

# Materia Japan

- ナノ結晶軟磁性合金ナノメット&L1<sub>0</sub> 磁石
- 永久磁石材料としての Nd(FeM)<sub>12</sub>N
- 「新技術・新製品」
- 春期講演大会プログラム(別冊付録)

# まてりあ

Vol.55 MTERE2 55 (3) 89~130 (2016)

2016 **3**



各種表面分析受託サービスなら  
ナノサイエンス株式会社 (EAGの日本支社) にお任せください。

# GDMS分析 世界シェア No.1

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

測定対象試料

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

“世界の分析リーダー”の技術を日本で——

An Evans Analytical Group Company

**NANO ナノサイエンス株式会社**

〒170-0013 東京都豊島区東池袋1-10-1 住友池袋駅前ビル7F

TEL.03-5396-0531(代) FAX.03-5396-1930

[E-mail]

analysis@eag.com

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

## どこにもないモノへの挑戦



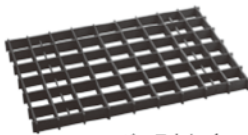
製品情報はこちらへ ▶ [www.toyotanso.co.jp/Products/](http://www.toyotanso.co.jp/Products/)

### C/Cコンポジット製熱処理製品

様々な形状に加工可能な複合材料

- 金属製と比較して、高温強度が高く変形しません
- 処理量アップの提案でトータルコストの削減に貢献

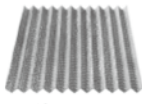
【製品例】



ベーストレイ



バスケット



波形トレイ



スプリング

C/Cコンポジット製品の  
詳細はこちらへ



特殊黒鉛製品の  
詳細はこちらへ

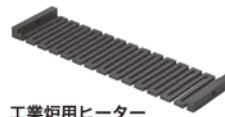


### 特殊黒鉛製品 (等方性黒鉛)

等方的な構造・特性をもった黒鉛

- 2,000℃以上の超高温下で安定使用が可能
- 金属材料に比べ、かさ密度が低く軽量
- 機械加工性に優れ精密な加工が容易

【製品例】



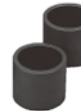
工業炉用ヒーター



ホットプレス用鋳型  
(カットモデル)



連続鋳造用ダイス



真空蒸着用つぼ

高機能素材ワールド E2013 内  
**高機能プラスチック展**  
主催: プラスチック ジャパン

へ出展します  
2016年4月6日(水)~8日(金)  
会場/東京ビッグサイト  
東ホール E7-9

その他、用途に応じたきめ細かなご提案をいたします。

**東洋炭素株式会社**

【本社】〒555-0011 大阪市西淀川区竹島 5-7-12

熱テクノロジー・マテリアル事業部 Tel.06-6472-5849

東洋炭素 C/Cコンポジット

検索

◎ 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)

最近の研究	超低磁心損失・高鉄濃度軟磁性合金「NANOMET®」の最新研究開発動向 牧野彰宏 .....89
	<small>東北発素材技術先導プロジェクトの超低損失磁心材料技術領域で遂行されている拠点形成、基礎研究、応用実証および東北復興・雇用創出の研究成果ならびに軟磁性ナノ結晶合金ナノメットおよびFeNi磁石合金の成果を紹介。</small>
	ThMn <sub>12</sub> 構造を有するNd(FeM) <sub>12</sub> N化合物の永久磁石材料としての 可能性と課題 平山悠介 三宅 隆 宝野和博 .....97
	<small>高飽和磁化、高異方性磁界を有するNdFe<sub>12</sub>Nの磁気特性を、第一原理計算と薄膜を用いてのモデル実験の両面から紹介。</small>
新進気鋭	中性子を利用した結晶方位の先端的評価技術の開発と今後の展望 小貫祐介 .....104
新技術・新製品	耐力力緩和特性に優れる車載コネクタ用70Cu/30Zn ベース合金「C44710」の開発 大石恵一郎 外蘭 孝 積川靖弘 須崎孝一 .....108
	衝突時の安全性を高めた船舶用高強度高延性鋼板の開発 中島孝一 一宮克行 長谷和邦 衛藤太紀 深井英明 .....111
	連続鍛造圧延法による高性能銅合金線の開発 中本 斉 石田徳和 服部芳明 大石恵一郎 芦田哲哉 .....114
研究室紹介	形状記憶合金を用いたエネルギー変換材料の開発を目指して 仁井貴文 .....117
はばたく	これまでの研究活動とこれからの研究活動 白石貴久 .....118
本会記事	会告 .....119 次号予告 .....127
	支部行事 .....123 新入会員 .....127
	掲示板 .....124 行事カレンダー .....128
	会誌・欧文誌3号目次 .....125 本会刊行物のご案内 .....130
付録	2016年春期講演大会プログラム <span style="float: right;">別冊付録</span>

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

表紙デザイン：北野 玲  
複写をご希望の方へ

本会は、本誌掲載著作物の複写に関する権利を一般社団法人学術著作権協会に委託しております。本誌に掲載された著作物の複写をご希望の方は、(一社)学術著作権協会より許諾を受けて下さい。但し、企業等法人による社内利用目的の複写については、当該企業等法人が社団法人日本複写権センター((一社)学術著作権協会が社内利用目的の複写に関する権利を再委託している団体)と包括複写許諾契約を締結している場合にあつては、その必要はありません。(社外頒布目的の複写については、許諾が必要です。)

権利委託先 一般社団法人学術著作権協会  
〒107-0052 東京都港区赤坂9-6-41 乃木坂ビル3F  
FAX 03-3475-5619 E-mail: info@jaacc.jp <http://www.jaacc.jp/>  
複写以外の許諾(著作物の引用、転載、翻訳等)に関しては、直接本会へご連絡下さい。

- 廃熱のみを利用した感温性磁性流体の磁気体積力による自己循環型ポンプ
- マイクロチャンネルに感温性磁性流体を封入した小型熱輸送デバイスの開発 (磁気工学と流体工学の融合)



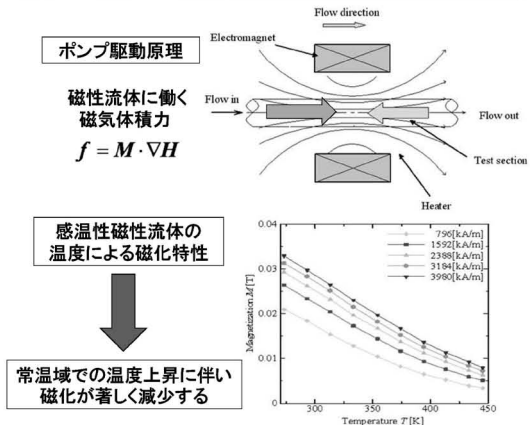
### 目的・背景

#### 背景

- CPU, LSI, LED等の高性能化・高密度化により微小領域からの高熱流束の除熱の問題が顕在化
- 特殊な感温性磁性流体を用いて、磁場勾配と温度場による自己循環型ポンプ技術のシーズを保有

#### 目的

- 特殊な感温性磁性流体を封入したマイクロチャンネルと、小型永久磁石によりマイクロチャンネルに高磁場勾配を印加し、自己循環型ポンプ性能を向上し、実用的な熱輸送技術を構築する
- 廃熱のみを利用した消費電力0の小型熱輸送デバイスを開発する



### 本技術の特徴

#### 1. 小型永久磁石による磁場を作用

- ・内径φ0.5~φ6mmの閉ループチューブに特殊磁性流体を封入

#### 2. 磁場勾配印加

- ・小型永久磁石磁気回路により、チューブ進行方向に磁場勾配を印加

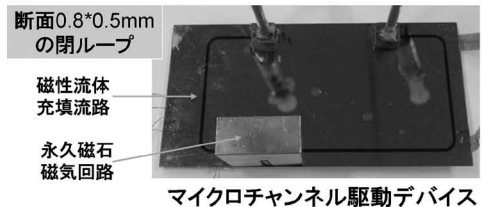
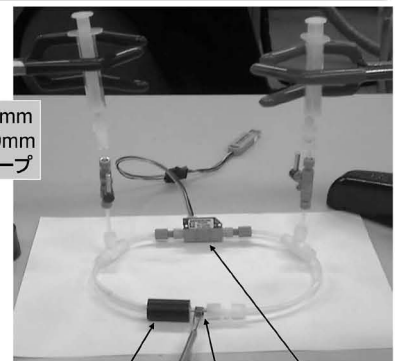
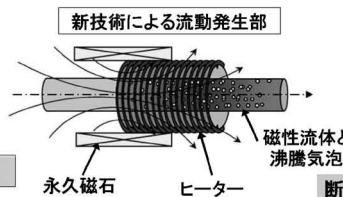
#### 3. 磁性流体局所加熱 (動作確認の為)

- ・感温性磁性流体の磁場最大位置より下流側を約100℃で廃熱印加

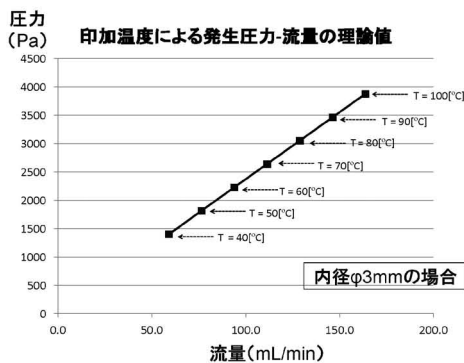
#### 4. 実験結果

- ・感温磁化特性による磁化の低下と気相混入による空間平均的な磁化率の低下により磁気体積力が増加

・流速≒40mm/s (φ2mm)で駆動を確認



### KRIからのご提案/今後の展開/期待される成果など



#### 今後の高性能化に向けて

- ・磁気回路と磁性流体の改良による駆動特性の向上

#### 今後の応用展開例

- ・パソコンCPU冷却、スマートフォンのCPU冷却
- ・プロジェクター素子冷却、二次電池の冷却
- ・半導体、パワーデバイスの冷却
- ・廃熱利用の発電

# 超低磁心損失・高鉄濃度軟磁性合金 「NANOMET<sup>®</sup>」の最新研究開発動向

牧野 彰 宏\*

## 1. はじめに

本稿では、著者が研究代表者を務める東北発 素材技術先導プロジェクト超低損失磁心材料技術領域(2012年6月～2017年3月)で進められている超低磁心損失・高鉄濃度軟磁性合金「NANOMET<sup>®</sup>(ナノメット)」の最新研究開発動向を紹介する。本技術領域では、東北大学で生み出されたFeと半金属元素からなる新しいナノ結晶軟磁性材料ナノメットをベースに、東北を中心とする関連企業と一体となった取り組みにより東北での産業化を目指している。この目標達成のため、拠点形成から最終目標の東北での産業集積・新産業の創出に至るロードマップ(図1)を設定し、(I)拠点形成、(II)基礎研究、(III)実証研究および(IV)最終目標の達成に向

けて、研究を推進中である。

以下では、著者らがナノ結晶軟磁性合金ナノメット<sup>(1)</sup>の開発に至った経緯を研究開発の時代背景とともに解説する。ナノメットは、1970年以降、東北大学を中心とする我が国が研究を牽引してきたアモルファス合金(金属ガラス)の研究分野の流れを汲んでいる。Fe基アモルファス合金は、アモルファス合金の三大特性として広く知られている強靱性、超耐食性、および軟磁性の全てに関与する重要な合金系であり、特に、軟磁性は実用化に最も近い特性として着目され、古くから研究開発が進められてきた。

Fe基アモルファス合金は、歴史的に、アモルファス合金、ナノ結晶合金、バルクアモルファス合金(バルク金属ガラス)の順で研究が進展した。まず、B, C, Si, Pなどの半金属を含むFe-半金属アモルファス合金<sup>(2)</sup>の研究が1970年代に進展したことに端を発し、その後、Fe-Si-B系アモルファス合金として知られるMetglass<sup>®</sup>に継承されて商用ベースで現在に至っている。続いて、1980年代後半にFe-半金属系のFe基ナノ結晶軟磁性合金が開発された。例えば、FINEMET<sup>®</sup>(ファインメット: Fe<sub>73.5</sub>Cu<sub>1</sub>Nb<sub>3</sub>Si<sub>13.5</sub>B<sub>9</sub> at%)合金<sup>(3)</sup>は、前期遷移金属のNbの添加によるナノ結晶化と極微量のCu添加によるナノ結晶組織制御により優れた軟磁気特性が得られる。ほぼ同時期に、著者らはZr, Hf, Nb等の前期遷移元素(M元素)と半金属のBを含有する、いわゆる、Fe-M-B系ナノ結晶軟磁性合金(NANOPERM<sup>®</sup>)<sup>(4)</sup>の開発に成功している。これらのナノ結晶軟磁性合金も商用ベース研究開発がなされている。なお、NANOPERMの高温特性改善のために、Coを添加したHITPERM<sup>(5)</sup>も海外の研究グループにより開発されている。

その後、1995年に臨界直径1mmのFe基バルク金属ガラス(Fe<sub>73</sub>Al<sub>5</sub>Ga<sub>2</sub>P<sub>11</sub>C<sub>5</sub>B<sub>4</sub> at%)<sup>(6)</sup>が報告されて以来、Fe基アモ



図1 東北発 素材技術先導プロジェクト超低損失磁心材料技術領域のロードマップ。

\* 東北大学; リサーチプロフェッサー, 東北大学金属材料研究所; 教授(〒980-8577 仙台市青葉区片平2-1-1)  
The Latest Research and Development Trends of Super-Low Core-Loss and High Fe-Content Nanocrystalline Soft Magnetic Alloy “NANOMET<sup>®</sup>”; Akihiro Makino (Institute for Materials Research, Tohoku University, Sendai)  
Keywords: core-loss, soft magnetic alloy, nanocrystalline alloy, amorphous alloy, energy-saving  
2015年11月27日受理[doi:10.2320/materia.55.89]



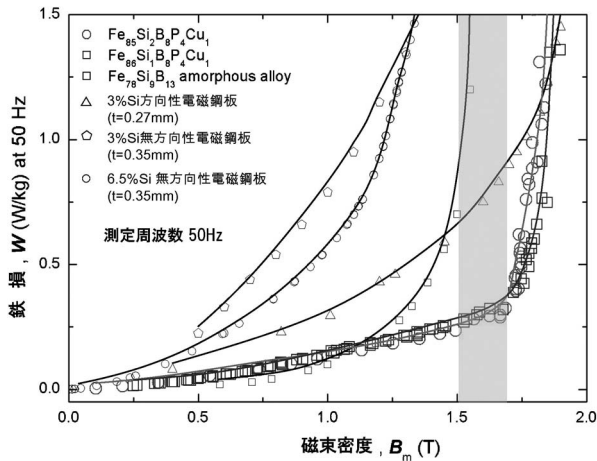


図5 ナノメットおよび比較材の鉄損特性.

メットの鉄損特性は、図5に示すように、1.5~1.6 Tの磁束密度領域でも0.3 W/kg程度以下の低鉄損を達成しており、珪素鋼板と比較しても優れた鉄損特性が得られる。

次章では、上述の背景をもつナノメットの最近の研究動向を本技術領域のロードマップに沿って概説することとする。

## 2. 研究開発成果

### (1) 拠点形成

2012年6月に本技術領域が始動したことに伴い、東北大学金属材料研究所に超低損失軟磁性ナノ結晶材料研究開発センター(ナノ結晶センター)を設立し、金研敷地内で基礎研究を開始した。続いて、同11月に応用実証を目的とする大型設備の設置を目的として、仙台郊外の宮城県黒川郡富谷町にあるYKK(株)金属材料研究所を借り受けて富谷サテライトを設置した。その後、2014年9月に開所した東北大学産学連携先端材料研究開発センター(MaSC: Materials Solution Center)に基礎研究メンバーが移り、拠点の集積化が完了した。拠点形成については、この間、東北大学BIP(ビジネス・インキュベーション・プログラム)の採択および実施を通じて、大学および大手企業5社出資による大学発ベンチャー(2015年11月設立、東北大としては第一号)<sup>10)</sup>に発展している。これらにより、本技術領域の拠点形成が完成し、現在に至っている。

### (2) 基礎研究成果

本技術領域は、文部科学省プロジェクトであり、基礎研究にも十分重点を置いた研究を行っている。以下では、本研究領域で得られた主な基礎研究成果として、以下の5つの研究成果を紹介する。(1)薄帯試料の幅広化の取り組み、(2)透過電子顕微鏡観察結果およびナノメットにおけるCuの役割の解明、(3)合金組織形成機構の解明と急速加熱が合金組織に与える影響の解析、および(4)熱力学計算、第一原理シミュレーション、(5)ナノメットの基本磁気特性である。

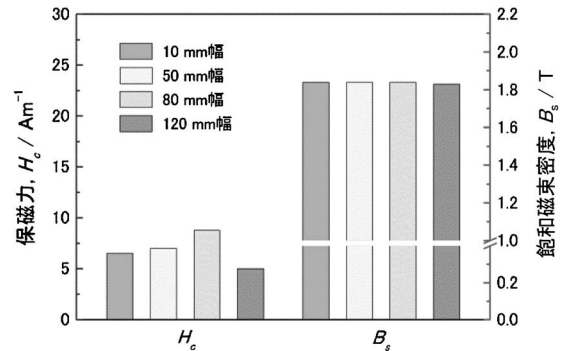


図6 ナノメット薄帯の幅広化と基本磁気特性の薄帯試料幅依存性.

薄帯試料の幅広化は、基礎研究から応用実証研究に展開する際に取り組むべき重要事項のひとつである。通常、研究室レベルで作製される液体急冷薄帯試料の幅は、およそ1~2 mmであり、この幅の試料があれば基礎研究を展開するのに量的に十分である。しかしながら、本技術領域では応用実証への展開を図るために、薄帯試料の幅広化に取り組んだ。その結果、2012年6月時点で5 mm幅、2013年時点では80 mm幅薄帯試料を安定的に作製する技術を確立した。次いで、2014年6月時点で120 mm幅に到達して、プレスリリースを行った<sup>(11)</sup>。さらに、2014年12月には、JIS規格で定められている170.2 mm幅に対応するために、富谷サテライトに超幅広液体急冷装置を導入して、薄帯試料のさらなる幅広化と安定的な製造技術の確立に向けた研究を行っている。ところで、応用実証に向けた薄帯試料の幅広化に伴い、幅広薄帯試料の軟磁気特性の劣化が危惧される。しかしながら、図6に示されるように、ナノメットの基本磁気特性は薄帯試料幅に依存しないことが検証されている。これにより、一気に応用実証化が促進されることになった。

第二に、ナノメットの急冷材および熱処理材の合金組織および微細構造を精緻に観察、分析するために、2013年3月に透過電子顕微鏡(日本電子製、JEM-ARM200F Beluga)を導入して、ナノメットのヘテロアモルファス構造の本質を究明した(図7)<sup>(12)</sup>。さらに、SPring 8施設を利用したXAFS解析を行い、ナノメットの合金組織および構造の特徴を明らかにした<sup>(13)(14)</sup>。この構造・組織観察の結果、ナノメットのナノ結晶組織を特徴づけるのは微少添加されたCuであり、通常、fcc構造をとるCuが温度変化に伴って、アモルファス→fcc(〜 $T_{x1}$ -50 K)→bcc(〜 $T_{x1}$ )→fcc(〜 $T_{x2}$ )( $T_{x1}$ ,  $T_{x2}$ : 第一、第二結晶化温度)のように同素変態することが明らかになった。このようなCuの同素変態は、FINEMETでは認められず、また、FINEMETにおけるCuの役割がFe(Si)結晶の核形成サイトであることも異なっている。

第三の熱処理に関しては、ナノメットの特徴のひとつとして、ナノ結晶化の熱処理の際に急速加熱を要する点を挙げる事ができる。示差走査熱量計(DSC)測定を行った場合、ナノメットは、 $T_{x1}$ =660 K付近で $\alpha$ -Feが析出し、 $T_{x2}$ =

820 K 近傍の温度で化合物の析出が生じる。この際、 $T_{x1}$ における結晶化エンタルピー( $\Delta H_{x1}$ )は 5 kJ/mol 程度であり発熱量としては他の Fe 基アモルファス合金の  $\Delta H_{x1}$  と比較してかなり大きく、かつ、DSC トレースの第一結晶化ピークが急峻である特徴をもつ。換言すれば、ナノメットは  $T_{x1}$  で一気に結晶化が生じる。この大きな  $\Delta H_{x1}$  は、実証を指向して作製した大形状サンプルを熱処理した場合、結晶化の自己発熱(熱暴走)によるサンプルの炎上を起こす場合がある程の熱量であり、開発においては熱処理条件の制御に留意を要した。その他、ナノメットで得られる合金組織は、昇温速度依

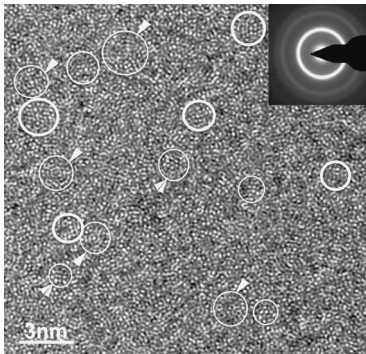


図7  $Fe_{85.2}Si_2B_8P_4Cu_{0.8}$  ヘテロアモルファス合金急冷材の球面収差補正高分解能電顕像および制限視野電子回折パターン。原子クラスターが○印の領域で観察される<sup>12)</sup>。

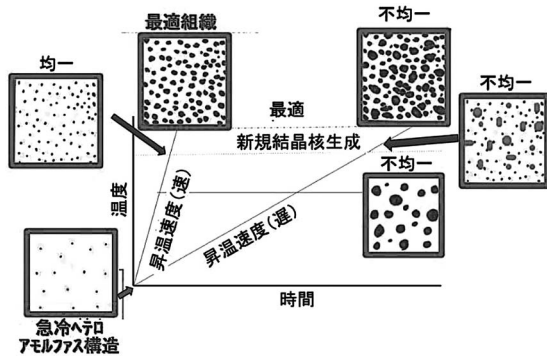


図8 ナノメット組織の熱処理条件依存性<sup>15)</sup>。文献<sup>15)</sup>から許可を得て転載。

存性が高い点も特徴のひとつである。図8は、熱処理条件によるナノメットの組織の違いを模式的に示している。最適組織である10ナノメートル程度の結晶粒から成る均一組織を得るためには、毎分数百Kの急速加熱が必要であることが明らかになっている<sup>15)</sup>。

第四として、計算機科学のアプローチによるナノメットの基礎研究成果を紹介する。手法としては、熱力学に立脚する状態図および Gibbs 自由エネルギー解析と第一原理シミュレーションなどを行っている<sup>16)</sup><sup>17)</sup>。例えば、熱力学計算では、 $Fe_{85}B_{15}$  二元系アモルファス合金からナノメットの5元系合金を系統的に比較することにより、ナノメットの結晶化の特徴を Gibbs の自由エネルギー解析により解明し、前述したナノメットの特異な結晶化機構の自由エネルギー的解析に成功した<sup>16)</sup>。一方、第一原理シミュレーションでは、Fe と半金属の間の電荷移動を精緻に解析して、今後、ガラス形成能および軟磁性の改善の指針を提示している<sup>17)</sup>。

最後に、これらの基礎研究のまとめとして、ナノメットの基本磁気特性を表1<sup>18)</sup>に示す。ナノメットの特長は、高い飽和磁束密度( $B_s = 1.85$  T)と低い磁心損失( $W \sim 0.3$  W·kg<sup>-1</sup>)を併せもつ点にあり、飽和磁束密度については  $Fe_{78}Si_9B_{13}$  (2605)アモルファス合金やナノ結晶ファインメットをはるかに凌ぎ珪素鋼板に迫る高い値を示す。さらに、磁心損失については珪素鋼板をよりも1オーダー、アモルファス合金の1/3程度の優れた軟磁気特性を示す。総じて言えば、ナノメットは、既存の軟磁性材料の様々な特性の特長を併せ持つ画期的な軟磁性材料であるといえる。ナノメットの実証研究を指向した具体的な基礎研究の取り組みとして、図9に示すようにC元素添加による軟磁気特性のリボン厚さ依存性を測定した。その結果、C添加により40 μm超厚さのサンプルにおいても、 $H_c \leq 10$  A/mの軟磁気特性を保持しており、厚肉化が可能であることが明らかになった<sup>19)</sup>。

### (3) 応用実証および協業

本技術領域では工業化を指向した応用実証を研究項目に掲げている。研究開発を開始した2012年6月以降、約3年数カ月の間に、前述した幅広リボン(120 mm幅)の作製成功の他に、パナソニック㈱との共同研究による超低損失モータ試作(図10、表2)<sup>20)</sup>および高性能な軟磁性粉の開発と圧粉コ

表1 ナノメットと他の軟磁性材料との特性比較<sup>18)</sup>。

名称	合金組成	板厚 t/μm	磁束密度 $B_m$ /T	飽和磁束密度 $B_s$ /T	保磁力 $H_c$ /A·m <sup>-1</sup>	実効透磁率 $\mu_e$ (at 1 kHz)	磁心損失 $W_{15/50}$ / W·kg <sup>-1</sup>	磁心損失 $W_{17/50}$ / W·kg <sup>-1</sup>	比抵抗 $\rho/\mu\Omega\cdot m$	磁歪 $\lambda_s/10^{-6}$	キュリー 温度 $T_c/^\circ C$
ナノメット	Fe-Si-B-P-Cu	17-23*	1.82	1.85	5.8	27000	0.25	0.38	0.736	2.3	728
方向性珪素鋼板	Fe-3 mass%Si	270	1.92	2.03	7.8	6100	0.61	0.84	0.478	1.2	740
無方向性珪素鋼板	Fe-3 mass%Si	350	1.51	2.03	26	720	2.03	3.48	0.572	6.8	740
無方向性珪素鋼板	Fe-6.5 mass%Si	100	1.29	—	22	2100	2.7	—	0.817	-0.1	690
アモルファス合金	$Fe_{78}Si_9B_{13}$ (2605)	20	1.49	1.54	2.6	10600	0.68	—	1.35	27	395
ナノ結晶 ファインメット	$Fe_{73.5}Si_{13.5}B_9Nb_3Cu_1$	18	1.23	1.24	0.5	150000	—	—	1.15	2.1	571

\* 可変



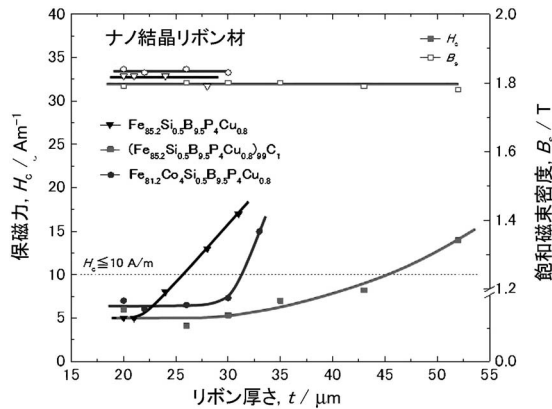


図9 Fe<sub>85.2</sub>Si<sub>0.5</sub>B<sub>9.5</sub>P<sub>4</sub>Cu<sub>0.8</sub>, (Fe<sub>85.2</sub>Si<sub>0.5</sub>B<sub>9.5</sub>P<sub>4</sub>Cu<sub>0.8</sub>)<sub>99</sub>C<sub>1</sub> および Fe<sub>81.2</sub>Co<sub>4</sub>Si<sub>0.5</sub>B<sub>9.5</sub>P<sub>4</sub>Cu<sub>0.8</sub> ナノ結晶合金の H<sub>c</sub> および B<sub>s</sub> のリボン厚さ依存性<sup>(19)</sup>. 文献<sup>(19)</sup> から許可を得て転載.

アの試作に成功(図11)<sup>(21)</sup>し、それぞれプレスリリースを行っている。

これらのプレスリリースを起点として、企業との協業を展開しており、2015年11月現在、外資系一社を含む26社との共同研究を展開するに至っている。実証研究に関しては、液体急冷薄帯とアトマイズ粉体のうち、前者がリアクトル、トランス、モータの実証研究を通じて、ロードマップの前倒しで先行している。一方、粉末については、2014年に東北大学のBIP(ビジネス・インキュベーション・プログラム)で端緒を付け、2015年3月のプレスリリース<sup>(21)</sup>を経て、11月の大学発ベンチャー設立へと発展している。なお、大学発ベンチャーの設立は、別途、プレスリリースを行っている<sup>(10)</sup>。粉末材については、ヘテロアモルファス状態およびナノ結晶状態での使用の双方が目的に応じて可能である。例えば、前者では電子部品などへの展開が可能であり、一方、高B<sub>s</sub>を要する用途ではナノ結晶状態粉末で対応できる。中型・小型モータに関しては、急冷薄帯を積層させる2次元設計よりも、粉末の固化成形による3次元設計モータが求められており、ナノメット粉末はその期待に十分応えられるポテンシャルを有している。

#### (4) 貢献

本技術領域では、東北地域を中心とした東日本大震災からの復興を目指して、地域活動、ネットワーク形成、最先端機器共用、ベンチャー設立などの活動を展開している。地域とのネットワーク形成では、2012年以来、毎年仙台で地域連携研究フォーラムを開催してきたが、2015年10月には、第4回地域連携研究フォーラムをいわき産業創造館(福島県いわき市)で開催し、いわき市長およびいわき商工会議所会頭のご臨席いただくとともに、140余名の参加者と東北地域の復興について貴重な意見交換を行った。復興貢献とともに、東北地方を中心として雇用創出が目標のひとつとして重要であり、2015年11月に設立された東北大学と大手5社による

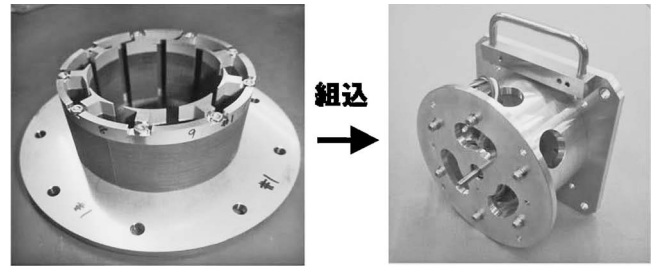


図10 試作したモータ(左)新ナノ結晶合金ナノメットを積層したステータコア. (右)特性評価用モータ<sup>(20)</sup>.

表2 電磁鋼板とナノメットのモータ特性比較<sup>(20)</sup>.

	今回の試作 モータでの実績		家電用モータへ 適用した場合の試算	
	電磁鋼板	ナノメット	電磁鋼板	ナノメット
鉄損	1.4 W (基準)	0.4 W (△70%)	2.2 W (基準)	0.7 W (△70%)
モータ効率	85% (基準)	91% +6%	93% (基準)	96% +3%

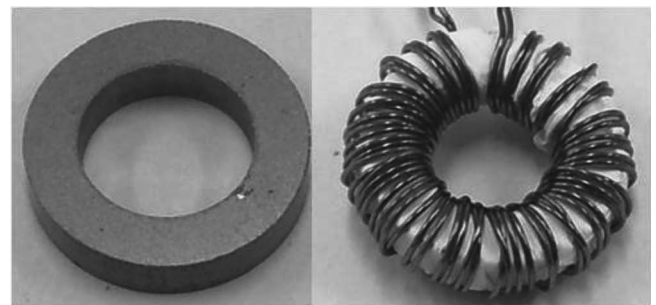


図11 コアの外観写真<sup>(21)</sup>. (左)成形体, (右)製品体. 鉄粉なみの高飽和磁束密度≒1.6 Tと、金属ガラスなみの低コアロス<500 (kW/100 kHz, 100 mT)を兼備する高い性能が実現.

大学発ベンチャー「東北マグネット インスティテュート (TMI)<sup>(22)</sup>」がその中心的役割を担う予定である。

#### (5) スピンオフ(L1<sub>0</sub>-FeNi 規則相, 隕石磁石)

軟磁性合金であるナノメットの性能改善の研究の一環として、Feの一部をNiに置換した合金を研究した結果、スピンオフとして硬質磁性合金(隕石磁石)の開発に成功<sup>(23)</sup>、プレスリリースを行った<sup>(24)</sup>。この開発の経緯と現在得られている成果を以下に概説する。言うまでもなく、永久磁石技術開発は日本の代表的得意分野であり、KS鋼から近年のNd-Fe-B系磁石まで世界をリードし、さらに、新規材料出現を基に非連続的な広範な技術発展、新産業形成を成し遂げてきた。とくに、1980年代に開発された高性能永久磁石であるネオジム磁石は、ハイブリッド車(HEV)や電気自動車(EV)のエネ自動車用駆動モータをはじめ、電動パワーステアリングの駆動モータ、省エネルギー型のアエアコン用圧縮機のモー

タ、傾斜ドラム式洗濯機のドラム駆動用モータ、産業用モータやハードディスクドライブ駆動モータなどの幅広い用途で使われ、産業や社会基盤を支えてきた。かつてネオジム磁石は日本企業のみが生産し、世界を牽引してきたが、基本特許等排他的独占権が切れつつある中、中国の生産額は我が国を上回ってきており、また、希土類の輸出規制とあいまって、わが国の産業基盤上の大きなリスクとなっている。次世代自動車や家電、産業機械の心臓部であるモータの省エネ化・競争力を確保し、我が国産業全体を活性化のためにレア・アースに依存しない革新的な新規高性能磁石の開発が最重要課題となっている。現状、多くの研究は、ネオジム磁石の高温における特性劣化を防止するために必須とされる Dy の添加量の減少を試みている。しかしながら、これらは、既存のネオジム磁石を前提とする研究、換言すれば、ネオジムに依存する研究であり、高性能磁石を製造する際に希土類元素を全く使用しないわけではなく、将来的なリスクの根本的解決にはならない。完全レア・アースフリー磁石としては、Fe と Ni を主成分とする天然隕石中に、ごく微量含まれる  $L1_0$ -FeNi 規則相が硬質磁性を発現することから1990年以降、学術的に注目を集めている。人工的に  $L1_0$ -FeNi 規則相を作製する試みは、 $L1_0$ -FeNi 相が発見された1960年代以来、粒子線の照射<sup>(25)</sup>、微粒子法<sup>(26)</sup>、メカニカルアロイング<sup>(27)</sup>、単原子積層<sup>(28)</sup>、高圧ひずみ加工<sup>(29)</sup>や化学合成等<sup>(30)</sup>の方法で試行されてきたが、残念ながら、極めて高い化学的規則度をもつ  $L1_0$ -FeNi 相の硬質磁石の製造方法は未だに確立していなかった。今回の完全レア・アースフリー磁石は、ナノメット中の Fe を Ni で一部置換した Fe-Ni-半金属合金を用い、ナノメットと同じ製法で作製した。その結果、この  $L1_0$  Fe-Ni 相を含む合金の XRD パターン(図12)では明瞭な(001)規則回折が認められるとともに図13の TEM 観察ではシミュレーション結果と比較して規則度( $S$ ) $\geq 0.8$ のきわめて高い規則度をもつ  $L1_0$  Fe-Ni 粒を含有していることが分った。

一方、磁気測定結果の図14の赤色曲線が示すように、印加磁場(H) $\sim 3.5$  kOe(キロエルステッド)で横軸を切っており、このことは本合金中に存在する  $L1_0$ -FeNi 結晶粒の磁化

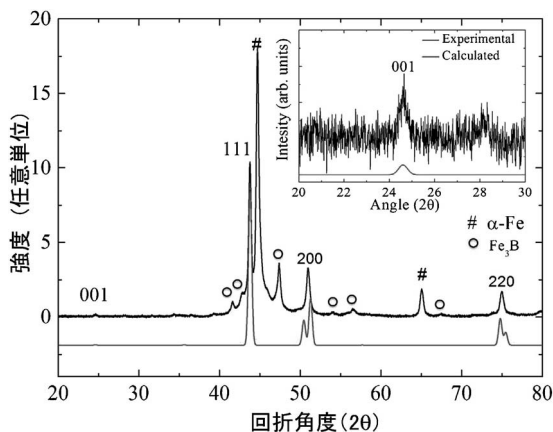


図12 X線回折パターン(実験:黒色, 計算:赤色)<sup>(23)</sup>.

を反転させるためには少なくとも $\sim 3.5$  kOeの印加磁場が必要であることを示している。この値は等方性ネオジムボンド磁石( $\sim 4.4$  kOe)に匹敵する優れた硬磁性であり、本研究で得られた  $L1_0$ -FeNi 規則相の優れた硬磁性を示唆している。この研究成果は、従来必須とされていた Sm, Nd や Dy などのレア・アース元素(希土類)を全く含まない完全レア・アースフリー磁石の創製に世界で初めて成功した事例であり、学術的にも産業的にもきわめて意義深い成果である。

本合金における  $L1_0$ -FeNi 規則相の形成メカニズムは、以下のように理解されている(図15)。宇宙空間で数十億年かけた超徐冷(新規学術概念・用語として「超平衡状態」と命名)

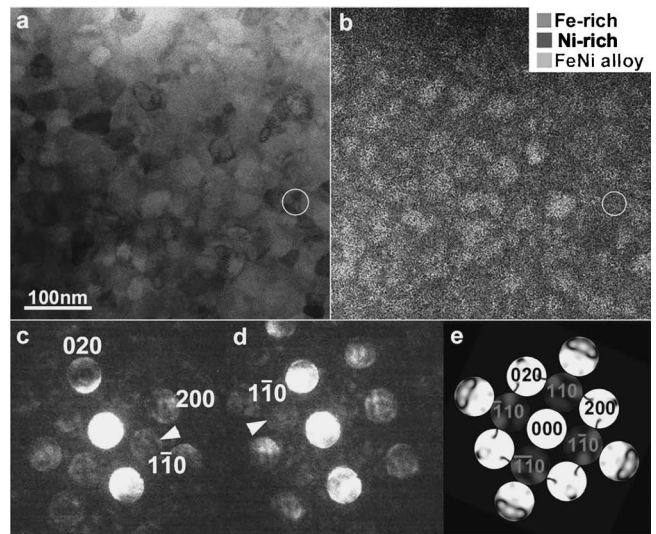


図13 電子顕微鏡による組織観察および電子回折像の観察ならびに計算結果。a: 走査透過型電子顕微鏡-明視野像, b: 走査透過型電子顕微鏡-エネルギー分散型 X線分光法による元素マッピング, c: および d: 図 5a および b の○印は位置から得たナノビーム電子回折(NBD)像, e: 規則度( $S$ ) $= 0.8$ をもつ  $L1_0$ -FeNi 構造の計算 NBD パターン<sup>(23)</sup>.

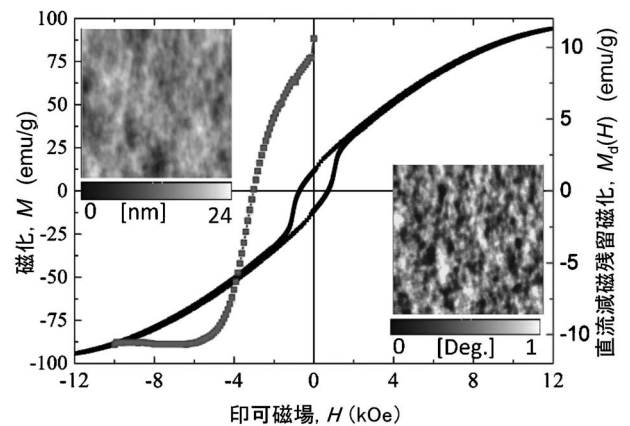


図14 本合金の磁気ヒステリシス曲線(黒色)および dc 減磁曲線(赤色:第2,3象限)および磁気力顕微鏡像<sup>(23)</sup>.

で形成された天然隕石中に極微量含まれる Fe-Ni 磁石は 1960年代の発見により知られているが、これを人工的に短時間で作製することは不可能と考えられていた。我々はアモルファス金属が熱処理によりナノ結晶化する時に生じる通常の粒界拡散・体拡散よりも数オーダー高い拡散(新規学術用語として、「超高速原子移動」と命名)を利用し、タイムトン

ネルのように数十億年かかるものを300時間に短縮し、より高品質に作製することに成功した。本研究で得られた L1<sub>0</sub>-FeNi 規則相と他の研究成果との特性比較を表 3 にまとめる。

今回の研究成果は世界で初めて完全レアースフリー磁石開発のドアを開いたといえる<sup>(24)</sup>。今後、本材料は人類が初めて手にした材料として、物質としての基礎的物性、磁気特性の把握を優先する。並行して、材料としての研究・開発を着実に進める予定である。具体的には、(1)L1<sub>0</sub>-FeNi 相の体積分率を増加、(2)人工的規則相の磁気物性の把握、磁石材料としてのポテンシャルの明確化および(3)工業化への課題の抽出、その解決法の構築を進める計画である。さらに、この結果を踏まえて、近い将来の量産化を見越した開発を進め、モータ等への実装を指向した応用研究も推進する計画である。

### 3. ま と め

東北発 素材技術先導プロジェクト超低損失磁心材料技術領域で研究開発が行われているナノメットの基礎研究および応用実証の現状を中心に最新研究動向を紹介した。基礎研究では、高 B<sub>s</sub> と超低磁心損失を両立するナノメットの原子構造、合金組織を理解するとともに、ナノ結晶化機構について理解を深めることに成功した。一方、応用実証研究では、省エネモータの試作、電子部品用の粉末材等について、企業との協業により目に見える出口戦略を展開した。拠点形成につ

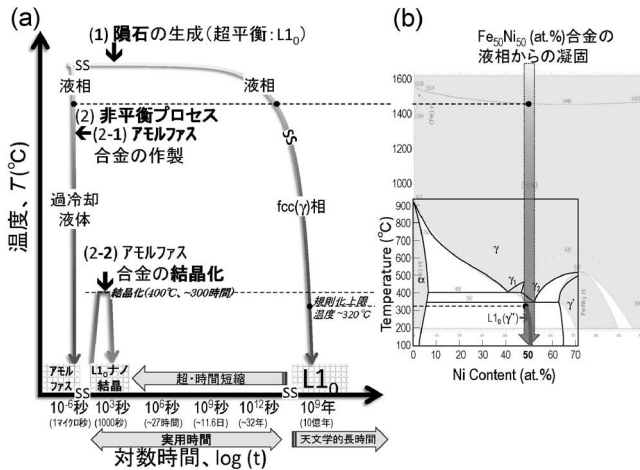


図15 (a)L1<sub>0</sub>-FeNi 相の生成の模式図。(b)一般的に知られている Fe-Ni 二元系状態図(背景図)と隕石関係の論文でみられる状態図。後者では赤色太線で描かれている超平衡 L1<sub>0</sub>-FeNi 規則相が含まれている<sup>(24)</sup>。

表 3 L1<sub>0</sub>-FeNi 相の従来研究との比較(X 印は、XRD 観察で明瞭な結果が認められない結果)。

サンプル作製方法	規則度, S	規則/不規則変態温度 (°C)	磁気異方性エネルギー Ku/erg·cm <sup>-3</sup>	XRD 規則回折	TEM 規則斑点	格子定数 (Å)	体積分率	磁気特性 M(emu/g) Hc(Oe)	参考文献
化学合成(塩化物還元法)				(001)				— 54 kA/m(678 Oe)	(30)
薄膜	0.330 (AuN)* 0.379 (Cu)* 0.395 (CuNi)*		5.8 × 10 <sup>6</sup>	X				1200 emu/cm <sup>3</sup>	(31)
薄膜	0.66		6.1 × 10 <sup>6</sup>	(001)					(32)
隕石	0.608 ± 0.04			(001)		a = 3.582 c = 3.607 c/a = 1.007		1100 emu/cm <sup>3</sup> 900 Oe(面直方向) 500 Oe(面内方向) (500 Oe ~ 3 kOe)	(33)
本研究	≥ 0.8	550		(001)	(011)	a = 3.560 c = 3.615 c/a = 1.015	~10%	~100 emu/g 700 Oe	(23)
実験状態図		320							(26)
ディスク状 FeNi 単結晶への粒子線照射	Sp = 0.41 Sq = 0.45	320	K <sub>1</sub> = 3.2 × 10 <sup>6</sup> K <sub>2</sub> = 2.3 × 10 <sup>6</sup>						(25)
メカニカルアロイング				X				~145 eum/g	(27)
単原子積層	0.6 ± 0.2		6.3 × 10 <sup>6</sup>	(001)					(28)
高圧ひずみ加工				X	(001)**				(29)

\* バッファー, \*\* (001)デバイリング。



# ThMn<sub>12</sub> 構造を有する Nd(FeM)<sub>12</sub>N 化合物の 永久磁石材料としての可能性と課題

平山悠介<sup>1)</sup> 三宅 隆<sup>2)</sup>,\*\* 宝野和博<sup>3)</sup>

## 1. はじめに

現在、電気自動車や風力発電のモーター等で用いられている Nd<sub>2</sub>Fe<sub>14</sub>B を主成分とするいわゆる Nd-Fe-B 磁石は、1982年に佐川らによって発明された。室温において、飽和磁化  $\mu_0 M_S = 1.6$  T, 異方性磁界  $\mu_0 H_A = 8.7$  T であり<sup>(1)(2)</sup>, 現在最高性能の永久磁石として様々な分野に用いられている。この磁石の欠点を挙げるとするならば、熱耐性が低いことにある。Nd<sub>2</sub>Fe<sub>14</sub>B のキュリー温度  $T_C$  が 312°C であるのに対し<sup>(3)</sup>, モーター等での使用温度は 150~200°C であり、この温度域では  $\mu_0 M_S$ ,  $\mu_0 H_A$  とともに顕著に低下する。それに伴い、室温で 1.2 T の保磁力を有する Nd-Fe-B 磁石も 200°C ではわずか 0.2 T 程度にまで低下してしまう。そこで、Dy を結晶粒界に沿って拡散させ(結晶粒界拡散法)、結晶粒界部分での  $\mu_0 H_A$  を増大させることで、この問題を解決している<sup>(4)(5)</sup>。最近では、粒界相に希少金属である Dy の代替として低共晶点を有する金属を拡散させ(共晶合金拡散法)、Nd<sub>2</sub>Fe<sub>14</sub>B 粒間の磁気的交換結合を分断することにより、Dy 置換した Nd-Fe-B 磁石と同等の保磁力が得られることも報告されている<sup>(6)(7)</sup>。

磁石材料の性能を表すエネルギー積  $(BH)_{\max}$  の向上は、铸造磁石から始まり、フェライト磁石, Sm-Co 磁石, Nd-Fe-B 磁石と新しい磁石が開発される度に飛躍的に向上してきた。図 1 に既知の強磁性体の  $\mu_0 H_A$  を、 $\mu_0 M_S^2/4$  から算出される  $(BH)_{\max}$  の最大値に対して整理した。高  $\mu_0 M_S$ , 高  $\mu_0 H_A$  を示す Nd<sub>2</sub>Fe<sub>14</sub>B よりも右上の領域に位置するような、新規磁石材料を開発することが強く望まれている。

ThMn<sub>12</sub> 構造を有する  $R(Fe_{1-x}M_x)_yN$  ( $R$ : 希土類元素,  $M$ : 遷移金属元素) 強磁性化合物の中には  $\mu_0 H_A$ ,  $T_C$  が Nd<sub>2</sub>Fe<sub>14</sub>B に勝る化合物も存在するが、 $\mu_0 M_S$  が Nd<sub>2</sub>Fe<sub>14</sub>B の値に及ばない。後に詳しく記述するように、 $M$  元素の置換が ThMn<sub>12</sub> 構造を保つ役割を果たす一方で、 $\mu_0 M_S$  を低下させてしまう。近年、第一原理計算により、ThMn<sub>12</sub> 構造を有する NdFe<sub>12</sub>N の  $\mu_0 M_S$  は Nd<sub>2</sub>Fe<sub>14</sub>B のそれよりも大きい可能性が示唆された(3章で詳細に述べる)<sup>(8)(9)</sup>。その後、この計算結果を検証するために、薄膜法により、NdFe<sub>12</sub>N<sub>x</sub> を合成したところ、その基本磁気特性( $\mu_0 H_A$ ,  $\mu_0 M_S$ ,  $T_C$ )は、Nd<sub>2</sub>Fe<sub>14</sub>B の値を超えることが報告された(4章で詳細に述べる)<sup>(10)</sup>。本稿では、近年再度注目を集めている ThMn<sub>12</sub> 構造を有する希土類-鉄化合物の結晶構造、磁気特性を理論計

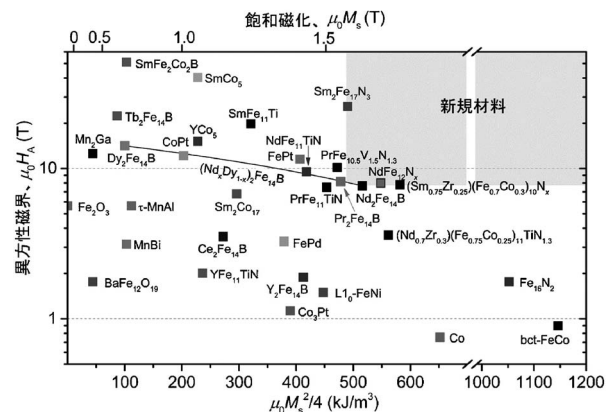


図 1 強磁性相における  $\mu_0 H_A$  と  $\mu_0 M_S$  から計算される理論最大エネルギー積の関係。

\* 物質・材料研究機構 元素戦略磁性材料研究拠点; 1)ポスドク研究員 2)主任研究員 3)フェロー(〒305-0047 つくば市千現 1-2-1)

\*\* 産業技術総合研究所 機能材料コンピュータシミュレーションデザイン研究センター; 主任研究員

The Potential and Challenges of Nd(FeM)<sub>12</sub>N Compounds with ThMn<sub>12</sub> Structure for Permanent Magnet Materials; Yusuke Hirayama\*, Takashi Miyake\*\*, and Kazuhiro Hono\* (\*Elements Strategy Initiative Center for Magnetic Materials (ESICMM), National Institute for Materials Science, Tsukuba. \*\*Research Center for Computational Design of Advanced Functional Materials (CD-FMat), National Institute of Advanced Industrial Science and Technology, Tsukuba)

Keywords: ThMn<sub>12</sub> structure, permanent magnet, hard magnet, NdFe<sub>12</sub>N

2015年11月10日受理[doi:10.2320/materia.55.97]

算, 実験の両面から紹介する.

## 2. CaCu<sub>5</sub> 構造を基本とする結晶構造群

永久磁石材料の開発において, 高  $\mu_0 M_S$  を得るためには鉄元素を用い, 高い結晶磁気異方性を有するためには希土類元素を用いることが有効である. そこで, 鉄を主成分とし, 少量の希土類元素 ( $R$ ) を用いることで高磁化, 高磁気異方性を兼ね備える化合物を得られる可能性がある.  $R$ -Fe 系の高 Fe 濃度の二元化合物には, CaCu<sub>5</sub> 構造<sup>(11)</sup> を基本とする多くの結晶相が存在し, それらの結晶構造を理解することは, 磁気特性の理解に必要不可欠であるため, 以下で詳しく説明していく.

この構造を有する  $R$ -Fe 規則合金の組成式は  $R_m-nFe_{5m+2n}$  ( $m, n$  はゼロ以上の整数) で与えられる. それぞれの結晶構造は, 基本となる CaCu<sub>5</sub> 構造の格子内にある希土類元素のうち,  $n/m$  の割合の希土類元素を規則的に一対の鉄, いわゆる「ダンベル鉄: Fe-Fe」に置き換えていくことで得られる. 図 2 にはそれぞれの構造を, 2 方向からの投影図と鳥瞰図で示した. プロトタイプで表示される低濃度の元素を本図では希土類元素  $R$  として表示し, 高濃度の元素は簡便の為に表示していない. CaCu<sub>5</sub> 構造を基本構造とし, 表示されている  $R$  が, 規則, または不規則にダンベル鉄に置き換わることで, この図に示すすべての結晶構造は得られる. CaCu<sub>5</sub> 構造は P6/mmm の対称性を有し, 図 2 に示す全ての結晶構造の基本単位となる構造である(図 2(a)). Th<sub>2</sub>Zn<sub>17</sub> 構造は CaCu<sub>5</sub> 構造の 1/3 個の  $R$  サイトを規則的にダンベル鉄で置換することにより, R $\bar{3}m$  の対称性を持つ(図 2(b)). Th<sub>2</sub>Ni<sub>17</sub> 構造は Th<sub>2</sub>Mn<sub>17</sub> 構造と同様で, CaCu<sub>5</sub> 構造の 1/3 個の  $R$  サイトを規則的にダンベル鉄で置換することにより得られる(図 2(c))<sup>(12)</sup>. ただし, 規則性の違いにより, P6/mmm の対称性を有する. さらにダンベル鉄を不規則に導入

していくことで, Th<sub>2</sub>Ni<sub>17</sub> タイプの不規則構造(図 2(d)), TbCu<sub>7</sub> タイプ, TbCu<sub>9</sub> タイプとも呼ばれる構造が得られる(図 2(e)). この場合, Th<sub>2</sub>Zn<sub>17</sub> 構造, Th<sub>2</sub>Ni<sub>17</sub> 構造に比べ, Fe の濃度を高めることができるが, その為には, ダンベル鉄が入る空間を確保する必要がある. Zr を Sm サイトに置換させることで  $c/a$  を高くし, ダンベル鉄の入る空間を作ることで高鉄濃度化に成功した (Sm<sub>0.75</sub>Zr<sub>0.25</sub>) (Fe<sub>0.7</sub>Co<sub>0.3</sub>)<sub>10</sub> は TbCu<sub>7</sub> タイプの構造を有し, さらに窒素を侵入させることで (Sm<sub>0.75</sub>Zr<sub>0.25</sub>) (Fe<sub>0.7</sub>Co<sub>0.3</sub>)<sub>10</sub>N<sub>x</sub> は 1.71 T という高  $\mu_0 M_S$  を達成している<sup>(13)</sup>. Nd<sub>3</sub>(Fe<sub>1-x</sub>Ti<sub>x</sub>)<sub>29</sub> は局所的には Th<sub>2</sub>Zn<sub>17</sub> 構造と ThMn<sub>12</sub> 構造の二つが存在するような複雑な系であるが<sup>(14)</sup>, 規則相の一つである(図 2(f)). ThMn<sub>12</sub> 構造は CaCu<sub>5</sub> 構造の希土類のうち 1/2 をダンベル鉄に規則的に置換することで得られる<sup>(15)</sup>. 表示されている原子だけでは I4/mmm の対称性は得られないが, 今回簡便の為に表示していない原子を加えると, I4/mmm の対称性が得られる(図 2(f)). これにより, ThMn<sub>12</sub> 構造を有する二元化合物 RFe<sub>12</sub> は, 最も低希土類濃度で鉄族遷移金属の含有量が最大となるため, 大きな磁化が期待される. 図 3 に, すべての元素を含む ThMn<sub>12</sub> 構造を示した. 体心位置に希土類元素  $R$  ( $2a$  サイト) が位置し, Fe には 3 つのサイト ( $8f, 8i, 8j$ ) が存在する. また, N は  $2b$  サイトを占有する.  $2b$  サイトが窒素

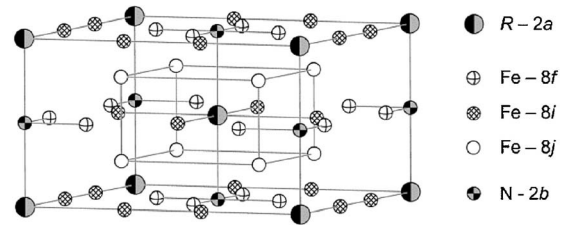


図 3 ThMn<sub>12</sub> 構造を有する RFe<sub>12</sub>N の結晶構造.

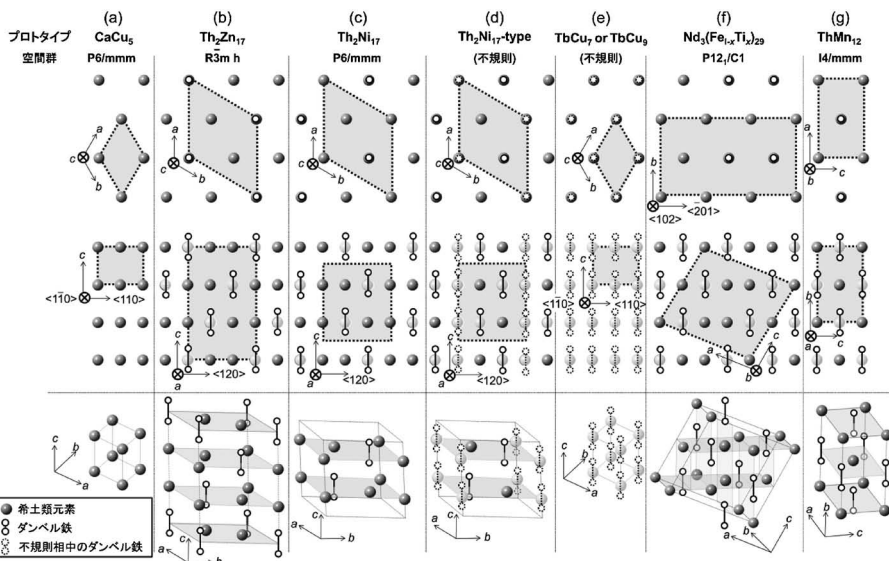


図 2 CaCu<sub>5</sub> 構造を基本とする結晶構造の希土類元素と, それを置き換えたダンベル鉄のみの投影図と俯瞰図.

ですべて満たされた場合、窒素量が1であるが、多くの報告の中では1以上を報告しており、Nが占める他サイト(4d, 16l, 16m)について言及している報告もある<sup>(16)</sup>。

ここで、窒素導入による磁気特性の変化は、Th<sub>2</sub>Zn<sub>17</sub>構造を有するSm<sub>2</sub>Fe<sub>17</sub>N<sub>3</sub>に代表される。Sm<sub>2</sub>Fe<sub>17</sub>は一軸異方性を示さず、 $\mu_0M_S$ の値も小さいが、Nを導入し格子を広げ、Sm<sub>2</sub>Fe<sub>17</sub>N<sub>3</sub>とすることで、 $\mu_0M_S = 1.56$  T,  $\mu_0H_A = 26$  T,  $T_C = 457^\circ\text{C}$ という優れた磁気特性を示すようになる<sup>(17)</sup>。Th<sub>2</sub>Zn<sub>17</sub>構造と同類のThMn<sub>12</sub>構造も同様に、窒素量によって磁気特性が劇的に変化する可能性があり、窒素量の定量、位置を調べることは非常に重要である。

### 3. ThMn<sub>12</sub>構造を有するR(FeM)<sub>12</sub>N<sub>y</sub>系磁石材料

高い磁化が期待できるThMn<sub>12</sub>構造を有する希土類元素と鉄のみの組み合わせのRFe<sub>12</sub>化合物は安定に存在できない。ThMn<sub>12</sub>構造を安定化させるためには、Feの一部を第三元素M(Si, Al, Ti, V, Cr, Mo, W, Nb等)に置き換えることが必要であり<sup>(18)-(23)</sup>、バルクでThMn<sub>12</sub>構造を有する化合物は、R(Fe<sub>12-x</sub>M<sub>x</sub>)<sub>12</sub>のようにFeの一部をM元素で置換することでのみ得られる。また、それぞれの元素Mによって、安定化できるMの濃度(x)も異なる<sup>(24)</sup>。Mの種類によって、MがFeのどのサイトに優先的に入るかが決まる。例えばTiは8iサイトにほぼ入り<sup>(25)</sup>、Vであれば8jサイトに入る傾向が中性子回折によって報告されている<sup>(26)(27)</sup>。さらに、R(Fe<sub>12-x</sub>M<sub>x</sub>)<sub>12</sub>に窒素を導入し、結晶構造とその対称性は変えずにR(Fe<sub>12-x</sub>M<sub>x</sub>)<sub>12</sub>N<sub>y</sub>とすることにより、磁気特性に大きな変化を与えることができる。

SmFe<sub>11</sub>Tiはc軸方向に一軸異方性を有し、 $\mu_0H_A = 19.8$  TとNd<sub>2</sub>Fe<sub>14</sub>Bのほぼ3倍であるものの、 $\mu_0M_S$ が1.27 Tと小さいために<sup>(28)</sup>、Nd<sub>2</sub>Fe<sub>14</sub>Bに取って代わる存在にはなり得なかった。また、Smはスティーブンス因子 $\alpha_f$ が正であるために、ThMn<sub>12</sub>構造を要するSmFe<sub>11</sub>Tiに対してN等を導入しても一軸異方性は示さない。ここで、 $\alpha_f$ とは、希土類元素の内殻にある4f電子の電化密度(形状)に関する物理量である。4f電子雲は周りのイオンからの結晶場を受けて、その安定方向が決まるため、電子雲の形状は磁気異方性の向きを決定づける。一方、 $\alpha_f$ が負の希土類元素Rに関しては、Nを格子間に侵入させることで、R(FeM)<sub>12</sub>N<sub>y</sub>はc軸方向に一軸異方性を示し、永久磁石として使用できる可能性がある。また、R(FeM)<sub>12</sub>にNを侵入させることでFe-Fe間の距離が広がるために、すべての希土類元素Rに対して、100 K以上のT<sub>C</sub>の上昇が観測されている<sup>(29)</sup>。例えば、NdFeTi<sub>11</sub>は窒化することで、T<sub>C</sub>は274°Cから456°Cへ上昇している。しかしながら、その $\mu_0M_S$ は1.48 Tであり、Nd<sub>2</sub>Fe<sub>14</sub>Bのそれには到達していない。その後、NavarathnaらはNdFe<sub>11</sub>Co<sub>1-y</sub>Mo<sub>y</sub>N膜を作製し、 $\alpha$ -Feが多少析出しているものの、 $\mu_0M_S = 1.62$  T, 保磁力 $\mu_0H_c = 8.7$  T,  $\mu_0H_A = 14.5$  Tを報告している<sup>(30)</sup>。2001年にはPrFe<sub>10.75</sub>V<sub>1.25</sub>N<sub>1.6</sub>が室温で $\mu_0M_S = 1.56$  T,  $\mu_0H_A = 10.5$  T,  $T_C = 427^\circ\text{C}$ であること

が報告されたが<sup>(31)</sup>、それでもまだ $\mu_0M_S$ がNd<sub>2</sub>Fe<sub>14</sub>Bに比べ低い為に、Nd<sub>2</sub>Fe<sub>14</sub>Bに取って代わる存在にはなり得なかった。ただし、T<sub>C</sub>がNd<sub>2</sub>Fe<sub>14</sub>Bに比べ約100°C程度高い為に、高温特性は匹敵もしくは勝る可能性がある。

また、Feの一部をCoで置換したRFe<sub>11-x</sub>Co<sub>x</sub>TiN<sub>y</sub>(R = Nd, Pr)の磁気特性も報告されている。窒素侵入量はCo濃度が増加するにつれて減少し、同様の効果は2-17相でも確認されている<sup>(32)</sup>。NdFe<sub>8</sub>Co<sub>3</sub>TiN<sub>1.3</sub>の $\mu_0M_S$ は1.5 T,  $\mu_0H_A$ は7.5 T, T<sub>C</sub>は600°C以上であり、FeをCo置換することで $\mu_0H_A$ にはほとんど影響がないが、 $\mu_0M_S$ の多少の増加と、T<sub>C</sub>の大幅の上昇が観測された<sup>(33)</sup>。近年、鈴木らにより(Nd<sub>0.7</sub>Zr<sub>0.3</sub>)(Fe<sub>0.75</sub>Co<sub>0.25</sub>)<sub>11.5</sub>Ti<sub>0.5</sub>N<sub>0.52</sub>が $\mu_0M_S = 1.68$  T,  $\mu_0H_A = 3.6$  T, T<sub>C</sub> > 730 Kであることが報告され<sup>(34)</sup>、室温でもNd<sub>2</sub>Fe<sub>14</sub>Bの $\mu_0M_S$ を超えるような材料が報告されている。しかしながら、 $\alpha$ -Feの析出を抑制することが出来ておらず、磁化を過大評価している可能性がある。また、 $\mu_0H_A$ も飽和漸近則から間接的に求められた値であるため、正確ではない。RとMの組み合わせで、R(FeM)<sub>12</sub>N<sub>y</sub>の $\mu_0M_S$ を向上させ、相を安定化させることで $\alpha$ -Feの析出を抑制する必要があるが、従来に比べ少ないTi量においてもThMn<sub>12</sub>構造が安定に得られることは興味深い。 $\mu_0H_A$ の向上はDyをNdの一部と置換することにより達成されるが、重希土類元素であるDyとFeの磁気モーメントは反平行に結合するため、Dyの濃度増加と共に $\mu_0M_S$ は減少する<sup>(35)(36)</sup>。

バルクのR(Fe<sub>12-x</sub>M<sub>x</sub>)<sub>12</sub>の合成には多くの場合、液体超急冷-熱処理、メカニカルアロイング-熱処理という過程を経るが、熱処理温度が940°C以上<sup>(37)</sup>もしくは1100°C以上<sup>(38)</sup>でThMn<sub>12</sub>構造が得られるため、高温で安定に存在する相であると理解できる。また、1000°CにおけるSm-Fe-Tiや、1100°CのNd-Fe-Ti三元系状態図によると、いずれも非常に狭い領域でのみThMn<sub>12</sub>構造が得られることが示されており<sup>(39)(40)</sup>、合成できる条件(温度、組成)は限られる。唯一、第三元素Mを置換せずにThMn<sub>12</sub>構造を保つことが知られているのは、SmFe<sub>12</sub>薄膜である。FullertonらはMgO(100)基板、Wをバッファ層に用い、約300 nmのSmFe<sub>12</sub>のエピタキシャル膜の合成に成功している<sup>(41)</sup>。また、Sunらは、ガラス基板を用い、SmFe<sub>12</sub>の約1-3  $\mu\text{m}$ の膜を合成し、構造・磁気特性を報告している<sup>(42)</sup>。Hegdeらは、SmFe<sub>12</sub>の $\mu_0M_S$ を1.43 Tと報告しており、この値はTiを置換して得られたSmFe<sub>11</sub>Tiの $\mu_0M_S$ (1.27 T)と比較し、12%も大きい<sup>(43)</sup>。Nd系において三宅らは、NdFe<sub>11</sub>TiNとNdFe<sub>12</sub>Nのそれぞれの元素が持つ磁気モーメントを計算することで、Tiが単なる磁化の希釈効果だけではなく、周囲のFeの磁気モーメント自体をも低下させてしまうことを第一原理計算から指摘している<sup>(8)</sup>。このことは、第三元素によって磁化の低減率が異なる<sup>(44)</sup>ことの説明にもなる。したがって、R(FeM)<sub>12</sub>N<sub>y</sub>の第三元素Mをできるだけ少なくし、さらにFeモーメントの低減少率であるMを適切に選ぶことで、より大きな磁化を持つ可能性がある。

#### 4. 第一原理計算による $R(\text{Fe}M)_{12}\text{N}$ の磁性<sup>(8)(9)</sup>

結晶磁気異方性定数  $K_1$  は、 $K_1 = -3J(J-1/2)\alpha_f \langle r^2 \rangle A_2^0$  で表される。ここで、 $J$  は希土類イオンの全角運動量、 $\langle r^2 \rangle A_2^0$  は結晶場係数である。よって、大きな一軸異方性を有するためには、 $\alpha_f \langle r^2 \rangle A_2^0$  が負の大きな値をとることが条件である。 $\alpha_f$  は、希土類イオンの種類によって決まった値をとるために、同希土類イオンであれば、 $\langle r^2 \rangle A_2^0$  の値が磁気異方性の大きさを表している。図4(左)に絶対零度における4つの化合物の磁化と  $\langle r^2 \rangle A_2^0$  の第一原理計算の結果を示す。NdFe<sub>11</sub>Ti の Ti を Fe で置換した NdFe<sub>12</sub>N では、磁化が顕著に増加する。 $\langle r^2 \rangle A_2^0$  は NdFe<sub>12</sub>N の方がわずかに小さいものの、大きな影響は見られない。したがって、NdFe<sub>12</sub>N は NdFe<sub>11</sub>TiN と同程度の磁気異方性と、より大きな磁化をもつ磁石化合物であると期待される。

定量的に見ると、NdFe<sub>11</sub>TiN の磁化 1.74 T (26.9  $\mu_B$ /f.u.) に対して NdFe<sub>12</sub>N の磁化は 2.08 T (31.6  $\mu_B$ /f.u.) である。(同じ手法による Nd<sub>2</sub>Fe<sub>14</sub>B の磁化の計算値は 1.85 T である)。注目すべきことに、置換による変化は 4.8  $\mu_B$ /f.u. にも達する。この値は、置換サイトでの鉄の磁気モーメント (2.5  $\mu_B$ ) よりはるかに大きい。すなわち、非磁性の Ti サイトを磁性のある鉄原子で置き換える単純な描像では定量的に説明できない。

顕著な磁化の変化は状態密度から理解することができる。NdFe<sub>12</sub>N を出発点として、Fe を Ti で置換したときの多数 (少数) スピンの電子数の変化を  $\Delta N_{\text{up}}$  ( $\Delta N_{\text{dn}}$ ) とする。Ti の d バンドはフェルミ準位の上に現れる (フリーデルの仮想束縛状態)。元の Fe-3d 多数スピンバンドはほぼ占有されているので、Ti 原子 1 個あたり  $\Delta N_{\text{up}} = -5$  と見積もられる。一方、全電子数は Fe と Ti の電子数の差だけ変化するので  $\Delta N_{\text{up}} + \Delta N_{\text{dn}} = -4$  である。この二つの方程式を連立させると、スピンの変化は  $\Delta N_{\text{up}} - \Delta N_{\text{dn}} = -6$  と計算され、鉄の局所スピンより大きな磁化の変化が理解できる。実空間描像に立ち返れば、NdFe<sub>11</sub>TiN の Ti サイトは Fe サイトと反平行にスピン分極する。また Ti により周囲の Fe サイトの局所

モーメントも変化する。言い換えれば、安定化元素  $M$  による磁化の低下は、その濃度だけでは決まらず、 $M$  元素の種類にも依存する。

次に窒素侵入が磁性に与える影響を議論する。NdFe<sub>11</sub>Ti と NdFe<sub>11</sub>TiN を比べると、侵入型窒素原子により結晶場係数が大きな正の値に変化する。Nd<sup>3+</sup> イオンの  $\alpha_f$  が負であることを考慮すると、強い一軸磁気異方性が誘起されることが示唆される。これは次のように説明される。窒素により Nd-N 間の領域で電子密度が増加する (図4(右))。そのクーロン反発を避けるように Nd-4f 電子は  $ab$  方向に広がる。フント則にしたがうと、Nd<sup>3+</sup> イオンの 4f 電子は軌道磁気モーメントの方向に押しつぶれた扁平な分布をもつ。したがって、Nd-4f 電子が  $ab$  方向に広がることは、軌道磁気モーメントが  $c$  方向を向くことを意味する。すると、強いスピン軌道相互作用により、Nd-4f のスピンの向きも  $c$  軸方向を向く。これが Nd-5d 電子を媒介して Fe-3d 電子に伝わり、結晶全体の磁化が  $c$  軸方向にそろう。

窒素がない NdFe<sub>11</sub>Ti や NdFe<sub>12</sub> では、結晶場係数の絶対値が小さく、格子歪みや安定化元素の存在によるわずかな影響で、符号が変わりうる。これらの物質では、磁化容易軸は局所的な環境に依存すると考えられる。実際、NdFe<sub>11</sub>Ti の実験では、低温で複雑な磁性が報告されている<sup>(45)(46)</sup>。

窒素は磁化も変化させる。NdFe<sub>11</sub>Ti に比べて NdFe<sub>11</sub>TiN では 2.7  $\mu_B$ /f.u. の増大がみられる。典型元素が磁化に与える影響を「鉄のコバルト化」<sup>(47)</sup> との関連から少し詳しく議論する。まず Nd<sub>2</sub>Fe<sub>14</sub>B を念頭にコバルト化の考え方を整理する。B-2p 軌道は Fe-3d との軌道エネルギーより高い。両者

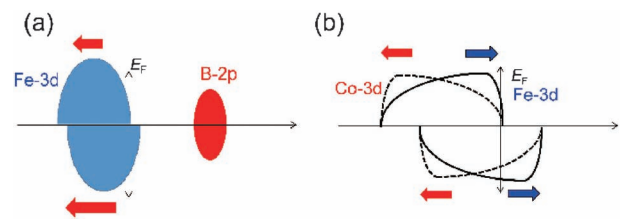


図5 Fe-B系における鉄のコバルト化の概念図。

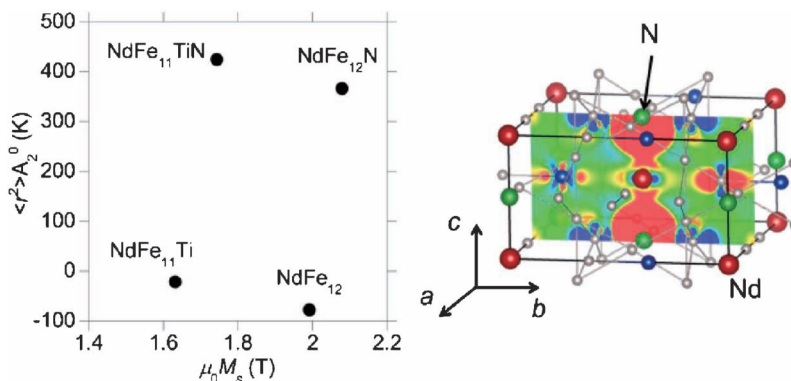


図4 (左)第一原理計算による Nd(FeM)<sub>12</sub>N の磁化と結晶場係数の結果、(右)窒素による電子密度の変化。赤い領域の電子密度が増加する (文献(8)より転載)。



の軌道混成の結果、Fe-3d バンドに B-2p の成分が少し混じり、軌道反発のためにエネルギー準位が下がる(図 5 (a)). ここで、Fe-3d と B-2p の軌道エネルギー差と波動関数の重なり大きさを考えると、多数スピンバンドよりも少数スピンバンドの方がエネルギーシフトが大きい. その結果、B 近傍の Fe サイトでは、電子数が増加、交換分裂が減少し、磁気モーメントが減少する. これを鉄のコバルト化と呼ぶ. 一方、Co (Co 化した Fe) 周辺の Fe では逆の効果があらわれる. 図 5 (b) に前者(後者)の部分状態密度を赤(青)で示す. 軌道混成(合金化)の効果を考慮すると、前者は低エネルギー側に、後者は高エネルギー側に重みがシフトする. その結果、後者の少数スピンバンドの電子数が減少し、スピンモーメントが増加する. より正確には、電子間相互作用まで考慮すると、この電子数の変化のためにクーロン反発が減少する. その結果、Fe-3d の多数スピンバンドが低エネルギー側にシフトし、Co-3d バンドと一体化する. 以上の議論をまとめると、B 近傍の Fe の磁気モーメントは減少し、その周囲の Fe の磁気モーメントは増大する. NdFe<sub>11</sub>TiN の第一原理計算の結果<sup>(48)</sup>では、N の最近接の Fe(8j) サイトで磁気モーメントが減少する一方で、その周囲の Fe(8f) サイトでは増加し、全体として正味の磁気モーメントは増加する. この結果は、金森の提唱した Fe の Co 化を支持する. ただし、磁化の増大の原因としては、軌道混成の効果(化学効果)よりも N による構造変化に起因した効果(磁気体積効果)の方が定量的には大きい. また、N-2p の軌道エネルギーは Fe-3d の軌道エネルギーと同程度で、図 5(a) で説明したような 2p バンドが Fe-3d バンドを押し下げる描像は当てはまらない. このように詳細に見れば、NdFe<sub>11</sub>TiN での N の役割は、金森の Fe の Co 化の説明と異なるが、いずれにせよ磁化の定量的理解において電子論的な考え方が重要であることに変わりはない. Nd<sub>2</sub>Fe<sub>14</sub>B や NdFe<sub>12</sub>N を超える新磁石化合物の設計において、鉄リッチ化合物の構造と相安定性に加えて、元素置換や添加による磁性の電子論的な制御が今後の重要な課題である.

## 5. 実験による NdFe<sub>12</sub>N<sub>x</sub> の作製<sup>(10)</sup>

基板に MgO(100)単結晶を選び、その上に下地層である W(100)をエピタキシャル成長させ、基板温度を650°Cの条件下、Fe と Nd を同時スパッタし、所定組成となるように堆積した. その後、500°Cの窒素雰囲気下で熱処理することで NdFe<sub>12</sub>N<sub>x</sub> 膜の作製を行った. 本実験で下地層として W を選択した理由は NdFe<sub>12</sub> との格子ミスフィットが小さく(4.2%)、NdFe<sub>12</sub> に拡散、反応しない材料であるからである. XRD 測定より、ThMn<sub>12</sub> 構造の(002)、(004)面からの回折ピークが得られ、c 軸が面直方向であるエピタキシャル NdFe<sub>12</sub>、NdFe<sub>12</sub>N<sub>x</sub> 膜の合成に成功した. 図 6 に W と NdFe<sub>12</sub> の界面の HADDF 像を示す<sup>(49)</sup>. W と得られた NdFe<sub>12</sub> の格子定数のミスフィットは約4.2%であり、白線で囲まれた部分にミスフィット転位が見られるが、W 結晶の上に NdFe<sub>12</sub> 結晶がヘテロエピタキシャル成長していることがわかる.

磁化測定結果を図 7 に示す<sup>(10)(50)</sup>. 図 7(a)より、室温での  $\alpha$ -Fe を含んだ  $\mu_0 M_S$  は  $1.78 \pm 0.02$  T、 $\mu_0 H_A$  は 8 T であることがわかる. ここで、 $\alpha$ -Fe の磁化を差し引くために、 $\alpha$ -Fe の体積比率を算出する必要がある. 今回は 2 つの方法で  $\alpha$ -Fe の体積比率を算出した. 1 つ目は TEM の断面観察から、面積比を算出し、Fe が12%含まれていることが分かった. 2 つ目は、困難方向の磁化曲線より、ゼロ磁場付近の立

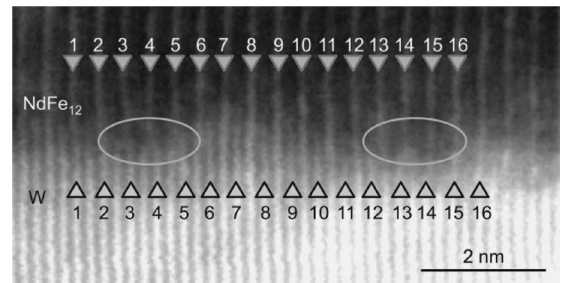


図 6 W と NdFe<sub>12</sub> の界面の高分解能 STEM 像.

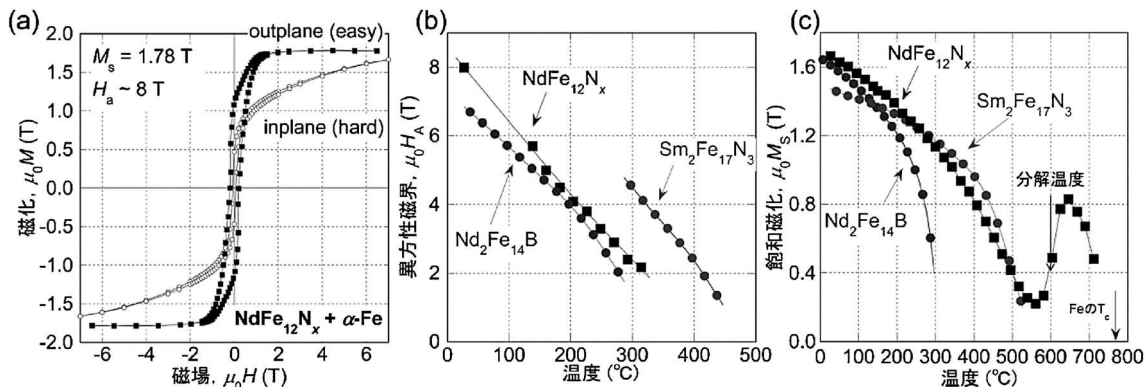


図 7 NdFe<sub>12</sub>N<sub>x</sub> 膜の (a) ヒステリシス曲線, (b)  $\mu_0 H_A$  の温度依存性, (c)  $\mu_0 M_S$  の温度依存性. (b), (c) については比較の為 Nd<sub>2</sub>Fe<sub>14</sub>B と Sm<sub>2</sub>Fe<sub>17</sub>N<sub>3</sub> のデータも載せた.

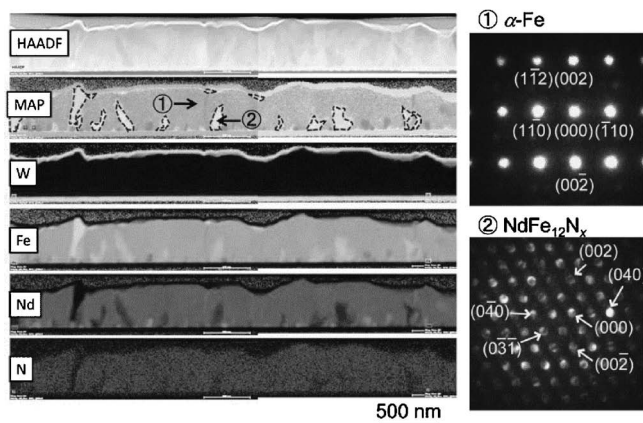


図8 NdFe<sub>12</sub>N<sub>x</sub>膜の断面のSTEM/HAADF像，EDXマッピング像とナノビーム回折像。

ち上がりが見えてFeからの寄与であると仮定すると30%のFeが含まれていることがわかり，これら二つの違いを誤差として扱えば，NdFe<sub>12</sub>N<sub>x</sub>の $\mu_0M_S$ は $1.66 \pm 0.08$  Tと見積もることが出来る．図7にNdFe<sub>12</sub>N<sub>x</sub>の(b) $\mu_0H_A$ と(c) $\mu_0M_S$ の温度特性を示した．比較として，Sm<sub>2</sub>Fe<sub>17</sub>N<sub>3</sub>とNd<sub>2</sub>Fe<sub>14</sub>Bも載せている．室温以上では $\mu_0H_A$ ， $\mu_0M_S$ いずれもNd<sub>2</sub>Fe<sub>14</sub>Bと比べ高い．また，(c)よりNdFe<sub>12</sub>N<sub>x</sub>の $T_C$ は約550°Cであり，Nd<sub>2</sub>Fe<sub>14</sub>Bよりも200°C以上高い．よって，この化合物で磁石を作ることができれば，現行のネオジウム磁石で耐熱性改善のために加えられている希少で高価なDyの使用が抑えられる可能性がある．

図8に，膜厚約360 nmのNdFe<sub>12</sub>N<sub>x</sub>のSTEM/HADDF，EDX像を示す<sup>(50)</sup>．また，ナノビームを用いた電子線回折像も示した．多少の $\alpha$ -Feは存在するものの，膜の上部でもNdFe<sub>12</sub>N<sub>x</sub>からの回折が確認できるため，一旦ThMn<sub>12</sub>構造ができ始めると，360 nmまではその構造を保つことができる．この結果はある適切な条件を選ぶことにより，第三元素なしでもThMn<sub>12</sub>構造を有するRFe<sub>12</sub>N<sub>x</sub>化合物が合成できることを示唆している．このように永久磁石として高い磁気特性を有するNdFe<sub>12</sub>N<sub>x</sub>であるが，磁石材料に発展させるためには解決すべき課題も多い．まず，今回の実験ではWの(100)面の上に成長させることで，NdFe<sub>12</sub>N<sub>x</sub>薄膜を合成できたが，バルク化するために同様のプロセスを経ることは難しい．さらに，580 °C付近に分解温度が存在することより(図7(c))，Nd<sub>2</sub>Fe<sub>14</sub>Bのように高温で焼結させ，稠密な成型物を得ることは難しい．よって，NdFe<sub>12</sub>N<sub>x</sub>粉を作製する方法，さらには，低温での高圧焼結<sup>(51)</sup>などを用いることで，稠密化する方法を開発することが必要である．

## 6. まとめと今後の展望

本稿では，新規磁石材料であるNdFe<sub>12</sub>N化合物について，第一原理計算，実験の両方の側面から述べた．NdFe<sub>12</sub>Nの可能性について第一原理計算を用いて計算することで，Nd<sub>2</sub>Fe<sub>14</sub>Bに比べ $\mu_0M_S$ は高く， $\mu_0H_A$ は同等であることが示

唆された．この計算結果を実証するために，W(001)上にNdFe<sub>12</sub>N<sub>x</sub>を作製することに成功し，その $\mu_0M_S$ は $1.66 \pm 0.08$  T， $\mu_0H_A$ は8 T， $T_C$ は550°Cであった．これらの値はNd<sub>2</sub>Fe<sub>14</sub>Bに同等，もしくは高い．本実験では薄膜により第三元素を減らすことが可能になり，高 $\mu_0M_S$ が得られることを証明できた．しかしながら，実用的な永久磁石材料を開発するには，バルクで作製する必要があり，やはり第三元素の添加によるThMn<sub>12</sub>構造の安定化は必須である．よって，高磁化を保ちつつ， $\alpha$ -Feを析出させずにThMn<sub>12</sub>構造を如何に安定させるか，という課題に尽きる．今後は，適切な第三元素の選定とその組成最適化について系統的に調べる必要があり，理論計算による予測がこれらの実験を加速させ得る．

本研究は文部科学省，元素戦略磁性材料研究拠点(ESICMM)および，科学技術振興機構(JST)，戦略的創造研究推進事業(CREST)の支援によって行われた．

## 文 献

- (1) M. Sagawa *et al.*: J. Appl. Phys., **55**(1984), 2083–2087.
- (2) M. Sagawa, S. Fujimura, H. Yamamoto, Y. Matsuura and S. Hirosawa: J. Appl. Phys., **57**(1985), 4094–4096.
- (3) M. Sagawa, S. Hirosawa, H. Yamamoto, S. Fujimura and Y. Matsuura: Jpn. J. Appl. Phys., **26**(1987), 785–800.
- (4) M. H. Ghandehari: Appl. Phys. Lett., **48**(1986), 548–550.
- (5) C. H. de Groot, K. H. J. Buschow, F. R. de Boer and Kees de Kort: J. Appl. Phys., **83**(1998), 388–393.
- (6) T. Akiya, J. Liu, H. Sepehri-Amin, T. Ohkubo, K. Hioki, A. Hattori and K. Hono: J. Appl. Phys., **115**(2014), 17A766.
- (7) H. Sepehri-Amin, Lihua Liu, T. Ohkubo, M. Yano, T. Shoji, A. Kato, T. Schrefl, K. Hono: Acta Mater., **99**(2015), 297–306.
- (8) T. Miyake, K. Terakura, Y. Harashima, H. Kino and S. Ishibashi: J. Phys. Soc. Jpn., **83**(2014), 043702.
- (9) Y. Harashima, K. Terakura, H. Kino, S. Ishibashi and T. Miyake: JPS Conf. Proc., **5**(2015), 011021/1–8.
- (10) Y. Hirayama, Y. K. Takahashi, S. Hirosawa and K. Hono: Scr. Mater., **95**(2015), 70–72.
- (11) K. H. J. Buschow and A. S. Van Der Goot: Acta Cryst., **B27**(1971), 1085–1088.
- (12) D. Givord, F. Givord, R. Lemaire, W. J. James and J. S. Shah: J. Less-Common Metals, **29**(1972), 389–396.
- (13) S. Sakurada, A. Tsutai, T. Hirai, Y. Yanagida, M. Sahashi, S. Abe and T. Kaneko: J. Appl. Phys., **79**(1996), 4611–4613.
- (14) Hong-Shuo Li, J. M. Cadogan, R. L. Davis, A. Margarian and J. B. Dunlop: Sol. Sta. Comm., **90**(1994), 487–492.
- (15) J. V. Florio, R. E. Rundle and A. I. Snow: Acta Cryst., **5**(1952), 449–457.
- (16) S. Suzuki, N. Inoue and T. Miura: IEEE Trans. Mag., **28**(1992), 2005–2009.
- (17) T. Iriyama, K. Kobayashi, N. Imaoka and T. Fukuda: IEEE Trans. Mag., **28**(1992), 2326–2331.
- (18) K. Ohashi, Y. Tawara and R. Osugi: J. Less-Common Met., **139**(1988), L1–L5.
- (19) I. Felner *et al.*: J. Magn. Magn. Mater., **38**(1983), 172–182.
- (20) D. B. De Mooij and K. H. J. Buschow: J. Less-Common Met., **136**(1988), 207–215.
- (21) K. Ohashi, T. Yokoyama, R. Osugi and Y. Tawara: IEEE Trans. Mag., **23**(1987), 3101–3103.
- (22) B. Fuquan, J. L. Wang, O. Tegus, W. Dagula, N. Tang, F. M. Yang, G. H. Wu, E. Brück, F. R. de Boer and K. H. J. Buschow: J. Magn. Magn. Mater., **290–291**(2005), 1192.



# 中性子を利用した結晶方位の 先端的評価技術の開発と今後の展望

小貫 祐介\*

## 1. 緒 言

量子線を用いた材料中の結晶方位並びにその分布(集合組織)の測定, およびこれらが材料の性質に与える影響は, 古くから評価がなされてきた. また, 結晶方位の測定は, 各種のプロセッシング中に生じる現象を理解する手掛かりとしても重要な役割を持つ. 1920年に Nishikawa らは白色 X 線を用いて, 圧延した金属を焼鈍したときの透過回折図形の変化を報告している<sup>(1)</sup>. これは焼鈍による結晶粒径, 転位密度および結晶方位分布の変化を定性的に反映したものと見ることが出来る. このようにすでに約100年前から, 結晶方位分布は金属組織の様相を表すパラメーターの一つとして扱われていたことが分かる.

結晶方位分布は, 結晶粒径や相分率と同様に, なるべく材料中の広範囲からの情報に基づき決定されるべきものである. 近年普及した EBSD (electron backscatter diffraction) は極めて優れた測定手法ではあるが, 統計的な確からしさを担保するためには, 長時間の測定が必要になる. 電子顕微鏡内で変形や加熱ができる装置もあるが, 微小な観察領域, それも表面で見られる状態, 現象が材料全体を代表し得るのか常に注意する必要がある.

X 線, 電子線と並び材料研究に用いられる量子線として, 中性子線が挙げられる. ほとんどの金属に対し高い透過能を示す中性子線を用いた回折・散乱実験では, 透過した体積全体からの情報が得られるため, 極めて高い統計精度を担保できる. 著者と前任研究者らはこの点に注目し, TOF (Time-of-Flight) 型中性子回折による集合組織測定手法の開発に取り組んできた<sup>(2)</sup>. その中で, J-PARC/MLF に設置さ

れている中性子回折装置の一つである茨城県材料構造解析装置, iMATERIA<sup>(3)</sup>では, わずか数分で完全な結晶方位分布を得ることが可能であることが分かってきた<sup>(4)</sup>.

本稿では, まず TOF 型中性子回折による集合組織測定の原理を紹介し, なぜ短時間測定が可能であるかをご説明したい. その上で, 本測定手法を活用した例と今後の展望について述べる.

## 2. 測定原理

今日最も一般的な集合組織測定法は, 管球 X 線による Schulz の反射法によって得た複数枚の部分正極点図を統合し, 結晶方位分布関数 (ODF: Orientation Distribution Function, 結晶方位分布関数) を求める手法である<sup>(5)</sup>. ODF は, 3 つの Euler 角で定義される結晶方位の存在密度を表したものである. 集合組織を測定するといった場合, ODF を求めることがゴールであるといってよい. 単波長 X 線の反射法測定では正極点図の一部分しか測定できないが, ODF が求めれば, 任意の回折面の完全正極点図や, 任意の試料方向の逆極点図を求めることが出来る.

一方で筆者らが開発中の TOF 型中性子回折による測定では, 正極点図を経由せずに ODF を求める. この方法は米国, LANCE に設置されている TOF 中性子回折装置, HIPPO の装置関係者が考案したものである<sup>(6)</sup>.

本手法では, 多数の検出器で回折ヒストグラムを測定し, これを入力として計算を行う. 中性子線は, 波長が速度に反比例するため, 発生してから試料で散乱され, 検出器に届くまでの時間 (Time of flight) を計測することで分光が可能である. このため検出器や試料を回転させなくとも, 回折ヒス

\* 茨城大学フロンティア応用原子科学研究センター・産学官連携; 助教(〒319-1106 茨城県那珂郡東海村白方162-1 いばらき量子ビーム研究センター内)

Development of Advanced Techniques for Crystal Orientation Analysis Using Neutron Diffraction; Yusuke Onuki (Frontier Research Center for Advanced Atomic Sciences, Ibaraki University, Tokai, Ibaraki)

Keywords: *neutron diffraction, crystallographic texture, crystal orientation analysis, microstructure*

2015年11月10日受理[doi:10.2320/materia.55.104]

トグラムを測定することができる。

図1に iMATERIA で得られる回折ヒストグラムの例を示す。これらは AZ31マグネシウム合金 (Mg-3 mass% Al-1 mass% Zn) 押出材を試料とし、それぞれ異なる位置にある検出器上の観測点で測定されたものである。002回折に注目すると、いくつかのヒストグラムでは明瞭にピークが認められるのに対し、他ではほとんどピークが見られない。これは材料が集合組織を持つことに起因するものである。異なる位置にある検出器は、異なる向き(試料座標)へ配向した結晶面からの回折線を受け取るため、材料の持つ集合組織によって回折強度の強弱が見られるのである。

粉末構造解析に用いられる Rietveld 解析では、通常は結晶方位の分布に偏りが無いことを前提として計算を行う。一方で、結晶方位分布がランダムな状態のヒストグラムが Rietveld 解析によって計算できるならば、実測の回折強度と計算された強度を比較し、回折強度の大小を評価することで、各検出器の対応する試料座標へ配向した結晶軸の軸密度が求められる。本手法ではこれを入力として ODF 計算を行う。求められた ODF から、各検出器における回折強度比を Rietveld 解析によるプロファイルフィッティングにフィードバックしてやれば、計算されたヒストグラムと実測ヒストグラムの差は小さくなる。この状態でもう一度格子定数やピークの広がりに関するパラメーターの見直し (Rietveld 解析) が行われ、更新された軸密度から再度 ODF 計算が行われる。このように ODF 計算と Rietveld 解析を相互に関係させながら繰り返し行うことで、もっとも確からしい ODF と Rietveld 解析の安定解を求める<sup>(7)</sup>。

以上の計算を行えるソフトウェアとして、GSAS<sup>(8)</sup>および MAUD<sup>(9)</sup>と呼ばれるものがフリーウェアとして公開されている。特に MAUD はあらかじめ集合組織などの計算を主眼としたソフトウェアであるため、比較的簡単な操作で上記の集合組織計算が可能である。本稿では、MAUD を使って得た結果を示す。

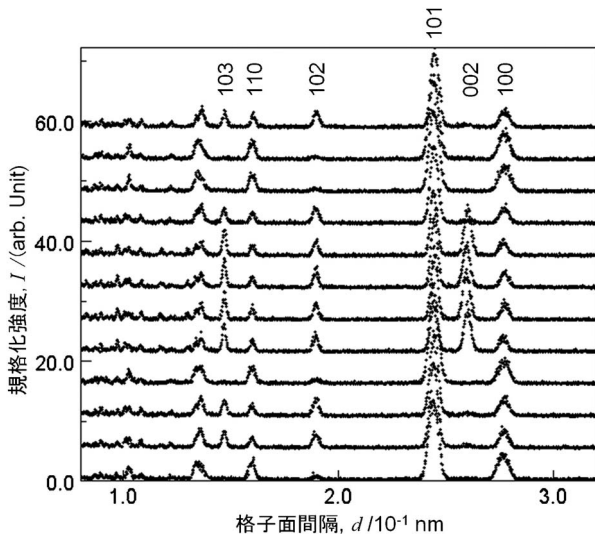


図1 iMATERIA の低角バンクに属する12の異なる位置にある観測点で測定された AZ31マグネシウム合金押出棒材の回折ヒストグラム。

### 3. 測定・解析条件の設定

ODF 計算の入力となる回折ヒストグラム中にピークがみられる回折面をステレオ投影図にプロットし、その回折強度を集合組織がない状態の回折強度の倍数として表すと、これはその観測点に対応する、ある試料方位への結晶軸配向を表す逆極点図(図2)となる。すなわち、TOF 中性子回折による集合組織測定とは、複数の逆極点図測定、およびこれらを入力とした ODF 計算であると言い換えることもできる。この点が単波長の量子線で行う正極点図に基づく ODF 計算と大きく異なる点である。

十分な精度と分解能を持った ODF の計算に、いくつの回折ヒストグラムが必要であるかは、実験的に検討する必要がある<sup>(4)</sup>。本手法を開発したグループの回折装置 HIPPO では、90~120個の回折ヒストグラムから、分解能(Euler 角の刻み幅)が15°の ODF が求められるとしている<sup>(9)</sup>。しかし金属材料の研究では、従来の X 線法により分解能 5°の ODF を求めることが普通である。このため HIPPO 並みの分解能では、中性子線の持つ様々なメリットを鑑みても満足のいく定量解析ができるとは言い難い。一方で iMATERIA は HIPPO に比べて大型で結晶面間隔  $d$  の分解能が高い。よって iMATERIA ではより広い  $d$  の範囲を入力に用いることができる。これはそれぞれの入力逆極点図の持つ情報量が大きいことを意味する。このことから、iMATERIA では HIPPO よりも少ない回折ヒストグラムの数で ODF 計算が可能であり、十分なヒストグラムの数を与えられれば ODF 分解能も 5°まで小さくすることができると思われた。

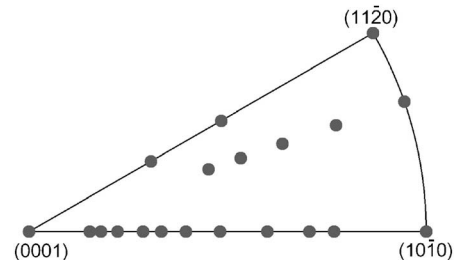


図2 (0001)ステレオ投影図上に示した、図1中に見られる回折面のプロット。

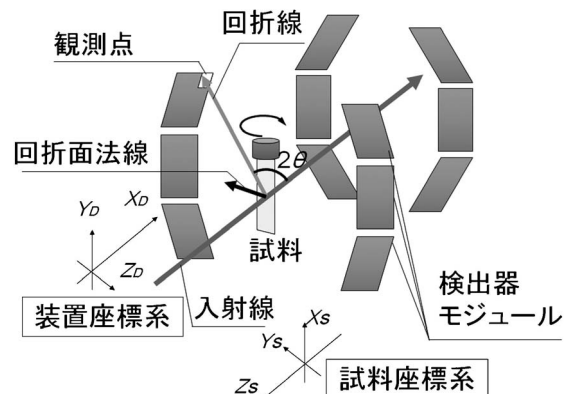


図3 iMATERIA における測定ジオメトリの模式図。

図3は、iMATERIAにおける集合組織測定の様式図である。入射中性子線を取り囲むように設置された検出器モジュールを、約100 mm×100 mmの観測点に細分化した。すべての観測点に対応する回折面法線方向を、装置座標系の $-X_D$ を投影面法線としてステレオ投影したものが図4(a)である。全部で888点あるが、実際には図4(b)のように間引きをして計算を行った。まずは検討の第一段階として、思い切って28点まで絞り込んだ。

iMATERIAの試料ホルダーは、 $Y_D$ まわりに試料の角度を変えることができる。このため、例えば試料の設置角度を $0^\circ$ と $50^\circ$ として測定を行うと、図4(c)のように56の異なる試料方位に対応する回折ヒストグラムを得ることができる。このようにして回折ヒストグラムを28の倍数で増やして解析を行うことで、最小限必要なヒストグラムの数を検討した。一つの角度に固定して中性子線を照射する時間は、鉄鋼材料の場合はおおよそ1分~数分程度で十分である。

#### 4. 解析に要する回折ヒストグラム数の検討

図5は、BCC相(フェライトまたはマルテンサイト)とFCC相(オーステナイト)の二相を含む鋼板(梯新日鉄住金提

供)の集合組織をiMATERIAで測定し、使用するヒストグラムの数( $N$ )を変えて解析して得た二相の $\{110\}$ 正極点図である。試料は圧延のTD方向を回転軸 $X_S$ として取り付けた。ODFの分解能は $10^\circ$ として計算した。 $N$ が大きい、すなわちより多くの回折情報を用いた場合の方がより確からしい結果が得られていると考えられるが、 $N \geq 56$ では極点図上の見かけの変化は非常に小さい。すなわち $N=56$ 、わずか3分程度の測定で極点図の解析が可能であると言える。集合組織の経時変化を追うその場測定では、測定時間が最小の時間分解能となるが、分単位の時間分解能と統計精度を併せ持った方法は他には存在しない。

一方で、精密な議論を行う場合や、X線測定の結果と比較したい場合はODF分解能を $5^\circ$ とすべき状況もある。図6に分解能 $5^\circ$ で解析し、再構築した $\phi_2=45^\circ$ 断面図を示す。ここでも各集合組織成分の方位密度はあるヒストグラム数以上で一定値に収束する傾向が見られる。 $N=56$ では $\gamma$ ファイバー( $\Phi=55^\circ$ )付近の主成分位置が不明瞭であるが、 $N=140$ またはそれ以上の場合は、 $(\phi_1, \Phi, \phi_2) = (0^\circ \text{ or } 60^\circ, 55^\circ, 45^\circ)$ 、すなわち $\{111\}\langle 1\bar{1}0 \rangle$ に方位の集積があることが確認できる。これよりODF分解能を $5^\circ$ とし、Euler空間を用いた議論をするためには $N=140$ 以上が望ましいことがわかる。140点

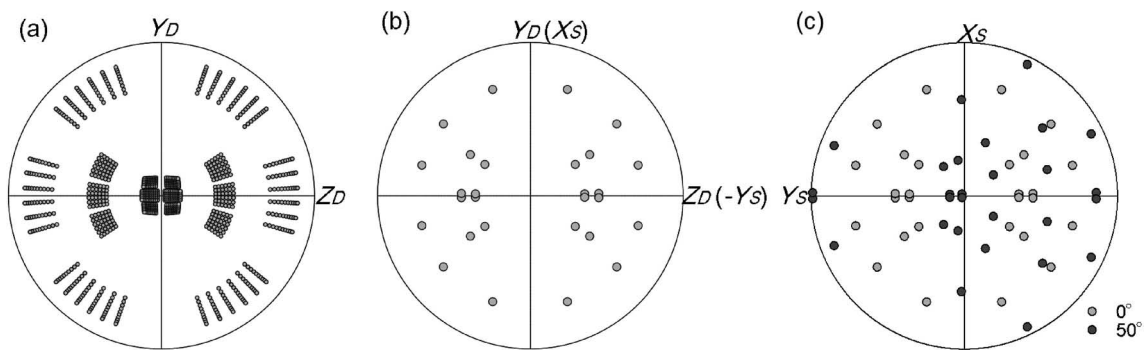


図4 (a)全観測点に対応する回折面のプロット、(b)使用した28の回折面のプロット、(c)試料角度 $0^\circ$ と $50^\circ$ の時の回折面プロットを合わせたもの。

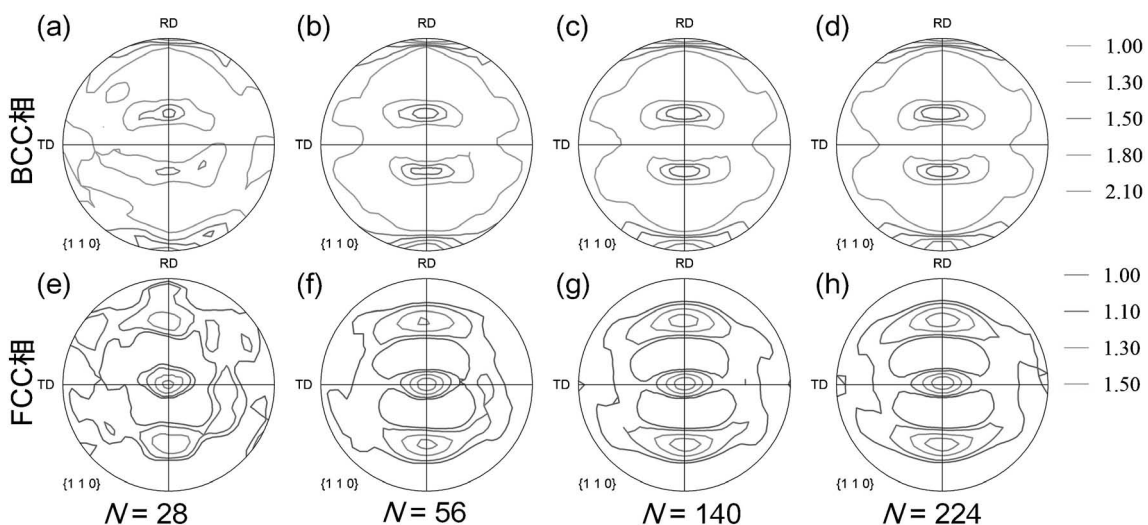


図5 iMATERIAで測定し、MAUDで解析(ODF分解能 $10^\circ$ )して得た二相鋼板の $\{110\}$ 正極点図。(a)~(d)BCC相、(e)~(h)FCC相。 $N$ は計算に使用したヒストグラム数を示す。

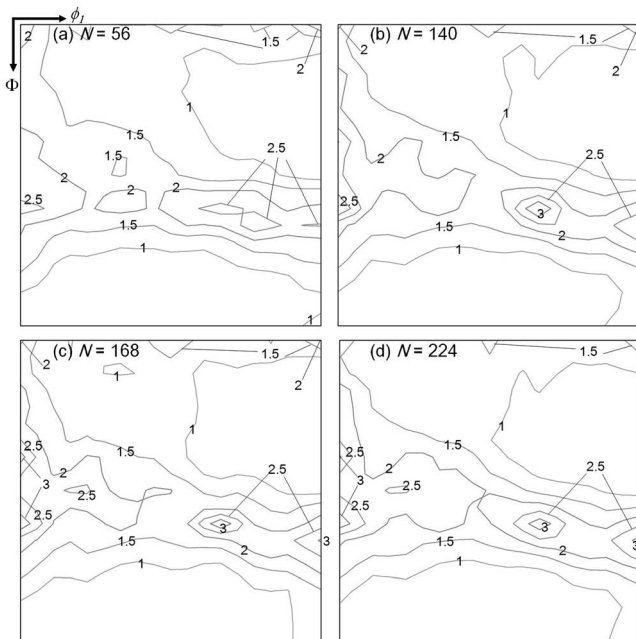


図6 二相鋼板のBCC相の $\phi_2=45^\circ$ 断面図。(a)ヒストグラム数(N)56個,(b)140個,(c)168個,(d)224個.

の測定は、現状では約7分で完了する。

## 5. 今後の展望

上述のように、測定手法の技術開発はおおよそ完成しつつある。今後は本手法の特性を活用した実験成果を挙げていきたいと考えているが、筆者自身のみでなく、企業、大学の研究者の皆様にも利用していただき、その有用性を広く認知、活用していただくことが真の測定手法の完成であると考えている。以下に本測定の特徴と想定される活用例をいくつかまとめておく。

### (1) 高時間分解能のその場集合組織測定

金属材料の変形中や加熱、冷却中に生じる集合組織変化を観察可能と期待される。特に再結晶や加工誘起変態、双晶など、瞬間的に結晶方位分布に影響を及ぼす現象について、そのメカニズム解明に有用な知見が得られると期待される。

### (2) Rietveld 解析を活用した測定

本手法ではモデルに基づくピークフィッティングによる回折強度評価を行う。そのため、ピーク重複が原因でX線による集合組織測定が難しい、複雑な結晶構造をとる材料、複数の相からなる材料においても適用可能である。

### (3) 相分率測定

集合組織そのものが興味の対象でない場合においても、量子線の回折強度に基づく相分率測定では、集合組織の影響で測定値にばらつきが見られることがある。集合組織の影響を最小限にするための方法も提案されているが、わずか数分で集合組織が測定できてしまうのならば、これを相分率解析に

用いてやるのが結果的に最も簡便で迅速、かつ確実な方法と言える。集合組織を解析する際のRietveld解析により、集合組織を考慮した相分率の決定は半ば自動的に行われるので、追加的に解析、計算を行う必要もない。

筆者自身、中性子回折に携わるようになって気づいたことだが、微細組織や集合組織の制御、すなわち材料自体の作り込みに関する知見の獲得を目的とした中性子回折の応用例は意外に少ない。この観点から「中性子で何ができるのか」を考えていくと、これまで見えていなかったことが明らかにできるのではないだろうか。

## 6. まとめ

J-PARC/MLFに設置されている中性子ビームライン、iMATERIAにおいて、数分でODFを求めることができる集合組織測定手法を提案した。TOF中性子回折と大型装置の特長を活用することで、短時間での高精度測定が可能になった。今後は応用研究を通じて、更に手法を洗練させたい。iMATERIAでの集合組織測定について、ご興味を持たれた方は是非筆者へご連絡を頂きたい。

本研究に携わる機会を与えて下さった茨城県、林真琴様、峯村哲郎様、並びに茨城大学、佐藤成男教授にこの場をお借りして心より感謝申し上げます。ODFの解析理論について貴重なアドバイスを頂いた大阪府大、井上博史教授、本稿の執筆を推薦して下さいた東北大学、藤枝俊助教にも厚く御礼申し上げます。

## 文献

- (1) S. Nishikawa and G. Asahara: Phys. Rev., **15**(1920), 38–45.
- (2) 鈴木徹也, 徐平光: 塑性と加工, **54**(2013), 106–110.
- (3) T. Ishigaki *et al.*: Nucl. Instrum. Meth. A, **600**(2009), 189–191.
- (4) 小貫祐介, 星川晃範, 佐藤成男, 石垣 徹, 徐平光: 材料とプロセス, **28**(2015), 942.
- (5) U. F. Cocks, C. N. Tomé and H.-R. Wenk: Texture and Anisotropy, Cambridge University Press, U. K., (1998), 127–178.
- (6) H.-R. Wenk, L. Lutterotti and S. Vogel: Nucl. Instrum. Meth. A, **515**(2003), 575–588.
- (7) S. Matthies, L. Lutterotti and H.-R. Wenk: J. Appl. Cryst., **30**(1997), 31–42.
- (8) R. B. Von Dreele: J. Appl. Cryst., **30**(1997), 517–525.
- (9) H.-R. Wenk, L. Lutterotti and S. C. Vogel: Powder Diffr., **25**(2010), 283–296.



小貫祐介

★★  
2013年 横浜国立大学大学院工学府博士課程後期修了  
2013年 University of Saskatchewan, Canada ポスドク研究員  
2014年 東北大学 多元物質科学研究所 教育研究支援者  
2015年1月– 現職  
専門分野: 集合組織測定に基づく金属材料の変形機構解析  
◎TOF型中性子回折装置, iMATERIAの機能開拓, 維持管理に従事。  
各種量子ビームを併用して, 鉄鋼・非鉄材料の微細組織の形成機構や微細組織と機能の関係を見出すことを目標に, 日々研究しています。  
★★

# 耐応力緩和特性に優れる車載コネクタ用 70Cu/30Zn ベース合金「C44710」の開発

大石恵一郎<sup>\*1)</sup> 外 蘭 孝<sup>\*2)</sup>  
積川靖弘<sup>\*3)</sup> 須崎孝一<sup>\*3)</sup>

## 1. 開発の背景

近年、自動車に対する安全性能、環境性能、快適性向上の強い要望から、自動車に搭載される電子・電気機器の多機能化、高性能化が進み、それに伴い端子・コネクタについても小型化、高性能化の要請が高まっている。車載用コネクタには、民生家電や情報機器などに用いられるコネクタと異なり、過酷な高温環境下でも確実に電気信号を送るために、端子間の接圧を長期間に渡って維持する高い信頼性が必要であり、耐応力緩和特性に優れた銅合金が求められている。

また、RoHS 指令<sup>(1)</sup>、ELV 指令<sup>(2)</sup>に代表される鉛規制により、はんだの鉛フリー化が進む一方で、“プレスフィット接続”と呼ばれる無はんだ接続技術が注目されており<sup>(3)</sup>、プレスフィット接続においても応力緩和特性は重要である。

一方、リーマンショックを挟み2006年から2012年にかけて金属価格が急騰し、今後も金属材料の高騰リスクがあり、コストパフォーマンスの高い銅合金が望まれている。

## 2. 開発の概念

車載用コネクタには、例えば純銅をベースとし、特別な熱処理を必要とするコルソン合金(Cu-Ni-Si系合金)を始め様々な銅合金が使用され、欧州ではりん青銅(JIS H3110 C5191 94Cu-6Sn-P)が主に使用されている。日本で最も使用されているのが黄銅(JIS H3100 C2600 70Cu-30Zn)である。黄銅は、市販の銅合金の中で金属材料コストが最も低い銅合金のひとつで、固溶型銅合金でシンプルなプロセスで製造され、純銅に比べ密度が約5%低く、適度な強度と曲げ加工

性、導電性を備えている。ところが黄銅は耐応力緩和特性に乏しいため、その使用は室内に限られ、エンジンルームを始めとする過酷な高温環境下では一般に使用されていない。

近年の金属材料価格の高騰リスクにより、高性能で価格面に優れた銅合金が強く求められ、我々はそのニーズに応えるために、70Cu/30Znをベースとして原料コストを低減させながらも、一般的な製造工程で製造でき、コネクタとして十分な強度、曲げ加工性、導電性と、耐応力緩和特性に極めて優れている合金を開発した。

開発合金の代表組成を表1に示す。開発合金は、CDAにC44710として登録され、「MNEX<sup>®</sup>28」の商品名で販売されている。金属材料価格について、2012年から2014年の3年間の国内建値<sup>(4)</sup>、および市中の平均価格から算出し、Cuの価格を100とすると、Znは32、Niは232、Snは303であった。この値を元に計算すると、Snを多量に含むりん青銅、純銅ベースでNiを含有するコルソン合金は100を超え、黄銅は80である。開発合金はNiとSnを含むものの、Znの影響で85であり、Cuとの比重差を加味すると81である。またSnやNiは、メッキとして使用されることから、スクラップの再利用が可能となり、環境負荷を低減させる。

応力緩和特性は一種のクリープ現象であり、再結晶温度の低い黄銅は、耐応力緩和特性に劣る。黄銅にNiを10 mass%以上添加した洋白は、再結晶温度が高く、耐応力緩和特性に優れることがよく知られているが、多量のNi添加により金属材料価格が上り、導電率が低くなる欠点があった。開発合金は、金属材料コストの上昇と導電率の低下を防ぐために、Ni量を低減させつつ、主としてNiとPの作用に着目し、組成の最適化を図り、70Cu/30Znがベースでありながら耐応力緩和特性を大きく向上させることに成功している。

\* 三菱伸銅株式会社

開発部：1)シニアフェロー・部長、2)副部長、3)副主任  
Development of High Stress Relaxation Resistance 70Cu/30Zn Based Alloy “C44710” for Automotive Connector; Keiichiro Oishi, Takashi Hokazon, Yasuhiro Tsugawa and Koichi Suzaki (Mitsubishi Shindoh Co., Ltd.)  
2015年10月30日受理[doi:10.2320/materia.55.108]

表1 化学成分(mass%)

	Cu	Zn	Ni	Sn	P
MNEX <sup>®</sup> 28	残	28	2.0	0.5	0.02



### 3. 開発合金の諸特性

#### (1) 耐応力緩和特性

図1に、Zn量を約28 mass%、Sn量を約0.5 mass%とし、P無添加と0.02 mass%P添加の場合の、Ni量と応力緩和率の関係を示す。ここで応力緩和率とは、0.2%耐力に対して80%の負荷をかけ、150°Cで1000時間保持した後にどれだけばね保持力が低下しているかを示す値であり<sup>5)</sup>、値が小さいほど耐応力緩和特性が良好である。過酷な環境で使用される車載コネクタ用銅合金では、150°C、1000時間保持後の値として20%以下を求められることが多い。図1より、Ni量が多くなるにしたがって応力緩和率が低下し、0.02 mass%Pの添加の効果により、さらに応力緩和率が低下する。2 mass%Niと0.02 mass%Pの共添加で、10 mass%Niを含有する洋白と同程度の耐応力緩和特性が得られている。

図2に28Zn, 0.5Sn一定でNiを変量したときの導電率を示す。Ni量が増すに従い導電率が低下し、Ni量が2 mass%で導電率が約20%IACSになる。導電率20%IACSは、黄銅に比べ8%IACS低いが、りん青銅より6%IACS高い。

図3に開発合金と黄銅、コルソン合金(Cu-2Ni-0.5Si)、りん青銅の応力緩和率を測定した結果を示す。150°C、1000時間保持後の応力緩和率を基準に取れば、開発合金の応力緩和率は約15%で、黄銅の1/5以下、りん青銅の1/3以下で

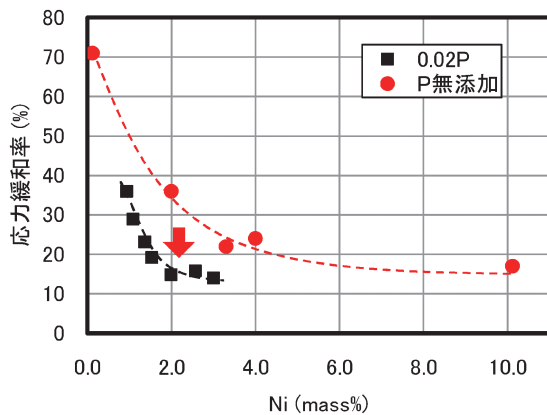


図1 Cu-28Zn-0.5Sn-Ni合金のNi量と応力緩和率の関係。

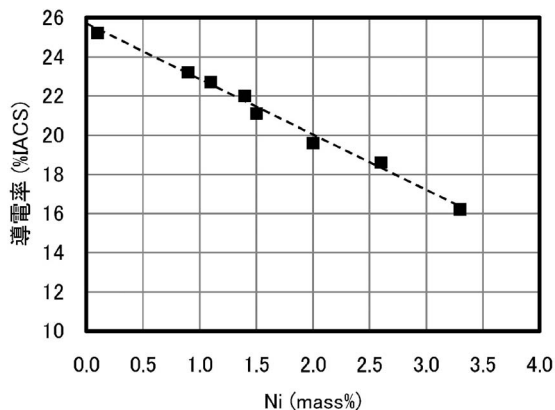


図2 Cu-28Zn-0.5Sn-Ni合金のNi量と導電率の関係。

あり、コルソン合金よりも低い値である。開発合金の180°Cでの応力緩和率は、黄銅の90°Cの値より小さいことから、黄銅に比べ、少なくとも90°C高い高温環境で使用できる。

#### (2) 金属組織

図4に開発合金「MNEX®28」のEBSDによるIPF mapを、図5に析出物のTEM像示す。一般的に耐応力緩和特性は結晶粒が大きいほどよく、曲げ特性、強度面からは、結晶

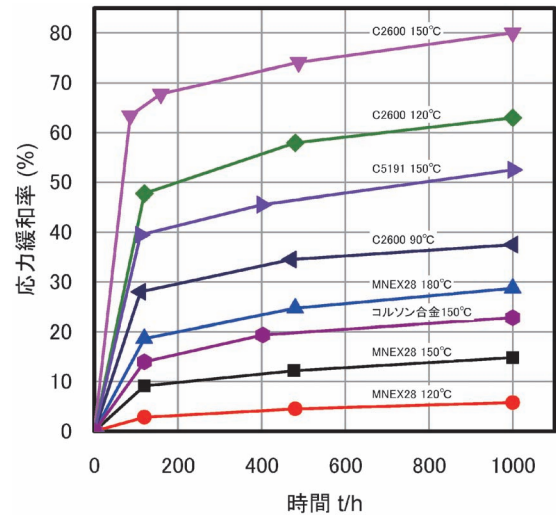


図3 開発合金と黄銅、りん青銅、コルソン合金の90°C、120°C、150°C、180°Cでの応力緩和率。

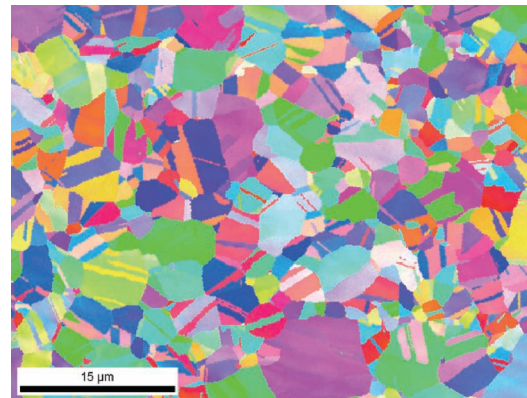


図4 MNEX28のIPF map。

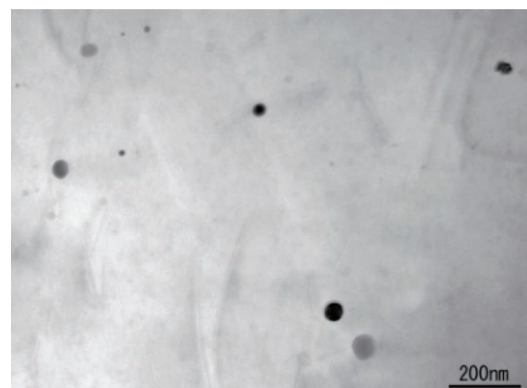


図5 MNEX28の析出物のTEM像。

表2 MNEX28の代表特性.

方向	EC %IACS	HV	TS MPa	PS MPa	EL %	応力緩和率 %
LD	20	190	585	535	19	16
TD			595	545	13	13

粒が細かいほうがよいが、MNEX28の平均結晶粒径は約5 $\mu\text{m}$ であり、適切な特性バランスを得ている。

図5から粒径が50nm以下の微細な析出物が析出していることが観察され、微細析出物は、NiとPからなる六方晶のNi<sub>2</sub>P粒子である。これらの微細析出物は、粒界に対するピン止めとして作用する効果があるため、マトリックスの結晶粒は、約5 $\mu\text{m}$ と微細かつ均一に、そして容易にコントロールされる。また、固溶するNi、Pの作用により、耐応力緩和特性が向上していると思われる。

### (3) 機械的性質

表2に、MNEX28の代表的な機械的特性、導電率および150 $^{\circ}\text{C}$ 、1000時間の応力緩和率を示す。LD、TDは、それぞれ試験片を圧延と平行方向、直角方向から取ったことを示す。MNEX28は、導電率が20%IACSであり、黄銅と比べてやや低いが、使用環境による温度上昇に加えて通電発熱によりコネクタの温度上昇があっても、耐応力緩和特性が良いので、コルソン合金等の車載端子用銅合金と比べて遜色ないばね性を保持する。

MNEX28の耐力はLD、TDでそれぞれ535MPa、545MPaで、コルソン合金を含め車載端子用銅合金と比較しても遜色のない数値である。また結晶粒の微細化は強度の向上のほかに、曲げ加工性も向上させる。図6のTD方向の180 $^{\circ}$ 密着曲げ試験結果が示しているように、MNEX28の曲げ加工性は良好である。

このようにMNEX28は、組成、析出物のサイズと分布、マトリックスの結晶粒径を制御することにより、優れた耐応力緩和特性と強度-曲げバランスを発現させている。

### (4) 耐応力腐食割れ性

図7にMNEX28とCu/15~30Zn合金の耐応力腐食割れ性試験結果を示す。応力緩和試験と同様に耐力の80%の応力を付加した状態で、特に厳しいとされるアンモニア雰囲気中に暴露し(“ASTMB858-01”, pH 10.1, 25 $^{\circ}\text{C}$ の雰囲気, 24h), 緩和率によって耐応力腐食割れ性を評価した。黄銅の問題点のひとつに耐応力腐食割れ性があり、一般的に耐応力腐食割れ性はZn量に依存するが、MNEX28はNi、Snの含有により耐応力腐食割れ性が向上し、28Znにもかかわらず、80Cu/20Znと同等の耐応力腐食割れ性を示す。

## 4. 開発の将来性、発展性

開発合金「MNEX<sup>®</sup>28」は、従来から多用されている黄銅をベースとした合金でありながら、コルソン合金と同等の応

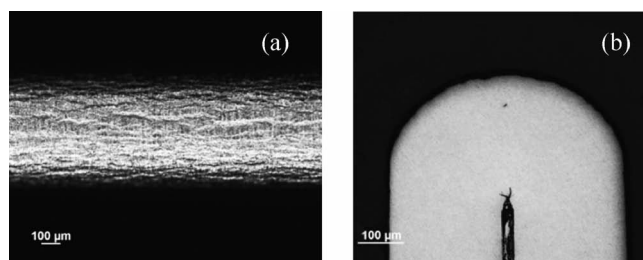


図6 MNEX28のTD方向180度密着曲げ試験結果。(a)表面 (b)断面

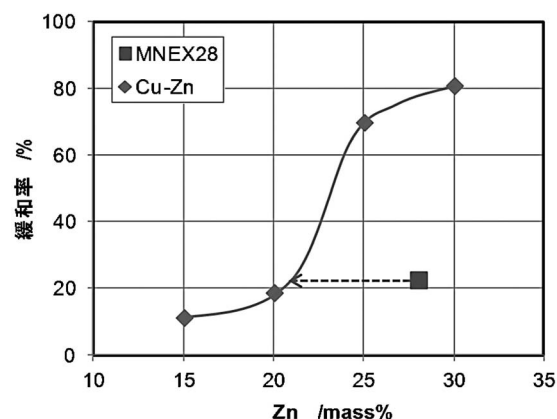


図7 MNEX28とCu/Zn合金の耐応力腐食割れ性試験結果。

力緩和特性、強度、加工性を有していることから、車載用端子・コネクタの小型化や、プレスフィット端子に対応できる。また、リサイクル性にも優れ、一般的なプロセスで製造できる上、Znを28%使用することで原料コストを低減しているため、メタル価格高騰リスクも大幅に低減させている次世代型銅合金である。

開発合金「MNEX<sup>®</sup>28」は、新興国の低価格帯自動車向けから次世代の環境対応車向け車載用端子・コネクタまで幅広い展開を見込んでいる。

## 5. 特許

本開発合金に関わる特許は、PCT/JP2014/075735として出願済みである。

## 文 献

- (1) Directive 2011/65/EU of the European Parliament and of the Council of 8 June 2011 on the restriction of the use of certain hazardous substances in electrical and electronic equipment.
- (2) Directive 2000/53/EC of the European Parliament and of the Council of 18 September 2000 on end-of life vehicles.
- (3) 野村良行, 齋藤 寧, 古川欣吾:自動車 車載用プレスフィットコネクタの開発, SEIテクニカルレビュー, 169(2006), 73-78.
- (4) 例えば, <http://www.nmm.jx-group.co.jp/cuprice/> (2015年10月19日).
- (5) JCBA T309:2004銅及び銅合金薄板条の曲げによる応力緩和試験方法.

# 衝突時の安全性を高めた 船舶用高強度高延性鋼板の開発

中島孝一<sup>\*1)</sup> 一宮克行<sup>\*1)</sup> 長谷和邦<sup>\*2)</sup>  
衛藤太紀<sup>\*3)</sup> 深井英明<sup>\*3)</sup>

## 1. 緒言

液化石油ガス(LPG)や液化天然ガス(LNG)などのガス搭載船や原油タンカー等の船舶では、座礁や衝突によるガス・油の流出が環境汚染の観点から問題となっており、船殻の二重構造化等の船体構造面からの取り組みがなされている。一方で、変形性能を向上させた鋼板を適用することによっても衝突時の安全性を向上することが可能であり、変形性能と鋼板のミクロ組織の相関に関する検討も実施されている。延性に優れた軟質なフェライトを母相とし、ベイナイトやマルテンサイトといった硬質相を第二相とした複相組織とすることで鋼板の変形性能を向上できることが示されている<sup>(1)-(5)</sup>。

高変形能の複合組織は、二相域焼入れ-焼戻しの熱処理プロセスにより形成することが可能であり、自動車用薄鋼板や調質型厚鋼板で実績があるが、本開発では、船舶用鋼板として、工業的な生産性の点から、制御圧延-加速冷却を適用したオンラインプロセスでの検討を志向した。また、薄鋼板分野では、更に強度延性バランスを追求し、第二相をサブミクロンオーダーで微細分散させた組織制御の検討もなされている<sup>(6)</sup>。しかし、厚鋼板分野では、溶接部特性等の観点から主強化因子として析出強化を用いる材質設計を適用することは非常に困難であり、溶接部特性に配慮した上での変形性能アップが必要である。

以上の課題を踏まえて、著者らは、鋼材の化学成分を大幅に変更することなく、溶接部特性は従来の材料と同等に確保しつつ、厚板圧延時のオンラインプロセスにおける最適化技術を駆使することで、母材の高延性化を図り、衝突時の安全

性を向上した船舶用高強度鋼板を開発した。本稿では、開発鋼の特徴ならびに性能について紹介する。

## 2. 開発技術

図1に開発鋼のコンセプトを示す。鋼材から採取した引張試験片に荷重を付与すると図のような公称応力-公称歪曲線が得られる。この試験片になされた仕事すなわち変形時の吸収エネルギーはハッチング部の面積に等しくなるため、鋼材自体の延性を向上することができれば吸収エネルギーを増大させ、構造体が衝突した際の安全性を向上できると考えられる。また、本開発では、船体の側面部に使用される鋼板として、降伏応力(YP)が315 MPa, 355 MPa級の高強度鋼板を対象とし、従来材で形成するフェライト-パーライト組織に対して第2相のベイナイト化を図った。フェライト-パーライトおよびフェライト-ベイナイト組織を有する供試材を実験室レベルで作製し、引張強さと延性の関係が整理した結果を図2に示す。従来知見と同様に、本対象の成分系においてもフェライト-ベイナイト組織を有する材料で優れた強度・伸びバランスが得られている。以上のラボ検討結果をもとに、フェライト-ベイナイト組織を得るために、実製造ライ

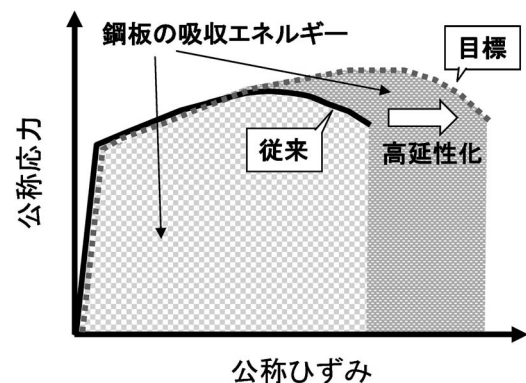


図1 開発鋼のコンセプト。

\* JFE スチール株式会社  
スチール研究所 鋼材研究部; 1)主任研究員 2)部長  
3)西日本製鉄所 鋼材商品技術部 主任部員  
Development of High Strength Steel Plate with Superior Deformability for Ship Safety in Collision; Koichi Nakashima, Katsuyuki Ichimiya, Kazukuni Hase, Taiki Eto and Hideaki Fukai (JFE Steel Corporation)  
2015年11月5日受理[doi:10.2320/materia.55.111]

ンにて高度なオンライン製造プロセスを適用し鋼板を製造した。図3に、オンライン製造プロセスの概念図を示す。通常プロセスでは、例えば(a)のように、スラブ加熱後の、制御

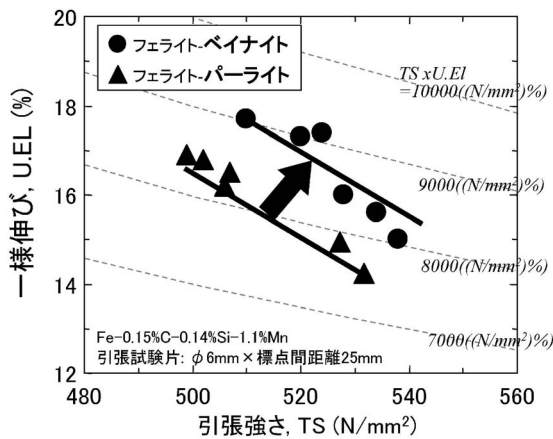


図2 フェライト-ベイナイト，フェライト-パーライト組織材における引張強さと延性の関係。

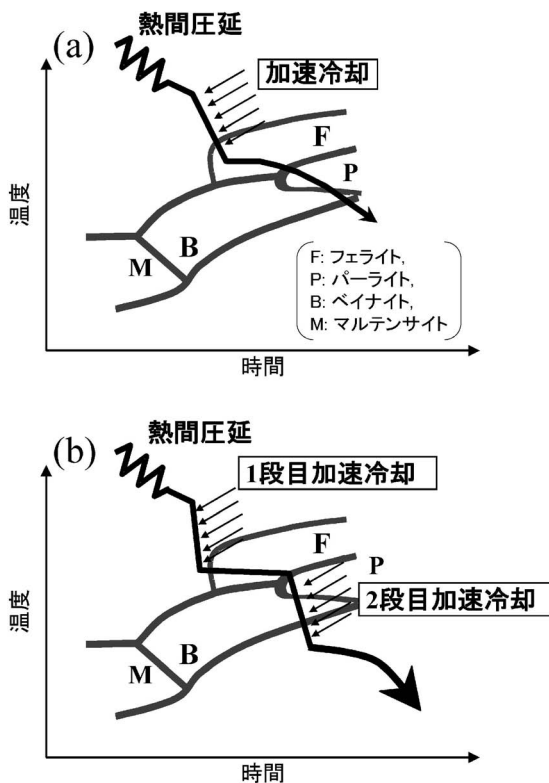


図3 オンライン製造プロセスの概念図。

圧延や加速冷却の条件を最適化することで所望の強度調整が図られる。一方で、(b)のように、2段の冷却プロセスを適用することにより、変形性能に優れた軟質なフェライトを多量に分散しつつ、第2相のベイナイト化を促進することが可能となる。1段目の冷却ではフェライトノーズ付近の温度域で冷却を停止、保持することでフェライト変態を進行させ、2段目の冷却では未変態の残留オーステナイトのベイナイト化を図る。このとき、2段目の冷却は通常プロセスに対して冷却停止温度を低くすることによりベイナイト相を形成させている。図4に開発鋼のマイクロ組織例を示す。軟質なフェライトが多量に分散しており、第2相としてベイナイト相が形成しており目的の組織が得られている。

### 3. 開発鋼の特性

#### (1) 母材の引張特性

上述の組織制御の考え方にに基づき、実機製造ラインにて板厚 17 mm の高強度鋼板を製造した。開発鋼の化学成分を表1に示す。化学成分は KA32, KD32, KA36, KD36 の規格範囲(NK 船級)であり従来材と同等である。また、日本鋼船工作法精度標準(JSQS: Japan Shipbuilding Quality Standard)では、C当量が0.36 mass%を超えるTMCP型高張力鋼について、溶接時の予熱実施等の制約を規定している。開発鋼はJSQSにおける本条件も十分に満足しており、優れた溶接性を有し予熱フリー溶接が可能である。図5に開発鋼の応力-歪線図の例を示す。比較のため従来材の全伸びおよび引張強さで規格化している。開発鋼は、従来材と同等の高強度を有しつつ、優れた延性を示している。全伸びは従来材に対して大幅に向上しており、変形時の吸収エネルギーの向上に有効に作用すると考えられる。

#### (3) 衝突解析結果

船体が衝突した際の損傷状況を船舶衝突シミュレーション

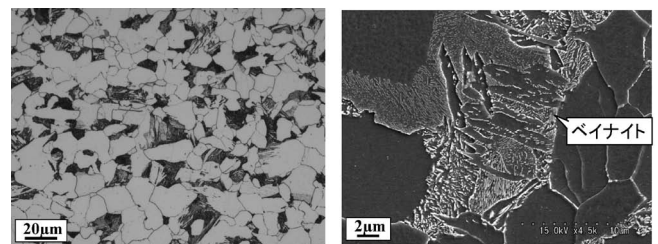


図4 開発鋼のマイクロ組織例。

表1 開発鋼の化学成分。

板厚 (mm)	化学成分 (mass%)							
	C	Si	Mn	P	S	Others	Ceq*	
	0.14	0.27	1.09	0.013	0.006		0.32	
KA32, KD32 KA36, KD36	17	≤0.18	≤0.50	0.90-1.60	≤0.035	≤0.035	Nb, Ti	≤0.36 (KA32, KD32) ≤0.38 (KA36, KD36)

\* Ceq = C + Mn/6 + (Cr + Mo + V)/5 + (Cu + Ni)/15

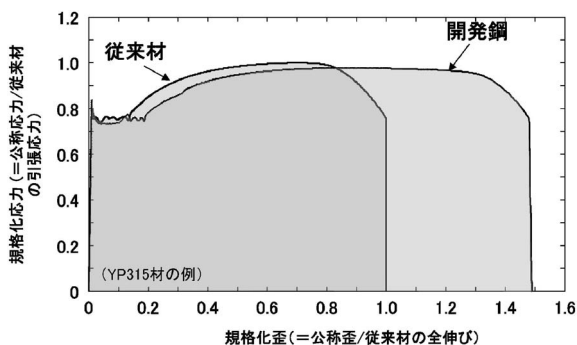


図5 開発鋼の応力-歪曲線例.

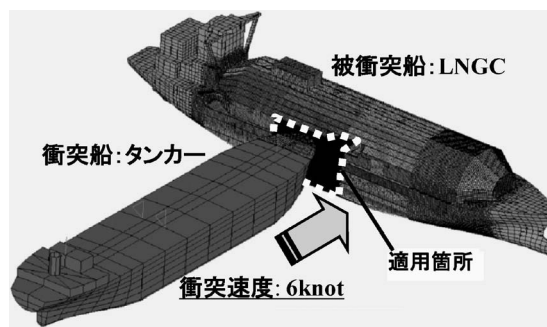


図6 衝突解析モデルの概略図.

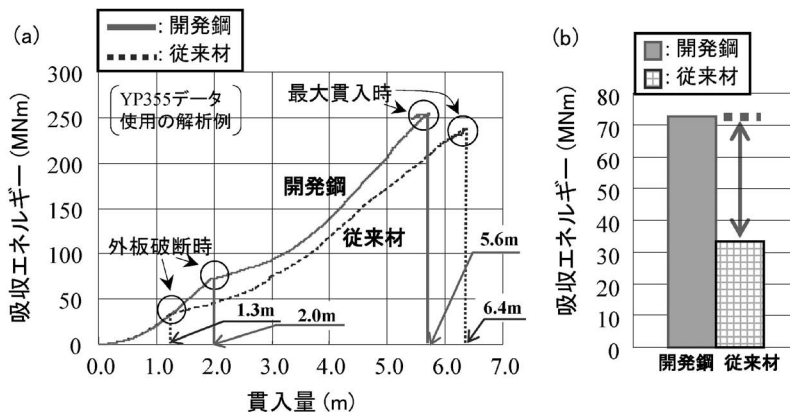


図7 衝突解析の結果 (a) 吸収エネルギーと貫入量の関係、  
(b) 外板破断時の吸収エネルギーの比較.

により解析した<sup>(7)</sup>。衝突解析モデルの概略図を図6に示す。LNG船の側面部に、高延性の開発鋼および従来材を配置し、タンカーが衝突した場合に、被衝突船が吸収するエネルギーおよび衝突船の貫入量を評価した。なお、本解析では、引張特性の歪速度依存性データも取り込み、衝突時の被衝突船まわりの歪速度分布も考慮されている。解析結果を図7に示す。高延性の鋼板を適用することにより、最大貫入量が約10%低減(a)、船体に吸収されるエネルギー(外板破断時)が約2.2倍向上し(b)、船体衝突時の安全性を高めることが可能である。本結果は高延性鋼を船体の側面のみに適用したケースを想定したものであり、その他の部位(ロンジ等の補強材)に用いれば更なる効果が期待される。

#### 4. 実用化状況および特許

船舶衝突時の安全性を高めることができる高強度、高延性の衝突安全鋼を開発した。本衝突安全鋼は、世界で初めてLPG(液化プロパンガス)運搬船に実船適用され、今後ますます

当該分野の鋼材として適用が拡大していくと考えられる。また、本技術に関連した特許も取得済み<sup>(8)</sup>である。なお、開発に際して、三菱重工船舶海洋株式会社殿に船舶衝突に関する解析を実施頂いた。ここに感謝の意を表します。

#### 文 献

- (1) J. H. Bucher and E. G. Hamburg: Formable HSLA and Dual-Phase Steels, ed. by A. T. Davenport, (1979), 142-150.
- (2) 古川 敬: 日本金属学会会報, **19**(1980), 439-446.
- (3) 高橋政司, 国重和俊, 岡本篤樹: 日本金属学会会報, **19**(1980), 10-16.
- (4) 国重和俊: 材料, **50**(2001), 47-54.
- (5) S. Oliver S, T. B. Jones and G. Fourlaris G.: Mater. Sci. Technol., **23**(2007), 423-431.
- (6) 船川義正, 藤田 毅, 山田克美: JFE 技報, (2012), 1-5.
- (7) K. Hirota, S. Nakayama, T. Okafuji, K. Nakashima, K. Hase, H. Shiomi and S. Tsuyama: Proceedings of the Twenty-second (2012) International Offshore and Polar Engineering Conference, Greece, (2012), 763-768.
- (8) 例えば, 特許第3578126号.

# 連続铸造圧延法による高性能銅合金線の開発

中本 齊<sup>\*1)</sup> 石田徳和<sup>\*2)</sup> 服部芳明<sup>\*\*</sup>  
 大石恵一郎<sup>\*\*\*</sup> 芦田哲哉<sup>\*\*\*\*</sup>

## 1. はじめに

近年環境保護の意識が高まり、環境への負荷を軽減する材料の開発が求められている。銅線材分野においては、例えば銅重量軽減の手段として電線や配線の細径化が進んでおり、細径化前と同等の強度を有する高強度銅合金線や、耐屈曲性、耐摩耗性に優れた銅合金線が求められるようになった。

通常このような銅合金線は、ビレット押出→伸線→熱処理→伸線、といった多くの工程が必要となり生産性やコストに問題がある上、長尺化にも限界があった。

三菱マテリアル株式会社は、無端ベルトと铸造輪からなり、低コストで生産性の高い連続铸造圧延装置を有している。本装置はタブピッチ荒引銅線の製造装置であるが、世界で初めて無酸素荒引銅線（ROX<sup>®</sup>シリーズ）の製造に成功し<sup>(1)</sup>、その製造技術と、従来から当社の型銅部門で培った銅合金製造技術を融合させ、連続铸造圧延による無酸素銅ベースの高性能銅合金線の製造に成功したので以下に報告する。

## 2. 連続铸造圧延による銅合金線製造技術開発

### (1) 連続铸造圧延装置の概要

図1にシステムの概略図を示す。原料（電気銅等）はシャフト炉で溶解され溶銅となり、保持炉に一旦ストックされる。その後铸造速度に合わせて溶銅を保持炉からタンディッシュ

へ流し、铸造輪と無端ベルトからなる铸造機で铸造バーを製造し、圧延工程、冷却・還元工程を経て荒引銅線をコイル状に巻き取る。

### (2) 連続铸造圧延による無酸素荒引銅線製造技術<sup>(1)</sup>

連続铸造圧延工程で無酸素銅を得る為に、溶解工程での燃焼雰囲気制御が必要がある。図2にシャフト炉内の都市ガス燃焼雰囲気と溶銅中の溶存ガス成分の平衡計算結果を示す。燃焼雰囲気としてCO(dry)濃度を指標としている。こ

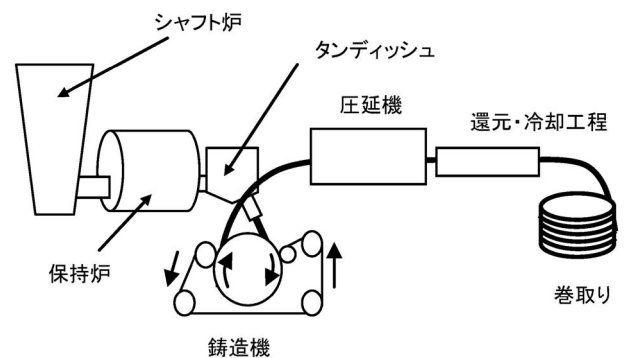


図1 連続铸造圧延概略図。

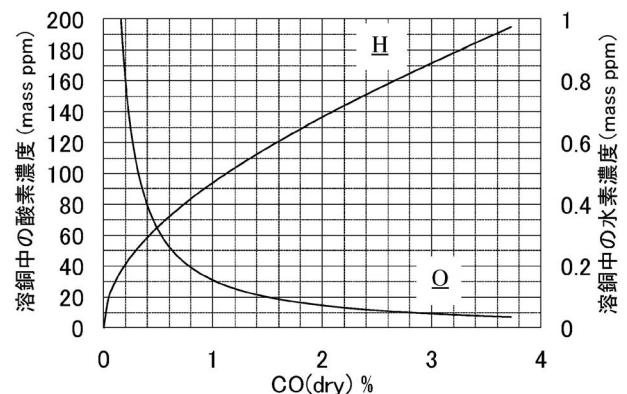


図2 溶銅中の酸素、水素濃度に及ぼす空燃比の影響。

\* 三菱マテリアル株式会社：1)堺工場 製造課 課長補佐  
 2)金属事業カンパニー 銅加工事業部 副事業部長  
 \*\* 小名浜製錬株式会社：小名浜製錬所 生産部 铸造課 課長  
 \*\*\* 三菱伸銅株式会社：開発部 部長，シニアフェロー  
 \*\*\*\* 菱星尼崎電線株式会社：尼崎工場 工場長  
 Development of High-Performance Copper Alloy Wire on a Continuous Casting and Rolling Process; Hitoshi Nakamoto\*, Norikazu Ishida\*, Yoshiaki Hattori\*\*, Keiichiro Oishi\*\*\* and Tetsuya Ashida\*\*\*\*, (\*Mitsubishi Materials Corporation, \*\*Onahama Smelting and Refining Co., Ltd. \*\*\*Mitsubishi Shindoh Co., Ltd. \*\*\*\*Ryosei Amagasaki Electric Wire Co., Ltd.)  
 2015年10月30日受理[doi:10.2320/materia.55.114]

これはシャフト炉に供給されている都市ガスと空気の混合ガスをインラインの分析装置にも供給し、装置内で実際に燃焼させた後に排ガス中のCO濃度を測定することで求められる。

通常操業ではシャフト炉の燃焼雰囲気はおよそCO(dry) = 0.3%であり、シャフト炉出口での溶銅中の酸素濃度は90 mass ppm程度である。これは、都市ガス(組成: CH<sub>4</sub> 88%, C<sub>2</sub>H<sub>6</sub> 6%, C<sub>3</sub>H<sub>8</sub> 4%, C<sub>4</sub>H<sub>10</sub> 2%)の燃焼反応式より求められるH<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O, CO, CO<sub>2</sub>ガスの分圧を用いて計算した溶銅中の酸素、水素の活量<sup>(2)(3)</sup>とよく一致しており、シャフト炉内では平衡がほぼ成立していると考えられる。従って図2より、燃焼雰囲気をCO-リッチにする事で低酸素の溶湯を得られることが分かる。ただし実操業では、コスト・湯温・溶解速度を踏まえて制御範囲を決定している。

図3に溶解工程から製品までのガス成分の挙動について、通常操業と無酸素銅製造時の場合に分けて示した。タフピッチ銅を製造する場合は、シャフト炉出口以降で酸化が進み、荒引線では約300 mass ppmの酸素濃度となる。一方無酸素銅を製造する場合は、シャフト炉における燃焼制御によりシャフト炉出口で酸素濃度が約20 mass ppm以下となり、更にその後の工程で脱水素、脱酸素を行い、最終的には酸素約3 mass ppm、水素約0.4 mass ppmの荒引線が得られる。

### (3) 連続鋳造圧延による高性能銅合金線製造技術

強度や導電性に優れる高性能銅合金の多くには、Mg, Zr, Cr, Ti, Fe, Pといった酸素親和性が高い合金元素が含まれることがほとんどであるため、これら元素を含む銅合金を得るには溶銅の無酸素化が不可欠となる。様々な高性能銅合金線の製造技術開発は、前述の溶湯処理技術をベースに達成したものである。

### 【Cu-Mg系】

Cu-Mg系は銅合金の中で最も高強度が得られる合金品種の一つで、鉄道用トロッコ線や電子部品の接続部等の素材として使用される。Mgは極めて酸素と反応しやすく連続鋳造が困難とされてきたが、酸素濃度を極めて低減させることでスラグ等による汚染のないCu-Mg系の溶湯が得られ、連続鋳造圧延での荒引線製造に成功している。試作段階において、Cu-Mgの鋳造バーの温度が極端に低下するという課題があ

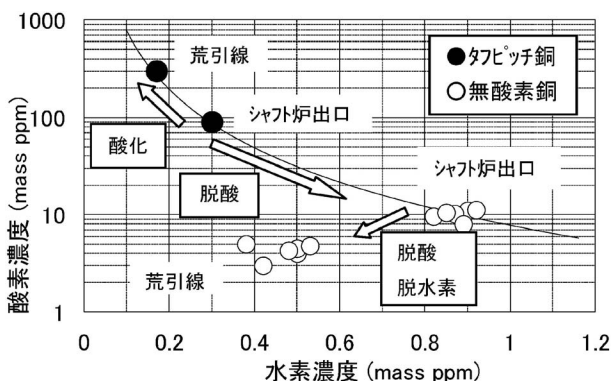


図3 各工程における溶銅中のガス成分挙動。

ったが、鋳造鋳型を熱伝導度の小さい材質に変更することで解決した。

### 【Cu-Cr系】

CrもMgと同様に酸素親和性が高く溶湯を汚染しやすい合金元素であるが、Cu-Mg系と同様、前述の無酸素銅の溶湯処理技術を活用した。

### 【Cu-Fe-P系, Cu-Co-P系】

FeやCoは溶銅に対して難溶解性の元素であることから通常の溶湯温度では溶解しないため、溶解工程ラインに溶湯加熱装置を設置した。またPは鋳塊の粒界割れを誘発するが、鋳造組織制御によって解決した。

### 【共通】

全ての合金品種において、圧延負荷が著しく上昇した。開発当初は鋳造バーや圧延材の温度調整で対応したが、特に高強度のCu-Mg系やCu-Co-P系は圧延負荷が一段と高くなり、圧延が不可能であった。そこで対象の合金品種毎の高温変形抵抗データを基に圧延シミュレーションを実施し、各圧延スタンドにおいて適正な前方・後方張力になるようパススケジュールを変更し、更に圧延モーターの能力を増強することで連続鋳造圧延を可能にした。

## 3. 高性能銅合金線 ROX<sup>®</sup>-CP<sup>(4)</sup>

### (1) 特長

連続鋳造圧延装置により製造した高性能銅合金線であるROX<sup>®</sup>-CPについて紹介する。ROX<sup>®</sup>-CPはCu-Co-P系銅合金で、強度・導電率の特性値は図4に網掛けで示す領域に位置する。

図4より、ROX<sup>®</sup>-CPの特性はCu-CdやCu-Cr-Zr等の難製造合金とほぼ同等であり、Co-Pによる析出強化とSn,

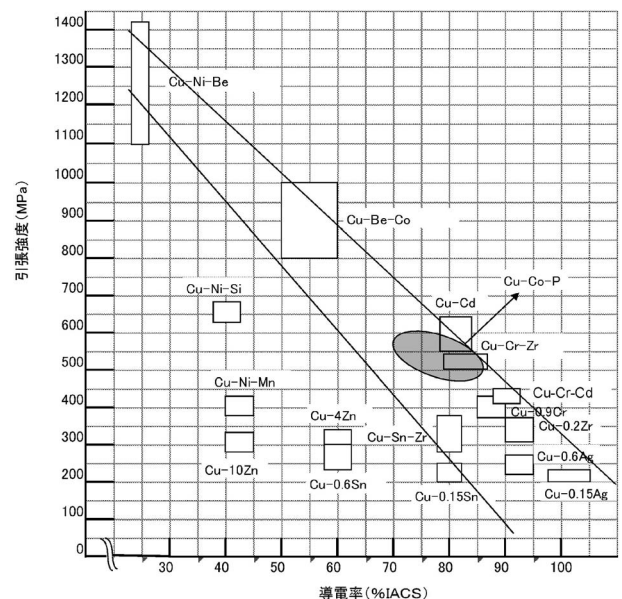


図4 各種銅合金線の代表特性。

Mg, Ag 等による固溶強化を組み合わせることで、高強度かつ高導電性を有するバランスに優れた特性が実現される。また、時効熱処理の条件を変え、Co-P の析出物のサイズを調整することで、耐摩耗性、耐熱性および耐屈曲性など各ユーザーの要求に応じた様々な特性を自由に選択することができ、トロリ線のような大径サイズから、ロボット用配線等の極細線まで、幅広いサイズに対応が可能である。

更に、従来の製法である熱間押出では数百 kg の短尺品しか製造できないが、ROX<sup>®</sup>-CP は連続鋳造圧延により製造するので長尺品が可能となる。

このように、ROX<sup>®</sup>-CP は 1 合金品種で様々な市場のニーズに対応することが可能で、特性バランスとコスト競争力を兼ね備えた優れた銅合金線であり、既に連続鋳造圧延により量産化し、市場に投入されている。

## (2) 用途

### (a) 自動車用ワイヤーハーネス

自動車の車体軽量化による燃費向上と排気ガス低減の目的で、多線化が進むワイヤーハーネスの銅線使用重量を削減するために、ワイヤーハーネスの細径化が進んでいる。

通常使用されているワイヤーハーネスは 0.3 mm<sup>2</sup> から 0.22 mm<sup>2</sup>, 0.13 mm<sup>2</sup>, 0.08 mm<sup>2</sup> へ、導体断面積で 50~90% 減の細径ハーネスの開発が進められているが、細径化されても要求される強度は 0.3 mm<sup>2</sup> と同等であり、銅合金線を使用しなければ達成できない要求値となっている。

一方で現行材 (0.3 mm<sup>2</sup>) は軟銅線を用いることによりワイヤーハーネス組み込み時や走行中の衝撃を吸収しており、細径化後も当然ながら耐衝撃性を兼ね備える為に適度の材料伸びが必要とされる。

ROX<sup>®</sup>-CP は強度、伸び、導電性を兼ね備えていることから、上記ワイヤーハーネスの要求に適合する。ROX<sup>®</sup>-CP について実際に実機でハーネス組立てまで行い、諸特性の評価を行った結果を表 1 に示す。

導体特性を最適化することで、ROX<sup>®</sup>-CP は現行材である 0.3 mm<sup>2</sup> と同等のハーネス組立性を達成することができた。同時に評価した Cu-0.3%Sn はハーネスの組立て自体は可能であったが、伸びが不足し形状を付与する配策性が悪く、線ハネや線絡みにより組み立て作業に時間を要した。

### (b) ロボット用ケーブル

ロボット用ケーブルは、ロボットアームの屈曲部等に使用されるため、耐屈曲性の向上による長寿命化が求められる。

図 5 は ROX<sup>®</sup>-CP と従来材 (タフピッチ軟銅線, Cu-0.3% Sn 硬/軟銅線) の繰り返し曲げ回数を比較したものである。

表 1 0.13 mm<sup>2</sup> ワイヤーハーネス評価。

	タフピッチ銅	Cu-0.3 mass%Sn	ROX <sup>®</sup> -CP	
断面積	0.3 mm <sup>2</sup>	0.13 mm <sup>2</sup>	0.13 mm <sup>2</sup>	
導体	抗張力	70 N	102 N	75 N
	伸び	≦20%	3%	7%
	導体抵抗	57 Ω/km	165 Ω/km	180 Ω/km
	耐屈曲性	—	210回	1100回
ハーネス配策性	○	△	○	

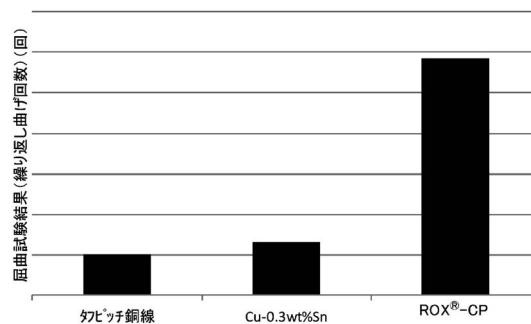


図 5 屈曲試験結果 (0.08 mmφ)。

流通しているタフピッチ軟銅線や Sn 入り銅線に比べ、ROX<sup>®</sup>-CP は 4~6 倍の耐屈曲性を有する。

## 4. ま と め

- (1) 環境負荷軽減を目的とし、低コストで生産性の高い連続鋳造圧延装置を用いた高性能銅合金線の製造に成功した。
- (2) 高性能銅合金線 ROX<sup>®</sup>-CP は連続鋳造圧延で製造した Cu-Co-P 系の荒引銅線であるが、1 品種の荒引線で多種の加工度、熱処理温度を組み合わせることにより、様々な用途に対応できる。

## 文 献

- (1) 堀 和雅, 和田正彦, 服部芳明: 伸銅技術研究会誌, **40** (2001), 153-155.
- (2) 幸塚善作, 鈴木康治, 大石敏雄, 森山徐一郎: 日本金属学会誌, **32**(1968), 1132-1137.
- (3) 加藤栄一, 上野晴信: 日本金属学会誌, **33**(1969), 1161-1164.
- (4) 中本 齊, 石田徳和, 芦田哲哉, 渡邊和章: 銅と銅合金, **51** (2012), 306-310.





## 形状記憶合金を用いたエネルギー変換材料の開発を目指して

愛知教育大学教育学部創造科学系  
技術教育講座；修士1年(北村研究室)

仁井貴文

私たちの研究室は、愛知教育大学技術科に属しており、北村一浩教授のもとで大学院生1名、学部4年生3名、3年生3名が日々研究を行っています。私たちの研究テーマは形状記憶合金の物性研究や形状記憶合金を用いた応用品の開発です。

形状記憶合金とは、温めると元の形に戻る性質(形状記憶特性)を有した機能材料であり、近年注目を集めています。また、形状記憶合金には大きな荷重を与えても、負荷を除いた瞬間に元の形状に戻る超弾性特性もあります。形状記憶合金のこれらの性質を利用し、現在100℃以下の排熱利用を目的とした熱エンジンの開発や、カメラで写真や動画を撮影する際に衣服に直接取り付け、カメラを持つ腕を支持する保持補助具の開発等を行っています。熱エンジンはクランク型やオフセット型、プーリー型など様々なものがありますが、私たちの研究室では形状記憶合金の疲労特性が良い、重り移動型の熱エンジンを採用し、現在は大型のものを開発してエネルギーを回収しようと試みています。また、新たな熱エンジンとしてレシプロ型の熱エンジンを開発しています。このエンジンも、お湯と水を交互に流す機構を持たせることで、形状記憶合金の疲労特性を考慮した構造となっています。

ここで、「なぜ教育大学で形状記憶合金を？」と思われる方もいると思います。

私たちの所属する技術科は、中学校教育の技術・家庭科における技術の教員を養成する学科であり、学生の多くが卒業後中学校の技術の教員になります。中学校の技術教育は材料加工・エネルギー変換・生物育成・情報の4つの領域に分かれており、私たちの研究室では、形状記憶合金の性質を用いて子どもが見て実感できるエネルギー変換教材を作れないかとの考えで、研究を進めています。

これまで、技術科が毎年定期的に行っている「ものづくり教室」内で、模型を使用して大小2つのプーリーに環状の形状記憶合金を取り付け、お湯に少し浸けるとプーリーが

回転するプーリー型熱エンジンを製作したり、形状記憶合金のバネの先に重りを取り付け宙吊り状態にし、直下に置かれた磁石に重りが触れると通電加熱で重りが跳ね上がるおもちゃ「イルカジャンプ」等を製作したりしてきました。また、現在はシーソーの構造を用いた、新たな形状記憶合金によるエネルギー変換教材の開発を行っています。

シーソー型エネルギー変換教材の概要は次に示します。

- 本教材は梯子と土台の大きく2つのパーツからできていて、パーツは3Dプリンタで作成しました。
- 縦200mm、横50mmで高さ25mmの梯子部に幅7mmの溝が掘ってあります。
- 縦200mm、横80mmで高さ100mmの四角錐形状の土台の頂点付近に梯子部を取り付けることで、シーソーのような構造となっています。
- 梯子の両下端に形状記憶合金バネを取り付け、直下に固定します。
- 鉄球を梯子の溝に乗せ梯子の端に行くと電気回路が形成され、鉄球がある方とは反対の端にある形状記憶合金が通電加熱され縮みます。
- 一方の形状記憶合金が縮むことで、バランスが崩れ、鉄球が転がります。この動きが連続的に繰り返されることにより動作します。

この教材によって、子どもは「電気エネルギー→熱エネルギー→運動エネルギー」というエネルギーの移り変わりが目で見てわかります。

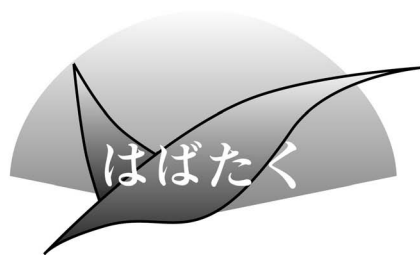
今回、パーツの作成には3Dプリンタを利用しました。中学校教員は授業外も部活やその他の業務が多くあり、とても多忙であります。そんな忙しい中で、教材研究を行っていかねばなりません。3Dプリンタを用いることで、教材研究に大幅な時間を費やすことなく授業の準備ができるようになると考えています。

この教材の位置付けとしては、3年間の見通しを持たせる「ガイダンス授業」内、または「エネルギー変換授業」の導入で利用することで教材としての効果を発揮できると考えています。そのため、今後は実際に中学校で使用して、子ども達の反応や中学校の教員の意見を聞き、より良い教材へと発展させていきたいと考えています。

形状記憶合金は、中学校技術科の教科書に「新たな素材」として紹介されている、今注目を集める素材の一つです。私たちの研究室では、今後も積極的に教材をはじめ形状記憶合金を利用した応用品を開発し、形状記憶合金をより身近なものにしていきたいと考えています。

(2015年12月28日受理) [doi:10.2320/materia.55.117]

(連絡先: 〒448-8542 刈谷市井ヶ谷町広沢1)



## これまでの研究活動と これからの研究活動

東北大学金属材料研究所；助教  
白石 貴久

### 1. はじめに

私は、2015年に東京工業大学大学院総合理工学研究科物質科学創造専攻舟窪研究室にて博士課程を修了し、現在は東北大学金属材料研究所不定比化合物材料学研究部門今野研究室にて助教として研究を行っております。この度、本稿を執筆する機会を頂きましたので、これまでの研究活動を通して感じた事、そしてこれからの研究活動に対して考えることを述べさせていただきます。

### 2. これまでの研究活動

大学4年生の時に、東京理科大学理学部応用物理学科小向得研究室に所属し、小向得優教授の下で、初めての研究活動としてプロトン導電体の伝導メカニズムに関する研究に携わりました。その中で、初めて材料を作製したり、装置を組み立てたりと、様々な経験をする事が出来ました。また、これまで学んだ知識を活用するだけでは全く足りず、次々と知識を増やさなければ、実験結果と向き合うことすら出来ないことを痛感しました。しかし、先生方や先輩方からの丁寧で熱心な指導により、1年間という短い間ですが、学んだことが実際に活かされ、現象が一つ一つ紐解かれていくことへの感動を体験することが出来ました。これは、今後も研究活動を行いたいと強く思うきっかけとなりました。

修士課程から博士課程修了までの5年間は、東京工業大学舟窪浩教授の下で、無機圧電体膜の作製および電気特性評価に関する研究に携わりました。所属した当初は、膜とは何かも分かっておらず、聞き慣れない専門用語に四苦八苦し、新しい環境に付いていくので精一杯でした。しかし、全てが新しい経験であり、使用できる装置が増えることで実験の選択肢が増え、新たな可能性が生まれることは非常に楽しく、博士課程に進学することで自分の研究内容にさらに深く取り組みたいと感じたことを覚えております。これも先生方および先輩方からのご指導・ご鞭撻あってのことと感謝しております。また、研究活動を通じて多くの研究者の方々と交流す

る機会を頂き、研究内容だけでなく、研究に対する姿勢や考え方など多くの事を学びました。特に、博士課程1年時に国外で開かれた学会に初めて参加した際は、海外の方々のプレゼンテーションレベルの高さや、語学の堪能さに驚くばかりであり、自分の発表が非常に小さいものを感じました。世界中に素晴らしい研究をしている方々がいることを肌で感じたことは、その後の研究活動への大きな励みとなりました。

博士課程においては、それまで行ってきた圧電体膜作製および電気特性評価に加え、アプリケーションに向けた研究にも携わりました。これにより、実際に応用を目指した場合は材料設計のみならず、回路や素子構造の設計が非常に重要となることを学びました。多くの失敗と試行錯誤の末に、非常に簡易でありましたが振動発電素子を作製し、実際に発電するのを観測した時の喜びは忘れられません。携わった研究が何かの役に立つかもしれないとも思いました。

これまでの研究活動を通じて、新しい分野やテーマへ挑戦する機会を沢山頂きました。そして、様々な実験装置や多くの材料を扱うことにも繋がりました。これらは、自分の力が試される貴重な機会であり、可能性を広げる素晴らしい機会であったと感じております。

### 3. 今後の研究活動

現在は、今野豊彦教授および木口賢紀准教授の下で、透過型電子顕微鏡を用いた酸化物薄膜の結晶構造評価に関する研究に携わっております。これまで透過型電子顕微鏡を扱ったことがない私にとっては、新たな領域への挑戦であります。このような私を受け入れて下さり、素晴らしい研究環境に身を置かせて頂いていることに感謝しております。そして、自分の考えたテーマがどこまで開花するのか、どこまで開花させることができるのか、自分の力が試されることに喜びを感じております。この研究を通して、これまで着目してきた酸化物薄膜の電気特性がどのようなメカニズムで発現しているのかを明らかにし、材料設計へフィードバックできたらと考えております。また、今年から大学院の学生を指導する機会を頂いております。私自身初めての経験なので、多くの事が手探りではありますが、責任あることだと強く自覚しております。これまで先生方や先輩方が私にして下さったように、熱心で丁寧な指導を心掛け、一つずつ進んで行きたいと考えております。そして、楽しく研究に取り組み、一つでも感動や喜びを感じてもらえたらと考えております。

### 4. 最後 に

私が研究活動に精一杯取り組んでいるのは、周りの方々のご指導・ご鞭撻あってのことです。この場を借りて厚く御礼申し上げます。そして、育てて頂いた感謝の気持ちを忘れず、今度は少しでも誰かの役に立てるよう日々精進したいと考えております。

(2015年12月24日受理) [doi:10.2320/materia.55.118]

(連絡先：〒980-8577 仙台市青葉区片平 2-1-1)

# 本 会 記 事

会 告	2016年春期(第158回)講演大会ご案内	119
	2016年春期講演大会概要集 DVD の販売について	119
	第1回ランチョンセミナー開催のお知らせ	119
	第8回男女共同参画ランチョンミーティング開催	120
	日本金属学会・日本鉄鋼協会講演大会相互聴講のお知らせ	120
	2016年春期講演大会期間中の託児室設置のご案内	120
	2016年秋期講演大会外国人特別講演および招待講演募集	120
	日本金属学会主催国際会議企画提案募集	121
	新設研究会のお知らせ	121
	まてりあ：プロジェクト報告企画公募	122
	欧文誌：特集企画の投稿募集	122

支部行事	123	次号予告	127
掲示板	124	新入会員	127
会誌・欧文誌3号目次	125	行事カレンダー	128

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。
- ・投稿規程、刊行案内、入会申込は、ホームページをご利用下さい。

- ・会告原稿締切：毎月1日で、翌月号掲載です。
- ・掲示板は、ホームページにも掲載しております。

## 会 告 (ホームページもご参照下さい)

### 2016年春期(第158回)講演大会ご案内

会 期 2016年3月23日(水)～3月25日(金)  
場 所 東京理科大学葛飾キャンパス(〒125-8585 東京都葛飾区新宿6丁目3-1)  
各種賞贈呈式 2016年3月23日(水)午前9時より  
東京理科大学葛飾キャンパス図書館棟 3F 大ホール  
懇 親 会 2016年3月23日(水)18:00～20:00  
(同大学学生食堂2階)  
参加申込 当日受付(事前受付終了)  
講演発表 本号付録およびホームページ掲載  
詳 細 ホームページ→講演大会をご参照下さい。

### 2016年春期講演大会概要集 DVD の販売について

2016年春期講演大会の概要集 DVD を販売いたします。  
ご購入希望の方は下記をご記入の上、E-mail または FAX でご注文下さい。

- ①件名「2016年春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(会員番号併記), ④申込数,
  - ⑤送付先住所
- 3月9日の発行後、請求書を添えて送付いたします。

会員価：本体3,810円+税 定価：本体10,000円+税 送料：360円

申 込 先 E-mail: member@jim.or.jp [\[FAX\]](#) 022-223-6312

## 第1回ランチョンセミナー開催のお知らせ

この度、春期講演大会において第1回ランチョンセミナーを開催いたします。このセミナーは、参加者の皆様に講演大会の昼食時間を利用して(昼食(軽食)をとって頂きながら)、企業による最新の技術情報を聴講いただくことを企画いたしました。参加無料です。多くの皆様のご参加をお待ちしております。

主 催 公益社団法人日本金属学会  
企 画 榊明報社  
日 時 2016年3月24日(木)12:15～12:45  
会 場 東京理科大学葛飾キャンパス講義棟(3階, 4階)

〈ランチョンセミナー開催企業・講演テーマ・演者は下記の通りです。〉

- C 会場(3階302号室)  
株式会社 TSL ソリューションズ  
「EBSD 法—今後の展望とその限界」
- F 会場(3階305号室)  
株式会社 日立ハイテクノロジーズ  
「材料評価方法を拡張する日立ハイテクノロジーズの顕微鏡製品」
- H 会場(3階307号室)  
日本電子株式会社  
「Multi-purpose Transmission Electron Microscope JEM-F200の開発」
- K 会場(4階402号室)  
日本エフイー・アイ株式会社 アレックス ブライト  
「Titan Themis: Cs-corrected S/TEM for metals research」
- M 会場(4階404号室)  
アジレント・テクノロジー株式会社 石川隆一  
「アジレントの最新原子スペクトル装置による分析例のご紹介～マトリックスに強く高速測定が可能な ICP-OES での測定例を中心に～」

※講演テーマ、演者は変更となる場合がございます。予めご了承下さい。

参加費：無料 軽食を無料提供いたします。

参加方法：3月24日(木)9:00より参加券を「機器展示会場(講義棟2階)」にて配布致します。

参加券をご持参の上、セミナー会場までお越し下さい。

※予定数に達し次第、配布は終了致します。

## 第8回男女共同参画ランチョンミーティング開催

### 「金属材料分野での多様なキャリアパス」

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

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

**主催** 男女共同参画委員会日本金属学会・日本鉄鋼協会

**協賛** 男女共同参画学協会連絡会

**日時** 2016年3月25日(金)12:00~13:00

**会場** 東京理科大学葛飾キャンパス講義棟5階506教室(鉄鋼協会第5会場) (〒125-8585 東京都葛飾区新宿 6-3-1)

**参加費** 無料 弁当30人分までは無料提供。  
(講演大会参加申込の有無にかかわらず、このミーティングに参加できます!!)

#### プログラム

司会 御手洗容子(物材機構)

12:05~12:10 開会の挨拶

男女共同参画委員会委員長 東北大 梅津理恵

12:10~12:40 「出産が仕事に与えた advantage~冶金を軸に金属の外を歩く~」

旭硝子株式会社生産技術センター 中田英子

12:40~12:55 総合討論

12:55~13:00 閉会の挨拶

男女共同参画委員会副委員長 東大 醍醐市朗

## 日本金属学会・日本鉄鋼協会講演大会相互聴講のお知らせ

日本金属学会・日本鉄鋼協会の講演大会相互聴講をご案内します。

### 申込方法：当日受付

鉄鋼協会の講演を聴講する場合は、金属学会で従来の参加受付を済ませた後、鉄鋼協会受付で相互聴講の申込をする。

鉄鋼協会に発表し、金属学会で聴講のみされる場合は、鉄鋼協会に従来の参加受付を済ませた後、金属学会受付で相互聴講の申し込みをして下さい。

(注) 金属学会で講演発表する場合は、金属学会の正規大会参加申込みが必要です。

**料金** 一般・学生・非会員を問わず同一料金

聴講のみ(概要集 DVD 無し)	3,000円
聴講と概要集 DVD(1冊)	6,000円

## 2016年春期講演大会会期中の託児室設置のお知らせ

利用日時 2016年3月23日(水) 9:00~17:30

3月24日(木) 9:00~17:30

3月25日(金) 9:00~14:00

**申込締切** 2016年3月7日(月)

**場所** 東京理科大学葛飾キャンパス(詳細は後日ご案内)

**料金** 子供一人800円/時間(鉄鋼協会受付にて当日払い。)

**申込方法** 日本鉄鋼協会・日本金属学会男女共同参画委員会ホームページ託児室案内記載の申込要領をお読みの上、3月7日(月)までにホームページ(下記 URL)の託児室案内よりお申込み下さい。

<https://www.isij.or.jp/godo/isijjim/>

確認後、シッター会社(㈱ファミリー・サポート)よりご予約確認の返信メールをお送りします。

**申込・問合せ先** ㈱ファミリー・サポート BAMBINO CLUB

担当者：星

☎ 03-3377-3177 FAX 03-3377-3178

E-mail: khoshi@familysupport.co.jp

住所：東京都渋谷区代々木 1-58-16 4F

(公社)全国保育サービス協会正会員

**問合せ先** (一社)日本鉄鋼協会 総務グループ 野村茂樹

☎ 03-3669-5931 FAX 03-3669-5934

E-mail: nomura@isij.or.jp

**詳細情報** 日本鉄鋼協会・日本金属学会男女共同参画委員会ホームページ <https://www.isij.or.jp/godo/isijjim/>

## 2016年秋期講演大会外国人特別講演 および招待講演募集

春秋講演大会における外国人研究者による特別講演と招待講演については会員からの推薦のもと、毎年6月と12月に開催される国際学術交流委員会において審議採択いたし、講演実施細目については分科会運営委員会で決定いたします。2016年秋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ので、下記要領によりご推薦下さい。

### 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下さい)により、下記メールアドレス宛に「外国人特別講演推薦」と明記しお送り下さい。送信後2~3日過ぎても受理メールの無い場合はお問合せ下さい。

**推薦書提出期日** 2016年5月31日(火)

**照会・推薦書提出先**

〒980-8544 仙台市青葉区一番町一丁目14-32

(公社)日本金属学会 国際学術交流委員会宛

☎ 022-223-3685 FAX 022-223-6312

E-mail: gaffair@jim.or.jp

## 日本金属学会主催国際会議企画提案募集

本会が主催する国際会議につきまして、ダイナミックな国際化の動きに即したタイムリーな企画を選定するため、次の方針で提案募集を行います。2018年度以降開催の国際会議が対象です。ご参照の上、期日までに有意義な企画をご提案下さいますようお願いいたします。

提案締切日 2016年5月31日(火)

提案要項 下記事項を記載した文書(A判)をもって、本会会長宛に申請して下さい。

- (1) 会議の名称(和文名・英文名)
  - (2) 会期
  - (3) 開催地・会場予定
  - (4) 会議の目的・特徴
  - (5) 日本開催の経緯と意義
  - (6) 計画概要
    - a. 協賛、後援団体
    - b. 主要準備日程
    - c. 使用語
    - d. 参加予定国(国名・国数)
    - e. 参加予定者数(国内外)
    - f. 著名な国内外参加予定者(氏名・所属・役職)
    - g. パラレルセッション数およびポスターセッションの有無
    - h. プロシーディングスの出版(出版元・予定頁数、製作部数・頒価・配布方法)
    - i. 予算(収入・支出明細))
  - (7) 準備委員会委員(氏名・所属・役職)
  - (8) 提案(連絡)責任者(氏名・所属・役職・住所・電話・Email)
- 提案書送付先 〒980-8544 仙台市青葉区一番町一丁目14-32  
(公社)日本金属学会 国際会議募集係

一公益社団法人日本金属学会主催国際会議実施方針(2013年12月改訂抜粋)一

### 1. 基本的要件

- (1) 開催要望が国内外で高まっており、かつ本会会員からも要望されていること。
- (2) 関係国内学協会の協賛が得られること。
- (3) 会議の計画内容が本会主催の会議としてふさわしいと認められること。
  - 1-1 会議の構成、主要題目、日程、使用語が適切である。
  - 1-2 参加国数および国外参加者が10カ国50名以上予定されていること。
  - 1-3 参加予定国および参加予定者は確実な根拠に基づいて推定されていること。
  - 1-4 当該分野における国内外の代表的研究者の参加が予定されていること。
- (4) 会議のProceedingsを刊行する場合は、多重投稿等ミスコンダクトが生じないように対策をとること。実施する対策を事前に届け出て本会の承認を得ること。

### 2. 本会主催国際会議の区分と規模

- (1) JIMIS: 国際シンポジウム一参加者150名未満
- (2) JIMIC: 国際コンファレンス一参加者150名以上
- (3) その他の国際会議一国際的要請に基づいて主催する国際集會等

### 3. 開催頻度

必要に応じて随時開催する。

### 4. テーマの公募、選定方法

- (1) 「まてりあ」会告で定期的に企画提案を募集する。
- (2) 提案された企画案は、まず分科会運営委員会において検討、優先順位を付けて、国際学術交流委員会に提示する。
- (3) 国際学術交流委員会において実施企画、会議の区分、貸与金(内定)を決定して、理事会に答申する。

- (4) 理事会において正式決定し、提案責任者に対して文書により決定通知と開催準備推進の依頼を行う。

### 5. 財源

- (1) 参加費
- (2) 文部科学省補助金
- (3) 地方公共団体補助金
- (4) 民間財団補助金
- (5) 本会国際学術交流資金からの貸与金(上限100万円会議後返却)
- (6) 寄付金

### 6. 業務処理の会計処理

本会の「国際会議開催準備マニュアル」と「国際会議会計処理マニュアル」に準拠する(これらの資料は採択決定後に提案責任者に送付する)。

### 7. 本会主催の国際会議開催予定

- ①PRICM9 国際会議(第9回環太平洋先端材料とプロセッシング国際会議)  
開催時期: 2016年8月1日(月)~5日(金)  
開催場所: 国立京都国際会館

## 新設研究会のお知らせ

本年3月から新たに下記の研究会が発足いたします。メンバーとして登録を希望される方は、氏名、勤務先、連絡先(E-mail address 含む)を明記の上、世話人宛にお申込み下さい。研究会の設置期間は3ヶ年ですが、特に活動の継続を必要とする場合は、2年を限度として更新することができます。

(研究会新設募集: 7号会告/申請締切日: 9月1日)

### ■77. 高度超塑性成形研究会

設置期間 1期5年間(2016年3月~2021年2月)

超塑性は、材料学と塑性加工学の境界領域に位置し、その研究開発・実用化推進のためには両分野の研究者と企業技術者との連携・協力が必要である。輸送機器(自動車・鉄道車両・宇宙航空等)分野では、特に高速・高精度の高度超塑性成形が要求されている。従来の準静的な塑性変形という超塑性のイメージを離れて、高温で材料の組織と力学応答が相互作用を起こしながら変化しつつある状態を利用して、高速・高精度な塑性変形を実現することが求められている。本研究会では、材料学と塑性加工学の両分野の研究者と企業技術者との間で、超塑性のダイナミックな様相について、情報交換と討論の場を提供することを目的として活動する。

代表世話人 佐藤英一

宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究所 教授

☎ 042-759-8263 FAX 042-759-8461

E-mail: sato@isas.jaxa.jp



## まてりあ「プロジェクト報告」企画公募

特別推進研究新学術領域研究、学術研究、戦略的創造研究など、これまで公的資金補助によるプロジェクト研究が数多く行われていますが、その研究成果が一部の関係者に資料配布されるに留まっているという現状があるようです。

その成果を多くの研究者が目を通す会報「まてりあ」にまとめて掲載しませんか。

「まてりあ」には、有料で掲載できる「プロジェクト報告」というカテゴリーがあり、通年応募を受け付けております。下記参照の上、奮ってご応募下さい。

**種別名称** 「プロジェクト報告」

**主 旨** 公的資金を得ているプロジェクトの最終研究成果を有料掲載する。

**応募期間** 通年とする。

**応募資格** 企画提案者および執筆者に本会会員2名以上が含まれていることを要する。

**提出書類** 企画書(プロジェクト名、責任者名、企画趣旨、希望号、企画主題、記事種別・題目・執筆者・執筆頁・執筆のねらい、責任者連絡先)を提出する。

**企画内容** プロジェクト紹介(1頁)、解説、最近の研究、トピックス記事スタイルの組み合わせとする。

**解 説** 新しい特定の問題を取り上げて、専門外の会員にも分かるように記述する。  
さらに勉強しようとする人のために参考となる文献も示しておく。

**最近の研究** 最近の重要な研究のうち、比較的せまい範囲のテーマを取り上げて、国内外の最近の研究を紹介する。  
各分野の現状、現在の問題点などを取り上げて、総括的に分かり易く記述したもので、その分野の研究を進める上で参考となる内容とする。

**トピックス** 最近の情報を手短かに紹介するもので、話題は限定しない。

**企画決定** 会報編集委員会にて採否の決定を行う。

**費用負担** 1頁：28,000円＋税

**企画総頁** 35頁以内

**著 作 権** 日本金属学会に帰属する。

**査 読** 会報編集委員会が行う。論文毎の複数名査読候補者を含めた企画書を提出してもらい一括して審議する。

**執筆依頼** 特集関係の執筆依頼方法と同じ方法で事務局が行う。

**執筆方法** 「まてりあ」執筆要項に準じる。

**送付・問合せ先** 〒980-8544 仙台市青葉区一番町一丁目14-32

(公社)日本金属学会 会報編集委員会

☎ 022-223-3685 FAX 022-223-6312

E-mail: materia@jim.or.jp

## 特集企画の投稿募集

下記2テーマに関する特集を、Materials Transactions 58巻3号(2017年3月発行)に予定しております。多数ご投稿下さいますようお願いいたします。

### ■New Proposals on Titanium Production and Molten Salts(チタンの新製錬法と熔融塩化学)

第5回熔融塩中でのチタン製造の国際円卓会議が日本金属学会の協賛の下、北大と洞爺湖文化センターで2016年7月10-14日に開催される。通常はアブストラクトのみの会議であったが、国際アドバイザリーから助言を受けて、優秀な発表を材料化学系の雑誌に特集号として取り纏めたいということになった。発表は40件を見込んでいたが、優秀な発表に限定して寄稿を進める方針である。国際会議参加の有無を問わず、チタンの新しい製造方法および熔融塩を用いた酸化物の還元分野における新規論文を特集する。

### ■The Recent Advances in Nuclear Materials Research and Its Methodology(原子力材料に関する実験・計算技術の新展望)

原子炉の高安全化および事故耐性材料のための評価や補修に係る技術開発、より安全な先進原子炉や核融合炉等の開発研究は非常に重要な意義を有する。原子炉材料は高温高圧水や放射線照射など特殊環境に置かれ、照射硬化や脆化、照射誘起応力腐食割れ現象等が発現する。そのため、適用環境下における材料劣化を明確に把握し、科学的合理性のある保守管理技術および規制評価に反映させ、将来の安全性を科学的見地より担保することは重要である。一方、三次元アトムプローブ、陽電子消滅法、透過電子顕微鏡、第一原理計算など、各種分析技術の向上により劣化機構解明研究は大きく進展しており、複雑な劣化事象を的確に解釈し、高精度に予測できるようになりつつある。これらの科学技術に関し、我が国の研究は質、量ともに世界を先導する水準にあることから、本特集号の目的として、原子炉環境、核融合炉環境における種々の材料の劣化の機構解明に係る最新研究成果を収集し、先進的な実験手法をとりまとめることとした。

**掲載予定号**：第58巻第3号(2017年)

**原稿締切日**：2016年9月1日

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

**問合せ先** 〒980-8544 仙台市青葉区一番町一丁目14-32

(公社)日本金属学会 欧文誌編集委員会

http://jim.or.jp/

☎ 022-223-3685 FAX 022-223-6312

E-mail: editjt@jim.or.jp



## 支部行事

東北支部

### 平成28年度 第1回支部会議(総会)開催のご案内

日時 2016年4月21日(木)12:00~13:30  
(昼食を準備いたします)  
場所 東北大学工学研究科マテリアル・開発系 教育研究棟  
(B01)会議室(2階202号室)  
(〒980-8579 仙台市青葉区荒巻字青葉 6-6-02)  
仙台駅からのアクセス  
<http://www.tohoku.ac.jp/japanese/profile/campus/01/aobayama/areab.html>

#### 【議題】

- (1) 平成27年度事業報告および決算報告について
- (2) 平成28年度事業計画案および予算案について
- (3) 支部役員について
- (4) 東北支部規則の改正について
- (5) その他

ご出席の方は、4月8日(金)までに、下記の支部事務局までE-mailでお知らせ下さい。

連絡先 日本金属学会 東北支部事務局  
〒980-8579 仙台市青葉区荒巻字青葉 6-6-02  
東北大学工学研究科マテリアル・開発系 貝沼研究室  
☎/FAX 022-795-7323  
E-mail: kamakura@material.tohoku.ac.jp

関東支部

### 平成28年度 日本金属学会関東支部講演見学会

以下の要領で、日本航空 整備工場の見学会を実施いたします。  
奮ってご参加下さい。

日時 2016年5月20日(金)14:40~17:30  
場所 日本航空株式会社 整備工場  
(東京都大田区羽田空港 3-5-1 JAL メインテナンスセンター1)  
集合時間 14:40  
集合場所 東京モノレール新整備場駅下車 JAL メインテナンスセンター1(詳細は申込受付後お知らせします)  
工場見学 展示エリア、Sky Museum、格納庫見学など  
技術講演会  
ジェットエンジンタービン部品の補修技術と問題点、及びエアラインにおけるコスト削減の取組について(仮題) 講師 中野 剛  
申込方法 氏名、所属(学生の場合は学年も)、連絡先を明記の上、下記宛E-mailにてお申込み下さい。  
注意 ヒールの高い靴、サンダル、厚底の靴はご遠慮下さい。  
定員 40名(定員になり次第締め切ります)  
申込締切 2016年5月13日(金)必着  
申込先 日本金属学会 関東支部事務局  
(jim-kanto@mtl.titech.ac.jp)

中国四国支部

### 日本金属学会・日本鉄鋼協会中国四国支部 平成28年度支部会議

日時 2016年3月14日(月) 13:00-14:00  
場所 広島オフィスセンター 本館会議室  
(〒732-0805 広島市南区東荒神町 3-35)  
議題 平成27年度業務・会計報告、平成28年度業務計画・予算案、表彰、支部規則の策定、新役員承認

### 日本金属学会・日本鉄鋼協会中国四国支部 湯川・本多光太郎記念支部講演会

日時 2016年3月14日(月) 14:10-16:20  
場所 広島オフィスセンター 本館会議室  
(〒732-0805 広島市南区東荒神町 3-35)  
プログラム  
14:10~14:15 開会挨拶 金属支部長  
座長:松木一弘(広島大)  
14:15~15:05 (湯川記念講演)  
アルミニウムの超高純度化  
広島国際学院大 学長 李木経孝  
15:05~15:15 一休憩—  
座長:市川貴之(広島大)  
15:15~16:15 (本多光太郎記念講演)  
複相型水素透過合金の組織制御  
金沢大 教授 石川和宏  
16:15~16:20 閉会挨拶 鉄鋼支部長

参加費 無料  
参加締切 3月8日(火)  
申込・連絡先 市川貴之(広島大学)宛  
☎/FAX 082-424-5744  
E-mail: ichikawa@h2.hiroshima-u.ac.jp  
アクセス 広島オフィスセンター  
<http://www.intelligent-hotel.co.jp/oc/>

九州支部

### 平成28年度春季講演会

[共催]日本鉄鋼協会九州支部

日時 2016年3月14日(月) 13:15~16:55  
場所 九州大学 伊都キャンパス  
工学部西講義棟3階 工学部第四講義室(福岡市西区元岡744番地)  
プログラム  
13:15~14:15 湯川記念講演会  
日本における新エネルギー・経済  
SBIホールディングス 中塚一宏  
14:25~16:55 講演討論会 テーマ「材料とエネルギー・環境」  
(1) 新しいマグネシウム合金 熊本大 河村能人  
(2) 先進耐熱鋼のクリープ変形 九大 中島英治  
(3) 製鉄分野におけるグリーンエネルギー製鉄への挑戦 九大 大野光一郎  
(4) 製鉄所における地球温暖化抑止への考察 九大 斉間 等

参加費 無料  
定員 111名  
問合せ先 〒819-0395 福岡市西区元岡744番地  
九州大学大学院 工学研究院 材料工学部門 東田賢二  
☎ 092-802-2950 FAX 093-802-2990  
E-mail: higasida@zaiko.kyushu-u.ac.jp  
又は  
〒807-0873 北九州市八幡西区藤原 4-5-22  
(一社)日本鉄鋼協会 九州支部 事務局 北岡 宏  
☎ 093-691-2531 FAX 093-980-1570  
E-mail: kitaoka.hiroshi@iwa.bbq.jp

〈掲載要項〉  
 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：TEL 022-223-6312 E-mail: materia@jim.or.jp  
 無料掲載：募集人員，締切日，問合せのみ掲載。

◇東北大学金属材料研究所 准教授 公募◇

公募人員 准教授 1名

(東北大学は、男女共同参画を推進しています。子育て支援の詳細等、男女共同参画の取組については下記URLをご覧ください。

<http://www.bureau.tohoku.ac.jp/danjyo/>

所 属 東北大学金属材料研究所 結晶物理学研究部門  
 専門分野 結晶成長に関連する分野。結晶成長メカニズムの研究、あるいは、高性能結晶の成長技術開発に独自の手法で意欲的に取り組んでいただける方。

応募資格 博士の学位を有する方。

着任時期 決定後なるべく早い時期。

任 期 10年(審査により再任1回5年可)

公募締切 2015年3月31日(木)必着

- 提出書類
- (1)履歴書(写真貼付)
  - (2)研究業績目録(原著論文，著書・解説，招待講演，その他に分類)
  - (3)主要論文別刷10編(コピー可)
  - (4)研究業績概要(1,500字程度)
  - (5)当部門着任後の研究計画と展望(1,500字程度)
  - (6)照会可能者2名の氏名と連絡先

書類送付先 〒980-8577 仙台市青葉区片平2-1-1  
 東北大学金属材料研究所 結晶物理学研究部門  
 教授 藤原航三 宛

- \*封筒表面に「結晶物理学研究部門 准教授応募書類在中」と朱書きし，必ず書留にて郵送して下さい。
- \*応募書類の返却は致しません。履歴書は本応募の用途に限り使用し，個人情報に正当な理由なく第三者への開示することは一切ありません。
- \*書類選考後，面接による選考を実施します。

問合せ先 教授 藤原航三  
 ☎ 022-215-2010  
 E-mail: kozo@imr.tohoku.ac.jp

◇レアメタル研究会◇

■主 催 レアメタル研究会

主宰者 東京大学生産技術研究所 教授 岡部 徹  
 協力 (一財)生産技術研究奨励会(特別研究会 RC-40)  
 共 催 東京大学マテリアル工学セミナー  
 協 賛 (一社)軽金属学会，(一社)資源・素材学会，  
 (一社)新金属協会，(公社)日本化学会，  
 (公社)日本金属学会，(一社)日本チタン協会，  
 (一社)日本鉄鋼協会 (五十音順)

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

■参加登録・お問い合わせ

岡部研 レアメタル研究会事務担当 宮寄智子  
 (okabelab@iis.u-tokyo.ac.jp)

■第70回 2016年3月11日(金)(平成27年度 第5回)(平成27年度最終回)(15:00～ An棟2F コンベンションホール)

テーマ：非鉄金属，海洋資源開発

時 間：午後3時～

講 演：

- ・非鉄金属材料の現状と課題と将来展望(仮)(60分)  
 ～ユニークな技術により，地球に新たなマテリアルを創造し，循環型社会に貢献～  
 三菱マテリアル株式会社 常務取締役 飯田 修 講師
- ・レアメタルに関する最近の話題(仮)(45分)  
 東京大学 生産技術研究所 教授 岡部 徹 講師
- ・海洋資源開発の夢とロマン(仮)(60分)  
 ～海賊として山賊に大いなる夢を語る～  
 東京大学 名誉教授  
 九州工業大学社会ロボット具現化センター長，特別教授  
 海上技術安全研究所水中工学センター長 浦 環 講師

午後6:30～ 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〉

■RMW11 Workshop on Reactive Metal Processing (Reactive Metal Workshop)

February 19 (Fri)-20 (Sat), 2016, Cambridge, MIT

\*Reactive Metal Workshop のHP\*

<http://www.okabe.iis.u-tokyo.ac.jp/core-to-core/rmw/>

～ 掲示板，企業求人情報は，本会ホームページにも掲載しております。～



日本金属学会誌掲載論文

Vol. 80, No. 3 (2016)

サルモネラ菌の硫化水素産生能を用いた銅の抗菌性評価  
翠川 裕 仲井正昭 翠川 薫 新家光雄

$\alpha + \beta$  二相組織を有する Mg-Sc 合金の時効硬化挙動  
小川由希子 安藤大輔 須藤祐司 小池淳一

明初期に鋳造された洪武大砲の金属組織学的調査  
鄭 巍巍 庄子哲雄 糸藤春喜 張 建華

高温・強磁場中磁化測定による FeRh 合金のメタ磁気相転移の観測  
小野寺礼尚 大武和樹 高橋弘紀  
木村尚次郎 渡辺和雄 小山佳一

超高分子量ポリエチレンの圧縮特性に及ぼす照射の影響  
神矢 優 菊川久夫 浅香 隆 神田昌枝 西 義武

原子論に基づく鉄合金のマクロ降伏強度予測のための理論モデルの構築  
新里秀平 譯田真人 尾方成信

高温時の酸化皮膜挙動に着目したクロム銅合金の拡散接合性改善  
塚本雅章

ドロップチューブプロセスを用いた InSb 単結晶微粒子生成に対する融液温度と凝固時間の影響  
新井健太 永山勝久

プロピオン酸代替物質を用いた高延性バルクナノ結晶 Ni-W 合金電析浴の開発  
松井 功 尾村直紀 李 明軍 村上雄一朗 多田周二

Materials Transactions 掲載論文

Vol. 57, No. 3 (2016)

—Overview—

Alloy Design Based on Molecular Orbital Method  
Masahiko Morinaga

—Special Issue on New Aspects of Martensitic Transformations—

Effect of Solution Carbon and Nitrogen on the Microstructural Size and Crystallography of Lath Martensite in Fe-N and Fe-C Alloys  
Shigekazu Morito, Yuki Iwami, Tamotsu Koyano and Takuya Ohba

Compatibility at Junction Planes between Habit Plane Variants with Internal Twin in Ti-Ni-Pd Shape Memory Alloy  
Takeshi Teramoto, Masaki Tahara, Hideki Hosoda and Tomonari Inamura

Enhancement of Shape Memory Properties through Precipitation Hardening in a Ti-Rich Ti-Ni-Pd High Temperature Shape Memory Alloy  
Yuki Namigata, Yuki Hattori, M. Imran Khan, Hee Young Kim and Shuichi Miyazaki

Antiphase Boundary-Like Structure of B19 Martensite in Ti-Ni-Pd Shape Memory Alloy

Mitsuhiro Matsuda, Masatoshi Mitsuvara, Kazuki Takashima and Minoru Nishida

The Effects of Aging on the Degree of Order in Cu-Al-Ni Shape Memory Alloys

Yoshiyuki Nakata, Yutaka Iizuka and Takafumi Ono

Effect of Alloying Element X on Transformation Strains and Phase Stabilities between  $\alpha''$  and  $\beta$  Ti-Nb-X (X = Al, Sn, Zr, Ta) Ternary Alloys from First-Principles Calculations

Daichi Minami, Tokuteru Uesugi, Yorinobu Takigawa and Kenji Higashi

Martensitic Transformations and Superelastic Behavior at Low Temperatures in  $Ti_{50-x}Ni_{40+x}Cu_{10}$  Shape Memory Alloys

Yuta Kimura, Xiao Xu, Kodai Niitsu, Toshihiro Omori and Ryosuke Kainuma

Mechanical Properties of the R-Phase and the Commensurate Phase under [111] Tensile Stress in Iron-Doped Titanium-Nickel Alloys

Takashi Fukuda, Gakudai Yamasaki, Hiroaki Yoshinobu and Tomoyuki Kakeshita

Design Concept and Applications of Fe-Mn-Si-Based Alloys—from Shape-Memory to Seismic Response Control (Overview)

Takahiro Sawaguchi, Tadakatsu Maruyama, Hiroaki Otsuka, Atsumichi Kushibe, Yasuhiko Inoue and Kaneaki Tsuzaki

—Regular Articles—

Materials Physics

Preparation of Ag-Cu Composite Nanoparticles by the Submerged Arc Discharge Method in Aqueous Media

Kuo-Hsiung Tseng, Chih-Ju Chou, To-Cheng Liu, Yu-Han Haung and Meng-Yun Chung

Ligand-Driven Spin-Crossover Behavior of Fe<sup>II</sup> Molecules

Do Viet Thang, Nguyen Van Thanh, Nguyen Thi Hien, Nguyen Huy Sinh and Nguyen Anh Tuan

Improvement of Low-Temperature Impact Value of Sandwich-Structural (CFRP/ABS/CFRP) Laminate Plies by Homogeneous Low-Energy Electron Beam Irradiation (HLEBI)

Takumi Okada, Michael C. Faudree, Naoya Tsuchikura and Yoshitake Nishi

Atomic Arrangement and Magnetic Order in  $Mn_2RuZ$  (Z = Sn, Si)

Koki Shimosakaida and Shinpei Fujii

Magnetic and Structural Properties of Metamagnetic  $MnCo_{0.92}Fe_{0.08}Ge$  Compound

Kosuke Ozono, Yoshifuru Mitsui, Masahiko Hiroi, Rie Y. Umetsu, Kohki Takahashi, Kazuyuki Matsubayashi, Yoshiya Uwatoko and Keiichi Koyama

#### Microstructure of Materials

**Suppressed Hydrogen (H) Solubility in Body Centered Cubic Vanadium (V) by Alloying with Molybdenum (Mo), Chromium (Cr), Iron (Fe) or Cobalt (Co) Appreciated in Terms of Statistical Thermodynamics**  
Nobumitsu Shohoji

**Effects of Solute Fe, Zn and Mg on Recrystallization in Aluminum**  
Koji Wada, Kenta Takeshima, Tokuteru Uesugi, Yorinobu Takigawa and Kenji Higashi

#### Mechanics of Materials

**Geometry Effects in Four-Point Bending Test for Thin Sheet Studied by Finite Element Simulation**  
Xiaolong Dong, Hongwei Zhao, Lin Zhang, Hongbing Cheng and Jing Gao

**Mechanical Properties and Dislocation Substructure of 6061-T6 Aluminum Alloy Impacted at Cryogenic Temperatures**  
Woei-Shyan Lee and Yu-Chi Huang

**Damping Characteristics of the Inherent and Intrinsic Internal Friction of  $Ti_{50}Ni_{50-x}Fe_x$  ( $x = 2, 3,$  and 4) Shape Memory Alloys**  
Shih-Hang Chang, Chen Chien and Shyi-Kaan Wu

#### Materials Chemistry

**A Novel Process for the Production of Gold Micrometer-Sized Particles from Secondary Sources**  
Akihiro Yoshimura and Yasunari Matsuno

**Hardness and Wear Properties of Ti-Mo-C-N Film**  
Toshiaki Toyoda, Yuji Sutou, Shoko Komiyama, Daisuke Ando, Junichi Koike and Mei Wang

**High Adhesive Force between Laminated Sheets of Titanium and Polyurethane Improved by Homogeneous Low Energy Electron Beam Irradiation Prior to Hot-Press**  
Arata Yagi, Chisato Kubo, Masae Kanda, Itaru Jimbo and Yoshitake Nishi

**Effects of Homogeneous Low Energy Electron Beam Irradiation (HLEBI) on Adhesive Force of Peeling Resistance of Laminated Sheet with Polyethylene (PE) and Austenitic 18-8 Stainless Steels**  
Chisato Kubo, Masae Kanda, Olivier Lame, Jean-Yves Cavaille and Yoshitake Nishi

#### Materials Processing

**Effects of Number of Graphite Nodules on Fatigue Limit and Fracture Origins in Heavy Section Spheroidal Graphite Cast Iron**  
Naoto Shiraki, Yuki Usui and Toshitake Kanno

**Mechanical Properties and Deposition Mechanism of Cold-Sprayed CoNiCrAlY/YSZ Cermet**  
Kang-II Lee, Kazuto Sato and Kazuhiro Ogawa

**Fabrication of Reliable Joints of Alumina Ceramics by Microwave-Assisted Reactive Brazing Technique**  
Mayur Shukla, Sumana Ghosh, Nandadulal Dandapat, Ashis K. Mandal and Vamsi K. Balla

**Frequency Dependence of the Defect Sensitivity of Guided Wave Testing for Efficient Defect Detection at Pipe Elbows**  
Toshihiro Yamamoto, Takashi Furukawa and Hideo Nishino

**Effect of Process Parameters on Purification of Aluminium Alloys by Backward Extrusion Process under a Semisolid Condition**

Thet Thet Cho, Sumio Sugiyama and Jun Yanagimoto

**Effect of Casting Parameters on the Microstructure and Mechanical Properties of ADC10 Alloys Using a Semisolid Die Casting and Heat Treating Process**  
Byung Keun Kang, Chun Pyo Hong, Young Soo Jang, Byoung Hee Choi and Il Sohn

#### Engineering Materials and Their Applications

**Internal Activation of Thermoplastic Polypropylene GFRT Composite by Homogeneous Low Energy Electron Beam Irradiation (HLEBI) of the Interlayered Glass Fiber Chopped Strand Mats (GF-CSM) Prior to Assembly**  
Ryo Nomura, Masae Kanda, Michael C. Faudree, Itaru Jimbo and Yoshitake Nishi

**Investigation of New Ammonia Synthesis Process Utilizing Vanadium-Based Hydrogen Permeable Alloy Membrane**  
S. Morimoto, H. Yukawa, T. Nambu and Y. Murata

#### Environment

**Microbially Induced Sand Cementation Method Using *Pararhodobacter* sp. Strain SO1, Inspired by Beachrock Formation Mechanism**  
Takashi Danjo and Satoru Kawasaki

**Novel Numerical Simulation of the Stereological Bias of Binary Particles**  
Takao Ueda, Tatsuya Oki and Shigeki Koyanaka

**Effects of Doping Elements in  $\beta$ -FeSi<sub>2</sub> Prepared Utilizing Cast Iron Scrap Chips**  
Assayidatul Laila, Makoto Nanko and Masatoshi Takeda

**Gas Separation Properties of the Dense Polymer — Zeolite Powder Composite Membranes**  
Dominik Brkic, Dragutin Nedeljkovic, Lana Putic, Jasna Stajic-Trosic and Marina Stamenovic

#### —Express Regular Articles—

**Planar Bonded Magnets with 52% Enhanced Stray Magnetic Flux Density and the Same Polarity at Both Surfaces via Homopolar Magnetization**  
Shinji Isogami

**Effects of Si on Microstructures and High Temperature Properties of Beta Stabilized TiAl Alloy**  
Canxu Zhou, F. P. Zeng, Bin Liu, Yong Liu, Kun Zhao, Jinzhong Lu, Congzhang Qiu, Jianbo Li and Yuehui He

**Board Level Drop Reliability of Epoxy-Containing Sn-58 mass% Bi Solder Joints with Various Surface Finishes**  
Sang-Min Lee, Jeong-Won Yoon and Seung-Boo Jung

#### —Rapid Publication—

**Micro-Scale Cyclic Bending Response of NiTi Shape Memory Alloy**  
Orkun Onal, Berkay Gumus, Bekir Aksoy, Gregory Gerstein, Burhanettin Erdem Alaca, Hans Jürgen Maier and Demircan Canadinc

Announcement

まてりあ 第55巻 第4号 予告

ミニ特集「生体・医療・福祉用金属製品の設計・製造プロセスの  
特徴・課題・展望」

企画にあたって……………小泉雄一郎他  
歯科インプラントの設計・製造プロセス……………飯山賢一他  
冠動脈ステントに求められる力学的特性とその評価……………榎 学  
人工関節の設計・製造プロセス……………井上貴之  
脊椎固定器具の設計・製造プロセスの現状・課題・展望  
……………織部一弥他

〈一般記事〉

[新進気鋭] 半導体点欠陥の第一原理計算……………熊谷 悠  
—他—

—編集の都合により変更になる場合がございます。—



(2015年12月22日～2016年1月21日)

正 員

富樫 晃 司 SMK 株式会社  
小田 望 株式会社日立金属若松  
松島 永 佳 北海道大学

松本 圭 介 愛媛大学  
開 徳 憲 史  
前 川 恵 一 株式会社本田技術研究所

藤 間 美 子  
池 口 裕 子

学 生 員

林 知 樹 名古屋大学  
関 翔 悟 名古屋大学  
于 美 琪 広島大学  
横 山 達 也 茨城大学

上 村 徳 秀 大同大学  
佐 藤 仁 志 大同大学  
安 藤 一 喜 弘前大学  
山 内 優 希 弘前大学

沼 田 祥 旺 大同大学  
近 藤 顕 二 茨城大学

外国一般会員

KO HYEONG SIK

外国学生会員

Zhang Xuejian Liaoning University of Science  
and Technology



～2016年度の会費お払込について～

2016年度の会費お払込のお手続きはお済みでしょうか。会員の皆様には、既にご請求のご案内をお送りいたしてありますが、お手続きが未だの方は、ご対応をお願いいたします。

尚、本会ホームページの会員専用ページからは支払いの確認や、クレジットカード決済などできます。また、ご連絡先住所の変更もこのページからできますのでご利用下さい。

JIM ホームページ → [会員マイページ](#) → ID & パスワード入力 → 会費決済 or 各種変更届手続きへ



# 行事カレンダー

太字本会主催(ホームページ掲載)

開催日	名称・開催地・掲載号	主催・担当	問合せ先	締切
<b>3月</b>				
1	2016年 産業技術総合研究所中部センター 研究講演会(名古屋)	産業技術総合研究所中部センター・吉田・林	TEL 052-736-7064・7063 chubu-kouhou-ml@aist.go.jp http://www.aist.go.jp/chubu/	定員 150名
3	第31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 http://jcot.gr.jp	
4	腐食防食部門委員会第309回例会(大阪)	日本材料学会	TEL 075-761-5321 jimuj@jsms.jp http://www.jsms.jp	
4~5	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—(名大)	日本機械学会	TEL 03-5360-3506 araki@jsme.or.jp http://www.jsme.or.jp/	
7~11	第4回対称性群論トレーニングコース(東京)	日本結晶学会他	http://pfwww.kek.jp/trainingcourse/4th/	定員 35名
8	第33回軽金属セミナー「アルミニウム合金の組織—中級編(時効析出)」(第2回)(早稲田大)	軽金属学会	TEL 03-3538-0232 http://www.jilm.or.jp/	定員 40名
8~9	「実習で学ぶ、振動の解析と設計コース」(川崎)	神奈川科学技術アカデミー	TEL 044-819-2033 ed@newkast.or.jp http://www.newkast.or.jp/	定員 10名
11	第60回特別基金講演会「地球の環境保護に向けた最新技術」(東京)	日本マリンエンジニアリング学会	TEL 03-3539-5920 staff@jime.jp http://www.jime.jp	
11	第70回レアメタル研究会「非鉄金属、海洋資源開発」(東大生産技研)(本号124頁)	レアメタル研究会・宮崎(東大生産技研岡部研)	okabelab@iis.u-tokyo.ac.jp http://www.okabe.iis.u-tokyo.ac.jp/japanese/rc40_j.html	
11	第1回SPRING-8先端利用技術ワークショップ〜放射光の偏光特性を活用した磁気分光物性研究の最前線〜(東京)	高輝度光科学研究センター	TEL 0791-58-0949 sp8workshop@spring8.or.jp	
14	平成28年度春季講演会(九大)(本号123頁)	九州支部	<b>TEL 092-802-2950 FAX 093-802-2990 higasida@zaiko.kyushu-u.ac.jp</b>	定員 111名
14	日本金属学会・日本鉄鋼協会中国四国支部平成28年度支部会議および支部講演(広島)(本号123頁)	中国四国支部	<b>TEL/FAX 082-424-5744 ichikawa@h2.hiroshima-u.ac.jp</b>	3.8
15~16	2015年度量子ビームサイエンスフェスタ(つくば)	高エネルギー加速器研究機構, J-PARCセンター他	imss-festa@pfqst.kek.jp http://qbs-festa.kek.jp/2015/	
16~18	第7回日本複合材料会議(JCCM-7)(東京)	日本材料学会, 日本複合材料学会	TEL 075-761-5321 jimuj@jsms.jp http://www.jsms.jp	
17~18	第19回 磁粉・浸透・目視部門・電磁気応用部門・漏れ試験部門合同シンポジウム「表面探傷技術における現場と研究の融合」(東京)	日本非破壊検査協会・中村	TEL 03-5609-4015 nakamura@jsndi.or.jp http://www.jsndi.jp/	
17~18	「安全・安心な社会を築く先進材料・非破壊計測技術シンポジウム」(鹿児島)	日本非破壊検査協会・中村	TEL 03-5609-4015 nakamura@jsndi.or.jp http://www.jsndi.jp/	
18	第41回組織検査用試料の作り方(組織の現出)講習会「鉄鋼材料・非鉄金属材料・表面改質処理および異常組織材」(東京)	材料技術教育研究会	TEL 047-431-7451	定員 100名
21	平成27年度 高専女子フォーラム in 九州沖縄(北九州)	国立高等専門学校機構他	TEL 093-964-7200 s-soumu@kct.ac.jp http://www.kosen-k.go.jp/kosengirl/jyoshi-forum/	
22	日本金属学会第2回企業説明会(東京理科大葛飾キャンパス)(2号77頁)	日本金属学会・山村	<b>TEL 022-223-3685 segnl@jim.or.jp</b>	
23~25	日本金属学会春季講演大会(東京理科大学葛飾キャンパス)(本号119頁)	日本金属学会	<b>annualm@jim.or.jp TEL 022-223-3685 FAX 022-223-6312</b>	
24	第1回ランチオンミーティング(東京理科大)(本号120頁)	金属学会・斉藤	<b>TEL 022-223-3685 FAX 022-223-6312 gaffair@jim.or.jp</b>	
25	第8回男女共同参画ランチオンミーティング開催(東京理科大)(本号119頁)	金属学会	<b>TEL 022-223-3685 FAX 022-223-6312 gaffair@jim.or.jp</b>	
<b>4月</b>				
21	日本金属学会東北支部平成28年度第1回支部会議(総会)(東北大)(本号123頁)	東北支部	<b>TEL/FAX 022-795-7323 kamakura@material.tohoku.ac.jp</b>	4.8
<b>5月</b>				
11~13	第5回 最先端の顕微鏡と理論計算に関する国際シンポジウム(AMTC-5)(愛知)	ファインセラミックスセンター ナノ構造研究所	TEL 052-871-3500 k-yamamoto@jfcc.or.jp http://www.amtc5.com/	
12	第69回技術セミナー〜水素社会に向けた水素自動車, 水素燃料電池, 水素ステーションの現状〜(東京)	腐食防食学会	TEL 03-3815-1161 ysm.hng-113-0033@jcorr.or.jp http://www.jcorr.or.jp/sonota/69gijutsu.html	定員 70名
16~17	第4回岩崎コンファレンス「医工学とビッグデータが拓く医療の未来」(東京)	日本磁気学会	TEL 03-5281-0106 msj@bj.wakwak.com http://www.magnetics.jp/	定員 100名
20	平成28年度 日本金属学会関東支部 講演見学会(東京)(本号123頁)	関東支部	<b>jim-kanto@mtl.titech.ac.jp</b>	5.13
20~22	平成28年度塑性加工春季講演会(京都工芸繊維大)	日本塑性加工学会	http://www.jstp.or.jp	
23~25	トライボロジー会議2016春(東京)	日本トライボロジー学会	TEL 03-3434-1926 jast@tribology.jp http://www.tribology.jp/	

開催日	名称・開催地・掲載号	主催・担当	問合せ先	締切
27~29	軽金属学会第130回春期大会(阪大)	軽金属学会	TEL 03-3538-0232 http://www.jilm.or.jp/	予約申込 4.21
<b>6月</b>				
5~10	Rare Earths 2016 in Sapporo, JAPAN(札幌)	日本希土類学会	TEL 06-6879-7352 kidorui@chem.eng.osaka-u.ac.jp http://www.kidorui.org/RE2016.top.html	
16~17	第21回動力・エネルギー技術シンポジウム(横浜)	日本機械学会	TEL 03-5360-3505 sakurai@jsme.or.jp http://www.jsme.or.jp/pes/Event/symposium.html	
<b>7月</b>				
6~8	第53回アイソトープ・放射線研究発表会(東京)	日本アイソトープ協会	TEL 03-5395-8081 gakujutsu@jrias.or.jp http://www.jrias.or.jp/	
10~15	第5回溶融塩中のチタン製錬国際円卓会議(北大)	第5回溶融塩中のチタン製錬国際円卓会議実行委員会・山瀬	TEL 011-706-6339 yamase@eng.hokudai.ac.jp http://www.eng.hokudai.ac.jp/TiRT2016/index.html	
<b>8月</b>				
1~5	第9回環太平洋先端材料とプロセッシング国際会議(PRICM9)(京都)	日本金属学会・梶原	TEL 022-223-3685 FAX 022-223-6312 pricm_9@nta.co.jp http://web.apollon.nta.co.jp/PRICM9/	Abstract 1.5
7~12	第18回結晶成長国際会議(ICCGE-18)(名古屋)	日本学会議他	TEL 070-5268-6664 secretariat@iccg18.jp http://www.iccg18.jp/	
<b>9月</b>				
5~9	第5回ICFSMA'16国際会議(強磁性形状記憶材料に関する国際会議)(仙台)	第5回ICFSMA'16国際会議組織委員会・大森(東北大)	TEL 022-795-7323 icfsma@material.tohoku.ac.jp http://www.material.tohoku.ac.jp/~icfsma/	事前予約 6.30
21~23	日本金属学会秋期講演大会(大阪大学豊中キャンパス)	日本金属学会	annualm@jim.or.jp TEL 022-223-3685 FAX 022-223-6312	
<b>11月</b>				
1~4	The 11th International Symposium on Advanced Science and Technology in Experimental Mechanics (11th ISEM '16-Ho Chi Minh)(Vietnam)	日本実験力学会・小林(新潟大)	nmtam@hcmut.edu.vn TEL +84-8-38-647-256 ext. 5590 http://www.jsem.jp/	
<b>12月</b>				
7	エコデザイン・プロダクト&サービスシンポジウム(EcoDePS)2016(東京理科大)	エコデザイン学会連合・宇野	secretariat@ecodenet.com FAX 03-5840-8142	
<b>2017年9月</b>				
6~8	日本金属学会秋期講演大会(北海道大学)	日本金属学会	annualm@jim.or.jp TEL 022-223-3685 FAX 022-223-6312	

### 2015, 2016年度会報編集委員会 (五十音順, 敬称略)

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

まてりあ 第55巻 第3号 (2016) 定価(本体1,700円+税) ¥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

発行日 2016年3月1日

〒980-8544 仙台市青葉区一番町一丁目14-32

発行人 山村英明

TEL 022-223-3685

印刷所 小宮山印刷工業株式会社

FAX 022-223-6312

発売所 丸善雄松堂株式会社

郵便振替口座 02210-2-5592

〒105-0022 東京都港区海岸 1-9-18

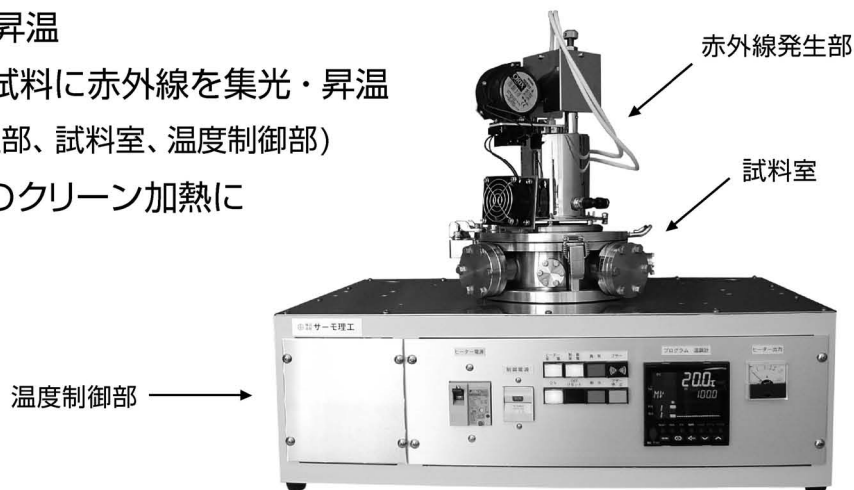


金属化学入門シリーズ		巻	会員特価	定価	送料	申込部数
1011	金属物理化学	第1巻	972 + 税	1,456 + 税	360	
1012	鉄鋼製錬	第2巻	1,800 + 税	2,400 + 税	360	
1013	金属製錬工学	第3巻	1,000 + 税	1,500 + 税	360	
1014	材料電子科学 (改訂)	第4巻	2,000 + 税	2,500 + 税	360	
講座・現代の金属学 材料編						
1021	材料の構造と物性	第1巻	2,915 + 税	3,883 + 税	360	
1022	ミクロ組織の熱力学	第2巻	1,905 + 税	2,500 + 税	360	
1023	材料強度の原子論	第3巻	2,096 + 税	2,800 + 税	360	
1024	鉄鋼材料	第4巻	1,800 + 税	2,400 + 税	360	
1025	非鉄材料	第5巻	1,800 + 税	2,400 + 税	360	
1026	原子力材料	第8巻	1,496 + 税	2,000 + 税	360	
1027	金属表面物性工学	第9巻	1,458 + 税	1,942 + 税	360	
1028	鑄造凝固	第10巻	1,553 + 税	2,039 + 税	360	
1029	金属加工	第11巻	1,600 + 税	2,100 + 税	360	
講座・現代の金属学 製錬編						
1037	製錬工学	第3巻	2,915 + 税	3,981 + 税	360	
講座・現代の金属学 金属工学シリーズ						
1054	金属・合金の強度	第4巻	1,200 + 税	1,700 + 税	360	
1055	電子材料	第6巻	705 + 税	1,000 + 税	360	
1056	金属の物性	第7巻	2,305 + 税	2,900 + 税	360	
1057	磁性材料	第8巻	2,305 + 税	2,700 + 税	360	
その他の単行本						
1062	金属用語集	改訂増補版	1,458 + 税	1,942 + 税	360	
1063	材料工学の先端実験技術		1,096 + 税	3,000 + 税	500	
1167	日本金属学会における材料戦略		953 + 税	953 + 税	360	
1176	材料開発のための顕微鏡法と応用写真集		10,000 + 税	10,000 + 税	500	
1180	医療用金属材料概論		1,905 + 税	2,381 + 税	430	
1181	バイオマテリアル研究の最前線		5,900 + 税	5,900 + 税	700	
セミナーテキスト						
1134	循環型社会における環境・リサイクル技術	(93)	667 + 税	1,714 + 税	360	
1135	自動車の電動化の進展と望まれる材料特性	(94)	667 + 税	2,381 + 税	360	
1137	最先端のスピエレクトロニクス技術の基礎と応用	(96)	858 + 税	2,858 + 税	360	
1140	環境/エネルギー関連機器用高温耐食材料の保護皮膜の生成と破壊	(99)	1,143 + 税	3,810 + 税	360	
1141	非シリコン半導体の現状と展望	(100)	715 + 税	2,381 + 税	360	
1142	原子炉材料の照射損傷	(101)	715 + 税	2,381 + 税	360	
1143	水素貯蔵の材料科学	(102)	715 + 税	2,381 + 税	360	
1144	金属材料と人間との共生	(103)	715 + 税	2,381 + 税	360	
1145	ナノ構造制御した触媒・光触媒の設計・評価・応用	(104)	715 + 税	2,381 + 税	360	
1146	機能元素のナノ材料科学	(105)	715 + 税	2,381 + 税	360	
1147	バルクナノメタル 構造用金属材料の新たな可能性	(106)	715 + 税	2,381 + 税	360	
1148	高温過酷環境を制する耐食材料/コーティングのさらなる挑戦	(107)	2,286 + 税	3,810 + 税	360	
1149	材料科学的アプローチによる太陽電池研究の最前線	(108)	1,429 + 税	2,381 + 税	360	
1150	構造材料の元素戦略	(109)	1,429 + 税	2,381 + 税	360	
1151	次世代永久磁石材料をめざして一磁石材料の微細構造と保磁力	(110)	1,429 + 税	2,381 + 税	360	
1152	材料における拡散-基礎および鉄鋼材料における拡散と関連現象	(111)	1,700 + 税	2,800 + 税	360	
1153	半導体における点欠陥と拡散 - 基礎と最先端デバイス	(112)	1,400 + 税	2,300 + 税	360	
シンポジウム予稿集						
1762	材料の資源生産性の評価手法の前進	2005-1	477 + 税	1,000 + 税	270	
1763	規則合金系材料の現状と磁気記録への展開	2005-2	477 + 税	1,000 + 税	270	
1764	シリコンデバイスの先端技術・材料開発の展望	2006-1	477 + 税	1,000 + 税	270	
1765	自然に学ぶ超低環境負荷型材料技術の可能性	2007-1	477 + 税	1,000 + 税	270	
1766	長周期積層構造マグネシウム合金の現状と今後の課題	2008-1	477 + 税	1,000 + 税	270	
1767	チタン合金の研究・開発最前線	2008-2	477 + 税	1,000 + 税	270	
1768	鉄鋼材料における元素機能	2008-3	477 + 税	1,000 + 税	270	
1769	スピントロニクス・ナノ磁性材料の進展と将来展望	2008-4	477 + 税	1,000 + 税	270	
1770	核融合システムにおける材料開発課題	2009-1	477 + 税	1,000 + 税	270	
1771	リチウム電池の研究開発動向と材料学的課題	2010-1	1,000 + 税	1,000 + 税	270	
1772	バイオメタルサイエンス研究の最前線	2011-1	1,000 + 税	1,000 + 税	270	
1773	環境・医療 IT調和型 デバイス、及び材料の最前線	2011-2	1,000 + 税	1,000 + 税	270	
1774	チタン合金の新展開 チタンが切り拓く新用途と新技術	2012-1	1,000 + 税	1,000 + 税	270	
1775	シンクロ型LPSO構造の材料科学	2012-2	1,000 + 税	1,000 + 税	270	
1776	中性子・材料科学と新しいJMTR	2013-1	1,000 + 税	1,000 + 税	270	
1777	3Dプリンターによる次世代ものづくり	2014-1	1,000 + 税	1,000 + 税	270	

# 試験試料のクリーン加熱

## 集光照射式赤外線真空炉 IVF298W

- 1500℃まで高速昇温
- 真空チャンバー内試料に赤外線を集光・昇温
- 一体型 (赤外線発生部、試料室、温度制御部)
- 真空、ガス中試料のクリーン加熱に

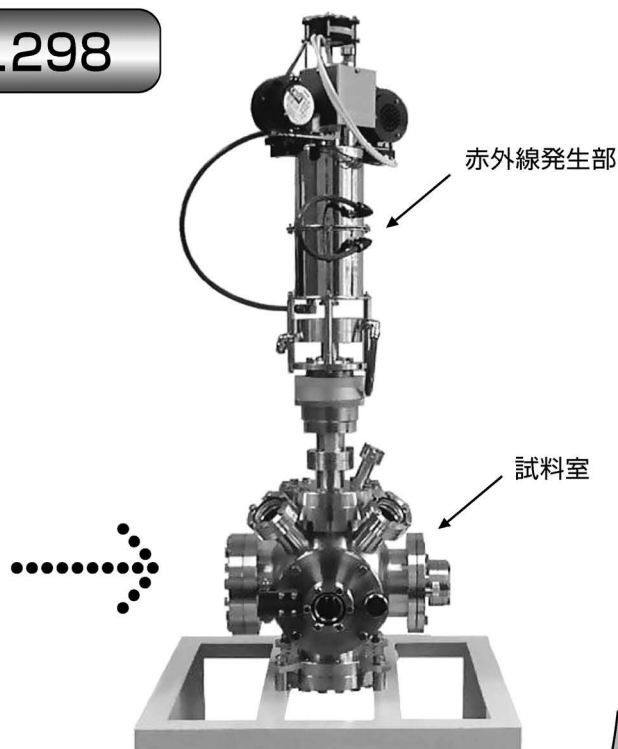


## 赤外線導入加熱装置 GVL298

- 1500℃まで1分で昇温
- 周りを加熱せず試料のみクリーン加熱
- 研究室真空システムに取付可能
- 磁性体材料等の磁場中昇温、強磁場中 Fe・Co合金の焼鈍 他



【試料室内】



★ 日本金属学会付設展示会 (東京理科大学葛飾キャンパス) 2016年3月23日～25日に出席

依頼試験も受け付けております。下記にお問合せください。



熱と共に歩む

株式会社サーモ理工

〒181-0013

東京都三鷹市下連雀8-7-3 三鷹ハイテクセンター

TEL.0422-76-2511 FAX.0422-76-2514

e-mail : sekigai@thermo-r.co.jp

★詳しくはWEBで [サーモ理工](#) [検索](#)

## ガラス物性データベース SciGlass 7.7

価格(税別) ¥700,000.- (一般向け) ¥400,000.- (教育機関向け)

### ■ガラス

252,000件の酸化ガラス、15,860のハロゲン化ガラス、3,3808のカルコゲナイドガラスなど338,101件のガラス。

### ■物性

1,000,000件以上の実測値と合成法、測定法の情報。

### ■物性推測計算

100通り以上の推測法で16種類の物性を推測。実測値との比較プロット。

### ■最適ガラスの検索

### ■光学スペクトルデータ (UV, NIR)

Class #	SiO <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> O	HgO	d (g/cm <sup>3</sup> )	α <sub>D</sub> (°/K) in temperature °C	α <sub>D</sub> (°/K) in temperature °C	T <sub>g</sub> (°C)	M <sub>w</sub>
14876	69.12	46.16	-	2.572	174	179	460	46
14880	47.56	44.95	-	2.559	179	197	456	49
14891	47.71	42.37	-	2.558	179	180	462	50
14882	46.92	41.14	-	2.562	166	172	462	50
14883	46.29	38.48	-	2.548	157	165	470	52

Value	Unit
1.688	
Composition	
SiO <sub>2</sub>	29.68
B <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	18.74
La <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	5.82
BeO	20.94
CoO	3.10
TiO <sub>2</sub>	16.83
ZrO <sub>2</sub>	3.40

システムプラットフォーム: Windows 2000/XP/Vista/7

## 化学プロセス用の物性データベース

# DIPPR with DIADEM pro

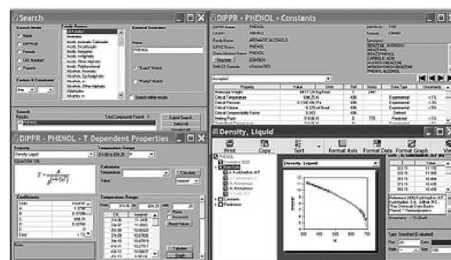
(Design Institute for Physical Property Data)

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 (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 4.0

価格(税別) ¥160,000.- マルチユーザー ¥260,000.-

### 検索条件

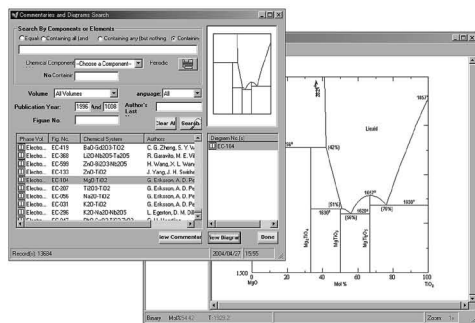
- 成分系、元素記号
- 著者、出典誌名、出版年
- 状態図番号

### 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)



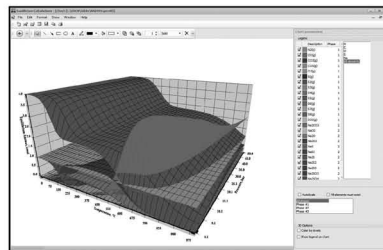
システムプラットフォーム: Windows XP/Vista/7

## 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

最高温度2,800℃

純度5PPM以下

## 汚れや飛散のないカーボン材料

■真空、高温炉内材料一式

■炉内部品取替工事

■炭素繊維高温材料

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



## メカニカルカーボン工業株式会社

本社・工場：〒247-0061 神奈川県鎌倉市台 5-3-25 TEL.0467(45)0101 FAX.0467(43)1680代

事業所：東京 03(5733)8601 大阪 06(6586)4411 福岡 092(626)8745

周南 0834(82)0311 松山 0899(72)4860 郡山 024(962)9155

工場：広見工場 0895(46)0250 野村工場 0894(72)3625 新潟工場 0254(44)1185

http://www.mechanical-carbon.co.jp E-mail: mck@mechanical-carbon.co.jp

## 特殊遊星回転ボールミル（加熱式、冷却式）

### 加熱式 遊星回転ボールミル LP-M2H



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

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

### 冷却式 遊星回転ボールミル LP-M2C

従来の遊星回転ボールミルでは、高速回転中の粉碎エネルギーや、摩擦による避けられない熱が生じ、低融点、或いは弱熱性の試料を粉碎することは困難でした。冷却式のLP-M2Cは運転中に粉碎エリア内全体を強力に冷却し、粉碎容器内部での発熱を常温に近い約20～40℃以下に抑えるので、試料への熱の影響は殆どありません。粉碎容器は2個掛けて、容量は各45mlです。粉碎容器は、メノウ、部分安定化ジルコニア、Hiアルミナ、タングステン等、数種類の材質があり、試料に適した材質の選択ができます。振動センサー、温度表示が付いています。

尚、有償でレンタル機もご利用頂けますのでお問い合わせ下さい。

- 電源：100V 50/60Hz
- モーター：200W
- 回転数：台盤の回転数 最大500rpm
- 外形寸法：W640×D672×H313mm
- 重量：約30kg
- タイマー：デジタル減算式、最大99時間59分



※レンタルもあります



株式会社 伊藤製作所

〒103-0022 東京都中央区日本橋4-6-7 TEL:03-3270-9901 FAX:03-3270-9906  
www.itoh-mill.com/ E-mail: itousei@itoh-mill.com

想像を超えた感動を手に入れる。

※社内行事：富士登山にて撮影

販売品目

- 各種グローブボックス ●ガス循環精製装置
- クリーンオープン ●真空デシケータ ●ドライルーム
- 封止装置 ●ラミネート装置 ●高気密恒温恒湿室
- 大型システム ●クリーンチェンバー
- その他特殊試験、製造装置の制作いたします。

※当社のすべての製品は、日本国内でのみご利用いただけます。



株式会社 美和製作所

本社：〒567-0028 大阪府茨木市畑田町11番50号

TEL 072-625-1138 FAX 072-625-1178

東京営業所：〒101-0042 東京都千代田区神田東松下町32番地

TEL 03-5256-1138 FAX 03-5256-1145

<http://www.miwass.co.jp> [info@miwass.co.jp](mailto:info@miwass.co.jp)

