図を前提とした組織形成シミュレーションが可能となった点は、今後、多方面に大きな影響を及ぼすと期待される。

4. 溶接における組織形成シミュレーション

以下、一連の計算手順および計算例について説明する。なお温度場は3次元の計算で、組織形成は2次元の計算である(MI統合システムにおいて、 γ 多結晶組織形成に関しては、3次元計算のモジュールも整備されている点を記しておく)。また細かい設定に関しては、MI統合システムにおいて、各種のマニュアルをモジュール別に作成してあるので、そちらを参照されたい。

(1) γ 多結晶粒組織形成シミュレーション

三次元の温度場の設定については、Rosenthalの式⁽⁹⁾⁻⁽¹¹⁾を用いた。溶接条件として、部材の各種定数(融点、 A_{c3} 温度、熱伝導率、熱拡散係数、初期温度、熱源の移動速度、入熱量など)を入力すると、部材全体の各位置における温度履歴がわかる。この温度履歴にあわせて、まず γ 多結晶組織形成の計算を行った例を図1に示す⁽¹⁸⁾。図の左上頂点が点熱源の位置であり、熔融池が存在した領域において γ 相は柱状晶となり、溶接の熱影響部(HAZ部)では、局所的な温度場に依存して、熔融池の縁に近いほど、 γ 結晶粒サイズが大きくなっていることがわかる。この組織が計算された後、本システムのユーザーは、その後の冷却過程において析出・変態を計算したい場所を選択する(フェライト析出、パーライト変態、およびベイナイト変態については、解像度および計算速度の制約から、上記領域の一部分を切り出して計算を行うため)。たとえば、図1の X_1 位置の四角領域を選択したとしよう。図の上面が部材表層になるので、この位置は、表層から2mmの位置である(以後、この領域を“切り出し領域”と記す)。このように切り出し領域を固定すると、Rosenthalの式から、その位置における温度は時間の関数として入手でき、その情報をCCT線図上に記入すると、この切り出し領域において、どの温度・時間で、どの析出や相変態が開始・終了するかがわかる(切り出し領域の温度も、当然ながら既

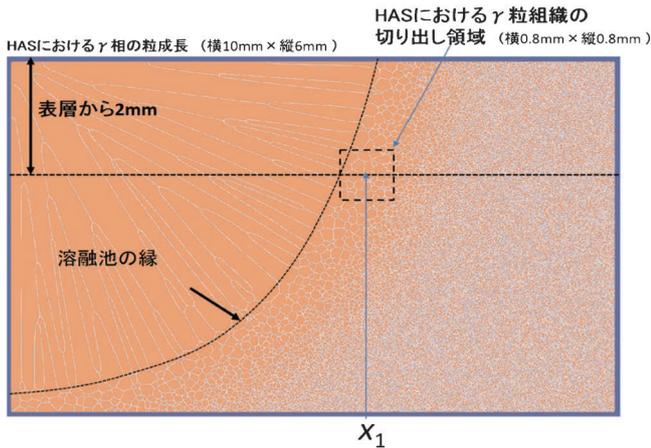


図1 γ 多結晶組織形成シミュレーション. 溶融池部分では凝固による柱状晶形成も計算されている.

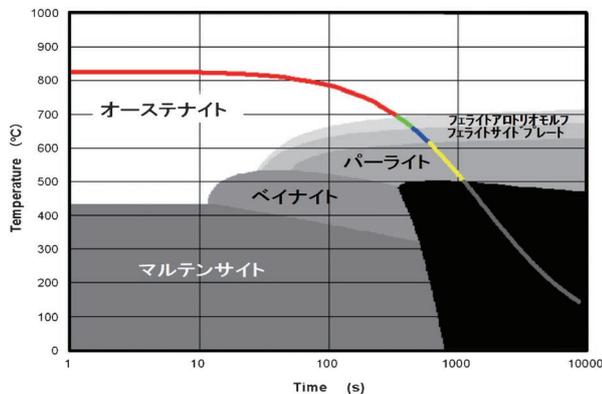


図2 CCT線図上でのRosenthalの式に従う温度履歴の計算結果.

知である). 図2は, 実験的に決定されたFe-0.15C-1.5Mn鋼のCCT線図上に, 切り出し領域の温度履歴(図中の曲線で, Rosenthalの式の計算結果である)を記入した例であり, この図から, 全ての析出・変態の開始温度(時間)および終了温度(時間)の情報がわかる.

(2) α 相の析出シミュレーション

切り出し領域の γ 多結晶組織形態が, そのまま α 相析出計算の境界条件となる. 切り出し領域の温度変化は, Rosenthalの式から計算され, α 相析出の開始温度(時間)と終了温度(時間)は, CCT線図から得られる. 図3に γ 多結晶組織から α 相の析出を計算した例を示す. (a)が図1から切り出された初期組織例で, (b)が α 相析出の計算結果である⁽¹⁹⁾. α 相析出の初期では, 温度が高く, α 相の析出形態は, 粒界アロトリオモルフの形態をとる(図(b)の青線まで). その後の温度低下に伴いサイドプレート状の組織形態へと遷移する(アロトリオモルフの計算にはPF法を, サイドプレート形成には, セルラーオートマトン法⁽²⁰⁾を活用している). この遷移する温度(時間)の切り替えも, 図2のCCT線図の情報を活用する点に注意されたい. 従来, この

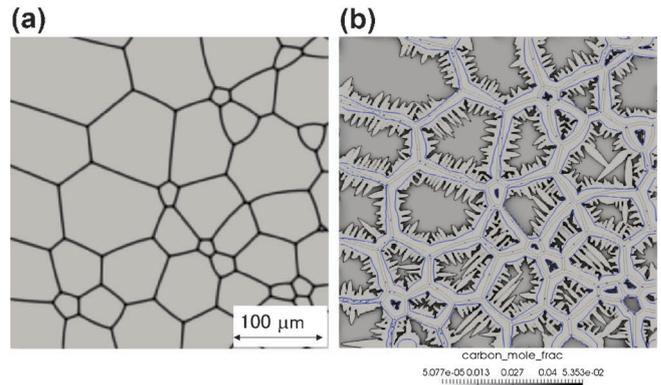


図3 α 相析出のシミュレーション. アロトリオモルフフェライトおよびフェライトサイドプレートの析出形態が計算されている.

部分の遷移に関して, 研究者によって種々のモデル・仮定が存在し, 汎用的な計算システム構築の大きな障害となっていた. 個々の相変態のメカニズムの本質を究めることは, もちろん重要な学術課題であるが, 本アプローチのように, CCT線図やシミュレーションモデルなどの種々の知見を縦横に組み合わせ, 鉄鋼材料分野の知見をインテグレートして, 現象を大枠から把握する方法論は, 鉄鋼材料に代表される複雑・多様な材料開発において実用的な優位性を有すると考える次第である.

(3) 硬質相形成のシミュレーション

図4と図5は, それぞれパーライト変態とベイナイト変態の計算例である. (a)の初期組織は4(2)にて説明した α 相析出組織で, (b)は α 相析出で残存した γ 相からのパーライトおよびベイナイト変態を計算した結果である(赤系の色部分が, パーライトおよびベイナイトに対応する). 図4は冷却速度が遅い場合で, すでに α 相の成長が顕著であり, かつ特に炭素が濃化した γ 相領域((a)の黒い部分)においてパーライト変態が生じていることがわかる. また図5は冷却速度が速い場合で, α 析出は短時間で終了し, 残存した γ 相領域全体がベイナイト変態した結果となっている.

パーライトおよびベイナイトは, フェライト相およびセメントタイト相から構成される組織であるが, 本計算では, パーライト(もしくはベイナイト)を, 一つの単一相のように仮定して計算を行った(マルチフェーズフィールド法⁽²⁾を基本計算手法として採用). パーライト変態およびベイナイト変態自体を対象としたPFシミュレーションは, 現在も新モデル⁽²¹⁾⁽²²⁾が提案され続けているため, あえて個別の変態機構の詳細に立ち入らずに, パーライトコロニーやベイナイトバリエーションの単一ドメイン形成のダイナミクスに焦点を絞ったモデル化した. ただし4(2)の α 析出シミュレーションにおいて, 組織内における溶質元素の濃度分布情報が得られるので, パーライト変態とベイナイト変態の計算では, これに起因する局所的な化学的駆動力の影響を考慮できるようにモデル化している. 一見, 簡易モデルではあるが, 個別の詳細モ

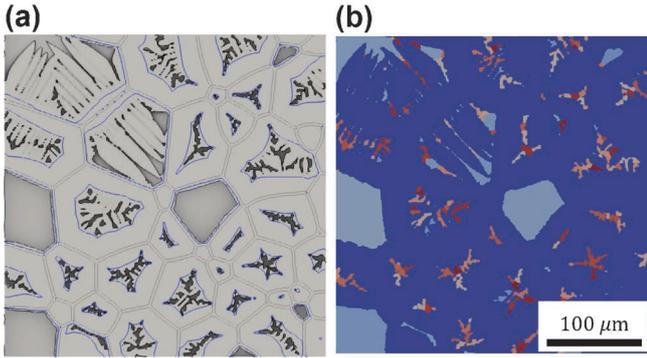


図4 パーライト変態シミュレーション. α析出で炭素が濃化したγ相領域において、パーライト変態が生じている。

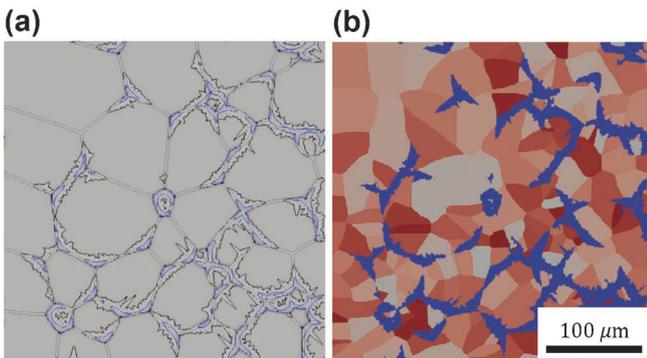


図5 ベイナイト変態シミュレーション. α析出で残存したγ相領域全体が、ベイナイト変態する結果が得られている。

デルの発展情報を、変態の駆動力やドメイン移動の緩和係数項に取り込むことができる仕様を採用したので、今後の当該分野の進展に継続的に対応することができるモデルとなっている点を強調しておきたい。

5. まとめ

本研究では、MIの考え方を意識したシステム設計を行った。組織形成の研究や優れたシミュレーションの追求だけでなく、実用的観点、学術的観点、各種の材料学的知見、および各種のノウハウを、材料工学的センスでインテグレートし、今後の発展の“伸び代”も見据えながら、成長しつづけることのできるシステムの構築を目指した。特に本稿で示した方法論：CCT線図とPFシミュレーションの連携や、PF法とセルラーオートマトンの連携等は、その試みの一つである。なお、本計算のアウトプットは組織形態情報(濃度場、結晶方位場、PFなど)であり、これらは、画像としてもデータ化されるので、各種の画像処理技術を軸足とした機械学習⁽²³⁾に(すなわち、本プロジェクトにおける“特性空間システム”に)、そのまま受け渡すことができる点を記しておく。

本研究は、内閣府総合科学技術・イノベーション会議の戦

略的イノベーション創造プログラム(SIP)「革新的構造材料」(管理法人：JST)によって実施されました。ここに感謝申し上げます。

文 献

- (1) <http://www.jst.go.jp/sip/k03/sm4i/project/project-d1.html>, (SIP-MIプロジェクトHP, 2019年5月現在)。
- (2) 小山敏幸, 高木知弘: フェーズフィールド法入門, 丸善, (2013)。
- (3) 小山敏幸: ふえらむ, **19**(2014), 635-639。
- (4) 阿部太一: 材料設計計算工学 計算熱力学編, 内田老鶴圃, (2011)。
- (5) 阿部太一: カルファド法による状態図計算—TDBファイル作成で学ぶ材, 内田老鶴圃, (2015)。
- (6) 野本祐春, 若目田寛, 瀬川正仁, 山中晃徳, 小山敏幸, 高木知弘: 日本機械学会第31回計算力学講演会論文集, (2018), 066。
- (7) X. Dong, H. Xing, K. Weng and H. Zhao: J. Iron Steel Res. Int., **24**(2017), 865-878。
- (8) 小山敏幸: ふえらむ, **23**(2018), 680-686。
- (9) 松田福久: 溶接冶金学, 日刊工業, (1972)。
- (10) 百合岡信孝, 大北 茂: 鉄鋼材料の溶接, 産報出版, (1999)。
- (11) 溶接学会, 日本溶接協会編, 溶接・接合技術総論, 産報出版, (2015)。
- (12) M. Ohno, T. Takaki and Y. Shibuta: Phys. Rev. E, **96**(2017), 033311。
- (13) M. Watanabe, T. Kadohira, S. Minamoto, S. Tsukamoto, T. Kasuya, M. Okada and J. Inoue: “Prediction of Continuous Cooling Transformation Curves for Steels from Database”, 4th World Congress on Integrated Computational Materials Engineering, (2017)。
- (14) CCT線図データベース: Mat Navi(NIMS物質・材料データベースHP), <https://mits.nims.go.jp/>。
- (15) T. Kasugai and M. Fujita (Eds.), Atlas of CCT Diagrams for Welding.(I), NRIM-special report, No.99-02, (1999)。
- (16) T. Ishikawa, N. Yurioka, M. Yamazaki and M. Fujita (Eds.), Atlas of CCT Diagrams for Welding.(II), NIMS-MITS-special report, (2008)。
- (17) 日本鉄鋼協会(編), 溶接構造用鋼の溶接用CCT図集, 日本鉄鋼協会, (1997)。
- (18) M. Ohno, Y. Shibuta and T. Takaki: Mater. Trans., **60**(2019), 170-179。
- (19) T. Kohtake, A. Yamanaka and Y. Suwa: Metal. Mater. Trans. A, **49**(2018), 5023-5034。
- (20) 棗千修: 鉄と鋼, **103**(2017), 730-737。
- (21) 毛利優斗, 塚田祐貴, 小山敏幸: 鉄と鋼, **105**(2019), 305-313。
- (22) M. Toloui and M. Militzer: Acta Mater., **144**(2018), 786-800。
- (23) 足立吉隆, 松下康弘, 上村逸郎, 井上純哉: システム制御情報学会誌, **61**(2017), 188-193。

★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★

小山敏幸

1990年4月 名古屋工業大学工学研究科物質工学専攻博士後期課程退学, 同月に名古屋工業大学助手

2002年4月 (独)物質・材料研究機構 計算材料科学研究センター 主任研究員

2011年4月 名古屋工業大学 大学院工学研究科 教授

2015年4月 現職

専門分野: 相変態, 材料設計計算工学, フェーズフィールド法

◎金属材料分野を中心に, 相変態・組織形成の研究に従事。

フェーズフィールド法を基軸とした材料設計計算工学分野を中心に活動。

★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★



小山敏幸

大野宗一

山中晃徳

糟谷 正

塚本 進

SIP-MI プロジェクトにおける 性能予測システムの開発

榎 学*

1. はじめに

構造物の多くは長期間使用され、人々の安心・安全に直接関わる。そのため材料および構造物の特性・性能評価は時間とコストをかけて行われている。例えば、繰り返し荷重下で長期に使われる構造材料では、様々な試験法を用いて入念に評価され、実使用期間に相当する時間をかけて疲労特性が評価され、実構造体に近いスケールでも評価されてきた。これらは構造物の信頼性を確保する上で必要であるが、材料開発が長期化・高コスト化する主要因となっており、計算手法を駆使して性能予測をいかに効率的かつ正確に行うかが、今後の構造材料の開発において強い競争力を維持するため重要である。

内閣府の戦略的イノベーション創造プログラム(SIP)「革新的構造材料」(マテリアルズインテグレーション)プロジェクトでは、疲労強度・クリープ強度・水素脆化・脆性破壊等の性能に関して、理論式、経験式を網羅した順解析を行う計算モジュールを開発するとともに、性能に関する膨大なデータを解析して得られるデータベースモジュールの開発も行い、実際の構造材料開発に役立つような性能予測システムの開発を目指した。また、多様な素材、プロセスから製造されて部材や構造体に用いられる構造材料の組織と時間依存の性能の予測を、理論や経験則、数値モデリング、データベース、データ駆動予測などの融合(インテグレーション)から可能とするマテリアルズインテグレーションシステムの構築を目的とした。その取り組みの一部を紹介する。

2. 性能予測システムの概要

本システムでは、組織予測システムを用いて得られた組織情報から、疲労強度・クリープ強度・水素脆化・脆性破壊等の構造材料における時間依存の性能を予測するシステムの開発を行った。性能予測システムは大きく分けて、理論的な物理モデルを用いて順解析を行う計算モジュール群と、これま

で蓄積されてきた性能データを用いるデータベースモジュール群から成る。また、予測された性能の妥当性を評価するための検証も行うことにより、性能予測システムの有効性の確認を行った。また、組織情報が必ずしも得られない場合においても、材料・溶接条件・溶接構造を用いて、ある使用条件下における時間依存の性能を予測するモジュールに関しても開発を行った。

疲労性能予測モジュールにおいては、図1に示したような計算を連続的に行うことにより、鉄鋼材料の溶接部の疲労特性をばらつきも含めて予測を可能としている⁽¹⁾。疲労性能予測モジュールは、三次元組織情報を入力データとして、例えばき裂発生モデル等を用いて高精度な予測をするモジュールと、抽出された組織パラメータから得られる比較的単純な構造体モデルを用いることにより、高速で予測をするモジュールから構成される。開発されたそれぞれのモジュールを用いた予測結果を比較することにより、各モジュールの最適化を図っている⁽²⁾⁻⁽⁴⁾。図2に示したクリープ性能予測モジュールでは、各種クリープ構成則によるクリープ変形解析、損傷力学・破壊力学・拡散方程式等によるクリープ損傷と破壊の計算解析を行う。厚肉構造部材や溶接継手のクリープ寿命予測では、多軸応力場の影響が重要になるが、これを考慮した計算コードの開発を行っている⁽⁵⁾⁽⁶⁾。図3の水素脆化予測モジュールにおいては、応力誘起水素拡散を支配する構成方程式の解析を行うことにより、構造体での水素拡散輸送に関する計算を行う。この結果を溶接部の三次元の応力場と連成させることにより水素脆化割れを予測する。また溶接部の不均一組織による水素トラップ効果の違いから、拡散現象も組織に依存する。そのため、組織予測システムで得られた情報を参照しながらこれら影響も考慮する⁽⁷⁾。図4で示した脆性破壊予測モジュールにおいては、溶接部での熱影響部や溶接金属内の位置によって異なるマイクロ組織から靱性を予測し、さらにこれまでに得られているシャルピー衝撃試験結果などのデータを有機的に組み合わせることにより溶接部の靱性を予測することを試みている⁽⁸⁾。

* 東京大学大学院工学系研究科；教授(〒113-8656 東京都文京区本郷7-3-1)

Development of Performance Prediction System on SIP-MI Project; Manabu Enoki(The University of Tokyo, Tokyo)

Keywords: materials integration, materials informatics, structural materials, welding, performance prediction, integrated computational materials engineering, data driven approach, fatigue, creep, hydrogen embrittlement, fracture toughness

2019年5月20日受理[doi:10.2320/materia.58.498]

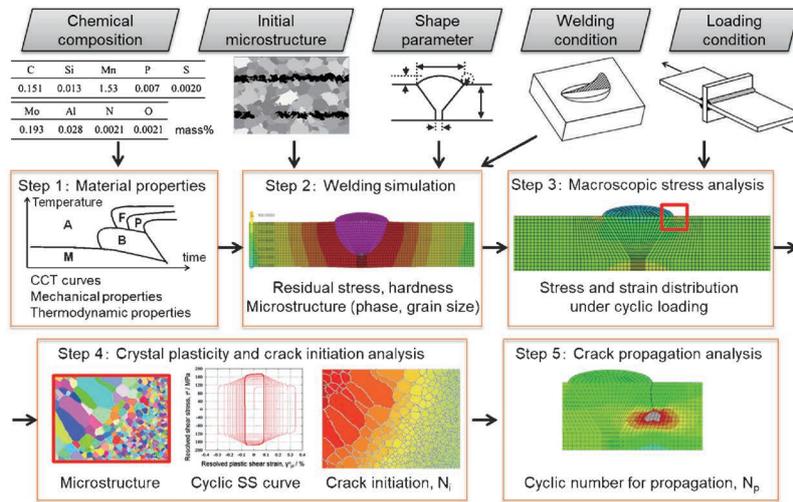


図1 疲労性能予測モジュールのワークフロー。(オンラインカラー)

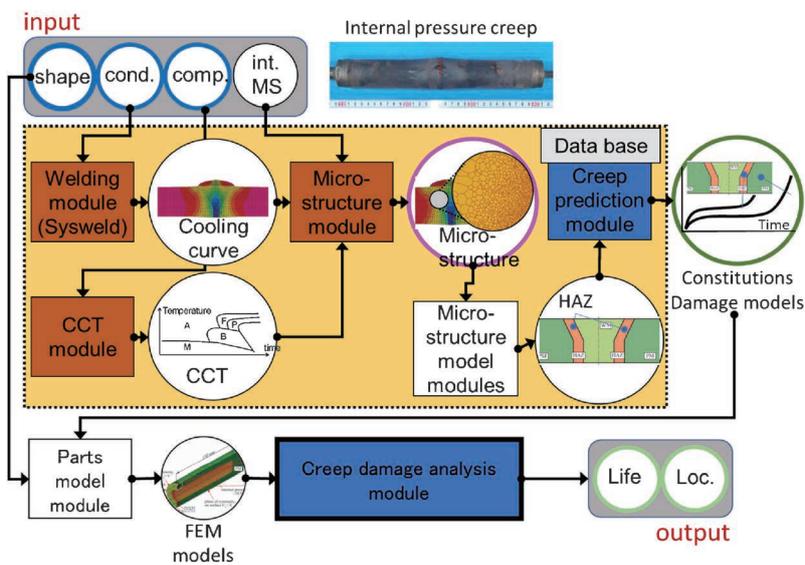


図2 クリープ性能予測モジュールのワークフロー。(オンラインカラー)

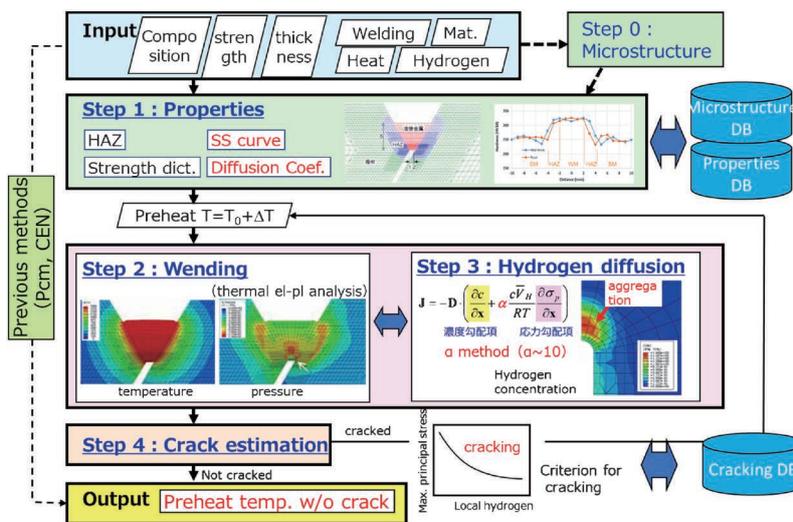


図3 水素脆化予測モジュールのワークフロー。(オンラインカラー)

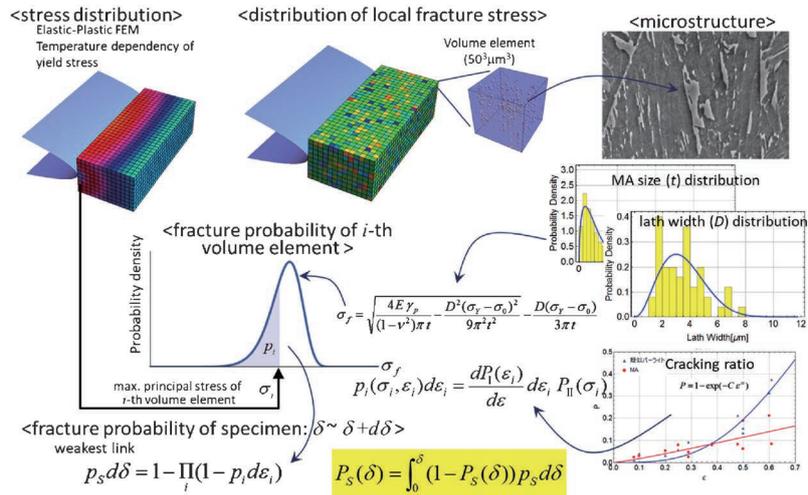


図4 脆性破壊予測モジュールのワークフロー。(オンラインカラー)

3. 疲労性能予測

(1) 概要

以下での疲労性能予測の例について述べる⁽¹⁾。新しい材料や構造の開発においては、その性能を評価するためにしばしばかなりの時間とコストを要する。溶接構造物の疲労特性の場合、疲労破壊の統計的挙動を検証するために、膨大な量の疲労試験を実施する必要がある。したがって、より短時間で疲労特性の評価は非常に重要になる。従来の疲労評価では、S-N 曲線に基づく疲労設計曲線(応力範囲と破断回数との関係に対する逆べき乗則)が用いられている。このアプローチでは、主に接合の形状が考慮され、ほとんどの場合残留応力と微細構造の影響は無視される。一方、疲労特性を改善するためのいくつかの新しい材料が開発されている。例えば、低変態温度溶接材料は残留応力を低減し、二相鋼は微細構造を制御することによって疲労特性を改善する。したがって、残留応力および微細構造の影響の評価がますます重要になってきている。

このような背景から、溶接継手の疲労に関する数値シミュレーション技術が提案されている。フェイズフィールド法は、複雑な微細構造を予測する有望な方法の1つであり、また結晶すべりや双晶などの物理的変形メカニズムを考慮した結晶塑性モデルが近年注目されている⁽⁹⁾。微視組織と結晶の塑性に基づく疲労き裂発生寿命の予測が精力的に行われている⁽¹⁰⁾。また拡張有限要素法(X-FEM)は、疲労き裂の進展を予測するための強力かつ広く使用されているツールであり、更なる改良も進められている。

この研究の目的は、溶接継手の疲労性能を予測するために、先に説明した最新の計算技術を統合して包括的な枠組み(フレームワーク)を開発することである。溶接継手の疲労寿命予測法の概要を図1に示す。この方法は、市販のソフトウェアとデータベースを用いて、以下の手順からなる。(1) CCT 曲線を含む材料特性と鋼の機械的および熱的特性の推定、(2)熱応力有限要素法(FEM)による巨視的モデル上で溶接プロセス中に生じる温度場、残留応力およびひずみの計

算、(3)硬化構成モデルを用いた FEM による繰り返し荷重下での巨視的応力場の計算、(4)巨視的モデルにおける応力集中領域の検出および微細多結晶構造モデルの作成、Tanaka-Mura モデルによる疲労き裂発生寿命(Ni)の解析、(5)拡張有限要素法(X-FEM)による初期き裂からの疲労き裂伝播寿命(Np)の解析、最終的な Ni と Np の合計による破断寿命の推定。前述のステップを自動的に実行する計算のフレームワークが構築された。一例として、低炭素鋼(0.15%C)を用いて広く使用されている突合せ継手における疲労寿命を提案された方法によって評価した。

(2) 解析方法

提案された方法の第1段階では、市販のソフトウェア JMatPro v9.0を使用して化学組成から様々な材料特性を計算した。化学組成から、連続冷却変態(CCT)図、密度、比熱、熱伝導率、ヤング率、ポアソン比、熱膨張率、降伏応力、硬化勾配を求めた。最大加熱温度1350°C、旧オーステナイト粒径500 μm の計算を行った。ソフトウェアの計算手順は、CALPHAD(状態図の計算)方法と関連する経験式に基づいている。応力-ひずみ曲線は、SYSWELD の混合物の規則によって計算した。降伏応力は、個々の相の降伏応力の平均として計算した。

提案手法の第2ステップは、残留応力と微細構造分布を解析する溶接シミュレーションである。Abaqus CAEで、板厚や止端半径などの形状パラメータに基づいて、2次元の有限要素モデルを作成した。幾何形状は、測定された止端半径と余盛角の平均値に対応するように選択された。有限要素モデルでは、最小サイズ0.005 mmの4ノード平面ひずみ要素(CPE4)を使用した。前節で計算された材料特性がモデルに適用された。母材の初期組織は75%のフェライトと25%のパーライトで構成されていた。溶接部の材料特性は、単純化のために母材の材料特性と同じであると仮定した。

熱入力分布は Goldak の二重楕円熱源モデルによって定義された。Goldak の熱源モデルは、三次元の二重楕円体のガウス熱分布関数であり、アーク溶接プロセスの熱伝達解析に広く使用されている。前楕円体の長さ、後楕円体の長さ、熱

源の深さ、熱源の幅は、それぞれ10, 20, 10, および7.5 mm に設定した。幅および深さの値は、溶接金属のすべての元素が溶融するように選択された。熱源は板の中心線に沿って1 mm/s の速度で移動した。熱入力合計量は1.5 kJ/mm とした。シングルパス溶接が完了した後、突合せ継手を室温まで冷却させた。

一般に、熱伝導解析、相変態解析および応力解析が、溶接プロセス中の微細構造および応力-ひずみ状態を得るために必要である。このシミュレーションでは、熱伝達と相変態の問題は強結合法によって解かれた。熱伝達の問題はフーリエ方程式と潜熱を考慮して計算した。相変態解析では、拡散タイプとマルテンサイトタイプの変態がそれぞれ予測された。ビッカース硬さの分布は、実験式に従って、700°C(Vr)における化学組成および冷却速度からも導出された。オーステナイト結晶粒度はまた、Leblondらによって提案された増分方程式によって計算された。相転移に伴う熱伝達解析後、伝熱解析により算出された温度分布及び相変態履歴に基づいて、熱弾塑性解析を行い、残留応力を算出した。この解析では、弾性ひずみ、塑性ひずみ、熱ひずみ、変形ひずみを考慮した。これらの計算は、市販のFEMコードSYSWELDによって実行された。

第3のステップは、巨視的な応力解析である。この段階の入力データは、硬度分布、前のステップから得られた残留応力分布、荷重条件である。この硬度分布から、前のステップで用いた有限要素モデルを10領域に分割し、各領域に異なる応力-ひずみ曲線を与えた。応力-ひずみ曲線は、SYSWELDの混合則によって計算した。負荷する前に残留応力のすべての成分がモデルに導入された。このモデルは、応力比 $R = -1$ および7つの異なる応力振幅、すなわち100, 150, 200, 300, 400, 500および600 MPa で10回の繰返し負荷を受けた。巨視的応力解析の後、最大主応力の最大値を有する要素の位置を記録し、次のステップで使用した。

第4ステップは、結晶塑性有限要素法(CP-FEM)を用いたメソスコピック応力場の解析とき裂発生である。このステップでは、第2ステップおよび第3ステップの結果を入力値として使用した。微視構造モデルの形状とメッシュが図5に示めされている。モデルの形状は、巨視的モデルの最も高い応力位置周辺の領域から切り取られた。この領域は、マルテンサイトの体積分率が第2段階で約100%と予測されたため、マルテンサイト単相であると推定した。旧オーステナイトの平均粒径は、第2ステップで算出した粒度分布を参考にして求めた。再構築された粒の形態は、以前の研究(2)で説明したテッセレーション手法によって生成された。微細構造モデルのサイズは、約40個の粒子を含むように選択された。モデルは、平均サイズ50 μm の4ノード平面ひずみ要素(CPE4)のメッシュで、結晶方位はランダムに割り当てられた。

微視構造モデルの弾性-塑性変形挙動を計算するために、Hutchinsonらによって提案された現象論的構成則を考慮した先進材料シミュレーションキット(DAMASK)⁽¹¹⁾を使用した。非直線的な硬化は、Armstrong-Frederick硬化法によってモデル化されている。ここで、塑性せん断ひずみ速度、分解せん断応力、臨界分解せん断応力(CRSS)、すべり系の

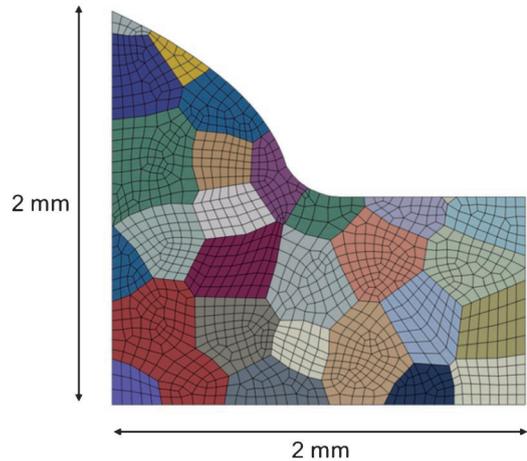


図5 メソスコピックモデルの幾何形状とメッシュ。(オンラインカラー)

背応力などこのシミュレーションで使用された結晶塑性パラメータの一部は文献から得られた。このシミュレーションの境界条件は、巨視的モデルの変位場によって定義された。

き裂発生解析は、すべり帯に蓄積された不可逆的エネルギーを考慮したTanaka-Muraモデル⁽¹²⁾に基づいて行った。Niの値は、すべり線に平行に定義された潜在的なき裂経路を平均して評価した。最初のき裂のみが計算コストを節約するために考慮された。さらに、7つの異なる微細構造モデルを、き裂発生寿命のばらつきを評価するために、同じ手順および同じ平均粒径を用いてランダムに作成した。

最後のステップは、X-FEMを用いた疲労き裂進展解析である。この方法では、き裂はジャンプ関数によって表され、有限要素メッシュはき裂経路に従う必要はない。前のステップで得られた初期き裂の位置と長さを巨視的モデルに導入した。き裂成長速度は、パリズ則から計算された。応力拡大係数は、Abaqus内のバーチャルクラック閉鎖法によって計算された。これらの定数は、溶接鋼構造物の疲労設計指針にしたがったものが用いられた⁽¹³⁾。第1ステップから第5ステップまでの一連の計算を自動的に実行するpythonスクリプトが開発された。

(3) 結果

JMatProで熱伝導率、降伏応力、CCT図が計算された。熱伝導率と降伏応力を各相の温度の関数として求めた。CCT曲線は、溶接に用いられた低炭素鋼(C 0.1~0.2%)の実験的に求められたCCT図と定性的に類似していた。密度、比熱、ヤング率、ポアソン比、熱膨張係数、硬化勾配も化学組成から求めた。これらの特性を用いて溶接シミュレーションを実施した。フェライト、パーライト、ベイナイトの体積分率も計算した。熱源から遠い母材は、初期微細構造(フェライト75%およびパーライト25%)と同じであった。HAZの旧オーステナイト粒径は約1 mmと推定された。ビッカース硬さは143~377に分布していた。母材と同じ材料特性が溶接材料に割り当てられているので、溶接金属と母材との間の界面で分布が連続していた。実際の溶接では、HAZの硬度の低下がしばしば見られるが、硬度は溶融帯からほぼ単調に減少する。正確な残留応力と微細構造分布を得

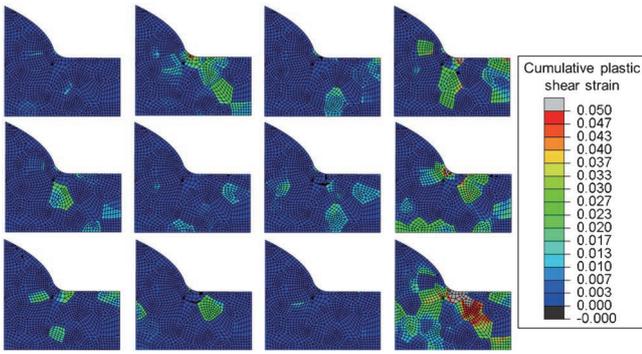


図6 各すべり系における累積塑性せん断ひずみの例 ($\Delta\sigma=300$ MPa). (オンラインカラー)

るためには、実験データに基づいて熱源モデルのパラメータと境界条件を較正する必要がある。この研究で構築された自動計算システムは、較正のために有効である。

すべり系の累積せん断ひずみが図6に示されており、累積せん断塑性ひずみは溶接止端部付近で高い値を示した。図に示すように、塑性ひずみは、結晶方位の違いにより非常に不均質な分布を示した。鋼中のいくつかの異種のせん断ひずみ分布をデジタル画像相関法(DIC)によって実験的に観測されている。結晶塑性解析により求めたミーゼス応力分布から、各粒における全てのすべり面とすべり方向に対してNiが評価され、Niが最小となるすべり系でき裂が発生すると仮定した。さらにX-FEMによりき裂進展経路を計算した。き裂は最初のき裂に平行に伝播し、その後荷重方向に対してほぼ垂直に成長した。き裂伝播の回数Npは、き裂の長さが板厚の3分の1に達するとき定義された。最終的に破断までの総サイクル数は、NiとNpの合計として得られた。7つの応力レベルと7つの異なる微細構造モデルの組み合わせで、合計49回の一連のシミュレーションを実施した。すべての結果は図7に示されている。○の記号はき裂発生であり、●は破断までの総繰返し数である。溶接止端部を研削することによって幾何学的形状が改善された場合、または非破壊試験を使用して溶接部に重大な欠陥がないことが示されている場合、突合せ継手はクラスCに分類される。□はJSSC推薦書⁽¹³⁾のクラスCに属する実験結果である。計算結果は実験値の傾向とよく対応していた。

4. おわりに

「マテリアルズインテグレーション」における物理モデルを用いた性能予測について紹介した。またここでは紹介はぶいたが、各リンク自体における非線形性に対しては、バイズの定理を用いたデータ駆動型アプローチによる解析が有効な手法となる。今後さらに、性能予測を行う上で重要となる組織-特性のリンクに対して、組織解析、結晶塑性解析、疲労試験結果を組み合わせた逆問題解析について検討することが重要と思われる。このようなマテリアルズインテグレーションシステムの構築により、構造材料の開発期間の短縮、コスト低減、材料製造や利用加工のプロセス条件の最適化、さらに構造体設計時の材料選択の最適化・信頼性向上が期待される。

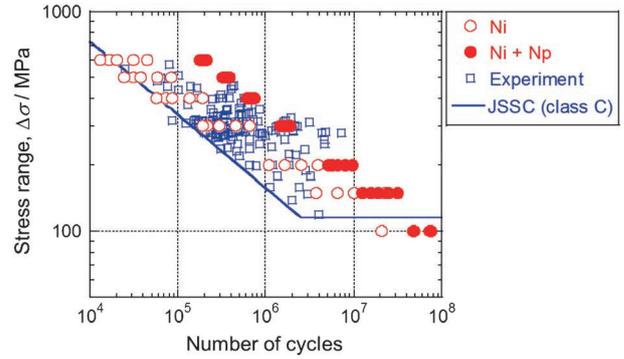


図7 予測された疲労寿命とJSSCが推奨する疲労設計曲線。(オンラインカラー)

本研究は、内閣府総合科学技術・イノベーション会議の戦略的イノベーション創造プログラム(SIP)「革新的構造材料」(管理法人: JST)によって実施された。ここに感謝する次第である。

文 献

- (1) T. Shiraiwa, F. Briffod and M. Enoki: Engineering Fracture Mechanics, **198**(2018), 158–170.
- (2) F. Briffod, T. Shiraiwa and M. Enoki: Mater. Sci. & Eng., **A 695**(2017), 165–177.
- (3) F. Briffod, T. Shiraiwa and M. Enoki: Int. J. Fatigue, **107**(2018), 72–82.
- (4) K. Shibamura, K. Ueda, H. Ito, Y. Nemoto, M. Kinoshita, K. Suzuki and M. Enoki: Mater. & Design, **139**(2018), 269–282.
- (5) M. Tabuchi, H. Hongo and T. Matsunaga: Mater. at High Temperatures, **34**(2017), 466–472.
- (6) K. Koiwa, M. Tabuchi, M. Demura, M. Yamazaki and M. Watanabe: Mater. Trans., **60**(2019), 213–221.
- (7) A. T. Yokobori Jr., G. Ozeki, T. Ohmi, T. Kasuya, N. Ishikawa, S. Minamoto and M. Enoki: Mater. Trans., **60**(2019), 222–229.
- (8) 井元雅弘・岡崎喜臣・樺田真大・栗飯原周二・川畑友弥・槽谷正、鋼溶接熱影響部における組織及びシャルピー衝撃特性予測モデルの統合、CAMP-ISJ第177回春季講演大会, **32**(2019), 353.
- (9) F. Roters, P. Eisenlohr, L. Hantcherli, D. D. Tjahjanto, T. R. Bieler and D. Raabe: Acta Mater., **58**(2010), 1152–1211.
- (10) D. L. McDowell and F. P. E. Dunne: Int. J. Fatigue, **32**(2010), 1521–1542.
- (11) F. Roters, P. Eisenlohr, C. Kords, D. D. Tjahjanto, M. Diehl and D. Raabe: Procedia IUTAM, **3**(2012), 3–10.
- (12) K. Tanaka and T. Mura: J. Appl. Mech., **48**(1981), 97–103.
- (13) JSSC, Fatigue Design Recommendations for Steel Structures, Giho-do, Tokyo, Japan, (2010).



榎 学

★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★
 1989年 東京大学大学院工学系研究科博士課程修了
 東京大学先端科学技術研究センター助手、助教授、東京大学大学院工学系研究科マテリアル工学専攻准教授
 2009年1月より現職
 専門分野: 信頼性材料工学
 ◎AE(アコースティック・エミッション)などの非破壊評価手法を用いた破壊挙動に関する研究に従事。材料プロセス中に生じる損傷モニタリング、供用中における構造ヘルスマニタリング、マテリアルズインテグレーションによる性能予測など、構造材料の力学的信頼性について研究を進めている。

★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★

SIP-MI プロジェクトにおける
特性空間分析システムの開発井上純哉* 岡田真人** 長尾大道***
横田秀夫**** 足立吉隆*****

1. はじめに

2014年度にスタートした第1期SIP「革新的構造材料」では、統合型材料開発システムの礎として、材料開発の基本要素であるプロセス・組織・特性・性能の連関を計算機上でシームレスに実現し、材料の組織や性能の予測を可能にする「マテリアルズインテグレーション(以後、MIと記す)」の構築が目指された。本稿の主題である「特性空間分析システム」は、データ科学的手法の適用により、実験や数値計算に基づくデータベースを用いて物理モデルや現象論モデルのモデルパラメータを最適化し、MI統合システムに導入された組織予測や性能予測といった各種モジュールの飛躍的な高精度化をサポートするためのシステムとして構想された。しかし、本プロジェクトでは単なる予測の高精度化だけにとどまらず、第2期SIPの主題となる「逆問題」の効率的な解析も視野に入れ、現象を説明する有効な説明変数や物理モデル・現象論モデルの自動選択や、大規模な3次元材料組織データの効率的な管理手法や、3次元組織情報の有効な活用手法に関する研究開発も行った。

この様な特性空間分析システムは、大きく分け「データ駆動型予測システム」と「3D/4D分析システム」の2つのシステムから構成される。以下ではそれぞれのシステムの内容を実際の適用事例を踏まえて簡単に紹介する。

2. データ駆動型予測システム

データ駆動型予測システムでは、個々のモジュールの高精度化に不可欠となるデータ同化手法と、説明変数やモデルの

選択を可能にするスパースモデリングの二つのデータ科学的手法に着目し、そのモジュール化と具体的な材料問題への適用を試みた。

(1) データ同化

データ同化は、気象学や海洋学の分野において盛んに研究されてきた手法である⁽¹⁾⁽²⁾。これら分野では、物理法則などに基づいて時空間モデルを構成し、大規模な数値解析を行なうことにより、実際の気象変動をすることが可能であるように思われる。しかしながら、この様な予測では、システムが持つ非線形性が原因となり、初期条件や境界条件に加えモデルに含まれるパラメータの与え方により、予測結果が現実の現象より大きく乖離した著しく不適切な結果となることが問題となる。そのため、数値解析における初期条件、境界条件ならびにモデルパラメータを、実際の観測に基づいた適切なものに設定することで、実現象をより正確に再現した数値解析を可能にする手法が不可欠となっていた。それを可能にしたのがデータ同化である。構造材料を対象とした場合、予測の難しさは気象学や海洋学と同様に、構造材料が持つマルチスケールな不均一性や物理モデルの不完全性に起因する。データ同化ではこの様な不均一性や不完全性を踏まえた予測が可能になるだけでなく、その結果生じる数値解析結果の不確実性も定量的に評価できること(Uncertainty Quantification, UQ⁽³⁾)も、所謂一般的な機械学習ではなくデータ同化を用いることの最大のメリットと言える。データ同化を実現する手法には、時間を順方向に辿る逐次データ同化手法と、逆方向に辿る4次元変分法がある。

(a) 逐次データ同化手法

逐次データ同化手法は、対象とする物理現象をモデル化し

* 東京大学先端科学技術研究センター；准教授(〒153-8904 東京都目黒区駒場 4-6-1)

** 東京大学新領域創成科学研究科；教授

*** 東京大学地震研究所；准教授

**** 理化学研究所量子工学研究センター；チームリーダー

***** 名古屋大学工学部；教授

Development of Data-Driven System in Materials Integration; Junya Inoue*, Masato Okada**, Hiromichi Nagao***, Hideo Yokota**** and Yoshitaka Adachi***** (*Research Center for Advanced Science and Technology, The University of Tokyo, Tokyo. **Graduate School of Frontier Science, The University of Tokyo, Kashiwa. ***Earthquake Research Institute, The University of Tokyo, Tokyo. ****Image Processing Research Team, RIKEN Center for Advanced Photonics, Wako. *****School of Engineering, Nagoya University, Nagoya)

Keywords: *materials integration, structural materials, integrated computational materials engineering, sparse modelling, data assimilation, database*

2019年6月17日受理[doi:10.2320/materia.58.503]

た数値シミュレーションモデルが既に手元にある場合に非常に有効な手段となる。逐次データ同化手法の概略を、代表的な手法であるアンサンブルカルマンフィルタ (Ensemble Kalman Filter, EnKF⁽⁴⁾) を用いて説明する。EnKF はモデルが非線形であっても適用できる上、並列化を含めた実装が比較的容易であるため、気象・海洋に限らず様々な分野で広く用いられている手法である。

逐次データ同化では、まず現象を説明する時間発展方程式 (システムモデル) が離散的に以下の形式で与えられるとする：

$$x_{t+1} = f(x_t, v_t)$$

ここで x_t は状態ベクトルと呼ばれ、システムモデルを記述するために必要な内部変数であり、例えば変位や圧力・温度などの状態量やモデルパラメータに対応する。また、 v_t はシステムモデルが現象を完全には表現できないことによる誤差である。また、一般に観測においては全ての状態ベクトル x_t を完全に計測することは不可能であることから、観測値 y_t は状態ベクトル x_t を入力とした観測演算子 $h(x_t)$ と観測ノイズ w_t により次式で与えられるとする：

$$y_t = h(x_t) + w_t$$

この様に考えると、例えば時刻 $t-1$ までの全ての観測 $y_{1:t-1}$ を用いて時刻 $t-1$ の状態ベクトル x_{t-1} の事前分布 $P(x_{t-1} | y_{1:t-1})$ が既に推定されていれば、時刻 t の状態ベクトル x_t の確率密度関数 $P(x_t | y_{1:t-1})$ はシステムモデルを用いて予測可能である。これを一期先予測と呼ぶ。この一期先予測を時刻 t に得られる観測 y_t と観測演算子 $h(x_t)$ を用いて、次式で与えられるベイズの定理により更新することで、時刻 t までの全ての観測 $y_{1:t}$ を用いて推定される状態ベクトル x_t の事後分布 $P(x_t | y_{1:t})$ が得られる：

$$P(x_t | y_{1:t}) = \frac{P(y_t | x_t) P(x_t | y_{1:t-1})}{P(y_t)}$$

以上を繰り返すことで、過去に観察された全ての観測値 $y_{1:t}$ を有効に活用し、時刻 t の状態ベクトル x_t の分布を得ようとするのが逐次データ同化手法である。

EnKF では状態ベクトル x_t の確率密度関数 $P(x_t | y_{1:t})$ を、離散的な状態ベクトル $x_t^{(i)}$ の集合として次式の様にアンサンブル近似する：

$$P(x_t | y_{1:t}) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \delta(x_t - x_t^{(i)})$$

これにより、時刻 t での離散的な一期先予測 $x_{t-1}^{(i)}$ は個々の状態ベクトル $x_{t-1}^{(i)}$ を既存の数値シミュレーションモデルに適用することで次式の様に簡単に求まる：

$$x_{t-1}^{(i)} = f(x_{t-1}^{(i)}, v_{t-1})$$

その結果、一期先予測 x_t の確率分布 $P(x_t | y_{1:t-1})$ は、以下のように近似的に推定できるのである：

$$P(x_t | y_{1:t-1}) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \delta(x_t - x_{t-1}^{(i)})$$

EnKF では更に観測演算子が次式の様な線形方程式で与えられるとし：

$$y_t = H_t x_t + w_t$$

更に観測ノイズが正規分布で与えられると仮定することで線形化されたベイズの定理を用いて、一期先予測 $x_{t-1}^{(i)}$ を次式で更新し、時刻 t の予測 $x_t^{(i)}$ を得ている：

$$x_t^{(i)} = x_{t-1}^{(i)} + \hat{K}_t (y_t + \hat{w}_t^{(i)} - H_t x_{t-1}^{(i)})$$

ここで、各項は全て単純な一次方程式で与えられる。MI 統合システムではこのような EnKF をモジュールとして導入しており、任意の数値シミュレーションモデルに対し逐次データ同化を適用することが可能になっている。

(b) 4次元変分法(アジョイント法)

4次元変分法⁽⁵⁾は EnKF とは異なり、既存の数値シミュレーションモデルをそのまま用いることはできない。しかし、少ない計算資源で効率的にデータ同化できるため、より大規模なシミュレーションモデルに適用できるという特徴がある。

4次元変分法では、まずシステムモデルが次式の時間発展方程式で与えられるとする：

$$\frac{\partial x}{\partial t} - F(x) = 0, \quad x(0) = x_0$$

また、逐次データ同化手法と同様に観測演算子 $h(x)$ を通して観測値 $y(t)$ が得られるものとする。解くべき問題は、全ての観測値 $y(t)$ を説明する最も尤もらしい状態ベクトル $x(t)$ の推定である。つまり、評価関数 J を次式で定義すると：

$$J = \int_0^T \mathcal{J}(x, y) dt$$

システムモデルを拘束条件として得られる次式のラグランジュ関数 \mathcal{L} の最適化問題を解くこととなる：

$$\mathcal{L} = \int_0^T \mathcal{J}(x, y) dt + \int_0^T \lambda^\dagger \left(\frac{\partial x}{\partial t} - F(x) \right) dt$$

ここで λ^\dagger は λ の転置を表す (以下でも同様)。最適解は \mathcal{L} の第一変分 $\delta \mathcal{L}$ がゼロとなる点として得られる：

$$\begin{aligned} \delta \mathcal{L} &= \int_0^T (\nabla_x \mathcal{J})^\dagger \delta x dt + \int_0^T \delta \lambda^\dagger \left(\frac{\partial x}{\partial t} - F(x) \right) dt \\ &\quad + \int_0^T \lambda^\dagger \left(\frac{\partial \delta x}{\partial t} - (\nabla_x F) \delta x \right) dt \\ &= \int_0^T \delta \lambda^\dagger \left(\frac{\partial x}{\partial t} - F(x) \right) dt + \lambda^\dagger(T) \delta x(T) - \lambda^\dagger(0) \delta x(0) \\ &\quad + \int_0^T \left((\nabla_x \mathcal{J})^\dagger - \lambda^\dagger (\nabla_x F) - \frac{\partial \lambda^\dagger}{\partial t} \right) \delta x dt \end{aligned}$$

ここで、最適解周辺では任意の $\delta \lambda$, δx に対して $\delta \mathcal{L} = 0$ となる必要があるため、最終的には最適解は以下の条件を満たす $x(t)$, $\lambda(t)$ となる事が分かる：

$$\frac{\partial x}{\partial t} - F(x) = 0$$

$$\nabla_x \mathcal{J}(x, y) - (\nabla_x F(x))^\dagger \lambda - \frac{\partial \lambda}{\partial t} = 0$$

$$\lambda(0) = \lambda(T) = 0$$

最初の式は $x(t)$ の時間発展方程式である。2番目の式は $\lambda(t)$ の時間発展方程式であり、アジョイント方程式と呼ばれる。

3番目は $\lambda(t)$ の初期条件と終端条件である。これらを同時に

満たす $x(t)$ と $\lambda(t)$ の探索方法として、4次元変分法では勾配法を用いる。 $x(t)$ の時間発展方程式、アジョイント方程式、更には終端条件 $\lambda(T) = 0$ が常に成り立つとすると、第一変分 $\delta\mathcal{L}$ は次式の様に变形できる：

$$\delta\mathcal{L} = \delta J = (\nabla_{x_0} J)^\dagger \delta x_0 = \lambda^\dagger(0) \delta x_0$$

つまり、 $\lambda(T) = 0$ を終端条件としてアジョイント方程式を時間方向に逆に積分することで得られる $\lambda(0)$ は、初期条件 x_0 に対する評価関数の勾配 $\nabla_{x_0} J(x, y)$ に対応することが分かる。従って、まず適当な初期条件 x_0 に対し $x(t)$ の時間発展方程式を解き、得られた $x(t)$ を用いてアジョイント方程式を時間方向に逆に積分することで勾配 $\nabla_{x_0} J(x, y) = \lambda(0)$ を求める。そして最後に勾配 $\nabla_{x_0} J(x, y)$ を用いて初期条件 x_0 を更新する。以上を勾配 $\nabla_{x_0} J(x, y)$ がゼロになるまで繰り返すことで、最適な初期条件 $x(0) = x_0$ 、つまり $x(t)$ と $\lambda(t)$ を得ることが可能になるのである。

以上のように、4次元変分法は勾配法を用いて少ない更新回数で精度良く最適解を得る手法となっている。そのため、アンサンブル近似を用いる EnKF より遥かに少ない計算資源で実行できるという利点を持つ。また、その定式化は有限要素法等の変分法に基づく数値解析手法と親和性が高いことが分かる。一方で、従来の4次元変分法は最尤推定であるため、最適解の一点だけが求まる。しかし、上述のように不確定要素が多い構造材料の解析においては、最適解に内在する不確実性の明示化(UQ)は推定結果の信頼性を議論する上で不可欠となる。そのため、MI プロジェクトでは推定に含まれる不確実性を明確にするための拡張も行った⁽⁶⁾⁽⁷⁾。紙面の都合上、詳細は参考文献(6),(7)をご参照頂きたい。

(c) データ同化の適用事例

データ同化の適用例として、Al合金の再結晶挙動をデータ同化により調査した例を以下に示す⁽⁸⁾。図1は実際に強加工されたアルミ合金を時効処理したときの再結晶挙動を、SEM-EBSDを用いて観察した結果である。積層欠陥エネルギーの大きなAl合金の再結晶挙動は、Humphreysによりサブグレイン成長モデルで良く説明できることが示されている⁽⁹⁾。そこで、ここではシステムモデルとしてMulti-Phase-Field(MPF)モデルを用いた。また、界面のモビリティと界面エネルギーに関しては、結晶方位依存性を考慮したモデルで良く説明できることが知られている⁽⁹⁾⁻⁽¹¹⁾。一方で、加工により導入されたひずみエネルギーは結晶方位毎に異なるが、従来はボトムアップ的なモデルを構築する事例が数多く報告されている。しかし、Humphreysも指摘している様に⁽¹²⁾、そのモデル化は模索段階と言える。そこでこ

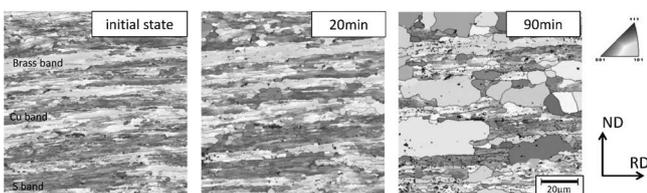


図1 Al合金の再結晶挙動(A1050, 573 K)。

では、逆に実験データを用いてひずみエネルギーをその時間推移を含めて推定できないかという観点で解析を行った。

図2にEnKFを用いて推定された結晶方位毎の体積率とひずみエネルギーの推移を示す。この解析では、観測値として結晶方位毎の体積率の変化を用いている。このような解析から、例えばS方位バンド内にはBrass方位バンド内よりも大きなひずみエネルギーが蓄えられていることや、Sバンド内に点在するCu方位粒には非常に小さなひずみエネルギーしか蓄えられていないことなどが読み取れる。また、Cu方位粒とS方位バンド内に蓄えられたひずみエネルギーの差は $10^{14} \sim 10^{15} / \text{m}^2$ 程度の転位密度に対応しており、強加工されたAl合金の転位密度と良く対応していることが分かる⁽¹³⁾。この例では集合組織の変化という限られた情報だけを用いているため、得られる情報も限られる。しかし、興味深い知見も得られており、将来的には表面構造写真の特微量抽出⁽¹⁴⁾やX線トモグラフィー等のより高度な測定と併用することで、より詳細な知見が得られると期待している。

(2) スパースモデリング

構造材料の特性データベースは、多くの場合でデータを得るためのコストが甚大なため、現在までに多大な労力が費やされてきたにも関わらず、蓄積された情報量には限りがある。そのため、多量のデータを前提とする機械学習手法の適用は現実的ではない場合が多い。これに対しスパースモデリングは、限られた情報量から現象を的確に表現しうる重要なパラメータを自動的に抽出する情報科学的モデリング技術であり、情報量が限られる構造材料とは極めて相性が良い手法と言える。また、データに含まれる本質を自動的に抽出するスパースモデリングは、未解明な現象が多く残されている構造材料の発展にも大きく寄与する可能性を秘めている。

スパースモデリングをベイズの定理に基づき定式化すると以下のようになる。ベイズの定理によると、観察 y を得た後のあるモデル M_i のモデルパラメータ x の事後分布 $P(x|y, M_i)$ は以下の式で与えられる：

$$P(x|y, M_i) \propto P(y|x, M_i)P(x|M_i)$$

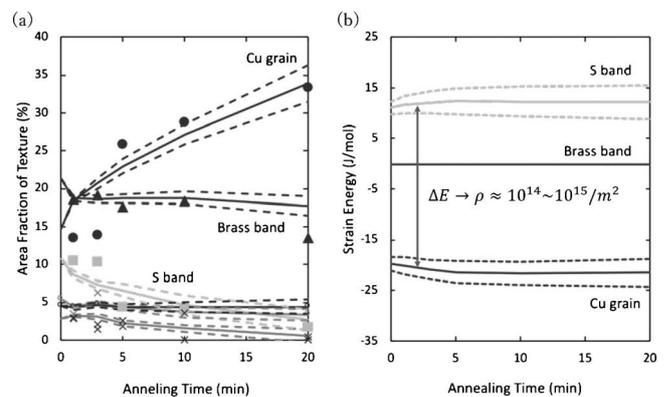


図2 EnKFによる同化結果。(a)体積率変化、(b)ひずみエネルギー。

さらに、現象を説明するモデル候補が有限個あるとき、個々のモデル M_i の事後分布は同様に次式で与えられる：

$$P(M_i|y) \propto P(y|M_i)P(M_i)$$

ここで、 $P(M_i)$ は個々のモデルの事前分布であり、事前知識としてモデルの優先度がない場合は全てのモデルで同じ値となる。つまり、一般にはモデルの事後分布 $P(M_i|y)$ は尤度 $P(y|M_i)$ に比例することが分かる。ここで、尤度 $P(y|M_i)$ は周辺尤度やエビデンスと呼ばれ、モデルパラメータ x で周辺化することで次式により得られる：

$$P(y|M_i) = \int P(y|x, M_i)P(x|M_i) dx$$

なお、周辺尤度の \ln を取って負にしたものをベイズ的自由エネルギー (Bayesian Free Energy, BFE) と呼ぶ。つまり、個々のモデル M_i に対し、観察 y の周辺尤度または BFE が計算できれば、どのモデルが現象を説明するにふさわしいモデルなのか議論できるのである。しかし、周辺尤度や BFE の計算は一般には難しく、ガウス分布を仮定することで解析的に導出する方法や、マルコフ連鎖モンテカルロ法 (Markov Chain Monte Carlo, MCMC 法) を用いた数値積分が用いられる。

ここでは、重回帰分析における変数選択と複数の物理モデルからのモデル選択する場合の方法を紹介する。

(a) 重回帰分析の変数選択

得られるデータ量に制限がある中で、対象とする現象の説明変数の候補が多数あるとき、単純な重回帰分析は過学習を引き起こす。そのため、多数の説明変数の候補の中から有効な説明変数を選択する必要がある、変数選択問題として古くから様々な方法が提案されている。例えば、Pearson の相関係数 (Pearson's coefficient correlation)⁽¹⁵⁾等は古くから用いられている手法であるが、これは説明変数と出力の2つの変数間の直線関係の程度を表す指標に過ぎない。そのため、それだけでは最適な変数の組み合わせは教えてくれない。そのため、近年では LASSO (Least Absolute Shrinkage and Selection Operator) と呼ばれる L1 正則化手法⁽¹⁶⁾が広く用いられる様になっている。LASSO は基本的には観測 y に対し評価関数 $J(x, y)$ が与えられたとき、説明変数の係数 x に対し $\sum |x| \leq t$ となる制約条件を付加することで、説明変数の次元を圧縮する手法である。この様な LASSO により選ばれた説明変数の組み合わせは、確かにある超パラメータ λ に対する最適解ではある。しかし、超パラメータ λ によって最適となる組み合わせは異なり、また選ばれた最適解が他の組み合わせに対しどの程度の優位性があるのかという情報は示されない。多くの現象が複雑に絡み合う構造材料では、唯一絶対のモデルが存在し、それだけで現象が完全に表現できるという考えは受け入れにくい。そのため、MI 統合システムでは、線形重回帰分析に対しては LASSO に代わり ES-LiR (Exhaustive Search for Linear Regression)⁽¹⁷⁾⁽¹⁸⁾ と呼ばれる手法を利用したモジュールが導入されている。ES-LiR は線形重回帰分析に特化して BFE を網羅的に計算することで、最適解だけでなく最適解近傍の状態密度に関する情報も

明らかにする手法である。紙面の都合上、定式化の詳細は参考文献(17)(18)を参照されたい。

ES-LiR の適用事例として、鋼のマルテンサイト変態開始点 (Ms 点) の推定式を扱った例を示す⁽¹⁹⁾。鋼の Ms 点は炭素をはじめとする合金元素の濃度に強く依存することが知られ、古くから多くの推定式が提案されており⁽²⁰⁾⁻⁽²²⁾、その一例を以下に示す⁽²²⁾。

$$Ms = 512 - 453C + 15Cr - 16.9Ni - 9.5Mo + 217C^2 - 71.5CMn - 67.6CCr$$

このような推定式に含まれる合金元素の組み合わせは、個々の提案者の勘と経験に基づくものであり、多くの場合は諸々の事情にあわせて都合の良い推定式が用いられる。この問題に対し ES-LiR を適用し、BFE の全状態を明らかにした結果を図 3 に示す。なお、データには 1965 年以前の鋼が網羅的に調査された Andrews のデータを採用した⁽²²⁾。図 3 (a) から分かるように、Andrews の推定式は BFE の観点からは他の研究者の推定式より優秀ではあるものの、必ずしも最適な推定式ではない。一方で、図 3 (b) からは最適解自体も他の推定式に対し十分な優位性を示すわけではないことも分かる。このような場合、BFE を用いて全ての説明因子の重要度を評価した方が有用な情報が得られる (図 4)。図 4 (a) は上位 10 位までのモデルにおいて選択された説明因子を白色、選択されなかったものを黒色で示している。また、図 4 (b) は各説明因子に対し全モデルの確率を積算した値として重要度を示している。例えば、BFE を最適にする推定式だけからは、「W は必要だが Mo と C の交差項は不要」とな

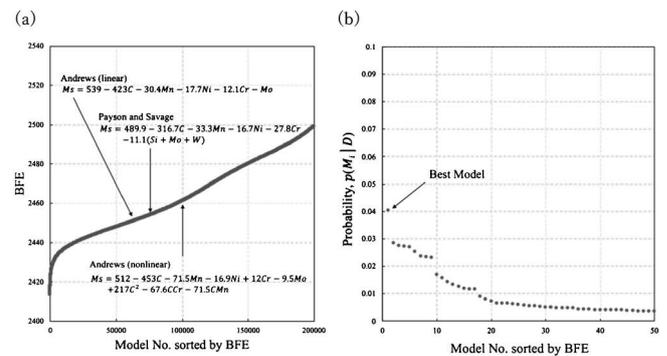


図 3 BFE の分布と推定式ならびに最適解。

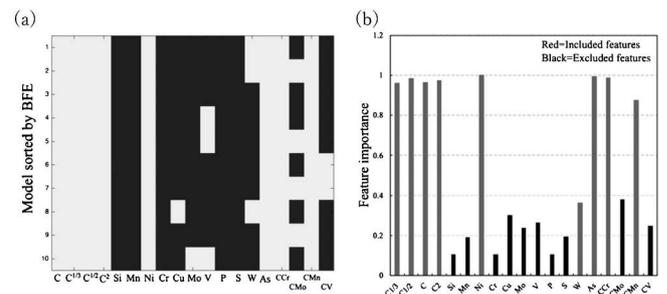


図 4 Top10 の変数選択と変数重要度。

る(図4(a)). しかし, 重要度の観点からは「W と CMo はほぼ同等の重要性がある」ことが分かる(図4(b)). 単なる予測だけに興味があるのであれば, 最適解だけを扱うことに異論はない. しかし, 選択された説明因子や背後の物理を真面目に考える上では, ES-LiR により得られる状態密度はより多くの示唆を与えるのである.

(b) 複数の提案モデルからのモデル選択

構造材料の問題においては, 一つの現象を説明するモデルとして複数のメカニズムが提案されることは珍しくない. また, いずれのメカニズムが実際の現象を支配しているのかといった判断は, 個々の研究者の経験と勘に基づいているといっても過言ではない. しかし, その様な判断が真っ当に出来るまでには長年に渡る経験が不可欠であり, 結局は個々の研究者の暗黙知のレベルで蓄積された知の深さが重要となる. しかし, その様な暗黙知の伝承は難しく, 経験と勘だけに頼らない方法論の確立が必要である. ここでは, 提案された複数のメカニズムに対し BFE を求め, 最も尤もらしいモデルの選択が可能か検証した例を示す.

一般に, BFE はモデルが非線形な場合は解析的に求めることは困難である. そのため, MCMC 法を用いた近似的な推定手法が広く用いられる(23). 中でも, 交換 MCMC 法は, 事後分布に多峰性があっても局所解に陥りにくいことや, 比較的安価に BFE の導出ができるため(24), MI システムで採用されている手法である. 交換 MCMC 法は, 逆温度 β_i を定義し, 個々の逆温度 β_i における事後分布を $P(y|x)^{\beta}P(x)$ とすることで, 異なる逆温度間での交換を従来の MCMC 法に加えて行う手法である. この場合, BFE は次式で与えられる:

$$BFE = -\ln \int P(y|x, M_i)P(x|M_i) dx$$

$$= -\sum_j \ln \langle \exp(-(\beta_{j+1} - \beta_j) \log P(y|x, M_i)) \rangle_{\beta_j}$$

ここで, $\langle \blacksquare \rangle_{\beta_j}$ は逆温度 β_j の事後分布における \blacksquare の平均を意味する. この様な導出は一見煩雑に見えるが, モンテカルロ法においては一般に平均値の収束は早く, 逆温度 $\beta=1$ の精緻な事後分布を得ることで BFE を求めるより, 高速に BFE を求めることができるのである.

交換 MCMC 法の適用事例として, 鋼の変態挙動を表す様々なモデルから実験データを用いて実際の変態挙動を最も尤もらしく説明するモデルを選択した例を示す(25). 図5(a)は鋼(Fe-0.15C-1.5Mn)を1400°Cから0.3°C/sで冷却した時の熱膨張測定により導出されたフェライト変態率の推移である. ここでの問題は, この様な変態率の推移だけからフェライト変態のキネティクスが議論できるのかということである. この問題の場合, 形成組織に関する事前知識が全く無い中で想定されるフェライト形態は3つある. 一つは非整合界面だけで構成されるレンズ上の粒界フェライト(LF), もう一つは整合界面と非整合界面で構成される Pill-box 型と呼ばれる粒界フェライト(PF), そして最後はフェライトサイドプレートと呼ばれる板状のフェライト(FSP)である. ま

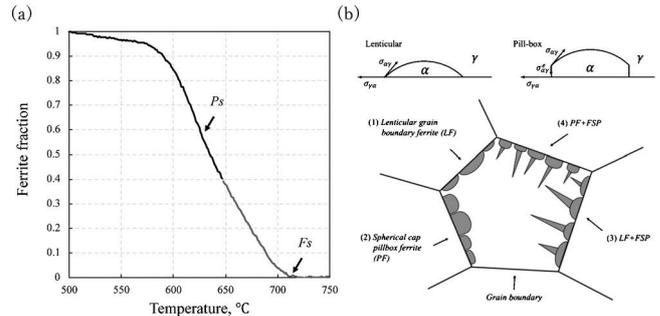


図5 フェライト変態率の推移(1400°C, 0.3°C/s)とフェライト変態モデル.

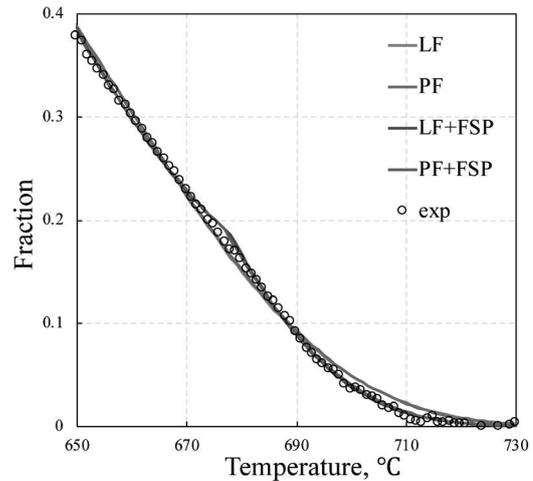


図6 フェライト変態率の最尤推定結果.

表1 フェライトモデルの推定誤差と BFE.

| Model class | Fitness | Complexity | BFE | Probability |
|-------------|---------|------------|-----|------------------------|
| LF | 112 | 18 | 130 | 4.09×10^{-35} |
| PF | 94 | 11 | 105 | 3.53×10^{-24} |
| LF + FSP | 42 | 24 | 66 | 3.05×10^{-7} |
| PF + FSP | 34 | 17 | 51 | 99.99 |

た, 観察される組み合わせとしては LF, PF がそれぞれ単独で形成される場合, LF の後に FSP が形成される場合, 更には PF の後に FSP が形成される場合の計4通りの組み合わせがある(図5(b)). なお, 個々のモデルに対する変態率の変化は Johnson-Mehr-Avrami-Kolmogorov (JMAK) 方程式を用いて与えられる(26)(27). 図6は, 全てのモデルのモデルパラメータを最尤推定により求め, 推定誤差が小さかった上位3つのモデルの推定結果と実験結果を比較した図である. いずれのモデルも推定誤差は十分に小さいことが分かり, これだけでは最適なモデル選択は難しい. しかし一方で, 表1に示す様に BFE からは, PF+FSP モデルが他のモデルよりも遥かに大きな尤度を示すことが分かる. 実際, 冶金学的観察からは Pill-box 型の粒界フェライトが形成された後に FSP が形成されることが観察される. また, その

遷移温度も PF + FSP モデルと一致しており、BFE を用いた推定結果の妥当性を支持する結果となっている⁽²⁵⁾。

3. 3D/4D 分析システム

3D/4D 分析システムでは、巨大な材料組織の 3 次元情報を得るための画像データを効率的に扱うクラウドシステムである Material Image Communication Cloud (MICC)⁽²⁸⁾ と、材料組織の 3 次元構造を活用した特性予測を実際に体験出来る Materials Integration Phase Analyzer (MIPHA)⁽²⁹⁾ の開発を行った。

(1) MICC

構造材料の特性を考える場合、材料組織の 3 次元構造の詳細を明らかにすることは重要と考えられている。しかし、そのためには 2 次元の断面組織画像を集約し、3 次元画像を構築する 3 次元画像処理環境が不可欠だが、その環境を手にするには高いコストや専門的な知識を必要とする。そのため、従来の材料組織の解析は主に 2 次元の断面組織画像が利用されているに過ぎなかった。また、たとえ材料組織の 3 次元画像が構築できたとしても、複雑な材料の幾何形状を抽出するには材料の組織形成に関する深い知識が必要であり、長年の経験を備えた専門家でも簡単ではない。そのため、知識や経験に頼らずに試行錯誤の中から適切な画像処理手法を組み合わせ見出すシステムが必要とされている。

MICC は、クラウド上で動作する 3 次元画像処理環境であり、ネットワークを通してアクセスすることで、あたかも手元の端末で大規模な画像処理を実行しているように見せることができるシステムになっている(図 7)。また、研究室や研究者ごとに画像データへのアクセス権限も管理でき、利用者間でのデータ共有の仕組みも備えている。そのため、複数の研究機関の連携や共同研究の効率化を支援できる構成となっている。さらに画像処理の履歴やその管理機能を有しており、過去に行ったすべての画像処理の履歴を記録することが可能である(図 8)。このような履歴を利用することで、将来的には多くの研究者による無数の試行錯誤の中から最適な画像処理方法を見出すことができると期待されている。

MICC の適用例として、鋼の溶接部への適用事例を紹介する。図 9(a) はシリアルセクションングにより取得した鋼組織の光学顕微鏡写真を再構成することで得られた材料の 3 次元組織を、様々な方向で切り出した断面画像を表示している様子を示している。この様に任意断面の材料組織を抽出することで、例えば旧オーステナイト粒界やマルテンサイト組織のブロックやパケットといった階層的な 3 次元構造を容易に抽出することが可能になるのである。また、図 9(b) はこの様にして抽出したブロックの 3 次元構造を示している。この例では専門家が様々な断面における組織形態から組

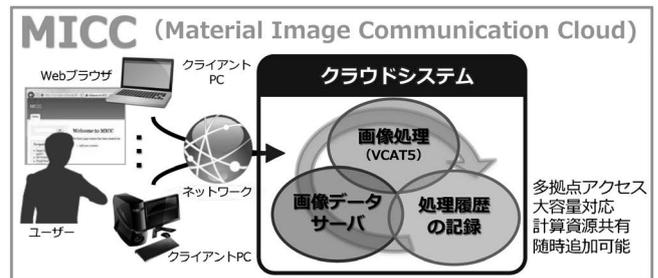


図 7 MICC の概略。

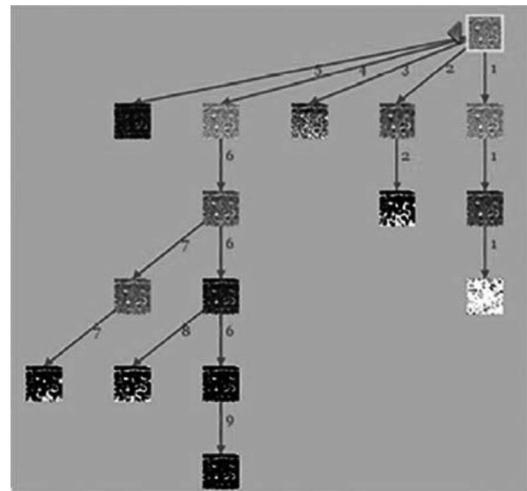


図 8 画像処理履歴のデータベース化。

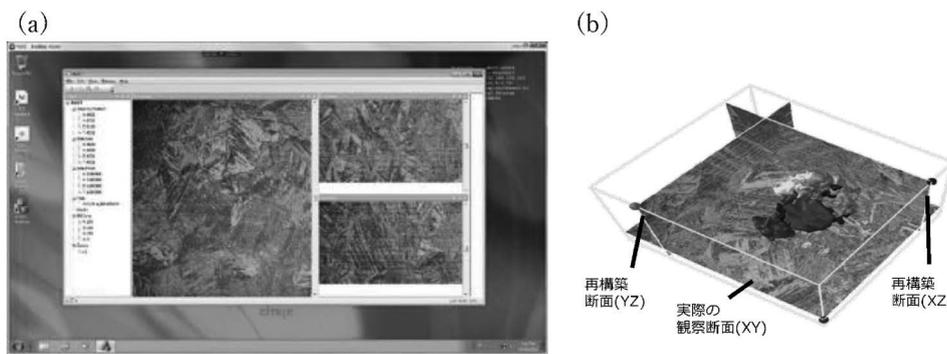


図 9 鋼組織の 3 次元組織再構成と組織抽出。

織境界の抽出を行っているが、この様な抽出をする過程の作業履歴を全て蓄積したデータを学習することで、シリアルセクションングにより得られた光学顕微鏡写真から自動的に組織判別や抽出が可能になると期待される。

(2) MIPHA

前述のように「材料組織の3次元幾何構造は特性の予測に重要である筈だ」と材料屋なら誰も想像している。しかし、実際に材料組織の3次元情報の集め方や利活用方法、更にはその効果となると必ずしも自明ではない。そこでMI統合システムが稼働する以前に、材料組織の3次元情報の扱い方や3次元の組織情報の効果をデモンストレーションする必要があり、そのプロトタイプとしてMIPHAを先行して開発を行った。

MIPHAはMI統合システムが目指した枠組みと同様に、材料組織の3次元情報を扱う上で不可欠な要素である、①組織識別、②2次元特徴量抽出、③3次元特徴量抽出、④特性推定、⑤逆解析を個々のモジュールとして実行できる統合型システムとなっている。特に画像の重要な特徴量としては、材料工学的に重要な特徴量(粒径、体積率など)と数学・画像工学的に重要な特徴量(自己相関関数、相互情報量、二点相関関数の距離、パーシステントホモロジーなど)があるが、MIPHAはワンクリックで前者の特徴量を画像から抽出するシステムとなっている。また、開発が続けられているshinyMIPHAでは後者の特徴量を抽出する。更に、MIPHAではこれらの特徴量を用いて、簡単に精度良く特性

の予測ができることが理解できるツールとなっている。

MIPHAの適用事例として、DP鋼の特性を推定した例を示す。図10はシリアルセクションングにより得られた光学顕微鏡写真から、機械学習によりフェライトやマルテンサイトを自動認識し、その情報を利用して3次元的な組織を再構成した例を示している。また、図11には応力-ひずみ曲線に影響する材料組織因子を示すが、ここに含まれる多くの幾何学的記述子をMIPHAでは抽出可能になっており、これらを様々な機械学習手法を適用することで、簡単に応力-ひずみ曲線が推定できることが体験できる⁽²⁹⁾。

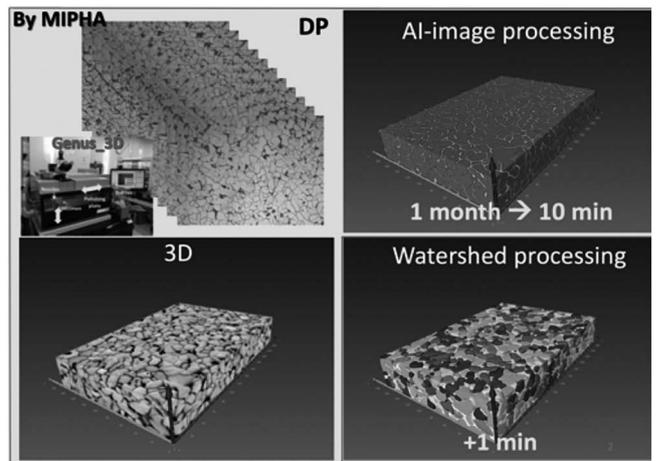


図10 DP鋼組織の3次元組織再構成と組織抽出。

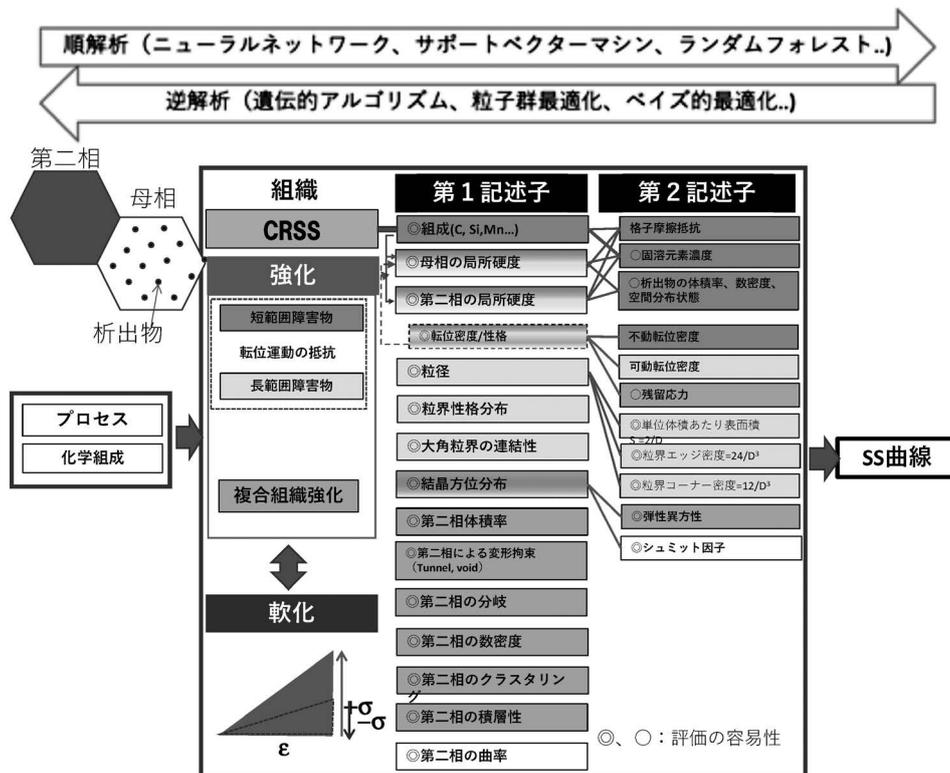


図11 MIPHAで利用可能な記述子と順解析/逆解析。

SIP-MI プロジェクトにおける
統合システムの開発源 聡¹⁾ 門平卓也²⁾
伊藤海太³⁾ 渡邊 誠⁴⁾

1. 緒 言

近年、構造材料に要求される性能が厳しく、かつ多岐にわたるようになってきた。例えば航空機材料においては、さらなる軽量化、燃焼ガスの温度上昇、高応力・腐食環境への適応などがいずれも高いレベルで求められている。こうした多岐にわたる厳しい要求に応えるために、最適化を必要とする因子は複雑化するばかりである。このような状況において、研究者やエンジニアの勘や経験に頼る従来の材料開発方法では、新規材料開発に膨大な時間を費やすことから、開発の効率化、加速が強く望まれるようになってきた。

これに対し、米国では PSPP モデル (Process, Structure, Property, Performance)⁽¹⁾ に基礎においた ICME (Integrated Computational Materials Engineering) が脚光を浴びている⁽²⁾⁽³⁾。ICME とは材料開発、製造を、プロセス、構造、特性、性能に分解し、理論モデルや計算科学による解析を中心に材料開発の促進を行うものである。日本でも、2014年に開始された SIP プロジェクトの中で、航空機材料を対象とした「革新的構造材料」に関するプロジェクト⁽⁴⁾⁽⁵⁾ が実行され、5年間のプロジェクトの中で欧米とも情報交換を行いながら材料設計・開発のための基盤システム、マテリアルズインテグレーションシステム (Materials Integration System, 以下 MI システム) の開発を続けてきた。

2. MI システムの開発思想

プロジェクトを通じて我々はマテリアルズインテグレーションの定義・概念⁽⁶⁾⁽⁷⁾ に基づき、産官学の連携チームで材料開発のための統合的なシステム (MI システム) の開発を進めてきた。具体的には、以下を実現するための基盤システムの開発を行ってきた。

- 材料開発におけるワークフローの設計・実行
 - 材料工学の持つ概念レベルでの語彙やデータの接続性の整理
 - データの蓄積、および機械学習などによるデータの活用
- 以下、具体的に MI システムに実装された機能などを説明していく。

(1) 材料開発におけるワークフローの設計・実行

まず材料工学の問題を解くためのツール (数値計算プログラムやデータなど) の入出力データや内在する物理モデルを洗い出す。次に対象となる課題に解を与えるようなツール同士の接続 (これをワークフローと呼ぶ) をユーザは試行錯誤しながら設計する。そうして設計したワークフローに対して、入力パラメータを与えて一気通貫で計算を実行する、というような仕組みを整えた。一気通貫で計算できる環境で最も重要なメリットは、事象を整理して影響しうる因子を露わに書き下すことにより、課題の解決方法を特定の研究者の主観に依存しない形で客 thể化できることである。

ユーザは MI システムを通じて、ツールの接続性の是非や効率性を、試行錯誤を通じて明示的に考えることができる。つまり、経験と勘という暗黙知を利用してきた従来の材料開発に対して、MI システムは思考の手段を提供できると考えている。

(2) 材料工学の持つ概念レベルでの語彙やデータの接続性の整理

MI システムでは、ツール間は単なる数値データや入出力ファイルを受け渡すだけでなく、合金組成やプロセス条件に付与されている材料工学上の概念 (モデル化されたデータ) を受け渡すことで、ツールの開発や、ワークフローの設計をより材料工学の観点から行えるようにすることを考慮している。これにより、さまざまなスケールの事象や、異なる分野

* 国立研究開発法人 物質・材料研究機構 統合型材料開発・情報基盤部門 (MaDIS) 1) 主幹研究員 2) 主幹エンジニア 3) 主任研究員 4) チームリーダー (〒305-0044 つくば市並木 1-1)

** 東京大学 先端科学技術研究センター; 准教授

Materials Integration System for Materials Design and Manufacturing; Satoshi Minamoto*, Takuya Kadohira*, Kaita Ito* and Makoto Watanabe** (*Research & Services Division of Materials Data and Integrated System (MaDIS), National Institute for Materials Science, Tsukuba. **Research Center for Advanced Science and Technology, The University of Tokyo, Tokyo)

Keywords: materials integration, structural materials, integrated computational materials engineering, modules, workflow, data schema, systems approach, data science, inverse design

2019年5月8日受理 [doi:10.2320/materia.58.511]

の物理現象を連成させて解く、などの応用がより容易になると考えている。また、材料工学の観点から設計されたワークフロー同士は、上で述べたようにさまざまな指標で比較・評価できるほか、ノウハウとしての蓄積も重要であり、今後望まれる材料設計の多様化、複雑化の対応に必要な基盤的な情報源となると期待できる。

このようにして、過去の知見を踏まえながら、材料工学の知見を踏まえて設計と評価のサイクルを回すことで、材料の特性を支配する新しい物理や重要因子を発見することに向けても、MIシステムは活用されていこうと考えている。

(3) データの蓄積、および機械学習などによるデータの活用

前述の通り、一気通貫で計算ができるように整理されたワークフローは、計算の自動化が比較的容易であり、MIシステムを介して出力される多様なデータは効率的に整理して蓄積されるために、その再利用性が確保されている。つまり蓄積データに対して、過去のデータを参照するばかりでなく、機械学習技術などを利用することで多様な予測モデルが構築でき、ワークフロー設計において組み合わせ可能なツールの一つとして再び利用することが可能である。この再利用性は非常に重要で、例えば計算に時間のかかるツールに対しては事前に生成しておいた予測モデルで代替して、着目すべき部分に焦点を当てて資源を集中させることができるなど、試行錯誤の効率化が可能である。

3. MIシステムの構成要素

図1にMIシステムのプロジェクト内での位置づけを示す。材料の性能が、材料マイクロ組織を予測する部分と性能を予測する部分に加えて、情報学的に両者をサポートする部分を包括的に含むシステム構成となっている。SIPでは例題として溶接部材が持つ課題を取り上げているが、MIシステムはその他の問題にも対応できるように設計がなされている。

図2にMIシステムにおけるプラットフォームとしての機

能開発の概念図を示す。構成要素としてはワークフローの設計・実行部分、語彙インベントリ部分が主たるものであるが、いくつかのサブシステムも構築している。以下に、MIシステムの構成要素についてまとめる。

(1) ワークフローデザイナー/プレイヤー

ワークフローの設計・実行を行うアプリケーションである。ユーザはここで、実際の解析に関する試行錯誤を繰り返すことができる。ここで重要なことは、用いるプログラムの入力ファイル名などを入力ポートとして設計せずに、できるだけ材料工学上の概念に近い言葉で記述を行うことである。そのような言葉で作成されたワークフローは計算プログラムと可換なモジュールが用意できればプログラムを自在に変更しても同じ概念で計算が流れることを意味する。逆に同じ概念で記述したワークフローであってもモジュールが異なることで計算の結果が左右される場合は、他に考えるべき因子が存在することを意味している。この作業を繰り返すことが事象の理解に貢献するものとする。

(2) 特性空間語彙インベントリシステム

語彙インベントリシステムでは、材料の性能予測のための語彙情報の管理に関する概念⁽⁸⁾を実装した機能を備えている。これは記述子、予測モデル、ワークフロー、実行結果の4階層に分けて、固有識別子を付与して管理するシステムであり、階層ごとに以下のように構成される。

- (1) 材料のプロセス、構造、特性、性能の各々に関するパラメータが記述された記述子を蓄積する機能
- (2) 材料のプロセス、構造、特性、性能の少なくとも2つについての関連の入出力の情報を記述した予測モデルを記録する機能
- (3) 2つ以上の予測モデルの関連を、記述子を用いて書き下したワークフローを記録するための機能
- (4) ワークフローごとの実行結果を、各予測モデルにおける出力結果も含めて蓄積する機能

このような構成の下、設計されたワークフローが実行され、実際のデータの流れを具現化していくことになるが、併せて記述子の情報を語彙インベントリから俯瞰的に眺めるこ

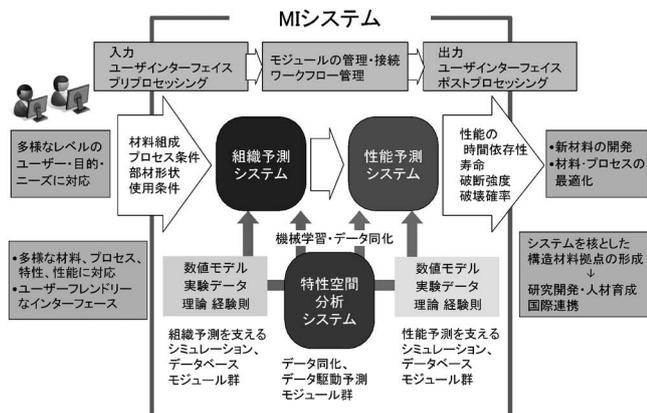


図1 プロジェクト内におけるMIシステムの位置づけ。

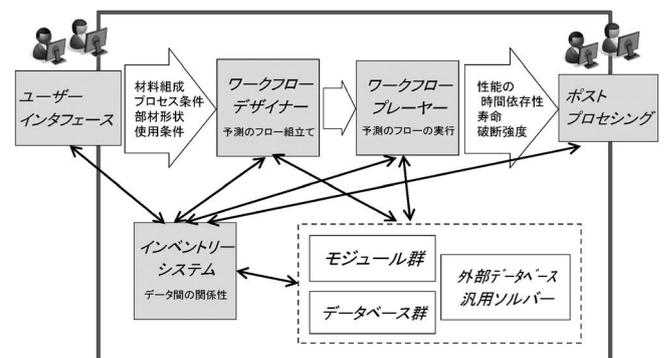


図2 MIシステムのプラットフォーム機能開発。

とで物理モデルの関係性を見ることができ、不足しているモデルや考慮すべき因子を入れ込む可能性を検証することができる。

すなわち、語彙インベントリシステムは材料工学の知識、概念を元に語彙の関係性を表現する空間であり、概念の関係性を評価するための情報を生成、解析、可視化するためのシステムである。モジュールが可換であるかどうかを形式知からのみではなく、蓄積したデータや語彙情報などからシステム側でも判断の支援を行っていく。これはさまざまなデータを集約することにより集合知としての情報抽出を目的としている。現在は、さまざまな計算データやワークフローデータに対してスコアリングを行い、類似性や接続性を判定する機能が実装されているが、スコアリングのアルゴリズムに関しては今後さらに検証を行っていく必要がある。

(3) サブシステム、あるいは外部システムとの連携機能

MI システムにはサブシステムとして、モジュールのシステムへの登録支援機能(MI モジュールビルダ)や、機械学習による予測モデル生成器(MIREA: MI REgression Analyzer)が用意されており、いずれも MI システムとの接続性を重要視して構築されている。さらに溶接問題に特化した GUI を搭載したサブシステム(WFAS: Weld Fatigue Analysis online Simulator)が開発されている。

さらにサブシステムと外部システムとの連携についても検証を行っている。例えば、国際的に広く利用されている GRANTA Design 社の材料データベース(GRANTA MI)⁽⁹⁾ から検索した材料データを、MIREA を通じて抽出し、機械学習による予測モデル生成の後、MI システム上で利用可能なツールとする仕組みを構築した。

4. 溶接問題を例題とした実例

SIP では、溶接部の問題でも特にクリープ寿命解析、脆性破壊解析、疲労寿命解析、水素脆性の解析の4つの課題に関して主に取り組んできた。以下に、これまでに実装されたワークフロー例を示す。

(1) クリープ解析のためのワークフロー

図3にクリープ寿命計算におけるワークフローデザインの例を示す。青字が入力項目、黄色がツール、グレーが出力項目である。クリープ解析の場合、材料組成や試験温度、応力条件が入力パラメータとなり、クリープ寿命の値や可視化に関するファイルが出力となる。ここでは有限要素解析(FEM)の結果を用いているが、FEM 解析についても形状情報や、材料物性値を含むワークフローが作成されている。

(2) 脆性破壊解析のためのワークフロー

図4に脆性破壊の解析のためのワークフローデザインの例を示す。ここでは、材料組成情報やマイクロ組織観察から得られる情報(相分率など)も入力パラメータとして必要である。

これらの情報は熱力学計算など他の解析ツールから得ることも可能なので、そのようなツールと組み合わせていくことで、ワークフロー自体を拡張することが可能である。

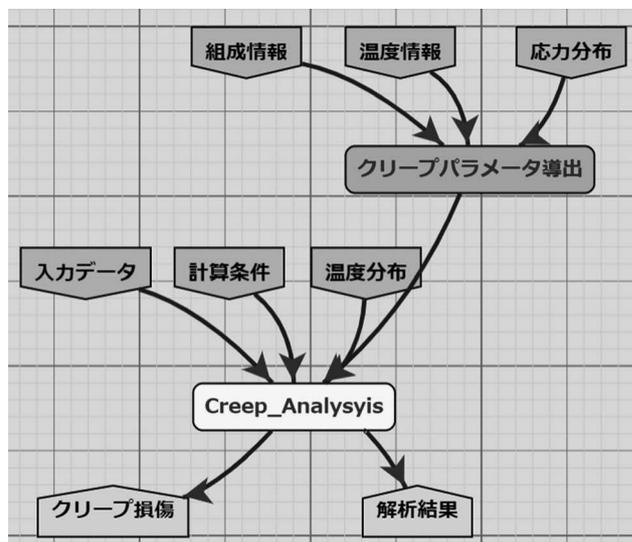


図3 クリープ寿命計算におけるワークフローデザイン例。

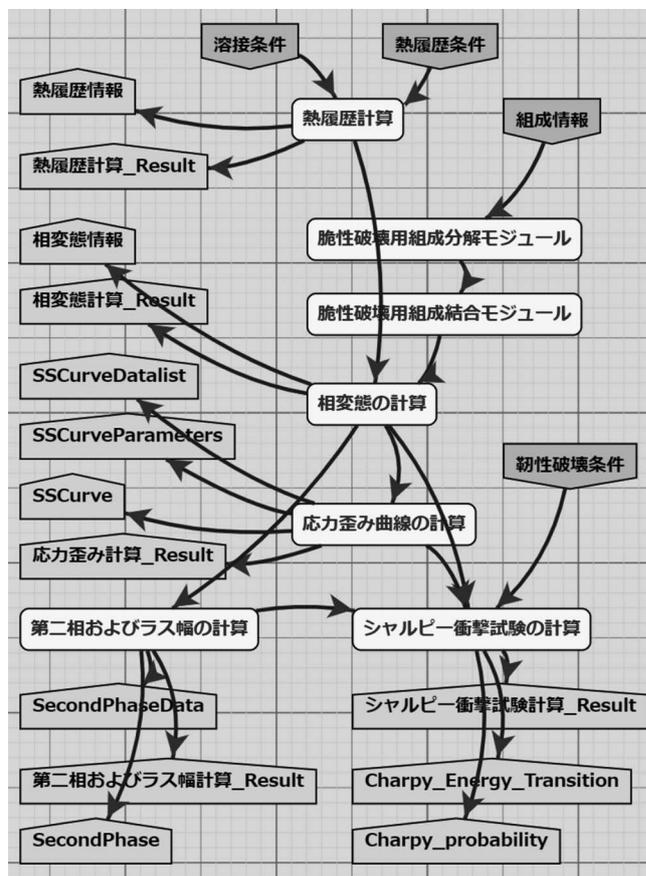


図4 脆性破壊解析のためのワークフローデザイン例。

5. ユーザ利便性と各種データへのアクセス制御

MI システムは多岐にわたる機能を複数の機関やユーザで利用されること想定しているために、セキュリティ確保の対策がとられている。具体的にはシングルサインオン機能や、マルチテナント方式の採用、計算データや実行モジュール、ワークフローデータに対するアクセス権限設定機能などがある。アクセス権の権限設定は、組織単位、グループ単位、ユーザ単位で設定できる。

MI システムでは、汎用化されたワークフローから多くのデータを取得し、広いパラメータ空間を見ようとするものであり、データ共有は強く推奨される。更にそのことが、データ共有の強い動機付けになることを期待する。

6. ま と め

マテリアルズインテグレーションという概念を具現化した MI システムは、材料一般の物理現象の背景の把握をデータの活用により実現しようとしたシステムである。これまで特定の物理モデルを解くための要素技術の開発や拡張を通じて現象を捉えようとする試みは力強く行われてきている。本プロジェクトでは材料開発に必要なプロセス条件などの境界条件を検討し、材料の持つ性能などを把握しようとする試みを、データや語彙などが持つリッチな情報を元に物理モデルを見直し、データ空間を広げようとする試みを行ってきた。したがって要素技術開発は依然重要な研究テーマではあるが、それらの接続性の議論を継続的に進めていくことも今後非常に重要になると考える。特に不均一性が材料の性能の要となる構造材料においては、整理されたデータを集約しどのように接続させるかを議論し、情報工学的な手法の支援の下、データから見えてくる因子を明確にし、物理モデルの精緻化に関する提案を行えるシステムとして成長しなければならない。

2018年11月からは、第2期 SIP プロジェクト「統合型材料開発システムによるマテリアル革命」が併走する形で開始

した。引き続き MI システムを考えるための道具として API も含めて活用できるように開発を行う。さらに広く産学共同での開発を続け、利用可能なツールを拡充し、複雑化する材料開発における現象理解のためのプラットフォームとしての発展を目指す。

本研究は、内閣府総合科学技術・イノベーション会議の戦略的イノベーション創造プログラム(SIP)「革新的構造材料」及び「統合型材料開発システムによるマテリアル革命」(管理法人：JST)によって実施されました。ここに感謝申し上げます。

文 献

- (1) G. Schmitz, U. Pahl: Handbook of Software Solutions for ICME, Wiley-VCH Verlag, (2016).
- (2) 村山光宏：まてりあ, **51**(2012), 462-466.
- (3) G. B. Olson: Science, **288**(2000), 993-998.
- (4) 戦略的イノベーション創造プログラム(SIP) : <http://www.jst.go.jp/sip/k03.html>
- (5) 佐久田博司, 長谷川 大, 源 聡 : マイクロサービスによる Materials Integration 入門, (2018).
- (6) 小関敏彦 : 情報管理, **59**(2016), 165-171.
- (7) https://www.jst.go.jp/sip/k03/sm4i/dl/pamph_d1_j.pdf
- (8) T. Ashino: Data Science Journal, **9**(2010), 54-61.
- (9) <https://grantadesign.com/>

★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★
源 聡
1995年 京都大学大学院人間・環境学研究所博士課程前期修了
1995年～2014年 民間企業勤務
2008年 博士(理学) 東京工業大学
2015年～ 現職
専門分野 : 計算科学
©SIP「革新的構造材料」開始から MI システムの開発に従事。
★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★



源 聡 門平卓也 伊藤海太 渡邊 誠

放射光による工業材料評価

～3. 放射光による X 線分光～

廣 沢 一 郎*

3・1 放射光を用いた X 線分光

国内の放射光施設で行われている X 線分光測定の代表は X 線吸収分光と光電子分光であろう。X 線吸収分光は軟 X 線域から硬 X 線域にかけて多数の利用事例があるが、特に硬 X 線域の X 線吸収分光は高輝度な連続スペクトルを有する X 線光源である放射光の登場によって普及した測定手法の代表である。このため、国内にある複数の放射光施設で硬 X 線域の XAFS 測定に対応した複数のビームラインが設置されている⁽¹⁾。放射光施設での実施が前提の測定技術ではあるが、日本語の解説書⁽²⁾が発行されるほどに普及している。

そこで、本稿では主に硬 X 線域の XAFS を取り上げる。更に、XAFS と同様、本格的な利用は放射光施設から開始されてはいるが⁽³⁾、最近では実験室装置の利用も始まり⁽⁴⁾、今後急速に普及する可能性がある硬 X 線光電子分光(Hard X-ray photoelectron spectroscopy: HAXPES)も簡単に紹介する。

3・2 硬 X 線域の X 線吸収分光 XAFS

(1) XAFS の特徴と事例

硬 X 線域(概ね 4 keV 以上)の X 線吸収分光は通常 XAFS (X-ray absorption fine structure)と呼ばれている。分析技術として日常的に行われている赤外吸収分光や紫外可視吸収分光と同様に試料を透過する X 線強度の光子エネルギー(波長)依存性の測定より X 線吸収スペクトルを得る手法であり、硬 X 線域の X 線吸収の主因が内殻電子の励起であることを反映して、以下のように元素選択的に化学状態(価数)や注目する元素周囲の局所構造の知見が得られる。

図3.1は BaMgAl₁₃O₁₇:Eu(紫外線励起の青色蛍光体 BAM, Eu は Ba に対して数%の濃度で添加されている)の Ba と Eu の X 線吸収スペクトルであり、縦軸の X 線吸収は試料を透過した X 線の割合である X 線透過率の対数の絶対値が表示されている。この図が示すとおり Ba と Eu の L 殻電子のエネルギーの違いを反映して X 線吸収が大きく変化する X 線エネルギー(吸収端のエネルギー)は Ba が 37.5 keV, Eu が 48.5 keV に観測されている(元素選択性)。図3.2は EuCl₂ と EuCl₃ の Eu L III 吸収端の XAFS スペクトルであるが、同じ元素でも価数の違いを反映して吸収端エネルギーに違いが観測されている⁽⁵⁾⁽⁶⁾。更に、図3.3は ZnO と ZnCl₂ の Zn の K

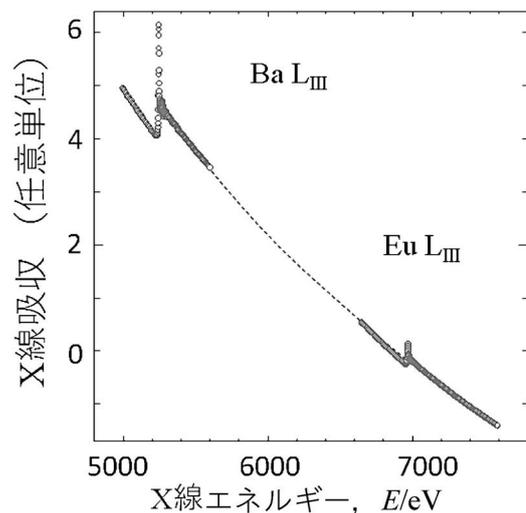


図3.1 Eu 添加青色蛍光体 BaMgAl₁₃O₁₇:Eu (Eu の添加量はおよそ10%)の X 線吸収スペクトル (Spring-8 BL19B2 で測定)。実際の測定データを○で示す。破線は測定結果からの内挿である。

* 公益財団法人高輝度光科学研究センター；産業利用推進室長(〒679-5198 兵庫県佐用郡佐用町光都 1-1-1) Synchrotron Radiation as Analytical Tools for industrial materials～ 3. X-ray Spectroscopic Experiments with Synchrotron Radiation～; Ichiro Hirose (Japan Synchrotron Radiation Research Institute (JASRI), Sayo-gun, Hyogo) Keywords: synchrotron radiation, x-ray grazing incidence, x-ray diffraction, industrial materials 2019年5月7日受理[doi:10.2320/materia.58.515]

収集端における XAFS スペクトルである⁽⁷⁾。どちらも Zn は 2 価で、K 吸収端のエネルギーに差はないが、Zn に結合した元素の違いを反映した明瞭な違いが観測されている。以上のように表情豊かな吸収スペクトルが観測される吸収端近傍において、吸収端のエネルギーから概ね 50 eV 高エネルギー側の領域の XAFS スペクトルは XANES (X-ray Absorption Near-Edge Structure) と呼ばれる。XANES スペクトルを解釈するためには電子状態計算が必要であるが、組成や結晶構造が既知である物質の XANES スペクトルとの比較により測定対象の状態を推定することが広く行われている(指紋

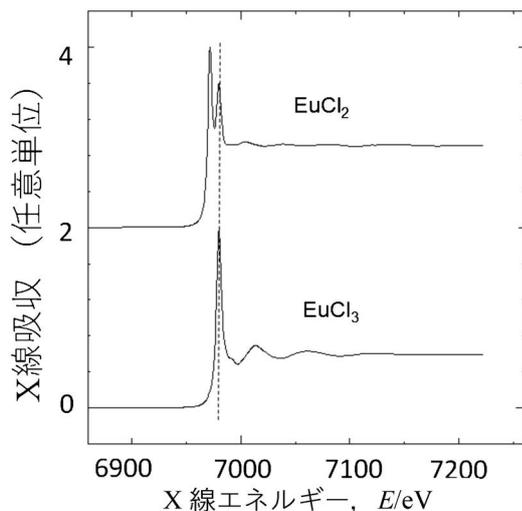


図3.2 EuCl₂(上)とEuCl₃(下)のEu L_{III}吸収端で測定したXAFSスペクトル(SPring-8 BL19B2で測定). EuCl₂は6972 eV, EuCl₃は6980 eV(破線)で吸収が最大となっている。なお, EuCl₂で6980 eVにみられる極大はEuCl₂の一部が測定中に分解して生じたEu₂O₃によるものと考えられる。

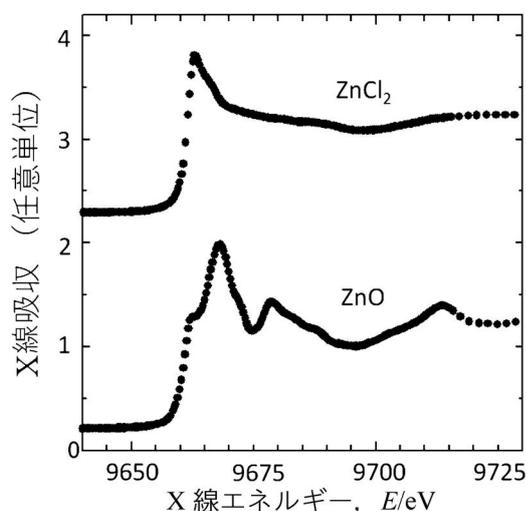


図3.3 SPring-8 BL14B2で測定したZnCl₂(上)及びZnO(下)のXANESスペクトル(SPring-8 BL14B2 XAFS標準試料データベースより)。

法)⁽⁵⁾⁽⁶⁾。XANES スペクトルを材料評価に利用する場合、参照物質の XANES スペクトルも実際に測定することが原則である。しかし、参照物質の入手が困難な場合や参照物質の選定に迷う場合は、JASRI 産業利用推進室が構築中の“XAFS 標準試料データベース <http://support.spring8.or.jp/xafs/standardDB/standardDB.html>”をご参照いただきたい⁽⁷⁾。当該データベースには BL14B2 で測定した 913 の XAFS スペクトル(2018 年度末)が収録され、測定データを自由にダウンロードすることができる。このデータベースの利用にあたっては、SPring-8 のユーザー ID が必要なので SPring-8 の利用経験がない方は SPring-8 User Information の WEB ページ(<https://user.spring8.or.jp/>)より取得していただきたい。

XANES より高エネルギーの領域の XAFS スペクトルにも EXAFS (Extended X-ray Absorption Fine Structure) と呼ばれる微弱な振動構造が観測される。EXAFS 領域では光電子の波動関数を自由電子で近似することが可能であるため、測定値から抽出した EXAFS 振動成分を光電子の運動エネルギー(入射 X 線の対象とする元素の吸収端からの差)の波数でフーリエ変換して得られる動径構造関数(Radial structure function)より、吸収原子周囲の配位距離、配位数、配位子の元素種などの局所構造に関する知見が得られる。図 3.4 は青色蛍光体 BAM の Ba 及び Eu の L_{III} 吸収端の EXAFS スペクトル、図 3.5 はそれらをフーリエ変換して得られた動径構造関数である⁽⁵⁾⁽⁶⁾。X 線回折により結晶内では Ba から約 0.27 nm の距離に Al と結合した 9 個の酸素原子が配位していることが示されていることから、動径構造関数の 0.2 から 0.3 nm 付近に現れた 2 つのピークは Ba に配位した酸素原子とその外側にある Al の原子に対応した信号と結論

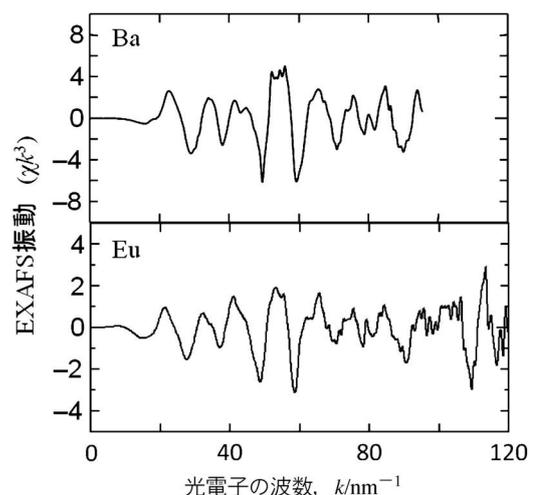


図3.4 Eu 添加青色蛍光体 BaMgAl₁₀O₁₇:Eu の Ba (上)と Eu (下)の L_{III} 吸収端で測定した XAFS スペクトルより導出した EXAFS 振動スペクトル。横軸は光電子の運動エネルギー(E_k)に対応する波数 k ($E_k = \hbar^2 k^2 / 8\pi^2 m_e$; m_e は電子の質量, \hbar はプランク定数)。高波数域での振動が明瞭なるように k^3 の重みを乗じている。

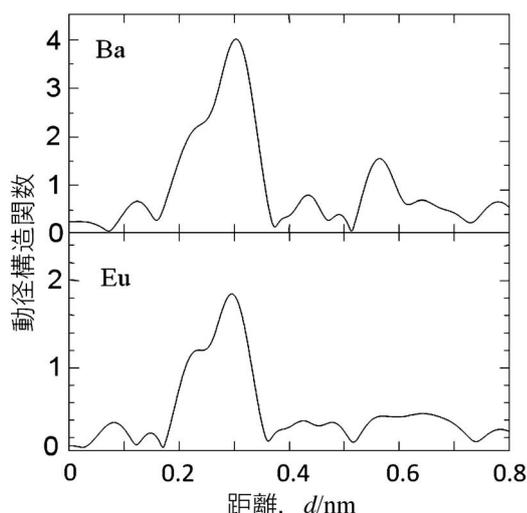


図3.5 Eu 添加青色蛍光体 BaMgAl₁₀O₁₇:Eu の Ba (上) と Eu (下) の L_{III} 吸収端の EXAFS 振動 (図3.4) をフーリエ変換して得られた振幅成分 (動径構造関数). フーリエ変換の波数域は Ba が29.5から87.5 nm⁻¹, Eu が30.0から93.0 nm⁻¹.

できる. 一方, 添加された Eu の結晶内での位置を X 線回折により明らかにすることは困難であるが, 元素種が異なっているにもかかわらず, Ba と Eu とでは EXAFS 振動スペクトル, 動径構造関数ともによく似た特徴を有するため Eu の配位環境は Ba と同じである可能性が強く示唆される. そこで, 図3.5に示した Eu の動径構造関数の0.2から0.3 nm のピークに注目し, Ba と同様に Eu は最近接に6個, 第2近接に3個の O 原子, 第3近接に12個の Al 原子が配位していると仮定し, 計算値が測定値と一致するように Eu からの距離の最適化を行った. その結果, Eu から第1近接, 第2近接, 第3近接までの距離の最適値は0.277 nm, 0.325 nm, 0.367 nm となり, Eu が Ba を置換していると考えても矛盾しない. その一方で, 添加した Eu の配位環境として提案されていた17個の O 原子と12個の Al 原子が配位した構造や6個の O 原子と6個の Al 原子が配位した構造では, 原子間距離の最適化で測定結果を再現することができず, Eu による Ba の置換を支持する結果となった⁽⁸⁾. この例のように少量添加された元素の結晶内での位置や非晶質物質⁽⁹⁾など X 線回折による構造検討が難しい対象でも XAFS (EXAFS) 測定から有用な知見を得ることが可能で, 液体中に溶解した金属イオンの配位環境の検討にも用いられている⁽¹⁰⁾.

先の例のように EXAFS 測定より得られる動径構造関数は対象とする元素の配位環境を反映しているが, ピークの位置や高さは原子間距離や配位数の正確な値ではない. 原子間距離や配位数を検討する場合は, 先の例のようにプロファイルフィッティングによるパラメーターの最適化が必須であることにご注意いただきたい. また, パラメーター同士が強く相関する組み合わせ (例: 配位数と Debye-Waller factor, 光電子の平均自由行程 等々) があるので, 注意して最適化を行うことが必要である.

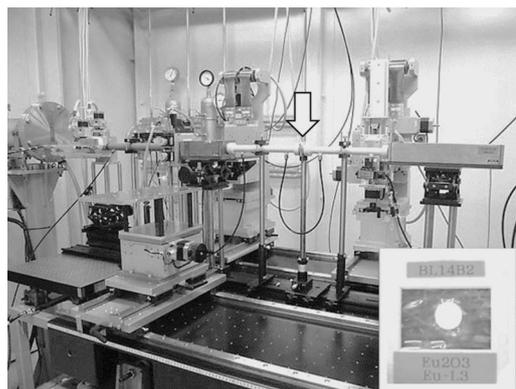


図3.6 XAFS 測定装置の例 (SPring-8 BL14B2). 透過法で測定する場合は, 右下の挿入図のように錠剤型に形成した試料を矢印の位置に置く. この例では, 錠剤型に形成した試料を薄いポリエチレン袋に入れて周辺をシーラーで封じ, 袋ごとスライドマウントに挟んで固定している.

なお, 動径構造関数の導出や配位構造のパラメーター最適化を行うプログラムは複数あるが <http://bruceravel.github.io/demeter/> より無料で入手できる ATHENA, ARTEMIS (Demeter) が広く使われている⁽¹¹⁾. 国内の各施設が実施している XAFS 解析講習会もこのプログラムを対象としている.

(2) 測定方法と試料調製

図3.6は SPring-8 の BL14B2 に設置された XAFS 測定装置の写真であるが, 測定者が行う作業は所定の位置 (図3.6では矢印で示した位置) に測定試料を置くだけである. BL14B2 では試料交換や試料位置調整とともに測定装置パラメーターの調整も全自動で行っている⁽¹²⁾, 未経験者でも容易に XAFS 測定を行うことができる. このように測定自身は容易であるが, 良好なデータを得るには試料調製や目的に応じた測定法や測定条件の選択が適切に行われていることが必要である. 以下では代表的な XAFS 測定法である透過法と蛍光法の特徴と試料調製について紹介する.

試料を透過した X 線の強度をそのまま測定する透過法は最も信頼できる測定法である. 透過法用の試料は図3.6の右下に示したような錠剤型に調製することが広く行われている. 錠剤形成に用いるバインダーには X 線吸収が少なく化学的に安定な BN (窒化ホウ素) 等を用いる. 錠剤中に含まれる試料が希薄すぎる場合は, X 線吸収が小さくなるため良好な XAFS スペクトルが得られないが, 十分な強度の X 線が試料を透過しなければ X 線吸収量を精度よく測定することができない (極端に高濃度だと X 線が透過しない). EXAFS 測定では, 試料による X 線吸収量の適値として, 透過 X 線強度が 1% 以上で吸収端における吸収量変化が 20% 以上が目安になる. XANES にのみ注目する場合でも吸収端での吸収量変化が 5% 以上あることが望ましい. このような条件での XAFS 測定に適した試料濃度の計算は試料組成や対象

元素に依存するために少々面倒ではあるが、<http://support.spring8.or.jp/xafs/history.html> より無料で入手できる XAFS 試料調製ガイドプログラム等を用いることで容易に計算することができる。なお、X 線エネルギーの走査により X 線の進行方向や強度分布、単色性(残留高調波成分)が微妙に変化することがあるため、錠剤試料は(1)試料の粉碎が十分に行われていること、(2)錠剤全体にわたって試料が均一に分散していること、(3)錠剤の厚さが均一であることが求められる。

測定対象の元素濃度が希薄で透過法で測定することができない場合や基板上に形成された極薄膜など十分な量の試料を確保できない場合は蛍光法を試すことになる。元素ごとにエネルギーが決まった蛍光 X 線は、X 線吸収によって生じた内殻軌道の空孔を埋めるために高い準位から落ちてきた外殻電子が発するため、蛍光 X 線(特性 X 線)強度には X 線吸収量が反映される。つまり、蛍光法は蛍光 X 線強度の入射 X 線エネルギー依存の測定によって X 線吸収スペクトルを推定している。図3.7は積算時間や入射 X 線形状などの条件を同じにして測定した透過法と蛍光法の比較であるが、透過法では検出できなかった XAFS 振動が蛍光法では明瞭に観測できている。

このように、蛍光法は希薄な試料の XAFS 測定に有効であるが、X 線吸収係数と X 線の侵入深さは逆相関の関係にあるため、良好な XAFS スペクトルの取得には試料が“十分に希薄”であることが必要となる。均一で厚い試料においては、元素による X 線吸収が大きくなると試料内部への X 線侵入深さが短くなって蛍光 X 線を発生させる実効的な試料体積が小さくなり、発生する蛍光 X 線の量は X 線吸収係数ほどには増えない。このため、単体金属の箔など測定対象とする元素の濃度が極端に高い場合には、X 線吸収係数の

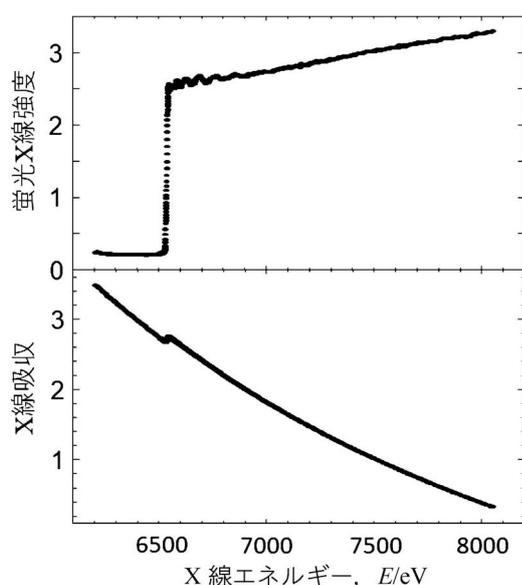


図3.7 蛍光法(上)と透過法(下)で測定(SPring-8 BL19B2したBa₃Mn₂Si₄₀のMn K吸収端のXAFS スペクトル)。

変化によらず発生する蛍光 X 線量はほぼ一定になることを簡単な計算で示すことができる。このように、蛍光法は試料の状態によっては吸収スペクトルを正確に推定できない場合があるため、試料調製を工夫して可能な限り透過法で測定するように努力することが望ましい。なお、基板上的薄膜試料の場合、基板が測定対象元素を含まず、膜厚が X 線侵入深さよりも十分に薄い試料に限り、高濃度な試料でも蛍光法を用いて XAFS スペクトルを取得することができる。

(3) XAFS の応用例

硬 X 線域の XAFS が材料評価技術として今日のように広く普及した理由は、硬 X 線は透過能が高いことから、温度や雰囲気などの試料環境制御が比較的容易であること、溶液試料も測定可能であるなど試料形態の制限が少ないこと、と考えている。このような特徴を活用して、溶液中での反応生成物の化学状態の時間変化を追跡する時分割 XAFS 測定⁽¹³⁾や、電極電位と燃料電池用卑金属触媒の液中での状態を調べる⁽¹⁴⁾等々、実験者の工夫次第で種々の試料環境下での XAFS 測定を行うことができるので、施設職員と協力しながら斬新な XAFS 実験に是非挑戦して頂きたい。なお、本稿では透過法と蛍光法のみを紹介したが、これ以外にも表面敏感な転換全電子収量法など特徴的な測定法がある。XAFS についてより詳しく知りたい方は成書⁽²⁾があるのでそちらをご参照いただきたい。

3・3 硬 X 線光電子分光(HAXPES)

光電子分光は軟 X 線域の放射光を利用した測定に加えて Al や Mg の特性 X 線を励起光源とした実験室装置が広く普及しているが、硬 X 線域での光電子分光の本格的な利用は SPring-8 の運用開始後となり⁽³⁾、その歴史は15年程度にすぎない。しかしながら、試料深部からの光電子を検出するために試料の表面状態による影響が小さく⁽¹⁵⁾、測定時の前処理が不要となる場合も少なくない。また、軟 X 線励起では難しい埋もれた界面の化学状態を非破壊で評価できることから利用が急拡大し⁽¹⁶⁾、最近では大気圧中での光電子スペクトルの測定や⁽¹⁷⁾、駆動中の有機半導体デバイスの測定⁽¹⁸⁾など新しい取り組みが活発に行われている。以下、HAXPES による試料深部の検討例として、熱酸化膜を有する Si 基板上に形成した厚さ30 nm のペンタセン膜の表面に厚さ10 nm の Au 電極を形成した試料(表面から、Au(10 nm)/pentacene (30 nm)/SiO₂(200 nm)/Si 基板)の Si 1s スペクトルの測定例を紹介する。

図3.8は X 線7940.16 keV の X 線を用いて測定した電圧印加がない状態でのスペクトル、図3.9が Au 電極に Si 基板に対して -15 V を印加した状態での Si 1s スペクトルである。どちらも試料表面に対する光電子の取り出し角(TOA: take off angle)により異なったスペクトルが観測されているが、TOA が小さいほど、試料表面に近い場所で発生した光電子の割合が大きくなるため、TOA 80°で強く観測されて

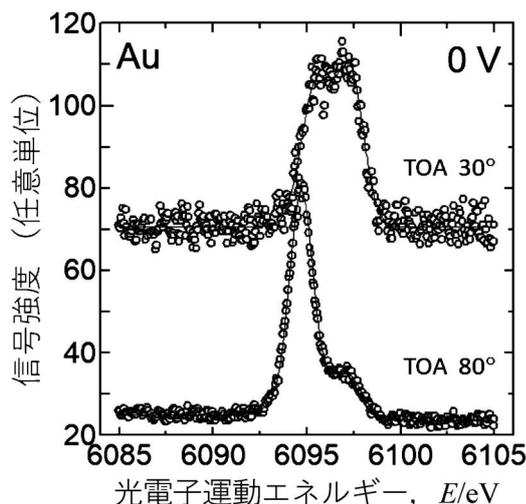


図3.8 Si 基板上に形成した Au(10 nm)/pentacene (30 nm)/SiO₂(200 nm)多層膜試料における Si 1s 光電子スペクトル. 上が TOA 30°, 下が TOA 80°での測定測定結果である. 表面の Au 電極と Si 基板との電位差は 0 V(等電位)に設定している. X線エネルギーは7940.16 keV(Au 4f スペクトルで校正).

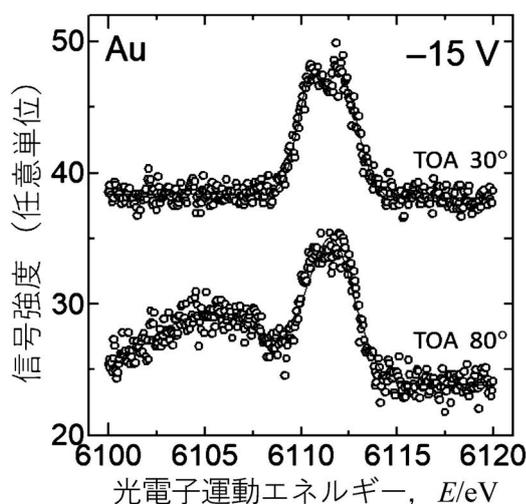


図3.9 表面の Au 電極に Si 基板に対して -15 V の電圧を印加して測定した Au(10 nm)/pentacene (30 nm)/SiO₂(200 nm)/Si 多層膜試料における Si 1s 光電子スペクトル. TOA は上が 30°, 下が 80°である.

いる光電子運動エネルギーが小さいピークが SiO₂ 膜深部の状態を反映した信号と考えられる. 図3.9が示すとおり, 電圧の印加により2つのピークの間隔が広がっていることから, SiO₂ 膜深部は pentacene との界面に近い部分よりも印加電圧への応答が小さいことを示している. このように, HAXPES は軟 X 線励起の光電子分光では測定が難しい材料深部(試料表面から数10 nm 程度)の外場応答を容易に測定できる.

3・4 入門講座のまとめに代えて

測定技術の向上や測定機器の自動化で“拍子抜け”するほど誰でも簡単に測定できるようになってきた(水産物養殖業を生業としている方(漁師さん)が測定のために SPring-8 に来所された例がある)が, 放射光実験に敷居の高さを感じる方も多いと思われる. まずは, “習うより慣れろ”で, 各放射光施設が毎年複数回実施している初心者向け測定実習(研修会)にご参加いただき, 体験していただきたい. 本入門講座が放射光利用への敷居を下げる端緒となれば幸甚である.

(完)

文 献

- (1) 廣沢一郎: ぶんせき, 10号(2015), 416-421.
- (2) 日本 XAFS 研究会編: XAFS の基礎と応用, 講談社サイエンスフィック, (2017).
- (3) K. Kobayashi, M. Yabashi, Y. Takata, T. Tokushima, S. Shin, K. Tamasaku, D. Miwa, T. Ishikawa, H. Nohira, T. Hattori, Y. Sugita, O. Nakatsuka, A. Sakai and S. Zaima: Appl. Phys. Lett., **83**(2003), 1005-1007.
- (4) A. Regouz, M. Mascheck, T. Wiell, S. K. Eriksson, C. Liljenberg, K. Tetzner and B. A. D. Williamson: Rev. Sci. Inst., **89**(2018), 073105.
- (5) I. Hirose, T. Honma, K. Kato, N. Kijima and Y. Shimomura: J. SID, **12**(2004), 269-273.
- (6) I. Hirose, T. Honma, K. Kato, N. Kijima and Y. Shimomura: J. SID, **13**(2005), 673-678.
- (7) XAFS 標準試料データベース <http://support.spring8.or.jp/xafs/standardDB/standardDB.html>
- (8) I. Hirose, T. Honma, K. Kato, N. Kijima and Y. Shimomura: IEICE Trans. Electron., **E89-C**(2006), 1413-1417.
- (9) 安野 聡, 稲葉雅之, 小坂修司: SPring-8/SACLA 利用研究成果集, **4**(2016), 268-271.
- (10) F. Takasaki, K. Fujiwara, Y. Nakajima, T. Nishikawa, H. Masu, M. Imanari, Y. Hidaka and N. Ogawa: Dalton Trans., **44**(2015), 645-652.
- (11) B. Ravel and M. Newville: J. Synchrotron Rad., **12**(2005), 537-541.
- (12) H. Oji, Y. Taniguchi, S. Hirayama, H. Ofuchi, M. Takagaki and T. Honma: J. Synchrotron Rad., **19**(2012), 54-59.
- (13) S. Fujieda, A. Yoshino, K. Shinoda, Y. Takahashi and S. Suzuki: ISIJ International, **54**(2014), 125-130.
- (14) K. Asazawa, H. Kishi, H. Tanaka, D. Matsumura, K. Tamura, Y. Nishihata, A. G. Saputro, H. Nakanishi, H. Kasai, K. Artyushkova and P. Atanassov: J. Phys. Chem. C, **118**(2014), 25480-25486.
- (15) K. Kobayashi, Y. Takata, T. Yamamoto, J.-J. Kim, H. Makino, K. Tamasaku, M. Yabashi, D. Miwa, T. Ishikawa and S. Shin: Jpn. J. Appl. Phys., **43**(2004), L1029-L1031.
- (16) E. Ikenaga, I. Hirose, A. Kitano, Y. Takata, A. Muto, T. Maeda, K. Torii, H. Kitajima, T. Arikado, A. Takeuchi, M. Awaji, K. Tamasaku, T. Ishikawa, S. Komiya and K. Kobayashi: J. Electron Spectroscopy and Related Phenomena, **144-147**(2005), 491-494.
- (17) Y. Takagi, T. Nakamura, L. Yu, S. Chaveanghong, O. Sekizawa, T. Sakata, T. Uruga, M. Tada, Y. Iwasawa and T. Yokoyama: Appl. Phys. Express, **10**(2018), 076603.
- (18) T. Watanabe, K. Tada, S. Yasuno, H. Oji, N. Yoshimoto and I. Hirose: Jpn. J. Appl. Phys., **55**(2016), 03DD12.
- (19) I. Hirose, T. Watanabe, H. Oji, S. Yasuno, T. Koganezawa, K. Tada and N. Yoshimoto: Jpn. J. Appl. Phys., **55**(2016), 03DD09.

電磁振動プロセスを用いた異方性鋳造ネオジム磁石の創製

田村 卓也¹⁾ 李 明軍²⁾

「異方性鋳造ネオジム磁石を作りたい。」と磁石の専門家に相談したならば、きっと呆れられるに違いない。多分、磁石として成り立つための発現機構に関して詳細に説明して頂けるだろう。実際、ネオジム磁石の組成を溶解・凝固させても磁石の「じ」にもならない。Nd₂Fe₁₄B相はデンドライト成長するため、一つの結晶核から発生・粗大化したデンドライト結晶は全て繋がっていることが磁石の「じ」にもならない最大の要因であろう。磁石となるNd₂Fe₁₄B相が試料の中で微細結晶粒として存在し、更に磁化容易軸のc軸が配向していることが異方性ネオジム磁石として成立させるための条件である。詳細な磁石の基礎知識に関しては他文献⁽¹⁾⁽²⁾を参照して頂くとして、我々の専門である「凝固プロセス」に関して少しご説明したい。「鋳造」を辞書で引くと、「金属を溶かし、型に流し込んで固め、目的の形状物を作ること。」というような文言が出てくるであろう。我々はその中の「溶かし・固める」という凝固プロセスを研究している。特に力を入れているプロセスが「電磁振動プロセス」である。電磁振動プロセスとは、直流磁場内で金属液体中に直流磁場と直交する交流電流を印加することにより、金属液体内部に発生する交流電流の周波数と同じ周波数で振動する力(ローレンツ力)を利用したプロセスである⁽³⁾。これまで、我々は電磁振動プロセスによる結晶粒微細化⁽⁴⁾や金属ガラスにおけるガラス形成能向上⁽⁵⁾に関して電磁振動プロセスの効果を見出してきた。これらの効果は液相と固相の電気抵抗が異なるため、電気抵抗の低い固相に電流が集中し、液相の中で固相が大きく振動する現象が基本原理となっている。

さて、話を「異方性鋳造ネオジム磁石」に戻そう。つまり、我々は電磁振動プロセスにより異方性ネオジム磁石を作製しようと試みているわけである。そのためには液相と固相が混じった状態にできる合金系でなければならない。そこで、Pierre Courtoisらが強磁場中でNd₂Fe₁₄B相の配向実験に用いていた「Nd-30 mol%Cu共晶+30 mass% Nd₂Fe₁₄B」合金⁽⁶⁾を実験に用いた。Nd-30 mol%Cu共晶合金の共晶温度

は793 Kと比較的低温であるので、ある温度域において、Nd-30 mol%Cu液相とNd₂Fe₁₄B固相が共存できる状態となる。図1に10 Tの強磁場下で1273 Kまで昇温させ、Nd-30 mol%Cu液相とNd₂Fe₁₄B固相の状態にした後、完全凝固させた試料の光学顕微鏡写真を示す。試料の大きさは直径φ5.5 mm、長さ20 mmである。白い相がNd₂Fe₁₄B相であるが、非常に大きな板状結晶であることがわかる。このような状態では磁石として機能するはずもなく、強磁場下で冷却したのにもかかわらず、全く鉄にはくっつかない試料であった。Nd₂Fe₁₄Bの結晶構造はc軸が長い正方晶であり、c軸方向に稠密な鉄層を持つため⁽²⁾、凝固プロセスを研究している我々としてはc軸方向の結晶成長速度がa, b軸方向よりも遅く、板状結晶となっている、つまりは板状結晶の板厚方向がc軸方向と考えるのが当然である。そうすると「電磁

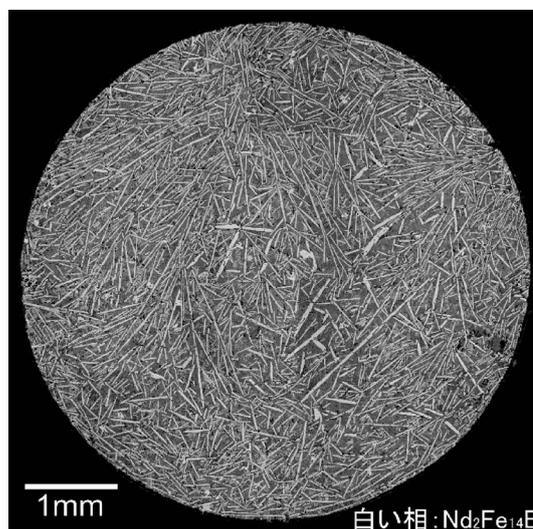


図1 10 Tの強磁場下で1273 Kまで昇温させ、Nd-30 mol%Cu液相とNd₂Fe₁₄B固相の状態にした後、完全凝固させた試料の光学顕微鏡写真。

* 国立研究開発法人産業技術総合研究所 磁性粉末冶金研究センター 磁性材料プロセスチーム(〒463-8560 名古屋市守山区下志段味穴ヶ洞2266-98) 1)研究チーム長 2)主任研究員
 Creation of the NdFeB Anisotropic Cast Magnet Using the Electromagnetic Vibration Process; Takuya Tamura, Mingjun Li (National Institute of Advanced Industrial Science and Technology (AIST), Magnetic Powder Metallurgy Research Center, Nagoya)
 Keywords: neodymium magnet, electromagnetic vibration, magnetic anisotropy, crystalline orientation, cast magnet
 2019年5月28日受理[doi:10.2320/materia.58.520]

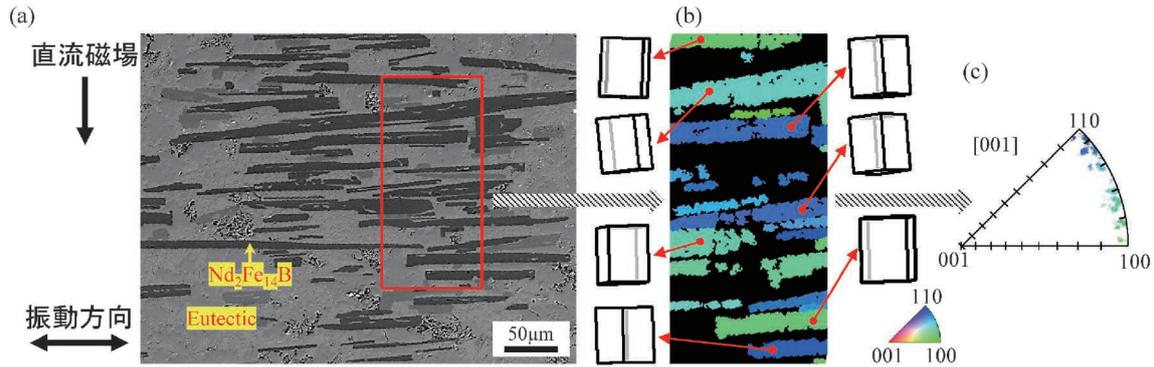


図2 電磁振動印加により、微細化かつ配向化された $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ 凝固組織. (a) 走査型電子顕微鏡(SEM)の二次電子線像(secondary electron image, SEI) (b) 赤線で示した領域にある $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ 相の電子線後方散乱回折(electron back scattering diffraction, EBSD)画像. 代表的な $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ 相の結晶方位も単位格子にて表示している. (c) EBSD 画像からの[001]逆極点図(inverte pole figure, IPF). 結晶方位は(100)から(110)間に集中し、(001)へのズレは 10° 以内である.

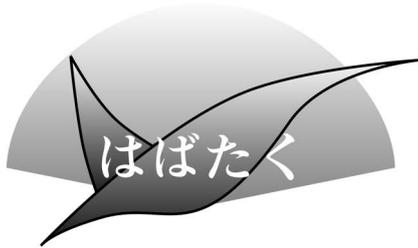
振動プロセスにより板状結晶を微細化し、更に板状結晶を並べることにより配向化させ…最終的に「異方性铸造ネオジム磁石」ができるに違いない。」という発想に至るまでには時間はかからなかった。しかし、電磁振動プロセスにより板状結晶を微細化することは、これまでの結晶粒微細化等の研究成果より容易に想像できるが、果たして板状結晶を並べることができるのであろうか？ Pierre Courtois らは、 $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ B相が常磁性状態の高温において、結晶構造に起因する磁化率の異方性エネルギーのみでは強磁場下でc軸方向に配向させるのに十分なエネルギーを与えられないと結論づけている⁽⁶⁾。この問題に対する解は電磁振動プロセスの基本原理にあった。それは、「液相の中で固相が大きく振動する現象」である。お風呂の中で浮かぶ板状のおもちゃを平らな状態で沈めたことがあるだろうか？ 左右に振動しながら水平のまま上昇するのである。つまり、板状物体を液相の中で振動させると、流体抵抗を最小にするため振動方向に対して必ず板厚方向が垂直になるのである。当然といえば当然のことである。そこで、10 Tの強磁場下で973 Kまで昇温させ、Nd-30 mol%Cu液相と $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ 固相の状態を試料の長さ方向に60 A, 1 kHzの交流電流を2 min流すことで電磁振動を印加した後、冷却し試料を完全凝固させた。その試料断面の走査型電子顕微鏡(SEM)像、及び電子線後方散乱(EBSD)結果を図2に示す。電磁振動により、 $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ 固相が微細化し、望み通り板厚方向が振動方向に対し垂直となっている。さらに、結晶構造に起因する磁化率の異方性エネルギーによりc軸方向が磁場印加方向と同じになっていることもわか

る。この結果より、 $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ 板状結晶の板厚方向がc軸方向であり、電磁振動プロセスにより $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ 板状結晶を微細化・c軸配向化させることができることが判明した。この試料は、鉄に僅かに引き寄せられる程度であったが、微細化・c軸配向化それぞれに最適な電磁振動を印加する「2ステップ電磁振動プロセス」を用いることにより、「Nd-30 mol%Cu共晶+30 mass% $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ 」合金において、残留磁束密度0.38 T、保磁力621 kA/mの異方性铸造ネオジム磁石を創製することができた。詳細は、Scientific Reportsに掲載された論文⁽⁷⁾を参照して頂ければ幸いである。

今後は、 $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ 相増加による高性能化や、他の複合材料系にこの電磁振動プロセスによる微細分散・配向化を適用できればと考えている。本研究の一部はJSPS科研費JP19K05071の助成を受けたものです。

文 献

- (1) 金子秀夫, 本間基文: 磁性材料, 日本金属学会, (1977).
- (2) 佐川真人, 浜野正昭, 平林 真: 永久磁石—材料科学と応用—, アグネ技術センター, (2007).
- (3) C. Vives: Metall. Mater. Trans. B, **27**(1996), 445-455.
- (4) M. Li, T. Tamura and K. Miwa: Acta Mater., **55**(2007), 4635-4643.
- (5) T. Tamura, K. Amiya, R. S. Rachmat, Y. Mizutani and K. Miwa: Nature Mater., **4**(2005), 289-292.
- (6) P. Courtois, R. P. de la Bathie and R. Tournier: J. Magn. Magn. Mater., **153**(1996), 224-230.
- (7) M. Li and T. Tamura: Scientific Reports, **9**(2019), 5733.



In situ TEM に魅せられて

京都大学構造材料元素戦略研究拠点；研究員
(2019年5月まで)

現在；Department of Physics, Chalmers University
of Technology

近藤 隼

1. はじめに

私は2016年3月に東京大学大学院工学系研究科マテリアル工学専攻にて博士(工学)の学位を取得した後、同年4月より京都大学構造材料元素戦略研究拠点の一員として構造材料研究に従事しておりました。この度本稿を執筆する機会をいただきましたので、拙文ながら私のこれまでの研究を紹介させていただきます。

2. 研究について

私は学生時代から現在に至るまで材料の機械特性に関する基礎研究に従事しております。特に塑性変形や脆性破壊等の力学現象に対して結晶粒界の存在がどのような影響を及ぼすのかについて、ナノスケールから現象を理解する取り組みを行っています。私が学生時代に携わった研究テーマは、粒界と転位の相互作用過程の直接観察でした。Hall-Petchの関係に代表されるように粒界の存在は転位運動に大きな影響を与えることが知られています。しかし、一口に粒界といっても両結晶の相対方位関係や粒界面方位によって異なる粒界性格を有しています。そして、このような粒界性格に依存して粒界と転位の相互作用過程も異なり、その結果として機械特性に与える影響も変化することが予測されます。私の研究では実際の変形中に粒界と転位がどのように相互作用するのかを直接観察し、粒界-転位相互作用過程の粒界性格依存性を解明することを目的としていました。

実験に関して申し上げますと、ナノスケールの欠陥構造である転位を可視化するためには透過電子顕微鏡法(TEM)は必要不可欠な手法です。さらに転位運動や粒界との相互作用は動的な過程ですので、TEM内で試料に応力を印加し、現象をその場観察しなければなりません。これまでいくつかのTEM応力印加その場観察手法が用いられてきましたが、私が高研究で用いたのはTEMナノインデンテーション法でした。通常よく用いられるTEM内引張試験や圧縮試験では試料に均一な応力を印加するため、TEMの限られた視野範囲で現象を発現させることが難しいという難点があります。

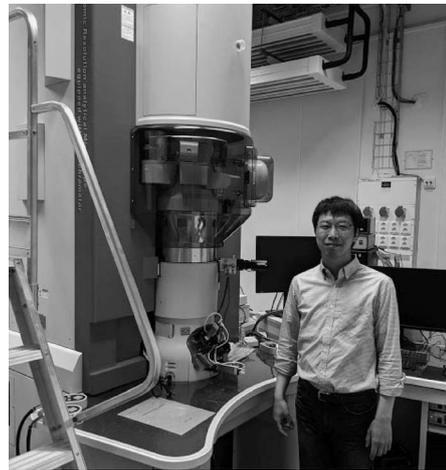


図1 With JEM-ARM200F microscope equipped with a monochromator and double aberration correctors in Chalmers University of Technology.

一方TEMナノインデンテーション法ではTEM観察を行いながら針状の圧子を制御し、狙った場所に局所応力を印加することができるため、TEMとの相性が良い応力印加手法になります。本研究では粒界近傍に圧子を挿入することで導入・伝播する転位と粒界の相互作用を動的に観察することに成功しました。また様々な相対方位関係を有する双結晶試料を使うことで、粒界性格依存性も観察することができ、論文としてまとめることができました⁽¹⁾。

3. おわりに

私は粒界と転位の相互作用に関する研究の後、粒界破壊に関する研究を行いました。そこでは粒界に沿って亀裂が伝播する際にどこの原子間結合が切れたのかをTEMナノインデンテーション法を利用して決定することができました⁽²⁾。このようにTEMその場観察法は通常の観察よりも高度な技法や忍耐力を必要としますが、構造ではなく現象を直接可視化できるため、多くの情報を得ることができます。そして材料研究の発展に大きく寄与する手法であると信じています。

私は本年度6月より日本学術振興会海外特別研究員として、スウェーデンのチャルマース工科大学で研究を行っております。こちらでも粒界の機械特性や電気物性に関する研究をTEMその場観察を用いて行う予定です。

最後になりましたが、これまでご指導いただきました東京大学大学院工学系研究科総合研究機構の幾原雄一教授、柴田直哉教授にこの場を借りて心より感謝申し上げます。また、この度「はばたく」に寄稿する貴重な機会を与えてくださった関係者の皆様にも深くお礼申し上げます。

文 献

- (1) S. Kondo, T. Mitsuma, N. Shibata and Y. Ikuhara: Sci. Adv., **2** (2016), e1501926.
- (2) S. Kondo, A. Ishihara, E. Tochigi, N. Shibata and Y. Ikuhara: Nat. Commun., **10**(2019), 2112.
(2019年6月10日受理)[doi:10.2320/materia.58.522]

Diversity for us ～社内の女性活躍推進リーダー、 三児の母として～

株式会社IHI 技術開発本部 技術企画部；
連携ラボグループ課長

高橋 円

日本金属学会/鉄鋼協会春期講演大会第11回男女共同参画ランチョンミーティングにて「宇宙飛行士サポートから研究員、研究員から企画管理へ～三児の母として～」という題目で講演をさせていただきました。講演では、材料工学専攻の理由、筑波宇宙センターでの宇宙飛行士支援業務、転職、研究開発、キャリアチェンジ、女性活躍推進についての話をしました。男女共同参画ミーティングだったこともあり、質問タイムでは多くの「女性活躍推進」や「働き方」に関する議論になりました。なかでも印象に残っているのは「社会で活躍するためには、上司の理解が不可欠である」という質問者の言葉でした。質問者は男性でしたが、確かに上司の理解は、育児中の女性だけではなく、共働き・介護をする男性、外国籍の方、LGBT等、多様な方々が生き活きと働く上で重要な要素と思っています。ここでは、私が業務で携わっている「女性活躍推進」について取り上げたいと思います。

1. 日本の女性活躍推進の歴史と現状

日本の「女性活躍推進」は先進国内だけではなく、世界全体で極端に遅れていることはご存知のことと思います。ベストセラー「LIFE SHIFT」の著者リンダ・グラットン氏は「日本での女性活躍は、欧米に比べ、60年遅れている」と仰っていました。半世紀以上も遅れていると聞いてショックを受けましたが、歴史を紐解いてみれば、日本政府は様々な改善策として法整備を打ち出しています。1986年の雇用機会均等法、1999年の男女共同参画社会基本法、2006年の雇用機会均等法改正、2015年の女性活躍推進法等、盛んに行われてきました。このランチョンミーティングもその一環だと思えます。しかしながら、世界経済フォーラムのジェンダーギャップインデックスを見ると、日本の総合順位は、2016年は144か国中111位、2017年は144か国中114位、2018年は149か国中110位でした。2015年は101位ですから、「女性活躍推進法」を2015年に整備したにも関わらず、順位が下がっています。日本政府の努力が、残念ながら実っていないことを示しています。また、日本の男女の賃金格差においては、世界最大レベルです。諸外国では男女の賃金格差は10～20%ですが、日本では40%弱もあります。これは日本に非正規雇用が多いためですが、同じフルタイム正規雇用においても賃金格差が30%以上あり、男女の管理職比率が大きく異なることに原因があります。

「なぜ女性管理職が少ないのか」について、シカゴ大学山口一男著書⁽¹⁾の中で企業のアンケート結果を示しています。以下の3つが主な回答になるとのことです。

① 現時点では、必要な知識や経験、判断力などを有する女性が少ない。

② 将来管理職につく可能性のある女性はいるが、現在管理職に就くための在職年数などの条件を満たしてものはいない。

③ 勤続年数が短く、管理職になるまでに退職する。

これらの回答について、著者は以下のように問題点を指摘します。

① 管理職が少ない理由を女性の問題と考えている。当事者意識がない。

② 女性に対する企業の差別的制度(間接差別、他)が原因と指摘する企業がない。

私は上記の他に、アンコンシャスバイアス(無意識の偏見)の問題があると思っています。

2. 女性管理職増加の企業におけるメリット

女性管理職を増やすと企業側にメリットがあることが分かっています。日経BP 麓幸子著書⁽²⁾の中では、女性採用率や従業員比率が中央値より高い企業と低い企業の収益性(ROA)の差はわずか0.4%、0.8%と小さいのにも関わらず、女性管理職の高い企業は低い企業と比べて2.4%高くなっており、明確な差が認められていることが分かっています。理由として、女性管理職による生産性の向上が業績に直接影響を及ぼしているとのこと。また、「女性が働きやすい会社ベスト100」(日経WOMAN)に選ばれた100社を、5年間「管理職登用度」、「女性活用品」、「ワークライフバランス度」、「男女均等度」の4つのカテゴリーでの株式パフォーマンス(累積超過リターン)を比較した結果、特に「管理職登用度」の上位10社のパフォーマンスが突出して高い結果が出ました。これは、ステークホルダー(利害関係者)が①:経営資源の効率的な配分がされている、②:適切な評価制度が整っている、③:①②の理由により、優れた企業風土を持ち、長期的に成長する可能性が高い、と見做していることを示しています。日本の株式市場における外国人投資家のインパクトは大きくなってきています。そして、外国人投資家の注目するファクターとして、クォータ制の後押しもあり、従来以上に女性管理職登用度と資本市場での評価の関係は強くなると考えられます。

3. 最後 に

講演後に名刺交換した方からランチのお誘いを受けました。紹介したい人がいるとのこと。お会いしてみると、紹介された方は産休前で、今後のキャリアについて閉塞感をお持ちでした。一緒に会話していくことで、彼女自身のモチベーションが上がったようで、育児休暇中は自己投資に当たりたいと仰ってくださいました。講演が人と人とのつながりを作り、人の役に立てたことに感謝したいと思います。性別やその他の属性によらず、誰もが持てる潜在能力を十分に発揮できる社会にしたいというのは、誰もが同じ意見だと思います。そのギャップを埋める活動を今後も推進していきたいと思っています。

文 献

- (1) 山口一男: 働き方の男女不平等 理論と実証分析, 日本経済新聞出版社, (2017).
- (2) 麓幸子: なぜ、女性が活躍する組織は強いのか, 日経BP社, (2014).

日本鉄鋼協会「ふぁらむ」Vol. 24 (2019) No. 9に同時掲載。

(2019年6月17日受理) [doi:10.2320/materia.58.523]

(連絡先: 〒235-8501 横浜市磯子区新中原町1番地)

談話室

梅津理恵先生、 猿橋賞受賞おめでとう ございます！

奈良女子大学研究院自然科学系物理学領域；
准教授

松岡由貴

「猿橋賞」という賞を、ご存じでしょうか？ 毎年受賞者が決まると、多くのメディアで取り上げられるので、知っているの方が多いと思うのですが、簡単に紹介しますと“自然科学分野で素晴らしい研究成果をあげた女性研究者に贈られる賞”です⁽¹⁾。この賞は、地球化学者・猿橋勝子氏によって創設されました⁽²⁾。猿橋氏は戦前～戦後間もなくの、まだまだ女性に研究者としての道が開かれていない時代に、水爆実験で生じた放射性核種の分析で非常に精度の良い分析結果を示すなど世界的な業績を上げ、後進の女性に道を開いてくださった“パイオニア”です。

猿橋賞の対象となる研究分野は自然科学全般に及び、これまでの受賞者の専門分野は物理・生物・化学・数学・環境・宇宙・・・と、実に多岐に渡ります。それだけに、“その分野で”だけではなく、“広く他の分野も含めて”みたときに、顕著な業績を上げたと評価される研究をしてようやく受けることができる賞と言えるのです。

39回目となる今年は、金属学会員である東北大学の梅津理恵先生が受賞されました(図1~4)。今回の受賞で評価された研究業績は「ハーフメタルをはじめとするホイスラー型機能性磁気材料の物性研究」で、ハーフメタル物質の電子状態を詳細に調べ、磁性材料としての有用性を示されました^{(3)~(5)}。また、この研究手法として放射光が極めて有用で

あることも示されました。

私達の生活から“材料”が見えにくくなり、地道な物性研究や材料の研究・開発がいかに重要であるかを、一般の、特に若手の人に知ってもらうことが難しくなっている時代であるがゆえに、今回の梅津先生の受賞は、金属学会としても大いに喜ぶべきことと思っています。そして、金属材料分野が、女性研究者にとって“活躍できる”分野であると広く知ってもらうきっかけにもなると期待しています。

梅津先生がどのような努力や苦労を重ね、乗り越えて来られたか、という話は他に譲りますが、現在私が勤務する奈良女子大学に梅津先生が学生として在籍されていた頃の逸話(研究だけではなく、テニスで全国大会に出る程の実力者だった等々)を当時の恩師である松尾先生から伺い、やはり梅津先生は自分のやりたいこと・進む道をしっかりと自らの中に持っておられたのだと感じます。積み重ねてこられたものが、こうして開花したことは、長年金属学会で共に活動してきた仲間としても誇らしいです。

梅津先生のこれから益々の御活躍を期待すると共に、私達金属学会員もまた、他分野の方々にも興味を持ってもらい、評価される研究を進めていきたいですね。

文 献

- (1) 女性科学者に明るい未来をの会
<http://www.saruhashi.net/newhp/index.html>
- (2) 米沢富美子：岩波科学ライブラリー157 猿橋勝子という生き方、岩波書店、(2009)。
- (3) R. Y. Umetsu, H. Fujiwara, K. Nagai, Y. Nakatani, M. Kawada, A. Sekiyama, F. Kuroda, H. Fujii, T. Oguchi, Y. Harada, J. Miyawaki and S. Suga: Phys. Rev. B, **99**(2019), 134414.
- (4) 梅津理恵, 大久保亮成, 貝沼亮介, 石田清仁：まてりあ, **49**(2010), 462-470.
- (5) R. Y. Umetsu, K. Kobayashi, A. Fujita, R. Kainuma, K. Ishida, K. Fukamichi and A. Sakuma: Phys. Rev. B, **77**(2008), 104422.

(2019年7月19日受理)[doi:10.2320/materia.58.524]
(連絡先：〒630-8506 奈良市北魚屋西町)



図1 猿橋賞受賞のスピーチ。



図2 猿橋賞受賞者、「女性科学者に明るい未来をの会」会員の方々と。



図3 猿橋賞受賞を知らせる記事や、女性研究者を取り巻く環境についてのコメント掲載等。



図4 東北大学金属材料研究所：高梨所長とご一緒に。

本 会 記 事

| | | |
|------------|-------------------------------|---------|
| 会 告 | 会費の自動振替のご案内 | 525 |
| | 永年会員制度について | 525 |
| | 2019年秋期講演大会・各賞贈呈式のご案内 | 525 |
| | 日本金属学会・日本鉄鋼協会講演大会相互聴講のお知らせ | 525 |
| | 2019年秋期講演大会企画・公募シンポジウム開催のお知らせ | 526 |
| | 第8回ランチョンセミナー開催 | 526 |
| | 第9回女性会員のつどい：「特別企画」 | 526 |
| | 2019年度全国大学材料研究教室協議会講演会ご案内 | 526 |
| | 2020年春期講演大会外国人特別講演および招待講演募集 | 526 |
| | 会誌・欧文誌編集委員会からのお知らせ | 527 |
| | 第43回技術開発賞募集 | 528 |
| | 第70回金属組織写真賞作品募集 | 528 |
| 支部行事 | 行事カレンダー | 528 536 |
| 掲示板 | 次号予告 | 529 539 |
| 会誌・欧文誌9号目次 | 金属学会シンポジウム開催のご案内 | 531 540 |
| 新入会員 | | 534 540 |

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

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

会 告 (ホームページも参照下さい)

会費の自動振替のご案内

2020年度会費自動振替のご案内を申し上げます。ホームページからのお手続きを宜しくお願いいたします。

- ホームページ：入会・会員→会費支払方法
- 2020年度会費自動振替申込締切 **2019年10月4日(金)**

問合せ・申込書送付先

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

永年会員制度について

本会では長年にわたり本会の発展に尽された会員の労に報いるため、永年会員制度を設けております。自己申告制となっておりますので、該当すると思われる方は、はがき、FAX 又は E-mail にて会員番号、生年月日およびおおよその入会年を記入の上、本会事務局宛お問い合わせ下さいませようお願いいたします。

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

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

受付締切 毎年9月30日

永年会員資格付与 毎年1月1日

問合せ先 (公社)日本金属学会

〒980-8544 仙台市青葉区一番町 1-14-32

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

2019年秋期(第165回)講演大会のご案内

会 期 2019年9月11日(水)～9月13日(金)

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

懇親会 2019年9月11日(水)(ピュアリティまきび「孔雀の間」)

ご参加 当日受付をお願いします。

詳 細 ホームページ→2019年秋期講演大会をご参照下さい。

日本金属学会 各賞贈呈式のご案内

日時 2019年9月11日(水) 9:00～9:40

場所 岡山大学津島キャンパス(50周年記念会館金光ホール)

日本金属学会・日本鉄鋼協会講演大会相互聴講のお知らせ

申込方法：当日受付

鉄鋼協会の講演を聴講する場合は、金属学会で従来の参加受付を済ませた後、鉄鋼協会受付で相互聴講の申込をする。

(注) 金属学会で講演発表する場合は、金属学会の正規大会参加申込みが必要です。

料 金：一般・学生・非会員を問わず同一料金

| | |
|-----------------|--------|
| 聴講のみ | 3,000円 |
| 聴講と概要集(ダウンロード権) | 6,000円 |

2019年秋期講演大会企画・公募シンポジウム開催

2019年秋期講演大会では、下記のシンポジウムを開催いたしますので、奮ってご参加下さい。

〈企画シンポジウム〉

- K1 高性能軟磁性材料の現状と課題(9月13日開催)
- K2 若手科学者へ贈る研究のヒント II～未踏領域へ到達するために～(9月13日)
- K3 自動車の大変革に貢献する材料技術の最新動向(自動車技術会・日本鉄鋼協会との合同シンポジウム)(9月12日)

〈公募シンポジウム〉

- S1 ハイエントロピー合金の材料科学Ⅱ(9月11日, 12日開催)
- S2 材料変形素過程のマルチスケール解析(Ⅱ)(9月12日, 13日)
- S3 キンク強化の材料科学Ⅱ(9月11日～13日)
- S4 水素エネルギー材料-VIII(9月12日, 13日)
- S5 先進ナノ構造解析に基づく材料科学の新展開Ⅱ(9月11日～13日)
- S6 ナノ・マイクロスペースステイラリングⅡ(9月12日)
- S7 医療・福祉のための Additive Manufacturing の材料科学Ⅲ(9月12日)
- S8 マテリアルズ・インテグレーション(Ⅲ)―順問題から逆問題へ―(9月11日, 12日)

〈KIM-JIM シンポジウム〉

(9月11日(水)10:00～17:10)

第8回ランチョンセミナー開催

秋期講演大会の会期中に、第8回ランチョンセミナーを開催いたします。多くの皆様のご参加をお待ちしております。

主催 公益社団法人 日本金属学会

企画 株式会社 明報社

日時 2019年9月12日(木) 昼休み時間

会場 岡山大学津島キャンパス 日本金属学会講演会場

参加費 無料 昼食を無料提供いたします。

参加方法 9月11日(水)は12:00より、9月12日(木)は8:30より、参加券を「機器展示会場」にて配布致します。

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

※予定数に達し次第、配布は終了致します。

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

参加企業

- オックスフォード・インストゥルメンツ㈱(A会場)
「in-situ加熱で元素マップをライブ観察 TEM用EDS分析システムAztecLive TEMのご紹介」
- サーモフィッシャーサイエンティフィック㈱(E会場)
「New FIB-SEM Hydra Ar+イオンFIBを利用したTEM試料作製とFIBに搭載したSIMS技術の紹介」(村田 薫)
- 榊TSLソリューションズ(D会場)
「TEMを用いたナノスケール結晶方位マップの作成」(代表取締役 鈴木清一)
- NISSHA エフアイエス㈱(F会場)
「低温炉(-100℃～600℃)の開発状況、ppb領域での微量水素測定」
- ヴァーダー・サイエンティフィック㈱(N会場)
「金属組織解析用試料作製の新製品のご紹介」(高辻博史)

日本金属学会・日本鉄鋼協会第9回女性会員のつどい



～特別企画「梅津先生を囲む会」開催～

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

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

主催 日本金属学会・日本鉄鋼協会男女共同参画委員会

日時 2019年9月13日(金)12:00～13:00

会場 岡山大学津島キャンパス一般教育棟D棟2階D23(金属学会F会場)

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

参加申込 当日参加も可能です。事前に参加申込みいただいた方には、弁当を無料提供いたします。

8月31日以降の参加申込み・当日参加される方は、弁当をご持参願います。

参加費 無料

問合・申込先 男女共同参画委員会係

E-mail: gaffair@jim.or.jp

☎ 022-223-3685

2019年度秋季 全国大学材料研究教室協議会講演会ご案内

日時 2019年9月13日(金)15:00～16:00

場所 岡山大学津島キャンパス内(一般教育棟D棟2階D25金属学会H会場)

講演会 金属付加製造(AM)における材料特性制御のためのプロセス最適化設計

大阪大学大学院工学研究科 教授 小泉雄一郎

聴講料 無料

2020年春期講演大会の外国人特別講演および招待講演募集

春秋講演大会における外国人研究者による特別講演と招待講演については会員からの推薦をもとに、国際学术交流委員会において審議採択し、講演実施細目については講演大会委員会で決定いたします。2020年春期講演大会における特別講演と招待講演を募集いたしますので、下記要領によりご推薦下さい。

特別講演

- ・講演者: 著名な外国人研究者とする。
- ・講演時間: 30分(討論10分)
- ・採択件数: 3~4件
- ・滞在費補助: 10,000円×5日(上限日数)
- ・その他: 大会参加費免除、懇親会招待

招待講演

- ・講演者: 有益な講演が期待される国内に滞在する外国人研究者とする。
- ・講演時間: 15分(討論5分)
- ・採択件数: 5件程度
- ・滞在費補助: なし
- ・その他: 大会参加費免除

推薦用紙

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

推薦書提出期日 2019年11月20日(水)

照会・推薦書提出先

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



会誌編集委員会からのお知らせ

特集企画の投稿募集

■材料と資源強度(Special Issue on Resource Intensity behind Materials)

言うまでもなく、材料生産の背後には種々の環境影響が存在する。従来、環境影響として二酸化炭素排出量が代表的な指標として用いられており、データの蓄積により多くの議論ができるようになってきた。一方、「資源」に注目した評価はそれほど多くない。しかし、例えば次世代自動車では、低炭素化が実現できた一方で、大量のレアメタル等が投入されている。このような状況は、材料の背後にある資源強度を評価する指標があまり注目されてこなかったことが原因の一つである。しかし近年、多くの研究者の努力により資源強度に関して一定の成果が集まってきた。本特集では、これらの成果について紹介する。

上記テーマに関する特集を、日本金属学会誌84巻7号(2020年7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84巻第7号(2020年)

原稿締切日 2020年1月6日(月)

- ・投稿に際しては、日本金属学会会誌投稿の手引・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。

欧文誌編集委員会からのお知らせ

特集企画の投稿募集

■Nanostructured Functional Materials and Their Applications III (ナノ構造を有する機能性材料とその応用(その3))

本特集号は、2015年に Vol. 56, No. 9(40件の論文を掲載)として第1号、2018年に Vol. 59, No. 7(15件の論文を掲載)として第2号の刊行を行ったものの継続となる第3号に当たるものであり、前回刊行以降の当該分野の進展に関する先端的な論文を募集する。

ナノ構造を有する金属やセラミックス等の材料はバルク材料とは異なる、特異な機能を発現するものが多数見いだされ、それらの機能を工学的に応用して広く社会に浸透してきている。現在までのナノ構造物質に関する研究成果を集約すると共に、今後の更なるナノ構造を有する材料開発の発展に向けて、以下のトピックスを中心に成果を集める。

- 一ナノ構造を有する磁性体、誘電体、圧電体
- 一ナノ構造を有する半導体、複合材料、フォトニクス材料
- 一ナノ構造物質の作成と評価技術
- 一ナノ構造を有する物質の応用

上記テーマに関する特集を、Materials Transactions 61巻7号(2020年7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61巻第7号(2020年)

原稿締切日 2020年1月6日(月)

- ・投稿に際しては、日本金属学会欧文誌投稿の手引・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(会誌・欧文誌共通) 〒980-8544 仙台市青葉区一番町 1-14-32
(公社)日本金属学会 会誌・欧文誌編集委員会
☎ 022-223-3685 ☎ FAX 022-223-6312 E-mail: editjt@jim.or.jp
<https://jim.or.jp/>

第43回技術開発賞
「新技術・新製品」記事募集

応募締切：2019年11月1日(金)

賞の名称 第43回公益社団法人日本金属学会技術開発賞
賞の対象 あたりあ「新技術・新製品」記事に掲載された記事
(59巻1号から)が選考対象となります。
表彰 2020年9月の秋期講演大会
申込 URL <https://gijyutsu.jim.or.jp/entry>
原稿問合せ あたりあ係 E-mail: materia@jim.or.jp
詳細 あたりあ 8号472頁 or ホームページ：本会賞の募集
技術開発賞の問合せ
(公社)日本金属学会各賞係
☎ 022-223-3685 E-mail: gaffair@jim.or.jp

第70回金属組織写真賞作品募集

応募締切：2019年11月1日(金)

賞の名称 第70回公益社団法人日本金属学会組織写真賞
募集部門 「写真賞部門」
1. 光学顕微鏡部門
2. 走査電子顕微鏡部門(分析, EBSD 等を含む)
3. 透過電子顕微鏡部門(STEM, 分析等を含む)
4. 顕微鏡関連部門(FIM, APFIM, AFM, X線CT等)
注：光学顕微鏡と透過電子顕微鏡写真, 走査電子顕微鏡と透過電子顕微鏡写真等の組写真を応募する場合, 応募者が最も適切と判断する部門を選択すること。
申込要領 下記 URL の申込フォームにより説明文を入力し, 写真作品データを提出する。
【写真作品】
①写真データの解像度は, A2版サイズを前提に400 dpi以上とする。
②写真データは PDF または画像ファイル(jpg など)で提出する。(それ以外はプレビュー表示が出来ない)
③写真と図の組み合わせでも提出は可(写真, 図への挿入文字は小さすぎないこと)。
④作品には, 応募者名, 共同研究者名を記載しない。
⑤応募作品数には制限を設けない。
⑥他学協会等の同様の賞を受賞していない作品であること。
詳細 あたりあ 8号473頁 or ホームページ：本会賞の募集
申込 URL <https://picture.jim.or.jp/entry>
送付・問合せ先 (公社)日本金属学会 各賞係
☎ 022-223-3685
E-mail: gaffair@jim.or.jp

支部行事

関東支部

第16回 ヤングメタラジスト研究交流会
開催のご案内

ヤングメタラジスト研究交流会は, 関東支部内の大学や企業に所属する若手研究者の交流を目的とし2004年に第1回目が開催されて以降, 今年で第16回目を迎えます。支部内の若手研究者と研究に熱意ある学生が研究活動の報告を通じて互いに交流し, 連携を深めることで, 関東支部の金属材料研究がより一層活性化することを目指しております。本年度は, JFE スチール株式会社 東日本製鉄所 京浜地区にて若手研究者による講演およびポスターセッションを開催いたします。また, 東日本製鉄所の見学も企画しております。皆様のご参加をお待ちしております。

日時 2019年11月7日(木)12:45~19:00

(参加者数に応じ変更の可能性があります)

場所 〒210-0855 川崎市川崎区南渡田町1番1号

アクセス JR 鶴見線浜川崎駅より徒歩5分

スケジュール(参加者数に応じ変更の可能性があります)

12:45-13:00 開会挨拶・諸連絡

13:00-14:30 東日本製鉄所 見学

14:40-16:10 講演

16:20-17:30 ポスターセッション(第1部)

17:30-19:00 ポスターセッション(第2部)兼懇親会・ポスター賞表彰式

講演プログラム

14:40-15:10 β Ti 基形状記憶合金における析出 α 相とその結晶学的特徴(予定)

JFE スチール株式会社 スチール研究所 薄板研究部 遠藤一輝

15:10-15:40 高炭素鋼線のマイクロ組織評価を通じて学んだ研究遂行術

産業技術総合研究所 エレクトロニクス・製造領域

製造技術研究部門 権藤詩織

15:40-16:10 分散強化合金の降伏応力と加工硬化の結晶塑性解析

木更津工業高等専門学校 電子制御工学科 奥山彫夢

参加費 懇親会費のみ2,000円/一般, 無料/学生

参加申込方法

交流会に参加をご希望の方は10/11(金)17:00までに氏名, 所属, 連絡先, E-mailなどを下記リンクの登録フォームからご応募下さい。

<https://forms.gle/nhuE3Phr2zw36ASa7>

ポスターセッションについては, 運営の都合上, 下記の通り別途締切を設けます。

・学生ポスターセッション: 9/27(金)17:00

ポスター仮題とともにご応募下さい。

・ポスターアブスト提出締切: 10/11(金)17:00

申し込み時にフォーマット(A4の3分の1ページ分)をお送りします。

・ポスターサイズ: A0サイズ(841mm×1189mm)縦型

問合せ先 JFE スチール株 兵藤義浩

東京大学大学院工学系研究科 江草大佑

E-mail: y-hyodo@jfe-steel.co.jp/egusa@stem.t.u-tokyo.ac.jp





2019年度秋季講演会

日時 2019年10月11日(金)13時00分～
 場所 日本製鉄㈱ 大分製鉄所 コミュニケーションセンター
 大ホール

講演

- ① 本多記念講演会 九大名誉教授 高木節雄
多結晶フェライト鋼における降伏ならびに降伏後の変形
- ② 湯川記念講演会 日本製鉄フェロー 吉永直樹
安心・安全を支える最近の自動車用ハイテンの動向
- ③ 講演討論会
テーマ：安心・安全に関する高機能鋼板
高延性造船用鋼板「NSafe(r)-Hull」による船舶衝突安全性の向上 日本製鉄主幹研究員 市川和利
自動車用超ハイテンに関する高機能化の取組み 神戸製鋼所主任研究員 村上俊夫
低炭素鋼溶接部の信頼性評価 熊大教授 寺崎秀紀

参加料 無料

定員 約150名

問合せ先 日本製鉄㈱大分技術研究部 横井龍雄

☎ 097-553-2282

E-mail: yokoi.47n.tatsuo@jp.nipponsteel.com

掲示板

〈公募類記事〉
 無料掲載：募集人員，締切日，問合せのみ掲載。
 有料掲載：1/4頁(700～800文字)程度。
 ・「まてりあ」とホームページに掲載；15,000円＋税
 ・ホームページのみ掲載；10,000円＋税
 〈その他の記事〉 原則として有料掲載。
 ・原稿締切・掲載号：毎月1日締切で翌月号1回掲載
 ・原稿提出方法：電子メールとFAX両方(受け取りメールの確
 認をして下さい)
 ・原稿送信先：FAX 022-223-6312 E-mail: materia@jim.or.jp

◆豊橋技術科学大学大学院工学研究科 機械工学系 教員(助教)公募◆

募集人員 助教1名

所属 機械工学系 材料・生産加工分野

専門分野 各種構造・機能材料におけるナノレベルでの組織制御および強度・破壊特性評価に関する分野

応募資格 博士あるいはPhDの学位を有するか着任までに取得見込みの方

担当科目 工学実験，機械創造実験，プロジェクト研究などに関する科目

※ 日本語を母語としない場合は，学内諸業務ができる日本語運用能力を有する方

※ 教育研究のグローバル化を推進するため，英語による学生指導補助ができる方が望ましい

※ 男女共同参画の視点から，女性教員の採用を積極的に進めます

採用予定時期 令和2(2020)年4月1日以降できるだけ早い時期

待遇 (1) 給与：採用時における本学給与規程による(全国立大学を対象に年俸制と退職金制度を両立させた新制度が発足する可能性がある。)

(2) 諸手当：扶養手当，住居手当，通勤手当，単身赴任手当等 ※要件を確認のうえ支給

(3) 勤務時間：8：30-17：15を基本とする裁量労働制

(4) 休日：土曜日，日曜日，祝日，年末年始，夏季休日

(5) 保険：(短期)文部科学省共済組合保険，(長期)厚生年金保険

勤務形態 常勤(任期あり)

任期：5年(ただし，再任は審査により1回限り3年，最長8年まで)

提出書類 (1) 履歴書(市販用紙可，写真貼付，連絡先電話番号，メールアドレスを明記，所属学会を記載すること)

(2) 研究業績リスト(著書，査読付き学术论文，国際会議論文，その他(国内会議論文，総説・解説，招待講演，特許，受賞，社会貢献実績等)に分類して記載)

(3) 主要論文別刷(3編，コピー可)

(4) 学会および社会における主な活動状況(所属学会，学会等における役職・委員歴，国際会議・国内学会での委員歴，など)

(5) 外部資金獲得実績(科研費，産学連携プロジェクト，財団助成金，機関内競争経費，など代表者・分担者の別を明記。その他アピールできる事項)

(6) これまでの研究概要(A4判，2ページ程度)と今後の研究計画(A4判，1ページ以内)

(7) 教育についての実績と抱負(A4判，1ページ以内)

(8) 応募者について所見を伺える方2名の連絡先(氏名，所属，職位，電話，電子メールアドレス)

※ なお，選考状況により別途書類の提出を求められることがあります。

選考方法 (1) 書類審査(選考は本学の教員選考基準による)

(2) 面接：書類審査により適格とされた応募者に対し個別に連絡した後，実施します

※ 選考結果に関する個別の問合せには応じない

応募締切 令和元(2019)年11月1日(金)(必着)

書類送付先 〒441-8580 愛知県豊橋市天伯町雲雀ヶ丘1-1
豊橋技術科学大学 大学院工学研究科 機械工学系
系長 足立忠晴

※ 「材料・生産加工分野教員(助教)応募書類在中」と朱記し，書留で郵送して下さい

問合せ先 機械工学系 教授 三浦博己(コース長)

☎ 0532-44-6697 E-mail: miura@me.tut.ac.jp

その他 (1) 応募書類は返却しません(返却を希望される場合：返信用の封筒(切手あるいは着払いの伝票が添付されたもの)を同封して下さい)

(2) 個人情報保護法に基づき，応募書類に含まれる個人情報には本選考の用途以外には使用しません

(3) 面接等，来学に関わる費用は応募者の自己負担となります

(4) 選考結果は，審査終了次第，本人宛に通知します

※ 必ず下記のURLをご参照下さい。

<https://www.tut.ac.jp/about/kyoin-koubo.html>

筑波大学：材料学，材料力学等の基礎学問に立脚し，最先端のスマートマテリアル開発に関する分野(助教1名)

応募締切 2019年9月30日(月)

筑波大学システム情報系公募情報

<http://www.eis.tsukuba.ac.jp/recruit>

◇兵庫県立大学大学院 工学研究科
材料・放射光工学専攻 教員公募◇

募集人員 准教授1名
(男女共同参画を推進していますので女性研究者の応募を歓迎します)

所 属 材料・放射光工学専攻

専門分野 トポロジカル材料工学

概 要 ポスト「京」スーパーコンピュータの利用を視野に入れ、大規模数値計算により強相関物質におけるトポロジカル量子現象を利用した高機能材料の開発、および新機能創出を目的とした理論研究と教育を実施できる人材を公募する。

教育担当 大学院〈博士前期〉量子統計物理学，材料工学特別演習〈博士後期〉信頼性材料工学セミナー
学部 量子反応工学，機械・材料工学実験，材料工学実験，卒業研究その他関連分野の講義を担当する場合があります

応募資格 博士の学位を有し，上記専門分野の研究と教育に意欲がある方

着任時期 令和2年4月1日

応募書類 1. 履歴書(写真貼付，学歴は高等学校卒業以降，職歴，賞罰等)：様式1
2. 研究業績(著書，論文等)：様式2および主要論文別刷り(5編まで，コピー可)
3. 教育歴および学会・社会における活動等：様式3
4. これまでの主要な研究概要(2,000字程度)：様式4
5. 教育・研究への抱負(2,000字程度)：様式5
6. 推薦書1通または応募者に対して意見を伺える方2名の氏名・役職と連絡先を記載した書類

応募締切 2019年9月30日(月)必着

選考方法 書類審査および面接(模擬授業を含む)による

書類提出先 〒671-2280 姫路市書写 2167
兵庫県立大学姫路工学キャンパス 総務課気付
大学院工学研究科長 川川喜弘 宛
*封筒に「材料・放射光工学専攻准教授(トポロジカル材料工学)応募書類在中」と朱書きし，簡易書留で送付すること。応募書類は原則として返却しません。

問合せ先 材料・放射光工学専攻 専攻長 菅誠一郎
☎ 079-267-4925
E-mail: koubo208@eng.u-hyogo.ac.jp

公募の URL
<http://www.eng.u-hyogo.ac.jp/outline/koubo/index.html>

◇名古屋大学未来材料・システム研究所 准教授 公募◇

募集人員 准教授1名

所 属 未来材料・システム研究所 附属高度計測技術実践センター 電子顕微鏡計測部

募集内容 詳細は HP 参照；<https://www.imass.nagoya-u.ac.jp>

勤務地 名古屋市千種区

着任時期 2020年4月1日以降のできるだけ早い時期

公募する研究領域 持続可能な資源循環型社会を世界規模で実現するために，環境と調和する様々な機能性・省エネルギー材料などの開発が求められています。そのために，最先端高機能材料の創製・分析・開発に関連する研究領域の課題達成に貢献できる人材を公募します。今回は，特に電子顕微鏡を利用した高度な観察・測定技術を開拓でき，ナノ領域物性研究を推進する研究プロジェクトを担当いただける人材を募集します。

募集研究分野 大分類 材料工学，物性物理学
小分類 金属物理，無機材料物性，電子顕微鏡学

応募締切 2019年9月30日(月)17:00必着

応募方法 以下の書類を，応募期間内(必着)に以下へ郵送。
※書留で「高度計測技術実践センター教員応募書類在中」と朱書きのこと。応募書類はプリントアウトしたもの1部およびそれをPDF形式のファイルにしてUSBメモリに格納して提出すること。

- (1) 履歴書(書式自由，写真貼付，電子メールアドレスを含む連絡先記載)
- (2) 研究業績リスト(①査読付き論文，②国際学会論文，③著書，④総説・解説など，⑤特許，⑥受賞，⑦招待講演，⑧外部資金獲得実績(代表・分担に分けて記載)，⑨学会活動を含む社会貢献に分けて記載)[共著者名はすべて掲載順に記入し，自身の箇所に下線を付すこと。]
- (3) 主な論文5編以内の別刷り(上記(2)研究業績リストに※印を付すこと。)
- (4) これまでの教育・研究の概要(任意形式でA4用紙3ページ以内)
- (5) 着任後の研究プロジェクト課題名とその研究計画(任意形式でA4用紙3ページ以内，研究プロジェクト期間は5-10年)
- (6) 教育に関する抱負
- (7) 所見を求めうる方(2名)の氏名，所属，連絡先

書類送付先 〒464-8603 名古屋市千種区不老町
名古屋大学研究所未来材料・システム研究所 所長 岩田 聡 宛
※書留で「高度計測技術実践センター教員応募書類在中」と朱書きのこと。応募書類はプリントアウトしたもの1部およびそれをPDF形式のファイルにしてUSBメモリに格納して提出すること。

問合せ先 名古屋大学未来材料・システム研究所 高度計測技術実践センター長 齋藤 晃
E-mail: saitoh*.*imass.nagoya-u.ac.jp(@前後の*を削除。)
☎ 052-789-3596



日本金属学会誌掲載論文

Vol. 83, No. 9 (2019)

——特集「超伝導材料最前線 —実用化に向けた組織制御技術の進歩—」——

特集「超伝導材料最前線 —実用化に向けた組織制御技術の進歩—」によせて 松本 要 熊倉浩明

AgシースBi-2223超伝導線材の開発(オーバービュー) 長部吾郎

母材への元素添加による新しい内部スズ拡散法 Nb₃Sn 線材組織制御(レビュー) 伴野信哉 森田太郎 余 洲 谷貝 剛 太刀川恭治

ケーブル応用に向けた金属テープ上 BaHfO₃ 添加 SmBa₂Cu₃O_y 多層薄膜の縦磁場中 J_c 特性 杉原和樹 一野祐亮 土屋雄司 一瀬 中 吉田 隆

成膜温度を変化させて作製した YBa₂Cu₃O₇ + BaHfO₃ 薄膜の磁束ピンニング特性 堀出朋哉 鳥越健太 喜多隆介 中村亮太 石丸 学 淡路 智 松本 要

市販されているコーテッドコンダクター(希土類系超電導テープ線材)の微細組織と臨界電流 一瀬 中 土屋清澄 菊池章弘 小黒英俊

Vapor-Liquid-Solid 成長法を用いて作製した Y₂BaCuO₅ を添加した YBa₂Cu₃O_y 高温超伝導薄膜の磁束ピンニング特性 土屋雄司 田尻修也 一野祐亮 一瀬 中 吉田 隆

マグネシウム気相輸送法による高純度 MgB₂ 超伝導多結晶バルクの開発 佐野川 悠 山本明保

PIT 法によるステンレスと Ag-Sn 合金で二重被覆した鉄系 Ba-122超伝導テープの作製と特性 戸叶一正 Z. Gao 松本明善 菊池章弘 熊倉浩明

Materials Transactions 掲載論文

Vol. 60, No. 9 (2019)

——Overview——

Radiation Tolerance of Ultrafine-Grained Materials Fabricated by Severe Plastic Deformation

Nariman A. Enikeev, Valentin K. Shamardin and Bertrand Radiguet

——Special Issue on Latest Research and Development of Structural and Functional Titanium-Based Materials——

PREFACE Takayoshi Nakano, Takayuki Narushima, Takao Hanawa, Masato Ueda, Yoko Yamabe-Mitarai, Tadashi Furuhashi, Hideki Hosoda and Mitsuo Niinomi

Effect of Forging Temperature on Microstructure Evolution and Tensile Properties of Ti-17 Alloys

Yoko Yamabe-Mitarai, Syuji Kuroda, Norie Motohashi, Hiroaki Matsumoto, Goro Miyamoto, Elango Chandiran, Yoshinori Yoshida and Yoshio Itsumi

Quantitative and Qualitative Relationship between Microstructural Factors and Fatigue Lives under Load- and Strain-Controlled Conditions of Ti-5Al-2Sn-2Zr-4Cr-4Mo (Ti-17) Fabricated Using a 1500-ton Forging Simulator

M. Niinomi, T. Akahori, M. Nakai, Y. Koizumi, A. Chiba, T. Nakano, T. Kakeshita, Y. Yamabe-Mitarai, S. Kuroda, N. Motohashi, Y. Itsumi and T. Choda

Suppression of Grain Boundary α Formation by Addition of Silicon in a Near- β Titanium Alloy

Masaaki Nakai, Mitsuo Niinomi, Huihong Liu and Tomonori Kitashima

Low Springback and Low Young's Modulus in Ti-29Nb-13Ta-4.6Zr Alloy Modified by Mo Addition

Qiang Li, Qiang Qi, Junjie Li, Masaaki Nakai, Mitsuo Niinomi, Yuichiro Koizumi, Daixiu Wei, Kenta Yamanaka, Takayoshi Nakano, Akihiko Chiba, Xuyan Liu and Deng Pan

Effects of Fe on Microstructures and Mechanical Properties of Ti-15Nb-25Zr-(0, 2, 4, 8) Fe Alloys Prepared by Spark Plasma Sintering

Qiang Li, Xufeng Yuan, Junjie Li, Pan Wang, Masaaki Nakai, Mitsuo Niinomi, Takayoshi Nakano, Akihiko Chiba, Xuyan Liu and Deng Pan

Development of Low-Cost Manufacturing Process and Effects of Adding Small Amounts of Ta, O, and N on the Physical and Mechanical Properties of Highly Biocompatible Ti Alloys

Yoshimitsu Okazaki

Preparation of Titanium Alloy/Bioactive Glass Composite for Biomedical Applications via Selective Laser Melting

Sungho Lee, Jong Yeong Oh, Soichiro Mukaeyama, Shi-Hai Sun and Takayoshi Nakano

Production of Superplastic Ti-6Al-7Nb Alloy Using High-Pressure Sliding Process

Kyohei Watanabe, Maki Ashida, Takahiro Masuda, Petr Kral, Yoichi Takizawa, Manabu Yumoto, Yoshiharu Otagiri, Vaclav Sklenicka, Takao Hanawa and Zenji Horita

Mechanical Properties of Additively Manufactured Porous Titanium with Sub-Millimetre Structural Units

Masato Ueda, Masahiko Ikeda, Shigeo Mori, Kenji Doi, Hisashi Kitagaki and Shuntaro Terauchi

Enhanced Cell Proliferation on Biomedical Titanium Surfaces by Laser Ablation-Induced Micro- and Nanoscale Hybrid Structures

Hwa-Teng Lee and Ching-Chi Lin

Fabrication of the Silicate Containing CaTiO₃ Film with Hydrophilic and Smooth Surface on Titanium to Improve Osteoconductivity

Liwei Zhu, You Saito, Koji Koike, Kensuke Kuroda and Masazumi Okido

Formation of Photocatalytically Active TiO₂ Layers on Ti-Nb Alloys by Two-Step Thermal Oxidation

Shota Sado, Takatoshi Ueda, Yosuke Tokuda,
Naoki Sato, Kyosuke Ueda and Takayuki Narushima

Photocatalytic Performance of an Anodic TiO₂ Layer Fabricated in a NH₄NO₃/Ethylene Glycol Electrolyte with Various Crystallographic Phases

Mingxue Bai, Shunya Nakazono, Kaho Yamaguchi and
Naofumi Ohtsu

Temperature Dependence of Activation Enthalpy for Yielding in Bimodal Ti-6Al-4V

Bhargavi Rani Anne, Masaki Tanaka and
Tatsuya Morikawa

High Temperature Tensile Deformation Mode and Microstructural Conversion of Ti-6Al-4V Alloy with the ($\alpha + \alpha'$) Duplex Starting Microstructure

Hiroaki Matsumoto and Hiromasa Ito

Effect of Oxygen Addition on the Formation of α'' Martensite and Athermal ω in Ti-Nb Alloys

Sota Kawano, Sengo Kobayashi and Satoshi Okano

Effects of $\{332\}\langle 113 \rangle$ Deformation Twinning on Fatigue Behavior of Ti-Mn System Alloys

Ken Cho, Kohei Yuki, Hiroki Kobata, Mitsuo Niinomi and
Hiroyuki Y. Yasuda

α -Phase Precipitation Behavior in β -Type Ti-15V-3Cr-3Sn-3Al Alloys Aged by Different Aging Processes, Investigated Using Transmission Electron Microscopy

E. Sukegai, T. Hashiguchi, M. Naruse and E. Tanabe

Effect of C and Al Elements on High Specific Resistance and High Rigidity of Ultra-High Strength TiC_(1-x)/Ti Metal Matrix Composites Fabricated by Blended Elemental Reactive Sintering

Tadahiko Furuta, Katsuomi Shiina,
Yoshihisa Ueda, Shinobu Shimazaki and
Kiyoharu Nakamura

— *Regular Article* —

Materials Physics

Tunability of Mg₂Si Bandgap by Formation of Mg₂(Si, C) with an Anti-Fluorite Structure Examined by First-Principles Calculations

Yoji Imai, Atsushi Yamamoto and Ken-ichi Takarabe

Microstructure of Materials

Strengthening Mechanisms of Powder Metallurgy Extruded CP Titanium Materials with Zirconium and Oxygen Solid Solution via Decomposition of ZrO₂ Additives in Sintering

Mizuki Fukuo, Shota Kariya, Junko Umeda,
Katsuyoshi Kondoh and Masato Yoshiya

Goss Orientation Evolution in Ti-5.5Mo-8Al-6Zr Shape Memory Alloy upon Heat Treatment

Yuri Shinohara, Tomoya Sasaki, Masaki Tahara,
Hideki Hosoda and Tomonari Inamura

Solidification of Aluminum Plate and Cylinder Induced by Heat Transfer

Toshiro Owadano

Influence of Gamma Irradiation on Properties of Ferroelectric Composite from Cellulose Nanoparticles and Triglycine Sulfate

Mai Bich Dung and Hoai Thuong Nguyen

Enhanced Property of W-Cu Composites by Minor Addition of Ag

Xiaojuan Gong, Shu Yu, Yunping Li
and Hu Yang

Effects of Microstructure on Mechanical Properties of Harmonic Structure Designed Pure Ni

Masaya Nagata, Naoki Horikawa, Mie Kawabata and
Kei Ameyama

Enhanced Dendrite Coarsening and Microsegregation in Al-Cu Alloy under a Steady Magnetic Field

Shengya He, Tongjun Zhan, Chuanjun Li, Weidong Xuan,
Jiang Wang and Zhongming Ren

Mechanics of Materials

Investigation on Simplified Equation for Estimating J -Integral of Adhesive Joint and Its Application to Galvannealed Steel Plate

Kensuke Ogawa, Ryusei Maeda, Takaya Kobayashi,
Eiichiro Yokoi, Toru Furusawa, Kenji Takada and
Masaki Omiya

Mechanism behind the Crack Formation in Hydrogen Doping Cz-Si Crystal Growth

Wataru Sugimura, Kousuke Takata, Masaki Tanaka and
Kenji Higashida

Materials Chemistry

Investigation of Sintering Behavior in Low-alloyed Steel Powder Containing TiB₂ Particles

Nobuhiko Matsumoto, Toshitake Miyake, Mikio Kondoh,
Yusuke Oishi and Kazuhiro Toyama

Anisotropic Electric Conductivity and Battery Performance in C-axis Oriented Lanthanum Silicate Oxypatite Prepared by Slip Casting in a Strong Magnetic Field

Tohru S. Suzuki, Satoshi Takahashi, Tetsuo Uchikoshi,
Takamasa Ishigaki and Kiyoshi Kobayashi

Influence of Zn Content on Grain Boundary Precipitates on Stress Corrosion Cracking of Al-Zn-Mg Alloys under Environments Containing Chloride Solutions

A. Chiba, S. Takamori, M. Ode
and T. Nishimura

Preparation of Nanoporous CeO₂ Catalyst Supports by Chemical Treatment of Amorphous Alloys and Investigation of Ni/CeO₂ Catalytic Activity

Ai Nozaki, Ryosuke Fujiwara, Chiyako Ueda,
Ayane Yamashita, Hiroaki Yamamoto and Masao Morishita

Effect of Titanium on Oxidation Behavior of High-Purity Ferritic Stainless Steel

Yoshiharu Inoue,
Nobuhiko Hiraide, Atsutaka Hayashi and Kohsaku Ushioda

Materials Processing

Evaluation Method of Formability through Development onto Tangential Planes: Geometrical Evaluation for Forming of Closed Section Parts from Sheet

Masahiko Sato, Akihiro Tokugawa,
Yukihiisa Kuriyama and Katsuyuki Suzuki

Influence of Various Elements on Primary Crystal Temperature and Carbon Equivalent in Hypo-Eutectic Cast Iron

Toshitake Kanno, Yuki Iwami and Ilgoo Kang

Effect of Alloying Element on Si Phase Precipitation from Si-Supersaturated α -Al Solid Solution in JIS ADC12 Alloy Die Castings during Heat Treatment

Shuxin Dong, Yasushi Iwata, Jun Yaokawa, Kazuma Hibi and Keiichiro Oh-ishi

Numerical Simulation of Cut Surface Shape and Residual Stress Distribution in Shearing Process

Masaru Fukumura, Yoshiaki Zaizen, Takeshi Omura, Kunihiro Senda and Yoshihiko Oda

Microscopic Observation of Precipitation Behavior at Friction Stirring Zone of Super Duplex Stainless Steel

Itto Sugimoto, Seung Hwan C. Park, Satoshi Hirano, Hikaru Saito and Satoshi Hata

Evaluation of Mass Transfer in an Aluminum Melting Furnace Stirred Mechanically during Flux Treatment

Kenya Kato, Takuya Yamamoto, Sergey V. Komarov, Ryosuke Taniguchi and Yasuo Ishiwata

Engineering Materials and Their Applications

Electrical Property Improvement of Copper Filler Conductive Adhesive with Low-Melting Point Metal Bridge

Michiya Matsushima, Yusuke Takechi, Shogo Minami, Shinji Fukumoto and Kozo Fujimoto

A Low Temperature Fabrication and Photoactivity of Al_2TiO_5 in Cinnamic Acid Degradation

Nguyen D. Trung, Ha C. Anh, Nguyen Tri, P.H. Phuong and Hoang T. Cuong

Enhancement of Perpendicular Exchange Bias by Introducing Twin Boundary in Pt/Co/ α -Cr₂O₃/ α -V₂O₃ Epitaxial Film

Yu Shiratsuchi, Saori Yoshida, Satoshi Onoue, Chiharu Mitsumata, Nobuhito Inami, Tetsuro Ueno, Kanta Ono and Ryoichi Nakatani

TiO₂@SiO₂ Nanoparticles Functionalized with Para-Aminobenzoic Acid (PABA) by Fisher Esterification Reaction

María L. Carrera-Jota, Margarita García-Hernández, Ernesto Rivera-Becerril, Jorge H. Luna-Domínguez, Ángel de J. Morales-Ramírez, Arturo López-Marure, Perla Y. López-Camacho and Brenely González-Penguelly

The Flow Softening Behavior and Deformation Mechanism of AA7050 Aluminum Alloy

Qunying Yang, Xiaoyong Liu, Yongxin Liu, Xiangze Fan and Mei Shu

Three-Dimensional Morphology of C15-Al₂Ca Precipitates in a Mg-Al-Ca Alloy

Sakiko Kashiwase, Mariko Unekawa, Hiromu Hisazawa and Yoshihiro Terada

Positive Effects of the Ultrasound on Biosynthesis, Characteristics and Antibacterial Activity of Silver Nanoparticles Using *Fortunella Japonica*

Nguyen P. Anh, Duong N. Linh, Nguyen V. Minh and Nguyen Tri

Environment

Direct Deoxidation of Ti by Mg in MgCl₂-HoCl₃ Flux

Lingxin Kong, Takanari Ouchi and Toru H. Okabe

Erratum
Announcement

書評

刃物の金属組織学 身近な刃物・日本刀・隕鉄 驚きの真実

朝倉健太郎 著

筆者は今まで、各種刃物の組織や製法についての「刃物あれこれ」と、はさみに関する「髪の毛を切ってなんだろう」の2冊の本を共著で出版している。本書はこれまでの2冊の刃物とはさみの内容を超え、包丁、はさみ、農具刃物、大工道具、カッターナイフなどの身近な刃物や日本刀、隕鉄の組織とその機能・特殊性についてまとめた「刃物の本」である。

第1章の「刃物の歴史」では、隕鉄から日本刀、包丁、はさみ、農具刃物から大工道具まで、幅広く刃物の歴史を扱っている。第2章の「金属の基礎知識」では、金属の基礎知識として、鉄-炭素系の平衡状態図や鋼の各組織、焼き入れや焼き戻しの処理などについての平易な説明があり、金属が専門でない読者にも内容がわかるように配慮されている。第3章では、隕鉄を扱っていて、隕鉄がFe-Ni-Co合金で、組織観察からほとんどの組織が擬等軸フェライトで、内部組織も極微細粒であることを明らかにしている。第4章では、ステンレス鋼の歴史と分類、金属の強化因子について詳しく説明されている。

第5章から第10章までは、包丁、農具刃物、大工道具、日本

刀、はさみなどについて、金属組織、ビッカース硬さ、刃角度に注目してそれぞれの刃物について詳細に載せている。特に第10章の「100円包丁と100円はさみ」の章では、これらの刃物がサビやすい金属学的な考察があり、興味深い。第11章「刃角度と3D測定マイクロスコープによる測定と実測値の比較」では、非接触で面を3D測定できる3D測定マイクロスコープを用いて非破壊で刃角度の測定を行い、刃角度の精度について検討している。第12章では、「越前打ち刃物体験教室」で筆者が実際に体験した打ち刃物(包丁)の製法を、多くの写真を使って詳細に紹介している。第13章では、「付録」として材料の特質を知るために、硬さの測定方法や各種試験機の概要、硬さ換算表、鋼の火花による炭素量の簡易分析、倍率スケールからの倍率換算表など、本書の内容の理解を助けるための有用な情報を載せている。

本書は、従来の刃物の本の範疇を超えた、「刃物の本」の集大成であると言える。

(愛知教育大学 教育学部 北村一浩)

[2018年 B5判 アグネ承風社 約400頁 8500円+税]

新 入 会 員

(2019年6月21日～2019年7月22日)

正 員

| | | |
|--------------------------|---------------------------|---------------------------|
| ZHOU ZHENXING 東北大学 | 瀬川 正 仁 伊藤忠テクノソリューションズ株式会社 | 藤岡 正 弥 北海道大学 |
| 味戸 沙 耶 東北大学 | 中川 宏 司 太陽鋳工株式会社 | 宮嶋 一 樹 株式会社淀川製鋼所 |
| 石川 善 恵 国立研究開発法人産業技術総合研究所 | 中村 康 一 京都先端科学大学 | 最上 讓 二 東北大学 |
| 井上 謙 一 日立金属株式会社 | 成瀬 真 司 東北特殊鋼株式会社 | 山口 裕 史 株式会社クボタ |
| 牛飼 隆 昭 株式会社日立製作所 | 西澤 洋 行 白井国際産業株式会社 | 山崎 強 日本製鉄株式会社 |
| 片岡 理 樹 国立研究開発法人産業技術総合研究所 | 野崎 浩 佑 東京医科歯科大学 | 山崎 敏 広 伊藤忠テクノソリューションズ株式会社 |
| 勝部 大 樹 長岡技術科学大学 | 野田 祐 輔 名古屋大学 | 山下 隼 人 大阪大学 |
| 柴田 基 洋 東京大学 | 馬場 将 亮 長岡技術科学大学 | 山ノ内友里香 北海道大学 |
| 菅江 清 信 日本製鉄株式会社 | 平林 潤 一 東芝エネルギーシステムズ株式会社 | 渡邊 厚 介 名古屋工業大学 |

学 生 員

| | | |
|-----------------------|------------------|-----------------|
| 相磯 匠 東北大学 | 小笠原拓哉 東京工業大学 | 古賀 拓 郎 東北大学 |
| 青木 愛 美 関西大学 | 岡田 魁 富山大学 | 児玉 春 奈 東京医科歯科大学 |
| 阿賀 一 朗 大阪大学 | 岡出健太郎 東京大学 | 湖東 弘 樹 大阪府立大学 |
| 浅野 真 由 同志社大学 | 小川 広 容 室蘭工業大学 | 後藤 宏 基 東北大学 |
| 荒木 翔 大阪大学 | 奥村 貴 大 東北大学 | 古仲 雄 亮 北見工業大学 |
| 荒木 航 東北大学 | 尾崎 稔 樹 大阪市立大学 | 小西 淳 之 大阪大学 |
| Alijani Fatemeh 同志社大学 | 尾田 誠 司 大阪府立大学 | 古野 慎 二 名古屋工業大学 |
| 伊井 杏 香川大学 | 落合 祐 介 筑波大学 | 小林 幸 央 関西大学 |
| 飯島 穰 東北大学 | 尾堂 裕 隆 大阪大学 | 小林 佳 弥 大阪大学 |
| 池野 浩 平 東京工業大学 | 小野寺 巧 早稲田大学 | 菰田 誉 大 高知工科大学 |
| 生駒 隼 人 関西大学 | 小尾 拓 野 筑波大学 | 小屋 聡 三重大学 |
| 生駒 真 人 関西大学 | 柿本 亮 平 九州大学 | 斉藤 凌 東京工業大学 |
| 石川 達 裕 筑波大学 | 霞 佳 龍 仙台高等専門学校 | 匂坂 康 平 東北大学 |
| 石黒 琢 己 三重大学 | 片山 靖 和 東北学院大学 | 佐久間 広 夢 名古屋大学 |
| 石橋 春 佳 長崎大学 | 片山 昇 関西学院大学 | 櫻木 智 仁 東京工業大学 |
| 市川 大 樹 東北大学 | 蟹谷 望 大阪大学 | 迫 優 太 朗 山形大学 |
| 一瀬 颯 北海道大学 | 上澤 将 大 北海道大学 | 佐々木 志 帆 岩手大学 |
| 井手 泰 徳 九州大学 | 上村 源 東京大学 | 佐々木 和 東京理科大学 |
| 伊藤 志 将 大阪大学 | 河口 紘 明 京都工芸繊維大学 | 佐藤 俊 太 郎 東北大学 |
| 井俣 竜 士 大同大学 | 川田 拓 哉 広島大学 | 佐藤 瑞 起 東京工業大学 |
| 今泉 冴 香 東北大学 | 川西 洋 太 東京工業大学 | 佐藤 基 岐 北海道大学 |
| 今川 雄 大 大阪大学 | 川堀 龍 新居浜工業高等専門学校 | 更 山 楓 富山大学 |
| 岩井 裕 太 関西大学 | 河村 菜 里 筑波大学 | 沢田 仁 志 広島大学 |
| 上野 裕 次 郎 東京大学 | 菅野 匡 宏 千葉工業大学 | 塩 沢 優 大 東北大学 |
| 上村 海 長岡技術科学大学 | 神原 新 東北大学 | 重松 和 磨 九州大学 |
| 上山 椋 平 大阪大学 | 菊池 修 平 秋田大学 | 志藤 悠 平 茨城大学 |
| 内堀 宗 民 東海大学 | 北浦 孝 直 関西大学 | 島 守 日 菜 東北大学 |
| 内村 祐 也 大阪府立大学 | 北野 裕 人 大阪府立大学 | 下田 慶 人 長崎大学 |
| 畝川 真 梨 子 東京工業大学 | 北原 慎 吾 熊本大学 | 首藤 洋 輔 熊本大学 |
| 梅田 健 司 大阪府立大学 | 木下 賀 登 名古屋工業大学 | 庄 司 理 信 東北大学 |
| 梅田 侑 暉 東京工業大学 | 木村 勇 太 東北大学 | 白井 杜 都 北海道大学 |
| 梅村 亮 佑 名古屋大学 | 葛谷 慎 吾 秋田大学 | 末丸 直 也 九州大学 |
| 江越 友 哉 筑波大学 | 工藤 大 輝 北海道大学 | 菅 沼 諒 耶 大阪大学 |
| 尾家 一 志 九州大学 | 久保田 侑 治 横浜国立大学 | 杉 内 一 彦 秋田大学 |
| 大崎 淳 也 東北大学 | 窪田 陸 人 東京大学 | 杉野 誠 紀 広島大学 |
| 大迫 明 弘 大阪府立大学 | 窪前 友 宏 大阪市立大学 | 杉山 将 崇 東京理科大学 |
| 大志田 達 郎 東北大学 | 隈 元 健 岡山大学 | 圖 子 光 樹 北海道大学 |
| 大瀧 純 太 金沢工業大学 | 久米 井 康 志 東北大学 | 鈴木 竣 名古屋大学 |
| 大谷 龍 剣 東京大学 | 蔵谷 太 朗 兵庫県立大学 | 春原 光 希 名古屋大学 |
| 大津 彬 鳥取大学 | 黒川 拓 也 東海大学 | 清野 雄 太 東北大学 |
| 大津 英 晃 北海道科学大学 | 呉 燦 榮 金沢工業大学 | 鷹野 陽 弘 大阪府立大学 |
| 大槻 龍 矢 東京大学 | 小石川 直 生 名古屋大学 | 高橋 征 也 名古屋大学 |
| 大野 冠 太 金沢大学 | 合戸 信 之 介 東北大学 | 高山 隼 太 朗 熊本大学 |
| 大野 堅 太 芝浦工業大学 | 古賀 詩 悠 九州大学 | 滝本 健 太 筑波大学 |

| | | | | | |
|---------|----------|--------|----------|--------------|----------|
| 竹達 統真 | 室蘭工業大学 | 馬場 鷹人 | 神戸大学 | 松尾 泰貴 | 豊橋技術科学大学 |
| 竹場 准也 | 東京海洋大学 | 濱岡 光太 | 北海道大学 | 松坂 匡晃 | 大阪大学 |
| 竹花 諒 | 大阪大学 | 濱田 鉄也 | 京都大学 | 松葉 寿明 | 東京工業大学 |
| 竹谷 健太郎 | 早稲田大学 | 濱田 輝哉 | 千葉工業大学 | 丸田 彩佳 | 東京工業大学 |
| 田代 潤一 | 東京工業大学 | 濱本 創 | 広島大学 | 丸山 涼 | 東京理科大学 |
| 田代 匡史 | 熊本大学 | 林 隆徳 | 同志社大学 | 三浦 悠太 | 東北学院大学 |
| 田中 順也 | 大阪大学 | 林 裕太郎 | 名古屋工業大学 | 水野 大輔 | 上智大学 |
| 田中 友規 | 東京工業大学 | 原 健太郎 | 大阪大学 | 三改木 怜斗 | 北海道大学 |
| 谷口 哲 | 横浜国立大学 | 樋口 龍輝 | 千葉工業大学 | 光山 容正 | 京都工芸繊維大学 |
| 田村 和暉 | 京都工芸繊維大学 | 菱田 真由子 | 東京工業大学 | 光楽 弘基 | 東京工業大学 |
| 塚瀬 大規 | 筑波大学 | 肥村 康治 | 東海大学 | 南元 伸哉 | 同志社大学 |
| 綱分 萌菜実 | 東京大学 | 日山 洋平 | 茨城大学 | 三村 忠寛 | 岡山大学 |
| 手塚 内児 | 芝浦工業大学 | 平賀 良 | 東京工業大学 | 宮 瞭 | 東北大学 |
| 土居 哲朗 | 広島大学 | 廣川 大樹 | 東北大学 | 宮本 健太 | 金沢大学 |
| 戸巻 洋平 | 仙台高等専門学校 | 廣瀬 祐介 | 東北大学 | 宮本 直幸 | 大阪府立大学 |
| 富永 桂太 | 北海道大学 | 廣田 隆人 | 芝浦工業大学 | 宮脇 浩平 | 熊本大学 |
| 友野 翔平 | 横浜国立大学 | 福尾 智裕 | 愛媛大学 | 村上 善樹 | 東京大学 |
| 長江 弘一郎 | 富山大学 | 福岡 稜馬 | 大同大学 | 望月 喬史 | 大阪府立大学 |
| 中尾 隼 | 関西大学 | 福士 達也 | 北海道大学 | 森 翔太 | 愛媛大学 |
| 中川 将嘉 | 早稲田大学 | 福島 涼 | 大阪大学 | 森本 知樹 | 兵庫県立大学 |
| 中沢 亮太 | 東京工業大学 | 藤井 俊輔 | 広島大学 | 師岡 弘一 | 芝浦工業大学 |
| 中島 悠太 | 芝浦工業大学 | 藤井 健雄 | 京都大学 | 山内 大輝 | 愛媛大学 |
| 永田 貴一 | 芝浦工業大学 | 藤井 規史 | 大阪大学 | 山岡 祐介 | 大阪大学 |
| 永田 将 | 茨城大学 | 藤井 優作 | 富山大学 | 山形 武史 | 東北大学 |
| 永田 将偉 | 崇城大学 | 藤居 稜 | 兵庫県立大学 | 山岸 直希 | 東京工業大学 |
| 永田 知裕 | 金沢大学 | 藤澤 彩夕 | 京都大学 | 山口 貴士 | 長崎大学 |
| 長田 洸 | 東海大学 | 藤田 育郎 | 九州大学 | 山口 匡訓 | 広島大学 |
| 中津 大輔 | 東京工業大学 | 藤田 一輝 | 東北大学 | 山下 宙紀 | 芝浦工業大学 |
| 中西 亮太 | 大阪大学 | 藤田 一宏 | 長崎大学 | 山田 智子 | 大阪府立大学 |
| 中原 拓也 | 熊本大学 | 藤田 健 | 京都大学 | 大和 佳史 | 茨城大学 |
| 中村 公二 | 九州大学 | 藤林 征宏 | 大阪府立大学 | 結城 弦太 | 東北大学 |
| 生井 航平 | 茨城大学 | 藤村 晃庸 | 広島大学 | 百合嶋 隆太 | 茨城大学 |
| 並河 祐貴 | 広島大学 | 藤本 幹也 | 豊橋技術科学大学 | 横山 遼 | 京都大学 |
| 奈良井 誠大 | 愛媛大学 | 藤原 健弥 | 東京工業大学 | 吉田 匠 | 兵庫県立大学 |
| 成 本 裕 希 | 大阪大学 | 藤原 聡一郎 | 名古屋大学 | 吉元 大進 | 早稲田大学 |
| 成瀬 統伍 | 北海道大学 | 船木 元裕 | 上智大学 | 雷 雨超 | 東北大学 |
| 西浦 且章 | 大阪大学 | 帆足 勇之 | 北海道大学 | LIAO Kun-Yen | 東京大学 |
| 西尾 祐輝 | 大阪大学 | 包 駿 卿 | 芝浦工業大学 | 劉 漢 卿 | 東京大学 |
| 西谷 健太 | 名古屋大学 | 堀江 翼 | 東京理科大学 | 鷲野 孝成 | 早稲田大学 |
| 西村 直樹 | 兵庫県立大学 | 堀口 智弘 | 愛媛大学 | 渡邊 康平 | 芝浦工業大学 |
| 橋本 貴斗 | 上智大学 | 本村 陸央 | 大阪大学 | 渡邊 紳二 | 広島大学 |
| 橋本 直幸 | 筑波大学 | 前田 拓海 | 大阪大学 | 渡辺 まどか | 大阪大学 |
| 長谷川 修也 | 東京理科大学 | 牧野 雄也 | 岡山大学 | 渡邊 桃加 | 熊本大学 |
| 八野田 将吾 | 東北大学 | 松井 裕貴 | 茨城大学 | 渡邊 裕貴 | 山形大学 |
| 花田 晃広 | 東京工業大学 | 松浦 周太郎 | 京都大学 | | |

外国一般会員

| | | | | | |
|----------------------|---------------------------------|---------------|---------------------------------|--------|---------------------------------|
| Chandiran elango | 東北大学 | KIM JONGHYUN | Chongqing University | YA Bin | Dalian University of Technology |
| DONG Wei | Dalian University of Technology | MENG Linggang | Dalian University of Technology | 杜 玉峰 | 東北大学 |
| GAIDA Nico Alexander | 名古屋大学 | XU Fumin | Dalian University of Technology | | |

外国学生会員

| | | | | | |
|------------------------|-----------------------------|-----------|-----------------------------|--------|---------------|
| Fajarin Rindang | 東北大学 | Yun jimin | PUKYONG National University | プーワデッチ | スティパンヤー 防衛大学校 |
| HAN DONGKEUN | Pukyong national university | 欧陽 凌霄 | 東北大学 | 楊 楚楚 | 東京大学 |
| Khuchitbaatar Gerelmaa | 東北大学 | 謝 耀 枢 | 東京大学 | 羅 力天 | 京都大学 |
| KIM Ki Beom | Pukyong national university | 双 逸 | 東北大学 | 劉 磊 | 鳥取大学 |
| LAZARCZYK Justyna | 東京工業大学 | 崔 雨仙 | 関西大学 | 王 浩然 | 東北大学 |
| LIAO Hongxin | Chongqing University | 張 庭セソ | 関西大学 | | |
| ODHIAMBO JOHN OTIENO | 鳥取大学 | 朴 洸 模 | 広島大学 | | |

行事カレンダー

太字本会主催(ホームページ掲載)

| 開催日 | 名称・開催地・掲載号 | 主催 | 問合せ先 | 締切 |
|----------------|--|--|--|--------------------------|
| 2019年9月 | | | | |
| 1～3 | 日本実験力学会2019年度年次講演会(徳島大) | 日本実験力学会 | TEL 088-656-7387 JSEM2019@ml.tokushima-u.ac.jp http://www.jsem.jp/event/Annual19/index.html | |
| 2～3 | 第14回水素若手研究会(琉球大) | 水素若手研究会事務局 | hydrogen.wakate@gmail.com https://home.hiroshima-u.ac.jp/h2wakate/index.html | |
| 2～3 | 2019電気化学セミナー3「初心者のための電気化学測定法—実習編」(東工大) | 電気化学会 | TEL 03-3234-4213 ecsj@electrochem.jp https://electrochem.jp/post_seminar/2842/ | 8.19 |
| 2～4 | 第16回日本熱電学会学術講演会(名工大) | 日本熱電学会 | http://www.thermoelectrics.jp/conference.html | |
| 2～4 | 第22回 XAFS 討論会(京大) | 日本 XAFS 研究会 | TEL 075-753-6850 yamamoto.kentaro.4e@kyoto-u.ac.jp http://www.moleng.kyoto-u.ac.jp/~moleng_04/event/jxafs22/ | |
| 3～4 | 第34回初心者のための疲労設計講習会(東京都市大) | 日本材料学会 | TEL 075-761-5321 jimuj@jsms.jp http://www.jsms.jp | 定員 60名 |
| 3～4 | 第35回分析電子顕微鏡討論会(幕張メッセ) | 日本顕微鏡学会 | TEL 011-706-6768 bunseki@eng.hokudai.ac.jp http://labs.eng.hokudai.ac.jp/labo/LIFM/bunseki/ | 事前参加 8.30 |
| 3～4 | 第236回塑性加工技術セミナー「伸線(引抜き)加工の基礎技術」(関西大) | 日本塑性加工学会 | http://www.jstp.or.jp | 定員 200名 |
| 4 | 腐食防食部門委員会第329回例会(大阪) | 日本材料学会 | TEL 075-761-5321 jimuj@jsms.jp http://www.jsms.jp | |
| 4 | 2019年度 日本金属学会関東支部 講習会「高強度金属材料の機能発現機構—転位論の基礎から材料強度化まで—」(東大)(7号413頁) | 日本金属学会関東支部 | nakaya@wood3-staff.t.u-tokyo.ac.jp | 事前 8.19 |
| 4～6 | 第162回塑性加工工学講座「有限要素法入門セミナー」(東京) | 日本塑性加工学会 | http://www.jstp.or.jp | 定員 30名 |
| 4～6 | 2019年度工学教育研究講演会(東北大) | 日本工学教育協会 | TEL 03-5442-1021 kawakami@jsee.or.jp https://www.jsee.or.jp/ | |
| 5～6 | 第41回安全工学セミナー物質危険性講座(東京) | 安全工学会 | TEL 03-6206-2840 jsse-2004@nifty.com http://www.jsse.or.jp | |
| 5～6 | 第44回複合材料シンポジウム(岡山理科大) | 日本複合材料学会 | TEL 03-5981-6011 jscm@asas-mail.jp https://www.jscm.gr.jp/ | |
| 6 | 低炭素社会を実現する先端的耐熱材料・軽量材料の開発(東京) | 科学技術振興機構 未来創造研究開発 推進部低炭素研究 推進グループ | TEL 03-3512-3543 alca@jst.go.jp http://www.jst.go.jp/alca/event/ event20190906.html | 定員 140名 |
| 8～10 | 第13回インキュベーションホール(御殿場) | 応用物理学会 プラズマエレクトロニクス分科会 | TEL 042-677-2749 s-uchida@tmu.ac.jp http://annex.jsap.or.jp/plasma/PE_files/ PE_SS_2019 | 定員 60名 |
| 10～12 | 日本計算工学会サマースクール2019 in 東京「非線形有限要素法による弾塑性解析の理論と実践」(中央大) | 日本計算工学会 | TEL 022-795-7417 nonlinearfem@grp.tohoku.ac.jp http://msd.civil.tohoku.ac.jp/ nonlinearfem2019/ | 8.30 |
| 11～13 | 日本金属学会秋期講演大会(岡山大学津島キャンパス)(岡山)(8号467頁) | 日本金属学会 | TEL 022-223-3685 FAX 022-223-6312 annualm@jim.or.jp | |
| 12 | 第8回ランチョンセミナー(岡山大)(本号526頁) | 日本金属学会 | TEL 022-223-3685 stevent@jim.or.jp | |
| 12～14 | 第21回日本感性工学会大会(芝浦工大) | 日本感性工学会 | TEL 03-3666-8000 jske@jske.org https://www.jske.org/taikai/jske21 | |
| 13 | 第112回シンポジウム「今後の航空機産業における軽金属材料の役割」(日大) | 軽金属学会 | TEL 03-3538-0232 http://www.jilm.or.jp/ | 定員 100名 |
| 13 | 第87回レアメタル研究会(東大生産技研) | レアメタル研究会 | TEL 03-5452-6314 tmiya@iis.u-tokyo.ac.jp https://www.okabe.iis.u-tokyo.ac.jp/ japanese/index_j.html | |
| 13 | 日本金属学会・日本鉄鋼協会第9回女性会員のつどい(岡山大)(本号526頁) | 日本金属学会・日本鉄鋼協会 | TEL 022-223-3685 stevent@jim.or.jp | |
| 13 | 2019年度秋季 全国大学材料関係教室協議会講演会(岡山大)(本号526頁) | 全国大学材料関係教室協議会 | | |
| 16～18 | 第32回計算力学講演会(東洋大) | 日本機械学会 | https://www.jsme.or.jp/ | |
| 17 | 第6回大型実験施設とスーパーコンピューターとの連携利用シンポジウム—機能性材料におけるフォノン物性の理解—(東京) | 高輝度光科学研究センター他 | TEL 0791-58-2785 | |
| 17～21 | 国際トライボロジー会議2019 仙台(仙台) | 日本トライボロジー学会 | TEL 022-722-1311 itc2019@convention.co.jp http://www.tribology.jp/ | |
| 18 | 京都大学構造材料元素戦略拠点公開講演会「構造材料のブレークスルーをめざして～わが国の基礎研究の挑戦～」(東京)(8号475頁) | 京都大学構造材料元素戦略拠点(ESISM) | TEL 077-753-5573 admin@esism.kyoto-u.ac.jp http://esism.kyoto-u.ac.jp/ESISM_breakthrough_2019.html | 締切 9月13日 定員 80名 |

| 開催日 | 名称・開催地・掲載号 | 主催 | 問合せ先 | 締切 |
|-----------------|--|-------------------------------|---|------------|
| 18~19 | 第163回塑性加工学講座「板材成形の基礎と応用～基礎編～」(東京) | 日本塑性加工学会 | https://www.jstp.or.jp | 定員 80名 |
| 18~19 | 第47回ガスタービン学会定期講演会(函館) | 日本ガスタービン学会 | TEL 03-3365-0095 gtsj-office@gtsj.org http://www.gtsj.org/ | |
| 19~20 | 軽金属基礎技術講座「アルミニウムの製造技術」(掛川) | 軽金属学会 | TEL 03-3538-0232 http://www.jilm.or.jp/ | 定員 50名 |
| 20 | 金属学会シンポジウム「陽に陰にオリンピック・パラリンピックを支える材料工学」(東京)(8号481頁) | 日本金属学会 | TEL 022-223-3685 FAX 022-223-6312 meeting@jim.or.jp | 事前 9.2 |
| 22~27 | 20th International Symposium on Boron, Borides and Related Materials(第20回ホウ素・ホウ化物および関連物質国際会議)(新潟) | 第20回ホウ素・ホウ化物および関連物質国際会議組織委員会 | TEL 0258-47-9714 takeda@mech.nagaokaut.ac.jp http://sogalabo.jp/isbb2019 | |
| 23~25 | 高温変形の組織ダイナミクス研究会「2019年度夏の学校」(金沢)(6号279頁) | 研究会 No. 76 | TEL 0172-39-3643 mineta@hirosaki-u.ac.jp | |
| 23~26 | 第3回J-PARC国際シンポジウム「宇宙・物質・生命の起源を求めて」(つくば) | J-PARCセンター他 | http://j-parc.jp/symposium/j-parc2019/ | |
| 24 | 第103回金属のアノード酸化皮膜の機能化部会(ARS)例会 ―プラズマを利用したアノード酸化とその関連技術―(首都大学東京) | 表面技術協会・金属のアノード酸化皮膜の機能化部会(ARS) | http://ars.sjf.or.jp/ | 9.10 |
| 24~26 | 資源・素材2019(京都)～資源・素材関係学協会合同秋季大会～(京大) | 資源・素材学会 | TEL 03-3402-0541 info@mmij.or.jp https://confit.atlas.jp/guide/event/mmij2019b/top?lang=ja | |
| 25 | 第334回塑性加工学シンポジウム「多品種少量生産を支える逐次成形技術の最前線―高機能・高付加価値製品の成形事例の紹介―(刈谷) | 日本塑性加工学会 | http://www.jstp.or.jp | 定員 80名 |
| 26~27 | 第12回トライボロジー入門西日本講座―全面リニューアル! 進化した入門講座―(兵庫県立大) | 日本トライボロジー学会 | TEL 03-3434-1926 http://www.tribology.jp/ | 9.13 |
| 2019年10月 | | | | |
| 3~4 | 第10回社会人のための表面科学ベーシック講座(東京理科大) | 日本表面真空学会 | TEL 03-3812-0266 office@jvss.jp https://www.jvss.jp/ | 9.26 |
| 4 | 関東支部 工場見学会(さいたま)(7号413頁) | 日本金属学会関東支部 | nakaya@wood3-staff.t.u-tokyo.ac.jp | 9.2 |
| 6 | 2019年度秋期第74回学術講演会「先端技術・材料にフォーカスした矯正歯科治療のさらなる可能性を探る!」(長崎大) | 日本歯科理工学会 | TEL 03-3947-8891 gakikai30@kokuhoken.or.jp | |
| 7 | 2019年度溶接工学専門講座(大阪) | 溶接学会 | TEL 03-5825-4073 jws-info@tg.rim.or.jp http://www.jweld.jp/ | 定員 50名 |
| 9~11 | ADMETA Plus 2019(Advanced Metallization Conference 2019: 29th Asian Session)(東大) | ADMETA委員会・吉田 | TEL 03-6801-5685 jimukyoku@admeta.org | |
| 9~11 | 第38回電子材料シンポジウム(EMS-38)(檀原) | 電子材料シンポジウム運営・実行委員会 | TEL 082-424-7649 ytominag@hiroshima-u.ac.jp http://ems.jpn.org/ | |
| 10 | 第239回西山記念技術講座 資源・環境・エネルギー問題から見た製鉄技術の進歩と今後の展開(早稲田大) | 日本鉄鋼協会 | TEL 03-3669-5933 educact@isij.or.jp https://www.isij.or.jp/mun6c7d2k | |
| 10~11 | JISSE16 (16th Japan International SAMPE Symposium and Exhibition) Satellite Meeting: Symposium on bioinspired design of advanced materials: active and sensing materials, energy-harvesting materials, micro-nano-soft-robotics and hierarchical composite designs in Honor of the 75th Birthday of Prof. Minoru Taya(東京理科大) | SAMPE JAPAN | http://www.sampejapan.gr.jp/jisse/jisse16/ | 9.20 |
| 11 | 第80回技術セミナー: Q & A で学ぶ電子機器・部品の腐食評価と防食技術(東京) | 腐食防食学会 | TEL 03-3815-1161 naito-113-0033@jcorr.or.jp https://www.jcorr.or.jp/ | |
| 11 | 2019年秋季講演会(大分)(本号529頁) | 日本金属学会九州支部 | TEL 097-553-2282 yokoi.47n.tatsuo@jp.nipponsteel.com | 定員 150名 |
| 11 | 第38回エレクトロセラミックスセミナー「超音波周辺技術とその展開」(川崎) | 日本セラミックス協会電子材料部会 | TEL 03-3362-5231 e-seminar@cersj.org | |
| 12~13 | 第70回塑性加工連合講演会(習志野) | 日本塑性加工学会 | http://www.jstp.jp/ | |
| 15 | 第3回EBSD法による損傷評価講習会 | 日本材料学会 | TEL 075-761-5321 jim@jsms.jp http://www.jsms.jp/ | 8.23 |
| 15~16 | 第7回フラクトグラフィ講習会(京都) | 日本材料学会 | TEL 075-761-5321 jim@jsms.jp http://www.jsms.jp/ | 10.1 |
| 15~18 | 第5回材料WEEK(京都) | 日本材料学会 | TEL 075-761-5321 jim@jsms.jp http://www.jsms.jp/ | |
| 17~18 | 第35回初心者のための疲労設計講習会(京都) | 日本材料学会 | TEL 075-761-5321 jim@jsms.jp http://www.jsms.jp/ | 定員 36名 |
| 18 | 第16回機械・構造物の強度設計, 安全性評価に関するシンポジウム(京都) | 日本材料学会 | design16@jsms.jp jim@jsms.jp http://www.jsms.jp/ | 講演 7.1 |
| 18~19 | 第81回塑性加工技術フォーラム「プレス自動化に向けた計測・搬送技術の最新動向」(諏訪圏工業メッセ見学および記念講演聴講付き)(諏訪) | 日本塑性加工学会他 | http://www.jstp.or.jp | 定員 70名 |

| 開催日 | 名称・開催地・掲載号 | 主催 | 問合せ先 | 締切 |
|-----------------|--|--------------------------------|---|---------------------------|
| 19 | 日本機械学会関東支部山梨講演会(山梨大) | 日本機械学会関東支部 | TEL 055-220-8445 tsuyoshi-s@yamanashi.ac.jp http://society.me.yamanashi.ac.jp/jsme/2019/ | |
| 19~20 | 日本銅学会第59回講演大会(関西大) | 日本銅学会 | TEL 03-6803-0587 dou-gakkai@copper-brass.gr.jp https://www.copper-brass.gr.jp/ | |
| 20~25 | 第12回新物質及び新デバイスのための原子レベルキャラクターゼーションに関する国際シンポジウム(京都) | 日本学術振興会 マイクロビームアナリシス第141委員会 | alc19@alc.jsps141.org https://alc.jsps141.org/alc19 | |
| 23~25 | 第9回構造物の安全性・信頼性に関する国内シンポジウム(東京) | 日本学術会議 | TEL 075-761-5321 jimu@jsms.jp | |
| 23~25 | 第60回高圧討論会(札幌) | 日本高圧力学会 | TEL 070-5545-3188 tounonkai60@highpressure.jp http://www.highpressure.jp/new/60forum/ | 講演 7.9 |
| 24~25 | 第51回溶融塩化学討論会(北大) | 電気化学会溶融塩委員会 | 072-751-9426 mscj@electrochem.jp http://msc.electrochem.jp/touron.html | |
| 27~11.1 | The 13th Pacific Rim Conference of Ceramic Societies (PACRIM13)(沖縄) | 日本セラミックス協会 | TEL 03-3362-5231 jim-ask@cersj.org http://www.ceramic.or.jp/pacrim13/ | |
| 28~30 | 第40回日本熱物性シンポジウム(長崎) | 日本熱物性学会 | TEL 03-5734-2435 jstp@op.titech.ac.jp http://jstp-symp.org/symp2019/index.html | 事前参加 8.30 |
| 30~11.1 | 第48回結晶成長国内会議(JCCG-48)(阪大) | 日本結晶成長学会 | TEL 070-5047-3339 jccg-48@jacg.jp http://www.jacg.jp/jp/event/conference.html | |
| 2019年11月 | | | | |
| 1~3 | 軽金属学会第137回秋期大会(東京農工大) | 軽金属学会 | TEL 03-3538-0232 http://www.jilm.or.jp/ | 参加予約 9.30 |
| 1~4 | The 14th International Symposium on Advanced Science and Technology in Experimental Mechanics(つくば) | 日本実験力学会 | TEL 025-368-9310 office-jsem@clg.niigata-u.ac.jp http://jsem.jp/ | |
| 5 | 2019年度溶接工学企画講座 ~「建築鉄骨を支える最近の溶接技術」~(東京) | 溶接学会 | TEL 03-5825-4073 jws-info@tg.rim.or.jp http://www.jweld.jp/ | 定員 50名 |
| 6 | 日本希土類学会第37回講演会(横浜) | 日本希土類学会 | TEL 06-6879-7352 kidorui@chem.eng.osaka-u.ac.jp http://www.kidorui.org/lecture.html | 10.16 |
| 6 | 第240回西山記念技術講座 資源・環境・エネルギー問題から見た製鉄技術の進歩と今後の展開(大阪) | 日本鉄鋼協会 | TEL 03-3669-5933 educact@isij.or.jp https://www.isij.or.jp/mun6c7d2k | |
| 7 | 第239回塑性加工技術セミナー「複雑変形の塑性と損傷—単軸引張からの脱却—」(名工大) | 日本塑性加工学会 | http://www.jstp.or.jp | 定員 50名 |
| 7 | 第16回ヤングメタラジスト研究交流会(川崎)(本号528頁) | 日本金属学会関東支部 | https://forms.gle/nhuE3Phr2zw36ASa7 | |
| 8 | 微小領域の力学特性評価とマルチスケールモデリング(軽井沢)(6号342頁) | 日本金属学会研究会 No. 82 | https://www.nims.go.jp/group/sdg/micromech-jim/ | |
| 11 | 金属学会シンポジウム「ハイエントロピー合金の材料科学」(東京)(8号481頁) | 日本金属学会 | TEL 022-223-3685 FAX 022-223-6312 meeting@jim.or.jp | 事前 10.28 |
| 15 | 第88回レアメタル研究会(東大生産技研) | レアメタル研究会 | TEL 03-5452-6314 tmiya@iis.u-tokyo.ac.jp https://www.okabe.iis.u-tokyo.ac.jp/japanese/index_j.html | |
| 16 | 第18回日本金属学会東北支部研究発表大会「21世紀を支える構造材料」(名取)(8号475頁) | 日本金属学会東北支部 | TEL 022-381-0378 jim.tohoku2019(at)gmail.com | 講演 10.5 参加 11.11 |
| 11~14 | NACE EAP Conference 2019 腐食科学と防食技術(横浜) | NACE EAP | http://www.nace-tokyosection.org/ | |
| 17~22 | 国際ガスタービン会議2019Tokyo (IGTC2019 Tokyo)(東京) | 日本ガスタービン学会 | http://www.gtsj.org/english | |
| 20~22 | 第19回破壊力学シンポジウム(福島) | 日本材料学会 | TEL 075-761-5321 jim@jsms.jp http://www.jsms.jp/ | |
| 21~22 | 電気加工学会全国大会(2019)(金沢大) | 電気加工学会 | TEL 0538-45-0127 goto.akihiro@sist.ac.jp http://www.jseme.or.jp | |
| 22 | 第22回ミレニアム・サイエンスフォーラム(東京) | ミレニアム・サイエンス・フォーラム | TEL 03-6732-8966 msf@oxinst.com http://www.msforum.jp/ | |
| 25~27 | 第40回 超音波エレクトロニクス基礎と応用に関するシンポジウム(明大) | 超音波エレクトロニクス協会 | TEL 042-443-5166 h.nomura@uec.ac.jp | 講演 8.9 |
| 25~27 | EcoDesign 2019国際会議(横浜) | エコデザイン学会連合会 | ecodesign2019_secretariat@ecodenet.com http://ecodenet.com/ed2019/ | |
| 26~27 | 第29回 傾斜機能材料シンポジウム(阪大) | 傾斜機能材料研究会 | fgms2019@jwri.osaka-u.ac.jp http://www.fgms.net/?p=1722 | 11.1 |

| 開催日 | 名称・開催地・掲載号 | 主催 | 問合せ先 | 締切 |
|-----------------|---|-------------------|--|-------|
| 26~28 | 第45回固体イオニクス討論会(九大) | 日本固体イオニクス学会 | TEL 092-802-6711 atakagak@cstf.kyushu-u.ac.jp http://www.cstf.kyushu-u.ac.jp/~ishihara-lab/ionics/ | |
| 26~28 | 第2回 材料機能特性のアーキテクチャー研究会 (@南紀白浜)開催のご案内(8号474頁) | 日本金属学会研究会 No. 81 | TEL 052-789-3366 anaka@nagoya-u.jp http://j3www.materia.titech.ac.jp/mishima-kimura/architecture.html | 10.11 |
| 27 | 産業技術総合研究所エネルギー・環境シンポジウムシリーズ エネルギー技術シンポジウム2019 エネルギー材料開発・エネルギーシステム評価のための先端計測技術(東京) | 産業技術総合研究所 | TEL 029-861-7247 | |
| 28 | 第71回白石記念講座 地震と鋼材—阪神・淡路大震災から25年を過ぎて—(東京) | 日本鉄鋼協会 | TEL 03-3669-5933 educact@isij.or.jp https://www.isij.or.jp/mu8ne0d9y | |
| 28~29 | 第52回安全工学研究発表会(長岡) | 安全工学会 | TEL 03-6206-2840 jsse-2004@nifty.com https://www.jsse.or.jp | |
| 28~29 | 粉末冶金基礎・実用講座(京都工芸繊維大) | 粉末粉末冶金協会 | TEL 075-721-3650 info@jspm.or.jp | |
| 28~30 | 第46回炭素材料学会年会(岡山大) | 炭素材料学会 | FAX 03-5227-8632 tanso-desk@bunken.co.jp http://www.tanso.org/contents/event/conf2019/ | |
| 29~30 | 日本顕微鏡学会第62回シンポジウム(さいたま) | 日本顕微鏡学会 | TEL 03-6457-5156 jsm-post@microscopy.or.jp http://www.microscopy.or.jp/sympo/62nd/entry.shtml | |
| 2019年12月 | | | | |
| 3~4 | 溶接構造シンポジウム2019「デジタル技術が拓く溶接構造化技術の革新」(阪大) | 溶接学会溶接構造研究委員会 | TEL 03-5825-4073 s_kogure@tt.rim.or.jp http://www.jwri.osaka-u.ac.jp/~conf/wmd2019/ | |
| 5~6 | 2019年度磁性流体連合講演会(名古屋) | 磁性流体研究連絡会 | TEL 052-735-7542 jsmfr@jsmfr.on.arena.ne.jp http://jsmfr.on.arena.ne.jp/jsmfr2019.html | |
| 10~14 | 日本 MRS 創立30周年記念国際会議(横浜) | 日本MRS | TEL 045-263-8538 info_mrm2019@jmru.org https://mrm2019.jmru.org | |
| 2020年1月 | | | | |
| 10 | 第89回レアメタル研究会(東大 鉄門記念講堂) | レアメタル研究会 | TEL 03-5452-6314 tmiya@iis.u-tokyo.ac.jp https://www.okabe.iis.u-tokyo.ac.jp/japanese/index_j.html | |
| 28~29 | 第26回『エレクトロニクスにおけるマイクロ接合・実装技術』シンポジウム(横浜) | スマートプロセス学会他 | TEL 06-6878-5628 mate@sps-mste.jp http://sps-mste.jp/mate2020/src/ | |
| 2020年3月 | | | | |
| 6 | 第90回レアメタル研究会(東大生産技研) | レアメタル研究会 | TEL 03-5452-6314 tmiya@iis.u-tokyo.ac.jp https://www.okabe.iis.u-tokyo.ac.jp/japanese/index_j.html | |
| 8~11 | COMPSAFE2020(第3回安心・安全・環境に関する計算理工学国際会議)(神戸) | COMPSAFE2020実行委員会 | secretary@compsafe2020.org http://www.compsafe2020.org | |
| 17~19 | 日本金属学会春期講演大会(東京工業大学大岡山キャンパス)(東京) | 日本金属学会 | TEL 022-223-3685 FAX 022-223-6312 annualm@jim.or.jp | |
| 2020年6月 | | | | |
| 29~7.3 | PTM2020(8th International Conference on Solid-Solid transformations in Inorganic Materials)(中国西安) | 中国金属学会 | ptm2020@csm.org.cn http://www.ptm2020.com | |
| 2020年10月 | | | | |
| 19~22 | The 8th conference of Crystal Growth and Crystal Technology (CGCT8) 第8回アジア結晶成長・結晶技術国際会議(宮崎) | アジア結晶成長および結晶技術学会他 | TEL 06-6879-8730 yamanoi-k@ile.osaka-u.ac.jp https://www.opt.miyazaki-u.ac.jp/hikari/ | |
| 2020年12月 | | | | |
| 8~29 | Mate2020第26回『エレクトロニクスにおけるマイクロ接合・実装技術』シンポジウム(横浜) | スマートプロセス学会他 | TEL 06-6878-5628 mate@sps-mste.jp http://sps-mste.jp/mate2020/src/ | |

まてりあ 第58巻 第10号 予告

ミニ特集「材料技術史から見るこれからの技術展開Ⅱ～製錬・精錬・リサイクル～」
[最近の研究] YBa₂Cu₃O₇ ナノコンポジット薄膜における磁束ピンニング制御……………堀出朋哉

[新進気鋭] 原子分解能電子顕微鏡法を用いたセラミックス粒界溶質偏析機構の解明……………馮 斌

—他—

編集の都合により変更になる場合がございます。



～陽に陰にオリンピック・パラリンピックを支える材料工学～

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

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

日 時 2019年9月20日(金)13:10～17:00

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

募集定員 70名

事前申込締切 2019年9月2日(月)着信(テキストの事前送付有り)当日申込可

プログラム

| | | |
|-------------|-------------------------|------------|
| 13:10～13:15 | 趣旨説明 | 愛教大 北村一浩 |
| 13:15～13:55 | 持続可能社会へのレガシーとしての都市鉱山メダル | 物材機構 原田幸明 |
| 13:55～14:35 | ゴルフと金属学・チタンの進化 | 大同特殊鋼 鷺見芳紀 |
| 14:50～15:30 | スケート競技に貢献する材料科学 | 物材機構 村上秀之 |
| 15:30～16:10 | 材料から眺めたオリンピック・パラリンピック | 名大 小山敏幸 |
| 16:10～16:50 | パラリンピックへのスポーツ工学の貢献 | 東工大 中島 求 |
| 16:50～17:00 | 総合討論 | |

～ハイエントロピー合金の材料科学～

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

(企画世話人 京大 乾 晴行 京大 辻 伸泰 阪大 尾方成信 名大 小山敏幸 東北大 加藤秀実 東北大 古原 忠)

日 時 2019年11月11日(月)9:30～17:00

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

募集定員 120名

事前申込締切 2019年10月28日(月)着信(テキストの事前送付有り)当日申込可

プログラム

| | | |
|-------------|---------------------------------------|-----------|
| 9:30～9:40 | 挨拶 | |
| 9:40～10:20 | (1)ハイエントロピー合金研究の現状と展望 | 京大 乾 晴行 |
| 10:20～11:00 | (2)平均価電子濃度による高エントロピー合金の構造制御 | 東北大 竹内 章 |
| 11:10～11:50 | (3)ハイエントロピー合金における拡散と熱力学 | 名大 小山敏幸 |
| 11:50～12:30 | (4)ハイエントロピー合金ナノ粒子の作製と触媒機能への展開 | 京大 北川 宏 |
| 14:00～14:40 | (5)ハイエントロピー合金の力学特性のモデリングとシミュレーション | 阪大 尾方成信 |
| 14:40～15:20 | (6)加工熱処理によるハイエントロピー合金のナノ/マイクロ組織制御 | 京大 辻 伸泰 |
| 15:30～16:10 | (7)強加工と相変態によるハイエントロピー合金の組織制御 | 物材機構 土谷浩一 |
| 16:10～16:50 | (8)電子ビーム積層造形によって作製されたハイエントロピー合金の組織と強度 | 東北大 千葉晶彦 |

まてりあ 第58巻 第9号 (2019) 発行日 2019年9月1日 定価(本体1,700円+税)送料120円
年間機関購読料金52,400円(税・送料込)

発行所 公益社団法人日本金属学会

〒980-8544 仙台市青葉区一番町一丁目14-32

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

発行人 山村英明

印刷所 小宮山印刷工業株式会社

発売所 丸善雄松堂株式会社

〒160-0002 東京都新宿区四谷坂町10-10

専門技術者(特許調査)募集

▶▶▶ 特許庁の特許審査に貢献してみませんか ◀◀◀

～知財経験 不問～

特許審査に必要な特許文献調査及び特許出願等への分類付与業務を行っていただきます。

- ▶ 今までに培った専門技術を活かすことができる!
- ▶ 常に最新の技術に接することができる!
- ▶ 最長73歳まで働くことができる!

IPCC 特許調査



※ 処遇、募集技術分野等の詳細についてはHP参照



民間向け先行技術調査サービス

知財部も納得の品質

- 特許庁審査官向け先行技術調査32年370万件の実績
- 1600人を超える専門技術者が全ての技術分野を網羅
- 特許庁審査官向けと同じ品質の調査結果を報告
- 出願審査請求料金が割引
- 優先権主張や外国出願の検討材料として利用可能
- 調査対象: 国内、英語、中韓、独語特許文献
- 早期納品可能(応相談)



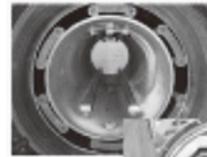
一般財団法人
工業所有権協力センター
Industrial Property Cooperation Center

〒135-0042 東京都江東区木場一丁目2番15号
深川ギャザリア ウェスト3棟
採用担当: 人材開発センター 開発部 採用課
TEL 03-6665-7852 FAX 03-6665-7886
URL <https://www.ipcc.or.jp/>

高温真空 3000°Cへの挑戦

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

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



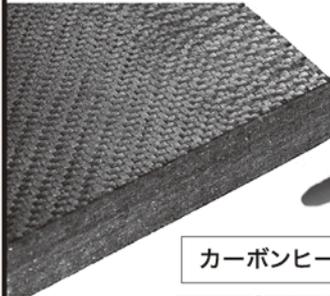
炉の改修

ハイブリット成形断熱材



高断熱+省エネ

カーボンフェルト



6面シート
貼り



メカニカルカーボン工業株式会社

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

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



各種表面分析受託サービスなら
ナノサイエンス株式会社(EAGの日本支社)にお任せください。

GDMS分析
世界シェア **No.1**



高感度不純物分析手法 GDMS ICPとは異なり固体のまま最小限の試料処理で直接分析ができます。

測定対象試料.....

| | | | |
|-------------|--------------------------|---------|-------------|
| 高純度金属 | 合金・超合金 | 特殊金属 | レアメタル・レアアース |
| カーボン及び黒鉛製造品 | 酸化物・炭化物・窒化物・硫化物などのセラミックス | 各種半導体材料 | 太陽電池用シリコン |

“世界の分析リーダー”の技術を日本で——



ナノサイエンス株式会社

〒171-0021 東京都豊島区西池袋1-21-7 住友不動産池袋西口ビル7F

TEL.03-5396-0531(代) FAX.03-5396-1930

[E-mail]

analysis@eag.com

お問い合わせ・見積り・分析お申込みはHPから... <http://www.nanoscience.co.jp>