

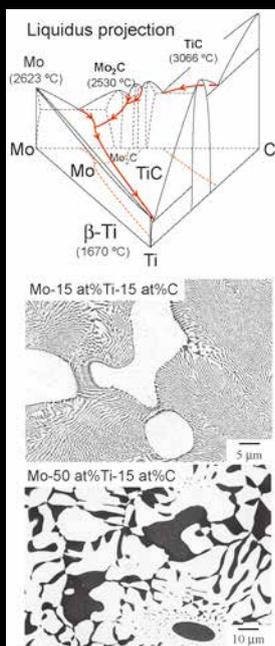
Materia Japan

まてりあ Vol.63

MTERE2 63 (8) 527~602 (2024)

No.8

2024



• 金属なんでもランキング!
銅における不純物拡散係数の活性化エネルギー

巻頭
記事 “金属” で病を治す

- レーザ積層造形が生み出す非平衡組織の制御
- 界面やバルクにおける電氣的スピン変換技術
- Mo-Ti-C 三元系の凝固組織と非化学量論 TiC の弾性率

実学
講座

金属材料実験の手引き 2. 特性の計測評価
2-3 磁気特性の計測と解析
2-3-1 磁気測定的基础：静的磁化測定

- 先達からのお便り
- What's 技術士?

**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、パフを含めて定価100万円(税別)

精密切断機 MINICUT 4000

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



試料埋め込み材料、アクセサリ

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

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

カタログおよび価格表は弊社にお問い合わせください

フリツチュ・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

8

2024
Vol.63
No.8

まてりあ

金属なんでもランキング！ No. 25 銅における不純物拡散係数の活性化エネルギー	527
巻頭企画 “金属” で病を治す	528
最近の研究 レーザ積層造形が生み出すアルミニウム合金の非平衡組織・準安定相の多元素化による制御 高田尚記	533
<small>金属 3D プリント技術のレーザー粉末床溶融結合法が生み出す非平衡組織と準安定相の制御に向けた材料設計を紹介。優れた高温強度や高い熱伝導率を発現します。</small>	
界面やバルクにおける電氣的スピン変換技術 福間康裕	540
<small>イオン照射した白金薄膜のスピンホール効果やチタン酸ストロンチウム接合界面のラッシュバ・エデルシュタイン効果を利用した電流からスピン流への変換技術を紹介。</small>	
新進気鋭 TiC の利活用の拡大に向けた Mo-Ti-C 三元系における凝固組織および非化学量論 TiC の弾性率の研究 井田駿太郎	549
トピックス 電子顕微鏡における遠隔観察・遠隔操作の現状 平田智丈	554
実学講座 金属材料実験の手引き 2. 特性の計測評価 2-3 磁気特性の計測と解析 2-3-1 磁気測定の基礎：静的磁化測定 小野寺礼尚 喜多英治	556
先達からのお便り 濡れと鋳物の二刀流 中江秀雄	568
研究所紹介 広島県立総合技術研究所 東部工業技術センター 加工技術研究部 坂村 勝	573
東北大学国際放射光イノベーション・スマート研究センター(SRIS) 高橋幸生	574
What's 技術士？ 企業内技術士の活動紹介～技術者として『ありがたい姿』の追求～ 藤間美子	575
思い出の教科書、この一冊！ 続 金属学プロムナード —セレンディピテイの誕生そして迷走— 小岩昌宏(著) 毛利哲夫	578
本会記事 会告	580
次号予告	598
掲示板	593
行事カレンダー	599
会誌・欧文誌 8 号目次	597
新入会員	602

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

【今月の表紙写真】 Mo-Ti-C 三元系の液相面および Mo-15 at%Ti-15 at%C と Mo-50 at%Ti-15 at%C の凝固まま材の反射電子像。
(井田駿太郎著 551頁 図3より掲載)

表紙デザイン：ビーコン コミュニケーションズ株式会社 グラフィックスタジオ

複写をご希望の方へ

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

Materia Japan

Volume 63 Number 8 August 2024

Contents

Ranking of Metals	Activation Energy of Impurity Diffusion Coefficient in Copper	Yuhki Tsukada	527
Top Article	Healing Diseases with Metals		528
Recent Research			
	Multi-elemental Control of Non-equilibrium Microstructures and Metastable Phases of Aluminum Alloys Produced by Laser Additive Manufacturing	Naoki Takata	533
	Charge-to-spin Conversion in Bulk and Interfaces	Yasuhiro Fukuma	540
Emerging Young Researchers			
	Study of Solidification Microstructure and Elastic Moduli of Off-stoichiometric TiC in Mo-Ti-C Ternary System for Expansion of TiC Utilization	Shuntaro Ida	549
Topicks			
	Current Status of Remote Observation and Remote Control in Electron Microscopes	Tomotake Hirata	554
Practical Courses			
	Experimental Guides for Metallic Materials: 2. Measurement and Evaluation of Material Properties		
	2-3 Structural Measurement and Analysis Using X-rays		
	2-3-1 Introduction of Basic Magnetometry: Basic of Static Measurement	Reisho Onodera and Eiji Kita	556
Letters from Seniors			
	Two-way Player with Wetting and Castings	Hideo Nakae	568
Welcome to My Laboratory			
	Hiroshima Prefectural Technology Research Institute Eastern Region Industrial Research Center Material Processing Research Division	Masaru Sakamura	573
	International Center for Synchrotron Radiation Innovation Smart(SRIS), Tohoku University	Yukio Takahashi	574
What's the Professional Engineers?			
	Introduction to Company-internal Professional Engineers: Pursuing My Ideal Engineer	Yoshiko Fujima	575
My Memorable TextBook			
	Zoku Kinzokugaku Promenade by Masahiro Koiwa	Tetsuo Mohri	578

Published by THE JAPAN INSTITUTE OF METALS AND MATERIALS

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

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

©2024 The Japan Institute of Metals and Materials

How to Obtain Permission

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

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



金属なんでもランキング!

No.25 銅における不純物拡散係数の活性化エネルギー

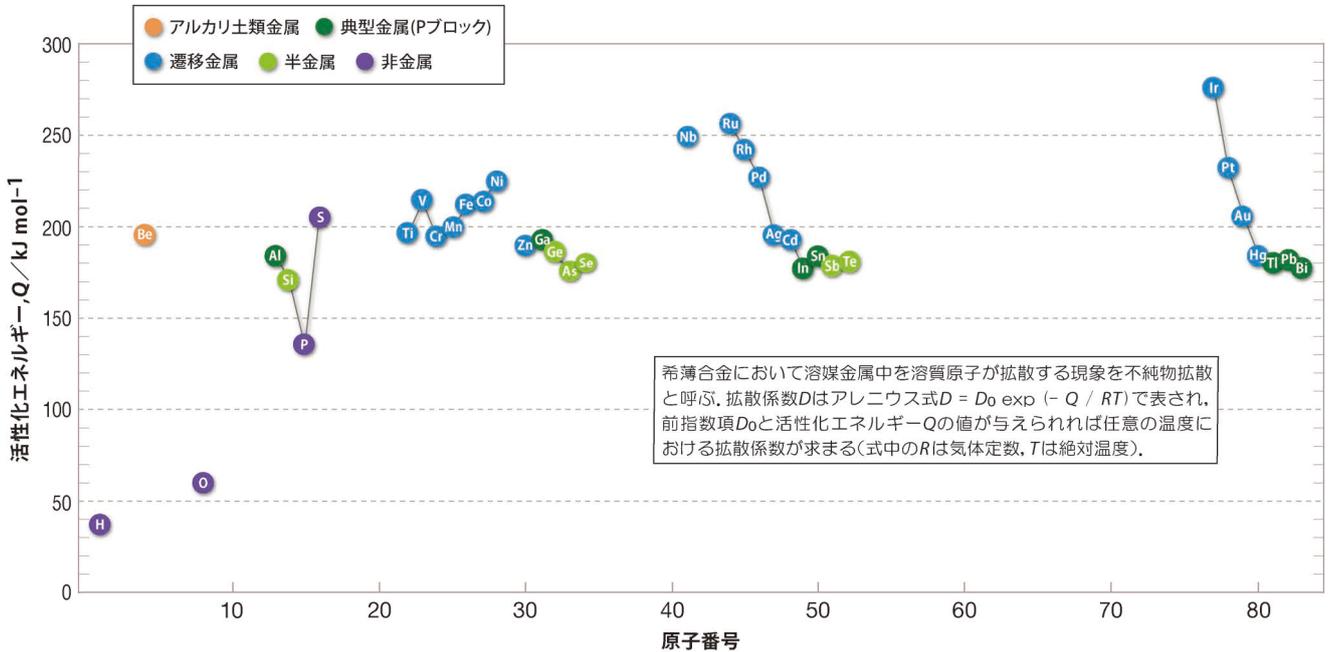


図1 銅における溶質元素の不純物拡散係数の活性化エネルギー。

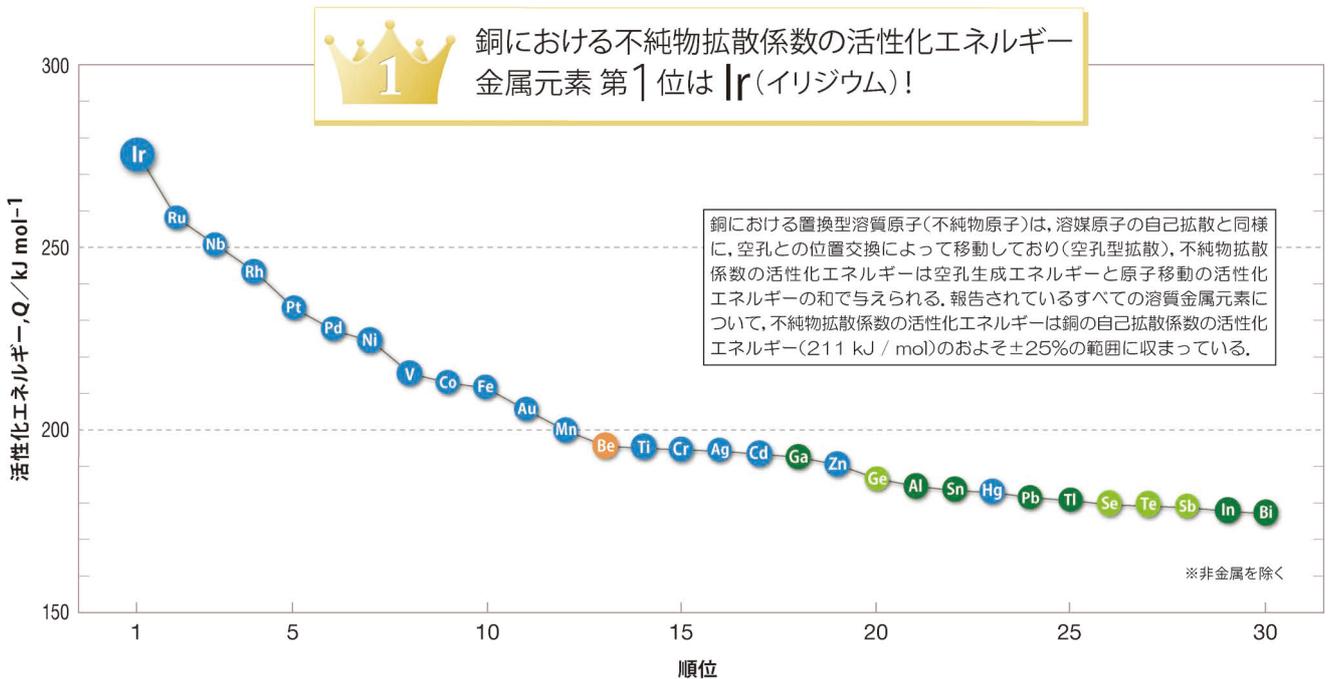


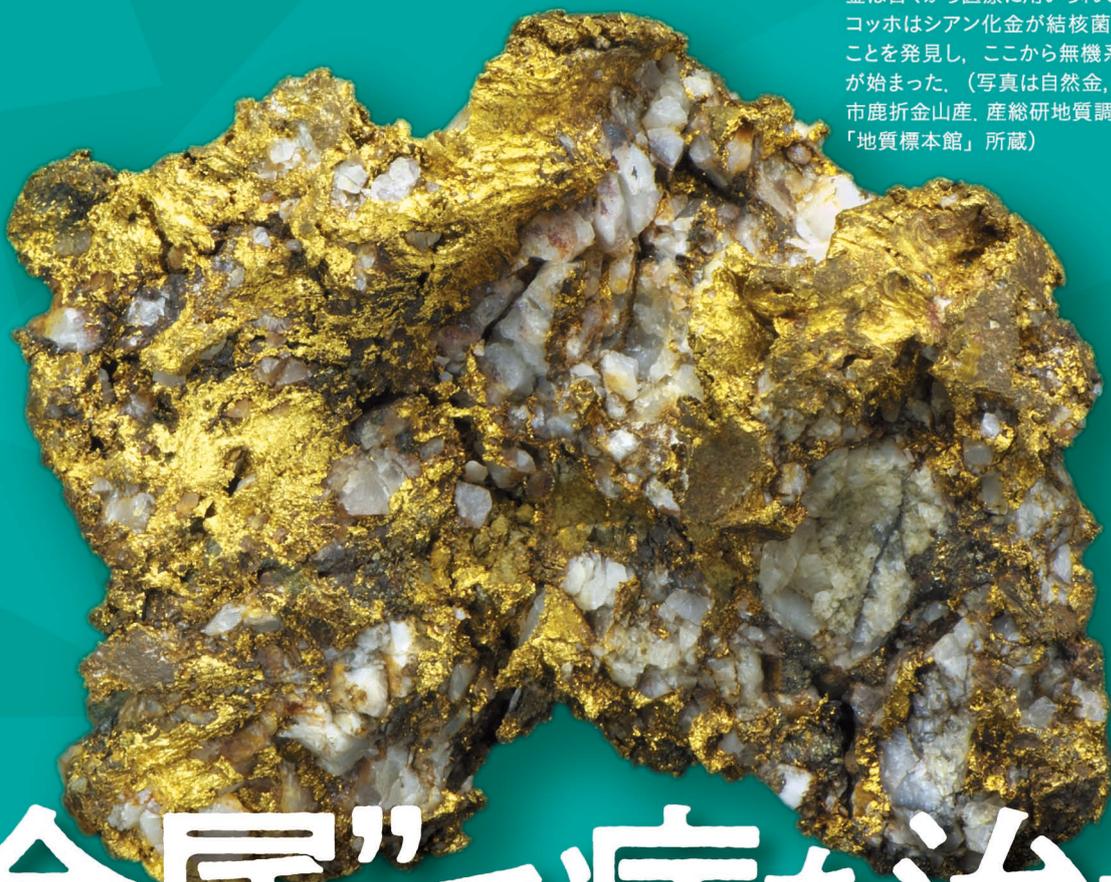
図2 銅における溶質金属元素の不純物拡散係数の活性化エネルギーランキング(上位30位まで)。

参考文献:

- (1) 改訂4版金属データブック: 日本金属学会編, 丸善, (2004).
- (2) G. Neumann and C. Tuijn: Self-diffusion and Impurity Diffusion in Pure Metals, Elsevier, (2009).

次回! 金属素描 No.36 錫

金は古くから医療に用いられてきた。1890年、コッホはシアン化金が結核菌の成長を抑えることを発見し、ここから無機系医薬品の研究が始まった。（写真は自然金、宮城県気仙沼市鹿折金山産。産総研地質調査総合センター「地質標本館」所蔵）



“金属”で病を治す

金属元素は生体においてイオンや化合物といった形態で含まれているほか、古代から薬の原料成分として採用され、病気を治し健康を維持する上で重要な役割を果たしてきた。

このことを示す慣用語の一つとして「薬石効なく」があり、

「石」、すなわち鉱物が薬と同様に薬効を期待されていたことが分かる。

薬の歴史を紐解くと、多くの金属元素に秘められた多彩な力を改めて認識させられる。

今回は、金属元素と病の関係をテーマに、

有史以来伝えられる“薬効”について様々なエピソードを紹介する。



古代から利用されてきた薬⁽¹⁾⁻⁽³⁾

人類が初めて薬を使ったのは、いつのことだろうか。

紀元前3000年頃の古代メソポタミアの粘土板の記録によれば、当時は植物薬250種、動物薬180種、鉱物薬約120種が知られており、発熱を伴う病気、疫病、卒中、眼病、耳の病気、皮膚病、心臓病、リウマチ、性病などの治療のために使われていたという。

紀元前1550年頃に古代エジプトで書かれたエーベルス・パピルスは、かの地の医学の最も古い記録と言われている。これによれば、処方薬800種、植物・動物・鉱物薬700種が使われ、鉱物薬には食塩、硝石（硝酸カリウム）、炭酸ナトリウム、辰砂（しんしゃ、硫化水銀鉱物）、明礬（みょうばん、硫酸アルミニウムカリウム）、胆礬（たんぱん、硫酸銅鉱物）、マグネシウム、瀝青炭（黒色粘着性炭化水素）、鉛白（炭酸水酸化鉛）、鉄、銅、宝石の粉末などが使われていた。対象となっていた傷病は、肺・心臓・腹部の病気、寄生虫感染、腹水浮腫、咽頭粘液疾患、膀胱障害、皮膚病、血管神経疾患、婦人病、小児病、創傷など非常に幅広い。

一方、中国では、後漢から三国時代（25～280年）に成立した本草書である神農本草経（しんのうほんぞうきょう）に、天然薬365種のうち鉱物薬が45種を占めると記されている⁽⁴⁾。

日本でも、昔から鉱物が病気の治療に用いられた記録が残っている。8世紀中頃の奈良時代に建設された奈良・東大寺の正

倉院では、当時の宝物（御物）とともに、薬も保存されている。また、益富壽之助が行った鉱物薬（石薬）の調査結果が、1958年に出版されている⁽⁵⁾。ここでは約60種類の鉱物性の薬物が確認されており、帳内薬物（日常的に使用される薬物）は19種類、帳外薬物（緊急時に使用される薬物）は6種類あり、ナトリウム、カルシウム、マグネシウム、アルミニウム、ケイ素、ヒ素、鉄、鉛、水銀などを含むものが全体の30%を占めていることが明らかになっている。

いずれの記録から見ても、私たちの祖先は自然の植物や動物、鉱物を利用して薬を作り、利用してきたことが窺える。

錬金術から継承された薬の研究

価値の低い金属から価値の高い金属（特に金）を生み出そうとする、いわゆる錬金術は、古代エジプトに始まり、アラビアで発展して、10世紀ごろ確立された⁽⁶⁾。残念ながら金を作り出すことはできなかったが、金属についての科学的な考え方、抽出技術、ガラス器具などは中世のヨーロッパに伝えられた。

金属化合物を薬に利用することについて科学的な起点となったのは、16世紀に活躍したスイスの医学者、パラケルススである。パラケルススは鉱山で様々な鉱物を採取し、精製して、鉄、水銀、アンチモン、鉛、銅、ヒ素などの金属を含む化合物を内服薬として用いた。また、彼は「すべての物は毒であり、その毒性は量で決まる」と説いた。摂取量

をコントロールすれば薬として使うことができるという考え方、いわゆる「用量依存性」をこの時代に見出したことは、極めて画期的なことであった⁽¹⁾⁻⁽³⁾。

当時の医師の役割は、患者の体内に溜まった有害な物質を嘔吐により排出させることだったと言われている。医師であったパラケルススが用いた嘔吐剤には酒石酸アンチモンカリウム（吐酒石）があり、これはアンチモンを含む容器の中にワインを入れて温めることによって得られる石であった。ちなみに、アンチモンには虫除け効果があることが知られており、アイシャドウにも使用されていた（図1）。

17世紀頃、医学研究において「体内における必須元素の欠乏が、病気の原因となる」と考えられるようになり、各種元素に関する研究が盛んになった。元素欠乏の代表的な例は、鉄分の不足による貧血症である。19世紀には、ヨウ素の不足により甲状腺腫が起こることが明らかになった。その後、甲状腺腫の患者の地理的分布が調査された結果、内陸部に住む人に比べ、海岸部に住む人には甲状腺腫が少なかった⁽⁷⁾。そこで、内陸部に住む人にヨウ素を含むワカメの摂取を促したところ、症状が改善したという。

様々な元素に関する研究の進展の過程で、金属元素を含むタンパク質や酵素が多く発見されるようになった（表1）が、これには微量元素の分析技術の進歩が大きく影響した。さらに様々な病気と元素との関係が明らかになり、元素の特性を生かして薬を創っていくという発想から、多くの薬が開発されていった。

近代的な医薬品研究の始まり

鉱物を使った薬は専門的には無機系医薬品と呼ばれ、①無機化合物、②無機元素と有機化合物とが配位結合してできた金属錯体（錯塩）、③無機元素と有機化合物中の炭素との結合を含む有機無機元素複合体（有機金属化合物）、の3種類に分けられる⁽⁸⁾。現在の一般的な医薬品のうち99%は有機化合物系の医薬品であり、無機系医薬品の占める割合は極めて小さい。しかし、無機系医薬品には有機系医薬品には見られない特有用な治療効果が見いだされている。

次に、金属元素を用いた無機系医薬品研究の代表的な例を紹介する。1882年、

図1 アイシャドウに使われたアンチモン



エジプトの女王、クレオパトラのブルーのアイシャドウにはアンチモンと銅が使われていた。アンチモンの虫除け効果が古くから知られていたからである。（写真は映画「クレオパトラ」1963年（米）より。©Getty Images）



柱状の結晶が美しい輝安鉱は、アンチモンを含む鉱物である。輝安鉱はスティブナイト（Stibnite）と呼ばれるが、この語源はアイシャドウを意味するギリシャ語のスティビ（Stibi）であり、アンチモンの元素記号Sbも同じ語源から名づけられた。（写真は輝安鉱、愛媛県西条市産、産総研地質調査総合センター「地質標本館」所蔵）

ドイツのコッホは結核菌を発見し、その成長を抑制する効果のある化合物を見つけようと様々な化合物を結核菌に加えてみたところ、塩化金やシアン化金 (AuCN) などの金化合物に効果があることを発見した。

さらに、当時は結核の一種と考えられていたリウマチ性関節炎に対しても、その治療に金チオ硫酸ナトリウム (Na₃Au (S₂O₃)₂) などの金化合物の適用が試みられたが、毒性のため中止された。しかしその後、1927年に金一チオグルコース錯体の有効性が確かめられ、1960年には注射剤の金チオリンゴ酸ナトリウム (C₄H₃AuNa₂O₄SとC₄H₄AuNaO₄Sの混合物、シオゾール®)、1976年には経口投与剤のオーラノフィン (C₂₀H₃₄AuO₉PS) が見いだされた⁽⁹⁾。これらの錯体分子はいずれも、生体内には見られない金-硫黄結合を持つことから、このような特徴を持つ化合物が難病改善に役立つ可能性を示した例として注目された。

また、細菌学者エールリヒと日本からドイツに留学した細菌学者の秦佐八郎による梅毒治療薬の研究もよく知られている。1910年、2人は梅毒の治療薬として、ヒ素を含む有機ヒ素化合物であるサルバルサン606

(C₆H₆AsNO)を開発した。このときエールリヒは、現代の医薬品開発の基盤となる「化学療法」や「特効薬」という新しい考え方を提案した⁽⁸⁾。化学療法とは、病原微生物が生体に侵入して増殖した時に起こる感染症に対し、化学物質を用いて病原菌を撲滅し、症状を治癒させる療法のことであり、サルバルサンは世界最初の化学療法剤と言われる。その後、サルバルサンの使用により梅毒の患者数は半減し、1940年代にペニシリンが登場するまで用いられた。

現在使われている 代表的な無機系医薬品

現在使われている代表的な無機系医薬品の例を紹介する。

■白金を含む抗がん剤⁽⁸⁾

白金を使用した抗がん剤としてシスプラチン (Cl₂H₆N₂Pt) が知られているが、この薬は予期せぬ偶然、セレンディピティから生まれた。大腸菌の研究者であったローゼンバーグは、大腸菌を塩化アンモニウムを含む溶液に入れた際の挙動を調べていたところ、電流を流すと大腸菌が細長くなり、増殖が抑えられることを発見した。その原因を探るうち、白金電極から溶け出した白金イオンが塩化アンモニウムと結合してシス型の白金一アンモニア錯体となり、大腸菌の増殖を

阻害していたことが明らかになった。

その後ローゼンバーグは、100年以上も前に合成されていたペイロン塩が実はシスプラチンであり、これが動物の腫瘍抑制に効果があることを発見し、人間のがん治療にも用いられ、大いに役立てられた。

しかし、抗がん剤として第1世代に当たるシスプラチンはその効果の反面、毒性が強かったことから、その後より安全性の高い白金錯体が世界的に探索された。その結果、第2世代のカルボプラチンやネダプラチンが開発され、さらに1976年、日本の喜谷喜徳によって、第3世代の白金錯体と呼ばれるオキサリプラチンが開発された。

■鉄を含む高リン血症治療薬⁽⁸⁾⁽¹⁰⁾

透析や腎臓病では、腎臓からのリン排泄が低下すると高リン血症となる。治療には、消化管からのリン吸収を抑制するアルミニウム制酸剤、沈降炭酸カルシウム、炭酸ランタン水和物などが用いられてきたが、近年ではさらに安全性の高い薬として、クエン酸鉄 (III) 水和物 (リオナ®) が開発・使用されている。この薬では、必須元素である鉄が消化管内でリン酸と結合し、リンの消化管吸収を抑制する働きが認められている。

■亜鉛を含むウィルソン病治療薬と抗潰瘍薬⁽⁸⁾

ウィルソン病とは、肝臓、腎臓、脳などに銅が多量に蓄積して肝機能低下などの障害を起こす先天性の銅代謝異常症である。治療としては、銅の摂取制限や排出促進などが行われる。低分子化合物である酢酸亜鉛水和物を投与すると、亜鉛成分が腸管

表1 金属含有タンパク質・金属含有酵素の例⁽¹¹⁾

金属元素	金属タンパク質・金属酵素・ビタミン
鉄 (Fe)	ヘモグロビン ミオグロビン 鉄-硫黄タンパク質
亜鉛 (Zn)	カルボキシペプチダーゼ サーモリシン スーパーオキシドジスムターゼ
銅 (Cu)	セルロプラスミン スーパーオキシドジスムターゼ アスコルビン酸オキシダーゼ メタロチオネイン
セレン (Se)	グルタチオンペルオキシダーゼ
マンガン (Mn)	コンカナバリン アルカリホスファターゼ スーパーオキシドジスムターゼ
モリブデン (Mo)	キサンチンオキシダーゼ
ニッケル (Ni)	ニトロゲナーゼ ウレアーゼ
バナジウム (V)	プロモベルオキシダーゼ
カドミウム (Cd)	メタロチオネイン
コバルト (Co)	ビタミンB ₁₂ の成分

表2 人間の体内における元素と必須元素
(太字は必須元素)⁽¹¹⁾

多量元素 (体内残存量 1%以上)	酸素、炭素、水素、窒素、カルシウム、リン
少量元素 (0.01~1%)	硫黄、カリウム、ナトリウム、塩素、マグネシウム
微量元素 (0.0001~0.01%)	鉄、フッ素、ケイ素、亜鉛、ストロンチウム、ルビジウム、鉛、マンガン、銅
超微量元素 (0.0001%未満)	アルミニウム、カドミウム、スズ、バリウム、水銀、セレン、ヨウ素、臭素、モリブデン、ニッケル、ホウ素、クロム、ヒ素、コバルト、バナジウム

健康を支える金属元素の役割

INTERVIEW

病を治す金属元素のパワー

ある種類の動物は、岩塩を舐めて体内の塩分を補うという。人間も同様に、古代から天然の鉱物や温泉などを通じて必要な元素を摂取してきたのではないだろうか。それによって病気が治り、効果があることを知る。偶然の連続と経験知から、鉱物が薬に使われるようになったと想像できる。また、自然金や自然銅など独特の光沢がある鉱物を見て、古代人は未知のパワーを感じ取ったのだろう。古代の薬では、無機元素の果たした役割は大変大きかったことだろう。その後、生命科学の歴史の中で、人体には多くの元素が存在し、20数種類の元素が健康を維持するため

に欠かせない必須元素であることが明らかになった。

1910年の化学療法の発見が契機となり、無機元素とそれを含む金属錯体の能力が引き出され、それ以降、多くの無機系医薬品が開発されてきた。これらの薬は多くの人々の病気を治し、健康を守り、現在も世界中で多くの薬が開発されている。

今後期待される薬品に、核医学治療*を対象とした放射性核種がある。日本では現在4種類の放射性核種が核医学治療に承認されており、さらに新しい核種の探索の研究も進んでいる。この分野でも、金属元素は大きな役割を果たすことが期待されている。



桜井 弘さん

京都薬科大学名誉教授

*核医学治療：放射性同位元素を特定の疾患部やがん病巣に集中させ、放出される放射線の力により細胞を死滅させる治療法。

粘膜上皮細胞において金属キレート作用を有するメタロチオネイン（システインに富む金属結合タンパク質）の生成を誘導し、その増加したメタロチオネインが銅と結合して体外に排出させ、結果として銅の体内吸収を抑制する働きがあり、治療薬として承認されている。

また、既に潰瘍抑制作用が発見されていた亜鉛イオンとカルノシン（ $C_9H_{14}N_4O_3$ ）を結合して合成された亜鉛-カルノシン錯体（ポラプレジック）は相乗的に作用して胃潰瘍治療作用を持つことが藤村一と高美茂夫らにより発見され、こちらも医薬品として承認されている。

我が国では古くから多くの無機系医薬品が開発されてきた。例えば、1961年に開発された胃腸薬の銅-クロロフィルカリウム（サクロン®）は、クマザサから抽出した成分を銅錯体に変換したものである。

また、胃粘膜の修復作用を持つ薬の開発では、抗ペプシン（タンパク質を分解する酵素）作用・胃粘膜保護作用を持つショ糖硫酸エステルアルミニウム塩（スクラルファート、 $C_{12}H_{54}Al_16O_{75}S_8$ ）が1968年に開発された。

必須元素とサプリメント

人体内に存在している元素は、存在量別に4つのグループに分けられる（表2）。体内存在量が1質量%以上の元素は「多量元素」と呼ばれ、酸素、炭素、水素、窒素、カルシウム、リンがある。これらを合計すると、体重の98.5%を占める。続いて0.01~1%の元素は「微量元素」と呼ばれ、多量元素と合わせると体重の99.4%を占める。これより量が少ない「微量元素」は体内存在量が0.0001~0.01%、「超微量元素」は0.0001%未満である。しかし、存在量が少ない元素にも、人間の生存にとって不可欠な必須元素が多い。人体で必須元素が欠乏すると様々な症状が現れ、その元素を補うと症状が回復する。これは、その元素が体内で特有の役割を果たしていることを示す。この必須元素の働きがあつてこそ、人間は生命活動を営むことができる。

現代人が金属元素を摂取する手段の一つに、サプリメントの利用がある。多忙な生活や偏った食生活により必要な栄養素を十分に摂取できない場合、サプリメントがそれ

を補い、栄養バランスを整える手助けとなる。

近年、亜鉛の欠乏がよく指摘されている。日本では、推奨される亜鉛摂取量に多くの人が達していないという問題があり、特に子どもや高齢者、若い女性で深刻化している状況が指摘されている。亜鉛イオンは300種以上の酵素に存在し、人体にとって重要な微量元素である。亜鉛の欠乏は、皮膚炎や口内炎など多くの症状を引き起こす。亜鉛は食品から摂取する量が少ない上に、体内でタンパク質に結合し代謝を受け、体外に排出されるため、欠乏しやすい性質がある。

亜鉛欠乏の対策として、サプリメントの摂取がある。亜鉛は比較的毒性が低い元素であり、サプリメントで摂取しやすい。最近、サプリメントの摂取について関心が高まっているが、毎日の食事から必須元素をバランス良く摂取するだけでなく、必要に応じてサプリメントを利用することも一つの方法と考えられている。

こうして見てくると、人体と金属元素とは深い関わりを持っていることに改めて気付かされる。私たちが健康な生活を送る上で、金属元素は重要な役割を果たしている。

文 献

- (1) ルネ・ファーブル, ジョルジュ・ディルマン, 奥田 潤, 奥田睦子共訳: 薬学の歴史, 文庫クセジュ, 白水社, (1969).
- (2) 桜井 弘: RIONA PRESS, 1(2014), 1-4.
- (3) 桜井 弘: 金属は人体になぜ必要か, 講談社ブルーバックス, 講談社, (1996).
- (4) 川原秀城: 毒薬は口に苦し, 大修館書店, (2001).
- (5) 益富壽之助: 正倉院薬物を中心とする古代石薬の研究 正倉院の鉱物I, 日本礦物趣味の会, (1958), 221.
- (6) ブリタニカ国際大百科事典小項目事典, コトバンクホームページ <https://kotobank.jp/dictionary/britannica/1835/> (accessed, Jul. 8th, 2024)
- (7) 糸川嘉則: 最新ミネラル栄養学, 健康産業新聞社, (2000).
- (8) 桜井 弘: 薬学雑誌, 50(2015), 7-12.
- (9) 桜井 弘編著: 元素118の新知識第2版, 講談社ブルーバックス, 講談社, (2023).
- (10) 松村謙二: 薬学雑誌, 135(2015), 545-549.
- (11) 桜井 弘: Biomed. Res. on Trace Elements, 26(2015), 140-146.



〈刊行物のご案内〉



● **日本金属学会誌（月刊）** <https://www.jstage.jst.go.jp/browse/jinstmet/-char/ja/>

オンラインジャーナルは、全論文フリーダウンロード可能。投稿・掲載費用無料。各種データベース搭載（Web of Science, CrossRef...）。レビュー・オーバービューの定期的な掲載。速報論文等早期公開のカテゴリも充実（受付から掲載まで最短 40 日で公開）。



● **共同刊行欧文誌：Materials Transactions（月刊）** <https://www.jstage.jst.go.jp/browse/matertrans/-char/ja/>

材料系 15 学協会での共同刊行を実施。公開から 6 ヶ月経過した論文は、フリーダウンロード可能。さらに、2018 年 2 月より、公開後すぐにフリーダウンロード可能となるサービスを開始。各種データベース搭載（Web of Science, CrossRef...）。Review・Overview の定期的な掲載。Rapid Publication 等早期公開のカテゴリも充実（受付から掲載まで最短 40 日で公開）。



● **日本金属学会会報「まてりあ」（月刊）** <https://www.jim.or.jp/journal/m/>

会員の情報交換や啓発・教育を目的とした会報誌「まてりあ」。啓発を促す「最近の研究」・「講義ノート」、若手の活躍を紹介する「新進気鋭」「はばたく」「スポットライト」記事、大学・企業の現場を紹介する「研究室紹介」などバラエティに富んだ内容を毎月お届けしております。その他、「金属素描」「金属なんでもランキング！」など『金属』に視点を当てた記事も掲載しております。オンラインジャーナルでの閲覧も出来ます。是非、ご活用下さい。

〈学術図書類出版案内〉

- 金属化学入門シリーズ
- 講座・現代の金属学 材料編
- 講座・現代の金属学 製錬編
- 金属工学シリーズ
- セミナーテキスト
- シンポジウム予稿集
- 単行本

◇日本金属学会春秋講演大会 開催予定◇

- ★2024年 9 月18日（水）～20日（金） 大阪大学豊中キャンパス
高校生・高専学生ポスターセッション（オンライン別日）
- ★2025年 3 月 8 日（土）～10日（月） 東京都立大学南大沢キャンパス
高校生・高専学生ポスターセッション（オンライン別日）

〈多彩な学会活動〉

- 講演大会（年 2 回）・調査研究活動
- 高校生・高専学生ポスター発表（年 2 回）
- セミナー/シンポジウム・研究会・若手研究グループ活動
- オンライン教育講座
- 支部活動（全国 8 支部）
- 表彰事業（学会賞/論文賞/金属組織写真賞etc・・・）
- World Materials Day Award 事業
- 男女共同参画活動 等



熱気溢れるポスター発表

～ ご入会をお待ちしております。 <https://jimm.jp/> ～

レーザー積層造形が生み出すアルミニウム合金の 非平衡組織・準安定相の多元素化による制御

高田 尚 記*

1. はじめに

近年、積層造形(付加製造)技術は飛躍的な発展を遂げ、従来の加工法では不可能な三次元複雑形状の造形を可能とした⁽¹⁾⁻⁽³⁾。積層造形技術を用いた材料の造形プロセスは、3Dプリンティングやアディティブ・マニュファクチャリング(Additive Manufacturing)と称される場合も多い。金属材料に適用される積層造形技術で最も汎用的なプロセスのひとつは、レーザー粉末床溶融結合(Laser Powder Bed Fusion: L-PBF)法⁽¹⁾⁻⁽⁵⁾である。不活性ガス雰囲気中のチャンバー内に敷設した金属粉末を1層ずつ積層し、造形部にレーザー照射し溶融・凝固を繰り返し、構造体を造形する。アルミニウム(Al)合金粉末を用いたL-PBFプロセス適用の報告例⁽⁶⁾⁻⁽⁸⁾は近年著しく増加し、従来の鋳造合金に分類されるAl-Si系合金⁽⁹⁾⁻⁽¹¹⁾や展伸材に分類されるAl-Cu系合金⁽¹²⁾⁽¹³⁾やAl-Zn-Mg合金⁽¹⁴⁾⁽¹⁵⁾に留まらず、新たな合金系⁽¹⁶⁾⁻⁽¹⁸⁾へ適用されている。

L-PBFプロセスにより製造された金属造形体は、造形過程の走査レーザー照射による連続的な局所溶融・超急凝固($10^5\sim 10^7\text{°C/s}$ ⁽¹⁹⁾)を通じて溶融池構造(melt pool structure)を有する。L-PBFプロセスが生み出す材料組織の特徴は微細な凝固組織形態を呈するだけでなく、過飽和固溶体や準安定相を内包する非平衡状態であることが挙げられる⁽²⁰⁾。その非平衡組織を有する金属造形体は優れた強度⁽²⁰⁾、耐摩耗性⁽²¹⁾、耐食性⁽²²⁾など、従来法によって製造された材料と比較し、多機能性を示す。軽量金属の代表であるAl合金を用いた造形体の強度は従来材より高く、その高強度化は高濃度の異種元素を含む合金でより顕著になる⁽²⁰⁾⁽²³⁾。この高強度

化をもたらす要因のひとつは、レーザー照射による局所溶融・急凝固に起因する多量の合金元素を過飽和に固溶した α -Al母相(過飽和固溶体)の形成である。この過飽和固溶体は、室温における動的析出を引き起こし、従来の常識とは異なる強度の負のひずみ速度依存性を発現させる⁽²⁴⁾。また、過飽和固溶体を利用し、低温時効処理(T5処理に相当する)を用いた析出強化⁽²⁵⁾⁽²⁶⁾が多くのAl合金積層造形体で適用されつつある。微細な析出物は加工硬化を促進するため⁽²⁷⁾、造形体の均一伸びの向上にも有効である。

著者らは、産業的に重要なAl-Si系合金だけでなく、典型的な遷移金属元素であるFeとの2元系合金のL-PBFプロセスに関する基礎研究を進めてきた⁽²⁸⁾⁽²⁹⁾。その結果、L-PBFプロセスによって製造されたAl-Fe 2元系合金造形体には、過飽和Feを固溶する母相だけでなく、微細な Al_6Fe 準安定相⁽³⁰⁾が均一微細に生成することを見出した(従来の鋳造プロセスでは、粗大な $\text{Al}_{13}\text{Fe}_4$ 安定相⁽³¹⁾が生成する)。この微細な準安定相の生成が、高い高温強度を発現させることを見出した⁽³²⁾。一般に、Al合金にFe等の遷移金属添加は機械的性質や耐食性を劣化させるため⁽³³⁾避けられており、これまでのAl合金の成分設計の常識と異なる。この知見に基づき、著者らは微細な Al_6Fe 相の生成を促進する合金設計を行い、L-PBFプロセスの適用を試みた。本稿では、先ずL-PBFプロセスで製造したAl-Fe 2元系合金積層造形体の非平衡組織の特徴を紹介し、それに基づき設計したAl-Fe-Mn⁽³⁴⁾及びAl-Fe-Cu⁽³⁵⁾ 3元系合金粉末を用いたL-PBFプロセスの適用と造形体の組織解析の結果を示す。また、Al-Fe-Mn及びAl-Fe-Cu 3元系合金造形体の優れた機能性についても紹介する。

* 名古屋大学 大学院工学研究科 物質プロセス工学専攻; 准教授(〒464-8603 名古屋市千種区不老町1 工学部5号館605号室)
Multi-elemental Control of Non-equilibrium Microstructures and Metastable Phases of Aluminum Alloys Produced by Laser Additive Manufacturing; Naoki Takata (Department of Materials Process Engineering, Nagoya University, Nagoya)
Keywords: laser powder bed fusion, aluminum alloy, intermetallics, microstructure, thermodynamic calculation, solidification, mechanical properties, thermal conductivity
2024年4月1日受理[doi:10.2320/materia.63.533]

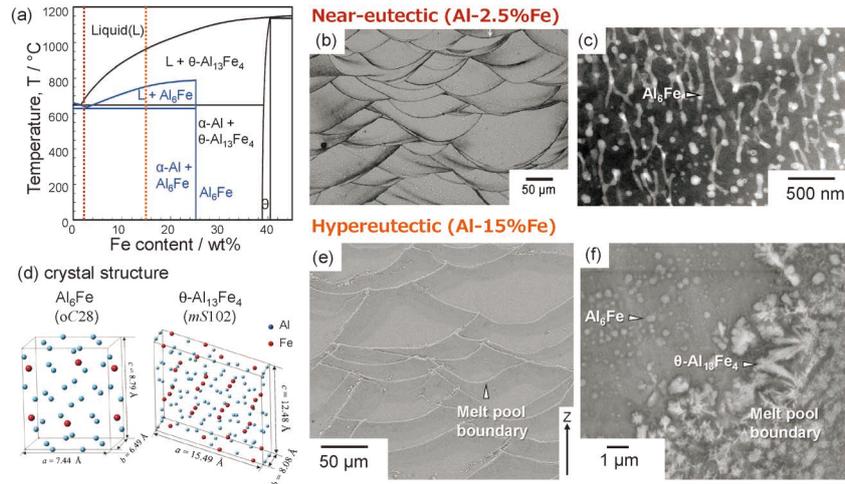


図1 (a) Al-Fe 2 元系状態図(α -Al 相と Al_6Fe 準安定相が平衡する場合⁽³⁶⁾)を重ねて示す)に示された合金組成, (b), (c) 共晶近傍組成の Al-2.5%Fe 合金造形体の組織⁽²⁸⁾, (e), (f) 過共晶組成の Al-15%Fe 合金造形体の組織⁽³²⁾, (d) Al_6Fe 相(斜方晶)と θ - $\text{Al}_{13}\text{Fe}_4$ 相(単斜晶)の結晶構造⁽³⁷⁾.

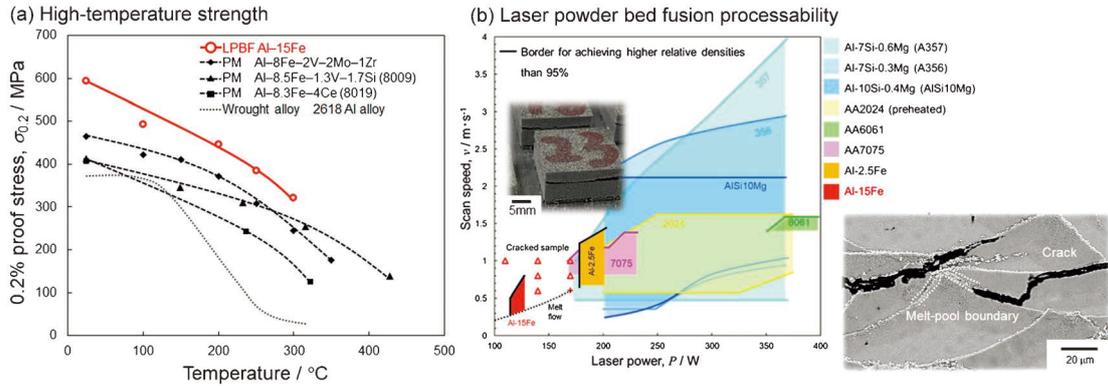


図2 (a) 圧縮試験によって測定された Al-15%Fe 合金造形体の0.2%耐力の試験温度に伴う変化⁽³⁴⁾, (b) L-PBF プロセスによって相対密度95%以上の試料が造形可能なレーザー出力(P)とレーザー走査速度(v)の条件と Al-15%Fe 合金造形体に観察されるき裂⁽³⁹⁾.

2. Al-Fe 2 元系合金積層造形体における組織の特徴

図1に, Al-Fe 2 元系状態図(α -Al 相と Al_6Fe 準安定相が平衡する場合⁽³⁶⁾)を重ねて示す)に示された合金組成 (Al-2.5%Fe 及び Al-15%Fe) とそれらの合金粉末を用いて L-PBF 造形した試料の組織を, Al_6Fe 相(斜方晶)と θ - $\text{Al}_{13}\text{Fe}_4$ 相(単斜晶)の結晶構造⁽³⁷⁾と併せて示す. 本研究で用いた合金組成である Al-2.5%Fe 及び Al-15%Fe は, それぞれ共晶近傍の組成及び過共晶の組成に対応する(図1(a)). 両合金造形体の巨視的な組織形態は, L-PBF プロセスによる特徴的な溶融池構造を示す(図1(b)(e)). Al-2.5%Fe 合金造形体の溶融池組織内部に, 大きさ数十 nm の微細な Al_6Fe 相が均一に分散する(図1(c)). その形態は, 凝固方向に沿って一部連結している. なお, Al-2.5%Fe 合金造形体の溶融池境界(レーザー照射による局所溶融後の凝固開始位置に対応する)近傍において, 比較的粗大な Al_6Fe 相が観察される. これは, 凝固初期は固相の成長速度が低い⁽¹⁹⁾⁽³⁸⁾, 比較的

粗大な凝固組織が形成するためと考えられる. この溶融池境界に沿った局所的に粗大な組織形態は, Al-Si 合金造形体⁽¹⁹⁾でも認められる. この傾向は, 過共晶組成を有する Al-15%Fe 合金でより顕著になり, 溶融池境界に沿った比較的粗大な θ 相(板状形態)の生成が観察される(図1(f)). この θ 相はレーザー照射による局所溶融後の初晶に対応し, 凝固初期は θ 安定相が晶出することがわかる. 一方, 溶融池内部には粒状 Al_6Fe 相も観察され(図1(f)), 凝固進行に伴う成長速度の増加⁽¹⁹⁾⁽³⁸⁾によって, 初晶が θ 安定相から Al_6Fe 準安定相に遷移することがわかる. なお, 溶融池内部に非常に微細な α -Al/ Al_6Fe 2 相共晶組織⁽²⁹⁾が観察され, 状態図(図1(a))の傾向と良く一致する.

L-PBF 造形した Al-15%Fe 合金は非常に高い高温強度を示すが, 造形性が乏しい特徴を持つ(図2). 図2(a)に, 圧縮試験によって測定された Al-15%Fe 合金造形体の0.2%耐力の温度による変化⁽³²⁾を, 他の Al 合金の結果⁽¹⁸⁾と併せて示す. Al-15%Fe 合金造形体は室温において約 600 MPa の高い降伏強度を示す. その強度は, 300°Cの高温において

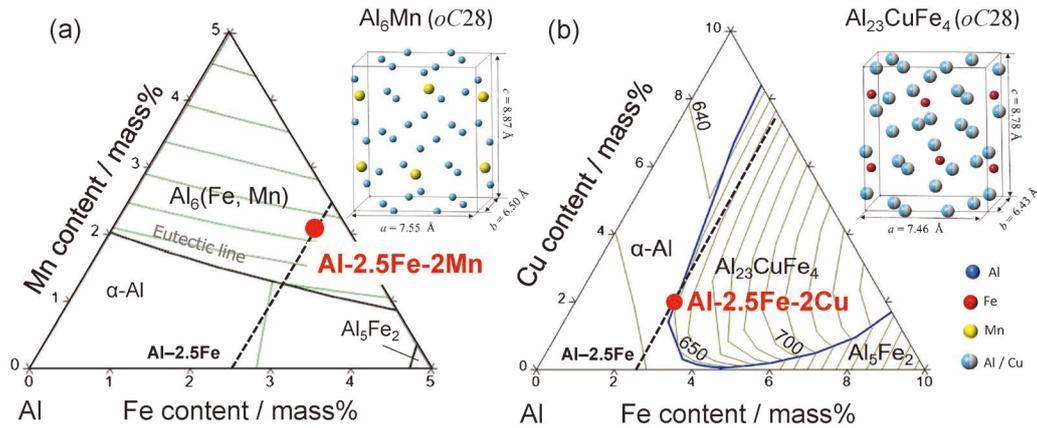


図3 Al₁₃Fe₄相を除外して熱力学計算を実施した(a) Al-Fe-Mn及び(b) Al-Fe-Cu 3元系液相線投影図⁽³⁴⁾⁽³⁵⁾とAl₆Mn相及びAl₂₃CuFe₄相の結晶構造⁽³⁷⁾。(オンラインカラー)

350 MPaを維持する。この高温強度は、耐熱性Al鍛造合金として分類される2618合金だけでなく、粉末冶金によって作製されたAl-Fe系合金試験片よりも高い。この優れた高温強度は、非常に微細な α -Al/Al₆Fe₂相共晶組織に由来する⁽³²⁾。したがって、L-PBFプロセスにより生成する微細なAl₆Fe相は優れた高温強度をもたらすことがわかる。図2(b)に、L-PBFプロセスによって相対密度95%以上の試料が造形可能なレーザー出力(P)とレーザー走査速度(v)の条件を、他のAl合金粉末の結果と併せて示す⁽³⁹⁾。高い P と v の条件で造形したAl-15%Fe合金試料の多くは造形方向に垂直な割れを示し、このき裂の発生が造形体の相対密度を低下させる。SEM像(図2(b))に示されるように、このき裂は溶融池境界に沿って伝播しており、その連結が巨視的な割れを引き起こす。溶融池境界に局在する比較的大な θ 相(脆性的な性質を持つ:破壊靱性値 $1.27 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ ⁽⁴⁰⁾)が、L-PBF造形中に発生するき裂伝播の要因である。したがって、L-PBFプロセスにより生成する脆性的な θ 相は造形性を著しく低下させる。

3. L-PBF造形に適用可能な高強度Al-Fe基合金の設計

Al-15%Fe合金造形体の結果(図2)に基づくと、良好なL-PBF造形性を有する高強度Al-Fe合金の開発には、脆性的な θ 安定相の生成を抑制し、高強度化を担う微細形態のAl₆Fe準安定相の生成を促進する必要がある。Al-2.5%Fe合金造形体の結果(図1)は、Al-Fe 2元系における共晶近傍の組成において、 θ 安定相の生成はL-PBFプロセスによる急冷凝固過程により抑制されることを示す。一方、微細形態のAl₆Fe準安定相は300°C以上の高温保持により分解し、 α -Al相と平衡する粗大な θ 相が析出する⁽⁴¹⁾。そこで、Al₆Fe相の熱力学的な安定化による生成促進(θ 相生成の抑制)を目的とした第3元素として、Mn及びCuを選択した。Al-Mn 2元系状態図⁽⁴²⁾においてAl₆Mn(斜方晶, *oC28*)相⁽⁴³⁾は α -Al相と平衡し、Al-Mn-Fe 3元系におけるAl₆Mn相の単相

領域は等Mn濃度線に沿って拡大する⁽⁴²⁾。このことは、Al₆Mn相のMn副格子位置に固溶置換したFe元素がAl₆M(M: Mn, Fe)の構造を安定化する(Al₆Mn相のGibbsエネルギーを低下させる)ことを意味する。したがって、Al-Fe 2元系へ添加されたMnはAl₆Fe相へ分配され、Al₆Fe相を熱力学的に安定化させると考えられる。同様の予測が、Al-Fe-Cu 3元系状態図から可能である。Al-Fe-Cu 3元系においてAl₂₃CuFe₄相(斜方晶, *oC28*)⁽⁴⁴⁾は、高温にて α -Al相と平衡する。結晶構造の観点から、Al₂₃CuFe₄相は(Al, Cu)₆Fe相と表記でき、Cu原子はAl副格子位置に置換固溶できることがわかる。したがって、Mn元素同様、Al-Fe 2元系へ添加されたCuはAl₆Fe相へ分配され、Al₆Fe相を安定化させると考えられる。以上の相安定性の観点から、良好なL-PBF造形性を有する高強度Al-Fe合金の基本組成としてAl-Fe-Mn及びAl-Fe-Cu 3元系を選択し、熱力学計算を用いた合金設計を行った。

L-PBF造形過程による急冷凝固によりAl-Fe 2元系共晶近傍の組成において θ 安定相の生成は抑制される⁽²⁸⁾。本研究では、L-PBF造形の凝固組織を模擬するため、 θ 相を意図的に除外した熱力学計算を実施し、液相線投影図を作成した。その計算結果を、図3⁽³⁴⁾⁽³⁵⁾に示す。 θ 相を含む従来報告されている液相線投影図⁽⁴⁵⁾⁽⁴⁶⁾とは異なり、Al-Fe-Mn及びAl-Fe-Cuの3元系において、それぞれ α -Al/Al₆(Fe, Mn) 2相共晶及び α -Al/Al₂₃CuFe₄ 2相共晶の凝固反応経路が出現する。多くの高強度Al合金において報告されるL-PBF造形中の凝固割れ(hot crack)の抑制⁽⁴⁷⁾⁽⁴⁸⁾の観点から、Al-2.5%Feを基本としたAl-2.5%Fe-2%Mn及びAl-2.5%Fe-2%Cuの2相共晶近傍の組成を設計した。

4. Al-Fe-Mn及びAl-Fe-Cu 3元系設計合金のL-PBF造形性と組織

Al-2.5%Fe-2%Mn及びAl-2.5%Fe-2%Cu 3元系合金粉末をガスアトマイズ法で製造し、L-PBF造形装置であるProX 200(3D SYSTEM製)を用いて造形実験を行った。合

金粉末や L-PBF 造形条件の詳細は既報⁽³⁴⁾にて報告されているため、本稿では割愛する。本研究で設計した3元系合金の L-PBF 造形性を検証するため、造形体の相対密度に及ぼす L-PBF 造形条件(レーザー出力 P とレーザー走査速度 v)の影響を系統的に調査した。その結果を、図 4⁽³⁴⁾に示す。一般に用いられる体積エネルギー密度 (Volumetric energy density)⁽⁴⁹⁾より、材料中の熱拡散長を考慮した Deposited energy density⁽⁵⁰⁾に基づく P と v の整理が、3 元系合金造形体の緻密化に有効である⁽⁵¹⁾⁽⁵²⁾。Deposited energy density に基づくレーザー条件の探索は、99%以上の相対密度を持つ造形体の製造可能な P と v の範囲を同定した(図 4(a))。両合金とも比較的広い P と v の範囲で相対密度99%以上の緻密な造形体を作製可能であった。これらの最適条件を用いて、機械的性質を測定可能な大きさの造形体試料が作製できた(図 4(b))。これらの結果は、本研究で設計した3元系合金が優れた L-PBF 造形性を持つことを示す。

図 5 に、L-PBF プロセスにより作製された Al-2.5%Fe-2%Mn 合金造形体の組織解析結果⁽³⁴⁾を示す。従来の Al 合

金造形体と同様、本合金造形体の巨視的な組織形態は熔融池構造である(図 5(a))。電子線後方散乱回折 (EBSD) 法による α -Al 母相の結晶方位分布図は、造形方向(z 方向)に沿って伸長した凝固組織形態を示す(図 5(b))。また、造形方向に 001 方位及び 011 方位を持つ結晶粒が多く認められた。Al-2.5%Fe-2%Mn 合金造形体の熔融池境界近傍において比較的粗大なセル状の組織(図 5(c))が観察されるが、Al-15%Fe 合金で認められる板状の θ 相(図 1(f))は存在しない。熔融池内部は非常に微細な組織形態(図 5(d))を呈し、Al-2.5%Fe 合金に観察された微細な Al_6Fe 相(図 1(c))と酷似している。同領域から取得した電子線回折図形は、 Al_6M (斜方晶, $oC28$) 相の 312 面に由来する回折リングを示す(図 5(e))。また、Al-2.5%Fe-2%Mn 合金造形体の熔融池内部と境界近傍における透過型電子顕微鏡 (TEM) によるエネルギー分散型 X 線分光 (EDS) 分析の結果(図 6)、高濃度の Mn 元素が Fe 濃化領域から検出された。なお、Al 合金造形体は合金粉末表面の酸化皮膜に由来する酸素元素を含むため、数十 nm の酸化物粒子が含まれている。以上の結果は、Al-Fe

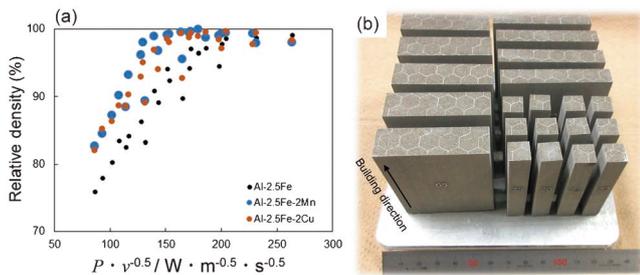


図 4 Deposited energy density に基づく $P \cdot v^{-0.5}$ に伴う Al-2.5%Fe-2%Mn 及び Al-2.5%Fe-2%Cu 合金造形体の相対密度の変化⁽²⁸⁾⁽³⁴⁾と (b) 相対密度99%以上を実現する P 及び v を用いて造形した Al-2.5%Fe-2%Mn 合金試料の外観⁽³⁴⁾。

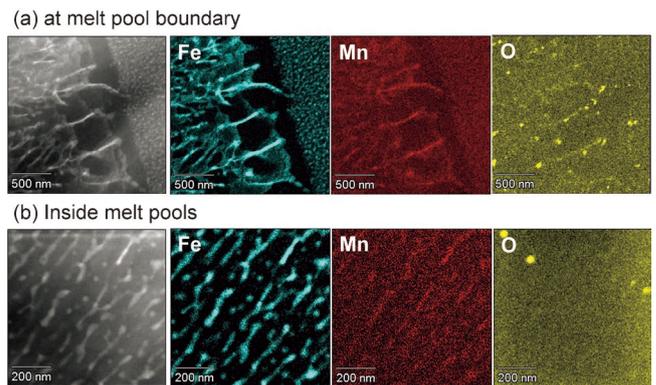


図 6 L-PBF 造形した Al-2.5%Fe-2%Mn 合金の EDS 元素分析結果⁽³⁴⁾: (a) 熔融池境界近傍, (b) 熔融池内部。

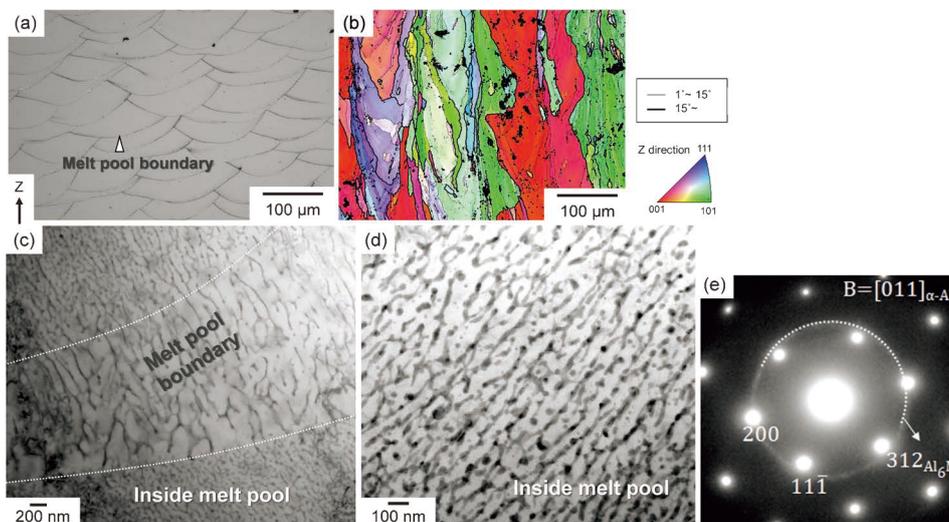


図 5 L-PBF 造形した Al-2.5%Fe-2%Mn 合金の組織解析結果⁽³⁴⁾: (a) 光学顕微鏡像, (b) EBSD 法による α -Al 母相の結晶方位分布図(造形方向に平行な方位を逆極点図に従って色付けた), (c), (d) TEM 明視野像, (e) 電子線回折図形。

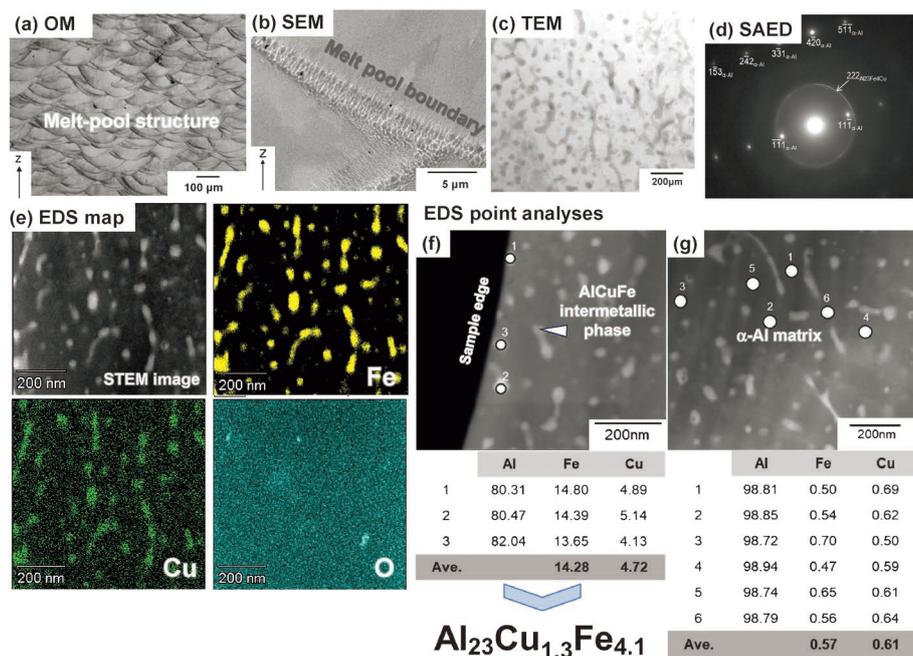


図7 L-PBF造形したAl-2.5%Fe-2%Cu合金の組織解析結果⁽³⁵⁾: (a) 光学顕微鏡像, (b) SEM像, (c) TEM明視野像, (d) 電子線回折図形, (e) EDS元素分布図, (f) 化合物相の元素定量分析結果, (g) α -Al母相の元素定量分析結果. (オンラインカラー)

2元素に添加されたMn元素は Al_6Fe 相に分配し, $Al_6(Fe, Mn)$ 相を生成することを示す. また, Al_6Fe 相のFe副格子位置に置換固溶したMnは $Al_6M(M: Fe, Mn)$ 相の体積率を向上させ,高強度化に寄与することが期待される.

Al-Fe-Mn 3元素合金造形体における組織の特徴は,Al-Fe-Cu 3元素合金にも認められる. 図7に, L-PBFプロセスにより作製されたAl-2.5%Fe-2%Cu合金造形体の組織解析結果を示す. 本造形体は巨視的に熔融池構造(図7(a))を呈し, 熔融池境界近傍において比較的粗大なセル状の組織(図7(b))を示す. 熔融池内部において微細な粒状の Al_6Fe 相(図7(c)(d))が観察され, その内部にはCu元素が濃化する(図7(e)). TEM薄膜試料におけるEDS定量分析の結果, Al_6Fe 相は $Al_{23}CuFe_4$ と非常に近い組成を有することが明らかとなった(図7(f)). したがって, Al-Fe 2元素に添加されたCu元素は Al_6Fe 相に分配し, $Al_{23}CuFe_4$ 相($(Al, Cu)_6Fe$ 相)を生成することを示す. また, Al-2.5%Fe-2%Cu合金造形体の α -Al母相は約0.6%のFeとCu元素を固溶していた(図7(g)). 検出されたFeの固溶量はAl-Fe 2元素の固溶限(0.1%以下)以上であり, L-PBF造形に伴う急冷凝固に起因する過飽和固溶体の生成を示す.

以上の結果から, 第3元素として添加したMn及びCuは Al_6Fe 相の熱力学的な安定化による生成($Al_6(Fe, Mn)$ 相及び $(Al, Cu)_6Fe$ 相の生成)を促進し, L-PBF造形性に有害である θ 相の生成を抑制したことがわかる.

5. L-PBF造形したAl-Fe-Mn及びAl-Fe-Cu 3元素合金の機能性

Al_6Fe 相の安定性を向上させたAl-Fe-Mn及びAl-Fe-Cu

3元素合金のL-PBF造形体は異なる特徴の物性を示す. 図8に, Al-2.5%Fe-2%Mn合金造形体の引張強度の温度による変化⁽³⁴⁾を, L-PBF造形された種々の耐熱性Al合金の結果と併せて示す. なお, 本合金造形体において引張方向が造形方向と垂直($\perp Z$)もしくは平行場合($//Z$)の試験片の強度を示す. Al-2.5%Fe-2%Mn合金造形体は室温において約370 MPaの引張強度を示し, Al-2.5%Fe合金造形体(約310 MPa⁽⁵³⁾)より高い. また, 造形方向に対する引張方向の関係によってやや異なるものの, 室温における引張延性は6%以上を示す⁽³⁴⁾. 特筆すべきは, 本合金造形体の強度が300°Cの高温においても250 MPaを維持することであり, 世界で報

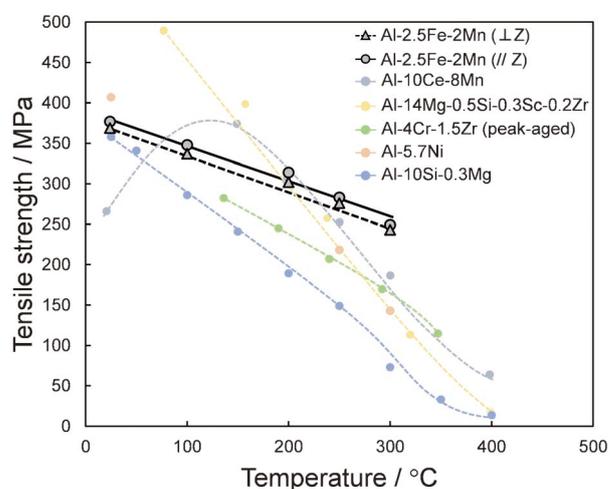


図8 Al-2.5%Fe-2%Mn合金造形体の引張強度の温度による変化⁽³⁴⁾とL-PBF造形された種々の耐熱性Al合金との比較. (オンラインカラー)

告されている L-PBF 造形 Al 合金よりも高い値を示す。これは、L-PBF 造形を通じて生成する微細形態を有する α -Al/Al₆(Fe, Mn) 2 相組織が温度上昇に伴う強度の低下を抑制することを意味する。この特徴は、高強度をもたらす Al₆(Fe, Mn) 相の高い高温安定性や α -Al 母相中の固溶 Mn 元素の小さい拡散係数⁽⁵⁴⁾に由来すると考えられるが、L-PBF 造形が生み出す優れた高温強度の支配因子は不明である。現在、Al-2.5%Fe-2%Mn 合金造形体の高温部材適用の可能性を探索するため、Al₆(Fe, Mn) 相の高温安定性の評価を実施中である。

α -Al 母相中に固溶する Cu 元素は比較的拡散が速い⁽⁵⁴⁾。そのため、L-PBF 造形した Al-Fe-Cu 3 元系合金には熱処理による組織制御が有効である(図 9)。Al-2.5%Fe-2%Cu 合金造形体と 300°C 熱処理を施した試料の強度と熱伝導率を汎用 Al 合金展伸材の結果と併せて示したもの⁽³⁵⁾を、図 9 (a)に示す。Al-2.5%Fe-2%Cu 合金造形体の引張強度は Al-2.5%Fe-2%Mn 合金同様、360 MPa 以上を示し、Al-2.5%Fe 合金造形体(約 310 MPa⁽⁵³⁾)より高い。造形体の熱伝導率は 140 Wm⁻¹K⁻¹ であるが、300°C で 100 時間の温度保持によって 175 Wm⁻¹K⁻¹ まで向上する。その際、造形体の強度は 350 MPa を維持する(図 9(a))。これは、L-PBF 造形により生成した多量の Fe 及び Cu 元素を固溶する α -Al 母相(図 7(g))からナノサイズの析出相が均一に生成し(図 9 (b))、高い強度を維持する。また、析出相の生成に伴い母相中の固溶元素濃度が低下する(図 9(c))ため、熱伝導率が改善する。したがって、L-PBF 造形と熱処理の組み合わせは、高強度と高熱伝導率を両立する Al-2.5%Fe-2%Cu 合金を創製する。

6. 今後の展望

本稿では、Al-Fe 2 元系合金の L-PBF 造形と非平衡組織に関する基礎研究に基づき、レーザ照射による局所溶融・急

凝固過程により生成する Al₆Fe 準安定相を活用する Al-Fe 基合金を設計し、L-PBF 造形を試みた。Al₆Fe 準安定相の安定化と θ -Al₁₃Fe₄ 安定相の生成抑制の観点から設計した Al-Fe-Mn 及び Al-Fe-Cu 3 元系合金粉末は、良好な L-PBF 造形性を示した。これら添加元素は L-PBF 造形による Al₆Fe 相の生成を促進し、高強度化・多機能化をもたらすことを述べた。一般に高強度化に使用される希少元素(Ce, Sc, Zr, Er 等)を用いず、比較的豊富に存在する遷移金属元素を基本組成とした Al-Fe 基合金の L-PBF 造形の適用は産業応用の観点から重要である。本研究成果は、L-PBF 造形プロセスにおける非平衡状態においても、熱力学の観点から合金設計や材料組織形成の理解が可能であることを示す。今後、添加元素の分配を利用した準安定相の制御だけでなく、レーザ照射による局所溶融・急凝固過程における固液間の元素分配を利用した組織制御の可能性を探索する。以上のような観点から、L-PBF 造形が生み出す非平衡組織・準安定相を利用した機能性発現に基づく合金設計原理の構築を目指す。

本稿で紹介した研究は、名古屋大学 大学院生の王 文苑氏、程 悦氏、宮脇 孝暢氏、チー シン氏(現：京都大学)、鈴木 飛鳥助教、小橋 眞教授、あいち産業科学技術総合センターの加藤 正樹氏と共同で実施されました。また合金粉末作製に関して、東洋アルミニウム(株) 村上 勇夫氏から多大な協力を得ました。本研究は、国立研究開発法人科学技術振興機構 戦略的創造研究推進事業 さきがけ「金属 3D プリントを用いた非平衡組織・準安定相の創出(課題番号：JPMJPR22Q4)」、軽金属奨学会 統合的先端研究「レーザ 3D 積層造形が創出するアルミニウム合金の新奇力学機能とその制御」、及び知の拠点あいち重点プログラム(VI 期)「積層造形技術の深化によるモノづくり分野での価値創造とイノベーション創出」の支援を受けました。ここに特記して感謝の意を表します。

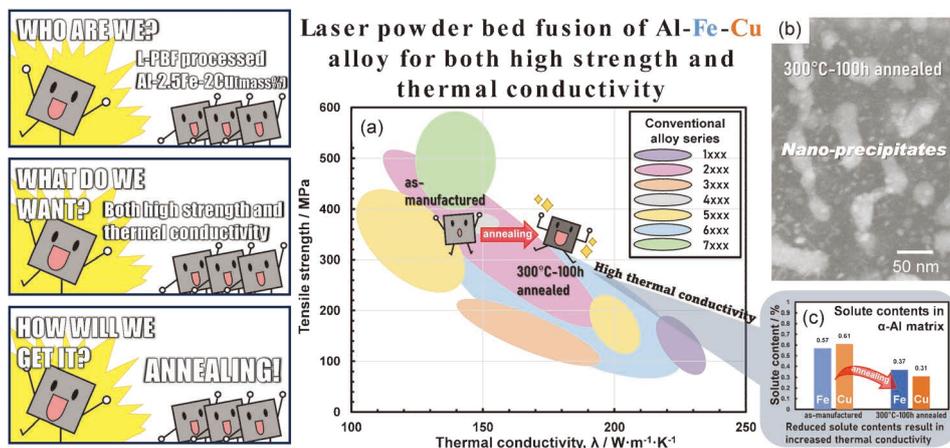


図 9 (a) 300°C 熱処理を施した Al-2.5%Fe-2%Cu 合金造形体の高い引張強度と熱伝導率の両立⁽³⁵⁾、(b) 熱処理により生成する微細な析出相、(c) 熱処理による固溶元素濃度の変化。

界面やバルクにおける電氣的スピントルク変換技術

福間 康裕*

1. はじめに

電氣的スピントルク変換技術とは試料へと電場を印加した際にスピントルクを誘起する現象である⁽¹⁾。例えば、強磁性体中の電子はスピントルク分極しており、電場を印加することでスピントルク分極した電流(スピントルク流+電流)が生成される。このスピントルク分極した電流から自由磁化層の磁化へとトルクを作用させることで磁化反転を行い、スピントルク磁気ランダムアクセスメモリ(STT-MRAM)にて情報記録が行われている⁽²⁾。図1にMRAMにおける情報書き込み技術の概略図を示す。図1(a)のトルク方式では、ビット線およびワード線に流れる電流から生成される磁場を利用する。この磁場は空間的に広がっていることから、メモリセルの選択性が悪く大容量化が困難である。スピントルク磁気ランダムアクセスメモリ(STT-MRAM)の利用によりこの課題を克服し、MRAMの大容量化が進められている。一方、MRAMの情報読み出し動作にはトンネル磁気抵抗効果が利用されている。二つの強磁性体における磁化の相対角度(平行 or 反平行)に依存した抵抗変化がデジタル情報(0 or 1)に対応す

る。スピントルク磁気反転では極薄トンネル障壁層に大きな電流密度($\sim 10^{11}$ A/m²)を流すことからメモリの耐久性・信頼性に課題がある⁽²⁾。そこで次世代MRAMの情報書き込み技術として、スピントルク軌道トルク(SOT)方式が大きな注目を集めている⁽³⁾⁽⁴⁾。

スピントルク軌道トルクとは、スピントルクホール効果やラッシュバ・エデルシュタイン効果により電場印加方向に対して垂直方向にスピントルク流が生成され、隣接した磁性層の磁化へと作用する力である。図1(c)に示すようにスピントルク変換電極に電流を印加することで自由磁化層へとスピントルク流を注入し、磁化反転を引き起こすことができる⁽⁵⁾。このSOT-MRAMはキャッシュメモリへの応用(SRAMの代替)が期待されている。更に、スピントルク軌道トルクは電極上に配置された多数の強磁性体を一斉に励起することが可能になる。このような磁性体ネットワークを利用した脳型コンピューティング技術も精力的に研究開発が進められている⁽⁶⁾⁻⁽⁹⁾。この研究分野はスピントルクオービトロニクスと呼ばれ、低消費電力動作の情報ハードウェアを創製する新しい技術として大きな注目を集めている。本稿では、電氣的スピントルク変換技術として効率的にスピントルク軌道トルク

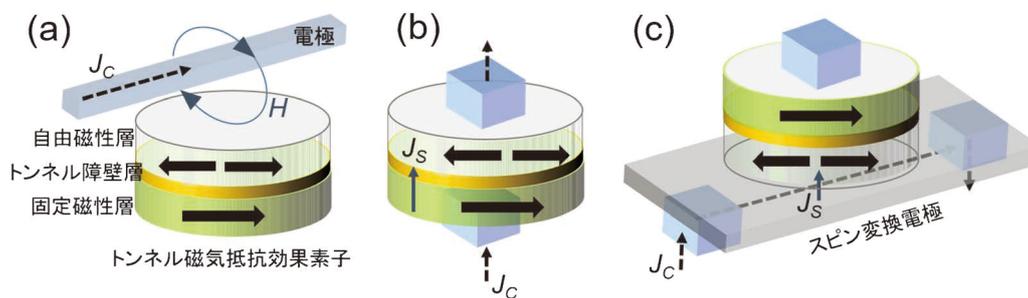


図1 MRAMにおける書き込み動作技術の概略図。(a)トルク方式では自由磁性層に隣接したビット線やワード線に流れる電流から生成される磁場からのトルク、(b)STT方式では固定磁性層からのスピントルク、(c)SOT方式ではスピントルク変換電極からのスピントルク軌道トルクを磁化反転に利用する。ここで、 J_C は電流、 J_S はスピントルク流、磁性層内の黒矢印は磁化を表す。(オンラインカラー)

* 九州工業大学大学院情報工学研究院；教授(〒820-8502 飯塚市川津680-4)

Charge-to-spin Conversion in Bulk and Interfaces; Yasuhiro Fukuma (Department of Physics and Information Technology, Faculty of Computer Science and Systems Engineering, Kyushu Institute of Technology, Iizuka)

Keywords: spin Hall effect, Rashba-Edelstein effect, spin current, spin-orbit torque, ferromagnetic resonance, magnetic random access memory, ion implantation, quasi-2D electron gas

2024年4月1日受理[doi:10.2320/materia.63.540]

を生成する材料系について、我々の研究結果を中心に紹介する。

ホール効果は試料へと印加する電場に対して横方向に電流が生じるのに対して、スピホール効果は電場に対して横方向にスピ流が生じる現象である⁽¹⁰⁾。このスピ変換特性の指標としてスピホール伝導度がよく利用されている。スピホール効果の実験研究は、初めに半導体であるGaAsの低温光学実験で観測された⁽¹¹⁾⁽¹²⁾。次に、5d遷移金属であるPtのスピホール伝導度がGaAsの10000倍にも達し、室温で明確な電気的信号の観測に成功した⁽¹³⁾⁽¹⁴⁾。その後、非熱平衡相である β -Ta⁽⁵⁾や β -W⁽¹⁵⁾、合金PdPt⁽¹⁶⁾等により大きなスピホール伝導度が報告され⁽¹⁷⁾、スピオービトロニクス素子の実現が期待されている。

スピホール効果の主因は物質のスピ軌道相互作用にあり、その起源が結晶場によるものが内因性機構、不純物によるものが外因性機構に大別される⁽¹⁸⁾⁽¹⁹⁾。また、空間反転対称性の破れに起因した反対称スピ軌道相互作用も知られており、この界面にて生じるラシュバ型スピ軌道相互作用を通じたエデルシュタイン効果によってもスピ流を生成できる⁽²⁰⁾。これら現象は、内因性スピホール効果、外因性スピホール効果、ラシュバ・エデルシュタイン効果とそれぞれ呼ばれている。変換効率を議論する際、電場の印加により生成される縦方向電流(J_c)に対する横方向スピ流(J_s)の比をスピホール角($\theta_{CS} = J_s/J_c$)、ラシュバ・エデルシュタイン効果では界面における電気伝導層厚(t)を正確に見積もることが困難であるために $\theta_{CS}/t(\text{nm}^{-1})$ が評価の指標となる。

2. 不純物をイオン注入した白金薄膜のスピホール効果

金属材料において、白金は比較的大きなスピ軌道相互作用をもつがそのスピホール角は0.07(効率として7%)程度である。デバイス応用に向けてはスピ変換特性の飛躍的な向上が必要といえる。内因性機構に関して、4dおよび5d遷移金属は理論と実験の両面から明らかにされており、更なる特性の向上は困難である⁽²¹⁾⁽²²⁾。外因性機構に関して、不純物のスピ軌道相互作用が重要なことから銅やアルミニウム等の薄膜にイリジウムやビスマス等の原子番号の大きな不純物が添加されている⁽²³⁾⁻⁽²⁵⁾。最近の実験によれば、アルミニウム薄膜中にオスミウム不純物を添加した物質にて1近くのスピホール角が報告されている⁽²⁵⁾。一方、スピ軌道相互作用の大きなホスト物質にスピ軌道相互作用の小さな不純物を添加した場合、内因性機構は小さくなることが予想されるが外因性機構はどう変化するのかは明らかでない。本稿では、白金薄膜に軽元素である硫黄、酸素、窒素を不純物として添加した試料のスピホール効果について調べた結果を報告する⁽²⁶⁾⁻⁽²⁸⁾。

熱酸化膜付きシリコンウェハー上に、超高真空スパッタ装置を利用して、アルゴンガス圧1 Pa, DCパワー50 Wにて10 nm厚の白金薄膜を作製した。薄膜中への不純物添加方法

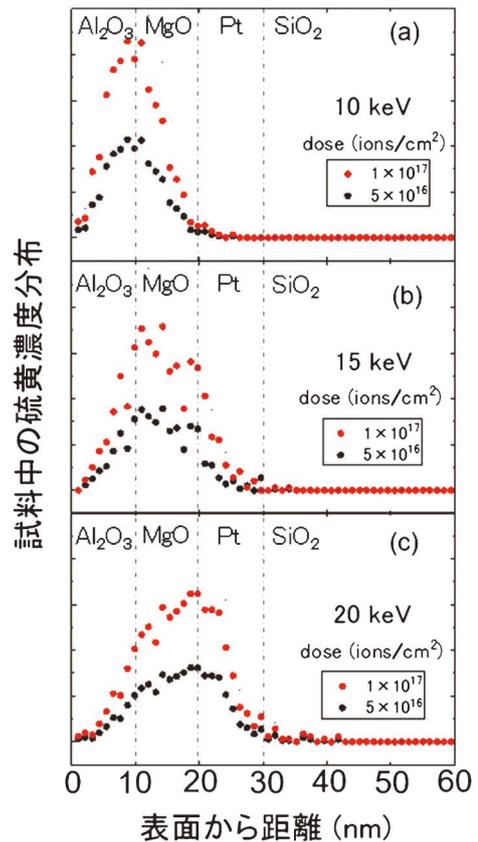


図2 TRIMシミュレーションにより計算した試料($\text{Al}_2\text{O}_3/\text{MgO}/\text{Pt}/\text{SiO}_2$)内の硫黄分布。加速電圧を増加させることで試料内部へと硫黄(S)イオンを注入することができる。(オンラインカラー)

としてイオン注入装置を利用した。イオン注入時、高エネルギー粒子から白金薄膜へのダメージを防ぐために酸化マグネシウム(10 nm)/酸化アルミニウム(10 nm)の保護層を作製した。酸化マグネシウムを利用した理由は、イオンミリングにより保護層を取り除く際、二次イオン質量分析計にて高感度に検出できるためである。酸化アルミニウムは酸化マグネシウムの潮解を防ぐために利用した。図2に、TRIM(Transportation of ion in material)シミュレーション⁽²⁹⁾により計算した試料内のSイオンの分布を示す。イオン注入による不純物添加は、加速電圧により試料内の不純物分布、ドーズ量により不純物添加量を制御することができる。図2(a)に示す10 keVの加速電圧を用いたイオン注入では、硫黄は主に保護層内に添加される。一方、図2(c)に示す20 keVの加速電圧を用いたイオン注入では基板のシリコン熱酸化膜中にも硫黄が添加される。本実験では、できるだけ白金薄膜へのダメージを低減することを目的に低加速電圧12 keVを用いてイオン注入を行った。

透過型電子顕微鏡により測定した薄膜断面像を図3に示す。図3(a)は硫黄イオン注入前(Pt)の明視野像、図3(b)は硫黄イオン注入後(Pt(S))の明視野像を示す。原子番号の大きな白金は暗く映っており、その層厚は設計通り10 nmであることが分かる。白金層中央部の高分解能像および電子線

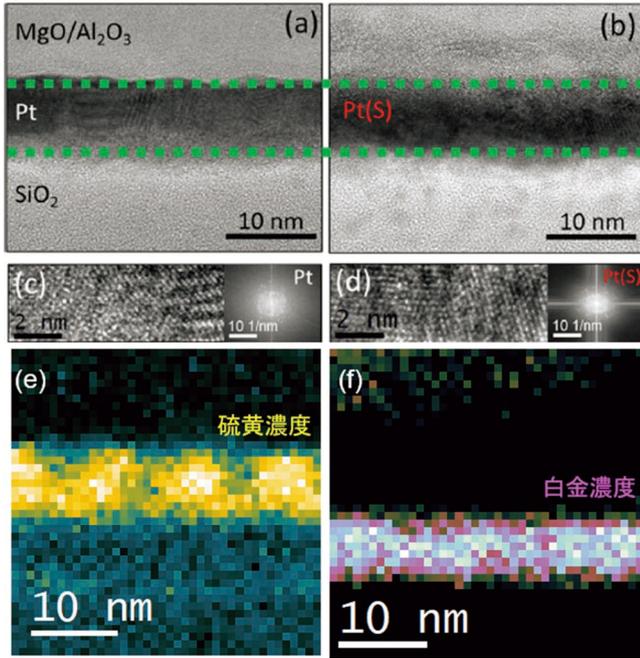


図3 透過型電子顕微鏡により観測した試料断面像。(a)および(b)硫黄イオン注入前後の明視野像，(c)および(d)硫黄イオン注入前後の白金層中央部の高分解能像と電子線回折像，(e)および(f)電子エネルギー損失分光法による測定した硫黄分布と白金分布を示す。(オンラインカラー)

回折像を図3(c)および図3(d)にそれぞれ示す。白金層は面心立方格子をもつ多結晶体であり、イオン注入によりスエリングやアモルファス化は観測されなかった。図3(e)に電子エネルギー損失分光法(Electron Energy Loss Spectroscopy: EELS)により試料内の硫黄元素(L_{2,3}-edge)分布を調べた結果を示す。図3(f)の白金元素(O_{2,3}-edge)の分布と比較して硫黄は主に保護層(MgO/Al₂O₃)内に添加されており、図2のTRIMシミュレーションとよい一致を示している。白金層内に硫黄は比較的均一に拡散しており、全体を積分して求めた不純物濃度は10%程度であった。

次に、スピントルク効果の評価方法について説明する。スピントルクを直接観測することはできないために、磁性体の磁化へと作用するトルクの大きさからスピントルクを見積る⁽³⁰⁾。磁化ダイナミクスが従う現象論的な式として以下に示すLandau-Lifshitz-Gilbert方程式が知られている⁽³¹⁾。

$$\frac{dm}{dt} = -\gamma m \times H_{\text{eff}} + \alpha \left(m \times \frac{dm}{dt} \right) + \tau_{\text{DL}} (m \times (\sigma \times m)) + \tau_{\text{FL}} (m \times \sigma) \quad (1)$$

右辺第一項目が歳差項、第二項目が制動項である。有効磁場 H_{eff} は磁化 m へと作用する磁場であり、外部から印加された磁場、磁性体内の反磁場および異方性磁場を全て含んでいる。 γ はジャイロ磁気定数と呼ばれる物質定数である。制動項は磁化の平衡状態(m と H_{eff} が同じ方向)へと戻るとorqueを表している。ダンピング定数 α がゼロの場合、磁化は磁場の周りを回り続けることができる。一般的な軟磁性体であ

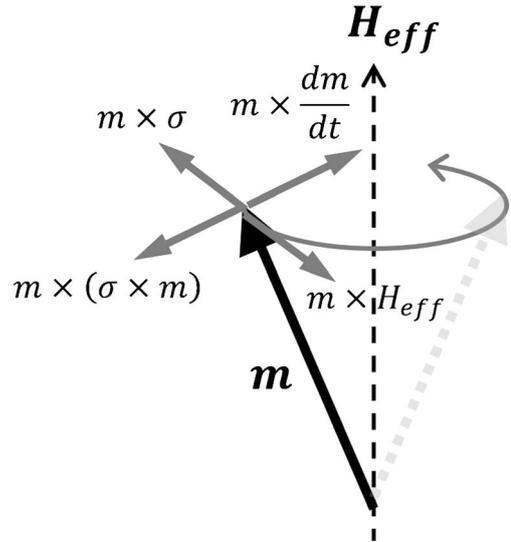


図4 励起(強磁性共鳴)状態の磁化へと作用するトルク。 m は磁化、 H_{eff} は磁化へと作用する磁場、 σ はスピントルクのスピントルク方向を表す。

るパーマロイ Ni₇₈Fe₂₂では $\alpha \sim 0.01$ 程度の小さな値である。スピントルクが磁性体へと流れ込むと磁化へとスピントルクが作用する。スピントルク効果により生じるスピントルクからのトルクをスピントルクと呼んでいるが、両トルクとも式(1)の第三項目および第四項目で表すことができる⁽³²⁾⁽³³⁾。磁化へと作用するこれらトルクの様子を図4に示す。 σ はスピントルクの分極方向である。スピントルク効果において、 J_s 、 J_c 、 σ は互いに直交する。このために、積層膜(スピントルク変換電極/磁性層)構造では J_s の向きは固定されており、 J_c の印加方向により σ の向きを制御する。このために磁化へと作用するスピントルクの向きは電流により制御できる。式(1)の第三項目は制動項と同じ軸に作用し、ダンピングライク項と呼ばれている。式(1)の第四項目は歳差項と同じ軸に作用し、フィールドライク項と呼ばれている。これらの物理的起源は、磁性体との接合界面を通じてスピントルクあるいはスピントルクのどちらかが磁化へと作用するのかに依存する。一般的な金属接合ではスピントルクが磁性体層へと流れ込むためにフィールドライク項は小さく、ダンピングライク項が支配的となる。このダンピングライク項やフィールドライク項を検出するためには、磁化の励起状態である強磁性共鳴を利用してスピントルクによる共鳴スペクトルの変化をみればよい。この手法はスピントルク強磁性共鳴法と呼ばれている⁽³⁴⁾。

図5にスピントルク強磁性共鳴測定方法および試料の概略を示す。信号発生器により振幅変調したマイクロ波を試料へと印加する。ここではマイクロ波の周波数を固定し、外部から印加する磁場 H_{ext} を掃引して測定を行っている。マイクロ波の周波数と共鳴磁場が一致したときに強磁性共鳴現象が励起され、磁化の歳差運動に起因した異方性磁気抵抗効果の変化により図5(c)に示すような電圧変化を検出することができる⁽³⁵⁾。本研究で利用したNi₇₈Fe₂₂の共鳴周波数はマイクロ波帯域であるために、図5(a)の写真に示すようなコブ

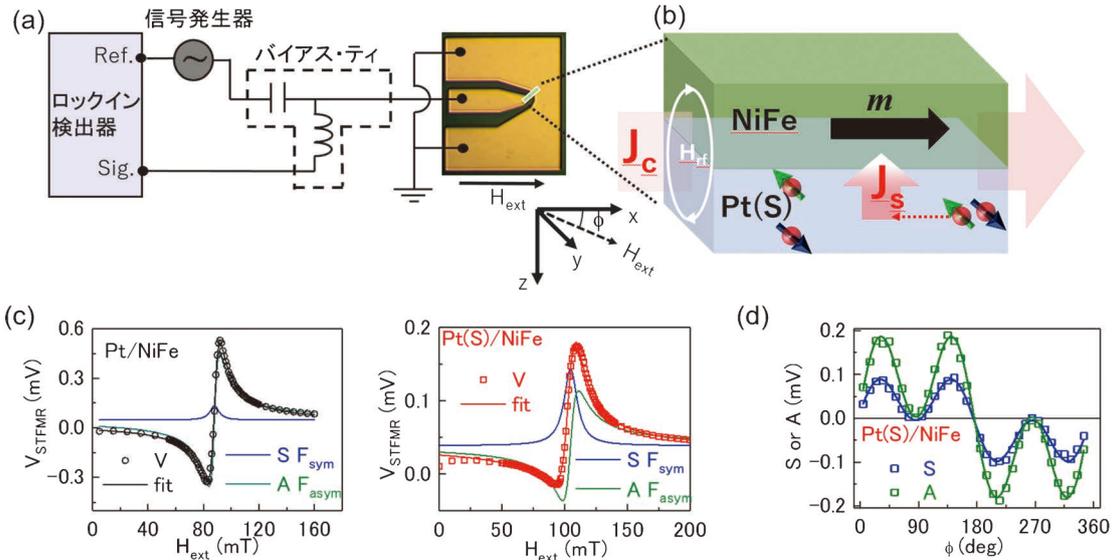


図5 (a) スピンホール効果やスピン軌道トルクを評価する方法の概略図および作製した試料の光学顕微鏡像, (b) 試料中における電流 J_c , スピン流 J_s , スピン分極 σ , エルステッド磁場 H_{eff} , 磁化 m の模式図, (c) 硫黄イオン注入前後のスピントルク強磁性共鳴スペクトル (9 GHz, 15 dBm), (d) 硫黄イオン注入後の試料における共鳴スペクトル強度の対称成分 S および非対称成分 A (9 GHz, 15 dBm) を示す. (c) において, 丸点は実験値, 実線は式(2)とのフィッティング結果. (c) から S および A を決定し, 磁場の印加角度を変えながら測定を行うことで(d)の結果を得た. (オンラインカラー)

レーナ線路を利用してマイクロメートルサイズの試料 ($60 \times 5 \mu\text{m}^2$) を測定に利用した. 試料作製は, イオン注入後に保護層 ($\text{MgO}/\text{Al}_2\text{O}_3$) をイオンミリングにより除去し, 超高真空スパッタ装置を利用して 5 nm 厚の磁性層 $\text{Ni}_{78}\text{Fe}_{22}$ を堆積し, リソグラフィ技術を用いて微細加工を行った. 図5 (b) に示すように, 試料へと電流を印加したとき, Pt あるいは Pt(S) へと流れる電流からアンペールの法則によりエルステッド磁場 (H_{eff}) が生じる. 加えて, スピンホール効果によりスピン流 (J_s) が生じる. この磁場およびスピン流から磁化へと作用するトルクは図4に示すように向きが異なり, この違いを共鳴スペクトル形状の変化として検出できる. 図5 (c) に Pt/ $\text{Ni}_{78}\text{Fe}_{22}$ および Pt(S)/ $\text{Ni}_{78}\text{Fe}_{22}$ のスピントルク強磁性共鳴測定結果を示す. ここでは周波数 9 GHz およびパワー 15 dBm のマイクロ波を試料へと印加した. 共鳴磁場近傍で電圧信号 V_{STFMFMR} の大きな変化がみられる. この V_{STFMFMR} は以下の式で表すことができる.

$$\begin{aligned} V_{\text{STFMFMR}} &= S F_{\text{sym}}(H_{\text{ext}}) + A F_{\text{asym}}(H_{\text{ext}}) \\ &= S \left(\frac{(\Delta H)^2}{(H_{\text{ext}} - H_0)^2 + (\Delta H)^2} \right) \\ &\quad + A \left(\frac{\Delta H(H_{\text{ext}} - H_0)}{(H_{\text{ext}} - H_0)^2 + (\Delta H)^2} \right) \end{aligned} \quad (2)$$

ここで, ΔH は共鳴スペクトルの半値半幅, H_0 は共鳴磁場, S および A は共鳴スペクトルの対称性成分および反対称成分の重みである. 対称性成分がスピントルク, 反対称性成分が磁場トルクに起因している. 図5(c)に示すように, Pt/ $\text{Ni}_{78}\text{Fe}_{22}$ と Pt(S)/ $\text{Ni}_{78}\text{Fe}_{22}$ の共鳴スペクトルを比較すると, イオン注入により対称性成分が増えている. つまり, スピントルクが磁場トルクよりも相対的に増え, スピン変換効率が向上していることが分かる. この成分比から以下の式に

よりスピンホール角を求めることができる.

$$\theta_{\text{CS}}^{\text{LS}} = \frac{S}{A} \frac{e\mu_0 M_s d_{\text{NiFe}} d_{\text{Pt}}}{\hbar} \sqrt{1 + \frac{M_{\text{eff}}}{H_0}} \quad (3)$$

ここで, M_s は自発磁化, d_{NiFe} は磁性体の膜厚, d_{Pt} はスピンホール材料の膜厚, $M_{\text{eff}} = M_s - H_p$ は磁性体内の有効磁場, H_p は異方性磁場である. 室温において, Pt の $\theta_{\text{CS}}^{\text{LS}}$ は 0.09, Pt(S) の $\theta_{\text{CS}}^{\text{LS}}$ は 0.28 であった. イオン注入によりスピンホール角は 3 倍程度も向上した. また, 磁場 (H_{ext}) の印加角度を変えながら測定した結果を図5(d)に示す. 図5(a) および (b) に示す測定系において S および A は以下の式で表すことができる⁽³⁶⁾.

$$S = S_{\text{DL}}^x \sin(2\phi) \sin(\phi) + S_{\text{DL}}^y \sin(2\phi) \cos(\phi) + S_{\text{FL}}^z \sin(2\phi) \quad (4)$$

$$A = A_{\text{FL}}^x \sin(2\phi) \sin(\phi) + A_{\text{FL}}^y \sin(2\phi) \cos(\phi) + A_{\text{DL}}^z \sin(2\phi) \quad (5)$$

ここで, S_{DL}^x , S_{DL}^y , A_{DL}^z はダンピングライク項の各方向成分 (x, y, z), A_{FL}^x , A_{FL}^y , S_{FL}^z はフィールドライク項の各方向成分 (x, y, z) である. この測定を行うことで σ の向きを同定することができる. 図5(d)では, 対称成分 S および反対称成分 A とともに $\sin(2\phi)\cos(\phi)$ 成分が支配的となっている. 上述したように, Pt(S) を流れる電流から生成されるスピン流のスピン分極は y 方向であり, 予想通りの実験結果である. また, 金属接合ではスピン流からのフィールドライク項は非常に小さく, ここでは H_{eff} からの寄与が反対称成分の信号として検出されている.

図4に示すように, スピン流からのフィールドライク項は歳差項と同じ方向に, ダンピングライク項は制動項と同じ方向に作用する. このため, 強磁性共鳴状態において直流電流を印加することでダンピングライク項を制御し, 共鳴スペ

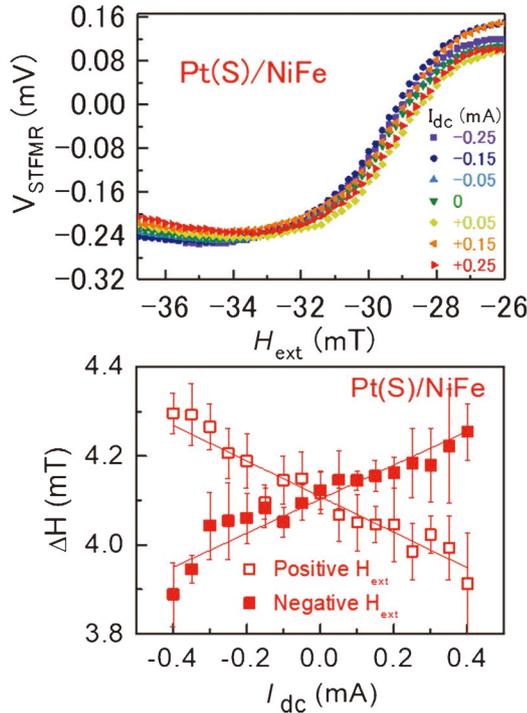


図6 (a) 硫黄イオン注入後の試料に5 GHzのマイクロ波を印加することで強磁性共鳴を励起し、直流電流を印加しながらスピントルク強磁性共鳴スペクトルを測定した結果、(b) 共鳴スペクトル線幅の印加直流電流依存性を示す。(オンラインカラー)

クトル線幅の変化が期待される。直流電流 I_{dc} を変化させながら共鳴スペクトルを測定した結果を図6(a)に示す。スペクトル線幅は変化しているが、共鳴磁場の明確な変化はみられない。このために、Pt(S)/Ni₇₈Fe₂₂においてスピン流からのフィールドライク項は無視できる。スペクトル線幅の変化から以下の式によりスピンホール角を求めることができる。

$$\theta_{CS}^{LW} = \frac{2e}{\hbar} \left(H_0 + \frac{M_{eff}}{2} \right) \mu_0 M_s d_{NiFe} \left| \frac{\Delta H}{J_C} \right| \quad (6)$$

図6の実験結果と式(6)のフィッティングにより得られたスピンホール角は0.35であり、スペクトル解析結果と比較的良好一致を示した。

Pt(S)と同様に、イオン注入を利用して酸素や窒素を添加した白金薄膜(Pt(O), Pt(N))を作製した。表1にスピンホール効果の測定結果を示す。Pt(O)は、酸素添加量と共にスピンホール角が増加する。Pt(N)は、 5.0×10^{16} ions/cm²のドーズ量まではスピンホール角が増加し、 1.0×10^{17} ions/cm²のドーズ量ではスピンホール角が減少した。これらイオン注入による不純物添加白金薄膜のスピンホール効果を理解するために、内因性機構と外因性機構の解析を行った。スピンホール効果と異常ホール効果は密接な物理現象である。外因性機構にはスキュー散乱やサイドジャンプというスピンの依存した不純物散乱がある⁽³⁷⁾⁻⁽³⁹⁾。スキュー散乱は不純物の強いスピン軌道相互作用によりスピンの運動量が変化する非弾性散乱である。一方、サイドジャンプは電子の進行方向

表1 イオン注入により不純物添加した白金薄膜のスピンホール効果。 θ_{CS}^{LS} は式(3)で求めたスピンホール角、 θ_{CS}^{LW} は式(6)で求めたスピンホール角、 σ_{SH}^{int} は内因性スピンホール伝導度、 θ_{SH}^{sj} はサイドジャンプにより生じるスピンホール角を示す。

Sample	θ_{CS}^{LS}	θ_{CS}^{LW}	$\sigma_{SH}^{int}(\Omega^{-1}m^{-1})$	θ_{SH}^{sj}
Pt	0.06	0.07	130300	0.07
Pt(S) 5×10^{16}	0.28	0.35	18200	0.46
Pt(O) 2×10^{16}	0.08	0.07	42100	0.01
Pt(O) 5×10^{16}	0.11	0.11	40000	0.12
Pt(O) 1×10^{17}	0.23	0.23	37600	0.21
Pt(N) 2×10^{16}	0.10	0.10	128400	0.25
Pt(N) 5×10^{16}	0.13	0.14	114600	0.32
Pt(N) 1×10^{17}	0.09	0.11	42300	0.26

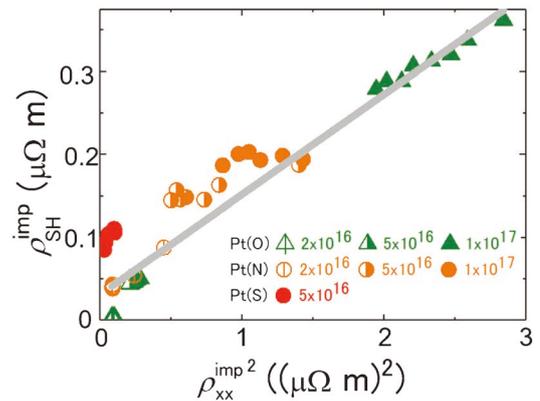


図7 不純物添加した白金薄膜の不純物によるスピンホール抵抗率 ρ_{SH}^{imp} と不純物による抵抗率 ρ_{xx}^{imp} の関係。実験結果は概ね $\rho_{SH}^{imp} \propto (\rho_{xx}^{imp})^2$ の直線上分布しており、サイドジャンプが支配的といえる。(オンラインカラー)

に対して横向きにスピンが不連続に跳躍する。この際、電子の全運動量は保存され跳躍の向きがスピンの向きに依存する。スキュー散乱で生じるスピンホール抵抗率 ρ_{SH}^{imp} は不純物による抵抗率 ρ_{xx}^{imp} に比例する。また、サイドジャンプで生じるスピンホール抵抗率 ρ_{SH}^{imp} は不純物による抵抗率 ρ_{xx}^{imp} の2乗に比例する。図7に不純物添加した白金薄膜の不純物によるスピンホール抵抗率 $\rho_{SH}^{imp} = \rho_{SH}^{Pt(S), Pt(O), Pt(N)} - \rho_{SH}^{Pt}$ と不純物による抵抗率 $\rho_{xx}^{imp} = \rho_{xx}^{Pt(S), Pt(O), Pt(N)} - \rho_{xx}^{Pt}$ の関係を示す。ここではそれぞれの試料について、温度を変えながら測定(100–300 K)した結果を示している。実験結果は概ね $\rho_{SH}^{imp} \propto (\rho_{xx}^{imp})^2$ を示しており、サイドジャンプが支配的と考えられる。これら不純物を添加した白金薄膜のスピンホール効果は内因性機構とサイドジャンプ機構により生じており、スピンホール伝導度は以下の式で表すことができる。

$$\sigma_{SH} = \sigma_{SH}^{int} + \sigma_{SH}^{side} \propto \sigma_{SH}^{int} + \theta_{SH}^{sj} \rho_{xx}^0 (\sigma_{xx})^2 \quad (7)$$

ここで、 σ_{SH}^{int} は内因性スピンホール伝導度、 σ_{SH}^{side} はサイドジ

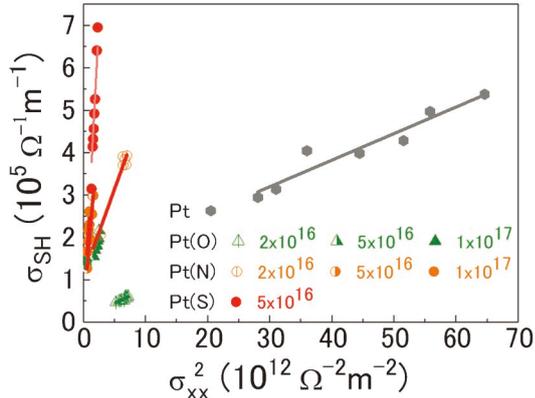


図8 不純物添加した白金薄膜のスピホール伝導度 σ_{SH} と電気伝導度 σ_{xx} の関係。(オンラインカラー)

ジャンプにより生じるスピホール伝導度、 θ_{SH}^S はサイドジャンプにより生じるスピホール角、 ρ_{xx}^0 は不純物による残留抵抗率である。図8において、傾きがサイドジャンプの強さ、 y 切片($\sigma_{xx}=0$)が内因性スピホール伝導度を示す。表1に各試料の内因性スピホール伝導度およびサイドジャンプ散乱により生じるスピホール角を示す。白金の理論計算値は $\sigma_{SH}^{\text{int}} = 1300 (\hbar/2e) (\Omega^{-1} \text{cm}^{-1})$ であり⁽²¹⁾、実験値とよい一致を示している。また、スピホール角(θ_{CS}^{LS} や θ_{CS}^{LW})の大きさとサイドジャンプ散乱により生じるスピホール角(θ_{SH}^S)の大きさは相関がみられる。不純物添加により内因性機構によるスピホール効果は減少するが、サイドジャンプ機構によるスピホール効果が増加することが分かった。スピ軌道相互作用の小さな不純物においてもホスト材料のスピ軌道相互作用が強ければスピ依存散乱が引き起こされ、スピホール効果が向上しているものと考えられる。

3. SrTiO₃/AlN や SrTiO₃/Al₂O₃ 界面におけるラシュバ・エデルシュタイン効果

空間反転対称性のある物質ではスピ軌道相互作用はスピ軌道結合(LS結合)がよい指標となる⁽⁴⁰⁾。一方、空間反転対称性が破れた系ではLS結合とは異なるスピ軌道相互作用が生じ、反対称性スピ軌道相互作用と呼ばれている⁽⁴¹⁾。その代表例がラシュバ型であり、薄膜成長方向の鏡映対称性が破れた界面等にて生じる。このようなスピ軌道相互作用を利用した電氣的スピ変換としてラシュバ・エデルシュタイン効果により電流からスピ流が生じることがSrTiO₃/LaAlO₃界面にて報告されている⁽⁴²⁾⁽⁴³⁾。しかしながら、強いLS結合の白金と比較して界面系にてどのくらいのスピ軌道トルクが生じるのかは明らかでない。本稿では、SrTiO₃/AlN/Ni₇₈Fe₂₂、SrTiO₃/Al₂O₃/Ni₇₈Fe₂₂においてラシュバ・エデルシュタイン効果により生じるスピ軌道トルクをPt/Ni₇₈Fe₂₂と比較した結果を報告する⁽⁴⁴⁾。

図9(a)に示すように、チタン酸ストロンチウムSrTiO₃(100)単結晶基板の上にパルスレーザー堆積法にて10 nm厚の

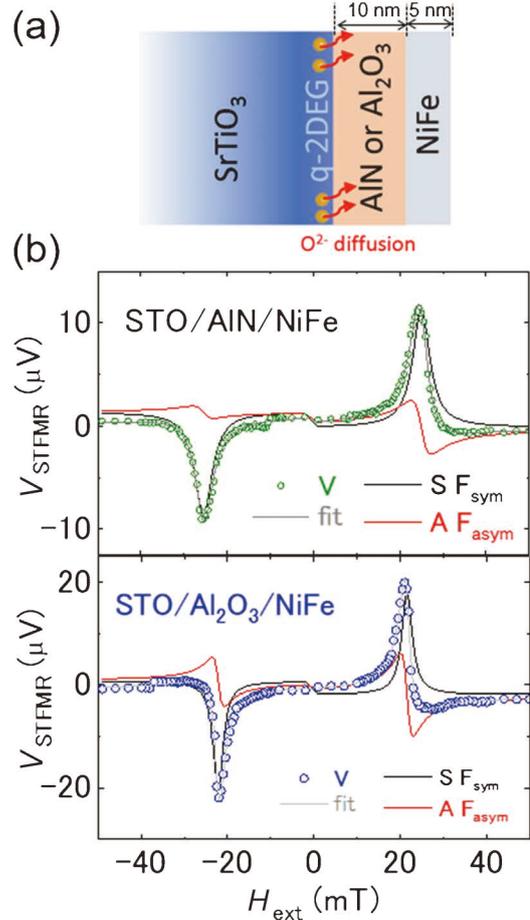


図9 (a) ラシュバ・エデルシュタイン効果を調べるために作製した試料の概略図、(b) SrTiO₃/AlN界面およびSrTiO₃/Al₂O₃界面におけるスピトルク強磁性共鳴測定の結果。(b)において、丸点の実験値、実線は式(2)とのフィッティング結果を示す。(オンラインカラー)

窒化アルミニウムAlNまたは酸化アルミニウムAl₂O₃薄膜を堆積した。AlNおよびAl₂O₃はアモルファス膜であるが、電子陰性度の違いからチタン酸ストロンチウムの表面層に電気伝導層が形成される⁽⁴⁵⁾。SrTiO₃/AlN界面、SrTiO₃/Al₂O₃界面のシート抵抗はそれぞれ90 kΩ(sq)⁻¹、1000 kΩ(sq)⁻¹であった。その後、超高真空スパッタ装置を利用して5 nm厚の磁性層Ni₇₈Fe₂₂を堆積した。スピトルク強磁性共鳴法によりスピ変換特性を評価するために、80×20 μm²のSrTiO₃/AlN/Ni₇₈Fe₂₂(SrTiO₃/Al₂O₃/Ni₇₈Fe₂₂)試料に加工し、図5(a)の写真と同様のコプレーナ線路を作製した。図9(b)に室温でのスピトルク強磁性共鳴測定結果を示す。スピトルクが起因した対称性成分(SF_{sym})がみられ、SF_{asym}は外部磁場の向きにより反転していることから、ラシュバ・エデルシュタイン効果によりスピ流が生成しているものと考えられる。白金の場合と同様に以下の式にて変換効率を議論することができる。

$$\frac{\theta_{CS}^{LS}}{t} = \frac{S}{A} \frac{e\mu_0 M_s d_{NiFe}}{\hbar} \sqrt{1 + \frac{M_{\text{eff}}}{H_0}} \quad (8)$$

SrTiO₃/AlN界面におけるスピ変換効率は0.24 (nm)⁻¹、

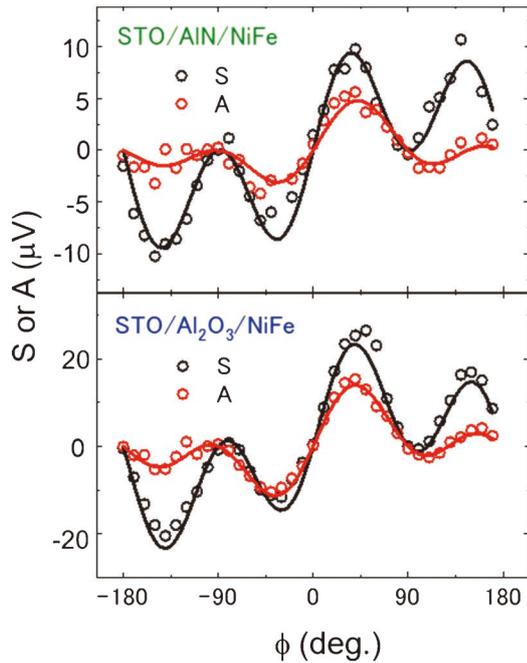


図10 磁場の印加角度を変えながらスピントルク強磁性共鳴測定を行い、式(2)とのフィッティングにより決定した S および A の実験結果を示す。(オンラインカラー)

$\text{SrTiO}_3/\text{Al}_2\text{O}_3$ 界面におけるスピン変換効率 η は $0.10(\text{nm})^{-1}$ であった。ここで電気伝導層を 10 nm と仮定した場合、 $\text{SrTiO}_3/\text{AlN}$ 界面の $\theta_{\text{CS}}^{\text{S}}$ は 2.4 、 $\text{SrTiO}_3/\text{Al}_2\text{O}_3$ 界面の $\theta_{\text{CS}}^{\text{S}}$ は 1.0 と Pt と比較して非常に大きな値となる。実際の試料における電気伝導層厚は不明であるが、 $\text{SrTiO}_3/\text{LaAlO}_3$ 界面や $\text{SrTiO}_3/\text{LaTiO}_3$ 界面にて報告されている巨大な $\theta_{\text{CS}}^{\text{S}}$ ⁽⁴³⁾⁽⁴⁶⁾⁽⁴⁷⁾ にはこのような理由があることも考慮しておく必要がある。

また、図10にスピントルク強磁性共鳴スペクトルの対称成分および反対称成分の印加磁場角度依存性を示す。スピンホール効果では図5(d)に示すように $\sin(2\phi)\cos(\phi)$ 成分が支配的となるが、空間反転対称性の破れた界面では様々なトルク成分からの寄与がみられる⁽³⁶⁾⁽⁴⁸⁾。 $\text{SrTiO}_3/\text{AlN}$ 界面ではスピントルクにおいて y 方向成分 ($\sin(2\phi)\cos(\phi)$) が95%であるが、 $\text{SrTiO}_3/\text{Al}_2\text{O}_3$ 界面では75%に減少している。このような測定手法において、印加するマイクロ波と磁気抵抗の時間変化との位相変化によりスペクトル形状が変化することが知られている⁽⁴⁹⁾。特に、高抵抗試料ではインピーダンス不整合により印加したマイクロ波が試料へと入力されず、周波数によりスペクトル形状が大きく変化する傾向にある。このために、図10でみられる角度依存性が空間反転対称性の破れに起因したトルク成分かどうかを見極めるには更なる精密な計測が必要と考えられる。

一方、図6に示した直流電流印加による共鳴スペクトルの線幅変化を検出する手法はこのような試料のスピン変換特性を評価するのに有効な手段である。図11に、 $\text{SrTiO}_3/\text{AlN}$ 界面、 $\text{SrTiO}_3/\text{Al}_2\text{O}_3$ 界面、Pt の測定結果を示す。 $\text{SrTiO}_3/\text{AlN}$ 界面および Pt では、磁場あるいは直流電流の印加方向

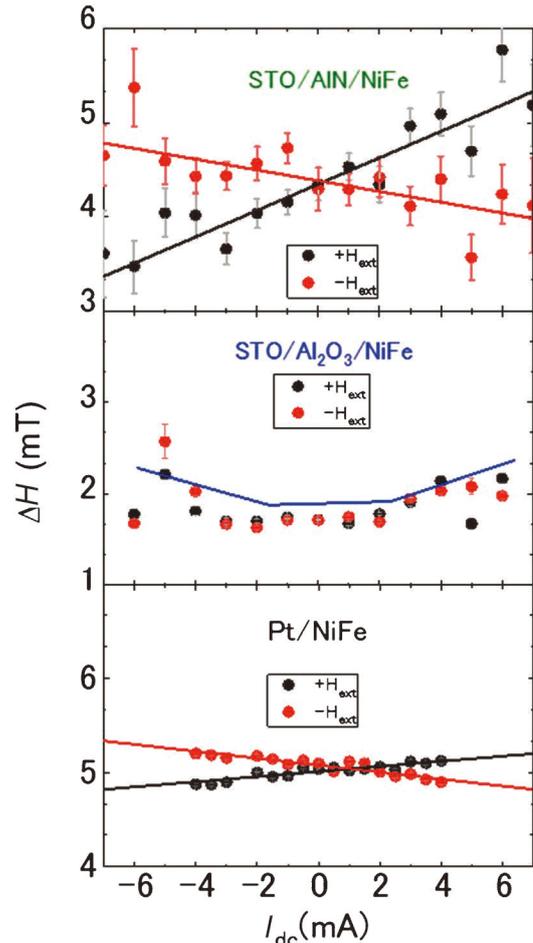


図11 強磁性共鳴を励起し、直流電流を印加しながらスピントルク強磁性共鳴スペクトルを測定することで求めたスペクトル線幅の印加直流電流依存性を示す。(オンラインカラー)

により共鳴スペクトル線幅変化 (ΔH) の増減が変わっている。これは、スピンホール効果やラシュバ・エデルシュタイン効果では、電流、スピン流、スピン流の分極方向は互いに直交しており、スピン軌道トルクの作用する方向(図4のダンピングライク項の向き)が変化するためである。この変化分 ΔH が試料におけるスピン軌道トルクの大きさといえる。 $\text{SrTiO}_3/\text{AlN}$ 界面の ΔH は Pt と比較して2倍程度大きく、より強いスピン軌道トルクが $\text{Ni}_{78}\text{Fe}_{22}$ 層の磁化へと作用している。一方、 $\text{SrTiO}_3/\text{Al}_2\text{O}_3$ 界面では電流印加により ΔH が放物線上に増加している。これは高抵抗かつ小さなスピン変換効率であるために、電流印加により生じるジュール熱の影響が ΔH の主因となっている。

4. まとめと今後の展望

情報通信技術の進展は企業活動のみならず、我々の生活の利便性も大きく向上した。近年、Society5.0に向けて情報通信技術は更に進展している。情報社会の持続的な発展に向けて危惧されることは、AIハードウェアの消費電力であ

る⁽⁵⁰⁾。その解決方法の一つが、キャッシュメモリ (SRAM) を不揮発性メモリに置き換えることであり⁽⁵¹⁾、スピン軌道トルク MRAM がその最有力候補である。更に、スピン軌道トルクは新しい AI デバイスの創出にも貢献できる⁽⁵²⁾。これらデバイスを実現できるかどうかのカギは電氣的スピン変換効率にある。本稿で紹介したイオン注入による不純物添加は様々な材料系に適用することができ、試料中の不純物分布や濃度を任意に制御することができる。酸素等の軽元素添加においてもホストである白金の強いスピン軌道相互作用を利用して外因性機構による変換効率の向上に成功した。元素の選択性が拡がり、更なる高い変換効率をもつ材料の開発へと繋がるのが期待される。また、界面伝導層を利用したスピン変換においてもバルク白金の性能を上回るスピン流の生成およびスピン軌道トルクの観測に成功した。スピン軌道相互作用の大きなトポロジカル絶縁体の界面(表面)伝導層を利用したスピン変換についても研究が進められている⁽⁵³⁾。スピントロニクスは、ハードディスクドライブの大容量化や MRAM の実用化を通じて情報社会の発展に貢献した。今後は、高いスピン変換効率をもつ新材料を利用した革新的なスピンオービトロニクス素子を創製し、情報社会の持続的な発展にハード面から貢献できることを期待したい。

本稿で紹介したイオン注入による不純物添加した白金に関する研究は、九州工業大学大学院情報工学研究科の Utkarsh Shashank 氏、友田好郁氏、中村要士氏、草場優氏、Surbhi Gupta 博士、Rohit Medwal 博士、山口大学大学院創成科学研究科の浅田裕法教授、Nanyang Technological University の Joseph Vimal Vas 博士、Martial Duchamp 准教授、Rajeev Singh Rawat 教授、Inter University Accelerator Center の Asokan Kandasami 博士と共同で行った。ラッシュバ界面に関する研究は、Purdue University の Angshuman Deka 博士、Nanyang Technological University の Chen Ye 博士、Renshaw Wang 准教授と共同で行った。また、本稿で紹介した研究の一部は、科学研究費補助金(22K04198)、キオクシア株式会社、池谷科学技術振興財団、田中貴金属記念財団の支援をうけて実施したものです。

文 献

- (1) Y. Otani, M. Shiraishi, A. Oiwa, E. Saitoh and S. Murakami: *Nature Phys.*, **13**(2017), 829.
- (2) <https://www.everspin.com/spin-transfer-torque-mram-technology>
- (3) Q. Shao *et al.*: *IEEE Trans. Magn.*, **57**(2021), 800439.
- (4) 池田正二, 遠藤哲郎: まぐね, **18**(2023), 276–282.
- (5) L. Liu, C.F. Pai, Y. Li, H.W. Tseng, D.C. Ralph and R.A. Buhrman: *Science*, **336**(2012), 555.
- (6) K. Kudo and T. Morie: *Appl. Phys. Exp.*, **10**(2017), 043001.
- (7) M. Zahedinejad, A. A. Awad, S. Muralidhar, R. Khymyn, H. Fulara, H. Mazraati, M. Dvornik and J. Akerman: *Nature Nanotech.*, **15**(2020), 47.
- (8) A. Houshang, M. Zahedinejad, S. Muralidhar, J. Checinski, R. Khymyn, M. Rajabali, H. Fulara, A. A. Awad, M. Dvornik and J. Akerman: *Phys. Rev. Appl.*, **17**(2022), 014003.
- (9) J. R. Mohan, A. J. Mathew, K. Nishimura, R. Feng, R. Medwal, S. Gupta, R. S. Rawat and Y. Fukuma: *Sci. Rep.*, **13**(2023), 7909.
- (10) J. E. Hirsh: *Phys. Rev. Lett.*, **83**(1999), 1834.
- (11) Y. K. Kato, R. C. Myers, A. C. Gossard and D. D. Awschalom: *Science*, **306**(2004), 1910.
- (12) J. Wunderlich, B. Kaestner, J. Sinova and T. Jungwirth: *Phys. Rev. Lett.*, **94**(2005), 047204.
- (13) E. Saitoh, M. Ueda, H. Miyajima and G. Tatara: *Appl. Phys. Lett.*, **88**(2006) 182509.
- (14) T. Kimura, Y. Otani, T. Sato, S. Takahashi and S. Maekawa: *Phys. Rev. Lett.*, **98**(2007), 156601.
- (15) C. F. Pai, L. Liu, Y. Li, H. W. Tseng, D. C. Ralph and R. A. Buhrman: *Appl. Phys. Lett.*, **101**(2012), 122404.
- (16) L. Zhu, K. Sobotkiewch, X. Ma, X. Li, D. C. Ralph and R. A. Buhrman: *Adv. Funt. Mat.*, **29**(2019), 1805822.
- (17) A. Hoffmann: *IEEE Trans. Magn.*, **49**(2013), 5172–5193.
- (18) 村上修一: 日本物理学会誌, **62**(2007), 2–9.
- (19) 紺谷 浩, 平島 大, 井上順一郎: 日本物理学会誌, **64**(2009), 1–9.
- (20) V. M. Edelstein: *Solid State Commun.*, **73**(1990), 233.
- (21) T. Tanaka, H. Kontani, M. Naito, D. S. Hirashima, K. Yamada and J. Inoue: *Phys. Rev. B*, **77**(2008), 165117.
- (22) M. Morota, Y. Niimi, K. Ohnishi, D. H. Wei, T. Tanaka, H. Kontani, T. Kimura and Y. Otani: *Phys. Rev. B*, **83**(2011), 174405.
- (23) Y. Niimi, M. Morota, D. H. Wei, C. Deranlot, M. Basletic, A. Hamzic, A. Fert and Y. Otani: *Phys. Rev. Lett.*, **106**(2011), 126601.
- (24) Y. Niimi, Y. Kawanishi, D. H. Wei, C. Deranlot, H. X. Yang, M. Chshiev, T. Valet, A. Fert and Y. Otani: *Phys. Rev. Lett.*, **109**(2012), 156602.
- (25) P. Wang, A. Migliorini, S. H. Yang, J. C. Jeon, I. Kostanovskiy, H. Meyerheim, H. Han, H. Deniz and S. S. P. Parkin: *Adv. Mat.*, **34**(2022), 2109406.
- (26) U. Shashank, R. Medwal, T. Shibata, R. Nongjai, J. V. Vas, M. Duchamp, K. Asokan, R. S. Rawat, H. Asada, S. Gupta and Y. Fukuma: *Adv. Quantum Technol.*, **4**(2021), 2000112.
- (27) U. Shashank, R. Medwal, Y. Nakamura, J. R. Mohan, R. Nongjai, A. Kandasami, R. S. Rawat, H. Asada, S. Gupta and Y. Fukuma: *Appl. Phys. Lett.*, **118**(2021), 252406.
- (28) U. Shashank, Y. Nakamura, Y. Kusaba, T. Tomoda, R. Nongjai, A. Kandasami, R. Medwal, R. S. Rawat, H. Asada, S. Gupta and Y. Fukuma: *Phys. Rev. B*, **107**(2023), 064402.
- (29) J. F. Ziegler, J. P. Biersack and U. Littmark: *The stopping Power and Range of Ion in Solids* (Pergmon, New York, 1985).
- (30) 近藤浩太, 大谷義近: 応用物理学会誌, **86**(2017), 139–143.
- (31) 小峰啓史: まぐね, **18**(2023), 52–60.
- (32) L. Berger: *Phys. Rev. B*, **54**(1996), 9353.
- (33) J. C. Slonczewski: *J. Magn. Magn. Mater.*, **159**(1996), L1.
- (34) L. Liu, Y. Kawanishi, D. H. Wei, C. Deranlot, T. Moriyama, D. C. Ralph and R. A. Buhrman: *Phys. Rev. Lett.*, **106**(2011), 036601.
- (35) Y. Suzuki and H. Kubota: *J. Phys. Soc. Jpn.*, **77**(2008), 031002.
- (36) D. MacNeil, G. M. Stiehl, M. H. D. Guimaraes, R. A. Burhman, J. Park and D. C. Ralph: *Nature Phys.*, **13**(2017), 300.
- (37) J. Smit: *Physica*, **21**(1955), 877.
- (38) J. Smit: *Physica*, **24**(1958), 39.
- (39) L. Berger: *Phys. Rev. B*, **2**(1970), 4559.
- (40) 播磨尚朝: 日本物理学会誌, **78**(2023), 254–255.
- (41) 柳瀬陽一, 播磨尚朝: 固体物理, **46**(2011), 283–292.
- (42) E. Lense, Y. Fu, S. Oyarzun, J. C. R. Sanchez, D. C. Vaz, H. Nagamuna, G. Sicoli, J. P. Attane, M. Jamet, E. Jacquet, J. M. George, A. Barthelemy, H. Jaffres, A. Fert, M. Bibes and L. Vila: *Nature Mat.*, **15**(2016), 1261.
- (43) Y. Wang, R. Ramaswamy, M. Motapothula, K. Narayanapillai, D. Zhu, J. Yu, T. Venkatesan and H. Yang: *Nano Lett.*, **17**

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

井田 駿太郎*

1. はじめに

この度は第33回日本金属学会奨励賞を頂戴しましたこと、この場を借りて関係各位に改めて感謝申し上げます。また、本記事を執筆する機会を頂き、大変光栄に思います。

著者は、東京工業大学大学院、理工学研究科、物質材料学専攻、鉄鋼材料学講座にて竹山雅夫教授、小林覚准教授のもと、博士号を取得しました。博士論文研究では、Ni₃Al- γ' 相に頼らないNi基合金の組織設計として、 γ' 相以外の金属間化合物により粒界を被覆し、低応力長時間クリープ強度を向上させる組織設計を目指し、Ni-Nb-Co三元系状態図の作製⁽¹⁾や状態図を基にした粒界析出挙動の解明⁽²⁾⁽³⁾を行いました。その研究のベースとなる学問は平衡論、速度論であり、研究の目標温度は、石炭火力発電やガスタービン、ジェットエンジンに使用される鍛造Ni基合金を想定し、700-1200°Cにおける高温でした。

現在は東北大学大学院工学研究科、知能デバイス材料学専攻、ナノ材料物性学講座にて吉見享祐教授、関戸信彰准教授のもと、カーボンニュートラル実現に向けたガスタービンやジェットエンジンの高温化や宇宙用材料も見据えて、1500°Cを超える超高温材料の研究にも取り組んでいます。本稿では、東北大学での成果である受賞対象研究の取り組みと今後の展望について紹介します。

2. 研究背景

著者の所属する研究室では吉見享祐教授を中心に超高温材料のMoSiBTiC合金の研究を精力的に進めている。本合金はMo-Si-B合金にTiCを添加しており、Mo-Si-B三元系合金よりも優れた強度と靱性を兼ね備えている⁽⁴⁾⁻⁽⁶⁾。

著者はTiCに着目した研究を行っている。TiCは、高融点(3067°C)、低密度(4.93 g/cm³)、硬い性質を有し、高温材料の強化相として有望である⁽⁷⁾⁻⁽¹⁰⁾。結果として、この炭化物は工具鋼のコーティング、サーメットの硬化相やIF鋼における侵入型元素の固定化等として利用されている⁽⁸⁾⁽¹¹⁾⁻⁽¹⁵⁾。その一方で、TiCの課題は乏しい靱性であり、化学量論組成のTiCの室温破壊靱性値は3 MPa(m)^{1/2}程度である⁽¹⁶⁾⁽¹⁷⁾。また、金属固溶体相と相平衡するB1型TiCが化学量論組成に近い場合、例えばFe-Ti-C三元系合金では、TiCの体積率の増加に伴い合金の延性が低下する⁽¹⁸⁾。この低靱性化によりTiCの高温での優れた特性を活かした材料設計が十分になされていない。

一方で、MoSiBTiC合金における興味深い点は、TiC添加に伴う靱性の向上である。本合金の破壊靱性値はMo-Si-B合金よりも高く、TiCおよびMo固溶体相の体積率の和の増加に伴い上昇する傾向にある⁽⁵⁾。このTiC添加に伴う靱性の向上の要因の解明はTiCのさらなる利活用の可能性を拓くと考えられる。そこで本研究では、MoSiBTiC合金をブレイクダウンしたMo-Ti-C三元系合金を用い、

* 東北大学大学院工学研究科；助教(〒980-8579 仙台市青葉区荒巻字青葉 6-6-02)
Study of Solidification Microstructure and Elastic Moduli of Off-stoichiometric TiC in Mo-Ti-C Ternary System for Expansion of TiC Utilization; Shuntaro Ida (Department of Materials Science, Graduate School of Engineering, Tohoku University, Sendai)
Keywords: *solidification microstructure, elastic modulus, off-stoichiometry, ultra-high temperature*
2024年4月8日受理[doi:10.2320/materia.63.549]

TiC 添加に伴う韌性改善に関連すると考えられる凝固組織変化および TiC の非化学量論性に伴う弾性率変化を調べた。

3. TiC の添加に伴う凝固組織変化

Mo 基合金において、凝固は組織に大きく影響する現象である。図 1 に Mo-Si-B 三元系および Mo-Ti-C 三元系の 1800 °C 等温断面図を示す⁽¹⁹⁾⁽²⁰⁾。Mo 固溶体相には MoSiBTiC 合金の構成元素のうち Ti 以外はほとんど固溶しないため、析出を利用した組織設計は困難である。また、各相の融点も非常に高いため、熱処理による組織変化も生じにくい。すなわち、Mo 基合金の組織設計において凝固組織が他の合金系に比べて重要となる。そこで、Mo 合金の凝固組織に及ぼす TiC の添加の効果の解明を目指し、Mo-Si-B 三元系および Mo-Ti-C 三元系の液相面投影図を含めた凝固過程を調べた。

図 2 に Mo-Si-B 三元系および Mo-Ti-C 三元系の液相面投影図を示す⁽²⁰⁾⁽²¹⁾。Mo-Si-B 三元系に関しては、温度不

変反応の詳細な組成を調べ、これまでの報告と大きく異なることを、Mo-Ti-C 三元系に関しては、報告されていた温度不変反応 ($L \rightarrow Mo + TiC + Mo_2C$) とは異なる温度不変反応 ($L + Mo_2C \rightarrow Mo + TiC$) が生じることなどを明らかにした。ここでは、MoSiBTiC 合金の構成相を含む共晶反応である Mo-Si-B 三元系における液相 ($L \rightarrow Mo + Mo_5SiB_2 (T_2)$) および Mo-Ti-C 三元系における $L \rightarrow Mo + TiC$ に着目する。前者の共晶反応組成は生成される両相の化学量論組成のおおよそ中央付近にある。一方、後者の共晶反応組成は比較的 Mo 相側によっており、Ti 濃度の増加に伴いさらに Mo 相側シフトする。この共晶反応組成は各相の融点に影響されていると考えられる。図 3 (a) に模式的な Mo-Ti-C 三元系状態図を示す。また、各相の化学量論組成における融点も示す。共晶反応組成は生成される固相の融点に影響される場合が多い。例えば、Mo-C 二元系の $L \rightarrow Mo + Mo_2C$ の共晶反応では、両固相の融点が同等であるが、この場合の共晶反応組成は両相のおおよそ中央付近となる。したがって、共晶組織における固溶体相と化合物の割合は同等である。一方で、

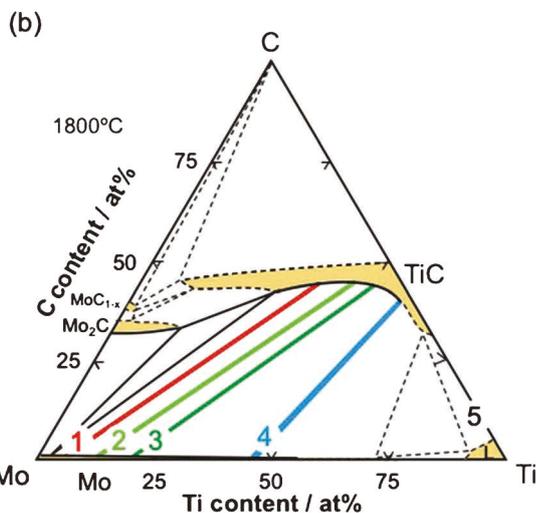
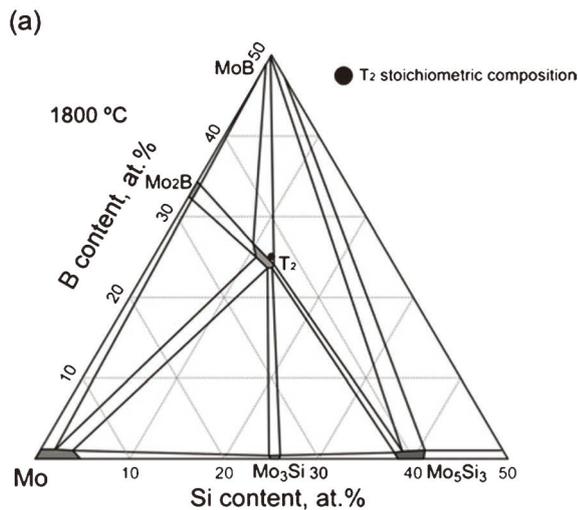


図 1 1800 °C における等温断面図 : (a) Mo-Si-B 三元系, (b) Mo-Ti-C 三元系⁽¹⁹⁾⁽²⁰⁾。(オンラインカラー)

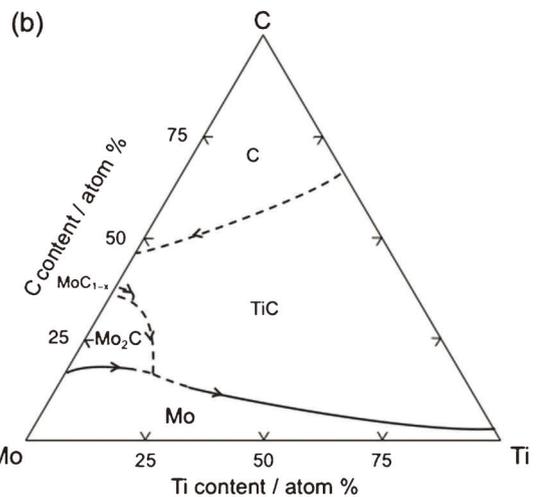
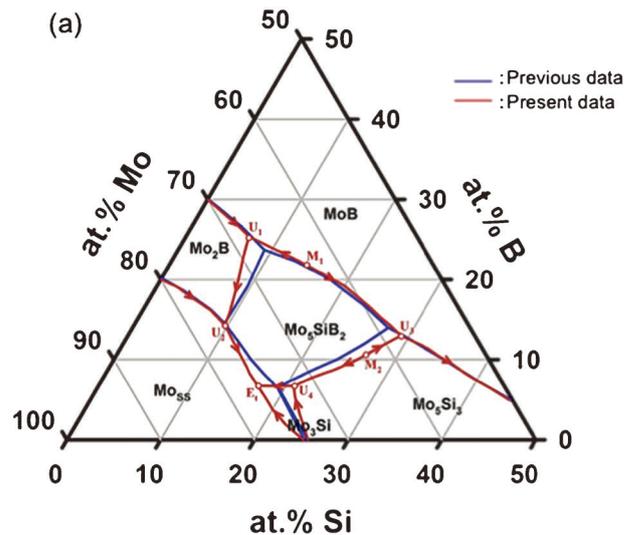


図 2 液相面投影図 : (a) Mo-Si-B 三元系, (b) Mo-Ti-C 三元系⁽²⁰⁾⁽²¹⁾。(オンラインカラー)

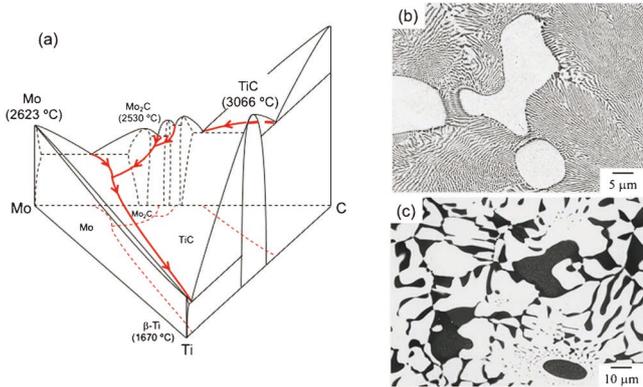


図3 模式的な Mo-Ti-C 三元系状態図(a)および Mo-15 at% Ti-15 at% C と Mo-50 at% Ti-15 at% C の凝固まま材の反射電子像(b, c)。(オンラインカラー)

Ti-C 二元系の $L \rightarrow \beta\text{-Ti} + \text{TiC}$ の共晶反応では、TiC の融点が十分高く、共晶反応組成は $\beta\text{-Ti}$ 相側にある。その結果、共晶組織における固溶体相の割合が高い。この効果が Mo-Ti-C 三元系にも生じている。すなわち、固溶体相 (Mo 相) よりも融点の高い TiC の添加および Mo 相の融点を下げる Ti の添加は $L \rightarrow \text{Mo} + \text{TiC}$ の共晶反応組成を Mo 相側にシフトさせ、共晶組織における Mo 相の割合を高める効果がある。図 3 (b), (c) に Mo-15 at% Ti-15 at% C と Mo-50 at% Ti-15 at% C の凝固まま材の共晶組織を示す。共晶反応組成が Mo 相側によりシフトした Mo-50 at% Ti-15 at% C の共晶組織の Mo 相の割合は Mo-15 at% Ti-15 at% C よりも高くなり、Mo 相の連続性も上昇している。このような共晶組織における延性相の Mo 相の体積率や連続性の上昇は Ductile Phase Toughening による強靱化機構をより有効に発揮させ、靱性向上に有効と考えられる。

同様のメカニズムが Mo-Si-B 三元系合金と MoSiBTiC 合金にも生じていると考えられる。Mo-Si-B 三元系合金で生じる共晶組織よりも MoSiBTiC 合金の共晶組織はより連続的な Mo 相を有しているが、これは TiC の添加による共晶反応組成のシフトに起因すると考えられる。この TiC の添加による共晶組織における Mo 相の連続性や体積率の向上が MoSiBTiC 合金の高靱性化の要因の一つと考えられる。

4. TiC の非化学量論性に伴う弾性率変化

TiC は大きな非化学量論性を持つ場合がある。例えば、Mo-Ti-C 三元系では (図 1 (b)), 金属相 (Mo 相) と平衡する TiC の組成は高 Mo 側だけでなく、低 C 側にも大きく拡大している⁽²⁰⁾。前者は Ti サイトにおける Mo の置換、後者は C サイトにおける空孔の形成に対応しており、この非化学量論性が TiC の組織形成や材料特性に影響すると考えられる。また、MoSiBTiC 合金中の TiC もこの非化学量論性を有している⁽²²⁾。この非化学量論性が TiC の材料特性を変化させ、靱性を改善している可能性がある。一方で、TiC を含む遷移金属炭化物のバルク体には作製中に空隙が形成するた

め、バルク体を用いた材料特性の正確な測定は困難である⁽²³⁾。

そこで本研究では、非化学量論性を持つ TiC と金属相が平衡する合金を用いた弾性率の算出を試みた。図 1 (b) に示すように Mo-Ti-C 三元系の 1800°C における Mo/TiC 二相域における複数のタイライン上の合金を作製した。これら合金のうち、同じタイライン上の合金は金属相と TiC の体積率は異なるものの、各相の組成は同じである。したがって、これら合金の弾性率を測定し、複合則で整理すれば、各タイラインのターミナル組成を有する TiC の弾性率が算出できると考えた。

図 4 に各タイラインの合金の弾性率と TiC の体積率の関係を示す⁽²⁴⁾。なお、Tie line 1-4 は Mo-Ti-C 三元系の Mo/TiC 二相合金であり、図 1 (b) の状態図のタイラインの色と対応している。また、Tie line 5 は Ti-C 二元系の $\beta\text{-Ti}/\text{TiC}$ 二相合金である。いずれの Tie line の合金のヤング率 (E)、剛性率 (G)、体積弾性率 (K) も TiC の体積率の増加に伴い直線的に変化した。したがって、複合則の Voigt モデルを用い、

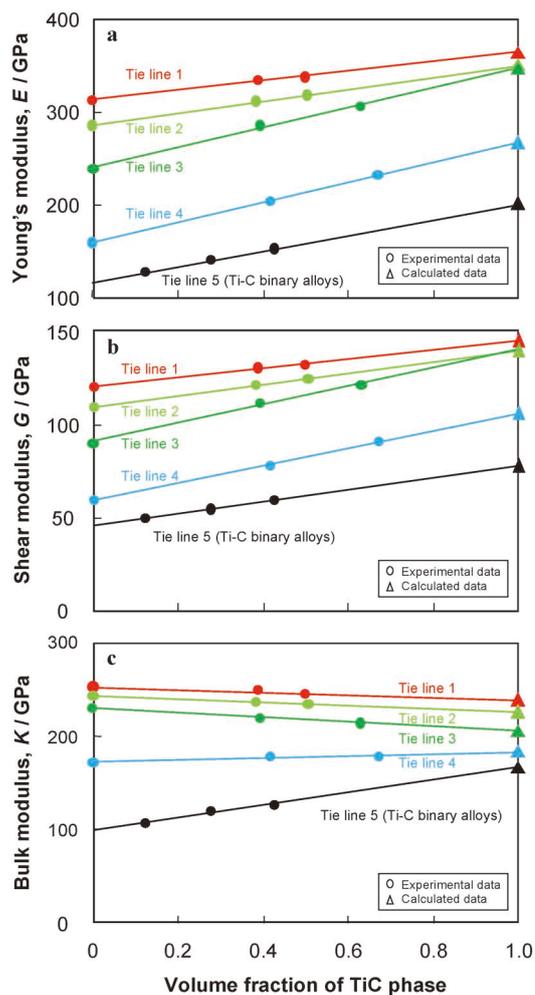


図4 Mo-Ti-C 三元系合金の Mo/TiC 二相域におけるタイラインの合金の弾性率と TiC の体積率の関係：(a) ヤング率、(b) 剛性率、(c) 体積弾性率。(オンラインカラー)

TiCの体積率が1, すなわち各 Tie line のターミナル組成を持つ TiC の弾性率を算出した. E と G は Tie line 1-3 ではほとんど変化せず, Tie line 3-5 では大きく低下した. その一方で, 体積弾性率は Tie line 1-5 にかけて単調に低下した. これらは各弾性率に及ぼす非化学量論性の効果が異なることを示唆している.

そこで, Tie line 1-3 の TiC のターミナル組成は C 濃度が同等であることから, Tie line 1-3 の TiC の弾性率のデータから Ti サイトにおける Mo の置換の効果を算出した. さらに Tie line 3-5 では C 濃度も Mo 濃度も変化することから, C サイトにおける空孔の形成の効果と Ti サイトにおける Mo の置換の効果の両者の効果が含まれる. そこで, Tie line 3-5 の TiC の弾性率のデータから上述した Ti サイトにおける Mo の置換の効果を引くことにより C サイトにおける空孔の形成の効果を分離した. その結果を図 5 に示す⁽²⁴⁾. なお, 実験結果と第一原理計算の結果を併せて示す. Ti サイトにおける Mo の置換に伴い E と G はほとんど変化しないものの K は上昇し, C サイトにおける空孔の形成によりいずれの弾性率も変化するが, その効果は K に比べ E

と G の方が大きかった. これは, 各弾性率の支配因子が異なることを示唆している. そこで, 各弾性率が TiC の結合力に支配されると仮定し, 弾性率の支配因子を以下のように考察した.

化学量論組成の TiC における C サイトの C と Ti サイトの Ti で, 6 の Ti-C 最近接結合と 12 の Ti-Ti および C-C 第二近接結合を形成している(図 6 (a)). C サイトに空孔が形成されると(図 6(b)), 6 の Ti-C 最近接結合と 12 の C-C 第二近接結合が消失する. その結果, K に比べ E と G の方が低下したことから, Ti-C 最近接結合力と C-C 第二近接結合力は K に比べ E と G を支配する因子であると考えられる. 一方で, Ti サイトに Mo が置換されると(図 6(c)), 6 の Ti-C 最近接結合が Mo-C 最近接結合となり, 12 の Ti-Ti 第二近接結合が Ti-Mo 第二近接結合になる. ここで, Ti-Mo 結合力は Ti-Ti 結合力よりも強いと考えられる. これは Mo 固溶体相の弾性率(図 4)が Mo 濃度の増加に伴い上昇したためである. しかし, E と G は Mo の置換に伴いほとんど変化しなかったことから, Mo-C 最近接結合力は Ti-C 最近接結合力よりも弱いと考えられる. 一方で, K は Mo の置換に伴い上昇したことから, Ti-Ti 第二近接結合力は E と G に比べ K を支配する因子であると考えられる. また, 第一原理計算と実験結果が十分近い値を示すことから, 第一原理計算で室温の TiC の弾性率の予測が可能であることがわかった(図 5). そこで, TiC の Ti サイトと C サイトに元素や空孔を系統的に置換させ, これに伴う弾性率の変化を第一原理計算で幅広く調べることにより, 弾性率の支配因子のさらなる解明を進めている. その支配因子を用いることにより, 非化学量論性を持つ TiC の弾性率の予測に挑戦している.

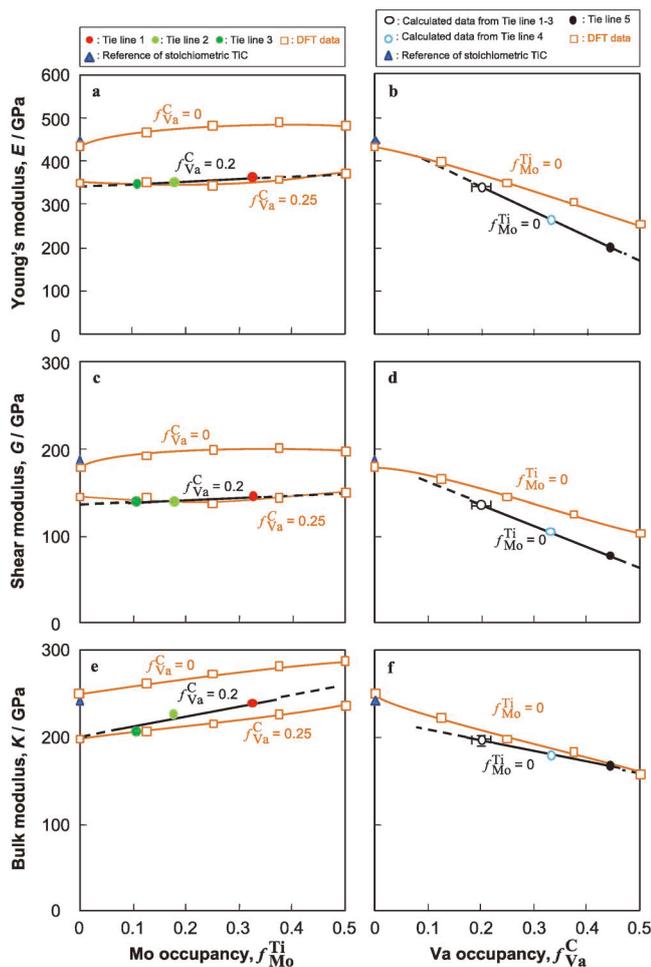


図 5 Mo-Ti-C 三元系の TiC の Ti サイトにおける Mo の割合(a, c, e)および C サイトにおける空孔の割合(b, d, f)に伴う弾性率変化: (a) ヤング率, (b) 剛性率, (c) 体積弾性率. (オンラインカラー)

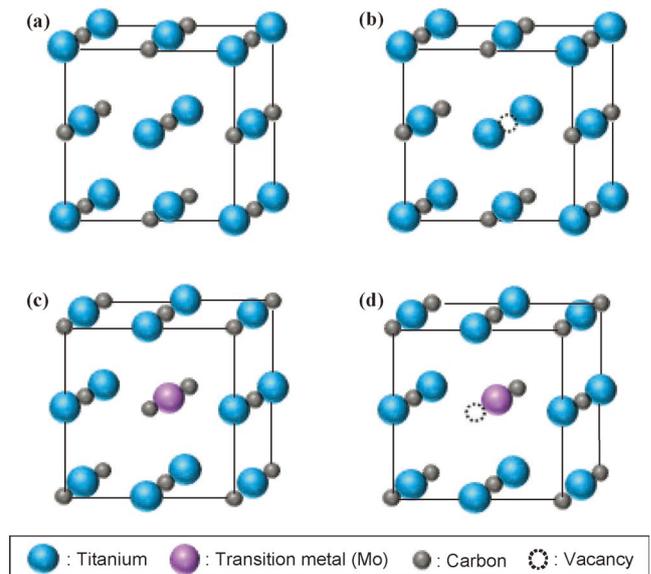


図 6 B1 型 TiC の構造: (a) 化学量論組成, (b) 化学量論組成の TiC の C サイトに空孔が形成された構造, (c) 化学量論組成の TiC の Ti サイトに Mo が置換した構造, (d) 化学量論組成の TiC の C サイトに空孔が形成され, Ti サイトに Mo が置換した構造. (オンラインカラー)

電子顕微鏡における遠隔観察・遠隔操作の現状

平田 智 丈*

1. はじめに

走査電子顕微鏡 (Scanning Electron Microscope: SEM) や透過電子顕微鏡 (Transmission Electron Microscope: TEM) は、金属材料を取り扱う研究者にとって、利用する機会が非常に多い装置である。特に、これらに元素分析用のエネルギー分散型 X 線分光器 (Energy Dispersive X-ray Spectroscopy: EDS) や波長分散型 X 線分光器 (Wavelength Dispersive X-ray Spectroscopy: WDS)、あるいは電子線後方散乱回折 (Electron Backscatter Diffraction: EBSD) による結晶方位解析装置を装備した分析系装置は、材料の物性評価や新機能創出には、なくてはならない装置と言っても過言ではない。したがって、研究者にとっては、これらの装置を常時使用できる環境が担保されることが望ましく、その実現を目指し、弊所が最近注力している取り組みについて紹介する。

2. 電子顕微鏡の遠隔利用の普及状況

2020年、COVID-19、いわゆる新型コロナウイルスの感染が世界的に急拡大し、我々を取り巻く環境が激変した。最近では、以前と比べると落ち着きつつあるものの、この環境変化を機に働き方が大きく変化し、テレワークの採用など、多種多様な働き方が認められるようになってきた。ただし、研究者を対象とした場合、テレワークで対応できる仕事は、極めて制限されると考えられる。しかしながら、今日ではネットワーク環境が著しく発展し、一部の装置では遠隔利用が実現している。たとえば国内の大学を中心に、遠隔操作を利用した各種分析機器の相互利用⁽¹⁾や、テレビ会議システムを利用した TEM の遠隔観察⁽²⁾など、遠隔利用システムの整備が進められている。さらに、電子顕微鏡を取り扱うメーカーにおいても、機器の遠隔操作や遠隔観察などが実現できる装置やシステムを開発し、積極的に提供し始めている⁽³⁾⁽⁴⁾。

以上のように、電子顕微鏡を中心とした一部の装置においては、研究者においても、現代に合わせた働き方を選択する

ことが不可能ではなくなってきた。このような状況の中、著者が所属する大阪産業技術研究所においても、新しい働き方を支援することを目的に、数年前から分析機器類の遠隔操作に係わる環境整備を推進している。

3. 遠隔操作システムの概要

前述の遠隔利用は、接続先が変わらない特定の機関が対象となることが多いと推測される。その場合、専用の回線を準備するか、あるいは VPN (バーチャルプライベートネットワーク) を利用して接続することで、遠隔利用が実現できる。しかしながら、その手法ではセキュリティを確保することはできないが、利用には複雑な操作が必要となる。

一方、弊所で保有する装置は、所内の職員が使用するだけでなく、外部の不特定多数の方が使用される。これは、利便性やセキュリティにおいて考慮すべき点となるが、弊所ではオープンソースソフトウェア⁽⁵⁾を使用し、図1のような仕組みで、汎用の Web ブラウザ上で遠隔操作できるシステムを構築した。これにより、利用者側の PC に専用のアプリケーションを導入することなく、装置を安全かつ手軽に遠隔操作

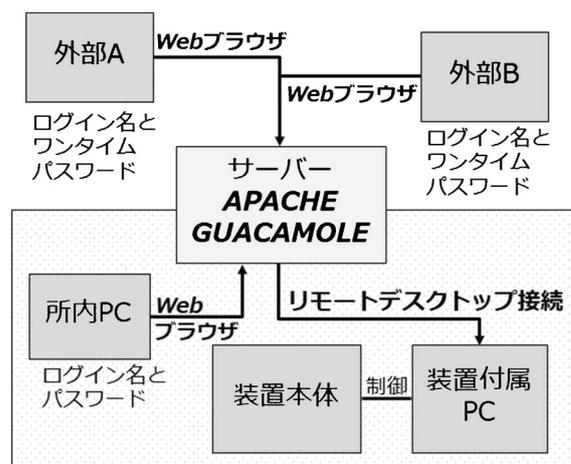


図1 遠隔操作システムの概要。

* 地方独立行政法人大阪産業技術研究所和泉センター；研究室長(〒594-1157 和泉市あゆみ野 2-7-1)
Current Status of Remote Observation and Remote Control in Electron Microscopes; Tomotake Hirata (Osaka Research Institute of Industrial Science and Technology, Izumi)
Keywords: *electron microscope, remote, energy dispersive X-ray spectroscopy (EDS), electron backscatter diffraction (EBSD), electron probe micro analyzer (EPMA)*
2024年3月29日受理 [doi:10.2320/materia.63.554]

することが可能となった。遠隔操作の様子は、複数の別の接続先から遠隔観察することも可能である。なお、外部の方が遠隔利用される場合、予めログイン名と時間制限を設けたパスワードを発行し、装置使用を管理することができる。

4. 遠隔操作可能な機器の紹介

現在、弊所において、遠隔操作による装置使用サービスを本格的に開始しているのは、SEM 関連の二つの装置になる。一つは、WDS を搭載した電界放出型(Field Emission: FE)の電子プローブマイクロアナライザ(Electron Probe Micro Analyzer: EPMA)で、もう一つは EDS と EBSD を装備した FE-SEM(SU5000: 株式会社日立ハイテク製)である。

FE-EPMA(JXA-8530F: 日本電子製)は、高度な分析ができるが、測定に長時間を要する。ただし、装置は測定中、自動制御されるが、遠方から弊所にお越しいただく場合は、その間に実施できる作業が限定される。そこで、一つの対策として、前述の遠隔操作システムを採用した(図2)。一方、FE-SEM に関しては、像観察のみ(SEM 本体のみ)遠隔操作する場合は、メーカーが準備している ExTOPE⁽⁴⁾ というシステムを利用する。このシステムは、テレビ会議用アプリケーションとして知られる Webex を利用し、装置本体

PC とケーブルで接続された遠隔操作 PC に外部から接続し、遠隔操作を行う仕組みとなっている(図3)。ただし、EDS や EBSD に関しては、SEM 本体の像観察とは異なるソフトウェア上で操作するため、ExTOPE による遠隔操作には対応していない。そこで、分析系装置の使用に際しては、FE-EPMA と同じシステムを採用している。なお、いずれの装置においても、試料の出し入れに関しては遠隔操作ができないため、現地でのサポートが必要となる。

多くの SEM は、専用の操作盤(つまみやボタンにより調整するもの)により制御するが、装置用 PC 内の SEM 用アプリケーションの中でも、マウス操作により制御することができる。今回構築した遠隔操作システムでの操作機能は、弊所が独自に準備したのではなく、上記のマウス操作による制御を利用している。したがって、ネットワークに接続でき、マウス操作で制御できる装置であれば、本システムにより、遠隔操作できる環境を比較的容易に構築できる可能性がある。現地での慣れ親しんだ使用法と比べると、最初は若干の戸惑いがあるかもしれない。さらに、インターネット環境により、作業の軽快さも異なるが、少なくとも著者自身は、今ではそれほど苦に感じることなく使用している。是非一度、ご利用いただければ幸いである。

5. おわりに

新型コロナが拡大したとき、学協会等の大会は、Web 開催が主流となった。Web 形式は大変便利なツールであり、新型コロナ収束後も、その形式が主流になることも予想されたが、実際は元の現地開催やハイブリッド形式を選択することが多くなっている。これは、Web 形式は手軽に参加しやすいが、現地に足を運べば、参加者との交流を通じた情報交換など、現地でしか得られない多くの利点があるからであろう。装置使用においても、現地での使用ならではの利点は存在し、遠隔利用がすぐに主流になっていくとは考えにくい。しかしながら、電子顕微鏡の遠隔利用は、地理的・時間的不利を解消し得るツールであることは間違いなく、実際、弊所においても遠方の機関との共同研究等は増加傾向にある。今後も需要が伸びていくものと期待しており、装置の遠隔利用の推進が、学術の発展に少しでも貢献できれば幸いである。最後に、今回の執筆機会を与えていただいた編集委員会の方々に感謝を申し上げ、弊所の取り組みに関する紹介を終える。

文 献

- (1) <https://www.nagaokaut.ac.jp/project/share/index.html>
- (2) 市川 聡, 永瀬丈嗣, 西 竜治: 第103回鑄造先端プロセス研究部会講演用配布資料(2023.6).
- (3) 石丸雅夫: 第103回鑄造先端プロセス研究部会講演用配布資料(2023.6).
- (4) <https://www.hitachi-hightech.com/jp/ja/products/ict-solution/extope.html>
- (5) <https://www.designet.co.jp/ossinfo/apachequacamole/>

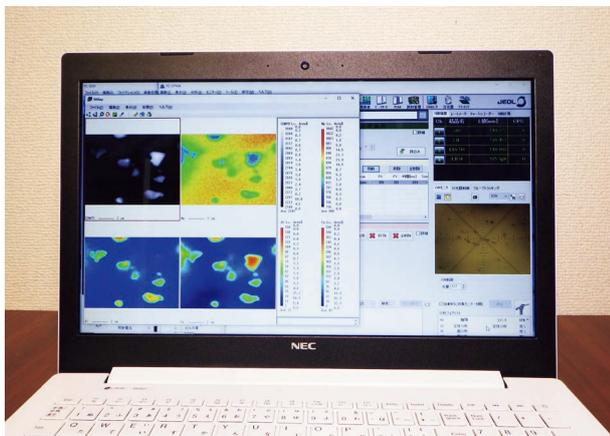


図2 FE-EPMA の遠隔操作(著者の自宅ノート PC より接続)。

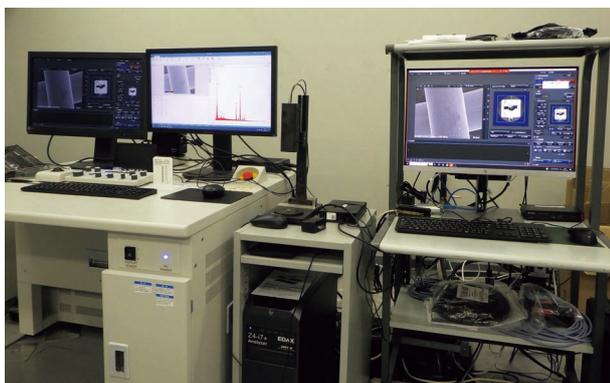
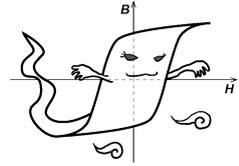


図3 ExTOPE による SEM の遠隔操作。左側は SEM 本体用 PC, 真ん中は分析用 PC, 右側は遠隔操作 PC。



2. 特性の計測評価

2-3 磁気特性の計測と解析

2-3-1 磁気測定の基本：静的磁化測定

小野寺 礼 尚* 喜 多 英 治**



2-3-1-1 はじめに

磁気測定と聞くと、永久磁石や軟磁性材料など磁性体を扱う人たちの研究手法というイメージを持たれているのかもしれませんが、しかし、例えばよく知られた鉄の α - γ 変態など材料の相変態や、組織を構成する相の割合など多様な情報を変態に伴う磁気的性質の変化から見積もることができます。

この講座は、普段、組織を金属顕微鏡や電子顕微鏡により直接観察することが多く、磁気測定を研究手法として取り入れている方、例えば構造材料の研究を始めた学部生や修士課程の学生のみなさんに向けて、その原理、手法、測定例を紹介し、新たな解析方法として挑戦してもらうために執筆しました。

磁気測定については全2回の連載となりますが、初回は静的な測定、今回は動的な測定について、なるべく噛み砕きながら説明していきたいと考えています。また、動的測定については、現在、磁性体をテーマに研究している学生のみなさんも、自分で装置を組み上げ、測定・解析ができるような説明を心がけます。

2-3-1-1-1 磁場、磁気モーメントと磁化

初めに、磁場に対する物質の応答を考えます。物質が磁場(H)の中に置かれると磁気分極(あるいは磁化)が誘起されます。磁気分極は古典的には、一对のNSの磁極(磁気双極子)やループ状の電流で表わされます。その磁化は磁場とともに磁束密度(B)に寄与し、磁場の強さ H [A/m]および単位体積あたりの磁化 M [A/m]と磁束密度 B [TあるいはWb/m²]との間には、次の関係式が成り立ちます¹⁾。([]内はCGS単位系による表式)

$$B = \mu_0(H + M), [B = H + 4\pi M] \quad (1)$$

ここで μ_0 は真空の透磁率と呼ばれる定数です²⁾。

微視的に見ると、原子単位での角運動量が磁気分極(磁気モーメント)の源となっていて、量子力学によって説明されています³⁾⁽¹⁾⁻⁽³⁾。磁場に対する応答は物質によって異なり、外部磁場のない状態でも磁気分極が存在して秩序状態にある場合と磁場に比例した応答をする場合があります。図1に、前者の強磁性、反強磁性、フェリ磁性と後者の例である常磁性における磁気モーメントの状態を示しています。個々の原子が担う磁気モーメントの大きさを m として表し、材料全体で磁気モーメントの総和(ベクトル和)をとった値を単位体積当たりに換算した量を(体積磁化) M として表しています⁴⁾。強磁性(a)の場合は、磁気モーメントが全て同一方向に整列(あるいは秩序化)します。そのため、強磁性は自発磁化 M_0 を持ちます。反強磁性(b)では、最隣接の磁気モーメント同士が反平行に秩序しているため、総和はゼロとなり自発磁化を持ちません。一方、フェリ磁性(c)は、2種類の原子すなわち磁気モーメントによって構成されています。反強磁性と同様の秩序状態を示しますが、互いの磁気モーメントの大きさが異なるため、総和をとると自発磁化を持ちます。

¹⁾ 磁束の単位であるWb(ウェーバ)はSI組立単位であり磁束密度と面積の積を意味し、次元はm² kgs⁻² A⁻¹で表されます。1 m²の面積に1 Wbの磁束が存在するとき、磁束密度は1 Wb/m²すなわち1 Tと表されます。

²⁾ 真空の透磁率。以前は、 $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$ H/mあるいはN/A²と定義されていました。2018年のSI単位系の改定に伴いアンペアの定義が新しくなった影響で、定義値ではなく測定によって決定する物理量(1.25663706212(19) × 10⁻⁶ N/A²)となりました。本稿では、便宜的に以前の定義である $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$ N/A²を使用します。

³⁾ 詳しくは次の文献を参考してください。初学者向けには文献(1)、物理が得意な方や大学院生には文献(2)を挙げます。英書ですが、文献(3)にも丁寧な説明があります。

* 茨城工業高等専門学校 国際創造工学科; 准教授(〒312-8508 ひたちなか市中根866)

** 筑波大学名誉教授

Experimental Guides for Metallic Materials: 2. Measurement and Evaluation of Material Properties

2-3 Structural Measurement and Analysis Using X-rays : 2-3-1 Introduction of Basic Magnetometry: Basic of Static Measurement; Reisho Onodera* and Eiji Kita** (National Institute of Technology, Ibaraki College, Hitachinaka. **Emeritus Professor, University of Tsukuba, Tsukuba)

Keywords: magnetization measurement, magnetic moment, magnetic field, vibrating sample magnetometer (VSM), Currie temperature

2024年5月21日受理[doi:10.2320/materia.63.556]

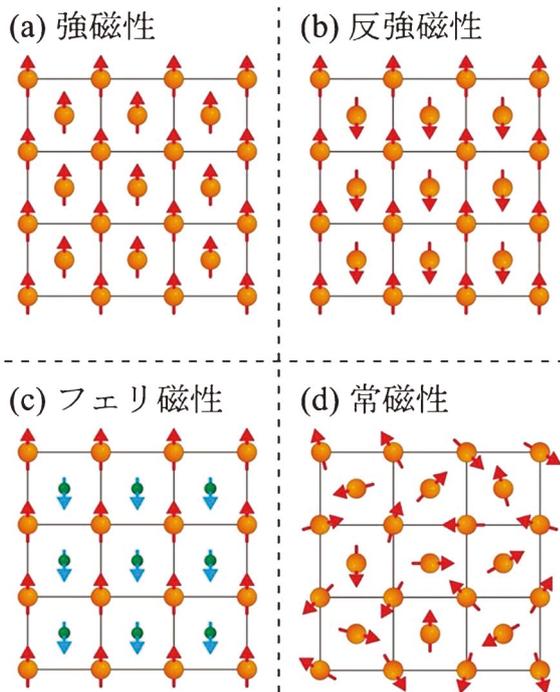


図1 物質の磁性と磁気モーメントの秩序の例。橙色、緑色の丸で表した個々の原子が、それぞれ矢印で表した磁気モーメントを担っているとしたとき、(a)強磁性：磁気モーメントが一方向に秩序、(b)反強磁性：最隣接の磁気モーメントが反平行に秩序、(c)フェリ磁性：大きさの異なる磁気モーメントが反強磁性秩序、(d)常磁性：磁気モーメントの方位が無秩序。

なお磁気モーメントが平行に並ぶか反平行に並ぶかは磁気モーメント間の交換相互作用の符号に依存します⁽²⁾。(d)は磁気モーメントが秩序しておらず、常磁性と呼ばれています。また磁気モーメントの秩序がない磁性として、反磁性も挙げられます。反磁性では磁場印加されることで磁場と逆向きの磁気モーメントが生じます。

ここで、強磁性体を例に磁化測定によって測定できる磁化 M と磁気モーメントの状態について説明します。絶対零度では強磁性体の磁気モーメントは熱擾乱の影響を受けないため、図2(a)に示すように真の磁気モーメントの大きさ m を示します、この総和が飽和磁化 M_s となります。一方で有限の温度においては、図2(b)に示すように熱擾乱により観察できる磁気モーメントの大きさは熱平均値 $\langle m \rangle$ となるため、その総和 M_s は絶対零度における値よりも小さくなります。磁気モーメントの真の大きさ m として、一般には液体ヘリウム冷却で測定できる 4.2 K の値が用いられます。

強磁性体をキュリー温度以上に加熱すると熱エネルギーにより秩序は崩壊し、図2(c)に示すように各々がランダムな方位をとるようになり常磁性へと磁気変態します。変態後、モーメントの総和はゼロとなります。この状態に磁場を印加すると図2(d)で表すように個々の磁気モーメントは磁場方向に弱く整列するため印加磁場に比例した磁化が誘起されます。またこの時の比例係数 χ を磁化率(帯磁率)と呼びます。

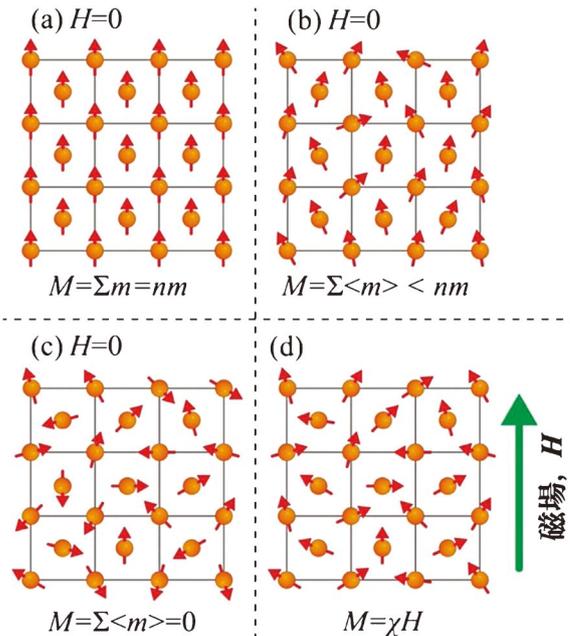


図2 強磁性体において測定される磁化 M 、および磁気モーメント m の秩序の様子、 n は体積あたりの原子数。(a)絶対零度における自発磁化、(b)有限温度における自発磁化、(c)キュリー温度以上の状態、(d)(c)に磁場印加した際の磁化 M 。 M は磁化率 χ および磁場の強さ H に比例する。

磁場印加による磁化は、キュリー温度以下でも誘起されるため、磁化 M は H の関数として、

$$M(H) = M_0 + \chi H \quad (2)$$

と表すことができます。式(2)で表される磁化は弱い外部磁場での近似であり、いずれ飽和して M_s に到達します。

磁束密度 B [T あるいは Wb/m^2] と磁場あるいは単位体積の磁化 M [A/m] をかけた値は、 J/m^3 となり単位体積のエネルギーの次元をもつため、体積磁化と磁場は共役の物理量といえます。

材料の磁化は体積あたり、あるいは質量あたりの値を用いて議論することが一般的ですが、物性物理や磁性材料の分野では、原子1つあたりのモーメントの大きさ (m) を議論することが多くあります。この場合、ほぼ1電子の磁気モーメントの大きさを表すボーア磁子 $\mu_B = e\hbar/2m_e$ ($9.2741 \times 10^{-24} \text{ Am}^2$) を単位として表現されます。ただし、 e は電気素量、 \hbar はディラック定数(プランク定数 h を 2π で割った値)で、 m_e は電子の静止質量です。ボーア磁子を用いると、Fe原子一つの磁気モーメントは、 $m = 2.22 \mu_B$ と表されます⁽⁵⁾。したがって、磁束密度 B [T] を掛けると、やはりエネルギーの次元を持つこととなります。

図3にはさまざまな磁性体の磁化曲線の概念図を示します。ここまで単位体積あたりに換算された磁化 M を用い説明してきましたが、実際は試料の体積より質量の方が容易に計測できます。その場合、図3のように質量磁化 σ [Am^2/kg] で表すこととなります。以降の図も、実験データは質量磁化を用いて表しています。強磁性やフェリ磁性の磁化は磁

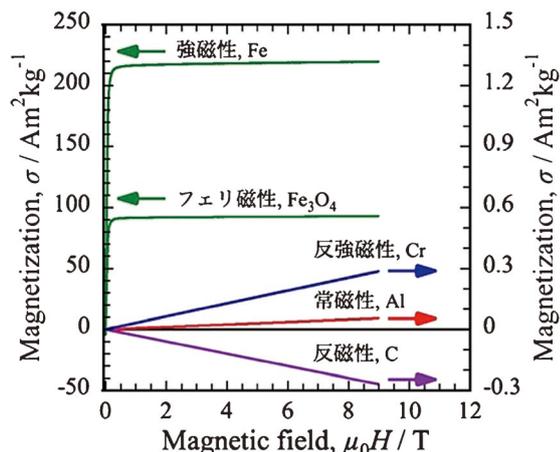


図3 磁性体の磁化曲線(概念図). 強磁性体やフェリ磁性体の質量磁化 σ は, 常磁性体, 反強磁性体および反磁性体が示す磁化の $10^2 \sim 10^3$ 倍大きい。(実際の磁性体の飽和磁化, 磁化率⁽⁶⁾を元に作成.)

場印加によって飽和しますが, 常磁性と反強磁性の磁化は磁場に対して比例します. これらの磁化率は小さく, 一般的な強度の磁場印加では強磁性の磁化の100分の1程度の大きさになります. また, 炭素やビスマスのような反磁性体は負の比例関係があります. このため計測対象の磁化の大きさによって感度の異なる計測手段を選択する必要があります.

強磁性体は磁場印加によって一定値に飽和しますが, 結晶構造や試料形状に由来する磁気異方性によって, 磁化の飽和の過程が異なります. 後述するヒステリシスループを測定することで, この異方性の情報を得られます. この磁化と磁場の関係を調べるのが磁化測定と呼ばれる計測です.

磁化測定で得られる物性値として, 物質の磁化と上述の磁気異方性があります. さらに温度変化を測定することで, 強磁性を失う温度, すなわちキュリー温度を測定することができます. キュリー温度は, 強磁性をもたらす交換相互作用の強さに影響を受けるため, 間接的に磁気モーメントの結びつきの強さを測定することになります.

磁気測定分野で扱う単位には, emu を用いた CGS 表記がまだ使われる場面があるため簡単に説明します¹⁴. CGS 単位系における質量磁化 $\sigma = 1 \text{ emu/g}$ は SI 単位系における質量磁化 $\sigma = 1 \text{ Am}^2/\text{kg}$ に等しいため, 換算が容易です. また SI 単位系における磁気モーメントの次元 $[\text{Am}^2]$ は, ループ面積(S)を流れる電流(I)の積を表しています. 参考までに表1に, 単位系ごとの磁化および磁場の単位をまとめ, 表2には, 実際の測定を想定していくつか単体物質の磁性と飽和磁化(強磁性体)と $\mu_0 H = 1 \text{ T}$ の磁場中での質量磁化(常磁

表1 SI および CGS 単位系における磁化・磁場の単位⁽⁴⁾.

単位系	SI 単位系	CGS 単位系
磁気モーメント (試料磁化) m	Am^2	emu
体積磁化 M	A/m	emu/cm^3
質量磁化 σ	Am^2/kg	emu/g
磁場の強さ H	A/m	Oe(エルステッド)
磁束密度 B	$\text{T}(\text{Wb/m}^2)$	G(ガウス)
備考	1 T は約 796 kA/m に相当($B = \mu_0 H$) 1 T は 10 kG に相当 試料体積を v とすると試料磁化 $= Mv$	

表2 単体物質の室温付近の飽和磁化(強磁性体)と 1 T の磁場下での磁化(常磁性, 反強磁性および反磁性)⁽⁶⁾.

元素	磁性	質量飽和磁化 $[\text{Am}^2/\text{kg}]$	変態温度 Θ_f $[\text{K}]$
Fe		218.0	1043
Co	強磁性	161.85	1388
Ni		55.01	631
質量磁化($\mu_0 H = 1 \text{ T}$ の磁場下)			
Al	常磁性	0.61×10^{-2}	
Pt	常磁性	0.983×10^{-2}	
Cr	反強磁性	3.17×10^{-2}	
Cu	反磁性	-0.086×10^{-2}	
C	反磁性	-3.0×10^{-2}	

性, 反強磁性および反磁性)をまとめました. 後者の質量磁化は μ_0 をかけることにより質量磁化率に変換できます.

2-3-1-1-2 磁化測定で得られる情報

強磁性を示す単一元素や合金構成元素(Fe, Co, Ni, Cr, Mn, etc.)は, 炭素鋼や, 強靱鋼, ステンレス鋼などの構造材料に含まれていることはご存知だと思います. したがって, 構造材料の微細組織を構成する各相も当然磁氣的性質を有しています. これが, 構造材料など磁気分野以外のフィールドで研究しているみなさんでも, 磁化測定する意味が見出せると著者が考えている理由です.

材料の中には温度環境によって相変態するものが多くあります. 鋼の主構成要素である鉄(Fe)は, 1043 K にキュリー温度をもち, 1185 K で bcc 構造の α -Fe(フェライト)から fcc 構造の γ -Fe(オーステナイト)へと相変態します. 図4は純鉄の磁化の温度依存性を示しています. 1043 K 以上では α -Fe, γ -Fe 共に常磁性ですが磁化率が異なるため, 変態温度で磁化に異常な変化が現れます. 図4は印加磁場の異なる熱磁化曲線を示しており, 挿入図に変態温度近傍の拡大図を示しますが, 一次変態の特徴である α - γ 変態に伴い磁化が急激に減少することや, 加熱・冷却時にヒステリシスを伴って変態していることがわかります.

¹⁴ ここで注意すべきことは, emu は次元をもつ単位ではなく, 使用する単位系を示していることです. 本稿では, できる限り SI 単位系で統一し, 磁化の値には質量磁化(σ)では Am^2/kg , 磁場の強さには T(テスラ)を用いることにします. T(テスラ)は厳密には磁束密度(B)の単位ですが, 慣例として磁場の強度を表す際によく用いられます.

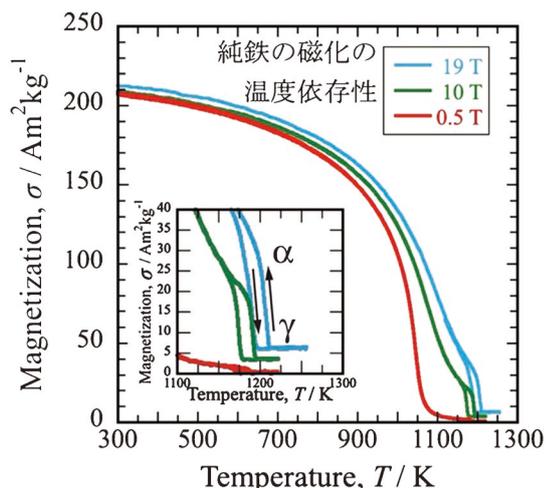


図4 純鉄の熱磁化曲線. 挿入図はキュリー温度近傍の拡大図.

また、マルテンサイト変態のような無拡散変態や、規則合金の規則-不規則転移のような拡散変態も磁化率の差を反映した磁化の変化から観測することが可能です。

このような変態は当然、DTA(differential thermal analysis)やDSC(differential scanning calorimetry)などの熱分析で観測することができます。特に、DSCでは変態の潜熱を測定し、熱力学的な平衡状態に関する貴重な情報を得ることができます。TG(thermogravimetry)-DTAのように他の測定と組み合わせて複数の物性値を測定することもできます。ただし、主として試料へ出入りする熱を観測するため、磁気変態を比熱の変化を通して観測することになります。比熱に対する磁性の寄与は決して大きくなく、独立した現象として明瞭に観察できないこともあります。

一方で磁化測定は他の物理量からの影響が少ない環境で行われるため、比較的独立した計測と考えられます。このため、磁性を担う電子状態などが直接反映される利点があります。例えば、磁化だけが観測に影響するため、キュリー温度では単に自発磁化が消失します。これが磁化測定の特徴と言えます。

また、熱分析やX線構造解析では材料の平均的な(あるいは巨視的な)情報を得られます。局所的な(部分的な)情報は主相のシグナルに埋もれてしまう場合がありますが、磁化測定で検出できる場合があります。

合金系によっては組成や温度、あるいは熱処理履歴によってさまざまな非平衡相が生じる場合がありますが、それらの相を磁化測定で検出・同定することができます。

このように、磁化率や磁化の大きさ(絶対値)といった物性値の基本的な評価に加えて、組織構成に関する情報を得られます。熱分析と磁化測定のどちらかが優れているという話ではなく、測定手法としてどちらも習得すれば、所望する情報に応じて適切な手法を選択できると理解していただければと思います。

まとめると磁化測定によって物質の、

- 磁気モーメント(磁化)
- キュリー温度(磁気変態温度)
- 相変態温度(構造, 規則-不規則, etc)
- 相の構成比

を得ることができます。これらの情報は、磁性材料を研究対象とする方以外にも重要な情報であるといえます。次節では、一般的な磁化測定装置の装置構成について紹介します。

2-3-1-2 磁化測定装置の概要

2-3-1-2-1 構成要素

この節では、一般的な磁化測定装置の構成について紹介します。磁化測定装置は、大きく分けて、磁場発生部、磁化検出部から構成されます。それぞれについて簡単に説明したのち、市販されている装置の測定可能範囲についてまとめます。

2-3-1-2-2 磁場発生部

磁化測定では、材料に磁場を印加することで材料に誘起される磁化を計測します。強磁性体の場合、後述する反磁場の影響もあり、飽和させるためには0.5~1 Tは必要となります。異方性の大きい永久磁石材料などを飽和させるためには、さらに強い磁場が必要となる場合があります。

磁場発生装置として最も一般的であるのが電磁石で、図5(a), (b)のように銅線を鉄心に巻いたコイルから構成されます。磁場は磁極間に発生し、最大発生磁場は一般的な磁石で1~1.5 Tほど、強磁場発生用に設計されたもので3.5 T程度です。

電磁石よりも強い磁場が必要な場合は、超伝導磁石を用います。図5(c), (d)のように超伝導ケーブルをソレノイド状に巻いた空芯コイルです。

市販の磁化測定装置に用いられている超伝導磁石は発生磁場5~9 Tのものが多く、最大で14 T発生する測定装置もあります。

磁場強度の測定には、ホール効果を利用した磁気センサで

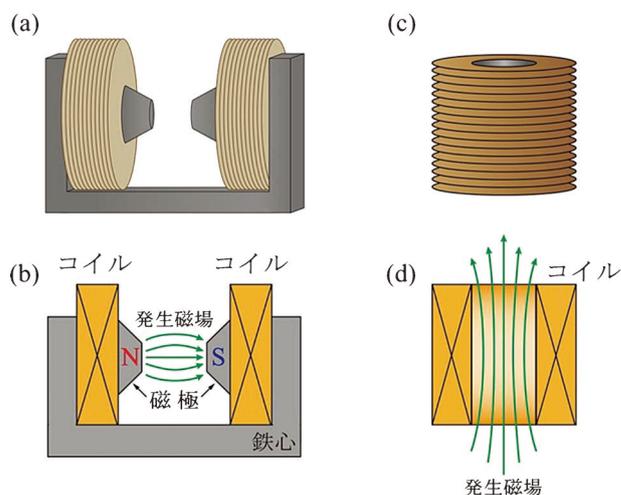


図5 (a) 一般的な電磁石の概念図と(b)断面図, (c) ソレノイド型空芯磁石の概念図と(d)断面図.

あるホール素子を用いる方法と、コイルに通電している電流値を測定し、磁場に換算する方法があります。ホール素子では、薄膜状の半導体素子の面内に電流を流し、電流に垂直方向に磁場が印加されると、両者に垂直な方向に磁場強度に比例して電圧が生じるホール効果を利用して磁場を測定します。鉄心のある電磁石では、電流と磁場の関係に鉄心由来のヒステリシスが存在することがあるため、実際の磁場を測定するホール素子が利用されます。超伝導磁石では電流値を用いることが一般的です。超伝導磁石への通電している電流値を計測する際には、電源の設定値ではなく、シャント抵抗を用いて正確な電流値の測定を行うことが望ましいです。シャント抵抗は電流の測定に特化した抵抗器で、電流経路に直列に接続し、抵抗両端の電圧降下を測定して、オームの法則から電流値を計算します。

さらに強磁場が必要な場合、パルス磁場を用いることがあります。パルス磁場は $\mu\text{s}\sim\text{ms}$ の時間で数10 T～数100 Tの磁場を発生させることができますが、室温以下の測定がほとんどです¹⁵。

2-3-1-2-3 磁化検出方法

磁場によって生じた材料の磁化を検出する方法として、ピックアップコイルと呼ばれる検出コイルを用いる方法が一般的です。図6で説明するように検出コイルを鎖交する磁束 Φ に時間変化が生じると、その変化率 $d\Phi/dt$ に比例する電圧 V が誘起される、いわゆるファラデーの電磁誘導の法則を用いて磁化を検出します。検出コイルを鎖交する磁束 Φ の発生源は、測定対象物の全磁化 Mv (試料体積 v)です。

$$-\frac{d\Phi}{dt} = V \quad (3)$$

磁束を時間的に変化させる方法としては、一定速度で試料をコイル中を通過させる引き抜き法や、コイルの中心で一定振幅・周波数で試料を振動させる試料振動型磁力計(VSM: vibrating sample magnetometer)⁽⁴⁾があります。

次に、試料の磁化が検出コイルに作る磁束を考えます。まず図6(a)に示すように単独のコイルの中心に磁化を配置して、コイル中心を z 軸方向の原点にとります。 z 軸上で試料位置を変化させたとき、磁束 Φ は図6(b)のように変化します。もし磁場や磁化が時間変化せず一定で試料位置も固定されているならば、式(3)に従ってコイルに起電力 V は発生しません。ここで試料を z 軸に沿った位置で小さく振動させるとコイルに生じる誘導起電力は図6(c)のようになります。ただこの場合、コイル中心に試料を置くと電圧はゼロになります。

磁化測定中は磁場中に試料が置かれているため検出コイルには磁化の作る磁束に比べてはるかに大きな、磁場発生装置からの磁束が鎖交します。このため、電源電流の揺らぎや振動が検出コイルの誘導起電力に雑音として影響を与えます。

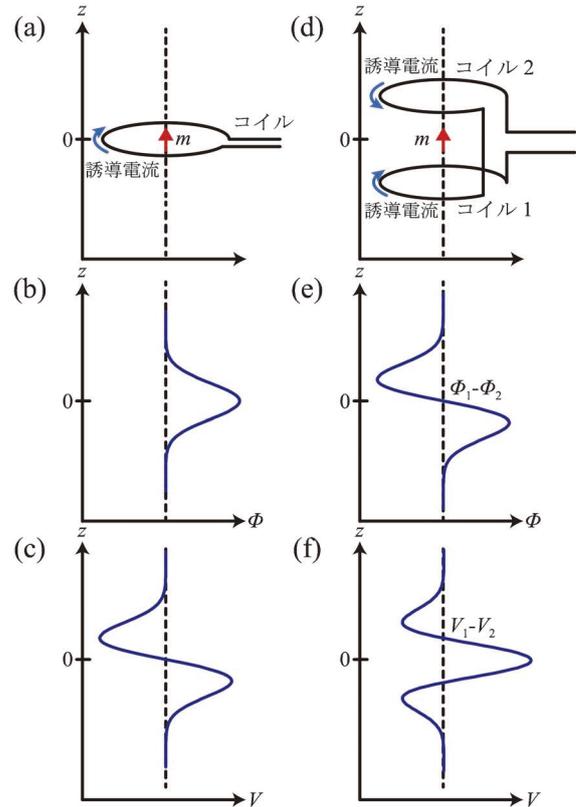


図6 ピックアップコイルが検出する磁束 Φ と誘導起電力 V 。(a)単独コイルの中心に磁化 m を配置した場合に(b)コイルを鎖交する磁束、(c)試料を小さく振動させたときにコイルに生じる誘導起電力。(d)直列接続した2つのコイルの中心に磁化を配置した場合の(e)それぞれのコイルを鎖交する磁束の和、(f)起電力の和。

これを避けるために図6(d)のように2つ1組のコイルを配置し、外部からの一様磁場を打ち消します。2つのコイルの中心に z 軸の原点をとり、試料を軸方向に移動させると、各コイルを鎖交する磁束の和は図6(e)のように表され、中心では位置に対し直線的に変化します。このとき、試料を小さく振動させた場合の起電力は図6(f)のように表せます。これがVSMで一般的に用いられる磁化検出方法ですが、検出コイルを構成するコイルの数は装置によって異なります。

試料(磁化の大きさ Mv)を図6(d)に示した2つのコイルの中心に置き、 z 方向に角振動数 $\omega (=2\pi f, f: \text{周波数})$ で振動させたとき、振幅が $z = A_0 \sin \omega t$ (A_0 は比例係数)で表されるとすると、コイルを鎖交する磁束 Φ の時間変化は A を比例定数として次式で表せます。

$$\Phi = AMv \sin \omega t \quad (4)$$

検出コイルに発生する電圧(V)は

$$V = -\frac{d\Phi}{dt} = AMv\omega \cos \omega t \quad (5)$$

で表せ、振動周波数と磁化に比例します。このコイルに生じた誘導起電力の検出にロックインアンプを用います。ロックインアンプでは、入力された信号から正弦波の参照信号に同期した信号を分離することができます。参照信号に加振器の

¹⁵ 国内では東京大学物性研究所と大阪大学にてパルス磁場が共同利用に供されています。

駆動信号を用いれば、雑音を除去して試料の振動と同じ周波数成分だけを検出することができます。

また、SQUID 磁力計⁸⁾と呼ばれる超伝導量子干渉素子 (SQUID: superconducting quantum interference device) を用いて磁化を検出する方法があります¹⁶⁾。検出コイルを用いることは、試料振動法と同じですが、そのコイルは超伝導線材を用いて巻き、超伝導トランスで磁束を伝達し計測します。これは、上述の方法では磁束の時間微分の電圧が発生するのに対して、磁束の変化を打ち消す直流の完全反磁性電流(遮蔽電流)が流れることを利用します。その磁束を SQUID で検出し、出力電圧を磁化に変換する方法です。試料を振動させなくても磁化に比例した電流が流れることが特徴です⁷⁾。

SQUID では試料の作る磁束を、量子化された磁束 ($\Phi_0 = h/2e = 2.07 \times 10^{-15} \text{ Tm}^2$) を基準に検出することができます。市販の SQUID 磁力計 (SQUID magnetometer) では、試料が一定速度でピックアップコイルを通過する DC モードに加えてさらに高感度が実現できる手法としてピックアップコイル内で試料を振動させる VSM モードを選択できます。

計測装置の感度に対する要求は、測定対象に大きく依存します。VSM は SQUID 磁力計に比べ大きな磁化をもつ強磁性体などの測定に適しており 20~100 mg ほどの試料質量があれば十分な精度で測定できます。一方、感度に優れている SQUID 磁力計は常磁性や反強磁性、反磁性やごく微量の強磁性体など磁化が小さい物質の測定に適しています。

また、測定温度に対する要求も装置選択の重要な要因です。測定温度範囲が 4.2 K~1200 K と広い装置であっても、同じセッティングでこの範囲をカバーできるわけではありません。ほとんどの装置で低温測定と高温測定でセッティングを変える必要があり、室温を跨いだ広範囲の測定を一括で行うことは困難です。

2-3-1-3 磁化測定の準備

この節では実際に磁化を測定する際に必要な手順、注意点を述べていきます。特に、装置の構成および、試料のセッティング、測定前の較正、測定条件の選択などについて、図 7 に示したような電磁石を用いた典型的な VSM 装置をもとに説明します。

2-3-1-3-1 装置構成

一般的に市販されている VSM は、図 7 に示すように、磁場印加のための電磁石とその冷却装置、電磁石の励磁電源、試料に関係した部分は試料を振動させるための加振器、サンプルロッド、サンプルホルダーで構成されます。磁化信号処理と制御のための制御・測定系は発振器、ロックインアンプ、制御用 PC などで構成されています。

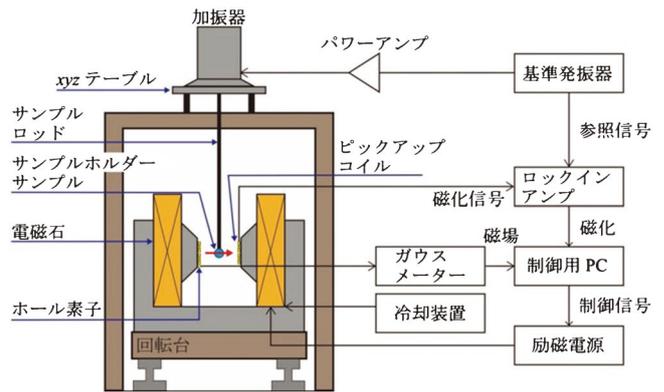


図 7 VSM ブロックダイアグラム。

電磁石の上方に据え付けられた加振器には試料ロッドが取り付けられます。ロッド先端には試料が固定され、磁場の中心で振動させます。試料は形状や温度環境に応じて適切な容器(試料ホルダー)に納め、測定に用います。

制御・測定系には、加振器振動の基準となる信号(40~80 Hz 程度)発振器の他、検出コイルの信号を検出するロックインアンプや、磁場の強度を計測するガウスメーターなどが組み込まれています。ほぼ全ての操作は、制御・計測ソフトがインストールされた制御用 PC で行うことができます。この辺りは、メーカーによって異なりますので、装置管理者によく相談の上使用してください。

2-3-1-3-2 試料ロッド・ホルダーの選択、試料固定

試料ロッドの先端は試料を固定する試料ホルダーとなっています。試料ホルダーは試料形状(試料容器)に対応したものが装置メーカーによって用意されています。そのため、測定者は試料形状に適した試料ホルダーを選択し、試料をセットするだけで測定できます。ただし、測定したい温度範囲によってロッド・ホルダーの素材に注意する必要があります。

室温測定用の試料ホルダーには、ポリマー樹脂製かガラス製の反磁性磁化率が小さい素材が使用されています。低温用には低温脆化が小さいポリマー樹脂製か、熱収縮の小さいガラス製、高温用には石英ガラス製のホルダーと、測定温度範囲に適したホルダーが用意されています。

試料ホルダーのタイプについて紹介します。メーカーごとに細かい違いがありますが、通常は薄膜用、バルク用、粉末用が用意されています。図 8 には著者の手元にあるいくつかの試料ホルダーを示しています。図 8(a) に示す薄膜用ホルダーでは平滑面に試料を乗せた後、図 8(b) のようにカバーを被せ、ネジでカバーごと押さえつけて固定します。図 8(c) に示したバルク用ホルダーは、比較的大きな試料空間を持っており、試料をネジで押さえつけて固定します。粉末試料は図 8(d) に示したように専用カプセルに詰め、バルク用ホルダーに固定する方法[図 8(c)] が一般的だと思いますが、アルミホイルなどで均一な厚みになる様に包み、薄膜用

¹⁶⁾ SQUID 磁力計の検出回路や動作原理については、次回の付録として紹介します。

のホルダーに固定する方法もあります。

また、比較的小さなバルク試料であれば粉末用カプセルに入れて測定する方法も考えられます。ただし、カプセル内で試料が動かないよう、石英ウールで隙間をぎっしりと埋める必要があります。

上述のように、試料固定にホルダー以外の素材を用いる場合、その素材の磁化率を把握する必要があります。石英ウールは反磁性、アルミホイルは常磁性ですので、磁場の強度に比例して磁化が生じます。大量に使用する場合や強い磁場を印加する場合には注意が必要です。あらかじめ、同量の石英ウールやアルミホイルの磁化を測定しておき、試料磁化の測定後に較正する必要があります。

試料をホルダーにセット後、振動ロッドに取り付けて測定位置にセットしますが、本測定を始める前に試料位置を調整する必要があります。磁気モーメントの大きさが不変でも試料位置によって検出コイルの出力が変化し、磁化信号に差が生じるためです。図9に検出コイルに生じる起電力の x, y, z 軸方向の分布を示しました。 x 軸方向は磁化信号が最小値、 y 軸と z 軸方向は最大値となるよう調整します。角度 θ は、磁場に対して測定したい試料面が平行・垂直になるよう、ロッドあるいは電磁石を回転させて調整をします。

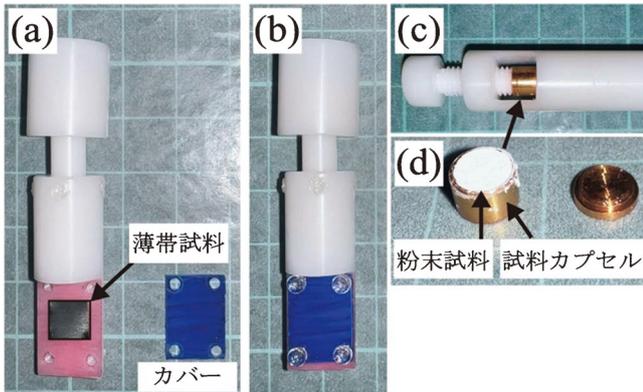


図8 VSM サンプルホルダーの一例。(a), (b) 薄膜用ホルダー、(c) バルク用ホルダーに(d) 粉末試料用カプセルを固定。

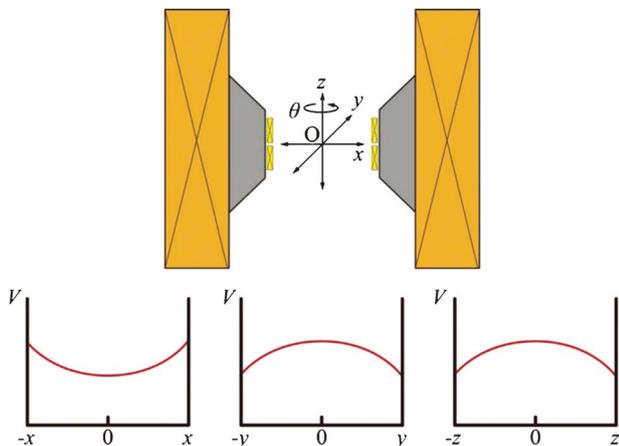


図9 電磁石磁極間の試料位置と検出コイルの出力 V の変化。

この位置調整を行うことで、試料は磁場の分布の鞍点に位置することになります。最近のVSM装置では、試料セットのガイダンスがあり、指示に沿って操作すれば位置調整できるものがあるようですが、試料位置と磁化信号の関係を理解しておくでセッティングがスムーズに行えると思います。このような試料の位置調整は、磁化較正用の標準試料および、測定試料の測定ごとに必要です。

2-3-1-3-3 磁化の較正(標準Niの測定)

VSMでは磁化をピックアップコイルで検出します。得られる出力は磁化の大きさに比例する誘導起電力で式(5)に示すような関係があります。その比例係数を決定する較正作業が必要です。較正は、磁化の値が既知である標準試料を測定することで行われます。一般的に、VSMの場合は強磁性Niの飽和磁化を、高感度のSQUID磁力計の場合は常磁性Pdの磁化率を用います。

標準試料は、通常その装置に付随して用意されています。使用する際には、なるべく測定しようとする試料と同様の形状のものを使います。VSMでは磁化が既知の薄板状、ロッド状、球状の標準Niが用意されているはずですが。

標準試料の測定結果がその試料の磁化に一致するよう、較正係数を決定します。その係数を用いて以後の測定結果を較正します。測定ソフトウェア上で較正できることが多いと思いますが、この関係さえ把握していれば、測定後、データを解析する際に自分で較正することもできます。

2-3-1-3-4 測定パラメータの設定

VSMで磁化測定をする際には、

- (a) パーミアンス係数
- (b) 時定数(タイムコンスタント)
- (c) 印加磁場の掃引速度
- (d) 印加磁場の強度
- (e) 磁化の測定レンジ
- (f) 試料体積、質量

などを入力・設定する欄があると思います。

このうち、(a)のパーミアンス係数と呼ばれる値は、後述する反磁場を補正するために必要なパラメータです。反磁場は試料形状によって異なりますが、飽和磁化やその温度依存性を求める場合には影響が少なく、入力されている値を変更する必要はありません。

(b)の時定数は、測定条件によって変更する必要があります。磁化はピックアップコイルに生じる誘導起電圧としてロックインアンプで振動周波数と同じ周波数成分を取り出しますが、この時、横波信号を積分しSN比を上げること(積算)が行われます。その際の積算時間が時定数です。一般に100ms~10sの範囲で設定されます。1sと設定した場合、直前1s間に収集したデータを平均化したものが出力されることとなります。したがって、時定数は試料振動の一周期よりも十分長く、後述する $M-H$ ループや、磁化の温度依存性を評価する場合、磁場や温度の時間変化よりも十分短い時間に設

定をしなければいけません。

例えば、(c)磁場掃引速度 10 mT/s(100 Oe/s)で、時定数を 1 s と設定した場合、10 mT 刻みの平均化された磁化の値しか測定できません。永久磁石の保磁力のように、急峻な磁化の変化を測定したい場合には、注意が必要です。一方、掃引速度はそのまま時定数を 100 ms に設定すれば、1 mT 刻みの測定ができ、それだけ磁場の変化に対して敏感な測定ができます。ただし、積算時間が短くなるため雑音除去できなくなり測定精度が低下します。時定数と磁場の掃引速度を適切に設定するためには予備実験が必要です。

磁化の温度依存性を測定したい場合、加熱速度は 5 K/min 程度が一般的と思われます¹⁷。5 K/min では 1 s 間に 0.083 K の変化しかありませんので、時定数は 3 s ほどで十分です。温度計に熱電対を使うとして、温度測定の精度からみてもこの程度の温度間隔で十分かと思えます。

(d)印加磁場強度は印加する磁場の最大値です。ただし、最大磁場の発生には制限時間が設けられている場合があります。M-H ループの測定ならばあまり関係ありませんが、温度依存性のように長時間その磁場を維持したい測定では注意する必要があります。

(e)測定レンジは、測定対象物の磁化の大きさに合わせる必要があります。小さい磁化を大きなレンジで測定してしまうと、磁化の小さな変化が雑音に埋もれてしまうことになります。また、測定中にレンジの設定を変更するとデータに不連続点が生じることがあるため、注意してください。

2-3-1-4 測定データと解析手法

2-3-1-4-1 磁化曲線に影響を及ぼす因子

(A) 反磁場

試料の形状によって反磁場が生じ、磁化過程に影響を受けます。磁化した材料の表面には、図10のように磁極が生じます。すると、その磁極によって磁性体内部に外部磁場 H_{ex} と逆向きの磁場が生じます。これを反磁場 H_d と呼びます。

反磁場の大きさは、材料の形状によって異なります。試料長手方向に磁場印加すると小さく、その垂直方向への印加で大きくなります。また、材料内部が一樣に磁化していない場合、分布が生じます。

試料が回転楕円体である場合、その回転軸方向に磁化させると内部の反磁場は一樣となり、

$$H_d = -NM \quad (6)$$

で与えられます⁽⁴⁾。この式中の N を反磁場係数と呼びます。反磁場係数には、回転の主軸を x, y, z とすると $N_x + N_y + N_z = 1$ なる関係が成り立ちます。球状の場合、 $N_x = N_y = N_z = 1/3$ となり、長い円柱の場合は z 方向を長手方向として、 $N_x = N_y = 1/2, N_z = 0$ と近似できます。

したがって、測定試料に実質的に働く磁場 H_{eff} は、

$$H_{eff} = H_{ex} + H_d = H_{ex} - NM \quad (7)$$

¹⁷ 加熱・冷却の速度が早すぎたり、試料が大きすぎたりすると、試料温度が制御温度に追従せず、正しい磁化の温度変化を測定できない場合があります。

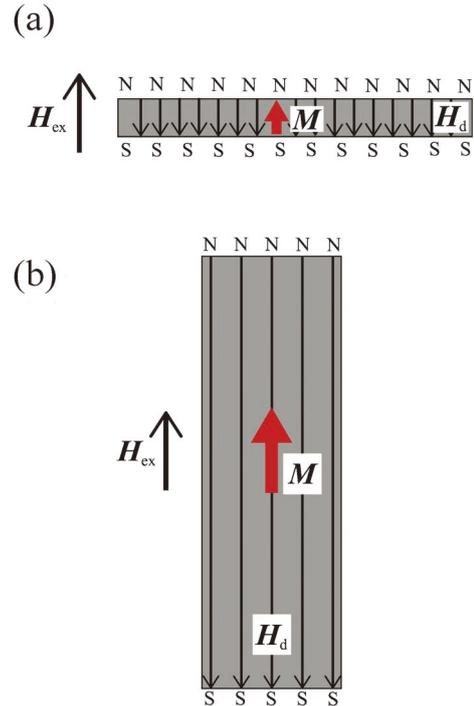


図10 細長い形状をした強磁性体が磁化した際に(a)短軸方向、(b)長軸方向に生じる反磁場 H_d 。(a)に比べ磁極が離れているため、反磁場は小さい。

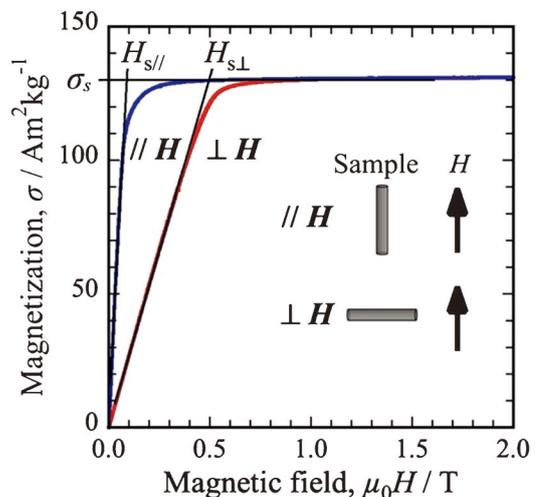


図11 針金の磁化過程($\sigma//H, \sigma \perp H$)。

で与えられます⁽⁴⁾。例えば、飽和した鉄の球状試料の場合、飽和磁束密度 $\mu_0 M = 2.17$ T、反磁場係数 1/3 を用いて、

$$\mu_0 H_d [\text{T}] = -N\mu_0 M = -\frac{1}{3} \times 2.17 [\text{T}] = -0.723 [\text{T}]$$

と計算できます。したがって、飽和させるためには、0.7 T 以上が必要になると推定されます。

図11は、著者が測定した $\phi 0.9 \text{ mm} \times 3 \text{ mm}$ の市販されているステンレス製の針金の磁化曲線になります。針金の長手方向に垂直に磁場を印加した測定を $\perp H$ 、長手方向に磁場印加した測定を $// H$ の添字で表しています。反磁場係数は $N_{\perp H} > N_{// H}$ となるため、飽和に要する磁場(飽和磁場)は $// H$ の

方が小さくなります。飽和磁場 H_s は、図11に示すように飽和の前後を直線近似し、それぞれの延長の交点と定義しています。

この測定では質量飽和磁化 $\sigma = 131 \text{ Am}^2/\text{kg}$ が得られました。円柱の長手方向に垂直に磁場をかけた ($\perp H$) として、 $N = 1/2$ を用いて H_d を概算してみます。

鉄の密度 $7.8 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ を質量飽和磁化 σ に掛けると、この試料の体積磁化は、 $M = 1022 \text{ kA/m}$ と得られます。したがって、

$$H_d = -NM = -\frac{1}{2} \times 1022 [\text{kA/m}] = -511 [\text{kA/m}]$$

が得られるため、 $\mu_0 H_d = -0.64 \text{ T}$ となります。この値は実験結果と概ね一致していることが図11から分かります。

(B) 結晶磁気異方性

材料の磁化過程は印加磁場方向がどの結晶方位に平行に印加されるかによっても異なる場合があります。この特性を評価するために単結晶試料を用いて測定が行われます。多結晶試料の場合にはそれらの平均的な磁化過程が得られますが、集合組織や、結晶配向した場合には、多結晶試料でも異方的な磁化曲線が現れます。図12は純鉄の単結晶について、各結晶軸に磁場を印加した際の磁化過程になります⁽⁹⁾。図12は1926年に報告された論文からの引用であるため、現在の国際単位系 (SI 単位系) ではなく CGS 単位系で表されています。図中の磁束密度 10^3 G (ガウス) は 0.1 T に相当し、磁場の強さ 100 Oe (エルステッド) は約 7.96 kA/m に相当します。

この磁化過程を見て明らかのように、 $[100]$ 方位に磁場を印加した場合、最も小さい磁場で飽和し、 $[111]$ 方位に印加した場合は飽和に要する磁場が最も大きくなります。このように、磁性体の結晶構造には、磁化しやすい結晶軸 (磁化容易軸) と磁化しにくい結晶軸 (磁化困難軸) が存在します。純鉄の結晶 (bcc) の場合、 $[100]$ が磁化容易軸、 $[111]$ が磁化困難軸となります。 $[110]$ 方位は中間軸となります。このように、特定の結晶軸に沿って磁化しやすい特性を結晶磁気異方性と呼びます。

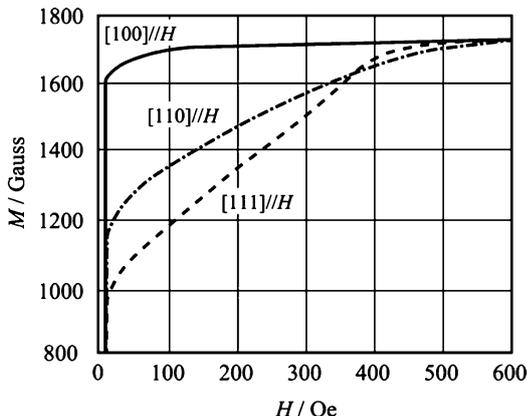


図12 純鉄の磁化過程と結晶磁気異方性⁽⁹⁾。

(C) ミラー効果 (鏡像効果)

試料磁化の大きなものを測定していると、磁場の増加に伴って磁化が減少してしまう時があります。これは、試料の磁化によって電磁石の鉄心に磁極が誘起されてしまうためです。これをミラー効果といいます。

ミラー効果の影響を小さくするためには、磁極間距離を広げ試料と磁極を離す、試料磁化を小さくする、試料を飽和しやすい形状にするなどが挙げられます。

2-3-1-4-2 ヒステリシスループ

ヒステリシスループは、図13に示したように連続した磁場の変化に対して追従する磁化の履歴曲線のことであり、磁性材料の特性評価のため幅広い分野で測定されます。このループを測定することで、飽和磁化の他、残留磁化や保磁力の測定、さらに、エネルギーロスを見積もることができます。

ヒステリシスループは、図13の②→③→④→⑤の過程で描かれます。①は、初磁化曲線と呼ばれ、試料を飽和させるために磁場を印加する過程であるため、ループの過程には入りません。また、⑤の過程で1周のループを描いた後は磁場を減じ、測定は終了となります。一般的な装置では、ループ測定モードを選択し、最大磁場だけ入力すればループ測定を実施してくれます。

②の過程で磁場がゼロとなっても磁化が残る場合、これを残留磁化 M_r と呼び、永久磁石の性能を示すパラメータの一つとなっています。さらに、磁場を反転させる③の過程で磁化がゼロになります。このように、残留磁化をゼロとするのに必要な逆向きの磁場の強さを保磁力 H_c と呼びます。保磁力も磁性材料の特性を表す重要なパラメータの一つです。また、このループに囲まれた面積はヒステリシスループを1周描く際のエネルギー損失に相当します。

保磁力は少なくともループが閉じるまで (飽和するまで) 磁場印加したのちに測定する必要があります。十分に磁場を掛

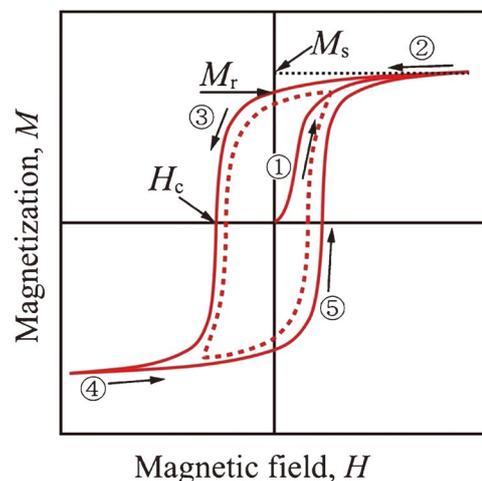


図13 強磁性体のヒステリシスループ。

けた後のヒステリシスループは図13に実線で描かれた②→③→④→⑤の過程を辿りますが、もし、初磁化曲線①や⑤の過程の途中、磁化が飽和に達しない磁場で反転させると磁化曲線は点線で示したようなループを描きます。これをマイナーループと呼びます。このとき、見かけの保磁力は飽和したループから得られる値より小さく観測されてしまいます。マイナーループから得られた保磁力は特性評価として適切な値とはいえません。保磁力を正しく評価するためには磁化が磁場に対して一価関数になるまで(飽和するまで)十分に大きな磁場を印加した後にヒステリシスループの測定をする必要があります。先述した反磁場は磁化過程には影響しますが、 $M=0$ で $H_d=0$ となるため、原理的に保磁力には影響を及ぼしません。しかし、反磁場が大きいと飽和磁場が大きくなり、飽和が困難になります。したがって、なるべく反磁場係数の小さい形状で測定することが推奨されます。

2-3-1-4-3 温度依存性

最後に磁化の温度依存性について述べます。磁気変態や構造変態などの状態変化を磁化の変化から読み取ることができ、本稿では、それら相変態の一例として、磁気変態、アモルファス合金の結晶化、および純鉄の α - γ 変態を紹介します。

(A) 磁気変態

材料の強磁性-常磁性変態に関して、その特徴を表すキュリー温度などが実験的に求まります。強磁性が自発磁化を失う温度として強磁性キュリー温度 Θ_f 、常磁性温度領域の磁化率の温度依存性(キュリー・ワイスの法則)から漸近キュリー温度(常磁性キュリー温度) Θ_p が求まりますが、分子場理論に基づいて解釈することにより交換相互作用や揺らぎの単位などの物理量に関係づけることができます⁽⁵⁾。分子場理論によるとキュリー温度近傍では、磁化の2乗 M^2 が磁場の大きさ H と磁化 M 、キュリー温度 Θ_f 、温度 T を用いて、

$$M^2 = \frac{a}{A} \left(1 - \frac{T}{\Theta_f}\right) + \frac{\mu_0 H}{A M} \quad (8)$$

と表せます⁽⁴⁾。

また、キュリー・ワイスの法則は以下の式で表されます。

$$\chi = \frac{C}{T - \Theta_p} \quad (9)$$

ただし、キュリー定数 C は量子スピンの大きさに関連する値であり、 Θ_p には交換積分の符号と大きさが含まれますが、本稿では詳細を割愛します。興味のある方は、文献(2)や(4)を参考にしてください。

ここでは、強磁性キュリー温度 Θ_f の求め方として簡易的な方法とアロットプロット、漸近キュリー温度 Θ_p の求め方としてキュリー・ワイスの法則に沿って逆磁化率を用いる方法の計3種類を紹介します。

(A1) キュリー温度の簡便な決定法(M^2 vs. T プロット)

この方法では磁場一定の条件で温度依存性を測定します。式(8)で右辺の第2項を無視すると磁化の2乗は温度 T に

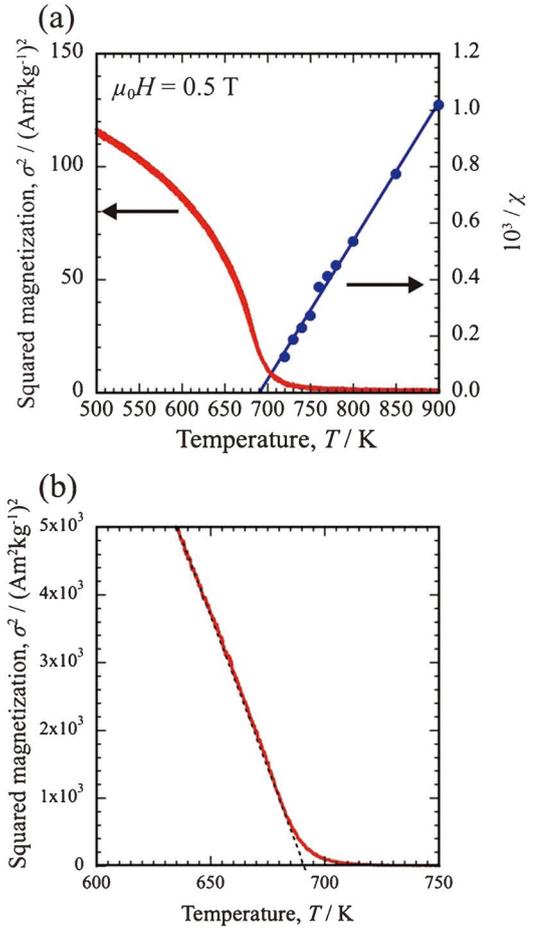


図14 (a) FeRhの質量磁化 σ と逆磁化率(χ^{-1})の温度依存性⁽¹⁰⁾, (b) σ^2 の温度依存性。

比例しているため、磁化の温度依存性を測定し、 M^2 vs. T をプロットします。このプロットで M^2 の近似直線が横軸を切った点がキュリー温度となります。図14は、著者がFeRhという強磁性を示す合金を測定した結果になります⁽¹⁰⁾。図14(a)は磁場0.5 Tで測定した質量磁化 σ の温度依存性と、磁化率の逆数 χ^{-1} の温度依存性、図14(b)はキュリー温度近傍で質量磁化の2乗 σ^2 を温度に対してプロットしたものになります。

(A2) アロットプロットによるキュリー温度の決定

この方法では、キュリー温度近傍で試料温度を一定に保持し、磁化の磁場依存性を測定します。保持温度を徐々に上げ、キュリー温度を十分超えるまでこの測定を繰り返します。著者がFeRhで測定した結果を図15(a)に示します。この実験データを式(8)に沿って、 σ^2 vs. H/σ でプロットすると、図15(b)のようになります。このプロットをアロットプロットといいます。図中の各系列の近似直線を外挿したとき、原点を通過した直線に対応する温度が強磁性キュリー温度 Θ_f となります。 Θ_f より低温ではy軸切片が正、キュリー温度より高温では切片が負になります。

しかし、特定していない温度で測定することはできません。そこで、この近似直線の切片(式(8)の右辺第1項)が

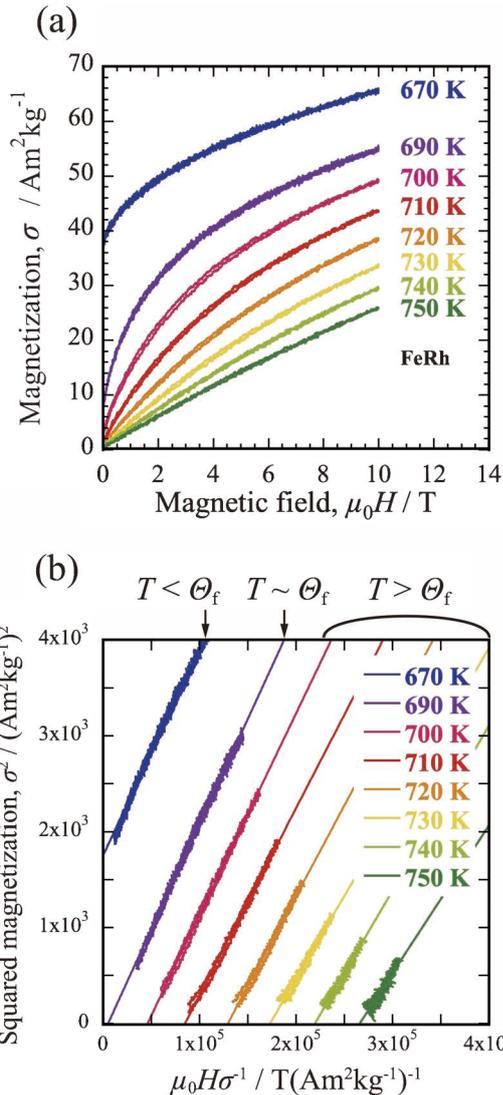


図15 FeRhのアロットプロットによる強磁性キュリー温度の決定. (a) 各温度における質量磁化 σ の磁場依存性⁽¹⁰⁾ と (b) アロットプロット.

温度に比例することを利用します. アロットプロットで得られた切片を測定温度でプロットします. このプロットの近似直線の温度軸切片として Θ_f が得られます.

先に紹介した (A1) M^2 vs. T プロットとこのアロットプロットはいずれも式 (8) に基づいて Θ_f を推測する方法です.

(A1) では磁化の磁場依存性を無視するため, Θ_f 近傍のデータが使えないなどの欠点が生じます. 一方, (A2) アロットプロットでは右辺の第2項を含んで磁化の磁場依存性を取り込んでいるため (A1) より正確な推定方法と言えます.

(A3) キュリー・ワイスの法則を用いた漸近キュリー温度の決定法

最後に, 漸近キュリー温度の決定法について紹介します. 式 (9) は強磁性体や反強磁性体が変態温度以上で常磁性状態での磁化率 χ の温度 T に対する依存性を表しており, 式 (9) で C はキュリー定数と呼ばれ物質固有の値となります. この関係から求まる温度は, 漸近キュリー温度あるいは

表3 各種方法で求めた FeRh 合金のキュリー温度と漸近キュリー温度⁽¹⁰⁾.

手法	温度
σ^2 vs. T	$\Theta_f = 692.5$ K
アロットプロット	$\Theta_f = 689.6$ K
キュリー・ワイスの法則	$\Theta_p = 690.8$ K

常磁性キュリー温度と呼ばれます.

キュリー・ワイスの法則から漸近キュリー温度を求める場合, 試料の磁気変態温度よりも十分高温で測定します. 図15(a)に示すようにキュリー温度より十分高温では磁化曲線は比例関係を示し, 磁化率 χ が求まります. いくつかの温度で χ を得たら, その逆数を温度に対してプロットすると,

$$\chi^{-1} = \frac{T - \Theta_p}{C} \quad (10)$$

に従い, 温度 T に比例します. これが図14(a)の右軸に対応するプロットになります. これを直線近似すると温度軸の切片からキュリー温度 Θ_p が得られます.

一般に, アロットプロットで求めた強磁性キュリー温度に比べて, キュリー・ワイスの法則から求めた漸近キュリー温度はやや大きな値となります. これは, キュリー温度の直上では, 磁気モーメントの長距離秩序が失われても短距離秩序が残っているためです. したがって, 短距離秩序も失われる十分高温のデータから求めた値はやや高く得られます. 以上, 3種類の方法で求めた FeRh のキュリー温度を表3にまとめました. 表3を見てわかるように, 全ての方法でキュリー温度はおよそ 690 K であることがわかります. また, (A1) および (A2) の方法で求めた強磁性キュリー温度 Θ_f には多少の差がありますが, 真の値に近いのは (A2) のアロットプロットで求めた値であると考えられます. また, (A3) 常磁性キュリー温度 Θ_p は (A2) の方法で求めた強磁性キュリー温度 Θ_f よりも高く得られる傾向は一致していますが, 一般的な例から見ると Θ_f に近すぎます. このように, 見積りの方法によって, 多少異なる値が得られますので, 学会発表や論文などに用いる際には, どのような方法で見積もった値であるか併記することが重要です.

(B) 相変態の観察

最後に, 磁化測定による相変態の観察について紹介します. 本稿の序盤でも紹介しましたが, 材料に生じる相変態を磁化測定で観測できることがあります. 一例として, 鉄の α - γ 変態, Fe 基アモルファス合金の結晶化, 規則合金の規則-不規則変態, 磁気形状記憶合金のマルテンサイト変態などです. これらの変態以外でも磁性, 磁化率の変化を伴う変態は磁化で明瞭に観察することができます.

純鉄の α - γ 変態については, 冒頭に示した図4と共に説明をしました. その他の例として, Fe 基アモルファス合金の結晶化を磁化測定で観察した例を紹介します.

図16は Fe-Si-B アモルファス合金の磁化の温度依存性で

濡れと鋳物の二刀流

早稲田大学名誉教授 中江 秀雄

1. はじめに

私は1964年3月に早稲田大学理工学部金属工学科を卒業し、修士課程・博士課程を経て、鋳造で博士号を取得した。この時は第一次オイルショック発生の直前で、早く入社しないと採用できなくなると担当者に言われ、卒論・修論の指導を急遽取りやめ1971年1月に株式会社日立製作所(以下、日立)に入社し、機械研究所でプロの研究者として研究開発に従事した。

日立を選んだ一つの理由は、昔から「日立・小松・クボタ」が日本を代表する鋳物に端を発した企業と云われてきたことによる。機械研究所では、機械屋の中の金属屋として潤滑剤の如く働いた。

日立の研究soでは、部長は在任中に2人の博士を作れとの義務(?)が科せられていた。しかし、既に博士号を取得していた筆者にはその必要が無かったことから、筆者は常に新しく発生した課題を担当させられた。いわば、救急救命医のような存在であった。

鋳造に始まって切削、粉末冶金、セラミックス、冷蔵コンプレッサー、減衰材料、溶接、拡散接合等々の研究に従事した⁽¹⁾。機械研究所では、溶解炉の炉修までも研究者が行うシステムであった。これらの経験は大学で大いに役立つことになった。

1983年4月に、早稲田大学理工学部に着任した。この時に与えられた講義科目は、状態図と凝固であった。鋳造関係の講義は大先生方が担当し、筆者の出る幕は全く無かったのである。しかし、研究テーマは別物であったが、資金と設備の貧弱さには苦勞させられた。筆者が日立出身ということ、企業から依頼研究がもらえるようになるのには5年ほど要した。資金が無ければ知恵を働かせて卒論・修論のテーマを考え出さなければならず、これもその後の大学生活で大いに役立った。

研究装置の入手に学生を連れて学内のゴミ捨て場ツアーに出かけ、実験装置で使えそうな物を物色しては修理し、研究室の設備を整えていった。因みに、電気炉はスーパーコンタからケラマックスまでの高温炉も全て自作した。

さて、問題は研究テーマである。大学に来て2年ほど、鋳造の他に何を主要テーマにすべきかを考え続けていた。日立の研究所に比べて人材と装置に劣る大学の研究環境で、成果を出し得るテーマは何かを、である。その時、鋳物や溶接・接合、金属基複合材料の基礎学問に濡れがあることに気

付き、濡れ研究の我が国の実情を調査した。幸いに、大学の同期生の故広瀬裕輔君が日新製鋼の研究所で濡れの研究に従事していることが分かり、研究装置を見せてもらった。これで、濡れの研究は大学の研究室でもできそうであるとの感覚を強くし、その後の主要テーマとした。これが二刀流の始まりであった。

私の研究手法は、課題を解決するための新しい実験方法の立案にあった。新しいテーマの立上げに際しては、それを解決するにはどのような実験をすべきかを考え続けた。本項では、新しい実験法の提案と試作の経緯を記述することにした。

2. 濡れと鋳物：研究開発は複眼志向で

(1) 濡れの一般論⁽²⁾

濡れとは何かを理化学辞典で引くと、「付着の項を見よ」とあることから、付着の一部として濡れが扱われていることが分かる。濡れとは『固体表面上で液体が気体を押しのけて、拡がる現象』と定義されている。即ち、固体(S)/気体(V)/液体(L)の3相共存状態での物性が濡れに該当する。濡れ性とは『固体表面上を液体が拡がるときの、その拡がり易さ』を示し、液体と固体のなす接触角 θ で表される(図1)。図中の各記号の意味は、次の通りである。

- $\gamma_{l/v}$; 液体と気体の界面エネルギー(液体の表面張力)
- $\gamma_{s/l}$; 固体と液体の界面エネルギー
- $\gamma_{s/v}$; 固体と気体の界面エネルギー(固体の表面エネルギー)

それ故、 $\gamma_{s/v}$ と $\gamma_{s/l}$ が等しければ、 $\gamma_{l/v}$ に関係無く接触角 θ は 90° になる。ここで、表面とは固体・或いは液体と気体との界面をいい、界面とは固体と液体、固体-1と固体-2、液体-1と液体-2の界面に用いる用語である⁽²⁾。

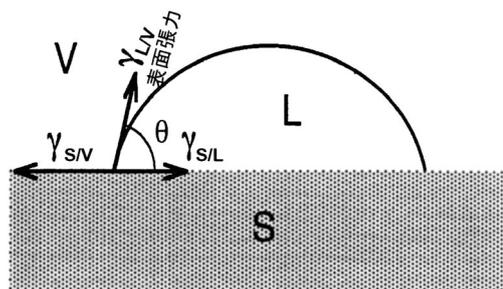


図1 固体上の液滴形状と各種界面エネルギーの釣り合い。

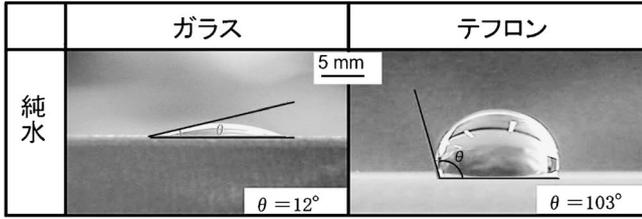


図2 ガラス板とテフロン板上の水滴の形状。

図2に、ガラス板とテフロン板上の水滴の形状を示す。これより、水/ガラス系の方が水/テフロン系よりも濡れ性が良いことが分かる。

(2) 濡れと鋳物

濡れと鋳物の何処に関連性があるのかから話を始める⁽²⁾⁽³⁾。砂型を用いて鋳物を造ることができるのは濡れのお陰である、と言っても読者にはピンとこないであろう。砂型の隙間からガスは逃がすが、溶湯が浸入し得ないのは濡れの為せる業である。砂型の原理は、図3に示す防水加工を施した茶漉しのように、空気を通すが水は通さないというものである。

白鳥が水に浮くのも濡れの為せる業で、白鳥の羽根のマクロ・ミクロモデルを図4に示す。羽根の繊維が水に濡れない($\theta > 90^\circ$)ことによる浮力で白鳥は水に浮いており、これもまた砂型の原理といえる。

砂型に話題を転じる。一般に、砂型にはシリカ(SiO_2)やMgOなどが用いられる。これら砂型材料と純鉄の濡れに対する酸素導入の影響を図5に示す⁽⁴⁾。Ar雰囲気下で純鉄を1600°Cで溶解し、150 s後に10%の酸素ガスを導入した。酸素の導入により、 θ の急激な低下が生じている。この現象が



図3 防水加工を施した茶漉しの中から水が漏れ出さない様子⁽³⁾。

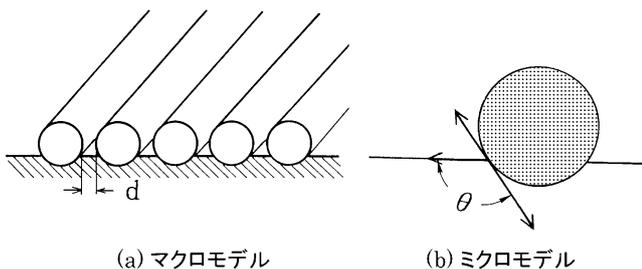


図4 白鳥の羽根と水のマクロ・ミクロモデル⁽³⁾。

焼付きの主原因で、筆者はこれを「化学的焼付き」と呼んでいる。この結果は、塩基性酸化物(例えばMgO)の方が酸性酸化物(同じく SiO_2)よりも焼付きが起こり難いという経験則とも一致する。

これだけでは説明が不十分なので、石英リングの中に粒径0.5 mm程度の SiO_2 粒子を充填した砂型モデルを作成した。この砂型モデル上で純鉄を溶解し、酸素ガスを導入することで、溶鉄が砂型に浸入する(焼付きが起こる)現象を確認している⁽⁴⁾。

(3) 金属基複合材料製造への展開

金属基複合材料製造に焼付き現象を応用した場合(溶浸法)について検討した。その中で、SiCプリフォームをアルミニウム溶湯に浸漬させ、その重量変化を計測することで、自発的溶浸過程を観察する実験法⁽⁵⁾⁽⁶⁾を考案した。アルミニウム溶湯の浸入に伴うプリフォームの重量変化を測定した結果を図6に示す。プリフォームの浸漬直後からガス気泡の発生・離脱が繰り返され、その頻度(ガスの放出速度)が低下した100 s付近で急激な重量増加が認められる。これが自発的溶浸である。

(4) Al-Si合金のSiの改良処理機構の解明

共晶合金($\alpha + \beta$)の凝固現象の解明に、濡れの考え方を応

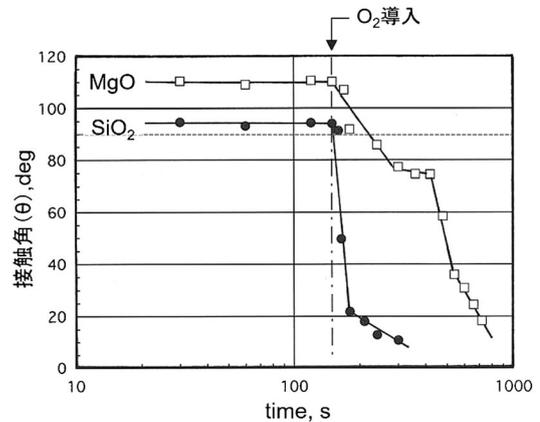


図5 溶鉄と砂型材料(SiO_2 , MgO)の接触角に対する酸素導入の影響⁽⁴⁾。

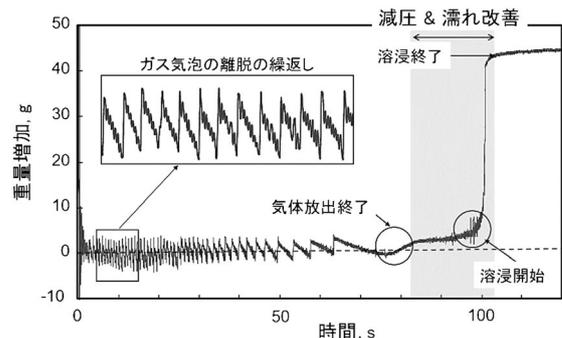


図6 SiCプリフォームへのAl溶湯の自発的溶浸過程⁽⁶⁾。

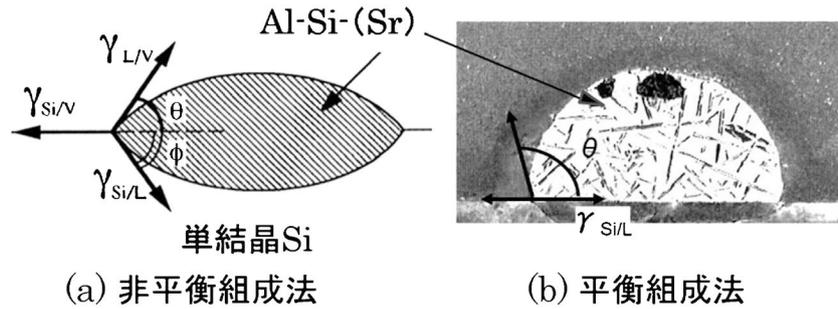


図7 熔融 Al-Si と単結晶 Si 面の界面エネルギーの測定法⁽⁷⁾.

用した. 固体-1(α -Al)と, 固体-2(Si), 液体(L)の3相が共存する点での界面エネルギーの釣り合いから, 凝固組織を読むことにした. 単結晶 Si 上に Al-Si-(Sr)液滴を滴下する際に, Si を Al 合金に溶解させる非平衡組成法と, Si 飽和した Al 合金を滴下させる平衡組成法である. 測定方法の一例を図7⁽⁷⁾に示す. 非平衡組成法で求めた $\gamma_{Si/V}$ を用いて, 平衡組成法で $\gamma_{Si/L}$ を求めた. これより, Si の単結晶面との $\gamma_{Si/L}$ は Sr 添加で約15%低下し, 面の異方性が縮小することを明らかにし, これが Si の改良処理の機構であると考えられるに至った.

Al-Si-Sr 合金の一方方向凝固実験では, Sr が極めて活性な元素で損耗が著しいので, 実験検証が難しい. したがって, これまでの一方方向凝固実験では, 凝固速度 R を 20~2000 mm/h に変化させた場合において, 全域で共晶 Si の微細化(modification)が生じると報告⁽⁸⁾されている. しかし, 実際の等軸晶の凝固速度 R は 2~10 mm/h 程度であり⁽⁹⁾, これらの実験条件では凝固速度が大き過ぎて, 等軸晶の改良処理現象は説明できない. そこで, 筆者らは図8に示す自己密閉法を考案し, 低速での一方方向凝固実験に成功している⁽¹⁰⁾.

自己密閉法とは, 一方方向凝固実験に用いる縦型の高純度アルミナ管以内に, 2 個の Al-Si-Sr (或いは Fe-C-Ce) 試料を高純度アルミナ板で仕切り, 上下 2 段に装入する手法である. 上部試料で大気から密閉し, 下部試料を保護させることができる. この手法により, 20 h 以上の長時間にわたる Al-Si-Sr 試料の一方方向凝固実験を可能にした. すなわち, 自己密閉法により 0.5~16 mm/h の凝固速度 R で Al-13%Si (-0.07%Sr) 合金の一方方向凝固実験を行うことができた. R

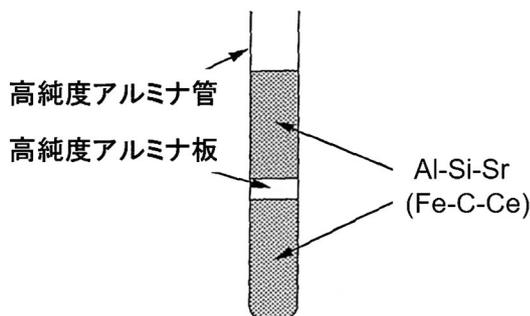


図8 自己密閉法⁽¹⁰⁾.

と Si の相間隔 λ で纏めた結果を図9に示す. これにより, 凝固速度 4 mm/h 以上で Sr は共晶 Si の微細化に働き, それ以下の速度では共晶 Si の粗大化に作用することを明かした.

これらの実験で得られた Al-Si-Sr 合金 3 試料の, 固液界面で Si 形状に凝固速度の影響が表れた組織を図10⁽¹¹⁾に示す. これらの試料は NaOH 水溶液で Al を腐食除去し, 共晶 Si の固液界面での形状を SEM により観察したものである. 図中の矢印は一方方向凝固した Si から焼入れ時に成長した Si への遷移点を示している.

共晶 Si の形態は凝固速度で大きく変化している. 全ての試料で液相部の Si は微細化しているのがわかる. すなわち, 0.5 mm/h の試料では凝固部の Si は板状で粗大, 4 mm/h では塊状, 16 mm/h では珊瑚状で, 焼入れ部の Si は全ての試

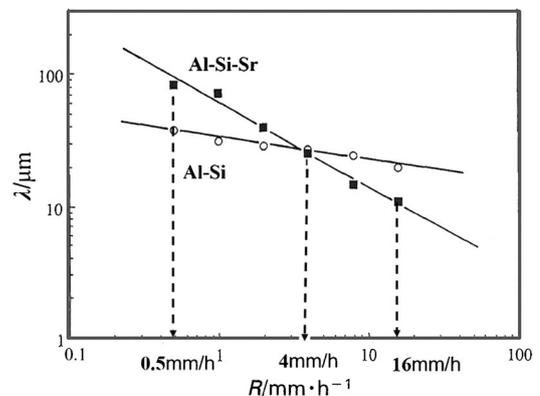


図9 自己密閉法による Al-Si 合金の一方方向実験結果⁽¹⁰⁾.

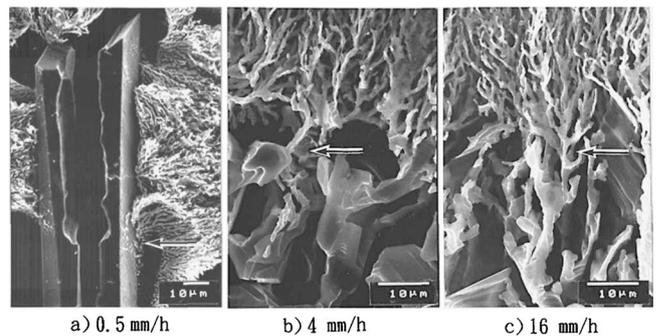
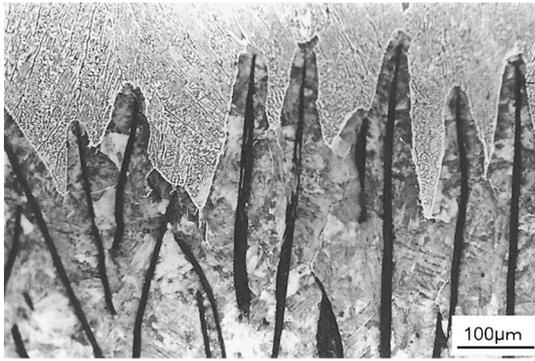
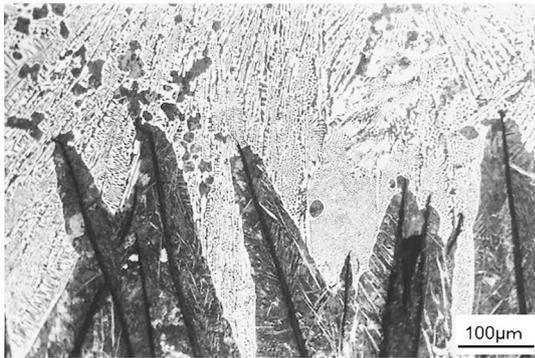


図10 Al-Si-Sr 合金の Si 形状に及ぼす凝固速度の影響が表れた組織⁽¹¹⁾.



(a) 球状黒鉛鑄鉄 (0.2% Ce)



(b) 片状黒鉛鑄鉄 (0.006% S)

図11 2 mm/h で一方向凝固させた球状及び片状黒鉛鑄鉄の固液界面の形態⁽¹²⁾.

料で改良処理が生じていることがわかる。0.5 mm/h の試料では、凝固部は粗大 Si で、焼入れ部では微細な改良された Si であり、この結果は図9 と一致する。

(5) 球状黒鉛鑄鉄への展開

鑄鉄の今世紀最大の発明に球状黒鉛鑄鉄がある。これは、鑄鉄の強度を鋼並みに引き上げた大発明であった。そこで、片状黒鉛鑄鉄と球状黒鉛鑄鉄の一方凝固(2 mm/h)時に、焼入れした固液界面形状(上部が液相部)を図11に示す⁽¹²⁾。これより、球状黒鉛鑄鉄では黒鉛先端がオーステナイトに取り囲まれているが、片状黒鉛鑄鉄では黒鉛先端は液相中に突き出ていることが分かる。勿論、一方凝固は連続成長であり、球状黒鉛は晶出できない。詳細は省くが、球状黒鉛は液相から直接晶出し、共晶凝固時にはその周囲は γ -Fe 相に囲まれ、 γ -Fe 相を通しての C 原子の拡散で成長することが知られている。

このような形態変化が生じるメカニズムは、界面エネルギー(濡れの応用)の観点から図12の様に説明付けられる⁽¹³⁾。 $\gamma_{G/L}$ が大きくなると、これを含む全エネルギーを最小にするため、G/L 界面積を小さくし、遂には G/L 界面が無くなる。球状黒鉛鑄鉄の連続成長の様子を図11(a)に示したが、球状黒鉛は生成せず、黒鉛先端は完全に γ -Fe に覆われている。これは、球状黒鉛がオーステナイトに囲まれて成長する機構に類似している。

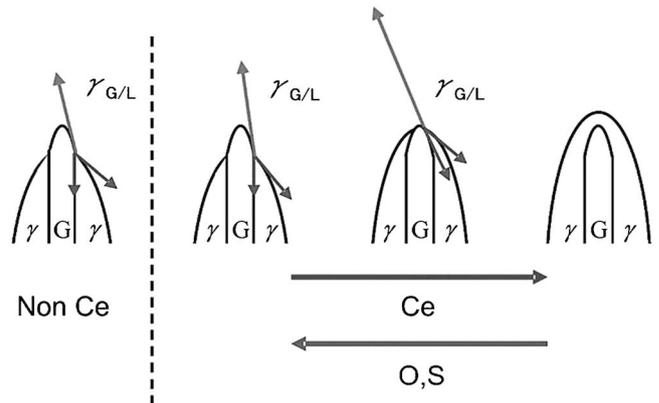
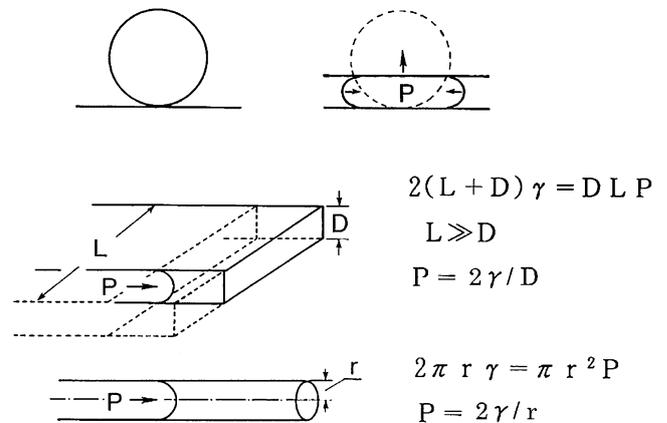


図12 鑄鉄の固液界面組織に及ぼす界面エネルギーの影響⁽¹³⁾.



$$P = 0.2 \text{ atm (300mm Fe)}$$

$$\gamma_{Fe} = 1800 \text{ mN/m}$$

$$\rightarrow r = 0.1 \text{ mm}$$

図13 湯流れ先端の抗力 P に対する濡れの影響。

(6) 湯流れ

機械分野での流れは主に、管壁との相互作用で論じられる。鑄造での湯流れは、如何にしては鑄型内の空間を溶湯で満たすかで論じられてきた。しかし先に述べたように、砂型の隙間に溶湯は浸入できない。湯流れ先端に濡れ(表面張力)による抗力 P が発生するので、どの程度の細管や薄板まで溶湯が浸入できるかを図13で検討する。

例えば、溶鉄の表面張力を 1800 N/m、鑄型の高さ(静圧)を 300 mm とすると、溶鉄が浸入できる隙間の半径 r は $P = 2\gamma/r$ の関係より 0.1 mm になる。したがって、これより細かい砂を用いれば、鑄型内に溶湯は浸入しないが、ガスは通過できる。これが砂型で鑄物ができる原理である。

水泳選手が濡れない水着を着用することで速く泳げるならば、この原理を鑄造の湯流れに適用できないか、との発想からの研究にも着手した。しかし、濡れないと図13での湯流れ先端の抵抗 P が増大し、鑄型と溶湯間の(濡れで)界面での滑り効果を P が相殺してしまうため、この研究はうまくゆかなかった。

広島県立総合技術研究所 東部工業技術センター 加工技術研究部

部長 坂村 勝

1. はじめに

広島県立総合技術研究所は、2007年4月に県内の試験研究機関(保健環境, 食品工業, 西部工業, 東部工業, 農業, 畜産, 水産海洋, 林業)を統合して設立されました。研究所内に工業系, 農林水産系, 保健環境系の研究者が所属するという特徴を活かし, 複数の技術の横断的・融合的な研究に取り組むことで, より広い県民・産業ニーズに対応できるように努めています。その中で, 東部工業技術センターでは, ①金属系材料等の加工・計測・評価技術, ②機械技術, ③光計測技術, ④電子技術, ⑤ゴム, プラスチック, 繊維等の有機・高分子材料技術, ⑥資源環境技術等の分野を担っており, 筆者の属する加工技術研究部では主として①~④の技術分野を担当しています。本稿ではそのうち, 金属関連に絞って紹介をいたします。

2. 広島県東部地域の産業の地域性とセンターの日々の役割

広島県東部地域の金属関連業界の産業構造は, 様々な業種の中堅企業の下に多くの中小企業が連なるという形をしており, 関連する技術分野は鋳造, 溶接, 熱処理, 粉末冶金, メッキ, 機械加工等々と非常に多岐に渡っています。日々の業務は, 地元企業から持ち込まれる技術相談(破壊・腐食原因調査, 製品性能評価方法等), 依頼試験(強度評価, 分析, 形状計測等), 県内企業ニーズを起点とする研究開発から構成され, 所属研究員にはこれらの業務をバランス良くこなすことが求められています。

3. 金属関連の最近の研究の取り組み

加工技術研究部では2005年頃から, 当時, 研究開発が盛んになりつつあった摩擦攪拌接合技術に注目し, 汎用フライス盤を用いての研究開発を始めました。

(1) 摩擦アンカー接合の考案

筆者らが摩擦攪拌接合技術に関する研究開発を始めた頃, 世の中では耐久性の高い摩擦攪拌接合用ツールが求められていました。当時, 我々の部では研究開発予算が必ずしも潤沢ではなく, 高価なツール用材料の購入が困難であったことから, 安価に入手でき, 応力集中の無い球形状のツールの適用を検討しました。そして, このツールをアルミニウム合金と鋼の重ね材の接合に適用したところ, 図1に示すように, 下板の鋼が球面に沿ってアルミニウム合金内に侵入し, 角形状を呈することが分かりました。得られた接合材に対して引張せん断試験, 十字引張試験を実施したところ, 角形状の鋼突起によるアンカー効果によって, 特に十字引張強度が非常に高いことが分かり⁽¹⁾, 特許出願, そして登録にまで至ることができました⁽²⁾。本技術については現在も, 合金化溶融亜鉛めっき鋼板(Galva-Annealed Steel: GA 鋼板)や炭素繊維強化プラスチック(Carbon Fiber Reinforced Plastic: CFRP)への適用に向け研究開発を継続しているところです。

(2) 新たな接合装置の導入

摩擦アンカー接合を主体とするそれまでの研究成果を掲

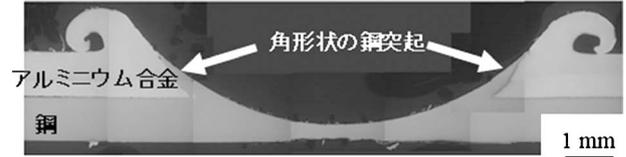


図1 アルミニウム合金/鋼接合剤の断面マクロ写真の一例。



図2 新たに導入した摩擦攪拌接合装置。(オンラインカラー)

表1 加工ヘッドの種類と特徴。

	通常ヘッド	高速ヘッド	超高速ヘッド
最大回転数 (rpm)	2000	4000	30000
最大荷重 (ton)	2	1.5	-
傾斜角度 (°)	0~5	0~5	±90
対象材料板厚	中板	中板~薄板	極薄板

げ, 経済産業省の「平成30年度地域新成長産業創出促進事業費補助金(地域未来オープンイノベーション・プラットフォーム構築事業)」に応募したところ, 採択されました。これによって, 中四国・九州地域の公設試験研究機関で初めて, 弊所に摩擦攪拌接合の専用装置が導入されることとなりました。図2に, 導入された芝浦機械製摩擦攪拌接合装置MPF2114FSを示します。本装置は先端の加工ヘッドが取り換え可能であることを特徴とし, 現在の仕様では表1に示す3種類のヘッドを有しており, 最大荷重2 tonの低速回転接合から最大回転数30000 rpmの高速回転接合まで対応可能です。なお, 加工ヘッドのうち, 高速ヘッドは2022年に公益財団法人JKAの補助事業の中で導入したものです。本装置を用いて, 各種アルミニウム合金や銅合金の線接合に関する基礎データ収集, 低荷重接合技術開発, 高耐久性接合ツール用材料の開発等を行うとともに, 地元企業のニーズに直結する技術開発も行っています。

4. おわりに

広島県立総合技術研究所東部工業技術センター加工技術研究部では, 摩擦攪拌接合技術以外にも歯車, 溶射等の研究開発を精力的に行っており, 特徴的な評価装置等も取り揃えています。広島県内に限らず, 多くの方に是非ご活用いただければ幸いです。

文 献

- (1) 大石 郁, 坂村 勝, 大田耕平, 藤井英俊: 溶接学会論文集, 32 (2014), 1-7.
- (2) 大石 郁, 坂村 勝, 竹保義博: 日本国特許第5854451号(2015). (2024年3月25日受理)[doi:10.2320/materia.63.573] (連絡先: 〒721-0974 福山市東深津町3-2-39)



東北大学国際放射光イノベーション・スマート研究センター(SRIS)

東北大学国際放射光イノベーション・スマート研究センター
教授 高橋 幸生

1. 高輝度放射光を利用してフロンティアを開拓する「SRIS」

3 GeV 高輝度放射光施設 NanoTerasu(ナノテラス)⁽¹⁾が、東北大学青葉山新キャンパスに建設され、2024年4月1日より運用開始されました。東北大学国際放射光イノベーション・スマート研究センター(SRIS)⁽²⁾は、NanoTerasuを舞台に人類に新たな知を生み出すことをミッションとして、2019年10月に誕生した東北大学の本部直轄の研究センターです。2024年4月には、同キャンパスに新棟 SRIS 研究棟が開設され、NanoTerasuの放射光を利用する研究・教育活動が本格的に開始されました。SRISでは、放射光を駆使した最先端の計測技術を開発し、それをを用いて様々な学術研究のフロンティアを開拓することを目指しています。「ニーズドリブなイノベーションの創出」も重要なキーワードであり、学术界と産業界がタッグを組むだけでなく、放射光計測の未だ見ぬ活用のルートを切り拓いていきます。また、NanoTerasuのエンドステーションの設計や高度化、さらには既存の放射光施設での測定可能性の検討(フィジビリティ・スタディ)についても、積極的な活動を推進しています。SRISは、国の主体機関である国立研究開発法人量子科学技術研究開発機構(QST: National Institute for Quantum Science and Technology)や一般財団法人光科学イノベーションセンター(PhoSIC: Photon Science Innovation Center)と協働体制にあり、ビームラインに関する様々なことをこれらの機関と連携して進めております。

2. 多様な計測解析ニーズに応えるコアリション・ビームライン

科学の基本である観察と検証のニーズに対し、放射光施設は幅広い計測手法のラインナップで応えてきました。国内の他の放射光施設と比較して、軟X線領域で約100倍の輝度を誇る NanoTerasu は、その高い光源性能によって、これまでアクセスすることが難しかったナノスケールでの対象物の形状や反応状態の観察を可能にします。NanoTerasuには初期ビームラインとして10本が設置されています。うち3本が国(QST)が整備を進める共用ビームラインで、7本がPhoSICが運用し、加入金を支払ったコアリション・メンバーが優先的に利用できるコアリション・ビームライン⁽³⁾です。コアリション・ビームラインのエンドステーションでは、



図1 SRISの教員とスタッフ。後ろに見えるのは3 GeV 高輝度放射光施設 NanoTerasu(奥)と SRIS 研究棟(手前)。

X線吸収分光, 小角散乱, X線回折などの標準的な測定に加え、試料環境に合わせたオペランド分光・回折, 試料を多角的に可視化するマルチモーダルイメージング, シングルナノメートル・ミリ秒での試料観察を可能にする高時空間分解イメージングなどの最先端技術を用いた高度かつ挑戦的な測定を行うことができます。コアリション・ビームラインにおいて、SRISの研究者は放射光計測・解析を希望する産学の研究者に対し、主に最先端の測定技術を用いて共同研究を進めます。また、国内外の大学や研究機関、産業界等をつなぐハブの役割を担い、次世代の豊かな才能と個性を活かした研究を推進します。2024年4月9日には、コアリション・メンバーによるコアリション・ビームラインの本格的な利用が始まりました。SRISと民間企業との共同研究で行った含硫黄高分子材料の観察に関する結果が早くも学術論文として発表される⁽⁴⁾など、順調に研究成果が創出されております。

3. おわりに

2024年5月より、NanoTerasu 共用ビームラインにて世界最先端の性能を引き出すべく、その最終調整を目的とした試験的共用が始まりました。そして2025年3月より共用開始予定です。これにより、初期に整備された10本全てのビームラインでの本格的利用が開始されます。

NanoTerasuの放射光を利用した最先端計測・解析技術が、金属およびその関連材料分野をはじめとする様々な学問分野の研究に活用されるよう、SRISのメンバー一丸となって取り組んで参ります。

文 献

- (1) <https://nanoterazu.jp/>
- (2) <https://www.sris.tohoku.ac.jp/>
- (3) <https://www.phosic.or.jp/>
- (4) N. Ishiguro, F. Kaneko, M. Abe, Y. Takayama, J. Yoshida, T. Hoshino, S. Takazawa, H. Uematsu, Y. Sasaki, N. Okawa, K. Takahashi, H. Takizawa, H. Kishimoto and Y. Takahashi: Appl. Phys. Express, **17** (2024), 052006.
(2024年6月5日受理) [doi:10.2320/materia.63.574]
(連絡先: 〒980-8577 仙台市青葉区片平2-1-1)

“What’s 技術士?”

企業内技術士の活動紹介 ～技術者として『ありがたい姿』の追求～

三菱電機株式会社 生産システム企画・技術部 生産技術グループ； 藤間 美子



1. はじめに

私は総合電機メーカーに勤務し、家電製品の信頼性・安全性評価などに従事してきた。現在、企業内の技術士として活動している。日々の業務は多忙だが、技術士としての視点から見ると、その中には多くの学びがある。ここでは、私が技術士になって初めて意識し始めた「自律」「研鑽」「指導」の観点から、企業内での取り組みなどについて紹介する。

2. 技術士受験での学び

私の技術士資格取得への挑戦について述べる。

技術士となるための試験では、受験申し込み時に自己の業務経歴証明書を提出する。業務経歴証明書には、業務経歴を列記し、その中から一つを選択し、その業務内容の詳細を記述する。私の場合、2000年頃以降10年近く注力した、電気製品のキーパーツである実装基板のはんだ材の鉛フリー化実現のための研究と品質改善について記述した。鉛フリーはんだは、従来の鉛入りはんだに比べて市場実績が乏しく、過去のトラブルの再発が危惧されることから、その防止のための信頼性評価を要した。実装基板に関わる代表的なトラブルである、はんだ接合部の熱疲労クラック、イオンマイグレーションおよび錫ウィスカについて対策を講じて品質改善に繋げ、その技術標準化と伝承、技術者育成に努めている。

2019年に技術士(金属部門)となり、公益社団法人日本技術士会(以下、技術士会と記す)の会員(金属部会所属)となってから、自己の業務経歴に関して金属部会定例会にて講演し、会誌「技術士」に投稿することもできた⁽¹⁾。

このように私が金属部門の技術士となるに至ったのは、鉛フリーはんだや電気・電子部品、実装基板に用いられる金属材料との関わりが深くなったことが発端となっている。学生時代の専攻は化学系分野であったが、その後、企業内で培った実務経験、課題解決能力が技術士の資格取得に結び付いた。技術士受験を通じて、自身の業務を棚卸し、自分がどのような業績を上げてきたのかを評価する機会を得た。これが私を技術士へと導いたのである。

3. キャリア自律

近年、企業内において、個人がキャリアについて自分なりの考えを持ち、自身の力でキャリアを切り拓くことを意味する「キャリア自律」が求められている。我が国の労働者不足は深刻化しており、企業内での社員の生産性を高める取り組みが求められている。労働力不足を解消する鍵として、40～60歳代のミドルシニア層(私もその範囲に該当)は重要な担い手であるが、終身雇用制度の中で安定して働いてきたことから、受け身の社員が多いと言われている。技術士の資格は、技術者の技術レベルを国が保証する役割を果たすものであるが、多くの場合(私の場合も)業務上必須ではない。しかし、その資格を取得することにより、受け身な働き方から脱却し、「キャリア自律」を具現化できると考える。先述した技術士試験の出願時に作成する業務経歴証明書は、自らの意思でキャリアについて考え、自身のキャリア形成の進捗を確認するものと言える。技術士資格の取得は、ミドルシニア層だけでなく、より若い層のキャリア自律に繋がることは言うまでもない。

働き方改革として、人的資本価値の最大化に向けて人事制度を刷新し、成長に繋がる適正評価の実現と自律的キャリア開発を支援する企業が増えつつある。それは、企業の持続可能な成長を促進する一環となっている。技術士資格の取得が自律的キャリア開発のマイルストーンとなれば、評価や報酬に反映され、技術士の知名度向上に繋がると期待する。私は企業内技術士として、働き方改革といった変化にも柔軟に適応し、キャリア自律を先導する役割を果たしたい。

「キャリア自律」という言葉は、技術士の視点から新たな意味を持つ。企業内だけでは得られない視野を広げ、自身のキャリアを自律的に築くことに繋がる。これは、外の世界を知ることが、企業内でのキャリア形成に大いに役立つということを意味するのである。

4. 継続研鑽と後進の育成

技術士には高度な技術と高い技術者倫理を兼ね備えることが求められており、備えるべき資質能力(コンピテンシー)と

して、「専門的学識」「問題解決」「マネジメント」「評価」「コミュニケーション」「リーダーシップ」「技術者倫理」が定められている⁽²⁾。企業内には社員教育・研修などの機会があるが、それだけでは技術士に求められるコンピテンシーを保持するのに十分とは言えない。技術士会やその他の学協会での講演・聴講や委員会活動、社会貢献活動、論文や書籍の執筆・購読などの継続研鑽(CPD: Continuing Professional Development)を通じて、最新の技術や研究、技術者倫理に基づく事例を自ら勉強(自己研鑽)し、積み重ねる必要がある。なお、CPD実績は、日本技術士会のホームページにあるCPD行事申し込みシステムを通じて、もしくは自身による直接入力により、文部科学省の技術士自己研鑽データベースに登録することができる。私もこの仕組みを利用している。日々の業務に追われる中で忘れてしまいがちな自己研鑽を計画的に行い、数値として状況を把握することができ、技術士活動を行う上での励みとなっている。

企業内技術士としては、自己研鑽だけではなく、自身が取り組んだ課題解決の経験や知識、ノウハウを後進の技術者に教育し伝承する役割が期待されている。特に、団塊の世代が退職し、2025年問題として危惧される人材不足が深刻化しつつある中、若い世代の技術者を育成することは喫緊の課題である。我が社では、不具合対応などを実践できる強い技術者の育成を目指し、教育カリキュラムの整備などに尽力している。私自身も社内の講師役を務め、後進の指導に努めている。また、企業内の技術士会に参画し、これから技術士を目指す方々をメンターとしてバックアップし、相互のコミュニケーション向上に励んでいる。これらは、継続的な研鑽と後進の指導に対する私の取り組みである。

5. 金属部会の DE&I 活動

技術士会金属部会に入会し、月次開催の定例部会(CPD講演会)や部会主催行事などに参加するようになったことを契

機に、部会活性化幹事を拝命した。数少ない女性会員であったこともあり、部会幹部方から後押しいただき、金属部会内で標記の活動を開始している。

ダイバーシティ&インクルージョン(D&I)とは、多種多様な人が互いの考え方の違いや個性を受け入れながら、ともに成長し、共存共栄することである。我が国では、少子高齢化などに伴う労働力人口の減少が加速するとみられ、女性や高齢者、障がい者、外国人などの多様な人材の活用で労働力を補うことがますます必要となる。技術士会でも、男女共同参画推進委員会を組織し、さらに公平性(エクイティ: Equity)を重視したダイバーシティ・エクイティ&インクルージョン(DE&I)に進化する活動を継続している⁽³⁾。時代とともに、働き方やキャリアに対する考え方、価値観も多様化する中、ビジネスのグローバル化も進み、D&Iへの取り組みが不可欠である。

厚生労働省の女性活躍推進の取り組みに関する諸資料⁽⁴⁾に見られるように、我が国は他の先進国と比較すると、種々の男女の格差が依然として大きい状況にある。特に科学技術関連では、それに携わる技術者の数だけみても、男女の差異は大きい。技術士に目をやってみても、全体的に女性の比率は僅か約2%に過ぎず、男女共同参画というにはほど遠い状況といえる。

金属部会ではこの問題への理解を深めるため、「女性だけでなく世代を越えた多様な人材の活躍を推進するのに有効な取り組みはないか」「このような優良事例がある」「管理者としてこんな経験をした」といった意見交換・コミュニケーションを図る場を設けている。そして、部会内でアンケートを実施し、活動の呼称を「Metals DE&I(デアイ)」とした。ビデオ会議システム Zoom[®]を用いて通常開催される定例部会やCPD講演会の後に、Zoomの機能の一つであるブレイクアウトルームを開設して意見交換し、図1に示すような議事メモを技術士会金属部会のホームページに掲載して、各位に展開(金属部会員以外にも閲覧可能)している。

資料No.07

2023年 10月15日
部会活性化幹事 藤間(記)
BOR:ブレイクアウトルーム

Metals DE&I(デアイ)9月度(9月24日BOR)の報告

参加者 :加藤さん、田中さん、笹口さん、中山さん、渡邊さん、平野さん、松下さん、新井田さん、鳥形さん、藤間(計10名)

進め方 :DE&Iについての一般論とその理解として、多様な人材の活躍推進について、日ごろ思うことなど一言コメントいただき、お時間の許す限り、フリーディスカッションしました。

議事メモ :以下のように、いただいたコメントなどを列記します。

- ✓ 自動車メーカーに所属しているが、製造業の現場に女性が少ない。強制的に女性管理職を増やしてみるとということも難しい現場があるだろう。重厚長大時代から女性の活用は課題としてあった。
- ✓ 失敗を恐れず強制的に女性管理職を増やして・・・ということで、失敗したということは聞かない。周りの意識・受け入れる側の配慮も必要だが、やってみることだ。
- ✓ 多様な人材という観点では、高齢者人材活用も大切と考える。今後、日本が伸びていく分野(医療機器など)への経験豊富な機械・材料の専門技術者の貢献が望まれる。
- ✓ 海外に目をむけると日本人は視野が狭いことを痛感する。偏った見方があるため、多様な人材の活躍が進まない。
- ✓ 女性に限らず多様な人材の、適材適所での活躍が望ましい。ただし、中小企業の生産現場では難しいところがある。
- ✓ 例えば、身近な組合活動での気づきであるが、女性が参加したからといって現実としてある。どうしたらよいか?多様な人材が参加しやすい風土を根付かせるところが課題となっている。

今後の予定:男女共同参画(済)、DE&I一般論の理解(済)、多様性の尊重、エクイティ、心理的安全性と順次話し合っていきます。

次回は**多様性の尊重、エクイティ**といったDE&Iのキーワードについて話します。

身近で取組んでいること、日ごろ思うことなど、話し合います。

限られたお時間ですので、その場でお話していただかなかったご意見など、下記にお寄せください。BORに参加されなかった方もご意見・ご希望などありましたら、よろしくお願います。

図1 Metals DE&I ミーティングでの議事メモの一例。(オンラインカラー)

思い出の教科書、この一冊!

「番外編」

続 金属学プロムナード —セレンディピティの誕生そして迷走—

小岩昌宏(著)
アグネ技術センター 2024年

北海道大学名誉教授 毛利哲夫

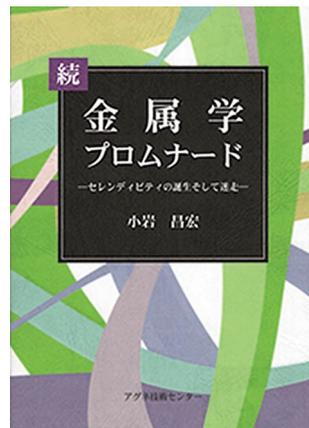


図1 「金属学プロムナード」(2004年刊行)の続編。

タイトルからわかるように本書は2004年に初版が発行された同名の書の続編である。但し、今回の副題は異なっており、前書の「セレンディピティを追って」の延長線上に何らかの収斂を予感させるものではない。前書も本書も各章は著者がこれまでに金属誌に連載寄稿したものであり、本書には著者が教鞭をとった大学の同窓会誌に寄稿されたものが一編加わっている。それらのいくつかは読んだことがあるが、こうして単行本にまとまったものを改めて読んでみると単編の足し算にはないプラスアルファのようなものを感じる。それは底辺を流れる著者の金属学に対する誇りと愛情であろう。「プロムナード」という書名のごとく、気軽に読むことができるのだが、事実・史実への驚き、新たな知識を得た喜び、そして著者の非凡な探求心への畏敬、それらが読後に一過性の興味や動機の発揚以上のものをもたらしてくれる。

我々の多くは、物理学や化学を本格的に学ぶ前からアインシュタインやマリー・キュリーなど、数多の物理学者、化学者の名前を知っている。各々の学者がどのような発見・発明を行ったのかということは知らずとも、類まれなる才能に関する逸話、あるいは特異な風貌や奇行、そんなことを介して物理や化学への興味をそそられてきたのではなからうか。金属学(著者の意図を尊重し、材料学や材料科学などの言葉は使わないことにする)はどうであろう? 金属学は、機能材料や構造材料等、日常生活に計り知れない恩恵を与え、今日の文明の礎をなす基幹技術・学問でありながら、私達は無機質な知識の集積に意を注いでも、そこに携わってきた人々の素性や生い立ちを見逃してきたのではなからうか。日常の教育や研究において、フィック(A. E. Fick)の法則、オロワン(E. Orowan)の式、ヒューム-ロザリー(W. Hume-Rothery)則などと頻りに引用しながら、殆ど彼らのことを知らないのは私だけではなからう。本書は16章から成り立っているが、全章は人の物語であると言っても過言ではない(フィックやヒューム-ロザリーは前書に詳しい)。しかし単なる伝記や評伝の類ではない。著者の独自の調査に基づいて、彼らが発明や発見に至った経緯、時代背景、取り巻く人間関係が綴られている。「人に歴史あり」「金属学に物語あり」、一つ一

つの美しい概念や数式の背後にある人間模様を引き込まれながら、思わず読み進んでしまった。偽らざる感想である。

総じて英国の研究者の紹介が多いが、著者が英国びいきである(とかねがね思っていたのだが)ことを差し引いても、金属学の源流に英国出身の学者が成した貢献の大きさを改めて感じた次第である。その貢献の一つは、物理学とは一線を画した金属学・冶金学の学問体系を創り上げたことである。冶金学は恐らく死語かも知れない。金属学もひょっとするとその途を辿りつつあるのかもしれない。かつて筆者が学生時代に物理化学の講義で、「物理の勘を養いたければ解析力学をしっかりと勉強しなさい。金属学の勘を養いたければ金相学をしっかりと勉強しなさい。」と言われたのを思い出す。当時、金相学なる講義は既になく、一体これがいかなる学問であるかもわからなかったのだが、その後、教育や研究の経験を積むにつれ、この名前の含蓄がわかるようになってきた。本書に金相学は出てこないが、冶金学は同時代の言葉であり、鋼、ジュラルミン、変形、疲労、破壊などが、冶金学の垣根の中で如何に不朽な材料となり、不滅の概念に昇華したのか、そしてマンハッタン計画のような国家危急のプロジェクトにおいて冶金学でこそ果たし得た役割、そんな逸話が満載されている。冶金学は物理学と軌を分かち独自の道を歩んだが、再び今、材料科学として多くの共通の課題に融合されつつある。いたずらに学問領域の定義をするのは意味のないことであるが、己の立ち位置を明快にするために学問の系譜を辿ることは必要であろう。本書は金属学・冶金学の源流に誘ってくれる。そして、何か誇らしいような気持ちにさえさせてくれる。

各章は人間の物語であると書いたが、人間物語を介した金属学への招待でもある。転位、拡散、破壊等々、現代の材料科学の必須項目が扱われている。それらは、決して数多の教科書や専門書の記載と重複するものではなく、著者が自らの知識と調査に基づいて再構築したものである。従って、金属学の諸概念をこれまでとは別の角度から見直し、確認するのに役に立つ。但し、通常の教科書のように系統的な章立てがなされているわけではないので初学者が金属学を学ぶための教科書として用いるのは難しいかもしれないが、金属学の一

一般的な知識を身に着けた者にとっては、それぞれの知識を深化させるために恰好の書である。例えば、隕鉄のことが一章を割いて書かれているが、Fe-NiのL1₀規則相は筆者のグループが長年にわたって第一原理計算の対象としてきたものである。第一原理計算は結晶構造と原子番号のみから平衡状態を算出するものであり、そこに内部組織の情報が入ることは極めてまれである。本書を読んで、ウィドマンステッテン組織と隕鉄の関連の詳細を知り、平衡状態図に安定領域を求めることのみに躍起になっていたことが恥ずかしくなった。本書を早く読んでいれば、「生きた計算、血の通った計算」ができたかも知れないと残念な気持ちである。教室で金属学を講じている先生方にも、バックグラウンドの知識として知っておくと有益な逸話や史実を提供してくれるはずである。

前編と少し異なる点は、タイトルからだけでは金属学と判じられない章がいくつか設けられていることである。「ワイン…」、「発表の技法」、「小説の中の…」、「書くこと読むこと断想」などである。この辺り、プロムナードたる所以かも知れないが、決して金属学の本題を外れているものではない。この短評に内容を記す余裕はないが、読者の周辺の日頃金属学などに無縁の人達にもこれらの章はオススメである。金属学のファンを増やすことができるかも知れない。

著者にも言及しておこう。知る人ぞ知る読書家である。尋常ではない読書量をもたらす溢れんばかりの言葉を自由に紡ぎながら文章を書いているのだと思うが、曖昧模糊たる美文や修辞を避けたところの洗練された平明な文章は読み易い。

この著者にして初めてなし得ることだと思う。もう一つ特筆すべき点は、著者の類まれなる好奇心(という言い方が適切かどうかはわからないが)と探求力である。恐らく普通の人々がフッと通り過ぎてしまうところにも、この著者は興味を示し、それを徹底的に調べるのである。全章は正にその調査の果実である。但し、著者は自分の意見を開陳していない。これだけの自己努力によって調査した結果をエッセイにするときには、自分の意見・思いを記述したくなるはずだが、著者はあくまで調べた事実を平明に語ることに徹している。そんな客観的な視座が好感をもたらす。

最後に、前著と本著を流れる「セレンディピティ」とは何だったのか？ 副題の「迷走」は象徴的な暗示であり、著者はこれに対してさえも結論を述べていないように思う。全編を貫く発見の人間物語の中に、読者それぞれが解答を見つけなさいということかも知れない。セレンディピティを、科学・技術における発見の必然と偶然という課題に限定すれば、私は、“本当に独創的な技術を生み出す上で「必要は発明の母」は誤りであり、有用な技術の芽は「強い美的好奇心や芸術的楽しみを求める動機」から生まれてきた”というC. S. Smithの言葉に共鳴する。読者もプロムナードを散策しながら考えてみてはいかがだろう。

教育、研究の一助として、又、団欒のひとときに、研究室、オフィス、そして家庭の居間に、どこにおいてもフィットする書として推薦したく思う。

(2024年6月17日受理)[doi:10.2320/materia.63.578]

本 会 記 事

会 告	2024年秋期(第175回)講演大会参加申込について	580
	2024年秋期講演大会日本金属学会・日本鉄鋼協会合同懇親会 開催・参加募集	582
	2024年秋期講演大会関連広告募集	583
	第22回 World Materials Day Award 募集	584
	第13回女性会員のつどいのご案内	584
	2024年秋期講演大会会期中の託児室設置のお知らせ	584
	第48回技術開発賞募集「新技術・新製品」記事募集	585
	第75回金属組織写真賞作品募集	586
	2025年度金属学会シンポジウムのテーマ募集	587
	2025年春期講演大会公募/企画シンポジウムテーマ提案募集	587
	「2025年度若手研究グループ」新規申請募集	588
	「研究会」新規・更新申請募集	589
	日本金属学会オンライン教育講座開催案内	590
	オンデマンド配信：オンライン教育講座開催案内	592
	欧文誌・まてりあ編集委員会からのお知らせ	598
掲示板		593
行事カレンダー		599
会誌・欧文誌 8号目次		597
新入会員		602
次号予告		598

◎本会へのお問合せは下記URLを
ご利用下さい。

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

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

会 告(ホームページもご参照下さい)

2024年秋期(第175回)講演大会参加申込について

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

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

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

～講演大会日程～

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

- ◆懇親会 開催日時：2024年9月18日(水)18:30～20:30
開催場所：千里阪急ホテル 西館 2F「仙寿」582頁参照

◆申込の種別と申込期間

- (1) 事前申込(8月30日(金)をもって事前参加申込完了となります)
申込期間：2024年5月27日(月)～2024年8月30日(金)
ウェブサイト URL：<https://www.jim.or.jp/convention/2024autumn/>
決済方法：クレジットカード、コンビニ支払、銀行振込



(2) 後期(当日)申込

申込期間：2024年9月6日(金)～9月25日(水)

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

決済方法：クレジットカード



(3) 相互聴講(鉄鋼協会に参加する本会非会員のみ 現地申込のみ)

申込期間：2024年9月18日(水)～20日(金)

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

決済方法：クレジットカード

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

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

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

・お支払後の取消は、ご返金できませんのでご了承下さい。

・領収書は、決済完了後に申込画面(「講演大会 MyPage」)からダウンロードし、印刷して下さい。

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

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

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

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

◆参加証

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

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

◆講演概要の閲覧・ダウンロード

公開場所：講演大会ウェブサイト(ログイン必要)

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

ログイン：ログイン用のIDとパスワードが必要です。

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

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

◆講演概要集の購入

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

◆相互聴講について

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

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

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

問合せ先 講演大会係 E-mail: annualm@jimm.jp

2024年秋期講演大会 各種シンポジウムのご案内

公募シンポジウム9テーマ

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

企画シンポジウム5テーマ

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

2024年秋期講演大会

日本金属学会・日本鉄鋼協会合同懇親会開催・参加募集

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

開催日時 **2024年9月18日(水)18:30-20:30**

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

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

予約申込期間 2024年7月1日(月)～8月23日(金)

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

※講演大会参加申込とは別になります。

支払方法 ※お支払後の取消はご返金いたしかねますのでご了承下さい。

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

領収書は決済後、支払い通知メールに記載の URL よりダウンロードできます。

当日申込 現金のみでのお支払い

当日の参加方法について

〈予約申し込みの方〉

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

〈当日申込をされる方〉

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

問合せ先

〒980-8544 仙台市青葉区一番町 1-14-32

(公社)日本金属学会 講演大会係 ☎ 022-223-3685 ☎ 022-223-6312 E-mail: annualm@jimmm.jp

2024年秋期講演大会 大会ホームページ・バナー広告、 付設展示会、誌上展示会(まてりあ11号)各募集要領

■大会ホームページ・バナー広告

掲載期間 2024年7月～(会期終了後もアーカイブで閲覧できます)

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

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

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

申込 随時受付
申込最終締切 **8月20日(火)**

■付設展示会

展示会会期 9月18日(水)～20日(金)9:00～17:00
※20日は, 13:30まで(予定)
搬入日: 9月17日(火)
14:00～16:00(予定)
展示会場 大阪大学・豊中キャンパス

〈機器・書籍展示〉

研究開発用機器, 書籍, ソフトウェア等の出展を募集いたします。

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

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

申込締切 **8月20日(火)**
※規定数に達し次第, 先着順に締切ります。

〈カタログ展示〉

展示部数 2点(A4サイズ, 8頁以内)につき, 30部以内
出展料金 2点につき30,000円(税別)(1点増すごとに10,000円(税別)追加)
申込締切 **8月20日(火)**

■まてりあ11号・誌上展示会

付設展示会のフォローアップ広告を募集致します。

発行予定日 11月1日(水)
掲載料金 1枠(1/4頁) 28,000円(税別)
申込締切 **9月26日(木)**
広告原稿締切 9月26日(木)

※本広告企画は, 付設展示会に出展されていない企業様も出稿できます。

上記の他, ランチョンセミナー, 学生キャリアサポート企画等の協賛メニューは, 企画ができ次第ご案内いたします。下記までお問い合わせ下さい。

■申込・問合せ先

株式会社 明報社
(担当: 月岡太郎 または, 営業担当者まで)
☎ 03-3546-1337 ☎ 03-3546-6306
E-mail: tsukioka@meihosha.co.jp
(または営業担当のアドレスまで)
URL: <http://www.meihosha.co.jp>

第22回 World Materials Day Award 募集

応募期間：2024年7月1日～8月23日

材料系国際協会連携組織である IOMMMS (International Organization of Materials, Metals and Minerals Societies) では、国際連携活動の一環として、材料系分野のプレゼンス向上のため World Materials Day を制定し(毎年11月の最初の水曜日)、この日に世界同時に、「材料に関する知識とその重要性を社会や若者に啓発する活動」に貢献があった学生を顕彰しております。日本では、**11月6日(水)**に顕彰いたします。尚、本年は下記日程にて展示および審査を行いますのでご確認の上、多数のご応募をお待ちしております。

募集要項

対象となる活動：次の3部門で募集します。

- 第1部門：社会における材料の重要性を示すホームページ
- 第2部門：学園祭やキャンパスオープンデー等での該当する展示物、作品等
- 第3部門：その他(材料教育プロジェクト、青少年対象の材料実験等)

応募資格者

日本在住の学部学生、修士課程大学院生(グループも可)。高校生・高専学生も可
日本金属学会の会員でなくても応募できるが授賞決定後には会員になることが望ましい。

展示方法

日本金属学会秋期講演大会(2024年9月18～20日、大阪大学)において、応募作品を展示する。

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

審査方法

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

授賞

- ① World Materials Day Award：優秀作品1作品(または1グループ) 副賞5万円
- ② 各部門賞：各部門1作品に表彰、賞状のみ。
贈呈は World Materials Day に受賞者の所属する機関で行う。

応募要領

メールによる申込み記載事項(応募者名、住所、所属、作品名、応募分野・部門、展示方法(web、実物、写真、ビデオ等)、展示必要スペース・重量などを明記して応募下さい。

申込方法 下記アドレス宛にお申込下さい。

(応募様式はホームページからダウンロードして下さい)

参考

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

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

～ ご応募お待ちしております。～



日本鉄鋼協会・日本金属学会 第13回女性会員のつどいのご案内

日本鉄鋼協会と日本金属学会は、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。この機会を利用して女性会員同士、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。学生さんもどうぞご参加下さい。

主催 日本鉄鋼協会・日本金属学会男女共同参画委員会
日時 2024年9月20日(金)12:00～13:00
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。職場の環境や人間関係で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 鉄鋼協会・金属学会女性会員、学生さん
参加申込 申込みは不要です。直接、会場へお越し下さい。ささやかですがお菓子を準備してお待ちしています。お弁当・お茶の用意はございませんので、必要な方はご持参下さい。

問合せ先 日本鉄鋼協会・日本金属学会
男女共同参画委員会委員長 西畑ひとみ
E-mail: nishibata.qz8.hitomi@jp.nipponsteel.com



2024年秋期講演大会会期中の 託児室設置のお知らせ

2024年秋期講演大会期間中、日本金属学会と日本鉄鋼協会が共同で託児室を開設いたします。利用ご希望の方はホームページ掲載の託児室利用規程をご確認の上「託児室利用申込書」に記入頂き、下記シッター会社へ直接お申し込み下さい。

設置期間および利用時間(開始、終了時間は予定です)

設置期間	利用時間
2024年9月18日(水)	8:30～18:00
2024年9月19日(木)	8:30～18:00
2024年9月20日(金)	8:30～17:00

場所 9/18～20 大阪大学豊中キャンパス内(お申し込みの方へ直接ご連絡いたします)

対象・利用料金 0歳～小学校低学年 無料です

利用シッター会社 ㈱ポピンズファミリーケア

申込方法

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

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

※申込受領後3営業日以内に、ポピンズファミリーケアより返信メールをお送りします。

申込期間 2024年8月1日(木)～8月30日(金)16:00まで
(定員に達し次第締め切らせて頂きます)

申込・問合せ先 ㈱ポピンズファミリーケア大阪支社
担当)竹内・西田
☎ 06-6367-2100(代表)
E-mail: order-osaka@poppins.co.jp

第48回公益社団法人日本金属学会技術開発賞 「新技術・新製品」記事募集

応募締切：2024年11月1日(金)

[本賞の趣旨]

本会は創意あふれる開発研究を推奨する目的で、金属工業に関する独創性に富む新技術・新製品の技術開発に優れた実績を収めた技術者に対し、本賞を授賞するものである。

(注1)本賞は、当該年の日本金属学会会報「まてりあ」“新技術・新製品”の欄に掲載された記事が、選考対象となる。

技術開発賞募集要綱

1. 賞の名称 第48回公益社団法人日本金属学会技術開発賞

2. 対象となる業績と区分など

(1) 次の部門およびそれらにまたがるものとする。

- ①材料基礎技術部門
- ②素材製造・評価技術部門
- ③素材応用技術部門
- ④新素材開発部門
- ⑤その他

(2) 評価は次の諸点について行われる。

- ①独創性のある技術か
- ②技術、システムあるいは製品に関する有用な発明、考案、改良(有用性)であるか
- ③技術上の問題解決に役立ち、あるいは新製品の開拓をさらに促す可能性(将来性)があるか
- ④新技術・新製品の開発に優れた実績があるか
- ⑤生産実績や適用実績はあるか

(3) いわゆる「金属」のみでなく、その周辺の材料、たとえば燃料、耐火物、半導体、複合材料などに関するものでもよい。

(4) 応募の時点で、他の公募制の褒賞(発明協会賞、大河内賞など)を受けていない斬新な主題であることが望ましい。

3. 応募者の条件

(1) 1件につき**10名以内**のグループまたは個人直接開発に関与した技術者であって、単なる職制上の管理者や代表者を含まないことが望ましい。

4. 選考

(1) 受賞者の選考は選考委員会で行う。選考委員は本会理事会が毎年選任し、会長が委嘱する。

(2) 理事会が授賞該当無しと認めた場合は、その年度は授賞しない。

(3) 選考に当たって、特許係争等が問題となった記事は授賞対象から除外する事がある。

5. 授賞

(1) 2025年6月末日までに受賞者を内定する。

(2) 2025年秋期講演大会において授賞する。

(3) 受賞者には賞状と副賞(楯)を贈呈する。受賞者が非会員の場合には、会員資格を与える。

6. 技術開発賞受賞記念講演

技術開発賞受賞をより意義深いものとするため、受賞記念講演をお願いする。

第48回の受賞記念講演は2025年秋期講演大会(9月予定)の折りに行う。

7. 受賞決定までの流れ

応募(11月1日締切)→まてりあ掲載(64巻(2025年)1号から)→選考・受賞決定(2025年6月)→授賞(2025年9月)

まてりあ「新技術・新製品」記事への応募の方法

1. 応募・原稿締切

(1) 2024年11月1日(金)

(2) 申し込み受理順を参考に会報「まてりあ」に第1号から第3号まで(予定)掲載する。

2. 応募記事は編集委員会の査読を経て、日本金属学会会報「まてりあ」に掲載する。

掲載記事が技術開発賞の選考対象となる。

掲載が決まった場合には、刷り上がり1ページ当たり28,000円の投稿料を納入すること。

ただし、掲載号1冊、掲載記事のPDFファイルを無料とする。

3. 応募記事の記述の留意事項

(1) 社名、商品名その他、商業用呼称を用いることは差し支えないが、その内容が一般に理解できるよう説明を付すこと。

(2) know-howに属する事項を記述する必要はないが、新技術・新製品の特色などが理解できるようなデータを含めること。

(3) 現在までの実績、経済性、特許関係など「技術開発賞」選考に参考となる項目をなるべく含めること。

(4) 特許関係等についての記述は十分に注意すること。

4. 原稿作成について

(1) 原稿は本文、図(写真)および表を含めて刷り上がり3頁以内(約6,700字)とする。

(2) 原稿は図・表の説明を含めて全て日本語とする。物理量の単位はなるべくSI単位系による。

(3) 原稿はレイアウトの体裁にあわせて作成する。

(4) 応募は、下記Webサイトから申込む。

URL <https://data.jimm.jp/jim/shou/gikai/sui/>

ホームページから直接入力→原稿をZip形式ファイルでアップロード→受理mailの発行→受付完了。

原稿ファイルの提出；本文、図表、レイアウトを別個に作成し、Zip形式(ファイルサイズ上限は50MB)でまとめる。

① レイアウト用紙(Webサイトにてダウンロード可能)

② 図(写真)・表

・図と写真は区別せず図1、図2…のように、表は、表1、表2…のようにそれぞれ通し番号とする。

・写真にはスケールを入れる。

・それぞれキャプションを付すること。

(記述は横軸・縦軸・説明も含めすべて日本語とする。)

・カラー原稿にはカラー印刷の有無を必ず明記する。

・カラー印刷は刷り1頁あたり35,000円を著者が負担する。

5. 掲載された記事の著作権を本会に委譲すること。

6. まてりあ一般記事の要領に従うこと。(まてりあ掲載「新技術・新製品」記事を参考にすること)

7. 提出資料

①レイアウトされた原稿 ②本文テキスト ③図表原稿

◎①～③のデータファイル(Zip形式でアップロードする。)

8. 申込・送付先

(公社)日本金属学会各賞係

☎ 022-223-3685 E-mail: award@jimm.jp

9. 「新技術・新製品」記事の問合せ先

まてりあ係 E-mail: materia@jimm.jp

第75回金属組織写真賞作品募集

Web フォームによる申込です !!

～ にとっておきの作品(一枚)を後世に ～

応募期間：2024年8月1日(木)～11月1日(金)

1. 募集部門

下記4部門で行っております。

各部門とも試料，方法，結果などにオリジナリティーのある高い学術的価値が認められるもの，試料処理，写真処理他において技術的価値が高く，また，オリジナルな技術が含まれるもの，教材や写真集の編集などの際に利用できるような典型的な組織写真であるものを選考対象とします。

優秀賞および奨励賞作品を選考授賞し，特に優れた作品について最優秀賞を贈ります。ただし，該当する作品がないときは授賞しないことがあります。

「写真賞部門」

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

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

2. 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。

【申込フォーム】

- ①応募部門：4部門の該当する部門を選択する。
- ②題目
- ③作品の説明
- ④学術的価値(新規性，波及効果について世界の情勢に照らして記入)
- ⑤技術的価値(試料，試料作製，写真処理において新規性，独自性について記入)

⑥組織写真の価値(組織写真作品としての新規性や優れた点など，特記事項を記入)

⑦材料名

⑧試料作製法

⑨観察手法

⑩作品の出典(作品はオリジナルまたは本会所属の写真で使用許可のあるものに限る.)

⑪応募者・共同研究者

⑫連絡先

【写真作品】

①写真作品データの解像度は，A2版サイズを前提に400dpi以上とする。

②写真作品データはPDFまたは画像ファイル(jpg, png, tiff, bmp)として作成したもの(ファイルサイズ上限は100MB)をアップロードする。

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。

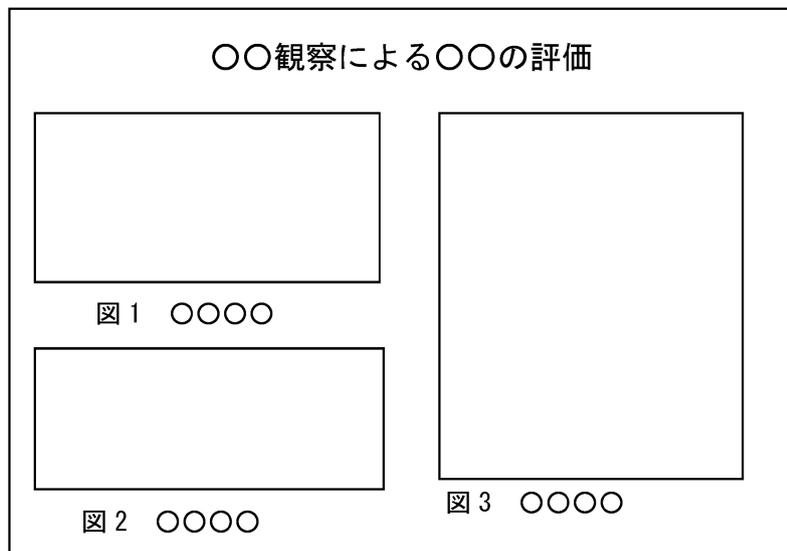
⑦作品を春期講演大会の会場等で展示すること，およびWebサイトで紹介することについて同意すること。

送付・問合せ 〒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@jimm.jp
URL : https://data.jimm.jp/jim/shs/sui/

【作成例】写真解像度：A2版サイズを前提に400dpi以上

写真見本

申込フォーム：入力項目



- ①応募部門 (1. 2. 3. 4.)
- ②題目
- ③作品の説明
- ④学術的価値
- ⑤技術的価値
- ⑥組織写真の価値 (特記事項等)
- ⑦材料名
- ⑧試料作製法
- ⑨観察手法
- ⑩作品の出典
- ⑪応募者・共同研究者
- ⑫応募者連絡先

2025年度 金属学会シンポジウム*のテーマ募集

提案期限：2024年10月7日(月) 厳守

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

シンポジウムの開催趣旨

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

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

応募要領

提出書類：提案書を下記提出先に送付して下さい。(提案書の様式はホームページよりダウンロードして下さい。)

提案締切：2024年10月7日(月)

応募から実施までの流れ

募集締め切り(10月)⇒セミナーシンポジウム委員会にて採択決定(10月頃)⇒事務局から採択通知と具体的実施準備の連絡⇒講師・プログラム・会場の決定(開催6か月前に確定必要)・会告⇒講師依頼⇒テキスト作成(開催2か月前に原稿必要)⇒参加者募集⇒開催

〈世話人〉

1. 講演者への内諾(内諾後、事務局から正式依頼いたします。)
2. プログラム日程案作成・会場手配(事務局と相談)
3. 開催当日の司会・進行

〈講師〉

事前の予稿集原稿(4頁程度)執筆と予稿

〈事務局〉

1. 費用支払い(会場費、旅費謝礼、昼食費等)
2. 予稿集編集・印刷
3. 講師依頼状配信
4. 関係学協会への協賛依頼

提案書提出先・問合せ

下記宛てに E-mail で送付して下さい。2, 3日過ぎても受理の通知が届かない場合はご連絡下さい。

日本金属学会 セミナーシンポジウム委員会宛

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

2025年春期講演大会公募シンポジウムのテーマ募集

提案期限：2024年9月2日(月) 期日厳守

会員の研究活動一層の活性化を図ることを目的として、春秋大会において会員からの提案テーマによるシンポジウム講演を実施いたしており、活況を呈しております。明年の秋期大会の公募シンポジウムテーマを募集いたします。次の要領をご参照のうえ、活発な討論が期待できる有益なテーマを積極的にご提案下さい。(提案様式はホームページよりダウンロードして下さい。)

詳細 あたりあ63巻7月号513頁またはホームページ→講演大会→2025春

問合せ・照会先 E-mail: stevent@jimm.jp

☎ 022-223-3685 FAX 022-223-6312

日本金属学会講演大会委員会宛

2025年春期講演大会企画シンポジウムのテーマ募集

提案期限：2024年9月2日(月) 期日厳守

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

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

詳細 あたりあ63巻7月号514頁またはホームページ→講演大会→2025春

公益社団法人日本金属学会
「2025年度若手研究グループ」新規申請募集

申請締切：2024年9月2日(月)

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

【実施要領】

- (1)概要 要 • 新たな研究会の設立、新規研究テーマの開拓やフロンティア助成研究の申請に向けた研究課題の抽出や研究目標の明確化のための調査の実施や構成員による討論会や会議の開催等を行なう。
- 本研究グループの活動を、日本金属学会フロンティア研究助成申請時の審査の参考情報とする。
 - 目的・目標・活動計画を明確にし、機関誌等での活動報告を義務化した上で、活動費を支給する。
- (2)対象者 • 申請者および構成員は申請時(9月2日時点)に40才以下の研究者であること。申請代表者は正会員であること。
- 申請時には、構成員は5名以上であり、非会員を構成員とすることができるが、過半数は正会員であること。
 - 構成員に最低1名は産業界のメンバーが入っていること。(適当なメンバーがいない場合は、申請時に企業メンバーの推薦を該当分科の調査研究委員会委員等に依頼すること。)
 - 活動開始時には、非会員の構成員は会員になること。
- (3)活動費 年間50万円を上限とする。(税金分を含む)
- (4)活動期間 2025年3月1日～2027年2月28日の2年間とし、原則として延長は認めない。
- (5)活動報告 • 研究成果報告として、講演大会において講演(若手研究グループの企画セッション等が望ましい)を行う。
- 1年経過後および活動終了後に報告書A4版1枚(2,200字程度)を調査研究委員会に提出する(必要な場合は説明いただく)。提出された報告書は、本会ホームページおよび会報「まてりあ」に掲載する。
- (6)採択件数 • 5件以内とする。
- (7)応募方法 • 名称、申請代表者、構成員、申請理由、活動の概要、活動計画、予算、成果の報告予定、関連分野を記載した申請書を下記申込専用サイトに必要事項を入力の上、アップロードし提出する。なお、ファイルはMS-Word形式として下さい。
- <https://data.jim.or.jp/jim/wakate/tou/>

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

2024年度活動中の若手研究グループ(2グループ)

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

これまで活動した若手研究グループ

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

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

公益社団法人日本金属学会
「研究会」新規・更新申請募集

申請締切：2024年9月2日(月)

研究会の登録を希望される方は研究会実施要領をご参照の上、お申込下さい。

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

【実施要領】

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

- 年間運営費 100,000円
- 活動期間 新規申請の場合1期5年間以内、継続更新の場合は、延長期間1期3年以内。
最長活動期間は2期8年以内
- 新規申請書の内容 ①研究会名称、②活動目的、③活動期間、④代表世話人、⑤世話人(複数可)、⑥構成員名簿
- 継続更新申請書の内容 ①研究会名称、②継続理由、③延長期間、④代表世話人、⑤世話人、⑥構成員、⑦これまでの成果報告、⑧今後の活動計画書
- 年間採択数 新規2件以内、継続(延長)申請は2件以内

(6) 研究会の審査 調査研究推進委員会で1次審査をし、理事会で最終審査を行う。

(7) 審査基準

- 十分な学術貢献が期待できるか。
- 既存の研究会と類似していないか。
- 構成員は適切か。
- そのテーマの研究会が必要か。
- 本会の講演大会公募シンポジウムや金属学会シンポジウムを開催出来るか。

(8) 現在活動中の研究会の留意事項

- 2025年2月に終了する研究会で、過去に継続(延長)の申請をしている研究会は、現在の活動期間で終了となります。
- 2025年2月に終了する研究会で、これまで継続(延長)の申請をしていない研究会は、1期3年の継続(延長)の申請が出来ます。ただし、研究会の審査により2件以内の採択となります。

(9) 申込方法 作成した申請書を下記申込専用サイトに必要事項を入力の上、アップロードし提出して下さい。なお、ファイルはMS-Word形式として下さい。

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

問合せ・照会先 (公社)日本金属学会 研究会係

E-mail: stevent@jimm.jp

☎ 022-223-3685

日本金属学会各種研究費申請比較表

◎応募検討の際、ご参照下さい。

	研究会	若手研究グループ	フロンティア研究助成
目的	先端領域又は学術領域における研究会を効率的に推進するために活動することを目的とする	若手および調査・研究事業を活性化することを目的とする。新たな研究会の設立、新規研究テーマの開拓やフロンティア助成研究の申請に向けた研究課題の抽出や研究目標の明確化のための調査の実施や構成員による討論会や会議の開催等を行なう。	教育・研究機関での金属及びその関連材料分野の学術研究及び技術研究の発展や若手研究者の育成や奨励を主な目的として、金属及びその関連材料分野に関連する材料又はプロセスに関する研究に助成金を交付する
対象者	代表世話人および世話人は会員であること。代表世話人は調査研究委員であることが望ましい。構成員は必要に応じて外部の専門家(非会員)でも可。他	申請者および構成員は40才以下の研究者であること。申請代表者は正会員であること。 ・申請時には、構成員は5名以上であり、非会員を構成員とすることができるが、過半数は正会員であること。 ・構成員に最低1名は産業界のメンバーが入っていることが望ましい。 ・活動開始時には、非会員の構成員は会員になること。	応募者(代表者)は、応募年4月1日時点で45歳以下の日本の教育機関または公的研究機関に所属し、日本国内で研究に従事する者(学生・大学院生および企業との兼務者を除く)であること。ただし、共同研究者は国外でも可とする。他
研究期間	5年間(申請により最長8年可)	2年間(延長なし)	2年間
支給金額	年間運営費 10万円 用途は、会議費、旅費交通費、通信運搬費、消耗品費、印刷製本費等の運営費用とする	年間50万円を上限 用途は、会議費、旅費交通費、通信運搬費、消耗品費、印刷製本費等の運営費用とする	150万円以下 用途は、研究等に直接必要な費用及び所属組織の必要最低限の間接経費とする
審査	調査研究委員会にて審査後、理事会にて承認	調査研究委員会にて審査後、理事会にて承認	調査研究委員会にて審査後、理事会にて承認
採択上限	新規2件、継続2件	5件程度	15件以下
活動報告	研究会活動期間中に講演大会公募シンポジウムや金属学会シンポジウムを計画すること。	講演大会において講演(若手研究グループの企画セッション等が望ましい)を行う。 1年経過後および活動終了後に報告書A4版1枚を調査研究委員会に提出し、会報および本会ホームページにも掲載する。	研究終了6ヶ月後までに、終了報告書(A4様式1枚)及び成果報告書を日本語(専門語等で部分的に外国語を使用することは可)で作成。 研究成果は研究開始時から研究完了後1年までの間に本会の講演大会における発表2件及び本会の欧文誌又は会誌に論文を投稿すること。
募集期間	例年7月会告 締切9月初旬	例年7月会告 締切9月初旬	3号会告 募集期間3月1日~4月末日

日本金属学会オンライン教育講座 開催案内

New!!

『マルチスケール材料科学』

日 時 一日目 2024年10月28日(月)13:00~16:10

二日目 10月29日(火)13:00~16:10

講義概要

材料の諸現象は電子、原子の振る舞いに端を発し、内部組織の形成を経て、強度や機能の発現に至るマルチスケール現象である。従って諸現象の素過程は電子・原子のスケールにあるが、これを単純に集積するだけではマクロな現象を理解することはできない。素過程が集まり、事象や現象を発現するときには、素過程の中で支配的なものが選択され、又、素過程の足し算以上のプラス α が現れる。cross-scaleあるいはtrans-scaleに伴う選択則やプラス α の正体を明らかにし系統化することがマルチスケール材料科学の課題である。本講義ではこのようなことを念頭において、ミクロからマクロに至る種々の素過程の原理を復習し、材料科学/材料工学特有のマルチスケール性を学ぶ。

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

プログラム

2024年10月28日(月)

13:00~14:30 離散格子上の統計熱力学

14:30~14:40 一休憩

14:40~16:10 連続体における内部組織の形成

2024年10月29日(火)

13:00~14:30 強度や機能発現の素過程と支配過程

14:30~14:40 一休憩

14:40~16:10 順問題・逆問題と cross-scale

受講方法 オンライン(Zoom)

講師紹介 北海道大学名誉教授 毛利哲夫先生

1976年北海道大学工学部金属工学科卒業、1982年 University of California, Berkeley, PhD コース修了、同年 Lawrence Berkeley Laboratory, University of California, Assistant Research Engineer、1985年北海道大学工学部講師、1986年北海道大学工学部助教授、1996年北海道大学大学院工学研究科教授、2013年東北大学金属材料研究所教授、2017年-2020年同特任教授、2019年-2020年 JST シニアフェロー、2014年北海道大学名誉教授 現在に至る(この間1994年 Forschungszentrum, Juelich 客員研究員、1997年-1998年ウイーン大学物理学科 Guest professor、2016年 University of Texas, Austin 客員教授等)

コーディネーター 東北大学 特任准教授 寺田弥生、物質・材料研究機構 主幹研究員 井 誠一郎、物質・材料研究機構 主幹研究員 戸田佳明

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

申込締切 2024年10月21日(月)

受講料

対象者	受講料	2講座日以降の受講料*
正員	20,000円	15,000円
学生	8,000円	6,000円
非会員	40,000円	30,000円

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

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

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

受講料支払方法 ①カード決済 ②コンビニ決済 ③銀行振込

問合せ 〒980-8544 仙台市青葉区一番町 1-14-32

(公社)日本金属学会 セミナー・シンポジウム参加係

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

協賛予定

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

日本金属学会オンライン教育講座 開催案内

『結晶学の基礎』

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

講義概要

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

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

プログラム

2024年8月26日(月)13:00~16:30

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

2024年8月27日(火)13:00~16:30

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

受講方法 オンライン(Zoom)

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

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

コーディネーター 株式会社プロテリアル 部長 西内武司

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

申込締切 2024年8月19日(月)

受講料

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

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

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

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

受講料支払方法 ①カード決済 ②コンビニ決済 ③銀行振込

問合せ先 〒980-8544 仙台市青葉区一番町 1-14-32

(公社)日本金属学会 セミナー・シンポジウム参加係

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

協賛予定

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



オンデマンド配信：日本金属学会オンライン教育講座 「工業材料の応力・歪測定」

New!!

配信：2024年10月1日(火)～10月31日(木)

製造工程，形状に起因する残留応力・歪及び集中応力は，物理・化学・機械的特性に大きな影響を与えることが多く，定量的に把握することが求められています。工業製品を構成する材料は，金属，無機・有機材料，半導体，結晶学的にも多結晶・単結晶と多様化し，大きさも極小化する時代となっています。万能な応力・歪測定法はなく，X線・電子線・中性子・放射光・レーザー光・超音波などを用いて個々考案し適用してきました。本講座ではこれらの手法を基礎から解説し測定事例とともに紹介します。Table-top型X線機器を用いた応力測定の実演も行っています。

2023年10月26日および27日に開催した当該講座の録画をオンデマンドで視聴いただきます。配信期間中は好きな時間に聴講できます。

講師紹介

東北大学名誉教授 **田中俊一郎先生**

1980年3月東北大学大学院工学研究科博士課程修了，工学博士。1993年10月-1999年3月JST-ERATO「田中固体融合プロジェクト」総括責任者。1999-2000年東京大学工学系研究科客員教授。2002年2月名古屋工業大学工学部教授。2005年7月東北大学多元物質科学研究所教授。2015年4月東北大学名誉教授，NICHe教授。2018年4月東北大学μSIC。現在に至る。

コーディネーター 東北大学准教授 **森戸春彦**， 大阪大学教授 **小泉雄一郎**

カリキュラム 1：応力・歪測定の意義

2：応力測定法概論

3：破壊を伴う測定法，

4：結晶材料の応力・歪測定(X線法)

5：結晶材料の応力・歪測定(中性子線，放射光，電子線)

6：高分子材料・セラミックス・ガラスの応力・歪測定

7：応力・歪測定の実際(多様な場での応力・歪測定，卓上型X線cosα法の概要)

8：応力・歪測定の実際(卓上型X線装置による応力測定の実演)

9：応力・歪測定の総括

視聴期間 **2024年10月1日(火)～10月31日(木)**

視聴方法 オンデマンド配信システムUIshareから視聴いただきます。

資料は同システムのウェブサイトからダウンロードいただけます。

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

申込締切 **2024年10月8日(火)**

受講料

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

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

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

受講料支払方法 ①カード決済 ②コンビニ決済 ③銀行振込

問合せ先 〒980-8544 仙台市青葉区一番町1-14-32

(公社)日本金属学会 セミナー・シンポジウム係

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

協賛予定

エネルギー資源学会，応用物理学会，金属材料研究開発センター，軽金属学会，軽金属製品協会，合金状態図研究会，資源・素材学会，ステンレス協会，素形材センター，電気化学会，電気学会，日本アルミニウム協会，日本MRS，日本化学会，日本ガスタービン学会，日本機械学会，日本材料科学会，日本材料学会，日本歯科理工学会，日本磁気学会，日本セラミックス協会，日本塑性加工学会，日本チタン協会，日本チタン学会，日本鋳造工学会，日本鉄鋼協会，日本バイオマテリアル学会，日本物理学会，日本分析化学会，腐食防食学会，粉体粉末冶金協会，表面技術協会

〈公募類記事〉

有料掲載：1/4頁(700～800文字)程度。
「まてりあ」とホームページに掲載；16,500円
ホームページのみ掲載；11,000円

〈新刊案内〉

会員による出版案内(書誌情報の掲載)
〈その他の記事〉原則として有料掲載。
原稿締切・掲載号：毎月1日締切で翌月号1回掲載。
原稿提出先：電子メール(受け取りメールの確認をして下さい)
E-mail: materia@jimmp.jp

公 募

◇物質・材料研究機構 若手国際研究センター
ICYS リサーチフェロー公募◇

募集人員 ICYS リサーチフェロー 若干名
所 属 若手国際研究センター
専門分野 独自の発想に基づき、NIMSの優れた研究環境のもと独立して様々な材料(量子マテリアル、電池材料、磁性材料、構造材料、データ科学、有機材料、バイオ関連材料、その他の先端材料等)の研究に取り組む若手研究者を募集。国内最高ランクの給与(604万円～)と年間200万円の研究費を支給。NIMS定年制研究員への応募時の優遇措置あり(概ね5割が採用)。
応募資格 博士学位取得後10年以内、または着任までに取得見込みの方
着任時期 2025年2月1日～2025年9月1日
任 期 当初3年、その後評価により1年毎更新、最長5年(NIMS内から着任の場合、NIMSでの職歴により異なる)。産休・育休あり。
提出書類 様式などの詳細は下記URLをご参照下さい。
<https://www.nims.go.jp/icys/recruitment/>
応募締切 2024年9月25日(水)必着
問合せ先 物質・材料研究機構 ICYS採用担当
E-mail: icys-recruit@nims.go.jp

◇千葉工業大学工学部先端材料工学科専任教員公募◇

募集人員 准教授または助教 1名
所 属 工学部 先端材料工学科
専門分野 金属材料学(金属材料の製造および組織に関する研究など)
担当授業科目 先端材料工学実験、ゼミナール等の先端材料工学科および大学院先端材料工学専攻内で材料に関する講義、演習、特別研究を担当。なお、大学院においては、英語による授業を担当していただく場合があります。
応募資格 (1) 着任時に博士またはPh.D.の学位を有する方
(2) 先端材料工学科での教育研究に熱意のある方(准教授または助教として研究室を運営し、所属学生の卒業研究等を指導)

なお、本公募では「男女共同参画社会基本法」の主旨に則り、業績評価等の審査結果について同等と認められた場合には、女性を優先的に採用します。

着任時期 2025年4月1日

提出書類(A4版横書き)

(1)から(8)まで紙媒体とPDFを提出。なお、PDFについては各項目別のファイルを1枚のCD-RまたはUSBメモリーにまとめて下さい。

- (1) 履歴書(写真貼付、連絡先に電話番号とE-mailアドレスを記入)
- (2) 研究業績リスト(学位論文、著書、有審査論文、国際会議プロシーディングス、解説、特許、外部研究費の実績、受賞歴とその内容、その他などに分類)
- (3) 学協会等ならびに社会における活動実績のリスト
- (4) 英語力を示す資料(民間の英語資格、英語検定のスコア、海外で英語を使った仕事の経験を示したもの等)
- (5) 研究業績に関する概要(1,000字程度)
- (6) 教育に関する抱負(1,000字程度)
- (7) 今後の研究計画(1,000字程度)
- (8) 主要学術論文5編(准教授)または3編(助教)の別刷(コピー可)

応募締切 2024年9月6日(金) 消印有効

選考方法 第1次選考 書類審査

第2次選考 第1次選考合格者に対する面接審査(交通費等は本人負担)

書類送付先 〒275-0016 千葉県習志野市津田沼2-17-1

千葉工業大学 工学部 先端材料工学科

学科長・教授 田村洋介 宛

E-mail: yosuke.tamura@it-chiba.ac.jp

*応募書類の封筒には「先端材料工学科教員応募書類」と朱書きの上、簡易書留で郵送して下さい。なお応募書類は原則として返却致しません。

問合せ先 先端材料工学科 教授 齋藤哲治

☎ 047-478-0315

E-mail: tetsuji.saito@it-chiba.ac.jp

備 考

採用後3年間は年度毎の雇用契約更新制とし、その間の教育研究業績・素行等に問題があると判断された場合には、雇用契約を更新しないことがあります。

3度目の契約更新時点で特にその後の勤務に問題がないと判断した場合には、雇用期間の定めのない専任教員に身分が変更されます(無期雇用契約に転換)。雇用契約期間中は、雇用契約期間が定められていること以外、処遇面等は雇用期間の定めのない専任教員と同一です。なお、定年年齢は満65歳です。

◇長岡工業高等専門学校 機械工学科 教員
(准教授または助教)の公募◇

職名・人員 准教授または助教 1名

所 属 機械工学科

任用予定年月日 令和7年3月1日以降なるべく早い日

専門分野 機械工学, または機械工学と他分野の複合・融合分野

担当科目 材料工学分野の専門科目, 学生実験・実習, 学科・専攻科での研究指導, 低学年基礎科目

応募資格・条件

- (1) 学士課程相当の材料工学分野の授業を担当できる方
- (2) 当該専門分野について, 研究又は実務上, 優れた知識と能力及び実績を有し, 着任後も熱意をもってそれらを推進できる方
- (3) 心身ともに健康で, 高等専門学校の教育・学生指導(担任, クラブ顧問, 寮生指導等を含む)にも理解と熱意があり, かつ, 国際交流活動にも意欲のある方
- (4) 35歳以下(令和6年度末)で博士の学位を有する方, または着任までに取得見込みの方(「雇用対策法施行規則」第一条の三第1項三号のイ適用により, 長期継続によるキャリア形成を図る必要があるため.)

任 期 定めなし。ただし, 博士の学位取得見込みの方は, 1年間の任期付き採用となり, 任期中に学位を取得した場合は, 任期を付さない教員となります。

応募締切日 令和6年10月31日(木)

- 提出書類
- (1) 履歴書(写真貼付のこと)
 - (2) 個人調書 —— 本校所定の様式
 - (3) 論文・著書等一覧(論文, 著書, 口頭発表, 指導実績, 教育関係研究発表, 各種資格等を項目別に記載) —— 本校所定の様式
 - (4) 教育・研究活動等調書 —— 本校所定の様式
 - (5) 主要論文・著書3編以内(各2部, コピー可)
 - (6) 主要論文・著書等の概要(それぞれ800字程度) —— 本校所定の様式
 - (7) 着任後の教育・研究についての抱負を1,200字程度にまとめた書面(A4版用紙により作成)
 - (8) 応募者に関する意見を求めることができる方(2名)の氏名と連絡先, 本人との関係

※本校所定様式とあるものについては, 本校ホームページ内教員公募のお知らせから取得して下さい。

(<https://www.nagaoka-ct.ac.jp/college-info/employment-info/>)

選考方法 第1次選考: 書類審査

第2次選考: 第1次選考合格者を対象に面接及び模擬授業を実施

面接等に関わる交通費等は応募者負担とします。

書類の提出先 〒940-8532 新潟県長岡市西片貝町888番地
長岡工業高等専門学校 総務課人事係
☎ 0258-34-9313

E-mail: jinji@nagaoka-ct.ac.jp

問合せ先 長岡工業高等専門学校 機械工学科長

池田富士雄 ☎ 0258-34-9203

E-mail: ikeda@nagaoka-ct.ac.jp

※書類の提出は, 郵送の他, E-mailでも受け付けます。受領後返信メールを送信しますので, もし数日しても届かない場合は電話で問い合わせして下さい。書類を郵送する場合は簡易書留とし, 封筒に「機械工学科教員公募書類在中」と朱書して下さい。なお, 提出書類は原則として返却しませんが, 返却を希望する場合は, 切手を貼付けた返信用封筒を同封して下さい。

その他 (1) キャリア形成を支援する観点から, 他の国立高等専門学校へ人事交流により異動することがあります。

(2) 応募者に関わる個人情報(本校の教員選考のためのみに使用するものであり, 第三者に提供または公表することはありません)。

◇大阪大学大学院工学研究科マテリアル生産科学専攻
教授公募(二名)◇

募集人員 教授2名(内訳は下記のとおり)

- ・材料物性学講座担当教授 1名
- ・材料エネルギー理工学講座担当教授 1名

応募締切 2024年9月26日(木)必着

着任時期 2025年4月1日(以降できるだけ早い日)

応募方法 郵送または電子メール

*詳細については下記公募URLを参照下さい。

材料エネルギー理工学講座教授公募

和文 <https://www.eng.osaka-u.ac.jp/ja/topics/offering/21003/>

英文 <https://www.eng.osaka-u.ac.jp/en/topics/offering/21009/>

材料物性学講座教授公募

和文 <https://www.eng.osaka-u.ac.jp/ja/topics/offering/21006/>

英文 <https://www.eng.osaka-u.ac.jp/en/topics/offering/21011/>

集 会

◇レアメタル研究会◇

- 主 催 レアメタル研究会
- 主 宰 者 東京大学生産技術研究所 教授 岡部 徹
- 協 力 (一財)生産技術研究奨励会(特別研究会 RC-40)
- 共 催 東京大学マテリアル工学セミナー
レアメタルの環境調和型リサイクル技術の開発研究会
東京大学生産技術研究所 持続型エネルギー・材料統合研究センター
東京大学生産技術研究所 非鉄金属資源循環工学寄付研究部門(JX 金属寄付ユニット)

- 協賛 (公社)日本金属学会 他
- 開催会場 東京大学生産技術研究所
An棟2階 コンベンションホール
〒153-8505 東京都目黒区駒場4-6-1
(最寄駅: 駒場東大前, 東北沢, 代々木上原)
- 参加登録・問い合わせ: 岡部研 学術専門職員 宮崎智子
(参加登録: okabelab@iis.u-tokyo.ac.jp)
(問い合わせ: tmiya@iis.u-tokyo.ac.jp)

《2024年度 レアメタル研究会等の今後の予定》

- 第112回 2024年9月27日(金) (2024年度 第2回)
- 第113回 2024年11月15日(金) (2024年度 第3回)
★チタンシンポジウム(第8回)★(合同開催)
(関連イベント: 2024年11月22日(金)★日本学術会議主催
公開シンポジウム★)(会場: 日本学術会議講堂)
- 第114回 2025年1月10日(金) (2024年度 第4回)
★貴金属シンポジウム(第12回)+新年会★(合同開催)
- 第115回 2025年3月21日(金) (2024年度 第5回)

令和6年度 レアメタル研究会のご案内

(2024.6.28現在)

- 第112回 2024年9月27日(金) 14:00~
An棟2F コンベンションホール
リアル講演会+講演のネット配信(Zoom Webinar & YouTube)のハイブリッド研究会
テーマ: バッテリーメタルの現状と将来
午後2:00~ 講演【敬称略】
- レアアース, リチウム, ニッケルなどの現状と将来展望(仮)(60分)
豊田通商株式会社 金属資源部 技術チーム チームリーダー(兼)リバースサプライチェーン事業部 バッテリー3Rグループ 守山 武
- バッテリーメタルの現状と将来(40分)
東京大学 生産技術研究所 教授 岡部 徹
- コバルトの現状(資源, 製錬, 用途)と将来展望について(仮)(60分)
東京大学 生産技術研究所 特任教授 黒川晴正
<このあと総合討論を予定>
午後6:00~
研究交流会・意見交換会 @An棟2F ホワイエ

- 第113回 2024年11月15日(金) 14:00~
An棟2F コンベンションホール
★チタンシンポジウム(第8回)★(合同開催)
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: チタンの現状と将来
午後2:00~ 講演【敬称略】

- チタンの現状と将来(仮)(60分)
株式会社 大阪チタニウムテクノロジーズ 代表取締役社長 川福純司
- チタンの製錬プロセスについてのこれまでの研究とこれから挑戦したいこと(仮)(40分)
岩手大学理工学部 助教 関本英弘
- 溶融チタンから低酸素濃度のチタンを直接製造する革新的技術の開発(仮)(40分)
~チタン製品の爆発的普及へと期待~
東京大学 生産技術研究所 教授 岡部 徹
- 当社チタン事業の変遷(仮)(60分)
東邦チタニウム株式会社 常務執行役員 チタン事業部長 三戸武士

<このあと総合討論を予定>午後6:00~
研究交流会・意見交換会 @An棟2F ホワイエ

レアメタル研究会ホームページ

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

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

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

2024年度 関連研究会の予定

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

★産学連携と人材育成に関するシンポジウム★

(2024.4.22現在)

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

■講演会プログラム【敬称略】

司会 東京大学 生産技術研究所
非鉄金属資源循環工学寄付研究部門

特任教授 岡部 徹

・先端技術と人をつなぐデザイン、それを担う人材(40分)

東京大学 特別教授
東京大学 生産技術研究所
非鉄金属資源循環工学寄付研究部門 特任教授 山中俊治

・産学連携と人材育成の課題 ―産・学を経験して― (仮) (20分)

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

・大学という場での新しい価値創造の在り方(仮)(30分)

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

・私の考える理想の技術開発のかたち(30分)

東京大学 生産技術研究所
非鉄金属資源循環工学寄付研究部門 特任講師 大内隆成

・日本版サーキュラーエコノミーの実現を目指した産学連携 と人材育成(30分)

早稲田大学 理工学術院 教授
東京大学大学院 工学系研究科 教授
東京大学 生産技術研究所
非鉄金属資源循環工学寄付研究部門 特任教授 所 千晴

・JX 金属の学生に向けた活動と社員アイデア創出プラット フォーム『Idea Seed Bank』活動の紹介(30分)

JX 金属株式会社 技術本部技術戦略部
オープンイノベーション担当課長 主席技師 山岡利至

午後5:00~ 総合討論

統括と講評

JX 金属株式会社 取締役副社長執行役員 菅原静郎

写真撮影

午後6:00~

研究交流会・意見交換会 @ An棟1F レストラン・アーペ



2024年度オンライン教育講座 今後の予定

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

オンデマンド配信:オンライン教育講座 今後の予定

- ・金属製錬の熱力学 (配信:2024年8月1日(木)~8月30日(金))
- ・工業材料の応力・歪測定 (配信:2024年10月1日(火)~10月31日(木))
- ・構造材料(1) 鉄鋼材料編 (配信:2024年11月5日(火)~12月2日(月))

◇お申込みは、下記 URL よりご案内しております。

<https://jimmm.jp/event/online/index.html>

~ご参加お待ちしております。~



日本金属学会誌掲載論文
Vol. 88, No. 8 (2024)

—レビュー—

貴金属フリー亜鉛空気電池用触媒

シム ウェイジェン グエン マイタン 米澤 徹
訂正

Materials Transactions 掲載論文
Vol. 65, No. 8 (2024)

—Review—

Etching Behavior and Dielectric Film Formation
on Aluminum Foil Stocks for Electrolytic Capacitors: A Review
Nobuo Osawa

—Regular Article—

Materials Physics

Quantum Theory of the Effect of Increasing Weak
Electromagnetic Wave by a Strong Laser Radiation
in 2D Graphene

Tran Anh Tuan, Nguyen Dinh Nam,
Nguyen Thi Thanh Nhan and Nguyen Quang Bau

Estimation of Porosity for Sedimentary Rocks and
Volcanic Rocks from Sonic Log Data in the
Futagawa Fault Drilling

Susumu Shibutani, Weiren Lin, Terasu Sano,
Sumihiko Murata, Motohiro Fujii and Koichiro Sado

Microstructure of Materials

Processing-Microstructure-Property Relationship
in Governing High Strength-High Ductility Combination
in Fe-4Mn-4Ni-3Al-0.1C Steel

Linfeng Zhang, Kazuhiro Matsugi, Zhefeng Xu,
Yongbum Choi, Kenjiro Sugio and Yusuke Ochi

Mechanical Properties of $\text{Li}_{10.35}\text{Ge}_{1.35}\text{P}_{1.65}\text{S}_{12}$ with
Different Particle Sizes

Hanseul Kim, Kazuhiro Hikima, Kenta Watanabe,
Naoki Matsui, Kota Suzuki, Satoshi Obokata,
Hiroyuki Muto, Atsunori Matsuda, Ryoji Kanno
and Masaaki Hirayama

The Role of $\text{Y}_2\text{O}_3/\text{Hf}$ Co-Doping on the Microstructure
and Tensile Properties of Alumina-Forming
Co-Cr-Al-Ni ODS Superalloy

Hao Yu, Sosuke Kondo, Yasuyuki Ogino and Ryuta Kasada

Effect of Si Addition on the Mechanical Properties
and Material Structure of Al-Zn-Mg Alloys

Yusuke Sakurai

Effect of the Elemental Content of Bi and Pb on
the Properties of Sn-Bi-Pb Low Melting Point Alloys

Chengchao Niu and Zhuofei Song

Mechanics of Materials

Effects of Laser Peening on Surface and Bending
Fatigue Properties of Carburized Steel

Yuta Takeuchi, Nobuhiko Matsumoto, Takashi Asada
and Keiichiro Oh-ishi

Multi-Modal 3D Image-Based Simulation of
Hydrogen Embrittlement Crack Initiation in Al-
Zn-Mg Alloy

Ryota Higa, Hiro Fujihara,
Hiroyuki Toda, Masakazu Kobayashi, Kenichi Ebihara
and Akihisa Takeuchi

Inverse Estimation of Material Model Parameters
Using Digital Image Correlation and Ensemble-
Based Four-Dimensional Variational Methods

Sae Sueki, Akimitsu Ishii and Akinori Yamanaka

Examination of Impaction Efficiency of Sea-Salt
Particle for an Airborne Sea-Salt and a Corrosion
Sensor Using CFD Model

Yasuo Hattori, Hitoshi Suto, Naoto Kihara,
Hiromaru Hirakuchi and Junichi Tani

Experimental Investigation of Nano B_4C -NanoGr
Reinforced AA7075 Alloy Hybrid Nanocomposites

T.S. Krishna Kumar and Arunachalam Kandavel

Effect of Carbon Density at Grain Boundary on
Delayed Fracture Properties of Martensitic Steels

Ichiro Fujimoto, Tatsuya Okayama
and Ryosuke Matsumoto

Effect of Cut-Off Side Stiffness on Stretch Flange-
ability in High-Strength Steel

Takeshi Ogawa, Toyohisa Shinmiya, Yuji Yamasaki,
Eiji Iizuka, Yoshikiyo Tamai and Jiro Hiramoto

Materials Chemistry

Solvent Effects on Particle Size of Alumina
Produced by Corrosion and Sol-Gel Method

Daichi Sasaki, Zhang Xiong, Yoshihiko Oishi,
Kenta Kusumoto and Hideki Kawai

Relationship of the Thermal Decomposition Temperature
and Stretching Mode Wavenumber Shift
of Amine-Copper Formate Complex: FTIR Spectrum
Reveals the Decomposition Temperature of
Copper Formate Moiety

Kaori Kurosawa, Wakana Kanomata, Suzune Konno,
Gimyeong Seong, Shin-ichi Kondo, Takashi Naka,
Tadafumi Adschiri and Takanari Togashi

Whitening of Aluminum Surface by Anodizing at
High Current Density in Sulfuric Acid Solution

Tomo Hariyama, Kazunobu Ito, Teruyoshi Saito,
Sumitaka Watanabe and Sachiko Ono

Separation of Palladium and Rhodium from the
Spent Metal-Honeycomb Catalysts by Pulsed Discharge
without Chemical Additives

Chiharu Tokoro, Yuto Imaizumi, Taketoshi Koita,
Akiko Kubota, Yutaro Takaya, Keishi Oyama
and Md. Mijanur Rahman

Materials Processing

Fabrication of Electrodeposited Pure Zinc with Excellent Strength and Ductility Balance

Ryosuke Miyamoto, Hiroki Koto, Ryusei Arauchi
and Yorinobu Takigawa

Deposition of TiC Film by Surface Wave Plasma with Titanium Counter Electrode

Yusuke Ushiro, Ippei Tanaka, Yasunori Harada
and Takashi Ogisu

Engineering Materials and Their Applications

Machine Learning to Predict the Effect of Stress on Iron Loss and Its Frequency Dependence in Non-Oriented Electrical Steels

Kyohei Hayakawa, Isao Matsui, Yuichi Sekine
and Takaharu Maeguchi

会誌2024年秋期大会講演精選論文原稿募集 欧文誌 Selected Papers from JIMM Fall Meeting (2024)原稿募集

下記の投稿論文を募集いたします。多くのご投稿をお待ちしております。

◎日本金属学会誌「2024年秋期大会講演精選論文」89巻4号および5号(2025年)掲載

◎Materials Transactions「Selected Papers from JIMM Fall Meeting (2024)」66巻4号および5号(2025年)掲載

原稿締切 **2024年11月11日(月)**

予備登録、投稿および審査方法は、一般投稿論文に準ずる(ホームページ: 会誌・欧文誌投稿の手引き・執筆要領参照)。
欧文誌掲載論文は投稿掲載費用を必ず負担する。(会誌掲載論文は投稿掲載費用無料)

問合せ先 会誌・欧文誌編集委員会 E-mail: sadoku@jimm.jp

欧文誌編集委員会からのお知らせ

特集企画の投稿募集

下記の特集への論文投稿を募集しています。たくさんのご投稿をお待ちしております。

詳細は本会 Web サイト (<https://jimm.jp/publication/materials-transactions/news.html>) をご覧ください。

■Special Issue on ISSNIM 2024 - Integrated Computer Simulation for Materials and Process Engineering

掲載予定号: 第66巻第7号(2025年)

原稿締切日: **2024年9月2日(月)**

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

掲載予定号: 第66巻第5号(2025年)

原稿締切日: **2024年11月1日(金)**

問合せ先 会誌・欧文誌編集委員会 E-mail: sadoku@jimm.jp

会報編集委員会からのお知らせ

「まてりあ」今後の特集企画予定

- 生体組織材料表面の設計 (9号)
- 過酷環境下における材料強度と寿命 (11号)
- 最先端量子ビームで切り拓く熱電変換材料の研究最前線 (64巻1号)

まてりあ第63巻9号 予告

[金属素描] No.36 錫(Tin)

特集「生体組織材料表面の設計」

[最近の研究] 電子誘電体 TmFe_2O_4 の圧電性および強誘電性
の実証

…漆原大典 小西伸弥 浅香 透 田中勝久

—他—

—編集の都合により変更になる場合もございます—

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
2024年 8 月				
1～30	オンデマンド配信：オンライン教育講座「金属製錬の熱力学」(7号521頁)	日本金属学会	TEL 022-223-3685 meeting@jimm.jp	8.8
2	第132回シンポジウム「カーボンニュートラルに対応する自動車へのアルミニウム活用最前線」(芝浦工大)	軽金属学会	TEL 03-3538-0232 https://www.jilm.or.jp/	定員 120名
2～4	第34回顕微鏡サマースクール(東京)	日本顕微鏡学会	TEL 03-6457-5156 jsm-post@microscopy.or.jp https://www.em-summer-school.com/	
5	第29回日本磁気学会初等磁気工学講座(講義と演習による基礎講座)(東京+オンライン)	日本磁気学会	TEL 03-5281-0106 msj@bj.wakwak.com https://www.magnetics.jp/education/fs_029/	7.5
6～8	第47回日本磁気学会サマースクール(東京+オンライン)	日本磁気学会	TEL 03-5281-0106 msj@bj.wakwak.com https://www.magnetics.jp/education/ss_047/	7.5
8～9	表面分析実践講座2024～実践！最新走査電子顕微鏡実習 実際の作業を通して身につける最新技術～(東京)	日本表面真空学会	TEL 03-3812-0266 office@jvss.jp https://www.jvss.jp/	7.11
19～20	金属第64回 鉄鋼第67回 中国四国支部講演大会	中国四国支部・日本鉄鋼協会中国四国支部	tatara@riko.shimane-u.ac.jp	
19～21	第261回塑性加工技術セミナー「はじめての塑性力学」(準備編・基礎編・応用編)(オンライン)	日本塑性加工学会	http://www.jstp.or.jp	定員 60名
26	日本鉄鋼協会東北支部 地区講演会および若手研究者フォーラム	日本鉄鋼協会東北支部	goro.miyamoto.e8@tohoku.ac.jp	
21～22	第54回初心者のための有限要素法講習会第1部(演習付き)(京都)	日本材料学会	TEL 075-761-5321 jimu@office.jsms.jp https://www.jsms.jp/	8.5
26～27	オンライン教育講座「結晶学の基礎(オンライン)」(本号591頁)	日本金属学会	TEL 022-223-3685 meeting@jimm.jp https://jimm.jp/event/online/2024/group_002.html	8.19
27	第8回統合的先端研究成果発表会(ハイブリッド開催)	軽金属奨学会	TEL 06-6271-3179 grant@lm-foundation.or.jp http://www.lm-foundation.or.jp/	
27	熱測定講習会2024(東京理科大)	日本熱測定学会	TEL 03-6310-6831 netsu@mbd.nifty.com https://www.netsu.org/	
29～30	第10回初心者にもわかる信頼性工学セミナー(オンライン)	日本材料学会	TEL 075-761-5321 http://sinrai.jsms.jp/	8.9
29～30	第54回初心者のための有限要素法講習会第2部(演習付き)(神戸)	日本材料学会	TEL 075-761-5321 jimu@office.jsms.jp https://www.jsms.jp/	8.5
30	2024茨城講演会(茨城大)	日本機械学会関東支部	ibarakiconf24@jsme.or.jp https://www.jsme.or.jp/conference/ibarakiconf24/index.html	
30	第262回塑性加工技術セミナー「有限要素法 入門セミナー」(日大)	日本塑性加工学会	http://www.jstp.or.jp	定員 50名
2024年 9 月				
2～3	第18回水素若手研究会(北大)	水素若手研究会	hydrogen.wakate@gmail.com https://sites.google.com/view/hydrogen-wakate/	7.19
3～4, 10.1～9	初心者のための電気化学測定法-実習編(現地開催/東京理科大+オンデマンド配信)	電気化学会	TEL 03-3234-4213 sekine@electrochem.jp https://www.electrochem.jp/seminar/	
5～6	SPring-8 シンポジウム2024(九大+オンライン)	SPring-8 ユーザー協同体(SPRUC)他	TEL 0791-58-2785 sp8sympo2024@spring8.or.jp http://www.spring8.or.jp/ja/science/meetings/2024/sp8sympo2024/	
6～8	2024年度工学教育研究講演会(九大伊都キャンパス)	日本工学教育協会他	TEL 03-5442-1021 kawakami@jsee.or.jp http://www.jfes.or.jp/	
10～12	資源・素材2024(秋田)-2024年度資源・素材関係学協会合同秋季大会(秋田大)	資源・素材学会	TEL 03-3402-0541 info@mmij.or.jp	
10～12	第37回秋季シンポジウム(名大)	日本セラミックス協会	TEL 03-3362-5232 fall37@ceramic.or.jp https://fall37.ceramic.or.jp/	
11～13	2024年度 高温材料の変形と破壊研究会(日田市)(6号428頁)	研究会No.83	saruta.mamiko@nims.go.jp	7.19
11～13	2024年度 微小領域の力学特性評価とマルチスケールモデリング研究会(日田市)(7号515頁)	研究会No.82	iguchi.rie@nims.go.jp	7.19
12～14	第26回日本感性工学会大会(東京)	日本感性工学会	TEL 03-3666-8000 jske@jske.org https://www.jske.org/taikai/jske26	
13	第358回塑性加工シンポジウム「金型寿命向上に有効な表面処理技術の最前線」(名城大+オンライン)	日本塑性加工学会	http://www.jstp.or.jp	定員 80名
17～19	日本実験力学会2024年度年次講演会(山形大学)	日本実験力学会	TEL 025-368-9310 office-jsem@clg.niigata-u.ac.jp https://jsem.jp/event/Annual24/index.html	事前 7.21

開催日	名称・開催地・掲載号	主催	問合せ先	締切
18~19	第36回疲労シンポジウム(函館)	日本材料学会	TEL 075-761-5321 jimuj@jsms.jp http://fatigue.jsms.jp	講演 6.14
18~20	日本金属学会秋期講演大会(大阪大学豊中キャンパス)(本号580頁)	日本金属学会	TEL 022-223-3685 annualm@jimm.jp	講演 7.5 高校生ポスター 7.12
24	第12回「高校生・高専学生ポスター発表」(オンライン)(7号505頁)			参加 8.30
20	日本鉄鋼協会・日本金属学会 第13回女性会員のつどい(阪大)(本号584頁)	日本金属学会・鉄鋼協会	TEL 022-223-3685	
20	産学連携と人材育成に関するシンポジウム(東大+オンライン)(本号595頁)	東京大学 生産技術研究所 非鉄金属資源循環工学寄付研究部門(JX 金属寄付ユニット)	t-ikedai@iis.u-tokyo.ac.jp http://www.metals-recycling.iis.u-tokyo.ac.jp	
24	第95回技術セミナー「大気腐食の評価技術と予測」(東京)	腐食防食学会	TEL 03-3815-1161 naito-113-0033@jcorr.or.jp https://www.jcorr.or.jp/yotei/95.html	
24~26	第21回 日本熱電学会学術講演会(TSJ2024)(産総研つくば)	日本熱電学会	TEL 092-583-7948 suekuni.koichiro.063@m.kyushu-u.ac.jp https://www.thermoelectrics.jp/conference.html	
26~27	第16回「役に立つ真空技術入門講座」(大阪公立大+オンライン)	日本表面真空学会 関西支部	TEL 072-247-6162 syojin-yakunitatsu@jvss-kansai.jp https://www.jvss.jp/	定員 200名
26~28	第60回熱測定討論会(京都府立大)	日本熱測定学会	TEL 03-6310-6831 netsu@mbd.nifty.com https://www.netsu.org/60touron/index.html	
27	レアメタル研究会(東大生産技研/ハイブリッド)(本号595頁)	レアメタル研究会	TEL 03-5452-6314 tmiya@iis.u-tokyo.ac.jp https://www.okabe.iis.u-tokyo.ac.jp/japanese/index_j.html	
2024年10月				
1~31	オンデマンド配信 オンライン教育講座「工業材料の応力・歪測定」(本号592頁)	日本金属学会	TEL 022-223-3685 meeting@jimm.jp	
2~4	第43回電子材料シンポジウム(EMS-43)(樺原)	電子材料シンポジウム運営・実行委員会	ems43-query@ems.jpn.org http://ems.jpn.org/	
2~4	ADMETA Plus 2024(Advanced Metallization Conference 2024: 33rd Asian Session)(東大+オンライン)	応用物理学会	TEL 03-5821-7120 jimukyoku@admeta.org https://www.admeta.org/	
8~9	第6回EBSD法による損傷評価講習会(京都+オンライン)	日本材料学会	TEL 075-761-5321 jimuj@office.jsms.jp http://www.jsms.jp/	9.11
8~9	第14回材料の衝撃問題シンポジウム(京都)	日本材料学会	http://www.jsms.jp impact14@office.jsms.jp	講演 6.28
8~10	第10回材料 WEEK(京都)	日本材料学会	TEL 075-761-5321 jimuj@office.jsms.jp http://www.jsms.jp/	
10~11	第185回塑性加工学講座(Web開催)「板材成形の基礎と応用~基礎編~(オンライン開催)」	日本塑性加工学会	http://www.jstp.or.jp	定員 50名
14~18	第4回J-PARCシンポジウム「J-PARCの将来とJ-PARCが創る未来」(水戸)	J-PARCセンター	https://j-parc.jp/symposium/j-parc2024/	
16, 30	第253・254回西山記念技術講座「最新シミュレーション技術の進歩と鉄鋼業への展開」(大阪)(東京)	日本鉄鋼協会	TEL 03-3669-5933 educact@isij.or.jp https://isij.or.jp/event/event2024/nishiyama253.html	
18~19	第96回塑性加工技術フォーラム「塑性加工技術と金型高度化の最前線」(岡谷)	日本塑性加工学会 他	http://www.jstp.or.jp	定員 50名
18~20	日本銅学会第64回講演大会(宇都宮)	日本銅学会	TEL 03-6803-0587 dou-gakkai@copper-brass.gr.jp https://www.copper-brass.gr.jp/?p=7483	
18~20	第37回計算力学講演会(仙台)	日本機械学会	TEL 03-4335-7610 https://www.jsme.or.jp/conference/cmdconf24/index.html	
20~24	2024年日本表面真空学会学術講演会(北九州)	日本表面真空学会	taikai2024@jvss.jp https://pub.conf.itatlas.jp/en/event/jvss2024 https://www.jvss.jp/conference/iss10/	
20~24	The 10th International Symposium on Surface Science (ISSS-10)(北九州)	日本表面真空学会	TEL 03-3812-0266 iss10@jvss.jp https://www.jvss.jp/conference/iss10/	
23~24	第52回日本ガスタービン学会定期講演会(高松)	日本ガスタービン学会	TEL 03-3365-0095 gtsj-office@gtsj.or.jp http://www.gtsj.or.jp/	
24	第64回「現場の硬さ試験」講習会-基礎とその活用-(東京)	日本材料試験技術協会	TEL 047-431-7451 gyomu2@ystl.jp http://www.mtraj.jp	10.17
28~29	オンライン教育講座「マルチスケール材料科学」(本号590頁)	日本金属学会	TEL 022-223-3685 meeting@jimm.jp	10.21
28~30	第45回日本熱物性シンポジウム(長岡市)	日本熱物性学会	TEL 03-5452-6218 jstp@iis.u-tokyo.ac.jp http://jstp-symp.org/symp2024/index.html	
29	公開シンポジウム「バイオマテリアル・生体医工学の研究開発戦略」(仙台)	日本学術会議材料工学委員会他	jsb_symposium2024.com	

開催日	名称・開催地・掲載号	主催	問合せ先	締切
29～31	第49回コロージョンセミナー 主題：様々な腐食・劣化に対応できる腐食防食研究者・技術者を目指して(名古屋)	腐食防食学会	TEL 03-3815-1161 naito-113-0033@jcorr.or.jp	参加 10.21
31～11.1	第60回 X 線分析討論会(高知)	日本分析化学会 X 線分析研究懇談会	TEL 079-267-4929 murama@eng.u-hyogo.ac.jp https://xbun.jsac.jp/conference/no60.html	
2024年11月				
1～3	第31回機械材料・材料加工技術講演会(M & P 2024)(富山大)	日本機械学会	https://jsmempd.com/conference/ mpdconf/2024/	
5～12.2	オンデマンド配信 オンライン教育講座「構造材料(1)鉄鋼材料編」	日本金属学会	TEL 022-223-3685 meeting@jimm.jp	
6～7	NIMS AWARDシンポジウム2024(つくば)	物質・材料研究機構	TEL 029-859-2240 https://www.nims.go.jp/nims-award-symposium/	
8～10	軽金属学会第147回秋期大会(群馬大)	軽金属学会	https://www.jilm.or.jp/	
8～10	第75回塑性加工連合講演会(琉球大)	日本塑性加工学会	TEL 03-3435-8301 http://www.jstp.jp/	
13～15	第65回高圧討論会(盛岡)	日本高圧力学会	TEL 070-5545-3188 touronkai65@highpressure.jp http://www.highpressure.jp/new/65forum/	参加事前 9.13
13～15	第71回材料と環境討論会(那覇)	腐食防食学会	TEL 03-3815-1161 ysm.hng-113-0033@jcorr.or.jp https://www.jcorr.or.jp/yotei/71.html	
15	レアメタル研究会(東大生産技研/ハイブリッド) (本号595頁)	レアメタル研究会	TEL 03-5452-6314 tmiya@iis.u-tokyo.ac.jp https://www.okabe.iis.u-tokyo.ac.jp/ japanese/index_j.html	
15	第26回ミレニアム・サイエンスフォーラム(東京)	ミレニアム・サイエ ンス・フォーラム	TEL 090-8024-7568 msf@oxinst.com http://www.msforum.jp/	
17～22	15th International Symposium of Atomic Level Characterizations for New Materials and Devices '24(ALC'24)(松江)	日本表面真空学会	TEL 03-3812-0266 office@jvss.jp https://www.jvss.jp/division/mba/alc/ alc24/	
21	第75回白石記念講座 データ駆動型材料開発の最前線とその適用例(東京)	日本鉄鋼協会	TEL 03-3669-5933 educact@isij.or.jp https://www.isij.or.jp/event/event2024/ shiraishi75.html	
22	日本学術会議公開シンポジウム「サステナブル社 会への移行における資源循環の役割」(東京)	日本学術会議 材 料工学委員会, 材 合工学委員会, 材 境学委員会他	TEL 03-5286-3320 info@mmij.or.jp	
25～27	第45回 超音波エレクトロニクスの基礎と応用 に関するシンポジウム(東京)	超音波エレクトロ ニクス協会	TEL 03-3259-0766 use-sponsor-app@iuse.or.jp https://www.use-jp.org/	
28～29	オンライン教育講座「構造材料(2)非鉄材料編」	日本金属学会	TEL 022-223-3685 meeting@jimm.jp	
2024年12月				
2～4	The 22nd Asian BioCeramics Symposium (ABC2024)(第22回アジアバイオセラミックス会 議)(北九州)	日本セラミックス 協会生体関連材料 部会	TEL 093-695-6025 tmiya@life.kyutech.ac.jp http://www.ceramic.or.jp/bseitai/ ABC2024/index.html	
9～11	第50回固体イオニクス討論会(豊中)	固体イオニクス学 会	TEL 022-217-5341 ssij@ssj-j.org https://www.ssi-j.org/symp/ssij50/	
11～13	Asian Thermal Spray Conference 2024(アジア溶 射会議2024)(東北大)	日本溶射学会	TEL 06-6722-0096 jtss@jtss.or.jp	
2025年1月				
10	レアメタル研究会(東大生産技研/ハイブリッド) (本号595頁)	レアメタル研究会	TEL 03-5452-6314 tmiya@iis.u-tokyo.ac.jp https://www.okabe.iis.u-tokyo.ac.jp/ japanese/index_j.html	
2025年3月				
8～10	日本金属学会春期講演大会(東京都立大学南大沢 キャンパス)予定	日本金属学会	TEL 022-223-3685 annualm@jimm.jp	63-11 会告予定
21	レアメタル研究会(東大生産技研/ハイブリッド) (本号595頁)	レアメタル研究会	TEL 03-5452-6314 tmiya@iis.u-tokyo.ac.jp https://www.okabe.iis.u-tokyo.ac.jp/ japanese/index_j.html	
2025年7月				
1～4	COMPSAFE2025(第4回安心・安全・環境に関 する計算理工学国際会議)(神戸)	日本計算工学会他	compsafe2025@compsafe2025.org	
2025年9月				
17～19	日本金属学会秋期講演大会(北海道大学)	日本金属学会	TEL 022-223-3685 annualm@jimm.jp	64-5号 会告予定



新 入 会 員

(2024年5月21日～2024年6月20日)

正 員

木下秀吉 久保孝文 松田産業株式会社
Kim Jungryang 国立研究開発法人産業技術総合研究所 高木佐登志 株式会社ストルアス

学 生 員

赤谷優太郎 芝浦工業大学	河野龍星 茨城大学	中塚 裕 関西大学
朝田有希子 芝浦工業大学	河邊崇徳 九州大学	西 彩那 関西大学
浅野颯斗 中部大学	ケプラー仁 群馬大学	西村侑真 大阪公立大学
荒木琢真 北海道大学	コウカキ 東北大学	長谷川琢斗 北海道大学
飯塚汰斗 金沢工業大学	小口拓海 北海道大学	濱脇柚貴 関西大学
井口大暉 九州大学	近藤輝一 富山大学	平岡創真 大阪大学
池田憲哉 東京工業大学	堺 悠真 北海道大学	深代基生 東京大学
石黒祐輔 富山大学	坂本青音 熊本大学	松尾泰之介 九州大学
伊藤光平 立命館大学	作本 丞 九州大学	松田顕汰 千葉工業大学
植田海人 京都大学	笹川貴朗 関西大学	真柳己信 早稲田大学
上田航平 大阪公立大学	佐藤琢巳 名古屋大学	村上翔太 兵庫県立大学
江藤優吾 東京工業大学	SANPHIBOON WANLALAK 富山大学	村木亮太 横浜国立大学
榎田月輝 東京工業大学	東海林瑞希 芝浦工業大学	村田貫太 九州大学
王思奇 東北大学	白澤桃花 九州大学	村山 希 大阪大学
岡田典之 東北学院大学	杉藺統真 九州大学	横井瑞穂 東北大学
加藤幸汰 京都大学	高木美由 名古屋大学	横山 颯 富山大学
川口健太 群馬大学	長 慎也 東京工業大学	吉田祐梨 秋田大学
鞆嶋春輝 東京工業大学	中川雄斗 富山大学	渡辺太一 関西大学

外国一般会員

蔡 永福

外国学生会員

TIWARI Alavya 北海道大学 王 瀟 東北大学 張 博信 大阪大学

ユース会員

齋藤くらら 辻 陽也 大阪大学

2023, 2024年度会報編集委員会 (五十音順, 敬称略)

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

まてりあ 第63巻 第8号 (2024) 発行日 2024年8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 発行人 谷山 明
〒980-8544 仙台市青葉区一番町一丁目14-32 印刷所 小宮山印刷工業株式会社
TEL 022-223-3685 FAX 022-223-6312 発売所 丸善雄松堂株式会社
〒104-0033 東京都中央区新川 1-28-23

ALLOYS & METALS

品名	純度	形状	品名	純度	形状	品名	純度	形状
純金属			高純度金属			中間合金		
高純度アルミニウム	99.99%	約1kgインゴット	アルミニウム	99.999%	粒状100g入	磷	P>14.5%	粒状
アルミニウム	>99.7%	〃	アルミニウム	〃	約100g塊	シリコン	Si 15%	約1kgインゴット
アルミニウム3N粒	99.9%	粒状1kg入	ビスマス	99.9999%	粒状100g入	マンガン	Mn 25%	〃
アルミニウム4N粒	99.99%	〃	ビスマス	〃	約100g塊	マグネシウム	Mg 50%	約800gインゴット
アルミニウム粉	99.7%	粉末	高純度クロム(4N5)	99.995%	薄片状	クロム	Cr 10%	約1kgインゴット
銀	99.99%	粒状	無酸素銅	99.99%	10×10×1mm	テルル	Te 50%	〃
ポロクリスタル	99.4%	3~8mm小塊	鉄(マイロンSHP)	99.99%	25×25×2mm	コバルト	Co 10%	〃
ポロンアモルファス	95~97%	粉末	ゲリウム	99.9999%	粒状25g入	ニッケル	Ni 30%	〃
ビスマス	99.99%	針状	ゲルマニウム	99.999%	約50g塊	鉄	Fe 100%	〃
コバルト粒(ロシア産)	99.3%	粒状	インジウム	99.999%	粒状100g入	チタン	Ti 50%	〃
電解コバルト(FB)	99.9%	約25×25×10mm	インジウム	〃	約100g塊	ジルコニウム	Zr 50%	〃
金属クロム	99%	塊状	インジウム	99.999%	薄片状	ボロン	B 2%	粒状
金属クロム	99%	薄片状	錫	99.999%	粒状100g入	アルミ	Cu 40%	約5~7kgインゴット
クロム粉	99%	粉末500g入	錫	〃	約100g塊	アルミ	〃	〃
電気	99.99%	約25×50×10mm	アンチモン	99.9999%	粒状100g入	アルミマグネシウム	Mg 20%	約2kgインゴット
電解鉄(アトミロンMP)	99.9%	小片状	アンチモン	〃	約100g塊	アルミマンガン	Mn 10%	約5kgインゴット
電解鉄(アトミロンYL)	〃	小片状25kg入	テール	99.9999%	約100g塊	アルミニウム	Ni 20%	〃
電解鉄(アトミロンFP)	〃	〃	テール	〃	約100g塊	アルミクロム	Cr 5%	〃
電解鉄(アトミロンXL)	〃	〃	亜鉛	99.999%	約100g塊	アルミチタン	Ti 5%	約4~5kgインゴット
電解鉄粉	99%	粉末1kg入	亜鉛	〃	約100g塊	アルミシリコン	Si 25%	〃
ハフニウム	99.6%	スポンジ小塊	亜鉛	99.9999%	約100g塊	アルミコバルト	Co 5%	〃
インジウム	99.99%	塊状	亜鉛	〃	約100g塊	アルミモリブデン	Mo 5%	〃
マグネシウム200	99.9%	約200g塊	亜鉛	〃	5φ×150mm	アルミタングステン	W 2.5%	〃
マグネシウム100(プリン型)	99.9%	約100g塊	亜鉛	〃	塊状	アルミベリリウム	Be 2.5%	約50gインゴット
電解マンガン	99.9%	薄片状	チタン	99.98%	〃	アルミ鉄	Fe 50%	塊状
モリブデン粉	99.9%	粉末	高純度シリコンスクラップ	99.999%	〃	アルミジルコニウム	Zr 5%	約5kgインゴット
ニオブグラニュー	99.9%	3~10mm小塊	レアアース金属			アルミボロン	B 4%	約200gインゴット
ニオブ粉	〃	粉末	イットリウム	99.9%	塊状、削状、粉状	アルミバナジウム	V 50%	3~10mm小塊状
電気ニッケル	99.99%	25×25×10mm	ランタン	〃	〃	アルミストロンチウム	Sr 10%	約100gインゴット
ニッケルベレット	99.97%	6~12mm球状	プラセオジウム	〃	〃	アルミカルシウム	Ca 10%	約2.5kgインゴット
レニウム粉	99.99%	粉末	ネオジウム	〃	〃	ニッケルボロン	B 15%	1~30mm小塊状
ルテニウム粉	99.9%	〃	サマリウム	〃	〃	ニッケルニオブ	Nb 60%	塊状
アンチモン	99.9%	塊状	イッテルビウム	〃	〃	ニッケルマグネシウム	Mg 50%	塊状
金属シリコン(中国産)	99%	〃	テルビウム	〃	〃	コバルトボロン	B 15%	1~30mm小塊状
金属シリコン(ブラジル産)	〃	〃	ジスプロシウム	〃	〃	磷	P 5%	インゴット
錫インゴット	99.99%	約1kgインゴット	ホルミウム	〃	〃	Uアロイ(低融点合金)		
錫	〃	粒状	エルビウム	〃	〃	Uアロイ 47	融点47±2°C	約500gインゴット
タンタル	99.9%	3~10mm小塊	ガドリニウム	〃	〃	Uアロイ 60	60±2°C	〃
タンタル粉	〃	粉末	ツリウム	〃	〃	Uアロイ 70	70±2°C	〃
テルル	99.99%	小球状	ルテチウム	〃	〃	Uアロイ 78.8	78.8±2°C	〃
スポンジチタン	99.7%	スポンジ塊	セリウム	〃	〃	Uアロイ 91.5	91.5±2°C	〃
チタン板	JIS1種	250×250×1mm	ユーロピウム	〃	〃	Uアロイ 95	95±2°C	〃
バナジウム	99.7%	3~10mm小塊	ミッシュメタル	TRE>97%	5.4φ×6mm200g入	Uアロイ 100	100±2°C	〃
バナジウム粉	〃	粉末	フェロアロイ			Uアロイ 124	124±2°C	〃
タングステン粉	99.9%	〃	フェロモリブデン	Mo 60%	3~10mm小塊状	Uアロイ 150A	150±2°C	〃
タングステンスクラップ	99%	板状	フェロニオブ	Nb 60%	10~30mm			
亜鉛インゴット	99.99%	約2kgインゴット	フェロバナジウム(太陽鋳工製品)	V75~85%	10~30mm			
亜鉛	〃	粒状	フェロボロン	B 20%	1~30mm			
ジルコニウム	>99.5%	スポンジ塊	カルシウムシリコン	Ca30%Si60%	小塊状			
			フェロホスホル(リン鉄)	P20~28%	塊状			

お問い合わせは、必ず下記事項をご記入の上、FAXしてください。

「社名」または「大学名」、および「所属と名前」、個人の方は「名前」
 「郵便番号・住所・電話・FAX」・「商品名・純度・形状・希望数量」
 見積・注文でお急ぎの場合は「至急」と明記して下さい。

FAX (03)
3294-9336

株式会社 **平野清左衛門商店**
 〒101-0047 東京都千代田区内神田1丁目5番2号 TEL(03)3292-0811

商品の詳細はホームページでご覧になれます。
<http://1921seizaemon.jp/>

●土曜・日曜・祭日休業 ●手形取引はいたしません
 ●輸出はせず国内取引のみ

未来を先導する領域を開拓し、世界に発信する

2024年秋期
第175回
講演大会

公益社団法人

日本金属学会

The Japan Institute of Metals and Materials

2024年

会期

9月18日(水) ▶▶ 20日(金)・25日(水)

会場

大阪大学 豊中キャンパス

25日のみ
オンライン

〒560-0043 大阪府豊中市待兼山町1



～日本金属学会・日本鉄鋼協会合同懇親会開催・参加募集～

2024年9月18日(水) 18:30～20:30 千里阪急ホテル 西館2F「仙寿」

ご予約締切: 8月23日(金) 10,000円 当日申込 12,000円

公募シンポジウム

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

企画シンポジウム

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

国際シンポジウム

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

事前参加申込締切: 2024年 8/30(金)

参加方法の詳細はホームページで公開



★詳細は、まてりあ本号会告(582頁)または
本会ホームページをご覧ください。

～皆様のご参加をお待ちしております。～

問
合
先



公益社団法人
日本金属学会 講演大会係

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

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

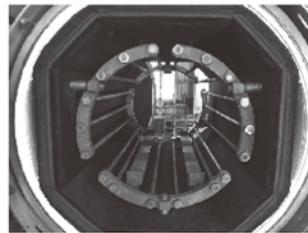


高断熱+省エネ

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

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

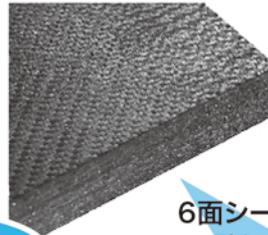
高温真空炉



カーボンヒーター



シール



6面シート
貼り



カーボンフェルト

CO₂削減



メカニカルカーボン工業株式会社

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

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

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



鉄、コバルト、ニッケルからチタン、ニオブまで



真空誘導溶解炉 ならお任せください!

コールドクルーシブル

耐火物ルツボ

真空誘導溶解炉

水冷ロール(アモルファス)など、
様々な鑄造方式にも対応可能!

納入事例

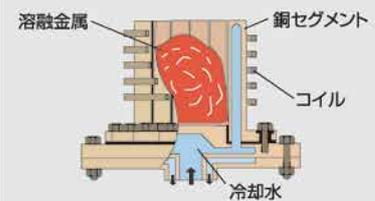


水冷ロール鑄造



炉内

コールドクルーシブルの原理



シンフォニアテクノロジー株式会社
産業インフラ営業部

〒105-8564 東京都港区芝大門1-1-30 芝NBFタワー
☎03-5473-1832

受託溶解はお任せください!

詳細は
こちら ▶



M/A、エネルギー関連材料、機能性セラミックス、環境リサイクル、電気電子材料等の開発に不可欠な

ドイツ フリッチュ社製遊星型ボールミル

“NANO領域” PREMIUM LINE P-7.



本体価格(税別):
2,350,000円~

容器がセットされる様子。

明日の遊星型ボールミルはこれだ。

特色

1. 弊社Classic Line P-7と比べて250%の粉碎パワーUP
自転：公転比率：1：-2. MAX 1,100/2,200rpm
粉碎エネルギー：MAX 94G(Classic Line P-7では46G)
2. 容器を本体に内蔵。
外部に飛び出す危険性は皆無に。
3. 容器のサイズは20, 45,
80ccの3種類。
雰囲気制御容器も多数用意。
4. 容器のセット、取り出しも
極めて容易に。



CLASSIC LINE 遊星型ボールミル P-5/4, P-6, P-7

premium lineと並んで従来どおりの
遊星型ボールミルトリオも併せて
ご提供いたします。



CLASSIC LINE 雰囲気制御容器一例

遊星型ボールミルの パイオニア



本体価格(税別):
3,000,000円~

フリッチュ社の技術で 容器1個で遊星型に



本体価格(税別):
1,350,000円~

微量の試料を 対象に



本体価格(税別):
1,450,000円~

●通常の容器、雰囲気制御容器ともボールも含めて次ぎの材質を御使用いただけます。メノー、アルミナ、ジルコニア、チッカ珪素、ステンレス、クロム、タングステンカーバイト、プラスチックポリアミド ●容器のサイズ。500, 250, 80, 45, 12cc。 ●乾式のみならず湿式での粉碎が可能。またISO9001, TUEV, CE等の国際安全基準をクリアー

カタログおよび価格表は弊社にお問い合わせください

フリッチュ・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