

# Materia Japan

- 次世代生体材料開発に向けた設計指針の構築
- 亀裂先端転位と脆性-延性遷移挙動
- 整数論的手法による粒界原子構造予測

まてりあ

Vol.56 MTERE2 56 (10) 583~626 (2017)

2017 **10**

# 弾性定数 $C_{ij}$ 測定の実況と今後

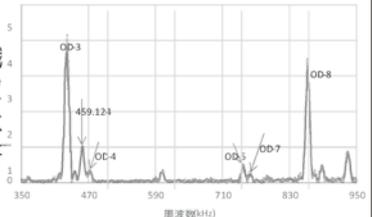
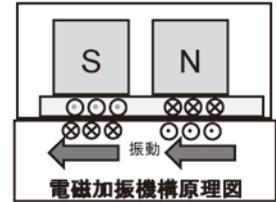
弾性定数(弾性スティフネス  $C_{ij}$ )の測定法は数種類あります。新素材開発時点で要求される小試料測定で最適な装置が電磁超音波共鳴(EMAR)式弾性率、弾性定数測定装置 CC II シリーズです。従来の RUS 法に比べて振動モードを特定して測定できることから、弊社では測定の可能性を以下のように順次拡大しています。

結晶構造：立方晶→正方晶→六方晶→斜方晶→多結晶

試料形状：立方体→直方体→円柱→小円薄板

試料材質：磁性金属→比磁性金属→セラミックス→樹脂→木材

この進展には測定子構造、振動発生機構、解析手法などが複雑に絡んでいますが、材料組織と弾性の基本技術を高度に意識しながら解析する必要があります。組織構造のわずかな変化、不純物の混入などによる力学定数の変化から組織構造などを解明する方向への研究にも利用されそうな予測があります。これらの前進には材料の最先端研究者と装置メーカーとの連携は欠かせません。ぜひとも最先端研究においてご利用いただきつつ、ご指導いただきますと幸甚です。



10φ × 2mmt アルミ合金の振動

**$C_{ij}$  測定は力学特性から組織解明を可能に**

## 電磁超音波共鳴式 弾性率・弾性定数装置 CC II - シリーズ

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

CC2-HT



**弾性率と内部摩擦の高温測定で最高の装置**

## 高温弾性率等同時測定装置 EG-HT

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



**室温や比較的低温で最も信頼性の高い装置**

## 自由共振式弾性率、内部摩擦測定装置 JE-RT (ヤング率) & JG-RT (剛性率)

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

JE-RT  
& JG



**他の試料形状や測定目的に対応**

## その他の製品

- ▼ 薄板・細線用弾性率測定装置 TE, TG シリーズ
- ▼ 縦共振式ヤング率測定装置 VE シリーズ
- ▼ 圧電共振式弾性定数測定装置 CC シリーズ
- ▼ インパクト式ヤング率測定装置 IE シリーズ
- ▼ 強制振動式内部摩擦測定装置 MS シリーズ  
(メカニカルスペクトロメータ)
- ▼ 共振式薄板疲労試験装置 RF シリーズ

IE, VE を除き、  
高温用 (\*\*-HT) あります。

RF-RT



共振法応用の弾性率や内部摩擦等の物性測定・試験・計測装置の開発専門企業

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

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

# 10

2017  
Vol.56  
No.10

# まてりあ

◎ 会告原稿締切：毎月1日



翌月号(1日発行)掲載です。

- 支部行事：[shibu@jim.or.jp](mailto:shibu@jim.or.jp)
- 本会記事：[stevent@jim.or.jp](mailto:stevent@jim.or.jp)
- 掲示板：[materia@jim.or.jp](mailto:materia@jim.or.jp)

巻頭言 日本金属学会ビジョンの公表 中島英治 .....583

最近の研究 次世代生体材料開発に向けた設計指針の構築  
当代光陽 石本卓也 松垣あいり 中野貴由 .....584

新しい設計指針および製造プロセスによる単結晶インプラントや生体用ハイエントロピー合金といった次世代生体材料開発について紹介。

整数論的手法による粒界原子構造予測 井上和俊 斎藤光浩 小谷元子 幾原雄一 .....589

粒界周期構造と有理数分布の密接な関係を、原子分解能STEMによる原子構造解析に基づき整数論的視点から概説。

亀裂先端転位と脆性-延性遷移挙動 田中将己 定松 直 東田賢二 .....597

破壊現象を亀裂先端近傍での転位運動と結びつけて理解しようとする応力遮蔽効果に関する実験結果を紹介。

新進気鋭 希土類系金属ガラスにおける動的緩和挙動の支配因子 山崎由勝 .....604

新技術・新製品裏話 開発裏話～構造用素材として優れたコストパフォーマンスを持つ省合金型二相ステンレス鋼(NSSC®2120)の開発  
及川雄介 柘植信二 江目文則 本村 洋 井上裕滋 .....608

研究室紹介 先進加工プロセスを用いた機能性金属材料の開発をめざして 武内 孝 .....610

学会・研究会だより 医歯薬工連携による骨形態計測学の新たな展開  
～第37回日本骨形態計測学会を開催・参加して～ 石本卓也 .....611

本会記事 会告 .....612 次号予告 .....621  
支部行事 .....615 新入会員 .....621  
金属学会セミナー .....617 行事カレンダー .....622  
掲示板 .....618 書評 .....625  
会誌・欧文誌10号目次 .....620

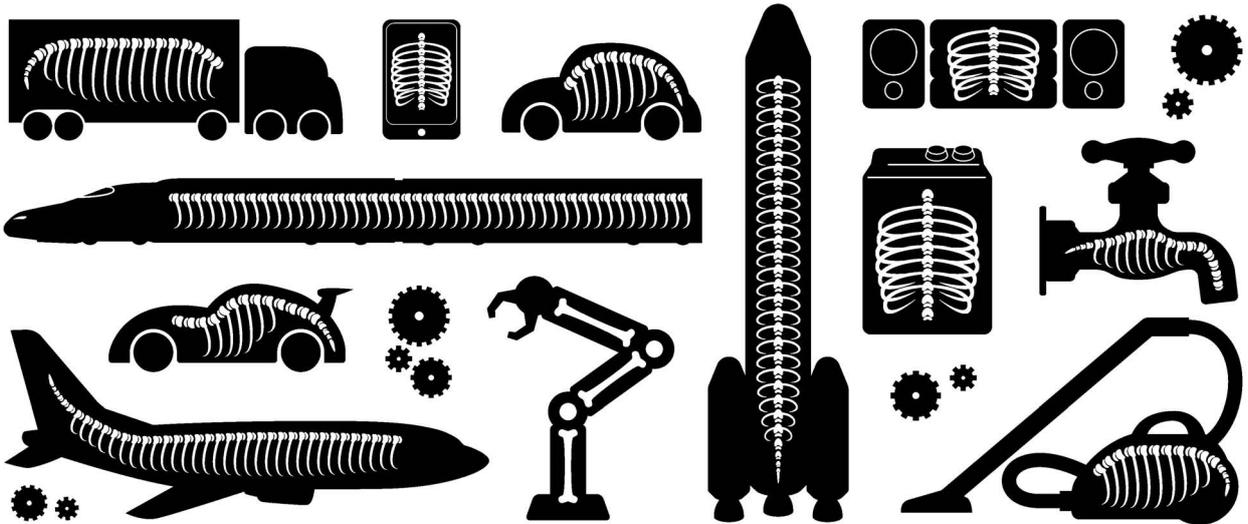
会誌・欧文誌・まてりあの投稿規定・投稿の手引・執筆要領、入会申込書、刊行案内はホームページを参照下さい。  
<http://jim.or.jp/>

表紙デザイン：北野 玲  
複写をご希望の方へ

本会は、本誌掲載著作物の複写に関する権利を一般社団法人学術著作権協会に委託しております。本誌に掲載された著作物の複写をご希望の方は、(一社)学術著作権協会より許諾を受けて下さい。但し、企業等法人による社内利用目的の複写については、当該企業等法人が社団法人日本複写権センター((一社)学術著作権協会が社内利用目的の複写に関する権利を再委託している団体)と包括複写許諾契約を締結している場合にあっては、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](mailto:info@jaacc.jp) <http://www.jaacc.jp/>  
複写以外の許諾(著作物の引用、転載、翻訳等)に関しては、直接本会へご連絡下さい。

外からは見えませんが、骨のある会社です。



多彩なフィールドで、フロンティアを目指しています。

大同特殊鋼の素材は、暮らしや産業を支える多彩な製品や部品に使われています。

私たちはこれからも、素材の力で新たな価値創造に貢献していきます。



## 日本金属学会発行誌 広告のご案内

### まてりあ（会報）

前付) 1色1P ￥100,000 1/2P ￥60,000

後付) 1色1P ￥95,000 1/2P ￥55,000

※表紙回り、カラー料金等お問い合わせ下さい。

### 春・秋期講演大会プログラム

後付) 1色1P ￥70,000 1/2P ￥40,000

広告ご掲載についてのお問い合わせ・お申込み

株式会社 明報社

〒104-0061 東京都中央区銀座7-12-4 友野本社ビル

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

E-mail info@meihosha.co.jp HP www.meihosha.co.jp



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。



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

## 精密切断機 MINICUT 4000

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



## 試料埋め込み材料、アクセサリ



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

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

## 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

# 遊星型ボールミル “PREMIUM LINE”

## モデル P-7 **新型**



### 特色

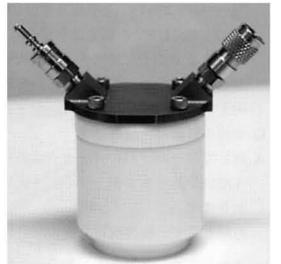
1. 従来弊社P-7と比べて250%の粉碎エネルギーUP。  
自転公転比：1：-2. Max 1,100/2200rpm  
粉碎エネルギー：Max 94G(現状P-7：46.08G)
2. 容器は本体内に。  
外部に飛び出す危険は無し。
3. 搭載容器も20, 45, 80ml  
の3種類。  
材質は従来どおり多様。  
雰囲気制御容器も  
各種用意。



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。



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。



▲P-5/4

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



▲P-6

少量試料を対象にした  
パワフルな機種



▲P-7

### 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、湿式の両粉碎も可能。
- 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

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



## 日本金属学会ビジョンの公表

本会は、今年で創立80周年を迎えました。これを機に本会の目的を再確認し、より具体的なビジョンとしてまとめましたので、公表いたします。今後このビジョンを指針として、各事業のあるべき姿や目標を明確化し、アクションプランを策定・実施していきます。

公益社団法人日本金属学会  
会長 中島 英治

### 日本金属学会ビジョン

公益社団法人日本金属学会は、金属及びその関連材料の学術および科学技術の振興に関する事業を通じて公益の増進に寄与することを目的に設立され、優れた研究や技術に関する情報発信、優秀な人材の育成、後世への技術の継承などを行う学術団体である。その具体的な学会像を以下に記す。

- 1. 未来を先導する領域を開拓し、世界の材料科学・工学をリードする**  
材料科学・工学における未来を先導する先端領域、学際領域の科学技術課題を討論する研究会を主催し、新領域を開拓するとともに、国際的かつ長期的視点から当該分野をリードする学会
- 2. 最新の研究や技術を世界に発信する**  
金属及びその関連材料に関する最新の研究や技術を世界に発信し、会員のプレゼンスの向上を図る学会
- 3. 多様な研究者・技術者が集い、最新の研究や技術の交流を図る**  
学界・産業界の多様な研究者・技術者が最新の研究成果や技術を発表・討論する場を提供し、知識や技術の水準を高める交流や情報交換を図る学会
- 4. 次世代を担う人材の教育や育成を行なう**  
金属及びその関連材料に関する基礎学理から先端領域までの学術や技術の幅広い教育を通じて、優れた工学技術の継承や人材育成を行う学会
- 5. 会員や地域・社会のニーズに対応したサービスを提供する**  
会員や地域・社会のニーズを深く理解し、ニーズに応じて金属及びその関連材料に関する情報や支援などのサービスを提供する学会

# 次世代生体材料開発に向けた 設計指針の構築

當代光陽<sup>1)\*</sup>\*\* 石本卓也<sup>2)</sup> 松垣あいら<sup>2)</sup> 中野貴由<sup>3)</sup>

## 1. はじめに

近年の超高齢社会の到来に伴い、生体材料の重要性ならびに市場規模は膨らむ一方である。高齢者の人口増加は骨折疾患や骨疾患罹患患者の増大につながり、このことは骨折用インプラントなどに応力遮蔽を発現さないような骨類似力学機能を具備させ、骨修復後の抜去を必要としない次世代の骨代替材料の開発を要請している。応力遮蔽とは、応力がインプラントに優先的に負荷され、骨自体への応力負荷が低減される現象であり、結果として、骨吸収や骨密度の低下、さらにはアパタイト配向性に代表される骨質の劣化が生じる<sup>(1)</sup>。

これまで生体インプラント用構造材料には $(\alpha+\beta)$ 型 Ti 合金である Ti-6Al-4V 合金が広く利用されてきたが、この合金のヤング率は約 110 GPa であり、生体皮質骨のヤング率約 30 GPa の 3 倍以上の値を示す<sup>(2)</sup>。従って、より低ヤング率を示すチタン合金が求められている。こうした中、室温にて bcc 構造を有する  $\beta$  型 Ti 合金は Ti-6Al-4V 合金に比べて良好な加工性を有しつつ低ヤング率を示すため、力学的信頼性を担保し、かつ生体毒性の少ない元素から構成される低ヤング率  $\beta$  型 Ti 合金の研究および開発が近年盛んに行われている。Ti-Nb-Ta-Zr 合金などはその一例である<sup>(3)</sup>、こうした合金開発はその組成選択や組織を巧みに制御しなければならず、高度な知識とノウハウが必要となる。

このため、我々の研究グループでは、より系統的かつ定量化された低ヤング率を有する  $\beta$  型 Ti 合金の設計指針の構築を目指し研究を行ってきた。本稿では筆者らの一連の研究のうち、 $\beta$  型 Ti 合金単結晶の低ヤング率化に向けた設計指針構築から Ti-15Mo-5Zr-3Al 合金単結晶インプラントの開発と積層造形法を用いた製造プロセス戦略についての概要に加えて、生体用ハイエントロピー合金に関する最近の研究結果について紹介する。

## 2. $\beta$ 型 Ti 合金の低ヤング率化に向けた設計指針構築

低ヤング率を有する  $\beta$  型 Ti 合金の設計にあたっては変位型の構造相転移を示す母相 (bcc 相) が特定の組成域にて相安定性の低下を示し、これに起因した弾性スティフネス定数の軟化が発現することに注目しつつ、さらに単結晶化することで特定方位において大きなヤング率の低減が発現すると着想し、本研究を進めた。

まず、種々の  $\beta$  型 Ti 合金における相安定性に起因した弾性スティフネス定数を一定の変数にて系統的に記述するため、1 原子あたりの価電子数 ( $=e/a$ ) を変数として選択し、すでに報告されている種々の  $\beta$  型 Ti 合金単結晶における弾性スティフネス定数を整理したところ (図 1)、室温での単結晶体における弾性スティフネス定数と異方性因子は添加元素によらず、統一的に記述できることを見出した<sup>(4)(5)</sup>。ここで注目すべきは、図 1 に示すように弾性スティフネス定数  $C'$  ( $\{110\}$  面における  $\langle 1\bar{1}0 \rangle$  方位へのシアーに対応) は  $e/a$  の減少にともない軟化し、その一方で弾性スティフネス定数  $C_{44}$  は  $e/a$  に対して大きな変化を示さないことである。 $C'$  の軟化は式 (1) より  $\langle 001 \rangle$  方位へのヤング率 ( $E_{001}$ ) の低減をもたらす。

$$E_{001} = \frac{9}{1/B+3/C'} = \frac{(C_{11}-C_{12})(C_{11}+2C_{12})}{C_{11}+C_{12}} \quad (1)$$

式 (1) 中において  $C_{11}$ ,  $C_{12}$ , は立方晶系において独立な弾性スティフネス定数であり、 $B$  は体積弾性率を示す。加えて、図 1(a) に示されるように非熱的  $\omega$  が析出すると  $C'$  の軟化を阻害し、 $\beta$  相単相におけるスティフネス定数の  $e/a$  依存性曲線からは外れ、増加する。すなわち、 $e/a$  の減少と  $\omega$  相抑制の 2 条件を満たすことで、 $C'$  の低下に代表される格子軟化を示す  $\beta$  相を出現させ、このことが  $\langle 001 \rangle$  方位に低ヤング率を示す  $\beta$  型 Ti 合金単結晶の設計を可能とする<sup>(5)</sup>。この設計指針に基づくと、 $e/a$  が 4.10 と低く、室温にて  $\omega$  相が抑制

\* 大阪大学大学院工学研究科マテリアル生産科学専攻；1)助教 2)准教授 3)教授 (〒565-0871 吹田市山田丘 2-1)

\*\* 現 新居浜工業高等専門学校環境材料工学科；准教授 (〒792-8580 新居浜市八雲町 7-1)

Design of the Next Generation Metallic Biomaterials; Mitsuharu Todai<sup>\*,\*\*</sup>, Takuya Ishimoto<sup>\*</sup>, Aira Matsugaki<sup>\*</sup>, Takayoshi Nakano<sup>\*</sup> (\*Division of Materials and Manufacturing Science, Graduate School of Engineering, Osaka University, Suita. \*\*Department of Environmental Materials Engineering, Niihama Institute of Technology, Niihama College, Niihama)

Keywords: biomaterials, Be-ta Ti alloys, single crystal, additive manufacturing (AM), high entropy alloys (HEA)

2017年 7月12日受理 [doi:10.2320/materia.56.584]



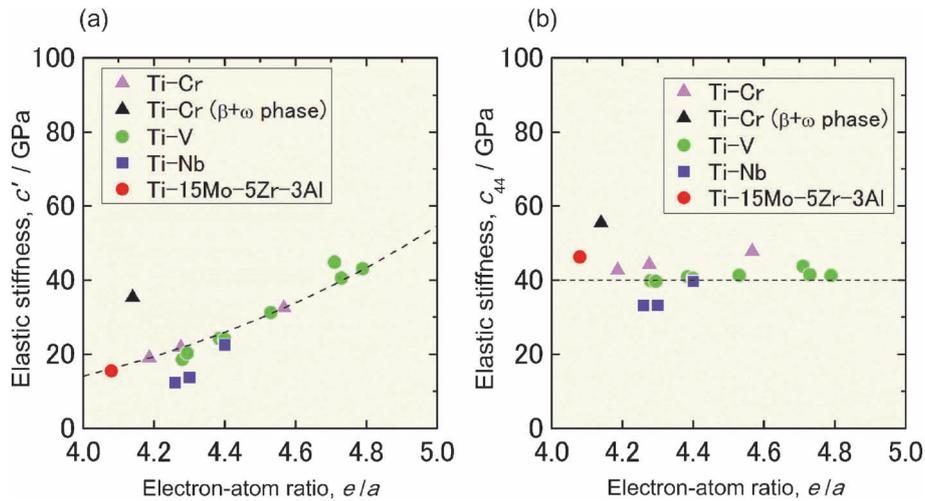


図1 種々のβ型Ti合金単結晶が有する弾性スティフネス定数の $e/a$ 依存性<sup>(4)(5)</sup>。記載している各合金の組成はTi-(7~28.5 at%)Cr, Ti-(28~79 at%)V, Ti-29Nb-13Ta-4.6Zr(mass%), Ti-30 at%Nb, Ti-40 at%Nb。(オンラインカラー)

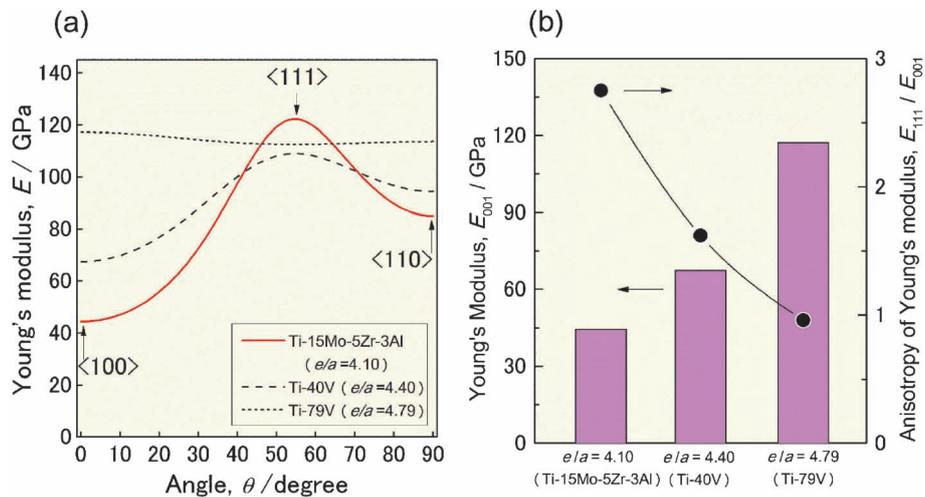


図2  $e/a$ が異なるβ型Ti合金単結晶が示す(a)ヤング率の方位依存性<sup>(5)</sup>, (b)  $E_{001}$ およびヤング率の異方性。(オンラインカラー)

され、さらにISOによりすでに認証を受けているTi-15Mo-5Zr-3Al合金は、生体材料として、単結晶体における<001>方位へのヤング率低減が期待できる。そこで、本合金単結晶を浮遊帯溶融法(Floating Zone method; FZ法)にて育成速度2.5 mm/hにて育成した。育成した単結晶中には非熱的 $\omega$ の析出が皆無であることを透過型電子顕微鏡観察により確認した後、弾性スティフネス定数を測定した。その結果を先に示した図1にプロットすると、上述の予想通り、 $C'$ の軟化が確認でき、このことが $e/a$ の低いβ型Ti合金において強いヤング率の異方性を発現させるとともに、式(1)より $E_{001}$ が44.4 GPaまで低減することが明らかとなった(図2)。ここで $E_{001}$ と式(2)に示すHill近似<sup>(6)</sup>によって予測される多結晶体におけるヤング率 $E_H$ との比 $E_{001}/E_H$ は約0.5であり、このことから単結晶化によって多結晶体のヤング率から約50%もその値を低減させることに成功したといえる。

$$E_H = \frac{1}{2} \left\{ \frac{9}{1/B + 15/(2C' + 3C_{44})} + \frac{5}{5/(9B) + 2/(3C') + 1/C_{44}} \right\} \quad (2)$$

ここで、式(2)において $C_{44}$ ,  $C'$ はそれぞれ弾性スティフネス定数を、 $B$ は体積弾性率を示している。

### 3. 単結晶ポーンプレートの開発

前節の結果より、2条件からなる合金設計指針に基づいて、すでにISOにより認証を受けているβ型Ti合金であるTi-15Mo-5Zr-3Al(mass%)合金を用いて<001>方位のヤング率を生体骨程度まで低減させることに成功した。このことは、Ti-15Mo-5Zr-3Al合金単結晶における<001>方位を選択的に骨の荷重軸方向に合致させることで、応力遮蔽を抑制可能な低ヤング率インプラントの開発を可能とすることを意味している。単結晶ポーンプレートは荷重軸方向である長手方向に最も低ヤング率となる<001>方位が合致するよう設計

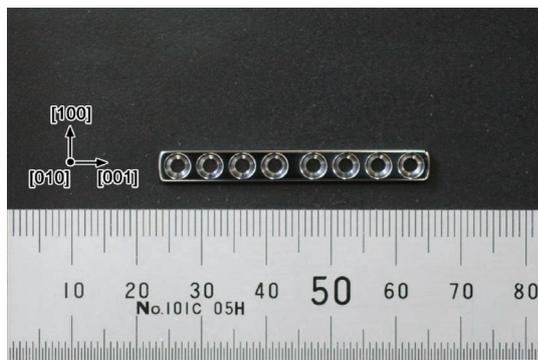


図3 Ti-15Mo-5Zr-3Al合金を用いた単結晶インプラントの外観<sup>(7)</sup>。(オンラインカラー)

する必要があるため、あらかじめ{001}面を切り出した単結晶シードに種付けすることで成長方位が<001>方位となる直径約15 mm、長さ約180 mmの単結晶を育成した。単結晶育成前後における余分な酸素の混入は0.01 mass%以下に収まっており、かつ合金組成の変化が最も変動したAlでさえ0.2 mass%にとどまることを確認し、育成前後における酸素混入と組成変動を最小限にとどまることを確認した。非熱的 $\omega$ の抑制を透過型電子顕微鏡にて確認し、以上より成長方位が<001>方位かつ、単結晶ボンプレートの切り出しが可能である単結晶の作製に成功した。その後、背面ラウエ法による結晶方位同定後、低ヤング率を示す<001>方位を長手方向とするような板材を3軸ゴニオメータと放電加工機を用いて切り出し、さらにこの板材に穴あけ加工した後、残留歪の除去のため、試料全面にて研磨を施し、図3に示すような長さ42 mm、幅5 mm、厚さ1.2 mm、 $\phi=2.2$  mmのスクリュウ孔を8つ備えた単結晶ボンプレートの作製に成功した<sup>(7)</sup>。この低ヤング率ボンプレートの有用性については現在調査している。

#### 4. AMを利用した次世代構造材料の設計

前節の通りFZ法を用いての単結晶インプラントの開発には成功した。次の課題は単結晶育成時のコストを削減することやボンプレートに複雑な形状の付与、すなわちカスタムメイド化が挙げられる。FZ法によって方位制御した $\beta$ 型Ti合金単結晶の育成や単結晶の加工には高度な技術が必要であり、このことを解決するため、レーザー積層造形法(Selected laser melting; SLM)を用いた $\beta$ 型Ti合金の結晶配向化制御に取り組むこととした。

金属粉末を用いた金属積層造形法(Additive manufacturing; AM)は近年急速に注目を集めており、とりわけ、カスタムインプラントへの応用を目指したCo-Cr合金、Ti合金と難加工耐熱材料であるNi基超合金、TiAl金属間化合物などについての研究が盛んに行われている。図4に示すように積層造形法は所望の形状の3次元CADデータを作成し、そのデータをスライスした2次元データに加工する。このデータをもとに、ベースプレート上に原料粉末の散布と、レーザーや電子ビームによる熱源を用いて2次元スライスデータ

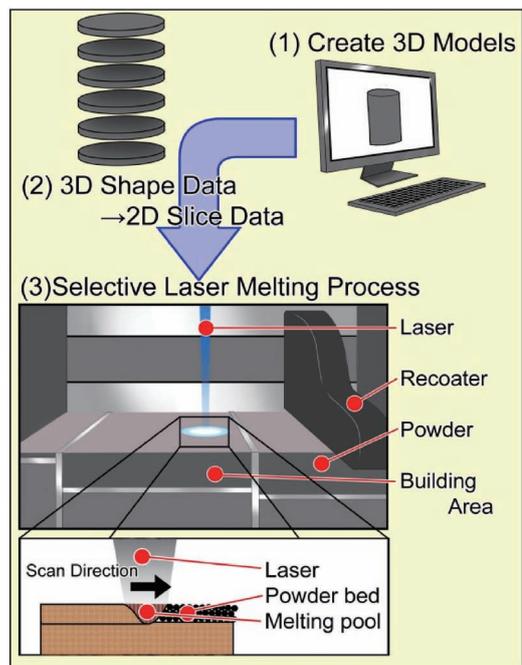


図4 レーザ積層造形法における各工程の模式図。(オンラインカラー)

の形状に対応した箇所の粉末を溶融および凝固させる工程を交互に繰り返すことで、三次元の造形体を得る新規プロセスである。このプロセスはこれまでの切削等のプロセスでは実現できなかった複雑形状を難加工材料でも可能とすることから注目を集めている。しかしながら、筆者らの研究グループでは形状付与のみにとどまらず、積層造形時における局所的溶融や熱流方向を利用して、内部組織までも制御し、金属積層造形法ならではの形状と材質の同時制御を、多種多様な材料<sup>(8)-(10)</sup>において俯瞰的に設計する新たな学理構築を目指している。例えば航空機タービンブレード用のTiAl金属間化合物に関して電子ビーム積層造形法を用い、形状の付与と金属積層造形法特有の局所的熱処理によるDuplex組織と $\gamma$ バンドが交互に並んだ特異層状組織の形成を見出し、この特異組織の異方性を利用することで2%以上の室温延性の改善に成功している(図5)<sup>(11)</sup>。

生体材料は製品個々で求められる形状は異なり、個体や埋入部に合わせて最適な形状を素早く生産することが求められる。このため積層造形プロセスは、複雑形状を有するカスタマイズされた少量多品種のインプラントを迅速に製造可能であるため、Ti合金を対象として多くの研究および開発がなされている。金属積層造形法を用いて、合金造形体を作製する場合、合金化した原料粉末をあらかじめ準備しなければならず、このことが自由に組成を選択して合金造形体を作製することを困難にする一要因となっている。ここでもし、純金属粉末から所望の合金組成になるよう混合粉末を作製し、造形時に合金化も同時に達成できたならば、選択できる組成が飛躍的に拡大すると考えられる。このことはすなわち、第2節で述べたように $\beta$ 型Ti合金における $e/a$ を自在に変化できることを意味している。加えて、結晶集合組織を制御し、低ヤング率が発現する<001>方位を荷重軸に合致するように

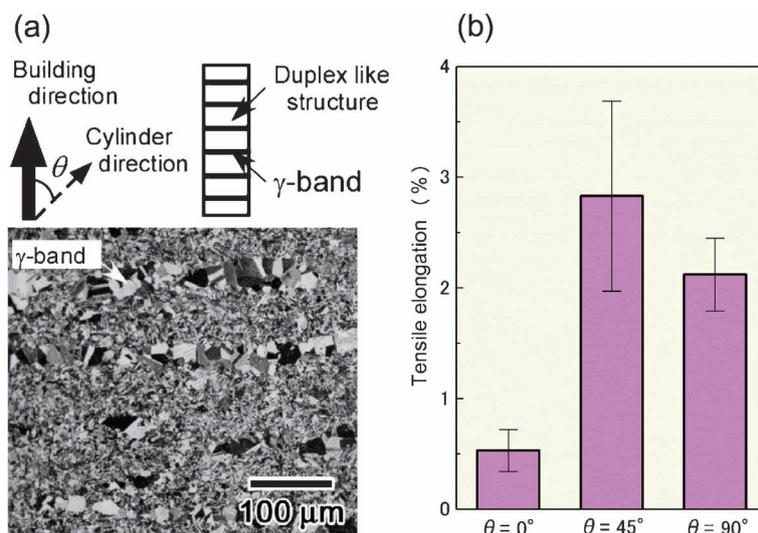


図5 EBMにより得られたTiAl金属間化合物で観察された(a)  $\gamma$ バンド, (b)室温延性の $\gamma$ バンド方位依存性<sup>(11)</sup>. (オンラインカラー)

設計することで、単結晶インプラントに匹敵する低ヤング率を示すカスタムインプラントの設計が可能となる。そこで現在純Tiと各種 $\beta$ 安定化元素の純金属粉末の混合粉ならびにレーザ積層造形法を用いて結晶配向化Ti合金造形体の作製に挑戦している。現時点において混合粉からの造形体作製に成功しており、合金化、形状付与ならびに結晶配向の制御の可能性までもが示唆されている。今後は、融点、平衡分配係数、投入エネルギー密度、冷却速度などの熱力学的諸量や造形パラメータが溶融現象に与える影響について解明することを目指して研究を進める予定である。

## 5. 次世代生体用金属材料としてのハイエントロピー合金の設計

以上のように $\omega$ 相抑制と価電子濃度制御による低ヤング率 $\beta$ 型Ti合金の設計とこれを用いた単結晶インプラントの開発、さらにSLMと純金属混合粉を用いた $\beta$ 型Ti合金造形体の作製と結晶配向化制御を行ってきた。これに加えて、ごく最近ではさらなる高強度・高延性を有したインプラント用構造材料を可能とする生体用ハイエントロピー合金の開発を行っている。このことについて最後に少し触れる。ハイエントロピー合金(High Entropy Alloy; HEA)は、一般に<sup>(12)(13)</sup>,

- (1) 構成元素が5成分以上の多成分合金
- (2) ほぼ等原子組成比である
- (3) 単相固溶体を形成する合金

とされており、従来の合金とは異なる高強度、高延性ならびに高耐食性を示すことが報告されており、次世代高温構造材料として大きな注目を集めている。筆者らの研究グループでは、ハイエントロピー合金が示す上述の特性が生体材料としても利用可能ではないかと着想し、これまでになかった力学的高機能を示すインプラント用構造材料としての可能性を模索することとした。

ハイエントロピー合金の系統的な合金設計は様々な手法が

提案されているが<sup>(12)(13)</sup>, 多成分系合金の固溶体形成を高い精度で予測できる手法は未だ提唱されていない。このことはハイエントロピー合金に関する研究が新しい分野であり、報告例が十分でないことやこれまでの合金設計論が多成分合金を想定しておらず既存手法の適用が難しいことなどに起因する。こうした中、実際の実験結果を統計的に整理・データベース化し、半経験的に固溶体が形成されやすい傾向にある合金系が有するパラメータを見出し、このことからハイエントロピー合金を設計するパラメータ法が提案されている<sup>(12)(13)</sup>。これまで多くのパラメータが提唱されているが、本研究では、(1)混合のエントロピー、 $\Delta S_{\text{mix}}$ , (2)混合のエントタルピー、 $\Delta H_{\text{mix}}$ , (3)構成元素の原子半径比を表すデルタパラメーター、 $\delta$ , (4) $\Delta S_{\text{mix}}$ と $\Delta H_{\text{mix}}$ をともに含む無次元パラメータであるオメガパラメーター、 $\Omega$ , (5)価電子の総数 $e$ と総原子数 $a$ の比からなる $e/a$ を改良したVEC (Valence Electron Concentration)値、さらに(6)構成元素の生体毒性を指標として、bcc系生体用ハイエントロピー合金の設計を試みた<sup>(14)(15)</sup>。パラメータ法より、等原子組成TiNbTaZrMo合金にて良好な生体適合性を有したハイエントロピー合金(Bio high entropy alloy)が得られると予想されたため<sup>(14)</sup>, 本合金を真空アーク溶解法にて溶製し、その相構成、力学特性ならびに生体適合性について調査した。その結果を図6に示す。図6(a)にTiNbTaZrMo合金のas-cast材および1000°C、168時間熱処理材におけるXRD測定の結果を示す。いずれの試料においても、●で示すbcc相(主相)と○で示すbcc相(マイナー相)として指数付けが可能であり、それ以外の相に対応する回折ピークの存在は現れなかった。微細組織観察より、as-cast材では、ハイエントロピー合金に特有の等軸デンドライト組織の発達が確認でき、熱処理材では等軸デンドライトの粗大化が観察された。これらの結果に加えて、デンドライトおよびデンドライト樹間相EPMA-WDS分析の結果を比較することで、bcc主相はTa, Mo, Nbが濃化したデンドライト相、bccマイナー相はTiとZrが濃化したデンドライト樹間相に対応することを確認した。本合金の降伏強



# 整数論的手法による粒界原子構造予測

井上和俊<sup>1)</sup> 斎藤光浩<sup>\*\*</sup>  
小谷元子<sup>2)</sup> 幾原雄一<sup>\*,\*\*\*</sup>

## 1. はじめに

金属・セラミック材料は多結晶体として用いられることが多く、その特性は粒界構造と密接に関連している。歴史的には、材料を巨視的視点から連続体と見なし、内部に存在する欠陥を幾何学の枠組みで捉える研究が100年ほど前からなされてきた。近年実験および理論手法の進展は目覚ましく、収差補正走査透過型電子顕微鏡(STEM)による粒界原子構造の直接観察、および第一原理計算による機能特性の探求などが盛んに行われている<sup>(1)(2)</sup>。一般に、固体物質・材料は特有の結晶構造を有し、種々の格子欠陥を含有している。本稿では、主に2次元欠陥である粒界を取り扱う。個々の粒界と機能特性の相関は、その粒界性格(方位・粒界面等)に大きく依存するため、欠陥に起因する諸現象を本質的に理解するためには、粒界性格を制御した双結晶などのモデル材料を用いた研究が有効である<sup>(1)(2)</sup>。

対称傾角粒界の場合、構造ユニットと呼ばれる多面体の配列で粒界構造を記述することができる<sup>(3)</sup>。小傾角粒界には刃状転位列が形成される一方、大傾角粒界には粒界転位が導入され、転位間相互作用を最小化するためにそれらが周期的に配列すると考えられてきた。巨視的には転位間距離は等間隔であるとして差し支えないかもしれない。しかしながら、粒界の原子構造は、傾角に応じた幾何学的制約と原子の離散性を反映する。従って、後述するように特定の傾角を除いて、原子レベルの転位あるいは粒界転位間隔は一定にはなり得ない。このような粒界構造を詳細に解析し、次世代材料へ応用するためには、数学的手法は極めて有効である。特に、粒界

の最安定原子配列と有理数の分布には密接な関係があり、整数論による有理数分布の解析を用いて粒界周期構造を系統的に予測することが可能である。本稿では近年の原子構造解析の結果をもとに、粒界の最安定原子配列を整数論的視点から概説する。

## 2. 格子の幾何学

19世紀にミンコフスキーにより創始された「数の幾何学」は、幾何学的手法を整数論の問題に応用するもので、結晶学や材料科学にも応用されている。特に無理数を有理数で近似するディオファントス近似理論<sup>(4)</sup>は整数論でも活発に研究されており、本稿においても重要な役割を果たす。本節では、整数論を活用した格子の幾何学を応用し、粒界最安定構造を系統的に予測する研究を紹介する。

### (1) 対応格子理論・O格子理論

2つの結晶を3次元的に重ねると、特定の方位関係で格子点同士的一致が生じる。このとき一致格子点がない結晶格子を対応格子(Coincidence-Site Lattice, CSL)と呼ぶ<sup>(4)-(9)</sup>。基本格子に対する対応格子の単位胞の体積比は整数指標として用いられ、 $\Sigma$ を用いて表される(対応格子点密度の逆数としても定義可能である)。また、2つの結晶粒が対応方位関係にあるとき、その界面を対応粒界と呼ぶ。対応格子が存在するためには、基本格子における鏡映対称面の存在に加えて、ある種の「有理数条件」が必須である。有理数は実数の中で稠密に存在するため、対応方位は離散的でありながら無数に存在する。また、回転軸の取り方や六方晶の $c/a$ 比など結晶

\* 東北大学材料科学高等研究所; 1)助教 2)教授(〒980-8577 仙台市青葉区片平2-1-1)

\*\* 東京大学・日本電子産学連携室; 副室長

\*\*\* 東京大学大学院工学系研究科総合研究機構; 教授

Analysis of Periodic Atomic Structures in Grain Boundaries by Number Theory; Kazutoshi Inoue\*, Mitsuhiro Saito\*\*, Motoko Kotani\* and Yuichi Ikuhara\*\*\* (\*WPI-AIMR, Tohoku University, Sendai. \*\*JEOL Ltd., Tokyo. \*\*\*Institute of Engineering and Innovation, The University of Tokyo, Tokyo)

Keywords: grain boundary, structural units, STEM(scanning transmission electron microscopy), HAADF(high-angle annular dark field), number theory

2017年7月12日受理[doi:10.2320/materia.56.589]

に起因する条件によっては、近似対応格子の概念が必要になることもある<sup>(10)</sup>。従来、 $\Sigma$ 値の比較的小さい低エネルギー粒界については、実験および理論計算によって多数の研究がなされてきた。しかしながら、低 $\Sigma$ 値の対応粒界は特別な粒界であり、すべての粒界を網羅するためには、無数の一般粒界についての統一的な理論研究が必要である。こうした背景の下、1960年代に2つの格子の一致の良さを定量化するためにO格子理論が提唱された<sup>(8)(9)(11)(12)</sup>。対応格子理論では2つの結晶格子が特定の幾何学的関係で交わる必要があるのに対し、O格子理論では任意の方位関係を連続的に扱うことができる。

さて、O格子点は次の方程式によって求められる：

$$\mathbf{a} = (\mathbf{I} - \mathbf{A}^{-1})^{-1} \mathbf{t}. \quad (1)$$

ここで $\mathbf{I}$ は恒等変換、 $\mathbf{A}$ は2つの格子の方位関係を結ぶ一次変換(直交変換)、 $\mathbf{t}$ は基本格子の格子ベクトルである。 $\mathbf{t}$ を任意に動かす毎に $\mathbf{a}$ が定まり、そのような $\mathbf{a}$ の集合によってO格子が得られる。式(1)は、2つの格子による格子パターン(dichromatic pattern)の中心、すなわち一次変換 $\mathbf{A}$ の原点と同値な点を求めていることになる。一般に、一次変換で結ぶことが出来る結晶同士であれば、異種界面でも扱うことが出来る。図1(a)および(c)はそれぞれ、正方格子 $L_0$ のある格子点を中心として $28.07^\circ$ および $36.87^\circ$ 回転し、新たに出来る正方格子 $L_1$ を重ねた格子パターンを示している。また、それぞれの格子パターンに、 $L_0$ と $L_1$ を結ぶ一次変換として回転変換を選んだ場合のO格子 $O(L_0, L_1)$ を描いた。ここで基本格子 $L_0$ に対するO格子点の内部座標を計算すると、(a)は(0,0), (1/2,0), (0,1/2), (1/2,1/2)の4種類、(c)は(0,0), (1/2,1/2)の2種類存在することが分かる。図1(b), (d)に、 $\Sigma 17(410)/[001]$ 対応粒界および $\Sigma 5(310)/[001]$ 対応粒界の格子パターンと構造ユニットの模式図を示す。各図中央の線は粒界面を表しており、線より下側が基本格子 $L_0$ 、上側がもう一方の格子 $L_1$ である。図1(b), (d)に粒界面近傍をハイライトしたが、実材料における粒界面近傍の原子構造は極めて複雑であり、対応格子理論の幾何学モデルで記述するには限界がある。そのため本稿では、さらに1原子層離れた位置に構造ユニットを描いた。このように単一の構造ユニットのみで記述される粒界は、後述する参照構造(reference structure)の候補となる。粒界面上には、対応格子点と重なるO格子点と、そうではないO格子点が交互に配置していることに注意する。

理論的な側面では1980年代に、一般の粒界構造は低指数対応粒界に現れる構造によって記述されることが報告されている<sup>(13)-(19)</sup>。また、粒界における構造ユニット配列に階層構造が存在することについても先行研究で指摘されている<sup>(16)(20)(21)</sup>。一方、O格子理論は物理的な背景から導かれたものではないため、提案当時から批判にさらされてきた<sup>(22)(23)</sup>。だが我々は、一次変換を適切に選ぶことによってO格子が粒界構造の周期を表す指標となることを見出し、粒界面上のO格子点の周期と粒界構造ユニットの周期に対応が存在することを示した<sup>(24)</sup>。それに基づき、有理数の分布

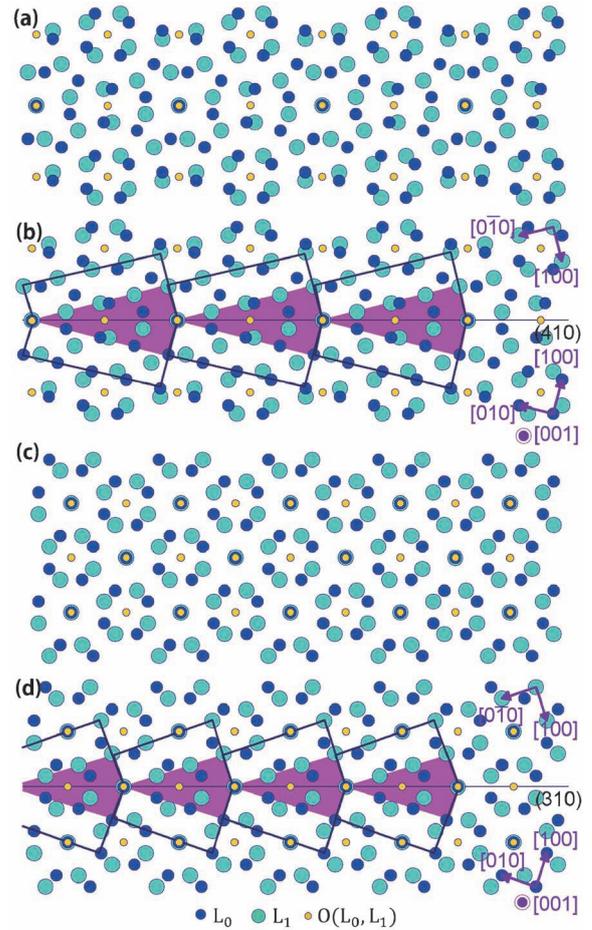


図1 (a), (c) 正方格子 $L_0$ の格子点を中心に $28.07^\circ$ および $36.87^\circ$ 回転して出来る格子 $L_1$ を重ねた格子パターンに、 $L_0, L_1$ によるO格子 $O(L_0, L_1)$ を描き入れた。基本格子 $L_0$ に関するO格子点の内部座標は(a) (0,0), (1/2,0), (0,1/2)および(1/2,1/2)の4種類、(c) (0,0)と(1/2,1/2)の2種類存在する。(b), (d) (a), (c)の格子パターンをそれぞれ単純立方格子の $\Sigma 17(410)$ および $\Sigma 5(310)$ 対称傾角粒界の $[001]$ 投影図と見立てた幾何学モデル。中央の線は粒界面を表しており、線より下側が基本格子 $L_0$ 、上側がもう一方の格子 $L_1$ である。構造ユニットを模式的に示し、中心部分をハイライトしてある。粒界面上にO格子点が等間隔に並び、対応格子点と重なるO格子点とそうではないO格子点が交互に配置している。

と対称傾角粒界の周期性の関係を導出した<sup>(24)</sup>。

上記関係の例として、立方晶岩塩型結晶であるMgOの $[001]$ 対称傾角粒界を考える。その際、固相接合法により傾角約 $35^\circ$ を有するMgOの対称傾角(近似 $\Sigma 5$ )粒界を作製し、収差補正STEM法による原子構造解析を行った<sup>(25)(26)</sup>。図2に、傾角 $35.3^\circ$ のMgO対称傾角粒界の高角環状暗視野(HAADF)-STEM像を示す。傾角 $35.3^\circ$ の粒界では、傾角 $36.87^\circ$ の $\Sigma 5(310)$ 対応方位からのずれが小さいため $\Sigma 5(310)$ 構造ユニットが主になり、 $\Sigma 5$ 対応方位からのずれを補償するため、 $\Sigma 17(410)$ 対応方位に現れる構造ユニットが周期的に出現することが観察された。傾角 $35.3^\circ$ の対応方位は、

$\Sigma 5(310)$ 対応方位 ( $36.87^\circ$ )と $\Sigma 17(410)$ 対応方位 ( $28.07^\circ$ )の間に存在し、粒界構造はそれらの低指数対応粒界に現れる構造ユニットによって構成されている。このように一般の粒界構造が、低指数対応粒界に現れる構造ユニットの配列によって記述出来るとき、そのような低指数対応粒界のことを参照構造という。図3に傾角 $35.3^\circ$ の対称傾角粒界の格子パターンを示す。図の両端に対応格子点が存在し、それらを結ぶ中央の線分は粒界面を表している。線より下側が基本格子 $L_0$ 、上側がもう一方の格子 $L_1$ である。図1(b), (d)と同様に、 $L_0$ と $L_1$ を結ぶ一次変換として $35.3^\circ$ の回転変換を選んだ場合のO格子 $O(L_0, L_1)$ も描いてある。図3を見ると、粒界面上にO格子点等間隔に配列している様子が分かる。図1において、対応格子点と重なるO格子点とそうではないO格子点が交互に等間隔に配列していたことに倣い、図3においても粒界面上の対応格子点と重なるO格子点から順に、O格子点を1つおきに通るように仮想的に構造ユニットを書き込む。すると構造ユニットの内部に存在するO格子点が周期性を持つことに気付く。図3に示すように、それら

の内部座標を求めると、左から順に $(4/7, 1/2)$ ,  $(5/7, 1/2)$ ,  $(6/7, 1/2)$ ,  $(0, 1/2)$ ,  $(1/7, 1/2)$ ,  $(2/7, 1/2)$ ,  $(3/7, 1/2)$ となる。従って図3の構造ユニット内部に存在するO格子点は周期7で基本格子の単位胞内を徐々に移動することが分かり、それが粒界を記述する構造ユニットの周期に対応すると考えられる。ここで、図中央部分の矢印で示すように、内部座標 $(0, 1/2)$ を持つO格子点が存在する。先述の通り、これは $\Sigma 17(410)$ 対応方位には現れるが、 $\Sigma 5(310)$ 対応方位には現れないことに注意する。図2のHAADF-STEM像では、大多数の $B = \Sigma 5(310)$ 構造ユニット配列の間に、 $A = \Sigma 17(410)$ 構造ユニットが周期的に導入されることで $\Sigma 5$ 対応方位からのずれを補償していた。その比は $1:6 (= A+6B)$ であり、構造ユニット配列の周期はO格子の解析と整合し7である。また、粒界面直上の輝点は不純物の偏析によるものであり、特に $B = \Sigma 5(310)$ 構造ユニットに顕著であるが<sup>(26)</sup>、ここでは言及しない。

一方、2つの格子が対応方位関係にあるとき、対になる概念としてDSC(displacement-shift complete)格子がある<sup>(27)</sup>。DSC格子とは2つの格子の全ての格子点を含む最も疎な格子、すなわちそのような格子の中で単位胞の体積が最大になるものとして定義される。あるいは、一方の格子を変位させた際に、対応格子の格子パターンを保存する平行移動ベクトルの集合としても特徴づけられる。DSC格子の基本格子に対する単位胞の体積比は、対応格子の場合の逆数 $1/\Sigma$ で与

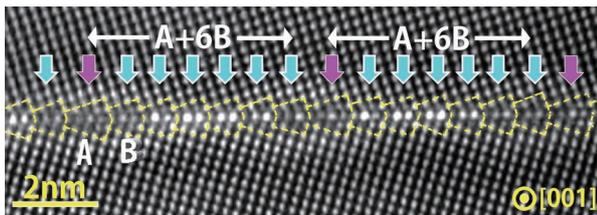


図2 傾角 $35.3^\circ$ のMgO[001]粒界のHAADF-STEM像。傾角 $36.87^\circ$ の $\Sigma 5(310)$ 対応方位からのずれを緩和するため、 $B = \Sigma 5(310)$ ユニットが大部分を占める中に $A = \Sigma 17(410)$ ユニットが周期的に存在する<sup>(25)(38)</sup>。

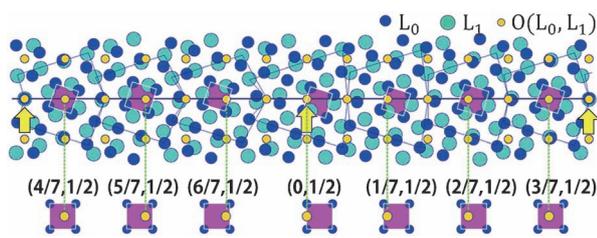


図3 正方格子 $L_0$ の格子点を中心に、 $35.30^\circ$ 回転して出来る格子 $L_1$ を重ねた格子パターンに、 $L_0, L_1$ によるO格子 $O(L_0, L_1)$ を描き入れた。図の両端に対応格子点が存在する(矢印部)。それらを結ぶ中央の線分は粒界面を表しており、線より下側が基本格子 $L_0$ 、上側がもう一方の格子 $L_1$ である。さらに仮想的に構造ユニットを描くと、構造ユニットの内部に存在するO格子点が基本格子の単位胞内を徐々に移動する様子が確認出来る。それらの基本格子 $L_0$ に対する内部座標は左から順に $(4/7, 1/2)$ ,  $(5/7, 1/2)$ ,  $(6/7, 1/2)$ ,  $(0, 1/2)$ ,  $(1/7, 1/2)$ ,  $(2/7, 1/2)$ および $(3/7, 1/2)$ であり、周期7で変化している。特に図中央矢印部の $(0, 1/2)$ は、 $\Sigma 17(410)$ 対応方位に特徴的に現れるO格子点である<sup>(24)</sup>。

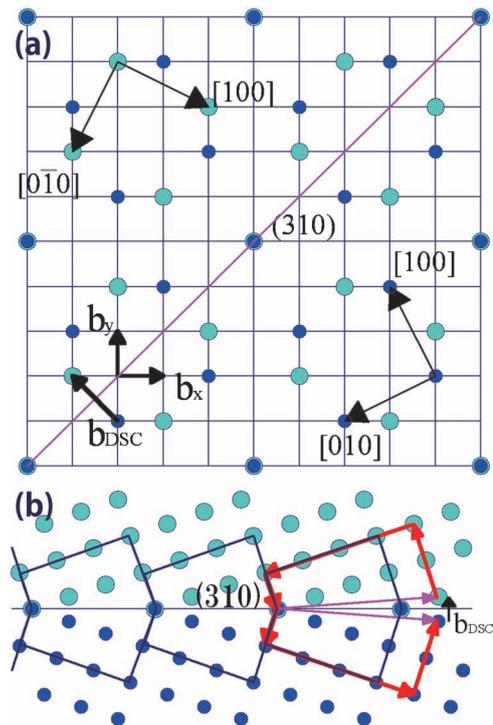


図4 (a)  $\Sigma 5(310)/[001]$ 対応方位関係の格子パターンとDSC格子。(b)  $\Sigma 5(310)/[001]$ 対応粒界のモデルに $\Sigma 17(410)/[001]$ 対応粒界をまたぐ閉経路(図1(b)の構造ユニット1つ分)を展開したもの。展開曲線の始・終点の差が粒界転位のバーガーズベクトル $b_{DSC}$ である。

えられる。図4(a)は、 $\Sigma 5(310)$ 対応方位関係を示しており、線同士の交わりがDSC格子の格子点を表す。粒界転位(あるいはDSC転位)は格子パターンを保つ変位によって導入される場合に最安定であると考えられ、そのバーガーズベクトルもDSC格子に基づいて定義される。図4(b)は $\Sigma 5(310)$ 対応粒界の模式図に、 $\Sigma 17(410)$ 対応粒界をまたぐ閉曲線(図1(b)の構造ユニット1つ分)を展開したものである。このとき展開曲線は閉じず、始・終点の差がDSC転位のバーガーズベクトル $\mathbf{b}_{\text{DSC}}$ を与える。図2において、数の少ないA= $\Sigma 17(410)$ 構造ユニットにDSC転位が導入されると考えられ、それらが最大限離れて配置されている。

一般に、傾角 $2\theta$ の立方晶[001]対称傾角粒界において、 $\tan\theta$ が有理数 $p/q$ ( $q \geq p \geq 0$ )となるときに $(q\ p\ 0)$ 対応粒界が存在する。傾角 $2\theta=35.3^\circ$ のときは $\tan\theta \approx 7/22$ と近似されるため、理論的には $\Sigma 533(22\ 7\ 0)$ 対応粒界である。図2と図3より、粒界構造は6つの $\Sigma 5(310)$ 構造ユニットと1つの $\Sigma 17(410)$ 構造ユニットで表されると考えられ、面指数(逆格子ベクトル)の分解としては $(22\ 7\ 0) = (410) + 6(310)$ と表される。ただし、MgOでは参照構造として傾角 $28.07^\circ$ の $\Sigma 17(410)$ と傾角 $36.87^\circ$ の $\Sigma 5(310)$ 対応方位が現れるが、CuやAlなどの金属ではこれらの構造も傾角 $0^\circ$ の $\Sigma 1(100)$ バルク構造および傾角 $53.13^\circ$ の $\Sigma 5(210)$ 対応粒界を参照構造として、 $(410) = (210) + 2(100)$ 、 $(310) = (210) + (100)$ と記述される<sup>(17)(28)</sup>。一般に傾角が $2\theta$ の $(q\ p\ 0)/[001]$ 対称傾角粒界の構造は、 $(m-1\ 1\ 0)$ および $(m\ 1\ 0)$ を参照構造として、

$$(q\ p\ 0) = n_1(m\ 1\ 0) + n_2(m-1\ 1\ 0), \quad (2)$$

と表されると考えられる<sup>(18)(19)(24)</sup>。その解 $n_1, n_2$ は2つの構造ユニットの組合せを表しており、 $m-1 < \cot\theta = q/p < m$ のとき正の整数として一意に定まる。また、 $n_1 + n_2 = p$ は構造ユニットの周期を表しており、 $(q\ p\ 0)$ 面指数の $p$ に一致する<sup>(24)</sup>。

粒界上の構造ユニット配列は、整数計画問題(integer programming problem)として捉えることも出来る。整数計画問題は最適化問題の一例で、難問の場合が多い。 $(q\ p\ 0)$ 対応粒界における対応格子点間隔を $l = \sqrt{q^2 + p^2}$ とし、参照構造である $(m\ 1\ 0)$ 、 $(m-1\ 1\ 0)$ 対応粒界における粒界面上の対応格子点間隔をそれぞれ $l_1 = \sqrt{m^2 + 1}$ 、 $l_2 = \sqrt{(m-1)^2 + 1}$ とする。このとき、 $(q\ p\ 0)$ 対応粒界上に2種類の構造ユニットを配置する最も単純なモデルとして、 $(q\ p\ 0)$ 粒界の対応格子点間隔 $l$ の間に $(m\ 1\ 0)$ 、 $(m-1\ 1\ 0)$ 粒界の格子点間隔 $l_1, l_2$ をそれぞれ $n_1, n_2$ 個並べたことを考える。このとき、

$$|l - (n_1 l_1 + n_2 l_2)| \quad (3)$$

を最小にする非負の整数 $n_1, n_2$ が定まるとき、原子レベルの歪れも最小になると考えられる。例えば傾角 $35.3^\circ$ のMgO(22 7 0)傾角粒界の場合、格子定数を単位として $l = \sqrt{22^2 + 7^2} = \sqrt{533}$ 、 $l_1 = \sqrt{4^2 + 1^2} = \sqrt{17}$ 、 $l_2 = \sqrt{3^2 + 1^2} = \sqrt{10}$ であり、網羅的に探索すれば $n_1 = 1$ 、 $n_2 = 6$ と求まる。一般に式(3)を最小化する非負整数 $n_1, n_2$ は、式(2)の解として与えられる。

## (2) 粒界構造とフェレイ数列

上記解析に基づき、立方晶[001]対称傾角粒界の数理構造を抽出すると、次のようにまとめられる。まず $p, q, p_1, q_1, p_2, q_2$ は、 $p \leq q, p_1 \leq q_1, p_2 \leq q_2$ を満たす非負の整数であり、 $(p, q)$ 、 $(p_1, q_1)$ 、 $(p_2, q_2)$ の対はそれぞれ互いに素であると仮定する。 $(q\ p\ 0)$ 対応粒界の参照構造を $(q_1\ p_1\ 0)$ および $(q_2\ p_2\ 0)$ に選んだとすると、 $(q\ p\ 0)$ 対応方位が2つの参照構造の対応方位の間にあるという条件は、不等式

$$p_1/q_1 < p/q < p_2/q_2 \quad (4)$$

で与えられる。このとき $(q\ p\ 0)$ 対応粒界が2つの参照構造によって

$$(q\ p\ 0) = n_1(q_1\ p_1\ 0) + n_2(q_2\ p_2\ 0) \quad (5)$$

と構成されるならば、係数 $n_1, n_2$ が正の整数として一意に定まるための必要十分条件は、

$$\det \begin{pmatrix} q_1 & q_2 \\ p_1 & p_2 \end{pmatrix} = 1 \quad (6)$$

という条件で与えられる。このとき $n_1 + n_2 = p$ が成立する。しかしながら、2種類の構造ユニットの配列は傾角によっては非常に多くの組合せがある。Suttonらは、一般の粒界構造は2つの参照構造の整数係数線型和 $n_1A + n_2B$ によって記述されることに加え、傾角の変化に応じて2つの参照構造の間をできる限り連続に変化するべきであることを提唱した<sup>(14)</sup>。例えばある対称傾角粒界において、Aユニットが3つ、Bユニットが4つで1周期の構造ユニット配列(3A+4B)が現れるとすると、その配列の仕方は以下の5通りの可能性がある：AAABBBBB, AABABBBB, ABAABBBB, AABBBABB, ABABABBB。このとき数の少ない構造ユニットAにDSC転位が導入されるとすれば、平均転位間隔すなわちA同士の平均間隔はいずれの場合も同じになる。しかし、この中でAとBが「平均的」に混合した配列は5番目の場合であり、数の少ないA同士が出来るだけ離れて配置し粒界エネルギーが最小になると考えられる。またこのような配列のときに、傾角の変化に応じて粒界構造も連続的に変化する。Suttonらは2種類の構造ユニットの割合が与えられたときに、それらの配列方法を決定するアルゴリズムを与えた<sup>(16)(29)(30)</sup>。その手法は、本質的にはユークリッドの互除法によるものである。

一方我々は、別の視点から2種類の構造ユニットの配列を与えるアルゴリズムを提唱した<sup>(31)(32)</sup>。先の説明から、 $(q\ p\ 0)$ 対応粒界の構造ユニットの周期は $p$ である。ここで $p, q$ は本節冒頭で述べた条件を満たす整数であり、傾角 $2\theta$ の $(q\ p\ 0)$ 対応粒界のとき $\tan\theta = p/q$ が成り立つ。一方、傾角の順に対応する $p$ を並べ、9以下のものを抜き出すと次の29項からなる数列 $\{p_n\}_{n=1}^{29}$ が周期的に現れる：

$$1, \underline{9}, 8, 7, 6, 5, \underline{9}, 4, \underline{7}, 3, \underline{8}, 5, 7, \underline{9}, 2, \\ \underline{9}, 7, 5, \underline{8}, 3, \underline{7}, 4, \underline{9}, 5, 6, 7, 8, \underline{9}, 1. \quad (7)$$

両端の $p_1 = p_{29} = 1$ はそれぞれ、例えば $\Sigma 17(410)$ 対応粒界( $28.07^\circ$ )および $\Sigma 5(310)$ 対応粒界( $36.87^\circ$ )の周期1(すなわち単一の構造ユニットで記述できること)に対応する。このと



き、 $p_6=5$ は傾角 $2\theta_1=29.49^\circ$ の(19 5 0)対応粒界( $\tan\theta_1=5/19$ )、 $p_8=4$ は傾角 $2\theta_2=29.86^\circ$ の(15 4 0)対応粒界( $\tan\theta_2=4/15$ )にそれぞれ対応する。ところで $p_7=9$ は、 $p_7=p_6+p_8$ ( $=5+4$ )を満たすため、2つの周期 $p_6=5$ と $p_8=4$ の結合によって、さらに大きな周期 $p_7=9$ の長周期構造が形成されると考えられる。ここで $p_7=9$ は傾角 $2\theta=29.65^\circ$ の(34 9 0)=(19 5 0)+(15 4 0)対応粒界( $\tan\theta=9/34$ ,  $\theta_1<\theta<\theta_2$ )に対応する。A=(410), B=(310)として、(19 5 0)および(15 4 0)対応粒界における構造ユニット配列がそれぞれ4A+B, 3A+Bと記述されるとすれば、(34 9 0)対応方位の構造は(4A+B)+(3A+B)を1周期とする長周期構造を持つと考えられる。この場合、数の少ないBユニットにDSC転位が導入され、それらは出来るだけ離れて配置される。単純に述べれば、7個のAと2個のBを周期的に並べる際に、B同士を出来るだけ離して並べるには、(4A+B)+(3A+B)のように並べるしかない。このときBユニットの間にAユニットが3個ないし4個存在するため、DSC転位は等間隔には並ばない。式(5)の帰結として、 $n_1=1$ あるいは $n_2=1$ であるような傾角のときは、粒界面上の転位あるいは粒界転位は等間隔に並ぶが、それ以外の場合は原子レベルで見れば等間隔とはなり得ない。これは小傾角粒界の刃状転位配列に関しても同様である。このような数学的に厳密な解析は、粒界や転位の原子構造をより詳細に議論する際に有効になるものと思われる。

ところで式(7)の太字下線部分は

$$p_n = p_{n-1} + p_{n+1} \quad (8)$$

を満たし、短周期構造の結合によって長周期構造が形成されることを表現している。式(8)は、有名なフィボナッチ数列の漸化式と同一のものであり、対称傾角粒界の構造にも準周期的な秩序が存在すると予想される。我々は、式(8)の数列 $\{p_n\}$ は、図5に示す第9世代のファレイ数列 $F_9$ に現れる分母と一致することを見出した<sup>(31)</sup>。ここで、第 $n$ 世代の

ファレイ数列 $F_n$ とは、0と1の間にある既約分数のうち、分母が $n$ 以下のものを昇順に並べたものである<sup>(4)</sup>。ファレイ数列は様々な物理現象に登場することが知られている<sup>(33)-(37)</sup>。ここで、分母同士・分子同士を足して得られる分数(中間数)を生成する演算田を新たに導入する：

$$a/b \text{田} c/d = (a+c)/(b+d). \quad (9)$$

同一分数の和 $a/b \text{田} a/b$ は、 $2(a/b)$ のように表すことにする。図5は、各世代のファレイ数列間の関係を表している。第1世代のファレイ数列 $F_1$ が仮想的な分数0/1および1/1によって構成されるとすると、式(9)で定義した演算を隣り合う分数に施すことにより、次世代のファレイ数列を逐次的に得ることができる。このような二分木をファレイ図と呼ぶ。特に $a/b < c/d$ のとき、 $a/b < a/b \text{田} c/d < c/d$ であることに注意する。また、この演算において

1. 非可換性( $p \text{田} q \text{田} r \neq q \text{田} p \text{田} r$ ),
2. 巡回置換(cyclic permutation)を許容する  
( $p \text{田} q \text{田} r = r \text{田} p \text{田} q$ , 特に $p \text{田} q = q \text{田} p$ が成り立つ)。

の2点を仮定する。非可換性は、構造ユニットP, Q, Rの配列に関してPQRとQPRは異なることに対応し、巡回置換を許容する点は、PQR, RPQ, QRPが同一の配列を記述することに対応する。さらに、ファレイ数列において隣接する2つの既約分数の分母・分子を並べて $2 \times 2$ 行列をつくると、行列式が1になるという性質がある。これは、式(6)において見られた条件でもある。したがって、式(5)の参照構造の選定基準として、ファレイ数列の隣り合う分数に対応する対応粒界を選べばよいことが分かる。また、低指数粒界面上に対応する分数は、ファレイ数列 $F_n$ の $n$ が小さい世代(図5の上の方)にはじめて現れることに注意する。式(9)に示したファレイ数列の構成法に着目すると、 $F_9$ の分母に式(7)の数列が現れるのは、 $F_1$ の隣接分数0/1, 1/1の分母がともに1であることが原因である。従って、ファレイ数列のある世代で、隣接分数の分子がともに1となれば、後の世代

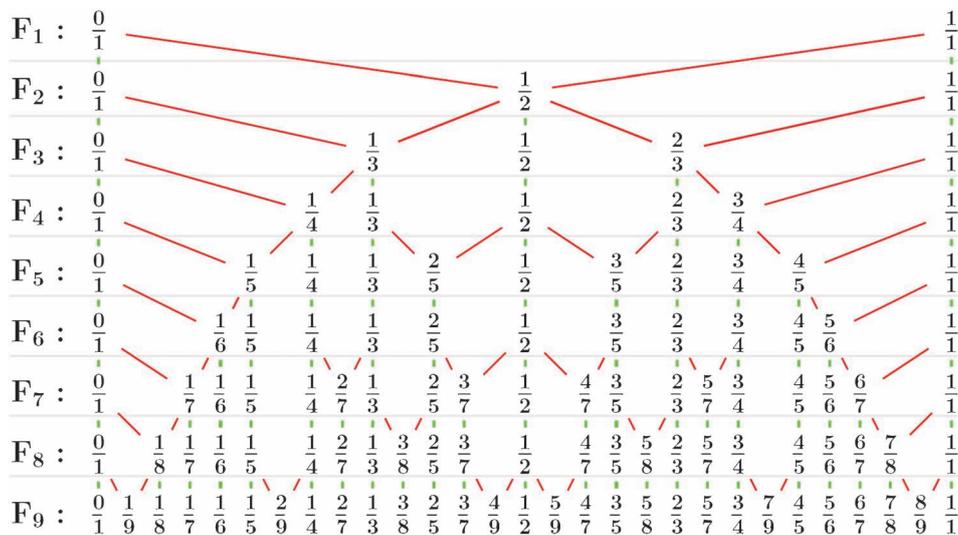


図5 第1世代から第9世代までのファレイ数列により構成される二分木(ファレイ図)。演算 $a/b \text{田} c/d = (a+c)/(b+d)$ により生成され、それぞれの分数 $p/q$ が $(qp0)$ 対応粒界に対応する<sup>(31)(32)</sup>。(オンラインカラー)

でそれらの間に存在する分数の分子にも、式(7)の数列が現れると考えられる。例えば、分数 $1/4$ と $1/3$ に対応して先述同様 $A=(410)$ 、 $B=(310)$ と置くと、 $1/4 \oplus 1/3 = 2/7$ に対応する $(720) = (410) + (310)$ 対応粒界は、 $A$ と $B$ が1対1で交互に現れる構造「AB」をもつ。また、 $2/7 \oplus 1/3 = 3/10$ に対応する $(1030) = (720) + (310)$ 対応粒界は、 $AB$ と $B$ が1対1で交互に現れる構造「ABB」をもつ。さらに、 $2/7 \oplus 3/10 = 5/17$ に対応する $(1750) = (720) + (1030)$ 対応粒界は、 $AB$ と $ABB$ が1対1で交互に現れる構造「ABABB」をもつ。この操作を繰り返すと、構造ユニット配列の周期として式(7)の数列が現れることが分かる。逆に、任意の分数はファレイ数列における演算田の履歴を記憶しており、その履歴を遡ることで、参照構造がどのように配列するかを特定することができる。実際、任意の既約分数に対して連分数表示を行うことで、その分数のファレイ数列における「親」を特定する公式が知られている<sup>(4)</sup>。立方晶 $[001]$ 対称傾角粒界の場合、既約分数 $p/q$ は $(q\ p\ 0)$ 対応粒界( $\tan\theta = p/q$ )に対応することに注意すると、構造ユニット配列を求めるアルゴリズムは次のようにまとめられる<sup>(31)</sup>：

1. 傾角 $2\theta$ に対して $\tan\theta$ を計算する。
2.  $\tan\theta$ を連分数展開しその値を近似する分数 $p/q$ を求める。
3.  $p/q$ のファレイ数列における「親」を遡り、参照構造の配列を特定する。

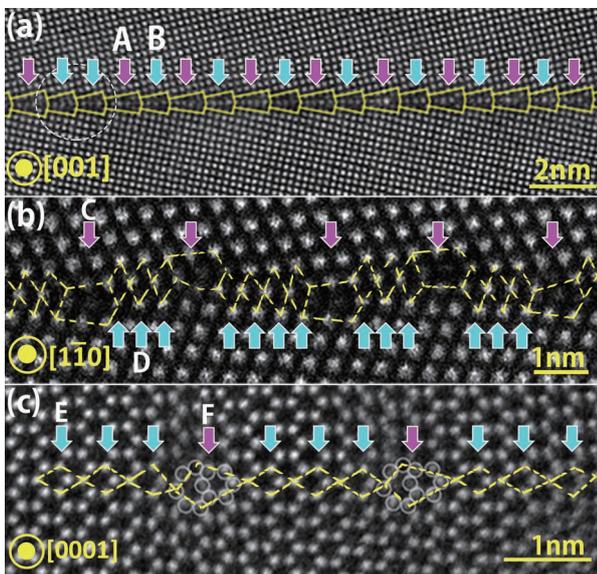


図6 (a) 傾角 $25.2^\circ$ の $\text{MgO}$   $[001]$ 対称傾角粒界のHAADF-STEM像。A =  $\Sigma 13(510)$  ( $22.62^\circ$ )およびB =  $\Sigma 17(410)$  ( $28.07^\circ$ )構造ユニットが交互に並び、破線円部に示すようにBユニットが余計に加わる<sup>(38)</sup>。(b) 傾角 $60^\circ$ の立方晶ジルコニア $[1\bar{1}0]$ 対称傾角粒界のHAADF-STEM像。C =  $\Sigma 9(221)$  ( $38.94^\circ$ )構造ユニットの間にD =  $\Sigma 3(111)$  ( $70.53^\circ$ )構造ユニットが3個ないし4個存在する<sup>(40)</sup>。(c) 傾角 $6.8^\circ$ の $\text{ZnO}$   $[0001]$ 対称傾角粒界のHAADF-STEM像。F =  $\Sigma 7(12\bar{3}0)$  ( $21.79^\circ$ )構造ユニットの間にE =  $\Sigma 1(11\bar{2}0)$ バルク構造( $0^\circ$ )ユニットが3個存在する。

上記手法は $[001]$ 対称傾角粒界だけでなく、下記に示す通り、他の物質・他の回転軸に関する対称傾角粒界の構造予測においても有効である。以下、代表的なセラミックスの幾つかの粒界を例として、上記手法による解析について説明する。図6に、今回対象とする(a)傾角 $25.2^\circ$ の $\text{MgO}$   $[001]$ 対称傾角粒界、(b)傾角 $60^\circ$ の立方晶ジルコニア( $\text{ZrO}_2$ )  $[1\bar{1}0]$ 対称傾角粒界、(c)傾角 $6.8^\circ$ の $\text{ZnO}$   $[0001]$ 対称傾角粒界のHAADF-STEM像を示す。まず(a)については、 $2\theta = 25.2^\circ$ より $\tan\theta \approx 17/76$ と近似される。以下、 $A = \Sigma 13(510)$  ( $22.62^\circ$ )および $B = \Sigma 17(410)$  ( $28.07^\circ$ )とおく。 $25.2^\circ$ はそれらの対応方位の間にあるので、 $A$ と $B$ 2種類の構造ユニットで記述できると考えられる。上述の手法により近似分数は $17/76 = 8(1/5 \oplus 1/4) \oplus 1/4$ によって構成され、面指数としては $(76\ 17\ 0) = 8((510) + (410)) + (410)$ と分解する。従って、大部分は $A = \Sigma 13(510)$ および $B = \Sigma 17(410)$ 構造ユニッ

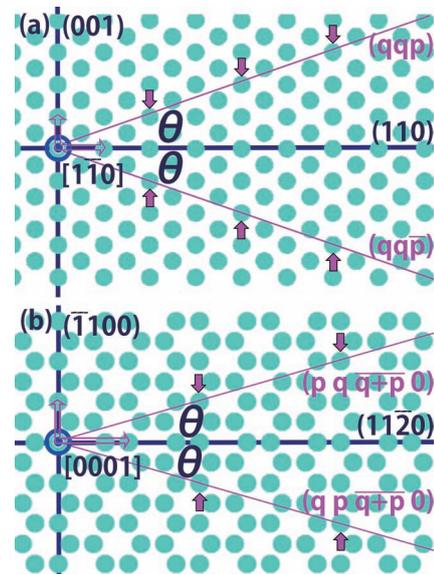


図7 (a) 面心立方格子の $[1\bar{1}0]$ 投影図の模式図。(b) 六方晶の $[0001]$ 投影図の模式図。それぞれ角度 $2\theta$ のくさび領域を切り取り、切断面を貼り合わせると、図の矢印位置に対応格子点が生じる。(a)において $(qqp)$ 面と $(110)$ 面のなす二面角が $\theta$ であり、対応方位は $[ppq] = p[110] + q[001]$ と表される。あるいは $(qqp)$ 面は $[1\bar{1}0]$ 軸と $[ppq]$ 軸により張られるため、 $(qqp) = q(110) + p(001)$ とも表される。 $[001]$ 方位と $[110]$ 方位は直交し、それぞれの方位の格子点間隔(原点から伸びる矢印の長さ)の比が $1:\sqrt{2}$ であることから、 $\sqrt{2}\tan\theta = p/q$ が成り立つ。(b)において $(1120)$ 面と $(pq\bar{p}+q\ 0)$ 面のなす二面角が $\theta$ であり、対応方位は $[q\bar{p}\bar{p}-q\ 0] = (q+p)/2[1\bar{1}00] + (q-p)/2[11\bar{2}0]$ と表される。あるいは $(pq\bar{p}+q\ 0)$ 面は $[0001]$ 軸と $[q\bar{p}\bar{p}-q\ 0]$ 軸により張られるため、 $(pq\bar{p}+q\ 0) = (q+p)/2(11\bar{2}0) + (q-p)/2(\bar{1}100)$ とも表される。 $[1\bar{1}00]$ 方位と $[11\bar{2}0]$ 方位は直交し、それぞれの方位の格子点間隔(原点から伸びる矢印の長さ)の比が $1:\sqrt{3}$ であることから、 $\sqrt{3}\tan\theta = (q-p)/(q+p)$ が成り立つ。

トが交互に並び、 $B = \Sigma 17(410)$ が余計に加わると予測される。実際に図6(a)のSTEM像からも、破線円部のようにBユニットが余計に加わる配列を確認することができる<sup>(38)</sup>。

次に、図6(b)の立方晶ジルコニアの $[1\bar{1}0]$ 対称傾角境界の場合を考察する。図の輝点はZr原子列を表しており、この場合Zr原子は面心立法構造をとる。図7(a)に面心立方格子の $[1\bar{1}0]$ 投影図を示す通り、(110)面が鏡映対称面である。完全結晶から角度 $2\theta$ のくさび領域を切り取り、切断面を貼り合わせると、図の矢印位置が対応格子点になる。図7(a)において $(qqp)$ 面と(110)面のなす二面角を $\theta$ とする。このとき対応方位は $[ppq] = p[110] + q[001]$ と表される。あるいは $(qqp)$ 面は $[1\bar{1}0]$ 軸と $[ppq]$ 軸により張られるため、 $(qqp) = q(110) + p(001)$ とも表される。 $[001]$ 方位と $[110]$ 方位は直交し、それぞれの方位の格子点間隔の比が $1 : \sqrt{2}$ であることから、 $\tan\theta = p/\sqrt{2}q$ が成り立つ。すなわち、 $\sqrt{2}\tan\theta$ が有理数 $p/q$ となるとき、 $(qqp)$ 対応境界が存在する。ここで $2\theta = 60^\circ$ より、 $\sqrt{2}\tan\theta = \sqrt{2}/3 \approx 9/11$ と近似されるため、 $(11\ 11\ 9)$ 対応境界が対応する。また、この境界は $C = \Sigma 9(221)$  ( $2\theta_1 = 38.94^\circ$ ,  $\sqrt{2}\tan\theta_1 = 1/2$ )と $D = \Sigma 3(111)$  ( $2\theta_2 = 70.53^\circ$ ,  $\sqrt{2}\tan\theta_2 = 1/1$ )に現れる構造ユニットで記述されると考えられる<sup>(39)</sup>。従って、 $9/11 = \{3(1/1) \oplus 1/2\} \oplus \{4(1/1) \oplus 1/2\}$ より、面指数としては $(11\ 11\ 9) = \{3(111) + (221)\} + \{4(111) + (221)\} = (3D + C) + (4D + C)$ と分解し、 $C = \Sigma 9(221)$ 構造ユニットの間に $D = \Sigma 3(111)$ 構造ユニットが3個ないし4個存在すると予測される<sup>(40)</sup>。

最後に図6(c)の傾角 $2\theta = 6.8^\circ$ の小傾角境界を、六方晶 $[0001]$ 対応境界の例として考察する。図7(b)は六方晶の $[0001]$ 投影図であり、 $(11\bar{2}0)$ 面が鏡映対称面である。図7(a)と同様に角度 $2\theta$ のくさび領域を切り取り、切断面を貼り合わせると、図の矢印位置が対応格子点になる。図7(b)において $(11\bar{2}0)$ 面と $(p\ q\ \bar{p} + q\ 0)$ 面のなす二面角を $\theta$ とすれば、対応方位は $[q\ \bar{p}\ p - q\ 0] = (q + p)/2[1\bar{1}00] + (q - p)/2[11\bar{2}0]$ と表される。あるいは $(p\ q\ \bar{p} + q\ 0)$ 面は $[0001]$ 軸と $[q\ \bar{p}\ p - q\ 0]$ 軸により張られるため、 $(p\ q\ \bar{p} + q\ 0) = (q + p)/2(11\bar{2}0) + (q - p)/2(\bar{1}100)$ とも表される。 $[1\bar{1}00]$ 方位と $[11\bar{2}0]$ 方位は直交し、それぞれの方位の格子点間隔の比が $1 : \sqrt{3}$ であることから、 $\tan\theta = (q - p)/\sqrt{3}(q + p)$ が成り立つ。すなわち、 $\sqrt{3}\tan\theta = (q - p)/(q + p)$ あるいは $(1 - \sqrt{3}\tan\theta)/(1 + \sqrt{3}\tan\theta) = p/q$ のとき、 $(p\ q\ \bar{p} + q\ 0)$ 対応境界に対応する。ここで $(1 - \sqrt{3}\tan\theta)/(1 + \sqrt{3}\tan\theta) = f(\theta)$ とおくと、傾角 $2\theta = 6.8^\circ$ の場合、 $f(\theta) \approx 4/5$ と近似される。通常小傾角境界は刃状転位が周期的に配列すると言われているが、この場合は構造ユニット配列で記述でき、 $E = \Sigma 1(11\bar{2}0)$ バルク構造 ( $2\theta_1 = 0^\circ$ ,  $f(\theta_1) = 1/1$ )と $F = \Sigma 7(12\bar{3}0)$  ( $2\theta_2 = 21.79^\circ$ ,  $f(\theta_2) = 1/2$ )対応境界が参照構造である<sup>(41)</sup>。このとき、 $4/5 = 3(1/1) \oplus 1/2$ より、面指数としては $(4\ 5\ \bar{9}\ 0) = 3(1\ 1\ \bar{2}\ 0) + (1\ 2\ \bar{3}\ 0) = 3E + F$ と分解する。その結果、 $F = \Sigma 7(12\bar{3}0)$ 構造ユニットの間に $\Sigma 1$ バルク構造ユニットEが3個存在すると予測される。このように、図6(b), (c)についてもSTEM像から予測通りの構造を確認することができる。今回述べた

方法は他の物質・粒界に対しても適用可能であり、粒界に関する先行研究の解析結果についてもその全てを系統的に説明することが可能である<sup>(17)-(21)(28)(29)(41)-(44)</sup>。

### 3. おわりに

本稿では、対称傾角境界の構造ユニット配列について、整数論的視点から概説した。一般に、対称傾角境界における構造ユニット配列は、Suttonらが導いた次の条件、

- (1) 2つの参照構造の整数係数線型和によって記述される。
- (2) 傾角の変化に応じて2つの参照構造の間を出来る限り連続に変化する。

に従うことが知られている<sup>(14)</sup>。その結果、転位同士が平均的に配列した状態が最安定となる。本稿ではこの性質をさらに一般化させ、対称傾角境界の構造と有理数の一対一対応を用いて粒界最安定構造を系統的に解析した。また、傾角境界に存在する階層構造をフェレイ数列によって記述した。それぞれの粒界に対応する既約分数自体に上記2条件が組み込まれており、 $\Sigma$ 値の大きな傾角境界であってもフェレイ数列を用いることで構造ユニットの配列を精度よく推定することが出来る。このとき、転位あるいは粒界転位間隔は原子の離散性を反映して準周期の一部を実現する。他の配列が観察されないのは、歪場を最小化する構造ユニット配列が実現されているためだと考えられる。このため、比較的粒界エネルギーの高い配位が参照構造として選択される場合もあり、参照構造は粒界エネルギーだけでは決定することができない。隣接する参照構造の組合せによってそれらの間の傾角に現れる構造が補間される点は様々な物質に共通しているものの、参照構造を与える傾角とその構造は物質ごとに異なる。現状では実験および理論計算により適切に参照構造を特定しなければならず、より一般的な数学的枠組みの中で、単一構造ユニットで記述される粒界の決定条件、ひいては最安定構造の決定に関わる根源的な理論を構築していく必要がある。

本研究は、文部科学省構造材料元素戦略研究拠点事業、ナノテクノロジープラットフォーム事業、および科学研究費助成事業(15K06420)並びに新日鐵住金株式会社の助成を受けて行われた。本研究の一部は、馮斌博士、盧智英博士、石川亮博士、柴田直哉博士(東京大学)および陳春林博士(東北大学)との共同研究成果であることを申し添える。また、吉永日出男九州大学名誉教授には継続的に激励頂き、様々な助言を頂戴しました。ここに感謝申し上げます。

### 文 献

- (1) S. J. Pennycook and P. D. Nellist (Eds.): Scanning Transmission Electron Microscopy, Springer-Verlag, New York, (2011).
- (2) Y. Ikuhara: J. Electron Microsc., **60**(S1) (2011), S173-S188.
- (3) G. H. Bishop and B. Chalmers: Scr. Metall., **2** (1968), 133-140.
- (4) G. H. Hardy and E. M. Wright: An Introduction to the Theory



# 亀裂先端転位と脆性-延性遷移挙動

田中將己\* 定松 直\*\* 東田賢二\*\*\*

## 1. はじめに

材料の破壊力学物性について、その巨視的挙動を原子レベルで理解し、制御しようとする気運が、近年高まっている。材料の靱性を理解する上で、亀裂先端の塑性域の挙動を如何に記述しモデル化するかが最重要の課題であることは、材料工学、機械工学など分野を超えて共通した基本的認識であった。しかし、「塑性域」の物理的内容は長く不明確なまま放置され、亀裂先端近傍の塑性域の微視的構造を解明しようとする気運が生まれたのは比較的近年のことである。特に破壊物理研究分野では、転位論に基づいた材料の靱性の理解が進み、その実験的検証と新たな理論展開の上で、亀裂先端塑性域の構造解析が強く望まれるようになった<sup>(1)(2)</sup>。そのような中、シリコン結晶は材料の破壊現象を取り扱うためのモデル結晶として注目を集めた。その理由として以下のことが挙げられる。

(1) シリコン結晶は室温では脆性的に破壊するが、温度が上昇すると延性的な性質を示すようになる。この挙動は脆性-延性遷移(Brittle-to-ductile transition: BDT)と呼ばれ、一般の金属材料でも見られるものであるが、シリコン結晶では数°Cという狭い温度域で急峻に靱性値が上昇する鋭いBDTが現れる。

(2) 半導体産業におけるシリコンウェハの大量生産技術により、高純度完全シリコン単結晶を容易に入手出来る。

(3) シリコン結晶中の転位挙動に関して、充実した研究が蓄積されている。

このように、シリコン結晶における変形・破壊の研究は、当初は学術的興味によるものが主であった。しかし近年、デバイスの更なる高機能化への要求が高まりシリコン結晶の力

学的性質自体も実用的な観点から強い関心をもたれるようになってきている。

## 2. シリコン単結晶におけるBDT挙動

シリコン単結晶の変形挙動において、特に注目すべき点は先に述べたようにその鋭いBDT挙動にある。これは、図1<sup>3)</sup>で示すように、St. Johnに見いだされた。彼は破壊靱性値が急峻に上昇する温度をBDT温度とし、このBDT温度を荷重増加率の関数として系統的に整理し、(1)BDT温度と応力拡大係数増加速度との間にはアレニウス型の関係が見られ、BDTがある種の熱活性化過程に支配されているという

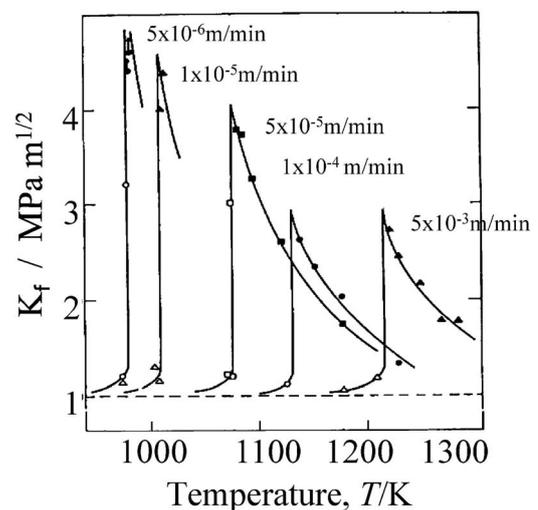


図1 シリコン単結晶における破壊靱性値の温度・歪速度依存性<sup>(3)</sup>。

\* 九州大学大学院工学研究院材料工学部門；准教授(〒819-0395 福岡市西区元岡744)

\*\* 鹿児島大学大学院理工学研究科；助教

\*\*\* 佐世保工業高等専門学校；校長，九州大学名誉教授

Crack-tip Dislocations and Brittle-to-Ductile Transition; Masaki Tanaka\*, Sunao Sadamatsu\*\* and Kenji Higashida\*\*\* (\*Department of Materials Scienc and Engineering, Kyushu University, Fukuoka. \*\*Department of Mechanical Engineering, Kagoshima University, Korimoto, Kagoshima. \*\*\*National Institute of Technology, Sasebo College, Sasebo)

Keywords: dislocation, silicon, brittle-to-ductile transition, crack, fracture, shielding, transmission electron microscopy, electron tomography, strain

2017年8月8日受理[doi:10.2320/materia.56.597]

こと、(2)BDT 温度の応力拡大係数増加速度依存性から求めた活性化エネルギーの値が BDT 温度近傍でのシリコン結晶中での転位運動の活性化エネルギーの値と良く一致すること、を実験的に示した。

ここで歪速度 ( $\dot{\epsilon}$ ) と BDT 温度 ( $T_{BDT}$ ) には次式が成り立つ<sup>(3)</sup>。

$$\dot{\epsilon} = \epsilon_0 \exp\left(\frac{-\Delta G_{BDT}}{kT_{BDT}}\right) \quad (1)$$

なお、 $\epsilon_0$  は温度に依存しない定数、 $k$  はボルツマン定数、 $\Delta G_{BDT}$  は活性化エネルギーである。アレニウスプロットより活性化エネルギーを実験的に求める事ができる。

図 2 に種々の単結晶材料により求められた  $\Delta G_{BDT}$  と遷移温度との関係を示す<sup>(4)</sup>。パイエルス応力の高い結晶においては、図中に示すように結晶構造に拘わらず、遷移温度と活性化エネルギーの間には直線的な関係があることがわかる。この活性化エネルギーの物理的意味を理解するために、表 1 に種々の単結晶で得られた  $\Delta G_{BDT}$  の値と BDT 温度近傍での転位運動の活性化エネルギー  $\Delta G_d$  との関係を示す。表よりシリコン単結晶だけでなく、他のパイエルスポテンシャルが高い単結晶材料においても  $\Delta G_{BDT}$  が、 $\Delta G_d$  とよく対応する事がわかる。このことから、BDT 挙動を律速している素過程は転位運動にある事がわかる。つまり  $\Delta G_{BDT}$  は亀裂を有する試料において脆性と延性を分ける転位易動度の閾値を表している。歪速度一定の条件下において転位運動の活性化エネルギーは温度上昇と共に増大するが、その値がある値に達したときに BDT が起こる。St. John はこれを、外力増加に

よって生じる亀裂先端近傍での応力集中場の増大速度に、塑性域の広がり速さ、即ち転位運動速度が追いつくときに BDT が生じると表現している。

また、表 1 で見られるように n 型シリコンの  $\Delta G_{BDT}$ 、 $\Delta G_d$  は純シリコンと比べて共に小さい。n 型シリコンは、電気伝導度を制御するために P や As が添加されており、これら元素が転位易動度の増加を引き起こし、その結果 BDT 温度が低下する事となる。これはいわゆる固溶軟化現象で他の金属でも同様に見られる。例えば、鉄にニッケルを添加すると BDT 温度が低下する現象はよく知られているが、この遷移温度の低下もニッケル添加に伴う鉄中の転位易動度上昇で説明できる<sup>(5)(6)</sup>。

### 3. 応力遮蔽効果

シリコン単結晶における BDT 挙動に関する研究は、先の St. John の研究に端を発し、Oxford (Hirsch, Roberts ら) のグループ<sup>(7)-(10)</sup>、Nancy (George, Michot ら) のグループ<sup>(11)-(13)</sup>、Göttingen (Haasen ら) のグループ<sup>(14)-(16)</sup> 等を中心として更に活発な議論がすすめられ、BDT 温度で見られる破壊靱性値の上昇は亀裂先端近傍での転位による応力遮蔽効果と呼ばれる応力緩和過程として説明できることが明らかとなった。次に、この応力遮蔽効果について述べる。

ここでモード I 亀裂を考え、そこに負荷応力拡大係数  $K_I$  が作用し、塑性変形が全く起きていないとすると、亀裂先端近傍の応力  $\sigma_{ij}$  は、よく知られるように、亀裂先端を原点とした極座標 ( $r, \theta$ ) の位置で、次式のように与えられる。

$$\sigma_{ij} = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} f(\theta)_{ij} \quad (2)$$

ここで、 $f(\theta)_{ij}$  は亀裂のモードやその他のき裂の幾何学的条件によって決まる  $\theta$  の関数である。

次に塑性変形が起きた時を考えると、亀裂先端近傍の応力場は、外力に加えて発生した転位の内部応力場も考慮する必要がある。一般に、亀裂先端近傍に転位が導入されると、転位によって生じる内部応力場によって外力と同様に亀裂先端近傍では応力集中が生じる。この転位による応力  $\sigma_{ij}^D$  も式 (2) と同様の形式で以下に表す事ができる。

$$\sigma_{ij}^D = \frac{k_{1d}}{\sqrt{2\pi r}} f(\theta)_{ij} \quad (3)$$

なお、 $k_{1d}$  は転位による局部応力拡大係数である。

式 (2)、(3) より、負荷状態において転位も存在する場合での応力  $\sigma_{ij}^T$  は、次式のように書ける。

$$\begin{aligned} \sigma_{ij}^T &= \sigma_{ij} + \sigma_{ij}^D \\ &= \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} f(\theta)_{ij} + \frac{k_{1d}}{\sqrt{2\pi r}} f(\theta)_{ij} \\ &= \frac{K_I + k_{1d}}{\sqrt{2\pi r}} f(\theta)_{ij} \end{aligned} \quad (4)$$

ここで、 $k_1 = K_I + k_{1d}$  と表され、 $k_1$  は局部応力拡大係数と呼ばれ、亀裂先端にかかる正味の応力拡大係数である。転位が導入された場合、その転位による  $k_{1d}$  は、一般に外力による

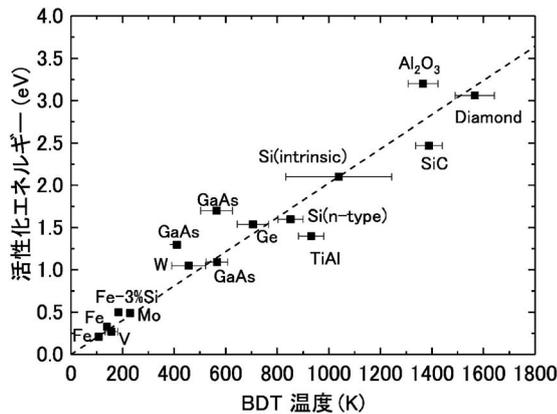


図 2 BDT 温度と活性化エネルギーとの関係<sup>(4)</sup>。

表 1 種々の単結晶から得られた活性化エネルギー。

Material	$\Delta G_{BDT}$ (eV)	$\Delta G_d$ (eV)
Intrinsic Si <sup>(10)(41)</sup>	2.1	2.35
n-type Si <sup>(10)(41)</sup>	1.6	1.7
Sapphire <sup>(42)</sup>	3.2	3.2
Intrinsic Ge <sup>(43)</sup>	1.54	1.58
GaAs <sup>(44)</sup>	1.09 (+0.04/-0.15)	1.1 ± 0.1
Diamond <sup>(45)</sup>	3.06 ± 0.25	2.6 ± 0.5
Mo <sup>(46)</sup>	0.49	0.49

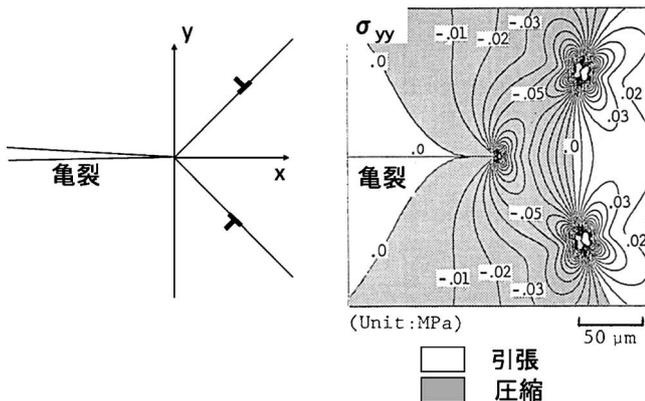


図3 転位による亀裂先端での応力分布<sup>(19)</sup>。

応力集中を緩和する(遮蔽する)ように働き、その際の $k_{ID}$ の符号は負となる。ここで、この応力遮蔽効果を直感的に示すために、Thomson potential<sup>17)</sup>を用いて計算した刃状転位を含む亀裂先端近傍の応力場を図3に示す<sup>(18)(19)</sup>。刃状転位は亀裂先端から100  $\mu\text{m}$ 離れた所に位置し、それらの転位線方向は紙面に垂直で extra half plane はいずれも迂回面に対して亀裂側にあるとする。このような転位は mode I 亀裂が開く際に発生する。図3で示す応力成分は亀裂面に垂直な $\sigma_{yy}$ で、外力は全く負荷されていないため応力場の発生源は転位の弾性応力のみである。転位芯に等高線が集中し、応力集中が生じていることはもちろんであるが、ここで注目すべき点は、それに加え亀裂先端にも応力集中が生じている事にある。この等高線は0.01 MPa毎に描いたもので、さらに陰影を施した領域が負の値、即ち圧縮応力を示している。この圧縮応力は、外力による亀裂先端の引張り応力集中を緩和(遮蔽)するため、亀裂を進展させるためには、より正の応力集中の増加、即ち負荷応力拡大係数を増加させる必要がある。これが転位の応力遮蔽効果を用いた破壊靱性値の上昇メカニズムである。

そこで次に転位遮蔽効果が破壊靱性の増加に実際に寄与することを確かめるため、シリコン単結晶を用いて次のような実験を行った。まず、予亀裂を導入した試料を1137 Kで亀裂先端近傍から塑性変形が発生したことを確認後、除荷、冷却した試料を作製した。次に予亀裂導入後全く高温での予変形を加えない試料を準備した。これら2種類の試片を用いて、新たには全く塑性変形の起こらない室温という条件で破壊靱性値を測定し、両者を比較した。その結果、1137 Kで予変形を与えた試料での破壊靱性値は $1.6 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ となり、予変形を与えなかった試料の破壊靱性値 $1.0 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ と比べ、約1.6倍に上昇した。これより、1137 Kでの変形時に亀裂先端で発生した転位による破壊靱性値の上昇量は $0.6 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ である事がわかる。この値が、式(3)で示した $k_d$ に対応する。このように転位の導入によって破壊靱性値の上昇が認められ、応力遮蔽効果は確かに存在すると言える。

#### 4. 亀裂先端歪場の可視化

前述の転位による亀裂先端近傍の応力遮蔽効果は、転位による弾性場によって生じている。その効果を原子スケールで立証するため、近年提案されている geometric phase analysis (GPA)<sup>(20)</sup>を用いて、転位による遮蔽場の可視化に試みた。この手法は、高分解能電子顕微鏡法を用いて格子像をまず取得し、測定領域の格子像と歪の無い参照領域における格子像とを比較することで、原子サイズスケールでの歪場を測定できる。

図4(a)にシリコンウェハにインデンテーション法を用いて導入した亀裂先端近傍の高分解能電子顕微鏡像を示す<sup>(21)</sup>。亀裂は、図中央上部から中心に向けて伸びてやや開口しており、黒抜きで示している。なお、亀裂面は $\{110\}$ 面、亀裂進展方向は $\langle 100 \rangle$ 方向である。格子像より、亀裂先端に計4本の転位が導入されている事がわかる。FS/RH convention<sup>(22)</sup>に基づきバーガースペクトルの解析を行った結果、いずれの転位の extra-half plane も迂回面を基準として亀裂に近い側に存在していることが明らかとなった。

図4(b)にGPAにより測定した(a)と同領域の歪マップを示す。座標軸は亀裂進展方向をx軸、亀裂面方向をy軸とし $\epsilon_{yy}$ を示す。亀裂先端から約3 nm離れた位置に4箇所の歪集中部が見られる。これは転位による歪場で、いずれの亀裂に近い側に圧縮の歪場を有しており、図3で示した転位での応力集中と対応している。ここで、亀裂先端部分の歪分布に着目してみると、圧縮歪場となっている。このように応力遮蔽効果の存在が原子サイズオーダーでも明らかとなっている。

#### 5. 亀裂先端転位の透過電子顕微(TEM)鏡観察

Lawnら<sup>(23)</sup>は圧痕法で亀裂を導入した試料を薄膜化し、透過電顕観察を行い、この手法が亀裂先端を膜内に含んだTEM試料の作製に有効である事を示した。彼らは更に、この手法で導入された亀裂は非常に鋭いことや、加熱によってその亀裂から発生する事を示した。またChaoとClarck<sup>(24)</sup>は、試料ホルダーと試料の熱膨張率の違いによって亀裂に引張り荷重がかかるように試料を電顕ホルダーにセットし、TEM内で試料を加熱し、亀裂周辺から転位の発生する様子をその場観察した。このように、幾つかの亀裂先端転位像の観察例は報告されていたがTEM試料作製の難しさもあり、シリコン結晶の亀裂先端近傍をTEM観察した例はその後あまり報告されてこなかった。これを打開したのが、集束イオンビーム(Focused Ion Beam: FIB)法の開発である。FIB法は特定領域を選択的に薄膜化する事が比較的容易に行える。坂ら<sup>(25)-(27)</sup>はこの手法を亀裂先端領域の薄膜化に初めて応用し亀裂先端近傍のTEM観察を行った。

亀裂先端近傍での転位は3次元で入り組んでいる。それら転位の3次元構造を明らかにするために強力な手法とし





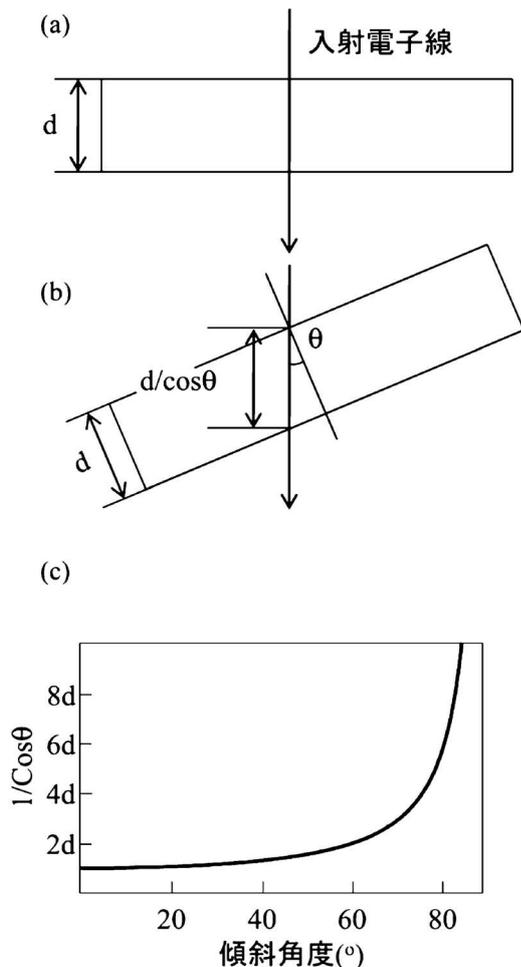


図5 (a)厚さ  $d$  の試料における膜面入射, (b)試料傾斜時の見かけの厚さ, (c)試料の傾斜角度  $\theta$  と見かけの試料厚さとの関係.

きくなる. そのため, 加速電圧の高い電子顕微鏡を使うことでより厚い試料中の転位を観察する事が可能となる. 特に, 超高压電子顕微鏡(HVEM)は1000 kV以上の加速電圧をかけることが可能であることから, HVEM法と電子線トモグラフィーを組み合わせたHVEM-トモグラフィーが転位の三次元構造解析に有効な手段となる. 図6(a), (b)に超高压電子顕微鏡(JEM-1300NEF)で観察した亀裂先端近傍の転位像とその連続傾斜観察より求めた転位の3次元再構築像とを示す. 再構築像を用いることで, 転位が載っている迂り面の同定が容易になる. また, 転位の消滅実験を用いた転位のバーガスベクトルの決定と併せて, 転位の性格付けを行うことによって, これら転位が亀裂先端へ及ぼす影響を計算することが可能となる. 即ち, 転位構造とバーガスベクトルがわかれば, 式(3)中の  $k_d$  の値を計算することが可能となる<sup>(33)</sup>.  $k_d$  計算の結果, これらの転位は亀裂先端を遮蔽するタイプの転位である事が明らかとなった<sup>(34)</sup>. これは, 先ほどの高分解能電子顕微鏡観察結果とよく一致している.

転位の遮蔽(圧縮)場は転位ループの内側に発生し, 転位ループの外側では反遮蔽(引張)場となる. そのため, 迂り面が

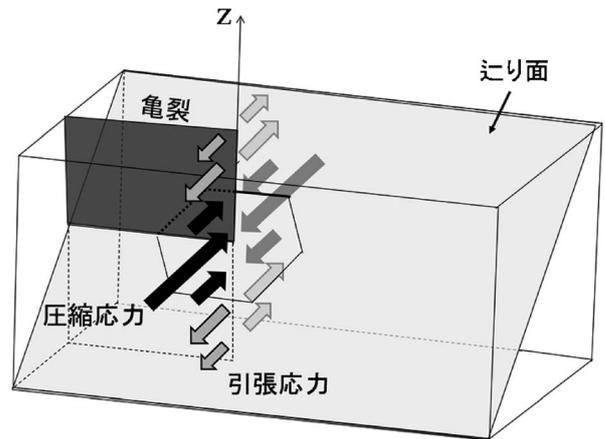


図7 亀裂面に対して迂り面が傾いている際の亀裂先端での応力分布模式図.

亀裂面に対して傾いている場合, 発生した転位は亀裂の前縁全体を遮蔽せずその一部のみを遮蔽する(図7). 一本の転位ループがもたらす反遮蔽場はその転位ループ外側のある位置で最大値をとる<sup>(34)(35)</sup>. 複数の転位ループが発生している亀裂先端における  $k_d$  の計算を実際に観察された転位構造を用いて行ったところ, 転位ループの中心から約  $1 \mu\text{m}$  離れた位置に反遮蔽のピークが見られた. 反遮蔽がピークになる亀裂先端部が新たな転位源として働くことが示唆される. 実際に, 同じ試料のTEM観察で見られた転位源間隔は  $0.6 \sim 1 \mu\text{m}$  であった. このことから迂り面が亀裂面と傾いている試料において, 次のような亀裂前縁での転位源増殖モデルが構築できる<sup>(34)(35)</sup>. (1)亀裂先端でまず転位ループが発生する. (2)発生した転位ループの反遮蔽場によって生じる引張力が亀裂前縁上にある別の転位源を活動させる駆動力となり, 新たな転位ループが発生する. (3)このプロセスが連鎖的に起こることにより, 亀裂前縁全体が転位によって覆われる. (4)亀裂先端からの転位発生が続くと, 亀裂先端近傍で転位の2重交叉迂りが起こる. この転位がFrank-Read源となり, 亀裂前縁以外での転位増殖が進む. このように, 亀裂先端近傍での転位の爆発的な増殖が図1で見られる破壊靱性値の急激な上昇を引き起こすことになる.

TEMの観察試料が厚くなれば, 試料中に含まれる転位の数が多くなり転位構造に関する情報は増す一方で, 試料厚さの増加に伴う電子線の色収差の影響が大きくなる. 色収差の増加は像質の低下をもたらすため, 像内に含まれる転位の数は増えるがその解析が困難になる. 図8にシリコン結晶において膜厚が  $0.1 \mu\text{m}$ ,  $4.1 \mu\text{m}$  での電子エネルギー損失スペクトルを示す. 膜厚が  $0.1 \mu\text{m}$  の場合には, 電子エネルギー損失は0の位置にピークが現れ, 電子エネルギー損失の分散幅も高々  $30 \text{ eV}$  程度であるのに対し, 膜厚が  $4.1 \mu\text{m}$  の場合には, 電子エネルギー損失が0の位置にはほとんど強度は見られず, 電子エネルギー損失スペクトルの分散も  $1000 \text{ eV}$  にわたる. 更に膜厚が増加すると, 電子エネルギー損失スペクトルの分散は更に大きくなり, 電子線は透過するものの転位像

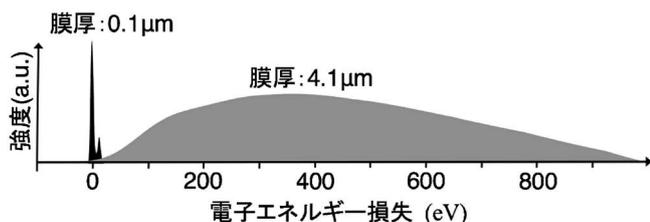


図8 シリコン単結晶における電子エネルギー損失スペクトル<sup>(36)</sup>.

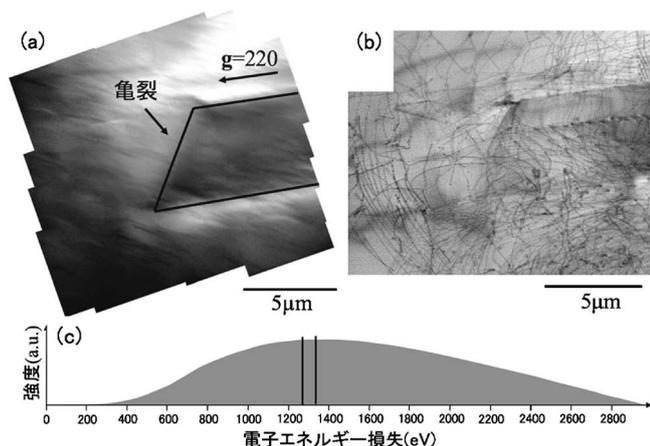


図9 (a)試料膜厚 10 μm のシリコン単結晶における亀裂先端 HVEM 明視野像(Ω-フィルター無し), (b)Ω-フィルター使用時における(a)と同領域のHVEM 明視野像, (c)観察試料から得られた電子エネルギー損失スペクトル. 図中の黒線は, 結像に用いた電子エネルギー損失域<sup>(36)</sup>.

の明瞭な観察は困難となる. 図9(a)および(c)に膜厚が約 10 μm のシリコン単結晶の HVEM 明視野像およびその電子エネルギー損失スペクトルを示す. この膜厚ではエネルギー損失スペクトルの幅が 2800 eV にも達する. 図9(a)中に線で囲った領域は亀裂であるが, 像がぼけてしまいもはや亀裂及び転位の像を識別することはできない(なお, この図は非点収差も含んでいる). そこで, Ω型フィルターを用い, エネルギー損失スペクトルの中で最も強度が高い 1360 eV を中心に ±40 eV の電子のみが結像に寄与するようにして, 結像した明視野像が図9(b)である<sup>(36)</sup>. 図9(a)とほぼ同じ視野領域であるが, 亀裂と転位が明確に識別できる. このようにエネルギーフィルター法を応用することによって, 厚さ 10 μm に達する試料中の転位の観察も可能となってきている.

## 6. おわりに

BDT 挙動にも見られるような破壊挙動は, これまで現象論としての取り扱いが多いように思われる. そのような中, Thomson らによって提唱された破壊の物理によって, 転位論を基盤として扱えるようになった. このような取り扱いの妥当性は, シリコン結晶などのモデル単結晶を用いて確かめ

られて来た. 一方, 実用上重要な鋼などの構造用金属材料では, 結晶粒径<sup>(37)(38)</sup>や添加元素の影響<sup>(5)(39)(40)</sup>など材料組織や冶金学的因子が靱性に大きく影響する. それらが BDT 挙動に与える影響について一つ一つ明らかにし, その物理的メカニズムを明らかにしていくことが今後重要である.

本稿で取り上げた内容の一部は科学研究費補助金(26249106, H1504147)により支援を受けて得られた成果を含んでいる. ここに謝意を表す.

## 文 献

- (1) J.R. Rice and R. Thomson: *Philos. Mag.*, **29**(1974), 73-97.
- (2) J.R. Rice: *J. Mech. Phys. Solids*, **40**(1992), 239-271.
- (3) C. St. John: *Philos. Mag.*, **32**(1975), 1193-1212.
- (4) A. Giannattasio, M. Tanaka, T.D. Joseph and S.G. Roberts: *Physica Scripta*, **T128**(2007), 87-90.
- (5) 前野圭輝, 田中将己, 吉村信幸, 白幡浩幸, 潮田浩作, 東田賢二: *鉄と鋼*, **98**(2012), 667-674.
- (6) K. Okazaki: *Journal of Materials Science*, **31**(1996), 1087-1099.
- (7) P.B. Hirsch: *Mater. Trans., JIM*, **30**(1989), 841-855.
- (8) P.B. Hirsch, S.G. Roberts and J. Samuels: *Proc. R. Soc. Lond. A*, **421**(1989), 25-53.
- (9) P.B. Hirsch and S.G. Roberts: *Philos. Mag. A*, **64**(1991), 55-80.
- (10) J. Samuels and S.G. Roberts: *Proc. R. Soc. Lond. A*, **421**(1989), 1-23.
- (11) G. Michot: *Cryst. Prop. Prep.*, **17-18**(1988), 55-98.
- (12) A. George and G. Michot: *Mater. Sci. Eng. A*, **164**(1993), 118-134.
- (13) M.A.L. de Oliveira and G. Michot: *Acta Mater.*, **46**(1998), 1371-1383.
- (14) R. Behrensmeier, M. Brede and P. Haasen: *Scripta Metall.*, **21**(1987), 1581-1585.
- (15) M. Brede and P. Haasen: *Acta Metall.*, **36**(1988), 2003-2018.
- (16) T.Y. Zhang and P. Haasen: *Philos. Mag. A*, **60**(1989), 15-38.
- (17) R. Thomson: F. Seitz and D. Turnbull (Eds.), *Solid state physics*, vol. 39, Academic Press, INC., Orlando, San Diego, New York, Austin, Boston, London, Sydney, Tokyo, Toronto, (1986), 1-129.
- (18) N. Narita, K. Higashida, T. Torii and S. Miyagi: *Mater. Trans. JIM*, **30**(1989), 895-907.
- (19) K. Higashida and N. Narita: *JJAP Ser.2, Lattice Defects in Ceramics* (1989), 39-43.
- (20) M.J. Hÿtch, E. Snoeck and R. Kilaas: *Ultramicroscopy*, **74**(1998), 131-146.
- (21) D.R. Adhika, M. Tanaka, T. Daio and K. Higashida: *Microscopy*, **64**(2015), 335-340.
- (22) J.P. Hirth and J. Lothe: *Theory of dislocations*, McGraw-Hill, (1986), 19-25.
- (23) B.R. Lawn, B.J. Hockey and S.M. Wiederhorn: *J. Mater. Sci.*, **15**(1980), 1207-1223.
- (24) Y.-H. Chiao and D.R. Clarke: *Acta Metall.*, **37**(1989), 203-219.
- (25) H. Saka and G. Nagaya: *Philos. Mag. Lett.*, **36**(1995), 73-75.
- (26) H. Saka and S. Abe: *Japan Soc. Electr. Microscopy*, **1**(1997), 45-57.
- (27) Su Prijadi and H. Saka: *Philos. Mag. Lett.*, **78**(1998), 435-443.
- (28) 金子賢治, 馬場則男, 陣内浩司: *顕微鏡*, **45**(2010), 37-41.
- (29) P.A. Midgley and R.E. Dunin-Borkowski: *Nature Materials*, **8**(2009), 271-280.
- (30) J.S. Barnard, J. Sharp, J.R. Tong and P.A. Midgley: *Science*, **313**(2006), 319.
- (31) J.S. Barnard, J. Sharp, J.R. Tong and P.A. Midgley: *Philos. Mag.*, **86**(2006), 4901-4922.



# 希土類系金属ガラスにおける 動的緩和挙動の支配因子

山崎 由勝\*

## 1. 緒 言

### (1) 金属ガラス

ガラス物質の歴史は古く、紀元前4,000年より前から製造が始まったとされている。酸化ガラスやポリマーなど、金属を除いた無機・有機物質の分野においては決して珍しいものではない。しかし、金属においては従来、ガラス状態は得られないと考えられてきた。ところが、1960年に Duwez らによって、Au-Si 共晶合金の液体を超急冷(冷却速度:  $10^6$  K/s 以上)することで、金属ガラスが得られることが初めて見出された<sup>(1)</sup>。1990年頃になると、Inoue らによって、Mg 基や La 基、Zr 基など、過冷却液体における熱的安定性が高い金属ガラスが相次いで開発された<sup>(2)</sup>。これにより、現在では金属ガラスの研究が飛躍的に進んでいる。

### (2) 金属ガラスにおける動的緩和現象

ガラス形成過程は、液体構造が冷却過程で準安定平衡状態まで緩和せず、非平衡状態においてキネティクスが凍結される現象と理解される。過冷却液体及びガラス固体における緩和現象を深く理解するということは、ガラス構造の理解やその制御方法の確立などに繋がり、これまで“物性物理学における主要な未解決問題”とされてきたガラス科学にブレークスルーをもたらす切っ掛けになるかもしれない。

金属ガラスにおける過冷却液体状態は、他のガラス物質と比べて熱的安定性が低く、比較的短時間で結晶状態へと変態してしまうため、金属ガラスにおける緩和現象の研究のほとんどは、ガラス転移温度以下のガラス固体温度領域で行われてきた。特に、Pelletier らが、 $\text{Pd}_{43}\text{Cu}_{27}\text{Ni}_{10}\text{P}_{20}$  金属ガラスにおいて観測される動的ガラス転移及び  $\text{sub-}T_g$  緩和がそれぞれ、他のガラス物質においても観測される  $\alpha$  緩和及び  $\beta$

緩和に対応することを指摘して<sup>(3)</sup>以降、金属ガラスの動的緩和現象の解釈が大きく進んだ。

ほとんどの金属ガラスは共通して  $\alpha$  緩和が観測される一方で、 $\beta$  緩和が  $\alpha$  緩和の低温側又は高周波側に Peak や Shoulder として明瞭に観測される合金系は限られている。 $\beta$  緩和が明瞭に観測されない合金系の代表として、Zr-Cu 系金属ガラスが挙げられる。Rösner らは、 $\text{Zr}_{65}\text{Cu}_{27.5}\text{Al}_{7.5}$  金属ガラスにおいて、 $\alpha$  緩和ピークの低温側に Excess wing と呼ばれる別の緩和モードが存在することを示すと共に、Excess wing と  $\beta$  緩和との関係について言及した<sup>(4)</sup>。Ngai らは、カップリングモデル解析により、 $\text{Zr}_{65}\text{Cu}_{27.5}\text{Al}_{7.5}$  金属ガラスの Johari-Goldstein (J-G) 緩和<sup>(5)</sup>が Excess wing の観測された温度・周波数領域で発生し得ることを示し、Excess wing と  $\beta$  緩和が同一の現象であるとする Rösner らの考えを支持した<sup>(6)</sup>。これにより、 $\alpha$  緩和及び  $\beta$  緩和は金属ガラスにおいて普遍的に存在し、Excess wing は  $\beta$  緩和が  $\alpha$  緩和に一部埋没しているために明瞭に観測されないとの見方が一般的になった。

### (3) $\alpha$ 緩和と $\beta$ 緩和のカップリング度

金属元素のみから構成される、いわゆる金属-金属系の金属ガラスのほとんどは、 $\beta$  緩和が  $\alpha$  緩和の低温側又は高周波側に Excess wing として観測される<sup>(7)</sup>。これは  $\alpha$  緩和と  $\beta$  緩和の活性化エネルギーの差が小さいことを意味しており、ガラス構造が共有結合と比較して異方性の小さい金属結合による均質な構造で形成されていることを考えると、一見自然であるように思える。ところが、同じく金属-金属系に分類される RE-TM 系(RE: 希土類元素, TM = Ni, Co) 金属ガラスにおいては、 $\beta$  緩和が  $\alpha$  緩和から明瞭に分離して Peak として観測され<sup>(8)(9)</sup>、これは直感的には理解し難い挙動である。

\* 宇部工業高等専門学校; 助教(〒755-8555 宇部市常盤台 2-14-1)

Dominant Factor of Dynamic Relaxation Behaviors in Rare-earth-based Metallic Glasses; Yoshikatsu Yamazaki\* (\*Research Group, Department of Mechanical Engineering, Ube National College of Technology, Ube)

Keywords: metallic glass, amorphous alloy, dynamic relaxation,  $\alpha$ -relaxation,  $\beta$ -relaxation

2017年6月28日受理[doi:10.2320/materia.56.604]

これまでの研究を鑑みると、金属ガラスにおける $\alpha$ 緩和と $\beta$ 緩和のそれぞれの緩和時間分布の重なり度合い、つまり、カップリング度の大小には、構成元素濃度よりも構成元素種の方が大きく影響しているように思える<sup>(8)-(10)</sup>。例えば、 $Y_{60}TM_{15}Al_{25}$  (TM=Ni, Co, Cu, Fe)系<sup>(9)</sup>や $La_{70}TM_{15}Al_{15}$  (TM=Ni, Co, Cu)系<sup>(8)</sup>金属ガラスにおいて、添加する遷移金属の種類によって、 $\alpha$ 緩和と $\beta$ 緩和のカップリング度の大小が顕著に変化することが報告されている。Yuらは、このような $\alpha$ 緩和と $\beta$ 緩和のカップリング度の大小における合金組成依存性について、“異種元素間の混合エンタルピーが全て似たような値であり、かつ、それらの値が負に大きいほど、 $\alpha$ 緩和と $\beta$ 緩和のカップリング度は小さくなる”という経験則を見出している<sup>(11)</sup>。一方で、 $Pd_{43}Cu_{27}Ni_{10}P_{20}$ 金属ガラスにおいて、 $\alpha$ 緩和は構成元素中で最も原子半径が大きいPdの拡散、 $\beta$ 緩和は構成元素中で最も原子半径が小さいPの拡散が密接に関係していることが実験的に示されている<sup>(7)</sup>。この結果は、構成元素間の原子サイズのミスマッチも、 $\alpha$ 緩和と $\beta$ 緩和のカップリング度の大小に影響を与えていることを示唆している。

ところで、これまで金属ガラスの合金設計には、①構成元素数、②原子半径比、③混合エンタルピー、④換算ガラス化温度 $T_g/T_1$  ( $T_g$ : ガラス転移温度、 $T_1$ : 液相線温度)といった因子がしばしば用いられてきた<sup>(2)</sup>。これらの因子は簡便であるという利点をもつ。 $\alpha$ 緩和と $\beta$ 緩和のカップリング度の大小を支配する因子についても、このような簡便な因子によって説明ができれば、合金設計指針として即座に展開可能になる。以降、著者らが、①原子半径比、②混合エンタルピー、③構成元素の融点といった各因子と、 $\alpha$ 緩和と $\beta$ 緩和のカップリング度の大小との関係について検討した結果<sup>(12)</sup>を紹介する。前述したように、ガラス形成の本質は緩和現象にあるため、本結果はガラス構造の不均質性やガラス形成能、塑性変形能など様々な性質の理解において、重要な手掛かりになると著者らは考えている。

## 2. La 基金属ガラスを用いた $\alpha$ , $\beta$ 緩和カップリング度の支配因子の検討

前述したように、希土類基金属ガラスにおける $\alpha$ 緩和と $\beta$ 緩和のカップリング度の大小は、添加する遷移金属の種類に敏感であることが報告されている。これまでガラス形成することが報告されているLa-Al系金属ガラスは、La-TM-Al (TM=Ni, Cu, Co, Pd, Au)である<sup>(10)(13)-(15)</sup>。著者らは、新たにLa-TM-Al (TM=Ag, Pt, Rh, Ir)においてもガラス形成することを見出している<sup>(12)</sup>。これらは、Laの原子半径が1.88 Å (0.188 nm)、Alの原子半径が1.43 Å (0.14 nm)であり、遷移金属TM (Cu, Ag, Au, Ni, Pd, Pt, Co, Rh, Ir)は原子半径が1.25~1.45 Å (0.125~0.145 nm)と幅広い値を持つ<sup>(16)</sup>。構成元素間の混合エンタルピーは、La-Al間が-38 kJ/molであり、Cu-Al間の-1 kJ/molからLa-Pt間の-80 kJ/molまで幅広い値を持つ<sup>(17)</sup>。構成元素の融点は、Laが1193 K、Alが933 Kであり、Cuの1358 KからIrの2739 Kまでこれも幅広い値を持つ。従って、 $\alpha$ 緩和と $\beta$ 緩和のカ

ップリング度の大小と、①原子半径比、②混合エンタルピー、③構成元素の融点といった各因子との関係を系統的に調査する上で最適な合金系だと言える。また、調査対象をLa-Al系金属ガラスに限定することで、汎用性は欠くが議論の複雑性を排除することができる。よって、差し当たりLa-Al系金属ガラスを調査対象として絞り、導出した結果の一般性は後に議論することにした。

### (1) 混合エンタルピー差が動的緩和挙動に及ぼす影響

図1(a)~(d)に $La_{60}TM_{10}Al_{30}$  (TM=Cu, Ag, Au, Ni, Pd, Pt, Co, Rh, Ir)金属ガラスの動的緩和挙動を示す。定速加熱(3 K/min)・定周波数(1 Hz)下での動的な応力緩和挙動を測定しており、横軸は温度 $T$ を $\alpha$ 緩和のピーク温度 $T_\alpha$ で規格化した値 $T/T_\alpha$ 、縦軸は損失弾性率 $E''$ を $\alpha$ 緩和のピーク強度 $E''_\alpha$ で規格化した値 $E''/E''_\alpha$ である。図1(a)に示されるように、 $La_{60}(Ni, Co)_{10}Al_{30}$ 金属ガラスにおいては $\beta$ 緩和が $\alpha$ 緩和の低温側にPeakとして観測され(Peak型)、 $La_{60}Cu_{10}Al_{30}$ 金属ガラスにおいては $\beta$ 緩和が $\alpha$ 緩和の低温側にShoulderとして観測された(Shoulder型)。この傾向は従来の結果と一致している<sup>(8)</sup>。Ni, Co, Cuは原子半径がそれぞれ1.25, 1.25, 1.28 Å (0.125, 0.125, 0.128 nm)<sup>(16)</sup>と比較的近く、Yuらが指摘するように合金中の混合エンタルピー環境の差異が $\alpha$ 緩和と $\beta$ 緩和のカップリング度の大小に影響を与えていると考えられる<sup>(11)</sup>。Yuらの経験則<sup>(11)</sup>は、“各異種原子ペアの混合エンタルピー $\Delta H_{ij}^{mix}$ の差が小さい”と言い換えることができる。今、La-TM-Al系金属ガラスにおいて遷移金属TMのみを変えているため、TM周りの混合エンタルピー環境のみに着目すればよい。つまり、構成元素間の混合エンタルピー差として、 $|\Delta H_{TM-La}^{mix} - \Delta H_{TM-Al}^{mix}|$ をパラメータとして導入する。ここで、 $\Delta H_{ij}^{mix}$ は元素i-j間の混合エンタルピーを表す。 $La_{60}Ni_{10}Al_{30}$ 及び $La_{60}Co_{10}Al_{30}$ 金属ガラスにおける混合エンタルピー差 $|\Delta H_{TM-La}^{mix} - \Delta H_{TM-Al}^{mix}|$ はそれぞれ、5及び2 kJ/molと求まる。一方、 $La_{60}Cu_{10}Al_{30}$ 金属ガラスにおいては20 kJ/molと求まる。ここで、構成元素間の混合エンタルピーには、Takeuchiらによって報告されている計算値を用いた<sup>(17)</sup>。

$\beta$ 緩和Peak型である $La_{60}(Ni, Co)_{10}Al_{30}$ 金属ガラスと混合エンタルピー環境が似ている合金として $La_{60}Rh_{10}Al_{30}$ 金属ガラスが挙げられる。 $La_{60}Rh_{10}Al_{30}$ 金属ガラスにおける混合エンタルピー差 $|\Delta H_{Rh-La}^{mix} - \Delta H_{Rh-Al}^{mix}|$ は4 kJ/molであり、 $La_{60}(Ni, Co)_{10}Al_{30}$ 金属ガラスにおよそ近い値を有する。従って、 $La_{60}Rh_{10}Al_{30}$ 金属ガラスは、 $\alpha$ 緩和と $\beta$ 緩和のカップリング度は小さく、 $\beta$ 緩和Peak型を示すと予測される。また、 $\beta$ 緩和Shoulder型である $La_{60}Cu_{10}Al_{30}$ 金属ガラスと混合エンタルピー環境が似ている合金として $La_{60}(Ag, Ir)_{10}Al_{30}$ 金属ガラスが挙げられる。 $La_{60}Ag_{10}Al_{30}$ 金属ガラスにおける混合エンタルピー差 $|\Delta H_{Ag-La}^{mix} - \Delta H_{Ag-Al}^{mix}|$ は23 kJ/mol、 $La_{60}Ir_{10}Al_{30}$ 金属ガラスにおける混合エンタルピー差 $|\Delta H_{Ir-La}^{mix} - \Delta H_{Ir-Al}^{mix}|$ は18 kJ/molであり、これらは $La_{60}Cu_{10}Al_{30}$ 金属ガラスにおよそ近い値を有する。従って、 $La_{60}(Ag, Ir)_{10}Al_{30}$ 金属ガラスは $\alpha$ 緩和と $\beta$ 緩和のカップリング度は中程度であり、 $\beta$ 緩和Shoulder型を示すと予測され

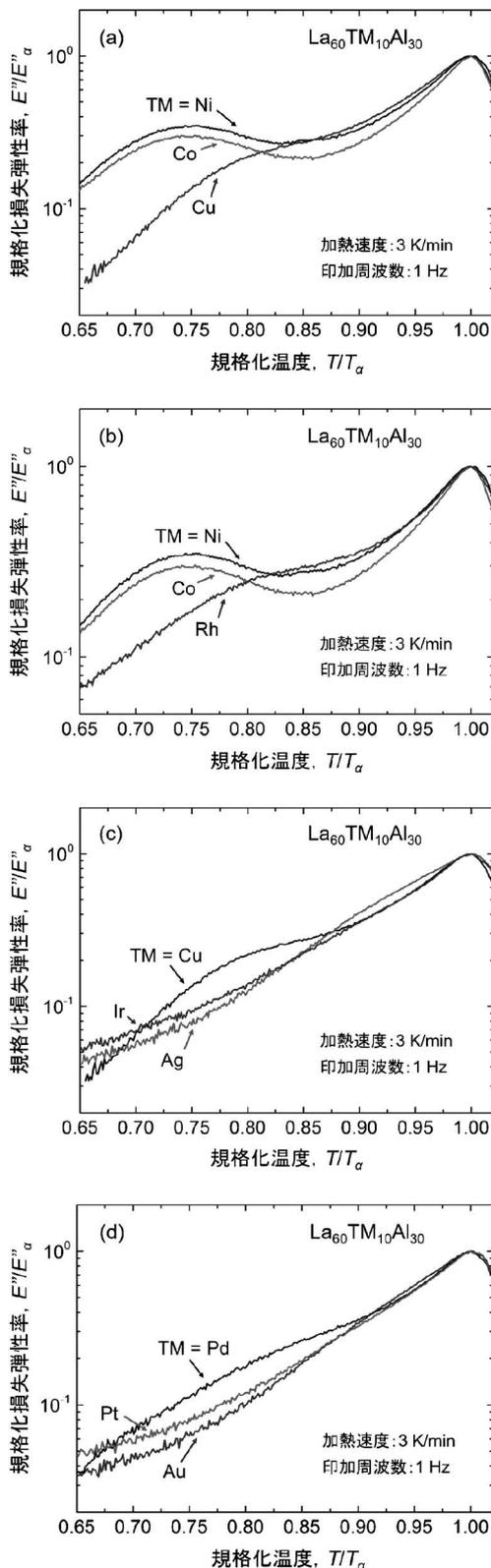


図1  $\text{La}_{60}\text{TM}_{10}\text{Al}_{30}$  (TM: 遷移金属) 金属ガラスにおける  $\alpha$  緩和のピーク強度で規格化した損失弾性率  $E''/E''_{\alpha}$  の温度依存性. 温度  $T$  は  $\alpha$  緩和のピーク温度  $T_{\alpha}$  で規格化した. このときの印加周波数は 1 Hz, 加熱速度は 3 K/min とした. (a)  $\text{La}_{60}\text{TM}_{10}\text{Al}_{30}$  (TM = Ni, Co, Cu), (b)  $\text{La}_{60}\text{TM}_{10}\text{Al}_{30}$  (TM = Ni, Co, Rh), (c)  $\text{La}_{60}\text{TM}_{10}\text{Al}_{30}$  (TM = Cu, Ir, Ag), (d)  $\text{La}_{60}\text{TM}_{10}\text{Al}_{30}$  (TM = Pd, Pt, Au).

る. しかし, 図 1 (b), (c) に示されるように,  $\text{La}_{60}\text{Rh}_{10}\text{Al}_{30}$  金属ガラスは  $\beta$  緩和 Shoulder 型,  $\text{La}_{60}(\text{Ag}, \text{Ir})_{10}\text{Al}_{30}$  金属ガラスは  $\beta$  緩和 Excess wing 型であった. 従って, La-TM-Al 系金属ガラスにおいて, 構成元素間の混合エンタルピー差だけでは,  $\alpha$  緩和と  $\beta$  緩和のカップリング度の大小は説明できない. しかし, 金属ガラスにおける  $\alpha$  緩和と  $\beta$  緩和のカップリング度の大小は, Yu らの経験則<sup>(11)</sup> で概ね説明できるため, 構成元素間の混合エンタルピーが主要な因子の一つであることには間違いのないであろう.

## (2) 原子半径比が動的緩和挙動に及ぼす影響

第二の因子として, 構成元素間の原子半径比  $R_{\text{TM}}/R_{\text{La}}$  を導入し検討する. ここで,  $R_{\text{TM}}$  は溶質元素である遷移金属 TM の原子半径 ( $R_{\text{TM}} = 1.25 \sim 1.45 \text{ \AA}$ ),  $R_{\text{La}}$  は主成分元素である La の原子半径 ( $R_{\text{La}} = 1.88 \text{ \AA}$ ) を表しており, 原子半径は文献値 (16) を用いた. 表 1 に,  $\text{La}_{60}\text{TM}_{10}\text{Al}_{30}$  (TM = Cu, Ag, Ni, Co, Rh, Ir) 金属ガラスにおける, 構成元素間の混合エンタルピー差  $|\Delta H_{\text{TM-La}}^{\text{mix}} - \Delta H_{\text{TM-Al}}^{\text{mix}}|$  及び原子半径比  $R_{\text{TM}}/R_{\text{La}}$  を示す.  $\beta$  緩和 Peak 型である  $\text{La}_{60}(\text{Ni}, \text{Co})_{10}\text{Al}_{30}$  金属ガラスと  $\beta$  緩和 Shoulder 型である  $\text{La}_{60}\text{Rh}_{10}\text{Al}_{30}$  金属ガラスは, 構成元素間の原子半径比  $R_{\text{TM}}/R_{\text{La}}$  が  $\text{La}_{60}\text{Rh}_{10}\text{Al}_{30}$  金属ガラスの方が大きい ( $R_{\text{Ni}}/R_{\text{La}} = R_{\text{Co}}/R_{\text{La}} < R_{\text{Rh}}/R_{\text{La}}$ ). そして,  $\beta$  緩和 Shoulder 型である  $\text{La}_{60}\text{Cu}_{10}\text{Al}_{30}$  金属ガラスと  $\beta$  緩和 Excess wing 型である  $\text{La}_{60}(\text{Ag}, \text{Ir})_{10}\text{Al}_{30}$  金属ガラスは, 構成元素間の原子半径比  $R_{\text{TM}}/R_{\text{La}}$  が  $\text{La}_{60}(\text{Ag}, \text{Ir})_{10}\text{Al}_{30}$  金属ガラスの方が大きい ( $R_{\text{Cu}}/R_{\text{La}} < R_{\text{Ir}}/R_{\text{La}} < R_{\text{Ag}}/R_{\text{La}}$ ). 従って, 構成元素間の原子半径比  $R_{\text{TM}}/R_{\text{La}}$  が小さくなる, つまり原子サイズのミスマッチが大きくなるほど,  $\alpha$  緩和と  $\beta$  緩和のカップリング度は小さくなる傾向にあると言えそうである.

ところが, 図 1 (d) に示されるように,  $\text{La}_{60}\text{TM}_{10}\text{Al}_{30}$  (TM = Pd, Pt, Au) 金属ガラスは, 構成元素間の混合エンタルピー差  $|\Delta H_{\text{TM-La}}^{\text{mix}} - \Delta H_{\text{TM-Al}}^{\text{mix}}|$  及び原子半径比  $R_{\text{TM}}/R_{\text{La}}$  が  $\beta$  緩和 Excess wing 型である  $\text{La}_{60}\text{Ir}_{10}\text{Al}_{30}$  金属ガラスよりも大きい,  $\text{La}_{60}\text{Pd}_{10}\text{Al}_{30}$  金属ガラスが例外的に  $\beta$  緩和 Shoulder 型を示した. ただ,  $\text{La}_{60}\text{Pd}_{10}\text{Al}_{30}$  金属ガラスで見られる  $\beta$  緩和は  $\text{La}_{60}(\text{Cu}, \text{Rh})_{10}\text{Al}_{30}$  金属ガラスよりも不明瞭であり,  $\alpha$  緩和と  $\beta$  緩和のカップリング度は比較的大きいと言える. 従って, La-TM-Al 系金属ガラスにおける  $\alpha$  緩和と  $\beta$  緩和のカップリング度は, 構成元素間の混合エンタルピー差及び原子半径比によりほとんど説明でき, 別に第三の因子がマイナーな因子として働いていると考えられる. 著者らは, この第

表 1  $\text{La}_{60}\text{TM}_{10}\text{Al}_{30}$  (TM = Ni, Co, Rh, Cu, Ir, Ag) 金属ガラスにおける構成元素間の混合エンタルピー差  $|\Delta H_{\text{TM-La}}^{\text{mix}} - \Delta H_{\text{TM-Al}}^{\text{mix}}|$ , 原子半径比  $R_{\text{TM}}/R_{\text{La}}$ . ここで,  $\Delta H_{\text{TM-La}}^{\text{mix}}$  は元素 i-j 間の混合エンタルピー,  $R_i$  は元素 i の原子半径を表す.

$\text{La}_{60}\text{Al}_{30}\text{TM}_{10}$	$ \Delta H_{\text{TM-La}}^{\text{mix}} - \Delta H_{\text{TM-Al}}^{\text{mix}}  [\text{kJ/mol}]$	$R_{\text{TM}}/R_{\text{La}}$
Ni	5	0.66
Co	2	0.66
Rh	4	0.72
Cu	20	0.68
Ir	18	0.72
Ag	23	0.77



# 開発裏話～構造用素材として優れたコストパフォーマンスを持つ 省合金型二相ステンレス鋼(NSSC<sup>®</sup>2120)の開発

及川雄介<sup>1)</sup> 柘植信二<sup>2)</sup> 江目文則<sup>3)</sup>  
本村 洋<sup>4)</sup> 井上裕滋<sup>\*\*</sup>

## 1. 開発の背景

製造業における中国の台頭は各業界で見られる現象であるが、ステンレス鋼に関しても2009年からのわずか6年間で粗鋼生産量を2倍以上増やし世界の約半分を占めるまでになってきており<sup>(2)</sup>、過剰な生産能力が、日本の業界にとって相当な脅威となっている。ステンレス鋼の鋼種構成は、汎用鋼種のSUS304系が全ステンレスの4割以上を占めている<sup>(3)</sup>が、当該鋼は製造が容易であるため、中国に対し、コストを含めた競争力を維持するのは相当難しい。従って、日本のメーカーが生き残るには、付加価値を持ちかつコスト競争力も有するステンレス鋼の開発が重要になってくる。

二相ステンレス鋼は従来より、汎用ステンレス鋼より高強度高耐食(かつ高価)な材料としてケミカルタンカー等に使われてきた。特に脚光を浴びるようになったのは、2004年頃からの合金の高騰のもとで、ニッケルの使用量が少ないために、オーステナイト系ステンレス鋼より相対的に割安になったことがきっかけである。同じ頃当社も二相ステンレス鋼ラインナップの拡充に着手した。

その中で二相ステンレス鋼の持つ高強度(高耐力)でニッケルの含有量が少ない特長を活かすことで、前述の命題が実現できるのではと考え、コスト競争力のある省合金型に焦点を当て開発に取り組んだ。

## 2. 鋼種開発に関する裏話

二相ステンレス鋼に関して、Blomの文献<sup>(4)</sup>に“Nitrogen Paradox”という記述がある。これは、溶接部の特性を低下させるクロム窒化物の析出を抑制するには、オーステナイト相再析出を促進するために、敢えて窒素含有量を高める対策が有効なことを説明している用語である。この、一見常識の逆に見える考えが、現在二相ステンレス鋼においては常識と

なっている。当然、この考えが最初から常識だったわけではなく、初期材の大きな問題であった溶接部の耐食性劣化を解決する方策として1960～70年代に開発がなされた成果である<sup>(5)</sup>。しかしながら、以降は、「窒素は固溶しうる最大限まで添加した方が良い」「オーステナイト相の再析出量を増加させれば良い」という考えが固定され、これを前提に開発が進められてきたように思う。実際、省合金型(リーン)二相ステンレス鋼についても、0.2%を超える高窒素系が多数開発されてきた。それに対し本開発では、溶接熱影響部の詳細観察により、省合金型に関してはフェライト単相にならない二相加熱領域の窒化物析出を抑制する必要があることを見出し、それより、「二相ステンレス鋼における常識」から一歩進んだステージとして、①フェライト単相加熱領域のオーステナイト再析出は確保しつつ、②クロム窒化物の析出駆動力も抑制するという二元での成分設計を提案するに至ったものである(図1参照)。

更に、窒化物析出駆動力抑制については、単に窒素のみの最適値を見つけるのではなく、Thermo-Calc<sup>®</sup>による状態図計算により、各成分の寄与を統合して窒化物平衡析出温度を

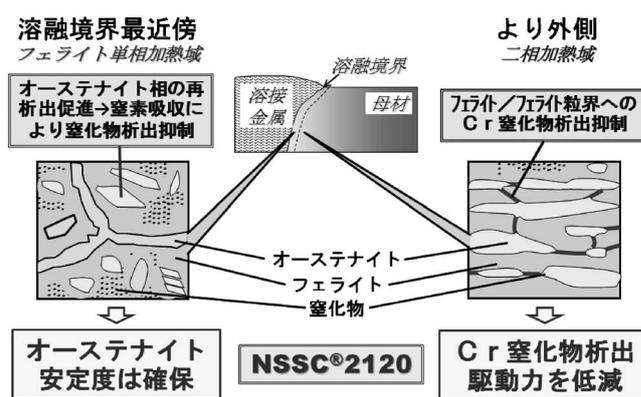


図1 NSSC<sup>®</sup>2120成分設計のポイント。

\* 新日鐵住金ステンレス株式会社；1)研究センター 主任研究員 2)リサーチフェロー 3)商品開発部 部長 4)光製造所 部長代理

\*\* 新日鐵住金株式会社 鉄鋼研究所 接合研究部；上席主幹研究員(現 大阪大学接合科学研究所)；教授

Development of Lean Duplex Stainless Steel that is Cost-effective as a Material for Structure; Yusuke Oikawa\*, Shinji Tsuge\*, Fuminori Gohnome\*, Hiroshi Motomura\*, Yuji Inoue\*\* (\*Nippon Steel and Sumikin Stainless Steel Corporation, Hikari. \*\*Nippon Steel & Sumitomo Metal Corporation, Futtsu)

Keywords: lean duplex stainless, material for structure, welding, heat affected zone, nitride precipitation, solution proposed, flood gate

(まてりあ第55巻 2号70-72頁「新技術・新製品」掲載)

2017年7月31日受理[doi:10.2320/materia.56.608]



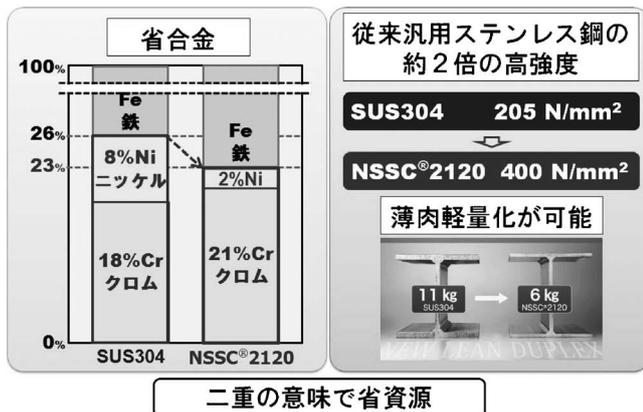


図2 NSSC®2120の特長.

算出する方法を考えた. これにより, 窒化物析出駆動力, オーステナイト再析出特性だけでなく, 製造性や合金コスト等も考え合わせた多次元で成分を最適化することが可能となった.

### 3. 製造技術と拡販ソリューションの大きな貢献

本鋼が多くのお客様にお使い頂ける存在となったのは研究開発のみによる成果ではなく, 製造技術と拡販ソリューションが非常に大きな貢献を果たしていることを強調したい. 以下に概要を記す.

#### (1) 安定的生産体制の確立

製造性に関しては, 高コスト製造が許されない省合金型の方が却って铸片気泡や表面疵を生じやすいというジレンマがあり, 開発当初は「付加価値を持ちコスト競争力を有する」というコンセプトが成立しない可能性もあった. これに対し, ほとんど全ての工程で生じていた種々の課題を, ポイント部分では的確な設備投資を行い(高性能レバラー, 高効率酸洗設備等), それ以外では一つ一つの工程でソフト的な工夫を施すことにより, 汎用ステンレス鋼レベルの高い生産性を持つ製造工程を実現した. この生産性の高さは, 当社が二相ステンレス鋼を提供する上で大きな強みになっている.

#### (2) ソリューション提案による新たな市場開拓

生産性の高い製造工程を確立したことで, ①高強度で軽量化が可能で, ②良好な溶接性を有し, 更に③汎用鋼レベルの生産性も達成した二相ステンレス鋼を実現した. その優位性は図2に示すように明瞭である.

しかしながら当初より当該鋼の優位性を最も発揮しようと考えられたインフラ用途は, 公共性を有することから, 新しい素材を採用して頂くことは困難な分野と見なされていた. また, 当初は二相ステンレス鋼自体が認知されておらず, 「二層」のクラッド鋼と勘違いされたこともあると聞いている. これらの壁に営業部門が果敢に挑んで今日の成果を得た. 国土交通省の新技术情報提供システム NETIS への登録や, お客様が気付かれていない画期性を具体的に提案する発明的なソリューション等の様々な工夫により, 現在では土木

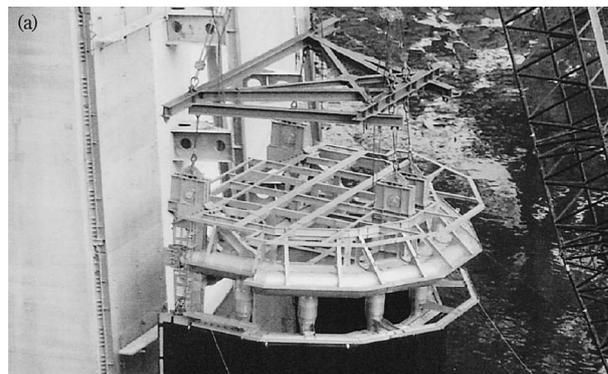


図3 NSSC®2120の適用例. (a) 二瀬ダム取水設備(埼玉県). (b) 小袖漁港水門(岩手県).

分野で炭素鋼や Al 合金と比べても競争力のある素材と認知されつつある. 特に, 東日本大震災以降, 水門の設計基準がより大型化していることから軽量化への需要がより増大しており, これに対した的確な解決策を提示できたことは, 社会に対しても貢献し得たと考える.

NSSC®2120の適用は, 淡水領域のインフラシステムを主に広がっている. 新たな適用例を図3に示す.

### 4. 開発を振り返って

以上のように, この開発は研究開発, 製造技術, 営業部門がそれぞれの力を発揮しつつ協力し一体となって作り上げた, まさに日本的な製品開発手法による成果だと考える. 中国メーカーは資本力経済力に勝っており, また技術力についても個人は優秀である. 我々の現在のポジションを維持するのは容易ではないが, 今回のような開発手法を発展させ, 付加価値商品をこれからも世に出していくことで対抗していきたい.

### 文 献

- (1) 及川雄介, 柘植信二, 江目文則, 本村 洋, 井上裕滋: までりあ, **55**(2016), 70-72.
- (2) ステンレス協会ホームページ「生産量」.
- (3) 秦野正治, 松山宏之, 石丸詠一郎, 高橋明彦: までりあ, **52**(2013), 180-183.
- (4) KJ. Blom: Proc. Int. Conf. Stainless Steels '87, York (1987).
- (5) 銚日本材料学会腐食防食部門委員会編: 二相ステンレス鋼の上手な使い方, (1999), 4.



## 先進加工プロセスを用いた 機能性金属材料の開発をめざして

地方独立行政法人 大阪産業技術研究所 森之宮センター  
物質・材料研究部 先進構造材料研究室；研究室長

武内 孝

私たちの研究室が所属している大阪産業技術研究所〔略称：大阪技術研，英名：Osaka Research Institute of Industrial Science and Technology (ORIST)〕は，大阪府と大阪市の公設試験研究機関であった大阪府立産業技術総合研究所（大阪府和泉市）と大阪市立工業研究所（大阪市城東区）の2つの地方独立行政法人が合併することによって，2017年4月に設立された研究所になります。2つの研究所はともに歴史が長く，大阪市立工業研究所は大正5年に，大阪府立産業技術総合研究所は昭和4年に設立された機関であり，それぞれ対応する業種や得意とする分野などに共通する部分と異なる部分がありましたが，合併後は両機関の強みを生かすことで，機械・金属・電子・化学・高分子・バイオ・食品・ナノテクノロジーといった幅広い分野に対応可能な研究所となり，現在は，旧・大阪府立産業技術総合研究所を本部・和泉センター，旧・大阪市立工業研究所を森之宮センターとして新たに出発することになりました。

研究所の業務内容は，公設試験研究機関の役割としての，地域ものづくり中小企業への支援が中心であり，主に次のような業務を行っています。技術相談（工業技術に関する質問への対応），依頼試験（試料の分析，評価などを行う），受託研究（企業より提案を受けたテーマに基づく研究を行う），装置使用（企業が研究所の保有する装置を利用する），研究開発（先進的な独自テーマの研究に取り組み，得られた研究成果や技術シーズ，ノウハウなどの蓄積を行う）。これらの業務を通して，地域の企業から求められる研究開発から実用化，製品化までのニーズに総合的に技術支援を行い，また産官学連携によるイノベーション創出拠点としても機能できるような研究所を目指しています。

研究所の現在の組織は，和泉センターに7研究部，森之宮センターに5研究部，合計12の研究部によって構成されており，職員数は合計241名（2017年4月時点）です。私たちの研究室「先進構造材料研究室」は，森之宮センターの物質・材料研究部に所属していますが，物質・材料研究部では，金属材料，プラスチック材料，複合材料を対象とした新素材の

開発ならびに加工技術の高度化に関する研究および関連業界への技術支援を行っています。研究部のメンバーは17名で5つの研究室に分かれています。その中の一つが私たちの研究室であり，現在は4名の研究員が所属しています。

先進構造材料研究室では，先進加工プロセスを用いた組織制御手法により，鉄鋼・アルミニウム合金・マグネシウム合金などの構造用金属材料の高性能化に関する研究を行っています。研究室で取り組んでいる研究テーマとしては次のようなものがあげられます。

### ・摩擦攪拌プロセスによる組織制御

摩擦攪拌プロセス(FSP)による，固相状態で金属材料の表面を攪拌し改質する特徴を活かして，工具鋼や超硬合金，マグネシウム合金などに対する表面組織の微細化，粒子添加による複合化など，組織制御技術の開発に関する研究を行っています。例えば，溶射処理により基材上に形成した超硬合金皮膜にFSPを施すことで，皮膜内のポア量の低減，金属バインダ相の組織微細化等の組織制御を行い，高硬化化，高靱性化することに成功しています。また最近では，焼結プロセスにより作製した超硬合金と鉄鋼材料等との摩擦攪拌接合(FSW)に関する研究も行っていきます。その他，FSPを材料創製技術として発展させるべく，金属材料の表面に金属やセラミックの粉末を配置し，FSPを利用して材料中に分散させ改質を行う研究についても取り組んでいます。例えば，攪拌部にナノ粒子粉末を供給し重複FSPを施すことで複合化し，マグネシウム鑄造材の粗大結晶粒組織を粒径数100nm程度の超微細粒複合組織に改質する技術（摩擦攪拌粉末プロセス）や，2枚の異種金属板を重ね合わせて重複FSPを施すことで合金化し，攪拌部に微細な化合物粒子がその場析出した微細粒複合組織を得る技術（重ね摩擦攪拌プロセス）等について研究を進めています。

### ・マグネシウム合金の機械的特性向上

マグネシウム合金に対して押出し加工や非対称圧延などの塑性加工プロセスを用いた組織制御を行って機械的特性を向上することを旨とした研究を行っています。第二相粒子分散制御による室温での局部伸びの向上，集合組織制御などによる振動減衰能の改善，粒界すべりの起こりやすさの制御による超塑性特性の改善などに取り組んで来ました。最近では，生体材料としての利用を念頭においたマグネシウム合金やマグネシウム合金基複合材料の開発も行っています。

私たちの研究室では，種々の先進加工プロセスを用いた機能性金属材料の開発に関する研究をめざし，そこで得られた研究成果やノウハウを活用することで，地域企業に対する技術支援を進めています。研究室の見学はいつでも歓迎しておりますので，興味がありましたらお問い合わせください。

（2017年7月28日受理）[doi:10.2320/materia.56.610]

（連絡先：〒536-8553 大阪市城東区森之宮1-6-50）



## 医歯薬工連携による骨形態計測学の新たな展開

～第37回日本骨形態計測学会を開催・参加して～

(2017年6月22日～24日)

大阪大学大学院工学研究科 石本卓也\*  
マテリアル生産科学専攻；准教授

2017年6月22日(木)～24日(土)の3日間、大阪国際会議場(リーガロイヤルホテル大阪を含む)にて第37回日本骨形態計測学会(会長：大阪大学大学院工学研究科マテリアル生産科学専攻 中野貴由教授)を開催した。筆者は運営委員長として、本会の企画、準備、運営に携わった。

本学会はこれまで、整形外科、内分泌内科、腎臓内科、放射線科、小児外科、さらには歯科を中心とした医歯薬系の会長の指揮の下で開催されてきた。工学系から会長が選出されたのは37回の歴史の中で今回が初めてのことであり、本来製薬メーカーがスポンサーとなる学会の会長を工学系から選出するというのは、医歯薬系からの、材料工学・工学系への研究開発の期待の大きさを示している。

こうした状況を踏まえて、本大会のテーマは「医歯薬工連携による骨形態計測学の新たな展開」とした。このテーマには、骨の形態・代謝学に対する基礎・臨床分野の医歯学研究、骨粗鬆症をはじめとした骨疾患への創薬・薬効評価研究のみならず、骨形態計測学の深化を目指した最先端計測・計算解析手法やそれに基づく材料・方法論設計といった工学的見地からの研究を融合し、英知を結集することで、骨形態計測学の新たな発展の足がかりとしたい、という強い意気込みが込められている。本大会のロゴ(図1)はまさに、医・歯・薬・工がタグを組んで強固に連携した1つの集合体として、骨形態計測学を発展させていこうとする姿を表現している。

骨形態計測学を含む骨関連医学において、そもそも「材料工学・工学系」がいかなる役割を果たしている(果たせる)のか？2000年のNIH(米国国立衛生研究所)の提言は、骨密度のみでの骨解明・治療の限界を示し、骨密度以外に骨強度を決定する骨質因子の存在を提示した。すなわち、レントゲンでは捉えることのできない、骨の材質を構成するnmオーダーでの化学的、構造的因子の重要性を意味し、これはまさに、無機・有機材料工学が得意とする分野の一つである。実際に、骨ミネラルの配向性や結晶化度、コラーゲンの配列や分子架橋等の骨力学的機能への関与が工学的解析に基づき同定されている。さらに、こうした因子の高精度イメージングも、工学系の寄与なくして成し得ない技術の1つと言える。

こうした骨形態計測学の中での「材料工学・工学系」の重要性を医歯薬学系の医師・研究者に理解いただき、共同研究等の出会いの場となることを目指し、本大会では、『電子顕微鏡・光学顕微鏡による最先端骨イメージング』、『3D プリ



図1 本大会での「医歯薬工連携」を表現したロゴ。



図2 中野研究室や関係研究室が一致団結して運営した本大会終了後の記念撮影。

ンティングによる生体組織構築』といった工学的アプローチに特化したシンポジウムを企画した。さらに、特別講演では、大阪大学理事・副学長の吉川秀樹先生(整形外科)に、『人工骨による骨再生：過去・現在・未来』と題し、整形外科医から見た医工連携研究の必要性と実際の成功事例、今後の方向性について講演いただいた。

結果として71件の一般演題、41件の指定演題と約330名の参加者があり、これまでで最大規模の大会となった。特筆すべきは、一般演題の中で医歯薬工連携に関するものが25%、工学系からの研究発表が15%であり、合計で材料工学・工学系が関与した講演が40%を占め、本学会での材料工学・工学系の重要性を示す結果となった。これは、「医歯薬工連携」をテーマとして掲げたことが理由の1つではあるものの、昨年度、骨形態計測学会発祥の地、新潟(朱鷺メッセ)で開催された第36回大会においても、一般演題の約30%に工学系研究者が関与していたことを考えると(10年前の第26回大会(新潟)では約20%)、本学会での「医歯薬工連携」はすでに安定期・成長期に入っていると言える。

現在日本が直面している超高齢社会において、高精度・高速な骨診断や、物理的外場因子や人工材料、薬剤を駆使した骨再建、予後管理といったあらゆる場面で医歯薬工が一丸となって取り組む必要性はますます拡大し、その中でも材料工学の重要性はますます大きくなっていくものと確信する。私は今後も、金属学会を母体としながら医歯薬工連携を進め、近未来のQOL(Quality of life)向上に材料工学の立場から貢献していく所存である。

なお、本大会の実施にあたり、医歯薬系のみならず工学系の合わせて40企業にスポンサーとして共催いただいたとともに、(公社)日本金属学会に所属する多くの先生方にもご参加・ご協力いただきました。ここに、感謝の意を表します。

(2017年8月7日受理)[doi:10.2320/materia.56.611]

(\*連絡先：〒565-0871 吹田市山田丘2-1)

# 本 会 記 事

会 告 講演大会の参加費および登壇費の改訂のお知らせとお願い	612
会費自動払込のご案内	613
第26回奨学賞の推薦校募集について	613
2018年度春期講演大会の外国人特別講演および招待講演募集	613
第41回技術開発賞募集	613
第68回金属組織写真賞作品募集	613
平成30・31年度代議員候補者の立候補者募集	614
平成30・31年度の監事候補者の立候補者募集	615
平成30・31年度代議員選挙管理委員会委員募集	615
日本金属学会「若手研究グループ」募集	616
金属学会セミナー	617
支部行事	615
次号予告	621
掲示板	618
新入会員	621
会誌・欧文誌10号目次	620
行事カレンダー	622

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

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

- ・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。
- ・オンラインジャーナルの発行や行事のご案内等の本会からのお知らせ E-mail の受信をご希望される方は、本会ホームページの [会員マイページ](#) → [会員情報の変更届](#) にて手続して下さい。

## 会 告 (ホームページもご参照下さい)

### 講演大会の参加費および登壇費の改訂のお知らせとお願い

2017年9月1日

講演大会委員会委員長 杉本 諭

2018年春期講演大会より講演大会の参加費および登壇費を改訂いたしますので、お知らせいたします。本会では、より魅力ある講演大会にするため、各種施策の実施を行ってきておりますが、ご承知のように、会場使用料金の上昇に伴う減収が生じております。これを補うため、正員の講演大会の参加費ならびに非会員の講演大会参加費および登壇費を、以下の表に示すように値上げさせていただくことになりました。ただし、学生員の事前申込みの参加費は据え置きとするとともに、正員の値上げ幅を非会員のものに比べて低く抑えさせていただいております。これによって、これまで非会員で講演大会に参加されていた方の本会への入会および事前参加申込みを促したいと存じます。

なお、非会員の参加者には、会員への移行を促すため、1年間、「まてりあ」を寄贈するとともに、会員価格で講演大会以外のイベントに参加できる特典を付与いたします。

以上、ご理解いただきますようお願い申し上げます。

#### 参加費の改訂内容

	改訂後参加費		改訂前参加費	
	事前申込み	当日申込み	事前申込み	当日申込み
正 員	10,000円	13,000円	9,000円	10,000円
学生員	6,000円	7,000円	6,000円	6,500円
非会員一般	24,000円	27,000円	19,000円	20,000円
非会員学生	14,000円	16,000円	14,000円	15,000円

#### 登壇費の改訂内容

	改訂後登壇費	改訂前登壇費
非会員一般	10,000円	6,000円
非会員学生	5,000円	3,000円

#### \*維持員会社の正員登録者以外の社員が講演発表する場合

	改訂後の参加費・登壇費	
	事前申込み	当日申込み
参加費は正員扱	10,000円	13,000円
登壇費は非会員扱	10,000円	10,000円
合 計	20,000円	23,000円

## 会費の自動払込のご案内

2018年度会費自動払込のご案内を下記の通り申し上げます。  
ご利用の方は、お手続きを宜しくお願いいたします。

ホームページ：入会・会員→会員ページ→会費支払方法

2018年度会費自動払込申込締切 **2017年10月6日(金)**

### 問合せ・申込書送付先

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

## 日本金属学会・日本鉄鋼協会 第26回奨学賞の推薦校募集について

奨学賞はこれまで全国大学材料関係教室協議会参加大学の学部学生を対象としておりましたが、材料分野の発展の貢献が期待できる多くの優秀な学生を幅広く奨励するため、全国大学材料関係教室協議会参加大学以外の教育機関からも広く募集いたします。  
下記要項によりご応募下さい。

### 奨学賞募集要項

- 教育機関の募集**
  - 国内の材料系の学科又はコース等を有する大学および高等専門学校
  - 同一の教育機関(1校)の応募数は、関係する材料系の学科又はコース等に拘らず1件とします。
- 教育機関における候補者の対象**
  - 大学は学士課程4年に在学する学生。
  - 高等専門学校は専攻科2年に在学する学生。
- 推薦校の推薦者資格**
  - 教育機関の代表専攻長(代表学科主任)  
同一教育機関の応募窓口は事前にご調整願います。
  - 下記の全国大学材料関係教室協議会の参加大学には、推薦校の資格が与えられます。
- 手続き** 所定の**応募用紙**(本会ホームページよりダウンロードできます)により必要事項を記入の上、ご応募下さい。
- 応募締切** **2017年11月1日(水)**
- 申込問合せ先** 〒980-8544 仙台市青葉区一番町 1-14-32  
(公社)日本金属学会 奨学賞係  
☎ 022-223-3685 FAX 022-223-6312  
E-mail: gaffair@jim.or.jp

### 7. 2017年全国大学材料関係教室協議会の参加大学(34校)

大 学 名			
1 北海道大学	13 豊橋技術科学大学	25 大阪府立大学	
2 室蘭工業大学	14 名古屋大学	26 兵庫県立大学	
3 岩手大学	15 名古屋工業大学	27 石巻専修大学	
4 秋田大学	16 京都大学	28 千葉工業大学	
5 東北大学	17 大阪大学	29 東京理科大学	
6 茨城大学	18 島根大学	30 芝浦工業大学	
7 筑波大学	19 香川大学	31 東海大学	
8 東京大学	20 愛媛大学	32 金沢工業大学	
9 東京工業大学	21 九州大学	33 関西大学	
10 横浜国立大学	22 九州工業大学	34 近畿大学	
11 長岡技術科学大学	23 長崎大学		
12 富山大学	24 熊本大学		

## 2018年春期講演大会の外国人特別講演および招待講演募集

推薦書提出期日：2017年11月20日(月)

2018年春期講演大会における特別講演と招待講演を募集いたします。

### 特別講演

- 講演者：著名な外国人研究者とする。
- 講演時間：30分(討論10分)
- 採択件数：3~4件
- 滞在費補助：10,000円
- その他：大会参加費免除、懇親会招待

### 招待講演

- 講演者：有益な講演が期待される国内に滞在する外国人研究者とする。
- 講演時間：15分(討論5分)
- 採択件数：5件程度
- 滞在費補助：なし
- その他：大会参加費免除

推薦用紙 所定様式(ホームページからダウンロードして下さい)

詳細 あたりあ9号567頁

推薦書提出期日 **2017年11月20日(月)**

照会・推薦書提出先

〒980-8544 仙台市青葉区一番町 1-14-32  
(公社)日本金属学会 国際学術交流委員会宛  
☎ 022-223-3685 FAX 022-223-6312  
E-mail: gaffair@jim.or.jp

## 第41回技術開発賞 「新技術・新製品」記事募集

応募締切：2017年10月31日(火)

賞の名称 第41回公益社団法人日本金属学会技術開発賞  
賞の対象 あたりあ「新技術・新製品」記事に掲載(1号から)された記事が選考対象となります。

表彰 2018年9月の秋期講演大会

原稿問合せ先 あたりあ E-mail: materia@jim.or.jp

詳細 あたりあ8号519頁 or ホームページ：本会賞の募集

申込 URL <http://gijutsu.jim.or.jp/entry>

技術開発賞の問合せ先

(公社)日本金属学会各賞係  
☎ 022-223-3685 E-mail: gaffair@jim.or.jp

## 第68回金属組織写真賞作品募集

応募締切：2017年10月20日(金)

賞の名称 第68回公益社団法人日本金属学会組織写真賞

詳細 あたりあ8号520頁 or ホームページ：本会賞の募集

申込 URL <http://picture.jim.or.jp/entry>

問合せ先 (公社)日本金属学会 各賞係

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

～皆様のご応募お待ちしております。～

公益社団法人日本金属学会の  
平成30年度・31年度代議員候補者の立候補募集

会長 中島英治

平成30年度・31年度の代議員の選挙を次の要領で実施しますので、立候補希望者は、応募願います。

1. 地区別および本部枠代議員候補者改選数

地区	定員	非改選数*(留任)	改選数**(新任)
北海道地区	4名	2名	2名
東北地区	12名	4名	8名
関東地区	39名	16名	23名
東海地区	12名	5名	7名
北陸信越地区	5名	2名	3名
関西地区	19名	7名	12名
中国四国地区	7名	3名	4名
九州地区	6名	2名	4名
本部枠	4名	2名	2名
総計	108名	43名	65名

地区別代議員の定員

事業年度末の当該地区正員数を40で割り、端数を四捨五入して算出(細則第3条代議員定員)

(各地区の選挙定員は2017年2月28日現在の会費納入正員数に基づいて決定しています)

代議員の任期

- \*非改選：定時社員総会の選任日(2017年4月24日)から、2回目に終了する事業年度に関する定時社員総会の終結まで。
- \*\*改選：定時社員総会の選任日(2018年4月23日予定)から、2回目に終了する事業年度に関する定時社員総会の終結まで。

2. 立候補受付期間 2017年10月1日～10月25日(当日消印有効)

3. 立候補応募方法

所定の用紙(ホームページにあります)の候補地区名等の欄に、地区名、本部枠の区分を記載し、住所、氏名(押印)、勤務先および連絡先(TEL, FAX, E-mail)をご記入の上、上記期日までに郵送下さい。

4. 応募先 〒980-8544 仙台市青葉区一番町1-14-32

公益社団法人日本金属学会「代議員選挙管理委員会 御中」

5. 注意事項

- (1) 本会ホームページの「情報公開」の「主要規程」に公開してある「代議員選挙規程」を予め承知願います。
- (2) 次の方は代議員に立候補出来ません。  
本会名誉員、永年会員、留任代議員(平成29年度選任)、学生員、外国会員、2017年度会費未納者、会員資格停止中の者。本部枠代議員は、維持員から正員資格付与者として指名された正員以外の者。
- (3) 代理人(本会の正員、本部枠代議員は維持員の連絡担当者に限る)が立候補を届出する場合は、代理人の住所、氏名(押印)、勤務先および連絡先(TEL, FAX, E-mail)もご記入下さい。
- (4) FAXやE-mailなどの文書以外の手段による届出は無効であり、受け付けません。
- (5) 選挙投票用紙の立候補者名は受け付け順に記載されます。

6. 問合せ 公益社団法人日本金属学会 代議員選挙管理委員会  
事務局 斎藤 E-mail: gaffair@jim.or.jp

◎代議員選挙日程(予定)

平成30・31年度の代議員選挙は、2017年12月1日～12月31日を予定しておりますので、ご承知おき願います。

2018年度代議員に加えない方  
◎代議員候補者の対象に加えない方

(下記の留任代議員および2期継続就任代議員の方は立候補できません)

北海道地区

上田幹人 北海道大学 鈴木亮輔 北海道大学

東北地区

折茂慎一 東北大学 杉本 諭 東北大学  
鈴木 茂 東北大学 原 基 秋田大学

関東地区

石黒 孝 東京理科大学 梅澤 修 横浜国立大学  
枝川圭一 東京大学 大堀 學 早稲田大学  
川岸京子 物質・材料研究機構 北 蘭 幸一 首都大学東京  
小出政俊 ㈱神戸製鋼所 児島明彦 新日鐵住金㈱  
齋藤哲治 千葉工業大学 下条雅幸 芝浦工業大学  
須佐匡裕 東京工業大学 瀬戸一洋 JFE スチール㈱  
高橋 聡 株式会社 IHI 寺嶋 和夫 東京大学  
原 卓也 新日鐵住金㈱  
藤田敏之 ㈱東芝エネルギーシステムソリューション  
藤田 雅 本田技研工業㈱ 細田 秀樹 東京工業大学  
丸山俊夫 東京工業大学 山本知之 早稲田大学

東海地区

小山敏幸 名古屋大学 斎藤尚文 産業技術総合研究所  
高橋 裕 三重大学 戸高義一 豊橋技術科学大学  
牧野 浩 トヨタ自動車㈱ 松村康志 大同特殊鋼㈱  
山本剛久 名古屋大学

北陸信越地区

門前亮一 金沢大学 山本有一 大平洋製鋼㈱

関西地区

乾 晴行 京都大学 宇田哲也 京都大学  
岡崎喜臣 ㈱神戸製鋼所 垣辻 篤 大阪府立産業技術総合研究所  
金野泰幸 大阪府立大学 田中敏宏 大阪大学  
林田隆秀 日新製鋼㈱ 春名 匠 関西大学  
藤本慎司 大阪大学 三浦永理 兵庫県立大学  
山末英嗣 立命館大学

中国四国地区

岡田達也 徳島大学 川越崇史 日新製鋼㈱  
小島由継 広島大学

九州地区

連川貞弘 熊本大学 中島英治 九州大学  
西田 稔 九州大学

本部枠代議員

岸本康夫 JFE スチール㈱  
諏訪部繁和 日立金属㈱

公益社団法人日本金属学会の  
平成30年度・31年度の監事候補者の立候補募集

平成28事業年度に関する定時社員総会(平成30年4月23日開催予定)で選任される監事の候補者は、細則では立候補制で正員による選挙を実施することができるものと定めており、監事選挙を次の要領で実施しますので、立候補希望者は応募願います。

1. 監事候補者選挙数：1名

2. 監事候補者対象地区：その他の地区在住

3. 監事の職務および権限(定款第25条)

第25条 監事は、理事の職務の執行を監査し、法令で定めるところにより、監査報告を作成する。

2 監事は、いつでも、理事及び使用人に対して事業の報告を求め、この法人の業務及び財産の状況の調査をすることができる。

3 監事は、理事会に出席し、必要があると認めるときは、意見を述べなければならない。

4 監事は、理事が不正の行為をし、若しくはその行為をするおそれがあると認められるとき、又は法令若しくは定款に違反する事実若しくは著しく不当な事実があると認めるときは、これを理事会に報告しなければならない。

5 監事は前号の報告をするため必要があるときは、会長に理事会の招集を請求することができる。ただし、その請求があった日から5日以内に、2週間以内の日を理事会とする招集通知が発せられない場合は、直接理事会を招集することができる。

6 監事は、理事が社員総会に提出しようとする議案、書類その他法令で定めるものを調査し、法令若しくは定款に違反し、又は著しく不当な事項があると認めるときは、その調査の結果を社員総会に報告しなければならない。

7 監事は、理事がこの法人の目的の範囲外の行為その他法令若しくは定款に違反する行為をし、又はこれらの行為をするおそれがある場合において、その行為によってこの法人に著しい損害が生ずるおそれがあるときは、その理事に対し、その行為をやめることを請求しなければならない。

8 監事は、監事に認められた法令上の権限を行使することができる。

4. 立候補受付期間：2017年10月1日～10月25日(当日消印有効)

5. 立候補応募方法：

所定の用紙(ホームページにあります)に「日本金属学会監事立候補者」と記載し、住所、氏名(押印)、勤務先および連絡先(TEL、E-mail)をご記入の上、上記期日までに郵送下さい。

6. 応募先 〒980-8544 仙台市青葉区一番町 1-14-32

公益社団法人日本金属学会「監事選挙管理係 御中」

7. 注意事項

①監事候補者は東北地区以外のその他の地区在住の方に限ります。

②立候補届出時に2017年度正員会費を納入していない正員の届出は無効になります。

③郵送以外のFAXやE-mailでの届出は無効です。

④選挙投票用紙の立候補者名は受付順に記載します。

8. 問合せ先：公益社団法人日本金属学会 監事選挙係

E-mail: gaffair@jim.or.jp

事務局 斎藤

◇監事選挙日程(予定)◇

平成30年度・31年度の監事選挙は2017年12月1日～12月31日を予定しておりますので、ご承知お願います。

公益社団法人日本金属学会の  
平成30年度・31年度の代議員選挙管理委員会委員募集

受付期間 2017年10月1日～10月25日(当日消印有効)

応募方法 応募用紙(ホームページに公開します)に「日本金属学会の代議員選挙の選挙管理委員会委員に応募します」と記載し、住所、氏名、勤務先および連絡先(TEL、FAX、E-mail)をご記入の上、郵送で上記期日までにご応募下さい。

募集人数 3名

応募先 〒980-8544 仙台市青葉区一番町 1-14-32

公益社団法人日本金属学会 代議員選挙管理委員会

問合せ先 公益社団法人日本金属学会 代議員選挙管理委員会事務局 斎藤 E-mail: gaffair@jim.or.jp



支部行事



H29年度秋季講演会

【共催】日本鉄鋼協会九州支部

日時 2017年10月20日(金)13:00-17:35

場所 熊本大学工学部研究棟 I, 2階 203講義室

講演会

13:00～14:00

本多記念講演会(日本金属学会九州支部主催)

大気腐食による水素侵入と水素脆化

東北大 秋山英二

14:10～15:10

湯川記念講演会(日本鉄鋼協会九州支部主催)

鉄鋼材料の腐食・環境脆化とその改善アプローチ

神戸製鋼所 中山武典

講演討論『金属材料の腐食と環境脆化』

15:20～16:05

金属材料の水素存在状態と水素脆化

上智大 高井健一

16:05～16:50

アルミニウム合金の水素脆化

茨城大 伊藤吾朗

16:50～17:35

オーステナイト系ステンレス鋼の変形挙動に及ぼす水素の影響

熊本大 峯 洋二

参加料 無料

定員 約90名

問合せ先 熊本大学先進マグネシウム国際研究センター

山崎倫昭

☎/FAX 096-342-3705/3710

E-mail: yamasaki@kumamoto-u.ac.jp

## 公益社団法人日本金属学会「若手研究グループ」募集

若手および調査・研究事業を活性化することを狙いとして、新たに若手主体の研究グループを設置することといたしました。若手研究グループの登録を希望される方は下記を参照の上、若手研究グループ設置申請用紙でお申込下さい。(申請用紙はホームページよりダウンロードして下さい)

申請締切：2017年11月17日(金)

### 【実施要領】

**概要** 研究会又は新規研究テーマの開拓に向けた課題の抽出や目標の明確化のための調査の実施や構成員による討論会や会議の開催等を行う。目的・目標・活動計画を明確にし、機関誌等での活動報告を義務化した上で、活動費を支給する。

**対象者** 申請者および構成員は40才以下の研究者であること。申請代表者は正会員であること。申請時には、構成員は5名以上であり、非会員を構成員とすることができるが、過半数は正会員であること。なお、構成員に最低1名は産業界のメンバーが入っていることが望ましい。また、活動開始時には、非会員の構成員は会員になること。

**活動費** 年間50万円を上限とする。

**活動期間** 2018年3月1日～2020年2月28日の2年間とし、原則として延長は認めない。

**活動報告** 研究成果報告として、講演大会において講演(研究グループの企画セッション等が望ましい)を行うこと。および、1年経過後および活動終了後の7月に報告書を分科会企画委員会に提出すること(必要な場合は説明いただく)。活動終了後、6ヶ月以内にまてりあに研究会の活動に関する記事を掲載すること。

**採択件数** 平成29年度の採択数は5件以内とする。

**応募方法** 名称、申請代表者、構成員、申請理由、活動の概要、活動計画、予算、成果の報告予定、関連分野を記載した申請書を提出する。

**審査** 分科会企画委員会で審査の後、理事会で決定する。必要に応じ、面談等を行うことがある。

**備考** その他は研究会の規定に準ずる。

活動費の使途は、会議費(会場費、会議中のお茶代・弁当代)、旅費交通費、通信運搬費、消耗品費、印刷製本費等の運営費用とする。本会規程に基づく旅費・交通費の支給は可とする。ただし、講演大会中および講演大会と連続する日程で開催される構成員の会議等の旅費は不可。

会計担当者を置き、予算の消化状況の管理を行なうこと。予算の使用状況は半年毎に実績報告を行なうこと。費用の支出は、活動費申請書を事務局に提出して請求し、事務局が送金する。会計担当は、収入および支出を現金出納帳に記載するとともに、活動費の残金および参加等収入等の現金ならびに領収書を管理する。年度末に、決算書および出納簿、領収書を事務局に提出すること。これらの会計処理方法の詳細は会計マニュアルに定める(分科活動費会計処理に準ずる)。

**審査基準**

- 研究会への発展や新規研究テーマの開拓に貢献できるか。
- 研究会に類似のテーマはないか。
- 構成員は適切であるか。
- 必要性が高いか。
- 目的や目標が明確にされているか。
- 成果を広く周知する活動報告が計画されているか。

**申請先  
問合せ先** 申請書を下記 E-mail アドレスに送付して下さい。2,3日過ぎても受理返信通知のない場合はご連絡下さい。  
(公社)日本金属学会 若手研究グループ係  
E-mail: gaffair@jim.or.jp ☎ 022-223-3685



### ◎2017年秋期講演大会概要集 DVD の販売について◎

2017年秋期講演大会の概要集 DVD を販売しております。

ご購入希望の方は、E-mail または FAX で下記要領をご記入の上お申し込み下さい。

①件名「2017年秋期講演大会講演概要集 DVD 購入申込」、②申込者氏名、③会員資格の有無(会員番号併記)、  
④注文数、⑤送付先住所  
確認後、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

申込先 (公社)日本金属学会 E-mail: ordering@jim.or.jp ☎ 022-223-6312



## 状態図・相変態の基盤と実践的ノウハウ —CALPHAD 法とフェーズフィールド法を使いこなすために—

日本金属学会「セミナー・シンポジウム委員会」企画

[協賛予定] (一社)日本鉄鋼協会, (一社)軽金属学会, (一社)日本機械学会, (一社)日本計算工学会, 日本学術振興会第172委員会

状態図および相変態は材料開発における重要基盤の1つです。近年、CALPHAD 法とフェーズフィールド法の進展により、状態図と相変態の定量的解析が著しく発展し、これまで以上に、当該分野の基盤とその実践的な理解が必要となってきました。そこで本特別講座では、状態図と相変態の基盤を、入門編を超えて、基礎から応用までをわかりやすく解説するとともに、CALPHAD 法とフェーズフィールド法に関する実践的ノウハウを説明します。当該分野における材料工学の根本から最先端までを効率的に学ぶよい機会ですので、是非とも、多くの皆様のご参加をお願いいたします。

(企画世話人: セミナー・シンポジウム委員会 代表 小山敏幸)

日 時 2017年12月13日(水) 13:00~17:00, 14日(木) 9:30~17:00

場 所 東京・エッサム神田ホール2号館6階(601中会議室)(〒101-004 東京都千代田区内神田3-24-5)

募集定員 60名

受講料(★受講料に、以下のテキスト代は含まれませんので、ご注意下さい)

受講資格	事前申込	当日申込
正員	10,000円	12,000円
学生	5,000円	7,000円
非会員	21,000円	23,000円

(協賛学会会員は会員扱い。学生は会員、非会員の区別なし)

テキスト代(必要なテキストのみご購入を申込み下さい。なお購入申込みされたテキストは当日配布になりますのでご注意下さい。)

テキスト	金額
①西澤泰二:「ミクロ組織の熱力学(講座・現代の金属学 材料編2)」, 日本金属学会, (2005).	2,160円
②阿部太一:「TDB ファイル作成で学ぶカルファド法による状態図計算」, 内田老鶴圃, (2015).	2,160円
③小山敏幸:「材料設計計算工学 —計算組織学編—」, 内田老鶴圃, (2011).	2,420円

(テキスト代は、市価からの2割引と、お得になっています。なお、テキストのみの購入は不可とさせていただきます。)

申込要領 E-mail で meeting@jim.or.jp 宛にお申し込み下さい。申込項目は以下のとおりです。

①送信 subject に「状態図・相変態の基盤と実践的ノウハウ」と記入, ②氏名・年齢, ③会員・非会員・学生の区別(本会会員は会員番号も), ④勤務先・所属, ⑤通信先住所(住所, E-mail, 電話番号等), ⑥購入希望テキストの番号(上表参照)。

申込受理確認の E-mail を返信いたします。

事前申込締切 2017年11月24日(金)着信

参加証の送付 開催10日前までに、事前に申し込まれた方へ参加証等関係資料(テキストを除く)をお送りいたします。

受講料払込方法 お申込受理後、請求書を送付いたします。

問 合 先 〒980-8544 仙台市青葉区一番町1-14-32

金属学会セミナー(特別講座)参加係 E-mail: meeting@jim.or.jp ☎ 022-223-3685 FAX 022-223-6312

プログラム(予定):

【第1日目】 13:00~16:00

- |   |                        |
|---|------------------------|
| 1. 熱力学の基盤(純物質および溶体の自由エネルギー) [①の1章と2章, ③の2章] | NIMS 大沼郁雄 阿部太一 名大 小山敏幸 |
| 2. 正則溶体近似から副格子モデルへ(溶体・化合物の熱力学) [①の3章, ②の3章] | NIMS 阿部太一 大沼郁雄         |

【第2日目】 9:00~12:00

- |  |                   |
|--|-------------------|
| 3. 状態図に関する高度な理解(状態図の熱力学と規則化の熱力学) [①の4章と7章] | NIMS 大沼郁雄 阿部太一    |
| 4. 界面の熱力学 [①の5章, ③の3章]                     | 名大 小山敏幸 NIMS 大沼郁雄 |

12:00~13:00 一昼食・休憩—

【第2日目】 13:00~17:00

- |  |                   |
|--|-------------------|
| 5. 相変態の速度論(拡散, 核生成, 成長の熱力学とダイナミクス)①の6章, 8章, 9章, ③の5章 | 名大 小山敏幸 NIMS 大沼郁雄 |
| 6. CALPHAD 法とフェーズフィールド法 ②の1章と2章, ③の6章と7章             | NIMS 阿部太一 名大 小山敏幸 |

〈公募類記事〉

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

集 会

◇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11回状態図・熱力学セミナー 開催案内」◇

〔主催〕独日本学術振興会 第172委員会

〔協賛〕日本金属学会，日本鉄鋼協会，軽金属学会，資源・素材学会  
 趣旨

状態図は，「材料設計の地図」であると形容されるように，目的のミクロ組織を得るため，製造プロセスの最適化のための重要な役割を持っている。CALPHAD法は，状態図計算・評価手法として広く行われており，現在では多くの熱力学計算ソフトウェア，熱力学データベースが市販・公開され，材料開発に用いられている。

本セミナーでは，一日目に状態図・熱力学計算の基礎となる熱力学基礎とCALPHAD法の基礎を取り上げ，二日目により実践的な内容である実験による状態図の決定や熱力学量の測定手法の詳細とCALPHAD法による熱力学解析の概略までを解説する。

日 時 11月27日(月)～11月28日(火)

場 所 名古屋大学 野依記念学術交流館1階(名古屋大学 東山キャンパス)

アクセス <http://www.nagoya-u.ac.jp/access-map/index.html>

定 員 40名

プログラム

一日目

熱力学基礎 東京工業大学 梶原正憲

カルファド法基礎 物質・材料研究機構 阿部太一

二日目

状態図の実験的決定 物質・材料研究機構 大沼郁雄

熱力学計算演習 物質・材料研究機構 阿部太一

申し込み方法

下記ウェブサイトから申込書入手し必要事項を記入後，メール添付にて阿部(abe.taichi@nims.go.jp)までお送り下さい。

<http://www.nims.go.jp/CSMD/members/Seminar/11thPDSeminar.htm>

世 話 人 阿部太一(NIMS)，梶原正憲(東工大)，大沼郁雄(NIMS)

問合せ先 物質・材料研究機構 構造材料研究拠点 計算構造材料設計グループ 阿部太一

☎ 029-859-2628 E-mail: abe.taichi@nims.go.jp

◇非鉄製錬におけるマイナーメタルに関する  
 シンポジウム◇

■主 催 東京大学 生産技術研究所 非鉄金属資源循環工学寄付研究部門(JX 金属寄付ユニット)

■協 賛 京都大学大学院工学研究科材料工学専攻 非鉄製錬学講座 (公社)日本金属学会他

■協 力 東京大学 生産技術研究所 持続型エネルギー・材料統合研究センター，レアメタル研究会

■参加登録・お問合わせ 岡部研 学術支援専門職員 宮寄智子

E-mail: okabelab@iis.u-tokyo.ac.jp

FAX 03-5452-6313

■日 程 2017年11月10日(金)

シンポジウム 10:25—17:10

交流会 17:30—19:30

■会 場 東京大学生産技術研究所 An棟2F コンベンションホール (〒153-8505 目黒区駒場4-6-1)(最寄り駅：駒場東大前，東北沢，代々木上原)

■会 費 シンポジウム：資料代として3,000円(一部企業関係者)  
 交流会：無料

■プログラム【敬称略】:

10:25-10:30 趣旨説明

東京大学生産技術研究所 JX 金属寄付ユニット 特任教授 中村 崇

10:30-11:10 Aurubis by products recovery in primary and secondary copper

Corporate Director Research Development and Innovation, Aurubis Dr. Gerardo R. F. Alvear Flores

11:10-11:50 By-products recovery possibilities in zinc processing

Research Manager, Boliden Dr. Justin Salminen

11:50-12:20 神岡鉱業における Bi 回収

神岡鉱業株式会社 金属リサイクル工場 加藤雅樹

12:20-13:10 一休憩—

13:10-13:40 銅電解におけるマイナーエレメントの挙動(仮)

JX 金属株式会社 技術開発センター 岡本秀則

13:40-14:10 製錬副産物からの Sn, Sb 回収(仮)

DOWA 金属株式会社 技術部 鈴木一成

14:10-14:40 HPAL ニッケル精製プロセスからのクロマイトの回収

住友金属鉱山株式会社 金属事業本部 海外プロジェクト推進室 尾崎佳智

14:40-15:10 レニウムの現状と製錬・リサイクル

東京大学大学院工学系研究科 マテリアル工学専攻 八木良平

15:10-15:40 一休憩—

15:40-16:20 循環型社会における非鉄製錬業における物理選別技術(仮)

早稲田大学 理工学術院 教授 所 千晴

16:20-17:10 特別講演 非鉄金属資源の動向(仮)

経済産業省 鉱物資源課 課長 大東道郎

17:10-17:20 シンポジウムを終えて

東京大学 生産技術研究所 JX 金属寄付ユニット 特任教授 前田正史

17:30-19:30 交流会

東京大学 生産技術研究所 An棟1階 レストラン アーベ

◇レアメタル研究会◇

- 主催 レアメタル研究会  
主宰者 東京大学生産技術研究所 岡部 徹 教授  
協力 (一財)生産技術研究奨励会(特別研究会 RC-40)  
共催 東京大学マテリアル工学セミナー  
レアメタルの環境調和型リサイクル技術の開発研究会  
東京大学生産技術研究所 持続型エネルギー・材料統合研究センター  
東京大学生産技術研究所 非鉄金属資源循環工学寄付研究部門 (JX 金属寄付ユニット)  
協賛 (公社)日本金属学会 他  
■開催会場 東京大学生産技術研究所  
An 棟 2F コンベンションホール  
(〒153-8505 東京都目黒区駒場 4-6-1)  
(最寄り駅: 駒場東大前, 東北沢, 代々木上原)  
■参加登録・お問合わせ  
東京大学 生産技術研究所  
岡部研究室 レアメタル研究会事務担当 宮寄智子  
E-mail: okabelab@iis.u-tokyo.ac.jp

〈平成29年度 レアメタル研究会開催予定のご案内〉 (2017.9.1 現在)

- 第78回 2017年11月17日(金)  
■第79回 2018年1月12日(金)  
★貴金属シンポジウム(第5回)+新年会★(合同開催)  
■第80回 2018年3月9日(金)  
★前田正史教授が熱く語る特別シンポジウム+慰労会★(合同開催)

- 第78回 2017年11月17日(金)14:00~ An 棟 2F コンベンションホール  
テーマ: チタンの将来  
時間: 午後2:00~  
講演:  
・海とチタン-エンジニアの挑戦(仮)(60分)  
~海洋土木と船舶分野へのチタンの適用~  
一般社団法人日本チタン協会 木下 和宏 講師  
・低コストチタンの製造の可能性と課題(仮)(30分)  
東京大学 生産技術研究所 教授 岡部 徹 講師  
・燃料電池車開発から見たチタンとその製造革新への期待(仮)(60分)  
トヨタ自動車株式会社  
FC 技術・開発部 プロフェッショナル・パートナー 高橋和彦 講師

午後6:00~ 研究交流会・意見交換会(An 棟 2F ホワイエ)

- 第79回 2018年1月12日(金)14:00~ An 棟 2F コンベンションホール  
★貴金属シンポジウム(第5回)+新年会★(合同開催)  
テーマ: 貴金属の製錬・リサイクル  
時間: 午後2:00~  
講演: 貴金属の製錬・リサイクル技術に関する講演  
・講師依頼中  
午後6:00~ ポスター発表 兼 研究交流会  
(An 棟 1F レストラン アーベ(予定))

- 第80回 2018年3月9日(金)14:00~ An 棟 2F コンベンションホール  
★前田正史教授が熱く語る特別シンポジウム+慰労会★(合同開催)  
テーマ: 前田先生の研究と活動, 非鉄業界と研究の将来展望  
時間: 午後2:00~  
講演:  
・講師依頼中  
・非鉄金属リサイクルプロジェクトと産官学連携(仮)(60分)  
東京大学 生産技術研究所 教授 前田正史 講師  
午後6:00~ 研究交流会・意見交換会(An 棟 2F ホワイエ)

\*レアメタル研究会ホームページ\*

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

★備考: 関連研究会

〈米国版レアメタル研究会(RMW)のご案内〉

- RMW13 Workshop on Reactive Metal Processing (Reactive Metal Workshop)  
March 16 (Fri)-17 (Sat), 2018, Cambridge, MIT  
\*Reactive Metal Workshop の HP\*  
<http://www.okabe.iis.u-tokyo.ac.jp/core-to-core/rmw/>

◎掲示板はホームページにも掲載しております。  
そちらもご活用下さい。

◇ ◇ ◇

~日本金属学会誌, Mater. Trans. へ投稿しませんか?~

- ◎日本金属学会誌および Mater. Trans. は, 会員, 非会員問わず投稿することができます。  
掲載論文充実化のため, レビュー, オーバービュー, 技術論文など多くの種別を取り入れて  
しております。会誌の投稿・掲載費用は無料です。  
詳細は, 本会ホームページ → [会誌](#) or [Mater. Trans.](#) のページをご覧ください。  
皆様のご投稿をお待ちしております。

日本金属学会誌掲載論文  
Vol. 81, No. 10 (2017)

—オーバービュー—

相界面析出現象と最近の実用鉄鋼材料への応用

船川義正

—論文—

マグネシウムの塑性変形に対するイットリウム添加の影響

カ久弘章 森 貴志 津志田雅之 北原弘基 安藤新二

アルミニウム基複合材料の有効熱伝導率に対する界面熱抵抗の影響

杉尾健次郎 崔 龍範 佐々木 元

クラッド付圧力容器鋼の磁気ヒステリシス特性とビッカース硬さの相関

相原雄太 鎌田康寛 村上 武

小林 悟 渡辺英雄

異方性コラーゲン基板による若齢マウス由来骨芽細胞配列化制御

小笹良輔 松垣あいら 磯部仁博 佐久太郎 中野貴由

使用済核燃料ガラス固化体中生成相  $\text{Nd}_2(\text{MoO}_4)_3$  の熱力学的性質

木下義樹 森下政夫 野崎安衣 山本宏明

Materials Transactions 掲載論文  
Vol. 58, No. 10 (2017)

—Regular Articles—

Materials Physics

Estimating the Spatial Distribution of Ca Dopants in  $\alpha$ -SiAlON by Statistical Analysis of HAADF-STEM Image

Norihito Sakaguchi, Fuuta Yamaki,

Genki Saito and Yuji Kunisada

Microstructure of Materials

Effects of Natural Aging on Age-Hardening Behavior of Cu-Be-Co and Cu-Ti Alloys Severely Deformed by High-Pressure Torsion

M. Hibino, C. Watanabe, Y. Tsuji, R. Monzen, Y. Todaka and W. Sato

Microstructures of Ta-Inserted  $\text{SmCo}_5$  / Fe Nanocomposite Thick Film Magnets

Masaru Itakura, Shin-ichi Murayama, Masatoshi Mitsuahara, Minoru Nishida, Hiroaki Koga, Masaki Nakano and Hirotohi Fukunaga

First-Principles Study of Chlorine Adsorption on Clean Al(111)

Jun Yamashita and Norio Nunomura

Application of a Tritium Imaging Plate Technique to Depth Profiling of Hydrogen in Metals and Determination of Hydrogen Diffusion Coefficients

Teppei Otsuka and Tetsuo Tanabe

Mechanics of Materials

Deformation and Density Change of Open-Cell Nickel Foam in Compression Test

Woo-Young Kim, Ryo Matsumoto and Hiroshi Utsunomiya

Effect of  $\gamma$ -Phase Stability on Local Deformation Energy of  $\alpha$ - $\gamma$  Duplex Stainless Steel

Masayuki Yamamoto, Ryosuke Ochi, Kyono Yasuda,

Masatoshi Aramaki, Shinji Munetoh and Osamu Furukimi

Selective Dissolution of Delta Ferrite Phase in Welded 308 Stainless Steel under Proton Irradiation

Yoshiharu Murase, Norikazu Yamamoto and

Hideki Katayama

Improved Mechanical Properties of  $\text{Al}_2\text{O}_3$  Ceramics by Sputtered TiN Coatings

Chia-Hui Chien, Feng-Min Lai, Chih-Wen Cheng,

Sin-Liang Ou, Shu-Chuan Liao, Tsan-Ming Su and

Yao-Tsung Yang

Fundamental Properties of Ti-6Al-4V Alloy Produced by Selective Laser Melting Method

Tatsuro Morita, Chika Tsuda, Hitoshi Sakai and

Norio Higuchi

Solid Solution Hardening and Precipitation Hardening of  $\alpha_2$ - $\text{Ti}_3\text{Al}$  in Ti-Al-Nb Alloys

Kei Shimagami, Sae Matsunaga, Atsushi Yumoto,

Tsutomu Ito and Yoko Yamabe-Mitarai

Acoustic Emission Pattern Recognition Method Utilizing Elastic Wave Simulation

Kenta Arakawa and Takuma Matsuo

Materials Chemistry

Effect of Chloride Ions in Electrowinning Solutions on Zinc Deposition Behavior and Crystal Texture

Keisuke Kashida, Satoshi Oue and Hiroaki Nakano

Equilibrium Modeling of the Extraction of Copper and Ammonia from Alkaline Media with the Extractant LIX84I

Shubin Wang, Jie Li, Hirokazu Narita and Mikiya Tanaka

Measurement and Thermodynamic Analysis of Carbon Solubility in Si-Cr Alloys at SiC Saturation

Hironori Daikoku, Sakiko Kawanishi and

Takeshi Yoshikawa

Aluminum Co-Doping Method to Increase the Boron and Phosphorous Concentration Limits Allowed in Silicon Feedstock for Solar Cells

Yuliu You and Kazuki Morita

Materials Processing

Formation of Fe-Cr-Mo Alloy Metallic Glass Coating Using High-Velocity Oxy-Fuel Apparatus with Hydrogen Gas and Its Microstructural Transition at Elevated Temperatures

Yoshito Koga, Kazunori Sakata, Daisuke Oka,

Kouhei Kuwatori, Ichihito Narita and Hirofumi Miyahara

### Development of New T-Bar Production Technology by Tandem Universal Rolling

Yukio Takashima, Yoichiro Yamaguchi, Hideki Takahashi, Tomoo Horita and Toshio Nakatsuka

### Synthesis of Lead-Free Solder Particles Using High-Speed Centrifugal Atomization

Akio Furusawa, Shinnosuke Akiyama, Kazuki Sakai, Yamato Hayashi and Hirotsugu Takizawa

### Crystallization Behavior of Thermally Rejuvenated $Zr_{50}Cu_{40}Al_{10}$ Metallic Glass

Rui Yamada, Naoyuki Tanaka, Wei Guo and Junji Saida

### Engineering Materials and Their Applications

### Effects of Crack Size Distribution and Specimen Length on the Correlation between $n$ -Value and Critical Current in Heterogeneously Cracked Superconducting Tape

Shojiro Ochiai, Hiroshi Okuda and Noriyuki Fujii

### Training Effect on Microstructure and Shape Recovery in Ti-Pd-Zr Alloys

Hiroataka Sato, Hee Young Kim, Masayuki Shimojo and Yoko Yamabe-Mitarai

### Strength and Ductility at High-speed Tensile Deformation of Low-carbon Steel with Ultrafine Grains

Rintaro Ueji, Hai Qiu and Tadanobu Inoue

### Fabrication of $YBa_2Cu_3O_7$ Superconducting Film on $\{100\}\langle 001\rangle$ Textured Cu Tape via Conductive Buffer Layers

Toshiya Doi, Masayuki Hashimoto, Shigeru Horii and Ataru Ichinose

### Environment

### Leaching of Copper from Cuprous Oxide in Aerated Sulfuric Acid

Ilhwan Park, Kyoungkeun Yoo, Richard Diaz Alorro, Min-seuk Kim and Soo-kyung Kim

### —Rapid Publication—

### Brittle Fracture Stress of Ultrafine-Grained Low-Carbon Steel

Tadanobu Inoue

Editor's Announcement

### まてりあ 第56巻 第11号 予告

[紹介] 2017年秋表彰者紹介  
[巻頭言] 未知なる深海を探る～金属資源を求めて～  
[プロムナード] 提言「材料工学から見たものづくり人材育成の課題と展望」……………中嶋英雄

[最近の研究] 水素エネルギーの貯蔵-輸送を駆動する金属触媒……………森 浩亮 山下弘巳

—他—

～編集の都合により変更になる場合がございます～



(2017年7月21日～2017年8月21日)

### 正員

田辺克明 京都大学  
藤原照彦 株式会社トーキン

國吉太 日立金属株式会社  
大庭康宏 大光炉材株式会社

### 学生会員

乙脇萌乃 龍谷大学  
矢田涼輔 龍谷大学

藤田大雄 龍谷大学  
手塚智樹 筑波大学

東樹章浩 東海大学

### 外国一般会員

Huang Genzhe Changchun University of Science and Technology

### 外国学生会員

wang xiaofei henan agricultural university Yongfeng Qi University of Science and Technology Beijing

# 行事カレンダー

太字本会主催(ホームページ掲載)

開催日	名称・開催地・掲載号	主催	問合せ先	締切
<b>10月</b>				
2～3	平成29年度「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	TEL 03-5823-6324 http://www.jwes.or.jp/	定員 48名
3	第69回白石記念講座「金属材料の弾塑性変形のマクロ・ミクロモデルの進歩」(早大)	日本鉄鋼協会・橋岡	TEL 03-3669-5933 educact@isij.or.jp https://www.isij.or.jp/mu0yiwnlf	
4～6	オータムスクール2017 in 大阪「非線形有限要素法による弾塑性解析の理論と実践」(阪大)	日本計算工学会	TEL 03-3868-8957 office@jcses.org http://www.jcses.org/	9.20
5～6	第1回金属・無機・有機材料の結晶方位解析と応用技術研究会(下呂)(9号570頁)	研究会 No. 79・井上(大阪府立大)	TEL 072-254-9316 FAX 072-254-9912 inoue@mtr.osakafu-u.ac.jp	9.15
10～11	第6回フラクトグラフィ講習会(京都)	日本材料学会	TEL 075-761-5321 jimuj@jsms.jp http://www.jsms.jp/	
10～14	第3回材料 WEEK(京都)	日本材料学会	TEL 075-761-5321 jimuj@jsms.jp http://www.jsms.jp/	
11	腐食防食部門委員会第318回例会(京都)	日本材料学会	TEL 075-761-5321 jimuj@jsms.jp http://www.jsms.jp	
11～13	1st International Conference on Energy and Material Efficiency and CO <sub>2</sub> Reduction in the Steel Industry (EMECCR2017)(神戸)	日本鉄鋼協会	emecr2017@issjp.com	
12	第1回EBSD法による損傷評価講習会(京都)	日本材料学会	TEL 075-761-5321 jimuj@jsms.jp http://www.jsms.jp/	8.25
12～13	第30回初心者のための疲労設計講習会(京都)	日本材料学会	TEL 075-761-5321 jimuj@jsms.jp http://www.jsms.jp	定員 40名
13	第15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 design15@jsms.jp/ http://www.jsms.jp/	講演 7.3
13～14	第12回材料の衝撃問題シンポジウム(京都)	日本材料学会	ymda@nda.ac.jp http://www.jsms.jp	
16	第72回塑性加工技術フォーラム(プロセス・トライボロジー分科会第152回研究会(刈谷))	日本塑性加工学会	http://www.jstp.or.jp	定員 60名
17～18	第64回表面科学基礎講座(阪大)	日本表面科学会	TEL 03-3812-0266 shomu@sss.jp.org http://www.sss.jp.org	10.11
18～19	第45回日本ガスタービン学会定期講演会(松山)	日本ガスタービン学会	TEL 03-3365-0095 gtsj-office@gtsj.org http://www.gtsj.org/	
18～19	第39回安全工学セミナー危険現象講座(東京)	安全工学会	TEL 03-6206-2840 jsse-2004@nifty.com http://www.jsse.or.jp	定員 30名
18～20	ADMETA Plus 2017(Advanced Metallization Conference 2017: 27th Asian Session)(東大)	応用物理学会	TEL 03-6801-5685 jimukyoku@admata.org	
20	H29年度秋季講演会(熊本)(本号615頁)	九州支部・山崎(熊本)	TEL/FAX 096-342-3705/3710 yamasaki@kumamoto-u.ac.jp	定員 90名
20	第129回金属物性研究会「高温材料用金属材料の展望」(松江)(9号571頁)	中国四国支部・森戸(島根大)	TEL 0852-32-6398 tatara@riko.shimane-u.ac.jp	9.28
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 zaikenjimuj@list.waseda.jp	10.13
20～21	第73回 塑性加工技術フォーラム「プレス成形技術の高度化と課題」(諏訪)	日本塑性加工学会	http://www.jstp.or.jp	定員 70名
24	二相ステンレス鋼の溶接施工ガイドラインについてのシンポジウム(東京)	日本溶接協会	TEL 03-5823-6324 http://www.jwes.or.jp/	9.15
24	第49回 エンジニアリングセラミックスセミナー(東工大)	日本セラミックス協会	http://www.ceramic.or.jp/bkouon/index_j.html encera@cersj.org	定員 100名
25～27	第38回 超音波エレクトロニクス基礎と応用に関するシンポジウム(多賀城)	超音波エレクトロニクス協会	TEL 045-924-5598 onodera@iuse.or.jp http://www.use-jp.org/	講演 7.24
26～27	講習会「もう一度学ぶ機械材料学」—機械・製造技術者のための基礎講座—(東京)	日本機械学会	TEL 03-5360-3506 araki@jsme.or.jp http://www.jsme.or.jp/	
26～27	第53回 X線分析討論会(徳島大)	日本分析化学会 X線分析研究懇談会	TEL 088-656-7263 takashi-yamamoto.ias@tokushima-u.ac.jp http://web.ias.tokushima-u.ac.jp/xbun53/	事前参加 10.13
26～27	第10回トライボロジー入門西日本講座(名城大)	日本トライボロジー学会	TEL 03-3434-1926 jast@tribology.jp http://www.tribology.jp	10.13
27	平成29年度第2回講演会「錆との闘い～防錆技術の将来動向～」(東京)	日本塗装技術協会	TEL 03-6228-1711 tosou-jimukyoku@jcot.gr.jp http://jcot.gr.jp	
30	第34回金属のアノード酸化皮膜の機能化部会(ARS)松島コンファレンス(松島)	表面技術協会・金属のアノード酸化皮膜の機能化部会(ARS)・柳下	TEL 042-677-2842 ars@sfj.or.jp	10.13
31	第324回塑性加工シンポジウム「板材加工における残留応力」(日大)	日本塑性加工学会	http://www.jstp.or.jp	10.24
<b>11月</b>				
1～4	The 12th International Symposium on Advanced Science and Technology in Experimental Mechanics (12th ISEM '17-Kanazawa)	日本実験力学会	TEL 025-368-9310 office-jsem@clg.niigata-u.ac.jp http://www.jsem.jp	

開催日	名称・開催地・掲載号	主催	問合せ先	締切
2	第5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(5)」(兵庫県立大)(9号569頁)	研究会 No. 69・松尾(兵庫県立大)	FAX 079-267-4907 nmatsuo@eng.h-hyogo.ac.jp	11.1
2~6	第53回熱測定討論会と8th International and 10th Japan-China Joint Symposium on Calorimetry (CATS-2017)(福岡大)	日本熱測定学会	TEL 03-5821-7120 netsu@mbd.nifty.com http://www.cats2017-53netsu.com/	
4~5	軽金属学会第133回秋期大会(宇都宮大)	軽金属学会	TEL 03-3538-0232 http://www.jilm.or.jp/	予約 10.5
5~10	第18回核融合炉材料国際会議(ICFRM-18)(青森)	第18回核融合炉材料国際会議	secretariat@icfrm-18.com http://www.icfrm-18.com/contacts.html	
5~10	第18回材料集合組織国際会議 18th International Conference on Textures of Materials (ICOTOM 18)(St George, Utah, USA)	ICOTOM 18・井上(大阪府立大)	TEL 072-254-9316 inoue@mtr.osakafu-u.ac.jp http://event.registerat.com/site/icotom2017	アブストラクト 2016.11.15
7	第231回西山記念技術講座「破壊力学」の進展とインフラ・構造物の信頼性～安全、安心を管理するフラクチャー・コントロール～(東京)	日本鉄鋼協会・植岡	TEL 03-3669-5933 educact@isij.or.jp https://www.isij.or.jp/mubicwtwx	
7~9	第38回日本熱物性シンポジウム(つくば)	日本熱物性学会	TEL 03-5734-2435 jstp@op.titech.ac.jp http://jstp2017.org/index.html	事前参加 8.1
8~10	第64回材料と環境討論会(沖縄)	腐食防食学会	TEL 03-3815-1161 ysm.hng-113-0033@jcorr.or.jp	
8~10	第58回高圧討論会(名大)	日本高圧力学会	TEL 070-5658-7626 touronkai58@highpressure.jp http://www.highpressure.jp/new/58forum/	講演 7.3
8~10	第36回電子材料シンポジウム(EMS-36)(長浜)	電子材料シンポジウム運営・実行委員会	TEL 03-5841-7131 deura@dpe.mm.t.u-tokyo.ac.jp http://ems.jpn.org/	
9	第74回塑性加工技術フォーラム「北陸地区の魅力あるものづくり」(福井)	日本塑性加工学会	http://www.jstp.or.jp	定員 50名
10	非鉄製錬におけるマイナーメタルに関するシンポジウム(東大生産研)(本号618頁)	東京大学 生産技術研究所 非鉄金属資源循環工学寄付研究部門(JX 金属 寄付ユニット)・宮崎(岡部研)	TEL 03-5452-6314 okabelab@iis.u-tokyo.ac.jp http://www.metals-recycling.iis.u-tokyo.ac.jp/	
10	関西支部第30回技術研修会「生活を支え、環境に配慮し、地道に進化し続けるねじ部品の世界」(尼崎)	日本塑性加工学会 関西支部	TEL 090-9280-0383 kansosei@mail.doshisha.ac.jp	10.20
10	第391回講習会 加工技術の進化を追い～AM(アディティブ・マニファクチャリング)と切削ハイブリッドによる複雑形状加工～(東京理科大)	精密工学会	TEL 03-5226-5191 http://www.jspe.or.jp/	定員 100名
10	平成29年度溶接工学専門講座 ものづくり力伝承講座～溶接プロセスの可視化を極める～(東京)	溶接学会	TEL 03-5825-4073 jws-info@tg.rim.or.jp http://www.jweld.jp/	定員 50名
10	第20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/	
10~11	第68回塑性加工連合講演会(福井)	日本塑性加工学会	http://www.jstp.or.jp	
12~16	第11回亜鉛および亜鉛合金めっき表面処理鋼板に関する国際学会(Galvatech2017) 11th International Conference on Zinc and Zinc Alloy Coated Steel Sheet (Galvatech2017)(東京)	GALVATECH2017・事務局	TEL 03-5657-0777 galvatech2017@jtbcom.co.jp http://www.galvatech2017.jp/	
14~16	日本磁気科学会 第12回年会(京大)	日本磁気科学会	TEL 075-753-4723 MSSJ2017kyoto@gmail.com http://www.device.energy.kyoto-u.ac.jp/mssj12/index.html	
15~16	第39回安全工学セミナープラント安全講座(東京)	安全工学会	TEL 03-6206-2840 jsse-2004@nifty.com http://www.jsse.or.jp	定員 30名
15~18	トライボロジー会議2017秋 高松(高松)	日本トライボロジー学会	TEL 03-3434-1926 jast@tribology.jp http://www.tribology.jp	
16	第43回腐食防食入門講習会(東京)	腐食防食学会	TEL 03-3815-1161 naito-113-0033@jcorr.or.jp	定員 90名
16~17	平成29年度 磁性流体連合講演会(首都大東京)	磁性流体研究連絡会	h29jsmfr@tmu.ac.jp http://jsmfr.on.arena.ne.jp/	
17	第5回統合的先端研究成果発表会(東京)	軽金属奨学会	TEL 06-6271-3151 lm-foundation@nifty.com http://www.LM-Foudation.or.jp	10.31
17	第227回塑性加工技術セミナー「繊維強化複合材の成形シミュレーション」(東工大)	日本塑性加工学会	http://www.jstp.or.jp	定員 50名
17	第46回 薄膜・表面物理基礎講座(2017)ビッグデータを活用した新材料研究(名大)	応用物理学会 薄膜・表面物理分科会	TEL 03-3828-7723 oda@jsap.or.jp http://www.jsap.or.jp/	参加 11.8
17	日本金属学会東北支部地区講演会(秋田大)(9号570頁)	東北支部・原(秋田大)	TEL 018-889-2414 haramoto@gipc.akita-u.ac.jp	懇親会 11.10

開催日	名称・開催地・掲載号	主催	問合せ先	締切
17	第1回機械材料・材料加工部門 若手ポスターシンポジウム(早稲田大)	日本機械学会	<a href="http://mp-poster.org/2017/">http://mp-poster.org/2017/</a>	講演 8.31
17	第78回 レアメタル研究会(東大生産研)(本号619頁)	レアメタル研究会・宮崎(東大生産研岡部研)	TEL 03-5452-6314 okabelab@iis.u-tokyo.ac.jp <a href="http://www.okabe.iis.u-tokyo.ac.jp/japanese/rc40_j.html">http://www.okabe.iis.u-tokyo.ac.jp/japanese/rc40_j.html</a>	
17~19	日本銅学会 第57回講演大会(富山大)	日本銅学会	TEL 03-3836-8801 m-kurihara@copper-brass.gr.jp <a href="https://www.copper-brass.gr.jp/">https://www.copper-brass.gr.jp/</a>	
20	日本希土類学会 第35回講演会(東京)	日本希土類学会	TEL 06-6879-7352 kidorui@chem.eng.osaka-u.ac.jp <a href="http://www.kidorui.org/lecture.html">http://www.kidorui.org/lecture.html</a>	11.6
20~21	平成29年度溶接入門講座(広島)	溶接学会	TEL 03-5825-4073 jws-info@tg.rim.or.jp <a href="http://www.jweld.jp/">http://www.jweld.jp/</a>	定員 60名
20~22	INCHEM TOKYO 2017(東京)	化学工学会, 日本能率協会	TEL 03-3434-1988 inchem@jma.or.jp	
20~24	Plasma Conference 2017(姫路)	応用物理学会他	TEL 052-735-3185 mnhmt@meijo-u.ac.jp	
21	平成29年度工学教育調査研究連合委員会シンポジウム(東京)	日本工学教育協会他	TEL 03-5442-1021 kawakami@jsee.or.jp <a href="https://www.jsee.or.jp/taikai/kouenkai/">https://www.jsee.or.jp/taikai/kouenkai/</a>	11.8
21	溶接部の腐食トラブル防止事例講習会(阪大)	溶接学会	TEL 03-5825-4073 s_kogure@tt.rim.or.jp <a href="http://www.jweld.jp/">http://www.jweld.jp/</a>	定員 70名
22	第106回シンポジウム「アルミニウム建築・土木の現状と将来展望」(日本大学)	軽金属学会	TEL 03-3538-0232 <a href="http://www.jilm.or.jp/">http://www.jilm.or.jp/</a>	定員 80名
22	第16回日本金属学会東北支部研究発表大会(東北大)(9号571頁)	東北支部・篠田(東北大)	<b>TEL 022-217-5624</b> <b>shinoda@tagen.tohoku.ac.jp</b>	<b>10.27</b>
27~28	第11回状態図・熱力学セミナー(名大)(本号618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	abe.taichi@nims.go.jp	11.15 定員 40名
27~29	第46回結晶成長国内会議(JCCG-46)(浜松)	日本結晶成長学会	TEL 070-5047-3339 jaccg-46@jacg.jp <a href="http://www.jacg.jp/">http://www.jacg.jp/</a>	
28	第186回腐食防食シンポジウム「自動車腐食防食の現状と課題～第1回自動車腐食分科会の活動報告～」(東京)	腐食防食協会	TEL 03-3815-1161 ysm.hng-113-0033@jcorr.or.jp	定員 90名
28	第232回西山記念技術講座「破壊力学」の進展とインフラ・構造物の信頼性～安全, 安心を管理するフラクチャー・コントロール～(大阪)	日本鉄鋼協会・植岡	TEL 03-3669-5933 educact@isij.or.jp <a href="https://www.isij.or.jp/mubicwtwx">https://www.isij.or.jp/mubicwtwx</a>	
29	第50回安全工学研究発表会(北九州)	安全工学会	TEL 03-6206-2840 jsse-2004@nifty.com	10.31
30	関西支部第19回塑性加工基礎講座「入門 結晶塑性シミュレーション(実習付き)」(京大)	日本塑性加工学会関西支部	TEL 090-9280-0383 kansosei@mail.doshisha.ac.jp	11.16
30	実用表面分析セミナー2017(神戸大)	日本表面科学会関西支部	TEL 06-7670-4168 tanaka-hajime@nsst.jp <a href="http://www.sssj.org/Kansai/kansai_jitsuyou20.html">http://www.sssj.org/Kansai/kansai_jitsuyou20.html</a>	
30~12.1	第25回新粉末冶金入門講座(京都産業大)	粉体粉末冶金協会	TEL 075-721-3650 info@jspm.or.jp	11.17
<b>12月</b>				
3~8	第11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ーゼーションに関する国際シンポジウム(ハワイ)	日本学術振興会マイクロビームアナリシス第141委員会	alc17@jpsps141.surf.nuqe.nagoya-u.ac.jp <a href="http://alc.surf.nuqe.nagoya-u.ac.jp/alc17/">http://alc.surf.nuqe.nagoya-u.ac.jp/alc17/</a>	
5~6	溶接構造シンポジウム2017「超スマート社会を支える基盤溶接技術」(阪大)	溶接学会溶接構造研究委員会	TEL 072-254-9345 <a href="http://www.jwri.osaka-u.ac.jp/~conf/wmd2017/">http://www.jwri.osaka-u.ac.jp/~conf/wmd2017/</a>	
5~7	第43回固体イオニクス討論会(天童)	日本固体イオニクス学会	TEL 022-795-6976 <a href="http://ceram.material.tohoku.ac.jp/ssij43/ssij43-org@ceram.material.tohoku.ac.jp">http://ceram.material.tohoku.ac.jp/ssij43/ssij43-org@ceram.material.tohoku.ac.jp</a>	事前参加 11.10
6~8	第44回炭素材料学会年会(桐生)	炭素材料学会	FAX 03-3368-2827 tanso-desk@bunken.co.jp	講演 8.21
7~9	走査型プローブ顕微鏡(31)&ICSPM25(静岡)	応用物理学会	TEL 03-3828-7723 oda@jsap.or.jp <a href="http://dora.bk.tsukuba.ac.jp/event/ICSPM25/">http://dora.bk.tsukuba.ac.jp/event/ICSPM25/</a>	参加 11.25
7~9	第55回高温強度シンポジウム・第18回破壊力学シンポジウム(熊本)	日本材料学会	TEL 075-761-5321 <a href="http://www.jsms.jp/">http://www.jsms.jp/</a>	講演 9.1
11~12	第14回ノートパソコンで出来る原子レベルのシミュレーション入門講習会～分子動力学計算と電子状態計算～(大阪)	日本材料学会	TEL 075-761-5321 jimuj@jsms.jp <a href="http://www.jsms.jp">http://www.jsms.jp</a>	



開催日	名称・開催地・掲載号	主催	問合せ先	締切
13~14	金属学会セミナー「状態図・相変態の基盤と実践的ノウハウー CALPHAD 法とフェーズフィールド法を使いこなすためにー」(東京)(本号617頁)	金属学会	TEL 022-223-3685 FAX 022-223-6312 meeting@jim.or.jp	事前 11.24
14	第4回 初心者にもわかる信頼性工学入門セミナー(大阪)	日本材料学会	http://sinrai.jsms.jp/	
15~16	第30回記念信頼性シンポジウム-安心・安全を支える信頼性工学の新展開(大阪)	日本材料学会	RESYMPO2017@jsms.jp http://sinrai.jsms.jp/	
<b>2018年1月</b>				
12	第79回 レアメタル研究会(東大生産研)(本号619頁)	レアメタル研究会・宮崎(東大生産研岡部研)	TEL 03-5452-6314 okabelab@iis.u-tokyo.ac.jp http://www.okabe.iis.u-tokyo.ac.jp/japanese/rc40_j.html	
15~16	第39回安全工学セミナー安全マネジメント講座(東京)	安全工学会	TEL 03-6206-2840 jsse-2004@nifty.com http://www.jsse.or.jp	定員 30名
19~20	第23回 電子デバイス界面テクノロジー研究会ー材料・プロセス・デバイス特性の物理ー(三島)	応用物理学会薄膜・表面物理分科会他	NAGATA.Takahiro@nims.go.jp http://home.hiroshima-u.ac.jp/oxide/	定員 200名
30~31	Mate 2018第24回「エレクトロニクスにおけるマイクロ接合・実装技術」シンポジウム(横浜)	スマートプロセス学会他	TEL 06-6878-5628 mate@sps-mste.jp http://sps-mste.jp/mate/	
<b>2018年3月</b>				
8	第33回塗料・塗装研究発表会(東大生産研)	日本塗装技術協会	TEL 03-6228-1711 tosou-jimukyoku@jcot.gr.jp	発表 10.20
9	第80回 レアメタル研究会(東大生産研)(本号619頁)	レアメタル研究会・宮崎(東大生産研岡部研)	TEL 03-5452-6314 okabelab@iis.u-tokyo.ac.jp http://www.okabe.iis.u-tokyo.ac.jp/japanese/rc40_j.html	
19~21	日本金属学会春期講演大会 千葉工業大学新習志野キャンパス(本年11号会告予定)	日本金属学会	TEL 022-223-3685 FAX 022-223-6312 annualm@jim.or.jp	
<b>2018年7月</b>				
9~12	The 6th International Conference on the Characterization and Control of Interfaces for High Quality Advanced Materials (ICCCI2018)(倉敷)	紛体工学会	TEL 045-339-3959 http://ceramics.ynu.ac.jp/iccci2018/ iccci2018@ml.ynu.ac.jp	
<b>2018年8月</b>				
5~8	15TH INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON FUNCTIONALLY GRADED MATERIALS —Structural Sector Approaches for New Functionalities and Durability—(北九州)	傾斜機能材料研究会	TEL 052-735-5293 fgms_2018@f-jast.or.jp http://www.fgms.net/isfgms2018	abstract 2018.1.20
<b>2018年9月</b>				
19~21	日本金属学会秋期講演大会(東北大学川内北キャンパス)	日本金属学会	TEL 022-223-3685 FAX 022-223-6312 annualm@jim.or.jp	



## 応用物理計測学

梶谷 剛 著

実験を行う研究では、測定と誤差を考慮した解釈が求められる。また統計的な取り扱いを行う理論研究においても同様に誤差を意識した研究が求められ、誤差の取り扱いをテーマとした本書がカバーする分野は広い。誤差の取り扱いが正しくできないと結果の解釈を誤った方向に導くため、誤差の取り扱いとは重要な基礎知識であり、研究者はそれを十分に理解した上で研究にあたる必要がある。しかしながら、現代の研究環境では測定装置に備わるソフトウェアやデータ解析ツールなどが誤差の取り扱いまでも行うものが少なく、それらを理解する機会を得ないまま研究生活を送る学生や若手研究者も多いのではなかろうか。

本書の構成は、著者が大学で講じた講義ノートのまとめということで、前半部分で誤差の性質や解析方法の基礎を説明した上で、後半に各測定方法に付随する誤差の実践的な取り扱い方法を述べており、大学生、院生、および研究者のいずれも読解できるよう、丁寧な説明がなされている。随所にコラムなどの読み物もあり、身近に

取り扱われる誤差の話に触れることで、問題のイメージもしやすく、誤差の基礎を取り扱った前半部分は気軽な読み物として読み進めることも可能である。誤差の知識を再確認する上で、前半だけでも一読しておいて損はない。また、章毎に練習問題を多数掲載しており、得られた知識の応用・実践力を鍛えることが可能である。誤差の関数などは複雑で理解が難しいものが多いが、本書には GNU PLOT などフリーのソフトウェアのコードや Excell のような汎用ソフトウェアによる関数が記述されているので、実際に計算コードを動かすことで可視化することができ、関数の形状や特徴などをイメージしやすい。さらに、応用の章では Laplace 変換を用いた解析方法などがあり、実践的な知識を獲得することができる内容となっている。

(東北大学多元物質科学研究所 榎木勝徳)

[2017年 A5版 アグネ技術センター 187頁 2,000円+税]



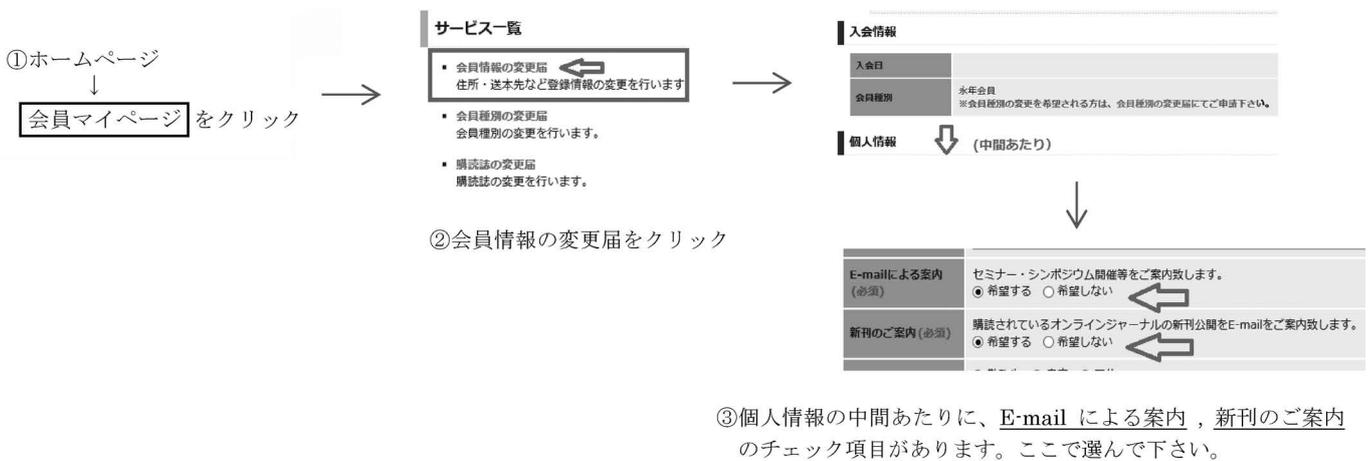
## お知らせ

- 会報「まてりあ」は、11号または12号の巻頭言でカラー掲載記事を企画しております。
- 2017年秋期(第161回)講演大会の記録は、次号に掲載予定です。

## JIM's NEWS

### 本会からのメール配信サービスのご活用について

会員の皆様の利便性を目的に、「まてりあ」オンライン発行のお知らせや本会の主要行事(講演大会・セミナー・シンポジウム等)のご案内などをE-mailでもお届けしております。  
こちらをご利用されていない方でこのメール配信サービスをご希望される方は、下記の方法で是非ご活用下さい。



### 2017, 2018年度会報編集委員会 (五十音順, 敬称略)

委員長	山本剛久					
副委員長	大塚誠					
委員	赤瀬善太郎	足立望	安達正芳	池尾直子	池田賢一	石本卓也
	上田恭介	梅津理恵	榎木勝徳	大野直子	大森俊洋	小幡亜希子
	木口賢紀	北村一浩	高坂典晃	近藤亮太	齊藤敬高	榊浩司
	佐々木秀顕	佐藤紘一	佐藤幸生	下島康嗣	杉浦夏子	杉田一樹
	芹澤愛	高木成幸	竹田修	武田雅敏	田中智仁	田中秀明
	田中康弘	田辺栄司	趙研	佃論志	堤祐介	寺井智之
	寺西亮	寺本武司	土井康太郎	永井崇	長岡亨	中川鉄水
	仲村龍介	野山義裕	萩沢武仁	長谷川誠	春本高志	本間智之
	水本将之	宮崎秀俊	宮澤知孝	森田敏之	盛田元彰	森戸春彦
	諸岡聡	山中謙太	横田智之	横山賢一	吉矢真人	吉年規治
	李海文	和田武				

まてりあ 第56巻 第10号 (2017) 発行日 2017年10月1日 定価(本体1,700円+税)送料120円  
年間機関購読料金52,400円(税・送料込)

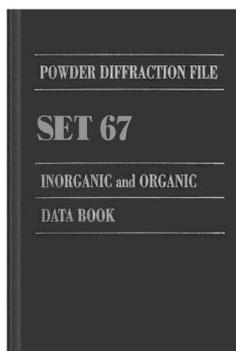
発行所 公益社団法人日本金属学会 発行人 山村英明  
〒980-8544 仙台市青葉区一番町一丁目14-32 印刷所 小宮山印刷工業株式会社  
TEL 022-223-3685 FAX 022-223-6312 発売所 丸善雄松堂株式会社  
〒105-0022 東京都港区海岸 1-9-18



## 粉末回折データベース PDF Book Form (Set67)

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

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



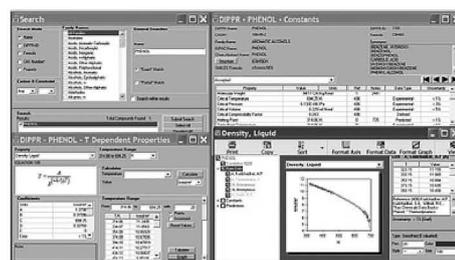
## 化学プロセス用の物性データベース DIPPR with DIADEM pro (Design Institute for Physical Property Data)

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

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

### おもな機能 (DIADEM)

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



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

## 25,000件のセラミックス状態図データベース ACerS-NIST Phase Equilibria Diagrams, Version 4.1

価格(税別) ¥160,000.- マルチユーザー ¥260,000.-

### 検索条件

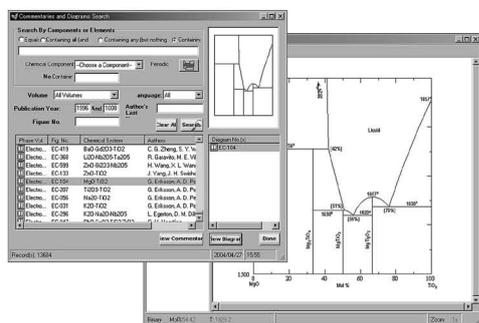
- 成分系、元素記号
- 著者、出典誌名、出版年
- 状態図番号

### データ表示

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

データソース / 新データ2,500件を追加

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

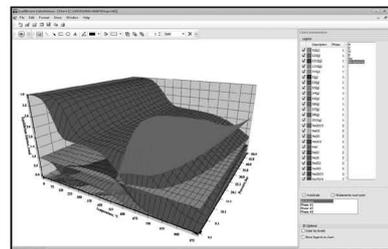


システムプラットフォーム: Windows XP/Vista/7

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

価格(税別) ¥650,000.-/¥280,000.- (一般/教育)

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



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

# 株式会社 デジタルデータマネジメント

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

# 高純度 GfG

## 汚れや飛散のないカーボン材料

最高温度2,800℃

純度5PPM以下

■真空、高温炉内材料一式

■炉内部品取替工事

■炭素繊維高温材料

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



## メカニカルカーボン工業株式会社

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

## 試験雰囲気ガス中の酸素濃度のコントロール・測定に!!

高濃度 ( $10^5 \text{ PaO}_2$ ) から極低濃度 ( $10^{-25} \text{ PaO}_2$ ) まで酸素をコントロール測定します。

### 酸素分圧 & 雰囲気制御試験炉



NEW

管状炉付酸素分圧  
コントローラー

SiOAF-200C

- 簡便な GUI によりタッチパネル、ネットワーク、PC から容易に温度、雰囲気、酸素分圧等のプログラムパターン運転が可能です。
- 酸素分圧コントロールユニット (オプション) の付加により高濃度 ( $10^5 \text{ Pa}$ ) から極低濃度 ( $10^{-25} \text{ Pa}$ ) までの酸素分圧を制御できます。
- 最大3ガス種までの雰囲気ガスを接続し、任意のタイムプログラムにて雰囲気調整できます。
- 均熱長 120mm / 1ゾーン制御炉から均熱長 300mm の3ゾーン制御炉まで対応できます。

SiOC-200CB  
(循環型)



### 酸素分圧コントローラー

- 本装置はジルコニア式酸素ポンプに不活性ガスを流し、ガス中の酸素濃度を制御します。
- 酸素濃度のコントロールは酸素ポンプと酸素センサーを組み合わせた PID 式フィードバック回路により制御されます。
- 不活性ガス中の酸素濃度は  $10^5 \sim 10^{-25} \text{ PaO}_2$  (タイプ C 循環式) の範囲で制御します。

特注品(流量、試料処理部付/イメージ炉、真空チャンバー)などにも対応します。

SiOS-200C  
(コンパクトタイプ)



### 高感度酸素センサー

- 極低酸素分圧領域  $10^5 \sim 10^{-25} \text{ Pa}$  における研究開発に使用できます。
- 高分解能測定回路の採用により、測定レンジの切替をせずに、広範囲酸素分圧をダイレクト測定できます。
- 測定ガスサンプリングポンプを付属したタイプ (SiOS-200P) も揃えています。



## 技術で世界を輝かせる。

世界が求めるニーズはより多様化し、複雑に進化し続けています。

私たちはその一つひとつの声を叶えるために、技術を磨いてきました。

そのなかで培われた、世界をリードする素材・機械ビジネス。

私たちは、いち早くニーズに応えるというだけでなく、

技術で驚きや感動を与えることを大切にしています。

私たちがつくる、より強くしなやかな素材から、新たな価値が生まれる。

私たちがつくる、より低燃費の機械が働くことで、

ある国の礎が築かれる。

私たちは技術で社会や人を繋げ、より輝く世界へと、

導いていくために、挑み続けていきます。

<http://www.kobelco.co.jp/>

**KOBELCO**