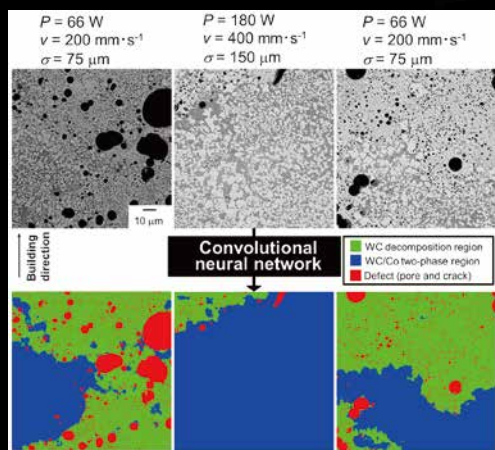


# Materia Japan

まてりあ Vol.62

MTRE2 62 (7) 427 ~ 506 (2023)

No.7  
2023



・ 金属素描 ~ビスマス~

特集

## 材料技術史から見るこれからの 技術展開V~鉄~

・ 機械学習を活用した金属積層造形のプロセスパラメータ設計

入門  
講座

永久磁石の保磁力メカニズム  
第3回 原子画像のアプローチ

・ JIM/TMS Young Leader International Scholar  
出張報告

・ EuroSuperalloys 2022 報告

・ 思い出の教科書, この一冊!

・ スポットライト

# 科研費関連機器・製品申請ガイド

## 〈材料検査・評価機器・製品〉

### 環境制御型SEM向け材料特性試験ステージ

価格：お問い合わせください

SEMを用いた高温下観察、引張試験向けの製品です。  
1000℃を超える加熱実験をご検討の方、引張・圧縮・屈曲試験を加熱しながら行ないたい方のご希望に応える製品です。

#### 加熱ステージ

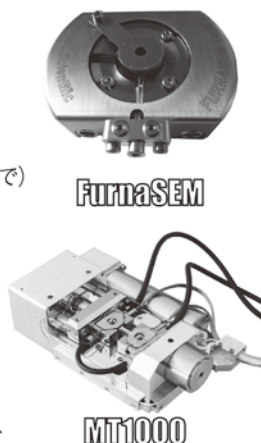
- ・1000℃または1300℃まで
- ・熱電子軽減フィルター
- ・EBSD観察対応

#### 引張ステージ

- ・牽引力5 kN (オプション10 kNまで)
- ・圧縮、屈曲変換ツール
- ・ダブルオープンによる温度勾配
- ・SEM内試料光学観察キット
- ・EBSD観察対応

#### そのほかに

- ・実験支援ソフトウェア
- ・ガス注入キット、冷却キット
- ・予備実験用真空チャンバーセット



#### 株式会社アド・サイエンス 営業部

〒102-0071 東京都千代田区富士見2-7-2  
ステージビルディング13F TEL 03-6824-4510  
<https://www.ads-img.co.jp/> e-mail: [ads-contact@ads-img.co.jp](mailto:ads-contact@ads-img.co.jp)



## 〈材料加工実験機器・製品〉

### パルス通電加圧焼結 (SPS) 装置 LABOX シリーズ

価格 (税込) : 3,360,000円～  
(機種、仕様による)

#### ■特徴

- ・真空雰囲気その他、陽圧不活性ガス中 (max0.98Mpa) での焼結が可能な機種をLABOXラインナップに加えました。
- ・粉末充填から焼結完了まで雰囲気制御可能な機種もございます (グローブボックス付きSPS装置GHシリーズと既設グローブボックス利用MCシリーズ)。
- ・ON/OFFパルス直流焼結電源の他、交流式電源も選定いただけます。

#### ■仕様

- ・最大加圧力: 10～300kN (加圧機構ACサーボモーター式)、最大焼結電流 1000～10000A、最高使用温度 2500℃、試料台寸法 Φ70～Φ200

- 写真は陽圧チャンバー仕様パルス通電加圧焼結装置LABOX-225GP



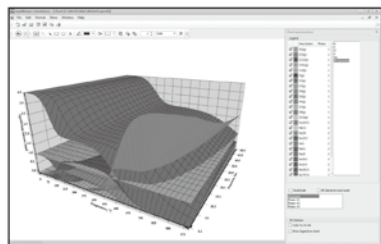
#### 株式会社シンターランド

〒940-2055 新潟県長岡市雨池町123  
TEL 0258-25-8008 FAX 0258-25-8010  
URL: <https://sinterland.jp/> e-mail: [info@sinterland.jp](mailto:info@sinterland.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. 10

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



年間使用料 (税込)  
¥319,000 (一般)  
¥110,000 (教育)

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

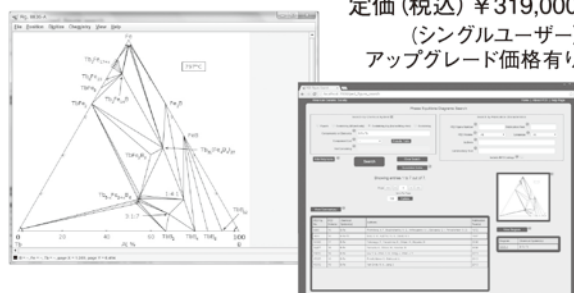
#### 株式会社 デジタルデータマネジメント

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

## 〈ソフトウェア・書籍・サービス〉

### 約30,000件のセラミックス状態図データベース ACerS-NIST Phase Equilibria Diagrams, Version 5.0

定価 (税込) ¥319,000  
(シングルユーザー)  
アップグレード価格有り



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

#### 株式会社 デジタルデータマネジメント

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

7

2023  
Vol.62  
No.7

まてりあ

金属素描 No. 29 ビスマス(Bismuth) 細川 侑 .....427

## 特集「材料技術史から見るこれからの技術展開 V ～鉄～」

|                                                   |     |
|---------------------------------------------------|-----|
| 企画にあたって 北村一浩                                      | 429 |
| 官営八幡製鐵所の創立事業と野呂景義 清水憲一                            | 430 |
| 金属材料研究所と鉄鋼研究の歴史 古原 忠                              | 434 |
| 鉄鋼組織学発展に見る科学・技術展開条件の考察(1850～1925年頃までの西欧を基に) 沖森麻佑巳 | 442 |
| 日本における製鉄プロセスの変遷と未来に向けての最近の動向 日野光元                 | 447 |
| 鉄ベースの水素貯蔵材料研究のこれまでの進展と今後の展開<br>佐藤豊人 齋藤寛之 折茂慎一     | 453 |
| 近代日本の鑄造技術史 中江秀雄                                   | 458 |

新進気鋭 機械学習を活用した金属積層造形のプロセスパラメータ設計 鈴木飛鳥 .....464

入門講座 永久磁石の保磁力メカニズム 第3回 原子描像のアプローチ 広沢 哲 .....470

永久磁石の保磁力について、材料畑の直感的視点で解説。連載第3回(最終回)は Nd-Fe-B 磁石の保磁力を熱揺らぎのある原子スピン集団の振る舞いとして扱う最新の研究を紹介。

学会・研究会だより 第15回本会派遣 JIM/TMS Young Leader International Scholar 出張報告  
今里和樹 .....478

第4回超合金とその応用に関する欧州シンポジウム(EuroSuperalloys 2022)報告  
田畑千尋 鈴木進輔 .....479

思い出の教科書、この一冊! 希土類永久磁石 俵 好夫 大橋 健(共著) 松浦昌志 .....480

スポットライト マグネシウム2次電池の実用化に向けたイオン拡散に関する研究  
上田悠人 金古雄大 山脇佳奈 大庭颯来 .....481

イチゴによるアルミニウムの溶解  
岸田 純 笹部祐也 川口拓真 岡部矩史 志手銀河 .....483

本会記事 会告 .....486 行事カレンダー .....503

掲示板 .....499 新入会員 .....506

会誌・欧文誌7号目次 .....501 訂正 .....506

次号予告 .....502

会誌・欧文誌・まてりあの投稿規定・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。

【今月の表紙写真】 種々の条件で L-PBF 法により作製した WC/Co 超硬合金の SEM 像と機械学習による分類画像。  
(鈴木飛鳥 466頁 図3より掲載)

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

複写をご希望の方へ 本会は、本誌掲載著作物の複写に関する権利を一般社団法人学術著作権協会に委託しております。本誌に掲載された著作物の複写をご希望の方は、(一社)学術著作権協会より許諾を受けて下さい。但し、企業等法人による社内利用目的の複写については、当該企業等法人が社団法人日本複写権センター((一社)学術著作権協会が社内利用目的の複写に関する権利を再委託している団体)と包括複写許諾契約を締結している場合にあっては、その必要はありません。(社外頒布目的の複写については、許諾が必要です。)

権利委託先 一般社団法人学術著作権協会  
〒107-0052 東京都港区赤坂 9-6-41 乃木坂ビル 3F FAX 03-3475-5619 E-mail : info@jaacc.jp http://www.jaacc.jp/  
複写以外の許諾(著作物の引用、転載、翻訳等)に関しては、直接本会へご連絡下さい。

# Materia Japan

Volume 62 Number 7 July 2023

## Contents

**Sketch of Metals** No. 29 Bismuth Yu Hosokawa 427

### **Special Issue on Future Growth Expected from Technological History of Materials V**

Preface to Special Issue on “Future Growth Expected from Technological History of Materials V”

Kazuhiro Kitamura 429

The Establishment of the State-Owned YAWATA Steel Works and Kageyoshi Noro Norikazu Shimizu 430

History of Steel Research in Institute for Materials Research (“KINKEN”) of Tohoku University Tadashi Furuhashi 434

Consideration on Condition of Deployment of Science and Technology from Development of Metallographic Structure of Steel (Based on Western Europe from 1850~1925) Mayumi Okimori 442

Changes of Modern Iron- and Steel-Making Process since Meiji Period and Current Topics of the Future in Japan Mitsutaka Hino 447

Progress in Iron-based Hydrogen Storage Material Researches Toyoto Sato, Hiroyuki Saitoh and Shin-ichi Orimo 453  
Japanese Modernization History of Casting Technology Hideo Nakae 458

### **Regular Articles**

#### **Emerging Young Researchers**

Design of Process Parameters in Metal Additive Manufacturing Utilizing Machine Learning Asuka Suzuki 464

#### **Introduction Lectures to Beginners**

Mechanisms of Coercivity of Permanent Magnets : 3. Atomistic Approaches Satoshi Hirosawa 470

#### **News · Report**

15th JIM/TMS Young Leader International Scholar Kazuki Imasato 478

EuroSuperalloys 2022 Chihiro Tabata and Shinsuke Suzuki 479

#### **My Memorial Textbook**

“Kidoruieikyujishaku” Masashi Matsuura 480

#### **Spotlights**

Approach to the Ion Diffusion of Magnesium Batteries for Practical Use Yuto Ueda, Yudai Kaneko, Yoshina Yamawaki and Sora Oba 481

The Corrosion of Aluminium by a Strawberry in a Lunch Box Jun Kishida, Yuya Sasabe, Takuma Kawaguchi, Norifumi Okabe and Ginga Side 483

Published by THE JAPAN INSTITUTE OF METALS AND MATERIALS

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

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

©2023 The Japan Institute of Metals and Materials

#### **Notice for Making a Copy of This Publication**

Please obtain permission from the Japan Academic Association for Copyright Clearance (JAACC) to which the copyright holder has consigned the management of the copyright regarding reprographic reproduction.

Japan Academic Association for Copyright Clearance (JAACC)

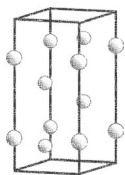
Address 9-6-41 Akasaka, Minato-ku, Tokyo 107-0052 Japan

Website <https://www.jaacc.org> E-mail [info@jaacc.jp](mailto:info@jaacc.jp) FAX +81-33475-5619

Users in countries and regions of which Reproduction Rights Organizations (RROs) are listed on the above website are requested to contact the respective RPOs directly to obtain permission.

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

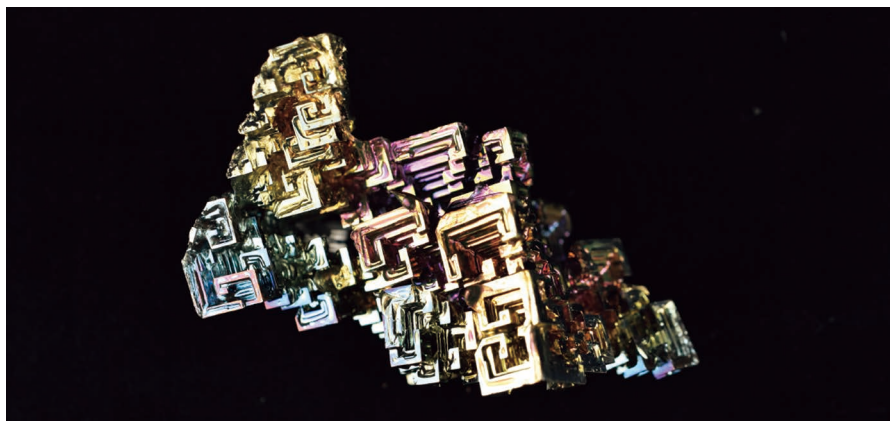
The front-cover, designed by Beacon Communications k.k. Graphic Studio



シリーズ「金属素描」

## No. 29 ビスマス(Bismuth)

JX 金属 細 川 侑



元素名：Bismuth, 原子番号：83, 原子量：208.98, 電子配置：[Xe] 4f<sup>14</sup>5d<sup>10</sup>6s<sup>2</sup>6p<sup>3</sup>, 密度：9.80 Mg・m<sup>-3</sup>(298 K), 結晶構造：菱面体(～融点), 融点：545 K, 沸点：1833 K<sup>(1)</sup>, 地殻存在量：0.18 μg・g<sup>-1(2)</sup> 【写真】金属ビスマスの骸晶(東京サイエンス製, 編集委員会撮影)

ビスマスの世界における生産量は約1万9千トン(2021年)<sup>(2)</sup>で、その大部分が中国で生産されている。一方で、日本でもビスマスは生産されており、約600トン/年(2021年)<sup>(2)</sup>である。ビスマスは世界的にはタングステンや鉛の製錬における副産物として製造されるが、国内では専ら鉛製錬の電解スライムからビスマスが生産されている。銅製錬、金や銀などの貴金属製錬は鉛製錬との相性が良く、ある製錬の廃棄物が別の製錬の原料となるなど、お互いに融通が利く。そのため、世界でも有数の銅製錬国である日本では、ビスマスは鉛とともに濃縮され、鉛製錬の過程で分離、生産されている。

ビスマスは液体から固体になるときに体積が増える異常液体(水などと同じ)である。また、固体は脆く、厚み5 mm程度の板なら人の手で容易に割ることができる。その機械的な特性ゆえにビスマス単体で使われることは少ない。しかし、単体では使いにくいビスマスも、合金や化合物となるとスポットライトが当たるものがいくつかあるので紹介したい。

半田合金に関しては、鉛フリーという世の中の動きに合わせて、錫系の合金が広く使われるようになった。錫-ビスマス合金は、共晶組成において融点が139℃と低く、代表的な低融点半田合金として知られる。SDGsやESGが叫ばれる昨今では、エネルギー投入量が少なく済む低融点半田は注目度が高い。

ウッドメタル(ビスマス-鉛-錫-カドミウム合金)は約70℃の融点であり、消防用スプリンクラーヘッドの感熱材料として用いられている。

代表的な熱電材料であるビスマステルルは、光通信用半導体レーザーや電子デバイスの冷却で大活躍している。小面積に対して精密な温度制御を行うことができるからである。

その他にも、ビスマス化合物が医薬品、化粧品などに、ビ

スマスがアルミニウム合金や銅合金、フェライトの添加材として用いられている。

人の目に直接触れることは少ないものの、陰で実力を発揮するビスマスであるが、実は天然に存在するビスマスはすべて放射性同位体である。安定同位体と考えられていた<sup>209</sup>Biはマルシャックらによって約1.9×10<sup>19</sup>年(1900京年)という非常に長い半減期を持つ放射性同位体で、<sup>205</sup>Tlにアルファ崩壊することが示された<sup>(3)</sup>。つまり、約137億年と言われる宇宙の年齢よりもはるかに長い半減期を持つということである。我々の実際の生活上では、無視して全く問題ない放射能レベルであり、「安定」「安全」と考えて良い。原子番号82の鉛における<sup>208</sup>Pbは最も質量数が大きい安定同位体である。原子番号83のビスマスより大きい原子番号を持つ元素には安定同位体はなく、すべて放射性同位体である。ビスマスよりも大きい原子番号で半減期が長いのは、<sup>232</sup>Th(半減期140億年)、<sup>238</sup>U(半減期44億年)、<sup>235</sup>U(半減期7億年)などである。なんだ、トリウムやウランも結構安定しているではないかと思われるかもしれないが、少なくとも「安全」ではない。計算していただければわかるが、少量の固体でもかなりの量の放射線が出る。ビスマスは半減期が異常に長すぎてほぼ放射線が出ない。

ビスマスは脆いくせに、簡単には崩壊しないのだ。

### 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) U.S. Geological Survey, Mineral Commodity Summaries, January 2022 (2022).
- (3) P. Marcillac, N. Coron, G. Dambier, J. Leblanc and J.P. Moalic: Nature, **422**(2003), 876-878.

次号！ 金属なんでもランキング！ 窒化物の標準生成ギブス自由エネルギー



未来を先導する  
領域を開拓し、  
世界に発信する

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

# 日本金属学会

2023年  
秋期  
講演大会  
(第173回)

ポスターセッション

会期

2023年 **9/19** 火

会場

とやま自遊館

〒930-0805 富山県富山市湊入船町9番1号

記念講演、一般講演、公募シンポジウム、  
企画シンポジウム、共同セッション

2023年

会期

**9/20** 水 ~ **22** 金

会場

富山大学 五福キャンパス

〒930-8555 富山県富山市五福3190

公募シンポジウム

## S1: 材料変形素過程のマルチスケール解析 (VI)

Multi-scale analysis of elementary processes in plasticity (VI)

## S2: 水素エネルギー材料X

Hydrogen Energy Materials - X

## S3: ハイエントロピー合金の材料科学(X)

Materials Science and Technology in High-Entropy Alloys (X)

## S4: 特異反応場における時間/空間応答を利用した新奇材料構造創成IV

Tailoring of novel-structured materials using spatio-temporal responses under exotic reaction fields IV

## S5: Additive Manufacturingの材料科学II:超温度場材料創成学

Materials Science of Additive Manufacturing II: Creation of Materials by Superthermal Field

## S6: 機能コアの材料科学 IV

New Materials Science on Nanoscale Structures and Functions of Crystal Defect Cores, IV

## S7: データ創出・活用による磁性材料の研究開発

Digital Transformation Initiative R&D for Magnetic Materials

## S8: 極限環境対応構造材料のためのマテリアルDX (I)

Materials DX for the research and development of structural materials for extreme environment (I)

## S9: ワイドギャップ結晶の材料科学と高温プロセスングV

Materials Science and high temperature processing of widegap materials V

企画シンポジウム

## K1: 自動車技術会・日本鉄鋼協会・日本金属学会共催・

第5回自動車関連材料合同シンポジウム  
「モビリティの革新に貢献する材料技術の最新動向」  
Recent Trends in Materials Technology Contributing to Mobility Innovation

## K2: 若手科学者へ贈る研究のヒントVI~未踏領域へ到達するために~

Gifts from pioneers to young scientists VI~ To hitch your wagon to star ~

## K3: 中学高校生向け金属体験学習

Hands-on learning on metals and materials for junior high and high school students

## K4: 国内のマテリアル戦略とインフォマティクス応用

Materials Informatics and Materials Strategies

## 講演申込締切

●共同セッション

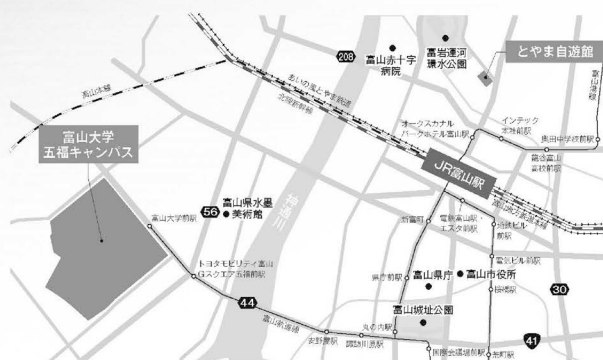
2023年 **6/26** 月 **17** 時

●一般

●公募シンポジウム

●ポスターセッション

2023年 **7/7** 金 **17** 時



◇ 詳細は、7号会告（486 頁）または本会ホームページをご覧ください。  
～ 皆様のご参加をお待ちしております。～

問合先

公益社団法人日本金属学会

TEL 022-223-3685

講演大会係

annualm@jimm.jp

<https://jimm.jp/>

## 企画にあたって

北 村 一 浩\*

2022年9月22日、第171回秋期講演大会において「材料技術史から見るこれからの技術展開 V」と題したシンポジウムを開催した。持続可能な社会の実現には、材料特性の向上だけでなく、高効率・低環境負荷プロセスの開発が必要である。そのため本シンポジウムは、時代に沿ったプロセスの変遷、合金開発や応用展開、更には環境問題も含め、鉄が人間社会にとっていかに身近な存在であったか、どのような技術革新をもたらしてきたのかを振り返り、更に今後の可能性を考えることを目的とした。2018年9月20日に「チタン」をテーマに第1回シンポジウムを、2019年3月21日に「製錬・精錬・リサイクル」をテーマに第2回シンポジウムを、2020年9月17日に「アルミニウム合金」をテーマに第3回シンポジウムを、2022年3月16日に「分析機器・評価装置」をテーマに第4回シンポジウムを行なった。第5回目となる今回のシンポジウムでは、「『鉄』の技術史と今後の展望」について議論するために企画を行なった。

九州国際大学名誉教授の清水憲一氏には、「官営八幡製鐵所の創立事業と野呂景義」と題して、官営製鐵所創立事業への野呂景義の関わりについて解説いただくとともに、野呂の技術指導により、官営八幡製鐵所の連続操業の実現、製鋼・圧延作業の改善への取り組みを解説いただいた。また、大学時代の教え子たちと日本鉄鋼協会を設立し、鉄鋼自給への道を模索して行ったことについても解説いただいた。

東北大学金属材料研究所の古原忠氏には、「金属材料研究所と鉄鋼研究の歴史」と題して、日本の鉄鋼研究の中で、特に物理冶金学の発展に注目して金属材料研究所の研究を振り返りながら鉄鋼研究の歴史を概説していただいた。

沖森麻佑巳先生には、「鉄鋼組織学発展に見る科学・技術展開条件の考察(1850～1925年頃までの西欧を基に)」と題して、産業社会の基盤を支えている鉄にさまざまな元素を添加した鉄鋼材料の、1850～1925年頃の西欧における鉄鋼組織学の変遷を概説していただくとともに、鉄鋼の科学や技術の発展に必要な条件をピックアップしていただいた。

東北大学名誉教授の日野光元先生には、「日本における製鉄プロセスの変遷と未来に向けての最近の動向」と題して、まずは、西洋の近代製鉄法直輸入に苦勞した明治時代の我が国鉄鋼製造技術史を概説いただいた。次に、大正、昭和時代

の太平洋戦争終戦までの近世製鉄プロセスの技術改良史、並びに戦後、世界一の鉄鋼生産国となるまでの、我国独自の現代製鉄技術開発史も概説いただいた。最後に、直近の環境問題まで視野に入れた、未来に向けた排出カーボンニュートラルを目指す新製鉄技術開発動向にも言及していただいた。

芝浦工業大学の佐藤豊人先生、国立研究開発法人量子科学技術研究開発機構の齋藤寛之先生、東北大学金属材料研究所の折茂慎一先生には、「鉄ベースの水素貯蔵材料研究のこれまでの進展と今後の展開」と題して、まずはカーボンニュートラルを達成するために再生可能エネルギーを利用して水素を製造・貯蔵・利用する社会(水素社会)を構築するために、汎用的に利用されている鉄をベースにする水素貯蔵材料の研究に関して、これまでの進展、及び今後の展開を解説していただいた。

早稲田大学名誉教授の中江秀雄先生には、「近代日本の鑄造技術史」と題して、鑄鉄鑄物を中心に江戸時代から明治中頃までの、地金、溶解炉、送風機と製品(大砲)の変遷の鑄造技術史を解説していただいた。特に日本では、江戸時代とそれ以前の鑄鉄鑄物は、鑄鉄を原料としたFe-C合金であったため、良質なねずみ鑄鉄製大砲がほとんど実現できず、実現には、明治18年までかかったことについて理由も含めて解説いただいた。

上記の8名の方に解説記事を執筆いただいた。官営製鐵所創立事業への野呂景義の関わりについてや、金属材料研究所と鉄鋼研究の歴史、鉄ベース材料の水素貯蔵材料研究、江戸時代から明治中頃までの鑄造技術の変遷などが示唆され、今後の研究の方向性を示すものとなっている。本特集が、読者の参考になれば幸いである。



北村一浩

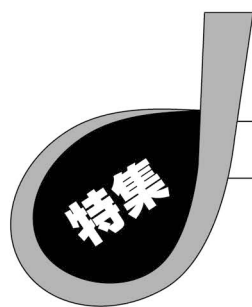
★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★  
 2000年3月 筑波大学大学院工学研究科博士課程修了  
 2007年4月 国立長野工業高等専門学校 機械工学科  
 准教授  
 2009年4月 愛知教育大学 教育学部 技術教育講座  
 准教授  
 2015年4月 現職  
 専門分野: 技術教育, 形状記憶合金, 相変態  
 ◎中学校技術科向けの教材開発と, Ti-Ni 形状記憶合金の特性評価・応用研究を行っている。  
 ★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★

\* 愛知教育大学教育学部創造科学系 技術教育講座; 教授

Preface to Special Issue on "Future Growth Expected from Technological History of Materials V"; Kazuhiro Kitamura (Aichi University of Education, Kariya)

Keywords: *technology education, Ti-Ni alloys, shape memory alloys, phase transformation*

2023年4月24日受理[doi:10.2320/materia.62.429]



## 官営八幡製鐵所の創立事業と野呂景義

清水 憲 一\*

### 1. 官営製鐵所の創立事業

#### (1) 官営製鐵所創立の背景

維新後の岩倉使節団によって欧米の富強の根本が「石炭と鉄」という認識を深めた政府は、富国強兵・文明開化の基礎としての鉄の国内生産に取り組んだ。広島鉄山(1875～1905, 砂鉄精錬)・釜石鉄山(1873～82)・中小坂鉄山(1878～81)という3つの官営鉄山事業は、短期間に不調・放棄された。しかし軍需と鉄道レールを中心とする鉄鋼需要が高まり、その輸入が増大する一方であった。1880年頃、世界的には「鉄の時代」から「鋼の時代」に転換し、輸入も錬鉄材から鋼材に比重を変えていった。

「鋼の時代」に対応する製鉄所建設構想は、ドイツ留学(1885～89)から帰国し工科大学教授に就いた野呂景義が中心となった。「夫レ鉄ハ万業ノ母、護国ノ基礎ナリ製鉄ノ業起ラザレバ万業振ハズ・・・」<sup>(1)</sup>と訴え、'91年に海軍省所管製鋼所案が帝国議会で提出された。第三議会予算委員会で、野呂は政府委員として議案の説明・答弁にあたるが、国内資源などの調査不足ということから否決され、製鋼事業調査会が設置された。翌'93年には臨時製鉄事業調査委員会へと継続し、日清戦争末に議会在議院が製鉄所建設を決議すると製鉄事業調査会が設けられ、「創立案」の策定へと進んだ。

野呂は、製鉄業の第一人者として、各調査会においてリーダー的役割を果たした。製鉄所建設に必要な調査と技術的試験は、そのほとんどが野呂の指導で行われた。原料鉄鉱の埋蔵量と鉱質、官営釜石失敗の原因、製造費・鉄材需用調査、屑鉄代替の粗製錬鉄を砂鉄を原料に製造する「新製鋼法」、レール・鋼板の製造と製品試験、コークス・炉材(耐火煉瓦)の製造試験と多岐にわたった。こうした成果を踏まえて野呂原案の「創立案」が策定された。「先づ小規模ヨリシテ漸次大規模ニ移ル」<sup>(2)</sup>を基本として、日産60トン高炉3基で

42,000トンの転炉用銑鉄生産、平炉用銑鉄は外部から購入し、原料屑鉄の代替として砂鉄を原料とする粗製錬鉄を製造し、兵器用鋼材はルツボにより、鋼材6万トンを生産するものであった。この創立予算409万円が、'96年の第9議会で承認されるが、この審議の最中に、野呂が顧問技師であった日本鑄鉄会社の東京市水道管不正納入問題が発覚し、この年の3月25日付で工科大学教授・農商務省技師を非職となった。官営製鐵所の建設は野呂ぬきで進むことになった。

#### (2) 創立事業

官営製鐵所の創立事業は、国家財政支出の「創立費」による事業期間(1896～1910)で、第一期拡張までが該当する。創立事業の経緯を要点で押さえておく。

創立案・創立費が議会の協賛('96)によって確定した後、製鐵所官制による長官(山内堤雲)・技監(大島道太郎)人事および八幡への立地と用地買収、開庁('97.6)によって建設工事が始まった。大島技監の欧米調査('96.10～'97.10)と和田維四郎二代長官の「意見書」('97.11)によって創立案を拡大する建設案と追加予算('98.5)によって建設工事が本格化した。原料鉄鉱石は赤谷鉱山を買収したものの中国大冶からの購入に転じた('99.4)。お雇い外国人技師は解雇されたが、外国人職工長のもとで技術者・職工は第一高炉火入れ(1901.2)など開業準備にあたり、作業開始式を迎えた('01.11.18)。製銑・製鋼・圧延作業による鋼材生産を進めるが、事業費の財政逼迫が生じ、長官が陸軍・中村雄次郎に交替し、製鉄調査会の設置('02.6)と高炉・転炉作業の中止('02.7.28)となった。

日露戦争が勃発するや('04.2)、第一高炉の第二次火入れを服部漸製銑部長のもとで急いだ。ハンキングと羽口・出銑口を鉱滓が塞いだことで、失敗に終わった。中村長官は野呂に作業再開を委ねた('04.5)。野呂は「鉬銑炉調査概報」によって作業方法の改善を図り、苦闘の末に高炉操業を再開

\* 九州国際大学名誉教授

The Establishment of the State-Owned YAWATA Steel Works and Kageyoshi Noro; Norikazu Shimizu (Emeritus Professor, Kyushu International University, Kitakyushu)

Keywords: the state-owned steel works, founding project, the launch plan, operation of the blast furnace, kageyoshi noro

2023年3月3日受理[doi:10.2320/materia.62.430]

させた('04.7.23)。翌'95年2月には第二高炉も改造の上で火入れし、連続操業を達成した。製鐵所は、日露戦時の臨時事件費による設備の充実に踵を接して、第一期拡張(1906-8年度、'09年度完成)に取り組み、創立事業の目標であった鋼材18万トン生産体制を達成した。

以上の経緯における留意点について、箇条書きで言及しておく。

1) 製鐵所の八幡立地は、'97年2月の「公示」より5ヶ月程前の'96年9月25日に「確定」<sup>(3)</sup>した。立地については、当時の技術では、鉄1トンに4~5トンの石炭を要するため、石炭立地が選択され、国内最大の産炭地の筑豊周辺が第一候補であった。筑豊炭田と積出の筑豊鉄道・若松築港に深く関わっていた当時の日銀総裁岩崎弥之助=三菱と炭鉱主・若松社長安川敬一郎たちは、その人脈を活用して、若松港=洞海湾拡張計画によって八幡村への誘致を実現した。

2) 原料鉄鉱石は国内・赤谷鉄山から大冶へ替わった。赤谷鉄山は三菱が買収していたものを買い取った('99)。その直後、製鐵所和田長官は漢陽製鐵所=盛宣懷との間に鉄鉱石購入契約を結んだ('99.4)。中国での外国資本による製鐵業進出を回避する狙いをもっていた。その後、漢冶萍に対する相次ぐ借款供与(1904~)によって長期安定的に確保することになる。

3) 「創立案」を変更・拡張した「和田意見書」(第一期鋼材9万トン、第二期18万トン)の達成が創立事業の目標であった。また、野呂原案の「創立案」は銑鋼一貫および鍊鉄・鋼材生産の側面で不十分・不完全であったが、大島・和田の建設案は鍊鉄・坩堝鋼をなくして「鋼の時代」の銑鋼一貫製鐵所という画期的な性格をもっていた。

4) 創立費は当初計画では賠償金500万円を予定していた。しかし、政府が対露軍備拡張を優先したために製鐵所創立費は公債支弁事業に転じた。しかも国内経済の不振から内国債発行が困難となり、英国債(四分利付英貨公債、邦貨9,763万円)=外資導入('99)によって財源が確保された(製鐵所創立費1,862万円)。

5) 当初409万円で出発した創立費は、設計変更による追加予算、日露戦時の臨時事件費による設備拡充費、第一期拡張費と膨張し、最終的には10倍増の4,122万円となった。作業会計は初期段階には巨額の損失を累積した。製鐵所は、官営事業であるがために、多様な国内鋼材需要と軍事需要に対応していくために「少量多種生産の不利益」<sup>(4)</sup>と「軍需が経営圧迫」<sup>(4)</sup>という経営体質を抱え込みながら、「軍需と経済」<sup>(4)</sup>の両立が求められた。こうした中で、1910年度、製鐵所は作業会計上の欠損を脱却して黒字を記録すると、その後短期間で収益事業へ転換していった。

6) 創立事業の完成によって、1910年には鋼材18万トンの生産体制を実現したが、鋼材の国内自給率は3割程度でしかなかった。「我国における造船、建築、橋梁用諸鋼材の一大供給源」<sup>(5)</sup>には達していなかった。製鐵所拡張の継続と国内民間製鋼企業の勃興へと展開していく。

## 2. 官営製鐵所創立事業と野呂景義

非職後の野呂は、'98年に農商務省から兵器鋼材製造の欧米調査を委嘱され、'99年5月に帰朝した。また、1901年11月の作業開始式にも臨席した。官営製鐵所とのこうした関わり以外は、“Consulting Engineer”の肩書きで、民間製鐵所の事業に従事した。釜石田中製鐵所では顧問として、わが国初のコークス高炉を成功させた('94.8)。真幸鉱山('98)、仙人鉄山(1900)、日本製鐵栗木鉄山('07)などの木炭高炉の設計・指導、北海道炭鉄鉄道輪西製鐵所では顧問としてコークス工場を設計・操業し、20トン高炉を設計した。この時、製鐵所中村長官から高炉操業の立て直しを依頼された。

### (1) 製鐵所高炉第三次操業の成功と連続操業の実現

#### (a) 第一次操業は「失敗」か？

1901年2月に初めて火入れされた東田第一高炉は、11月の作業開始式以降も不調で、このために'02年7月に操業中止に追い込まれたとする見解がある。悪質コークスの使用が高炉作業の「命取り」になった。また「1901年11月から約8ヶ月後の1902年7月に炉内のコークス還元反応は不調で炉内を高温に維持することができずに装入物が固着して操業停止となった」<sup>(6)</sup>。

しかし、作業開始後の高炉操業は、「不調ではないが順調でもない」<sup>(7)</sup>状況が続いた。'02年2月が最悪で、「骸炭ノ粗悪ナルコト」<sup>(2)</sup>で高炉内はハンキング(棚掛または生鉱降り)で不良状況を招いた。「善良ナル骸炭ノ製造」<sup>(2)</sup>が急務であった。しかし、この頃がボトムで、その後'02年3月には生産能力日産160トンに比して100トンを記録し、高炉作業中止命令の7日も日産100トンであった。設備能力の8割である。なお、野呂によって「炉況ノ佳良」<sup>(8)</sup>になった'04年8月中旬の銑鉄日産は80~100トンであった。

転炉および圧延作業なども動力の瓦斯・蒸気が不足し、分塊・軌条工場の操業に集中して、他の工場は昼間のみの作業になり、交代で操業するような状況であった。最新の機械設備も、その操業を支える燃料・運搬など補助部門との有機的な連関が整って初めて機能する。こうした機械設備の不完全さを生み出している資金不足から製鐵所は創立費の補足を求め続けた。しかし、追加予算案は議会で否決され、'02年4月に第三代長官に陸軍中將中村雄次郎が就くと、政府は製鐵所運営の根本的再建策を検討するために製鐵事業調査会を設置した。と同時に、銑鉄の在庫が3万トンに達すると、'02年7月、政府は「作業経済上」の理由から、高炉・転炉作業の中止を命令した。そして熔鉱炉職工600人が解雇された。

「熔鉱炉及転炉ノ操業ヲ中止セシハ全ク本所作業経済上ヨリ打算シタルモノニシテ三十五年七月末ニ於ケル銑鉄ノ現在高ハ積ンテ三万余噸ニ上リ尚進ンテ之ヲ生産スルハ徒ニ資本ヲ固定セシムルニ過キスシテ経済上不利ナルヲ認メタルニ依リ茲ニ一部ノ事業ヲ中止シ以テ資本停滯ノ弊ヲ防遏スル」<sup>(2)</sup>という銑鉄在庫にともなう作業資金の圧迫にあった。

## (b) 野呂による第一高炉の操業の定着

1904年5月1日付で野呂は「熔鋳炉調査ヲ囑託ス」<sup>(2)</sup>として、第一高炉の操業再開を託された。「第一鑄鑛爐吹止ニ至ルノ原因ヲ調査セントスルニ爐床全部ハ既ニ取崩シアルヲ以テ充分ノ取調ベヲナスコト能ハ」<sup>(2)</sup>なかったために、第二次操業にあたった大学の教え子の製鉄部長服部の「熔鋳炉休風顛末報告」にもとづいて「熔鋳炉調査概報」をまとめた。不結果の原因は、「決して世人の想像するか如き大問題にあらず」<sup>(9)</sup>、①羽口の径と炉内突出が過大、②不良なる骸炭、③装入物の調合を誤り、鋳滓が塩基過ぎることが原因であり、鋳滓を酸基(硅酸40%以上)に、良質の骸炭を使用し、小径の羽口に変更することを改善策とした。とくにコークス製造については、野呂による操業前の4月に碎炭工場と洗炭工場が作業を開始し、6月にはコッペー炉が製造を開始した(8月にはハルデー炉稼働)。第二次操業での三池製コークス使用による失敗から配合技術の重要性を、野呂は指摘していた。

「此時余か最も困難を覚へたるは第一高炉の始末是なり。第一高炉は当年4月吹止後直ちに修繕を加へ再び吹立の準備既に整ひ居るも、其構造は前に述るか如くにして成功の見込甚だ覚束なき故に、余は其吹立に従事することを好まず。然れども大金を投じて修繕したるものを更に改築するか如きは不経済なるのみならず、目下鉄材の供給に迫られ居る場合なれば、失敗を覚悟の上にて吹立呉れとの当局者の懇談もあり、已むを得ず余は此高炉に付ては責任を有せずとの条件を以て、(6月1日より熔鋳炉乾燥ニ同11日より付属熱風炉ノ乾燥及加熱ニ着手シ7月18日より21日迄ニ熔鋳炉ノ填充ヲ了リ23日午前9時点火ヲ行ヒ25日送風ヲ開始ス)37年7月下旬と云ふ高炉の火入には最も不適當なる期節に於て吹立を施行したるに果せるかな大なる失敗を来し余は為に3週間殆んど安眠を貪る暇なかりし。其原因は炉床の冷却と骸炭の悪質にありて炉底は漸く高まりて終に羽口に達せり。茲に於て救済の方法として鋳滓を極めて酸基(硅酸40%以上)となし供給の許す限り良質の骸炭を使用し、小径の羽口を急製する等、種々なる手段を施したる結果炉底の固り追々溶解し、其溶下するに随ひ出鉄高も漸次増加し80噸となり100噸となり、…」<sup>(8)</sup>。こうして第一高炉の第三次操業は、'04年7月23日から1910年6月2日まで2,140日間に、31万トンを出鉄する連続操業を実現した。

## (2) 製鐵所高炉操業定着後の技術的課題

第一高炉の操業定着後に第二高炉の操業も始まった('05.2)。しかし、製品の鋼材に不純物が含まれており、レール製品は規格外が多く、製品寿命も短いという重大な欠点を持っていた。鋼材原料の鉄質の改善とそのための操業方法を検討することになった。'09年5月19日付で野呂は「製鋼及製品事業ノ調査ヲ囑託」<sup>(2)</sup>された。こうした製鐵所事業の技術的課題と大正初期の日本製鐵事業の現状について、野呂は日本鉄鋼協会誌『鉄と鋼』の連載「本邦製鐵事業の過去及将来」に記録を残している。野呂は結局、創立事業の達成に深く関わったことを示している。創立事業達成後の官営製鐵

所の現状について、野呂の言及を整理しておく。

高炉原料では、鉄鋳石の下級大冶鋳は燐が多くベッセマー鉄の原料には適さず、上等は含岩石が少なく鋳滓が少なく流動が難しい。このため、燐分・礬土(明礬)少なく、応分の硅石を含有する鋳石と併用、つまり「赤谷鋳石を併用」<sup>(8)</sup>を指摘している。また、朝鮮の赤鉄鋳(安岳)・褐鉄鋳(載寧・殷栗)を使用するようになったが、大冶と半々が望ましいとした。

コークスについて、副産物回収式ソルベー炉の導入('07)によって新たに化学工業との結合を生み出したが、原料石炭の炭質が充分堅硬ならざると灰分の多きことは、依然として改良が必要である。

製鉄技術とその経済性は面目を一新し、堅実に展開している。鉄産額が増進し、技術進歩の指標である高炉容積1m<sup>3</sup>に対する24時間の出鉄も向上している。しかし、その品質においては、硅素量を減少せしめているが、ベッセマー転炉用鉄としては硅素・燐が過多なので、混鉄炉を増設してベッセマー鉄と平炉鉄を区分して製造することが望ましい。なお、鉄製造費は、'09年にトン当たり28円で米国鉄と大差ない水準となった。コストの大きな比重を占める鋳石代が米国の14.6円に比して11.8円と安価であった。また、高炉操業にともなう副産物・鋳滓とガスの利用が進歩し、経済的にも貢献している。

製鋼作業も進歩した。'10年から第一製鋼工場(屑鉄法・平炉)に鋳鉄供給が始まり、鉄鋼一貫操業の実質的なメリットを実現した。

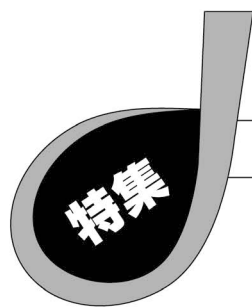
ベッセマー酸性転炉では、原料鉄の硅素が過多のために、吹製時間が長くなっている。創業当時に比して時間を短縮し、産額を増進しているが、吹製回数は「未だ満足なる成績を得ること能はず」状況である。この改善のためには、原鉄の硅素量を減少させることが必要で、混鉄炉で適量の鉄鋳石または屑鉄を投入する方法と高炉で低硅素鉄を鑄製するという二方法がある。第一の場合は、八幡の混鉄炉は旧式で「直ちに之を實行し難」<sup>(8)</sup>く、第二の場合は、硅素を減らすと硫黄・燐の増加促すので、低燐鉄を原料にする必要があり、現状では対応できない。良質の鋼材を得るためには、「酸基ベスメルを塩基に変更するか、或は転炉を全廃し平炉法のみによるべきか此事たるや将来本邦製鋼業に関し重大なる問題」<sup>(8)</sup>になっている。

なお、野呂は'10年に第一高炉で低硅素鉄の試験を実施した。官営八幡製鐵所で低硅素鉄が製出できるようになるのは、野呂死後の1924年頃であり、1927年に転炉は廃止された。

塩基性平炉による製鋼作業は、「最初は冷鉄と古鉄を用ふる普通の方法にして、明治三十八年の頃までは其成績未だ好しからざりしか、其後種々改良を施すに伴れ漸次に良結果を現はし、殊に近時に至り著大なる進歩をなした」<sup>(8)</sup>。転平炉合併法を採用('08)し、転炉で吹製した鋳鋼を平炉に移して残留する燐・炭素を除去することで軟鋼をえている。

圧延作業による製品については、とくに製造費において欧





# 金属材料研究所と鉄鋼研究の歴史

古 原 忠\*

## 1. はじめに

日本の鉄鋼業の発展は官営製鐵所(1880年釜石, 1897年八幡)の設立に端を発する。1900～10年代には高炉会社の前身が相次いで設立され, 1915年に日本の鉄鋼に関する事業の発達を目的として日本鉄鋼協会が創立された<sup>(1)</sup>。

東北大学金属材料研究所(以下「金研」)は, 1916年に東北帝国大学理科大学内に設置された臨時理化学研究所第2部を前身とする。この背景には, 第一次大戦の影響で物資輸入が制限され鉄鋼の自給に迫られ, その中で基礎研究の重要性がクローズアップされたことがある。研究所の設置は, 住友家からの寄付を原資に行われた。当時研究主任であった本多光太郎にリードされ, 当時世界最強の永久磁石であったKS磁石鋼発明などの優れた業績により, 勅令により大学に附置される研究所へと発展した。金研は“金属をはじめ, 半導体, セラミックス, 化合物, 有機材料, 複合材料などの広範な物質・材料に関する基礎と応用の両面の研究により, 真に社会に役立つ新たな材料を創出することによって, 文明の発展と人類の幸福に貢献する”を理念とし, その実現のために“材料科学に関する学理の探求と応用研究”を目的としている。研究活動では, 戦前から戦後さらには現在まで多くの節目があるが, その中で創設時から100年余り鉄鋼研究を継続していることは本所の誇りである<sup>(2)</sup>。

本稿は, 日本の鉄鋼研究の創生期から金研が果たしてきた役割を俯瞰的にまとめることで, 関連分野の発展と今後の展開を考える上での一助となることを期待するものである。

## 2. 金属材料研究所の組織的変遷

表1は, 創立時から現在までの金研の主要な沿革をまとめたものである。臨時理化学研究所第2部としての設置後は, 1919年に勅令により東北帝国大学附属鉄鋼研究所の設置を経て, 1922年には非鉄金属を含む金属の総合研究を行う官制附置研究所「金属材料研究所」となった。初代所長は本多光太郎(後, 東北帝大総長)である。金研の設置の背景には, 第一次大戦の影響で鉄鋼の自給に迫られる中で基礎研究が重要とされたことがある。金研は, 前身が設置された理科大学物理学教室(現: 理学部物理学科)に関わるとともに, 工学部金属工学科ともその創立時(1924年)から研究教育で緊密に協力してきた。初代の学科主任は金研の助教授を経て工学部教授に着任した村上武次郎(金研を併任, 後に第3代所長)である。

図1に戦前～戦中にかけての金研の組織的変遷をまとめる<sup>(3)</sup>。附置研当初の研究組織は冶金, 製鋼, 鑄物の3研究部であったが, その後研究部が増設され1943年には10研究部となる。その後1945年には従来の10研究部を基礎研究部10部門とし, 新たに民間との直接協力を行う工業化研究部7部門を設置する大部門体制へと改組された。戦中は基礎研究に加え, 戦時研究として兵器用鉄鋼材料の研究開発も行われた。東北大学では1941年に選鉱製錬研究所(「選研」, 現在の多元物質科学研究所の前身の1つ)が設置され, 製鋼・製錬研究の中心は工学部と選研へと移行する。金研では, 戦後の改組の中で, 金属に加えて, 原子力関連材料, 化合物・セラミックス・アモルファス等の幅広い新物質・材料や各種分析手法の研究開発を進めていく。1970年前後から1980年代にかけての材料照射や強磁場環境など大型施設の設置, 1987年

\* 東北大学金属材料研究所; 教授(〒980-8577 仙台市青葉区片平 2-1-1)  
History of Steel Research in Institute for Materials Research (“KINKEN”) of Tohoku University; Tadashi Furuhashi (Institute for Materials Research, Tohoku University, Sendai)  
Keywords: iron, steel, physical metallurgy, microstructure  
2023年3月2日受理[doi:10.2320/materia.62.434]

表1 戦前～現在までの金研における組織的沿革.

|         |                                                                                                  |
|---------|--------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1916    | 東北帝国大学理科大学に 臨時理化学研究所第2部として発足                                                                     |
| 1919    | 東北帝国大学附属鉄鋼研究所として設置 — 初代所長：本多光太郎博士                                                                |
| 1922    | 金属材料研究所へ改称 — 官制による附置研究所としてのスタート<br>3部門設置、軽金属・非鉄合金を含む金属の総合研究所                                     |
| 1949    | 21部門構成となる                                                                                        |
| 1952    | 日本初のヘリウム液化機導入 — 低温物性関係の共同利用の魁                                                                    |
| 1957-62 | 原子炉材料関係4部門の増設 — 25部門構成                                                                           |
| 1969    | 附属材料試験炉利用施設（現：量子エネルギー材料科学国際研究センター）設置<br>— 原子力材料関連研究の共同利用                                         |
| 1981    | 附属超電導材料開発施設（現：強磁場超伝導材料研究センター）設置<br>— 強磁場環境の共同利用                                                  |
| 1987    | 全国共同利用研究所への改組、Institute for Materials Researchへ改称<br>新素材開発施設（現：新素材共同研究開発センター）設置<br>— 素材開発装置の共同利用 |
| 1994    | スーパーコンピュータ導入                                                                                     |
| 2001    | 計算材料科学センター 設置 — 材料科学分野でのスパコン共同利用への展開                                                             |
| 2002    | 材料科学国際フロンティアセンター（現：国際共同研究センター）設置<br>— 国際共同研究の組織的推進                                               |
| 2006    | 附属大阪センター（現：産学官広域連携センター）設置<br>— 広域連携での産業界支援                                                       |
| 2009    | 材料科学共同利用・共同研究拠点の認定                                                                               |
| 2015    | 先端エネルギー材料理工共創研究センター 設置                                                                           |
| 2016    | 金研百周年                                                                                            |
| 2018    | 材料科学国際共同利用・共同研究拠点の認定 — 2021 認定更新                                                                 |

臨時理化学研究所第二部（1916）→ 附属鉄鋼研究所  
（1919）

金属材料研究所（1922）（\*工学部金属工学科（1922））

冶金、製鋼、鋳物 → 冶金、製鋼、鋳物、砂鉄、軽合金（1930） → 冶金、製鋼、鋳物、砂鉄、軽合金、低温（1937）貧鉍処理（1939）

（\*製鋼・製錬研究の中心 — 工学部・選鉍製錬研究所（1941）へ）

大部門設置（1945）

➤ 基礎研究部（10部門）

・金属物理 ・特殊鋼  
・物理冶金 ・軽合金  
・低温物理 ・金属化学  
・磁性合金 ・低温化学  
・製鋼 ・防食

➤ 工業化研究部（7部門）

・溶解鋳造 ・粉末冶金  
・鍛造 ・分析  
・加工 ・電解溶射  
・熱処理

国立大学設置法（1949）

➤ 基礎研究部（13部門）

・結晶物理学 ・金属表面化学  
・冶金物理学 ・低温化学部  
・低温物理学 ・金属塑性学  
・磁性合金部 ・金属物性論  
・磁気物理学 ・金相学  
・特殊鋼部 ・放射線金属学  
・非鉄合金

➤ 工業化研究部（8部門）

・溶解鋳造 ・分析  
・鍛造加工 ・電解溶射  
・熱処理 ・鋳鉄  
・粉末冶金 ・溶接

大部門改組（1953） 小部門制へ

➤ 基礎研究部（11→13部門）

・金属物理 第1～6部  
（第7部：1958）  
・金属化学 第1～3部  
（第4部：1957）  
・低温物性 第1～2部

➤ 工業化研究部（10→12部門）

・金属材料 第1～4部  
（第5部：1962）  
・製造冶金 第1～6部  
（第7部：1959）

原子力研究分野4部門の新設

図1 戦前～戦中にかけての金研の改組.

の全国共同利用研究所への改組も契機にさらに組織が拡充された。現在は5研究部(小講座形式の27部門)に5附属研究施設, 4共同研究センターを加えて, 材料科学分野の先導を掲げて研究を推進するとともに, 国際共同利用・共同研究拠点活動を通じたコミュニティ育成への貢献や, 創立以来の理念「産業は学問の道場である」を体現する産官学連携など, 多彩な活動を現在まで行っている。

日本金属学会は, 1937年に金属に関する理論と工業の進歩発達をはかることを目的として設立されたが, 本多博士の東北帝国大学在職25周年にその貢献を記念して設立された記念会の寄付金の一部を原資とした。金研が発行した月刊誌「金属の研究」は日本金属学会誌の前身である。金属学会は, 現在の鉄鋼協会学会部門の前身である鉄鋼基礎共同研究会の設置を1963年に鉄鋼協会, 日本學術振興会とともに主催した。現在も金研は他機関と協力し, 多くの学協会で主導的役割を担っている。

### 3. 日本における鉄鋼の研究と金研の関わり

#### (1) 本多スクールにおける研究(～戦前までの研究)

金研初期から戦前までの本多スクールでの鉄鋼研究は多彩である<sup>(4)</sup>。KS鋼などの特殊鋼, 鉄の状態図および各種相変態, 焼入れ焼戻し, 鉄単結晶の磁気異方性などが代表的なものとして上げられる。成果の多くは東北帝国大学理科報告(英文)に収録されている。また, 和文でまとめられた著書<sup>(5)</sup>, また成果のサマリーも参照されたい<sup>(6)(7)</sup>。興味をお持ちの方には, 本所のホームページの動画アーカイブにて, 研友会が所蔵している本多自らの講義動画を観ることができるので, ここに紹介しておく。

表2は, 金研が設置されるまでの, 欧米と日本における鉄鋼の製造技術および研究の発展を比較したものである<sup>(8)</sup>。現在の鉄鋼製造法の基本である高炉および転炉法は英国での開発された。1880年代には米国及び英国にて鉄鋼協会が創設されている。日本での最初の洋式高炉は盛岡藩士大島高任の努力で1857年に釜石に建設された。その後釜石および八幡での官営製鐵所設立があり, これらの技術開発および実装業

表2 欧米と日本の鉄鋼研究の進展(維新前～大正)。

| 欧米                       | 日本               |
|--------------------------|------------------|
| 1735 コークス高炉の完成(ダービー二世)   |                  |
| 1820 合金鋼の実験(ファラデー)       | 1850 島津家 精錬所設立   |
| 1856 転炉法の開発(ベッセマー)       | 1857 日本初の洋式高炉    |
| 1864 鉄と鋼の顕微鏡組織(ソルビー)     |                  |
| 1865 米国鉄鋼協会 創設           | 1867 明治維新        |
| 1869 イギリス鉄鋼協会 創設         |                  |
| 1878 鉄の顕微鏡による研究(マルテンズ)   | 1880 官営 釜石製鐵所    |
| 1887 鉄の同素変態(オスモン)        | 1901 官営 八幡製鐵所    |
| 1884 高マンガン鋼開発(ハドフィールド)   | 1913 「金属組織学」(俄)  |
| 1890 ケイ素鋼の研究(ハドフィールド)    | 1915 日本鉄鋼協会 設立   |
| 1897 鉄-炭素状態図(オーステン)      | 1916 臨時理化学研究所第2部 |
| 1899 インバー合金の開発(ギョーム)     | 1919 鉄のA2変態(本多)  |
| 1900 鉄-炭素状態図の確立(ローゼンボーム) | 1922 金属材料研究所の設置  |

に多大な貢献をした東京帝国大学教授の野呂景義らの提唱により1915年に日本鉄鋼協会が設立されている。著者の専門である物理冶金学・金属組織学の分野では, 合金鋼研究の先達であったファラデーの後, 顕微鏡技術を金属の研究に導入した英国のソルビーやドイツのマルテンスの研究が画期的な進歩をもたらす。日本では東京帝大の俵国一がこの手法を導

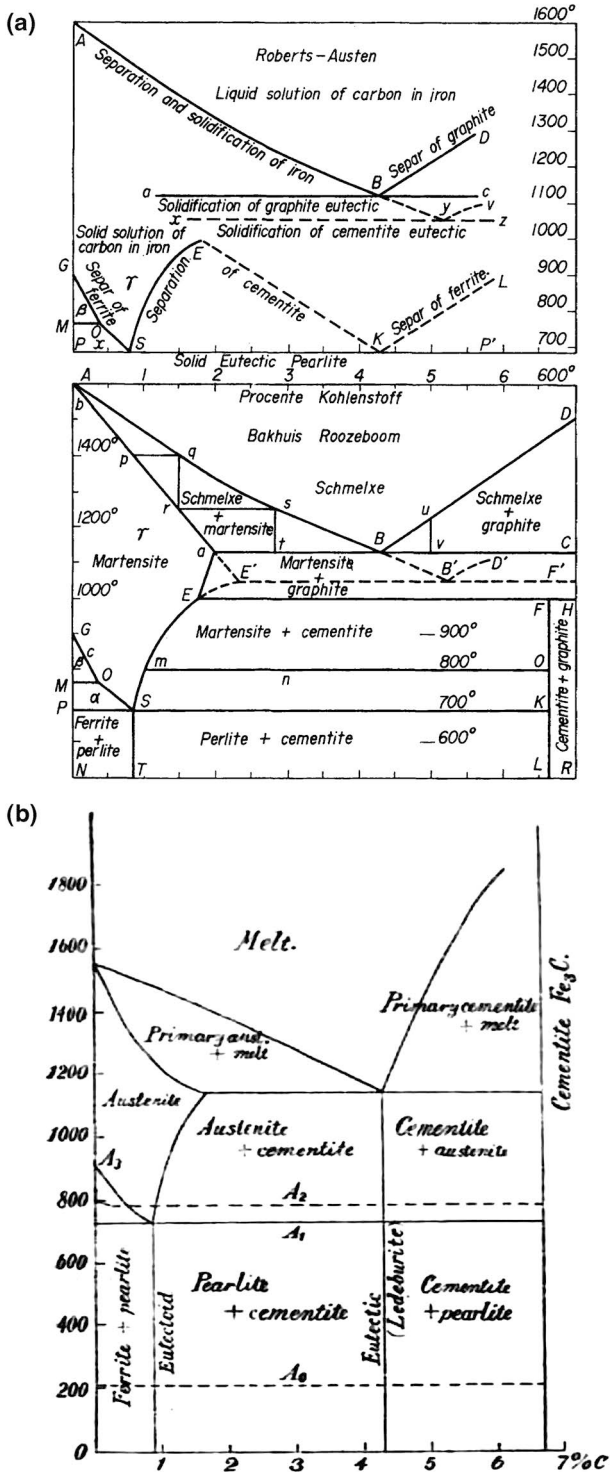


図2 Fe-C 2元系状態図の代表的な研究成果。(a) ロバーツーオーステン(上図)とローゼンボーム(下図)による状態図<sup>(9)</sup>, (b) 本多らの研究による状態図<sup>(10)</sup>。

入して研究を主導した。金研の本多スクールでも村上らが中心となって金属組織の研究を精力的に行った。俵も金研の囑託として、それに貢献している。表2の比較では日本における鉄鋼の学術研究は欧米に対して30年ほど遅れていたことがわかる。

図2は、19世紀末における研究の中でまとめられていったFe-C二元系状態図の研究成果である。図2(a)<sup>(9)</sup>の上図に示した米国のロバート・オーステンの状態図に描かれている相境界線は現在のものにかかなり近いが、オランダのローゼンボームが米国の科学者ギブスの提唱した相律の概念に基づいて状態図の原型を下図のように確立した。ただし、状態図の中にマルテンサイトが存在している。これは、当時高温でマルテンサイトが存在し、冷却時に室温でも残存するという考え方があったことによる。図2(b)は本多らが金研での研究に基づいて提唱した状態図である<sup>(10)</sup>。この状態図にはすでにマルテンサイトがなく、その精度の高さには驚くべきものがある。

本多スクールにおける世界的な業績は、金属の磁性に関する研究である。実用面ではKS磁石を始めとする強磁性材料、増本量(第6代所長)らによるセンダストなどの軟磁性材料の開発がある。一方、基礎研究としては鉄の磁気変態の研究がまず上げられる。フランスのオスモンは、熱分析を用いて純鉄を加熱・冷却した時の潜熱の発生を研究し、1887年に鉄の同素変態の存在を提唱したが、現在我々が鉄の磁気変態点(キュリー点)である770°C付近の変態を巡って有名なβ鉄論争が当時展開されることになる<sup>(9)</sup>。ちなみにピエール・キュリーは、オスモンの報告に先立って鉄の帯磁率の変化を報告している。この論争では、オスモンらが別の結晶構造の存在を提唱したのに対して、一方で米国のアーノルドらは炭化鉄の生成を主張し、両派が大きく対立した。

本多はドイツ留学で学んだ熱分析をこのA<sub>2</sub>変態に応用し、fcc鉄からbcc鉄への構造が変化するA<sub>3</sub>変態点では熱量変化曲線の微分値に不連続が見られるのに対して、A<sub>2</sub>変態点では連続であることを1915年に報告した<sup>(11)</sup>。このことはA<sub>2</sub>変態が結晶構造変化をともしなわれないことを強く示唆するものである。論争への最終的な終止符が打たれるのは、ウェストグレンによるX線回折実験<sup>(12)</sup>を待つことになるが、本多の成果は、当時の論争の解決に大きな役割を果たしたと評価されている。このあたりの詳しい内容は文献(8)および(13)を参照されたい。

本多らの鉄の磁性研究は現在のエネルギー問題にも大きく貢献している。英国のハドフィールドは鉄の電磁特性におよぼす種々の合金元素の影響を評価する中で、現在でも変圧器やモーターの鉄芯用の電磁鋼板として用いられているケイ素鋼を発見した<sup>(14)</sup>。欧米での熱延電磁鋼板の工業生産は1904年頃から始まったが、日本では1924年以降である<sup>(15)</sup>。ケイ素鋼はFe-3%Siの組成を持ち、bccフェライト構造を示す。鉄芯に巻いたコイルに交流電流を流すと交番磁界が発生し、ヒステシス損と渦電流損からなるエネルギー損失(「鉄損」)が起こる。本多と茅誠司(後、東京大学総長)は、純鉄の

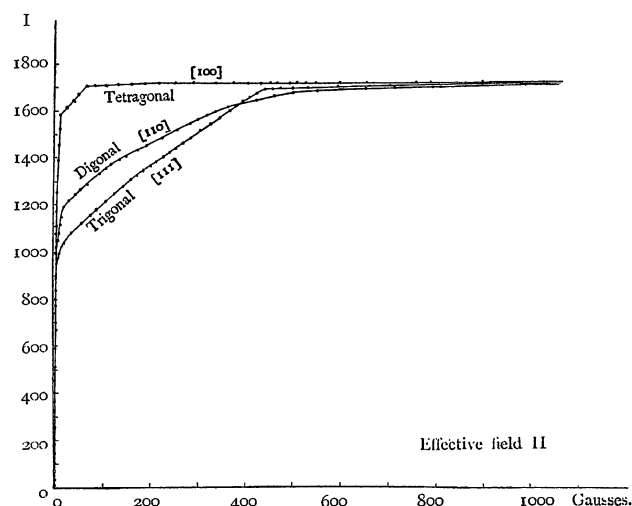


図3 本多、茅による純鉄単結晶の磁化曲線の結晶異方性<sup>(16)</sup>。

単結晶の磁化曲線の測定より、結晶磁気異方性を発見し、bccの<100>方向が容易磁化方向であることを示した(図3)<sup>(16)</sup>。この知見は、その後米国や日本における再結晶集合組織を制御して鉄損の低減を図った一方向性電磁鋼板、無方向性電磁鋼板の開発につながった。特に無方向性電磁鋼板は今後飛躍的に拡大するEVのモーター部材として不可欠の素材で、今後の社会における省エネルギーにも大きく貢献するものである。

本多スクールにおいて、鉄鋼の組織学的研究を主導したのは先述した村上武次郎である。村上は「特殊鋼の開拓者」とも呼ばれ、KS磁石の組織制御からステンレス鋼、高速度鋼の研究を行った。特に多くの鉄基二元系・三元系について平衡状態図を精査し、自ら開発した赤血塩(フェリシアン化カリウム)アルカリ溶液(「村上試薬」)を腐食液に用いて特殊鋼中の炭化物などの複雑な区別を行った<sup>(17)</sup>。金研では他にも石原寅次郎、岩瀬慶三その他の研究者が状態図に取り組んでいたが、当時の状態図研究については、村上の指導を受け、後に工学部金属工学科教授となった佐藤知雄の回想記事<sup>(18)</sup>より伺い知ることができる。村上は、日本における鋼材溶接の冶金学的研究を金研において始めたことにも言及したい。他の大学で溶接工学を発展させた関口春次郎(金研助手→名大工)、岡田実(阪大工、後に総長)は東北帝大金属工学科を1930年に卒業したが、ともに村上門下であったことを申し添える。

著者のように鉄鋼の相変態に関わるものにとって当時金研所属の大先達として忘れていけない研究者は、ミスター・マルテンサイトである西山善次である。本多スクールでの研究手法は、1910年代は化学分析、熱分析、顕微鏡観察が主体であったが、先述したA<sub>2</sub>変態でのウェストグレンの成果もあり、1920年代以降は磁気分析、電気抵抗に加えてX線回折を用いた研究が精力的に展開された<sup>(19)</sup>。西山は、山田良之助、関戸信吉が行っていた鋼の焼入れ焼き戻しの研究をさらに発展させたが、X線回折を駆使して炭素鋼マルテンサ

イトの正方晶性を解明する<sup>(20)</sup>とともに、fcc→bcc マルテンサイト変態における新たな結晶方位関係(N関係あるいはN-W関係)の発見<sup>(21)</sup>など世界に冠たる成果を挙げている。西山は1936年まで金研で助手を務めた後、大阪大学産業科学研究所に異動したが、その後日本のマルテンサイト研究の隆盛に果たした大きな役割については説明の必要はないであろう。西山と本多の関係の一端は、文献(22)(23)より知ることができる。

金研における鉄基高合金の機能性の研究は、増本量(第6代所長)によって主導された。最も代表的なものは高い透磁率を持つセンダスト(Fe-10Si-5Al)である<sup>(24)</sup>。ギョームは1897年に室温付近で熱膨張係数がゼロになるFe-36Niインバー合金を発見したが、増本らはスーパーインバー(Fe-32Ni-4Co)、ステンレスインバー(Fe-52Co-11Cr)などを開発し、その分野の発展に大きく寄与した<sup>(25)</sup>。

## (2) 戦後の研究展開～現在の取り組み

金研では、戦後、基礎研究部での磁性や金属塑性などの基礎研究、工業化研究部での強靱鋳鉄・鋳鋼、非鉄金属の製錬等の研究が進められた。村上武次郎より特殊鋼部門を引き継いだ今井勇之進は、各種相変態を含む鉄鋼の組織と特性に及ぼす合金元素の効果および窒素鋼の研究を展開し戦後の鉄鋼研究をリードした。表3は、村上研の時代から今井研における集録形態で発表されている主要な研究論文である。その業績は、今井による解説記事を参照されたい<sup>(26)~(28)</sup>。今井の研究成果で特筆すべきものは、鋼の合金元素としての窒素の役割の解明である。代表的な研究の一部を図4に示す。図4(a)は土屋らがFe-NマルテンサイトのMs点のN濃度依存性をFe-Cの場合と比較したものである<sup>(29)</sup>。彼らはマルテンサイトの正方晶性について炭素や窒素の規則配置として熱力学的に取扱い詳細な検討を行っている。一方、図4(b)は12%Cr-Fe-C-N系4元合金の組織マップの検討結果である<sup>(30)</sup>。高Cr鋼では炭素や窒素の含有量によってフェライトやオーステナイトの相安定性が変化し、またCrの炭化物や

窒化物が析出が起こることで耐食性が低下したりする。よって、種々の組成やプロセス条件による組織変化を明らかにし、状態図に関する理解を深めることが重要である。現在でも高窒素ステンレス鋼は高強度と高耐食性を兼ね備えた材料として知られている。特にオーステナイト系ステンレス鋼における主要成分のNiは高価で、また生体アレルギーを起こすことから、これを一部でも代替できる窒素の添加はコスト減や生体材料への適用において有望であり、今井らの研究の重要性が理解できる。その他の成果を含めた鉄鋼における窒素の役割についての教科書も今井とその門下によりまとめられ、出版された<sup>(31)</sup>。

戦後の鉄鋼研究は、日本の鉄鋼業の飛躍的発展とともに活発に推進された。1960年前後に鉄鋼メーカー各社は、それまでの箇所研での研究体制から中央研究所の設立へと向かい、研究開発への莫大な投資が行われた。また関連研究を行う研究機関も官立3研究所、4試験所、公立3研究機関、大

表3 今井勇之進の主な研究(集録を中心)。

|                           |                             |                      |
|---------------------------|-----------------------------|----------------------|
| 村上武次郎・<br>今井勇之進           | 鋼の恒温変態に及ぼす諸元素の影響<br>(第1~5報) | 日本金属学会誌<br>(1942~44) |
| 村上武次郎・<br>今井勇之進・<br>矢沢悦次郎 | 特殊鋼の滲炭に関する基礎的研究<br>(第1~5報)  | 日本金属学会誌<br>(1944~48) |
| 今井勇之進・<br>泉山昌夫            | 鋼の深冷処理について<br>(第1~4報)       | 日本金属学会誌<br>(1955~58) |
| 今井勇之進・<br>熊田健三郎           | 高クロム鋼の研究<br>(第1~3報)         | 日本金属学会誌<br>(1953~54) |
| 今井勇之進・<br>石崎哲郎            | 鋼の合金元素としての窒素<br>(第1~20報)    | 日本金属学会誌<br>(1953~56) |
| 今井勇之進・<br>増本健             | γ型耐熱合金の焼戻過程に関する研究<br>I~V    | 鉄と鋼<br>(1961~62)     |
| 今井勇之進・<br>宮崎亨             | 粒子分散型合金の機械的性質               | 日本金属学会誌<br>(1962)    |

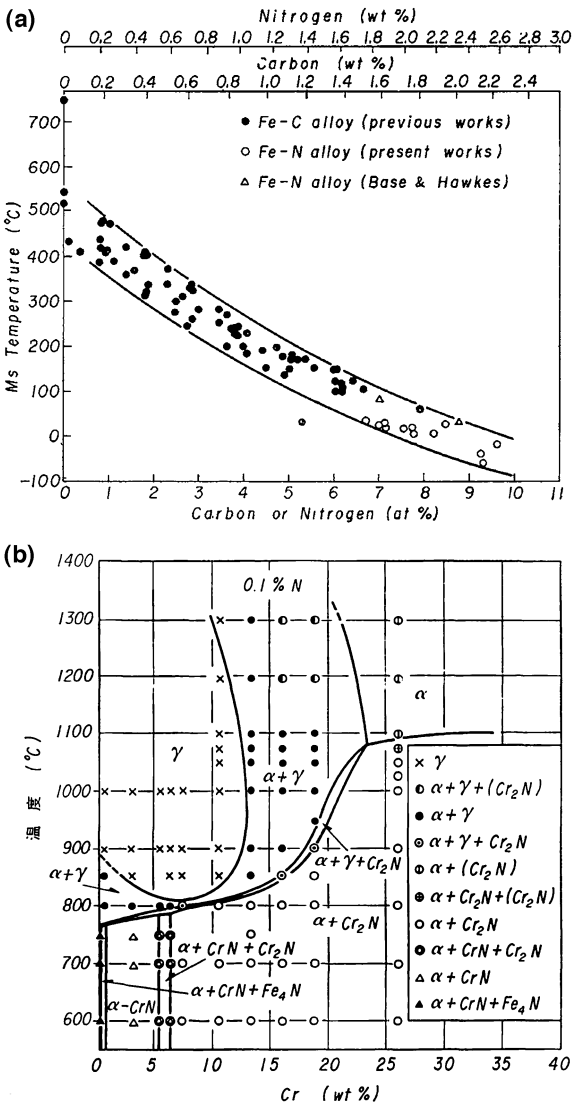


図4 (a) Fe-N合金のMs点のN濃度依存性<sup>(29)</sup>。(b) Fe-12%Cr-C-N 4元系の0.1%N縦断面図<sup>(30)</sup>。

学関係10研究所，特殊法人2研究所と隆盛を極め，活発な研究が行われることになる。しかしながら，その中での問題意識として，学協会での企業間共同研究の推進や大学等の基礎研究の応答展開，さらには官民を問わず総合的有機的な研究開発の実現の必要性が問われ，欧米に対する科学技術費の非常に低い政府支出率も問題視されるなど，現在の状況とも共通する課題が指摘されている<sup>(32)</sup>。

1970年代から80年代においては，厚鋼板製造における加工熱処理(TMCP)技術が確立される中で，より効率良い製造に向けて鉄鋼の組織・材質予測技術が注目され，また高強度化と溶接性の向上の両立を目指した低炭素ベイナイト鋼の開発も進められた<sup>(33)</sup>。薄鋼板では，自動車用鋼板の研究が大きく進められ，高加工性の追求における極低炭素鋼から Interstitial Free (IF) 鋼へのシフト，オイルショックを背景とした自動車の燃費向上の要求に答えるべく複合組織鋼の開発が精力的に行われていく<sup>(34)</sup>。この中では，特に低合金鋼の相変態組織制御の研究が必要とされ，日本の産官学で多くの研究者により進められていくことになるが，金研では当時対応する指導的人材が不足しており，東北工芸学部や他大学・他機関に関連研究の中心は移っていくことになる。

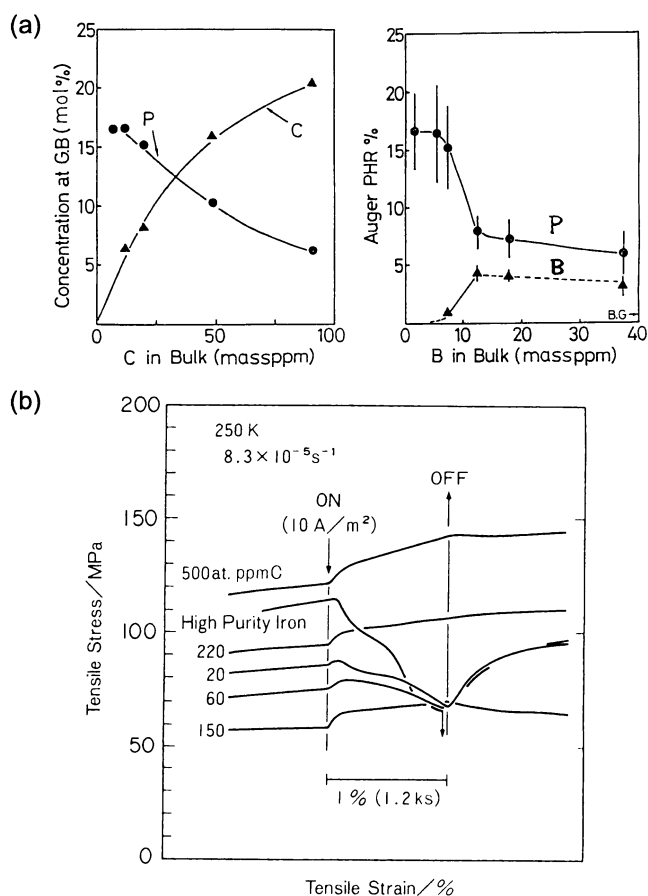


図5 (a) Fe-0.2%P合金フェライトの粒界P濃度とC添加量(左図)およびB添加量(右図，ただし縦軸はオージェ分光で評価した粒界被覆率)との関係<sup>(35)</sup>。(b) 高純度鉄とC微量添加材の応力-ひずみ曲線(250 K引張)におけるHチャージの影響<sup>(36)</sup>。

その中で，鉄の本質を理解するための基礎研究は金研において引き続き追求された。1965年に金属塑性学部門担当となった木村宏は，その後基礎鉄鋼学研究部門に異動し，格子欠陥全般を対象に金属の力学的性質を一貫して研究した。特に超高真空電子ビーム浮遊帯溶解や高純度電解鉄からの超高真空高周波溶解などの画期的な手段を駆使して，純度99.999%以上までに至る高純度鉄を創製し，その力学物性と微量元素添加の影響に関して大きな研究成果を挙げた。その代表的な成果を図5に示す。図5(a)は高純度鉄におけるリン(P)偏析におよぼす炭素(C)およびボロン(B)微量添加の影響を示している<sup>(35)</sup>が，両元素の添加によって粒界脆化元素であるP偏析が低減されている。主な原因としてサイトコンペティションが提案されているが，靱性向上についてはCおよびBによる粒界強化の可能性も言及された。図5(b)は，高純度鉄にCおよびHを微量添加したときの固溶軟化および固溶強化の挙動を示すものである<sup>(36)</sup>。高純度鉄ではHが固溶軟化をもたらすのに対して，C含有量が増えると，逆に硬化に転じており，Hの塑性変形挙動への影響が不純物濃度によって異なることがわかる。このような高純度鉄の力学的性質の研究は，鉄という元素の持つ本性に迫るものであり，基礎的知見としてインパクトの大きいものであった。

一方，同時期に，増本健(第15代所長)はアモルファス金属の研究を精力的に推進し，鉄合金において高強度，高耐食，軟磁性という稀有な3大特性を発見した<sup>(37)</sup>。図6はFe-Si-Bアモルファス合金の応力-ひずみ曲線であるが，高強度ピアノ線と比較してより高強度が得られるとともに伸びも示していることがわかる。増本らは工業化に必要な各種製

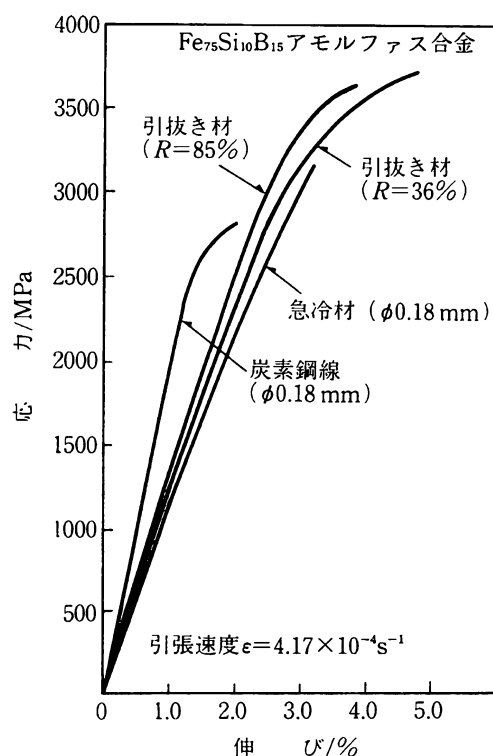


図6 鉄基アモルファス合金の引張特性<sup>(37)</sup>。

表 4 その他の部門での主な鉄鋼関連研究.

|                                                           |                                                                                                    |
|-----------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 金属塑性学部門<br>(1949~1975)<br>(旧:物理冶金部)                       | 寿時富弥: Alの加工硬化など<br>幸田成康: 電子顕微鏡による析出・変形挙動解明<br>木村 宏 (1975年基礎鉄鋼学へ移動)                                 |
| 冶金物理学部門 (1949~)<br>(旧:物理冶金部,<br>後 “や金”物理学 →<br>ランダム構造物質学) | 竹内 栄: 金属精錬・浸炭, 高純度チタン合成<br>(鈴木秀次: マルテンサイト成長機構, 加工・再結晶, 鈴木効果)<br>鈴木謙爾: 液体金属物性, アモルファス構造, X線・中性子散乱利用 |
| 金属表面化学部門 (1949~)<br>(旧:防蝕部<br>後 生体材料学 →<br>構造制御機能材料学)     | 下平三郎: 合金の応力腐食割れ・水素脆性 (鉄基: 軟鋼, ステンレス鋼)<br>鉄さびの生成反応機構<br>橋本功二: 超耐食アモルファス合金と不動態化 (鉄基: Fe-(Ni)-Cr-半金属) |

造法も確立したが, その成果は企業における磁気ヘッドやトランスなどの用途での実用化に繋がっていく. その後のアモルファス研究, さらに井上明久(第18代所長)らが進めた金属ガラスの研究においても, 様々な合金系および化学組成を持つ金属基材料の広範な研究が推進されたが, 著者の限られた知識の範囲では, ある程度のサイズの構造部材に必要な特性である良好な強度-延性・靱性バランスは, 鉄基合金では未だ実現には至っていないと思われる. 一方, その優れた軟磁性特性は, 牧野彰宏らの研究により新たな展開を生み出し, ナノ結晶化の過程を経て, ケイ素鋼の特性を上回る超低磁心損失・高鉄濃度軟磁性合金の開発<sup>(38)</sup>へと波及するが, 本稿の本題は構造材料としての鉄鋼研究にあるので, 機能材料に関するこれ以上の記述は割愛したい.

以上, 1980年代までの金研における鉄鋼の物理冶金的研究の発展のサマリーを述べてきたが, それ以外に種々の周辺研究も行われた. 表 4 は, その中の一部を例示したものである. X 線・中性子回折や電子顕微鏡の応用や塑性変形, あるいは金属の腐食挙動などを研究する部門が研究活動を行っていた. 個々の部門の変遷は様々であるが, その研究の系譜は今でも脈々と続いている. 現在の金研における鉄鋼研究の主体は, 著者らが行っている元素機能に基づく鉄鋼の組織と特性制御に加えて, 高強度鋼の腐食・水素環境下での特性評価, 原子炉用鉄鋼材料の劣化挙動, 鉄鋼製造プロセスにおける微量分析・迅速分析法の開発などである. その詳細については, 本所のウェブサイトなどで紹介しているので, 興味のある方はご参照されたい.

#### 4. おわりに—今後への期待

本稿では, 日本の鉄鋼研究の中で特に物理冶金学の発展に注目して, 著者が所属する金研の研究を振り返りながら概説した. 100年を優に超える歴史をまとめるには大変力不足で, 不十分な内容であったかと思うが, 読者の皆様には研究所での所属期間も20年に満たない弱輩の作としてご容赦いただければ幸いである.

日本の鉄鋼業は, 社会基盤を支える最も重要な基幹産業分野として我が国の経済発展と国際競争力を支えてきた. しかし, 昨今の東アジアを中心とした諸外国の鉄鋼生産技術の著しい向上, カーボンニュートラルやサーキュラーエコノミー

など国内外の社会環境の急激な変化への対応など多くの重要課題を抱える中, レジリエントでグリーンな社会基盤構築などで期待される役割は大きい. その中では, 革新的な技術発展とそれを支える学術基盤の飛躍的進展が今後不可欠であることは言うまでもない. 産官学が強力に連携し, マテリアル DX などの新たな展開<sup>(39)</sup>も活用しながら, 鉄鋼の学術のさらなる活性化と次世代を担う人材育成が推進されることを切に祈念する.

なお, ここまでの引用文献等に加えて参考とした文献および図書を最後に挙げておく<sup>(40)-(46)</sup>.

#### 文 献

- (1) 創立100周年日本鉄鋼協会誌, (2015).
- (2) 金属材料研究所創立百周年記念誌, (2016).
- (3) 金研五十周年記念誌, (1966).
- (4) 平林 真編, 本多記念会監集: 「本多光太郎—マテリアルサイエンスの先駆者—」, アグネ技術センター, (2004), 25.
- (5) 本多光太郎: 「鉄及び鋼の研究」, 第1~4巻, 内田老鶴圃, (1919-1926).
- (6) 本多光太郎: 鉄と鋼, **21**(1935), 384-392.
- (7) 本多光太郎: 鉄と鋼, **16**(1930), 133-150, 241-269.
- (8) 中澤護人: 「鉄のメルヘン 金属学をきづいた人々」, アグネ, (1975).
- (9) 中澤護人: 日本金属学会会報, **16**(1977), 291-297.
- (10) 本多光太郎: 「鉄及び鋼の研究」, 第2巻, 第1章(1920).
- (11) K. Honda: J. Iron Steel Inst., **91**(1915), 199-254.
- (12) A. Westgren: J. Iron Steel Inst., **105**(1922), 241-273.
- (13) C. S. Smith: “A History of Metallography”, The MIT Press, (1980).
- (14) W. F. Barrett, W. Brown and R. A. Hadfield: Sci. Trans. Roy. Dublin Soc., **8**(1902), 1-22.
- (15) 岡見雄二: ふえらむ, **2**(1997), 52-57.
- (16) K. Honda and S. Kaya: Sci. Rep. Tohoku Imperial Univ., **15**(1926), 721-752.
- (17) 村上武次郎: 日本金属学会誌, **6**(1942), A218-A225.
- (18) 佐藤知雄: 日本金属学会会報, **16**(1977), 533.
- (19) 松尾宗次: まてりあ, **38**(1999), 39-42.
- (20) 本多光太郎, 西山善次: 金属の研究, **10**(1933), 1-25.
- (21) Z. Nishiyama: Sci. Rep. Res. Inst. Tohoku Univ., **23**(1934), 638-664.
- (22) 西山善次: 日本金属学会会報, **16**(1977), 535.
- (23) 清水謙一: ふえらむ, **19**(2014), 619-624.
- (24) 増本 量, 山本達治: 日本金属学会誌, **1**(1937), 127-135.
- (25) 斎藤英夫, 藤森啓安: 日本金属学会会報, **7**(1968), 263-278.
- (26) 今井勇之進: 鉄と鋼, **51**(1965), 2336-2358.
- (27) 今井勇之進: 日本金属学会会報, **11**(1972), 503-512.
- (28) 今井勇之進: 日本金属学会会報, **14**(1975), 405-415.
- (29) 土屋正行, 泉山昌夫, 今井勇之進: 日本金属学会誌, **29**

- (44) 追悼 村上武次郎先生出版委員会 編集・出版,「追想 村上武次郎先生」,(1980).
- (45) 石川梯次郎著:「増本量伝」,誠文堂新光社(1976).
- (46) 初山高仁著 東北大学出版会:「鉄の科学史—科学と産業のあゆみ—」,(2012).



古原 忠

★ ★ ★ ★ ★ ★ ★ ★ ★ ★ ★ ★ ★ ★ ★ ★ ★ ★ ★ ★ ★ ★

1989年 カーネギーメロン大学大学院工学研究科博士  
課程修了 Ph.D

1989年 京都大学工学部金属加工学科 助手

1997年 同大学院工学研究科材料工学専攻 助教授

2005年10月より現職(2020年4月～2023年3月)

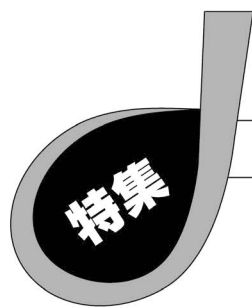
第22代金属材料研究所長)

2022年4月～現在 第56代日本鉄鋼協会会長

專門分野：金属組織学，鉄鋼材料学，相変態論

◎鉄鋼を中心とした構造用金属材料の組織および特性の制御に関する研究を、熱力学・速度論・結晶学など総合的観点から行っている。

★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★



# 鉄鋼組織学発展に見る科学・技術展開条件の考察 (1850～1925年頃までの西欧を基に)

沖 森 麻佑巳\*

表 1 1850～1900年頃 鋼の時代 の誕生.

## 1. 緒 言

鉄に様々な元素を添加し出現した鉄鋼材料は多様な組織を有し、強度、靱性、弾性、加工性、美麗性等を特性として、産業社会基盤を支えている。その特性は19世紀後半に出現し発展した鉄鋼組織学によって制御されている。特性に最も大きく影響する成分は炭素 C である。C 別に鋼を分類すると、薄板用の低 C 鋼(～0.10%)、厚板・鋼管・軌条等用の中 C 鋼(0.11～0.50%)、高 C 鋼(0.51%～)となる。本論では1850～1925年頃の西欧における鉄鋼組織学の変遷をトレースし、科学や技術の発展に必要な条件を考察する。それを基に重要課題 SDGs が鉄鋼材料に求めている現況と今後を考察する。

## 2. 19世紀後半における鋼の時代の登場

表 1 のように H. Bessemer(酸性底吹転炉)、P. Martin(平炉)、S. G. Thomas(塩基性底吹転炉)らの発明によって、鋼の大量生産が可能な「鋼の時代」が始まり、これに呼応して鋼の内部構造を解明する「鉄鋼組織学」の確立が課題になり、多くの研究者・技術者が活動した。英国では王立協会、鉄鋼協会が課題を共有化し活動を支えた。日本では明治期になって大島高任、田中長兵衛、野呂景義らの活動によってコークス高炉の操業技術の確立が進み、1901年に八幡製鉄所が操業を開始した。英国に半世紀遅れて、1915年に野呂が日本鉄鋼協会を設立し、産学が協力し鉄鋼業の発展を推進することになった<sup>(1)</sup>。

|      |                                        |
|------|----------------------------------------|
| 1856 | H. Bessemer / 酸性底吹転炉法で溶鋼を大量に製造, 脱Pに難   |
| 1858 | P. Martin / 平炉法で溶鋼を大量に製造               |
| 1859 | 大島高任 / 釜石で洋式木炭高炉の稼働に成功                 |
| 1869 | 第1回の英国鉄鋼協会大会が開催された                     |
| 1876 | W. Siemens / 平炉で鉄鉱石活用した精錬法を開発          |
| 1878 | S. G. Thomas / 塩基性耐火物施工の底吹転炉法, 溶鋼脱Pに成功 |
| 1880 | 官営釜石製鉄所の木炭高炉操業は失敗                      |
| 1886 | 田中長兵衛 / 釜石で小型木炭高炉の操業に成功                |
| 1894 | 野呂 / 石炭コークス化に成功, 釜石コークス高炉で銑鉄を製造        |
| 1901 | 官営八幡製鉄所の一貫製鉄設備の稼働開始, 立ち上げ失敗            |
| 1904 | 野呂 / 八幡製鉄所で大型コークス高炉で銑鉄製造               |
| 1915 | 野呂 / 日本鉄鋼協会を設立, 産学協力が体制化された            |

## 3. 鉄鋼組織学の基礎確立のマクロ変遷

図 1 のように鋼の時代における鉄鋼組織学の発展の主要な流れは、①  $\beta$  鉄論争<sup>(2)(3)</sup>に多くの研究者らが参画し、顕微鏡、温度・熱測定、熱処理、機械・硬度測定、磁気測定など様々な解析手法が登場し、鋼特性の分子レベルの解明、② X線回析法による結晶構造の原子レベルの解明<sup>(4)(5)</sup>、③基礎熱力学を応用した合金状態図による鋼の新材料の開発、鉄鋼熱力学による鉄鋼化学反応の解明<sup>(6)(7)</sup>である。

### (1) $\beta$ 鉄論争

$\beta$  鉄論争は Osmond の「鋼の高強度・高硬度の原因は、高温  $\beta$  鉄の急冷下での残存であり、 $\beta$  鉄と  $\alpha$  鉄は同素体関係」という「 $\beta$  鉄硬化説」(Allotropist)から1887年に始まった(図 2(a))。Osmond は「鉄中に 2 種類の Carbon があり、一つは  $\beta$  鉄中溶けており硬化を担う hardening Carbon、他は

\* 技術士事務所(金属・総合技術監理)(〒292-0042 木更津市清見台南 1-19-4)

Consideration on Condition of Deployment of Science and Technology from Development of Metallographic Structure of Steel (Based on Western Europe from 1850～1925); Mayumi Okimori (Professional Engineer; Metallurgy, Comprehensive Technical Supervision, Kisarazu)

Keywords:  $\beta$  iron controversy, dissolved hardening carbon martensite, X ray diffraction, phase diagram, thermodynamics, SDGs, trip steel, high tensile steel, neutron diffraction

2023年 1 月20日受理[doi:10.2320/materia.62.442]

|                         |                                                                                                                |                               |                                                                                         |                                                |                               |                                                       |    |                                                                                                       |    |      |
|-------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------|-------------------------------|-------------------------------------------------------|----|-------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|------|
|                         | 1850                                                                                                           | 60                            | 70                                                                                      | 80                                             | 90                            | 1900                                                  | 10 | 20                                                                                                    | 25 | 1950 |
|                         | ・日本刀<br>・大島高炉 '59<br>・石炭高炉<br>・Martin, 平炉 '58<br>・坩堝炉<br>・Bessmer, 底吹酸性転炉 '56<br>・パドル炉<br>・Thomas, 底吹塩基性転炉 '78 | ・明治元年 '68<br>・数学物理学会 '77      |                                                                                         |                                                | ・釜石高炉 '94                     | ・八幡製鉄所高炉 '01<br>野呂景義<br>・鉄鋼協会 '15                     |    | ・たたら稼働中止 '23<br>・金属学会 '21                                                                             |    |      |
| 相変態の相織                  | Sorby '63<br>・Microscope                                                                                       | Martens<br>・Spiegeleisen      | Sorby '86<br>Pearlite                                                                   | Howe '90<br>・Hardinite                         | Osmond '95<br>・Martensite     | Howe '03<br>・Austenite                                |    |                                                                                                       |    |      |
| 相変態温度<br>熱処理<br>焼入/焼戻   |                                                                                                                |                               | Le Chatelier '86<br>・Pt/(Pt+Rh)熱電対<br>Tschernoff '85<br>・焼入焼戻温度                         | Arnold '94<br>・リカレセンス<br>Osmond '85<br>・リカレセンス |                               | Honda '15<br>・リカレセンス                                  |    | Bain '30<br>・TTT曲線<br>・CCT曲線                                                                          |    |      |
| 固溶硬化<br>機械強度 硬度<br>合金成分 |                                                                                                                |                               | Osmond '85~'90<br>・β鉄硬化論<br>Sorby '86<br>・C起因硬化論<br>Austen, Osmond '88~'90<br>・合金の原子体積則 | R. Hadfield '94<br>・炭化物硬化論<br>・Mn鋼             |                               | Rosenhain '13<br>・引張強度<br>Benedicks '12<br>・鋼の相の固溶体論  |    | 的場幸雄, 澤村宏<br>・鉄鋼熱力学                                                                                   |    |      |
| 状態図 γ相<br>熱力学           | R. Clausius, '50<br>・熱力学第1,2規則                                                                                 | Gibbs '75~'78<br>・熱力学/自由エネ・相律 |                                                                                         | Austen '99<br>・Fe-C状態図                         | Roozeboom '00<br>・Fe-C状態図, 相律 | Honda '19<br>・Fe-C状態図                                 |    | H. Ellingham '44<br>F. Richardson '49<br>計算状態図                                                        |    |      |
| 磁化率, 磁化<br>磁気変態         |                                                                                                                |                               |                                                                                         | P. Curie '96<br>・Curie点                        |                               | Weiss, '11<br>・磁化率<br>Honda, '15, '19<br>・磁化率, Curie点 |    | Honda, '26<br>・Fe磁化容易軸                                                                                |    |      |
| 結晶構造<br>X線解析            |                                                                                                                |                               |                                                                                         | Rontgen '95<br>・X線発見                           |                               | Bragg '14<br>・ $2d\sin\theta=n\lambda$                |    | Westgren '21 '22 '28<br>・ $\alpha, \beta, \gamma, \delta$ 鉄構造, 高速度鋼<br>・Fe <sub>3</sub> C, Martensite |    |      |

図1 1850~1950年頃における鉄鋼組織解明のマクロの変遷。

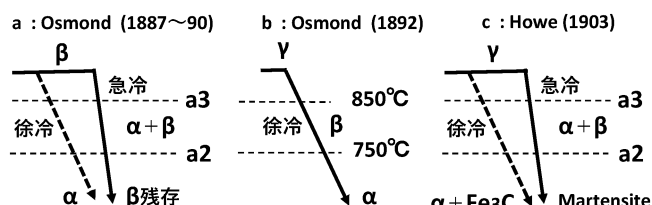


図2 Osmond, Howe による急冷下での相の出現。

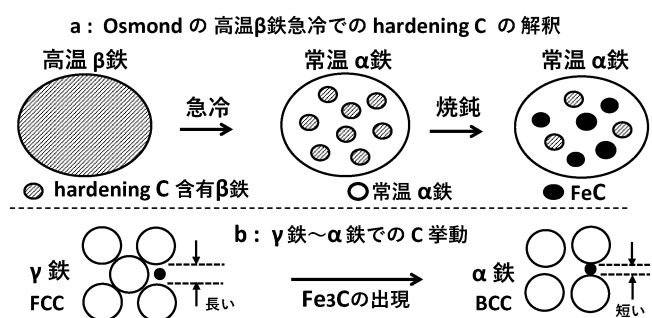


図3 鉄中のCの挙動(Osmondと現在の比較)。

焼鈍でFeと結合してFe<sub>3</sub>CをつくるCarbonである」と考えた(図3(a))<sup>(8)</sup>。β鉄硬化説に賛同したW. R. Austenは「鋼の焼入で含有成分元素の原子体積がβ鉄の硬化現象を支配する(Austen硬化則)」をOsmondに示唆した。Osmondは様々な成分を有する鋼で実験し「原子体積Vで評価すると、Fe(V=7.2)よりも小さいVをもつ元素を含有する鋼は硬化し、逆に大きいVをもつ元素を含有する鋼は軟化する」ことを明らかにした(表2)<sup>(9)</sup>。この硬化と軟化の区別がFe-X系状態図のγ相出現の規則性に関係した。1892年になってOsmondは「高温のγ鉄を徐冷すると、変態点a3=850°Cでβ鉄に、a2=750°Cでα鉄変態する」という見解を述べた(図2(b))<sup>(2)(8)</sup>。彼はLeChatelierが発明したPt/Pt-

表2 鋼の硬化、軟化に影響する合金元素の原子体積。

|          |        |       |         |         |        |        |
|----------|--------|-------|---------|---------|--------|--------|
| 硬化, β鉄生成 | C/3.6  | B/4.1 | Ni/6.7  | Mn/6.9  | Cu/7.1 | Fe/7.2 |
| 軟化, α鉄生成 | Cr/7.7 | W/9.6 | Al/10.5 | Si/11.2 | P/13.5 | S/15.7 |

Rh熱電対を測定試料に取付け、加熱と冷却における温度(起電力)を測定し、鉄が発生・吸収する時の温度a3点、a2点を、a3点のヒステレシスを明らかにした。β鉄硬化説に対して、R. Hadfield, J. O. Arnoldらは鉄中のC(炭素)そのものが鋼の硬化・軟化を支配するという「炭素硬化説(Carbonist)」を主張した<sup>(10)</sup>。Hadfieldは高Mn鋼(13.4%Mn, 1.05%C, 非磁性、粘りけがあり焼入処理しても普通鋼のように硬化しない)を発明した。Hadfieldは「高Mn鋼に浸C処理して急冷すると磁化が発生する」ことからCが関連すると思ったが、原因を明確にできなかった<sup>(10)</sup>(現在は磁性が生成Fe<sub>3</sub>Cに起因することが判明)。Arnoldは浸C処理した鉄中のCの分布、Feと元素(C, S, P, Ni, 他)の化学結合物の拡散などを研究し、a3点にヒステレシスが存在することを確認した。1890年頃のAllotropistとCarbonistは共に、鉄中のCの挙動をミクロな原子レベルの視点で示すことができず、長い論争に決着がつかなかった。現在では、鉄の原子間距離はγ鉄の方がα鉄よりも大きく、自由なCがα鉄よりもγ鉄中に多く取り込まれること、その差分がCementite出現に関与することが示されている(図3(b))。鋼の硬化に関しては1885年にロシアのD. Tschernoffは、0.8%C鋼を高温700~750°C以上から200°C以下に、4~5秒で焼入急冷すると鋼が硬化することを示した。1895年にOsmondは「高温のFerrite中のCementiteが温度低下しMartensite, Troostiteに変化し硬化C(hardening carbon)を含むMartensiteが出現する」と定性的に説明した(図4(a))<sup>(8)</sup>。Howeは1903年に「高温のγ鉄の急冷でMartensiteが出現する」と述べた(図2(c))。現在ではMartensiteは、γ鉄(面

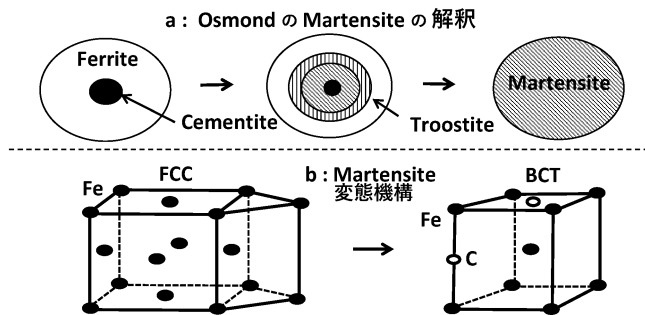


図4 Martensite 生成機構 (Osmond と現在の比較)。

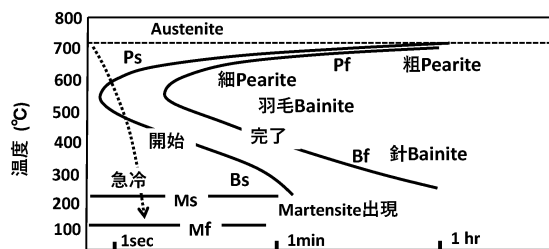


図5 焼入による Martensite 出現の考え方。

心立方格子, FCC)から Fe と C は無拡散で,  $\gamma$  鉄 (体心立方格子, BCC) に変態することが判明している (図 4(b)). 鋼の焼入処理では 1931 年に B. C. Bain が作成した TTT 曲線 (等温変態線図) から明らかなように, 急冷で Martensite が出現する (図 5). 実現場では CCT 曲線 (連続変態線図) を活用し鋼板の熱処理を実行している。

## (2) X 線回析法による鉄鋼の結晶構造の解明

以上のようなマクロな分子レベルでの解析が進んできたが, 様々な現象の主因が明確にはならなかったので, 1900 年前後には原子レベルの構造解析が要求されていた。それに応じて表 3 のように 1895 年に W. C. Rontgen が X 線を発見した以降, X 線の実態は W. L. Bragg が粒子説, M. T. F von Laue が波動説を主張した。Laue が ZnS 結晶に X 線照射し斑点像を得て (Laue 法), Bragg が X 線回析のブラッグ則  $2d \sin \theta = n\lambda$  を考案, D. J. W. Debye と P. Scherrer が多結晶の粉末回析法を開発した<sup>(3)</sup>。上記の基盤ができた後にスウェーデンの Arne Westgren が, 高温粉末回析法で鉄結晶の構造 ( $\alpha, \beta, \gamma, \delta$ ) を解明し,  $\alpha$  鉄と  $\beta$  鉄は体心立方構造 (BCC) であるとことを明らかにして  $\beta$  鉄論争に決着をつけた。彼は X 線回析法を駆使して, 格子定数の変化から  $\gamma$  鉄中の C は Fe 原子間の空隙部に不規則に分布していること, Martensite は変態後の格子定数測定から BCC であること (現在は体心正方晶 BCT と判明), 格子定数  $a, b, c$  を決定し  $\text{Fe}_3\text{C}$  は斜方晶であることを明らかにした<sup>(4)(5)</sup>。さらに高速度鋼の複雑な  $\text{M}_6\text{C}$ ・炭化物 ( $\text{Fe}_4\text{W}_2\text{C}$ ,  $\text{Fe}_3\text{W}_3\text{C}$ ), 窒化物などの構造を X 線回析法によって決定し, 優れた特性を有する特殊鋼の製造が進められることになった。

表 3 X 線回析学の進展。

|      |                                                                                                                     |
|------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1895 | Rontgen/陰極線の研究中に X 線を発見                                                                                             |
| 1911 | Bragg, Laue/X 線=ブラッグ粒子説, Laue 波動説                                                                                   |
| 1912 | Laue/X 線に対し結晶格子の回折格子化を予見                                                                                            |
| 1912 | Laue/ZnS 結晶に X 線照射し斑点像: ラウエ法考案                                                                                      |
| 1914 | Bragg/X 線回析のブラッグ則を考案, $2d \sin \theta = n\lambda$                                                                   |
| 1916 | Debye, Scherrer/多結晶の粉末 X 線回析法を開発                                                                                    |
| 1921 | Westgren/粉末回析法で鉄結晶構造 ( $\alpha, \beta, \gamma, \delta$ ) 解明<br>$\alpha$ 鉄と $\beta$ 鉄は共に体心立方構造 (BCC) = $\beta$ 鉄論争決着 |
| 1922 | Westgren/ $\gamma$ 鉄, Martensite で Fe 原子間に C が侵入<br>Westgren/斜方晶 $\text{Fe}_3\text{C}$ の格子定数 $a, b, c$ を決定          |

表 4 1850~1950 年の熱力学体系化と鉄鋼熱力学の発展。

|      |                                                                             |
|------|-----------------------------------------------------------------------------|
| 1850 | Clasius/熱力学の基本第 1 則, 第 2 則 を数式定量化                                           |
| 1858 | Kirchhof/反応温度変化=生成反応物の熱容量の差                                                 |
| 1865 | Clasius/エントロピー増大則の数式定量化                                                     |
| 1875 | W. Gibbs/不均質系の平衡で, 化学ポテンシャル $\mu$<br>Gibbs 自由エネルギー $G$ , 相律 $F = C - P + 2$ |
| 1882 | Helmholtz/ヘルムホルツ自由エネルギー $A$ の定量化                                            |
| 1900 | Roozeboom/Gibbs 相律を活用し Fe-C 状態図を作成                                          |
| 1901 | Lewis/非理想系溶体を扱う活量 $a$ (成分濃度) を導入                                            |
| 1932 | Randallら/化学物質の自由エネルギー $\Delta G_0$ を測定                                      |
| 1944 | Ellingham/ $\Delta G_0$ で反応難易性を判定=エリンガム図                                    |
| 1949 | Richardson/ $\text{O}, \text{C}, \text{H}$ の $\text{Po}_2$ 座標で酸化還元難易性判断     |

## (3) 鉄鋼の熱力学と状態図

表 4 のように産業革命期に蒸気機関を実用化した J. Watt や熱機関の理論化を進めた N. S. L. Carnot らの研究を経て 1850 年頃から Clasius, G. R. Kirchhof, J. W. Gibbs, H. Helmholtz らが熱力学の基礎確立を進め, 鉄鋼熱力学へと発展した。特に Gibbs は不均質系の平衡に関する研究で, 化学ポテンシャル  $\mu$ , Gibbs 自由エネルギー  $G$ , 相律  $F = C - P + 2$  ( $F$  = 自由度,  $C$  = 成分数,  $P$  = 相数) の新しい概念を創出した<sup>(6)</sup>。1899 年に W. R. Austen が Fe-C 状態図を作成し, 1900 年にオランダの H. Roozeboom は相律と 2 相の共存域発現の考え方 (自由エネルギー曲線  $G$  の共通接線) を活用してより詳細な Fe-C 状態図を理論的に研究し発表した<sup>(11)</sup>。炭素 C はじめ他の合金成分 X の Fe-X 系状態図の多くの研究から,  $\gamma$  相の出現には  $\gamma$  相の開放型, 拡大型, ループ型, 狭小型などの規則性があることが明らかになり実用合金の開発の指針になっている<sup>(12)</sup>。現在では当初の実験状態図からコンピューターの発達で計算状態図の時代になり, 汎用的計算ツール CALPHAD, Thermo-Calc, SOLGASMIX, FACT, Fact-Sage, Phase-Field などが開発され, 新合金開発に必須の手段になった。20 世紀になり様々な物質の酸化, 還元反応の Gibbs 自由エネルギー  $\Delta G$  が測定された。蓄積データを基に, H. J. T. Ellingham や F. D. Richardson らが  $\Delta G$  vs  $T$  で構成される簡単に反応の進行方向を判定できるチャートを考案し, 現在は実用現場の技術開発に不可欠なツールになっている<sup>(7)</sup>。

## 4. 科学・技術の発展に必要な条件の考察

### (1) 発展に必要な基盤条件

以上に述べた鉄鋼組織学の確立変遷をもとに科学技術の発展に必要な条件を考察し整理すると表5のようになる。①社会と産業界のニーズ、②周辺の科学技術の基盤成熟、③メタラジー現象の元素、原子レベルの解明などの「発展に必要な基盤条件」に加えて、④学会・協会活動による課題の取組み、⑤自由な討議と情報交換、⑥技術者・研究者達の向学心・好奇心などの「基盤の周辺を支える条件」が必要になる。

### (2) SDGs 視点からの必要条件

この表5を現時点の世界的な重要課題である「SDGs」の視点で見直すと表6となる。表6の「A：社会と産業界のニーズ」では、SDG13=大気変動、CO<sub>2</sub>削減とSDG7=エネルギー、省エネさらにSDG8、9=経済成長、産業、技術革新などから、高強度化による車体軽量化、電気自動車、水素自動車、燃料電池車(FCV)、Hybrid車の開発が必要になっている。上記のニーズに呼応するべく開発された軽量高強度車用の薄板鋼板、電気自動車用の電磁鋼板について述べる。「D：鉄鋼メタラジー新分野拡大」の自動車用薄鋼板については、図6の引張強度と全伸びの関係図で示す第1世代から第2世代、第3世代へとバラエティーに富む薄鋼板の開発が積極的に進められている<sup>(13)</sup>。例えば省エネ自動車には板厚みを薄くすることのできる高強度鋼板が採用され、加工

誘起変態を有する鋼板は自動車の衝突時にエネルギー吸収することができ、Trip鋼、高Mn Trip、Twip鋼板が広く適用されている。2040年に50%以上に到達する電気自動車EVには駆動モーター用の無方向性電磁鋼板が必要である。特に高磁束密度化については実現場の圧延では[100]磁化容易方向を出現させる2相域圧延法が開発され<sup>(14)</sup>、鉄損低減化では0.35mmの薄ゲージ化が可能になっている。このメタラジー新分野拡大を「B：周辺の科学技術の成熟」が支えており、例えば材料の直接観察を可能にしてきた電子顕微鏡、EBSD、SEM、TEMを経て、最近、新材料開発に適用されている新解析法の「中性子線回折」がある。中性子線はX線と同様にBragg回折則に従い、中性子線の有効侵入深さは大きく(数mmから数10mm)、結晶構造、磁気構造などの物質内部の情報を取得できる。結晶格子定数の測定では、100年前のWestgrenのX線回折は温度を固定した測定であったが、中性子線回折では温度を連続的に変化させて測定が可能で精密な情報を得ることが可能である<sup>(15)</sup>。さらに図7

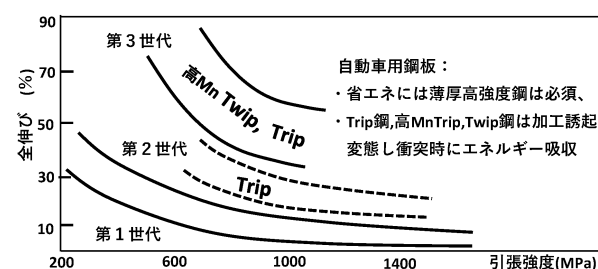


図6 薄板鋼板の引張強度と全伸びのマクロ的關係。

表5 西欧と日本の状況から考察した科学技術発展の必要条件。

| 1850～1925年頃までの西欧と日本の状況                                                                  | 必要条件                  |
|-----------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------|
| 英国は鋼の大量生産時代に入り、鋼の内部構造を解明できる鉄鋼組織学の確立が急務になっていた産業革命を推進し、さらに富国化を推進していた英国は、長期に蓄積した科学技術を基盤にした | ① 社会と産業界のニーズ          |
| 西欧は鉄鋼組織学の確立には、まず元素レベルの次に原子レベルの構造把握が必要になっていた                                             | ② 周辺の科学技術の基盤の成熟       |
| 英国は19世紀後半には王立協会、鉄鋼協会などの学会と産業界が課題を共有化し対応策を模索した                                           | ③ メタラジー現象の元素、原子レベルの解明 |
| 西欧のβ鉄論争でAllotrope, Carbonistが学会活動で自由に論争し課題の解決法が発見された                                    | ④ 学会・協会活動による課題の取組み    |
| 西欧では研究者Osmond, Arnold, Westgrenら、産業人Bessmer, Marten, Thomasらが登場した                       | ⑤ 自由な討議と情報交換          |
|                                                                                         | ⑥ 技術者・研究者達の向学心・好奇心    |

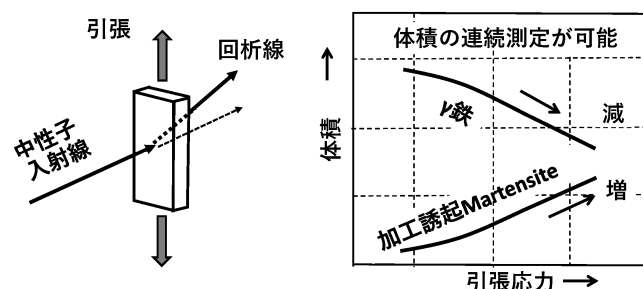


図7 引張試験中の中性子回折による体積の測定の考え方。

表6 最近の社会の動きと鉄鋼材料への要求と対応の事例。

|   | 評価の視点            | 現在の状況                                                                                                                                                                                                                                                |
|---|------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| A | 社会と産業界のニーズ       | <ul style="list-style-type: none"> <li>SDG8, 9: 経済成長, 産業, 技術革新 → 高強度化 = 車体軽量化</li> <li>SDG13 大気変動, CO<sub>2</sub>削減 → 電気自動車, 水素自動車(FCV), Hybrid車, Plug In HV,</li> <li>SDG7 エネルギー, 省エネ → リスク管理, 企業倫理, 技術者・研究者倫理,</li> <li>SDG12 製造責任・使用責任</li> </ul> |
| B | 周辺の科学技術の成熟       | 材料の直接観察 / 電子顕微鏡, EBSD, SEM, TEM, 中性子線回折等の新技術                                                                                                                                                                                                         |
| C | グローバル時代のデジタル情報制御 | Cpuサイエンス, Dataサイエンス, AI, Big Data活用, DX, 特許情報戦略                                                                                                                                                                                                      |
| D | 鉄鋼メタラジー新分野拡大     | 自動車用薄鋼板, 電磁鋼板, 耐水素鋼板                                                                                                                                                                                                                                 |
| E | 学会・協会・国の活動       | 産学共同研究: 量子線(放射線, 中性子線回折) Proj., 超微細粒鋼, 超鉄鋼, Super Metal, Material Innovation Proj.                                                                                                                                                                   |
| F | 自由な討議と情報交換       | 理系と文系の学際的な連携 → 天文学と材料学: 隕石組織から磁石開発                                                                                                                                                                                                                   |
| G | 技術者・研究者達の向学心・好奇心 | SDG8 働きがい → 若手研究技術者の活躍・理工学分野への女性進出・基礎研究開発の充実                                                                                                                                                                                                         |

のように引張試験下の試料を中性子線回析すると、組織の体積を連続的に測定可能で、 $\gamma$ 鉄が加工誘起 Martensite に変化していることが判定できる<sup>(16)</sup>。さらに「C：グローバル時代のデジタル情報制御」に示すように、逆解析で高強度合金の設計をする Data サイエンス、Big Data の活用などの新手法も重要になっている。「基盤の周辺を支える条件」として「A：学会・協会・国の活動」では、産学共同研究で量子線プロジェクト(放射線、中性子線回折)、新材料開発プロジェクト(超微細粒鋼、超鉄鋼、Super Metal, Material Innovation Proj.)などが新鉄鋼材料の開発に大きな役目を果たしている。他の重要な「SDGs」の項目として「A：社会と産業界のニーズ」に示す SDG12=製造責任、使用責任がある。企業と技術者・研究者は社会生活・産業活動において、正しい倫理観をもって行動し、リスク管理をしっかりと実行することが求められる。加えて「G：技術者・研究者達の向学心・好奇心」についても SDG8=働きがいの視点から、一層の若手研究技術者の活躍、理工学分野への女性進出はじめ、基礎研究開発の充実が重要となっている。

## 5. 結 言

現在の鉄鋼組織学を構成する基礎的な諸項目は、鋼の時代が始まった1850年から多くの研究者らの活動により確立された(図1)。鉄鋼組織学の変遷から、鉄鋼の科学技術の発展に必要な条件をピックアップした(表5)。当条件を、現在、注目されている「SDGs」の視点で考察した(表6)。考察すべき鉄鋼材料の事例は自動車用の薄板鋼板、電磁鋼板であり、その開発を支えるのは中性子回析技術、Data サイエ

ンス、産学協同の国プロジェクトなどである。近年、研究者・技術者や企業は社会的な責任を果たすべく、製造責任、使用責任、倫理的行動、働きがいなどに柔軟に対応し、科学・技術開発を推進することが求められている。

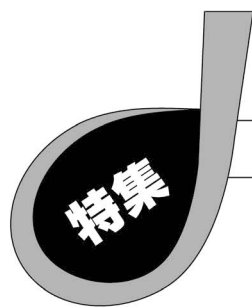
## 文 献

- (1) 沖森麻佑巳：金属，**89**(2019)，54-60.
- (2) 沖森麻佑巳：金属，**77**(2007)，39-45.
- (3) 沖森麻佑巳：金属，**77**(2007)，50-55.
- (4) 沖森麻佑巳：金属，**90**(2020)，57-63.
- (5) Arne Westgren: J. Iron Steel Inst., (1921), 303-337.
- (6) 沖森麻佑巳：金属，**88**(2018)，85-96.
- (7) 沖森麻佑巳：金属，**88**(2018)，66-74.
- (8) C. S. Smith: A History of Metallography, MIT Press, paper back edition (1988), 207-235.
- (9) M. F. Osmond: J. Iron Steel Inst., (1890), 67.
- (10) R. A. Hadfield: J. Iron Steel Inst., (1894), 156-180.
- (11) H. Roozeboom: Zeitsch. fur Phy. Chemie, (1900), 441.
- (12) 日本金属学会：金属便覧，5 版，丸善，(1990)，510.
- (13) 鳥塚史郎：ふえらむ，**26**(2021)，486-496.
- (14) 早川康之：鉄と鋼，**106**(2020)，2-14.
- (15) 友田 陽ら：鉄と鋼，**106**(2020)，29-37.
- (16) 土田紀之ら：鉄と鋼，**105**(2019)，64-72.



沖森麻佑巳

★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★  
 1972年 名古屋大学 金属鉄鋼工学 修士課程卒  
 1972年 新日本製鉄㈱八幡製鉄所入社，以降 光製鉄所などに勤務後  
 2001年 日鉄テクノロジー，日鉄住金テクノロジーの勤務を経て  
 2016年 現在 技術士事務所自営  
 専門分野：金属工学  
 ★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★



# 日本における製鉄プロセスの変遷と 未来に向けての最近の動向

日 野 光 兀\*

## 1. はじめに

本稿では、西洋の近代製鉄法直輸入に苦勞した明治時代の我国鉄鋼製造技術史を先ず紹介する。引き続き、大正、昭和時代の太平洋戦争終戦までの近世製鉄プロセス技術改良史、並びに戦後、世界一鉄鋼生産国となるまでの、我国独自の現代製鉄技術開発史を紹介する。最後に、直近の環境問題まで視野に入れた、未来に向けた、排出カーボンニュートラルを目指す新製鉄技術開発動向にも言及したい。

我国に於ける近代製鉄技術の導入動機は「海防」すなわち鑄鉄製大砲を製造することであった<sup>(1)</sup>。江戸末期、欧米列強はアフリカ内陸部の植民地化を終了し、最後の侵略対象を東北アジアとし、中国でアヘン戦争を開始し大清を大敗させた。これを受けて江戸幕府はヒュゲニン著「西洋鉄煩鑄造篇」を翻訳させ、これを参考にして、佐賀藩に命じて日本初の反射炉実証炉を建設させ洋式砲を鑄造した。その後、Matthew C. Perry が黒船で横浜浦に来航し開港を求め国中が大騒ぎになった。そこで萩藩は反射炉を建設した。更に水戸藩主徳川斉彬は那珂湊に反射炉を建設した。薩摩藩も集成館に反射炉を完成し青銅砲の鑄造に成功した。更に、伊豆荏山では江戸湾防衛のため反射炉が設置された。しかし、何れの藩でも鑄鉄製大砲製造は困難であった。

大島高任は、岩鉄(鉄鉱石)銑であってこそ優れた西洋式大砲ができると確信し、鉄鉱石を製錬できる炉、即ち西洋式高炉を築き、柔鉄(鉄鉱石から製錬した銑鉄)を作りたいと願望した。大島高任は、南部藩釜石地区大橋に洋式木炭高炉を建設し、試行錯誤の結果、1858年(旧暦安政4年12月1日)遂に操業初出銑に成功し、高炉製銑法の導入による近代製鉄の幕開けとなった<sup>(2)</sup>。

その操業の特徴<sup>(3)</sup>は、先ず、燃料・還元剤として木炭を用い、送風として水車動力を利用した木製箱型鞆の適用であった。2つ目の特徴は塊鉱石の使用と予備処理だった。即ち、磁鉄鉱(岩鉄)を整粒し、種焼竈で薪炭を用いて煅焼したことであった。

倒幕後、新樹立の明治政府は富国強兵のために工廠創設を目指したので、次にその経緯を記す。江戸幕府時代は海防のため海軍を創設していたが、ペリー艦隊来航から明治維新後初頭までに幕府海軍は政府軍務官兵器司へ引継がれた。一方、陸軍兵器製造施設の変遷を顧みると、徳川幕府末期には小石川に関口製造所、大阪城内に製造所が設置されていた。明治維新後、両施設は1868(明治元)年政府管轄に移行された<sup>(4)</sup>。

## 2. 明治期における近代製鉄法の創設<sup>(4)(5)</sup>

倒幕後、明治政府は近世・近代国家設立のため、「鐵は國家なり」の掛け声の下、富国強兵国家の建設を目指し、鉄を使用した武器の製造のため工廠を設置した。と同時に、殖産興業のために国内の鉄道施設と鉱業・重工業の興業に注力した。

### (1) 工廠の創設<sup>(4)-(8)</sup>

当時、兵力は輸入した主力艦船と兵器に依存していた。艦船兵器は機密保持のため国産化すべきという国策に則り、新政府は工廠を創設することにした。しかし、製鋼技術の急速な自立と発展を見ることになるのは1905(明治38)年の日露戦争終戦以降である。その後、陸軍造兵廠と海軍工廠は全国20か所にまで拡充された<sup>(6)-(8)</sup>が、これらの工廠は太平洋戦争敗戦により全面閉鎖された。

\* 東北大学名誉教授

Changes of Modern Iron- and Steel-Making Process since Meiji Period and Current Topics of the Future in Japan; Mitsutaka Hino (Emeritus Professor, Tohoku University, Sendai)

Keywords: iron-making process, steel-making process, Meiji period, modern process, future process, history of steel industry

2023年2月22日受理[doi:10.2320/materia.62.447]

表1 造兵工廠における西洋からの製鋼技術の導入例.

|             |                                                                                        |
|-------------|----------------------------------------------------------------------------------------|
| 1870(明治 3)年 | 原田宗助 英アームストロング社で7年間坩堝製鋼法習得                                                             |
| 1875(明治 8)年 | 東京築地に海軍省兵器局兵器製造所設置                                                                     |
| 1878(明治11)年 | 大河平才蔵、坂本俊一(両者のち海軍造兵大監)<br>兵器材料習得のため独クルップ社へ派遣                                           |
| 1881(明治14)年 | 帰国                                                                                     |
| 1882(明治15)年 | 築地で3tコークス焚坩堝製鋼法を開始<br>我国としての近代製鋼の創始 ヤスリ地金溶製                                            |
| 1883(明治16)年 | 兵器製造所は芝赤羽に移行<br>堅鉄榴弾を初試作                                                               |
| 1884(明治17)年 | 粘土、黒鉛、玉鋼など全て国産原料を用いて<br>クルップ式砲門、鋼楯鑄造成功 (明治21)                                          |
| 1889(明治22)年 | 兵器製造所は海軍造兵廠と改称 向井哲吉独留学                                                                 |
| 1894(明治27)年 | 日清戦争開戦 小杉辰三米留学、吉田正心英留学<br>口径47mm以下の鍛鋼榴弾製造、 (明治28)<br>口径47mm砲身試作成功<br>併せ湯で溶鋼高166t溶製可となる |

海軍工廠における西洋からの製鋼技術の導入法の一例<sup>(6)-(8)</sup>を示せば表1のようになる。先ず将校である原田宗助を兵器製造会社である英国アームストロング社に派遣し、7年間坩堝製鋼法を習得させ、訓練した製鋼設備を購入して帰国し、工廠で習得した技術を工員に伝承するという人材育成法を行った。それ以降も同様な技術導入、人材育成法を踏襲した。

## (2) 官営製鐵所設立

### (a) 官営中小坂製鐵所<sup>(4)(9)(10)</sup>

当時、鋼材は未だ国産がなかったので、国産にすべく、官営製鐵所の設立が望まれた。群馬県中小坂で、山一組が1874(明治7)年洋式製鐵所操業を開始していた。しかし政府資金の供与が得られず、1878(明治11)年申し出て官営化され、1881(明治14)年まで操業継続された。これが我国に於ける最初の官営製鐵所である。しかし、採算が取れなくなり、同年民営化され、その後、1908(明治41)年操業を中止した。現在は、当時の石垣と焙焼炉が残っているだけである。

中小坂製鐵所建設では英国式高炉設備一式を輸入した。操業は3人の雇用外国人技師の指導の下開始された。製鐵所では直ぐ裏山の鉄山で産出される磁鉄鉱を採掘し、同時に木炭も生産してトロッコで運搬し、磁鉄鉱を酸化焙焼して、これを矢張り地元産の石灰石と共に装入して木炭高炉で操業した。

### (b) 人材育成<sup>(11)-(14)</sup>

新政府は維新直後の1871(明治4)年から3年間岩倉遣欧使節団を欧米に派遣し近代国家設立のため、殖産興業のための人材育成にも注力した。

同行した大島高任はドイツフライベルクに単独調査に入り、「1860年までの製鉄法は廃業している。当今の方法は、ここ三年ばかりの間に開発されたものである。勿論、未だ書籍にその新方法を著したものはない。よって私に2カ月の滞在をこのフライベルクの地に許して頂きたい」と上申し、伊藤博文(全権副大使)はこれを認め、帰国は延期され、ヨーロッパ最古の鉱山大学フライベルク大学に留学し、西洋の最も新しい製鉄法を身につけて、1873(明治6)年6月に帰国した。その後、明治政府は同大学に毎年1~2名の留学生を派遣し続け、鉄鋼分野の人材育成に努めた。

### (c) 官営釜石製鐵所<sup>(2)</sup>

中小坂での操業失敗後、政府は、官営釜石製鐵所を1880(明治13)年9月に操業を開始した。山田純安を中心に英人8名、独人2名が指揮をし、動力送風を用いた木炭並びにコークス高炉操業をし、パドル炉による鍊鉄生産を試行した。官営釜石製鐵所設置の歴史的な意義は、1881(明治14)年コークス生産を開始し、日本初のコークス高炉の操業を試みたことである。しかし深刻な財政、金融大整理時代に伴う財政事情、木炭不足のため、1882(明治15)年事業継続を断念し、1883(明治16)年廃業し操業は失敗した。

### (d) 釜石鑛山田中製鐵所の近代製鉄法への貢献<sup>(2)</sup>

次に釜石鑛山田中製鐵所の創設について触れておきたい。1883(明治16)年、前薩摩藩御用商人で官省御用達商人である田中長兵衛は官営釜石製鐵所敷地と鉱石、木炭の払い下げを受けて操業復興再開を試みた。大島高任時代の容量規模の大野木炭高炉の操業再開を試み、1886(明治19)年10月16日に49回目の操業で遂に初出鉄に成功した。

この成功を受けて、工科大学教授野呂景義を顧問として参

画を仰ぎ、野呂景義の門下生である香村小録を技師長に任じて、官営時代の英国式高炉・熱風炉の設計上の欠陥を修正し、鉾石焙焼炉を設置して、1893(明治26)年 25 t 高炉 1 基を改修・復活させるのに成功した。

これまでの西洋式製鉄法の我国への導入は、最新の設備を購入し、イギリスやドイツから技師を連れて来て操業指導して頂いたのに全て失敗してしまった。

その原因を考察した、「明治日本の産業革命遺産」世界遺産協議会委員であった元新日鐵の稲角<sup>(15)</sup>は、日本で産出した鉄鉾石と、英国や欧州大陸で産出した鉄鉾石の種類の違いを指摘している。日本で産出した鉄鉾石は磁鉄鉾で、欧州で多く産出していた赤鉄鉾や褐鉄鉾と異なり、今の進んだ科学で判ったことであるが、還元し難い鉄鉾石であったと指摘している。非常に緻密組織である磁鉄鉾は一端酸化させ赤鉄鉾にすると鉾物組織が非常に粗なり還元し易くなることが現在では知られている。即ち、磁鉄鉾には焙焼工程が非常に重要な工程になる。

大島高任が成功した秘訣は確かにこの種焼の実施であった。釜石鑛山田中製鐵所での成功も、野呂景義による鉾石の焙焼工程の徹底であった。この問題は、後に述べる、官営八幡製鐵所の立上げの時も、また繰り返され、野呂景義によって再度指摘された。

田中製鐵所の歴史的意味は、1894(明治27)年 8 月、我が国最初の炭化室分離型のコペー式コークス炉を新たに設置し、木炭に代わって北海道夕炭炭を焼成したコークスを使用

し、国内初のコークス銑生産に成功したことである。その生産量は年間 8,000 t にも達した。我国の翌年の高炉銑生産量は大きく飛躍し砂鉄銑を初めて上回った。また、5 t 塩基性平炉 2 基を設置し、1903(明治36)年 3 月、我国で初めて鉄鋼一貫体制を確立せしめたことであり、御雇外国人は一切採用せず、日本技術者の育成・成長を社内で行ったことがその後の日本国内製鉄所増設に大いに貢献した。企業として成功できた大きな要因の一つは大阪砲兵工廠を客先として確保出来ていたことであると思われる。1894(明治27)年 7 月には日清戦争が勃発し1895(明治28)年 3 月まで戦争は継続したため、鉄鋼需要は大きく強まり、企業規模も大いに拡張された。

(e) 官営八幡製鐵所<sup>(11)(12)(16)(17)</sup>

この状況を受けて官営製鐵所設立の機運が再度起こった。このような時代背景のもと、官営八幡製鐵所は日清戦争終戦 6 年後で日露戦争開戦 3 年前の1901(明治34)年、殖産興業を目標に、鉾業・重工業の興業、国内への鉄道の施設、均質鋼種の大量生産を目指して稼働を開始した。

操業開始当時の八幡製鐵所鋼材生産規模は、その後大島道太郎により日清戦争終戦後の急激な鋼材需要増加、輸入銑鉄と鉄鉾石増加への対処案として大幅に変更され、増強案が採用された。製鋼炉としては、操業当初から平炉と同時に Bessemer 転炉も導入した。1901(明治34)年には U. S. Steel も設立されたが八幡に比較にならない程の大規模操業であった。

表 2 我国の明治期における近代製鉄設備初実機化系譜<sup>(4)</sup>。

| 西暦(和暦)年      | 製鉄設備         | 炉容         | 最初の設置場所   |
|--------------|--------------|------------|-----------|
| 1858(安政 5)年  | 木炭高炉         | 高さ 6m      | 釜石大橋鉄山    |
| 1874(明治 7)年  | 蒸気機関熱風炉      | 10,20,30HP | 中小坂鉄山     |
|              | パドル法         | 60 t/m     | 中小坂鉄山     |
| 1882(明治 15)年 | コークス専焼坩堝製鋼   | 3 t        | 築地兵器製造所   |
| 1890(明治 23)年 | 重油焚酸性平炉      | 5 t        | 横須賀鎮守府    |
|              | 酸性平炉         | 250 kg     | 大阪砲兵工廠    |
| 1894(明治 27)年 | コークス高炉       | 25 t       | 釜石鑛山田中製鐵所 |
| 1896(明治 29)年 | 塩基性平炉        | 3 t        | 大阪砲兵工廠    |
| 1899(明治 32)年 | Ni-Cr 鋼塊の初生産 |            | 大阪砲兵工廠    |
|              | 平炉国産初築造      | 8 t        | 東京砲兵工廠    |
| 1901(明治 34)年 | 塩基性平炉        | 25 t       | 官営八幡製鐵所   |
|              | 酸性転炉         | 10 t       | 官営八幡製鐵所   |
| 1911(明治 44)年 | エルー式アーク炉     |            | 海軍工廠      |
| 1917(大正 6)年  | 誘導炉          | 3 t        | 官営八幡製鐵所   |
|              | 塩基性電気炉       | 3 t        | 呉海軍工廠     |
| 1938(昭和 13)年 | 塩基性転炉        | 20 t       | 日本鋼管      |

大島道太郎が留学時代の恩師レーデブア教授の助言に従って、計画策定と設備機器の発注を行い、操業への助力はドイツ人技師に囑託した。が、立ち上げには多くの難題を抱え、その多くのドイツ人技師帰国後、多くの日本人の努力によって、数年以上かけてやっと操業に成功した。

### (3) 我国の明治期における近代製鉄設備初実機化系譜

我国の明治期における近代製鉄設備が初実機化した系譜<sup>(4)</sup>を一括して示せば表2のようになる。このように一覧すると、我国における製鉄製鋼技術の導入の多くは陸海軍工廠から始まっていることが理解できる。

明治期の我国鉄鋼業は欧州技術の移植・培養時代で、経済的には未だ独立自主の段階に入っておらず、軍工廠と官営八幡製鐵所が発展の原動力で、何れも熱心に海外の近代技術を模倣し、熟練を積み重ねていった時期であった。

## 3. 大正期から太平洋戦争終戦までの製鉄事情の変遷

### (1) 明治時代末期～大正時代 現存する民間製鉄企業の創設

明治時代末期に創設されて現存する主な民間製鉄企業は以下の通りである。1905(明治38)年神戸製鋼所、1907(明治40)年日本製鋼所、1909(明治42)年現在の日本製鉄室蘭製鉄所、1903(明治36)年日立金属工業、1906(明治39)年JFEスチール、1916(大正5)年大同特殊鋼などは、本格操業は大正時代に入ってからである。その他の大手製鉄企業も大正から昭和以降に操業を開始した。

### (2) 日中戦争・太平洋戦争中の動向<sup>(18)</sup>

日中戦争・太平洋戦争中の動向を概観する。1931(昭和6)年満州事変開始、1933(昭和8)年国際連盟脱退以降、日本は世界各国から締め出されて、1939(昭和14)年日米通商航海条約破棄を通告され、1940(昭和15)年米国から屑鉄の日本輸出禁止、1941(昭和16)年対日石油輸出全面禁止を通告され、製鋼原料が極端に不足する状態に陥ってしまった。そしてついに同年12月に太平洋戦争を勃発させてしまった。

そこで、製鉄原料を確保すべく、現在の北朝鮮や、満州、西太平洋南方諸島の鉱山を占領し、多くの現地の製鉄所の操業を占有し、生産した鉄鋼を国内に移送し始めた。

## 4. 太平洋戦争終戦後の復興期から経済高度成長期における製鉄プロセスの変遷

### (1) 戦後復興期の系譜<sup>(18)</sup>

しかし、1945(昭和20)年太平洋戦争敗戦によってこれらの外地の製鉄資源・製鉄所は全て手放すことになり、国内でも八幡・釜石・室蘭などの大きな製鉄所は空襲や艦砲射撃を受け主要製鉄設備壊滅状態となってしまった。

戦後になって、GHQの命令により、1946(昭和21)年財閥解体が本格化し、製鉄の世界でも、過度経済力集中排除法により1950(昭和25)年、日本製鐵が解散された。

戦後、我国の鉄鋼業界では、国の基幹産業である鉄鋼産業を再興しようと多くの方々が最大限の努力を払われた。1949(昭和24)年6月朝鮮動乱が勃発し、特需景気により、鉄鋼生産量も急激に回復した。

1951(昭和26)年から1965(昭和40)年に亘って、第1次、第2次、第3次合理化政策が遂行された。その頃、池田首相により提唱された“所得倍増計画”と相まって、世の中が好景気に見舞われた。1969(昭和44)年3月、八幡製鐵と富士製鐵が合併し、超大製鐵会社の新日本製鐵が発足した。

### (2) 経済高度成長期における製鉄プロセス

#### (a) 少資源国日本の貿易立国指向

1961(昭和36)年からの第3次合理化政策では、八幡製鐵君津、日本鋼管福山、川崎製鉄水島などが着工された。その後も、住友金属鹿島製鉄所、新日鐵大分製鉄所、神戸製鋼所加古川製鉄所などの大製鉄所が続いた。何れも、少資源国の日本が貿易立国を目指した臨海製鉄所であった。これらがその後の世界における製鉄所立地のモデルとなった。

我国の高度成長時代には、豪州産綿状粉鉄鉱山開発投資・大量買付と高炉の大型化が行われた。この時、高炉操業の進歩・改善の追求が熱心に討議され、そこでは、1943(昭和18)年創設された産学官共同研究機体制である日本学術振興会製鉄第54委員会と日本鉄鋼協会の製鉄部会、コークス部会、耐火物部会等の貢献が非常に大きかったと言われている。

#### (b) 戦後の転炉製鋼法の技術開発<sup>(19)</sup>

現代の製鋼技術の先駆となった純酸素上吹転炉製鋼法は、第2次世界大戦後の1950年頃から急成長した技術であり、実態としては、LD試験転炉は1949(昭和24)年オーストリアで初稼働し、我国では、50tLD炉が八幡製鐵所で1956(昭和31)年に生産作業開始された。1970年頃から開発され始まったOBM純酸素底吹転炉は1967(昭和42)年ドイツで操業開始され、我国では1977(昭和52)年川崎製鐵に230tQ-BOP炉が導入され、操業開始された。1980年頃になると、川崎製鐵は150tLD-KGC、250tK-BOPなどの改良技術開発を行い、1984(昭和59)年から実操業を開始した。

その結果、第2次世界大戦中の主要製鋼炉であった平炉から、世界でいち早く転炉に切り替えることに成功した<sup>(20)</sup>。1960年以降の我国における新製鋼技術導入・改良・開発により、日本の鉄鋼業は世界に誇る技術開発に成功し、鋼材の質、生産量ともに世界のリーダーになることができた。

この製鋼工程でも、1934(昭和9)年創設された日本学術振興会製鋼第19委員会と日本鉄鋼協会の製鋼部会、電気炉部会、特殊鋼部会、耐火物部会、分析技術部会等の貢献が非常に大きかったと言われている。ここで盛んに討議されたのは、高純度鋼精錬のための機能分化や高速吹錬による生産性の向上であった<sup>(21)</sup>。

しかし、1996(平成8)年になると、中国の鉄鋼生産量は我国を上回り、現在は我国生産量の10倍程に達している<sup>(20)</sup>。

## 5. 未来に向けての最近の動向

ところで最近、異常気象の主原因は、地球温暖化であると盛んに議論されている。この起源は、大気中の二酸化炭素濃度の上昇が主であると言われている。日本全体のエネルギー起源 CO<sub>2</sub> 排出に占める各部門の割合は産業部門が最大だと指摘されている。その中で、鉄鋼産業が43%も占め、圧倒的に大きく、世間から白い目で見られている。2020年10月、菅首相は初の所信表明で「産業・社会に変革」を起こすと、「温室ガスを2050年までにゼロ」にすると宣言した。鉄鋼業界を始め、排出業界は対応を迫られているが、「コストが上がり立ち行かない」、「どうしても出る CO<sub>2</sub> まで『なくせ』」と言われたら、どうなるのか」と多くの戸惑いの声が上がっている。

### (1) 「環境調和型製鉄プロセス技術開発」(COURSE50)<sup>(22)</sup>

実は、日本鉄鋼業界では、排出 CO<sub>2</sub> を減少させようと、産学官一体となって、既に「環境調和型製鉄プロセス技術開発」(COURSE50)を2008(平成20)年にスタートしている。このプロジェクトでは、製鉄プロセスで排出される総量中の7割を占める高炉工程で、高温にする燃料と鉄鉱石の還元剤としてコークスが使用されているが、コークス炉から発生するガスを変性し水素を発生させ、高炉内の還元剤として代替させ、発生する CO<sub>2</sub> を減少させるというものである。このプロジェクトは前半の10年間は既に終了し、日本製鉄君津製鉄所に試験高炉を設け、その後も実機化に向けた試験が鋭意継続されている。

このプロジェクトでは、高炉から排出された CO<sub>2</sub> を分離回収することも行っている。この CO<sub>2</sub> は地中深くパイプで送り込んで貯留し、炭酸塩の岩塩にして安定化させるという別のプロジェクトも推進中で、現在、苫小牧で実地試験が行われている。これらのプロジェクトを成功させるためには、現存の鉄鋼製造設備に加えて、新たに設備を改修・増設する必要があり、多額の投資を必要とする。

一方欧米では10数年前から高炉法に依らない、Alternative Iron-making の技術開発が盛んに行われている。このプロジェクトは、我国ではほとんど期待できないが、世界広く埋蔵が確認されている天然ガスを改質して、水素で鉄鉱石を還元し、直接還元鉄を生産するという製鉄法である。この場合、排出ガスは水蒸気と炭酸ガスとなるが、排出 CO<sub>2</sub> 量は高炉法に比較すると圧倒的な少量になる。

このような大きな世界の動きは日本鉄鋼業界でも無視する訳にはいかず、極最近、大きな合理化を実行し、合わせて、高炉操業を止めて、CO<sub>2</sub> 排出量が極少量で済む、スクラップを原料とする電気炉法に置き換える動きが顕著になってきている。

また、製鉄業の海外進出や、産業構造の変革に乗り出すという事も盛んに行われ始めている。

### (2) 「ゼロカーボン・スチール」の実現に向けた技術開発プロジェクト<sup>(23)</sup>

そこで極直近では、日本鉄鋼業界では総力を挙げて「ゼロカーボン・スチール」の実現に向けた技術開発プロジェクト」が金属系材料研究開発センター JRCM の指揮の下、スタートしている。即ち、高炉製鉄法では還元剤として水素のみを使用し、燃料であるコークスから排出する CO<sub>2</sub> はメタノール生成原料として有効利用する。これまでの一部の高炉の代替としては、シャフト炉、流動層を使用して水素による直接還元鉄を製造し、これを電気炉製鋼法に原料として使用するというものである。

日本の鉄鋼生産量は、最近急速に生産量を伸ばしているインドに抜かれて、世界第3位で、8千万トンから9千万トン位になっている。今後最盛期の一億トンはもはや見込まれず、最近のベトナム、インドネシアの急成長振りを考慮すると6千万トンに低迷することもありうると思われる。また天然ガスを利用して、還元鉄を製造しているトルコ、イラン、メキシコの急成長も注目される。最近変動が激しい3年間の熱延コイルの価格変動を比較すると、日本の価格を欧州並みとすると中国産の3割高となっている。

このようにしてみると、貿易立国日本の鉄鋼業を取り巻く、世界情勢は大きな変節を迎えていることが理解できる。

## 6. おわりに

おわりに、日本の鉄鋼業のこれからについて、余りに個人的意見であるが、将来展望を記す。

中国は世界最高級で最新の設備投資をして、日本の鉄鋼生産量の10倍を製造し、世界鉄鋼の6割弱を生産している。我が国が従来の製鉄法に比較して、CO<sub>2</sub> 排出量を3割減できるとしても、果たしてこの中国が、新たな資本投資をして、COURSE50と同様の鉄鋼製造法を採用するだろうか。中国、日本を除いて、Alternative Iron-making に舵を切った欧米を見ると、天然ガスを産出しない我国は、還元鉄生産を含め製鉄を日本国内で行うのが正解なのだろうか。

スクラップを原料とする電気炉法に日本も米国並みにもっともって重点を移してもよいのではないかと思う。電気炉製鋼法では、自動車用鋼板などの高級鋼は生産できないと言われ続けているが本当なのだろうか。電炉法における不純物除去法の原理は、産学官挙げて既に20年前に明らかにしている。しかし当時、確かに不純物低減は十分に可能だが、現行の製鋼法に比較して金が掛かり過ぎると言われ、お蔵入りになってしまった。しかし直近の多額の設備投資を必要とするゼロカーボンの動きを観た時には、もう一度お蔵から引き出して、再検討してもよいのではないかと考えている。

## 文 献

- (1) 加藤康子監修：世界遺産 明治日本の産業革命遺産 製鉄・製鋼、造船、石炭産業、「明治日本の産業革命遺産」，世界遺産協議会発行，(2015)．
- (2) 日野光元：ふえらむ，**24**(2019)，596．
- (3) 北の鉄文化，岩手県立博物館，(1990)，152．
- (4) 日野光元：日本鉄鋼協会「鉄の技術と歴史研究フォーラム」第40回フォーラム論文集，幕末・明治期の鉄研究会第1回講演会，(2022)，5．
- (5) 日本鉄鋼史．明治篇；日本鉄鋼史編集会編，小島精一，他著，五月書房，(1945)．
- (6) 戦前軍用特殊鋼技術の導入と開発(旧陸海軍鉄鋼技術調査委員会報告書)，日本鉄鋼協会，(1991)．
- (7) 堀川一男：海軍製鋼技術物語 大型高級特殊鋼の製造技術の発展，アグネ技術センター，(2000)．
- (8) 堀川一男：続海軍製鋼技術物語 米海軍「日本技術調査報告書」を読む，アグネ技術センター，(2003)．
- (9) 飯田賢一：日本鉄鋼技術史，東洋経済新報社，(1979)．
- (10) 大橋周治：幕末明治製鉄史，アグネ，(1991)．
- (11) 矢島忠正著，日野光元監修：官営製鐵所から東北帝國大學金属工學科へ，東北大学出版社，(2010)．
- (12) 日野光元：ふえらむ，**23**(2018)，43，90．
- (13) 佐々木正勇：研究紀要，日本大学人文科学研究所，(1985)，31，26．
- (14) 松尾展成：岡山大学経済会雑誌，**29**(1998)，4，187．
- (15) 稲角忠弘：かまいしの鐵学，**1**(2022)，16．

- (16) 北九州産業技術保存継承センター『北九州市産業技術史調査研究 八幡製鐵所の設備・技術の変遷』第1-4分冊, (2008-2010).
- (17) 史料が語る八幡製鐵所の歴史, 新日鐵住金編, (2013).
- (18) 戦後復興期におけるわが国鉄鋼技術の発展, 戦後技術史調査小委員会編集, 日本鉄鋼協会, (1992).
- (19) わが国における酸素製鋼法の歴史, 鉄鋼科学・技術史委員会製鋼ワーキンググループ編集, 日本鉄鋼協会, (1982).
- (20) 創立100周年日本鉄鋼協会史, 日本鉄鋼協会, (2015).
- (21) 第百巻記念特集号 鉄鋼技術, その百年の足跡: 鉄と鋼, **100** (2014), No. 1.
- (22) 「環境調和型製鉄プロセス技術の開発/水素還元活用製鉄プロセス技術開発(STEP2)」事後報告書, 国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構研究評価委員会, (2017).
- (23) JRCM NEWS No. 428, 金属系材料研究開発センター, (2022年8月).



日野光兀

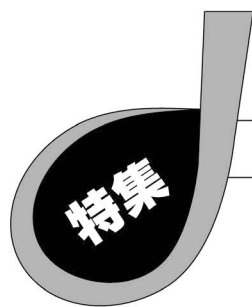
★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★

1975年 東北大学大学院工学研究科金属工学専攻単位取得退学  
元東北大学大学院教授，元北海道職業能力開発大学校校長

2009年4月—東北大学名誉教授  
専門分野：鉄鋼製錬学

◎鉄鋼製錬工程の反応機構解明や熱力学的解析に従事。溶鉄，溶鋼，溶融合金，溶融スラグの熱力学モデルの提言や熱力学データの測定，データ集の編集を中心に活躍。鉄鋼業界を取り巻く環境問題修復の課題についても研究多数。

★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★



# 鉄ベースの水素貯蔵材料研究のこれまでの 進展と今後の展開

佐藤 豊人\* 齋藤 寛之\*\* 折茂 慎一\*\*\*,\*\*\*\*,\*\*\*\*\*

## 1. はじめに

カーボンニュートラルを達成するために再生可能エネルギーを利用して水素を製造・貯蔵・利用する社会(水素社会)の構築が切望されている。本特集では、汎用的に利用されている鉄をベースにする水素貯蔵材料の研究に関して、これまでの進展、および今後の展開を解説する。

## 2. 水素貯蔵技術

水素貯蔵技術は、水素が高压下で圧縮された高压貯蔵、極低温下で液化された液化貯蔵、固体として貯蔵される水素貯蔵材料が挙げられる<sup>(1)</sup>。高压貯蔵は、燃料電池車に搭載され、液化貯蔵は、オーストラリアで製造された水素を液化して日本へ海上輸送する実証実験が進められている。高压貯蔵と液化貯蔵は、水素が分子として貯蔵されるが、水素貯蔵材料は、水素が原子として水素貯蔵材料の格子間位置に侵入、又は金属・非金属元素と化学結合して貯蔵される<sup>(1)-(4)</sup>。材料を構成する原子配列内に大きな空隙を有する金属有機構造体(Metal Organic Frameworks: MOFs)や比較的大きな表面積を有する炭素系材料等も水素貯蔵材料であるが、これらの場合、空隙内や表面に水素を分子状態で貯蔵・吸着する(物理吸着)<sup>(3)(5)</sup>。水素分子として貯蔵される高压貯蔵や液体貯

蔵は、水素分子間の反発に起因して体積当たりの水素量を $70 \text{ kgH}_2/\text{m}^3$ 以上にすることが困難であるが、水素原子として貯蔵される水素貯蔵材料は、水素分子間の反発を回避できるため、高压水素や液体水素よりもコンパクトな水素貯蔵が可能である(多くの水素貯蔵材料の体積当たりの水素量: $90 \text{ kgH}_2/\text{m}^3$ 以上)<sup>(1)-(4)</sup>。そのため、水素貯蔵材料は、省スペースでの水素貯蔵が求められる定置型のエネルギー供給システム等に利用されている<sup>(6)</sup>。

## 3. 金属中での水素の吸蔵・放出反応

水素貯蔵材料は、水素との反応により原子レベルで水素が吸蔵・放出される。図1に金属中の水素の吸蔵・放出反応に関する概念図を示す。水素ガス(水素分子)は、金属の表面で水素原子に解離し、表面から格子内に拡散して固溶体相が形成される。その後、水素は、格子間位置に侵入、又は金属・非金属元素と化学結合(イオン結合、又は共有結合)して水素化物相を形成する(水素吸蔵反応)。吸蔵された水素は、圧力、又は温度制御により水素ガスとして放出され、水素吸蔵反応の逆反応で金属へ戻る(水素放出反応)。即ち、水素吸蔵反応は、水素化物の形成反応を示し、水素放出反応は、水素化物の分解反応を示す。

周期表の1-5族の金属元素は、水素と高い親和性を有するため、水素と反応して二元系水素化物(例:  $\text{LiH}$ )を形成し

\* 芝浦工業大学工学部機械機能工学科; 特任准教授(〒135-8548 東京都江東区豊洲 3-7-5)

\*\* 国立研究開発法人量子科学技術研究開発機構量子技術基盤研究部門関西量子科学研究所放射光科学研究センター水素材料科学研究グループ; グループリーダー

\*\*\* 東北大学材料科学高等研究所; 所長

\*\*\*\* 東北大学金属材料研究所; 教授

\*\*\*\*\* 高エネルギー加速器研究機構物質構造科学研究所; 客員教授

Progress in Iron-based Hydrogen Storage Material Researches; Toyoto Sato\*, Hiroyuki Saitoh\*\* and Shin-ichi Orimo\*\*\*,\*\*\*\*,\*\*\*\*\*  
(\*Department of Engineering Science and Mechanics, College of Engineering, Shibaura Institute of Technology, Tokyo. \*\*Foundational Quantum Technology Research Directorate, National Institutes for Quantum Science and Technology, Sayo-gun, Hyogo. \*\*\*Advanced Institute for Materials Research (WPI-AIMR), Tohoku University, Sendai. \*\*\*\*Institute for Materials Research, Tohoku University, Sendai. \*\*\*\*\*Institute of Materials Structure Science, High Energy Accelerator Research Organization (KEK), Tsukuba)

Keywords: *hydrogen storage materials, crystal structure, hydrogen, iron*

2023年3月3日受理[doi:10.2320/materia.62.453]

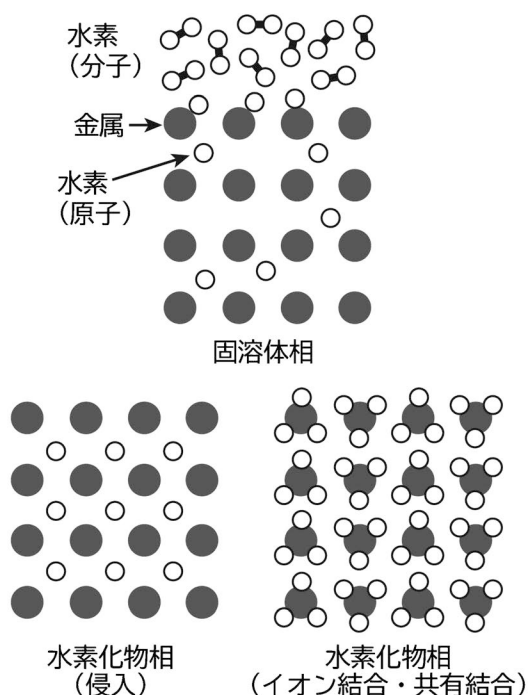


図1 金属中の水素の吸蔵・放出反応に関する概念図。(上) 固溶体相、(下左) 格子間位置に侵入する水素化物相、(下右) 水素と金属・非金属元素がイオン結合・共有結合する水素化物相。

易い傾向を示す。一方、Pdを除く6-15族の金属・非金属元素は、水素と低い親和性を有し、水素との二元系水素化物が形成されにくい傾向を示す。本特集で着目する鉄(8族)は、1 GPa以上(1万気圧以上)の高圧下で水素と反応して鉄水素化物( $\text{FeH}_x$ ,  $x < 1$ )を形成する<sup>(7)-(9)</sup>。また、6-15族の金属・非金属元素は、水素と共有結合して錯イオン(例： $[\text{FeH}_6]^{4-}$ )を形成し、アルカリ金属やアルカリ土類金属等の金属陽イオンとイオン結合して錯体水素化物を形成する<sup>(1)(2)(10)-(13)</sup>。

水素貯蔵材料は、1-5族の金属元素と6-12族の金属元素で構成される金属間化合物に電荷中性の水素が侵入する侵入型水素化物、金属陽イオンとイオン性水素(ヒドリド)で構成されるイオン結合型水素化物、陽イオン(アルカリ金属、アルカリ土類金属等)と6-15族元素と水素による錯イオンで構成される錯体水素化物が利用されている。鉄ベースの水素貯蔵材料は、侵入型水素化物と錯体水素化物が知られている。最近では侵入型水素化物や錯体水素化物とは異なる鉄ベースの新規水素化物も報告されている。そのため、本特集では、これらの水素化物に関して各々の特徴、研究の進展、および今後の展開を解説する。

#### 4. 侵入型水素化物

典型的な水素貯蔵材料である侵入型水素化物は、金属間化合物 $\text{AB}_x$ (A: 1-5族元素, B: 5-12族元素,  $x=1-5$ )の格子間位置に電荷中性の水素が侵入して貯蔵される。水素吸蔵後

も金属原子配列は維持され、吸蔵された水素は、多くの場合、AとBで形成される四面体、又は八面体内に位置している<sup>(1)(2)(13)-(16)</sup>。水素は、電荷中性のため、後述の錯体水素化物よりも低温、かつ低圧での水素吸蔵・放出反応が期待されるが、水素吸蔵量は、錯体水素化物よりも低くなる。

鉄を含有する侵入型水素化物は、TiFeが代表的な水素貯蔵材料である<sup>(4)(17)(18)</sup>。TiFeの水素吸蔵反応に伴う結晶構造の変化を図2に示す<sup>(19)-(21)</sup>。塩化セシウム型の結晶構造を有するTiFeは、水素と反応して $\text{TiFeH}_{1.4}$ (水素貯蔵量: 1.3 mass%)と $\text{TiFeH}_{1.9}$ (同: 1.8 mass%)を形成する二段階の水素吸蔵反応を示す。 $\text{TiFeH}_{1.4}$ と $\text{TiFeH}_{1.9}$ の結晶構造は、塩化セシウム型の結晶構造とは異なるが、基本的な原子配列を維持しながら水素吸蔵反応が進行する。実用化されている水素貯蔵材料 $\text{LaNi}_5$ の水素貯蔵量は、1.4 mass%であるが<sup>(1)(22)</sup>、TiFeは、最大で1.8 mass%の水素を吸蔵し、汎用的に用いられるTiとFeで構成されていることから $\text{LaNi}_5$ に代わる水素貯蔵材料として期待されている<sup>(6)(17)</sup>。一方、TiFeの水素吸蔵・放出反応を室温近傍で進行させるためには初期に673 K以下、5 MPa以下の条件で複数回の水素吸蔵・放出反応を繰返す活性化処理が必要である。活性化条件の改善が課題の一つに挙げられるが、Feの一部のMn等へ

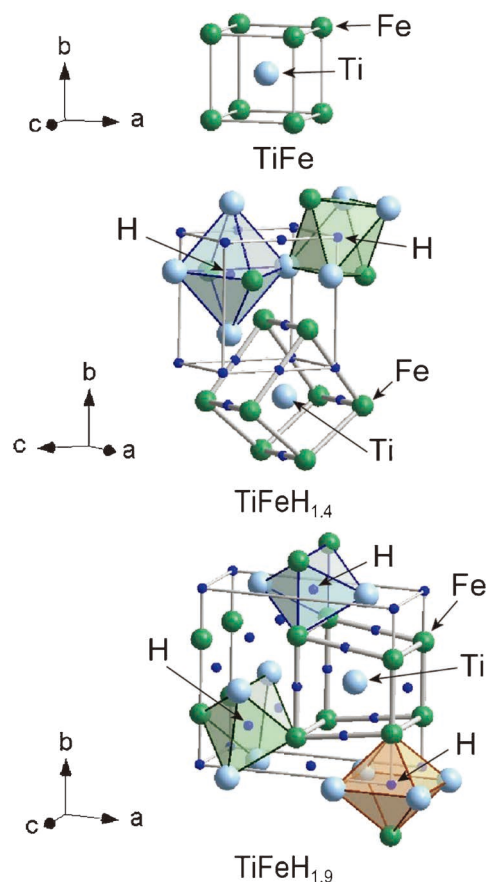
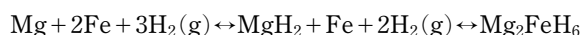


図2 TiFeの水素吸蔵反応における結晶構造の変化。(上) TiFe、(中)  $\text{TiFeH}_{1.4}$ 、(下)  $\text{TiFeH}_{1.9}$ 。水丸、緑丸、青丸はTi, Fe, H原子を示す。(オンラインカラー)

の置換や機械的な加圧とねじりにより，活性化条件の改善が報告されている<sup>(4)(17)(18)</sup>．

## 5. 錯体水素化物

鉄などの6-15族元素は，水素と共有結合して錯イオンを形成する( $[\text{FeH}_6]^{4-}$ 等)．錯イオンは，陽イオン(アルカリ金属，アルカリ土類金属，一部の遷移金属)とイオン結合して，安定化され，錯体水素化物を形成する<sup>(1)-(3)(10)(11)(13)</sup>．代表的な鉄ベースの錯体水素化物は， $\text{Mg}^{2+}$ と $[\text{FeH}_6]^{4-}$ のイオン結合で形成される $\text{Mg}_2\text{FeH}_6$ である． $\text{Mg}_2\text{FeH}_6$ の結晶構造を図3に示す．水素吸蔵・放出反応は下記の反応で進行する．



錯体水素化物の長所は，高い質量水素密度を有することである． $\text{Mg}_2\text{FeH}_6$ の場合，5.5 mass%の水素が貯蔵されるためTiFeの約3倍に相当する．一方，錯体水素化物の水素吸蔵・放出反応は，前述の侵入型水素化物と異なり，水素吸蔵・放出反応前後で原子配列が異なる水素化物の形成・分解で進行するため，遅い反応速度が課題である．多くの錯体水素化物は，数百度で水素吸蔵・放出反応が進行するが，触媒添加によって反応速度が改善されている．

$[\text{FeH}_6]^{4-}$ を安定化できる金属陽イオンは，アルカリ土類金属のみであったが，1 GPa以上の高压合成法により $\text{Li}^+$ と錯イオン $[\text{FeH}_6]^{4-}$ で構成される $\text{Li}_4\text{FeH}_6$ (質量水素密度：6.7 mass%)， $\text{Li}^+$ ， $\text{Al}^{3+}$ ， $[\text{FeH}_6]^{4-}$ ，および $\text{H}^-$ で構成される $\text{Li}_3\text{AlFeH}_8$ (同：7.2 mass%)， $\text{Li}^+$ と $[\text{FeH}_7]^{3-}$ で構成される $\text{Li}_3\text{FeH}_7$ (同：8.4 mass%)が報告されている(図4)<sup>(23)-(25)</sup>．これらの錯体水素化物は，Mgよりも軽量のLiで構成され， $\text{Li}_3\text{FeH}_7$ では，鉄周りに水素が7配位する錯イオン $[\text{FeH}_7]^{3-}$ を含有するため高い質量水素密度を有している．今後は，高压合成法も利用して，水素をより高密度に含有する新規錯体水素化物の探索が期待される．

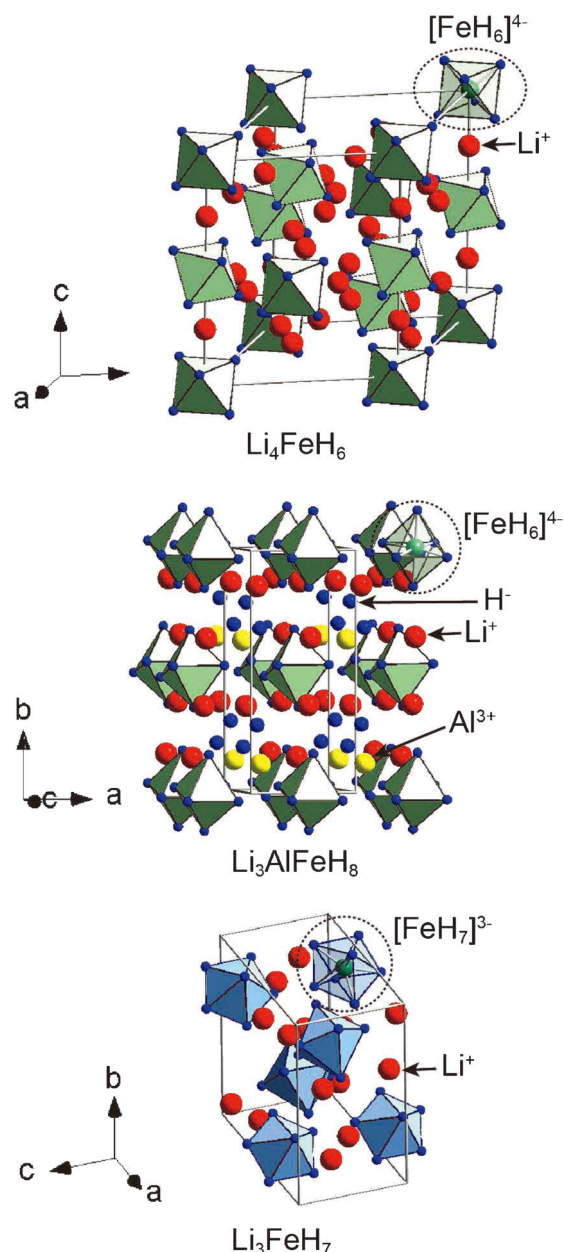


図4  $\text{Li}_4\text{FeH}_6$ ， $\text{Li}_3\text{AlFeH}_8$ ， $\text{Li}_3\text{FeH}_7$ の結晶構造．赤丸，黄丸，緑丸，青丸は，Li，Al，Fe，Hを示す．(オンラインカラー)

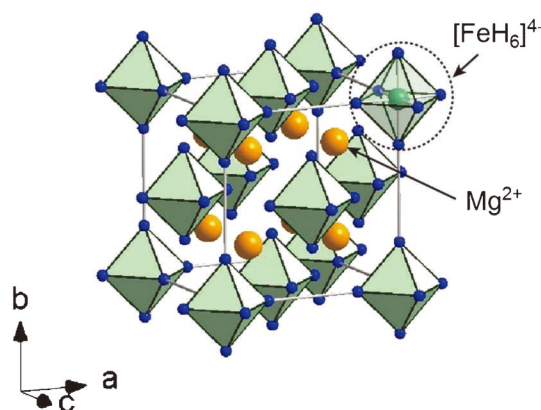
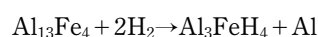


図3  $\text{Mg}_2\text{FeH}_6$ の結晶構造．橙丸，緑丸，青丸はMg，Fe，H原子を示す．(オンラインカラー)

## 6. 鉄ベースの新規水素化物

水素貯蔵材料は，水素との親和性が高い元素と低い元素で構成されている．水素との親和性が高い元素のみで構成される水素化物は多数報告されているが，鉄のように水素との親和性が低い元素同士の水素化物の報告例は極めて少ない．しかし，最近，1 GPa以上の高压合成法を用いて，水素との親和性が低い元素である8族のFeと13族のAlで構成される新規水素化物 $\text{Al}_3\text{FeH}_4$ が報告されている<sup>(26)</sup>． $\text{Al}_3\text{FeH}_4$ は，下記の反応式で形成され，図5に $\text{Al}_3\text{FeH}_4$ の結晶構造を示す<sup>(26)</sup>．



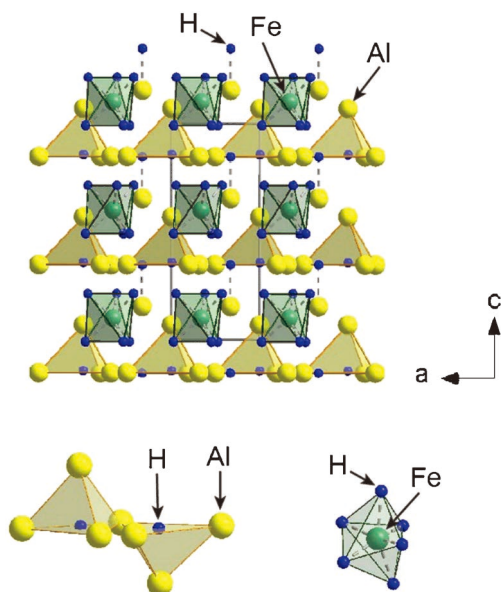


図5  $\text{Al}_3\text{FeH}_4$  の結晶構造. 黄丸, 緑丸, 青丸は Al, Fe, H 原子を示す. (オンラインカラー)

$\text{Al}_3\text{FeH}_4$  の結晶構造は, 図5に示すように Al と Fe の層構造を有している. 水素は, Al で構成される四面体内, および Fe の周りに 6 配位し, 水素と Al, 又は Fe の化学結合は, 共有結合成分を有している. そのため, 侵入型水素化物とは異なる水素化物である. Fe の周りに 6 配位したユニットは, 図3や図4に示す錯体イオン  $[\text{FeH}_6]^{4-}$  に酷似しているが,  $\text{Al}_3\text{FeH}_4$  は, 陽イオンを有しないため錯体水素化物とも異なる水素化物である. このような水素化物は, 金属間化合物  $\text{LaMg}_2\text{Ni}$  の水素吸蔵反応でも確認され<sup>(27)–(29)</sup>,  $\text{Al}_3\text{FeH}_4$  は, 水素が中間的な結合状態で存在する水素化物であることが示唆されている.

$\text{Al}_3\text{FeH}_4$  は, 7 GPa, 923 K の高圧・高温下で合成される. これは, 水素の化学ポテンシャルが 1 GPa 以上で向上するため<sup>(30)</sup>, 汎用的な圧力領域では水素吸蔵反応を示にくい材料の水素吸蔵反応が促進されることに起因する. 一方, 水素ガスで 1 GPa 以上の高圧を発生させることは困難である. 1 GPa 以上の高圧実験は, 試料と共に水素供給用の内部水素源(水素化物)を塩化ナトリウム製カプセルに封入し, マルチアンビル型プレス機を用いて行われる. 昇温により内部水素源から水素が発生され, 1 GPa 以上の水素雰囲気での水素吸蔵反応が実現される. この高圧合成法を利用して,  $\text{Al}_3\text{FeH}_4$  以外にも新たな水素化物が多数報告されている<sup>(7)–(9) (22)–(26) (31)–(34)</sup>. 最近では, ダイヤモンドアンビルセルを用いて, 100 GPa 以上の高圧下で鉄の周りに水素が 13 配位する鉄水素化物  $\text{FeH}_5$  も報告されている<sup>(35)</sup>. Fe のように汎用的な元素で構成される水素貯蔵材料が利用可能であれば, 希少金属からの脱却の観点でも魅力的な材料となる. そのため, 高圧で得られる  $\text{FeH}_5$  のような水素化物をより低圧で合成する技術開発が期待される.

## 7. おわりに

水素社会を構築するためには, 鉄のように汎用的な元素を利用した高密度に水素を含有する材料の研究開発が不可欠である. 水素貯蔵材料は, 原子レベルで水素を貯蔵する材料のため, 今回紹介したように原子配列の観点での理解が水素吸蔵・放出反応機構の解明やその改善につながる. また, 新たな水素貯蔵材料の探索には, 高圧技術も不可欠となっている. 従って, 検出が困難な物質中の水素を原子レベルで高精度に評価して水素吸蔵・放出反応機構を解明することで, 高圧下で合成される水素貯蔵材料の低圧合成法や新規水素貯蔵材料の開発に繋がることが期待される.

## 文 献

- (1) 佐藤豊人, 折茂慎一: 応用物理, **90**(2021), 570–573.
- (2) S. Orimo, Y. Nakamori, J. R. Eliseo, A. Züttel and C. M. Jensen: Chem. Rev., **107**(2007), 4111–4132.
- (3) M. Hirscher, *et al.*: J. Alloys Compd., **827**(2020), 153548.
- (4) L. Pasquini, *et al.*: Prog. Energy, **4**(2022), 032007.
- (5) E. M. Dematteis *et al.*: Prog. Energy, **4**(2022), 032013.
- (6) N. Endo, K. Goshome, T. Maeda, Y. Segawa, E. Shimoda and T. Nozu: Int. J. Hydrogen Energy, **46**(2021), 262–271.
- (7) A. Machida, H. Saitoh, H. Sugimoto, T. Hattori, A. Sano-Furusawa, N. Endo, Y. Katayama, R. Iizuka, T. Sato, M. Matsuo, S. Orimo and K. Aoki: Nat. Commun., **5**(2014), 5063.
- (8) A. Machida, H. Saitoh, T. Hattori, A. Sano-Furusawa, K. Funakoshi, T. Sato, S. Orimo and K. Aoki: Sci. Rep., **9**(2019), 12290.
- (9) H. Saitoh, A. Machida, R. Iizuka-Oku, T. Hattori, A. Sano-Furusawa, K. Funakoshi, T. Sato, S. Orimo and K. Aoki: Sci. Rep., **10**(2020), 9934.
- (10) K. Miwa, S. Takagi, M. Matsuo and S. Orimo: J. Phys. Chem. C, **117**(2013), 8014–8019.
- (11) S. Takagi and S. Orimo: Scr. Mater., **109**(2015), 1–5.
- (12) 折茂慎一: まてりあ, **60**(2021), 152–155.
- (13) T. Sato and S. Orimo: Top. Catal., **64**(2021), 614–621.
- (14) T. Sato, T. Mochizuki, K. Ikeda, T. Honda, T. Otomo, H. Sagayama, H. Yang, W. Luo, L. Lombardo, A. Züttel and S. Orimo: ASC Omega, **5**(2020), 31192–31198.
- (15) T. Sato and S. Orimo: Energies, **14**(2021), 8163.
- (16) T. Sato, K. Ikeda, T. Honda, L. L. Daemen, Y. Cheng, T. Otomo, H. Sagayama, A. J. Ramirez-Cuesta, S. Takagi, T. Kono, H. Yang, W. Luo, L. L. Lombardo, A. Züttel and S. Orimo: J. Phys. Chem. C, **126**(2022), 16943–16951.
- (17) E. M. Dematteis, N. Berti, F. Cuevas, M. Latroche and M. Baricco: Mater. Adv., **2**(2021), 2524–2560.
- (18) K. Edalati, J. Matsuda, H. Iwaoaka, S. Toh, E. Akiba and Z. Horita: Int. J. Hydrogen Energy, **38**(2013), 4622–4627.
- (19) R. Ray, B. C. Giessen and N. J. Grant, Metall. Trans., **3**(1972), 627–629.
- (20) J. Schefer, A. F. Andresen, P. Fischer, W. Haelg, L. Schlapbach and F. Stucki: Mater. Res. Bull., **14**(1979), 1281–1294.
- (21) P. Fischer, J. Schefer, K. Yvon, L. Schlapbach and T. Riesterer: J. Less-Common Met., **129**(1987), 39–45.
- (22) T. Sato, H. Saitoh, R. Utsumi, J. Ito, Y. Nakahira, K. Obana, S. Takagi and S. Orimo: Molecules, **28**(2023), 1256.
- (23) S. Takagi, Y. Iijima, T. Sato, H. Saitoh, K. Ikeda, T. Otomo, K. Miwa, T. Ikeshoji, K. Aoki and S. Orimo: Angew. Chem. Int. Ed., **54**(2015), 5650–5653.
- (24) S. Takagi, T. D. Humphries, K. Miwa and S. Orimo: Appl.



## 近代日本の鑄造技術史

中 江 秀 雄\*

## 1. はじめに

本報では鑄鉄鑄物を中心に、江戸時代から明治中頃までの鑄造技術史を論じる。それには地金、溶解炉、送風機とその製品(大砲)の変遷で話を進める。今日では資源に乏しい国とされている日本であるが、江戸時代には佐渡金山、岩見銀山と住友銅山などから世界に金、銀、銅の輸出が行われており、当時の日本はこれら金属の主要輸出国であった<sup>(1)</sup>。

一方で鑄鉄鑄物の実用化は、中国が西欧よりも2000年以上(紀元前600～500年)早く、その原因は送風機と縦型溶解炉にあったとされている<sup>(2)</sup>。これらの技術が縄文後期から弥生前期にかけて韓国を経てわが国にもたらされたので、日本の鑄鉄鑄物の製造は西欧よりもずっと早かったのである<sup>(2)</sup>。

江戸時代、鑄鉄鑄物は鑪鉄を原料とした Fe-C 合金であった。それが明治時代になると鑄鉄鑄物は高炉鉄を用いた Fe-C-Si 合金になり、今日も同様である。この詳細は表 1 で後述する。

鑄鉄の Si は黒鉛化に作用することが良く知られている。鑄鉄は C が鉄炭化物( $\text{Fe}_3\text{C}$ )に凝固すると、その破面は真っ白になるので、これを白鑄鉄と呼ぶ。一方で黒鉛に凝固すると破面はねずみ色を呈し、これをねずみ鑄鉄という。因みに  $\text{Fe}_3\text{C}$  と黒鉛の両者に凝固したものは斑鑄鉄と呼ぶ。

Si の鑄鉄凝固組織に対する影響は Maurer が最初に示し、Maurer 組織図(図 1)<sup>(3)</sup>として著名である。図 1 では肉厚の異なる板状鑄物で、白鑄鉄の生成域を I で、それに対して黒鉛が晶出したねずみ鑄鉄で基地組織にパーライトが生成する領域を II で、パーライトとフェライトが混在する領域を II + III で示してある。

この図より、例えば肉厚 90 mm の板状鑄物で黒鉛を晶出

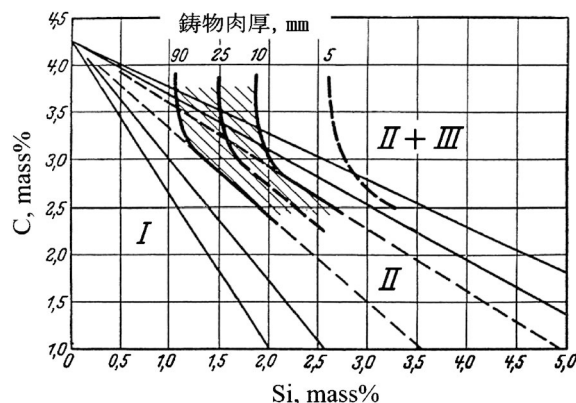


図 1 マウラーの組織図：鑄鉄組織に及ぼす C と Si の影響<sup>(3)</sup>。  
I：白鑄鉄，II：パーライト鑄鉄，III：フェライト鑄鉄

させるには 1.0 mass% (これ以降単に % で記述する) 以上の Si が、肉厚 10 mm の鑄物では 1.8% Si が必要ことがわかる。これより、1.0% 以下の Si 量では殆んど全ての鑄鉄鑄物は白鑄鉄になってしまうこともわかる。これが鑄鉄鑄物組織に対する Si の影響である。したがって、現代の鑄鉄鑄物は Fe-C-Si 合金になっている。ちなみに、白鑄鉄は硬く・脆いため機械加工ができず、機械部品としては使用できなかったのである。

それでは江戸時代とそれ以前の鑄鉄鑄物は全て白鑄鉄かというそうではない。石野<sup>(4)</sup>は昔の鑄鉄鑄物を調べて表 1 を示している(この表は筆者が一部加筆・修正した)。これより、日本で造られた竹虎燈炉(1591年)と鳥居(1839年)は、その Si 含有量が 0.05% であるにもかかわらず黒鉛が出ていることが確認されており、これらの炭素含有量は過共晶であることを示している。しかし、石野はこれらの鑄物は和鉄を木炭吹き<sup>こしき</sup>の甕で溶解したものであろうと推察しているが、黒

\* 早稲田大学名誉教授

Japanese Modernization History of Casting Technology; Hideo Nakae (Professor Emeritus, Waseda University, Tokyo)

Keywords: Japanese iron castings, history, TATARA (鑪), KOSHIKI (甕), cupola, TATARA pig iron, reverberatory furnace, artillery, iron carbon alloy, iron carbon silicon alloy, blower

2023年1月13日受理[doi:10.2320/materia.62.458]

表1 昔の铸铁鑄物の化学組成と铸铁の種類(チル: 白铸铁, 片状: ねずみ铸铁)<sup>(4)</sup>.

| 鑄造品名        | 製作年    | 鑄造場所 | 化学分析成分、%          |                   |       |                   |       | 铸铁の種類             |
|-------------|--------|------|-------------------|-------------------|-------|-------------------|-------|-------------------|
|             |        |      | C                 | Si                | Mn    | P                 | S     |                   |
| 竹虎燈炉        | 1591年  | 京都   | 4.35<br>~<br>4.47 | 0.05<br>~<br>0.06 | -     | 0.23<br>~<br>0.24 | 0.020 | 過共晶の粗大な<br>片状黒鉛铸铁 |
| 茶湯釜         | 1600年代 | 京都   | 4.30              | 0.03              | 0.002 | 0.204             | 0.027 | チル鑄物              |
| 茶湯釜         | 1700年代 | 京都   | 4.17              | 0.07              | 0.014 | 0.191             | 0.019 | チル鑄物              |
| IRON BRIDGE | 1779年  | イギリス | 3.25              | 1.48              | 1.05  | 0.54              | 0.037 | 片状黒鉛铸铁            |
| カノン砲(戸栗)    | 1820年頃 | アメリカ | 3.22              | 0.69              | 0.27  | 0.275             | 0.132 | 片状黒鉛铸铁            |
| 茶湯釜         | 1800年代 | 京都   | 4.30              | 0.04              | 0.025 | 0.279             | 0.020 | チル鑄物              |
| 鳥居          | 1839年  | 奈良   | 4.57              | 0.05              | 0.006 | 0.240             | 0.025 | 過共晶の粗大な<br>片状黒鉛铸铁 |



図2 佐賀の24ポンド砲(戸栗美術館蔵, 全長3025 mm, 口径148 mm, 重量2890 kg)<sup>(5)</sup>. (オンラインカラー)

鉛の生成に関してそれ以上の詳細な記述はない。

この表に『カノン砲(戸栗)』と記載されている大砲はアメリカ製であり, 国産のねずみ铸铁砲に関しては言及していない。このカノン砲を図2に示す。この砲は当初, 佐賀の反射炉で造られたとされていたが<sup>(5)</sup>, 後述するように斎藤<sup>(6)</sup>がアメリカ製であることを明らかにしている。江戸時代に造られたわが国の大砲は, その殆どが青銅鑄造砲と鍛鉄製の砲(大筒: 大型の火縄銃)で, 铸铁砲は極めて少ないので表1に記載がないのであろう。

この砲は旧鍋島邸にあった24ポンド砲で, 1975年末に東京渋谷の戸栗 亨邸(江戸時代の鍋島家屋敷跡)で発見されたものである。その成分を九州大学が分析した結果, 次の値が得られている<sup>(5)</sup>。

3.22% C-0.69% Si-0.27% Mn-0.275% P-0.132% S

この化学組成に基づいて大橋<sup>(7)</sup>は当初, この砲が0.69% Siであることから, 『輸入銃又はその混入によって製造されたと推定される』として, (佐賀藩の)輸入銃説<sup>(5)</sup>を支持していた。それに疑問を抱いた斎藤<sup>(6)</sup>は, 大砲に刻印されたマークから, アメリカの Bell Foundry 社で製造されたもので, 薩英戦争の後に薩摩藩が緊急輸入したものの1門と推定した。この結果に基づいて大橋<sup>(7)</sup>はこの砲は佐賀製ではなく, アメリカ製であることを認め, その経緯の詳細を書き残している<sup>(5)</sup>。

## 2. 日本のねずみ铸铁製大砲

筆者はこれまでに, 国産の铸铁砲で黒鉛が晶出しているもの(ねずみ铸铁製)を2門で確認している。その1門が図3に示した永瀬家の铸铁砲(中)<sup>(8)</sup>で, 1844(弘化)年に川口の鑄物師増田安治郎が千葉の茂原に出向いて大・中・小の铸铁砲3門を鑄造し, その内の1門がこの大砲(中)である。全長は1.54 m, 口径は66 mm である。筆者が永瀬家を訪れた時は改築中で, 長年庭に放置されていたこの砲を工事中の床の間に移した, その直後であった。

この砲は厚い錆で覆われており, 厚い錆層を砲尾部から採取し, 黒鉛組織の調査に供した。錆層に樹脂を含浸させ, SEMにより元素分布の調査を行った結果を図4<sup>(9)</sup>に示す。これより, 酸化鉄の基底中に片状黒鉛の存在が明確に認められ, この砲はねずみ铸铁であることを確認した。

残りの1門は安乗神社の铸铁砲<sup>(10)</sup>である。同神社は, 「この大砲は, 鳥羽城主稲垣藩の抱き若荷の紋が刻まれている黒船来航時の大砲である。1853(嘉永6)年13代徳川家定の時代に海岸護衛の必要の為, 鳥羽藩は伊勢神宮警護の役により志摩国海岸各所に砲台を築いた。その砲が, 安乗神社境内に保存されている。志摩国に現存する唯一の記念物である。」としている。この砲も川口の鑄物師・増田安治郎の作とされている。

筆者はこの砲の小片を入手することができ, その組織観察



図3 永瀬家の大砲(中)<sup>(8)</sup>. (オンラインカラー)

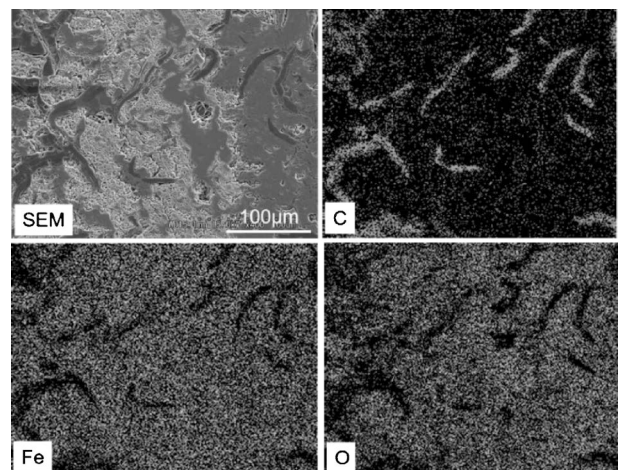


図4 大砲(中)の錆層内の元素分布(SEMによる解析)<sup>(9)</sup>.

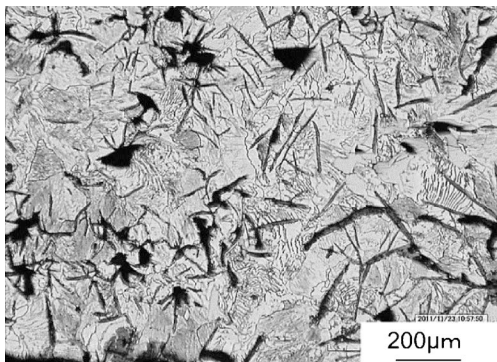


図5 安乗神社の鑄鉄砲の光学顕微鏡組織<sup>(10)</sup>。

を行った結果を図5<sup>(10)</sup>に示す。この砲の化学組成は4.48%C, 0.13%Si, Mn<0.001%, 0.117%P, 0.034%S, 0.005%Tiであった。この化学組成は鑄鉄の特徴である極低Siであるにも関わらず、ねずみ鑄鉄であることが確認できた。これらの事実は、川口の鑄物師・増田安治郎がねずみ鑄鉄を製造する秘伝の技術を習得していたことを示している。この秘伝に関しては以下に論じる。

### 3. 江戸時代の鑄鉄溶解炉と送風機

#### (1) 甌による鑄鉄の溶解

これまでに記述した2門のねずみ鑄鉄製の大型砲は、増田安次郎が甌で溶解・鑄造したものと筆者は考えている。その根拠としては、当時の反射炉ではねずみ鑄鉄製大型砲は製造できなかった<sup>(11)(12)</sup>、のである。それは、反射炉では脱炭が生じるため<sup>(12)</sup>、鑄鉄(極低Si)ではねずみ鑄鉄を製造するのは不可能であった、と考える。それ故、甌による溶解が行われたのであろう。

当時の甌の溶解を詳述する。甌の詳細な内部構造を『倉吉の鑄物師』<sup>(13)</sup>の図に筆者が一部加筆・修正したもので図6に示す。甌は地金(鑄鉄や銅)と木炭を炉頂から交互に層状に投入し、踏鞴(タタラ)からの送風を1本の羽口で炉内に吹き込み、木炭を燃焼させ、その燃焼熱で地金を溶解する炉である。基本的には、甌の構造はキューポラ(コークスを用いる洋式の近代甌)とほぼ同じであるが、甌はキューポラに比べて、有効高さ比(炉の高さを内径で除した数値)が小さい(背が低い)のが特徴である<sup>(11)</sup>。

図6の炉には左下に3か所に出湯口(ノミ口1, 2, 3)が設けられている。これは、ノミ口1から湯(溶けた金属、溶湯)が出せれば、炉内の湯の高さはそれ以上に達していることがわかる。ちなみに、この炉底は直径490 mmで、炉底に溜め得る湯の高さを500 mm程度とすると、炉底部には約660 kgの鑄鉄の湯を溜めることができる。その時に、一番下のノミ口3を開ければ全量の鑄鉄の湯を取り出すことができる。したがって、この炉2基を同時に操業すれば一度に1320 kgの湯を、5基同時に操業すれば一度に3300 kgの湯を鑄造することができる。この様な操業法で大型砲や梵鐘を鑄

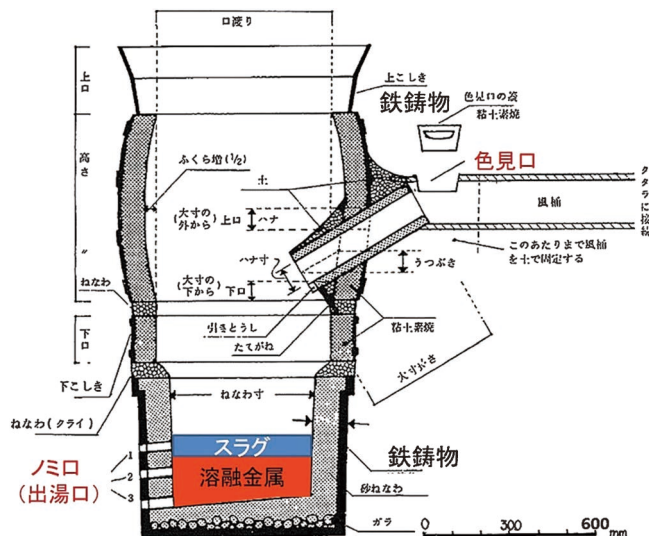


図6 江戸時代の甌の内部構造<sup>(13)</sup>(筆者が加筆・修正)。(オンラインカラー)

造していた。

この様に記述したの、鑄物はゆっくり鑄込むと途中で湯が凝固してしまい、湯が鑄型を満たし得ない。これを湯回り不良という。それ故に鑄込む速度、すなわち鑄込み時間が重要になる。鑄込み時間とは、溶湯を鑄型に入れ始めてから終わるまでの時間をいう。

一般的な鑄鉄鑄物の鑄込み時間は、250 kg以下の鑄物で4~6 s, 500~1000 kgで6~20 s, 1000~3000 kgでは10~30 sが良いとされている<sup>(14)</sup>。この様に、鑄込みは極めて短時間で行なう。これ以上に速く鑄込むと鑄型を壊し、遅く鑄込むと湯回り不良が発生し易くなる。また、鑄込み時間は同じ重量の鑄物でもその肉厚によって変化するので、上記の様に幅ができる。薄肉鑄物では湯回り不良を起こさないためにも短時間で鑄込まなければならず、厚肉鑄物ではゆっくり鑄込む。したがって、鑄込みに必要とされる分の湯を炉底に溜め、その湯をノミ口3から取り出し、鑄物(大型砲)に適した鑄込み時間で鑄込むのが良いとされてきた。

因みに1250 kgの梵鐘の鑄造では鑄込み時間は180 sくらい、と『倉吉の鑄物師』<sup>(13)</sup>に示されている。大型砲に関してはこれらの数値を見いだせなかったが、ほぼ同じであろう。180 sという鑄込み時間は上記の数値と比べると長い、梵鐘や大型砲では製品の肉厚はほぼ均一で比較的肉厚である。それ故に、このようにゆっくりと鑄込まれてきたのであろう。

大きな大型砲や梵鐘を鑄込むときには、例えば図7(鑄鞴八挺之次第)のように8基の甌による操業法が『石火矢鑄方伝』<sup>(15)</sup>に掲載されている。この図では甌はタ・ラと、大型砲の鑄型は石火矢之形と書かれている。この方式を採用すれば10 t以上の大型大型砲の鑄造も可能になる。ただし、これら8基の甌の出湯時間を合わせなければならず、かなりの技量が必要になったであろうことは容易に推察できる。

江戸時代に甌に用いられた送風機は踏鞴(タタラ)であった。その構造と踏板を踏む人夫を図8<sup>(16)</sup>に示す。当時の踏



図7 甌(タタラと記されている)8基操業による大砲{石火矢之形(型)}铸造の図<sup>(15)</sup>.

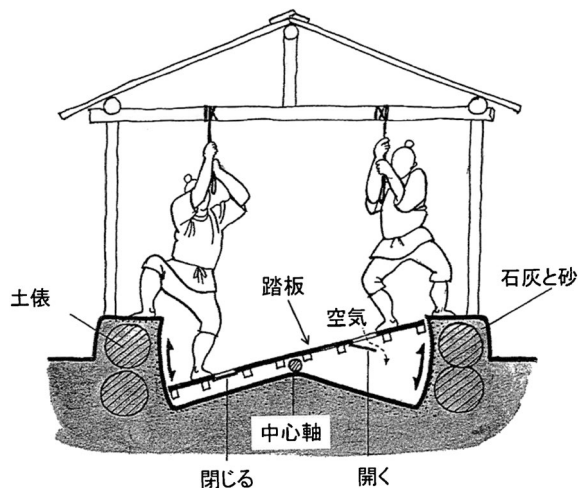


図8 踏輪(タタラ)の仕組みと踏板を踏む人夫<sup>(16)</sup>.

甌は気密性が不十分で、送風圧力を上げ得なかったため、甌の通風抵抗を少なくするために炉高を低くせざるを得なかった<sup>(11)</sup>、と筆者は考える。

この踏輪は製鉄炉(鑪, たたら)用の送風機(天秤吹き)<sup>(17)(18)</sup>とその大まかな構造はよく似ているが、本質的には異なる送風機である<sup>(17)(19)</sup>。その理由は、甌は短時間で大量の金属をとくす炉で、鑪は精錬(製鉄)炉であり、例えば現在操業中の出雲たたらでは3日操業で2~3tの鋳(鉄)を製造している。これに対して、図6の甌は1時間に1.0t程度の地金を溶解できる炉である、と筆者は推定している。したがって、甌の方が鑪よりも大量の空気(大量の木炭を燃焼させるために)を送りこむために多くの人夫が必要であった。例えば、図9の加賀藩の甌の踏輪(タタラ)<sup>(20)</sup>では踏板を踏む人夫は4人で描かれている。

図9<sup>(20)</sup>は加賀藩の甌による大砲となまこ铸造の様子を示している。左の甌は大砲の鑄型に铸造している様子が、右の

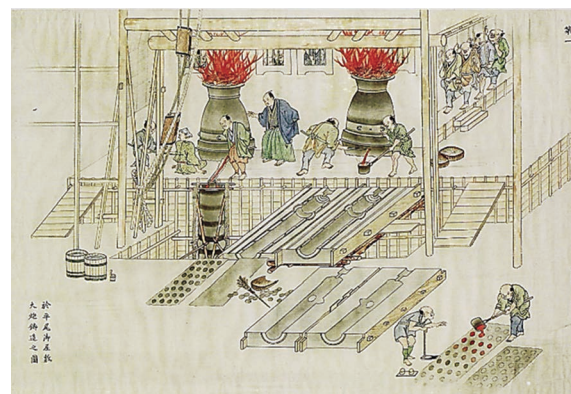


図9 加賀藩の大砲となまこ铸造の図 鈴木一義蔵<sup>(20)</sup>。(オンラインカラー)

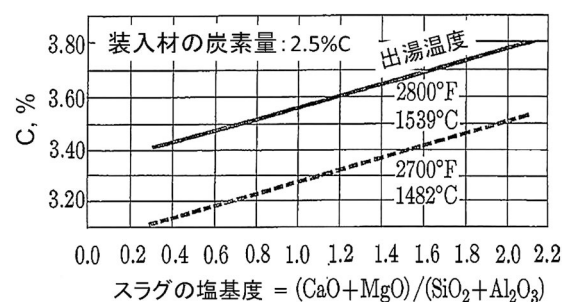


図10 キュボラ溶解の加炭に対する溶解温度とスラグ塩基度の影響<sup>(21)</sup>.

甌はなまこに铸造している様子が描かれており、その右奥にはタタラを4人で踏んでいるのが見える。なまことは、鑄鉄や青銅などの蒲鉾状の金属塊で、溶解炉の湯(溶けた金属)を再溶解に用いる金属塊に铸造したものを指す。一説には、この形が海鼠に似ていることからなまこと呼ぶようになったとも云われている。

それでは何故になまこを铸造していたのであろうか。鑄鉄をキュボラ(甌でも同様であろう)で溶解するとその炭素含有量が增大することが図10<sup>(21)</sup>のように知られている。この図では2.5%Cの原料地金をキュボラ(コークス)で1482°C溶解すると3.2%C以上の溶湯が得られることを示している<sup>(21)(22)</sup>。一般に甌(木炭)で得られる鑄鉄溶湯の温度は1482°Cよりも低いであろうが、コークスよりも木炭の方が加炭に優れているので、甌でも1%程度の加炭が得られると推測する。なまこを甌で繰返し溶解することで加炭が進み、ねずみ鑄鉄を得ることができたのであろう。実際の作業では、溶解で得たなまこを割って、その破面が白鑄鉄かねずみ鑄鉄かを判定し、ねずみ鑄鉄の破面が得られるまで甌による再溶解を繰り返す。ねずみ鑄鉄のなまこが得られるとなると、これを溶解し大砲の鑄型に铸造することでねずみ鑄鉄製の砲を造りえた、との仮説をたてた。

筆者らはこの仮説を証明するために、50 kgの高周波誘導炉を用い、安乗神社砲の0.13%Siを基準に、炭素量だけを3.95~5.1%に変化させ、直径30 mmの丸棒に铸造した。こ

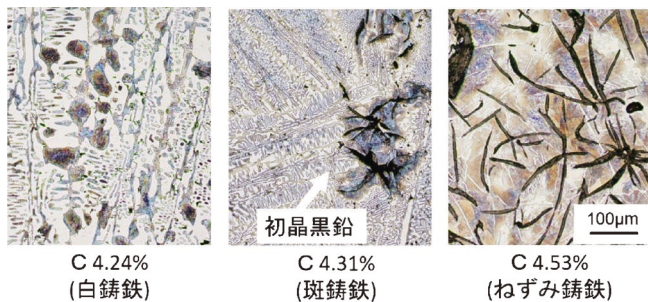


図11 0.13%Si 铸铁(直径30 mm)の黒鉛晶出に及ぼす炭素量の影響<sup>(22)</sup>。(オンラインカラー)

の試料の組織を図11<sup>(22)</sup>に示す。これより、炭素量が4.3%を超えると黒鉛(初晶)が晶出し始め(矢印で示した)、4.5%以上の試料では完全に黒鉛組織になることを確認した<sup>(22)</sup>。これより、江戸時代の川口の鋳物師 増田安治郎が甌で和鉄を繰り返し溶解をすることで、ねずみ铸铁製のなまこが得られた時点で铸铁砲に铸造していた、と推察した。この技法を秘伝とし、ねずみ铸铁製の大砲と砲弾の製造を独占したのであろう。しかし、この現象は図1のマウラーの組織図からは読み取れず、筆者らも知らなかった現象で、増田の秘伝技法と位置付けるのが正しいのであろう。

この点に関連して大橋<sup>(7)</sup>は、水戸藩史料を引用し次のように記述している。「増田安治郎の場合は、1850(嘉永3)年からの3年間で、1856(安政3)年からの3年間にわたって、合計213門の大砲(うち(ねずみ)铸铁砲9門)と、41,323発の(ねずみ)铸铁製の砲弾を铸造し巨満の富を築いた。その納入先は、北は津軽藩から西は肥後藩まで、日本全国にまたがったとされる」。幕府や有力藩が全力を挙げて挑んだ反射炉ではねずみ铸铁製の大砲を製造できなかったと、筆者らは考えているが<sup>(11)(12)</sup>、川口の鋳物師が甌を使ってねずみ铸铁砲の製造に成功していた事実<sup>(8)-(10)</sup>は極めて興味深い。

## (2) 反射炉による铸铁の溶解

これまでは炉と送風機を同時に論じてきた。しかし電気炉を除くと、反射炉は送風機が不要な溶解炉であり、一度に大量の溶けた金属を出湯できる炉である<sup>(12)</sup>。反射炉は煙突による空気の吸引効果で、空気を取り入れる炉である。

我が国では江戸時代の中頃までは甌による(铸铁や青铜)の溶解が行われてきたが、なかなかねずみ铸铁製大砲が得られず反射炉ブームが起こった、と考えている。30基もの反射炉が铸铁砲の製造を目的に江戸時代後期に建設されたのである<sup>(7)(12)</sup>。しかし、反射炉では脱炭が生じるため、極低Siの鑪鉄では白铸铁しか得られず、たとえ大砲の形はできても砲弾の実射に耐えなかったのであろう。

図12に徳川幕府による葦山の反射炉を示す<sup>(23)</sup>。ここで鑄台とは、大砲の鑄型を設置した場所のことである。この炉では良質の(ねずみ)铸铁製大砲ができなかったため、幕府はこれを取り潰し江戸の滝野川に移すことにした。この時に徳川幕府の瓦解が生じ、滝乃川反射炉は、残念ながらその完成は

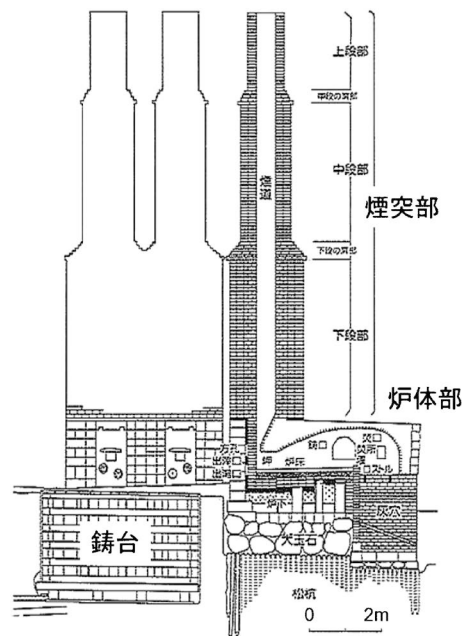


図12 創建当時の葦山反射炉の断面構造<sup>(23)</sup>(筆者が加筆)。

定かになっていない<sup>(24)</sup>。藤井<sup>(25)</sup>によると、「しかしながら、1868(慶応4)年に徳川幕府は崩壊し、(滝野川の)大砲製造所の経営(建設か)も頓挫することになる。」としている。

江戸時代末期に反射炉ブームが起こったが良質の(ねずみ)铸铁製大砲は造り得なかった。それが尾を引いて、明治時代になって大阪造幣局に第一号反射炉が銅合金用として導入され、これに遅れること約10年で大阪砲兵工廠に铸铁溶解用の反射炉が設置された、と筆者<sup>(12)</sup>は推測している。ここで良質の铸铁製大砲とはねずみ铸铁で砲孔の機械加工ができ、実弾の発射に耐える大砲の意味である。

## 4. おわりに

ここでは明治時代の铸铁砲に言及する。明治政府は铸铁砲の製造が難しく、かつその大砲は信頼性に掛けていた。一方で、鑄鋼砲(クルップ)が優秀なことは十分に承知していたが、その国産化は難しかった。そこでわが国の実情から、明治政府は青铜砲を正式なものと決め、明治19年から青铜砲を大阪砲兵工廠で製造を始め、明治21年には全国の野戦砲兵隊に配布した<sup>(26)</sup>。

一方で铸铁砲は、釜石再生(精錬)鉄を用いて海岸要塞砲(铸铁装箍砲)の製造を始めている。これらの装箍砲は本体を铸铁で造り、それを鋼の箍で締め付ける構造になっている。铸铁砲が信頼性に欠ける欠点を、この様な手法で解決した。大口徑の铸铁装箍砲は明治18年の十九糎加農砲と二八糎榴弾砲で、翌年には二四糎加農砲が铸造された。これらの装箍砲の造り方は明治44年に完成したが、その翌年には鑄鋼砲の製法が完成し、铸铁砲の時代は終焉を迎えたのである<sup>(26)</sup>。そして、鑄鋼砲も鍛鋼砲に置き換えられてしまったのである。

## 文 献

- (1) 村上 隆：金・銀・銅の日本史，岩波新書，(2007)，1085.
- (2) 井川克也：日本機械学会誌，**87**(1984)，703-709.
- (3) E. Maurer und P. Holzhausen: Stahl Eisen, **47**(1927)，1805-1812, 1977-1984.
- (4) 石野 亨：鑄物五千年の足跡，日本鑄物工業新聞社，(1994)，158, 159.
- (5) 佐賀県立博物館編：幕末における佐賀藩鑄造の大砲とその復元 (1979).
- (6) 斎藤利生：防衛大学校，**45**(1982)，231-256.
- (7) 大橋周治編：幕末明治製鉄論，アグネ，(1991)，2, 70.
- (8) 中江秀雄，安井純一：銃砲史研究，**362**(2009)，9-10.
- (9) 峯田元治，中江秀雄：季刊 考古学，**109**(2009,11)，69-72.
- (10) 中江秀雄，峯田元治，岡崎 清，安井純一：銃砲史研究，**374**(2012,12)，25-30.
- (11) 中江秀雄：鑄造工学，**90**(2018)，467-472.
- (12) 中江秀雄：鑄造工学，**94**(2022)，492-498.
- (13) 倉吉市教育委員会：倉吉の鑄物師，(1986)，22, 191, 194.
- (14) 阿部喜佐男，師岡利政，中村幸吉，斎藤和夫：金属材料加工学，共立出版，(1966)，320.
- (15) 米村治太夫：石火矢鑄方伝，江戸科学古典叢書，**42** 恒和出版，(1982)，81-166.
- (16) 香取忠彦，穂積和夫：新装版 奈良の大仏，草思社，(2010)，41.
- (17) 岡田廣吉編：たたらから近代製鉄へ，平凡社，(1990)，53.

- (18) 渡辺ともみ：たたら製鉄の近代史，吉川弘文館，(2006)，79-84.
- (19) JFE21世紀財：たたら 日本古来の製鉄，(2004).
- (20) 小西雅徳：銃砲史研究，**367・368**合併号，(2010,11)，30-48.
- (21) R. A. Flinn: Fundamentals of Metal Casting, Addison-Wesley Pub., (1963)，273.
- (22) 中江秀雄：大砲からみた幕末・明治，法政大学出版，(2016)，91.
- (23) 静岡県韮山町：史跡韮山反射炉，(1989)，109.
- (24) 北区飛鳥山博物館編：近代工業化のルーツ 滝乃川反射炉展，(2016).
- (25) 東京都北区教育委員会：滝野川村 戸部家文書 調査報告書，(2013)，137.
- (26) 中江秀雄：ぶらすとす，**2-17**(2019)，290-295.



中江秀雄

★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★

1970年3月 早稲田大学大学院理工学研究科博士課程 中退

1970年10月 工学博士(早稲田大学)

1971年1月 株式会社 日立製作所 機械研究所

1977年8月 同 上 主任研究員

1983年4月 早稲田大学理工学部金属工学科教授

2012年4月 同 上 名誉教授

専門分野：鋳造工学，凝固工学，濡れ(固液界面工学)

◎如何にして金属材料に形を付与するかとの観点から，鋳造工学に始まって凝固，濡れ性の研究に従事。

★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★

# 機械学習を活用した金属積層造形の プロセスパラメータ設計

鈴木 飛鳥\*

## 1. はじめに

この度は第32回日本金属学会奨励賞を頂戴しましたこと、関係各位の皆様には厚く御礼申し上げます。また、受賞に際して、本記事を執筆する機会をいただきました。拙い内容で大変恐縮ではございますが、私が現在取り組んでいる研究や今後の展望に関して紹介させていただきます。私は2016年9月に名古屋大学大学院工学研究科マテリアル理工学専攻にて村田純教授、湯川 宏助教の指導の下で学位を取得した後、2017年4月より名古屋大学大学院工学研究科物質プロセス工学専攻にて小橋 眞教授、高田尚記准教授の研究室にて助教を務めております。学生時代は、金属系の水素透過膜の水素透過特性を水素の化学ポテンシャルをもとに解析する研究を実施しておりました。助教に着任以降は金属積層造形をはじめとする粉末冶金プロセスの研究に従事し、金属材料のポーラス化、複合化、組織制御に関する研究を行っております。その中で、機械学習・深層学習などのデータ科学を活用したプロセス設計や特性予測を行うことが現在の研究のメインテーマとなっております。そこで本記事では、私が助教着任後に行ってきた研究の一つとして、金属積層造形のプロセスパラメータ設計における機械学習の活用について紹介させていただきます。

## 2. 研究背景

金属積層造形(Additive Manufacturing; AM)は、設計データに基づき金属原料を一層ずつ積層することで目的とする

形状の金属部材を得る方法である<sup>(1)(2)</sup>。従来の鋳造、鍛造、焼結、塑性加工、切削などを経るプロセスと比較して複雑な形状を有する部材を製造することができるとともに、複数のパーツからなる部材を一体で製造することができる<sup>(3)</sup>。そうした部材は医療分野や航空機分野で実用化されている<sup>(4)(5)</sup>。金属AMの中で最も代表的な方式の一つが、レーザ粉末床溶融結合(Laser Powder Bed Fusion; L-PBF)法である<sup>(2)</sup>。L-PBF法では、原料となる金属粉末を造形エリアに均一な厚さ(数十 $\mu\text{m}$ 程度)で敷設し、目的とする箇所へレーザを照射することで局所的に溶融・凝固させる。一層でのレーザ照射が終了した後、再び粉末の敷設とレーザ照射を行う。このステップを幾度も繰り返すことで設計した部材とほぼ同一形状の部材を製造することができる。こうしたニアネットシェイプ造形は難加工材料に適用した際にその優位性が高い。例えば、超合金はWC硬質粒子とCoバインダー相からなる材料であり、高硬度と優れた耐摩耗性を併せ持つため、切削工具や金型に利用されている材料である。現在は原料となる粉末を焼結し、所定の形状に切削することで部材を作製している<sup>(6)</sup>。しかしながら、その優れた特性ゆえに超合金を製品の形に切削する際に長期間を要する<sup>(7)</sup>。そうした問題を解決する上で、L-PBF法は有効である。L-PBF法によりニアネットシェイプで造形することで、最終仕上げのみで製品を得ることができるため、製造期間を大幅に短縮できる。加えて、従来製造が困難であったインラインセンシング金型などの高機能部材製造を可能とする<sup>(8)</sup>。以上の観点から、WC/Co超合金のL-PBF造形に取り組んだ。

しかしながら、WC/Co超合金のL-PBF造形においては大きな課題がある。図1に従来の焼結法およびL-PBF法

\* 東海国立大学機構名古屋大学大学院工学研究科物質プロセス工学専攻；助教(〒464-8603 名古屋市千種区不老町1)  
Design of Process Parameters in Metal Additive Manufacturing Utilizing Machine Learning; Asuka Suzuki(Department of Materials Process Engineering, Graduate School of Engineering, Nagoya University, Tokai National Higher Education and Research System, Nagoya)  
Keywords: additive manufacturing, machine learning, process informatics, composite, cemented carbide  
2023年3月23日受理[doi:10.2320/materia.62.464]

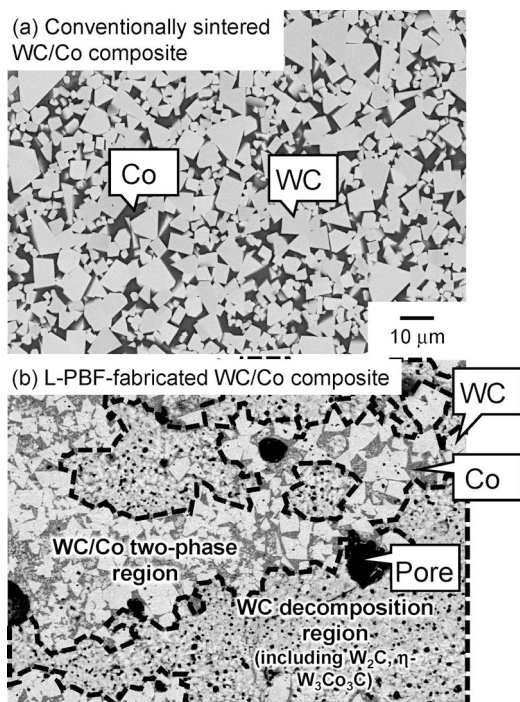


図1 (a) 従来の焼結法および(b) レーザ粉末床溶融結合(L-PBF)法(レーザー出力( $P$ ): 195 W, 走査速度( $v$ ): 300 mm·s<sup>-1</sup>, スポット径( $\sigma$ ): 150 μm)により作製した WC/Co 超硬合金の代表的な微視組織を表す SEM 像<sup>(9)</sup>.

によって作製した WC/Co 超硬合金の微視組織を示す<sup>(9)</sup>。図 1(a)に示されるように、従来の焼結法で作製した超硬合金では高い体積率で存在する WC 硬質粒子が均一に分散し、Co バインダー相によって結合された組織形態を呈する。こうした微視組織に起因して、上述の高硬度・耐磨耗性といった特性が発現する。しかしながら、L-PBF 法で作製した超硬合金は、従来の焼結法で作製したものと異なる不均質な組織を呈する(図 1(b))。この組織は大きく分けて 2 種類の組織領域に大別することができる。1 つは WC 硬質粒子と Co 相を主な構成相とし、比較的従来の超硬合金の組織に近い領域(WC/Co 二相領域)である<sup>(9)(10)</sup>。もう 1 つは WC 粒子や Co 相がほとんど確認されず、微細な組織を呈する領域(WC 分解領域)である。この WC 分解領域では、W<sub>2</sub>C や  $\eta$ -W<sub>3</sub>Co<sub>3</sub>C などの相が存在することが報告されている<sup>(11)(12)</sup>。こうした組織領域の形成は、超硬合金の高硬度・耐磨耗性を損なう要因となる。したがって、超硬合金の L-PBF 造形では、その微視組織を制御しながら造形を達成する必要がある。そのためには、L-PBF 法のプロセスパラメータ(レーザー出力, 走査速度, スポット径, etc.)の最適化が必要不可欠である。本研究では、機械学習などのデータ科学を活用することで効率的にプロセスパラメータを最適化することに取り組んだ<sup>(13)</sup>。

### 3. 画像認識による組織情報の定量化

機械学習を用いるために、組織情報を定量化する必要がある。

本研究の場合、WC 分解領域を抑制することが目的のため、SEM 像における WC 分解領域の面積率( $A_d$ )が定量情報としては有効である。 $A_d$ を定量化するためには、WC 分解領域とそれ以外の領域に分ける二値化処理を実行すればよい。しかしながら、図 1(b)に示されるように、WC 分解領域と WC 二相領域はそれぞれに明部・暗部を含むため、階調に閾値を設定する一般的な二値化処理ではその判別が困難である。そこで本研究では、階調だけでなく、組織の形態情報も基準として組織を判別できる畳み込みニューラルネットワーク(Convolutional Neural Network; CNN)による画像認識を活用した。CNN は教師あり機械学習手法の一つであり、組織画像とそれに対応する情報(特性などの数値情報やセグメントした画像)を学習させる。本研究で言えば、組織画像とそれを各領域(WC 分解領域, WC/Co 二相領域)にセグメントした画像を学習させる。その後、学習に用いていない画像を入力すると、学習に基づく基準によって組織を判別し、セグメンテーションを行う。よって、この方法を用いるためには、教師画像とそれをセグメントした画像を用意する必要がある。しかしながら、超硬合金の組織画像を教師データとした場合、その画像を手作業でセグメントする必要がある、CNN を用いる利点が少ない。そこで教師画像を簡便に取得するために、本研究ではシングルトラック試験を行った。

シングルトラック試験(図 2(a))は、バルク体や粉床にレーザーを一度だけ走査するものであり、L-PBF 法においてはレーザー照射による溶融挙動や組織変化を基礎的に調べるためによく行われる。本研究では、超硬合金の焼結体にレーザーを種々の条件で走査する実験を行った。その結果、図 2(c)に示す組織画像を得た<sup>(13)</sup>。このとき、図 2(b)に示すように、レーザー照射中心部に近い箇所では、L-PBF 造形体における WC 分解領域と似た組織形態が認められた。実際にこの領域を解析すると、W<sub>2</sub>C や  $\eta$ -W<sub>3</sub>Co<sub>3</sub>C の存在が認められた。レーザー照射中心部付近は特に温度が上昇するため、温度上昇と WC 分解領域の形成には密接な関係があると考えられる。C-Co-W 三元系状態図では、本研究で用いた原料粉末組成では WC の溶融温度まで W<sub>2</sub>C や  $\eta$ -W<sub>3</sub>Co<sub>3</sub>C の形成は予想されない<sup>(11)</sup>。また、Scheil の条件に基づく非平衡凝固シミュレーションにおいても W<sub>2</sub>C の形成は予想されない<sup>(10)</sup>。一方、L-PBF 造形体や WC 分解領域の組成分析の結果から、レーザー照射によって Co や C が気化することが示されている<sup>(11)(12)</sup>。こうした組成シフトを考慮すると、非平衡凝固シミュレーションにおいて W<sub>2</sub>C や  $\eta$ -W<sub>3</sub>Co<sub>3</sub>C の形成は予想される<sup>(10)(11)</sup>。すなわち、WC も溶融と Co, C の気化に伴う組成シフトを経た後、L-PBF プロセスの速い冷却速度に起因した非平衡凝固過程によって W<sub>2</sub>C や  $\eta$ -W<sub>3</sub>Co<sub>3</sub>C が形成すると考えられる。一方、レーザー照射中心部から離れると、温度は WC の融点に達しないため、Co のみが溶融し、WC/Co 二相組織が維持される。つまり、L-PBF 造形体で見られた 2 つの組織領域は、領域ごとに到達温度に差が生じ、異なる溶融・凝固挙動を示した結果として形成したものと考えられる。シングルトラック試験により得られた組織画像で

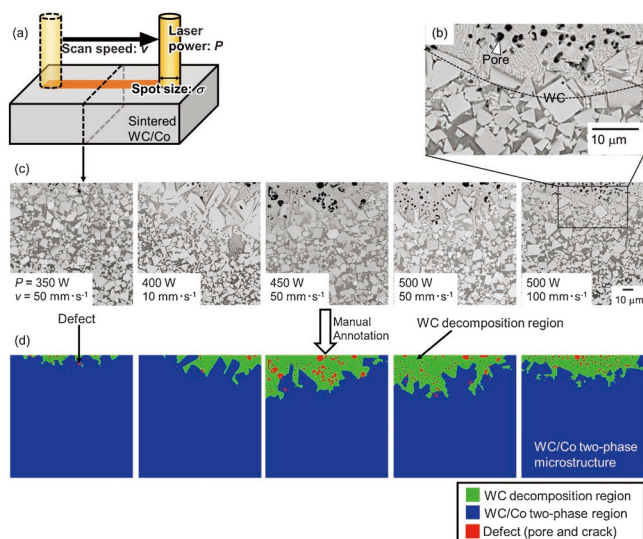


図2 (a) シングルトラック試験の模式図および(b) WC/Co 超硬合金のレーザー照射部断面の代表的な微視組織。(c) 種々の条件でシングルトラック試験を行った WC/Co 超硬合金の SEM 像および手動で領域をセグメントした画像<sup>(13)</sup>。

は、このような2つの組織領域が明瞭に判別でき、手作業でセグメントすることも比較的容易である。そこで、こうした画像を図2(d)のように WC 分解領域、WC/Co 二相領域、欠陥の3つの領域にセグメントし、教師画像として用いた(実際の教師画像は図2(c), (d)も含めて13組の画像を用いた)。

レーザー出力、走査速度、スポット径をプロセスパラメータとして、約30条件で超硬合金の L-PBF 造形を行った。造形体の組織を SEM により観察し、上述のシングルトラック試験の組織画像を学習させた CNN により組織のセグメンテーションを行った。その結果の代表例を図3に示す<sup>(10)(13)</sup>。シングルトラック試験の組織画像を教師データとしても、概ね正しいセグメントが行えることが明らかとなった。シングルトラック試験による教師データ収集は、金属積層造形による他の材料系に应用が可能である。得られたセグメント画像から、 $A_d$  を定量化し、レーザー出力、走査速度、スポット径に対してプロットしたものを図3(b)に示す<sup>(10)</sup>。図中の×印で示されるプロットは、レーザーに投入エネルギーが小さかったため、造形時に固化しなかった条件である。○印で示されるプロットは、立方体形状の試料が作製可能であった試料であり、プロットの色で  $A_d$  を区別している。これらの結果から、低出力、低走査速度、大スポット径において、試料が固化するとともに  $A_d$  が小さい傾向が確認できる。

#### 4. 回帰・分類分析による定量化情報の解析と最適条件推定

組織情報を定量化できれば、様々なデータ解析の手法を適用することができる。その一例を図4に示す<sup>(13)</sup>。例えば、

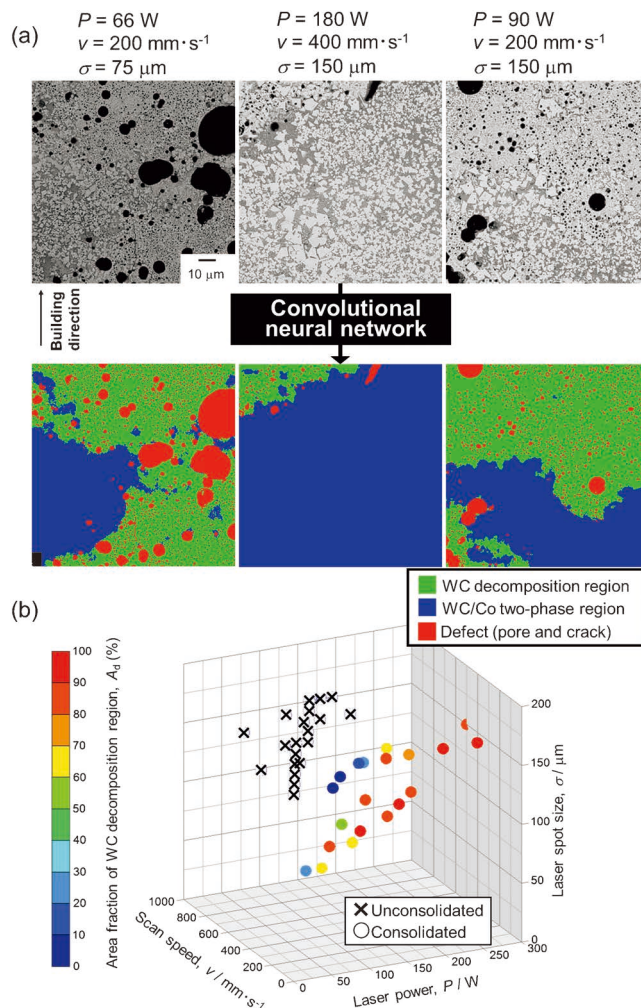


図3 (a) 種々の条件で L-PBF 法により作製した WC/Co 超硬合金の SEM 像および(b) シングルトラック試験のデータを学習させた畳み込みニューラルネットワーク(CNN)により領域をセグメントした画像。(c) WC 分解領域の面積率( $A_d$ )と  $P$ ,  $v$ ,  $\sigma$  の関係<sup>(9)</sup>。

レーザー出力、走査速度、スポット径を説明変数、 $A_d$  を目的変数とした線形重回帰分析を行い、各説明変数の回帰係数を求めた結果を図4(a)に示す。レーザー出力は正、走査速度とスポット径は負の回帰係数を持つことが分かる。このことから  $A_d$  は、高レーザー出力、低走査速度、小スポット径ほど大きくなる傾向がある。加えて、この回帰係数の絶対値から、各説明変数の重要度が理解できる。すなわち、レーザー出力が最も  $A_d$  に与える寄与が大きく、走査速度が最も寄与が小さいことが分かる。

一方、こうした定量化情報から好適なレーザー条件の範囲を推定することも可能である。例えば、レーザー条件をサポートベクターマシン(SVM)により、 $A_d=0.1$  を閾値として、分類した結果を図4(b)に示す。図中に示される平面が SVM による分類境界を表す。主にレーザー出力とスポット径を重視した分類が行われていることが分かる。この分類は、上述の重回帰分析において走査速度の重要度が最も低いことと対応する。一方、図4(c)に試料が固化するかどうかを基準として

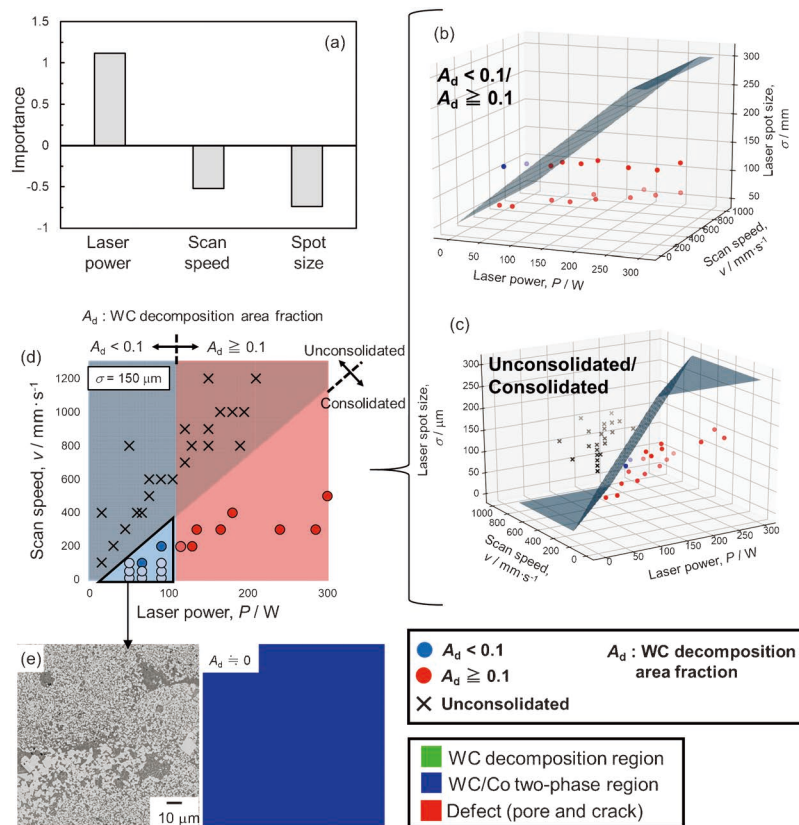


図4 (a)  $A_d$  と  $P$ ,  $v$ ,  $\sigma$  の関係を重回帰分析した際の回帰係数<sup>(13)</sup>. (b)  $A_d < 0.1/A_d \geq 0.1$  or (c) unconsolidated/consolidated を基準としたサポートベクターマシン(SVM)によるレーザ条件の分類および(d) それらの  $\sigma = 150 \mu\text{m}$  における断面<sup>(13)</sup>. (e) SVM による推奨条件の一つ( $P=50 \text{ W}$ ,  $v=10 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ , and  $\sigma=150 \mu\text{m}$ )で造形した WC/Co 超硬合金の微視組織と CNN によるセグメント画像<sup>(13)</sup>.

レーザ条件を分類した結果を示す. 試料の固化の可否に対しては, レーザ出力, 走査速度, スポット径のすべてが寄与する分類が行われている. このように, 分類の基準によってレーザ条件の寄与度は大きく異なる. この二つの分類結果を重ね合わせ, スポット径を  $150 \mu\text{m}$  に固定した平面を表示したものを図 4(d) に示す. この図において, 横軸に垂直な線が  $A_d$  を閾値とした分類, 斜めの線が試料の固化を基準とした分類である. よって, 図中の太線で囲まれた三角形内のレーザ条件では, 試料が固化するとともに,  $A_d$  を 0.1 以下に低減できることを示している. そこで, この三角形内の条件で追加の造形を行った. その中でレーザ出力  $50 \text{ W}$ , 走査速度  $10 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$  で造形した試料の断面 SEM 像と CNN によるセグメンテーションの結果を図 4(e) に示す. この条件において試料は固化し, かつ WC 分解領域の  $A_d$  はほぼ 0 であることが確認された. このように, CNN による定量情報と SVM による分類分析を活用することで, 超硬合金の微視組織を制御できるレーザ条件の最適化に成功した. 一方で, 図 4(e) に示される組織には不均一性が認められ, 局所的に WC 粒子が認められない領域や WC 粒子が成長・粗大化した領域が観察される. WC 粒子が認められない領域は Co リッチの液相が原料粉末間の隙間や原料粉末内に存在した気孔に流入し, 凝固した箇所であると考えられる. また, WC 粒子が成長・粗大化した箇所は, プロセス中にレーザ照射中心部に近

かった箇所と推定される. それにより, 局所的に高い温度に到達し, Co リッチの液相を介した原子拡散が促進され, WC 粒子が成長・粗大化したと考えられる. こうした組織の均一化は, 今後の課題である.

## 5. 移動熱源シミュレーションによる温度場解析

上述のように, 機械学習やデータ解析の手法を活用することは, 画像解析の効率化, レーザパラメータの重要度解析, 最適レーザ条件探索などに有効である. 一方で, データ科学手法は総じて帰納的な方法論である. すなわち, データに含まれる傾向から, レーザパラメータという説明変数と  $A_d$  という目的変数間の相関関係を導いている. しかしながら, データ科学手法のみでは, 「なぜ  $A_d$  に対してレーザ出力の寄与が最も大きく, 走査速度の寄与が最も小さいのか」といった原理を理解することは困難である. こうした原理を理解するためには, 物理的なモデルに基づく演繹的な方法論, すなわちシミュレーションが有効と考えられる.

シングルトラック試験の結果より, WC 分解領域はレーザ照射中心部付近に形成される. これは, レーザ照射によって温度が WC の融点以上に到達することに起因すると考えられる. すなわち, レーザパラメータと微視組織の相関関係には到達温度という因子が密接に影響していると考えられる.

そこで本研究では、移動熱源モデルによる温度場解析を試みた。移動熱源モデルとしては、移動する点熱源を仮定する Rosenthal の式が広く用いられている<sup>(14)–(18)</sup>。しかしながら、本研究ではレーザ出力と走査速度に加えてスポット径の寄与も解析するため、点熱源を仮定するモデルでは不十分である。一方、Eager と Tsai はガウス分布型のエネルギー分布をもつ移動熱源による温度場解析のモデルを提案している<sup>(19)</sup>。本研究で用いた積層造形装置においてもレーザのエネルギー分布はガウス分布に従うため、本モデルが有効と考えた。Eager と Tsai による温度場  $T(x, y, z, \tau)$  は以下により定式化される。

$$T(x, y, z, \tau) - T_0 = \frac{P}{\pi \rho c \sqrt{4\pi\alpha}} \int_0^\tau \frac{\exp\left\{-\frac{(x-v\tau')^2 + y^2}{4\alpha(\tau-\tau')} - \frac{z^2}{4\alpha(\tau-\tau')}\right\}}{\sqrt{(\tau-\tau')\{2\alpha(\tau-\tau') + (\sigma/4)^2\}}} d\tau'$$

ここで、 $T_0$  は基準温度、 $P$  は熱源の出力、 $\rho$  は密度、 $c$  は比熱、 $\alpha$  は熱拡散率、 $v$  は熱源の移動速度、 $\sigma$  はスポット径(熱源のエネルギーが最大値の  $1/e$  になる位置で規定した円の直径)、 $x, y, z$  は空間座標、 $\tau$  は時間、 $\tau'$  は  $\tau$  に至るまでの時間をそれぞれ表す。モデルの概略図を図 5(a) に示す。本モデルでは、半無限固体を仮定し、 $z \leq 0$  の領域全体に固体が存在する。ガウス分布型の熱源は  $x$  方向に一定速度  $v$  で移動する。このモデルでは、固体の熔融や液相の流動は解析できないため、得られる温度場は定量的には実験と一致しないと考えられる。一方で、レーザパラメータ  $P, v, \sigma$  が温度場に与える影響について半定量的に議論することが可能である。図 5(b) に代表座標  $(x_0, 0, 0)$  における温度と時間の関係を示す。ここでは、基準となるレーザ条件として、(i)  $(P, v, \sigma) = (150 \text{ W}, 100 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}, 150 \mu\text{m})$  を設定し、そこから走査速度を半分(条件(ii))、スポット径を半分(条件(iii))、レーザ出力を 2 倍(条件(iv))にした条件をそれぞれ解析した。縦軸の温度は条件(i)における最高到達温度で規格化している。また、横軸が 0 のとき熱源の中心と代表座標の位置が一致する。条件(i)に対して走査速度を半分にした条件(ii)では、全体的に温度変化が緩やかになったものの、最高到達温度は条件(i)と比べてほとんど変化しない。一方で、スポット径を半分あるいはレーザ出力を 2 倍にした条件(iii), (iv)では最高到達温度が約 2 倍になることが分かる。条件(iii)と(iv)については、図 5(c)–(f) に温度場を示す。この温度場は、熱源の中心が代表座標の位置と一致した時間における温度場を  $x$ – $y$  平面および  $z$ – $y$  平面上にそれぞれ表示したものであり、最高到達温度に対して、0.8 倍、0.6 倍、0.4 倍となる位置がコンター色の境界と対応する。この結果から、これら 2 つの条件では、最高到達温度はほぼ同じである一方、高い温度に到達する空間的範囲が条件(iv)の方が広いことが分かる。以上をまとめると、走査速度を低下させても最高到達温度にはほとんど寄与しない、スポット径を絞るあるいはレーザ出力を増加させると最高到達温度が大きく上昇する、レーザ出力を増加させた場合の方が高い温度に到達する空間的範囲

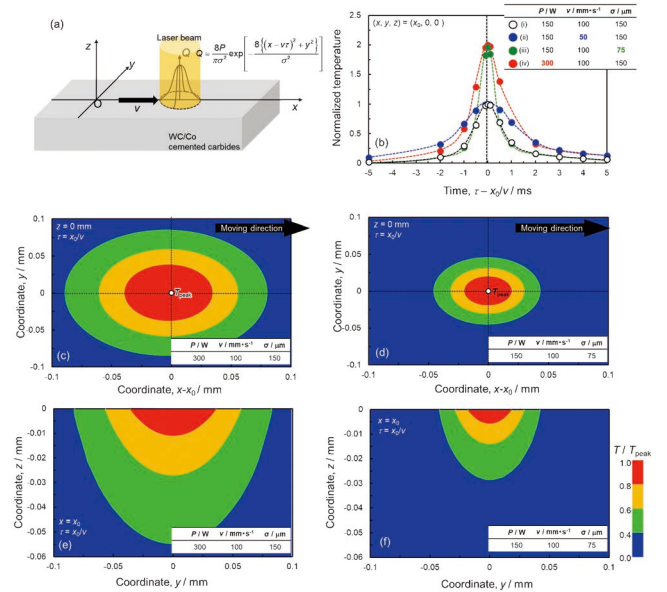


図 5 (a) Eager と Tsai<sup>(19)</sup> によるガウス分布型のエネルギー分布を有する移動熱源モデルの模式図。(b) 種々の条件下での  $(x_0, 0, 0)$  における規格化温度と時間の関係<sup>(13)</sup>。規格化温度は、各条件における温度を条件(i)  $P=150 \text{ W}$ ,  $v=100 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ ,  $\sigma=150 \mu\text{m}$  における最高到達温度で除したものである。 $\tau = x_0/v$  における (c), (d)  $z=0 \text{ mm}$  と (e), (f)  $x=x_0$  での断面における温度のコンター図<sup>(13)</sup>。条件は (c), (e)  $(P, v, \sigma) = (300 \text{ W}, 100 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}, 150 \mu\text{m})$  および (d), (f)  $(150 \text{ W}, 100 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}, 75 \mu\text{m})$  である。

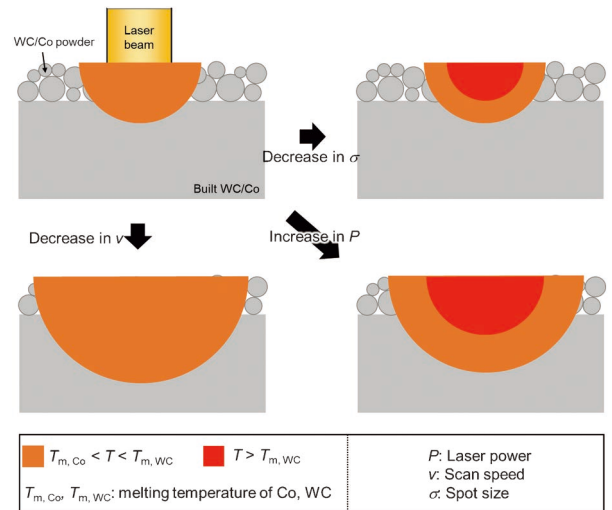


図 6 温度場および WC 分解領域の形成に及ぼす  $P, v, \sigma$  の寄与の模式図<sup>(13)</sup>。

が広いことが明らかとなった。

これらの結果から、 $A_d$  に与えるレーザ条件の影響は図 6 に示した模式図を用いて考える。まず、議論を簡略化するため WC 分解領域は到達温度が WC の融点を越えた範囲で形成され则认为(厳密には、温度上昇に伴う Co や C の気化に伴う組成のシフトも考慮する必要がある)。ある条件で WC の融点に到達しなかったと仮定すると、そこからレーザ

本研究を遂行するにあたり、名古屋大学工学研究科小橋 眞教授、高田尚記准教授、あいち産業科学技術総合センター加藤正樹主任研究員、梅田準史氏、フジミインコーポレーテッド伊部博之氏に多大なる協力を頂いた。また、機械学習による解析は、名古屋大学大学院生の柴勇輔君の尽力によるものである。本稿で紹介した内容は、科学技術交流財団の知の拠点あいち重点研究プロジェクト第II～IV期、科学研究費補助金の学術変革領域(A)公募研究(JP22H05281)、科学技術振興機構(IST)の戦略的創造研究推進事業(ACT-X、

# 永久磁石の保磁力メカニズム

## 第3回 原子描像のアプローチ

広 沢 哲\*

前回まで<sup>(1)(2)</sup>に見てきたように、工学的に信頼できる保磁力の正確な理論予測のためには、有限のエネルギー障壁を熱活性化過程で乗り越えるといった、熱揺らぎの効果を取り込んだ取り扱いが必要である。材料を連続的な媒体とみなして磁気物性値を温度と位置の関数として表現する議論では結晶粒界や結晶表面の原子配列の乱れなどの効果を直接取り扱うことができない。結晶や粒界の元素配列に基づいた磁性の第一原理計算に基づいて、局所の磁化を構成する原子各個の磁気モーメントの熱運動を取り扱うことのできる、原子描像のアプローチが必要である。このアプローチには、有限の大きさの結晶モデルに配置した全ての原子磁気モーメントの磁化反転過程のダイナミクスを直接計算する方法と、それら多数の原子磁気モーメントの統計的な挙動を確率論によって計算し、有限温度で磁化反転核が生成するプロセスの自由エネルギー障壁を計算する方法があり、両者の結果を比較することで、その整合性が検証されている。本講座の最終回はそのような原子描像のアプローチを紹介し、それらが示唆するところに基いて、熱揺らぎの効果から磁石の高温特性を守るために考慮すべき点について考察する。

### 9. 原子描像の考え方

前回までに、マイクロマグネティックスの基本的な定式化で使われている連続体描像の範囲では取り扱えない、原子尺度のミクロな視点で議論すべき課題があることを指摘してきた。最近、有限温度での実際の磁化過程を個々の原子の磁化の運動を考えて磁化反転過程を記述するという立場の研究が進歩を遂げている。最近の総合的な文献としては、宮下清二らのレビュー(オープンアクセス)<sup>(3)(4)</sup>がある。最近、本学会誌にも西野正理の解説<sup>(5)</sup>が掲載された。本稿ではこの考え

方を原子描像のマイクロマグネティックスと呼ぶことにする。

原子描像のマイクロマグネティックスを用いて有限温度の保磁力を扱う方法の概要を図17に示す。大きく分けて、系の熱平衡状態の物理量をモンテカルロ法により計算する方法と、エネルギーをその原子磁気モーメントに働く有効磁界として表現してその下での磁気モーメントの運動を熱揺動の効果を入れた確率的ランダム・リフシッツ・ギルバード(SLLG)方程式を使って計算する方法とがある。原子磁気モーメントのエネルギーを原子磁気モーメント間の交換結合と双極子相互作用のエネルギー、および、結晶磁気異方性エネルギー等の和として表現する点は両者とも共通である。前者では磁気モーメントや磁壁のエネルギー、磁化反転核のエネルギーなどが計算でき、後者では磁化反転の時間発展過程を直接計算し、磁化反転核が生成する様子を視覚化したり、平均の緩和時間を求めたりすることができる。実際にそのようなダイナミクスの計算ができるのは最近のコンピュータでも

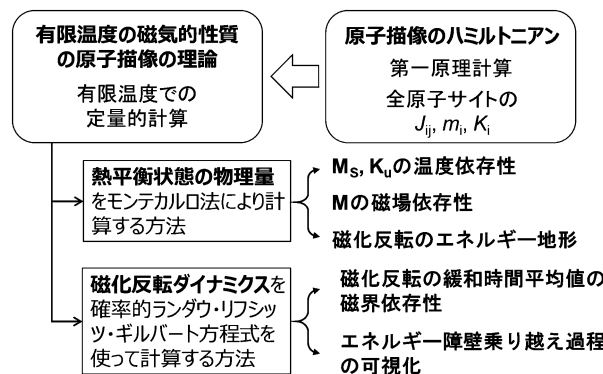


図17 有限温度の保磁力を扱うための原子描像マイクロマグネティックス計算<sup>(3)(4)</sup>のアプローチ。

\* 物質・材料研究機構；特別研究員(〒305-0047 つくば市千現 1-2-1)

Mechanisms of Coercivity of Permanent Magnets: 3. Atomistic Approaches; Satoshi Hirosewa\*(\* Materials Open Platform for Permanent Magnets, National Institute for Materials Science, Tsukuba)

Keywords: spin magnetic moment, atomic spin, micromagnetics, finite temperature, Monte-Carlo method, stochastic LLG, thermal fluctuations, microstructure

2022年12月19日受理[doi:10.2320/materia.62.470]

1 ナノ秒以下の時間領域にしか過ぎず、取り扱うモデルの空間サイズは数十 nm 径の小ささという制約があるが、物理的根拠が明確な第一原理計算の情報と温度の効果を入れて物理的な洞察を助けるという点に大きな意義がある。

原子描像のマイクロマグネティックスの連続体描像にない利点は、結晶構造とその格子点に入る原子種を決めれば、第一原理計算を使って非経験的にエネルギーの計算をすることが原理的に可能であり、磁化反転に関与する微小な領域の磁化や結晶磁気異方性といった物性の測定値や、恣意的なパラメータを用いることなく磁化反転過程を取り扱うことが、原理的にできる点にある。さらに、熱揺らぎの効果を直接取り扱うことができる点は原子描像の最大の利点であろう。特に、磁化反転核の生成に局所的な磁気モーメントの熱揺らぎがどのように拡大して反転核の生成に至るかを調べるには、実際に熱揺動を入れたダイナミクスをシミュレートしてスナップショットとして画像化してみるのが直接的である。熱揺動の影響はその効果を表す時間的にランダムに方位を変える磁場成分として表現される。最近の研究を紹介しつつ両者の関係がどうなっているかも見てみよう。

## 10. 原子描像による磁気物性値の熱平衡値

本講座の初回冒頭の問題提起の一つは、従来の保磁力の議論では有限温度での保磁力を原子レベルの組織構造と関連付けることができていなかったという点であった。Nd-Fe-B 磁石のプロット型の磁壁幅は約 4.2 nm であるのに対して、Nd<sub>2</sub>Fe<sub>14</sub>B の結晶格子の単位胞は *a* 軸方向が約 0.88 nm、*c* 軸が約 1.221 nm である。磁壁の厚み方向は単位胞およそ 5 個分しかない。これはすでに個々の原子の挙動を離散的に取り扱うべき領域ではないのか、といったことを議論した。

磁化反転過程を記述するためのエネルギー式には少なくとも結晶格子に置いたスピン間の交換結合  $J_{ij}^{\text{ex}}$  と各サイトの結晶磁気異方性、一様な外部磁界とスピン磁気モーメントとの静磁気相互作用が含まれる。例えば Nd<sub>2</sub>Fe<sub>14</sub>B (図18(a)) は単位胞に68個の原子を含み、磁壁幅よりも十分大きい一辺およそ 10 nm の立方体の磁化反転を調べるには、11×11×8=

968個のユニットセル(約 9.68 nm×9.68 nm×9.76 nm)に含まれる65,824個の原子スピンを扱う必要がある(Bにも小さいが磁気分極があるので数に入れる)。これらの原子スピン間全ての交換結合定数  $J_{ij}^{\text{ex}}$  の個数は膨大であるが、文献(6)にスピン成分との積の数表が提供されている。図18(b)にグラフ化したものを示す。遍歴電子系の磁性体なので、スピン対間の交換エネルギーが遠距離まで有限の値を持つことが分かる。

梅裕太ら<sup>(7)</sup>が行った計算では、希土類イオンの結晶磁気異方性は結晶場モデルを使って記述し、遷移金属原子の *i* サイトでの磁気異方性エネルギー、希土類イオンの *i* サイトでの結晶磁気異方性エネルギーで表記して、

$$\mathcal{H} = -2 \sum_{i < j} S_i J_{ij}^{\text{ex}} S_j \mathbf{e}_i \cdot \mathbf{e}_j - \mu_0 \sum_i \mathbf{m}_i \cdot \mathbf{H}_{\text{ext}} - \sum_{i \in TM} D_i^A (e_i^z)^2 + \sum_{i \in RE} \sum_{l=2,4,6} \bar{\theta}_i^l A_{l,i}^m \langle r^l \rangle_i \hat{O}_{l,i}^{m_i} \quad (30)$$

と書き表している。右辺は第1項から順に、交換相互作用、印加磁界による静磁気エネルギー、鉄サイトの磁気異方性、希土類サイトの磁気異方性のそれぞれの全サイトにわたる和である。 $\mathbf{e}_i$  はサイト *i* のスピンの方位ベクトル、 $D_i^A$  はサイト *i* の微視的な磁気異方性定数である。右辺第4項の希土類サイトの 4f 電子の磁気異方性は孤立した3価イオンの結晶場理論に従って記述されており、 $\bar{\theta}_i^l$  は電荷分布の球対称性からのずれを表すスティーブンス因子、 $A_{l,i}^m$  と  $\hat{O}_{l,i}^{m_i}$  は結晶場係数とスティーブンス演算子、 $\langle r^l \rangle_i$  は 4f 電子の空間分布である。各項の指数 (*l, m*) は各サイト (*i*) の結晶場ポテンシャルを球面調和関数  $Y_l^m$  で表現する際の係数の指数である。各原子の磁化  $\mathbf{m}_i$  は Fe と B についてはスピン磁気モーメントであり、希土類原子については 4f 電子以外のスピン磁気モーメントと結晶場理論に従って求められる 4f 電子の磁気モーメントとの和である。また、原子スピン間の双極子相互作用は、取り扱うモデルのサイズが数十 nm まででは交換相互作用と比較して小さいので、無視されている。

我らは Nd<sub>2</sub>Fe<sub>14</sub>B の磁性について希土類サイトの磁気異方性を除いて第一原理計算によって各原子サイトの磁気パラメータを決定し、結晶場パラメータは磁化困難方向の磁化曲線

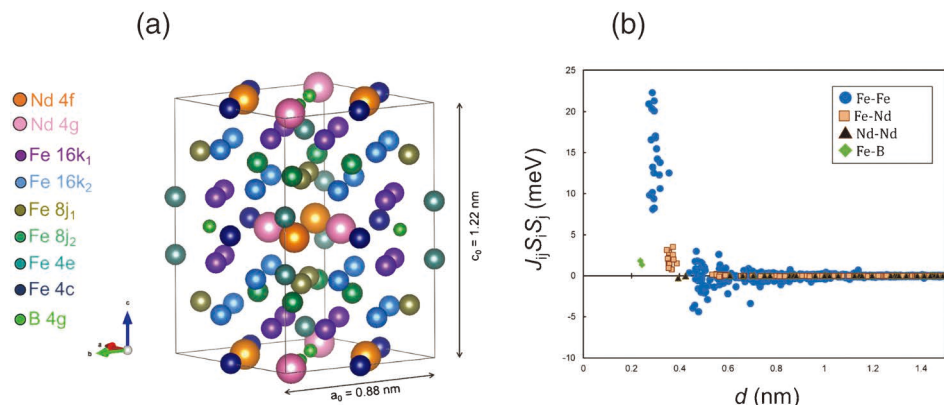


図18 Nd<sub>2</sub>Fe<sub>14</sub>B の結晶構造(単位胞)とサイト *i-j* 間の交換結合エネルギーの原子間(*d*)距離依存性<sup>(6)</sup>。(オンラインカラー)

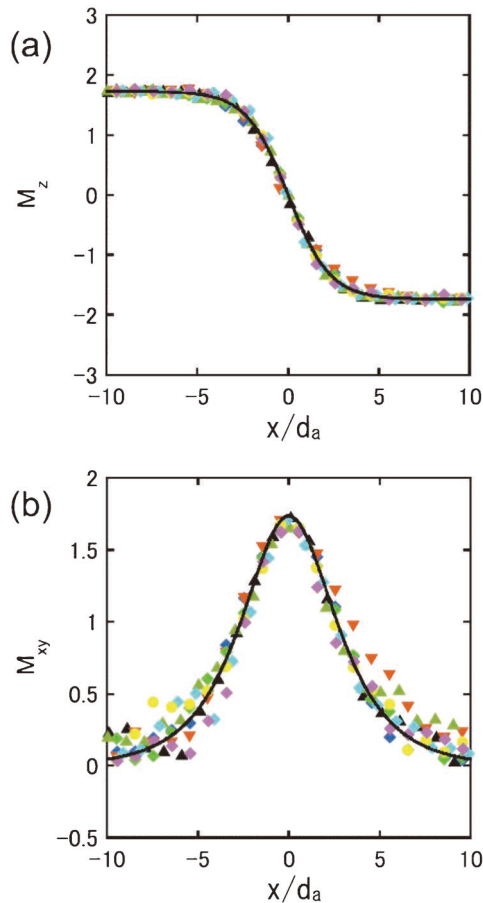


図19  $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$  におけるブロッホ磁壁のモンテカルロシミュレーション結果<sup>(8)</sup>。横軸を磁壁中心からの距離( $a$  軸長( $d_a$ )単位), 縦軸を磁化の $z$ 成分( $M_z$ ) (a) と  $x$ - $y$  成分の自乗平均値の平方根( $M_{xy}$ ) (b) とした場合のモンテカルロシミュレーションにおける熱平衡状態のスナップショット(複数回の重ね合わせ)。この表現での磁壁の関数形は磁化の回転角で表現した場合は異なっている点に注意。Reused under the Creative Commons Attribution 4.0 International license from Ref. (8). (オンラインカラー)

を再現するように決められた数値を用いて, 最大  $6 \times 6 \times 6 = 216$  ユニットセル (14,688 原子) のモデルに対して, 磁化の温度変化, 磁化曲線, および, 結晶磁気異方性の温度変化を計算し,  $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$  の磁性について測定結果をほぼ再現できることを示した。キュリー温度については, スピン間交換結合のカットオフ半径に強く依存するうえ, 計算値が実験値より数百 K 高温側にずれている。しかし, このずれは絶対零度でのみ正確な第一原理計算で決めた交換結合定数を使用した結果であり, 温度軸をキュリー温度でスケールし直すなどの方法を使えば, 我々の目的には十分定量的な議論ができる。この研究によって, 我々は原子描像のモデルを使って永久磁石の使用温度での保磁力の問題を扱うために必要な有限温度の磁性をある程度正確に記述できる手法を手にすることができたと言える。

さらに, 保磁力に関係する最も基本的な磁化の局所ねじれ構造である磁壁についても, 西野正理らが同様のスピンモデ

ルを用いて解析している<sup>(8)</sup>。彼らは有限サイズの角柱状の結晶モデルを使い, 両端面のスピンを逆方向にした時にどのような磁化分布が確からしい状態として表れるかを, モンテカルロ法を使って計算した。温度の効果はモンテカルロ法のボルツマン確率因子によって取り扱われる。本稿第1回<sup>(1)</sup>の図3と比較するため, いくつかのシミュレーションのスナップショットを下記図19に引用する。これらの計算から, ブロッホ磁壁の $c$  軸方向の磁化成分の期待値( $M_z$ ) が連続体描像で得られている関数形  $\tanh(x/\delta_0)$  で近似できるだけでなく, 磁壁幅の温度依存性も  $\text{Nd-Fe-B}$  系の実験結果(実験値は広くばらついているが)とおおむね合致することが示された(ここで,  $\delta_0 = \sqrt{A/K_1}$  は磁壁特性長)。また, 磁化の横成分の値も連続体描像の  $\cosh^{-1}(x/\delta_0)$  に従う。連続体モデル(実線)の磁化方向を向かない原子磁気モーメントが確率的に存在するため, その振幅は $c$  軸方向の磁化の値よりも数%小さく, 両端付近でも有限の値(揺らぎ成分)を持っている。

以上述べた二つの研究で, 原子描像のマイクロマグネティックス計算を用いて, 磁壁幅程度の局所的な磁気構造の有限温度における自由エネルギーの計算をするための手法が準備された。これらは最低エネルギー状態の原子磁気スピンの方向を決定するものではなく, 数多く存在し得るスピン配列を含んだアンサンブルの熱的挙動を記述している点に注意いただきたい。非常に多くの原子磁気モーメントの集団が示す実際の材料における挙動を理解するにはこれらのアプローチが有効であると思われる。永久磁石材料に対する原子描像のアプローチは海外でも近年盛んに研究されており,  $\text{Nd-Fe-B}$  磁石を扱ったものとしては, S. C. Westmoreland ら<sup>(9)(10)</sup>や, Qihua Gong ら<sup>(11)(12)</sup>の論文を挙げることができる。

## 11. 逆磁区核発生のエネルギーバリア

磁化反転のエネルギーバリアの形状を, 連続体のマイクロマグネティックスシミュレーションを使って最低エネルギー経路を求めることにより求めた例について前回述べたが, 有限温度では最低エネルギーではない状態を経由した磁化反転が確率的に発生することも議論した。原子描像のマイクロマグネティックスでは多数のスピンを向きをランダムに発生させるモンテカルロ計算を使って自由エネルギーを計算し, 磁化の $z$  方向成分  $M_z$  の関数として書き出すことによって, 多数の原子スピン状態のエントロピーの効果を含んだ自由エネルギー地形図を求める方法が, 梅らによって開拓された<sup>(13)</sup>。

この方法では, 原子スピンモデルを使って,  $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$  の微小孤立粒子における逆磁区核発生から磁化反転に至る過程の自由エネルギーバリアを磁化容易軸方向の磁化の関数として明らかにし, 外部磁界を逆向きに印加した時のエネルギー障壁の磁界依存性から, 緩和時間が1秒になる磁界を保磁力として, その温度依存性を求める。図20に自由エネルギーの  $M_z$  への依存性と, 自由エネルギー障壁の印加磁界依存性の結果を文献(13)から引用する。この図は本稿第2回<sup>(2)</sup>の概念図(図15)に対応する。図20(b)から結晶サイズが14.1

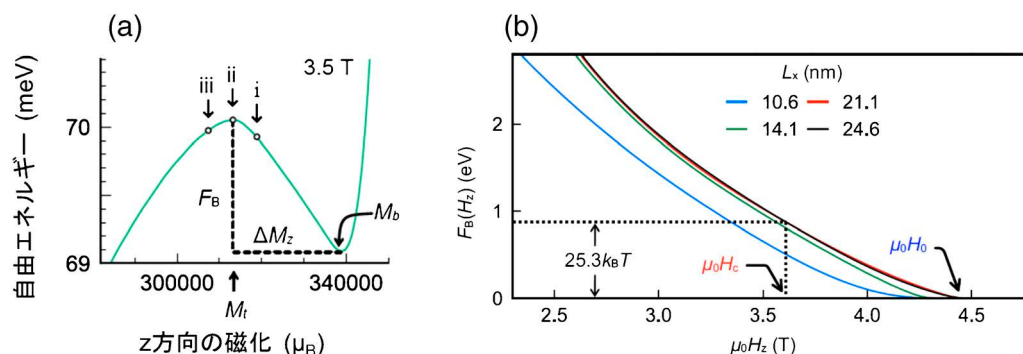


図20 室温(スピンモデルの計算値の46%の温度)における  $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$  単結晶 ( $14.1 \times 14.1 \times 14.6 \text{ nm}^3$ , 212,536 スピン) における印加磁界  $2.8 \text{ MA/m}$  ( $\mu_0 H = 3.5 \text{ T}$ ) 下の自由エネルギーと結晶の磁化の  $z$  成分(単位はボーア磁子  $\mu_B$ ) との関係(a), および, 自由エネルギー障壁 ( $F_B(H_2)$ ) の印加磁界 ( $\mu_0 H_2$ ) 依存性(b). 図中(a)図の小文字ローマ数字は i: 臨界核形成直前, ii: 臨界核, iii: 核発生後の状態を示す. Used under the Creative Commons Attribution 4.0 International License from Ref. (13) (modified). (オンラインカラー)

nm 以上で計算結果がほぼ収束したことがわかる。

連載第2回で, エネルギー障壁と緩和時間との関係を議論した際に, エネルギー障壁が  $\ln(10^{-11}) k_B T = 25.3 k_B T$  となる印加磁界が, 我々が通常の測定で観測する緩和時間1秒の保磁力  $H_c$  に対応すると考えられることを示した(式(16)). 緩和の無い場合の仮想的な保磁力  $H_0$  と比較すると,  $H_c$  はおよそ12%低い. これらは熱揺らぎを考慮しない場合は一斉回転粒子臨界径程度のサイズの  $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$  単結晶粒子についての, 室温の熱揺らぎの効果を入れた定量的な計算結果である. この研究により, 古典スピンモデルの範囲内ではあるが, 反転核生成過程のエネルギー障壁の正確な形が初めて明らかにされたと言える. なお, ここでは反磁界の効果は無視されているので, それを考慮すると, 得られた保磁力値は実験値と比較できる数値範囲に入る。

この計算から, 柵らはエネルギーバリアの頂点付近に磁壁生成から磁化反転した中心核が生成する過程への遷移に対応するカuspが頂点付近に現れることを初めて指摘した. 本講座第1回の図9で示した概念のように, 有限の厚みのある磁壁が生成する場合は, 磁化反転核生成初期の磁壁生成過程では自由エネルギーの増分が磁化が回転し始めた領域の体積にほぼ比例するのに対し, 磁化反転した核が現れるとその境界(磁壁)の面積にほぼ比例するようになるので, この二つの過程のクロスオーバー点で自由エネルギーの  $M_z$  依存性にカusp状の変化が現れる. この磁壁生成から中心核の生成までの磁気構造は印加磁界によって大きくは変わらないので, 保磁力近傍ではこのカuspの位置は磁界にあまり依存しない. これは, 上記のようなミクロな解析でなければ分からない特徴であり, 磁化反転の起点となる反転核の構造が印加磁界にほとんど依存しないことを示す重要な結果である。

前回の最後に議論した活性化体積についても, 上記の計算から定量的な数値が得られる. 図20(a)の  $\Delta M_z$  が活性化体積  $V_a$  の磁化の大きさ  $\Delta M_z = V_a M_S$  であり, 柵らの計算では  $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$  の一辺  $21.1 \text{ nm}$  および  $24.6 \text{ nm}$  の単結晶粒子について, 保磁力近傍では活性化体積がほぼ一定で, 室温でおよ

そ  $200 \text{ nm}^3$  であることが示された. 球として換算すると活性化体積(すなわち, 反転核)の半径はおよそ  $3.6 \text{ nm}$  となり, 本講座第2回目に紹介した磁気余効現象の測定に基づく解析結果と定量的によく一致している. 図20(b)のエネルギー障壁の印加磁界依存性の形は逆磁区の核生成過程に密接に関係していて, 古典的なマイクロマグネティックス理論の解析式と比較して議論することもできるが, 本稿では割愛する。

## 12. 磁化反転過程の時間発展

永久磁石材料では磁気記録材料やスピントロニクス材料とは異なり磁化反転過程のダイナミクスを追う必要はないが, 磁化の運動方程式に基づくシミュレーションは, 熱揺らぎの効果で多くのスピンの向きが時々刻々変化しつつ, 磁化反転領域がどのように局在化して成長するか, といったことを視覚化する有効な手段である. 実測される保磁力を定量的に予測するためには, 長くても1ナノ秒(ns)の時間スケールまでしか計算できないダイナミクスシミュレーションから1秒の時間領域を予測する手法について, 西野らの提案を以下に紹介する<sup>(14)</sup>.

原子スピンモデルでの原子サイト  $i$  の原子磁気モーメントの運動は, エネルギーを原子スピンモデルのハミルトニアン(式30)で表し, 各サイトに働く有効磁界  $\mathbf{H}_i^{\text{eff}}$

$$\mathbf{H}_i^{\text{eff}} = -\partial \mathcal{H} / \partial \mathbf{m}_i \quad (31)$$

と熱揺動の効果を用いた磁界,  $\xi_i(t) = (\xi_i^x, \xi_i^y, \xi_i^z)$ , の和として, サイト  $i$  の磁気モーメント  $\mathbf{m}_i$  の運動を確率的ランダム・リフシッツ・ギルバート(Stochastic Landau-Lifshitz-Gilbert; SLLG)運動方程式,

$$\frac{d}{dt} \mathbf{m}_i = -\frac{\gamma}{1 + \alpha_i^2} \mathbf{m}_i \times (\mathbf{H}_i^{\text{eff}} + \xi_i) - \frac{\alpha_i \gamma}{(1 + \alpha_i^2) S_i} \mathbf{m}_i \times [\mathbf{m}_i \times (\mathbf{H}_i^{\text{eff}} + \xi_i)] \quad (32)$$

を使って記述される. ここで,  $\gamma$  は磁気回転比,  $\alpha_i$  はギルバ

ートのダンピング係数である．ノイズ磁界は時間軸上でランダムに方位を変えるホワイトノイズで， $\xi_i(t)$ の振幅  $D_i$  は，

$$D_i = \frac{\alpha_i k_B T}{\gamma m_i} \quad (33)$$

により，熱エネルギー  $k_B T$ ，および，各サイトのダンピング係数と磁気モーメントと関連付けられる<sup>(15)</sup>．この関係式は熱平衡値を正しく与えるための条件から導かれる．ホワイトノイズを用いると熱揺動の効果が過大に見積もられる可能性があるが，量子効果のない古典スピン系のモデルとしてキュリー温度近傍(概ね室温以上)の振る舞いや熱平衡値は正しく与えられるので室温以上の議論では許容される<sup>(3)</sup>として議論を進める． $\alpha_i$ をサイトごとに知るのは容易でないので一定値  $\alpha$  として扱う( $D_i$ は  $m_i$ に逆比例することになる)．

一定の緩和時間での保磁力を問題にする場合は結果の  $\alpha$  依存性が問題となるが，西野らは非常に長い時間(計算可能な時間に対して)に対しては印加磁界の関数として緩和時間が急速に増大するので，確率論による保磁力の予測値があまり変わらず，前節の自由エネルギー障壁から求めた結果とほぼ一致することを示している<sup>(14)</sup>．以下にその議論を紹介する．

単位時間あたりの緩和頻度が  $p$  とすると平均の緩和時間は

$$\langle \tau \rangle = \frac{1}{p} \quad (34)$$

で与えられる．時刻 0 から  $t$  までに緩和現象が起こる確率は  $P(t) = 1 - e^{-pt}$  であり， $N$  回のシミュレーションサンプルの中で，この間に緩和(磁化反転)しないサンプルの数は  $Ne^{-pt}$  である．SLLG 方程式によるシミュレーションで磁化反転が起こるまでの時間は印加磁界により大きく変動し，印加磁界が系の  $H_0$  よりも大きい場合は非確率的(決定論的)に磁化反転が起こってしまうが，印加磁界が  $H_0$  よりもわずかに小さな一定の範囲では，シミュレーション時間中に磁化反転に至ったサンプルと磁化反転に至らなかったサンプルとが確率的に現れる．数多くのシミュレーションを実行して磁化反転に至らなかったサンプルの数  $Ne^{-pt}$  の対数を時間に対してプロットすれば(支配的な緩和メカニズムが同じ範囲では)直線関係が得られる．その傾きから緩和頻度  $p$  が求められ，式(34)から平均の緩和時間  $\langle \tau \rangle$  を知ることができる．

西野らは  $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$  の  $12 \times 12 \times 9$  単位胞(近似的に一辺約 11 nm の立方体)のモデルについて，緩和時間の印加磁界依存性を室温に相当するシミュレーションの温度で上記の解析を実施し，ダンピング係数を 0.1 とした場合，印加磁界 3.26 MA/m ( $\mu_0 H = 4.1 \text{ T}$ ) に対して  $p = 1.491 \times 10^9$  毎秒， $\tau = 6.71 \times 10^{-10}$  秒となることを見出した<sup>(14)</sup>．この緩和時間は通常の保磁力の測定に相当する緩和時間(1 秒)と比較すると，約 9 桁も短い．これを磁化測定の時間スケール(秒)の領域に外挿することにはあまり物理的な意味がないと考えることもできるが，緩和時間が印加磁界の減少と共に指数関数的に極めて急峻に増加するため，実際にはダンピング係数にはあまり依存しない値となることが示された．ダンピング係数が 0.1 から 0.2 の範囲で，室温の保磁力として，2.4 MA/m 近傍の

値が得られ，同じハミルトニアンを用いたモンテカルロシミュレーションで求められた自由エネルギー障壁から得られた値と良く一致することが確認されている．エネルギー障壁の解析から反転核のサイズは磁界によらずほぼ一定の値であることが示唆されたので，動的シミュレーションが可能な時間枠で磁化反転する程度の大きな印加磁界の下での磁化反転過程を種々の構造モデルに対して調べ，視覚化していくことには，一定の意味があると言える．

図21は  $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$  の  $12 \times 12 \times 9$  単位胞 (88,128原子) のモデルを使った室温，印加磁界 3.26 MA/m での磁化飽和状態からの一回の磁化反転初期過程について西野らが行ったシミュレーション<sup>(14)</sup>のスナップショットである．各原子磁化の向きはランダムに変化しながら立体の辺や頂点付近に全体とは逆方向(すなわち減磁界と同じ向き)を向いたスピンの高頻度で現れ始め，スピン間の方位相関のために次第にまとまった領域が揺らぎを伴いつつ形成されて，逆磁区核が形成される直前の過程が見て取れる．

直接シミュレーションの利点は，粒界相として強磁性で磁気異方性が小さい層が数原子層入ったモデルのような少し複雑な系についても，挙動を把握することができる点にある．実際の原子配列や原子間の交換結合定数 ( $J_{ij}$ ) 等がまだ決定されていない場合でも，粒界相の構造は主相と同一として物性値を人為的に変更するなどのモデルを採用すれば，磁化反転過程における原子レベルの挙動の理解に有益な知見が得られる．西野らは，粒界相を挟んだモデルを使った主相表面層の

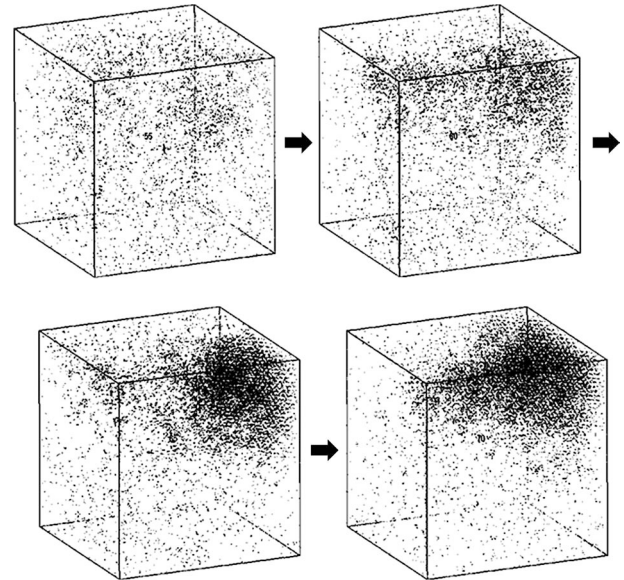


図21  $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$  の  $12 \times 12 \times 9$  単位胞 (88,128原子) のモデルにおける室温 (0.46 T<sup>at</sup>)，印加磁界 3.26 MA/m の下での磁化飽和状態からの磁化反転初期過程<sup>(13)</sup>のスナップショット (NIMS・西野正理博士作成の動画から承諾を得て作成．動画では全ての原子磁気モーメントが矢印で描画されており，赤色と青色で矢印の先端が上下半球のいずれにあるかが表現されているが，白黒印刷で分かりやすいように反転方向(下半球)を向いたスピンのみが黒い点で表現されるよう画像変換したものである．)

Nd の Dy による置換の磁化反転ダイナミクスへの影響について磁化反転の様子を公開している<sup>(16)</sup>。室温において希土類サイトの磁化の揺らぎが鉄サイトと比較して大きいことなど、動的過程から多くの示唆が得られている。

### 13. 原子描像のマイクロマグネティックスが磁石開発に教えてくれること

磁石材料のマクロの世界に対して数十 nm という非常にミクロな領域を扱う原子描像のマイクロマグネティックス解析を、何にどのように役立てるのかという点について、著者の思いを述べて本講座を終了したい。一般には、物理モデルに基づいた関数形を仮定して解析的に説明するという演繹的方法が有益だが、材料の組織に依存する保磁力の問題で実際の材料の改善につなげるには、問題の原因を推定する帰納法的なアプローチも重要である。永久磁石材料では、磁化反転開始の素過程は常に活性化体積がナノメートル(nm)オーダーの微小な領域であることを見てきた。エネルギー障壁の形を実際のミクロな核生成プロセスに基づいて具体的に知り、それを材料組織に基づいて局所の磁性を記述する理論計算と関連付けるところから、材料組織を改善する具体的な方針が得られることが期待される。

#### (1) 熱揺らぎ効果抑制の指針

熱揺らぎの効果を定量的に取り扱える点が、原子描像のマイクロマグネティックス計算の最大の利点である。本稿の第1回で反磁界の横成分がいわゆるブラウンパラドックスの説明要素の一つであることを指摘したが、本稿で紹介した原子スピンモデルの計算では双極子相互作用を無視しているので、その効果はない。しかし、母らが指摘しているように<sup>(13)</sup>、立方体の角部から磁化反転が開始する確率が高い。その要因は、立体の角部では磁壁の面積が小さくて済むことの他に、結晶頂点の表面では原子対の数が内部原子より大幅に少ないため、熱揺らぎの効果が大きくなることにある。そこで熱揺らぎを抑制する指針について考えてみよう。

#### (a) 希土類元素の選定

保磁力が高温でも大きく低下しない磁石を実現するためには、熱揺らぎを抑制する強い交換場によって原子磁気モーメントが高温までよく整列していることが重要と考えられる。特に希土類副格子の磁気異方性は副格子磁化のほぼ3乗に比例して変化するので、高温まで希土類副格子の磁化を維持することが効果的と考えられる。分子場理論の描像に従うと、3d 遷移金属との化合物では希土類副格子の磁化は3d 遷移金属副格子の磁化との弱い相互作用によって誘起されている。熱揺らぎの効果を抑制するには、その副格子間相互作用が大きいことが望ましい。この相互作用は、大雑把に言えば、4f 電子のスピン磁気モーメントの  $J$  方向の射影  $\mu_B(g_J - 1)J$  に比例すると考えられる。ここで  $g_J$  はランデ因子であり、希土類イオンの磁気モーメントと全角運動量量子数  $J$  との比例

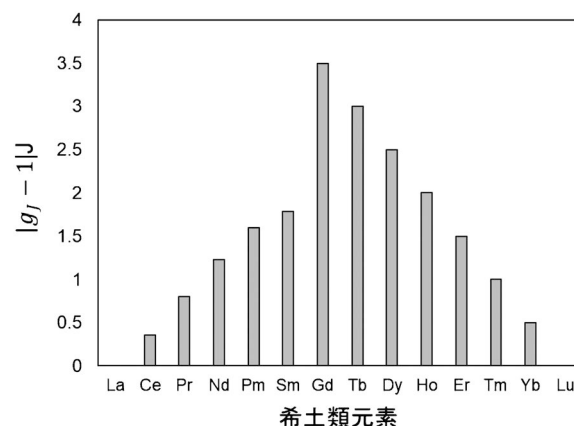


図22 ランタン系元素の3価イオン基底状態の  $(g_J - 1)J$  の絶対値の希土類元素による変化。

係数である。したがって、図22に示すように、 $(g_J - 1)J$  の絶対値が大きくなるランタン系中央(Gd)近傍でスティーブンス因子の絶対値が大きな希土類元素、すなわち、Sm と Tb が熱に強い希土類磁石創出に有利な元素ということになる。ただし、この議論は希土類元素の4f軌道が局在した場合を想定しているので、4f軌道の半径が大きい軽希土類側と4f電子が内郭に埋もれている重希土類側を同列に取り扱うことには注意が必要である。例えば、最近の第一原理計算による計算結果がNd<sub>2</sub>Fe<sub>14</sub>BとDy<sub>2</sub>Fe<sub>14</sub>Bについて示されており<sup>(3)(16)</sup>、NdとDyのFeとの交換結合エネルギーの差はほぼないことが分かっている。すなわち、軽希土類側では孤立した3価イオンの基底状態での推定値よりもかなり大きな磁気結合が希土類と3d遷移金属との間に働いている。

Dy添加による高温での保磁力改善効果の仕組みとして、Ndイオンでは低温でスピン再配列転移を引き起こす磁気異方性エネルギーの角度依存性のために、スピンの回転に対して回転角が直角方向付近のエネルギーバリアが常に低いという特徴が高温でも残るので、常に  $c$  軸方向にエネルギーの最低ポイントがあるDyの方がNdよりも高温でのエネルギーバリアが相対的に大幅に高くなるという効果を西野らが指摘している<sup>(16)</sup>。Nd-Fe-B磁石ではPrの利用が既に進んでいるが、PrもDyと同様の効果によって、ランタン系の端にありながらも、高い保磁力を室温直上付近まで維持することに貢献していると考えられる。

他方、過去には新たな磁石開発のテーマとしてCeの価数を3価にすることがしばしば試みられてきたが、もしもCeが3価になって大きなスティーブンス因子を獲得したとしても、 $(g_J - 1)J$ の絶対値が小さすぎるため、室温以上の温度では磁気異方性に対するCe<sup>3+</sup>の寄与は、熱揺らぎのため、あまり期待できないことも指摘できる。

一方、3d遷移金属の磁気異方性への寄与が高温では相対的に重要になる。これまでの理論計算では原子間の交換結合パラメータに基底状態の第一原理計算の結果が使われているが、R<sub>2</sub>Fe<sub>14</sub>B系では系統的にキュリー温度を過大評価する結果になり、有限温度では交換結合パラメータが実効的に減少

していることが示唆されている<sup>(17)</sup>。交換結合定数が温度に依存しないことは、3d および 4f 原子の副格子磁化を高温まで維持して結晶磁気異方性を保持することにより保磁力の温度依存性を抑制したい我々にとっては重要な要素である。交換結合定数の温度依存性は、今後の鉄基永久磁石の研究開発において重要な視点となろう。

#### (b) 結晶表面の熱揺らぎ抑制

保磁力の問題における結晶表面の効果については、結晶磁気異方性が表面では内部と大きく異なっていることや、実際の磁石材料では粒界相との界面の構造が結晶内部とは異なっていることなどがこれまでに指摘されている<sup>(18)(19)</sup>。その影響については、熱揺らぎ効果を考慮した解析が始まったばかりであり<sup>(20)</sup>、十分な理解には程遠い。有限温度での原子描像に立った解析のためには、副相との界面構造の詳細やその多様性を把握する必要がある、今後の課題として残されている。

他方、Nd-Fe-B 系焼結磁石では、磁石表面から Tb や Dy などの重希土類元素を粒界に沿って拡散させ、主相の結晶表面層に磁気的な硬さを強化したシェル層を形成することによって、保磁力とその温度依存性を強化する手法<sup>(21)</sup>が既に工業的に採用されている。また、Nd<sub>0.7</sub>Cu<sub>0.3</sub>などの低融点共晶合金を粒界浸透させて主相間に希土類リッチな層を形成し、主相間の強磁性的磁気結合を分断する技術も既に開発されている<sup>(22)</sup>。逆磁区核のサイズが半径数 nm という知見から、シェル層の厚みは主相の結晶表面層の数 nm から数十 nm の領域を覆っていれば十分であることが分かってきた。それに近い組織は、J. Li らの研究や<sup>(23)</sup> Xin Tang らの研究<sup>(24)</sup>等により実現されている。そのような微細組織を制御して工業的に適用可能な製造プロセスを確立するためには組織形成過程を動的に記述できる熱力学も必要であり、今後も地道な研究が欠かせない。

#### (2) 有限温度における有限要素マイクロマグネティックスとの関係

最近、A. Bolyachkin らは FePt 記録媒体を対象にして、材料組織解析のデータから組織モデルを生成し、マイクロマグネティックス・シミュレーションと実際の減磁曲線とをデータ同化してシミュレーションに機械学習をさせ、組織モデルに用いたマイクロマグネティックス・パラメータを調整するというようなアプローチを使ってシミュレータを構成し、材料組織と減磁曲線の形状とを関連づけることに成功した<sup>(25)</sup>。原子描像の理論計算の役割のひとつは、エネルギー最少化経路を求める通常のマイクロマグネティックスシミュレーションでは取り込んでいない熱揺らぎの効果を理論的に明確にし、計算結果と実験値との乖離の要因として理解することにある。その理解に基づいて、上記のようなシミュレータで生成されるパラメータの物理的合理性を原子描像の理論計算が吟味あるいは担保するという位置づけになる。原子描像の計算から物理的な枠組みが異なる有限要素法のマイクロ

マグネティックス・パラメータの物理的に意味のある数値範囲を与えるという手法は、有効性も含めて未だ検討されていないが、工学的手法として磁石材料においても材料組織の改良のために用いることができる可能性があると思われる。

## 14. ま と め

今回は熱揺らぎを伴う有限温度での磁化反転過程を解析する手法として最近著しい進展を見せた原子描像の解析手法とそれが示唆する熱活性化過程の定量的な理解について述べた。現実の磁石材料は数 mm から数 cm の大きさを持つマクロな材料であり、その減磁曲線の形が材料の性能を記述する最重要の特性であるが、それは nm 領域の逆磁化核の生成という極めてミクロな現象に支配され、熱揺らぎの効果を無視しては記述できない。その領域を扱う原子描像のマイクロマグネティックスの理論手法を、さらに大きな領域を扱う連続体描像の有限要素法のマイクロマグネティックスの理論手法に接続することは未だ実現されていないが、原子描像のマイクロマグネティックスシミュレーションを用いて保磁力を支配している熱揺らぎによる磁化反転開始までのメカニズムを理解し、その領域のミクロな組織解析と組み合わせる材料の改善につなげられる可能性が見えてきている。ミクロな領域での現象の物理を把握したうえで多結晶系の磁化曲線の形状を記述し、材料の組織因子と結び付ける手法の研究開発は今後も必要とされる。

3 回にわたって、永久磁石の保磁力メカニズムについて概念的な記述を進めた。大学等での永久磁石材料についての講義では保磁力現象の動的な特徴や温度依存性の本質について踏み込んだ議論をすることが少ないと思われたので、その層の読者を念頭に置いた。本講座が磁石材料をこれから研究する方々の役に立てば幸いである。

本講座は著者が代表を務めた文部科学省の委託事業「元素戦略磁性材料研究拠点」(2012年度～2021年度、課題番号 JPMXP0112101004)で得られた永久磁石の保磁力に関する理解が進展した部分について一部を解説したものです。特に本稿では、宮下清二、西野正理、榎裕太各氏が執筆された多数の論文から多くを引用させていただきました。関係者の皆様に謝意を表します。(完)

## 文 献

- (1) 広沢 哲：まてりあ, **62**(2023), 307–313.
- (2) 広沢 哲：まてりあ, **62**(2023), 375–380.
- (3) S. Miyashita, M. Nishino, Y. Toga, T. Hinokihara, I. E. Uysal, T. Miyake, H. Akai, S. Hirose and A. Sakuma: Sci. Tech. Adv. Mater., **22**(2021), 658–682.
- (4) 宮下清二, 西野正理, 榎 裕太, 榎原太一, I. E. Uysal, 三宅 隆, 赤井久純, 佐久間昭正：粉体および粉末冶金, **69**(2022), S126–S146.
- (5) 西野正理, 宮下清二：日本金属学会誌, **87**(2023), 158–172.

- (6) Supplemental material of Ref. (1), available on-line;  
<https://www.tandfonline.com/doi/suppl/10.1080/14686996.2021.1942197?scroll=top>
  - (7) Y. Toga, M. Matsumoto, S. Miyashita, H. Akai, S. Doi, T. Miyake and A. Sakuma, Phys. Rev. B, **94**(2016), 174433.
  - (8) M. Nishino, Y. Toga, S. Miyashita, H. Akai, A. Sakuma and S. Hirosawa: Phys. Rev. B, **95**(2017), 094429.
  - (9) S. C. Westmoreland, R. F. L. Evans, G. Hrkcac, T. Schrefl, G. T. Zimanyi, M. Winklhofer, N. Sakuma, M. Yano, A. Kato, T. Shoji, A. Manabe, M. Ito and R. W. Chantrell: Scr. Mater., **148** (2018), 56–62.
  - (10) S. C. Westmoreland, C. Skelland, T. Shoji, M. Yano, A. Kato, M. Ito, G. Hrkcac, T. Schrefl, R. F. L. Evans and R. W. Chantrell: J. Appl. Phys., **127**(2020), 133901.
  - (11) Q. Gong, M. Yi, R. F. L. Evans, B.-X. Xu and O. Gutfleisch: Phys. Rev. B, **99**(2019), 214409.
  - (12) Q. Gong, M. Yi and B.-X. Xu: Phys. Rev. Mater., **3**(2019), 084406.
  - (13) Y. Toga, S. Miyashita, A. Sakuma and T. Miyake: npj Comp. Mater., **6**(2020), 67.
  - (14) M. Nishino, I. E. Uysal, T. Hinokihara and S. Miyashita: Phys. Rev. B, **102** (2020), 020413(R).
  - (15) M. Nishino and S. Miyashita: Phys. Rev. B, **91**(2015), 134411.
  - (16) M. Nishino, H. Hayasaka and S. Miyashita: Phys. Rev. B, (2022), 0254422, Supplemental material;  
<https://journals.aps.org/prb/abstract/10.1103/PhysRevB.106.054422#supplemental>.
  - (17) T. Miyake, Y. Harashima, T. Fukazawa and H. Akai: Sci. Tech. Adv. Mater., **22**(2021), 543–556.
  - (18) H. Tsuchiura, T. Yoshioka and P. I. Novák: IEEE Trans. Magn., **50**(2014), 2105004.
  - (19) 合田義弘，立津慶幸，常行真司：日本金属学会誌，**81**(2017)，26–31.
  - (20) M. Nishino, H. Hayasaka and S. Miyashita: Phys. Rev. B, **106** (2022), 054422.
  - (21) K. Hirota, H. Nakamura, T. Minowa and M. Honshima: IEEE Trans. Magn., **42**(2006), 2909–2911.
  - (22) T. Akiya, J. Liu, H. Sepehri-Amin, T. Ohkubo, K. Hioki, A. Hattori and K. Hono: Scr. Mater., **81**(2014), 48–51.
  - (23) J. Li, L. Liu, H. Sepehri-Amin, X. Tang, T. Ohkubo, N. Sakuma, T. Shoji, A. Kato, T. Schrefl and K. Hono: Acta Mater., **161**(2018), 171–181.
  - (24) Xin Tang, J. Li, H. Sepehri-Amin, T. Ohkubo, K. Hioki, A. Hattori and K. Hono: Acta Mater., **203**(2021), 11679.
  - (25) A. Bolyachkin, H. Sepehri-Amin, I. Suzuki, H. Tajiri, Y. K. Takahashi, K. Srinivasan, H. Ho, H. Yuan, T. Seki, A. Ajan and K. Hono: Acta Mater., **227**(2022), 117744.
- 

広沢 哲
- ★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★  
1981年 京都大学大学院工学研究科博士後課程修了  
1984年 住友特殊金属(株)(現 日立金属(株))入社  
2012年 4月－ 現職  
専門分野：希土類磁石材料  
◎Nd-Fe-B系統結晶磁石、および、ナノコンポジット  
磁石の研究開発等に従事、元素戦略プロジェクト  
の磁石分野研究代表者として活動後、その成果を  
基盤とする産学連携マテリアルズオープンプラッ  
トフォームの企画運営に2022年から従事。  
★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★

## 第15回本会派遣JIM / TMS Young Leader International Scholar 出張報告

産業技術総合研究所 つくばセンター  
今里和樹

この度、日本金属学会より Young Leader International Scholar として選出され、The Minerals, Metals & Materials Society 152nd Annual Meeting & Exhibition (TMS2023)に参加した。また TMS2023の前の週にはアメリカ合衆国内の希望する大学の訪問(University of California, Davis)を行うという機会をいただいた。

TMS2023はカリフォルニア州のサンディエゴにおいて、3月19日から3月23日までの5日間で開催された。70か国以上の国から4,000人以上の参加者とセッション数85を超える、非常に大きな学会であるため、すべてを語りつくすことは難しいが、少しでも雰囲気伝われば幸いである。TMSは学生時代から何度も参加してきたが、コロナにより最近ではリモート参加となっていたため、久しぶりの対面参加となった。サンディエゴ開催のTMSへの参加は初めてであり、(メキシコに接している地理的なイメージから)暖かい気候を期待していたものの、一日を除いてほとんど雨、曇りの一週間であった(図1)。朝に強い雨が降った日もあり、セッションの開始が遅れたこともあった。しかし、学会会場は非常に活気があり、いたるところでディスカッションが行われていた。学会全体を通じて自分の発表以外にも Emerging Professional Tutorial Luncheon Lecture, TMS Awards Ceremony & Reception などにも招待していただき、これまでとは違うTMSを味わうことができた。以前、ポスター賞をいただいたことはあるものの、ここまできちんとした授賞式には参加したことがなかったので、壇上で賞状を受け取る経験は初めてだった(図2)。最近ではバーチャルでの発表や、リモートでの授賞式が多かったため、ステージ上で受け取る賞というのは実感があり、よいものだと感じた。Receptionでは国内外からいらした先生方、企業の研究者の方ともお話しする機会があり、貴重な経験となった。

受賞講演は、Alloys and Compounds for Thermoelectric and Solar Cell Applications XI というセッションで行った。これまでも何度か発表を行ってきたセッションではあるものの、久しぶりの対面参加ということで、以前からの知り合いとの再会を果たせただけでなく、新たなつながりも得られた

よいセッションであった。発表した内容はハーフボイスラ材料を基盤とした新たな材料合成に関する研究で、熱電材料を主な研究対象とする研究者から質疑をいただいた。最近新しく始めた内容であったため、ご経験のある先駆者の方からアドバイスをいただくことができ、非常に有意義であった。講演後にもアメリカ、フランスの研究者とのディスカッションを通して、新たな発見や、共同研究への可能性が広がったことが大きな収穫であった。

研究室訪問はサンディエゴからも近いカリフォルニア大学デービス校(University of California, Davis: UC Davis)に伺った(図3)。UC Davisにはサンディエゴから一時間半ほどのサクラメント空港から向かった。キャンパスがあるデービスは学生街のようで、小さいながらも学生が多く、活気のある街だと感じた。町並みは私が博士号を取得したイリノイ州のエバンストン(Evanston)に非常によく似ていて、懐かしく感じた一方、やはり、西海岸ということで、アジア料理、アジアンスーパーマーケットが豊富だった。日本人もそれなりにいるようだったので留学先としてもおすすめである。

ホストしてくださった、Prof. Susan Kauzlarichは以前私が学生だった際に、TMSのポスターセッションで議論させていただき、その時の記憶が強く残っていたため今回の訪問を依頼したところ快く受け入れてくれた。Kauzlarich教授は今回TMSに参加できなかったものの、新規材料合成に関する新しい視点や、現在取り組んでいる研究内容についてもフィードバックをいただき、有意義な時間を過ごした。さらに、事前に作成いただいた分刻みのスケジュールに沿って、ご本人以外にも10人以上の学部の方、学生との交流時間を設けていただいた。AIから表面物理まで様々な分野のエキスパートと議論させていただく機会になり、普段とは異なる視点から自らの研究内容を見直すよいきっかけになった。Interdisciplinaryな研究というのはこういった交流から始まるのだろうという実感を得ることができた。訪問の最後にはセミナーを開いていただき、TMSで発表予定だった内容をよりわかりやすい形で丁寧に説明した。学生からもわかりやすかったというフィードバックが得られ、質問もいただけたので、よい経験になった。

全旅程を通して、以前からの知り合いとの再会に加えて、新たな出会いも得られ、豊富で非常に実りのある渡航となった。このような貴重な機会を頂いたことに感謝し、今後の国際交流、研究の推進に必ず役立てて行きたい。今回の渡航に関してご尽力、ご支援くださった日本金属学会ならびにTMS事務局に心より御礼を申し上げる。

(2023年5月16日受理)[doi:10.2320/materia.62.478]  
(連絡先: 〒305-8569 つくば市小野川16-1)

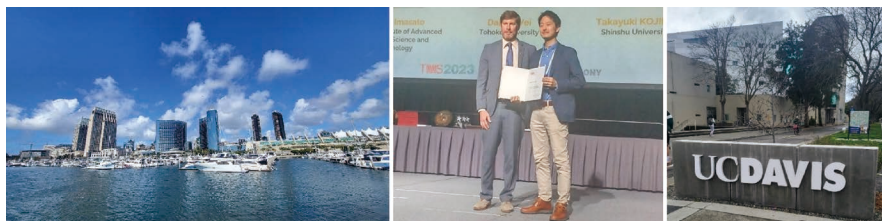


図1(左) 会場近くから、貴重な晴れの日に撮影。図2(中) 授賞式の壇上にて、筆者とProf. W. Jud Ready(2022 TMS President)。図3(右) UC Davis キャンパス入口。大学と街が融合して、住みやすく、研究にうってつけの街であると感じた。



## 第4回超合金とその応用に関する欧州シンポジウム (EuroSuperalloys 2022)報告

田畑千尋<sup>1)</sup>\*\* 鈴木進補<sup>2)</sup>\*\*\*

2022年9月にドイツバンベルク(図1)で開催された国際会議 EuroSuperalloys2022について報告する。Prof. Mathias Göken (Friedrich-Alexander-Universität Erlangen Nürnberg)が実行委員長を務め、対面とオンラインのハイブリッドで開催された。4年ごとに欧州で開催される超合金分野で権威あるシンポジウムであり、同じく4年ごとに米国で開催されている Superalloys と交互に開催されている。今回は第4回となり、前回2018年は、Oxford Univ. で開催された。今回は、現地にて対面で田畑が、日本にてオンラインで鈴木が出席した。以下にその様子を報告する。

現地とオンラインを合わせた参加者数は20カ国から309人となり、所属機関の国別ではドイツ115人、英国37人、中国33人、フランス32人などで、日本からの参加は8人であった。

下記の Plenary Talk が行われた。

- Plastic Localization and Fatigue Strength in Polycrystalline Nickel-based Superalloys, Stinville, J.-C. (University of Illinois at Urbana-Champaign)
- Recrystallization in Ni-based Single Crystal Superalloys, Zhang, J. (Chinese Academy of Sciences)
- Atomistic Simulations of Dislocation—Precipitate Interactions in Model Ni-based Superalloys, Bitzek, E. (Max-Planck-Institut für Eisenforschung GmbH)
- Detecting Phase Transition Temperature and Microstructure Evolution Behaviors of Ni-based Superalloys using Resistivity and Calorimetry, Utada, S. (University of Oxford)
- Forging and Heat Treatment Conditions that produce visible Grains in a Nickel Alloy, Hardy, M. (Rolls-Royce PLC)
- Tensile Deformation in Single Crystal Superalloys: The Effect of Strain Rate, Rae, C. (University of Cambridge)
- Recrystallization and Grain Size Control in  $\gamma$ - $\gamma'$  Ni based Superalloy Forgings, Bozzolo, N. (Mines Paris, Sophia Antipolis)

この分野を牽引してきた Prof. Rae の University of Cambridge 定年退職を記念して、“Cathie Rae honorary symposium”が開催された。門下生が、講演を行うとともに Prof. Rae との思い出を紹介した。

\* 早稲田大学大学院基幹理工学研究科材料科学専攻

1) 博士課程 2) 教授

\*\* 国立研究開発法人物質・材料研究機構

\*\*\* 早稲田大学各務記念材料技術研究所

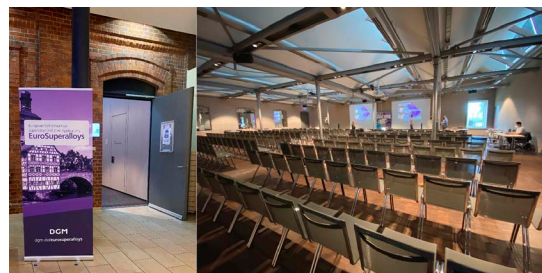


図1 (左)会場入り口と(右)会場内の様子。(オンラインカラー)

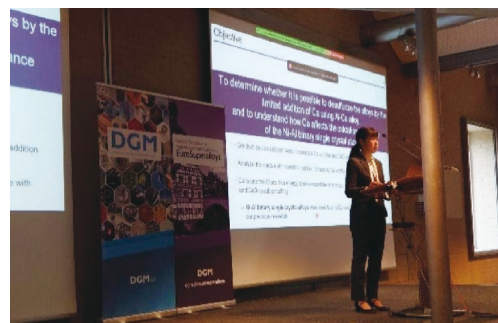


図2 現地での発表の様子(田畑)。(オンラインカラー)

今回の発表内容では大半の内容が additive manufacturing であった。これは超合金分野に限ったことではないが、粉末冶金や3Dプリンターを用いた材料作製が脚光を浴びていることが分かる。また、ここ2、3年新型コロナウイルスによる行動制限などにより、一時期実験が困難になったと予想されることから、materials modelling and simulation や materials selection and characterization by digital data analysis and artificial intelligence などといったシミュレーション系のセッションが多数あった。このような傾向は66件あったポスター発表の内容でも見られており、超合金分野に限らず、多くの材料分野で現在注目されている項目である。

また、現地参加の日本人は著者(田畑、図2)を含め4名であったが、いずれも欧州在勤者であり、日本からの参加は著者のみであった。新型コロナウイルスによる移動制限などがあることから、アジア圏からの参加は少なく、大半がオンライン参加であった。多くの学生は博士課程在学中であり、欧州の大学(主に今回の開催地であるドイツ国内の大学院)から参加している方が殆どであった。

著者が主に研究している耐酸化性に関する発表は限られていたが、中でも pre-oxidation という、先に合金を高温であえて酸化させることで連続的な  $\text{Al}_2\text{O}_3$  の酸化被膜を形成し、耐酸化性を向上させるという発表が興味深かった。また、クリープ試験の際に主に使用されている ASTM (American Society for Testing and Materials) の手順と ETMT (Electro-Thermo Mechanical Testing) によるミニチュア試験片を用いた場合の比較を行った Dr. Y. Tang らの発表は、会議室が満室になるほど人が集まり、注目を集めていた。

次回は2026年、フランス Gien にて開催予定である。

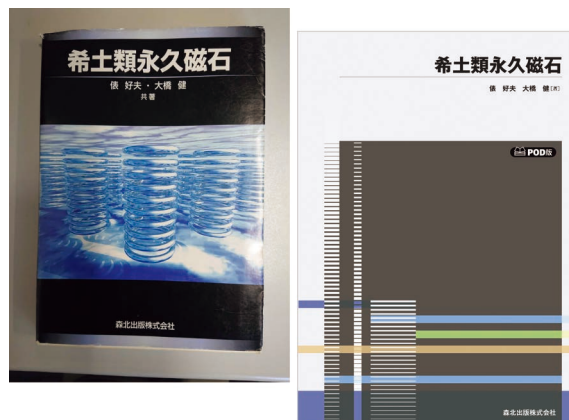
(2023年4月14日受理) [doi:10.2320/materia.62.479]  
(〒169-8555 東京都新宿区大久保3-4-1 59号館305)



## “希土類永久磁石”

俵 好夫 大橋 健(共著)  
森北出版株式会社 1999年

東北大学大学院工学研究科 松浦昌志



■「希土類永久磁石」の表紙写真(左図：オリジナル版、右図：POD版)

この教科書は、私が学部4年生で研究室に入りNd-Fe-B系磁石の研究をはじめると同時に、研究室の先輩から勧められて購入した“思い出の一冊”です。本書は6章構成で、希土類磁石について基礎から応用まで分かりやすく書かれており、今でも読み返す一冊です。以下、本書の内容を簡単にご紹介します。

まず第1章は「永久磁石磁性概説」として、磁性の基礎から希土類の磁性、磁区構造と保磁力などの要点がまとめられています。なお、磁性材料をはじめて勉強する方にとって最初のハードルとなるのが、単位変換だと推察されます。それは、磁性分野ではMKSA単位系とCGS単位系が混在しており、両単位の変換を身に着ける必要があるからです。本書の第1章は磁石材料研究に必要な基礎がMKSA単位系で統一して書かれておりますので、まずはMKSA単位系で基礎を理解し、その上で巻末に掲載のMKSAとCGS単位系の単位変換一覧表と照らし合わせることで、単位変換も学ぶことができます。(なお、単位変換やそれぞれの単位系での式変形をより詳しく勉強したい方は、「磁気工学の基礎Ⅰ、Ⅱ」<sup>(1)</sup>や「磁気工学入門」<sup>(2)</sup>などのテキストもあわせてお読みいただくことをお勧めします。)

第2章は「希土類鉄族化合物」であり、希土類永久磁石を構成する希土類(R)と鉄(またはコバルト)系合金について、状態図、化合物の結晶構造や磁気特性に至るまで詳細に説明されています。具体的には、 $\text{RCO}_5$ 化合物、 $\text{R}_2\text{Co}_{17}$ 化合物、 $\text{R}(\text{Fe}, \text{T})_{12}$ 化合物(T: 添加元素)、 $\text{R}_2\text{Fe}_{17}\text{N}_x$ (または $\text{C}_x$ )化合物、 $\text{R}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ 化合物と、希土類磁石の主要な化合物が網羅されています。

第3章は「希土類永久磁石の製造方法」という章です。永久磁石は焼結磁石とボンド磁石に大別されますが、それぞれの磁石の製造方法について簡潔ながら重要なポイントが網羅されて解説されています。

第4章は「希土類永久磁石」という、本書のメインテーマの章です。はじめはSm-Co系磁石について詳しく書かれています。Sm-Co系磁石は「サマコバ磁石」として広く

知られており、その高い耐環境性を生かし、今もなお社会に不可欠な永久磁石です。そのSm-Co系磁石について、開発の歴史に沿って、組成や熱処理条件、微細組織変化と磁気特性の関係が詳しく記載されております。続いて、現在最強のNd-Fe-B系磁石(いわゆる「ネオジム磁石」)について述べられています。焼結磁石からボンド磁石まで幅広く利用されているネオジム磁石について、その作製方法から磁気特性、微細組織等について解説されています。本書には、たとえば「実用磁石としては保磁力を適切な値に制御し、保磁力の分布を極小に抑えることが望まれる。筆者らは二回時効がこの問題の解決に有効であることを見出した。」(本書p. 87)など、実際に磁石を作製するうえで重要なノウハウが盛り込まれております。これは実際に希土類磁石を開発・作製されてきた著者のお二人だからこそ書ける内容であり、大変参考になります。

第5章は「磁気回路の設計」、第6章は「希土類磁石の応用」として、永久磁石をデバイスに組み込む際の磁気回路の考え方、そして実際の応用例について記述されており、デバイス応用を考えている技術者の方にも役立つ内容となっております。

このように本書は、はじめて磁石を学ぶ大学の若手研究者のみならず、企業であらたに磁石を勉強される方にもお勧めできる一冊です。ちなみに、現在はPOD版(図・右)を新品で購入可能ですが、掲載されている図面はオリジナル版(図・左)の方が明瞭ですので、古本屋で探してみるのも良いのではないのでしょうか。

## 文 献

- (1) 太田恵造：磁気工学の基礎Ⅰ、Ⅱ、(1973)、共立全書。
- (2) 高梨弘毅：磁気工学入門—磁気の初歩と単位の理解のために、日本磁気学会編、(2008)、共立出版。

(2023年5月25日受理)[doi:10.2320/materia.62.480]

# スポットライト

～第8回「高校生・高専学生ポスター発表」優秀賞～

## マグネシウム2次電池の実用化に向けたイオン拡散に関する研究

兵庫県立宝塚北高等学校 化学部

上田悠人 金古雄大  
山脇佳奈 大庭颯来

### 1. はじめに

現在広く利用されているリチウムイオン電池には、リチウム、コバルト、ニッケルといったレアメタルが多く使用されており、これらのレアメタルの省資源化が望まれている。そこでリチウムに比べて地球上に豊富に存在するマグネシウムを用いた電池に注目した<sup>(1)(2)</sup>。マグネシウムは2価の陽イオンとなるため、電池として利用した際のエネルギー密度が大きいのが特徴であるが、一方イオンの拡散速度が遅いといった課題があり、その克服に向けて盛んに検討されている<sup>(3)-(6)</sup>。そこで、我々もこの課題について考察すべく、電解液と電極板に分けて検討していくこととし、今回は電解液の性能評価に向けて、まずマグネシウム1次電池の電荷移動の速度について考察することとした。

この電荷移動については、マグネシウムからマグネシウムイオンを生じる電荷移動と生じたイオンが拡散する電荷移動に影響されるが、正極電解液、負極電解液中のマグネシウムイオンを定量することにより考察しようとした。そして、電池を放電している時の正極、負極での反応は以下の通りであり、

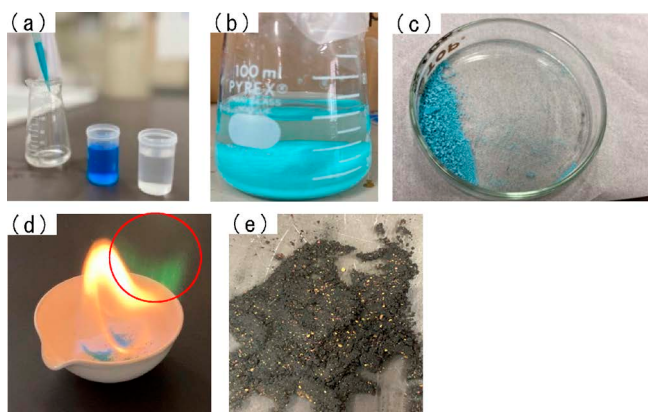
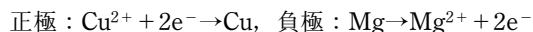


図1 電解液からの沈殿物の生成および観察時の様子。  
(a) 硝酸銅(Ⅱ)水溶液と硝酸マグネシウム水溶液の混合溶液の調整、(b) 沈殿Aの生成、(c) 明るい青色固体B、(d) 炎色反応による緑色炎、(e) 粉末C。(オンラインカラー)



Cuと $\text{Mg}^{2+}$ の係数が等しいことから、銅(Ⅱ)イオンが単体になる物質と単体のマグネシウムがイオンとなって拡散する物質は等しいと考えられるため、放電により減少した銅(Ⅱ)イオンの量をマグネシウムイオンの拡散量と捉え、各電解液中の銅イオンを定量することで、マグネシウムイオン量を算出できると考えている。そこで本稿ではまず電解液中の銅イオンの定量方法について検討を行ったので報告する。

### 2. 研究(方法・結果および考察)

#### 【実験1】銅イオン量の測定方法の検討

電解液である硝酸マグネシウム水溶液と硝酸銅(Ⅱ)水溶液に水酸化バリウム水溶液をそれぞれ加えpHによる溶解度の差を利用して銅イオンのみを水酸化銅の沈殿として取り出し、銅イオン量を算出できないか検討した。

まず、両極の電解液として用いる1.00 mol/Lの硝酸銅(Ⅱ)水溶液、1.00 mol/Lの硝酸マグネシウム水溶液を1:1の割合で混合し、そこへ0.100 mol/Lの水酸化バリウム水溶液をpHが7になるまで加えて攪拌すると、青白色の沈殿Aが生成した(図1(a), (b))。次に、この沈殿物を吸引ろ過によりろ別し、自然乾燥することで、明るい青色の固体Bを得た(図1(c))。その後、この青色の固体Bにエタノールを加えて点火すると緑色の炎が見られた。このことより銅の存在を確認した(図1(d))。次に、先行程によって得られた青白色の沈殿Aに炭素粉末を加え加熱した。こうして得られた粉末Cの中には赤褐色の粉末が見られ、還元により生じた銅が含まれることが示唆された(図1(e))。

一方、1.00 mol/Lの硝酸マグネシウム水溶液(pH4)20 mLに0.100 mol/Lの水酸化バリウム水溶液をpHが7になるまで攪拌しながら加え、しばらく放置した。水溶液からは沈殿が生じなかった。

以上の実験結果から、生じた青白色の沈殿Aは水酸化銅(Ⅱ)であり、これにはマグネシウム化合物が含まれないことから、これをろ別、乾燥し質量を測定することで、電解液中の銅イオン量を算出できる可能性を見出した。

#### 【実験2】放電時間による沈殿量の変化

本実験では、正極電解液に1.00 mol/Lの硝酸銅水溶液(pH6)、負極電解液に1.00 mol/Lの硝酸マグネシウム水溶液(pH4)、正極板に短冊状(15×45 mm)の銅板、負極板に短冊状(15×45 mm)のマグネシウム板を使用した。正極電解液を100 mLビーカーに50 mL入れ、セロハンチューブ(直径23.8 mmφ、長さ25 m、平面幅36.9 mm、分画分子量約10000～14000、孔径2.4 nm)を開き、末端を捻りたこ糸で括って作った内側の空間内に10 mL入れて使用した(図2)。

この電池を6つ作製し、それぞれ0分、2分、4分、6分、8分、10分間放電した後、電極をセロハンチューブごと引き上げ、銅板(正極板)に付着した正極電解液とマグネシウム板

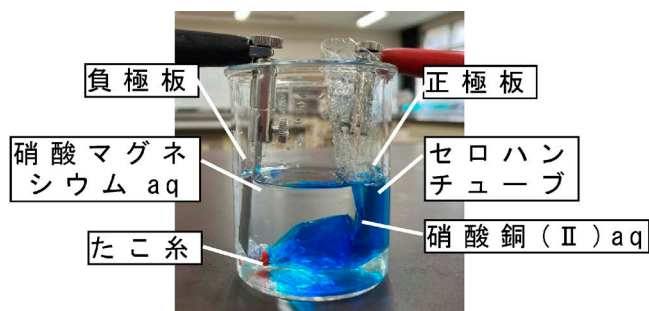


図2 作製したマグネシウム電池。(オンラインカラー)

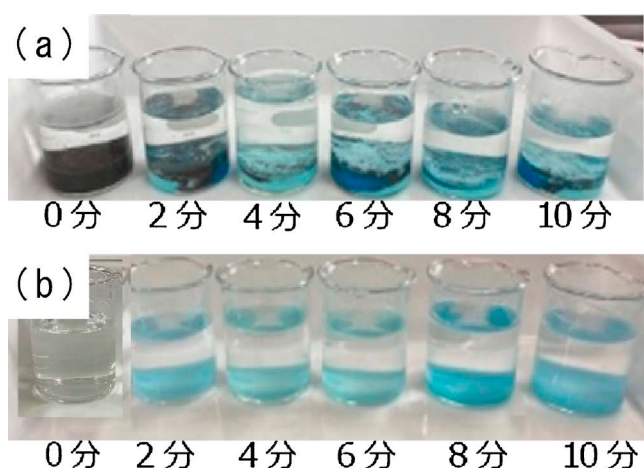


図3 水酸化バリウム水溶液による沈殿の生成。(下部の時間は放電時間), (a) 正極電解液, (b) 負極電解液。(オンラインカラー)

(負極板)に付着した負極電解液を蒸留水で複数回洗い流し、正極、負極ごとにそれぞれ保存した。

次に、放電していない両極電解液(放電0分)及び、先行程で保存した電解液に水酸化バリウム水溶液を加えて攪拌し、静置して沈殿物の生成を待った。ここで、正極電解液の様子を図3(a)、負極電解液の様子を図3(b)に示す。

それぞれの電極の沈殿物を吸引ろ過によりろ別後、静置して自然乾燥させた。そして、デシケーターで十分に乾燥させたのち、質量を測定した。得られた沈殿物の質量を図4に示した。未放電の負極電解液からは沈殿は生じなかった。

正極の電解液から生じた沈殿物の質量は放電とともに減少する傾向が見られ、銅イオンの定量の可能性を見出せた。しかし結果にばらつきが見られることからその精度の向上が課題となった。実験1では沈殿物を乾燥して明るい青色の物質のみを得ていたため、沈殿物はすべて水酸化銅(II)であると考えていたが、実験2では、乾燥した沈殿物の一部に、水酸化銅(II)が脱水して酸化銅(II)になったと考えられる黒色の固体も併せて得られたことがばらつきの要因の一つだと考えている。そして、今回の実験では、これらの沈殿物中の酸化銅(II)の割合が不明なため、沈殿物の質量から銅イオンの物質量を算出することが出来ず、マグネシウムイオン量の算出にも至らなかった。さらに、実験装置によりセロハンチ

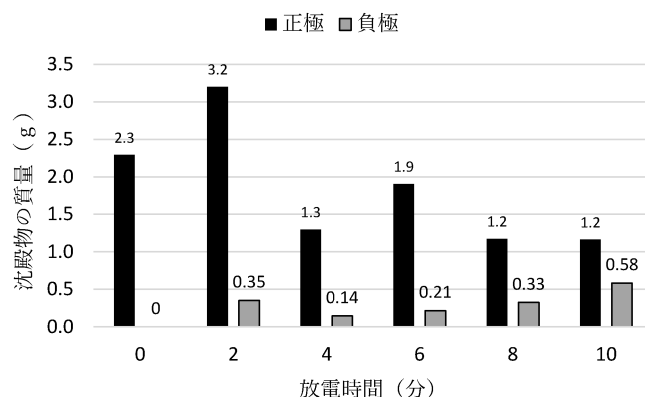


図4 放電時間による沈殿物の質量。

ューブがビーカーの底について折れ曲がっていたことがあったり、セロハンチューブをたこ糸で縛ったことで先端部分にしわが生じていたりし、正極電解液の濃度に部分ごとの差が生じたこと、また放電時間が短かすぎたため、イオン濃度の変化が小さく、測定誤差が結果に与えた影響が大きかったことなどもばらつきの要因と考えられる。さらに実験2では負極の電解液からも沈殿が確認されたことから、放電により生じたマグネシウムイオンがセロハン膜を介して正極側へ拡散するとともに、正極の銅イオンが負極側へ拡散したためではないかと考え、マグネシウムイオンの半透膜を介しての拡散を示唆した。今後その定量へつなげたい。

### 3. 展 望

これらの結果を踏まえて、実験2での沈殿のばらつきの低減を目指し実験装置の改良を検討しつつ、得られた沈殿物を強力に加熱することですべて酸化銅(II)に変換してから計測し、銅イオンの物質量の算出を行う実験を進めている。こうしてイオンの物質量を正しく測定することで、マグネシウム1次電池の電荷移動の速度についての考察<sup>(5)(6)</sup>につなげていきたい。

### 文 献

- (1) M. Walter, M. V. Kovalenko and K. V. Kravchyk: New J. Chem., **44**(2020), 1677-1683.
- (2) 物質・材料研究機構 “マグネシウム金属電池実現へ一歩—合金設計で蓄電容量20%上昇” つくばサイエンスニュース.
- (3) H. Li, N. L. Okamoto, T. Hatakeyama, Y. Kumagai, F. Oba and T. Ichitsubo: Adv. Energy Mater., **27**(2018), Wiley Online Library.
- (4) H. Miyoshi: J. Ion Exchange, **7**(1996), 186-199.
- (5) Y. Yoshida, T. Yamada, Y. Jing, T. Toyao, K. Shimizu and M. Sadakiyo: J. Am. Chem. Soc., **144**(2022), 8669-8675.
- (6) 三好航太: エネルギー・資源, **35**(2014), 250-253.

(2023年2月7日受理)[doi:10.2320/materia.62.481]  
(連絡先: 〒665-0847 宝塚すみれが丘4-1-1)

# スポットライト

～第8回「高校生・高専学生ポスター発表」優秀賞～

## イチゴによるアルミニウムの溶解

兵庫県立宝塚北高等学校 化学部

岸田 純 笹部祐也 川口拓真  
岡部矩史 志手銀河

### 1. 動機および目的

ある部員が、ステンレス鋼製の弁当箱内でイチゴを入れたアルミカップに孔が開いているのを発見した。孔はイチゴとアルミニウムが接している部分に生じ、溶けたアルミニウムがイチゴに付着していた。アルミニウムは表面に酸化被膜を持つため、腐食しにくい金属として広く用いられている。我々は、このアルミニウムが溶けるという現象に疑問を持ち、この現象が起きる原理を化学的に解明することを目的に研究を始めた。

### 2. 仮 説

アルミニウムが溶けた要因として、以下の二つの仮説を立てた。

仮説1 イチゴに含まれる酸がアルミニウムを溶かした。

仮説2 ステンレス鋼、アルミニウムとイチゴでイチゴを電解液とした電池が出来た。

これらの仮説の検証実験を以下の通りに行った。

### 3. 実 験 材 料

イチゴ：実験時に路地物のイチゴが入手できなかったため冷凍イチゴを用いた。

アルミニウム：アルミホイル(三菱アルミ製、厚さ10 $\mu$ m)を用いた。

ステンレス鋼：オーステナイト系のステンレス SUS304(Cr 18.5%, Ni 8.5%を含む)を用いた。

### 4. 実 験 と 結 果

#### ◆実験1—酸とアルミニウムの反応

【方法1】すりつぶしたイチゴのpHを測定したところ2.9だった。そこで、仮説1の検証として、イチゴに含まれる酸であるクエン酸、リンゴ酸をpH 2.9に調整した水溶液、およびイチゴをそれぞれ2.0 ml ずつアルミホイルを用いて作成した直径6 cmのアルミニウムカップの中に注ぎ12時間放置した。

【結果1】実験時間内ではアルミニウムは溶けず、酸と接触していたアルミニウム表面に変色や光沢の変化も見られなかった。

【考察1】弁当が作られてから部員が弁当を食べるまでの時間は6時間未満であり、実験時間の12時間よりも短時間でアルミニウムの溶解が起こっている。このことから、弁当内でのアルミニウム溶解は酸だけが原因ではないと考えた。

#### ◆実験2—異種金属とイチゴの反応

【方法2】仮説2の検証実験として、図1のようにイチゴをアルミニウム(36 cm<sup>2</sup>)とステンレス鋼板(100 cm<sup>2</sup>)に挟み12時間放置した。また対照実験としてステンレス鋼板をプラスチック板に変え、同様に実験した。

【結果2】ステンレス鋼板を用いたときのみ、アルミニウムが溶け、数 mm 程度の孔が確認できた(図2)。また、孔の周辺は黒く変色していた。

【考察2】ステンレス鋼板を用いたときのみアルミニウムが溶けたことから、弁当内では異種金属間で酸化還元反応が起き、実験時間内にアルミニウムの溶解が起こったと考えた。アルミニウムとステンレス鋼の間に電子の授受が生じていることを確かめるために、イチゴ、アルミニウム、ステンレス鋼を1つの回路に繋げ、電流を測定する実験を行った。

#### ◆実験3—電流の測定

【方法3】図3のようにアルミニウムとステンレスの間にイチゴを挟み、アルミニウムとステンレスを電極として繋げ、電流計を用いて電流を12時間測定した。

【結果3】電流は検出できなかった。

【考察3】このような結果になったのはアルミニウムの酸化被膜による抵抗値が大きく、電流が微弱すぎて検出できなかったためだと考え、同様の実験装置で電圧を測定することにした。

#### ◆実験4—電圧の測定

【方法4】アルミニウムとステンレスの間にイチゴを挟み、

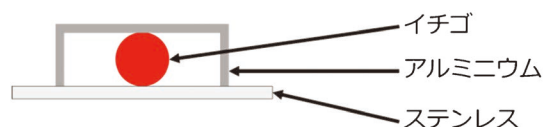


図1 イチゴを異種金属で挟んだ様子。(オンラインカラー)



図2 アルミニウムに開いた孔。(オンラインカラー)

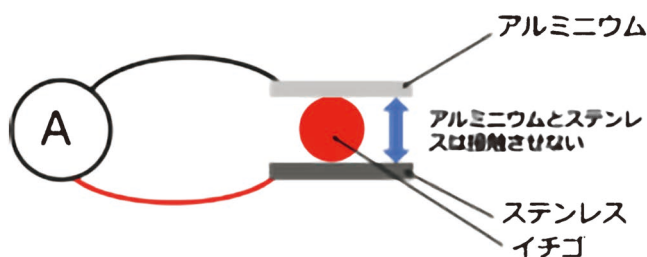


図3 イチゴと異種金属による電流測定の様子。（オンラインカラー）

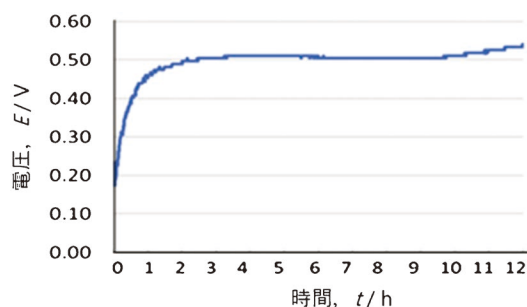


図4 イチゴと異種金属の接触による電圧。（オンラインカラー）

アルミニウムとステンレスを電極として繋げ、電圧計を用いて電圧を12時間測定した。

【結果4】電圧は徐々に上昇し、0.5 V 程度で安定した(図4)。

【考察4】電圧が確認されたことから、アルミニウムとステンレスを電極、イチゴを電解液とした電池が出来ていることが考えられる。また、電圧が徐々に上昇しているのはイチゴの酸がアルミニウムの酸化被膜を溶かしたからだと考えた。そこで、pHの異なる水溶液を電解液に用いた実験5を行った。その際、実験4の実験装置では金属板とイチゴの接触面積を一定にできないため、ビーカーを用いた装置(図5)に変更した。

#### ◆実験5—電解液の pH による電圧変化

【方法5】正極にステンレス、負極にアルミニウム、電解液に0.10 mol/L 硝酸(pH 1.0)、0.10 mol/L クエン酸水溶液(pH 2.1)、イチゴ液(pH 2.9)、0.10 mol/L 塩化ナトリウム水溶液(pH 7.0)を用いて電池型装置を作り、電圧計を用いて電圧を12時間測定した。なお、イチゴをすり潰し、イチゴ：精製水の質量比が1：3になるように混合した試料をイチゴ液とした。

【結果5】電解液のpHが低いほど電圧は高くなる傾向にあった(図6)。

【考察5】アルミニウムの酸化被膜において、pHの低下もしくは上昇により均一に溶解する均一腐食が知られており<sup>(1)</sup>、今回実験に用いた酸性度が大きい硝酸やクエン酸水溶液ではアルミニウムの均一腐食が起きた結果、安定して電圧が検出されたことが考えられる。なお硝酸は酸化力の強い酸ではあるが、今回使用したものは0.10 mol/Lの希硝酸であるためアルミニウム表面で不動態が形成されずに均一腐食が増大したと考えている。また、アルミニウムの酸化被膜の破壊は、



図5 ビーカーを用いた装置の様子。（オンラインカラー）

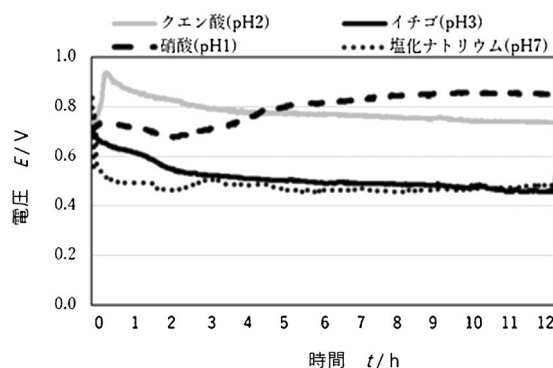


図6 電解液別の電圧変化。

酸や塩基による均一腐食のみならずハロゲン化物により局所的な破壊が生じる局部腐食によっても起こることが知られている<sup>(1)</sup>。塩化ナトリウム水溶液では、塩化物イオンによる酸化被膜の局部腐食がわずかに生じていたために、中性でありながらイチゴ液と同程度の電圧が生じたことが考えられる。イチゴ液に関しては、弱酸の液体でありかつ塩化物イオンを含むことから、アルミニウムの均一腐食と局部腐食の両方が起こっている可能性が示唆された。塩化物イオンがアルミニウムの酸化被膜の破壊を促進することを確かめるために、実験6を行った。

#### ◆実験6—塩化物イオンの影響の測定

【方法6】実験5で使用した電解液のうち、塩化ナトリウム水溶液を除く3種に0.10 mol/L 塩化ナトリウム水溶液を0.10 mL 添加後実験5と同様に電圧を測定した。また、実験5における各電解液の平均電圧と塩化ナトリウム添加後の各電解液の平均電圧の変化Δを算出した。

【結果6】クエン酸水溶液で電圧が増加したが、硝酸とイチゴ液では有意な変化は認められなかった(表1)。

【考察6】クエン酸水溶液における電圧変化は、酸による均一腐食に加えて塩化物イオンがアルミニウムの酸化被膜の局部腐食を促進し、電圧を増大させたと考えている。また、金

表1 塩化ナトリウム添加後の各電解液の平均電圧変化.

| 電解液     | Cl <sup>-</sup> 添加後の平均電圧(V) | 電圧の変化 $\Delta$ (V) |
|---------|-----------------------------|--------------------|
| 硝酸      | 0.82                        | 0                  |
| クエン酸水溶液 | 1.1                         | +0.34              |
| イチゴ液    | 0.52                        | 0                  |

属アルミニウムが酸化溶解して生成したアルミニウムイオンに対して、塩化物イオンが配位し安定化し、金属アルミニウムの酸化溶解が促進された可能性も考えられる。硝酸においては、硝酸中のアルミニウム表面で均一に溶解が生じ、酸化被膜が無いまたは非常に薄い状態であったため、塩化物イオンによる局所的な酸化被膜の破壊の影響は小さく、電圧の変化として測定できなかったと考えている。イチゴ液中で変化が見られなかったことについては、もともとイチゴ液に含まれていた塩化物イオンによって局部腐食の影響を十分に受けていたため、新たに塩化物イオンを添加しても有意な電圧変化が見られなかったのではないかと考えている。

## 5. ま と め

今回のイチゴを入れたアルミカップに孔が開いた現象は、イチゴに含まれる酸や塩化物イオンの影響によりアルミニウムの酸化被膜の破壊が促進され、アルミニウムとステンレスの異種金属間で電子の授受を伴う酸化還元反応が起きたため、短時間でアルミニウムが溶解したことにより生じた。

## 6. 今 後 の 展 望

- 電圧とアルミニウムの溶解量が比例関係にあるかを検証する。
- イチゴ液に含まれる可能性のある物質とアルミニウムの酸化被膜の反応について、より詳細に検証する。

## 文 献

- (1) 大谷良行, 小山高弘, 兒島洋一: UACJ Technical Reports, **3** (2016), 52-56.

(2023年2月2日受理)[doi:10.2320/materia.62.483]  
(連絡先: 〒665-0847 宝塚市すみれが丘 4-1-1)

# 本 会 記 事

|                    |                                         |     |
|--------------------|-----------------------------------------|-----|
| 会 告                | 2023年秋期(第173回)講演大会講演募集 .....            | 486 |
|                    | 第10回「高校生・高専学生ポスター発表」募集 .....            | 487 |
|                    | 2023年秋期(第173回)講演大会ご案内および参加申込について .....  | 488 |
|                    | 2023年秋期講演大会会場周辺のご案内 .....               | 490 |
|                    | 2023年秋期講演大会関連広告掲載および付設展示会、誌上展示会募集 ..... | 491 |
|                    | 2023年秋期講演大会会期中の託児室設置のお知らせ .....         | 492 |
|                    | 第21回 World Materials Day Award 募集 ..... | 492 |
|                    | 2024年春期講演大会公募・企画シンポジウムテーマ提案募集 .....     | 493 |
|                    | 2024年度金属学会シンポジウムのテーマ募集 .....            | 494 |
|                    | 2024年度若手研究グループ新規申請募集 .....              | 495 |
|                    | 研究会新規・更新申請募集 .....                      | 495 |
|                    | 各種研究費申請比較表 .....                        | 498 |
|                    | 研究集会 .....                              | 499 |
| 掲示板 .....          | 行事カレンダー .....                           | 503 |
| 会誌・欧文誌 7 号目次 ..... | 新入会員 .....                              | 506 |
| 次号予告 .....         |                                         | 502 |

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

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

## 会 告 (ホームページもご参照下さい)

## 2023年秋期(第173回)講演大会講演募集

◎2023年秋期講演大会の講演を下記の通り募集いたします。  
各種応募要項および締切日をご確認の上、お申込み下さい。

募集講演: 一般講演、公募シンポジウム、共同セッション、ポスター

募集期間: 一般講演、公募シンポジウム、ポスター: 5月25日(木)～7月7日(金)17時  
共同セッション: 締切しました。

開催会期: 2023年9月19日(火)～9月22日(金)

開催場所: とやま自遊館(9月19日 ポスターのみ)(〒930-0805 富山市湊入船町9番1号)  
富山大学五福キャンパス(9月20日～22日)(〒930-8555 富山市五福3190)

募集講演: 高校生・高専生(3年生以下)ポスターセッション

募集期間: 5月25日(木)～7月14日(金)17時

開催会期: 2023年9月19日(火)および9月26日(火)(発表者の希望によりどちらかで発表)

開催場所: とやま自遊館(9月19日)、オンライン(**Zoom** 利用)(9月26日)(発表者の希望によりどちらかで発表)

### 講演を申込まれる前に下記をご確認下さい

- ☐ 非会員も大会参加費と登壇費を前納すれば、講演申込ができます(詳細は「講演申込要領」の「講演資格」参照.)。
- ☐ 講演申込は同時に大会参加の事前予約が必要です。期日までに参加費を納入下さい。期日までに参加費を納入しない場合は講演を認めず、欠講として取り扱います。
- ☐ 講演申込と講演概要提出は同時に行ってください。(同時に行わない場合は、講演申込は受理されません)
- ☐ 原則、講演申込者は講演発表者であること、(「講演申込要領」5.を参照)
- ☐ 会員資格での申し込みには会員番号とパスワードが必要です。パスワードを紛失または忘れた方は、本会ホームページより再発行を行って下さい。セキュリティ上、電話やメールでの発行は出来ません。

- ① 最新の概要原稿フォーマットを利用し、PDF に変換してアップロード下さい。
- ② 一人 2 件の講演を申込みできます。ただしポスター 2 件は不可。
- ③ 同一研究室の 3 件以上の連続講演は認められません。
- ④ 事前参加申込者(講演者含む)へは参加申込み締切後に、講演概要ダウンロード ID とパスワードを配信いたします。
- ⑤ 「参加証」は郵送いたしません。各自「大会マイページ」から印刷して下さい。

#### 講演申込先及び申込期限

| 講演申込ウェブサイト URL                                                                                          |                      |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------|
| <a href="https://www.jim.or.jp/convention/2023autumn/">https://www.jim.or.jp/convention/2023autumn/</a> |                      |
| 講演申込みおよび概要原稿提出期限(締切厳守!)                                                                                 |                      |
| 講演種別                                                                                                    | 講演申込期間               |
| 共同セッション                                                                                                 | 締切ました                |
| 一般,公募シンポジウム,ポスターセッション                                                                                   | 5月25日(木)~7月7日(金)17時  |
| 高校生・高専生ポスター                                                                                             | 5月25日(木)~7月14日(金)17時 |
| 講演についての問合せ先: 講演大会係 <a href="mailto:annualm@jimm.jp">annualm@jimm.jp</a>                                 |                      |

#### これから入会して講演申込をされる方へ

- ☐ 下記の入会申込期限までに入会申込を行い、年会費を納入して下さい。
- ☐ 年会費納入期限までに会費の払込がない場合は、プログラムに掲載されていても、講演を認めません。
- ☐ 下記の入会申込みサイトから入会を申込んで下さい。入会申込すると ID(会員番号)とパスワードが即日メールで送信されます。

|            |                                                                                                                       |
|------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 入会申込 URL   | <a href="https://www.jim.or.jp/member/mypage/application.php">https://www.jim.or.jp/member/mypage/application.php</a> |
| 入会申込期限     | 共同セッションの講演: 締切ました<br>その他の講演: 7月5日(水)                                                                                  |
| 年会費納入期限    | 7月31日(月)                                                                                                              |
| 入会・会費の問合せ先 | 会員サービス係 <a href="mailto:member@jimm.jp">member@jimm.jp</a>                                                            |

## 日本金属学会2023年秋期(第173回)講演大会 第10回「高校生・高専学生ポスター発表」募集

申込締切日: 2023年7月14日(金)

#### 「高校生・高専学生ポスター発表」要領

大会名 日本金属学会2023年秋期(第173回)講演大会

行事名 「高校生・高専学生ポスター発表」

開催場所 「とやま自遊館」(9月19日(火))および「オンライン」(9月26日(火))

開催日時 2023年9月19日(火)午後または9月26日(火)14:00~17:00の間で2時間程度を予定

対象者 高校生および3年以下の高専学生

発表方法 9月19日(火)は、とやま自遊館(オンサイト)、または9月26日(火)は、オンラインのいずれかを選択して発表する

テーマ 材料に限定せず、分野は問いません。

ポスター発表資料作成について: 別途連絡

講演申込 <https://www.jim.or.jp/convention/2023autumn>

問合せ・連絡先: (公社)日本金属学会 講演大会係

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

## 2023年秋期(第173回)講演大会のご案内および参加申込みについて

2023年秋期講演大会を、9月19日(火)にポスターセッションを「とやま自遊館」で、20日(水)から22日(金)は「富山大学五福キャンパス」で開催します。

高校生・高専学生ポスターセッションは、9月19日(火)に「とやま自遊館」で、9月26日(火)に「オンライン」にて開催します。(選択された発表方法により開催日が変わります。)

尚、参加申込みは、すべてインターネット申込みとなります。詳細は、下記参加申込要領をご覧ください。

| 日 程                                            |                                                              |
|------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------|
| 日 時                                            | 行 事                                                          |
| 9月19日(火)<br>13:00～16:30                        | ポスターセッション, 高校生・高専学生ポスターセッション(とやま自遊館)                         |
| 9月20日(水)<br>9:00～9:40<br>10:00～17:00<br>18:30～ | 開会の辞, 贈呈式 } (富山大学五福キャンパス)<br>学術講演 }<br>懇親会: ANA クラウンプラザホテル富山 |
| 9月21日(木)<br>9:00～17:00                         | 学術講演(富山大学五福キャンパス)                                            |
| 9月22日(金)<br>9:00～16:30                         | 学術講演(富山大学五福キャンパス)                                            |
| 9月26日(火)午後                                     | 高校生・高専学生ポスターセッション(オンライン)                                     |

### ◆ご協力願い◆

日本金属学会講演大会参加証用ストラップをお持ちの方はご持参願います。

### 参加申込要領(参加申込みは全てウェブサイトからとなります)

(事前申込)2023年5月25日～9月1日  
<https://www.jim.or.jp/convention/2023autumn/>

(後期(当日)申込)2023年9月6日～9月26日  
[https://www.jim.or.jp/convention/2023autumn\\_after/](https://www.jim.or.jp/convention/2023autumn_after/)

### ◆大会参加費(講演概要ダウンロード権含む)※年会費とは異なります。

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

| 会 員 資 格                                         | 事前参加申込<br>(5月25日～9月1日) | 後期(当日)申込<br>(9月6日～9月26日)<br>クレジット決済のみ |
|-------------------------------------------------|------------------------|---------------------------------------|
| 正員・維持員会社社員, シンポジウム共催・協賛の学協会会員・鉄鋼協会会員<br>(本会非会員) | 10,000円                | 13,000円                               |
| 2023年3月1日時点で65歳以上の個人会員*                         | 無 料                    | 無 料                                   |
| 学生員**                                           | 6,000円                 | 7,000円                                |
| ユース会員(中高生会員, 高専専科1年生以下, 大学3年生以下)                | 無 料                    | 無 料                                   |
| 非会員*** 一般                                       | 24,000円                | 27,000円                               |
| 非会員*** 学生(大学院生含む)                               | 14,000円                | 16,000円                               |

- お支払後の取消は、準備の都合上ご返金いたしかねますのでご了承下さい。
- 領収書は、決済完了後に申込画面(講演大会 Mypage)からダウンロードし、印刷して下さい。
- 参加方法や講演概要ダウンロードについては、下記をご参照下さい。

\* **65歳以上の個人会員** : 会員情報に生年月日のご登録がない場合は、課金されますのでご注意ください。会員情報に生年月日をご登録されていない方は、大会参加申込みの前に [annualm@jimm.jp](mailto:annualm@jimm.jp) まで会員番号・お名前・ご連絡先・生年月日をお知らせ下さい。

\*\* **学生員** : 卒業予定変更等により会員種別に相違がある場合、事前に**会員種別の変更手続き**を行ってから、大会参加をお申込下さい。会員情報に登録された卒業年次を超えると、自動で正員となっています。

\*\*\* 非会員の参加申込者には、1年間の会員資格を付与します。ただし特典は重複して付与いたしません。

◆懇親会費(消費税込み)

開催日時 2023年9月20日(水)18:30~20:30

開催場所 ANA クラウンプラザホテル富山(〒930-0084 富山市大手町2番3号)

- ・お支払後の取消は、準備の都合上ご返金いたしかねますのでご了承下さい。
- ・懇親会ご参加申込の方には、参加証をお渡ししますので当日、懇親会の会場の受付にお立ち寄り下さい。

| 予約申込締切日        | 9月1日(金)(申込および入金期日)        |                          |
|----------------|---------------------------|--------------------------|
| 種 別            | 予約申込<br>(インターネット申込・事前支払い) | 当日申込<br>(懇親会会場受付・現金払いのみ) |
| 一般             | 8,000円                    | 10,000円                  |
| 同伴者(ご夫人またはご主人) | 5,000円                    | 5,000円                   |

◆支払方法

事前申込のお支払いはクレジットカードおよびコンビニ振込決済をご利用頂けますが、後期(当日)申込はクレジット決済のみとさせていただきます。事前予約申込は9月1日(金)の入金日をもって事前参加申込完了となります。

◆参加方法

大会マイページにて「参加証」を印刷し、来場下さい。

◆講演概要の WEB 公開

講演概要の公開日は、大会2週間前の2023年9月5日(火)です。特許関係のお手続きは、公開日までにお済ませ下さい。  
講演大会公開サイトにログイン後、講演概要の閲覧ができます。

(事前参加申込みの方)参加申込みをされ、参加費を納入された方へは、概要公開日に講演概要閲覧等に必要な参加者個別認証 ID とパスワードを配信いたします。

(後期(当日)申込の方)参加申込受理通知に記載の「登録番号」および「パスワード」が講演概要閲覧に必要な個別認証 ID とパスワードになります。

◆講演概要集購入について

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

2023年秋期講演大会 開催予定の各種シンポジウム

公募シンポジウム9テーマ

- S1 材料変形素過程のマルチスケール解析(VI)
- S2 水素エネルギー材料X
- S3 ハイエントロピー合金の材料科学(X)
- S4 特異反応場における時間/空間応答を利用した新奇材料構造創成Ⅳ
- S5 Additive Manufacturing の材料科学Ⅱ：超温度場材料創成学
- S6 機能コアの材料科学Ⅳ
- S7 データ創出・活用による磁性材料の研究開発
- S8 極限環境対応構造材料のためのマテリアル DX(Ⅰ)
- S9 ワイドギャップ結晶の材料科学と高温プロセッシングⅤ

企画シンポジウム4テーマ

- K1 自動車技術会・日本鉄鋼協会・日本金属学会共催・第5回自動車関連材料合同シンポジウム「モビリティの革新に貢献する材料技術の最新動向
- K2 若手科学者へ贈る研究のヒントⅥ～未踏領域へ到達するために～
- K3 中学高校生向け金属体験学習
- K4 国内のマテリアル戦略とインフォマティクス応用

参加申込・問合せ先

(公社)日本金属学会 ☎ 022-223-3685 ☎ 022-223-6312 E-mail: annualm@jimm.jp

## 2023年秋期(第173回)講演大会会場周辺のご案内

2023年秋期講演大会 実行委員長 松田健二

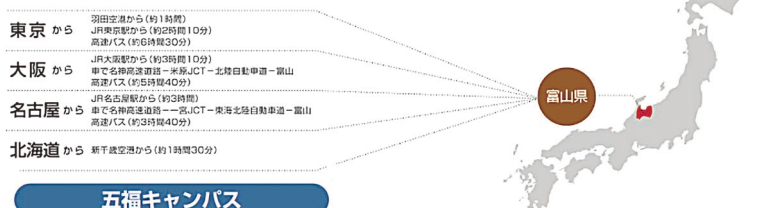
今年の日本金属学会秋期講演大会は、9月19日(火)から9月22日(金)までの4日間にわたり、日本鉄鋼協会と合同で富山大学にて開催されます。北陸信越地区での開催は2020年に富山大学で開催される予定でしたが、コロナ禍の影響でOn-lineで行われました。現在、コロナパンデミックから普通の活動ができる時期を迎え、富山大学五福キャンパスにて行うことになりました。富山大学は、人文・教育・経済・理・工・都市デザイン・医・薬・芸術文化の9学部と大学院、和漢医薬学総合研究所、附属病院からなる日本海側有数の総合大学です。富山大学五福キャンパスはJR富山駅からバスや路面電車で20分、富山空港から車で20分という利便性の良いキャンパスであり、地域と世界に向けて先端的研究情報の発信を行なっています。

富山県は、日本海に面しており、海と山に囲まれた自然豊かな地域です。標高3,000メートルの立山連峰と水深1,000メートルの富山湾を望む立山連峰や黒部峡谷、黒部ダムなど、豊かな自然や国宝瑞龍寺・勝興寺などの観光スポットが多数あります。特に、講演大会が開催される9月は平均気温24℃で、とても過ごしやすい気温になり、講演大会での発表に集中できること間違いありません。富山県は、製造業が盛んな地域で、特に金属加工業や精密機械製造業が有名です。富山県の製造業は、高い技術力と品質管理力に基づいて、世界中から信頼されています。また、富山県は食品産業も盛んで、富山湾の海産物や地元の農産物を使った加工食品が多数生産されています。このように、富山県は、豊かな自然と発展した産業が共存する地域で、その中でも富山県は、金属材料の研究・技術開発に力を入れています。富山大学産業技術総合研究所など、多くの研究機関が金属材料の基礎研究や応用研究を行っています。また、産業界との連携も密で、先進的な金属材料研究と技術の開発が進められています。

富山市は、2000年代に入り、都市の再開発やまちづくりが進められ、富山駅周辺や商業地域などが、新しい建物や公園、広場、歩道などで整備されています。これらの取り組みにより、市内がより魅力的な街に生まれ変わり、講演大会へのご参加にあわせて県内にも足を伸ばして、富山のまちづくりを体験することや食文化に触れていただければ幸いです。

特に、「天然の生け簀」と称される富山湾は、日本海に分布するとされる約800種のうち約500種の魚が生息する水産資源の宝庫です。市内には、富山ならではの天然・新鮮の極上寿司を味わえる「富山湾鮎」や朝獲れ直送の地魚が手頃に食べられる「回転ずし」まで多くのお店が軒を連ねます。日本海からとれた新鮮な地魚と富山の地酒の素晴らしいコンビネーションをこの機会に体験されますことをお勧めします。

### 位置図



### 五福キャンパス

〒930-8555 富山市五福3190  
代表電話: 076-445-6011



富山大学へのアクセス。

- バス  
富山きときと空港から富山駅まで約20分  
富山駅(南口側)から約20分
- 市内電車  
富山駅(南口側)から約15分
- タクシー  
富山きときと空港から約20分  
富山駅(南口側)から約15分
- 車  
北陸自動車道「富山西IC」から約15分  
または「富山IC」から約20分



空から見た富山大学五福キャンパス風景。



富山の寿司。

**2023年秋期講演大会**  
大会ホームページ・バナー広告、大会プログラム広告(まてりあ9号付録)、  
付設展示会、誌上展示会(まてりあ11号)各募集要領

本会2023年秋期講演大会は、9月19日(火)～22(金)の4日間、富山大学・五福キャンパスにて開催致します。本講演大会にて、各種広告、付設展示会の出展を募集致します。

■大会ホームページ・バナー広告

掲載期間 2023年7月～(会期終了後もアーカイブで閲覧できます)

アクセス数 200,000アクセス(約2ヶ月、前回参考値)

サイズ タテ80ピクセル×ヨコ160ピクセル(静止画)

データ形式 静止画のPNG(.png), JPEG(.jpg), GIF(.gif)

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

掲載料金 1枠50,000円(税別)※バナーデータ制作費は別途です。  
※本会維持員様、プログラム広告掲載会社様、付設展示会出展社様は50%OFF。

申込 随時受付

申込最終締切 8月17日(木)

■講演大会プログラム広告(冊子)

発行予定日 9月1日(金) まてりあ9号付録

原稿サイズ A4 1頁 天地260mm×左右180mm  
1/2頁 天地125mm×左右180mm

入稿形態 完全データ(グレースケール)

掲載料金 後付モノクロ1頁 ¥70,000(税別)  
後付モノクロ1/2頁 ¥40,000(税別)  
※広告データ制作費は別途です。  
※付設展示会出展社様は50%OFF。

申込締切 7月27日(木)

広告データ締切 8月3日(木)

※講演大会がオンライン開催となった場合でもキャンセルはできません。

■付設展示会

展示会会期 9月20日(水)～22日(金)  
9:00～17:00(22日は、14:00まで)  
搬入日:9月19日(火)14:00～16:00(予定)

展示会場 富山大学・五福キャンパス

〈機器・書籍展示〉

研究開発用機器、書籍、ソフトウェア等の出展を募集します。

1コマ 間口1,800mm、奥行き900mm(予定)  
展示台(テーブル)、バックパネル(高さ2100mm×幅1800mm)、椅子をご用意します。  
※電気使用容量を制限する場合がございます。(例:1コマ200Wまで)

出展料金 機器展示:1コマ 140,000円(税別)  
書籍展示:1コマ 90,000円(税別) 出版社様限定

申込締切 8月17日(木)  
※規定数に達し次第、先着順に締切ります。

〈カタログ展示〉

展示部数 2点(A4サイズ、8頁以内)につき、30部以内

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

申込締切 8月17日(木)

■まてりあ11号・誌上展示会

付設展示会のフォローアップ広告を募集します。

発行予定日 11月1日(水)

掲載料金 1枠(1/4頁) ¥28,000(税別)

申込締切 9月28日(木)

広告原稿締切 9月28日(木)

※本広告企画は、付設展示会に出展されていない企業様も出稿できます。

ランチョンセミナー他の協賛メニューは、企画でき次第ご案内致します。下記までお問い合わせ下さい。

本講演大会がオンライン開催となった場合、諸事情により付設展示会が中止となった場合は、別途協賛メニューをご案内致します。

■申込・問合先

〒104-0061 東京都中央区銀座7-12-4  
友野本社ビル7F  
株式会社 明報社 (担当:月岡太郎  
または、営業担当者まで)  
☎ 03-3546-1337 FAX 03-3546-6306  
E-mail: tsukioka@meihosha.co.jp (または営業担当のアドレスまで)  
URL: http://www.meihosha.co.jp

## 2023年秋期講演大会会期中の託児室設置のお知らせ

2023年秋期講演大会期間中、日本金属学会と日本鉄鋼協会が共同で託児室を開設いたします。利用ご希望の方はホームページ掲載の託児室利用規約をご確認の上「託児室利用申込書」に記入頂き、下記シッター会社へ直接お申し込み下さい。

### ■設置期間および利用時間(開始、終了時間は予定です)

| 設置期間          | 利用時間        |
|---------------|-------------|
| 2023年9月19日(火) | 12:30~17:00 |
| 2023年9月20日(水) | 8:30~18:00  |
| 2023年9月21日(木) | 8:30~18:00  |
| 2023年9月22日(金) | 8:30~17:00  |

■場所 9/19 とやま自遊館内(お申し込みの方へ直接ご連絡いたします)

9/20~22 富山大学五福キャンパス内(お申し込みの方へ直接ご連絡いたします)

### ■対象・利用料金

0歳~2歳 お子様1人につき 2,000円/1日

3歳~学童まで お子様1人につき 1,500円/1日

※利用時間外の場合 500円/1時間の追加料金がかかります。

※兄弟割引あり 下のお子さん(弟もしくは妹)は上記金額の半額

利用者は利用当日、シッターの方(保育スタッフ)に利用料金をお支払い下さい。

なお、申込締切後のキャンセルはキャンセル料を頂く場合がありますので、あらかじめご了承下さい。

### ■利用シッター会社：スマイルキッズ

#### ■お申込み方法

・日本金属学会・日本鉄鋼協会ホームページ託児室案内の託児室利用規約をご確認の上、「利用申込書」をダウンロードし、必要事項を記入の上、下記シッター会社へメールにてお申し込み下さい。

・申込の際は、件名に「秋期講演大会の託児室予約」とご記入の上、利用申込書を添付して下さい。

※申込受領後3営業日以内に、スマイルキッズより返信メールをお送りします。

### ■申込期間：2023年8月1日(金)~9月11日(月)16:00

(定員に達し次第締め切らせて頂きます)

### ■申込・問合せ先：スマイルキッズ

(個別保育事業者協議会会員)

担当) 吉田直子

☎ 076-464-5102(代表)

FAX 076-471-8196

E-mail: smilekids@m5.dion.ne.jp

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

## 第21回 World Materials Day Award 募集

応募期間：2023年7月1日~8月25日

材料系国際学協会連携組織である IOMMMS(International Organization of Materials, Metals and Minerals Societies)では、国際連携活動の一環として、材料系分野のプレゼンス向上のため World Materials Day を制定し(毎年11月の最初の水曜日)本年は、**11月1日(水)**、この日に世界同時に「材料に関する知識とその重要性を社会や若者に啓発する活動」に貢献があった学生を顕彰しております。下記日程にて展示および審査を行いますので、多数のご応募をお待ちしております。

### 募集要項

対象となる活動：次の3部門で募集します。

第1部門：社会における材料の重要性を示すホームページ

第2部門：学園祭やキャンパスオープンデー等での該当する展示物、作品等

第3部門：その他(材料教育プロジェクト、青少年対象の材料実験等)

### 応募資格者

日本在住の学部学生、修士課程大学院生(グループも可)。高校生・高専学生も可。

日本金属学会の会員でなくても応募できるが授賞決定後には会員になることが望ましい。

### 展示方法

日本金属学会秋期講演大会(2023年9月19~22日、富山大学)において、応募作品を展示する。

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

### 審査方法

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

### 授賞

- ① World Materials Day Award：優秀作品1作品(または1グループ) 副賞5万円
- ② 各部門賞：各部門1作品に表彰、賞状のみ。

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

応募要領 メールによる申込み記載事項(応募者名、住所、所属、作品名、応募分野・部門、展示方法(Web、実物、写真、ビデオ等)、展示必要スペース・重量などを明記して応募下さい。(応募様式はホームページからダウンロードして下さい)

申込方法 下記アドレス宛にお申込下さい。

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

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

# 2024年春期講演大会 公募シンポジウムテーマ提案募集

提案期限：2023年9月1日(金) 期日厳守

会員の研究活動の一層の活性化を図ることを目的として、春秋大会において会員からの提案テーマによるシンポジウム講演を実施いたしており、活況を呈しております。明年の春期大会の公募シンポジウムテーマを募集いたします。次の要領をご参照のうえ、活発な討論が期待できる有益なテーマを積極的にご提案下さい。(提案様式はホームページよりダウンロードして下さい。)

## 【募集対象の大会】

2024年春期講演大会(東京理科大学葛飾キャンパス予定)

## 【実施要領】

- 境界領域を取り込むもの、最新の情報を含むもの、適時な討論展開ができるもの。
- 一般会員、若手・中堅研究者の、斬新なアイディアによる提案を期待する。
- これまでの金属学会になかったテーマを歓迎する。一つのシンポジウムの講演件数は10件以上であることを目安とする。
- 採択したテーマは、公募シンポジウムとして、講演申込を募集会告する。
- 採択された場合、提案者(企画責任者)はテーマ責任者として、積極的に講演募集を行い、また講演プログラムを編成する。シンポジウムの企画に積極的な方々が将来、調査研究・講演大会などで主導的に活躍されることを期待する。

### 1. 講演の種類 基調講演と応募講演

### 2. 提案書の内容 ①テーマ、②テーマ英語名、③趣旨、④基調講演の予定題目と講演者、⑤推定講演数、⑥希望会場広さ・開催希望日、⑦提案者所属・役職/氏名、⑧通信先住所・TEL・FAX、E-mail

### 3. 提案書送付先 下記宛てE-mailで送付して下さい。2,3日過ぎても受理返信通知のない場合はご連絡下さい。

### 4. テーマの選定 講演大会委員会で選定し、結果は提案者に通知します。

### 5. 採択テーマの告知と講演募集

「まてりあ」11号2024年春期大会講演募集会告ならびに本会ホームページで行う。

### 6. 講演申込締切日 2024年1月初旬予定

### 7. 講演プログラム テーマ責任者がプログラム編成し、講演大会委員会へ提出する。

### 8. 講演時間

応募講演：15～25分(+討論時間5～10分=合計20～35分)

基調講演：30分(+討論時間10分=合計40分)

### 9. 講演概要原稿分量 A4判1ページ(応募講演、基調講演とも)

## 【公募シンポジウム企画の採択基準】

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

## 【参考】2023年春期講演大会における公募テーマ

|    |                                                          |
|----|----------------------------------------------------------|
| S1 | ハイレントロピー合金の材料科学(X)                                       |
| S2 | 金属表面の材料化学Ⅵ—めっき・耐食性・耐酸化性・触媒研究の新发展—                        |
| S3 | 材料機能特性のアーキテクチャー構築シンポジウムⅣ—さまざまな拡散・輸送現象のアナロジー体系化による学理の再認識— |
| S4 | 特異反応場における時間/空間応答を利用した新奇材料構造創成Ⅲ                           |

## 問合・照会先 (公社)日本金属学会 講演大会委員会宛

E-mail: stevent@jimm.jp

☎ 022-223-3685 ☎ 022-223-6312

## 2024年春期講演大会 企画シンポジウムテーマ募集

提案期限：2023年9月1日(金)

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

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

### 【募集対象の大会】

2024年春期講演大会(東京理科大学葛飾キャンパス)

### 【実施要領】

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

演大会委員会へ提出する。

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

各締切日等：下記表参照

|                   | 2024年春期大会      |
|-------------------|----------------|
| 企画募集案内            | 7月1日(7号会告)     |
| 応募締切              | 2023年9月1日      |
| 企画テーマの決定          | 2023年9月下旬      |
| 講演者リスト提出期日        | 2023年11月25日頃予定 |
| プログラム提出期日(講演登録締切) | 2024年1月初旬予定    |
| 講演大会企画委員会(会場決定)   | 2024年1月下旬予定    |
| プログラム公開           | 2024年2月初旬予定    |

○講演時間(討論時間)：15分~30分(5分~10分)

○非会員の取扱い(参加費, 交通費, 謝金)：公募シンポジウムに準ずる

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

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

## 2024年度金属学会シンポジウムのテーマ募集

提案期限：2023年9月1日(金) 厳守

### 今回募集するシンポジウムの開催時期

2024年度(2024年3月1日~2025年2月28日)内に実施

### 応募要領

提出書類 提案書を下記提出先に送付して下さい。  
(提案書の様式は HP (<https://jimm.jp/event/symposium/>) よりダウンロードして下さい。)

### 応募から実施までの流れ

募集締め切り(9月)⇒セミナーシンポジウム委員会にて採択決定(10月頃)⇒事務局から採択通知と具体的実施準備の

連絡⇒講師・プログラム・会場の決定(開催6か月前に確定必要)・会告⇒講師依頼⇒テキスト作成(開催2か月前に原稿必要)⇒参加者募集⇒開催

### 提案書提出先・問合せ

下記宛てに E-mail で送付して下さい。  
日本金属学会 セミナーシンポジウム委員会宛  
E-mail: stevent@jimm.jp ☎ 022-223-3685

詳細 ホームページ/イベント まてりあ 5号333頁

公益社団法人日本金属学会  
「2024年度若手研究グループ」新規申請募集

申請締切：2023年9月1日(金)

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

【実施要領】

- (1)概要 • 新たな研究会の設立、新規研究テーマの開拓やフロンティア助成研究の申請に向けた研究課題の抽出や研究目標の明確化のための調査の実施や構成員による討論会や会議の開催等を行なう。
- 本研究グループの活動を、日本金属学会フロンティア研究助成申請時の審査の参考情報とする。
- 目的・目標・活動計画を明確にし、機関誌等での活動報告を義務化した上で、活動費を支給する。
- (2)対象者 • 申請者および構成員は申請時(9月1日時点)に40才以下の研究者であること。申請代表者は正会員であること。
- 申請時には、構成員は5名以上であり、非会員を構成員とすることができるが、過半数は正会員であること。
- 構成員に最低1名は産業界のメンバーが入っていること。(適当なメンバーがいない場合は、申請時に企業メンバーの推薦を該当分科の調査研究委員会委員等に依頼すること。)
- 活動開始時には、非会員の構成員は会員になること。
- (3)活動費 年間50万円を上限とする。(税金分を含む)
- (4)活動期間 2024年3月1日～2026年2月28日の2年間とし、原則として延長は認めない。
- (5)活動報告 • 研究成果報告として、講演大会において講演(若手研究グループの企画セッション等が望ましい)を行う。
- 1年経過後および活動終了後に報告書A4版1枚(2,200字程度)を調査研究委員会に提出する(必要な場合は説明いただく)。提出された報告書は、本会ホームページおよび会報「まてりあ」に掲載する。
- (6)採択件数 5件以内とする。
- (7)応募方法 名称、申請代表者、構成員、申請理由、活動の概要、活動計画、予算、成果の報告予定、関連分野を記載した申請書を下記申込専用サイトに必要事項を入力の上、アップロードし提出する。なお、ファイルはMS-Word形式として下さい。
- 申込専用サイト  
<https://data.jim.or.jp/jim/wakate/tou/>

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

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

公益社団法人日本金属学会  
「研究会」新規・更新申請募集

申請締切：2023年9月1日(金)

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

新規申請の研究会は新規申請用紙、継続延長申請の研究会は継続更新申請用紙でお申込下さい。(申請用紙はホームページよりダウンロードして下さい)

【実施要領】

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

- (1)年間運営費 100,000円
- (2)活動期間 新規申請の場合1期5年間以内、継続更新の場合は、延長期間1期3年以内。  
最長活動期間は2期8年以内
- (3)新規申請書の内容 ①研究会名称、②活動目的、③活動期間、④代表世話人、⑤世話人(複数可)、⑥構成員名簿
- (4)継続更新申請書の内容 ①研究会名称、②継続理由、③延長期間、④代表世話人、⑤世話人、⑥構成員、⑦

これまでの成果報告, ⑧今後の活動計画書

- (5) 年間採択数 新規2件以内, 継続(延長)申請は2件以内
- (6) 研究会の審査 調査研究推進委員会で1次審査をし, 理事会で最終審査を行う.
- (7) 審査基準
- 学術貢献出来る研究会が望ましい.
  - 類似の研究会に属しない.
  - 構成員は適切か.
  - そのテーマの研究会が必要か.
  - 研究会活動期間中に講演大会公募シンポジウムや金属学会シンポジウムを計画しているか.
- (8) 現在活動中の研究会の留意事項
- 2024年2月に終了する研究会で, 過去に継続(延長)の申請をしている研究会は, 現在の活動期間で終了となります.
  - 2024年2月に終了する研究会で, これまで継続(延長)の申請をしていない研究会は, 1期3年の継続(延長)の申請が出来ます. ただし, 研究会の審査により2件以内の採択となります.
- (9) 申込方法 作成した申請書を下記申込専用サイトに必要事項を入力の上, アップロードし提出して下さい. なお, ファイルはMS-Word形式として下さい.

申込専用サイト

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

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



## 公益社団法人日本金属学会 研究会規則

### (規則の目的)

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

### (運営費)

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

2 この法人の運営費以外の運営は参加費等収入で充当する.

3 企業からは原則として分担金を徴収しない.

4 前項に定める同系統のテーマで継続的活動を目的とする更新申請の承認にあたっては, 会告や会場の手配などの支援はするが活動支援金を提供しない場合もある.

### (研究会の申請)

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

2 調査研究推進委員会は申請書を審査の上, 調査研究委員会の議を経て, 理事会の承認を得るものとする.

3 研究会の年間採択数は新規は2件以内, 継続更新は2件以内とする.

4 新規に採択された研究会は3年経過後に継続する目処がたたなくなった場合は研究会を解散することが出来る.

5 研究会は活動期間中に, 1回以上春秋公募シンポジウムを開催しなければならない.

### (研究会の新規申請)

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

2 新規応募の申請書に記載する事項は次の通りとする.

- (1) 研究会の名称および活動目的
- (2) 代表世話人(氏名, 所属, 役職名, TEL, E-mail)
- (3) 世話人の名簿
- (4) 構成員の名簿
- (5) 活動期間は1期5ヵ年以内とする

### (更新申請)

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

2 更新申請に記載する事項は次の通りとする.

- (1) 研究会の名称および継続理由
- (2) (2)代表世話人(氏名, 所属, 役職名, TEL, E-mail)
- (3) 世話人の名簿
- (4) 構成員の名簿
- (5) これまでの成果報告書
- (6) 今後の活動計画書
- (7) 延長期間1期3ヵ年以内とする
- (8) 最長活動期間は2期8ヵ年以内とする

### (研究会の構成員)

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

2 代表世話人は新たに参加した構成員を事務局に通知する.

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

#### (研究会の審査)

第7条 研究会の新規および継続更新の審査は、下記による。

- 2 調査研究推進委員会で1次審査をし、理事会で最終審査を行う。
- 3 研究会の審査は次の基準による
- (1) 学術貢献出来る研究会であるか
  - (2) 類似の研究会に属しないか
  - (3) 構成員は適切か
  - (4) そのテーマの研究会が必要か
  - (5) 本会の講演大会公募シンポジウムや金属学会シンポジウムを開催出来るか

#### (研究集会の開催)

第8条 研究集会を催す場合は、下記による。

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

#### (研究会の運営)

第9条 研究会の運営に関する事務処理は代表世話人のもとで行う。

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

#### (研究会の活動および成果報告)

第10条 研究会の活動および成果報告は、下記による

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

#### (委員会の関与)

第11条 この規則に疑義が生じた場合は、調査研究推進委員会で協議する。

#### (規則の改廃)

第12条 この規則を改廃する場合は、調査研究委員会の決議を要する。

| 2023年度活動中の研究会 |                                |                     |               |  |
|---------------|--------------------------------|---------------------|---------------|--|
| 10テーマ研究会      |                                |                     |               |  |
| No.           | 名 称                            | 活動期限                | 代表世話人         |  |
| 1             | 75 キンク研究会*                     | 2015年3月～<br>2024年2月 | 藤居 俊之(東 工 大)  |  |
| 2             | 80 高エネルギー環境用材料評価研究会            | 2018年3月～<br>2024年2月 | 橋本 直幸(北 大)    |  |
| 3             | 81 材料機能特性のアーキテクチャー研究会          | 2018年3月～<br>2024年2月 | 木村 好里(東 工 大)  |  |
| 4             | 82 微小領域の力学特性評価とマルチスケールモデリング研究会 | 2019年3月～<br>2025年2月 | 大村 孝仁(物・材機構)  |  |
| 5             | 83 高温材料の変形と破壊研究会               | 2020年3月～<br>2026年2月 | 澤田 浩太(物・材機構)  |  |
| 6             | 84 ソフト磁性研究会                    | 2020年3月～<br>2026年2月 | 遠藤 恭(東 北 大)   |  |
| 7             | 85 状態図・計算熱力学研究会                | 2021年3月～<br>2026年2月 | 阿部 太一(物・材機構)  |  |
| 8             | 86 結晶性材料の結晶配向評価および結晶方位解析技術研究会  | 2022年3月～<br>2027年2月 | 長谷川 誠(横浜 国 大) |  |
| 9             | 87 水素が関わる材料科学の課題共有研究会          | 2022年3月～<br>2027年2月 | 浅野 耕太(産 総 研)  |  |
| 10            | 88 高温構造用材料の水蒸気酸化に関する基礎科学研究会    | 2022年3月～<br>2027年2月 | 上田 光敏(東 工 大)  |  |

\* 期間延長研究会

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

|                                |                 |                                 |                 |
|--------------------------------|-----------------|---------------------------------|-----------------|
| 35. 界面の原子論研究会                  | (1996.3～1999.2) | 63. 計算材料科学研究会                   | (2009.3～2012.2) |
| 36. 拡散研究会                      | (1998.3～2003.2) | 64. 触媒材料研究会                     | (2009.3～2015.2) |
| 36. ハイパフォーマンス・バイオマテリアル研究会      | (1998.3～2001.2) | 65. 高温強度と組織形成の材料科学研究会           | (2010.3～2015.2) |
| 38. 超高純度金属研究会                  | (1998.3～2003.2) | 66. 熱電変換材料研究会                   | (2011.3～2014.2) |
| 39. 材料集合組織研究会                  | (1999.3～2002.2) | 67. 結晶と組織の配向制御による材料高性能化研究会      | (2011.3～2017.2) |
| 40. 高温材料設計研究会                  | (2003.3～2005.2) | 68. シンクロ型 LPSO 構造研究会            | (2011.3～2014.2) |
| 41. ストラクチャーダイナミックス研究会          | (2000.3～2003.2) | 69. エレクトロニクス薄膜材料研究会             | (2013.3～2018.2) |
| 42. 機能的薄膜研究会                   | (2000.3～2003.2) | 70. プラストンに基づく変形現象研究会            | (2013.3～2022.2) |
| 43. 可逆的インターコネクション研究会           | (2001.3～2004.2) | 71. グリーンエネルギー材料のマルチスケール創製研究会    | (2013.3～2018.2) |
| 44. ナノプレーティング研究会               | (2002.3～2005.2) | 72. 水素化物に関わる次世代学術・応用展開研究会       | (2014.3～2023.2) |
| 45. 水素新機能研究会                   | (2002.3～2005.2) | 73. 水素誘起超多量空孔研究会                | (2014.3～2019.2) |
| 46. エキゾチック金属間化合物の構造・相安定性と物性研究会 | (2003.4～2005.2) | 74. チタン製造プロセスと材料機能研究会           | (2014.3～2019.2) |
| 47. 強ひずみ加工微細組織制御研究会            | (2004.3～2008.2) | 75. キンク研究会                      | (2015.3～2024.2) |
| 48. 照射場材料制御研究会                 | (2004.3～2009.2) | 76. 高温変形の組織ダイナミクス研究会            | (2015.3～2020.2) |
| 49. 次世代軽負荷マグネシウム研究会            | (2004.3～2009.2) | 77. 高度超塑性成形研究会                  | (2016.3～2022.2) |
| 50. 超高純度ベースメタル研究会              | (2004.3～2007.2) | 78. 触媒材料の金属学研究会                 | (2017.3～2023.2) |
| 51. 先進材料の高温強度と組織研究会            | (2005.3～2009.2) | 79. 金属・無機・有機材料の結晶方位解析と応用技術研究会   | (2017.3～2022.2) |
| 52. ベリリウム金属間化合物研究会             | (2005.3～2008.2) | 80. 高エネルギー環境用材料評価研究会            | (2018.3～2024.2) |
| 54. ナノプレーティング研究会               | (2006.3～2013.3) | 81. 材料機能特性のアーキテクチャー研究会          | (2018.3～2024.2) |
| 56. 結晶方位と組織の制御研究科              | (2006.3～2011.2) | 82. 微小領域の力学特性評価とマルチスケールモデリング研究会 | (2019.3～2025.2) |
| 57. 変位型相変態を利用した構造・機能的材料研究会     | (2007.3～2012.2) | 83. 高温材料の変形と破壊研究会               | (2020.3～2026.2) |
| 58. 機能的ポーラス材料研究会               | (2008.3～2013.3) | 84. ソフト磁性研究会                    | (2020.3～2026.2) |
| 59. 機能的チタン合金研究会                | (2008.3～2013.3) | 85. 状態図・計算熱力学研究会                | (2021.3～2026.2) |
| 60. 格子欠陥制御工学研究会                | (2008.3～2013.3) | 86. 結晶性材料の結晶配向評価および結晶方位解析技術研究会  | (2022.3～2027.2) |
| 61. 核融合システム・材料統合研究会            | (2009.3～2012.2) | 87. 水素に関わる材料科学の課題共有研究会          | (2023.3～2028.2) |
| 62. 励起反応場を用いた低次元ナノ材料創成研究会      | (2009.3～2015.2) | 88. 高温構造用材料の水蒸気酸化に関する基礎科学研究会    | (2023.3～2028.2) |

日本金属学会各種研究費申請比較表

◎応募検討の際、ご参照下さい。

|       | 研 究 会                                                                 | 若手研究グループ                                                                                                                                                        | フロンティア研究助成                                                                                                                        |
|-------|-----------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 目 的   | 先端領域又は学術領域における研究会を効率的に推進するために活動することを目的とする                             | 若手および調査・研究事業を活性化することを目的とする。新たな研究会の設立、新規研究テーマの開拓やフロンティア助成研究の申請に向けた研究課題の抽出や研究目標の明確化のための調査の実施や構成員による討論会や会議の開催等を行なう。                                                | 教育・研究機関での金属及びその関連材料分野の学術研究及び技術研究の発展や若手研究者の育成や奨励を主な目的として、金属及びその関連材料分野に関連する材料又はプロセスに関する研究に助成金を交付する                                  |
| 対 象 者 | 代表世話人および世話人は会員であること。代表世話人は調査研究委員であることが望ましい。構成員は必要に応じて外部の専門家(非会員)でも可。他 | 申請者および構成員は40才以下の研究者であること。申請代表者は正会員であること。<br>・申請時には、構成員は5名以上であり、非会員を構成員とすることができるが、過半数は正会員であること。<br>・構成員に最低1名は産業界のメンバーが入っていることが望ましい。<br>・活動開始時には、非会員の構成員は会員になること。 | 応募者(代表者)は、応募年4月1日時点で45歳以下の日本の教育機関または公的研究機関に所属し、日本国内で研究に従事する者(学生・大学院生および企業との兼務者を除く)であること。ただし、共同研究者は国外でも可とする。他                      |
| 研究期間  | 5年間(申請により最長8年可)                                                       | 2年間(延長なし)                                                                                                                                                       | 2年間                                                                                                                               |
| 支給金額  | 年間運営費 10万円<br>使途は、会議費、旅費交通費、通信運搬費、消耗品費、印刷製本費等の運営費用とする                 | 年間50万円を上限<br>使途は、会議費、旅費交通費、通信運搬費、消耗品費、印刷製本費等の運営費用とする                                                                                                            | 150万円以下<br>使途は、研究等に直接必要な費用及び所属組織の必要最低限の間接経費とする                                                                                    |
| 審 査   | 調査研究委員会にて審査後、理事会にて承認                                                  | 調査研究委員会にて審査後、理事会にて承認                                                                                                                                            | 調査研究委員会にて審査後、理事会にて承認                                                                                                              |
| 採択上限  | 特になし                                                                  | 5件程度                                                                                                                                                            | 10件以下                                                                                                                             |
| 活動報告  | 研究会活動期間中に講演大会公募シンポジウムや金属学会シンポジウムを計画すること。                              | 講演大会において講演(若手研究グループの企画セッション等が望ましい)を行う。<br>1年経過後および活動終了後に報告書A4版1枚を調査研究委員会に提出し、会報および本会ホームページにも掲載する。                                                               | 研究終了6ヶ月後までに、終了報告書(A4様式1枚)及び成果報告書を日本語(専門語等で部分的に外国語を使用することは可)で作成。<br>研究成果は研究開始時から研究完了後1年までの間に本会の講演大会における発表2件及び本会の欧文誌又は会誌に論文を投稿すること。 |
| 募集期間  | 例年7月会告 締切9月初旬                                                         | 例年7月会告 締切9月初旬                                                                                                                                                   | 3号会告 募集期間3月1日～4月末日                                                                                                                |

## 2023年度 高温材料の変形と破壊研究会

2023年度の「高温材料の変形と破壊研究会」を下記のとおりで開催いたします。本研究会は、様々な材料における高温変形と破壊、また、高い力学特性を生み出す材料の内部組織に注目し、実験的ならびに計算的研究成果について基礎的な観点から討論して、高温材料の長寿命化・高強度化のための原理・原則を見直すことを目的としています。皆様どうぞ奮ってご参加下さい。

代表世話人 物質・材料研究機構 澤田浩太

日 時 2023年9月4日(月)15時00分  
～9月6日(水)12時00分  
会 場 ホテル華乃湯(<https://www.hananoyu.com/>) 仙台市太白区秋保町湯元字除33-1 ☎ 022-397-3141  
参 加 費 5,000円(税込)※定員に達した場合は申込をお断りさせていただく場合がございます  
交流会費 3,000円(税込)  
宿 泊 費 11,000円(税込)  
講演申込 <https://forms.gle/nCUuNJiRD5R4dfQb9>  
聴講申込 同上  
申込締切 2023年7月28日(金)  
問合せ先 物質・材料研究機構 クリープデータユニット  
猿田真美子  
E-mail: [saruta.mamiko@nims.go.jp](mailto:saruta.mamiko@nims.go.jp)

※講演発表者以外の共同研究者(共著者)が研究会への参加を希望される場合は、別途参加申し込みが必要です。  
※聴講のみのご参加も歓迎いたします。

各種イベントのご案内はホームページにも掲載しております。

## 掲 示 板

## 〈公募類記事〉

無料掲載：募集人員、締切日、問合先のみ掲載。

有料掲載：1/4頁(700～800文字)程度。

「まてりあ」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。

原稿提出先：電子メール(受け取りメールの確認をして下さい)

E-mail: [materia@jimm.jp](mailto:materia@jimm.jp)

## 公 募



## ◇金属材料データベースに携わる

## NIMS エンジニア募集◇

物質・材料研究機構技術開発・共用部門 材料データプラットフォームにおいて、金属材料データベースの業務に携わる専門的な人材を下記の通り募集しています。

**組織概要** 国立研究開発法人物質・材料研究機構(NIMS)は、物質・材料科学技術に関する基礎研究および基盤的研究開発等の業務を総合的に行うことにより、物質・材料科学技術の水準の向上を図ることを目的としている特定国立研究開発法人です。NIMS 技術開発・共用部門 材料データプラットフォームは、世界最大級の物質・材料データベース群「MatNavi」を提供しており、そのひとつに金属材料の強度や特性に関するデータベース「Kinzoku」があります。

**募集職種** NIMS エンジニア(任期制) 1名

一年度毎の年次審査による更新あり。

※無期労働契約転換職員採用制度(採用試験実施)あり。

**所 属** 技術開発・共用部門 材料データプラットフォーム データ収集ユニット

**業務内容**

1. NIMS が保有する材料データベース MatNavi のための金属材料の強度や特性に関するデータ整理・入力・管理
2. 金属材料データベースに関する専門的な議論への参加
3. 管理下のデータとデータ参照元との比較・修正
4. 金属材料に関連する文献の調査
5. その他、指揮命令者の指示による業務

**応募資格・専門分野**

1. 理工学系の修士卒、またはそれと同等以上の能力を有している方
2. 金属材料に関する2年以上の実務もしくは研究経験を有する方
3. 材料工学または機械工学に関する知識を持つ方。金属の機械試験、とりわけクリープ・疲労に関する知識があると望ましい
4. MS Word, Excel, PowerPoint を使用できる方(但し、資格等は問わない)

5. データベース等の IT 技術の習得に意欲がある方  
勤務時間 1 日 7 時間45分 週 5 日を予定(相談に応じます)  
休日・休暇 土・日・祝祭日, その他機構の定める日, 有給  
休暇制度あり

詳細・応募方法

<https://www.nims.go.jp/research/group/data-collection/employment/rriaiu00000081ac.html>

問合せ先 〒305-0044 茨城県つくば市並木 1-1  
国立研究開発法人物質・材料研究機構  
技術開発・共用部門 材料データプラットフォーム  
データ収集ユニット 松田朝彦  
E-mail: MATSUDA.Asahiko@nims.go.jp

◇宇宙航空研究開発機構 宇宙科学研究所  
教育職 公募◇

国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構(JAXA)は, 下記の通り助教(教育職)の公募を行いますので, 広く適任者の推薦, 応募を求めます。

公募職種および人数 助教(教育職)1名

配属予定部署 宇宙科学研究所 宇宙飛翔工学研究系  
求める人物像

本公募においては, 将来の観測・探査計画に貢献する機能性を有する材料, および, それを使用した機器の自由な発想による研究を推進するとともに, 宇宙科学プロジェクトにおいて不具合対応を含む各場面で材料研究者の立場からプロジェクトチームに主体的かつ遅滞なく貢献する研究者を求めます。具体的には次の条件を満たすものとします。

- 自律駆動や耐熱性といった機能性が発現する材料に係る研究あるいは実務の経験を持ち, 国内外で評価された優れた実績を有すること。
- 将来の宇宙科学プロジェクトへの適用を前提として, 材料工学に関する研究を遂行するとともに, 当該分野でリーダーシップを取っていく能力および意欲を有すること。
- 宇宙科学プロジェクト遂行に必要な活動に, 金属材料に関する知見をベースとしつつもその専門分野に拘ることなく, 積極的に貢献する姿勢および能力を有すること。
- 大学院学生を教育・指導できる能力を有すること。

応募資格 博士号を有すること

応募締切 **2023年 9 月15日(金)正午(日本時間)必着**

問合せ先 宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究所  
宇宙飛翔工学研究系 研究主幹 澤井秀次郎  
教授 E-mail: sawai.shujiro@jaxa.jp  
科学推進部人事担当  
E-mail: ISAS-JINJI@ml.jaxa.jp

その他 詳細につきましては以下の web サイトを参照下さい。  
[http://www.jaxa.jp/about/employ/educator\\_j.html](http://www.jaxa.jp/about/employ/educator_j.html)

集 会

◇レアメタル研究会◇

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

- 第106回 2023年 7 月28日(金)(2023年度 第 1 回)←次回  
(関連イベント: 寄付ユニット関連イベント 2023年 9 月 8 日(金))(会場: 生産技術研究所コンベンションホール)
- 第107回 2023年 9 月29日(金) (2023年度 第 2 回)
- 第108回 2023年11月24日(金) (2023年度 第 3 回)  
★チタンシンポジウム(第 7 回)★(合同開催)
- 第109回 2024年 1 月12日(金) (2023年度 第 4 回)  
★貴金属シンポジウム(第11回)+新年会★(合同開催)
- 第110回 2024年 3 月 1 日(金) (2023年度 第 5 回)  
または 2024年 3 月15日(金)

令和 5 年度 レアメタル研究会のご案内

(2023.4.1現在)

- 第106回 2023年 7 月28日(金)14:00～  
(An 棟 2F コンベンションホール)  
リアル講演会+講演のネット配信(Zoom Webinar & YouTube)のハイブリッド研究会  
テーマ: 非鉄金属の未来 午後 2:00～  
講演【敬称略】
  - Battery Recycling at Umicore(仮) (60分)  
Umicore, Corporate Research & Development,  
Associate Scientist (Recycling & Extraction Technologies) 八木良平
- レアメタルに関する最近の話題 (45分)  
東京大学 生産技術研究所 教授 岡部 徹
- 非鉄金属材料の現状と未来展望(仮) (60分)  
三菱マテリアル株式会社 執行役常務 金属事業カンパニー  
プレジデント 伊左治勝義  
午後 6:00～ 研究交流会・意見交換会(開催未定)

レアメタル研究会ホームページ

[https://www.okabe.iis.u-tokyo.ac.jp/japanese/rc40\\_j.html](https://www.okabe.iis.u-tokyo.ac.jp/japanese/rc40_j.html)

日本金属学会誌掲載論文

Vol. 87, No. 7 (2023)

—論文—

ナノインデンテーション法を用いた高純度アルミニウム合金の局所力学特性に及ぼす添加元素の影響解明  
寺崎保裕 望月喬史 小島淳平 山本剛久 瀧川順庸

DyMnO<sub>3</sub>の相選択に対する雰囲気酸素分圧とトレランス因子の影響  
下村健太 栗林一彦 清宮優作  
白鳥 英 小澤俊平

Materials Transactions 掲載論文

Vol. 64, No. 7 (2023)

—Special Issue on Superfunctional Nanomaterials by Severe Plastic Deformation—

PREFACE Kaveh Edalati and Zenji Horita

An Overview of the Effect of Grain Size on Mechanical Properties of Magnesium and Its Alloys (Overview)  
Amanda P. Carvalho and Roberto B. Figueiredo

Nanostructuring of Multi-Principal Element Alloys by Severe Plastic Deformation: from Fundamentals to an Improved Functionality (Overview)  
Jenő Gubicza and Pham Tran Hung

Overview: Using Severe Plastic Deformation in the Processing of Superplastic Materials (Overview)  
Terence G. Langdon

Nanostructuring Ti-Alloys by HPT: Phase Transformation, Mechanical and Corrosion Properties, and Bioactivation (Overview)  
Alberto M. Jorge, Jr.,  
Virginie Roche, Diego A.G. Pérez and Ruslan Z. Valiev

An Overview on the Corrosion Behavior of Steels Processed by Severe Plastic Deformation (Overview)  
Diana M. Marulanda Cardona and Fabio E. Castillejo Nieto

Equal Channel Angular Extrusion of Polymers: Structural Changes and Their Effects on Properties (Overview)  
Victor Beloshenko, Alina Vozniak and Andrei Voznyak

Internal Interfaces in Severely Deformed Metals and Alloys: Coupling of Kinetics, Structure and Strain with Properties and Performance (Overview)  
Gerhard Wilde, Harald Rösner and Sergiy Divinski

Structural and Functional Properties of Si and Related Semiconducting Materials Processed by High-Pressure Torsion (Overview)  
Yoshifumi Ikoma

SPD Deformation of Pearlitic, Bainitic and Martensitic Steels (Overview)

M. W. Kapp, A. Hohenwarter, A. Bachmaier, T. Muller  
and R. Pippan

Incremental Feeding High-Pressure Sliding (IF-HPS) Process for Upscaling Highly Strained Areas in Metallic Materials with Enhanced Mechanical Properties (Overview)

Yoichi Takizawa and Zenji Horita

Hydrolytic Hydrogen Production from Severely Plastic Deformed Aluminum-Based Materials: An Overview (Overview)

Junyuan Zhong, Fan Zhang,  
Xiangling Tong, Xinxin Hu and Bo Wang

The Effect of Severe Plastic Deformation on the Hydrogen Storage Properties of Metal Hydrides (Overview)

Ádám Révész and Marcell Gajdics

Specific Features of Grain Boundaries in Nickel Processed by High-Pressure Torsion (Overview)

Vladimir V. Popov, Elena N. Popova and Egor V. Osinnikov

Mechanical Properties and Deformation Behavior in Severely Cold-Rolled Fe-Ni-Al-C Alloys with Luders Deformation —Overview with Recent Experimental Results— (Overview)

Shigeru Kuramoto, Yuta Kawano, Yuwa Mori,  
Junya Kobayashi, Satoshi Emura and Takahiro Sawaguchi

Revealing What Enhance the Corrosion Resistance beside Grain Size in Ultrafine Grained Materials by Severe Plastic Deformation: Stainless Steels Case (Overview)

Hiroyuki Miyamoto

An Overview on Recent Works of Heterostructured Materials Fabricated by Surface Mechanical Attrition Treatment (Overview)

Cong Li, Xingfu Li, Zhengrong Fu, Hongjiang Pan,  
Yulan Gong and Xinkun Zhu

Nanoscale Analysis of Solute Distribution in Ultrahigh-Strength Aluminum Alloys (Overview)

Equo Kobayashi, Masato Ohnuma, Shigeru Kuramoto,  
Junya Kobayashi and Goroh Itoh

Tube High-Pressure Shearing: A Simple Shear Path to Unusual Microstructures and Unprecedented Properties (Overview)

Zheng Li, Ying Liu, Jing Tao Wang  
and Terence G. Langdon

Anneal Hardening in Single Phase Nanostructured Metals (Overview)

Oliver Renk and Reinhard Pippan

Micro-Mechanical Characterisation of Hydrogen Embrittlement and Fatigue Crack Growth Behaviours in Metastable Austenitic Stainless Steels with Microstructure Refinement (Overview)

Yoji Mine

Perspectives of Scaling up of Severe Plastic Deformation: A Case of High Pressure Torsion Extrusion (Overview)

Yulia Ivanisenko

**Band Gap Engineering of Semiconductors and Ceramics by Severe Plastic Deformation for Solar Energy Harvesting** (*Review*)

Hadi Sena and Masayoshi Fuji

**Basic Research on Multi-Directional Forging of AZ80Mg Alloy for Fabrication of Bulky Mechanical Components** (*Review*)

Hiromi Miura, Wataru Nakamura and Chihiro Watanabe

**Severe Plastic Deformation for Advanced Electrocatalysts for Electrocatalytic Hydrogen Production** (*Review*)

Xiying Jian, Jian Li, Liqing He, Hai-Wen Li, Meng Zhang, Peng Zhang and Huai-Jun Lin

**Superplasticity in Severely Deformed High-Entropy Alloys** (*Review*)

Hamed Shahmir, Mohammad Sajad Mehranpour, Megumi Kawasaki and Terence G. Langdon

**Magnetic Materials via High-Pressure Torsion of Powders** (*Review*)

Lukas Weissitsch, Franziska Staab, Karsten Durst and Andrea Bachmaier

**A Review of Recent Research on Nanoindentation of High-Entropy Alloys Processed by High-Pressure Torsion** (*Review*)

Dong-Hyun Lee, In-Chul Choi, Megumi Kawasaki, Terence G. Langdon and Jae-il Jang

**Creep in Nanostructured Materials** (*Review*)

Vaclav Sklenicka, Petr Kral, Jiri Dvorak, Marie Kvapilova and Kveta Kucharova

**Severe Plastic Deformation through High-Pressure Torsion for Preparation of Hydrogen Storage Materials -A Review** (*Review*)

Liqing He, Xiaobin Shi, Xiao Li, Jing Huang, Tengfei Cheng, Xi Wang, Yongtao Li, Huaijun Lin, Kaveh Edalati and Hai-Wen Li

**In Situ Synchrotron High-Pressure X-ray Analysis for ZnO with Rocksalt Structure**

Zenji Horita, Yongpeng Tang, Takahiro Masuda, Kaveh Edalati and Yuji Higo

—Regular Article—

**Microstructure of Materials**

**R-Phase Transformation in  $\text{Ti}_{50-x}\text{Ni}_{47+x}\text{Fe}_3$  Shape Memory Alloys**

Yuta Kimura, Xiao Xu, Kwangsik Han, Kodai Niitsu, Toshihiro Omori, Rie Y. Umetsu and Ryosuke Kainuma

**Mechanics of Materials**

**High-Temperature Hardness in Hypereutectoid Steels with Various Microstructures Measured by Using Small Ball Rebound Hardness Test**

Norimitsu Koga, Kouki Koizumi, Shuto Takayasu, Osamu Umezawa, Mizuki Watanabe, Masayuki Yamamoto and Takashi Yamamoto

**Modeling of Yield Surfaces for A5052 Aluminum Alloy Sheets with Different Tempers by Simplified Identification Method and Its Experimental Validation**

Yuta Saito and Hideo Takizawa

**Simple Estimation of Creep Properties of Negative Electrode for Lithium-Ion Battery**

Shota Ono, Kairi Shiraishi, Yoshinao Kishimoto, Yuki Yoshi Kobayashi, Hiroshi Yamazaki and Takahiro Nomoto

**Compressive Deformation Characteristics of  $\text{Nb}_2\text{Co}_7$  as Crystalline Mille-Feuille Structured Material**

Toshiaki Horiuchi, Konatsu Yamada, Shigeru Saito, Ken-ichi Ikeda, Seiji Miura and Frank Stein

**Improvement of the Wear Resistance and Corrosion Properties of CrN Films on Oxynitriding-Treated Vanadis 23 High-Speed Steel by the DC Magnetron Sputtering Process**

Shih-Hsien Chang, Wen-Yu Shiao and Kuo-Tsung Huang

**Materials Processing**

**Fabrication of Porous Steels via Space Holder Technique and Their Mechanical Properties**

Tomoyuki Fujii, Shu Saito and Yoshinobu Shimamura

**Solidification Microstructures in 3d-Transition Metal High Entropy Alloys with Cu Element**

Takeshi Nagase and Takuya Tamura

**Design and Characterization of Al-Co-La-Bi Multicomponent Immiscible Alloys with Liquid Phase Separation and an Amorphous Phase Formation**

Takeshi Nagase

◆ ◆ ◆  
まてりあ第62巻8号 予告

「金属なんでもランキング！」

No.22 窒化物の標準生成ギブス自由エネルギー

「最近の研究」スピネル型ハーフメタル  $\text{NiCo}_2\text{O}_4$  のエピタキシャル薄膜の作製と磁性制御

.....京大 菅 大介

「実学講座」金属材料実験の手引き 2. 特性の計測評価

2-1 力学特性 2-1-3 疲労試験

.....大阪公大 兼子佳久

—他—

編集の都合により変更になる場合がございます。

# 行事カレンダー

太字本会主催(ホームページ掲載)

| 開催日              | 名称・開催地・掲載号                                                                             | 主催                                                     | 問合せ先                                                                                                       | 締切         |
|------------------|----------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| <b>2023年 7 月</b> |                                                                                        |                                                        |                                                                                                            |            |
| 5～7              | 第60回アイソトープ・放射線研究発表会(東京)                                                                | 日本アイソトープ協会                                             | TEL 03-5395-8081<br>happyoukai@jrias.or.jp<br>http://www.jrias.or.jp/seminar/cat11/                        |            |
| 10～14            | 第11回対称性・群論トレーニングコース英語(つくば)                                                             | 日本結晶学会                                                 | TEL 029-864-5196<br>tyoshimi@post.kek.jp<br>http://pfwww.kek.jp/trainingcourse/                            |            |
| 11               | 腐食防食部門委員会 第349回例会(大阪)                                                                  | 日本材料学会                                                 | TEL 075-761-5321 jimu@office.jsms.jp<br>http://www.jsms.jp/                                                |            |
| 13～14            | 令和5年度 中性子産業利用報告会(東京)                                                                   | J-PARC センター他                                           | TEL 029-219-5300<br>m_komuro@cross.or.jp<br>https://neutron.cross.or.jp/ja/events/23071314/                |            |
| 13～14            | 第54回トライボロジー入門講座(東京+オンライン開催)                                                            | 日本トライボロジー学会                                            | TEL 03-3434-1926<br>jast@tribology.jp<br>http://www.tribology.jp/                                          | 6.30       |
| 14, 28           | 熱測定オンライン講習会2023(オンライン)                                                                 | 日本熱測定学会                                                | TEL 03-5821-7120<br>netsu@mbd.nifty.com<br>https://www.netsu.org/                                          |            |
| 18～19            | 第53回初心者のための有限要素法講習会(演習付き)(第1部)(京都)                                                     | 日本材料学会                                                 | TEL 075-761-5321 jimu@office.jsms.jp<br>https://www.jsms.jp/                                               | 7.5        |
| 19, 20           | 2023年度「デジタルラジオグラフィに関する技術講習会」(東京)                                                       | 日本溶接協会                                                 | TEL 03-5823-6324<br>http://www.jwes.or.jp/                                                                 | 定員<br>36名  |
| 20, 21           | 第63回塗料入門講座 後期(東大生産技研)                                                                  | 色材協会                                                   | TEL 03-3443-2811 admin@jscm.or.jp<br>http://www.shikizai.org/                                              | 定員<br>100名 |
| 20～21            | 第57回 X 線材料強度に関するシンポジウム(甲府)                                                             | 日本材料学会                                                 | TEL 075-761-5321 jimu@office.jsms.jp<br>https://www.jsms.jp/meeting/xsym_regist.html                       |            |
| 21               | 第431回講習会「精密工学からものづくりを考える—MEMS/NEMS・ミリマシン—」(川崎)                                         | 精密工学会                                                  | TEL 03-5226-5191<br>https://www2.jspe.or.jp/form/koshukai/koshukai_form.html                               | 定員<br>60名  |
| 23               | 公開シンポジウム「医工学シンポジウム2023」—医工連携の現在そして未来—(東北大)                                             | 日本学術会議機械工学委員会他                                         | tadano@wb3.so-net.ne.jp                                                                                    |            |
| 24～25            | 2023年度「デジタルラジオグラフィに関する技術講習会」(大阪)                                                       | 日本溶接協会                                                 | TEL 03-5823-6324<br>http://www.jwes.or.jp/                                                                 | 定員<br>36名  |
| 24～26            | 第29回結晶工学スクール(2023年)(立命館大+ハイブリッド開催)                                                     | 応用物理学会<br>結晶工学分科会                                      | TEL 03-3828-7723 divisions@jsap.or.jp<br>https://annex.jsap.or.jp/kessho/                                  | 参加<br>7.7  |
| 24～28            | 第11回対称性・群論トレーニングコース日本語(つくば)                                                            | 日本結晶学会                                                 | TEL 029-864-5196<br>tyoshimi@post.kek.jp<br>http://pfwww.kek.jp/trainingcourse/                            |            |
| 24～8.7           | 2023年度 溶接工学夏季大学(オンデマンド開催)                                                              | 溶接学会                                                   | TEL 03-5825-4073<br>jws-info@tg.rim.or.jp<br>http://www.jweld.jp/                                          | 7.14       |
| 28               | 第91回技術セミナー「腐食を理解するための電気化学入門」(東京)                                                       | 腐食防食学会                                                 | TEL 03-3815-1161<br>naito-113-0033@jcorr.or.jp<br>https://www.jcorr.or.jp/                                 | 7.20       |
| 28               | 第106回レアメタル研究会(東大生産技研+オンライン開催)                                                          | レアメタル研究会                                               | TEL 03-5452-6314<br>tmiya@iis.u-tokyo.ac.jp<br>https://www.okabe.iis.u-tokyo.ac.jp/japanese/index_j.html   |            |
| 30～8.4           | 第26回 IUPAC 化学熱力学国際会議(ICCT-2023)(豊中)                                                    | 日本熱測定学会他                                               | icct2023_office@chem.sci.osaka-u.ac.jp<br>https://www.chem.sci.osaka-u.ac.jp/lab/micro/ICCT2023/index.html | 定員<br>500名 |
| <b>2023年 8 月</b> |                                                                                        |                                                        |                                                                                                            |            |
| 7～8              | 第33回電顕サマースクール(川崎医科大)                                                                   | 日本顕微鏡学会                                                | TEL 03-6457-5156<br>jsm-post@microscopy.or.jp<br>https://microscopy.or.jp/summerschool/                    |            |
| 9～10             | 表面分析実践講座2023～実践! 最新走査電子顕微鏡実習 実際の作業を通して身につける最新技術～(東京)                                   | 日本表面真空学会                                               | TEL 03-3812-0266 office@jvss.jp<br>https://www.jvss.jp                                                     | 7.13       |
| 9～10, 21         | サマースクール2023「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+オンライン開催)                                       | 日本計算工学会                                                | TEL 03-3868-8957 office@jscs.org<br>https://www.jscs.org/                                                  |            |
| 12～18            | 9th International Discussion Meeting on Relaxations in Complex Systems(9IDMRCS)(幕張メッセ) | Institute for Solid State Physics, University of Tokyo | TEL 04-7136-3374 info@9idmr.cs.jp<br>https://9idmr.cs.jp/                                                  |            |
| 18               | 2023年度茨城講演会(茨城大)                                                                       | 日本機械学会関東支部                                             | TEL 03-4335-7618<br>kt-staff@jsme.or.jp                                                                    |            |
| 21～23            | 第255回塑性加工技術セミナー「はじめての塑性力学(準備編・基礎編・応用編)」(オンライン開催)                                       | 日本塑性加工学会                                               | http://www.jstp.or.jp                                                                                      | 定員<br>60名  |
| 24～25            | 第53回初心者のための有限要素法講習会(演習付き)(第2部)(神戸)                                                     | 日本材料学会                                                 | TEL 075-761-5321 jimu@office.jsms.jp<br>https://www.jsms.jp/                                               | 7.5        |

| 開催日      | 名称・開催地・掲載号                                                                               | 主催                     | 問合せ先                                                                                                                                                                                                                          | 締切                                     |
|----------|------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------|
| 27       | 微小領域の力学特性評価とマルチスケールモデリング2023(北海道科学大学) (5号336頁)                                           | 日本金属学会研究会 No. 82       | <a href="mailto:micromech_jim@nims.go.jp">micromech_jim@nims.go.jp</a><br><a href="http://nims.nims.go.jp/group/sdg/micromech-jim/">http://nims.nims.go.jp/group/sdg/micromech-jim/</a>                                       | 5.31                                   |
| 27~31    | The International Conference on Sintering 2023 (Sintering 2023国際会議) (岐阜)                 | 日本セラミックス協会             | <a href="mailto:info@sintering2021.org">info@sintering2021.org</a><br><a href="https://www.sintering2021.org/">https://www.sintering2021.org/</a>                                                                             | 参加<br>2.15                             |
| 29~31    | 日本実験力学学会2023年度年次講演会(和歌山)                                                                 | 日本実験力学学会               | TEL 025-368-9310<br><a href="mailto:office-jsem@clg.niigata-u.ac.jp">office-jsem@clg.niigata-u.ac.jp</a><br><a href="https://jsem.jp/event/Annual23/index.html">https://jsem.jp/event/Annual23/index.html</a>                 |                                        |
| 2023年9月  |                                                                                          |                        |                                                                                                                                                                                                                               |                                        |
| 1        | 第256回塑性加工技術セミナー「有限要素法 入門セミナー」(大阪工大)                                                      | 日本塑性加工学会               | <a href="http://www.jstp.or.jp">http://www.jstp.or.jp</a>                                                                                                                                                                     | 定員<br>50名                              |
| 4~6      | 2023年度 高温材料の変形と破壊研究会(仙台)(本号499頁)                                                         | 日本金属学会研究会 No.83        | <a href="mailto:saruta.mamiko@nims.go.jp">saruta.mamiko@nims.go.jp</a><br><a href="https://forms.gle/nCUuNJiRD5R4dfQb9">https://forms.gle/nCUuNJiRD5R4dfQb9</a>                                                               | 7.28                                   |
| 6~8      | 2023年度工学教育研究講演会(広島大)                                                                     | 日本工学教育協会               | TEL 03-5442-1021 <a href="mailto:kawakami@jsee.or.jp">kawakami@jsee.or.jp</a><br><a href="https://www.jsee.or.jp/">https://www.jsee.or.jp/</a>                                                                                |                                        |
| 11       | 腐食防食部門委員会 第350回例会(大阪)                                                                    | 日本材料学会                 | TEL 075-761-5321 <a href="mailto:jimu@office.jsms.jp">jimu@office.jsms.jp</a><br><a href="http://www.jsms.jp/">http://www.jsms.jp/</a>                                                                                        | 9.4                                    |
| 13~14    | 日本中性子科学会第23回年会(北大)                                                                       | 日本中性子科学会               | <a href="https://www.eng.hokudai.ac.jp/labo/QBMA/JSNS2023/">https://www.eng.hokudai.ac.jp/labo/QBMA/JSNS2023/</a>                                                                                                             |                                        |
| 13~15    | 第48回コロージョンセミナー「様々な腐食・劣化に対応できる腐食防食研究者・技術者を目指して」(三条)                                       | 腐食防食学会                 | TEL 03-3815-1161<br><a href="mailto:naito-113-0033@jcorr.or.jp">naito-113-0033@jcorr.or.jp</a><br><a href="https://www.jcorr.or.jp/yotei/48.html">https://www.jcorr.or.jp/yotei/48.html</a>                                   |                                        |
| 13~15    | 第8回若手研究者および技術者のための高温強度講習会(兵庫県播磨町/オンライン)                                                  | 日本材料学会                 | TEL 075-761-5321 <a href="mailto:jimu@jsms.jp">jimu@jsms.jp</a><br><a href="http://www.jsms.jp/">http://www.jsms.jp/</a>                                                                                                      | 7.14                                   |
| 17~22    | The 21st international conference on Solid-State Protionic Conductors(SSPC-21)(福岡)       | SSPC-21 組織委員会          | <a href="https://q-pit.kyushu-u.ac.jp/yamazaki/sspc21.html">https://q-pit.kyushu-u.ac.jp/yamazaki/sspc21.html</a>                                                                                                             |                                        |
| 19~22    | 日本金属学会秋期講演大会(富山大学五福キャンパス)(本号486頁)                                                        | 日本金属学会                 | TEL 022-223-3685 FAX 022-223-6312<br><a href="mailto:annualm@jimm.jp">annualm@jimm.jp</a><br><a href="https://www.jim.or.jp/convention/2023autumn/">https://www.jim.or.jp/convention/2023autumn/</a>                          | 共同<br>6.26<br>講演<br>7.7<br>事前申込<br>9.1 |
| 20~21    | 第27回動力・エネルギー技術シンポジウム(東京海洋大)                                                              | 日本機械学会                 | <a href="https://www.jsme.or.jp/conference/pes27/index.html">https://www.jsme.or.jp/conference/pes27/index.html</a>                                                                                                           |                                        |
| 20~22    | INCHEM TOKYO 2023(東京ビッグサイト)                                                              | 化学工学会他                 | TEL 03-3434-1988 <a href="mailto:INCHEM@jma.or.jp">INCHEM@jma.or.jp</a>                                                                                                                                                       |                                        |
| 25~27    | 第20回日本熱電学会学術講演会(TSJ2023)(北九州)                                                            | 日本熱電学会                 | TEL 06-4256-5530<br><a href="mailto:jimu@thermoelectrics.jp">jimu@thermoelectrics.jp</a><br><a href="https://www.thermoelectrics.jp/conference.html">https://www.thermoelectrics.jp/conference.html</a>                       |                                        |
| 25~30    | ITC Fukuoka 2023 (9th International Tribology Conference, Fukuoka 2023)(福岡)              | 日本トライボロジー学会            | TEL 03-3434-1926<br><a href="https://www.itc2023.jp/">https://www.itc2023.jp/</a>                                                                                                                                             |                                        |
| 26       | 日本金属学会秋期講演大会高校生・高専学生ポスターセッション(オンライン)(本号487頁)                                             | 日本金属学会                 | TEL 022-223-3685 FAX 022-223-6312<br><a href="mailto:annualm@jimm.jp">annualm@jimm.jp</a>                                                                                                                                     | 7.14                                   |
| 28~29    | 第15回「役に立つ真空技術入門講座」(大阪公大/オンライン)                                                           | 日本表面真空学会<br>関西支部       | TEL 0791-58-0802(3913)<br><a href="mailto:syoin-yakunitatsu@jvss-kansai.jp">syoin-yakunitatsu@jvss-kansai.jp</a><br><a href="https://www.jvss.jp/">https://www.jvss.jp/</a>                                                   | 定員<br>200名                             |
| 29       | 第107回レアメタル研究会(東大生産技研+オンライン開催)                                                            | レアメタル研究会               | TEL 03-5452-6314<br><a href="mailto:tmiya@iis.u-tokyo.ac.jp">tmiya@iis.u-tokyo.ac.jp</a><br><a href="https://www.okabe.iis.u-tokyo.ac.jp/japanese/index_j.html">https://www.okabe.iis.u-tokyo.ac.jp/japanese/index_j.html</a> |                                        |
| 2023年10月 |                                                                                          |                        |                                                                                                                                                                                                                               |                                        |
| 3        | 第352回塑性加工シンポジウム「トライボロジー技術と型表面微細テクスチャリング技術の最新動向」(名古屋工大+web)                               | 日本塑性加工学会               | <a href="http://www.jstp.or.jp">http://www.jstp.or.jp</a>                                                                                                                                                                     | 定員<br>80名                              |
| 4        | 第51回日本ガスタービン学会定期講演会(福井)                                                                  | 日本ガスタービン学会             | <a href="https://www.gtsj.or.jp/">https://www.gtsj.or.jp/</a>                                                                                                                                                                 |                                        |
| 10~13    | 第9回材料 WEEK(京都)                                                                           | 日本材料学会                 | TEL 075-761-5321 <a href="mailto:jimu@office.jsms.jp">jimu@office.jsms.jp</a><br><a href="http://www.jsms.jp/">http://www.jsms.jp/</a>                                                                                        |                                        |
| 11~13    | ADMETA Plus 2023 (Advanced Metallization Conference 2023 32nd Asian Session)(東大+オンライン開催) | ADMETA委員会              | TEL 03-5821-7120<br><a href="mailto:jimukyoku@admeta.org">jimukyoku@admeta.org</a><br><a href="https://www.admeta.org/">https://www.admeta.org/</a>                                                                           |                                        |
| 11~13    | 第42回電子材料シンポジウム(EMS-42)(榎原)                                                               | 電子材料シンポジウム運営委員会        | <a href="mailto:ems42-query@ems.jpn.org">ems42-query@ems.jpn.org</a><br><a href="https://ems.jpn.org/">https://ems.jpn.org/</a>                                                                                               |                                        |
| 13~17    | 2024年粉末冶金国際会議(略称: WORLD PM 2024)(横浜)                                                     | 日本粉末冶金工業会、(一社)粉体粉末冶金協会 | <a href="mailto:worldpm2024@jtbcom.co.jp">worldpm2024@jtbcom.co.jp</a><br><a href="http://www.worldpm2024.com/">http://www.worldpm2024.com/</a>                                                                               |                                        |
| 16~18    | International Conference on Powder and Powder Metallurgy, 2023, Kyoto (JSPMIC2023)(同志社大) | 粉体粉末冶金協会               | TEL 075-721-3650<br><a href="mailto:jspmic2022@jspm.or.jp">jspmic2022@jspm.or.jp</a>                                                                                                                                          |                                        |
| 21~22    | 第59回 X線分析討論会(東京都市大)                                                                      | 日本分析化学会<br>X線分析研究懇談会   | TEL 070-7667-9223<br><a href="mailto:xbun59@tcu.ac.jp">xbun59@tcu.ac.jp</a><br><a href="https://xbun.jsac.jp/conference/no59.html">https://xbun.jsac.jp/conference/no59.html</a>                                              |                                        |
| 25~27    | 第36回計算力学講演会(豊橋)                                                                          | 日本機械学会                 | TEL 03-4335-7610<br><a href="https://www.jsme.or.jp/conference/cmdconf23/index.html">https://www.jsme.or.jp/conference/cmdconf23/index.html</a>                                                                               |                                        |

| 開催日      | 名称・開催地・掲載号                                                                                                       | 主催                                        | 問合せ先                                                                                                     | 締切           |
|----------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------|
| 25～27    | 第10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                                    | jcossar2023@ml-jsce.jp<br>https://www.jcossar2023.jp/                                                    |              |
| 26～27    | オンライン教育講座「工業材料の応力・歪測定」(オンライン)(4号264頁)                                                                            | 日本金属学会                                    | TEL 022-223-3685 FAX 022-223-6312<br>meeting@jimm.jp                                                     | 事前<br>10.16  |
| 30～11.1  | 第70回材料と環境討論会(姫路)                                                                                                 | 腐食防食学会                                    | TEL 03-3815-1161<br>ysm.hng-113-0033@jcorr.or.jp<br>https://www.jcorr.or.jp/                             |              |
| 2023年11月 |                                                                                                                  |                                           |                                                                                                          |              |
| 1～3      | 第64回高圧討論会(柏)                                                                                                     | 日本高圧力学会                                   | TEL 070-5545-3188<br>tounonkai64@highpressure.jp<br>https://www.highpressure.jp/                         | 参加事前<br>9.15 |
| 10       | 第25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・フォーラム運営委員会                    | TEL 03-6732-8966 msf@oxinst.com<br>https://www.msforum.jp                                                |              |
| 12～16    | 2023 Joint Symposium on Molten Salts(京都)                                                                         | 電気化学会溶融塩委員会                               | TEL 0774-38-3500<br>ms12@msc.electrochem.jp                                                              |              |
| 13～15    | 第44回 超音波エレクトロニクスの基礎と応用に関するシンポジウム(富山)                                                                             | 超音波エレクトロニクス協会                             | TEL 042-443-5166<br>h.nomura@uec.ac.jp                                                                   |              |
| 13～16    | 28th IFHTSE Congress in Yokohama(横浜)                                                                             | 第28回熱処理国際会議組織委員会                          | TEL 03-6661-7167<br>ifhtse2023office@jsht.or.jp<br>https://jsht.or.jp/ifhtse2023/index.html              |              |
| 13～17    | HYPERFINE2023(奈良)                                                                                                | HYPERFINE 2023実行委員会                       | https://confit.atlas.jp/guide/event/hfi2023/top?lang=en                                                  |              |
| 15～17    | The 1st international conference on Creation of Materials by Super-Thermal Field 2023(略称: CMSTF2023)(豊中)         | 超温度場 3DP                                  | TEL 06-6879-7477<br>http://www.mat.eng.osaka-u.ac.jp/super3dp/index.php/cmstf2023_jp/                    |              |
| 15～17    | 第49回固体イオニクス討論会(北大)                                                                                               | 日本固体イオニクス学会                               | TEL 022-217-5341 ssij@ssi-j.org<br>https://www.ssi-j.org/symp/ssij49/                                    |              |
| 16～18    | 第61回高温強度・第21回破壊力学シンポジウム(新潟)                                                                                      | 日本材料学会                                    | TEL 075-761-5325 jimu@office.jsms.jp<br>http://www.jsms.jp/                                              | 講演<br>9.1    |
| 17～18    | 第74回塑性加工連合講演会(富山)                                                                                                | 日本塑性加工学会                                  | TEL 03-3435-8301 http://www.jstp.jp/                                                                     |              |
| 19～23    | PRICM-11 (The 11 <sup>th</sup> Pacific Rim International Conference on Advanced Materials and Processing)        | KIM                                       | TEL +81-2-573-6207 info@pricm11.org                                                                      |              |
| 24       | 第108回レアメタル研究会(東大生産技研+オンライン開催)                                                                                    | レアメタル研究会                                  | TEL 03-5452-6314<br>tmiya@iis.u-tokyo.ac.jp<br>https://www.okabe.iis.u-tokyo.ac.jp/japanese/index_j.html |              |
| 26～12.1  | International Gas Turbine Congress 2023 Kyoto (IGTC2023 Kyoto)(京都)                                               | 日本ガスタービン学会                                | TEL 03-3365-0095 gtsj-office@gtsj.or.jp<br>https://igt2023.org/                                          |              |
| 28～29    | 溶接構造シンポジウム2023—「カーボンニュートラル社会を担う溶接構造化技術」—(阪大)                                                                     | 溶接学会溶接構造研究委員会                             | TEL 03-5822-4073<br>s_kogure@tt.rim.or.jp<br>https://jweld.jp/seminars/wdsympo2023/                      |              |
| 29～12.1  | 第50回炭素材料学会年会(仙台)                                                                                                 | 炭素材料学会                                    | FAX 03-5227-8632<br>http://www.tanso.org/contents/event/conf2023/index.html                              |              |
| 2023年12月 |                                                                                                                  |                                           |                                                                                                          |              |
| 7～8      | 第21回キャビテーションに関するシンポジウム(大阪大)                                                                                      | 日本学術会議 第三部(予定)第21回キャビテーションに関するシンポジウム実行委員会 | https://cav21-mech.eng.osaka-u.ac.jp/                                                                    |              |
| 7～8      | 日本金属学会オンライン教育講座「構造材料(1)鉄鋼材料編」(オンライン)(4号264頁)                                                                     | 日本金属学会                                    | TEL 022-223-3685 FAX 022-223-6312<br>meeting@jimm.jp                                                     | 事前<br>11.27  |
| 11～16    | The 3rd Materials Research Meeting (MRM2023) The 24th IUMRS-International Conference in Asia (IUMRS-ICA2023)(京都) | 日本 MRS                                    | TEL 03-6667-0922 info_mrm@jmru.org<br>https://mrm2023.jmru.org/                                          |              |
| 2024年1月  |                                                                                                                  |                                           |                                                                                                          |              |
| 12       | 第109回レアメタル研究会(東大生産技研+オンライン開催)                                                                                    | レアメタル研究会                                  | TEL 03-5452-6314<br>tmiya@iis.u-tokyo.ac.jp<br>https://www.okabe.iis.u-tokyo.ac.jp/japanese/index_j.html |              |
| 2024年3月  |                                                                                                                  |                                           |                                                                                                          |              |
| 1 or 15  | 第110回レアメタル研究会(東大生産技研+オンライン開催)                                                                                    | レアメタル研究会                                  | TEL 03-5452-6314<br>tmiya@iis.u-tokyo.ac.jp<br>https://www.okabe.iis.u-tokyo.ac.jp/japanese/index_j.html |              |
| 12～15    | 日本金属学会春期講演大会(東京理科大学葛飾キャンパス)                                                                                      | 日本金属学会                                    | TEL 022-223-3685 annualm@jimm.jp                                                                         |              |
| 2024年9月  |                                                                                                                  |                                           |                                                                                                          |              |
| 17～20    | 日本金属学会秋期講演大会(大阪大学豊中キャンパス)                                                                                        | 日本金属学会                                    | TEL 022-223-3685 annualm@jimm.jp                                                                         |              |



(2023年4月21日～2023年5月22日)

### ユース会員

岡田 悠大 名古屋工業大学

### 正 員

大神田佳平 株式会社アルフェコ

KIM Dasom 名古屋大学

小林 真子 東北大学

佐々木孝彦 東北大学

寺方 泰夫 株式会社寺方工作所

中島 隆夫 三井情報株式会社

中村 孝 北海道大学

藤田 英史 DOWA エレクトロニクス株式会社

藤山 紀之 株式会社東レリサーチセンター

松原 智行 株式会社コベルコ科研

森 孝茂 日本製鉄株式会社

### 学 生 員

大信 祐輔 長岡技術科学大学

香川 颯太 豊橋技術科学大学

北 竣太 名古屋大学

齋藤 直也 九州大学

鄭 義赫 東北大学

神野 俊介 熊本大学

高橋 勇人 東京都立大学

寺前 拓馬 大阪大学

新村 彩 東北大学

船木 優大 北海道大学

松下 開智 長岡技術科学大学

矢田 裕貴 総合研究大学院大学

渡部 乃愛 津山工業高等専門学校

### 外国学生会員

KUMAR GAURAV Indian Institute of Technology Bombay

BLANCHARD CLARA 東北大学

杜 俊鋒 東北大学

### 〈訂 正〉

まてりあ62巻(2023)第6号351頁, 352頁 下記の通り訂正いたします。

#### 役員紹介(351頁)

監 事 (正) 後藤光宏 住友電気工業㈱副本部長

(誤) 後藤光宏 住友電気工業㈱所長

#### 役員紹介(352頁)

監 事 (正) 後藤光宏 住友電気工業㈱研究開発本部副本部長

(誤) 後藤光宏 住友電気工業㈱アドバンストマテリアル研究所所長

### 2023, 2024年度会報編集委員会 (五十音順, 敬称略)

編集委員長  
編集副委員長  
委 員

田中 秀明

鈴木真由美

李 誠 鎬

植木 洸輔

小笹 良輔

北村 一浩

佐々木秀顕

高山 直樹

寺西 亮

長谷川 誠

松本 洋明

山崎 由勝

米田 鈴枝

池尾 直子

上田 恭介

川崎 由康

國枝 知徳

佐藤 豊人

竹田 修

土井康太郎

藤井 進

三井 好古

山田 亮

石川 浩一

宇部 卓司

川西 咲子

小嶋 隆幸

篠原 百合

田辺 栄司

豊木 研太郎

細川 明秀

宮崎 秀俊

山中 謙太

石川 史太郎

海瀬 晃

河野 義樹

小島 淳平

新里 恵多

Chang Tso - Fu Mark

永井 崇

本間 智之

宮部 さやか

山本 知一

井田 駿太郎

大塚 誠

木口 賢紀

小山 元道

鈴木 賢紀

塚田 祐貴

永瀬 丈嗣

松浦 昌志

森谷 智一

横井 達矢

岩岡 秀明

岡 弘

北原 弘基

齊藤 雄太

高橋 弘樹

圓谷 貴夫

袴田 昌高

松垣 あいら

諸岡 聡

吉年 規治

まてりあ 第62巻 第7号 (2023) 発行日 2023年7月1日 定価1,870円(本体1,700円+税10%)送料120円

発行所 公益社団法人日本金属学会

〒980-8544 仙台市青葉区一番町一丁目14-32

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

発行人 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

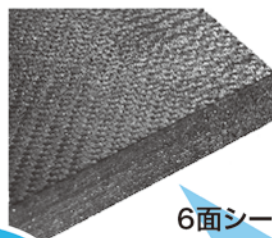
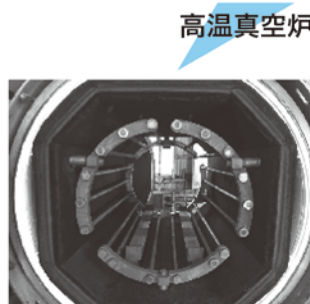
## 高断熱+省エネ

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

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



CO<sub>2</sub>削減



### メカニカルカーボン工業株式会社

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



## 日本金属学会発行誌 広告のご案内

### まてりあ (会報)

前付) 1色1P ￥100,000 (税別) 1/2P ￥60,000 (税別)

後付) 1色1P ￥95,000 (税別) 1/2P ￥55,000 (税別)

※表紙回り、カラー料金等お問い合わせ下さい。

### 春・秋期講演大会プログラム

後付) 1色1P ￥70,000 (税別) 1/2P ￥40,000 (税別)

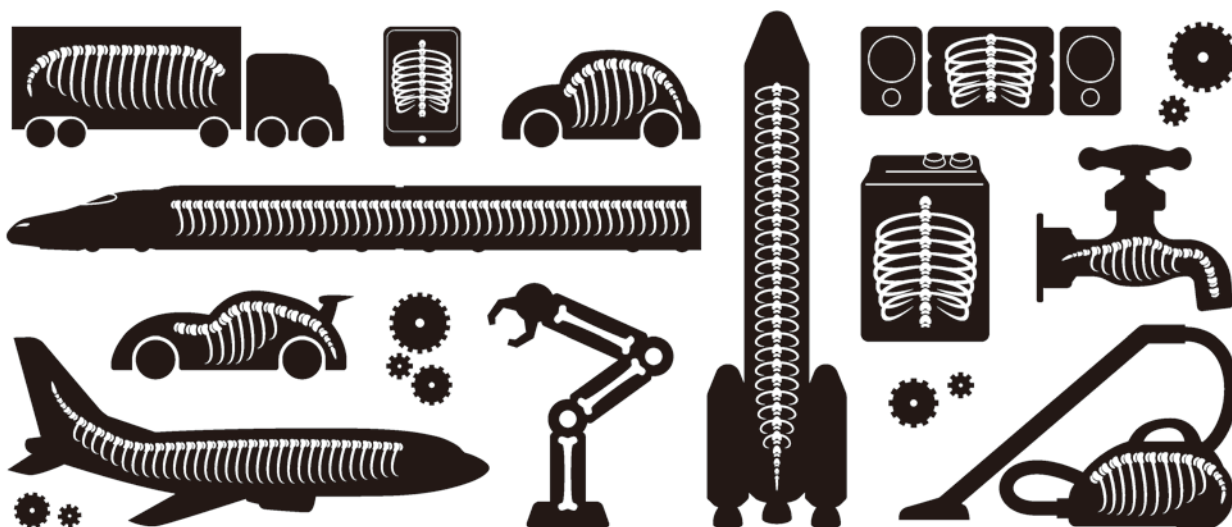
広告ご掲載についてのお問い合わせ・お申込み

株式会社 明 報 社

〒104-0061 東京都中央区銀座7-12-4 友野本社ビル  
TEL (03) 3546-1337 FAX (03) 3546-6306  
E-mail [info@meihosha.co.jp](mailto:info@meihosha.co.jp) HP [www.meihosha.co.jp](http://www.meihosha.co.jp)

**DAIDO STEEL GROUP**  
 Beyond the Special

外からは見えませんが、骨のある会社です。



多彩なフィールドで、フロンティアを目指しています。

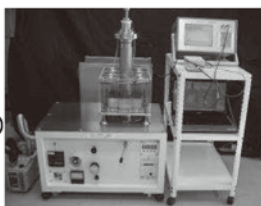
大同特殊鋼の素材は、暮らしや産業を支える多彩な製品や部品に使われています。  
 私たちはこれからも、素材の力で新たな価値創造に貢献していきます。



## 広い温度領域・各種形状試料・特殊測定に対応します。

等方体や単結晶の弾性率と共に弾性定数  $C_{ij}$  の測定で、最先端研究に大きく寄与  
**電磁共振式弾性率・弾性定数測定装置**  
**CC II -型** (RT 室温用、HT 高温用、LT 低温用)

- より詳細な力学特性測定  
弾性定数(弾性スティフネス  $C_{ij}$ ) から求めるヤング率、剛性率、ポアソン比は高精度
- 新素材研究時の小試料で測定できます。  
5mm 程度の立方体や円柱の測定。
- 単結晶、多結晶
- 最高温度 1200℃
- 自動解析ソフト開発中  
現在、等方体と立方晶の解析まで完成。順次他の結晶に対応します。



室温や比較的低温で最も信頼性の高い装置  
**自由共振式弾性率、内部摩擦測定装置**  
**JE-型/JG-型** (RT 室温用、HT 高温用、LT 低温用)

- 高精度・簡単操作  
高再現性・迅速測定
- 板状、線材の単純形状
- 最高温度：1000℃



弾性率と内部摩擦の高温測定で最高の装置  
**高温弾性率等同時測定装置**  
**EG-型** (HT 高温用、LT 低温用)

- 最も信頼性の高い高温測定
- ヤング率、剛性率、ポアソン比  
内部摩擦同時自動測定
- 最高温度 1200℃



共振法応用の弾性率や内部摩擦等の物性測定・試験・計測装置の開発専門企業  
 **日本テクノプラス株式会社** <https://nihon-tp.jp> (株)神戸工業試験場グループ  
 06-6390-5993 info@nihon-tp.com 〒532-0012 大阪市淀川区木川東 3-5-21 第3丸善ビル