スピンによるミリ波の電気的検出
 放射光による FeRh 合金の照射効果の研究
 鉄系超弾性合金の相変態・組織制御
 ^{入門} 講座 測定の不確かさ評価について -3.不確かさの算出手順 2 ---



JSX-1000S JEOI X-ray fluorescence spectrometer 元素分析のスマートソリューション ElementEye スマートFP法による定量分析 ●/**い**クFP法/薄膜FP法 ●自動バランス成分 ●自動厚み補正 全元素高感度分 ●ショートパス光学系 ●高感度フィルタ JEOL 各種ソリューションアプリの提供 ●簡易金属ソリューション ●Snめっきスクリーニング ●簡易有機物ソリューション ●Niメッキスクリーニング ●簡易酸化物ソリューション ●ハロゲンスクリーニング ●RoHSスクリーニング 全エネルギー範囲高感度検出 ●SDDを採用したショートパス光学系

●高感度フィルター:重金属元素(Cl~U)の高感度検出
 ●排気ユニット:軽元素(F~Cl)の高感度検出

2 スマートFP法

バルク試料から薄膜試料の定量分析が可能
 高感度フィルターを利用しての数10ppmレベルの低濃度元素の検出(検量線の作成不要)
 バランス成分の自動設定が可能 樹脂や食品の分析が容易

🕄 ソリューションアプリの提供

目的の測定を実現するためにレシピをボタン化し、煩わしい条件の設定不要な簡単高精度分析を提供

簡易金属分析ソリューションによる測定例

金属でも同色同形となると種類を正確に判断することが難しくなります。専門家であれば一見あるいは感触で金属種を判別することは容易なのでしょうが、鋼種判定となると 簡単にはいきません。このような場合にスマートFP法を利用すると迅速簡便に鋼種を 判断することができます。

成分	認証値(mass%)	分析結果(mass%)
Si	0.72	0.7
Cr	18.35	18.3
Mn	1.53	1.5
Fe	69.6	70.0
Ni	8.67	8.6
Cu	0.316	0.3
Nb	0.052	0.05
Mo	0.41	0.4

試料はCr、Fe、Niが主成分であることからステンレス系の合金であることが判断でき、それらの組成からSUS304系の合金であることが分かります。

	₩	雨子株式会社	本社•[招島製作所	東京都昭島	市武蔵	野3-1-2 TEL(042	2)543-11	11	http://v	ww.jeol.co.jp/
	+		前企業営	画室 東京都千	代田区大手町2-	1-1 TE	EL(03)6262-3560	西日本ソリュー	・ションセンター 大阪市淀川区	【西中島5-14-5	TEL(06)6305-0121
■東	京	電子光学機器営業グループ TE	L(03)62	62-3581	分析機器営業グ	ループ	TEL(03)6262-3582	産業機器	諸学業部 TEL(03)6262-35	570	
		半導体機器営業室 TE	L(042)5	28-3491	医用機器営業グ	ループ	TEL(03)6262-3583				
■札	幌	TEL(011)726-9680 🛛	仙台	TEL(022)22	2-3324 🛛 🔳	筑 波	TEL(029)856-3220)│■横	浜 TEL(045)474-2181	■名古屋	TEL(052)581-1406
■大	阪	TEL(06)6304-3941 ■	広島	TEL(082)22	1-2500 🛛 🔳	高 松	TEL(087)821-0053	3 │ ■福	間 TEL(092)411-2381		

Materia Japan

http://www.jim.or.jp/journal/m/

8

2015 Vol.54 No.8

◎ 会告原稿締切: <u>毎月1日</u>

翌月号(1日発行)掲載です.

- 支部行事: shibu@jim.or.jp
- •本会記事:stevent@jim.or.jp
- •揭示板:materia@jim.or.jp

最近の研究	究 高垂直磁気異方性 L1₀ 規則合金を用いたスピンダイナミクス 永沼 博3 +ノサイズの微小素子を用いたミリ波の電気的検出!						
	放射光を用いた鉄ロジウム合金のイオンビーム照射誘起構造・磁気変態の研究 岩瀬彰宏 松井利之						
	高エネルギー加速器からのイオンビームで磁性を改質し,大型放射光施設からの X 線ビームでそれを評価した 研究を紹介します.						
	 						
入門講座	測定の不確かさ評価について —3. 不確かさの算出手順2— 城野克広405 測定の不確かさとは何か? どう評価し,どう使うのか? 100回以上の講師体験を持つ著者による事前知識不 要の入門的解説.(全4回)						
新進気鋭	アルミナにおける小角粒界を用いた転位設計と構造解析 栃木栄太409						
はばたく	虚心坦懐に現象と向き合う 小野寺礼尚						
本会記事	会告414次号予告423支部行事417材料系学協会情報コーナー423第39回技術開発賞募集418新入会員424第66回金属組織写真賞作品募集419行事カレンダー426掲示板420書評430会誌・欧文誌 8 号目次422						

会誌・欧文誌の投稿規定・投稿の手引・執筆要領、入会申込書、刊行案内はホームページを参照下さい. 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複写に関する権利を再委託している団体) と包括復写許諾契約を締結している場合にあっては、その必要はありません。(社外頒布目的の複写については、許諾が必要です。) 権利委託先 一般社団法人学術著作権協会 〒107-0052 東京都港区赤坂 9-6-41 乃木坂ビル 3F FAX 03-3475-5619 E-mail:info@jaacc.jp http://www.jaacc.jp/ 復写以外の許諾(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。

FRITSCH "NANO領域"

遊星型ボールミル "PREMIUM LINE" モデル P-7(新型



特色

- 1. 従来弊社P-7と比べて250%の粉砕エネルギーUP。 自転公転比:1:-2. Max 1,100/2200rpm 粉砕エネルギー: Max 94G(現状P-7:46.08G) 2. 容器は本体内に。
- 外部に飛び出す危険は無し。 3. 搭載容器も20, 45, 80ml の3種類。 材質は従来どおり多様。 雰囲気制御容器も



容器がセットされる様子。

従来型ボールミル "CLASSIC LINE"

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



各種用意。





フリッチュ社が開発した 遊星型シリーズの パイオニア機種。



世界で初めて容器ひとつで 遊星運動に成功した 昨年度のベストセラー機種



少量試料を対象にした パワフルな機種



全機種共通の特長

- 雰囲気制御容器以外の通常容 器、ボールの材質は、ステン レス、クローム、タングステン カーバイド、メノー、アルミナ、 ジルコニア、窒素ケイ素、プ ラスチックポリアミドの8種類。
- ●乾式、湿式の両粉砕も可能。
- ●ISO9001、CE、TÜVの国 際安全基準をクリアー

フリッチュジャパン株式会社

社 〒231-0023 横浜市中区山下町252 大阪営業所 〒532-0011 大阪市淀川区西中島7-12-5

info@fritsch.co.jp http://www.fritsch.co.jp

Tel (045)641-8550 Tel (06)6390-0520 Fax (06)6390-0521

Fax (045)641-8364



Your partner for materialography

Made in Germany



自動研磨機 SCANDIMATIC 33305

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

- *φ* 200 mm の 研磨 盤 対応
- ●重錘はφ25mm、φ30mmの試料で3個、
- ●研磨盤回転数は40~600rpm、1rpm毎に設定可能
- ●本体、PVC製研磨盤、バフを含めて定価100万円(税別)

精密切断機 MINICUT 4000

●低速で試料にストレスを与えず
 ●50~1,000rpmの広い範囲での設定可能
 ●切断位置はマイクロメーターで±0.01mmで設定可能

●ダイヤモンド、CBN、SIC製の切断刃を用意





試料埋め込み材料、アクセサリー

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

●試料への密着性が高い常温硬化剤。硬化時間はわずか5分 ●構成は粉末硬化剤と液体硬化剤。これを10:6の比率で混合

その他各種有効な消耗品を用意してございます。

フリッチュジャパン株式会社 本 社 〒231-0023 横浜市中区山下町252 大阪営業所 〒532-0011 大阪市淀川区西中島7-12-5

 info@fritsch.co.jp
 http://www.fritsch.co.jp

 Tel (045)641-8550
 Fax (045)641-8364

 Tel (06)6390-0520
 Fax (06)6390-0521

	AL	LO	創業1 YS {	921	年 ME		5	H27.4改
品名	純度	形状	品名	純度 宇 金 属	形状	品名 フェロ	純度	形状
高純ル ステレス こう ム アルルミニウム アルルミニウム 松 アルルミニウム 松 パルルミニウム 松 パロンアモマス ス コロンアモマス ス コロンアモマス ス コロンアモマス ス コロンアモマス ス コロンアモマス ス コロンアモマス ス コロンアモマス ス コロンアモマス ス コロンアモマス ス の ロンアモス マ ム 和 留解解解解解解解解解解解 (アトミニロンYL) 電電 ワング ム の コム 粉 電子 ジンディーン アレミン (アートーン) 電電 リブオ ス マング 解 リブオ ニックム 粉 コ ス の カム か の 二 コ かう ム 物 電電 (アートーン) (アートーー) (アー) (アートーー) (アー) (アー) (アー) (アー) (アー) (アー) (アー) (99.99% 99.7% 99.99% 99.7% 99.99% 99.4% 95~97% 99.9% 99.3% 99.9% 99.% 99.9% 99.9% 99.9% 99.9% 99.9% 99.9% 99.9% 99.9% 99.9% 99.9% 99.9% 99.9% 99.9% 99.9% 99.9% 99.9% 99.9%	約1kgインゴット	アア銀ビビ高無 (マリマンン) ススクロ たい (4N5) 観ビビ高無 (マリマジジガ チチルル ななな (マリマジジガ モモモルル の ウウ ムムムン ンン ンン シン シン の モモ ター (4N5)	99.999% 99.999% 99.999% 99.995% 99.99% 99.999% 99.999% 99.999% 99.999% 99.999% 99.9999% 99.9999% 99.9999% 99.9999% 99.9999%	粒状100g入 約粒状100g入 約粒状100g塊状 粒約100g塊状 100g塊状 10×10×1mm 25×25×2mm 約粒状100g塊状 100g塊状 100g塊 約粒、100g塊 約 100g塊入約 約状100g塊入 約 数100g塊入 約 数100g塊入 約 数100g塊入 約 数100g塊 次入 約 数100g塊 次入 約 数100g塊 次入 約 数100g塊 次入 約 支 5 5 5 5 5 5 5 5 5 5 5 5 5 5 5 5 5 5	ファーン ファニロロバロクログラン モロバロクログラン ファニロジロククテ ファニーン ファニー レーン ファニー ファニー ファニー ファニー ファニー ファニー ファニー ファニー ファニー ファニー ファニー ファー ファニー ファー ファー ファー ファー ファー ファー ファー ファ	Mo 60% Nb 60% V 80% B 20% Ca30%Si60% Ca30%Si60% Ca30%Si60% P > 14.5% Si 15% Mg 50% Cr 10% Te 50% Cr 10% Te 50% Cr 10% Te 50% Co 10% Ti 50% Zr 50% B 2% Cu 40% Mg 20% Mn 10% Ni 20% Cr 5% Ti 5% Si 25% Co 5%	塊 状 // 塊 状 // 塊 状 約1kg1>ゴット // // ジゴット // // // // // // // // // // // // //
ニレルア金錫錫タタテスチチババタタ亜亜ジッニテン属 ンン ポーナナング ルムムモコ ルル タタルジ ジウテクウ リールル タタルジ ジウテクク コート リールル ターチンンウムンラック かかかかい 粒塊粉ルン粉板ム粉粉プ鉛粒ム	99.8% 99.99% 99.9% 99.9% * 99.9% * 99.9% 99.7% 99.7% * 99.7% * 99.7% 99.7% 99.7% * 99.6%	粉粉 塊 約粒小粉小ス粉25小粉 板約粒ス末 ペインゴンボン ペインゴン 地 球ン 500g ペイン ジリング (インゴン ジリング) (1) (1) (1) (1) (1) (1) (1) (1) (1) (1	イラセブネサイテジホエガユツル ミック・クレームシムムムムムムムムムムムムムムムムムムムムムムムムムムムムムムムムムムム	99.9% * * * * * * * * * * * * *	プレ 塊状、削状、粉状 * * * * * * * * * * * * * * * * * * *	アルルミタン リフテン アルルミタン リミニウム アルシミン ジルゴロウム アルシミン ボーロウム アルシン ジルボロウム アルシン ジャウク アルルシン ジャウク アルルシン マケクク アルルシン マケクク アククレーク リン マクレーク ロロク ロロク ロロク ロロク ロロク ロロク ロロク ロロク ロロク ロ	Mo 5% W 2.5% Be 2.5% Fe 50% Zr 5% B 4% V 50% Sr 10% Ca 10% B 15% P 5% C(低融点で) (低融点で) 70.5% 70.5% 70.5% 70.5% 70.5% 70.5% 70.5% 70.5% 70.5% 70.5% 95.5% 100.5% 95.5% 1000	* 約50gインゴット 塊 約5kgインゴット 状 約20gインゴット 水 約100gインゴット 約2.5kgインゴット 地 オ ンゴット 含金) 約500gインゴット * * * *





特殊遊星回転ボールミル(加熱式、冷却式)

加熱式 遊星回転ボールミル LP-M2H



本装置は、常温での粉砕は勿論のこと230~250℃に加熱しながらの粉砕実験が行える 遊星回転ボールミルです。付属のコントロールパネルにて温度調節、回転数、粉砕時間など の設定が出来、更に粉砕時の加熱状況を記録するための温度記録計と、運転中に重量の アンバランスによる異常振動を感知し自動停止させるためのセンサーが内蔵されています。

- ●容 器:専用容器 45ml 2個掛け
- ●最大回転数:台盤500rpm
- ●回転調整:インバーター式
- ●回転数表示:台盤回転数をデジタル表示
- ●ヒーター:最大3kw SCR自動制御
- ●使用最高温度:230~250°C
- ●使用電源:AC200V 3相 50/60Hz
 ●重 量(約):本体200kg、制御盤20kg
- ●全体寸法:約W100×D60×H50cm
- ●温度調節:プログラム式
- ●時間設定:デジタルタイマー
- ●モーター:200W

冷却式 遊星回転ボールミル LP-M2C







最近の研究 🔷 🖉 🖉 🖉 🖉 🖉 🖉 🖉 🖉 🖉

高垂直磁気異方性 L1₀ 規則合金を用いた スピンダイナミクス

1. はじめに

1995年頃にスピン偏極した高密度電流を微小磁性体に流 すとスピントランスファートルクが発生することが理論的に 予測⁽¹⁾⁽²⁾され,注目された. 強磁性①/非磁性/強磁性②の三 層構造の面直方向から電流を流す系では、ランダムな電子ス ピンが片方の強磁性層①を通過すると、電子スピンが強磁性 体の up と down スピンの分極率および磁化方向により異な るポテンシャルを受けることで偏極され、スピン偏極電流が 生成される. 非磁性層が薄い場合, スピン偏極の情報を保持 したまま通過する. 強磁性層2の磁化方向が角度(heta)だけ傾 いていると,スピン偏極した電子が強磁性層②を通過する間 に s-d 交換相互作用によって up と down スピンが異なる位 相変化を受け、伝導電子のスピン角運動量の横成分が失われ る.一連の伝導現象においてスピン角運動量の保存則を満た さなければならないため、伝導電子の失ったスピン角運動量 は強磁性層の局在スピンにトルクとして受け渡されることに なる.この現象がスピントランスファーであり、強磁性層② に励起されたトルクをスピントルクとよぶ.実験としては, 1998年に微小接合を有する Co/Cu 多層構造の巨大磁気抵抗 素子を用いてスピントルクによる強磁性層の励起状態(電気 抵抗変化)がはじめて観測された⁽³⁾. また, 1999年頃には強 磁性/非磁性/強磁性の3層構造の巨大磁気抵抗素子に流れ る電流を増大させると、ある閾値電流のきスピントルクによ る磁化反転現象が実験的に観測された⁽⁴⁾⁻⁽⁶⁾.磁気抵抗素子 の接合をナノサイズまで微小化することにより流す電流を低 く抑えても磁化反転に必要な閾値電流が得られることから, 不揮発性磁気メモリの書き換え方法にスピントルクを利用す る研究が盛んになった.一方,磁化反転の閾値電流以下のと

永 沼 博*

き、電流密度を一定とすると強磁性体の磁化は磁化反転せず に等しい大きさのスピントルクを受け続ける⁽³⁾. そのスピン トルクと反対方向に材料固有の磁気摩擦トルクが働き、両方 が釣り合うとき歳差トルク方向へ磁化の定常的な歳差運動が 励起されることになる.実際に2003年に強磁性/非磁性/強 磁性の3層構造の巨大磁気抵抗素子に直流電流を流して磁 化の歳差運動を観測することに成功した⁽⁷⁾.1つの強磁性層 にのみ歳差運動を励起させると、もう1方の強磁性層との 磁化の相対角は時間と共に振動することになる. これは,素 子の電気抵抗(電圧)が時間と共に振動する、いわゆる発振現 象である.また,2005年には交流電流を強磁性トンネル接 合素子に流すことによりマイクロ波を整流(検波)することに も成功した⁽⁸⁾.このように磁気抵抗を用いたスピントルク発 振・検波が報告されてから、研究の方向性は大きく分類され た. (1)位相ノイズを減らし高いQ値,検波感度を得るこ と,(2)入力に対する高出力化,(3)無磁場の発振・検波, (4) 高周波数化などが挙げられる.これまで、(1) について は位相同期現象の導入(9)(10),磁気渦構造の利用(11)(12),接 合形状の工夫と垂直磁場の利用(13)(14),もしくは垂直磁化材 料をもちいて歳差時の反磁界の影響の低減、大角による歳差 運動(15)-(18)などの様々な工夫によりQ値については高くな ってきた. (2)についてはトンネル障壁を用いた強磁性トン ネル接合素子の利用(19),ハーフメタル強磁性電極を用いた 磁気抵抗比の増大(20)などの工夫により出力が高くなってき た.(3)については歳差運動の励起を担う2つの強磁性層と その歳差運動を磁気抵抗比として検出する強磁性層を分けた 3層構造により無磁場での発振が報告(15)されている.ま た,(4)の高周波化については数テスラという強い垂直磁場 により面内磁化膜を垂直方向へ傾けることによりミリ波帯域 の発振を報告(21)(22)している.このように、各項目の目的に

* 東北大学助教;大学院工学研究科応用物理学専攻(〒980-8579 仙台市青葉区荒巻字青葉)

Spindynamics Using $L1_0$ -ordered Alloy with High-perpendicular Magnetic Anisotropy; Hiroshi Naganuma (Graduate School of Engineering, Tohoku University, Sendai)

Keywords: *L1₀-ordered alloy, perpendicular magnetic anistropy, high frequency spin dynamics, FePd, magnetic tunnel junction* 2015年3月5日受理[doi:10.2320/materia.54.383]

沿って着実に発振・検波素子の実用化に必要な研究が進んで いる.しかし、4 つを同時に満たすスピントルク発振・検波 素子の研究はそれほど多くない.特に高周波化と(1)-(3)の 条件を満たすような研究は殆どない.以上の背景から、本研 究では(2)-(4)を満たすことを目的として、結晶磁気異方性 の高い L1₀ 規則合金を励起層として、面内磁化の固定層か ら面内スピン偏極電子を注入する強磁性トンネル接合素子を 作製し、高周波スピンダイナミクス特性を評価した.

2. 実験方法

MgO(001) 基板/Cr(40)/Pd(10)/Fe₅₀Pd₅₀(t_{FePd})/[Co₄₀ $\mathrm{Fe_{40}B_{20}(0.5)]}/\mathrm{MgO}\left(\mathit{t_{\mathrm{MgO}}}\right)/\mathrm{Co_{40}Fe_{40}B_{20}(2)}/\mathrm{Ru}\left(0.85\right)/\mathrm{Co_{75}}$ $Fe_{25}(2)/IrMn(10)/Ta(3)/Ru(2)(1.5 \le t_{FePd} \le 5.0, 0.75 \le$ t_{Me0}≤2.5)[単位は nm]多層膜試料は10⁻⁷ Pa 以下まで排気 された超高真空 r.f. マグネトロンスパッタ装置を用いて作製 した. MgO 基板を700℃で加熱し、その後に室温にて Cr 層 を製膜してから700℃まで基板温度を上昇させる.350℃ま で基板温度を下げてから Pd 層を製膜して、種々の温度にて FePd 層を製膜した. CoFeB より上の層は全て室温で製膜し た. 製膜時のArガス圧は各層で最適化された条件を用い た. 例えば, FePd 層は 0.6 Pa のガス圧で製膜したとき, Fe と Pd の合金組成が1:1となり, L1₀ 規則度が最も高く なった. 試料の膜構造はX線回折および走査透過型電子顕 微鏡(JEOL: ARM200F)および透過型電子顕微鏡観察(FEI Tecnai G2 F20),磁気特性は超電導量子干渉磁束計(Quantum Design: MPMS)および振動試料型磁力計により評価し た.

3. CoFeB 挿入による格子ミスフィットの緩和

bcc 構造の強磁性体と MgO 障壁が接するとトンネル伝導 は △1 電子が支配的となり、高い磁気抵抗比が得られるため 強磁性トンネル接合素子の障壁材料として広く利用されてい る.しかし、L10規則合金系との格子ミスフィットは約10% と大きく,界面に多くのミスフィット転移および c 軸が面内 に向くような構造となり高い磁気抵抗比が得られない問題が ある. これまでに Fe 層を L10 規則合金と MgO トンネル障 壁の間に挿入すると磁気抵抗比が高くなることが報告されて いる. そこで本研究では格子ミスフィットを段階的に緩和す るため CoFeB を *L*1₀-FePd と MgO 障壁の間に挿入した. 比較のため CoFeB を挿入してない試料も作製した.図1に 種々の FePd 膜厚のMgO(001) 基板/Cr/Pd/FePd(t_{FePd})/ [CoFeB(0.5)]/MgO/Taの θ-2θX 線回折プロファイルを示 す.図1(a)はFePd 単層膜,1(b)はFePd/CoFeB 二層膜を 示す. FePdの膜厚が 2.0 nm より厚くなると L1₀の超格子 反射の(001)回折ピークが観測された.図1(c)にL1₀規則度 と FePd 膜厚との関係を示す. CoFeB を挿入した試料の方 がいずれの FePd 膜厚においても L10 規則度が高くなること がわかった.図1(d)に表面平坦性(R_a)とFePd 膜厚の関係

を示す. 原子間力顕微鏡により $1 \times 1 \mu m^2$ 領域を $5 \times m$ 観察 して,その平均値を R_a とした. いずれの FePd 膜厚におい ても CoFeB を挿入した試料の方が膜表面が平坦となること がわかった.

図2に種々のFePd 膜厚を有するFePd および FePd/ CoFeB 試料の(a), (b) 磁化曲線 (M-H), (c) 飽和磁化 (*M*_s),および(d)異方性磁界(*H*_k)を示す. CoFeB 挿入の有 無に因らず、FePdの膜厚に対して Ms はバルク値とほぼ一 致した. CoFeB を挿入しない場合, FePd を薄くしていくと 4.0 nm を境に垂直磁化膜から面内磁化膜となった. CoFeB を挿入すると, FePdの膜厚を 3.0 nm まで薄くしても垂直 磁化膜となった.図1(c)と比較すると、FePdの垂直磁気異 方性はL10規則度と対応していることがわかる. 強磁性ト ンネル接合の下部電極は平坦($R_a \leq 0.4 \text{ nm}$),かつミリ波の 周波数に到達するためにはおよそ8000 kA/m 以上の異方性 磁界が必要となる. CoFeB を挿入すると FePd の膜厚が 3.0 nmのときに上記の条件を満たすことになるが、閾値付近の 作製条件は磁気特性が安定しないことが懸念される. そのた め本研究では、FePdを3.5 nm として強磁性トンネル接合 素子を作製した.

図3にトンネル接合素子用の多層膜の(a)透過型電子顕微 鏡(TEM)および(b)走査透過型電子顕微鏡(STEM)の断面 観察像を示す. TEM 像から上部固定層まで各層が平滑な界 面を形成していることがわかる. FePd 層付近を拡大した STEM 像から Fe と Pd が垂直方向に交互に配列されており、 L10 規則構造に起因した明瞭な原子コントラストが観察され た. FePd 層の STEM 像を高速フーリエ変換すると L1₀の (001)超格子反射が確認され、STEM 観察領域のL10規則度 は比較的高いことがわかる. また, FePd の組成比は殆ど 1:1であることを ICP 発光分析により明らかとなっている. Fe と Pd の二元系状態図曲線から L1₀ 規則合金の200℃での 固溶範囲は50~615 at %-Pd と広がりをもつため1:1 組成 比の FePd が Pd と界面を形成すると Pd 過剰側固溶する可 能性があるが,STEM 像から原子の相互拡散は確認されな かった. また, CoFeB と FePd 層の界面にも原子拡散によ る界面の乱れは観察されなかった.一方, Cr と Pd 層の界 面の STEM 像は不明瞭であることから原子相互拡散が生じ ていることが考えられる.ナノビームを用いた組成分析を FePd 界面に近い Pd 層の局所領域で行ったところ, Cr 原子 は検出されなかったことから Cr の拡散は Pd との界面付近 で収まっていると考えられる. STEM 観察の結果, 原子拡 散の影響は各層により異なるが、励起層である FePd には原 子拡散は生じていないことが明らかとなった.

4. L1₀-FePd/CoFeB 二層膜の磁気摩擦

磁気摩擦定数が小さいと少ない電流でスピントルクを励起 することができるため、低消費電力の観点から磁気摩擦定数 は重要なパラメーターである. $L1_0$ -FePd⁽²³⁾は $L1_0$ -FePt⁽²⁴⁾ および $L1_0$ -CoPtに比べて磁気摩擦定数が小さくなる傾向に



図1 種々のFePd 膜厚の(a)FePd 単層膜および(b)FePd/CoFeB 二層膜のX線回折プロファイル. 試料構造は MgO(001)基板/Cr(40)/Pd(10)/FePd(t_{FePd})/[CoFeB(0.5)]/MgO(2)/Ta(3)である.



図2 種々の FePd 膜厚(t_{FePd})の(a) FePd 単層膜および(b) FePd/CoFeB 二層膜の(a), (b) 磁化曲線, (c) 飽和磁化 (M_{s}), および(d) 異方性磁界(H_{k}).

あり、スピントルク素子に適した材料である.しかし、これ までに FePd/CoFeB の磁気摩擦定数を調べた報告は無い. そこで MgO 基板/Cr/Pd/FePd(3.5)/CoFeB(0.5)/MgO/Ta の磁気摩擦定数をポンプ・プローブ法により評価した.図4 (a)に種々の外部磁場方向に対する MOKE 信号の遅延時間 を示す.図4(b)に示すように、周波数(f)と $\theta_{\rm H}$ を LLG 方 程式によりフィッティングをしたところ、実験データとよく ー致した.フィッティングにより得られた H_{k}^{eff} は約800 kA/mであり磁化曲線から見積もった700 kA/mと近くなった.

 $f = \left(\frac{\gamma}{2\pi}\right) \sqrt{[[H\cos(\theta_{\rm H} - \theta) + H_{\rm k}^{\rm eff}\cos^2\theta][H\cos(\theta_{\rm H} - \theta) + H_{\rm k}^{\rm eff}\cos^2\theta]} \quad (1)$ 一方,緩和時間(τ)につて調べたところ,小角での歳差運動 を前提とした LLG 方程式では実験データと一致しなかっ た. [図 4(c)]図 2 の面内方向の M-H曲線から磁化は緩やかに飽和している傾向があり,僅かな面内の磁化成分により 垂直磁気異方性が分散していると考えられる.そこで,磁気 異方性分散($\Delta H_{k}^{\text{eff}}$)を加えてフィッティングを行った.

$$\frac{1}{\tau_{\rm dis}} = \left[\frac{d(2\pi f)}{dH_{\rm k}^{\rm eff}} \right] \cdot \frac{\Delta H_{\rm k}^{\rm eff}}{2} \tag{2}$$

その結果、 ΔH_k^{eff} =30 kA/m とすると破線で示すように実験 値とよく一致した.このように ΔH_k^{eff} が大きくなった原因は、



図3 (a) 透過型電子顕微鏡(TEM) および(b) 走査透過 型電子顕微鏡(STEM)による多層膜の断面観察像. FePd の垂直磁気異方性が大きく,磁気異方性分散の絶対量 も増大しているためと考えられる.次に,種々の $\theta_{\rm H}$ に対す る磁気摩擦定数($\alpha_{\rm eff}$)を算出した.

$$\alpha_{\rm eff} = \frac{1}{2\pi f \tau} \tag{3}$$

*L*1₀ 規則合金薄膜の高周波スピンダイナミクスの 電気的検出

スピントルクにより誘起された CoFeB/FePd 二層膜の歳 差運動を電気的に検出すために,強磁性トンネル接合素子を 作製した.スピントルクを効率的に得るため,接合サイズを 直径 120 nm まで微小化して,スピン偏極電流密度を高くし た.また,歳差運動時の面内方向の反磁界係数を等しくする ために接合形状を円とした.微小な円形接合を作製するため の微細化プロセスには,電子線リソグラフィー,Ar イオン ミリングとリフトオフ法を用いた.さらに,マイクロ波から



図4 種々の外部磁場方向($\theta_{\rm H}$)に対する(a) MOKE 信号スペクトル,(b) 周波数,(c)緩和時間,および(d)磁気摩擦 定数.

ミリ波の高周波特性を効率的に測定するためには、測定系の 特性インピーダンス(Z_0)を50 Ω に整合させる必要がある. 集積回路とは異なり、実際の高周波測定の実験では GSG プ ローバを用いて1つ1つ実験条件の異なる素子と高周波測 定機器を接続して評価することになる.しかし、トンネル接 合の直径は120 nm と微小であり、GSG プローバと直接、 接触させることは難しい.そこで、伝送特性を損なうことな くトンネル接合に接続するために GSG コプレーナーウェー ブガイドを用いた.GSG とは1本の信号(S)線を等間隔で配 置した2本のグラウンド(G)線で挟んだ構造をしており、 G-S 間を等間隔にして伝送させることにより高周波損失を 抑えながら、異なる大きさの配線・素子を接続させることが できる.GSG コプレーナーウェーブガイドの設計には Wadel の式を用いた⁽²⁵⁾.

$$Z_{0} = \frac{\eta_{0}}{4\sqrt{\varepsilon_{\rm eff}}} \frac{K(k_{1})}{K(k_{1}')}$$
(4)

ここで, $\eta_0 (= \langle \mu_0 / \varepsilon_0 : \mu_0, \varepsilon_0$ は真空の透磁率,誘電率)は自 由空間における Z_0 である. K(x)は第一種完全楕円積分であ り,

$$K(x) = \frac{\pi}{2} \sum_{n=0}^{\infty} \left(\frac{(2n-1)!!}{(2n)!!} \right)^2 x^{2n}$$
 (5)

と書ける. k_1, k'_1, k_2, k'_2 はそれぞれ以下の通りとなる.

$$k_{1} = \frac{c}{b} \sqrt{\frac{b^{2} - a^{2}}{c^{2} - a^{2}}}$$

$$k_{1}^{\prime} = \sqrt{1 - k_{1}^{2}}$$

$$k_{2} = \frac{\sin h(\pi c/4h)}{\sin h(\pi b/4h)} \sqrt{\frac{\sin h^{2}(\pi b/4h - \sin h^{2}(\pi a/4h))}{\sin h^{2}(\pi c/4h) - \sin h^{2}(\pi a/4h)}}$$

$$k_{2}^{\prime} = \sqrt{1 - k_{2}^{2}}$$
(6)

ここで、aはS線幅、bはG線端の間隔、cは全長、tはS線 やG線の膜厚、hは基板の膜厚、 ε_r は基板の誘電率である. ε_{eff} は以下の通りとなる.

$$\begin{aligned} \boldsymbol{\varepsilon}_{\rm eff} &= 1 + \frac{\boldsymbol{\varepsilon}_{\rm r} - 1}{2} \frac{K(k_1)}{K(k_1')} \frac{K(k_2')}{K(k_2)} + \frac{\boldsymbol{\varepsilon}_{\rm r} - 1}{2} \left(\frac{K(k_1)}{K(k_1')} \right)^2 \\ &\times \frac{K(k_2')}{K(k_2)} \left(\frac{t}{b-a} \right) + \frac{2t}{b-a} \frac{K(k_1)}{K(k_1')} + \left(\frac{t}{b-a} \frac{K(k_1)}{K(k_1')} \right)^2 \end{aligned} \tag{7}$$

実際に 120 nm の微小部に接続させることは電子線リソグラフィーの位置精度から難しいため,接合の直上に 10 μ m²の正方形電極を作製し,GSG コプレーナー電極の G 線と上部で接続させた.従って,トンネル接合部は a, b, c, tを 5.2 μ m, 10 μ m, 580 μ m および 300 nm とした.また,手動のマニピュレーターにより GSG プローブの位置合わせを行うため,150 μ m 間隔の GSG プローブとの接触部は a, b, c, tを 50 μ m, 92 μ m, 690 μ m および 300 nm として,位置合わせの操作がし易い設計とした.これら 2 箇所を 50 μ m の長さで等間隔に保ちつつ緩やかな角度により接続し,伝送損失を抑制した⁽²⁶⁾.実際の素子の概略および GSG コプレーナー上部電極の光学顕微鏡写真を図5(a)に示す.尚,正方形の上部電極は 10 μ m² と接合サイズ(120 nm)に比べて大きく,層間絶縁膜(SiO₂)を介した寄生容量が高周波特性に影響を及ぼすことが考えられるが,定量的な評価は行っていない.ま

た、トンネル障壁により素子抵抗が高くなるため、MgO 障 壁層を極薄化して Z₀ をなるべく 50 Ω に近づけられるように した.図5(c)に接合抵抗(RA)のMgO障壁膜厚依存性を示 す. MgO 障壁を 0.85 nm まで薄くすると RA は 1 桁台(実 抵抗:約160Ω@無磁場)まで低下した.図5(d)に固定層を 面内磁化,励起層を垂直磁化 CoFeB/FePd とした強磁性ト ンネル接合素子の電気抵抗(R)-磁場(H)曲線,および面内 と垂直磁化配置の磁気抵抗素子の理想的な R-H 曲線を示す. CoFeB/FePd は急峻な磁化反転が実現しており、殆ど理想 的な R-H 曲線となっていることがわかる.また,面内磁化 一垂直磁化構造であるため, TMR 比の角度依存性から垂直 磁化一垂直磁化構造の TMR 比を算出⁽²⁷⁾したところ約27% であった.図5(b)に高周波測定の概略図を示す.信号発生 器からは AM 変調された高周波信号を送り,素子にて高周 波成分が吸収されることによりバイアスTで分岐された直 流電圧のみをロックインアンプにて検出した. GS プロー ブ,伝送ケーブル,バイアスT,コネクタ類は40GHzまで 対応の高周波部品を使用した.尚,外部磁場印加によるプロ ーブの離反を避けるため GS プローブは非磁性品を用いた. 図 5(e)に CoFeB/FePd を用いた強磁性トンネル接合素子の 高周波特性を示す.外部磁場は膜面垂直方向へ印加した.低 周波側(1~15 GHz)から5 GHz 付近にピークが観測され た. これは、面内磁化の積層フェリ構造を有する固定層から の共鳴ピークであると考えられる. 239 kA/m 程度の外部磁 場では積層フェリ構造の磁気結合が強いため共鳴ピークは殆 ど移動しなかった. 高周波側(13~38 GHz)にもピークが観 測され、外部磁場の低下と共に高周波側へ移動した⁽²⁸⁾. CoFeB/FePd の垂直磁化方向とは逆向きに外部磁場を印加 した. つまり, 外部磁場を増大させると CoFeB/FePd の異 方性磁界(H_k^{eff})が低下する. Kittel の式によりピーク位置と 外部磁場のフィッティングをおこなったところ、実験データ と良く一致した. このことから, 非線形性はなく強磁性共鳴 に基づいたスピントルクを受けていると考えられる. これ は、信号発生器からの高周波入力電力が-15 dBm とそれほ ど多くないこと、および接合が円形状であるためと考えられ る.注目すべきは、外部磁場を印加しない状態においてもお よそミリ波帯域の共鳴ピークが観測されたことである. 無磁 場において共鳴ピークが現れた理由は、固定層の面内磁化に よりスピン偏極した電子のスピントルクの交流信号を CoFeB/FePd 垂直磁化が受け続けているためである.外部 磁場を印加するためには永久磁石もしくはコイルを配置する 必要があるため、無磁場動作はデバイスサイズの微小化の観 点から重要である.以上に述べたように, 強磁性トンネル接 合素子に高磁気異方性のL10規則合金を用いてスピンダイ ナミクスをミリ波帯域において電気的に検出した報告は殆ど なく、本報告はスピントルク素子の新たな用途として広がり をもたらすことが期待される.半導体の発振・検出素子と比 べると,素子サイズはスピントルク素子の方が圧倒的に小さ い. また,半導体素子には時定数の制限があり,ミリ波帯域 での利用には様々な工夫が必要である.スピントルク素子に



図5 (a)高周波測定用素子の概念図とGSG コプレーナー上部電極の顕微鏡写真,(b)高周波測定の概略図,(c) MgO 障壁厚さと素子抵抗(RA)の関係,(d) R-H曲線,(e) スピンダイナミクスの電気特性.

は時定数の制約がなく、ミリ波のような高い周波数領域において有利である.スピントルク発振・検波素子の研究は黎明 期であるため明らかになっていないことも多い.将来の電子 デバイスとしての有用性を検討するためには、TMR 比の増 大により検波感度を高める基本的な工夫だけでなく、周波数 変調方法、非線形性の取り扱い、および位相ノイズの対策な ど高周波スピントルクデバイス特有の研究課題を幅広く展開 していく必要がある.

5. ま と め

L1₀規則合金の高周波応用の可能性を検討するために,高 い磁気異方性材料による高周波帯域の電気的検出を強磁性ト ンネル接合素子を用いて試みた.FePdとMgOには9%も の大きな格子不整合があり,異方性磁界を低下させないため にもCoFeB挿入層による段階的な格子緩和が必要であるこ とがわかった.また,FePd/CoFeB二層膜の磁気摩擦定数 は0.007と他の垂直磁化材料に比べてかなり低いことが明ら かとなった.高周波の電気的特性について調べたところ,お よそミリ波帯域においてスピントルクによる強磁性共鳴吸収 ピークが無磁場で観測された. L1₀規則合金を有する強磁性 トンネル接合素子を用いて無磁場かつミリ波帯域で電気的検 出したはじめて報告となり,将来の新しいスピンダイナミク スデバイスへの研究の広がりが期待される.

本研究において,主に多層構造の最適化を金国天博士, K. M. N. Islam 博士,高周波測定系構築と評価・解析を河田 祐紀博士,畠山憲三氏,井波暢人先生,薄膜形状の磁気摩擦 評価を飯浜賢志氏,水上成美先生,研究の包括的支援を大兼 幹彦先生,安藤康夫先生により行われました.また,遠藤 恭先生にコプレーナー上部電極の設計指針について助言をし て頂き,谷口知大博士と垂直磁化膜のスピンダイナミクス現 象に関して有意義な議論を行いました.紙面をお借りして深 く感謝の意を表します.また,本研究は,JST 日独共同研 究(ASPIMATT),最先端プログラム,NEDO,科研費基盤 Sおよび田中貴金属工業の助成のもと行われました.

文 献

- (1) J. C. Slonczewski: J. Magn. Magn. Mater., 159(1995), L1–L7.
- (2) L. Berger: Phys. Rev. B, 54(1996), 9353–9358.
- (3) M. Tsoi, A. G. M. Jansen, J. Bass, W. C. Chiang, M. Seck, V. Tsoi, and P. Wyder: Phys. Rev. Lett., 80(1998), 4281–4284.
- (4) E. B. Myers, D. C. Ralph, J. A. Katine, R. N. Louie, and R. A. Buhrman: Science, 285 (1999), 867–870.
- (5) A. Katine, J. F. Albert, R. A. Buhrman, E. B. Meyers, and D. C. Ralph: Phys. Rev. Lett., 84(2000), 3149–3152.
- (6) F. J. Albert, J. A. Katine, R. A. Buhrman, and D. C. Ralph: Appl. Phys. Lett., 77 (2000), 3809–3811.
- (7) S. I. Kiselev, J. C. Sankey, I. N. Krivorotov, N. C. Emley, R. J. Schoelkopf, R. A. Buhrman and D. C. Ralph: Nature, 425 (2003), 380–383.
- (8) A. A. Tulapurkar, Y. Suzuki, A. Fukushima, H. Kubota, H. Maehara, K. Tsunekawa, D. D. Djayaprawira, N. Watanabe and S. Yuasa: Nature, 438 (2005), 339–342.
- (9) S. Kaka, M. R. Pufall, W. H. Rippard, T. J. Silva, S. E. Russek and J. A. Katine: Nature, 437 (2005), 389–392.
- (10) F. B. Mancoff, N. D. Rizzon, B. N. Engel and S. Tehrani: Nature, 437 (2005), 393–395.
- (11) V. S. Pribiag, I. N. Krivorotov, G. D. Fuchs, P. M. Braganca, O. Ozatay, J. C. Sankey, D. C. Ralph and R. A. Buhrman: Nature Phys., 3 (2007), 498–503.
- (12) Q. Mistral, M. van Kampen, G. Hrkac, J.-V. Kim, T. Devolder, P. Crozat, C. Chappert, L. Lagae and T. Schrefl: Phys. Rev. Lett., **100** (2008), 257201.
- (13) W. H. Rippard, M. R. Pufall, S. Kaka, T. J. Silva and S. E. Russek: Phy. Rev. B, **70**(2004), 100406.
- (14) H. Maehara, H. Kubota, Y. Suzuki, T. Seki, K. Nishimura, Y. Nagamine, K. Tsunekawa, A. Fukushima, H. Arai, T. Taniguchi, H. Imamura, K. Ando, and S. Yuasa: Appl. Phys. Exp., 7 (2014), 023003.
- (15) D. Houssameddine, U. Ebels, B. Delaet, B. Rodmacq, I. Firastrau, F. Ponthenier, M. Brunet, C. Thirion, J. P. Michel, L. Prejbeanu–Buda, M. C. Cyrille, O. Redon, and B. Dieny: Nature Mater., 6(2007), 447–453.
- (16) T. Nozaki, Y. Shiota, S. Miwa, S. Murakami, F. Bonell, S. Ishibashi, H. Kubota, K. Yakushiji, T. Saruya, A. Fukushima,

S. Yuasa, T. Shinjo and Y. Suzuki: Nat. Phys., 8(2012), 491–496.

- (17) H. Kubota, K. Yakushiji, A. Fukushima, S. Tamaru, M. Konoto, T. Nozaki, S. Ishibashi, T. Saruya, S. Yuasa, T. Taniguchi, H. Arai and H. Imamura: Appl. Phys. Exp., 6 (2013), 103003.
- (18) S. Tamaru, H. Kubota, K. Yakushiji, T. Nozaki, M. Konoto, A. Fukushima, H. Imamura, T. Taniguchi, H. Arai, T. Yamaji and S. Yuasa: Appl. Phys. Exp., 7 (2014), 063005.
- (19) A. M. Deac, A. Fukushima, H. Kubota, H. Maehara, Y. Suzuki, S. Yuasa, Y. Nagamine, K. Tsunekawa, D. D. Djayaprawira and N. Watanabe: Nature Phys., 4(2008), 803–809.
- (20) R. Okura, Y. Sakuraba, T. Seki, K. Izumi, M. Mizuguchi and K. Takanashi: Appl. Phys. Lett., 99(2011), 052510.
- (21) W. H. Rippard, M. R. Pufall, S. Kaka, S. E. Russek and T. J. Silva: Phys. Rev. Lett., 92 (2004), 027201.
- (22) S. Bonetti, P. Muduli, F. Mancoff and J. Åkerman: Appl. Phys. Lett., 94(2009), 102507.
- (23) S. Iihama, A. Sakuma, H. Naganuma, M. Oogane, T. Miyazaki, S. Mizukami and Y. Ando: Appl. Phys. Lett., 105 (2014), 142403.
- (24) S. Mizukami, S. Iihama, N. Inami, T. Hiratsuka, G. Kim, H. Naganuma, M. Oogane and Y. Ando: Appl. Phys. Lett., 98 (2011), 052501.
- (25) Brian C. Wadell: Transmission line design handbook, Artech House, London, (1991).
- (26) Y. Kawada, H. Naganuma, A. S. Demiray, M. Oogane and Y. Ando: to be submitted.
- (27) J. C. Slonczewski: Phys. Rev. B, 39(1989), 6995–7002.
- (28) H. Naganuma, G. Kim, Y. Kawada, N. Inami, K. Hatakeyama, S. Iihama, K. M. N. Islam, M. Oogane, S. Mizukami and Y. Ando: Nano Lett., 15(2015), 623–628.



永沼 博

從事。 ★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★

ま て り あ 第54巻 第8号(2015) Materia Japan 最近の研究

放射光を用いた鉄ロジウム合金の

イオンビーム照射誘起構造・磁気変態の研究

岩 瀬 彰 宏* 松 井 利 之**

1. はじめに

Fe-50%Rh 金属間化合物(FeRh 合金)は、室温より少し上 の温度で、結晶構造(B2構造)を変えずに低温相である反強 磁性から高温相の強磁性へと1次相転移するという特異な 磁気特性を持つことから、近年、熱アシスト型記憶媒体、ス ピンバルブデバイスへの応用などで関心を持たれている物質 である. 我々は, この物質を数 keV から数 GeV のエネルギ ーを持つイオンビームで照射することにより格子の乱れ(格 子欠陥)が導入され、それによって室温以下の磁性が熱的安 定相である反強磁性から強磁性に変態したり、さらに照射を 続けることによって、結晶構造が本来のB2構造からA1(不 規則 FCC 型)構造に変態し、それに伴って磁化も消失に向 かうこと、さらには、これらイオンビーム照射効果が、高温 熱処理により回復することなどを報告してきた. また最近で は、これら FeRh 合金の磁性に対するイオンビーム照射効果 をより詳細に調べるため、高エネルギー加速器研究機構放射 光施設(KEK-PF)や SPring-8 における放射光を用いた研究 を進めている.本稿では,放射光を用いた X線吸収微細構 造(EXAFS), 軟X線磁気円二色性(XMCD),磁気コンプト ン散乱(MCP),光電子顕微鏡(PEEM)の各測定法によって 得られた結果を紹介する.なお,FeRh 合金の構造や磁性に 関する一般的な論文, SQUID 磁束計や陽電子消滅測定によ る FeRh 合金のイオンビーム照射効果に関する我々の研究結 果や、この記事に記した放射光実験以前に行った放射光実験 の結果(EXAFS,硬X線MCD),磁気力顕微鏡による磁気 パターニングの観察については、2011年の「まてりあ」の 記事(文献(1))およびその引用文献を参照されたい.

2. EXAFS 法を用いた鉄ロジウム合金のイオンビー ム誘起構造変態の評価

FeRh 合金は、約 1300 K 以下において原子配列が規則的 な B2 型結晶構造をとる. このような規則的な原子配列がイ オンビーム照射によってどう変化するかを特定の原子位置か ら見るには EXAFS 法が有効である.本測定では、鉄原子 の周辺の局所原子配列を見るため、KEK-PF の BL27B に おいて Fe-K 吸収端(7.11 keV)における EXAFS スペクトル を測定した⁽²⁾.図1(a)は、未照射 FeRh の EXAFS フーリ エ変換スペクトル(EXAFS-FT スペクトル)、図1(b),1(c) は、それぞれ、10 MeV ヨウ素イオンを5×10¹²/cm²、1× 10¹⁴/cm² 照射した FeRh バルク試料の EXAFS-FT スペク トルである.比較のため、図1(b),(c)には未照射試料のデ ータも同時にプロットしてある.図1(a)では、B2 構造にお ける鉄原子の最近接原子のロジウム原子に相当する大きなピ



* 大阪府立大学教授;大学院工学研究科マテリアル工学分野(〒599-8531 堺市中区学園町1-1)

** 大阪府立大学教授;21世紀科学研究機構;大学院工学研究科

Study on Energetic Ion Beam Irradiation Induced Magnetism and Lattice Structure by Using Synchrotron Radiation X-ray; Akihiro Iwase and Toshiyuki Matsui (*Department of Materials Science, Osaka Prefecture University, Sakai. **Research Organization for the 21 Century, Osaka Prefecture University, Sakai.)

Keywords: synchrotron radiation, EXAFS, XMCD, PEEM, MCP, FeRh, ion beam irradiation effects, micro beam, magnetism, lattice structure 2015年4月30日受理[doi:10.2320/materia.54.390]

ークが観測される. 照射量が 5×10¹²/cm²の場合(図1(b)) は、スペクトルの形状は照射前と類似しているが強度が大き く低下する.これは、B2構造における鉄原子周辺の原子配 列がイオン照射によって乱れたことを意味しており、それに よって強磁性が発現することが SQUID 測定により分かっ た. なぜ原子配列の乱れによって反強磁性状態が強磁性に転 移するのかは、本研究での一番重要なポイントの一つである と思われるが、そのメカニズムに関しては、まだ十分に解明 していない.しかし、FeRhの一次磁気相転移にともなう強 磁性相の出現には、スピン揺らぎがその要因であるとの解釈 がなされている.従って、イオン照射により誘起された強磁 性についても、原子配列の乱れに伴って生ずる電子系の揺ら ぎが強磁性相を安定化させると解釈することが今のところ妥 当である.また照射量が多い場合は、EXAFS-FT スペクト ル(図1(c))は,鉄原子とロジウム原子がFCC格子上に不規 則に配列するA1構造に対応することがFEFFシミュレー ションにより分かった. A1 構造をとる FeRh 合金は非磁性 であることがわかっているので,照射量を多くした場合,磁 化が減少、消失することは、照射による結晶構造変態によっ て説明できる.

軟 X 線 MCD による FeRh 合金のイオンビーム照 射誘起磁性の評価

軟 X 線 MCD は, 円偏光放射光を用いた X 線吸収分光測 定であり,磁性体による X 線の吸収強度が偏光の向きに依 存することを利用した磁性測定法である.軟 X 線 MCD は,ある元素の吸収端近傍における測定を行うことにより, その元素由来の磁性を評価できること,さらに総和則(sum rule)を用いてスペクトルを解析することにより,磁性の起 源を,軌道磁気モーメントとスピン磁気モーメントに分離し て評価できるなど,SQUID 磁束計による測定と比べて,磁 性の詳細が議論できる特徴を持つ.そこで,イオンビームに よって FeRh 合金に誘起された磁性の軟 X 線 MCD 測定を 実施した⁽³⁾.

測定に用いた試料はイオンビームスパッタ法によって MgO単結晶基板上に作成した厚さ約80nmのFeRh薄膜試 料である.試料は,まず10MeVのヨウ素イオンを用いて 照射し,その後,SPring-8のBL25SUにおいて軟X線 MCDスペクトルを測定した.放射光のエネルギーは鉄の L2,L3吸収端近傍,入射方向は試料表面に対し30度,印加 磁場はビームの入射方向に1.9T,測定温度は20Kであっ た.X線吸収は,試料から放出される2次電子収量を測定 すること(全電子収量法)で評価した.図2に,測定された軟 X線MCDスペクトルを示す.未照射試料においてもMCD シグナルが観測されるが,これは,作成した薄膜に若干の格 子の乱れが存在し,それによって発現した強磁性を捉えたも のと考えられる.1×10¹³/cm²までの照射量では,軟X線 MCDスペクトルに大きな変化は認められないが,照射量が 2×10¹³/cm²になると,強磁性に伴う大きな強度の軟X線 MCD スペクトルが観測された. さらに照射量を多くする と、軟X線MCDスペクトルはほとんど観察されなくな り, 試料が非磁性になったことを示す. 比較のため, SQUID 磁束計を用いて同一試料について印加磁場-6T~6 T, 測定温度 20 K における磁化-磁場(M-H)カーブを測定 した.その結果を図3に示す.SQUID 測定において得られ た磁気モーメントも、照射量の増加とともに増大し、照射量 の大きな領域では減少して0に近づく.図2で示された軟 X線 MCD スペクトルを,総和則を用いて解析した結果を図 4に示す.総和則によって評価されたスピン磁気モーメン ト、軌道磁気モーメントはヨウ素イオンの照射量の増加とと もに増加するが、照射によって発現する磁気モーメントで は、スピン由来の磁気モーメントが支配的であることがわか る.次に,軟X線 MCDから求めた総磁気モーメントと, SQUID 磁束計で得られた磁気モーメント(図3)を同じく図 4にプロットして両者を比較する.図からわかるように, SQUID 磁束計で測定した磁気モーメントのほうが、軟 X 線 MCD スペクトルから評価した磁気モーメントよりもかなり 大きい. つまり, 異なる2つの方法では, 観測している磁







図3 10 MeV ヨウ素イオン照射した FeRh 薄膜におけ る磁場-磁化(M-H)曲線(SQUID 磁束計による測 定).



図4 10 MeV ヨウ素イオン照射した FeRh 薄膜におけ る照射誘起強磁性の磁気総和則に基づく解析結 果.

気モーメントの値が異なる. SQUID 磁束計では, 試料全体 のすべての磁気モーメントを測定するのに対して, 軟X線 MCDでは、試料の極表面において、しかも特定の原子(今 の場合,鉄原子)に由来する磁気モーメントを選択的に測定 している.従って、2つの方法で測定した磁気モーメントの 値が異なることの原因は主に2つ考えられる.1つは,照射 によって誘起される磁化のかなりの部分がロジウム原子に由 来するものということである.もう1つは、試料全体の磁 化に比べて照射面近傍の磁化が小さいということである.し かし、未照射試料が室温以上で示す強磁性におけるロジウム 原子の寄与は鉄原子の3分の1程度であるので、イオン照 射によっても,特にロジウム原子の磁気モーメントが鉄原子 よりも大きく発現することは考えにくい.従って,この結果 は、照射面と試料内部、あるいは、MgO 基板と試料との界 面において大きさの異なる磁化が発現していることを意味し ていると思われるが、さらなる考察が必要である.また、前 にも述べたが、軟X線 MCD 測定の特徴は、その結果から 軌道磁気モーメントとスピン磁気モーメントを分離して定量 的に議論できることである.従って,照射量の関数としてス ピン磁気モーメントと軌道磁気モーメントの比率がどう変化 するかという議論は非常に重要であり、軟 X線 MCD を用 いてこそ得られる結果であるが、現状ではデータ数も少な く、照射量による両者の比率の変化についてはまだ議論でき ない段階である. 今後, さらに詳しい結果を得て, この点に 関してもぜひ考察したいと考えている.

イオンビーム照射による試料表面での強磁性発現について は,KEK-PFのBL16Aにおいても軟X線MCD測定を行 い,その現象を確認している.特にBL16Aでは,装置に付 属しているスパッタ用のイオンガンを用いて1-3keVのAr イオン照射を行い,照射効果を「その場」で軟X線MCD 測定によって評価する実験も行った⁽⁴⁾.Arイオン照射時間 の増加とともに軟X線MCD信号は大きくなり強磁性発現 が示されたが,さらに長時間照射をすると,軟X線MCD 信号は減少した.

磁気コンプトン散乱プロファイル(MCP)を用いた FeRh バルク合金のイオンビーム誘起磁性の評価

上で述べたように,軟X線MCD法は,試料の極表面の 磁性状態を詳細に評価する方法として有効である.一方,バ ルク試料の磁性を評価する方法として,高エネルギー円偏光 X線を用いた磁気コンプトン散乱法がある.物質中に入射 したX線が物質中の電子で散乱されたとき,一部の散乱X 線のエネルギーが入射X線のエネルギーより低くなる現象 は,よく知られたコンプトン散乱である.一方,円偏光X 線を用いたコンプトン散乱を測定することにより,物質中の 磁性電子の運動量密度を測定することにより,次ピン磁気 モーメントを評価できる.そこで,FeRhバルク合金のイオ ンビーム照射誘起磁性を,磁気コンプトン散乱法を用いて評 価した⁽⁵⁾.

本測定に用いた試料は厚さ 0.5 mm のバルク FeRh 試料で ある. 照射に用いたイオンは 200 MeV Xe イオンである. このイオンの FeRh 合金における飛程(レンジ)は 9.7 μ m で あるので, 照射効果も試料表面から 9.7 μ m までしか現れな い. そこで, 照射効果を受ける体積を増やすために, 試料の 両面を Xe イオンで照射し, さらに同じ照射量(1×10¹³/ cm², 5×10¹³/cm², あるいは 1×10¹⁴/cm²)の照射をした試 料を数枚重ねることによって, コンプトン散乱の強度を上げ ることとした. 重ねた試料は, SPring-8 BL08W の真空チ ェンバー内コールドヘッドに取り付け, 50 K における磁気 コンプトンプロファイル(MCP)を測定した. 用いた円偏光 X 線のエネルギーは 182 keV, 散乱角は178.5°であった. 散 乱 X 線は多素子 Ge ディテクターにより検出した. 印加磁場 は 2.5 T, -2.5 T であった. 比較のために, 未照射の FeRh バルク試料および純鉄の MCP も測定した.

測定結果を図5に示す.図は、磁気モーメントを電子の運 動量成分 pzの関数としてプロットしたものである. MCPの データを p_zに対して積分することにより, 試料中に誘起さ れたスピン磁気モーメントの値を求めることができる. それ によると、200 MeVのXeイオンを1×10¹³/cm² 照射する ことによって誘起されるスピン磁気モーメントは1.2µB/ f.u, 照射量が5×1013/cm2の場合の誘起磁気モーメントは 2.9µ_B/f.u となった. なお,純鉄の磁気モーメントは 2.2µ_B/ f.u である. これらスピン磁気モーメントのXe イオン照射 量依存性を表したグラフが図6である.図6には、SQUID 磁束計により求めた磁気モーメントをもプロットした. SQUID 磁束計では、スピン磁気モーメントと軌道磁気モー メントを合わせた総磁気モーメントが求まるが、この値と MCP から求めたスピン磁気モーメントの値がほぼ一致する ことから、イオン照射によって誘起されるモーメントの大部 分はスピン磁気モーメントであると結論できる.これは,軟 X線 MCD によって求めた結果と一致する.最後に、イオン 照射した FeRh バルク試料の MCP と純鉄の MCP を比較す



図5 200 MeV Xe イオン照射した FeRh バルク試料に おける磁気コンプトンプロファイル.



図6 磁気コンプトン散乱(MCP)および SQUID 磁束 計により求めた FeRh の磁気モーメントの 200 MeV Xe イオン照射量依存性.

ることにする.図7から、イオン照射したFeRh合金の MCPは、純鉄のMCPよりも若干分布が狭いことがわかる.これは、磁性に寄与するd電子の局在状態が両者において異なることを示すものであり、照射したFeRhバルク試料では、鉄の3d電子だけでなくロジウムの4d電子も磁気モーメントに寄与していることを示唆するものである.また、 $p_z = 0$ 近傍のMCPも純鉄とイオン照射したFeRhバルク試料では異なるが、この差を議論するためには、非局在s電子、 p電子の磁性への寄与も考慮する必要があると思われる.

5. 重イオンマイクロビーム,集束イオンビームを用 いて作製した鉄ロジウム表面の磁気微小構造の PEEM による観察

軟 X 線 MCD の結果が示すように,重イオンビーム照射 により FeRh 合金表面に強磁性が発現する.また,この現象



図7 Xe イオン照射した FeRh(照射量 5×10¹³/cm²)と 純鉄の磁気コンプトン散乱プロファイルの比較.

は、イオンが照射される領域にのみ生ずると考えられること から、重イオンマイクロビームを用いた FeRh 合金表面の微 小磁気構造の作成を試みた. MgO 基板上にスパッタした厚 さ約 80 nm の FeRh 薄膜試料を、スリットや4 重極レンズ でマイクロメートルスケールに調整した 10 MeV エネルギ ーのヨウ素イオンマイクロビームで照射し、SPring-8 BL25SU において試料表面における磁性を PEEM によって 観察した⁽⁶⁾. さらに、集束イオンビーム装置(FIB)からの集 束 Ga イオンを用いて照射した FeRh 薄膜試料においても PEEM 観察を行った⁽⁷⁾.

図8は、2µm×4µmの形状の10MeVヨウ素イオンマイ クロビームをスキャンして, 10 µm×10 µm 領域に 10 µm 間隔で FeRh 薄膜上に照射したときの PEEM 像を示す.な お, 試料には MgO 基板の[001]方向に沿った磁場を NdFeB 永久磁石によって付加し、その後磁石を除いた状態、すなわ ち残留磁化状態で PEEM 測定をしている.図8において, 円偏光放射光の方向は、MgO 基板の[100]方向と平行であ る. ヨウ素イオンマイクロビームによって照射された10 μm×10μmの領域が明るい像として観察されている. ま た、この照射領域、および未照射領域において鉄L3吸収端 (707 eV)のエネルギーの放射光による XANES, 軟 X 線 MCD 測定の結果を図9に示す.照射領域では,右偏光X線 と左偏光 X 線の吸収が異なり、XMCD シグナルが明確に観 測されている. それに対し、未照射領域では XMCD 信号は 殆ど観測されない. 以上の実験結果から, ヨウ素イオンマイ クロビームによって照射された 10 µm×10 µm の微小領域 において強磁性が誘起されていることが明確になった.次 に、マイクロビームによって誘起された微小強磁性領域の磁 化方向を見るために、試料を回転して放射光の入射方向と MgO 基板の「001] 方向の角度を変えて PEEM 観察を行っ た. その結果を図10に示す. この実験には, 10 MeV ヨウ素 イオンマイクロビームを用いて幅, 10 µm で MgO 基板 [001] 方向に延びるストライプ形状の微小磁気構造を用い



図8 10 MeV ヨウ素イオンマイクロビームで10 µm× 10 µm の領域を照射した FeRh 試料の XMCD-PEEM 像.



 図9 図8に示された照射領域および未照射領域の FeL3吸収端近傍の、X線吸収プロファイル (XAS)とXMCDシグナル.

た. 放射光の入射方向と MgO[001]方向が平行の場合が一 番明るい PEEM 像が得られ,両者の角度が大きくなるにつ れて像は暗くなり,角度80度の時が像は一番暗くなる. PEEM シグナルの大きさは試料の残留磁化の放射光方向成 分と対応することから,この実験結果から,照射領域の残留 磁化の大部分は, MgO 基板[001]方向と平行であることが わかる.

マイクロメーターサイズの微小領域のイオン照射誘起磁化 状態については、30 keV の Ga 集束ビームを用いた実験に おいても確認されている.図11は、Ga イオンを 30 µm×30 µm の領域に照射したときの PEEM 像を示す.図11(a)は、



 図10 10 MeV ヨウ素イオンマイクロビーム照射により 作製した FeRh 膜表面の微細磁気ストライプパ ターンに関する XMCD 像の放射光入射方向依存 性:(a)0°,(b)22.5°,(c)45°,(d)80°(いずれ も放射光入射方向が MgO 基板[001]方向となす 角度).



図11 30 keV ガリウム集束イオンビーム照射により作成した,FeRh 薄膜試料表面の30 μm×30 μm 微小磁気ドットパターンのPEEM 観察像の照射量依存性(a):1×10¹² cm⁻² 照射後,磁場をかけずにPEEM 観察,(b):1×10¹² cm⁻² 照射後,磁場をかけたのち PEEM 観察した結果,(c):同1×10¹³ cm⁻²,(d):(c)で示した試料において,放射光入射方向を45度回転させたときのPEEM像、白色の矢印が,測定前にかけた磁場の方向.hvと書いた矢印はX線入射方向.

照射量が1×10¹²/cm²で,PEEM 観察前に磁場を印加しな かった試料,図11(b)は、同じく照射量1×10¹²/cm²で観察 前に MgO 基板[001]方向に磁場を印加した試料,そして、 図11(c)は、照射量1×10¹³/cm²で磁場を印加した試料に対 する PEEM 像である.放射光は、MgO 基板[001]と平行に 入射した.前もって磁場を印加しない場合は照射領域が明確 に見えない.それに対して、磁場を印加した試料では、照射 領域が明確に観察されている.しかし、イオンビーム照射量 の少ない場合は、よく見ると PEEM 像にムラがみられる (図11(b)).これは、磁化方向が放射光の入射方向に対して 揃っていないことを示唆する.それに対してイオンビームの



図12 30 keV ガリウム集束イオンビーム照射により作成した微小磁気ドットパターンのドットサイズ依存性: (a) 30 µm×30 µm, (b) 10 µm×10 µm, (c) 5 µm×5 µm.

照射量を多くすると、照射領域の PEEM 像の輝度は一様と なり、これは、照射領域内で磁化の向きがほぼ一定になって いる, すなわち, 30 µm×30 µm の微小磁化領域は単磁区構 造であることがわかる.この単磁区の磁化方向を確認するた めに、磁場印加方向を放射光の入射方向に対して45度回転 した場合の PEEM 像(図11(d))と図11(c)を比較する.磁場 印加方向と放射光の入射方向が平行の場合のほうが PEEM 像の輝度が大きい. これは、微小磁化領域は、磁化方向が磁 場印加方向の単磁区であることを確認する結果であり、前に 述べた10 MeV ヨウ素のマイクロビーム照射の結果(図10) と一致する.図12は、微小磁化領域のサイズを30 µm×30 μm, 10 μm×10 μm, 5 μm×5 μm と変化させ, それに対して PEEM 像がどのように変化するかを示したものである. Ga イオンの照射量はどれも同じく1×10¹³/cm²である.いずれ のサイズの場合も、微小領域は一様な輝度であり、単磁区構 造であることを示しているが、輝度は領域のサイズに依存し ており、サイズが小さくなるにつれて PEEM の輝度は低下 する. 照射によって誘起された微小強磁性領域の周辺は反強 磁性状態であることから、このサイズ効果には、照射領域と 未照射領域の界面における強磁性・反強磁性間の交換相互作 用が重要な役割を演じていると思われる. 照射領域のサイズ をさらに広く変化させて磁区構造がどう変化するかを見る実 験を現在実施中である.

軽イオンマイクロビームによる様々な微小磁気パ ターンの作製と PEEM による観察

以上に述べた実験結果から,FeRh 合金のイオンビーム照 射誘起強磁性の発現は照射領域のみにおいて現れ,これを利 用してマイクロメータースケールの微小な強磁性領域を作製 できることがわかった.また,照射量を多くすると,結晶構 造が A1 構造に変態し非磁性状態に移行することも,第1章, 2章で述べたように,EXAFS や SQUID 磁束計による測定 などからわかっている.そこで,2 MeV のエネルギーを持 つ軽イオン(H,He)マイクロビームを用いて,様々な微小磁 気パターンの作製を行い,PEEM を用いて観察した⁽⁸⁾.ヨ ウ素イオンなどの重イオンマイクロビームや,FIB からの 集束 Ga イオンビームでも微小磁気パターンの作製が可能で

図13 2 MeV H イオンビーム照射により作成した,各 種形状の磁気パターンの PEEM 観察結果.

あることを示してきた.しかし,集束 Ga イオンビームはエ ネルギーが小さいため,試料表面に Ga イオンが蓄積し,そ れが結晶構造や磁気的性質に影響を与える懸念がある.また, MeV 領域の重イオンビームは、少ない照射量で大きな照射 効果を与えることができるという利点はあるが、イオン源の 複雑さなどから若干ビーム電流が不安定である.それに対し て、1-2 MeV の H, He イオンマイクロビームは、飛程が大 きく試料表面にイオンが蓄積しないこと、長時間安定したビ ームが得られることなどの利点を持つため、微小磁気パター ンの作製には適していると考えられる.

図13に、2 MeV の H イオンマイクロビームを用いて FeRh 合金表面に作製した様々な強磁性パターンの PEEM 像を示す.図13(a)は、1.4 µm×1.5 µm の大きさのマイクロ ビームを 10 µm 間隔で照射した試料の PEEM 像である.確 かにマイクロビームと同じ大きさの領域の輝度が高く、この 領域が強磁性になっていることがわかる.また、図13(b) は、マイクロビームを縦方向、横方向にスキャンして描いた ストライプ状の強磁性パターン、図13(c)は、幅 1.5 µm の 「FeRh」という強磁性領域でできた文字を書いた試料の PEEM 像である.2 MeV He イオンマイクロビームを用い ても同様の微小磁気パターニングが可能であることも確認し た.

次に、イオン照射量の増加による微小領域の磁性の変化を PEEMによって観測した結果について報告する.図14(a) は、同じ視野内に、2 MeV の H イオンマイクロビームを2 ×10¹⁶/cm²から2×10¹⁸/cm²の照射量で照射して作製した 10 µm×10 µm の微小磁気パターンの PEEM 像である. 照 射量が小さい場合の PEEM 像は暗く,照射量の増加に伴っ て明るさは増し、2×1017/cm2の照射量の時もっとも明るく なる.これは,照射量(あるいはイオンビームによる付与エ ネルギー)の増加に伴って、微小領域の磁化が増加している ことを意味する. さらに照射量を増加させると, 逆に PEEM 像は暗くなっていく.これは,照射によって微小領 域の磁化が減少していることを示すものである. 同様の結果 は2MeV He イオン照射の場合においても得られている(図 14(b)). これらの結果から、マイクロメータースケールの 領域におけるイオンビーム誘起強磁性のイオン照射量依存性 は,SQUID 磁東計や XMCD 測定によって広い領域で得ら れた結果と同じであることがわかる.このように,軽イオン マイクロビームのエネルギーや照射量を変えることによっ



図14 2 MeV H (a) および 2 MeV He (b) イオンビー ム照射により作成した 10 µm × 10 µm 微小磁気 ドットパターンのイオン照射量依存性.



図15 2 MeV H イオンビーム照射により作成した磁気 ドットパターンの PEEM 像輝度における照射量 ならびに熱処理温度依存性.

て、マイクロメートルスケールの任意の形状で、しかもいろ いろな磁化の大きさを持った強磁性パターンを FeRh 表面上 に作成できることがわかった.

最後に、マイクロビームによって作成した微小磁気パター ンが、照射後の熱処理によってどう変化するかを示す.図 14(a)で示した試料を423 Kから573 Kの温度で熱処理し、 各温度での熱処理のたびに PEEM 像を観測した.PEEM 像 の輝度を熱処理温度の関数としてプロットしたのが図15であ る.PEEM 像の輝度は磁化の大きさに対応するものであ る.照射量が2×10¹⁶/cm²と少ないときは、照射によって発 現する磁化は比較的低温(423 K)での熱処理で消滅し,もと の反強磁性状態に回復する.最大磁化が発現する照射量2× 10¹⁷/cm²の場合は,熱処理温度の増加とともに磁化は減少 するものの,573 K での熱処理でもまだ磁化は大きく残って いる.これらの現象は,SQUID 磁束計による測定でも見ら れた傾向であり,強磁性発現の原因であった格子の乱れが熱 処理によって回復し,磁性も本来の反強磁性状態に戻ってい くと考えられる.それに対して,照射量が2×10¹⁸/cm²の場 合は,熱処理温度の増加に伴い,磁化が増加する傾向がみら れる.これは,照射量が大きいときに試料の結晶構造の1 部がA1 に変化したために消失した磁化が,熱処理による B2 構造への回復によって強磁性へと変化したことによる.

7. まとめ

放射光によるいろいろな実験手段を用いることにより,イ オンビーム照射によって FeRh 中に誘起される結晶構造や磁 性の詳細が明らかになってきた.特に,マイクロイオンビー ムを用いることにより,FeRh 表面に,いろいろな形状と磁 化の大きさを持つマイクロメータースケールの2次元微小 磁気パターンが制御よく形成できることが放射光 PEEM 観 察によって明確になったのは大きな成果である.(なお,マ イクロメータースケールの微小磁化領域の磁区構造に関して は,最近,SPring-8 BL17SU における高分解能 PEEM 測 定を用いて詳細な観察を進めているところである.)

これら2次元磁性改質と、イオンのエネルギーを変える ことによる試料の深さ方向の磁性の制御を組み合わせること によって,磁性の3次元微小構造の作成も可能であると思 われる.これはトップダウン方式による磁性デバイスの開発 に応用できる技術として期待される. すでに, 高エネルギー のHイオンを照射した試料を,試料表面の磁性を測定する XMCD と試料全体の磁性を測定する SQUID 磁東計の結果 を比較することによって, FeRh の深い位置にのみ強磁性層 が誘起されていることを示唆する実験結果が得られてい る⁽⁹⁾. また, Au 原子が3個集まったクラスターイオンの照 射により、Au 単原子イオン照射よりも大きな磁化が試料表 面に誘起される結果もXMCD 測定により得られてい る⁽¹⁰⁾.この結果は、イオン照射によって誘起される磁化 が、イオンビームによって試料に付与されるエネルギーのみ では記述できないことをしめす大変興味ある結果である.こ のように、放射光を用いた FeRh 合金の照射効果の研究は、 イオンビームで物質の性質を改質・制御し、それを放射光で 評価するという,まさに量子ビーム融合研究の1つであ る. 今後, FeRh 合金にとどまらず, いろいろな金属材料, セラミックス材料におけるイオンビーム照射効果を放射光測 定で明らかにすることにより、イオンビームと物質との相互 作用の基礎過程を明らかにするとともに、イオンビームを用 いた材料プロセシング技術の開発へと繋げていきたいと考え ている.

本研究で紹介した研究の一部は、科学研究費補助金、若狭

湾エネルギー研究センター共同研究費を用いて実施されまし た. 若狭湾エネルギー研究センターとの共同実験では、同研 究センター・石神龍哉氏にご協力いただきました. SPring-8の軟X線 MCD 測定, PEEM 観察では, 高輝度光科学研 究センター(JASRI)・中村哲也氏,大河内拓雄氏,小嗣真人 氏,木下豊彦氏に,同じくSPring-8の磁気コンプトン散乱 実験では、JASRI・櫻井吉晴氏、伊藤真義氏にお世話になり ました. KEK-PF における軟 X 線 MCD 測定では, KEK・ 雨宮健太氏,酒巻真粧子氏の,同じくKEK-PFにおける EXAFS 測定では,原子力機構・岡本芳浩氏,和泉寿範氏, KEK・宇佐美徳子氏のご協力を得ました. さらに本研究の 一部は日本原子力研究開発機構との共同研究制度ならびに施 設供用制度を用いて実施されたものです. マイクロビーム照 射, クラスタービーム照射を含む高エネルギーイオン照射実 験は、原子力機構高崎量子応用研究所のシングルエンド加速 器、タンデム加速器、および原子力機構原子力科学研究所 (茨城県東海村)のタンデム加速器を用いて,原子力機構・斎 藤勇一氏,石川法人氏,神谷富裕氏,佐藤隆博氏,江夏昌志 氏,高野勝昌氏のご協力のもと,実施されました.さらに深 部磁性改質に用いた高エネルギーH, He イオン照射は, 住 重試験検査株式会社・坂根仁氏,鵜野浩行氏のご協力によ り,同社 サイクロトロン加速器を用いて実施しました. 関 係者の皆様に深く感謝します。また、本研究に携わった歴代 の大阪府立大学大学院生・福住正文氏、圖子善大氏、藤田直 樹氏,小杉晋也氏,愛甲一馬氏,唐木淳志氏,小出哲也氏に 感謝します.

文 献

- (1) 岩瀬彰宏,松井利之,堀 史説:まてりあ,50(2011),247-253.
- (2) S. Kosugi, N. Fujita, T. Matsui, F. Hori, Y. Saitoh, N. Ishikawa, Y. Okamoto and A. Iwase: Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. B, **269**(2011), 869–872.

- (3) K. Aikoh, A. Tohki, S. Okuda, Y. Saitoh, T. Kamiya, T. Nakamura, T. Kinoshita, A. Iwase and T. Matsui: Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. B, 314(2013), 99–102.
- (4) T. Matsui, K. Aikoh, M. Sakamaki, K. Amemiya and A. Iwase: Nucl. Instrum. Methods, B(2015), to be published.
- (5) S. Kosugi, T. Matsui, N. Ishikawa, M. Itou, Y. Sakurai, K. Aikoh, K. Shimizu, Y. Tahara, F. Hori and A. Iwase: J. Appl. Phys., **109** (2011), 07B737.
- (6) K. Aikoh, A. Tohki, T. Matsui, A. Iwase, T. Satoh, K. Takano, M. Kohka, Y. Saitoh, T. Kamiya, T. Ohkochi, M. Kotsugi, T. Nakamura and T. Kinoshita: J. Synchrotron Rad., **19**(2012), 223–226.
- (7) A. Tohki, K. Aikoh, R. Shinoda, T. Ohkochi, M. Kotsugi, T. Nakamura, T. Kinoshita, A. Iwase and T. Matsui: Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. B, **302**(2013), 51–54.
- (8) T. Koide, T. Satoh, M. Kohka, Y. Saitoh, T. Kamiya, T. Ohkochi, M. Kotsugi, T. Kinoshita, T. Nakamura, A. Iwase and T. Matsui: Jpn. J. Appl. Phys., 53 (2014), 05FC06.
- (9) T. Koide, H. Uno, H. Sakane, M. Sakamaki, K. Amemiya, A. Iwase and T. Matsui: J. Appl. Phys., 117 (2015), 17E503.
- (10) T. Koide, Y. Saitoh, M. Sakamaki, K. Amemiya, A. Iwase and T. Matsui: J. Appl. Phys., 115(2014), 17B722.

★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★ 岩瀨彰宏

1978年3月 東京大学大学院工学系研究科(物理工学専攻)博士課程中途退学

1978年4月 特殊法人 日本原子力研究所 入所

- (1993年-1994年 米国アルゴンヌ国立研究所 研究員)
- 2003年3月 日本原子力研究所 退所

2003年4月 大阪府立大学 先端科学研究所 教授

- 2005年4月 現職
- 専門分野:放射線物性学,格子欠陥学

◎放射線と物質の相互作用,各種高エネルギービーム(電子,イオン,ガンマ 線,X線)を用いた材料改質,材料評価などの研究に従事.



岩瀬彰宏

松井利之

最近の研究

鉄合金の BCC/FCC マルテンサイト変態と超弾性

大森俊洋* 貝沼亮介**

1. はじめに

鉄合金のマルテンサイト変態は古くから多くの研究がされ ており,特に鉄鋼材料の強化法として広く利用されている. 鉄合金のマルテンサイト変態には, $y(FCC) \rightarrow \epsilon(HCP)$ 変態 (Fe-Mn系)や $y \rightarrow$ FCT 変態(Fe-Pd系)もあるが,実用的に 最も重要なのは $y \rightarrow \alpha'$ (BCT または BCC)変態である. $y \rightarrow \alpha'$ 変態は,高温が密な構造(FCC)で低温が粗な構造(BCC)で あり,他の金属で一般的な粗→密変態(BCC→FCC や BCC →HCP)とは逆の特殊な変態であると言える⁽¹⁾.しかし近年, Fe-Mn-Al などの一部の鉄合金において α 相(BCC)がy相 \neg マルテンサイト変態することが報告され⁽²⁾,他の金属同 様,鉄合金においても粗→密変態が生じることが判明した.

マルテンサイト変態を利用した機能性材料として形状記憶 合金が挙げられる.形状記憶合金では,加熱や磁場の印加に より、変形した材料が元の形状に戻る形状記憶効果や、弾性 的な変形量が数%から10%程度にも及ぶ超弾性が得られる ことから、センサー・アクチュエーター部品やガイドワイヤ ー,ステントなどの医療機器などとして利用されている⁽³⁾. 実用的に利用されている形状記憶合金のほとんどは優れた形 状記憶特性を示す Ti-Ni 系合金であるが、低廉な鉄合金で 形状記憶特性を得ることができれば、形状記憶合金の利用用 途は拡大することが期待できる. Fe-Mn-Si 合金では $y \leftrightarrow \epsilon$ マルテンサイト変態を利用して形状記憶効果が得られ(4),ク レーンレール用継ぎ目板などに利用されている(3).一方,鉄 合金で明確な超弾性を得ることは、長年、実現されなかっ た.しかし,最近, Fe-Ni-Co-Al系多結晶合金で $y \Leftrightarrow \alpha' \forall \nu$ テンサイト変態を利用して約13%にも及ぶ超弾性が得られ るようになり⁽⁵⁾⁽⁶⁾, Fe-Pd 単結晶合金でも FCC⇔FCT マル テンサイト変態に関係して超弾性を含む大きな弾性変形挙動 が得られている⁽⁷⁾⁽⁸⁾. また, Fe-Mn-Al-Ni 系では, $\alpha \Leftrightarrow y \lor$

ルテンサイト変態を利用して超弾性が得られることがわかった⁽⁹⁾⁽¹⁰⁾. この合金における超弾性は、マルテンサイト誘起 応力の温度依存性が極めて小さく温度変化による影響を受け にくい、といった特徴を有する. これらの鉄系超弾性合金 は、既存のTi-Ni合金に対し低コストであること以外に も、このように特徴的な材料特性を有するので、超弾性材料 として新たな展開が期待される.

本稿では、Fe-Mn-Al系合金を中心とした鉄合金の $\alpha \rightarrow \gamma$ マルテンサイト変態について、これまでの研究報告について 紹介し、さらに、著者らの取り組んでいる Fe-Mn-Al-Ni合 金の組織制御と超弾性の研究を含めた国内外の研究状況を紹 介する.

Fe-Mn-Al 3 元系合金における α→y'マルテンサ イト変態

Fe 合金のマルテンサイト変態の中で, α相から y 相への 変態に関する報告は数少ない. 富田らは, Fe-Cr-Ni 急冷凝 固箔帯において α→y マルテンサイト変態が生じることを報 告している⁽¹¹⁾. さらに, Fe-Mn-Al-C 合金バルク材におい てもこの種の変態が起こり、マルテンサイト変態の結晶構造 は18層周期であることが報告されている(12)-(14).著者らも, Fe-Mn-Al3元系において $\alpha \rightarrow \gamma$ マルテンサイト変態が起こ ることを確認している⁽²⁾.図1(a)(b)にFe-Mn-Al3元系の 光学顕微鏡写真を示す.図1(a)のFe-36 at%Mn-15 at%Al 合金(以降,組成はat%で示す)では、一部にマルテンサイ トのような組織が見られ、透過型電子顕微鏡(TEM)による 観察では、明視野像において多量の欠陥が観察されている (図1(c)).マトリックスの領域から得た制限視野回折図形 (図1(d))はBCC(A2)構造を示しており、マルテンサイト (図1(e))は双晶を含む FCC(2M)構造を示している.この ことから、この材料では α→y マルテンサイト変態が起きた

* 東北大学助教;大学院工学研究科 金属フロンティア工学専攻(〒980-8579 仙台市青葉区荒巻字青葉 6-6-02)

** 東北大学教授;大学院工学研究科 金属フロンティア工学専攻

BCC/FCC Martensitic Transformation and Superelasticity in Fe-Based Alloys; Toshihiro Omori, Ryosuke Kainuma (Department of Metallurgy, Graduate School of Engineering, Tohoku University, Sendai) Keywords: *martensitic transformation, shape memory alloy, superelasticity, CALPHAD, microstructural control, iron-based alloy* 2015年5月18日受理[doi:10.2320/materia.54.398] ことがわかる.これに冷間圧延を加えると,さらに多量のマ ルテンサイト相が誘起することも確認されている⁽²⁾.図1 (b)は Fe-40Mn-15Al 合金の光学顕微鏡写真である.Mn 量 を増加させることでマルテンサイト相分率が高くなっている. Mn は y 相を安定化させる元素なので,この結果は鉄合金の 相安定性から考えても妥当と言える.本3元系においてマ ルテンサイト変態を起こす組成域は,30~40 at % Mn-15 at % Al 付近であり,状態図において y 相との二相域⁽¹⁵⁾に近 い領域である.



図1 (a)1473 K, 30分間熱処理した Fe-36Mn-15Al の光学顕微鏡写真,(b)1473 K, 30分間熱処理し た Fe-40Mn-15Alの光学顕微鏡写真,(c)Fe-36Mn-15Alの TEM 明視野像と(d)母相及び(e) マルテンサイト相の制限視野回折図形.

Fe-Mn-Al 合金における $\alpha \rightarrow \gamma$ マルテンサイト変態は熱力 学的に次のように説明できる(9).図2は文献(15)の熱力学 パラメータを用いて Thermo-Calc により計算した純 Fe と Fe-Mn-Al のエントロピー変化($\Delta S_{\text{total}}^{\alpha/\gamma} = \Delta S_{\text{total}}^{\gamma} - \Delta S_{\text{total}}^{\alpha}$,上 段)と Gibbs 自由エネルギー変化 ($\Delta G_{\text{total}}^{\alpha/\gamma} = \Delta G_{\text{total}}^{\gamma} - \Delta G_{\text{total}}^{\alpha}$, 下段)である. さらに, $\Delta S_{\text{total}}^{\alpha/\gamma} = (S_{\text{nonmag}}^{\gamma} + S_{\text{mag}}^{\gamma}) - (S_{\text{nonmag}}^{\alpha} + S_{\text{mag}}^{\gamma})$ S_{mag}^{α}) = $\Delta S_{\text{nonmag}}^{\alpha/\gamma} + \Delta S_{\text{mag}}^{\alpha/\gamma}$, $\Delta G_{\text{total}}^{\alpha/\gamma} = (G_{\text{nonmag}}^{\gamma} + G_{\text{mag}}^{\gamma}) -$ $(G_{nonmag}^{\alpha} + G_{mag}^{\alpha}) = \Delta G_{nonmag}^{\alpha/\gamma} + \Delta G_{mag}^{\alpha/\gamma}$ のように、磁気の寄与 を考慮しない $\Delta S_{nonmag}^{\alpha/\gamma}$ や $\Delta G_{nonmag}^{\alpha/\gamma}$ をベースに磁性項 $\Delta S_{mag}^{\alpha/\gamma}$, $\Delta G_{mag}^{\alpha/\gamma}$ を加える形式で解析した.その結果について、磁気 項を除いた $\Delta S_{nonmag}^{lpha/y}$, $\Delta G_{nonmag}^{lpha/y}$ を点線で, 磁気を考慮した $\Delta S_{\text{total}}^{\alpha/y}$, $\Delta G_{\text{total}}^{\alpha/y}$ を実線で図2に示す.ここで、 α 相のキュリ ー温度 Tčとy相のネール温度 Th も合わせて示した.純 Fe (図 2(a))では基本は $\Delta S_{nonmag}^{\alpha/\gamma} < 0$ だが、磁気の寄与⁽¹⁶⁾によ り、 α 相のキュリー温度よりやや高い温度から $\Delta S_{total}^{\alpha/\gamma} > 0$ と 符号が逆転する.このとき、ΔG^{α/y}はα相(高温)→γ(低温) に加え、さらに低温で γ 相→ α 相となる. すなわち、 α 相は 強磁性となることにより、中間温度のy相を挟み、低温と高 温で存在し得るのである. さて、Fe-Mn系は $\Delta G^{\alpha/\gamma}_{KM}$ の温度 依存性が Mn 濃度により著しく変化することが知られてい る⁽¹⁷⁾. 実際,図2(b)に示すFe-20Mn-10Alでは,Mn 添加 によりα相のキュリー温度は著しく低下し,より低温で $\Delta S_{\text{total}}^{\alpha/\gamma} > 0$ となり、 $\Delta G_{\text{total}}^{\alpha/\gamma}$ も低温で正となる. さらに Fe-36Mn-15Al(図2(c))では、α相のキュリー温度が室温近傍 まで低下するため、 $\Delta S_{nonmag}^{\alpha/\gamma}$ と $\Delta S_{total}^{\alpha/\gamma}$ の差はほとんど見ら れない. すなわち, 磁性の寄与が顕著に小さく, $\Delta S_{total}^{\alpha/\gamma} > 0$ とならず、低温でも $\Delta G_{\text{total}}^{\alpha/\gamma} < 0$ のままである.また、高温側 で $\Delta G_{\text{total}}^{\alpha/\gamma} = 0$ となる温度(T_0 温度)も低下している. Fe-Mn-Al 系の T_0 温度をAl 濃度に対して描くと図3の様になる. ここで、α相のキュリー温度についても合わせて示した.こ の図からもキュリー温度近傍でα相が安定化され,その結 果 20Mn までは y ループを形成できるが, 36Mn では室温付



図2 Thermo-Calc で計算したエントロピー変化, $\Delta S_{\text{total}}^{\alpha/\gamma} = S_{\text{total}}^{\gamma} - S_{\text{total}}^{\alpha}$, $\Delta S_{\text{nonmag}}^{\alpha/\gamma} = S_{\text{nonmag}}^{\gamma} - S_{\text{nonmag}}^{\alpha}$ (上段)と自由エネルギー変化 $\Delta G_{\text{total}}^{\alpha/\gamma} = G_{\text{total}}^{\gamma} - G_{\text{nonmag}}^{\alpha} = G_{\text{nonmag}}^{\gamma} - G_{\text{nonmag}}^{\alpha}$ (下段). (a) Fe, (b) Fe-20Mn-10Al, (c) Fe-36Mn-15Al.



図3 Fe-Al, Fe-Mn-AlのMn 濃度一定における計算 縦断面状態図. T₀線とα相のキュリー温度T^e を示している.

近まで γ ループを形成せず, $\alpha \rightarrow \gamma$ 変態が比較的低温で起こ り得ることがわかる.本状態図から, Fe-36Mn-15Al 近傍 の組成では高温の α 相から冷却すると γ 相に変態するこ と,また Fe 合金としては特異な α/γ マルテンサイト変態が 生じうることが理解できる.なお,低温に存在するとされる γ 相の反強磁性も相安定性に寄与しているが,その定量的な 評価は今後の課題である.以上のように,Fe-Mn-X系(X: α 安定化元素)において,Mn,X(今回はAl)を添加して α 相 の磁気の影響を抑制すれは,高温の α 相(すなわち δ 相)から γ 相へ,他の金属でよく見られる粗 → 密変態が得られる.

Fe-Mn-Al-Ni 合金における熱弾性型マルテンサ イト変態

通常、超弾性は熱弾性型マルテンサイト変態において得ら れるが、Fe-Mn-Al3元系合金のマルテンサイト変態は非熱 弾性型である⁽²⁾.しかし、Niの添加により熱弾性型マルテ ンサイト変態が得られる.図4(a)はFe-34Mn-15Al-7.5Ni 合金 1473 K 溶体化材の熱磁化曲線である⁽⁹⁾. 母相は強磁性 (キュリー温度 390 K)であり、マルテンサイト相は反強磁性 と予想されている.マルテンサイト変態開始温度 M_s=約 243 K で磁化の強さが減少し始め、加熱すると逆変態により 磁化が徐々に増加する.その熱ヒステリシスは約150Kで ある.熱弾性型変態のヒステリシスは一般に 50 K 程度以下 とされているが、それに比較して本合金のヒステリシスは異 常に大きい.一方,図中に示した光学顕微鏡その場観察写真 では、変態に伴うマルテンサイトプレートの可逆的な成長・ 収縮が確認できた.これは熱弾性型変態に見られる特徴のひ とつである. 応力に対してもマルテンサイトプレートの可逆 的な移動は確認されている⁽⁹⁾. さらに, △G が直線に近似で きる温度範囲内であれば変態が生じるときの駆動力 *ΔG*^{α/γ}≈



図4 Fe-34Mn-15Al-7.5Ni 合金の(a)1473 K, 30分間 の溶体化材と(b)溶体化後 473 K, 6時間時効し た試料の M-T 曲線及び光学顕微鏡その場観察写 真.

 $\Delta S^{\alpha/\gamma} \cdot \Delta T (\Delta T : T_0$ からの過冷度)の関係が成り立ち,本合 金系の場合, $\Delta G^{\alpha/\gamma}$ は - 32 J·mol⁻¹と見積もられる(表 1). これは Fe-Ni などの非熱弾性型変態⁽¹⁸⁾より 1~2桁小 さく,Ti-Ni の熱弾性型 B2⇔B19'変態の 1/4 程度である. 以上のことから,この変態は熱弾性型であると結論付けられ る.またこの関係式から,熱弾性型にも関わらず変態ヒステ リシスが広いのは,図2(c)で予想される通り,変態エント ロピー変化が極めて小さいことに起因している.同様の理由 で,低温まで冷却しても母相は一部残留すると考えられるの で,低温での比較的大きな磁化は残留母相を反映したもので あろう.なお,473 K で時効すると M_s 温度は低下し,6時 間時効材では熱的にマルテンサイト変態は誘起しなくなる (図4(b)).内挿図は 4.2 K での母相の磁化曲線であり,自 発磁化は 108 J·T⁻¹·kg⁻¹である.

Ni 添加によりマルテンサイト変態が熱弾性型になる理由 は、 β 相(NiAl, B2構造)のナノ析出に関係している.Fe-Ni-Al系では、いわゆる規則化に基づく相分離(A2→A2 (Fe-rich)+B2(NiAl-rich))が起こることが知られており⁽¹⁹⁾, Fe-Mn-Al-Niでも同様な相分離が生じる.図5はマルテン サイト相中に10 nm 程度の β -NiAl相が析出した領域の HAADF-STEM(High-Angle Annular Dark Field Scanning TEM)像である⁽²⁰⁾. この観察手法では、結晶格子のカラム 内における原子量が大きいほど明るいコントラスト(Zコン トラスト)が得られる.図5の β 粒子内における輝点の配列 は、強い輝点がNiサイトを、弱い輝点がAlサイトを示し ており、その規則配列から β 粒子はB2構造に規則化してい ることが確認できる.マルテンサイト相はFCC構造であ



 図5 Fe-34Mn-15Al-7.5Ni 合金のマルテンサイト (M)相中にβ相が析出した領域のHAADF-STEM像.内挿図は加熱により逆変態させた後 の界面付近の像([110]_{FCC}, [100]_{B2}入射).内挿 図は加熱により逆変態させた後の界面付近の像.

り,図中に白い線で示す位置に双晶欠陥が導入されている. 明確な周期性は見られないが、少なくとも観察した領域では 平均的に(53)の積層周期を有している.これは,8倍周期 (8M 構造)の報告⁽⁹⁾⁽²¹⁾と矛盾しない. この組織を monoclinic として見たとき、 β 角(図5の白線で示した角度)は95°で ある. β 相析出物が存在しない Fe-Mn-Al 3 元系合金のマル テンサイト相は 2M 構造であり, β=109.5°である. すなわ ち、 β 相-NiAl粒子の存在により β 角が90°に近づいてい る. 一方,本来, β相は立方晶だが,図5では明らかに95° ほど傾いている(これは制限視野回折図形⁽²⁰⁾からも確認でき る). 内挿図はマルテンサイト逆変態後の母相とβ粒子の HAADF-STEM 像である.界面にミスフィット転位が全く 観察されないことから、逆変態前のマルテンサイト相とβ 粒子も整合性を維持していたと考えられる. このことから, A2 母相中に整合析出したβ粒子はマルテンサイト変態に伴 うシアーを受けて弾性的にひずみ、同時に、マルテンサイト 相もナノ双晶を導入してβ角を90°に近づけ、析出粒子との 整合性を維持したと考えられる. このとき、マルテンサイト 相と母相との晶癖面における格子整合性も保たれるはずであ る.よって,変態に必要な非化学的自由エネルギーも小さく なり, また, 変態に伴う原子移動の可逆性も維持され, 熱弾 性型変態が得られたものと考えられる.β相が粗大になる と、やがてマトリックスとの整合性を維持できなくなり、 Fe-Mn-Al3元系と同様に、非熱弾性型変態になるものと予 想されるが、組織と変態の詳細な関連性については、今後の 研究が必要である.

熱弾性型マルテンサイト変態を示す多くの既存合金は規則 合金だが、Fe-Ni-Co-Ti系やFe-Ni-Co-Al系では、不規則 FCC相(A1構造)中に y'規則相(L12構造)をナノ析出させる ことで熱弾性型変態を得ている⁽⁵⁾⁽²²⁾.Fe-Ni-Ti-C合金で は、y'相が微細な時は、変態後もマルテンサイト相と整合で あり、粗大な時は非整合になるとされており、その臨界サイ ズは 4-5 nm であると言われている⁽²³⁾⁽²⁴⁾.Fe-Ni-Co-AlTa-B合金では、y'相が5nmのときに整合、22nmのとき はミスフィット転位が観察され、変態は非熱弾性型に変化す る⁽²⁵⁾. Fe-Mn-Al-Niでは図5に示す通り、 β 相が少なくと も 10 nmのときはマルテンサイト相と整合だと考えられ る.以上の様に、変態による結晶構造の変化が全く逆ではあ るものの、不規則マトリックス中に整合ナノ析出させること で熱弾性型マルテンサイト変態を得ている点で、両合金は類 似性がある.ただし、母相と整合析出物との組み合わせ(す なわち、BCC+B2とFCC+L1₂)の違いが超弾性特性にどの 様な影響を与えるかについては、今後の課題である.

4. Fe-Mn-Al-Ni 合金の組織制御と超弾性

多結晶合金における超弾性は結晶粒径や集合組織などのミ クロ組織に影響を受ける.図6はFe-34Mn-15Al-7.5Ni合 金線(φ1 mm)の超弾性挙動⁽²⁶⁾である.この線材は<110>再 結晶集合組織が形成されている. d は平均結晶粒径, D は線 直径で, d/D は比結晶粒径を表している. d/D=0.41 では図 中の EBSD (Electron Back Scatter Diffraction)法で得た IPF (Inverse Pole Figure)マップのように直径方向に複数の結晶 粒が存在している.このとき,超弾性はほとんど得られな い. 一方, d/D=2.19 では結晶粒が線直径を貫通するバンブ ー構造であり,優れた超弾性特性が得られている. d/D と 超弾性による超弾性ひずみ量 ese とマルテンサイト変態誘起 の臨界応力 σ_c の関係をまとめたのが図7である⁽²⁶⁾. ε_{SE} は d/Dに強く依存しており,明瞭な超弾性を得るにはバンブ ー構造とする必要があることがわかる. バンブー構造では 5%程度の超弾性ひずみ量が得られる.一方,マルテンサイ ト変態誘起臨界応力 σ_c は d/D が小さくなると高くなる. こ のことは、変形時の結晶粒間の拘束力が強いことを示してい る.多結晶体が外力を受けて変形する際,全体に渡ってひず みが均一で粒界での連続性を維持されると仮定する Taylor モデルでは、変態誘起臨界応力 σ_c^{Taylor} と変態ひずみ量(=最 大の超弾性ひずみ量) Etstart

$$\sigma_{\rm c}^{\rm Taylor} = \frac{\Delta S}{\eta} \overline{M'} \left(T - M_{\rm s} \right) \tag{1}$$

$$\varepsilon_{\rm TS}^{\rm Taylor} = \frac{\eta}{M'} \tag{2}$$

となり(\overline{M} :修正 Taylor 因子⁽²⁷⁾, η : せん断の大きさ), こ のモデルでは結晶粒間の拘束力は強く見積られることにな る. <110>繊維集合組織なので $M'^{(110)}$ を計算すると本合金 は11.29と高く, Ti-Ni 超弾性合金と異なり, また, Cu 系超 弾性合金と同様, 強く粒間拘束の影響を受ける合金系であ る⁽²⁶⁾. そのため, 図 6 の組織のように, 結晶粒が線断面内 に複数存在して粒間拘束を受ける場合は塑性変形がされやす く, 断面を貫通する場合は各結晶粒が単結晶のように応力誘 起変態・逆変態することで優れた超弾性が得られると考えら れる.

以上より,結晶粒成長は優れた超弾性の鍵となる重要な組 織制御因子であると言える.しかし,線形が太くなるほど大



図 6 冷間伸線後,1473 K 溶体化処理,473 K,3 時間 時効処理を施した φ1 mm の Fe-34Mn-15Al-7.5Ni 合金線における比結晶粒径 d/D と超弾性挙 動の関係. EBSD で得た IPF (Inverse Pole Figure)マップは伸線方向の方位を示している.



図7 Fe-34Mn-15Al-7.5Ni 合金線(φ1 mm)の比結晶 粒径 d/D と超弾性ひずみ量 ε_{SE},マルテンサイト (M)変態誘起臨界応力 σ_cの関係.

きな粒径にする必要性があり、バンブー構造は得られにくく なるため,超弾性部材としての形状が制約されてしまう.そ こで、異常粒成長等を利用して結晶粒を粗大化することが重 要となる. Cu-Al-Mn 形状記憶合金では、 $\beta \Leftrightarrow \alpha + \beta$ 変態を示 す温度域で冷却・加熱のサイクル熱処理をすることで異常粒 成長を得ている(28).本手法は、通常の熱処理プロセスで容 易に巨大結晶粒が得られることから、量産プロセスにも適し ている. 著者らは, Fe-Mn-Al-Ni 合金でも, 高温でα単 相,低温で y 相が析出するため,同様の冷却・加熱サイクル 手法を試み、本手法の有効性を明らかにした.図8は、Fe-34Mn-15Al-7.5Ni 合金を α 単相である 1473 K から冷却し て α+y 二相とし,再度,1473 K に加熱した時の異常粒成長 開始時の組織である.異常粒の周囲の結晶粒内には多数の微 細な結晶粒界が観察されるが, EBSD による解析の結果, これらは亜粒界であることがわかった.一方,異常粒内部に はほとんど亜結晶粒は存在していない. この異常粒成長現象



図8 Fe-34Mn-15Al-7.5Ni 合金の異常粒成長開始時 の光学顕微鏡写真. 周囲の結晶粒内には亜結晶 粒が観察されている.

は、y相が半整合的に析出した時に母相中に導入された亜粒 界が、その後溶体化してもα母相中に残留し、特定の結晶 粒がそれら亜粒界の界面エネルギーを駆動力として急速に粒 成長するため生じる、と説明できる.このサイクル熱処理を 繰り返し実施することで、異常粒成長は何度でも累積的に生 じ、最終的に単結晶を作製することが可能である.図9はゲ ージ長8mmで実施した単結晶試料の超弾性特性である⁽⁹⁾. 繰り返し熱処理により数センチメートルの単結晶も容易に得 られている.

Fe-34Mn-15Al-7.5Ni 合金における超弾性の温度依存性 を図10(a)に示す⁽⁹⁾.約6%変形に対して形状回復を示して おり、さらに、各温度における応力があまり変動していな い.通常,超弾性合金の応力は温度に強く依存し,例えば図 中の Ti-Ni では、室温で超弾性を示すが、低温では熱的に マルテンサイト変態するため超弾性を示さず、高温ではすべ りが導入されて変形が残留する.各種の多結晶超弾性合金の 変態誘起臨界応力を図10(b)にまとめた⁽⁹⁾.応力の温度依存 性は, Ti-Ni で 5.7 MPa·K⁻¹, 比較的小さい Cu-Al-Mn で 2.4 MPa · K⁻¹ であるが, Fe-Mn-Al-Ni では473 K 6 時間 時効材で 0.74 MPa・K⁻¹, 24時間時効材で 0.53 MPa・K⁻¹ と一桁小さい. 単結晶に対する温度依存性も調査されてお り⁽⁹⁾, [100]に対して引張で 0.54 MPa·K⁻¹, 圧縮で 0.41 MPa・K⁻¹が報告されている⁽²¹⁾.マルテンサイト変態誘起 臨界応力 σ_c の温度依存性は次の Clausius-Clapeyron の関係 で表される.

$$\frac{d\boldsymbol{\sigma}_{\rm c}}{dT} = -\frac{\Delta S}{\boldsymbol{\varepsilon}_{\rm TS} \cdot V_{\rm m}} \tag{3}$$

ここで、 $V_{\rm m}$ はモル体積である. $\epsilon_{\rm TS}$, $V_{\rm m}$ は他の合金系と大きな違いはないが、変態エントロピー変化 ΔS は表1の通り -0.43 J·mol⁻¹·K⁻¹と非常に小さい.よって式(3)より、 Fe-Mn-Al-Ni 合金における応力の温度依存性が小さいのは、明らかに ΔS が小さいことに因る.このような特徴により、Fe-Mn-Al-Ni 合金では環境温度にあまり影響されずに



図9 サイクル熱処理により得たFe-34Mn-15Al-7.5Ni 合金単結晶(473K,3時間時効材)の室温 での超弾性挙動.引張方位は内挿図に示している.



図10 (a) Fe-34Mn-15Al-7.5Ni 合金(473 K, 6時間時効)と Ti-Ni 合金の各温度における超弾性挙動.
(b) 各種多結晶超弾性合金のマルテンサイト(M)変態誘起臨界応力 σ_c の温度依存性. Fe-Mn-Al-Ni の(1)は 473 K, 6時間時効材, (2)は 473 K, 24時間時効材.

安定した力学的性質が期待できる.さらに、応力の上昇はす べり変形を起こして超弾性発現温度を制限するが、Fe-Mn-Al-Ni 合金の温度に対する鈍感性は、部材として使用温度範 囲が極めて広いことも意味する.

5. おわりに

本稿では、Fe-Mn-Al 系合金で生じる α⇔y マルテンサイ

表1 各種合金の変態自由エネルギー変化 $\Delta G^{\alpha/\gamma}$,変態 エントロピー変化 $\Delta S^{\alpha/\gamma}$,変態ヒステリシス ($\approx 2\Delta T$).

合金系	$\Delta G^{\alpha/\gamma}/J \text{ mol}^{-1}$	$\varDelta S^{lpha/\gamma}/\mathrm{J} \ \mathrm{mol}^{-1} \mathrm{K}^{-1}$	$2\Delta T/\mathrm{K}$
Fe-Mn-Al-Ni	- 32	-0.43	150
Fe-Ni	$-1000 \sim -2000$	-6.28	400
Ti-Ni	- 131	-4.37	60
Cu-Al-Mn	-17	-1.15	30

ト変態とそれに付随して得られる超弾性に関し,著者らの成 果を含む国内外の研究を紹介した.鉄合金のマルテンサイト 変態は $y \rightarrow \alpha'$ 変態がよく知られているが,合金元素により相 安定性を制御することで,他の金属で見られる BCC 構造 α 相(高温:粗な構造)→FCC 構造 y 相(低温:密な構造)の変 態が得られることが示された.その中で,磁性が相安定性に 及ぼす影響が大きいことが再確認された.なお,他の Fe 合 金では,規則相ではあるが Fe-Mn-Ga 系でも類似した変態 (L2₁(規則 BCC)⇔D0₂₂(規則 FCT))が報告されている⁽²⁹⁾⁽³⁰⁾.

Fe-Mn-Al-Ni 合金は、近年になり実現されるようになっ た鉄系超弾性合金のひとつであり、比較的低廉な原料からな り、熱間・冷間加工性も良好なので、低コストでの製造が見 込める. さらに, 応力の温度依存性が極めて小さく力学特性 が環境温度に鈍感なので、使用温度範囲が少なくとも77K から423K程度までは可能である.このような鉄系超弾性 合金は、比較的小型の機能性部材として利用されてきた形状 記憶合金を大型の構造部材へと用途拡大できる可能性を有す る. 例えば, 巨大地震で建築物や橋梁などの土木構造物が変 形を受ける際、超弾性合金の自己復元力を利用した残留変形 の抑制やエネルギー吸収による振動抑制を目的とした研究が 国内外で行われている(31)-(33).この分野では、超弾性特性 に加え大型化とコスト,加工性などが問題となっており, Fe-Mn-Al-Ni 合金は候補材のひとつとして大いに期待でき る. なお、本合金は粒界破壊など、解決すべき問題点も見つ かっており、今後、高延性化、結晶粒成長を含む大型化、疲 労特性などに関する研究が必要である.

最後に、本稿では、東北大学名誉教授石田清仁先生、物 質・材料研究機構大沼郁雄先生、東北大学長迫実先生、大 学院生安藤佳祐氏(現 JFE スチール株式会社)との共同研究 の成果を多数紹介させていただきました.心から御礼申し上 げます.

文 献

- (1) 西澤泰二:ミクロ組織の熱力学,日本金属学会,(2005)(第二章).
- (2) K. Ando, T. Omori, I. Ohnuma, R. Kainuma and K. Ishida: Appl. Phys. Lett., 95 (2009), 212504.
- (3) K. Yamauchi, I. Ohkata, K. Tsuchiya and S. Miyazaki: Shape

Memory and Superelastic Alloys, Woolhead Publishing, (2011).

- (4) A. Sato, E. Chishima, K. Soma and T. Mori: Acta Metall., 30 (1982), 1177–1183.
- (5) Y. Tanaka, Y. Himuro, R. Kainuma, Y. Sutou, T. Omori and K. Ishida: Science, **327**(2010), 1488–1490.
- (6)田中優樹,大森俊洋,檜室義幸,須藤祐司,貝沼亮介,石田 清仁:まてりあ,50(2011),339-345.
- (7) T. Fukuda and T. Kakeshita: Scr. Mater., 69(2013), 89-91.
- (8) F. Xiao, T. Fukuda and T. Kakeshita: Acta Mater., **61**(2013), 4044–4052.
- (9) T. Omori, K. Ando, M. Okano, Y. Tanaka, I. Ohnuma, R. Kainuma and K. Ishida: Science, 333(2011), 68–71.
- (10) 大森俊洋,荒木慶一,石田清仁,貝沼亮介:金属,82(2012), 458-465.
- (11) 富田俊郎,前原泰裕,大森靖也:日本金属学会誌,52(1988), 623-631.
- (12) S. K. Chen, W. B. Lee, K. W. Chour, C. M. Wan and J. G. Byrne: Scr. Metall., 23(1989), 1919–1924.
- (13) K. H. Hwang, C. M. Wan and J. G. Byrne: Mater. Sci. Eng. A, 132 (1991), 161–169.
- (14) W. B. Lee, F. R. Chen, S. K. Chen, G. B. Olson and C. M. Wan: Acta Metall. Mater., 43(1995), 21–30.
- (15) R. Umino, X. J. Liu, Y. Sutou, C. P. Wang, I. Ohnuma, R. Kainuma and K. Ishida: J. Phase Equilib., 27 (2006), 54–62.
- (16) C. Zener: J. Metals, 7(1955), 619–630.
- (17)石田清仁,渋谷 冽,西澤泰二:日本金属学会誌,37(1973), 1305-1313.
- (18) A. Borgenstam and M. Hillert: Acta Mater., 45(1997), 2079– 2091.
- (19) S. M. Hao, T. Takayama, K. Ishida and T. Nishizawa: Metall. Trans., 15(1984), 1819–1828.
- (20) T. Omori, M. Nagasako, M. Okano, K. Endo and R. Kainuma: Appl. Phys. Lett., 101 (2012), 231907.
- (21) L. W. Tseng, J. Ma, S. J. Wang, I. Karaman, M. Kaya, Z. P. Luo and Y. I. Chumlyakov: Acta Mater., 89 (2015) 374–383.
- (22) T. Maki, K. Koayashi, M. Minato and I. Tamura: Scr. Metall., 18(1984) 1105–1108.
- (23) E. Hornbogen and W. Meyer: Acta Metall., 15(1967), 584– 591.

- (24) T. Maki and C. M. Wayman: Acta Metall., **15**(1977), 695–710.
- (25) Y. Geng, D. Lee, X. Xiao, M. Nagasako, M. Jin, X. Jin, T. Omori and R. Kainuma: J. Alloys Comp., 628 (2015), 287–292.
- (26) T. Omori, M. Okano and R. Kainuma: APL Mater., 1(2013), 032103.
- (27) 小野 陽, 佐藤 敦:日本金属学会誌, 50(1986), 777-781.
- (28) T. Omori, T. Kusama, S. Kawata, I. Ohnuma, Y. Sutou, Y. Araki, K. Ishida and R. Kainuma: Science, **341** (2013), 1500– 1502.
- (29) T. Omori, K. Watanabe, R. Y. Umetsu, R. Kainuma and K. Ishida: Appl. Phys. Lett., 95 (2009), 082508.
- (30) W. Zhu, E. K. Liu, L. Feng, X. D. Tang, J. L. Chen, G. H. Wu, H. Y. Liu, F. B. Meng and H. Z. Luo: Appl. Phys. Lett., 95 (2009), 222512.
- (31) S. Saadat, J. Salichs, M. Noori, Z. Hou, H. Davoodi, I. Bar-on, Y. Suzuki and A. Masuda: Smart Mater. Struct., 11(2002), 218–229.
- (32) R. DesRoches and B. Smith: J. Earthq. Eng., 7(2004), 1–15.
- (33) Y. Araki, N. Maekawa, K. C. Shrestha, M. Yamakawa, Y. Koetaka, T. Omori and R. Kainuma: Str. Cont. Health Monitor., 21 (2014), 1304–1315.

★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★ 大森俊洋

- 2005年3月 東北大学大学院工学研究科博士課程修了
- 2005年4月 日本学術振興会特別研究員 PD(東北大学)
- 2007年4月 現職
- 専門分野:状態図,相変態,材料組織学
- ◎各種構造・機能材料の状態図と合金設計,組織制御に関する研究を中心に活動.



大森俊洋

貝沼亮介



測定の不確かさ評価について

—3. 不確かさの算出手順 2—

城野克広*

はじめに

前々回から4回に渡り,測定の不確かさについて解説し ております.第1回は「不確かさとは何か」,前回と今回は 「不確かさの算出手順」,第4回に「不確かさの活用」につ いてお話していきます.今回は,繰返しのばらつきの解析以 外の方法による不確かさの算出と,不確かさにも単位がある というお話をします.

3.1 幅だけ分かるときには一様分布

前回は標準偏差を紹介しました.標準偏差とはごく普通の ずれのことです.複数の不確かさ要因がある場合には,それ らの標準偏差を2乗して,足して,正の平方根を取ったも のが,最終的に知りたい値の標準偏差です.

ところが、考えてみると、標準偏差で表された不確かな数 値というものは、世の中には実に少ないのです。例えば、 「最大30%オフ!」と言われたとき、では、普通は何%オフ なのかと勘繰ってしまいます。だからと言って、「悪天候の ため新幹線に平均30分、標準偏差15分の遅れが出ておりま す.」と言われたら、ちょっとイライラする気がします。「悪 天候のため最大1時間の遅れ」の方が、まだましかも知れ ません。

他にも前々回のこの解説の冒頭でも述べましたように、 「飲料のカロリー表示の誤差の許容範囲は、健康増進法に基 づく栄養表示基準により、-20%~+20%と定められてい ます」とか、「日本の電圧の値は電気事業法によって、95 V ~107 Vの間に収まっていればよい」など、我々にもっとも 身近なばらつき表し方は「○○~△△」あるいは「最小で○ ○,最大で△△」という表現であると言い切ってよいでしょう.

言い切ったのはよいとして、それでは、「-20%~+20% の間でばらつく」と言われたとき、不確かさをどう求めるか ということは大きな問題です.不確かさの計算には標準偏差 が必要です.しかし、自分で実験した結果とは違って、この 場合には、①平均を計算し、②平均からの差の二乗和を求め、 ③それを(データ数-1)で割って正の平方根を取るという手 順は使えません.このままでは、不確かさの計算ができない のです.

「-20%~+20%」なる値の標準偏差はどうなるか?早速 ですが,結論を言ってしまいましょう.「-20%~+20%」 なる値の標準偏差は20/ $\sqrt{3}\%$ =11.5…%とします.

もちろん,なぜ $\sqrt{3}$? という疑問が湧くことでしょう. この背景には,図3.1(a)に示す確率分布が関係しています.



* 産業技術総合研究所 物質計測標準研究部門主任研究員(〒305-8565 つくば市東 1-1-1)

Things about Measurement Uncertainty —3. How to Evaluate It? (2/2)—; Katsuhiro Shirono (National Institute of Advanced Science and Technology (AIST), Tsukuba)

Keywords: Uncertainty, Guide to the expression of uncertainty in measurement (GUM) 2014年9月4日受理[doi:10.2320/materia.54.405]

この確率分布は一様分布と呼ばれるものです. -20%より も小さい,または+20%よりも大きい値が観測される確率 はゼロ. 一方で, -20%~+20%の範囲の値が観測される 確率は一様です.これが,一様分布の名前の由来となってい ます.ちなみに,一様分布は矩形(くけい)分布と呼ばれるこ ともあります.矩形というのは長方形という意味です.

では、一様分布の標準偏差について考えましょう.ここで はとっかかりを得るために、範囲「-20%~+20%」の一 様分布を、図3.1(b)のような(-20%, -15%, -10%, -5%、0%, +5%, +10%, +15%, +20%)という9個 の数字が同じ確率で現れる分布に近似します.この場合の標 準偏差は簡単です.①平均は0%.②平均からの差の2乗の 和を400+225+100+25+25+100+225+400=1500と求め ます.③これをデータ数9で割ると^{†1)}167.66…となります から、標準偏差はその正の平方根、およそ12.9%となります.

これは20/ $\sqrt{3}$ % ≈11.5%とは、そんなに離れているわけ ではないですが、ちょっと違う数字になりました.基本的な 考え方はこれでよいのですが、もっと細かく刻んで平均を取 る必要があるのです。例えば、(-20%、-19.9%、…、 +20.0%)と0.1%ずつ201個の値に区切って上の計算をする と、11.6となり、かなり11.5に近い数字になります。これを もっとずっと細かくしていくと、厳密に20/ $\sqrt{3}$ になるとい うわけなのです¹²).

ー様分布の標準偏差の計算の仕方はこれでよいとして,疑い深い方は,そもそもなぜ一様分布が出てくるのかと思ったかも知れません. 今,数値としてわかっているのは「-20% ~+20%」だけです.だからと言って,一様分布のような値の現れ方はしないというのは,常識的な判断かと思います.こういう幅が与えられている場合には,幅の限界ギリギリの値を見つける可能性は,幅の真ん中の値を見つける可能性よりも,ずっと低いというのが普通でしょう.

これも不確かさが単なるお約束の積み重ねに過ぎないとい うことの一つの表れかも知れません.不確かさのルールブッ クである国際文書 Guide to the expression Uncertainty in Measurement(GUM;ガム)には表面上は,常識や経験とい うものを取り入れて,不確かさを評価すると書いてはありま す.しかし,事実上,一定の幅に値が収まっているという場 合には,一様分布を用いることが多いのです.

結論としては,幅だけが分かっているときの標準偏差は半 幅の√3分の1.覚えてしまえば,別に難しいルールではあ りませんね.中学校の先生であれば「これはテストに絶対出 るから覚えておいてね!」と言うところです.

さて、この節では、標準偏差を実験結果に基づかずに、手 元の情報から決定しました.このような不確かさの評価をタ イプB評価と呼びます.一方で、自分で実験し、不確かさ を評価するのをタイプA評価と呼びます.

3.2 分布の王様は正規分布

先ほどは、一様分布を使った評価を見ましたが、測定の分 野でもっともよく目にする分布は、一様分布ではありませ ん.もっともよく目にするのは、正規分布と呼ばれる分布で す.正規分布とは、図3.2(a)に示した釣り鐘(つりがね)型な どとよく呼ばれる分布で、真ん中が盛り上がり、裾に行くほ ど小さいという特性を持っています.どうしてこの分布をよ く目にするのか、ちょっとした例を通してお話しましょう.

じゃんけんで勝つか,負けるか,あいこになるかの確率が それぞれ3分の1ずつになるというのは,ご存じでしょう か?あいこになる確率が大きいような気がするとすれば,そ れは大人数でのじゃんけんです.(4人でやると,半分近く はあいこになります.)ここでは2人での1回きりのじゃん けんを考えます.読者の方にはじゃんけんに自信のある方も いるかも知れませんが,「勝」,「分」,「負」がそれぞれ3分 の1ずつというのは前提としましょう.

ということは,「勝」,「分」,「負」の一様な分布と言えま す.しかし,ちょっとしたことで,この様相は変わってしま うのです.

例えば、2回じゃんけんをしてみましょう. どんな勝敗の 組み合わせが考えられるでしょうか?例えば「2連勝」, そ れから、「1勝1分」,「1勝1敗」,「2分」,「1敗1分」, そ して、「2連敗」です. ここで, 勝ち数から負け数を引いた 数をポイントとします. 2連勝の場合は2-0=+2ポイント となります. このポイントは, +2ポイントから-2ポイン トまでの, 色々なポイントになる可能性があります.

それぞれのポイントの確率を計算してみましょう. 結構大 変ですので,心してかかってください. まず, +2 ポイント



図3.2 (a)正規分布の確率密度関数. μは平均. σは標準偏差. (b)じゃんけんを3回やったときの勝ち数から負け数を引いた値の確率分布. 両者はよく似ている.

^{*1)(}データ数-1)の8ではなく、データ数9で割ったのは、ここでは本当の平均0が分かるからです。前回述べたように本当の平均が分からないときにはデータ数-1で割りますが、本当の平均が分かるときにはデータ数で割ります。

^{*2)} 細かくしてくと,最後は積分が現れます.中心が 0,半幅が $A \circ ($ つまり $-A \circ b \circ A \circ$ 範囲とする) 一様分布を考えまし ょう.値 $x \circ 0$ 中心 0 からのずれの 2 乗は $x^2 \circ \tau$ す.刻み幅を無 限に細かくすると, $x^2 \circ 0$ 平均は $\int A_{Ax^2 dx}/2A \circ f$ で与えられま す. $-A \circ b \circ A$ まで $x^2 \circ$ 積分したものを,その範囲の大き さ(2A) で割って平均化しているのです.これを計算して, その正の平方根をとると $A/\sqrt{3}$ が得られます.

は「2連勝」しかないですから、一回目に勝つ確率の1/3と 二回目に勝つ確率の1/3をかけて、1/9となります.+1ポ イントも「1勝1分」しかありませんが、先に勝つ場合と、 先に分ける場合の2つの場合があります.つまり、2連勝の 2倍起こりやすく、2/9の確率があることになります.0ポ イントは、「1勝1敗」と「2分」があり、「1勝1敗」は先 に勝つ場合と先に負ける場合があるので、全部で3つの場 合があり、確率は3/9となります.-1ポイントは+1ポイ ント相手がとった場合ということですから2/9.同じく、 -2ポイントは1/9です.ああ、大変でした.

何が言いたいかと言うと、この+2 ポイントから-2 ポイ ントの確率の並び(1/9,2/9,3/9,2/9,1/9)は、全く一様では ないということです. 真ん中が盛り上がっていて、裾に行く ほど小さい…おや、先ほどの正規分布の説明に似ているよう な….

ここでは、せっかくなので、もう一回じゃんけんしてみま しょう.+3ポイントから-3ポイントまでどういう確率で 現れるか、どうしても計算をしたいという方を止めたりはし ません.しかし、ここは先を急ぎましょう.答えを図3.2(b) に示します.いかがでしょうか?もうほとんど図3.2(a)と変 わらないと言っても過言では…あるかも知れませんが、だい ぶん正規分布に似てきたとは言えましょう.

最初は一様であった、「勝」、「負」、「分」の確率分布が、 3回繰り返すと、正規分布っぽくなるというのは、ちょっと 不思議なことです.しかも、これを無限に繰返していくと、 なんと、どんどんと正規分布に近づいていくことが数学的に 証明されています^{†1}.

ここでは一様分布でしたが、実は、他のどんな分布であっ ても、それらを足していくと、正規分布に近づくということ が知られています.自然物でも、人工物でも、いくつかの誤 差が重なった結果として、最終的に目に見える誤差になると いうことを考えると、誤差の分布は正規分布に近いものにな るであろうと予想されます.その予想は正しく、このため に、正規分布が測定の分野でよく表れることになるのです.

それでは、正規分布が不確かさ評価において、どのように 使われるかをお話しましょう、測定の分野で重要な正規分布 の特性はただ一つです.それは正規分布においては、標準偏 差の±2倍の範囲に、95%の値が現れるということです.

もう少し細かい話は次回にいたしますが、これは測定装置 を校正したときの不確かさと関連します.測定装置を校正に 出すと、校正事業者は校正結果を含む校正証明書を発行しま す.校正証明書には不確かさとして、標準偏差が書いていな いことがあります.その代わりにしばしば、95%の信頼の 水準⁽²⁾をもつ区間が書かれているのです. この95%の区間から標準偏差を計算したい時, どうする かと言えば,その半幅を2で割るのです.これは,ばらつ きが正規分布ならば,標準偏差の±2倍の範囲に95%の値が 現れるためです.そうでないということもあるのですが,例 外については次回またお話しましょう.

この節の絶対テストに出るポイントをまとめますと,正規 分布で,95%という確率と幅の大きさが分かっているとき には,その半幅を2で割ると標準偏差になるということで す.

3.3 不確かさにだって単位がある

突然ですが、皆様にはパーティーの幹事になっていただき ましょう.そのパーティーでは、食事は準備されているので すが、飲み物のビールの値段は飲んだ分だけ後払いです.も ちろん、ビールの総額は、(ビール1本の値段)×(ビールの 本数)ということなります.残念ながら、ビール1本の値段 も、消費されるビールの本数も不確かです.幹事としては、 おおよその値を定めるとともに、その不確かさも分かればう れしいところです.

ビール1本の値段については、95%の信頼の水準で260 (円/本)から300(円/本)までの範囲に入るという情報がある とします.ビールの値段が正規分布するならば、ビールの値 段の標準偏差は95%の範囲の半幅(20(円/本))の半分です. これは10(円/本)となります.

では、どれだけビールを飲むかというと、100本か、102 本か、93本か…そんなところです.ここでは、思い切って、 100本と決めてしまいましょう.ただし、±7本の幅がある ものと考えます.半幅の大きさを $\sqrt{3}$ で割ると、標準偏差 が求まります.消費されるビール本数の標準偏差は7/ $\sqrt{3}$ 本です.7/ $\sqrt{3}$ = 4.04…ですから、およそ4本ということに なりましょう.

ビールの総額は, (ビール1本の値段)×(ビールの本数) ですから,おおよそ280(円/本)×100(本)=28000円です. さて,この不確かさはどれほどでしょうか.

ここには2つの不確かさの要因があります.一つはビー ル1本の値段.この標準偏差は10(円/本)です.もう一つは ビールの本数です.この標準偏差も4本と分かっていま す.複数の不確かさの要因が分かっているときには,「2乗 して足す」のでしたね.これが一番重要なルールでした.

さて、2乗して足してみましょう. 10(円/本)を2乗する と、100(円/本)². 4本を2乗すると、16(本)². これらを足 して、116…と思った方はご用心. 116の単位がどうなるか を考えてみて下さい. 100の方の単位は「(円/本)の2乗」 です. では、116も「(円/本)の2乗」かというと、それは おかしいですよね. 足し算のする相手の16の単位は「本の2 乗」なのですから…. 要は足せないのです. 一体どういうこ となのでしょうか?

実は, 肝心なことを言い忘れていました. 「2 乗して足す」 ことで不確かさを決めることが出来るのは, 不確かさの要因

^{*1)}この無限にばらつく値を足しこんでいくと、その結果得られ る値の分布が正規分布になるという定理を中心極限定理と呼びます。

^{†2)}統計学には「信頼水準」という用語がありますが、不確かさ 評価ではあえて「信頼の水準」という異なる用語を使います. この言い回しにひっかかる方は、とりあえず「確率」と言い 換えていただいて問題ありません.

が単純に足し算してあるとき,あるいは引き算してあるとき だけなのです.なんとも,説明不足で申し訳ありませんでし た.今回は(ビールの総額)=(ビール1本の値段)×(ビール の本数)という掛け算なので,不確かさの計算はできないの です.これは困りました.

ただ,あきらめたら,そこで試合終了です.掛け算の不確 かさが計算できないのは事実です¹¹⁾が,掛け算を足し算に近 似することはできるかも知れません¹²⁾.

考えたいのは、例えば、ビール1本の値段が標準偏差の 分10(円/本)変わったとしたら、どのくらいビールの総額が 変わるかということです.ビールの本数はおおよそ100本で す.ということは、1本の値段が10(円/本)変わったら、総 額では10(円/本)×100本=1000円変わるということになり ますね.

具体的にビールの値段が280(円/本)の場合と290(円/本) の場合,ビールの本数を100本と固定したならば,総額が 28000円と29000円となります.確かに,ビール1本の値段 が10円増えると,総額は1000円変わっていますね.

同じく,ビールの本数が4本変わったら,総額は4本× 280円=1120円だけ変わるだろうということも分かっていた だけますでしょうか.

これらを踏まえると、ビールの総額は,

(ビールの総額)

=(ビール1本の大体の値段)×(ビールの大体の本数)

+(ビール1本の値段の変化による総額の変化)

+(ビールの本数の変化による総額の変化)

という足し算に近似できるような気がしてきます.なお,第 1項の(ビール1本の大体の値段)×(ビールの大体の本数)は 28000円です.

ちょっとピンと来ない方は図3.3もご覧ください.図3.3か らも分かるように,上の式は厳密には正しくはありません. しかし,不確かさがあまり大きくないときには,これで十分 な近似なのです.例えば,ビール1本の値段が290(円/ 本),ビールの本数が104本の時,ビールの総額は,290(円/ 本)×104本=30160円です.上の近似では,(ビール1本の 値段の変化による総額の変化)は1000円でした.同じく(ビ ールの本数の変化による総額の変化)は1120円.ビールの総 額は28000円+1000円+1120円=30120円となります.この 40円の差には目をつむってあげて下さい.



図3.3 掛け算を足し算に近似するときのイメージ図. 長方形の両辺の掛け算は長方形の面積.横のず れ(Δx)と縦の大体の値(y)を掛けると,横のず れによる変化となる.縦のずれも同じ.上で無 視する面積が大きいほど近似は悪くなる.

このように、掛け算を足し算に近似できました.しかも、 不確かさの要因はそれぞれ別の項に移してあります.近似式 の第1項の28000円は不確かさのない値です.第2項はビー ル1本の値段の不確かさが考慮された項で、この標準偏差 は1000円ということになります.第3項はビールの本数の 不確かさが考慮された項で、標準偏差は1120円となります.

これであれば、2 つの不確かさ要因の標準偏差である1000 円と1120円は同じ単位なので、「2 乗して足す」ことができ ますね.2 乗して足した値の正の平方根である、およそ1500 円がビールの総額の標準偏差なのです。

このように、複雑な式で測定対象量を求める場合には、そ の式を、不確かさ要因ごとに別の項になるように、足し算あ るいは引き算の形に近似します.

このときに、もともと知っていた単位での標準偏差が、別 の値に変換されます。例えば、ビール1本の値段の標準偏 差10(円/本)は1000円に変換されました。この変換の割合の ことを感度係数と呼びます。この例では1000(円)/10(円/ 本)=100(本)が感度係数です。感度係数は単位を変換する 係数とよく言われます。ただ、その背景に上の近似があると いうことも知っておいて、損はないでしょう。

今回は実験以外の情報から不確かさを導き出す方法と,単 位の変換についてお話しました.次回は最終回.不確かさの 使い方について,お話します. (つづく)



^{*1)} 正確に言うと、掛け算の不確かさを直接に計算しようとすると、とても大変だということです。通常は、モンテカルロ法と呼ばれる数値計算により実施します。

^{†2)} これは学会報なので、「テーラー展開して線形近似します」 だけで説明としては十分でしょうが、数学が苦手な方のため に遠回りな説明をしました、複雑な関数の不確かさを評価す るには、テーラー展開による線形近似が必須です。

アルミナにおける小角粒界を用いた 転位設計と構造解析

栃木 栄太*

1. はじめに

アルミナ(α-Al₂O₃, コランダム構造)は代表的高温構造用 セラミックスであり、その塑性変形挙動を理解することは重 要な研究課題である.アルミナのすべり系は(0001)1/3 $\langle 11\overline{2}0 \rangle$ basal $\forall \checkmark 0$, $\{11\overline{2}0\} \langle 1\overline{1}00 \rangle$ prism-plane $\forall \land 0$, {1101}1/3〈1101〉pyramidal すべりであり、これら3種類の すべり転位が古くから研究の対象とされてきた. 1970-1990 年代にかけて透過型電子顕微鏡(TEM)による転位構造解析 が継続的に行われ、アルミナ中の転位は基本的にいくつかの 部分転位へと分解していることが明らかとされてき た⁽¹⁾⁻⁽⁵⁾.転位の構造解析の進展と共にアルミナの塑性変形 挙動が転位の特徴的な分解構造と関連付けられて議論される ようになった.しかし、転位コアの原子構造に関する実験的 知見は十分に得られておらず、原子レベルでの塑性変形挙動 に関する議論については推測の域を出ない部分も多かった. 2000年代に入ると、転位コアの原子構造解析に高分解能 TEM(HRTEM)が適用されるようになり、basal 刃状転位 (**b**=1/3(1120))についてはかなり理解が進んだ⁽⁶⁾⁻⁽⁸⁾.しか し、他の転位のコア構造解析は依然として手付かずの状態に あった.これは,HRTEMによる転位コア構造解析では直 線状の転位を線方向に沿って観察しなければならないという 制約があり、変形組織から観察に適する転位を探し出すこと が技術的,確率的に困難であったためと考えられる.

そこで筆者らは転位が周期的に配列する小角粒界に着目 し,理想的な転位の設計と構造解析を行ってきた⁽⁹⁾⁻⁽¹⁴⁾.本 稿では,小角粒界を用いた転位の設計指針を概説し,3種類 のアルミナ中の転位に関してコア構造解析の結果を紹介する.

2. 小角粒界と粒界転位

一般に2つの結晶粒の相対方位差が15°以下の粒界を小角 粒界といい,粒界には方位差を補償するよう周期的な転位列 が形成される.粒界の方位差は傾角成分とねじり[†]成分に分 けられ,それぞれの成分は転位の刃状成分およびらせん成分 によって補償される.従って,小傾角粒界(方位差が傾角成 分のみの粒界)には,刃状転位列が形成される.この時,刃 状転位のバーガースベクトルは基本的に粒界面の法線ベクト ルと平行となる.一方,小ねじり角粒界(方位差がねじり成 分のみの粒界)には,らせん転位網が形成される.らせん転 位のバーガースベクトルは粒界面内の並進ベクトルと一致す る.上記を基礎とすると,例えば{1120}/〈1100〉小傾角粒界 には1/3〈1120〉刃状転位が,(0001)/[0001]小ねじり角粒界 には1/3〈1120〉の状転位が形成されるといったことが予測 できる.

転位はバーガースベクトルと転位線方向によって性格づけ られるため、小角粒界の方位関係を適切に設定することによ って、格子転位と等価な転位構造はもとより変形組織では実 現しない転位構造をも作製可能である.

3. 実験方法

本研究では、先の転位構造設計指針に基づいて、任意の方 位に切り出された1組のアルミナ単結晶を1773 K, 10時 間、大気中にて熱拡散接合することにより小角粒界を含む双 結晶を作製した.双結晶より粒界部分を切り出し、機械研磨 およびイオン研磨によってTEM 観察用試料を作製、粒界転 位構造を各種 TEM により詳細に解析した.

^{*} 東京大学助教;大学院工学系研究科総合研究機構(〒113-8656 東京都文京区弥生2-11-16)

Design and Analysis of Dislocations Using Low–angle Grain Boundaries of Alumina; Eita Tochigi (Institute of Engineering Innovation, The University of Tokyo, Tokyo)

Keywords: *alumina, dislocations, low-angle grain boundaries, stacking fault, TEM* † twist の日本語訳であり,「ねじれ」と表記される場合もある.

²⁰¹⁵年2月21日受理[doi:10.2320/materia.54.409]

4. 1/3<1120>転位

アルミナではおよそ 1000 K 以上の温度域で basal すべり ((0001)1/3<1120>)が容易すべり系となる⁽⁴⁾.従って, basal 転位(**b**=1/3<1120>)の挙動が高温変形と密接に関連し ていると考えられる.basal 刃状転位は下記の分解反応式に 従って2つの部分転位に分解していることが知られてい る⁽¹⁾.

 $1/3\langle 11\bar{2}0 \rangle \longrightarrow 1/3\langle 10\bar{1}0 \rangle + 1/3\langle 01\bar{1}0 \rangle$ (1) ここで、2本の部分転位は異なる basal 面上に位置し $\{11\bar{2}0\}$ 面上に 4-5 nm 幅の積層欠陥を伴って安定化している⁽⁶⁾. こ れは原子拡散を伴う転位の上昇機構による分解であり、上昇 分解と呼ばれている.

Basal 刃状転位のコア構造の理解が進む一方,basal らせん転位の分解構造については積極的に議論されてこなかった.そこで(0001)/[0001]小ねじり角粒界を作製し,basal らせん転位の構造解析を試みた⁽¹³⁾.なお,粒界のねじり角として結晶の切り出し精度程度(<1°)を想定した.図1は(0001)/[0001]小ねじり角粒界の平面観察 TEM 像である. 粒界面は紙面とほぼ平行であり,六角形状の転位網が観察されている.転位線は3つの等価な〈1120〉方向に平行であることから,これらは1/3〈1120〉らせん転位であることがわかる.図2は1/3〈1120〉らせん転位コアのHRTEM 像である.粒界は水平方向に位置しており,単一のらせん転位を転位線に沿って観察している.転位コア付近において若干のコントラストの乱れが見られるが,その範囲は1 nm 以下であり,実質的にこの転位は分解しておらず完全転位の状態であると言える.

上記の結果より,basal 刃状転位は上昇分解する一方で,らせん転位は完全転位の状態にあることが明らかとなった. 刃状転位の部分転位間に形成されるすべり面に垂直な {1120}積層欠陥は部分転位対のすべり運動を妨げるため, 刃状転位の可動性は式(1)の分解反応に影響されると考え られる.一方,らせん転位は完全転位の状態にあるため,そ の可動性が分解反応に依存することはありえない.このよう な刃状転位とらせん転位の差異は basal すべりによる塑性変 形挙動と密接に関連しているものと思われる.

5. <1100>転 位

およそ 400 K から 1000 K の温度域では prism-plane すべり({11 $\overline{2}$ 0}<(1 $\overline{1}$ 00>)が容易すべり系となる⁽⁴⁾. prism-plane 転位(b=<(1 $\overline{1}$ 00>)は次の反応式に従って3本の部分転位へと分解することが知られている⁽²⁾.

 $\langle 1\bar{1}00 \rangle \longrightarrow 1/3 \langle 1\bar{1}00 \rangle + 1/3 \langle 1\bar{1}00 \rangle + 1/3 \langle 1\bar{1}00 \rangle$ (2) $\langle 1\bar{1}00 \rangle$ 転位が[0001]方向に上昇分解した場合, $\{1\bar{1}00\}$ 面 上に積層欠陥が形成される. $\{1\bar{1}00\}$ 面の積層構造は…AB-CABC…と表わされ, この面上に形成され得る積層欠陥は… ABC//BCAB…(Vacancy: V型), …ABC/B/ABC…(Interstitial-Type I: I₁型), …ABC/C/ABC…(Interstitial-Type II: I₂型)の3通りが考えられる⁽³⁾. エネルギー的に安定な



図1 (0001)/[0001]小ねじり角粒界の平面観察 TEM 像⁽¹²⁾.



図 2 1/3<11²0>らせん転位コアの HRTEM 像⁽¹²⁾.

 $\{1\overline{100}\}$ 積層欠陥を明らかにすることは,転位構造や塑性変 形機構を理解する上で必要不可欠である.そこで $\{1\overline{100}\}/\langle 11\overline{20}\rangle$ 小傾角粒界を作製し, $\langle 1\overline{100}\rangle$ 転位のコア構造および 積層欠陥構造の解析を試みた⁽¹¹⁾.図3は $\{1\overline{100}\}/\langle 11\overline{20}\rangle^2$ ° 小傾角粒界のTEM像である.粒界は水平方向に位置してお り,転位線に沿って観察している.粒界に配列している転位 は3本一組となっており, $\langle 1\overline{100}\rangle$ 完全転位が式(2)の分解 反応に従って3本の部分転位へと分解していることが示唆 される.図4は一組の部分転位のHRTEM像である.図中 に示したバーガース回路より,転位のバーガースベクトルは $\langle 1\overline{100}\rangle$ であることが確認できる.部分転位間の2箇所にお いて $\{1\overline{100}\}$ 面上の積層欠陥に由来する特徴的なコントラス トが現れていることがわかる.

実験的に観察された $\{1\overline{1}00\}$ 面上の積層欠陥を同定するた め、V、I₁、I₂型の3種類の $\{1\overline{1}00\}$ 積層欠陥について、第一 原理計算によって理論構造モデルを構築した.理論構造モデ ルよりマルチスライス法によって TEM 像を再現し、実験像 と比較したものを図5に示す.図5(a)および(b)は図4のぞ れぞれ左側および右側の積層欠陥の一部を切り出したもので ある.図に示してあるように白点の位置を結んだ線同士を比 較すると、(a)については I₂型,(b)については V型の積層 欠陥とよく一致することが分かる.

第一原理計算より積層欠陥エネルギーは V 型:0.41 Jm⁻², I₁型:0.63 Jm⁻², I₂型:0.46 Jm⁻² と見積もられ, I₁型が



図3 {1100}/〈1120〉2°小傾角粒界の TEM 像⁽¹⁰⁾.



図4 〈1100〉刃状転位コアの HRTEM 像⁽¹⁰⁾.



図5 {1100}積層欠陥の実験像と理論像の比較⁽¹⁰⁾. (a),(b)はそれぞれ図4における左側および右 側の積層欠陥に対応している.

エネルギー的に不安定であるということが示唆された.この ことは I_1 型が形成されなかったという実験結果に符合す る.また、小傾角粒界においては、転位配列の間隔を計測す ることにより転位間に働く弾性相互作用を求めることによっ て、積層欠陥エネルギーを算出することが可能であ る⁽¹⁰⁾⁽¹¹⁾.本粒界での実験値は V型: 0.33-0.37 Jm⁻², I_2 型: 0.41-0.46 Jm⁻² と見積もられ、理論値とよく一致した 結果が得られた.

6. 1/3<1101>転位

高温域では $\{1\overline{1}01\}1/3\langle\overline{1}101\rangle$ pyramidal すべりが活動する ことが知られている⁽⁴⁾.しかし、 $1/3\langle\overline{1}101\rangle$ 転位については あまり研究が進んでおらず、その分解反応やコア構造につい



図 6 (0001)/〈1100〉2°小傾角粒界の HRTEM 像⁽¹⁴⁾.

ては不明な点が多い.筆者らの研究によって,(0001)/ <1100>小傾角粒界において特殊な転位の方位差補償機構が 働き1/3<1101>転位が配列することが分かったので,その概 要を下記に述べる⁽¹⁴⁾.

図6は(0001)/<1100>2°小傾角粒界のHRTEM像であ る.転位はおよそ約12nmの間隔で周期的に配列してい る. それぞれ転位は2本の部分転位に分解し,(0001)面上 に積層欠陥を形成していることがわかる. これまで(0001) 面上の積層欠陥は報告されておらず,興味深い結果である. 図中に示しているバーガース回路による解析により、部分転 位対の正味の刃状成分は左から1/6[1122],1/3[0001],1/ 6[1122]であり、この3種類の部分転位対が周期的に配列し ていることが分かった.完全転位のバーガースベクトルは並 進ベクトルに一致するが、先の3つのベクトルは並進ベク トルではない.従って、3種類の転位は[1100]方向のらせん 成分を有する混合転位であると考えられる. HRTEM によ る投影像からは転位のらせん成分に関する情報を直接得るこ とはできないが、刃状成分が判明しているため結晶学的考察 よりらせん成分が同定できる.これは、例えば1/6[1122]に 対して1/6[1122]+n[1100]が並進ベクトルとなるような最 小のnを求めるという命題に帰着する.上記を解くと1/6 $[11\bar{2}2]$, 1/3[0001], $1/6[\bar{1}\bar{1}22]$ の各ベクトルに対し, nは それぞれ 1/6, -1/3, 1/6 となる. つまり, バーガースベク トルの刃状成分、らせん成分および全成分の関係は以下のよ うになる.

$1/6[11\overline{2}2] + 1/6[1\overline{1}00] = 1/3[10\overline{1}1]$	(3)
$1/3[0001] + 1/3[\overline{1}100] = 1/3[\overline{1}101]$	(4)
$1/6\lceil \overline{1}\overline{1}22\rceil + 1/6\lceil 1\overline{1}00\rceil = 1/3\lceil 0\overline{1}11\rceil$	(5)

なお,コランダム構造は[0001]軸回りの対称性が3回であ るため,1/3[10Ī1]は並進ベクトルであるのに対し1/3 [Ī011]は並進ベクトルではない(1/3[Ī101]および1/3 [0Ī11]についても同様).このため,式(3),(4),(5)に おいてらせん成分の符号は厳密に定まる.

(0001)/<1100>小傾角粒界では,幾何学的な要請として, 粒界転位は粒界面に垂直な並進ベクトルである[0001]を補 償しなければならない.ここで1/3[1011],1/3[1101],1/ 3[0111]の和を取ると[0001]となることに気付く.つまり, 本粒界では1/3[1011],1/3[1101],1/3[0111]の3本一組 の転位配列が基本単位となり粒界の方位差を補償していると いうことである.この特殊な補償機構は,[0001]ベクトル (|**b**|=1.299 nm)が極めて大きく,[0001]転位が形成しにく いということに関連しているものと思われる.

次に1/3〈1101〉転位の分解構造を議論する.図7は1/3



図7 1/3<101>コア転位の走査型 TEM 像⁽¹⁴⁾. 矢印 は左から1/18[1123], 1/18[1123]および1/3 [0001]の刃状成分を示している.



図8 (0001)積層欠陥の拡大像⁽¹⁴⁾. 点線は積層欠陥の 位置を示している.

[Ī101]転位コアの走査型 TEM 像である. 黒いコントラス トが各原子カラムに対応している. バーガース回路による解 析から,2本の部分転位の刃状成分は1/18[1123]および1/ 18[ĪĪ23]であることが分かった.部分転位のバーガースベ クトルは並進ベクトルには一致しないため,先のような結晶 学的考察による部分転位のらせん成分の同定は不可能であ る.そこで,積層欠陥の変位ベクトルより部分転位のバーガ ースベクトルを同定することを試みた.

図8は積層欠陥部分の拡大像である.(0001)面の積層は …12A32B12C32A12B32C…と表されるが(数字のみは O層, アルファベット付きの数字はA1層を示す.), ここで は…12A32B12C3//1A21B31C…という積層欠陥の投影 像が観察されている.TEM像では[1100]方向の並進成分は 同定できないため,第一原理計算によりこの投影を満たす積 層欠陥の中でエネルギー的に安定となる[1100]並進成分を 探索した.議論が込み入るのでここでは結果のみを述べる が,エネルギー的に安定な積層欠陥が形成されるのは2本 の部分転位のらせん成分が共に1/6[1100]である場合のみで あることがわかった.以上より,本粒界における1/3<101 混合転位の分解反応式は下記のように特定された.

1/3<1101>→ 1/18<2423>+1/18<4223> (6) なお、1/3<1101>刃状転位やらせん転位は反応式(6)とは異 なる分解構造を取っている可能性もある. 今後の研究の進展 が期待される.

7. ま と め

小角粒界を用いることにより種々の転位構造を作製するこ とができ,詳細なコア構造解析に非常に有効である.本研究 を継続的に進め,アルミナ中の転位および積層欠陥に関する 基礎的知見を蓄積していくと共に,転位構造と塑性変形挙動 との相関を検討していきたいと考えている.

本研究の一部は文部科学省・構造材料元素戦略研究拠点, ナノテクノロジープラットホーム事業(No. 12024046)お よび科学研究費補助金(No. 25106003, No. 25889015, 15K20959)の支援を受けて行われた.また,本研究を遂行 するに当たり東京大学・幾原雄一先生,柴田直哉先生,溝口 照康先生,名古屋大学・山本剛久先生,中村篤智先生に格別 のご指導ご鞭撻を賜った.ここに厚く謝意を表する.

文 献

- (1) T. E. Mitchell, B. J. Pletka, D. S. Phillips and A. H. Heuer: Philos. Mag., 34(1976), 441–451.
- (2) J. B. Bilde–Sørensen, A. R. Thölen D. J. Gooch and G. W. Groves: Philos. Mag., 33(1976), 877–889.
- (3) K. P. D. Lagerlöf, T. E. Mitchell, A. H. Heuer, J. P. Rivière, J. Cadoz, J. Castaing and D. S. Phillips: Acta Metal., 32(1984), 97–105.
- (4) K. P. D. Lagerlöf, A. H. Heuer, J. Castaing, J. P. Rivière and T. E. Mitchell: J. Am. Ceram. Soc., 77 (1994), 385–397.
- (5) J. B. Bilde–Sørensen, B. F. Lawlor, T. Geipel, P. Pirouz, A. H. Heuer and K. P. D. Lagerlöf: Acta Mater., 44(1996), 2145– 2152.
- (6) A. Nakamura, T. Yamamoto and Y. Ikuhara: Acta Mater., 50 (2002), 101–108.
- (7) N. Shibata, M. F. Chisholm, A. Nakamura, S. J. Pennycook, T. Yamamoto and Y. Ikuhara: Science, **316**(2007), 82–85.
- (8) A. H. Heuer, C. L. Jia and K. P. D. Lagerlöf: Science, 330 (2010), 1227–1231.
- (9) E. Tochigi, N. Shibata, A. Nakamura, T. Yamamoto and Y. Ikuhara: Acta Mater., 56(2008), 2015–2021.
- (10) A. Nakamura, E. Tochigi, N. Shibata, T. Yamamoto and Y. Ikuhara: Mater. Trans., **50**(2009), 1008–1014.
- (11) E. Tochigi, N. Shibata, A. Nakamura, T. Mizoguchi, T. Yamamoto and Y. Ikuhara: Acta Mater., 58 (2010), 208–215.
- (12) E. Tochigi, N. Shibata, A. Nakamura, T. Yamamoto and Y. Ikuhara: J. Mater. Sci., 46 (2011), 4428–4433.
- (13) E. Tochigi, Y. Kezuka, N. Shibata, A. Nakamura and Y. Ikuhara: Acta Mater., 60(2012), 1293–1299.
- (14) E. Tochigi, A. Nakamura, T. Mizoguchi, N. Shibata and Y. Ikuhara: Acta Mater., 91 (2015), 152–161.



栃木栄太

	2011年 東京大学大学院工学系研究科博士課程修了
	2011年4月-同年6月 東京大学大学院工学系研究科
	総合研究機構 特任研究員
	2011年7月-2013年3月 米国ローレンスバークレー
	国立研究所 ポスドク研究
	員(日本学術振興会海外特
L	別研究員)
1	2013年4月- 現職
	専門分野:結晶格子欠陥
	◎透過型電子顕微鏡法を用いた結晶格子欠陥の構造解
	析に関する研究に従事.



虚心坦懐に現象と向き合う

茨城工業高等専門学校助教;機械システム工学科 小野寺礼尚

この度「はばたく」への寄稿の機会を頂きましたので,私 のこれまでの研究を振り返りながら簡単な自己紹介をさせて いただきます.

私は岩手大学工学部材料物性工学科を2010年3月に卒業 した後,東北大学大学院工学研究科応用物理学専攻に入学, 本年3月に学位を取得しました.4月からは茨城工業高等専 門学校機械システム工学科に勤務しております.修士・博士 課程では東北大学金属材料研究所附属強磁場超伝導材料研究 センター 渡邉和雄教授のもとで「Fe 基アモルファス合金 の結晶化過程における強磁場効果」の研究に取り組みました.

特定の組成のアモルファス合金に適切な熱処理を施すこと で超微細な結晶相が高密度に分散したナノ結晶合金を作製す ることができます.このナノ結晶合金はトランスコアなどに 応用が期待される優れた軟磁気特性を有することが知られて いますが、特に硅素鋼板に匹敵する高飽和磁化を併せ持つた めには、結晶相として bcc-Fe を得る必要があり、前駆体と して Fe 基アモルファス合金を選択します.この Fe 基アモ ルファス合金から晶出する bcc-Fe 結晶粒の密度, 粒径がナ ノ結晶合金の磁気特性を支配していることが知られていま す. この合金の磁気特性の向上,あるいは制御のために結晶 粒密度の向上や粒径の高均一化が求められています. 私の研 究は、前駆体アモルファス合金の結晶化過程に強磁場を印加 することで、この bcc-Fe の核形成・粒成長を制御すること を目的としていました. 金属材料の相変態における強磁場の 効果は、当時既に幾つかの研究例があり、磁場印加によって 強磁性相が得るゼーマンエネルギー利得が相平衡条件を変化 させることで、強磁場下で相転移温度が変化することが一般 に知られています.アモルファスは準安定状態であり,結晶 化とは安定相への構造緩和過程です。Fe 基の場合,結晶化 時のアモルファス相は常磁性、晶出する結晶相は強磁性であ

るため、磁場印加で両相が得るゼーマンエネルギーには大き な差があり、より大きなエネルギー利得を得る強磁性相の結 晶化が強磁場印加で促進されるのでは?という興味のもと研 究を始めました.

この研究課題には修士課程から取り組んでいましたが,初 めて見出した強磁場効果は当初予想していた結晶化の促進効 果ではなく,抑制効果でした.10Tという強磁場を印加し ても結晶化温度がわずか3K上昇するだけの小さな効果で したが,結晶化が確実に強磁場の影響を受けることを見出し たと自信を持つことができました.さらに実験を重ねること で,この現象が拡散に律速された結晶成長の成長速度抑制効 果であることを明らかにしましたが,修士課程ではこの現象 の起源に迫ることはできませんでした.

博士課程へ進学してからは、当初予想していた結晶化促進 効果を引き出すために新しい試料にも取り組み、その結果、 確かに bcc-Fe の結晶化を促進する強磁場効果が存在するこ と、それが核形成の促進効果であることを明らかにしまし た. さらに組成によっては核形成の促進後に成長が抑制され るという複雑な強磁場効果を見出すに至りました.

強磁場印加による強磁性結晶核の形成促進効果は結晶相の ゼーマンエネルギー利得から考えても妥当な効果であり起源 の説明も容易ですが,はじめに見出した成長抑制効果を説明 することは困難でした.一般に,アモルファス合金における 結晶相の成長過程は拡散に律速されます.従って,成長速度 の抑制とは成長を支配する原子拡散の抑制効果であり,拡散 係数が強磁場印加で低下すると考えるまではそれほど時間を 要しませんでした.しかし,拡散係数を構成する要素の何が 磁場の影響を受けているかは最後まで問題として残っていま した.最終的にこれまでの実験結果を解析しなおし,先入観 を持たずに見つめた結果,拡散の活性化エネルギーが強磁場 印加で上昇すること,その起源には磁気モーメント間の交換 相互作用のエネルギーが影響しているとの考えに至りました.

先入観をもたずに現象を見つめる、学部時代の恩師である 岩手大学吉澤正人教授の言葉をお借りすると「虚心坦懐に現 象と向き合う」ことを、私が胸を張って実践できているとは 言い難いですが、この精神を常に持ち続けたいと考えていま す.

4月から新環境となり現在は研究室の立ち上げ,来年度か ら学生を受け入れます.自分が多くの先生に研究者として育 てていただいたことを忘れずに,今後は指導者として虚心坦 懐の精神で学生と共に現象に向き合っていきたいという決意 表明をして結びに代えたいと思います.

> (2015年5月19日受理)[doi:10.2320/materia.54.413] (連絡先:〒312-8508 ひたちなか市中根866)

本会記事

会 告	2015年秋期(第157回)講演 いて 2015年秋期講演大会会期 日本金属学会・日本鉄鋼板 2015年秋期講演大会プログ ット広告募集 い 第13回 World Materials D 平成27年度秋期全国大学板 2016年春期講演大会公募 研究集会 電子ジャーナル機関購読の 永年会員制度について 会誌・欧文誌編集委員会が 第39回技術開発賞「新技術	(大会ご案内ならびに参加申込みにつ414中の託児所手配のお知らせ協会女性会員のつどいのご案内ゲラム広告・講演概要集 DVD ジャケ416Day Award 募集416小料関係教室協議会講演会のご案内416ソンポジウムテーマ提案募集416シンポジウムテーマ提案募集416シンポジウムテーマ提案募集416シンポジウムテーマ提案募集416シンポジウムテーマ提案募集416シンポジウムテーマ提案募集416シンポジウムテーマ提案募集416シンポジウムテーマ提案募集417ボッ新製品」記事募集418
	第39回技術開発賞「新技術 第66回金属組織写真賞作品 会報編集委員会からのお知	新・新製品」記事募集 ······418 品募集 ·····419 ロらせ ····421
支部行事 掲示板 … 会誌・欧5 次号予告	·····································	材料系学協会情報コーナー423 新入会員424 行事カレンダー426

事務局	涉外 · [国際関係	系:secgnl@jim.or.jp
	会員サー	ビス全般	ጵ : account@jim.or.jp
	会費·	各種支払	ム:member@jim.or.jp
	刊行绐	物申込み	と:ordering@jim.or.jp
セミナーシ	・ンポジウム	参加申込み	ない meeting@jim.or.jp
	講演	[大会]	È : annualm@jim.or.jp
	総 務 ·	各種賞	🕻 : gaffair@jim.or.jp
学術	情報サー	・ビス全般	ጵ : secgnl@jim.or.jp
	分	科 会	È : stevent@jim.or.jp
	まてり	あ・広告	告 : materia@jim.or.jp
	会誌	·欧文誌	表: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/

会告原稿の締切は<u>毎月1日</u>で,翌月号掲載となります。

 掲示板のご利用については、ホームページも ご参考下さい。

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.

会告(ホームページもご参照下さい)

2015年秋期(第157回)講演大会ご案内ならびに参加申込みについて

会 期: 2015年9月16日(水)~9月18日(金)

会場:九州大学伊都キャンパス(〒819-0395 福岡市西区元岡744)

懇親会: 2015年9月16日(水)19:00~21:00

場所: ホテル日航福岡(〒812-0011 福岡市博多区博多駅前 2-18-25)

大会参加予約申込締切: 2015年8月10日(月)17:00

参加申し込みは、インターネット申込となります.詳細は、下記申込要領をご覧下さい.

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〉5月20日(水)~8月10日(月)17:00

大会参加申込み URL http://www.jim.or.jp/convention/2015autumn/

予約申込締切後,予約申込者へ大会参加証,概要集 DVD を送付します.懇親会参加申込をされた方には,<u>懇親会参加券</u>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下さい(WEB 画面:講演大会 Mypage よりダウンロード)**. 8月11日以降は当日申込となりますので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	申込および入金期日: 8 月10日(月)				
会員資格	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) (大会会場受付・現金払いのみ)			
正員・前維持員会社社員・鉄鋼協会会員	9,000円	10,000円			
学生員	6,000円	6,500円			
非会員 一般	19,000円	20,000円			
非会員 学生(大学院生含む)	14,000円	15,000円			

◆懇親会費(消費税込み)

懇親会:2015年9月16日(水)19:00~21:00 場 所:ホテル日航福岡(〒812-0011 福岡市博多区博多駅前2-18-25)

予約申込締切日	申込および入金期日: 8 月10日(月)		
	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) (大会会場受付・現金払いのみ)	
一般	8,000円	10,000円	
同伴者(ご夫人またはご主人)	5,000円	5,000円	

•お支払後の取消は、ご返金いたしかねますのでご了承下さい.

◆支払方法

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.手数料は本会が負担します.また,入金後のご返金は致しかねます. <u>8月10</u>日(月)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(※講演発表・聴講するためには、上記大会参加申込みが必要です。)

件名を「2015年秋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. 9月2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·問合先

〒980-8544 仙台市青葉区一番町一丁目14-32 (公社)日本金属学会 🖀 022-223-3685 E-mail: member@jim.or.jp

2015年秋期講演大会会期中の託児所手配のお知らせ

2015年秋期講演大会期間中,日本金属学会と日本鉄鋼協会が共同で託児所を手配いたします.

■設置期間および利用時間

設置期間	利用時間
2015年9月16日(水)	$7:30{\sim}20:30$
2015年9月17日(木)	$7:30{\sim}20:30$
2015年9月18日(金)	$7:30{\sim}20:30$

*託児所のある電気ビルの開館が7:30となります.

- ■設置場所:「キッズスクウェア 福岡天神南」 福岡市中央区渡辺通 2-1-82 ☎ 092-739-6900 電気ビル北館 2F(https://goo.gl/0Iu8aj)(開館 7:30~)
- ■対 象:3ヶ月から就学前まで(小学校低学年までは応相談). *大会参加者のお子様に限ります.
- ■利用料金:お子様お一人につき 800円/1時間. 料金は学会期間中に金属学会の受付にてお支払い下さい. なお、申込締切後のキャンセルにつきましては、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.
- ■利用託児所運営会社:株式会社アルファコーポレーション (www.alpha-co.com)
- ■お申込方法:ご利用には予約が必要です. 「キッズスクウェア 福岡天神南」まで直接お電話でお申し込 み下さい.(お申し込み後,キッズスクウェアより当日の持ち物 等をそれぞれの利用者ごとに案内頂きます.)
- ■託児所に関するご質問・ご連絡先・申込先:
- キッズスクウェア 福岡天神南 学会託児担当まで 窗 092-739-6900
- ■申込期間:2015年9月8日(火)まで (定員に達し次第締め切らせて頂きます)
- ■詳細情報 日本金属学会ホームページ講演大会各種ご案内 http://jim.or.jp/MEETINGS/2015_atmn/index.html

日本金属学会・日本鉄鋼協会 第5回女性会員のつどいのご案内

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

昨年に引き続き,秋期講演大会期間中に女性会員の方々が気軽に 意見交換できる「つどい」を行います.ランチを楽しみながら,楽 しいひとときを過ごしませんか.

- **主 催** 日本金属学会·日本鉄鋼協会男女共同参画合同委員会
- 日 時 2015年9月18日(金) 12:00~13:00
- 会場 九州大学伊都キャンパスセンター2号館3階(2408)
 (〒819-0395 福岡市西区元岡744番地)
- 内容女性会員の交流・人脈作り、キャリアデザイン意見交換、 仕事場や上司・部下への困ったこと等本音トーク、学会への要望、などなど、
- 参加資格 金属学会・鉄鋼協会女性参加者.学生さん,子連れも welcome♪
- 参加申込 申込みは不要です.直接,会場へお越し下さい.
- 持ち物 弁当,飲み物は持参でお願いします... この「つどい」に参加して,静かな部屋でゆっくり語り 合いましょう♪♪♪
- 問合せ先 梅津理恵(東北大学)rieume@imr.tohoku.ac.jp



2015年秋期講演大会プログラム広告・ 講演概要集 DVD ジャケット広告募集

- 申込締切
 2015年9月2日(水)
 申込問合
 〒104-0061 東京都中央区銀座7-12-4
 株式会社 明報社 担当 後藤一哲
 ☎ 03-3546-1337(代) [M 03-3546-6306
 E-mail: goto@meihosha.co.jp
 http://www.meihosha.co.jp/
 - 細 まてりあ 54巻6号299頁

詳

第13回 World Materials Day Award 募集

第13回 World Materials Day Award 応募作品を募集しており ます.展示および審査は、日本金属学会秋期講演大会(2015年9月 24~26日,九州大学)期間中に行います.沢山のご応募をお待ちし ております.

- 詳細まてりあ54巻6号299頁ホームページ → 講演大会
- 締 切 <u>2015年8月31日(日)</u>
 申込・問合先 (公社)日本金属学会 各種賞係

☎ 022-223-3685 MM 022-223-6312
 E-mail: gaffair@jim.or.jp
 (応募様式はホームページからダウンロードして下さい)

平成27年度秋期全国大学材料関係教室協議会 講演会のご案内

- 〔主 催〕全国大学材料関係教室協議会
- 〔共 催〕日本金属学会,日本鉄鋼協会
- 日 時 2015年9月18日(金) 13:00~14:00
- 場 所 九州大学伊都キャンパス ゲストハウス 多目的ホール
- 聴講料 無料
- 演 題 アクティブラーナーの育成を目指して

九大 副学長, 基幹教育院長 丸野俊一

2016年春期講演大会公募シンポジウムテーマ提案募集

提案期限:2015年9月1日(火)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.明年の春期講演大会の公募 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 まてりあ54巻7号370頁 or ホームページ → 講演大会





研究会 No. 69

第3回エレクトロニクス薄膜材料研究会 「電子・情報・エネルギー素子と機能材料の最近の研究」

低炭素化社会の為の次世代電子・情報・エネルギー素子として, 従来の半導体材料及びプロセスに踏襲されない革新的機能を有する 電子デバイスが要求されている.本研究会では,革新的機能を有す る電子デバイスに繋がる新たなエレクトロニクス材料について検討 する.

- 日 時 2015年9月17日(木) 17:00~19:00
- 場 所 九州大学伊都キャンパス(センター1号館(金属学会 E 会場))

プログラム

- 17:00-17:40 リン化法を用いたカルコパイライト型リン化物の成 膜と太陽電池への応用 京大院工 野瀬嘉太郎
- 17:40-18:20
 ハーフメタル型電子状態を有するホイスラー合金の

 磁性と相安定性
 東北大金研 梅津理恵

 18:20-19:00
 電気磁気効果に基づく垂直交換磁気異方性の電界誘

 起方位反転
 阪大院工 白土 優

企画責任者 松尾直人(兵庫県立大 院工)

参加費 無料

 申込・問合先
 9月11日(金) 名・所属・電話番号を明記してお申込み下さい.

 〒671-2280
 姫路市書写2167 兵庫県立大学大学院 工学研究科

 太尾直人
 孤) 079-267-4907 E-mail: nmatsuo@eng.u-hyogo.ac.jp

電子ジャーナル機関購読のご案内

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

对象誌 日本金属学会誌, Materials Transactions

年間購読料金 別途お知らせいたします.お問合せ下さい.

- 对象期間 大学類,独立行政法人,企業等
- 問合せ先 〒105-0022 東京都港区海岸 1-9-18 国際浜松町ビル 丸善株式会社 学術情報ソリューション事業部 企画開発センター
 ☎ 03-6367-6114 [払] 03-6367-6184
 E-mail: e-support@maruzen.co.jp

永年会員制度について

本会では長年にわたり本会の発展に尽された会員の労に報いるため、永年会員制度を設けております。自己申告制となっておりますので、該当すると思われる方は、はがき(又は FAX:022-223-6312)にて会員番号、生年月日およびおおよその入会年を記入の上、本会事務局宛お問合わせ下さいますようお願いいたします。

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

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

受付締切 <u>毎年9月30日</u>

永年会員資格付与 毎年1月1日

会誌編集委員会からのお知らせ

■超伝導材料の高性能化 ―組織制御技術の進展

(High Performance Superconducting Materials

-Progress of Microstructure Control)

超伝導は MRI などで既に実用化され、また JR 東海が開発を進 めている磁気浮上列車では、これを支える基盤技術となっているこ となど、実用上大変重要な技術である. 超伝導は抵抗ゼロで大電流 を流すことが出来るため、各種の電力機器に応用するとエネルギー 効率が高まるだけではなく,機器が小型・軽量化されるので,特に 省エネルギーや低炭素化などの観点から有望視されている.このよ うな電力応用の観点から超伝導材料における最も重要な特性は、抵 抗ゼロの状態で流せる超伝導電流の上限値の大きさ(臨界電流密度) である.この臨界電流密度は超伝導体の微細組織に大きく依存する ために、材料の組織制御が極めて重要となる.本誌では、以上の観 点からこれまでに数回の超伝導特集号を企画・掲載してきており, 最近では2010年7月に特集号を掲載している.その後,超伝導材 料の組織制御による臨界電流特性の改善は大きく進んできており, いくつかの超伝導材料においては実用レベルの特性が得られつつあ って,その実用化が真剣に議論される段階にきている.一方,新し い超伝導材料では、2008年に発見された鉄系超伝導体が注目され るが、新超伝導体の探索はその後も続けられており、近年いくつか の注目すべき材料の発見もあった.

このような状況を踏まえて超伝導材料開発における現状を把握す るとともに、問題点を明らかにして今後の研究開発の方向性を考察 するために、ここに超伝導特集号を企画することにしたい.

上記テーマに関する特集を,日本金属学会誌80巻7号(2016年7 月発行)に予定しております.多数ご寄稿下さいますようお願いいたします.

実施予定号 第80巻第7号(2016年)

原稿締切日 2016年1月8日(金)

- 投稿に際しては、日本金属学会会誌投稿の手引・執筆要領(本 会 Web ページ)に従うこと.
- •通常の投稿論文と同様の審査過程を経て、編集委員会で採否を 決定する.
- 問合せ先 〒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 [AX] 022-223-6312
 E-mail: editjt@jim.or.jp

欧文誌編集委員会からのお知らせ

■Frontier Researches Related to Interconnection, Packaging and Microjoining Materials and Microprocessing for Such Materials (配線・実装・マイクロ接合材料および微細加工の最前線)

現代情報化社会を牽引する各種電子機器や電子部品に使用される 配線・実装・マイクロ接合材料には、銅、アルミニウム、ニッケ ル、金、錫などの金属材料から導電性接着剤にいたるまで様々な材 料が利用されている.電子部品の接合用材料として主として使用さ れてきたはんだ材料は、鉛フリーはんだの普及が進み、一般的な電 子機器への適用が進められた.また、配線および電極材料には、微 細めっき技術が適用されてきた.これらの材料については、車載用 デバイスやパワー半導体用などのより高温環境への対応が求められ ている.そのため、高温鉛フリーはんだ、銀ナノペースト、導電性 接着剤などの候補材料の研究開発が進められている.

また,実装材料の多様化に伴い,生成する異相界面における機械 的・熱的・電気的特性の調査,それらの特性の損失評価,界面にお ける物理化学的現象および信頼性評価に関する研究も重要になって おり,異相界面科学の発展が期待されている.さらに,2.5D/3D実 装や微小電気機械システム(MEMS)に使用される材料やそれらの 微細加工も電子部品の実装には欠かせない技術となっている.

これらの背景を踏まえ、本特集では、電子実装材料およびその接 合・微細加工に関する最先端の研究および Overview 論文を広く募 集する.内容としては、以下のものを想定している.

- ・電子実装材料の材料組織および諸特性
- ・接合および積層界面の構造および界面の特性と信頼性
- ・界面における物理化学的現象
- ・2.5D/3D および MEMS 用材料およびその微細加工技術
- ・電子実装材料に関する理論・計算・シミュレーションなどの研究

上記テーマに関する特集を, Materials Transactions 57巻5号 (2016年5月発行)に予定しております. 多数ご寄稿下さいますよ うお願いいたします.

実施予定号:第57巻第5号(2016年) **原稿締切日**:2015年12月1日(火)

- ・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 [払] 022-223-6312
 E-mail: editjt@jim.or.jp

支部行事

協

- **賛** 日本鉄鋼協会東海支部
- 日 時 2015年9月28日(月) 15:30~17:00
- 場 所 名古屋大学 ES 総合館 ES ホール
 - (〒464-8603 名古屋市千種区不老町)
- 講演者 大阪大学大学院基礎工学研究科 尾方成信 教授
- 講演題目 原子・電子論に基づく金属材料の変形と強度の理解と予測

本多光太郎記念講演会のお知らせ

- 講演要旨 ホームページをご覧願います.
- 定員 180名

参加費 無料

申込方法 <u>9月14日(月)</u>までに,所属,氏名,TEL, E-mail,を 明記の上,下記申込み先へE-mailでお申し込み下さい.尚,当日受付も可能です.

申込・問合先 〒464-8603 名古屋市千種区不老町
 名古屋大学大学院工学研究科
 マテリアル理工学専攻内
 日本金属学会東海支部
 E-mail: tokai@numse.nagoya-u.ac.jp

交通案内 名古屋市地下鉄名城線「名古屋大学」駅下車 名古屋大学東山キャンパスマップ: http://www.nagoya-u.ac.jp/access-map/index.html

第39回公益社団法人日本金属学会技術開発賞 「新技術·新製品」記事募集

応募締切:2015年10月30日(金)

[本賞の趣旨]

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

(注)本賞は、日本金属学会会報「まてりあ」"新技術・新製品" の欄に掲載された記事が、選考対象となる.

技術開発賞募集要綱

1. 賞の名称 第39回公益社団法人日本金属学会技術開発賞

2. 対象となる業績と区分など

- (1) 次の部門およびそれらにまたがるものとする.
 - a . 材料基礎技術部門
 - b.素材製造·評価技術部門
 - c.素材応用技術部門
 - d . 新素材開発部門
 - e. その他
- (2) 評価は次の諸点について行われる.
 - f. 独創性
 - g. 技術,システムあるいは製品に関する有用な発明,考案, 改良(有用性)
 - h. 技術上の問題解決に役立ち,あるいは新製品の開拓をさら に促す可能性(将来性)
 - i. 生産実績その他本賞に適当と思われる新技術・新製品の開 発に優れた実績があるもの
- (3) いわゆる「金属」のみでなく、その周辺の材料、たとえば燃料、耐火物、半導体、複合材料などに関するものでもよい.
- (4) 応募の時点で,他の公募制の褒賞(発明協会賞,大河内賞な ど)を受けていない斬新な主題であることが望ましい.

応募者の条件

- (1) 1件につき<u>5名以内の</u>グループまたは個人
 直接開発に関与した技術者であって、単なる職制上の管理者
 や代表者を含まないことが望ましい。
- (2) 応募する時点で本会会員である必要はないが、本会会員となることが望まれる.

4. 選 考

- 受賞者の選考は選考委員会で行う.選考委員は本会理事会が 毎年選任し、会長が委嘱する.
- (2) 理事会が授賞該当無しと認めた場合は、その年度は授賞しない.
- (3) 選考に当たって、特許係争等が問題となった記事は授賞対象 から除外する事がある.

5. 授 賞

- (1) 2016年6月末日までに受賞者を内定する.
- (2) 2016年秋期講演大会において授賞する.
- (3) 受賞者には賞状(全員)と副賞(1賞牌)が贈呈される.

6. 技術開発賞受賞記念講演

技術開発賞受賞をより意義深いものとするため,受賞記念講演 をお願いする.

第39回の受賞記念講演は2016年秋期講演大会(大阪大学,9月 <u>予定)</u>の折りに行います.

7. 受賞決定までの流れ

応募(10月30日締切)→まてりあ掲載(55巻(2016)1号から)→ 選考・受賞決定(2016年6月)→授賞(2016年9月)

まてりあ「新技術・新製品」記事への応募の方法

- 1. 応募·原稿締切
- (1) 2015年10月30日(金)
- (2) 申し込み受理順を参考に会報「まてりあ」に第1号から第3 号までに掲載する.
- 応募記事は編集委員会の査読を経て、日本金属学会会報「まて りあ」に掲載する.掲載記事が技術開発賞の選考対象となる. 掲載が決まった場合には、240,000円(前維持員会社社員の場 合は210,000円)の投稿料を納入すること.ただし、掲載号1 冊,掲載記事の PDF ファイル、別刷100部を無料とする.
- 3. 応募記事の記述に当たっては、次の各項に留意されたい.
 - (1) 社名,商品名その他,商業用呼称を用いることは差し支えないが,その内容が一般に理解できるよう説明を付すこと.
 - (2) know-how に属する事項を記述する必要はないが、新技術・ 新製品の特色などが理解できるようなデータを含めること.
 - (3) 現在までの実績,経済性,特許関係など「技術開発賞」選考 に参考となる項目をなるべく含めること.
 - (4) 特許関係等についての記述は十分に注意すること.

4. 原稿作成について

- (1) 原稿は本文,図(写真)および表を含めて<u>刷り上がり3頁以</u> 内(約6,700字)とする.
- (2) 原稿は図・表の説明を含めて全て日本語とする.物理量の単位はなるべく SI 単位系による.
- (3) 原稿はレイアウトの体裁にあわせて作成する.
- (4) 応募はホームページからできます.
 ホームページから直接入力 → 印刷(2枚目最後に要ご署名)
 → 原稿と一緒に提出 → 事務局確認 → 受付完了です.
 図表,レイアウトを別にして作成し各原稿1部と電子ファイルを同封の上送付する.
 - レイアウト用紙(HPよりダウンロードして下さい)
 図(写真)・表
 - •図と写真は区別せず図1,図2…のように,表は,表1, 表2…のようにそれぞれ通し番号とする.
 - 写真にはスケールを入れる.
 - それぞれキャプションを付すること.(記述は横軸・縦
 軸・説明も含めすべて日本語とする.)
 - カラー原稿には<u>カラー印刷の有無</u>を必ず明記する.
 - •カラー印刷は刷上り1頁あたり35,000円を著者が負担する.
- 5. 本会では、まてりあに掲載の著作物の著作権を本会に帰属させ ていただきます.
- まてりあ一般記事の要領に従うこと.(まてりあ掲載「新技術・ 新製品」記事を参考にして下さい)
- 7. 提出資料
 - 応募表紙(署名を記入すること)
 応募表紙はホームページ*
 から直接入力作成できます
 ・応募表紙はプリントアウト
 し、自署にてご署名下さい.(プリンターで B4→A4 に縮
 小印刷して下さい)
 - ② レイアウトされた原稿
 - ③ 本文テキスト
 - ④ 図表原稿
 - ◎①~④の出力物
 - ◎①~④のデータファイル(電子 mail 添付可)
 - ◎封筒には「技術開発賞応募記事」と朱書下さい.
 - * ホームページ→表彰関係→技術開発賞募集→応募表紙(入力)→ プリントアウト(署名)→原稿と一緒に送付して下さい.

申込·送付先

〒980-8544 仙台市青葉区一番町一丁目14-32 (公社)日本金属学会各賞係 ☎ 022-223-3685 E-mail:gaffair@jim.or.jp

「新技術・新製品」記事の問合先 まてりあ係 E-mail: materia@jim.or.jp

~とっておきの一枚を是非、今年もご応募下さい~

光学顕微鏡写真だけでも応募できます.

応募締切:2015年10月20日(火)

1. 募集部門

下記4部門で行っております.

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

それぞれ,優秀賞および奨励賞作品を選考授賞し,各部門の優秀 賞から特に優れた作品について最優秀賞を贈ります.ただし,該当 する作品がないときは授賞しないことがあります.

「写真賞新部門」

- 1. 光学顕微鏡部門
- 2. 走査電子顕微鏡部門(分析, EBSD 等を含む)
- 透過電子顕微鏡部門(STEM, 分析等を含む)
- 4. 顕微鏡関連部門(FIM, APFIM, AFM, X線CT等)
- 注:光学顕微鏡と透過電子顕微鏡写真,走査電子顕微鏡と透過電 子顕微鏡写真等の組写真を応募する場合,応募者が最も適切 と判断する部門を選択すること.

2. 提出要領

- 【提出】(①および②の両方をご提出下さい.)
 - ① **印刷物**:写真作品と説明書は別々の用紙に作成し、印刷物として郵送する.
 - ② <u>電子データ</u>:写真作品と説明書の電子データを別途メール添付で提出する、メールの題名は「金属組織写真 賞応募」とする.

【作品】

- ① 1作品の印刷物のサイズはA2版(60 cm×42 cm)(タイトル,写真,図,Figure 説明,キャプションのみ:下記の作成例参照)で,A2版の光沢紙にプリントアウトしたものを送付する(パネルのように台紙に貼付する必要はない).
- ② 写真と図の組み合わせでも提出は可(写真,図への挿入文字は小さすぎないこと).
- ③ 作品には、応募者名、共同研究者名を記載しない.
- ④ 応募作品数には制限を設けない.
- ⑤ 他学協会等の同様の賞を受賞してない作品であること.

【説明書】

- ※所定様式の説明書は、印刷物で送付するとともに、別途メール に添付して送付すること.(所定様式のダウンロード)
- ① 応募部門:4部門の中から該当する部門を選択する.
- ② 題目
- 作品の説明
- ④ 学術的価値(新規性,波及効果について世界の情勢に照らして記入下さい)
- ⑤ 技術的価値(試料,試料作製,写真処理において新規性,独 自性について記入下さい)
- ⑥ 特記事項(教材などとしての利用価値などを記入下さい)
- 材料名,試料作製法,観察手法,応募者・共同研究者,連絡 先の必要事項を付記する.
- 3. 応募作品は、原則返却いたしませんので、予めご了承下さい.

 送付・問合先 〒980-8544 仙台市青葉区一番町一丁目14-32 (公社)日本金属学会 金属組織写真賞係
 ☎ 022-223-3685 1 022-223-6312
 E-mail: gaffair@jim.or.jp

〈作成例〉写真サイズ:A2



·····揭示/板

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

集会

本多記念講演会一金研100周年を前にして一 「今に生きる本多イズム」

- 日 時 2015年10月2日(金)13:20~19:00
- 会場ホテルメトロポリタン仙台(〒980-8477 仙台市青葉区中央1-1-1 ☎ 022-268-2525)
- 主 催 公益財団法人本多記念会
- 後援東北大学金属材料研究所,公益社団法人日本金属学会,公 益社団法人日本磁気学会,一般社団法人日本物理学会,一 般社団法人日本鉄鋼協会
- 開催目的 我が国の物理冶金学の創始者である本多光太郎先生が創 立した東北大学金属材料研究所(金研)が来年100周年を 迎えることから,100年前の本多先生の業績を再評価 し,何をどのように伝承するかを議論する.

プログラム

(I) 基調講演 13:30~15:30
 「本多先生の実学と材料研究」
 増本 健 東北大学名誉教授/電磁材料研究所 グランドフェロー
 「日本の磁石研究はすごい!!」

佐川眞人 インターメタリックス㈱ 最高技術顧問 「相変態が生み出す鉄鋼の多様性」

津崎兼彰 九州大学工学研究院教授

- (II) パネルディスカッション 15:45~16:45
- 対象テーマ:「実学:出口と基礎研究」 (皿) 総合討論 17:00~19:00
- 「本多先生を語る」
- **申込·登録方法** 事前申込不要
- 参加費 無料
- 問合先 公益財団法人本多記念会 事務長 佐藤正義 ☎ & Ⅲ 022-215-2868 E-mail: ma-sato@imr.tohoku.ac.jp

集会)

(独日本学術振興会 産学協力研究委員会 合金状態図第172委員会 「第9回状態図・熱力学セミナー 開催案内」

20世紀型大量消費・使い捨て文明から、低エネルギー消費・資源循環型文明への転換を余儀なくされている現代において、資源循環,新エネルギー創出,低エネルギー消費,低環境負荷等の課題は工学を担う我々に託された解決すべき問題です.このような観点から、第1回~第4回のセミナーでは、様々な材料を見直すために必要な材料学の基礎である状態図について解説し,産業界への応用例を紹介しました.また,第5回セミナーでは、熱力学や統計力学と状態図の関係を詳細に説明しました.一方,第6回セミナーでは統計力学と状態図の関係に注目し、第7回~第8回セミナーでは統計力学と状態図の関係に注目し、それぞれ2日間にわたり解説しました.今回は、第6回セミナーの内容をさらに掘下げて、2日間にわたりじっくりと解説します.

- **日 時** 2015年10月19日(月)~20日(火)
- 塭 所 東北大学 東京分室(サピアタワー, 10階) (https://www.bispot.jp/bill_pages?bill_cd=N00&locale=ja) 賛 (公社)日本金属学会, (一社)日本鉄鋼協会 協 員 50名 定 プログラム 10月19日(月) 9:20~10:20 相平衡熱力学の基礎 (2) 10:30~11:30 同上 (3) 12:40~13:55 同上 (4) 14:05~15:20 同上 東京工業大学 梶原正憲 (5) 15:30~17:00 CALPHAD 法による状態図計算 東北大学 大谷博司 10月20日(火) (1) 9:20~10:20 CALPHAD 法による状態図計算 (2) 10:30~11:30 同上 (3) 12:40~13:40 同上 東北大学 大谷博司 (4) 13:50~15:20 状態図に関連する実験手法と熱力学パラメ ータの評価 (5) 15:30~17:00 同上 物質·材料研究機構 大沼郁雄 参加費 事前申込:10月14日迄 • 第172委員会参加企業 6,000円 その他の企業 10,000円 •大学,官公庁関係 4,000円 2.000円 一学生 申込方法 http://j2www.materia.titech.ac.jp/seminar/から申込書 を入手し、必要事項をご記入後、E-mailの添付書類に て kajihara@materia.titech.ac.jp 宛にお送り下さい. 世話人 梶原正憲(東工大),大谷博司(東北大), 阿部太一(物材機構)
- 問合せ先 東京工業大学 総合理工学研究科 材料物理科学専攻 梶原正憲
 - ☎ 045-924-5635 [FAX] 045-924-5857

E-mail: kajihara@materia.titech.ac.jp

集 会

◇レアメタル研究会◇

<u>↓</u> ↓,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,	まて	こりあ「プロミ
■主 催:レアメタル研究会		
主宰者:東京大学生産技術研究所 教授 岡部 徹	特定領域	或研究新学術領域
協 力:(一財)生産技術研究奨励会(特別研究会 RC-40)	これまでな	公的資金補助によ
共 催:東京大学マテリアル工学セミナー,レアメタルの環境調	その研究原	戈果は一部の関係
和型リサイクル技術の開発研究会(最先端・次世代研究	現状である	5.
開発支援プログラム:JSPS NEXT Program)	その成身	果を多くの研究者
協 賛:(一社)軽金属学会, (一社)資源 · 素材学会, (公社)日本	掲載しませ	さんか.
化学会, (公社)日本金属学会, (一社)日本チタン協会,	「まてり	あ」には、有料
(一社)日本鉄鋼協会 (五十音順)	というカラ	テゴリーがあり,
■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	照の上,看	奮ってご応募下さ
〒153-8505 目黒区駒場 4-6-1		
(最寄り駅:駒場東大前,東北沢,代々木上原)	種別名称	プロジェクト研
■参加登録・お問い合わせ:岡部研 学術支援専門職員 宮嵜智子	主旨	公的資金を得て
(tmiya@iis.u-tokyo.ac.jp)		掲載する.
	応募期間	通年とする.
〈平成27年度 レアメタル研究会の予定〉(2015.6.25現在)	応募盗格	企画提案考お
■ 第67回 2015年9月18日(余)(第2回)	心夯其伯	ていることを理
 第68回 2015年11月97日(金)(第2回) 	担山事粗	ふ両圭(プロミ
	派山自然	上回音() - 、
■ π_{00} 回 2010 + 1 $\int_{0}^{0} O(\overline{x}) (\pi_{4} + \Theta)$		ク,正回工感,
▼貝金禺ンノ小ンワム(弗3回)+利平云▼(行回開催)	人面中向	のねらい、貝口
■ 弟10回 2010年3月11日(金)(平成21年度 取於回)	企画内谷	ノロンェクトポ
		人記事人ダイル
		脱
テーマ:走るレチメタル、働くレチメタル		
時 间:午後3:00~		
講		
 ・自動車に使用される希少資源とその使用量削減に向けたトヨタの 		最近の研究
取り組み(60分)		
トヨタ自動車株式会社 材料技術統括室 主査 野田克敏 講師		
• 走るレアメタル,働くレアメタルについて(仮)(45分)		
東京大学 生産技術研究所 教授 岡部 徹 講師		
•希土類(レアアース)産業の過去・現在・未来 〜自動車・ロボッ		
ト産業などへの貢献~(仮)(60分)		
株式会社 三徳 代表取締役社長 岡田 力 講師		トピックス
午後6:30~ 研究交流会・意見交換会 (An 棟 2F ホワイエ)		
	企画決定	会報編集委員会
■第68回 2015年11月27日(金)15:00~ An棟2F コンベンションホール	費用負担	1頁:28,000円
テーマ:未来材料:チタン	企画総頁	35頁以内
時 間:午後3:00~	著作権	日本金属学会に
講 演:	杳 読	会報編集委員会
 チタン産業の過去・現在・未来(仮)(60分) 	<u> </u>	めた企画書を携
東邦チタニウム株式会社 チタン生産本部 本部長 小瀬村 晋 講師	執筆依頼	特集関係の執筆
 チタンのリサイクルの現状と課題について(45分) 	執筆方法	「まてりあ」 幸
東京大学、生産技術研究所、新塔·岡部、御 講師	送付・問題	会、、、、、、、、、、、、、、、、、、、、、、、、、、、、、、、、、、、、
		-76 1700 004
- ノアマズ(MV中州)についまい(VU)/) 古新十学 工学研究社 社社工学市市 著橋 空田折井 港師		
ホールハナ エナリカ村 竹村エナ号以 教授 十田省世 蒔即 ケ.後6・20。		
一下仮U・5U ~ 「「「死又孤云・息兄父探云 (All 傑 $\Delta \Gamma$ 小ワイエ)		
★研究会小ームハーン★ http://www.akaka.ia.u.tolwo.co.ic/inco.co./u.40.ilter1		
nttp://www.okabe.ns.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〉

Workshop on Reactive Metal Processing (Reactive Metal Workshop)

RMW11 February 19 (Fri)-20 (Sat), 2016, Cambridge, MIT http://www.okabe.iis.u-tokyo.ac.jp/core-to-core/rmw/

会報編集委員会からのお知らせ

ジェクト研究報告」企画公募

或研究,学術研究,戦略的創造研究など, よるプロジェクト研究が行われているが, 系者に資料配布されるに留まっているのが

者が目を通す会報「まてりあ」にまとめて

で掲載できる「プロジェクト研究報告」 通年応募を受け付けております. 下記参 きい.

- 研究報告
- ているプロジェクトの最終研究成果を有料
- よび執筆者に本会会員2名以上が含まれ 要する.
- ジェクト名,責任者名,企画趣旨,希望 記事種別・題目・執筆者・執筆頁・執筆 壬者連絡先)を提出する.
- 昭介(1頁),解説,最近の研究,トピック レの組み合わせとする.
 - 新しい特定の問題を取り上げて、専門外 の会員にも分かるように記述する. さらに勉強しようとする人のために参考 となる文献も示しておく.
 - 最近の重要な研究のうち,比較的せまい 範囲のテーマを取り上げて,国内外の最 近の研究成果を紹介する. 各分野の現状、現在の問題点などを取り 上げて、総括的に分かり易く記述したも ので、その分野の研究を進める上で参考 となる内容とする.
 - 最近の情報を手短に紹介するもので,話 題は限定しない.
- 会で採否の決定を行う.
- +税
- こ帰属する.
- 会が行う. 論文毎の複数名査読候補者を含 是出してもらい一括して審議する.
- 筆依頼方法と同じ方法で事務局が行う.
- 執筆要項に準じる.
- 4 仙台市青葉区一番町一丁目14-32 (公社)日本金属学会 会報編集委員会 ☎ 022-223-3685
 FAX 022-223-6312 E-mail: materia@jim.or.jp

 \Diamond \Diamond \bigcirc

日本金属学会誌掲載論文 Vol. 79, No. 8 (2015)

論 文

δプロセスによるインコネル718の結晶粒微細化 西牧智大 筧 幸次 河上祐介

Mg-Si クラスタ形成による Al-Mg-Si 合金の強度と 延性の向上およびその機構

> 高田 健 潮田浩作 秋吉竜太郎 池田賢一 高橋 淳 波多 聰 金子賢治

高電流密度下における硫酸酸性浴からの Zn-Ni 合金 析出挙動 安藤 聡

高松塚古墳石室の目地漆喰表面汚染層の微細構造 北田正弘 高妻洋成 建石

分子動力学法を用いた TiAl 系金属間化合物における 転位挙動の解析

竹内俊一 河村貴宏 鈴木泰之 北嶋具教

寄 書

ショートドロップチューブプロセスを用いた InSb お よび GaSb 単結晶半導体微粒子生成

河村忠晴 永山勝久

徹

Materials Transactions 掲載論文

Vol. 56, No. 8 (2015)

—Regular Articles—

Microstructure of Materials

Relation between Vickers Hardness and Bragg-Edge Broadening in Quenched Steel Rods Observed by Pulsed Neutron Transmission Imaging Hirotaka Sato, Tomoya Sato, Yoshinori Shiota, Takashi Kamiyama, Anton S. Tremsin, Masato Ohnuma and Yoshiaki Kiyanagi

Mechanics of Materials

Titanium Powders via Gas-Solid Direct Reaction Process and Mechanical Properties of Their Extruded Materials Takanori Mimoto, Junko Umeda and Katsuyoshi Kondoh

The Deformation Modes of Rock Slopes due to Excavation in Mountain-Type Mines

Najib, Daisuke Fukuda, Jun-Ichi Kodama and Yoshiaki Fujii

Tensile Shear Strength Improvement of 18-8 Stainless Steel/CFRP Joint Irradiated by Electron Beam Prior to Lamination Assembly and Hot-Pressing Akiko Minegishi, Takumi Okada, Masae Kanda, Michael C. Faudree and Yoshitake Nishi

Density Dependency of Tempered Martensite Hardness in Sintered Carbon Steel

Singon Kang, Minwook Kim and Seok-Jae Lee

Optimization of Vacuum Hybrid Welding Process Parameters for YG8 Cemented Carbide and 42CrMo Steel Using Artificial Neural Networks Wan-chang Sun, Pei Zhang, Han-jun Wei, Chun-yu Miao and Kun Zhao

Mechanical and Magnetic Properties of Ni-Mn-Ga-Gd Ferromagnetic Shape Memory Alloys

Li Gao, Xiaoyun Shen, Jie Xu and Wei Cai

Materials Chemistry

Activity of Phosphorus Pent-Oxide and Tri-Calcium Phosphate in 2CaO · SiO₂-3CaO · P₂O₅ Solid Solution Saturated with CaO Ming Zhong, Hiroyuki Matsuura and Fumitaka Tsukihashi

Effect of Electrolysis Condition on the Lightness and Surface Morphology of Ni Deposit from Chloride Electro-Winning Solutions Ryo Takahashi, Yuki Sato, Satoshi Oue, Shinichi Heguri and Hiroaki Nakano

Preparation of Ni-Al-Pt Coating on Ni-6 at%Cr Alloy by Electrodeposition Method and Cyclic-Oxidation Resistance Takuhiro Yamashita, Naka Sato, Michihisa Fukumoto and Motoi Hara

Effect of Oxygen Evolution on Platinum Dissolution in Acidic Solution

Zhongqi Wang, Eiji Tada and Atsushi Nishikata

Pitting Corrosion of Stainless Steel 430 in the Presence of Thin MgCl₂ Solution Films: Effects of Film Diameter and Thickness

Tran Van Nam, Eiji Tada and Atsushi Nishikata

Materials Processing

Effects of Moisture in the Air on Characteristics of Strength in High Strength Spheroidal Graphite Cast Iron Naoto Shiraki and Kazuyuki Morita

Development of an Elasto-Viscoplastic Constitutive Equation for an Al-Mg Alloy Undergoing a Tensile Test during Partial Solidification

> Ryosuke Takai, Akira Matsushita, Shogo Yanagida, Koichiro Nakamura and Makoto Yoshida

Laser-TIG Hybrid Welding of Magnesium Alloy T-Joint with Cold Filler Wire

Zhong-lin Hou, Chen-bin Li and Li-ming Liu

Effect of the O_2/N_2 Ratio on the Growth of ZnO Nanostructures on *c*-Plane Sapphire Substrate via Thermal Evaporation Technique

Geun-Hyoung Lee

Engineering Materials and Their Applications Synthesis with Glucose Reduction Method and Low Temperature Sintering of Ag-Cu Alloy Nanoparticle Pastes for Electronic Packaging

Dongyue Zhang, Guisheng Zou, Lei Liu, Yingchuan Zhang, Chen Yu, Hailin Bai and Norman Zhou

Evaluation of Torsional Fatigue Behavior of Coronary Stents Ryohei Kogure, Takayuki Shiraiwa, Manabu Enoki and Tomoaki Suzuki Thermal Conductivity Enhancement of Magnetic Fluids under Magnetic Field Based on Percolation Theory Yong Jae Suh and Kuk Cho

Effect of Various Refinement Methods on the Morphologies of Primary Si in a Hypereutectic Al-**18Si Alloy** Gil-Yong Yeom, Sang-Soo Shin, G. Eisaabadi B., Young-Ok Yoon, Shae K. Kim and Soong-keun Hyun

Feasibility of Bioleaching in Removing Metals (Al, Ni, V and Mo) from as Received Raw Petroleum Spent Refinery Catalyst: A Comparative Study on Leaching Yields, Risk Assessment Code and **Reduced Partition Index** Ashish Pathak, Haragobinda Srichandan and Dong-Jin Kim

Passivation Behavior of Ce-Containing Hyper **Duplex Stainless Steels in Sulfuric Acid Solution** Soon-Hyeok Jeon, Geun-Dong Song, Do Haeng Hur and Yong-Soo Park

Extraction and Separation of Cadmium from the Chloride Solution of E-Waste Using Cyanex 923 **Impregnated Amberlite XAD-7HP Resin**

Nghiem Van Nguyen, Jae-chun Lee, Hai Trung Huynh and Jinki Jeong

Transition Metal Oxide (TMO) Thin Film Memristor on Cu Substrate Using Dilute Electrodeposition Method Fatin Bazilah Fauzi, Raihan Othman, Mohd Ambri Mohamed, Sukreen Hana Herman, Ahmad Zahirani Ahmad Azhar and Mohd Hanafi Ani

Rapid Publications

Time Dependent Magnetization of an Al-1.6% Mg₂Si Alloy Katsuhiko Nishimura, Kenji Matsuda, Takahiro Namiki, Norio Nunomra, Teiichiro Matsuzaki and Wayne D. Hutchison

A Preparation Method for Atomically Clean Sapphire Surfaces and High Resolution Topographic Method for Their Imaging by Non-**Contact Atomic Force Microscopy**

Daiki Katsube, Yutaro Takase, Hayato Yamashita, Satoshi Abo, Fujio Wakaya and Masayuki Abe

Announcement

まてりあ 第54巻	第9号 予告
ミニ特集 金属製造プロセスへの粒子法の応用 企画にあたって 奥村圭二 Euler-Lagrange 法による高炉モデル …夏井俊悟 菊地竜也 鈴木亮輔 粒子法を用いた金属精錬プロセスの解析 伊藤公久 金属製造プロセスにおける流動・凝固現象の連成解析 安斎浩一 平田直哉 粒子法による摩擦撹拌接合現象のモデル化 宮坂史和 流動現象への粒子法の応用 角田和彦	 【最近の研究】共鳴振動を利用した金属材料の非線形弾性定数評価への取り組み
\diamond \diamond	\rightarrow
"材料系学協会情報コーナー"	
 〈軽金属 第65巻 第8号 予定〉 解 説:軽金属学会賞 超々ジュラルミン開発の伝統を受け継いで一超塑性材料の組織制御から学んだこと―/吉田英雄 アルミニウム技術史 第4回 電気化学製法のはじまり(米国):チャールス・マーチン・ホール/鈴木雄一 研究論文 高圧スライド(HPS)加工による A2024丸棒材の結晶粒超微細化と超塑性発現/増田高大・藤光利茂・瀧沢陽一・堀田善治 Al-Siアモルファス合金の照射耐性と析出促進過程の計算機実験/篠嶋 妥・安島直紀・桃井一章・岩瀬彰宏 Al-Mg(-Zn)系合金のセレーション発生挙動に及ぼす析出状態の影響/松本克史・有賀康博・常石英雅・岩井光・水野正隆・荒木秀樹 	レーザ照射を施した工業用純アルミニウムおよび Al-Mg 合金板の集合組織と曲げ加工性/又吉祐 子・酒井 孝・金 英俊・小山純一 一他— くふえらむ 第20巻 第8号 予定〉 学術功績賞記念特別講演 金属介在物分析と製鋼プロセス/井上 亮 鉄鋼のマルテンサイトと水素脆化の研究/津崎兼彰 外部設計型の鉄鋼材料/小関敏彦 入門講座 鉄鋼の日本工業規格-7 耐熱鋼(SUH)/高橋宏之 躍動 真空浸炭の研究を通して/森田敏之 解説 炭素循環製鉄による低炭素社会への貢献/加藤之貴 一他—



王 洪欣 物質·材料研究機構

水 上 成 美	東北大学
重田 出	鹿児島大学
<u></u> 貢 利 古 人	市古十 学
同采但八	米尔八子
浜 厔 厷 平	大阪大学
林 懐俊	九州大学
高 村 陽 太	東京工業大学
学生。	員
山口修平	北海道大学
上村宗二朗	熊本大学
鈴木康平	東北大学
篠原勇仁馬	大阪大学
本	大阪大学
林仍刀	人阪八子
石井陵一	大阪府立大学
田路千恵	大阪大学
瀧 瀬 遼 平	富山大学
アジザン モ	ハマド 千葉大学
水野桐	能太大学
十公 佴 幻	十四十学
人谷陵祀	入阪入子
米原一帆	金沢大学
中 嶋 啓 太	広島大学
坂本恭介	金沢大学
山田夏子	大阪大学
長 編 旦 樹	官山大学
以 祀 白 闼	田田八丁
川田村之	北海道科学大学
尚 崎 倫 久	大阪大学
日比野貴郁	秋田県立大学
渡 部 千 秋	高知工科大学
生 合 麻 未	 甫 古丁 士 士 学
立 石 州 不	朱小工 朱八 1
刷	巩仮入子
胡 兵	北海道大学
滝 谷 悠 介	徳島大学
MOGES Kid	ist 北海道大学
中村大樹	東北大学
王相 済	大阪府立大学
八似 愿	大阪府立八子
没 遼 俗 乂	東北 人子
村田 峻	京都大学
佐藤 光	東京工業大学
井上俊人	大阪府立大学
齋藤 竣	東北大学
死 攸 輔	南 北大学
<u></u> 一 一 一 一 一 一 一 一 一 一 一 一 一 一 一 一 一 一 一	术 北八子 末 世上学
可田貢祎	東北大字
林 和	群馬大学
小 林 恭 輔	群馬大学
林 佑美	群馬大学
金岡恒大郎	大阪府立大学
上自 出	カ州大学
	プレバスチー
土屋朋生	東北大学
丹羽謙太郎	名城大学
早坂健太	名古屋大学
浦井拓也	大阪大学
宜澤直已	京都大学
口作巴口	かやハナ
山 凩 刈 饧	照半人子

正 員

床尾尚也	株式会社日立製作所
渡 邉 騎 通	物質·材料研究機構
北 澤 英 明	物質・材料研究機構
廣井 慧	豊田工業大学
岩田博之	愛知工業大学
加藤直樹	京都大学
藤井伸弥	北海道大学
三木友架理	大阪大学
海野亮輔	東北大学
横山龍太	横浜国立大学
萩原宏幸	大阪市立大学
米田 力	大阪市立大学
高橋佑理子	京都大学
松田夏芽	神戸大学
蓬田綾香	東北大学
西原卓郎	香川大学
内 藤 大 樹	香川大学
青 野 友 紀	東北大学
石 本 悟 志	名古屋大学
高城 藍	横浜国立大学
草分剛瑠	大阪大学
矢守圭佑	大阪大学
南 大地	大阪府立大学
樋口公計	大阪府立大学
大山 達	金沢大学
安部達彦	京都大学
大橋優生	大阪府立大学
福田一貴	熊本大学
山本 啓	大阪大学
渡邊和貴	大阪府立大学
丸山蒼太	東京工業大学
中村大輝	東京工業大学
吉田里香子	東京工業大学
新保右京	北海道科学大学
阿 部 滉 平	北海道科学大学
山田浩兵	名古屋工業大学
五十嵐健太	名古屋大学
山口勇気	名古屋大学
甲斐将史	関西大学
藤田尚也	東京大学
天野晋太郎	大阪府立大学
新田 寛和	久留米工業高等専門学校
大石和希	久留米工業高等専門学校
東園拓海	久留米工業高等専門学校
広瀬慎吾	名古屋大学
松下将輝	名古屋大学
鯵坂祐介	東京工業大学
櫻井康二	横浜国立大学
川井良太	名古屋大学
岡 孝保	大阪大学

廣井政 彦	鹿児島大学
石井明男	大阪大学
山木健大郎	
出不足 <u></u> 风印	五州十学
你 但你	几川 八 子 明 <u></u> 山十 <i>一</i>
公 毛 早 摩	明宿入子
诞日 項	果尿天子
高橋一樹	長岡技術科学大学
渡 部 恭 平	九州大学
山口 良	東海大学
高 瀬 早 桐	東海大学
関上周作	東海大学
上田恵輔	東海大学
高橋杏奈	東海大学
露木徳哉	東海大学
佐藤陽平	東北大学
北原大輔	東海大学
久間千早希	大阪府立大学
岸太勝樹	九州丁業大学
中村仁美	九州工業大学
藤尾かする	九州工業大学
减产/,《 清 藤 社 一	市海士学
速脉加	末 () () () () () () () () () (
中 川 赤 輛 洒 土 ナ 樹	水尔 二 木 八 子 カ
伯开入阀	入留木工未向寺守门子仪
尿口 坏 古井 恥	九州大子
中村 坨	果北大子 土 川工業上学
今林里貢	九州上兼大字
新貝育也	長崎大字
大里一弘	長崎大字
浦川 売 太	長崎大学
木村友美	大阪大学
須藤和也	宇都宮大学
井和丸 新	東京工業大学
雨宮太希	筑波大学
石川 遼	長岡技術科学大学
山 村 美 来	仙台高等専門学校
鍛冶田貴大	東京工業大学
宇尾直也	東京工業大学
岡本岳大	東京工業大学
緒 方 新 也	熊本大学
窪 洋志	北海道大学
栗林広延	長岡技術科学大学
伴 昭憲	名城大学
辻 村 圭 輝	名城大学
西村元秀	芝浦工業大学
稲葉正紘	芝浦工業大学
河村弘樹	芝浦工業大学
竹田雄哉	芝浦工業大学
品川室勝	能本大学
十 沢 社 쇼	東北大学
八八四月 提 書 帯	長崎大学
火 貝穴	八一 · · · · · · · · · · · · · · · · · · ·
小平 辺	以門八丁

鈴木宣好 北海道大学	上田将嗣	芝浦工業大学	田中 諒	熊本大学
田 中 悠 哉 東京工業大学	池田翔伍	神戸大学	渡 部 紘 介	茨城大学
芦田貴大 芝浦工業大学	梅 澤 道 久	名古屋工業大学	東野行広	京都大学
小谷野修平 芝浦工業大学	海住亮太	東京工業大学	河村麻莉乃	京都大学
神 矢 優 東海大学	廣 瀬 貴 昭	広島大学	阿南朋宏	長崎大学
奥 田 洋 平 北海道大学	山本 舜	東北大学	奥原雅也	東海大学
青山高士 東北大学	岡田佳寛	東京工業大学	加藤雅史	東北大学
齋 藤 広 輝 群馬大学	児 玉 勇 人	大阪府立大学	石橋一真	足利工業大学
神 尾 宗 希 宇都宮大学	高橋 智 史	岩手大学	和泉博貴	大阪大学
三 好 喬 之 九州大学	岩中拓夢	神戸大学	松永崇宏	熊本大学
大久保 学 福井大学	貴島悠右	神戸大学	小林奎太	山形大学
廣本智也 秋田大学	尾森健吾	北海道大学	小松崎 巧	早稲田大学
山 科 公 英 物質·材料研究機構	西 城 舜 哉	群馬大学	南川英輝	京都大学
渡 辺 大 海 熊本大学	森川 聡	東海大学	上村泰斗	名古屋工業大学
冨 田 龍 也 芝浦工業大学	山岸 稜	東北大学	康 少明	広島大学
松 永 直 樹 熊本大学	松木田直樹	九州工業大学	渡辺稜介	九州工業大学
鈴木成実 東海大学	村 上 裕 美	東北大学	石井義彦	長岡技術科学大学
池 田 昇 平 九州工業大学	松浦祥之	大阪大学	辻田圭吾	関西大学
山 本 浩 史 九州工業大学	井尻佑太	北海道大学	渡邉 謙	九州工業大学
高田駿士 熊本大学	安徳新之介	九州大学	八子卓矢	横浜国立大学
杉 山 貴 悟 九州工業大学	小ヶ倉勇樹	東京工業大学	坂倉 響	横浜国立大学
長 谷 貴 之 神戸大学	松 武 真 平	兵庫県立大学	蘇 航	九州大学
鈴木恵理子 北海道大学	石川 晶	兵庫県立大学	大井 梓	東京工業大学
鷲 平 拓 也 東海大学	須坂祐輔	芝浦工業大学	田中智成	九州大学
高橋慶一郎 東京都市大学	畑山 匠	秋田大学	高 橋 佳 大	関西大学
河 口 楓 北海道大学	上 川 亮 磨	北海道大学	小林佑介	九州大学
佐和雄樹 北海道大学	児島孝文	茨城大学	越場 昂	東北学院大学
宮田隼平 東海大学	田中優貴	富山大学	山田隆介	九州大学
酒 井 彦 行 愛媛大学	中村洗揮	北海道大学	福 島 悠 太	九州大学
鈴 木 利 弥 茨城大学	武 井 美 博	東海大学	山下祥平	京都大学
操 上 敬 太 東北大学	中尾ありさ	愛媛大学	森 川 喜 友	愛知工業大学
富 田 惇 喜 東北大学	中島啓介	北海道大学		
外国一般会員				
Lim Silmook Korea Polytechnic University	オーミンホ	東京工業大学	LI Chenglin	物質・材料研究機構
Baek MinSook Sunchon National University	唐 永鵬	横浜国立大学		
GEORGARAKIS Konstantinos 東北大学	SUH Byeon	gchan 物質·材料研究機構		
		-		

外国学生会員

董 千 名古屋大学 GHOLIZADEH REZA 京都大学 Li Shaohua 東北大学 サラトゥーンウン ピムペット 東京工業大学 Ko Sang-Won Korea Polytechnic University Bhuian AKM Saiful Islam 九州大学 QIANG Jian 物質·材料研究機構 周 文 冲 物質・材料研究機構

Vega Farje Juan Antonio 京都大学 LEE KwangHyeon Pusan National University 衣 立 夫 鳥取大学 DAO Chi Tue 物質·材料研究機構 武 焕 岩手大学 諸 Junho Jang Chon-buk University

張 宸 東北大学 Morrall Daniel 京都大学 VILAKAZI Siboniso 大阪大学 KIM Hyemin 名古屋大学 Kowalska Agata 物質·材料研究機構

 \Diamond \diamond \diamond

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	問合先	締切
8月 10	\$\$ 910 回潮热抽了针发达之上。「古纳南亚拉测点	口士胡姓加丁兴人	http://www.ista.co.in	一一日
10	第210回型任加工技術セミラー「高有度形状測定 の基礎(実習付き)」(長野)	日本塑性加工学会	nttp://www.jstp.or.jp	定貝 16名
16~20	The 13th World Conference on Titanium (Ti- 2015)チタン世界会議2015(サンディエゴ)	The Minerals, Me- tals and Materials Society (TMS) 新家(東北大金研)	TEL 022–215–2574 niinomi@imr.tohoku.ac.jp http://www.tms.org/meetings/2015/ Ti2015/home.aspx#.VE85Emflrcs	アブストラクト 12.15
19~20	第45回初心者のための有限要素法講習会(演習付き)第1部(京都)	日本材料学会	TEL 075–761–5321 jimu@jsms.jp http://www.jsms.jp/	8.7 定員 80名
19~20	金属第55回·鉄鋼第58回中国四国支部講演大会 (広工大)(7号372頁)	中国四国支部 · 日 野(広島工大)	TEL 082-921-4454(直通), FAX 082-921-8973(機械システム工学科事務室) taikai@me.it-hiroshima.ac.jp	参加 7.31
19~20	第7回役に立つ真空技術入門講座(大阪電気通信 大)	日本真空学会関西 支部・深沢	TEL 06-6397-2279 shinku-kansai@optomater.kuee.kyoto-u.ac.jp http://www.vacuum-jp.org/KANSAI/ kansaihome.html	7.31 定員 100名
19~21	第141回塑性加工学講座「有限要素法入門セミ ナー」(日大)	日本塑性加工学会	http://www.jstp.or.jp	定員 35名
20~21	D-RT 講習会「デジタルラジオグラフィに関す る技術講習会」(東京)	日本溶接協会 · 上 原	TEL 03-5823-6324 uehara@jwes.or.jp	
20~21	サマースクール2015in東京「非線形有限要素法に よる弾塑性解析の理論と実践」(中央大)	日本計算工学会	TEL 03-3868-8957 office@jsces.org http://www.jsces.org/	8.7
21	第7回新機能無機物質探索研究センターシンポ ジウム(東北大多元研)	東北大学多元物質 科学研究所 新機 能無機物質探索研 究センター・蔡 (東北大多元研)	TEL 022–217–5723 aptsai@tagen.tohoku.ac.jp	
23	高温変形の組織ダイナミクス研究会「平成27年度 夏の学校」(弘前)(6号300頁)	No. 76 研 究 会 紙川(弘前大)	TEL/FAX 0172–39–3671 kamikawa@hirosaki–u.ac.jp	発表7.10 参加7.24
24	2015年度 インフラ構造材料サマースクール(物 材機構)	物質・材料研究開 発機構元素戦略材 料センター・土谷	TEL 029-859-2117 TSUCHIYA.Koichi nims.go.jp	
24	第22回高校課題研究フォーラム「高校でできる セラミックス実験」(愛知)	日本セラミックス 協会	TEL 03-3362-5231 cersj-kyouiku@cersj.org http://www.ceramic.or.jp/ikyoiku/kadai_ kenkyu_forum.html	定員 20名
$24 \sim 25$	D-RT 講習会「デジタルラジオグラフィに関す る技術講習会」(大阪)	日本溶接協会・上 原	TEL 03-5823-6324 uehara@jwes.or.jp	
25~26	2015電気化学セミナー3「初心者のための電気化 学測定法―実習編」(早稲田大)	電気化学会	TEL 03-3234-4213 ecsj@electrochem.jp http://www.electrochem.jp/promotion/ index.html	
27~28	2015年度技術者継続教育「基礎コース」講習会 (神戸)	日本マリンエンジ ニアリング学会	TEL 03–3539–5920 staff@jime.jp http://www.jime.jp	
27~28	第10回水素若手研究会(福島)	水素若手研究会実 行委員会 · 青島 (筑波大)	TEL 090-2816-5709 s1420852@u.tsukuba.ac.jp http://home.hiroshima-u.ac.jp/h2wakate/ index.html	
28	第211回塑性加工技術セミナー「伸線(引抜き)加 工の基礎技術」-伸線・引抜き・矯正・潤滑-」 (関西大)	日本塑性加工学会	http://www.jstp.or.jp	定員 200名
28	2015年茨城講演会(茨城大)	日本機械学会関東 支部・道辻(茨城 大)	TEL 0294–38–5027 ibakouen@mx.ibaraki.ac.jp	
28~29	日本実験力学会2015年度年次講演会(新潟大)	日本実験力学会・ 小林(新潟大)	TEL 025–368–9310 office–jsem@clg.niigata–u.ac.jp	
31	第375回講習会「実習付き基礎講座:ベーシック 機械計測–測る・使える・わかる–」(首都大東京)	精密工学会他	TEL 03-5226-5191 http://www2.jspe.or.jp/	定員 30名
31	2015年度講習会「材料分析・評価技術活用への理 解:本質に迫るツボ〜汎用から最先端まで〜」 (東工大)(6号303頁)	関東支部 · 多賀 (東工大)	jim-kantoa@mtl.titech.ac.jp TEL 080-4833-3136	8.14 定員 60名
9月				
$1 \sim 2$	第31回分析電子顕微鏡討論会(幕張メッセ)	日本顕微鏡学会· 村上(九大)	TEL 092-802-3497 murakami@nucl.kyushu-u.ac.jp http://eels.kuicr.kyoto-u.ac.jp/bunseki2015/	
$1 \sim 3$	第9回プラズマエレクトロニクスインキュベー ションホール(静岡)	応用物理学会プラ ズマエレクトロニ クス分科会・静岡 大(松井)	TEL 053-478-1064 matsui.makoto@shizuoka.ac.jp http://annex.jsap.or.jp/plasma/PE_files/ PE_SS_2015/	7.30 定員 60名
$1 \sim 3$	第17回日本感性工学会大会(文化学園大)	日本感性工学会・ 上野	TEL 03–3666–8000 jske17@jske.org http://www.jske.org/	事前 7.17
$1 \sim 4$	第55回真空夏季大学(掛川)	日本真空学会 · 佐 久間	TEL 03-3431-4395 ofc-vsj@vacuum-jp.org http://www.vacuum-jp.org/	7.31

開催日	名称・開催地・掲載号	主催·担当	問合先	締切
$2\sim 3$	第45回初心者のための有限要素法講習会(演習付き)第2部(京都)	日本材料学会	TEL 075-761-5321 jimu@jsms.jp http://www.jsms.jp/	8.7 定員 45名
$2\sim 4$	平成27年度工学教育研究講演会(九大)	日本工学教育協 会・川上	TEL 03-5442-1021 kawakami@jsee.or.jp	5.7
5	セラミックス大学2015(CEPRO2015)(工学院大)	日本セラミックス 協会	TEL 03–3362–5231 cersj–kyouiku@cersj.org http://www.ceramic.or.jp	定員 120名
6	2015年度計算力学技術者(CAE 技術者)の資格認 定試験「上級アナリスト」(東京)	日本機械学会・石 澤	TEL 03-5360-3506 caenintei@jsme.or.jp http://www.jsme.or.jp/cee/cmnintei.htm	
6~11	XVIII International Sol–Gel Conference (Sol–Gel 2015) (Kyoto)	ISGS & J. Sol- Gel Society	TEL 075-753-2925 solgel2015@kuchem.kyoto-u.ac.jp http://kuchem.kyoto-u.ac.jp/solgel2015/	
$7 \sim 11$	12th International Conference on Superplasticity in Advanced Materials(ICSAM)2015(東大)	ICSAM2015 · 北 薗(首都大東京)	TEL 042–585–8679 kitazono@tmu.ac.jp	
8~9	キンク研究会「平成27年度研究交流会」(福岡)	No.75研究会·石 川(九大中島研)	nk–a–ishikawa@mms.kyushu–u.ac.jp	8.7
8~10	平成27年度資源·素材関係学協会合同秋季大会 (愛媛大)	資源·素材学会	info@mmij.or.jp https://confit.atlas.jp/guide/event/ mmij2015b/top	
$9 \sim 10$	第43回日本ガスタービン学会(米子)	日本ガスタービン 学会	TEL 03-3365-0095 gtsj-office@gtsj.org http://www.gtsj.org/	
11	第315回塑性加工シンポジウム「ハイブリッド 車,電気自動車に貢献できる塑性加工」(刈谷)	日本塑性加工学会	http://www.jstp.or.jp	定員 100名
11	サマースクール2015in東京「非線形有限要素法に よる弾塑性解析の理論と実践」(中央大)	日本計算工学会	TEL 03-3868-8957 office@jsces.org http://www.jsces.org/	8.7
13~14	SPring-8 シンポジウム2015「放射光が先導する グリーンイノベーション〜グローバルな視点から の発信〜」(九大)	SPring-8 ユーザー 協同体(SPRUC) 他	SPring-8 ユーザー協同体(SPRUC)事務局 TEL 0791-58-0970 users@spring8.or.jp http://www.spring8.or.jp/ja/science/ meetings/2015/sp8sympo2015	
14~15	第25回格子欠陥フォーラム「材料の強化と劣化のサイエンス」(阪大)	日本物理学会・領 域10「格子欠陥・ ナノ構造」分科・ 君塚(阪大)	TEL 06-6850-6196 kimizuka@me.es.osaka-u.ac.jp http://www.r10.div.jps.or.jp/	
16~18	第28回秋季シンポジウム(富山大)	日本セラミックス 協会・山口	TEL 03-3362-5232 fall28@cersj.org http://www.ceramic.or.jp/ig-syuki/28th/	
16~18	日本金属学会秋期講演大会(九州大学伊都キャン パス)(本号414頁)	日本金属学会	annualm@jim.or.jp(講演) TEL 022-223-3685 FAX 022-223-6312 member@jim.or.jp(参加申込)	参加 8.10
$16 \sim 20$	国際トライボロジー会議 東京 2015 (ITC TOKYO 2015) (東京理科大)	日本トライボロ ジー学会	TEL 03-3434-1926 http://itc2015.com/	
17	第3回エレクトロニクス薄膜材料研究会「電子・ 情報・エネルギー素子と機能材料の最近の研究」 (九大)(本号416頁)	研究会 No.69 · 松尾(兵庫県立大)	FAX 079–267–4907 nmatsuo@eng.u–hyogo.ac.jp	9.11
17~18	2015年度技術者継続教育「基礎コース」講習会(神戸)	日本マリンエンジ ニアリング学会	TEL 03–3539–5920 staff@jime.jp http://www.jime.jp	
18	日本金属学会・日本鉄鋼協会 第5回女性会員のつどい(九大)(本号415頁)	日本金属学会·日 本鉄鋼協会男女共 同参画合同委員 会·梅津(東北大)	rieume@imr.tohoku.ac.jp	
18	平成27年度秋期全国大学材料関係教室協議会(九 大)(本号416頁)	全国大学材料関係 教室協議会	東田賢二·九大	
18	第67回レアメタル研究会(東大生産技研)(本号 421頁)	レアメタル研究 会・宮嵜(東大生 産技研岡部研)	FAX 03-5452-6314 tmiya@iis.u-tokyo.ac.jp http://www.okabe.iis.u-tokyo.ac.jp/ japanese/index_j.html	
25	第212回塑性加工技術セミナー(プロセッシング 計算力学分科会 第50回セミナー)「微視的情報 を得るための数値解析法とそれによる材料加工解 析」(東大生産研)	日本塑性加工学会	http://www.jstp.or.jp	定員 90名
$24 \sim 25$	第6回社会人のための表面科学ベーシック講座 (東京理科大)	日本表面科学会	TEL 03-3812-0266 shomu@sssj.org http://www.sssj.org	定員 70名
28	本多光太郎記念講演会(名大)(本号420頁)	東海支部	tookai@numse.nagoya-u.ac.jp	定員180名 9.14
29 10月———	腐食防食部門委員会第306回例会(大阪)	日本材料学会	TEL 075–761–5321 jimu@jsms.jp http://www.jsms.jp	
2	本多記念講演会一金研100周年を前にして一「今 に生きる本多イズム」(仙台)(本号420頁)	公益財団法人本多 記念会・佐藤(事 務長)	TEL 022–215–2868 ma–sato@imr.tohoku.ac.jp	
$5\sim 6$	第142回塑性加工学講座「板材成形の基礎と応用 ~応用編~」(名大)	日本塑性加工学会	http://www.jstp.or.jp	定員 50名

開催日	名称・開催地・掲載号	主催·担当	問合先	締切
$5 \sim 8$	Asia Steel International Conference 2015(Asia Steel 2015)(横浜)	日本鉄鋼協会	asiasteel2015@issjp.com http://www.asiasteel2015.com	
8~9	結晶と組織の配向制御による材料高性能化研究会 (黒部)(5号250頁)	研究会 No. 67 · 井上(大阪府立大)	TEL 072-254-9316 FAX 072-254-9912 inoue@mtr.osakafu-u.ac.jp	6.30
8~10	第51回熱測定討論会(東京電機大)	日本熱測定学会	TEL 03-5821-7120 netsu@mbd.nifty.com http://chem.ru.dendai.ac.jp/jccta51/	参加予約 9.11
10	セラミックス大学2015(CEPRO2015)(東京大)	日本セラミックス 協会	TEL 03-3362-5231 cersj-kyouiku@cersj.org http://www.ceramic.or.jp	定員 120名
12~16	9th International Conference on Reactive Plasmas and 68th Gaseous Electronics Conference/33rd Symposium on Processing Plasmas (HAWAII)	応用物理学会プラ ズマエレクトロニ クス分科会	ICRP-9 Conference Office icrp9@intergroup.co.jp +81-52-581-3241	
$13 \sim 14$	第17回破壊力学シンポジウム(京都)	日本材料学会	FAX 075-761-5325 http://www.jsms.jp/	
14	第223回西山記念技術講座「表面処理鋼板の技術 展開」(東京)	日本鉄鋼協会・楢 岡	TEL 03-3669-5933 educact@isij.or.jp https://www.isij.or.jp/mu1vn1m2m	
14~16	第8回構造物の安全性・信頼性に関する国内シ ンポジウム(JCOSSAR2015)(東京)	日本学術会議・小 阪(日本機械学会)	TEL 03–5360–3505 http://www.jsme.or.jp/conference/ jcossar2015/	
15~16	2015年度技術者継続教育「基礎コース」講習会(神戸)	日本マリンエンジ ニアリング学会	TEL 03–3539–5920 staff@jime.jp http://www.jime.jp	
17	第14回 機械・構造物の強度設計,安全性評価 に関するシンポジウム(京都)	日本材料学会	FAX 075–761–5325 design14@jsms.jp http://www.jsms.jp	講演 7.3
19~20	第9回状態図・熱力学セミナー(東京)(本号420 頁)	日本学術振興会 産学協力研究委員 会 合金状態図第 172委員会・梶原 (東工大)	TEL 045–924–5635 kajihara@materia.titech.ac.jp	
19~21	第36回日本熱物性シンポジウム(東北大)	日本熱物性学会	TEL 022–217–5277 jstp@microheat.ifs.tohoku.ac.jp http://www.jstp2015.com/	
20	早稲田大学各務記念材料技術研究所オープンセミ ナー(早大)	早稲田大学各務記 念材料技術研究所	TEL 03-3203-4782 zaikenjimu@list.waseda.jp http://www.waseda.jp/zaiken/index.html	定員 150名
20~21	第60回表面科学基礎講座(阪大)	日本表面科学会	TEL 03-3812-0266 shomu@sssj.org http://www.sssj.org	10.14
21	第224回西山記念技術講座「表面処理鋼板の技術 展開」(大阪)	日本鉄鋼協会 · 楢 岡	TEL 03-3669-5933 educact@isij.or.jp https://www.isij.or.jp/mu1vn1m2m	
25~30	第10回新物質及び新デバイスのための原子レベ ルキャラクタリゼーションに関する国際シンポジ ウム(松江)	日本学術振興会マ イクロビームアナ リシス第141委員 会・永富(旭化成)	TEL 0545-62-3248 alc15@jsps141.surf.nuqe.nagoya-u.ac.jp http://alc.surf.nuqe.nagoya-u.ac.jp/alc15/	
$26 \sim 28$	第85回マリンエンジニアリング学術講演会(富 山)	日本マリンエンジ ニアリング学会	TEL 03–3539–5920 staff@jime.jp http://www.jime.jp	講演 6.25
29~30	第51回 X 線分析討論会(姫路)	日本分析化学会 X線分析研究懇 談会·村松	TEL 079-267-4929 murama@eng.u-hyogo.ac.jp	
29~31	第66回塑性加工連合講演会(いわき)	日本塑性加工学会	http://www.jstp.or.jp	
10~12	第56回高圧討論会(新潟)	日本高圧力学会	TEL 070–5658–7626 touronkai56@highpressure.jp http://www.highpressure.jp/new/56forum/	講演 7.17
11	第18回ミレニアム・サイエンス・フォーラム(東 京)	ミレニアム・サイ エンス・フォーラ ム	TEL 03-6732-8966 msf@oxinst.com http://www.msforum.jp/	
11~13	The Joint Conference of HSLA Steels 2015, Microalloying 2015, OES 2015 (Hangzhou, Zhejiang Province, P. R. CHINA)	CSM,CAE (The Chinese Society for Metals Mr. WANG Lei and Mrs. LIU Fang)	Tel +86-10-65211205 or 65211206 Fax +86-10-65124122 hslasteels2015@csm.org.cn	
13	第67回白石記念講座「新しい世紀の形態計量学 一数学と鉄鋼研究のコラボレーションー」(早大)	日本鉄鋼協会 · 楢 岡	TEL 03–3669–5933 educact@isij.or.jp https://www.isij.or.jp/muwuv846u	
14	セラミックス大学2015(CEPRO2015)(上智大)	日本セラミックス 協会	TEL 03–3362–5231 cersj–kyouiku@cersj.org http://www.ceramic.or.jp	定員 120名
16~18	第28回国際超電導シンポジウム(ISS2015)(東京)	国際超電導産業技 術研究センター	TEL 044-850-1612 iss@istec.or.jp http://www.istec.or.jp/ISS	
19~20	第20回アコースティック・エミッション総合コ ンファレンス(名古屋)	日本非破壊検査協 会・中村	TEL 03-5609-4015 nakamura@jsndi.or.jp http://www.jsndi.jp/	参加 10.16

開催日	名称・開催地・掲載号	主催·担当	問合先	締切
21~22	軽金属学会第129回秋期大会(日本大)	軽金属学会	TEL 03–3538–0232 jilm1951@jilm.or.jp http://www.jilm.or.jp/	予約申込 10.15
24~27	第2回東アジア顕微鏡学会議(EAMC2)(姫路)	日本顕微鏡学会他	TEL 03-5389-6640 eamc2@microscpy.or.jp http://www.eamc2.org/	
25~27	第41回固体イオニクス討論会(北大)	日本固体イオニク ス学会・幅崎(北 大)	http://labs.eng.hokudai.ac.jp/labo/ elechem/41thsolidionics/	
27	第68回レアメタル研究会(東大生産技研)(本号 421頁)	レアメタル研究 会・宮嵜(東大生 産技研岡部研)	FAX 03-5452-6314 tmiya@iis.u-tokyo.ac.jp http://www.okabe.iis.u-tokyo.ac.jp/ japanese/index_j.html	
27~29	ISETS '15エコトピア科学に関する国際シンポジ ウム2015(名大)	名古屋大学エコト ピア科学研究所・ 和久(名大内山研)	FAX 052-789-4219 m-waku@esi.nagoya-u.ac.jp http://www.esi.nagoya-u.ac.jp/h/isets15/	
12月				Γ
1~3	2015年真空・表面科学合同講演会 第35回表面 科学学術講演会・第56回真空に関する連合講演 会(つくば)	日本表面科学会, 日本真空学会	taikai15@sssj.org http://www.sssj.org ofc-vsj@vacuum-jp.org http://www.vacuum-jp.org/	
$2\sim 4$	第42回炭素材料学会年会(関西大)	炭素材料学会	FAX 03-3368-2827 tanso-desk@bunken.co.jp	講演 8.17
$2 \sim 4$	第36回 超音波エレクトロニクスの基礎と応用 に関するシンポジウム(韓国・釜山)	超音波エレクトロ ニクス協会・小野 寺(東工大)	TEL 045-924-5598 onodera@iuse.or.jp http://www.use-jp.org	講演 8.3
$2 \sim 4$	EcoDesign 2015国際会議(9th InternationalSymposium on Environmentally Conscious Design and Inverse Manufacturing)(東京)	エコデザイン学会 連合他・高橋(東 大)	TEL 03-5841-6499 ecodesign2015_secretariat@ecodenet.com	
$3 \sim 4$	電気加工学会全国大会(2015)(徳島)	電気加工学会·溝 渕(徳島大)	TEL 088-656-9741 a-mizobuchi@tokushima-u.ac.jp http://www.jseme.or.jp/	
18~20	TWENTY-FOURTH International Symposium on PROCESSING AND FABRICATION OF AD- VANCED MATERIALS [PFAM XXIV] (12.18– 20) (Osaka university)	Kansai Universi- ty · Prof. Ikeda (Kansai Univ.)	http://pfam24.jp/	
19	平成27年度 高専女子フォーラム in 東北(仙台)	国立高等専門学校 他	TEL 022-391-5537 gakumu@sendai-nct.ac.jp http://www.kosen-k.go.jp/kosengirl/ jyoshi-forum/	
19	2015年度計算力学技術者(CAE 技術者)の資格認 定「1・2 級」試験・講習会(東京)	日本機械学会・石 澤	TEL 03–5360–3506 caenintei@jsme.or.jp http://www.jsme.or.jp/cee/cmnintei.htm	
1月(2016年	E)			
8	第69回レアメタル研究会(東大生産技研)(本号 421頁)	レアメタル研究 会・宮嵜(東大生 産技研岡部研)	FAX 03-5452-6314 tmiya@iis.u-tokyo.ac.jp http://www.okabe.iis.u-tokyo.ac.jp/ japanese/index_j.html	
23	第21回高専シンポジウム in 香川(丸亀)	高専シンポジウム 協議会,香川高等 専門学校	TEL 0875-83-8506 esyomu@t.kagawa-nct.ac.jp http://www2.es.kagawa-nct.ac.jp/ sympo21/	
т <u>и</u> л. 15	KAST 教育講座「去本刑プローブ顕微鏡の是新	抽奏川科学は海マ	TFL 044-819-2033	完昌
38	活用術」(川崎)	カデミー	takagi@newkast.or.jp	20名
11	第70回レアメタル研究会(東大生産技研)(本号	レアメタル研究	FAX 03-5452-6314	
	421頁)	会·宮嵜(東大生 産技研岡部研)	tmiya@iis.u-tokyo.ac.jp http://www.okabe.iis.u-tokyo.ac.jp/ japanese/index_j.html	
23~25	日本金属学会春期講演大会(東京理科大学葛飾キ ャンパス)	日本金属学会	annualm@jim.or.jp TEL 022–223–3685 FAX 022–223–6312	



•2015年秋期講演大会および懇親会参加申込みについて; インターネット予約申込み,事前支払い期日:<u>8月10日(月)</u>です.

- •永年会員制度については、本号416頁をご覧下さい.
- PRICM9(第9回環太平洋先端材料とプロセシング国際会議);
 Abstruct Submission開始しております.ホームページをご覧下さい.

増補改訂 量子分光化学 分光分析の基礎を学ぶ

本書は、分光分析法の基礎を学ぶために書かれたものであり、初 期量子論や量子論の発達に関する文献が引用されている.量子論に 関する基本的な考え方が述べられており、それらは幾つかの分光分 析法の原理に関係している.各章の終わりには、各章の内容に関係 した新旧の多くの参考文献や参考書が記載されている.一方、各章 の冒頭には、19世紀終わりから20世紀のはじめにかけて活躍した ポアンカレの「科学の仮設」、「科学の価値」「科学の方法」の和訳 の文章が引用されている.その時代から発展してきた量子論の考え 方が、分光分析法の基礎となっていることを示唆している.

たとえば、本書では励起水素原子の線スペクトルの話が出てくる が、これは発光分光法の基礎であり、調和振動子に関する話はプラ ズモン損失スペクトル等に関係している.また、分子軌道における 電子配置に関する話は光電子分光法やX線吸収分光法に関連して おり、分子の回転の量子化は赤外分光法等に関係している.さら に、様々なスペクトルを検討するときには化学結合の対称性が重要 河合 潤 著

であり、それらに関する角運動量等についても記述されている.こ のように、多くの分光分析法を学ぶときには量子論的な考えが必要 であり、その基礎となる演習問題も示されている.本文では、用語 等の語源やオリジナリティにも配慮して記述されているのも興味深 い.

本書では各分光分析法の具体的な内容についてはあまり取り上げ られていないが、スペクトルの発現等を理解する上では参考になる 書籍といえる.本書を読むと、量子論的な考えが各分光分析法にお いて重要であることをあらためて感じさせられる.最近の分析分野 の書籍では表面的なスペクトルの記述に留まっていることが多い が、本書には様々な分光分析法を利用するときに基礎を学んでほし いという、著者の思いが込められているようである.ご一読を勧め たい.

(鈴木茂 東北大学多元物質科学研究所) [2015年 A5判 140頁 2,400円+税 アグネ技術センター]



$\left(\right)$		2015,	2016年度会報	報編集委員会	(五十音順,敬称					
	委 員 長 副 委 昌 長	御手洗容子 大 塚 誠								
	委員	赤瀬善太郎 梅 津 理 恵	浅 野 耕 太 大 津 直 史	池 田 賢 一 大 野 直 子	池 田 大 亮 大場洋次郎	石 本 卓 也 大 森 俊 洋	上 田 恭 介 北 村 一 浩			
		小泉雄一郎 杉 浦 夏 子	齊 藤 敬 高 芹 澤 愛	佐 藤 和 久 千 星 聡	佐 藤 幸 生 染 川 英 俊	下 島 康 嗣 高 橋 淳	下 田 一 哉 高 林 宏 之			
		滝沢 聡多根正和	竹田 修田村友幸	武田雅敏	田中真悟 堤 祐介	田中秀明寺田大将	田中康弘 寺西 亮			
		戸高義一 堀内寿晃	中村貴宏 堀部陽一	長谷川 誠 本間智之	晶山賢彦 松尾元彰	藤枝 俊 水本将之 山室生*	府山伸行 宮岡裕樹 株田知之			
		利 石 信 二 湯 蓋 邦 夫	森 户 春 彦 吉 矢 真 人	和田 武	山 田 尚 広 渡 辺 博 行	山至佐盆	傾田省之			
まてりあ第54巻第8号(2015) 定価(本体1,700円+税)〒120円 佐間地間購詰切合52,400円(税)ご約約11)										
	平间破闲期就科查32,400円\忧·达科达/ 莽行所 公益社団法人日木全尾堂会									
	〒980-8	3544 仙台市青葉	这一番町一丁目	14-32 発行	人 山村英明	-				
	TEL 022-223-3685				所小宮山印刷工業株式会社					
FAX 022–223–6312					所 丸善株式会社					
	郵便振替口座 02210-2-5592 〒 105-0022 東京都港区海岸 1-9-18									





AES

1

Sのオージェマップ

H -38

走査型オージェ電子分光分析装置 Auger Electron Spectroscopy PH 710 Scanning Auger Nanoprobe

CMA 型 AES

- 高感度・高スループット分析
- 電流値1nA(オージェ分析可能)で AES 分解能≦8 nm
- 高エネルギー分解能測定 (CMA 使用)

SEM 分解能 ≦3 nm, AES 分解能 ≦8 nm



グラファイト上の金粒子における SEM分解能測定(25 kV 0.2 nA)

SEM像



ダクタイル鋳鉄割断面の粒界介在物の分析



https://www.ulvac-phi.com