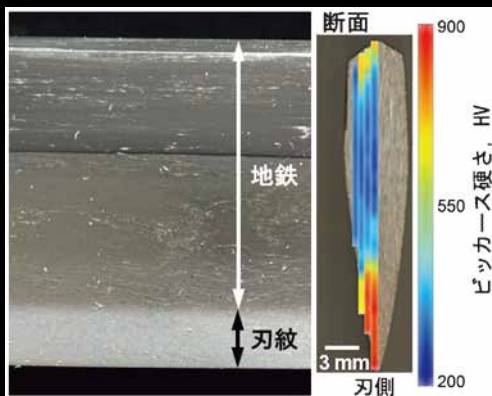


Materia Japan

まてりあ Vol.64

MTERE2 64 (3) 145 ~ 222 (2025)

No.3
2025



・ 金属素描

特集

「材料科学の人文科学分野 (文化財・考古学) への展開」

・ 機械学習を用いた点欠陥解析と表面物性予測

講義
ノート

固体相転移の熱力学と熱問題への応用
～第3回：転移進行と熱移動の関係および
まとめ (ケーススタディ)～

・ はばたく

・ スポットライト

付録 2025 年春期講演大会プログラム

合金材料設計のための解析ツール

多様な合金の熱力学計算・特性予測・ 拡散・析出・AM・冶金プロセス解析



Thermo-Calc 2025aリリース!!

データベース：元素・相・アセスメント・物性の追加

- ・鉄鋼材料向けデータベース(TCFE14) 弾性特性の追加
- ・酸化物向けデータベース(TCOX14) Ba, Li、熱伝導/電気伝導率の追加
- ・熔融塩向けデータベース(TCSALT2) Li、モル体積、表面張力/粘度の追加
- ・汎用固溶体向けデータベース(SSOL9) アセスメントの修正

拡散・析出・AM・冶金プロセス・プロパティモデルの各モジュールの更新

お問い合わせはこちら: <https://www.engineering-eye.com/THERMOCALC/contact.html>
CAEアドバイザーサービス、CN、GX、DXなど各種ご相談も承ります



Thermo-Calc Software

平衡計算

多元系状態図、駆動力、固溶限、液相面、
比熱、潜熱、ポテンシャル図 凝固過程...

体積

密度、熱膨張係数

液相の特性

表面張力、粘性

プロパティモデル

界面エネルギー、割れ感受性、降伏応力、
T0温度、スピノーダル、柱状・等軸晶遷移...

電気特性

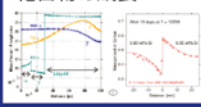
電気抵抗、電気伝導

熱特性

熱抵抗、熱伝導

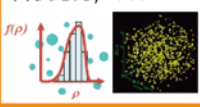
拡散モジュール DICTRA

浸炭、窒化、接合、
均質化、凝固、
化合物の成長...



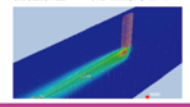
析出モジュール TC-PRISMA

粒径分布、数密度、
平均粒径、体積分率、
降伏応力、TTP...



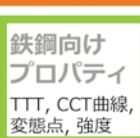
AMモジュール

AMプロセスの温度
分布、溶融池形状、
溶融池の物性評価...



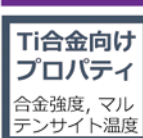
冶金プロセス モジュール

BOF、アーク炉、
LF、...



Ni合金向け プロパティ

APBエネルギー、
ひずみ時効割れ



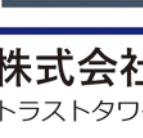
鉄鋼向け プロパティ

TTT, CCT曲線、
変態点、強度



Ti合金向け プロパティ

合金強度、マル
テンサイト温度



プログラミング インターフェース

SDK

TC-Python (Python)
TQ-interface (Fortran)

- ・並列解析・可視化

- ・統計処理、数値計算、
最適化、機械学習
のライブラリ連携

- ・独自モデルの実装、
融合



伊藤忠テクノソリューションズ株式会社

科学システム本部 東京都港区虎ノ門4-1-1 神谷町トラストタワー
E-mail: thermo-calc@ctc-g.co.jp



2003 年より販売しておりました MALT グループ著作による MALT for Windows は、さまざまな研究分野、産業分野でご利用いただきましたが、この度大幅なアップグレード版 (Omega) と改訂普及版 (Basic) の 2 版をリリースいたしました。

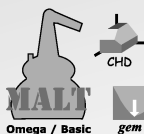
熱力学データベース

MALT Omega/Basic

著作権：MALT グループ / 販売：科学技術社

大幅アップグレード版

Omega 販売開始

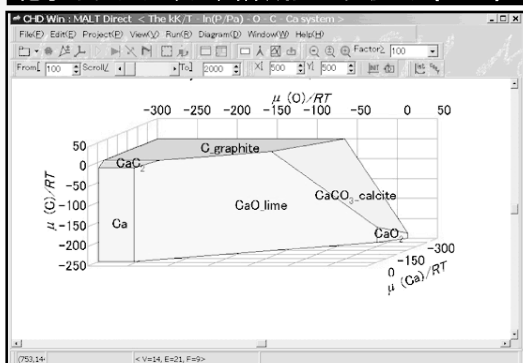


MALT Omega は収録化合物が増え (7890 種)、水溶液種も含んでいます。Omega 版ではプールベ線図を CHD により描くことができます。

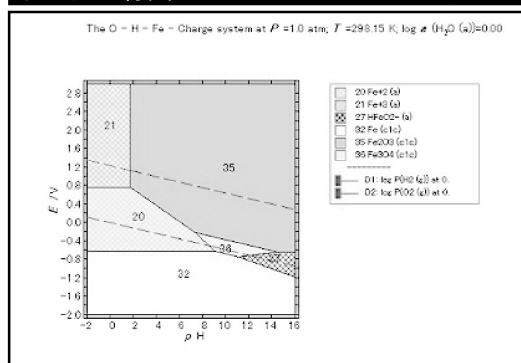


<https://www.kagaku.com/malt/>

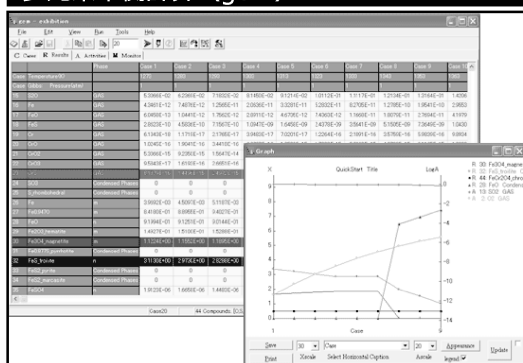
化学ポテンシャル図作成プログラム (CHD)



プールベ線図



多元系平衡計算 (gem)



化学熱力学データの収録

エンタルピー変化
生成ギブズエネルギー変化
298.15 度のエントロピー
比熱
相転移におけるエンタルピー変化

Thermodynamic database with application software



化学ポテンシャル図作成ソフト



多元系化学平衡計算ソフト

お問い合わせ

株式会社 **科学技術社**

〒111-0052 東京都台東区柳橋 2-10-8 武田ビル
TEL : 03-5809-1132 FAX : 03-5809-1138
Email : malt@kagaku.com



材料特性のその場観察

化学反応・
表面組織

加熱ステージ

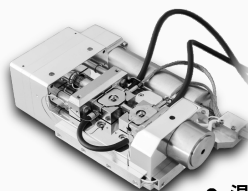


NewTec
Scientific

**FurnaSEM
1000**

- 1200°Cまで
- ガス注入キット
- EBSD 観察可
- ソフトウェア など

引張ステージ



NewTec
Scientific

MT1000

- 引張、圧縮、
屈曲試験
- 温度勾配付加熱
- ガス注入キット
- ソフトウェア など

BSE 検出器

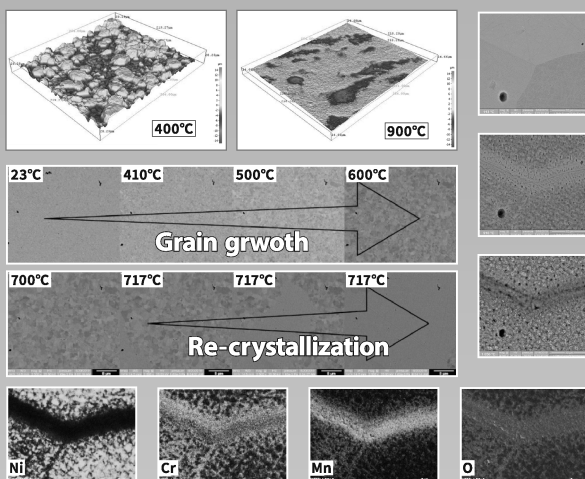
高温・ガス雰囲気下での
観察を可能にする BSE 検出器



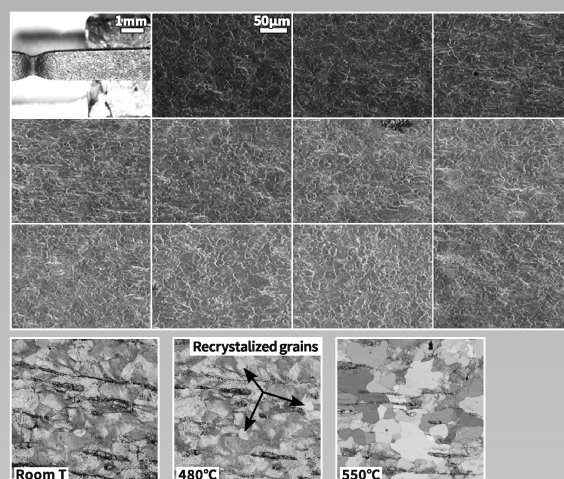
- 熱電子をカット
- パイプ冷却



表面形態・化学組成・粒成長



EBSD観察・変形試験



SEM/FIB 内での試料操作を可能に



**Gas Injection
System**



**Micro Gripper
System**



**Micro Injection
System**



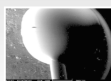
**Force
Measurement
System**



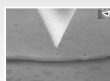
デボやガス導入



試料をつかむ



液滴導入



力測定やマーキング

kleindiek
nanotechnik

コンタミネーション予防・除去

SEM 内で除去・予防

リモートプラズマクリーナー
(プラズマソース分離型)



事前に除去・予防

卓上プラズマクリーナー
(スタンドアロン型)



pie
SCIENTIFIC

ADS 株式会社 アド・サイエンス

〒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13階

☎ 03-6824-4510

✉ ads-contact@ads-img.co.jp

🌐 <https://www.ads-img.co.jp/>



3

2025
Vol.64
No.3

まてりあ

金属素描 No. 39 ゲルマニウム(Germanium) 竹田 修 齊藤雄太145

特集「材料科学の人文科学分野(文化財・考古学)への展開」

企画にあたって 永瀬丈嗣 北村一浩 石川史太郎 岡 弘 吉年規治 藤田全基	147
材料科学と人文科学が紡ぐ新知創造学際領域研究 藤田全基 佐藤敬浩	148
文化財研究を加速する即発γ線分析法による非破壊元素分析 大澤崇人	153
冶金関連遺物による東アジア冶金史学の構築—鑄型・羽口・溶解炉— 丹羽崇史	157
銅鐸から弥生時代社会を見直す冶金史学と東奈良遺跡の役割 清水邦彦	162
銅鐸の復元鑄造 小泉裕司	167
日本刀の科学分析とアウトリーチ活動 中田隼矢	172
兵庫出石・辰鼓楼機械時計 科学調査プロジェクト 永瀬丈嗣 井関崇博 辻井浩一 中井淳史 井上 毅 奥田孝一 兼吉高宏 塩川太郎 中嶋勝己 早稲田一嘉 徳網 靖	179

新進気鋭 機械学習を用いた点欠陥解析と表面物性予測 清原 慎184

講義ノート 固体相転移の熱力学と熱問題への応用～第3回：転移進行と熱移動の関係および
まとめ(ケーススタディ)～ 藤田麻哉190

前半では、1次相転移の熱現象を語る上で欠かせない、もう一人の奇才である Stefan の業績の意味について再
考してみる。最後に、前回までの内容も含め、理解から利用に踏み込むためのケーススタディを示す。

はばたく 計算科学を用いたアルミニウム合金中の溶質原子の拡散挙動の解明
東海林瑞希196

水素脆化の研究を通じた産学間の橋渡し 齋藤 圭198

スポットライト 位置エネルギーを用いた発電及び蓄電装置の製作
新井直哉 大木修吾 勝又耕平 日高周真200

本会記事 会告204 会誌・欧文誌3号目次216 次号予告216 新入会員217	掲示板218 追悼219 行事カレンダー220
---	---

付録 2025年春期講演大会プログラム

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

【今月の表紙写真】 岐阜大学教育学部附属郷土博物館収蔵の打刀中の地鉄と刃文及び現代刀断面のビッカース硬さ分布。
 (中田隼矢著 173頁(図2), 174頁(図4)より掲載)

表紙デザイン：ビーコン コミュニケーションズ株式会社 グラフィックスタジオ

複写をご希望の方へ

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

Materia Japan

Volume 64 Number 3 March 2025

Contents

Sketch of Metals No. 39 Germanium Osamu Takeda and Yuta Saito 145

Special Issue on “Disciplinary Development of Materials Science into the Humanities Field, Cultural Heritage and Archaeology”

PREACE

Takeshi Nagase, Kazuhiro Kitamura, Fumitaro Ishikawa, Hiroshi Oka, Noriharu Yodoshi and Masaki Fujita 147
Interdisciplinary Research on Innovative Knowledge Hub for Materials Science and Humanities

Masaki Fujita and Takahiro Sato 148

Nondestructive Elemental Analysis by Prompt γ -ray Analysis to Accelerate Cultural Property Research Takahito Osawa 153

The Construction of Metallurgical History in East Asia by Metallurgical Material: Clay Mold, Tuyere and Furnace Wall
Takafumi Niwa 157

Metallurgical Historiography Reviewing Yayoi Period Society from Dotaku and The Role of Higashinara Site
Kunihiko Shimizu 162

Reproduction of Bronze Bells Yuji Koizumi 167

Japanese Swords: Scientific Analysis and Outreach Activities Toshiya Nakata 172

Scientific Research Projects for Hyogo-Izushi-Shinkoro Old Tower Clock
Takeshi Nagase, Takahiro Iseki, Koichi Tsujii, Atsushi Nakai, Takashi Inoue, Koichi Okuda, Takahiro Kaneyoshi,
Taro Shiokawa, Katsumi Nakashima, Kazuyoshi Waseda and Kiyoshi Tokuami 179

Regular Articles

Emerging Young Researcher

Point Defects Analysis and Surface Property Prediction by Machine Learning Shin Kiyohara 184

Lecture Notes A Lecture on the Thermodynamics of Solid-state Phase Transition and Application for Thermal Management
Issues 3~Influence of Thermal Phenomena on Transition Progress and Overall Summary (Case Study)~
Asaya Fujita 190

Portrait of Young Researchers

Insights Into Solute Atom Diffusion Behavior in Aluminum Alloys Using Computational Science Mizuki Shoji 196

Intermediary Research Between the Industry and Academia Through the Study of Hydrogen Embrittlement
Kei Saito 198

Spotlights

Creating a Power Generation Device Using Gravitational Potential Energy
Naoya Arai, Shugo Oki, Kohei Katsumata and Shuma Hidaka 200

Published by THE JAPAN INSTITUTE OF METALS AND MATERIALS

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

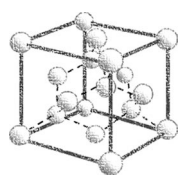
<https://www.jim.or.jp/journal/m/> (in Japanese)

©2025 The Japan Institute of Metals and Materials

How to Obtain Permission

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

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



シリーズ「金属素描」

No. 39 ゲルマニウム (Germanium)

東北大学 竹田 修, 齊藤 雄太



元素名: Germanium, 原子番号: 32, 原子量: 72.64, 電子配置: $[\text{Ar}]3d^{10}4s^24p^2$, 密度: $5.32 \text{ Mg}\cdot\text{m}^{-3}$ (298 K), 結晶構造: ダイヤモンド構造 (常圧), 正方晶 (高圧), 融点: $1232 \text{ K}^{(1)}$, 沸点: $3106 \text{ K}^{(2)}$, 地殻存在量: $1.3 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1(3)}$ 【写真】純ゲルマニウム粒

14族元素としては、本コーナーにおいて、原子番号14のシリコン(Si)⁽⁴⁾、原子番号50の錫(Sn)⁽⁵⁾、原子番号82の鉛(Pb)⁽⁶⁾を取り上げた。今回は、同じ14族元素、原子番号32のゲルマニウム(Ge)を取り上げる。

Geは、1886年、フライブルクで見つかったアルギロ鉱 (Argyrodite, $\text{GeS}_2 \cdot 4\text{Ag}_2\text{S}$) の中からドイツの化学者 Clemens Alexander Winkler (1838~1904) によって発見された。もともとは新鉱物の精密分析を依頼されたためであったが、全分析した際の各成分の和が100%にならないことから未知の物質の存在に気が付き、長い試行錯誤を経て新元素の発見に至った。この発見に先立ち、1871年、ロシアの化学者 Dmitriy Ivanovich Mendeleev (1834~1907) が、シリコンと錫の間にある未知元素を予言しており、エカケイ素と呼ばれていた。Mendeleev によって予言されたエカケイ素の性質とゲルマニウムの性質は見事に一致した。

金属 Ge は、硬く灰色がかった金属光沢の元素であるが、延性が無い。常圧ではダイヤモンド構造を有し、硬くて脆い。化学的にはシリコンに似た面が多く、物理的には半導体性を有する。また、金属 Ge は、波長 2~16 μm の赤外線をよく通す。

Ge は、地殻中の氧化物や硫化物中に広く薄く分布し、亜鉛鉱や石炭の中にはやや多い。Ge が濃縮したゲルマン鉱 (Germanite, $\text{Cu}_3(\text{Ge}, \text{Ga}, \text{Fe})\text{S}_4$) や、アルギロ鉱など、特別な Ge 鉱物もあるが、通常は亜鉛製錬の副産物として工業生産する。

金属 Ge の製造のためには、亜鉛鉱石の抽出残渣や加熱処理物を塩化焙焼し、揮発回収、Ge を濃縮する。カドミウムなどを除去したのち、 GeCl_4 を得て、精留を繰り返して高純度 GeCl_4 を得る。その後、高純度水で加水分解して GeO_2 を得る。 GeO_2 を 650°C で水素還元し、生成した金属を 1000°C で溶融する。その後、帯域溶融 (Zone melting) を繰り返して、超高純度 Ge を得る。

Ge の主な用途は触媒、光ファイバーのコア材、赤外線検知素子などである。PET (ポリエチレンテレフタレート) 樹脂の触媒として、 GeO_2 が国内で主に用いられている。また、四塩化ゲルマニウム GeCl_4 は、光ファイバーのコアの屈折率を高めるためにドーパ剤として利用されている。ま

た、純 Ge は光学バンドギャップが 0.67 eV (波長 $1.85 \mu\text{m}$) 程度の半導体であり、赤外線の検出に用いられる。

半導体としての Ge は、1947年にアメリカ・ベル研究所で初めて増幅作用を示したトランジスタの材料でもある⁽⁷⁾。1955年に当時の東京通信工業 (現: ソニー) が商品化したトランジスタラジオには Ge が用いられていた。一方で、酸化物である GeO_2 が水溶性であることなどから、Ge トランジスタの特性はばらつきが大きく、温度特性も悪かったため、同じ14族元素であるシリコンに取って代わられた。その後、シリコントランジスタは集積回路の主役として長年王座を守り続けてきたが、近年、微細化によるシリコントランジスタの動作速度の限界が顕在化してきており、電子・正孔どちらの移動度もより高い Ge が再注目されている⁽⁸⁾。

また Ge は、書き換え型の光ディスク (DVD-RAM や Blu-ray Disc) の記録層である Ge-Sb-Te 合金の構成元素であり、アモルファス相と結晶相の可逆的な相変化特性の発現に不可欠である⁽⁹⁾。さらに、熱電材料の分野で世界最高の性能指数を示す合金が最近発見されたが、それは GeTe を主成分とする材料であった⁽¹⁰⁾。このように、電子デバイスから、光、熱と様々な機能材料の中心的な元素として幅広い応用が期待されている。近年では、炭素の原子一層であるグラフェンと同様に、ゲルマニウムの二次元シートであるゲルマネンが実験的に合成されており、次世代の機能電子材料として注目を集めている⁽¹¹⁾。

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) 渡辺 正 監訳: 元素大百科事典, 朝倉書店, (2007).
- (3) R. L. Rundnick, S. Gao: "The Crust", Elsevier Ltd. (2004), 1-64.
- (4) 永井 崇: まてりあ, **63** (2024), 289.
- (5) 谷ノ内勇樹: まてりあ, **63** (2024), 603.
- (6) 太田洋文: まてりあ, **62** (2023), 575.
- (7) J. Bardeen and W. H. Brattain: Phys. Rev., **74** (1948), 230-231.
- (8) R. Pillarisetty: Nature., **479** (2011), 324-328.
- (9) M. Wuttig and N. Yamada: Nat. Mater., **6** (2007), 824-832.
- (10) M. Hong, et al., Adv. Mater., **30** (2018), 1705942.
- (11) E. Bianco, et al., ACS Nano., **7** (2013), 4414-4421.

次回! 金属なんでもランキング! No. 27 融解時のモル体積変化

金属×挑戦＝変革 金属で未来を拓く・創る

2025年春期 第176回講演大会

会期 2025年
3月8日[土]－10日[月]・13日[木]

会場 東京都立大学
南大沢キャンパス
〒192-0397 東京都八王子市南大沢1丁目1

13日 のみオンライン開催



講演申込締切

- 一般 ●公募シンポジウム
- 共同セッション
- ポスターセッション

2024年
12月26日(木)
17時

- 高校生・高専生ポスター

2025年
1月8日(水) 17時

事前参加申込締切

2025年
2月19日(水)

参加方法の詳細は
ホームページを
ご覧ください



公募シンポジウム

- S1 材料機能特性のアーキテクチャー構築シンポジウムVI
—マルチスケール構造制御による材料設計の新展開—
Architecture construction for functions and properties of materials VI
—New frontier of multiscale structure control for materials design—
- S2 微小領域の力学特性評価とマルチスケールモデリング
Nano-mechanical characterization and multiscale modeling
- S3 材料表面の化学II —めっき・耐食性・耐酸化性・触媒研究の新展開—
Chemistry on Material Surfaces II:
The state-of-the-art research in plating, aqueous and high temperature corrosion, and photocatalysis
- 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VII
Tailoring of novel-structured materials using spatio-temporal responses under exotic reaction fields VII

企画シンポジウム

- K1 What's 技術士? 国家資格技術士(金属部門)になりませんか?
What's a Professional Engineer? How about getting a national qualification, Professional Engineer(Metals division)
- K2 生体機能を指向したバイオマテリアルデザイン
Biomaterial design oriented to biological functions
- K3 産学共創シンポジウム・カーボンニュートラルを目指して 2
Symposium Toward a Carbon Neutral Society 2

本多記念講演

日本金属学会賞
記念講演

JIMM

金属組織写真展示

日本発
物質材料研究ジャーナル

STAM

Science and Technology
of Advanced Materials

UACJ

Aluminum lightens the world
アルミでかたえる、軽やかな世界

大同特殊鋼

DAIDO STEEL GROUP
Beyond the Special

UNICO
Glove box



問合せ先

日本金属学会 講演大会係
〒980-8544 仙台市青葉区一番町1丁目14-32
TEL 022-223-3685
(9:00～17:00、土日祝日除く)

E-mail: annualm@jimm.jp

<https://jimm.jp/>

金属学会

検索



企画にあたって

永瀬丈嗣¹ 北村一浩² 石川史太郎³ 岡 弘⁴ 吉年規治⁵ 藤田全基⁶

材料科学の分野にてこれまで培われさらに近年の発展が著しい顕微鏡法(Microscopy)・分析法(Spectroscopy)・データベースを中心とする材料組織・構造解析法, 3D データ構築・3D データ解析・積層造形法などは, 単に工学の分野とどまらず, 人文科学分野, 特に文化財や考古学の分野に大きく展開されようとしている。文化財は, 地域の歴史・文化に根差したものであり, その地域の歴史そのものと言える。文化財がその地域の文化や歴史と深く結びついている特徴は, 文化財の分析は単に材料組織・構造解析法だけでなく, 現代とは異なる時代の製造方法の検討, 保存や劣化の解明, 復元などの総合的な材料科学的視点だけではなく, 人文科学的な視点との連携が必要不可欠であることを意味している。文化財を取り巻く環境は大きく変容している。少子高齢化が進む我が国においては, 所有者の努力だけでは文化財の維持・継承は困難となり, 地域社会全体で文化財と文化・歴史を支える仕組みづくりが必要となっている。別の観点から見れば, 文化財には, 文化財を中核とする観光拠点の整備など, 観光客の誘致促進や地域活性化による「地方創生の実現」までが期待されるようになってきている。文化財には, 地域遺産・地域資源という表現があてはめられる場合もある。すなわち, 文化財の調査は, 材料科学だけの問題ではなく, 他分野・異分野の融合による調査, さらに人類の文化の継承や地方創生の実現にいたる極めて重要なテーマとなっている。本特集号では, 材料科学の人文科学分野(文化財・考古学)への展開に注目した最近の研究について報告する。

東北大学の藤田全基らは「**材料科学と人文科学が紡ぐ新知創造学際領域研究**」と題して、東北大学金属材料研究所と文化財や自然史資料の研究に特色を持つ7つの学術機関からなる「学際領域展開ハブ形成プログラム」事業による文理融合の学際領域研究、異分野の知識を結びつけた「総合知」を生み出す基盤の形成に向けた取り組みについて解説している。

日本原子力研究開発機構の大澤崇人氏には「文化財研究を加速する即発 γ 線分析法による非破壊元素分析」として、中性子を用いた分析法の一つである即発 γ 線分析法の原理と特徴、さらにはその応用について解説いただいている。

奈良文化財研究所の丹羽崇史氏には「冶金関連遺物による東アジア冶金史学の構築—鑄型・羽口・溶解炉—」と題し

て、人類の冶金の歴史を考古学・文化財科学双方から検討を行う「冶金史学」の新たな展開、冶金関連遺物である土製鋳型の最近の研究について解説いただいている。

島根大学の清水邦彦氏には、「銅鐸から弥生時代社会を見直す冶金史と東奈良遺跡の役割」と題して、大阪府東奈良遺跡にて出土された銅鐸鋳型と鋳造関連遺跡を例として、冶金史学の観点からの分析について解説いただいている。

和銅寛文の小泉裕司氏には「銅鐸の復元鑄造」と題して、古代銅鐸の復元鑄造分野において、形状だけではなく、技法や材料、道具にいたるまで考察を重ねて再現された、銅鐸の復元および鑄造方法の復元について解説いただいている。

岐阜大学の中田隼矢氏には「日本刀の科学分析とアウトリーチ活動」と題して、日本刀を題材とした材料科学の観点から研究だけではなく、中学生・高校生向けの金属に関するアウトリーチ活動や教育研究を実施するためのクラウドファンディングについて紹介いただいている。

兵庫県立大学の永瀬丈嗣らは「**兵庫出石・辰鼓楼機械時計科学調査プロジェクト**」と題して、兵庫県豊岡市出石町の辰鼓楼機械時計初号機の分析における材料科学×人文科学×情報通信×教育×地域振興からなる新たな文化財分析の概念とその実践例について解説している。

最後に、本企画を企画するにあたり、ご多忙にもかかわらず執筆を快諾していただきました著者の皆様に心より御礼申し上げます。

★★
永瀬丈嗣

2003年 大阪大学大学院工学研究科博士後期課程修了

2003年 大阪大学大学院工学研究科 助手

2008年 大阪大学超高压電子顕微鏡センター 助教

2021年4月-現職

専門分野：電子顕微鏡学，材料科学

◎電子顕微鏡学(遠隔電子顕微鏡法, 電子顕微鏡と放射光の複合観察, 電子照射効果, その場観察法, 超高圧電子顕微鏡法)および材料科学(材料設計学, 鑄造・凝固, 教材開発)に関する教育・研究に従事。

★★



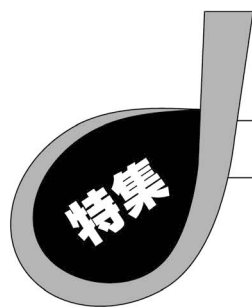
永瀬丈嗣 北村一浩 石川史太郎 岡 弘 吉年規治 藤田全基

¹ 兵庫県立大学大学院工学研究科, ² 愛知教育大学技術教育講座, ³ 北海道大学量子集積エレクトロニクス研究センター.

⁴ 北海道大学大学院工学研究院, ⁵ 九州大学大学院工学研究院, ⁶ 東北大学金属材料研究所

Keywords: *materials science, humanities, cultural heritage, archaeology, interdisciplinary activity*

2025年1月24日受理[doi:10.2320/materia.64.147]



材料科学と人文科学が紡ぐ新知創造学際領域研究

藤田全基¹⁾ 佐藤敬浩²⁾

1. 人文科学研究による材料科学基盤の活用

文化財や自然史財は、過去の人々の生活や地球の歴史を後世に伝える人類の共有財産である。歴史、民族、芸術など幅広い分野と結びつく資料の調査には、形態解析や年代分析に加えて、材料学的視点から製造方法の解明や復元材料の開発、さらには保存と劣化に関する研究などが不可欠である。そのため様々な研究技術が存在するが、日々高度化する技術を個々の研究者が包括的に利用することは難しく、ニーズに応じた技術開発や量子ビームによる先端非破壊分析には専門家との協働が求められる。一方、物質や材料を定量的に扱う理工学研究分野では、特性の解明や機能向上を目的として研究を体系的に進めてきた。また大型設備や最先端装置を開発し、多くの研究者が共同で活用できる研究エコシステム（共同利用・共同研究制度）を構築してきた。このエコシステムを最大限活用すれば、人文科学において広くつながりのある協業研究が実現し、異分野の知識を結びつけた「総合知」を生み出す基盤の強化が期待できる。

東北大学金属材料研究所（通称「金研」）と文化財や自然史資料の研究に特色を持つ7つの学術機関は、文部科学省が2023年度から開始した「学際領域展開ハブ形成プログラム」事業に文理融合に関する内容を提案した。この事業は、これまでの共同利用・共同研究体制の成果を基礎とし、従来と異なる分野との連携によって新たな学際領域の開拓を目指すものである。提案した「人文科学と材料科学が紡ぐ新知創造学際領域の形成（新知創造学際ハブ）」が採択されたことにより、文理融合の学際領域研究を組織的に進める場が整備されることになった。

2. 金属材料研究所と人文科学の交流

「新知創造学際ハブ」事業について説明する前に、事業の中核機関で国際共同利用・共同研究拠点である金研を紹介する。1916年に設立された金研は、108年の歴史を持ち、金属をはじめ、半導体、セラミックス、化合物、有機材料、複合材料などの多様な物質・材料に関して基礎研究から応用技術までを行う研究機関である。物質材料の創製・評価に関する最先端の研究設備を有しており、照射材料試験などに対応した大型実験施設を運用する国際共同利用・共同研究拠点として、国内外の研究者や技術者に研究の門戸を開放している。独自研究と年間600件を超える共同研究を通じて、金研には物質・材料分野の膨大な知識と経験が蓄積されている。

「新知創造学際ハブ」事業では、金研のこの研究基盤を全国の人文科学系研究者が活用できる制度を構築する。文化財に対する物質科学的アプローチには、分析による「観る」だけではなく、修復材料やレプリカを「作る」、劣化・保存条件を解析して「継ぐ」といった観点も重要である。評価技術、材料創製・造形技術、計算科学技術を有する金研は、「観る」「作る」「継ぐ」の全てにおいて、物質・材料科学の視点から人文科学に貢献することを目指す。特に文化財研究で求められる非破壊分析には、先端量子ビーム（中性子ビーム、放射光、電子線、放射線同位元素ビーム、ミュオンビーム）が重要である。金研にはビームライン運営に主体的に携わる専門研究者が大勢おり、大型研究施設で中性子ビームや放射光を用いる測定環境を利用者に提供している。（図1参照）この環境を文化財・自然史財の分析に適したものに整備していく。研究基盤の利用促進については、事業参画機関が有する金属

* 東北大学金属材料研究所 1)教授 2)首席URA(〒980-8577 仙台市青葉区片平2-1-1)
Interdisciplinary Research on Innovative Knowledge Hub for Materials Science and Humanities; Masaki Fujita and Takahiro Sato
(Institute for Materials Research, Tohoku University, Sendai)
Keywords: humanities, materials science, interdisciplinary research, joint usage/joint research system, cultural heritage, archaeological material, non-destructive/chemical Analysis
2024年11月11日受理[doi:10.2320/materia.64.148]



図1 研究用定常中性子源 JRR-3 の(左上)全景と(左下)ビームホール内の様子、および、(右上)金属材料研究所が管理運営する中性子測定装置。(オンラインカラー)

器、陶磁器、恐竜骨、年縞と呼ばれる湖底堆積物などの学術標本に科学分析を行って研究事例を示すことで、その呼び水とする。

なお、金研はこれまでも文化財をはじめとする人文科学分野で研究に貢献がある。例えば、室町時代の日本刀「法城寺国光」の光学顕微鏡による構造研究や、絵画保存を目的とした油絵具材料の微細構造解析、瑞鳳殿の戊辰戦争弔魂碑の材料分析と修復などが挙げられる。最近では、生命の起源を探る「はやぶさ2プロジェクト」において、小惑星「リュウグウ」から持ち帰られた試料の微量元素分析も手掛けている⁽¹⁾。

3. 新知創造学際ハブ事業の推進

(1) 目指すもの

「新知創造学際ハブ」事業は、最長10年の支援を文部科学省から受けられる。この事業の目的は、「多彩な物質・材料に関する技術、知識と経験を縦糸に、研究対象の時代や地域が異なる文化財・自然史財を横糸にして学際領域研究を推進し、テーマ発掘から分析・保存修復、学術研究、ものづくり展開、アウトリーチまでを包括する一気通貫システムを構築する。」ことである。金研はこの事業の中心的役割を担い、材料科学と人文科学の互惠的な深化・発展と学際領域開拓を参画機関とともに進める。図2の上図は、材料科学と人文科学の融合をイメージした事業ロゴである。下図には、事業参画機関が有する資料と金研が持つ分析機器の一部の写真を示している。

この目的に対する取り組みとして、次の3つを設定している。

1. 金研に整備されている国際共同利用・共同研究制度を基盤として、人文科学・材料科学学際ネットワークを構築する
2. 統合された先端分析プラットフォームを構築し、材料科

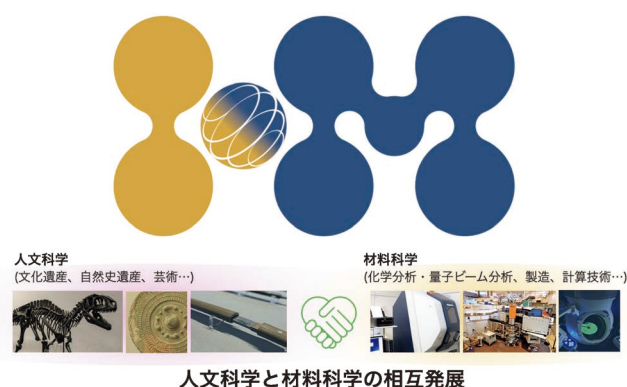


図2 (上) 新知創造学際ハブ事業のロゴ。Humanity と Material Science の頭文字である“H”と“M”をモチーフに、両者の融合をイメージしたもので、8つの○印は初期参画機関を示している。(下) 事業参画機関が有する資料と金研が持つ分析機器の写真。(オンラインカラー)

学の先端技術を文化財などに適用して高度な研究を推進する

3. 学際領域研究を先導できる若手研究者、技術者、および、リサーチ・アドミニストレーター(URA)を育成する

分野融合の基盤を作り、学際領域で研究と人材育成を行うという内容である。その取り組みを3つのフェーズに分けて段階的に推進していく。(図3を参照)第1期(2023年度～2025年度)では学際研究の基礎を固めるため、金属製文化財をキーワードに「文化の起源を金属元素から探る」というテーマで共同研究を進める。金研と参画機関が得意とする研究テーマを中心に研究を進めるとともに、具体的なテーマ設定により国内外の研究者や組織の参入を促し、事業強化する期間と位置づけている。第2期(2026年度～2028年度)には共同利用・共同研究制度を活用して、より多くの国内外研究者や学生に学際研究の機会を提供する。そこで集まった課題から多くの研究者が協働可能な新たなテーマを設定し、海外の研究機関とも連携することで新しい学術知の創造の場を広げていく。最終の第3期(2029年度以降)には、学際領域研究の成果を社会実装するための取り組みを進め、繋がりができた多様なステークホルダーと学際研究ネットワークの拡大を図る。事業終了後には学際領域で育つ研究者や専門職員が、次世代につながる共創の場で中心的に活躍していることをイメージしている。

事業で構築する一気通貫システムは、地域性、時代性から従来はテーマが独立しがちな人文科学の研究を体系化し、学術の大きな潮流を生み出す源になると期待している。また材料科学の目も加えて関連する研究を包括することで、有史以来の人類の営みと文化の変遷を材料科学的に解明し、豊かな未来社会につながる新たな材料・物質観を共有した学術知の創造(新知創造)を目指す。日本人のルーツ探しや人類が世界中に広がっていった歴史(グレートジャーニー)を追う夢のあるプロジェクトなどに貢献できれば、分野を超えた学際的な

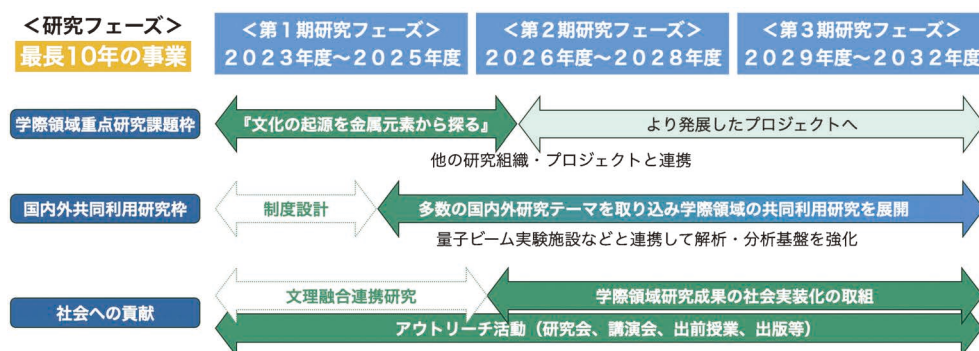


図3 事業計画。3つのフェーズに分けて段階的に推進する。金研と参画機関が中心となって学際領域研究展開の成功事例を創出する第1期研究フェーズ、その取組みを発展させ国内外の研究者を取り込んだ共同利用研究への展開を進める第2期研究フェーズ、学際領域研究ネットワークの規模拡大を図り、成果の社会実装化を推進する第3期研究フェーズである。（オンラインカラー）

拡がりの中で次世代の研究者と魅力的な協働が進められるであろう。

(2) 事業発足後の取り組み

前節では10年間の事業内容として、やや漠然とした内容を述べた。この節では事業が始まってから約1年の間に実施した具体的な事柄を紹介する。力を入れたことは学際領域を創成するための基盤固めである。まず分析環境については、金研が有する中性子測定装置の整備⁽²⁾⁽³⁾と、蛍光X線分析、ミュオン特性X線分析、中性子イメージング、即発γ線分析、中性子放射化分析と言った量子ビーム非破壊分析⁽⁴⁾を行うために関連組織と連携を進めた。この環境整備は、文化財の産地推定や製造プロセスの解明などを多角的に行うことで、材料学的観点から研究に深みを持たせ、同時に資料の文化財的価値や芸術的価値を科学的に裏付ける情報を供することを目的にしている。文化財に対するミュオン測定を実施している高エネルギー加速器研究機構物質構造科学研究所とは「文理融合学際領域研究に関する連携協力協定」を締結し、大強度陽子加速器施設での測定に事業関係者を派遣して文化財研究の経験を積んでいる。また日本原子力研究機構、京都大学複合原子力科学研究所とも中性子ビーム測定のためのマシンタイム確保を協力して行った。このような測定基盤を用いて事業参画機関の持つ資料の一部についてテスト分析・予備測定を行い、本格測定のフェーズに順次移行している。金研内でも人文科学系の研究者と共同利用・共同研究を進めるために、教育研究環境の整備の提案（研究推進・基盤形成助成課題）を募集し、5件を採択した。このような基盤整備を進める中で行った文理融合型研究を二件紹介する。（図4を参照。）

・中性子を用いた古墳時代遺物の非破壊分析

古墳時代の青銅製の鍔は、社会的・政治的に重要な意義を持つ。そのため研究対象になっているが、破壊分析を極力避けるために製作技術には不明な点が多い。そこで岡山大学文明動態学研究所とイタリアの国立核物理学研究所の研究チームは中性子イメージングと中性子回折による非破壊解析を行

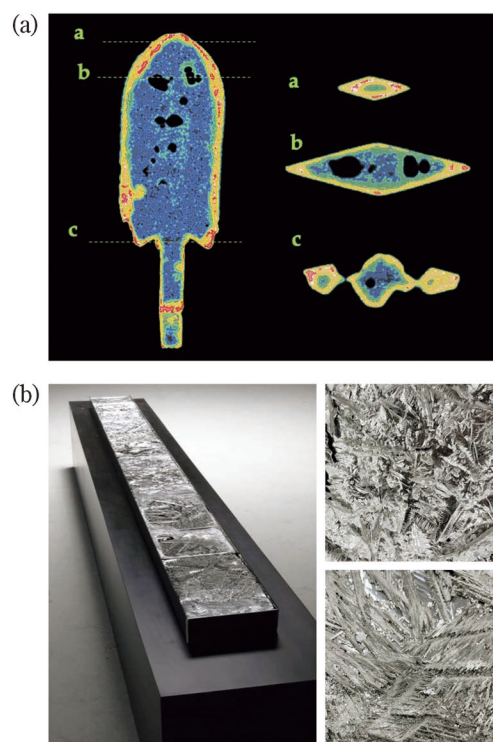


図4 (a) 中性子イメージング法で見た鍔の断層像。（写真は岡山大学文明動態学研究所のライオンジョセフ特任准教授より提供頂いた。）(b) 立体構造を持たせた金属結晶で作製された作品。（作品名：Connotation and extension of time, 制作：松岡美穂、全体像の撮影：末正真礼生。）（オンラインカラー）

った。その結果、内部構造や保存管理に役立つ情報を得ることに成功した。

・三次元形状を有する金属結晶を用いた立体彫刻の作製

従来、金属や半導体結晶の成長過程では微細組織の制御が重視され、3次元形状を持つ結晶の作製は工業的価値が低いと行われてこなかった。今回、女子美術大学と金研の結晶物理学研究部門の共同研究により、3次元構造を持つ金属結晶彫刻の作製が試みられた。芸術分野と材料科学分野の研究

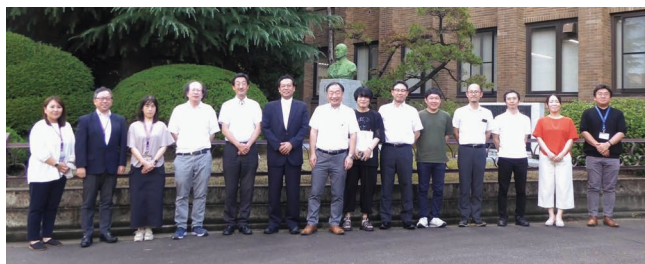


図5 新知創造学際領域形成推進室メンバーの集合写真。(オンラインカラー)

者が協働し、金属元素の選定、結晶の作製方法、作品デザインを含む全工程が一から検討された結果、新しい立体彫刻が完成した。現在、この作品は金研で公開されている。

事業では文理融合の「文」の範囲は広く捉えており、芸術も協働の対象としている。

また研究テーマの掘り起こしと研究者同士のつながりを作ることとを目的とした研究会、研究テーマと測定手法のマッチングを図るためのミーティング、一般参加が可能な公開ミーティング(研究会形式)などを行った。研究会は事業に共通する話題を設定して開催することもあれば、開催を担当する参画機関の研究内容を主な話題にすることもある。例えば分析に関する話題で「先端分析技術と文化財研究の新たな交流」という題目の研究会を開催した。また岩手大学で行った研究会では中尊寺金色堂と陶磁器の調査分析を話題とした。この様なイベントはホームページ(<https://ikh.imr.tohoku.ac.jp>)に随時公開し、メーリングリストに登録頂いた方にはメールでも案内を送っている。

アウトリーチ活動として、文理融合に関する中学生対象の特別授業、一般シンポジウムでの講演、関連学会・イベントで事業紹介などを行った。その他にも量子ビーム測定の現場環境と研究との関係を理解頂くために、参画機関の人文系研究者、および、事務系職員の方向けの施設見学会を開催した。事業では、分野や立場が異なる者同士が集まって協働するため、信頼関係と事業への期待感が大事と考え、連携イベントを行っている。この様な活動は、金研に設置した事業推進室(正式名称:新知創造学際領域形成推進室)が取りまとめている。(図5参照。)研究者、コミュニティのつながりを意識し、開かれた活動を心がけているので、興味がある方からの連絡をお待ちしている。

4. 人文研究に門戸を開く 共同利用・共同研究制度

一気通貫システム構築の中核に、研究エコシステムの利用機会を人文科学の研究者に拡げることがある。この取り組みも事業発足後に行った内容であるが、ここに章立てて説明する。

金研には整備された共同利用・共同研究制度(GIMRT)がある。物質材料科学に関する研究設備やデータ・知識を研究者が共同で活用できる制度で本事業にも適応する。しかし人

文科学の研究に対して初めて組織的に門戸を開くので、分野の研究スタイルに合った制度にするため、時間を掛けて検討した。一方で事業推進室には研究相談や事業・組織連携の話しが多数寄せられ、協働を速やかに始めることが望まれる状況にあった。そこでGIMRTでの課題公募に先立ち、制度の試験的な意味合いも含めて、事業独自に共同研究課題を公募した。相談内容を研究として具体化するための支援、および、測定などを進められる場合にはその支援を行うことが研究上の目的である。申請者は、金研と事業参画機関の研究者と共同で行う研究を提案し、課題が採択された場合には、共同研究者の所属機関と金研、実験実施機関への出張旅費の支援が受けられる。この公募に5件の応募があり、審査の結果、全ての課題を採択した。下記はその課題である。これらは、第一期研究フェーズのキーワードに関連した研究である。

- 中国西南部における鉄器出現期の銅鉄複合製品の構造と材質
- 日本古代金属製品の微量サンプルによる材質分析方法
- イスラム貨幣の成分分析による銀の流通と貨幣経済史
- 青銅柄鉄剣の分析と製作工程の復元による人工鉄の起源解明
- 金属製文化財の脱塩、防錆処置

各課題について申請者と共同研究者が共通認識を持ち、方針を定めて研究を進めるために、参画機関の研究者を交えた相談会を開催した。その議論内容に基づいて資料評価など可能なことから進めている。金研のGIMRT公募においては、長期に設備等の利用を必要とする課題に対して安定的な共同利用・共同研究の機会を提供するため、最長3年の研究を提案できることにした。また多極間共同研究が行える制

学際ハブ関係機関

東北大学学術資源研究公開センター
岩手大学平泉文化研究センター
大阪公立大学
大学院文学研究科都市文化研究センター
福井県立大学恐竜学研究所
福井県年輪博物館
岡山大学文明動態学研究所



初期参画機関



図6 共同利用・共同研究のイメージ図。申請者は金研の装置や知見等を活用できるだけでなく、学際ハブ事業参画機関でもして共同利用・共同研究を行える。(オンラインカラー)

「まてりあ」にて執筆の機会を頂いたことに感謝申し上げます。事業においては参画機関の皆様に関連頂いており、推進室の活動は金研の今野智恵子、具志堅美樹(以上、学際ハブ推進室)、堀田さつき、吉田健樹(以上、研究協力係)、大石毅一郎(情報企画室)、笠田竜太(原子力材料工学研究部門)、佐々木孝彦(低温電子物性学研究部門)、白崎謙次(現大阪大学放射線科学基盤機構)、杉山和正(ランダム構造物質学研究部門)、山中謙太(加工プロセス工学研究部門)、藤原航三(結晶物理学研究部門)、宮本吾郎(金属組織制御学研究部門)の各氏、藤澤敦氏(東北大学学術資源研究公開センター博物館)、三河内彰子氏(明治学院大学文学部)と進めています。また事業の立ち上げでは、湯本道明氏(現東京大学先端科学技術研究センター)にご尽力頂きました。この場をお借りして御礼申し上げます。

人文研究と材料研究の融合は、學術の枠を超えた協働の場を提供する機会である。研究の過程では、様々な化学反応が期待できる。例えば、新たなニーズに応じた計測技術の高度化や新しい方法論の開発も進むであろう。その結果、文化財が簡便に分析できる技術が確立されれば、個人が所有する多数の文化財も調べられ、一般の方も科学的観点からその歴史的意義に思いをはせることができる。個々に得られる成果の体系化から地域・時代がつながる物語ができることで地域振興が進むことも期待される。多くのステークホルダーとともに両科学が真に融合する学際領域の形成に挑戦していきたい。文化財を対象とする研究は、「ものづくり」の重要性を一般の方にわかりやすく伝える機会にもなり、金研の研究を始めとする材料科学の重要性を社会に浸透させる一助になると考えている。広報機能を強化して、材料科学のアピールにも取り組みたい。一方、この様にして興る社会的影響の側面は、物質・材料の試料とは違う文化財資料(史料)の扱いに関する倫理的側面とも関係する。そのため、人文科学と材料科学の学際領域における両面の融和から新しい価値観が生まれることになるであろう。その様な学際領域では総合的な知識、柔軟な思考力、コミュニケーション能力、リーダーシップを持つ人物も必要である。事業では次世代の科学と文化の架け橋になる人材の成長を支援していきたい。

「新知創造学際ハブ」事業を2023年に開始し、人文科学と材料科学の融合に関する組織的な取り組みの一步を踏み出した。金研の国際共同利用・共同研究制度は人文科学の研究者にも開かれることになる。この制度を活かして、これまで交流がなかった者同士が集い共創する場を事業で形成していく。この活動に多くの方が参加頂ければ幸いである。

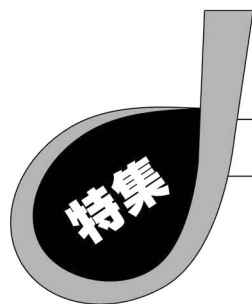
- (1) T. Nakamura et al.: Science, **379**(6634) (2023), eabn8671.
- (2) Y. Ikeda, T. Taniguchi, S. Takada, Y. Nambu, M. Ohkawara and M. Fujita: J. Phys. Soc. Jpn., **93**(2024), 091003.
- (3) Y. Nambu, Y. Ikeda, T. Taniguchi, M. Ohkawara, M. Avdeev and M. Fujita: J. Phys. Soc. Jpn., **93**(2024), 091005.
- (4) 国内で行われた非破壊量子ビーム測定の報告例として下記の論文と記事がある. Y. Abe: SPRing-8/SACLA Research Frontiers, M. K. Kubo, H. Moriyama, Y. Tsuruoka, S. Sakamoto, E. Koseto, T. Saito and K. Nishiyama: J. Radioanal. Nucl. Chem., **278**(2008), 777-781, M. Matsubayashi and F. Masuzawa: RADIOISOTOPES, **56**(2007), 763-775, C. Yonezawa: RADIOISOTOPES, **43**(1994), 50-775, T. Osawa: HAMON, **24**(2014), 273-279, H. Sato, T. Shinohara, R. Kiyonagi, K. Aizawa, M. Ooi, M. Harada, K. Oikawa, F. Maekawa, K. Iwase, T. Kamiyama and Y. Kiyonagi: Physics Procedia, **43**(2013), 186-195.

藤田全基

[illegible]

佐藤敬浩

★ ★



文化財研究を加速する即発 γ 線分析法による 非破壊元素分析

大澤 崇人*

1. はじめに

考古遺物や美術品といった文化財に関する科学的な情報を得る手段として、元素分析は強力な手法である。なぜならば、試料中の元素組成は、その試料がどのような原材料を使い、どのような製法で作られたのかを解明する糸口となるからである。元素分析法には様々な種類があるが、大きく分けて破壊分析法と非破壊分析法がある。よく知られている破壊分析法としては、誘導結合プラズマ発光分光分析法や原子吸光度法などがある。一方、非破壊分析法としては、X線蛍光分析法(XRF: X-ray Fluorescence)やエネルギー分散X線分光法(EDS: Energy Dispersive X-ray Spectroscopy)がよく知られている。分析法にはそれぞれ長所と短所があり、破壊分析法の場合は非常に高い検出感度と高い分析精度があるが、試料を破壊しなければならないという問題がある。貴重な考古遺物や美術品の場合、それらを破壊することはできないため、破壊分析法を適用することは難しい。そこで、非破壊分析法が利用されるのだが、非破壊分析法は破壊分析法と比べて検出感度が低く、得られる分析データも正確さを欠くことが多い。

試料中の元素組成の正確な情報を得るためには、適切な分析法を選択することはとても大切なことであり、それぞれの分析法の長所と短所を正しく理解している必要がある。本稿では読者がご存じであろう元素分析法とは違う、一風変わった手法として即発 γ 線分析法を紹介し、よく知られている分析法と何が違うのかを解説する。

2. 即発 γ 線分析法の原理

即発 γ 線分析法は中性子を用いた分析法であり、中性子誘起即発 γ 線分析法(PGA: Neutron-induced Prompt Gamma-

ray Analysis)とも呼ばれる。本分析法をご存じの読者はほとんどおられないと思うので、できる限りわかりやすく説明したいと思う。まず、中性子について簡単に説明したい。原子核を構成している粒子である中性子は、原子核反応を利用することで原子核の外に取り出すことができる。最も簡単に中性子を取り出す方法としては核分裂反応がある。ウラン235は核分裂しやすい性質があり、核分裂が起きると原子核が壊れ、その際に中性子も放出される。この中性子が別のウラン235に当たると核分裂を誘発するので、ウラン235が一か所にたくさん存在すれば、核分裂は連続して発生することになる。これを臨界と言う。原子炉は臨界を維持するための装置であり、その内部では大量の中性子が発生している。研究用原子炉では、発生した中性子を炉心から取り出して実験に使用することができる構造となっている。

中性子はとても面白い性質を持っている粒子であり、その性質をうまく利用することで様々な研究に利用することができる。中性子は電荷を持たないこともあり、物質に対する透過性がとても高いが、原子核と反応することもある。原子核との反応のしやすさは原子核の種類(核種)ごとに著しく異なり、非常に反応性の高い核種もあれば、ほとんど反応しない核種もある。中性子が原子核と反応を起こすと、原子核は不安定な励起状態(複合核)になり、複合核は形成後即座に光(γ 線)を放射する。これを即発 γ 線と言う(図1)。

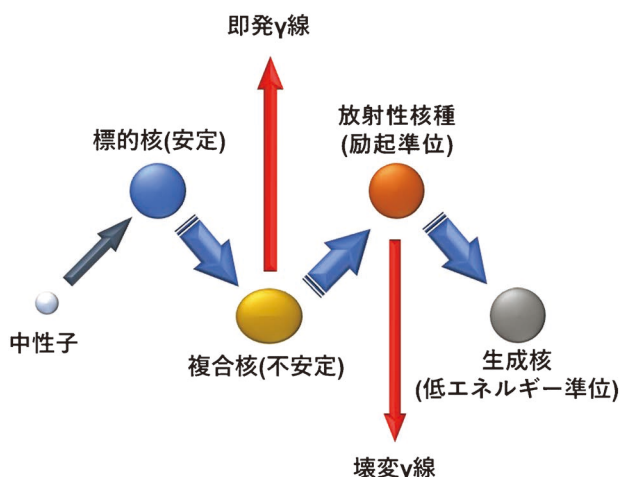
即発 γ 線の持つエネルギーは放出源である核種に依存しているため、放出された即発 γ 線のエネルギーが分かれば、試料中にどんな核種がどれだけ存在しているのかわかる。核種は同位体とも言い換えることができるので、即発 γ 線分析法は厳密には同位体分析法なのだが、大多数の分析試料では同位体の存在比が天然存在比から大幅に変わることはないのので、即発 γ 線分析法は元素分析法として利用することができる。本分析法は試料に中性子を当てただけで測定できるので、試料を破壊することのない非破壊分析法である。

* 日本原子力研究開発機構; 研究主幹(〒319-1195 茨城県那珂郡東海村白方2-4)

Nondestructive Elemental Analysis by Prompt γ -ray Analysis to Accelerate Cultural Property Research; Takahito Osawa (Materials Sciences Research Center, Japan Atomic Energy Agency, Tokai-mura, Naka-Gun)

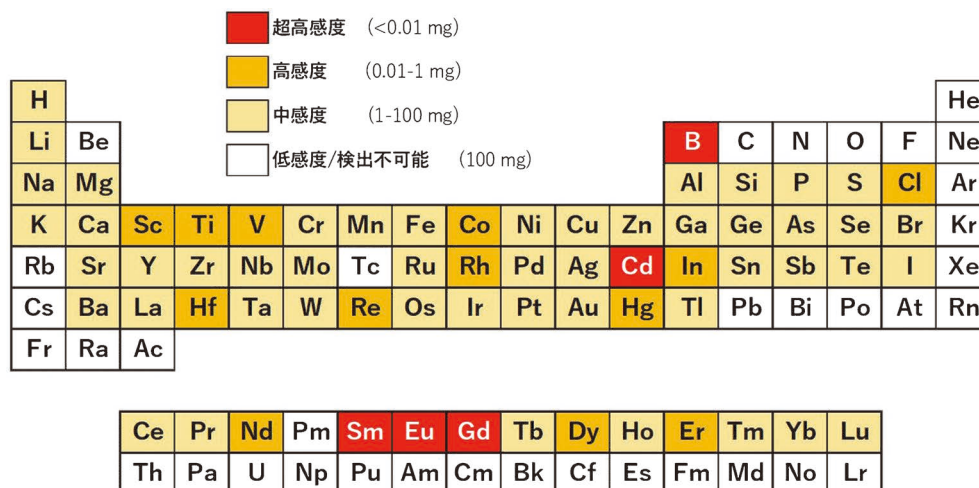
Keywords: *prompt gamma-ray analysis, neutron, Japan Research Reactor-3 (JRR-3), elemental analysis, nondestructive analysis*

2024年10月24日受理[doi:10.2320/materia.64.153]



3. 即発 γ 線分析法の特長

の要求からすれば厄介な性質である．一方，中性子を使った即発 γ 線分析法では化学効果が全く存在しない．原子核は化学結合による影響を一切受けないからである．



の方法として幅広い分野で利用されている。ホウ素や水素の他にも、カドミウムや水銀などの有害元素、ガドリニウムやサマリウム等にも特異的に高い感度を有している。その他にも多くの元素に対して感度を有しており、多元素を同時に定量することが可能である。

4. 即発 γ 線分析法の短所

即発 γ 線分析法は他の非破壊分析法と比較して明確な優位性があることは間違いないが、短所も存在する。まず最大の短所は、それを実行できる施設が非常に少なく、世界レベルで見ても10指に満たない点である。東海村の原子力科学研究所にある研究炉 JRR-3 に設置されている即発 γ 線分析装置(PGA)はそうした数少ない装置の一つである。本装置については後ほど詳しく述べるが、即発 γ 線分析法は巨大な中性子源が必要となるため、研究室レベルで実施することはほぼ不可能である。

即発 γ 線分析法は特定の元素に対して高い感度を有し、多くの主要元素に対しても感度を持っているが、苦手とする元素も存在している。例えば、酸素や炭素に対する感度はかなり低い。得意と不得意が顕著で、測定したい元素に対する感度がない場合は、他の分析法と組み合わせることになる。

もう一つ短所を挙げるとするならば、放射化の問題がある。本分析法は中性子による核反応を利用しているため、どうしても放射性核種が作られてしまう。量としては微々たるものであり、1 か月も放置しておけば放射能はなくなってしまうのだが、美術品などの文化財を測定する際に問題となる場合もある。分析後すぐに持ち帰らなければならない試料の場合は、照射量を加減したり、冷却期間を確保するための特別なスケジューリングが必要となったりする。

5. 即発 γ 線分析装置(PGA)

ここまで即発 γ 線分析法について簡単に解説してきたが、ここからは実際に使用されている分析装置(PGA)について紹介したい。即発 γ 線分析装置は世界に数台というレベルの希少装置であり、市販されている分析装置とは異なり一点物の特注品である。研究用原子炉 JRR-3 にはガイドホールと呼ばれる実験ホールがあり、計5本の中性子ビームラインが設置されている。このうち熱中中性子の T1 ライン最下流に PGA は設置されている。中性子は電荷がなく曲げることが難しいため、ガイド管と呼ばれる縦長の管の中を反射させながら輸送する。ガイド管の内壁は、中性子スーパーミラーと呼ばれる、ニッケルとチタンの膜厚を少しずつ変化させながら交互に積層した多層膜で構成されている。ガイド管は炉心から PGA まで50メートル以上設置されている。

PGA は鉛の遮蔽体の内壁をフッ化リチウムのタイルで覆いつくした構造となっている(図3)。フッ化リチウムは最も優れた中性子遮蔽材であり、中性子を確実に停止させるだけでなく、即発 γ 線の放出が少ない素材である。試料はテフロ

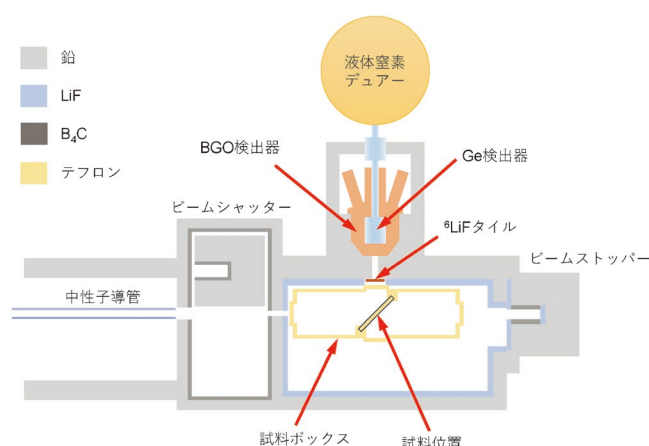


図3 PGAの内部構造。(オンラインカラー)

ンでできたサンプルボックスの内部に設置する。サンプルボックス内部は、中性子と反応しにくいガスとして二酸化炭素を充填する。中性子ビームは2センチ角に切り出されており、この範囲の分析が可能である。発生した即発 γ 線はGe検出器で検出する。Ge検出器の周囲はゲルマニウム酸ビスマス(BGO)検出器で覆われている。高エネルギーの γ 線はGe検出器の内部で完全に停止せず、一部のエネルギーを残して周囲に散乱してしまうことがある。これをコンプトン散乱と言い、正確な γ 線のエネルギーが検出されずバックグラウンドが悪化する。そのため、Ge検出器から漏れ出た γ 線をBGO検出器で検知し、そのイベントを除去することでバックグラウンドノイズを改善できる。これをコンプトンサブレッションと言う。PGAはこのような構造故に、世界一バックグラウンドの低い装置となっている。

PGAは平成初期に建造された古い装置であったが、筆者が大幅な改造を行い、現在では完全な自動分析が可能となっている(図4)^①。図4(a)の写真は装置を下流側、図3の右上方向から撮影したものである。ユーザーは試料を設置しておくだけで、後は全ての操作が自動で行われる。制御プログラムには様々な便利機能が搭載されており、例えば測定データはeメールで自動的に送られてくるので、ユーザーは何処に居ても最新の実験データを見ることができる。

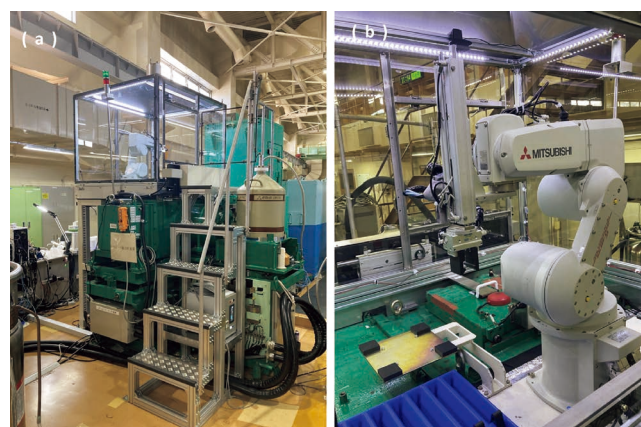


図4 JRR-3に設置された即発 γ 線分析装置(PGA)の全景 (a) および多関節ロボット (b)。(オンラインカラー)

6. 文化財の即発 γ 線分析

近年、即発 γ 線分析で文化財の分析を行うことが海外で流行しており、特にハンガリー・ブダペスト中性子センターでは積極的な研究開発が行われている。当該センターでは即発 γ 線分析と中性子イメージングを組み合わせることで、文化財の特定部位の元素分析が行える優れたシステムを構築している。一方、日本のPGAにおいては、1990年代に様々な文化財に対して即発 γ 線分析が行われ、中世の銅銭⁽²⁾、陶磁器⁽³⁾、須恵器⁽⁴⁾、中国の銅鏡⁽⁵⁾などが分析の対象として選ばれた。近年ではメソポタミアの土器の分析が行われている。これらの研究では様々な元素の分析が行われており、それらの元素組成から試料の分類が行われたり、歴史的変遷が判明したりしている。例えば、中国の銅鏡の研究では時代ごとに元素組成が変化していることが判明した。またメソポタミアの土器の研究では、出土した地域で希土類元素の濃度が大きく異なることが判明した。

つい最近、ずっと停滞していたPGAを用いた文化財の分析が再開されつつあり、古墳などの遺跡から出土した各種考古遺物の分析を進めている。まだ始めたばかりの研究であるが、興味深いデータが出つつあり、今後の展開に期待していただきたい。

7. PGA で何かできるのか

残念ながら PGA では文化財の分析は20年ほど前から下火になってしまった。文化財を分析するためには考古学などを専門とする文系の研究者との連携が欠かせないが、そうした異分野の研究者との繋がりが継承されなかったことが原因である。そのため、文化財の分析に特化した技術開発は行っていなかった。

とは言え、PGAには次々と新機能が実装されており、現在も進化を続けている。さらに、最近になって文化財の分析を再開しつつある。ここでは文化財の分析という観点から、現状のPGAで何ができ、何ができないのかを少し説明しておく。

まず、PGA では試料のバルクの元素組成を知ることができるが、これは裏返せば局所分析やマッピングが不得手だということである。その理由は、中性子ビームを集光させることが難しいことによる。実はPGA には集光ミラーが設置されているのだが、上流側と下流側の2 段構成になっている集光ミラーのうち、上流側のミラーが東日本大震災で破壊されてしまい、十分な集光ができなくなっているという事情もある。また、集光ビームを使いたいというユーザーが極端に少ないため、現在では専ら平行ビーム用のミラーが使われている。

たとえ集光ミラーを復旧できたとしても、中性子を電子線のように鋭く集光することはできないので、試料中の超微細な局所分析はPGAではできない。空間分解能は数ミリメー

トル程度であるため、その空間分解能で問題ない試料を選ぶ必要がある。集光ビームを使わず、平行ビームを細く切り出すことで、試料の特定の部分だけを分析するという方法もあるが、ビームを細くすればするほどビームは弱くなるので検出感度は悪くなる。

日本で文化財の即発 γ 線分析が再度活性化されれば、それに向けた技術開発は進むことになるだろう。この点に関しては次章で少し触れることとする。

8. PGA の未来

PGA では海外のトレンドとは全く無関係に技術開発を進めている。分析の完全自動化という大目標を達成した現在、新たな技術開発目標の一つとして掲げているのが、新しい二次元検出器を使った元素イメージング技術の開発である。ビームを集光するのではなく、検出器自体に空間分解能を持たせてしまおうという発想である。現在使用している Ge 検出器は高感度、高エネルギー分解能であるが、空間分解能は全くない。そこで、X 線天文学の分野で開発されてきたテルル化カドミウム半導体 (CdTe) 二次元検出器を即発 γ 線分析に応用することで、最終的には非破壊で元素の 3 次元分布を取得する計画である。この技術は癌の治療法のひとつであるホウ素中性子捕捉療法 (BNCT) への応用を目指して開発しているものだが、文化財への適用も可能である。

技術開発はニーズがあれば進展するが、ニーズがなければ全く進展しないものである。ヨーロッパで文化財の即発 γ 線分析の技術開発が盛んに行われているのは、ニーズがあるためである。日本でも、PGA を用いた文化財の非破壊分析のニーズが高まれば、それに合わせた技術開発を進めるつもりである。即発 γ 線分析法に興味のある方がおられたら、ぜひ PGA を利用していただきたい。また即発 γ 線分析法についてより詳しく知りたい方は文献 (6) をご覧いただきたい。

文 献

- (1) 大澤崇人: 波紋, **31** (2021), 7-8.
- (2) 富沢 威, 横山哲也, 米沢仲四郎, 澤幡浩之, 間柄正明, 葉袋佳孝, 富永 健: 第37回放射化学討論会講演予稿集(1993), 168-169.
- (3) 末木啓介, 金子 護, 佐藤 渉, 中原弘道, 富沢 威, 森本伊知郎: 第40回放射化学討論会講演予稿集(1996), 42-43.
- (4) 中原弘道, 三辻利一, 松江秀明, 米澤仲四郎: 第42回放射化学討論会講演予稿集(1998), 40.
- (5) Y. Oura, A. Saito, K. Sueki, H. Nakahara, T. Tomizawa, T. Nishikawa, C. Yonezawa, H. Matsue, and H. Sawahata: J. Radioanal. Nucl. Chem., **239** (1999), 581-585.
- (6) 大澤崇人: 放射化学分析, **34** (2023), 34-50.



大澤崇人

★★

2003年 東京大学大学院理学系研究科科学専攻博士課程 修了

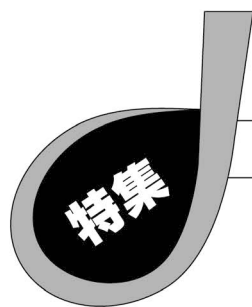
2005年 日本原子力研究所 環境科学部 研究員

2016年 日本原子力研究開発機構 物質科学研究センター 研究主幹

専門分野：地球惑星科学，分析科学，オートメーション工学

◎即発γ線分析装置(PGA)の装置担当者。中性子やミュオンを用いた新たな分析装置の開発と，それらを用いた地球外物質の分析を行っている。近年は複雑な化学実験を自動化するシステムの開発や，社会実装にも力を入れている。

★★



冶金関連遺物による東アジア冶金史学の構築 — 鑄型・羽口・溶解炉 —

丹 羽 崇 史*

1. はじめに

中国の殷周時代の青銅器は、複雑・高度な鑄造技術で製作され、なかには現代に伝わっていない技法も存在する。これまで殷周青銅器の詳細な観察・分析の蓄積により、漢代以前を中心とした中国における冶金技術の時代変遷に関するモデルが構築され⁽¹⁾、その成果は中国青銅器の範疇にとどまらず、日本をはじめとした東アジア周辺地域における冶金技術史の構築にも大きな影響を与えている。

一方、冶金技術に関わる考古資料として、青銅器そのものの以外にも、青銅器を鑄造するための鑄型をはじめ、羽口（送風管）・溶解炉・砥石などの遺物の存在が知られている。これらはまさに、当時においてものづくりの活動を終えて廃棄された「産廃」に該当するものである。このような過去の時代の「産廃」はただの廃棄物ではなく、当時のものづくりの技術や技術者同士の交流の実態を考えるうえで、しばしば重要な資料となる。たとえば羽口は、鍛冶・鑄造をはじめ、金属の加工・溶解で送風が必要なさまざまな工程において用いられるが、地域や時代、用いられる作業工程によって、形や大きさが異なることが知られている。こうしたあり方を把握することによって、過去の時代における技術者同士の交流や生産体制の一端を描くことが可能となる⁽²⁾。

筆者は「土製鑄型を中心とした冶金関連資料による東アジア冶金史学の構築」（日本学術振興会 科学研究費助成事業 基盤研究(B) JP20H01365 2020-2024年度）という科学研究費による研究課題にもとづき、こうした過去の時代の「産廃」を対象とした調査・研究を進めてきた。近年、中国では人類の冶金の歴史を考古学・文化財科学双方から検討を行う

「冶金史学」が発達し、青銅器や鑄型の研究を中心に多くの成果が発信されている。殷周青銅器の鑄型については、実験研究のほか、自然科学・岩相学的な分析も踏まえた総合的な研究も行われ、それらの特徴も明らかになりつつある⁽³⁾。このような自然科学・岩相学的な分析事例数は日本をはるかに凌駕する状況である一方、羽口や砥石といった冶金関連遺物の研究においては弥生・古墳時代研究を中心とした日本考古学に研究蓄積がある。筆者を中心とした研究グループは、考古学・文化財科学・実験的手法を総合的に実践し、日中双方の研究蓄積の共有にもとづく「東アジア冶金史学」の構築を目指した研究を進めている。本稿では筆者らが中心となって進めてきた調査・研究を中心に、土製鑄型・羽口・溶解炉などの冶金関連遺物に関する研究成果を紹介する。

なお鑄型・羽口・溶解炉とともに、冶金生産遺跡から出土する遺物として砥石がある。「東アジア冶金史学」の構築を目指した研究における砥石に関する調査成果については、森貴教氏と筆者の論文に報告しているため、そちらを参照願いたい⁽⁴⁾。

2. 土製鑄型の調査

中国では青銅器を鑄造するための土製鑄型が数多く出土しているが、殷周時代の青銅器を鑄造した鑄型の多くは、粒度の細かい黄土を用いたものである。一方、日本の遺跡で出土する土製鑄型の多くは、内面と外面とで粒度・材質の異なる素材を用いた複層構造のもので、鑄造時のガス抜き・空気抜きのために構造上の工夫と考えられている。なぜ殷周時代と日本の鑄型でこのような違いがあるのか？

先に述べたように、中国では出土鑄型に対する数多くの分

* 奈良文化財研究所 都城発掘調査部平城地区考古第二研究室長(〒630-8577 奈良市二条町 2-9-1)
The Construction of Metallurgical History in East Asia by Metallurgical Material: Clay mold, Tuyere and Furnace Wall; NIWA Takafumi
(Nara National Research Institute for Cultural Properties, Nara)
Keywords: metrological material, clay mold, X-ray CT, tuyere, melting furnace, Houma bronze workshop site, China, Japan, East Asia, archaeology
2024年12月 9 日受理[doi:10.2320/materia.64.157]

析事例があるが、こうした研究の多くは個別事例の検討にとどまり、土製鋳型製作技術の時間的変遷、ならびに地域別の差異など、通史的・広域的な観点から考古学的に検討したものは少ないのが現状である。日本でも土製鋳型の時代的変遷を検討した事例は多くはないが、こうした視点による数少ない研究事例として、久保智康氏の銅鏡鋳型の研究がある。久保氏は銅鏡鋳型の構造の変化にもとづき以下のように分類する⁽⁵⁾。

I類：単層鋳型(表面を薄く真土で化粧したものを含む)。7世紀に出現。

II類：2層鋳型。粗型を焼いてから、一定の厚さの真土を塗る。10世紀に出現。

III類：2層構造で粗型に条線を刻む。14世紀以降に出現。

筆者は久保氏の研究を参考にし、主にこれまで自身で観察した資料にもとづき、中国の二里头時代(紀元前二千年紀前半ごろ)から漢代における土製鋳型の基体構造の変遷を検討した。その結果、二里头時代から東周時代までは単層構造の鋳型が多くみられるが、複層構造の鋳型も一定数存在することを指摘した。また、漢代において、基部に砂状物質を含んだ鋳型の表面に、細かい土を塗布した銭貨鋳型の事例があり、日本の奈良時代の銭貨鋳型にも類似した構造のものを報告した⁽⁶⁾。ただし、土製鋳型は、鋳型の基体部分のほか、それを覆う包み土(バックアップ)、鋳型内面に塗布する塗型剤など、機能が異なるさまざまな部分を含んでいる。このような鋳型の詳細な構造、ならびに各層の機能、鋳型の製作技術について、いかに「客観的」「定量的」に把握をするか、という課題を残していた。

筆者らはこうした土製鋳型の構造・技法を明らかにするため、考古学的な観察・実測などの調査とともに、奈良文化財研究所のX線CTなど分析機器を用いた調査を実施している。X線CTを用いた土製鋳型の調査の前例として、日本の福岡県須玖タカウタ遺跡出土の弥生時代の土製鋳型の事例がある⁽⁷⁾ほか、近年は中国でもX線CTなどを用いた出土鋳型の分析成果が発表されている。また、冶金関連遺物ではないが、X線CTを用いた土製品の構造調査の事例として、奈良県川原寺裏山遺跡出土の塑像の調査、ならびに漢代の封泥の調査などが挙げられる⁽⁸⁾。

冒頭で述べた科研費研究課題は2020年度に採択になった

ものの、コロナ禍により海外調査が実質不可能な状態が続いていたこともあり、筆者らは国内に所在する関連資料の調査に注力した。こうした国内所在資料の調査の一環として、公益財団法人泉屋博古館・和泉市久保惣記念美術館の多大なご協力のもと、両館の所蔵する青銅器・銭貨等の土製鋳型に対する実測、顕微鏡観察、三次元計測、X線CT、さらに蛍光X線分析等の非破壊調査を実施した。調査成果の詳細については別稿にて発表を予定しているが、X線CTによる調査の結果、各時代の鋳型で共通する特徴として、

- ・鋳型の構造は、単層構造のものと、複層構造のものが存在する。
- ・薄い鋳型は単層構造で、細粒子からなる傾向が観察できる。単層構造のなかには粒径組成が不均質で、空隙の分布も不規則なものがある。
- ・鋳型の空隙は、鋳型の内面付近から外層の縁辺部まで貫進しない。

といった点を確認できた(以上の土製鋳型のX線CT調査に関する成果は、①村田泰輔、丹羽崇史「日本所在中国青銅器・銭貨鋳型に関するX線CT調査」シンポジウム「東アジア冶金史学の開拓」(奈良文化財研究所 2024年6月7日)の発表資料、②日本文化財科学会2024年度大会(青山学院大学 2024年7月27・28日)の発表ポスター(丹羽崇史、村田



図1 土製鋳型類(公益財団法人泉屋博古館所蔵 奈良文化財研究所撮影)。

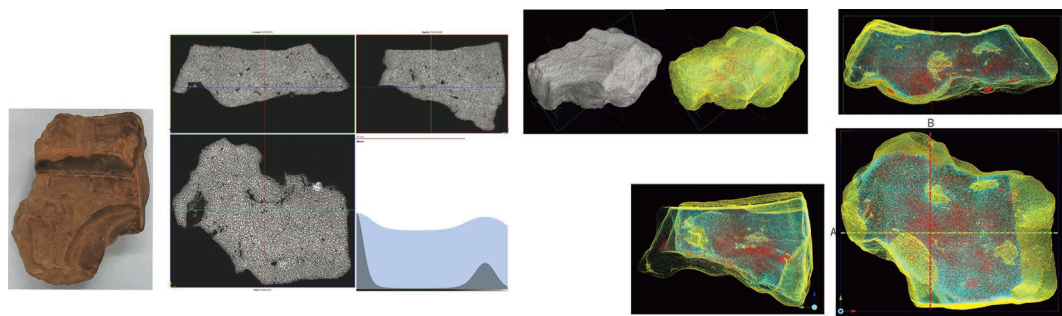


図2 殷周時代の青銅器の土製鋳型(公益財団法人泉屋博古館所蔵)のX線CT撮像(奈良文化財研究所撮影)。大きさは幅7.3 cm、高さ8.5 cm、厚さ4.5 cm

泰輔：中国青銅器・錢貨鑄型の調査—泉屋博古館・和泉市久保惣記念美術館所蔵資料を対象として—にて公表した。）(図1・2)。

今後はさらに調査事例の蓄積を進めるとともに、鑄型の構造を構成する要素、たとえば空隙率や通気度などを数値化し、それらの機能とともに、鑄型構造の時代的変遷・地域差の検討を進めたいと考える。

3. 羽口の調査

冒頭で述べた通り、羽口は銅・鉄など金属の溶解や製錬・精錬等、さまざまな工程に用いられる。また、時代や地域、用途により多様な形態・法量のものが存在することが知られている⁽⁹⁾。筆者も日本の古墳時代や奈良時代の羽口に着目し、製作者集団や技術系譜の特徴が羽口に反映されていることを指摘した⁽¹⁰⁾。

さて中国をはじめ、中央ユーラシアやシベリアでは先端が曲がった湾曲羽口が出土している⁽¹¹⁾。ここでは紀元前1000年紀の長城地帯を中心に分布する「北方系」湾曲羽口の検討から明らかになった技術展開の一端を紹介する。先行研究によれば、この形式を祖形とするものが弥生時代の日本列島にまで伝わったことが指摘されており⁽¹²⁾、弥生時代の鑄銅

技術と大陸のつながりを理解するうえで不可欠な資料となる。そればかりでなく、韓半島/朝鮮半島、華北地域、新疆地域においてもこの形式の羽口が出土しており、広域的な冶金技術の展開、および地域間関係を考えるうえでの重要な資料であるといえる。

筆者はこれまでの調査成果を踏まえ、「北方系」湾曲羽口の韓半島/朝鮮半島、華北地域、新疆地域における展開について、基礎的な整理とともに、資料ごとの比較検討を行った。検討の結果、長城地帯を起点として、韓半島/朝鮮半島から日本列島に伝わる中で、形態や製作技法に関する要素が徐々に変容する「地理勾配」的な様相が明らかとなった。ただし、華北地域の山西省侯馬鑄銅遺跡例は、先端部の湾曲という形状のみが長城地帯の「北方系」湾曲羽口と共通し、大きさ、製作技法、使用形態等は異なっている(図3)。このような差異が生じたのは、長城地帯とは大きく異なった華北地域の溶解技術が背景にあるものと考えられる。

4. 溶解炉の調査

鑄造遺跡から出土する炉壁は、溶解炉などの施設の構造を解明するための重要な遺物である。ケーススタディとして、春秋戦国時代の晋国の鑄銅工房である山西省侯馬鑄銅遺跡か

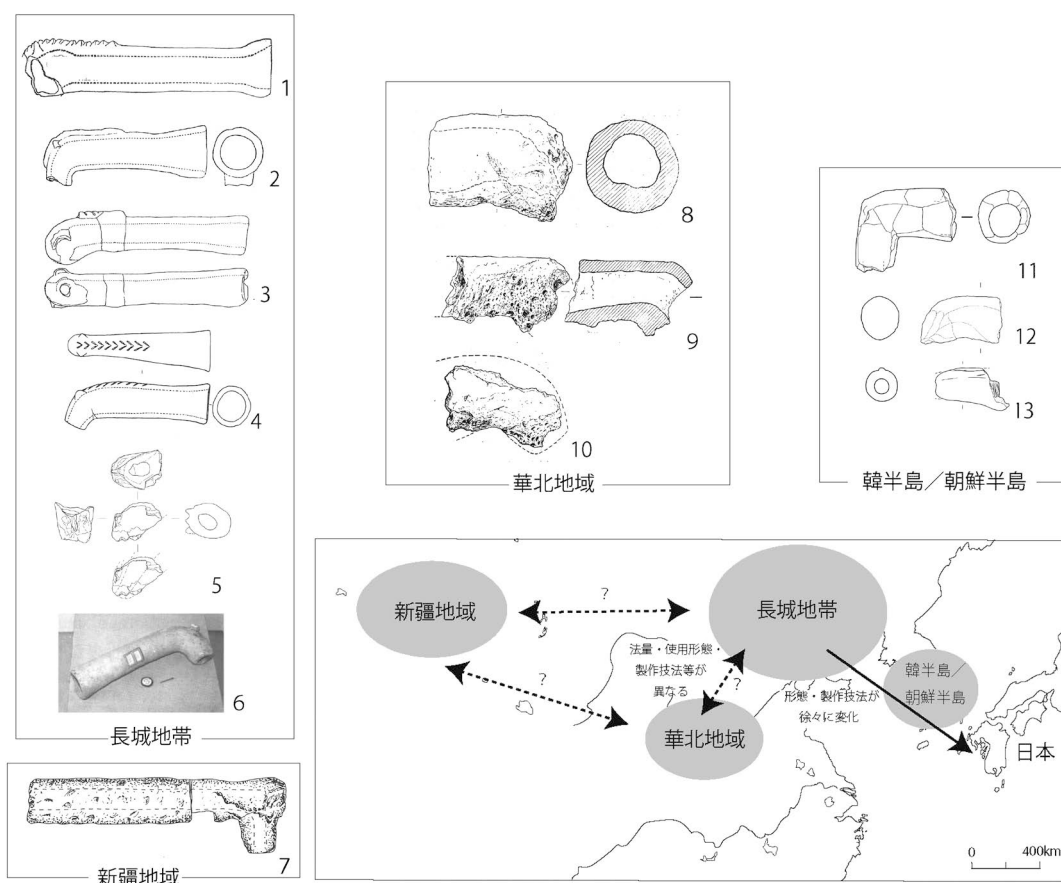


図3 東アジアにおける「北方系」湾曲羽口。(文献(17)丹羽2021bを改変)図は1:10
1. 大井古銅鉱 2. 三官甸 3. 赤峰(京都大学総合博物館蔵) 4. 小黒石溝 5. 上馬石(京都大学総合博物館蔵) 6. 龍頭山
馬鑄銅遺跡 11. 安心(国立全州博物館蔵) 12. 馬田 13. 新昌洞

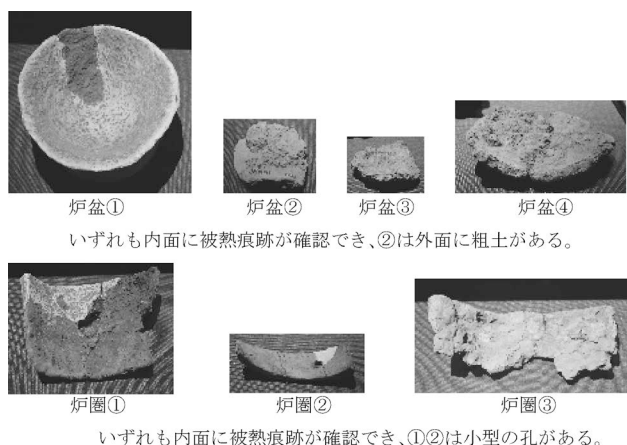


図4 侯馬銅遺跡出土炉盆・炉圈。(文献(17)丹羽2021aを改変)

ら出土した溶解炉に関する筆者の研究を紹介する。

侯馬銅遺跡の報告書⁽¹³⁾では同遺跡から出土した溶解炉に相当する遺物として、「炉盆」、「炉圈」が報告されている。炉壁の厚みは1~4.5 cmで炉圈は中央付近に1~2 cm前後の小型の孔を有するものもある。炉盆・炉圈いずれも外面に草入りの土が付着するものもある。報告書では、溶解炉は固定式ではなく可動式で、内面を燃焼させるものとし、1周に2~3つのパーツを組み合わせて、粘土紐(泥条)で固定し、炉を構築したとしている。

筆者は2019年10月に中国の山西省太原市にある山西青銅博物館展示室にて、ケース越しではあるが、炉盆4点、炉圈3点の実物資料を観察する機会を得た(図4)。炉盆・炉圈いずれも内面に溶銅が付着した被熱痕跡があり、溶銅に直接接していたとみられる。また、炉盆の外面には部分的に粗土が付着するほか、炉圈には報告書の記載通り1~2 cm前後の小型の孔が確認できる。

以上のような観察結果から、侯馬例の場合、複数のパーツ(炉壁)を組み合わせて、外面に粗土を付着させて固定させたものとみられる。このような可動式で、円形のパーツを積み重ねて構築する構造は、日本の伝統鑄金で用いられる甑炉と共通する。ただし甑炉の炉壁の個々のパーツは円形だが、侯馬例は、一周を半分もしくは3分の1に分割したものという違いが存在する。

次に東アジア的な観点から侯馬銅遺跡における溶解施設の位置づけを検討する。本来はまずは同じ春秋戦国時代の黄河・長江流域の他の事例から比較すべきであるが、ここでは近年、溶銅技術に関する研究の進展が著しい日本の弥生時代の事例と対比を行う。弥生時代の場合、高杯状土製品を用いた土器炉による溶銅が行われたと考えられ、村上恭通氏は侯馬銅遺跡や湖北省武漢市盤龍城遺跡の溶解炉を弥生時代の土器炉の類例と位置付けている⁽¹⁴⁾。ただし、弥生時代の土器炉は内面に土を貼り付けることが知られているが、侯馬銅遺跡では逆に外面に粗土を貼り付け、内面は溶銅と直接接している点などが異なる。侯馬例の場合、複数のパーツ(炉壁)を組み合わせて構築することが前提のため、外面に粗土を付着

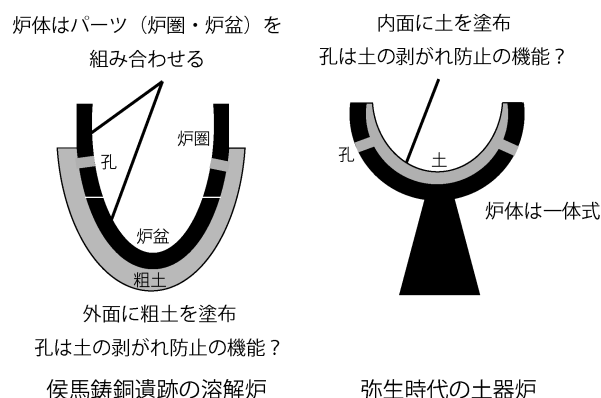


図5 侯馬銅遺跡の溶解炉と弥生時代の土器炉の構造対比模式図。(文献(17)丹羽2021aを改変)

させて固定させたものとみられる(図5)。このような方法は、同遺跡出土の鑄型と共通したものである。すなわち、鑄型も個々のパーツを組み合わせたのち、粗土を主体とした包み土で固定することから、溶解炉と共通した方法が用いられていると考えられる。

また、小型の孔が穿孔される点も侯馬例と弥生時代の高杯状土製品・鑄型外枠の例で共通するが、後者の場合、「内面に貼った真土が剥がれ落ちないようにするための工夫」⁽¹⁵⁾と考えられている。侯馬銅遺跡の炉圈に設けられた孔も同様な意図があった可能性がある。

前述の村上氏の研究によりユーラシアレベルでの溶銅技術の共通性が指摘されてきた。しかしながら、炉の構造や構築方法に目を向けると、より各地の溶銅技術の多様性、さらには背後にある技術者集団どうしの交流の実態が明らかになるものとみられる。特に土の貼付方法、および一体型と組み合わせ型の炉体の構造の差異は、技術系統を理解するうえで重要な要素となることを指摘しておきたい。

5. おわりに

本稿では筆者と共同研究者が進めてきた調査・研究を中心に、冶金関連遺物に関する研究成果を紹介した。

2024年6月8日、こうした調査・研究成果を紹介するとともに、「冶金史学」研究の可能性・方向性を議論するため、国内外の研究者を招聘し、シンポジウム「東アジア冶金史学の開拓」を開催した。シンポジウムでは土製鑄型など冶金関連遺物の研究課題、および「冶金史学」研究の新たな可能性について意見交換をおこない、会場・オンライン含め、約70名の方々に参加をいただいた⁽¹⁶⁾。「東アジア冶金史学」の構築のためには、冶金史学の専門家だけではなく、考古学・文化財科学・鑄造技術・科学史・地質学・工学・情報学・美術史など多様な分野の研究者と連携する必要がある。本解説が、材料科学と人文科学の融合とも言える多分野融合研究の参考になれば幸いである。

本研究はJSPS科研費JP16H05946, JP17H01646, JP20H01365の助成を受けたものである. 本稿第3・4節は拙稿⁽¹⁷⁾を骨子として再構成したものである.

文 献

- (1) 蘇 榮譽, 華 覺明, 李 克敏, 盧 本珊: 中国上古金属技術, 山東科技出版社, (1995).
- (2) 丹羽崇史:「産廃」の考古学—いにしへのものづくりを探索する—, コラム作寶樓(2021). <https://www.nabunken.go.jp/nabunkenblog/2021/04/20210415.html>
- (3) 譚 德睿: 中国青銅時代陶范鑄造技術研究, 考古學報1999-2(1999), 211-250. 岳 占偉, 荊 志淳, 劉 煜, 岳 洪彬, J. B. Stoltman, J. M. Kenoyer: 殷墟陶范, 陶模, 泥芯的材料来源与处理, 南方文物2015-4(2015), 152-159.
- (4) 森 貴教, 丹羽崇史: 古代都城における生産遺跡出土砥石の基礎的検討—平城京の銅鋳遺跡出土品を対象として—, 奈良文化財研究所紀要2021(2021), 16-17. 森 貴教, 丹羽崇史: 砥石からみた平城京における冶金生産体制, 奈文研論叢5(2025予定).
- (5) 久保智康: 中世・近世の鏡, 至文堂(1999).
- (6) 丹羽崇史: 二里頭時代から漢代における土製鋳型の基体構造の変遷, アジア鑄造技術史学会研究発表概要集15(2022), 24-26.
- (7) 春日市教育委員会: 須玖タカウタ遺跡3 5次調査(2017).
- (8) 市元 壘, 輪田 慧: X線CTスキャナによる川原寺裏山遺跡出土塑像の基礎調査, 飛鳥・川原寺裏山遺跡と東アジア資料集, 関西大学文学部考古学研究室国際シンポジウム実行委員会(2012), 139-152. 谷豊信, 市元壘, 宮田将寛, 佐々木由香: 高精細X線CTスキャナによる古代中国封泥の研究, MUSEUM707(2023), 7-41. 谷豊信編: 高精細X線CTスキャナ活用を中心とする古代中国の封泥の作成方法に関する総合的研究, 東京国立博物館(2024).
- (9) 村上英之助: ふいこや羽口の系統序説, 日本製鉄史論, たたら研究会(1970), 9-45.
- (10) 丹羽崇史: 奈良時代における湾曲羽口の再検討, 文化財論叢Ⅳ 奈良文化財研究所創立60周年記念論文集, 奈良文化財研究所(2012), 503-521. 丹羽崇史, 山本晃平, 濱崎範子: 古墳時代中・後期近畿地方における冶金生産に関する基礎的研究

—冶金関連遺物・遺構の集成から—, 古代学研究208(2016), 30-35.

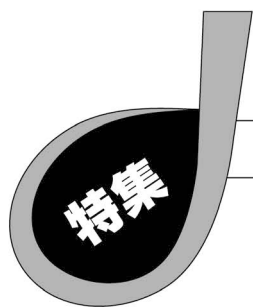
- (11) 村上恭通：日本・中国における青銅器生産技術の接点—送風管を中心に—，人文学論叢 8(2006)，189-198. 村上恭通：弥生時代の青銅熔解技術，村上恭通編，第 9 回愛媛大学考古学研究室公開シンポジウム 弥生・冶金・祭祀，愛媛大学法文学部考古学研究室(2008)，1-12. 村上恭通：東アジアに向けた青銅器の生産技術・文化の伝播，한국 청동기 제작기술 전동익 새로운 미래，国立清州博物館・韓国鑄造技術史学会(2020)，133-151. 清水邦彦：東アジアにおける曲状送風管の系譜—北方青銅器文化と獣首送風管—，古代学研究 230(2021)，21-34. 清水邦彦：ユーラシア大陸東西の鑄造用具，考古学と文化史 同志社大学考古学研究室開設70周年記念論集(2023)，63-72.
- (12) 難波洋三：銅鐸の調査と工房復元，奈良国立文化財研究所埋蔵文化財センター埋蔵文化財発掘技術者特別研修 生産遺跡調査課程，奈良国立文化財研究所(1998)，42-65.
- (13) 山西省考古研究所：侯馬鑄銅遺跡，文物出版社(1993).
- (14) 註11村上恭通(2008). 村上恭通(2020).
- (15) 難波洋三：銅鐸の鑄造，北井利幸編，銅鐸—弥生時代の青銅器生産—，奈良県立橿原考古学研究所附属博物館(2009)，80-87.
- (16) 丹羽崇史：東アジア冶金史学の開拓—シンポジウム開催報告を兼ねて，コラム作寶樓(2024). <https://www.nabunken.go.jp/nabunkenblog/2024/12/20241220.html>
- (17) 丹羽崇史：侯馬鑄銅遺跡における溶解炉の検討，アジア鑄造技術史学会研究発表概要集14(2021a)，48-50. 丹羽崇史：東アジアにおける「北方系」湾曲羽口の展開，中国考古学 21(2021b)，91-102.



丹羽崇史

★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★

2007年 3月 九州大学大学院人文科学府博士後期課程中途退学
2007年 4月 奈良文化財研究所 研究員
2016年 4月 奈良文化財研究所 主任研究員
2024年 4月- 現職
専門分野：考古学
◎研究テーマは東アジアにおける手工業生産の歴史的変遷、特に金属製品・窯業製品・生産関連資料を対象として研究を進めている。



銅鐸から弥生時代社会を見直す 冶金史学と東奈良遺跡の役割

清水 邦彦*

1. はじめに

青銅器生産の組織は、①技術^{こうじん}を保持する工人、②鑄造用具、③原材料、④製作地の有機的結合で構成される。本稿では、これらの諸要素の管理形態について青銅器生産体制という用語を用いて論を進めていくことにしたい。青銅器生産体制は社会構造に応じて異なる。そのため、青銅器生産体制を研究することは、対象とする時期や地域の社会像の復原への大きな貢献が期待される。

本稿でとりあげる銅鐸とは、朝鮮半島から日本列島へ伝わった朝鮮式小銅鐸（銅鈴）^{そけい}を祖型として、弥生時代中期前葉（紀元前4世紀）に近畿地域で創出された青銅器である⁽¹⁾。当時、金属を知らなかった人々にとってその輝きや音は特別なものであったと想像され、銅鐸は祭りに用いる祭器として普及する。一方、銅鐸は日常的に用いられた土器などとは違い、日本列島外から金属原料の入手^{ていしゅ}や鑄造という特殊な技術が必要である点から、限定的な生産とならざるをえない。これらのことから、銅鐸の生産体制、さらには流通を含む管理のあり方に関する議論は、集団統合が進展していく弥生時代社会像の評価に大きな影響を与えてきた。

このような銅鐸の生産組織のうち、本稿では③原材料について材料科学を用いることで、人文科学的問いに対してどのような貢献をできるのかについて先学の研究を紹介するとともに、東奈良遺跡の事例を用いて今後の展望について述べることにしたい。

2. 材料科学からみた弥生時代金属原料の産地について

銅鐸生産体制のなかでも金属原料について議論をおこなう

場合、その産地の所在は重要な問題となる。日本考古学では古くから、日本列島産の自然銅を利用したとする見解と、日本列島外の金属原料を使用していたとする見解が対立していた。どちらの見解を採用するのかによって、弥生時代における金属原料の管理の具体像は大きく異なる。このような状況のなか、金属原料の産地特定の研究に大きな役割を果たしたのが鉛同位体比分析である。

鉛同位体比分析とは、鉛の安定同位体とされる²⁰⁴Pb、²⁰⁶Pb、²⁰⁸Pbの比が原料の産地によって異なることを利用して、出土した文化財の鉛同位体比を測定することで原料の産地を科学的に推定する手法である。馬淵久夫・平尾良光は出土した弥生・古墳時代の青銅器に含まれる鉛の同位体比にもとづき、“朝鮮系遺物タイプ”、“前漢鏡タイプ”、“規格・漢タイプ”、“古墳出土鏡タイプ”に区別した。銅鐸については、生産当初は朝鮮系遺物タイプ（Dライン）であったものの、その後は前漢鏡遺物タイプ（A領域）、さらには規格・漢タイプ（a領域）へと、使用する鉛の産地が変化すること（図1～3）を示した⁽²⁾。

馬淵・平尾の成果は鉛を対象としたものであったが、難波洋三は微量元素であるアンチモンとヒ素に着目して、銅の産地について考察した。具体的には、同じ工人集団が製作したと考えられる荒神谷遺跡（島根県出雲市）出土の中細形銅剣c類のうち実施された37本のICP分析の結果では、銅濃度が高くなるほどヒ素とアンチモンの濃度も高くなる一方、鉛・錫についてはそれらの濃度が高くなるほどヒ素とアンチモンの濃度が低くなることから、当該期のヒ素とアンチモンは銅に最も高濃度^{かうこんど}に含まれていたと考えた。そして、Dラインの鉛を含む外縁付鈕1式末以前の銅鐸は以後のA領域の鉛を含む銅鐸と比べ、ヒ素・アンチモン濃度が低いことから

* 島根大学法文学部；講師（〒690-8504 松江市西川津町1060）

Metallurgical Historiography Reviewing Yayoi Period Society from Dotaku and The Role of Higashinara Site; Kunihiko Shimizu (Faculty of Law and Literature, Shimane University, Matsue)

Keywords: Dotaku, Yayoi period, Japanese Islands, archeology, scientific analysis

^{†1} この根拠については後述する。

2024年11月8日受理[doi:10.2320/materia.64.162]

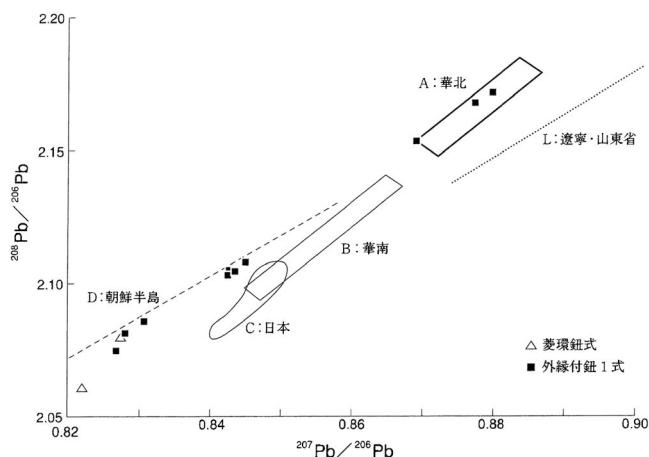


図1 最古段階銅鐸の鉛同位体比分布⁽⁵⁾.

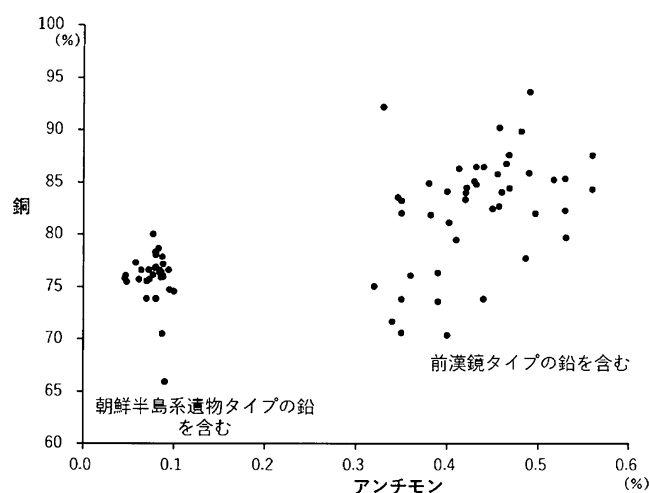


図4 銅鐸の鉛濃度とアンチモン濃度⁽⁶⁾.

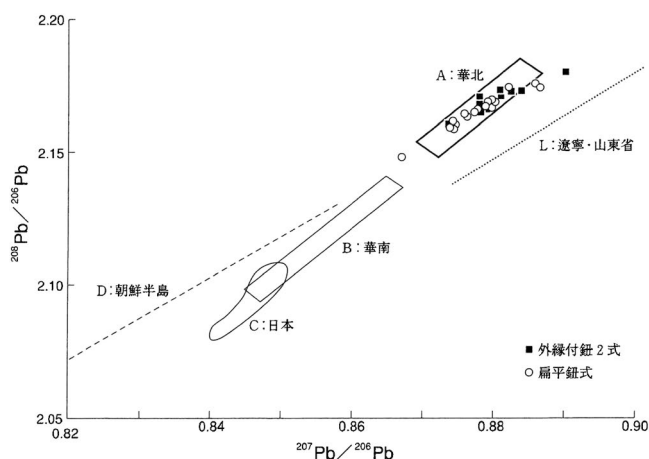


図2 古段階・中段階銅鐸の鉛同位体比分布⁽⁵⁾.

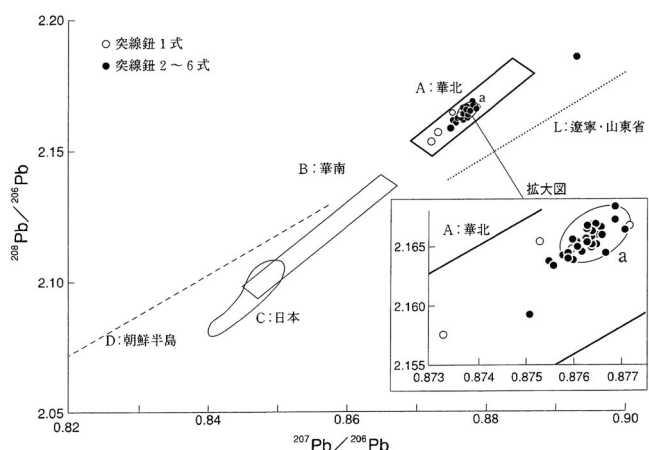


図3 新段階銅鐸の鉛同位体比分布⁽⁵⁾.

(図4), 鉛の産地の変化と連動して銅の産地もまた変化したことを示した⁽³⁾.

さらに、加茂岩倉銅鐸群(島根県雲南市)における ICP 分析の結果を検討した増田浩太は、外縁付鈕2式以降の銅鐸の錫濃度があがるにつれて微量元素であるビスマスとコバル

トの濃度も高くなることに着目して、ビスマスとコバルトは錫にもともと含まれていた不純物であった可能性を指摘した。一方で、それ以前の外縁付鈕1式銅鐸はビスマス濃度が一律に低いことから、この間に青銅素材の変化があったことを指摘した⁽⁴⁾。

紙幅の都合上、主要な研究のみの紹介にはとどまるものの、材料科学による成果を活用した研究によって、金属原料国産説は衰退し、日本列島外からの金属原料が使用されていたことが有力視されるようになったことがうかがえる。また、金属原料の具体的な産地のみならず、産地の変化についても明らかにした一連の研究成果は、銅鐸生産に使用される金属原料の管理のあり方を考えるうえで重要な情報を提供したと言える。

3. 材料科学研究における東奈良遺跡が占める位置

(1) 東奈良遺跡の概要

ここでとりあげる東奈良遺跡(大阪府茨木市)はほぼ完全な形を保った石製銅鐸鋳型(東奈良1号銅鐸鋳型)が出土したことで知られ、36点の石製銅鐸鋳型、3点の土製銅戈鋳型、4点の土製ガラス勾玉鋳型、3種以上の埴塼(高坏形土製品)、160点以上の送風管が見つかった弥生時代の大規模集落遺跡である。代表的な鋳造用具を(図5)に示した。ほぼ完全な形を保った1号銅鐸鋳型で高さが43.5 cm, 幅29.0 cm, 厚み14.5 cmである。この鋳型で高さ34 cm前後の銅鐸を製作することができる。

銅鐸鋳型に彫り込まれた文様などから、外縁付鈕2式の縦型流水文銅鐸を製作していたことが知られ⁽⁷⁾、多くの類似した特徴をもつ三対耳四区袈裟禪文銅鐸も製作されていた可能性が高い。東奈良遺跡のように、製品である銅鐸の検討から導かれた銅鐸群の製作地が明らかとなっている事例は非常に少ない。これは彫り込まれた銅鐸型式を判別できる石製鋳型の出土事例が少ないこと、鋳型素材が石製から土製へ変化して以降は銅鐸鋳型の出土事例が唐古・鍵遺跡(奈良県磯



図5 東奈良遺跡出土の鋳造用具⁽¹¹⁾。

城郡田原本町)例を除いて未発見であることに起因する。このような資料状況であるため、東奈良遺跡の事例は非常に貴重であり、銅鐸の工人系統を考えるうえで定点となりうる。さらに、製品である銅鐸そのものや鋳型の検討だけでなく⁽⁸⁾、生産に用いられた送風管や埴塙(高坏形土製品)などにも工人系統の基層的な差異が見出されており、工人系統間の関係性についての議論が進められている⁽⁹⁾⁽¹⁰⁾。

また、東奈良遺跡では銅鐸生産がおこなわれた時期より遡る製作時期の小銅鐸が出土している点も注目される。

(2) 東奈良遺跡で作られた銅鐸の鉛同位体比

東奈良遺跡で製作された銅鐸群の金属原料について、同時期におけるほかの工人系統の銅鐸群の金属原料と比較することで、多元的な生産体制であった銅鐸生産における金属原料の実態を探ることができる。そのため、銅鐸工人系統間における金属原料の異同について材料科学からアプローチすることにした。

現状では ICP 分析の事例数はまだ限られることから、筆者によって東奈良遺跡で製作を想定できる縦型流水文銅鐸と三対耳四区袈裟襴文銅鐸、および大阪平野中部での製作が推測されている横型流水文銅鐸の鉛同位体比についての検討がまず進められている⁽¹²⁾。鉛同位体比分析については、 $^{208}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ を縦軸、 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ を横軸とした A 式図、 $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ を縦軸、 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ を横軸とした B 式図がある。 ^{204}Pb は存在量が小さく誤差が比較的大きくなる。そのため、類似原料のグルーピングと原料の異同を細かく検討したい場合には、 ^{204}Pb を使わない比を優先した方がよいことが馬淵・平尾によって指摘されている⁽³⁾。以下、この指摘を踏まえ、A 式図を用いた検討を紹介することにした。

縦型流水文銅鐸については東奈良 3 号銅鐸鋳型で製作された気比 3 号鐸(兵庫県豊岡市)、恩智垣内鐸(大阪府八尾

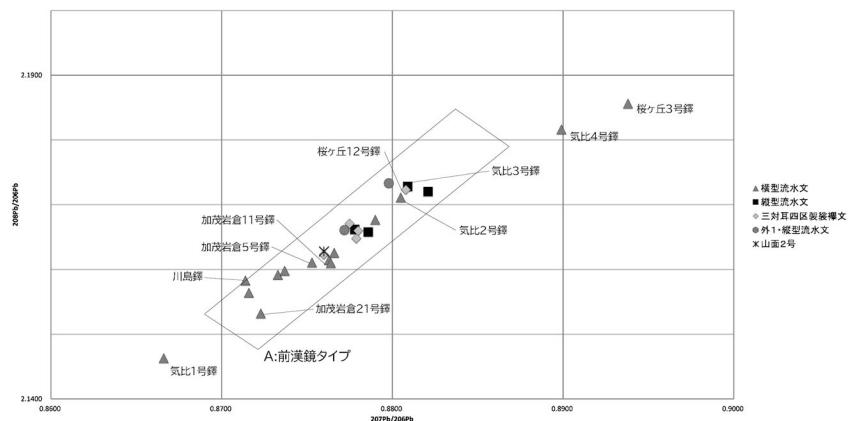


図6 外縁付鈕 2 式を中心とした銅鐸群の鉛同位体比分布⁽¹²⁾。

市)とその同範鐸である倭文鐸(兵庫県南あわじ市)、神戸鐸(三重県津市)を、三対耳四区袈裟襴文銅鐸については磯山鐸(三重県鈴鹿市)とその同範鐸である出土地不明の辰馬432号鐸、森鐸(兵庫県神戸市)、出土地不明の辰馬418号鐸、桜ヶ丘12号鐸(兵庫県神戸市)¹²⁾を、横型流水文銅鐸については加茂岩倉 2 号・5 号・11 号鐸・21 号・31 号・32 号・34 号鐸、川島鐸(徳島県吉野川市)、気比 1 号・2 号・4 号鐸、桜ヶ丘 3 号鐸、伝徳島県榎瀬鐸、古川鐸(香川県観音寺市)を対象として実施された鉛同位体比分析のデータを参照した。縦型流水文銅鐸、三対耳四区袈裟襴文銅鐸、横型流水文銅鐸について作成した A 式図を図 6 に示した。図 6 より、いずれの銅鐸の鉛同位体比も A 領域内、もしくはその周辺に位置していることがわかる。より詳細にこれらの銅鐸群の鉛同位体比についてみていくと、縦型流水文銅鐸と三対耳四区袈裟襴文銅鐸は A 領域のなかでも比較的狭い範囲に分布が重なる傾向を読み取れる。一方で、横型流水文銅鐸は広く A 領域に分布し、一部は A 領域外にも分布が認められる。縦型流水文銅鐸と三対耳四区袈裟襴文銅鐸が同じ東奈良遺跡で製作されていた可能性が高いことを踏まえると、製作地が異なる銅鐸工人系統の違いと鉛同位体比に相関が認められることになる。

東奈良遺跡での製作を想定できるほかの銅鐸についても、みておこう。外縁付鈕 1 式末の伝滋賀県辰馬407号とその同範鐸である出土地不明の辰馬414号鐸についても、縦型流水文銅鐸と三対耳四区袈裟襴文銅鐸と類似した鉛同位体比を示す。また、次の扁平鈕式古段階であるものの、三対耳四区袈裟襴文銅鐸の影響を受けた山面 2 号鐸(滋賀県蒲生郡竜王町)も類似した鉛同位体比を示す。

このように、外縁付鈕 2 式の銅鐸群における鉛同位体比分析の結果をみるならば、縦型流水文銅鐸や三対耳四区袈裟

¹²⁾ 桜ヶ丘12号鐸については、三対の飾耳をもたないものの、それ以外の特徴は三対耳四区袈裟襴文銅鐸と一致することから、本稿では三対耳四区袈裟襴文銅鐸に含めて、鉛同位体比の検討をおこなうことにする。

禪文銅鐸など東奈良遺跡で製作された銅鐸、大阪平野中部での製作が想定される横型流水文銅鐸の大きく2つに分けることができる。すなわち、製作地が異なる銅鐸工人系統の違いと相関して、鉛同位体比に違いが認められることになる。そして、この点は工人系統によって使用する鉛原料の入手状況が異なっていた可能性などを示唆する。

(3) 試料の汚染についての検討

日本列島出土の青銅器について鉛同位体比分析が広く実施されるようになった理由の一つに、試料として微量の鍍で十分であることから、ほぼ非破壊分析といって差し支えないとされたことによる⁽³⁾。しかし、鍍を試料として鉛同位体比分析の測定結果⁽¹³⁾については、隣接した青銅器から溶け出した鉛で鍍が汚染された事例が指摘されている⁽¹⁴⁾。実際に、前原Ⅷ遺跡(静岡県浜松市)では、銅鐸本体からの距離と土壌内の銅・鉛・リン濃度の関係が検討されており、銅鐸近くでは鉛の濃度が高いことを確認されている⁽¹⁵⁾。そのため、上述した、製作地が異なる工人系統によって認められる鉛同位体比の違いについて、そのまま信用してよいのかについては、慎重に判断をおこなう必要がある。

検討の組上に載せた銅鐸のうち、加茂岩倉2号・5号・11号鐸・21号・31号・32号・34号鐸、気比1~4号鐸、桜ヶ丘3・12号鐸については複数埋納であることから、鍍による鉛同位体比分析がおこなわれていた場合は汚染の可能性について考慮する必要がある。このうち、加茂岩倉遺跡出土銅鐸については、腐食していない金属部分を試料としているため、複数埋納による汚染の可能性を考える必要はない⁽¹⁶⁾。また、気比3号鐸と桜ヶ丘12号鐸については、ほかの外縁付鈕1・2式の縦型流水文銅鐸と類似した鉛同位体比を示しており、汚染による大きな影響を受けた可能性は考えなくてよいと考える。これらを除く横型流水文銅鐸である気比1・2・4号鐸および桜ヶ丘3号鐸については、A領域外となるものもあり、判断が難しい。しかし、この4点の事例を除いても横型流水文銅鐸には10点の分析結果があり、かつ腐食していない金属部分を試料とした分析事例数が多いことを踏まえると、横型流水文銅鐸の鉛同位体比が縦型流水文銅鐸や三対耳四区袈裟禪文銅鐸の鉛同位体比と異なる傾向をもつと判断することは問題がないだろう。

(4) 同範銅鐸における鉛同位体比の検討

同じ鋳型で製作された銅鐸を同範銅鐸という。同範銅鐸は土製鋳型に比べ破損しにくい石製鋳型によって製作された事例が圧倒的に多い。

ほぼ完全な形を保った銅鐸鋳型は高さ30cm台の銅鐸を製作できるが、片面の鋳型のみで約28kgの重量がある。そのため、両面では50kg以上となり、さらに高さ40cm台の銅鐸の鋳型であれば、それ以上の重量となる。鋳型素材となる石材などとは異なり、鋳型面に傷がつかないように管理しながら持ち運ばなければならないことを考えると、容易に運搬できる重量ではないだろう。そのため、同範銅鐸は同一工

房で使用された可能性が高いと推測される。

この点を踏まえ、同範銅鐸における鉛同位体比の異同についてみておきたい。上記で鉛同位体比を検討した銅鐸のうち、同範銅鐸は加茂岩倉5号鐸と気比2号鐸、加茂岩倉21号鐸と気比4号鐸、加茂岩倉11号鐸と川島鐸が該当する。これらはいずれも外縁付鈕2式の横型流水文銅鐸であり、石製鋳型で製作されたものである。図6で3組の鉛同位体比を確認すると、いずれも近似していない¹³⁾。

同じ鋳型を用いて銅鐸を製作するタイムラグをどれほど見込む必要があるのかは課題であるものの、製作した鋳型を長い期間使用せずにおいておくとは考えにくい。そのため、横型流水文銅鐸の製作地では、ほぼ同時期にA領域内の様々な鉛原料を入手していたと推測できる。

(5) 鉛同位体比からみた工人系統間の金属原料

本稿で見出した銅鐸工人系統の違いに対応して認められる鉛同位体比の差異、そして横型流水文銅鐸の同範銅鐸における鉛同位体比のばらつきからは、工人系統によって使用する鉛の入手状況が異なっていた可能性を想定することができる。ただし、鉛同位体比の測定値については、銅に不純物として含まれる鉛の影響も考慮する必要がある。そのため、結論の確定には鉛同位体比のみの分析ではなく、今後のICP分析の結果を待って、多角的に検討を進めていく必要があるだろう。

また、ここまでは外縁付鈕2式銅鐸に限定した議論であるが、ほかの時期についても同様の検討を進めていくことで、ほかの要素で認められる銅鐸生産体制の時期的変化との相関などの検討も進めていく必要があるだろう。

(6) 東奈良小銅鐸の検討

さいごに、東奈良遺跡で製作されたわけではないが、東奈良小銅鐸もまた材料科学研究において重要な資料である。東奈良小銅鐸はその形態的特徴から銅鐸の最古型式である菱環鈕1式よりは後出するものの、菱環鈕2式から外縁付鈕1

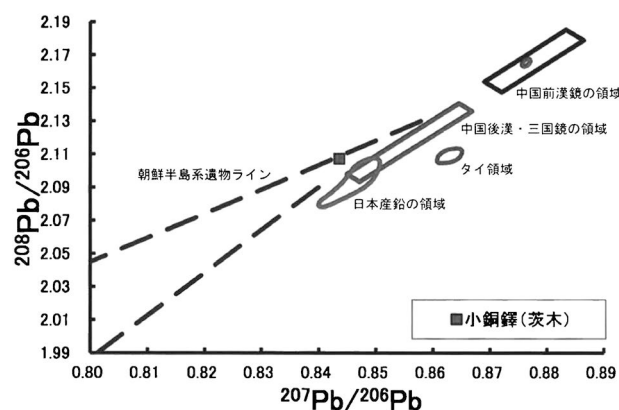


図7 東奈良小銅鐸の鉛同位体比(A式図)⁽⁶⁾。

¹³⁾ 気比2・4号鐸は複数埋納であり、鍍による汚染の可能性も考慮しておく必要がある。

表1 ICP分析による東奈良小銅鐸の定量分析結果⁽⁶⁾.

酸可溶分

試料名	小銅鐸		
n数	n=1	n=2	平均
Cu	90.46	91.37	90.915
Sn	7.27	7.29	7.280
Pb	0.792	0.775	0.784
As	0.184	0.184	0.184
Bi	0.004	0.004	0.004
Ni	0.011	0.011	0.011
Zn	0.008	0.007	0.008
Fe	0.010	0.016	0.013
Mn	<0.001	0.001	<0.001
Ag	0.090	0.089	0.090
Sb	0.426	0.434	0.430
Co	0.001	0.001	0.001
Au	0.001	0.001	0.001
Mo	0.028	0.016	0.022
Mg	0.001	0.001	0.001
Ca	0.019	0.015	0.017
Si	0.009	0.008	0.009

※ Bi,Zn,Mn,Co,Au,Mq は ICP-MS による (単位: mass%)

酸不溶分

試料名	小銅鐸		
n数	n=1	n=2	平均
Cu	0.166	0.157	0.162
Sn	0.069	0.013	0.041
Pb	0.001	<0.001	0.001
As	<0.001	<0.001	<0.001
Ni	<0.001	<0.001	<0.001
Zn	0.050	0.014	0.032
Fe	<0.001	<0.001	<0.001
Mn	<0.001	<0.001	<0.001
Sb	<0.001	<0.001	<0.001
Si	<0.001	0.002	0.001

(単位: mass%)

式末に並行する。Dラインの鉛を含む菱環鈕1式から外縁付鈕1式末より古い段階の銅鐸の鉛濃度はほぼ7~9%であるのに対して、東奈良小銅鐸は銅90.915%、錫7.280%であるのに対して、鉛が0.784%と著しく少ないことが判明している(表1)。一方で、鉛同位体比はDライン上にある値(図7)を示している⁽⁶⁾。東奈良小銅鐸の場合、鉛が著しく少ないことから、たとえ鉛を添加していたとしても、上述のように鉛を多く含む銅鐸とは異なり、主成分である銅に不純物とし

て含まれていた鉛の影響を受けることを想定できる。それにもかかわらず、鉛同位体比がDライン上に位置していることは、鉛の産地の変化と連動して銅の産地も変化したとする難波の指摘⁽³⁾からさらに踏み込んで、少なくともDラインの鉛を使用していた時期においては、銅と鉛は同一産地のものが使用されていたと考える証拠となろう。

4. おわりに

本稿は銅鐸生産体制から弥生時代社会を考えるにあたり、材料科学が果たしてきた成果について紹介するとともに、東奈良遺跡の事例検討を踏まえつつ、今後の展望について述べたものである。銅鐸生産に用いられた金属原料の通史的な検討のみならず、同時期における工人系統間における金属原料の異同についても研究を進めていくことで、銅鐸生産体制ひいては弥生時代社会構造の研究の深化へとつながっていくだろう。

文 献

- (1) 九州地域で形成されたと考える説もある。石川日出志：交響する古代，**XII**(2021)，1-10。
- (2) 馬淵久夫，平尾良光：考古学雑誌，**68**(1982)，42-62。
- (3) 難波洋三：山を越え川に沿う，長野県立歴史館，(2009)，66-79。
- (4) 増田浩太：青銅器の考古学と自然科学，朝倉書店，(2018)，41-75。
- (5) 平尾良光：考古学資料大観6，小学館，(2003)，346-368。
- (6) 難波洋三：茨木市立文化財資料館館報，**6**(2021)，5-14。
- (7) 難波洋三：辰馬考古資料館考古学研究紀要，**2**(1991)，57-109。
- (8) 難波洋三：豊饒をもたらす響き銅鐸，大阪府立弥生文化博物館，(2011)，80-109など。
- (9) 清水邦彦：日本考古学，**44**(2017)，27-25。
- (10) 清水邦彦：考古学研究，**66**(2019)，59-70。
- (11) 奈良県立橿原考古学研究所附属博物館：銅鐸，(2009)。
- (12) 清水邦彦：考古学と文化史2，同志社大学考古学研究室，(2025予定)。
- (13) 馬淵久夫，江本義理，門倉武夫，平尾良光，青木繁夫，三輪嘉六：出雲神庭荒神谷遺跡第一冊，島根県古代文化センター，171-186など。
- (14) 難波洋三：埋蔵文化財ニュース，**174**(2019)，16-25。
- (15) 青木繁夫：浜松市博物館館報，**3**(1991)，1-10。
- (16) 齊藤 努，肥塚隆保，高妻洋成，澤田正明，中川 寧，増田浩太：古代文化研究，**24**(2016)，1-17。



清水邦彦

★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★
 2008年 同志社大学大学院文学研究科文化史学専攻
 博士前期課程修了
 主な略歴
 2011年 茨木市立文化財資料館 学芸員
 2023年 博士(文化史学)学位取得(同志社大学)
 2024年4月-現職
 専門分野：考古学
 ◎研究テーマは弥生時代における青銅器製造技術と生産体制。とりわけ、生産遺跡に遺された铸造用具の考古学的検討や出土資料に基づく実験考古学の成果を踏まえた研究を中心に活動。
 ★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★

銅鐸の復元鑄造

小 泉 裕 司*

1. はじめに

銅鐸とは弥生時代に作られた釣り鐘形の青銅器である。内部に金属や石で出来た「舌」と呼ばれる棒をぶら下げ、本体を揺らして音を鳴らしていたと考えられている。初期の銅鐸は高さが20 cmと小型であったが、時代が下るにつれ1 mを超えるものも作られた。祭祀で使われていたとされているが、具体的な使用方法については分かっていない。弥生時代の終焉と共に作られなくなり、土中に埋納された銅鐸は人々の記憶からも消えてしまった。

製作方法については、詳細が記録された映像や資料は無く、さらに後の時代に銅鐸を祖型とする金属器もないので出土遺物から想定するしかない。

和銅寛では1988年より、弥生時代でも入手可能な材料を使った銅鐸の復元鑄造に取り組んできた。図1に、弊社で復元した銅鐸のうちのいくつかを示す。本稿ではその製作方法について紹介する。

2. 銅鐸はどのように作られたのか

銅鐸の製作には溶かした銅・錫・鉛の合金を鋳型に流し込んで形を作る鑄造技術が用いられている。故に、銅鐸の作り方を解明するには、鋳型の作り方を解明する事が何よりも肝要である。これまでに出土した遺物から銅鐸の鋳型には石で作られた石製鋳型と土で作られた土製鋳型の2種類があり、初期の銅鐸は石製鋳型で作られ、その後に土製鋳型で作られるようになったという事が分かっている。図2に、銅鐸の代表的な鋳型として、大阪府茨木市の東奈良遺跡出土品の石製鋳型(全長43.5 cm)とその型から作られたと考えられる復元銅鐸(図2(a))と唐古・鍵遺跡出土品の銅鐸鋳型外枠(図2(b))を示す。土製鋳型の技術は弥生時代以降も使われ続け、古墳時代には青銅鏡や馬具が、奈良時代には銭や仏像



図1 復元した銅鐸の一例。モデルとなったのはA：兵庫県桜ヶ丘5号銅鐸，B：滋賀県石山寺銅鐸，C：滋賀県大岩山昭和4号銅鐸である。（オンラインカラー）

などが作られた。石製鋳型は現在利用されていないが、土製鋳型は現代でも美術工芸品や仏具などの製作に利用されている。

本稿では、現在の銅鐸復元の主流となっている土製鋳型を利用した復元鑄造について解説する。

土製鋳型で銅鐸を作るにあたり、もっとも参考になったのが図2(b)の奈良県田原本町にある唐古・鍵遺跡で出土した銅鐸鋳型外枠である。遺跡からは複数の外枠が出土しているが、図2(b)で示す外枠が最も大きく、全長は63.4 cmである。図3に、典型的な土製鋳型の構造図を示す(文献(2)の図を引用改変している)。図3で示すように、銅鐸の土製鋳型は、一対となる外型2つで中子と呼ばれる1つのパーツ

* 有限会社和銅寛；取締役(〒618-0091 京都府乙訓郡大山崎町円明寺金蔵14)
Reproduction of Bronze Bells; Yuji Koizumi(Wadokan Art Works, Oyamazaki-cho, Otokuni-gun, Kyoto)
Keywords: bronze bell, sand casting, mold, restoration, yayoi period, archeology
2024年11月11日受理[doi:10.2320/materia.64.167]



図2 銅鐸鑄型の一例。(a)大阪茨木東奈良遺跡出土品・石製鑄型と復元銅鐸、大阪府茨木市の広報いばらきに掲載された写真，文献(1)を引用改変，(b)唐古・鍵遺跡出土品 銅鐸鑄型外枠。(オンラインカラー)



図3 土製鑄型の構造図。文献(2)より引用改変。(オンラインカラー)

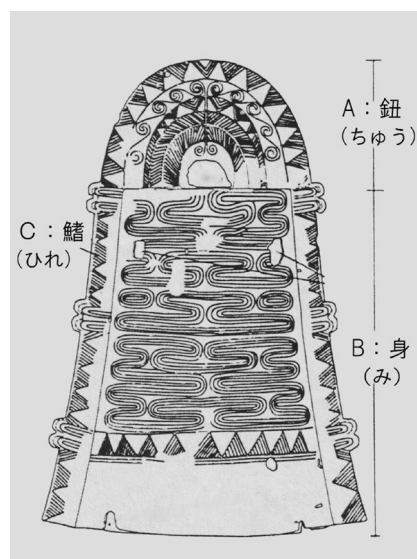


図4 銅鐸の模式図と部分名称。文献(3)より引用改変。
A: 鈕，B: 身，C: 鰭。

を挟むように構成されている。
この外型のベースとなるのが鑄型外枠である。

3. 復元銅鐸の作り方

図4に，典型的な銅鐸の模式図を示す(文献(3)の図を引用改変している)。図4を用いて，銅鐸の部位の名称を示す。Aで示す吊り手の部分は「鈕」，Bで示す円柱状の鐘本体部分が「身」，Cで示す身から張り出している部分が「鰭」である。鈕と鰭は一体化している。

・ゲージの作製

外型は2つで1セットであり，大きさが異なっていると鑄型の用をなさないで，外型2つは同じ大きさに作る必要がある。同じ大きさに作る為には基準となる物差しが必要なのでゲージを作製する。図5に作製したゲージの外観写真を示す。出土遺物にゲージとなるような物は見つかっていな

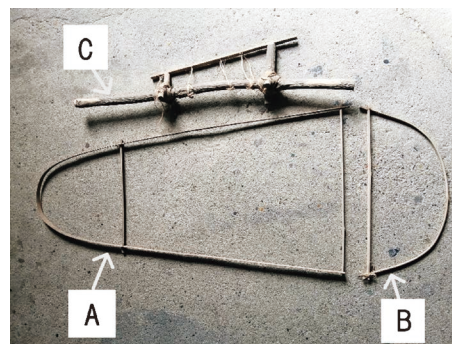


図5 作製したゲージの外観写真。A: 銅鐸全体の外形線用，B: 身の円弧用，C: 身の上下を結ぶ曲線用。(オンラインカラー)

いので、弥生時代でも入手可能と考えられる竹や木を使ってゲージを作製した。作製したゲージは3種類であり、それぞれ図5においてインデックスAで示す銅鐸全体の外形線用、Bで示す身の円弧用、Cで示す身の上下を結ぶ曲線用である。Aの全長はおよそ95cmである。

・鋳型外枠の作製

図6に鋳型外枠の作製の様子⁽⁴⁾を示す。まず板状の粘土を、身の円弧用ゲージを物差しとして使いながら、鋳型外枠(A)の形状になるよう成形する。ここで、粘土の下に敷いてあるのはサポート材代わりの砂(B)である。つぎに、十分に乾燥させた後、焼成し素焼きにする。鋳型外枠の作製方法は、いまだ確立された方法はなく、さらなる改良点があると考えられる。具体的には、知り合いの陶芸家から「紐状の粘土を積み上げて円筒状に成形し、乾燥前に切断し、立てた状態で乾燥させる方が良い」という助言なども参考にした改良なども考えられる。

・外型の作製

図7に外型の作製の様子を示す。

外枠(A)を地面に据えて、外枠の上下に二股になった木(B)を設置する。設置した木に身の上下を結ぶ曲線用のゲージ(C)を載せ、ゲージを回転させながら真土(D)を付けていく。「真土」とは川砂や山砂を粘土と混ぜて焼成し粉碎した

鋳物用の砂である⁽⁵⁾。一般的に新しく真土を作ることは稀で、鋳造後の真土鋳型を粉碎して再利用するのが殆どであり、今回使用した真土も再利用で作られた物である。真土は粒度で篩分けして使っており、粒度の粗いものから順に粗真土・中真土・粉真土の3種類を使用する。

外枠に粗真土を付けてゲージを回転させて成形し乾燥させる。乾燥後、同様の工程で中真土を付け、さらに粉真土を付ける。技法的には梵鐘や茶の湯の釜などで使われている惣型法である。ゲージには紐が結んであり、この紐の場所が銅鐸の文様の横線になる。

・文様彫り

図8に、文様を真土に彫り込む様子を示す。銅鐸全体の外形線用のゲージを使い、外型(A)に外形線を刻み入れる。鱗と鈕の部分は一段低く彫り込む。線を刻む道具は竹べら(B)を作製し使用した。鉄筆なども試してみたが竹べらが最も使いやすかった。ただし、先のゲージと同様に竹べらの出土例はないので、実際に使用していたかどうかは不明である。身の横線は先の工程で決まっているので、縦線を刻み入れる。縦横の線を彫り終わった後、鋸歯文等の文様を彫る。

・肌焼き

図9に、石を組んで外型を裏返して置き、下から炭で表面を炙り焼き締める、肌焼きの様子を示す。外型の向きはその

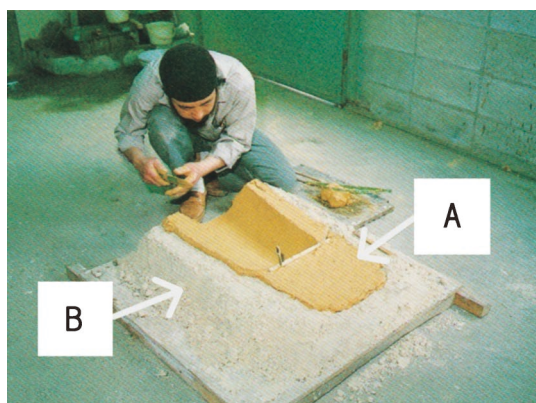


図6 粘土を外枠の形状に成形する。文献(4)より引用改変。
A：鋳型外枠の粘土，B：砂。(オンラインカラー)

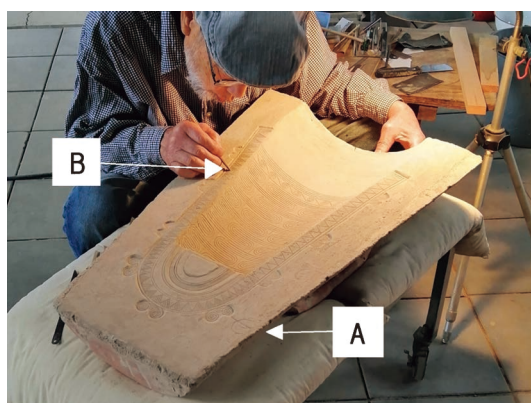


図8 竹べらで文様を彫る様子。A：外型，B：竹べら。
(オンラインカラー)

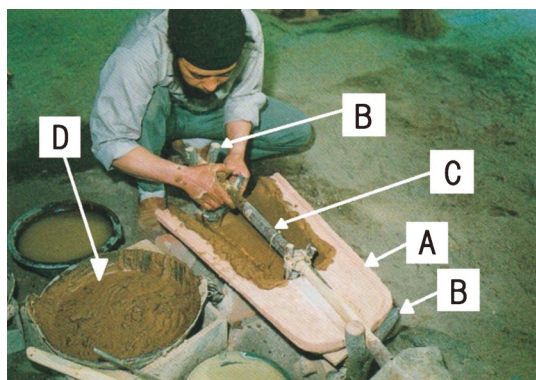


図7 ゲージを使って真土を付ける。文献(4)より引用改変。
A：外枠，B：二股になった木，C：身の上下を結ぶ曲線用のゲージ，D：真土。(オンラインカラー)



図9 鋳型表面を焼き締める肌焼きの作業。文献(4)より引用。
(オンラインカラー)

ままで鑄型表面の上で火を熾して焼き締めても同等の結果が得られた。

・中子づくり

図10に中子づくりの様子を示す。外型を二つ合わせにして紐で縛って固定(A)し、土間(B)に外型の半分くらいまで埋める。外型の間に真土(C)を込めて中子を作製する(図10(a))。中子を完全に込めてしまうと鑄造時にガスの抜けが悪くなるので、真ん中は空けておく。中子がある程度乾燥したら外型から中子を外し、中子を乾燥させる。

乾燥後、型持部分の線を刻み入れる。型持以外の部分に、銅鐸の厚み分の深さの線を十字に刻み入れる。その後、型持以外の部分を銅鐸の厚み分だけ表面を削り取り、表面に粉真土を塗布し、乾燥後に焼成する(図10(b))。

型持は外型と中子の隙間を保持する為に身の上面と上下に設け、鑄造後は溶けた青銅が流れないので孔となる。

・鑄型組み立て

図11に、組み立てた鑄型の外観図を示す。外型(A)に中子(B)をセットし、鑄型を組み立てる。外型の合わせ目(C)に粘土で陶片を貼り、上から真土を塗り込め、乾燥させて外型を固定する。現代であれば針金で縛れば良いのだが、弥生時代には針金がないのでこのような固定方法を用いた。

溶けた青銅が流れ込みやすくなるよう身の裾を少し削り漏斗の様に加工し(鑄造の用語では湯口(D)とする。現代の感覚では巾木を設けておいて、そこに鑄口と湯道を彫って作るのが一般的だが、辰馬考古資料館所蔵の鑄放し銅鐸を参

考に、巾木を設けずこのような鑄口とした。

・鑄造

図12に、注湯の様子を示す。組み立てた鑄型を土間に埋めて固定(A)する。流れ込んだ青銅の浮力で中子が浮き上がらないように、木の棒(B)と石を使って中子を押しさえる。甑炉(溶解炉の一種、現在ではキュボラのようなもの)(C)と呼ば

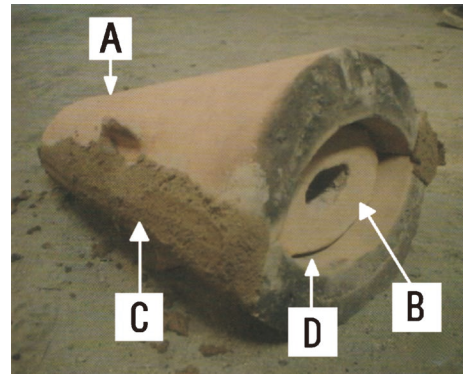


図11 組み立てた鑄型。文献(2)より引用改変。A：外型，B：中子，C：外型の合わせ目，D：鑄口(湯口)。(オンラインカラー)

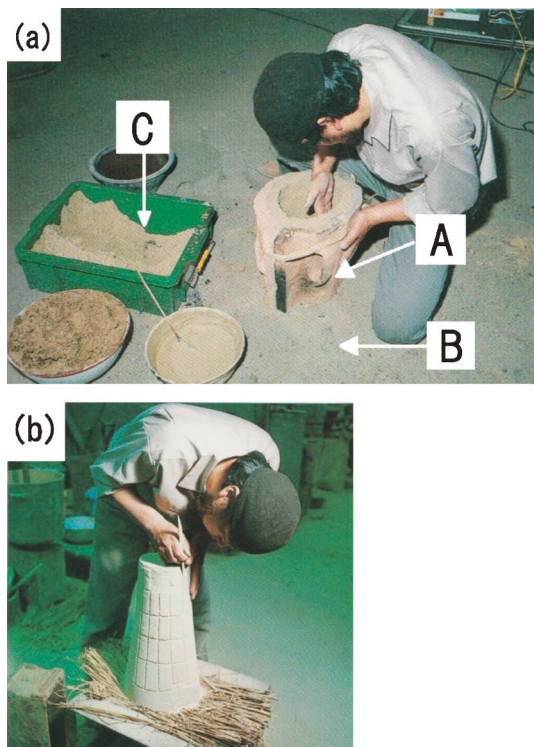


図10 中子の作製の様子。(a) 真土を込めて中子を作る作業，(b) 中子表面を銅鐸の厚み分だけ削る。文献(4)より引用改変。A：外型，B：土間，C：真土。(オンラインカラー)

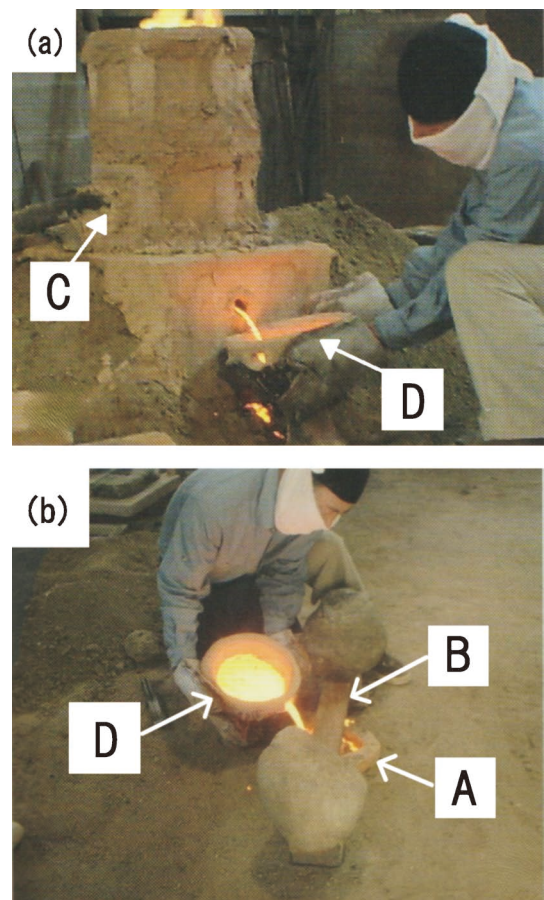
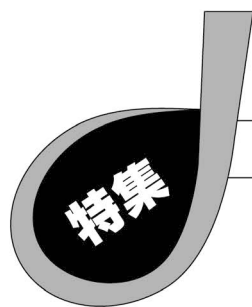


図12 青銅の溶解と注湯による鑄造の様子。(a) 甑炉による青銅の溶解と取鍋での溶湯の受け取り，(b) 土間に埋め込まれた鑄型への注湯。文献(2)を引用改変。A：土間に埋め込まれた鑄型，B：中子を抑える木の棒，C：甑炉，D：取鍋。(オンラインカラー)



日本刀の科学分析とアウトリーチ活動

中 田 隼 矢*

1. は じ め に

筆者が勤務する岐阜大学教育学部技術教育講座は、小学校および中学校の技術・家庭科 技術分野（以降、技術科と記載）の教員養成を目的としており、本講座において筆者は金属加工の教育を担当している。小学校、中学校、高等学校などの学習内容は文部科学省によって定められた学習指導要領⁽¹⁾によって規定されており、現行の中学校学習指導要領における技術科の学習内容は、「材料と加工の技術」、「生物育成の技術」、「エネルギー変換の技術」、「情報の技術」の4分野で構成され、金属加工は「材料と加工の技術」に含まれている。さらに「材料と加工の技術」においては、我が国の伝統的な技術によって支えられてきた伝統や文化に関する学びが求められている。

岐阜県では鎌倉時代の終わり頃から日本刀製作が始まったとされ、五箇伝の一角を担っている⁽²⁾。五箇伝とは、特に際立った個性を有する日本刀を製作していた五つの地域である。隆盛を極めた時代はそれぞれ異なり、古い順に大和伝、山城伝、備前伝、相州伝、美濃伝となり、それぞれ現在の奈良、京都、岡山、鎌倉、岐阜にあたる。現在でも、岐阜県の関市周辺には多くの刀工や研師、鞘師らが活動を続けており、岡山県に次いで日本刀に関わる職人が数多く在住している。また、関市は包丁などの刃物の生産量が全国一となっており、その基盤となったのは日本刀づくりとされている。したがって、岐阜県にとって日本刀は、地域の伝統的なものづくりであると同時に地場の代表的な産業へと発展したものづくりであり、技術科の学びに直結する。このような背景から、筆者は現職に着任してから教育研究の題材として日本刀を扱いだした。本記事では、日本刀に関する簡単な解説をしたのち、筆者が実施している中学生・高校生向けの金属に関

するアウトリーチ活動、および日本刀を材料科学の観点から研究するためのクラウドファンディングについて紹介する。

2. 日 本 刀

(1) 日本刀の歴史と鑑賞方法

日本刀は刀身に反りをもつ鋼製の片刃の刃物であり、平安時代の終わり頃に誕生したとされる。本記事は2024年秋に執筆をしているが、2024年放送のNHKの大河ドラマ「光る君へ」の舞台は平安時代となっており、同時代の代表的な刀工の一人に三条宗近がいる。宗近は山城伝の祖とされる刀工の一人であり、日本刀誕生初期に活躍した最も著名な刀工である⁽³⁾。宗近が作刀したとされる日本刀は幾つか現存しており、その中の一振り太刀 銘 三条(名物 三日月宗近)は国宝に指定されている(図1)⁽⁴⁾。本刀は徳川将軍家伝来の宝刀であった来歴を有し、現在は東京国立博物館の収蔵品として定期的に一般公開されている。現存する日本刀の多くは美術工芸品として博物館や美術館などに収蔵されており、国宝や重要文化財などに指定されているものも少なくない。その中でも、平安から鎌倉時代に作刀された日本刀は特に評価が高い。残念ながら当時の詳細な作刀方法は伝承されておらず、現在では完全に同じものを再現することはできないとされている。



図1 太刀 銘 三条(名物 三日月宗近)、全長98.1 cm.
(出典：国立文化財機構所蔵品統合検索システム
(https://colbase.nich.go.jp/collection_items/tmm/F-20103))

* 岐阜大学教育学部技術教育講座；准教授(〒501-1193 岐阜市柳戸1-1)
Japanese Swords: Scientific Analysis and Outreach Activities; Toshiya Nakata(Technology Education, Faculty of Education, Gifu University, Gifu)
2024年11月29日[doi:10.2320/materia.64.172]

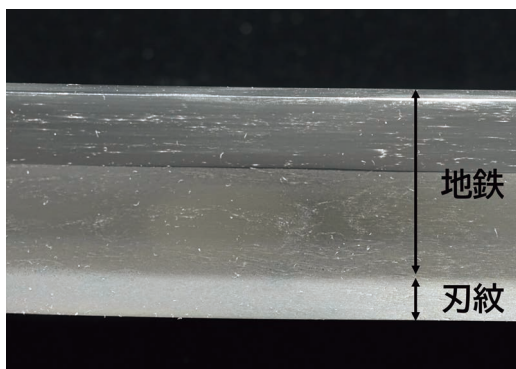


図2 打刀(幅約3 cm)の地鉄と刃文。(岐阜大学教育学部附属郷土博物館収蔵物)(オンラインカラー)

美術工芸品としての日本刀の鑑賞要素は「姿(すがた)」, 「地鉄(じがね)」, 「刃文(はもん)」となる⁽⁵⁾⁽⁶⁾。ここでは, 後述する独特の製法によって生じる「地鉄」と「刃文」について紹介する。図2は岐阜大学教育学部郷土博物館が収蔵している打刀の刀身の一部を拡大した写真となる。地鉄は後述する折り返し鍛錬によって形成され, 刃文は焼入れによって形成される。地鉄は日本刀へと鍛錬された鋼全体, もしくは焼入れが施されていない部位を指し, 地鉄内の折り返し鍛錬によって生じた文様を鍛え肌と呼ぶこともある。刃文は焼入れによって硬質化した部位となる。研磨が施されることで地鉄はやや黒く, 刃文は白色となるが, これらは単色ではなく製法に起因する淡い文様が生じている。日本刀鑑賞の難しさはこの変化を視認しにくいことが一因となるが, 視認のコツは金属表面を鏡面状態に仕上げる研磨工程の一部とよく似ている。具体的には, エメリー紙による研磨からバフ研磨に移行すると研磨痕は徐々に浅くなり, 消えていく。バフ研磨中の浅い傷の有無を確認するためには, サンプルを種々の角度に傾け光の当て方を調整することで傷が視認しやすくなる。日本刀の鑑賞もこの要領に似ている。ただ, 日本刀を直接手に持って鑑賞できる場合は刀身を動かすことで光の当て方を調整できるが, 博物館などで展示されている日本刀と光源となる照明は固定されている。そのため, 展示中の日本刀を鑑賞するためには, 我々自身が動くことで, 視認する反射光を調整する必要がある。もし, 博物館などで日本刀を鑑賞する機会があった際は, 真正面からだけではなく, 斜めからも観察することで刀身内に現れる多種多様な文様の変化を探っていただきたい。

(2) 日本刀の材料科学

失われた古い時代の日本刀の製法を解明するため, 様々な分野の専門家が日本刀の研究を重ねてきている。製法に密接に関わる冶金学研究は100年以上の歴史があり, その先駆者は俵国一である。俵は東京帝国大学教授を務めた日本の冶金学研究の礎を築いた人物であり, ドイツに留学後, 当時先進的だった金属用光学顕微鏡を日本に導入し, 日本刀へと鍛え上げられた鋼の金属組織などを分析している⁽⁷⁾。なお, 俵は

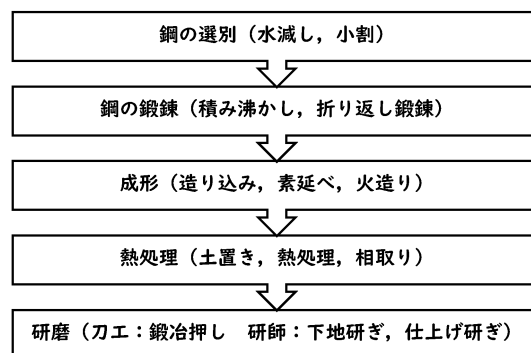


図3 日本刀の作刀工程の概略。

日本鉄鋼協会の創立者の一人であり, 日本金属学会とも関わりが深い。その後も微細組織評価を中心に多くの研究が重ねられており, 近年では北田が電子顕微鏡等を用いた膨大な分析結果を報告している⁽⁸⁾。近年では, SPring-8やJ-PARCなどを用いた内部構造の評価なども精力的に進められており, 文化財である日本刀にとって非破壊で分析できる意義は極めて大きい⁽⁹⁾⁻⁽¹²⁾。図3は日本刀の製作方法の概略となる⁽⁷⁾⁽⁸⁾⁽¹⁴⁾⁻⁽¹⁷⁾。ここでは, 素材である玉鋼, 折り返し鍛錬, 造り込み, 熱処理について, 材料科学の観点も交えながら簡単に紹介したい。より詳細な製法について関心を持っていただいた場合は, 谷村⁽¹³⁾による報告が全体像を把握しやすく, わかりやすい。なお, 前述の通り古刀の詳細な製法は不明なため, 以下に記す製法は現在のものである。

日本刀の素材は鋼であるが, この鋼は日本古来の製鉄法であるたたらによって製錬される⁽¹⁴⁾⁻⁽¹⁶⁾。商業的なたたら製鉄は大正時代に途絶えてしまったが, 現在では公益財団法人日本美術刀剣保存協会によって毎年1~2月に島根県奥出雲町にて日刀保たたらが実施され, 得られた鋼は全国の刀工に配付されている⁽¹⁵⁾。たたら製鉄の原料は砂鉄と木炭となり, 粘土製の炉内で砂鉄とともに木炭を燃焼することで砂鉄を還元する。現在では得られる鋼を玉鋼と呼称することが多く, 本鋼は不純物の含有が少なく, 現代鋼と比べて後述する折り返し鍛錬を施しやすいとされる。なお, 作刀方法と同様に製鉄方法についても古い時代の製法は不明な点が多く, 古刀を再現できない要因の一つに鋼の性質が異なる可能性も指摘されている。玉鋼の炭素濃度にはバラツキがあり, 炭素濃度が約1.0~1.5 mass%前後の状態がよいものが後述する皮鉄(かわがね)として刀身外側の素材として用いられる。折り返し鍛錬では玉鋼全体の炭素濃度を0.6 mass%程度に均質化しつつ, 鋼中に残存する不純物の除去や破砕などを目的とする。本工程では, 1200℃程度に加熱した鋼塊を槌で繰返し叩くことによって徐々に伸ばす。鋼塊がある程度伸びた段階で切込みを入れ折りたたみ, 内側の面同士を鍛接によって接合し, 再び槌で打ち伸ばす。皮鉄ではこの工程を10~15回程度繰返し, 高温下での鍛錬によって表層では脱炭が生じつつ, 折り返しと炭素原子の拡散によって鋼中の炭素濃度の均質化が進む⁽¹⁸⁾。鋼中に残存する脱炭層や不純物が地鉄

内の肌模様となるため、折り返し方向などを変えることによって肌模様は多様に化する。

日本刀の形状は細く長いため、刀身に外力が加わると曲がりやすく折れやすい。形状に起因する弱さを補うため、日本刀は単一の鋼で製作するのではなく、硬軟の鋼を組み合わせた複合構造をもつ。この複合化を造り込みと呼ぶ。複合構造には幾つかの種類があるが、外側には硬質な炭素濃度が高い鋼、内部は靱性を重視し外側より炭素濃度が低い鋼を用いるのが基本構造となる。外側の鋼は皮鉄、内側の鋼は心鉄と呼ばれる。硬質な皮鉄によって刃部の硬さと刀身の曲げに対する強さを確保し、心鉄の靱性によって刀身の破壊を抑制している。造り込み後、形状を整え熱処理を施す。日本刀の熱処理条件は、土置きにより緻密に制御される。土置きは粘土、木炭、鉄粉、砥石の粉などを混ぜた焼き刃土を適量の水で溶き刀身に塗布することで、膜沸騰の抑制と冷却速度を制御する⁽¹⁹⁾。高温に加熱した刀身を直接水に投入すると、鋼に接した水は瞬間的に沸騰し、気泡化した蒸気が鋼表面に付着する膜沸騰が生じる。蒸気膜の付着により鋼から水への熱伝達が妨げられるが、焼き刃土を極薄く塗ることによって鋼への蒸気膜付着を抑制し、冷却速度の低下を防ぐことができる。冷却速度を大きく低下させるためには、焼き刃土を厚く塗布することで鋼から水への熱伝達を抑制する。刃には焼き刃土を極薄く塗布することで急冷によるマルテンサイト変態を起こし、その他の部位は焼き刃土を厚く塗布することで徐冷によるパーライト変態などを起こし、刀身内の強度と靱性のバランスを巧みに整えている。図4に筆者が評価した現代刀の断面に対するビッカース硬さ分布を示す。造り込みと熱処理条件の緻密な制御によって、刀身内の硬さが大きく変化していることがわかる。熱処理後、その成否などを確認するため刀工自身が粗研ぎ(鍛冶押し)を実施し、その後は研師のもとで研がれる。研ぎは大きく分けて形状を整える「下地研ぎ」と鋼中の文様を現出させる「仕上げ研ぎ」の2段階に分かれる。仕上げ研ぎでは、折り返し鍛錬や熱処理に伴って

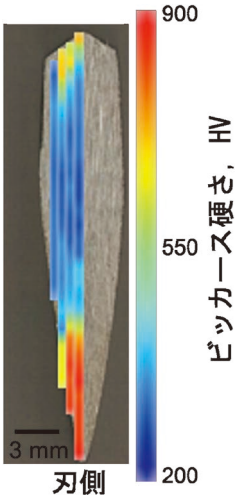


図4 日本刀断面のビッカース硬さ分布。(オンラインカラー)

生じた鋼中の僅かな硬軟差を利用し、表面に繊細な凹凸を形成する。この凹凸が地金中の鍛え肌や刃文の濃淡となり、鋼中に多彩な文様の変化を生み出す。

近年は若年層にも日本刀の愛好家が増えている。本紙の読者には大学教員も多いかと思う。講義の中で鉄鋼の組織制御などを扱う際は、日本刀と関連付けて解説をすると目を輝かせる学生もいるかもしれない。

3. アウトリーチ活動

(1) 日本刀の材料科学に関するオンライン講義配信

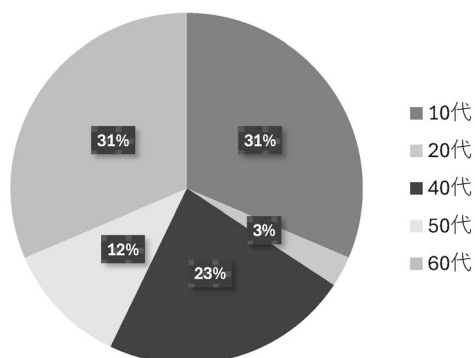
筆者は2019年度より日本刀の製法を材料科学の観点から解説する公開講座を開講している⁽²¹⁾。受講対象は中学生・高校生としているが、一般からの受講も受け付けている。初年度は対面で開講できたものの、翌年度からはコロナ禍の感染対策のためYouTubeによるオンデマンド動画配信に移行し、その後もオンライン形式で開講してきた。なお、(自身が話している動画を視聴するのは苦行なため)配信動画は、明らかな言い間違いや大きな間などが生じない限りほぼ編集はしていないが、音声を聞き取りやすくするため音声収録用のコンデンサーマイクなどを用いながら収録を行っている。ここでは、対面で実施した2019年度とオンラインで開講し特に受講者が多かった2021年度の結果について簡単に紹介する。

本講座の受講者数を表1に示す。2021年度の受講者数が急激に増加したのは開催期間が長かったことに加えて、開催期間の後半からSNSによる情報拡散が上手く機能したためと思われる。両年度の受講者の年齢分布を図5に示す。対面で開講した2019年度の講座については、最も受講者が多かった年齢層は10代と60代となり、次いで40代が多かった。10代のほとんどが中学生もしくは高校生となっており、40代の受講者の多くが中高生の保護者だった。30代の受講者はいなかった。オンラインで開講した2021年度の講座については、2019年度と比べて20代および30代の受講者割合が大きく増加し、60代の受講者割合は大きく減少した。受講者層の大きな変化は、開講情報の案内方法と開講形式の変化が影響していると思われる。2019年度の開講情報は、大学公式サイトへの掲載、大学が立地する岐阜市発行の広報誌への掲載、近隣の中学校・高等学校への開催案内の配布などを行った。中高生は学校で開催情報を知った受講者が多く、50および60代は広報誌で開講情報を知った受講者が多かった。一方2021年度については、学校への案内と広報誌への掲載は実施しなかったため、中高生と50代以上の受講者が減少したと思われる。SNSによる開催案内は、2019年度は

表1 公開講座の受講者数。

開催年度 () 内は開催期間	受講者数 (人)	男性 (人)	女性 (人)
2019年度 (7/7)	35	22	13
2021年度 (7/31~2/27)	254	93	161

2019年度



2021年度

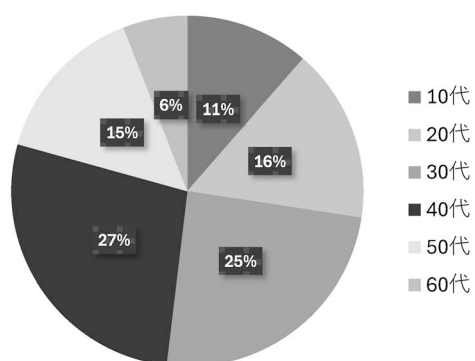


図5 2019年度および2021年度の受講者の年齢分布。

Facebook 上の筆者の個人アカウント、2021年度については Facebook, Twitter (現: X), Instagram の筆者の個人アカウントに加えて大学の公式 Twitter アカウントに開催情報が掲載されたが、受講申し込み繋がったのはおそらく2022年1月からの筆者の Twitter アカウントの投稿のみだったと思われる。これは、後述する日本刀に関するクラウドファンディング(CF)の実施予告を2022年1月頃から実施したところ反響が大きく、あわせて本講座も認知されることになった。その結果、本予告以降に175名の受講申し込みがあった。

本講座の内容については実施年度によって多少変更しているが、対面で開講した2019年度は日本刀の製法を材料科学の観点で解説する内容を軸とし、岐阜大学教育学部の紹介、非鉄金属も含めた金属全般に関する内容を休憩と焼入れの簡単な実験を交えながら2時間程度実施した。オンラインで開講した2021年度は4部構成とし、動画1:岐阜大学の紹介と金属全般、動画2:日本刀の簡単な歴史や鑑賞方法、動画3:日本刀の製法を材料科学の観点で解説、動画4:製鉄とした。動画3については前・後編の2分割とし各約40分の動画としたが、それ以外は各30分程度の動画とした。なお、これらの内容は、筆者が岐阜大学の一般教養科目(全学共通教育科目)として開講している日本刀の製法などを扱っている講義(現講義名:古今のものづくり)を基に、高等学校や中学校で学ぶ内容と関連付けた解説を意識した。例えば、マルテンサイト変態については高等学校の化学と関連付け、

鉄原子の配列の変化や炭素原子の固溶についても簡単に解説している。講義の難易度設定は受験生確保に繋げたい目的もあり、高校生を想定している。

受講後のアンケート結果を確認する限りでは、両年度とも「非常にわかりやすい」、「分量が適当だった」という回答が約80%となり、2021年度については熱心に視聴してくれた中学生も一定数いた。一般の受講者も含めて、ある程度専門性が高い内容を丁寧に解説したことが評価されたようだった。但し、受講後のアンケートへの回答率は対面開講時はほぼ100%だったが、オンライン開講に移行してからは25%程度に低下していた。なお、YouTubeのアナリティクス上の各動画の平均再生率は動画1については38%だったが、それ以外は40%代前半だった。平均再生率は、各ユーザーがその動画の何割程度を視聴したかを示す再生率を平均化したものとなる。YouTube チャンネルの収益化を目指す場合は、平均再生率は40%程度を目指すこと、とする情報がインターネット上に散見している。YouTube 側の公式見解ではないため真偽のほどは定かではないが、本講義動画もある程度の受講者が一定時間視聴してくれたと判断できる。

(2) 木目金製アクセサリ製作のワークショップ

2022年度より中学生・高校生限定で木目金(柸目金)製の装飾品製作のワークショップ型公開講座も開講している。中学校・技術科のカリキュラム中の「材料と加工の技術」には金属も含まれているが、授業時間数の兼ね合いや設備の問題から実習で金属を扱わないことが多い。本ワークショップは技術科の授業を補完しつつ、大学の設備を活かしたものづくり体験の提供を目的としている。木目金は、江戸時代頃に秋田の刀装具職人が考案したとされる伝統工芸一つとなり⁽²²⁾、金属内に木材の木目と似た模様を形成できることからその名が付いた。色の異なる金属板を積層させた状態で加熱し、拡散接合などによって金属板同士を接合し木目金の地鉄を製作する。この地鉄に種々の加工を施すことによって、多種多様な模様を造り出すことができる。例えば、図6のように下層の金属板に達するまで地鉄の表面を局所的に削る。その後は槌で打つ、あるいは圧延を施すことで表面の高さを揃える。下層の金属板は表面の金属板と色が異なるため、この部分が模様となる。積層数を増やし多段的に削り出せば、複雑な模様を形成することができる。ただ、接合から模様形成までは長い時間を要するため、本ワークショップでは純銅と銅合金

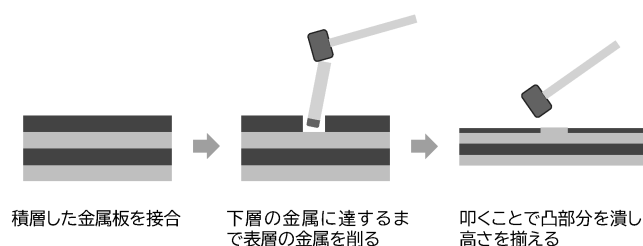


図6 木目金の製作方法。

中学生・高校生対象 指輪製作のワークショップ

岐阜大学教育学部・公開講座

対象

中学生・高校生 3名

実施日時

2024年11月16日(土) 9:30~13:00(申込み〆切:11/4)

2024年12月15日(日) 9:30~13:00(申込み〆切:12/1)

参加費

500円(保険及び材料代)

申込み方法

右のQRコード、もしくはプロフのURLより。



図7 Instagramに掲載したワークショップの開催案内。(オンラインカラー)

を接合し模様を形成済みの地鉄を予め用意し、半日程度ではほぼ手作業で指輪の製作を行っており、これまで51名が受講している。受講者の多くは金属に対して「硬い」印象を持っていたが、加工方法を工夫すれば手作業で成形できることに驚く声が多かった。また、最終工程となる研磨では、丁寧に磨き上げることで光沢を帯びることも達成感が得られやすいようだ。

本講座の受講者確保にもSNSが大きな役割を果たしている。Twitter, Instagram, Facebookによる案内を試してみたが、受講者やその保護者の利用率が高いInstagramが効果的だった。Instagramは画像を主体とする情報発信となるため、木目金のサンプルとその製作ワークショップであることが伝わりやすい画像を掲載すると、申し込みに繋がりがやすかった。Instagramに掲載している開催案内例を図7示す。

4. 日本刀の科学研究とクラウドファンディング

刀工達は種々の製法を組み合わせることによって、刀身内の強度分布を巧みに制御している。鋼の強度は作刀条件の影響を強く受けることから、鋼の強度を定量的に評価できれば、作刀条件推定の大きな手掛かりとなり得る。しかし、日本刀研究において、鋼の微細組織などの評価と比べて強度に着目した研究は極めて少ない。その要因は、内部構造が複雑な日本刀に対して、標準的な強度試験を適用することが難しいことが一因と思われる。そのため、日本刀へと鍛え上げられた鋼の強度に関わる研究は、通常よりも微小な試験片を用いることで引張特性⁽²³⁾、曲げ特性⁽²⁴⁾、衝撃特性⁽²⁵⁾を評価したもの、さらに集束イオンビーム(FIB)加工を用いて、結晶粒内からマイクロサイズの試験片を採取し引張特性などを

評価した報告⁽²⁶⁾がある程度となる。

筆者の専門は材料強度学であり、その中でも指先に載る程度の微小試験片を用いた強度評価に取り組んできた。微小試験片を用いた強度評価において最も留意すべきことは、試験片の変形機構が変化するサイズ効果が生じる可能性があることだ⁽²⁷⁾。筆者は、これらの問題に対して実験と数値解析を組み合わせることで、新たな評価指標の提案⁽²⁸⁾⁽²⁹⁾や試験条件の影響を定量化⁽³⁰⁾してきた。これらの研究知見を基盤として、強さの観点から日本刀の評価を試みようとしている。具体的には前述の製法の推定だけではなく、独特の製法を組み合わせることによって実現している刀身の強さの評価に結びつけたい。日本刀の形状や鋼の強さも時代とともに変化しており、これは武器としての日本刀の扱い方の変化に対応しているとされる。素材である鋼の強さを精緻に評価することで、各時代・各地域の刀工達が目指した日本刀の姿の一端を明らかにしていきたいと考えていた。しかし、研究資金の獲得に難航し、研究に着手できない状況が続いていた。そのような中、2021年末に所属する岐阜大学内でクラウドファンディング(CF)テーマの公募があり、CFに挑戦することにした。以下、筆者が実施したCFの概要について紹介する。

筆者は、2022年3~4月に「日本刀の製法解明へ。日本刀を作り出す鋼の強さの評価研究にご支援を。」、および2023年12月~2024年1月に「科学が紐解く、日本刀の強さの秘密:「曲がらず」の解明」のテーマで2度研究資金をCFで募り、両者とも成功している。ここでは初回のCFについて記す。筆者が実施したCFは、岐阜大学が提携しているREADYFOR株式会社が運営するCFサービスを利用した。初回のCFでは、広報活動の方針やWEB上のCF実施ページの製作等について、同社のキュレーターによるサポートを受けながら進めた。なお、CFで得た支援金は同社を介して寄付金として大学に支払われるため、通常の寄付金と同じく支援者は税制上の優遇措置を受けることができる。

CFの実施にあたって重要なことは、支援を検討してくれる可能性がある人達にその情報を届ける広報活動となる。そのため、公私問わずできるだけ多くの人達にCFへの支援を呼びかけることを求められた。この支援とは直接の寄附だけではなく、情報拡散への協力も含まれる。広報の方法は様々あるが、筆者はSNSを軸に活動を行いつつ、これまで実施してきた公開講座の受講者にメールにて支援を依頼した。なお、SNSのアカウントは研究室名義で運用していたが、CFの実施にあたってアカウント名を本名と所属に切り換えて運用している。

SNSによる広報はTwitter, Facebook, Instagramを併用したが、Twitterを主に利用することになった。これ以前は、SNSを用いた情報発信は公開講座の開催案内の掲載程度となり、SNSの運用にはやや不慣れだった。CFを開始して早々、筆者の配慮・説明不足により、Twitter上でご意見をいただくことになった。幸い、すぐに詳しい説明を行うことで解決できたが、以降も本CFに関する書き込みの中で筆者から説明が必要と判断したものについては、ほぼ対応をし

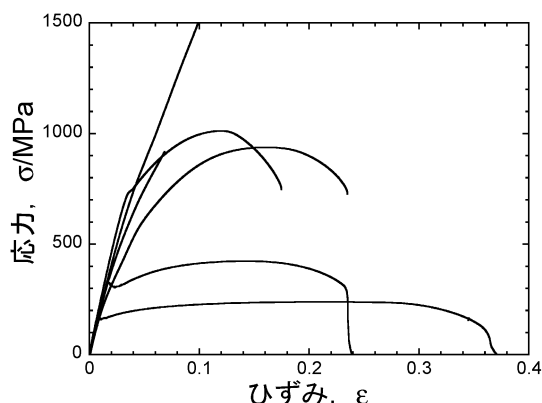


図8 いくつかの日本刀内から採取した微小引張試験片によって評価した公称応力-公称ひずみ線図。

ていった。本対応にかなりの労力を割くことになったが、オープンな場で意見を交わすことで広報的な効果が少なからずあったように思う。この対応がどの程度支援に結びついたかは不明だが、TwitterからのCF実施ページへのアクセス割合は全体の54%となり、支援数割合と支援額割合は少なくともそれぞれ31%と15%だった。FacebookやInstagramからの情報発信も行っていたが、Twitter上での対応に注力したこともあり、ほとんど効果はなかった。なお、大学WebサイトからCF実施ページへのアクセス数は10%に満たなかったことから、独自の広報活動を実施しなければ成功に至ることはなかったと思われる。初回のCFの目標金額は200万円としていたが、最終的な支援金額は2,615,000円となった。通常のCFは実施者の知人からの支援割合が多いとされるが、筆者の支援者110名の内95%が公私含めて直接の面識はない方々であった。また、直接の面識がない支援者の内、岐阜県および愛知県在住者からの支援はそれぞれ約10%であり、全国の方々から多くのご支援をいただいた。この中にはオンライン公開講座の受講者も多く、受講者の中学生が自分のお小遣いから支援をしてくれたケースもあり、多くの方々より想いの籠もった重いご支援をいただいた。

CFで得られた研究資金を用いて実施した実験結果の一例として、日本刀内から微小試験片(全長16mm、厚さ0.5mm)を採取して引張特性を評価した公称応力-公称ひずみ線図を図8に示す。現在、成果をまとめている最中のため、ひずみはクロスヘッド変位による簡易評価結果とし、いくつかの日本刀の評価結果を混在させたものであることをご容赦願いたい。刀身内の位置が僅かに異なる、あるいは製法が異なることで引張特性が大きく変化することを明瞭に確認できる。現在は、2回目のCFで支援いただいた寄付金を用いて、本引張特性を用いた日本刀の構造解析の初期検討にも取り組んでいる。なお、分析に用いている日本刀は、現代の刀工から提供を受けたものや様々な事情で切断されてしまった日本刀の断片から試験片を採取している。本誌読者の皆様におかれましては、もし過去の研究などで切断されてしまった日本刀がお手元に残っており、今後利用の見込みがない場合

には、本研究への提供をご検討いただけますと幸いです。

4. 最 後 に

学術的な知見をほとんど含まない散文にお付き合いいただいたことを深謝いたします。これらの活動は、以下に記す多くの皆様のお力添えにより実施した。

日本刀に関する引張試験は筆者が博士研究員として在籍していた国立研究開発法人量子科学技術研究開発機構(旧・独立行政法人日本原子力研究開発機構)で実施した。六ヶ所フュージョンエネルギー研究所の野澤貴史グループリーダーおよび加藤太一朗主幹技術員に御礼申し上げます。また、試験片加工などはCF「日本刀の製法解明へ。日本刀を作り出す鋼の強さの評価研究にご支援を。」による寄付金を用いて実施した。支援者の皆様に御礼申し上げます。

木目金については、岐阜大学の2021年度全学共通教育科目「学びをデザインする」の受講者である工学部化学・生命工学科 藤原奈生さんの協力を得て製作条件の最適化を実施した。失敗を重ねながらも根気強く取り組んでくれた熱意は、目を見張るものがあった。藤原さんの大きな協力に心より感謝します。

CFは岐阜大学学術研究・産学官連携推進本部企画・研究支援部門URAの大岡敦子特任助教に協力いただきながら進めた。学内にCFのノウハウがない時期に最後までお力添えをいただいたことに御礼申し上げます。

最後に、日本刀の鑑賞方法については、静岡県三島市に所在する公益社団法人佐野美術館が開講する日本刀初心者講座を通じて学ぶ機会をいただいた。初級コースの講師である住麻紀先生、中級コースの講師であり同館元理事長であられた故渡邊妙子先生と学芸員の志田理子先生、そして佐野美術館のスタッフの皆様にご心より感謝申し上げます。筆者が日本刀に深い関心を抱く契機となったのは、2019年2月に同館で開催された「日本刀をもってみよう」というイベントに運良くキャンセル枠で参加でき、渡邊先生のお話を伺う機会に恵まれたためである。2024年2月にご逝去された渡邊妙子先生のご冥福を心よりお祈り申し上げるとともに、刀剣の魅力と奥深さを教えてくださいました渡邊妙子先生に改めて深く深く感謝申し上げます。

文 献

- (1) https://www.mext.go.jp/content/20230120-mxt_kyoiku02-100002604_02.pdf (2024年10月25日閲覧)
- (2) 渡邊妙子, 住 麻紀: 日本刀の教科書, 東京堂出版, (2014), 95.
- (3) 渡邊妙子, 住 麻紀: 日本刀の教科書, 東京堂出版, (2014), 98.
- (4) 国立文化財機構所蔵品統合検索システム「太刀 銘 三条(名物 三日月宗近)」(https://colbase.nich.go.jp/collection_items/tnm/F-20103)
- (5) 小笠原信夫, 佐藤貫一: 復刻版 日本刀の鑑賞基礎知識, 雄山閣, (2019).
- (6) 酒井元樹: 刀剣鑑賞の歴史, 東京国立博物館, (2017), 40.

- (23) M. Okayasu, H. Sakai and T. Tanaka: J. Mater. Sci. Eng., **04** (2015), 1000162.
- (24) M. Yaso, *et al.*: J. Alloy. Compd., **577** (2013), S690-S694.
- (25) 佐々木直彦, 他: 鉄と鋼, **86**(2000), 45-50.
- (26) 郭 光植, 他: 鉄と鋼, **110**(2024), 160-170.
- (27) 幸野 豊: プラズマ・核融合学会誌, **76**(2000), 368-375.
- (28) T. Nakata, *et al.*: Mater. Sci. Eng.: A, **666**(2016), 54-60.
- (29) T. Nakata, *et al.*: Fusion Engineering and Design, **200**(2024), 114143.
- (30) T. Nakata, *et al.*: Expe. Mech., **57**(2017), 487-494.



★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★

2009年 9月 室蘭工業大学大学院工学研究科博士課程
修了

2009年10月 日本原子力研究開発機構核融合炉構造材
料開発グループ 博士研究員，2012年
10月より任期付研究員

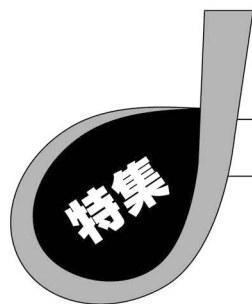
2013年 2月 株式会社神戸製鋼所材料研究所

2015年 4月 岡山大学大学院自然科学研究科 助教

2017年10月より現職

専門分野：材料強度学，微小試験片試験技術

★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★



兵庫出石・辰鼓楼機械時計 科学調査プロジェクト

永瀬丈嗣¹ 井関崇博² 辻井浩一³ 中井淳史⁴ 井上 毅⁵ 奥田孝一⁶
兼吉高宏⁷ 塩川太郎⁸ 中嶋勝己⁹ 早稲田一嘉¹⁰ 徳網 靖¹¹

1. 緒 言

兵庫県豊岡市は兵庫県北部の日本海側に位置し、兵庫県北部地域にあたる但馬地域の中心都市であり、特別天然記念物に指定されているコウノトリとの共生を目指す町ぐるみの取り組みという世界でも類のない先駆的な試みが行われていることで有名である。豊岡市は多くの観光資源に恵まれ、代表的な観光地として、大自然を体験できる玄武洞や神鍋高原、温泉地として城崎温泉、城下町として出石などが知られている。

出石の豊岡市出石伝統的建造物群保存地区⁽¹⁾にある時計台である辰鼓楼は、伝統的建造物群保存地区のシンボルの一つとも言える重要な建造物であり、現在では4代目の電波式時計が正確な時刻を町民・観光客に知らせる役割を担っている。辰鼓楼に設置されていた機械式大時計（以後、機械時計）について、初号機は出石藩の医師の息子として生まれ明治になり出石町に医院を開業した池口忠恕⁽²⁾が寄贈して辰鼓楼に設置され、1881年9月8日から稼働したことが分かっている。時計台・機械時計としては、札幌の時計台に設置されたアメリカ製（ハワード社）の機械時計が1881年8月12日から稼働しており、これが国内最古であると認識されている。出石辰鼓楼の機械時計・初号機（以後、出石初号機）の外観図を図1⁽³⁾に示す。出石初号機は、札幌時計台の機械時計や同志社大学彰栄館・アメリカ製（セス・トーマス社）のものと外観が大きく異なり、二つの板に支柱が立てられ支柱に歯車が設

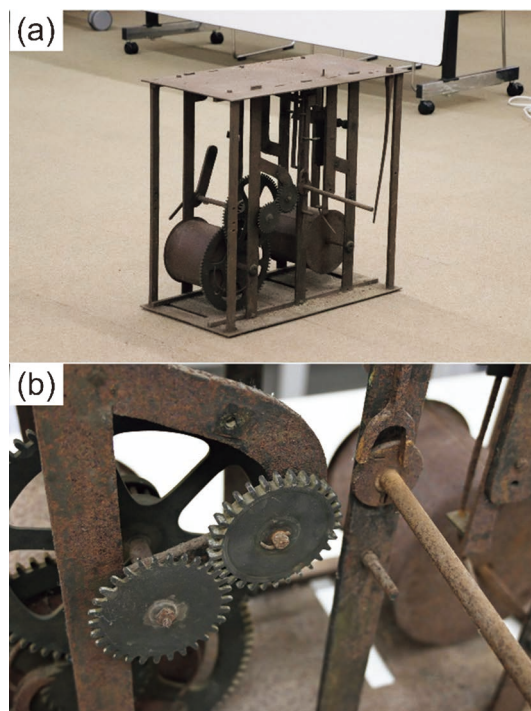


図1 出石機械時計・初号機の外観写真(a)と現存する歯車部分の拡大写真(b)⁽³⁾。

置される形式となっている。出石初号機は、これまで wikipedia⁽⁴⁾などでオランダ製あるいは日本製など諸説があると記載されてきたが、いずれもその根拠が明確でなかった。出石初号機の製造地同定に関して、地元の方から「金属

¹ 兵庫県立大学大学院工学研究科；教授（〒671-2280 姫路市書写2167） ² 兵庫県立大学大学院環境人間学部；教授

³ 兵庫県立大学社会価値創造機構；コーディネーター ⁴ 兵庫県立大学大学院地域資源マネジメント研究科；教授

⁵ 明石市立天文科学館；館長 ⁶ 兵庫県立但馬技術大学校；校長 ⁷ 兵庫県立工業技術センター；次長 ⁸ 芸術文化観光専門職大学；教授

⁹ 新産業創造研究機構(NIRO)；統括コーディネーター ¹⁰ 神戸市立工業高等専門学校；教授 ¹¹ 但馬国出石観光協会；理事長

Scientific Research Projects for Hyogo-Izushi-Shinkoro Old Tower Clock; Takeshi Nagase¹, Takahiro Iseki², Koichi Tsujii³, Atsushi Nakai⁴, Takashi Inoue⁵, Koichi Okuda⁶, Takahiro Kaneyoshi⁷, Taro Shiokawa⁸, Katsumi Nakashima⁹, Kazuyoshi Waseda¹⁰ and Kiyoshi Tokunami¹¹ ⁽¹⁾Graduate school of Engineering, University of Hyogo, Himeji. ⁽²⁾School of Human Science and Environment, University of Hyogo, Himeji. ⁽³⁾Institute for Innovation and Social Value Creation, University of Hyogo, Himeji. ⁽⁴⁾Graduate School of Regional Resource Management, University of Hyogo, Toyooka. ⁽⁵⁾Akashi Municipal Planetarium, Akashi. ⁽⁶⁾Hyogo Prefectural Tajima Technical Institute, Toyooka. ⁽⁷⁾Hyogo Prefectural Institute of Technology, Kobe. ⁽⁸⁾Professional College of Arts and Tourism, Toyooka. ⁽⁹⁾New Industry Research Organization, Kobe. ⁽¹⁰⁾Kobe City College of Technology, Kobe. ⁽¹¹⁾Tajimanokuni Izushi Tourist Association, Toyooka.)

Keywords: old machine clock, cultural property, Izushi, Hyogo prefecture, scientific analysis

2024年11月11日受理[doi:10.2320/materia.64.179]

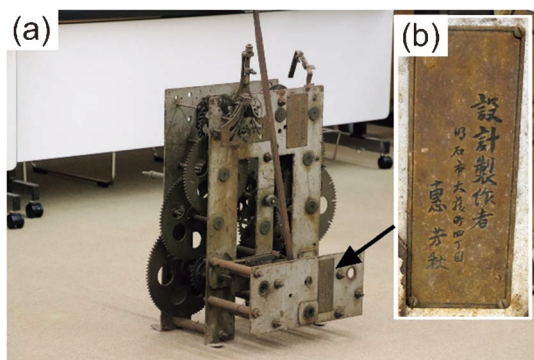


図2 出石機械時計・二号機の外観写真(a)と銘板拡大図(b)⁽³⁾。

材料の分析などから、国内製か海外製かの特定ができないかと相談」が豊岡市出石振興局にあり、この問い合わせが兵庫県立大学産学連携本部(2024.04より社会価値創造機構)によせられたことが兵庫出石・辰鼓楼機械時計科学調査プロジェクトの始まりと言える。2023年からの予備調査と出石から兵庫県立大学姫路工学キャンパス(姫路)への出石初号機および図2⁽³⁾に示す出石辰鼓楼の機械時計・二号機(以後、出石二号機)の輸送、2024年6月10日のプロジェクトキックオフミーティングを経て、出石初号機の製造地解明にむけたプロジェクトが始動している。

本論文では、材料科学の観点からみた材料科学×人文科学×情報発信の組み合わせからなる異分野・多分野融合型文化財調査の新しい試み、明治期の機械・金属文化財の調査法として材料科学の新たな取り組みの観点から積層造形・3Dプリンターの適用を中心に紹介する。

2. 材料科学×人文科学×情報発信を組み合わせた新たな機械・金属調査法

調査開始前の2023年5月の時点で、出石初号機の製造地同定に関する情報として明らかになっていたのは、下記の事項である：(1)出石初号機の形状は、札幌市時計台の機械時計(ハワード社)や同志社大学彰栄館(セス・トーマス社)と大きく異なる。(2)部品の欠損が激しく、時計としての動作機構、すなわち時を刻む機構が残されていない。(3)製造地の特定につながる資料や写真などが残されていない。

一般的な考えであれば、特徴(3)に関連する資料調査などの「人文科学」的な調査、あるいは特徴(2)に関連する歯車・機構学の観点から「機械工学」の専門家から調査がはじまると考えられるが、いずれも出石初号機の製造地同定に有効ではなく、金属分析の点から調査の検討がはじまったことが、材料科学を中心として開始された兵庫出石・辰鼓楼機械時計科学調査プロジェクトの特徴と言える。

文化財調査は研究用金属材料の調査とは異なる点が多く存在し、その代表は下記にまとめられる：(A)文化財の持つ価値は、物としての価値だけではない。文化財は、精神的・物質的な豊かさの基盤となる地域や国の歴史や文化そのものであるという価値があることを認識する必要がある。(B)文化

財に破損の危険性がある場合は持ち出せない場合がある。文化財に破損の危険性が無くても、地域や国の歴史や文化そのものであるため、移動や接触すら禁じられる場合がある。(C)文化財の調査では、精度よりも非破壊分析が選択される傾向が高い。破壊分析の適用は容易ではない。(D)文化財の調査が、専門家のみが特定の研究機関にて、一般市民に完全非公開で調査を実施することは望まれない。文化財の持ち出しや調査には、文化財の所有者および市民の同意のもと実施する必要がある。市民参加型の文化財調査が望ましい。

兵庫出石・辰鼓楼機械時計科学調査プロジェクトでは、上述の(A)–(D)における文化財調査の特徴を踏まえ、単なる材料科学的な最先端技術の導入による調査ではなく、機械工学・機構学や人文科学との組み合わせによる多分野融合、および市民参加型の文化財調査実現のための積極的な情報公開とアウトリーチ活動を組み合わせた新たな文化財調査法、あえて名称をつけるのであれば「フルオープン・ネットワーク分析」あるいは「出石モデル」ともいうべき新たな文化財調査手法の構築を試みた。「フルオープン・ネットワーク分析」「出石モデル」の特徴は下記にまとめられる：(a)調査により得られた情報は、WEBサイトに公開を原則とする。

WEB公開を行うことで、各地の様々な分野の専門家が瞬時データと共有できるだけでなく、市民の方にリアルタイムで情報を伝えることで、市民参加型文化財調査を実現する。(b)「大衆の科学理解」における情報欠如モデル⁽⁴⁾のような、情報を持つ専門家と情報を持たない非専門家の間に分断が出来る状態を避けるため、アウトリーチ活動に重点をおき、単なる調査だけではなく、教育を通じて出石機械時計の価値を伝える活用を行いながら市民参加型文化財調査を実現する。(c)3DデジタルデータをWEB公開と3Dプリンターを併用し、文化財を調査のために機械時計を現地から外部に持ち出した地域の市民の方、さらには調査に携わる各地の専門家が、実機が目前に無くてもデジタルデータを利用し、必要であれば3Dプリンターで造形物を利用できる、現実とデジタルデータが両立するデジタルツインを実現する。

兵庫出石・辰鼓楼機械時計科学調査プロジェクトでは、材料科学×人文科学×情報発信を組み合わせた調査・アウトリーチ活動を実現する体制として、豊岡市、但馬国出石観光協会、兵庫県立大学、芸術文化観光専門職大学、神戸市立工業高等専門学校、兵庫県立工業技術センター、但馬技術大学、明石市立天文学館、公益財団法人新産業創造研究機構(NIRO)が参画した、出石・豊岡・姫路・明石・神戸をクラウドでつなぐ体制を構築し、調査を進めている。

3. 調査結果(2024年10月時点)

兵庫出石・辰鼓楼機械時計科学調査プロジェクトでは、WEBサイトに情報を公開することでデジタルツインを実現するとともに専門家・市民が情報を共有するだけでなく、アウトリーチ活動を通じて専門家・市民が異分野の知見や機械時計の価値を学ぶ仕組みが組み込まれている。文化財を後世



図3 プロジェクトの中核をなすWEBサイト⁽³⁾。

に伝えていく次世代人材・学生の教育とWEBサイトが連動していることも特徴である。図3⁽³⁾に、プロジェクトの中核をなすWEBサイトのトップページを示す。

豊岡市は、出石機械時計の所有者である。但馬國出石観光協会は、文化財の保存と伝承だけではなく、観光資源としての活用・紹介を通じた観光文化の向上と地域の活性化を担っている。

兵庫県立大学大学院工学研究科は、全体のプロジェクトの取りまとめ、遠隔電子顕微鏡法であるNetwork tele-microscopyを利用した金属分析による製造地同定の検討とアウトリーチ活動を行っている。兵庫県立大学環境人間学部は、情報発信と情報共有の中核を担う図3⁽³⁾に示すWEBサイトの構築を行っている。単なるWEBサイトの構築だけではなく、「ときあかせ」といった専門家・市民がともにこのプロジェクトに興味をいだくキャッチフレーズの検討、専門家向けの調査結果データベースである「データアーカイブ」と専門家・市民向けのサイエンスコミュニケーションのための「記事」などの仕組みを組み込んでいる。リアルタイムで調査状況を把握できる「分析日誌」とアウトリーチ活動を記載する「アウトリーチ活動」から、日々の調査・アウトリーチ活動の状況を把握することができ、専門家・市民がともに状況を把握することができる。兵庫県立大学大学院地域資源マネジメント研究科は、文化財調査・人文科学的調査を行っている。出石初号機は、物としての価値だけではなく、明治初期における不定時報から定時法への変更という「時の概念」の変革の歴史と文化の象徴、特に但馬地域・日本海側・我が国における東京・大阪以外の地方都市での「時の概念」の変革の象徴として、人文科学的観点からの価値も極めて高いと評価される。兵庫県立大学社会価値創造機構は、県内各地の参画機関の連絡・事務取りまとめを行っている。

芸術文化観光専門職大学では、科学的調査よりも出石機械時計の存在を周知させるための宣伝活動、単純な宣伝活動ではなく3Dプリンターで作製されたレプリカを利用した科学調査と連動したアウトリーチ活動、さらには文化財調査を活かした観光振興・地域振興について検討している。まずは次世代を担う若者すなわち機械時計を次世代に継承していくべき若者に興味を持ってもらうこと、そして多くの方からの情



図4 芸術文化観光専門職大学で学生により作成されたポスターの一例。

報提供を促すという目的で、芸術文化観光専門職大学のゼミ活動を通して学生によるポスター作成を試みている。図4にポスターの一例を示す。

兵庫県立但馬技術高等学校では、3Dデータの構築を行っている。図5⁽³⁾に出石初号機・出石二号機の3Dデータ復元像を示す。3Dデータ(eprtファイル)⁽³⁾はWEB公開されている。

兵庫県立工業技術センターでは、WEB公開された写真データから3Dデータ(stlファイル)⁽³⁾を構築・WEB公開すると同時に、樹脂プリンターを利用した樹脂レプリカ、砂型プリンターと鋳造法を利用した金属レプリカの作製を行っている⁽⁶⁾。図6⁽³⁾⁽⁶⁾に、WEBに掲載された写真データから構築した出石初号機の歯車部品の3Dデータ・3Dイメージと、3Dプリンターにより作製したレプリカを示す。3Dプリンターによるレプリカ作製(実物が手元になくても部品を造形できるデジタルツインの実現)は、①歯車の歯の形状が一つ一つ異なる手作業で作製された特徴の反映、②機構部検証においてレプリカを利用すれば駆動部の破損防止が可能、③電子顕微鏡などの破壊分析において実際にどのような破損もたらされるか実証できる、④アウトリーチ活動・教育においてデジタルだけではなくアナログ効果が利用できるなど数多い。兵庫県立工業技術センターの試みは、文化調査における3Dプリンターおよびその周辺技術の開発の先駆例と言える。

新産業創造研究機構(NIRO)では、機械・機構学の観点か

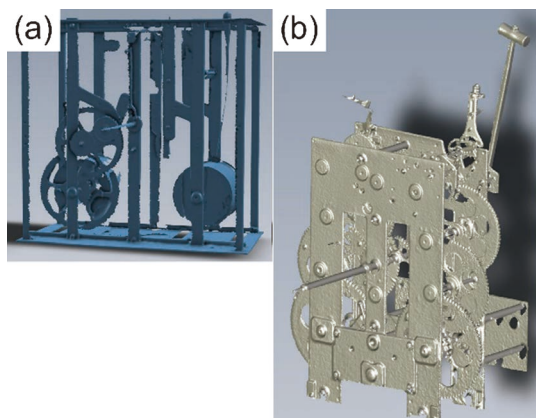


図5 但馬技術大学校で構築された3Dイメージ。(a)初号機, (b)二号機⁽³⁾。

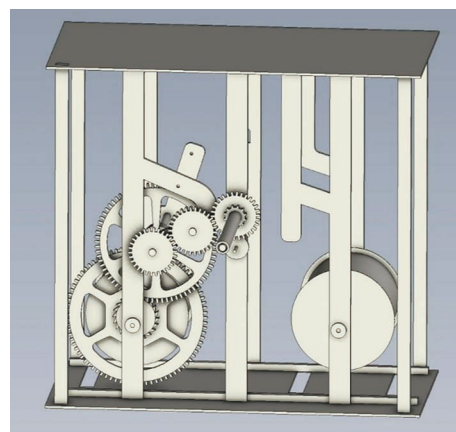


図7 新産業創造研究機構(NIRO)にて構築された出石初号機の3Dイメージ⁽³⁾⁽⁶⁾。

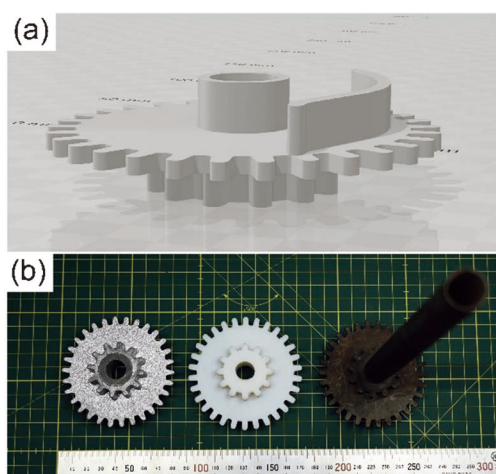


図6 兵庫県立工業技術センターにて機械部品の3Dイメージと3Dプリンターレプリカ。(a)3Dイメージ, (b)左は金属レプリカ, 中央は樹脂レプリカ, 右は本物⁽³⁾⁽⁶⁾。

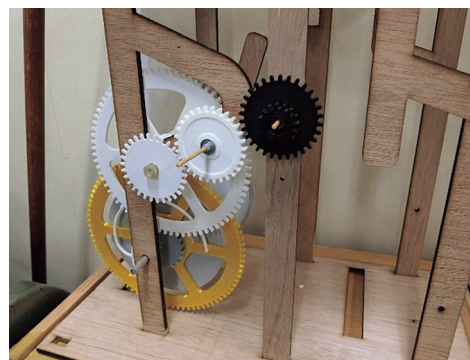


図8 神戸市立工業高等専門学校にて作製されている出石初号機復元モデル⁽⁴⁾。

ら初号機の検証を行っている。図7⁽³⁾に、時計の機構、歯車の機構学の観点から構築された3Dイメージ(stl, step, f3zファイル)⁽³⁾を示す。機構学の観点からみた出石初号機の特徴は下記にまとめられる：出石初号機の形は、フランスのモービエクロックのように、上下の板に支柱が立てられ、この支柱に歯車が配置されている単純なものである。上下の鉄板は、くさびで支柱に固定されている。上側の板に穴はほとんど開いていないことから、時を刻む機構は、天符式ではなく振り子式と考えられる。ガンギ車や雪輪などの時計機構の判別において重要な部品が欠損している。和時計における鐘打ち棒の駆動バネ(シュモクバネ)のような部品が残っている一方で、ランタンピニオンが利用されている点は一般的な和時計とは異なる。和時計は多くの歯車が鉄系金属材料で作製されていると考えられるが、出石初号機の歯車は磁石につかないことから、黄銅・青銅製の可能性が高い。歯車の形状は、インボリュート歯車ではない。

神戸市立工業高等専門学校では、新産業創造研究機構(NIRO)にて構築された3Dデータをもとにした3D復元模型の作製が行われている。復元模型は、専攻科の学生が中心



図9 2024年に明石立天文科学館で開催された特別展「ときあかせ！辰鼓楼・機械時計の謎」のポスター⁽⁷⁾。

兵庫出石・辰鼓楼機械時計科学調査プロジェクトでは、上述のように、兵庫県各地の様々な分野の専門家と市民が、クラウド・WEBを介してつながり、材料科学×人文科学×情報発信の融合による出石初号機の製造地解明を行っている。加えて、アウトリーチ活動の一環としての展示・講演だけではなく、大学・高専における授業や学生による研究活動、さらには兵庫県立明石高等学校・STEAM探究科の学生によるSTEAM教育の一環としての学びなど、市民参加型の調査が実施されていることも大きな特徴と言える。

機械学習を用いた点欠陥解析と 表面物性予測

清 原 慎*

1. 研究背景

実用に供される材料中には、無数の格子欠陥が含まれている。格子欠陥とは、母相(以降バルクと呼称)の周期性に従わない領域であり、点欠陥に代表されるように原子一つレベルのものから、表面のように nm~m スケールのものでさまざまな種類が存在する。それらに共通する特徴として、バルクとは異なる原子・電子状態を有することが挙げられる。この特異的な原子・電子状態は、時にバルクが持ちえない機能を材料に付与する。

本稿では、筆者の最新の結果である、1. アモルファス中の点欠陥の解析と 2. 酸化物表面の物性予測に関する研究を紹介する。

2. アモルファス中の点欠陥の解析

(1) 研究背景

酸化物材料において、酸素空孔は非常にありふれた点欠陥であり、材料の機能に大きな影響を与えることが知られている。多くの酸化物の中性酸素空孔では、電子が空孔に局在した電子構造をとることが知られている⁽¹⁾⁻⁽¹³⁾。しかし、いくつかの酸化物においては結晶構造や構成するカチオンに由来して電子が結晶全体に広がったような電子状態をとるという報告も存在する⁽⁵⁾⁽⁶⁾⁽¹¹⁾。このように結晶に対してはこれまで多くの研究が行われてきており、理解もかなり進んでいる。一方で、電子材料や光学材料として非常に重要である酸化物アモルファス中の酸素空孔に関する研究は数が限られている。しかし、これらの限られた研究によりアモルファス中

では酸素空孔が特異的なふるまいをすることが示唆されている。例えば、アモルファス Al_2O_3 中の酸素空孔には、最安定状態と準安定状態が存在し、これらの遷移エネルギーが非常に小さいことがわかっている⁽¹⁴⁾。

本研究では、第一原理計算と機械学習を用いて、アモルファス SnO_2 中の酸素空孔の解析を行った。結晶のスズ酸化物では $\text{SnO}(\text{Sn}^{+2})$ と $\text{SnO}_2(\text{Sn}^{+4})$ が一般的であり、 SnO 中の Sn は Sn 5p 軌道に由来する孤立電子対(lone-pair)を有する。 SnO_2 に中性酸素空孔を導入した場合、残された 2 つの電子が Sn まわりに局在して lone-pair 構造をとることが期待されるが、そのようなふるまいは確認されていない⁽²⁾。

(2) アモルファス SnO_2 の酸素空孔の第一原理計算

108個のスズ原子、216の酸素原子を含むセルに対して、経験的なポテンシャルを用いた分子動力学計算を行った。急冷後の構造モデルを第一原理計算により構造緩和を行った。結晶の $\text{SnO} \cdot \text{SnO}_2$ の Sn の配位数は、それぞれ 4 個と 6 個である。一方で、今回構築したアモルファス SnO_2 の Sn 配位数は、5 個(5.5%)、6 個(80.5%)、7 個(14%)であった。

構築したアモルファス SnO_2 モデル内の 216 個のすべての酸素サイトに対して、酸素空孔を導入し第一原理計算による構造緩和計算を行った。詳細な計算条件は文献(15)を参照されたい。計算が収束した 112 サイトに対して(結果的に古典的な取り扱いと量子力学的な取り扱いで構造が大きく変わらないサイトに対して)、electron localization function⁽¹⁶⁾を解析した結果の中で 2 つの典型的な電子状態を図 1(a, b)に示す。酸素空孔の有無にかかわらず酸素には電子が局在しているが、酸素空孔を導入したことにより、Sn に電子が異方的に局在していることがわかる(図 1(a)白矢印)。この異方

* 東北大学金属材料研究所; 講師(〒980-0814 仙台市青葉区片平 2-1-1)

Point Defects Analysis and Surface Property Prediction by Machine Learning; Shin Kiyohara (Institute for Materials Research, Tohoku University, Sendai)

Keywords: point defects, amorphous, surface, first-principles calculation, machine learning

2024年12月2日受理[doi:10.2320/materia.64.184]

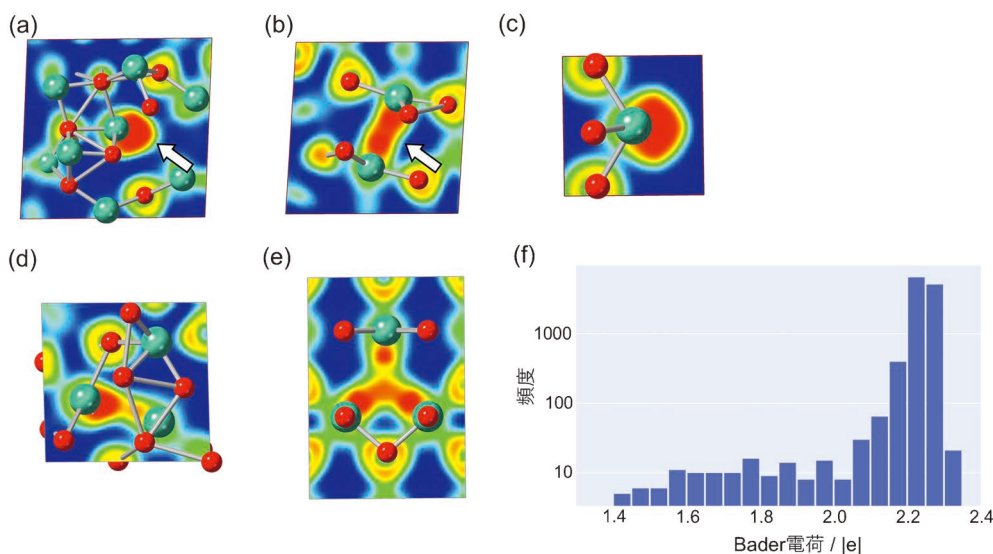


図1 酸素空孔周辺の Electron localization function と Bader 電荷分布. (a) アモルファス SnO₂ における lone-pair 構造, (b) アモルファス SnO₂ における Sn-Sn の dimer 構造, (c) 結晶 SnO における lone-pair 構造, (d) 結晶 SnO₂ における酸素空孔, (e) アモルファス SnO₂ における lone-pair 構造と dimer 構造の中間構造. 緑と赤の球はそれぞれ Sn 原子と O 原子を示す. 等値面は0.65に設定されている. (f) アモルファス SnO₂ の112酸素空孔モデルにおける Sn の Bader 電荷分布. (オンラインカラー)

的な局在状態は SnO 中の lone-pair 電子構造に非常に似ていることがわかる(図1(c)). また, 図1(b)のように2つの Sn を橋渡しするように電子が局在している状態も見られた. このような dimer 構造はアモルファス SiO₂ や GeO₂ でも報告されている⁽¹⁷⁾⁻⁽¹⁹⁾. 一方で, 酸素空孔を導入した結晶 SnO₂ では3つの Sn 原子にまたがるように電子が局在する振る舞いが見られた(図1(e)).

続いて, 局在した電子量を定量化するために Bader 電荷⁽²⁰⁾⁻⁽²³⁾を計算した(図1(f)). 酸素空孔から遠い Sn の Bader 電荷が 2.1-2.3|e| である一方, lone-pair 構造を有している Sn の Bader 電荷は 1.4|e| であった. また dimer 構造を有する Sn の Bader 電荷は 1.8|e| であった. 一方, 図1(f)から 1.6|e| ほどの Bader 電荷を有する Sn があることがわかる. この Sn まわりの電子構造を図1(e)に示す. この電子構造は, lone-pair と dimer 構造の中間のような電子構造をしていることがわかる. 以上のことから, Bader 電荷が電子状態の識別するうえで有効な指標であることがわかった.

(3) 機械学習を用いた原子構造-電子構造相関性解析

2.(2)節での解析により Bader 電荷と電子構造には相関性があることがわかった. 続いて, 機械学習を用いて原子構造-電子構造相関性解析を行った.

原子構造を記述子化(ベクトル化)するために, ここでは smooth overlap of atom positions(SOAP)⁽²⁴⁾を用いた. 結晶 SnO・SnO₂, 酸素空孔を導入したアモルファス SnO₂ の Sn 周りの原子構造から SOAP を計算し, さらに t-SNE⁽²⁵⁾により 2次元に次元圧縮した. 詳細なプロセスは文献(15)を参照されたい.

図2(a)に可視化した SOAP と Bader 電荷を示す. この図から Bader 電荷が小さな点(小さな Bader 電荷をもつ Sn 周

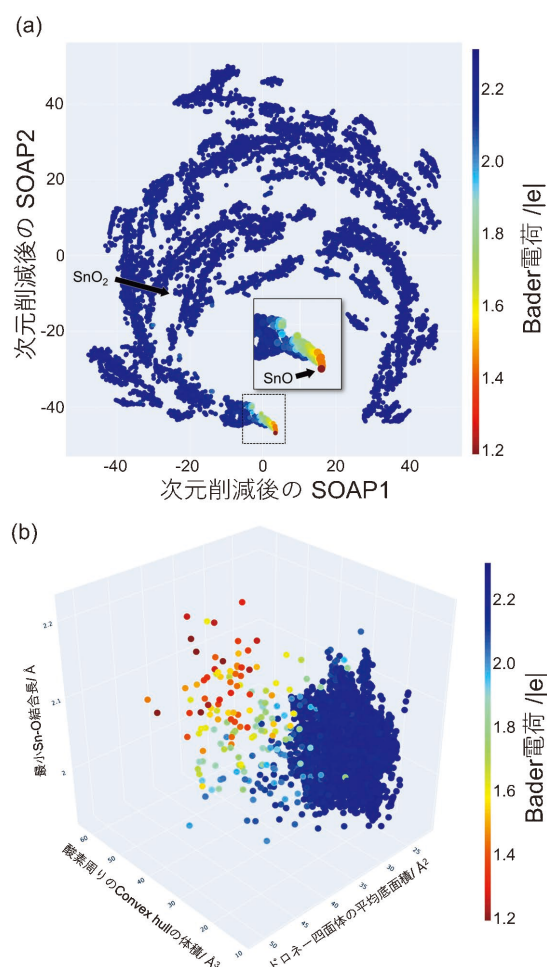


図2 原子構造-Bader 電荷の分布. (a) 次元削減後の SOAP と Bader 電荷の分布 (b) 3種類の構造記述子と Bader 電荷の分布. (オンラインカラー)

りの原子構造)が同じ場所に集まっていることがわかる。さらに、SnO から遠ざかるにつれて、点の色は赤から青へと徐々に変化しており、Bader 電荷が大きくなっている。この特徴は、局所的な原子構造を記述する SOAP が、Bader 電荷とよく相関していることを示している。

SOAP が Bader 電荷と相関していることから、局所的な原子構造と Bader 電荷が相関していると考えられる。しかし、どのような局所構造、例えば結合長と相関しているかを SOAP から直接解析することは困難である。そこで、解釈しやすい原子構造情報を用いてランダムフォレスト回帰を行い、Bader 電荷がどのような原子構造情報と相関しているかを解析した。その結果、「酸素周りの Convex hull の体積」、「最小 Sn-O 結合長」、「ドロネー四面体の平均底面積」が Bader 電荷と相関していることが分かった(図 2(b))。「酸素周りの Convex hull の体積」と「ドロネー四面体の平均底面積」が大きいほど Bader 電荷が小さいということから、Sn まわりの空間が大きいと電子が局在しやすいと解釈することができる。また、電子が局在すると Sn-O の距離が大きくなるが、これはまさに「最小 Sn-O 結合長」として現れている。

3. 酸化物表面の物性予測

(1) 研究背景

非金属固体のイオン化ポテンシャル(IP)と電子親和力(EA)は、それぞれ真空準位を基準とした価電子帯最大(VBM)と伝導帯最小(CBM)のエネルギー準位として定義される。これらは、電子の放出や受容のしやすさだけでなく、物質の相対的なバンド位置に関する情報も示している。光触媒、光起電力、その他あらゆるヘテロ構造電子・光電子デバイスを含む表面やヘテロ界面を利用した材料やデバイスの理解、設計、開発において、このようなバンドの相対的な位置関係は極めて重要な役割を担っている⁽²⁶⁾⁻⁽³¹⁾。

現在では、第一原理計算により高精度に IP・EA が定量化可能である。しかし、IP と EA の正確なハイスループットな計算は、膨大な計算コストを必要とする。この理由として以下の 2 点が挙げられる。標準的な交換相関汎関数を用いた密度汎関数計算では、価電子帯上端(VBM)や伝導帯下端(CBM)の位置に大きな誤差が生じるため、ハイブリッド汎関数や多体摂動論に基づく GW 近似など、より精巧で計算量の多いアプローチを用いる必要がある⁽³²⁾⁻⁽³⁹⁾。さらに、表面はミラー指数であらわされるように様々な自由度、結果として様々な原子構造を有する。そこで本研究では、機械学習を用いて様々な酸化物の表面における IP と EA を予測する手法を構築した。

(2) 酸化物表面のハイスループット計算

完全に占有されている、もしくは空の状態である原子軌道から構成された127の非金属二元系酸化物を対象として(41種類の元素が含まれる)、日沼らが開発した表面作成手法⁽⁴⁰⁾を用いて2,195種類の非極性表面を構築した。これらの表面

スラブモデルに対して第一原理計算を用いて構造緩和計算を行った。さらにそれぞれに対応するバルク構造に対して、比較的計算コストかつバンドギャップが正確に計算可能な Non-self-consistent hybrid functional 法⁽⁴¹⁾⁽⁴²⁾を用いて VBM・CBM を計算した。最後に、以下の式に従い、IP と EA を算出した。

$$IP = (\epsilon_{\text{vac}}^{\text{surface}} - \epsilon_{\text{ref}}^{\text{surface, far}}) - (\epsilon_{\text{VBM}}^{\text{bulk}} - \epsilon_{\text{ref}}^{\text{bulk}}) \quad (1)$$

$$EA = (\epsilon_{\text{vac}}^{\text{surface}} - \epsilon_{\text{ref}}^{\text{surface, far}}) - (\epsilon_{\text{CBM}}^{\text{bulk}} - \epsilon_{\text{ref}}^{\text{bulk}}) \quad (2)$$

$\epsilon_{\text{vac}}^{\text{surface}}$ と $\epsilon_{\text{ref}}^{\text{surface, far}}$ はそれぞれ真空レベルと表面から遠いバルク領域の参照静電レベルである。 $\epsilon_{\text{VBM}}^{\text{bulk}}$, $\epsilon_{\text{CBM}}^{\text{bulk}}$, $\epsilon_{\text{ref}}^{\text{bulk}}$ はそれぞれバルクの VBM, CBM, 参照静電レベルである。スラブモデル・バルクモデルともに参照レベルには酸素のコアポテンシャルを使用した。詳細な計算条件は文献(43)を参照されたい。

対象とした2,195個の表面の IP・EA を図 3(a)に占めす。図 3(a)の横軸は構成するカチオンを表しており、同じカチオンであっても、いくつかの多形の様々な表面を含んでいる。IP と EA の値はカチオンの種類に大きく依存するが、結晶と表面の原子構造が多様であるため、平均値から ± 1 eV のずれが生じる。図 3(b)に実験値と本研究の計算値を比較した結果を示す。実験的な IP と EA は、表面の詳細な原子構造や実験条件にかなり敏感であるが、実験と理論との間には、全体として十分な一致が認められる。これだけ膨大かつ正確な表面のデータベースは本研究が世界初である。

(3) ニューラルネットワークを用いた IP・EA の予測

構築したデータベースを基に、ニューラルネットワークによる学習を行った。原子情報の記述子には、2.(3)節と同様に SOAP を使用した。対象とする系に複数の元素が含まれる場合、一般的にはそれぞれの元素のペアで SOAP (ここでは element-pair SOAP と呼ぶ)を計算し、それらの連結を考える。しかし本研究では、41種類の元素を考慮するため、SOAP は数万次元に達する。記述子の次元数を減らし、過学習を防ぐため、SOAP を計算する際に40種のカチオンを同一種として扱い、酸素をアニオンとして扱った結果、図 4(a)の上部に示すように、カチオン-カチオン、カチオン-アニオン、アニオン-アニオンの組み合わせの3組の SOAP (以下、cation-anion-pair SOAP と呼ぶ)を考慮した。スラブ内の各原子サイトについて cation-anion-pair SOAP を計算後、それらの平均をニューラルネットワークの入力とした(以降 Simple-NN と呼称する)。この際、表面近傍の情報が IP と EA にとって重要であると仮定し、日沼らにより開発された手法⁽⁴⁴⁾により特定した表面原子の SOAP の平均を用いた。

結果、IP・EA 共に高精度に予測することができた(IP: $R^2: 0.90$, RMSE: 0.31 eV, MAE: 0.22 eV, EA: $R^2: 0.90$, RMSE: 0.32 eV, MAE: 0.23 eV)。図 3(a)に示すように、構成カチオンにより IP・EA は大きく変化する。この誤差は同じ物質内の異なる面方位の IP・EA 差を大まかに判断可能な精度である。それぞれの cation-anion-pair SOAP を

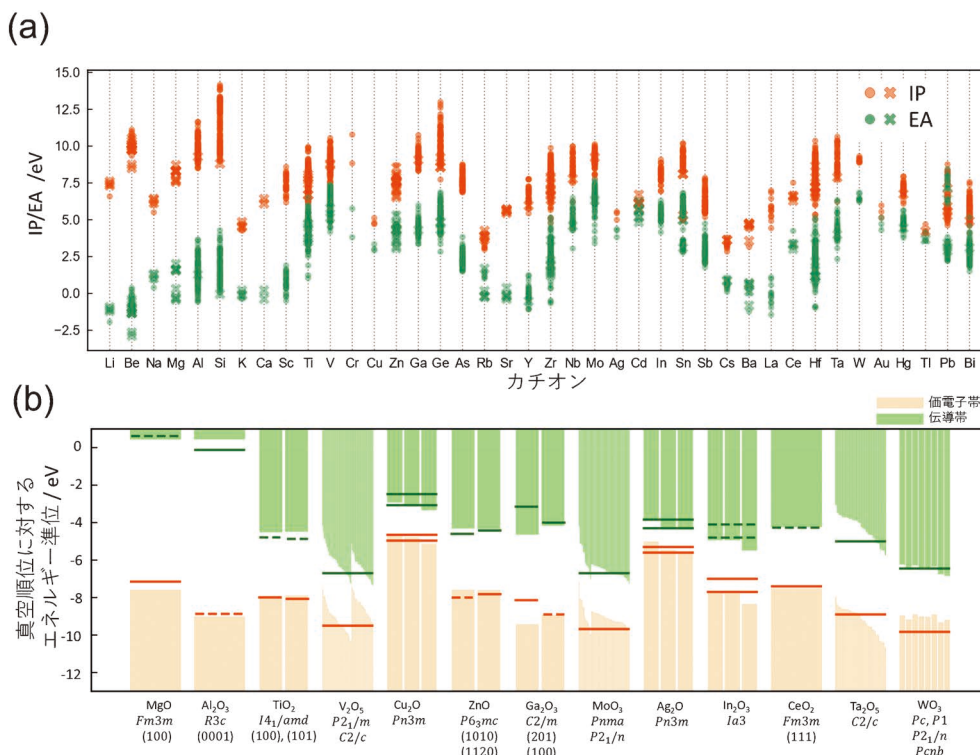


図3 第一原理計算による二元系酸化物のIP・EAの分布と実験との比較。(a) 第一原理計算による二元系酸化物のIP・EAの分布 (b) 実験値との比較。オレンジと緑の実線は、それぞれ実験的に報告されたIPとEAであり、破線は実験的なIPまたはEAと実験的なバンドギャップを組み合わせ導出したものである。(オンラインカラー)

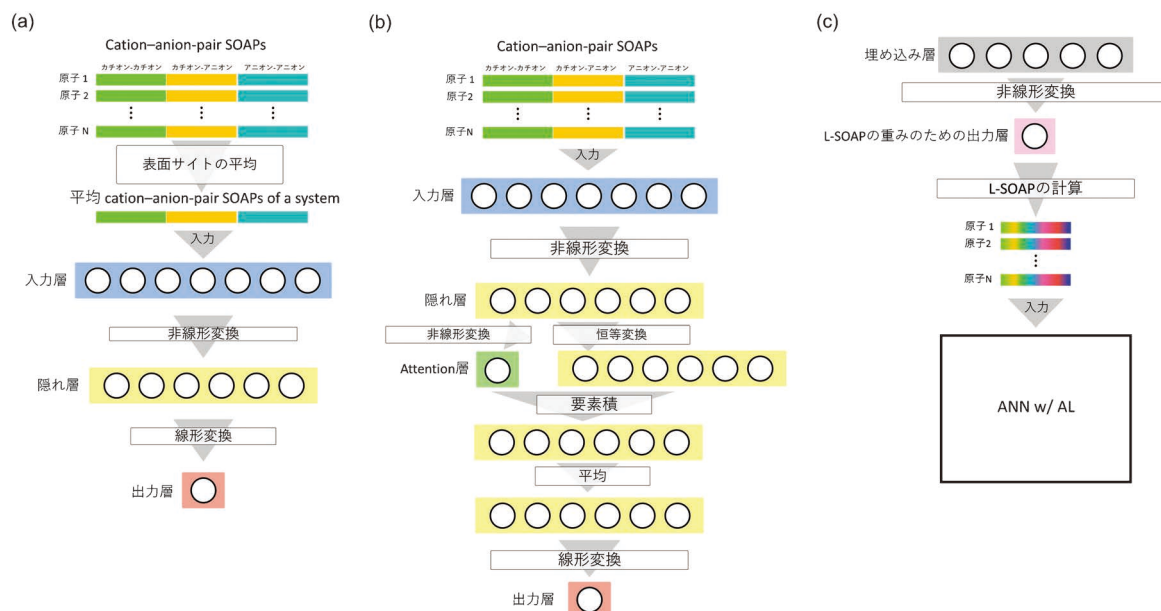


図4 ニューラルネットワークの構造。(a) Simple-ANN, (b) ANN w/AL, (c) ANN w/L-SOAP. (オンラインカラー)

用いたため明示的にはカチオンの種類に関する情報は考慮できていないにもかかわらず高精度な予測ができたことは、カチオンの違いを構造から学習したと推察される。

Cation-anion-pair SOAPを使用した Simple-NN は高精度の性能を示したが、一方で、表面の原子を指定する必要がある、任意性が残る。そこでこれらを自動的に考慮するため

に Attention 層⁽⁴⁵⁾⁽⁴⁶⁾を考慮したニューラルネットワークを構築した(図4(b), 以降 ANN w/AL と呼称する)。ANN w/AL では、Simple-NN とは異なり、スラブモデルすべての原子の SOAP を入力とする。ニューラルネットワークによる非線形変換を行いつつ、Attention 層で、各原子の重みを計算し、最終層直前で重み平均をとる(図4(b))。結果、

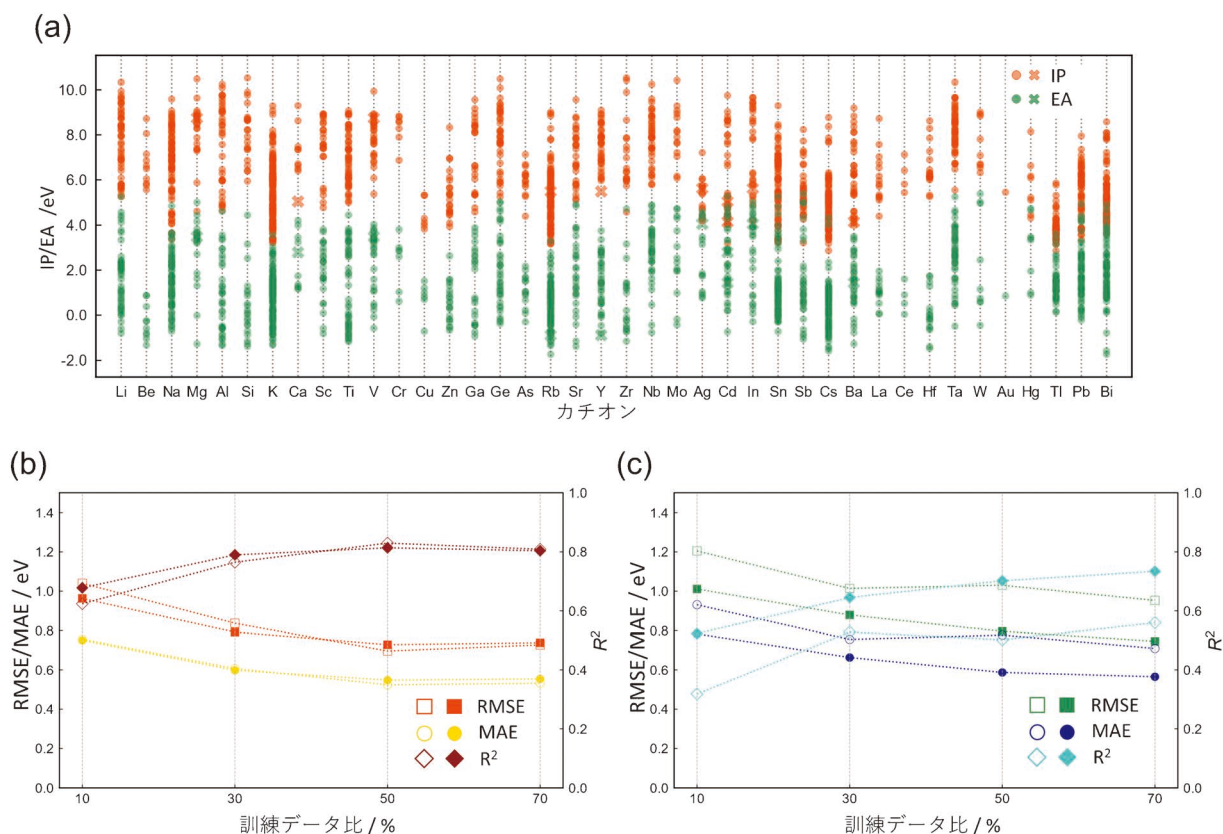


図5 第一原理計算による三元系酸化物のIP・EAの分布と転移学習の結果. (a) IP・EAの分布 (b, c) IP・EAに対する転移学習の結果. (オンラインカラー)

Simple-NNとは異なり、表面の原子であるという情報を与えていないにもかかわらず、Simple-NNよりも予測精度が向上した(IP: R^2 : 0.90, RMSE: 0.29 eV, MAE: 0.21 eV, EA: R^2 : 0.93, RMSE: 0.27 eV, MAE: 0.19 eV)。

続いて、718個の三元系酸化物表面(図5(a))に対して構築した予測モデルを転移学習した。その結果を(図5(b, c))に示す。横軸は転移学習の学習に用いた三元系酸化物の比率(718個に対する)を表している。この結果から、IPに関しては、70%では R^2 が0.8に達することがわかる(図5(b)白抜きマーカー)。一方EAでは、70%のデータを用いても R^2 が0.6を下回った(図5(b)塗りつぶしマーカー)。EAでの予測精度があまり向上しない原因として、今回使用したcation-anion-pair SOAPでは、同じスラブ内のカチオンを区別できないため、カチオン間の相互作用を考慮できないことが原因と考えられる。

そこで本研究では、新たなSOAPを開発した(L-SOAPと呼称)。通常、SOAPを計算する際、原子配位を球(三次元のガウス関数)の和として表現する。本研究では、原子種に依存した重みガウス関数にかけ合わせることで、原子配位に元素種の情報を反映させた。さらにこの過程をANN w/ALにつなげ、一つのネットワークの見なすことで、上述の重みを自動的に学習する手法を考案した(ANN w/L-SOAP)。

まずANN w/L-SOAPを二元系酸化物に適用した。その結果、cation-anion-pair SOAPの三分の一の次元数にもか

かわらず、ANN w/ALと同程度の予測精度を示した。さらに本手法を三元系酸化物に適用した結果、IPに関しては、cation-anion-pair SOAPを使用したANN w/ALと同程度の予測精度を示した。IPはVBM由来の値であり、酸化物のVBMは一般に酸素の2p軌道由来である。ANN w/L-SOAPではcation-anion-pair SOAPと異なり酸素の情報を明示的に与えていない。それにもかかわらず、L-SOAPはcation-anion-pair SOAPと同程度の予測精度を示した。またEAでは、L-SOAPは10%のデータ使用率で、cation-anion-pair SOAPの70%のデータ使用率結果と同程度の予測精度であった。また、70%のデータを使用することで R^2 は0.75程度に達した。これは、L-SOAPがカチオン間の相互作用を自動的に学習したことを示している。今後は、より精度を増す手段の一つとして、結晶の異方性や電子状態の情報を追加した予測を行う予定である。

4. 結 論

本稿では、第一原理計算と機械学習を用いて、アモルファス中の空孔解析および表面物性予測に関する研究を紹介した。機械学習を格子欠陥解析に適用するには、時に、バルクと異なる要素を考慮する必要がある。しかし、適切な処理や条件を追加することで、同様の手法はバルク材料と同等に強力なアプローチとなる。今後、格子欠陥解析における機械学

習の重要性はますます高まると期待される。

文 献

- (1) W.-J. Yin, S.-H. Wei, M. M. Al-Jassim and Y. Yan: Appl. Phys. Lett., **99**(2011), 142109.
- (2) J. Buckeridge, C. R. A. Catlow, M. R. Farrow, A. J. Logsdail, D. O. Scanlon, T. W. Keal, P. Sherwood, S. M. Woodley, A. A. Sokol and A. Walsh: Phys. Rev. Mater., **2**(2018), 054604.
- (3) C. Linderälv, A. Lindman and P. Erhart: J. Phys. Chem. Lett., **9**(2018), 222–228.
- (4) P. Deák, B. Aradi and T. Frauenheim: Phys. Rev. B, **86**(2012), 195206.
- (5) N. Tsunoda, Y. Kumagai and F. Oba: Phys. Rev. Mater., **3**(2019), 114602.
- (6) D. Muñoz Ramo, J. L. Gavartin, A. L. Shluger and G. Bersuker: Phys. Rev. B, **75**(2007), 205336.
- (7) M. Gerosa, C. E. Bottani, L. Caramella, G. Onida, C. Di Valentin and G. Pacchioni: J. Chem. Phys., **143**(2015), 134702.
- (8) P. Rinke, A. Schleife, E. Kioupakis, A. Janotti, C. Rödl, F. Bechstedt, M. Scheffler and C. G. Van De Walle: Phys. Rev. Lett., **108**(2012), 126404.
- (9) M. Burbano, D. O. Scanlon and G. W. Watson: J. Am. Chem. Soc., **133**(2011), 15065–15072.
- (10) N. Tsunoda, Y. Kumagai, M. Araki and F. Oba: Phys. Rev. B, **99**(2019), 060103.
- (11) A. Janotti, J. B. Varley, M. Choi and C. G. Van De Walle: Phys. Rev. B, **90**(2014), 085202.
- (12) Y. Kumagai, N. Tsunoda, A. Takahashi and F. Oba: Phys. Rev. Mater., **5**(2021), 123803.
- (13) F. Oba and Y. Kumagai: Appl. Phys. Express, **11**(2018), 060101.
- (14) H. Momida and T. Ohno: Appl. Phys. Lett., **117**(2020), 103504.
- (15) S. Kiyohara, D. Mora-Fonz, A. Shluger, Y. Kumagai and F. Oba: J. Phys. Chem. C, **126**(2022), 18833–18838.
- (16) B. Silvi and A. Savin: Nature, **371**(1994), 683–686.
- (17) E. P. O'Reilly and J. Robertson: Phys. Rev. B, **27**(1983), 3780–3795.
- (18) H. Imai, K. Arai, H. Imagawa, H. Hosono and Y. Abe: Phys. Rev. B, **38**(1988), 12772–12775.
- (19) T. Tamura, G.-H. Lu, R. Yamamoto and M. Kohyama: Phys. Rev. B, **69**(2004), 195204.
- (20) R. F. W. Bader, Atoms in Molecules: A Quantum Theory, Clarendon Press, (1990).
- (21) W. Tang, E. Sanville and G. Henkelman: J. Phys. Condens. Matter, **21**(2009), 084204.
- (22) E. Sanville, S. D. Kenny, R. Smith and G. Henkelman: J. Comput. Chem., **28**(2007), 899–908.
- (23) G. Henkelman, A. Arnaldsson and H. Jónsson: Comput. Mater. Sci., **36**(2006), 354–360.
- (24) A. P. Bartók, R. Kondor and G. Csányi: Phys. Rev. B-Condens. Matter Mater. Phys., **87**(2013), 184115.
- (25) L. Van Der Maaten and G. Hinton: J. Mach. Learn. Res., **9**(2008), 2579–2605.
- (26) S. J. A. Moniz, S. A. Shevlin, D. J. Martin, Z.-X. Guo and J. Tang: Energy Environ. Sci., **8**(2015), 731–759.
- (27) D. O. Scanlon, C. W. Dunnill, J. Buckeridge, S. A. Shevlin, A. J. Logsdail, S. M. Woodley, C. R. A. Catlow, M. J. Powell, R. G. Palgrave, I. P. Parkin, G. W. Watson, T. W. Keal, P. Sherwood, A. Walsh and A. A. Sokol: Nat. Mater., **12**(2013), 798–801.
- (28) Z. Zhang and J. T. Yates: Chem. Rev., **112**(2012), 5520–5551.
- (29) A. Polman, M. Knight, E. C. Garnett, B. Ehrler and W. C. Sinke: Science, **352**(2016), aad4424.
- (30) M. A. Green and S. P. Bremner: Nat. Mater., **16**(2017), 23–34.
- (31) J. Chen and N.-G. Park: ACS Energy Lett., **5**(2020), 2742–2786.
- (32) V. Stevanović, K. Hartman, R. Jaramillo, S. Ramanathan, T. Buonassisi and P. Graf: Appl. Phys. Lett., **104**(2014), 211603.
- (33) W. Chen and A. Pasquarello: Phys. Rev. B, **90**(2014), 165133.
- (34) P. G. Moses, M. Miao, Q. Yan and C. G. Van de Walle: J. Chem. Phys., **134**(2011), 084703.
- (35) H.-P. Komsa, P. Broqvist and A. Pasquarello: Phys. Rev. B, **81**(2010), 205118.
- (36) Y. Hinuma, A. Grüneis, G. Kresse and F. Oba: Phys. Rev. B, **90**(2014), 155405.
- (37) F. Oba and Y. Kumagai: Appl. Phys. Express, **11**(2018), 060101.
- (38) A. Grüneis, G. Kresse, Y. Hinuma and F. Oba: Phys. Rev. Lett., **112**(2014), 096401.
- (39) Y. Ping, D. Rocca and G. Galli: Chem. Soc. Rev., **42**(2013), 2437.
- (40) Y. Hinuma, Y. Kumagai, F. Oba and I. Tanaka: Comput. Mater. Sci., **113**(2016), 221–230.
- (41) Y. Hinuma, Y. Kumagai, I. Tanaka and F. Oba: Phys. Rev. B, **95**(2017), 075302.
- (42) F. Tran: Phys. Lett. A, **376**(2012), 879–882.
- (43) S. Kiyohara, Y. Hinuma and F. Oba: J. Am. Chem. Soc., **146**(2024), 9697–9708.
- (44) Y. Hinuma, T. Kamachi and N. Hamamoto: Trans. Mater. Res. Soc. Japan, **45**(2020), 115–120.
- (45) R. E. A. Goodall and A. A. Lee: Nat. Commun., **11**(2020), 1–9.
- (46) A. Y. T. Wang, S. K. Kauwe, R. J. Murdock and T. D. Sparks: Npj Comput. Mater., **7**(2021), 1–10.



清原 慎

★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★
2019年 東京大学大学院工学系研究科博士課程修了
2019年10月–2022年6月 東京工業大学科学技術創成
研究院(学振研究員)
2022年7月–2024年8月 東北大学金属材料研究所助
教
2024年9月– 現職
専門分野: マテリアルズインフォマティクス
◎マテリアルズインフォマティクスを用いた材料開
発・解析手法の開発に従事。
★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★

固体相転移の熱力学と熱問題への応用

～第3回：転移進行と熱移動の関係

およびまとめ(ケーススタディ)～

藤 田 麻 哉*

3・1 転移進行におよぼす熱物性の影響

本シリーズの3回目として、まず前回に引き続き、過冷却現象に触れるが、この現象ばかりでなく、相転移の動的性質を支配する因子には、核生成・成長などの内的な微視的变化だけではなく、熱伝導・熱拡散などの巨視的な熱現象なども登場することを述べておく。転移完了時間と観測時間を無限にとる理想平衡状態では、このような熱移動現象との関連は現れないが、現実の相転移進行の過渡性・非平衡性のもとでは、相転移進行が熱移動現象に律速されることも起こり得るのである。

まず、前節と同様に、過冷却現象(第2回の図2・4)を考える。連続冷却曲線上では、相転移完了までにさらに、リカレスセンスと呼ばれる温度反転ののち、サーマル・アレストと呼ばれる定温持続状態が観測される。リカレスセンス以降は生成核の成長が進行するが、もちろん、遅れて生じる核発生が重畳することもある。以下では話を簡単にするために、リカレスセンス以降の核発生は省略して考える。サーマル・アレストの発生は、逆に言うと、連続冷却過程での環境温度制御にともなう巨視的な熱のやりとりが、物質内部の核成長とバランスをとっていることになる。物質・環境の熱伝達挙動と相転移進行のバランス問題は、一般に Stefan 問題として知られており、この概念も、デンドライト成長から惑星マントルまで非常に幅広く用いられる普遍性の高いものである⁽¹⁾。Stefan が最初にこの問題に取り組んだ対象は、水-氷の界面

進行問題であるが、200年以上立った現在でも氷界面の問題は決着がつかないように、非線形課題の難問でもある。一方、その立式の中心はフーリエ則型の熱伝導現象に潜熱発生を加えた極めてシンプルなもの、オリジナルの式には物質・質量移動に関わる項は登場しない⁽²⁾。多くの Stefan 問題で拡散現象・質量移動との関係が出現するが、実は時間依存の根源に拡散現象は関係なく、熱移動こそが過渡的なスケールを決めるとしたのが Stefan 問題である。(数学上の特異微分方程式の分類として Stefan 問題という名称が冠されるが、「界面移動型微分方程式」問題の普遍性と、実際の相転移での Stefan 式の具象性とは全く別のものである。)実際の現象では、拡散現象が時間スケールを律速する場合も多いが、この対応にはさらなる改善の余地がある。一方で、Stefan 問題の概念は、電子・磁気・構造相転移といった異なる分野にも適用可能である。たとえば、サーマル・アレストは、水-氷転移だけでなく、磁気転移でも観測される。このように、熱移動現象を考慮する上で、Stefan 式はシンプルながら本質的な理解を与えてくれるであろう。水面に氷が張る挙動に熱移動現象が関与すると、最初に見通した Stefan の発想はユニークである。しかも Stefan 自身は、なんらかのラボ実験をしたわけではなく、ドイツとイギリスの北極圏探検隊の記録に載っていたジオグラフィック規模の氷観測データ群をもとにフーリエ則型の熱収支バランスだけで式構築した⁽²⁾のである。(19世紀のデータサイエンスとみなすと大変興味深い。)

では、一般化された Stefan 問題の表式を見てみよう⁽¹⁾。

* 国立研究開発法人 産業技術総合研究所中部センター(〒463-8560 名古屋守山区桜坂 4-205)

A Lecture on the Thermodynamics of Solid-state Phase Transition and Application for Thermal Management Issues 3 ~Influence of Thermal Phenomena on Transition Progress and Overall Summary(Case Study)~; Asaya Fujita(National Institute of Advanced Industrial Science and Technology(AIST), Nagoya)

Keywords: Stefan problem, thermal conductivity, transition kinetics, phase transition hysteresis

2024年3月19日受理[doi:10.2320/materia.64.190]

$$\lambda v_b = \alpha C_p \{(\nabla T)_{LTP} - (\nabla T)_{HTP}\} \quad (3 \cdot 1)$$

ここで、 λ は前回までと同じく体積あたりの潜熱で v_b は界面法線方向への界面速度である。一方、右辺の α は熱拡散係数で C_p は単位体積あたりの比熱である。精密に言えばこれら2つのパラメータは高温相(HTP)と低温相(LTP)で値が異なるが、その差を無視しても転移挙動の説明が変わるほどの大差は生じない。大事なことは、左辺が単位時間・単位面積あたりに発生する熱変化(降温の場合は発熱、昇温の場合は吸熱)の量であり、一方、右辺は相界面前方と後方の熱拡散を表す。なお、気をつけなければならないのは、同じ固定座標系で、昇温過程も降温過程も表すために、潜熱を吸熱と放熱で符号を変えてしまうと、界面進行方向も正逆が代わり、左辺はどちらの方向でも同じ符号になってしまう。あくまで、ベクトル値は界面速度と温度勾配だけでそれ以外は正のスカラー値であり、しかもこれらは界面法線ベクトル方向の話である。一般の物理式であれば本来、普遍的な対称性を備えているのが常であるが、その意味では、このような恣意性が表れる点で、物理式ではなく、現象論あるいは経験則として割り切るべきである。この他にも、前回までに述べてきた、過冷却分の駆動力も、界面張力に対する仕事は、一切含まれていない。もし α と C_p の相ごとの差が小さい場合に、温度勾配が界面前後で一緒であれば、差分は0になって速度も0つまり界面が動かないように見える。このため、あたかも、相転移のトリガーは温度勾配であるかのように勘違いする例も見受けられる。実際には、転移のトリガーの段階ですでに過冷却が生じ、駆動力が界面に作用しているのであって、熱活性があれば界面は進行できる。式(3・1)は、何らかのトリガーによって一旦界面が“動き出したら”、潜熱発生の影響がどうなるかを示す式として考える方が、この式に謎の物理解釈を含ませる恐れがない。(実際に、駆動力や表面張力分の仕事が入るように修正するためには、式(3・1)よりもはるかに複雑な非線形微分方程式を扱わないとならない。)

発熱方向の潜熱が発生し(降温に相当)、界面部分だけ周囲より温度が高くなった場合、低温相から高温相の方向を正にとると、 $(\nabla T)_{LTP}$ は正で $(\nabla T)_{HTP}$ は負になり、右辺全体では正になって、界面は高温相方向に向かって進み低温相が広がる。この見方であれば、潜熱発生前のベースの温度勾配がたとえ0であっても、界面進行した潜熱発生と、それが両側に散逸する速度がつりあうことになる。そもそも、この式では、どのパラメータも独立変数になり得るため、因果律として熱拡散が界面移動を引き起こすわけではない。つまり、実際上の理解としては、駆動力が大きく界面が熱拡散より早く進むと大きな温度勾配が生じるとみるのが妥当である。

現実の転移進行では、実はこの最後の式解釈が重要になる。準静的にあらゆる場所で温度が均一になるように熱力学的な「等温」過程で転移を進める場合には、温度を均一に保ちながら界面を極めて緩やかに進行させ、熱の過剰な蓄積を防ぐ理想形を考えていることになる。一方、界面付近で周囲から温度変化が生じた場合は、本来は、単にフーリエ則型の

熱収支が生じるだけでなく、駆動力への影響も生じる。界面進行が早くて熱散逸が追いつかない場合は、局所的に温度が上昇し、これは駆動力を得るための過冷却とは逆の方向に働く。つまり、潜熱が拡散して冷えないと、環境温度相当の駆動力では足りなくなるのである。つまり、段階的な見方をすると、潜熱の散逸が不十分な場合、駆動力が不足し、散逸が十分であれば再び界面進行が可能になる。こうして、“結果的”に、熱拡散率が転移進行速度に影響するわけである。この効果を理解せずに、銜学的にStefan問題として相転移速度論を考えると間違いを犯すが、一方で、相転移進行が熱拡散により大きく変わることも理解しておく必要がある。

連続冷却過程における外部への熱移動時間の視点を踏まえながら、もう一度、過冷却完了後のリカレンセンスおよびサーマル・アレスト現象を振り返ってみる。まず過冷却により蓄えられた自由エネルギー利得(あるいはOP変化分で微分した駆動力)は、核発生するための界面張力に抗する仕事として消費されるが、同時に、界面付近には潜熱が発生する。核生成あるいはそれに続く初期の界面移動(核成長)が進むと、界面付近の潜熱が物質内へ拡散し、物質/外界の熱抵抗を経て外部と吸放熱することで、元の温度を保持しようとするが、潜熱発生速度が熱拡散による散逸よりも早いと、界面局所の温度上昇だけでなく、最終的には物質内部の温度も全体に少しだけ上昇する。この過程を巨視的に俯瞰すると、実は直感的には奇妙なことが生じていて、水-氷であれば、水の温度は“上昇しながら”水の凍結が進み、氷が増えていく。これらが自発的かつ連続的に進行するためには、この温度上昇は、水中の氷の核発生臨界点である T_{on} を超えることはない。もし、冷却速度が速く、前回の2・6節で説明した核発生確率に由来して大きな過冷却度が生じた場合は、潜熱の熱拡散に要する時間の影響が少なく、温度が T_{on} に達する前に氷になりきって潜熱発生がとまり、外部冷却に追従して温度低下する場合もある。そもそも過冷却自体が2・6節の確率過程で生じるとしても、その後に温度上昇してリカレンセンスが起きるということは、物質/外界の熱放出が核成長で界面移動した分の潜熱増加に追いついていない証拠でもある。潜熱がダブつきながらも系の温度が T_{on} を超えずに済むためには、潜熱の発生を“絞る”より他なく、これは結局、界面移動速度によりバランスされることで実現される。こうして T_{on} を超えないように転移が進行するのがサーマル・アレストである。潜熱発生による局部昇温が駆動力を低下させるので、界面速度の適応が自発的にうまく釣り合うのである。なお、連続冷却の条件では、時間とともに、サーマル・アレストされた物質の温度と下がり続ける環境温度の差が開いていくので、この結果、単位時間あたりの放熱量が増加し、転移後半では潜熱による温度上昇が抑えられる。一方、核成長体積は一般にシグモイド型の増加率を示す。このため、環境の冷却速度が顕著に早い場合は、転移の途中であっても、サーマル・アレストが続かずに物質温度が降温挙動を示す場合もある。これ以外にも、界面張力が弱く過冷却が少なく済んだり、リカレンセンスが終わる前に転移が完了してしまった

りするとこれらの特徴が観測されない場合もある。

サーマル・アレスト現象は、人類の潜熱蓄熱を利用してきた歴史において最も中心的役割であり、大きな顕熱を使わなくとも保温・恒温を実現できる“旗印”である。しかしその熱力学的な要因は、相転移の内的因子だけではなく、また、その様相は定常平衡論だけから記述できるものではない。蓄熱材の保温性や恒温機能などを利用する場合は、その持続時間や動作温度などの設計に熱現象としての相転移挙動を理解して取り込むことが重要となる。

3・2 ケーススタディ

本講義ノートの終盤として、もう少し具体的な事例を挙げて話題を進めるが、単に、各論の現象を個別に定式化・類型化しても決して理解へのハードルは下がらないと思われる。そこで、実際の材料開発において直面するであろう相転移を工学的制御にするための方向性を含めた概論を説明してみる。

3・2・1 相転移温度の制御について

基本方針は第1回の図1・2に即したものとなるが、もう少し、応用上の要求を考慮したバックキャスト的な視点に近づいてみる。例えば、相転移の結果、望ましい工学特性が得られるが、転移点が室温以下に存在する場合、なんらかの材料学的方法により、転移点を上昇させたいという要望が生まれることがある。もし、理想化した操作(ある因子だけ制御できて、他の要因は固定できる)が可能であるとすると、方策としては図3・1におけるA, BおよびCのようなパターンが考えられる。Aは、第1回の式(1・2)あるいは第1・3節で述べた様に、内部エネルギー E およびエントロピー S の温

度変化が小さければ、基底状態の $E_H - E_L$ を増加させることで T_C を上昇できる例である。このパターンを実現する例としては、 $E_H - E_L$ がクーロン電子相関に由来する場合には、励起相(ここまで高温相と呼んでいたが、絶対零度の高温相という言い方による混乱を避けるためにここでは励起相と呼ぶ)において、クーロン相互作用を感じる電子数をさらに増やすようにしたい。このためには、高い電子状態密度にフェルミ準位 E_F が近づくようにしたり、あるいは、基底相(低温相)の側で、より相互作用が減らせるように、 E_F がギャップに近づく電子濃度や原子間距離を調整する、といった合金設計が想定される。

一方、Bのパターンは、やはり E および S の温度変化を考慮せず、 $-ST$ 項の変化を調整して T_C を動かす狙いである。高温相の S の絶対量を低下させた場合を想定している。具体的には、高温相固有のフォノンや磁気モーメントあるいは電気双極子揺らぎなどを調整することになる。このような制御には、それぞれの揺らぎにあわせ、双極子モーメントの振幅を小さくしたり、分子間力、原子結合力、磁気交換相互作用などバネ定数に相当する部分を変化させることが考えられる。したがって高温相の特定の物理量にだけ影響が強くなるような合金設計や元素選択などを考えるのが良い。(後述する二酸化バナジウムの例では、高温相にだけ金属磁気モーメントが発生するので、その磁気揺らぎ由来の S を調整するため、金属磁気モーメントの大きさを変えることなどが考えられる。)

パターンCについては、説明が難しくなるため第1, 2回では深掘りせずに、簡便に述べるにとどめてきたが、低温相(基底相)側の素励起により生じる内部エネルギー E の温度変化による、 ΔE の目減り分を考慮している。素励起による

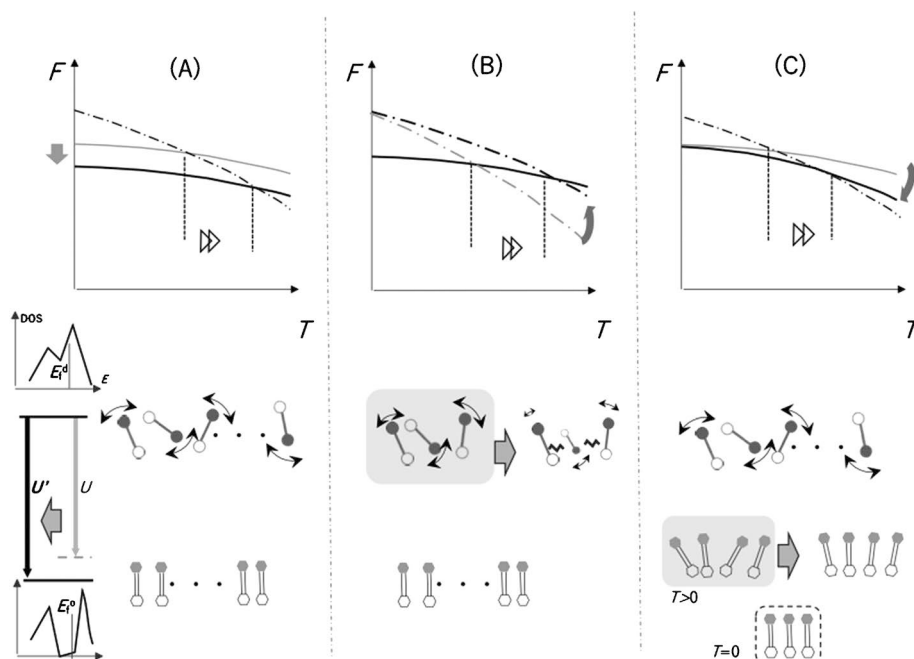


図3・1 相転移温度を上昇制御するための方策。

乱れのエントロピー寄与ではなく、1つ1つの励起子をもつエネルギーの合計である(1・2・2節参照)。例えば強磁性の基底状態を考えた場合、交換相互作用によるエネルギー変化が、隣り合うスピン S_i と S_j の間で、 $\varepsilon = -JS_i \cdot S_j$ で表されたとする。(ε は両スピンが平行のとき最低で、反平行のとき最大になる。)無秩序な常磁性相で、どのサイト間も瞬間々々でスピンが反平行になるような揺らぎ方を仮定し、一方、秩序/強磁性相では全スピンが平行に揃った理想状態を考える。この場合、絶対零度での2状態間の内部エネルギー差 ΔE は 2ε となる。温度が上昇し、素励起としての熱スピン波が発生するとスピン波は乱雑さとしてのエントロピーも稼ぐが同時に、部分的に平行から外れたスピンペア(あるいは複数スピン間に広がったスピン波)が発生するので、内部エネルギー差 ΔE も目減りし、 $2\varepsilon - \Theta(T)$ 型の温度変化をする。スピンを古典ベクトルから角運動量量子数に扱い直して計算すると、 $\Theta(T)$ は、温度 T までの熱減磁分(平行からのズレ分)の交換エネルギー上昇に相当する⁽³⁾。ここでは説明の都合で磁気系を例にしたが、制御方策については、磁気系では難しい話になるので概略だけ示す。強磁性状態のスピン波分散係数(温度当たりのスピン波励起の目安)だけを変化させ、強磁性状態の交換相互作用は保持することになるが、一方、1次相転移なので基底強磁性と励起常磁性の交換相互作用は同じでは無く、常磁性相の交換相互作用も保持するようにしないとならない。このような変化を実現するには、結晶対称性を考慮するか、遍歴電子系の場合は、バンド構造の微係数まで検討することになるなど、かなり複雑な様相を呈する。もう少し直感的にわかりやすい例を考えるなら、例えば基底-励起状態間のエネルギー差が基底状態のバンドギャップにおける充満帯から伝導帯に熱活性されたキャリア数で決まるような場合、ギャップを広げたり、ギャップ間の中間単位が現れないようにする材料調整が考えられる。

ここまでの説明は、“転移温度を上昇させる”という一つの要請に絞って方策を説明したが、もし、転移温度だけ変えるのではなく、同時に他の物性値の変化も付随させたい場合は、上記のパターンA~Cのなかでも、よりふさわしい方式を検討する必要がある。本稿は熱問題を話題の中心にしているので、“転移温度の上昇とともに潜熱を増やしたい”，といった場合どうするかを、パターンA~Cで考えてみる。Aの場合であれば、転移温度 T_c の上昇とともに、潜熱 λ も増加できる。(転移エントロピー変化 ΔS は両者の兼ね合いで大きくも小さくもなり得る。)一方、パターンBの場合は、 T_c は上昇するが、 λ の大きさは据え置きで、したがって ΔS は小さくなる。パターンCでは潜熱の目減り分を抑制したことになるので、 T_c での潜熱は増加するが、結果的に F^L 曲線の T_c での傾きが大きくなるため ΔS が小さくなると予想される。

当然のことながら、図3・1の各パターンを考察する上で設定した前提条件は、理想化および単純化しているがよほど微細あるいは確度がもとめられる状況でない限り、おおまかな傾向は把握できるはずである。また、実際には、例えばパタ

ーンAとCの影響が両立して現れる場合もあるが、合金設計の結果を判別する上で、このような考え方をで解析すれば、主要な変化がどこにあるのか(絶対零度の ΔE なのか、有限温度の $\Theta(T)$ なのか)、把握が容易になるであろう。

筆者が経験した事例として、二酸化バナジウム VO_2 における熱的特性の改善を示す⁽⁴⁾。 VO_2 は潜熱が大きいことが古くから知られてきたが、蓄熱材料として工学評価した際にも、従来のパラフィン系材料などに匹敵する特性となるため、動作中に液相を経由することのない「電子氷」として、固体蓄熱利用が有望視されてきた⁽¹⁾⁽²⁾。ただし、この物質は難焼結性のため、バルク化に工夫が必要であり、焼結のためのプロセスと、物性(蓄熱特性)の維持の両立に工夫が必要であった。プロセス改良を探索する中で、バルク試料が得られてプロセス前の粉末体に比べ転移温度はそれほど変わらないのに、潜熱が顕著に目減りしている例に遭遇した。本系の相転移の特徴を、前述の図3・1A~Cのパターンになぞらえて説明すると、基底状態と励起状態のエネルギー差を産むのは、 VO_2 の場合、いわゆる強相関とよばれる巨大電子間クーロン相互作用であり、巨大潜熱も電子相関に由来する。一方、相転移のトリガーとなる励起相エントロピー項に関しては、複数の要因が合算で寄与する。基底状態においては、電子バンドにギャップ状態が表れて(この要因については、モット機構とパイエルス機構の両方が入り組んだ状態であり、いまだに論争が絶えない話題なので、本稿では踏み込まずに置くが)、いわゆる絶縁体状態にあり、V-V結合において特定の軌道が占有され、3d電子がup-downペアによるスピン数 $S=0$ となるシングレット状態を形成する。一方、励起状態(高温相)では、電子がバルク中を動き回る金属状態であり、電子運動による(Sommerfeld)エントロピー S_{el} 、金属バンド的な広がりによる軌道選択自由度のエントロピーに S_{orb} 加え、金属モーメントの発生($S \neq 0$)による磁気揺らぎのエントロピー S_{mag} が出現する。潜熱の目減りが見られた VO_2 焼結体では、高温相における測定から求めた有効モーメントが文献の実験値あるいは理論値よりやや大きな値にあり、 S_{mag} も増加していることが予想された。確かに、当該試料の転移温度はやや低下しているので、この部分だけをみるとパターンBの機構になりそうであるが、それでは潜熱(あるいは転移エントロピー)の目減りが説明できない。そもそも高温相(金属バンド状態)の局所モーメントが増加しているということは電子状態に変動が生じていることを意味するので、低温相の基底状態にもなんらかの変化が生じているはずである。電気伝導の温度依存性から、低温相(絶縁相)での伝導ギャップを評価したところ、本来の絶縁相に現れるバンドギャップからの予想値より減少しており、ギャップの縮小あるいはギャップ間不純準位の発生が示唆された。このことは熱的にはパターンAで示した基底状態のエネルギー的安定度が低下しているか、もしくはパターンCのように素励起による内部エネルギーへの影響が増大している。この話題の場合には、その後、バンド計算の結果や分光測定などを踏まえ、物性変化は酸素欠損の影響であることで決着し、欠損回復の処

理により潜熱も回復することが確かめられた。本節の冒頭で提示した、積極的な転移温度制御とは逆の例示(転移温度を動かさずに潜熱を回復する例)ではあるが、熱的な視点がどのように物性の変化とリンクしているか、あるいはそのような視点を追加することで、どのような物性変化に注視すれば良いかというヒントになれば幸いである。

3・2・2 相転移履歴の制御について

転移の制御として要求されることが多いのは、必ずしも(平衡)転移温度だけではなく、相転移履歴を含んだ過渡状態の調整が要求されることも多い。たとえば筆者が関わる事例では、磁気相転移の潜熱を利用した磁気冷凍において、潜熱を保持しながらできるだけ転移履歴を抑制し、シャープな転移を実現する技術課題がある⁽⁵⁾。また別の事例では、NiTi系マルテンサイト変態の潜熱の大きさに注目し、履歴を増大させることで熱保持領域を安定化させるとともに、さらに応力誘起変態による機能を組み合わせて、アクティブ蓄熱を実現しようと取り組んでいる⁽⁶⁾。このように、相転移履歴は、サイクリックな動作には損失にしかなり得ないが一方、不可逆的にある状態を保持する場面では極めて有用な機能補助になり得る。転移の履歴現象として特別に抜き出した説明はしなかったが、核生成・成長(2.1~3節)などでも、転移の過渡性に関わる問題として履歴の存在には触れてきた。ただし、これらの内容を事細かに説明されたところで、制御の観点にはつながりにくいと思われるので、履歴制御についても応用からのバックキャスト的な説明を交えた方が馴染みやすいであろう。

履歴(制御)は核生成・成長と切り離すことはできないが、この際、第2回の図2・2に示した自由エネルギー空間と実空間のリンクを参照することが非常に役立つ。同図で説明した

ように、実空間で核生成を支配する表面張力は、自由エネルギー空間のエネルギー障壁に由来するので、つまり、核発生の表面張力は、電子状態に必ず関わっている。(格子変形や弾性に関わるとしても、エネルギー利得を支えているのは電子であり、また、格子対称性も弾性エネルギーも格子点の問題ではなく、それらを繋ぐバネ定数=電子結合の問題である。)そこでレシピの一案として挙げられるのは、電子論的に核発生の表面張力を調整することである。しかし、これは、表面張力だけでなく、他の要因も変化させてしまうこともあり、例えば“潜熱の大きさを保持して”といった付随要請に応えられないことも多い。

より簡便な方法として、内因的な電子状態よりも外因的要因による表面張力の制御が挙げられる。(もっと単純にわかりやすくいうと、例えば結晶粒界などである。)この発想は一見すると、極ありふれたもので、“なんだそんなことか”と思われるかもしれないが、逆に、結晶粒界の相転移への影響を正しく把握していないと、予想と逆の結果にぶつかる可能性もある。特に、典型的な片手落ちの発想として、結晶粒界の影響を“核成長におけるの異相界面の摩擦”としてだけ焦点を当て取り沙汰するような例があり、これは、木を見て森を見ず、な状態に陥る可能性がある。核生成・成長をセットにして、過渡遷移の「起承転結」として捉えなければならない。核生成の方に粒界の影響を利用して制御する方策を以下に述べてみる。

図3・2には、核生成の臨界半径 r_c に比べ、平均粒径 D が十分に大きい場合($D \gg r_c$)と、逆に D の方がやや小さい場合($D \leq r_c$)を想定して、核生成・成長の違いを定性的に図示した。前者の場合には、(均一か不均一かはさておき)確率的に一つの粒の中に1つ以上の核発生が起こり得て、初期の核発生には結晶粒組織を理由とする阻害要因はほぼ無い。しか

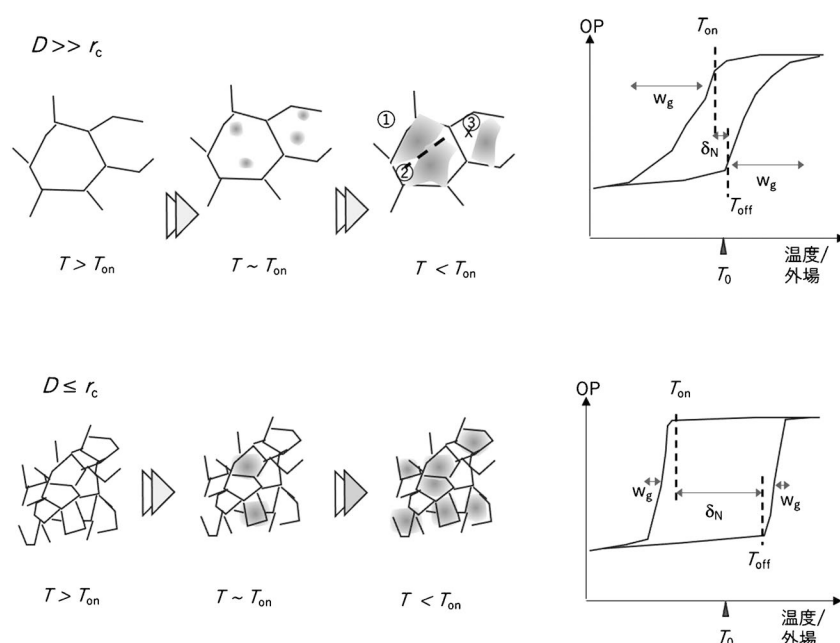


図3・2 相転移履歴幅を制御するための方策例の模式図。

3.3 終わりに

面に依存した機能発揮をもたらし重要なツールであり、その正しい理解と制御は、工学として社会的な意義も大きいが、一方、分野ごとの(半ば“ミーム化”した)概念の先鋭化や、熱力学の学習でどうしても「相転移」が後回しにされるスキームから、「知ってはいるが整理しきれていない」中途半端な状態に置かれている読者も少なくなかろうと思われる。1次相転移の説明はエネルギースケールでの議論が頻出するため、それに付随する熱現象の説明は、結局、熱力学そのものになる。そこで、より研究現場で出会うことの多い概念を中心に、いろいろな解説書でスキップされがちな部分を埋めた形でまとめてきた。熱現象に限らず相転移応用全般にかかわる読者に、相転移熱力学再訪を促すきっかけとなれば幸いである。(完)

文 献

- (1) J. S. Langer: *Rev. Mod. Phys.*, **52**(1980), 1–30.
- (2) J. Stefan: “ Ueber die Theorie der Eisbildung, insbesondere über die Eisbildung im Polarmeere” *Ann. Phys.* (1891).
- (3) 小口武彦；磁性体の統計理論，裳華房，（初版1970年11月，復刊2002年8月 オンデマンド発行）.
- (4) A. Fujita, Y. Kinemuchi and W. Yamaguchi: *Phys. Chem. Chem. Phys.*, **18**(2016), 30824.
- (5) A. Fujita and K. Imaizumi: *J. Phys.: Energy*, **5**(2023), 044001.
- (6) 中山博行，藤田麻哉，杵鞭義明：自動車技術，**78**(2024)，100–105.



藤田麻哉

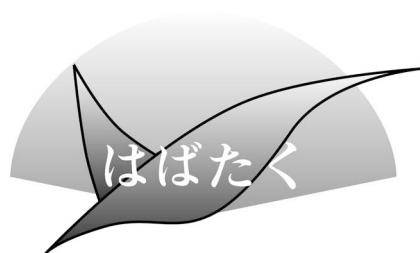
★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★

1997年 東北大学大学院工学研究科博士課程修了
2000年 同 助教, 2002年 同 准教授
2014年 産業技術総合研究所 研究チーム長
2022年 同 上級主任研究員

専門分野: 磁性を中心とした材料応用

◎磁石や軟磁性に限らず、磁気熱量や磁気体積効果の
応用と社会実装に従事。また、1次相転移現象の熱
マネジメント利用についても、研究開発に加え、
産業界へのコンセプト普及を念頭に活動中。

★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★



計算科学を用いたアルミニウム合金中の溶質原子の拡散挙動の解明

芝浦工業大学大学院理工学研究科材料工学専攻；
修士課程2年
東海林瑞希

1. はじめに

私は芝浦工業大学大学院理工学研究科材料工学専攻修士課程2年生として、アルミニウム合金の時効析出挙動に関する研究を行っています。この度は本誌「はばたく」での執筆という貴重な機会をいただきましたので、研究内容の紹介とともに、博士課程に向けた抱負について述べたいと思います。

2. 見えない世界を可視化する

私は学部4年次から、芹澤愛教授の指導の下、時効硬化型アルミニウム合金におけるナノクラスタおよびギニエ・プレストン(Guinier-Preston: GP)ゾーンの形成挙動の解明に取り組んでいます。時効硬化型アルミニウム合金は時効処理に伴って、ナノクラスタやGPゾーンといった溶質原子の微小な凝集体を形成します。この凝集体は析出物の前駆体であるため、これらの分布やサイズを制御することで、更なるアルミニウム合金の高強度化が期待できます。しかし、ナノクラスタやGPゾーンの形成挙動は合金種によって多様に変化し、そのメカニズムは未だ解明されていません。そこで、計算機シミュレーションを用いて、それらの形成メカニズムを調査し、アルミニウム合金の高強度化に有効な熱処理条件の探索を行っています(図1)。具体的には、確率変数のサンプリングにより現象の予測を行うモンテカルロ法を活用し、観察が困難な拡散過程の可視化を行っています。計算機シミュレーションを用いた最適条件の探索が可能となれば、高機能材料の開発コスト削減が期待されます。

私は学部生時代からミクロ組織の制御で特性を大きく変化させられるアルミニウム合金に魅力を感じ、以前からプログラミングに興味があったこともあり、アルミニウム合金中の高強度化に向けて、溶質原子の拡散挙動の調査を目的に、計算機を活用した研究を行うことになりました。当初は純粋な興味からプログラミングを勉強しただけの初学者であり、計

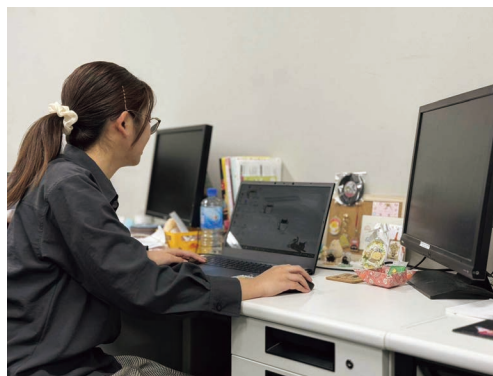


図1 自身のデスクにて計算機シミュレーションを行っている著者。(オンラインカラー)

算機シミュレーションの知識は全くありませんでした。しかし、芹澤先生の計らいと日本原子力研究開発機構(Japan Atomic Energy Agency: JAEA)の都留智仁先生のご厚意で、JAEAに常駐して計算機シミュレーションについて学ぶ機会を頂き、少しずつ自身の研究に応用できるようになりました。とはいえ、正直なところ、同期が着々とデータを集める中、学部4年生の秋頃まで、解析手法すら確立できていないことに対して、焦りしかありませんでしたが、些細な疑問点についても丁寧にご指導くださったJAEAのIvan Lobzenko先生の支えもあり、何とか解析手法を確立することができました。その過程で、目に見えない現象を扱うからこそ、得られた解析結果が本当に現実で起こり得ることなのか、丁寧に検証する重要性を実感しました。

卒業研究では、確立したこの解析手法を用いて、Al-Mg-Si合金およびAl-Cu合金中のナノクラスタおよびGPゾーンの形状の違いについて、溶質原子の原子間相互作用および結合角に基づいた解釈の提案に成功しました⁽¹⁾。しかし、試行を重ねる中で、実験的に得られているものとは異なる結果が得られることがありました。このようなときに、学会でお会いした先生方から「上手いかわない結果の方が大切」と言われたことを思い出し、諦めずに原因を突き止める努力を重ね、格子歪みによって構造が変化するという新たな視点に基づく解釈を提案するに至りました。国内・国際学会でこれらの研究成果を発表したところ、優秀ポスター賞あるいはBest poster awardを受賞することができました。発表を通じ、同じ分野のみならず、他分野の研究者に研究内容に興味を持ってもらえたり、理解してもらえたりした瞬間に非常に大きな喜びを感じたことを今でも鮮明に覚えています。

この経験は、私が博士課程への進学を決めた理由の一つでもあります。手法から結果の解釈まで自身で計画を立てて切り開いていく“研究者”という生き方の楽しさの一端を知ることができた気がしています。また、芹澤研究室は学会への参加や他の研究者との交流を積極的に促していることもあり、様々な学会で普段はお会いできない先生方と交流できたことは、私にとって何物にも代え難い経験と考えています。一線で活躍している研究者が楽しそうに自身の研究対象について語る様子を間近で見られたことは、間違いなく研究の道

へ進む後押しになりました。

私は現在、時効に伴う合金中の空孔濃度変化がナノクラスタおよび GP ゾーンに与える影響に関する研究を行っております。今まで使用していたモンテカルロ法は、濃度変化などを伴う系を取り扱うことは困難とされていることから、新たなシミュレーション手法の確立を目標に日々研究に努めております。

3. お わ り に

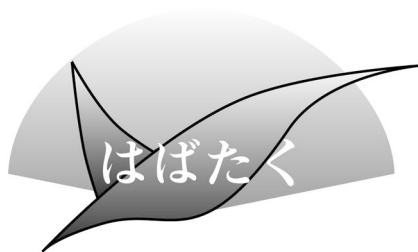
私は来年度より博士課程に進学する予定ですが、そこでも計算科学を駆使し、材料の未解明な現象を解明する挑戦を続

けたいと考えています。新たな知見を追求するだけでなく、次世代の産業や科学に革新をもたらすような研究を行えるよう邁進してまいります。

最後になりましたが、本稿執筆の機会を設けていただいた会報編集委員の皆様、これまで私と議論してくださったすべての研究者の方々にこの場を借りて厚く御礼申し上げます。

文 献

- (1) M. Shoji, K. Kurihara, I. Lobzenko, T. Tsuru and A. Serizawa: J. Japan Inst. Light Metals, **74** (2024), 535-545.
(2024年12月9日受理) [doi:10.2320/materia.64.196]
(連絡先: 135-8548 東京都江東区豊洲 3-7-5)



水素脆化の研究を通じた産学間の橋渡し

上智大学大学院理工学研究科理工学専攻；
博士後期課程3年

齋藤 圭

1. はじめに

私は上智大学大学院理工学研究科の博士後期課程において、高井健一教授の下、金属材料の水素脆化に関する研究に日々励んでおります。

この度、本稿執筆という貴重な機会をいただきましたので、前職の民間企業での経験、これまでの研究活動、そして産学の両視点からの研究への取り組み方を踏まえた今後の抱負について述べたいと思います。

2. 民間企業の材料技術者としての経験

私は上智大学大学院理工学研究科博士前期課程を修了した後、自動車メーカーにおいて、車体の軽量化に向けて、実験と計算工学を駆使して次世代高強度鋼板の開発業務に従事しておりました。そこでの開発課題は、プレス成形や衝突耐性の向上に必要な鋼板の力学特性(延性・強度)の確保、およびそれとトレードオフの関係にある技術課題(例：スポット溶接性、耐水素脆性)との最適解を見出すことでした。この課題の解決は困難でしたが、社内部署や鉄鋼メーカー、部品メーカーに属する様々な関係者と議論し、試験片や模擬部品を用いた実験と合わせ、計算工学を通じて、必要な力学特性およびスポット溶接が可能な化学成分範囲を明確化しました。また、脆化メカニズムが十分に分かっていなかった中、部品製造プロセスや市場環境を評価条件に落とし込むことで、耐水素脆性の向上に必要な特性を見出しました。様々な技術課題はありましたが、鋼板と部品の製造プロセス、部品要求特性、そして鋼板特性を引き出す材料工学の知見をより深め、それらを活用して自動車部品として成立する鋼板の目標特性を設定する貴重な経験ができました。一方、高強度鋼の水素脆化メカニズムの解明とそれに基づく耐水素脆性に優れた高強度鋼板の開発には未だ多くの課題があると痛感しました。

3. 高強度鋼の水素脆化に関する研究

自動車産業では急速な脱炭素社会への移行が求められており、2節で述べた通り、自動車の軽量化が喫緊の課題となっています。軽量化には、車体に占める鋼材量の削減につながる鋼材の高強度化、すなわち高強度鋼の適用が有効な手段の一つとなり得ますが、反面、水素脆化の発生リスクが顕著に高まることから、十分な普及には至っていません。水素脆化とは、金属材料中に ppm オーダーの微量な水素が侵入し、荷重が負荷された状態で脆性的に突如破壊する現象です。従来から水素は高強度鋼中において様々なトラップサイト(例：転位、原子空孔)に存在することが報告されていますが、室温での水素拡散係数が大きい本質的にどのような状態で存在する水素が脆化に関与するかはよく分かっていませんでした。

私は現在、博士後期課程において、水素脆化に関与する水素の存在状態と脆化の発生メカニズムを明らかにし、それに基づいた耐水素脆性に優れた高強度鋼の開発指針を提案する研究に取り組んでいます。具体的には、代表的な水素脆化破面の一つである擬へき開破面を示す高強度マルテンサイト鋼について、水素雰囲気下における引張試験にて水素脆化破壊が生じる直前で除荷したものを試料として、 -200°C からの昇温脱離分析法を通じて、水素脆化に関与する格子欠陥の同定とその形成過程の明確化を試みました。その結果、破断直前もしくは破面近傍において、転位からの放出に対応する分とは別に、原子空孔にトラップされていた水素の放出量が顕著に増加することを検出できました。つまり、高強度マルテンサイト鋼において水素を含んで塑性変形させることで、過剰な原子空孔が形成・蓄積することで水素脆化現象が起きることを実験的に明らかにしました⁽¹⁾。本研究成果は国際的に評価され、米国 TMS(The Minerals, Metals and Materials Society)において過去2年間に発表された論文の中で最も科学的な発見に貢献した論文として、論文賞「TMS-AIME CHAMPION H. MATHEWSON AWARD」を受賞しました(図1)。また、本研究成果を応用し、転位易動度を低下させ



図1 TMS-AIME CHAMPION H. MATHEWSON AWARD.
(オンラインカラー)

て原子空孔の形成量を低減させることで、水素脆化を間接的に抑制できると考えました。そして、熱処理条件を工夫することで、同一強度であるが転位すべりの起こり易さを変化させた低合金マルテンサイト鋼の耐水素脆化特性を引張試験にて評価しました。その結果、約 1.5 ppm 以下の低い水素量の範囲では、転位すべりが起こり難い鋼材の方が優れた耐水素脆化特性を有することを見出しました⁽²⁾。以上より、水素量が低く、擬へき開破壊する鋼材に関して、脆化メカニズムに関与する格子欠陥(転位と原子空孔)の役割を明らかにし、特別な合金を添加せずに熱処理条件を工夫することで、効果的に耐水素脆性に優れた鋼材を開発できる指針を提案しました。

4. 最 後 に

産業界から学术界に主軸を移して研究に取り組んでいく中で、民間企業での多角的に物事を把握して課題に取り組む姿勢が研究活動を進める上でも重要だと感じています。今後、

実際の材料の使われ方や水素脆化以外の技術課題を考慮し、自身の水素脆化に関する研究成果の産業界への応用を最大化できるようなテーマ選定をしていきたいと思います。特に、長期間にわたって安全に構造部材を使用するための実験と、計算工学を駆使した水素脆化寿命予測とメカニズムを反映させた評価法開発に関する研究に取り組んでいきたいと考えております。

最後になりましたが、本稿執筆の機会をいただきました日本金属学会関係者の皆様、ご指導いただいております先生方をはじめ、私の企業勤務時代に技術者としての基礎を築いてくださった方々に、この場を借りて心より感謝申し上げます。

文 献

- (1) K. Saito, T. Hirade and K. Takai: Metall. Mater. Trans. A, **50** (2019), 5091–5102.
- (2) K. Saito and K. Takai: ISIJ Int., **64**(2024), 1587–1598.
(2024年12月3日受理)[doi:10.2320/materia.64.198]
(連絡先: 〒102-8554 東京都千代田区紀尾井町 7-1)

スポットライト

～第11回「高校生・高専学生ポスター発表」優秀賞～

位置エネルギーを用いた発電及び蓄電装置の製作

神奈川県立厚木高等学校

新井直哉 大木修吾 勝又耕平 日高周真

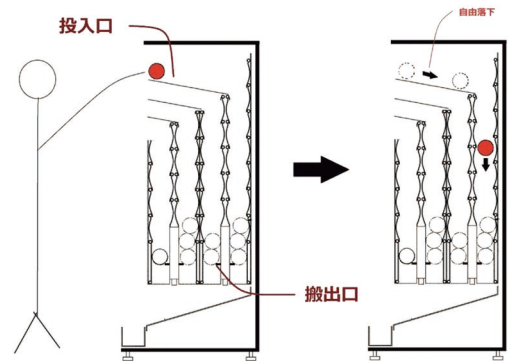


図1 自動販売機の内部構造。(オンラインカラー)

1. 背景

近年環境を汚さない発電方法として再生可能エネルギーによる発電方法が用いられるようになってきている。しかし風力発電や太陽光発電などは天候などの影響を受け、安定して発電することができないことが課題として挙げられる。そこで私達は自動販売機やゴミ箱など身近なものにおいて、物を落とすことにより発生する位置エネルギーに注目した。このような身近なもので発電が可能になれば未利用のエネルギーを活用することにつながる。位置エネルギーを用いた発電ができれば、今後のエネルギー活用に貢献できるのではないかと考えた。

2. 目的

位置エネルギーを用いた発電、蓄電方法を確立しエコな発電に貢献する。今回は自動販売機を一回動かす分の電力、360 Wを溜めることを目標とした。

3. 仮説

(1) 先行研究

a. 下記の参考文献(1)より

今回の回路に流れる電流は500巻コイルで約0.24 A流れることを目標にする。

b. 参考文献(2)より

今回の実験における最適なバネの種類は、落下物から装置へ与えられた位置エネルギーを圧縮エネルギーとして蓄え、落下物が取り除かれた後はエネルギーを開放するという機能が求められるため、圧縮コイルばねが適当である。

c. 参考文献(3)より

自動販売機内の通路には図1のように缶やペットボトルが詰まっており、バンドメカと呼ばれる装置が1回動くにつき1本のみ排出される。

d. 参考文献(4)より

2015年“超”モノづくり部品大賞にて電気・電子部品賞を受賞していたバンドメカが24 V駆動であった。今回の実験では確実にバンドメカを作動させるために24 Vより大きい25 Vを想定し、このバンドメカを動かすとして仮定して実験を行った。

(2) 仮説

位置エネルギーを利用して電磁誘導を起こすことで発電することができる。

また、発電した電気を蓄電し、自動販売機を動かせる分の電力を発生することができる。

4. 実験材料

(1) コイルの製作

塩化ビニルパイプ(長さ83 mm, 外径31 mm, 内径26 mm) 4つ

エナメル線(直径0.5 mm, 一つの500巻コイルにつき長さ48.7 m)

巻線機

塩ビパイプカッター

ドリル

(2) 装置の製作

アカマツの板(縦298 mm, 横146 mm, 厚さ15 mm)

木の棒(太)(直径20 mm, 長さ400 mm)

木の棒(細長)(直径10 mm, 長さ300 mm)

木の棒(細短)(直径10 mm, 長さ25 mm)

バネ(ばね定数0.231 N/mm, 自由長150 mm)

磁石(外径15 mm, 内径10 mm, 高さ5 mm, 吸着力40.4 N, 表面磁束密度407 mT)

のこぎり

接着剤

5. 手 順

(1) コイルの製作

- 塩ビパイプを長さ 83 mm にカットし、両端にドリルで直径 8 mm の穴を開ける(図 2)。
- 巻線機に a のコイルを固定しエナメル線を 500 回巻き付ける(図 3)。
- 巻き付けたエナメル線を a の穴で固定する。
- 同様に 4 本のコイルを作る。
- 1000 巻のコイルを作る(図 4)。

(2) 装置の製作(アカマツの板 2 枚を装置全体の土台とペットボトルが落ちる面とする。)

- 下板と木の棒(細長) 4 本と木の棒(太) 2 本を下板(それぞれ図 5 の薄いオレンジ、濃いオレンジの部分)に



図 2 穴を開けた塩ビパイプ。



図 3 500 巻コイル。



図 4 1000 巻コイル。



図 5 下板のイメージ図。(オンラインカラー)

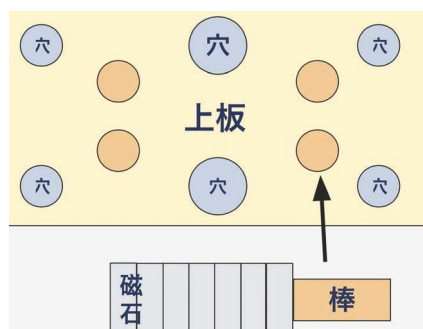


図 7 上板のイメージ図。(オンラインカラー)

接着剤で固定する。

- 各棒(細長)にバネを下板の 4 隅に通す。→棒がバネの支えになる。
- 木の棒(細短)を下板(図 5 のグレーの部分)に固定する。
- コイルを c の棒にはめる(図 6)。
- 上板の 4 箇所と 2 箇所にそれぞれ直径 24 mm, 44 mm の穴を開ける(図 7)。
- 長さ 50 mm にカットした棒(細長)に磁石を 6 つはめ込み、4 箇所取り付ける(図 8)。
- 下板に接着した棒が穴を通るように上板を被せる。

(3) 装置の作動と電流測定(図 9, 10)

- 作成したコイルの電流の向きを電流計を用いて確認する。
- 並列の回路となるよう 4 つのコイルをワニ口クリップで接続する。
- 電流計とワニ口クリップを接続する(図 11)。
- 装置を作動させ値の変動を読み取る。
- コイルに挿入する棒にはめ込む磁石の個数を各 3 つから 6 つに増やし同様に繰り返す。
- コイル 4 つ中 1 つを 1000 巻コイルに変え同様に行う。(磁石の数は 6 つのままで実験を行う。)

(4) 蓄電回路の用意

図 12 の回路を用意する。

今回はこの回路が動くかどうかを確認するために、回路の電源部分に装置を繋げる前に 1.5 V の単 1 アルカリ電池を直

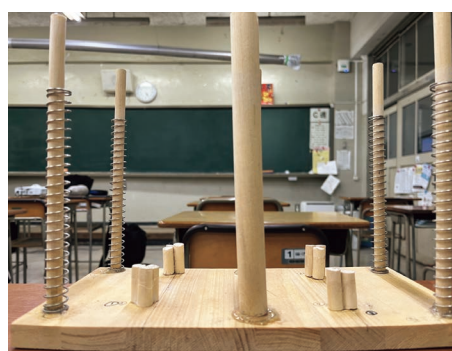


図 6 完成した下板。(オンラインカラー)

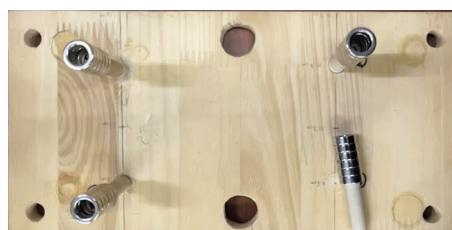


図 8 完成した上板。(オンラインカラー)

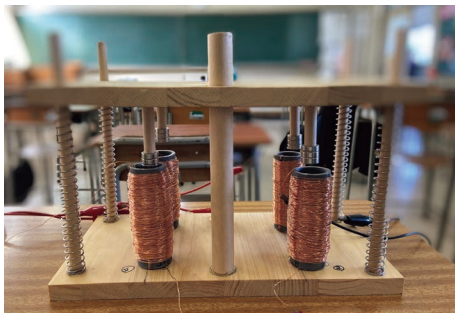


図9 完成した装置。(オンラインカラー)

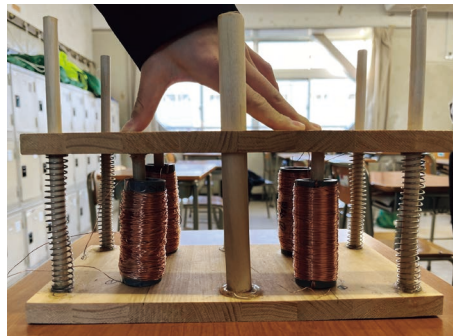


図10 装置の作動時の様子。(オンラインカラー)

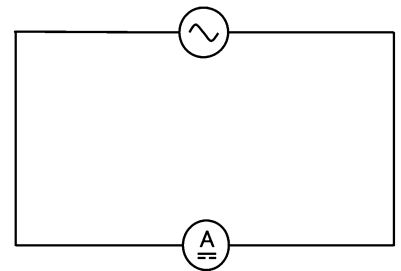


図11 (3)で使った回路.

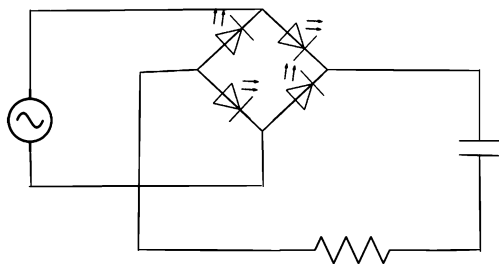


図12 蓄電回路.

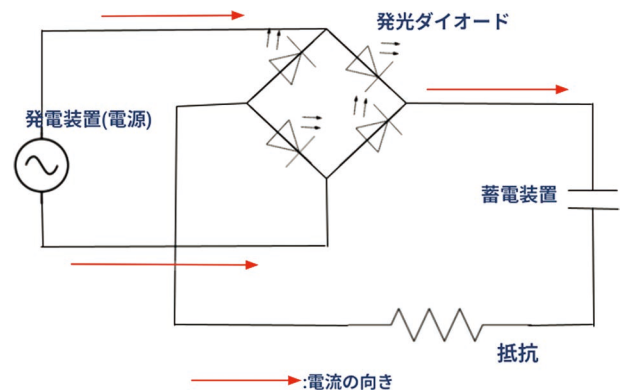


図13 回路の詳細。(オンラインカラー)

列に繋いで実験をした.

- 赤色の発光ダイオード4個(順方向電圧2.1V, 逆電圧5.0V, 順電流最大値30mA), および330Ωの抵抗を図12のように繋げる.
 - 1Fのコンデンサを繋げる.
 - 電池を繋ぎ1min保持する.
 - コンデンサを電流計に繋げ電流値を計測する.
 - コンデンサを電流計に繋げ, 電流計の針が振れないことを確認したことでコンデンサに蓄えられた電荷がないこととした.
 - 確認したコンデンサを回路にコンデンサを繋ぐ.
 - 電池を繋ぎ2min保持する.
 - コンデンサを電流計に繋げ電流値を計測する.
 - コンデンサに蓄えられた電荷がないことを確認して, 回路にコンデンサを繋ぐ.
 - 電池を繋ぎ3min保持する.
 - コンデンサを電流計に繋げ電流値を計測する.
- 蓄電が確認されたら, 装置でこれと同様の実験を行う.

(5) 回路の特徴(図13)

- 発光ダイオードの電気を通す通さない向きがあるという特徴を利用してコンデンサに向かう電気を一方方向に制限することができるので, 電気の浪費が少なく交流電流を無駄なく蓄電できる.
- 貯めた電気を発光ダイオードが発光する電力に変換することができる. →発電以外の要素になると考えられる.

6. 結 果

(装置)

表1 500巻コイルを使った装置を手でゆっくり10回, 約8s動かしたときに流れた電流の平均値.

コイル挿入棒への磁石装着数	電流値
3つ	4 mA
6つ	6 mA

表2 1000巻コイル単体を用い同様の実験を行ったときに流れた電流の値.

コイル挿入棒への磁石装着数	電流値
6つ	30 mA

表3 装置のコイルの巻数を変え同様の実験を行ったとき流れた電流の値.

コイルの巻数	電流値
4つすべて500巻	6 mA
4つのうち1つが1000巻	12 mA

(蓄電)

表4 単1電池(1.5V)2つを直列で図12の回路に繋げたときに流れた電流の値.

電池を繋いでいた時間 電流値	それぞれの時間で流れた電流		
	1 min 1 mA	2 min 2 mA	3 min 3 mA

回路に発電装置を繋げ数回動かした場合、電流計の針がメモリとして計測できない範囲で短い時間振れていたのが微量に蓄電量があると分かった.

7. 考 察

結果より、4つすべて500巻コイルを使用して装置を作動させたとき、流れた電流の大きさは6mAだった表1. また表2表3より、装置のコイルのひとつを1000巻にしたときに発電量は6mA増加したので、4つのコイルをすべて1000巻の二重巻にした場合、 $6 \times 4 = 24$ となり、全体では24mA増えると考えられる. これらのことを考慮すると、装置全体では $24 + 6 = 30$ すなわち合計で30mA発電できると考えられる. 手順(4)にある通り、動作確認の作業の結果が表4である. また、1000巻(500巻を二重に巻いた)コイル、合計の発電量30mA、このコイルの半径15.5mm、空気の透磁率 $1.26 \times 10^{-6} \text{ N/A}^2$ より磁場H、磁束密度B、磁束 Φ 、の理論値は以下の通りとなる.

$$H = 500 \times 2 \times 0.030 / (2 \times 15.5 \times 10^{-3}) = 967 \text{ A/m}$$

$$B = 1.26 \times 10^{-6} \times H = 1.22 \times 10^{-3} \text{ T}$$

$$\Phi = B \times 15.5^2 \times \pi = 9.20 \times 10^{-7} \text{ Wb}$$

よって、電圧の理論値Vは $V = |-1000 \times (\Phi - 0) / (1 - 0)| = 9.20 \times 10^{-4} \text{ V}$

つまり、この装置の電力Pは $P = 0.030 \times V = 2.76 \times 10^{-5} \text{ W}$ となる.

ベンドメカを1s動かすには合計で25A必要なのでベンドメカの電力は $25 \times 25 = 625 \text{ W}$ となる.

これらのことより、今回の実験での理論値の電力とベンドメカの必要な電力の差は $625 - V \approx 625 \text{ W}$ とまだ差がかなり大きいと考えられる.

8. 今後の展望

現在、コイルの製作は巻線機を用いて手動で行っているため効率が悪く正確性にも欠けている. またワニ口クリップの錆つきなど備品の劣化も発電量が少なかった原因として考えられる. 今回は参考文献(1)よりドーナツ状のネオジム磁石の使用といった工夫をしたが、さらに今後コイル製作の工業

化、自動化することによってコイルの巻数の増加、正確性の向上、参考文献(1)で示されていた交互巻きの導入や段ごとの巻数を変化させることなどにより発電効率は上がっていくと考えられる.

また、今回使ったコンデンサで自作の装置を用いた蓄電は電圧計の針がメモリの範囲まで振れず、時間などを測定できなかった. これは今回の実験で容量の大き過ぎるコンデンサを用いてしまったためと考えられる. 発生する電圧を計測しやすくするためにより容量の小さいコンデンサを用いる必要がある. また、オシロスコープを導入することで、時間計測も含めてより精密に今後実験していきたい.

加えて、現状のままだとペットボトルの落下場所を制限できずペットボトルを落としたとき発電装置がうまく動作しないため、今後ペットボトルの落下場所の誘導装置を作ることによって実際に想定したフォルムへと更に改良していきたい. また、改良という視点で見ればゴミ箱など、位置エネルギーを利用できそうな他のモノも日常にはありふれている. 今回自分たちが注目したのは自動販売機だったが今後また機会があるならそういったものにも取り組んでいきたい.

本論文作成にあたり、多くの方々にご指導ご鞭撻を賜りました.

昨年度まで本校に在籍されていました神奈川県立有馬高等学校教諭杉原孝治先生、本校教諭池田優太郎先生には終始適切なご指導を賜りました. ここに深謝の意を表します.

名城大学附属高等学校の伊藤憲人先生には下記参考文献(1)の詳細解説と本研究に対するご助言を賜りました. 厚く御礼申し上げます.

本校教諭伊勢遼先生には回路製作に当たり多大なるご協力を賜りました. 心より感謝申し上げます.

最後に本研究の遂行にあたり協力頂いた全ての方に重ねて御礼申し上げます.

文 献

- (1) 野田慎一郎: 電気学会論文誌 B, **134**(20214), p. NL3_6-NL3_8(閲覧日: 2024年11月10日)
- (2) 「圧縮コイルばねの特徴と種類」(購入サイト及び企業のためURL省略)(閲覧日: 2024年11月10日)
- (3) UMs 合同会社「自動販売機的全機種・全種類を仕組み、用途、メーカー別に徹底解説」
<https://ums01.co.jp/%e8%87%aa%e8%b2%a9%e6%a9%9f-%e7%a8%ae%e9%a1%9e/>(閲覧日: 2024年11月10日)
- (4) “超”モノづくり部品大賞「2015年受賞作品」
<https://cho-monodzukuri.jp/award/archive/2015/electric&electron.html>(閲覧日: 2024年11月10日)

(2024年7月9日受理)[doi:10.2320/materia.64.200]
(連絡先: 〒243-0031 神奈川県厚木市戸室2-24-1)

本 会 記 事

会 告	2025年春期講演大会参加申込みについて	204
	2025年春期講演大会 開催予定の各種シンポジウム	206
	会誌・欧文誌2025年春期講演大会関連論文原稿募集	206
	2025年春期講演大会懇親会参加募集(当日受付)	207
	令和7年春季 全国大学材料関係教室協議会講演会のご案内	207
	2025年春期講演大会ランチョンセミナー開催/学生キャリアサポート・企業展示&カタログ展示/付設展示会開催のお知らせ	208
	第15回男女共同参画ランチョンミーティング開催案内	209
	2025年秋期講演大会の外国人特別講演および招待講演募集	209
	第71回日本金属学会賞候補者推薦依頼	210
	第20回 JIM/TMS Young Leader International Scholar Award 募集	210
	日本金属学会主催国際会議企画提案募集	211
	第6回日本金属学会フロンティア研究助成募集	212
	オンデマンド配信：日本金属学会オンライン教育講座のご案内	214
	会誌・欧文誌3号目次	216
	追悼	219
	次号予告	216
	行事カレンダー	220
	新入会員	217
	掲示板	218

◎本会へのお問合せは下記URLをご利用下さい。

<https://jimm.jp/contact/>

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

会 告 (ホームページもご参照下さい)

2025年春期(第176回)講演大会参加申込みについて

2025年春期講演大会を、3月8日(土)から10日(月)まで、東京都立大学南大沢キャンパスで開催します。

ご講演発表ならびに皆様のご参加を下記の通り募集します。

高校生・高専学生ポスターセッションは、3月8日(土)に東京都立大学南大沢キャンパスで、3月13日(木)にオンラインで開催します。(選択された発表方法により開催日が変わります。)

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

～講演大会日程(会期は3日間です。～

日 時	行 事
3月8日(土) 9:00～9:40 9:50～11:45 13:00～16:30 13:00～17:15 18:30～20:30	開会の辞、贈呈式 学会賞受賞講演、本多記念講演 ポスターセッション、高校生・高専学生ポスターセッション シンポジウム講演(一般講演は行いません) 懇親会
3月9日(日) 9:00～17:30	学術講演
3月10日(月) 9:00～16:45	学術講演
3月13日(木) 14:00～16:30	高校生・高専学生ポスターセッション(オンライン)

◆懇親会

開催日時：2025年3月8日(土)

開催場所・料金：詳細本号207ページ参照

講演大会参加申込

◆申込の種別と申込期間

1) 後期(当日)申込

申込期間：2025年2月25日(火)～3月13日(木)

ウェブサイト URL：https://www.jim.or.jp/convention/2025spring_after/

決済方法：クレジットカード



2) 相互聴講(鉄鋼協会参加者 現地申込のみ)

申込期間：2025年3月8日(土)～10日(月)

ウェブサイト URL：https://www.jim.or.jp/convention/2025spring_after/

決済方法：クレジットカード



問合せ先：講演大会係 annualm@jimm.jp

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

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

会 員 資 格	事前参加申込	後期(当日)申込	相互聴講	登壇費
正員	10,000円	13,000円	—	—
非会員の維持員会社社員	10,000円	13,000円	—	10,000円
非会員のシンポジウム共催・協賛の学協会会員	10,000円	13,000円	—	10,000円
2025年3月1日時点で65歳以上の個人会員 ^{*1}	無 料	無 料	—	—
学生員 ^{*2}	6,000円	7,000円	—	—
ユース会員 ^{*3} (中高生会員, 高専専科1年生以下, 大学3年生以下)	無 料	無 料	—	5,000円 ^{*3}
非会員 ^{*4} 一般	24,000円	27,000円	—	10,000円
非会員 ^{*4} 学生(大学院生含む)	14,000円	16,000円	—	5,000円
鉄鋼協会講演大会参加者(一般学生問わず) 講演者は選択できません。	—	—	6,000円	—

・お支払後の取消は、ご返金できませんのでご了承下さい。

・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。

^{*1} **65歳以上の個人会員**：会員情報に生年月日の登録がない場合は課金されます。会員情報に生年月日を登録していない方は、**参加申込みの前に annualm@jimm.jp まで**会員番号・氏名・連絡先・生年月日をお知らせ下さい。

^{*2} **学生員**：卒業予定変更等により登録されている会員種別が実際と異なる場合は、**事前に会員種別の変更手続きを行って**から、大会参加を申込み下さい。会員情報に登録された卒業年次を超えると、自動で正員に変更されます。

^{*3} **ユース会員が高校生ポスター発表以外で発表する場合は、登壇費5,000円が必要です。**

^{*4} 非会員は講演申込サイトの各講演種別の「**非会員はこちら**」をクリックして、講演申込みをして下さい。
非会員の参加申込者には、1年間の会員資格を付与します。ただし特典は重複して付与しません。

◆参加証

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

*「参加証ケース」をお持ちの方はご持参下さい。ケースが必要な方には受付で配布します。

◆講演概要の閲覧・ダウンロード

公開場所：講演大会ウェブサイト(ログインが必要です)

公開日：大会2週間前の**2025年2月22日(土)**(特許関係の手続きは、公開日までに済ませて下さい。)

閲覧のためのログイン方法が変わります！

① confit 共通アカウントを作成(今回のみで OK. 次回から不要)



②学会で配信する「参加者個別認証コード」と結びつける作業をする。

※参加者個別認証コードは会員番号や会員パスワードではなくなります。

参加者個別認証コード：

- (事前参加申込の方) 参加費を納入済みの方に、概要公開日に「参加者個別認証コード」を配信します。
(後期(当日)申込の方) 参加申込受理通知に記載の「参加者個別認証コード」をお使い下さい。

◆講演概要集の購入

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

◆相互聴講について

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

申込資格：日本鉄鋼協会に参加登録された方(会員資格問わず)。

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

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

2025年春期講演大会 開催予定の各種シンポジウム

公募シンポジウム

- S1 材料機能特性のアーキテクチャー構築シンポジウムⅥ—マルチスケール構造制御による材料設計の新展開—
- S2 微小領域の力学特性評価とマルチスケールモデリング
- S3 材料表面の化学Ⅱ—めっき・耐食性・耐酸化性・触媒研究の新展開—
- 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Ⅶ

企画シンポジウム

- K1 What's 技術士？国家資格技術士(金属部門)になりませんか？
- K2 生体機能を指向したバイオマテリアルデザイン
- K3 産学共創シンポジウム・カーボンニュートラルを目指して2

会誌2025年春期大会講演精選論文原稿募集 欧文誌 Selected Papers from JIMM Spring Meeting (2025) 原稿募集

下記の投稿論文を募集いたします。多くのご投稿をお待ちしております。

◎日本金属学会誌「2025年春期大会講演精選論文」89巻9号および10号(2025年)掲載

Materials Transactions「Selected Papers from JIMM Spring Meeting (2025)」66巻9号および10号(2025年)掲載

◎原稿締切 **2025年5月1日(木)**

◎予備登録、投稿および審査方法は、一般投稿論文に準ずる(ホームページの会誌・欧文誌投稿の手引き・執筆要領参照)。

◎欧文誌掲載論文は投稿掲載費用を必ず負担する。(会誌掲載論文は投稿掲載費用無料)

問合先 sadoku@jimm.jp

2025年春期講演大会
日本金属学会・日本鉄鋼協会合同懇親会開催・参加募集案内(当日受付)

2025年春期講演大会における懇親会を日本鉄鋼協会と合同で下記の通り開催いたします。ご参加を希望される方は期日までに下記要領にてお申し込み下さい。

開催日時 **2025年3月8日(土)18:30~20:30**

開催場所 **LINK FOREST(〒206-0034 東京都多摩市鶴牧3丁目5-3 KDDI 多摩センタービル)**
(多摩センター駅から徒歩約10分)



アクセス:



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

当日の参加について

〈予約申し込みの方〉

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

〈当日申込の方〉

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

問合先

〒980-8544 仙台市青葉区一番町 1-14-32

(公社)日本金属学会 講演大会係

☎ 022-223-3685 ☎ 022-223-6312 E-mail: annualm@jimm.jp

令和7年春季 全国大学材料関係教室協議会講演会のご案内

日 時 **2025年3月10日(月)15:00~16:00**

場 所 **東京都立大南大沢キャンパス 1号館1階110教室**

聴講料 **無料**

講演会 **「マテリアル DX プラットフォームの挑戦」** 物質・材料研究機構 技術開発・共用部門 部門長 出村雅彦 先生

ランチョンセミナー開催のお知らせ

2025年春期講演大会にて、ランチョンセミナーを開催いたします。本セミナーは、参加者の皆様に講演大会の昼食時間を利用して昼食をとって頂きながら、企業による最新の技術情報を聴講いただく企画です。参加無料です。多くの皆様のご参加をお待ちしております。

主催 公益社団法人 日本金属学会

企画 株式会社 明報社

日時 2025年3月9日(日) 12:10~12:50

会場 東京都立大学・南大沢キャンパス 金属学会講演会場

参加費 無料 昼食(ドリンク付)を無料提供いたします。

参加方法 3月8日(土)8:30より参加券を「付設展示会場」付近にて配布いたします。

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

※予定数に達し次第、配布は終了いたします。(参加券をお持ちでない場合でもご聴講頂ける場合がございます。)

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

参加予定企業

3/9(日) 12:10~12:50

- オックスフォード・インストゥルメンツ(株): F会場(12号館1階101)
「新世代 EDS 検出器 Ultim Max Infinity の特長と解析事例」
- 産業技術総合研究所: I会場(12号館1階104)
「産総研と材料・化学領域の紹介」
- (株)新興精機: M会場(12号館2階202)
「AIを用いた高度3D画像解析ソフトウェア Dragonfly 3D World」

学生キャリアサポート・企業展示&カタログ展示

2025年春期講演大会・ポスターセッション会場にて、学生キャリアサポート・企業展示&カタログ展示を開催いたします。本企画は、学生参加者の皆様に、各社の展示ブースにて、各社の会社概要、今後の採用情報、インターンシップ募集情報、研究開発動向等を紹介解説するものです。学生参加者の皆様には、是非ご来場頂き、リクルート活動にお役立て下さい。参加・見学無料です。多くの皆様のご参加をお待ちしております。

主催 公益社団法人 日本金属学会

企画 株式会社 明報社

日時 2025年3月8日(土) 学生キャリアサポート・企業展示&カタログ展示 13:00~16:30(予定)

会場 ポスターセッション会場(8号館1階)

参加・見学 無料

参加予定企業 (1/未現在)

- 産業技術総合研究所
- (株)徳力本店
- (株)豊田中央研究所

カタログ展示

- 合同製鐵(株)

付設展示会開催のお知らせ

2025年春期講演大会にて、付設展示会を開催いたします。金属材料関連各社の製品やサービスを紹介いたします。

また、展示会場では、ランチョンセミナーのチケット配布(無料)、コーヒー無料サービスも実施する予定です。

是非、展示会場へご来場下さい!(大会ホームページでも出展情報を掲載いたします)

開催期間 2025年3月8日(土)~10日(月) 9:00~17:00
(10日は12:00まで)

展示会場 東京都立大学・南大沢キャンパス・11号館1F

出展予定企業 (1/未現在)

- (株)アカデメイア
- アドバンスソフト(株)
- 茨城県中性子ビームライン
- オックスフォード・インストゥルメンツ(株)
- (株)キューミックス
- (株)サーモ理工
- (株)新興精機
- テガラ(株)
- 東芝ナノアナリシス(株)
- 日本電子(株)
- (株)ニューメタルスエンドケミカルスコーポレーション
- ブルカー・ジャパン(株)
- (株)モルシス
- (株)ライトストーン

カタログ展示

- 文部科学省 マテリアル先端リサーチインフラ (ARIM)
- (株)山本科学工具研究社

第15回男女共同参画ランチョンミーティング開催案内 「金属材料分野での多様なキャリアパス」



金属材料分野でのキャリアパスとしてどのようなものがあるでしょうか。企業、大学、独法研究機関など様々です。また、一言で企業といっても様々な分野で活躍可能です。金属材料を学んだ先輩達がどのような進路で活躍しているか話を聞いてみませんか。

仕事のこと、キャリアの積み上げ方、家庭のこと、気になるいろいろなことを、気軽に質問してみてください。学生さん、若手の研究者、技術者の方、若い方にエールを送りたい方、大勢の方のご参加をお待ちしております。

【内容紹介】

今回は、企業の研究や製造で活躍されている、育児休暇取得を経験された3名の男性をお招きし、育児中の経験や家族・職場同僚との協力などについて、パネルディスカッション形式でお話を伺います。経験者の声を通じて、育児休暇の現状と課題、メリットや働き方の変化について考えます。会場の皆様からのご質問もお受けする予定です。

これから社会にでる学生の皆様、男性・女性を問わず、家庭と仕事の両立を目指している、または今まさに実現されている皆様に、広くご参加頂けると幸いです。

主 催 日本金属学会・日本鉄鋼協会男女共同参画委員会

日 時 2025年3月10日(月)12:00~13:00

会 場 東京都立大学南大沢キャンパス 1号館3階 308教室

参加費 無料 弁当30人分までは無料提供。

(講演大会参加申込の有無にかかわらず、このミーティングに参加できます!!)

プログラム

司会 西畑 ひとみ(日本製鉄)

12:05~12:10 開会の挨拶

男女共同参画委員会委員長 西畑 ひとみ(日本製鉄)

12:10~12:20 パネラー紹介

12:20~12:50 質疑応答

12:50~12:55 閉会の挨拶

男女共同参画委員会副委員長 上田 正人(関西大学)

2025年秋期講演大会の外国人特別講演および招待講演募集

春秋講演大会における外国人研究者による特別講演と招待講演については会員からの推薦をもとに、国際学術交流委員会において審議採択し、講演実施細目については講演大会委員会で決定いたします。2025年秋期講演大会の特別講演と招待講演を募集いたしますので、下記要領によりご推薦下さい。

特別講演

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

招待講演

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

推薦用紙

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

推薦書提出期日 2025年5月9日(金)

照会・推薦書提出先

〒980-8544 仙台市青葉区一番町 1-14-32

(公社)日本金属学会 国際学術交流委員会宛

☎ 022-223-3685

E-mail: stevent@jimm.jp

第71回日本金属学会賞 候補者推薦依頼

第71回日本金属学会賞の候補者の推薦を下記要領にて募集いたします。

第71回学会賞推薦要領

主 旨 金属およびその関連材料の学術および科学技術の振興に顕著な貢献をした者に授賞するものです。

推薦資格 本会代議員

審査基準 この賞の審査基準は、下記の通り

- (1)当該分野を切り開く先導的な役割を果たしたか
- (2)学術上重要な発見をしたか
- (3)効果が大きい重要な発明をしたか
- (4)学術や技術の進歩に大きく貢献したか
- (5)金属およびその周辺材料の科学技術の振興に貢献したか
- (6)研究や開発ならびに育成や啓発によって社会へ貢献したか
- (7)金属学会の活動に貢献したか

推薦方法 下記 Web フォームよりご推薦下さい。

推薦書類提出締切 2025年 5 月 7 日(水)

留意事項

- ・本賞の受賞者は、同じ年度の増本量賞、谷川・ハリス賞を受賞することはできません。

推薦書提出先 <https://data.jimm.jp/jim/shou/g/sui/>

問合せ先 (公社)日本金属学会 学会賞係

〒980-8544 仙台市青葉区一番町 1-14-32

☎ 022-223-3685 FAX 022-223-6312 E-mail: award@jimm.jp

第20回 JIM/TMS Young Leader International Scholar Award 募集

本会では、若手研究者及び技術者の活動の活性化を図り、併せて TMS との国際交流を促進させることを目的に JIM/TMS Young Leader International Scholar Program を設けており、TMS への派遣者を募集いたします。

決定した派遣者は、金属学会の Young Leader International Scholar Award 受賞者として、2026年 TMS Annual Meeting (2026年 3 月15日～19日：米国 California 州 San Diego)に派遣し、講演発表するとともに TMS から表彰を受けていただきます。また、大会前後に関連機関の訪問も可能です。

募集要領

- 応募資格**
- ①日本金属学会の正会員で派遣時点で満35歳以下であり、本会の活動に熱意を持っている人。
 - ②日本金属学会の機関誌に論文が掲載されたか、または講演発表した経験があり、かつ英語で講演発表ができる人。
 - ③日本金属学会の若手世代の代表として、責任ある行動がとれる人。

派遣人数 若干名(1～2名)/1回

応募手続 応募(推薦)申請書(所定の用紙)に記入の上、事務局まで E-mail で送信下さい。

応募書類 応募(推薦)申請書

- ①候補者情報
- ②応募理由(400字程度)
- ③論文および講演発表のリスト：5編程度
国際会議等での口頭発表リスト：5編以内
- ④TMS Annual Meeting で発表予定の講演のタイトルとアブストラクト(英語で400word程度)。
- ⑤研究内容と研究者として今後の抱負(英語で400word程度)。
- ⑥TMS Annual Meeting への参加・発表で期待される成果(英語で300word程度)。
- ⑦米国の大学・研究所・企業などへの訪問計画と目的(先方との事前コンタクトは不要)。

本会補助 派遣費用上限30万円。ただし、TMS への派遣に合わせて北米内の大学・研究機関・企業等を訪問する場合は上限40万円。

応募締切日 2025年 5 月 8 日(木)

提出先 〒980-8544 仙台市青葉区一番町 1-14-32

(公社)日本金属学会「Young Leader」係

☎ 022-223-3685 E-mail: stevent@jimm.jp

日本金属学会主催国際会議企画提案募集

本会が主催する国際会議の企画提案を募集します。2024年度以降開催の国際会議が対象です。期日までにご提案下さいますようお願いいたします。

提案締切日 2025年5月30日(金)

提案要項 下記事項を記載した提案書(A4版, ホームページよりダウンロードして下さい)を, 本会会長宛で申請して下さい。

- (1) 会議の名称(和文名・英文名)
- (2) 会期
- (3) 開催地・会場予定
- (4) 会議の目的・特徴
- (5) 日本開催の経緯と意義
- (6) 計画概要
 - a. 協賛, 後援団体
 - b. 主要準備日程
 - c. 使用語
 - d. 参加予定国(国名・国数)
 - e. 参加予定者数(国内外)
 - f. 著名な国内外参加予定者(氏名・所属・役職)
 - g. パラレルセッション数およびポスターセッションの有無
 - h. プロシーディングスの出版(出版元・予定頁数, 製作部数・頒価・配布方法)
 - i. 予算(収入・支出明細)
- (7) 準備委員会委員(氏名・所属・役職)
- (8) 提案(連絡)責任者(氏名・所属・役職・住所・電話・E-mail)

提案書送付先 〒980-8544 仙台市青葉区一番町1-14-32
(公社)日本金属学会 国際会議募集係
E-mail: stevent@jimm.jp

—公益社団法人日本金属学会主催国際会議開催の実施方針—

1. 基本的要件

- (1) 日本での開催の要望が国内外にあり, かつ本会会員からも要望されていること。
- (2) 関係国内学協会の後援を得られること。
- (3) 会議の構成, 主要題目, 発表予想件数, 日程, 使用語, 参加予定者数, 参加予定国, 予算規模, 会議の計画内容が本会が主催の会議としてふさわしいと認められること。
- (4) 本会主催の会議としてふさわしい会議計画の内容とは原則として次のようなものをいう。
 - ①会議の構成, 主要題目, 日程, 使用語が適切である。
 - ②参加国数及び国外参加者が10ヶ国50名以上予定されている。
 - ③参加予定国及び参加予定者は確実な根拠に基づいて推定されている。
 - ④予算規模及び内容は適切なものである。
 - ⑤当該分野における国内外の代表的学者の参加が予定されている。

- (5) 会議のProceedingsを刊行する場合は, 多重投稿等ミスコンダクトが生じないよう対策をとること。実施する対策を事前に届け出て本会の承認を得ること。

2. 会議の規模と区分

- (1) JIM 国際シンポジウム(JIMIS) 150名未満
- (2) JIM 国際コンファレンス(JIMIC) 151名以上
- (3) その他の国際会議(国際的要請や国際連携に基づいて主催する国際集会等)

3. 開催頻度

必要に応じ随時開催する。

4. テーマの選定方法

調査研究推進委員会で審議, 優先順位をつけて選定する。選定したテーマを国際学術交流委員会に提案, 同委員会で審議, 開催テーマ, 会議の区分等を決定して, 理事会に答申, 開催テーマ, 会議の区分等が正式に決定する。

5. 財源及び経費

- (1) 財源
 - ①参加費
 - ②国庫補助金
 - ③地方公共団体補助金
 - ④民間財団補助金
 - ⑤本会国際会議開催準備資金および国際学術交流資金からの補助金(上限350万円)
 - ⑥他学協会補助金
 - ⑦寄付金
- (2) 経費
会議に要する経費は, 慣例に従って下記の項目を計上する。
 - ①会議準備費
 - ②本会議費
- (3) 成果刊行費
 - ①印刷製本費(プロシーディングス製作費)
 - ②編集費(論文校閲料, アルバイト料, その他)
 - ③通信運搬費(プロシーディングス送料, 発送用資材等)
- (4) 予備費

6. 会議のプロシーディングス出版

JIMIS, JIMICについては, 統一したスタイルにより, 当該会議の予算により本会でプロシーディングスを作成することを原則とする。

7. 業務処理

本会の「国際会議開催準備マニュアル」を参考にして当該会議組織委員会(実行委員会)で処理する。本部事務局では組織委員会(実行委員会)の指示に従って業務の一部を処理する。

8. 会計処理

本会が主催する国際会議の会計処理は, 本会からの補助金の有無にかかわらず, 公益法人会計基準, 本会定款・細則及び会計処理規程並びに国際会議開催会計処理マニュアルに準拠して, 適切な処理をすることを原則とする。

9. 国際学術交流資金からの補助金

補助金は, 原則として一事業につき上限を350万円とする。ただし, 1年間に複数の事業(国際会議)を行う場合は, 一年あたり500万円を上限とする。

補助金の残余は会議終了後に全額を返却する。

第6回日本金属学会フロンティア研究助成募集

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しますので、助成の対象となる研究を募集いたしますので、応募下さい。

募集期間：2025年3月1日(土)～4月30日(水)まで

募集要項

1. 応募資格

応募者(代表者)は、2025年4月1日時点で45歳以下の日本の教育機関又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・大学院生及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。

応募は一人1件とします。同一研究室からの複数応募は可能ですが、新規採択は1件とする。

活動開始時には、非会員は会員になることが望ましい。

過去に研究代表者として助成を受けた応募者であっても、研究期間が終了すれば下記のすべての条件を満たした場合、応募が可能です。

(1)助成を受けた研究の成果報告書の提出が完了していること。

(2)助成を受けた研究を本会講演大会又はセミナー・シンポジウムにおいて2件以上発表済みであること。

(3)助成を受けた研究の成果を本会の欧文誌(Materials Transactions)又は和文誌(日本金属学会誌)に投稿済みであること。(採否は問わない)

過去に採択されなかったテーマで再応募する場合は新たに申請書を提出する。

2. 助成の対象となる研究

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調査、試験、研究及び開発とする。

3. 研究期間：助成研究の実施期間は、原則2年間とする。研究開始日は原則、交付決定予定日(9月)以降で、かつ当該年度内とし、研究開始日から年度をまたいだ2年間とする。

4. 助成件数：年間15件以下

5. 助成金額：1件あたり、150万円以下

6. 助成金の使途

フロンティア研究助成の助成金の使途は、申請者が申請した研究テーマの研究遂行に必要な費用に限定するものとし、大学や研究機関への間接経費の支出は想定していないが、特別な事情により、やむを得ず間接経費に充当する場合は必要最低限とし、直接経費の10%を上限とする。(研究代表者(申請者)からの求めに応じて所属機関へ「研究支援経費免除申請書」の発行可能)

7. 助成金の交付方法及び交付期間

研究助成金の交付方法は、原則として、助成実施者が所属する組織に対する奨学寄附の形とする。共同研究者が別の組織に所属する場合は、複数の組織に交付することは可能です。

研究実施者は、速やかに助成金受領のために助成金交付の手続き(奨学寄附受付窓口の連絡等)を行うこと。

8. 応募方法

(1)提出書類：所定様式の「研究助成金申請書」に必要事項を記入し、申込専用サイト(提出方法参照)からアップロードし提出する。申請書の様式は、本会のホームページからダウンロードできます。

必要事項：応募者、研究題名、研究分担者(共同研究者がある場合)、予算(費目、金額)、研究目的(背景、必要性、意義、価値、成果活用の見込み等)、研究計画(実施計画、成果目標等)、報告予定、該当する分科、金属学会での活動実績等

(2)作成要領

「研究助成金申請書」に記載された作成要領に従って日本語又は英語で作成すること。申請書については、作成要領に明記されたページ数制限(概ね4ページ程度)を遵守すること。制限ページ数を超えた申請は受け付けません。

(3)提出方法

申込専用サイト：<https://data.jim.or.jp/jim/fro/tou/>
作成した研究助成金申請書を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。

郵送やE-mail、Faxでの申請は受け付けません。提出書類等は、採否にかかわらず返却しません。

【遵守事項】

研究助成金の交付を受ける際には、研究実施者(応募者及び共同研究者)は、次の事項を遵守下さい。

①助成研究は、あらかじめ本会に提出した助成研究実施計画に従って実施すること。

②助成研究の実施過程において助成研究実施計画を変更する必要がある場合(中止する場合を含む)は速やかに報告し、重大な変更については本会と対応を協議すること。

③助成実施者が所属している組織から別の組織に異動する場合は、本会と対応を協議すること。

④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又は英語で作成し、原則としてE-mail添付にて提出すること。なお、成果報告書は“まてりあ”への成果報告(2頁)の投稿に代えるものとし、まてりあ及び金属学会ホームページに公表する。なお、成果報告は研究終了からおおむね1年後に“まてりあ”に掲載するものとする。

⑤研究成果は研究開始時から研究完了後1年までの間に、本会の講演大会又はセミナー・シンポジウムにおける発表2件以上、及び本会の欧文誌(Materials Transactions)又は和文誌(日本金属学会誌)に論文を必ず投稿しなければならない。

- ⑥ 本会から求められた場合は、実施状況を報告すること。また本会が研究施設への訪問を希望した場合は、可能な範囲で対応すること。
- ⑦ 研究実施者又は研究実施者の所属する組織は、帳簿を備え、助成研究に係わる経理を他の経理と明確に区別し、本会から照会があった場合はこれに応ずること。
- ⑧ 研究成果を学会・学術論文誌・新聞等に発表する場合は、事前に本会に連絡するとともに、本会から資金援助を受けたことを明記すること。
- ⑨ 以下の場合、交付された研究助成金の全額を返還するものとする。
- ・実施計画に記載した研究を実施しなかったとき。
 - ・提出期限後1年を経過しても研究成果報告書の提出及び本会の講演大会又はセミナー・シンポジウムにおける2件以上の発表及び本会の欧文誌 (Materials Transactions) 又は和文誌 (日本金属学会誌) への論文投稿がないとき。
- ⑩ 研究実施者が研究中断を申し出た場合は、交付された研究助成金の一部を返還するものとする。返還額は、調査研究委員会が決定する。

2. 助成研究の成果の帰属
- 助成研究の成果として得られた特許等の知的財産権は、原則として研究実施者に帰属します。
3. 助成研究の成果の公表等
- 成果報告は、この法人の会報及びホームページ上で一般の閲覧に供します。
4. 申請書記載情報の取り扱い
- 申請書に記載された研究情報については、審査・選考以外の目的には一切使用しません。
- また、個人情報については、本会外へは一切漏洩しません。
5. その他留意事項
- ① 採否の事由は非公開とし、これに関する問い合わせにはお答えしません。
- ② 研究助成金の申請後、何らかの理由により研究を実施できないことが判明した場合、速やかに本会に報告すること。

問合せ (公社)日本金属学会フロンティア研究助成係
E-mail: stevent@jimmm.jp ☎ 022-223-3685

【留意事項】

1. 機器・設備等の帰属
- 助成金により取得された機器・設備等は、原則として研究実施者の所属する組織に帰属します。



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。 ・申請時には、構成員は5名以上であり、非会員を構成員とすることができるが、過半数は正会員であること。 ・構成員に最低1名は産業界のメンバーが入っていることが望ましい。 ・活動開始時には、非会員の構成員は会員になること。	応募者(代表者)は、応募年4月1日時点で45歳以下の日本の教育機関または公的研究機関に所属し、日本国内で研究に従事する者(学生・大学院生および企業との兼務者を除く)であること。ただし、共同研究者は国外でも可とする。他
研究期間	5年間(申請により最長8年可)	2年間(延長なし)	2年間
支給金額	年間運営費 10万円 用途は、会議費、旅費交通費、通信運搬費、消耗品費、印刷製本費等の運営費用とする	年間50万円を上限 用途は、会議費、旅費交通費、通信運搬費、消耗品費、印刷製本費等の運営費用とする	150万円以下 用途は、研究等に直接必要な費用及び所属組織の必要最低限の間接経費とする
審査	調査研究委員会にて審査後、理事会にて承認	調査研究委員会にて審査後、理事会にて承認	調査研究委員会にて審査後、理事会にて承認
採択上限	新規2件程度、更新2件程度	5件程度	15件以下
活動報告	研究会活動期間中に講演大会公募シンポジウムや金属学会シンポジウムを計画すること。	講演大会において講演(若手研究グループの企画セッション等が望ましい)を行う。 1年経過後および活動終了後に報告書A4版1枚を調査研究委員会に提出し、会報および本会ホームページにも掲載する。	研究終了6ヶ月後までに、終了報告書(A4様式1枚)及び成果報告書を日本語(専門語等で部分的に外国語を使用することは可)で作成。 研究成果は研究開始時から研究完了後1年までの間に本会の講演大会における発表2件及び本会の欧文誌又は会誌に論文を投稿すること。
募集期間	例年7月会告 締切9月初旬	例年7月会告 締切9月初旬	3号会告 募集期間3月1日～4月末日



オンデマンド配信：日本金属学会オンライン教育講座 「電子顕微鏡と格子欠陥の基礎」

配信：2025年3月31日(月)～4月27日(日)

講義概要

本講座では電子顕微鏡による格子欠陥の解析を行うために必要不可欠な回折コントラストについて、結晶学の基礎から電子顕微鏡による実際の観察例までやさしく解説します。難解な数学は一切用いずに格子欠陥の回折コントラストに迫ります。各講義の内容は下に記載しています。

本講座は、2024年6月に開催した当該講座の録画をオンデマンドで視聴いただきます。配信期間中は好きな時間に聴講できます。

カリキュラム

1. 結晶学の基礎の基礎
2. ステレオ投影
3. 転位論の基礎
4. 電子顕微鏡の基礎
5. 明視野(BF)像と暗視野(DF)像、制限視野回折(SAD)
6. 欠陥のコントラスト
7. 走査電子顕微鏡(STEM)
8. 最新の研究例

講師紹介

愛知工業大学 客員教授 坂 公恭 先生

1964年3月名古屋大学工学部金属学科卒業、1969年3月名古屋大学大学院工学研究科博士課程修了、1970年11月名古屋大学工学部助手、1977年9月～1979年8月英国オックスフォード大学留学、1979年名古屋大学助教授、1988年名古屋大学教授、2005年3月名古屋大学名誉教授、2007年6月～2011年3月名古屋大学特任教授、2012年4月～2014年3月知の拠点あいち嘱託研究員、2014年4月愛知工業大学客員教授、現在に至る。

コーディネーター 名古屋工業大学 准教授 宮崎秀俊

視聴期間 2025年3月31日(月)～4月27日(日)

視聴方法 オンデマンド配信システム UIshare から視聴いただきます。

資料は同システムのウェブサイトからダウンロードいただけます。

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

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

申込締切 2025年4月7日(月)

受講料

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

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

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

受講料支払方法 ①カード決済、②コンビニ決済、③銀行振込のいずれかをご利用下さい。

問合先 〒980-8544 仙台市青葉区一番町 1-14-32

(公社)日本金属学会 セミナー・シンポジウム参加係

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

【各講義の内容】

「結晶学の基礎の基礎」

ここでは FCC, BCC, HCP を中心に結晶方向、結晶面の定義について述べるが、特に FCC, BCC に重点を置く。逆格子の概念は結晶学でも難解とされているが、逆格子は結晶面の法線方向に対応することを強調した。

「ステレオ投影」

ステレオ投影は本来、球状物体の表面の位置を平面上に投影する方法のひとつであり、地球上の地点を2次元に投影した地図に対応するものである。無味乾燥な結晶方位や面方位とは少し離れて、日常慣れ親しんだ地球上の都市を例にしてステレオ投影の操作の演習をしてみよう。ロンドン-東京間が約1万キロであることがすぐわかる。また、結晶表面の情報(トレース)から内部の結晶面を決定するトレース解析についても詳述する。

「転位論の基礎」

転位の基礎はバーガース・ベクトルである。バーガース・ベクトルを定義するものがバーガス回路である。これが理解できれば転位論が理解できたといっても過言では無い。逆にバーガス回路が理解できないと転位論の理解はおぼつかない。拡張転位、部分転位、積層欠陥、トンプソンの四面体についても述べる。

「明視野(BF)像と暗視野(DF)像」

結晶による回折について述べる。回折には Bragg の法則が適用されるが、Bragg の法則にドンピシャリあっているか、わずかにずれているか、全く離れているかによってコントラストがつくのが回折コントラストである。この理解には Ewald 球の理解が必須である。回折効果を最大限に活用するためには小さな(対物)絞りをいなければならないことを強調したい。電子顕微鏡では電子回折図形(逆格子)と拡大像(実格子)が同時に観察できる。これらを結びつけるのが DF と制限視野回折である。電子回折図形の指数付けについても演習する。DF の有用性も強調したい。

「転位のコントラスト」

いよいよ本題である。転位のバーガース・ベクトルの決定法、積層欠陥の intrinsic と extrinsic の識別法、転位ループが格子間原子タイプか空孔タイプかの識別法など詳述する。回折コントラスト法での高分解能であるウィーク・ビーム(WB)法についても詳述する。STEM-LACBED についても簡単に述べる。

「厚い試料を見る必要性」

最近では電顕の高分解能化に伴い薄い試料を見ることが日常化している。しかしこれでは2次元に投影した情報しか得られず、3次元情報は得られない。この対処法としてはステレオ観察がある。超高圧電子顕微鏡(HVEM)はこれに最適であるが、最近厚い試料を観察することが決定的である事象に遭遇した。即ちレーザによる結晶内部の損傷で、薄い試料の観察では肝心のことが完全に欠落してしまう。最後にこの最新情報を提供して皆様の参考にしたい。

〈参考書〉

「結晶電子顕微鏡学」(内田老鶴圃)

「問題と解答 結晶電子顕微鏡学」(内田老鶴圃)

「結晶転位論」(丸善出版)

協賛予定 エネルギー資源学会、応用物理学会、金属材料研究開発センター、軽金属学会、軽金属製品協会、合金状態図研究会、資源・素材学会、ステンレス協会、素形材センター、電気化学会、電気学会、日本アルミニウム協会、日本 MRS、日本化学会、日本ガスタービン学会、日本機械学会、日本材料科学会、日本材料学会、日本磁気学会、日本セラミックス協会、日本塑性加工学会、日本チタン協会、日本铸造工学会、日本鉄鋼協会、日本物理学会、日本分析化学会、粉体粉末冶金協会



日 本 金 属 学 会 誌 掲 載 論 文

Vol. 89, No. 3 (2025)

レーザー粉末床溶融結合法により作製した MXene 添加
Ti-6Al-4V 合金の組織と機械的性質

張 宇, 董 明琪, 周 偉偉, 野村直之

Materials Transactions 掲載論文

Vol. 66, No. 3 (2025)

—Review—

**Review: Copper Fine Particle/Nanoparticle-Based
Sintering Joining Material**

Kazuki Tamura, Masaki Nishio, Mai Thanh Nguyen
and Tetsu Yonezawa

—Regular Article—

Microstructure of Materials

**Effect of Annealing Temperature on Microstructure,
Mechanical and Corrosion Properties of
TiVNbZr_{0.5}Hf_{0.5} Light-Weight Refractory High
Entropy Alloy**

Nguyen Van Toan, Doan Dinh Phuong,
Dinh Chi Linh, Nguyen Thi Thanh Nga, Le Manh Tu,
Do Van Kiem, Dang Quoc Khanh, Bui Duc Long
and Tran Bao Trung

**Strengthening Mechanisms of Heterogeneous
Nano-Structured Cu-Zn-Si Alloy Bars Fabricated
by Caliber Rolling**

Hiromi Miura, Yoshitake Matsuo,
Yojiro Oba, Yoshiteru Aoyagi and Chihiro Watanabe

Mechanics of Materials

**An Economical Method for Synthesizing Rare
Earth Hexaborides and Tetraborides**

Ya-Long Wang and Guo-Hua Zhang

**Effect of Nickel Addition on Precipitate Microstructures
and Strength at an Elevated Temperature
in Wrought Al-Si-Cu-Mg Alloys**

Naoya Sugatani, Masayoshi Dohi, Taiki Tsuchiya,
Seungwon Lee and Kenji Matsuda

**Protection Efficiency of Triethanolamine
Decanedioate as a Water-Soluble Corrosion Inhibitor
for Steel in Metalworking Fluids**

Thitiporn Tocharat, Duangamol N. Tungasmita
and Sukkaneste Tungasmita

Materials Chemistry

**Effects of Thermal Pretreatment on the Oxidative
Dissolution of Chalcopyrite: Electrochemical
Study with Synthetic Minerals**

Katsuya Komorita,
Yu-ki Taninouchi and Hiroaki Nakano

**Air Filtration and Monitoring of Human Respiratory
Signs in Community Sports and Fitness
Venues Based on Ag@CNTs**

Qiji Pan and Wen Jia

Materials Processing

**Properties of Sintered Cantor High-Entropy Alloy
Pure-Nickel-Screen-Plasma-Nitrided at Varying
Gas Pressures**

Jiaxin Peng and Akio Nishimoto

**Prediction of Wrinkling in Thin-Walled Tube
Hydraulic Push-Pull Bending Process Based on
Neural Network**

Xin Zhang, Liming Wu, Qi Liu and Mingjun Wen

**Effects of Sulfur Adsorption on Surface Tension
of Liquid Copper**

Ryusei Hakuzan, Ryota Ishiguro,
Yusaku Seimiya, Norihiro Takasu and Shumpei Ozawa

**Microstructure of Repair Welding Heat-Affected
Zone of a Mo-Modified AISI H13 Hot-Work Tool
Steel for Die-Casting Die**

Yohei Sakuraba, Ryota Kawakami and Naofumi Ohtsu

Engineering Materials and Their Applications

**Numerical Analysis of Time-Dependent Springback
in L-Bending of Advanced High-Strength
Steel Sheet Based on Unified Constitutive Model**

Kouki Matsugi and Ryutaro Hino

**Turning Machinability of SiC Particle Reinforced
Aluminum Alloy Composites**

Kazunori Asano, Jinrong Liu, Takashi Fujita,
Mutsuo Hayashi, Shuhei Katsumata and Shogo Ochiai

まてりあ第64巻4号 予告

〔金属なんでもランキング Ⅰ〕 No. 27 融解時のモル体積変化

〔最近の研究〕 電場-スピン相関材料を用いた反強磁性スピントロニクスの新展開 ……阪大 白土 優
多元系 Mo-V 複合酸化物触媒の局所構造の解明と活性発現機構 ……東京科学大 石川理史

〔新進気鋭〕 金クラスター担持触媒の精密組成制御による触媒特性評価 ……東大 増田晋也

〔実学講座〕 金属材料実験の手引き 2. 特性の計測評価 2-5 熱分析の方法と解析 ……NIMS特別研究員/兵庫県立大名誉教授 森下政夫
—他—

(都合により変更になる場合がございます)

新 入 会 員

(2024年12月 1 日～2024年12月31日)

正 員

PARK Minha 東北大学	加 藤 浩 二 愛三工業株式会社	橋 本 国 秀 株式会社クボタ
今 淵 純 子 富山大学	田 畑 進 也 株式会社三徳	星 野 岳 穂 東京大学
遠 藤 昌 也 MA アルミニウム株式会社	時 本 扶 美 東京工科大学	松 林 康 仁 国立研究開発法人産業技術総合研究所
大 坂 藍 兵庫県立大学	永 安 克 志 株式会社戸畑製作所	
梶 並 佳 朋 大同特殊鋼株式会社	朴 Minha 東北大学	

学 生 員

BINTI MOHAMAD ZAIDI NUR ZULAIKHA 大阪大学	川 上 春 香 茨城大学	濱 口 勝 信 芝浦工業大学
Ho Truong Nam Hai Kyushu University	KAN HONGYIN 信州大学	濱 田 峻 暢 芝浦工業大学
Liang Li 京都大学	韓 銘 洋 東海大学	林 亮 弥 千葉大学
OJHA PANKAJ KUMAR 京都大学	北 村 正 規 東京大学	原 健 人 千葉大学
XU Hang 京都大学	北 山 蒼 紋 北見工業大学	原 弓 弦 名城大学
浅 田 涼 介 兵庫県立大学	鬼 頭 海 都 名古屋工業大学	春 田 啓 吾 東京大学大学院
足 谷 怜 哉 名城大学	木 山 幸 柁 富山大学	東 礼 子 名古屋大学
天 井 花 音 東北大学	窪 田 大 起 東北大学	平 尾 拓 馬 九州工業大学
荒 木 大 騎 東北大学	窪 田 穂 高 早稲田大学	廣 澤 朝 陽 千葉大学
飯 塚 大 貴 東京大学	小 林 篤 司 山形大学	樊 一 銘 東京科学大学
五十川 優 山形大学	小 林 翔 大 山形大学	藤 井 明 都 関西大学
池 上 颯 人 久留米工業高等専門学校	小 林 寛 武 新潟大学	藤 村 彩 和 富山大学
池 田 向 志 芝浦工業大学	佐々木謙也 岩手大学	星 野 壮 希 大阪大学
池 戸 一 将 名古屋工業大学	佐 藤 翔 太 早稲田大学	松 宮 竜 海 北海道大学
石 井 寛 也 東北大学	佐 俣 凜 人 東京理科大学	松 本 義 人 大阪大学
石 脇 萌 福井大学	謝 浩 然 東京大学	的 場 嵩 将 茨城大学
泉 谷 駿 輔 岩手大学	生 野 耕 輝 北海道大学	三 木 義 博 島根大学
磯 谷 太 一 大阪大学	新 出 航 大 金沢大学	水 留 柊 東北大学
猪 股 潮 芝浦工業大学	新 橋 創 太 兵庫県立大学	宮 崎 聖 也 芝浦工業大学
岩 野 竜 也 九州大学	杉 本 隼 飛 福井大学	村 上 聖 弥 鹿児島大学
上 田 真 碧 東京大学	諏 佐 優 芝浦工業大学	村 上 勇 樹 京都大学
氏 原 幸 太 東北大学	鈴 木 大 陸 JAXA 宇宙科学研究所	元 山 誓 織 大阪大学
王 浩 京都大学	清 家 瞬 芝浦工業大学	門 田 優 杜 兵庫県立大学
大 川 翔 大阪大学	関 根 風 人 長岡技術科学大学	安 永 尊 九州大学
大 川 玲 於 九州工業大学	徐 光 一 東京大学	安 永 騎 士 島根大学
太 田 拓 毅 茨城大学	高澤駿太郎 東北大学	楊 箸 航 大 茨城大学
太 田 悠 介 東京科学大学	高 島 海 瑠 芝浦工業大学豊洲キャンパス	山 本 紗 己 立命館大学
岡 村 翔 太 芝浦工業大学	高 嶋 幸 作 東京理科大学	山 本 卓 弥 九州大学
小 川 和 希 東北大学	高 橋 英 寿 北海道大学	楊 剛 東北大学
小 倉 博 人 東海大学大学院	谷 口 和 暉 九州工業大学	楊 文 越 東京大学
小 澤 杏 佳 茨城大学	趙 宇 基 東北大学	吉井遼太郎 東京科学大学
小 田 川 恒 輝 茨城大学	辻 美 空 鈴鹿工業高等専門学校	吉 田 萩 岩手大学
小 畑 奈 々 関西大学	辻 本 悠 真 大阪大学	吉 田 理 央 富山大学
折 橋 旺 東京大学	長 島 洸 生 明治大学	吉 丸 大 智 大阪大学
賈 雨 桐 東京科学大学	中 村 政 隆 名古屋大学	頼 俊 作 九州大学
河 西 光 希 東京大学	中 村 凌 茨城大学	劉 甜 大阪大学
片 亀 貴 裕 早稲田大学	野 口 知 希 茨城大学	劉 遠 宏 京都大学
片 山 紘 輔 立命館大学	芳 賀 夏 樹 茨城大学	渡 邊 碧 為 東京大学
鹿 取 温 希 京都大学	橋 口 達 希 兵庫県立大学	渡 邊 岳 斗 名城大学
金 子 睦 美 茨城大学	橋 本 碧 熊本大学	王 俊 博 東北大学
上 村 文 哉 大阪大学	馬 場 一 誠 京都大学	汪 羊 北海道大学

外国一般会員

CHENG CHIN-PAO National Taiwan Normal University
KIM Hoheok Korea institute of materials science

ユース会員

佐 藤 虹 斗 仙台高等専門学校
宮 井 颯 汰 大分工業高等専門学校

掲 示 板

〈公募記事〉：現在掲載を停止中
有料掲載：1/4頁(700～800文字)程度。
「まてりあ」とホームページに掲載；16,500円
ホームページのみ掲載；11,000円
〈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

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 持続型材料エネルギーイン
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 東京都目黒区駒場 4-6-1
(最寄駅：駒場東大前、東北沢、代々木上原)
■参加登録・問い合わせ：東京大学 生産技術研究所 岡部研
学術専門職員 宮崎智子
(参加登録：okabelab@iis.u-tokyo.ac.jp)
(問い合わせ：tmiya@iis.u-tokyo.ac.jp)

2024年度レアメタル研究会等の今後の予定

- 第115回 2025年3月21日(金) (2024年度 第5回)

令和6年度 レアメタル研究会のご案内
(2025.2.3現在)

- 第115回 2025年3月21日(金) 14:00～
An 棟 2F コンベンションホール
リアル講演会+講演のネット配信(Zoom Webinar &
YouTube)のハイブリッド研究会

テーマ：バッテリーメタルの現状と将来 午後2:00～

講演【敬称略】

- ・レアメタルフリーあるいはレアメタル使用を最小化する電池の動向と展望(仮)(60分)

株式会社テクノバ OB 井田和彦

- ・レアメタルの最近の話題(30分)

東京大学 生産技術研究所 教授 岡部 徹

- ・ニッケル資源、精錬、リサイクル、BEV 用途と需給(60分)

東京大学 生産技術研究所 特任教授 黒川晴正

このあと総合討論を予定

午後6:00～ 研究交流会・意見交換会 @An 棟 2F ホワイエ

レアメタル研究会ホームページ

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

〈2025年度 レアメタル研究会等の今後の予定〉

- 第116回 2025年7月4日(金) (2025年度 第1回)

- 第117回 2025年9月5日(金) (2025年度 第2回)

(関連イベント：2025年9月26日(金))

★寄付研究部門主催 シンポジウム★

(会場：生産技術研究所コンベンションホール)

- 第118回 2025年11月28日(金) (2025年度 第3回)

★チタンシンポジウム(第9回)★ (合同開催)

- 第119回 2026年1月9日(金) (2025年度 第4回)

★貴金属シンポジウム(第13回)+新年会★ (合同開催)

- 第120回 2026年3月13日(金)(予定)

(2025年度 第5回)

◇ ◇ ◇

＜お知らせ＞

「まてりあ」への「公募記事」の掲載は、現在停止しておりますのでご了承下さい。尚、ホームページへの掲載は随時受付をしております。

◇ ◇ ◇

追悼

本会元会長・名誉員 鈴木朝夫東京工業大学名誉教授を偲んで



本会元会長、名誉員鈴木朝夫先生は2025年1月23日に逝去されました。享年92歳。謹んで哀悼の意を表します。鈴木先生は1932年に千葉県で生まれ、1955年に東京工業大学理工学部金属工学科卒業後、大木伸銅株式会社勤務を経て1957年東京工業大学精密工学研究所助手、助教授を経て1981年教授昇任、1989年工学部金属工学科異動、1993年東京工業大学定年退官、同年4月東京工業大学名誉教授の称号を授与されています。その間、スタンフォード大学やマックスプランク金属研究所で客員研究員も務められました。1993年4月からは北海道大学工学部金属工学科教授として勤務され、1996年に同大学退官後、高知工科大学設立準備財団参与となり、1997年に高知工科大学副学長および物質環境システム工学科教授として勤務されました。2001年同大学退職後、高知工科大学名誉教授の称号も授与されています。その後、高知県公安委員会委員長、高知県産業センタープロジェクトマネージャーなど高知を地元とした地域に密接に関わる多数の活動をされました。2011年には瑞宝中綬章を授章されています。本会では、1996年に会長を務め、講演大会として初めて海外でのハワイ大会を開催されるなど、本会運営にも多大な貢献をされました。

研究では、鉄鋼材料および構造材料について、状態図と相安定性を基調とする多くの研究をなされ、特に、 Ni_3Al などの金属間化合物の高温変形挙動の解明に尽力し、 L1_2 型金属間化合物の強さの異常な温度依存性が D0_{22} 相や D0_{19} 相との相安定性に基づくことや、それらにおける非化学量論組成や添加元素の影響などを解明されました。これらの功績に対し、本会から1990年谷川・ハリス賞を受賞され、1995年には本多記念講演講師を務められ、また日本鉄鋼協会からは野呂賞や西山賞、西山記念賞などを受賞されています。また、宇宙への造詣も深く、1992年の日本初のスペースシャトルの宇宙実験にも尽力されました。研究はもちろん研究以外にも多彩な活動をされ、万事に博学の先生でした。鈴木朝夫先生の安らかなご永眠を心よりお祈りいたします。



公益社団法人日本金属学会への入会のおすすめ

社会基盤材料をはじめエネルギー材料、エコマテリアル、電子・情報材料、生体・福祉材料、材料と社会等の分野でご活躍の研究者、技術者、学生の皆様、当該分野に関心のある方のご入会をいつでもお待ちしております。

- 最新の研究や技術の動向をいち早く得ることができます
- 多様な研究者や技術者と交流ができます
- 研究成果を発表、討議して、研究を深めることができます
- 技術者・学生の能力開発や進路選択への支援が受けられます
- 表彰を受けられます



会員情報のご変更手続きのお願い

本会への会員情報のご登録は、最新のものになっておりますでしょうか。

[本会ホームページ](#) → [入会・会員](#) → [会員マイページ](#) より確認ができますので、ご利用下さい。

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
2025年 3 月				
4	第33回軽金属セミナー「アルミニウム合金の組織」中級編(時効析出)(第13回)(東京)	軽金属学会	TEL 03-3538-0232 https://www.jilm.or.jp/symposium/view?id=116	定員 40名
4	第6回世界エンジニアリングデー記念シンポジウム(オンライン)	日本工学会	TEL 03-6265-0672 eng@jfes.or.jp https://www.jfes.or.jp/topic/topic20241226_sympo20250304.pdf	
4～5	LMP シンポジウム2025 「レーザ加工技術の応用と最新動向」(北九州+オンライン)	日本溶接協会	TEL 03-5823-6324 https://www.jwes.or.jp/committees/laser/	2.18
8～10	日本金属学会春期講演大会(東京都立大学南大沢キャンパス)(本号204頁)	日本金属学会	TEL 022-223-3685 annualm@jimm.jp https://pub.conf.it.atlas.jp/ja/event/jimm2025spring	
8, 13	第13回「高校生・高専学生ポスター発表」(63-11号809頁)	日本金属学会		
11	第134回シンポジウム「アルミニウムの水素脆化・応力腐食割れの最前線」(東京)	軽金属学会	TEL 03-3538-0232 https://www.jilm.or.jp/	定員 60名
12	第34回軽金属セミナー「アルミニウム合金の組織」応用編(加工・熱処理による組織変化)(第11回)(東京)	軽金属学会	TEL 03-3538-0232 https://www.jilm.or.jp/symposium/view?id=117	定員 40名
12～14	2024年度量子ビームサイエンスフェスタ(つくば)	高エネルギー加速器研究機構物質構造科学研究所他	TEL 029-219-5300 qbsf2024-office@ml.j-post.kek.jp https://www2.kek.jp/imss/qbsf/2024/	
13	第253回研究会「TMR 研究のこれまでとこれから～室温 TMR 効果の発見から30年～」(東京)	日本磁気学会	TEL 03-5281-0106 https://www.magnetics.jp/event/topical_253/	
13～14	ウィンタースクール「トポロジー最適化の基礎～積層造形によるものづくりへの応用～」(東京理科大+オンライン)	日本計算工学会	TEL 03-3868-8957 office@jcses.org https://www.jcses.org/	定員 60名
17	第28回 電磁気応用部門・磁粉・浸透・目視部門・濡れ試験部門合同シンポジウム「表面探傷技術による健全性診断, 品質検査」(東京)	日本非破壊検査協会	TEL 03-5609-4015 nakamura@jsndi.or.jp http://www.jsndi.jp/	
17	腐食防食部門委員会第359回例会(大阪)	日本材料学会	jimu@office.jsms.jp	3.10
17	インフォマティクス・機械学習セミナー-基礎から先駆的な応用まで-(東京)	日本表面真空学会	TEL 03-3812-0266 https://jvss.jp/jpn/activities/06/detail.php?eid=00022	
18	第50回組織検査用試料の作り方(組織の現出)講習会「鉄鋼材料・非鉄金属材料・表面改質処理および異常組織材」(東京)	材料技術教育研究会	TEL 047-431-7451 http://www.mskoshukai.jp jimukyoku@mskoshukai.jp	3.4
21	レアメタル研究会(東大生産技研/オンライン)(本号218頁)	レアメタル研究会	TEL 03-5452-6314 tmiya@iis.u-tokyo.ac.jp https://www.okabe.iis.u-tokyo.ac.jp/japanese/index_j.html	
31～4.27	オンデマンド配信: 日本金属学会オンライン教育講座「電子顕微鏡と格子欠陥の基礎」(本号214頁)	日本金属学会	TEL 022-223-3685 meeting@jimm.jp	4.7
2025年 5 月				
14～16	2025年度塑性加工春季講演会(姫路)	日本塑性加工学会	http://www.jstp.or.jp	
14～30	第443回講習会「精密計測の基礎講座」(オンライン)	精密工学会	TEL 03-5226-5191 jspe_koushu@jspe.or.jp https://www.jspe.or.jp/custom-event/event-12831/	
16～18	軽金属学会第148回春期大会(北九州)	軽金属学会	TEL 03-3538-0232 jilm-shomu@jilm.or.jp https://www.jilm.or.jp/	
17～11.8 (全7回)	セラミックス大学2025(CEPRO2025)(オンライン開催)	日本セラミックス協会	TEL 03-3362-5231 cersj-kyoiku@cersj.org https://www.ceramic.or.jp/ikyoku/cepro2025/index.html	
20～23	第60回真空技術基礎講習会(和泉)	日本表面真空学会	TEL 03-3812-0266 office@jvss.jp https://www.jvss.jp/jpn/activities/18/detail.php?eid=00007	5.12
22～23	第41回希土類討論会(倉敷)	日本希土類学会	TEL 06-6879-7352 office@kidorui.org http://www.kidorui.org/discussion.html	
2025年 6 月				
2～6	The 20th International Conference on Strength of Materials (ICSMA20) (JIMIC-9)	ICSMA20	https://www.icsma20.com/index.html	
4～6	第30回計算工学講演会(埼玉)	日本計算工学会	TEL 03-3868-8957 office@jcses.org https://www.jcses.org/koenkai/30/	
5～6	第29回動力・エネルギー技術シンポジウム(金沢大)	日本機械学会	TEL 03-4335-7615 https://www.jsme.or.jp/conference/pes29/cosponsor.html	
9～11	日本顕微鏡学会第81回学術講演会(福岡)	日本顕微鏡学会	TEL 03-6457-5156 jsm-post@microscopy.or.jp http://conference.wdc-jp.com/microscopy/conf2025/index.html	

開催日	名称・開催地・掲載号	主催	問合せ先	締切
15～19	第41回熱電変換国際会議および第7回アジア熱電変換国際会議(仙台)	第41回熱電変換国際会議組織委員会他	ict2025@intergroup.co.jp https://ict2025.jp	事前 3.31
2025年7月				
1～4	COMPSAFE2025(第4回安心・安全・環境に関する計算理工学国際会議)(神戸)	日本計算工学会他	compsafe2025@compsafe2025.org	
2～4	第62回アイソトープ・放射線研究発表会(東京)	日本アイソトープ協会	TEL 03-5395-8081 happyoukai@jrias.or.jp https://www.jrias.or.jp/seminar/cat11/	
4	レアメタル研究会(東大生産技研/オンライン)(本号218頁)	レアメタル研究会	TEL 03-5452-6314 tmiya@iis.u-tokyo.ac.jp https://www.okabe.iis.u-tokyo.ac.jp/japanese/index_j.html	
24～25	第59回 X 線材料強度に関するシンポジウム(名城大)	日本材料学会	TEL 075-761-5321 jimu@office.jsms.jp https://www.jsms.jp/meeting/xsym_regist.html	
2025年8月				
10～13	17th International Conference on the Physics of Non-Crystalline Solids(PNCS17)(つくば)	第17回非晶質固体の物理に関する国際会議組織委員会	pnscs17-committee-request@ml.nims.go.jp https://amorphous.tf.chiba-u.jp/pnscs2025/index.html	
27～29	2025年度工学教育研究講演会(京大)	日本工学教育協会	2025_jsee_conference@jsee.or.jp https://www.jsee.or.jp/event/conference/	
2025年9月				
5	レアメタル研究会(東大生産技研/オンライン)(本号218頁)	レアメタル研究会	TEL 03-5452-6314 tmiya@iis.u-tokyo.ac.jp https://www.okabe.iis.u-tokyo.ac.jp/japanese/index_j.html	
15～19	先進赤外線計測技術と応用に関する国際シンポジウム(AITA 2025)(神戸)	日本非破壊検査協会	TEL 03-5609-4011 aita2025@jsndi.or.jp https://english.jsndi.jp/aita2025/index.html	
17～19	日本金属学会秋期講演大会(北海道大学)	日本金属学会	TEL 022-223-3685 annualm@jimm.jp	64-5号 会告予定
24～25	第75回塑性加工連合講演会(茨城大)	日本塑性加工学会	TEL 03-3435-8301 http://www.jstp.jp/	
2025年11月				
12～14	EcoDesign 2025(早稲田大)	エコデザイン学会連合	TEL 03-5286-2147 ecodesign2025_secretariat@ecodenet.com https://ecodenet.com/ed2025/02/07	
14	第27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 03-6744-4713 msf@oxinst.com	



2023, 2024年度会報編集委員会 (五十音順, 敬称略)

編集委員長	田中秀明					
編集副委員長	鈴木真由美					
委員	李誠鎬	池尾直子	石川史太郎	井田駿太郎	岩岡秀明	植木洸輔
	上田恭介	宇部卓司	大塚誠	岡弘	小笹良輔	川崎由康
	川西咲子	河野義樹	木口賢紀	北原弘基	北村一浩	國枝知徳
	小嶋隆幸	小島淳平	小山元道	齊藤雄太	佐々木秀顕	佐藤豊人
	篠原百合	新里恵多	鈴木賢紀	高橋弘樹	高山直樹	竹田修
	田辺栄司	Chang Tso-Fu Mark	塚田祐貴	圓谷貴夫	寺西亮	土井康太郎
	豊木研太郎	永井崇	永瀬丈嗣	袴田昌高	長谷川誠	八田武士
	藤井進	細川明秀	本間智之	松浦昌志	松垣あいら	松本洋明
	三井好古	宮崎秀俊	宮部さやか	森谷智一	諸岡聡	山中謙太
	山本知一	横井達矢	吉年規治	米田鈴枝		

まてりあ 第64巻 第3号(2025) 発行日 2025年3月1日 定価1,870円(本体1,700円+税10%)送料120円

発行所 公益社団法人日本金属学会

〒980-8544 仙台市青葉区一番町一丁目14-32

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

発行人 谷山 明

印刷所 小宮山印刷工業株式会社

発売所 丸善雄松堂株式会社

〒104-0033 東京都中央区新川 1-28-23

日本金属学会誌投稿の手引き

日本金属学会誌への投稿は、次の要件を満たさなければならない。

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

1. 日本金属学会誌に投稿可能な論文

(1) 学術論文(10頁以内)

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

Materials Transactions の Regular Article に Web 掲載後2年以内であれば、著者および内容が基本的に同一の場合に限り、和訳した論文を投稿できる。その事を脚注に明記する。ただし査読の結果、返却もあり得る。なお、著者が迅速掲載を希望し、追加費用を負担する場合は、査読期間短縮を含め迅速掲載のための処理を行う。

(2) レビュー(原則15頁以内)

各専門分野の研究開発の背景や最近の状況および今後の展望等について、重要な文献を引用して、各専門分野の専門家のみならず他分野の専門家や学生等も対象に、その概要を公正にかつわかりやすく解説する論文。Materials Transactions に Web 掲載後2年以内であれば投稿ができる。その事を脚注に明記する。また、Materials Transactions 掲載論文と異なる部分がある場合は、その事を脚注に明記する。なお、論文題目中に「レビュー」等を含めることが望ましい。

(3) オーバービュー(原則15頁以内)

単なる一般的な review ではなく、執筆者独自の考えに立って review し、取り上げた問題点の中において自説の位置付けを明確にした論文。ただし、事前に「タイトル」「氏名」「要旨」を編集委員会に提出し、了承を得た後、投稿する方式とする。Materials Transactions に Web 掲載後2年以内であれば投稿ができる。その事を脚注に明記する。また、Materials Transactions 掲載論文と異なる部分がある場合は、その事を脚注に明記する。なお、論文題目中に「オーバービュー」等を含めることが望ましい。

(4) 技術論文(10頁以内)

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

Materials Transactions に Web 掲載後2年以内であれば、著者および内容が基本的に同一の場合に限り、和訳した論文を投稿できる。その事を脚注に明記する。ただし査読の結果、返却もあり得る。

(5) 最近の研究動向(10頁以内)

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

(6) 速報論文(4頁以内)

速報を要する短い論文。すなわち、新規性のある研究成果、技術開発に関する新知見、新アイディア、提案等。最短2週間で審査を完了する。Mater.Trans. に Web 掲載後6カ月以内であれば、著者および内容が基本的に同一の場合に限り、和訳した論文を投稿できる。その事を脚注に明記する。

(7) オピニオン(2頁以内)

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

(8) その他理事会で決議した分類

2. 投稿の方法

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

英文掲載済み論文の和訳論文の場合には、英文掲載済み論文 PDF も送付する。

3. 原稿

執筆要領に従って原稿を作成し、指定のファイル形式に変換したものを提出する。

3.1 記載内容

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

3.2 単位

SI 単位を使用する。

3.3 引用文献・脚注

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

4. 審査

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

5. 校正

初校は著者の責任で行う。著者校正は原則として1回とし、誤植の修正に限る。

6. 投稿者負担金

6.1 投稿・掲載費用は、無料とする。(別刷の寄贈はありません。)

6.2 カラー図の掲載費用は、無料とする。

※オンラインジャーナルのみ(冊子・別刷はすべてモノクロ表示)。

6.3 学術論文の迅速掲載費用: 11,000円(税込み)

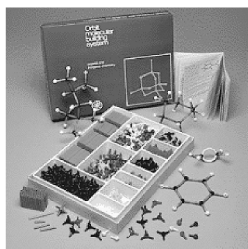
6.4 別刷購入希望の場合は、別途費用を負担する。

分子／結晶模型モデル (組み立て用キット)

プラスチックの原子と結合を使った教育学習用の分子／結晶構造の模型です。原子は色で区別され、正しい角度に設定された分枝を持ち、決められた長さの結合長で繋ぎ合わされます。直径1cmと6mmの原子を使う2種類のモデルサイズがあります。

基本セット

- Basic Structure (1cmモデル) Class Set ¥14,300.-
硫酸、塩化ナトリウム、ダイヤモンド、グラファイト、金属、酸と塩基、洗剤、ナイロン、アモルファス構造の学習用(原子515個)
- Lattice (1cmモデル) Class Set ¥13,200.-
ダイヤモンド、グラファイト、塩化ナトリウム、8および12配位金属、塩化セシウム、セ閃亜鉛鉱、ウルツ鉱、ルチル、氷構造の学習用(原子380個)
- Organic and Inorganic Chemistry (1cmモデル) Class Set ¥13,200.-
アルカン、アルケン、アルキン、環構造、酸素／窒素／硫黄／リンの官能基、ベンゼン環、ポリマー、複素結晶の学習用(原子500個)



結晶セット

- Carbon Nanotube (原子150個) ¥7,480.-
- Diamond (原子450個) ¥12,870.-
- Beta-Quartz (原子1,400個) ¥25,740.-
- Mica (原子1,550個) ¥55,000.- その他、多数あり

(製作: Cochranes of Oxford Ltd.)

化学プロセス用の物性データベース

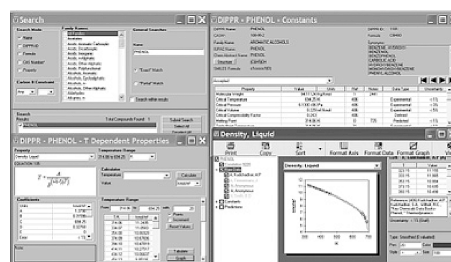
DIPPR with DIADEM Elite (Design Institute for Physical Property Data)

価格 ¥572,000.- / ¥82,500.- (一般 / 教育)

2,280化合物についての49種類の熱物性値(実測値)、複数の推算式、原文献データと15種類の温度依存物性には推算式の係数などのデータベースです。AIChE推奨のインターフェースソフトウェア(DIADEM)付きのスタンドアロンシステムです。

おもな機能 (DIADEM/Elite)

- 検索対象: Name, Formula, CAS番号、物性データ
- 物性値: 実測値、推算式による予測値
- データ表示: テーブルとグラフプロット
- 複数化合物データの重ね合わせプロット
- MDL Chimeプラグインによる構造式の立体表示
- ユーザーデータベースの作成



システムプラットフォーム:
Windows 8/10/11 (AIChE DIPPR Project 801)

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

(シングルユーザー用) 新規購入価格 ¥330,000.- (税込)
マルチユーザー用およびVersion 4.1/4.2/4.3/4.4/4.5からのアップグレード価格あり

検索条件

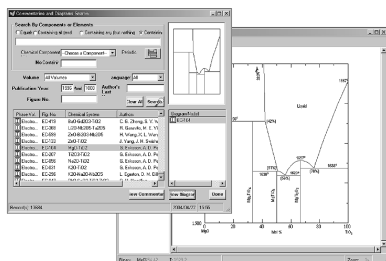
■元素記号、成分系 ■著者名、出典書誌名、出版年 ■状態図番号

収録物質系

■酸化物とその混合系 ■カルコゲナイド(硫化物、セレン化物、テルリド)
■フニチド類(第15族元素) ■炭化物類、炭酸塩類、ケイ化物類、ケイ酸塩類
■アクチニドおよび希土類 ■半導体材料 ■第3族元素 ■塩類とその混合系

データソース/Phase Diagrams for Ceramists他の1898年以降のACerSとNISTの刊行物

*Version 5ではすべての図がPDFで収録され、このバージョンではJAVAは不要です。

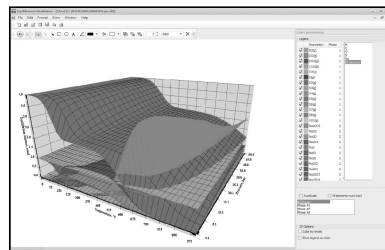


システム要件: Windows 7~10、2GB RAM、ディスク空き容量4GB 媒体: USB

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

年間使用料 ¥528,000.- / ¥176,000.- (一般 / 教育)

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またはSOLGASMIXのルーチンによる化学平衡を計算します。反応、熱平衡、分子量計算などの一般的なモジュールの他、電気化学セル平衡と相安定性、腐食の研究に使われるEh-pH(プールベ)状態図の作成などユニークなモジュールを持ち合わせています。計算結果のテーブルと状態図はクリップボードにコピーできます。SIM Flowsheetモジュールもあり、複数のユニットプロセスからなるプロセス全体のシミュレーションとモデリングができます。



システムプラットフォーム: Windows 7/8/10/11
(Outotec Research Oy. 製作)

※表記の価格は税込です。

株式会社 デジタルデータマネジメント

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

大好評
発売中

全自動研磨装置

Q ポル 250BOT

Q ポル 250BOT は、QATM の実験家具（システムラボ 2.0）に組み込まれた完全自動式の研磨システムです。システムは、研磨ステーションと洗浄ステーション、作業ホイール交換ユニット（16 枚収納）、研磨剤供給装置、沈殿槽で構成されます。



特長

- 中央荷重式の研磨・ポリッシングシステム
- 筐体は粉体塗装のアルミニウム製
- 研磨ヘッドの回転速度可変
- 研削規制ユニット（測定精度：0.1mm）
- タッチパネルによる電子制御
- 効果的な洗浄システム（水、エアー、エタノール）
- 洗浄システムには超音波洗浄を併用
- 自動研磨剤供給ユニット
- 装置内に簡単に収納できる沈殿槽（オプション）
- 安全光バリアによる安全確保



コンパクトなデザイン



操作が容易な配置

作業ホイール寸法	Φ 250mm
作業ホイール収納数	16 枚
回転速度	作業ホイール：50~600rpm ポリッシングヘッド：30~150rpm
回転方向	反時計方向 （ポリッシングヘッドのみ時計方向可）
荷重	20~400N（中央荷重のみ）
サンプルホルダー（数）	Φ 160mm（Φ 50mm（最大）× 6 個）
洗浄工程	エアー、水、エタノール
研削規制	ディスプレイ精度：0.1mm
電源	単相 220-230V / 50/60Hz 接続ロード：3.7kVA
寸法 (W)x(D)x(H)	1320x800x1500mm
重量	~ 390kg

Q ポル 250BOT 製品ページ



Q ポル 300BOT 製品ページ



大容量にはコチラがおすすめ
全自動研磨装置

Q ポル 300BOT



VERDER

ヴァーダー・サイエンティフィック株式会社

本社
〒151-0061
東京都渋谷区初台1丁目46番3号 シモモビル10階
TEL：03-6276-0073
FAX：03-6276-0076

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

メール問い合わせ：info@verder-scientific.co.jp



www.verder-scientific.co.jp

貴金属研究助成金

Create the Future with PRECIOUS METALS

当社は1930年の創業より、工業、医療、歯科、宝飾、精製、次世代産業など幅広い分野の需要に応じて様々な貴金属製品を製造してきました。

貴金属の新たな付加価値を生み出し、より豊かで持続可能な世界・社会の実現に貢献していくため、本助成金を通じて、未来ある研究者の可能性を支援します。

概 要

公募時期: 2025年5月1日～2025年6月30日

発 表: 9月中予定

募集対象: 国内教育・研究機関に所属する研究者

募集内容: 貴金属 (Au, Ag, Pt, Pd, Rh, Ir, Ru) 材料、用途、製法およびその関連技術に関する研究

助成金額: 応募頂いた研究内容について当社にて審査を実施し、優れた研究内容に対して賞および寄付金を授与します。

複数の賞を準備し、最大300万円の寄付金を予定しております。

応募方法: 当社指定の書類を添付し、件名を「【寄付金申請】名前_所属機関」として下記問合せメール宛に送付ください。詳しくは当社ホームページ (<https://www.ishifuku-kinzoku.co.jp/>) をご覧ください。

【お問い合わせ】

石福金属興業株式会社 技術戦略室 内

〒340-0002 埼玉県草加市青柳2丁目12-30

Email: ifk-grant@ifk.co.jp

石福金属興業株式会社HP: <https://www.ishifuku-kinzoku.co.jp/>

貴金属研究助成金HP: <https://www.ishifuku-kinzoku.co.jp/topics/2025/grant.html>



※本予告の内容は、公募開始の際に一部変更になる可能性がありますので、春頃に開示予定の公募内容をご確認下さい。

金属大発見！

金属大発見！



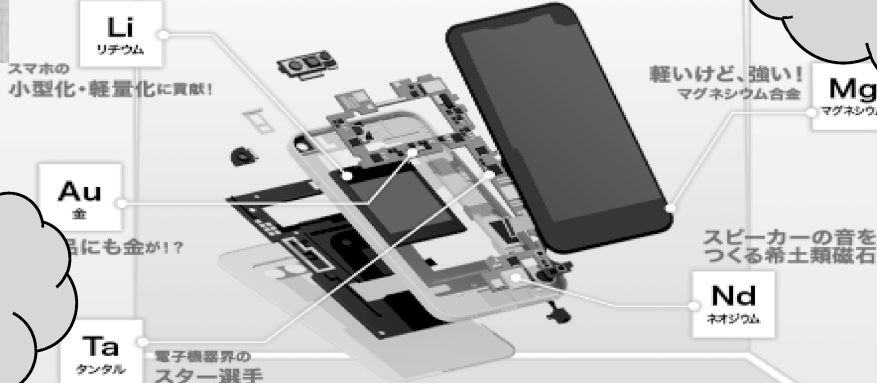
HPをご覧ください。

金属って
面白いよ～

金属には様々な種類があり、私たちの使っている身の回りのモノに多く使われています。進化する家電や交通手段、インフラを支えているのが、様々な金属です。金属の進化が最先端の技術をつくっているとも言えます。使っている身近なモノにどんな金属が使われているのでしょうか？いろいろなモノを大解剖して、すごい金属たちについて

Vol.01
スマホ大解剖！

1987年から使われている携帯電話は、今やスマートフォンとなり、軽量化、超多機能化、高速通信化されています。この進化を支えているのがすごい金属たちです。

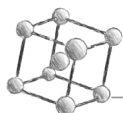
スマホの中身
大解剖！

昔の携帯電話は重くて、3キロもありました。しかも機体は電話をかけるだけ。今はポケットサイズのスマホでいろんなことができます。これを可能にしたのがすごい金属たち。しかもまだまだ進化しつづけています。誰かの新たな発見や発明がもししたらスマホの進化につながるかもしれません。一緒にすごい金属探求の冒険にいきましょう！
ユース会員を随時募集しています！ 特典はコチラ！ トロ

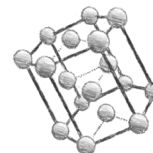
金属素描・金属なんでもランキング



まてりあ企画

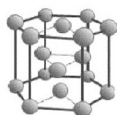


「金属素描」「金属なんでもランキング！」



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

金属素描



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

金属なんでもランキング！



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

★チタン、ジルコニウム、ハフニウム、コバルト、クロム、マグネシウム、ナトリウム・・・

★地殻存在量、密度、融点・沸点、電気伝導度、熱伝導度、比熱、デバイ温度、イオン化エネルギー・・・

etc...

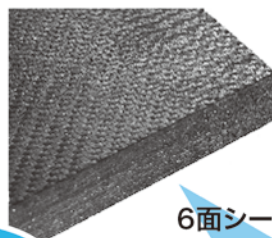
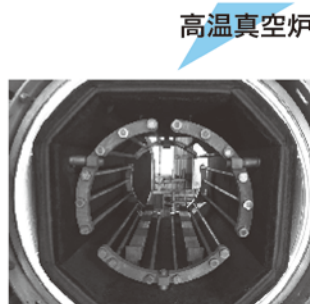
高断熱+省エネ

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



CO₂削減



6面シート
貼り



カーボンフェルト



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



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 HP www.meihosha.co.jp

クリーンな空間の創造。

超ドライ超低酸素科学技術の多様なニーズに向けて。

「はやぶさ」「はやぶさ2」「オシリスレックス」ミッションは、地球に試料カプセルを届けた後の今もなお研究は続けられています。当社「グローブボックス」は、その厳しい環境下での使用においても継続して信頼を頂き、その分析に活用され続けています。

また、地球外物質の研究以外にも、数々のプロジェクトに当社の製品が使用されています。

Clean Chamber
high vacuum performance 5×10^{-7} Pa or under
basic material SUS304
The parts facing the room are electrolytic composite polished baked at high temperature up to 120°C

high purity nitrogen
H₂O ----- 7.19 ppb
O₂ ----- 0.42 ppb
CO₂ ----- 0.21 ppb
CH₄ ----- 1.64 ppb

JAXA 地球外試料惑星物質試料受入れ設備

設計・製作・販売

- グローブボックス ●高真空グローブボックス ●クリーンチャンバ
 - ガス循環精製装置 ●窒素除去装置 ●真空電気炉 ●高真空電気炉
 - クリーンオープン ●水素還元炉 ●ラミネート装置 ●封止装置
 - ドライルーム ●高気密恒温恒湿室 ●高気密低濃度CO₂室
- その他、特殊試験・製造装置の製作をいたします。

※当社のすべての製品は、日本国内でのみご利用いただけます。



株式
会社

美和製作所

本社・工場 〒567-0028 大阪府茨木市畑田町11番50号

TEL: 072-625-1138 FAX: 072-625-1178

東京営業所 〒101-0042 東京都千代田区神田東松下町32番地

TEL: 03-5256-1138 FAX: 03-5256-1145

URL: <https://www.miwass.co.jp> E-mail: info@miwass.co.jp