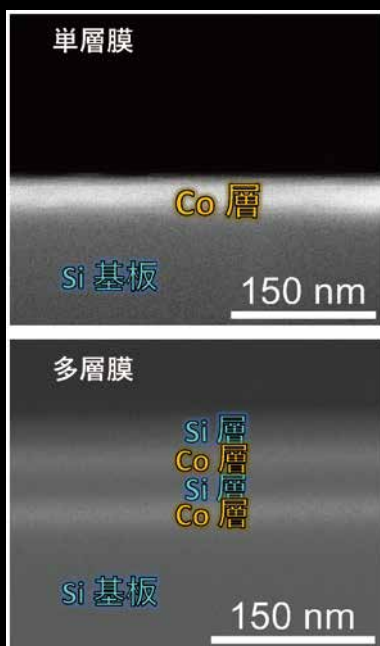


Materia Japan

まてりあ Vol.60

MTERE2 60 (9) 535 ~ 612 (2021)

No.9
2021



巻頭
記事

まてりあ 60 巻記念企画 : Back to 1962

・ 金属素描 ～ニオブ～

特集

IoT 時代における熱電材料の
深化と先鋭化

講義
ノート

金属製錬の熱力学 (第3回)

・ まてりあ 60 巻記念企画 : 委員会だより

付録

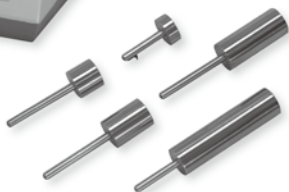
2021 年秋期講演大会プログラム

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



自動研磨機 SCANDIMATIC 33305

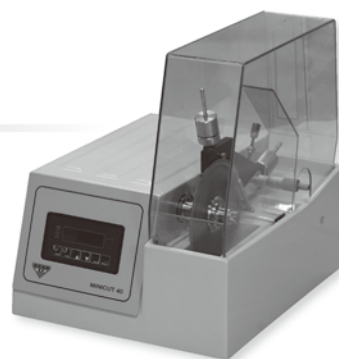
ヨーロッパ伝統の重錘を使った昔ながらのシンプルにして堅牢な研磨機。
必要最低限の機能のみを搭載。それが経済的な価格を生み出しました。



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

精密切断機 MINICUT 4000

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



試料埋め込み材料、アクセサリ



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

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

カタログおよび価格表は弊社にお問い合わせください

フリツシュ・ジャパン株式会社

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

info@fritsch.co.jp <http://www.fritsch.co.jp>
Tel (045)641-8550 Fax (045)641-8364
Tel (06)6390-0520 Fax (06)6390-0521
Tel (092)707-6131 Fax (092)707-6131

9

2021
Vol.60
No.9

まてりあ

巻頭企画	Back to 1962 : 国産初の研究用原子炉が臨界/東洋一の吊橋「若戸大橋」が完成535
金属素描	No. 18 ニオブ(Niobium) 佐々木秀顕539

特集「IoT 時代における熱電材料の深化と先鋭化」

企画にあたって	春本高志 三井好古541
機械学習を活用した Fe-Al-Si 系熱電材料 (FAST 材) の研究	高際良樹542
X 線吸収端微細構造法によるハーフホイスラー型熱電変換材料の局所結晶構造解析	宮崎秀俊546
Half-Heusler 規則構造の格子サイト占有に基づく熱電特性制御	木村好里 CHAI Yaw Wang550
熱磁気効果をベースとした熱電材料の新展開	水口将輝558
体温を用いたマイクロ熱電発電モジュール技術	菅原 聡562
新進気鋭	極細ピアノ線の高強度化に有効なメゾスケール構造とマイクロ組織 権藤詩織567
講義ノート	金属製錬の熱力学(第3回) 月橋文孝572
	高温での化学反応によって目的金属を得る金属製錬反応の解析のために必要な化学熱力学の使い方について述べる. 第3回は平衡状態図, 化学反応, 化学ポテンシャル状態図について説明する.

まてりあ 60巻記念企画

委員会だより	会誌, 欧文誌, 講演大会, セミナー・シンポジウム, 人材育成, 広報委員会579
--------	--

思い出の教科書, この一冊!	材料工学入門 正しい材料選択のために 長谷川誠592
----------------	----------------------------------

スポットライト	スティックスリップ現象における理論周期の導出と検証 保田千代 荒田祐希 仁木心音593
---------	--

本会記事	会告595	新入会員606
	支部行事600	次号予告607
	掲示板601	行事カレンダー608
	会誌・欧文誌 9 号目次605	

付録	2021年秋期講演大会プログラム別冊
----	--------------------------

今月の表紙写真	Co 単層膜の断面走査型電子顕微鏡像(上)および Si/Co 多層膜の断面走査型電子顕微鏡像(下). (水口将輝 著 560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 本会は, 本誌掲載著作物の複写に関する権利を一般社団法人学術著作権協会に委託しております. 本誌に掲載された著作物の複写をご希望の方は, (一社)学術著作権協会より許諾を受けて下さい. 但し, 企業等法人による社内利用目的の複写については, 当該企業等法人が社団法人日本複写権センター((一社)学術著作権協会が社内利用目的の複写に関する権利を再委託している団体)と包括複写許諾契約を締結している場合にあっては, その必要はありません.(社外頒布目的の複写については, 許諾が必要です.)

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

Back to **1962**

日本の経済成長とともに交通網の整備が急ピッチで進められた1960年代。

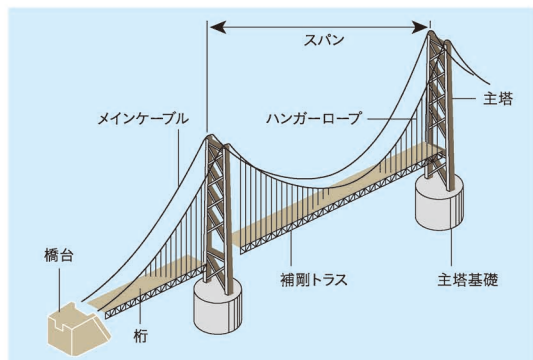
若戸大橋の完成は、多くの人に夢を与え、新たな時代への架け橋となった。

東洋一の吊橋 「若戸大橋」が完成

北九州市の戸畑地区と若松地区を結ぶ若戸大橋が完成。東洋一の吊橋として注目された。
総延長：約2.1 km、中央支間長：367 m、工法：ニューマチックケーソン、橋脚寸法：40 m×17 m、1962年完成（共同通信社）

北九州工業地帯をつなぐ 東洋一の架け橋

関門海峡を臨む九州最北端の都市、北九州市。北九州工業地帯の繁栄を支えてきた若松地区と戸畑地区であるが、両者は洞海湾を隔てた最短で1 kmにもならない位置にありながら、かつてその間を移動するには、自動車や鉄道などを利用して洞海湾奥まで20 km以上西に迂回するか、渡船を使うかのどちらかしかなかった。1930年に渡船転覆事故で多くの死者を出すという大惨事が起こり、これをきっかけにトンネル建設が検討されたが、第二次世界大戦の戦火拡大に伴い計画は中断された。



(図1) 吊橋の構造。

世界の長大橋の多くは吊橋である。メインケーブル、ハンガーロープ、桁は鋼製であり、主塔は鋼もしくは鉄筋コンクリート製である。一方、風や荷重によって揺れやすいという欠点がある。

戦後の復興とともに若松―戸畑間をつなぐ交通手段の整備が再び求められるようになり、トンネルか橋梁かが比較検討された結果、「若戸大橋」と名付けられた大型の吊橋が建設されることになった。1958年に着工し、1962年に完成。地元の人々の悲願であった若戸大橋は、「東洋一の吊橋」として大きな注目を集めた。建設には、当時の日本の最先端の橋梁技術が多く注ぎ込まれ、ケーブルや鉄筋、セメントなど、あらゆる材料に国産品が使用されたという。

ちなみに吊橋とは、主塔とそれに渡されるメインケーブルを持ち、メインケーブルから鉛直に垂らされたハンガーロープで桁を吊る構造の橋をいう⁽¹⁾(図1)。このメインケーブルには高炭素亜鉛めっき鋼線が使われている。吊橋に対し、ハンガーロープが無く、複数のケーブルを斜めに張って直接桁を支えるものは斜張橋と呼ばれる。吊橋のメインケーブルは垂れ下がり曲線を描くが、ハンガーロープとの2段構成とすることで、桁を水平に近い状態に保つ。メインケーブルの両端は、アンカーレイジ（橋台）で地面に固定される。

若戸大橋の場合、主塔間のスパン（中央支間長）は367 mに及び、それまで日本最大であっ

た三好橋（徳島県）の中央支間長140 mをはるかに超えるため、安全で確実な工法の選定が求められた。このため、特に高い信頼性が求められる主塔の基礎に対しては、剛性の高い基礎を築く工法として、ニューマチックケーソン工法が採用された。

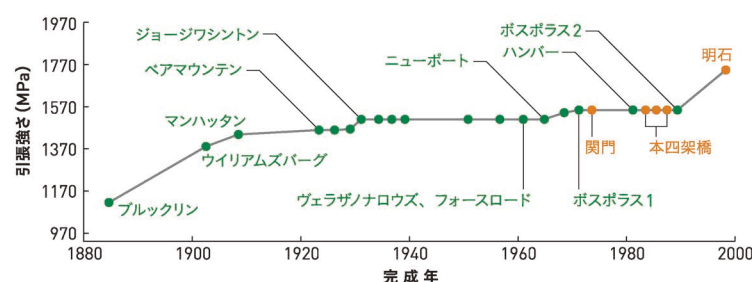
ニューマチックケーソン工法とは、地上でケーソン（コンクリート製または鋼製の大型の箱）を築造し、ケーソン下部の刃口部内側の掘削作業室に圧縮空気を送り込んで地下水の浸入を防ぎ、作業室内で掘削・排土・沈下を繰り返して所定の深さまでケーソンを沈設する施工法である。若戸大橋のケーソン本体は、自力浮揚で進水できる鋼製であった。

当時、若松側の主塔と中間塔の基礎工事と、ケーブルを固定する橋台の建設とその基礎工事などを担当した大成建設の記録によれば、ニューマチックケーソン工法による橋梁基礎工事は、その当時例の無い大規模なものであったそうだ⁽²⁾。主塔では地下24.5 m、橋台では地下22 mの位置にケーソンが沈設され、最盛期には300人の作業員が高気圧のケーソン内で作業したという。また、若松側橋台の建設工事でも、18000 m³ものコンクリートを打設する大掛かりなものとなった。ここでは、コンクリートの打ち込み温度を低下させることで熱応力によるひび割れを制御するプレクーリング工



(図2) 明石海峡大橋。

総延長：約4 km、中央支間長：1991 m、工法：設置ケーソン、橋脚（主塔基礎）寸法：φ80 m、1998年完成（共同通信社）



(図3) 橋梁ケーブル用鋼線の引張強度の変遷。

一般社団法人日本鉄鋼連盟ホームページを元に作成⁽⁴⁾

法や、型枠を順次迫り上げるスライディングフォーム工法など、当時の最新技術が国内で初めて採用された。

なお、1984年には交通量の増大に伴い2車線から4車線への拡幅工事が行われ、歩道の廃止、拡幅部の供用が行われた。これは、主構造をほとんど改造せずに形状変化の管理を行いながら拡幅するという、わが国初の工事となった。

世界の長大橋に不可欠な日本の橋梁技術

1962年の若戸大橋完成は、日本における長大橋建設構想の契機となった。中でも一大プロジェクトとなったのは、本州と四国とをつなぐ本州四国連絡橋計画である⁽³⁾。明石-鳴門、児島-坂出、尾道-今治の3つのルートに連絡橋を架けるこの計画は、1975年に尾道-今治ルートの大三島橋の着工に始まり、その後1999年までの間に多くの長大橋梁が建設された。

これらの3ルートの中で最も技術的に困難であるとされていたのが、明石海峡大橋の建設である。明石海峡は潮流が速く、台風が多い。そして、船舶の航行が多く、神戸空港や関西国際空港を離着陸する航空機が頻りに飛び交う。さらに、橋の直下に

活断層の存在が知られていたことから、高度の耐震性能も要求される。このため、当初は道路・鉄道併用橋として計画されたが、地盤や予算の面から着工の3年前に道路専用橋に設計変更された。そのような厳しい条件をクリアした上で、全長3911 m、中央支間長1991 mの長大吊橋が1998年に完成した（図2）。この大きさは、当時世界最長のハンバー橋（1410 m、イギリス）をはるかに超えるものであった。また、建設中の1995年に兵庫県南部地震に見舞われ、地盤に約1 mのズレが生じたが、橋梁構造物への影響は無く、工事は継続され、開通後も何ら影響は出ていない。

明石海峡大橋の建設に当たっては、それまでの長大橋の建設を通じて培ってきた高度な橋梁技術が結集された。主塔を支える海中基礎の建設に際しては、瀬戸大橋建設の際に用いた設置ケーソン工法（陸上で製作したケーソンを海上を曳航して現地へ運んで海底に沈めた後、内部にコンクリートを打設する施工法）が採用された。また、橋桁にはトラス桁（細長い材料を三角形に組み合わせた断面形状を持つ桁）を採用し、

道路面にはグレーチング（開口のある床構造）を設けることなどによって、強風に対しても強い構造を作り上げた。

橋桁を吊るメインケーブルには、引張強度1770 MPa級の高強度鋼線が使われた。メインケーブルを高強度化すればケーブル断面積や本数を減少して軽量化でき、架設工事の効率化、主塔高さの低減や工期短縮等につながる。中央支間長が1991 mと世界最長である明石海峡大橋では、若戸大橋などそれまでの長大橋で使われてきた引張強度1570 MPa級の鋼線ではなく、1770 MPa級鋼線が初めて採用された（当時の新日本製鐵が製造）。明石海峡大橋は吊橋の規模だけでなく、日本の橋梁技術や材料技術の水準を世界に知らしめた（図3）。

近年、海外では長大橋の建設が活況を迎えており、トルコのイズミット湾横断橋、中国の港珠澳大橋などの建設が進められている。中国などの鋼線メーカーの台頭も目立つ中、靱性および延性を確保しつつ高強度化を進め、世界をリードしてきた日本の高強度鋼線の進化を世界が見守っている。

文 献

- (1) 吉田巖：吊橋を支える基礎 若戸橋から明石大橋へ、総合土木研究所（2012）。
- (2) たいせい Circle（大成建設株式会社報告書）、84（2015）、7-8。
(https://www.taisei.co.jp/MungoBlobs/687/86/jigyohokoku2015_01.pdf)
- (3) 公益社団法人発明協会戦後日本のイノベーション100選事務局：長大橋建設技術、現代まで、戦後日本のイノベーション100選。
(http://www.koueki.jiii.or.jp/innovation100/innovation_detail.php?eid=00102&age=present-day)
- (4) 一般社団法人日本鉄鋼連盟：橋梁用高強度ワイヤ、(https://www.jisf.or.jp/business/tech/bridge/high/09_wire.pdf)

Back to 1962

日本では、1950年代に研究用原子炉の建設、運転、利用が始まった。今から60年前の1962年に初臨界に達した「JRR-3」は日本の技術で設計、製作された初めての研究用原子炉である。研究炉の建設・運転の技術開発に貢献したJRR-3はその後改造工事が施され、中性子利用施設として活用されている。2021年2月から運転を再開したJRR-3の歴史を振り返り、期待される役割について紹介する。

(図1) JRR-3が初臨界に達したときの制御室の様子
(1962年9月13日)。



(図2) 建設当時の建屋全景。

国産初の研究用原子炉が臨界

国産1号炉として 原子炉技術の確立に貢献

JRR-3 (ジェイ・アール・アール・スリー: Japan Research Reactor No. 3) は、日本原子力研究所 (現・国立研究開発法人日本原子力研究開発機構) が建設した熱出力10 MWの天然ウラン重水型の研究用原子炉である。天然ウラン重水型が採用された背景には、人形峠 (鳥取・岡山県境) で発見されたウランの使用や、重水冷却の技術開発などの目的があった。

JRR-3に先立って建設されたJRR-1およびJRR-2は輸入炉であったが、計画、設計、製作のすべてを日本の技術者が行い、ウラン燃料の一部や重水以外はほとんど国産品を使用していることから、JRR-3は「国産1号炉」と呼ばれている⁽¹⁾⁽²⁾。

1959年に始まったJRR-3の建設は、原子炉本体が日立製作所、水ガス系が三菱原子力工業、計測制御系のうち炉本体周りの計測を東芝、水ガス系の計測を富士電機製造、放射性同位元素取扱設備関係を石川島重工業がそれぞれ中心となって進め

られた。複数メーカーの複合方式で建設を進めたことは必ずしも効率的ではなかったが、日本の原子炉建設技術の開発促進と向上に大きく貢献し、JRR-3の建設が日本の研究炉に関する技術の基礎を固めることになった。

JRR-3が初臨界を迎えたのは1962年9月13日で、定格出力運転を達成したのは1964年3月31日であった (図1)。

炉心は直径約2.6 m、高さ約2.8 mのタンク型で、約9 tの天然ウラン燃料が装荷されていた。天然ウラン燃料の被覆材は、燃料温度、中性子吸収、誘導放射能などを考慮し、加工性がよい99.3 %以上のアルミニウムが選択された。現在の燃料は、ウラン・シリコン・アルミニウム分散型合金燃料で、被覆管にはアルミニウム合金 (A6061またはAG3NE) が使用されている。

1966年から本格的な利用運転に入ったJRR-3は1983年に運転を停止し、大規模な改造工事が行われた。これは中性子強度などが当時の研究者の要望に対応できなくなったためで、世界トップクラスの汎用研究炉を目指して改造が施された (図2)。

改造炉では、燃料のウラン濃縮度を高め

ることなどにより熱出力は20 MWに向上し、最大熱中性子束は旧JRR-3よりも一桁大きい約 3×10^{18} 個/($\text{m}^2 \cdot \text{s}$)を実現した。

また、改造炉には中性子導管が設置され、ビーム実験の利用効率が飛躍に向上した。さらに、試料を入れたアルミニウム容器 (ラビット) を水圧で原子炉内の照射筒内に送り込み、任意の照射時間で取り出すことができる水力照射設備が設置され、照射試験の自由度を向上させている。

1990年から共同利用が開始されたJRR-3の基本設計は、その後に設計された研究炉のモデルになったという。また、2007年には、原子力技術の改良や適用および原子力の平和利用のために役立つ非常に優れた成果を達成した施設やサイトに対して贈られる米国原子力学会ランドマーク賞を受賞している。

多彩な研究に利用可能な プラットフォーム

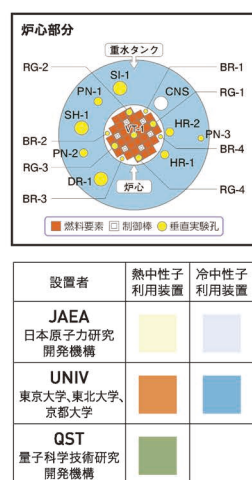
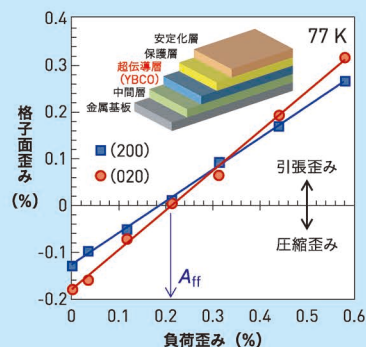
旧JRR-3で行われていた材料研究は、誘電体、磁性体、超伝導体、金属材料に



(図3) 改造後のビームホールの様子。

(図5)
JRR-3を活用した実験例
(複合超伝導線材YBCO
テープの歪み挙動)。

77 KでのYBCO超伝導相の200および020回折面の格子歪みの変化。A_{ff}が超伝導相の格子面歪みがゼロになる負荷歪みを示している。



JRR-3諸元

- 目的：ビーム実験、燃料材料照射、RI製造、放射化分析など
- 型式：低濃縮ウラン軽水減速冷却プール型
- 最大熱出力：20 MW

- 最大熱中性子束：約 3×10^{18} 個/($m^2 \cdot s$)
- 所在地：茨城県那珂郡東海村

(図4) JRR-3の中性子ビーム実験装置配置図。

炉心と重水タンクには17の照射孔、炉室には9台の実験装置、ビームホールには21台の実験装置が設置されている。

国立研究開発法人日本原子力研究開発機構の資料を元に作成

関する基礎物性研究が中心であり、格子振動と構造相転移や磁区構造とモーメント分布、磁気的励起などをテーマとした研究が行われていた。

改造後のJRR-3では、5本のビームラインを有するビームホールが増築され(図3)、基礎物性研究に加え、応用研究や実用化に資するための材料開発研究が大幅に増加している。炉心と重水タンクには17の照射孔、炉室には9台の実験装置、ビームホールには21台の実験装置が設置されている⁽³⁾(図4)。

J-PARCなど、中性子ビームを利用できる施設はいくつかあるが、JRR-3では実機材もしくは限りなく実機に近い大型構造材料などが実際に利用される環境に近い条件で実験を行えることが特長の一つになっている。

例えば、複合超伝導線材であるYBCOテープは超伝導層(YBa₂Cu₃O_{7-x}相)の他にも保護層や安定化層などを持った複雑な構造になっているが、中性子ビームによる観測は、YBCO超伝導層の歪みを計測可能で、極低温における超伝導線材の機械的特性と臨界電流特性の関係を明らかにし

ている⁽⁴⁾(図5)。

また、中性子ビームを用いることで水素などの軽元素が観察可能となることから、水素脆化のメカニズムの解明などに利用されている。ユニークな活用例としては、コンクリート中の水分挙動を観察することで、鉄筋コンクリート構造物の劣化診断や構造物の耐久性向上にかかわる技術の高度化などを旨とする研究が挙げられる⁽⁵⁾。

これらは2010年までの成果で、JRR-3は定期点検中に東日本大震災に被災し、その後も長期にわたって復旧と耐震工事などのために、運転を停止していた。停止期間中は一部のビームラインの改造も行われ、中性子導管をニッケルミラーからニッケルとチタンの薄膜を約400層重ねた高性能スーパーミラー⁽⁶⁾にすることで、利用できる中性子強度を2倍近く向上させるなどの機能

強化も行われている。JRR-3は2021年2月に運転を再開し、本格稼働へ向けての調整作業が行われている。

JRR-3は材料研究に加えて、放射性同位元素の製造技術の開発という役割も担っている。特に医療用では、がんの診断に利用される^{99m}Tcの国内製造のニーズが高く、再稼働後のJRR-3には医療用RIの製造にも大きな期待が寄せられている。その他、中性子を利用した放射化分析や即発ガンマ線分析も、少量の試料を非破壊で多元素同時分析が可能な高性能の分析手法として普及していくと予想される⁽⁷⁾。

運転を再開したJRR-3には、多彩な中性子利用が可能なプラットフォームとしての役割が期待されている。

画像および資料提供：
国立研究開発法人日本原子力研究開発機構

文 献

- (1) 研究炉管理部：研究炉33年のあゆみ、日本原子力研究所(1990)。
- (2) 飯島勉、宮坂靖彦、白井英次：日本原子力学会誌ATOMOS, **57** (2015), 766-771。
- (3) <https://jrr3.jaea.go.jp/2/21.htm> および <https://jrr3.jaea.go.jp/2/22.htm> を元に作成
- (4) K. Osamura, S. Machiya, Y. Tsuchiya and H. Suzuki: Supercond. Sci. Technol., **23** (2010), 45020。
- (5) 兼松学、野口貴文、丸山一平、飯倉寛：コンクリート工学年次論文集, **29** (2007), 981-986。
- (6) K. Soyama, H. Tsunoda and K. Murakami: Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, **529** (2004), 73-77。
- (7) 平井昭司、鈴木章信、永野章、米沢仲四郎、松江秀明：鉄と鋼, **100** (2014), 53-67。

2021年 秋期
第169回
講演大会

未来を先導する
領域を開拓し、
世界に発信する

公益社団法人

日本金属学会

The Japan Institute of Metals and Materials

会
期

2021年

9月14日(火)~17日(金)

オンライン開催

参加方法の詳細は
ホームページで公開

共同セッション演題登録締切 2021年 6月18日(金)

演題登録締切 2021年 7月2日(金)

事前参加申込締切 2021年 8月27日(金)

公
募
シ
ン
ポ
ジ
ウム

S1: 機能コアの材料科学II

New Materials Science On Nanoscale Structures and Functions of Crystal Defect Cores, II

S2: ミルフィーユ構造の材料科学IV

Materials Science of Mille-feuille Structure IV

S3: ハイエントロピー合金の材料科学(VI)

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

S4: 材料変形素過程のマルチスケール解析(IV)

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

S5: 超高温材料の科学技術II

Science and Technology of Ultra-High Temperature Materials II

S6: ナノ・マイクロスペースステイリングVI

Tailoring of Nano/Micro-Space for Advanced Functions VI

S7: 水素エネルギー材料IX

Hydrogen Energy Materials - IX

S8: コロナ禍の記録とポストコロナの材料戦略

Activity records of experiments, education and industries under the COVID-19 disaster and material strategy in post-corona society

S9: ワイドギャップ結晶の材料科学と高温プロセスIII

Materials Science and High temperature processing of widegap materials III

S10: マテリアルズ・インテグレーション(IV)

~社会実装に向けた取り組み~

Materials Integration (IV) - Endeavors toward social implementation -

企
画
シ
ン
ポ
ジ
ウム

K1: 材料化学におけるイノベーションの役割と工業製品への展開II

Innovations in materials chemistry and their effects on industry II

K2: 次世代パワエレクトロニクスに向けた酸化物軟磁性材料の現状と課題

~さらなる性能向上に向けたマテリアルデザイン~
Current states and issues of soft magnetic oxide materials for next-generation power electronics devices
~ Material design for further performance improvement ~

K3: 若手科学者へ贈る研究のヒントIV

~未踏領域へ到達するために~
Gifts from pioneers to young scientists IV: ~ To hitch your wagon to star ~

K4: 自動車の大変革を担う材料技術の最新動向

The latest trend of the materials R&D for the revolution of the Automotive

(金属学会単独開催)

オンライン懇親会開催案内

参加
無料

開催日時 9月14日(火) 18:30~

開催方法 オンライン会議ツールRemo(予定)

参加登録期間 事前登録(5月25日(火)~8月27日(金))および当日申込

登録方法 大会参加申込みの際、「懇親会に参加する」で申込ください。
申込者へは、9月上旬に会場URLと参加方法の案内を配信します。

※この懇親会で、ポスター賞の発表(表彰)を行います。



問合先

公益社団法人 日本金属学会 講演大会係

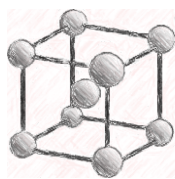
〒980-8544 仙台市青葉区一番町1丁目14-32

TEL:022-223-3685 E-mail:annualm@jim.or.jp

詳しくはホームページをご覧ください

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

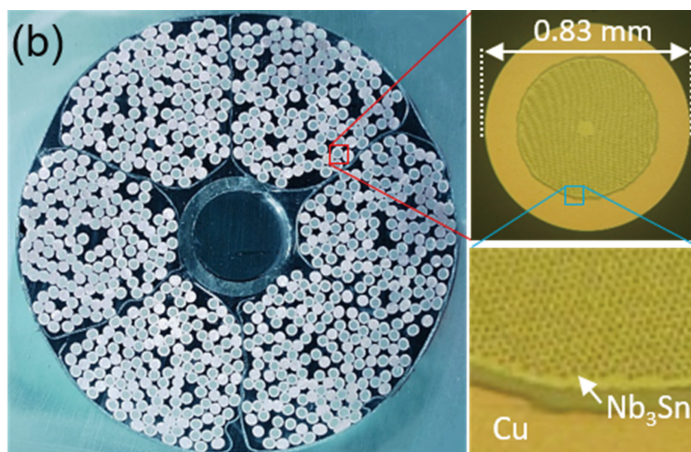
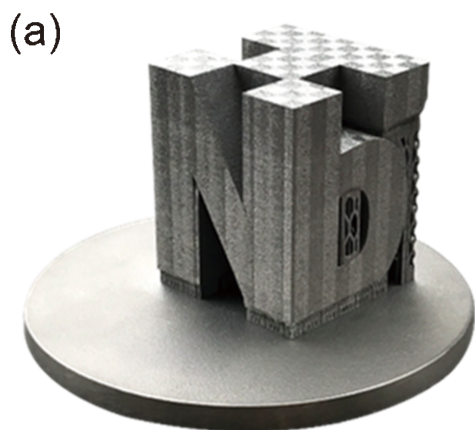




シリーズ「金属素描」

No. 18 ニオブ (Niobium)

愛媛大学 佐々木 秀 顕



元素名：Niobium，原子番号：41，原子量：92.91，電子配置：[Kr]4d⁴ 5s¹，密度：8.578 Mg・m⁻³(293 K)，結晶構造：体心立方，融点：2793 K，沸点：5200 K⁽¹⁾，地殻存在量：8 μg・g⁻¹⁽²⁾【写真】(a)アディティブ・マニュファクチャリングによる金属ニオブ造形物(TANIOBIS GmbH 写真提供)，(b) ITER-CS コイル用超電導導体。直径 0.83 mm の線材に13,000本の Nb フィラメント(径 2.3 μm)を埋め込み，拡散を利用して Nb₃Sn を形成させている(古河電気工業㈱写真提供)

41番元素であるニオブは同族のタンタルと化学的性質が類似しており，コルタンと呼ばれる鉱石にはこれらの元素が(Fe, Mn)(Ta, Nb)₂O₆の形で共存している．タンタルの名はギリシア神話のタンタロスに由来しており，ニオブの名称は1844年にドイツのハインリヒ・ローゼによってタンタロスの娘であるニオベからつけられた⁽³⁾．ただし，ニオブの発見と命名については以下のような紆余曲折があった．

イングランドのチャールズ・ハッチェットが1801年にアメリカ産の鉱石から新元素を発見し，アメリカ大陸の発見者の名にちなんで新元素をコロンビウムと名付けた⁽⁴⁾．翌年にエーケベリによってタンタルが発見され，1809年にはウォラストンによってコロンビウムとタンタルが同一の元素であると誤って判断された⁽⁵⁾．その後，1844年にローゼによりニオブが再発見され，1864～1865年にかけての科学者たちによる調査によってコロンビウムとニオブが同じものであると確認された．このような経緯からアメリカではコロンビウム，ヨーロッパではニオブの名が用いられる状態が約100年も続いたのち，IUPAC が1949年にニオブを正式に採択した．

ニオブとタンタルを含む鉱石から純ニオブを生産する際には，酸化物をフッ酸系の水溶液で溶解し，溶媒抽出でニオブとタンタルを分離する．酸化ニオブは活性金属もしくは水素による還元や溶融塩電解によって金属ニオブにされ，さらに電子ビーム溶解で精製される．現在のニオブの主要な原料は，1950年代以降にブラジルおよびカナダで巨大な鉱床が発見されたパイロクロア((Na, Ca)₂Nb₂O₆(OH, F))であり，年間ニオブ生産量約7万トンのうち9割近くをブラジルのCompanhia Brasileira de Metalurgia e Mineracao (CBMM)が占める．

鋼へ添加した少量のニオブが炭化物の析出や組織微細化に

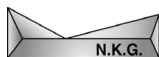
より高張力化に大きな効果をもたらすため，現在のニオブ需要の約90%を鉄鋼部門が占めている⁽⁶⁾．鉄鋼用には，酸化ニオブを酸化鉄とともにアルミニウムテルミット反応により還元して得られるフェロニオブが用いられる．鉄鋼以外の用途として，耐熱超合金や超硬合金がある．また，純ニオブ，ニオブチタン合金およびニオブスズ合金は超電導材料であり，電磁石に用いられる．優れた誘電体であるLiNbO₃やKNbO₃は，表面弾性波フィルターを含む圧電素子として利用される．タンタルコンデンサを資源的に豊富なニオブで代替するための開発も行われている．近年はとくに電池の負極材や固体電解質へのニオブの応用が注目されている．

英国の金属学会(現 IOM3)は1979年以降，ニオブに関連する優れた論文を選考して，CBMM 社からの資金援助によりチャールズ・ハッチェット賞を贈っている．この賞は現在までの約40年間に日本の鉄鋼会社および研究機関へ7回授与されており，ニオブを利用した材料特性の向上に日本の技術者・科学者が重要な貢献を果たしてきたことが窺える．

文 献

- (1) 金属データブック改訂4版，日本金属学会，丸善，(2004)．
- (2) R. L. Rundnick, S. Gao: "The Crust", Elsevier Ltd., (2004), 1-64.
- (3) H. Rose: Ann. Phys., **139**(1844), 317-341.
- (4) C. Hatchett: Philosophical Trans. R. Soc. London, **92**(1802), 49-66.
- (5) W. H. Wollaston: Philosophical Trans. R. Soc. London, **99**(1809), 246-252.
- (6) T. I. C. Bulletin: No. 184, Tantalum-niobium international study center, (2021)．

次号 金属なんでもランキング! No. 16 蒸発熱



公益社団法人日本金属学会への入会のおすすめ

公益社団法人日本金属学会は、本多光太郎先生のご提唱により1937年2月14日に創設され、金属及びその関連材料分野の学術および科学技術の振興を目的として、学術誌や学術図書の刊行、講演会や講習会の開催、調査・研究、表彰・奨励の事業を行っています。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入会をお待ちしております。

会報「まてりあ」は、会員のみに提供されます。さらに、会員には、講演大会への会員参加費での参加及び登壇費の免除、刊行物の会員価格での購入、本会主催のセミナー・シンポジウム・講演発表会等への会員割引価格の参加等の特典があります。

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

- 会報「まてりあ」が毎月無料で配付されます(電子ジャーナルも閲覧できます)。まてりあでは、専門外の方のための入門講座や講義ノート、解説記事で分野の基礎を学ぶことができます。
- 和文論文誌「日本金属学会誌」を会員価格で購読できます(電子ジャーナルの閲覧は無料です)。
- 英文論文誌「Materials Transactions」を会員価格で購読できます(刊行半年後からの電子ジャーナル閲覧は無料です)。
- 最新の研究成果が発表される年2回の講演大会に会員参加費で参加できます。
- 最新の研究や技術に関するシンポジウムに参加できます。
- 最先端の研究を討議する研究会が開催する研究集会に参加できます(新たな研究会を設立することも可能です)。

多様な研究者や技術者と交流ができます

- 様々な場で大学や企業の研究者や技術者と学術・技術の交流ネットワークを作ることができます。
- 各分野の専門家集団で構成される分科の活動に参加することができます。
- 最新の研究成果を発表する、春と秋の年2回開催される講演大会へ会員参加費で参加できます(参加費には講演概要が含まれています)。
- 講演大会概要を会員価格で購入できます。
- 全国に8つの支部があり、身近な研究者や技術者と交流できます。

研究成果を発表、討議して、研究を深めることができます

- 講演大会で研究成果を発表して、分野の専門家と討議できます(非会員が講演するには大会参加費および登壇料が必要になります)。
- 研究成果を論文として日本金属学会誌や Materials Transactions 誌に発表できます。投稿された論文は分野の権威による査読を受けることができます。
- Materials Transactions の投稿料の割引が受けられます(日本金属学会誌の投稿は無料です)。

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

- 教科書、データブック、セミナーテキスト等の学術図書類を会員価格で購入できます。
- 本会主催または本会協賛のセミナーや講習会、見学会等に会員価格で参加できます。
- 学生員は本会主催の企業説明会(春期講演大会に併せて開催予定)に参加できます。

表彰を受けられます

- 表彰・奨励制度があります。
- 本会外の表彰へ推薦することができます(各種の学術賞や奨励、助成等の候補の推薦団体に指定されています)。

[入会するには(入会手続き)]

本会ホームページの入会ページ(下記 URL)から入会申し込み下さい。

<https://www.jim.or.jp/member/mypage/application.php>

企画にあたって

春本高志* 三井好古**

近年、IoT 時代の到来に伴い、様々なモノやセンサーが、ワイヤレスなネットワークに接続されつつある。それに伴い、こうしたモノやセンサーの電源確保は重要な課題である。従来、自己放電の少ない長寿命なコイン型リチウム1次電池などがこうした用途に用いられてきたが、貴重な資源であるリチウムを使い捨ててしまうため非常に勿体なかった。一方、リチウムを使い捨てない点で優れているリチウムイオン2次電池(充電電池)については、小型・高性能化が進んでおり、様々なワイヤレスデバイスへと応用されているものの、2次電池ゆえに定期的に充電が必要という克服不可能な欠点を有している。

こうした中、充電の必要がなく、身近な日常に存在するエネルギーを利用して電気を得る方法として「環境発電(エナジーハーベスティング)」が注目されている。この環境発電は、発電の過程でCO₂を排出しないという点において、脱炭素社会・カーボンニュートラルへ向けての切り札でもある。現在、最も普及している環境発電は「太陽電池」であるが、近年、IoT との整合性において「振動発電」と「熱電発電」の2つが特に注目されている。「まてりあ」では、前者の振動発電については昨年(2020年)1月に取り上げ、特に、身近な振動(機械エネルギー)を電気へと変換する際の要となる逆磁歪材料(機械→磁気変換材料)について精力的に特集した⁽¹⁾。後者の「熱電発電」は、半導体の一種ではあるものの、熱→電気エネルギー変換に特化した材料である「熱電材料」を用いた発電であり、既に過去2回(2011年⁽²⁾と2016年⁽³⁾)特集した。従来、この熱電発電は、ある程度大きな、そして、それなりに熱い熱源に取り付けて使用することを前提とし、具体的には、工場のプラントや自動車などで捨てられていた熱の再利用を想定していた。したがって、別名「廃熱発電」とも呼ばれ、付加的に電気を得ることで、系のエネルギー効率を高めるのが従来であった。しかし、熱電材料の研究開発の進展には目覚ましいものがあり、新規材料の探索や微細組織・欠陥量制御、更には、熱電変換デバイス/モジュールの構造最適化により、体温などの微小な熱源からも発電でき得る状況となってきた。したがって、従来の熱電発電(=廃熱発電)の流れとは一線を画し、将に、環境発電としての熱電発電といえる状況となってきた。

そこで、本特集では、こうした熱電発電における著しい進展のスナップショットを撮るべく、「IoT 時代における熱電材料の深化と先鋭化」と題して、一線で研究開発される方に執筆をお願いした。先ず、新規熱電材料の研究開発状況につ

いては、「機械学習を活用した Fe-Al-Si 系熱電材料(FAST 材)の研究」と題し、物質・材料研究機構の高際良樹氏にご執筆頂いた。第一原理計算と機械学習の併用による最新の材料探索手法とその成果が記載されている。また、熱電特性向上に向けての材料組織や欠陥量の制御、設計指針については、「X 線吸収端微細構造法によるハーフホイスラー型熱電変換材料の局所結晶構造解析」と題して名古屋工業大学の宮崎秀俊氏、並びに、「Half-Heusler 規則構造の格子サイト占有に基づく熱電特性制御」と題して東京工業大学の木村好里氏・Chai Yaw Wang 氏にご紹介頂いた。トレードオフの関係にある各種パラメータを最適化するため、規則化度・サイト占有率や付随する局所歪を制御することの重要性についてご解説頂いた。更には、今後進展が期待される熱とスピンの相互作用による熱電変換について、名古屋大学の水口将輝氏に「熱磁気効果をベースとした熱電材料の新展開」と題してご紹介頂いた。最後に、体温という微小な熱源における熱電発電について、東京工業大学の菅原聡氏に「体温を用いたマイクロ熱電発電モジュール技術」と題し、熱流や発電効率などの観点から考察・実証した発電モジュールの最適化・設計指針についてご紹介頂いた。

本特集では、熱電材料の研究開発状況、並びにデバイス/モジュール化技術やその構造について、最新の内容を集めた。本会会員皆様のご参考・契機となれば幸いである。最後に、ご多忙にもかかわらず執筆をご快諾下さいました著者の皆様に、また、ご助力頂きました編集委員会第2分野の皆様に、この場を借りて深く御礼申し上げます。

文 献

- (1) 特集「磁歪・逆磁歪材料の基礎と振動発電への応用」: まてりあ, **59**(2020), 5.
- (2) ミニ特集「熱を電気に直接変換」熱電変換材料の現状と将来像」: まてりあ, **50**(2011), 141.
- (3) ミニ特集「環境調和型熱電材料の近年の進展と展望」: まてりあ, **55**(2016), 301.



春本高志



三井好古

* 東京工業大学; 助教(〒152-8552 東京都目黒区大岡山 2-12-1) ** 鹿児島大学: 准教授(〒890-0065 鹿児島市郡元 1-21-35)
 Preface to Special Issue on "Thermoelectric Materials: Recent Progress and Application to IoT Devices"; Takashi Harumoto and Yoshifuru Mitsui (*Tokyo Institute of Technology, Tokyo. **Kagoshima University, Kagoshima)
 Keywords: thermoelectrics, decarbonization, carbon neutral, energy harvesting, battery
 2021年7月27日受理[doi:10.2320/materia.60.541]

機械学習を活用した Fe-Al-Si 系熱電材料 (FAST 材)の研究

高 際 良 樹*

1. はじめに

近年、モノ同士がインターネットでつながる社会 (IoT 社会) を支える自立電源の一つとして、熱電発電技術が期待されている。現在のところ、各種センサ用電源としてボタン電池が主な電源として使用されているが、交換コストやリサイクルコストを考慮すると、メンテナンスフリーの自立電源が必要とされている。エネルギーハーベスティング技術の内、普及の進む太陽電池に次ぐ出力が期待できる熱電発電技術は有力な候補である。未利用排熱の内、200℃以下の温度域が大部分を占めており、この温度域の排熱を利用してセンサ用の自立電源として活用することができれば、無駄のないエネルギーの利用につながる。

民生利用される際に必要とされる熱電材料の条件は、環境調和性とコストに優れることである。現在市販化されている Bi-Te 系材料を用いた熱電発電モジュールは、希少元素で構成されるために材料コストが高くなる傾向がある。特に Te は90%以上が Cu の副産物として産出されているが、Cu のリサイクル化が進んでいることから生産量が今後更に低下することが懸念される。

我々は、資源性およびコストの両面で Bi-Te 系既存材料に代わる新規熱電材料の研究開発を遂行しており、近年、環境調和性に優れた Fe-Al-Si 系熱電材料 [Fe-Al-Si Thermoelectric Materials] (以下、FAST 材と略す。)を用いた小型発電モジュール化に成功した(図1)。本稿では、主に機械学習を用いた FAST 材の研究開発事例を紹介する⁽¹⁾⁻⁽³⁾。

地殻存在量

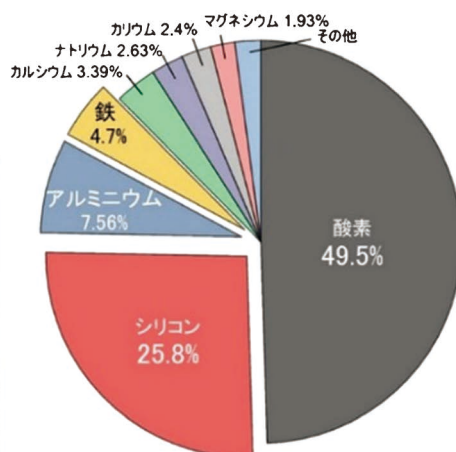


図1 (左)Fe, Al, Si の原材料と FAST 材を用いた小型熱電モジュール, (右)地殻存在量。

* 国立研究開発法人物質・材料研究機構エネルギー・環境材料研究拠点; 独立研究者(〒305-0047 つくば市千現 1-2-1) Development of Fe-Al-Si-based Thermoelectric (FAST) Materials Using Machine Learning; Yoshiki Takagiwa* (*National Institute for Materials Science, Tsukuba)
Keywords: thermoelectric materials, thermoelectric modules, first-principles calculation, machine learning, Fe-Al-Si
2021年5月28日受理[doi:10.2320/materia.60.542]

2. 計算科学を用いた FAST 材の開発とその特徴

我々が新材料探索の際に課した制約条件は、構成元素が無害かつ低コストであることである。計算科学と合金データベース(状態図)⁽⁴⁾の情報を組み合わせた材料探索を行い、Fe-Al-Si 三元系化合物において所望の電子構造を有する可能性のある新材料を見出した⁽⁵⁾。

Fe-Al-Si 三元系化合物は、 τ_1 から τ_{11} 相の安定相が知られている⁽⁴⁾。第一原理計算を用いた電子構造のスクリーニングにより、これらの安定化合物の中で τ_1 相 ($\text{Fe}_3\text{Al}_2\text{Si}_3$ 化合物) がフェルミ準位近傍に 0.2 eV 程度の狭ギャップを形成し、室温から 200°C 程度までの温度域で高い熱電特性を示す可能性が示された⁽⁵⁾。また、状態図⁽⁴⁾によると、 τ_1 相の生成域が鉄濃度を一定として Al と Si 方向に広く分布しており、 τ_1 相の優れた特徴の一つである Al と Si 比の組成調整のみで p 型と n 型半導体の作り分けが可能であるということも明らかにした⁽⁶⁾。

FAST 材は精密組成調整や最適な合成プロセスの適用により、室温から 200°C の温度範囲にて IoT 機器が駆動可能な発電特性を有する材料であることが実証された⁽¹⁾⁻⁽³⁾。また、フォノン計算からも示唆される比較的低い熱伝導率とモジュールの長期耐久性に重要な優れた機械特性も確認された⁽¹⁾⁽⁷⁾⁽⁸⁾。一方で、比較的大きな温度差を用いた発電が可能な中温域での廃熱回収を想定した場合には、FAST 材の適用温度範囲を低温側から中温側へと拡張させる必要がある。また、量産化が可能な高性能の FAST 材合成プロセスの確立も必要となる。現在の量産技術としては、真空溶解法、ガスアトマイズ法、そして、放電プラズマ焼結法を組み合わせたバルク試料作製プロセスを採用している。

3. 機械学習を用いた FAST 材の出力特性向上と適用温度域の拡張

FAST 材は組成の違いにより出力特性が大きく変化することから、最適な組成を実験的に明らかにする必要がある。一般的に、非化学量論組成を有する物質に対する第一原理計算は、構造モデルの構築が極めて煩雑になり、現状では FAST 材の最適組成を予測することは困難な状況である⁽⁹⁾。

このような背景のもと、我々は「より効率的に」最適組成を探索するために、実験と機械学習(ベイズ最適化)を組み合わせた研究を遂行している。ベイズ最適化とは、ベイズ確率の考え方を用いた推論に基づき未知の関数を最適化する手法であり、その詳細は文献(10)を参考にされたい。機械学習を始める際に必要なことは対象となるデータをできるだけ多く収集することである。まずは、様々な組成を有する FAST 材の合成を行った。合成の際には、少量のバルク試料作製プロセス(アーク溶解法+放電プラズマ焼結法)を採用した(仕込み組成 $\text{Fe}_{36.5}\text{Al}_{23.5+x}\text{Si}_{40-x}$)。熱電材料の出力特性に直結する電気出力因子(パワーファクタ)の温度依存性のデ

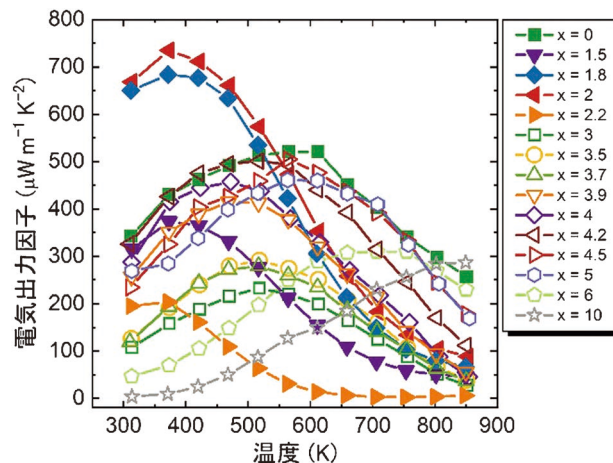


図2 様々な組成の FAST 材の電気出力因子の温度依存性。
(仕込み組成 $\text{Fe}_{36.5}\text{Al}_{23.5+x}\text{Si}_{40-x}$ [$0 \leq x \leq 10$])

ータを取得し、組成・温度・電気出力因子を機械学習のデータセットとして用いた。

図2は、様々な組成の FAST 材の電気出力因子の温度依存性を示したものである。出発組成により得られる電気出力因子が大きく異なることが分かる(中塗り:n型FAST材, 中抜き:p型FAST材)。一般的に、電気出力因子はキャリア濃度の関数であるため、ある程度の規則的傾向を示すことが予想される。このような観点から実験データをみると、 $x=0$ から 2.2 までは n 型材料としての挙動を示し、 x の増加とともに電気出力因子の最大値が増加して、 $x=2$ 付近で極大を迎えた後に、減少に転じることが分かる。また $x=3$ 以上では p 型材料としての挙動を示し、 x の増加とともにやはり電気出力因子の最大値が増加して、 $x=4.5$ 付近で極大値を迎え、その後、減少に転じる。この結果から一見して、実験により既に最適組成が得られているように思われるが、研究目標は FAST 材の適用温度範囲を低温側から中温側へと拡張させ、500 K 付近での電気出力因子を向上させることにある。図2に示すように、電気出力因子の極大を迎える温度は組成により異なることから、単純にキャリア濃度の調整だけでは電気出力因子の温度依存性を制御することは難しい。また、FAST 材の場合、組成を 0.1 at% 程度変化させただけでも、出力因子の絶対値と温度依存性が顕著に変化することから、実験的に最適解を得るためには多くの試行が必要とされる。

図2に示す様々な組成における電気出力因子の温度依存性をデータセットとしてベイズ最適化による機械学習を行った結果、 $x=0.7$ の組成が次のターゲット組成として予測された。実験により $x=0.7$ の試料を作製・評価を行った結果、 $x=0$ の試料と比較して 500 K 付近での電気出力因子が 15% 程度向上した。次に、 $x=0.7$ の測定結果をデータセットに加え、再度、同様の試行の後、次のターゲットとして $x=0.9$ の組成が予測された。また、0.9 より大きな x の組成では電気出力因子が減少することも予想された。 $x=0$ および $x=0.9$ の試料の電気出力因子の温度依存性を図3に示す。 $x=$

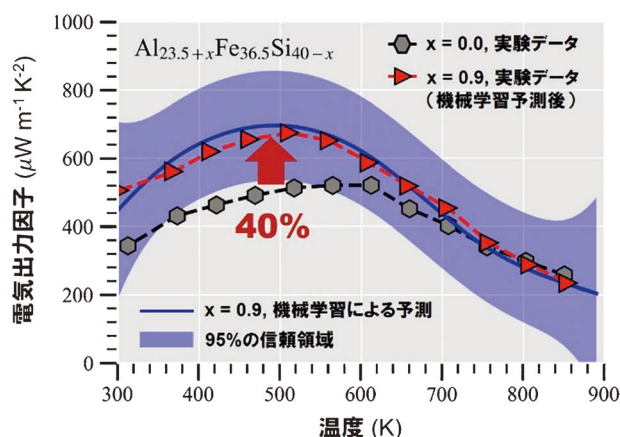


図3 機械学習を用いたFAST材の出力性能向上.

0.9の試料の電気出力因子は $x=0.7$ よりもさらに向上し、機械学習による予測データとほぼ一致した。 $x=0$ の試料と比較すると結果として40%程度もの特性向上に成功した。 $x=0.9$ の試料が最適組成であることを確認するために、前後の組成 $x=0.8$ および 1.0 の試料を作製し、電気出力因子を評価したところ、これら二つの組成を有する試料の特性値は $x=0.9$ の特性値を下回った。このことから、 $x=0.9$ が中温域での出力向上に資する組成であることが、2回の機械学習と実験の試行に加え、追加実験により明らかになった⁽¹⁾。合成した試料($x=0.9$)は、室温～700 Kまでの広範な温度範囲での利用が可能であり、機械学習を併用することにより初めて見出した新組成である。

$x=1.5$ 以下の組成域は異なる金属相が析出する組成領域である。一般的には、金属相が析出することにより、ゼーベック係数が顕著に減少することにより、電気出力因子も同様に低下することが予想される。機械学習が予測した半導体相と金属相が共存する二相共存領域で特性向上を達成したことは、実験開始前には予想できなかった。以上が機械学習にて得られた知見をもとに性能向上のメカニズムを実験的に解明することにより、新たな材料設計指針の構築につながった例である。

4. 機械学習を用いたFAST材における第四元素置換の最適化

3節で述べたように、非化学量論組成を示すFAST材における組成最適化に成功したことを受けて、熱電材料研究の常套手段である置換元素濃度の最適化に機械学習が適用できるかを検証した。Co置換を行ったFAST材を3節と同様の試料作製プロセスを用いてバルク試料を作製した(仕込み組成 $\text{Fe}_{38-x}\text{Co}_x\text{Al}_{24}\text{Si}_{38}$ [$x=0, 1.0, 2.0, 2.5, 3.0, 3.5, 3.7, 4.0, 4.1, 4.5$])。なお、この仕込み組成はアーク溶解前にペレット化処理を加えることにより変更したものであり、3節で紹介したFAST材の仕込み組成とは異なる⁽³⁾。

電気出力因子の最初のデータセットとして $x=0, 1.0, 2.0,$

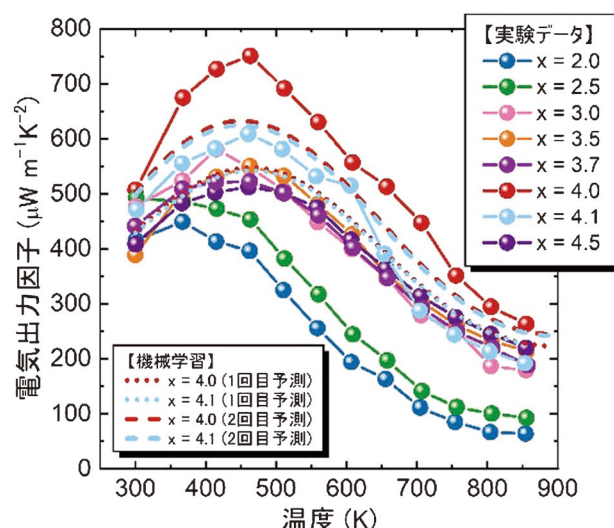


図4 機械学習を用いたCo置換したFAST材の置換濃度最適化.

2.5, 3.0, 3.5, 3.7, 4.0, 4.5の9個の試料の実験データを用いた。その結果、図4の破線に示すように、 $x=4$ が最も高い特性を示すと機械学習は予測したが、 $x=4.1$ の試料において僅かに増加する可能性があることが示された。その後、実験において $x=4.1$ の試料を作製して電気出力因子を評価したが、 $x=4.0$ の試料を下回った。データセットに $x=4.1$ を追加した後に機械学習を行った結果が図4の点線である。結果として、Coの置換濃度は $x=4.0$ であることが機械学習の結果からも示され、 $750 \mu\text{W m}^{-1}\text{K}^{-1}$ を473 Kで達成した。この値は、これまで作製されたn型FAST材の中で最も高い。

本稿では、n型FAST材の性能向上に関する取り組みを紹介したが、今後はp型FAST材に関しても同様に特性向上を目指す。

5. 今後の展望

FAST材に対して、室温から700 Kまでの非常に広範な温度域で使用可能な新組成を見出すことに成功した。機械学習が非化学量論組成を示すFAST材における最適組成の探索や第四元素置換濃度の決定に効果を発揮したことは今後の熱電材料研究に一石を投じるもので、理論科学、計算科学および実験科学に次ぐ第四の科学としてデータ科学のポテンシャルが明示されたといえる。我々は、民生利用に向けてFAST材を用いた小型発電モジュール化技術を構築し、FAST材の性能向上を目指すとともに、実際のアプリケーションを想定した研究開発を推進していく。

本稿で紹介した研究開発の一部は、(国研)物質・材料研究機構のZhufeng Hou 特別研究員(現、中科院福建物質結構研究所)、篠原嘉一博士、徐一斌博士、東京大学の津田宏治教授との共同研究の成果である。また、国立研究開発法人科学技術振興機構(JST)のイノベーションハブ構築支援事業「情

報統合型物質・材料開発イニシアティブ(MI²I)」および日本学術振興会科学研究費補助金「基盤研究(B)」課題番号：17H03421, 20H02469」からの支援を受けた。ここに謝意を表する。

文 献

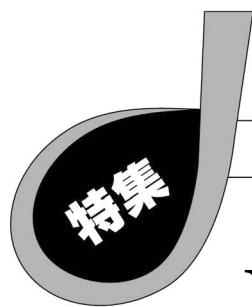
- (1) Z. Hou, Y. Takagiwa, Y. Shinohara, Y. Xu and K. Tsuda: ACS Appl. Mater. Interfaces, **11**(2019), 11545–11554.
- (2) Y. Takagiwa, T. Ikeda and H. Kojima: ACS Appl. Mater. Interfaces, **12**(2020), 48804–48810.
- (3) Y. Takagiwa, Z. Hou, K. Tsuda, T. Ikeda and H. Kojima: ACS Appl. Mater. Interfaces (2021). DOI:10.1021/acsami.1c04583
- (4) M. C. J. Marker, B. Skolyszewska-Kuhberger, H. S. Effenberger, C. Schmetterer and K. W. Richter: Intermetallics, **19**(2011), 1919–1929.
- (5) Y. Takagiwa, Y. Isoda, M. Goto and Y. Shinohara: J. Therm. Anal. Calorim., **131**(2018), 281–287.
- (6) Y. Takagiwa, Y. Isoda, M. Goto and Y. Shinohara: J. Phys. Chem. Solids, **118**(2018), 95–98.

- (7) Y. Takagiwa and Y. Shinohara: Scr. Mater., **172**(2019), 98–104.
- (8) N. Sato and Y. Takagiwa: Crystals, **11**(2021), 388–1–10.
- (9) Z. Hou, Y. Takagiwa, Y. Shinohara, Y. Xu and K. Tsuda: J. Phys.: Cond. Matter, **33**(2021), 195501–1–15.
- (10) Information Science for Materials Discovery and Design; T. Lookman, F. J. Alexander and K. Rajan, Eds.; Springer International Publishing: Switzerland (2016).



高際良樹

★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★
2009年 東京大学大学院 新領域創成科学研究科 物質系専攻 博士課程修了
2009年4月–2015年3月 東京大学大学院 新領域創成科学研究科 物質系専攻 助教
2012年4月–2013年3月 California Institute of Technology, Visiting Associate
2015年4月 国立研究開発法人物質・材料研究機構 に異動
2020年4月– 現職
専門分野：材料物性
◎低環境負荷の新規熱電材料の研究開発に従事。
★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★



X 線吸収端微細構造法による ハーフホイスラー型熱電変換材料の 局所結晶構造解析

宮 崎 秀 俊*

1. は じ め に

工場や自動車から排出される熱を電気に直接変換させることができる熱電変換発電は、電気を発電する際に二酸化炭素を排出しないことから、脱炭素社会への移行および持続可能な社会を実現するためのカギとなるクリーンな発電技術として注目を集めている。熱電変換材料の性能は熱電変換性能 zT を用いて以下の無次元性能指数で評価される⁽¹⁾。

$$zT = \sigma S^2 T / \kappa$$

ここで、 σ は電気伝導率、 S はゼーベック係数、 T は絶対温度、 κ は熱伝導率である。バンドギャップが約 0.3~0.4 eV の C1b 型ハーフホイスラー合金は、熱電変換材料として最適なキャリア量 ($n \sim 10^{19}/\text{cm}^3$) を持ち、高いゼーベック係数と高い電気伝導率を示すため、600~1000 K 程度の高温での熱電変換材料としてこれまで多くの研究がなされてきた⁽²⁾⁻⁽¹¹⁾。近年では、ナノ構造の析出、相分離、局所的な結晶構造の乱れを制御することにより熱伝導率を効率的に低減させる試みが行われており、n 型、p 型ともに高い熱電特性 ($zT > 1.2$) が報告されている⁽⁷⁾⁽⁹⁾。このように、ハーフホイスラー合金は、高温領域で使用する次世代熱電変換材料の有望な候補物質の 1 つである。

ハーフホイスラー型 NiZrSn (NZS) 合金は、優れた熱電特性、機械的強度⁽¹²⁾、耐酸化性⁽¹³⁾⁽¹⁴⁾ を有していることから、高温環境下で動作する熱電発電デバイスの開発に向けて実用化研究が活発に行われている。NZS 合金では、高い結晶対称性に関わらず、熱伝導率が 1 桁 W/mK 程度であり、この低い熱伝導率が高い zT に寄与している。NZS 合金における低い熱伝導率は既存の理論と比較して約半分程度で

ある⁽¹⁵⁾⁻⁽¹⁸⁾。この不一致は、放射光粉末回折 (SR-XRD) 測定により、ハーフホイスラー化合物中の空孔部位に格子間 Ni が原子欠陥として存在することに起因すると考えられているものの⁽¹⁹⁾⁻⁽²¹⁾、原子欠陥の存在のみでは NZS 合金における低い熱伝導率を説明することはできない。原子欠陥周辺の原子配位が歪み、熱伝導率の大幅な低下に寄与していると考えられるが、本材料では格子の歪みは観察されていない。SR-XRD 法は、結晶構造中の原子の周期的な配置を調べるための最良の方法ではあるが、この方法では、上述したような結晶中の局所的な格子歪みを確認することができない。原子欠陥周辺の格子歪みの詳細な変化を調べることができれば、歪み量の制御による熱伝導率のさらなる低減が可能になり、より高性能な熱電変換材料の実現が期待できる。

原子欠陥などの特定の原子の周りの原子配位に関する情報を得るための最も強力な実験手法は、放射光のような波長可変の光子源を用いた X 線吸収微細構造分光 (XAFS) 法である。元素選択的な XAFS データは、2 つの部分に分けて扱われる。(i) XANES (Near Edge XAFS) スペクトルは最近接原子の種類に強く影響されるため電子的特徴を反映するのに対し、(ii) EXAFS (Extended XAFS) スペクトルは広範囲の最近接原子の局所的な周期性を反映する。そのため、NZS 合金における EXAFS スペクトルを詳細に調べる事で、原子欠陥周辺の局所的な結晶構造に関する詳細な情報を得ることができる。

最近、筆者らは、XAFS 測定の実験結果とスーパーコンピュータによる空孔サイトへの格子間 Ni 原子の侵入に伴う局所結晶構造の変化の大規模バンド計算を組み合わせることにより、高い熱電変換性能を持つハーフホイスラー型 NZS 合金中に存在する局所歪の観測に成功し、高い熱電変換性能のしくみを説明することに成功した。本稿では、これ

* 名古屋工業大学工学部物理工学科; 准教授 (〒466-8555 名古屋市昭和区御器所町)
Local Crystal Structure Analysis of Half-Heusler-Type Thermoelectric Materials by X-ray Absorption Fine Structure Method; Hidetoshi Miyazaki (Department of Physical Science and Engineering, Nagoya Institute of Technology, Nagoya)
Keywords: thermoelectric materials, half-Heusler alloys, NiZrSn, local crystal structure, X-ray absorption fine structure
2021年6月25日受理 [doi:10.2320/materia.60.546]

までに著者らが行ってきたハーフホイスラー NZS 合金における局所結晶構造解析の最近の研究成果を紹介する⁽²²⁾。

2. ハーフホイスラー型 NZS 合金における空孔サイトへの原子欠陥による局所歪

図 1(a) と (b) は、バンド計算に用いた NZS 結晶構造のモデルである。空孔サイトにおける格子間 Ni の存在が局所的な結晶構造に与える影響を評価するために、格子間 Ni を含まない NZS 合金 ($\text{Ni}_{32}\text{Zr}_{32}\text{Sn}_{32}$) を Model 1, 格子間 Ni 原子を含むハーフホイスラー型 NZS 合金 ($\text{Ni}_{36}\text{Zr}_{32}\text{Sn}_{32}$) として周辺原子の構造緩和を含まない場合を Model 2, 構造緩和を含む場合を Model 3 として、構造最適化のためのバンド構造計算を行った。バンド計算には VASP-code を用いた⁽²³⁾⁻⁽²⁵⁾。希薄な格子間 Ni が及ぼす局所結晶構造への影響を取り扱うために、ハーフホイスラー合金のユニットセル

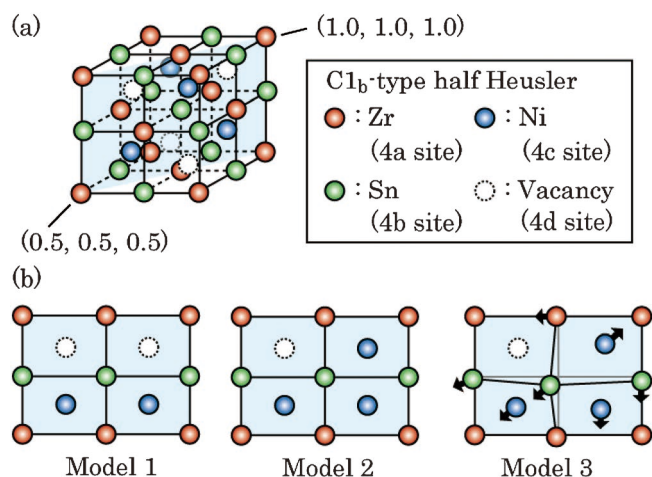


図 1 (a) C1b 型ハーフホイスラー NiZrSn 合金の結晶構造。図中の面は (110) 面を示す。図中の座標は、スーパーセル内の $\text{Ni}_{36}\text{Zr}_{32}\text{Sn}_{32}$ の相対座標である。(b) さまざまなハーフホイスラー構造とその欠陥モデルの原子座標：ハーフホイスラー合金の完全な結晶構造を Model 1, 空孔サイトに格子間 Ni を含むが周辺原子の構造緩和を行わない場合を Model 2, 格子間 Ni 周辺の原子を最適な原子位置まで構造的に緩和した場合を Model 3 とした。矢印は、平衡位置から緩和位置へ方向を示す。(オンラインカラー)

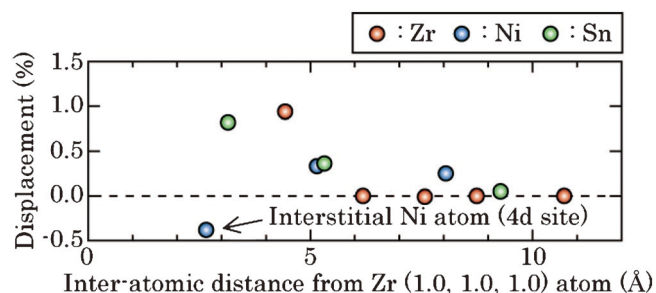


図 2 Model 3 における $\text{Zr}(1.0, 1.0, 1.0)$ 原子を基準とした、(110) 面の周囲の各原子の平衡位置からのずれ。(オンラインカラー)

($\text{Ni}_4\text{Zr}_4\text{Sn}_4$) に対して $2 \times 2 \times 2$ のスーパーセルを用いた。計算に用いた格子間 Ni を含む NZS 合金の組成 ($\text{Ni}_{36}\text{Zr}_{32}\text{Sn}_{32}$) は、XAFS 測定に用いた NZS 合金の組成 ($\text{Ni}_{34}\text{Zr}_{33}\text{Sn}_{33}$) と比較的一致している。

Ni の格子間欠陥の歪みが周囲の原子に与える影響を調べるため、バンド計算によって最適な原子位置を決定した。図 2 は、Model 3 における $\text{Zr}(1.0, 1.0, 1.0)$ 原子を基準にして、(110) 面における各原子が平衡位置からどの程度、ずれているのかを示した結果である。格子間 Ni 周辺の原子は平衡位置から大きくずれており、格子間 Ni に隣接する Zr 原子は平衡位置よりも約 0.9% 程度と最も大きくずれている。格子間 Ni 原子周辺の原子の平衡位置からのずれは、格子間 Ni から距離が離れるほど小さくなる傾向があり、 $5.5 \text{ \AA}$ (0.55 nm) 離れた Sn 原子では約 0.4% のずれが観測された。この局所的な結晶の歪の存在が NZS 合金における熱伝導率が理論計算と比較して低いことに関与している可能性が考えられる。

3. X 線吸収端微細構造法によるハーフホイスラー型 NZS 合金における原子欠陥への侵入元素が及ぼす局所歪の評価

2 章において、NZS 合金においては、空孔サイトへの格子間 Ni 原子の侵入により、周辺原子の局所的な歪の存在が示唆された。そこで、実験的にこの局所歪の観測を試みるために、NZS 合金に対してあいしシンクロトロン光センター BL5N1 において XAFS 測定を行った。図 3 にハーフホイスラー型 NZS 合金における Zr K 吸収端の XANES スペクトルおよびハーフホイスラー構造中の空孔サイトに格子間 Ni が存在し局所的な歪が生じている際 (Model 3) の XANES ス

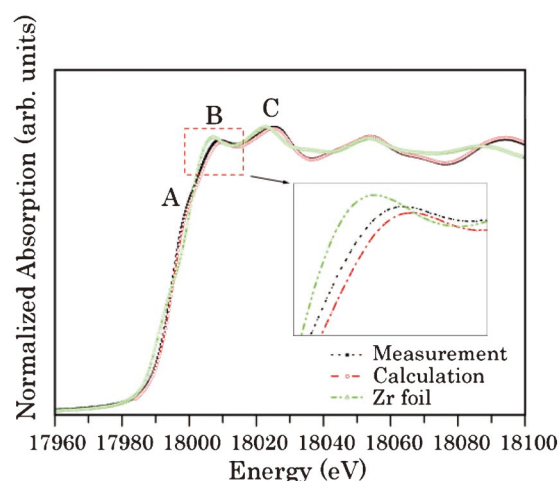


図 3 ハーフホイスラー型 NiZrSn 合金における Zr K 吸収端における XANES スペクトル (点線) およびハーフホイスラー構造中の空孔サイトに格子間 Ni が存在し局所的な歪が生じている際の XANES スペクトルの計算値 (図 1 中の Model 3: 鎖線)。同じビームタイムで測定した Zr 箔 (参照試料) の Zr K 吸収端 XANES スペクトルも示している。(オンラインカラー)

ベクトルの計算値を示す。NZS 合金の 17998 eV にあるピーク “A” は、 $d-p$ 混成状態に起因するものである⁽²⁶⁾。 $1s \rightarrow 5p$ 遷移に対応するメインピークである “B” (Zr 金属: 18006.6 eV, NZS 合金: 18008.6 eV) と “C” (Zr 金属: 18022 eV, NZS 合金: 18024 eV) に典型的なスプリットピークが観測されている。ピーク “B” は四面体サイト対称からなる Zr 原子の $1s \rightarrow 5p$ 遷移に対応し、ピーク “C” は立方体 NZS 合金の八面体サイト対称からなる Zr 原子 $1s \rightarrow 5p$ 遷移に対応する。Zr K 吸収端の XANES スペクトルの実験結果は、計算値とよい一致を示している。そこで、FEFF 8.2コード⁽²⁷⁾⁽²⁸⁾を用いて NZS 合金のバンドギャップを算出したところ、0.395 eV と計算された。この結果は、欠陥のない NZS 合金のバンド構造計算で得られるバンドギャップ 0.525 eV よりも小さい⁽²⁹⁾⁻⁽³²⁾。このような挙動は、構造の歪みによってバンドギャップが減少することで説明でき⁽³³⁾⁽³⁴⁾、バンドギャップの観点からも局所歪の存在が示唆される。

XANES 領域よりも高エネルギー側の EXAFS スペクトルには、測定原子の周辺の局所的な結晶構造に関する情報が含まれている。励起された測定原子の内殻電子は、その余剰エネルギーを運動エネルギーとして近隣の原子間を移動する。この光電子の散乱により、EXAFS スペクトルのテール部分には振動構造が生じる。この振動構造は、干渉の位相が揃っているときは正、位相がずれているときは負となる。スペクトルの振動領域の情報は、XAFS 解析ソフトである ATHERNA や ARTEMIS プログラムを使って EXAFS 領域の振動部分を抽出することで解析した。EXAFS 領域は、主吸収端の約 80 eV 高エネルギー側に位置し、400~800 eV のエネルギー範囲内の振動構造を解析した。Zr K -edge EXAFS スペクトルから抽出したハーフホイスラー NZS 合金の EXAFS 散乱強度(χ)を Model 3 から計算される EXAFS 散乱強度とともに図 4 に示す。全体的に測定データと計算データは一致しており、Zr 周辺の局所結晶構造は図 1 中の Model 3 となっていることが明らかになった。

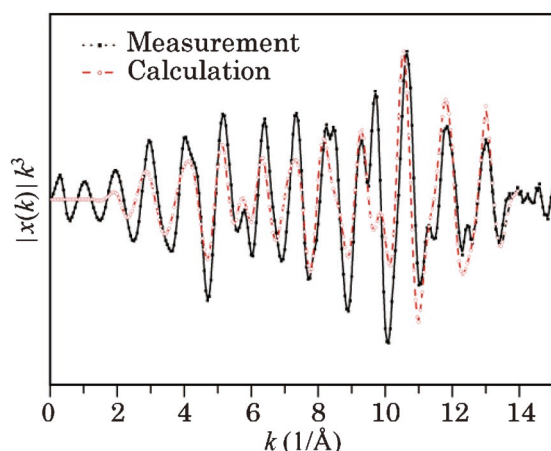


図 4 ハーフホイスラー NiZrSn 合金の Zr K 吸収端 EXAFS スペクトルから計算された散乱強度の実験値と図 1 中の Model 3 から計算された理論値の比較。(オンラインカラー)

ハーフホイスラー NZS 合金中の Ni 原子の K 吸収端 XANES スペクトルの実験結果と理論計算結果を図 5 に示す。図 5 の “B” で示される Ni の主要な K 吸収端は、 $1s \rightarrow 4p$ の遷移によるものである。Ni K 吸収端 XANES スペクトルは 8319 eV から立ち上がり始め、8331.3 eV に弱い肩のようなエッジを示す(図 5 の “A” で示す)。理論計算と実測のスペクトルはよく一致している。測定データと計算データの一致により、Ni 周辺の局所結晶構造は Zr と同様に図 1 中の Model 3 となっていることが明らかとなった。

Ni K 吸収端 EXAFS スペクトルから抽出したハーフホイスラー NZS 合金の EXAFS 散乱強度(χ)を、Model 3 から計算される結果とともに図 6 に示す。Ni K 吸収端から観測された散乱強度は、Zr において観測された散乱強度ほどは一致していない。一般的に、観測原子周辺の原子配置の乱れが生じた際に散乱強度の減衰が観測される。つまり、Ni 原子で観測された散乱強度の不一致は、Ni 原子周辺の格子間

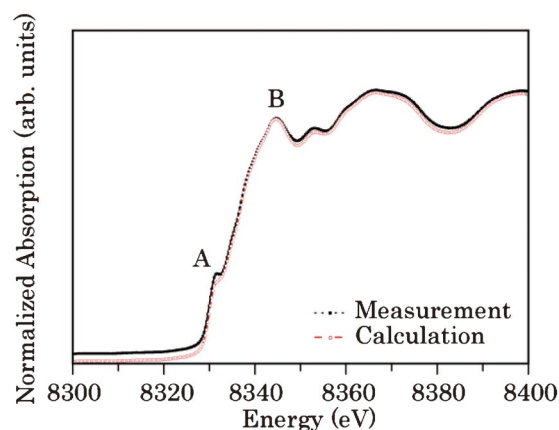


図 5 ハーフホイスラー型 NiZrSn 合金における Ni K 吸収端における XANES スペクトル(黒点線)および図 1 中の Model 3 から計算されたスペクトルの理論値(赤点線)の比較。(オンラインカラー)

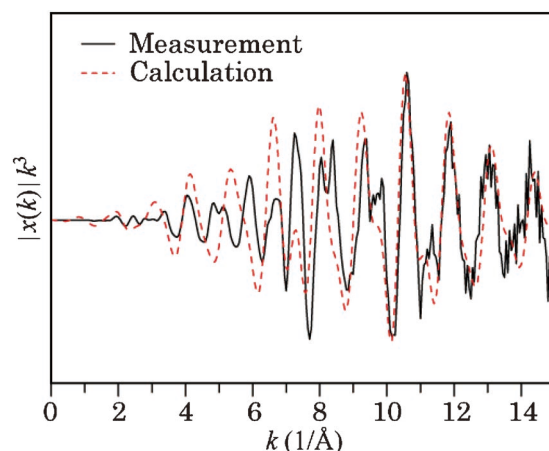
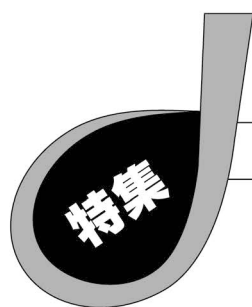


図 6 ハーフホイスラー NiZrSn 合金の Ni K 吸収端 EXAFS スペクトルから計算された散乱強度の実験値と図 1 中の Model 3 から計算された理論値の比較。(オンラインカラー)



Half-Heusler 規則構造の格子サイト占有に基づく熱電特性制御

木村 好里¹⁾ CHAI Yaw Wang²⁾

1. はじめに

廃熱など多様な熱源を利用して温度差で発電する熱電変換は、原理的に稼働時における CO₂ 排出ゼロで発電できる技術であり、持続的発展を目標に環境エネルギー問題の解決を図る有効手段として広く認識されている。地球上には様々な規模の熱エネルギーが未利用のまま分散しているが、これらを電気エネルギーとして回収できる可能性がある。一般に熱電材料の性能は、無次元性能指数 $zT = (S^2\sigma/\kappa)T$ を用いて評価され、ゼーベック係数(熱起電力) S と電気伝導率 σ を大きく、熱伝導 κ を小さくすることで zT を向上できる⁽¹⁾⁻⁽⁴⁾。 S と σ はキャリアを介して基本的にトレードオフの関係にあり材料組成の調整による独立した制御は困難である。熱伝導率 κ はキャリア成分と格子(フォノン)成分の和で表され、キャリア濃度を最適化して電気出力を最大にするため、キャリアの影響を受けない格子成分の制御は性能改善の鍵となる。目安として $zT=1$ 以上かつ温度差 250 K 程度の条件により、約10%を超える変換効率 η が見込まれる⁽¹⁾。

熱電材料研究の長い歴史において、冷却や精密な温度制御に使用するペルチェ熱電素子は、例えばレーザー発振機の温度管理などに実用されて情報社会を支えている。ゼーベック熱電素子による発電に関しては、材料性能とモジュール変換効率を飛躍的に改善することが永年の課題であり、経済的に低コスト化が必須となる一般用途での社会実装は現状において進んでいない。熱電発電の技術は宇宙探査船の電源 RTG (Radioisotope Thermoelectric Generator) という特殊用途において確かな実績を残している。例えばアメリカ航空宇宙局の Voyager (1号・2号)では、1977年の打ち上げから木星と

土星の探査を経て2012年頃に太陽系外に出て以来、現在も航行を続け50年にわたるミッションを RTG が支えている。温度差を確保することで長期間継続して発電できる熱電変換のメリットが理解できる。また、熱源の温度や規模を問わないことも熱電発電の特徴であり、産業活動や一般生活の廃熱利用に限らず、再生可能エネルギー発電やエネルギーハーベスタなど広い用途に対して期待を集めている。最近では特に IoT (Internet of Things) 技術とその応用展開を支える独立電源としての役割に大きな価値が見込まれている。実用化には熱電発電モジュールの小型化と高効率化が必要であり、熱電材料には低温における出力因子 $S^2\sigma$ の向上、厳しい制約の熱マネジメントの基盤としての低い熱伝導率が要求される。

Voyager ミッションで実証されているように、固体素子で構成されて機械摺動部を持たない熱電モジュールには、メンテナンス不要で長期使用できるメリットがある。使用条件によって、温度サイクルの熱応力や機械的な振動による疲労破壊、高温での酸化や腐食による材料劣化が実用上の問題となる。従って高性能はもちろん、長期寿命を支える耐久性と信頼性が熱電材料の特性として求められる。これらの観点から、熱膨張係数、耐酸化特性などの物理的、化学的性質が互いに近くなるように同一材料から N 型と P 型の素子を作り分けることが有利である。金属間化合物 Half-Heusler は魅力的な候補材料の一つである⁽⁵⁾⁻⁽⁸⁾⁻⁽⁴⁶⁾⁻⁽⁵⁰⁾⁻⁽⁵²⁾。本稿では、環境低負荷の元素だけで構成できる合金系として MNiSn (M: Ti, Zr, Hf) をベース合金として選択し、Half-Heusler 規則構造の各原子サイトと空孔サイトにおける構成元素ならびに添加元素の占有挙動と熱電特性の関係について議論する。状態図に基づく相平衡の理解にも焦点をあて、合金組成、規則構造と格子欠陥、組織と相界面の体系的な制御による熱電材

* 東京工業大学物質理工学院材料系; 1) 教授 2) 特任准教授 (〒226-8502 横浜市緑区長津田町4259-J3-19)

Thermoelectric Properties Control based on the Lattice Site Preferred Occupation in Half-Heusler Ordered Structure; Yoshisato Kimura, Yaw Wang Chai (Department of Materials Science and Engineering, School of Materials and Chemical Technology, Tokyo Institute of Technology, Yokohama)

Keywords: materials design, Half-Heusler, ordered structure, thermoelectric, phase stability, substitutional elements, lattice defects, phase separation, Seebeck coefficient, electrical and thermal conductivity

2021年6月21日受理 [doi:10.2320/materia.60.550]

料設計の指針を検討する。

2. Half-Heusler の規則構造と熱電特性

Half-Heusler (HH と表記) 相の $C1_b$ 型および Heusler (FH) 相の $L2_1$ 型の規則構造について単位胞を図 1 に示す。例えば $TiNiSn$ を Ti サイト (0, 0, 0), Sn サイト (1/2, 1/2, 1/2), Ni サイト (1/4, 1/4, 1/4), 空孔サイト (3/4, 3/4, 3/4) とする⁽⁵³⁾。NiTiSn, Ni_2TiSn と表記すべきかもしれないが、著者が引用してきた慣例に従って本稿では $TiNiSn$, $TiNi_2Sn$ と書くことにする。HH 相 $TiNiSn$ の空孔サイトが全て Ni 原子で置き換わると FH 相 $TiNi_2Sn$ となる。HH 規則構造は相互貫通した 4 つの FCC 副格子として、あるいは相互貫通した 2 組の B1 型 (NaCl 型, Rock salt) の副格子 (Ti と Sn, Ni と空孔) として捉えることができる。単位胞において 2 組の B1 型副格子を内と外どちらに配置しても規則構造としては等価である。Ni と空孔を単位胞の外側, Ti と Sn を内側に収まるように描くと, FH 規則構造は 8 個の BCC 単位胞で構成されると捉えることもでき, A2 型 (ランダム BCC), B2 型 (AB), $D0_3$ 型 (AB_3), $L2_1$ 型 (AB_2C) のように規則度の異なる一連の BCC 基調の結晶構造を考えると便利である。

HH 相は総価電子数 VEC (Valence electron count) 16 から 19 を中心に数多くの合金系において金属, 半金属, 半導体などの性質を示す安定相として存在し, VEC が 18 近傍では半導体の性質を示すとされる⁽⁵⁾⁻⁽⁷⁾。N 型の優れた熱電特性を有する $MNiSn$ (M: Ti, Zr, Hf) は最も多くの研究がなされている HH 相である⁽⁸⁾⁻⁽³⁵⁾。一方, P 型の優れた熱電特性を示す HH 相としては $TiCoSb$ など Sb 系などがよく知られており⁽³⁶⁾⁻⁽³⁹⁾, 他に Sn 系でも報告がある⁽⁴⁰⁾⁻⁽⁴⁵⁾。著者は環境に配慮した材料設計の立場から Sn 系に着目し, 光学式浮遊帯域溶融 OFZ (Optical floating zone melting) を用いた一方向凝固 DS (Directional solidification) により, ほぼ HH 単相の組織を有する種々の合金を作製して熱電特性を評価してきた^{(14) (16) (17) (27) (28) (42)-(44) (46)}。図 2 にゼーベック係数の温度依存性を示す。 $TiNiSn$ は OFZ-DS 法による単相合金が作製できず, $TiNi$ 固相/Sn 液相の拡散反応を応用した粉末焼結法を用いた^{(27) (28)}。 $MNiSn$ と $NbCoSn$ は優れた N 型,

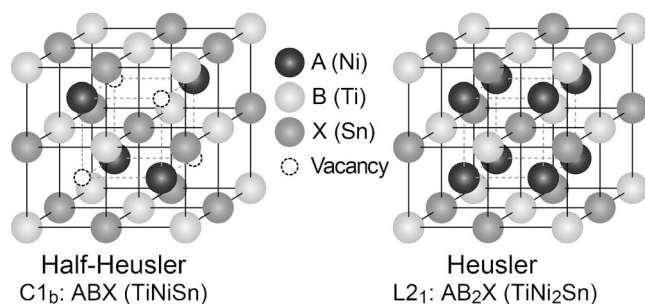


図 1 Half-Heusler (HH) $C1_b$ 型および Heusler (FH) $L2_1$ 型規則構造の単位胞。

$MPtSn$ は P 型のゼーベック係数を有しており, $TiPtSn$ は温度上昇に伴い N 型から P 型に大きく遷移している。ゼーベック係数 S を理論的に考察した報告は多数あり^{(1)-(7) (47)}, 例えば Mott の理論式によると状態密度 $N(E)$ に反比例した関数で表され⁽³⁾, フェルミ面 E_F における状態密度 DOS (Density of state) の傾き $[\partial N(E)/\partial E]_{E=E_F}$ に依存して S の値が決まる。

$$S = \frac{\pi^2 k_B^2 T}{3 e N(E_F)} \left[\frac{\partial N(E)}{\partial E} \right]_{E=E_F} \quad (1)$$

k_B はボルツマン定数, e は電子の電荷である。価電子帯側の DOS バンド端に E_F が位置すると P 型, 伝導帯側では N 型特性となる。ゼーベック係数の値と符号を制御するには, 元素と組成の選択に併せて非化学量論組成と点欠陥の活用を図ることで電子構造を最適化し, E_F 近傍に急峻で非対称な DOS の分布を作り出すことを考える。ここで同じ VEC=18 でありながら, $MNiSn$ は N 型, $MPtSn$ は P 型 (M: Zr, Hf) の特性を示すことは興味深い。Ni と Pt は同じ価電子数の第 10 族元素であるが, Ni の 3d 電子と Pt の 4f 電子の違いによって結合における電子軌道の重なりやエネルギーバンド構造は大きく異なる。総電子数が異なる元素の選択や各サイトの固溶置換によってフェルミ面と状態密度バンド端の位置が相対的にシフトすることで伝導タイプが N 型と P 型で遷移することが説明できる。同じ第 10 族 Pd について $ZrPdSn$ と $HfPdSn$ の HH 相としての報告はあるが熱電特性に関する記述はない⁽⁴⁰⁾。実際に $TiPdSn$ と $ZrPdSn$ を作製してみると, 安定な HH 相として存在しないことが分かった。N 型である $NbCoSn$ ⁽⁴⁵⁾ に対して Co を同族の Ir で置き換えた $NbIrSn$ が P 型の特性を示すことが報告されている⁽⁴⁰⁾。

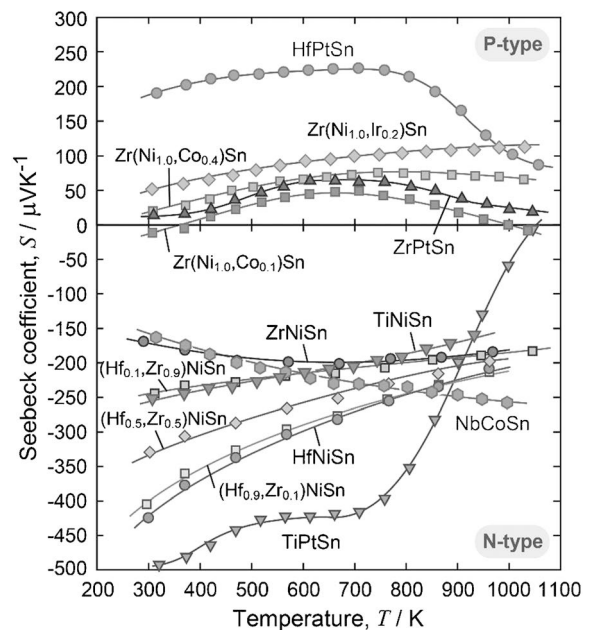


図 2 HH のほぼ単相組織を有する種々の HH 合金のゼーベック係数の温度依存性。OFZ-DS で作製した as-grown 試料の測定。 $TiNiSn$ は $TiNi$ 固相/Sn 液相拡散反応を応用した粉末焼結法で試料を作製。

HH 相の規則構造，電子構造，熱電特性の関連を理解することを目的に第 1 原理計算などを用いた理論的な検討がなされている^{(48)–(51)}．例えば，Ni サイトと空孔サイトが B1 型副格子を組む位置関係にあることで Ni-3d band が細くなり bonding sub-band と anti-bonding sub-band に分裂し，フェルミ面 E_F がその谷間に位置することでバンドギャップを持つ半導体となることが説明されている⁽⁴⁹⁾．HH 相の電子構造と物性を決める鍵となるのは B1 型副格子を組む Ni サイトと空孔サイトであると言える．実測した電気抵抗率の温度依存性から導出したバンドギャップの大きさには幅があるが，例えば ZrNiSn で約 0.11 eV，HfNiSn で約 0.21 eV 程度である⁽¹⁴⁾．理論的な考察と光電子分光分析など実験的手法を併せることで規則構造，電子構造，熱電特性の関連を詳しく理解することができれば，N 型と P 型の伝導タイプを制御して作り分ける熱電材料設計が期待できる．

3. Half-Heusler MNiSn (M : Ti, Zr, Hf) 構成元素のサイト占有による組織形成と熱電特性の関係

(1) Half-Heusler 相 MNiSn と Heusler 相 MNi₂Sn (M : Ti, Zr, Hf) の規則構造と相平衡の関係

M を Ti, Zr, Hf とする M-Ni-Sn 三元系において，HH 相の空孔サイトに固溶できる Ni 量は極めて小さく，正確に定量分析することは困難であるが，およそ数 at% 程度以下と考えられる．固溶限は高温ほど大きい凝固過程や熱処理の冷却過程において Ni-rich クラスターの形成や FH 相の析出が起こる^{(29)–(35)}．化学組成の局所的ゆらぎ，熱力学的に準安定な状態までを考慮すれば，HH 相と FH 相は何らかの形で必ず共存すると言っても強調しすぎではない．FH は金属相であるためゼーベック係数を低下させて性能劣化の原因となるが，ナノレベルで適正に制御できれば格子熱伝導を有効に低減して性能を改善できる可能性がある．誤解のないよ

うに追記すれば同一の合金系に HH と FH の両相が必ず共存する訳ではない．優れた熱電材料である FH 相 Fe₂VAl の場合には，Fe-V-Al 三元系において安定相として HH は存在しない．

HH 相 TiNiSn は FH 相 TiNi₂Sn と平衡することから，OFZ-DS など溶解凝固法で作製した試料は，やや Ni-rich の組成になる．一方，固相 TiNi と液相 Sn の拡散反応界面には化学量論組成を有する TiNiSn 相を形成できる．これら試料を比較した組織観察結果を図 3 に示す．固液反応界面で形成する化学量論組成 TiNiSn は走査電子顕微鏡では HH の単相組織として観察されるが，走査型透過電子顕微鏡 (STEM: Scanning Transmission Electron Microscopy) の明視野像 (a) で詳細に観察すると Modulated-like structure と呼称するナノ構造が認識できる．高分解能電子顕微鏡 (HRTEM: High Resolution TEM) 格子像と高速フーリエ変換 (FFT: Fast Fourier Transformation) による回折図形 (b)，さらに回折図形を逆高速フーリエ変換 (IFFT: Inverse FFT) で再構成した格子像 (c) により，原子配列が局所的に乱れた領域が観察できる．これは模式的に (d) に示すように，高温 (有限温度) では Ni と空孔のペアが入れ替わる格子欠陥がランダムな分布で存在すると考えている．また，詳細な観察によって Ti と Sn のペアも同様に入れ替わることが報告されている⁽⁵²⁾．Ni と空孔，Ti と Sn，どちらも第 2 近接の位置関係であり拡散による入れ替わりは難しいが，空孔を含む前者では比較的容易であると考えられる．図 3(a)，(b) で観察されるコントラストは FH 相ナノ粒子の形成ではなく，点欠陥の存在に起因する弾性ひずみに由来すると考えられる．溶解凝固で形成した Ni-rich TiNiSn の場合は，(h) のように過剰 Ni が空孔を占有したクラスターのドメイン形成が考えられ，原子配列の乱れが小さいように見える (e)，(f)．FFT 回折図形がディフューズな (b) では点欠陥がランダムに分布，シャープな (f) では点欠陥がまとまったドメインとして分布すると解釈でき

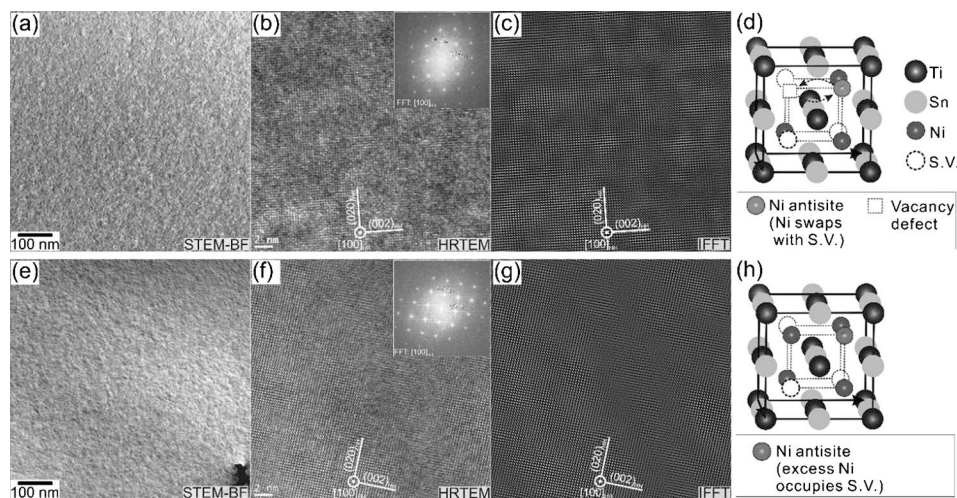


図 3 HH TiNiSn 相に形成するナノ構造 (modulated-like structure) : (a)–(d) 化学量論組成の試料，(e)–(h) Ni-rich 組成の試料，(a)，(e) STEM 明視野像，(b)，(f) HRTEM 格子像と FFT 回折図形，(c)，(g) IFFT で再構成の格子像，(d)，(h) 形成する主な点欠陥を説明した模式図．

る。IFFTで再構成した格子像(c), (g)では原子配列の乱れた部分が強調される。材料設計で意図しなくても、作製プロセスに依存してHH相には高密度の点欠陥が形成され、それらが及ぼす影響を含めた結果として優れた熱電特性が測定されていると言える。

HHとFHの規則構造は熱力学的に同じ基盤でと考えれば、FH相で空孔が規則化してHHが相分離すると解釈でき、NiMnSb(HH)-Ni₂MnSb(FH)擬二元系ではNi_{2-x}MnSbにおいて空孔の規則化が報告されている⁽⁵⁴⁾。最近接の異種原子間に引力が働く規則化と斥力が働く相分離が同一の合金中で発現することは一見矛盾するよう思えるが、Fe-Al系やCu-Zn系では両者が発現することが知られている⁽⁵⁵⁾。最近接原子間に引力が働き、第2近接原子間には強い斥力が働く傾向である場合、規則化により相分離が誘起される。一方、MNiSn系では空孔サイトへのNi固溶限が小さくNi組成に対する溶解度曲線の傾きが急峻であり、液相が相対的に安定になる温度域にあたるためHHとFHの溶解度ギャップが閉じる頂点部分は状態図には現れないと考えられる。

(2) MNiSn (M: Ti, Zr, Hf) のMサイト固溶とHalf-Heusler 同士の2相分離が熱電特性に及ぼす影響

原子の固溶置換により格子熱伝導率を低減させて性能を改善することは熱電材料設計における極めて一般的な指針であり、熱伝導率の低減が課題であるMNiSnのMサイト固溶に関する研究例は数多くある。当初はMサイトの固溶状態には関心が無く、ランダムに固溶すると思われていた。温度に依存してMサイトの固溶状態は変化すること、ランダム固溶状態からの温度低下に伴い(Zr, Hf)NiSnとTiNiSnが相分離することを著者は明らかにした⁽¹⁶⁾⁻⁽¹⁹⁾。組織観察と組成分析の考察結果をまとめたTiNiSn-ZrNiSn-HfNiSn擬三元系状態図の1273 Kにおける模式的な等温断面を図4に示す。原子半径(r/nm)はTi: 0.145, Zr: 0.160, Hf:

0.156であり、周期律表で考えるとZrは変則的に大きい。HHの格子定数(a/nm)を比較するとZrNiSn: 0.611およびHfNiSn: 0.607に比べてTiNiSn: 0.592は小さく、格子ミスフィットに依存して蓄積される弾性エネルギーを解放するためというサイズ効果がHH相分離の一因であると考えられる。TiNiSn-ZrNiSn-HfNiSn擬三元系において第1原理計算を用いて相安定性を評価した報告では、図4の実験結果と比較すると温度や組成の詳細は必ずしも合致しないが、概ね同じ傾向のHH相分離が示されている⁽⁵⁰⁾。またTiNiSn-ZrNiSnおよびTiNiSn-HfNiSnの擬二元系においてパイノーダル線とスピノーダル線を計算して相分離の妥当性を検討した報告がある⁽⁵¹⁾。

HH相MNiSnにおけるMサイト相互固溶の効果ならびにHH相分離で導入される相界面は組織因子として熱電特性に影響を及ぼすと考えられる⁽¹⁶⁾⁻⁽¹⁹⁾⁽³⁵⁾。最も顕著な影響が期待できる熱伝導率の温度依存性を図5に示す。OFZ-DSで作製したas-grown試料を用いて測定した。比較のために示した破線のHfNiSnとZrNiSn(OFZ-DS)、一点鎖線のTiNiSn(前述の反応粉末焼結)に比べると、Mサイトを相互固溶させた各合金が低い熱伝導率を有することが分かる⁽¹⁶⁾⁻⁽¹⁸⁾⁽²⁸⁾。なお、TiNiSnは熱処理(HP-HT)により熱伝導率を低減できる。(Ti_{0.13}Zr_{0.87})と(Ti_{0.15}Zr_{0.85})合金はZrNiSn単相組織、(Zr_{0.5}Hf_{0.5})合金はMサイト全率固溶、(Ti_{0.5}Hf_{0.5})と(Ti_{0.5}Zr_{0.5})合金はHH相分離である。(Ti_{0.5}Zr_{0.5})合金では追加でHH単相域での熱処理(HT1)後にHH-HHの2相域で熱処理(HT2)を施して比較した。凝固過程においてはZr-richとTi-richのHH相分離となり、大きな格子ミスフィットを有するシャープな半整合界面が形成し、化学分析プロファイルならびにミスフィット界面転位の組織観察で識別できる⁽¹⁹⁾⁽³⁵⁾。HH単相域温度でのTiとZrのランダム固溶状態から2相域に冷却保持することによるHH相分離では、溶解度曲線に沿った比較的小さい組成差のHH相同士による整合に近いディフューズな相界面が形成す

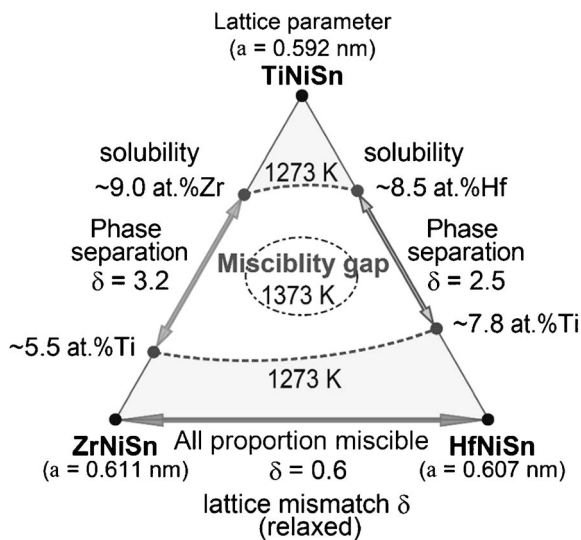


図4 HH相TiNiSn-ZrNiSn-HfNiSn擬三元系状態図の模式的な1273 Kの等温断面図。

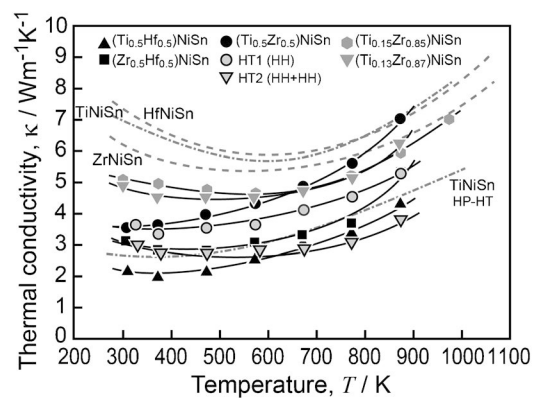


図5 Mサイトを固溶置換したMNiSn(M: Ti, Zr, Hf)合金の熱伝導率の温度依存性。基本的にOFZ-DSのas-grown試料で測定。追加で(Ti_{0.5}Zr_{0.5})NiSnではHH単相域と考えられる1373 Kで熱処理(HT1)後、さらにHH-HHの2相域と考えられる1073 Kで熱処理(HT2)を施した後に測定。

ると考えられ、TEMやHRTEMによる直接観察は極めて難しい課題である。より高密度に導入でき、効果的なフォノン散乱効果が期待できる後者のディフューズ相界面による熱伝導率の低減効果は大きいと考えられる。また、ここでは図示していない電気特性について述べると、 $(\text{Ti}_{0.15}, \text{Zr}_{0.85})$ NiSn 合金において 700 K で $5.0 \text{ mWm}^{-1} \text{K}^{-2}$ を超える優れた電気出力因子 $S^2\sigma$ が達成できる。これは FH 相 Fe_2VAl 系など電気特性に優れる熱電材料と肩を並べる高い値であり、ドーピングなどの電気的チューニングを施さずに実現していることが特徴的である。IoT デバイスの独立電源応用を目指すためには、低温域で高出力を維持することが必要であり、格子サイト原子占有挙動に基づく電子構造制御などによりゼーベック係数と電気伝導率を最適化することが鍵として考えられる。

4. Half-Heusler 相 ZrNiSn の空孔サイト固溶による熱電特性の制御

(1) MNiSn (M: Ti, Zr, Hf) の空孔サイト固溶に関する相平衡

前節で述べたように M-Ni-Sn 三元系 HH 相の空孔サイトに固溶する Ni 濃度は極めて小さいが、Ti-Co-Sn 三元系では 1073 K において FH 相から HH 相に組成域が連続している相平衡が報告されており⁽⁵⁶⁾、FH 相の Co サイトに空孔が導入されるか HH 相の空孔サイトに Co が固溶する可能性が示唆される。Zr-Co-Sn 三元系では ZrCoSn 組成は六方晶系の異なる化合物が安定相であり、HH は安定相として存在し

ないが、HH 相 ZrNiSn に Co および Ir を添加すると Ni サイトを置換する代わりに空孔サイトに固溶することを見いだした⁽⁴³⁾⁽⁴⁴⁾。ここで Co と Ir が空孔サイトだけを占有した規則度の高い状態である可能性については確かめられていない。拡散対の実験などを参考に、Ni と合わせた過剰原子が空孔サイトを占有、すなわち Ni と Co または Ni と Ir が Ni サイトと空孔サイトの両方をランダムに占有すると考えている。

M-Ni-Co-Sn 四元系 (M: Ti, Zr) 状態図の 1273 K 等温正四面体から HH 相 MNiSn と FH 相 MNi₂Sn の化学量論組成を含む濃度断面を切り出した模式的な状態図を図 6 (a), (c) に、対応する $\text{M}(\text{Ni}, \text{Co})_{1+x}\text{Sn}$ 合金 ($x=0\sim1$) の Co 濃度に依存した格子定数変化を (b), (d) に併せて示す。準備した合金には多相組織の合金が含まれるが、当該の濃度面外での相平衡についてはタイラインを表記していない。FH 相は MNi₂Sn-MCo₂Sn 間で連続固溶すると考えられる。Ti-Ni-Co-Sn 四元系の 1273 K では、HH と FH の相領域が連続する Ti-Co-Sn 三元系の傾向が強く反映され、Ti-Ni-Sn 三元系の近傍において HH と FH に 2 相分離が生じる。Zr-Ni-Co-Sn 四元系の 1273 K においても Zr-Ni-Sn 三元系の近傍で HH と FH の 2 相分離傾向が見られ、HH 相領域は FH 相 Zr(Ni, Co)₂Sn の組成方向に延びているが、FH 相とは狭い 2 相領域によって隔てられている。さらに比較として、M を Hf とする HfNiSn においては、Co はほとんど固溶せず、HH と FH の間には広い 2 相域が存在する。なお、図 6 に示す状態図上の HH 単相領域の脇には N 型から P 型への熱電特性変化(後述)を記入してある。

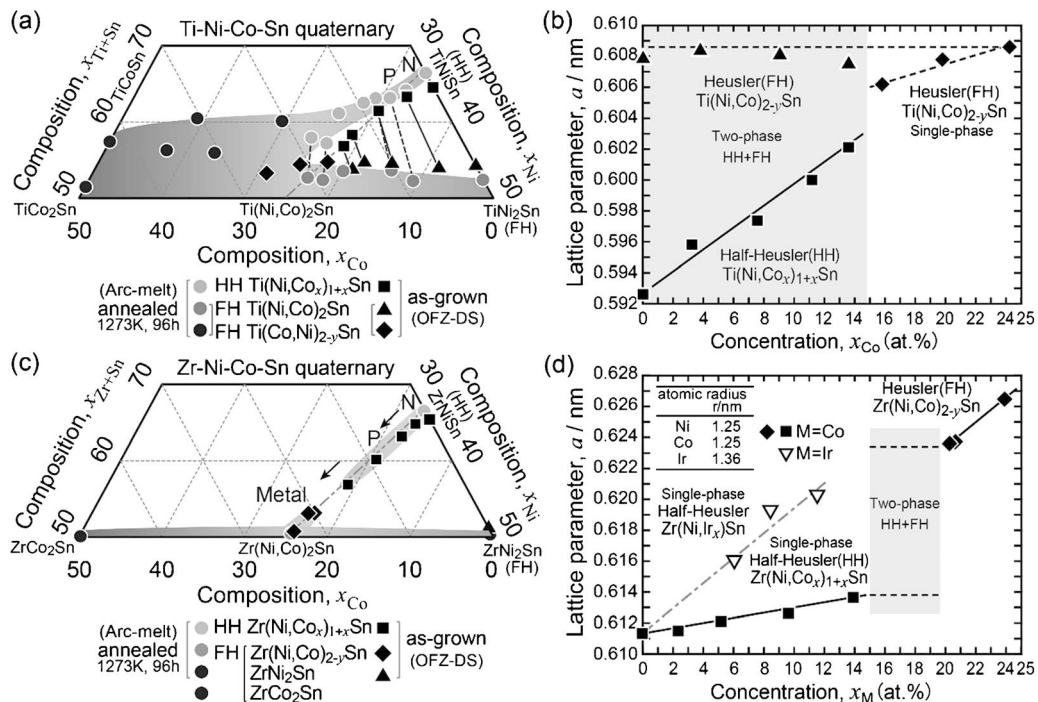


図 6 (a), (c) M-Ni-Co-Sn 四元系 (M: Ti, Zr) 状態図の 1273 K 等温正四面体から HH 相 MNiSn と FH 相 MNi₂Sn の化学量論組成を含む濃度断面を切り出した簡易表記の状態図, (b), (d) 対応する $\text{M}(\text{Ni}, \text{Co})_{1+x}\text{Sn}$, $\text{M}(\text{Ni}, \text{Co})_{2-y}\text{Sn}$ 合金 ($x=0\sim1$) に対して XRD で測定した格子定数変化の M (Co, Ir) 濃度依存性。Co および Ir の固溶濃度は EPMA を用いて測定した。

(2) ZrNiSn の空孔サイト固溶が熱電特性に及ぼす影響

HH(またはFH)のほぼ単相組織を有する OFZ-DS の as-grown 試料を用いて熱電特性を測定した。結果から述べると、ZrNiSn の空孔サイトに Co および Ir が固溶することに伴って熱電特性は N 型から P 型に遷移し、格子熱伝導率が大きく低減する。図 7 に (a)ゼーベック係数 S , (b)電気抵抗率 ρ , (c), (d)熱伝導率 κ の温度依存性を示す。(d)では Ir 添加合金の熱伝導率のキャリア成分と格子成分に分けて示している。なお、図中凡例の試料名は HH 相の組成式は用いずに EPMA(Electron Micro Probe Analysis)で実測した Co および Ir の固溶濃度で表記している。ゼーベック係数が 700 K 近傍で $-200 \mu\text{VK}^{-1}$ という ZrNiSn の優れた N 型特性は、数 at% の Co または Ir の空孔サイト固溶により劇的に P 型へと遷移する。なお、TiNiSn の空孔サイトに Co が固溶する場合にも N 型特性が P 型に遷移することを報告している⁽⁴⁵⁾。Ni より価電子数が 1 つ少ない Co と Ir は Ni に対する典型的な P 型ドーパントとして働くことは確かであるが、ここでは前述した N 型 HfNiSn と P 型 HfPtSn と同様の考え方、つまり、空孔サイト固溶による総電子数と電子構造の変化に伴いフェルミ面と状態密度バンド端の位置が相対的にシフトすることで N 型から P 型へと劇的に遷移すると理解できる。その効果は Co より Ir でより顕著であり、およそ 6Ir および 10Co(at%) 付近で P 型の最適キャリア濃度

になると考えられ、それ以上の固溶量では過剰ドーピングとなる。固溶する Co 量がさらに増えると二相域を経て、金属的な振る舞いの FH 相 $\text{Zr}(\text{Ni}, \text{Co})_2\text{Sn}$ に至る。

熱電特性を図 7 に掲載した種々の HH 相について、ホール効果測定から導出したキャリア濃度ならびに電気抵抗率の温度依存性から見積もったバンドギャップの値を表 1 にまとめて示す。ゼーベック係数と電気抵抗率(電気伝導率の逆数)はキャリア濃度を介して互に関連し、キャリア濃度は電気抵抗率と熱伝導率に顕著な影響を及ぼす。P 型のゼーベック係数の値が大きい合金ほどキャリア濃度は高くなり、これに伴って電気抵抗率は低減する。また、図 7(d)から分かるように、空孔サイト固溶によるキャリア濃度の変化は熱伝導率にも影響を及ぼす。Wiedemann-Franz 則 $\rho \cdot \kappa_{\text{car}} = LT$ を用

表 1 ZrNiSn および M (Co, Ir) が空孔サイト固溶した $\text{Zr}(\text{Ni}, \text{M}_x)\text{Sn}$ ($x=0.2, 0.3$) のキャリア濃度とバンドギャップ。

Alloys $x(\text{at}\% \text{M})$	Carrier concentration, n/m^{-3}	Band gap E_g/eV
ZrNiSn	9.48×10^{25}	0.13
0.2Co (5.2Co)	2.62×10^{26}	0.19
0.3Co (9.6Co)	6.81×10^{26}	0.18
0.2Ir (6.1Ir)	2.55×10^{26}	0.15
0.3Ir (8.3Ir)	3.82×10^{27}	0.08

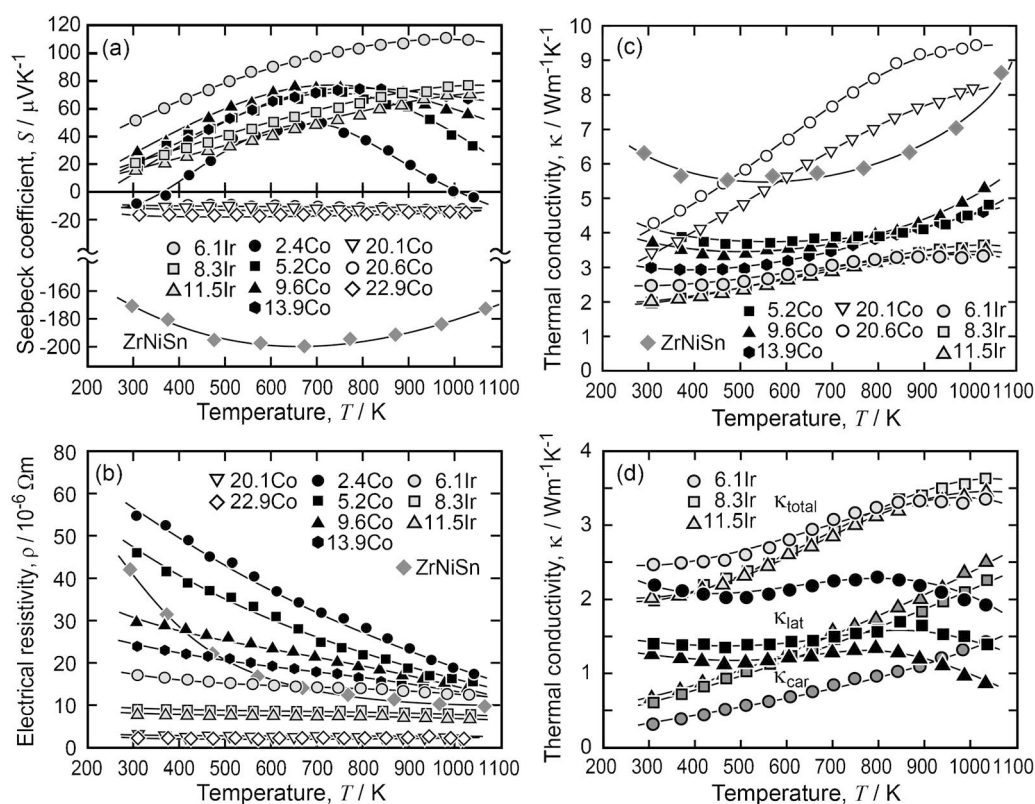


図 7 Co および Ir が空孔サイト固溶した $\text{Zr}(\text{Ni}, \text{M}_x)_{1+x}\text{Sn}$ 合金の (a)ゼーベック係数, (b)電気抵抗率, (c), (d)熱伝導率の温度依存性。(d)では Wiedemann-Franz 則を用いて Ir 添加合金の熱伝導率 κ をキャリア成分 κ_{car} と格子成分 κ_{lat} を算出。OFZ-DS の as-grown 試料で測定。HH 相の組成式ではなく EPMA で測定した Co および Ir の固溶濃度で試料名を表記。

いて熱伝導率 $\kappa = \kappa_{\text{car}} + \kappa_{\text{lat}}$ を格子成分 κ_{lat} とキャリア成分 κ_{car} に分けて算出すると、Co と Ir の固溶量の増加に伴う P 型キャリア濃度の増大に起因してキャリア熱伝導率は上昇している。L はローレンツ数であり、ゼーベック係数の実測値から算出した ZrNiSn の $L = 1.67 \times 10^{-8} \text{ V}^2\text{K}^{-2}$ を用いている。一方、空孔サイトを原子が占有する固溶体効果によりフォノン散乱源として極めて有効に働くために格子の熱伝導は劇的に低減され、全体としての熱伝導率は効果的に低減されている。参考までに、6.1Ir 合金における 1000 K での出力因子 $S^2\sigma = 1.0 \text{ mWm}^{-1}\text{K}^{-2}$ および $zT = 0.3$ がそれぞれの最大値である。P 型特性を有する HH 相としての性能面では Sb ベース HH が現状では優位にある。Sn ベース HH の環境低負荷というメリットを活かした高性能熱電モジュールを実現することで安全性とリサイクル性という価値を付与するため、Sn ベース HH において、優れた性能を誇る N 型と同レベルの出力因子 $5.0 \text{ mWm}^{-1}\text{K}^{-2}$ あるいは 60% から 80% 程度を目標として種々の特性制御による P 型性能の向上が望まれる。

5. お わ り に

Half-Heusler 規則構造の各格子サイトにおける構成元素と添加元素の占有挙動が、電子構造の変化、あるいは相安定性に関連して形成する組織の変化を介して、熱電特性に及ぼす影響について検討した結果を紹介した。将来的に IoT の独立電源として低温度域で使用することを想定すると、規則構造と電子構造の同時制御により、ゼーベック係数の正負、最大値となる温度域の制御法を確立することが望まれる。そのための今後の展望としては、N 型と P 型の間で伝導タイプを遷移させて最適化するメカニズムを理解するために、例えば光電子分光分析を用いて可視化することで状態密度の理解を深めることが有効な手段であると考えられる。規則構造が熱力学的に共通基盤である HH と FH では、両者の違いとなる全格子点の 1/4 もの空孔サイトの占有挙動を巡って、高温では様々な原因により種々の格子欠陥が導入されることが特徴である。結果として、原子スケールで局所的に形成する格子欠陥、ナノ構造、相界面などは観察と解析の対象として興味深いだけでなく、熱電特性に及ぼす影響とそのメカニズムを理解することがゼーベック係数の制御に特化した熱電材料設計を深化させる上で重要となる。熱電特性の評価指標となる各々の物性値は、試料全体の平均値として測定されるため、局所的に特徴づけられる格子欠陥や組織因子が及ぼす直接的な影響を精密に解き明かすことは技術的には難しいことが多い。最近の発展がめざましい材料科学アプローチ Materials Informatics 等を駆使して俯瞰的かつ包括的に整理し、種々の理論計算手法を駆使することで結晶構造、電子構造、格子欠陥や相界面など組織因子、熱電特性の関係について、マルチスケールにわたりシームレスに理解することが望まれる。同様に原子レベルから組織レベルまで階層的な構造を造り込む作製プロセスに目を向けると、これまで主に高温

用の熱電材料開発で培ってきた種々のナノ構造を導入して制御する技術は IoT 独立電源を稼働させる低温での熱電特性制御に有効な手段として応用できる。高温用の大型素子では安定に維持できない非平衡あるいは準安定プロセスで導入するような構造であっても、低温用の微小サイズ素子では有効に活用できる可能性がある。IoT デバイスの独立電源応用にに向けた熱電材料開発において、Half-Heusler 相には多彩な材料設計指針に基づき高い性能と出力を実現できる可能性があり、有望な熱電材料の一つとして積極的な社会実装が期待される。

Thomas J. Seebeck によりゼーベック効果が発見されてから 200 年を記念する 2021 年に本特集が企画され、著者として参画できることは光栄である。

本稿で紹介した研究は、科学研究費、企業共同研究、科学技術振興機構の戦略的創造研究推進事業など様々なサポートを受けて実施できました。ここに感謝を申し上げます。また、これまで研究を遂行するために共に尽力してくれた研究室の歴代の学生諸氏に心から感謝を申し上げます。

文 献

- (1) 上村欣一, 西田勲夫: 熱電半導体とその応用, 日刊工業新聞社, (1988).
- (2) 坂田亮 編著, 西田勲夫: 熱電変換工学—基礎と応用—, リアライズ社, (2001).
- (3) 梶川武信 監修: 熱電変換技術ハンドブック, NTS(エヌ・ティイー・エス), (2008).
- (4) 梶川武信 監修: 多様な熱源に対応する熱電発電システム技術, S&T 出版, (2013).
- (5) F. G. Aliev, N. B. Brandt, V. V. Moshchalkov, V. V. Kozyrkov, R. V. Skolozdra and A. I. Belogorokhov: Z. Phys. B: Condens. Matter, **75**(1989), 167–171.
- (6) 山中伸介, 梶川武信 監修: ハーフホイスラー化合物, 熱電学総論, サイエンス&テクノロジー, (2009).
- (7) 鹿又 武 編著: 機能性材料としてのホイスラー合金, 内田老鶴圃, (2011).
- (8) C. Uher, J. Yang, S. Hu, D. T. Morelli and G. P. Meisner: Phys. Rev. B, **59**(1999), 8615–8620.
- (9) T. M. Tritt, S. Bhattacharya, Y. Xia, V. Ponnambalam, S. J. Poon and N. Thadhani: Appl. Phys. Lett., **81**(2002), 43–45.
- (10) S. Sakurada and N. Shutoh: Appl. Phys. Lett., **86**(2005), 082105(1–3).
- (11) K. Kurosaki, T. Maekawa, H. Muta and S. Yamanaka: J. Alloys Compd., **397**(2005), 296–299.
- (12) H. Muta, T. Kanemitsu, K. Kurosaki and S. Yamanaka: Mater. Trans., **47**(2006), 1453–1457.
- (13) S. R. Culp, S. J. Poon, N. Hickman, T. M. Tritt and J. Blumm: Appl. Phys. Lett., **88**(2006), 042106(1–3).
- (14) Y. Kimura, T. Kuji, A. Zama, Y. Shibata and Y. Mishima: MRS Symp. Proc. **886**, Pittsburgh (PA), Mater. Res. Soc., (2006), 331–336.
- (15) H. Muta, T. Kanemitsu, K. Kurosaki and S. Yamanaka: J. Alloys Compd., **469**(2009), 50–55.
- (16) Y. Kimura, H. Ueno and Y. Mishima: J. Electronic Mater., **38**(2009), 934–939.
- (17) T. Kenjo, Y. Kimura and Y. Mishima: MRS Symp. Proc., Mater. Res. Soc., Pittsburgh, PA, **1218**(2011), MRS Online Proceedings Library, 1218–205–14.
- (18) Y. Kimura and Y. W. Chai: JOM, **67**(2015), 233–245.

熱磁気効果をベースとした熱電材料の新展開

水 口 将 輝*

1. はじめに

電子の電荷とスピンの二つの自由度を融合して新しいエレクトロニクスを開拓することを目的としたスピントロニクスとよばれる研究分野は、ハードディスクドライブ(HDD)のセンサーヘッドや磁気ランダムアクセスメモリ(MRAM)など、いくつかの実用的なアプリケーションを生み出しながら現在でも進展を続けている。特にこの10年で、スピントロニクスと熱の相関を取り扱う「スピントロニクス」の研究が注目され、スピントロニクスの中でも重要な分野の一つとして認識されるようになってきた⁽¹⁾⁻⁽³⁾。磁場中において金属や半導体に熱流があるとき、電位差あるいは温度差が生じる熱磁気効果は古くから知られている。これらの熱磁気効果の一つであるネルンスト(Nernst)効果は、温度勾配および磁場が印加されたときに、双方の外積方向に電圧が誘導される現象であり、荷電粒子にローレンツ力が作用することで生じる効果である⁽⁴⁾。特に対象となる物質が強磁性体のような自発磁化を有する場合に付加的に生じる現象は異常ネルンスト効果とよばれており、通常は自発磁化の大きさに比例して生じる現象であるとされている(図1に模式図)。観測されるネルンスト電界(E)は、ネルンスト係数(Q_0)、異常ネルンスト係数(Q_s)、外部磁場(H)、温度勾配(∇T)および磁化ベクトル(M_s)を用いて、以下のように表される。

$$\mathbf{E} = Q_0 (\mathbf{H} \times \nabla T) + Q_s (\mu_0 \mathbf{M}_s \times \nabla T) \quad (1)$$

右辺第一項は外部磁場に比例する正常ネルンスト項であり、第二項は磁化の大きさに比例する異常ネルンスト項である。異常ネルンスト効果には、熱電素子として広範に用いられているゼーベック(Seebeck)素子には無い、いくつかの特長があるため、その素子設計を戦略的に行うことにより、高性能

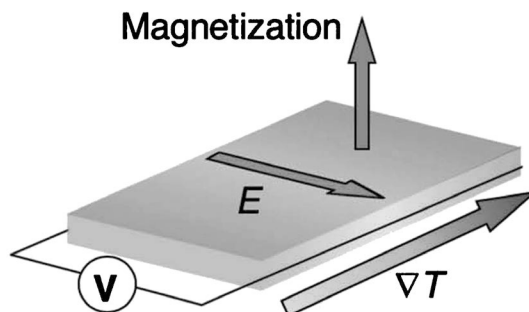


図1 異常ネルンスト効果の模式図。

な熱電素子への応用が可能になると期待される⁽⁵⁾。熱電素子への応用のために不可欠な要素技術として、大きな異常ネルンスト効果を示す材料の開発や異常ネルンスト効果の制御方法の確立などが想定される。筆者らは、このような背景から異常ネルンスト効果を活用した熱電応用を目的とし、材料探索やナノ構造の導入による制御などを試みてきた⁽⁶⁾⁻⁽¹⁰⁾。本稿では、特にグラニューラー構造や⁽¹¹⁾、金属と半導体の多層構造⁽¹²⁾などのナノ構造における異常ネルンスト効果の増大現象について紹介し、熱磁気効果をベースとした熱電材料創成の新しい展開について議論する。

2. グラニューラー構造における異常ネルンスト効果の増大現象

磁性材料を含むグラニューラー構造では、スピン依存トンネル伝導や異常ホール効果の変調効果など、特異な電気伝導現象が生じることが報告されており、異常ネルンスト効果の増大効果も期待される。そこで、グラニューラー構造を有する薄膜を作製し、ナノ粒子の形態を変化させた試料で異常ネルン

* 名古屋大学未来材料・システム研究所；教授(〒464-8603 名古屋市千種区不老町)
New Developments in Thermoelectric Materials Based on the Thermomagnetic Effects; Masaki Mizuguchi(Institute of Materials and Systems for Sustainability, Nagoya University, Nagoya)
Keywords: thermoelectric materials, thermomagnetic effects, ferromagnetic materials, anomalous Nernst effect, spin caloritronics
2021年7月27日受理[doi:10.2320/materia.60.558]

スト効果がどのように変化するかを調べた。スパッタ法を用いて $\text{Co}_x(\text{MgO})_{1-x}$ グラニューラー薄膜を作製した。薄膜の膜厚は 100 nm とし、Co ターゲットと MgO ターゲットのスパッタリング電力比を変化させることにより、 $x = 0.57, 0.59, 0.63, 0.67, 0.73, 0.77, 0.81, 0.85, 0.90, 0.92, 0.96, 0.98, 0.99, 1.00$ の 14 種類の試料を作製した。試料の組成比は、電子プローブマイクロアナライザ (EPMA) による分析により同定した。試料の微細組織を透過電子顕微鏡 (TEM) で観察した結果を図 2 に示す。図中の明るい部位は Co、暗い部位は MgO に対応している。図 2(a) は、 $x = 0.90$ の試料の断面 TEM 像であり、膜厚が設計値の 100 nm にほぼ等しいことと、表面・界面の平坦性が確認できる。図 2(b) は、 $x = 0.98$ の試料の高倍率断面 TEM 像である。ごく少量の MgO 粒子

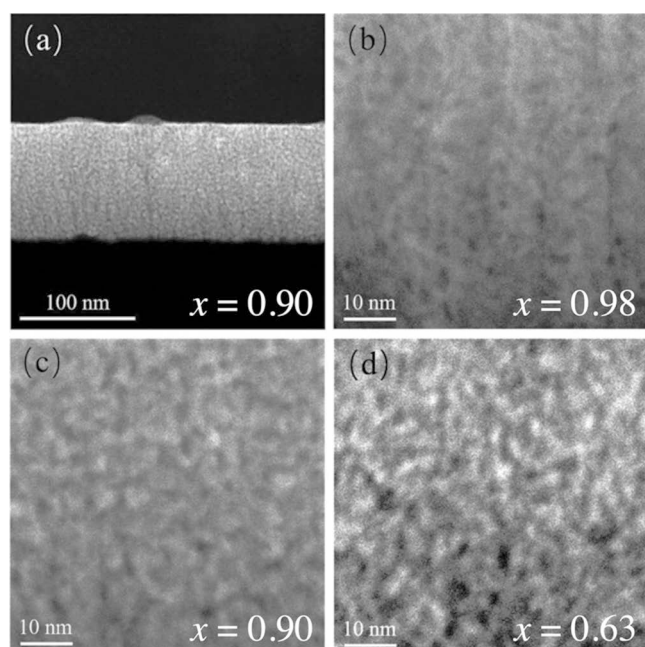


図 2 $\text{Co}_x(\text{MgO})_{1-x}$ グラニューラー薄膜の断面 TEM 像 ((a) $x = 0.90$ の低倍率像, (b) $x = 0.98$ の高倍率像, (c) $x = 0.90$ の高倍率像, (d) $x = 0.63$ の高倍率像)。

が、Co 領域に分散していることがわかる。MgO の濃度を増加させると、 $x = 0.90$ の試料では、金属 Co ネットワークの中に絶縁性の MgO の領域が多く形成された (図 2(c))。さらに MgO の濃度を増加させると、Co 間の距離やスペースが大きくなるとともに、Co の領域が小さくなり、Co グラニューラーが形成され始めることが分かる。図 2(d) に示すように、 $x = 0.63$ のサンプルでは、隣り合う Co グラニューラーがわずかにつながっており、パーコレーション閾値付近におけるグラニューラー構造に典型的にみられる微細組織を有していることが分かった。これらの試料について、その異常ネルンスト効果を室温で調べた。薄膜面内方向に温度勾配を加え、発生するネルンスト電圧を測定した。同時に温度勾配方向に生じるゼーベック電圧を測定し、ゼーベック電圧に対する異常ネルンスト電圧の比を異常ネルンスト角 (θ_{ANE}) と定義した。図 3(a) に示すように、 θ_{ANE} の大きさは、MgO の添加量の増加に従って増加し、MgO を添加していない Co 薄膜における θ_{ANE} の 3.5 倍程度にまで大きく増加することが分かった。また、熱勾配の代わりに電流を印加した場合に定義される異常ホール角 (θ_{AHE}) について同じ試料で調べた結果、図 3(b) に示すように、MgO の添加による θ_{AHE} の増加はほとんど確認されず、逆に大きく減少したことから、熱磁気効果のみに見られる増加現象であることが明らかになった。この結果は、熱電変換効率が大きく増加するグラニューラー構造のようなナノ構造を用いて素子設計を行うことにより、熱電変換効率を高められる可能性を示している。

3. 金属と半導体の多層構造における異常ネルンスト効果の増大現象

薄膜の膜厚をナノメートルのオーダーまで減少させると、異常ネルンスト効果に特異性が生じる。Chuang らは、3d 遷移金属元素の薄膜試料の膜厚を変えた試料について、室温で異常ネルンスト効果の測定を行った。その結果、Fe, Co, Ni 薄膜では、膜厚が 20 nm 以下になると θ_{ANE} の大きさが、10 倍以上の大きさまで増大することを報告した⁽¹³⁾。これは、

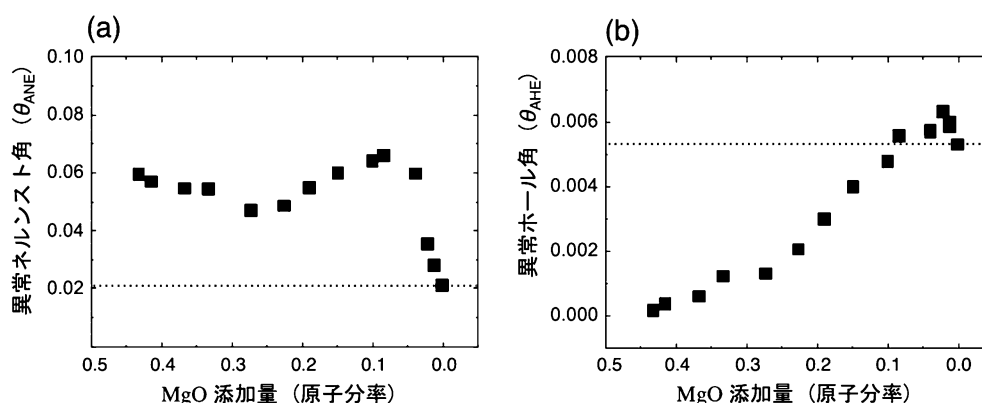


図 3 $\text{Co}_x(\text{MgO})_{1-x}$ グラニューラー薄膜における (a) 異常ネルンスト角の MgO 添加量依存性および (b) 異常ホール角の MgO 添加量依存性。それぞれの図の点線は、MgO を添加していない Co 薄膜における異常ネルンスト角、異常ホール角の大きさを示す。

超薄膜において電子構造がバルクのそれと比べて変調を受ける効果などに起因していると説明されている。同様に、膜厚が数ナノメートルである異種の超薄膜を積層した多層膜においても、異常ネルンスト効果の増大現象が報告されている。Uchidaらは、膜厚が数ナノメートルのPtおよびFeを交互に積層した多層薄膜を作製し、温度勾配を薄膜面直および薄膜面内方向の異なった方向に印加した場合のそれぞれの異常ネルンスト効果を室温で測定した⁽¹⁴⁾。PtおよびFe層の膜厚や積層数を変化した試料で横ゼーベック係数の大きさの比較を行ったところ、いずれの温度勾配方向で測定した場合でも、積層数を増加した場合、横ゼーベック係数が増加する結果が得られた。これは、界面数が増加することにより異常ネルンスト効果が増大することを示唆している。一方、熱電材料への応用の観点からは、 Q_s や電気伝導率の増加に加えて、熱伝導率(κ)の低減も重要である。一般に金属は高い κ を有するため、低い κ を示す半導体などとのハイブリッドナノ構造を設計することは有効な手段である。そこで、低い熱伝導率を有するアモルファス半導体層と強磁性金属層からなる多層構造に着目し、熱伝導率の低減と異常ネルンスト効果の増大を同時に達成することを狙った。電子線蒸着装置を用いて、Si(001)基板上にCoおよびSiを室温でそれぞれ20 nmずつ交互に2層ずつ積層し、これをSi/Co多層膜とした。参照試料として、20 nmのCo単層膜も作製した。構造評価には、走査型電子顕微鏡法(SEM)、ラマン分光を用いた。熱伝導率測定には 2ω 法を用いた。Co単層膜およびSi/Co多層膜のSEM像を確認したところ、図4(a)および(b)に示すように、各層の膜厚が設計値通りに20 nmで均一に積層されていることが分かった。また、試料の熱伝導率を測定したところ、Si/Co多層膜は、参照用のCo単層膜よりも30倍程度低い熱伝導率を示した。これは、熱伝導率の低いSiを挿入した効果であると考えられる。これらの試料について、その異常ネルンスト効果を室温で調べた。薄膜面内方向に温度勾配を加え、発生するネルンスト電圧を測定した。その結果、図5に示すように、多層膜の Q_s はCo単層膜のそれと比較して、2.6倍程度大きい値となった。このように多層膜における異常ネルンスト効果が増大する要因として、磁性/非磁性界面において、近接効果により僅かな磁性拡散

層が非磁性層内に生じ、異常ネルンスト効果が増大する効果が提案されているが⁽¹⁵⁾、バンド構造が変調される効果や界面における散乱の効果も寄与するという報告もあり、議論が続いている。本研究で観測された増大効果の要因も明らかにはなっていないが、金属/半導体の多層構造における異常ネルンスト効果の増大はこれまでに報告が無いため、さらなる現象の解明が待たれる。いずれにしても、本構造を用いることにより熱伝導率の低減と異常ネルンスト効果の増大を同時に達成することができることが明らかになった。この結果は、金属・半導体のハイブリッドナノ構造を用いて素子設計を行うことにより、熱電変換効率を高められる可能性を示している。

4. ま と め

熱磁気効果の一つである異常ネルンスト効果を活用した熱電応用を目的として、グラニュー構造や金属・半導体多層構造のようなナノ構造の導入による異常ネルンスト効果の増大現象を調べた。スパッタ法を用いて $\text{Co}_x(\text{MgO})_{1-x}$ グラニュー薄膜を作製し、ナノ粒子の形態を変化させた試料で異常ネルンスト効果がどのように変化するかを調べた。試料のナノ構造を透過電子顕微鏡で観察した結果、平均粒径数ナ

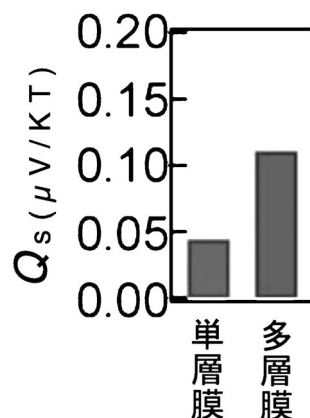


図5 Co単層膜およびSi/Co多層膜の異常ネルンスト係数。

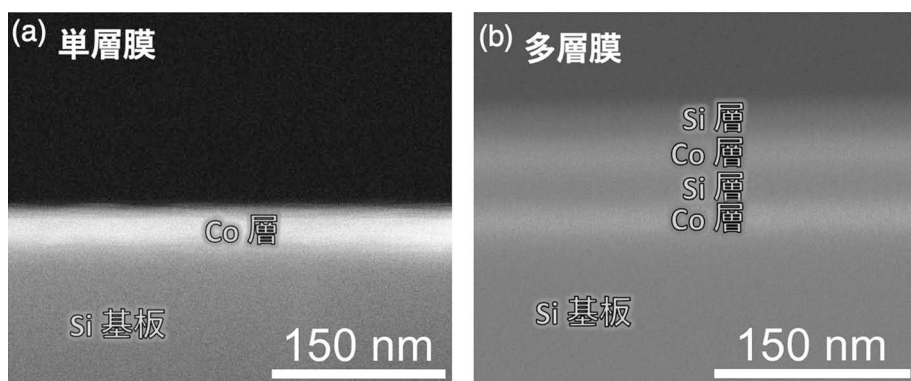


図4 (a) Co単層膜の断面走査型電子顕微鏡像および(b) Si/Co多層膜の断面走査型電子顕微鏡像。

本稿で紹介した研究成果の多くは、筆者の研究グループの Himanshu Sharma 博士研究員および Peng Sheng 博士研究員と、高知工科大学 藤田武志教授、大阪大学 北浦怜旺奈氏、石部貴史助教、中村芳明教授との共同研究によるものであり、各氏に感謝申し上げる。本研究の一部は、科学技術振興機構 CREST 研究 (Grant No. JPMJCR1524)、文部科学省 科学研究費補助金基盤研究 (A) (Grant No. 17H01052, 19H00853)、国際共同研究加速基金 (国際共同研究強化 (A)) (Grant No. 18KK0377)、村田学術振興財団研究助成およびカシオ科学振興財団研究助成の支援を受けて行われた。

- (1) G. E. Bauer, E. Saitoh and B. J. van Wees: *Nature Mater.*, **11** (2012), 391.
- (2) M. Hatami, G. E. W. Bauer, Q. Zhang and P. J. Kelly: *Phys. Rev. Lett.*, **99**(2007), 066603.
- (3) K. Uchida, S. Takahashi, K. Harii, J. Ieda, W. Koshibae, K. Ando, S. Maekawa and E. Saitoh: *Nature*, **778**(2008), 455.
- (4) W. Nernst: *Ann. Phys.*, **267**(1887), 760.
- (5) M. Mizuguchi and S. Nakatsuji: *Sci. Tech. Adv. Mater*, **20** (2019), 262.
- (6) M. Mizuguchi, S. Ohata, K. Hasegawa, K. Uchida, E. Saitoh and K. Takanashi: *Appl. Phys. Express*, **5**(2012), 093002.
- (7) Y. Sakuraba, K. Hasegawa, M. Mizuguchi, T. Kubota, S. Mizukami, T. Miyazaki and K. Takanashi: *Appl. Phys. Express*, **6**(2013), 033003.
- (8) K. Hasegawa, M. Mizuguchi, Y. Sakuraba and K. Takanashi: *Appl. Phys. Lett.*, **106**(2015), 252405.
- (9) S. Isogami, K. Takanashi and M. Mizuguchi: *Appl. Phys. Express*, **10**(2017), 073005.
- (10) H. Sharma, Z. Wen, K. Takanashi and M. Mizuguchi: *Jpn. J. Appl. Phys.*, **58**(2019), SBB103.
- (11) P. Sheng, T. Fujita and M. Mizuguchi: *Appl. Phys. Lett.*, **116** (2020), 142403.
- (12) R. Kitaura, T. Ishibe, H. Sharma, M. Mizuguchi and Y. Nakamura: *Appl. Phys. Express*, **14**(2021), 075002.
- (13) T. C. Chuang, P. L. Su, P. H. Wu and S. Y. Huang: *Phys. Rev. B*, **96**(2017), 174406.
- (14) K-i. Uchida, T. Kikkawa, T. Seki, T. Oyake, J. Shiomi, Z. Qiu, K. Takanashi and E. Saitoh: *Phys. Rev. B*, **92**(2015), 094414.
- (15) R. Ramos, T. Kikkawa, A. Anadón, I. Lucas, T. Niizeki, K. Uchida, P. A. Algarabel, L. Morellón, M. H. Aguirre, M. R. Ibarra and E. Saitoh: *Appl. Phys. Lett.*, **114**(2019), 113902.

★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★

2003年 3月 東京大学大学院工学系研究科博士課程修了

2003年 4月 日本学術振興会特別研究員(DC)

2004年 4月 大阪大学大学院基礎工学研究科特任助手

2007年 3月 東北大学金属材料研究所助手

2007年 4月 東北大学金属材料研究所助教

2009年 5月 東北大学金属材料研究所准教授

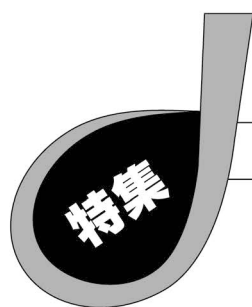
2020年 5月 名古屋大学大学院工学研究科教授

2021年 4月 名古屋大学未来材料・システム研究所教授

専門分野：磁性材料，スピントロニクス

◎新規磁性材料開発やスピントロニクス現象の解明と
新機能の探究に関する研究に従事。

★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★



体温を用いたマイクロ熱電発電モジュール技術

菅 原 聡*

1. は じ め に

近年, Internet-of-humans (IoH) と呼ばれるヒトを対象とした IoT ともいえる電子システムが注目されている⁽¹⁾⁽²⁾. 特に, IoH は高度高齢化社会における重要課題である医療・介護・ヘルスケアの分野においてその重要性が認識されている. 今後のさらなる高齢化社会では, 病院や専門の施設による医療/介護から在宅医療/介護への推進が重要(必要)になってくるが, このような状況における医療やケアの質の低下が懸念されている. また, 国民の健康維持は個々の QoL (Quality of life) の向上のみならず, 健康保険など財政にもかかわる問題になっている. IoH は近い将来に日本が突入することになる極端な高齢化社会における在宅医療/介護や国民の健康維持/推進に重要な役割を演ずると予想されている.

ウェアラブル・デバイス(WD)はヒトと IoH システムを繋ぐマン・マシン・インターフェイス(MMI)として用いられる. 医療・介護目的の IoH に用いられる WD では主機器とワイヤレス(無線)で接続できることに重要な意味がある. 特に, 有線デバイスのように利用者の行動的自由を奪うといった問題を生じないことは重要である. しかし, ワイヤレス接続の場合では WD に用いる電源が課題となり, バッテリー切れなどのない信頼性の高い電力供給用電源が必要になる. このような WD の主な機能はバイタルデータのセンシングと無線通信であるが, 特に無線通信は電力消費が大きい. 医療・介護の現場では無線 LAN 等の室内無線中継器の利用を前提とできるため, WD は消費電力の小さな短距離無線を実現できればよい. したがって, 体温による熱電発電を用いて WD に電力供給できる可能性があり, 高い信頼性

の電源確保に有効になると考えられる. さらに, 発電によって生じた余剰な電力を蓄電しておくことで信頼性はさらに向上できる.

また, ヘルスケアのための WD では, スマートフォンなどのモバイルデバイスとの併用を前提にすれば, やはり WD の無線通信を消費電力の低い短距離に限定できる. したがって, この場合でも体温による熱電発電を電源として利用できる可能性がある. ヘルスケアの分野では, WD の社会への普及が必要になるが, 体温による発電を用いた WD のバッテリーレス化はその商品価値を大幅に上げると予想され, WD の社会普及を促進できる.

以上のように, 医療/介護およびヘルスケアの分野において, IoH は重要な社会システムの 1 つになると考えられ, その MMI となる WD に体温を用いた熱電発電技術を用いることの期待は極めて大きい. この一方で, 現状では課題も多く, 従来技術だけではその実現は困難である. 日本の時計メーカーからは, 体温を用いた熱電発電によって駆動する腕時計がすでに発表されている⁽³⁾⁽⁴⁾. 世界に先駆けた優れた研究開発であるが, 以上に述べたような WD に応用するには発生できる電力が足りず, この技術だけでは通信機能を大きく制約するなどの問題を生じ, IoH 応用には適さない. この新たな応用に対応できる新しい熱電発電技術が必要になる.

本稿では, IoH を対象とした WD の電源に用いることができる体温をエネルギー源とするマイクロ熱電発電(μ TEG)モジュール技術について述べる. はじめに, 従来技術を応用する場合の課題について述べ, 次に, この課題を解消し, 高い出力の期待できる新型の μ TEG モジュールとその最適設計技術について述べる.

* 東京工業大学 未来産業技術研究所; 准教授(〒226-8502 横浜市緑区長津田町4259-J3-14)

Micro Thermoelectric Generator and its Module Technologies Using Body Heat; Satoshi Sugahara (Laboratory for Future Interdisciplinary Research of Science and Technology, Tokyo Institute of Technology, Yokohama)

Keywords: micro thermoelectric generator, wearable device, body heat, internet of humans, thermoelectric thin-film, thermoelectrics-on-insulator
2021年6月29日受理[doi:10.2320/materia.60.562]

2. 従来技術に関する課題

ゼーベック素子を集積化した小型の熱電発電デバイスを Micro thermoelectric generator (μ TEG)と呼ぶ。この呼び名はこれに放熱用のヒートシンクなどを組み合わせモジュール化したものの総称にも用いられるが、本稿ではゼーベック素子を集積化し、発電の機能を備えた部分のみを μ TEGと呼び、これを実装し、ヒートシンクなどを加えて高効率に発電できるようにモジュール化したものを μ TEGモジュールと呼ぶことにする。体温を用いた熱電発電では μ TEGとモジュールとを一体として考えることが重要になる。

体温を用いた μ TEGモジュールのWD応用では、短距離通信を前提にして、1 mW程度の出力が1つの目安になる。これは先に述べた腕時計に必要な電力の100倍程度にも及ぶ。ヒトから放出される熱流を μ TEGモジュールによって電力に変換することでこの電力を実現する。体温を用いた μ TEGモジュールの設計では、恒温動物であるヒトの局所的な産熱能力や皮膚近傍の熱抵抗等の理解に基づき設計する必要がある⁽⁵⁾。従来の μ TEGモジュールでは、放熱フィンなどのヒートシンクを導入して、放熱の工夫によって μ TEGの発電能力を最適化することができる。一方、WDへの応用では筐体やリストバンド等をヒートシンクに用いるために、放熱能力は限られており、また、これを自由に制御することも難しい。この場合では μ TEGモジュールの熱抵抗の方を放熱能力に合わせて最適設計することが重要になるが、従来型の μ TEGモジュールではゼーベック素子の加工寸法による制約からこれは容易ではない。以上は電気回路におけるマッチングの問題に相当し、前者(従来)は内部抵抗、後者(WD応用)は負荷抵抗による最適化に対応し、状況は大きく異なる。WDに適したヒートシンクによる放熱に熱的整合をとることが可能な熱抵抗を有する μ TEGを実現するためにはゼーベック素子にさらなる微細化が必要となる。これには、従来のバルク材料の機械加工に基づくゼーベック素子を集積化から、リソグラフィなどによる微細加工技術の導入が容易な薄膜材料を用いたゼーベック素子を集積化への転換が重要となる。また、薄膜熱電材料の利用は設計自由度、量産性、低コスト化、軽量化の観点からも有用である。以上から、体温を用いた熱電発電では、以下の4つが重要な課題となる。(i)薄膜に適合した μ TEGとWD応用に適したモジュールのデバイス構造、(ii)恒温動物を熱源とした設計系、(iii) μ TEGモジュールのモデリング、(iv)デバイス構造の構造最適化アルゴリズム。以下では、これらの課題について我々の進めてきた研究開発の概要について述べる。

3. 新型薄膜 μ TEGモジュール

体温を用いた μ TEGモジュールのWD応用では、WDの駆動に必要な電力(特に短距離無線通信: ~ 1 mW程度)と電圧(特にCMOS駆動: 0.5–1 V)を、薄膜熱電材料を用いて

(頻繁に)昇圧することなく実現できる必要がある。これらを実現するためには、出力電力が最大化されるように放熱に対する熱的および負荷に対する電気的な整合がとれるようにゼーベック素子を設計・集積化できるデバイス構造が必要になる。特に、WDの放熱能力に合わせて、 μ TEGモジュールの熱抵抗を設計できることは重要である。WD応用では、放熱による熱抵抗は一般的な μ TEGに用いるヒートシンクに比べてかなり高く、従来に比べて μ TEGの熱抵抗を高くする必要があるが、これには従来よりも微細化されたゼーベック素子を集積化する必要がある。薄膜の熱電材料を用いることは半導体大規模集積回路(VLSI)に用いられるリソグラフィなどの微細加工技術の導入を可能とし、さらに、従来技術では制約が大きかったゼーベック素子のサイズおよび素子数といった自由度を最大限に活用した設計の最適化を可能とする。

図1(a), (b)に薄膜トランスパース型 μ TEGのデバイス構造を示す⁽⁶⁾⁽⁷⁾。これは数100 nm–数 μ m程度の厚さの熱電材料薄膜を用いた μ TEGの構造で、VLSI技術に基づく微細加工の導入が容易な構造である。この μ TEGでは、短冊状のn型およびp型熱電薄膜を交互に並べた構成で、それぞれの接続部は交互に高温側および低温側のプレートに接続される。この構造では熱流が薄膜面内となり、薄膜でも容易に熱抵抗を高くできるだけでなく、面内の素子サイズ(短冊の長軸と短軸の長さ)でゼーベック素子の熱抵抗と電気抵抗を最適化できる。必要とされる熱抵抗を確保するための設計自由度が高く、薄膜を用いても高い出力を実現できる。また、下側のプレートにSi基板を用いることで、VLSIにおけるプロセス技術の導入がより容易になるだけでなく、最先端デバイス技術との融合も可能となる。薄膜トランスパース型 μ TEGの構造は、薄膜の熱電材料だけでなく、近年注目を集めているナノワイヤ(NW)の熱電材料にも適した構造にな

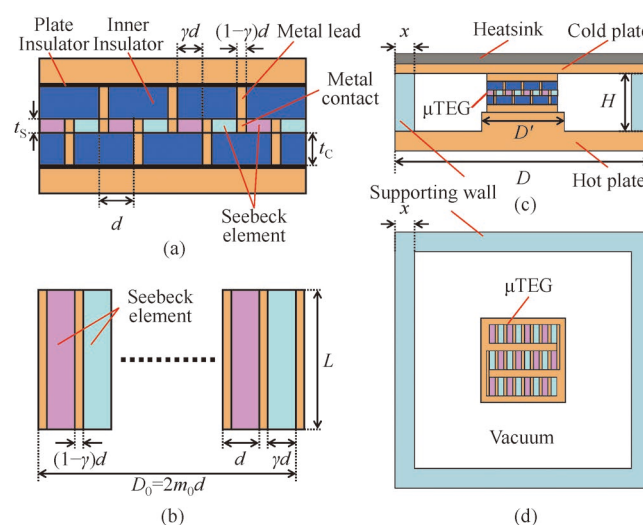


図1 薄膜トランスパース μ TEGの(a)側面断面構造、(b)上面断面構造。真空/絶縁体ハイブリッドアイソレーションモジュールの(c)側面断面構造、(d)上面断面構造。(オンラインカラー)

っている．VLSIの先端デバイスで用いられるSOI(Si-on-insulator)基板を利用し，NWトランジスタ技術を流用することで，Si-NWによって構成されるトランスパース型 μ TEGを実現できる⁽⁸⁾⁽⁹⁾．同様に，近年，先端トランジスタの分野で研究開発が進んでいるIII-V族化合物半導体を用いたIII-V-OI基板も応用可能である⁽¹⁰⁾．InSbやInAsのNW構造はSi-NWより優れた熱電物性を有すると期待されている⁽¹¹⁾．今後はこのような半導体に限らず様々な熱電材料を安定な絶縁体薄膜を介してSi基板上に構成したThermoelectrics-on-insulator (TEOI)[†]といったコンセプトが重要になると考えられる．

WDに適合する μ TEGモジュールでは，放熱に用いるヒートシンクに板上のものを用いると仮定し，またWDの装着される皮膚近傍の熱抵抗も考慮して， μ TEG部の熱抵抗をこれらの熱抵抗に整合させると(高い出力が得られるように設計すると)，ヒートシンクの面積に対して μ TEG部の占有面積は非常に小さくなる．したがってこの極端な状況を実装できるモジュール構造も重要な課題となる．このようなモジュール構造では， μ TEG内部(ゼーベック素子間)のみならずモジュール内全体の熱的なアイソレーションに μ TEGの出力は強く依存する．モジュール内を μ TEG内も含めてすべて真空とすれば，理論限界に近い高い出力が得られるが，作製プロセスとその実装が難しくなる．そこで，図1(c)，(d)に示す真空/絶縁体ハイブリッドアイソレーションを提案した⁽⁷⁾⁽¹²⁾⁽¹³⁾．この構造では μ TEG部(ゼーベック素子の集積領域)をモジュール内の限られた領域に制限して，この領域を熱絶縁体，この領域外を真空でアイソレーションする．この構造は絶縁体による熱アイソレーションを用いた μ TEGチップをVLSI技術で作製し，このチップをモジュール本体に真空封じして実装することで実現できる． μ TEG部は熱絶縁体を用いるため，微細加工プロセスに適合する．また，このモジュール構造はMEMSの分野で用いられている真空パッケージ技術を応用できる．図1(b)に示した μ TEGのサイズは $D_0 \times L$ であるが，長辺 D_0 が長いときは，図1(c)のように適当に折り畳んで集積化する．この構造では，大気へ熱放出を行うために必要となるモジュールの表面積に比べて， μ TEGの形成に必要な占有面積は十分に小さくできるため，完全な真空アイソレーションに近い熱抵抗の実現を期待できる．また，凸構造の下部プレートを用いることで，モジュールの熱抵抗を減少させてしまう真空封じ壁の影響も抑えることができる．

4. 系の設定と最適設計アルゴリズム

μ TEGモジュールの最適設計と性能予測を行う場合，人体-WD-大気からなる系を正しく表現できる系モデルが必要になる．従来の熱電発電は一定の熱流下での発電を前提として設計が行われることが多い．これを回路モデルで記述すれ

ば図2(a)のようになり，熱流は電気回路における電流源による駆動として表現される(以下では熱流源と呼ぶことにする)． K_M は μ TEGモジュールの熱抵抗， K_{air}' は放熱の熱抵抗に皮膚近傍の熱抵抗を加えたものである．このモデルではWDの熱抵抗の大きさによって，体温と大気との温度差(電気回路における電位差に対応する)が変化してしまうが，熱源が恒温動物であることを考慮すれば，このモデルは正しくない．WDによる放熱がヒトの産熱能力を越さない限り，恒温動物であるヒトはWDの熱抵抗に依らず一定の体温を保っていると考えられるから，体温と大気との温度差は一定になるはずである．そこで，図2(b)に示すように， K_M と K_{air}' に常に一定の温度差が加わる系モデルを提案した⁽⁶⁾⁽⁷⁾⁽¹²⁾⁽¹³⁾．この温度差は電気回路における電圧源で表現され(以下，温度差源と呼ぶことにする)，恒温動物と大気との温度差を一定に保つことができる．ただし，ヒトの産熱能力を考慮して，許容される熱流の最大値をこのモデルに課す必要がある⁽⁷⁾⁽¹²⁾⁽¹³⁾．

この恒温動物モデルにおける K_M を調節して， μ TEGモジュールの出力電力 P_{out} が最大化されるようにデバイスの構造を決定するが， P_{out} は μ TEGの電気抵抗 R_M にも依存し， R_M は μ TEGの構造で決定される．そして， K_M と R_M はトレードオフの関係にある．すなわち，都合よく K_M を高く， R_M を低く設定するようことはできない．そこで，トレードオフの関係にある K_M と R_M を1つのパラメータ γ ($0 \leq \gamma \leq 1$)で表現した最適化アルゴリズムを提案した⁽⁶⁾⁽⁷⁾⁽¹²⁾⁽¹³⁾．図1に示すように γ はゼーベック素子1つからなる単位構造の幅 d のうち，熱電材料の幅が占める割合として定義される． γ は熱流方向のゼーベック素子の長さに対応しており， K_M と R_M のトレードオフの関係を表現するのに適している．この γ によって， K_M と R_M を表現し， P_{out} を最大化する γ によってデバイス構造が決定される．最適化は，例えば，モジュールのサイズ D ，真空封じ壁の高さ H ，幅 x ，および熱電薄膜の膜厚 t_s を決めておき(これらは実装形態，機械的強度，デバイスプロセスで決まるところが大きい)， P_{out} を最大化できる μ TEG部の大きさ(D_0, L)，素子対数(m_0)，素子サイズ(γd)等を γ の関数として決定することで，デバイ

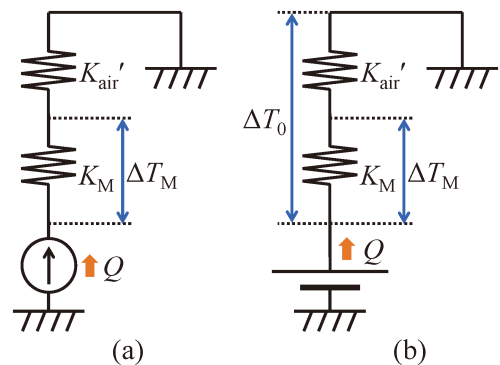


図2 系のモデリング．(a)定熱流源駆動モデル，(b)恒温動物(定温度差源駆動)モデル．(オンラインカラー)

[†] 著者による造語

ス構造を決めることができる。

この構造最適化アルゴリズムは計算時間が膨大となるため K_M および R_M には高速計算が可能な集中定数回路 (LCC) モデルを用いる必要がある。LCC モデルはデバイスの幾何学的形状から決定される素子値を用いて容易に K_M および R_M を表現することが可能である。薄膜 π 型 μ TEG では、 μ TEG 内の熱絶縁にポーラスシリカ (PS) などの低い熱伝導率の材料を用いることで、LCC モデルと高精度の分布定数回路 (DCC) モデルとの出力の誤差も極めて小さくすることができる。このため LCC によるモデリングは有効である⁽¹³⁾。同様に薄膜トランスバース型 μ TEG でも、層間絶縁膜の熱抵抗に広がり抵抗を用いた LCC モデルでは誤差を比較的小さく抑えることができるが、 π 型ほど精度が高くない。DCC モデルとの差は、ゼーベック素子と引き出し電極の接合部近傍における熱流の回り込みなどに起因するが、この LCC モデルに簡単な補正係数を導入することで、DCC モデルの結果をより正確に再現できるようになる。したがって、トランスバース型でも LCC モデルは構造最適化に有用となる⁽¹⁴⁾。図 3 に薄膜トランスバース型 μ TEG モジュールにおける熱抵抗の LCC モデルを示す⁽¹⁴⁾。 μ TEG 内の絶縁層には広がり抵抗を用いる。各熱抵抗の値はデバイスの幾何学的形状から決定されるが、接触抵抗については別途決める必要がある。電気抵抗についても同様に LCC モデルを適用できる。絶縁層へのリーク電流は容易に小さく抑えることができるため単純な LCC モデルの使用が可能である。

5. 設計結果と性能評価

提案した薄膜トランスバース型 μ TEG・真空/絶縁体ハイブリッドアイソレーション・モジュールについて、これまでに述べてきたモデルとアルゴリズムを用いて最適設計を行い、その性能の評価を行った。熱電材料には室温近傍で高い性能指数 (ZT) を有する BiTe 系材料 ($ZT \sim 1$) を、熱絶縁には PS を用いた。図 4 に構造パラメータおよび性能指標の γ 依存性を示す。図 1 の構造パラメータのうち D , H , x , t_s は前述のように固定してある。 μ TEG 部の長さ D_0 も固定し

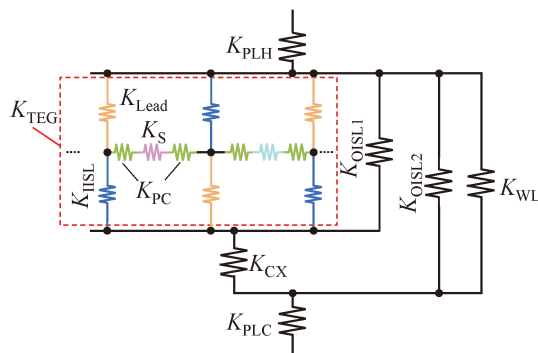


図 3 薄膜トランスバース型 μ TEG・真空/絶縁体ハイブリッドアイソレーション・モジュールの LCC モデル。(オンラインカラー)

た[†]。また、ここでは μ TEG モジュールの性能限界を知るために K_{air}' も最適化した。 K_{air}' を固定した場合は後述する。グラフの横軸の各 γ に対して P_{out} を最大化する K_M , R_M , K_{air}' が得られるように L と m_0 が最適化され、素子長 $\gamma d = \gamma L / 2m_0$ と電極幅 $(1-\gamma)d$ が決定される (図 1 参照)。この構造最適化によって、モジュールを通過する熱流 Q はどの γ においてもヒトの産熱限界による熱流に達し、そして、 P_{out} は特定の γ においてピークを持つ。この γ の値から最適構造を決定できる。この最適構造では μ TEG の占有面積 $D_0 \times L$ はモジュール (ヒートシンク) の面積 $D \times D$ に比べてはるかに小さく、先に述べた WD の系で高い P_{out} を得るための構造が実現できていることがわかる。また、トランスバース型では設計の自由度が高く、このピーク以外でも広い γ の範囲で、 P_{out} は比較的高い値を持っている。これとは対照的に、薄膜 π 型 μ TEG を真空/絶縁体ハイブリッドアイソレーション・モジュールに応用した場合は、構造パラメータは γ によって大きく変動し、最大の P_{out} も γ によって大きく変化する⁽¹³⁾。トランスバース型の持つこのような設計余裕の高さは熱電材料薄膜の膜厚依存性やコンタクト抵抗依存性にも現れ、トランスバース型ではより薄い熱電薄膜や、より高いコンタクト抵抗があっても、高い P_{out} を得ることができる⁽¹⁴⁾。

図 5 に P_{out} の K_{air}' 依存性を示す。この図では横軸の各 K_{air}' の値で、構造を最適化してある。また、ヒトの産熱能力による熱流限界の制約は外してある。 P_{out} は Q とともに K_{air}' の減少とともに増加するが、 Q がヒトの産熱能力内となるように K_{air}' を決める必要がある。アルマイト加工した平板のヒートシンクを仮定し、これにヒトの皮膚近傍の熱抵抗を加えると、 K_{air}' の値は $D \times D = 1 \text{ cm}^2$ のモジュール面積

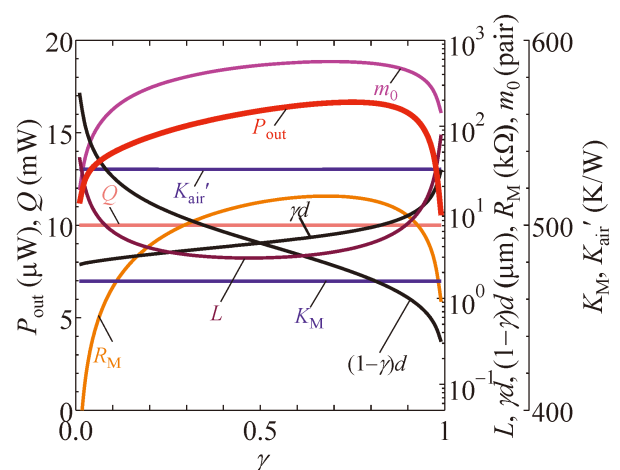


図 4 出力電力 P_{out} および設計パラメータの γ 依存性。 ($D = 1 \text{ cm}$, $H = 5 \text{ mm}$, $x = 0.5 \text{ mm}$, $D_0 = 9 \text{ mm}$, $t_s = 1 \text{ μm}$) (オンラインカラー)

[†] 薄膜トランスバース型 μ TEG ではこのパラメータの自由度は大きく、 D 程度の値からその $\sim 1/$ 数 100 程度の値であれば、その他の構造パラメータが適切に変化して D_0 に依らず最大の P_{out} が得られる。

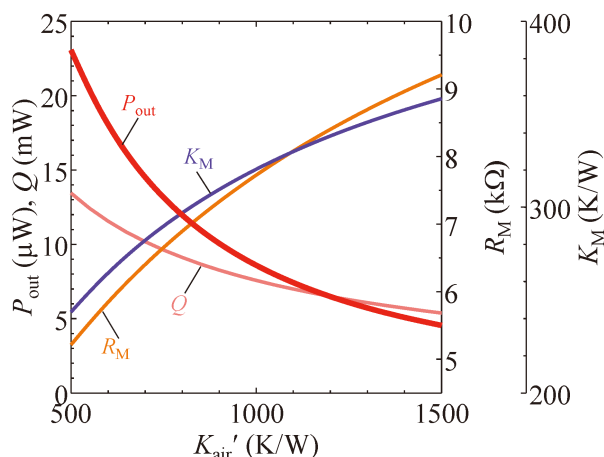


図5 出力電力 P_{out} および設計パラメータの K'_{air} 依存性. ($D=1\text{ cm}$, $H=5\text{ mm}$, $x=0.5\text{ mm}$, $D_0=9\text{ mm}$, $t_s=1\text{ }\mu\text{m}$) (オンラインカラー)

で 1000 K/W 程度となり, Q は産熱限界を下回る. このとき, P_{out} は概ね $\sim 10\text{ }\mu\text{W}$ となるから, 1 cm^2 のモジュールを 100 個程度 ($\sim 100\text{ cm}^2$), 例えばリストバンド状に実装することで, WD に応用可能な出力 $\sim 1\text{ mW}$ が得られる.

6. ま と め

体温を用いた μTEG モジュール技術について, 我々の研究開発してきたデバイス技術, 設計技術を中心に解説を行った. デバイス構造, 設計方法はこの系特有のものともいえるが, これらの根底にある考え方や方法論は熱電材料の特性を最大限に引き出し, ウェアラブルエレクトロニクスといった新たな応用を実現するための基盤となる. 材料の物性はもちろん重要であるが[†], その物性を最大限に引き出し使いこなす技術も同様に必要不可欠である. また, 体温を用いた μTEG モジュール技術は必然的に VLSI 技術とも整合することも述べた. 特に TEOI は最先端のトランジスタ技術を μTEG モジュール技術に転用させる技術になり得る.

本稿は, 近藤 剛, 千脇那菜, 清野稔仁, 大久保岳, 山下

涼音, 塩津勇作, 熊谷颯人, 遠藤弘之, 佐貫海斗の諸氏とともにやってきた研究成果に基づく. 本研究に携わってきた上記諸氏の貢献は大きく, 改めて感謝する. 本研究の一部は, JST 知財活用支援事業 スーパーハイウェイ の支援を受けたものである.

文 献

- (1) D. Metcalf, S. T. J. Milliard, M. Gomez and M. Schwartz: IEEE Pulse, **7** (2016), 35–39.
- (2) 井上創造, 中島直樹: 情報処理, **56** (1995) 870–873.
- (3) 岸 松雄: まてりあ, **38** (1999) 755–758.
- (4) 渡辺 滋, 村上 淳, 山田信一: マイクロメカトロニクス, **44**, (2000) 25–31.
- (5) V. Leonov: IEEE Sensors Journal, **13** (2013) 2284–2291.
- (6) T. Kondo, N. Chiwaki and S. Sugahara: Electron Device Technology and Manufacturing Conference, Toyama, Japan, February 28–March 2, (2017), paper P-14, 201–203. 本論文ではヒトの産熱限界を考慮していない.
- (7) N. Chiwaki, T. Seino and S. Sugahara: J. Micromech. Microeng., **28** (2018), 094003/1–6.
- (8) Y. Shiotsu, T. Okubo, H. Kumagai and S. Sugahara: 2019 Joint International EUROSIO Workshop and International Conference on Ultimate Integration on Silicon, Grenoble, France, April 1–3, (2019), paper P14.
- (9) H. Kumagai, Y. Shiotsu and S. Sugahara: IEEE International Conference on Micro Electro Mechanical Systems 2021, Online, January 25–29, (2021), paper M-136.i.
- (10) K. Sumita, K. Kato, M. Takenaka and S. Takagi: Jpn. J. Appl. Phys. **58**, (2019), SBBA03/1–6.
- (11) N. Mingo: Appl. Phys. Lett., **84** (2014), 2652–2654.
- (12) T. Seino, N. Chiwaki, S. Yamashita and S. Sugahara: Micro and Nanotechnology for Power Generation and Energy Conversion Applications (PowerMEMS) 2017, Kanazawa, Japan, November 14–17, (2017), paper PT. 70.
- (13) Y. Shiotsu, T. Seino, T. Kondo and S. Sugahara: IEEE Trans. on Electron Devices, **67**, (2020), 3834–3842.
- (14) Y. Shiotsu, T. Kondo and S. Sugahara: in preparation.



菅原 聡

★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★
 1996年 東京工業大学大学院理工学研究科電子物理工学専攻博士課程修了
 1996年 東京工業大学大学院理工学研究科電子物理工学専攻助手
 2002年 東京大学大学院工学系研究科電子工学専攻助手
 2006年より 現職
 専門分野: 集積デバイス・集積回路
 ★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★

[†] 第5節で述べたように WD 応用では $ZT=1$ が1つの目安ではあるが, 実装面積が少し大きい. さらに大きな ZT は実装面積を減らす, または高出力化(長無線距離化)できる.

極細ピアノ線の高強度化に有効な メゾスケール構造とマイクロ組織

権 藤 詩 織*

1. はじめに

軽量かつ高強度な材料の創製は、環境に対する負荷を少しでも低減し、持続可能な社会の構築において重要な技術である。特に鉄鋼材料の高強度化は目まぐるしい進化を遂げている。自動車用鋼板を例に挙げると、1970年代の440 MPa級鋼板の適用から始まり⁽¹⁾、最近では1500 MPa級の鋼板が実用されている⁽²⁾。一方で、鉄の理論強度は11000 MPaと言われており⁽³⁾、これに最も近い鉄鋼材料が5000 MPa近くの強度があるピアノ線である⁽⁴⁾。JIS G 3502によると、炭素量0.6%から1.0%の高炭素鋼に対応する線材がピアノ線材とされており、ピアノ線やオイルテンパー線、PC鋼線・撚線、ワイヤロープなどの素材となる⁽⁵⁾。これをさらにパテンティングと称される熱処理と、伸線加工と称される、テーパー状の孔に通して縮径させ、長手方向に引き延ばす加工を施した材料がピアノ線である⁽⁶⁾。名の通りピアノ弦から、自動車タイヤの補強材であるスチールコード、シリコンインゴットのスライスに用いられるソーワイヤなど、その用途は多岐にわたる。ピアノ線に繰り返し伸線加工を施し、細径化させると、著しい加工硬化現象が見られ、高強度化を実現できる。ラボスケールでは7000 MPaにも及ぶ⁽⁷⁾。一方で、強度増加に伴い著しい延性の低下が生じる。延性の低下はさらなる変形、つまり伸線加工を難しくするため、高強度化と高延性を同時に実現する伸線加工法の確立が求められ、高延性に寄与するマイクロ組織の解明が重要である。

著者はこの解明に取り組むにあたり、次の3つの課題に直面した。1つ目は、高強度化には細径化が前提であるが、

線径が数 μm から数十 μm のピアノ線(以下、極細ピアノ線と称す)においては、伸線加工中の微小な張力・速度変化が破断の原因となるため、伸線時の高度な張力・速度制御が必要である。2つ目は、その細さゆえ、取り扱いが難しいため、極細ピアノ線の延性の評価も難しく、延性評価法の確立が必要である。3つ目は、現行実用材料の主流として流通している約 $\phi 0.2\text{ mm}$ 以上のピアノ線と比較して、極細ピアノ線の伸線時に形成されるひずみ勾配が減少すると考えられ⁽⁸⁾、極細ピアノ線のマイクロ組織や機械的性質はこれまでに報告されている知見と異なる傾向を有する可能性がある。さらに、原子レベルの局所的な情報であるマイクロ組織と、線全体で評価した平均的な情報である機械的性質を結びつけた理解が求められる。本稿ではこれら課題への取り組みについて、成果の一部を紹介する。

2. 極細ピアノ線の伸線加工

ノンスリップ型伸線機⁽⁹⁾の導入により1つ目の課題を解決した。伸線加工時、図1(a)に示すように、ワイヤには伸線方向に引抜力 F_t 、反対方向に後方張力 F_b とダイスからの反力であるダイス抗力 F_d がはたらく。簡易的に $F_{tn} = F_{bn} + F_{dn}$ (n はパス数)で表される関係が成り立つ。引抜力は、次段の後方張力としてワイヤに作用するため、連続的に伸線加工を施そうとすると、後段側にて高い張力($F_{tn} = F_{b1} + \sum_{i=1}^n F_{di}$)がワイヤにかかり、場合によっては破断に至る。実操業にて一般に使用されているスリップ型伸線機では、キャプスタンと呼ばれる回転体を、その周速がワイヤの速度より速くなるように、ワイヤに接触させて回転させる(図1(b))。キ

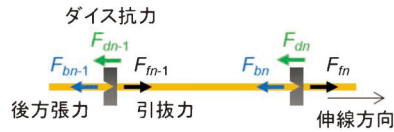
* 国立研究開発法人産業技術総合研究所；研究員(〒305-8564 つくば市並木1-2-1)

Mesoscale Structure and Microstructure of Fine Piano Wire for High Strengthening; Shiori Gondo(National Institute of Advanced Industrial Science and Technology (AIST), Tsukuba)

Keywords: wire drawing, high carbon steel wire, crystal orientation, fiber texture, EBSD (electron backscatter diffraction), microstructure, mechanical properties, ductility

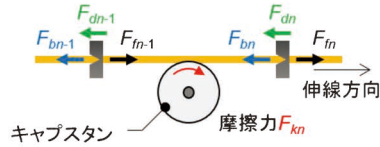
2021年3月10日受理[doi:10.2320/materia.60.567]

(a) 連続伸線の基本形



$$F_{fn} = F_{bn} + F_{dn} = F_{b1} + \sum_{i=1}^n F_{di}$$

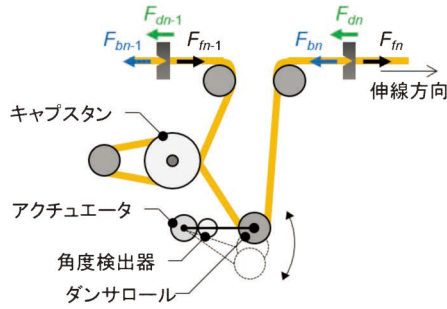
(b) スリップ型伸線機



$$F_{fn} = F_{bn} + F_{dn} - F_{kn} = F_{b1} + \sum_{i=1}^n F_{di} - \sum_{i=1}^n F_{ki}$$

ダイス
キャプスタン

(c) ノンスリップ型伸線機



$$F_{fn} = F_{bn} + F_{dn}$$



図1 各伸線加工形態の特徴：(a) 連続伸線の基本形，(b) スリップ型伸線機，(c) ノンスリップ型伸線機。

キャプスタンとワイヤとの間に摩擦力 F_k が発生し、ワイヤにかかる張力を低減できる ($F_{fn} = F_{b1} + \sum_{i=1}^n F_{di} - \sum_{i=1}^n F_{ki}$)。しかしながら、制御することはできない。また、キャプスタンは複数パスで一体構造であるため、各パス独立の回転速度でキャプスタンを駆動することができない。張力や速度の制御性が低く、何かの拍子に瞬間的に高い張力がワイヤにかかるのと破断に至るため、細径化を狙った伸線加工には難しさがあった。一方、図1(c)に示す極細ワイヤ用のノンスリップ型伸線機では、各キャプスタンを独立のモータで駆動する仕組みが採用されている。アクチュエータでダンサロールにかかるトルクを制御しながら、角度センサで伸線中のダンサロールの角度を検出し、設定した張力、速度となるように、アクチュエータとモータにフィードバックしている。このような構造により、ワイヤに作用する張力は前段の張力の影響を受けず、 $F_{fn} = F_{bn} + F_{dn}$ との関係が成り立つ。スリップ型伸線機と比較して、一度にどの程度縮径させるかの指標である減面率や、後方張力、伸線速度などの伸線加工条件の制御性が格段に向上し、極細ワイヤをより高速で安定的に伸線できるようになった。

本研究では、ノンスリップ型伸線機の出力範囲で伸線加工が可能、かつ、ピアノ線の実用材料の中でも特に細いソーワイヤの素材として一般的な太さ ($\phi 0.5 \text{ mm}$ 程度) のピアノ線と、これより細い、太いピアノ線として、伸線前の熱処理径が $0.276, 0.444, 0.936 \text{ mm}$ のピアノ線を扱うことにした。これらをそれぞれ $0.021, 0.029, 0.093 \text{ mm}$ まで、ノンスリップ型伸線機を用いて伸線した。ここで、伸線前の熱処理径を d_0 、 n パス後の線径を d_n とすると、伸線加工により導入されたひずみ ε は $2 \ln d_0/d_n$ と算出される。伸線加工によってど

の程度縮径したかを表す値であり、この値を横軸としたグラフがよく作成される。上記伸線材最終径での伸線加工ひずみは、それぞれ $5.12, 5.42, 4.61$ となる。いずれの熱処理径のピアノ線においても、伸線加工時の各パスの減面率 $R_e (= 1 - d_n^2/d_{n-1}^2)$ は約 14% 、後方張力(応力)は引張強さの 5% 未満とした。線径によらず、後方張力の負荷は伸線加工時のダイス面圧を減少させ、応力状態を変化させる効果があり、後述する集合組織の形成を制御しうる重大なパラメータであると考えた。したがって、熱処理径 0.444 mm のピアノ線においては、後方張力として引張強さの $30\%, 50\%$ の応力を負荷した条件においても伸線加工をおこなった。

3. 延性評価方法の確立

2つ目の課題には、一般的な引張試験方法、絞り測定方法、捻回試験方法に対し、極細ワイヤの特徴を考慮した工夫を凝らすことで、極細ワイヤの延性評価法を確立し⁽¹⁰⁾⁽¹¹⁾、対応した。引張試験では繊維用のつかみ具を採用した。クロスヘッドの移動量を変位とみなしても、非接触伸び計にも劣らない精度で伸びを算出できることを明らかにした⁽¹⁰⁾。破面を突合せた状態での極細ワイヤの絞り測定は困難であるため、破面一方のみの SEM (Scanning electron microscope, 走査型電子顕微鏡) 観察から絞りを算出する方法を考案した⁽¹⁰⁾。

上記方法にて極細ピアノ線の機械的性質を評価すると、伸線加工に伴い引張強さは増加し、絞りは伸線加工ひずみ 1.5 まで増加、その後減少するとの結果を得た。これらは $\phi 0.2 \text{ mm}$ 以上で報告されている従来知見と同様な傾向となった。

一方、一様伸びは伸線初期に急激に減少するが、その後徐々に減少したのち、高ひずみ域で増加するとの新しい傾向が得られた。これは、3つめの課題として挙げた極細ピアノ線特有の機械的性質に該当する。いずれの熱処理径においても伸線前のラメラ間隔に大きな差は見られなかったため、引張強さの差は非常に小さかった。しかしながら、ひずみ全域にて、熱処理径が大きいほど、一様伸びは高い値を示し、絞りは小さい値を示した。また、後方張力を負荷するほど、ひずみ1.5以上での絞りの減少が著しいと明らかにした。

4. 高延性に寄与するマイクロ組織

機械的性質と同様に極細ピアノ線のマイクロ組織を評価し、3つ目の課題に対応した。また、集合組織で特徴づけられる層構造“メゾスケール構造”の考え方を導入し、局所的な情報(マイクロ組織)と平均的な情報(機械的性質)の結び付けを試みることで、高延性に寄与するマイクロ組織の解明に取り組んだ⁽¹²⁾⁽¹³⁾。

(1) 極細ピアノ線のマイクロ組織

ピアノ線は軟質のフェライト相と硬質のセメンタイト相の層状組織であるパーライトラメラ組織を有する。前述したパテンティング処理により、ラメラの間隔は70 nm程度となる⁽⁷⁾。コロニーと呼ばれるある程度の固まりごとに、ラメラは様々な方向を向く。この状態から伸線加工を施すと、図2に示した概略図のように、ラメラ間隔は線径に比例して減少し⁽¹⁴⁾、ラメラは伸線方向に揃う⁽¹⁵⁾⁽¹⁶⁾。さらにフェライト相内では、格子欠陥(転位、空孔)量の増加⁽¹⁷⁾、炭素量の増加^{(18)–(21)}、が生じ、セメンタイト相内では、セメンタイトの分断⁽²²⁾、剛体回転⁽²³⁾、分解や、アモルファス化⁽²⁴⁾が生じると報告されている。

本研究では、熱処理径0.444 mmの伸線材を対象に、TEM(Transmission electron microscope, 透過型電子顕微鏡)観察と電気抵抗率の測定、DSC(Differential scanning calorimetry, 示差走査熱量測定)をおこなった。TEM明視

野像からラメラ間隔を測定した。電気抵抗率の測定ではラメラの傾きと格子欠陥量を、DSCでは格子欠陥量とセメンタイト分解量を間接的に評価した。伸線加工に伴いラメラ間隔が減少、格子欠陥量が増加すると示唆する結果を得た。また、ひずみ1.5までにラメラが伸線方向と平行になる傾向、ひずみ1.5以上にてセメンタイト分解量が増加する傾向が得られた。図2に示した伸線加工に伴うマイクロ組織の変化は、 $\phi 0.2$ mm以上のピアノ線を分析対象とした研究において報告された知見であるが、最終径が0.06 mm程度であれば、従来知見と同様な組織変化をたどると明らかにした。また、伸線時の後方張力の増加に伴い、単位質量当たりの格子欠陥量、セメンタイト分解量がある値に達するまでに必要なひずみ量が減少する傾向が得られた。これは、前述した伸線加工中の応力状態の違いに起因するものと考えられ、他線径においても上記の後方張力による効果は発現すると推測される。

(2) 集合組織で特徴づけるメゾスケール構造

図2および本研究で得られたマイクロ組織の情報はいずれも、数 nm から原子レベルの微視的な変化である。一方、結晶方位を単位結晶格子の向きと捉えると原子レベルのマイクロ組織要素であるが、同じ方向に向いた結晶格子の集合体である集合組織の向きと捉えれば、そのスケールは μm に及ぶ。ゆえに、集合組織を局所的な情報と平均的な情報を結びつける中間スケールの組織要素として扱うことができると考えた。

ピアノ線に伸線加工を施すと、フェライト結晶格子の $\langle 110 \rangle$ が伸線方向と平行となる $\langle 110 \rangle$ 繊維集合組織が形成されると古くより知られている⁽²⁵⁾。また、最終径が4 mm程度の鋼線では、外側に $\{100\}$ から $\{111\}$ が半径方向に垂直な $\langle 110 \rangle$ 集合組織、内側に $\{110\}$ が半径方向に垂直な $\langle 110 \rangle$ 集合組織が形成されると報告されている⁽²⁶⁾。伸線材内部において、半径方向の距離に応じて形成される集合組織が異なり、層構造が形成されている可能性があった。しかしながら、既往の報告された結果では伸線加工ひずみや分析領域が限定的であり、半径方向における集合組織分布と、伸線加工に伴う推移は体系的に理解されていなかった。

本研究ではEBSD(Electron backscatter diffraction, 後方散乱回折)による伸線材の結晶方位解析をおこない、伸線加工に伴う半径方向における集合組織分布の推移を明らかにし、層構造の特定を試みた⁽²⁷⁾。極細ピアノ線の中心を通る長手断面に非常に近い面がEBSDの分析面となるように、手動で研磨を施した⁽²⁸⁾。その後、研磨面半径方向全域にて菊池パターンを取得したのち、中心側から表層にかけて、いくつかの領域に分割してフェライト相の極点図を取得した。なお、先に述べたセメンタイト相の存在形態を考慮し、セメンタイト相の結晶方位は考えず、フェライト相のみ着目した。分割領域での極点図の一例を図3に示す。 $\{110\}$ 極点図には、 $\langle 110 \rangle$ が伸線方向に平行であると示すピーク(図中のaに該当)が出現した。 $\{111\}$ 極点図では、表層側と中心側ではそれぞれ図中の記号bとcで示すように、異なる位置にピークが表れた。外側では $\{100\}$ が観察面に垂直であると示

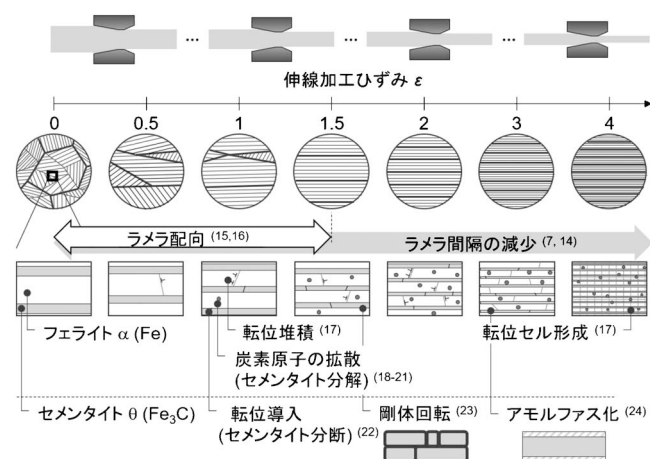


図2 ピアノ線の伸線加工にともなうマイクロ組織の変化に関する報告事例^{(7)(14)–(24)}。

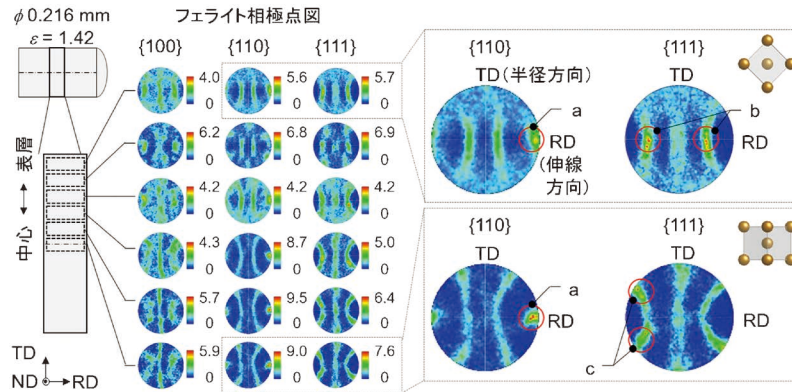


図3 極細ピアノ線(ϕ 0.216 mm, 伸線加工ひずみ1.42)の長手断面で取得したフェライト相の $\{100\}$, $\{110\}$, $\{111\}$ 極点図の一例⁽¹²⁾.

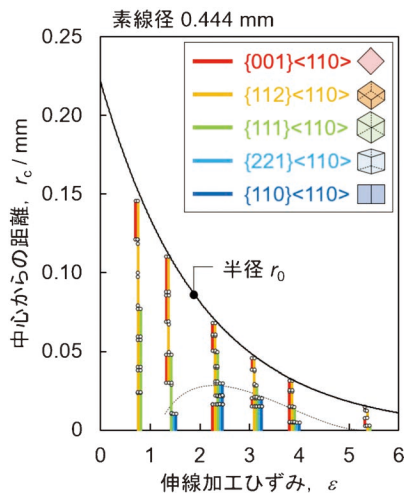


図4 伸線加工ひずみの増加に伴う伸線材半径方向における集合組織の分布の推移⁽¹²⁾.

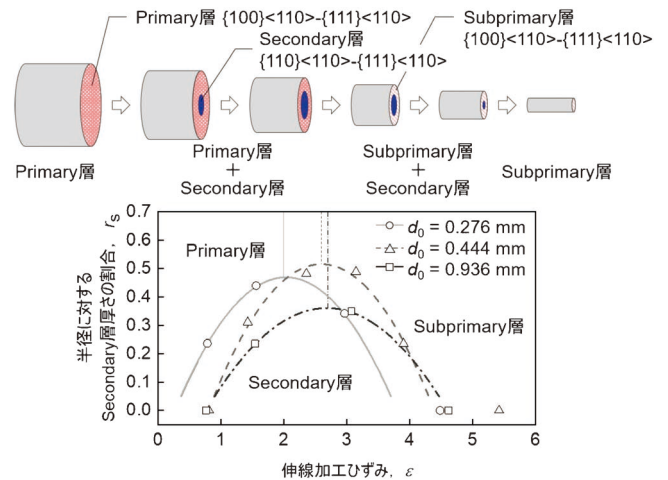


図5 伸線加工ひずみの増加に伴う半径に対する Secondary 層($\{110\}\langle 110 \rangle - \{111\}\langle 110 \rangle$)厚さの割合の推移⁽¹³⁾.

す極点図, 内側では $\{110\}$ から $\{111\}$ にかけてが観察面に垂直であると示す極点図が取得され, 半径方向に垂直な面が異なる $\langle 110 \rangle$ 繊維集合組織が形成されたと解釈できる. 各極点図のピークから, 観察面に垂直な面を読み取り, 図4に示す集合組織分布を得た. この分布図より, $\{100\}\langle 110 \rangle - \{111\}\langle 110 \rangle$ と $\{110\}\langle 110 \rangle - \{111\}\langle 110 \rangle$ の2種の方位群が存在し, 層構造が形成されると明らかにした. 推移は以下のように説明できる. 伸線初期, 半径方向全域に $\{100\}\langle 110 \rangle - \{111\}\langle 110 \rangle$ が形成される. 伸線加工ひずみの増加に伴い, 先に形成された方位群を外側に持ちながら, 新たに内側に $\{110\}\langle 110 \rangle - \{111\}\langle 110 \rangle$ が形成される. 伸線加工に伴い, 半径に対して内側の方位群が占める割合が増加するが, あるひずみ量まで達すると, 減少傾向に転じる. 高ひずみ域では, 再び外側の方位群が線全体を占める.

図5に示すように, 伸線材の半径に対する $\{110\}\langle 110 \rangle - \{111\}\langle 110 \rangle$ の厚さ割合が最大値をとるひずみ量を境に, それより小さいひずみ域での外側($\{100\}\langle 110 \rangle - \{111\}\langle 110 \rangle$)を Primary 層, 大きいひずみ域での外側を Subprimary 層, 内側($\{110\}\langle 110 \rangle - \{111\}\langle 110 \rangle$)を Secondary 層と定義し

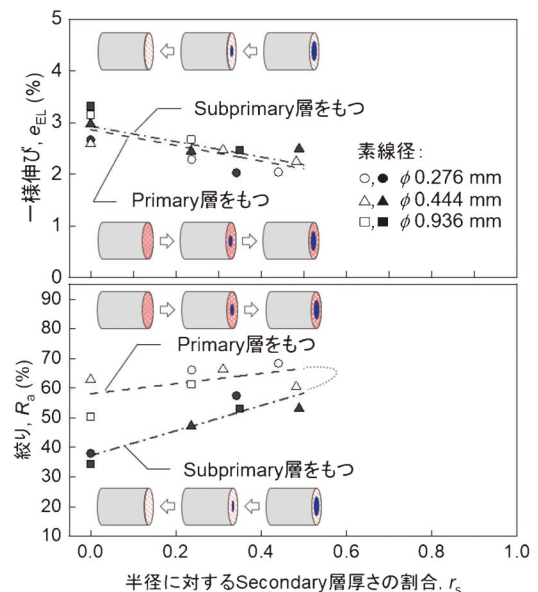


図6 半径に対する Secondary 層($\{110\}\langle 110 \rangle - \{111\}\langle 110 \rangle$)の厚さ割合と, 引張試験で得られる一様伸びと絞りの関係⁽¹³⁾.

金属製錬の熱力学(第3回)

月橋 文孝*

11. 平衡状態図

金属製錬反応の考察には、温度と相の間の平衡関係を示す平衡状態図が不可欠である。多くの反応は大気圧下(大気圧近傍)で起こるので、報告されている多くの状態図は、1 atmでの、温度と組成の平面図中に安定相が示されている。平衡状態図上では、平衡状態の物質の相関係が示されているので、そこに表される相関係は、相律をはじめ熱力学の法則に従っていないといけない。状態図を読み取るには、どの相とどの相が平衡しているかを見いだすと理解しやすくなる。

熱力学データが十分に測定されていれば、状態図を作製することができる。逆に、平衡状態図は、熱力学データを集成して図示したものであるから、測定された平衡状態図から熱力学データを推定することが可能である。近年、計算状態図の分野は非常に発展している。

非常に単純な二元共晶系状態図を例として説明する。複雑な状態図でも、また三元系等の成分が増えた場合でも、相の間の化学ポテンシャルが等しいということに基づいた考え方は同じである。

図9で表される非常に単純なA-B二元共晶系を考える。共晶温度以上で、純物質固相であるAまたはBと液相Lが平衡しているとする。純物質固相Aと液相が温度Tで平衡しているので、液相のAの化学ポテンシャル

$$\mu_A^l = \mu_A^o + RT \ln a_A^l \quad (122)$$

と固相のAの化学ポテンシャル

$$\mu_A^s = \mu_A^{so} + RT \ln a_A^s = \mu_A^{so} \quad (\text{固相純物質 } a_A^s = 1) \quad (123)$$

は等しい。

$$\mu_A^l = \mu_A^s \quad (124)$$

よって、

$$\begin{aligned} RT \ln a_A^l &= -(\mu_A^{so} - \mu_A^o) \\ &= -[(H_A^{so} - H_A^o) - T(S_A^{so} - S_A^o)] \\ &= -[\Delta H_{Af}^o - T\Delta S_{Af}^o] \end{aligned} \quad (125)$$

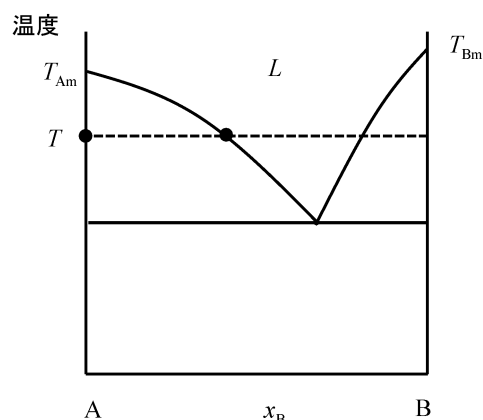


図9 単純化した二元共晶系状態図。

ここで ΔH_{Af}^o はAの溶融熱、 ΔS_{Af}^o はAの溶融のエントロピー変化である。Aの融点 T_{Am} では

$$T_{Am} = \frac{\Delta H_{Af}^o}{\Delta S_{Af}^o} \quad (126)$$

であるので、

$$RT \ln a_A^l = -\Delta H_{Af}^o \left(1 - \frac{T}{T_{Am}}\right) \quad (127)$$

となる。理想溶液を仮定すれば ($\gamma_A^l = 1$),

$$RT \ln x_A^l = -\Delta H_{Af}^o \left(1 - \frac{T}{T_{Am}}\right) \quad (128)$$

となる。純物質Aの溶融熱と融点から、液相のAの組成 x_A^l と温度Tの関係、すなわち液相線が推算できる。成分Bについても同様の関係

$$RT \ln x_B^l = -\Delta H_{Bf}^o \left(1 - \frac{T}{T_{Bm}}\right) \quad (129)$$

が得られ、成分B側の液相線が得られる。両者の交点から、共晶組成と共晶温度が推定できる ($x_B^l + x_B^s = 1$)。これは理想溶液を仮定し液相線のみを考慮した推算であるので、実測の平衡状態図からのずれがある。逆にいえば、実測の状態

* 東京大学名誉教授

Thermodynamics of Metal Smelting(Ⅲ); Fumitaka Tsukihashi (Emeritus Professor, The University of Tokyo, Tokyo)

Keywords: thermodynamics, metal smelting, chemical potential, equilibrium, activity, solution, phase diagram, chemical potential diagram, basicity, capacity of slag

2020年10月16日受理[doi:10.2320/materia.60.572]

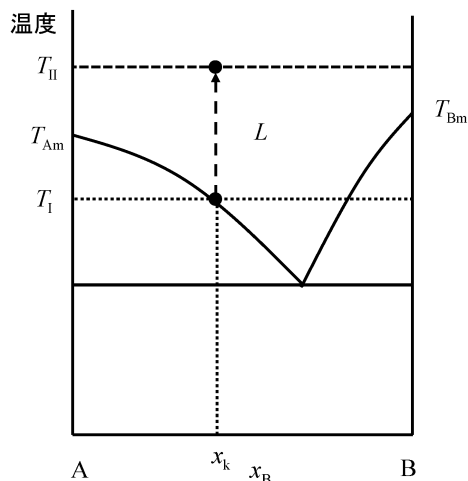


図10 正則溶液近似による異なる温度での活量の推算.

図とのずれは理想溶液からのずれを表すので、状態図から活量を推算できる。

図10の液相線から、均一液相となっている温度 T_{II} での活量を推定する方法を説明する。式(127)から、Aの液相線上で組成 x_k での液相線温度 T_I から、温度 T_I 、組成 x_k での液相の活量 $a_A^l(T_I)$ を求めることができ、そのときの活量係数

$$\gamma_A(T_I) \left(= \frac{a_A^l(T_I)}{x_k} \right)$$

を求められる。

温度 T_{II} での活量 $a_A^l(T_{II})$ を組成の関数として求めるには、通常 $\bar{H}_A^M$ が測定されていないので、式(130)の正則溶液近似により、温度 T_I での活量係数 $\gamma_A(T_I)$ を温度 T_{II} での活量係数 $\gamma_A(T_{II})$ に換算し、活量 $a_A^l(T_{II})$ を得る。

$$\bar{H}_A^M = RT_I \ln \gamma_A(T_I) = RT_{II} \ln \gamma_A(T_{II}) \quad (130)$$

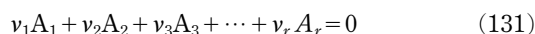
同様にAの液相線上で共晶組成までの組成範囲で温度 T_{II} でのAの活量 $a_A^l(T_{II})$ を求めることができる。

共晶組成よりB成分側では、同様に式(129)により温度 T_{II} でのB成分の活量係数を組成の関数として求める。Gibbs-Duhemの関係を用いて、B成分の活量係数からA成分の活量係数を求め、A成分の活量を得る。

純A組成から共晶組成までと、共晶組成から純B組成までの両者の活量を合わせて、全組成範囲での活量を推算することができる。

12. 均一液相内および不均一相間の化学反応

一般に化学反応を



とする。 A_i を化学種、 ν_i を化学量論係数とする。反応系の化学量論係数を負、生成系の化学量論係数を正として、反応系を左辺、生成系を右辺にまとめれば、通常の化学反応式の形となる。生成系から反応系へ変化したときの系の化学ポテンシャル変化は

$$\Delta\mu = \sum_{i=1}^r (\nu_i \mu_i) \quad (132)$$

となる。化学平衡となる条件は、反応系と生成系の化学ポテンシャルが等しいことであるので、

$$\Delta\mu = \sum_{i=1}^r (\nu_i \mu_i) = 0 \quad (133)$$

が条件である。第 i 成分の化学ポテンシャルは前述のように、

$$\mu_i = \mu_i^\circ + RT \ln a_i \quad (43)$$

により成分の純物質基準の活量で書き換えることができる。

これを上式に代入すると、

$$\begin{aligned} \sum_{i=1}^r (\nu_i \mu_i) &= \sum_{i=1}^r (\nu_i \mu_i^\circ) + RT \sum_{i=1}^r \ln a_i^{\nu_i} \\ &= \sum_{i=1}^r (\nu_i \mu_i^\circ) + RT \ln \prod_{i=1}^r a_i^{\nu_i} \end{aligned} \quad (134)$$

となる。ここで、

$$\sum_{i=1}^r (\nu_i \mu_i) (= \Delta\mu)$$

は反応による化学ポテンシャルの変化、

$$\sum_{i=1}^r (\nu_i \mu_i^\circ) (= \Delta\mu^\circ)$$

は純物質の反応による化学ポテンシャルの変化である。

$$RT \ln \prod_{i=1}^r a_i^{\nu_i} (= RT \ln K(T, P))$$

は平衡定数 $K(T, P)$ で表されるので、

$$\Delta\mu = \Delta\mu^\circ + RT \ln K \quad (135)$$

である。ここで $\Delta\mu^\circ = \Delta G^\circ$ と表し、反応の標準 Gibbs エネルギー変化という。ここで ΔG° の値は Gibbs エネルギーでなく、単位物質あたりの Gibbs エネルギー(単位 J/mol)であることに注意する必要がある。

$$\Delta G = \Delta G^\circ + RT \ln K \quad (136)$$

において、化学平衡の条件

$$\Delta\mu = \Delta G = 0 \quad (137)$$

では

$$\Delta G^\circ = -RT \ln K \quad (138)$$

が得られる。この関係式により、金属製錬反応を含め種々の化学反応で反応の標準 Gibbs エネルギー変化から平衡定数を求めることができ、製錬プロセスの解析で実用的に大変重要な式である。

金属製錬反応で生じる金属液相とスラグ液相の間の反応の平衡を取り扱うには、異なる相間の化学ポテンシャルが等しいこと(式(121))を利用して、同一相内にあるものとして取り扱うことで、式(138)を利用して平衡状態を予測することができる。

化学反応が右向きに進行するか、左向きに進行するかは ΔG° ではなく ΔG の値で判断する。 $\Delta G < 0$ であれば反応は正反応の向きに、 $\Delta G > 0$ であれば逆反応の向きに反応は進行する。 ΔG° は標準状態にある化合物の反応が進行するかの指標であり、 $\Delta G^\circ > 0$ であっても、活量係数比の項を小さくして $\Delta G < 0$ とする条件を整えることにより、反応を進行させることができる。

Gibbs-Helmholtz の式(式(139))から、式(140)の van't

Hoff 式が得られる。

$$\frac{d\left(\frac{\Delta G^\circ}{T}\right)}{dT} = -\frac{\Delta H^\circ}{T^2} \quad (139)$$

$$\frac{d \ln K}{dT} = \frac{\Delta H^\circ}{RT^2} \quad (140)$$

この式より吸熱反応 ($\Delta H^\circ > 0$) では、温度の上昇に伴い平衡定数は大きくなり反応は進行する。発熱反応 ($\Delta H^\circ < 0$) では、温度の上昇に伴い平衡定数は小さくなり反応は進まなくなる。このことはルシャトリエの原理に対応している。

先に述べたように Gibbs エネルギー変化 ΔG は、1 mol あたりのエネルギーである示強性状態量 (単位は J/mol) であり、示量性状態量である Gibbs エネルギー (単位は J) と異なる。

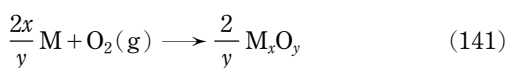
同じ記号で示強性状態量と示量性状態量を混用して用いている場合があるので、注意が必要である。

Gibbs エネルギーの値は、比熱やエンタルピー、エントロピー値のデータから求めることができるが、データ集には Gibbs エネルギーの値も載っているので、求めたい反応に関する化合物の Gibbs エネルギーから計算することができる。

標準生成 Gibbs エネルギーは多くの化合物について測定されデータ集にまとめられているので、化合物の生成反応を組み合わせて、求めたい反応の Gibbs エネルギー変化を計算できる。また、反応の Gibbs エネルギー変化がわかれば、反応の平衡定数を求めることができ、各成分の平衡組成、平衡分圧の見積もりに用いられる。

13. 化学ポテンシャル状態図

酸化反応



を考えると、

$$\begin{aligned} \Delta \mu^\circ &= \Delta G^\circ = \Delta H^\circ - T \Delta S^\circ = -RT \ln K \\ &= -RT \ln \left(\frac{a_{M_xO_y}^{2/y}}{a_M^{2x/y} \cdot P_{O_2}} \right) \end{aligned} \quad (142)$$

の関係から、成分の化学ポテンシャルと温度をパラメータとして、共存する相の安定領域を示す図をつくることができる。相の安定領域が温度、雰囲気を変数として図上でわかるので、反応プロセスの解析に非常に有用である。組成と温度で表される通常の状態図と基本的に同じであり、状態図を別の切り口から眺めたものと考えればよい。

(1) Ellingham 図

金属製錬では原料が酸化物であることが多いので酸化物を例として説明する。単体、化合物の M が 1 mol の O_2 ガスと反応して酸化物 M_xO_y が生成する反応は式 (141) で表される。

平衡状態では式 (142) より、反応の標準 Gibbs エネルギー

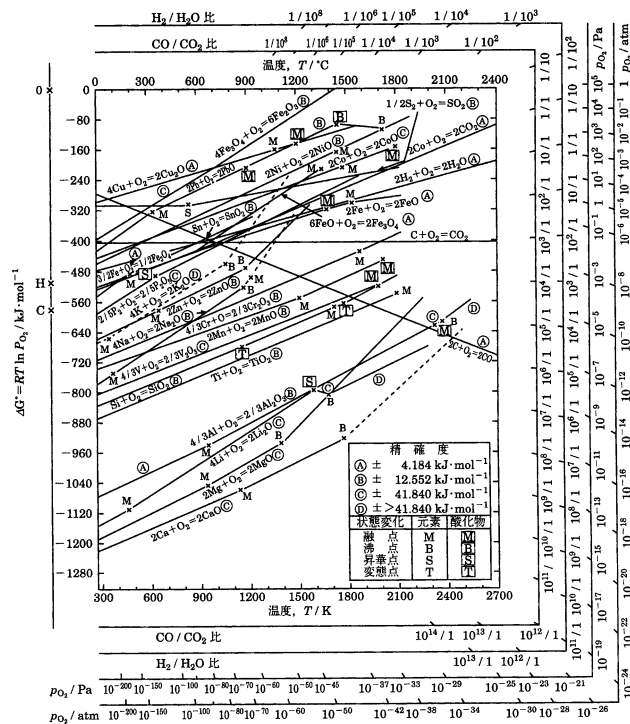


図11 酸化物の標準生成 Gibbs エネルギーと温度の関係 (Ellingham 図)。

変化は

$$\Delta \mu^\circ = \Delta G^\circ = -RT \ln \left(\frac{a_{M_xO_y}^{2/y}}{a_M^{2x/y} \cdot P_{O_2}} \right) = RT \ln P_{O_2} \quad (143)$$

となる。ここで M, M_xO_y は純物質でその活量基準を純物質とする。

$RT \ln P_{O_2}$ を酸素ポテンシャルという。酸素ポテンシャルは $RT \ln P_{O_2}$ 、酸素分圧は P_{O_2} であり、異なる量であるが、しばしば両者を混用して P_{O_2} を酸素ポテンシャルと呼んでいることがあるので、用語の間違いのないように注意が必要である。

$\Delta \mu^\circ$ は温度の関数であるので、各種物質について測定されている酸素ポテンシャルと温度の関係を示す Ellingham 図とよばれる図11⁽¹⁾が得られる。

ここに示される標準 Gibbs エネルギー変化は、式 (141) のように酸化物が生成するときの酸素 O_2 1 mol あたりの値である。この図は各種酸化物の安定性を示しており、図11の線の上側では酸化物 M_xO_y が安定、下側では M が安定相である。下方にある反応ほど酸素ポテンシャルが小さく、酸化物が安定に存在する。いいかえれば下方にある物質 M は酸素との親和力が大きく、上方にある酸化物を還元することができる。

鉄鋼製錬の製鋼反応で、溶鋼中に含まれる酸素を取り除く脱酸プロセスの脱酸材として用いられる Ca, Mg, Al, Ti の線は、図11の下方にあり、酸素との親和力が大きいため脱酸材として用いられることがわかる。

反応 (141) の Gibbs エネルギー変化は式 (144) のように表

される。

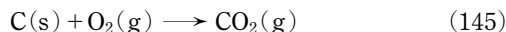
$$\Delta G^\circ = \Delta H^\circ - T\Delta S^\circ \quad (144)$$

図11の各線は、相変態のない温度範囲で、標準 Gibbs エネルギー変化は元素の種類に関わらずほぼ直線で表されていることから、反応のエントルピー変化 ΔH° 、エントロピー変化 ΔS° の温度による変化が非常に小さいことがわかる。式(144)より、図の直線の傾きは反応のエントロピー変化にマイナスの符号をつけた値になる。線の傾きはほぼ等しいことから、反応によるエントロピー変化がほぼ等しいことを示している。それぞれの線の表す反応が 1 mol の気体 O_2 が消滅する反応であり、気相のエントロピーが固相、液相のエントロピーに比べ非常に大きいため、気相のエントロピー変化が反応のエントロピー変化に大きく寄与していることを表している。

図の温度範囲で反応物が気相に変態する Ca, Mg では、沸点以上で気体として反応するために、エントロピーの減少変化量が大きくなり、線の傾きは大きくなる。

図11の左側の縦軸は温度 0 K である。式(144)より、各線と 0 K の縦軸との交点は反応のエントルピー変化 ΔH° となる。図11からわかるように、各反応の ΔH° の値は負の値となっており、反応は発熱反応である。各反応の酸化反応が発熱反応であることと一致する。

反応



では 1 mol の気体 O_2 が 1 mol の気体 CO_2 となるため、直線の傾きはほぼ 0 となる。

反応



では 1 mol の気体 O_2 が 2 mol の気体 CO となるため、エントロピーは増加し、図11では負の傾きで示される。傾きの大きさの絶対値は 1 mol の気体 O_2 が消滅する反応の線の傾きとほぼ同じである。

反応の酸素ポテンシャルは式(143)で表されるので、金属および酸化物の活量を 1 と仮定すると、標準 Gibbs エネルギー変化から各温度での反応の平衡酸素分圧 P_{O_2} を計算できる。Ellingham 図では周囲に酸素分圧の軸が書かれており、酸素分圧を図から直接、読みとることができる。

0 K での O 点(左上)は酸素ポテンシャル $\Delta G^\circ = RT \ln P_{O_2}$ が 0 であるので、O 点を通る直線上では酸素分圧 P_{O_2} が一定となる。その酸素分圧の値が、図の外側の P_{O_2} の軸として示されている。

例えば、1200℃での Si と SiO_2 の反応 $Si + O_2(g) \rightarrow SiO_2$ の平衡酸素分圧を求めるには、 $Si + O_2(g) \rightarrow SiO_2$ の線上の 1200℃の点と左側の絶対温度 0 K の軸上の O 点を結び、延長して酸素分圧の軸との交点の値を読みとればよい。図12に読み取り方を示す。酸素分圧はおおよそ 10^{-22} と読み取れる。

金属製錬では還元剤として H_2 , CO ガスが用いられ、反応は式(147), (148)で表される。

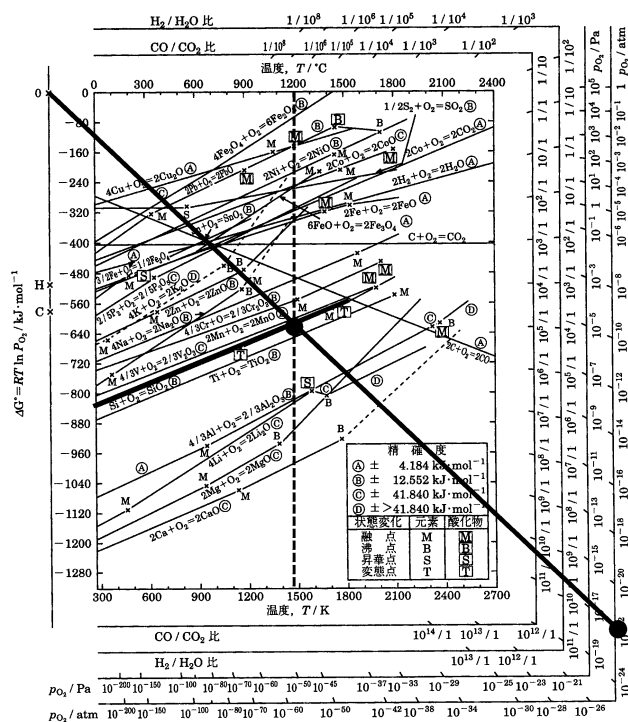
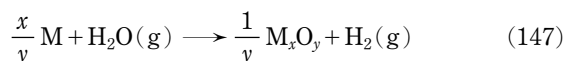


図12 酸素分圧の読み取り方法。

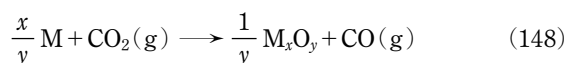
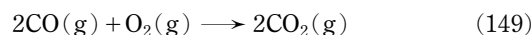


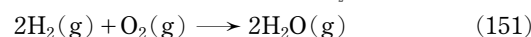
図11の Ellingham 図上では、反応が平衡になる H_2/H_2O 比, CO/CO_2 比を読み取ることができるように、 H_2/H_2O 比, CO/CO_2 比の軸も図の周りに示されている。 H_2/H_2O 比, CO/CO_2 比の読みとり方は酸素分圧の場合と同様であり、 H_2/H_2O 比を求めるには 0 K の左側の軸上の H 点と図上の反応のある温度での点を結んで、 H_2/H_2O 比の軸との交点の値を読みとればよい。

同様に、 CO/CO_2 比を求めるには、0 K の左側の軸上の C 点を起点として直線を引き、 CO/CO_2 比の軸との交点の値を読みとればよい。

H 点, C 点は



$$RT \ln P_{O_2} = \Delta G^\circ - 2 RT \ln \left(\frac{P_{CO}}{P_{CO_2}} \right) \quad (150)$$



$$RT \ln P_{O_2} = \Delta G^\circ - 2 RT \ln \left(\frac{P_{H_2}}{P_{H_2O}} \right) \quad (152)$$

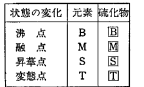
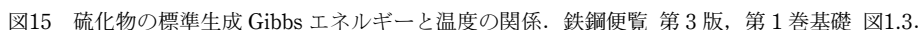
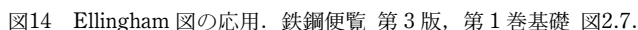
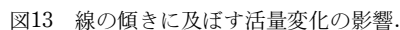
の反応の線の 0 K の左側の軸との交点である。

ただし、ここで得られた酸素分圧は、反応物および酸化物が純物質で、それらの活量が 1 という条件での値であり、合金やスラグ中の酸化物などのように、成分によりその活量が 1 より小さい場合にはその補正が必要である。

$$\Delta \mu^\circ = \Delta G^\circ = \Delta H^\circ - T\Delta S^\circ = -RT \ln \left(\frac{a_{M_xO_y}^{2/y}}{a_M^{2x/y} \cdot P_{O_2}} \right) \quad (142)$$

より

図14⁽²⁾に破線で示した Al-Al₂O₃ の平衡の線は、純 Al ではなく、溶鉄中の Al 濃度の Al と平衡するように換算した線である。純 Al の線に比べて、Al の活量が小さくなり、線の傾きが大きくなる。



熱力学データベースソフトウェアを用いれば元素と温度を指定して化学ポテンシャル状態図を容易に描くことができる。(つづく)

会誌編集委員会

会誌編集委員会委員長 佐藤 英 一*

日本金属学会誌(以下、会誌)は、本会設立の1937年に創刊された学術論文誌である。図1に、「本会の目的は一般金属に関する理論に重きを置き、学術と工業との連絡を密にし、両者の進歩発展を計るにある」(原文の旧漢字を新漢字に変換)と謳う。初代日本金属学会会長本多光太郎先生による創刊の辞の冒頭を載せる。その後1960年に欧文誌 Transactions of The Japan Institute of Metals(2000年より Materials Transactions)、1962年に日本金属学会報(1994年より まてりあ)を分離し、金属のみならず関連する幅広い分野の研究成果を対象とする和文学術論文誌として現在に至っている。また、2013年以降は、全巻が金属学会ホームページ⁽¹⁾およびJ-

STAGE⁽²⁾上で公開されている。

私は、昨年よりこの会誌の編集委員長を拝命している。そこで改めて知ったのは、会誌の発行が危機的な状況であるということ。各号4篇程度の論文掲載がやっとの状態、それを下回ると合本として隔月刊とせざるを得ないということであった。図2に、年間掲載数、年間投稿数、およびインパクトファクター(IF)の推移を示す。2005年頃には年間180篇ほど(各号15篇ほど)掲載していたが、徐々に減少し、2020年には年間52篇(各号4篇強)の掲載にまで落ち込んでいる。投稿時と掲載時の時間的ずれで投稿数が掲載数を下回っている年もあるが、平均して採択率は80%程度である。幸

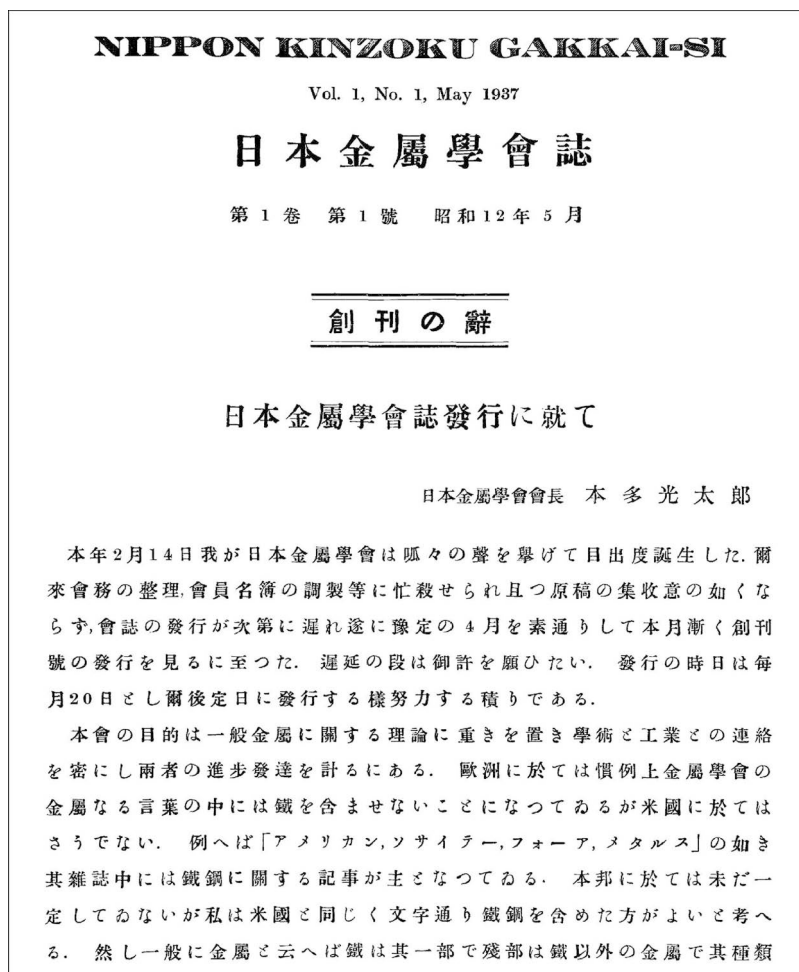


図1 日本金属学会誌, Vol. 1, No. 1(1937)1-2.

* 宇宙航空研究開発機構 宇宙科学研究所

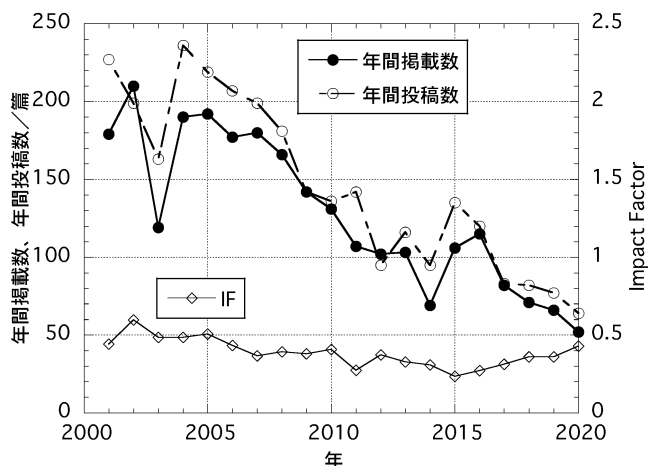


図2 日本金属学会誌における年間掲載数、年間投稿数、IFの推移。

い、IFは低いながら0.3~0.4程度を保っている。

近年とみに、大学等での研究者としての評価には一流の国際学術誌に掲載された英語論文の数が求められている中で、国内和文誌の意義を考え直してみる必要がある。そもそもは、自国の言語で科学技術を教育、研究し、成果を発表、議論する場を提供すること、ではないであろうか。物理や天文などの純粋な理学と異なり、工学の一分野である材料工学にとっては、背景にある産業を支えることは大きな命題であり、国際的アカデミアでの活動を主目的としていない企業の技術者や研究者にも、大いに活躍していただくことを期待している。そのような方々の発表の場として、また、将来アカデミアを目指す若者の前段階のトレーニングとして、会誌は

役に立てるのではないであろうか。

そのような方々のために、会誌の利点を以下のように纏めてみた。

- IFの付いた冊子体とオンラインジャーナルの2形態の雑誌
- 投稿・掲載ともに無料
- 発行後、即時に全論文フリーダウンロードが可能
- 掲載決定後2年以内であれば、Materials Transactionsへの翻訳論文投稿が可能
- 日本金属学会 新進論文賞⁽³⁾の対象

また、世知辛いことではあるが、特に以下のような応募には、学術誌掲載論文が1篇でもあると有利になる。

- 日本学生支援機構奨学金の特に優れた業績による返還免除
- 日本学術振興会特別研究員 DC1, DC2

そのような学生さんには是非、会誌を活用していただけないかと期待するところである。

現在、編集委員会では、会誌の魅力を高め、投稿数を増加させるために、学会事務局と相談しながら、検討を進めている。皆様も是非、会誌の発展にご協力をいただければ幸いである。

文 献

- (1) 日本金属学会ホームページ https://jim.or.jp/PUBS/thesis_j/j_index.html
- (2) J-Stage ホームページ <https://www.jstage.jst.go.jp/browse/jinstmet/list/-char/ja>
- (3) 日本金属学会ホームページ <https://jim.or.jp/INTRO/prize.html>

(2021年7月16日受理)[doi:10.2320/materia.60.579]

Materials Transactions のランクと インパクトファクター 向上を目指した最近の試み

欧文誌編集委員会委員長 堀 田 善 治*

1. は じ め に

「まてりあ」2021年7月号では、「Materials Transactions の審査基準とインパクトファクター向上について」と題してお知らせした⁽¹⁾。Materials Transactions(以後 MT と表記)の Journal Impact Factor™(以後 JIF と表記)は図1に示すように、2008年に1を下回って以後、0.7程度に低迷してきた⁽²⁾。このような不名誉な状態から脱却すべく、編集委員会・編集事務局では論文審査基準を見直すなど、一丸となって戦略的に JIF の向上を図ってきた。その結果、2021年6月に Clarivate Analytics 社より発表された2020年の JIF は1を上回り、2000年初めの頃の値に戻った。欧文誌編集委員長として、まずはこの回復を素直に受け入れて喜ぶたい。JIF 向上にご協力いただいた関係各位に、心よりお礼申し上げる。

しかしながら、最近の学術誌は JIF のインフレーションが大きく、大半が2を遙かに超えた状況にある。図1に、Metallurgy & Metallurgical Engineering 分野でのランクの推移についても追加した⁽²⁾。ここでのランクとは、JIF の高い順をいう。2000年初めは10位と高順位であったが、以

後、ランクは毎年低下している。2020年のランクは JIF の増加に伴って若干上昇したものの、それでも対象80誌中の50位とかなり低い。Materials Science の材料系学術誌に対象を広げると、335誌の中で282位となっている。100に規格化した場合、58/80は63位、282/335は84位に相当する。本質的に質の充実を図り、JIF とともにランクの向上を図ることが必須の課題となっている。

先の「まてりあ」7月号では、JIF の向上を目指すために、(1)ゼロ被引用論文の解消、(2) Review/Overview 論文の勧誘、(3)新規論文カテゴリ「Current Trends in Research(以後 CTR と表記)」の導入、(4)共同刊行の充実、の4項目を設けて、最近の対策をまとめた⁽¹⁾。ここでは JIF 向上を目指した対策について補足し、欧文誌編集委員会の活動をお知らせする。

2. インパクトファクターワーキンググループ(JIF-WG)の活動

欧文誌編集委員会ではインパクトファクターワーキンググループ(JIF-WG)を設けて、被引用状況の調査・追跡、特集号の勧誘・編集、Review/Overview 論文の勧誘、論文査読・審査への積極的関与など行っている。特に、被引用数の調査データに基づいて、高被引用論文に証明書(図2)を発行することを計画した。証明書は共著者を含め、全員に送るこ

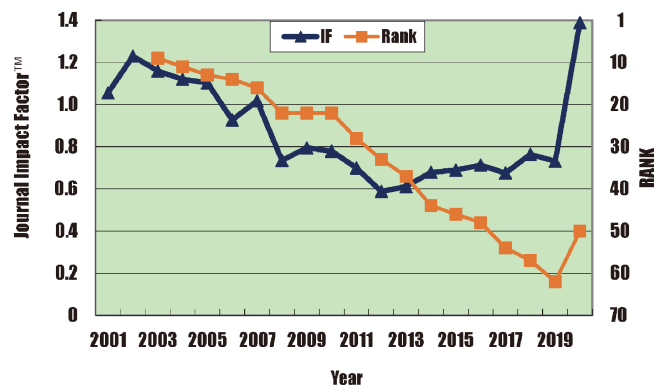


図1 Materials Transactions の2001年以降における JIF と Metallurgy & Metallurgical Engineering 分野でのランクの推移⁽²⁾。(オンラインカラー)



図2 高被引用論文に贈る証明書(案)の例。(オンラインカラー)

* 九州大学名誉教授

表 1 2020年の高被引用数上位10(TOP10)の論文一覧.

順位	被引用数	著者	国名	題目	巻	号	頁	年
1	22	Levitas, Valery I.	USA	High-Pressure Phase Transformations under Severe Plastic Deformation by Torsion in Rotational Anvils	60	7	1294-1301	2019
2	21	Mazilkin, Andrey; Straumal, Boris; Kilmametov, Askar; Straumal, Petr; Baretzky, Brigitte	Russia Germany	Phase Transformations Induced by Severe Plastic Deformation	60	8	1489-1499	2019
3	17	Wilde, Gerhard; Divinski, Sergiy	Germany	Grain Boundaries and Diffusion Phenomena in Severely Deformed Materials	60	7	1302-1315	2019
4	16	Bachmaier, Andrea; Pippan, Reinhard	Austria	High-Pressure Torsion Deformation Induced Phase Transformations and Formations: New Material Combinations and Advanced Properties	60	7	1256-1269	2019
5	15	Cizek, J.; Janecek, M.; Vlasak, T.; Smola, B.; Melikhova, O.; Islamgaliev, R. K.; Dobatkina, S. V.	Czech Republic Russia	The Development of Vacancies during Severe Plastic Deformation	60	8	1533-1542	2019
6	14	Han, Jae-Kyung; Jang, Jae-Il; Langdon, Terence G.; Kawasaki, Megumi	USA Korea UK	Bulk-State Reactions and Improving the Mechanical Properties of Metals through High-Pressure Torsion	60	7	1131-1138	2019
6	14	Edalati, Kaveh	Japan	Metallurgical Alchemy by Ultra-Severe Plastic Deformation via High-Pressure Torsion Process	60	7	1221-1229	2019
8	12	Seng, Sophea; Tabelin, Carlito Baltazar; Kojima, Motoya; Hirogoshi, Naoki; Ito, Mayumi	Japan	Galvanic Microencapsulation (GME) Using Zero-Valent Aluminum and Zero-Valent Iron to Suppress Pyrite Oxidation	60	2	277-286	2019
9	10	Renk, O.; Pippan, R.	Austria	Saturation of Grain Refinement during Severe Plastic Deformation of Single Phase Materials: Reconsiderations, Current Status and Open Questions	60	7	1270-1282	2019
10	9	Revesz, Adam; Kovacs, Zsolt	Hungary	Severe Plastic Deformation of Amorphous Alloys	60	7	1283-1293	2019
10	9	Blank, Vladimir D.; Popov, Mikhail Yu.; Kulnitskiy, Boris A.	Russia	The Effect of Severe Plastic Deformations on Phase Transitions and Structure of Solids	60	8	1500-1505	2019

とになっている。MT への貢献度の大きさを称えて贈るものである。表 1 は、2020年の JIF の向上に貢献した TOP10 の論文リストである。ちなみに、最高被引用数は 1 年間で 22 となっている。

3. Current Trends in Research (CTR)の現状

2020年に開設した CTR では、すでに 8 編の論文が掲載済み(あるいは掲載決定)状況にある⁽³⁾⁻⁽¹⁰⁾。いずれも MT での特集号掲載論文および関連論文を特集号企画担当者より紹介を受け、最近の研究状況をお知らせしたものである。また、CTR での 8 編の論文の中には、2019年に論文賞を受賞した論文 8 編⁽¹¹⁾⁻⁽¹⁸⁾の紹介記事が含まれている⁽⁷⁾。

4. Review/Overview 論文の公募

MT 共同刊行の軽金属学会では、Review/Overview 執筆者の公募を開始した。内容は、軽金属(主にアルミニウム、マグネシウム、チタン、ならびにこれらを主成分とする合金や化合物)を対象としたものになる。この公募では公益財団法人軽金属奨学会からの支援を受けて、投稿料の補助と合わせて、執筆料20万円が著者に支払われることになっている。申し込みの詳細については、下記案内を参照いただきたい。

<https://www.jilm.or.jp/page-MTRjyosei>

5. 特定論文収録集(PASDRA)の発行

MTでは独自の試みとして、特定研究テーマの下に掲載された論文を集約した「特定論文収録集(PASDRA: Papers Assembled in Specially Designated Research Area)」と称するウェブサイトを作成・公開した。最近では文献探索はインターネットを使って容易に実現できる状況にあるが、より迅速かつ正確に(洩れなく)関連論文が入手できることが望まれている。また、しばしば多くの学術論文発行社からメールが送り付けられてくるが、単発論文であることも多く、実際には関連分野のリサーチを自分で行うことが多い。このPASDRAではある一定の期間に掲載された論文をまとめ、単行本あるいは国際会議・シンポジウム議事録の形式で、著者インデックスやキーワードインデックスを付けてまとめている。下記ウェブサイトでは、筆者の研究分野よりMTに掲載された論文を収録した。このようなPASDRA企画は、動向調査を含めたグループ研究の一環として、あるいは特定プロジェクトの成果集として利用できるものと考えている。このPASDRAアドレスは、MTのホームページを通してアクセスできる状況にある。

<https://www.jim.or.jp/journal/e/special-issue/si-01/index.html>

6. 共同刊行の現状

MTでは論文投稿を共同刊行の学協会でも個別に受け付け、審査を進めてきたが、2021年4月から投稿窓口を一本化した。各学協会の特徴を活かしながら受付・審査を同一の基準とすることで、論文の形式と内容を充実させようというものである。外部から見て質や形式にばらつきがなく、統一感を与えて引き締まった印象にできると信じている。この窓口一本化は、共同刊行学協会全編集委員会および会員のご理解とともに、幹事の日本金属学会編集事務局と共同刊行学協会編集事務局の多大な尽力の下に為し得たものである。現在なお微調整が続いているが、結束を強めて、JIFやランクに関わる厳しい現状を乗り越えることができると切に願っている。

7. おわりに

MTは金属学会をはじめ、14学協会が承認した論文を発

表する公式機関誌である。編集は学協会より委嘱を受けた編集委員が担当し、査読者は専門性と信頼を基に選任され、厳格に査読が行われる。最近新たな商業的ジャーナルが増えてきているが、しばしば容易に掲載できる場合がある。いわゆるハゲタカジャーナル(捕食学術誌)と呼ばれている類である。MTはこのような新興ジャーナルとは異なり、1960年に創刊された歴史ある学術誌であり、論文の内容は学術的に保証されたものである。業績評価に当たってJIFの高い学術誌に公表されることは必然的に望まれるところであるが、一方では学術的な信頼性があるという評価となる。業績評価では、JIFも含めてどのような学術誌に投稿したかが問われることがある。一旦ハゲタカジャーナルで公表すると、その後のキャリアに致命的な影響を及ぼすことも懸念される。これに対して、MTは創刊以来60年以上の歴史を誇る我が国発の材料系学術誌との信頼を得ており、その矜持を失うことなく継続できることを切に望みたい。

文 献

- (1) 堀田善治: まてりあ, **60**(2021), 431-434.
- (2) <https://jcr.clarivate.com/> (閲覧日: 2021年7月5日)
- (3) Z. Horita and K. Edalati: Mater. Trans., **61**(2020), 2241-2247.
- (4) T. Yamamoto, M. Yoshiya and H. N. Nhat: Mater. Trans., **61**(2020), 2435-2441.
- (5) T. Ohmura: Mater. Trans., **62**(2021), 563-569.
- (6) R. Suzuki, S. Natsui and T. Kikuchi: Mater. Trans., **62**(2021), 905-913.
- (7) Z. Horita: Mater. Trans., **62**(2021), 1046-1051.
- (8) T. Kobayashi and T. Ando: Mater. Trans., **62**(2021), 1270-1276.
- (9) M. Ishimaru: Mater. Trans., **62**(2021), 1420-1423.
- (10) Z. Akase, M. Higo, K. Shimada, T. Sato, H. Magara, D. Shindo and N. Ohno: Mater. Trans., **62**(2021), in press.
- (11) F. Briffod, T. Shiraiwa and M. Enoki: Mater. Trans., **60**(2019), 199-206.
- (12) A. Takeuchi, T. Wada and H. Kato: Mater. Trans., **60**(2019), 1666-1673.
- (13) A. Takeuchi, T. Wada and H. Kato: Mater. Trans., **60**(2019), 2267-2276.
- (14) Y. Shimauchi, S. Ikemoto, S. Ohmori and T. Itoi: Mater. Trans., **60**(2019), 2328-2335.
- (15) T. Ube, A. Kawamoto and T. Ishiguro: Mater. Trans., **60**(2019), 525-530.
- (16) K. Wu, F. Briffod, K. Ito, I. Shinozaki, P. Chivavibul and M. Enoki: Mater. Trans., **60**(2019), 2151-2159.
- (17) T. Hara, T. Ishida and K. Oikawa: Mater. Trans., **61**(2020), 632-640.
- (18) M. Uenohara, Z. Hanlin, H. Nishio and K. Machida: Mater. Trans., **61**(2020), 782-786.
(2021年7月12日受理)[doi:10.2320/materia.60.581]

講演大会委員会

講演大会委員会委員長 御手洗 容 子*

講演大会委員会では、金属学会の主要活動の1つである講演大会の企画や講演大会申込数・聴講者数の動向の検証により、会員にとって魅力ある講演大会を目指している。2016年までは分科会と呼ばれる組織の中で、講演大会については「講演会・講習会事業」として、研究会など学会活動の活性化につながる活動については「調査・研究事業」として議論してきた。2009年に、「講演会・講習会事業」は各分科の幹事以上で構成される「講演大会企画委員会」と委員全員で構成される「講演大会委員会」に分かれ、「調査・研究事業」も同様に、各分科の幹事以上で構成される「分科会企画委員会」と委員全員で構成される「分科会委員会」に分かれた。「分科会企画委員会」と「分科会委員会」は、2018年にさらに「調査研究推進委員会」と「調査研究委員会」と名前を変え、現在に至っている。

講演大会の中で重要なものが、講演のセッション構成につながる専門分野である。2017年度まで、金属学会の中で「分科」という言葉を使って分類されていた。これまで何度か大きな改革が行われてきたが、私の記憶にある改革は44代花田修治委員長(東北大)及び45代村上正紀委員長(京都市大)の下で検討され、2001年春期大会から適用された。それ以前は、金属材料における基礎的な現象を元に分類され、第Ⅰ総合分科：物性、第Ⅱ総合分科：組織、第Ⅲ総合分科：力学特性、第Ⅳ総合分科：材料科学、第Ⅴ分科：材料プロセッシング、第Ⅵ総合分科：工業材料、第Ⅶ総合分科：教育・環境・新領域、となっていた。これが2001年には、イノベーションを意識し、出口志向の分類に大きく変更され、第1分科：エネルギー材料、第2分科：エコマテリアル、第3分科：電子・情報材料、第4分科：生体・福祉材料、第5分科：社会基盤材料、第0分科：教育・環境・新領域、となった。この分類をさらに応用・萌芽領域と基礎物性・プロセス領域に分け、基礎物性・プロセスの中にそれまでの分科のキーワードとなっていた学術的な現象に関するキーワードが並べられた。2013年には57代西田稔(九大)委員長により、革新的な材料の開発に不可欠な学理・現象・プロセッシング別のセッションの充実を図るとともに、材料別セッションとのバランスを現状よりも配慮して、分科の分類はそのままに、セッションの再構築のみを行った。特に、企業研究者・技術者の要望に応じるため、材料別セッションとそれらを横断する学理・現象・プロセッシング別のセッションに分類して再構築する方針に基づき、再びセッション改編が行わ

れた。

しかし、金属・材料の基礎を横断的に議論するという本会の特徴であり重要な役割を果たしにくくなっていったため、本会の本来の特徴である基礎・プロセス・材料に共通する研究議論の場を復活させるべく、2016年から2019年にかけて59代 杉本論(東北大)委員長により再び再編が行われた。分科を分野と呼び替え、9つの大分類に分け、その中に中分類、セッションキーワード、さらに詳細なキーワードを設置した。立場の異なる研究者・技術者にとっても魅力があり、討論の活発化を目指して、第1分野：材料と社会、第2分野：物性と電気・磁気関連材料、第3分野：組織・計算科学、第4分野：力学特性、第5分野：材料化学、第6分野：材料プロセッシング、第7分野：生体・医療・福祉、第8分野：構造材料、第9分野：エネルギー関連材料と分類し、現在に至っている。

講演大会のプログラム編成は講演大会企画委員会で行われ、以前は会議室に集まり、講演タイトル、発表者、講演概要が書かれた紙を見ながらセッションごとに講演タイトルの紙を貼り付け、座長を決定していった。最後に、座長の重複が無いか、講演申し込み数とプログラムの講演数が合うかを確認し、合わない講演数が合うまでミスを探す。これらの作業はほぼ1日かけて行っていたが、事務局の工夫によりだんだん短時間で行えるようになっていった。2016年からはWebを使ったプログラム編成となり、空いている時間に効率良くプログラム編成ができるようになったものの、各分野の委員が集まって議論しながらプログラムを編成する楽しみがなくなってしまったのは少々残念である。

最近の講演大会では、会員にとってより魅力的な大会とするために、分野間で協力したセッション企画や、テーマを最先端のホットな話題に焦点を当てた公開シンポジウム、企画シンポジウムなどの企画が多数行われている。また、杉本委員長の下で開始した自動車技術会との合同セッションや、韓国金属学会との国際セッション、アメリカ TMS との間で行われる Young Leader 派遣など、他機関との連携企画も盛り沢山である。

講演大会での講演数は、秋期大会では1000件を超えていたのが(図1)、会員数の減少とともに、2014年辺りから1000件を切るような状態が続いていた。しかし、上記に示すような委員会の努力により、2017年には再び1000件を超える講演数になっている。春期大会は2010年以前の講演数が1000件を超えていたのに対し、2012年(2011年は中止)以降は700-800件で推移している。聴講者数については、秋期

* 東京大学大学院新領域創成科学研究科

開催地	年	回	講演数	参加数	一般	学生
広島	1988	102	781	1,646		
		103	1,043	2,012		
	1989	104	852	1,813		
		105	1,088	1,568		
	1990	106	881	1,682		
		107	1,081	1,857		
	1991	108	920	1,801		
		109	1,158	1,584		
	1992	110	895	1,787		
		111	1,308	1,898		
	1993	112	1,008	1,778		
		113	1,256	1,898		
	1994	114	1,048	1,732		
		115	1,281	1,735		
	1995	116	1,093	1,774		
		117	1,296	1,433		
新潟	1996	118	991	1,616		
		119	1,259	1,644		
	1997	120	996	1,708		
		121	1,248	1,727		
	1998	122	1,069	1,794		
		123	1,327	1,798		
	1999	124	1,155	1,786		
		125	1,461	1,953		
	2000	126	1,160	1,798	1,210	549
		127	1,343	1,875	1,158	717
	2001	128	1,195	1,794	1,172	622
		129	1,383	1,797	1,102	695
	2002	130	1,256	1,882	1,242	640
		131	1,409	1,937	1,278	659
	2003	132	1,127	1,884	1,371	513
熊本		133	1,577	1,986	1,266	720
	2004	134	1,244	1,913	1,315	598
		135	1,443	1,912	1,214	698
	2005	136	1,146	1,809	1,258	551
		137	1,354	1,873	1,243	630
	2006	138	1,211	1,783	1,228	555
		139	1,212	1,743	1,005	667
	2007	140	1,244	1,881	1,248	559
		141	1,174	1,856	1,111	661
	2008	142	1,058	1,725	1,125	518
		143	1,233	1,738	998	662
	2009	144	1,086	1,704	1,125	479
		145	1,322	1,927	1,180	747
	2010	146	1,037	1,640	1,292	146
		147	1,277	1,746	1,034	712
札幌	2011	148	951	0	0	0
		149	1,497	1,890	1,037	853
	2012	150	763	1,350	888	391
		151	1,055	1,519	777	666
	2013	152	832	1,391	923	396
		153	1,016	1,511	803	626
	2014	154	825	1,425	923	373
		155	960	1,496	811	587
	2015	156	721	1,322	834	397
		157	915	1,375	716	561
	2016	158	755	1,390	854	441
		159	926	1,470	773	597
	2017	160	689	1,240	864	394
		161	1,139	1,616	950	668
	2018	162	735	1,286	859	387
仙台		163	1,037	1,655	1,045	610
	2019	164	680	1,273	900	373
		165	1,048	1,706	1,081	625

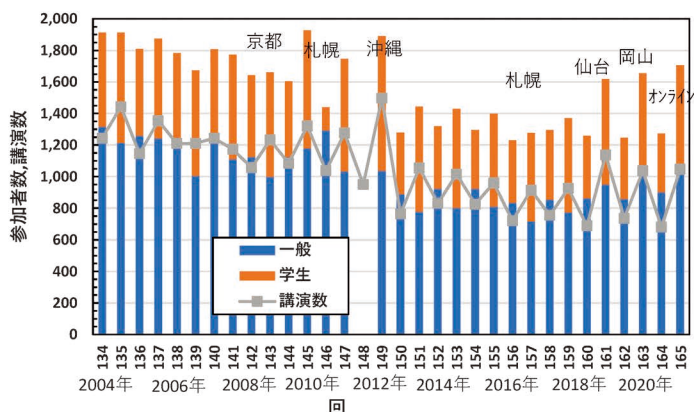
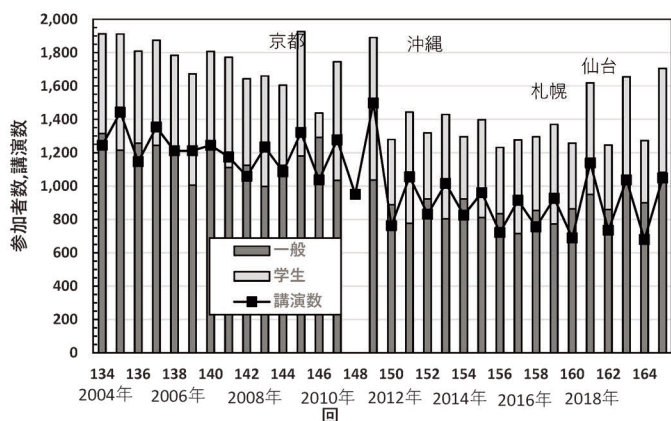


図1 参加者数、講演数の推移。(オンラインカラー)

大会で1500人程度，春期大会で1300人程度を推移している．秋期大会は北海道，東北，関東，東海，北陸信越，関西，中国四国，九州の各地区を順番に回って開催しており，開催地によっても聴講者数は変化する．1995年12月12日～15日にはハワイ・ホノルルのヒルトン・ハワイアン・ビレッジで講演大会を開催したときには，講演数1,296件，参加者数1,433名であった．2011年の春期大会は，東日本大震災のため中止となった．このような事態は，本学会史の中で初めてであった．学会事務局がある仙台的被害が甚大であり，学会活動が心配されたが，事務局の努力により徐々に事務局

の機能は回復していった．また，この年の秋期大会の担当は東北大であり，東北大も甚大な被害を被っていたが，偶然にも，新しい試みとして，従来担当大学で開催していた講演大会を国際会議場を利用する方式として企画していたため，2011年の秋期大会は台風を避けた11月に沖縄で開催された（図2）．講演数は1497件，聴講者数は1890人と，過去最多講演数1576件（2003年・北大），過去最大聴講者数2012名（1988年・阪大）に匹敵するものであった．2013年の金沢での講演大会では，台風が直撃し，航空機，鉄道が運行停止となり，大会前日に開催される講演大会委員会にほとんどの委

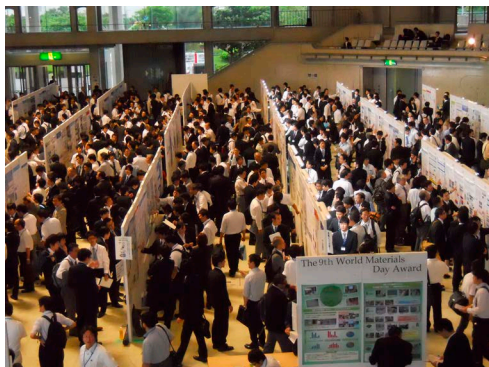


図2 2011年沖縄大会でのポスター発表。(オンラインカラー)



図3 第1回(2005年)託児室 学内をお散歩中(広島大学にて)。(オンラインカラー)

員が出席できない事態となった。多くの参加者が、台風の移動とともに動き始めた鉄道を乗り継いで、大会前日の夜中の到着となった。この時に、災害時における大会運営の判断や会員への連絡法について検討が行われた。2016年の大阪開催時にも台風に見舞われるなど、講演大会が気候に影響を受けることが多くなってきた。2020年にはコロナ禍の影響で、本学会史上初めて感染症による大会の開催中止という判断を行った。私自身が2019年度に講演大会委員会の副委員長、2020年度から委員長であったため、講演大会に与える感染症の影響の大きさを目の当たりにした。正直なところ、2020年1月頃には、感染症で大会が開催できなくなる事態に追い込まれるなど想像もしていなかった。2020年秋期大会はオンラインでの開催となったが、これについても、当初は開催できるとは全く想像できず、他学会でそのような話が上がっているのを半信半疑で聞いていた。初めてのオンライン開催ということで講演件数は718件と減少したが、聴講者は1369名で、これ以前の秋期学会よりも若干減少した程度であった。実際に開催してみると、講演スライドがよく見えて、講演がクリアに聞こえること、異なるセッションの移動が楽であること、人気ある講演で聴講者数が多くても、オフィスから座って聴講できることなど、メリットが多いことが分かった。高校生によるポスターセッションも、それ以前の参加者は開催地付近の高校生に限られていたが、オンライン化に伴い地理的制約が解消されたことにより発表件数が増え、高校生にとってもメリットがあることが示唆された。講演大会アンケートでも、大会参加者はオンライン開催に概ね満足したという結果になった。一方で、学会の醍醐味である人との交流ができない点に不満を抱く参加者も多かった。2021年春期大会では、オンラインでの交流会も試みた。参加人数は多くはなく、うまく話ができずに退出した会員も多かったが、参加者はそれなりに交流ができたと思う。この原稿を書いている2021年7月現在、コロナ禍が始まった当初は予想していなかったが、未だコロナ禍が続く状況下で東京

オリンピック開催を迎えようとしている。感染者数が十分に減少しない中、ワクチン接種が始まったことによる感染拡大鎮静化への期待感もあるが、残念ながら9月の講演大会は再びオンラインでの開催となった。7月時点で鉄鋼協会は対面開催を目指しており、日本金属学会とは開催日も開催形式も異なる別開催となった。これまでも、日本金属学会の記念行事としてハワイや沖縄で開催されるときは鉄鋼協会と別であったし、また春期大会においても会場の関係で別開催になったことはあるが、今回は感染症に対する対応の違いでの別開催となった。当学会の個々の講演大会を振り返っても、それぞれの時代の世相の影響を様々に受けてきたことが見て取れる。

個人的な話になるが、私が旧分科会に関わったのは2005年頃と記憶している。当時の第0分科「教育・環境・新領域」に参加し、材料が社会に与える影響についての企画を行った。2011年には東日本大震災による福島原子力発電所事故を受け、放射性物質やその取り扱いに関するシンポジウムを開催した。また、材料教育に関するシンポジウムや、材料リサイクルなどの環境問題に関するシンポジウムも開催した。学会における男女共同参画活動の重要性についても議論され、男女共同参画委員会が設置された。男女共同参画のセッション企画やシンポジウムを行い、2009年からは、講演大会の昼休みに昼食をとりながら、金属分野出身者のキャリアの積み方や子育ての話などを聴くランチョンミーティングを行っている。2011年からは、女性会員のネットワークを作るために、大会期間中に女性会員のつどいの会を開催している。また、2005年に講演大会中の託児室が初めて設置され、広島まで子供を連れて行って大会に参加したことは、個人的に印象に残っている(図3)。

最後に、この記事を書くに当たり、事務局の皆様、退職された斎藤智士氏から情報をいただいたことに感謝いたします。

(2021年7月12日受理)[doi:10.2320/materia.60.584]

セミナー・シンポジウム委員会

セミナー・シンポジウム委員会委員長 大村孝仁* 前委員長 小山敏幸**

セミナー・シンポジウム委員会は、「講演会・講習会事業」において講演大会と並ぶ活動に位置付けられ、専門知識の普及や啓発、教育を目的として、講習会、セミナー・シンポジウムを企画・運営する活動を行っている。2013年3月1日に日本金属学会が社団法人から公益社団法人へ移行した際の事業組織の見直しにおいて、セミナー・シンポジウム委員会は、それ以前における講演大会委員会の下部組織の位置付けから、独立して活動を行う委員会に格上げされた。これに伴って、2015年9月15日には、シンポジウムの名称が「分科会シンポジウム」から「金属学会シンポジウム」に変更された。これは、「分科会」が調査研究委員会の下部組織であるため、本会事業における整合性に基づく修正である。さらに、2019年4月1日の講演大会セッション改編および分野(分科)改編に伴い、セミナー・シンポジウム委員会の委員構成も新分野に合わせて刷新された。講演大会委員会からは独立しつつも、伝統を重んじつつ、各分野との連携維持・強化を図ったものである。

次に、活動内容については、2018年2月2日に制定された「日本金属学会10年後の目標・アクションプラン」において、講習会・セミナー・シンポジウム事業では、主に以下の3点の内容を推進することとした。

1. 最新の研究や技術を学べ、次世代を担う人材の教育と育成に貢献する魅力ある講習会を目指す
 2. 特別講座のメニュー拡大・全国での複数開催
 3. 分科の活性と横断の促進・全国での開催
1. においては、セミナー・シンポジウム活動をさらに活性化して学会活動の柱の一つに強化するため、講習会などを定期的に開催することや、各支部との共催、フェロー制度を活用した講師の充実化、会報「まてりあ」編集委員会との連携によるミニ特集・連載講座の開催案内の掲載などを進めている。2. においては、支部との連携強化、金属学会セミナー(特別講座)のメニュー拡大(10年で10件以上に)を進めるとともに、デジタルコンテンツの充実化、講演大会との連携(前後開催など)、Webinar 配信と映像コンテンツの活用を進めている。3. においては、分科との連携強化、基盤分野のシンポジウムの充実化、若手研究グループ制度の活用のほか、2. で掲げたデジタルコンテンツの充実化なども推進中

である。これらデジタル化の方向性をコロナ禍以前からすでに念頭に置いて進めている点は、特筆すべきであろう。昨年来の予期せぬ急速なオンライン化の流れに対して、今後、柔軟に対応しつつ、セミナー・シンポジウムの視点から学会活動のさらなる充実化を図ることが急務である。また、講習会などを契機に講師や受講者の会員登録を促進し、会員数増加へ貢献することも重要なミッションである。

これらのアクションプランに先行して、2017年7月7日には、当委員会の中心活動である金属学会セミナーを充実化させるため、新カテゴリー「特別講座」を追加した。従来、金属学会セミナーの趣旨は、「研究者・技術者に対する啓発あるいは教育・育成活動の一環であり、専門家同士の研究発表・討論の場であるシンポジウムとは異なる。セミナーにおいては、各分野の専門家が定説的・基礎的な理論・原理あるいは実験解析方法などを応用面への展開を考慮しつつ、新たに学ぼうとする研究者・技術者に解説し、その知識向上に資するという機能を重視する。」と規定されている。すなわち、教育を軸足とした基礎的な勉強会を内容とする旨が定められている。これに対して、昨今、材料科学・工学の学問分野が高度化・細分化・多様化する傾向にあって、基盤内容も厚みを増す一方であるため、これに対応するための方策として、従来型のセミナーに加え、金属学会セミナーの中でも特に基礎・基盤的な教育効果に重点を置いたセミナーとして、「特別講座」を新設した(表1)。

最後に、当委員会における近々の課題は、「オンライン・デジタル化」のさらなる推進である。急激なオンライン化の流れに対して、むしろその利点を最大限に活用し、内容の充実に加え、参加・登録料を柔軟に設定するなどの方策により、参加者数の拡大を目指す。また、オンライン開催によって全国(全世界)どこからでも参加可能となったことから、支部開催のシンポジウムとの相互乗り入れも視野に入れて、双方の活性化を図る。これらを推進するためにはセミナーテキストや講演映像のデジタルコンテンツ化が必須であるが、一方で著作権保護への対応も大きな課題となる。これらについても、講演大会委員会とも連携を密にして、最適化を進める方針である(図1)。

(2021年6月28日受理)[doi:10.2320/materia.60.587]

* 物質・材料研究機構 ** 名古屋大学大学院工学研究科

表1 2000年からのセミナー開催テーマ.

セ ミ ナ ー テ ー マ	開催日
〔特別講座〕 転位を知る—金属・合金における強度・延性の担い手—	2019年1月29, 30日
高温酸化腐食の基礎—熱力学・動力学を中心とした腐食の理解—	2019年1月22日
材料の力学特性向上を目指して—最近の実験・計算手法の進展に基づく本質的な理解—	2018年3月6日
状態図および相変態の基礎と応用—計算工学の観点から—	2018年1月15日
〔特別講座〕 状態図・相変態の基盤と実践的ノウハウ—CALPHAD法とフェーズフィールド法を使いこなすために—	2017年12月13, 14日
半導体における点欠陥と拡散—基礎と最先端デバイス	2015年11月12日
材料における拡散—基礎および鉄鋼材料における拡散と関連現象	2014年10月24日
次世代永久磁石材料をめざして—磁石材料の微細構造と保磁力—	2014年12月26日
構造材料の元素戦略	2013年1月23日
材料科学的アプローチによる太陽電池研究の最前線	2012年10月12日
「高温過酷環境を制する耐食材料/コーティングのさらなる挑戦」—最近の耐食性理論と長寿命材料の開発・実用化—	2012年3月15日
バルクナノメタル 構造用金属材料の新たな可能性	2009年7月24日
機能元素のナノ材料科学	2009年7月24日
ナノ構造制御した触媒・光触媒の設計・評価・応用	2009年1月20日
金属材料と人間との共生—金属材料の色彩と質感の科学と工学—	2007年4月17日
水素貯蔵の材料科学—基盤・応用両面での研究展開—	2006年3月30日
原子炉材料の照射損傷—高経年化への対応—	2006年11月10日
非シリコン半導体の現状と展望	2006年3月29日
環境/エネルギー関連機器用高温耐食材料の保護皮膜の生成と破壊—高温腐食メカニズムの解明と寿命予測技術はどこまで進歩したのか—	2006年2月2日
マグネシウム合金の製造と加工技術の最先端	2005年3月28日
チタン合金の研究・開発の最前線	2004年8月23日
最先端スピントロニクス技術の基礎と応用	2004年6月25日
材料強化設計の基礎と応用	2004年3月29日
自動車の電動化の進展と望まれる材料特性	2003年3月20日
循環型社会における環境・リサイクル技術	2002年11月22日
凝固および結晶成長—理論・シミュレーションと応用	2002年11月15日
先端材料における拡散—基礎と応用	2002年5月31日
材料破壊の基礎から応用—信頼性の高い材料の開発・利用にむけて	2001年10月23日
パソコンで学ぶ材料工学	2001年11月22日
エネルギー・環境保全機器材料の高温腐食および防食の基礎と実際	2001年10月23日
2次電池の高性能化の材料科学	2001年6月20日
鉛フリーはんだ実装の基礎と技術	2001年3月16日
抗菌剤および抗菌機能化金属材料をめぐる現状と将来	2000年7月17日
材料の環境負荷をいかに減らすか	2000年1月21日



図1 歴代のセミナーテキストが事務局に保管されている。(オンラインカラー)

日本金属学会人材育成事業 概要

人材育成委員会委員長 小林 千 悟*

日本金属学会では、2012年から人材育成委員会を設置して、次世代を担う人材を育成することを目的とした各種人材育成事業を企画・実施している。人材育成委員会は8名で構成されており、他の委員会とも協力して、以下に説明する①～⑤の事業を実施している。

①出張講義：企業の人材育成に資するため、企業に本会会員を派遣し、企業ニーズに合致した内容のきめの細かい講義を実施している。これまでに実施した講義の内容は、鉄鋼材料組織制御、鉄鋼材料強度学、鉄鋼物理化学、高炉シミュレーション、鉄鋼における相変態・析出の基礎、合金の状態図と熱力学、凝固金属の基礎である。今後、金属およびその関連分野における学術・科学技術・産業、教育・人材育成等に造詣の深い会員であるフェローによる出前講義を増やす予定である。なお、フェローとは2019年に日本金属学会に新設されたポストであり、出張講義はフェローが担うこととされる人材育成活動の一つである。

②セミナー・講習会：金属学の基礎を教授する「特別セミナー」を開催(セミナー・シンポジウム委員会)しており、若手研究者・技術者の育成に努めている。そして、各支部における講習会を積極的に支援して、各支部地域の材料学分野の発展に寄与している。

③企業説明会：大学生(大学院生)と企業とのマッチングを支援し、材料分野に携わる人材を増やすことを目的として、春期講演大会時に講演大会参加学生および開催校の学生ならびに鉄鋼協会学生会員を対象とした企業説明会(図1)を開催している。2015年春期講演大会の講演大会前日に実施した第1回では、参加企業35社、参加学生111名であった。講演大会前日に実施した場合、学生にとっては自分の講演や聴きたい講演と時間が重ならないというメリットがあるが、講演発表前の準備等で参加が難しくなるデメリットがあった。一方、参加企業にとっては、有望と思う学生の講演を聴きに行くことができるメリットが挙げられる反面、参加する学生が限られるというデメリットがあった。講演大会前日に開催するスタイルで2017年春まで実施し、2018年春からは講演大会最終日に実施するスタイルに変更となった。講演大会最終日に開催する場合、多くの学生が講演を終えており、落ち着いて企業説明会に参加できるメリットがあるが、一部の学生は講演と重なってしまうデメリットも生じた。また、遠方からの学生は説明会に最後まで参加出来ないこともあった。企業側には、ブースでの説明時間が長くとれ、訪問学生数が増える

メリットが挙げられたが、有望学生の発表を聴くことができないデメリットもあった。アンケート調査結果から、講演大会最終日に実施した方が参加者の満足度が高い結果となったため、2019年春も講演大会最終日での実施となった。2015～2019年の実績として、参加企業数は毎回40社前後であり、一方、参加学生数は約80～160名であった。また、学生が企業をより深く知るために立食の交流会(図2)を説明会に続いて開催し、企業と学生との交流を促進している。なお、2020年春は、新型コロナウイルス感染拡大の影響による講演大会中止に伴い、企業説明会も中止となった。

④小中高生への啓発活動：小中高生らに金属材料への興味を抱いてもらうために、アウトリーチ活動を積極的に進めている。高校生に対しては、「高校生・高専(3年生以下)学生ボスター発表」のセッションを2018年秋期講演大会から設けられている。第1回(2018年秋)では7件の発表があり、第2回(2018年秋)では12件、第3回(2020年春：中止)12件、第4



図1 企業説明会ブースの様子。(オンラインカラー)



図2 交流会の様子。(オンラインカラー)

* 愛媛大学大学院理工学研究科物質生命工学専攻



図3 なるほど、金属！みんな、集まれ。（オンラインカラー）

回(2020年秋：オンライン)9件，そして第5回(2021年春：オンライン)24件と，順調に発表件数が増加している．発表テーマは必ずしも材料に限定せず，いわゆるフリーテーマとして，高校生・高専生が参加しやすいように配慮している．各支部の研究会等においても高校生がポスター発表できる機会を設けており，ポスター発表の機会を通じて高校生・高専生が日本金属学会の活動を知ることができるようにしている．また，高校生向けホームページを作成し，金属の先端分野への応用例，金属製品の製造工程，金属の性質等の基礎知識等をわかりやすく解説するとともに，金属に携わる学生，研究者，社員等のインタビューもホームページに掲載し，公開している．本会のホームページ「なるほど，金属！みんな，集まれ！（<http://jim.or.jp/everyone/>）」(図3)を参照さ

りたい．

⑤理数探究教材の作成：高等学校において2022年から第1学年に入学した生徒から年次進行により段階的に「理数探究」科目が導入される．材料の面白さを高校生に理解してもらい，材料研究を目指す高校生を増やすことを目的に，「理数探究」科目において利用可能な，材料に関する実験事例や解説等を掲載した教材を学術図書刊行委員会と共同で作成する予定となっている．

上記①～⑤の事業活動の他，時代の変化に応じた人材の育成を今後も各種委員会と協力して企画・実施し，材料分野で活躍する人材の輩出に貢献していく．

(2021年7月29日受理)[doi:10.2320/materia.60.589]

広報委員会

広報委員会委員長 柴田直哉*

意外に聞こえるかも知れないが、広報委員会は本年度から発足したばかりの新米委員会である。よって本稿では、その前段となった広報推進WG(ワーキンググループ)(2020年発足)の活動内容を紹介したい。

広報推進WGは、会員数の漸次減少、年齢比率の高齢化、産学連携の停滞、国際プレゼンスの低迷などの危機感をベースとして、前会長である高梨弘毅先生の御発案により発足した。本WGでは、本学会の意義と活動内容を国内外にしっかりと発信し、科学界における金属・材料分野のプレゼンス向上と学会員の増員を目的としている。昨年度から活動をスタートし、本年度からは広報委員会に活動を継承している。WG委員長は東京大学の柴田が拝命し、委員には学術界および産業界から気鋭の若手研究者を結集し、本学会の20年後に対して責任を負う世代(40歳代中心)による運営を企図した。

本WGでは、まず本学会の過去・現在・未来を俯瞰し、広報活動における重要な観点を洗い出すべく、委員同士による複数回の議論と全会員へのアンケート調査を実施した。アンケート結果に関しては2021年7月号のまてりあに詳細に纏めているので、そちらを参照されたい⁽¹⁾。その結果、以下の4つのサブテーマ(①コーポレート・アイデンティティの作成と普及、②情報発信、③広報刊行物、④アウトリーチ活動)を立ち上げ、それらを有機的に且つ同時並行で推進している。①に関しては、これまで本学会には公式のロゴマークが存在していないことから、この機に公募コンペを行い、多くの学会員に御支持頂けるロゴマークの制定を目指している。また、学会キャッチフレーズに関しても鋭意検討中である。②では、ホームページの見直しやSNS、動画などを活用した情報発信の拡充を目指した活動を進めており、特にホームページの全面改訂を一大目標と定めている。③では、本学会の意義と活動を広く社会・産業界に発信するための媒体として、公式パンフレットの作成を進めている。④では、コロナ禍の中、小中高、企業などへ向けてどのようにアウトリーチを行っていくのかに関して議論を深め、オンラインを活用したチュートリアルや動画配信などの可能性を検討している。

表1 広報委員会メンバー

委員長	柴田直哉(東京大学)
副委員長	宮本吾郎(東北大学)
委員	安東知洋(大同特殊鋼)
	植田圭治(JFE スチール)
	好田 誠(東北大学)
	関谷茂樹(古河電気工業)
	高橋有紀子(物質・材料研究機構)
	中村篤智(大阪大学)
	平田秋彦(早稲田大学)
	松田光弘(熊本大学)

最近では委員の息もピッタリと合い、手前味噌ながら、本年度中に多くの成果が期待できる状況にあると考えている(表1)。本WGのモットーは、全員が忌憚無くどんどん発言し、大いに議論して自身の認識を深める、ということにある。これはメンバー構成を40歳代中心とした際に意図したことであるが、オンライン会議にもかかわらず毎回活発な議論が行われ、実働も積極的に進んでおり、大変頼もしく感じている。また、本WGを通じて委員全員が学会への愛着を再認識し、且つ将来への危機感を共有できたことが、現在の高いアクティビティのベースとなっていると考えられる。その意味で、広報を考える重要性を一早く提唱され、本WGおよび広報委員会の発足にご尽力された高梨前会長の慧眼に敬服するばかりである。また、山村英明事務局長の巧みなハンドリングにもこの場をお借りして感謝申し上げたい。広報委員会の成果についてはもう少しお時間を頂くことになるが、委員一同、学会員の皆様のご期待に沿えるよう、精進して参る所存である。

文 献

- (1) 柴田直哉：まてりあ，60(2021)，435-440。
(2021年7月12日受理)[doi:10.2320/materia.60.591]

* 東京大学大学院工学系研究科総合研究機構



“材料工学入門 正しい材料選択のために”

M. F. Ashby・D. R. H. Jones(著)
堀内 良, 金子純一, 大塚正久(共訳)
内田老鶴圃 1985年

横浜国立大学大学院工学研究院 長谷川 誠

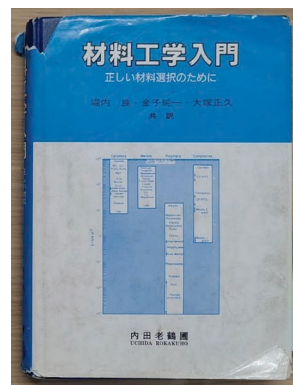


図1 手元にある教科書です。購入してから30年ほど経っていますが、表紙に破れがある程度でまだまだ使えています。1999年に増訂版が出ています。原著【英語版】ではFifth editionまで出ていて、全33章で構成されているようです。

この教科書を始めて手に取ったのは大学1年生の春、授業の教科書として指定され、大学生協の売店で購入した時だと思います(図1)。当時、進学した先の学科は、生産工学科と言う名称であり、機械工学科と金属工学科が合体してできた学科でした。現在は、改組により機械・材料・海洋系学科と名称が変わり、1年次からそれぞれの分野の教育プログラムにて教育を受けられるようになっていますが、当時は3年次になってから機械系か材料系のコースに分かれるカリキュラムになっていました。受講した講義は、機械系へも材料系へも進む可能性のある学生が1年春学期にて履修する専門科目として設定されており、そのためか、講義は材料の力学的性質に着目し、そこからその性質の発現原理を説明していくような流れだったように思います。

本書は全27章で構成されており、さらに上位のAからGの項目に関連して章が配置されています。まずは、材料の分類や材料の性質、価格や入手性に基づいた材料の選定方法が「工業材料とその性質」(AからGに先立つ序論に相当)や「A. 価格と入手しやすさ」に書かれています。その後、材料の力学的性質である「B. 弾性率」、「C. 降伏強さ、引張強さ、硬さおよび延性」、「D. 急速破壊、靱性および疲労」、「E. クリープ変形と破壊」、および環境特性である「F. 酸化と腐食」、「G. 摩擦と摩耗」についての記述があり、最後に総括に相当すると言える「総合的なケーススタディ」があるという構成です。

本書の特徴は、おおむね項目毎に力学的性質や環境特性などの材料の特性に着目した説明から始まり、その特性の定義を示すとともに、その特性が発現する原理や付随する事象を説明していることです。そして、最後にその特性が支配因子となるときにケーススタディの話になります。例えば、「B. 弾性率」の項目では、はじめに、弾性率が材料の弾性的な変

形に対する抵抗の尺度であることから説明され、その後、応力やひずみの定義やフックの法則の説明を経て、ヤング率や剛性率が定義されます。そこから、弾性率(ヤング率)という特性を理解するには、材料の原子レベルでの理解が必要とのことで、2原子間のポテンシャルエネルギーからの原子間力や結合の強さ、原子の充填状態を示す結晶構造やミラー指数、方向指数などの結晶学に関する説明がなされます。その後、結晶のヤング率が原子の結合の強さや配置から求められ、さらには複合材料におけるヤング率の複合則についての話へ進み、最後にヤング率によって決まる設計のケーススタディとして、天体望遠鏡の反射鏡に用いる材料の話がでてきます。

このように、本書は材料が実際の構造物に使われていることを強く意識させるように書かれています。ある材料特性からそれを示す基本的な原理やそれにとまらぬ事象、現象を掘り下げて説明するスタイルの教科書はあまり見られず、ユニークな構成で、大学へ入学したてで材料のことを全く知らなかった初学者の私にとっては、非常に理解しやすかったと記憶しています。学部1年時の講義後も2年、3年での講義で内容がわからなかった時に本書に立ち戻ったり、大学院生になってからも忘れした時にちょっと見直したりしていました。最近では、もっぱら学部生の授業の序論用に利用したり、高校生向けの模擬講義の参考にしたりしています。

実際の「物」と材料の関連を意識して書かれている本書は、初学者にとっつきやすい本だと思っています。これから材料を学ぶことになった大学生や、他分野の工学系の学生や技術者が材料を学ぶ必要に迫られたときに役立つのではないかと思います。

(2021年7月26日受理)[doi:10.2320/materia.60.592]

スポットライト

～第5回「高校生・高専学生ポスター発表」最優秀賞～

スティックスリップ現象における理論周期の導出と検証

岡山県立津山高等学校

保田千代 荒田祐希 仁木心音

私たちはスティックスリップ現象について研究しています。この現象は静止摩擦力が作用するスティック(固着)状態と、動摩擦力が作用するスリップ(すべり)状態が、交互に表れる現象です。私たちがこの現象を知ったのは、学校の椅子を引いた際の不快音の原因を突き止めようと調べていた時のことです。メカニズムを知ることによって興味が湧いてきて、それが研究をはじめのきっかけになりました。そして私たちを研究にのめりこませたもう一つの要因は紛れもなく「欲望」でした。私たちは、この現象による不快感を軽減する方法を見つけたいという一心で研究にのめり込みました。その方法を見つけ、対策を適用した画期的な製品を開発し、メディアの世界に進出するという夢を描いていたからです。今回の研究では開発まで及ばなかったものの、現象に対する理解を深めることができました。そして、今、私たちの「欲望」は満たされていると感じています。金属学会誌「まてりあ」に掲載していただき、「興味」がこのような結果に結びついたことを大変嬉しく思っています。今回は、未熟ではありますが、私たちが科学への興味と躍進への欲望をもって打ち込んだ研



図1 ゴム板でスティックスリップ現象を起こす実験。(オンラインカラー)

究を紹介しようと思います。

スティックスリップ現象で生じる音の高さは、物体の固有振動数により決定されます。私たちは固有振動数がスティックスリップ現象の周期に影響を与えているのではないかと考え、周期の研究を始めました。スティックスリップ現象の周期を $t=t_1+t_2$ と置き、スティック時間 t_1 と、スリップ時間 t_2 を決定するための理論モデルを考案しました。そしてゴム板をラジコンカーで水平に牽引することにより現象を起こし(図1)、実験から得られた周期と比較して考察を行いました。

初めに t_2 がゴム板の固有振動の3/4周期ではないかと考えて「固有振動モデル」を作成しました(図2)。

$$t=t_1+t_2=x/v_0+3\pi/2\sqrt{3EI/mL^3}$$

t_1 はゴム板の上端が一定の速さ v_0 で x 変位したときに、下端が最大摩擦力をむかえてすべりはじめるまでの固着時間として設定しました。 E はゴム板のヤング率、 I はゴム板の慣性モーメント、 m はゴム板の質量、 L はゴム板の固定位置から下端までの長さです。 t_2 はゴム板の面に垂直な方向に力を加えて変形させたときの復元力から運動方程式を立てて周期を導出⁽¹⁾し、その3/4周期としました。

しかし結果は、理論周期が実測値の時間を t_1, t_2 ともうまく説明できていませんでした。そこで私達は、原因を調べるため実験動画をより詳しく観察してみました。すると、予測していたよりもゴム板は大きく曲がらないままで跳ね上がっていることが分かりました。そこでゴム板を鉛直方向に単振動するばねに見立てることで、その1/2周期が床から飛び上がるまでの時間 t_1 と考えることにしました。そしてその後滞空時間 t_2 の斜方投射をしていると仮定して「バウンドモデル」を作成しました。

$$t=t_1+t_2=\pi\sqrt{m/k}+\sqrt{8h/g}$$

ここで、 k は比例定数、 m はゴム板の質量、 g は重力加速度の大きさ、 h はゴム板の下端の最高点です。

結果は、 t_1 は誤差の範囲で一致しました(表1)。つまり、 t_1 は鉛直方向の単振動の周期に関係すると考えれば、実験結果を上手く説明できることが分かりました。ただし t_2 に関しては鉛直方向の力をうまく制御できず、単純な斜方投射にはならなかったと考えられます。

今回の研究ではスティックスリップ現象の周期には物体の

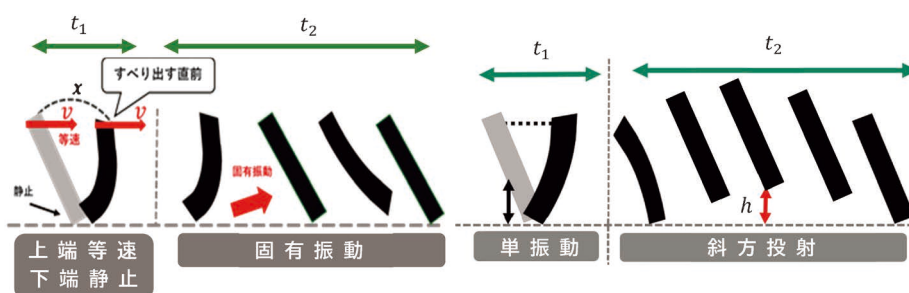


図2 左：固有振動モデル 右：バウンドモデル。(オンラインカラー)

表 1 バウンドモデルの理論周期と実測値の比較. 10回のバウンドの平均値として t_2 と t を測定し, 時間分解能の関係上 t_1 は直接測定せず $t_1 = t - t_2$ から導出しました.

	理論値(s)	実測値(s)
t_1	0.021±0.002	0.015±0.009
t_2	0.071±0.006	0.047±0.005
t	0.092±0.006	0.062±0.003

弾性定数と関連する固有振動は関係ないという結論になってしまいましたが, 実験条件によっては関係性が現れるのではないかと考えています. 実際, 金属学会の審査員の方からも, 荷重を変えていくことで固有振動が見えてくるのではないかとのご指摘もいただきました. 私たちは, スティックスリップ防止のために, 発生する不快音制御の面からアプローチしたいと考えているので, 今後は実験条件を変えつつ固有振動との関係について深めていきたいと思います.

私たちが通う岡山県立津山高等学校はスーパーサイエンス

ハイスクール(SSH)に指定されています. 恵まれた環境で私たちは興味のある研究に取り組むことができ, 今年度私たちだけでなく同級生たちも各種学会で多くの賞を受賞することができました. 今年度は新型コロナウイルスの影響によりオンラインでの開催となりましたが, 今まで一心一意に行ってきた研究を発表する場をこのように設けて頂き感謝しています. 研究発表を行うことでしか味わえない達成感や審査員の方とのディスカッションの時間は本当に有意義なもので, 研究することの楽しさを改めて実感しました. 審査員の方が私たちの研究に興味を示してくださったり, 「この研究は続けるともっと面白いものになる」と励まして下さったりとこの研究をさらに発展させていくうえで大きなモチベーションとなりました. 研究成果が認められることの面白さを是非もっと多くの学生の方に体験してもらいたいと思います.

文 献

(1) 佐藤 理: 連続体の力学, 朝倉書店, (2000), 14-29.
 (2021年 6 月21日受理)[doi:10.2320/materia.60.593]
 (連絡先: 〒708-0051 岡山県津山市椿高下62)



本 会 記 事

会 告	2021年秋期講演大会ご案内	595
	技術セミナー	597
	オンライン学生キャリアサポートセミナー開催	598
	付設展示会オンライン	598
	第10回女性会員のつどいのご案内	598
	会費自動振替のご案内	599
	永年会員制度について	599
	終身会員制度について	599
	第45回技術開発賞募集	599
	第72回金属組織写真賞作品募集	599
	研究集会	600
	会誌・欧文誌編集委員会からのお知らせ	604

支部行事	600	新入会員	606
掲示板	601	次号予告	607
会誌・欧文誌 9 号目次	605	行事カレンダー	608

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

・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。

会 告 (ホームページもご参照下さい)

2021年秋期(第169回)講演大会ご案内ならびに参加申込みについて

秋期講演大会は、9月14日(火)から17日(金)までオンラインにて開催いたします。

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

<日 程>

日 時	行 事
9月14日(火)	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、懇親会(ポスター賞発表)
9月15日(水) 9:00~17:00	学術講演
9月16日(木) 9:00~17:00	学術講演
9月17日(金) 9:00~17:00	学術講演、女性会員のつどい

2021年秋期講演大会 開催予定の各種シンポジウム

公募シンポジウム10テーマ

- S1 機能コアの材料科学Ⅱ
- S2 ミルフィーユ構造の材料科学Ⅳ
- S3 ハイエントロピー合金の材料科学(Ⅳ)
- S4 材料変形素過程のマルチスケール解析(Ⅳ)
- S5 超高温材料の科学技術Ⅱ
- S6 ナノ・マイクロスペースステイラリングⅥ
- S7 水素エネルギー材料Ⅹ
- S8 コロナ禍の記録とポストコロナの材料戦略
- S9 ワイドギャップ結晶の材料学と高温プロセッシングⅢ
- S10 マテリアルズ・インテグレーション(Ⅳ)—社会実装に向けた取り組み—

企画シンポジウム4 テーマ

K1 材料化学におけるイノベーションの役割と工業製品への展開II

Innovations in materials chemistry and their effects on industry II

この企画シンポジウムは、毎年春の講演大会で開催している「水溶液腐食」「高温酸化」「陽極酸化」「めっき・化成処理」「触媒」の各学術分野を包括した公募シンポジウムと対をなし、工業製品としての金属材料の開発・生産の最前線における「材料化学」の役割と研究・開発事例や課題を、主に企業研究者に講演していただくことを趣旨として、2020年度よりシリーズ化している。今年度も、前年度と同様の企画シンポジウムを開催する。材料化学は、溶液や気体などと金属表面との化学反応を扱う学問分野であるが、応用範囲は、めっき、化成処理、腐食、高温酸化、触媒など広範囲にわたっている。そこで、各産業分野で直面している課題や将来展望を議論することで、基盤となる学理を発展させるヒントや、産学官の連携強化のきっかけとした。

K2 次世代パワエレクトロニクス実用化に向けた酸化物軟磁性材料の現状と課題

～さらなる性能向上に向けたマテリアルデザイン～

Current states and issues of soft magnetic oxide materials for next-generated power electronics devices ~Material design for further performance improvement~

SiC, GaN といった次世代パワー半導体を利用したパワーエレクトロニクスデバイスの実用化に向けて、それらのデバイスに組み込むための既存および新規軟磁性材料に関して、現状と課題を整理しながらそれらの材料開発を進めていくことが強く望まれている。本シンポジウムでは、パワエレクトロニクスデバイス一端を担っていくことが期待される酸化物軟磁性材料として、その代表材料であるソフトフェライト(バルクから薄膜まで)に焦点を当てる。ソフトフェライト材料の特長および最新動向を整理しながら、さらなる性能向上に向けたマテリアルデザインの視点での課題を整理するとともに、また、若手研究者へ新たに本材料の研究に参加しやすい動機付けを提供したい。加えて、デバイス応用の視点から、本材料を含めた軟磁性材料について話題を提供する。

K3 若手科学者へ贈る研究のヒントIV～未踏領域へ到達するために～

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

第3回までは第1、第2分野と共同で開催を行ってきた、人材育成を趣旨とする啓蒙的な内容の企画シンポジウムの第4弾であり、今回はさらに第3、第8分野とも共同で開催する。独創的な研究成果に到達するためには、どのような姿勢で研究に臨むべきか、また、転機をどのように向かえ成功へ導くのか、著名なベテランにご講演頂き、そのヒントを得ることを目的とする。会員、特に若手研究者への刺激になれば幸いである。講演では、講演者ご自身の研究に触れつつ、研究者としての心構えや外部資金の獲得に関する話題など、シンポジウム全体として独創的な研究成果に到達するための必要条件を浮き彫りにする。講演後は双方向性の仕掛けとしてパネルディスカッションを設ける。

K4 自動車の大変革を担う材料技術の最新動向

The latest trend of the materials R&D for the revolution of the Automotive

近年の自動車を取り巻く環境は、従来からの課題である環境負荷低減、軽量化、燃費などに加え、電動化、安全性、自動運転などに代表される革新技術への対応も求められ、より複雑化、高度化している。日本金属学会では、多くの材料を利用し日々進化している自動車技術に焦点を当て、その技術の革新を基盤から支える材料技術における最新の動向について、日本鉄鋼協会、自動車技術会と合同でシンポジウムを2018年度から企画してきた。本シンポジウムでは日本金属学会からの講演者に加え、自動車技術会および日本鉄鋼協会から自動車および鉄鋼メーカーの製造関係者ならびに材料研究者も迎えて最新の研究動向を講演していただき、自動車用材料技術の方向性を共有するとともに、講演大会参加者の研究における一助となることを目的とする。

参加申込要領

インターネットによる大会参加申込期間および URL :

(後期(当日)申込)2021年9月2日～9月17日 https://www.jim.or.jp/convention/2021autumn_after/

参加申込締切後、参加方法や講演概要ダウンロードについては、下記をご参照下さい。なお、領収書は、決済完了後に申込画面から各自印刷して下さい(WEB画面:講演大会 MyPage よりダウンロード)。

◆大会参加費(講演概要ダウンロード権含む)※年会費とは異なります。

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

会 員 資 格	後期(当日)申込 (9月2日～会期最終日) クレジット決済のみ
正員・維持員会社社員、シンポジウム共催・協賛の学協会会員・鉄鋼協会会員(本会非会員)	13,000円
個人会員で2021年3月1日時点で65歳以上の方*	無 料
学生員**	7,000円
非会員*** 一般	27,000円
非会員*** 学生(大学院生含む)	16,000円

・お支払後の取消は、準備の都合上ご返金いたしかねますのでご了承下さい。

* **65歳以上の個人会員** : 会員情報に生年月日のご登録がない場合は、課金されますのでご注意ください。会員情報に生年月日をご登録させていただきますので、大会参加登録の前に annualm@jim.or.jp まで会員番号・お名前・ご連絡先・生年月日をお知らせ下さい。

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

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

◆支払方法

後期(当日)申込はクレジット決済のみとさせていただきます。また、入金後のご返金は致しかねます。

◆参加方法および講演概要の WEB 公開

講演概要の公開日は、大会 2 週間前の2021年 8 月31日(火)です。

講演大会公開サイトにログイン後、講演概要の閲覧ができます。特許関係のお手続きは、公開日までにお済ませ下さい。

(事前参加申込みの方)参加申込みをされ、参加費を納入された方へは、概要公開日にオンライン参加に必要な参加者個別認証 ID とパスワードを配信いたします。

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

◆講演概要集購入について

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

◆オンライン懇親会開催案内(金属学会単独開催)

開催日時 9月14日(火) 18:30～

開催方法 オンライン会議ツール Remo(予定)

参加費 無料

参加登録期間 事前登録(5月25日(火)～8月27日(金))および当日申込

登録方法 大会参加申込みの際、「懇親会に参加する」で申込下さい。

申込者へは、9月上旬に会場 URL と参加方法の案内を配信します。

*この懇親会で、ポスター賞の発表(表彰)を行います。

参加申込・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

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

技術セミナー開催

秋期講演大会(オンライン開催)にて、技術セミナーを開催いたします。各社の最新の技術を解説いたします。是非ご視聴頂き、皆様の研究開発にお役立て下さい。

主 催 公益社団法人 日本金属学会

企 画 株式会社 明報社

9月15日(水) A 会場

12:20～12:50

○名古屋大学微細構造解析 PF

「各種無機材料の電子顕微鏡その場観察と解析例」

荒井重勇

9月15日(水) B 会場

12:20～12:50

○オックスフォード・インストゥルメンツ(株)

「EBSD 解析ソフト『AZtecCrystal Advanced』の新機能」

9月16日(木) B 会場

12:20～12:50

○ティー・エイ・インストゥルメント・ジャパン(株)

「熱分析と疲労試験 ～金属材料の物性評価～」

前田美奈子・大塚康城

オンライン学生キャリアサポートセミナー開催

秋期講演大会(オンライン開催)にて、オンライン学生キャリアサポートセミナーを開催いたします。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、研究開発動向等を解説いたします。学生参加者の皆様には、是非ご視聴頂き、リクルート活動にお役立て下さい。

主 催 公益社団法人 日本金属学会

企 画 株式会社 明報社

9月17日(金) 学生キャリアサポートセミナー会場

13:00~13:30 DOWA ホールディングス(株)

13:35~14:05 住友重機械工業(株)

14:10~14:40 合同製鉄(株)

14:45~15:15 住友化学(株)

15:20~15:50 (株)UACJ

15:55~16:25 東邦チタニウム(株)

16:30~17:00 文部科学省

17:05~17:35 三菱マテリアル(株)

17:40~18:10 住友金属鉱山(株)

付設展示会(オンライン版)開催

秋期講演大会ホームページにて、付設展示会(オンライン版)を開催いたします。金属材料関連各社の製品やサービスの最新情報の他、製品動画や資料を閲覧できます。皆様のアクセスをお待ちしております。

下記大会ホームページよりご覧下さい。

<https://confit.atlas.jp/guide/event/jim2021autumn/top>

開催期間 8月上旬~9月17日(金)

出展企業

○(株)池上精機

○オックスフォード・インストゥルメンツ(株)

○(株)サーモ理工

○(株)新興精機

○(株)TSL ソリューションズ

○日本テクノプラス(株)

○(株)モルシス



日本金属学会・日本鉄鋼協会 第10回女性会員のつどいのご案内

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

秋期講演大会期間中に開催していた、「女性会員の集い」を今年はオンラインで行います。女性会員同士、気軽に意見交換をして楽しいひとときを過ごしませんか。

主 催 日本金属学会・日本鉄鋼協会男女共同参画合同委員会

日 時 2021年9月17日(金)12:00~13:00

開 催 法 オンライン(会期前日に大会 WEB サイトに会場 ZoomURL を掲載いたします。)

内 容 女性会員の交流・人脈作り。キャリアデザイン意見交換。仕事場や上司・部下への困ったこと等本音トーク。学会への要望。などなど

参加資格 金属学会・鉄鋼協会女性会員、学生さん

参加申込 申込みは不要です。当日直接、オンラインで入場して下さい。多くの方のご参加をお待ちしております。

問 合 先 梅津理恵(東北大学)

E-mail: rieume@imr.tohoku.ac.jp

会費の自動振替のご案内

2022年度会費自動振替のご案内を申し上げます。ホームページからのお手続きを宜しくお願いいたします。

- ・ホームページ：入会・会員→会費支払方法
- ・2022年度会費自動振替申込締切 **2021年10月1日(金)**

問合せ・申込書送付先

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

永年会員制度について

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

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

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

受付締切 **毎年 9 月30日**

永年会員資格付与 毎年 1 月 1 日

問合せ (公社)日本金属学会

〒980-8544 仙台市青葉区一番町 1-14-32
☎ 022-223-3685 E-mail: member@jim.or.jp

終身会員制度について

入会歴が40年に満たないために永年会員となっていた方、満60歳以上満65歳以下の会員が70歳までの会費を前納いただくことと終身会員の称号を贈り、以降の会費を免除いたします。前納会費の額は70歳までの会費の総額に比べて割安となっておりますので、ぜひご利用下さい。

年齢(2022年1月1日時点)	前納会費	(70歳までの通常会費)
60歳	80,000円	(110,000円)
61歳	70,000円	(100,000円)
62歳	65,000円	(90,000円)
63歳	55,000円	(80,000円)
64歳	50,000円	(70,000円)
65歳	40,000円	(60,000円)

ご希望される方は、**11月30日**までに、氏名、会員番号、生年月日を添えて下記連絡先にご連絡下さい。前納会費の請求書をお送りします。

問合せ (公社)日本金属学会 会員サービス係
☎ 022-223-3685 E-mail: member@jim.or.jp

第45回技術開発賞 「新技術・新製品」記事募集

応募締切：2021年11月1日(月)

賞の名称 第45回公益社団法人日本金属学会技術開発賞

賞の対象 まてりあ「新技術・新製品」記事に掲載された記事(第60巻1号から)

表彰 2022年9月の秋期講演大会

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

詳細 まてりあ 8号525頁 or ホームページ→本会賞の募集

問合せ先 (公社)日本金属学会各賞係

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

「新技術・新製品」記事の問合せ先

まてりあ係 E-mail: materia@jim.or.jp

第72回金属組織写真賞作品募集

応募締切：2021年11月1日(月)

募集部門

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

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

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

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

【写真作品】

- ①写真データの解像度は、A2版サイズを前提に400dpi以上とする。
- ②写真データはPDFまたは画像ファイル(jpgなど)で提出すること。(それ以外はプレビュー表示出来ない)
- ③写真と図の組み合わせでも提出は可(写真、図への挿入文字は小さすぎないこと)。
- ④作品には、応募者名、共同研究者名を記載しない。
- ⑤応募作品数には制限を設けない。
- ⑥他学協会等の同様の賞を受賞していない作品であること。

詳細 まてりあ 8号526頁 or ホームページ→本会賞の募集

問合せ先 〒980-8544 仙台市青葉区一番町 1-14-32

(公社)日本金属学会 金属組織写真賞係
☎ 022-223-3685 FAX 022-223-6312

E-mail: award@jim.or.jp
URL: https://picture.jim.or.jp/entry

研究集会

研究会 No. 82

“微小領域の力学特性評価とマルチスケールモデリング” 2021

2019年度に発足しました「微小領域の力学特性評価とマルチスケールモデリング」の第三回研究集会を、今秋もオンライン開催いたします。物理、機械、材料などの幅広い分野から、実験・シミュレーション・理論などの多様なアプローチの取り組み発表をお待ちしております。研究会当日の招待講演のほかに、事前に学生・若手研究者を対象としたオンラインポスター発表会を行い、ポスター賞を授与いたします(副賞あり)。今年度は、ショート・プレゼン動画での発表も受け付ける予定です。研究会当日には受賞講演も予定しています。皆様どうぞ奮ってご参加下さい。

日 時 2021年11月29日(月) 13時00分～17時00分(予定)
場 所 オンライン+会場(ハイブリッド)

ポスター発表申し込み締め切り: 10/15(金)

ポスター発表+審査: 10/18(月)~11/1(月)

ポスター賞受賞者決定・発表: 11/5(金)

企画責任者 大村孝仁(物質・材料研究機構)

参加費 無料

申込・問合せ先

A. または B. を選択いただき、下記内容をメールにてお申し込み下さい。

A. ポスター発表希望者: ポスタータイトル, 発表者氏名, 所属・身分〔若手(35歳未満)or 学生(学部生/修士/博士)], メールアドレス

B. 聴講希望者: 氏名, 所属, メールアドレス

問合せ先 E-mail: micromech_jim@nims.go.jp

“微小領域の力学特性評価とマルチスケールモデリング”
2021 事務局: 物質・材料研究機構 井口

研究会 No. 85

第二回 状態図・計算熱力学研究会 講演募集

近年、カルファド法に代表される状態図・計算熱力学分野は急速に進化を遂げています。本研究会では、この計算熱力学分野における最新の研究を共有するとともに、議論を深めることを目的としています。

第二回研究会は、企画セッションとして新学術領域研究「ハイエントロピー合金」に参画されている先生方(神戸大 田中先生, 名大 小山先生, 東北大 榎木先生)をお招きして「ハイエントロピー合金における短範囲規則化」をテーマにご講演いただきます。

また、一般講演として、状態図・熱力学に関するご講演を広く募集したいと思いますので、皆様からの積極的なお申し

込みをお待ちしています。また、参加を希望される方は下記要領にてお申し込み下さい。

日 時 2021年11月1日(月)

場 所 オンライン開催(Webex, GatherTown 予定)

共 催 新学術領域研究「ハイエントロピー合金」

参加費 無料

定 員 50名程度

講演申込締切 2021年10月1日(金)

参加申込締切 2021年10月25日(月)

申込方法 申込先まで件名を「第二回研究会」として、①氏名, ②所属, ③e-mail アドレス, ④講演タイトルと著者(講演申込をされる場合)を明記してお申し込み下さい。

申込・問合せ先 物質・材料研究機構 阿部太一
E-mail: abe.taichi@nims.go.jp

支部行事



第18回 ヤングメタラジスト研究交流会 開催のご案内

ヤングメタラジスト研究交流会は、関東支部内の大学や企業に所属する若手研究者の交流を目的とし2004年に第1回目が開催されて以降、今年で第18回目を迎えます。支部内の若手研究者と研究に熱意ある学生が研究活動の報告を通じて互いに交流し、連携を深めることで、関東支部の金属材料研究がより一層活性化することを目指しております。本年度は、新型コロナウイルス感染のリスクを考慮して Web 会議ツールによるオンラインにて若手研究者による講演およびポスターセッションを開催いたします。皆様のご参加をお待ちしております。

日 時 2021年10月6日(水) 13:00~17:30(参加者数に応じ変更の可能性があります)

開催形式 Web 会議ツールによるオンライン形式
(Cisco Webex を予定)

スケジュール(参加者数に応じ変更の可能性があります)

13:00-13:10 開会挨拶・諸連絡

13:10-15:10 ゲスト講演

15:30-16:10 ポスターセッション(第1部)

16:20-17:00 ポスターセッション(第2部)

15:30-16:00, 16:30-17:00 企業交流コーナー

16:00-16:30 講演者との交流・個別質疑コーナー

17:15-17:25 ポスター賞表彰式

17:25-17:30 閉会挨拶

講演プログラム

13:10-13:50 機能的マグネシウム合金の開発

材料機構 構造材料研究拠点 小川由希子

13:50-14:30 ナノインデンテーションにおける pop-in 現象のサイズ分布にみられるべき乗則とそのメカニズムの解析

東大大学院工 機械工学 佐藤悠治

14:30-15:10 浮遊した熔融金属に惹かれて

東工大 物質理工学院 渡邊 学

参加費 無料

参加申込方法

交流会に参加をご希望の方は **9/24(金)17:00** までに氏名、所属、E-mail などを下記リンクの登録フォームからご応募下さい。登録フォームへアクセスできない方は、幹事まで直接お問い合わせ下さい。

<https://forms.gle/n9vhH4xeDpgr3Gh9>

ポスターセッションについては、運営の都合上、下記の通り別途締切を設けます。

- 学生ポスターセッション申込締切: **9/17(金)17:00**
ポスター仮題とともにご応募下さい。
- ポスターアブストラクト提出締切: **9/24(金)17:00**
フォーマット(A4の3分の1ページ分)は上記の登録フォーム内よりダウンロードできます。ダウンロードできない方は幹事まで直接お問い合わせ下さい。
- ポスター発表は発表者毎にミーティングルームを開設し、各ミーティングルームに聴講者が入室し、ポスター(横長16:9サイズのスライド1枚)を用いたライブでの説明および質疑応答を行う方式とします。
実施方法の詳細については、改めて補足資料を配布する予定です。

問合先 E-mail: masuda@material.t.u-tokyo.ac.jp

東京大学大学院 工学系研究科 マテリアル工学専攻
増田紘士(第18回ヤングメタラジスト研究交流会幹事)



掲 示 板

〈公募類記事〉

無料掲載: 募集人員、締切日、問合先のみ掲載。

有料掲載: 1/4頁(700~800文字)程度。

• 「まてりあ」とホームページに掲載; 15,000円+税

• ホームページのみ掲載; 10,000円+税

〈その他の記事〉 原則として有料掲載。

• 原稿締切・掲載号: 毎月1日締切で翌月号1回掲載

• 原稿提出方法: 電子メール(受け取りメールの確認をして下さい)

• 原稿送信先: FAX 022-223-6312 E-mail: materia@jim.or.jp

公 募

◇東北大学大学院工学研究科 教員公募◇

公募人員 教授1名(任期なし)

所 属 知能デバイス材料科学専攻 情報デバイス材料科学講座 電光子情報材料科学分野

専門分野 半導体・金属・酸化物などにおいて、電子・光子・スピン等のダイナミクスや量子物性に起因する新機能の創出とデバイス創成に関する教育と研究を行う

応募資格 博士の学位を有し、当該分野の教育・研究に意欲と熱意があり、日本語と英語で講義のできる方

担当授業科目 「学部」固体物性論、電子材料科学、量子効果半導体、材料科学総合学実験、材料科学総合学基盤研修、知能デバイス材料科学コース研修等

「大学院」(前期)固体電子論、ナノ構造制御機能発現工学、応用電子材料科学、知能デバイス材料科学修士研修等、(後期)知能デバイス材料科学博士研修等

公募締切 **2021年10月15日(金)**

着任時期 2022年4月1日(金)

提出書類 (1)履歴書、(2)学位論文題目、(3)研究業績概要(A4版2頁以内)、(4)主要論文5編の別刷り(コピー可)、(5)研究業績リスト、(6)獲得外部研究資金(科研費等)一覧、(7)受賞、(8)招待講演等、(9)教育業績(担当科目等)、(10)所属学会、(11)学会活動歴(委員会等)、(12)研究活動、(13)社会活動等に関する一覧表、(14)今後の研究計画(A4版2頁以内)、(15)教育活動に関する抱負(A4版2頁以内)、(16)照会可能な方2名の氏名と連絡先(住所、電話、E-mail)、(17)応募者の連絡先(住所、電話、E-mail)

書類送付先 〒980-8579 仙台市青葉区荒巻字青葉 6-6-02

東北大学大学院工学研究科

マテリアル・開発系長 成島尚之

☎ & FAX : 022-795-7294

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

マテリアル・開発系ホームページ上に掲載した「公募提出書類作成の注意点」「応募書類の提出について」をご確認下さい。 <http://www.material.tohoku.ac.jp/news/jobs.html>

問合せ先 知能デバイス材料科学専攻長 武藤 泉

☎ & FAX 022-795-7298

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

※東北大学は共同参画を推進しており、多様な人材の積極的な応募を歓迎しています。本学の両立支援、研究支援等の詳細および共同参画の取組については、下記 URL をご覧ください。
男女共同参画推進センター WEB ページ
<http://www.tumug.tohoku.ac.jp/>

◇理化学研究所 主任研究員公募◇

公募人員 主任研究員 2 名(以下の分野の研究室主宰者、各 1 名)

新しい科学の創出をめざす有機化学

新しい科学の創出を目指し、物質創生の観点から理研の革新的な基礎反応や合成技術、機能分子などを開発する新規研究室を主宰していただきます。有機物と無機物の境界も含む幅広い分子群を対象にした、既存の方法や概念と異なる発想による研究を期待します。

持続可能社会のための広義の無機化学

持続可能社会の実現に向けて、物質創生の観点から理研の革新的な物質群や機能を開発する新規研究室を主宰していただきます。有機物と無機物の境界も含む幅広い物質やシステムを対象にした、既存の方法や概念と異なる発想による研究を期待します。

採用された方には、開拓研究本部の主任研究員として、長期的ビジョンに基づき自らの研究を自由に推進するとともに、研究分野や組織の壁を超え、新たな科学の創成を目指していただきます。

所 属 理化学研究所開拓研究本部(埼玉県和光市)
応募資格 すぐれた研究業績を有し、上記研究分野を国際的に牽引する実力のある方。国籍不問。
任 期 無期雇用職員(60歳定年)。65歳までの再雇用制度あり。審査を経ることで、65歳まで研究室を主宰し続けることが可能です。
応募締切 2021年 9 月22日(水)正午

そのほか、詳細及び応募方法は、以下の URL でご確認ください。

有機分野

https://www.riken.jp/careers/researchers/20210623_2/index.htm

無機分野

https://www.riken.jp/careers/researchers/20210623_1/index.html

◇兵庫県立大学大学院工学研究科 教員公募要領(第232号)◇

募集人員 教授 1 名

(本学は積極的にダイバーシティの推進に努めており、多様な人材の採用に努めております。特に

女性研究者の積極的な応募を歓迎しており、同等の能力であれば女性の採用を積極的に検討します)

所 属 化学工学専攻
専門分野 無機材料プロセス工学
教育担当 大学院：無機材料化学、化学工学演習、化学工学講究
学 部：無機化学、化学工学概論、化学工学実験、卒業研究

その他関連分野を担当する場合がある

応募資格 1. 博士の学位を有し、上記の研究と教育に熱意と意欲をお持ちの方
2. 国籍は問わない。ただし、学内の諸業務の遂行が可能な日本語能力を有すること

着任時期 令和 4 年 4 月 1 日 (予定)

応募書類 1. 履歴書(写真貼付、学歴は高等学校卒業以降、職歴、賞罰等): 様式 1
2. 研究業績(著書、論文等): 様式 2 および主要論文別刷り(10編まで、コピー可)
3. 教育歴および学会・社会における活動等: 様式 3
4. これまでの主要な研究概要(2,000字程度): 様式 4
5. 教育・研究への抱負(2,000字程度): 様式 5
6. 推薦書 1 通または応募者に対して意見を伺える方 2 名の氏名・役職連絡先を記載した書類

応募締切 令和 3 年 9 月30日(木)(必着)

選考方法 書類審査および面接(模擬授業を含む)による

書類提出先 〒671-2280 兵庫県姫路市書写2167
兵庫県立大学工学キャンパス 総務課気付
大学院工学研究科長 川月喜弘 宛

(※封筒に「(第232号)化学工学専攻教授 応募書類在中」と朱書きし、簡易書留で郵送すること。なお、原則として応募書類は返却しません。また、推薦書以外の応募書類については、紙媒体に加え、PDF 形式の電子ファイルを CD もしくは USB メモリにて提出して下さい)

問合せ先 化学工学専攻 専攻長 森下政夫

☎ 079-267-4913(直通)

E-mail: koubo232@eng.u-hyogo.ac.jp

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

◇豊橋技術科学大学大学院工学研究科 機械工学系 教員(助教)公募◇

募集人員 助教 1 名

所 属 機械工学系 材料・生産加工分野
専門分野 各種構造・機能材料におけるナノレベルでの組織制御および強度・破壊特性評価に関する分野
応募資格 博士あるいは PhD の学位を有するか着任までに取得見込みの方

※日本語を母語としない場合は、学内諸業務ができる日本語運用能力を有する方

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

採用予定時期 令和4(2022)年4月1日以降できるだけ早い時期

勤務形態 常勤(任期あり)
任期5年(採用後5年以内にテニュア審査を受け、合格すればテニュア助教(任期なし)となることができる)

応募締切 令和3(2021)年10月29日(金)(必着)

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

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

問合せ先 機械工学系 教授 三浦博己
☎ 0532-44-6697 E-mail: miura@me.tut.ac.jp

※提出書類や選考方法の詳細については、必ず下記のURLをご参照下さい。

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

集会

◇レアメタル研究会◇

- 主 催 レアメタル研究会
- 主 宰 者 東京大学生産技術研究所 教授 岡部 徹
- 協 力 (一財)生産技術研究奨励会(特別研究会 RC-40)
- 共 催 東京大学マテリアル工学セミナー
レアメタルの環境調和型リサイクル技術の開発研究会
東京大学生産技術研究所 持続型エネルギー・材料統合研究センター
東京大学生産技術研究所 非鉄金属資源循環工学寄付研究部門(JX 金属寄付ユニット)
- 協 賛 (公社)日本金属学会 他
- 開催会場 東京大学生産技術研究所 An棟2F コンベンションホール
- 参加登録・お問い合わせ
岡部研 レアメタル研究会事務担当 宮寄智子
(okabelab@iis.u-tokyo.ac.jp)

■第97回 2021年9月10日(金)

■第98回 2021年11月5日(金)

★チタン関係シンポジウム★(合同開催)

(関連シンポジウム：寄付ユニット特別シンポジウム 2021年11月26日(金))

(会場：SHIBUYA QWS(渋谷キューズ)を予定：会場変更の可能性あり)

■第99回 2022年1月7日(金)

★貴金属シンポジウム(第9回)+新年会★(合同開催)

■第100回 2022年3月11日(金)

■第97回 2021年9月10日 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：ニッケルやコバルトの現状、将来
午後2:00~

司会 東京大学 生産技術研究所 非鉄金属資源循環工学寄付研究部門 特任教授 岡部 徹

講演(各35分+5分質疑応答)(敬称略)

ニッケルやコバルトを中心とする資源の調達や国の戦略等について
経済産業省 資源エネルギー庁 資源・燃料部

鉱物資源課長 小林和昭

ニッケルやコバルトの資源の状況や探査の潮流について

独立行政法人石油天然ガス・金属鉱物資源機構 JOGMEC

資源探査部探査第一課 課長 吉川竜太

ニッケルやコバルトの製造と市場について

住友金属鉱山株式会社 金属事業本部

ニッケル営業原料部長 丹羽祐輔

電池ビジネスの課題と戦い方(仮)

プライム プラネット エナジー&ソリューションズ株式会社

代表取締役社長 好田博昭

パネルディスカッション

モデレーター 東京大学 生産技術研究所 特任教授 黒川晴正

東京大学 生産技術研究所 シニア協力員 中村 崇

午後6:00~

研究交流会・意見交換会(←Webでの開催を企画予定)

■第98回 2021年11月5日 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

★チタン関係シンポジウム★(合同開催)

テーマ：チタンの現状、将来

午後2:00~

講演依頼中

午後6:00~

研究交流会・意見交換会(←Webでの開催を企画予定)

レアメタル研究会最新の情報はホームページをご覧ください。

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

◇ ◇ ◇

◇掲示板は、本会ホームページにも掲載しておりますのでご利用下さい。

<https://jim.or.jp/> → 掲示板 です。

特集企画の投稿募集

下記テーマに関する特集企画の投稿を募集いたします。
多数ご投稿下さいますようお願いいたします。

■次世代エレクトロニクスのための金属材料の最先端 (Special Issue on Recent Advance of Metallic Materials toward Next Generation Electronics)

現代のエレクトロニクスにおいては、半導体集積回路技術の発展により高機能化と小型化が進んでいる。また、半導体技術から派生した微小電気機械システム(MEMS)技術は、加速度センサやマイクロマシンなど展開し、スマートフォンに内蔵されている。それらのエレクトロニクスの配線に用いる金属材料であるアルミニウム・銅は、現在マイクロメートルからナノメートル領域のサイズで成形・利用されており、最新の三次元化・多層化においては、錫や銅・ピスマスなどの材料がバンプとして利用されている。更に MEMS の機械的構成要素として、金やニッケルなど様々な金属が利用されている。従って、この分野での金属材料の用途は広がり続けている。この分野で用いる金属材料は小型化と、用途に対する高信頼性や高耐久性を両立するために多様な物性を制御する必要があり、相矛盾するような要求に応える必要に迫られている。そのため、リソグラフィ法のための高機能電気めっき技術および金属エッチング技術、3D プリンターなどの三次元造形技術や、ウェアラブルデバイスのための複合材料形成技術、それら全てに用いる微小な金属材料あるいは複合材料の材料評価技術など幅広い分野の研究が注目されている。本特集では、以上のような背景の下、次世代のエレクトロニクスへ応用を念頭に置いた様々な金属材料技術に関する論文を募集する。

上記テーマに関する特集を、日本金属学会誌86巻6号(2022年6月発行)に予定しております。

掲載予定号 第86巻第6号(2022年)

原稿締切日 **2021年12月1日(水)**

- ・投稿に際しては、日本金属学会会誌投稿の手引・執筆要領(本会 Web ページ)に従うこと。
- ・通常の投稿論文と同様の審査過程を経て、編集委員会で採否を決定する。

問合せ先 (公社)日本金属学会会誌編集委員会

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

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

特集企画の投稿募集

下記テーマに関する特集企画の投稿を募集いたします。
多数ご投稿下さいますようお願いいたします。

■Integrated Computer Simulation for Materials and Process Engineering

From new materials development to commercialization, the most time/cost-consuming step is the migration of a process from the lab-scale to the pilot plant or commercial scale. Despite decades-long endeavors to describe material behavior during manufacturing processes, simulations of nano-meso-macro scale “microstructural evolution” of materials under various processing circumstances have less been attended than continuum mechanics modeling to describe circumstances experienced by the materials. This special issue will address recent advances in scale-bridging simulations and characterization to understand, describe, and predict the microstructure-property relationship of newly developed materials in a lab to industrial-level processes. In general, multiple physical phenomena simultaneously take place during manufacturing, such as heat transfer, fluid flow, phase transformation, microstructural evolution, such as grain refinement, and elastic/plastic deformations under static and dynamic loadings, e.g., nanoindentation, severe plastic deformation, superplasticity, shock, metal 3d printing, etc. Hence, integration of multi-physics material simulation models of multiple length scales is essential to capture the process-structures-properties relations of materials during manufacturing. This special issue will bring together detailed analysis, characterization as well as computational modeling of materials from atomistic to macroscopic length scales. This special issue will also cover process optimization techniques such as artificial intelligence (AI), response surface methodology (RSM), and design of experiments (DOE).

上記テーマに関する特集を、Materials Transactions 63巻6号(2022年6月発行)に予定しております。

掲載予定号 第63巻第6号(2022年)

原稿締切日 **2021年12月1日(水)**

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

問合せ先 (公社)日本金属学会欧文誌編集委員会

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

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

日本金属学会誌掲載論文

Vol. 85, No. 9 (2021)

—論文—

気液二相流解析による亜鉛合金ダイカストの二重乗り欠陥予測

不破大樹 櫻木卓也 水林 舞 小林正幸 勝見徹也

Nb₃₀Ti₃₅Co₃₅ 合金の圧延-熱処理による微細組織変化と水素透過度

浜崎友貴 宮嶋陽司 石川和宏

抵抗スポット溶接重ね継手の引張せん断強度に及ぼすナゲット周囲のろう接併用の影響

北村貴典 秋山哲也 植村篤郎 三原知夏

ジルコニア式酸素ポンプを用いた極低酸素雰囲気におけるアルミニウム合金のフラックスフリーろう付

篠田智之 小澤俊平 川島健太 栗林一彦

山吉知樹 伊藤泰永

高温における Nd₂O₃-Na₂B₄O₇ 擬 2 元系の相関係とネオジム磁石のリサイクルへの応用

和田浩樹 荒井誠也 小川和宏 山口勉功

Materials Transactions 掲載論文

Vol. 62, No. 9 (2021)

—Regular Article—

Microstructure of Materials

Effect of Ball Milling and Spark Plasma Sintering on Microstructure and Properties of Mn-Cu Based Damping Alloy

Lin Huang, Xi He, Wei Fei and YongGang Xu

Metallic Silicon Powder Produced by Vacuum Decomposition of Magnesium Silicide Prepared by Magnesiothermic Reduction

Seon-Min Hwang, Su-Jin Park, Gwang-Tae Kim,
Ha-Neul Kim, Jae-Woong Ko,
Yong-Ho Park and Dong-Won Lee

Mechanics of Materials

Proposal of Analytical Model of Tensile Property of Untwisted Carbon Nanotube Yarn and Estimation of Tensile Property of Carbon Nanotube

Yoshinobu Shimamura, Yudai Yamaguchi, Keiichiro Tohgo,
Tomoyuki Fujii and Yoku Inoue

Effects of Particle Collision Treatments on Fatigue Strength of Ti-6Al-4V Alloy with Polishing Marks

Tatsuro Morita, Atsushi Miyatani,
Shogo Takesue, Masao Kumagai and Jun Komotori

Dynamically Recrystallized Structure and Mechanical Properties of Mg₉₆Zn₂Y₂ Alloys Deformed by ECAP

Hiromoto Kitahara, Michiaki Yamasaki,
Yota Nakayama, Masayuki Tsushida, Shinji Ando and
Yoshihito Kawamura

Magnetic Pulse Welding Conditions for High-Tensile Steel of 1 GPa Class and 6061-T6 Aluminum Alloy Sheets

Takaomi Itoi, Shunichi Kitta and Keigo Okagawa

Effects of Grain Size and Grain Boundary Stability on Mechanical and Fatigue Properties of Nanocrystalline Nickel Thin Films

Yoshikazu Nakai, Ryota Takeshige, Tsuyoshi Hirai and
Shoichi Kikuchi

Dislocation Motion in Al-Mg Alloys in the Creep Region Characterized by Activation Volume

Hiddenari Takagi

Failure Behavior of Cemented Carbide under Impact-Sliding Wear Conditions

D.Q. Tan, X.Q. Yang, Q. He and H.Y. Gao

Experimental Study and Numerical Simulation of Interfacial Morphology by Electromagnetic Pulse Welding with Aluminum to Steel

Luxin Chi, Xinxin Wang, Shifa Liang,
Yang Ran and Yingying Wang

Materials Chemistry

Development of the Test Solution for Rapidly Evaluating the Corrosion Resistance of Copper Tubes and Investigation for Effectiveness of the Initial Treatment on the Corrosion Resistance

Takashi Iyasu, Hajime Iseri and Natsumi Taniyama

Pitting Corrosion Resistance of Ta-Bearing Duplex Stainless Steel

Makoto Kawamori, Junichiro Kinugasa, Yuko Fukuta,
Masaki Shimamoto, Tomoko Sugimura, Yutaro Katsuki,
Natsuki Nishizawa and Mamoru Nagao

Hydrogen Generation from Ammonia-Borane over Ni-B Amorphous Alloys Prepared from Aqueous Solution Based on Thermodynamic Prediction of Hidden Metastable of State

Ai Nozaki, Masashi Kuroda, Ryota Kameo,
Hiroshi Ichiwara, Ryo Deguchi and Masao Morishita

Materials Processing

Experimental and Numerical Analyses of Cooling and Intermediate Layer Formation Process at the Magnetic Pulse Welded Al/Fe Joint Interface

Jiedi Li, Shinji Muraishi and Shinji Kumai

Effect of Amount of Fuel for Punchability in Punchless Impact Punching by Compression Ignition

Masahito Katoh

Analysis of Graphite Nuclear in Spheroidal Graphite Cast Iron and Mechanism of Nodule Count Increase by Bismuth Oxide

Hiroaki Tsuji, Hiroyuki Chono, Nobuya Yamamoto,
Tokio Kai and Yoshio Igarashi

Engineering Materials and Their Applications

Microstructural Evolution in Magnesium after Hyper-Velocity Impact of Alumina Projectile

Naoki Fujita, Tatsuya Nakatsuji, Sunao Hasegawa,
Naoko Ikeo, Eiichi Sato and Toshiji Mukai

Bioactivation of Yttria-Stabilized Tetragonal Zirconia Surface via a Chemical Treatment Process- ing Using a Calcium-Phosphate Slurry

Mitsuhiro Hirano, Yusuke Konaka and Naofumi Ohtsu

Effect of Lamellar Spacing on Creep Strength of α -Mg/C14-Mg₂Ca Eutectic Alloy

Koji Oishi, Satoshi Araki and Yoshihiro Terada

—Current Trends in Research—

Review of “12th Japanese-Polish Joint Seminar on Micro and Nano Analysis (August 29–September 1, 2018)”

Manabu Ishimaru

—Express Rapid Publication—

Visualization of Microscopic-Scale Strain Distributions in Martensitic Steel over a Wide Range of Tensile Strain by Using Digital Image Correlation Method on Replica Film

Norimitsu Koga, Motoki Fujita and Chihiro Watanabe

Editor's Announcement



(2021年6月22日～2021年7月20日)

正 員

岩崎 秀 北海道大学
北原龍之介 住友重機械工業株式会社
佐久田博司 青山学院大学

高橋 幸一 日鍛バルブ株式会社
土井 研児 大阪冶金興業株式会社
古垣 孝志 株式会社タクマ

松尾友紀子 名古屋工業大学
宮本 寛幸 大同特殊鋼株式会社

学 生 員

青木 勇太 東京大学
青山 恵太 京都大学
秋山 柚貴 筑波大学
浅井康之介 名古屋工業大学
阿出川 潤 千葉工業大学
安藤 拓澄 東京工業大学
飯岡 諒 群馬大学
池ノ本翔馬 九州大学
石 揚 翔 熊本大学
石崎誠太郎 熊本大学
石田 和也 東北大学
石田 素子 東海大学
石野 佑樹 名古屋大学
一 藁 大志 兵庫県立大学
伊藤 太一 富山大学
伊比井亜弥音 東海大学
岩井 駿平 兵庫県立大学
岩田 知紘 北海道大学
上田 峻也 兵庫県立大学
上道 捷平 大阪大学
上村 魁 大阪府立大学
鶴川 大輝 京都大学
内田茉友子 奈良女子大学
遠藤 稜 東京工業大学
及川 大地 千葉工業大学
大久保 龍 熊本大学
大崎 慎也 大阪府立大学
太田 知也 京都大学
大竹 善行 名古屋工業大学
大谷 涼 神戸大学
大西 啓太 名古屋工業大学
大林 浩也 大阪府立大学
小笠原伊吹 東北大学

岡部 修一 大阪大学
岡本 慶介 大阪大学
小野 公輔 千葉工業大学
郭 子 萌 九州大学
勝井 陽介 神戸大学
勝山湧太郎 名古屋大学
金井 宏喜 芝浦工業大学
金森 円花 関西大学
川島 遼都 千葉工業大学
北浦 雄大 大阪大学
北野 竜也 兵庫県立大学
木村 大河 茨城大学
グプタ ムリドゥル 大阪大学
國分 悠輔 京都大学
小寺 貴大 芝浦工業大学
後藤真矢子 名古屋工業大学
齊藤 大貴 長岡技術科学大学
坂井 優斗 熊本大学
酒井 諒二 長岡技術科学大学
坂口 徳光 九州大学
佐々木嘉葵 東北学院大学
佐藤 壮平 九州大学
佐藤 ひかる 秋田大学
佐藤 諒一 同志社大学
實方 涼二 千葉工業大学
篠原 諒 神戸大学
杉山 爽平 東京大学
鈴木 直亮 神戸大学
関 広太 日本大学
関 裕俊 足利大学
SONG CHANGJUN 北海道科学大学
高橋 朋之 群馬大学
高橋 直哉 新居浜工業高等専門学校

高橋 風 新居浜工業高等専門学校
竹内 薫 長岡技術科学大学
竹内 喬亮 東北大学
田嶋 晃 東海大学
田中 健治 東京工業大学
千島 祐也 芝浦工業大学
塚本 晨 東京理科大学
津村 宙樹 九州工業大学
鶴見 昂樹 愛媛大学
出口 凌 兵庫県立大学
寺門 雅文 足利大学
樋沢 美咲 岩手大学
時任 史菜 九州大学
徳富 可子 東京工業大学
鳥山 佳孝 同志社大学
長岡 駿弥 九州工業大学
中川 奎 福井大学
仲嶋 飛向 山形大学
中谷 勇喜 東北大学
長野 杜春 鹿児島大学
中村 駿介 神戸大学
中村 丞 東北大学
中元 綾乃 東京大学
鍋田 純治 九州工業大学
根本 壮弥 東北学院大学
野口 聖史 東京大学
野口 大 神戸大学
野崎 萌 芝浦工業大学
能勢 二郎 九州大学
野田 航希 名古屋大学
萩本 隆雅 東京工業大学
波頭 直輝 京都大学
濱里 恒彦 熊本大学

原 知 史 大阪大学
 平 井 開 都 東海大学
 平 岡 俊 亮 大阪府立大学
 福田琳汰朗 長岡技術科学大学
 藤 井 達 也 東京都立大学
 藤 本 智 大 富山大学
 二 塚 俊 洋 東京大学
 星 野 海 大 北海道大学
 本 宮 智 之 愛媛大学
 馬 聚 懷 九州大学
 前 岡 莉 歩 京都大学
 前 河 佳 晃 京都大学
 前 田 潤 也 富山大学
 前 山 光 兵庫県立大学
 牧 直 弥 金沢大学

牧 亮 志 熊本大学
 町 田 成 海 岡山大学
 松 岡 弘 剛 大阪大学
 真 鍋 光 喜 大阪大学
 三 川 陸 東北大学
 水 谷 洸 太 神戸大学
 三 井 明 北海道大学
 三津原晟弘 名古屋大学
 峯 田 陸 東北学院大学
 宮 内 創 香川県産業技術センター
 宮 崎 紘 平 東北大学
 宮 田 裕 都 名古屋工業大学
 宮 原 佐 季 千葉工業大学
 宮 本 芳 宏 熊本大学
 村 松 兼 志 東北大学

森 駿太郎 東京工業大学
 森 内 理 生 芝浦工業大学
 森 川 大 地 東京理科大学
 盛 国 祐 太 大阪府立大学
 保 田 大 河 熊本大学
 山 口 光 輝 島根大学
 山 崎 竣 成 千葉工業大学
 山 崎 萌 子 金沢大学
 山 田 理 久 大阪大学
 山 本 大 貴 九州大学
 吉 崎 友 哉 高知工科大学
 吉 間 晴 紀 大阪大学
 渡 邊 彩 恵 東北学院大学
 渡 邊 直 樹 東北大学

外国一般会員

WANG Hui 東京大学

外国学生会員

Kautsar Zulfa Hilmi 筑波大学
 Xu Yang Northwestern Polytechnical University
 zhenge zhu ningbo university
 ZHU Junyu 東京大学

YU YUE 筑波大学
 謝 昭 東京工業大学
 鐘 凱 文 芝浦工業大学
 孫 峰 東海大学

Yan Xinyu 東北大学
 LUO FANGFEI 大阪大学
 呂 德 桐 北海道大学



まてりあ第60巻10号 予告

金属なんでもランキング！ No. 16 蒸発熱
 [ブロムナード] 異分野融合の意味と意義 ……京大 宮野公樹
 [最近の研究] コンビナトリアル手法を用いた機能性材料の開発
 ……日大 高橋竜太 川島一裕
 無機2次元ナノシートが拓く原子層技術
 ……名大 長田 実
 [新 進 気 鋭] Ni 基耐熱合金の金属粉末成形技術の開発
 ……川崎重工(株) 日比野真也

[講義ノート] 金属製錬の熱力学(第4回)
 ……東大名誉教授 月橋文隆
 [実 学 講 座] 1-3 走査型電子顕微鏡を用いた分析手法
 1-3-2-1 後方散乱電子回折法(EBSD)による結晶
 方位解析……ファインセラミックスセンター 横江大作
 —他—

編集の都合により変更になる場合がございます。

行事カレンダー

太字本会主催(ホームページ掲載)

開催日	名称・開催地・掲載号	主催	問合せ先	締切
2021年9月				
1～3	第24回 XAFS 討論会 (Web 開催)	日本 XAFS 研究会	jxafs24@gmail.com https://conference/jxafs.org/	
1～3	日本セラミックス協会第34回秋季シンポジウム (Web 開催)	日本セラミックス協会	TEL 03-3662-5232 fall34@ceramic.or.jp https://fall34.ceramic.or.jp/	
2～4	第23回日本感性工学会大会 (Web 開催)	日本感性工学会	TEL 03-3666-8000 jske@jske.org https://www.jske.org/taikai/jske23	
6～7	第15回プラズマエレクトロニクス・インキュベーションホール (Web 開催)	応用物理学会プラズマエレクトロニクス分科会	TEL 053-478-1064 matsui.makoto@shizuoka.ac.jp http://annex.jsap.or.jp/plasma/PE_files/PE_SS_2021/	定員 60名
8～9	KISTEC 教育講座「“つける”と“はがす”の新技術—分子接合と表面制御コース」(川崎)	神奈川県立産業技術総合研究所	TEL 044-819-2033 manabi@kistec.jp https://www.kistec.jp/learn/researcher/molecular-bonding/	
8～10	2021年度工学教育研究講演会(信州大)	日本工学教育協会・川上	TEL 03-5442-1021 kawakami@jsee.or.jp http://www.jsee.or.jp/	
9	第193回腐食防食シンポジウム 化学プラントにおける炭素鋼製熱交換器の腐食事例と検査適用の実例 (Web 開催)	腐食防食学会	TEL 03-3815-1161 ysm.hng-113-0033@jcorr.or.jp http://www.jweld.jp/	
10	第97回レアメタル研究会(リアル講演会+Web 開催)(本号603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	
13～17	第9回対称性・群論トレーニングコース(つくば)	日本結晶学会	TEL 029-864-5196 tyoshimi@post.kek.jp http://pfwww.kek.jp/trainingcourse/	定員 20名
14	第7回大型実験施設とスーパーコンピューターとの連携利用シンポジウム (Web 開催)	高輝度光科学研究センター他	TEL 0791-58-2785 jasri-event@spring8.or.jp	
14～16	2021年度資源・素材関係学協会合同秋季大会 (Web 開催)	資源・素材学会	TEL 03-3402-0541 info@mmij.or.jp	
14～17	日本金属学会秋期講演大会(オンライン開催)(本号595頁)	日本金属学会	TEL 022-223-3685 FAX 022-223-6312 annualm@jim.or.jp	事前参加申込 8.27
15	技術セミナー (Web 開催)(本号597頁)	日本金属学会	TEL 022-223-3685 stevent@jim.or.jp	
17	オンライン学生キャリアサポートセミナー (Web 開催)(本号598頁)	日本金属学会	TEL 022-223-3685 stevent@jim.or.jp	
17	女性会員のつどい (Web 開催)(本号598頁)	日本金属学会	TEL 022-223-3685 stevent@jim.or.jp	
17～18	SPring-8 シンポジウム2021 (Web 開催)	SPring-8 ユーザー協同体 (SPRUC) 他	TEL 0791-58-2785 sp8sympo2021@spring8.or.jp http://www.spring8.or.jp/ja/science/meetings/2021/sp8sympo2021/	
21～23	第34回計算力学講演会 (Web 開催)	日本機械学会	https://www.jsme.or.jp	
28	腐食防食部門委員会第338回例会 (Web 開催)	日本材料学会	TEL 075-761-5321 jimu@office.jsms.jp https://www.jsms.jp	
29～30	第7回若手研究者および技術者のための高温強度講習会 (Web 開催)	日本材料学会	TEL 075-761-5321 jimu@office.jsms.jp http://www.jsms.jp/	定員 80名
30	第342回塑性加工シンポジウム「複合材加工技術の最前線」 (Web 開催)	日本塑性加工学会	http://www.jstp.or.jp	定員 80名
2021年10月				
1, 12.2～3	2021年度粉末冶金講座(ハイブリッド開催)	粉体粉末冶金協会	TEL 075-721-3650 https://www.jspm.or.jp/	
5	第7回統合的先端研究成果発表会(ハイブリッド開催)	軽金属奨学会	TEL 06-6271-3179 lm-foundation@nifty.com http://www.lm-foundation.or.jp/	
6	第18回ヤングメタラジスト研究交流会 (Web 開催)(本号600頁)	関東支部	masuda@material.t.u-tokyo.ac.jp	
7～8	第14回トライボロジー入門西日本講座 (Web 開催)	日本トライボロジー学会	TEL 03-3434-1926 jast@tribology.jp http://www.tribology.jp/	9.24
7～8	第55回 X 線材料強度に関するシンポジウム (Web 開催)	日本材料学会	TEL 053-478-1035 sakaida.yoshihisa@shizuoka.ac.jp http://www.jsms.jp/	講演 7.23
8	第72回白石記念講座 進化するポリマー—自動車における金属材料との共存共栄— (Web 開催)	日本鉄鋼協会	TEL 03-3669-5933 educact@isij.or.jp https://www.isij.or.jp/	
12～13	第8回フラクトグラフィ講習会(京都・Web 開催)	日本材料学会	TEL 075-761-5321 jimu@office.jsms.jp http://www.jsms.jp/	9.30
12～15	第7回材料 WEEK(京都)	日本材料学会	TEL 075-761-5325 jimu@office.jsms.jp http://www.jsms.jp	
13～14	第38回初心者のための疲労設計講習会(京都)	日本材料学会	TEL 075-761-5321 jimu@office.jsms.jp http://www.jsms.jp/	定員 60名
13～14	第49回日本ガスタービン学会定期講演会(福岡)	日本ガスタービン学会	TEL 03-3365-0095 gtsj-office@gtsj.org http://www.gtsj.org/	

開催日	名称・開催地・掲載号	主催	問合せ先	締切
18～20	第62回高压討論会(姫路)	日本高压力学会	TEL 070-5658-7626 tounonkai62@highpressure.jp http://www.highpressure.jp/new/62forum/	web 参加 10.8
19～20	ALC'21 Online (13th International Symposium on Atomic Level Characterizations for New Materials and Devices, Online) (Web 開催)	日本表面真空学会	TEL 03-3812-0266 office@jvss.jp	
23～24	日本銅学会第61回講演大会(Web 開催)	日本銅学会	TEL 03-6803-0587 dou-gakkai@copper-brass.gr.jp https://www.copper-brass.gr.jp/	
25～27	第42回日本熱物性シンポジウム(北大 or Web 開催)	日本熱物性学会	TEL 086-251-8046 jstp@okayama-u.ac.jp http://jstp-symp.org/symp2021/index.html	事前参加 9.10
25～27	第42回 超音波エレクトロニクスの基礎と応用に関するシンポジウム(浜松)	超音波エレクトロニクス協会	TEL 042-443-5166 h.nomura@uec.ac.jp	
26	第233回研究会/第92回ナノマグネティクス専門研究会「磁気記録技術の最近の研究動向」(Web 開催)	日本磁気学会	TEL 03-5281-0106 https://www.magnetics.jp/event/topical_233/	
26～28	第68回材料と環境討論会(Web 開催)	腐食防食学会	TEL 03-3815-1161 ysm.hng-113-0033@jcorr.or.jp https://www.jcorr.or.jp/	
27～29	トライボロジー会議2021 秋 松江(Web 開催)	日本トライボロジー学会	TEL 03-3434-1926 jast@tribology.co.jp http://www.tribology.jp/	
27～29	第57回熱測定討論会(Web 開催)	日本熱測定学会	TEL 03-5821-7120 netsu@mbd.nifty.com http://chem.ru.dendai.ac.jp/jccta57/	
27～29	第50回結晶成長国内会議(JCCG-50) (Web 開催)	日本結晶成長学会	TEL 070-5047-3339 jccg-50@jacg.jp https://www.jacg.jp/jp/event/2021/jccg-50/	
29～30	第72回塑性加工連合講演会(Web 開催)	日本塑性加工学会	TEL 03-3435-8301 http://www.jstp.or.jp/	
2021年11月				
1	研究集会「第二回状態図・計算熱力学研究会」(Web 開催)(本号600頁)	研究会 No. 85	abe.taichi@nims.go.jp	
2～19	第419回講習会「高精度高効率加工を支えるオンマシン/インプロセス計測技術～基礎から最先端研究動向・最新の活用事例まで～」(Web 開催)	精密工学会	TEL 03-5226-5191 https://www2.jspe.or.jp/form/koshukai/koshukai_form.html	
3～6	The 16th International Symposium on Advanced Science and Technology in Experimental Mechanics (Vietnam)	日本実験力学会・小林(新潟大)	TEL 025-368-9310 office-jsem@clg.niigata-u.ac.jp http://isem16.imech.ac.vn/	
4～6	ICMaSS2021持続性社会のための材料とシステムに関する国際会議2021(Web 開催)	ICMaSS2021 未来材料・システム研究所	TEL 052-581-3241 icmass2021@intergroup.co.jp http://www.icmass.imass.nagoya-u.ac.jp/	
5	第98回レアメタル研究会(東京)(本号603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	
5～6	第57回 X 線分析討論会(福岡大)	日本分析化学会 X 線分析研究懇談会	TEL 092-871-6631(内線6218) xbun57@fukuoka-u.ac.jp https://xbun.jsac.jp/conference/no57.html	
8	2021年度溶接工学企画講座 ～産業分野のものづくりのトレンド～「自動車関連材料の溶接・接合技術自」～(Web 開催)	溶接学会	TEL 03-5825-4073 jws-info@tg.rim.or.jp http://www.jweld.jp/	
9	2021年度 溶接工学専門講座 溶接疲労強度評価の基礎と応用(Web 開催)	溶接学会	TEL 03-5825-4073 jws-info@tg.rim.or.jp http://www.jweld.jp/	
10	日本希土類学会第39回講演会(横浜)	日本希土類学会	TEL 06-6879-7352 kidorui@chem.eng.osaka-u.ac.jp http://www.kidorui.org/lecture.html	
12	第242回西山記念技術講座 最近の電気炉技術の進歩—平成30年間を振り返る—(Web 開催)	日本鉄鋼協会	TEL 03-3669-5933 educact@isij.or.jp https://www.isij.or.jp/	
12～14	創立70周年記念軽金属学会第141回秋期大会(Web 開催)	軽金属学会	https://www.jilm.or.jp/	事前 11.11
13	日本機械学会関東支部山梨講演会(山梨大)	日本機械学会関東支部	TEL 055-220-8434 ydc2021-tr@yamanashi.ac.jp http://society.me.yamanashi.ac.jp/jsme/2021/	
15～18	The 7th International Conference on the Characterization and Control of Interfaces for High Quality Advanced Materials (ICCCI2022) (富士吉田)	粉体工学会	http://ceramics.ynu.ac.jp/iccci2022/index.html iccci2022@ynu.ac.jp	
17	第79回固体イオニクス研究会(Web 開催)	日本固体イオニクス学会	TEL 092-802-6967 proton@ifrc.kyushu-u.ac.jp	
17～19	INCHEM TOKYO 2021(東京)	化学工学会, 日本能率協会	TEL 03-3434-1988 INCHEM@jma.or.jp	
22～24	第20回破壊力学シンポジウム(和歌山県西牟婁郡)	日本材料学会	TEL 075-761-5325 jimu@office.jsms.jp http://www.jsms.jp/	

開催日	名称・開催地・掲載号	主催	問合せ先	締切
25～26	電気加工学会全国大会(2021)(Web開催)	電気加工学会	zaikawa.kouichi@fitc.pref.fukuoka.jp TEL 093-691-0260 http://www.jseme.or.jp/	
28～12.2	The 9th International Symposium on Surface Science (ISSS-9)(高松)	日本表面真空学会	iss9@jvss.jp https://www.jvss.jp/iss9/	
29	研究集会“微小領域の力学特性評価とマルチスケールモデリング”2021(Web開催)(本号600頁)	研究会 No. 82	micromech_jim@nims.go.jp	
30～12.1	シンポジウム「先進自動車製造技術における接合技術2021」(Web開催)	溶接学会軽構造接合加工研究委員会	TEL 075-315-8472 jaaa@secretari.jp https://jaaa.secretari.jp/reg2021/guide/index.html	
2021年12月				
1	経産省・文科省連携磁性材料・高効率モータープロジェクト「MagHEM・ESICMM 合同成果報告会」(東京)	経済産業省(次世代自動車向け高効率モーター用磁性材料技術開発)	TEL 029-851-3354(内線3725) HIROSAWA.Satoshi@nims.go.jp	
1～3	第48回炭素材料学会年会(那覇)	炭素材料学会	TEL 03-5389-6359 tanso-desk@bunken.co.jp http://www.tanso.org/contents/event/conf2021/index.html	
1～3	EcoDesign2021(奈良)	エコデザイン学会連合	ecodesign2021_secretariat@ecodenet.com http://ecodenet.com/ed2021/	
8～10	第47回固体イオニクス討論会(徳島)	日本固体イオニクス学会	TEL 088-656-7577 nakamura.o.koichi@tokushima-u.ac.jp https://www.ssi-j.org/symp/ssi47/index.html	
9～10	第36回分析電子顕微鏡討論会(Web開催)	日本顕微鏡学会	TEL 011-706-6768 bunseki@eng.hokudai.ac.jp https://bunseki-denken.eng.hokudai.ac.jp/	11.30
9～10	2021年度 溶接入門講座～新入社員・構造部材設計技術者のための～(Web開催)	溶接学会	TEL 03-5825-4073 jws-info@tg.rim.or.jp http://www.jweld.jp/	
9, 10, 16	2021年度計算力学技術者(CAE技術者)1・2級の認定試験	日本機械学会	TEL 03-4335-7616 caenintei@jsme.or.jp http://www.jsme.or.jp/cee/	
9～10	第20回キャビテーションに関するシンポジウム(Web開催)	日本学術会議 第三部(予定)第20回キャビテーションに関するシンポジウム実行委員会	TEL 022-217-5229(直通) cav20-sendai@grp.tohoku.ac.jp http://www.ifs.tohoku.ac.jp/cfs/cav20/index.html	
10	第24回生体関連セラミックス討論会(京大)	日本セラミックス協会	https://www.ceramic.or.jp/bseitai/symposium/24th_Symp.html	
13～17	Materials Research Meeting 2021(MRM2021)(横浜)	日本 MRS	TEL 03-6264-9071 info_mrm@jmru.org https://mrm2021.jmru.org/	
2022年1月				
7	第99回レアメタル研究会(東大生産技研 or Web開催)(本号603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	
8～9	第60回セラミックス基礎科学討論会(熊大)	日本セラミックス協会基礎科学部会	kiso60@chem.kumamoto-u.ac.jp http://www.ceramic.or.jp/bkiso	
2022年2月				
1～14	Mate2022 28th Symposium on “Microjoining and Assembly Technology in Electronics”(Web開催)	スマートプロセス学会他	TEL 06-6879-7568 mate@sps-mste.jp http://sps-mste.jp/mate/	
2022年3月				
11	第100回レアメタル研究会(東大生産技研 or Web開催)(本号603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	
15～17	日本金属学会春期講演大会(東京大学駒場キャンパス)(予定)	日本金属学会	TEL 022-223-3685 FAX 022-223-6312 annualm@jim.or.jp	
2022年9月				
4～8	第18回アルミニウム合金国際会議(ICA18)(富山)	軽金属学会	http://www.icaa18.org/	
21～23	日本金属学会秋期講演大会(福岡工業大学)(予定)	日本金属学会	TEL 022-223-3685 FAX 022-223-6312 annualm@jim.or.jp	





- 日本金属学会秋期講演大会は、9月14日(火)～17日(金)、オンラインにて開催いたします。
後期(当日)申込は、9月17日まで可能ですので、是非、ご参加下さい。
また、9月14日(火)18:30～のオンライン懇親会へのご参加もお待ちしております。(詳細は本号会
告597頁を参照下さい)
- 今後の講演大会開催日程(予定)
2022年春: 3月15日(火)～17日(木) 東京大学駒場キャンパス
秋: 9月21日(水)～23日(金) 福岡工業大学

◇会報編集委員会より◇

今回のまてりあ60巻記念企画は、Back to 1962年(2回目)と本会の各種委員会活動記事の特集しました。
この後も本企画をどうぞお楽しみ下さい。



新刊紹介

『プレゼンテーション Zen 第3版』

ガー・レイノルズ 著 熊谷小百合、白川部君江 訳

2021年 B5変 352頁 丸善出版(株) 定価(本体2,600円+税)

2021, 2022年度会報編集委員会 (五十音順, 敬称略)

委員長	竹田 修						
副委員長	田中 秀明						
委員	池尾直子	石川史太郎	井田駿太郎	植木 洸 輔	宇部 卓 司	大塚 誠	
	大野直子	岡田周祐	川西 咲子	木口賢紀	北村一浩	國枝知徳	
	小嶋隆幸	小島淳平	小柳 禎彦	小山元道	齊藤雄太	近藤亮太	
	齊藤信雄	篠原百合	佐々木秀顕	佐藤豊人	芹澤 愛	鈴木賢紀	
	鈴木真由美	田辺栄司	高島克利	高山直樹	堤 祐介	趙 研	
	塚田祐貴	寺本武司	圓谷貴夫	寺西 亮	轟 直人	土井康太郎	
	徳永透子	長岡 亨	豊木研太郎	永井 崇	長谷川 誠	永瀬丈嗣	
	袴田昌高	本間智之	春本高志	藤井 進	松本洋明	松浦昌志	
	松垣あいら	宮崎秀俊	眞山 剛	三井好古	諸岡 聡	宮部さやか	
	盛田元彰	山本剛久	山崎由勝	山中謙太	吉年規治	山本知一	
	横井達矢	李 誠 鎬					

まてりあ 第60巻 第9号(2021) 発行日 2021年9月1日 定価1,870円(本体1,700円+税10%)送料120円

発行所 公益社団法人日本金属学会

〒980-8544 仙台市青葉区一番町一丁目14-32

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

発行人 山村英明

印刷所 小宮山印刷工業株式会社

発売所 丸善雄松堂株式会社

〒160-0002 東京都新宿区四谷坂町 10-10

Materials Transactions 投稿の手引き

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

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

1. Mater. Trans. に投稿可能な論文

(1) Regular Article (10 頁以内)

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

日本金属学会誌の学術論文または速報論文に Web 掲載後 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、英訳した論文を投稿できる。その事を脚注に明記する。ただし査読の結果、返却もあり得る。

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

(2) Review (15 頁以内)

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

(3) Overview (15 頁以内)

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

(4) Technical Article (10 頁以内)

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

日本金属学会誌もしくはまてりあに Web 掲載後 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、英訳した論文を投稿できる。その事を脚注に明記する。ただし査読の結果、返却もあり得る。

(5) Current Trends in Research (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) Express Rapid Publication (4 頁以内)

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

(7) Opinion (2 頁以内)

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

(8) その他理事会で決議した分類

2. 投稿の方法

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

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

3. 原稿

執筆要領に従って原稿を作成し指定のファイル形式に変換したものを提出する。

3.1 記載内容

① 題目・著者名・研究機関、② 英文概要・Keywords、③ 本文、④ 謝辞、⑤ 文献、⑥ Appendix、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、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

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

5. 校正

初校は著者の責任で行う。著者校正は原則として 1 回とし、誤植の修正に限る。

6. 投稿者負担金

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

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

※オンラインジャーナルのみ(冊子・別刷はすべてモノクロ表示)。

6.3 Regular Article の迅速掲載費用: 11,000 円(税込)。

高温真空 3000℃への挑戦

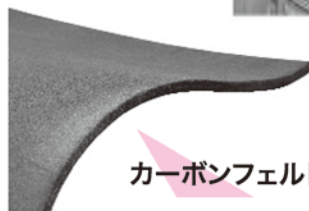
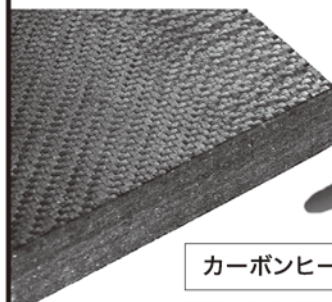
URL: <http://www.mechanical-carbon.co.jp/>

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



炉の改修

ハイブリット成形断熱材



カーボンフェルト

高断熱+省エネ

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

6面シート
貼り



メカニカルカーボン工業株式会社

本社: 247-0061 神奈川県鎌倉市台5-3-25 TEL. 0467-45-0101 FAX. 0467-43-1680

工場: 新潟工場・本社工場・野村工場(愛媛)・広見工場(愛媛) 事業所: 郡山・東京・大阪・松山・周南・福岡

お問い合わせEメール mck@mechanical-carbon.co.jp

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

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 ¥11,000.-

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 ¥11,550.-

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 ¥9,680.-

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) ¥3,410.-

■Diamond (原子450個) ¥7,700.-

■Beta-Quartz (原子1,400個) ¥14,960.-

■Mica (原子1,550個) ¥27,720.- 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 pro (Design Institute for Physical Property Data)

価格 ¥385,000.-/¥66,000.- (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イスソフトウェア(DIADEM)付きのスタンドアロンシステムです。

おもな機能(DIADEM)

■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 (AIChE DIPPR Project 801)

30,000件のセラミックス状態図データベース

ACerS-NIST

Phase Equilibria Diagrams, Version 4.4

価格 ¥198,000.- マルチユーザー ¥286,000.-

検索条件

■成分系、元素記号

■著者、出典誌名、出版年

■状態図番号

データ表示

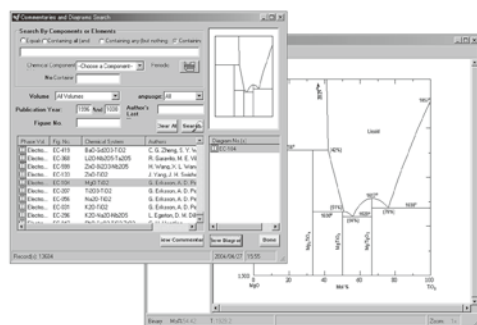
◆モル百分率↔重量百分率

◆Lever rule計算

◆ズームアップ/ズームダウン

データソース/新データ2,500件を追加

●Phase Diagrams for Ceramists (Volumes I・III, Annual Volumes '91, '92 and '93, High Tc Superconductor monographs (two), Phase Diagrams for Zirconium + Zirconia Systems and Phase Diagrams for Electronic Ceramics Vol.15)



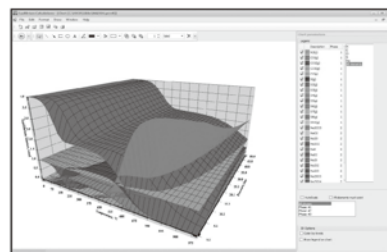
システムプラットフォーム: Windows 8/10

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 ¥319,000.-/¥110,000.- (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 8/10
(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>