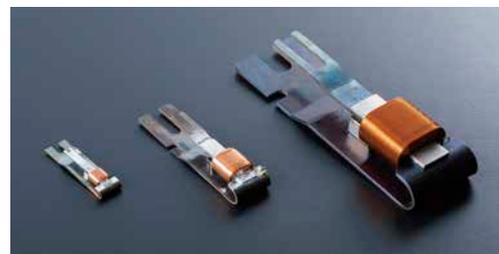


# Materia Japan

- 金属素描 ～ナトリウム～
- 特集「磁歪・逆磁歪材料の基礎と振動発電への応用」
- 科学・技術と社会の関係を考える  
—1. 科学・技術から科学技術へ—
- 講義ノート 焼結の基礎—理論的背景から実際まで—  
IV. 通電支援焼結の展開
- 新技術・新製品
- 新企画 思い出の教科書, この1冊!

# まてりあ



Vol.59 MTERE2 59 (1) 1~66 (2020)

2020

1

# 溶質原子の定量 メカニカルスペクトロスコピー

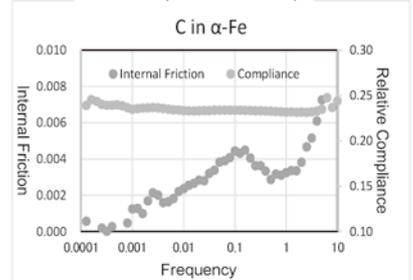
物質中の溶質原子は微量でその組織の性質を変化させます。当然ながらその含有量によって効果が異なるためにその分析測定が必要です。しかし化学分析や蛍光 X 線分析などでは析出したフリー原子も定量され、組織中に存在する溶質原子のみの定量はできません。そこで溶質原子のひずみエネルギーを検出するメカニカルスペクトロメータ MS 型（強制振動型内部摩擦測定装置）が力を発揮します。

樹脂などと違って金属やセラミックスなどで非常に高精度に適用できる装置は世界的にも弊社の MS 型のみとなっています。右のグラフの 0.1Hz 付近のピークは 30ppm の溶質 C の内部摩擦ピークです。弊社の雑居ビルという悪条件下でもこのように安定した検出を可能にしました。

汎用的な JE, JG 型や EG-HT 型だけでなく、特殊な最先端研究用の MS 型や弾性定数測定用の CC 型などを開発し、最先端の材料物性研究へのお手伝いをさせていただきます。



MS-LHT (-150°C~500°C)



**Cij 測定は力学特性から組織解明を可能に**

## 電磁超音波共鳴式 弾性率・弾性定数装置 CC II - シリーズ

- 異方性単結晶から多結晶体まで
- 弾性定数(弾性スティフネス Cij)も弾性率も
- 5mm 程度の立方体、直方体から円柱、円板、薄板(0.2mm)まで
- 室温用、高温用  
(常用 1000°C 最高 1200°C)
- 阪大基礎工 平尾・荻研開発

CC2-HT



**弾性率と内部摩擦の高温測定で最高の装置**

## 高温弾性率等同時測定装置 EG-HT

- 最も信頼性の高い高温測定が可能。  
粘性による振動数依存誤差が最小。
- 強力共振機構で難共振材に対応。  
難共振時の偽振動が最少。
- 多くの測定条件、測定項目に対応。  
ヤング率、剛性率測定  
ポアソン比算出  
温度依存性、ひずみ依存性  
2種の内部摩擦測定
- 最高 1200°C EG-HT&LT



## 室温や比較的低温で最も信頼性の高い装置 自由共振式弾性率、内部摩擦測定装置 JE-RT (ヤング率) & JG-RT (剛性率)

- 高精度・簡単操作・高再現性・迅速測定  
非接触加振、非接触検出  
試料も置くだけ
- 幅広い試料形状 (室温装置)  
短冊状でも細線・丸棒でも  
薄く・小さいものから厚く長いものまで

JE-RT  
& JG



## 強制振動式内部摩擦測定装置 メカニカルスペクトロメーター MS シリーズ

- 温度一定で加振エネルギー(振動数)を変えて内部摩擦変化を測定。(温度変化による物性変化を除外)
- 従来装置に比べて高分解能、高感度、高安定
- 測定や温度制御機構の改良により液体窒素の消費量が激減。長時間測定にも無人安定
- 悪条件下でも安定測定向上



MS-LHT

共振法応用の弾性率や内部摩擦等の物性測定・試験・計測装置の開発専門企業

日本テクノプラス株式会社 <http://www.nihon-tp.com/>

06-6390-5993 info@nihon-tp.com 〒532-0012 大阪市淀川区木川東 3-5-21 第3丸善ビル

# 1

2020  
Vol.59  
No.1

# まてりあ

巻頭言	年頭のご挨拶 乾 晴行	1
紹介	公益社団法人日本金属学会の組織と活動概況	2
金属素描	No. 7 ナトリウム(Sodium) 森戸春彦	3

## 特集「磁歪・逆磁歪材料の基礎と振動発電への応用」

	企画にあたって 春本高志 藤枝 俊 細川裕之 三井好古 梅津理恵	5
	Fe-Ga 合金を利用した振動発電技術とその電池フリー IoT への応用展開 上野敏幸	6
	振動発電用の Fe-Ga 合金単結晶の逆磁歪効果 藤枝 俊 柁 修一郎 川又 透 志村玲子 石山和志 福田承生 鈴木 茂	10
	Fe-Co 系磁歪合金を用いた複合材料の振動・衝撃発電特性 成田史生	16
	Ni <sub>2</sub> MnGa 系強磁性ホイスラー合金の磁歪特性 左近拓男 山崎優志 安達義也 野尻浩之 鹿又 武	21
	Fe-Ga 多結晶薄膜の磁歪と磁化ダイナミクスに関する研究 遠藤 恭	26
プロムナード	科学・技術と社会の関係を考える —1. 科学・技術から科学技術へ— 柴田 清	32
講義ノート	焼結の基礎—理論的背景から実際まで—Ⅳ. 通電支援焼結の展開 吉田英弘 焼結緻密化の理論的な背景から実際の事例まで、最近のトピックを交えながら概説。	37

新技術・新製品	薄ゲージ化と製缶時の加工自由度に貢献する高強度・高加工性缶用鋼板『JATT®』 の開発 齋藤勇人 假屋房亮 鈴木善継 川合 稔 中村紀彦 杉田一久 石井健太郎 大谷大介 神宮貴文 中田有紀	44
	ニッケル水素化物電池の出力特性改良技術開発 平光規行 林 宏明 金原雅彦 澤 春夫 中西治通 高橋泰博 山口匡訓 小島由継	47

企画にあたって	連載 「思い出の教科書、この一冊！」 編集チーム	50
---------	--------------------------	----

思い出の教科書、この一冊!	金属組織学序論 山本剛久	51
---------------	--------------	----

はばたく	結晶塑性解析と出会って 奥山彫夢	52
------	------------------	----

学会・研究会だより	第16回界面粒界国際会議(iib2019)会議報告 中村篤智 馮 斌	53
-----------	------------------------------------	----

本会記事	会告	54	次号予告	63
	掲示板	60	新入会員	63
	金属学会シンポジウム開催報告	61	行事カレンダー	64
	会誌・欧文誌1号目次	62		

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

**今月の表紙写真** Fe-Ga 合金を利用した振動発電デバイスの写真(左から小, 中, 大)。(上野敏幸 7頁 図3より改変)

表紙デザイン: 北野 玲  
複写をご希望の方へ

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

未来を先導する領域を開拓し、世界に発信する

## 2020年春期（第166回）講演大会

3/17（火）～3/19（木）

東京工業大学 大岡山キャンパス

## 2020年秋期（第167回）講演大会

9/16（水）～9/18（金）（予定）

富山大学 五福キャンパス

### 付設展示会 大会プログラム広告 ランチョンセミナー 募集のご案内

#### 付設展示会（機器・ソフトウェア・書籍）

・1コマ ¥140,000（税別）

#### 大会プログラム広告

・1色1頁 ¥70,000（税別） ・1色1/2頁 ¥40,000（税別）

#### ランチョンセミナー

・1枠 ¥100,000（税別）

まてりあ5月号・11月号「誌上展示会」（広告特集）

も同時募集！

★展示会のフォローアップ企画です★

1枠 ¥28,000（税別）

締切日等の詳細は、下記までお問い合わせ下さい。

広告掲載・ご出展のお問い合わせ・お申込み

**MEIHOSHA**  
ADVERTISING AGENCY

株式会社 明 報 社

〒104-0061 東京都中央区銀座七丁目12-4 友野本社ビル

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

E-mail info@meihosha.co.jp ホームページ www.meihosha.co.jp

# 年頭のご挨拶

公益社団法人 日本金属学会 会長 乾 晴行

新年、明けましておめでとうございます。皆様にはご健勝で新年をお迎えのこととお慶び申し上げます。

昨年は、2月の北海道胆振中東部を震源とする地震、8月の九州北部豪雨、9月の台風15号、10月の台風19号など様々な自然災害が日本を襲いました。被災者の方々には心よりお見舞い申し上げます。私も10月に大韓金属・材料学会への表敬訪問の帰途、豪雨・洪水の発生により成田空港で長時間の足止めに遭遇いたしました。このように近年多発する激甚な自然災害は、人類の活動に起因した激しい気候変動による多くの研究者が述べており、社会基盤に対する防災、エネルギー・環境問題の解決に材料科学・工学の立場から積極的に寄与できる学会活動を企画・推進することの大切さを痛感しています。一方で、昨年は、元号が令和となり、10月には海外から多くの賓客を招いて即位礼正殿の儀も執り行われ、祝賀ムードに包まれました。ラグビー・ワールドカップでサクラの戦士の活躍には日本中が沸き立ち、まさに新たな時代の到来を予感させます。本年は、日本金属学会にとってもそのような活気に満ちた明るい年にできればと考えています。



これらを踏まえ本年も公益社団法人として、引き続き公益目的事業を公正かつ適切に推進して参ります。昨年からは新たに開始した取り組みを事業毎に簡単に列挙すると、日本金属学会誌および Materials Transactions 誌の完全電子ジャーナル化、Materials Transactions 誌のフリーダウンロード論文導入(刊行事業)、講演大会一般講演のセッション改編、公募シンポジウム及び企画シンポジウムの企画促進(講演会・講習会事業)、9分科への分科改編や研究助成「金属学会フロンティア研究助成」の新設(調査・研究事業)などです。特に、表彰・奨励事業では、各種賞の重み、権威を高め、かつ、学会の将来を担う若手研究者を奨励できるよう各種表彰内容、選考方法等の見直しを行っています。また、庶務事業では、産業界も含めて、積極的に優秀な人材を広く募るために代議員及び理事等の役員の選出方法の見直しを行っています。会員数減少抑止に対しても引き続き積極策を推進して参ります。

学会の活性化には、多数の会員で取り組める魅力ある研究テーマや潤沢な研究資金が多くの会員に行き渡ることが大変重要と考えます。幸いなことに、現在、本会会員を研究代表者及び主たる研究分担者とした科学研究費新学術領域研究が4領域、新規な科学技術振興機構CREST研究が4プロジェクト、すべて同時に実施・進行されています。学会の活性化に必要な魅力ある研究テーマや研究資金の流布が達成されており、本学会の過去を振り返っても、このように学術活動が充実している学会は、数少ないと思います。各研究領域及び領域を支える個々の研究者の皆様の日々のご研鑽に心より敬意を表します。この状況は、1961年1月に行われたジョン・F・ケネディー大統領のあの有名な就任演説の一節を私に思い起こさせます。「…ask not what your country can do for you, ask what you can do for your country.」。あまりに有名な一句で「自己の利益を考えずに、いかなる寄与を国にできるかを考えて欲しい」との意味ばかり強調されますが、就任演説全体を通しては「このような個々の努力・研鑽が、人類の共通の敵に立ち向い自由を大切にす理想の国家の建設を可能にする」と問うています。学会はこれまで以上に個々の会員の皆様の研究活動がスムーズに行えるよう会員サービスを充実させて参ります。同時に、個々の会員の皆様の日々のご研鑽の積み重ねが、活発で充実した理想の学会を作り上げるものと思います。本年も、活発で明るい学会となるよう皆様方の積極的な研究・学会活動をお願い申し上げます。

最後になりましたが、会員の皆様のご健勝とご発展を祈念しまして年頭のご挨拶とさせていただきます。

2020年1月1日

# 公益社団法人日本金属学会の組織と活動概況

公益社団法人日本金属学会は、『金属に関する理論ならびに工業の進歩発達をはかること』を目的とした学術団体として1937年2月14日に創設され、2013年3月1日に公益社団法人に移行しました。会員数は2019年2月末時点で国内外合わせて4,929名、157団体で、金属及びその関連材料に関する研究成果を世界に発信する学会として活動を展開しています。近年は、対象分野も拡大し、金属及びその関連材料分野の学術および科学技術の振興を目的として、組織図に示すように、最高議決機関である「社員総会」、業務執行決定機関の「理事会」、業務監査機関の「監事」の下で、「委員会」、「支部」、「事務局」により、学術誌や学術図書刊行、講演会や講習会の開催、調査・研究、表彰・奨励の事業を行っています。

**刊行事業**では、会員の情報交換や啓発・教育を目的として、会報「まてりあ」を毎月刊行し、会員に配布しています。2019年は「金属素描」や「金属なんでもランキング」等の新企画記事の掲載を始めました。また、和文の学術論文誌「日本金属学会誌」および、材料系14学協会と共同刊行している英文の学術論文誌「Materials Transactions」を毎月刊行して、研究成果を国内外に広く発信しています。日本金属学会誌では年間約70編の論文が、Materials Transactionsでは年間約310編の論文を掲載しています。さらに、金属及び関連材料に関する専門書や教科書類等の「学術図書類」を刊行しています。

**講演会・講習会事業**では、最新の研究成果を発表・討議するとともに、会員間の交流を図ることを目的として、春秋2回の「講演大会」を開催しています。2019年に討論の活発化を目的としてセッションの改編を行いました。講演大会は約900件の講演があり、約1500名が参加しています。会場では「機器展示」や「ランチョンセミナー」も実施しています。さらに、次世代の若人に材料に関する関心を高めるために「高校生・高専生ポスター発表」を実施しています。春期講演大会では、卓越した業績を挙げた者による「本多記念講演」や、学生の進路選択と企業の採用を支援することを目的とした「企業説明会」を開催しています。また、専門知識の普及や啓発、教育を目的として「セミナー・シンポジウム」や講習会を開催しています。国際会議もこれまでに25件を本会主催

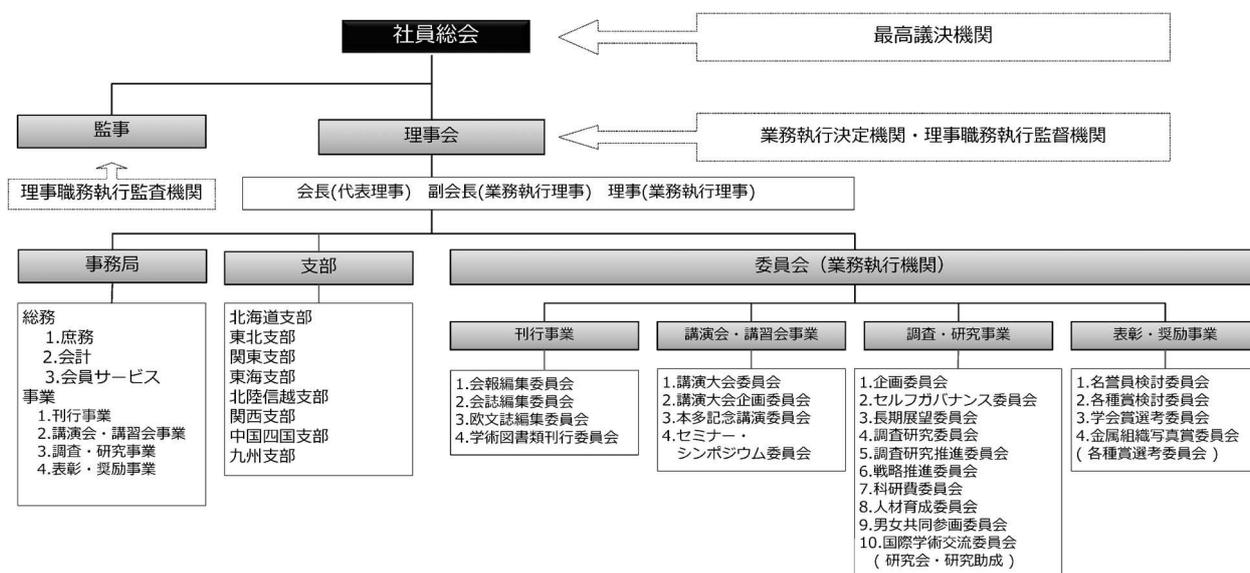
で開催しています。

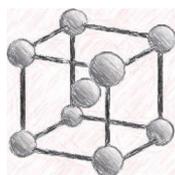
**調査・研究事業**では、重要な運営に関する「企画委員会」、「セルフガバナンス委員会」、「長期展望委員会」が設置されています。また、関連が深い専門分野の研究者や技術者が集う分科を2019年に再編し、9分科で「調査研究委員会」の活動を開始しました。先端領域や学際的領域の研究を促進する目的で「研究会」が活動しています。また、2019年には「フロンティア研究助成」事業を開始しました。さらに、「戦略推進委員会」や「科研費委員会」では、金属及び関連材料分野の振興に向けた材料戦略活動を行っています。「人材育成委員会」では、次世代を担う人材育成を目的として「高校生向けホームページ」等の活動を行っています。「男女共同参画委員会」では、女性の社会進出を支援するために、男女共同参画学協会連絡会との連携や鉄鋼協会合同男女共同参画委員会活動を実施しています。また、「国際学術交流委員会」では、World Materials Day Awardの授賞をはじめ、米国TMSとの講演大会へ研究者の相互派遣、韓国KIMとの共同シンポジウム開催等を実施しています。

**表彰・奨励事業**では、「名誉員」や「学会賞」を始めとして、優れた研究や技術開発の成果を上げた者や当該分野の発展に寄与した者の表彰や今後の貢献が期待される者の奨励を目的とした「各種賞」で、毎年20件の表彰・奨励を行っています。2019年は各種賞の重み、権威を高め、かつ学会の将来を担う若手研究者を奨励できるよう各種表彰内容、選考方法等の見直しを行い、来年から実施する予定です。

**全国の8支部**も活発に活動しており、各支部で独自に講演会・講習会（講演大会、本多光太郎記念講演会、セミナー、談話会）、研究会、見学会などを実施しています。

日本金属学会は21世紀の日本を背負って立つ研究者や技術者の入会を大いに歓迎いたします。会報「まてりあ」は、会員のみに提供されます。さらに、会員には、講演大会への会員参加費での参加及び登壇費の免除、刊行物の会員価格での購入、本会主催のセミナー・シンポジウム・講演発表会等への会員割引価格の参加等の特典があります。

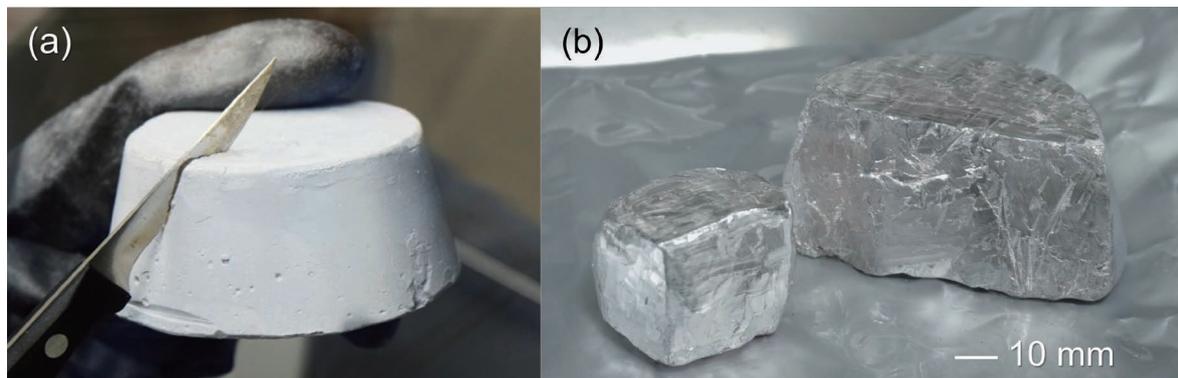




シリーズ「金属素描」

## No. 7 ナトリウム (Sodium)

東北大学 森戸春彦



元素名：Sodium，原子番号：11，質量数：22.99，電子配置：[Ne] 3s<sup>1</sup>，密度：0.966 Mg · m<sup>-3</sup>(293 K)，結晶構造： $\beta$ -Na 体心立方(室温～融点)，融点：371 K，沸点：1156 K，地殻存在量：2.3 mass%。【写真】(a)購入時の金属ナトリウム，(b)炭酸ナトリウム皮膜を除去後の金属ナトリウム(日本曹達株式会社，純度99.95%)

ナトリウムはアルカリ金属の一つで，ナイフで切れるほど柔らかい金属である。金属単体は銀白色の金属光沢を有しているが，空気中ではすぐに酸化されて光沢を失い，時間がたつと表面が炭酸ナトリウムの皮膜に覆われる。そのため，金属片を保管する際には，表面に流動パラフィンを塗布したり，灯油に入れておくことが一般的である。著者の研究室では，写真のように表面の皮膜をナイフで削ぎ落とした後に，アルゴンガス雰囲気中で保管している。

ナトリウムといえば水と激しく反応して爆発するイメージがあると思うが，この爆発は金属と水の反応によって生じた水素が反応熱によって発火するものと長らく考えられていた。しかし，チェコの研究チームが，この爆発はナトリウム原子が水と接触することで電子を失い，残った陽イオン同士が強いクーロン力によって互いに反発することで誘発されることを明らかにした<sup>(1)</sup>。

ナトリウムは水と激しく反応するため取り扱いには十分な注意が必要であるが，工業的に取り扱う技術は古くから確立されており，様々な分野で応用されている。金属ナトリウムの主な用途は，医農薬中間体や Na アルコラート，染料・香料の原料である。特に塩素や酸素の混入を避けるために塩化ナトリウム (NaCl) や水酸化ナトリウム (NaOH) が原料として使用できない場合に，金属ナトリウム単体を原料に用いることが多い。金属ナトリウムの特徴を上手く活かした応用例として，高速増殖炉や自動車用エンジンの排気バルブなどの中高温度域の冷却媒体が挙げられる。金属ナトリウムは，水の100倍も高い熱伝導率を示し，比較的広い温度範囲で液相状態であることから，中高温度域の排熱媒体として用いられる。また，融液が水に近い密度をもち，ステンレス鋼とも反応しないことから，循環用の動力ポンプや配管設備も水と同等のものが使用できることも特徴の一つである。燃焼温度の高い自動車用ターボエンジンではバルブ軸を中空にし，その中に排熱能力の高い金属ナトリウムを封入することで，熱排出効率を向上させている。効率的に熱を排出することで高価な耐

熱材料の使用を抑えることができ，ナトリウムの密度が小さいことからエンジンの軽量化にもなり，結果としてエネルギーコストの低い技術につながっている。その他にも，日本ガイシ株式会社の NAS 電池は，電極に熔融状態のナトリウム (Na) と硫黄 (S) を，電解質に  $\beta$ -アルミナを用いた二次電池で，大規模な電力貯蔵用として風力発電や太陽光発電と組み合わせ使用されている<sup>(2)</sup>。また，かつて電気機器の絶縁油として広く普及していた有害物質のポリ塩化ビフェニル (PCB) の無害化処理にも金属ナトリウムが活用されている。近年では，結晶育成の際のフラックス(溶剤)としての活路も見出しつつある。ナトリウムをフラックスに用いることで，高品質な窒化ガリウムの単結晶基板が製造されている<sup>(3)</sup>。

金属ナトリウムは，ダウンズ法と呼ばれる NaCl の電気分解により製造されている。実際の製造では NaCl の熔融温度を下げるために塩化カルシウム (CaCl<sub>2</sub>) を混合している。副産物として塩素ガスが回収されるため，塩素ガスの有効活用を考慮した生産体制になっている。日本曹達株式会社二本木工場が，日本国内で唯一工業的規模の金属ナトリウム製造を行っていたが，現在は操業を停止し，フランスにある日本曹達関連会社に製造の拠点を移している。

ナトリウムは，原料の塩が海水から採れ，地殻中にも豊富に存在する。工業的な製造方法も確立されているので，安価で大量供給が可能な元素の一つである。元素戦略的な研究開発が所望されている中で，新たな工業的用途が生まれることを期待している。

### 文 献

- (1) P. E. Mason: Nature Chem., **7**(2015), 250.
- (2) 日本ガイシ株式会社 HP (<https://www.ngk.co.jp/product/nas/index.html>)
- (3) Y. Mori *et al.*: ECS J. Solid State Sci. & Tech., **2**(2013), N3068.

取材協力：日本曹達株式会社 (<http://www.nippon-soda.co.jp/>)

次号 金属なんでもランキング! No. 7 デバイ温度



# 挑戦・柔軟・誠実 JFE スチール

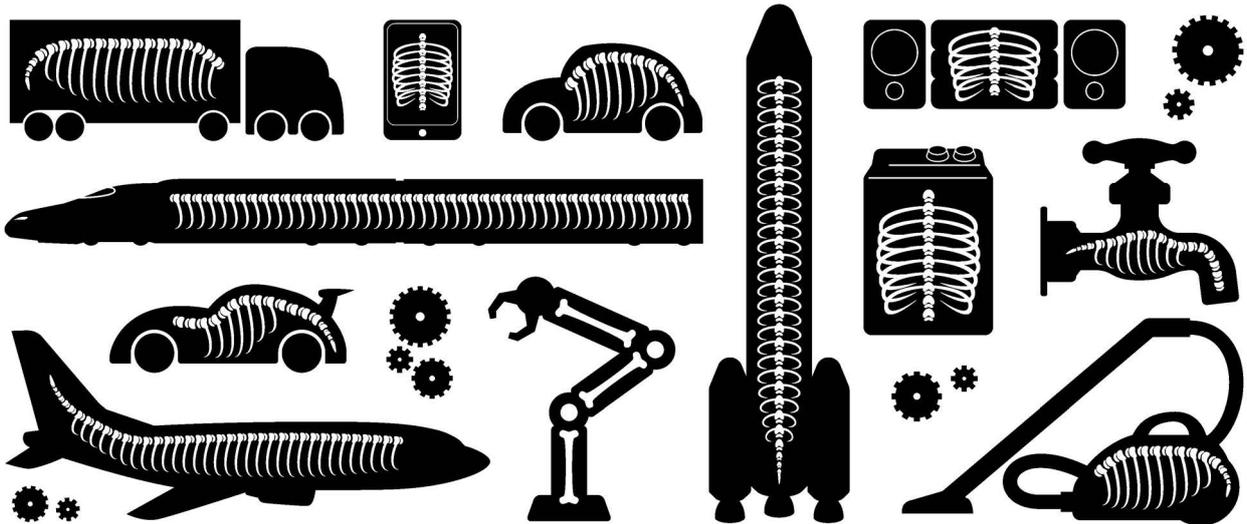


JFE スチールは、  
常に世界最高の技術をもって  
社会に貢献します。

JFE スチール 株式会社 〒100-0011 東京都千代田区内幸町2丁目2番3号(日比谷国際ビル) TEL 03(3597)3111 URL <http://www.jfe-steel.co.jp/>

## DAIDO STEEL GROUP Beyond the Special

外からは見えませんが、骨のある会社です。



多彩なフィールドで、フロンティアを目指しています。

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



2019年4月 新日鐵住金から日本製鉄へ



世界の  
当たり前を  
つくる。



NIPPON STEEL

日本製鉄株式会社

インターンシップ情報

インターンシップの日程やプログラム内容の詳細がご覧いただけます

<https://www.nipponsteel.com/interntip/>



採用情報

会社情報や仕事情報、社員のインタビューなどの詳細がご覧いただけます

<https://www.nipponsteel.com/recruit/>





## 〈刊行物のご案内〉



● **日本金属学会誌（月刊）** <https://www.jim.or.jp/journal/j/>

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, Chemport..）。レビュー・オーバ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 45 日で公開）。



● **共同刊行欧文誌：Materials Transactions（月刊）** <https://www.jim.or.jp/journal/e/>

材料系 14 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（J-STAGE）。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。各種データベース登載（Web of Science, CrossRef, Chemport, Materials Journal Portal Site...）。Review・Overview の定期的な掲載。Express 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 35 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」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。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◇

★2020年3月17日（火）～19日（木） 東京工業大学～大岡山キャンパス～

★2020年9月16日（水）～18日（金） 富山大学～五福キャンパス～

## 〈多彩な学会活動〉

- 講演大会（年 2 回）・調査研究活動
- セミナー/シンポジウム・研究会・若手研究グループ活動
- 支部活動（全国 8 支部）
- 表彰事業（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://jim.or.jp/> ～

## 企画にあたって

春本高志<sup>1</sup> 藤枝 俊<sup>2</sup> 細川裕之<sup>3</sup> 三井好古<sup>4</sup> 梅津理恵<sup>5</sup>

近年、IoT(Internet of Things)時代の到来に伴い、あらゆるモノやセンサーがネットワークに接続されつつあるが、こうしたモノやセンサーの電源確保が重要な課題である。そうした中、充電の必要が無く、持続的(永続的)に発電し得る環境発電・エネルギーハーベスティングが注目されている。特に、振動や衝撃など日常のありふれた機械エネルギーから電気エネルギーを得る「振動発電」は、センサーなどに対する電源として最も現実的であり、盛んに研究開発が行われている。従来、こうした振動発電は、セラミックス・有機物の圧電効果によるものが主であった。しかし、セラミックス・有機物ゆえの諸問題が存在し、実用化には課題が多く残るのが現状である。一方、近年注目されている金属強磁性体の逆磁歪効果(ピラリ効果)を利用した振動発電は、発電効率が良いだけでなく、その機械的強度が高く、また、多種多様な形態にて実施できるので、様々な用途への展開が期待されている。大きな磁歪を有する合金としては、Terfenol-D(Tb-Dy-Fe)やGalfenol(Fe-Ga)、Fe-Coなどが広く知られており、現在も物質探索が続けられている。そこで、本特集では、「磁歪・逆磁歪材料の基礎と振動発電への応用」と題して、これら磁歪・逆磁歪材料の基本的な特性に関する研究、及び、それらを用いた振動発電素子の設計と発電特性、更には、新規磁歪・逆磁歪材料の研究開発状況などについて各分野の専門家から、最新の研究成果を踏まえてご紹介頂いた。

はじめに、上野敏幸准教授(金沢大学)には、「Fe-Ga合金を利用した振動発電技術とその電池フリーIoTへの応用展開」と題して、逆磁歪効果による振動発電技術の概要とその展開について、ご考案のU字フレームベース振動発電素子の構造とその発電機構をご解説頂くと共に、今現在の程度の発電が可能であるのか、また、将来のスケールアップ見込に関してもご紹介頂いた。次に、藤枝俊准教授(大阪大学)には、こうした振動発電にはどのような逆磁歪材料が適するかという問いに対し、「振動発電用のFe-Ga合金単結晶の逆磁歪効果」と題して、Fe-Ga単結晶における詳細な研究をご紹介頂いた。振動発電の高効率化には、磁区構造を制御

することが重要であり、逆磁歪材料をあらかじめ磁化しておくことと良いなど、振動発電に用いる際の指針をご解説頂いた。成田史生教授(東北大学)には、磁歪材料と別材料と組み合わせた複合材料における振動発電について「Fe-Co系磁歪合金を用いた複合材料の振動・衝撃発電特性」と題してご紹介頂いた。ファイバー複合材料化することにより、靴(パンプス)への埋め込みが可能になるなど、振動発電は様々な形態で実施可能であるとのことである。また、クラッド鋼型振動発電と従来の圧電発電との比較についてもふれて頂いた。最後の2件の記事では、新規磁歪・逆磁歪材料の研究開発状況についてご紹介頂いた。左近拓男教授(龍谷大学)には、「Ni<sub>2</sub>MnGa系強磁性ホイスラー合金の磁歪特性」と題して、ホイスラー合金における磁歪について、温度変化に伴う結晶構造・各種磁気特性変化などと併せてご紹介頂いた。ホイスラー合金では、価電子濃度が磁歪に大きく影響するとのことである。遠藤恭准教授(東北大学)には、「Fe-Ga多結晶薄膜の磁歪と磁化ダイナミクスに関する研究」として、様々な組成のFe-Ga薄膜における磁歪について、また、関連する磁気特性や高周波用途を見据えた磁化ダイナミクスもついてご紹介頂いた。大きな磁歪を得るには、バルク同様に、薄膜の結晶方位(配向性)制御が必要不可欠であるのご紹介頂いた。

本特集では、IoT時代における金属の新しい展開として、「振動発電」を中心に、基礎となる磁歪・逆磁歪現象、また、その材料の研究開発状況など、最新の内容を集めた。本会会員皆様のご参考・契機となれば幸いです。最後に、本特集を企画するにあたり、ご多忙にもかかわらず執筆をご快諾下さいました著者の先生方に対して、この場をお借りして深く御礼申し上げます。



春本高志

藤枝 俊

細川裕之

三井好古

梅津理恵

<sup>1</sup> 東京工業大学物質理工学院; 助教(〒152-8552 目黒区大岡山2-12-1) <sup>2</sup> 大阪大学大学院工学研究科; 准教授

<sup>3</sup> 産業技術総合研究所材料・化学領域; 研究チーム長 <sup>4</sup> 鹿児島大学大学院理工学研究科; 准教授

<sup>5</sup> 東北大学金属材料研究所; 准教授

Preface to Special Issue on "Magnetostrictive Alloys and Their Application to Energy Harvesting"; Takashi Harumoto<sup>1</sup>, Shun Fujieda<sup>2</sup>, Hiroyuki Hosokawa<sup>3</sup>, Yoshifuru Mitsui<sup>4</sup> and Rie Umetsu<sup>5</sup>

Keywords: magnetostriction, Villari effect, energy harvesting, Galfenol

2019年12月2日受理[doi:10.2320/materia.59.5]

# Fe-Ga 合金を利用した振動発電技術と その電池フリー IoT への応用展開

上野 敏 幸\*

## 1. はじめに

磁歪振動発電は磁気を介した発電技術である。磁気を介したエネルギー変換が実用的であることは、我々の使う電力の大半が発電機(回転機)でつくられることから類推できる。発電機はタービンの大きな回転エネルギーを、磁気を介し電気エネルギーに変換する。筆者が開発する振動発電も同様、磁歪材料の応力で磁化が変化する逆磁歪効果を巧みに利用し、身の回りにある振動や動きを高効率で電力に変換する。その汎用性は極めて高く、機械振動から人・モノの動き、衝撃、波、流れまで多くがその適用対象になる。このエネルギー変換の基になる Fe-Ga 合金<sup>(1)</sup>は鉄系の磁歪材料で、延性で加工性がよく、大きな逆磁歪効果を有する。開発する振動発電デバイスはこの合金の優れた特徴を反映し、シンプルで堅牢、高出力、高感度など数多くの実用的な特徴を備える。圧電材料やエレクトレット(永久電荷)方式などの従来の振動発電を凌駕し、電池を代替する。IoT(モノのインターネット)の課題は、無線通信モジュールの電源、つまり電池で、振動発電で、この電池の交換や寿命管理の課題が解決されることで、IoTの普及に貢献する。またデバイスを大きくすることで、キロワットオーダーの電力を生成することも可能で、電力回生や波力、潮流発電といった再生可能エネルギーの分野へも展開できる。この技術の実用化を見据え、材料からデバイス、応用まで数多くの企業が商品開発に着手した。本稿では、この磁歪振動発電と構造と原理、特徴、出力特性を述べ、磁歪式で実現する電池フリー IoT、また大型化の展望について解説する。

## 2. デバイスの構造と動作原理、特徴

図1上が発電デバイスの構造である<sup>(2)(3)</sup>。磁性体のU字

フレームをベースに、その上面の一部に板状の Fe-Ga 合金(長手方向に磁化容易軸)を貼り付けユニモルフ(積層部)を構成し、これにコイルを巻き、内側に永久磁石を配置したものである。発電の原理を図1下に示す。Fe-Ga 合金は永久磁石により適度に磁気バイアスされた状態にあり、フレーム下面の片端を振動する物体、例えば機械などに固定し、他端に錘を取り付け振動させる。この時、錘に作用する慣性力でフレーム開口部が開閉するようデバイスは変形し、合金には長手方向に引張りと圧縮の力が交互に作用する。同時に逆磁歪効果で磁束が増減し、この磁束は図1下のループを流れ、この時間変化に比例した起電力がコイルに発生する。新規性はU字の「磁性体」と磁歪材料の積層、また磁歪材料を適度に磁化させながら、フレームの積層部(直下)の部分は磁気飽和させ、それ以外は磁気飽和させない構造にある。その関係を図2のB-H曲線で説明する。図中の矢印はデバイスが変形したときの Fe-Ga 合金内の磁束密度で、積層構造により合金内の応力は引張りもしくは圧縮でほぼ一様、つまり合金全体に大きな磁束変化が発生し、これがフレーム(磁気飽和でない部分)をヨークとした磁気回路を環流する。一方、

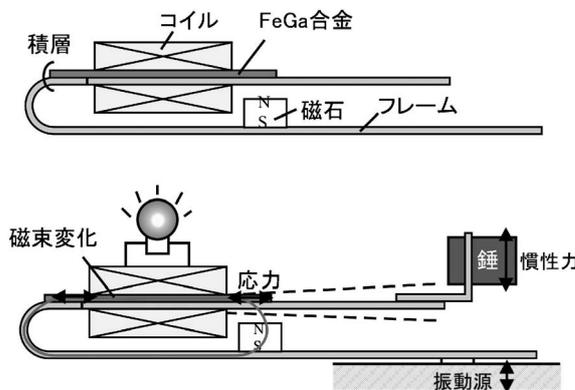


図1 発電デバイスの構造(上)と発電原理(下)。

\* 金沢大学理工研究域電子情報通信学系; 准教授(〒920-1192 金沢市角間町)  
Magnetostrictive Vibrational Power Generator and Its Application for Battery-free IoT; Toshiyuki Ueno (Kanazawa University, Kanazawa)  
Keywords: vibrational power generator, magnetostrictive material, inverse magnetostrictive effect, IoT  
2019年8月20日受理[doi:10.2320/materia.59.6]

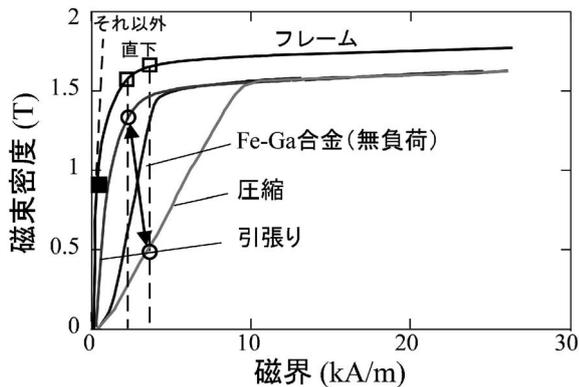


図2 デバイス構成要素のB-H曲線と動作挙動。

合金直下のフレーム部分は合金と同じ磁界ではほぼ磁気飽和(非磁性体と見なせる)の状態にある。結果、合金に発生した磁束変化がそのままコイルの鎖交磁束起電力に利用できる。なお従来の磁歪材料を用いた屈曲型の振動発電の大半は、磁歪材料と非磁性体との積層で、材料に発生する応力は一樣になるが、磁気バイアスや磁束の変化を上手に電力として取り出す磁気回路を構成していない。また本構造では自由端(可動部)と固定端が近い位置にあるため固定端に曲げモーメントが生じにくく、固定端に起因する損失も小さい。よって振動減衰が小さく感度も高い。また劣化の原因となる摺動部がなく、合金とフレームの剥離、金属疲労や引張強度以上の応力が発生しない限りデバイスは壊れない。シンプルで組み上げも容易、安価で構成できるのも大きな特徴である。

### 3. デバイスの特性

本デバイスは様々なサイズや形状の作製が可能である。その特性の概要を図3の写真左の小型のサイズ(質量4g、体積0.5 cm<sup>3</sup>)で説明する。これはFe-Ga合金4×0.5×16 mm(福田結晶技術研究所製<sup>(4)</sup>)、0.5 mm厚のフレーム(ペーナイト鋼)、線径0.05 mm、3500巻きのコイル、Nd-Fe-B磁石4×3×2 mmで構成される。一般に振動発電では共振現象を利用し、振動源の周波数とデバイスの共振周波数を一致させることで振幅が最大になり大きな発電が行われる。また大きな振動を得るためには先端に錘を付けた方がよい。例えばこれに錘10.2 gを付けた場合、周波数28.5 Hzで共振し、加速度0.049 G(1 G=9.8 m/s<sup>2</sup>)で、1 Vの電圧(開放)が発生する(図4)。これに抵抗を付けてジュール損で考慮した電力を評価した結果が図5で、0.075 Gで最大電力1.1 mW、実効電力0.39 mWを出力する。なお28.5 Hz、0.075 Gの振動振幅は0.015 mm(指で触れてもほとんど感じない)で、この時の出力0.39 mWは、コイン電池CR2032(直径20 mm、質量2.9 g)を3年間持たせる場合の平均電力0.026 mWを大きく上回る。錘1.7 gの場合、88.7 Hzで共振し、0.6 Gで更に大きな電力2.0 mWを出力する。実際、発生電圧から逆算した合金内の磁束変化は1.3 Tで、先に説明した

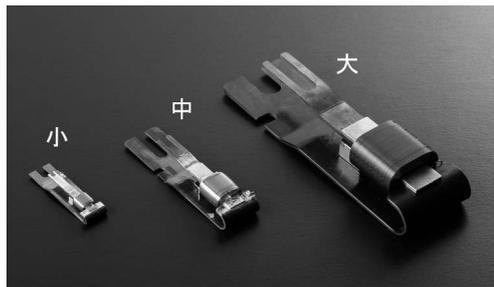


図3 デバイスの写真(左から小, 中, 大)。

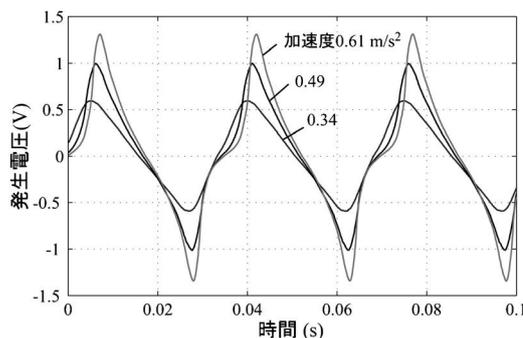


図4 振動周波数28.5 Hzの場合の発生電圧。

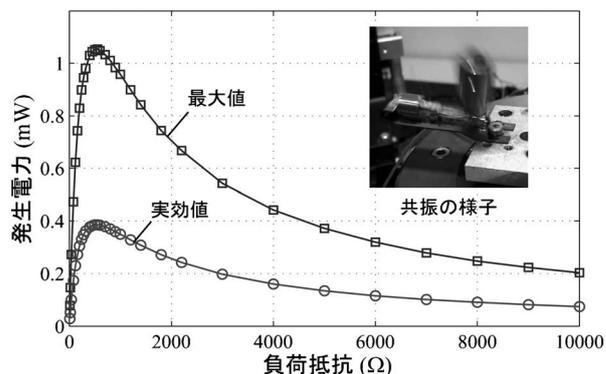


図5 振動周波数28.5 Hz、加速度0.075 m/s<sup>2</sup>の場合の発生電力。

発電原理を裏付ける。また先端に錘を付けず先端を弾く自由振動(共振周波数420 Hz)では25 Vの電圧が発生し、0.5~1 mJのエネルギーを取り出せる。磁歪式では、スケール効果が成り立ち、形状を3辺等尺でK倍すると、共振周波数は1/K、電圧はK倍、コイルの巻き数が同じなら抵抗は1/K、結果、出力はKの3乗、つまり体積に比例する<sup>(5)</sup>。図3の写真の中、右のデバイスは、前述の小型をそれぞれ2倍、4倍したもので、動作周波数はそれぞれ1/2、1/4となり出力は8倍、64倍になる。以上の関係からデバイスの動作周波数と発生電力(実効)をまとめると図6になる。筆者は、小型デバイスを10倍、1/2倍にした超大型、超小型のデバイス(図6中に写真あり)も開発している。

変換効率について、実測で機械エネルギーの最大40%を

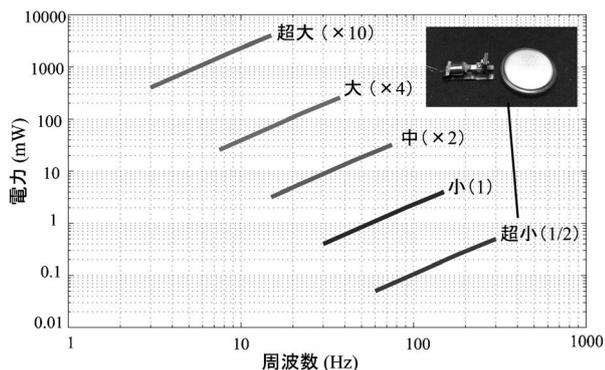


図6 デバイスサイズによる動作周波数と発生電力(実効値). 右上は超小型 1/2 サイズとコイン電池の写真である.

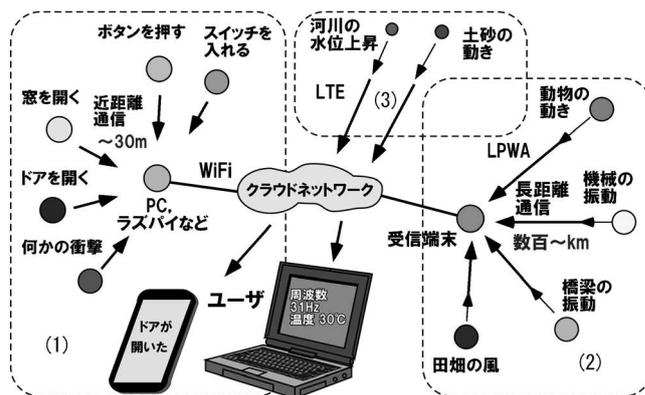


図7 磁歪振動発電デバイスで実現できる電池フリーIoT.

電気エネルギーとして取り出すことができることを確認している. これは Fe-Ga 合金の高い電気機械結合係数(0.7~0.8程度)と優れた構造と磁気回路に由来する. 比較として, 板に圧電素子を貼り付けたユニモルフ型の場合, 圧電横効果を利用し, 材料に応力が付与される長手方向と垂直な方向から電荷を取り出す. 横効果の電気機械結合係数は PZT で0.3~0.4程度, 変換効率は最大 16%程度である. ほかに電磁誘導式, 例えば永久磁石の往復運動を利用するタイプでは, 磁石を相当に変位させないと, コイルの鎖交磁束が変化しない. これは空隙の磁気エネルギーが主になるからで, 付随して大きな磁気力が発生する. 結果, 磁石を保持する機構が必要で, 摺動損が生じ, これが効率と感度, 耐久性を低下させる. 磁歪式では, 錘の振動速度が適度で, その運動を妨げる摺動部がない. よって効率と感度と共に耐久性も高い. 疲労試験も実施し, 錘なしで共振 420 Hz, 8 G, 1 億回の繰り返し振動後も出力の劣化がないことを確認し, 半永久の寿命をもつ可能性を実証している<sup>(6)</sup>.

#### 4. 磁歪振動発電による電池フリー IoT

磁歪振動発電を IoT 電源に利用すると図7のような主に3つのシステムが構築できる.

- (1) 人やモノの「一度」のちょっとした動きや衝撃で発電し, 近距離に無線を送信する
- (2) 定常的な振動や風などで発電し, 定期的に長距離にセンサ信号を無線送信する
- (3) 大きな動きで発電し, 長距離にセンサ信号を送信する, 等である.

3つのシステムの主な応用例とそれによる効果を以下に示す.

(a) 例えば家屋や学校, 病院, 飲食店などで, ドアや窓を開く, 照明のスイッチや呼び出しボタンを押すなど, デバイスに構造的な工夫を施し, 一度のモノの動き, 衝撃でデバイスを励振し, 無線送信を行う. これらの信号を PC や Raspberry Pi で一括に受信し, メールや Line など遠隔の

ユーザーに知らせる. これにより簡単に防犯や見守り, 呼び出しのシステムができる.

(b) 工場の生産機械や工作機械, モーター, 変圧器などの電気機器, 橋の振動で発電し, これを蓄電することで, 機械や構造体の振動周波数, 加速度, 温度などのセンサ信号を LPWA (低電力長距離無線モジュール) で定期的に送信する. これら信号の時刻暦を分析することで機械の予兆保全が出来る. 人が現地で行う定期的な計測が不要になり, 人件費の削減に繋がる.

(c) 例えば土砂や水位の動き, 波などで大きな動きで発電し, その情報を遠隔に知らせることで防災が出来る.

上記を実現するための技術的手法を以下に示す.

( ) 小型のデバイスを基本に, ボタンを押すやドアを開く動きでデバイスを励振し(別途, 永久磁石の吸脱着で自由振動を発生させる), 一度で 0.5 mJ のエネルギーを発生し, 無線モジュール(interplan 社製 IM315<sup>(7)</sup>)を動作し, 信号を送信する. 一度の動作の発電(2019年現在, 中型デバイスを利用)でアナログ信号を長距離で飛ばすことも可能で, 例えばドアを開くことで, 動きと共にその部屋の温度を送信するシステムもできる<sup>(8)</sup>. これは従来の低出力な振動発電ではできない使い方である.

( ) 中型のデバイスで 30 Hz, 0.2 G 程度の振動で, マイコンとセンサを動作させ, 2分おきに加速度センサで振動の周波数と加速度(実効値), 温度を送信するシステムを完成している(図8). このときデバイスは乾電池以上の電力を出力している. また振動だけでなく風速 1 m/s 以下の微風による振動でも発電し<sup>(9)</sup>, 定期的にセンサ信号を送信するシステムもできる.

( ) デバイスを大型化することで, 大きな入力に対応し, ワットオーダの発電, また長距離の通信を行うことも可能である. ほかに靴底にデバイスを取り付ける<sup>(10)</sup>と一歩毎(衝撃発電)にスマホ通信を行うことができ, これは玩具や楽器, スポーツ用具に応用できる. これら入力になる振動や動きと送信するセンサ信号を組み合わせれば応用は無限である. これ



# 振動発電用の Fe-Ga 合金 単結晶の逆磁歪効果

藤枝 俊\* 栢 修一郎<sup>1)</sup>\*\* 川又 透\*\*\* 志村 玲子\*\*\*\*  
石山 和志<sup>2)</sup>\* 福田 承生\*\*\*\*\* 鈴木 茂\*\*\*\*\*

## 1. はじめに

無磁場中において、強磁性体は磁区と呼ばれる磁化方向が揃った複数の領域を作り、外に漏れる磁束を低減した磁区構造を形成する。また、各磁区の内部では電子スピンと軌道の相互作用(スピン軌道相互作用)に起因して、磁歪と呼ばれる磁化方向に依存した結晶格子歪みが生じる。そのため、強磁性体に磁場を印加すると外形が歪む。これが磁歪効果(≡Joule 効果)である。この逆効果として、強磁性体へ応力を印加すると磁氣的性質が変化する。この現象は、逆磁歪効果(≡Villari 効果)と呼ばれる。

2011年に上野らにより逆磁歪効果を利用して身近で発生する振動を電気エネルギーに変換する画期的な振動発電デバイスが開発され<sup>(1)(2)</sup>、IoT(Internet of Things)デバイス用の小型電源として注目されている<sup>(3)</sup>。その振動発電の原理を、電磁誘導の原理と比較して図1に示す。導電性のコイルに磁石を近づけて、磁束がコイルを貫くと電磁誘導により誘導起電力が生じる(図1左参照)。この時に発生する電圧  $V$  は、次式に示す Faraday の法則で表され、コイルを貫く磁束の時間変化  $d\Phi/dt$  に比例する。

$$V = -N \frac{d\Phi}{dt} \quad (1)$$

ここで、 $N$ はコイルの巻き数を表す。一方、図1右に示すように、逆磁歪効果を利用した振動発電では、コイルの中に磁性体を設置し、バイアス磁場を印加して磁化させる。磁性体が振動により圧縮されたり引張られたりすると、逆磁歪効果によりコイルを貫く磁束が変化するため、磁性体の移動無しでも電磁誘導による誘導起電力が得られる。従って、優れた振動発電デバイスを実現するには、逆磁歪効果により大きな磁束変化を示す磁性体、すなわち“逆磁歪材料”が要求される。

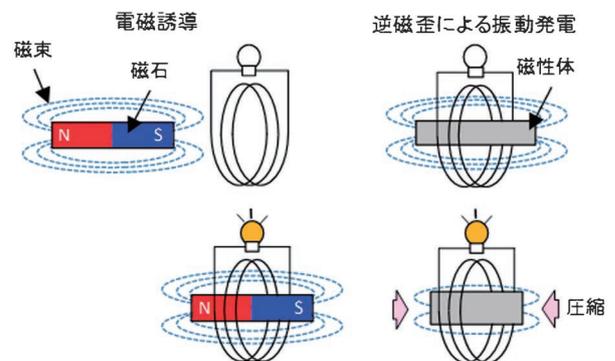


図1 電磁誘導(左)および逆磁歪効果を利用した振動発電(右)の原理の比較。(オンラインカラー)

\* 大阪大学大学院工学研究科；准教授(〒565-0871 吹田市山田丘 2-1)

\*\* 東北大学 電気通信研究所；1)准教授 2)教授

\*\*\* 東北大学 金属材料研究所；助教

\*\*\*\* 東北大学 多元物質科学研究所；准教授

\*\*\*\*\* 福田結晶技術研究所；社長

\*\*\*\*\* 東北大学 マイクロシステム融合研究開発センター；教授

Inverse Magnetostrictive Effect in Fe-Ga Alloy Single Crystals for Application to Vibration Power Generation; Shun Fujieda\*, Shuichiro Hashi\*\*, Toru Kawamata\*\*\*, Rayko Simura\*\*\*\*, Kazushi Ishiyama\*\*, Tsuguo Fukuda\*\*\*\*\*, Shigeru Suzuki\*\*\*\*\* (\*Department of Management of Industry and Technology, Graduate School of Engineering, Osaka University, Osaka. \*\*Reserch Institute of Electrical Communication, Tohoku University, Sendai. \*\*\* Institute for Materials Research, Tohoku University, Sendai. \*\*\*\*Institute of Multidisciplinary Research for Advanced Materials, Tohoku University, Sendai. \*\*\*\*\*Fukuda Crystal Laboratory, Sendai. \*\*\*\*\*Micro System Integration Center, Tohoku University, Sendai)

Keywords: inverse magnetostrictive effect, Villari effect, magnetostriction, magnetic domain, energy harvesting

2019年9月25日受理[doi:10.2320/materia.59.10]

本稿では、振動発電用の逆磁歪材料として bcc 構造の Fe-Ga 合金単結晶に着目して取り組んだ著者らの最近の研究結果を示す。まず、次節では Fe-Ga 合金単結晶の振動発電への応用により優れた発電特性が得られることを概説する。3 節では、Fe-Ga 合金単結晶の初期磁区構造(無印加磁場および無印加応力状態)および磁場印加の影響について述べる。4 節では、応力印加による磁区構造の変化および機械的性質との関係を明らかにする。それらの結果を踏まえ、5 節では Fe-Ga 合金単結晶の優れた発電特性の発現機構について磁区構造の観点から説明する。最後に 6 節でまとめを行う。

## 2. Fe-Ga 合金単結晶の振動発電への応用

bcc 構造の Fe-Ga 合金は 2000 年に Clark らにより見出された磁歪材料であり、17 at% 程度の Ga 濃度で Ni, Fe-Al 合金および Fe-Co 合金よりも大きな約 311 ppm の磁歪効果を示す<sup>(4)(5)</sup>。この値は超巨大磁歪材料と呼ばれる Tb-Dy-Fe 化合物の磁歪効果より小さい<sup>(6)</sup>。しかし、Fe-Ga 合金は比較的良好な機械的性質を有し、脆い Tb-Dy-Fe 化合物では困難な機械加工も可能である<sup>(7)-(9)</sup>。さらに、前者の飽和磁束密度は 1.5 T 程度で、後者(1 T 程度)よりも大きい。つまり、Fe-Ga 合金は比較的大きな磁歪と飽和磁束密度および良好な機械的性質を併せ持っている。

Fe-Ga 合金の磁歪定数は結晶方位に強く依存する<sup>(4)(5)</sup>。例えば、Ga 濃度 13 at% の Fe-Ga 合金の磁歪定数は  $\langle 100 \rangle$  方向で最大であり、その値(約 140 ppm)は  $\langle 111 \rangle$  方向の磁歪定数よりも約 9 倍も大きい<sup>(5)</sup>。そこで、著者らは結晶方位の揃った単結晶に着目した<sup>(10)(11)</sup>。Czochralski (CZ) 法により Fe-Ga 合金単結晶を作製し<sup>(12)(13)</sup>、切り出した試験片の  $\langle 100 \rangle$  方向と振動による応力の発生方向が平行になるようにデバイス(上野らが開発した旧型の平行梁型デバイス<sup>(14)</sup>)に搭載して振動発電試験を行った<sup>(12)</sup>。その結果、4 V 程度の振動発電に成功し、それが飽和磁束密度の 53% に相当する 0.8 T 程度の磁束変化に起因することを突き止めた。つまり、Fe-Ga 合金単結晶は、逆磁歪効果による大きな磁束変化に起因して優れた発電特性を実現できるため、逆磁歪材料として有望である。なお、Fe-Ga 合金単結晶の CZ 法による作製<sup>(15)(16)</sup> および振動発電デバイス<sup>(17)</sup> の詳細は解説記事を参照されたい。

## 3. Fe-Ga 合金単結晶の初期磁区構造および磁場印加の影響

Fe-Ga 合金単結晶を搭載した振動発電デバイスの発電特性を向上させるには、逆磁歪効果による大きな磁束変化の発生機構の解明が大切である。そこで、Kerr 効果顕微鏡を用いて逆磁歪効果と密接に関連する磁区構造の詳細な観察を行った。Ga 濃度 16.1 at% の Fe-Ga 合金単結晶の(001)面の初期磁区構造を図 2 に示す<sup>(18)</sup>。観察には直径 10 mm で厚さ 2 mm の円盤状試料を用いた。磁場印加により磁化飽和させた

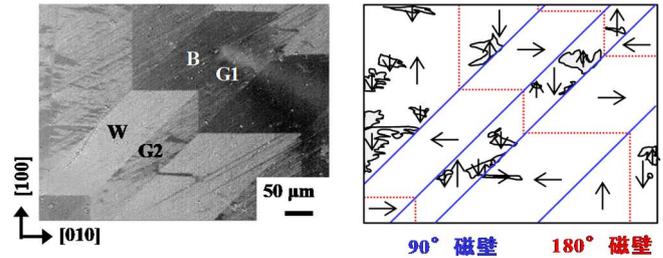


図 2 Fe-Ga 合金単結晶の(001)面の初期磁区像(無印加磁場および無印加応力)(左)と模式図(右)<sup>(18)</sup>。右図において、矢印は各磁区の磁化方向を表し、灰色の磁区は補助磁区を表す。(オンラインカラー)

状態を基準とし、その差分により磁区画像を得た。観察面が 2° 程度傾いているため補助磁区も含むが、コントラストの異なる 4 種類の磁区(B, W, G1 および G2)が観察された。観察光の入射方向とコントラストの関係を解析した結果、B 磁区および W 磁区の磁化方向は  $[010]$  および  $[0\bar{1}0]$  であり、G1 磁区および G2 磁区の磁化方向は  $[\bar{1}00]$  および  $[100]$  であった。隣り合う B 磁区と W 磁区および G1 磁区と G2 磁区の磁化方向はほぼ 180° で、磁区を隔てる磁壁に着目すると階段状である。一方、隣接する B 磁区と G1 磁区および W 磁区と G2 磁区の磁化方向はほぼ 90° で、その磁壁は直線的である。すなわち、Fe-Ga 合金単結晶の  $\{100\}$  面の初期磁区構造は、主に面内の 4 つの  $\langle 100 \rangle$  磁化容易軸方向を磁化方向とする磁区で構成され、それらは直線的な 90° 磁壁と階段状の 180° 磁壁で隔てられる。

図 3(a)-(d) に  $[010]$  方向への磁場印加による磁区構造の変化を示す<sup>(18)</sup>。300 Oe の磁場印加により、観察領域の左下外側から 180° 磁壁が現れる。また、右上の 180° 磁壁は、さらに右上に移動する。印加磁場を 560 Oe まで増加させると、左下の 2 つの 180° 磁壁は衝突して消滅し、右上の 180° 磁壁は観察領域の右上外側へ移動する。上述のように階段状の 180° 磁壁が移動・消滅している間、直線的な 90° 磁壁は殆ど移動しない。その結果、980 Oe の印加磁場では、直線的な 90° 磁壁のみで構成された縞状磁区となる。さらに強い磁場を印加すると、90° 磁壁が移動し始め、1960 Oe で磁場印加方向を磁化方向とする単磁区状態に達する。このように、磁場印加による磁区構造変化の特徴が明らかになった。

図 4 に磁区観察と同一単結晶の  $[010]$  方向の磁化  $M_{[010]}$  および歪み  $\Delta L/L_{[010]}$  の磁場依存性を示す<sup>(18)</sup>。これらの測定において、磁場は磁区観察と同様に  $[010]$  方向に印加した。磁場印加により、磁化方向が磁場方向の磁区( $\rightarrow$  方向)の割合が増加するため(図 3 参照)、磁化は増加する。一方、300 Oe 以下の印加磁場では、 $\Delta L/L_{[010]}$  曲線は殆ど変化しない。また、560 Oe 程度の印加磁場でも  $\Delta L/L_{[010]}$  は 30 ppm 程度である。その後、さらに強い磁場を印加すると  $\Delta L/L_{[010]}$  は急激に増大し、磁化と同程度の印加磁場で飽和する。Fe-Ga 合金の  $\langle 100 \rangle$  方向の磁歪定数は正であり<sup>(4)(5)</sup>、各磁区において結晶格子は磁化方向の  $\langle 100 \rangle$  磁化容易軸方向に伸び

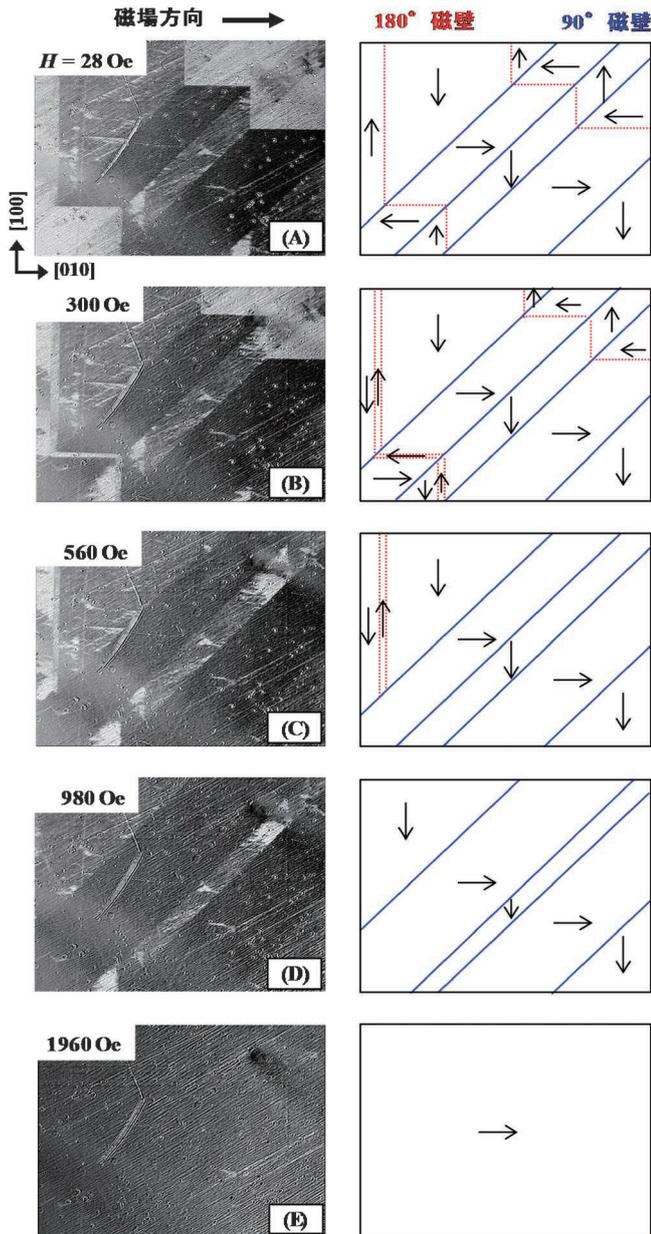


図3 [010]方向に磁場を印加して観察したFe-Ga合金単結晶の(001)面の磁区像(左)と模式図(右)<sup>(18)</sup>。右図の矢印は各磁区の磁化方向を表す。

ている。つまり、比較的低磁場で生じる180°磁壁の移動では、格子が[010]方向と平行方向に伸びている磁区(→方向および←方向)の割合は増加しないため、 $\Delta L/L_{[010]}$ 曲線は殆ど変化しない。比較的高磁場で生じる90°磁壁の移動により、格子が[010]方向と平行方向に伸びている磁区の割合は増加するので $\Delta L/L_{[010]}$ は増加する。つまり、図4下の $\Delta L/L_{[010]}$ 曲線の振舞いは、図3に示した磁区観察の結果と対応する。Kerr効果顕微鏡で観察できるのは表面近傍のみであるが、Fe-Ga合金単結晶の内部においても、図3で述べた特徴と同様の磁区構造変化が生じると推察される。

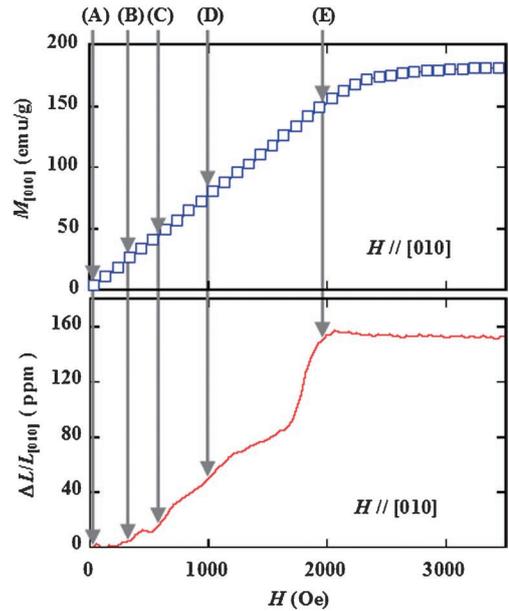


図4 Fe-Ga合金単結晶の[010]方向の磁化 $M_{[010]}$ (上)および歪み $\Delta L/L_{[010]}$ (下)の磁場依存性<sup>(18)</sup>。[010]方向に磁場を印加した。また、図3の(A)~(E)に対応する状態を矢印で示す。

#### 4. 応力印加による磁区構造の変化とヤング率との関係

引張り応力を印加したGa濃度12.8at%のFe-Ga合金単結晶の[010]方向の歪み $\Delta L/L_{[010]}$ の磁場依存性を図5に示す<sup>(19)</sup>。測定には、縦5.51mm、横4.67mmで厚さ0.54mmの板状試料を用いた。引張り応力および磁場は、[010]方向と平行に印加した。無印加応力状態において、 $\Delta L/L_{[010]}$ 曲線は160ppm程度に飽和する。ここで、飽和磁場が図4の値よりも低いのは、主に試料の形状が異なることに起因する。引張り応力の印加により、 $\Delta L/L_{[010]}$ 曲線の飽和値は減少する。前節で述べたように、 $\Delta L/L_{[010]}$ 曲線は磁区構造と密接に関わる。従って、引張り応力の印加による磁区構造の変化が強く示唆される。

同一単結晶の[010]方向と平行に引張り応力を印加して観察した磁区構造の変化を図6に示す<sup>(19)(20)</sup>。5.7MPa程度の引張り応力を印加すると、初期磁区を構成する直線的な90°磁壁および階段状の180°磁壁は同時に動き出す。さらに応力を印加すると、引張り方向に対して磁化方向が垂直の磁区(↑方向および↓方向)の割合が減少し、磁化方向が平行の磁区(→方向および←方向)の割合が増加する。さらに、11.4MPaの引張り応力を印加すると、引張り方向に対して磁化方向が垂直の磁区(→方向および←方向)は消滅し、磁化方向が平行の磁区(→方向および←方向)で構成された縞状構造となる。一方、圧縮応力を印加すると、圧縮方向と磁化方向が垂直の磁区で構成された縞状構造が観察された<sup>(21)</sup>。つまり、磁歪による結晶格子の歪みで印加応力を緩和するために90°磁壁は移動・消滅し、その際に磁束が外に漏れないように180°磁壁は階段状から直線的になると説明される。図3

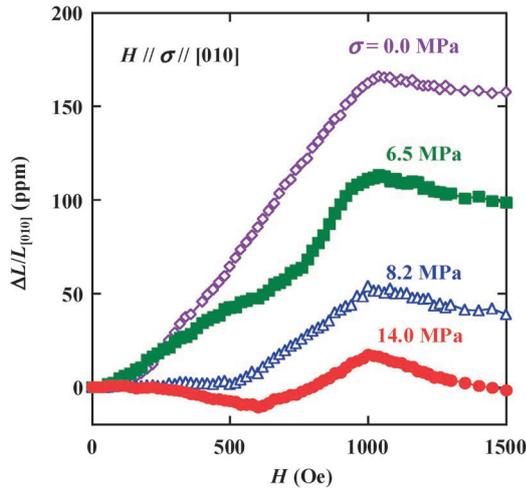


図5 引張り応力を印加したFe-Ga合金単結晶の[010]方向の歪み $\Delta L/L_{[010]}$ の磁場依存性<sup>(19)</sup>. 引張り応力および磁場は、[010]方向と平行に印加した.

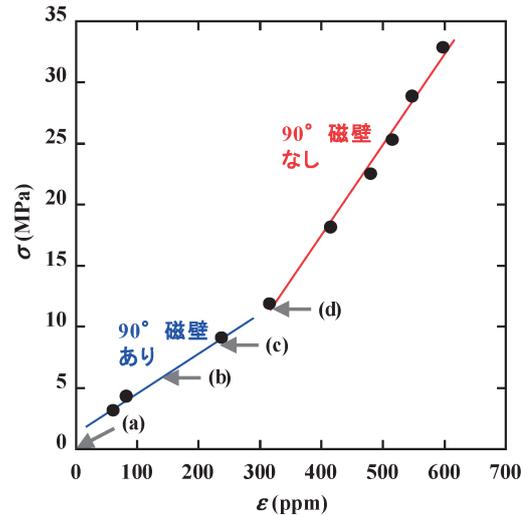


図7 Fe-Ga合金単結晶の張り応力 $\sigma$ —歪み $\varepsilon$ 曲線<sup>(19)</sup>. [010]方向と平行に引張り応力を印加した. 図5の(a)~(d)に対応する状態を矢印で示す.

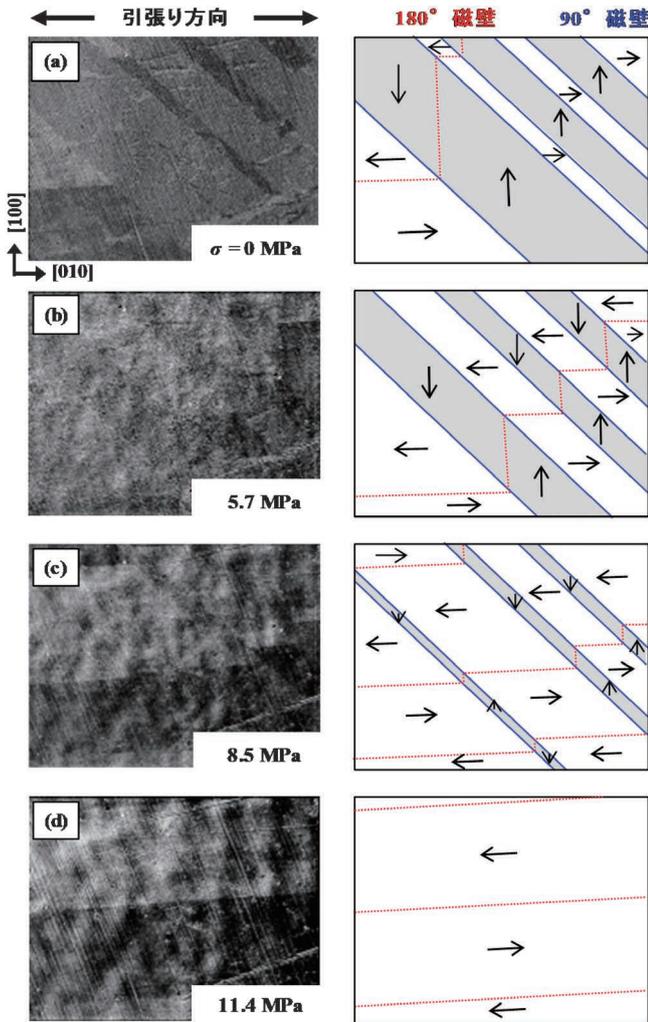


図6 [010]方向と平行に引張り応力を印加して観察したFe-Ga合金単結晶の(001)面の磁区像(左)と模式図(右)<sup>(19)</sup>. 右図において、矢印は各磁区の磁化方向を表し、磁化方向が引張り方向と垂直の磁区を灰色で示す.

で述べた磁場印加とは異なる、応力印加による磁区構造変化の特色が明らかになった. また、90°磁壁が消滅する11.4 MPa以上の引張り応力において図5の $\Delta L/L$ 曲線の飽和値はほぼゼロであり、磁区観察結果と対応することから、Fe-Ga合金単結晶の内部においても同様の特徴の磁区構造変化が生じていると推察される.

上述の磁区構造の変化は、機械的特性にも大きな影響を及ぼす. 図7に同一単結晶の引張り応力—歪み曲線を示す<sup>(19)</sup>. 応力—歪み曲線は、図6で90°磁壁がほぼ消滅する11.4 MPa近傍の印加応力で大きく折れ曲がる. 11.4 MPa以上の印加応力における応力—歪み曲線の傾きから求めたヤング率は74 GPaであり、既報と同程度の値を示す<sup>(22)</sup>. 一方、11.4 MPa以下のデータから求めたヤング率は32 GPaである. つまり、90°磁壁の移動・消滅による応力緩和により、ヤング率は59%も低下する. ここで注意しなければならないことは、11.4 MPa近傍の印加応力における歪みが300 ppm程度もあり、図5で示した無印加応力における $\Delta L/L_{[100]}$ 曲線の飽和値よりも2倍程度も大きいことである. このことは、応力印加による磁区構造の変化は弾性変形も伴うことを意味する. Fe-Ga合金単結晶では、印加応力の半分は弾性変形に費やされ、残りの半分程度しか磁区構造の変化には寄与しない. 従って、逆磁歪効果を利用して優れた発電特性を得るには、磁性体に磁歪よりも大きな歪みを印加する必要がある.

## 5. 逆磁歪効果による磁束変化の発生機構

図1で述べたように、優れた発電特性を得るには逆磁歪効果による大きな磁束変化が求められる. 3および4節で述べた磁区観察結果より予想されるFe-Ga合金単結晶の逆磁歪効果による磁束変化の発生機構を図8に示す<sup>(23)</sup>. 無印加

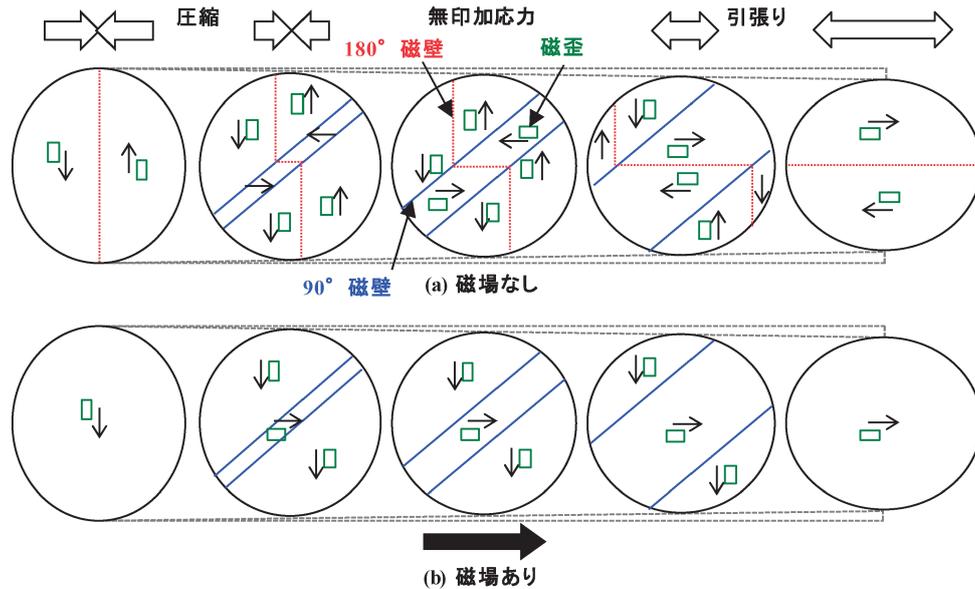


図8 磁区観察結果より予想される Fe-Ga 合金単結晶の応力印加による磁束変化の発生機構の模式図<sup>(23)</sup>。矢印は磁区の磁化方向を表す。また、各磁区における磁歪による結晶格子歪みを長方形で示す。

磁場および無印加応力の初期磁区は、直線的な  $90^\circ$  磁壁と階段状の  $180^\circ$  磁壁で形成される。この状態で Fe-Ga 合金単結晶に引張りおよび圧縮応力を印加すると、印加応力を緩和するように  $90^\circ$  磁壁は移動・消滅する。すなわち、引張り応力および圧縮応力と平行および垂直な  $180^\circ$  磁壁で構成された縞状磁区となる。従って、磁束変化は生じない。一方、無印加応力で適切な強さの磁場（バイアス磁場）を印加すると  $180^\circ$  磁壁が移動・消滅して、直線的な  $90^\circ$  磁壁で構成された縞状磁区となる（図 8(b) 参照）。この状態で応力を印加して  $90^\circ$  磁壁を移動・消滅させると、今度は引張り応力および圧縮応力と平行および垂直な磁化方向の単磁区に近い状態が生じ、大きな磁束変化が生じる。従って、初期磁区構造およびバイアス磁場の強さが Fe-Ga 合金単結晶を利用して優れた発電特性を実現する鍵となる。

最近、我々は振動発電デバイスに搭載した状態の Fe-Ga 合金単結晶の磁区観察に成功した<sup>(24)</sup>。図 9 (a) に示すように、上野らが開発した新型のユニモルフ振動発電デバイスでは、U 字型フレームに Fe-Ga 合金単結晶を貼り付けた状態でコイルを巻き付けて、永久磁石でバイアス磁場を印加する構造になっている。磁区観察は、図 9 (b) に示すように、自由端を振動させた際の応力の発生方向と  $[010]$  方向が平行で観察面が  $(001)$  面となるように Ga 濃度 14.3 at% の Fe-Ga 合金単結晶をデバイスに貼り付け、コイルと永久磁石を取り外した状態で行った。例として、無印加応力では 3.5 mm の U 字型フレームの開口部 ( $D$ ) を 2.0 mm に押し縮めて観察した結果を図 9 (c) に示す。デバイスに搭載した状態では磁化飽和状態の参照像を得ることが出来ず Kerr 効果顕微鏡での観察が困難であったため、この観察では参照像無しで明瞭な磁区像が得られる Faraday 効果磁場センサーを利用した。観察視野が限られているため、領域を分割して観察した結果

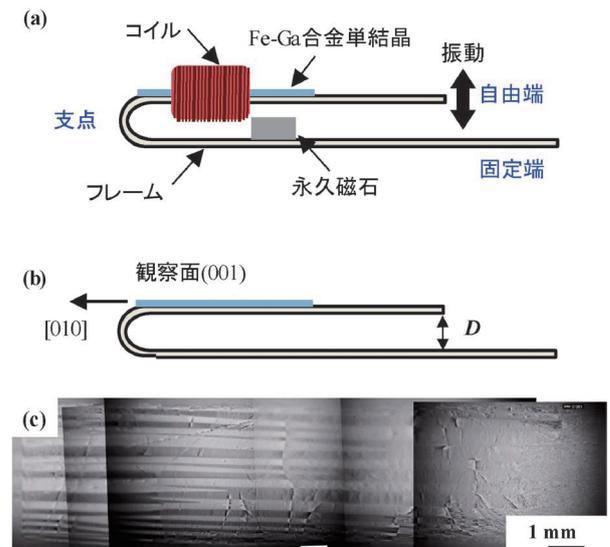


図9 (a)ユニモルフ型振動発電デバイスおよび(b)磁区観察方法の模式図。(c)デバイスに搭載した状態の Fe-Ga 合金単結晶の  $(001)$  面の磁区像<sup>(24)</sup>。

を繋ぎ合わせて Fe-Ga 合金単結晶の全面的磁区像を得た。単結晶の自由端側では、微細で複雑な磁区構造であるが、支点側では引張り応力方向とはほぼ平行の直線的な  $180^\circ$  磁壁で構成された縞状磁区が観察された。つまり、応力が支点側に集中するため不均一であるが、図 8 で述べた磁区構造変化がデバイスに搭載した状態で確認された。

## 6. おわりに

人工知能およびロボットの技術の目覚ましい進展が期待されており、それらの技術で利用される様々な情報を収集およ



# Fe-Co 系磁歪合金を用いた 複合材料の振動・衝撃発電特性

成田 史生\*

## 1. はじめに

あらゆるモノがインターネットにつながる IoT (Internet of Things: モノのインターネット) が全世界に破壊的イノベーションをもたらそうとしている。設備や機器にセンサ (目・耳) が搭載され、アナログ情報がデジタルデータとして可視化された後、インターネットを経由してクラウド上に蓄積され、分析される。そして、分析された情報は、最適化され、アクチュエータ (手・足) によって現実世界にフィードバックされる。これにより、品質・効率・生産性の向上や新しい価値・サービスの創出が可能となり、人々の生活が大きく変わろうとしている。一方、センサの数は、今後爆発的な勢いで増えることが予想され、2030年には1兆個に達するといわれている<sup>(1)</sup>。センサの駆動やデータの通信には、数  $\mu$ ~mW 程度の電力が必要であるが、1兆個レベルのセンサに電池を使用する場合は、環境、資源およびコストの面で極めて大きな社会問題となる。このため、自然界環境に広く存在する未利用のエネルギー (振動, 熱, 光, 電波など) から電力を回収するエネルギーハーベスティング (環境発電) が注目を集め<sup>(2)</sup>、センサ駆動・データ通信用電力としての利用が期待されている。

エネルギーハーベスティング材料として有望な圧電セラミックスは、脆く、また、絶縁体であるため、振動で得られる電圧が大きくても電流が小さく、大きな電力は得られない現状にある。また、チタン酸ジルコン酸鉛 (PZT) 系圧電セラミックスには、有害物質 (鉛) が含まれているため、環境問題上、非鉛系圧電材料の開発が要望されている<sup>(3)</sup>。一方、超磁歪特性を示す Tb-Dy-Fe 合金 (Terfenol-D) や Fe-Ga 合金 (Galfenol) がエネルギーハーベスティング材料として注目さ

れ、盛んに研究が進められている<sup>(4)(5)</sup>。また、スパッタ法により Fe-Co 薄膜<sup>(6)</sup>が、鍛造・冷間加工によって Fe-Co 合金<sup>(7)</sup>が開発され、磁歪特性に及ぼす熱処理などの影響が検討されている。さらに、センサへの応用を目指し、Fe-Ga/Fe-Co 積層材料<sup>(8)</sup>、AlN/Fe-Co 積層材料<sup>(9)</sup>、Tb-Dy-Fe/Fe-Co 積層材料<sup>(10)</sup>や Fe-Co コーティング<sup>(11)</sup>が開発されている他、Fe-Co 系マイクロワイヤの応力誘起磁壁移動に関する研究<sup>(12)</sup>も行われている。

複合材料は、使用目的に応じて2種類以上の材料を組み合わせ、単独では得られない特性を持たせたもので、様々な分野で利用されている。最近、軽量さと高い強度・剛性を備えた複合材料に全く新しい別の機能 (例えば、センサ、アクチュエータ、エネルギーハーベスティング・貯蔵、自己治療、モーフィングなどの機能) を追加して複数の機能を同時に実現するマルチファンクショナル複合材料の研究開発が進められ、複合材料の新しい用途展開と市場拡大に向けて研究トレンドが変化してきている。

本稿では、Fe-Co 合金を用いた機能性複合材料を対象に、エネルギーハーベスティングの基礎的事項を取り上げ、逆磁歪特性評価の概要について述べる。また、振動・衝撃発電特性に関する最近の研究状況についても言及する。

## 2. 磁場—力学場相互干渉と基礎式

本章では、磁歪材料の基礎式について述べる。直交座標系  $O-x_1x_2x_3$  において、長さ  $l$ 、断面積  $A$  の細長い磁歪丸棒を考え、磁化容易軸を、長さ方向と一致させ、 $x_3$  方向とする。丸棒の長さが直径に比べ極めて大きい場合は一次元問題に帰着され、磁歪材料の構成方程式は次式で与えられる<sup>(13)</sup>。

$$\epsilon_{33} = s_{33}\sigma_{33} + (d_{33} + m_{33}H_3)H_3 \quad (1)$$

\* 東北大学 大学院工学研究科 材料システム工学専攻; 教授 (〒980-8579 仙台市青葉区荒巻字青葉 6-6-02)

Magnetostrictive Fe-Co Integrated Composites for Kinetic Energy Harvesting; Fumio Narita (Tohoku University, Sendai)

Keywords: *mechanics of electromagnetic materials, energy harvesting test, finite element simulation, iron-cobalt fiber, composite materials, clad plates, inverse magnetostrictive effect, output power*

2019年8月20日受理 [doi:10.2320/materia.59.16]

$$B_3 = (d_{33} + m_{33}H_3)\sigma_{33} + \mu_{33}H_3 \quad (2)$$

ここに、 $\sigma_{33}$ 、 $\epsilon_{33}$  は、それぞれ応力テンソル、ひずみテンソルの成分、 $B_3$ 、 $H_3$  はそれぞれ磁束密度ベクトル、磁場の強さベクトルの成分、 $s_{33}$  は弾性コンプライアンス係数、 $d_{33}$  は圧磁定数、 $\mu_{33}$  は透磁率である。また、 $m_{33}$  は応力に依存する2次の磁気弾性定数<sup>(14)(15)</sup>である。

簡単のため、磁歪丸棒の磁化容易軸方向すなわち  $x_3$  方向に、時間  $t$  に依存する一様な圧縮荷重  $\sigma_0(t)A$  が作用する場合を考える。このとき、丸棒には一様な垂直応力  $\sigma_{33} = \sigma_0(t)$  が生じ、その結果、式(2)より丸棒内部の磁束密度  $B_3$  が変化する。単位長さあたりの巻き数  $n$  のコイルを通して磁歪丸棒に発生する電圧  $V_{out}$  は、Farady の法則から次のように得られる。

$$V_{out} = -nlA \frac{dB_3}{dt} \quad (3)$$

式(2)を式(3)に代入してみると、出力電圧はコイルの巻き数  $n$ 、磁歪材料の体積  $Al$  の他に、圧磁定数  $d_{33}$  や負荷速度  $d\sigma_{33}/dt$  に依存することが容易に理解できる。

### 3. Fe-Co ファイバー複合材料

Fe-Co 合金は、加工性と強度に優れ、磁化・磁歪特性も良く、線材にして樹脂に埋め込むことが可能である。本章では、Fe-Co ファイバー複合材料の特徴と逆磁歪特性を解明した最近の結果について概説し、パンプスのヒール部に応用して衝撃発電実験を行った例も示す。

#### (1) 特徴と逆磁歪特性

磁束がファイバーの長さ方向に浸透しやすい性質を引出し、かつ、エポキシ樹脂内部に埋め込む際の製造工程を工夫して、磁歪ファイバー複合材料が設計・開発されている。図1は様々な磁歪材料を示したもので、(a)は Terfenol-D、Galfenol、(b)は直径 0.2 mm の Fe-Co ファイバー、Fe-Co ファイバーとポリエステルファイバーとの織物材、(c)は Fe-Co ファイバー/エポキシ樹脂複合材料、Fe-Co ファイバーを埋め込んだ炭素繊維強化プラスチック(CFRP)積層板である。図の Galfenol と Fe-Co ファイバー/エポキシ樹脂複合材料は体積がほぼ同じで重さがそれぞれ約 12.8 g、2.14 g (ファイバーのみで 0.625 g) であるので、Fe-Co ファイバー複合材料は、軽量化を実現しており、また、構造体に成形一体化できるので設計の自由度も高い。この複合材料の外側にコイルを配置しておくと、圧縮応力  $\sigma_{33} = \sigma_0(t)$  により磁束密度  $B_3$  が変化して電圧  $V_{out}$  が発生する。単位体積当りの出力電圧は、負荷速度の増大に伴い増大し、ファイバーの直径<sup>(13)</sup>、引張残留応力<sup>(16)</sup>、初期バイアス磁場<sup>(17)</sup>、熱処理温度<sup>(17)</sup>などに依存して変化する。

最近、Fe-Co ファイバーとポリエステルファイバーとの織物材を用いてエポキシ樹脂複合材料が作製され、圧縮・三点曲げ荷重による磁束密度変化が計測されている<sup>(18)</sup>。Fe-Co ファイバーは、磁気異方性が高い上、縦弾性係数がエポ



Terfenol-D



Galfenol

(a)

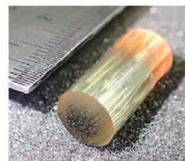


Fe-Co fiber

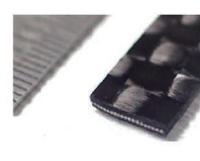


Fabric made of Fe-Co and polyester fibers

(b)



Fe-Co fiber/epoxy composite



Fe-Co fiber inserted CFRP

(c)

図1 磁歪材料の例。(a)バルク。(b)ファイバー。(c)複合材料。

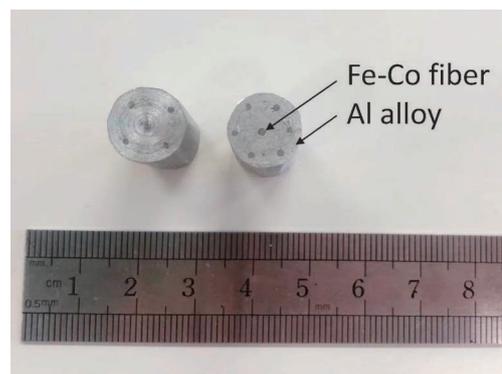


図2 Fe-Co ファイバー/Al 合金複合材料。

キシ樹脂と大きく異なるため、複合材料にすることで、外力を作用させると Fe-Co ファイバーのみに大きな応力が生じる<sup>(13)</sup>。したがって、Fe-Co ファイバー複合材料の見かけの逆磁歪特性は Terfenol-D に匹敵する結果となる。また、Fe-Co ファイバーを埋め込んだ CFRP 積層板の逆磁歪特性および損傷自己検知機能についても検討されている<sup>(19)</sup>。さらに、図2に示すような Fe-Co ファイバー/Al 合金複合材料が作製され、圧縮荷重によって約 5.5 mW の電力出力が

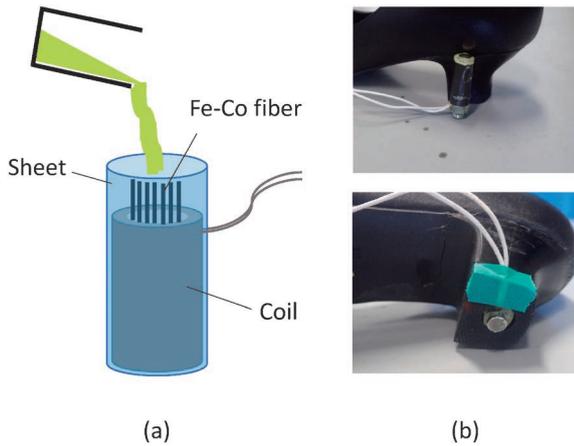


図3 コイル内蔵 Fe-Co ファイバー複合材料. (a)試作イメージ. (b)発電パンプスへの埋め込み.

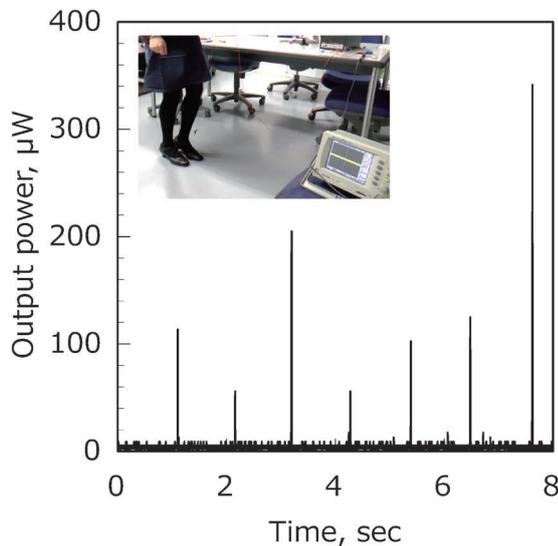


図4 Fe-Co 磁歪ファイバー埋込型パンプスの衝撃発電実験結果.

得られている<sup>(20)</sup>.

## (2) パンプスへの応用

Fe-Co ファイバー埋込型パンプスが試作され、歩行運動中の足踏みによる出力電力が評価されている<sup>(21)</sup>. 図3(a)はコイルを内蔵させた Fe-Co ファイバー複合材料(直径 10 mm, 長さ 35 mm)を示したもので、図3(b)のように市販のパンプスのヒールに搭載され、100~200 N 程度の衝撃荷重で LED の点灯が確認されている. 図4に示すように、ばらつきが認められるが、歩行時の衝撃によって 100 μW 以上の電力が得られている. また、結果は示していないが、出力電力は、ヒトの体重ではなく、歩行時の習性に依存して変化する.

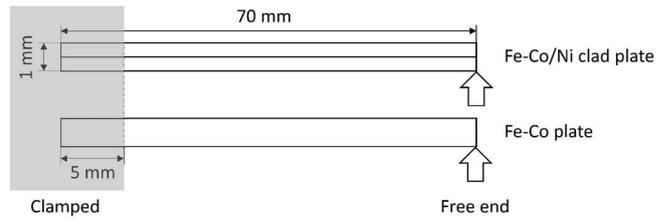


図5 Fe-Co/Ni クラッド鋼板および Fe-Co 平板の片持ちはり.

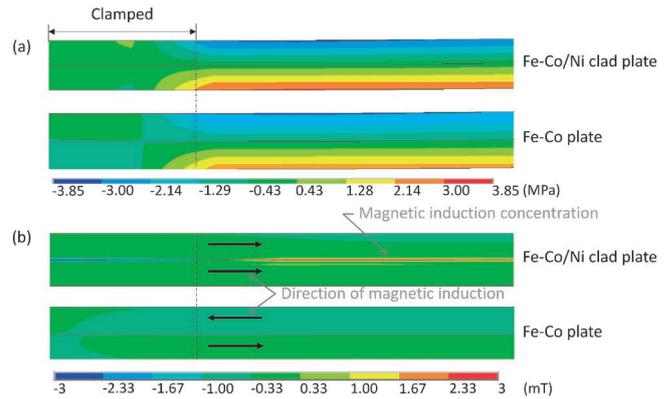


図6 静的曲げを受ける片持ちはりの(a)応力分布と(b)磁束密度分布.

## 4. Fe-Co クラッド鋼板

磁歪平板に曲げ荷重が作用し、下側が凸になるように変形する場合、平板の上側には圧縮応力が、下側には引張応力が生じる. 圧縮応力が生じている部分と引張応力が生じている部分の境界は中立面と呼ばれ、この中立面より上側と下側とで応力  $\sigma_{33}$  の正負が異なる. その結果、式(2)の磁束密度  $B_3$  は一様にならず、これが磁歪平板の高出力の妨げになっている. したがって、曲げ振動による出力電力を可能な限り大きくするには、磁歪材料設計に工夫が必要である<sup>(22)(23)</sup>. 本章では、Fe-Co クラッド鋼板の振動発電特性に注目し、最近の研究成果について述べる.

### (1) 機能発現メカニズム

Fe や Ni などの冷間圧延板と Fe-Co の冷間圧延板とを熱拡散接合させたクラッド鋼板は、曲げ振動を受けると、Fe-Co 平板単独の場合よりも大きな振動発電出力が得られる<sup>(24)</sup>. 図5は自由端に集中荷重を受ける Fe-Co/Ni クラッド鋼板と Fe-Co 平板の片持ちはりを示したもので、長さは 65 mm, 厚さは 1 mm, 幅は 5 mm である. 自由端に 0.05 mm の強制たわみを負荷し、磁場-力学場の相互干渉を考慮した有限要素解析を実施すると、図6(a)に示すように、材料内部に生じる長さ方向垂直応力分布は両材料ともほぼ同程度となる. 材料に生じる応力が等しいにも関わらず、クラッド鋼板の振動発電特性が大きくなる点は、両材料の磁束密度

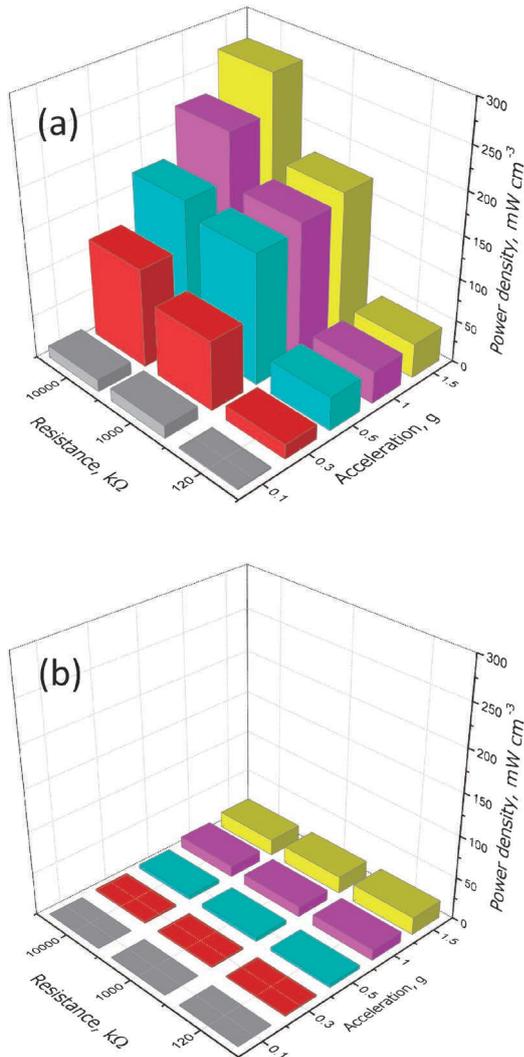


図7 (a) Fe-Co/Ni クラッド鋼板および(b) PZT 系圧電セラミック平板の振動発電実験結果.

分布の違いから理解できる. 図6(b)のように, Fe-Co/Ni クラッド鋼板の磁束密度は中立面より上側と下側とで方向が一致しているが, Fe-Co 平板の場合は方向が中立面の上下で逆になっている. すなわち, Fe-Co 平板は, 曲げ振動によって中立面より上側と下側の磁束が互いに逆方向に変化するため, 式(3)の  $dB_3/dt$  が小さくなる. 一方, 曲げ振動によって, Fe と Fe-Co とのクラッド鋼板は, Fe-Co のみ磁束が変化し, また, Fe の代わりに負の圧磁定数をもつ Ni を用いたクラッド鋼板の場合には, Ni と Fe-Co の磁束が同じ方向に変化して, 出力電力が増大する. さらに, 両材料に応力集中は認められないが, Fe-Co/Ni クラッド鋼板の場合は界面で磁束密度集中が生じている. この磁束密度集中も出力電力を増大させる理由の一つである. これは Fe-Co と Ni の界面における磁束密度ベクトルの法線方向成分と磁場の強さベクトルの接線方向成分の連続性に起因していると考えられる.

## (2) 振動発電特性

図7は, 振動発電デバイスを用いて, 曲げ振動発電実験を実施した結果の一例である<sup>(25)</sup>. コイルの巻き数は64000である. 図7(a), (b)は, それぞれ Fe-Co/Ni クラッド鋼板と PZT 系圧電セラミック平板(市販品)の曲げ振動によって出力される電力密度と負荷抵抗・加速度の関係を示したもので, 振動数 50 Hz の場合である. Fe-Co/Ni クラッド鋼板は, PZT 系圧電セラミック平板では達成できない微小振動からも電力が得られ, 様々な応用が期待される.

最近, Fe-Co クラッド鋼板の逆磁歪特性に及ぼす窒化処理<sup>(26)</sup>, 切欠き<sup>(27)</sup>および初期バイアス磁場方向<sup>(28)</sup>の影響が検討されている. クラッド鋼板の曲げ振動による出力電圧は, 窒化処理を施したり, 切欠きを導入することで増大するようであり, 振動発電特性の増大も予想される.

## 5. おわりに

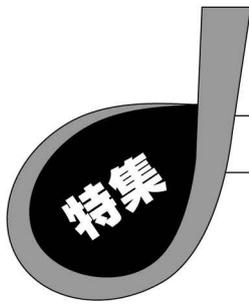
本稿では, Fe-Co 合金を用いた複合材料に注目し, 逆磁歪特性および振動・衝撃発電特性に関する理論的・実験的研究の現状を展望した. まず初めに, Fe-Co ファイバー複合材料の逆磁歪特性と衝撃発電に関する最近の研究状況について概説した. 次に, Fe-Co クラッド鋼板に注目し, 曲げによる磁気力学場の数値シミュレーションと振動発電実験の結果を示して, 考察した. 今後, Fe-Co 系磁歪合金を用いたエネルギーハーベスティング複合材料の開発がますます進むことが予想され, 電磁材料力学に基づく高機能化研究のさらなる発展が望まれる.

本研究の一部は, 東北特殊鋼株式会社 取締役 研究開発部長 江幡貴司氏をはじめ, 多くの方々との共同研究成果である. また, 国立研究開発法人 科学技術振興機構(JST)研究成果展開事業 地域産学バリュープログラム「逆磁歪効果を利用した衝撃発電ヒール・パンプスの開発 ～スポーツシューズへの展開を目指して～」の成果を含む.

## 文 献

- (1) J. Bryzek: TSensors Summit, (2013).
- (2) F. Narita and M. Fox: Adv. Eng. Mater., **20**(2018), 1700743.
- (3) Z. Wang and F. Narita: J. Appl. Phys., **126**(2019), 224501.
- (4) J. Atulasimha and A. B. Flatau: Smart Mater. Struct., **20**(2011), 043001.
- (5) Z. Deng and M. J. Dapino: Smart Mater. Struct., **26**(2017), 103001.
- (6) T. Nakajima, T. Takeuchi, I. Yuito, K. Kato, M. Saito, K. Abe, T. Sasaki, T. Sekiguchi and S. Yamaura: Mater. Trans., **55**(2014), 556-560.
- (7) S. Yamaura, T. Nakajima, T. Satoh, T. Ebata and Y. Furuya: Mater. Sci. Eng. B, **193**(2015), 121-129.
- (8) L. Liu, Q. Zhan, H. Yang, H. Li, S. Zhang, Y. Liu, B. Wang, X. Tan and R.-W. Li: AIP Adv., **6**(2016), 035206.
- (9) S. P. Bennett, J. W. Baldwin, M. Staruch, B. R. Matis, J. LaComb, O. M. Jvan'tErve, K. Bussmann, M. Metzler, N.





# Ni<sub>2</sub>MnGa 系強磁性ホイスラー合金の磁歪特性

左近 拓男<sup>1\*</sup> 山崎 優志<sup>2)</sup> 安達 義也<sup>\*\*</sup>  
野尻 浩之<sup>\*\*\*</sup> 鹿又 武<sup>\*\*\*\*</sup>

## 1. ホイスラー合金の磁気特性ならびに磁歪の特徴

### (1) ホイスラー合金の磁気特性

ホイスラー合金は、形状記憶効果を有することから、高機能合金として注目されている。さらに、磁気熱量効果を用いた磁気冷凍材料、ハーフメタルにおける磁気抵抗効果を用いたスピントロニクス材料、ペルティエ効果やゼーベック効果を用いた熱電変換素子など機能性材料としての応用に向けた研究もなされている<sup>(1)</sup>。また、マルテンサイト相での6%におよぶ巨大磁歪<sup>(2)</sup>や、母相のオーステナイト相とマルテンサイト相の間の中間相であるプレマルテンサイト相での大きな磁歪<sup>(3)</sup>も注目されている。本稿では、Ni<sub>2</sub>MnGa系ホイスラー合金の磁歪に関する研究について報告する。我々はこれまでにNi-Mn-X-Ga(x=Fe, Cu, Co)の磁性を研究してきた。各元素の組成比を変えていくと、室温付近でマルテンサイト構造相転移  $T_M$  が起こることが確認された<sup>(4)</sup>。これらの合金は基底状態が強磁性であるが、キュリー温度  $T_C$  も組成比を変えることで変化し、また、マルテンサイト転移と強磁性転移が同じ温度で起こる組成比の合金も見いだされた<sup>(5)</sup>。これらの合金は構造相転移と磁気相転移が同じ温度で同時に起こることから、Magneto-elastic coupling (磁性と格子との相関)が強いことが指摘されている<sup>(4)</sup>。磁歪も磁化といった磁性に関係することから、結晶構造と磁性に依存すると考えられる。

### (2) プレマルテンサイト相の磁歪

Ni<sub>2</sub>MnGaは、室温の母相では結晶構造がL2<sub>1</sub>立方晶型オーステナイト相(A相)であるホイスラー型合金であるが、室温より低温に冷却していくと、プレマルテンサイト転移を起こし、プレマルテンサイト転移温度  $T_p=255$  Kでプレマルテンサイト相(P相)が出現する。さらに低温では、マルテンサイト変態によりマルテンサイト相転移開始温度  $T_M=195$  Kで7Mマルテンサイト双相(M相)となる。M相では双晶磁歪により、6%におよぶ巨大磁歪が発生するが<sup>(2)</sup>、P相でも-200 ppm程度の大きな磁歪が発生する<sup>(3)</sup>。この値は、室温でのNi多結晶の磁歪(-34 ppm)<sup>(6)</sup>の5倍程度の大きさである。松井らは、A相およびM相の結晶磁気異方性以外にも、磁気異方性定数に磁歪項を導入することでP相での磁気異方性が説明されるとした<sup>(3)</sup>。SinghらはX線による結晶構造解析から、P相は3Mの結晶構造であることを明らかにした<sup>(7)</sup>。A相は立方晶で対称性が高く、そのため磁気異方性が小さいが、M相では7Mの層状で歪んだ構造となり、そのため磁気異方性も大きくなる。P相では3M構造であるので、M相ほど結晶の歪みは大きくはないが、A相よりも磁気異方性が大きく、また磁気異方性定数が不安定になるために、室温での磁歪(-40 ppm)の5倍の大きな磁歪が発生することになると考えられる。価電子数(平均外殻電子数) $e/a$ はNi, Mnは3d+4s軌道でそれぞれ10, 7であり、Gaは4s+4p軌道で3であるので、Ni, Mn, Gaの組成比を変えることでNi<sub>2</sub>MnGaあたりの価電子濃度 $e/a$ を変化させることができる。マルテンサイト転移温度  $T_M$  や  $T_p$  は、1

\* 龍谷大学理工学部機械システム工学科；1)教授, 2)学生(〒520-2194 大津市瀬田大江町横谷1-5)

\*\* 山形大学理工学研究科；准教授

\*\*\* 東北大学金属材料研究所；教授

\*\*\*\* 東北学院大学工学総合研究所；客員教授

Magnetostrictions of Ni<sub>2</sub>MnGa Type Ferromagnetic Heusler Alloys; Takuo Sakon\*, Yuushi Yamasaki\*, Yoshiya Adachi\*\*, Hiroyuki Nojiri\*\*\* and Takeshi Kanomata\*\*\*\* (\*Department of Mechanical and Systems Engineering, Faculty of Science and Technology, Ryukoku University, Otsu. \*\*Graduate School of Science and Engineering, Yamagata University, Yonezawa. \*\*\*Institute for Materials Research, Tohoku University, Sendai. \*\*\*\*Research Institute for Engineering and Technology, Tohoku Gakuin University, Tagajo)

Keywords: Heusler alloys, shape-memory alloys, itinerant ferromagnetism, magnetostriction, magnetization, premartensitic transition, forced magnetostriction, spin fluctuation theory

2019年7月22日受理[doi:10.2320/materia.59.21]

分子あたりの価電子濃度  $e/a$  が大きくなるにつれて高くなる  
ことが明らかとなっている<sup>(3)(8)</sup>。松井らは、これらの結晶構  
造転移温度が価電子数に依存することから、電子エネルギー  
と結晶構造が密接に関連していることを指摘した<sup>(3)</sup>。また、  
磁歪は磁気異方性や磁化と関係しており、電子エネルギーと  
も密接な関係にあると考えられる。

本稿では、 $\text{Ni}_2\text{Mn}_{1-x}\text{Cr}_x\text{Ga}$  ( $x=0.00, 0.15$ ) 多結晶の透磁率  
と磁歪の実験結果を紹介する。他の  $\text{Ni}_2\text{MnGa}$  系合金の磁歪  
の結果も交えて、 $e/a$  と磁歪の関係を考察する。

### (3) キュリー温度 $T_C$ における強制磁歪と遍歴磁性スピン ゆらぎの相関

近年、高橋らにより、強磁性体の磁化などの磁性・物性量  
を遍歴磁性スピンゆらぎ理論を用いて解析がなされている<sup>(9)</sup>。この理論により、スピンの熱ゆらぎのみならず、ゼロ  
点ゆらぎも考慮することで遍歴磁性体の磁化、帯磁率、比熱  
や磁歪などの物性量が、self consistent(自己無撞着)に矛盾  
なく説明できる。高橋の遍歴磁性の理論に基づく磁化  $M$  と  
外部磁場  $H$  の解析と考察も行われている。従来の遍歴磁性  
モデルでは、アロットプロットによる磁化の解析が行われて  
いるが、高橋は強磁性転移温度(キュリー温度)  $T_C$  近傍での  
 $M^6$  vs.  $H$  の関係が  $\delta=5$  であることを理論的に提唱した。磁  
化測定から、 $\text{Ni}_2\text{MnGa}$  系や  $\text{Co}_2\text{VGa}$  などのハーフメタルホ  
イスラー合金でも、高橋理論に適用することが報告されてい  
る<sup>(10)(11)</sup>。

高橋理論ではさらに、 $T_C$  近傍での磁歪の磁化依存性につ  
いて理論的考察がなされている<sup>(9)</sup>。それによると、強制体積  
磁歪  $\omega_h$  (磁歪の磁場依存性) と磁化  $M$  の関係は  $\omega_h \propto M^4$  である。  
これまでの磁場中での強制磁歪の研究としては松永らの  
論文がある<sup>(12)</sup>。松永らは、弱い強磁性体である  $\text{MnSi}$  の強  
制線磁歪測定および磁化測定から磁歪と磁化の関係を研究し  
た。彼らは、磁歪は磁場中での  $\text{Mn}$  の 3d バンドの分裂によ  
る磁化の変化によるものとし、磁歪は磁化の 2 乗に比例す  
ると結論した。磁場方向の線磁歪  $(\Delta L/L)_\parallel$  と磁化  $M$  の関係  
を  $(\Delta L/L)_\parallel$  vs.  $M^2$  でプロットした。キュリー温度  $T_C=29$   
K より高温の 40 K および 50 K では原点を通る直線で近似で  
きるが、 $T_C$  で直線で近似すると原点を通らず、磁化の小  
さい部分では磁化の 2 乗より高次の項に比例すると思われる。

本研究では、 $\text{Ni}_2\text{Mn}_{1-x}\text{Cr}_x\text{Ga}$  ( $x=0.00, 0.15$ ) の  $T_C$  での線  
磁歪  $\Delta L/L$  を測定し、 $\omega_h = (\Delta L/L)_\parallel + 2 \times (\Delta L/L)_\perp$  から体  
積磁歪  $\omega_h$  を求め<sup>(13)</sup>、磁化  $M$  と体積磁歪  $\omega_h$  の相関につ  
いて解析ならびに考察を行った。

## 2. 実験について

試料は、山形大学理工学研究科で育成された  $\text{Ni}_2\text{Mn}_{1-x}\text{Cr}_x$   
 $\text{Ga}$  ( $x=0.00, 0.15$ ) 多結晶試料を用いた。 $\text{Ni}_2\text{MnGa}$  ( $x=0.00$ )  
は  $e/a=7.500$  である。 $\text{Mn}$  を  $\text{Cr}$  で置換した理由は、これま  
でに  $e/a > 7.500$  の合金は多く研究されているが、 $e/a < 7.500$   
の合金は研究例が少ないからである。 $\text{Mn}$  と  $\text{Cr}$  は周期表で

は隣同士であり、 $\text{Cr}$  は外殻電子が  $3d^5 + 4s^1 = 6$  個であり、  
 $\text{Mn}$  の  $3d^5 + 4s^2 = 7$  個より 1 個少ない。 $\text{Ni}_2\text{Mn}_{0.85}\text{Cr}_{0.15}\text{Ga}$  ( $x$   
 $=0.15$ ) の  $e/a$  は 7.460 である。

原料は純度が 3N の  $\text{Ni}$ , 4N の  $\text{Mn}$ , 4N の  $\text{Cr}$ , ならびに  
6N の  $\text{Ga}$  を用いてアーク溶解されたインゴットを、 $800^\circ\text{C}$  で  
3 時間および  $500^\circ\text{C}$  で 2 日間アニールしたあと急速水冷して  
育成された。試料サイズは  $3 \times 3 \times 4$  mm である。磁歪測定  
は 10T-CSM 磁石で 0~50 kOe の範囲で歪みゲージ(共和電  
業株 KFH-02-120-C1-16) を用いて行った透磁率は、零磁場  
において、振動数 73 Hz, 振幅  $\pm 0.8$  kA/m ( $\pm 10$  Oe) の交流  
磁場中で測定を行った。磁化測定は龍谷大学理工学部のパ  
ルス磁場装置を用いた。

## 3. 実験結果と考察

### (1) $\text{Ni}_2\text{Mn}_{1-x}\text{Cr}_x\text{Ga}$ ( $x=0.00, 0.15$ ) の磁歪の温度依存性

図 1 に外部磁場が零のときの (a)  $x=0.00$ , および (b)  $x=$   
 $0.15$  の透磁率  $\mu$  の温度依存性を示す<sup>(14)</sup>。 $x=0.00$  では、420  
K からの降温過程において 380 K 付近で急激な増加が観測  
された。これは強磁性転移によるものであり、 $d\mu/dT$  の極  
大値から、キュリー温度  $T_C=375$  K であった。温度を降下  
させると、260 K で「へこみ」(dip) が観測された。これは  
 $L_{21}$  型 A 相から 3M 型 P 相へのプレマルテンサイト転移が  
原因である。

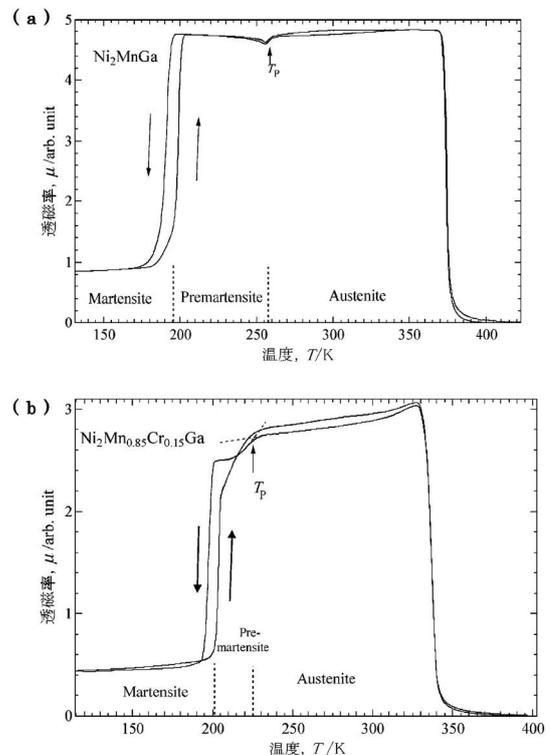


図 1 (a)  $x=0.00$  と (b)  $x=0.15$  の透磁率の温度依存性。  
 $T_p$  はプレマルテンサイト転移温度。文献(14) [T.  
Sakon, et al., Metals, 7 (2017), 410. MDPI, doi:10.3390/  
met7100410]からの転載。

さらに温度を降下させると 195 K で急激な減少が観測された。M 相の透磁率は A 相や P 相よりもかなり小さい。この原因は磁気異方性によるものと考えられる。

M 相では双晶構造となるが、母相と比べて10倍程度磁気異方性が大きくなる。M 相では、等温で磁場を印加させると、磁化容易軸の磁場誘起回転により、双晶磁歪という巨大磁歪が生じる。なお、この磁歪は、磁場による歪みの発生ということで、「巨大磁場誘起歪み」と称することもある。P 相では、超音波の実験により、弾性率の低下ならびに格子のソフト化が生じることが指摘された<sup>(15)</sup>。松井らは、Ni<sub>2</sub>MnGa の透磁率や磁気トルクおよび磁歪の実験を行うことにより、P 相で -200 ppm の大きな磁歪が発生すること、また、磁気異方性が磁歪に関係することを証明した<sup>(3)</sup>。松井らは M 相を正方晶として、母相の立方晶と正方晶の磁気異方性定数を各温度での磁気トルク測定により決定した。測定された異方性定数、 $K'_{u1}$ ,  $K'_{u2}$  は正方晶の結晶磁気異方性定数  $K_{u1}$ ,  $K_{u2}$ , ならびに磁歪項  $K'_\lambda$  を導入して、

$$K'_{u1} = K_{u1} + K'_{u2} \quad (1)$$

$$K'_{u2} = K_{u2} - K'_\lambda \quad (2)$$

の関係が成り立つことを提案した。磁場が印加されているときは結晶項の  $K_{u1}$ ,  $K_{u2}$  に磁歪項  $K'_\lambda$  が作用し、また、 $T_P$  近傍の温度で  $K'_\lambda$  の絶対値の増大がある。この原因は、弾性率が高温から  $T_P$  に向かって急に減少する格子振動のソフト化のためであると説明されている<sup>(3)</sup>。 $T_P$  に近づくにつれて磁歪項  $K'_\lambda$  が増大により  $T_P$  付近で大きな磁歪が発生すると考えられる。

図 1(a) の  $x=0.00$  において、 $T_P$  付近での透磁率の減少が観測された。振幅  $\pm 0.8$  kA/m ( $\pm 10$  Oe) の弱磁場では、磁歪は数 ppm と極めて小さいため、式 (2) の磁歪項は極めて小さいと考えられ、結晶磁気異方性が磁気異方性の大部分を占めていると判断できる。松井らの磁気トルク測定から求められた  $K_1$  の大きさは、室温では約  $3.5 \times 10^2$  J/m<sup>3</sup> であるが、 $T_P$  では  $11.2 \times 10^2$  J/m<sup>3</sup> に上昇する。磁気異方性が大きくなれば透磁率は小さくなるので、この  $K_1$  の急激な上昇が透磁率の減少をもたらしていると考えられる。 $T_P$  よりさらに降温させると、 $K_{u1}$ ,  $K_{u2}$  が両方とも温度の下降とともに小さくなっているため、 $T_P$  より温度が下がると、透磁率は上昇すると考えられる。一方、図 1(b) に示した  $x=0.15$  では、 $T_P$  以下で透磁率は顕著に減少している。 $e/a$  が異なることから電子状態が異なり、そのため磁性も  $x=0.00$  とは異なっていると考えられる。透磁率の温度依存性からは、 $x=0.00$  よりも磁気異方性が大きいことが推察される。P 相での結晶構造解析はまだ行われていないが、今後単結晶を育成し、A 相、P 相および M 相での結晶構造解析、ならびに磁気トルク測定による磁気異方性の研究をすることが重要である。

図 2 (a), (b) に、 $x=0.00$  および  $x=0.15$  の磁歪の温度依存性をそれぞれ示した<sup>(14)</sup>。磁歪  $\lambda$  は、 $\lambda = 2((\Delta L/L)_{\parallel} - (\Delta L/L)_{\perp})/3$  の公式を用いた<sup>(16)</sup>。 $x=0.00$  では、A 相から徐々に降温させると、磁歪量の絶対値が単調に増加し、250 K を中心に最大で -180 ppm の凹み (dip) が観測された。この凹み

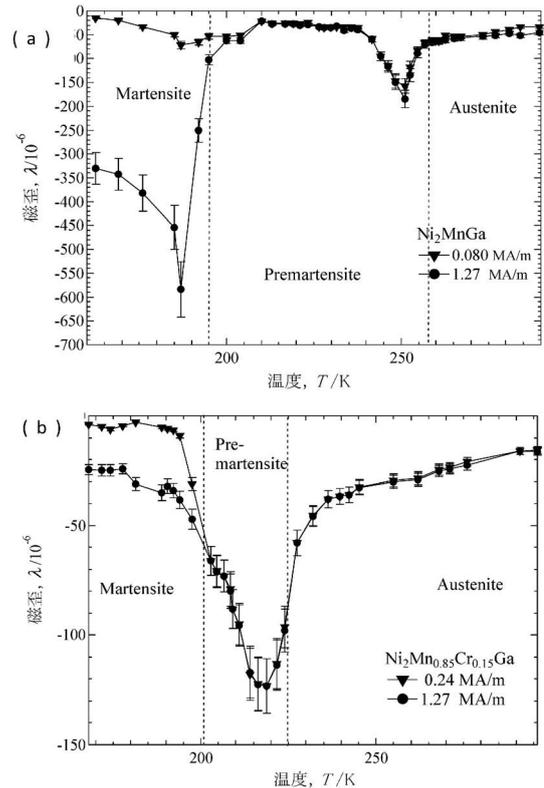


図 2 (a)  $x=0.00$  と (b)  $x=0.15$  の磁歪の温度依存性。文献<sup>(14)</sup> [T. Sakon, *et al.*; *Metals*, 7 (2017), 410. MDPI, doi:10.3390/met7100410]からの転載。

の温度領域は、透磁率の凹みの温度領域と一致した。P 相では 3M 構造となり A 相よりも結晶の対称性が低下することも合わせて考えると<sup>(7)</sup>、プレマルテンサイト転移に伴う格子変形と磁気異方性の増大により、磁歪量の増大が発生したと考えられる。さらに低温の M 相ではマルテンサイト終了温度  $T_{Mf} = 170$  K,  $H = 1.27$  MA/m (10 kOe) で -580 ppm の磁歪が発生した。M 相では低磁場の 0.080 MA/m (630 Oe) では A 相や M 相よりも磁歪量が小さいことである。M 相では 7M 双晶構造であり、ある程度の磁場を印加することで A 相や P 相よりも巨大な双晶磁歪が発生するが、数百 Oe 程度の弱い磁場では大きな磁気異方性のため磁気モーメントの回転が鈍いので、磁気的にはドメイン構造である双晶構造がそのまま保たれることが原因と考えられる。一方、 $x=0.15$  では、200 K から 230 K の温度領域で磁歪量の増加が観測された。この温度領域も  $x=0.00$  と同様に、透磁率の減少が観測される温度領域であり、このことから  $x=0.15$  は  $x=0.00$  と同様の機構で大きな磁歪が発生したと考えられる。 $T_P$  近傍での磁歪は -120 ppm であり、その絶対値は  $x=0.00$  よりも小さな値となった。いずれの合金でも、A 相および P 相では 1 kOe 以上の磁場では磁歪が余り増加しないことが特徴である。M 相での巨大磁場誘起歪みは数 kOe から数十 kOe の比較的強い磁場が必要であり、また、応力を印加しないと元の双晶構造には戻らない。一方、P 相での磁歪の場合、1 kOe 以下の磁場で磁歪が発生することから、磁場として

は、フェライト磁石程度の磁場で十分であり、大気圧でも元の状態に戻るため、磁気センサや逆磁歪発電などの応用にはP相での磁歪のほうが適当である。

$\text{Ni}_2\text{Mn}_{1-x}\text{Cr}_x\text{Ga}$  および他の実験結果を踏まえて、 $\text{Ni}_2\text{MnGa}$  系ホイスラー合金の磁歪と  $e/a$  の関係を示したものが図3である<sup>(17)</sup>。  $e/a$  が大きくなるにつれて磁歪量の絶対値が増加する結果となった。  $T_P$  も  $e/a$  が大きくなるにつれて高くなることも考慮に入れると、電子エネルギー、磁歪、そして  $T_P$  は互いに相関していることを示唆している。

$e/a$  が大きくなると磁歪量は大きくなり、また  $T_P$  も室温に近づいていくが、 $T_M$  は  $T_P$  よりも急に高くなるため、290 K 付近で  $T_M$  は  $T_P$  と一致する。このときの  $e/a$  はおよそ 7.58 である。また、 $\text{Ni}_2\text{Mn}_{1-x}\text{Cr}_x\text{Ga}$  においては、 $x \geq 0.20$  ではP相が観測されなかった<sup>(14)</sup>。P相での大きな磁歪は、M相での双晶磁歪のような、7M 双晶構造という大きな「ひずみ状態」から単相に磁場誘起歪みを起こすものではなく、3M 構造という適度な「ひずみ状態」から単相に変化する大きな磁歪であるため、実用性を考えるとP相の磁歪のほうが有利である。今後は  $T_P$  が室温以上の合金を探索することも重要である。

## (2) 磁化と強制磁歪の関係

高橋理論では、キュリー温度  $T_C$  における磁化の磁場依存性については、 $T_C$  近傍での  $M^\delta$  vs.  $H$  の関係が  $\delta=5$  のときに原点を切る直線となる<sup>(9)</sup>。さらに、強制体積磁歪  $\omega_h$  (磁歪の磁場依存性) と磁化  $M$  の関係は  $\omega_h \propto M^4$  である。これまでの研究では、 $\text{Ni}_2\text{MnGa}$  ( $x=0.00$ )<sup>(18)</sup> ならびに価電子濃度を増加させた  $e/a$  の合金である  $\text{Ni}_{2+x}\text{MnGa}_{1-x}$  ( $x=0.02, 0.04$ ,  $e/a=7.570$  for  $x=0.04$ )<sup>(17)</sup> は  $H \propto M^5$  の関係が成り立ち、磁場に平行方向の強制線磁歪  $\Delta L/L \propto M^4$  であった<sup>(17)(18)</sup>。今回は、高橋理論と同様に強制体積磁歪  $\omega_h$  と磁化  $M$  の関係を調べるために、キュリー温度  $T_C$  での  $\text{Ni}_2\text{MnGa}$  ( $T_C=375$

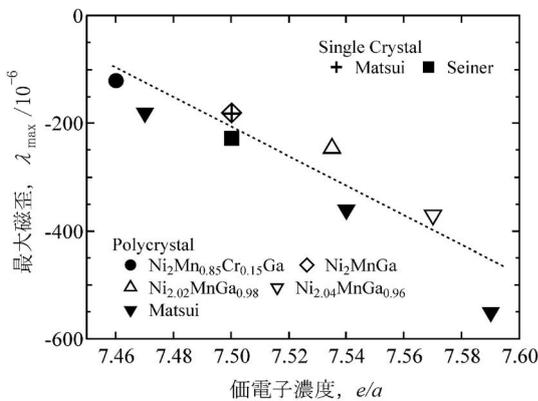


図3  $\text{Ni}_2\text{MnGa}$  系合金のP相での磁歪の最大値の  $e/a$  依存性。●：松井らによる多結晶<sup>(3)</sup>。+：松井らによる単結晶<sup>(3)</sup>。■：Seinerらによる単結晶<sup>(16)</sup>。△, ▽：多結晶  $\text{Ni}_{2+x}\text{MnGa}_{1-x}$ <sup>(17)</sup>。破線は近似直線。文献(14) [T. Sakon, *et al.*; *Metals*, 7 (2017), 410. MDPI, doi:10.3390/met7100410]からの転載。

K) および  $\text{Ni}_2\text{Mn}_{0.85}\text{Cr}_{0.15}\text{Ga}$  ( $T_C=338$  K) の磁場方向の線磁歪  $(\Delta L/L)_//$  ならびに磁場に垂直方向の線磁歪  $(\Delta L/L)_\perp$  を測定し、 $\omega_h = (\Delta L/L)_// + 2 \times (\Delta L/L)_\perp$  の関係式を用いて強制体積磁歪  $\omega_h$  を求めた<sup>(13)</sup>。図4に  $\text{Ni}_2\text{MnGa}$  のキュリー温度における強制体積磁歪  $\omega_h$  の  $M^4$  依存性を示した。  $\omega_h$  は線磁歪と同様に  $M^4$  に比例した。図5には  $\text{Ni}_2\text{Mn}_{0.85}\text{Cr}_{0.15}\text{Ga}$  のキュリー温度における強制線磁歪  $(\Delta L/L)_//$  と、強制体積磁歪  $\omega_h$  の  $M^4$  依存性を示した。高橋理論によると、 $\omega_h$  は  $M^4$  に比例する。キュリー温度での磁化と磁場の関係  $H \propto M^5$  および強制体積磁歪と磁化の関係  $\omega_h \propto M^4$  から、 $\text{Ni}_2\text{MnGa}$  系合金では磁化ならびに磁歪ともに高橋理論に従った遍歴電子磁性を示すと結論される。

強制体積磁歪  $\omega_h$  と価電子濃度  $e/a$  の関係を考察するために、 $\text{Ni}_2\text{Mn}_{1-x}\text{Cr}_x\text{Ga}$  ( $x=0.00, 0.15, 0.25$ )<sup>(19)</sup> の実験結果と、 $\text{Ni}_{2.02}\text{MnGa}_{0.98}$ <sup>(17)</sup> および、 $\text{Ni}_{2.04}\text{MnGa}_{0.96}$ <sup>(17)</sup> の強制線磁歪  $(\Delta L/L)_//$  の結果をもちいて、図6に、 $H=50$  kOe における強制体積磁歪  $\omega_h$  と価電子濃度  $e/a$  の関係を作成した。図5において強制体積磁歪  $\omega_h$  は強制線磁歪  $(\Delta L/L)_//$  の3倍と

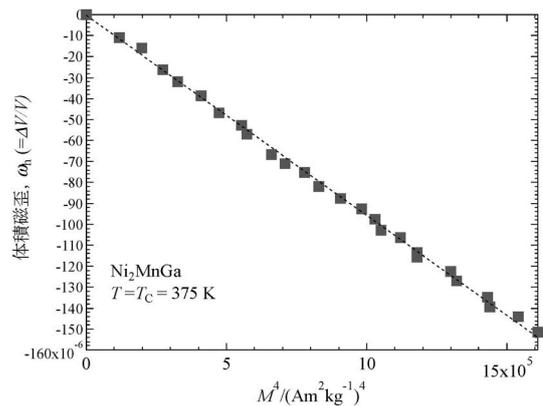


図4 キュリー温度  $T_C$  における、 $\text{Ni}_2\text{MnGa}$  の強制体積磁歪。文献(19) [T. Sakon, *et al.*; *Materials*, 12 (2019), 3655. MDPI, doi:10.3390/ma12223655]からの転載。

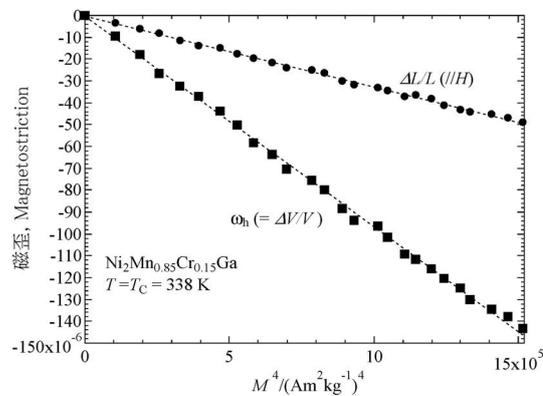


図5 キュリー温度  $T_C$  における、 $\text{Ni}_2\text{Mn}_{0.85}\text{Cr}_{0.15}\text{Ga}$  の強制磁歪の  $M^4$  依存性。●：磁場に平行方向の線磁歪  $\Delta L/L$ 。■：体積磁歪  $\omega_h = \Delta V/V$ 。破線は近似直線。文献(19) [T. Sakon, *et al.*; *Materials*, 12 (2019), 3655. MDPI, doi:10.3390/ma12223655]からの転載。



# Fe-Ga 多結晶薄膜の磁歪と 磁化ダイナミクスに関する研究

遠藤 恭\*

## 1. はじめに

ユビキタスセンサネットワークの構築<sup>(1)</sup>に向けて、さまざまな産業分野でのセンシングやモニタリング、エネルギー支援や人的健康支援等の分野でようやく実用化が開始されている。このセンサネットワークは社会インフラにおいて従来の運営管理から個人や社会・経済活動を密接に結び付ける重要な基盤技術となっている。その一方で、現状のセンサ送信技術では電力消費が多く、電池交換等のメンテナンスが問題となっている。この問題を解決する方法の一つとして、エネルギーハーベスティング(環境発電)が注目されている。

エネルギーハーベスティング<sup>(2)(3)</sup>は身の回りのどこにでもある環境中の未利用エネルギーを収穫して、電力に変換する技術である。未利用エネルギーの一つとして振動をエネルギー源とする力学的エネルギーがあげられる<sup>(4)</sup>。このエネルギーを電力に変換する方式は、電磁誘導<sup>(5)(6)</sup>、圧電<sup>(7)</sup>、静電誘導<sup>(8)</sup>、磁歪<sup>(9)(10)</sup>の4種類である。なかでも、磁歪方式は、磁歪材料内部の磁界変化にともなって外部への漏れた分を、巻き付けたコイルを通じて電気に変換する方式である。この方式は高いエネルギー変換効率が可能であり、耐久性、耐熱性および小型化など他の方式が抱えている課題を克服できると期待されている。したがって、材料開発を中心に研究が進められている。

エネルギーハーベスティング用磁歪材料の候補の一つとして、ガルフェノール(Fe-Ga合金)<sup>(11)(12)</sup>が注目されている。なぜなら、テルフェノール-D(Terlfenol-D, Tb-Dy-Fe)<sup>(13)-(15)</sup>に比べて磁歪量が小さいものの、靱性および強度といった機械特性に優れ、加工性もよく<sup>(16)</sup>、かつキュリー温度が高いといった特長を有しているからである。その一方

で、磁歪量がGa組成および結晶方位性に依存することから、組成および結晶方位といった構造パラメータの制御が重要な課題となっている。

これまでのFe-Ga合金に関する研究は主にバルク合金を用いて行われ、エネルギーハーベスティングへの応用研究<sup>(9)(10)(17)</sup>だけでなく、基礎研究の観点からは結晶構造と磁歪量との関連性<sup>(18)(19)</sup>について報告されている。一方で、Fe-Ga薄膜材料に関しては、エネルギーハーベスティングへの応用に加えてアクチュエータやセンサデバイスへの応用、さらに新規電磁気デバイスやマイクロ波磁気デバイスの創製に向けて、Fe-Ga単結晶薄膜<sup>(20)-(27)</sup>や多結晶薄膜<sup>(28)-(31)</sup>に関する研究開発が進められている。Fe-Ga単結晶薄膜に関しては、金属基板、GaAsやMgOといった単結晶基板上にスパッタ法もしくは分子線エピタキシー法により膜厚やGa組成の異なるFe-Gaエピタキシャル膜を作製し、それらの磁歪量と高周波磁気特性について検討されてきた。なかでも、ガルフェノールの組成に近いGa組成領域では、磁歪量が80 ppm<sup>(23)</sup>、Gilbert制動定数(以下、ダンピング定数と記述)が0.0055<sup>(27)</sup>となることが報告されている。しかしながら、Fe-Ga多結晶薄膜に関しては、上述したデバイス応用に向けた、Fe-Ga膜における構造、磁歪量と高周波磁気特性の膜厚やGa組成に対する関連性について詳細な検討が不十分であり、不明瞭な点が多い。したがって、筆者らは膜厚およびGa組成の異なる幅広いFe-Ga多結晶薄膜を、DCマグネトロンスパッタ法を用いて作製し、それらの構造、磁歪量および高周波磁気特性(磁化ダイナミクス)の関連性を詳細に検討してきた<sup>(32)-(34)</sup>。本稿では、筆者らがこれまで行ってきた研究の一部について紹介する。

\* 東北大学大学院工学研究科電気エネルギーシステム専攻; 准教授(〒980-8579 仙台市青葉区荒巻字青葉6-6-04)  
(東北大学スピントロニクス学術連携研究教育センター兼務, 東北大学高等研究機構・先端スピントロニクス研究開発センター兼務)  
Study on the Magnetostriction and Magnetization Dynamics of Fe-Ga Polycrystalline Films; Yasushi Endo (Department of Electrical Engineering, Graduate School of Engineering, Tohoku University, Center for Spintronics Research Network (CSRN), Tohoku University, Center for Science and Innovation in Spintronics (CSIS), Organization for Advanced Studies, Tohoku University, Sendai)  
Keywords: Fe-Ga film, saturation magnetostriction, piezo magnetic coefficient, magnetization dynamics, damping constant, statics magnetic properties, polycrystalline structure  
2019年9月9日受理[doi:10.2320/materia.59.26]

## 2. Fe-Ga 膜の構造

Fe-Ga 合金は、Fe-Al 合金と類似した平衡状態図を有し、Ga 組成 25 at% 近傍における状態図は複雑であり、A2, B2, D0<sub>3</sub>, D0<sub>19</sub>, L1<sub>2</sub> など数種の結晶相が近接して存在することが知られている<sup>(35)</sup>。このことを踏まえながら、DCマグネトロンスパッタ法を用いてガラス基板上に作製した膜厚および Ga 組成の異なる Fe-Ga 膜における結晶構造を検討した。図 1 に Fe-Ga 膜の X 線回折パターンの一例を示す。膜厚の増加とともに、いずれの Ga 組成においても、 $2\theta = 44^\circ$  付近のみに弱い回折ピークが観測された。これらの回折ピークは

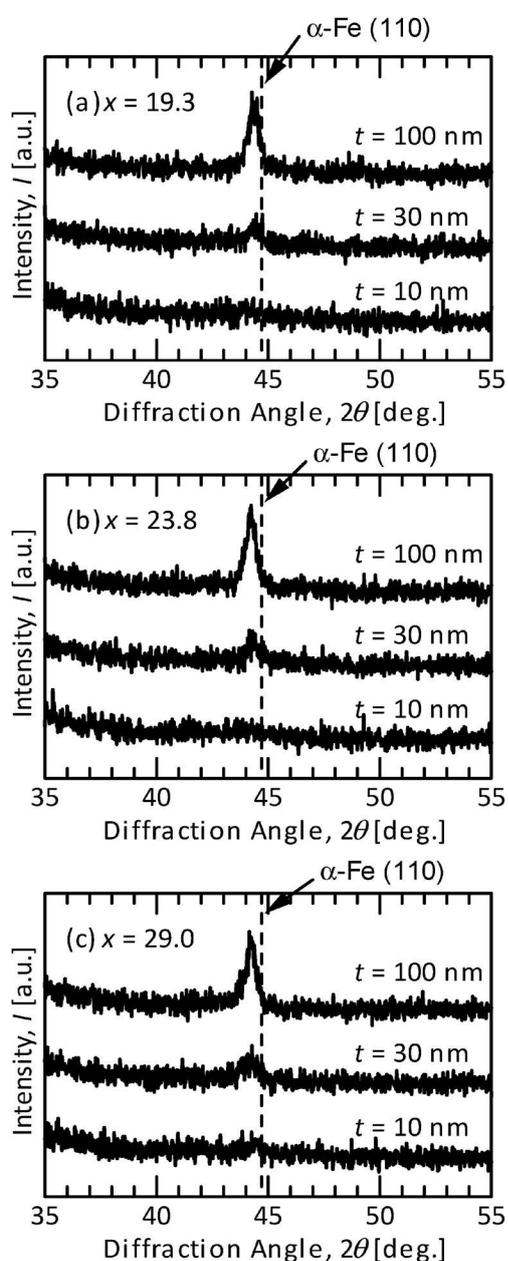


図 1 膜厚 ( $t$ ) および Ga 組成 ( $x$ ) の異なる  $\text{Fe}_{100-x}\text{Ga}_x$  薄膜における X 線回折パターンの一例。破線は Fe (110) の回折ピーク位置 ( $2\theta = 44.7^\circ$ ) である。

bcc 相の (110) に起因したものと考えられる。また、観測された回折ピーク位置は、Ga 組成の増加とともに低角側へ少しずつ移動した。この挙動は、Ga の原子半径が Fe の原子半径よりも大きく、結晶格子がわずかに膨らんだことによるものと考えられる。さらに、膜厚の異なる Fe-Ga 膜の構造をより詳細に検討するために、透過型電子顕微鏡 (TEM) による制限視野回折パターン観察を行った。図 2 からわかるように、膜厚および Ga 組成によらずいずれも bcc (110), (200), (211) に由来する回折リングが観測された。これらの結果から、作製した Fe-Ga 膜の構造は、膜厚および Ga 組成に関係なく、bcc 多結晶構造となっていることがわかった。

Fe-Ga 膜における結晶粒径の Ga 組成による変化を検討するために、膜面内方向の結晶粒径を原子間力顕微鏡 (AFM) により、膜面垂直方向の結晶粒径を X 線回折測定により観測された bcc (110) 回折ピーク位置と半値幅を Scherrer の式<sup>(36)</sup>にあてはめることにより評価した。膜面内方向の結晶粒径に関しては (図 3(a)), 22.3 at% 以下の Ga 組成において約 30 nm から約 20 nm まで減少し、22.3 at% 以上の Ga 組成ではほぼ一定となった。また、膜面垂直方向の結晶粒径に

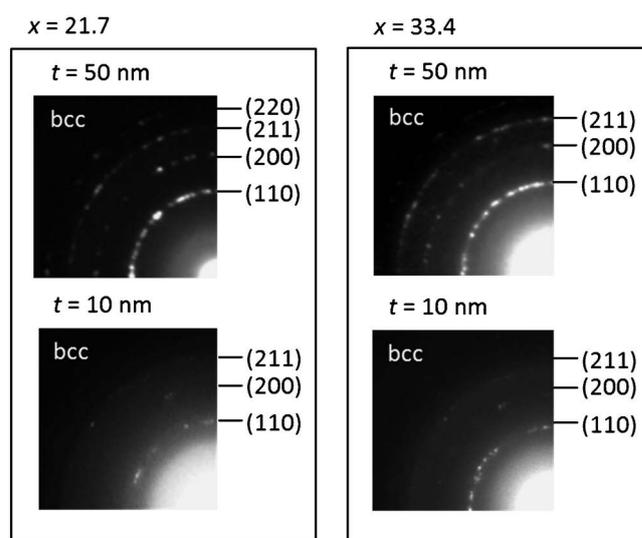


図 2 膜厚 ( $t$ ) および Ga 組成 ( $x$ ) の異なる  $\text{Fe}_{100-x}\text{Ga}_x$  薄膜における制限視野回折像の一例。

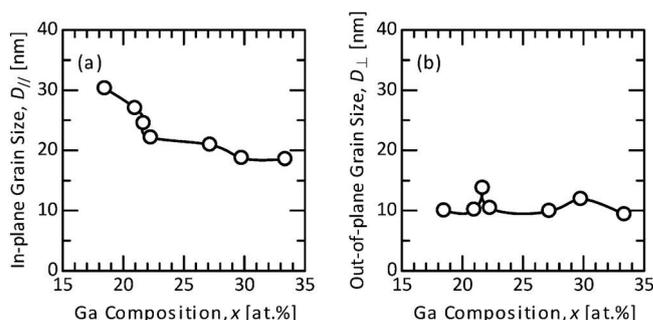


図 3 50 nm 厚の  $\text{Fe}_{100-x}\text{Ga}_x$  薄膜における膜面内方向の粒径および膜面垂直方向の粒径の Ga 組成 ( $x$ ) 依存性。

関しては(図3(b)), Ga組成に対する明確な依存性は見られず, 10~15 nm程度となった. これらの結果から, 作製したFe-Ga膜の結晶粒は, Ga組成にほとんど依存せず膜面内方向に少し伸びた形状となっていることがわかった. また, 粒径に関しては, いずれのGa組成においても微細なものとなっていることを示唆している.

### 3. Fe-Ga 多結晶膜の静磁気特性

本節では, 2節で述べたような構造を有するFe-Ga膜の静磁気特性を評価した結果について述べる.

膜厚およびGa組成の異なるFe-Ga膜の磁化曲線を振動試料型磁力計(VSM)により評価した. それらの曲線の一例を図4に示す. いずれのGa組成においても, 曲線形状は膜面へ印加する外部磁界の方向にはわずかにしか依存しないものの, 膜厚に対して異なっていた. このような挙動は他のGa組成のFe-Ga膜においても観測され, 膜面内の磁壁や磁区構造等に由来するものと考えられる. これらの磁化曲線から, 保磁力( $H_c$ ), 残留磁化比( $M_r/M_s$ )および飽和磁化( $4\pi M_s$ )を評価した.  $H_c$ に関しては(図5(a)), 5 nm厚の場合を除いていずれの膜厚においても, Ga組成の増加とともに

に減少する傾向にあるものの, それらの値は20~100 Oeとなり, 他の軟磁性材料に比べると高くなった. このような $H_c$ のGa組成による変化はMorleyらの報告<sup>(30)</sup>と類似した結果であり, 膜面内における磁壁のピニングによるものと考えられる.  $M_r/M_s$ に関しては(図5(b)), 磁化曲線形状の変化と同じように, 膜厚およびGa組成に関係なく外部磁界の方向に依存してわずかに変化した. これらの結果は, 膜面内の結晶磁気異方性によるものと考えられる. また,  $4\pi M_s$ に関しては(図5(c)), いずれも膜厚においても, Ga組成の増加とともに約16.5 kGから約12 kGへと減少した. これらの挙動は, 不規則相を有するFe-Ga合金における飽和磁化のGa組成による変化<sup>(18)</sup>と類似していて, 非磁性元素にあたるGaの割合がFe-Ga薄膜内で単調に増加したことによるものと考えられる.

膜厚およびGa組成の異なるFe-Ga膜における磁歪量( $\lambda$ )に関しては, 光てこ法による高感度磁歪測定装置(最大磁界175 Oe, 測定感度0.1 ppm以下, 東栄科学製)<sup>(32)</sup>を用いて回転磁界中での磁歪によって生じる試料の伸び縮みを試料の反り(曲率半径として)計測して評価した.  $\lambda$ と磁界強度( $H_{ex}$ )との関係(図6)からわかるように, いずれのGa組成においても,  $\lambda$ は $H_{ex}$ の増加とともにゼロ近傍から急激に大きくなり飽和した. なかでも,  $\lambda$ の値がゼロ近傍から立ち上がりはじめる $H_{ex}$ の値と飽和し始める $H_{ex}$ の値は, いずれも膜厚の増加とともに増加し, 一方でGa組成の増加とともに減少した. これらの挙動は,  $H_c$ および飽和磁界( $H_s$ )のGa組成依存性と類似した結果となった.

また, これらの $\lambda$ - $H_{ex}$ 曲線を用いてFe-Ga膜の飽和磁歪量( $\lambda_s$ )と最大ピエゾ磁気係数( $(d\lambda/dH_{ex})_{max}$ )を評価し, それらのパラメータについて膜厚を固定してGa組成を関数としてまとめた. それらの結果を図6, 7に示す.  $\lambda_s$ に関しては(図7), いずれのGa組成においてもおおむね膜厚の増加とともに増加し, 30 nm厚のときに最大となり, さらに膜厚を増加させると減少した. また,  $\lambda_s$ は5 nm厚の場合を除いて膜厚に関係なく, Ga組成の増加とともに増加し, Ga組成25~28 at%付近で極大をとり, さらにGa組成が増加すると, 一度減少後再び増加した. 一方で,  $\lambda_s$ の値に関しては, 最大で60~70 ppmにとどまっていた. Fe-Gaバルク合金(約350 ppm<sup>(12)</sup>)やFe-Ga多結晶膜(最大約90 ppm<sup>(30)</sup>)に比べると低くなった. この原因は次のように考えられる. 薄膜の磁歪量は膜中の結晶粒の方位分布(配向性)に依存する. すなわち, 結晶方位分布が等方的である場合の磁歪量は,  $\lambda_{isotropic} = \frac{2}{5} \lambda_{100} + \frac{3}{5} \lambda_{111}$  ( $\lambda_{100}$ : バルク<100>方向の磁歪定数,  $\lambda_{111}$ : バルク<111>方向の磁歪定数)と表され<sup>(37)</sup>, 膜面垂直方向の結晶方位が<110>方向である場合には $\lambda_{\langle 110 \rangle} = \frac{1}{5} \lambda_{100} + \frac{4}{5} \lambda_{111}$ と表される. Fe-Gaバルク合金の磁歪量は, 1節で記述したように, 結晶方位に依存し,  $\lambda_{100}$ が $\lambda_{111}$ に比べて大きくなることが知られている<sup>(30)</sup>. これらのことを踏まえてFe-Ga多結晶膜の磁歪量を考えると, 結晶方位分布が等方的であれば磁歪量が多少大きくなることが予想される. これに対して, 今回作製したFe-Ga多結晶膜では, 膜面垂直結

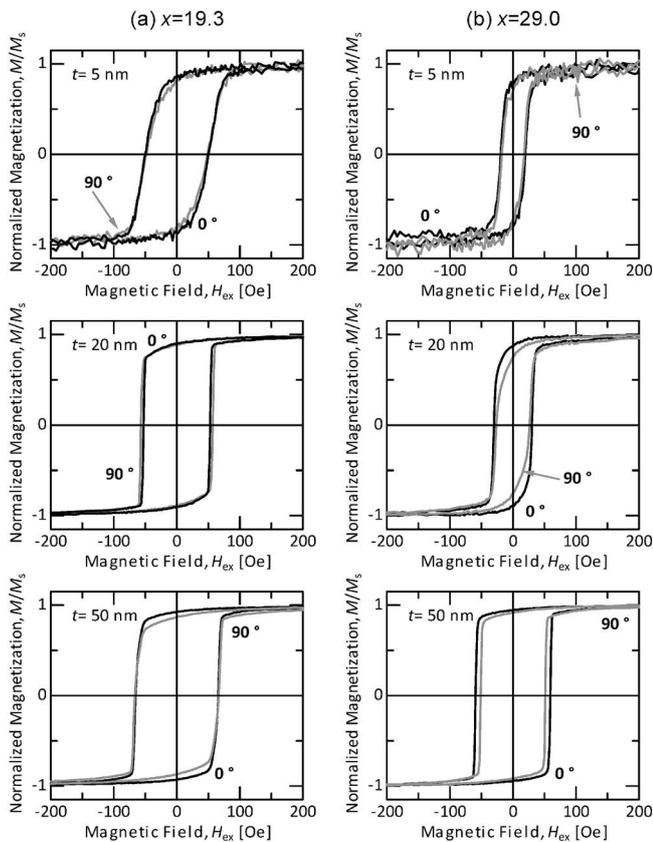


図4 膜厚( $t$ )およびGa組成( $x$ )の異なる $Fe_{100-x}Ga_x$ 薄膜の磁化曲線の一部. 黒線は測定時の膜面内磁界方向を $0^\circ$ とした結果であり, グレーの実線はその磁界方向から膜面に $90^\circ$ ずらした場合に得られた結果である.

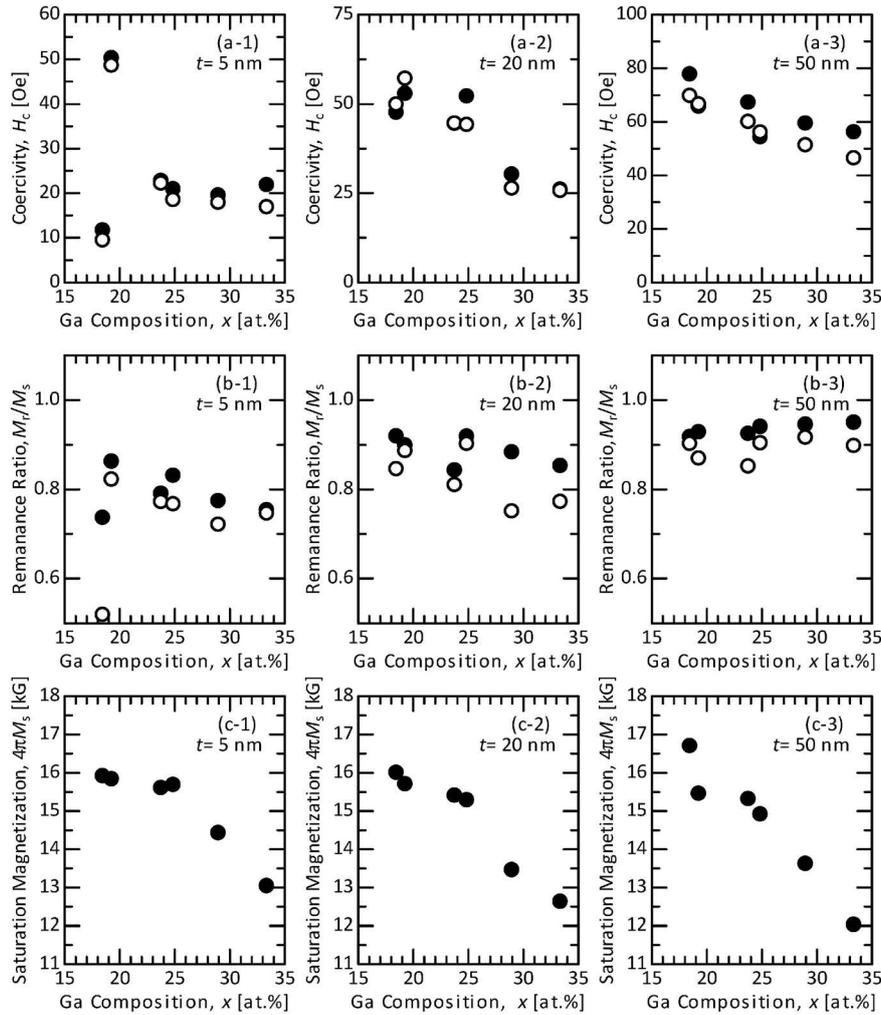


図5 膜厚の異なる  $\text{Fe}_{100-x}\text{Ga}_x$  薄膜における (a) 保磁力 ( $H_c$ ), (b) 残留磁界比 ( $M_r/M_s$ ) および (c) 飽和磁化 ( $4\pi M_s$ ) の Ga 組成 ( $x$ ) による変化. (a) と (b) の ● は, 測定時の膜面内磁界方向を  $0^\circ$  とした結果であり, ○ はその磁界方向から膜面に  $90^\circ$  ずらしたときに得られた結果である.

晶方位が  $\langle 110 \rangle$  方向となっているため, 膜厚および Ga 組成に関係なく磁歪量が低下したものと考えられる. また, 結晶構造解析の観点から, 作製した Fe-Ga 膜の結晶粒径が小さく微結晶状態となっていることにも由来するものと考えられる.

( $d\lambda/dH_{\text{ex}}$ )<sub>max</sub> に関しては (図 8), それらの膜厚および Ga 組成による変化は,  $\lambda_s$  の場合とほぼ類似した結果となった. また, それらの値に関しては, 10 nm 厚の場合を除いてそれ以外の膜厚ではおよそ Ga 組成 24~29 at% の間で最大となり, 20 nm 厚以上の膜厚領域では 5~6 ppm/Oe となった. これらの結果から, Ga 組成 24~29 at% の Fe-Ga 多結晶膜の場合, 外部磁界の変化に対する磁歪量の変化が最も大きくなることを表している.

#### 4. Fe-Ga 多結晶膜の磁化ダイナミクス

一般に, 高速動作が期待される新規電磁気デバイスやマイクロ波磁気デバイスでは, デバイスを構成する磁性薄膜のダ

мпピング定数が低いことが望まれる. したがって, 本節では, Fe-Ga 膜の新規電磁気・マイクロ波デバイスへの応用を見据えて, これらのデバイス応用へ直結する磁化ダイナミクスの主要な基本パラメータの 1 つとして知られているダンピング定数 ( $\alpha$ ) を評価した結果について述べる.

高周波伝送線路とベクトルネットワークアナライザを組み合わせた広帯域強磁性共鳴 (Broadband Ferromagnetic Resonance (B-FMR)) 測定法<sup>(38)-(41)</sup> を用いて, Fe-Ga 膜における 9~15 GHz の範囲の各周波数での S パラメータの外部磁界による変化を測定した. 膜厚および Ga 組成に関係なく, いずれの周波数においても FMR に起因するディップが観測され, 周波数の増加とともにディップが高磁界側へシフトした. これらの観測された FMR に起因するディップに対して Lorentz 関数によるフィッティングを行って, 共鳴磁界 ( $H_{\text{Res}}$ ) と共鳴磁界線幅 ( $\Delta H_{\text{Res}}$ ) を決定した.  $H_{\text{Res}}$  に関しては, 膜厚および Ga 組成に関係なく, いずれも測定周波数の二乗 ( $f_{\text{Res}}^2$ ) との関係を示す Kittel の関係式<sup>(42)</sup> を用いてうまく説明できる. また,  $\Delta H_{\text{Res}}$  に関しては, いずれの膜厚および

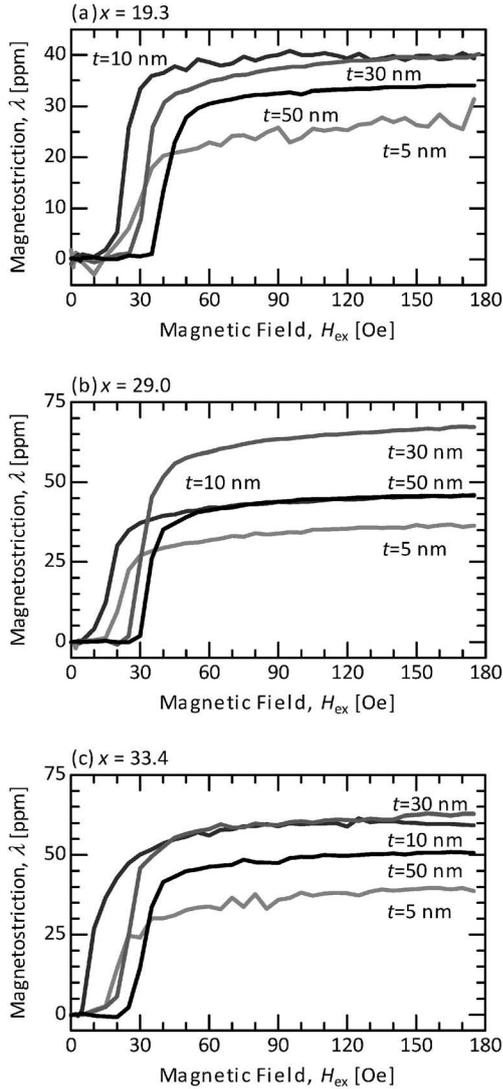


図6 膜厚( $t$ )およびGa組成( $x$ )の異なる $\text{Fe}_{100-x}\text{Ga}_x$ 薄膜における磁歪量( $\lambda$ )と磁界( $H_{\text{ex}}$ )の関係の一例.

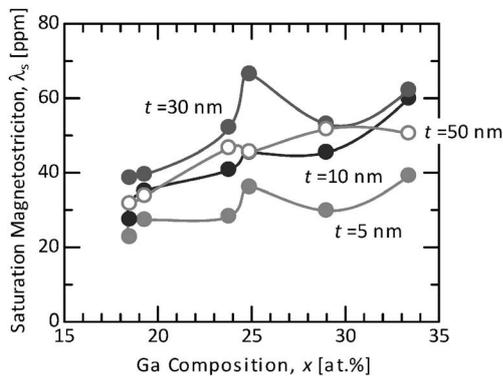


図7 膜厚( $t$ )の異なる $\text{Fe}_{100-x}\text{Ga}_x$ 薄膜における飽和磁歪量( $\lambda_s$ )のGa組成( $x$ )依存性.

Ga組成に対しても $f_{\text{Res}}$ の増加とともにおおむね線形的に増加した. すべてこれらの線形関係は, $\Delta H_{\text{Res}} = \Delta H_{\text{Res}}(0) + \frac{4\pi\alpha}{\gamma} f_{\text{Res}}(\Delta H_{\text{Res}}(0))$ : 磁気的不均一性,  $\gamma$ : ジャイロ磁気定

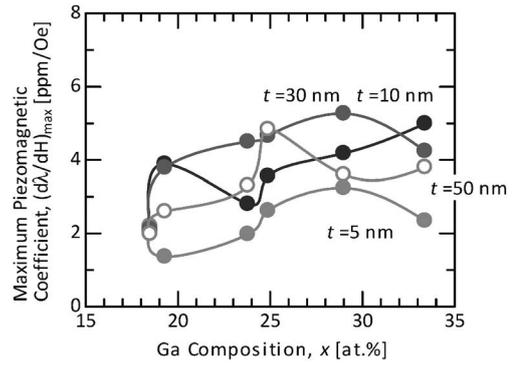


図8 膜厚( $t$ )の異なる $\text{Fe}_{100-x}\text{Ga}_x$ 薄膜における最大ピエゾ磁気係数( $(d\lambda/dH_{\text{ex}})_{\text{max}}$ )のGa組成( $x$ )依存性.

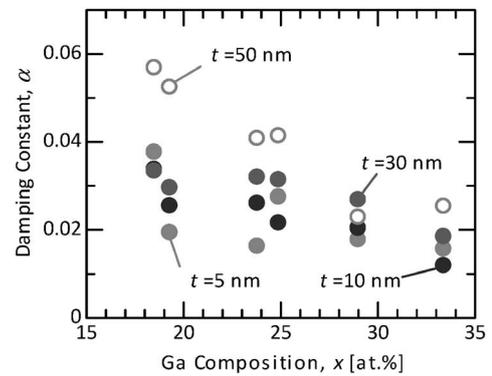


図9 膜厚( $t$ )の異なる $\text{Fe}_{100-x}\text{Ga}_x$ 薄膜におけるダンピング定数( $\alpha$ )のGa組成( $x$ )による変化.

数)<sup>(43)</sup>を用いて説明できる. したがって, この関係式による実験値に対するフィッティングを行うことにより, 傾きから $\alpha$ を求め, Ga組成を関数としてまとめた. それらの結果を図9に示す.  $\alpha$ は, 膜厚に依存せずGa組成の増加とともに減少した. それらの値はGa組成33.4at%の場合を除いて典型的な軟磁性合金薄膜( $\text{Ni}_{78}\text{Fe}_{22}$ <sup>(44)</sup>,  $\text{Fe}_{89}\text{Si}_{11}$ <sup>(45)</sup>)や $\text{Fe}_{100-x}\text{Ga}_x$ 単結晶薄膜<sup>(27)</sup>の場合と比べて高く, およそ2倍から7倍となった. この原因は, $\Delta H_{\text{Res}}(0)$ の膜厚およびGa組成依存性を含めると, 主に異方性分散などの磁気的不均一性に由来するものと考えられる. また, これらの結果は, ガルフェノール近傍のGa組成のFe-Ga膜では, 膜厚に関係なく磁化の高周波応答が良くないことを示唆している.

## 5. まとめ

本稿では, 膜厚およびGa組成の異なる幅広いFe-Ga多結晶膜の構造, 磁歪量および磁化ダイナミクスを詳細に検討してきた結果の一部について紹介した. 飽和磁歪量はFe-Ga単結晶膜に比べると低く, 一方で磁化ダイナミクスのパラメータの1つであるダンピング定数は典型的な軟磁性合金薄膜やFe-Ga単結晶薄膜に比べて高くなった. これらの結果から, Fe-Ga多結晶膜からなるエネルギーハーベスティングデバイスへ展開するためには, Fe-Gaバルク合金と

同様に、薄膜の結晶方位を制御すること(すなわち、膜の結晶配向性を制御するように基板を選択すること)によって飽和磁歪量および最大ピエゾ磁気係数をさらに増加させることが重要であることがわかった。一方で、Fe-Ga 多結晶膜からなる新規の電磁気デバイスやマイクロ波磁気デバイスを創製・実現するためには、B や C といった第三元素を加えることによる軟磁性化と、ダンピング定数と磁氣的不均一性の低減が必要不可欠である。

本研究に深く携わった川邊泰之氏、東北大学工学部技術部宮崎孝道博士に謝意を表します。Fe-Ga 膜の X 線回折測定にあたり、東北大学多元物質研究所 北上 修教授、岡本聡准教授、菊池伸明助教にご協力していただきました。ここに深く感謝いたします。また、Fe-Ga 膜の磁歪測定にあたり、株式会社東栄科学産業技術部 内海良一氏、佐藤茂行氏、森 修氏にご協力していただきました。ここに深く感謝いたします。

本研究の一部は、科研費基盤研究(B)(No. JP17H03226)の補助のもと行われた。また、東北大学高等研究機構先端スピントロニクス研究開発センター、東北大学スピントロニクス学術連携研究教育センター、東北大学国際集積エレクトロニクス開発センター、情報ストレージ研究推進機構(ASRC)の支援のもと行われた。

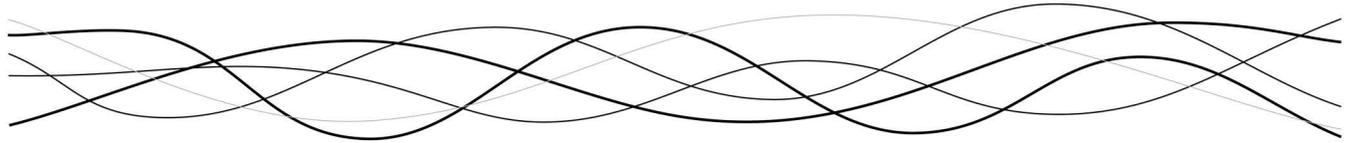
## 文 献

- (1) 大橋正良, 大槻智明: 電子情報通信学会誌, **95**(2012), 772-778.
- (2) K. Takeuchi: J. HTSJ, **52**(2013), 1-6.
- (3) 竹内敬治: 表面技術, **67**(2016), 334-338.
- (4) 神野伊策: 表面技術, **67**(2016), 348-352.
- (5) K. Nakano, A. Nakayama, T. Saito and T. Kurose: The Jpn. Soc. Mech. Eng., **68**(2002), 1641-1646.
- (6) H. Wakiwaka, Y. Kumakura, A. Yamada, K. Otakae and A. Izuno: Magn. Soc. Jpn., **31**(2007), 250-253.
- (7) M. Ferrai, V. Ferrai, M. Guzzetti, B. Ando, S. Baglio and C. Trigona: Sens. Actuators A, **162**(2010), 425-431.
- (8) Y. Sakane, Y. Suzuki and N. Kasagi: J. Micromech. Microeng., **18**(2008), 104011(6pp).
- (9) 上野敏幸, 山田外史: J. Magn. Soc. Jpn., **35**(2011), 88-91.
- (10) 上野敏幸: 精密工学会誌, **79**(2013), 305-308.
- (11) A. E. Clark, J. B. Restorff, M. Wun-Fogle, T. A. Lograsso and D. L. Schlagel: IEEE Trans. Magn., **36**(2000), 3238-3240.
- (12) M. Wuttig, L. Dai and J. Cullen: Appl. Phys. Lett., **80**(2002), 1135-1137.
- (13) A. E. Clark: AIP Conference Proceedings, **18**(1974), 1015-1029.
- (14) L. Sandlund, M. Fahlander, T. Cedell, A. E. Clark, J. B. Restorff and M. Wun-Fogle: J. Appl. Phys., **75**(1994), 5656-5658.
- (15) A. G. Jenner, R. J. E. Smith, A. J. Wilkinson and R. D. Greenough: Mechatronics, **10**(2000), 457-466.
- (16) R. A. Kellog, A. M. Russell, T. A. Lograsso, A. B. Flatau, A. E. Clark and M. Wun-Fogle: Acta Mater., **52**(2004), 5043-5050.
- (17) T. Ueno: J. Appl. Phys., **117**(2015), 17A740.
- (18) N. Kawamiya, K. Adachi and Y. Nakamura: J. Phys. Soc. Jpn., **33**(1972), 1318-1327.
- (19) E. M. Summers, R. Meloy and S.-Min Na: J. Appl. Phys., **105**(2009), 07A922.
- (20) J. L. Weston, A. Butera, T. Lograsso, M. Shamsuzzoha, I. Zana, G. Zangari and J. Barnard: IEEE Trans. Magn., **38**(2002), 2832-2834.
- (21) A. Butera, J. L. Weston and J. A. Barnard: J. Magn. Magn. Mater., **284**(2004), 17-25.
- (22) A. McClure, S. Albert, T. Jaeger, H. Li, P. Rugheimer, J. A. Schaefer and Y. U. Idzerda: J. Appl. Phys., **105**(2009), 07A938.
- (23) A. McClure, H. Li and Y. U. Idzerda: J. Appl. Phys., **107**(2010), 09A924.
- (24) A. McClure, E. Arenholz and Y. U. Idzerda: J. Vac. Sci. Technol. A, **28**(2010), 969-972.
- (25) D. E. Parkes, S. A. Cavill, A. T. Hindmarch, P. Wadley, F. McGee, C. R. Staddon, K. W. Edmonds, R. P. Campion, B. L. Gallagher and A. W. Rushforth: Appl. Phys. Lett., **101**(2012), 072402.
- (26) D. E. Parkes, L. R. Shelford, P. Wadley, V. Holý, M. Wang, A. T. Hindmarch, G. van der Laan, R. P. Campion, K. W. Edmonds, S. A. Cavill and A. W. Rushforth: Sci. Rep., **3**(2013), 1-6.
- (27) B. K. Kuanr, R. E. Camley, Z. Celinski, A. McClure and Y. Idzerda: J. Appl. Phys., **115**(2014), 17C112.
- (28) B. W. Wang, S. Y. Li, W. M. Huang and S. Y. Cao: J. Magn. Magn. Mater., **320**(2008), 769-773.
- (29) A. Javed, N. A. Morley and M. R. J. Gibbs: J. Magn. Magn. Mater., **321**(2009), 2877-2882.
- (30) N. A. Morley, A. Javed and M. R. J. Gibbs: J. Appl. Phys., **105**(2009), 07A912.
- (31) Y. Yu, Q. Zhan, J. Wei, J. Wang, G. Dai, Z. Zuo, X. Zhang, Y. Liu, H. Yang, S. Xie, B. Wang and R.-Wei Li: Appl. Phys. Lett., **106**(2015), 162405.
- (32) Y. Endo, T. Sakai, T. Miyazaki and Y. Shimada: IEEE Trans. Magn., **53**(2017), 2502305.
- (33) Y. Kawabe, Y. Endo and T. Miyazaki: T. Magn. Soc. Jpn. (Special Issues), **3**(2019), 34-38.
- (34) Y. Endo, Y. Kawabe, T. Miyazaki and Y. Shimada: J. Magn. Magn. Mater., **487**(2019), 165323.
- (35) 公益社団法人日本磁気学会編: 磁気便覧, 丸善出版, (2016), 299-307.
- (36) B. D. Cullity: 新版 X 線回折要論, アグネ, (1994), 91-96.
- (37) 太田恵造: 磁気工学の基礎 II, 共立出版, (1992), 237-245.
- (38) G. Council, J. V. Kim, T. Devolder, C. Chappert, K. Shigeto and Y. Otani: J. Appl. Phys., **95**(2004), 5646-5652.
- (39) S. S. Kalarickal, P. Krivosik, M. Wu, C. E. Patton, M. L. Schneider, P. Kabos, T. J. Silva and J. P. Nibarger: J. Appl. Phys., **99**(2006), 093909.
- (40) M. Toda, K. Saito, K. Ohta, H. Maekawa, M. Mizuguchi, M. Shiraiishi and Y. Suzuki: J. Magn. Soc. Jpn., **31**(2007), 435-438.
- (41) Y. Endo, Y. Mitsuzuka, Y. Shimada and M. Yamaguchi: IEEE J. Trans. Fund. Mater., **131**(2011), 505-510.
- (42) C. Kittel: Phys. Rev., **73**(1948), 155-161.
- (43) T. D. Rossing: J. Appl. Phys., **34**(1963), 995.
- (44) Y. Endo, Y. Mitsuzuka, Y. Shimada and M. Yamaguchi: J. Appl. Phys., **109**(2011), 07D336.
- (45) Y. Endo *et al.*: Private Communication.



遠藤 恭

★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★  
2000年 東北大学大学院工学研究科博士後期課程修了  
1999年4月 JSPS 特別研究員  
2001年5月 大阪大学大学院工学研究科助手(名称変更: 助教)  
2007年10月 東北大学大学院工学研究科准教授  
2016年5月 東北大学スピントロニクス学術連携研究教育センター兼務  
2018年6月 東北大学高等研究機構・先端スピントロニクス研究開発センター兼務  
現在に至る  
専門分野: 高周波磁気計測, 軟磁性薄膜・微粒子材料  
◎新規の高周波磁気計測装置の開発, 高周波軟磁性材料の開発とそのデバイス応用に従事。  
★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★



# 科学・技術と社会の関係を考える

## 1. —科学・技術から科学技術へ—

柴田 清\*

### 1. はじめに

この原稿を準備している数週間前に、日本原子力研究機構の幌延高レベル放射性廃棄物深地層処分研究センターを見学する機会を得た。高レベル廃棄物の処分技術は幾重もの漏洩防止技術を組み合わせたものであり、相当長期にわたり小惑星の衝突でもない限り安全性を確保できる可能性があると感じられた。しかし、それでもその処分場設置を実際に受け入れる地域が現れるとは思えないし、実際に今現在存在しない。原子力廃棄物の処分技術は科学技術に基づく合理的な解にたどり着いているのに、社会には受け入れられていない。これは、社会の側が非合理的な判断をしているからだろうか。社会は科学技術の専門家とは全く異なる合理性で判断をしているのではないだろうか。

科学技術の成果の多くが人間生活の安全性・快適性・利便性を向上させてきたのは間違いない。社会も変えてきた。スマートフォンが典型的な例である。しかし、それを社会が受け入れるかどうかの問題となった事例も少なくない。古くは産業革命時には機械化による熟練労働者の失業、不熟練労働者の酷使や労働環境の悪化などに抗議して機械や工場建築物を打ち壊したラッドアイド運動があった。現代では、原子力発電や遺伝子操作作物などは是非の議論が残る中を商用利用が拡大されているもの、遺伝子編集による人間の能力増強、人工知能搭載の完全自動兵器など規制の対象と考えられるものもある。実際、軍事技術の削減協定は何度も締結されたし、遺伝子操作技術の開発初期においては科学者による自主的なモラトリアム規程が設けられた。本誌に関係深いところでは、ナノマテリアルによる健康被害などがこうした例として挙げられる。その一方で、非科学的な言説、あるいは科学と紛ら

わしい言説が社会の人々を惑わせているように感じられる事案もある。

物理学者のアルヴィン・ワインバーグ<sup>(1)</sup>は「トランス・サイエンス問題」という概念を提起している。「科学によって問うことはできても、科学によって答えることができない」というのがワインバーグの定義だが、若干の拡大解釈をすれば、科学が一因となって引き起こされる問題だが、科学だけでは解決できない問題と言える。科学技術の発達によって、このような社会における問題の頻度・複雑さは増しているように思える。その一方で、科学技術の側もそれ自体の原理で進展するのではなく、社会の影響を受けているはずである。つまり、科学・技術と社会の界面で発生する問題(STS問題、STS: Science, Technology and Society)と言える。

このような問題に対して、科学技術の専門家はどうか対処すべきか、また専門家ではない人々はどのような態度で接すればよいのか。本誌のプロムナードという場を借りて、4回の連載においてこの問題を考えていきたい。

初回ではまず、なぜ、社会との間で起きる問題が深刻・拡大するようになったのかを考えるために、科学技術が歴史的にどのような変化(発展)を遂げてきたかを振り返り、以降、表1に示すような題材を採り上げながら、最終的には科学技術の専門家の役割と社会の側が備えるべき素養などを考えていきたい。

### 2. 科学

前節では「科学技術」という言葉を何の断りもないままに用いたが、2010年に日本学術会議において「科学技術」では科学技術政策が出口志向の研究に偏るとの疑念を生むので、「科学・技術」と表記すべきとの勧告がなされている<sup>(2)</sup>。

\* 千葉工業大学社会システム科学部；教授(〒275-0016 習志野市津田沼2-17-1) Interactions among Science, Technology and Society —1. “Science and Technology” to “Scientific Technology”—; Kiyoshi Shibata (Chiba Institute of Technology, Narashino)  
Keywords: science, technology, engineering, society, expert, conflict, history  
2019年9月20日受理[doi:10.2320/materia.59.32]

表1 本連載の構成予定.

	テーマ	トピックス
第一回	科学・技術から科学技術へ	科学とは, 技術とは, 科学技術の誕生
第二回	科学技術の理解	科学的正統性の条件, 疑似科学, 科学技術リテラシー・コミュニケーション
第三回	科学技術の制御	社会的合理性, レギュラトリーサイエンス, イノベーション, テクノロジーアセスメント, 市民参加
第四回	科学技術の倫理と公正	責任ある研究・イノベーション(RRI), 技術者倫理, 適正技術, 軍事研究

歴史的にはそもそも全く異なる活動であった「科学」と「技術」が、近年では一体化したものとなり、その影響力が増してきたことが、STS問題が拡大深化する大きな原因となっていると考えられている。そこで、この連載の第一回目は「科学技術」の成り立ちについて、そもそもの「科学」と「技術」の変質を順に見ていきたい。

### (1) 科学の歴史

「科学」は Science の邦語訳とされる。Science の語源はラテン語の *Scientia* であり、知識や学問の総体を意味する。本節では紙幅の都合上、「科学」を今日的な意味での自然科学に限定して、その内容(自然の理解の仕方)が決して一貫したものでなく、時代と主に変遷してきた様子を手短に振り返ってみる。

古来人間は様々な自然現象に関してなぜそのようなことが起きるのか理解したいと考え続けているようだ。まずそのような自然の探求は多くの場合、神話や宗教の体系による解決となったが、古代ギリシアにおいては論理的な一貫性をもった説明の仕方が追求された。その意味で「科学」の源流は古代ギリシアに求められる。アリストテレス、アルキメデス、ユークリッドらの知識は都市国家とその市民階級の衰退とともにアラブ世界に伝えられ、それが十字軍遠征やレコンキスタ運動を通じてルネサンス初期に欧州世界に発見された。

一般に、現代の自然科学の基礎は、16世紀半ば頃から17世紀のコペルニクス、ケプラー、ガリレオ、ニュートンらによって築かれたと認識されている。キリスト教教会の知的支配から脱却する「科学革命」と言われる。しかし、彼らの自然の理解は現在の我々のそれとは大きく異なっている。つまり、彼らはまだキリスト教神学の枠の中にあり、彼らが目指したのは神が創造したはずの自然の美しい秩序を明らかにすることであった。ニュートンが生涯にわたって最も力を入れていたのは、賢者の石による錬金術や聖書の解釈であったという。Scientist という言葉が生まれたのは1830年代であり、この時代の自然探求は自然哲学と呼ばれるものであった。従って、ニュートンらの時代には現在のような科学の活動は無く、彼らは「科学者」ではなく、神学者あるいは哲学者であった。我々は彼らの活動の中に、現在のわれわれの科

学意識に沿うところだけをつまみ食いしているということになる。それが、宗教革命や啓蒙主義の影響を受けた市民革命を経て、脱キリスト教化される。この過程を村上陽一郎は「聖俗革命」と言っている<sup>(3)</sup>。教会の支援を離れた Scientist たちは自らの資力や国王・領主などの支援を受け、自らの好奇心に基づき探求を進め、その成果を同好の士が集まる学教会で発表するようになった。それが何の役に立つのかはほとんど問題視されなかった。この好奇心駆動型の科学時代のエートス(性格・精神)を社会学者のロバー・C. マートンは CUDOS というアクリニムで表している。C (Communalism) : 科学知識の公的共有性, U (Universalism) : 真理としての普遍性, D (Disinterestedness) : 私的利益への無関心, OS (Organized Skepticism) : 組織的な懐疑主義である。我々が現在抱く心理を追求する科学の理念的なイメージに近いものであるが、プロテスタント、特にピューリタンのエートスとの類似性が指摘されている。だとすれば、ここにもキリスト教の痕跡がうかがえる。

しかし、そういった中でも、徐々に発見された自然に関する知識が役に立つことが気づかれるようになっていった。1620年にフランシス・ベーコンは「知は力」と表現し、自然現象の理解が人間の意図する結果を生み出すのに役立つことを主張した。タランベールやデイドロを中心に1751年から刊行が始まった「百科全書」では当時の科学と技芸の知識が総合的にまとめられている。1820年代にはドイツのゲーセン大学にリービッヒの化学実験室が設置され、そこから有機化学の発展が始まった。しかし、後述するように18世紀半ば頃からの産業革命を担った起業家技術者は、こういった科学活動とはほとんど無縁であった。産業革命を実現した機械類の作動原理の理解は、技術の実用化の後を追いかけている。蒸気機関に関する熱力学がその例である。科学知識が技術に活かせることを示したエポック・メイキングの例として、カローザスによる高分子の発見からのナイロンの発明、マンハッタン計画による原子爆弾の開発が挙げられることが多い。勿論それ以前にも科学知識の技術への応用成功例はあるが、ここに科学と技術の大規模な一体化が実際に始まったとみてとれる。その後の半導体技術や遺伝子工学の発展はその典型である。このように国家や産業が、科学を金の卵を産む鶏のように認識しはじめ、科学者の雇用、研究所の設立に動き出したのは20世紀になってからである。第二次世界大戦後には、ヴァネヴァー・ブッシュが「科学—その果てしなきフロンティア」で、基礎研究が応用開発を導くもの(リニアモデルと言われる)としてその重要性を訴え、政府や産業界はそれに基づく投資を拡大した。事実、国家が宇宙開発などによる威信向上、軍事的優位性の確保のために科学に対する積極的な投資を行った結果、様々なスピノフ技術が生まれている。

### (2) 科学の制度化、専門家の誕生

科学革命期に自然哲学の推進の場となったのは、大学ではなく学会であった。自然探求の最古の学会は、1603年にロ

ームで創設されたアカデミア・デイ・リンチェイ(山猫アカデミー)と言われる。大学は、哲学(自由七科：文法、修辞学、論理学、算術、天文学、幾何学、音楽学)を基礎課程とした上に神学、医学、法学の専門家養成を行っていて、新しい自然探求の場は好笑的なパトロンが自宅に学者を招いて主催するサロンの集まりだったようである。1662年に発足したロンドン王立協会では、このような自然探求の同好の士が集まり、お互いの知見を紹介し合った。(1665年創刊の機関誌「フィロソフィカル・トランザクション」は今日まで続く最古の学術雑誌である。)王立とは言うものの、会員会費による運営であった。このような学会を支えたのは世俗の新興富豪、啓蒙君主、貴族らであり、旧来の教会勢力と対抗する側であった。科学が社会と全く独立に進展するものではない、社会的影響を受けるという一例である。当時の自然哲学者らの多くは、ダーウィンのように資産家で研究に専念できた者もいたが、役人や新教の聖職者が本業であるアマチュア(語源的意味は真実を愛する人)であった。それが次第に探求の深化に伴い活動が高度化し、分野を限定した教育・訓練を受けてからでないと参入できない専門化が進んだものと考えられる。専門家の養成には専門家が必要であり、ピアレビューに基づく研究成果の妥当性評価、教育・研究機関での任用や研究者の褒賞・顕彰の仕組みが同志の共同体であるかのように出来上がった。これに国家や産業がスポンサーとして関与することで、自然哲学・科学が社会制度として成立してきた。

前述のように、「科学」は Science の和訳語と認識されているが、この訳語を作った西周としては、様々な専門に分科した学問と認識していたといわれている。「理学」よりも「科学」が日本語として普及した背景には、その見方が支持されたことがうかがえる。このことは、後述するように当時の我が国が科学と工学(技術)を区別なしに明治社会の建設に取り込んだことにも繋がっている。もっとも、Scientist という言葉を編み出したヒューエルは、それ以前に自然哲学が物理や化学など専門分化が進み、分野の専門家が出現していた状況を受けてそれら専門家の総称として Scientist と名付けたらしいので、西の翻訳は極めて的を射たものなのかもしれない。

科学は勿論科学自体の論理や天才のひらめきで発展の方向が選ばれるが、同時に社会の影響も受けて進展してきたことを確認しておきたい。

### 3. 技 術

「技術」に関しては、目的実現のための手段という基本的な役割は、人類の歴史を通じて変わっていないように思える。すなわち、人類誕生以来と言ってよいくらい、ヒトは道具を用い、生活の質(安全性・利便性・快適性)を高めてきた。その意味で、科学と違い技術は、生物種としてのヒトを人間たらしめてきた要因の中でも大きなものであり、その進展の緩急はあるものの、どのような時代・地域においても存

在する。

技術とは何かを簡単に言ってしまうと、目的実現のための手段ということになる。しかし技術を厳密に規定しようとすると、技術には幅広い領域があり、意外に難しい。我が国においては、技術の本質に関する「労働体系説」と「意識的適用説」の対立論争や、技術の善用・悪用に関連して価値中立論の当否、技術進歩の駆動力に関して技術本質論(あるいは技術決定論、自立的存在論)と社会構成論などの議論があった。これらは技術が社会的にどのように構成され、技術を社会がどのように管理・制御していけばよいかを考える上では基礎となるものだが、そもそも技術は二者択一的に割り切れるような存在ではなく、状況に応じてどのような性格が強く現れるかが問われるものだと筆者は考える。詳細な議論は別の機会に譲りたい。

#### (1) 技術の担い手

自然科学(哲学)の知識がモノ作りに応用されるようになったのは、化学の場合19世紀の後半、物理の場合20世紀の初め頃、生物の場合は20世紀の後半である。それまでは科学(自然哲学)と技術は全く異なる社会的階層に担われてきたし、当然その養成手段も別々であった。

古代ギリシアの市民たちが自然探求に関わっていた時に技術を担っていたのは奴隷階級であり、その伝統は根強く残っている。例えばドイツの総合大学には工学部は設置されていない。産業革命をけん引した起業家たちの中には、正規の科学(自然哲学)の教育を受けたものはいない。技術の養成は基本的に徒弟関係に拠っていた。

大学として技術教育を正式に課程に採り入れたのは我が国の帝国大学(東京帝国大学)である。高等教育機関での技術教育についてはフランスのエコールポリテクニックやドイツのTH(Technische Hochschule)のような例があるが、これらは高等教育機関であっても「大学」を名乗っていない。技術は知的伝統の象徴としての大学が扱うべきものではないとの考えが根強く残っていたことがうかがえる。明治初期の政府が欧米の科学を輸入するにあたって、工学を法・文・医・理学と同列に扱ったことは、富国強兵・殖産興業を急ぐ必要性だけでなく、伝統的に我が国の文化が究極的真理を求めず、実利を優先するものであったことを反映しているのだろう。

#### (2) 技術と工学、エンジニアリング

ところで「技術」に近接する言葉に「工学」がある。「工学」の語源は少し調べてみた範囲ではよく分からない。1871年には技術官僚養成を目的に工部省に工学寮が設置され、1877年に開成学校と東京医学校の統合により発足した旧東京大学に遅れて工芸学部が設置されたから、明治初頭においては「工学」という概念が成立していたと思われる。一般に「工学」は Engineering の邦訳語とされるが、両者には微妙な差があるように思われる。Engineering の語源は、5世紀ごろの要塞建築家・兵器製作者(ingeniator)が開発した新技術や、「発明の才に富む知性」を意味する ingenium で

あるとされる。技術が目的達成のための個々の手段・手法であるのに対し、複数の技術を組織してより大きな目的を実現する営為を **Engineering** ということ考えられる。現代日本語の「エンジニアリング」は業態を表す際にも用いられる。一般財団法人エンジニアリング協会は「エンジニアリングは、細分化、専門化した『技術』と『知識』を一定の社会目標(の達成)に向けて結集し、新たな社会システムの構築やイノベーションに貢献する活動です。」と言っている<sup>(4)</sup>。一方で、「工学」は学問でありエンジニアリングに含まれるような業の意味合いは薄く、人工物に関する知識体系のように思われる。技術についても、**Technology** の邦訳語とされているが、元々は西周が **Mechanical Art** に充てた訳語であり、技術と **Technology** にはニュアンスの違いがあるように思える。また「論理」を意味する **logy** が語尾についていることを考えれば、**Technique** が技術で **Technology** は技術学と言った方が適切な気がする。

### (3) 科学と技術

技術を科学と対比させてみるといくつかの際立つ特徴がある。箇条書きで列挙してみる。

- 技術には解決すべき課題があり、多くの場合その課題は外部から依頼される。(科学は依頼に応える必然性を持たない)
- 技術は問題を解決しなければ存在意義がない。解決さえできればなぜ解決できるのかの理屈はどうでもよい。別の言い方をすれば、技術は現象が分かっているなくても目的を実現できなければならない。(科学では不明項を残さないことを追求する)
- 同じ目的を達成するために複数の技術があり得る。(科学では唯一解を追求する)
- 技術では多くの場合、複数の目的を同時に満たすことが要求される。品質・コスト・納期が代表的な要素であり、トレードオフ関係にあることが一般的である。依頼者の欲が深いと、そのすべてを最高レベルで達成することは困難で、それらのバランスをとることが技術者のセンスになる。(科学では、部分的な解でも許容される)
- 技術では天然の材料を利用する限り不均一な物体を扱わざるを得ないし、製造物を使用する環境も空間的・時間的に変化する。(科学では、理想化された均一の対象を扱うことが多い)
- 人間が間違いを犯すことは避けられないので、技術はそれにあらかじめ対処しておくことが求められる(科学では、誤りを指摘される可能性・論理性を有することが求められる)

いずれにせよ、既に見てきたように「科学」と「技術」は一体化し、区別がつきにくくなっている部分がある。一方で、ニュートリノの観測でノーベル物理学賞を受賞した小柴が言うように「何の役にも立たない」と公言する研究も存在している。純粋な科学から解決すべき課題が明確な技術まで幅広いスペクトラムが存在するとみるべきであろうが、総じ

て程度の差はあれ、所定の目的の実現を目指す活動であるのだから、「科学の技術化」が志向されていると言ってよい。(一部にはそれが技術化した科学が「工学」であるという言い方もある。)

## 4. 科学技術の成立

「科学技術」は日本語独自の表現であるらしい。英語で **Science and Technology** あるいは **Science and Engineering** というと、**and** で繋がれているということはそれぞれ相容れない概念を示していることになる。「科学技術」という言葉の意味は、科学に立脚した技術あるいは両者が一体に融合したものと、科学と技術の単なる並立の表現の二通りに取れる。そもそもこの言葉は第二次世界大戦直前の我が国の技術官僚たちによる発明によるものであって、その時点から科学と技術という意味と科学的技術という意味の双方を使い分けていたようである。その背景には明治以来の文官支配を打破したいという技術官僚の思いと、当時の国家主義的な政策目標実現のための総動員体制がある。その実現のために科学を担当する文部省と技術を担当する商工省の縄張りを逃れる方策として「科学技術」という言葉が生み出されたようである<sup>(5)</sup>。ただし、科学技術の英訳を **Science and Technology** とすると両者並立の意味になってしまうので注意が要る。日本語の「科学技術」が意味する科学と一体化した技術は **Scientific technology**、技術を支える科学は **Techno-Science** ということがあるようだが、それほど馴染んだ言葉ではない。個人的な印象だが、欧米でも **Science** と **Technology** あるいは **Engineering** はかなり曖昧に使われているように思える。

とはいえ、既に見てきたように、科学が技術の役に立つ、そして技術は科学の対象となることは明らかであって、社会からは両者が一体化したものと見られるのが普通であろう。また、科学者であるのか技術者であるのか自分でも判別できない専門家も多いはずである。科学の立場から見れば、学問のための科学から国家・産業のための科学に変容し、国家政策や市場原理に支配され、学問としての自主・自立性を失いつつあるのではないか。

ギボンズは知識生産のモード(様式)が変わったとしている<sup>(6)</sup>。すなわち、従来は知的好奇心に基づいて真理の探究を自主的に志向していた伝統的な科学研究のモード1であったのが、外部から与えられた課題の解決を志向する請負型のモード2の研究様式が主体になってきたという。勿論モード1が無くなったというわけではないが、公的な支援を受けるのは容易ではなくなっている。科学技術の外部からは何か役に立つ(搾取可能な)ものはないか、内部からは何か売り物になるものはないかと探られる状況になっているのではないか。

第2節でマートンの **CUDOS** を紹介したが、それは20世紀前半の「科学」の時代における専門家のエートス(称賛されるべき価値)であった。そのような専門家のエートス(理

想)が科学の技術化によってどう変わったか、物理学者のジョン・ザイマンはマートンに倣って現代の現実を PLACE と表現している。それは P (Proprietary) : 知識資源の資産階級による私的所有化, L (Local) : 真理の適用範囲の局所化, A (Authoritarian) : 権威による知の制御, C (Commissioned) : 権力や資本からの要請受託, E (Expert) : 専門家としての振る舞いへの期待であり, 研究資源と業績の獲得のため権威におもね, 時流に従う研究者の態度を皮肉を込めて表している。

## 5. 社会との関係

科学と技術が融合することによって社会的な影響力が増大した。また従来社会の文化では想定できなかったことが実現できるようになり, 勿論好い効果ももたらしているが, そのスピードが速いので社会の側の理解や是非判断が追いつかない。社会的な立場によってネガティブな影響を受けることもある。科学と技術の融合の過程で, それぞれの担い手の養成がオープンになり, 大衆化の可能性が開かれた一方で, 専門知識領域としての深化は専門家の蝸壺化, 外部との隔絶を引き起こしている。科学技術の個々の中身は, その分野の訓練を受けた専門家であれば容易には理解できないものになっている。と言って, 非専門家は専門家の言いなりにそれを受け入れれば良いとは言えない。次回以降, そのために考慮すべき事項に触れていきたい。

なお, 本稿の執筆に当たっては, 文中で引用した以外に, 村上<sup>(7)</sup>, 池内<sup>(8)</sup>, 古川<sup>(9)</sup>の著作が参考になっている。

## 文 献

- (1) A. Weinberg: *Minerva*, **10**(1974), 209-222.
- (2) 日本学術会議: 総合的な科学・技術政策の確立による科学・技術研究の持続的振興に向けて, (2010).
- (3) 村上陽一郎: 近代科学と聖俗革命(新版), 新曜社, (2002).
- (4) エンジニアリング協会: <https://www.ena.or.jp/about/whats> (2019.9.20参照)
- (5) 大淀昇一: 技術官僚の政治参画, 中央公論社, (1997).
- (6) M. ギボンズ, 小林信一(訳): 現代社会と知の創造—モード論とは何か, 丸善, (1997).
- (7) たとえば, 村上陽一郎: 科学・技術の200年をたどりなおす, NTT 出版, (2008).
- (8) 池内 了: 科学技術と現代社会, みすず書房, (2014).
- (9) 古川 安: 科学の社会史, 筑摩書房, (2018).

(次号へ続く)



柴田 清

★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★  
 1980年 東北大学大学院工学研究科材料化学専攻博士前期課程修了  
 新日本製鉄, 東北大学素材研, 海上技術安全研究所などを経て2007年より千葉工業大学教授, 博士(工学)  
 専門分野: 材料プロセス工学, 環境工学, リスク科学, 科学技術社会論  
 ◎鉄鋼・非鉄製錬および関連環境技術の研究開発に携わったのち, 環境などの技術リスクにかかわる研究に従事する一方で, 科学技術と社会の関係に関心を持ち続けている。  
 ★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★

# 焼結の基礎—理論的背景から実際まで—

## Ⅳ．通電支援焼結の展開

吉 田 英 弘\*

これまで見てきたように焼結に関する研究は、二粒子モデルに代表される単純な物理モデルでの等温拡散過程に基づく解析から、より現実的な部材形状・昇温過程・組織変化に対応するシミュレーション解析にまで至っている。一方、新たな焼結手法として通電支援焼結技術が近年格段に進歩・普及し、セラミックス材料に対する電場ないし電流印加による焼結緻密化の促進が見出されようになった。特に、通常の焼結技術では必ずしも製造が容易でなかった微細組織や機能を有する焼結体の創製が多数報告されるようになってきている。しかしながら、焼結緻密化やそれに関連する物質輸送現象における電場ないし電流印加の影響については必ずしも全容が明かされているとは言えず、そのメカニズムについても不明な点が多い。焼結における通電効果の解明については今後の基礎研究の進展が俟たれるが、一方で一部の通電支援焼結技術(例えばパルス通電加圧焼結, 1.2.3節参照)は既に工業的実用化に成功しており、さらなる発展が期待されている。本稿では、第一回で紹介した通電支援焼結のうち、パルス通電加圧焼結(spark plasma sintering, SPS または pulse electric current sintering, PECS)と電場支援焼結・フラッシュ焼結を中心に、その焼結技術の特徴とメカニズムを概観する。

### 4・1 パルス通電加圧焼結(SPS)

#### 4・1・1 焼結技術の概要と焼結パラメータ

図1.5に示した通り、SPS装置はホットプレス(hot pressing)と同様にチャンバーと加圧システムから構成されるが、加圧治具は同時に真空チャンバー内での電極としても機能する。SPSでは通常、グラファイト製のダイスおよびパンチに原料粉末を封入し、真空中で圧縮応力が印加される。同時に、直流パルス電流がパンチを通してパンチ・ダイスおよび

粉末成形体に印加される<sup>(1)–(3)</sup>。SPSでパンチを通して印加される電圧および電流の値は、当然ながら焼結しようとする材料のサイズや材料物性、焼結条件に依存するが、概ね4~20 V, 500 A~40 kAの範囲である。

SPSではチャンバー内全体ではなく、ダイスとパンチのみが加熱される。加熱すべき領域の熱容量も相対的に小さいため、加熱・冷却速度は通常50~100°C/min、さらに数百°C/minという高速昇温・降温も可能である。またグラファイト製のダイスおよびパンチを用いているため、2000°Cという超高温で焼結を実施することもできる。ただしSPS中の温度を精度良く制御することは必ずしも容易ではない。その要因は、焼結中のダイス内の温度計測の困難さに起因する。現況、SPSの温度制御は、放射温度計によるダイスまたはパンチの表面温度に基づいて行うことが一般的である。

SPSでは昇温と同時に一軸の機械的圧力を加えることにより、ホットプレスおよび熱間等方圧加圧焼結(hot isostatic pressing, HIP)と同様の原理(2.4節参照)で高密度化が促進される。圧縮応力は通常20~100 MPaの範囲だが、SiC製ダイス等を用いることで、数百MPa~1 GPaの超高压の印加も実現できるようになっている。近年では、高密度の焼結体を得る上で、印加圧力も高度に制御すべき重要な制御パラメータとなっている<sup>(4)</sup>。

#### 4・1・2 SPSによる緻密化のメカニズム

SPSにおける緻密化プロセスは、通常焼結と同様に三段階に分けて考察されることが多い<sup>(4)</sup>。焼結の初期段階は原料粉末の充填、中期段階は原子拡散に起因するネック形成と粒界すべり、後期段階は主に粒界を通しての閉気孔の除去である。焼結中に印加される圧縮応力は、この第一段階での粉末充填だけでなく、HIPと同様に緻密化に対しても大きく寄

\* 東京大学大学院工学系研究科マテリアル工学専攻; 教授(〒113-8656 東京都文京区本郷7-3-1) Fundamentals of Sintering: —Theory and Practice— Ⅳ. Development of Electric Current-assisted Sintering Techniques; Hidehiro Yoshida (School of Engineering, Department of Materials Science, The University of Tokyo, Tokyo)  
Keywords: sintering, powder, ceramics, high temperature, diffusion, densification, polycrystal, grain boundary  
2019年11月11日受理[doi:10.2320/materia.59.37]

与するとされる。

SPSの緻密化挙動は、ホットプレスやHIPと同様の緻密化速度式に基づいて解析することが可能である。SPSにおける電場ないし電流の主な目的は通常、ジュール加熱であるとされる。焼結の初期段階では、原料粉末の電気伝導率が低いため、粉末成形体よりも先に(通常グラファイト製の)パンチとダイスの温度が上昇する<sup>(5)</sup>。成形体の温度は、ダイスとパンチの温度上昇によって加熱される。粉末成形体の温度上昇に伴い、成形体を流れる電流値(電気伝導率)が増加し、ジュール加熱による温度上昇によって焼結緻密化が進行すると考えられる<sup>(5)</sup>。

ここでSPSの高密度化プロセスの速度論的解析の例を挙げておく<sup>(6)</sup>。外部負荷の有無にかかわらず、焼結中の物質移動は、高温クリープ変形で発生する物質移動と類似している。定常状態のクリープひずみ $\epsilon$ は、次の構成方程式で記述される。

$$\frac{d\epsilon}{dt} = \dot{\epsilon} = A \frac{\phi \mu b}{kT} \left(\frac{b}{G}\right)^p \left(\frac{\sigma}{\mu}\right)^n \quad (1)$$

ここで $\dot{\epsilon}$ はクリープ速度、 $t$ は時間、 $A$ は定数、 $\phi$ は拡散係数、 $\mu$ は剛性率、 $b$ はパーガースベクトル、 $k$ はボルツマン定数、 $T$ は絶対温度、 $G$ は粒径、 $\sigma$ は巨視的な印加応力、 $p$ および $n$ はそれぞれ粒径指数と応力指数である。ホットプレスにおける緻密化速度式を基に、SPSの後期過程における相対密度 $D$ の時間変化は次のように書かれる。

$$\frac{1}{D} \frac{dD}{dt} = \frac{B \Phi \mu_{\text{eff}} b}{kT} \left(\frac{b}{G}\right)^p \left(\frac{\sigma_{\text{eff}}}{\mu_{\text{eff}}}\right)^n \quad (2)$$

ここで $B$ は定数、 $\sigma_{\text{eff}}$ は粉末成形体の相対密度を考慮した粒子接触部の有効応力(2.4節、HIPでの隣接粒子間の接触部の有効圧縮圧力(式(2.6))と同様)、 $\mu_{\text{eff}}$ は粉末成形体の相対密度を考慮した有効剛性率である。焼結中の粉末成形体の空隙率を考慮して、式(2)は次のように書きかえられる。

$$\frac{1}{\mu_{\text{eff}}} \frac{1}{D} \frac{dD}{dt} = K \frac{\exp(-Q_d/RT)}{T} \left(\frac{b}{G}\right)^p \left(\frac{\sigma_{\text{eff}}}{\mu_{\text{eff}}}\right)^n \quad (3)$$

ここで $K = Bb\Phi_0/k$ は定数( $\Phi_0$ は拡散係数の前指数項)、 $Q_d$ は緻密化の律速過程の活性化エネルギーである。導出の詳細は文献を参照されたい。式(3)から、パラメータ $p$ 、 $n$ 、および $Q_d$ はSPSにおける粉末成形体の焼結緻密化のメカニズムによって決まる値であり、実験的に求めることができる。例えば、原子拡散によって緻密化が進行する場合、緻密化速度は有効圧縮応力に比例し、応力指数 $n=1$ となる。このとき、緻密化速度の活性化エネルギーは粒界拡散や体拡散といった律速する拡散経路の活性化エネルギーを反映した値となる。温度が上昇すると、塑性変形(べき乗則クリープ)が緻密化に寄与する可能性があり、このとき応力指数は3以上の値を取るとされる。

例えばBernard-Grangerら<sup>(6)</sup>によれば、3 mol%  $Y_2O_3$ 安定化正方晶  $ZrO_2$  多結晶体(3Y-TZP)において上述の解析を行った結果、焼結温度が比較的低い場合にはホットプレスと同様に拡散による緻密化機構が主体であり、また焼結温度域が $950^\circ\text{C} \sim 1000^\circ\text{C}$ では応力指数2と見積もられ、界面反応律

速の粒界すべり( $Zr^{4+}$  または  $Y^{3+}$  カチオンの体拡散が、粒界・粒子表面における点欠陥生成反応等により制限される)によって進行するとされた。さらに $1050^\circ\text{C} \sim 1125^\circ\text{C}$ の高温領域では、応力指数は2.9~4.8と大きくなり、転位の上昇運動が律速する高温塑性変形(転位クリープ)によって緻密化が進行するとされた。

以上のように、SPSの緻密化挙動は、ホットプレスやHIPと同様の緻密化速度式による解析が可能である。見方を変えれば、応力印加の効果を除くと、電場ないし電流印加による付加的な緻密化への効果は大きくはないと考えることもできる。実際、森田ら<sup>(7)</sup>は、 $MgAl_2O_4$ の焼結における通電効果の有無を検討するため、同じ昇温および印加応力条件でホットプレス焼結とSPS焼結を実施し、その緻密化挙動を比較した。その結果、SPS、ホットプレスのいずれの緻密化曲線もほぼ重なることが分かった。この結果は、 $MgAl_2O_4$ の焼結緻密化において通電はジュール加熱以外の付加的な効果は持たないことを示唆するように思われる。一方、著者らの研究によれば、 $Y_2O_3$ ではむしろ有意な通電効果が認められており、 $Y_2O_3$ のSPS中の粒成長が通常焼結比べて大幅に加速されていること、また電子エネルギー損失分光法(EELS)分析により、SPSによって得られた $Y_2O_3$ 緻密体は真空中または空気中で焼結された $Y_2O_3$ と比較して還元状態にあることが報告されている<sup>(8)</sup>。さらにホットプレスとSPSを比べてみると、図4.1に示すように $Y_2O_3$ ではホットプレスと比べてSPSの方がより速い緻密化速度および相対密度を得た。これらの結果は、 $Y_2O_3$ において通電はジュール加熱以外の緻密化促進効果を持つことを示唆している。すなわち、パルス通電加圧焼結における電場ないし電流の役割

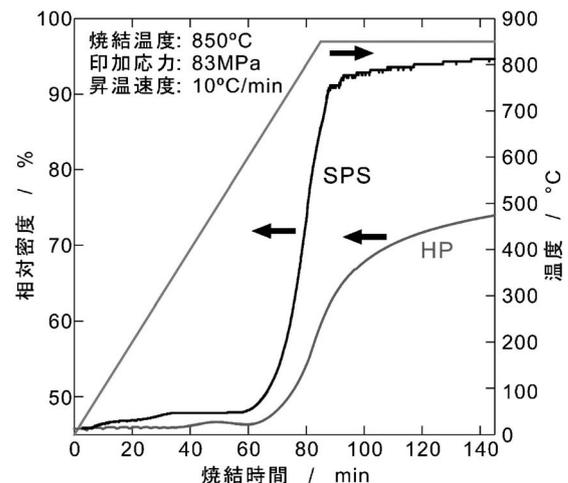


図4.1  $Y_2O_3$ における、パルス通電加圧焼結(SPS)とホットプレスとで焼結した場合の緻密化曲線の比較。SPS、ホットプレスともに焼結温度は $850^\circ\text{C}$ 、昇温速度 $10^\circ\text{C}/\text{min}$ 、印加圧力 $83\text{MPa}$ とした。炉内温度(右縦軸)を併せて示す。SPSの方が、緻密化開始温度、緻密化速度、最終到達密度のいずれもホットプレスよりも上回る事が分かる。

は、材料の誘電率や伝導キャリア等によっても変化する可能性があり、今後のさらなる研究とメカニズムの解明が俟たれる。

#### 4・1・3 SPS における昇温速度の影響

SPS における急速昇温は、材料の焼結を促進する上で有利な点であるとされている<sup>(9)</sup>が、高速昇温が焼結体の最終密度の向上や組織の微細化に常に有効であるとは限らないことを示すデータも数多く示されている。SPS において、昇温速度が及ぼす焼結体の微細組織および材料特性への影響についてはまだ明らかになっていない点も多々あるが、今後の重要な研究課題の一つとして本稿に現況をまとめておく。

SPS における焼結条件と焼結体の微細組織との関係は、特に  $\text{Al}_2\text{O}_3$  多結晶において多数報告がなされている。例えば Shen らは<sup>(10)</sup>、SPS による  $\text{Al}_2\text{O}_3$  の焼結において、焼結温度や焼結温度保持時間、焼結温度までの昇温速度、圧縮応力、電流波形といった様々な焼結条件下での焼結緻密化や粒成長挙動への影響を系統的に調査した。Shen らによれば、昇温速度  $50\sim 350^\circ\text{C}/\text{min}$  では相対密度 99% 以上の緻密な  $\text{Al}_2\text{O}_3$  焼結体を得られたが、それ以上の昇温速度では焼結体の最終密度はむしろ減少に転じるという、通常考えられている昇温速度の効果とは異なる結果が得られた(図4.2)。例えば昇温速度  $600^\circ\text{C}/\text{min}$  の場合、焼結温度  $1400^\circ\text{C}$  では相対密度は 99% から 90% まで減少していた。一方、昇温速度の増加と共に焼結体の平均粒径は(通常考えられている通り)減少していた。昇温速度の上昇は焼結中の粒成長の抑制には効果があるものの、焼結体の相対密度の向上には必ずしも反映されない模様である。

実際、緻密な  $\text{Al}_2\text{O}_3$  多結晶を得るにはむしろ低い昇温速度の方が有効であることが他の報告でも指摘されており、とりわけ微細結晶粒からなる透明  $\text{Al}_2\text{O}_3$  多結晶を得るのには、

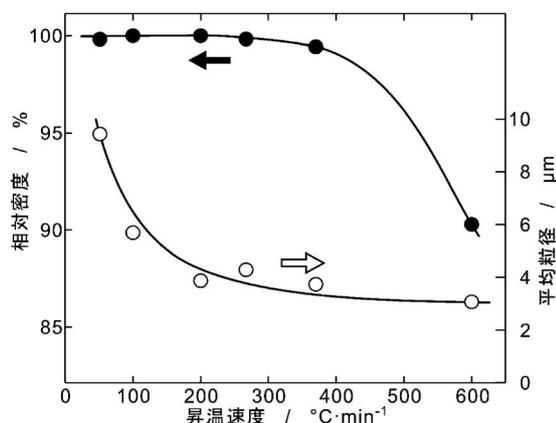


図4.2 様々な条件下でのSPSにより得られた $\text{Al}_2\text{O}_3$ 焼結体における相対密度(左縦軸, 黒丸)および平均粒径(右縦軸, 白丸)の昇温速度依存性<sup>(10)</sup>。昇温速度  $50\sim 350^\circ\text{C}/\text{min}$  では相対密度99%以上の緻密な $\text{Al}_2\text{O}_3$ 焼結体を得られたが、それ以上の昇温速度では焼結体の最終密度はむしろ減少に転じている。

昇温速度を低く抑えることが非常に有効であることが明らかとなっている。Kim らは、SPS での昇温速度について  $2\sim 100^\circ\text{C}/\text{min}$  の範囲で実験を行い、昇温速度を遅くするほど焼結体の平均粒径と残留気孔率を抑制すると共に、焼結体の光透過率を向上することを示した<sup>(11)</sup>。昇温速度低減の効果は、特に  $10^\circ\text{C}/\text{min}$  以下で顕著であった。従来、多結晶体の透光性を低減させる主要因(光の散乱源)の一つとして粒界の存在が挙げられ、焼結体の粒成長を促進し単位体積当たりの粒界面積を減少させることが焼結体の透光性向上のための常套手段であった。Kim らの報告は、SPS の昇温速度低減により焼結体の粒成長抑制と透光性向上を両立させるという、二重の意味で従来の知見を覆す結果となっていることは非常に興味深い。

結晶粒の微細化および到達密度の向上を図る上で、SPS での昇温速度が遅い方がむしろ有効であることは、 $\text{Al}_2\text{O}_3$  だけでなく、 $\text{MgAl}_2\text{O}_4$ <sup>(12)</sup> や  $\text{Y}_2\text{O}_3$ <sup>(13)</sup> でも報告されている。SPS における昇温速度の低減が緻密化に有効であるという理由については明確にはなっていないが、Kim らは速やかな昇温を目的として比較的大きな電流を流した場合、材料内部の点欠陥生成が促進され、粒界ないし粒内の残留ポアとなって緻密化を妨げる可能性を指摘している<sup>(14)</sup>。

#### 4・2 電場支援焼結

電場支援焼結(electric field-assisted sintering technique; FAST)は、1.2.3節で述べたように、セラミックスの粉末成形体に、数  $\text{V}/\text{cm}$ ~数十  $\text{V}/\text{cm}$  の一定の電場を印加しながら昇温するという手法であり<sup>(15)</sup>、電場印加によって緻密化が促進される効果が幾つかのセラミックス材料において認められている。パルス通電加圧焼結とは違って無加圧焼結であり、また伝導体のダイス・パンチを用いず直接試料に電場を印加するため、材料の電気伝導率に従って限られた電流値しか流れないことから、電場の効果が支配的であると考えられる。

Ghosh らは、焼結鍛造により得られた 3Y-TZP に  $1300^\circ\text{C} \times 10\text{h}$  の熱処理を施す実験において、 $4\text{V}/\text{cm}$  の弱い直流電場を印加すると、電場無印加の場合と比べて熱処理後の平均粒径が 20% ほど低減することを報告した<sup>(16)</sup>。さらに  $20\text{V}/\text{cm}$  の直流電場下におかれた 3Y-TZP の粉末成形体を一定速度で昇温した場合、緻密化曲線が低温側にシフトすることが Yang らによって初めて示された<sup>(17)</sup>。

Yang らは、SiC 製治具に懸吊したドッグボーン形状の 3Y-TZP 粉末成形体に Pt 線電極を取り付け、大気炉内で昇温速度  $11^\circ\text{C}/\text{min}$  にて  $1500^\circ\text{C}$  まで昇温し、直流  $20\text{V}/\text{cm}$  の電場印加または無印加(通常は無加圧焼結)とで緻密化挙動を比較した。図4.3に、Yang らによる電場無印加および印加下での 3Y-TZP の緻密化曲線を示す<sup>(17)</sup>。直流電場の印加により、緻密化曲線が低温側に  $60^\circ\text{C}$  ほどシフトしていることが分かる。通電試料における電気伝導率は通常の TZP におけるイオン伝導率と一致しており、ジュール加熱による温度上

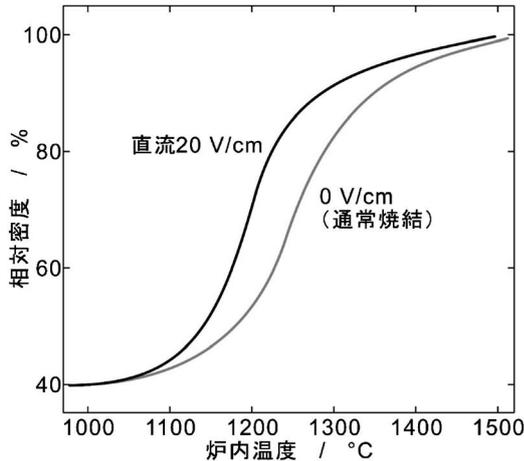


図4.3 20 V/cmの直流電場印加および無印加(すなわち通常の無加圧焼結)での3 mol%  $Y_2O_3$ 安定化正方形  $ZrO_2$ 多結晶体(3Y-TZP)の緻密化曲線<sup>(17)</sup>. 電場緻密化が昇温速度は11°C/minであった.

昇は10°C以下であると見積もられた. また, 電場印加下で得られた焼結体では, 通常の焼結体と比べて平均粒径が6割程度にまで微細になっていたという. このことから, 電場印加による焼結緻密化速度の上昇は, 粒成長の抑制に起因するとされた.

このように電場支援焼結は焼結緻密化をより低温で促進する効果があり, TZP以外にも  $Y_2O_3$ <sup>(18)</sup> や  $TiO_2$ <sup>(19)</sup>,  $BaTiO_3$ <sup>(20)</sup> 等で確認されている. ただし電場支援焼結に関しては, パルス通電加圧焼結や後述するフラッシュ焼結に比べて報告例は限られており, 現象の理解もまだ十分進んでいない. しかしながら, 電場支援焼結は微細組織および緻密化に対して興味深い効果をもたらすものであり, 今後の研究進展が望まれる.

### 4.3 フラッシュ焼結

#### 4.3.1 フラッシュ現象

フラッシュ焼結は Raj らの研究グループによって2010年に発表された焼結法である<sup>(21)</sup>. 彼らの最初の報告では3Y-TZPを対象としており, 例えば120 V/cmの直流電場を印加した場合, 大気中無加圧下850°Cにおいて緻密化が開始し, 僅か5秒で相対密度95%以上の緻密体を得られたとしている. 3Y-TZPの一般的な焼結条件が1400°C~1500°Cにおいて数時間要することを考えると, 直流電場の印加により焼結緻密化が低温・短時間で進むことが分かる. このような特長から, フラッシュ焼結は新たな省エネルギープロセスとして注目を集めた. Raj らの報告以降, フラッシュ焼結は種々のセラミックスで発現することが報告され, 現在では高純度  $Al_2O_3$ を除く主要な酸化物および,  $SiC$ <sup>(22)</sup>や  $Sb_2Te_3$ <sup>(23)</sup>など一部の非酸化物において, その焼結緻密化の低温・高速化が確認されている.

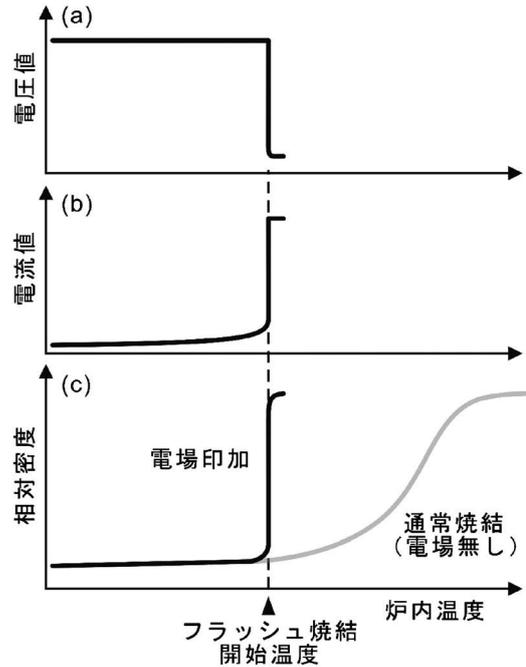


図4.4 セラミックス粉末成形体に一定の直流ないし交流電場を印加しながら, 一定の昇温速度で炉内温度を上昇させた場合の, 炉内温度に対する(a)電圧, (b)電流, および(c)相対密度(緻密化曲線)の模式図.

装置の構成としては, 通常の高温炉においてPt線を介して粉末成形体に通電するタイプ(図1.7), また熱膨張計に電極用のPt線を導入して試料への通電を可能としたタイプ<sup>(24)</sup>が使われている. フラッシュ焼結において, セラミックス粉末成形体に一定の直流ないし交流電場を印加しながら, 一定の昇温速度で炉内温度を上昇させた場合の, 炉内温度に対する(a)電圧, (b)電流, および(c)相対密度(緻密化曲線)をそれぞれ模式的に図4.4に示す. 一定電圧を粉末成形体に印加し炉内温度を一定速度で上昇させると, 試料の電気伝導率は温度上昇とともに増加し, 電流値は徐々に上昇する. あるしきい値を超えた電圧を印加している場合, 臨界温度に達すると試料を流れる電流値(電気伝導率)が通常温度依存性から逸脱して急激に上昇する. この強電場印加下での電気伝導率ないし電流値の急激な増加はflash eventと呼ばれることが多いが, 本稿ではフラッシュ現象と呼ぶことにする. このフラッシュ現象の開始と同時に, フラッシュ焼結が発生する. 粉末成形体に電力を供給する電源の出力には限界があるので, 通常, フラッシュ現象の開始と同時に, 電源の制御を電圧一定制御から電流一定制御に切り替える. すなわち, フラッシュ焼結開始後から電流値を一定値に保つ制御に切り替えるため, 印加電圧は初期値から低下する.

図4.5に, 著者らの報告した  $Y_2O_3$ における直流電場下でのフラッシュ焼結実験の結果を示す<sup>(18)</sup>. 図4.5(a)は各電場下での緻密化曲線, (b)は試料に投入された電力をプロットしている.  $Y_2O_3$ は難焼結性材料の一つであり, 一般的な焼結法で緻密体を得るためには, 1600°C以上の焼結温度で数

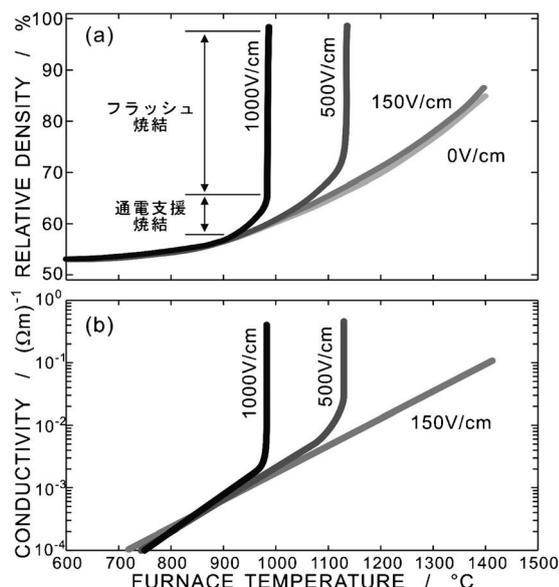


図4.5  $Y_2O_3$ における各直流電場下での(a)緻密化曲線および(b)試料に投入された電力と炉内温度に対してプロットした。昇温速度は $10^\circ C/min$ であった。500 V/cm, 1000 V/cmの電場印加により、徐々に緻密化が促進される電場支援焼結(FAST)が現れたのち、急激に緻密化が進むフラッシュ焼結が認められた。

時間保持をする必要がある。150 V/cmの直流電場を印加しても、緻密化挙動に目立った変化は認められない。これに対し、500もしくは1000 V/cmの直流電場の印加により緻密化が促進されており、徐々に緻密化が促進されるFASTの影響を示した後に、フラッシュ焼結が現れた。電場強度を増加するにしたがい、緻密化開始温度は低温側へと移動しており、例えば1000 V/cmの条件では約 $980^\circ C$ で約96%の最終密度が得られている。これは大気中、無加圧条件での通常焼結と比べても、 $600^\circ C$ 以上の焼結温度の低減と数時間以上の焼結時間短縮に繋がる。高電場印加下で、緻密化速度の増加と同時に、電力値も急激に増加しており、確かにフラッシュ現象が起きていることが確認できた。

#### 4・3・2 フラッシュ焼結のメカニズム

フラッシュ焼結においては、常に図4.4(b)に示したような電流ないし投入電力の上昇を伴うことから、急峻な緻密化速度の増加には試料への通電に起因するジュール熱が支配的に寄与していると結論する報告が多い。Toddらは、通電による温度と電気伝導率の上昇に関して有限要素法による解析を行い、フラッシュ現象が熱暴走、すなわちジュール熱による試料温度上昇とそれに伴う電気伝導率の増加との雪崩効果に起因するものと結論付けた<sup>(25)</sup>。実際、フラッシュ焼結中のジュール熱に起因して、試料温度が炉内温度から大きく逸脱して上昇する様子が、放射温度計による計測<sup>(18)</sup>やその場合X線回折法<sup>(26)</sup>により確かめられており、フラッシュ焼結のメカニズムとして熱暴走説を支持する報告が大半を占める。一

方、Rajは既報のTZPや $Al_2O_3$ -TZPコンポジットにおけるフラッシュ焼結のデータについて、熱収支に関する解析を行い、殆どのケースで熱暴走が起これないこと、すなわちフラッシュ焼結がジュール熱の効果だけでは説明できないと結論付けている<sup>(27)</sup>。ジュール加熱の寄与を巡り異なる見解が出てきていることの要因の一つは、フラッシュ焼結が極めて短時間の内に起こる非定常な現象であり、材料の局所的な温度や物質輸送を定量的に評価することが極めて困難であることにある。緻密化には特に粒子表面や粒界といった局所領域での物質輸送が主体的に関わっていることから、マクロな緻密化挙動からのみではフラッシュ現象の素過程を捉えることは困難であろう。そこで注目されるのが、フラッシュ焼結に付随して起こる、相変態をはじめとする特異な現象の発現である。

#### 4・3・3 フラッシュ焼結に伴う諸現象

上述のその場合X線回折実験では、フラッシュ焼結中の3Y-TZPの結晶構造変化が調べられた<sup>(26)</sup>。炉温 $1000^\circ C$ において100 V/cm ( $105 mA/mm^2$ )の直流電場を印加すると、この温度での安定相である正方晶に加えて、高温安定相である擬立方晶(pseudo-cubic phase)が現れた。この擬立方晶は電場を除去すると消失してしまう。このとき、試料に接触させたPt薄膜の格子定数から算出された試料温度は $1290^\circ C$ であった。一方、電場を印加しない3Y-TZPにおいては、 $1400^\circ C$ でも立方晶の出現は確認されなかった。すなわち、フラッシュ状態において生じた立方晶は、試料温度上昇の効果では説明できないことになる。

$ZrO_2$ の相変態挙動が関連する興味深い成果としては、この他にフラッシュ焼結による単斜晶 $ZrO_2$ 多結晶の固相<sup>(24)</sup><sup>(28)</sup>が挙げられる。 $ZrO_2$ は本来、約 $1000^\circ C$ 以下で単斜相が安定であり、 $ZrO_2$ セラミックスの通常の焼結温度である $1400^\circ C$ 以上では正方晶や立方晶が安定相となる。安定化剤を含まない $ZrO_2$ を高温で緻密化させても、降温時に $1000^\circ C$ 近辺で起こる正方晶から単斜相への相変態は単位胞の体積膨張を伴うため、内部応力によって焼結体は破碎してしまう。これに対し、175 V/cmの直流電場を用いて $1350^\circ C$ でフラッシュ焼結させると、室温まで降温しても破壊させずに単斜晶 $ZrO_2$ 多結晶を得ることができた。フラッシュ焼結後の無添加 $ZrO_2$ の微細組織からは、フラッシュ焼結に伴う酸素空孔濃度の上昇および強電場下での強制的な酸素イオン伝導が示唆されている。

さらに、Y-TZPや $Y_2O_3$ ,  $BaTiO_3$ 多結晶においても、フラッシュ焼結により緻密化させた材料は強還元状態になることが指摘されている。例えば、フラッシュ焼結により緻密化された $BaTiO_3$ 多結晶において、粒内と比して粒界が還元状態に類似の電子状態になっていることが電子エネルギー損失分光法(EELS)により示された<sup>(29)</sup>。同様の結果は $Y_2O_3$ でも見出されている<sup>(18)</sup>。さらに、フラッシュ焼結により、Y-TZPにおける過剰酸素イオン空孔が安定化され、大気中にもかかわらず $ZrO_2$ が窒化されることが明らかとなった<sup>(30)</sup>。強電場下で非平衡状態での量を越えた濃度の酸素イオン空孔

が導入されたことを強く示唆する。この他、フラッシュ焼結によって二粒子粒界面に非平衡結晶相が析出するという報告も存在する。著者らは、BaTiO<sub>3</sub>のフラッシュ焼結において過剰な電流を流すと、電流が集中する箇所粒界面が析出することをTEMにより確認した<sup>(31)</sup>。結晶構造と化学組成を定量評価したところ、この粒界面はBaO-TiO<sub>2</sub>系平衡状態図上には存在しない非平衡もしくは準安定相であると結論付けられた。

最近、フラッシュ焼結により、添加元素に依らない蛍光体の作製が相次いで報告された<sup>(32)(33)</sup>。交流電場を用いたフラッシュ焼結により、無添加Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>緻密焼結体は紫外光(254 nm)下で411 nmにピークを持つ蛍光発光を示すことが分かった(図4.6)<sup>(32)</sup>。さらに1 mol%のSi<sup>4+</sup>を添加したY<sub>2</sub>O<sub>3</sub>のフラッシュ焼結体は、より強い蛍光発光を示した。ただし、蛍光発光および励起スペクトルにおけるピーク波長は、Si<sup>4+</sup>の有無に関わらず変化はなかった。同じ原料粉末を用い、通常の大気中無加圧焼結により作製された無添加Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>および1 mol%Si<sup>4+</sup>添加Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>緻密多結晶体では蛍光発光を示さなかったことから、原料粉末に含まれる不純物が発光中心になっているとは考えられない。こうした結果から、Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>の蛍光発光は原料に含まれる不純物や添加したSi<sup>4+</sup>自体ではなく、フラッシュ焼結および電場下でのSi<sup>4+</sup>添加によってバンドギャップ内に導入された、何らかの欠陥準位の生成に起因することが示唆された。また、3Y-TZPを交流電場の印加によりフラッシュ焼結中した場合も、245 nmの紫外光の下で青色の蛍光を発することが明らかになった<sup>(33)</sup>。TZPにおいても、通常の焼結によって緻密化された焼結体では蛍光発光は得られず、電場ないし電流の働きによって蛍光特性が

得られたと考えられる。さらに、フラッシュ焼結の持続時間を長くすると、蛍光発光の強度が増した。こうした蛍光発光は、やはりY<sub>2</sub>O<sub>3</sub>の場合と同様、フラッシュ焼結のプロセスにおいて導入された何らかの欠陥準位に起因すると考えられる。

以上述べたように、フラッシュ現象を経ることで平衡状態では起こりえない原子欠陥の導入や非平衡または準安定相の生成が報告されるようになった。これらの事実、フラッシュ焼結においてはジュール加熱だけでなく強電場下での非平衡な点欠陥構造や物質輸送が実現することを示唆しており、これをフラッシュ現象ならびにフラッシュ焼結の起源と結びつけることは突飛な発想ではないであろう。例えばフラッシュ現象の発生条件と、点欠陥濃度や電気伝導度の急激な上昇との関連性などに興味を持たれる。現況、フラッシュ焼結により均一・高密度の焼結体を得るための手法は必ずしも確立していないが、印加する強電場として交流電場を用いることで、より簡便に均一且つ高密度の焼結体を得られるという報告が現れ始めている。著者らの報告でも、交流電場の利用が均一な焼結体の組織形成に有効であることが示されている<sup>(32)(33)</sup>。確かに直流電場よりも交流電場を印加する方が、焼結体において均一な微細組織を得ることが容易であることは想像に難くない。併せて、例えばフラッシュ焼結によってのみ実現しうる材料特性発現が可能になれば、フラッシュ焼結技術への関心は今後さらに高まるであろう。

#### 4・4 通電支援焼結の今後の展望

SPSは製造できる部材サイズの制約など問題点が指摘されながらも、SPSでしか実現が困難な材料—例えばバイナダレスWC系超硬材料など—を中心に、既に実用化が始まっている。これは従来からの焼結理論・経験に加えて、SPS実験装置の普及や数多くの基礎研究など産学の長年の努力が積み重なって到達し得たものであろう。フラッシュ焼結については最初の報告から約10年が経過したが、4.3.3で見たように、未だに新たな現象や微細構造の発現が報告されており、学術的にも工業的にもまだまだ萌芽段階であると考ええる。FASTやフラッシュ焼結においても、SPSと同様に焼結体の均質化や大型化など問題は山積しているが、焼結技術・装置の開発・向上だけでなく緻密化機構の解明、さらにSPSと同様にフラッシュ焼結でしか実現しない材料の製造技術の確立などが進めば、一層の学問展開が進むであろう。

焼結は長い年月をかけて基礎理論が構築され、とりわけセラミックスの基本的な製造技術として広く普及しているが、通電支援焼結をはじめ未だに新たな学術的萌芽が見出され続けており、学術的のみならず工業的にも解明すべき点は多い。今後の当該分野のさらなる発展を祈念して、本講義ノートの締めくくりとしたい。

最後になったが、本講義ノートの執筆にあたり、目 義雄博士、平賀啓二郎博士、金炳男博士、森田孝治博士(物質・

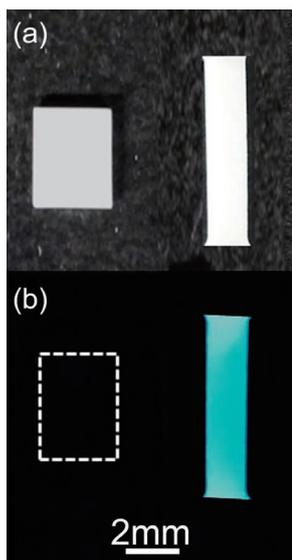


図4.6 大気中での通常の無加圧焼結(左)およびフラッシュ焼結(右)により得られたY<sub>2</sub>O<sub>3</sub>緻密体の(a)自然光および(b)紫外光(254 nm)下での試料外観写真<sup>(32)</sup>。フラッシュ焼結体は青白い蛍光発光を示したが、通常焼結体では蛍光発光は認められなかった。(オンラインカラー)



# 薄ゲージ化と製缶時の加工自由度に貢献する 高強度・高加工性缶用鋼板「JATT®」の開発

齋藤 勇人<sup>1)</sup> 假屋 房亮<sup>1)</sup> 鈴木 善継<sup>2)</sup> 川合 稔<sup>3)</sup> 中村 紀彦<sup>4)</sup>  
 杉田 一久<sup>5)</sup> 石井 健太郎<sup>5)</sup> 大谷 大介<sup>6)</sup> 神宮 貴文<sup>7)</sup> 中田 有紀<sup>8)</sup>

## 1. 緒 言

缶用鋼板は缶飲料や食品缶詰の容器であるスチール缶の材料として用いられる板厚 0.2 mm 前後の極薄鋼板であり、この鋼板に錫めっき処理や電解クロム酸処理等を施したものが、それぞれぶりき、ティンフリースチール等の表面処理鋼板として実用化されている<sup>(1)</sup>。

缶用鋼板は地球環境保全の観点から、薄ゲージ化による輸送時の軽量化が需要家から求められており、板厚低減に伴う缶体強度の低下を補うため鋼板の高強度化が求められている。薄ゲージ化は、鉄使用量を削減できるため、1缶当たりの鋼板製造過程で発生するCO<sub>2</sub>を削減できる効果もある。また、昨今の消費者からの多様なニーズに対応するため、加工性の向上による缶デザイン性の向上が求められている<sup>(2)</sup>。

缶用鋼板を高強度化するため、従来は、冷延鋼板を連続焼鈍炉で再結晶焼鈍処理した後に、さらに冷間圧延することで加工硬化させ高強度化する技術が適用されてきた(2回圧延、DR法<sup>(3)</sup>)。しかしながら、DR法では高強度化する反面、加工歪みにより伸びが低下するため、高加工性が求められる Easy Open End や、3ピース缶胴用途の加工時に、リベット、フランジ、ビード部等で割れが発生することが課題となっていた。

これらの課題の解決には、C、Mn等の固溶強化元素やNb、

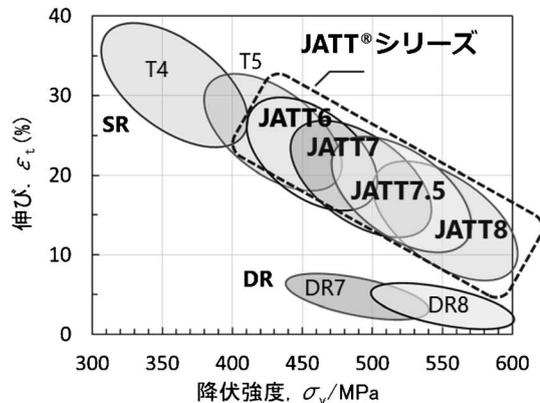


図1 開発鋼の強度延性バランス。

Ti等の析出強化元素を添加する手法が考えられる。しかしながら、食缶等に使用される缶用鋼板は、ASTM規格により<sup>(4)</sup>、耐食性劣化の観点から、合金添加量が厳しく制限されており、自動車や建材等で適用される多量の強化元素添加による強化法を適用することには限界がある。そのため、従来技術では、薄ゲージ化を可能とする高強度と高加工性を両立する缶用鋼板を提供することは不可能であった。

著者らは、強化元素の見直しによる強化機構の最適化と、製造条件最適化による強化機構発現の最大化を図ることで、ASTM規定内の最小限の強化元素添加で、高強度化と高加工性を両立する缶用鋼板 JATT® を新たに開発し、量産を開始した。図1に開発鋼の降伏強度(YS)–伸び(El)のバランスを示す。本稿ではその開発技術の内容と技術的意義について述べる。

## 2. 鋼板成分設計の考え方

前述のように缶用鋼板では強化元素の添加が厳しく制限される。例えば自動車用鋼板や建材等では、代表的な強化元素のSiやMnは一般的に1%以上添加されることがあるが<sup>(5)</sup>、缶用鋼板では、それぞれ最大0.02%、0.6%であ

\* JFE スチール株式会社  
 スチール研究所 缶・ラミネート材料研究部；1)主任研究員  
 2)部長 3)缶用鋼板セクター部 主任部員 4)東日本製鉄所 商品技術部 主任部員 5)東日本製鉄所 第1冷延部 主任部員  
 6)西日本製鉄所 薄板商品技術部 主任部員 7)西日本製鉄所 錫鍍金部(主任部員) 8)西日本製鉄所 錫鍍金部 (部員)  
 Development of High Strength and High Formability Steel Sheets for Can Material, 「JATT®」, that Contributes Down Gauge and Good Designability of Can Shape; Hayato Saito, Nobusuke Kariya, Yoshitsugu Suzuki, Minoru Kawai, Norihiko Nakamura, Kazuhisa Sugita, Kentaro Ishii, Daisuke Otani, Takafumi Jingu and Yuki Nakata (JFE Steel Corporation)  
 2019年10月31日受理[doi:10.2320/materia.59.44]

る(4). そのため、単に従来の強化機構を適用するのでは、高強度化が困難である。そこで、(1)強化元素見直し、(2)強化機構の最大発現を試みた。

### (1) 強化元素の見直し

ASTM 規格で許容される強化元素として、一般的な固溶強化元素である C の他に、従来十分には検討されていなかった N による固溶強化に着目した。一般的な鋼の N 含有量は高々 0.001~0.003 mass% 程度である。そこで溶鋼の精錬工程において、積極的に N を含有させた鋼を作製した。図 2 に機械特性に及ぼす固溶 N 量の影響を示す。0.015 mass% の N 添加で、伸びの低下を抑制しつつ、かつ降伏強度を 44 MPa 増加させることに成功した。また、析出強化元素としては、微量添加で炭化物等の微細析出物が析出して強度が増加する Nb を選択した(6)。

### (2) 強化機構の最大活用

固溶強化と析出強化による強度上昇効果を最大限活用するため、熱間圧延、および再結晶焼鈍条件の最適化を行った。Nb による析出強化効果を最大化するため、熱延巻き取り温度 (Coiling Temperature, CT) による影響を調査した。図 3 に熱延板の硬さに及ぼす CT と保持時間の影響を示す。CT を上昇させることで熱延鋼板の硬さが上昇した。さらに、このような CT の影響は再結晶焼鈍後にも引き継がれることが分かった。図 4 に CT を 675°C と 576°C に変えた熱延鋼板を冷延—再結晶焼鈍した鋼板中の析出物を透過電子顕微鏡観察

した結果を示す。低 CT 材と比較し、高 CT 材において 10 nm 以下の微細析出物が多数析出していることが明らかになった。以上のことから、熱延 CT を高めに制御することで、微細な Nb 析出物による析出強化効果を最大化出来ることがわかった。

また C, N による固溶強化効果を最大化するため、連続焼鈍炉内での再結晶焼鈍時の冷却条件による影響を調査した。図 5 に均熱処理後の冷却条件と鋼板の降伏強度の関係を示す。冷却停止温度を 300°C まで低下させて鋼板を急冷し、冷却速度を増加させることで、徐冷した場合に比べ降伏強度が顕著に上昇することがわかった。これは急冷により C および N が鋼中に固溶したままの状態が保持されることで、徐冷に比べ、固溶強化量が増加したことによると考えられる。以上のように再結晶焼鈍後の冷却速度を上昇させることで、固溶強化効果を最大化出来ることがわかった。

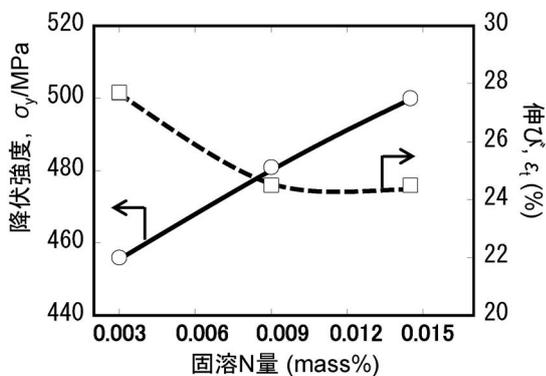


図 2 固溶 N 量が機械特性に及ぼす影響。

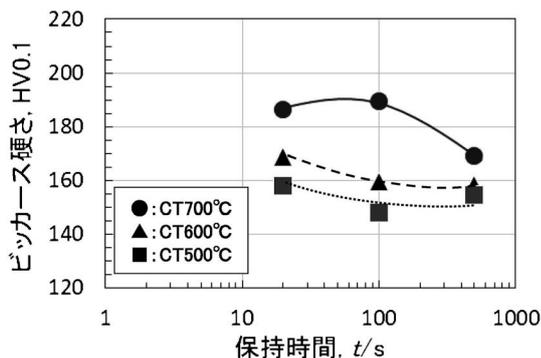


図 3 熱延板の硬さに及ぼす CT の影響。

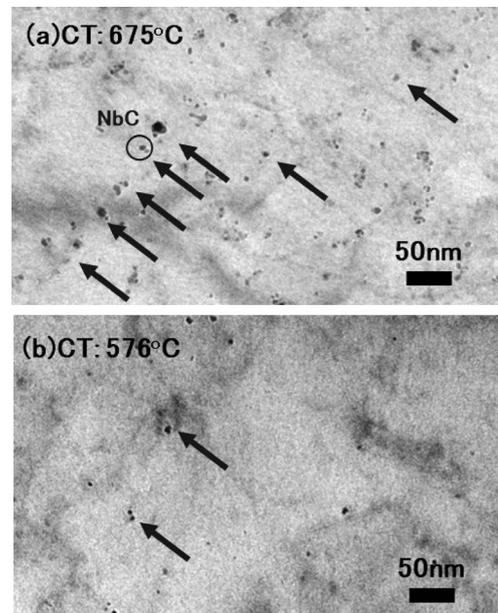


図 4 焼鈍板中の析出物に及ぼす CT の影響。

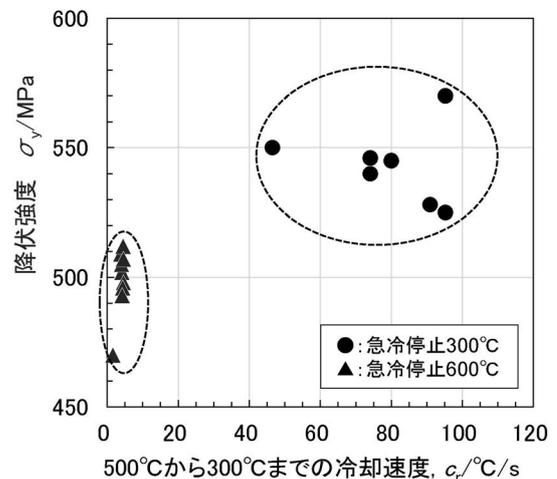


図 5 降伏強度に及ぼす冷却条件の影響。

表 1 開発鋼の機械特性.

		目標範囲		
	Grade	HR30T硬さ	降伏強度 / MPa	伸び (%)
JATT	6	67±4	460±50	≥15
	7	69±4	480±50	≥15
	7.5	71±4	520±50	≥15
	8	72±4	550±50	≥10



図 7 開発鋼の適用例.

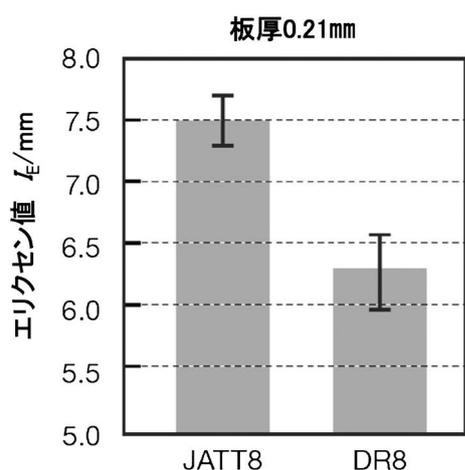


図 6 開発鋼のエリクセン加工性.

### 3. 開発鋼の特性

表 1 および前述の図 1 に開発鋼の機械特性を示す。従来の高強度鋼である DR7, DR8 グレード鋼と同等の強度レベルでありながら、高い伸びが実現出来た。また前述のように固溶・析出強化効果を最大限引き出すことで、これまでの T4, T5 グレード鋼に比べ、大幅な高強度化に成功した。図 6 に加工性の向上効果をエリクセン試験で調査した結果を示す。DR8 材と比較し、開発鋼ではエリクセン値が顕著に上昇した。以上述べたように、開発鋼は合金元素添加量を ASTM 規制内に抑制しつつ、析出元素最適化と強化機構の最大活用する独自の材質設計思想により、DR 材と同等の高強度を維持しつつ、かつ従来平均 3~5% の伸びに対し、最大 15% 以上の伸びを実現した。

### 4. 開発鋼の技術的意義と実用化状況

JATT® は主に高い加工性が求められる Easy Open End や、3 ピース缶胴用向け等にすでに実用化されており、2017 年から量産を開始している。図 7 に適用例を示す。一部のアイテムでは JATT® の適用により、板厚を 0.21 mm から 0.18 mm にゲージダウンすることが可能になった。また、従来 DR 材より加工の自由度が高く缶デザインの可能性が広がること、従来 SR 材(一回圧延, 通常の冷延—焼鈍材)と比較し強度が高く座屈やデント変形を軽減できるため、さらなる用途拡大による生産量の増加が見込まれる。このように JATT® は実用的にも優れた特性を有するだけでなく、薄ゲージ・軽量化の実現により、地球環境に優しく、かつ、グローバルな消費者の多様なニーズに答える缶用鋼板として今後ますます広く使われることが期待される。

### 5. 工業所有権

国内特許 9 件登録済み、海外特許 6 件出願済み。特許第 5939368 号、特許第 6191807 号、国際公開番号 WO2016/031234、国際公開番号 WO2017/150066 など。

### 6. 文 献

- (1) 小島克己：JFE 技報，**39**(2017)，1.
- (2) 例えば <https://www.canmaker.com/online/mead-johnson-launches-enfinitas-in-shaped-cans/>
- (3) ぶりきとティンフリースチール，アグネ，(1970)，133.
- (4) ASTM, A623M.
- (5) 苗村 博：第 88・89 回西山記念技術講座，日本鉄鋼協会，(1983)，314.
- (6) T. Gladman: The Physical Metallurgy of Microalloyed Steels, The Institute of Material, (1997), 54.

# ニッケル水素化物電池の出力特性改良技術開発

平光規行<sup>\*1)</sup> 林 宏明<sup>\*2)</sup> 金原雅彦<sup>\*\*</sup> 澤 春夫<sup>\*\*\*</sup>  
 中西治通<sup>\*\*\*\*1)</sup> 高橋泰博<sup>\*\*\*\*2)</sup> 山口匡訓<sup>\*\*\*\*\*1)</sup> 小島由継<sup>\*\*\*\*\*2)</sup>

## 1. はじめに

1990年にニッケル水素化物電池が市場に導入されて以来、その安全性の高さと搭載スペースの制約からハイブリッド自動車の二次電池として利用されてきた。その後、リチウムイオン電池が開発された。この電池は軽量で出力密度が高く2011年からハイブリッド自動車の電池に搭載されるようになってきている<sup>(1)</sup>。一方、ハイブリッド自動車用ニッケル水素化物(Ni-MH)電池について、さらに省スペース化が望まれている。従来のNi-MH電池の負極には水素吸蔵量が1 mass%程度、平衡プラトー圧(解離圧)が0.01 MPa程度の合金が利用されている<sup>(2)(3)</sup>。

解離圧が高く高容量な水素吸蔵合金を負極に利用することで、Ni-MH電池の出力密度が改良して省スペース化できるものと考えられる。筆者らはさまざまな水素貯蔵材料の中から、Ni-MH電池の負極に適した重量エネルギー密度と解離圧が高いAB<sub>5</sub>型水素吸蔵合金に注目し、Ni-MH電池の出力特性改良について研究を行った。

## 2. 従来のNi-MH電池の課題

従来のNi-MH電池については、リチウムイオン電池に比べ安価であるため、現在でもハイブリッド自動車に利用され

ている。しかしながらさらにこの電池のコンパクト、省スペース化が望まれている。これまで高解離圧(20°Cで2.0 MPa)のAB<sub>5</sub>型水素吸蔵合金が、水素吸蔵量1.5 mass%を示すことが報告されてきた<sup>(3)</sup>。しかしながら、通常の電池容器の耐圧は、1 MPa以下と考えられる。

筆者らは60°Cの解離圧が1 MPa以下で、高容量の高解離圧水素吸蔵合金を用いてNi-MH電池の出力密度を改良し、電池のコンパクト化が可能な技術を開発した。

## 3. 電池用高解離圧水素吸蔵合金の開発

### (1) 合金組成の最適化<sup>(4)</sup>

高解離圧水素吸蔵合金を用いたNi-MH電池で使用する水素吸蔵合金は、0.1 MPa以上の高解離圧を有する材料の中でも電池の負極材料として一般的な構成元素を有するAB<sub>5</sub>型合金を採用した。電池で利用することを想定してAB<sub>5</sub>型合金の最適組成を検討し、水素吸蔵、放出に伴う反応熱の低減および低温での水素解離圧向上(水素吸蔵量が多く適度な解離圧)を狙った。AB<sub>5</sub>型水素吸蔵合金のX線回折強度曲線を測定して結晶構造を求めた。また、種々の温度での水素吸蔵放出測定には圧力-組成-温度(PCT)特性測定装置(最高10 MPa)を使用した。

### (2) AB<sub>5</sub>型合金の特性

AB<sub>5</sub>型合金は六方晶系CaCu<sub>5</sub>型構造を有し、 $MmNi_{3.99}Co_{0.60}Mn_{0.36}Al_{0.053} (La_{0.241}Ce_{0.543}Pr_{0.0538}Nd_{0.163}Ni_{3.99}Co_{0.60}Mn_{0.36}Al_{0.053})$ は室温1 MPaで水素を吸蔵した。 $MmNi_{3.99}Co_{0.60}Mn_{0.36}Al_{0.053}$ の典型的な圧力-組成等温線を図1に示す。

真空熱処理による活性化後、1 MPa、室温(293 K)で1.4 mass%の水素を吸蔵し、圧力を下げると水素を放出して水素放出量は1.4 mass%となる。この値は従来、常圧(0.1 MPa)で利用されてきた合金(解離圧:約0.01 MPa)に比べ1.4倍に増加する。高解離圧水素吸蔵合金の平衡プラトー圧(解離圧)は約0.2 MPaであり、60°Cに加熱しても1 MPa以

\* 株式会社榎屋; 1)課長 2)常務執行役員

\*\* 株式会社GF イノベーション取締役社長

\*\*\* ケミオ株式会社取締役社長

\*\*\*\* トヨタ自動車株式会社; 1)技範 2)室長

\*\*\*\*\* 広島大学; 1)博士課程後期1年 2)教授

Power Characteristics Improvement Technology for Nickel Metal Hydride Batteries; Noriyuki Hiramitsu\*, Hiroaki Hayashi\*, Masahiko Kimbara\*\*, Haruo Sawa\*\*\*, Haruyuki Nakanishi\*\*\*\*, Yasuhiro Takahashi\*\*\*\*, Masakuni Yamaguchi\*\*\*\*\* and Yoshitsugu Kojima\*\*\*\*\* (\*Tsuchiya Co. Ltd., \*\*GF Innovation Ltd., \*\*\*Chemio Co. Ltd., \*\*\*\*Toyota Motor Corporation, \*\*\*\*\*Hiroshima University)

2019年10月31日[doi:10.2320/materia.59.47]

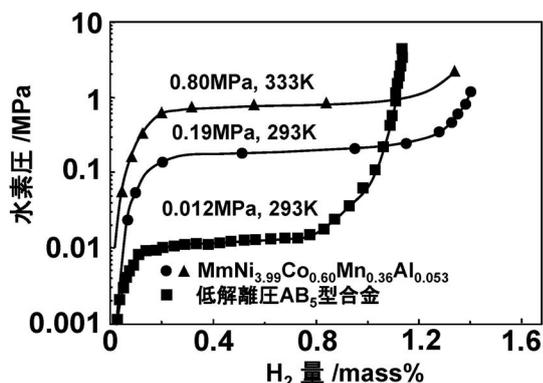


図1 AB<sub>5</sub>型水素吸蔵合金の水素圧-組成等温線.

下であった.

van't Hoffプロットから求めたMmNi<sub>3.99</sub>Co<sub>0.60</sub>Mn<sub>0.36</sub>Al<sub>0.053</sub>水素化物の生成熱は-29 kJ/molH<sub>2</sub>となり, その大きさは従来のNi-MH電池に利用されている水素吸蔵合金(-35 kJ/molH<sub>2</sub>)に比べ小さな値を示した.

水素吸蔵合金の解離圧はX線回折測定から求めた単位格子体積が小さいほど高くなり, 従来の報告とその傾向は一致する. 従来のAB<sub>5</sub>型水素吸蔵合金の解離圧は0.012 MPaであり, MmNi<sub>3.99</sub>Co<sub>0.61</sub>Mn<sub>0.30</sub>Al<sub>0.27</sub>(La<sub>0.803</sub>Ce<sub>0.140</sub>Pr<sub>0.0148</sub>Nd<sub>0.0427</sub>Ni<sub>3.99</sub>Co<sub>0.61</sub>Mn<sub>0.30</sub>Al<sub>0.27</sub>)(解離圧約0.01 MPa)と同程度の解離圧を示した. 低解離圧AB<sub>5</sub>型合金中のLaサイトをLa(0.169 nm)に比べ金属半径の小さなCe(0.165 nm), Pr(0.164 nm)やNd(0.164 nm)に一部置換し, Niサイト中でNi(0.115 nm)比べ金属半径の大きなAl(0.125 nm)の量を下げること, 解離圧が0.01 MPaから0.19 MPaに上昇するものと考えられる. Co(0.116 nm)は水素化による格子膨張を低減して, 電池のサイクル特性を向上させるために必要である.

#### 4. 電気化学特性

Ni-MH電池の起電力 $E_0$ は水素吸蔵合金の解離圧力 $P$ [atm]を用いて次式で計算することができる<sup>(3)</sup>.

$$E_0 = 1.35 + \frac{RT}{2F} \ln P = 1.35 + \frac{RT}{2F} \ln \left( \frac{\Delta H}{RT} - \frac{\Delta S}{R} \right) \quad (1)$$

ここで,  $R$ は気体定数, 8.314[J/Kmol],  $T$ :絶対温度[K],  $F$ :ファラデー定数, 96500[C/mol],  $\Delta H$ は標準エンタルピー変化(生成熱)[kJ/molH<sub>2</sub>],  $\Delta S$ は標準エントロピー変化[J/molK]である. 式(1)より, 圧力が0.1 MPa以上の高解離圧水素吸蔵合金を用いた電池の起電力は従来合金(解離圧:0.01 MPa)を用いた場合に比べ0.03 V以上高くなる. また, 低解離圧水素吸蔵合金の生成熱の大きさは高解離圧水素吸蔵合金に比べ大きくなる. 低温下では低解離圧水素吸蔵合金の起電力は高解離圧水素吸蔵合金に比べ大きく低下する.

ハイブリッド電気自動車用密閉形Ni-MH電池の出力密度および入力密度試験方法(JEVSD713)によると, 通電10秒後の放電電圧と放電電流(Cレート)の関係をプロットし, 1.0 V以上で10秒間維持できる最大放電電流が得られる. こ

で, Cレートとは電池に対して放電するときの電流の大きさを表す. 1Cの「C」は電池の容量を放電して1時間で放電終了となる電流値のことである. また電池の放電電圧と放電電流の間には直線関係が成立して, 電流が大きいくほど低下するものとする. JEVSD713に従い電池の出力(パワー) $P_w$ は次式で表される.

$$P_w = \left( \frac{E_0 - 1}{R} \right) \quad (2)$$

ここで $R$ は電池の抵抗を示し, 通電10秒後の放電電圧と放電電流の関係から求めた値である.  $R$ は電池容量 $Q$ が大きいくほど小さく, 次式が成立すると仮定できる.

$$R = R_0 e^{-aQ} \quad (3)$$

ここで,  $a$ は電極の厚さや合金粒子サイズ等に依存する定数,  $R_0$ は容量がゼロの時の抵抗である. 式(1)~(3)より高解離圧水素吸蔵合金を利用することで起電力( $E_0$ )が向上, 電池容量( $Q$ )が大きいくほど抵抗( $R$ )は低下, 電極厚さが薄く, 水素吸蔵合金の粒径が小さいほど $a$ の値が小さくなり, 出力密度の向上が期待できる.

室温における放電特性を検討した. 図2にNi-MH電池評価セルの概観と概略図を示す.

従来のNi-MH電池と同様, 正極(水酸化ニッケル:0.21 gをニッケル多孔体に塗布), セパレータ(スルホン化ポリプロピレン不織布), 負極(平衡解離圧0.19 MPaの合金0.2 gをニッケル多孔体に塗布)と電解液(KOH27 mass%, NaOH3 mass%, LiOH1 mass%水溶液)からなる. 比較として, 0.01 MPa合金を塗布した負極(0.2 g)を用いた電池も作製した. 図3に二種類の合金を用いた電池評価セルの1C(50 mA)の電流における放電曲線を示す. 通常のNi-MH電池は正極容量支配であるが, 低解離圧水素吸蔵合金は水素吸蔵量が小さいため, 本実験の少ない合金量では負極容量が足り

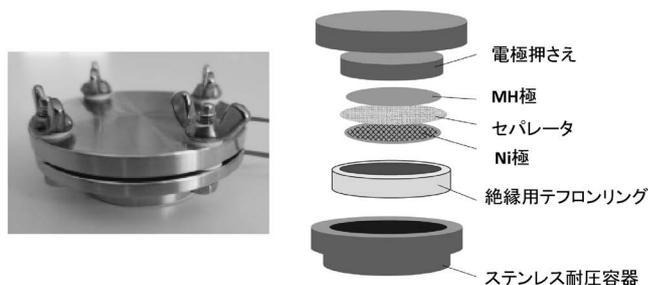


図2 Ni-MH電池評価セル概観と電池構造概略.

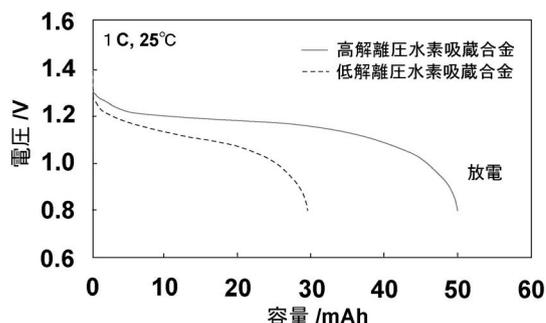


図3 電池評価セルの放電曲線.

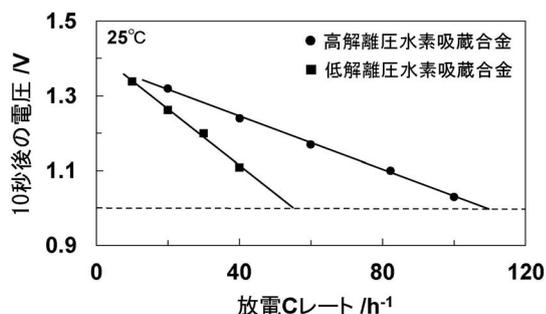


図4 10秒後の放電電圧と放電Cレートの関係.

ず、電池容量が小さくなってしまったと考えられる。それに対して、高解離圧水素吸蔵合金は水素吸蔵量が大きいため、少ない合金量でも負極容量が正極容量(50 mAh)を上回り、正常な正極容量支配が維持できた。

負極、正極ともに活物質(負極：高解離圧水素吸蔵合金もしくは低解離圧水素吸蔵合金、正極：水酸化ニッケル)をニッケル箔(30 μm)へ厚さ30 μmに塗布した電極にした。図4には通電後10秒後の放電電圧と放電電流(Cレート)の関係を示す。

高解離圧水素吸蔵合金を用いたセルの1Vにおける放電Cレートは109Cとなり、低解離圧水素吸蔵合金を用いたセル(55C)に比べ出力は約2倍に向上した。

## 5. 薄型セル作製とセルスタック出力密度

上記と同様のニッケル箔薄型電極によって電池の基本部分となる薄型セル(図5)を構成し、それを168枚スタックして202Vとした場合についてセルスタック(容器は含まない)の出力密度等を算出した。結果を表1に示す。高解離圧水素吸蔵合金を利用することで、低解離圧水素吸蔵合金を用いた場合に比べセルスタックの出力密度が大幅に向上しており、これにより電池のコンパクト化が可能と考えられる。

## 6. まとめ

高解離圧水素吸蔵合金を利用することで、Ni-MH電池の体積当たりの出力が大幅に向上し、電池のコンパクト化に寄与する可能性があることがわかった。今後、本技術の研究開発が一層活性化され、利用されることを期待する。

なお電池の設計と試作評価は榎屋とGFイノベーション

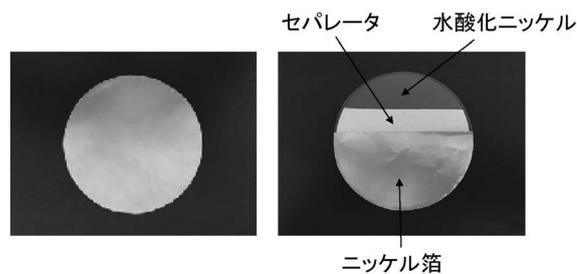


図5 薄型セルの概観.

表1 薄型Ni-MHセルにより構成したセルスタックの性能。(容器体積は含まない)

性能	高解離圧Ni-MH電池 (計算値)	低解離圧Ni-MH電池 (計算値)
電圧	201.6V	201.6V
容量	1.85Ah	1.85Ah
出力	33.9kW	17.1kW
内容積	3.96L	4.19L
エネルギー密度	94Wh/L	89Wh/L
出力密度	8.6kW/L	4.1kW/L

セルサイズ: 厚さ2.1mm, 直径120mm(高解離圧Ni-MH電池)

が、電極設計はケミオが、高平衡圧(高解離圧)水素吸蔵合金の開発は広島大学、トヨタ自動車を担当した。

## 特許

Ni-MH電池の改良に関する特許を6件出願その内下記4件が公開。

- (1) 高圧型水素化物二次電池, 特開2018-045942
- (2) アルカリ二次電池, 特開2018-147626
- (3) 蓄電装置, 特開2019-050103
- (4) アルカリ二次電池, 特開2019-125472

## 文 献

- (1) 井口隆明, 落合誠二郎, 小園 卓, 新田和司, 阿部泰之, 河野健次: ハイブリッド自動車用リチウムイオン電池 EH5, GS Yuasa Technical Report, **11** (2014), 24-30.
- (2) 森下真也, 近藤康仁, 大矢 豊, 砥綿真一, 阿部勝司: 日本化学会誌, No. 6(1999), 369-373.
- (3) H. Uesato, H. Miyaoka, T. Ichikawa and Y. Kojima: International Journal of Hydrogen Energy, **44** (2019), 4263-4270.
- (4) 山口匡訓, 上里裕紀, 宮岡裕樹, 小島由継: ニッケル水素化物電池用の高容量 AB<sub>5</sub> 型水素吸蔵合金開発, 日本金属学会秋期大会講演概要(2019).

## 連載「思い出の教科書，この一冊！」

編集チーム 上田恭介<sup>1</sup> 榎木勝徳<sup>2</sup> 大塚 誠<sup>2</sup> 木口賢紀<sup>3</sup>  
齊藤敬高<sup>4</sup> 竹田 修<sup>1</sup> 田中秀明<sup>5</sup> 佃 諭志<sup>2</sup>  
三井好古<sup>6</sup> 宮崎秀俊<sup>7</sup> 山本剛久<sup>8</sup> 横山賢一<sup>9</sup>

肝心なことが頭の中から抜け落ちてしまった時や考えをまとめたい時など，ふと手にする教科書は，誰にでも一冊程度はあるのではないのでしょうか？ その教科書は紛れもなく，その人にとっての座右の書ということになるでしょう。そんな教科書を手にしていた当時の思い出とともに語っていただく「思い出の教科書，この一冊！」が隔月掲載で始まります！

このシリーズで紹介するものと同じ教科書を使っていた方もいらっしゃるかと思います。共感することもあるでしょうし，ひょっとしたら.. の方もいらっしゃるかもしれません。その教科書を手にしていた時を思い出しながら，ぜひ，お楽しみ頂ければと思います。乞うご期待！

「私もこの教科書について語りたい！」という方がおられましたらぜひ，ご投稿をお待ちしております。

**連絡先：会報編集委員会 E-mail: [materia@jim.or.jp](mailto:materia@jim.or.jp)**

(ご連絡を頂きましたら，原稿フォーマットをお送りいたします。尚，掲載については編集チームでの査読が入りますことを申し添えます。)



上田恭介



榎木勝徳



大塚 誠



木口賢紀



齊藤敬高



竹田 修



田中秀明



佃 諭志



三井好古



宮崎秀俊



山本剛久

編集チーム：1 東北大学大学院工学研究科；2 東北大学多元物質科学研究所；3 東北大学金属材料研究所；4 九州大学大学院工学研究科；5 産業技術総合研究所エネルギー・環境領域電池技術研究部門；6 鹿児島大学大学院理工学研究科；7 名古屋工業大学大学院工学研究科；8 名古屋大学大学院工学研究科；9 九州工業大学大学院工学研究科  
2019年12月2日受理[doi:10.2320/materia.59.50]

# 思い出の教科書、この一冊!

## “金属組織学序論”

阿部秀夫(著) コロナ社 1967年

名古屋大学大学院工学研究科 山本剛久



■現在の教科書の表紙;あんまり勉強していなかったのか、それほど傷んでいないのはご愛敬〜。

筆者がこの教科書と出会ったのは、今ではもう遙か昔となつてしまった大学の学部二年次後期だったと記憶している。二年次後期は、一般教養の講義数が減少し、代わりに専門の講義が始まる学期であり、それまで臆気ながらイメージしていた金属というものが、筆者の中で少しずつ具体化し始めた頃だったように思い出される。これ以降、多くの専門講義が始まるのであるが、その最初に、確か、金属組織学という講義が設定されていて、この教科書は、その講義中に紹介されたような気がする。教科書のタイトルである金属組織学という用語は、いわゆる Metallurgy という英単語の日本語訳に相当するらしいと、その当時に教えられたことを今でも記憶している(本当にそう言われたか否かは今では怪しいが)。組織学という学問は、その内容を一言で表すことが難しく、それがカバーする内容は実に多岐にわたっていることは周知の事実である。講義を受講した当時は、実にとっつきにくく難解だったことが思い出される。この教科書は、タイトルに含まれる“序論”が表すように、広範囲な内容を一通り概観できるようにまとめ上げられていることが特徴である。しかしながらその内容は通り一辺倒ではなく、知るべき項目、理論的な式展開、さらには、的を得た挿入図などが順序だてて丁寧に説明されている点が優れている。現在でもしばしば手にすることもあり、また、演習問題などを作成する際にも、参考にすることが多い教科書の一つである。教科書の構成は、空間格子と空間群、ブラベー格子、X線回折などの結晶学の基礎から始まり、凝固過程の取り扱い、拡散、平衡、相変態、固溶体や析出、相律、二元系状態図へと進み、具体的な例として炭素鋼やアルミニウム合金の説明、さらには、強度を理解する上で必須の転位の基礎や引張試験による強度特性などへと展開されている。最後には、三元系状態図とステレオ投影法が応用的な内容として含まれている。

初版は1967年で、A5版328頁のボリュームである。当時はこの構成に何も感じることはなかったが、今改めてその内容を見てみると、基本的な知識が何もない初学者にとって、基礎を順序立てて理解していけるように十分練られた構成であるな、と感心する次第である。例えば、結晶に関してミラー指数があやふやな時や、消滅則が頭から抜けてしまった時など、さくっとこの教科書で確認できるのである。この時にいわゆる結晶学の分厚い専門書を手に取ってしまうと、何を調べようとしていたのかすら頭から抜けてしまう危うさがある。

ところが、この教科書であれば僅か40頁の分量に結晶学のエッセンスが整然と詰まっているのである。

ところで、この手の教科書は、しばしば付録として周期律が巻末に掲載されていることが多い。ところが、非常にユニークなことに、この教科書の付録には周期律が掲載されていないのである。その代わりに、原子の殻外電子配位の表が掲載されているのである。その当時はこの意味がよく理解できず、“?”の状態だったが、今はこの付表の意味することに感心させられる。組織という現象論的な学問においても、電子の結合という概念を理解することの重要性を、この教科書の筆者は学生に伝えたかったのかもしれない。

付 表 309

付表2 原子の殻外電子配位表<sup>(1)(2)</sup>

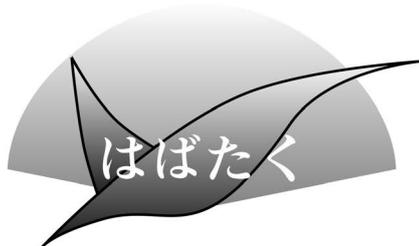
原子番号 元 素	K		L			M			N			
	1s	2s	2p	3s	3p	3d	4s	4p	4d	4f		
【電子数】 $n = l =$	1	2	2	3	3	3	4	4	4	4		
0	0	1	0	1	2	0	1	2	3			
1 H . . .	1											
2 He . . .	2											
3 Li . . .	2	1										
4 Be . . .	2	2										
5 B . . .	2	2	1									
6 C . . .	2	2	2									
7 N . . .	2	2	3									
8 O . . .	2	2	4									
9 F . . .	2	2	5									
10 Ne . . .	2	2	6									
...	2	2	6	1								
			6	2								

■教科書のP509に掲載されている付表2の一部。各元素の最外殻電子軌道の配置が掲載されている。

長い時を経て、筆者も恥ずかしながら似たような講義に携わっているのだが、結構な数の受講学生が、現在では絶版<sup>†</sup>となったこの教科書をなぜか持参している光景をしばしば目にする。先輩から言い伝えられているのだろうか。良書とは時を隔ても重宝されるものかと、学生当時の自身の姿を重ね合わせて一人感慨に耽るのである。この教科書はもう絶版(?)となっているが、電子論など大きく進展した学問を少し加えて、挿入図面をさらに充実させ、演習問題も含めて、さらには、カラー印刷や紙質を良くした改訂版が出ればヒットするのになあ、と少し残念ではある。

(2019年4月8日受理)[doi:10.2320/materia.59.51]

<sup>†</sup> 若干の在庫があるそうです! (2019年9月現在)



## 結晶塑性解析と出会って

木更津工業高等専門学校電子制御工学科；助教  
奥山 彫夢

### 1. はじめに

私は、北見工業大学の橋鉄也先生の下で、学部4年、修士課程、博士課程の6年間、有限要素法結晶塑性解析を学び、2017年3月に博士(工学)の学位を取得しました。2017年4月から九州大学の田中將己先生の研究室で学術研究員として2年間研究をさせていただき、2019年4月から木更津工業高等専門学校電子制御工学科の助教として勤務しております。この度は、「はばたく」への寄稿という貴重な機会を頂きましたので、これまでに力を入れてきた分散強化合金に関する研究について紹介させていただきます。

### 2. 有限要素法結晶塑性解析との出会い

子供のころパリ・ダカールラリーのドキュメンタリーや映画「紅の豚」が好きだった私は、自動車や航空機などの乗り物を作る仕事がしたいと思い、北見工業大学の機械システム工学科に進学しました。学部生の時、授業で汎用有限要素法解析ソフトを使った際に、これからの時代は計算力学が重要だと思い、橋先生の計算力学研究室を希望して配属されました。研究室の名前だけにしか着目しておらず、研究内容を把握していなかった私は、授業で見た自動車の衝突解析画像などを思い描きながら研究室の門を叩きました。そこで頂いた卒業研究のテーマは「第2相粒子を含む材料中の転位蓄積と加工硬化の結晶塑性解析」というもので、機械工学科では聞きなれない転位と結晶塑性解析という言葉に出会いました。

### 3. 分散強化合金に関する研究

第2相粒子を含む材料、すなわち母相結晶中に第2相粒子が分散する分散強化合金は、母相のすべり変形を担う運動転位に対して分散する硬質な第2相粒子が抵抗となることで高い降伏応力と加工硬化率を示し、優れた力学特性を有します。そのような中、フェライト中にCu粒子が分散する軟質粒子分散鋼は、高い降伏応力を示しながら低い加工硬化率で伸びが優れていることを示す報告<sup>(1)</sup>がありました。そこで硬質粒子分散鋼と軟質粒子分散鋼の力学特性の相違について結晶塑性解析を用いて検討することが研究の目的でした。まず基本となる硬質粒子が分散した合金の力学特性を有限要素法結晶塑性解析で表現できるかというところから始めました。従来の理論では、分散強化合金が高い加工硬化率を示す要因は以下の二つであると考えられています。一つ目は、母相の運動転位が粒子の間を潜り抜けていくとき粒子周りに形成するオロワングループの応力場によって、次に来る運動転位によるすべり変形に対する抵抗が増え加工硬化する<sup>(2)</sup>ということです。また、すべり変形の難しい硬質粒子がすべり変形する母相結晶中にあると、硬質粒子近傍に高い応力が生じ、



図1 指導教員である北見工業大学の橋鉄也先生(右)、佐藤満弘先生(中)と著者(左)。2016年、北海道黒岳山頂にて。

母相で2次すべり系の活動が容易に起こります。従来の理論の二つ目は、2次すべり系の活動に伴い主すべり系に対する林転位(林立転位)が増加することで加工硬化する<sup>(3)</sup>ということです。有限要素法結晶塑性解析は、母相と第2相の弾性率とすべり変形開始応力の違いによって以下の二つを計算することができます。

- (1) 母相がすべり変形するのに対して粒子がすべり変形しないことで粒子が高い応力を担い粒子周りにはオロワングループに相当する幾何学的に必要な転位(GN転位)の分布が形成する。
- (2) 粒子近傍の母相で多重すべりが生じ林転位密度が増加する。

つまり分散強化合金の従来の加工硬化理論で考えられていることが解析結果に表れることにより、実験で得られている力学特性を簡単に再現できると考えていました。結果は、実験結果と一致する力学特性は得られませんでした。そこで何が足りないのか考えながら分散強化合金に関する研究論文を読んでいくところ、あることに気が付きました。十分に塑性変形した分散強化合金のTEM像<sup>(4)</sup>には、主すべり系の転位が多く蓄積しており、加工硬化特性に大きく寄与しているのではないかとということです。そこで分散粒子の間隔が運動転位の平均自由行程に寄与するものとして、主すべり系に蓄積する転位密度を評価したところ、実験結果とよく一致する力学特性が得られました<sup>(5)</sup>。このモデルと考え方を基本的に分散強化合金の研究を行い、現在も続けています。

### 4. おわりに

木更津高専の教員となった現在も、分散強化合金に限らず、金属材料の微視組織と力学特性や微視組織中で生ずる不均一変形に注目し、結晶塑性解析を用いて引き続き研究しております。さらに高専の特色を生かして金属材料の研究にこだわらず新しいことに挑戦していこうと試みています。

最後になりましたが、研究に関することのみならず登山などの遊びに連れて行って頂き色々なことを教えて下さった橋鉄也先生と佐藤満弘先生(図1)、上司として色々なことを教えて下さった田中將己先生、これまでにご指導・ご支援頂いた先生方、研究室の先輩・同輩・後輩・学生の皆様はこの場を借りて深く御礼申し上げます。

### 文 献

- (1) Y. Imanami, M. Murakami, N. Nakada, T. Tsuchiyama and S. Takaki: ISIJ Int., **49**(2009), 1225-1226.
- (2) J. C. Fisher, E. W. Hart and R. H. Pry: Acta Metall., **1**(1953), 336-339.
- (3) M. F. Ashby: Philos. Mag., **14**(1966), 1157-1178.
- (4) F. J. Humphreys and P. B. Hirsch: Philos. Mag., **34**(1976), 373-390.
- (5) 奥山彫夢, 橋鉄也: 鉄と鋼, **102**(2016), 396-404.  
(2019年9月27日受理)[doi:10.2320/materia.59.52]  
(連絡先: 〒292-0041 木更津市清見台2-11-1)

## 第16回界面粒界国際会議 (iib2019) 会議報告

名古屋大学大学院工学研究科物質科学専攻；准教授

中村 篤智\*

東京大学大学院工学系研究科総合研究機構；助教

馮 斌

2019年7月1日～7月5日までの5日間、フランスパリにあるPSL研究大学のChimie ParisTechにおいて、第16回界面粒界国際会議(XVI International Conference on Intergranular and Interphase Boundaries in Materials: iib2019)が、パリサクレ大学のOlivier Hardouin Duparc教授とパリ東大学のSylvie Lartigue-Korinek教授の二人の共同チェアによって開催された。本会議では、招待講演8件、口頭発表79件、ポスター発表72件を含む計159件の発表が行われた。日本からは計23件の発表があり、十二分に存在感を示していた。本稿では、同会議に参加した2名がその会議内容を報告する。

本会議は、3年毎に界面・粒界に関する材料関係の第一線の研究者が世界各地から一同に会し、最新の研究に関する議論や情報交換を行う歴史と伝統のある国際会議である。日本との関係も深く、これまでに1985年、1996年、2010年と10数年おきに3回日本で開催されている。マクロスケールの研究報告も少なくないが、一方で最先端の電子顕微鏡法や最近発展が著しい理論計算を利用して、固体の粒界・界面における諸現象のナノ計測・解析を行い、粒界・界面のより深い理解に繋げる研究が目立つように思われた。最近の進展としては、従来からのナノスケールの計測・評価にとどまらず、原子レベル・電子レベルの議論が実験・計算の両面から実現されつつあることを感じた。本会議の具体的な内容を以下に記す。

まず、会議初日となる1日の最初の招待講演を東京大学の幾原雄一教授が行った(図1)。最先端電子顕微鏡法による、セラミックス粒界の原子・電子レベル構造に関する結果を紹介し、日本の粒界・界面レベルの高さを存分に見せつけた。1日午後の招待講演では、米国・ジョージ・メイソン大学のYuri Mishin教授が粒界移動と溶質元素の関係の理論的研究を紹介した。2日午後の招待講演では、ドイツ・ミュンスター大学のSergiy Divinski教授が粒界相変態について紹介した。3日午前の招待講演では、米国・ペンシルベニア大学のDavid Srolovitz教授が粒界ダイナミクスに関する研究紹介を行い、米国・ローレンス・バークレー国立研究所のUlrich Dahmen博士が界面の原子レベル移動に関する研究



図1 国際会議 iib2019 での東京大学幾原雄一教授の招待講演の様子。

紹介を行った。4日午前の招待講演では、ベルギー・アントワープ大学のChen Li博士が太陽電池中の粒界と転位に関する研究紹介を行った。4日午後の招待講演では、フランス国立科学研究センターのFrédéric Mompiau博士がTEMその場観察を用いた粒界と塑性に関する研究紹介を行った。5日午前の招待講演では、韓国・浦項工科大学校のSi-Young Choi准教授が金属-絶縁体遷移の界面現象に関する研究紹介を行った。

なお、筆者の1人、中村はチタン酸ストロインチウムの粒界転位の構造と機能に関する研究報告を行い、馮はジルコニア粒界の偏析現象に関する研究報告を行った。また、界面・粒界現象に関する最新の研究動向調査を行えたことは非常に有意義であった。

会議の行われたChimie ParisTechでは、キュリー夫人とも知られるマリア・スクウォドフスカ=キュリーの実験室がそのままの状態で保存されており、参加者は会議の合間に訪問し、その研究環境に感銘を受けていた。また、会議期間中は比較的天気も良かったため、多くの参加者がパリ中心部の遺跡を観光することもできていたようだ。バンケットはセーヌ川でのディナークルーズとして行われ、参加者はセーヌ川から見るパリの町並みやエッフェル塔などを楽しんでいた。

なお、iib2019会議関連の論文は、Journal of Materials ScienceのSpecial Issueとして刊行される。また、次のiib2022は中国の北京で開催される予定である。北京へは日本から短時間のフライトで行くことができる。10数年ごとに日本で開催されているという歴史からすると、日本での次回開催もそう遠くないように思われるので、この機会に参加を検討してみたいかがだろうか。

(2019年10月30日受理)[doi:10.2320/materia.59.53]

(\*連絡先: 〒464-8603 名古屋市千種区不老町)

# 本 会 記 事

会 告	2020年春期(第166回)講演大会ご案内ならびに参加申込みについて	54
	2020年春期講演大会併催企業説明会への学生参加者の募集	57
	2020年春期講演大会：第3回「高校生・高専学生ポスター発表」募集	57
	2020年春期講演大会機器・書籍・カタログ展示会出展およびプログラム掲載広告募集	58
	2020年秋期講演大会企画・公募シンポジウムテーマ募集	58
	男女共同参画ランチョンミーティング開催予告	58
	2020年春期講演大会会期中の託児室設置のお知らせ予告	59
	電子ジャーナル機関購読のご案内	59
	各種賞推薦(自薦)のお願い(村上記念賞・村上奨励賞・奨励賞・論文賞・まてりあ賞)	59
	欧文誌編集委員会からのお知らせ	59
	金属学会シンポジウム開催報告	61
掲示板		60
新入会員		63
会誌・欧文誌1号目次		62
行事カレンダー		64
次号予告		63

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

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

・投稿規程・出版案内・入会申込はホームページをご利用下さい。

## 会 告 (ホームページもご参照下さい)

### 2020年春期(第166回)講演大会ご案内ならびに参加申込みについて

会 期：2020年3月17日(火)～3月19日(木)

会 場：東京工業大学大岡山キャンパス(〒152-8552 東京都目黒区大岡山2-12-1)

日 程：	日 時	行 事
	3月17日(火)	各賞贈呈式、学会賞受賞講演・本多記念講演、学術講演会、ポスターセッション、高校生・高専学生ポスター発表、懇親会(「八芳園」)
	3月18日(水)	学術講演会、企業ランチョンセミナー
	3月19日(木)	学術講演会、男女共同参画ランチョンミーティング、企業説明会

大会参加予約申込締切：2020年2月28日(金) 事前参加申込みは、すべてインターネット申込となります。詳細は、申込要領をご覧ください。

### 《2020年春期講演大会 開催予定の各種シンポジウムご案内》

#### — 公募シンポジウム7テーマ —

- S1 ハイエントロピー合金の材料科学Ⅲ
- S2 ワイドギャップ結晶の材料学と高温プロセッシング2
- S3 ナノ・マイクロスペーステラリングⅢ
- S4 金属表面の材料化学Ⅲ—めっき・耐食性・耐酸化性・触媒研究の新展開—
- S5 永久磁石開発の元素戦略7 一次世代新材料に向けた基礎・基盤研究—
- S6 エネルギー関連材料の特性評価・解析・予測(I)—最先端技術への期待—
- S7 プラストンの材料科学Ⅶ

### K1 International workshop of young researchers for steel metallurgy

2018年3月から2年間に渡って活動した若手研究グループ「鉄鋼メタラジー研究グループ」のまとめとして、国際シンポジウムを開催する。グループ活動に参画したメンバーに加えて、国際的に活躍する同世代の海外講演者を数名招待し、鉄鋼材料を中心にその組織形成と力学特性に関する最先端の話題について講演を行う。特に、理論、実験、計算の各セッションを設け、各分野における今後の発展を見据えて、国際的な議論を図る。

### K2 工業製品における材料選択とマルチマテリアル構造～航空機機体～

ものづくりの基盤形成を担う第8分科発表のシンポジウムで、身の回りの工業製品がどのような材料からできているか、また材料選択やマルチマテリアル構造についてどのように考えるべきなのかを、広く議論する場を提供することを目的とする。1回目の今回は「航空機機体」を取り上げ、材料の企業研究者だけでなく、機体メーカーや運航会社の技術者などにも講演を依頼し、業界の動向や課題、各材料の強みや弱み、新材料の開発ならびに適用可能性について情報提供を頂くことを計画している。これまでの講演大会にはなかった『材料を横断的に捉えるシンポジウム』として、シリーズ化していくことを考えている。

### K3 医用材料・医療機器開発の最前線(Ⅰ)

医用材料・医療機器に対する材料開発は、治療や診断を目的に体内に埋入する材料から診断機器に搭載する材料まで多岐にわたる。このため、材料科学においても、生体材料のみならず、光学・電子材料、腐食防食など、異分野との協働が必須である。本企画シンポジウムでは、①体内に埋入する医用材料に対する材料科学ならびに②診断に関連する材料科学について、様々な材料科学の視点から議論することを目的とする。特に、医療応用の最前線で活躍されている企業の研究者から医用材料・医療機器開発における現状と将来展望について講演を行い、その現状と将来展望について産学の研究者を交えて緊密に議論する場としたい。

### K4 どこまで実現したか、スマート社会(仮題)

Society 5.0で標榜されるスマート社会においては、実空間(フィジカル空間)とサイバー空間の間で常に情報通信が行われる。こうした高度な情報通信には、回路・情報処理技術とともにセンシングデバイス・情報処理デバイスなどのデバイス・材料が両輪をなす必要がある事は言うまでもない。しかしながら、AI・ニューロモフィックデバイスに代表されるように、材料開発の指針が必ずしも明確ではない例もある。本シンポジウムでは、スマート社会を支える材料・デバイス開発として、ディスプレイ材料・IoT用センサー材料、AI・ニューロモフィックデバイスに関する最新動向、ならびに、特に材料開発の課題と期待について話題を提供して頂き、金属学会に係る研究者が貢献可能な課題を発掘する一助としたい。

### K5 明治の鉄鋼

明治期は日本が国として大きく変わった時期であるが、鉄鋼に関して大きく変化・拡大した時期でもあった。鉄鋼は日本が欧米と並ぶ先進国家であるために重要な産業であり、幾つもの製鉄所建造、技術革新がなされた。第一次大戦の影響もあり、それまでは欧米産が使われていた製品が次第に日本産に移り変わったのである。

このシンポジウムでは、明治期の鉄鋼業の発展の元となった製鉄技術の変遷や金属組織学・相変態などの学術的発展に加え、その後時代を経て消えてしまった製鉄所や、技術革新を果たした技術者、またそのためになされた試行錯誤にフォーカスして、ものづくりとは何なのか、また”明治の鉄鋼”が残したものは何かを議論する。

## 参加申込要領

インターネットによる事前の大会参加申込みおよび懇親会参加の申込み：〈締切〉2月28日(金)

大会参加申込み URL <https://www.jim.or.jp/convention/2020spring/>

予約申込締切後、大会参加証、講演概要ダウンロードについては、下記をご参照下さい。なお、領収書や参加証引換券は、決済完了後に申込画面から各自印刷して下さい(WEB画面：講演大会 MyPage よりダウンロード)。2月29日以降は当日申込となります。

当日申込をご希望の方は、会場受付にて直接お申込下さい。

### ◆大会参加費(講演概要ダウンロード権含む)※年会費とは異なります。

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

予約申込締切日	2月28日(金)(申込および入金期日)	
	予約申込 (インターネット申込・事前支払い)	当日申込 (大会会場受付・現金払いのみ)
会員資格		
正員・維持員会社社員	10,000円	13,000円
学生員※	6,000円	7,000円
非会員 一般	24,000円	27,000円
非会員 学生(大学院生含む)	14,000円	16,000円

・お支払後の取消は、ご返金致しかねますのでご了承下さい。

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

※ 非会員の(有料)参加申込者には、1年間「まてりあ」を寄贈するとともに、会員価格でイベント等(講演大会以外)に参加できる特典を付与いたします。ただし特典は重複して付与いたしません。

## ◆懇親会費(消費税込み)

予約申込締切日	2月28日(金)(申込および入金期日)	
種 別	予約申込 (インターネット申込・事前支払い)	当日申込 (懇親会会場受付・現金払いのみ)
一般	10,000円	12,000円
同伴者(ご夫人またはご主人)	5,000円	5,000円

- ・お支払後の取消は、ご返金致しかねますのでご了承下さい。
- ・懇親会ご参加申込の方へは、3月上旬に懇親会参加証を郵送申し上げます。

## ◆支払方法

事前予約のお支払いはクレジットカードおよびコンビニ振込決済をご利用頂けます。また、入金後のご返金は致しかねます。2月28日(金)の入金日をもって予約申込完了となります。

## ◆参加証

事前予約された際の大会マイページにて「参加証引換券」をダウンロード印刷し、会期当日受付で参加証とお引換え下さい。

## ◆講演概要の WEB 公開

講演概要の公開日は、大会2週間前の2020年3月3日(火)です。事前予約をされ、参加費を納入された方へは、概要公開日に概要ダウンロード用パスワードを配布いたします。当日申込の方へは申込の際に概要ダウンロード用パスワードをお渡しいたします。特許関係のお手続きは、公開日までにお済ませ下さい。

## ◆講演概要集購入について

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

### 参加申込・問合せ先

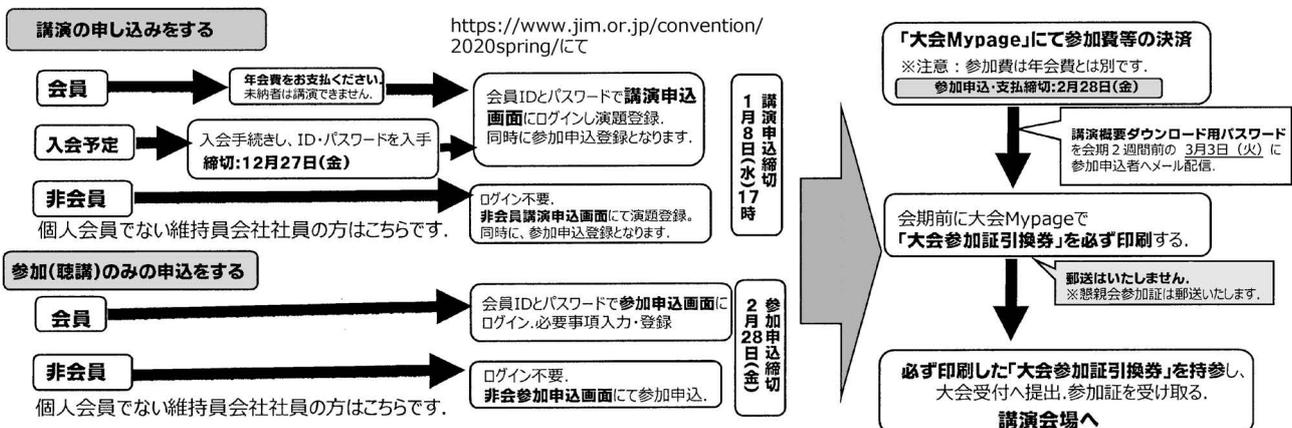
〒980-8544 仙台市青葉区一番町 1-14-32

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



## 講演申込・事前参加申込～参加までの流れ～

### 講演申込・事前参加申込～参加までの流れ



## 2020年春期講演大会併催企業説明会への学生参加者の募集

2020年春期講演大会に合わせ、学生のキャリアサポートの一環として本会主催により、日本金属学会・日本鉄鋼協会講演大会併催の第6回企業説明会を東京工業大学大岡山キャンパスにて開催します。本説明会は、学生にできるだけ多くの素材・材料関連企業に接してもらい、進路選択に役立ててもらおうというものです。日本金属学会学生員および日本鉄鋼協会学生会員並びに東京工業大学の学生を対象に募集しますので、奮ってご応募下さい。就職活動前の学生の参加も歓迎します。

学生の皆さんが参加しやすいように講演大会期間の最終日に開催いたします。ほぼ終日ブースを開設して、講演の合間や講演終了後にも企業ブースを訪問できるようにするとともに、昼食(軽食)を提供して昼休み時間にブースを訪問しやすくしています。また、参加企業の担当者により詳しく情報交換できるように、説明会終了後に参加企業の担当者との交流会(立食懇談)を開催します。

**開催日** 2020年3月19日(木)(春期講演大会の3日目)

**開催場所** 東京工業大学大岡山キャンパス百年記念館(東京都目黒区大岡山2-12-1)

**主催** 公益社団法人日本金属学会 協賛 東京工業大学学生支援センター(予定)、一般社団法人日本鉄鋼協会

**参加企業** 素材、材料関連の企業35社

**スケジュール** 11:00~16:30 ブース説明会(企業ブースでの対面説明)

\* 出入り自由。昼食(軽食)提供(先着順)。

17:00~18:30 参加企業担当者との交流会(立食懇談、参加無料)

\* ブース説明会のみ・交流会のみの参加も可。

**応募資格** 日本金属学会学生員、日本鉄鋼協会学生会員、東京工業大学学生

**応募方法** 本会ホームページ上の参加申し込み画面(<https://data.jim.or.jp/jim/kigyou/>)から申し込む。

**募集期間** 2019年12月2日(月)~2020年3月11日(水)

**問合せ先** 公益社団法人日本金属学会 企業説明会担当

〒980-8544 仙台市青葉区一番町1-14-32 ☎ 022-223-3685 FAX 022-223-6312 E-mail: jim.company2020@jim.or.jp

### 〜 第6回企業説明会参加企業 〜

(50音順)

愛知製鋼株式会社  
高周波熱錬株式会社  
山陽特殊製鋼株式会社  
JFE テクノリサーチ株式会社  
住友金属鉱山株式会社  
株式会社ソディック  
中越合金鋳工株式会社  
株式会社東芝  
ニダック株式会社  
日本製鉄株式会社  
福田金属箔粉工業株式会社  
三菱アルミニウム株式会社

石福金属興業株式会社  
合同製鐵株式会社  
JFE 条鋼株式会社  
昭和電線ホールディングス株式会社  
住友重機械ハイマテックス株式会社  
大同特殊鋼株式会社  
TDK 株式会社  
東邦チタニウム株式会社  
日鉄テクノロジー株式会社  
日本冶金工業株式会社  
古河電気工業株式会社  
三菱製鋼株式会社

株式会社キッツ  
株式会社コベルコ科研  
JFE スチール株式会社  
滲透工業株式会社  
住友電気工業株式会社  
太平洋製鋼株式会社  
TPR 株式会社  
トビー工業株式会社  
日鉄日新製鋼株式会社  
日立金属株式会社  
三井金属鉱業株式会社

## 日本金属学会2020年春期(第166回)講演大会 第3回「高校生・高専学生ポスター発表」募集案内

申込締切日: 2020年1月15日(水)

**開催場所** 東京工業大学大岡山キャンパス

**開催日時** 2020年3月17日(火)午後

**対象者** 高校生および3年以下の高専学生

**発表方法** パネル(幅900mm×高2100mm)へのポスター掲示および説明

**テーマ** 材料に限定せず、フリーテーマです。

**講演申込** <https://www.jim.or.jp/convention/2020spring>

**詳細** までりあ58巻12号801頁または本会ホームページ→2020年春期講演大会案内

**問合せ・連絡先** 公益社団法人日本金属学会 講演大会係

E-mail: annualm@jim.or.jp



**2020年春期講演大会機器・書籍・カタログ展示会出展募集  
大会プログラム掲載広告募集**

2020年3月17日(火)～19日(木)の3日間、東京工業大学大岡山キャンパスにて開催される春期講演大会会場内で機器・書籍およびカタログの有料展示会を開催いたします。あわせて講演大会プログラム掲載の広告の募集もいたします。

**■機器・書籍展示**

研究開発用機器，書籍，ソフトウェア等の出展を募集します。

1小間 間口1,800mm，奥行き900mm(予定)

展示台(テーブル)，椅子をご用意します。

\*電源を使用する場合は，予め必要電気容量(W)をお知らせ下さい。

出展料金 機器展示：1小間140,000円(税別)

書籍販売：1小間90,000円(税別)

申込締切 2020年2月5日(水)

**■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 2020年2月5日(水)

**■講演大会プログラム広告**

発行予定日 2020年3月1日

原稿寸法 A4版1P 天地260mm×左右180mm

1/2P 天地125mm×左右180mm

入稿形態 完全データ(グレースケール)

**広告料金**

掲載場所	頁	掲載料金
普通頁 後付	1	70,000円
後付	1/2	40,000円

○上記の料金には消費税は含まれておりません。

○原稿制作費は別途ご請求させていただきます。

申込締切 2020年1月30日(木)

原稿締切 2020年2月5日(水)

**■申込・問合せ**

〒104-0061 東京都中央区銀座7-12-4(友野本社ビル7F)

株式会社 明報社 担当 月岡太郎

☎ 03-3546-1337(代) FAX 03-3546-6306

E-mail: tsukioka@meihosha.co.jp

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



**2020年秋期講演大会(富山大学)  
企画シンポジウムテーマ提案募集**

提案期限：2020年2月20日(木)

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 までりあ58巻12月号806頁またはホームページ→講演大会→お知らせ

問合せ・照会先 (公社)日本金属学会 講演大会委員会宛

E-mail: stevent@jim.or.jp

☎ 022-223-3685 FAX 022-223-6312

**2020年秋期講演大会(富山大学)  
公募シンポジウムテーマ提案募集**

提案期限：2020年2月20日(木)

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。今年の春期大会の公募シンポジウムテーマを募集いたします。次の要領をご参照のうえ，活発な討論が期待できる有益なテーマを積極的にご提案下さい。(提案様式はホームページよりダウンロードして下さい。)

詳細 までりあ58巻12月号806頁またはホームページ→講演大会→お知らせ

問合せ・照会先 (公社)日本金属学会 講演大会委員会宛

E-mail: stevent@jim.or.jp

☎ 022-223-3685 FAX 022-223-6312



**第12回男女共同参画ランチョンミーティング  
「金属材料分野での多様なキャリアパス」開催予告**

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

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

主催 男女共同参画委員会日本金属学会・日本鉄鋼協会

協賛 男女共同参画学協会連絡会

日時 2020年3月19日(木) 12:00~13:00

会場 東京工業大学大岡山キャンパス(鉄鋼協会会場)  
(東京都目黒区大岡山2-12-1)

参加費 無料 弁当30人分までは無料提供。

(講演大会参加申込の有無にかかわらず，このミーティングに参加できます!!)

詳細は2号でお知らせいたします。

## 2020年春期講演大会会期中の託児室設置のお知らせの予告

2020年春期講演大会期間中、日本金属学会と日本鉄鋼協会が共同で託児室を開いたします。詳細は2号でお知らせいたします。

### ■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
2020年3月17日(火)	8:30~17:30
3月18日(水)	8:30~17:30
3月19日(木)	8:30~16:45

■場所: 東京工業大学大岡山キャンパス内  
(詳細はお申し込の方のみ, ご案内)

## 電子ジャーナル機関購読のご案内

機関(IPアドレス)認証による電子ジャーナルのご購読が可能となっております。ご利用下さい。

対象誌 日本金属学会誌, Materials Transactions

年間購読料金 別途お知らせいたします。お問合せ下さい。

対象機関 大学類, 独立行政法人, 企業等

問合せ先 〒105-0022 東京都港区海岸 1-9-18 国際浜松町ビル  
丸善雄松堂株式会社 学術情報ソリューション事業部  
外国雑誌・eリソースセンター

☎ 03-6367-6114 FAX 03-6367-6184

E-mail: epro-j@maruzen.co.jp

## 各種賞推薦(自薦)のお願い

下記の推薦をお願いします。

### 第17回村上記念賞 候補者推薦のお願い

推薦締切 2020年2月28日(金)

推薦資格 本会代議員による推薦

詳細 までりあ58巻12号797頁またはホームページ→表彰

### 第17回村上奨励賞・第30回奨励賞 候補者推薦のお願い

推薦締切 2020年2月28日(金)

候補者 個人を対象とします

推薦資格 本会代議員1名, 講演大会委員1名または正員3名による推薦

詳細 までりあ58巻12号798頁またはホームページ→表彰

### 第68回論文賞 候補論文推薦(自薦)のお願い

推薦締切 2020年2月28日(金)

対象論文 日本金属学会誌: 第83巻1~12号(2019年)掲載分  
Materials Transactions: Vol.60 No.1~12(2019年)掲載分

推薦資格 会誌, 欧文誌の編集委員, 当該論文の査読者または本会代議員による推薦, 著者本人による自薦

詳細 までりあ58巻12号798頁またはホームページ→表彰

### 第10回までりあ賞 推薦(自薦)のお願い

推薦締切 2020年2月28日(金)

対象記事 2017年~2019年掲載済記事

推薦資格 会報編集委員または正員3名による推薦, 著者本人による自薦

詳細 までりあ58巻12号799頁またはホームページ→表彰

### 欧文誌編集委員会からのお知らせ

## Materials Transactions 論文フリーアクセス公開サービス(Open Choice)について

『公開後すぐに, できるだけ多くの読者に読んでもらいたい!!』というご要望に応えるため, 投稿・掲載費用に, 追加費用(3万円)をお支払いいただければ, 半年間の認証期間を設けることなく, 公開即フリーダウンロードを可能とするサービス(Open Choice)を開始いたしました。

是非ご利用下さい。詳細は, [ホームページ: 刊行物 → 欧文誌](#) をご参照下さい。

〈公募類記事〉

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

集 会

◇NIMS 先端計測シンポジウム2020◇  
 「データ科学と融合したオペランド・先端計測」

主 催 「先進材料イノベーションを加速する最先端計測基盤技術の開発」プロジェクト  
 開催期日 2020年3月6日(金)  
 10時00分～17時05分  
 17時20分～意見交換会  
 開催地 茨城県つくば市  
 国立研究開発法人 物質・材料研究機構 千現地区  
 研究本館管理棟1階 第一会議場、講堂  
 問合せ先 国立研究開発法人 物質・材料研究機構  
 先端材料解析研究拠点 運営室  
 ☎ 029-851-3354(内線 3861)  
 E-mail: amc@ml.nims.go.jp

URL

[https://www.nims.go.jp/research/materials-analysis/events/amcp\\_sympto2020.html](https://www.nims.go.jp/research/materials-analysis/events/amcp_sympto2020.html)

集 会

◇レアメタル研究会◇

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

令和元年度レアメタル研究会のご案内 (2019.11.16現在)

■ 第89回 2020年1月10日(金)(2019年度 第4回)  
 ★貴金属シンポジウム(第7回)＋新年会★(合同開催)  
 【会場：鉄門記念講堂@本郷】  
 ■ 第90回 2020年3月6日(金)(2019年度 最終回)

■第89回 2020年1月10日(金) 14:00～ 鉄門記念講堂@本郷  
 ★貴金属シンポジウム(第7回)＋新年会★(合同開催)  
 テーマ：貴金属の製錬・リサイクル  
 午後2:00～

○講演会プログラム

- 三井金属竹原製錬所の最近の操業について  
 三井金属鉱業株式会社 金属事業本部 竹原製錬所 所長  
 野田真治 講師
- 貴金属湿式精錬プロセスにおける白金族回収について(仮)  
 住友金属鉱山株式会社 金属事業本部 東予工場 精金課長  
 新宮正寛 講師
- DOWA グループにおける貴金属の製錬・リサイクルについて  
 DOWA メタルマイン株式会社 製錬部 部長  
 山中義則 講師
- 佐賀製錬所における貴金属回収について  
 JX 金属株式会社 金属事業部製錬部 主任技師  
 竹内久久 講師
- 高温鉛はんだ代替を目指した銀導電性接着剤の開発(仮)  
 田中貴金属(シンガポール)株式会社  
 阿部真太郎 講師
- 貴金属の精錬とリサイクル研究・教育の最近の話題  
 東京大学 生産技術研究所  
 非鉄金属資源循環工学寄付研究部門 特任教授  
 岡部 徹 講師
- Heraeus Precious Metals -Recycling now and in the future  
 Heraeus Precious Metals, Vice President, Innovation  
 Dr. Philipp Walter 講師

〈研究交流会・意見交換会〉

会場：「レストラン カボ・ペリカーノ」(東京大学医学部教育研究棟13階)  
 ○開催会場：鉄門記念講堂  
 (東京都文京区本郷7-3-1 東京大学医学部教育研究棟14階)  
[https://www.u-tokyo.ac.jp/campusmap/cam01\\_02\\_09\\_j.html](https://www.u-tokyo.ac.jp/campusmap/cam01_02_09_j.html)  
 ○会費：参加費 無料  
 資料代 3,000円(企業会員・学生等は無料)

■第90回 2020年3月6日(金) 14:00～

生産技術研究所 An 棟2階コンベンションホール  
 テーマ：産業とSDGsと未来社会  
 午後2:00～  
 資源循環と環境問題とSDGs(仮)  
 JX 金属株式会社 特別理事 (前代表取締役社長)  
 大井 滋 講師  
 循環経済とITプラットフォームと未来社会(仮)  
 東洋大学 情報連携学部(経営学)教授  
 廣瀬弥生 講師  
 未来社会デザインとメタラジー(仮)  
 大阪大学 統括理事 副学長/日本鉄鋼協会 会長  
 田中敏宏 講師

★講演の順序は変更する可能性があります★

午後6:00～  
 研究交流会・意見交換会(An 棟2F ホワイエ)  
 ○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(最寄り駅：駒場東大前、東北沢、代々木上原)

\*レアメタル研究会ホームページ\*

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

## 金属学会シンポジウム開催報告

### ハイエントロピー合金の材料科学

(セミナー・シンポジウム委員会企画)

開催日 2019年11月11日(月)

場 所 エッサム神田ホール2号館(東京)

近年、ハイエントロピー合金と呼ばれる新規な多元系合金に興味が集まっており、世界的に活発な研究・開発が行われている。これは従来合金が示しえない特異な力学特性を示す合金がハイエントロピー合金と呼ばれる合金の中に多数見つかっているからである。しかし、その理由については未だ不明な点が多い。本シンポジウムでは、ハイエントロピー合金を理解する上で重要な合金形成能、原子構造、特異な物性、組織制御、モデリングについて基礎から最新の知見まで討論し、今後、ハイエントロピー合金研究が進むべき方向性について議論を深めた(11月11日、エッサム神田ホール、企画世話人・講師9名、有料参加者数135名)。

乾 晴行(京大)は、「ハイエントロピー合金研究の現状と将来展望」にて、ハイエントロピー合金の形成能、原子構造、特異な物性を4つのコア効果から概観し、従来合金に適用されるモデルでは説明がつかない現象やそれらを明らかにするための新たな実験手法や考え方の必要性を詳述した。例えば、ハイエントロピー合金が示す非常に高い強度は、従来合金の強度を説明するモデルでは不十分で、格子歪みに対応した平均原子変位で強度を整理する有用性を示した。

竹内 章(東北大)は、「平均価電子濃度による高エントロピー合金の構造制御」において、ハイエントロピー合金の形成能を考える上での平均価電子濃度の重要性を指摘し、形成が困難とされているHCP構造を持つハイエントロピー合金の形成を例に取り、その有用性を詳述した。また、平均価電子濃度による相形成予測を実証する前に行うソフトウェアを使った熱力学計算の重要性も併せて示した。

小山敏幸(名大)は、「ハイエントロピー合金における拡散と熱力学」にて、多元系合金の相互拡散理論について、詳細な説明を行い、ハイエントロピー合金のような多元系合金では構成元素間のエンタルピー項に起因した相互作用による遅い拡散は起こっても、エントロピー項の高さに起因した所謂スラギッシュ拡散は理論的に考えることができないことを明確に示した。

北川 宏(京大)は、「ハイエントロピー合金ナノ粒子の作製と触媒機能への展開」と題し講演し、触媒特性に優れた合金ナノ粒子を周期表における元素の位置を考慮したアルケミー的手法により、ハイエントロピー効果により固溶体状態で得られることを示し、優れた触媒特性が得られることを実証した。構造材料としての研究が先行する中で、機能特性に関してもハイエントロピー効果の有用性を示す画期的な例である。

尾方成信(阪大)は、「ハイエントロピー合金の力学特性のモデリングとシミュレーション」において、構成元素の多さゆえに生じる困難さを指摘しつつ、計算科学の有用性を詳述した。種々の原子間ポテンシャルを使った分子動力学計算からハイエントロピー合金の強度が構成元素の平均原子変位や局所ひずみと相関があること、スラギッシュ拡散はいかなる合金系でも起こるわけではなく、一般論としては起こらないことを示した。

辻 伸泰(京大)は、「加工熱処理によるハイエントロピー合金のナノ/マイクロ組織制御」において、FCC系、BCC系のハイエントロピー合金では、通常の合金に比べると加工後熱処理中の粒成長が遅く、通常の合金では見られない、ナノメートルオーダーの非常に微細な完全再結晶粒が生じ易いことを示した。メカニズムの更なる解析を要するものの、組織制御により優れた力学特性を達成できる期待を持たせる重要な知見である。

土谷浩一(物・材機構)は、「強加工と相変態によるハイエントロピー合金の組織制御」で、FCC系のハイエントロピー合金では強ねじり加工で通常の合金に比べ小さなひずみ量で容易に微細組織が形成されること、積層欠陥エネルギー(FCC-HCP相のエネルギー差)を制御することによりマルテンサイト変態や双晶変形を利用して力学特性を制御できることを示した。

千葉晶彦(東北大)は、「電子ビーム積層造形法によって作製されたハイエントロピー合金の組織と強度」で、2, 3のハイエントロピー合金の積層造形の例を示した。

130人を越える多数の聴講参加者を得て、ハイエントロピー合金の構造、特性に関する活発な討論が丸1日の討論会を通して行われ、当該合金の基礎、応用に関する理解が飛躍的に高まった。

(文責：乾)

(企画世話人：京都大 乾 晴行)



日本金属学会誌掲載論文

Vol. 84, No. 1 (2020)

— 論 文 —

易酸化性元素 Mn を含む銅合金の大気溶解における  $\text{Na}_2\text{O}-\text{B}_2\text{O}_3$  系フラックスによる耐火物の溶損とフラックスへの Mn 酸化物の溶解能の調査

長谷川 格 小泉琢哉 鈴木賢紀 田中敏宏

鍛造 Ni 基超合金 Udimet 520 における等温時効熱処理中の微細組織変化

山口義矢 阿部真弓 田島遼太郎 寺田芳弘

炭素クラスターの強化機構に関する原子論的研究

下川智嗣 安井紀一郎 新山友暁 木下恵介 澤田英明

銅めっきした鋼粒子を用いた微粒子ピーニングで創製された Cu-Fe-Al 移着組織の微視的接合強度

市川裕士 所 竜太郎 亀山雄高

Materials Transactions 掲載論文

Vol. 61, No. 1 (2020)

— Review —

Effect of Alloying Elements on Fracture Toughness and Ductility in Magnesium Binary Alloys; A Review

Hidetoshi Somekawa

A State of the Art Review of Dispersion and Inspection Techniques for Carbon Nanotubes (CNTs) into Matrix Composites

Hussein Zein and Yaser A. Al-Shataif

— Special Issue on New Aspects of Martensitic Transformations II —

Microstructural Characterization of Martensite with Long Period Stacking Order Structure in Hf-Co-Pd Alloy

Mitsuhiro Matsuda, Ryo Matsuoka, Masatoshi Mitsuhara and Minoru Nishida

Change in Magnetic Susceptibility of Ti-Ni Shape Memory Alloys Associated with Martensitic Transformations

Takashi Fukuda

Isothermal Martensitic Transformations in an Aged Ni-Rich Ti-Ni Alloy Containing Coherent  $\text{Ti}_3\text{Ni}_4$  Particles

Hiroshi Akamine, Yohei Soejima, Tadaaki Nakamura, Farjami Sahar, Takashi Fukuda, Tomoyuki Kakeshita and Minoru Nishida

Development of Digital Holographic Microscope for *In-Situ* Surface Relief Measurement of Low-Carbon Steel

Junya Inoue, Shuhei Komine, Ryo Misaki and Kenji Sekido

Kinetic Arrest of R-B19' Transformation in Iron-Doped Ti-Ni Shape Memory Alloy

Mitsuharu Todai, Takashi Fukuda and Tomoyuki Kakeshita

Orientation Dependence of Superelasticity and Stress Hysteresis in Cu-Al-Mn Alloy

Toshihiro Omori, Shingo Kawata and Ryosuke Kainuma

Internal Stress of Plate Martensite Depending on Aspect Ratio via fcc-hcp Martensitic Transformation in Metastable Austenitic Stainless Steels

Yuki Wada, Nobuo Nakada and Susumu Onaka

Deployable Rocket Nozzle Utilizing Superelastic Titanium Alloy Sheet (*Express Rapid Publication*)

Hirobumi Tobe, Yuichi Matsuki, Shinsuke Takeuchi and Eiichi Sato

— Regular Article —

Materials Physics

Crystal Structure Analysis of Irradiated  $\text{Ni}_3\text{Al}$  Using Molecular Dynamics Simulation

Ahmad Ehsan Mohd Tamidi, Yasushi Sasajima and Akihiro Iwase

Auto-Generation of Corrugated Nonpolar Stoichiometric Slab Models

Yoyo Hinuma, Takashi Kamachi and Nobutsugu Hamamoto

Atomic Layer Deposition of AlGaN on GaN and Current Transport Mechanism in AlGaN/GaN Schottky Diodes

Hogyong Kim, Hee Ju Yun, Seok Choi and Byung Joon Choi

Full-Potential KKR Calculations for Interaction Energies in Al-Rich AlX (X=H~Sn) Alloys: I. Fundamental Features and Thermal Electronic Contribution due to Fermi-Dirac Distribution

Mitsuhiro Asato, Chang Liu, Nobuhisa Fujima, Toshiharu Hoshino and Tetsuo Mohri

Microstructure of Materials

Effect of Composition on Recrystallization Texture Formation of Aluminum Extrusions

Masahiro Araki and Kenji Matsuda

Mechanics of Materials

Effect of Rotation Speed on Electric Damage of Copper Tribo/Electric Rolling Pairs under Lubricated Single-Point Contact

Zili Liu, Chenfei Song, Jiawei Li, Xinbin Hou, Li Wang and Yongzhen Zhang

Microstructure and Mechanical Study on Laser-Arc-Welded Al-Zn-Mg Alloy

Jiaying Gu, Shanglei Yang, Qi Xiong and Chenfeng Duan

Molecular Dynamics Study of Influences of Non-Glide Stress on  $\langle a \rangle$  Slips in Magnesium

So Yoshikawa and Daisuke Matsunaka

**Materials Chemistry**

**Effect of Argon-Purged Cooling on Generating Residual Stress in Oxide Scale Formed on Si-Containing Steels Examined by *In Situ* X-ray Diffraction and Finite Element Analysis**

Koji Sasaki, Kazushi Hayashi, Mikako Takeda, Shohei Nakakubo, Yohei Yamada, Amane Kitahara, Risei Wada and Isao Saeki

**Effect of Surface Texture of Steel Sheets on the Crystal Orientation Relationship between Zinc and Iron on Electroplated Steel Sheets**

Yuki Imatani, Satoshi Oue, Akinobu Kobayashi, Takehiro Takahashi, Yasuto Goto and Hiroaki Nakano

**Leaching Behavior of Titanium from Na<sub>2</sub>TiO<sub>3</sub>**

Dong Ju Shin, Sung-Ho Joo, Dongseok Lee, Jung Shin Kang, Min-Seuk Kim, Jin-Tae Park, Dong Joon Min and Shun Myung Shin

**Materials Processing**

**Effect of Mass of Drop-Hammer in Impact Punching with PVA Gel as Working Medium**

Masahito Katoh and Takuya Aihara

**Peen Forming of Anisotropic Double-Curved Surface by Vibration Peening Using Rectangular Solid Pin**

Takahiro Ohta

**Effects of Mo, V and Nb Addition on Behavior of Continuous Cooling Transformation of 16% Chromium Cast Iron**

Nobuya Sasaguri, Ryota Takao, Kaoru Yamamoto, Yuzo Yokomizo and Yasuhiro Matsubara

**Mechanical Properties Prediction of Gray Cast Iron Considering Trace Elements Based on Deep Learning**

Masato Shirai and Hiroshi Yamada

**Effect of Sb Addition on the Al-Si Eutectic of Hypoeutectic Al-Si Casting Alloys under Different Cooling Rates**

Han Yan, Congcong Zhu, Zhen Wu and Wenli Gao

**Engineering Materials and Their Applications**

**Rate-Controlling Process of Compound Growth in Cu-Clad Al Wire during Isothermal Annealing at 483–543 K**

Takeshi Kizaki, Minh O and Masanori Kajihara

**Suppression of Phosphorous Out-Diffusion in PH<sub>3</sub> Plasma Immersion Ion-Implanted Germanium Epilayer Grown on Silicon (100) Substrate through SiO<sub>x</sub> Capping Layer**

Daeyoon Baek, Kyu-Hwan Shim, Sung-Nam Lee, Woong-Ki Hong and Chel-Jong Choi

**Performance of AZ31 Alloy as Anodes for Primary Magnesium-Air Batteries under High Current Discharge**

Isao Nakatsugawa and Yasumasa Chino

**Kinetics of Diffusion Induced Recrystallization in the Cu (Al) System**

Takeshi Kizaki, Minh O and Masanori Kajihara

**Relation of Size Distribution of Cracks in Superconducting Layer to Critical Current Distribution under Small Voltage Probe Spacing in REBCO-Superconducting Composite Tape**

Shojiro Ochiai and Hiroshi Okuda

まてりあ 第59巻 第2号 予告

[金属なんでもランキング] No.7 デバイ温度 [プロムナード]

科学・技術と社会の関係を考える 2. 科学知とその構築に関する理解 ……柴田 清

[最近の研究] 強誘電体/誘電体研究への第一原理計算の展開

……………森分博紀 田口綾子  
TiO<sub>2</sub>をコーティングしたインプラント用 TiNbSn合金の生体適合性 ……正橋直哉

[材料教育] 教員養成系大学・技術専攻での材料教育と形状記憶合金を用いた中学校・技術科教材の開発

……………北村一浩

[新技術・新製品]

—他—

編集の都合により変更になる場合がございます。



(2019年10月22日～2019年11月20日)

**正 員**

赤 田 英 里 三重県工業研究所

岩 野 悠 佑 長野県工業技術総合センター

川 崎 健 史 株式会社島津製作所

小 瀬 峻 久 住友理工株式会社

月 原 亮 太 日鉄建材株式会社

西 村 公 宏 JFE スチール株式会社

**学 生 員**

菊 池 健 太 長岡技術科学大学

坂 井 節 昌 長岡技術科学大学

澤 畑 有 輝 千葉工業大学

柴 谷 遼 太 朗 富山県立大学

**外国一般会員**

YI angho 立命館大学

Zhang Xin Hohai University

韓 光 植 国立研究開発法人 物質・材料研究機構

PHAM Thi Nu 横浜国立大学

**外国学生会員**

DongDong Zhou Xinjiang University

薛 童 早稲田大学

# 行事カレンダー

太字本会主催(ホームページ掲載)

開催日	名称・開催地・掲載号	主催	問合せ先	締切
<b>2020年1月</b>				
9～10	“つける”と“はがす”の新技术-分子接合と表面制御コース(川崎)	神奈川県立産業技術総合研究所	TEL 044-819-2033 ed@newkast.or.jp	定員 20名
9～10	第58回 セラミックス基礎科学討論会(愛知)	日本セラミックス協会基礎科学部会	funntai@crl.nitech.ac.jp http://www.ceramic.or.jp/bkiso	事前 12.20
10	第89回レアメタル研究会(東大 鉄門記念講堂)(本号60頁)	レアメタル研究会	TEL 03-5452-6314 okabelab@iis.u-tokyo.ac.jp https://www.okabe.iis.u-tokyo.ac.jp/japanese/rc40_j.html	
16	北海道支部 冬期講演大会並びに講演募集のお知らせ(札幌)(11号698頁)	日本金属学会北海道支部	<b>TEL 011-706-6842</b> <b>jim-hokkaido@eng.hokudai.ac.jp</b>	
17	表面科学技術研究会2020トライボロジーの最前線-ナノトライボロジーその場計測-(大阪)	表面技術協会関西支部他	TEL 075-781-1107 kansai-office@sfi.or.jp http://www.sssj.org/Kansai/goudou20117.html	1.10
17	日本磁気学会 スピン×センサ×IoT(東工大)	日本磁気学会	TEL 03-5281-0106 https://www.magnetics.jp/event/research/topical_226/	
22～23	表面科学セミナー2020(実践編)「実践! マテリアルインフォマティクス 実際の作業を通して身につける材料データ科学」(東京理科大)	日本表面真空学会	TEL 03-3812-0266 office@jvss.jp https://www.jvss.jp/	
22～23	LMP シンポジウム2020「レーザ加工技術の基礎・応用と最新動向」(神戸)	日本溶接協会	TEL 03-5823-6324 http://www-it.jwes.or.jp/seminar/	
23～24	第48回ガスタービンセミナー(東大)	日本ガスタービン学会	gtsj-office@gtsj.org http://www.gtsj.org/	
24	炭素材料学会1月セミナー「エネルギー・環境材料としてのポーラスカーボン～未来を拓く古くて新しいカーボン～」(東京)	炭素材料学会	TEL 03-5227-8632 tanso-koshukai@bunken.co.jp http://www.tanso.org/	
25	第25回高専シンポジウム in Kurume(久留米)	久留米工業高専, 高専シンポジウム協議会	TEL 0942-35-9300 sympo25@kurume-nct.ac.jp http://www.kurume-nct.ac.jp/sympo25	
28	第336回塑性加工シンポジウム「高張力鋼材せん断加工部における2次的破壊の機構と対策」(東京電機大)	日本塑性加工学会	https://www.jstp.or.jp	事前 1.20
28～29	第166回塑性加工学講座「圧延加工の基礎と応用」(東京電機大)	日本塑性加工学会	https://www.jstp.or.jp	定員 70名
28～29	第27回超音波による非破壊評価シンポジウム(東京)	日本非破壊検査協会	TEL 03-5609-4015 http://www.jsndi.jp/ nakamura@jsndi.or.jp	
28～29	第26回『エレクトロニクスにおけるマイクロ接合・実装技術』シンポジウム(横浜)	スマートプロセス学会他	TEL 06-6878-5628 mate@sps-mste.jp http://sps-mste.jp/mate2020/src/	
29	腐食防食部門委員会第332回例会(大阪)	日本材料学会	TEL 075-761-5321 jim@jsms.jp http://www.jsms.jp	
30～2.1	第25回 電子デバイス界面テクノロジー研究会-材料・プロセス・デバイス特性の物理-(三島)	電子デバイス界面テクノロジー研究会	http://www.edit-ws.jp/	参加 12.16
31	第18回ナノテクノロジー総合シンポジウム(JAPAN NANO 2020)(東京)	物質・材料研究機構他	JAPANNANO@nims.go.jp TEL 029-859-2777 https://www.nanonet.go.jp/japannano/2020/	
31	溶接部の腐食トラブル防止事例講習会(東京)	腐食防食学会	TEL 03-3815-1161 naito-113-0033@jcorr.or.jp http://www.jcorr.or.jp/	定員 70名
<b>2020年2月</b>				
6	第33回軽金属セミナー「アルミニウム合金の組織-中級編(時効析出)」(第8回)(日大)	軽金属学会	http://www.jilm.or.jp/	定員 40名
7	第337回塑性加工シンポジウム「深絞り・しごき加工技術の最前線～製缶技術に学び、自動車の電動化へ～」(同志社大)	日本塑性加工学会	https://www.jstp.or.jp	定員 80名
13	第191回腐食防食シンポジウム「わが国における腐食コストの推定結果と腐食コスト削減へのシナリオ」(東京)	腐食防食学会他	TEL 03-3815-1161 ysm.hng-113-0033@jcorr.or.jp	
14	第407回講習会「熟練のものづくり技術を次世代へ! -デジタルツールを駆使した技能・技術継承-」(東京理科大)	精密工学会	TEL 03-5226-5191 https://www2.jspe.or.jp/	定員 60名
15	第48回「若手フォーラム」-ポスターセッション併催(岡山)(12号812頁)	日本金属学会中国四国支部	<b>TEL 086-251-5227 FAX 086-251-8266</b> <b>takemoto@mech.okayama-u.ac.jp</b>	1.24
21	ウィンタースクール「トポロジー最適化の基礎～積層造形によるものづくりへの応用～」(中央大)	日本計算工学会	TEL 03-3868-8957 office@jsces.org http://www.jsces.org/	2.14
21	第192回腐食防食シンポジウム「わが国における腐食コストの推定結果と腐食コスト削減へのシナリオ」(大阪)	腐食防食学会他	TEL 03-3815-1161 ysm.hng-113-0033@jcorr.or.jp	
21	本多光太郎博士生誕150年記念講演会(東京)	本多記念会	TEL 022-215-2868 http://hondakinenkai.or.jp/docs/150th_anniversary_of_the_birth_of_honda.pdf	

開催日	名称・開催地・掲載号	主催	問合せ先	締切
25	関西支部第32回技術研修会「塑性変形と加工における潤滑技術とその事例」(同志社大)	日本塑性加工学会 関西支部	kansosei@mail.doshisha.ac.jp	定員 80名
28	理研シンポジウム第22回「トライボコーティングの現状と将来」(東京)	理化学研究所大森 素形材工学研究 室, トライボコー ティング技術研究 会	TEL 03-5918-7613 tribo@tribocoati.st	定員 150名
2020年3月				
5	第1回世界エンジニアリングデイ記念シンポジウム(東大)	日本工学会	TEL 03-6265-0672 eng@jfes.or.jp http://www.jfes.or.jp/	
6	第34回軽金属セミナー「アルミニウム合金の組織—応用編(加工・熱処理による組織変化)」(第6回)(芝浦工大)	軽金属学会	TEL 03-3538-0232 http://www.jilm.or.jp/	定員 40名
6	第45回組織検査用試料の作り方(組織の現出)講習会「鉄鋼材料・非鉄金属材料・表面改質処理および異常組織材」(千葉工大)	材料技術教育研究会	TEL 047-431-7451	2.28
6	第90回レアメタル研究会(東大生産技研)(本号60頁)	レアメタル研究会	TEL 03-5452-6314 okabelab@iis.u-tokyo.ac.jp https://www.okabe.iis.u-tokyo.ac.jp/ japanese/rc40_j.html	
8~11	COMPSAFE2020(第3回安心・安全・環境に関する計算理工学国際会議)(神戸)	COMPSAFE2020 実行委員会	secretary@compsafe2020.org http://www.compsafe2020.org	
12~14	2019年度量子ビームサイエンスフェスタ(水戸)	高エネルギー加速器 研究機構物質構 造科学研究所, J- PARCセンター 他	https://mlinfo.jp/sp/qbs-festa/2019	
17	第3回「高校生・高専学生ポスター発表」(東工大)(本号57頁)	日本金属学会	TEL 022-223-3685 annualm@jim.or.jp	講演申込 1.15
17~18	第23回 電磁気応用部門・磁粉・浸透・目視部門・濡れ試験部門合同シンポジウム「表面探傷技術による健全性診断, 品質検査」(東京)	日本非破壊検査協 会	TEL 03-5609-4015 nakamura@jsndi.or.jp http://www.jsndi.jp/	参加 2.21
17~19	日本金属学会春期講演大会(東京工業大学大岡山キャンパス)(東京)(本号54頁)	日本金属学会	TEL 022-223-3685 FAX 022-223-6312 annualm@jim.or.jp	事前参加 2.28
19	第12回男女共同参画ランチョンミーティング「金属材料分野での多様なキャリアパス」(東工大)	男女共同参画委員 会	TEL 022-223-3685	
19	企業説明会(東工大)(本号57頁)	日本金属学会	TEL 022-223-3685 jim.company2020@jim.or.jp	
2020年5月				
19~20	第36回希土類討論会(札幌)	日本希土類学会	TEL 06-6879-7352 kidorui@chem.eng.osaka-u.ac.jp http://www.kidorui.org/	発表 1.24
2020年6月				
12~14	2020年度塑性加工春季講演会(名工大)	日本塑性加工学会	https://www.jstp.or.jp	
29~7.3	PTM2020(8th International Conference on Solid-Solid transformations in Inorganic Materials)(中国西安)	中国金属学会	ptm2020@csm.org.cn http://www.ptm2020.com	
2020年7月				
7~9	第57回アイソトープ・放射線研究発表会(東大)	日本アイソトープ 協会	TEL 03-5395-8081 gakujuetsu@jrias.or.jp http://www.jrias.or.jp/	
2020年9月				
16~18	日本金属学会秋期講演大会(富山大学五福キャンパス)(富山)	日本金属学会	TEL 022-223-3685 FAX 022-223-6312 annualm@jim.or.jp	
2020年10月				
19~22	The 8th conference of Crystal Growth and Crystal Technology (CGCT8)第8回アジア結晶成長・結晶技術国際会議(宮崎)	アジア結晶成長お よび結晶技術学会 他	TEL 06-6879-8730 yamanoi-k@ile.osaka-u.ac.jp https://www.opt.miyazaki-uac.jp/hikari/	
27~30	第1回地球環境のための炭素の究極利用技術に関するシンポジウム(奈良)	日本鉄鋼協会	TEL 075-223-2311 http://web.apollon.nta.co.jp/CUUTE-1/ cuute-1@nta.co.jp	
2020年11月				
15~19	The 9th International Symposium on Surface Science (ISSS-9)(高松)	日本表面真空学会	iss9@jvssjp https://www.jvss.jp/iss9/	参加 9.22
2020年12月				
8~29	Mate2020第26回『エレクトロニクスにおけるマイクロ接合・実装技術』シンポジウム(横浜)	スマートプロセス 学会他	TEL 06-6878-5628 mate@sps-mste.jp http://sps-mste.jp/mate2020/src/	

◇ ◇ ◇

～日本金属学会誌, Mater. Trans. へ投稿しませんか?～

◎日本金属学会誌および Mater. Trans. は、会員、非会員問わず投稿することができます。

掲載論文充実化のため、レビュー、オーバービュー、技術論文など多くの種別を取り入れております。

会誌の投稿・掲載費用は無料です。

詳細は、本会ホームページ → [会誌](#) or [Mater. Trans.](#) のページをご覧ください。

皆様のご投稿をお待ちしております。

◇ 日本金属学会 2020年 春秋講演大会 開催日程 ◇

春期講演大会：3月17日(火)～3月19日(木) 東京工業大学大岡山キャンパス：事前参加申込締切：2月28日(金)

秋期講演大会：9月16日(水)～9月18日(金) 富山大学五福キャンパス：まてりあ5号会告予定



事務局より

- 皆様 新年あけましておめでとうございます。本年もどうぞ宜しくお願いいたします。
- ただいま春期講演大会(東京工業大学)の事前参加(懇親会含む)登録を行っておりますので、ご確認下さい。
- 各種賞推薦依頼をしております(本号59頁)。是非、ご推薦下さい。
- まてりあ編集委員会では、本年も新しい種別(企画)の記事を掲載して参ります。どうぞお楽しみ下さい。



2019, 2020年度会報編集委員会 (五十音順, 敬称略)

委員長	大塚 誠						
副委員長	竹田 修						
委員	池尾直子	石本卓也	井田駿太郎	上田恭介	梅津理恵	大石 郁	
	大野直子	小幡亜希子	木口賢紀	北村一浩	小島淳平	小柳禎彦	
	近藤亮太	齊藤信雄	齊藤敬高	佐々木秀顕	佐藤紘一	佐藤豊人	
	杉浦夏子	芹澤 愛	高島克利	高山直樹	田中秀明	趙 研	
	佃 諭志	堤 祐介	圓谷貴夫	寺西 亮	寺本武司	土井康太郎	
	徳永透子	轟 直人	永井 崇	長岡 亨	中村篤智	野山義裕	
	長谷川 誠	春本高志	藤枝 俊	細川裕之	本間智之	三井好古	
	宮崎秀俊	宮澤知孝	宮部さやか	盛田元彰	森戸春彦	諸岡 聡	
	山中謙太	山本剛久	横山賢一	吉矢真人	吉年規治	李 海文	

まてりあ 第59巻 第1号 (2020) 発行日 2020年1月1日 定価(本体1,700円+税)送料120円

発行所 公益社団法人日本金属学会

〒980-8544 仙台市青葉区一番町一丁目14-32

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

発行人 山村英明

印刷所 小宮山印刷工業株式会社

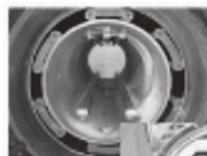
発売所 丸善雄松堂株式会社

〒160-0002 東京都新宿区四谷坂町 10-10

# 高温真空 3000℃への挑戦

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

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



炉の改修

ハイブリット成形断熱材



6面シート  
貼り



カーボンフェルト

高断熱+省エネ

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



## メカニカルカーボン工業株式会社

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

## 日本金属学会発行誌 広告のご案内

### まてりあ(会報)

前付) 1色1P ¥100,000 1/2P ¥60,000

後付) 1色1P ¥95,000 1/2P ¥55,000

※表紙回り、カラー料金等お問い合わせ下さい。

### 春・秋期講演大会プログラム

後付) 1色1P ¥70,000 1/2P ¥40,000

広告ご掲載についてのお問い合わせ・お申込み

株式会社 明報社

〒104-0061 東京都中央区銀座7-12-4 友野本社ビル

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

E-mail [info@meihosha.co.jp](mailto:info@meihosha.co.jp) HP [www.meihosha.co.jp](http://www.meihosha.co.jp)

## 分子／結晶模型モデル (組み立て用キット)

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

### 基本セット

■Basic Structure (1cmモデル) Class Set ¥10,000.-  
硫酸、塩化ナトリウム、ダイヤモンド、グラファイト、金属、酸と塩基、洗剤、ナイロン、アモルファス構造の学習用(原子515個)

■Lattice (1cmモデル) Class Set ¥10,500.-  
ダイヤモンド、グラファイト、塩化ナトリウム、8および12配位金属、塩化セシウム、セ閃亜鉛鉱、ウルツ鉱、ルチル、氷構造の学習用(原子380個)

■Organic and Inorganic Chemistry (1cmモデル) Class Set ¥8,800.-  
アルカン、アルケン、アルキン、環構造、酸素／窒素／硫黄／リンの官能基、ベンゼン環、ポリマー、複素結晶の学習用(原子500個)

### 結晶セット

■Carbon Nanotube (原子150個) ¥3,100.-

■Diamond (原子450個) ¥7,000.-

■Beta-Quartz (原子1,400個) ¥13,600.-

■Mica (原子1,550個) ¥25,200.- その他、多数あり



(製作: Cochranes of Oxford Ltd.)

化学プロセス用の物性データベース

## DIPPR with DIADEM pro (Design Institute for Physical Property Data)

価格(税別) ¥350,000.- (一般向け) ¥60,000.- (教育機関向け)

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

### おもな機能(DIADEM)

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



システムプラットフォーム:  
Windows Xp/Vista/7/8 (AIChE DIPPR Project 801)

25,000件のセラミックス状態図データベース

## ACerS-NIST Phase Equilibria Diagrams, Version 4.3

価格(税別) ¥160,000.- マルチユーザー ¥260,000.-

### 検索条件

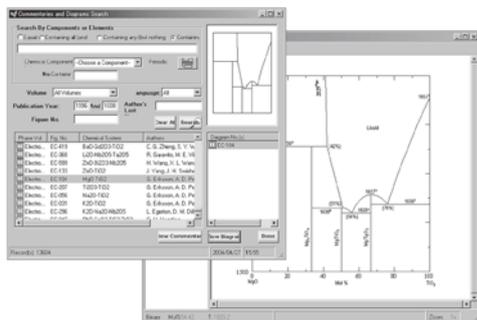
- 成分系、元素記号
- 著者、出典誌名、出版年
- 状態図番号

### データ表示

- ◆モル百分率 ↔ 重量百分率
- ◆Lever rule計算
- ◆ズームアップ/ズームダウン

データソース/新データ2,500件を追加

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



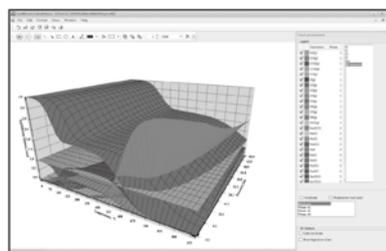
システムプラットフォーム: Windows XP/Vista/7

化学反応/平衡計算ソフトウェア

## HSC Chemistry for Windows, Ver.9.8

価格(税別) ¥650,000.-/¥280,000.- (一般/教育)

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



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

# 株式会社 デジタルデータマネジメント

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