

Materia Japan

- 第一原理計算による転位構造解析と合金設計
- 入門講座 中性子線による金属材料の組織と弾塑性変形挙動の解析 (I) ~測定対象と方法~
- 「新技術・新製品」

まてりあ

Vol.56 MTERE2 56 (1) 1-54 (2017)

2017

1

高温弾性率の重要な問題

従来から超音波や縦共振法による室温ヤング率や剛性率が高めに出ることがある、といわれていました。高温測定になるとその差が顕著に出ることが多く、ひずみ速度(振動数)依存性といわれていました。この原因を考察しますと、材料中に粘性成分があるとその部分の弾性振動は粘性によって時間遅れが生じ小さなひずみとして検出されます。弾性率=応力/ひずみの式の分母を小さく測定していることになります。結局高速振動ほど粘性の影響を受けやすく、高温軟化によって粘性が多くなるほど測定誤差が増える、ということになります。従来の超音波(数 MHz)や縦共振(数十 kHz)で測定した高温測定データは見直す必要がありそうです。

弊社の EG-HT は静的測定法に近い数十 Hz で測定しますので、粘性の影響は最小の動的測定法といえます。加えて本測定機構は高温における自由共振法の複雑振動や超音波の乱反射などのような乱れがないため難共振状態になる高温測定でも安定して測定できる装置で、自信を持ってお勧めできる強力な高温弾性率と内部摩擦測定装置となっています。

金属関係へお勧めの製品

室温や比較的低温で最も信頼性の高い装置 自由共振式ヤング率、内部摩擦測定装置 JE-RT

- 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



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<

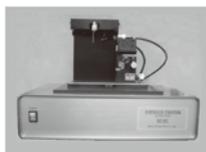


破断までの疲労過程も監視できる操作簡便な
画期的な疲労試験装置です

共振式薄板疲労試験装置 RF-RT

- 破断までのヤング率の変化を計測。
- ギガサイクルも短時間で試験。
物性に变化の少ない 500Hz 以下で試験します。
- 発熱による物性変化がありません
- 試験の再現性がよいです。
- 静音、小型、小電力、安価
- 200°C (RF-HT)

RF-RT



他の試料形状や測定目的に対応

その他の製品

- ▼自由共振式剛性率測定装置 JG シリーズ
- ▼縦共振式ヤング率測定装置 VE シリーズ
- ▼圧電共振式弾性定数測定装置 CC シリーズ
- ▼電磁共鳴式弾性定数測定装置 CC2 シリーズ
- ▼インパクト式ヤング率測定装置 IE シリーズ
- ▼強制振動式内部摩擦測定装置 MS シリーズ
(メカニカルスペクトロメータ)
- ▼イメージングプレート式ラウエカメラ

CC2-HT



VE-RT



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

1

2017
Vol.56
No.1

まてりあ

◎ 会告原稿締切：毎月1日



翌月号(1日発行)掲載です。

巻頭言	年頭のご挨拶 白井泰治	1
紹介	公益社団法人日本金属学会の組織と活動概況	3
最近の研究	第一原理計算に基づく転位構造解析と合金設計 —マグネシウムの延性向上への取り組み— 都留智仁	5
	<small>非経験的な合金設計と元素戦略に基づく代替元素探索として、第一原理計算を用いた合金元素の変形への影響を理解するアプローチを紹介。</small>	
入門講座	中性子線による金属材料の組織と弾塑性変形挙動の解析(I) ～測定対象と方法～ 友田 陽	14
	<small>ナノ・マイクロ因子のバルク平均値を測定してマクロ特性の定量的理解を深めることのできる中性子散乱回折法の利用について紹介。</small>	
新進気鋭	真にナノスケールのインデンテーション試験による複合材料硬度測定法 増田秀樹	20
新技術・新製品	パワーモジュール用アルミ一体型基板の開発 小山内英世 結城整哉 井手口 悟 菅原 章	24
	チョクラルスキー法による Fe-Ga 基磁歪合金の大型単結晶製造技術の開発 南部十輝 安藤宏孝 渡邊清和 高橋和也 福田承生 上野敏幸 川又 透 藤枝 俊 鈴木 茂	27
	船舶の衝突安全性に資する包括的材料ソリューションの開発 市川和利 大川鉄平 白幡浩幸 柳田和寿 中島清孝 小田直樹 山田安平 戸澤 秀 紙田健二 船津裕二	30
	動的析出強化を活用した自動車排気部品用耐熱フェライト系ステンレス鋼 (NSSC®429NF, NSSC®448EM)の開発 濱田純一 林 篤剛 神野憲博 小森唯志 伊藤宏治 福田 望 井上宜治	33
	合金鉄溶解炉による資源循環システムプロセスの開発 加藤勝彦 浅原紀史 小川雄司 平嶋直樹 府高幹男 兼川 賢	36
研究室紹介	材料組織形成をシミュレートする 塚田祐貴	39
はばたく	これまでの研究生活を振り返って 寺本武司	40
本会記事	会告	41
	次号予告	50
	支部行事	48
	新入会員	51
	掲示板	48
	行事カレンダー	52
	会誌・欧文誌1号目次	49
	訂正	54

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

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つては、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。



私たちは、世界最高のものづくりの力を追求し、優れた製品・サービスの提供を通じて社会の発展に貢献することを基本理念に、総合力世界No.1の鉄鋼メーカーを目指します。

鉄という素材は自動車や造船、社会インフラなど様々な分野で使われており、今後も需要が期待されています。

当社は、「人は価値創造の源泉である」と考え、若手には失敗を恐れず何事にも積極的に挑戦してもらっています。

是非、当社の幅広い活躍フィールドをご覧ください。



新日鐵住金株式会社

しんにってつすみきん

■お問合せ：人事労政部 人材開発室

〒100-8071 東京都千代田区丸の内2-6-1

Tel：(03) 6867-2242

採用ホームページ：<http://www.nssmc.com/recruit/hq/index.html/>

E-mail：saiyou@jp.nssmc.com



JFE

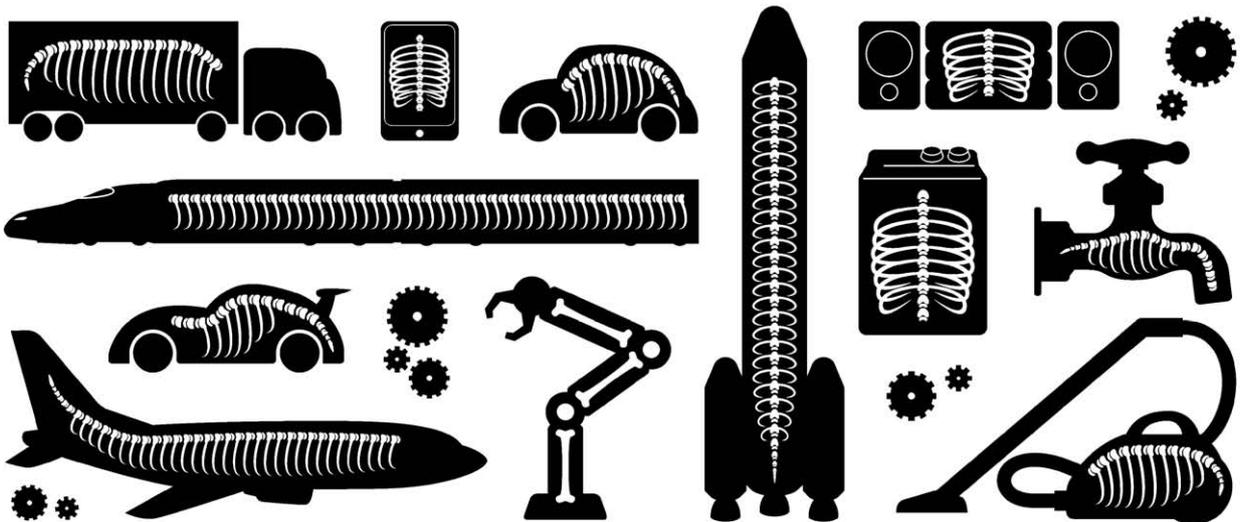
挑戦・柔軟・誠実 JFE スチール



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/>

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。

DAIDO STEEL GROUP
Beyond the Special

大同特殊鋼

◎下記2件の金属学会シンポジウムを予定しております。皆様のご参加をお待ちしております

金属学会シンポジウム

データサイエンスと材料研究開発

日時 2017年1月20日(金)13:00~17:00

場所 エッサム神田ホール1号館3F大会議室301(〒101-0045 東京都千代田区神田鍛冶町3-2-2)

募集定員 70名

事前申込締切 2017年1月10日(火)着信

詳細 までりあ11号552頁または本会ホームページの行事のご案内→「シンポジウム」

問合先 〒980-8544 仙台市青葉区一番町1-14-32

(公社)日本金属学会 シンポジウム参加係

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

プログラム

- 13:00~13:05 趣旨説明 名大 小山敏幸
- 13:05~13:45 材料科学データに対する機械学習の応用(仮題) 京大 世古敦人
- 13:45~14:25 ディープラーニングによる組織識別・検出の可能性の検討 鹿児島大 足立吉隆
- 休憩 —
- 14:40~15:20 アンサンブルカルマンフィルタによるパラメータ推定 ~フェーズフィールド法への適用~ 東京農工大 山中晃徳
- 15:20~16:00 フェーズフィールドモデルに資する4次元変分法データ同化
東大 長尾大道, 東大 伊藤伸一, 東京農工大 山中晃徳, 名大 塚田祐貴, 名大 小山敏幸, 東大 加納将行, 東大 井上純哉
- 16:00~16:40 材料工学におけるスパース学習の重要性(仮題) 名大 塚田祐貴, 小山敏幸
- 16:40~17:00 総合討論

—(演題は変更になる場合がございます。各講義には10分程度の質疑応答時間を含む)—

金属学会シンポジウム

高温物性値測定技術の最前線とものづくりへのアプローチ

日時 2017年1月24日(火)10:00~17:20

場所 東京工業大学 大岡山キャンパス 西9号館1階コラボレーションルーム

(アクセス: 東京急行大井町線/目黒線「大岡山51R」徒歩3分)

募集定員 40名

事前申込締切 2017年1月12日(木)着信

詳細 までりあ11号553頁または本会ホームページの行事のご案内→「シンポジウム」

問合先 〒980-8544 仙台市青葉区一番町1-14-32

(公社)日本金属学会 シンポジウム参加係

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

プログラム

- 10:00~10:10 挨拶
- 10:10~11:00 (1) 3Dプリンターの最新技術 芝浦工大 安齋正博
- 11:00~11:50 (2) 多種物性値同時測定システム PROSPECT の開発 東北大 福山博之
- 昼食 —
- 13:10~14:00 (3) 鉄鋼プロセスに関する熱伝導度・熱流量測定 東工大 須佐匡裕
- 14:00~14:50 (4) 高精度熱拡散率測定法 東工大 森川淳子
- 休憩 —
- 15:10~16:00 (5) 電気容量を用いた結晶化度測定 九大 齊藤敬高
- 16:00~16:50 (6) 液体金属の物理化学 阪大 田中敏宏
- 16:50~17:10 総合討論
- 17:10~17:20 挨拶

—(演題は変更になる場合がございます。各講義には10分程度の質疑応答時間を含む)—

年頭のご挨拶

公益社団法人日本金属学会 会長 白井 泰治

皆様、新年明けましておめでとうございます。

年頭に当たりまして、今事業年度にこれまでに実施されました主な事業と、理事会等で議論され、実施に移されました事項等をご報告申し上げます。



まずは、会長就任のご挨拶(まてりあ第55巻第6号7頁)で述べさせていただきました産業界との連携強化と財政基盤の安定化対策としての、維持員(企業・団体会員)制度の導入について、ご報告いたします。ご承知のように、本会は公益社団法人への移行に際し、企業・団体を会員とする維持員制度を廃止いたしました。社員に関する権利を持たない会員の会費は使用目的に限定のない寄付とみなされて一般正味財産となり、公益法人として満たすべき財務基準(収支相償、遊休財産規制)に適合しない恐れがあることから、維持員を終了し、指定正味財産となる使途を限定した刊行事業拡充賛助寄付金を導入しました。しかし、公益法人移行後の収支状況の悪化により、公益法人として満たすべき財務基準に抵触する可能性は低いことが明らかとなりました。一方で、寄付金を指定正味財産としたために、事業に使うためには、年度末前にあらかじめ収支相償を満足する範囲で一般正味財産へ振替えることが必要となり、また他の事業に使用できないことから、寄付金を事業に有効に活用することが困難となっております。その一方で、産業界からの声が、活動に反映されにくい状況となっております。そこで、この状況を改善すべく、昨年度来の度重なる理事会の議論を経て、企業や団体を会員とする維持員制度を復活することといたしました。2016年10月6日の臨時社員総会において、「本会の目的に賛同し事業を支援する法人または団体」を維持員として本公益社団法人の構成員とする定款の改訂が満場一致で承認されました。旧維持員との違いは、各団体から推薦された個人に正員資格を与え、新たに設けた本部枠の代議員・理事の被選挙権を与える点です。この中から最大4名の方が本部枠理事として社員総会で選任され、理事会で直接産業界からのご意見・ご要望等をご発言いただくこととなりました。今後、より緊密な産官学連携と財政基盤の安定化を通じて、本会の更なる発展が期待されます。

本事業年度に実施された大きな事業としては、2016年8月1日から5日までの5日間にわたり、国立京都国際会館において、PRICM9(第9回環太平洋先端材料とプロセッシング国際会議)が、本会の主催で盛会裏に開催されました。ご承知のとおり、PRICMは、環太平洋5カ国(中国、韓国、米国、オーストラリア、日本)が共同主催し、1992年からほぼ3年ごとに開催されています。日本は第4回会議(2001年)の主催国でありましたが、米国での同時多発テロ September 11による不測の事態でやむなく中止しており、今回の第9回会議が日本での初めての開催になりました。古原 忠組織委員長(東北大学)と梶原義雅特別顧問(前事務局長)のもと、事前に計8回にも及ぶ国際、国内組織委員会を開催して、周到な準備が進められました。その結果、28カ国から1,132名の参加があり971件の講演が行われ、活発な議論と情報交換そして研究者間の緊密な国際交流が行われました。財政的にも大きな黒字となり、本会の経常収支にも大きな貢献をいただきました。組織委員はじめご関係各位に厚くお礼申し上げます。

2016年秋期講演大会は、14年ぶりに大阪大学で開催されました。さらに今回初めて豊中キャンパスでの開催となりました。豊中キャンパスには大阪大学の全学共通教育のための講義棟が完備されており、そこを使わせていただくことで、かつてないほどコンパクトで会場間の移動も大変効率が良い、理想的な講演会場となりました。掛下知行大会実行委員長はじめ、関西地区の実行委員の皆様方のご尽力に厚くお礼申し上げます。また快く会場をご提供いただきました大阪大学の西尾章治郎総長、本講演大会を工学研究科共催としていただき、運営面および財政面で多大なご支援をいただきました田中敏宏工学研究科長に深く感謝申し上げます。秋期大会の講演総数は926件で、主な内訳は一般講演447件、公募シンポジウム講演162件、ポスターセッション221件です。昨年の秋期大会より9件増加しており、近年続いていた講演数の減少に歯止めがかかったようにも見えますが、さらに魅力的な講演大会にするための改革が必要と考えます。そして、金属およびその関連材料の学術および科学技術分野におけるハブ学会としての役割を果たし続ける責務があると思います。

本会は、2013年3月1日に公益社団法人に移行しましたが、移行後初めて昨年10月3日に内閣府公益認定等委員会の立ち入り検査を受けました。仙台の本会事務局応接室に2名の調査官が来られ、本会側は会長、山村英明事務局長、早坂 修経理担当副主任と公認会計士が対応しました。27年度の事業報告、28年度の事業計画書を基にし、法令上作成することとされている書類の確認、社員総会・理事会の招集・開催・決議等のガバナンスが適正に行われている事、個別の事業が適正に実施されている事、財産管理や会計処理等の財務管理が適正に行われている事を、書類・現物を確認しながら検査されました。終了後、社員総会・理事会・役員に関する手続き等のガバナンス、各公益目的事業の実施、財務管理もきちんと行われており、理事会の出席率も高いと肯定的な講評をいただくことが出来ました。公益社団法人化を計画後、時間をかけ慎重かつ丁寧に定款、細則および諸規程の改訂を進め、また公益法人移行後も、事業の公益目的事業化および財政の収支相償等の実現ならびに法人運営におけるセルフガバナンスの強化等に尽力してこられた、多くの役員の方々と事務局のご尽力の賜物と、この場を借りまして厚くお礼申し上げます。

最後に日本金属学会誌および Materials Transactions の状況についてご報告いたします。後者の欧文誌については、インパクトファクター(IF)の下げ止まりに成功しつつあります。これは、編集委員、査読者の先生方の公正で厳密な査読によって、質の低い論文の掲載が抑えられてきたことに負うところが大きいと考えられます。しかしより積極的にIFを向上させるためには、会員の皆様から、質の高い論文を積極的に投稿していただくことが最も重要と考えます。少しでもご協力いただけるように、今後は引用回数の多い論文10編をJ-STAGEのRecommended Papersに表示することにいたしました。是非ご投稿をお願いいたします。日本金属学会誌につきましては、日本語であるために低いIFに甘んじていますが、会員特に若手会員や現場の技術者向けの啓発的役割を考慮し、母国語の歴史ある専門誌を今後も維持していきたいと考えます。一時は論文数が減少し危機的状況になりましたが、投稿掲載費用を無料化することで投稿論文数を増やすことに成功しました。また現在は、編集委員のご尽力により、和文誌、欧文誌ともに、優れた特集記事やオーバービュー、レビューを積極的に企画いただいています。このような状況が今後も続くことを期待します。なお、両誌のより継続的な発展を図るため、これまで理事から選ばれていた編集委員長を、今後は編集委員会からの推薦を受け理事会で承認し、任期も2年(再任可)とすることになりました。

以上、思いつくままに本会の近況を書かせていただきました。会員諸氏からの忌憚のないご意見と、叱咤激励を期待いたします。

最後になりましたが、本会は本年2月14日に創立80年を迎えます。これまでの諸先輩およびご関係の皆様の本会へのご尽力、ご貢献に深く感謝申し上げるとともに、本会のさらなる発展および会員各位のご健勝とますますのご活躍を祈念致しまして、年頭のご挨拶とさせていただきます。

2017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、本多光太郎先生の提唱により1937年(昭和12年)2月14日に創設され、本年度で創立80周年を迎えます。その間、2013年(平成25年)3月1日には公益社団法人に移行いたしました。会員数は平成28年2月末時点で国内外合わせて5,148名で、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、社会基盤材料をはじめエネルギー材料、エコマテリアル、電子・情報材料、生体・福祉材料、材料と社会と対象分野も拡大し、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、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、会報「まてりあ」を毎月刊行し、会員に配布しています。また、和文の学術論文誌「日本金属学会誌」および、材料系12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120編の論文が、「Materials Transactions」では年間約360編の論文が掲載されています。また、金属及び関連材料に関する「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。講演大会は約800件の講演、約1,400名の参加で開催されています。また、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」を開催しています。さらに、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。また、国際会議もこれまでに24件を本会主催

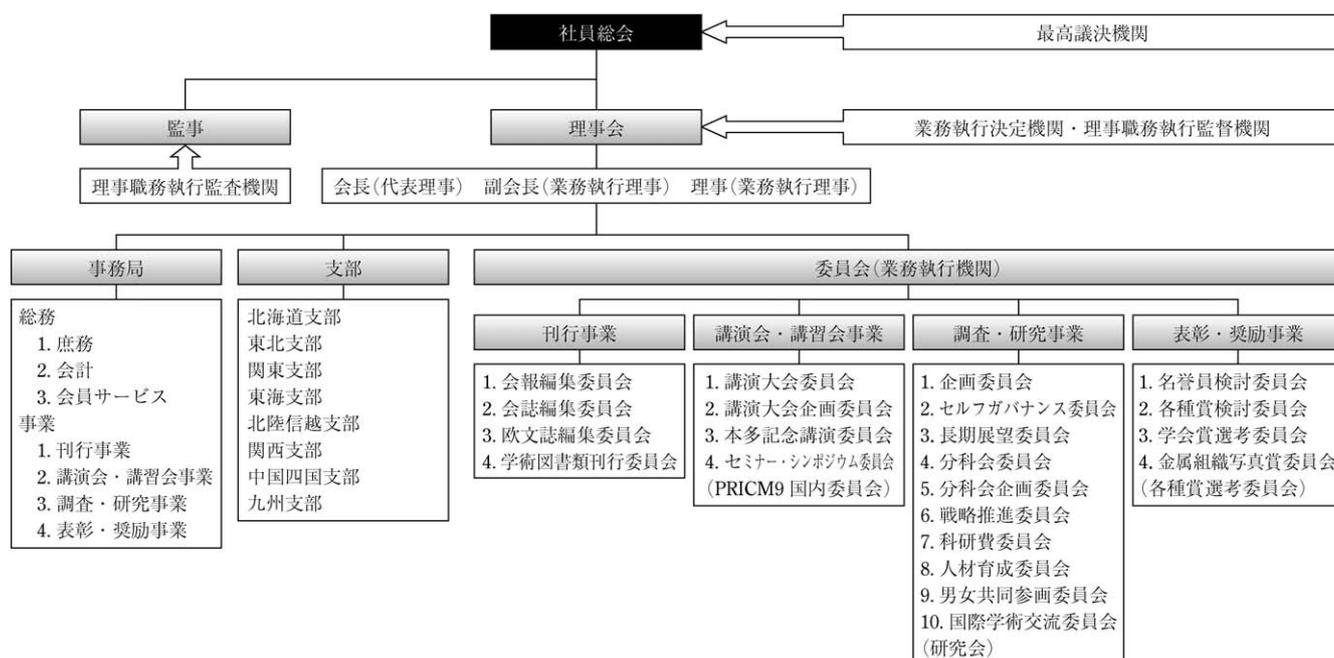
で開催しており、2016年8月には、国際会議「PRICM9」を開催しました。

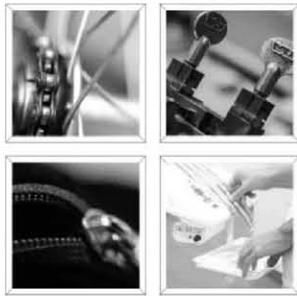
調査・研究事業では、重要な企画、統治、長期展望に関する「企画委員会」、「セルフガバナンス委員会」、「長期展望委員会」が設置されています。また、関連が深い専門分野の研究者や技術者が集う6つの分科で構成された「分科会」の活動を推進しており、先端領域や学際的領域の研究課題に対する研究を促進する目的で「研究会」が活動しています。さらに、「戦略推進委員会」や「科研費委員会」では、金属及びその関連材料分野の学術及び科学技術の振興に向けた材料戦略活動を行なっています。一方、「人材育成委員会」では、次世代を担う人材を育成することを目的として、出前講義や高校生向けホームページの作成等の活動を実施しています。「男女共同参画委員会」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、国内外の学術団体との交流も盛んに行っており、「国際学術交流委員会」では、IOMMMS との 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。

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、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。





どこで？
金属は身近なところで
活躍しています

どんなふう？

身の回りにあふれている金属製品。
だけど、知っているようで知らない事が多いかも！
一緒にのぞいてみよう！



金属の活躍現場

身近なところで活躍。
え！こんなところにも！

もっと知りたい



金属が製品になるまで！

鉱石▶板▶製品

もっと知りたい

性格いろいろ 金属大解剖



現場の声を徹底取材

金属の仕事をしているのはこんな人

もっと知りたい

Vol.1

航空機で活躍する金属

Vol.2

医療・福祉に役立つ金属



もっと金属について
詳しく知りたい

関連 HP へ

銅箔はどうやって作るの？ 動画あり **NEW**

鋼はどうやって作るの？

チタン眼鏡フレームの材料はどうやって作るの？



会社では
どんな仕事してるの？

女性も研究してるの？

女性も働いているの？



ぜひ、本会ホームページ
をご覧ください。

(公社) 日本金属学会

<http://jim.or.jp/everyone/index.html>

第一原理計算に基づく転位構造解析と合金設計 —マグネシウムの延性向上への取り組み—

都 留 智 仁^{*,**}

1. 緒 言

マグネシウム(Mg)は構造用金属材料で最も比重が低く、地球上に豊富に存在する元素であることから、省エネルギー社会の実現において軽量構造材料の有望な候補として期待されている⁽¹⁾。とりわけ輸送機器では、自動車の車体軽量化による燃費改善効果が高く(100 kg 当り 0.4–0.8 L⁽²⁾)、車重比率の高いフレームや駆動系統などのより多くの構造部材で Mg 合金の応用が望まれている。しかしながら、Mg 合金は六方晶構造(HCP)に由来する塑性異方性により変形能に乏しく、成形性、疲労強度、衝突安全性の向上が実用化に向けた重要課題となっている。

構造材料の機能向上のアプローチとして、「組織制御」と「合金化」が単相の材料設計の基礎として古くから広く行われてきた。組織制御に対して、加工による転位密度や結晶粒径がもたらす機械的性質への影響は体系的に理解され、組織制御による材料開発が積極的に行われている。Mg 合金に対する組織制御では、微細粒化によって強度と延性が向上することが知られており、双晶界面の減少や非底面すべりの活性化によることが指摘されている⁽³⁾⁽⁴⁾。しかしながら、Mg 合金では立方晶合金に比べて加工性が極めて低く、一般に加工時の温度や集合組織の制御に多くの困難を伴う。

合金化による材料設計は、強度や靱性などの機械的性質、融点などの熱力学的性質、耐食性などの化学的性質の機能向上を目的として行われる。Mg 合金においては、Mg–Al–Zn による AZ 系合金や Mg–遷移金属–希土類元素による長周期積層構造を有する合金が開発され⁽⁵⁾、Mg 合金の欠点である腐食性や可燃性の改善が図られてきた。一般に Mg 合金は低温での加工性が乏しいことから、加工による組織制御に先立つ機械特性向上のための積極的な合金設計が特に重要とな

る。近年、六方晶 Mg に対する二元系希薄合金の機械特性の体系的な実験により、Y, Ce などの一部の合金元素では、0.05 at%のごく微量な添加によって Mg 合金の延性を大きく向上させることが知られてきた⁽⁶⁾。ただし、同様の効果を生む元素の多くが希土類元素であり資源的に希少かつ高価なことから、延性向上のメカニズム解明とともに、代替材料の開発が期待されている。

希少元素の代替材料開発は元素戦略の重要な研究であり、原子・電子構造に立脚した構造材料に対する強さとねばさの両立に向けた取り組みが推進されている⁽⁷⁾。合金元素と機械特性の関係は、通常固溶原子と転位の相互作用による強化機構で説明される。Mg 合金においても Mg–3Al–1Zn(AZ31)合金の Al や Zn などの多くの合金元素で強化が生じる。その一方、通常の強化機構では Mg 合金の塑性異方性にわずかな変化を生じるのみであり、強化は実現されるが延性は依然として低い。Mg 合金の機械特性に関する一つの特徴として、高温で塑性伸びが大きく上昇することが知られており、その要因として高温域における非底面すべりの活性化であると考えられている⁽⁸⁾。添加元素による延性の向上には粒径の変化などの組織変化が寄与しないことから、微細粒化と異なるメカニズムとして、高温変形で生じるような非底面すべりが延性向上に重要な役割を果たすと考えられる。本稿では、転位論と第一原理計算を用いて、合金化による機械特性への影響を非経験的に評価するための合金設計手法を提案するとともに、具体的な対象として、Mg 合金の延性向上のメカニズムと合金設計指針について紹介する。

2. 積層欠陥エネルギー

Mg などの六方晶金属の変形は底面、柱面、錐面のすべり系と双晶によって生じる。六方晶 Mg 合金では、底面すべ

* 国立研究開発法人日本原子力研究開発機構；研究副主幹(〒319-1195 茨城県那珂郡東海村大字白方2-4)

** 京都大学 構造材料元素戦略研究拠点；拠点准教授

Alloy Design and Mechanical Properties: First-principles Calculations of Dislocation Core; Tomohito Tsuru (*Nuclear Science and Engineering Center, Japan Atomic Energy Agency (JAEA), Ibaraki. **Elements Strategy Initiative for Structural Materials (ESISM), Kyoto University, Kyoto)

Keywords: *dislocation core, theory of dislocations, alloy design, first-principles calculation, magnesium alloys*

2016年8月31日受理[doi:10.2320/materia.56.5]

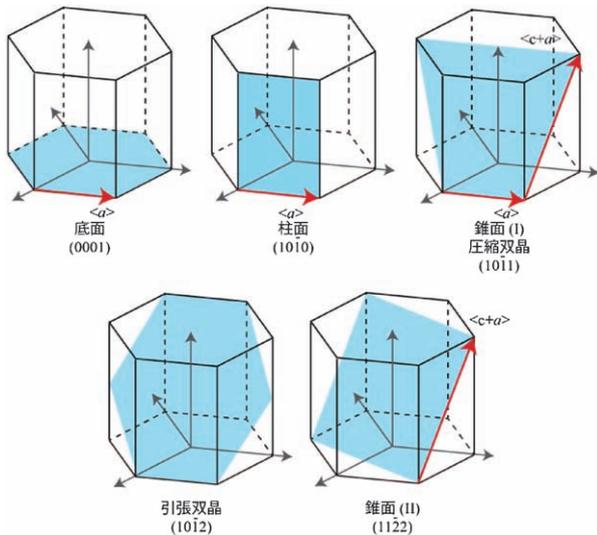


図1 HCP金属の変形モード．転位のすべり系と引張・圧縮双晶面．

り、柱面すべり、一次錐面すべり、二次錐面すべり、引張・圧縮双晶が知られており、それぞれ対応する面を図1に示す。これらの変形機構のうち、Mgでは底面 $\langle a \rangle$ 転位のPeierls応力が他の機構が作動する応力に比べて極めて低い。Schmid因子が小さい場合でも他のすべり系の臨界せん断応力よりも数十分の一以下と小さいために塑性変形の異方性を生じ、それが加工性の悪さの要因となっている。すべり変形に着目すると、積層欠陥(SF)エネルギー⁽⁹⁾は転位の構造と運動を決定する重要な特性であり、第一原理計算などの原子モデルを用いて比較的低い計算コストで精密に評価することが可能である。本研究では、すべり面の法線方向に最低18層の原子面を持つ原子モデルに対して、上部半分の原子をすべり面に沿った任意の方向に変位させ、すべり面の法線方向の自由度のみを緩和したときのエネルギー変化を一般化SFエネルギーとして解析した。第一原理計算には密度汎関数理論(Density functional theory; DFT)に基づく電子状態解析コードとしてVienna Ab initio Simulation Package (VASP)⁽¹⁰⁾を用いた。以降の全ての計算に対して、交換相関汎関数にPerdew-Burke-Ernzerhof(PBE)による一般化勾配近似(GGA)に基づく汎関数⁽¹¹⁾、 k 点サンプリングにMonkhorst-Packアルゴリズム⁽¹²⁾を用い、平面波のエネルギーカットオフは400 eVとした。まず、純Mgのすべり特性を理解するため、各すべり面に対する一般化SFエネルギーとそれぞれの面上の矢印で示すBurgersベクトル方向に沿ったエネルギーをそれぞれ図2、図3に示す。底面 $\langle a \rangle$ すべりのエネルギーは他の非底面すべりに比べて極端に小さく底面すべりが顕著なMgの特徴を再現している。柱面上の $\langle a \rangle$ すべりは底面 $\langle a \rangle$ すべりに次いで低く、一次錐面の $\langle a \rangle$ すべりは柱面 $\langle a \rangle$ すべりよりも大きい。 c 軸方向のすべり変形は $\langle c+a \rangle$ すべりとして生じることも一般化SFエネルギーから確認でき、一次錐面と二次錐面の $\langle c+a \rangle$ すべりが生じる。なおTiやZrなどの c/a 比が小さいものは底面と柱面の傾向が逆になり、これらも実際の特徴と一致する。

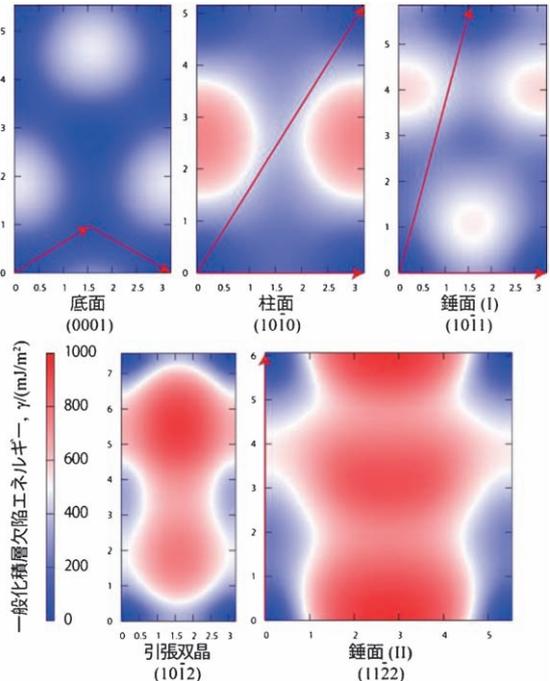


図2 純Mgのすべり面と双晶面に対する一般化SFエネルギー表面．横軸は底面，柱面，錐面(I)，引張双晶は $[11\bar{2}0]$ 方向，錐面(II)は $[1\bar{1}00]$ 方向の変位，縦軸は各面上で横軸と直交する方向の変位を表す．

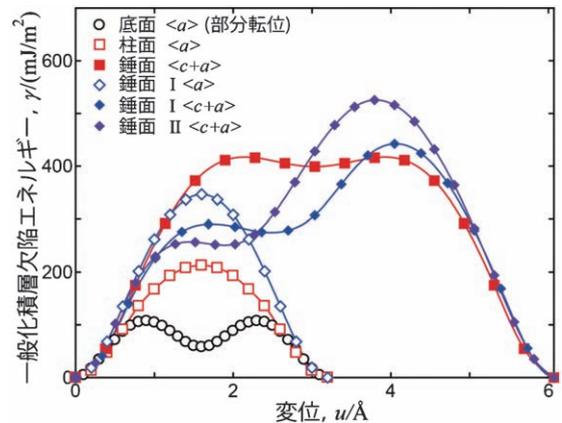


図3 図2の最小エネルギー経路に沿った一般化SFエネルギーと変位の関係．

3. Peierls-Nabarro (PN)モデルの理論と応用

(1) 古典PNモデル

一般化SFエネルギーからすべり変形に対する基礎的な傾向を予測することができる一方、実際の転位の構造や運動を記述することはできない。Peierls⁽¹³⁾とNabarro⁽¹⁴⁾は図4に示すような格子上的転位の描像を考え、転位の構造はすべり面を挟んだ二つの半無限弾性体とすべり面上における格子の相対的な変位によって記述されると仮定したPeierls-Nabarro (PN)モデルを提案した。PNモデルでは、すべり面上における相対的な変位を次式のように定義することですべり

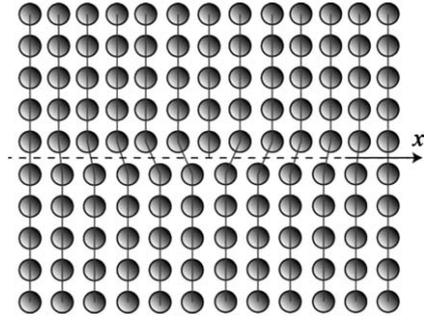


図4 Peierls-Nabarro モデルにおける格子転位の模式図.

面 ($y=0$) を挟んだ格子ミスマッチ (Disregistry) を記述し、さらに x 軸方向に沿って変位が分布を持つことを許容している.

$$\delta(x) = u(x, 0^+) - u(x, 0^-). \quad (1)$$

このような変位成分は無限小の Burgers ベクトルを持つ転位の集合と考えることができ、局所的な勾配 (転位芯密度) を用いて次式のように定義される. ここで、式 (2) の全領域における積分が Burgers ベクトルと等しい.

$$db(x') = \left(\frac{d\delta(x)}{dx} \right)_{x=x'} dx' \equiv \rho(x') dx'. \quad (2)$$

$$\int_{-\infty}^{+\infty} \rho(x) dx = \delta(+\infty) - \delta(-\infty) = b. \quad (3)$$

これらの変位によって生じる応力が格子の復元力 F と釣り合うときに次式の PN 方程式が満足される.

$$\frac{K}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{\rho(x')}{x-x'} dx' = F(\delta(x)). \quad (4)$$

ここで、 K はエネルギー係数と呼ばれる弾性係数であり⁽¹⁵⁾、復元力をシヌソイド系の解析関数と仮定して PN 方程式の解析的な解が得られる. 同様に、遠距離相互作用を除いた転位によるエネルギーは、無限小の転位が生じる弾性相互作用と、面間のミスフィットポテンシャルによって次式のように与えられる.

$$U_{\text{tot}}[\rho(x)] = U_{\text{elastic}} + U_{\text{misfit}}. \quad (5)$$

$$U_{\text{elastic}} = -\frac{K}{4\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} \rho(x) \rho(x') \ln|x-x'| dx dx'. \quad (6)$$

$$U_{\text{misfit}} = \int_{-\infty}^{+\infty} \gamma(\delta(x)) dx. \quad (7)$$

転位の安定構造は式 (5) のエネルギー汎関数の変分によって得られることになる. 実際ミスフィットエネルギーはすべり面を挟んだ離散的な原子列の総和で与えられる. Joós と Duesbery はミスフィットポテンシャルと復元力を一般化 SF エネルギーとその勾配として PN モデルに導入し、最大復元力を用いて Peierls 応力の定式化を行った⁽¹⁶⁾. 以上のように、古典 PN モデルはすべり面間のミスフィットの関数として転位に関する知見が得られるが、PN モデルから予想される Peierls 応力は実験結果と数値も異なることが知られている. これは古典 PN モデルでは、一方向に沿ったすべりを仮定してミスフィットポテンシャルをその変位成分のみの関

数で表現するためであり、部分転位などの 2 次元に広がった転位を再現できないなどの自由度の制限による. また、Joós らのモデルでは Peierls 応力が復元力の逆数で与えられる転位芯幅の指数関数で表されるため、最大復元力の精度に大きく依存する.

(2) 準離散変分 PN モデル

上記の問題に対して、Bulatov らは原子列に対して離散化された変数系を用いて三次元空間の自由度を有する準離散変分 PN (SVPN) モデルを提案した⁽¹⁷⁾. 転位芯密度は隣接する原子列の局所的な勾配として $\rho_i = (\delta_i - \delta_{i-1}) / (x_i - x_{i-1})$ で与えられる. このとき、転位の弾性エネルギーとミスフィットエネルギーは離散化されたすべり変位と転位芯密度による関数の総和として、次式で与えられる.

$$U_{\text{elastic}} = \sum_{i,j} \frac{1}{4\pi} \chi_{ij} [K_e(\rho_i^{(1)} \rho_j^{(1)} + \rho_i^{(2)} \rho_j^{(2)}) + K_s \rho_i^{(3)} \rho_j^{(3)}]. \quad (8)$$

$$\chi_{ij} = \frac{3}{2} \phi_{i,j} \phi_{j,j-1} + \psi_{i-1,j-1} + \psi_{i,j} - \psi_{i,j-1} - \psi_{j,i-1}.$$

$$\phi_{i,j} = x_i - x_j, \quad \psi_{i,j} = \frac{1}{2} \phi_{i,j}^2 \ln|\phi_{i,j}|$$

$$U_{\text{misfit}} = \sum_i \Delta x \gamma_{3d}(\delta_i). \quad (9)$$

ここで、 $\rho_i^{(1)} \sim \rho_i^{(3)}$ はそれぞれ、刃状、垂直、らせん成分の転位芯密度、 K_e 、 K_s は刃状転位とらせん転位のエネルギー係数、 Δx は原子列の間隔である. 転位による全エネルギーは式 (8) と式 (9) の和で与えられ、転位芯の安定構造は全エネルギーを数値的に変分することで求めることができる. また、転位に外力が負荷された時の仕事を合わせた全エネルギーを変分することで、外力下の転位構造が得られるとともに、負荷応力を徐々に増加させた際に安定な解が得られなくなり、転位が運動を始めるときの最小の負荷応力が求まる. この応力は Peierls 応力に相当する. SVPN モデルは、原理的に転位線方向の自由度に分割すれば曲線転位の解析が可能であり、また式 (9) の γ_{3d} にすべり面の法線方向の変位を考慮した SF エネルギーを用いることで微小転位線素の三次元空間の自由度で解析することができる. しかしながら、このような解析は原子スケールに相当する解像度になるため PN モデルの利便性は失われる. 本研究では、Mg 合金に対してすべり面法線方向の自由度にだけ緩和計算を行った一般化 SF エネルギー表面を用い、直線転位に対してすべり面上の二次元方向の自由度を考慮した転位芯構造と運動を検討した. ここで、エネルギー係数は表 1 に示す第一原理計算より求めた値を用いた.

一般化 SF エネルギー表面のサンプリング点は底面と柱面

表 1 Mg の底面および柱面 $\langle a \rangle$ 転位に対するエネルギー係数.

	底面 $\langle a \rangle$		柱面 $\langle a \rangle$	
	K_e (GPa)	K_s (GPa)	K_e (GPa)	K_s (GPa)
DFT	3.88	2.93	4.10	2.98

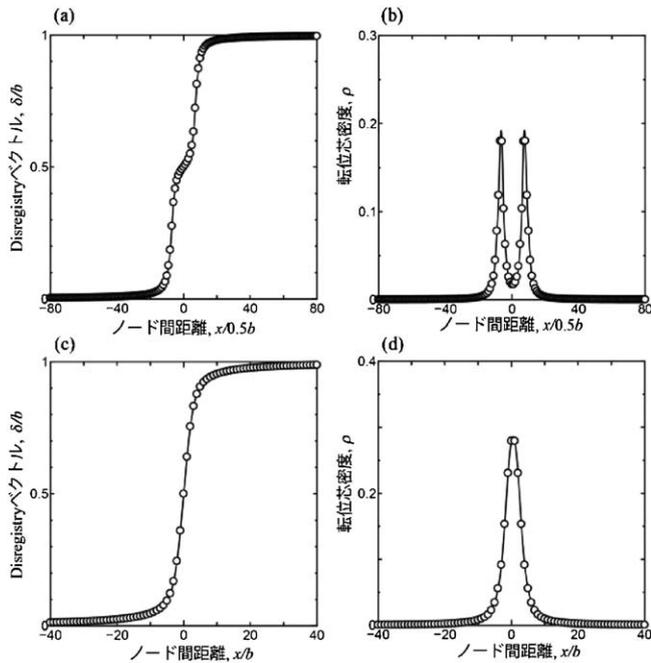


図5 格子位置に対する $[1\bar{1}20]$ 方向の格子ミスマッチ (disregistry, $\delta(x)$) と転位芯密度 ($\rho(x)$) の分布. (a), (b) 底面転位と (c), (d) 柱面転位の場合.

ともに 16×24 とし、任意の変位成分に対するエネルギー表面の勾配の解析に双三次スプライン関数を採用した. 純Mgの底面と柱面の $\langle a \rangle$ 刃状転位に対して、図2の一般化SFエネルギー表面をSVPNモデルに適用して得られた転位芯構造を図5に示す. 図の転位密度から底面転位と柱面転位で転位芯構造は大きく異なる. 底面転位は二つのピークを持っており、実験で観察される部分転位への分解に対応している. また、SVPNモデルから得られた底面転位と柱面転位のPeierls応力はそれぞれ1 MPa, 49 MPaとなり、実験結果をよく再現することが確認される. 次に、合金元素による柱面すべりへの影響を検討するため、合金元素がSFエネルギーに与える影響を検討した. AZ系Mg合金で用いられるAl, ZnとY元素が柱面のすべり面上に固溶している場合を考え、すべり面上の濃度が異なる場合の図1の矢印に沿った一般化SFエネルギーの変化をそれぞれ図6(a)~(c)に示す. すべり面に異種元素が存在するとき、多くの場合すべり運動の障害となるためSFエネルギーは上昇する. 本解析でも、AlとZnではすべり面上の濃度の増加に伴ってSFエネルギーが同程度上昇することが確認される. このとき、古典PNモデルからエネルギー勾配に関連づけられる復元力が上昇するため、Peierls応力は上昇すると考えられる. 一方、Yがすべり面上に存在するとき、SFエネルギーが極端に低下することがわかった. このとき、AlやZnとは逆にPeierls応力が低下することが予測される. 本研究では、Y添加によってもたらされる特異な一般化SFエネルギー変化に対する転位構造への影響を詳細に評価するため、Y固溶を考慮した一般化SFエネルギー表面を用いてSVPN解析を行った. 得られた転位芯構造を図7に示す. SFエネルギー

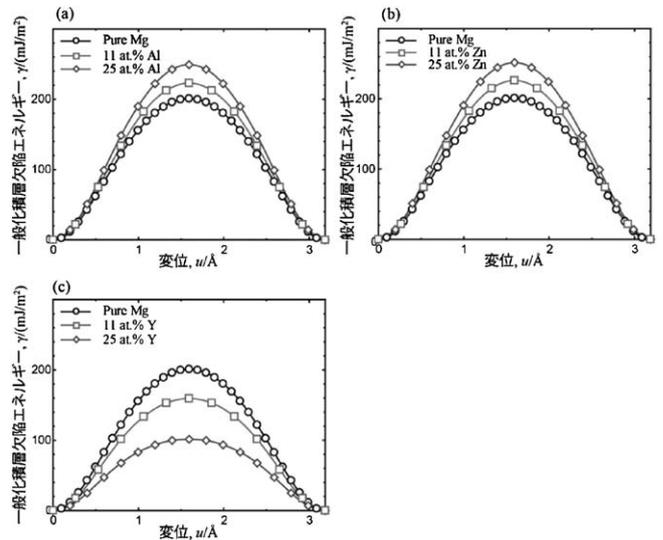


図6 合金元素添加に対する柱面の $\langle a \rangle$ 方向に沿った一般化SFエネルギーの変化. (a) Al, (b) Zn, (c) Y添加の場合.

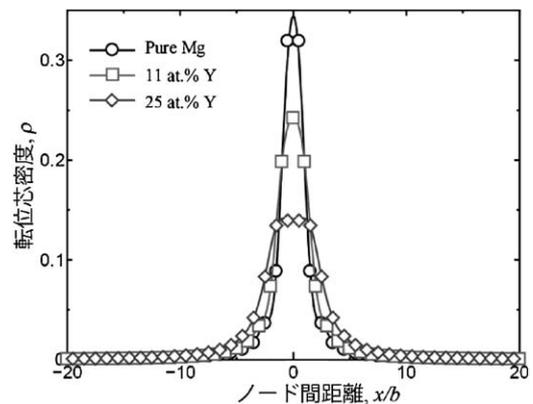


図7 SVPNモデルから得られたY添加による転位芯構造の変化.

一の低下に伴って、弾性ひずみを緩和するために転位芯は拡張することで転位芯構造が大きく変化し、Y添加によるSFエネルギーの低下が転位構造に有意な影響をおよぼすことが確認される. さらに、濃度が11 at%と25 at%で得られたPeierls応力はそれぞれ14 MPaと8 MPaとなり、純Mgの柱面の場合と比べて大きく低下する傾向を示すことがわかった. これらの傾向から、Y添加によって底面/非底面すべりの塑性異方性が低減され、延性の向上に重要な役割を果たすことが予想される⁽¹⁸⁾.

以上のように、第一原理計算によって得られた一般化SFエネルギーをSVPNモデルに適用することで、すべり面上に広がった転位芯構造を非経験的に評価することができる. また、合金化によるSFエネルギーの変化から転位芯構造やPeierls応力を比較的低い計算コストで予測することが可能である. その一方、PNモデルは転位の物理的描像をよく再現したモデルであるが、転位の特性をSFエネルギーから決定することに起因した欠点を有している. 転位の近傍に合金

元素が分布している場合、その影響は SF エネルギーに対する寄与として評価されるため、転位の弾性場との直接的な相互作用でなくすべり運動への影響として得られる。また、SF エネルギーは合金元素を含んだ系のすべりに対する平均的な寄与として評価される。すなわち、転位と合金元素の局所的な相互作用は考慮されない。そのため、合金系への適用はあくまで傾向を予測するための方法として用いるものとする。

4. 周期転位の理論と第一原理計算

(1) 周期系の転位双極子の弾性場

合金元素が転位に及ぼす影響は、転位と合金元素との間の弾性相互作用と化学的相互作用によってもたらされる。近年、マルチコアによる高性能な計算処理能力を持つ計算機環境が研究室レベルで実現できるようになり、第一原理計算を用いて格子欠陥を直接計算することが可能になっている。空孔、不純物クラスター、粒界構造などの格子欠陥に対する第一原理計算が行われ、実験によって求めることが困難な様々な特性に対して多くの知見が得られている。その一方、平面波基底を用いた第一原理バンド計算では周期境界条件が課され、欠陥構造が生じる弾性場を注意深く検討する必要がある。空孔やクラスターによるミスフィットひずみによる応力は距離 r に対して $1/r^3$ で減衰し、粒界構造が生じる応力は数原子層程度の局所的なものであることが知られていることから、数百原子程度のモデルでサイズの影響は収束し、欠陥構造による特性を首尾良く再現することができる。一方、孤立転位の弾性場は r に反比例して減衰する長距離応力場を持ったため⁽¹⁹⁾、原子モデルで孤立転位を扱うことはサイズの制限から困難である。そこで、バンド計算による転位の取り扱いには周期境界中に存在する転位双極子を考える。周期境界中の転位の場は、孤立転位の場を用いた周期的に存在するイメージ双極子の重ね合わせや⁽²⁰⁾⁽²¹⁾、転位配置を周期関数で表すことができる場合 Fourier 展開によって表すことができる⁽²²⁾⁽²³⁾。後者の方法を用いて、転位の周期的な分布によって生じるひずみ場を Fourier 展開によって次式の様に表示す。

$$\underline{\underline{\Delta}}(\mathbf{r}) = \sum_{\mathbf{G}} \underline{\underline{\tilde{\Delta}}}(\mathbf{G}) \exp(i\mathbf{G} \cdot \mathbf{r}). \quad (10)$$

ここで、 $\underline{\underline{\Delta}}(\mathbf{r})$ は \mathbf{r} におけるひずみテンソル、 \mathbf{G} は逆格子ベクトル、 $\underline{\underline{\tilde{\Delta}}}(\mathbf{G})$ はひずみテンソルに関する Fourier 係数である。転位に沿った方向の単位長さ当りの弾性エネルギーは $\underline{\underline{\tilde{\Delta}}}(\mathbf{G})$ に関して次式で与えられる。

$$W_c = \frac{1}{2} A_c c_{ijkl} \sum_{\mathbf{G}} \underline{\underline{\tilde{\Delta}}}_{ij}(\mathbf{G}) \underline{\underline{\tilde{\Delta}}}_{kl}^*(\mathbf{G}). \quad (11)$$

ここで、 A_c は転位双極子を含む単位領域の面積、 c_{ijkl} は弾性係数である。ひずみ場は、転位によって課されるトポロジカルな制約条件下で全弾性エネルギーを最小化するように選ばれる。

本研究では、六方晶金属に対する Burgers ベクトル $a/3 \langle 11\bar{2}0 \rangle$ のらせん転位を対象とし、 z 軸を Burgers ベクトルの方向、 x 軸を $[0001]$ 、 y 軸を $[\bar{1}\bar{1}00]$ または $[\bar{1}\bar{1}01]$ 方向とし

た。図 8 (a) に示すように、転位は x, y 軸方向に単位格子を 12×6 並べた 288 原子を持つスーパーセル内に双極子と四重極子として挿入される。転位芯半径を $b/4$ とし、転位芯近傍の特異場の δ 関数を Gaussian 関数を用いて smearing すると、 $N_G = 40$ で十分収束することが確認された。このとき、双極子と四重極子配置によるひずみ場は図 8 (b) に示すように周期的であることが確認される。次に、ある位置における周期的な変位場は、実空間上の基準点からのひずみ場の双極子間の特異場を横切らないパスを用いた経路積分によって得られる。

$$u_j(\mathbf{r}_b) = u_j(\mathbf{r}_a) + \int_{\text{path}_{a \rightarrow b}} dl_k \Delta_{kj}. \quad (12)$$

式(12)から図 8 (b) に対して得られた z 方向の変位場 u_z の分布を図 8 (c) に示す。ここで、 x 方向に 128、 y 方向に 72 のサンプリング点を用いて数値的に経路積分を行った。図 8 (c) かららせん転位の拘束条件が満たされることが確認できる。また、 u_z は y 方向に対して周期的でなく、線形的に変位が増加する繰り返し境界であることがわかる。最後に、双極子と四重極子配置の弾性エネルギーの寄与を式(11)を用いて評価した。Mg に対する弾性係数 $c_{11} = 62.4$, $c_{33} = 70.9$, $c_{12} = 22.0$, $c_{13} = 21.9$, $c_{44} = 11.7$ GPa を用いて得られた転位の相対位置に関する弾性エネルギー変化を図 9 に示す。双極子配置は四重極子配置に比べて転位が相対的に移動する際のエネルギー変化が大きい。これは、平衡位置からわずかな変位に対しても配置による弾性エネルギー寄与が大きいことを示している。そのため、転位の解析には転位移動による弾性エネルギー

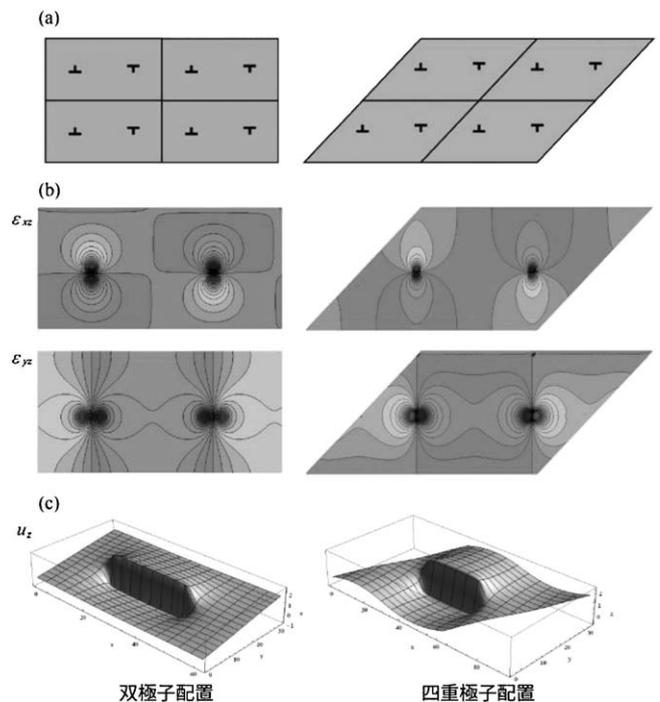


図 8 周期系の転位構造の模式図。(a) スーパーセル内の転位双極子と四重極子配置。(b) 双極子と四重極子配置に対する ε_{xz} 成分と ε_{yz} 成分のひずみ分布。(c) 双極子と四重極子配置に対する z 方向の変位分布。(オンラインカラー)

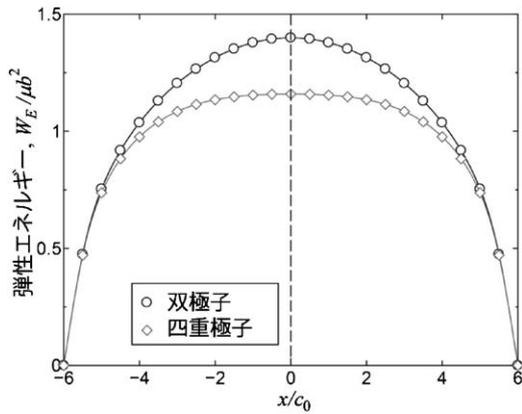


図9 双極子と四重極子配置の転位の相対位置に対する弾性エネルギー変化.

ギー寄与を小さくするために、一般に四重極子配置が用いられる。以上の弾性場に対する検討により、四重極子配置のユニットセルの各原子位置に対して、変位場の解を与えたものを初期構造として与え、第一原理計算を行った。

(2) 転位の第一原理計算と合金元素の影響

HCP 金属の Mg, Ti, Zr に対して、4.(1)で得られた転位モデルを用いて、第一原理計算により構造緩和を行った結果を図10に示す。ここで、構造緩和は共役勾配法によりエネルギー勾配が 0.005 eV/\AA 以下になるまで行った際の転位構造を Differential displacement (DD) ベクトル⁽²⁴⁾を用いて示している。HCP 金属に対する転位芯構造は c/a によって異なることが知られている。第一原理計算の結果からも、 $c/a = 1.614$ と理想比に近い Mg では底面の積層欠陥エネルギーが非常に低いことを反映して、底面上に大きく拡張した構造が最も安定であることが確認できる。Ti と Zr はそれぞれ $c/a = 1.581$ と 1.599 と非常に近い c/a 比を持ち、柱面上を運動する転位が最も安定と考えられてきた。しかしながら、本解析では Zr が従来の知見と同様に柱面上に広がっているものの、Ti では $(1\bar{1}01)$ 錐面に拡張した特異な転位芯構造が安定であることがわかった。近年、このような転位芯構造の違いが Ti と Zr の変形機構の違いに影響を与えることが指摘されており⁽²⁵⁾、第一原理計算に基づく転位芯構造の解析は重要な役割を果たしている。

本稿では、Mg 合金に対する転位運動について詳細に述べる。図10の純 Mg の $\langle a \rangle$ らせん転位が、底面、柱面、錐面を運動する際のエネルギー変化について検討を行った。ここで、それぞれの面を移動したと仮定して得られた安定配置を終状態として、11レプリカイメージによる NEB 計算によってエネルギー変化と遷移状態を求めた。NEB 解析から得られたエネルギー変化と柱面上を移動する転位芯構造の変化をそれぞれ図11(a)と(b)に示す。底面上の転位の移動のエネルギー障壁は非常に小さく、底面転位が極端に運動する実験結果とよく一致する。また、柱面と錐面上を転位が運動する際には底面に対して数十倍もの大きなエネルギー障壁を越える必要があり、Mg の構造に起因した塑性異方性の要因とな

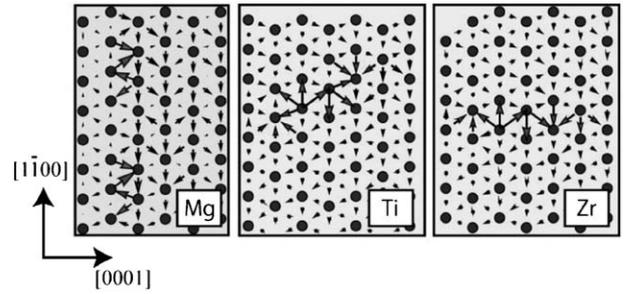


図10 HCP Mg, Ti, Zr に対する第一原理計算から得られた $\langle a \rangle$ 転位の安定構造。(オンラインカラー)

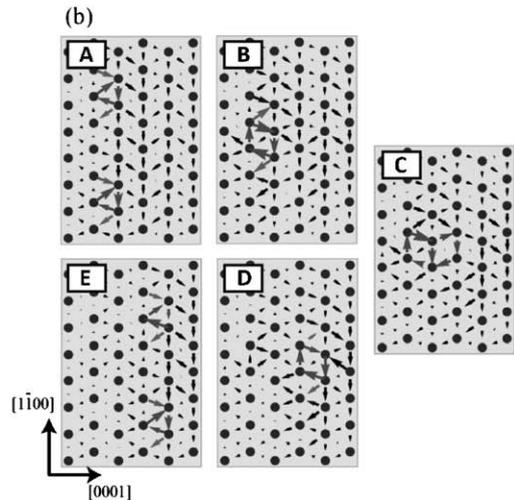
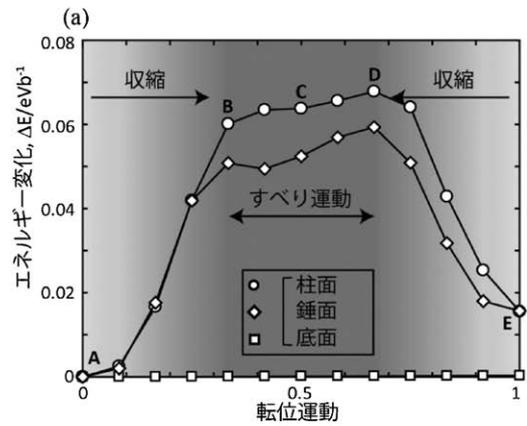


図11 純 Mg の底面、柱面、錐面上を運動する転位の (a) エネルギー変化と (b) 柱面上を転位が移動する際の転位芯構造の変化。(オンラインカラー)

ることが確認される。そこで、柱面上の転位の移動に着目し、最小エネルギー経路上の一部の転位の様子を DD マップを用いて示した。遷移状態の転位芯構造から、底面に拡張した転位が柱面上を運動する際には転位が収縮し、交差すべりを生じる必要があることがわかる。さらに、移動に必要なエネルギーの大部分が拡張した転位の収縮に要する一方、一端収縮した転位が非底面を運動する際のエネルギー障壁はそれに比べて十分小さいことがわかった。

図11の始状態と終状態では転位芯構造は全く同じである

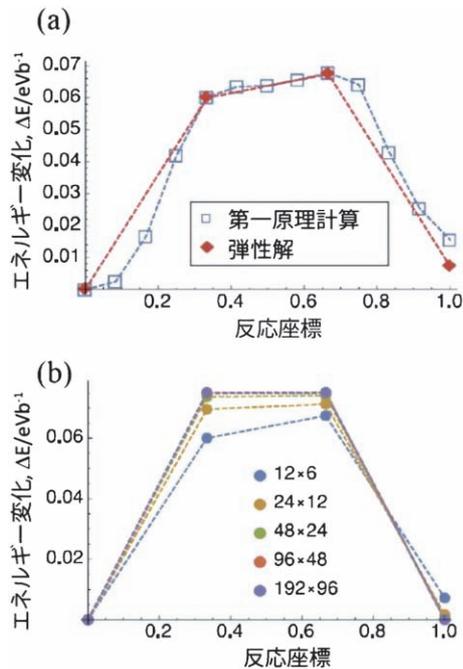


図12 純Mgの柱面上を運動する転位のエネルギー変化。(a)第一原理計算による結果と弾性エネルギーと積層欠陥エネルギーを考慮した解析解の比較。(c)解析解から得られるスーパーセルサイズの依存性。

が、0.018 eVのエネルギーの違いが生じている。この違いは図9で示した転位の相対位置の変化とy軸に沿ったz方向の線形変位による弾性エネルギー寄与に相当し、部分転位への拡張によってその影響が大きくなっている。この拡張した転位と収縮した転位において、第一原理計算と弾性論によるエネルギーを比較したものを図12(a)に示す。部分転位の収縮のエネルギーは弾性解と積層欠陥エネルギーによって正確に記述されるとともに、第一原理計算のスーパーセルの大きさによって周期境界中の弾性エネルギーの寄与が大きく影響することが確認される。転位の移動を考慮した場合のエネルギー変化に対するスーパーセルのサイズ依存性は図12(b)のように予想することができ、部分転位に拡張するMgでは特に大きいことがわかった。なお、相対位置を変えない転位運動のエネルギー変化が得られれば上記を考慮する必要はないが、合金元素が含まれる場合などでは相対位置をそろえることが困難であるため弾性エネルギーの寄与を評価する必要がある。

転位芯構造を決定する要因を検討するため、転位芯を構成するMg原子の電子状態を詳細に検討した。拡張転位の積層欠陥部と収縮した転位の転位芯近傍のMg原子の部分電子密度と局所状態密度をそれぞれ図13(a)と(b)および図13(c)と(d)に示す。その結果、純Mgにおいても、転位構造によって電子状態がわずかに異なることがわかった。大きく拡張した転位では電子状態は完全結晶中のものと大きな変化がないが、収縮した転位ではFermi準位近傍のp軌道で局所的に大きな変化が生じている。次に、合金元素による電子状態について、完全結晶中に合金元素が添加されたときの第

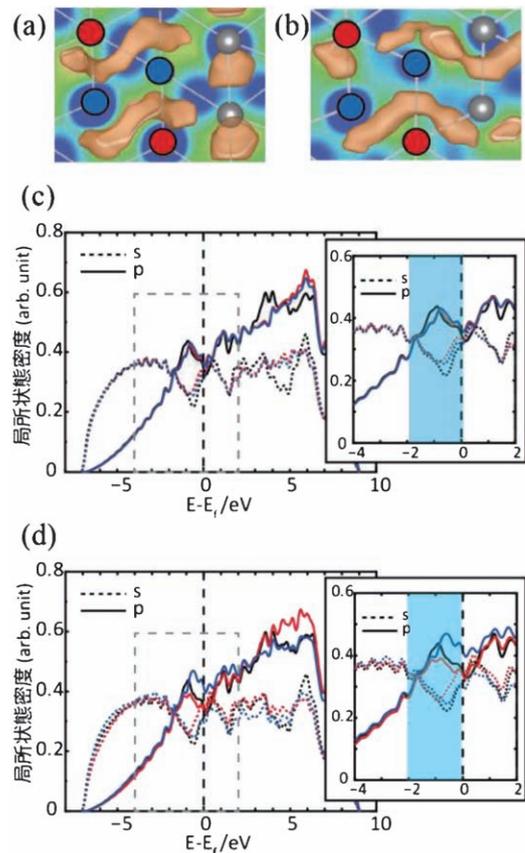


図13 純Mgの転位芯を構成するMg原子の部分電子密度と局所状態密度。(a)拡張転位の積層欠陥と(b)収縮した転位の-2~0 eVのエネルギーにある部分電子密度。(c)積層欠陥部と(d)収縮した転位の局所状態密度。黒は無欠陥のMg原子、赤と青はそれぞれ(a)と(b)のMg原子の色付けと対応する。

一、第二近接に存在するMg原子のs, p軌道と合金元素のd軌道の部分状態密度を評価した結果をそれぞれ図14(b), (c)に示す。AlとZn近傍のMg原子は電子状態に大きな変化を生じない一方、YやTiではFermi準位近傍のp軌道が変化することがわかった。同様の傾向が、CaやZrについても観察された。この状態は、図13(d)の転位が収縮した状態のMgの電子状態に類似しており、合金元素によってMgの欠陥構造の局所的な安定性に变化が生じる可能性を示唆している。合金元素がMg中に固溶するとき、Fermi準位近傍でAlやZnはd軌道の状態は存在しないか非常に少ないが、Y, Ca, Ti, Zrは近い傾向を示し、Fermi準位近傍に多くの状態が存在する。このことから、これらの合金元素はMgとの間にp-d軌道間の混成を生じMgの状態に大きな影響を与えると考えられる。Mg中でd軌道の状態が異なるAlとYを例に、実際に転位近傍に固溶した場合の転位芯構造と電子密度を図15に示す。Alでは図14(b)が示すようにMgとの電子的な相互作用は見られず、その結果Alが転位のごく近傍に存在しても純Mgの場合と同様に拡張転位として存在する。一方で、Yでは周囲のMg原子の電子構造を大きく変化させ、拡張していた転位は収縮した状態に変化する

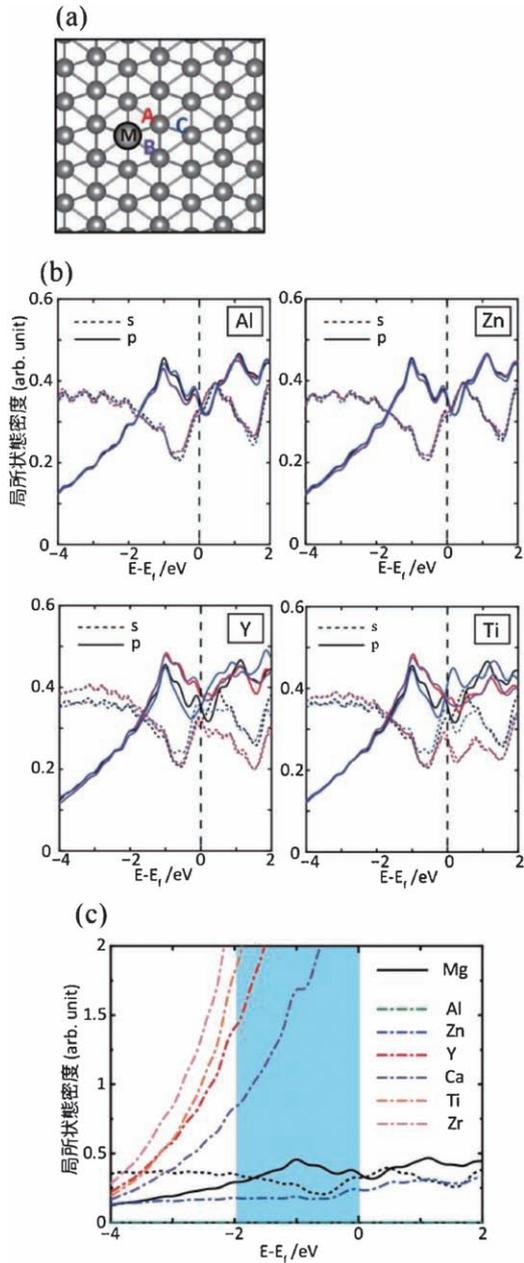


図14 Mg中に合金元素が固溶した状態の局所状態密度。(a)合金元素と近傍のMg原子。(b)合金元素近傍のMgに対するs, p軌道。それぞれの色は(a)の位置のMg原子に対応する。(c)Mg中に固溶した合金元素のd軌道。

ことが確認された。これにより、Yなどの一部の合金元素ではMgの電子状態を変化させ、拡張転位よりも収縮した転位が安定になる効果を生じることが予想される。最後に、図11の純Mgと同様の解析を行い、Yが固溶した場合の転位運動の移動エネルギーと遷移状態を図16に示す。純Mgにおける転位の非底面運動から予想されるように、収縮した転位の運動のエネルギー障壁は小さいため、Y添加によって収縮した転位の柱面への運動は純Mgのものに比べて大きく低下することがわかった。以上の解析から、Y元素近傍で拡張転位が収縮して交差すべりに必要なエネルギーを低減することにより、柱面などの非底面すべりを生じやすくす

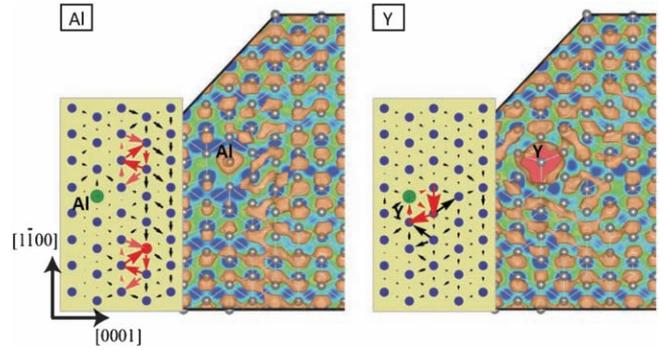


図15 転位芯近傍にAlとYが存在する場合の転位芯構造のDDベクトルと電子密度分布。

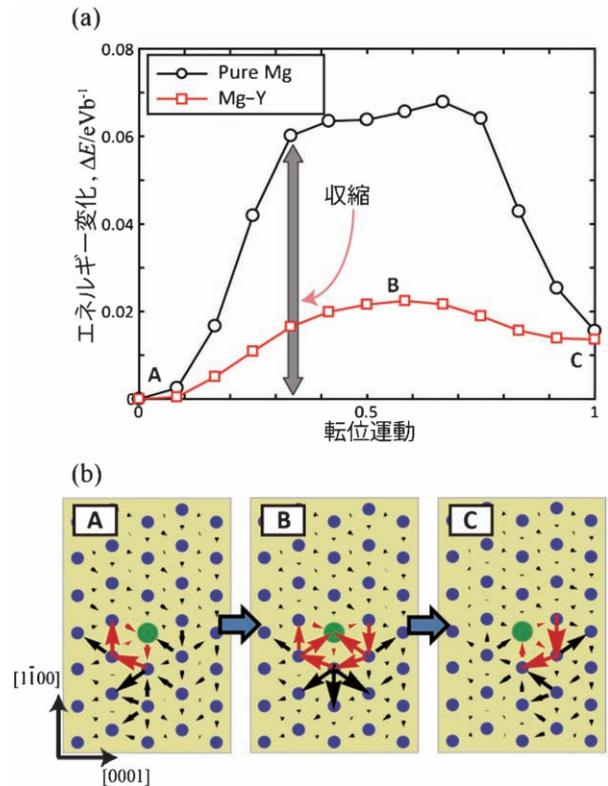


図16 転位芯近傍にYが存在する場合に転位が柱面上を運動する際の(a)エネルギー変化と(b)移動過程の転位芯構造の変化。

る効果を生じることが確認された。その結果、底面と非底面の塑性変形の異方性が低減し、延性が向上する要因となることが明らかになった⁽²⁶⁾。Mgの底面すべり以外の塑性変形の素過程として、 $\langle c+a \rangle$ 転位の運動についても第一原理計算によって詳細なすべり運動が明らかになっており⁽²⁷⁾、Mg合金の脆性破壊の要因となる双晶変形に対しても、実験と第一原理計算との連携によって一部の元素の固溶によって界面強化がなされることが確認されている⁽²⁸⁾。以上のように、電子状態に基づく解析によって合金元素がもたらす機械特性への影響を体系的に評価することが可能になり、希土類元素などの希少元素を用いない元素戦略に基づく合金設計への応用が期待される。

中性子線による金属材料の組織と 弾塑性変形挙動の解析 (I)

—測定対象と方法—

友 田 陽*

1.1 はじめに

金属材料の応力状態とマイクロ組織の評価・解析に電子線、X線、中性子線等の量子線散乱回折が利用されている。ビーム径を0.1 nm程度まで絞れる電子線は空間分解能に優れるが透過力が弱く薄膜あるいは試料表面層の情報のみが得られる。一方、中性子線はサブmm程度の空間分解能であるが、原子核および不対電子のみで散乱するため透過力は強く物体内部あるいは全体の情報を得るのに適している。X線は両者の中間の特徴を有する。中性子線はJIS規格の材料試験片全断面を対象にしても多重回折の影響は小さく、通常、運動学(kinetic)回折理論のみで扱われ、動力学(dynamic)回折理論による解析を必要としない。薄膜作製や鏡面研磨等の面倒な試験片加工を必要とせず機械部品等はそのまま測定できる利点がある。マイクロ組織と弾塑性変形挙動の定量的関係を解析するにはnm~cmのサイズ範囲をカバーする微視的~巨視的観察・測定が望まれる。しかし、空間分解能と透過能が両立する探索子は存在しないことから「樹をみて森もみる」研究を進めるためには、複数の測定法を併用する必要がある。

本講座では、中性子散乱回折法による応力・組織の測定法とその特徴を概説し(第1回)、続いて材料製造プロセス中のマイクロ組織形成(第2回)、弾塑性変形(第3回)における時分割その場測定の現状を解説する。

1.2 中性子線利用の特徴

実験に用いられる中性子線は原子炉あるいは加速器により発生される。定常波の前者では単色化して角度分散(Angular Dispersion: AD)法が、パルス中性子線の後者では飛行時間(Time of Flight: TOF)法が使われることが多い。2つの方法の違いについて回折を例にブラッグの式を用いて説明する。

$$2d_{hkl} \sin \theta = \lambda \quad (1.1)$$

ここで d_{hkl} は hkl 格子面間隔、 θ は入射角(散乱角の1/2)、 λ は波長である。波長一定の中性子線を用いて θ を変化させながら回折強度を計測する方法がAD法であり、パルス中性子線を用いて異なる波長 λ の中性子が検出器へ到達するまでの時間を計測して回折プロファイルを得る方法がTOF法(θ 固定)である。いずれの方法も横軸を式(1.1)により d_{hkl} に変換して、得られた回折強度をプロットできるので、測定対象が λ か θ かの違いである。

中性子線による測定法には、回折、小角散乱、透過イメージング(ブラッグエッジほか)を始め反射率、非弾性散乱、即発 γ 線分析等の多様な方法があり、応力・組織評価に汎用される最初の3つの概要を図1.1に示した。ここで、(a)は光学系、(b)は小角散乱と回折で得られるスペクトルの模式図で、ブラッグエッジスペクトルは回折等の残渣に相当する。図の横軸は散乱(あるいは波数)ベクトルの大きさ $q (=4\pi \sin \theta/\lambda)$ である。実際の測定例を後の図1.4, 1.7, 1.8で示す。そ

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

Characterization of Microstructures and Elasto-plastic Deformation Behavior of Metals and Alloys Using Neutron Beam (1) —Targets and Methods of Measurements—; Yo Tomota (Research Center for Structural Materials, National Institute for Materials Science, Tsukuba)

Keywords: *neutron beam, diffraction, small angle scattering, Bragg edge, profile analysis, transmission*

2016年2月1日受理[doi:10.2320/materia.56.14]

それぞれ得られる知見が異なるので、単独測定のみでなくハイブリッド測定も行われる。

試料に入射された量子線入射強度 (I_0) の試料内飛行距離 (x) の増加に伴う減衰は次式で表される。

$$I(x) = I_0 \exp(-\mu x) \quad (1.2)$$

ここで、 $I(x)$ はビーム強度、 μ は吸収係数を表し、熱中性子線 (波長 0.2 nm) および高エネルギー X 線 (波長 0.03 nm) における $I(x)$ と x の関係は図 1.2 のようになる。Fe に対する中性子線と高エネルギー X 線の透過を比べると大きな差がある。透過法により鉄鋼材料の観察を行うには、電子線の場合は数 10 nm 厚さ、実験室 X 線では数 10 μm 、高エネルギー X 線ではサブ mm の薄膜にする必要があるが、中性子線では数 cm の厚さでも測定が可能である。空間分解能は電子線が最も優れており、次に X 線、中性子線の順になる。したがって、表面あるいは薄膜を対象にした結晶粒内のナノ・マイクロ組織分布や応力分布は電子線や X 線を用いて測定し、試料深部もしくは試料全体の平均情報を中性子線で測定するのが好ましい。巨視的の平均を求めるには数千個の結晶粒が測

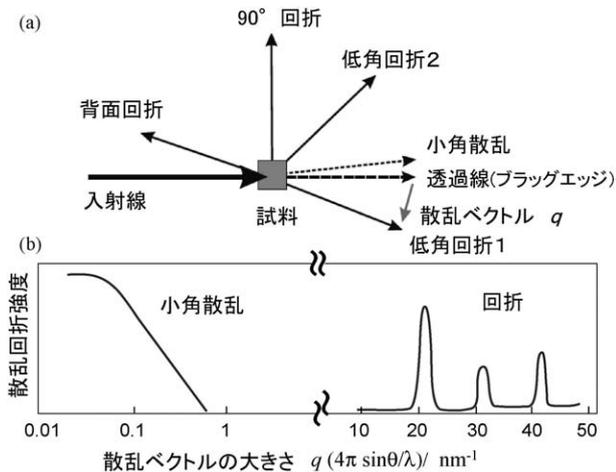


図 1.1 中性子線の試料による散乱回折と散乱ベクトル q (a) およびスペクトル (b) の模式的説明 (低角回折 1 → 低角回折 2 → $2\theta = 90^\circ$ 回折 → 背面回折と分解能が高くなる。透過線ベクトルと散乱回折ベクトルのベクトル差が散乱ベクトル q と呼ばれる)。

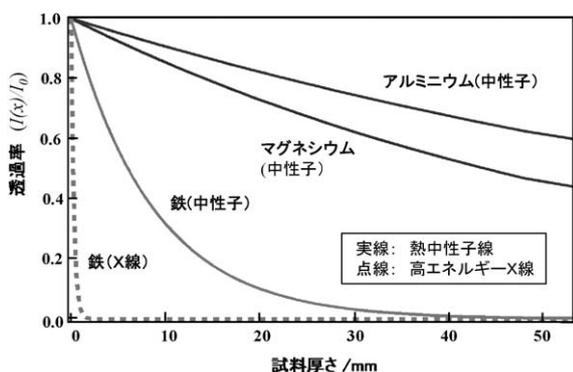


図 1.2 中性子線および X 線の減衰曲線。

定 (照射) 領域 (gauge volume) 内に含まれることが望ましい。そのため、X 線の透過し易い合金でも結晶粒径が数 10 μm の試料では、巨視的の平均情報を得るためには 5 mm × 5 mm 程度の中性子線を使うのが好ましい。

1.3 残留応力 (弾性ひずみ) の評価

電子線、X 線、中性子線を問わず回折法では、金属材料中の構成相の格子面間隔 d_{hkl} の変化から弾性ひずみを測定して線形弾性構成式 (Hooke の式) により応力を算出する⁽¹⁾。

$$\sigma_{ij} = C_{ijkl} \varepsilon_{kl} \quad (1.3)$$

ここで、 σ_{ij} と ε_{kl} は応力とひずみのテンソル、 C_{ijkl} は弾性係数を表す。応力を求めるには、主軸が既知の場合でも直交 3 方向の線ひずみが必要であるため、ある方向の弾性ひずみ測定のみで終わり応力が求められない場合がある。

実用金属材料の多くは複数以上の構成相からなる多結晶体である。熱処理や塑性加工を受けた材料のマイクロ組織状態に対応して生じる残留応力は、第一種応力 (試料平均: 巨視的の応力)、第二種応力 (構成相内の平均値: 相応力および $\langle hkl \rangle$ 結晶粒群の平均値: 粒応力)、および第三種応力 (結晶粒内の変化量: 粒内応力) に分けられる⁽¹⁾⁽²⁾。外力負荷なしの場合、たとえば相応力は残留相応力と呼ぶべきであるが、外力下でも同様な分類になるので簡単のため本稿では「残留」を省略し、巨視的の応力、相応力、粒応力、粒内応力と呼ぶ。図 1.3 は引張塑性変形を受けた二相合金試料の断面における残留応力分布の模式図である。平面応力状態の試料表面は拘束が少なく内部に比べて塑性変形し易いので、引張塑性ひずみが大きく除荷すると圧縮応力が残留する。マイクロ組織との関係に注目すると、塑性変形の大きい軟質相と小さい硬質相の残留応力は異なり、巨視的の応力との差を相応力 (圧縮および引張) と定義する。また、同じ構成相内でも個々の結晶粒によって塑性ひずみが異なり、「巨視的の応力と相応力の和 (図参照)」に対する「引張方向 $\langle hkl \rangle$ の結晶粒群における平均値」の差が粒応力である。さらに、個々の結晶粒内において転位

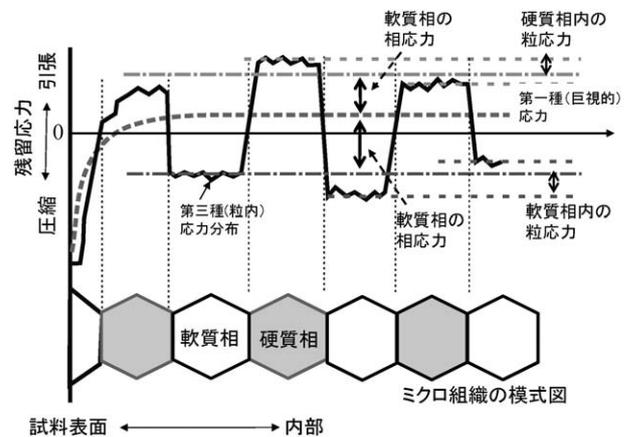


図 1.3 引張変形後の 2 相合金の残留応力分布の模式図: 第一種 (巨視的)、第二種 (相および粒) と第三種 (粒内) 残留応力の説明。

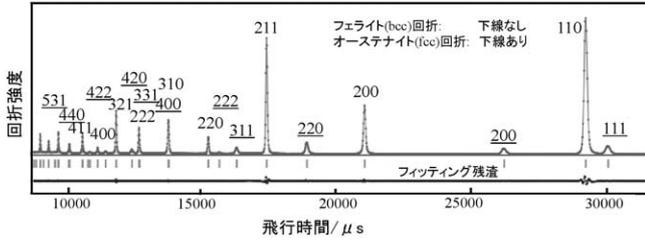


図1.4 TOF法によるフェライト-オーステナイト2相鋼の中性子回折プロファイル(S. Harjo: 匠/J-PARCによる測定例).

組織等の格子欠陥に起因する残留応力の変化が第三種応力(粒内応力)である。したがって、物体内の任意の点における応力は、巨視的応力、相応力、粒応力および粒内応力の総和で表される⁽³⁾。ここでは、二相合金における応力測定と解析法について説明するが、単相合金の場合は相応力をゼロと置けばよい。

中性子 TOF 法で得られたフェライト (α : bcc)-オーステナイト (γ : fcc)二相鋼の回折プロファイル例を図1.4に示す。個々の hkl 回折ピークは多くの結晶粒の中で散乱ベクトルと $\langle hkl \rangle$ が同じ方向を向いた結晶粒群からの中性子回折の総和で、ピーク中心位置から平均 $\{hkl\}$ 面間隔 d_{hkl} が求められる。 λ 一定のとき、式(1.1)より

$$\frac{\Delta d}{d} = -\cot \theta \cdot \Delta \theta \quad (1.4)$$

なので、回折分解能は図1.1(a)において背面($\theta \rightarrow 90^\circ$)を使うと高くなり、低角($\theta \rightarrow 0^\circ$)になるほど低下する。

応力が存在しない状態の面間隔 d_{hkl}^0 が既知であると $\langle hkl \rangle$ 粒群の散乱ベクトル方向の粒ひずみが

$$\varepsilon_{hkl} = \frac{d_{hkl} - d_{hkl}^0}{d_{hkl}^0} \quad (1.5)$$

で与えられる。ここで回折対象となる $\langle hkl \rangle$ 粒群はその直角方向には種々な $\langle hkl \rangle$ を有するので、直交3方向のひずみを同じ結晶粒群に対して測定することはできない。

図1.4に示すようにリートベルト解析によって精緻化した各構成相の格子定数 (a_{phase}) を求めれば、次式により3方向の相ひずみが得られる。

$$\varepsilon_{\text{phase}} = \frac{a_{\text{phase}} - a_{\text{phase}}^0}{a_{\text{phase}}^0} \quad (1.6)$$

ここで、 a_{phase}^0 は無応力状態の格子定数である。各構成相の単相多結晶におけるバルク弾性係数を用いて式(1.3)により各構成相が負担している応力 ($\sigma_{ij}^\alpha, \sigma_{ij}^\gamma$) を計算すれば、力のつり合い条件により巨視的応力 (σ_{ij}^A) が算出される。

$$\sigma_{ij}^A = \sigma_{ij}^\alpha f^\alpha + \sigma_{ij}^\gamma f^\gamma \quad (1.7)$$

ここで、 f^α と f^γ は構成相の体積率であり、巨視的応力との差、 $(\sigma_{ij}^\alpha - \sigma_{ij}^A)$ と $(\sigma_{ij}^\gamma - \sigma_{ij}^A)$ が相応力である。二相合金では、これらの巨視的応力と相応力に加えて図1.3で示したように粒応力と粒内応力が重畳する。ここで、式(1.7)において $f^\gamma = 0$ とおけば $\sigma_{ij}^A = \sigma_{ij}^\alpha$ となり α 単相鋼の場合になる。すなわち、TOF法では多くの hkl 回折ピークが同時に得られるの

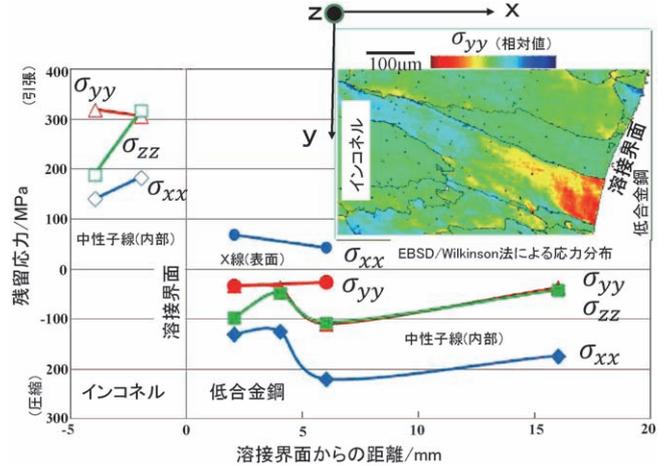


図1.5 中性子線およびX線回折により求めたインコネル・低合金異材溶接部の残留応力分布とEBSD/Wilkinson法による残留応力分布(挿入図)。

で、単相合金でも二相合金でも式(1.3)と式(1.6)を用いて巨視的応力を算出することができる。

一方、AD法においては回折弾性係数(回折ヤング率 E_{hkl}^D および回折ポアソン比 ν_{hkl}^D) と呼ばれる値を用いて式(1.5)の ε_{hkl} から巨視的応力が同定されている。 E_{hkl}^D と ν_{hkl}^D はあらかじめ引張外力(巨視的応力)を負荷しながら軸方向とその垂直方向の ε_{hkl} を実験で求めて決定するか、Krönerモデル⁽⁴⁾等の理論計算によって与えられる。 hkl 回折面がひとつの場合に使われる便宜的な方法である。詳細は割愛するが、一般のX線応力測定でもひとつの hkl 回折を選択し回折弾性係数を用いた効率的な測定法が用いられている。

インコネル・低合金鋼溶接部材(板厚 25 mm)の残留応力測定例⁽⁵⁾を図1.5に示す。試料表面の残留応力分布はX線回折で測定される。中心部(表面から 12.5 mm)の応力は中性子回折でのみ測定でき、他の手法では得られない貴重な結果が得られる。ただし、測定ゲージ体積 $2 \text{ mm} \times 2 \text{ mm} \times 2 \text{ mm}$ 内の平均値である。応力腐食割れを検討するためには粒界近傍や個々の結晶粒内部の応力分布の知見が重要なので、切断・研磨後にSEM/EBSD法で測定を試みたが、挿入図のように切断による応力緩和後の定性的な傾向しか得られなかった。物体深部の結晶粒内の応力分布を測定する非破壊検査法は存在しないので、各種測定法による結果と計算シミュレーションを組み合わせることで総合的に検討することが望まれる。

1.4 集合組織および構成相体積率の測定

中性子回折を用いると光学系を固定した状態で測定試料を回転するのみで完全極点図を得ることができ、試料全体を代表する方位分布関数(ODF)を得ることができる。入射線内に試料を完浴させた測定の様子を図1.6(a)に示す。球状試料を作製すれば吸収補正の必要もなく最も正確な測定法となる(立方体でもほとんど問題ない)。(b)はAD法により求めたIF鋼の完全極点図である⁽⁶⁾⁽⁷⁾。これらは試料表面層のみの

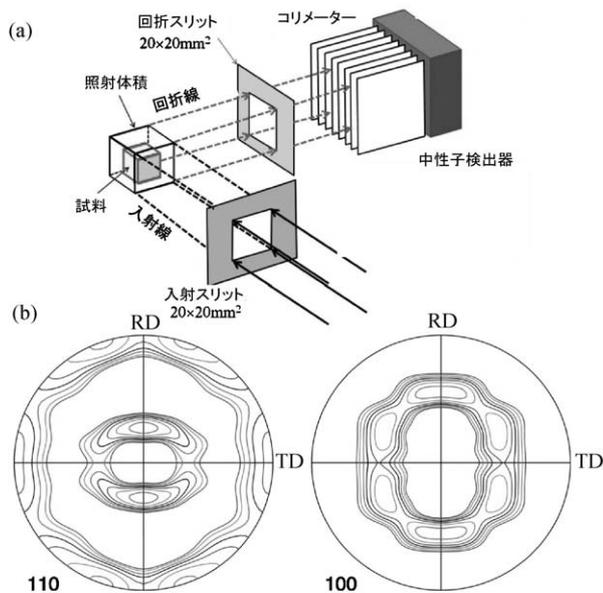


図1.6 中性子回折 AD法による集合組織測定法の概略 (a)とIF鋼の110と100完全極点図測定例(b).

部分的情報を測定するX線や電子線とは異なる中性子回折法ならではの長である。中性子回折TOF法では多くの方向に検出器を置いて図1.4のような中性子回折プロファイルと同時に測定できる。そのため、数回の試料回転で短時間にODF作成用データを取得でき、次回述べるように集合組織形成過程を時分割その場測定するのに適している⁽⁸⁾。

多相材料では回折強度から構成相の体積率が同定できる。先進鉄鋼材料では準安定 γ を利用することが多いが、表面層はマルテンサイト変態し易いので内部に比べて体積率が低いことが多い。安定度の低い残留 γ を含む鉄鋼材料では、TEM観察、SEM/EBSD測定、X線回折、中性子回折の順に γ 量の測定値が大きくなる⁽⁹⁾。力学特性を議論するには試料全体の平均値が得られる中性子回折が適当であるが、集合組織が強い鋼では補正が難しく、集合組織と構成相体積率を合わせて測定するのがよい。

集合組織や残留 γ は透過ブラッグエッジ法でも測定できる。図1.7に α - γ 二相ステンレス鋼のブラッグエッジスペクトル⁽¹⁰⁾を示す。リートベルト法に類似した解析プログラム(RITS)⁽¹¹⁾を使うと γ 相体積率が40%と求まり、EBSDの結果(43%)に近い値が得られている。ブラッグエッジ法は中性子回折に比べて分解能が低いので精度は劣るが、走査することなく透過スペクトルの2次元分布が得られる。2次元イメージング測定の利点から、日本刀や火縄銃等の文化財研究にも用いられている。

1.5 ミクロ組織の測定

力学特性に影響を及ぼすミクロ組織のサイズと形態は各種顕微鏡観察により調べられているが、それらの定量化は容易でない。組織サイズには母相結晶粒径、介在物、析出物や転

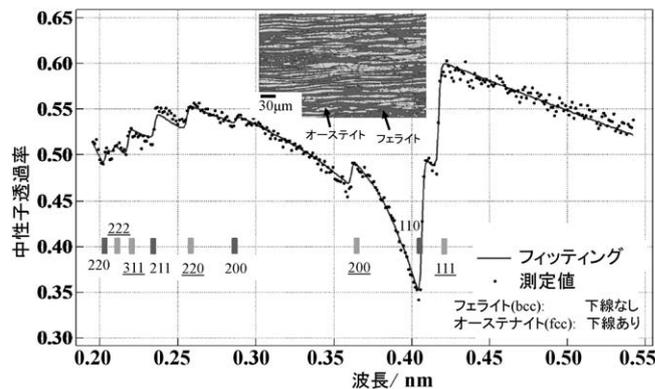


図1.7 市販2相ステンレス鋼のブラッグエッジスペクトルの例(EBSD/相マップを挿入)。

位セルの大きさ等がある。これらは中性子線による回折、小角散乱、ブラッグエッジから同定される。回折ピークの幅が因子のひとつが回折モザイク(coherently diffracting domain)サイズである。粒径が数10 nm以下の試料では他の手法による結果と良い一致が得られている⁽¹²⁾が、工業用金属材料の結晶粒径の測定には不適當な場合が多い。その理由は粒径が1 μm 以上になると回折ラインブロードニングへ及ぼす影響がきわめて小さくなり転位等による影響から分離して評価することが難しいこと、さらに転位組織が存在すると局所的に結晶方位が変化し前述したモザイクがセル等の転位組織に対応する領域になるためである。

数 μm 以上の母相結晶粒径の評価にはブラッグエッジ測定が有望である。結晶の完全度に依存する中性子線強度変化(Primary extinction)や多重回折は透過線の強さに大きく影響を及ぼす(個々の hkl 回折線強さにも影響する)ので、これを利用すると結晶粒径が推定される。実際に、前述した解析ソフトRITS⁽¹¹⁾を用いて、厚さ5~20 mmの曲げ加工した試料等の2次元粒径分布が測定されている⁽¹⁰⁾。

金属材料における析出物や介在物は体積率が小さく中性子回折ピークが弱いのでプロファイル解析から粒径を同定することは難しい。小角散乱はいわば透過線の幅がりに相当し、不均質体(粒子)と母相の中性子散乱コントラスト差に起因する散乱強度の変化が図1.1の散乱プロファイルに現れる。中性子小角散乱を用いると第二相粒子のサイズ分布、形状、体積率(数密度)等に関する定量的知見が得られる⁽¹³⁾。パーライト鋼(Fe-0.8 mass% C合金)のセメント球状化処理に伴う小角散乱プロファイルの変化⁽¹⁴⁾を図1.8に示す。測定は1 Tの磁場印加下で行い、図は磁気散乱を分離した核散乱強度の値である。小角散乱では図1.1(b)で示したように q の増加に伴って曲線が傾いてゆく領域A(ギニエ領域)に続いて線形領域B(ポロド領域)が現れるのが典型的である。図1.8では、最初の平坦な領域を確認するには測定 q 範囲が不足しているが、ギニエ領域の理論的勾配は平板で-2、球で-4なので、焼鈍によって球状化が進行する様子が推察される。また、焼鈍時間が長い試料ほどポロド領域の散乱強度が

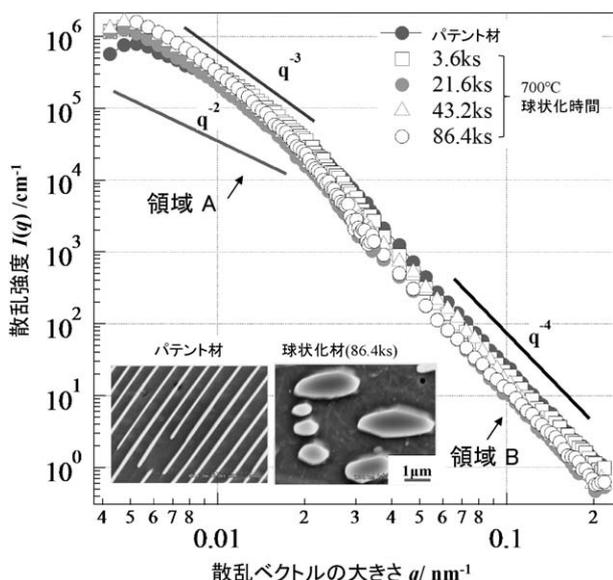


図1.8 パーライト鋼のセメンタイト球状化による小角散乱プロファイルの変化(SEM組織を挿入).

減少するのはセメンタイト相が球状化・粗大化するため二相界面の総面積が減少したことに起因する．このように小角散乱は鉄鋼中のセメンタイトや非金属介在物のような粗大第二相に対しても利用できる(特にポロド領域)が、高分解能TEM観察でも捉えがたいナノ析出物の量や形状を定量的に測定できることが注目すべき特長である．大沼らはX線と中性子小角散乱強度を絶対値化して、両者の元素に対する散乱コントラストの差異を利用してナノ析出物の化学組成を同定する方法を提案している⁽¹⁵⁾．

1.6 格子欠陥の評価

従来からX線回折を用いて半値幅によるWilliamson-Hall法⁽¹⁶⁾を使って転位密度が同定されているが問題点も多い．TEMによる転位線の観察法と同様に、転位線のひずみ場に起因する回折プロファイルの幅広がり、入射ビームの方向、パーガースペクトル、転位線方向と弾性係数(鉄や銅は弾性異方性が大きいので特に重要)の影響を受けるので、近年、これらを理論的に考慮した転位コントラスト因子がUngárらによって導入され、修正Williamson-Hall法と修正Warren-Averbach法を組み合わせた解析⁽¹⁷⁾が使われるようになった．X線や中性子線回折プロファイルの幅広がり、の要因には図1.9(a)に示すように、弾性ひずみ分布(転位線や整合析出物に起因)、回折モザイクサイズ、面欠陥(積層欠陥や双晶)等があり、半値幅のみを取り上げて評価するのは不十分であった．最近、開発されたConvolutional Multiple Whole Profile(CMWP)法⁽¹⁸⁾では多数のX線回折ピークを対象にプロファイル全体を合成理論関数でフィットすることにより、転位に関しては密度だけでなく性格(刃状とらせんの割合)と配列が求められるようになった．転位配列因子

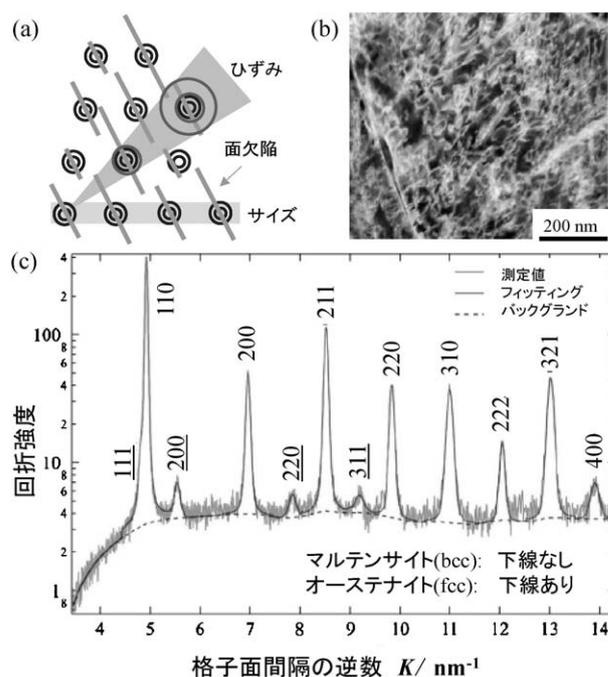


図1.9 焼入れマルテンサイト鋼のマイクロ組織解析例；(a) 3つの原因によるラインブロードニングの模式的説明，(b) STEM-環状暗視野(ADF)像(ビーム// $\langle 111 \rangle$)，(c) CMWP解析例(片対数プロット)：横軸は q でも構わないが、通常は $K(=1/d_{hkl}=2 \sin \theta/\lambda=q/2\pi)$ が用いられる．

M^* は $Rep^{0.5}$ で定義され、転位線周りに生まれる応力場の臨界半径 Re と転位密度 ρ で表される．ランダム分布では $M^* \gg 1$ 、ダイポールやポリゴニゼーションが進むと $M^* < 1$ になる．この方法は加速器中性子源TOF法にも適用が可能であり今後の発展が期待される．例として焼入れマルテンサイト鋼(0.22C-0.87Si-1.64Mn-0.0015B mass%)のCMWP法による解析例を図1.9(c)に示す．求められた転位密度は $3.0 \times 10^{15} \text{ m}^{-2}$ で、図1.9(b)のようなTEM観察により求めた値の約2倍であった⁽¹⁹⁾．この方法により焼戻しや引張変形に伴う転位密度・配列・性格の変化が追跡できることを次回以降で述べる．中性子・X線回折ラインプロファイル解析の最近の進歩に関しては文献⁽²⁰⁾を参照されたい．

金属材料の応力とマイクロ組織評価において中性子回折、小角散乱およびブラッグエッジが魅力のある発展途上の測定法であることを紹介した．その魅力は材料製造中(第二回)や力学特性発現中(第三回)のその場測定において倍増する．なお、本稿は著者の以前の研究室(茨城大学)に在籍された方々のご支援により作成できたことを付記する．(つづく)

文 献

- (1) M. E. Fitzpatrick and A. Lodini: Analysis of Residual Stress by Diffraction using Neutron and Synchrotron Radiation, Taylor & Francis, (2003).
- (2) M. T. Huchings, P. J. Withers, T. M. Holden and T. Lorenz: Introduction to the Characterization of Residual Stress by

真にナノスケールのインデンテーション試験による複合材料硬度測定法

増田 秀樹*

1. はじめに

複合材料の構造緻密化が進み、材料の機械的性能だけでなく、材料を構成する微細な複合組織までを設計した材料開発が求められている。このため、微細組織構造を観察するとともに、微細組織や組織同士の界面といったナノメートルスケールの構造に対応した物性値を取得して、個々の微細構造の物性と材料全体の性能との関係を明らかにすることが求められている。本稿では、物性値の一例として材料の機械的特性(硬度)に注目する。硬度の計測は、マイクロビッカース硬度試験⁽¹⁾をはじめとして、マイクロメートルスケールではすでによく確立されている⁽²⁾⁻⁽⁴⁾。例えばマイクロビッカース硬度試験では、決められた四角錐形状のダイヤモンド圧子を使用することで、硬度の直接的な比較が可能になっている。規定の圧子を用いて、 z 方向の高分解能化を行ったのがいわゆるナノインデンテーション法(NI)である⁽⁵⁾。バルクスケール材料や、薄膜材料の解析において活躍している。一方で、たとえばビッカースで規定された圧子の先端開き角は 136° と鈍いため、押し込み深さに対する投影断面積は大きな

り、結果 xy 方向の空間分解能は犠牲になっている。このことは応力が分散して、圧痕を得るために必要な荷重を増加させることにもつながっている。

図1には、マイクロビッカース試験機(Shimadzu, HMV-G)を用いて計測したビッカース圧痕の光学顕微鏡像の例を示している。図1(a)のような一般的な金属では問題はないが、硬く脆性のある SiO_2 においては、押し付けの際に圧痕の端からクラックが生じることがあり、圧痕の計測に影響を及ぼしている可能性がある(図1(b))。また、 $10\ \mu\text{m}$ 程度の球状粒子を析出している球状黒鉛鉄の断面では、圧痕に複数の組織が含まれて、組織ごとの硬度計測ができなくなる(図1(c))といった問題が生じている。

この問題を解決するために、原子間力顕微鏡(AFM)を用いたNIを導入する⁽⁶⁾。AFMで用いるカンチレバーの先端に、先端開き角の小さな鋭いダイヤモンド探針を装着することで、圧痕の微小化を実現している。AFM-NIで用いる圧子は、規定の圧子とは形状が異なる。そこでマイクロビッカース試験の結果と直接比較するために、同じ物質で同じ硬度が計測される際には圧痕の体積が同じ(すなわち荷重が同じ)であると仮定して、圧子の形状の違いを補正し、ナノスケー

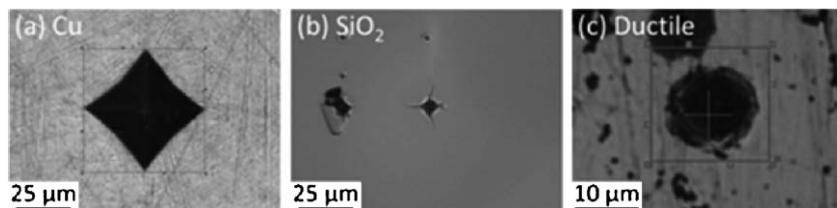


図1 マイクロビッカース試験機による圧痕の光学顕微鏡像。(a) Cu, (b) SiO_2 , (c) ダクタイル鉄の上で計測。

* 物質・材料研究機構；NIMS ポストドク研究員(〒350-0047 つくば市千現 1-2-1)
Hardness Measurement of Composite Materials Using Nanoscale Indentation Test; Hideki Masuda(Research Center for Advanced Measurement and Characterization, National Institute for Materials Science, Tsukuba)
Keywords: atomic force microscopy-nanoindentation, spherical graphite, ductile casted iron, Raman spectroscopy
2016年7月25日受理[doi:10.2320/materia.56.20]

ルの硬度分布計測手法の確立をめざした。本稿では、著者らの行っている研究のうち、AFM-NI からビッカース硬度を得るための換算と、球状黒鉛鋳鉄中での硬度分布計測実施例⁽⁷⁾を紹介する。

2. AFM-NI 法と硬度換算

NI は、市販の AFM (Bruker, multimode8) を用いて行った。圧子には、市販のカンチレバー (Artech Carbon LLC, ART D300) にマウントされているダイヤモンド探針を用いた。探針の形状はほぼ完全な円錐型であり (図 2(a)), その先端開き半角は 5° 、先端曲率半径は約 10 nm であった (図 2(b))。図 2(c) には、この円錐型探針の形状とビッカース圧子 (4 角錐) の形状を模式的に示している。これらの圧子を用いて同じ力で硬度試験したとき、その硬度にどの程度差異が生じるかを図 2(d) に示す。円錐型の圧子で四角錐型の圧子と同じ硬度を得るためには、 83° ほどの開き半角が必要である。本研究で使用する探針の先端開き半角 (5°) では、7.5 倍ほど大きな硬度が算出されるため、AFM-NI では探針の形状補正が必須となる (後述)。

今回使用したカンチレバーのばね定数はおよそ 40 N/m である。カンチレバーの反り感度は、実験直前にサファイア基板上でキャリブレーションした。インデンテーションは各点でおよそ 1 Hz にて行い、最大荷重はおよそ 30 μ N で行った。AFM で圧痕を直接観察し⁽⁶⁾、得られた画像からいわゆる 2 軸平均半径を計測し、圧子の形状から押し込み体積と接触面

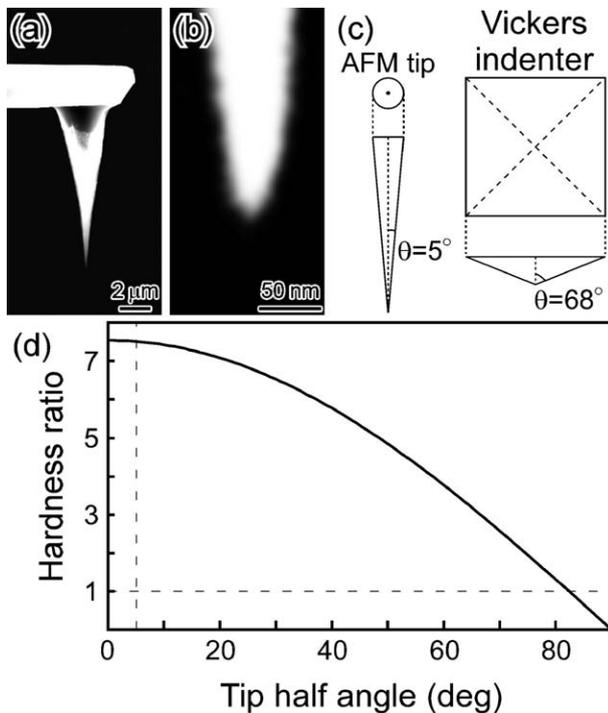


図 2 AFM-NI で用いる探針の形状と効果。(a), (b) 探針の SEM 像, (c) 探針とビッカース圧子の形状模式図, (d) AFM-NI の硬度をビッカース硬度の要領で算出したときの探針形状と硬度の変化。

積を算出した。このとき、特に圧痕のサイズ ($2r_c$) が圧子の先端半径に近づくと、完全な円錐モデル (図 3(a)) では再現できなくなる。先端が半球のモデル (図 3(b)) を用いて補正を行った。図 3(c) には、円錐モデルと先端半球モデル ($r_a = 10$ nm) の体積比を、圧痕投影面積の半径についてあらわしたものである。単純な円錐モデルだけでは、圧痕が小さいほど異常に硬度が低く算出されることを示している。

一般に用いられるビッカース硬度試験では、最大荷重 (P_{\max}) を接触面積 (A_{Contact}) で除して硬度を算出している:

$$H_{\text{Vickers}}(d) = 0.102 \times \frac{F_{\text{Max}}}{A_{\text{Contact}}(d)} = 0.102 \times \frac{2 \sin(68^\circ) F_{\text{Max}}}{d^2} \quad (1)$$

本研究で用いた圧子で得られた硬度をマイクロビッカース試験と直接比較できるように、面積項の変換を行った。

$$H_{\text{Vickers}}(d) = H_{\text{NI}}(r) = 0.102 \times \frac{F_{\text{Max}}}{\alpha} \quad (2)$$

ここで α は、変換によって得られるビッカース圧子での接触面積を表す。この α は、異なる圧子が同じ体積をもつという仮定から定義される。

$$\frac{1}{\alpha} = 8\sqrt{2} \pi \sin(68^\circ) \tan(68^\circ) \left(\frac{r^3}{\tan(5^\circ)} - \frac{r_a^3}{\tan(5^\circ)} + 2r_a^3 \right)^{-2/3} \quad (3)$$

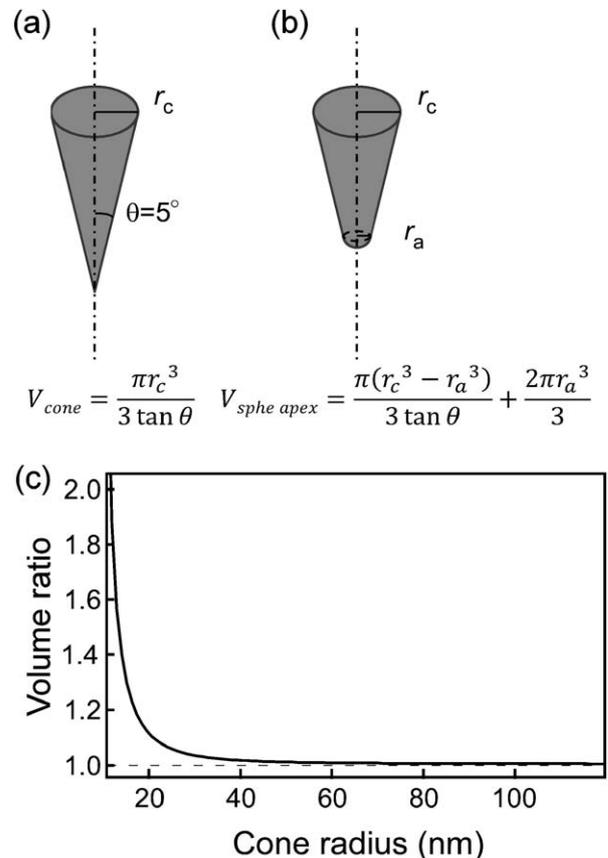


図 3 探針形状モデルと体積の変化。(a) 完全円錐モデル, (b) 先端半球型円錐モデル, (c) 底面半径に対する 2 つのモデルの体積比。

ここで r は圧痕の投影面積の半径であり、 r_a は探針先端の曲率半径を表す。 r_a が含まれる項は、探針の先端形状を再現するための補正項である。実際に鋳鉄のマトリクス上で計測したNI硬度は、式(2)を用いて 150 ± 20 と算出された。この値はマイクロビッカースで計測した値(200 ± 20 , 荷重 245 mN時)と比べてわずかに小さい程度である。

3. 球状黒鉛鋳鉄中の硬度分布計測

球状黒鉛を析出している鋳鉄である、市販のダクタイル棒材を切断・研磨して、AFM-NIによる硬度分布計測に用いた。この材料の組成は、表1に示す通りである。

図4に、NI後の球状黒鉛粒子のAFM像を示す。図4(a)に示すような、 $15 \mu\text{m}$ 程度の球状黒鉛の断面を観察した。黒鉛の形態は、これまで報告されている断面観察の結果と類似している⁽⁸⁾⁽⁹⁾。中央部分にはMgOやMgSなど、球状体の形成核となる粒子が存在している⁽¹⁰⁾。図4(b)はNIを行った箇所の拡大図である。金属酸化物の核粒子を含まないように、ほぼ等間隔に圧痕試験した。図中の c, d, e は、対応する圧痕像を取得したおおよその位置を示す。図4(c)-(e)はそれぞれ、鋳鉄マトリクス、球状黒鉛粒子中、および同粒子中のナノ構造での圧痕像である。図4(e)に示す圧痕は非常に小さい。

図5には、図4(b)の左端から右端にかけて計測した硬度の分布をプロットした。記号 $c-e$ はそれぞれ、図4(c)-(e)の圧痕からの寄与を示す。球状黒鉛領域の硬度は主に、100-200に分布した。この硬度は、鋳鉄マトリクスで計測された硬度に近い(160, marked c)。一方で、2000を超える高い硬度も球状黒鉛領域で計測されている(marked e)この

硬度は、グラファイトというよりはダイヤモンドライクカーボン(DLC)などで計測される値に近い⁽¹¹⁾。これらの結果から、実際にはこの球状黒鉛粒子は図4(d)に示すようなグラファイトナノ結晶の集合体であると予想した。ナノ結晶の境界(図4(e))に、グラファイトより大きな硬度を示す炭素構造を含んでいると考えられる。

ナノカーボンの結晶構造をより考察するために、NI試験した同じ断面で、球状黒鉛粒子のラマン散乱スペクトルを取得した。図6は室温下、532 nmのレーザーを用いてNanophoton, Raman Touch-VIS-NIRで計測したラマン散乱スペクトルを示す。このスペクトルには、D, G, D', およびG'バンドのピークに加えて、 $1000-1700 \text{ cm}^{-1}$ にブロードなピークが観察されている。Gバンドピークは、グラフェ

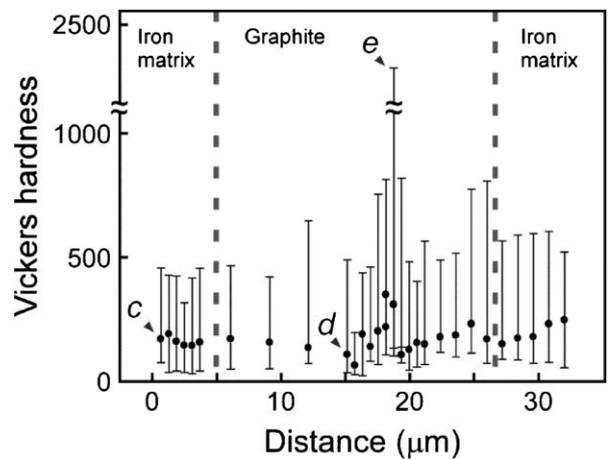


図5 AFM-NIで計測した球状黒鉛のビッカース硬度分布。

表1 本研究で用いたダクタイル鋳鉄の組成(wt%)。

Alloy	C	Si	Mn	Mg	S	N	P	Ce	Al	Ca	Fe
D4	3.63	2.73	0.46	0.02	0.004	0.003	0.022	0.01	0.01	<0.01	balance

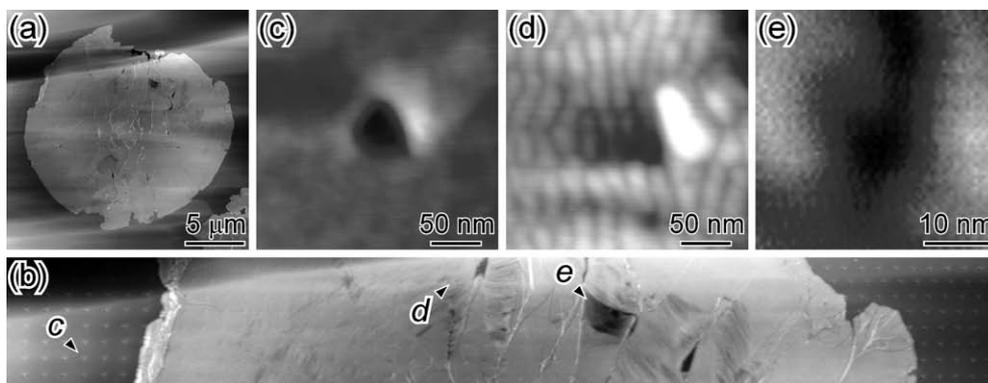


図4 ダクタイル鋳鉄中に析出した球状黒鉛のAFM像。(a) AFM-NI後の粒子全景、(b) 圧痕試験部の拡大図、(c) 鋳鉄マトリクス部分での圧痕、(d) 球状黒鉛部での圧痕、(e) 球状黒鉛部のナノ結晶界面部にてきた圧痕。

パワーモジュール用アルミ一体型基板の開発

小山内英世¹⁾ 結城 整哉²⁾ 井手口 悟³⁾ 菅原 章^{**}

1. はじめに

近年、電気エネルギーを高効率で変換するインバータやコンバータの使用量が省エネルギー目的で増えている。

インバータやコンバータには民生用途から産業、電鉄、自動車用途に幅広く使われており、産業、電鉄、自動車用途にはパワーモジュールと呼ばれるケース型の半導体パッケージが使われている。

パワーモジュールは図1に示すように半導体素子の他に金属-セラミックス基板、ベース板等から構成され、これらは半田で接合され、さらにアルミワイヤーや銅のバスバー電極で結線され、シリコンゲル、ケースで封止される。

パワーモジュール運転時は、半導体素子のスイッチング時に損失する電気エネルギーが、熱エネルギーとして放出されるため、素子の保護を目的とし、熱を逃がす必要がある。そのため、各部材は熱伝導率の高い材料が好ましく、回路基板としては金属-セラミックス基板が使われている。また従来のパワーモジュールは素子、金属-セラミックス基板、ベース板と多種の材料が半田で接合された構造となっており、半田材料は熱伝導率が高くないことや、組み立てが複雑でかつ接合界面が多いことから、構造のシンプル化や半田を使わない構造のニーズが高い。さらに素子製造技術やゲート電極構造の進化による高集積化が多数報告されており、この面でもパ

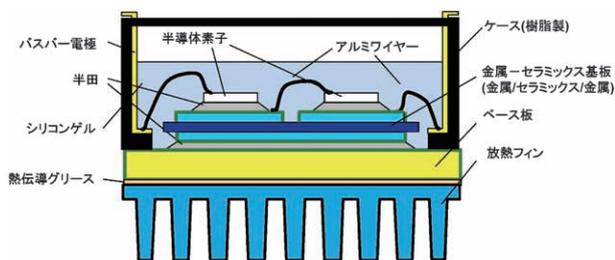


図1 パワーモジュール断面構造模式図。

* DOWA パワーデバイス株式会社：1)取締役開発部長 2)開発部新規開発課リーダー 3)開発部プロセス開発課長

** DOWA メタルテック株式会社代表取締役社長
Development of Aluminum Integrated Substrates for Power Modules; Hideyo Osanai*, Seiya Yuki*, Satoru Ideguchi* and Akira Sugawara** (*DOWA POWERDEVICE Co., Ltd. **DOWA METALTECH Co., Ltd.)

2016年9月12日受理[doi:10.2320/materia.56.24]

ッケージの放熱性向上のニーズは大きい⁽¹⁾⁽²⁾。

筆者らは、これらを鑑み、金属-セラミック基板とベース板の一体構造化について、基板の材料、接合方法および接合体の構造を検討し、アルミ一体型基板を開発した。

2. 材料、接合方法の選定

絶縁材には一般的に樹脂やゴム、セラミックスといった材料があるが、熱伝導率の観点からセラミックスが好ましく、アルミナ、窒化アルミニウム、窒化珪素などが一般的に使用されている。表1にその代表的な特性を示す。

一方で、電気回路はコスト面や電気伝導率の面から銅やアルミニウムを使うのが一般的であるが、前述のセラミックスとこれら金属を接合させた場合、線膨張係数のミスマッチが課題となる。表2に金属およびセラミックスの代表特性を示す。

接合した材料間に線膨張係数差があると、パワーモジュールを運転して素子が発熱した場合、接合体には線膨張係数差起因による応力が発生し、剥離や反り変形が起こる可能性がある。接合させないという選択肢もあるが、セラミックスと金属材料を接触させた場合、微小な空隙が生じると放電の発生や熱伝達のロスの問題があり、基本的には接合させた方が好ましい。

表1 各セラミックスの代表特性。

	熱伝導率 (W/m·K)	曲げ強度 (MPa)	絶縁耐圧 (kV/mm)	価格
アルミナ	24	400	23	安価
窒化アルミニウム	170	550	23	やや高価
窒化珪素	90	650	20	やや高価

表2 金属およびセラミックスの代表特性。

	熱伝導率(W/m·K)	線膨張係数(10 ⁻⁶ /K)
銅(99.9%)	397	17
アルミニウム(99.9%)	238	24
アルミナ	24	6~8
窒化アルミニウム	170	4~5
窒化珪素	90	2~3

表3 金属およびセラミックスの代表的接合方法.

	接合対象	接合温度	接合強度
DBC法	銅とアルミナ	1,000~1,100°C	△
AMB法	銅と窒化物セラミックス	750~850°C	○
アルミ溶湯接合法	アルミニウムと各セラミックス	700~800°C	◎

表4 各接合体のピール強度.

接合体	接合方法	ピール強度(N/cm)
銅とアルミナ	DBC法	100~150
銅と窒化アルミニウム	AMB法	150~200
アルミニウムと窒化アルミニウム	アルミ溶湯接合法	300~350

次に前述のセラミックスと金属の接合方法であるが、一般的にDBC(Direct Bonding of Copper)法, AMB(Active Metal Brazing)法, アルミ溶湯接合法などがある. その特徴を表3に示す.

DBC法は銅とアルミナの直接接合法であり, 最も古くから使用されてきた接合方法である. 簡便であるが相対的に接合強度が弱く, また接合温度が高いため, 接合体への残留応力が残りやすい.

AMB法は銅と窒化物セラミックスを活性金属を含むろう材で接合する方法である. ろう材を使うことで接合強度が比較的高いが, ろう材の主成分に銀が使われること, ろう材をハンドリングする工程が必要など, DBC法に比べコストが高い.

アルミ溶湯法は著者らが独自に量産技術を開発してきた方法⁽³⁾で, 雰囲気中で加熱した鋳型にアルミニウムの溶湯を流し込み, 接合と鋳造を同時に行う方法であり, コストが低い. また本方法は接合強度が非常に高く, 接合ポイドができてにくい特徴がある. ここで著者らが各方法で接合した接合体についてピール強度試験を実施した結果を表4に示す.

アルミ溶湯法で接合したアルミニウムと窒化アルミニウム接合体のピール強度が最も大きい値であった. これはアルミ溶湯法の接合プロセスがセラミックス表面をアルミ溶湯で徐々に濡らしていく形をとっており, 他方法に比べ接合ポイドが生じにくいからである.

前述した各材料, 接合方法を比較検討し, 一体型基板に最適なものとしてアルミ溶湯接合法を選択した. 理由は, (1)もっとも接合強度が高い(接合欠陥ができてにくい), (2)鋳造法の一つであり, 複雑な形状をつくることのできることにある.

3. 構造の検討

金属-セラミック基板とベース板を一体構造化した接合体の構造について検討した. 材料としてはアルミ溶湯法を用いることから, 金属としてはアルミニウム(純度99.9%), セラミックスとしては表1に示した熱伝導率と強度のバランスから窒化アルミニウムを選択した. これらの一体構造化を検討するために, アルミベースの片面にセラミック一枚を接

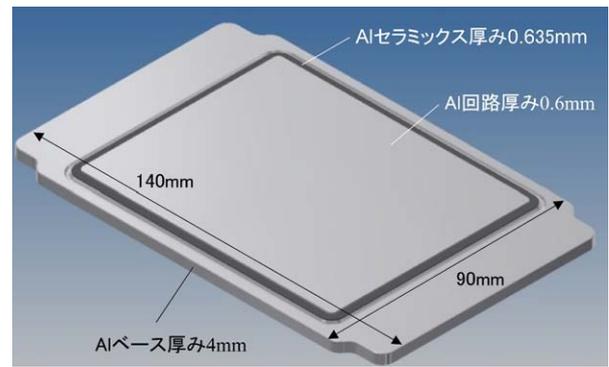


図2 アルミ一体型基板(セラミック一枚)解析モデル.

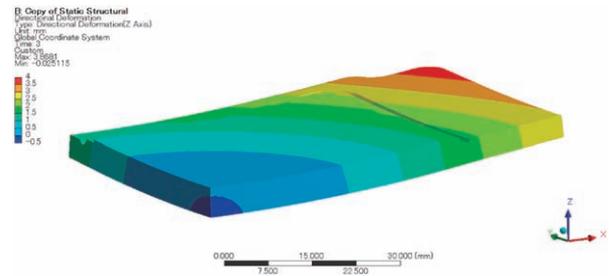


図3(a) 270°C加熱時のZ方向変位コンター図(1/4モデル).

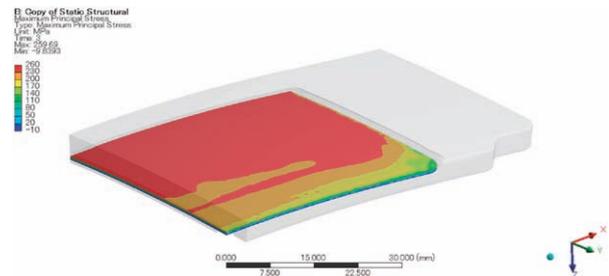


図3(b) 270°C加熱時のセラミック裏面への応力コンター図(1/4モデル).

合した構造の接合体とアルミベースの両面にセラミック二枚を接合した構造体を考案し, 以下の方法で比較検討した. パワーモジュール組立時にかかる最大温度を270°Cと想定し, 有限要素法を用いて270°Cで発生する反り変形量およびセラミックスにかかる最大主応力を弾塑性解析した. 解析領域は1/4とし, アンシス社メカニカルを使用した. 前者の解析モデルを図2に示す.

図3に解析結果を示す. セラミックスに発生する最大主応力は約260MPaで比較的小さいが, 反り変形量は約4mmと大きな値を示した.

前述の計算結果を実証するために接合体を作成して加熱評価を行った. 加熱中の反り量はほぼ計算結果と同等であった. 以上からこの構造では加熱時に反り変形が大きく発生し, 組み立てが困難なため, 製品として成り立たないことがわかった.

後者は加熱時の反りを抑えることを目的とし, 厚み方向に材料構成が対称になるようセラミックを二枚使った新構造を考案した. この構造の解析モデルを図4に示す. このモデルについても270°Cで発生する反りおよびセラミックスにか

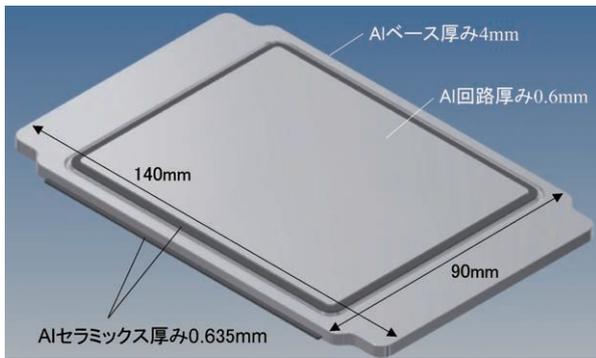


図4 アルミー一体型基板(セラミックス二枚)解析モデル.

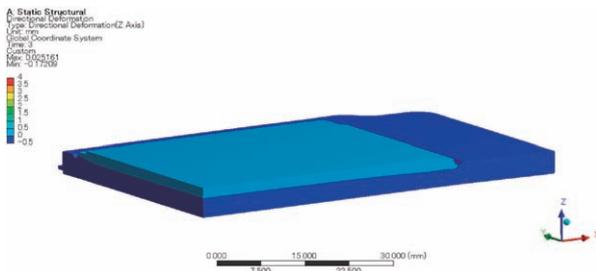


図5(a) 270°C加熱時のZ方向変位コンター図(1/4モデル).

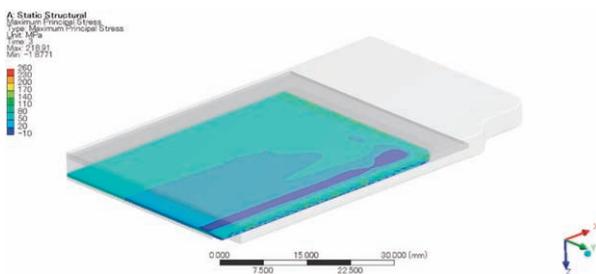


図5(b) 270°C加熱時のセラミックス裏面への応力コンター図(1/4モデル).

かる最大主応力を弾塑性解析した結果を図5に示す。

セラミックスを二枚使用した構造では、反りはセラミックス一枚の構造と比べ大幅に小さく、ほぼフラットを維持し、かつセラミックスに発生する最大主応力も1/3以下の約80MPaになることがわかった。

この結果を実証するため、図6に示す接合体を作成し加熱評価を行った(n=6)。加熱中の反り量は計算結果とほぼ同等で、十分に実用に耐えるものであることがわかった。

4. 信頼性評価

前章で検討したセラミックスを二枚使用した構造の接合体の信頼性の評価を実施した(n=6)。加熱評価したサンプルを低温側-40°C、高温側150°Cの液槽ヒートショック1,000サイクルの試験に供した。試験後に、セラミックスのクラックや接合界面の剥離の有無を観察した。図7に結果の一例を示す。

ヒートショック試験1,000サイクル経過後でも6サンプルともにセラミックスのクラック発生はなく、接合界面での剥離も見られなかった。セラミックスを二枚使用した接合体は



図6 実際の接合体写真.

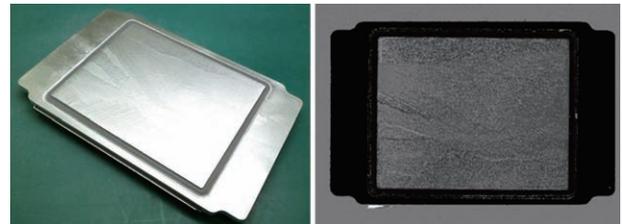


図7 (左)試験後の外観、(右)同、接合界面の超音波探傷像.

十分な信頼性を有すると結論づけられる結果であった。

従来技術では一体構造化も達成されておらず、本報告で示したような大面積のセラミック基板もセラミックスのクラックや半田接合部のクラックの問題で使用できなかった。本技術で開発した接合体は、一体構造化だけでなく、大型のセラミックスを使用できる画期的製品であることが確認された。

5. 結 言

著者らはこれまで成し遂げられていなかった金属-セラミックス基板とベース板の一体構造化に成功した。接合には接合強度が高く、接合欠陥が起きにくいアルミ溶湯接合法を適用し、厚み方向に材料構成が対称になるようセラミックスを二枚使った構造を考案、採用することで、一体構造化を困難としていた材料の線膨張係数差起因による反り変形を抑制しつつ、長期ヒートサイクル経過後も接合界面に剥離が起らないアルミー一体型基板を実現した。

この技術の確立により、大面積の半田接合をなくし、信頼性の大幅な向上とともに、銅を使用しないことで約60%の軽量化、大型基板使用での回路集積化による低コスト化を達成した。本製品はこれまで新エネルギー用途を中心に約10万台の出荷実績があり、関連する特許も国内49件、海外16件権利化されている⁽⁴⁾。またさらに本基板、本技術に改良を加え、EV、HEV等の自動車用途への展開を検討中で、パワーデバイス産業の発展にさらに貢献できるものと考えている。

文 献

- (1) K. Takahashi, S. Yoshiwatari and Y. Sekino: FUJI ELECTRIC REVIEW, **56**(2010), 56-59.
- (2) M. Sawada, S. Yoshiwatari, H. Ichikawa, Y. Onozawa, O. Ikawa and T. Heinzl: PCIM Europe Proceedings, (2016), 824-830.
- (3) 高橋貴幸, 中村潤二, 沢辺明朝, 小山内英世, 菅原 章: Journal of MMIJ, **124**(2008), 333-336.
- (4) 例えば: 小山内英世, 風呂正博: 金属セラミックス回路基板, 特許第4756200号, (2011).

チョクラスキー法による Fe-Ga 基磁歪合金の大型単結晶製造技術の開発

南都十輝^{*1)} 安藤宏孝^{*1)} 渡邊清和^{*2)} 高橋和也^{*2)} 福田承生^{*3)}
 上野敏幸^{**} 川又 透^{**1)} 藤枝 俊^{**1)} 鈴木 茂^{**2)}

1. はじめに

エネルギーハーベスティング(環境発電)は、身近な微小エネルギーを利用する技術であり、欧米を中心に盛んに研究されている⁽¹⁾。この技術による発電量は比較的低いものの、IoT(モノのインターネット)社会に使われるセンサーや無線通信等に用いる電源に利用できる。我が国のナノテクノロジー・材料の研究分野においても、高効率エネルギー利用のための革新的材料の技術開発が重視されており⁽²⁾、それに関連して微小エネルギーを利用した革新的環境発電技術の開発課題が科学技術振興機構等で取り上げられている。たとえば、身の回りの振動エネルギーは、磁歪材料を用いて電気エネルギーへ変換することが可能であり⁽³⁾、そのための優れた磁歪特性を示す材料として Fe-Ga 合金が注目されている⁽⁴⁾⁻⁽⁶⁾。これまで、磁歪材料として粗大粒からなる多結晶の比較的小型の棒状の Fe-Ga 合金が市販されていたが、その結晶方位の集積度は十分でなかった。このため、振動発電等に Fe-Ga 基合金の大型単結晶の製造技術の開発が求められていた。本技術開発では、結晶成長等に関する困難な技術課題に取り組み、この合金単結晶育成の技術開発に成功した。本稿では、それらの技術開発の要点について紹介するとともに、このプロセスにより製造した合金単結晶の特性等について述べる。

2. 単結晶育成上の課題

体心立方構造の Fe-Ga 基合金の磁歪特性は、結晶方位に大きく依存し、 $\langle 001 \rangle$ 方向に大きな磁歪を示す。このため、この合金を振動発電用デバイス等として用いるときには、振動方向と結晶方位の関係を考慮する必要がある。しかし、この合金の単結晶を融液法で育成するときには、凝固における組成変化が課題となる。図1は、Fe-Ga 系の Fe 側の平衡状態図を模式的に示している。平衡状態図では 20%Ga の合金を凝固させると、初晶として Fe 過剰の固相が出現し、さらに温度が下がると Ga の組成が徐々に高くなっていく。これまでの Fe-Ga 合金単結晶は、比較的小型の結晶を育成するブリッジマン法等により作製されていた。本技術開発では、単結晶の大型化に向けチョクラスキー法(CZ法)を採用し、それらの凝固に関する研究課題にも取り組んだ。本技術では育成する単結晶の化学組成に多少ばらつきがあっても、求められる特性を満足するため、凝固過程が複雑な単結晶でも育成できることを明らかにした。

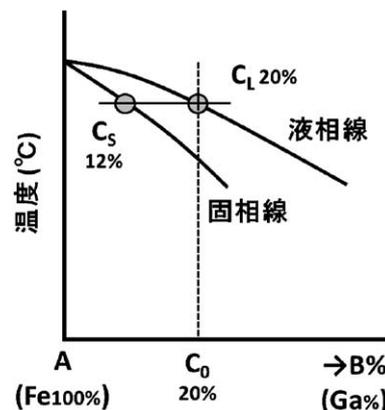


図1 1500°C付近における Fe 側の Fe-Ga 系の平衡状態図。

* 株式会社福田結晶技術研究所；1)社員，2)課長，3)社長

** 金沢大学理工学域；准教授

*** 東北大学多元物質科学研究所；1)助教，2)教授

Development of Growth Processes of Large-sized Single Crystals of Magnetostrictive Fe-Ga Base Alloys by the Czochralski Method; Toki Nanto*, Hiroyuki Ando*, Kiyokazu Watanabe*, Kazuya Takahashi*, Tsuguo Fukuda*, Toshiyuki Ueno**, Tohru Kawamata***, Shun Fujieda***, Shigeru Suzuki*** (*Fukuda Crystal Laboratory. **Kanazawa University. ***Tohoku University)

2016年10月21日受理[doi:10.2320/materia.56.27]

3. プロセス設計コンセプトと開発技術

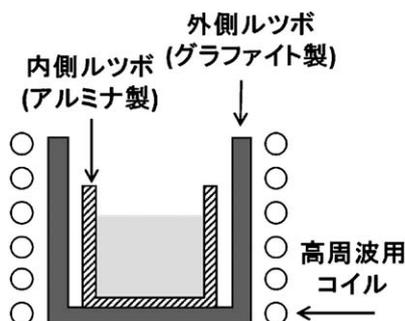
CZ法によるFe-Ga基合金の大型単結晶の製造技術の開発では、まずFe-Ga二元系合金単結晶を製造できるようにし、次にGaの一部を他の元素で置き換えることにより、多元系合金単結晶の育成技術の確立も目指した。

今回のFe-Ga基合金は、図1の平衡状態図に示したように、Gaの分配係数が1より小さいという特徴がある。このため、冷却過程で大きくGaの固液分配が異なるため融液界面が不安定になり、インゴット表面が平滑でなくなる可能性が高い。本技術開発ではこの課題を解決するために、インゴットの凝固時の温度勾配を制御した。

また、ブリッジマン法や一方向凝固法による単結晶育成では種結晶の方位制御に課題があるのに対し、CZ法では育成する結晶がルツボに接触していないため、目的の結晶方位の単結晶が比較的容易に得られる。また、CZ法の加熱炉の操業においては、ルツボの周囲に発熱体を置くことにより、安定した発熱により融体の温度を制御しやすくでき、電力消費量を低減できる。そこで本開発技術では、図2に示すように、グラファイト製の外側ルツボと外側ルツボ内に配置されたアルミナ製の内側ルツボとからなる二重ルツボとした。結晶育成においては、ルツボ内のFe-Ga原料融液に種結晶を接触させた後に、種結晶を引き上げて単結晶を育成させた。内側ルツボの材質はアルミナ以外の酸化物や非酸化物系セラミック製の耐火物でもよい。このような結晶引き上げに関する周辺技術により、単結晶育成の際にGa酸化物等の浮遊物発生が抑制され、浮遊物による結晶の多結晶化やポイド発生が防止された。

4. 開発合金の特性

今回のFe-Ga基合金の磁歪特性は、化学組成や結晶方位に依存するため、化学組成や結晶方位を系統的に評価した。育成したFe-Ga基合金を磁歪材料として実用するには、インゴットの単結晶の方位だけでなく、化学組成、表面性状、磁歪特性、磁区構造等も重要になる。インゴットの結晶方位は、シード結晶とほぼ同様であり、以下のようにして、表面性状等の特性に関する課題を解決してきた。



(1) インゴットにおける化学組成変動

インゴットの長さ方向の異なる場所から切り出した試験片の化学組成を分析し、各位置の磁歪量を測定した。その結果、インゴットの上部では仕込み組成よりFe量が多めであり、下部になるとGa量が多めになっていることを明らかにした。例として、初期Ga量が20%の合金素材を溶融し、長さ130mmのインゴットを作製したときのGaの組成変動幅は約3.5% (約14.0%-17.5%)であった。なお、それに対応した磁歪量は、合金中のGa量によってほぼ決まり、大よそ250ppm以上であった。これらの特性は、目標値の200ppmを上回っていた。

(2) インゴットの表面性状

インゴットの表面性状は、製品の歩留まりを向上させる上で非常に重要である。表面性状が悪い時にはインゴット内部に欠陥が残りがちが多く、それらの欠陥発生を抑制する点からも表面性状を良好にする必要がある。本技術開発では、インゴットの凝固時に適度な凝固方向への温度勾配をもたせることにより、インゴットの表面性状が良好になることを明らかにした。その例として、図3にチョコラルスキー法で小さい温度勾配で引き上げた合金、中程度の温度勾配で引き上げた合金、および大きな温度勾配で引き上げたFe-Ga合金単結晶の外観写真を示した。これらの結果は、温度勾配が大きいほど表面性状が良好であることを示している。このような結晶成長固時のプロセス条件の制御により、直径2インチ(約50mm)、長さ約150mm以上(世界最高レベル)の大きさのFe-Ga基合金単結晶の育成に成功した。

(3) インゴット各部位の磁歪特性

合金単結晶のインゴットの異なる部位から板状試料を切り出し、それらの磁歪特性を評価した。ここでは、磁歪量は板状試料の長手方向(ほぼ<001>)と直角方向に対して磁場を印加により生じるひずみ量の差として、データを整理した。CZ法とブリッジマン法による試料の結果を、図4にまとめて示した。磁歪は大よそ合金中のGa量によって決まり、適度な組成ではCZ法による合金の特性が優れていた。

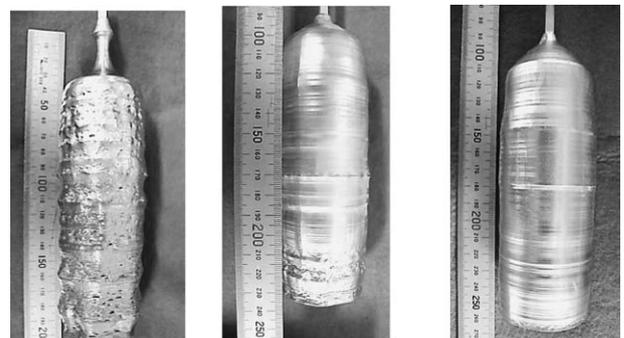


図3 チョクラスキー法の引き上げた表面性状が不十分な合金単結晶(左)、やや不十分な合金単結晶(中)、および表面性状に優れた合金単結晶(右)の外観写真。

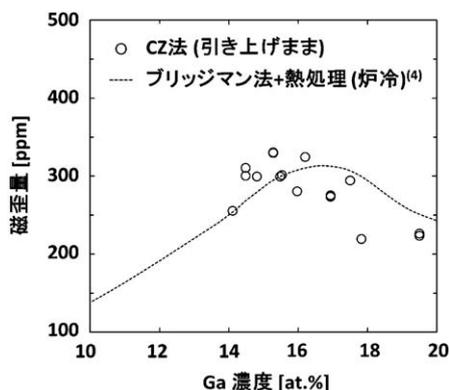


図4 磁歪のGa濃度依存性. 大型のCZ法による単結晶と小型ブリッジマン法による単結晶の磁歪量. Fe-Ga15%付近の組成で200 ppm以上の磁歪量が得られる.

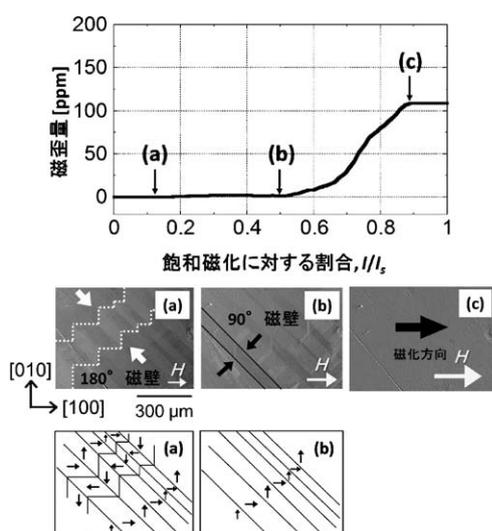


図5 磁場印加に伴うFe-Ga合金単結晶の磁歪変化(上), Kerr顕微鏡を用いた(001)面の磁区構造観察図(中)および磁区構造(矢印は磁気モーメントの方向)の模式図(下).

(4) 磁区構造

磁歪特性の発現には、合金中の磁区構造が重要な役割を演じているが、これまでの磁歪材料において磁区を観察した例は少ない。本技術開発においては、磁歪特性を最大限に発現させるために、育成した合金単結晶に対して磁場を印加しながら磁区観察を行った。Kerr効果顕微鏡により、磁場の増大に伴う合金単結晶の磁区構造の変化を観察した例を図5に示す。無磁場状態では、(a)に示すように、縞状の平行な 90° 磁壁およびジグザグ状の 180° 磁壁に囲まれた磁区構造となっていた。この状態に磁場を印加していくと、(b)に示すように、低磁場で 180° 磁壁が動き出すが、その段階では大きな磁歪は発生しなかった。さらに大きな磁場を印加すると、(c)に示すように、 90° 磁壁が動き出し、その時に大きな磁歪が発生することが明らかになった。

本研究開発では、これらの初期磁区構造と磁壁移動の過程を明らかにするだけでなく、外部応力印加による磁壁移動の

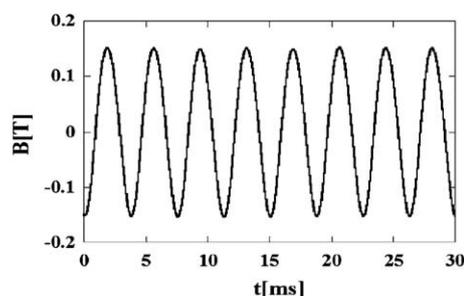


図6 約270 Hzの共振周波数で振動するFe-Ga合金単結晶からの磁束密度発生.

観察により、振動発電(外力による磁束密度変化)に関する 90° 磁壁が動きやすいという重要な知見も得ることができた⁽⁷⁾。これらの結果に対応し、図6は約270 Hzの共振周波数で板状のFe-Ga合金単結晶を低加速度で振動させたときに発生する磁束密度の時間変化の例を示している、これらの結果は、本合金単結晶により効率的な振動発電が可能であることを示している。以上の知見は、この合金単結晶をセンサーやアクチュエータのデバイス用に設計する上で非常に重要な結果となっている。

5. 実用化状況と今後の展望

本技術に関しては、特開2016-028831等の特許で開示されており、多元系合金単結晶の育成にも適用できる。育成した単結晶は、電器メーカー、機能性素材メーカー等へ供給しているとともに、学術機関等でも磁性の研究に利用されている。合金単結晶は、振動発電用デバイスだけでなくアクチュエータにも利用でき、さらに利用拡大が期待されている。本合金単結晶の各種デバイスへの応用においては、デバイスのサイズや利用形態に応じた単結晶を製造することも可能である。

本技術開発は、科学技術振興機構の復興促進プログラムや戦略的創造推進事業、文部科学省の人・環境と物質をつなぐイノベーション創出ダイナミック・アライアンスプロジェクト等の支援で行われた。関係各位に深く感謝申し上げたい。

文 献

- (1) S. Priya, D. Inman (Eds): Energy Harvesting Technologies, Springer (2009).
- (2) <http://www8.cao.go.jp/cstp/kihon3/bunyabetu6-2.pdf>
- (3) T. Ueno and S. Yamada: IEEE Trans. Magn., **47**(2011), 2407-2409.
- (4) A. E. Clark, K. B. Hathaway, M. Wun-Fogle, J. B. Restorff, T. A. Lograsso, V. M. Keppens, G. Pethculescu and R. A. Taylor: J. Appl. Phys., **93**(2003), 8621-8623.
- (5) S. Fujieda, S. Suzuki, A. Minato, T. Fukuda and T. Ueno: IEEE Trans. Magn., **50**(2014), 2505204-1-4.
- (6) 鈴木 茂, 藤枝 俊, 福田 承生: AEM 会誌, **24**(2016), 22-27.
- (7) S. Asano, S. Fujieda, S. Hashi, K. Ishiyama, T. Fukuda and S. Suzuki: IEEE Magn. Letters, in press.

船舶の衝突安全性に資する 包括的材料ソリューションの開発

市川和利^{*1)} 大川鉄平^{*1)} 白幡浩幸^{*1)} 柳田和寿^{*2)}
 中島清孝^{*3)} 小田直樹^{*3)} 山田安平^{*1)*} 戸澤 秀^{*2)*}
 紙田健二^{***} 船津裕二^{****}

1. 緒 言

重大海難事故の中で船舶の衝突・座礁は最も頻度が高い事故である⁽¹⁾。これらの事故による損傷・沈没は貴重な人命や資源を喪失させ、油漏洩等が生じれば、甚大な海洋環境汚染にも繋がるので、事故が万が一発生した場合の被害軽減策が世界的関心事項である。船体構造への非金属材料⁽²⁾⁽³⁾の導入や構造変更⁽⁴⁾ではなく、鋼材特性の向上により、船体重量や施工・検査の負荷を増加させずに、衝突や座礁による船舶の損傷を軽減し得る手法は経済合理性の観点からも現実的である。具体的には、伸びに優れた鋼板を被衝突船や衝突船の船体構造に適正に配置すれば、鋼板にて衝突エネルギーを吸収し、船舶の耐衝突性能を高めることができる。

新日鐵住金株式会社(以降、新日鐵住金)は、今治造船株式会社(以降、今治造船)、国立研究開発法人 海上・港湾・航空技術研究所の海上技術安全研究所(以降、NMRI)、一般財団法人 日本海事協会(以降、ClassNK)と連携して、船舶の衝突安全性に対する包括的船体材料ソリューションを提案している。

その一環として、新日鐵住金では永年の開発を経て、船体用高延性鋼 NSafe[®]-Hull(以降、本鋼)を開発した。新日鐵住金、今治造船と NMRI との共同研究による衝突シミュレーションで本鋼の効果を検証し、実船に適用した。

加えて、世界の衝突事故による被衝突船の損傷を最小限に抑えるためには、衝突船の安全性能も高めることが必要なので、衝突船の球状船首(バルバスバウ)用鋼材と構造に関しても、開発・実用化を行っている。

本論文では、このように、船舶の衝突安全性を向上させ、海洋環境を保護することを目的として船側部と船首部を包括して材料設計し、確立した材料ソリューションを紹介する。

2. 開 発 思 想

鋼板の衝突エネルギー吸収能を高めるには、その強度と延性の両方が優れている必要がある。本鋼では従来の船体用圧延鋼材(ClassNK 規則・検査要領)と同等の強度、靱性を有しつつ、伸びを従来鋼に比べて著しく向上させた。

一般に鋼材の強度と延性は相反し、それらの両立は難しいが、高強度鋼の一樣伸びの向上には、軟質相であるフェライトと硬質第二相からなる複合組織とすることが有効であり、各相の体積分率を適正化することで特性を高めることができる⁽⁵⁾。また、フェライトの細粒化強化は延性に対する悪影響が比較的小さい強化機構である⁽⁶⁾。さらに局部伸びの向上には、板厚方向の硬さ分布の均一化、第二相や介在物の微細分散などが有効である⁽⁷⁾⁽⁸⁾。本鋼では、化学成分適正化とTMCP(Thermo Mechanical Control Process)技術の活用により、フェライトと第二相の組織分率を最適化し、かつ第二相を微細分散させるマイクロ組織制御を行うことで、高強度と高延性の両立を可能にした。さらに、Sを極力低減するとともに介在物制御により、延性破壊のポイドの起点となり得る粗大介在物を排除し、伸びのばらつきを低減した。TMCP技術の活用により、炭素当量及び溶接割れ感受性組成を低減し、大入熱溶接熱影響部靱性を含む十分な溶接性を確保した。

3. NSafe[®]-Hull の特性

表1に本鋼の機械的性質の例を示す。引張試験にはNK U1号試験片を使用した。本鋼(板厚35 mm)の応力-ひずみ

* 新日鐵住金株式会社；1)主幹研究員，2)主査，3)主幹

** 海上・港湾・航空技術研究所；

1)海難事故解析センター 副センター長，2)研究特命主管

*** 今治造船株式会社；執行役員

**** 日本海事協会；プロジェクトマネージャー

Development of Holistic Solution to Improve Crashworthiness of Ships; Kazutoshi Ichikawa*, Tepei Okawa*, Hiroyuki Shirahata*, Kazuhisa Yanagita*, Kiyotaka Nakashima*, Naoki Oda*, Yasuhira Yamada**, Shigeru Tozawa**, Kenji Kamita*** and Yuji Funatsu**** (*Nippon Steel & Sumitomo Metal Corporation. **National Institute of Maritime, Port and Aviation Technology. ***Imabari Shipbuilding CO., LTD.. ****ClassNK)

2016年10月17日受理[doi:10.2320/materia.56.30]

表1 NSafe®-Hull の機械的性質例.

鋼 板厚(mm)	降伏点(N/mm ²)	引張強度(N/mm ²)	伸び(%)
A 11	410	517	30
B 18	389	508	33
C 26	384	509	32
D 35	381	505	33

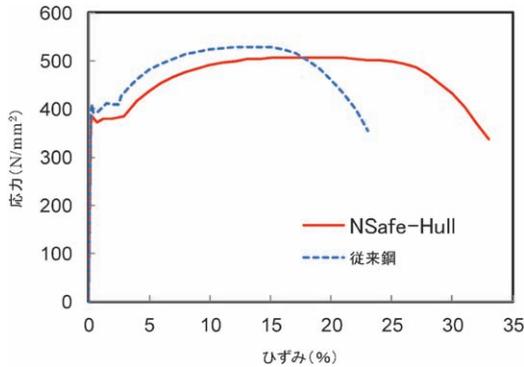


図1 NSafe®-Hull と従来鋼の応力-ひずみ曲線の例.

曲線の例を図1に示す. このように本鋼は従来鋼(KD36)と同等の強度と著しく優れた延性(従来 ClassNK 規則の約1.5倍の伸び)を有する. 本鋼は既に商業製造技術を確立されており, TMCPの加熱, 圧延および冷却条件の厳格管理により, 小さな材質ばらつきで強度・延性に優れた鋼板の安定製造が可能である.

4. NSafe®-Hull の耐衝突特性解析と実船適用例

ここでは, ばら積み船に本鋼を適用した場合の被衝突船の吸収エネルギーと破口に至る限界衝突速度に与える効果の例を示す. 停止したばら積み船の船側部に対し, 大型油タンカーが速度12ノット, 衝突角度90°で衝突するシミュレーションを非線形有限要素法解析で行った. 船側外板の一部の部材をClassNKの規則・検査要領相当の伸びを有する従来鋼と本鋼を適用した2つの場合で破口状況を比較した. なお, 海上交通安全法施行規則(昭和48年3月27日運輸省令第9号)で制定された我が国における航路内の最大速力制限が12ノットであることや, 山田と金湖による解析による「頻度が高い」船舶衝突速度は10~11ノットであること⁽⁹⁾を鑑み, 解析条件として, 十分に高い衝突速度12ノットを仮定した.

解析の結果, 船側部材の一部に本鋼を適用した場合を規則相当の伸びを有する従来鋼を適用した場合と比較すると, 船側外板破口発生までの吸収エネルギーは約3倍に向上することがわかった. この吸収エネルギーから求められた, 定量的指標である限界衝突速度⁽¹⁰⁾を比較すると, 1.75倍に向上する(図2). 実際の船舶の「平均」衝突速度は統計的に4.27ノットであること⁽¹¹⁾⁽¹²⁾を考えれば, この図で示した5ノットを超える限界衝突速度は有意なレベルである. なお, 同様にして, VLCC(Very Large Crude oil Carrier)に本鋼を適用した場合の効果も検証されており, 適用部位最適化により,

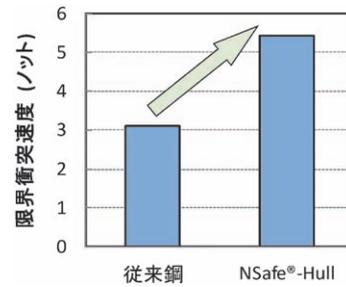


図2 破口限界衝突速度の比較例.



図3 NSafe®-Hull 初適用ばら積み船の進水.

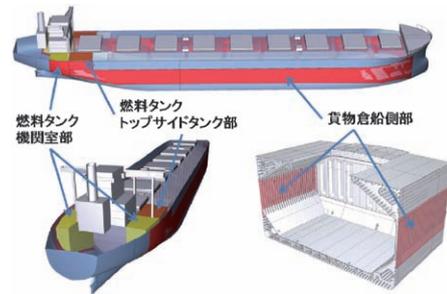


図4 初適用ばら積み船におけるNSafe®-Hullの適用部材(赤色部分).

VLCCが12ノット90°衝突しても外・内殻の破口は生じないことを示している⁽¹³⁾.

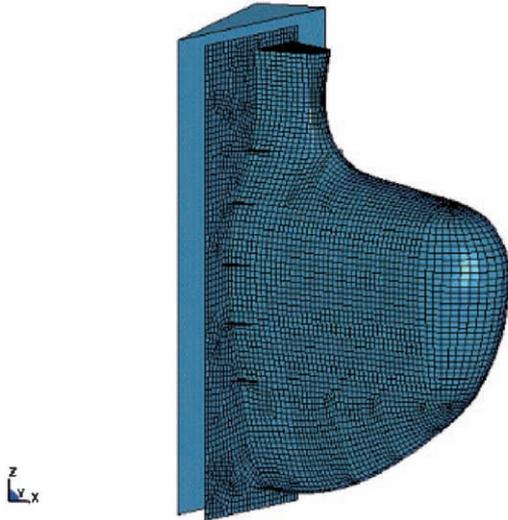
本鋼は, 今治造船建造のばら積み船に初適用され, 2014年8月に進水した(図3). 図4に示す部位に本鋼を適用することにより, 側面衝突時の破口発生を抑制し, 貨物倉内への浸水防止と貨物保護や沈没の危険性の低減が可能になる. また, 燃料油タンク部への適用により, 衝突時の油流出防止にも寄与する.

本研究の一部は, ClassNK「業界要望による共同研究」スキームの研究支援により実施され, 新日鐵住金では既にこの高延性鋼に関し, ClassNKの材料認証「Particulars of Approval」(例えば, 従来の規則要求の1.5倍の伸びを有するKA32-HD50など)を得た. また, 本鋼を適用した上述のばら積み船に対し, 衝突や座礁に対するエネルギー吸収に効果のある鋼を適用した船舶に付記されるClassNKの「Notation」を取得した.

5. 衝突安全性が高い球状船首の開発と実用化

新日鐵住金は極低炭素, 高純度化と最新の圧延技術により, 球状船首向けに特に変形能力の高い鋼材(NS-Ship-

(a) BB-E-72deg-slide (LY204,Longi removed)
Time = 0.0099995



(b) BB-E-72deg-slide (LY204,Longi removed)
Time = 1.2

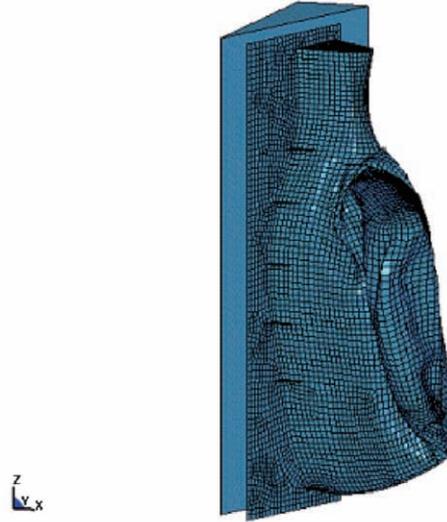


図5 衝突時の球状船首の変形解析例(海上・港湾・航空技術研究所提供), (a)衝突前, (b)衝突後.

Safety235)を開発し, 今治造船はこれを活用し, 47000 t プロダクトタンカーに「セーフティーバウ」として採用した⁽¹⁴⁾.

この鋼は従来鋼の1.5~2 倍の伸びを有し, 衝突時の球状船首の変形により衝突エネルギーの吸収が大きい. なお, この鋼材開発を発端として, 上述の NSafe[®]-Hull の開発にも繋がっている. また, セーフティーバウは加工硬化が小さいため, 衝突時の被衝突船に与える圧迫力が小さいので, 万が一, 衝突した場合でも被衝突船の損傷が小さい.

NMRI の協力で実施した衝突シミュレーション(例, 図5)で従来に比べ, 被衝突船への圧迫力は50%程度も低下し, 破口も縮小する結果を得た. NS-Ship-Safety235 の製造および適用も ClassNK 承認を得ている.

6. 結 言

船体構造に高延性鋼を適切に配置することにより, 衝突時の船体の破口を低減することが可能な包括的材料ソリューションを提案・実用化した. すなわち,

- (1) 従来鋼と同等の強度, 著しく優れた延性, 十分な溶接性を備えた船体用高延性鋼 NSafe[®]-Hull を開発, 実用化した.
- (2) 球状船首向けに変形性能の高い鋼材 NS-Ship-Safety235 を開発, 実用化した.

これらの技術は例えば参考文献(15)-(24)に示すように, 特許登録査定されている. NSafe[®]-Hull を採用したばら積み船が既に6隻竣工し, 現在, さらに10隻以上が建造中・適用予定である. 今後, 特に NSafe[®]-Hull をタンカーなど幅広い船種に適用することで, 安全・確実な海上輸送への貢献が期待される.

文 献

- (1) 海上保安庁: 海難の現況と対策について, (2012).
- (2) G. Nataro, K. Brinchmann and E. Steen: Collision and Grounding of Ships and Offshore Structures, ed. by J. Amdahl, S. Ehlers and B. J. Leira, (CRC Press, Taylor & Francis Group, London, UK, 2013), 85-92.
- (3) M. Schöttelndreyer, I. Tautz, W. Fricke and E. Lehmann: Collision and Grounding of Ships and Offshore Structures, ed. by J. Amdahl, S. Ehlers and B. J. Leira, (CRC Press, Taylor & Francis Group, London, UK, 2013), 101-108.
- (4) S. Rudan, B. Aščić and I. Višić: Collision and Grounding of Ships and Offshore Structures, ed. by J. Amdahl, S. Ehlers and B. J. Leira, (CRC Press, Taylor & Francis Group, London, UK, 2013), 331-337.
- (5) 寺田好男, 児島明彦, 清瀬明人, 中島隆雄, 土井直己, 原卓也, 森本 裕, 杉山昌章: 新日鉄技報, 第380号, (2004), 76-81.
- (6) 辻 伸泰: 鉄と鋼, **88**(2002), 359-369.
- (7) 内山 郁, 角田方衛: 鉄と鋼, **57**(1971), 1897-1911.
- (8) 小指軍夫: 鉄と鋼, **61**(1975), 2998-3021.
- (9) 山田安平, 金湖富士夫: 日本船舶海洋工学会講演会論文集, 第17号, (2013), 175-178.
- (10) Y. Yamada, H. Endo, P. T. Pedersen: International Journal of Offshore and Polar Engineering, **18**(2008), 1-9.
- (11) A. J. Brown: Marine Structures, **15**(2002), 335-364.
- (12) B. Liu and C. G. Soares: 7th International Conference on Collision and Grounding of Ships and Offshore Structures, ed. by S-R. Cho, H. K. Shin, J. Choung and R-T Jung, (The Society of Naval Architectures of Korea, 2016), 157-164.
- (13) Y. Yamada, S. Tozawa, T. Arima, K. Ichikawa, N. Oda, K. Kamita and H. Suga: 7th International Conference on Collision and Grounding of Ships and Offshore Structures, ed. by S-R. Cho, H. K. Shin, J. Choung and R-T Jung, (The Society of Naval Architectures of Korea, 2016), 215-223.
- (14) 例えば, 日刊工業新聞, 2009年8月26日, 15.
- (15) 特許第5994819号(出願日: 2014年5月30日).
- (16) 特許第6007968号(出願日: 2014年12月26日).
- (17) 特許第3434444号(出願日: 1997年12月26日).
- (18) 特許第3434445号(出願日: 1997年12月26日).
- (19) 特許第3434446号(出願日: 1997年12月26日).
- (20) 特許第3499125号(出願日: 1998年3月3日).
- (21) 特許第3499126号(出願日: 1998年3月3日).
- (22) 特許第5893231号(出願日: 2015年5月26日).
- (23) 特許第5167917号(出願日: 2008年4月10日).
- (24) 特許第5167918号(出願日: 2008年4月10日).

動的析出強化を活用した自動車排気部品用 耐熱フェライト系ステンレス鋼 (NSSC[®]429NF, NSSC[®]448EM)の開発

濱田純一¹⁾ 林 篤剛²⁾ 神野憲博³⁾ 小森唯志⁴⁾
伊藤宏治⁵⁾ 福田 望⁵⁾ 井上宜治^{**}

1. はじめに

自動車のエンジンから放出された高温の排ガスは、ステンレス鋼製の各種排気部品を通り車外に排出される。この間、排ガスの浄化、再循環および熱回収等が行われる。エンジン直下に設置され、排ガスを集めるエキゾーストマニホールドには鋳物が使用されていたが、軽量化による燃費向上、低熱容量化による触媒暖気性および排ガス浄化性能の向上等の観点から、1980年代以降ステンレス鋼板または鋼管の適用が急速に進んだ⁽¹⁾。図1に示すエキゾーストマニホールドやその後に配置されるコンバーターは高温の燃焼ガスに曝されるため、材料に要求される特性は高温強度、高温疲労(熱疲労、高サイクル疲労)、耐酸化性、加工性および溶接性と多岐に渡るが、エンジンの起動・停止や走行中の出力変動に伴う加熱と冷却の繰り返しで生じる熱疲労が最も重要となる。フェライト系ステンレス鋼は、オーステナイト系ステンレス鋼に比べて熱膨張係数が小さいため熱疲労特性に優れているとともに、コストパフォーマンスの観点からも広く採用されている。現在、主に使用されている汎用耐熱鋼はNbにより強化するSUS429系(14%Cr-Nb)であり、より高耐熱性が必要な場合にはMoを加えたSUS444系(18%Cr-2%Mo-Nb)が適用されている。

一方、NbやMoはレアメタルとして挙げられており、生

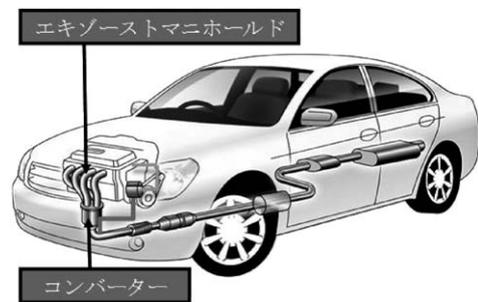


図1 開発鋼の主な適用対象となる自動車排気部品。

産国が偏在するとともに価格変動性が大きい元素である。よって、上記元素を代替可能な新たな耐熱元素の抽出あるいは省合金化は、元素戦略上極めて重要となる。加えて、市場では低コスト化、排ガス温度の高温化や薄肉・軽量化に対応可能な素材のニーズが高まってきている。

著者らは、エキゾーストマニホールドの耐久性で最も重要な熱疲労における動的組織変化を追求する中で、析出粒子の形態変化に着眼し、動的な高温析出強化を主体的に活用可能であることを見出した⁽²⁾⁽³⁾。その結果、ベースメタルであるCuをフェライト系ステンレス鋼に積極的に添加することで、耐熱用途の材料に対して必須元素とされてきたNbをフリーとしたCu添加鋼「NSSC[®]429NF」を開発した。また、この技術を発展させて、SUS444系に対してMoを大幅に削減したNb-Cu-微量Mo複合添加鋼「NSSC[®]448EM」を開発および商品化した。本稿では技術基盤となる研究、開発鋼の諸特性と実用例について述べる。

2. 開発の考え方

(1) 熱疲労過程のCu粒子形態

既存の耐熱鋼における主な強化機構はNbやMoの固溶強化であり⁽⁴⁾、析出強化は補助的な強化と位置付けられていた。その理由は、析出物を微細分散させた組織であっても長時間高温に曝されると析出物が粗大化して密度が減少し、そ

* 新日鐵住金ステンレス株式会社：
研究センター薄板・自動車材料研究部；1) 首席研究員 2) 主任研究員 3) マネジャー 4) 光製造所生産管理部；部長代理 5) 商品開発部；部長代理
** 新日鐵住金株式会社八幡技術研究部；首席主幹研究員
Development of Heat-resistant Ferritic Stainless Steels “NSSC[®]429NF” and “NSSC[®]448EM” Utilized Dynamic Precipitation Hardening for Automotive Exhaust Systems; Jun-ichi Hamada, Atsutaka Hayashi, Norihiro Kanno, Tadashi Komori, Koji Ito, Nozomu Fukuda and Yoshiharu Inoue (*Nippon Steel and Sumikin Stainless Steel Corporation. **Nippon Steel and Sumitomo Metal Corporation)
2016年10月31日受理[doi:10.2320/materia.56.33]

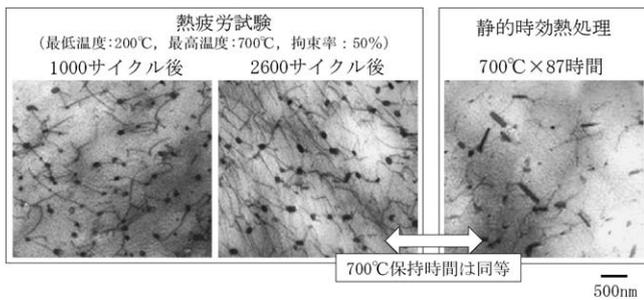


図2 熱疲労過程と時効熱処理後のCu粒子。

の強化量は大きく低減すると予想されるためである。しかしながら、自動車排気部品のように繰り返し熱・歪サイクルを受ける際の組織形成は、静的な時効熱処理の場合とは大きく異なっていた。自動車排気部品の耐久性能を高精度に評価可能なパイプを用いた熱疲労試験⁽⁵⁾を14%Cr-1.2%Cu添加鋼に対して実施し、時効熱処理の場合とCu粒子形態を比較した結果を図2に示す⁽³⁾。熱疲労過程のCu粒子は、時効熱処理の場合よりも球状微細分散し、Cu粒子に転位が絡んでいる様子が観察される。超高圧電子顕微鏡内での高温引張その場観察の結果⁽³⁾と併せて、高温で歪を受ける環境下におけるCu粒子は、通常想定される棒状粒子のオストワルド成長では無く、Dislocation shearingによる分断・固溶・再析出を繰り返し、微細形態を維持することが分かった。また、このようなCu粒子の析出形態は強化量が高く、静的熱処理後の約4倍の強化量が見積られ、動的析出強化の有効性を定量的に示した⁽³⁾。

(2) 熱疲労寿命に及ぼすCu添加および微量Mo添加の効果

従来、SUS429系で高温耐久性が未達な場合、約2%のMoが添加されたSUS444系が使用されてきた。しかしながら排ガス温度が徐々に高温化する中、コストアップが大きいため、Cu粒子の動的析出を活用したNb-Cu複合添加ならびにMo削減を検討した。18%Cr-0.5%Nb-0.1%Ti添加鋼の熱疲労寿命に及ぼす1.2%Cu添加および微量Mo添加の効果を図3に示す⁽⁶⁾。ここでは、CuおよびMo無添加鋼の寿命に対する比で示している。これよりCu添加により熱疲労寿命が向上し、排ガス高温化や軽量化に向けた適用が期待出来る。更に、従来検討されていない0.3%程度の微量Moを添加することで、より大きな寿命向上が認められた。

(3) 目標と成分設計

図4に二つの開発鋼の位置づけを示す。NSSC®429NFは、SUS429系が使用される温度環境下で同等以上の耐熱性を有することを目標とした。NSSC®448EMは、SUS429系とSUS444系の間隔的な耐熱性を有するとともに、使用が想定される高温域でもSUS429系に対して30%以上の寿命向上を目標とした。いずれも加工性と製造性を考慮してCu添加量は1.2%とし、図3の結果からNSSC®448EMは0.5%Nb、0.3%Mo添加とした。また、Cr量は耐酸化性を考慮して、NSSC®429NFで14%、NSSC®448EMで17%とした。更

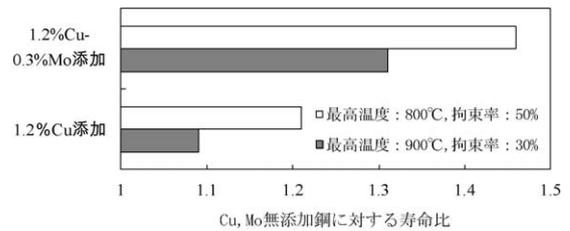


図3 熱疲労寿命に及ぼすCuおよび微量Mo添加の効果。

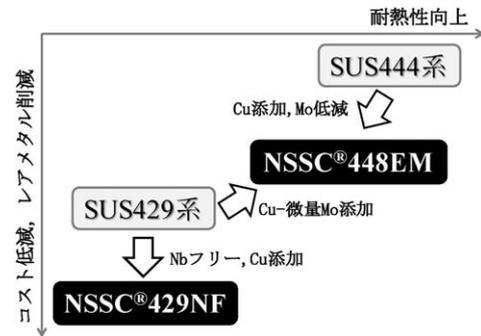


図4 既存鋼に対する開発鋼の位置づけ。

表1 開発鋼と既存鋼の成分例(mass%)。

鋼	Cr	Nb	Mo	Cu	Ti
NSSC®429NF	14.1	—	—	1.2	0.18
NSSC®448EM	17.1	0.54	0.3	1.2	0.11
SUS429系	13.3	0.43	—	—	—
SUS444系	17.2	0.47	1.8	—	0.11

に、いずれも溶接部の粒界腐食を防ぐために極低C, Nとして、安定化元素としてTiを添加した。化学成分例を表1に示す。

3. 開発鋼の特性

図5に開発鋼と既存鋼の熱疲労寿命の比較を示す⁽⁶⁾⁽⁷⁾。NSSC®429NFの熱疲労寿命は、SUS429系と同等であり、目標を満足する。NSSC®448EMの熱疲労寿命は、SUS429系とSUS444系の間隔に位置づけられるとともに、いずれの温度条件でもSUS429系に対して30%以上の寿命向上を達成している。

図6に開発鋼を大気中950°Cで200時間の連続酸化試験を行った後の外観を示す⁽⁶⁾⁽⁷⁾。両鋼ともCr量等が適正化されているため、異常酸化やスケール剥離は生じない。

表2に開発鋼と既存鋼の常温材質を示す⁽⁶⁾⁽⁷⁾。開発鋼は、SUS429系よりも硬質・低延性傾向であるが、深絞り性の指標であるr値を高めて成形性を向上させている。これは、製鋼・熱延・冷延・焼鈍の薄板一貫製造工程における金属組織(析出物、集合組織)制御を高効率かつ適正に行うことで得られている⁽⁶⁾。近年、ダウンサイジングに伴う部品コンパクト

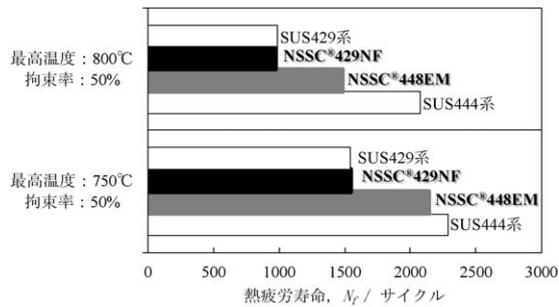


図5 開発鋼と既存鋼の熱疲労寿命の比較.

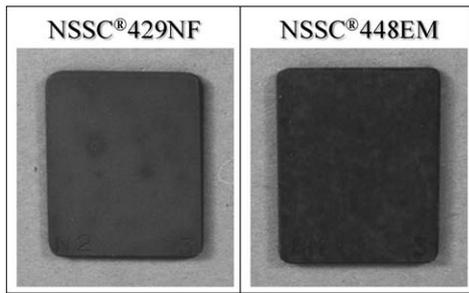


図6 開発鋼の酸化試験後の外観.

表2 開発鋼と既存鋼の機械的性質(2 mm 厚).

鋼	0.2%耐力 MPa	引張強度 MPa	全伸び %	平均 r 値	限界 絞り比	穴拡げ率 %
NSSC®429NF	326	447	34	1.4	2.13	158
NSSC®448EM	361	489	34	1.4	2.13	156
SUS429系	300	470	35	1.1	2.00	122
SUS444系	351	501	33	1.3	2.06	151

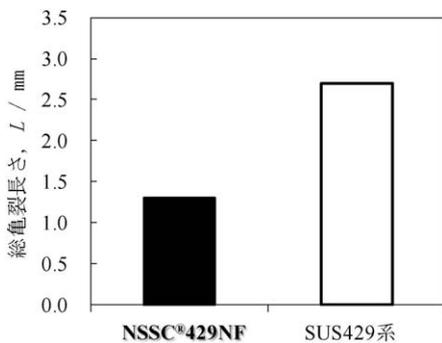


図7 NSSC®429NF と SUS429系のバレストレイン試験結果.

化の流れから素材の成形性も極めて重要になっているが、本開発鋼は深絞り性や穴拡げ性に優れており、複雑形状部品への成形の自由度が向上している。

図7に溶接部の凝固割れを模擬したバレストレイン試験結



図8 開発鋼が使用されたエキゾーストマニホールド.

果を示す⁽⁷⁾。Nb フリーとした NSSC®429NF は Nb 添加鋼に比べて凝固割れ感受性が低く、溶接性に優れている。

4. 実用例・将来性

開発鋼が適用されたエキゾーストマニホールドの実用例を図8に示す。2008年から製造が実施されており、その生産量は累計約11,000 tonに至っている。NSSC®429NFはSUS429系に対する省Nb化、NSSC®448EMはSUS444系に対する省Mo化およびSUS429系に対する薄肉・軽量化のメリットが得られることから、国内外の自動車に搭載が進んでいる。両鋼は、地球環境対策として加速する排ガス規制の強化、燃費や熱効率の向上並びに部品コスト削減等の種々のニーズに貢献可能なステンレス鋼として、今後も採用の拡大が期待される。

5. 特 許

本開発に関わる特許を国内外に15件出願しており、国内では特許第5297630号、特許第5546911号等の12件が登録されている。米国や中国をはじめ海外でも7件が登録されている。

文 献

- (1) 例えば、細井祐三監修：ステンレス鋼の科学と最新技術，ステンレス協会，東京，(2011)，222-228.
- (2) 神野憲博，井上宜治，濱田純一：CAMP-ISIJ，**25**(2012)，1175.
- (3) 神野憲博，濱田純一，金子賢治：CAMP-ISIJ，**29**(2016)，822.
- (4) 藤田展弘：新日鉄技報，**371**(1999)，30-34.
- (5) 宮原光雄，梶村治彦，樋口賢次：日本鉄鋼協会自主フォーラム，ステンレス鋼の高温特性と自動車排気系部材への利用技術，(2003)，10-15.
- (6) 濱田純一，神野憲博，林篤剛，平出信彦，梶村治彦，井上宜治：自動車技術会学術講演会前刷集，**46-14**(2014)，13-16.
- (7) 神野憲博，濱田純一，平出信彦，林篤剛，矢川敦久，井上宜治，寺岡慎一：自動車技術会2016年秋季大会学術講演会講演予稿集，(2016)，371-374.

合金鉄溶解炉による 資源循環システムプロセスの開発

加藤勝彦¹⁾ 浅原紀史²⁾ 小川雄司³⁾
平嶋直樹⁴⁾ 府高幹男⁵⁾ 兼川 賢^{**}

1. 概要

新日鐵住金株式会社では、フェロクロム合金の転炉投入によってフェライト系ステンレス鋼を主とする含クロム鋼を生産してきた。フェロクロム合金を転炉内で溶解するには多量の熱源を消費するため、従来はクロム鋼屑のリサイクルが困難であった。また、転炉で脱炭精錬を行う際に同時に酸化されるクロムを還元回収するため、精錬後にフェロシリコン合金を投入していたが、スラグ発生量の増大につながる課題があった。今回、合金鉄溶解炉⁽¹⁾⁻⁽³⁾を導入することで、クロム鋼屑の溶解利用および酸化クロムの効率的な還元回収を実現し、資源循環型の生産プロセスを確立した。

2. 開発の背景

新日鐵住金^株では、電気炉によるスクラップ溶解に比べて安価な高炉溶銑を主原料とし、上底吹き転炉にてフェロクロム合金を連続投入する含クロム鋼製造技術を構築してきた。しかしながら、溶銑に対してフェロクロム合金を多量に溶解するには熱源が必要となる。必要な熱源は炭材添加によって確保されるが、炭材には不可避免的に硫黄が含まれるため、低硫鋼の製造に課題が生じる。したがって、クロム鋼屑を転炉で再利用することは困難であった。

また、溶銑中の炭素濃度低減および燃焼熱の確保の観点から、転炉では酸素ガスによる酸化精錬が必須である。この際、炭素のみならず添加したクロムの一部が酸化される。従来、酸化精錬で生じた高濃度クロム酸化物は、転炉内にフェロシリコン合金を添加することで還元回収していた。しか

し、還元時にシリコンの酸化物が生成し、転炉でのスラグ発生量の増大を招いていた。また、高価なフェロシリコン合金の使用は製造コストの悪化につながる点も課題であった。更に、高濃度クロム酸化物は融点が高く溶解し難いため、クロム酸化物の還元には限界があった。

3. 合金鉄溶解炉の概要

本技術では転炉の前工程に合金鉄溶解炉(電気炉)を導入することで、電気炉法による電気加熱能力と高炉法による安価な主原料供給能力の両者をハイブリッドに活用する資源循環システムを構築する(図1)。

すなわち、合金鉄溶解炉においてクロム鋼屑およびフェロクロム合金をアーク熱によって溶解することが可能となり、クロム鋼屑の全量リサイクルを達成できる。

更に、転炉で発生した高濃度クロム酸化物は合金鉄溶解炉に装入され、フェロクロム合金中に含まれるシリコンを活用して還元される。従来に比べてフェロシリコン合金の使用量を大幅に削減できるため、スラグ発生量低減およびコスト削減が可能となる。

なお、一般的な電気炉操業では全装入原料に対する副原料の配合比率は5%程度⁽⁴⁾であるが、合金鉄溶解炉では約30%を占め大半が高濃度クロム酸化物である。本技術では、スラグ組成や処理温度、攪拌条件の適正化により、多量の高濃度クロム酸化物を少量の溶銑で還元処理し、高効率にクロムを

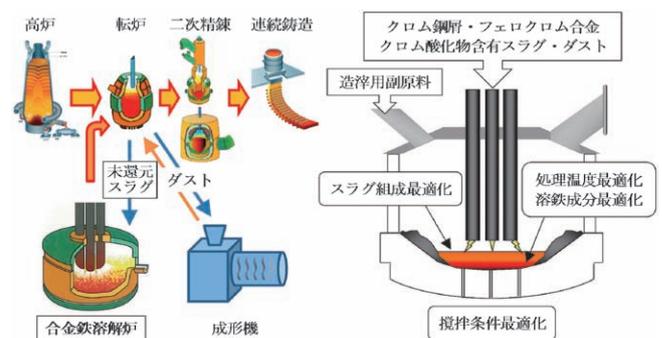


図1 合金鉄溶解炉による資源循環システムプロセスの概要。

* 新日鐵住金株式会社
八幡製鐵所; 1) ステンレス企画室長 4) 元製鋼部長
5) スパイラル鋼管工場長
技術開発本部; 2) 主幹研究員 3) プロセス技術部長
** 新日鐵住金ステンレス株式会社 光製造所; 製鋼工場長
Development of the Multi-Material Recycling System Using Electric Arc Furnace for Melting Ferro-Alloy; Katsuhiko Kato*, Norifumi Asahara*, Yuji Ogawa*, Naoki Hirashima*, Mikio Futaka* and Satoshi Kanekawa** (*Nippon Steel & Sumitomo Metal Corp. **Nippon Steel & Sumikin Stainless Steel Corp.)
2016年10月27日受理[doi:10.2320/materia.56.36]

還元回収できる。特にスラグ組成としては、環境負荷が懸念される螢石(CaF₂)を使用することなく低融点化を実現している。

4. 溶解炉実験による基礎検討

(1) 実験条件

処理温度およびスラグ組成の基礎検討のため、溶解炉実験を実施した。主な実験条件を表1に示す。ラボ溶解炉にて70 kgの含クロム溶銜を溶製した後、粉碎した未還元転炉スラグや生石灰を上置き添加した。スラグの熔融促進剤として、一部の水準ではアルミナも添加した。炉底に設けたポーラスプラグからArガスを吹き込み、攪拌を付与した。未還元スラグ投入時点から40分間での還元挙動を評価した。

(2) 処理温度の影響

種々の条件下で、酸化クロムの還元反応は概ね一次反応に従い、反応速度は下式で表された。

$$-d(\%Cr_2O_3)/dt = k(\%Cr_2O_3) \quad (1)$$

ここで、 k ：一次のCr還元反応容量係数(1/min)， $(\%Cr_2O_3)$ ：スラグ中Cr₂O₃成分濃度(mass%)である。以

表1 主な実験条件。

実験装置	100 kg 大気溶解炉	
溶鉄量	70 (kg)	
副原料投入量	未還元スラグ	50 (kg/t-metal)
	生石灰	3.6-25.7 (kg/t-metal)
	アルミナ	0-14.3 (kg/t-metal)
攪拌方法	Arガスによる底吹き攪拌	
攪拌動力密度 ⁽⁵⁾	0.04 (kW/t-metal)	
攪拌時間	40 (min)	
温度	1450, 1550, 1650 (°C)	
溶鉄成分	[Cr]	16 (mass%)
	[C]	4.2 (mass%)

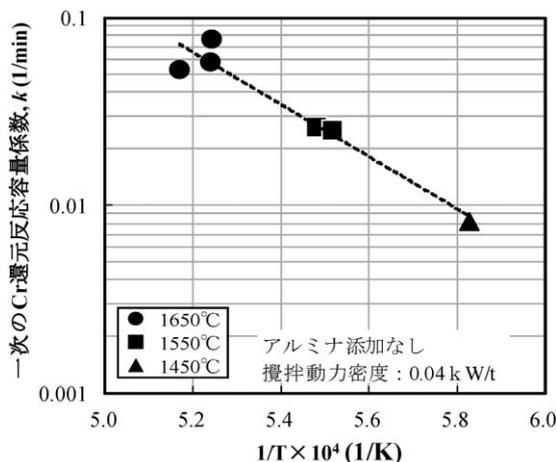


図2 処理温度と反応速度の関係。

降、反応速度の大きさは一次のCr還元反応容量係数 k で評価した。

処理温度と酸化クロムの還元速度の関係を図2に示す。処理温度が高いほど容量係数 k は増大することが確認された。

(3) 螢石レス下でのスラグ組成の適正化

攪拌動力密度0.04 kW/tの条件下でアルミナ添加量や温度を変化させた場合の反応速度および到達(%Cr₂O₃)を図3、4に示す。種々の指標との相関を調査した結果、図中の横軸に示すように実験終了時点の(%CaO)/{(%SiO₂) + (%Al₂O₃)}を指標とした時に最も相関が強かった。

本指標が1.1以下では、本指標が高くなるほど還元速度は増大し、還元処理後の到達(%Cr₂O₃)は低下した。これは熔融スラグの粘性低下による物質移動速度の向上によるものと考えられる。一方、本指標が1.1を超えて過剰に高くなると、反応速度の低下が見られた。これはスラグの液相率が低下して固液共存状態となり、スラグ全体の流動性が悪化したためと考えられる。

以上より、本指標が1.1程度となるようにアルミナと生石灰を添加した場合に最も還元速度が大きく、同時に還元処理後の(%Cr₂O₃)も低位になると推定された。

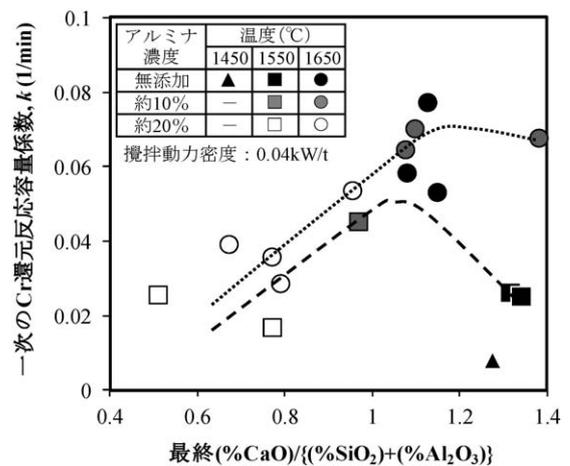


図3 反応速度に及ぼすスラグ組成の影響。

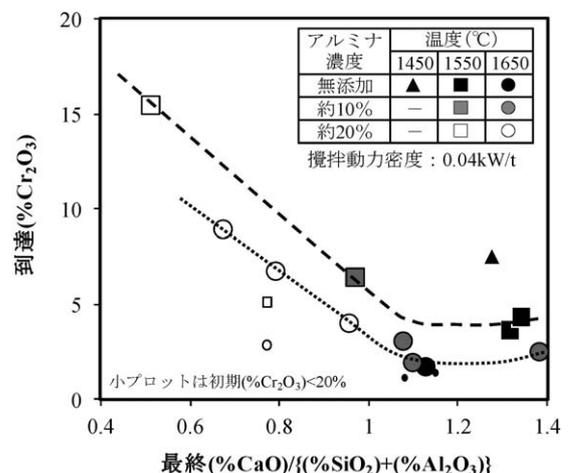


図4 到達(%Cr₂O₃)に及ぼすスラグ組成の影響。

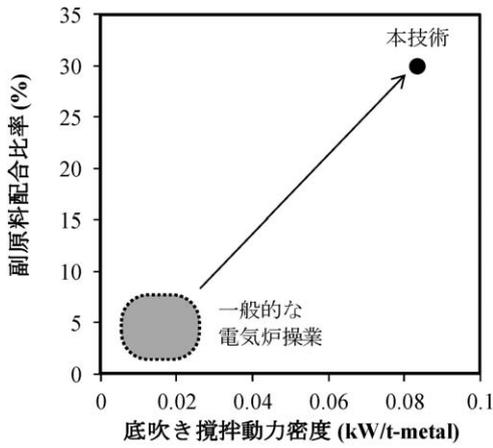


図5 攪拌力と副原料配合比率の関係。

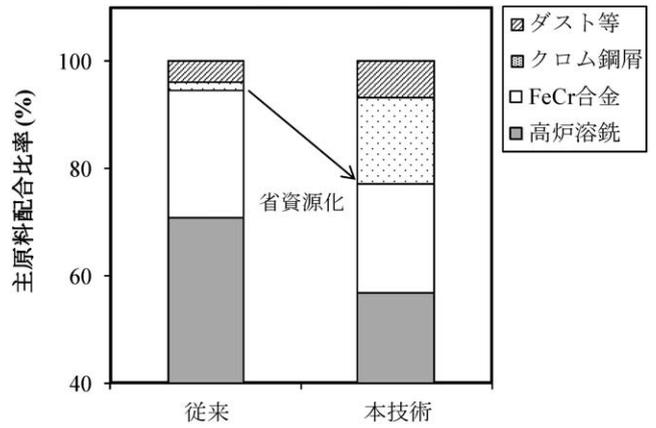


図7 主原料構成の変化。

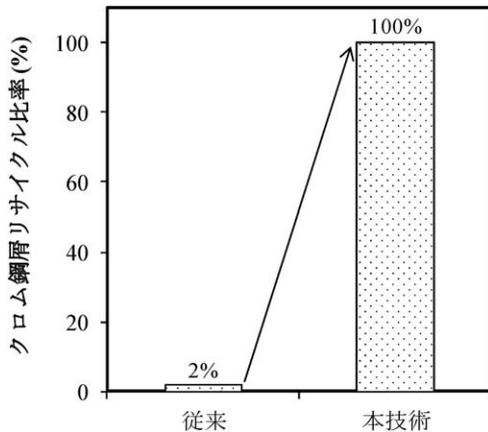


図6 クロム鋼屑リサイクル比率の変化。

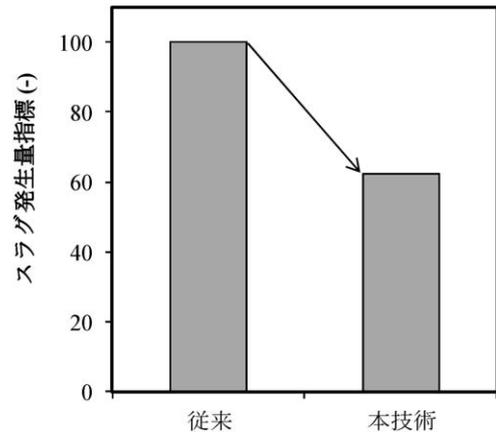


図8 一次精錬でのスラグ発生量の変化。

5. 本技術の実機化および主要成果

新日鐵住金(株)八幡製鐵所(戸畑地区)において、合金鉄溶解炉を実機化した。なお実機化にあたっては、多量のスラグを高効率に処理するため、一般的な電気炉操業⁶⁾に比べて底吹き攪拌力を強化した(図5)。また、ラボ溶解炉に比較して相対的にスラグが浅く広く分布する形状となるため、空間的に均一に攪拌することも重要である。そこで、通電加熱に伴う攪拌を加味しながら、底吹きガスの吹込み位置を数値流体解析等によって最適化した。

(1) 省資源化

合金鉄溶解炉設置前後のクロム鋼屑リサイクル比率を図6に示す。クロム鋼屑のリサイクル比率は、以前は2%程度と低位であったが、合金鉄溶解炉導入によって100%化を達成した。

また、本技術によってスラグの還元率が向上し、従来は約5%であった還元後スラグ中酸化クロム濃度は約2%まで低減した。これに相当するフェロクロム合金削減効果も得られた。

以上の結果、フェロクロム合金の使用量としては約15%、高炉溶銑とフェロクロム合金を合せた新規原料の使用量では約20%の削減効果が得られており、省資源化につ

ながった(図7)。

(2) スラグ発生量の削減

本技術ではフェロクロム合金中シリコンの活用による酸化クロムの還元回収を実現したことで、従来法に比べてフェロシリコン合金の使用量を約60%削減できた。その結果、図8に示す一次精錬(転炉、合金鉄溶解炉)でのスラグ発生量を約40%低減するとともに、大幅なコスト削減を達成できた。

6. 特許

本開発に関連して出願した主な特許は以下である。

特許第5454313号、特許第5458631号、特許第5326475号、他登録特許・実用新案全6件、公開特許5件、出願特許9件。

文 献

- (1) 楠伸太郎, 西原良治, 加藤勝彦, 坂上仁志, 福永新一, 平嶋直樹: 新日鐵技報, **394**(2012), 111-118.
- (2) 金子尚樹, 加藤勝彦, 田中康弘: CAMP-ISIJ, **28**(2015), 69.
- (3) N. Kaneko, K. Kato and Y. Tanaka: Proc. Asia Steel 2015, (2015), 488-489.
- (4) 森井 廉: 電気炉製鋼法, 日本鉄鋼協会, (2000), 100.
- (5) 森 一美, 佐野正道: 鉄と鋼, **67**(1981), 672-695.
- (6) 森井 廉: 電気炉製鋼法, 日本鉄鋼協会, (2000), 170.



材料組織形成をシミュレートする

計算組織学研究グループ(小山・塚田研究室)
名古屋大学大学院工学研究科
マテリアル理工学専攻材料工学分野

我々の研究室は、名古屋大学大学院工学研究科マテリアル理工学専攻材料工学分野(2017年度からは、後述の材料デザイン工学専攻)に所属しています。現在、教員・スタッフは、教授の小山敏幸先生、准教授の塚田祐貴、技術補佐員の三摩唱子氏の3名です。学生は、名古屋大学の修士課程学生6名、学部学生6名が在籍し、名古屋工業大学から修士課程学生5名を特別研究派遣学生として受け入れています。研究室では、材料組織形成メカニズムの解明や優れた材料特性を発現させるための組織制御指針の提示を目標に、フェーズフィールド(PF)法を軸足として、各種材料の組織や特性のシミュレーションに取り組んでいます。特に、PF法に基づく組織シミュレーションの結果を特性計算のイメージデータに用いることによってプロセス解析と特性解析を連携させる新しい研究を行っています。

PF法は材料組織形成過程のシミュレーション手法です。PF法では、材料組織を記述するためのフィールド変数を定義し、そのフィールド変数を用いて組織の全自由エネルギーを定式化します。そして、全自由エネルギーが最も効率的に減少する方向へフィールド変数の時間発展を計算し、組織形成をシミュレートします。これまで材料学の分野で確立されてきたエネルギー計算法(CALPHAD法に基づく単相のギブスエネルギー計算法やマイクロメカニクスに基づく弾性ひずみエネルギー計算法など)をPFモデルに直接取り込むことによって、全自由エネルギーの定量的評価に基づいた組織シミュレーションが可能になります。最近では、簡単な二次元シミュレーションであれば、組織形成の計算から計算結果の可視化まで、汎用のノートパソコンを使って数分程度で実行することができます。折に触れて、学部学生の前でノートパソコンを使った組織シミュレーションを実演することで、学生に材料組織形成に対する興味を持ってもらうとともに、最近の汎用パソコンの演算能力の高さを実感してもらっています。

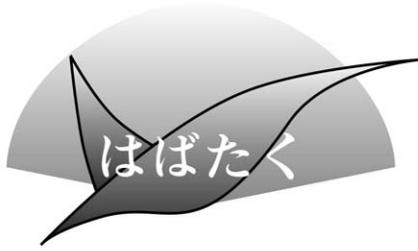
研究室では、「材料組織」をキーワードに、様々な材料を対象に研究テーマを設定しています。研究対象としている材料には、鉄鋼材料、ニッケル基耐熱材料、次世代マグネシウム構造材料、超弾性チタン材料、希土類磁石材料、電池材料などがあります。いずれの材料も、優れた特性を引き出すために、材料組織の改良・最適化が必要とされています。研究室では、組織シミュレーションを実行するにあたり、既製の

ソフトウェアは使わずに、各種材料のPFモデルを個別に構築し、ソースコードを開発しています。研究室の学生は、配属から1ヶ月程度で科学技術計算に必要なプログラミング言語の知識を身に付けた後、①研究対象とする材料組織形成に関する調査、②材料組織の各種エネルギー計算法の習得、③材料組織形成のモデリング、④組織シミュレーション結果の整理・可視化とその解釈、に多くの時間を割いています。学生は、学年や研究テーマに関係なくお互いの研究内容について議論し、また重要な知識や計算スキルをうまく共有しながら、研究を進めています。

我々は最近、PF法とデータサイエンスの手法を組み合わせた研究に積極的に取り組んでいます。材料組織形成に関する現象は数多くありますが、個々の現象のPFモデルは世界的に整備が進んできており、それらを効果的に組み合わせることで、実際の材料組織形成をシミュレートするための高度なPFモデルを構築することが可能になってきました。モデルが高度化すると、どうしても数値計算にかかる時間が増加してしましますが、我々の研究室では、GPGPU用の計算機を導入することで、比較的短時間でシミュレーション結果を得ることができています。PF法では、シミュレーションの入力データとして単相の各種物性値が必要です。当然、用いる入力データが異なれば、シミュレーションで得られる材料組織も異なってきます。もし、入力データが異なるシミュレーション結果が大量にあれば、データサイエンスの手法を用いて、入力データ(=単相の各種物性値)と計算結果(=材料組織)の関係を記述し、材料組織予測の簡易システムを構築することができます。もしこれが実現すれば、材料組織制御を目的とした従来の試行錯誤的なプロセスを大幅に加速することができると考えています。これ以外にも、データサイエンスの手法を活用した取り組みを順次進めており、「PF法の活用による材料開発プロセスの高効率化」を実現するための普遍的な手法を確立することを目指しています。

さて、名古屋大学工学部・工学研究科は2017年4月に改組が予定されており、新しくマテリアル工学科が誕生し、マテリアル工学科の上に、大学院の3つの専攻(材料デザイン工学専攻、物質プロセス工学専攻、化学システム工学専攻)が設置されます。マテリアル工学科では、材料・物理・化学を基軸として、物質・材料のナノスケールから製造・生産といったマクロなシステムまでを一つの体系として捉えたカリキュラムを構成しており、物質の原理原則に基づいたものづくりを目指した研究活動、マテリアルを様々な観点から俯瞰できる能力を持った人材を育成するための教育活動を行っています。計算組織学研究グループ(小山・塚田研究室)の見学は随時受け付けておりますので、ご興味のある方がいらっ

(文責：塚田祐貴 名古屋大学准教授)
(2016年11月7日受理)[doi:10.2320/materia.56.39]
(連絡先：〒464-8603 名古屋市千種区不老町)
E-mail: tsukada@numse.nagoya-u.ac.jp



これまでの研究生活を振り返って

神戸大学工学研究科機械工学専攻；助教
寺本 武司

1. はじめに

この度は「はばたく」への執筆の機会を頂きありがとうございます。関係各位に御礼申し上げます。最初に自己紹介をさせていただきます。

私は2016年4月より神戸大学工学研究科機械工学専攻の田中研究室で助教をしております。学部は名古屋工業大学の機械工学科に所属し、修士・博士課程は東京工業大学の物質科学創造専攻に所属していました。本稿では修士・博士課程の学生生活と教員生活で私が経験し、感じたことをお伝えできればと思います。

2. 学生生活

修士・博士課程では細田秀樹教授、稲岳朋也准教授のもと形状記憶合金の組織に関する研究をしていました。形状記憶合金を実用化するうえで長年の課題となっているのが長寿命化です。形状記憶合金は材料を繰り返し使用すると駆動温度や形状回復率が徐々に変化します。これは組織に蓄積される転位が原因です。形状記憶合金は室温でマルテンサイト組織を形成しますが、この組織はバリエーションと呼ばれるマルテンサイトプレートを構成単位とし、特定の種類のプレート同士が選択的に結合することにより構成されています。形状記憶合金を使用する際に発生する転位の発生源はバリエーション間に不可避的に生じるミスフィットが塑性的に緩和されることが原因ですので、どの種類のバリエーションが選択的に結合してマルテンサイト組織を形成するのかわかることが、組織に発生する転位を制御する上で重要になります。私の研究はこのマルテンサイト組織の選択性を解明するというものでした。研究室に配属された当初は実際の材料を用いた実験ではなく、マルテンサイト組織の構造を連続体力学により数値解析するという行っていました。数値解析には数学的なバックグラウンドが必要となりますが、お恥ずかしい話ではありま

すが、学部生時代の私はあまり真面目に授業を受ける学生ではなかったので、当初は線形代数、ベクトル解析、結晶学といった基礎的な予備理論の復習・勉強を主にしていました。正直なところ最初の頃は、他のテーマに配属された研究室の同期の学生が実験をしているのを羨ましく思うこともありましたが、実際に数値解析で得られた結果を材料の力学特性や組織と比較してみると、今まで取り組んできた理論解析が、一見乱雑に見える組織形態を理解するための着目点となることが分かりました。着目するということは、視野を狭めることにもなりますが、「窓」から物事を眺めるようにあえて視野を狭くすることで漠然と眺めているだけでは見えなかったものが見えるということに感銘を受けました。そして自分自身で新しい窓を見つけたいと考えるようになりました。博士課程ではその窓を探ることが目的となりましたが、いざ自分で窓を探す立場になると、それが容易ではないことを思い知りました。私の場合、最初に窓の重要性に気づきましたが、窓を重視し、それを模倣しようとするあまり視野が狭くなりすぎてしまったことが原因でした。最終的にはマルテンサイト組織の選択性に関する小さい窓を見つけることができましたが、助教になった現在でも、この部分に関しては勉強すべきところがあると思っています。

3. 教員生活

現在、私は神戸大学の田中克志教授のもとで層状構造を持った酸化チタン熱電材料の組織と熱電特性の関係について研究しています。これまでの実用熱電材料であるテルライド系熱電材料はレアメタルや有害元素を含む点、材料の高温安定性が低い点などから使用場所が限定されるという問題があります。チタン酸化物系熱電材料は材料コスト、安全性、高温安定性ともに優れている材料ですが、実用化するためには熱電変換特性の向上が必要です。本研究室では、本材料特有の Ti_2O_3 導電体膜と TiO_2 絶縁体層の層状構造の電気伝導特性に着目して組織制御を行うことで本材料の高性能化を目指しています。熱電材料と形状記憶合金は同じ機能性材料ですが、物理現象も大きく異なる材料であり、まだまだ勉強しなければならないことが多々ありますが、同時にあたらしい理論に触れる機会でもあります。新たな分野での刺激を原動力に私なりの新たな窓を見つけていきたいと思っています。

博士を卒業する際に私の主指導教員だった稲岳先生より「初心忘れるべからず」という言葉を頂きました。この言葉は室町時代の猿楽師である世阿弥によるもので、能の舞台に初めて立つ際の上手い下手にかかわらず情熱をもって取り組む姿勢、すなわち初心いつまでも忘れるべきではないという言葉です。指導される側の学生から助教として学生を指導する立場に変わっても、慢心せず、学生時代に感じた研究の面白さや情熱を失わずに日々成長していけるようこれからも精進していきたいと思っています。

(2016年11月9日受理)[doi:10.2320/materia.56.40]

(連絡先：〒657-8501 神戸市灘区六甲台町1-1)

本 会 記 事

会 告	2017年春期(第160回)講演大会ご案内ならびに 参加申込みについて	41
	2017年春期講演大会における企業説明会への学生参加者の募集	42
	2017年春期講演大会機器・書籍・カタログ展示会出展募集, 大会プログラム広告および講演概要集 DVD ジャケット広告募集	43
	2017年春期講演大会会期中の託児室設置のお知らせ	43
	第3回ランチョンセミナー開催予定	43
	2017年秋期講演大会公募シンポジウムテーマ提案募集	44
	学術貢献賞(第15回)候補者推薦のお願い	44
	功労賞(第15回)候補者推薦のお願い	44
	奨励賞(第27回)候補者推薦のお願い	44
	村上奨励賞(第14回)候補者推薦のお願い	45
	第65回論文賞候補論文推薦(自薦)のお願い	45
	第7回まてりあ賞推薦(自薦)のお願い	45
	2017年1号からの機関誌の配送について	45
	研究集会	46
	金属学会シンポジウム	46
	会誌・欧文誌編集委員会からのお知らせ	47
支部行事	次号予告	50
掲示板	新入会員	51
会誌・欧文誌1号目次	行事カレンダー	52

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
 分科会: 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
<http://jim.or.jp/>

- ・会告原稿締切: 毎月1日で、翌月号掲載です。
- ・掲示板や行事のご案内は、ホームページにも掲載しております。

- ・ご連絡先住所変更等の手続きは、[本会ホームページ](#) [会員マイページ](#) からできます。
- ・投稿規程、刊行案内、入会申込は、ホームページをご利用下さい。
- ・オンラインジャーナルの発行や行事のご案内等の本会からのお知らせ E-mail の受信をご希望される方は、[会員マイページ](#) → [会員情報の変更届](#) にて手続して下さい。

会 告 (ホームページもご参照下さい)

2017年春期(第160回)講演大会ご案内ならびに参加申込みについて

会 期: 2017年3月15日(水)～3月17日(金)

会 場: 首都大学東京南大沢キャンパス(〒192-0397 東京都八王子市南大沢 1-1)

懇親会: 2017年3月15日(水) 18:00～20:00

懇親会会場: 首都大学東京南大沢キャンパス 国際交流会館内レストラン「ルヴェソソヴェール」

大会参加予約申込締切: 2017年2月10日(金)

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

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: <登録期間> 11月10日(木)～2月10日(金) 17:00

大会参加申込み URL <http://www.jim.or.jp/convention/2017spring/>

予約申込締切後、予約申込者へ大会参加証引換券、概要集 DVD を送付します。懇親会参加申込をされた方には、懇親会参加券もあわせてお送りします。なお、領収書は、決済完了後に申込画面から各自印刷して下さい(WEB画面: 講演大会 MyPage よりダウンロード)。

■2月10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(講演概要集 DVD 代含む)※年会費とは異なります。

参加費・講演概要集 DVD・懇親会の消費税扱については、[ホームページ\(一覧表 PDF\)](#) をご参照下さい。

予約申込締切日	2月10日(金)(申込および入金期日)	
	会員資格	当日申込 (大会会場受付・現金払いのみ)
	正員・維持員会社社員	9,000円
	学生員*	6,000円
	非会員 一般	19,000円
	非会員 学生(大学院生含む)	14,000円

・お支払後の取消は、ご返金いたしかねますのでご了承下さい。

※ [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。

◆懇親会費(消費税込み)

予約申込締切日	2月10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 (懇親会会場受付・現金払いのみ)
一般	5,000円	7,000円
同伴者(ご夫人またはご主人)	3,000円	3,000円

・お支払後の取消は、準備の都合上ご返金いたしかねますのでご了承下さい。

◆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10日(金)の入金日をもって予約申込完了となります。

◆講演概要集 DVDのみ購入する場合

件名を「2017年春期講演大会講演概要集 DVD 購入申込」とし、①申込者氏名②会員資格(会員番号も併記)③申込数④住所をご記入の上、E-mail: ordering@jim.or.jp 宛にお申込み下さい。3月1日の発行後、請求書を添えて送付いたします。

会員価：本体3,810円+税 定価：本体10,000円+税 送料：360円

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

2017年春期講演大会における企業説明会への学生参加者の募集

2017年春期講演大会開催に合わせ、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・日本鉄鋼協会併催の第3回企業説明会を開催します。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。講演大会に参加する学生を対象に募集しますので、奮ってご応募下さい。今回は、企業のことをより深く知ることができるように、説明会終了後に企業の担当者との交流会(立食懇親会、無料)を行ないます。

開催日時 2017年3月14日(火)12:00~19:30

*軽食を準備します。

開催場所 首都大学東京南大沢キャンパス(12号館, 8・9号館, 国際交流館) (東京都八王子市南大沢 1-1)

主催 公益社団法人日本金属学会

協賛 首都大学東京学生サポートセンター, 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42社

スケジュール 12:00~14:00 企業口頭説明(企業概要のプレゼンテーション)

14:00~17:00 企業ブース説明

17:30~19:30 企業担当者との交流会(立食懇親会, 参加無料)

応募資格 日本金属学会の春期講演大会の参加学生

応募方法 本会ホームページ上の2017年春期講演大会の参加申し込み画面から申し込む

募集期間 2016年11月10日(木)~2017年2月10日(金)

問合せ先 (公社)日本金属学会 企業説明会担当 ☎ 022-223-3685 FAX 022-223-6312 E-mail: secgnl@jim.or.jp

～ 第3回企業説明会参加企業(42社) ～

(50音順)

1 愛知製鋼株	2 石福金属興業株	3 NTN株	4 株荏原製作所
5 株神戸製鋼所	6 株コベルコ科研	7 サンデンホールディングス株	8 山陽特殊製鋼株
9 株GSユアサ	10 JFE スチール株	11 JFE テクノリサーチ株	12 昭和電工株
13 新日鐵住金株	14 新日鐵住金ステンレス株	15 新明和工業株	16 日鉄住金 SG ワイヤ株
17 住友金属鉱山株	18 住友重機械工業株	19 住友電気工業株	20 セイコーインスツル株
21 株ソディック	22 大同特殊鋼株	23 中越合金鋳工株	24 中外炉工業株
25 TDK株	26 東洋鋼板株	27 DOWA ホールディングス株	28 トビー工業株
29 日新製鋼株	30 日鐵住金建材株	31 日鉄住金テクノロジー株	32 日本軽金属株
33 日本発条株	34 日本冶金工業株	35 日立金属株	36 株日立製作所
37 日立造船株	38 福田金属箔粉工業株	39 三井金属鉱業株	40 三菱アルミニウム株
41 ヤマハ発動機株	42 株UACJ		

**2017年春期講演大会機器・書籍・カタログ展示会出展募集
大会プログラム広告および
講演概要集 DVD ジャケット広告募集**

2017年3月15日(水)から17日(金)までの3日間、首都大学東京南大沢キャンパスで開催される春期講演大会会場で機器・書籍およびカタログの有料展示会を開催いたします。大会プログラム、講演概要集 DVD ジャケット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900mm(予定)

展示台(テーブル)、椅子、電源(100V 1kWまで)をご用意します。

*電気容量の追加は1kW毎に10,000円(税別)をご負担下さい。

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 2017年2月3日(金)

■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 2017年2月3日(金)

■講演大会プログラム広告

原稿寸法 A4版1P 天地260mm×左右180mm
1/2P 天地125mm×左右180mm

入稿原形態 完全データ(グレースケール)

申込締切 2017年1月26日(木)

原稿締切 2017年2月2日(木)

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。

■講演概要集 DVD ジャケット広告

原稿寸法 天地120mm×左右121mm

入稿形態 完全データ(4色カラー)

申込締切日 2017年2月2日(木)

原稿締切日 2017年2月2日(木)

掲載場所	頁	掲載料金
表紙2カラー	1	50,000円
表紙4カラー	1	75,000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・問合せ先

〒104-0061 東京都中央区銀座7-12-4(友野本社ビル)

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

2017年春期講演大会会期中の託児室設置のお知らせ

2017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設いたします。利用ご希望の方は「託児室利用規約」をご確認の上、下記シッター会社へ直接E-mailにてお申込み下さい。

設置期間および利用時間(開始、終了時間は予定です)

設置期間	利用時間
2017年3月15日(水)	8:30~17:30
2017年3月16日(木)	8:30~17:30
2017年3月17日(金)	8:30~16:45

場 所 首都大学東京南大沢キャンパス内

(詳細はお申し込の方のみにご案内します)

対象・利用料金

0歳~2歳 お子様1人につき 2,000円/1日

3歳 お子様1人につき 1,500円/1日

4歳~学童まで お子様1人につき 1,500円/1日

※二人同時に預ける場合、二番目の子(弟もしくは妹)は半額

利用料金は、利用当日朝までに、日本鉄鋼協会事務局室(6号館1階)にお支払い下さい。なお、申込締切後のキャンセルはキャンセル料を頂く場合がありますので、あらかじめご了承下さい。

利用シッター会社 (株)ファミリー・サポート BAMBINO CLUB

担当者:星

申込方法 申込み期間中に本ホームページに開設する申込みページよりお申込み下さい。

※お申込み受領後3営業日以内に、シッター会社より返信メールをお送りします。

申込期間 2017年2月1日(水)~2月28日(火)まで(定員に達し次第締め切らせて頂きます)

申込・問合せ先 (株)ファミリー・サポート BAMBINO CLUB

担当者:星

☎ 03-3377-3177 FAX 03-3377-3178

E-mail: khoshi@familysupport.co.jp

※不測の事故に対応するために、シッター会社が保険に加入しており、保険適用範囲で補償いたします。また日本金属学会および日本鉄鋼協会は、事故の責任は負わないことを申し添えます。お子様の健康状態、留意点など必ず託児スタッフへお伝え下さい。お伝えいただけない事が原因となってお子様へ損害が発生した場合はお客様の責任となります。

※完全ご予約制となっておりますので、ご予約のない場合にはご利用いただけません。なお、託児室のスペースの関係上、定員になり次第締め切らせていただきますので、予めご了承下さい。

第3回ランチョンセミナー開催予定

春期講演大会の会期中に、第3回ランチョンセミナーを開催いたします。このセミナーは、参加者の皆様に講演大会の昼食時間を利用して昼食をとって頂きながら、企業による最新の技術情報を聴講いただく企画です。参加無料です。多くの皆様のご参加をお待ちしております。

主 催 公益社団法人 日本金属学会

企 画 株式会社 明報社

日 時 2017年3月16日(木) 昼休み時間

会 場 首都大学東京南大沢キャンパス 1号館(講演会場)

参加費 無料 昼食を無料提供いたします。

~皆様のご参加をお待ちしております!!~

参加企業・参加方法 次号2号にて詳細をご案内いたします。

2017年秋期講演大会公募シンポジウムテーマ提案募集

提案期限：2017年2月20日(月) 期日厳守

会員の研究活動一層の活性化を図ることを目的として、春秋講演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。本年の秋期講演大会の公募シンポジウムテーマを募集いたします。要領をご参照の上、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55巻12号624頁 or ホームページ→講演大会

第15回学術貢献賞候補者推薦のお願い

本会では地域振興の観点から各地域に根ざした技術の進歩発達に貢献した個人あるいは組織を対象とした「学術貢献賞」を設けております。第15回の授賞式は、2017年秋期講演大会(北海道大学)の折、9月6日に行い、また会期中に受賞記念講演をお願いしております。

多数の優秀な候補者を推薦いただくため、広く会員からの推薦(3名以上連名)をもとめております。下記要領により積極的にご推薦下さい。

*推薦書(様式)は、チェック項目を確認の上、ご提出下さい。

■推薦要領

候補者の対象 各地域において金属学または金属工業に関する学術または技術の進歩発達に功労があった方。

受賞人数 各支部1名、但し関東支部と関西支部は1~3名程度
受賞者の方には、秋期講演大会の折に受賞記念講演をお願いしております。

推薦資格 本会支部長、代議員または3名以上の正員連名による推薦

推薦書記入方法 ①所定の推薦書様式に合わせてご推薦願います。
②最終学歴は卒業年次および学校名(学部名)を記入、また、大学院修了者は修了年次と大学名も併せて記入して下さい。
③業績の概要と推薦理由は1,000字程度で記入して下さい。

推薦手続き 下記メール宛に「第15回学術貢献賞推薦」と明記し、お送り下さい。送信後2~3日過ぎても受理メールの無い場合はお問合せ下さい。(所定様式はホームページからダウンロードして下さい。)

推薦締切 2017年2月20日(月)

詳細 までりあ12号622頁 ホームページ：表彰関係

第15回功労賞候補者推薦のお願い

本会では45歳以上の研究・技術分野に功績があった方を対象として、日本金属学会賞に次ぐ賞として「日本金属学会功労賞」を設けております。第15回の授賞式を2017年秋期講演大会(北海道大学)の折、9月6日に行います。多数の優秀な候補者を推薦いただくため、広く正員からの推薦(3名以上連名)をもとめております。下記要領により積極的にご推薦下さい。

*推薦書(様式)は、チェック項目を確認の上、ご提出下さい。

■推薦要領

候補者の対象 2017年5月31日時点で45歳以上、各組織における定年までの方

対象部門 学術部門：金属学または金属工業に関する学術の進歩発達に功労があった方
技術部門：金属学または金属工業に関する技術の進歩発達に功労があった方

受賞人数 学術部門2名 技術部門1名

推薦資格 本会代議員または3名以上の正員連名による推薦

推薦書記入方法

- ①所定の推薦書様式に合わせてご推薦願います。
- ②最終学歴は卒業年次および学校名(学部名)を記入、また、大学院修了者は修了年次と大学名も併せて記入して下さい。
- ③業績の概要と推薦理由は1,000字程度で記入して下さい。
- ④論文リストは特に主要な論文を「原著論文」「解説論文」「国際会議論文」に分別し、計15編以内を選び、論文題目、発表誌名、巻号頁、共著者を記載の上、A4版1~2頁で提出下さい。

推薦手続き 下記メール宛に「第15回功労賞推薦」と明記し、お送り下さい。送信後2~3日過ぎても受理メールの無い場合はお問合せ下さい。(所定様式はホームページからダウンロードして下さい。)

推薦締切 2017年2月20日(月)

詳細 までりあ12号622頁 ホームページ：表彰関係

第27回奨励賞の候補者推薦のお願い

本会では次世代を託する優れた若手研究者を顕彰するために1991年から「日本金属学会奨励賞」を設けており、第27回の授賞式を2017年の秋期講演大会(北海道大学)の折、9月6日に行います。

歴史の転換期にある今日、若い世代の意識の高揚こそが何よりも望まれ、金属・材料工学ならびに関連分野で活躍しつつある若手研究者の中から将来性豊かな人材をご推薦下さいますようお願いいたします。

*推薦書(様式)は、チェック項目を確認の上、ご提出下さい。

■推薦要領

候補者の対象 2017年5月31日時点で33歳以下の方、金属・材料工学ならびに関連分野で卓越した業績を挙げつつある研究者。工業技術部門は企業の研究者または技術者を対象とします。

対象部門 物性、組織、力学特性、材料化学、材料プロセッシング、工業材料、工業技術部門の7部門

推薦資格 本会代議員、分科会委員または3名以上の正員連名による推薦

推薦書記入方法

- ①所定の推薦書様式に合わせてご推薦願います。
- ②最終学歴は卒業年次および学校名(学部名)を記入、また、大学院修了者は修了年次と大学名も併せて記入して下さい。
- ③研究部門は物性、組織、力学特性、材料化学、材料プロセッシング、工業材料、工業技術部門の7部門となっております。どの部門に推薦されるか記入して下さい。(分野別に選考いたします)
- ④業績の概要と推薦理由は1,000字程度で記入して下さい。工業技術部門は企業人としての実績(特許・社内表彰等)も記入下さい。
- ⑤論文リストは特に主要な論文を「原著論文」「解説論文」「国際会議論文」に分別し、計15編以内を選び、論文題目、発表誌名、巻号頁、共著者を記載の上、A4版1~2頁で提出下さい。

推薦手続き 下記メール宛に「第27回奨励賞推薦」と明記し、お送り下さい。送信後2~3日過ぎても受理メールの無い場合はお問合せ下さい。(所定様式はホームページからダウンロードして下さい。)

推薦締切 2017年2月20日(月)

詳細 までりあ12号622頁 ホームページ：表彰関係

第14回村上奨励賞候補者推薦のお願い

本会では財団法人村上記念会からのご寄付を基に金属工学の分野で卓越した業績を挙げつつある若手研究者を奨励するため「日本金属学会村上奨励賞」を設けており、第14回の授賞式を2017年の秋期講演大会(北海道大学)の折、9月6日に行います。多数の優秀な候補者を積極的にご推薦下さい。

*推薦書(様式)は、チェック項目を確認の上、ご提出下さい。

■推薦要領

候補者の対象 金属工学の分野で卓越した業績を挙げつつある、2017年5月31日時点で40歳以下の若手研究者。

推薦資格 本会代議員、分科会委員または3名以上の正員連名による推薦

受賞人数 若干名

推薦書記入方法

- ①推薦書様式に合わせてご推薦願います。
- ②最終学歴は卒業年次および学校名(学部名)を記入、また、大学院修了者は修了年次と大学名も併せて記入して下さい。
- ③推薦理由は1,000字程度で記入して下さい。
- ④論文リストは特に主要な論文を「原著論文」「解説論文」「国際会議論文」に分別し、計15編以内を選び、論文題目、発表誌名、巻号頁、共著者を記載の上、A4版1~2頁で提出下さい。

推薦手続き 所定の様式に必要事項を記入の上、下記メール宛に「第14回村上奨励賞推薦」と明記し、お送り下さい。送信後2~3日過ぎても受理メールの無い場合はお問合せ下さい。(所定様式はホームページからダウンロードして下さい。)

推薦締切日 2017年2月20日(月)

詳細 までりあ12号623頁 ホームページ：表彰関係

第65回論文賞候補論文推薦(自薦)のお願い

本会では毎年秋の講演大会の折に、前年1カ年の会誌、欧文誌に掲載された論文の中から特に優秀な論文に対し、論文賞を授賞しております。論文賞候補論文の推薦は会誌、欧文誌の「編集委員」または「論文査読者」あるいは「代議員」の方々をお願いしております。また、より広く推薦していただくため、「著者本人」からの自薦も認めております。つきましては、下記ご参照の上、奮ってご応募をお願いいたします。

*論文賞推薦書(様式)は、チェック項目をご確認の上ご提出下さい。

◎第65回論文賞の対象論文

日本金属学会誌：第80巻1~12号(2016年)掲載分

Materials Transactions：Vol. 57 No. 1~12(2016年)掲載分

注：次の要件をすべて満たした原著論文を対象といたします。

- (1) 日本金属学会誌掲載論文は、「学術論文」又は「技術論文」のカテゴリーに属する論文であること。
Materials Transactions 掲載論文は、「Regular Article」又は「Technical Article」のカテゴリーに属する論文であること。
- (2) Materials Transactions に英文発表後1年以内に日本金属学会誌に投稿された論文若しくは日本金属学会誌に発表後1年以内に Materials Transactions に投稿された論文ではないこと。
- (3) コピーライトが本会に帰属されていること(本会に著作権を委譲している論文)。
- (4) 推薦数の要件
 - ①推薦者は、同じ論文を複数の部門に推薦することはできない。
 - ②1名の推薦者がこの賞に推薦出来る論文数は、一部門につき1論文である。

◎ 推薦書の記入要項

1. 論文題名
2. 著者名
3. 掲載・巻・号・頁
4. 対象部門(物性、組織、力学特性、材料化学、材料プロセス、工業材料の中から選択) 掲載された部門で選考されます
5. 推薦理由(300~400字)
6. 推薦者名(勤務先・連絡先 TEL・E-mail も記入下さい)

推薦締切 2017年2月20日(月)

詳細 までりあ12号623頁 ホームページ：表彰関係

第7回までりあ賞推薦(自薦)のお願い

会報「までりあ」に掲載された論文または記事の中から、金属及びその周辺材料の学術及び科学技術の振興に顕著な貢献をしたと思われる方に「までりあ賞」を授賞しております。

授賞候補論文および授賞候補記事の推薦は「会報編集委員」、「著者本人」、「一般会員(正員3名以上の連名)」の推薦となります。積極的なご推薦をお願いいたします。

■第7回「までりあ賞」推薦要領

賞の名称・概要および授賞件数

- (1) **までりあ論文賞** 2編以内
日本金属学会会報「までりあ」に掲載した論文で、学術または科学技術上優秀で且つ金属およびその周辺材料に係る分野の進歩発展に顕著な貢献をした論文に対し授賞する。
- (2) **までりあ啓発・教育賞** 2編以内
日本金属学会会報「までりあ」に掲載した記事で、までりあ記事の特徴を活かし、金属およびその周辺材料に係る啓発や教育に顕著な貢献をした記事に対し授賞する。

授賞対象記事 2014年~2016年掲載済記事(授賞済記事は除く：授賞済記事はホームページに掲載します。)

推薦締切 2017年2月20日(月)

詳細 までりあ55巻12号623頁 ホームページ：表彰関係

2017年1号からの機関誌の配送について

〈お知らせ〉

2017年1号より、会報「までりあ」、金属学会誌、Materials Transactions の配送は、3誌それぞれ別便による送付となります。これまで「までりあ」と同封されていた他のジャーナルはそれぞれ別にお手元に届くこととなりますので、何卒ご了承下さいますようお願い申し上げます。



研究会 No. 70

第6回プラストンに基づく変形現象研究会
～変形機構研究のフロンティア～

[共催] 京都大学 構造材料元素戦略研究拠点

近年、必ずしも転位の概念だけでは理解しきれない変形現象が顕在化しつつある。回位(disclination)の運動によるナノ結晶材料における複数の結晶粒の協調的なせん断や回転、原子のシャフリングを要する六方晶や金属間化合物における変形双晶、マルテンサイト変態、粒界すべりなどがこの範疇に属し、材料の変形現象を包括的に理解する上位概念として変形子(プラストン)が提案されている。本研究会は新規な挑戦的概念であるプラストンを題材に新たな視点から材料の変形と破壊についての基礎的議論を行うために企画された。今回は、構造材料の研究に関する基礎的検討を通して、活発な意見交換を行いたい。

日時 2017年1月31日(火)～2月1日(水)

場所 京都大学 楽友会館
(〒606-8501 京都市左京区吉田二本松町)

プログラム(全て英語での講演)

1月31日(火)

10:00～10:25 Registration

10:25～10:30 Opening Remark

10:30～11:30

(1) New Insights into Strengthening Mechanisms in Superalloys
Prof. Michael J. Mills, The Ohio State University, USA

—休憩—

11:50～12:30

(2) Plastic deformation and solid solution strengthening in high entropy alloys with the fcc structure Assistant
Prof. Norihiko L. Okamoto, Kyoto University

—昼食休憩—

13:50～14:50

(3) Ab initio modeling of dislocation core properties in HCP and BCC metals Prof. David Rodney, Universite de Lyon, France

—休憩—

15:20～16:00

(4) Crack-tip shielding by dislocations and its effect on fracture toughness Prof. Kenji Higashida, Kyushu University
(Now at National Institute of Technology, Sasebo College)

—休憩—

16:10～16:50

(5) Deformation Twinning in Ultrafine Grained High-Mn Austenitic Steels Prof. Nobuhiro Tsuji, Kyoto University

2月1日(水)

9:30～10:30

(1) Deformation and Failure at the Nanoscale: Case Studies on Complementing Experiments with Simulations
Prof. Erik Bitzek, Friedrich-Alexander Universitat Erlangen-Nurnberg, Germany

—休憩—

11:00～11:40

(2) Multiscale analysis on temper and H-induced embrittlement of steel
Dr. Masatake Yamaguchi, Japan Atomic Energy Agency

—休憩—

11:50～12:30

(3) Hydrogen-related fracture behavior of martensitic steels under different deformation conditions
Associate Prof. Akinobu Shibata, Kyoto University

—昼食休憩—

13:50～14:50

(4) Unique tensile fracture of high Mn alloys
Prof. Young-Kook Lee, Yonsei University, Korea

—休憩—

15:20～16:00

(5) FCC to HCP martensitic transformation and dislocation motion under thermal and mechanical cycling
Dr. Takahiro Sawaguchi, National Institute for Materials Science

—休憩—

16:10～16:50

(6) Effect of Elemental Segregation on Properties of Structural Materials
Dr. Koichi Tsuchiya, National Institute for Materials Science

16:50～17:00

Closing

企画責任者 乾 晴行(京大・工)

参加費 無料(参加人数確認のため可能な限り事前参加申し込み下さい)

申込・問合先 1月20日(金)までにE-mailまたはFAXにて氏名所属電話番号を明記してお申し込み下さい。

〒606-8501 京都市左京区吉田本町
京都大学 構造材料元素戦略研究拠点
大石毅一郎

☎ 075-753-5573 FAX 075-753-5578

E-mail: admin@esism.kyoto-u.ac.jp

金属学会シンポジウム

データサイエンスと材料研究開発

日時 2017年1月20日(金)13:00～17:00

場所 エッサム神田ホール1号館3F 大会議室301(〒101-0045 東京都千代田区神田鍛冶町3-2-2)

事前申込締切 2017年1月10日(火)着信 当日申込もごさいます。

高温物性値測定技術の最前線とものづくりへのアプローチ

日時 2017年1月24日(火)10:00～17:20

場所 東京工業大学 大岡山キャンパス 西9号館1階コラボレーションルーム

事前申込締切 2017年1月12日(木)着信 当日申込もごさいます。

詳細 までりあ11号552頁, 553頁または本会ホームページの「シンポジウム」をご覧下さい。

問合先 〒980-8544 仙台市青葉区一番町1-14-32 (公社)日本金属学会 シンポジウム参加係

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

■先端材料の結晶方位分布と関連特性 II (Crystallographic Orientation Distribution and Related Properties in Advanced Materials II)

金属やセラミックス等の結晶性材料の高性能化には組成や組織の制御以外に結晶方位の制御も必要である。将来的な資源循環を考慮すると、微細組織と結晶方位を最適化することがますます重要となる。また、最近の結晶方位解析技術の進歩により、結晶方位と関連した様々なソフトウェアが開発されている。このような動向を背景に、本特集企画では会誌77巻9号(2013年)に掲載された「先端材料の結晶方位分布と関連特性」を再企画する。結晶方位分布に関する様々な研究を対象とする。

上記テーマに関する特集を、日本金属学会誌81巻11号(2017年11月発行)に予定しております。多数ご投稿下さいますようお願いいたします。

実施予定号：第81巻第11号(2017年)

原稿締切日：2017年5月1日

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

問合せ先 〒980-8544 仙台市青葉区一番町 1-14-32
(公社)日本金属学会 会誌編集委員会
<http://jim.or.jp/>
☎ 022-223-3685 FAX 022-223-6312
E-mail: editjt@jim.or.jp

■Recent Advances in Solid State Ionics and Its Applications (固体イオニクスとその応用における最近の新展開)

固体イオニクスの分野では、イオン輸送現象、材料開発、デバイス応用の各方面において近年様々な新展開があります。イオン輸送現象においては、計算科学や先端分光・回折技術との連携によりバルク内拡散の可視化や、ナノスケール界面・表面での伝導機構と電気化学反応の理解が進んでいます。材料開発では、高イオン伝導性材料、混合伝導体に加えて、複合アニオンや有機・無機ハイブリッド材料が注目されています。また、様々な手法によりこれら材料の高品質な薄膜も作製されています。応用面では、二次電池、燃料電池の高性能・高信頼性が進み、それらのオペランド解析も注目されています。さらに、原子スイッチやメモリスターは固体イオニクスの新しい展開です。本特集号は、これら固体イオニクス分野でのオーバービュー、原著論文を広く募り、現状と今後の展望を探る機会とします。

上記テーマに関する特集を、Materials Transactions 58巻12号(2017年12月発行)に予定しております。多数ご投稿下さいますようお願いいたします。

掲載予定号：第58巻第12号(2017年)

原稿締切日：2017年6月1日

■Kinetics and Phase Relationships for Microstructure Evolution in Metals and Alloys (金属材料における組織形成過程の速度論的挙動と相関係)

金属材料の物理的性質や機械的強度は、合金組成ばかりでなく材料組織によって決定される。このため、優れた材料特性を有する金属材料を開発するためには、最適な材料組織を実現することが重要である。熱処理過程における金属材料の組織変化は、主に拡散律速型で進行する。しかし、熱処理過程の初期段階では、むしろ界面反応律速型が支配的であると言われている。このため、材料組織を最適に制御するためには、組織変化の律速過程等に対する知見が必要である。本特集号では、金属材料の組織形成過程に対する速度論的挙動や相関係に注目した実験研究や理論解析に関する論文を対象としている。

上記テーマに関する特集を、Materials Transactions 58巻12号(2017年12月発行)に予定しております。多数ご投稿下さいますようお願いいたします。

掲載予定号 第58巻第12号(2017年)

原稿締切日 2017年6月1日

- 投稿に際しては、日本金属学会欧文誌投稿の手引・執筆要領(本会 Web ページ)に従うこと。
- 通常の投稿論文と同様の審査過程を経て、編集委員会で採否を決定する。
- 著者は、投稿・掲載費用をご負担願います。(別刷50部寄贈)。

問合せ先 〒980-8544 仙台市青葉区一番町 1-14-32
(公社)日本金属学会欧文誌編集委員会
<http://jim.or.jp/>
☎ 022-223-3685 FAX 022-223-6312
E-mail: editjt@jim.or.jp



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。又、掲載論文の早期公開も行っております。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。～



第36回「若手フォーラム」
—ポスターセッション併催—

日本金属学会・日本鉄鋼協会 中国四国支部では、若手研究者および技術者の研究・開発への意欲向上ならびに議論を通じての支援のために、講演の場を提供することを実施しています。またポスターセッション(フリーテーマ)を開催しますので、意欲あふれる研究発表を期待しています。

日時 2017年2月17日(金)10:00~16:30
場所 岡山国際交流センター 7階多目的ホール
(<http://www.opief.or.jp/oicenter/>)
(〒700-0026 岡山市北区奉還町 2-2-1
JR 岡山駅運動公園口(西口)から徒歩5分)

プログラム

10:00~10:10 開会の挨拶 岡山理科大 金谷輝人
10:10~11:00 座長:岡山大 竹元嘉利
微小試験片試験技術を用いた金属材料の局所強度特性と損傷評価
○岡山大 中田隼矢
11:00~11:10 —休憩—
11:10~12:00 座長:広島大 市川貴之
Fabrication process of carbon nanofibers reinforced magnesium-calcium alloy composites
○広島大 姚友強(Youqiang YAO)
13:30~16:30 ポスターセッション
(下記要領にてお申込下さい)

〈ポスター発表募集〉

申込方法 (a)題名(b)所属・氏名(発表者に○印)(c)連絡先(電話・E-mail)を明記、**2月8日(水)必着**で、下記申込先へE-mailでご連絡下さい。

ポスターサイズ 横90cm×縦210cm(Max.)

参加費 無料

企画世話人 竹元嘉利(岡山大), 清水一郎(岡山理科大),
金谷輝人(岡山理科大)

申込・問合せ先 岡山大学工学部 竹元嘉利
☎ 086-251-8027 FAX 086-251-8266
E-mail: takemoto@mech.okayama-u.ac.jp



掲示板

〈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.
•「あたりあ」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して下さい)
•原稿送信先: FAX 022-223-6312 E-mail: materia@jim.or.jp

◇3N-Lab Workshop on Permanent Magnets◇

★ご参加には事前登録が必要です。
登録方法についてはワークショップホームページをご確認下さい。

■開催期日 2017年3月24日(金)

■開催会場 物質・材料研究機構 千現地区(茨城県つくば市)

■ホームページ

<http://www.nims.go.jp/mmu/3N-LabWorkshop.html>

■予定講演者とタイトル

●D. Givord, Neel Lab.

“What magnetic measurements bring to our understanding of coercivity”

●S. Okamoto, IMRAM, Tohoku Univ.

“Coercivity mechanism of Nd-Fe-B magnets based on magnetic viscosity and FORC measurements”

●T. Schrefl, Danube Univ. of Krems

“Micromagnetics of magnetization reversal in permanent magnets—nucleation and pinning in focus”

●T. Miyake, AIST

“Possibility of rare earth permanent magnets other than Nd₂Fe₁₄B”

●O. Gutfleisch, Technische Univ. Darmstadt

“Free rare earth or rare earth free magnets—vision and reality”

●K. Hono, NIMS and JST, CREST

“High coercivity Dy-free Nd-Fe-B magnets”

●T. Iriyama, Intermetallics Japan

“Issues in ultrafine grained Nd-Fe-B sintered magnets”

●T. Nakamura, JASRI

“XMCD imaging of magnetization reversal processes in Nd-Fe-B magnets”

●T. Abe, NIMS

“Thermodynamic database for NdFeB permanent magnets based on CALPHAD approach”

●N. Dempsey, Neel Lab.

“RE-TM hard magnetic films—from model materials to applications”

●H. Sepehri-Amin, NIMS

“Microstructure and coercivity of Sm₂(Co,Fe,Cu,Zr)₁₇ permanent magnets”

■問合せ 物質・材料研究機構

磁性・スピントロニクス材料研究拠点

運営室 吉野

E-mail: YOSHINO.Ayumi@nims.go.jp

★備考:「3N-Lab」とは国際共同研究ラボ

「NEEL NIMS for Nanosciences Laboratory」の略称です。

◇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 岡部 徹 教授
 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
 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 (一社)軽金属学会 (一社)資源・素材学会他
 ■開催会場 東京大学生産技術研究所
 An 棟 2F コンベンションホール(〒153-8505 東京都目黒区駒場 4-6-1)
 (最寄り駅: 駒場東大前, 東北沢, 代々木上原)
 ■参加登録・お問合わせ
 東京大学 生産技術研究所
 岡部研究室 学術支援専門職員 宮崎智子
 ☎ 03-5452-6313 E-mail: tmiya@iis.u-tokyo.ac.jp

〈平成28年度 レアメタル研究会のご案内〉(2016.11.30現在)

- 第74回 2017年1月6日(金)(平成28年度 第4回)
 ★貴金属シンポジウム(第3回)+新年会★(合同開催)
 ■ 第75回 2017年3月10日(金)(平成28年度 最終回)
 ★中村崇教授が熱く語る特別シンポジウム+慰労会★(合同開催)

■第74回 2017年1月6日(金) 13:30~An棟2F コンベンションホール
 特別・合同シンポジウム(第4回貴金属シンポ)+新年会
 貴金属の製錬・リサイクル技術の最新線

■第75回 2017年3月10日(金)14:00~ An棟2F コンベンションホール
 ★中村崇教授が熱く語る特別シンポジウム+慰労会★(合同開催)
 テーマ: 中村崇先生の研究と活動, 非鉄業界と研究の将来展望
 時 間: 午後2:00~
 講 演:
 ・講演題目検討中(2件程度の講演を予定) 講師依頼中
 ・非鉄製錬の研究と業界に対する取り組みと将来展望(仮)(60分)
 東北大学 多元物質科学研究所 教授
 東京大学 生産技術研究所 特任教授 中村 崇 講師
 午後6:00~ 研究交流会・意見交換会(An棟2F ホワイエ)

レアメタル研究会ホームページ
http://www.okabe.iis.u-tokyo.ac.jp/japanese/rc40_j.html

★備考: 関連研究会
 〈米国版レアメタル研究会(RMW)のご案内〉
 ■RMW12 Workshop on Reactive Metal Processing (Reactive Metal Workshop) March 3 (Fri)-4 (Sat), 2017, Cambridge, MIT
<http://www.okabe.iis.u-tokyo.ac.jp/core-to-core/rmw/>

日 本 金 属 学 会 誌 掲 載 論 文
 Vol. 81, No. 1 (2017)

特集「ネオジム磁石の金属組織および粒界近傍の
 磁性と保磁力機構」

特集「ネオジム磁石の金属組織および粒界近傍の磁性と保磁力機構」によせて 広沢 哲

ネオジム焼結磁石の微細組織—粒界相および界面組織 (レビュー) 佐々木泰祐 大久保忠勝 宝野和博

マイクロマグネティクス計算によるNd-Fe-B磁石磁化反転過程の解析 (レビュー) 大久保忠勝 Hossein Sepehri-Amin 宝野和博

希土類磁石における界面および粒界近傍の結晶磁気異方性と保磁力 (レビュー) 吉岡匠哉 土浦宏紀

ネオジム磁石の粒界構造と局所磁性の電子論 (レビュー) 合田義弘 立津慶幸 常行真司

Nd-Fe-Cu 3元系状態図の熱力学的解析 佐伯成駿 堀野祐司 Luo Jinya 榎木勝徳 大谷博司

ネオジム磁石の粒界相形成に対するフェーズフィールドシミュレーション 小山敏幸 塚田祐貴 阿部太一 小林能直

Materials Transactions 掲載論文
 Vol. 58, No. 1 (2017)

—Regular Articles—

Materials Physics
Diffraction-Pattern Based on Spontaneous Wrinkled Thin Films Shi Peng, Wei Li and Jing Zhang

Microstructure of Materials
Effects of Friction Stir Process and Stabilization Heat Treatment on Tensile Characteristics and Punch-Shear Properties of AZ61 Alloy Hsiang-Ching Chen, Fei-Yi Hung, Truan-Sheng Lui and Li-Hui Chen

Solubility of Carbon in Molten Copper-Nickel Alloy and Vickers Hardness of Copper-Nickel-Saturated Carbon Muizz bin Mohd Noor Abdul and Seiji Yokoyama

Kinetics of Solid-State Reactive Diffusion in the Cu/Zn System Yoshiki Takamatsu, Minho O and Masanori Kajihara

Surface Sulfation Chemistry, Structural and Chemical Activities of High Pure Anatase TiO₂ Nanocrystals Youjun Yan

Modeling of Phosphorus Transport by Interstitial Dumbbell in α -Iron Using First-Principles-Based Kinetic Monte Carlo

Ken-ichi Ebihara,
Tomoaki Suzudo and Masatake Yamaguchi

Aging Behavior of *In-Situ* TiB₂ Particles Reinforced 2014Al Alloy Composites

Jing Xue,
Luling Zhang, Jun Wang and Renjie Wan

Correlation between Density and Microstructural Features in Vacuum Die Cast AZ91D Magnesium Alloy

Qingliang Wang, Shoumei Xiong and
Xingzhong Zhang

Mechanics of Materials

Mechanical Properties of Zircaloy-4 Cladding Tube by Advanced Expansion due to Compression (A-EDC) Test

Z. Zhao, D. Kunii, T. Abe, H.L. Yang,
S. Kano, Y. Matsukawa, Y. Satoh and H. Abe

Effect of Intergranular Carbides on Creep Strength in Nickel-Based Heat-Resistant Alloys

Takanori Ito, Shigeto Yamasaki, Masatoshi Mitsuahara,
Minoru Nishida and Mitsuharu Yonemura

Materials Chemistry

Influence of Temperature on the Selective Chlorination and Evaporation Reactions of Zn and Pb in EAF Dust

Guodong Sun, Hiroyuki Matsuura and
Fumitaka Tsukihashi

Synthesis of Ag/CuInS₂ Core-Shell Nanoparticles

Toshihiro Kuzuya, Takahiko Kuwada, Yasushi Hamanaka
and Shinji Hirai

Highly Enhanced Heavy Metal Adsorption Performance of Iron Oxide (Fe-Oxide) upon Incorporation of Aluminum

Hye-Jin Hong, Ji-Won Yang,
Jung-Seok Yang and Hyeon Su Jeong

Electrochemical and Quantum Chemical Studies of 1, 2, 3-Benzotriazole as Inhibitor for Copper and Steel in Simulated Tap Water

Yong-Sang Kim and Jung-Gu Kim

Materials Processing

Stress Analysis of Thin Wall Core Pin in Aluminum Alloy High Pressure Die Casting

Suguru Takeda, Norio Shinmura and Shinji Sannakanishi

Fabrication of Nano-Crystalline Diamond Duplex Micro-Gear by Hot Filament Chemical Vapor Deposition

Hong-jun Wang, Dun-wen Zuo, Feng Xu
and Wen-zhuang Lu

Joining of AZ31 Magnesium Alloy and Steel Sheet under Four Different Coating Conditions Based on Gas Metal Arc Weld-Brazing

Minjung Kang,
Cheolhee Kim and Young-Min Kim

Engineering Materials and Their Applications

Synthesis, Spectral Properties of Zinc Hexadecafluorophthalocyanine (ZnPcF₁₆) and Its Application in Organic Thin Film Transistors

Yingli Sun, Xianggao Li, Shirong Wang, Lijun Zhang and
Feng Ma

Alignment of Biological Apatite Crystallites in Peri-Implant Bone of Beagles

Kento Odaka,
Satoru Matsunaga, Masaaki Kasahara, Takayoshi Nakano,
Masao Yoshinari and Shinichi Abe

Inhibitory Effect of Zirconium Coating to Bone Bonding of Titanium Implants in Rat Femur

Ryohei Takada, Tetsuya Jinno, Yusuke Tsutsumi,
Hisashi Doi, Takao Hanawa and Atsushi Okawa

Biodegradation of Pure Magnesium and Bone Tissue Reaction in Rabbit Femur 1 Year Results of 3D Micro-CT Monitoring and Histological Observation

Akane Ishikawa, Jun Tamura, Toshikazu Akahori,
Tomokazu Hattori and Masataka Deie

—Rapid Publication—

Evaluation of Pitting Corrosion Mechanism of AZ31 Magnesium Alloy by Monitoring Acoustic Emission

Hye-Young Kim, Jae-Yeon Kim,
Seung-Mi Lee and Jai-Won Byeon



まてりあ 第56巻 第2号 予告

[最近の研究] 溶融金属や溶融塩、溶融スラグの粘度に関する研究 竹田 修
[最近の研究] 生体用マグネシウム合金のリン酸カルシウム被覆 廣本祥子

[入門講座] 中性子線による金属材料の組織と弾塑性変形挙動の解析(Ⅱ)～組織形成その場測定～ 友田 陽
[新技術・新製品] 5編
—他—

編集の都合により変更になる場合がございます。

新 入 会 員

(2016年10月21日～2016年11月21日)

正 員

浅野 聡	住友金属鉱山株式会社	木戸 敬彰	住友重機械ハイマテックス株式会社	西岡 淳一	昭和電線ケーブルシステム株式会社
阿部 能之	住友金属鉱山株式会社	木村 紀孝	日本カンタム・デザイン株式会社	野村 政功	東洋鋼鋳株式会社
綾田 倫彦	日本発条株式会社	櫛部 春雄	トクセン工業株式会社	羽柴 基	株式会社やまびこ
五十嵐正晃	新日鐵住金株式会社	久保田高史	三井金属鉱業株式会社	服部 和徳	株式会社黒木工業所
池田 成明	古河電気工業株式会社	栗岩 貴寛	株式会社三徳	林 耕一	臼井国際産業株式会社
石川 和男	株式会社豊田自動織機	桑原 鉄也	住友電気工業株式会社	桧村 雅人	日鍛バルブ株式会社
石川 欣一	丸本ストルアス株式会社	小出 政俊	株式会社神戸製鋼所	平井 寿敏	大分県産業科学技術センター
石丸詠一郎	新日鐵住金ステンレス株式会社	小紫 正樹	一般財団法人金属系材料研究開発センター	平石 政伯	日本金属株式会社
石本 和弘	東京製鋼株式会社	佐々木 明	DOWA メタニクス株式会社	平澤 愛依	ニダック株式会社
伊藤 明洋	中部電力株式会社	渋江 和久	株式会社UACJ	蛭田 修平	株式会社特殊金属エクセル
伊藤 雅章	大亜真空株式会社	嶋田 利生	中外炉工業株式会社	廣澤 正樹	新日鐵住金化学株式会社
井上 哲夫	東芝マテリアル株式会社	清水 剛	日新製鋼株式会社	藤田 雅	株式会社本田技術研究所
岩本 規暁	愛知製鋼株式会社	城 正満	株式会社TSLソリューションズ	藤村 浩	株式会社日本製鋼所
植田 義久	株式会社ファインシンター	杉田 啓介	住友化学株式会社	藤本 裕之	愛三工業株式会社
内海 宏和	宮城県産業技術総合センター	鈴木 至	国立研究開発法人科学技術振興機構	古川 淳	古河電池株式会社
江川 恭徳	石福金属興業株式会社	鈴木 雄詞	日本軽金属株式会社	細川 勇平	トピー工業株式会社
王 昆	日本冶金工業株式会社	住友 三幸	日亜化学工業株式会社	堀井 貴司	パナソニック株式会社エコソリューションズ社
大石 惠一郎	三菱伸銅株式会社	諏訪部 繁和	日立金属株式会社	牧野 浩	トヨタ自動車株式会社
大上 良樹	関西大学	ソノ サソフン	POSCO JAPAN 株式会社	松原 敏夫	徳島県立工業技術センター
大久保 智	東京都立産業技術センター	高岡 英清	株式会社村田製作所	三阪 佳孝	高周波熱錬株式会社
太田 晃浩	マルヤス工業株式会社	高木 英俊	三協立山株式会社 三協マテリアル社	水野 幸隆	日本高周波鋼業株式会社
大間 英之	日本精線株式会社	高嶋 耕司	株式会社IHI	味 富 晋三	日本タンゴステン株式会社
小川 宏	東ソー株式会社	竹田 幸浩	NTN 株式会社	村田 明宏	岐阜県工業技術研究所
小澤 正	日本ケミコン株式会社	竹中 久貴	株式会社トヤマ	森田 進	日本新金属株式会社
表 和彦	株式会社リガク	田澤 豊彦	日本電子株式会社	安富 義幸	一般財団法人ファインセラミックスセンター
春日 良一	ダイジェット工業株式会社	田中 隆	日鉄住金テクノロジー株式会社	山岡 拓也	三菱製鋼株式会社
桂 翔生	株式会社 神戸製鋼所	田中 義孝	新日本電工株式会社	山口 桂一郎	東北特殊鋼株式会社
金田 章	小名浜製錬株式会社	田野 智宏	株式会社東海理化電機製作所	山田 まりな	東邦金属株式会社
鎌田 隆史	セイコーインスツル株式会社	土屋 新	三菱マテリアル株式会社	吉井 章	三菱アルミニウム株式会社
亀井 裕次	川崎重工業株式会社	長岡 美津也	日新技研株式会社	吉田 成孝	曙ブレーキ工業株式会社
川村 律夫	大阪チタニウムテクノロジーズ	中川 路重己	日鐵住金建材株式会社	吉田 直樹	長野計器株式会社
神田 輝一	関東冶金工業株式会社	中西 賢	電源開発株式会社	吉永 英雄	太陽鋳工株式会社
岸上 一郎	日立金属株式会社冶金研究所	中西 広吉	株式会社豊田中央研究所	吉村 国浩	東洋鋼鋳株式会社
岸本 康夫	JFE スチール株式会社	中野 元裕	神鋼鋼線工業株式会社	渡部 英治	株式会社デンソー
喜多 昭彦	アイシン・エイ・ダブリュ株式会社	中野 要一郎	株式会社淀川製鋼所		

学 生 員

東 尚志	早稲田大学	小谷 拓史	東京大学	三木 健司	群馬工業高等専門学校
安藤 佑樹	早稲田大学	大慶 哲也	京都大学	水越 悠介	富山大学
石原 佐季	東京大学	辻 康広	富山大学		
岡田 晏佳	関西大学	藤岡 由美	大阪大学		



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・担当	問合せ先	締切
1月				
6	第74回 レアメタル研究会(東大生産技研)(本号49頁)	レアメタル研究会・宮崎(東大生産技研岡部研)	TEL 03-5452-6314 okabelab@iis.u-tokyo.ac.jp http://www.okabe.iis.u-tokyo.ac.jp/japanese/rc40_j.html	
12~13	第55回 セラミックス基礎科学討論会(岡山)	日本セラミックス協会 基礎科学部会・難波(岡山大)	TEL 086-251-8896 kiso55@ecm.okayama-u.ac.jp http://ecm.okayama-u.ac.jp/kiso55/	
13	第149回 塑性加工工学講座「熱処理とその周辺技術」(東京)	日本塑性加工学会	http://www.jstp.or.jp	定員 60名
13	チタンの計算材料科学の現状と展望(関西大)(12号626頁)	研究会 No. 74・上田(東北大)	ueda@material.tohoku.ac.jp TEL/FAX 022-795-7295	1.6
17	第101回 シンポジウム「多機能性アルミニウム材料の開発と応用」～素材に息吹を与える多機能化～(早稲田大)	軽金属学会	TEL 03-3538-0232 http://www.jilm.or.jp/	定員 80名
19	表面科学技術研究会2017 高度なモノづくりを支える表面洗浄技術—洗浄とはなに? 完璧洗浄を目指して—(京都)	日本表面科学会 関西支部他・大田	TEL 075-823-1092 mota@shimadzu.co.jp http://www.sssj.org/Kansai/	1.18
20	第36回 疲労講座「初めて学ぶ金属疲労」(札幌)	日本材料学会	TEL 075-761-5321 jimu@jsms.jp	1.10
20~21	第22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)	応用物理学会 薄膜・表面物理分科会・澤野(京都市大)	sawano@tcu.ac.jp http://home.hiroshima-u.ac.jp/oxide/	定員 200名
20	金属学会シンポジウム「データサイエンスと材料研究開発」(東京)(本号46頁)	日本金属学会	TEL 022-223-3685 FAX 022-223-6312 meeting@jim.or.jp	1.10
21	第48回 応力・ひずみ測定と強度評価シンポジウム(東京)	日本非破壊検査協会・岡	TEL 03-5609-4015 oka@jsndi.or.jp http://www.jsndi.jp	
23	第220回 塑性加工技術セミナー「はじめての表面分析—表面形状および結晶組織測定の基本—」(東工大)	日本塑性加工学会	http://www.jstp.or.jp	定員 60名
23	腐食防食部門委員会第314回例会(大阪)	日本材料学会	TEL 075-761-5321 jimu@jsms.jp http://www.jsms.jp	
24	金属学会シンポジウム「高温物性値測定技術の最前線とものづくりへのアプローチ」(東工大)(本号46頁)	日本金属学会	TEL 022-223-3685 FAX 022-223-6312 meeting@jim.or.jp	1.12
24~25	Symposium on Surface Science & Nanotechnology—25th Anniversary of SSSJ Kansai—(京都)	日本表面科学会・大塚(阪大)	TEL 06-6850-5401 sssn_office@chem.sci.osaka-u.ac.jp	
26	低炭素社会を実現する先端耐熱材料・軽量材料の開発(シンポジウム)(東京)	科学技術振興機構・環境エネルギー研究開発推進部・ALCA・富中	TEL 03-3512-3543 toshiharu.tominaka@jst.go.jp http://www.jst.go.jp/alca/sympo2017/index.html	1.19
26~27	第24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 oka@jsndi.or.jp	
26~27	第150回 塑性加工工学講座「圧延加工の基礎と応用」(阪大)	日本塑性加工学会	http://www.jstp.or.jp	定員 70名
26~27	第45回 ガスタービンセミナー(和光)	日本ガスタービン学会	gtsj-office@gtsj.org http://www.gtsj.org/	
26~27	2016年度 技術者継続教育「先進コース」講習会	日本マリンエンジニアリング学会	TEL 03-6453-9453 staff@jime.jp http://www.jime.jp	
27	第221回 塑性加工技術セミナー「塑性加工屋にわかる材料知識—鉄系編—」(阪大)	日本塑性加工学会	http://www.jstp.or.jp	定員 90名
27	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4回)(京都)	軽金属学会	http://www.jilm.or.jp/	定員 40名
27	第211回 研究会/第63回 磁気工学専門研究会「医療と磁気の現状と将来展望」(中央大)	日本磁気学会	TEL 03-5281-0106 http://www.magneticsjp/event/research/topical_211/	
28	第22回 高専シンポジウム in MIE(鳥羽商船高専)	高専シンポジウム協議会他	TEL 0599-25-8402 soumu-kikaku@toba-cmt.ac.jp http://www.suzuka-ct.ac.jp/	
31~2.1	研究会「第6回 プラスチックに基づく変形現象研究会—変形機構研究のフロンティア—」(京大)(本号46頁)	研究会 No. 70・大石(京大)	TEL 075-753-5573 FAX 075-753-5578 admin@esism.kyoto-u.ac.jp	1.20
2月				
3	第386回 講習会「これが工具の最前線! ~切削現象解明からの最新工具の使いこなし・革新工具まで~」(東京)	精密工学会	TEL 03-5226-5191 http://www2.jspe.or.jp/	定員 60名
9~10	表面科学セミナー2017「物質・材料開発の新潮流—マテリアルズ・インフォマティクスの最前線—」(東京理科大)	日本表面科学会	TEL 03-3812-0266 shomu@sss.jp http://www.sssj.org	1.18
9~10	LMP シンポジウム2017 レーザ加工技術の基礎・応用と最新動向(阪大)	日本溶接協会・黒井	TEL 03-5823-6324 kuroi@jwes.or.jp	

開催日	名称・開催地・掲載号	主催・担当	問合せ先	締切
13	2017年 産業技術総合研究所中部センター 研究講演会(名古屋)	産業技術総合研究所中部センター・吉田・林	TEL 052-736-7064・7063 chubu-kouhou-ml@aist.go.jp http://www.aist.go.jp/chubu/pr/kouenkai20170213.html	定員 150名
17	第35回「若手フォーラム」—ポスターセッション併催(岡山)(本号48頁)	中国四国支部・竹元(岡山大)	TEL 086-251-8027 FAX 086-251-8266 takemoto@mech.okayama-u.ac.jp	2.8
17	第102回シンポジウム「こんなことまでできるの! アルミの表面処理で!!」~新機能を発現するアルミニウム合金表面処理の最新情報~(工学院大)	軽金属学会	TEL 03-3538-0232 http://www.jilm.or.jp/	定員 100名
24	第321回塑性加工シンポジウム「航空機関連産業の現状と市場参入への取り組み」(同志社大)	日本塑性加工学会	http://www.jstp.or.jp	定員 80名
24	理研シンポジウム第19回「トライボコーティングの現状と将来」(和光)	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・金	TEL 03-5918-7613 tribo@tribocoati.st https://www.sites.google.com/site/tribocoating/	200名
3月				
2	第69回塑性加工技術フォーラム「プレスおよび金型におけるセンシングとIT技術の可能性」(刈谷)	日本塑性加工学会	http://www.jstp.or.jp	定員 80名
3	第42回組織検査用試料の作り方(組織の現出)講習会「鉄鋼材料・非鉄金属材料・表面改質処理および異常組織材」(東京)	材料技術教育研究会	TEL 047-431-7451	2.24
6	第222回塑性加工技術セミナー「塑性加工屋にわかる材料知識 —非鉄系編—」(東京)	日本塑性加工学会	http://www.jstp.or.jp	定員 80名
9~10	第20回 磁粉・浸透・目視部門・電磁気応用部門・漏れ試験部門合同シンポジウム「表面探傷技術における現場と研究の融合」(岡山)	日本非破壊検査協会・中村	TEL 03-560-4015 nakamura@jsndi.or.jp http://www.jsndi.jp/	参加 2.17
10	第75回 レアメタル研究会(東大生産技研)(平成28年度最終回)(本号49頁)	レアメタル研究会・宮崎(東大生産技研岡部研)	TEL 03-5452-6314 okabelab@iis.u-tokyo.ac.jp http://www.okabe.iis.u-tokyo.ac.jp/japanese/rc40_j.html	
14	日本金属学会春期講演大会における企業説明会(首都大学東京南大沢キャンパス)(本号42頁)	日本金属学会	TEL 022-223-3685 secgnl@jim.or.jp	2.10
14~15	2016年度量子ビームサイエンスフェスタ(つくば)	高エネルギー加速器研究機構, J-PARCセンター他	qbs-festa-office@pfiqst.kek.jp http://qbs-festa.kek.jp/2016/	
15~17	日本金属学会春期講演大会(首都大学東京南大沢キャンパス)(八王子)(本号41頁)	日本金属学会	annualm@jim.or.jp TEL 022-223-3685 FAX 022-223-6312 http://www.jim.or.jp/convention/2017/spring	講演 1.6 参加 2.10
16	第3回ランチョンセミナー(首都大学東京南大沢キャンパス)(八王子)(本号43頁)	日本金属学会	TEL 022-223-3685	
5月				
14~19	第8回先端的な電子顕微鏡に関する国際会議(沖縄)	EDGE2017 Organizing Committee	TEL 03-5452-6320 EDGE2017@nims.go.jp http://www.nims.go.jp/EDGE2017/	
15~16	第33回希土類討論会(鳥取)	日本希土類学会(阪大内)	TEL 06-6879-7352 kidorui@chem.eng.osaka-u.ac.jp http://www.kidorui.org/	発表 1.20
16~17	第87回(平成29年)マリンエンジニアリング学術講演会(東京海洋大)	日本マリンエンジニアリング学会	TEL 03-6453-9453 staff@jime.jp http://www.jime.jp	講演 1.25
19~21	軽金属学会第132回春期大会(名大)	軽金属学会	TEL 03-3538-0232 http://www.jilm.or.jp/	予約申込 4.20
26	第2回マルチスケール材料力学シンポジウム(第22回分子動力学シンポジウム・第10回マイクロマテリアルシンポジウム)(名城大)	日本材料学会	http://www.jsms.jp	講演 2.17
31~6.2	第22回計算工学会講演会(さいたま)	日本計算工学会	TEL 03-3868-8957 office@jsces.org http://www.jsces.org/koenkai/22/	
6月				
8~10	平成29年度塑性加工春季講演会(岐阜)	日本塑性加工学会	http://www.jstp.or.jp	
7月				
27~28	第51回 X線材料強度に関するシンポジウム(神戸)	日本材料学会	TEL 075-761-5321 jimu@jsms.jp	講演 3.10
8月				
27~9.1	The 15th International Conference on Advanced Materials (IUMRS-ICAM2017)(京大)	日本 MRS	TEL 045-263-8538 meeting@iumrs-icam2017.org http://www.iumrs-icam2017.org/	
9月				
6~8	日本金属学会秋期講演大会(北海道大学)(札幌)	日本金属学会	annualm@jim.or.jp TEL 022-223-3685 FAX 022-223-6312	

開催日	名称・開催地・掲載号	主催・担当	問合せ先	締切
10月				
11~13	1st International Conference on Energy and Material Efficiency and CO ₂ Reduction in the Steel Industry (EMECR2017) (神戸)	日本鉄鋼協会	emecr2017@issjp.com	
11月				
5~10	第18回材料集合組織国際会議 18th International Conference on Textures of Materials (ICOTOM 18) (St George, Utah, USA)	ICOTOM 18・井上(大阪府立大)	TEL 072-254-9316 inoue@mtr.osakafu-u.ac.jp http://event.registerat.com/site/icotom2017	アブストラクト 2016.11.15
20~24	Plasma Conference 2017(姫路)	応用物理学会他	TEL 052-735-3185 mnhrrmt@meijo-u.ac.jp	

〈訂正〉 までりあ 55巻第11号(2016)516頁 表彰 → 第27回優秀ポスター賞受賞者紹介

この度掲載いたしました下記受賞者の所属名表記につきまして、誤りがございました。
下記の通り、訂正してお詫びいたします。申し訳ございませんでした。

第27回優秀ポスター賞受賞者紹介

36 結晶塑性有限要素法によるステントの疲労解析 (P217)

東京工業大学 土方亮二郎君, Briffod Fabien君, 白岩隆行君, 榎学君

(誤) 東京工業大学 土方亮二郎君, Briffod Fabien君, 白岩隆行君, 榎学君



(正) 東京大学 土方亮二郎君, Briffod Fabien君, 白岩隆行君, 榎学君



〈事務局より〉

- 2017年1号より、会報「までりあ」、金属学会誌、Materials Transactions の配送は、3誌それぞれ別便による送付となります。何卒ご了承下さいませよう宜しくお願い申し上げます。



2015, 2016年度会報編集委員会 (五十音順, 敬称略)

委員長	御手洗容子						
副委員長	大塚 誠						
委員	赤瀬善太郎	浅野耕太	池田賢一	池田大亮	石本卓也	上田恭介	
	梅津理恵	大津直史	大野直子	大場洋次郎	大森俊洋	北村一浩	
	小泉雄一郎	齊藤敬高	佐藤和久	佐藤幸生	下島康嗣	下田一哉	
	杉浦夏子	芹澤 愛	千星 聡	染川英俊	高橋 淳	高林宏之	
	滝沢 聡	竹田 修	武田雅敏	田中真悟	田中秀明	田中康弘	
	多根正和	田村友幸	垂水竜一	堤 祐介	寺田大将	寺西 亮	
	戸高義一	中村貴宏	長谷川誠	畠山賢彦	藤枝 俊	府山伸行	
	堀内寿晃	堀部陽一	本間智之	松尾元彰	水本将之	宮岡裕樹	
	村石信二	森戸春彦	山下良之	山田高広	山室佐益	横田智之	
	湯蓋邦夫	吉矢真人	和田 武	渡辺博行			

までりあ 第56巻 第1号 (2017) 発行日 2017年1月1日 定価(本体1,700円+税)送料120円
年間機関購読料金52,400円(税・送料込)

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

〒105-0022 東京都港区海岸 1-9-18

高純度 GfG

最高温度2,800℃

純度5PPM以下

汚れや飛散のないカーボン材料

■真空、高温炉内材料一式

■炉内部品取替工事

■炭素繊維高温材料

- カーボンヒーター
- 炭素繊維断熱材
- 炉内サポート治具
- 機械用カーボン
- 連続鑄造ノズル
- ホットゾーン改修工事



メカニカルカーボン工業株式会社

本社・工場：〒247-0061 神奈川県鎌倉市台 5-3-25 TEL.0467(45)0101 FAX.0467(43)1680代
事業所：東京 03(5733)8601 大阪 06(6586)4411 福岡 092(626)8745
周南 0834(82)0311 松山 0899(72)4860 郡山 024(962)9155
工場：広見工場 0895(46)0250 野村工場 0894(72)3625 新潟工場 0254(44)1185
<http://www.mechanical-carbon.co.jp> E-mail: mck@mechanical-carbon.co.jp

EAG

LABORATORIES

各種表面分析受託サービスなら

ナノサイエンス株式会社(EAGの日本支社)にお任せください。

GDMS分析 世界シェア No.1



高感度不純物分析手法 GDMS ICPとは異なり固体のまま最小限の試料処理で直接分析ができます。

測定対象試料

高純度金属	合金・超合金	特殊金属	レアメタル・レアアース
カーボン及び黒鉛製造品	酸化物・炭化物・窒化物・硫化物などのセラミックス	各種半導体材料	太陽電池用シリコン

“世界の分析リーダー”の技術を日本で——

NAN ナノサイエンス株式会社

〒170-0013 東京都豊島区東池袋1-10-1 住友池袋駅前ビル7F

TEL.03-5396-0531(代) FAX.03-5396-1930

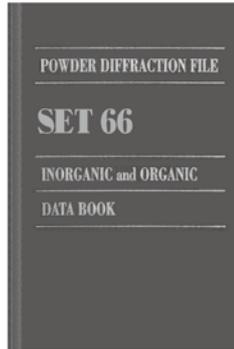
[E-mail] analysis@eag.com

お問い合わせ・見積り・分析お申込みはHPから… <http://www.nanoscience.co.jp>

粉末回折データベース PDF Book Form (Set66)

価格(税別) ¥155,000.- (データブック)各¥75,000.- (インデックスブック)
(データブックとインデックスとのセット割引、教育機関向け割引等あり、要問い合わせ)

JCPDS-ICDDから毎年9月に発売されるデータブックとインデックスブックです。データブックには無機1,900/有機600の回折パターンが追加収録されます。インデックスには無機用のAlphabetical IndexとHanawalt Index、有機用のOrganic Indexの計3点があります。



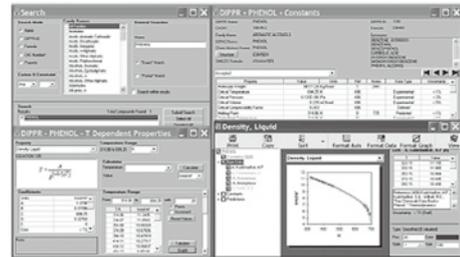
化学プロセス用の物性データベース DIPPR with DIADEM pro (Design Institute for Physical Property Data)

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、原文献データと15種類の温度依存物性には推算式の係数などのデータベースです。AIChE推奨のインターフェイスソフトウェア(DIADEM)付きのスタンドアロンシステムです。

おもな機能 (DIADEM)

- 検索対象: Name, Formula, CAS番号、物性データ
- 物性値: 実測値、推算式による予測値
- データ表示: テーブルとグラフプロット
- 複数化合物データの重ね合わせプロット
- MDL Chimeプラグインによる構造的立体表示
- 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 4.1

価格(税別) ¥160,000.- マルチユーザー ¥260,000.-

検索条件

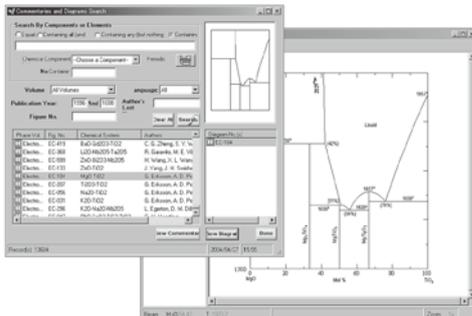
- 成分系、元素記号
- 著者、出典誌名、出版年
- 状態図番号

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), Phase Diagrams for Zirconium + Zirconia Systems and Phase Diagrams for Electronic Ceramics Vol.15)

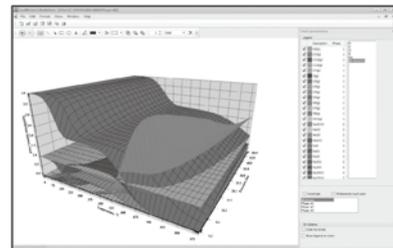


システムプラットフォーム: Windows XP/Vista/7

化学反応/平衡計算ソフトウェア HSC Chemistry for Windows, Ver.9.0

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
(Outotec 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>