

Materia Japan

- 金属なんでもランキング！～原子半径～
- TT690 合金の長期耐応力
腐食割れ性に関する研究
- アモルファス GeSn 結晶化における Sn の振る舞い
- 入門講座 微小領域における金属材料の材料力学
～Ⅳ.微小金属材料の引張及び曲げ変形とヤング率の計測～
- ミニ特集「若手研究グループ活動報告」

まてりあ

Vol.59 MTERE2 59 (12) 647～690 (2020)

2020 **12**



マテリアルズインフォマティクスによる材料ゲノムの解析との連携！ 効率的な材料内部組織の三次元可視化！

全自動シリアルセクションング3D顕微鏡
Fully-automated serial sectioning 3D microscope

Genus 3D™

**HDR機能
新搭載！**

新搭載！ 設定条件ライブラリー

設定値、動作設定、消耗品の自動選定

全自動！ 電解エッチング

チタン、アルミ、ニッケル、ステンレス等

NEW！ 純正消耗品

逐次研磨像

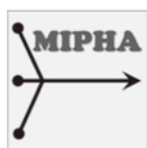
3D

Nakayamadenki Co., Ltd.



材料情報統合システム“MIPHA¹⁾”および“shinyMIPHA²⁾”販売開始！

1)MIPHA: スタンドアロン, 2)shinyMIPHA: クラウドシステム



高度な材料組織形態解析と順・逆解析を搭載

・MIPHA: 機械学習型画像処理、連結性、分岐性、曲率解析、metric特徴量

・shinyMIPHA: パーシステントホモロジー、二点相関関数、豊富な順・逆解析

国内総発売元



株式会社 新興精機

大阪営業所

大阪府吹田市広芝町7-26

TEL : 06-6389-6220 FAX : 06-6389-6221

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

営業窓口 : 池内 ikeuchi@shinkouseiki.co.jp

日本金属学会発行誌 広告のご案内

まてりあ（会報）

前付）1色1P ￥100,000 1/2P ￥60,000

後付）1色1P ￥95,000 1/2P ￥55,000

※表紙回り、カラー料金等お問い合わせ下さい。

春・秋期講演大会プログラム

後付）1色1P ￥70,000 1/2P ￥40,000

広告ご掲載についてのお問い合わせ・お申込み

株式会社 明 報 社

〒104-0061 東京都中央区銀座7-12-4 友野本社ビル

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

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

金属なんでもランキング! No. 12 原子半径647

プロムナード 第4回大規模アンケートから見える金属学会員の現状 松岡由貴648

最近の研究 TT690合金の長期耐力腐食割れ性に関する研究 米澤利夫654

TT690合金の加圧水型軽水炉一次系模擬水中での応力腐食割れき裂進展速度やき裂進展のメカニズムに関するここ10数年間の研究報告、種々の国際会議での議論等から、プラント寿命末期迄の長期耐力腐食割れ性評価を紹介。

アモルファス GeSn の結晶化における Sn の振る舞い 石丸 学 仲村龍介662

状態図に存在しない高 Sn 濃度 GeSn 結晶の形成過程を透過電子顕微鏡その場観察により調査。アモルファスの結晶化時に Sn が過冷却液体状態として存在。

入門講座 微小領域における金属材料の材料力学
—Ⅳ. 微小金属材料の引張及び曲げ変形とヤング率の計測— 曾根正人669

金属材料の微小材料試験により引張及び曲げ変形がどのように起こるかを実験結果に基づいて議論すると同時に、レーザードップラー法による実効ヤング率の計測を解説。

ミニ特集「若手研究グループ活動報告」

No. 1: 若手研究グループ活動報告～鉄鋼メタラジー研究グループ～
中田伸生676

No. 2: 超高耐食性金属材料の開発研究
—レーザ積層造形によるマルテンサイト系ステンレス鋼の高耐食性化—
堤 祐介 石本卓也 上田恭介 丸山晋平 久世哲嗣 松垣あいら 蘆田茉希 陳 鵬679

No. 3: 多様な先端観察・測定法を用いた組織の定量と力学特性解析への適用
宮嶋陽司 宮澤知孝685

科学館めぐり トヨタ産業技術記念館(名古屋市) 山本剛久688

本会記事 会告691 掲示板695 会報編集委員会からのお知らせ701 新入会員702	会誌・欧文誌12号目次705 次号予告706 行事カレンダー707 追悼708
--	--

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

今月の表紙写真 通常プロセスより高い耐食性を発揮するレーザ積層造形体(サイズ: 11 mm × 11 mm × 11 mm)。(堤 祐介 石本卓也 上田恭介 丸山晋平 久世哲嗣 松垣あいら 蘆田茉希 陳 鵬 著 681頁 図1より)

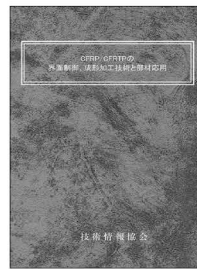
表紙デザイン: 北野 玲
複写をご希望の方へ

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

書籍ガイド

CFRP/CFRTPの界面制御、成形加工技術と部材

岩下哲雄、杉浦直樹ほか全60名
A4判・約500頁 2020年12月発刊
定価：80,000円（税別）
アカデミック割引価格：30,000円（税別）
発行所名：（株）技術情報協会
ISBN：978-4-86104-811-1
〒141-0031
東京都品川区西五反田2-29-5
日幸五反田ビル8F
TEL：03-5436-7744
FAX：03-5436-7745
URL：http://www.gijutu.co.jp/



試読可（約1週間）

CFRP・CFRTPの部材応用に向けた、母材樹脂の選定、母材樹脂、炭素繊維間の界面制御、層間剥離特性評価、CFRP積層板の層間剥離特性、レーザー、超音波を用いた非破壊検査、複雑形状に対応した成形技術、クラックの進展評価、穴あけ加工における工具選定、実際の部材開発事例などを詳細に解説。

触媒の劣化対策、長寿命化

薩摩篤、清水研一ほか全81名
A4判・約550頁 2020年11月発刊
定価：80,000円（税別）
アカデミック割引価格：30,000円（税別）
発行所名：（株）技術情報協会
ISBN：978-4-86104-814-2
〒141-0031
東京都品川区西五反田2-29-5
日幸五反田ビル8F
TEL：03-5436-7744
FAX：03-5436-7745
URL：http://www.gijutu.co.jp/



試読可（約1週間）

どういったメカニズムで触媒は劣化するのか？前処理剤、合金化、触媒の微粒子化・担体への分散技術、第三成分（プロモーター）の添加、活性金属の複合化などの劣化対策。シタリング（焼結）、炭素析出評価、担体構造の破壊（スポーリング）、耐硫黄性、画像で見る触媒劣化状態の評価。

クリーンルームの微小異物・汚染物対策と作業員教育

難波重典、山崎晶次郎ほか全55名
A4判・523頁 2020年10月発刊
定価：80,000円（税別）
アカデミック割引価格：30,000円（税別）
発行所名：（株）技術情報協会
ISBN：978-4-86104-805-0
〒141-0031
東京都品川区西五反田2-29-5
日幸五反田ビル8F
TEL：03-5436-7744
FAX：03-5436-7745
URL：http://www.gijutu.co.jp/



試読可（約1週間）

- ・人から生まれる異物・発塵への対策—作業員教育でどこまでリスクを抑制できるのか？そのポイント
- ・人が持ち込む異物・発塵への対策—清浄度クラスに応じてどれくらい厳しくするのか？その判断基準
- ・各産業分野におけるクリーンルームの異物対策—製造プロセス、製造機器から生まれる異物の事例

工場・研究所における災害・事故およびリスクの可視化と対策

中村昌允、半田安ほか全63名
A4判・770頁 2020年8月発刊
定価：80,000円（税別）
アカデミック割引価格：30,000円（税別）
発行所名：（株）技術情報協会
ISBN：978-4-86104-802-9
〒141-0031
東京都品川区西五反田2-29-5
日幸五反田ビル8F
TEL：03-5436-7744
FAX：03-5436-7745
URL：http://www.gijutu.co.jp/



試読可（約1週間）

製造ラインの省人化への対応。AIやIoTを活用した次世代の作業員教育。容器配管のメンテや薬品保管、トリオンセンサ、ドローンの活用など工場IoT化ノウハウ。免震、風水害や停電や雷害への対策、新型コロナウイルスへの工場での対応、BCP・災害発生後の活動維持体制などを詳説。

宇宙ビジネス参入の留意点と求められる新技術、新材料

小塚莊一郎、久保田孝ほか55名
A4判・478頁 2020年4月発刊
定価：80,000円（税別）
アカデミック割引価格：30,000円（税別）
発行所名：（株）技術情報協会
ISBN：978-4-86104-817-3
〒141-0031
東京都品川区西五反田2-29-5
日幸五反田ビル8F
TEL：03-5436-7744
FAX：03-5436-7745
URL：http://www.gijutu.co.jp/

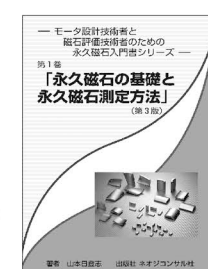


試読可（約1週間）

民間参入を後押しする法制度、支援体制／小型ロケット、衛星などの部品、材料、電子機器の要求特性、参入方法／宇宙産業特有の法的リスク／民間企業が手掛けるべき研究開発テーマ／衛星データの利活用の現状とビジネスアイディアの見つけ方／宇宙飛行中の栄養管理と宇宙食／宇宙での植物栽培／宇宙旅行

永久磁石の基礎と永久磁石測定方法（第3版）

著者 工学博士 山本 日登志
B5判 2019年発刊
本体価格：2,300円（送料別）
ネオジコンサル社
お問い合わせは、TELまたはE-mail。
TEL：080-2442-9009
E-mail：hitoshiad_0330@yahoo.co.jp
https://hitoshiad26.sakura.ne.jp
書籍内容抜粋は以下参照下さい；
山本HPメニュー ⇒ 書籍ご案内 ⇒ 書籍内容抜粋



モータ設計技術者等の永久磁石入門書。電気回路と磁気回路の類似と差異、パーミアンズ係数の考え方、減磁曲線の見方等を平易に解説。種々の永久磁石の測定方法や具体的測定例を紹介。

**研磨機・切断機
期間限定キャンペーン中!!**
詳細はお問い合わせください。



自動研磨機 **SCANDIMATIC 33305**

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



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

精密切断機 **MINICUT 4000**

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



試料埋め込み材料、アクセサリ



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

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

その他各種有効な消耗品を用意しております。

カタログおよび価格表は弊社にお問い合わせください

フリッチュ・ジャパン株式会社

本社 〒231-0023 横浜市中区山下町252
大阪営業所 〒532-0011 大阪市淀川区西中島7-2-7
福岡営業所 〒819-0022 福岡市西区福重5-4-2

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

Tel (045)641-8550 Fax (045)641-8364
Tel (06)6390-0520 Fax (06)6390-0521
Tel (092)707-6131 Fax (092)707-6131

FRITSCH “NANO 領域”

遊星型ボールミル “PREMIUM LINE”

モデル P-7 **新型**

特色

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



従来型ボールミル “CLASSIC LINE”

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



フリッチュ社が開発した
遊星型シリーズの
バイオニア機種。

世界で初めて容器ひとつで
遊星運動に成功した
ベストセラー機種

少量試料を対象にした
パワフルな機種

全機種共通の特長

- 雰囲気制御容器以外の
通常容器、ボールの材質
は、ステンレス、クローム、
タングステンカーバイド、メ
ノー、アルミナ、ジルコニア、
窒化ケイ素、プラスチック
ポリアミドの8種類。
- 乾式、湿式の両粉碎も可能。
- ISO9001、CE、TÜVの国際基準をクリア



P5



P6



P7

カタログおよび価格表は弊社にお問い合わせください

フリッチュジャパン株式会社

本 社 〒231-0023 横浜市中区山下町252
大阪営業所 〒532-0011 大阪市淀川区西中島7-2-7

URL <http://www.fritsch.co.jp>
E-mail info@fritsch.co.jp

TEL 045-641-8550 FAX 045-641-8364
TEL 06-6390-0520 FAX 06-6390-0521

金属なんでもランキング! No.12 原子半径

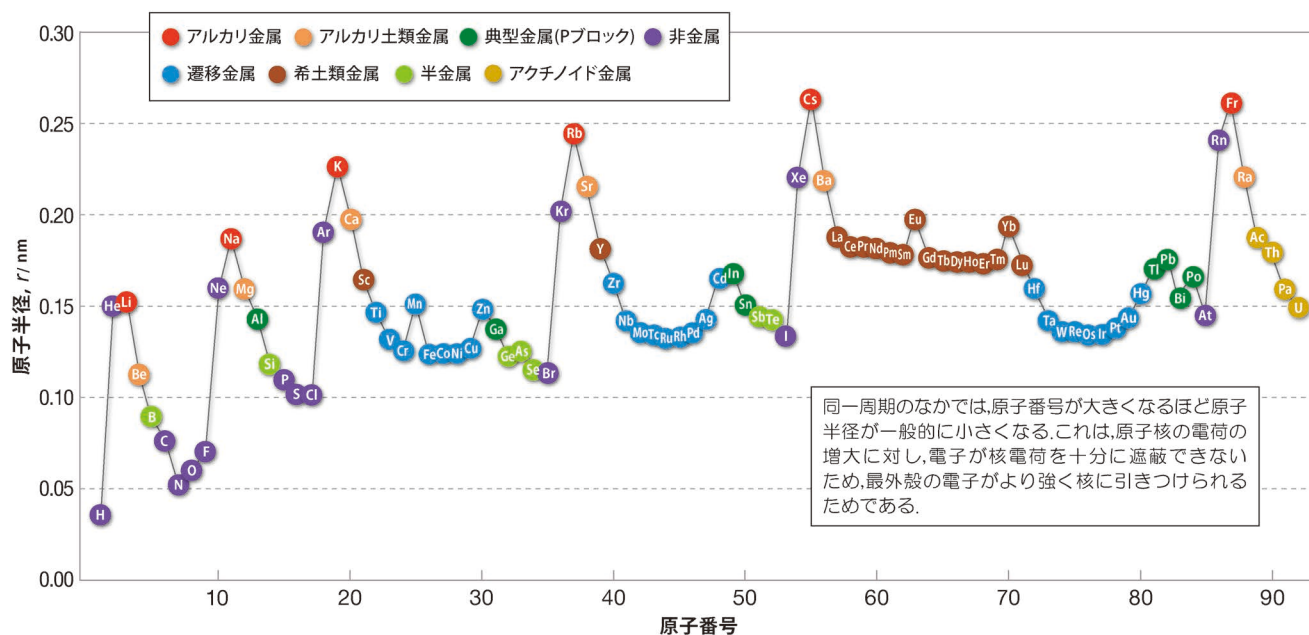


図1 各元素の原子半径。
(金属は金属原子半径、非金属は共有結合半径、希ガスはvan der Waals半径。多形変態があるものなどは、大きい方の半径を表示)

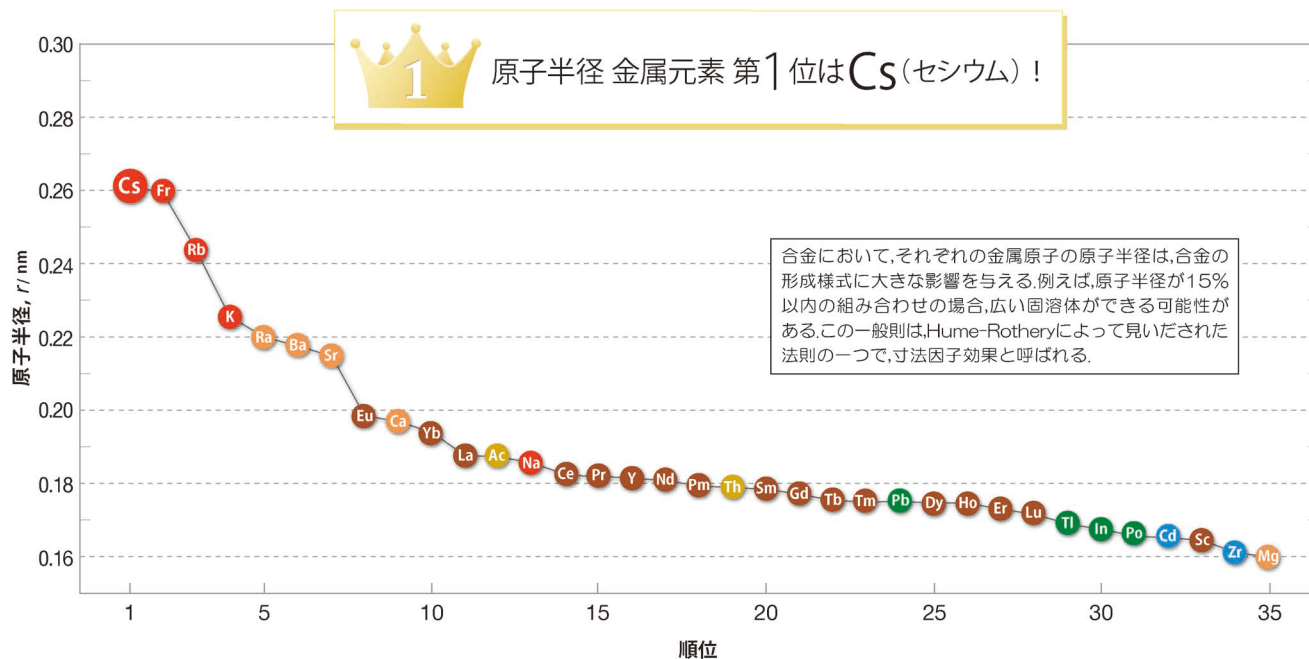
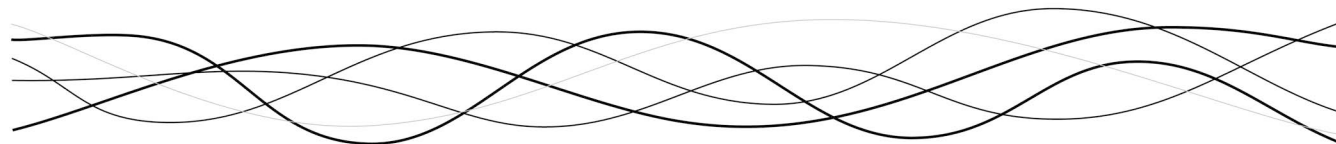


図2 金属元素の原子半径ランキング(35位まで)。

参考文献：改訂4版 金属データブック：日本金属学会編，丸善（2004）。

次号！金属素描 No. 13 銅



第4回大規模アンケートから見える 金属学会員の現状

松岡由貴*

自然科学系の学協会約110団体が加入し、2002年から運営されている「男女共同参画学協会連絡会」（以下学協会連絡会）の名は金属学会員の方もほぼ全員が聞いた事があると思います。本会もオブザーバー団体として活動に参加しています。しかし、その活動内容となると、大抵の人は良く知らないでしょう。特に男性に“男女共同参画”と付いているだけで「自分には関係ない」と思い、関心を払わない人が多いと見受けられます。

学協会連絡会の発足時は、女性科学者・技術者の研究・労働環境改善のための活動が主で、女性がライフイベントにより、仕事に割く時間を減らしたり離職せざるを得ない状況をデータで示し、育児をしながらでも働き続けられる制度の整備を働きかけてきましたが、次に若手のポスト（ポストドク、期限付き、非正規雇用など）、介護…と活動の重点領域をシフトさせてきており、最近ではワーク・ライフ・バランスを重視していると言えます。言うまでも無く、性別や国籍などで受ける格差や、期限付き職・非正規雇用で働く人が抱えている問題、介護は男女を問わず考えなければいけない課題であり、それらに無関係でいられる人はいません。そのような課題を明らかにし、改善のための提言を政府に行う、自然科学系で最も大きな団体が、学協会連絡会と言えます。

学協会連絡会はおおよそ4年に一度、大規模アンケートを行っています。ここで得られたデータが、政府への提言や様々な制度提案の土台になります。第4回は2016年に実施されました⁽¹⁾。金属学会からは**156人**の回答が得られました。これは、当時の**会員数(4951人)**の**3.2%**にあたり、回答率としては惨憺たる数値です。内訳は、男性112人：2.4%、女性44人：17.9%と回答者数は少ないですが、日本鉄鋼協会・日本金属学会男女共同参画委員会が特に注目したい設問についてそれぞれの会員の回答を分析してみると、自然科学

系全体に共通して現れる傾向と、金属学会/鉄鋼協会の特徴と思われる傾向が見えてきました。結果は会員の皆様に見ていただけるよう、本会の男女共同参画委員会ホームページにありますダイジェスト版にまとめておりますが、今回はその一部を皆さんに御紹介させていただきます。（「全回答者」と記したグラフは学協会連絡会の報告書から引用。「金属」と記したグラフはダイジェスト版からの抜粋ですので、一部グラフは金属・鉄鋼の両結果を載せております。）

金属学会は、自然科学系の中でも特に女性比率が低い工学や物理領域の団体であり、その認識は皆さんもお持ちだと思います。ではこの分野の年齢分布に着目してみると、どうでしょうか？ 回答者の年齢分布は、大規模アンケート全体の回答者（以下【全回答者】と記す）が40代前半にピークがあるのに比べ、金属は45才付近でした（図1）。【全回答者】の所属・専門分野分布をみるとポストドクが多い生物系の回答者が多く、そのため全体の年齢分布のピークが40代前半になった、と考えられます。とすると、金属学会員回答者の平均年齢が【全回答者】に対して10歳近く高いのは何を意味しているのでしょうか？

大規模アンケートは、若手の方が回答率が高いそうです。一方、2016年の金属学会員の平均年齢が40代で、回答者の平均年齢と同程度です。この結果は、金属・鉄鋼等材料分野への若手の流入が少ないことを示していると考えられます。つまり、実際に学生会員から正会員に移行する人の割合や、30代以下の会員数の年次変化の反映であるということです。

さて、それ以外の設問への回答結果についても順次紹介していきましょう。

「現在の所属機関」（図2）と「現在の役職名」は、【全回答者】と同様の傾向でした。図3は回答者年齢と現在の役職名から割り出した職階指数です。平均して男性の方が女性より

* 国立大学法人奈良女子大学；准教授（〒630-8291 奈良市北魚屋西町）

The Real Condition of the JIM Members to Have a Glimpse from “The 4th Large-Scale Survey of Actual Conditions of Gender Equality in Scientific and Technological Professions”; Yuki Matsuoka (Nara Women's University, Kitauoyanishi-machi Nara)

Keywords: survey, questionnaire, work life balance, social environment, experimental environment, natural science, scientist

2020年10月7日受理[doi:10.2320/materia.59.648]

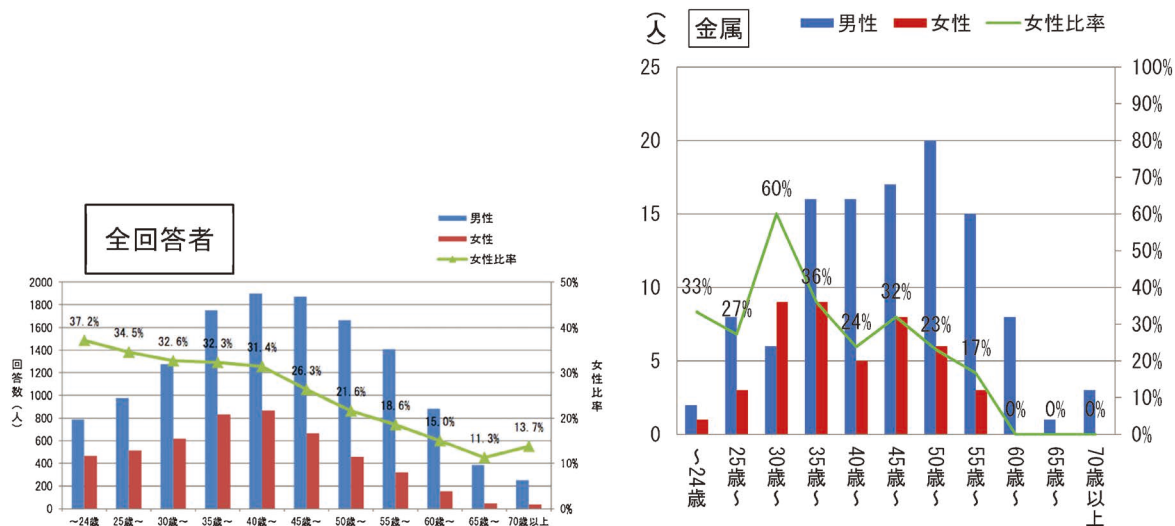


図1 アンケート参加者の年齢分布。(オンラインカラー)

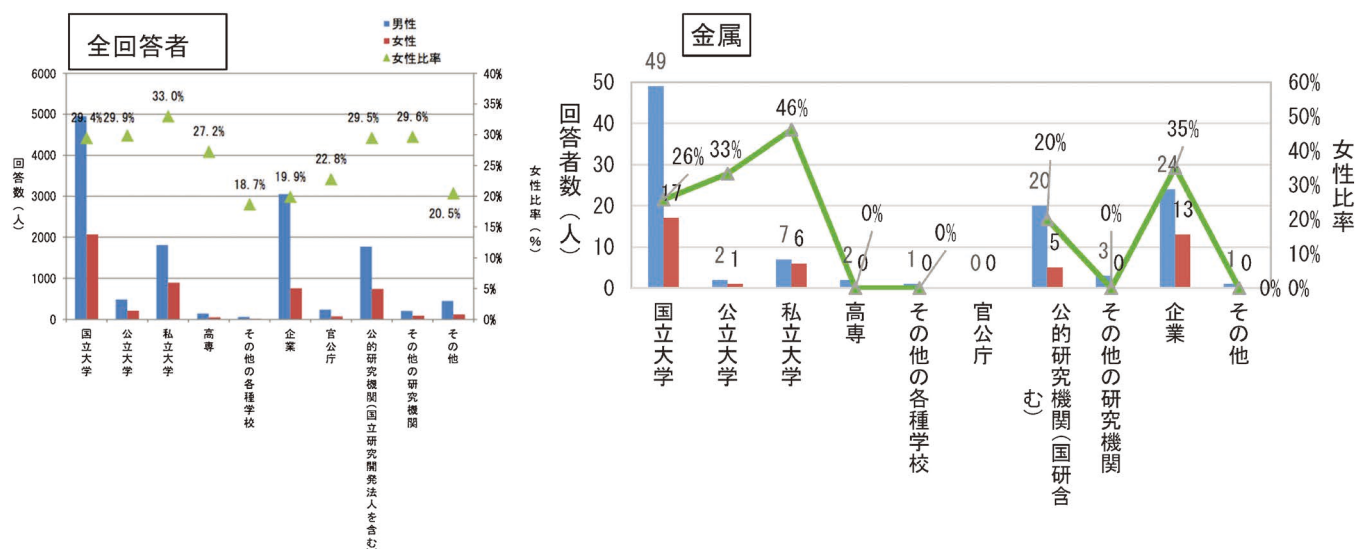


図2 アンケート参加者の現在の所属機関。(オンラインカラー)

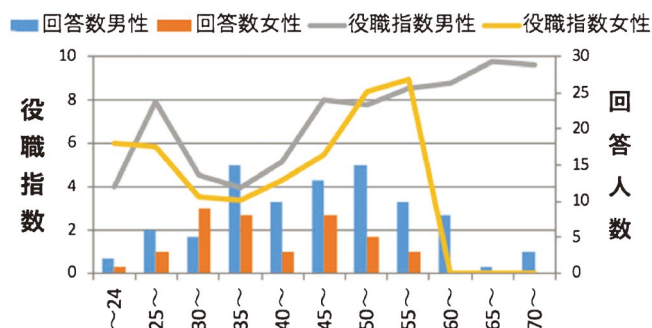


図3 アンケート参加者の役職指数。(オンラインカラー)

職階指数が高い事が分かります。

年齢分布に続き、金属学会の特徴が出ていると思われるのが雇用に関する設問でした。図4に示すように、雇用形態

は任期・契約期間無しの率が【全回答者】に比べ男女とも15%ほど高く、約75%でした。

日本国内で働き続けるとすれば、ポスドクなど任期付きの職は、“次の職を見つける労力が大い”，“身分や収入が不安定”などネガティブな側面があり、出来れば任期・契約期間無しの職に就きたい、ほとんどの人が考えていると思います。任期・契約期間無しの率の高さが、ここ数年で職に就いた人でも同じであれば、“金属材料系に進学・就職したい”という人材が増えるでしょう。30代以下の金属学会員に絞って調査数を増やし、実体を知りたいところです。

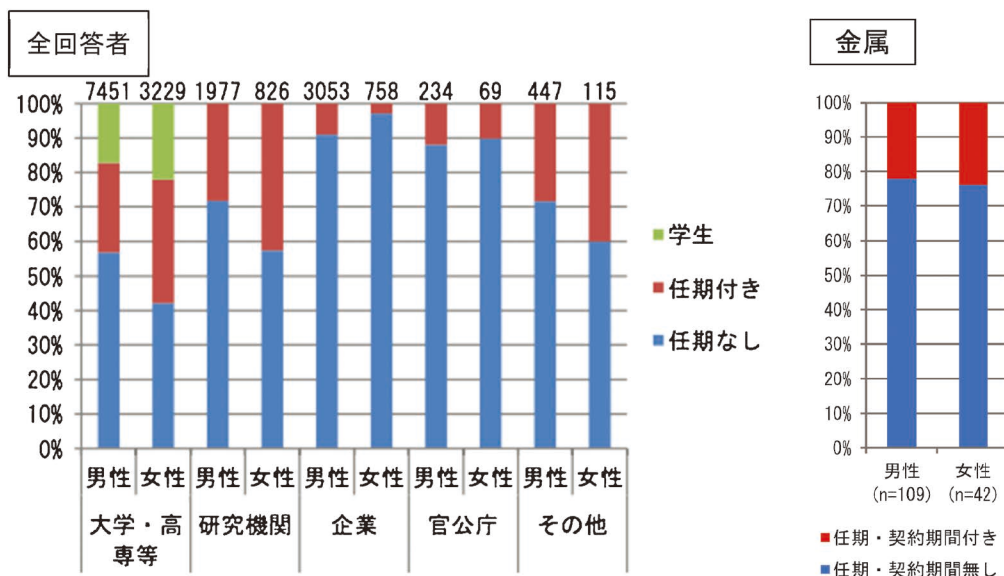


図4 現在の雇用形態。(オンラインカラー)

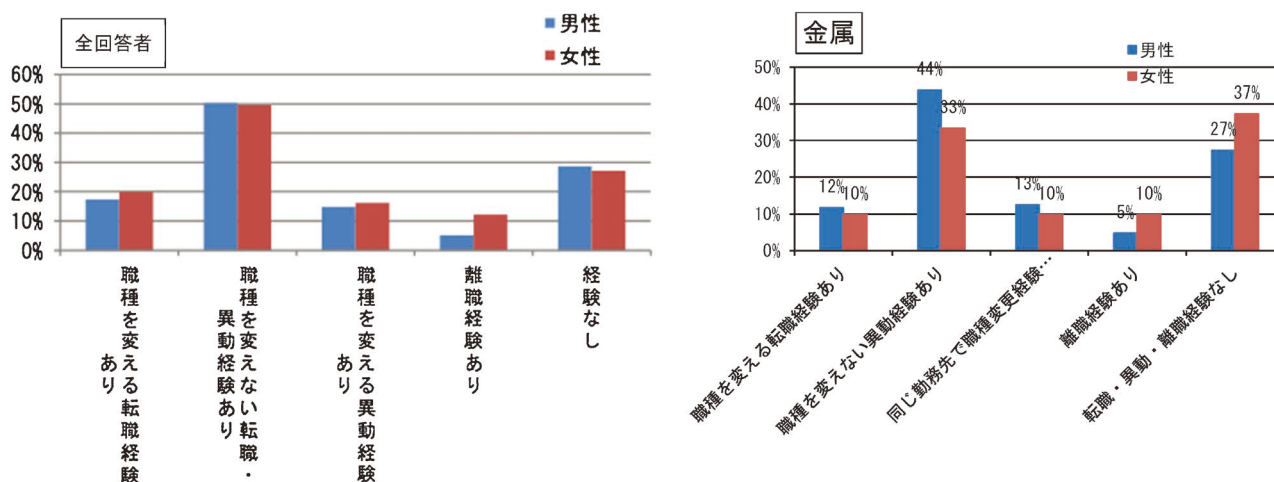


図5 離職・転職・異動経験の有無。(オンラインカラー)

図5「離職・転職・異動の有無」は【全回答者】と傾向は同様でしたが、転職・異動共に経験有りの率が【全回答者】より低いです。これは雇用形態とリンクしている結果でしょう。

図6「離職・転職・異動の理由」も、傾向は【全回答者】とほぼ同様で、男性ではキャリアアップや職務内容を上げる人が多いのに対し、女性はそれ以上に前職の任期満了による人が多く、男性は「自分の意思」により、女性は「雇用契約」により転職していると言えます。

図7「仕事と家庭の両立に必要なこと」で【全回答者】より特にポイントが高かったものを挙げると、意識改革では「仕事中心の考え方」、制度改革では「多様な休暇・休業制度」「休業中の代替要員」「業務サポート」、経済支援では「遠距離介護への経済支援」、施設やサービスでは「病児保育」「学童保育の拡充」となりました。ざっとまとめると、

意識改革：上司や職場の雰囲気は比較的良い。個々人の意識の持ち方を変えるべし。

制度改革：今よりもフレキシブルな人・勤務場所・時間での働き方と仕組みの整備を望む。

経済支援・施設やサービス：保育・病児・介護関連の充実。というところでしょうか。

全体に、今の職場での満足度は高いけれど、勤務スタイルや社会的サービスの制度が時代の変化に追いついておらず改編を望んでいる、というのが金属会員の姿だと思われます。

図8より、「研究職・技術職において一般に女性比率が低い理由」については、特に女性に「教育環境」や「社会の偏見」、「ロールモデルの少なさ」を挙げる率が高いです。「教育環境」と「家庭環境」両方に関わることですが、やはり「無意識のバイアス」が強く働いていて、女性会員はそのバイアスがかかっていることを男性よりも実感していると言えるでしょう。

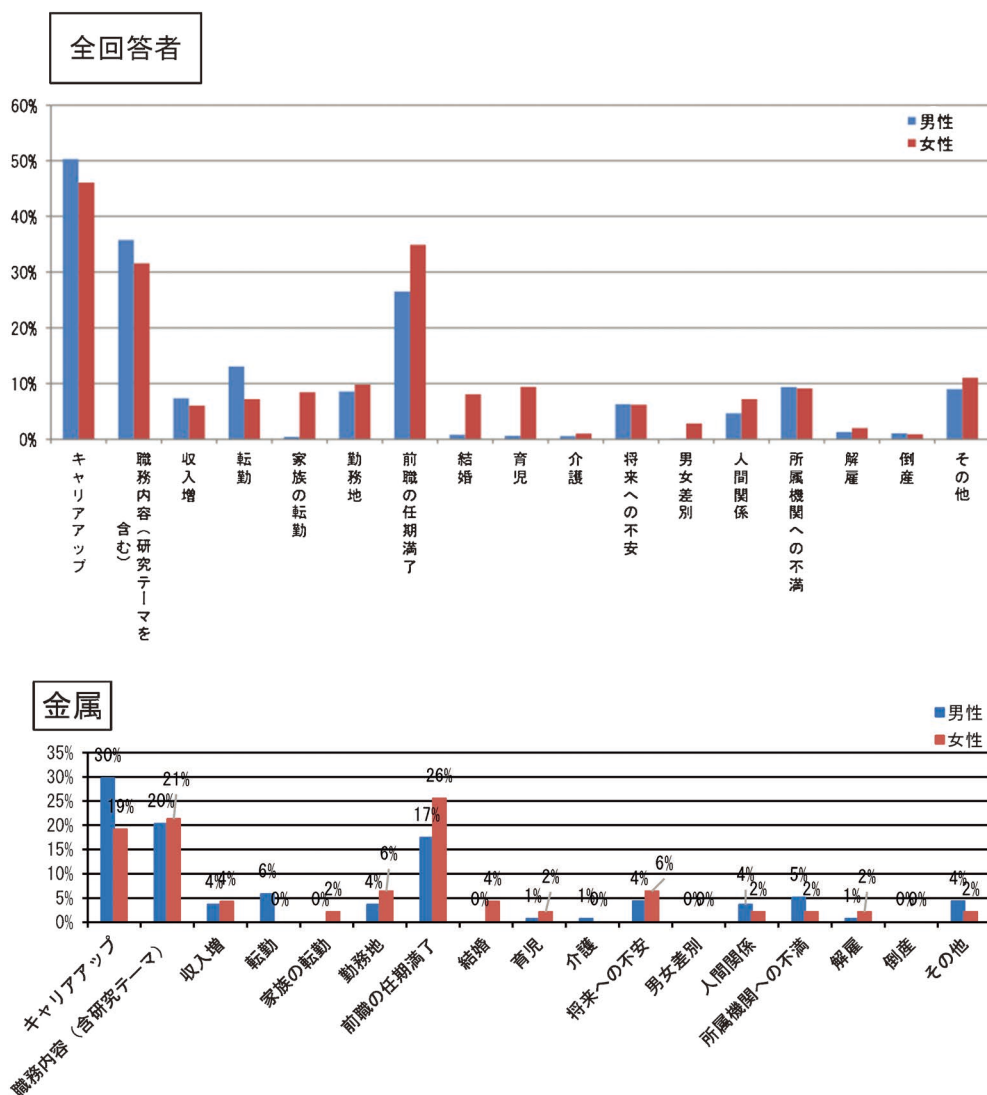


図6 転職・異動・離職経験者のその理由(複数回答可)。(オンラインカラー)

う⁽²⁾。しかし「業績評価に対する配慮不足」「男性優先の意識」のポイントは低く、実際にこの分野で働いている人は人材の評価に性別があまり関与していないと感じているようです。

念押しで記しておきますが、「仕事と家庭の両立に必要なこと」(図7)、「研究職・技術職において一般に女性比率が低い理由」(図8)とも、ここでは金属学会員の回答ポイントが【全回答者】に比べ有意に高かったものについてのみ述べましたが、上記以外のポイントが高かった項目についても改善されることが望ましいです。

さて、皆さんはグラフからどんな情報を読み取られたでしょうか？ 最初に提示した平均年齢からは、私は金属材料学分野の人材確保と今後の発展への不安を強く感じています。そもそも、金属学会員の多くが属する材料系の研究に対し、

次世代を担う年齢層の人達が魅力を感じてくれているのでしょうか？ 我々は魅力を伝えられているのでしょうか？

「仕事と家庭の両立に必要なこと」と「研究職・技術職において一般に女性比率が低い理由」の結果について先に述べた通り、金属材料の分野は、飛び込んでみれば満足度が高い世界なので、金属材料を知らない人達に偏見や思い込みを無くしてもらい、魅力ある分野だと気づいてもらう努力が必要です。各大学が個別に入試倍率に一喜一憂するのではなく、全体で小・中・高校生にアピール出来る取組(イベントに限らず、教材やweb・SNSでのアピール等を含む)を行い、広く金属材料分野の魅力を知ってもらえる、連携した活動を展開出来ないでしょうか。そのことを金属学会全体で考える時なのではないと思います。

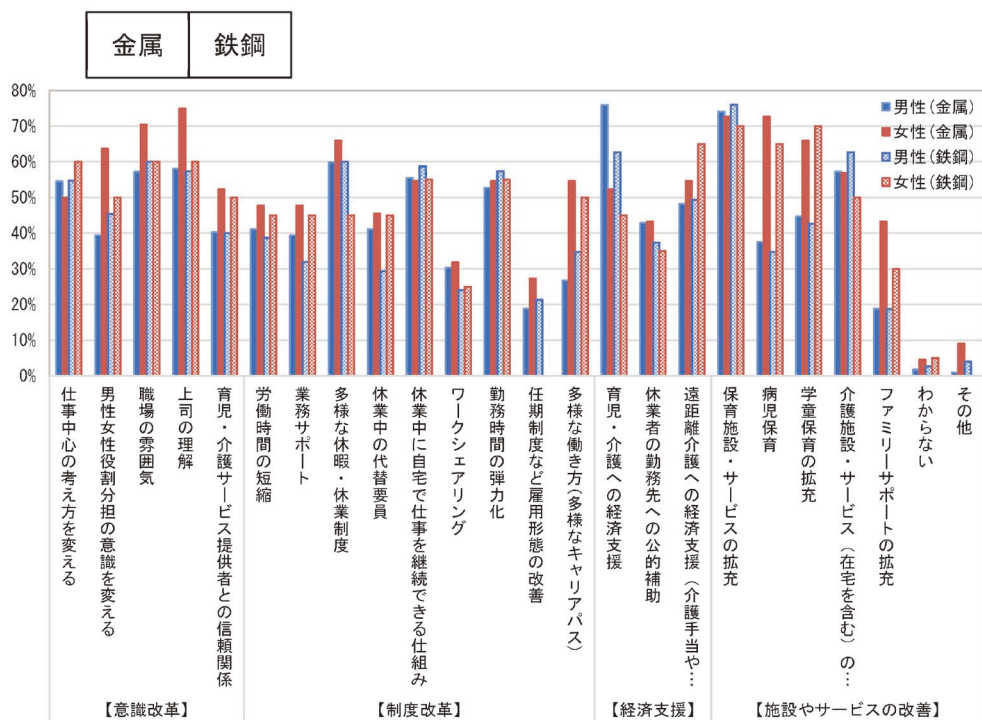
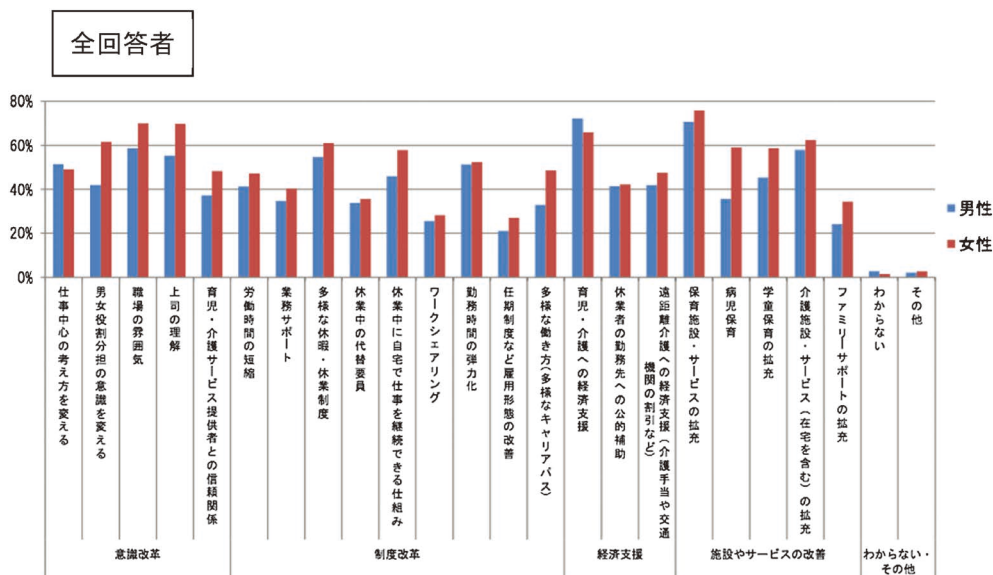


図7 仕事と育児、介護の両立に必要なこと(複数回答可)。(オンラインカラー)

他にも、年収や子供の有無、仕事時間など、ワークライフバランスや職場環境に関わる結果について集計した結果をダイジェスト版に掲載しています。ダイジェスト版は金属学会ホームページ内「分科会・研究会」→「男女共同参画委員会」からダウンロードしていただけます。是非一度ご覧下さい。

第5回大規模アンケートが近々行われる見込みです。我々の研究を含む労働一般と生活環境をより良くするための提

言に繋げるために、また、金属学会員にとってより良い学会運営を行うために、一人でも多くの方が回答していただけますよう、御協力をよろしくお願い致します。

最後になりましたが、今回の取りまとめ役を務めて下さった九州大学 尾崎由紀子先生、東京大学 御手洗容子先生を始めとするワーキンググループの皆さんに御礼を申し上げます。

TT690合金の長期耐応力腐食割れ性に関する研究

米 澤 利 夫*

1. は じ め に

筆者は、37年ほど前、当時の三菱重工業㈱の同僚や住友金属工業㈱(当時の社名、現日本製鉄㈱)の方々と共に、足掛け8年ほどかけて加圧水型軽水炉(PWR: Pressurized Water Reactor)の一次冷却水中および二次冷却水中での耐食性に優れた蒸気発生器伝熱管材(SG Tube: Steam Generator Tube)としてTT690合金【溶体化処理後700℃で15時間の時効処理(TT: Thermal Treatment)を施したNi基30Cr-9Fe合金】を開発・実用化する事に成功した⁽¹⁾⁽²⁾。爾來、TT690合金は世界中のPWRでSG Tubeのみでなく、一次冷却系の各種耐圧部材に、従来のMA600合金【930～1,000℃で焼鈍(MA: Mill Anneal)仕上げのNi基15Cr-9Fe合金】に替わるPWR一次系水中での耐応力腐食割れ性(耐PWSCC性: 耐Primary Water Stress Corrosion Cracking性)に優れた材料として多用されてきており、現在までに既に30年近く一次冷却水環境下で全くSCCは検出されておらず、優れた成績を収めている⁽³⁾。

しかし、軽水炉用材料には、火力、水力発電用や他工業用の材料では例を見ない極度の安全性が求められ、炉寿命末期までの使用部材の信頼性実証が求められている。国内では、軽水炉の寿命は通常40年、寿命延長が認められても最長60年と定められた⁽⁴⁾が、米国では、軽水炉の寿命は当面40年、申請によって20年の寿命延長が、最近ではさらに20年寿命延長して計80年が検討されており、フランスでは70年が検討されている⁽⁵⁾。そのような背景の下で、米国原子力規制委員会(US NRC: United States Nuclear Regulatory Commission)では、高経年化した軽水炉用材料の健全性確認の研究が、極めて活発に推進されてきている。NRCでは、過去のPWRにおける不具合事象に対する対応への反省から、たとえLBB(Leak Before Break: 配管等が破断前に漏れを検出することで破断事故を防止できる)事象が成立する部材であっても破断確率を評価すべく、xLPR(Extremely Low

Probability of Rupture)プロジェクト「部材が極度の安全性を維持するための確率論的評価手法を確立するための研究プロジェクト」を2011年から立ち上げ、推進してきている⁽⁶⁾。

そのxLPRプロジェクトの一環としてNRCでは、「TT690合金では既にSCCき裂が発生しているものと想定して、SCCき裂がTT690合金使用部材を貫通するまでの進展速度評価が可能なSCCき裂進展速度評価式の確立と、TT690合金使用部材の定期検査基準制定に向けた取り組み」を進めている。また、米国電力研究所(EPRI: Electric Power Research Institute)はNRCからの委託を受け、TT690合金のSCCき裂進展速度評価式策定の為に、「世界6か国の大学、研究機関、プラントメーカー、電力会社等のNi基合金のPWSCCき裂進展速度に関する14人の専門家から成る“PWSCC CGR Expert Panel”(PWSCCき裂進展速度専門家会議)」を設けた⁽⁷⁾。筆者はその専門家会議の一員として、2014年から2017年末まで足掛け4年をかけ、2カ月に1度の割合で開催される会議(Web会議を含む)に参加し、議論を続けてきた。この評価式には、筆者らの国内実機用TT690合金を用いたSCCき裂進展速度データをも含まれ、2018年初頭に米国関係機関のレビューを受けた後、EPRI MRP-386として公表された⁽⁸⁾。

その後もこのxLPRプロジェクトは継続推進されており、現在は、100年程度迄のPWR運転条件下で、TT690合金に長範囲規則不規則変態(LRO: Log Range Ordering)や、短範囲規則不規則変態(SRO: Short Range Ordering)を生じて、PWR一次冷却水環境下でのSCCき裂進展速度が著しく増大することはないかとの研究が進められつつある⁽⁹⁾。

本報告は、TT690合金のSCCき裂進展速度やSCCメカニズムに関するここ10数年間の、内外の研究報告、筆者らの研究報告等に対する種々の国際会議での議論等の概要を纏めたものであり、PWR用TT690合金の高経年化に伴う信頼性評価に資する事が出来れば幸いである。

* 東北大学未来科学技術共同研究センター；シニアリサーチフェロー(〒980-8579 仙台市青葉区荒巻字青葉6-6-10)
Studies on Long-term Stress Corrosion Cracking Resistance for TT Alloy 690; Toshio Yonezawa (New Industry Creation Hatchery Center, Tohoku University, Sendai)
Keywords: crack growth rate, cold work, cavity, grain boundary
2020年7月29日受理[doi:10.2320/materia.59.654]

2. TT690合金の SCC き裂進展速度に及ぼす溶製方法、冷間加工の影響

2007 年、有岡らが非公開の国際会議で⁽¹⁰⁾、D. J. Paraventi らが公開の国際会議で⁽¹¹⁾、図 1 に示すように、「強加工(20%以上の冷間圧延)を施した TT690合金の PWR 一次冷却系模擬水中での SCC き裂進展速度は比較的大きく、MA600合金の 1/5~1/10 程度となる」と報告し、PWR 事業関係者や規制当局に多大の衝撃を与えた。

また、D. J. Paraventi らは、「供試材は、図 2-(a)に示すように、局部的には Cr 炭化物の偏析が認められるが、図 2-(b)に示すように、粒界は Cr 炭化物で綺麗に覆われており正常な TT690合金である」と報告した。

しかし、筆者は今迄、熱間押し出しによる熱間仕上の PWR 実機用 TT690合金製品(制御棒駆動機構(CRDM: Control Rod Drive Mechanism)アダプターノズル等)、および熱間押し出し後、冷間抽伸等により冷間仕上げした PWR 実機用 TT690合金製品(SG Tube 等)について、それぞれ数百チャージを越える国産材の金属組織を観察してきたが、図 2-(a)および-(b)で観察された金属組織は、実機用 TT690合金の金属組織とは大きく異なっている。即ち、実機用 TT690合金では、材料は均質で図 2-(a)のような偏析は認められず、ミクロ組織は図 2-(c)に示すように、この程度の観察倍率

(400倍)では粒界炭化物は見えない程度に小さいのである。

さらに、筆者は、図 2-(a)のマクロ組織とよく似た組織を Ni 基の析出硬化型合金である X-750 合金(Ni 基 15Cr-2.5Ti-1Nb-0.7Al)で見た事がある。その経験からすると、白く見えるところは多くの Cr 炭化物が析出した高 Cr の相であるのに対して、黒く見えるところは炭化物析出の無い低 Cr の相である。それは凝固時の偏析がそのまま最終製品に残留したものである。と言うのは、図 3 に示す Ni-Cr 二元系平衡状態図から分かるように、Ni 基-高 Cr 合金では、液相線と固相線とが極めて接近していることから、凝固初期には低 Cr 相(30%Cr の 690合金ならば凝固初期は 17%程度の低 Cr 相)が晶出するのに対して、凝固終盤には高 Cr 相(30%Cr の 690合金ならば凝固終盤には 45%程度の高 Cr 相)が晶出する。これが原因で、Ni 基-高 Cr 合金では凝固偏析

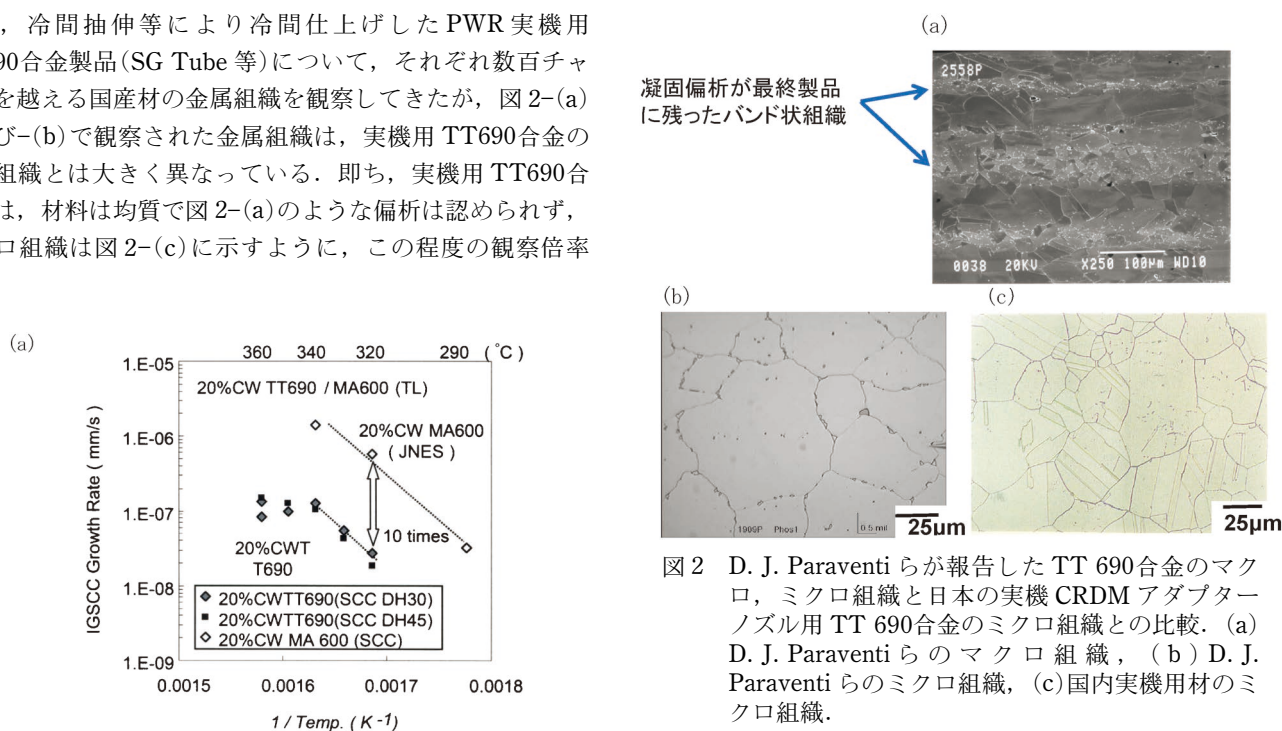


図 2 D. J. Paraventi らが報告した TT 690合金のマクロ、ミクロ組織と日本の実機 CRDM アダプターノズル用 TT 690合金のミクロ組織との比較。(a) D. J. Paraventi らのマクロ組織、(b) D. J. Paraventi らのミクロ組織、(c)国内実機用材のミクロ組織。

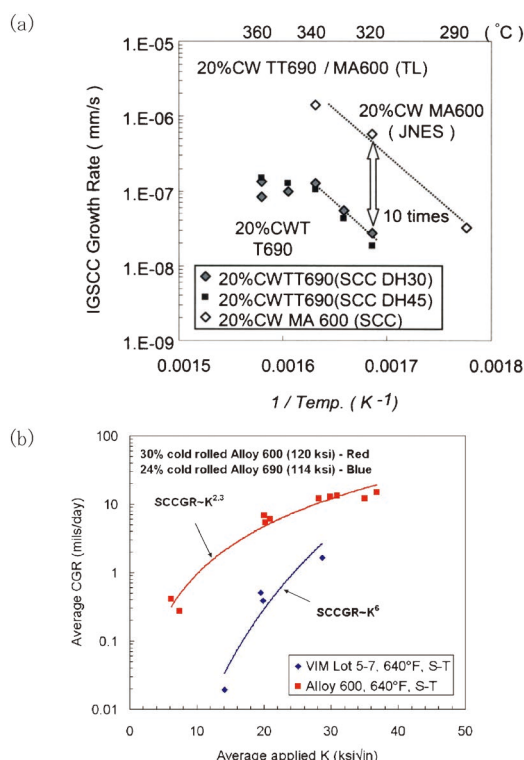


図 1 有岡らの 20%冷間圧延した TT690合金と 20%冷間圧延した MA600合金の PWR 一次系模擬水中 SCC き裂進展速度の試験温度依存性の比較(a), と、D. J. Paraventi らの 24%冷間圧延した TT690合金と 30%冷間圧延した MA600合金の PWR 一次系模擬水中 SCC き裂進展速度の K 値依存性の比較(b)。

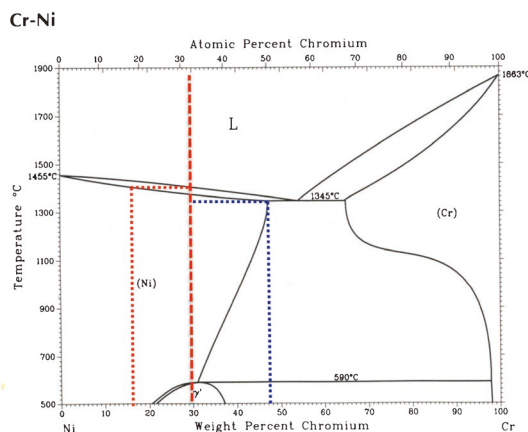


図 3 Ni-Cr 二元系平衡状態図と 690合金の凝固時の Cr 濃度。

が激しく、凝固後の均質化焼鈍や熱間加工が不十分であると、凝固偏析が最終製品にまで残り易くなる。図2-(a)のマクロ組織はNi基30CrのTT690合金のマクロ組織であるが、15%程度しかCrを含有していないX-750合金でも凝固時の凝固偏析は基本的に同じであり、凝固後の均質化焼鈍や熱間加工が不十分であると、Ni, Crの凝固偏析が最終製品にまで残り易くなることが知られている。

また、有岡らは35kgの実験室溶製のTT690合金を用いたとのことで⁽¹²⁾、D. J. Paraventiらは市販材とは言え、1 ton未満の比較的小さなインゴットから溶製したTT690合金を用いたとのことであった⁽¹²⁾。これに対し、実機用のTT690合金国産材は40~60 ton VODで溶解し、鍛錬比の大きな熱間押出を用いており、熱間加工も含めた溶製方法が全く異なっている。

以上のことを併せ考えると、有岡らや、D. J. ParaventiらのTT690合金は、実機用のTT690合金とは溶製方法の違いにより金属組織が大きく異なっており、実機用のTT690合金では「PWR一次系模擬水中でのSCC進展速度が、MA600合金の1/5~1/10程度となる」ことは無いのではないかと筆者は考えた。

そこで、筆者はまず、予備検討として、D. J. ParaventiらのTT690合金の化学組成で、Sheilの凝固モデルによるシミュレーション計算を堀内らとの共同研究で実施した⁽¹³⁾。その結果、図4に示すように、TT690合金の凝固過程は、初晶は γ 相であり、次にTiC, TiN(主としてTiN)が晶出し、最終凝固過程で $M_{23}C_6$ が晶出する事が分かった。

次に筆者らは、D. J. Paraventiの共同研究者であるC. M. Brownらが報告しているTT690合金の化学組成⁽¹⁴⁾を模擬した690合金を、実験室溶製としては比較的大きな180 kg真空誘導溶解によりインゴットを作成した(Y材)。図5に示すように、このインゴットを4等分し、(1)铸造まで1,075°Cで3~4時間の溶体化処理(SHT: Solution Heat Treatment)後TT処理を施したもの、(2)铸造後熱間軽鍛造、SHT後TT処理を施したもの、(3)铸造後熱間軽鍛造、熱間重鍛造、

SHT後TT処理を施したもの、(4)铸造後熱間軽鍛造、熱間重鍛造、中間焼鈍、冷間圧延、SHT後TT処理を施したものを作成した。

これらの各スラブ材と、比較材として実機CRDMアダプターノズル用TT690合金材(以降、実機用TT690合金と略記する)の金属組織を図5に併せ示し、図6にY材軽鍛造TT690材と実機用TT690合金の粒界炭化物の電子回折結果を示す。この図5および図6から、Y材軽鍛造TT690材で認められた粒界炭化物は図1-(b)で認められた粒界Cr炭化物と同様に大きく、母相と非整合な $M_{23}C_6$ であるのに対し、実機用TT690合金で認められる粒界Cr炭化物は母相と整合した $M_{23}C_6$ で1 μm 以下の小さなものである。これらのことから、図1-(b)で認められた粒界Cr炭化物は、Y材軽鍛造TT690材と同様に凝固過程で晶出した $M_{23}C_6$ が軽鍛造+溶体化処理+TT処理後に残留して認められたものと推定され、実機用TT690合金で認められるTT処理で析出した $M_{23}C_6$ とは異なると考えられる⁽¹⁵⁾。

Y材軽鍛造TT690合金スラブと、実機用TT690合金スラブに対して、10~30%の一方方向冷間圧延を施し、冷間圧延

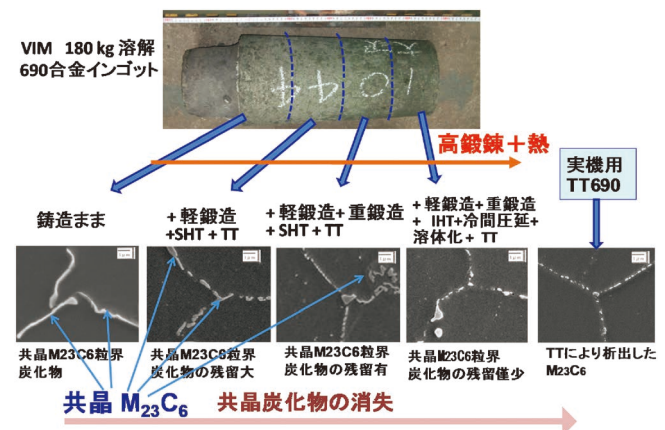


図5 実験室溶製各種熱間加工を施したTT690合金(Y材)と実機CRDM用TT690合金の粒界炭化物 $M_{23}C_6$ の比較。

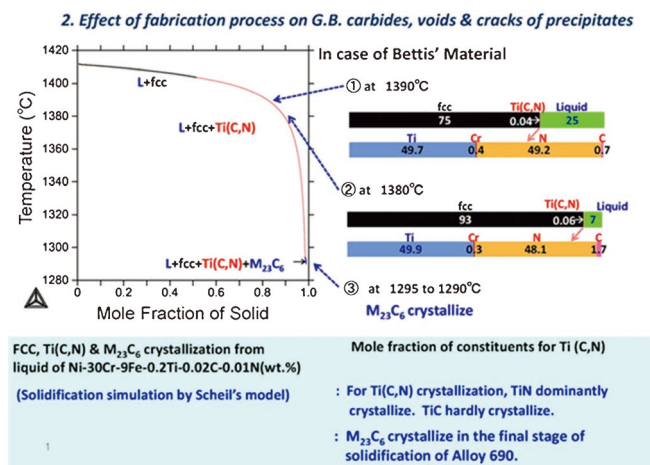


図4 D. J. ParaventiらのTT690合金の化学組成(Ni-30Cr-9Fe-0.2Ti-0.02C-0.01N)で、Sheilの凝固モデルによるシミュレーション計算結果。

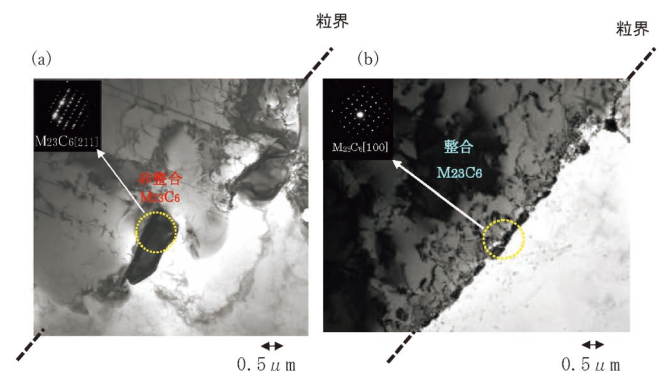


図6 Y材軽鍛造TT690の合金および実機用TT690合金の粒界炭化物の種類と整合性。(a)Y材軽鍛造TT690合金の粒界炭化物、(b)実機用TT690合金の粒界炭化物。

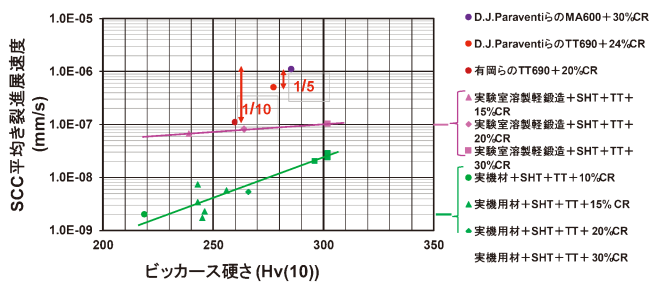


図7 TT690合金実験室各種溶製材と実機用TT 690合金の340～360℃温度加速PWR一次系模擬水中SCCき裂進展平均速度とビッカース硬さとの関係(D. J. Paraventiらや有岡らのデータは降伏強さ(σ_y)から $Hv=0.189 \times \sigma_y(\text{MPa}) + 129$ で換算した.)。

方向に対してT-L方向に0.7T CT試験片を採取し、360℃に温度加速したPWR一次系模擬水中で長時間のSCCき裂進展試験を実施した。それらのSCCき裂進展速度を硬さと比較してまとめ、これに有岡らや、D. J. ParaventiらのTT690、MA600合金のSCCき裂進展速度データを併せ表示したものを、図7に示す。

この図から、有岡らや、D. J. ParaventiらのTT690合金のSCCき裂進展速度データは、筆者らが採取した実機用TT690合金のSCCき裂進展速度データに比べて1桁以上大きく、有岡らのデータは、筆者らが採取したY材軽鍛造TT690合金のSCCき裂進展速度に近い値となった。また、同じ溶製材であれば、SCCき裂進展速度は、部材の硬さの増加に伴い増大するという従来知見⁽¹⁶⁾と同じ結果が得られた⁽¹⁵⁾⁽¹⁷⁾。この図から、TT690合金冷間加工材のPWR一次系模擬水中でのSCCき裂進展速度は、溶製方法と冷間加工度により大きく異なることが判明した。

3. 実機用TT690合金のPWR一次系水中でのSCCき裂進展速度評価

有岡らや、D. J. Paraventiらが「TT690合金のPWR一次冷却系模擬水中でのSCCき裂進展速度はMA600合金の1/5～1/10程度となる」と報告したが、用いたTT690合金の溶製方法が、発電用のPWR実機に用いられているTT690合金とは大きく異なっていたこと以外に、20%以上の高度の冷間加工が施されたTT690合金であった。

上述した「PWSCCき裂進展速度専門家会議」では、PWR実機構造部材に於いて、20%以上という高度の冷間加工が施されたTT690合金が存在し得るのか否か、PWR実機構造部材ではどの程度の冷間加工材が存在し得るのかが議論された。議論の結果、「TT690合金管製造時、実機構造物製造時、溶接熱影響等々、保守的に評価しても、PWR実機構造部材のTT690合金で存在し得る冷間加工度は12%以下」ということで専門家会議メンバー全員のコンセンサスを得た⁽⁸⁾。

また、この専門家会議では、世界中から集めたTT690合金のPWR一次系模擬水中でのSCCき裂進展速度試験デー

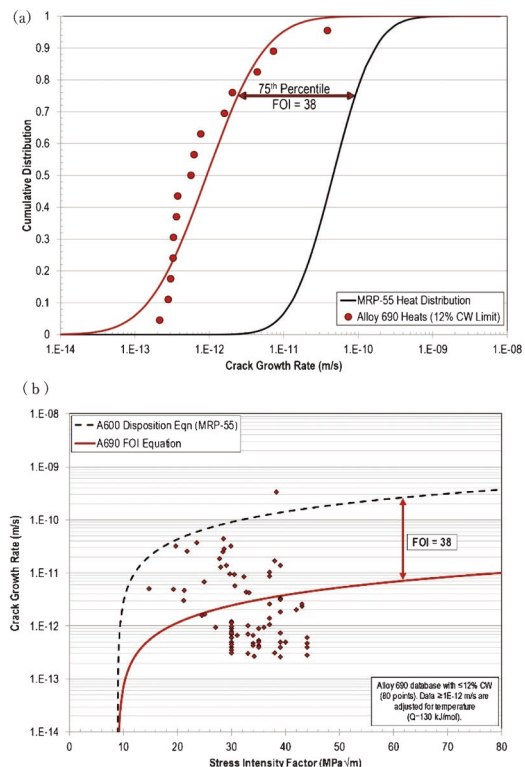


図8 12%以下の冷間加工TT690合金のPWSCCき裂進展速度の600合金のPWSCCき裂進展速度(MRP-55)に対する改善度(FOI)比較。(a) TT690合金のSCCき裂進展速度ワイブルプロットとMRP-55、(b) TT690合金のK値に対するSCCき裂進展速度評価曲線とMRP55。

タ約500点を用いて、試験温度、材料の降伏強さ、冷間加工度、K値、一次系模擬水中水素濃度、等々の多くの因子について多変量解析を行い、SCCき裂進展速度評価式の策定を試みた。しかし、世界中から集まったTT690合金のPWR一次系模擬水中でのSCCき裂進展速度試験データの内、12%以下の冷間加工材のデータは80点で、これらのデータのみから多変量解析を行うことは不可能であった。そこで多変量解析を諦め、12%以下の冷間加工材のデータ80点をワイブルプロットし、EPRIが2002年に制定したMA600合金のSCCき裂進展速度評価式EPRI MRP-55のワイブルプロットと比較して⁽¹⁸⁾、図8に示すように、TT690合金はMA600合金のSCCき裂進展速度評価式に対して38分の1となるSCCき裂進展速度評価式を策定した。換言すればTT690合金はMA600合金に比べてSCCき裂進展速度は38倍の改善効果(FOI: Factor of Improvement)があるというものである⁽³⁾⁽⁸⁾。EPRIでは、その後も12%以下の冷間加工を施したTT690合金のPWR一次系模擬水中での更なるSCCき裂進展速度データを集めつつあり、将来的には多変量解析によるSCCき裂進展速度評価式の策定を期待している。

ところで、「PWR実機構造部材で存在し得る冷間加工度は12%以下」とのコンセンサスを得たが、実構造物では、グラインダ加工等による局所的な表面仕上げ等が含まれるこ

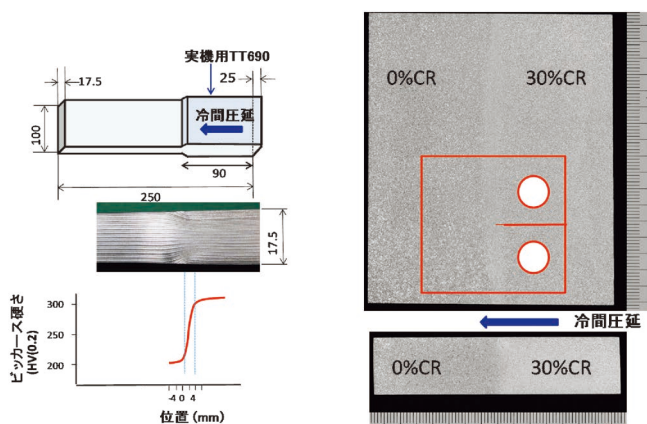


図9 傾斜機能冷間加工を施した実機用 TT690 合金板材からの CT 試験片の採取。

とが多い。そこで、若し、そのような表面仕上げ等により高度の冷間加工層が内表面に存在していたとして、その表面強加工部から PWSCC が発生したら、その PWSCC き裂は母材にそのまま進展し、肉厚を貫通するのかが心配される。

しかし、母材は12%以下の冷間加工しか存在しないことからすれば、母材のビッカース硬さは230程度以下であり、前掲の図7からすれば母材の SCC き裂進展速度は 2.0×10^{-12} m/s 以下となる。従って、表面強加工部から PWSCC が発生しても、厚肉の TT690 部材の肉厚を SCC が貫通することは考えられない。

この点について筆者らは、実機用 TT690 合金を用いて、図9に示すようにグラインダ加工部相当の肉厚方向硬さ分布に似せ、急激に肉厚を変化させた板材を作成して一方向冷間圧延を施し、傾斜機能冷間加工材を作成した。この傾斜機能冷間加工板材から CT 試験片を採取し、疲労予き裂先端を傾斜機能冷間加工部の直前に位置させ、360℃温度加速の PWR 一次系模擬水中で5.09 Ms の SCC き裂進展試験を実施した。その結果、SCC き裂はグラインダ加工部相当の硬化領域から、母材の軟らかい領域にき裂先端が到達すると急激に SCC き裂進展速度は低下した。このことから、たとえグラインダ加工等により一次系水接液面が強加工された部材であっても、母材が正常であれば SCC き裂は発生しても伝播停止するか無視し得る程度の遅いき裂進展速度になり、部材の全肉厚を SCC が貫通することは無いことを報告している⁽¹⁶⁾⁽¹⁷⁾⁽¹⁹⁾。

4. 冷間加工された TT690 合金の PWR 一次系水中での SCC き裂進展メカニズムについて

以上のように、「TT690 合金は溶製法によっても異なるが、20%以上の高度の冷間加工を受けると、PWSCC き裂進展速度が大きくなる」が、そのメカニズムは何かについて、ここ数年多くの議論がなされてきた⁽¹⁶⁾⁽¹⁷⁾⁽²⁰⁾⁻⁽³⁴⁾。

まず、有岡らは、20%の高度の冷間加工を施した TT690 合金から作成した CT 試験片を320～360℃の PWR 一次系模擬水中で長時間 PWSCC き裂進展試験を行った後、図10

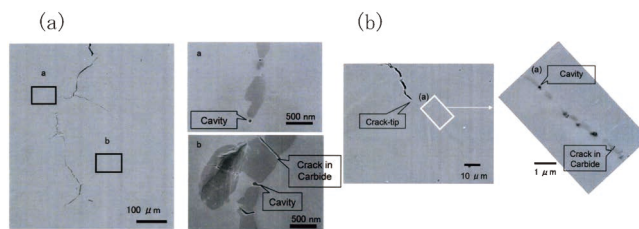


図10 360℃温度加速 PWR 一次系模擬水中に3,907時間 SCC き裂進展試験をした CT 試験片 SCC き裂先端近傍に認められた、(a)キャビティと粒界炭化物の割れ、および、(b)425℃大気中で3,762時間クリープ試験を行った CT 試験片クリープ粒界き裂先端近傍に認められたキャビティと炭化物の割れ。

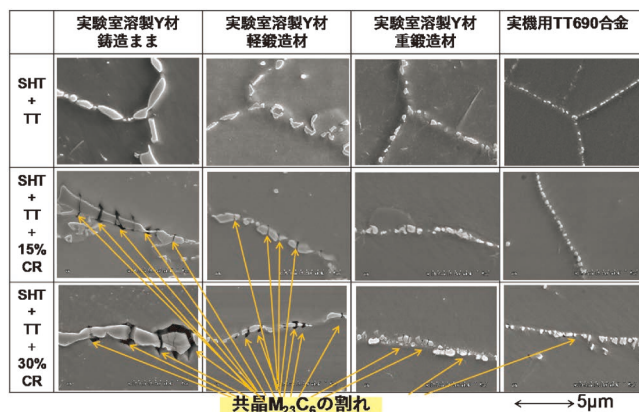


図11 実験室溶製各種熱間加工 TT690 合金および実機用 TT690 合金の TT 処理後冷間加工度と粒界炭化物の割れの有無の比較。

に示すように、SCC き裂先端から少し離れた、き裂が進展していくであろう粒界で、粒界炭化物の割れや、キャビティを見出した。それらの割れやキャビティは、425℃で大気中長時間クリープ試験を行った20%冷間加工 TT690 合金製 CT 試験片に認められた粒界炭化物の割れや、キャビティと酷似していたことから、有岡らは、「高度の冷間加工を施した TT690 合金の PWSCC き裂進展のメカニズムは、クリープ損傷による」との仮説を提唱した⁽²⁰⁾。

これに対し、筆者らは図11に示すように、TT690 合金で粒界炭化物に割れが認められるのは、実験室溶製の鋳造まま + SHT + TT 材や、軽鍛造 + SHT + TT 材に15%以上の冷間加工を施した場合で、冷間加工を施していない TT までは割れは認められず、冷間加工度が高くなると粒界炭化物の割れ数が増大することを報告した⁽¹⁶⁾⁽¹⁷⁾。また、実機用 TT690 合金材では、30%冷間圧延後も粒界炭化物の割れは極めて少なく、高度の冷間加工を施した実験室溶製の TT690 合金では SCC 試験やクリープ試験前に粒界炭化物の割れが認められることを報告した⁽¹⁶⁾⁽¹⁷⁾。さらに、これは、鋳造まま材や、軽鍛造材では熱間加工や高温での加熱などが不十分な為に、鋳造時に晶出した共晶の $M_{23}C_6$ 炭化物が溶体化処理、TT 処理後も残留し、冷間圧延により割れを生じ

るのに対して、重鍛造材や実機用 TT690 合金では共晶 $M_{23}C_6$ 炭化物が殆ど残留せず、TT 処理により析出した $M_{23}C_6$ 炭化物は冷間圧延により割れを生じ難く、粒界炭化物の割れと、クリープ損傷とは無関係であることを報告した⁽¹⁶⁾⁽¹⁷⁾。

さらに、有岡らは、図12に示すように、市販の TT690 合金に冷間加工を施し、長時間の SCC き裂進展試験後の CT 試験片のき裂先端近傍の粒界炭化物近傍にキャビティを見出した。それらのキャビティと、大気中クリープ試験を行った CT 試験片でのき裂先端近傍の粒界炭化物近傍のキャビティと比較し、さらにそれらのキャビティ生成は試験温度が高くなるにつれ増大する傾向があることから、有岡らは「キャビティ生成はクリープ損傷による」と断じ、「TT690 合金の SCC き裂進展のメカニズムは、TT690 合金が SCC き裂進展試験中に受けたクリープ損傷による」と報告した⁽²³⁾⁻⁽²⁶⁾。この有岡らの仮説を、S. Bruemmer らは支持している⁽²⁷⁾⁻⁽²⁹⁾。

しかし、有岡らの「SCC がクリープ損傷に基づくのではないか」とする考え方には、材料力学的に大きな矛盾を含んでいると考えられる。即ち、「クリープ事象とは、絶対温度で融点の約半分の温度以上で生じると言われており、その温度では原子の熱振動により、残留応力の弛緩が生じる。一方、PWSCC は残留応力のみで生じ得る。クリープとは応力が弛緩する方向に作用する訳であり、若し、PWSCC のメカニズムがクリープ損傷によるとするのなら、残留応力のみが付与されている部材では、PWSCC 試験中に応力が弛緩し、PWSCC の駆動力 (Driving Force) が無くなってしまい、SCC き裂は生じなくなる。」と言う大きな矛盾をはらんでいる。

また、有岡らや S. Bruemmer らの報告では、「SCC がクリープ損傷に基づくとする仮説の根拠として、粒界でのキャビティ生成を挙げているが、これはクリープ損傷事象に対する必要条件を述べているだけで、キャビティ生成に対する応力依存性やクリープに伴う伸び変形などの十分条件を調べていない点」に大きな問題がある。そこで筆者らは、図13およ

び14に示すように、実機用 TT690 合金を30%冷間圧延した板材から3点曲げ試験片を採取し、360℃に温度加速した PWR 一次系模擬水中で SCC 試験を行い、応力負荷部と応力無負荷部とのキャビティ生成量を比較した。その結果、両者に殆ど変化は認められず、キャビティ生成に応力依存性は無いことを証明した⁽³³⁾⁽³⁴⁾。

さらに、有岡らや、S. Bruemmer らの報告では、全て SCC 試験やクリープ試験前の状態におけるキャビティの生成状況を確認しておらず、キャビティ生成が何によるものかが明確でない点に大きな問題がある。

そこで、筆者らは、実機用 TT690 合金を用いて、応力を付加せずに、大気中加熱試験前後、水素濃度を変えた PWR 一次系模擬水中浸漬前後で、試験片の粒界炭化物近傍のキャビティ数、形状を詳細に調査した。その結果、図15に示すように、粒界炭化物近傍のキャビティ数は、一次系模擬水中浸漬前、大気中加熱前では、冷間加工度が10%を超えると、冷間加工度が増すにつれて増大すること、大気中加熱後は大気中加熱温度が増すにつれ増大し、一次系模擬水中浸漬時間、大気中加熱時間が増すにつれ増大し、一次系模擬水中水素濃度が高くなるにつれ増大すること、粒界炭化物の無い溶体化処理のままの690合金では冷間加工度に拘わらず粒界近傍

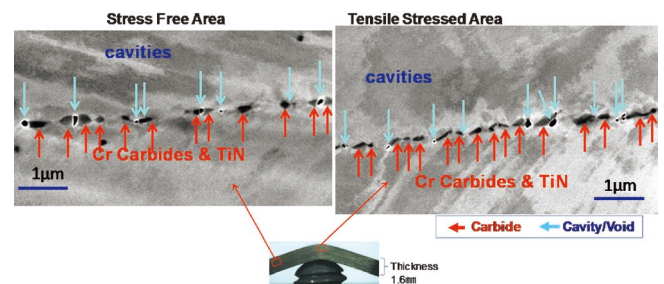


図13 30%冷間圧延した実機用 TT690 合金から作成した3点曲げ試験片を360℃PWR 一次系模擬水中で8,532時間 SCC 試験を行った後に応力負荷部、応力無負荷部で観察された粒界炭化物近傍のキャビティ。

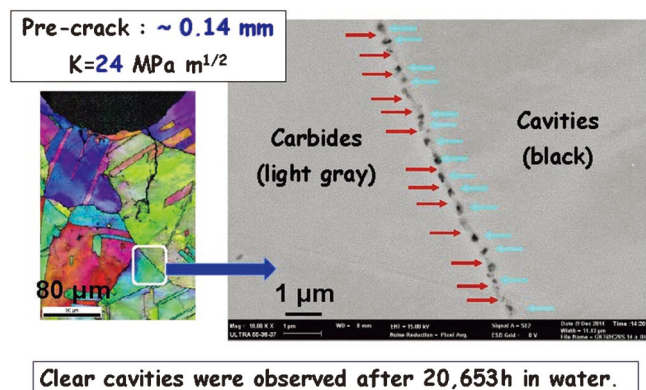


図12 有岡らが報告した、20%冷間圧延した TT690 を 360℃PWR 一次系模擬水中で20,653時間 SCC 試験を行った CT 試験片のき裂先端から少し離れた粒界炭化物近傍に認められたキャビティ。

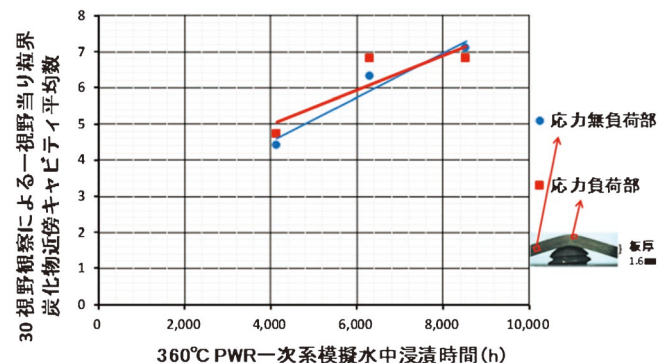


図14 30%冷間圧延した実機用 TT690 合金から作成した3点曲げ試験片を360℃PWR 一次系模擬水中で4,132, 6,312, 8,532時間 SCC 試験を行った後に応力負荷部、応力無負荷部で観察された粒界炭化物近傍のキャビティ検出数の比較。

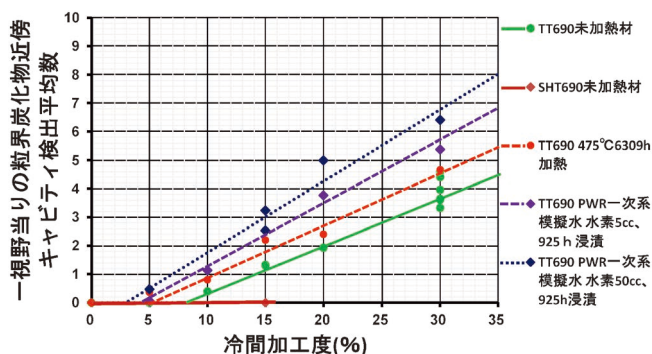


図15 実機用 TT690 合金各種冷間圧延材について大気中475℃で6,309時間加熱前(●)・後の試験片(●), および360℃温度加速 PWR 一次系模擬水中水素濃度 5cc/kg(◆)または50cc/kg・STPH₂O に925時間浸漬した試験片(◆)およびTT690合金再溶体化材各種冷間加工の試験片(◆)について、それぞれ10,000倍で30視野 SEM 観察し、一視野当たりの粒界炭化物近傍キャビティ検出平均数を比べたもの。

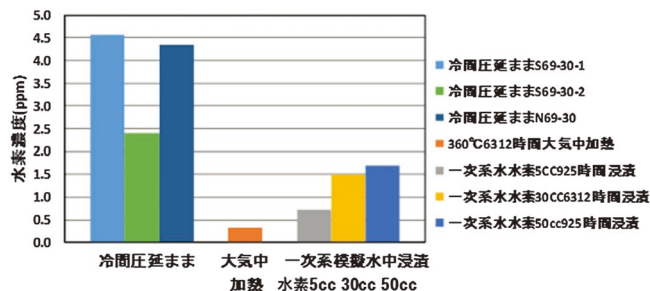


図16 実機用 TT690 合金の冷間圧延まま、大気中加熱後、水素濃度を変えた PWR 一次系模擬水中浸漬後の合金中水素濃度。

でキャビティが認められないことなどが明確になった⁽³⁰⁾⁻⁽³⁴⁾。また、これらの大気中加熱前後、PWR 一次系模擬水中浸漬後の試験片中の水素濃度を計測すると、図16に示すように、冷間加工ままでは Ni 基合金として通常の水素濃度であるが、大気中加熱により殆どバークアウトされ、PWR 一次系模擬水中浸漬後は模擬水中水素濃度が高くなるにつれ増大することが分かる。さらに、図17に示すように、TT690 合金は、冷間加工を受けると、粒界炭化物の周辺で格子欠陥密度が高くなることが認められている。

これらのことから、TT690 合金は、高度の冷間加工を受けると、基質がせん断変形を受けて、粒界炭化物に微細なき裂が入ったり、粒界炭化物近傍に小さなキャビティを生じ、その周辺では多くの格子欠陥が存在し、これらの格子欠陥は熱を加えると集合して、微細なき裂に集まり、キャビティが成長したり、新たな小さなキャビティを生成する。その小さなキャビティは、PWR 一次系模擬水中では、含まれている溶存水素によって、固定され、粒界炭化物近傍キャビティ数が増大したり、大きさが増したりするのではないかと筆者は考えており、今後キャビティの数だけではなく、形状の変化な

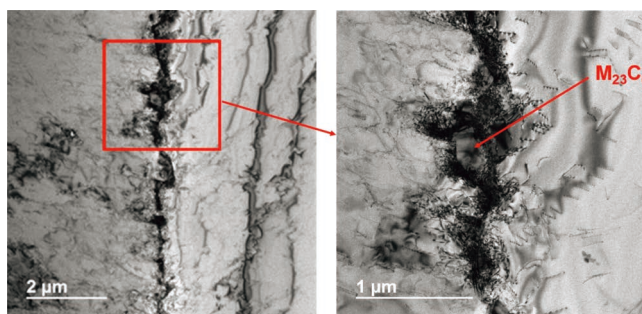


図17 PWR 実機用 TT690 合金 5%冷間圧延材の粒界炭化物 M₂₃C₆ 近傍の転位網。

ども観察し、考察を深めたいと考えている。

以上のことから、筆者は、「SCC がクリープ損傷による」とする説は、明らかに誤りであると信じる。

5. おわりに

TT690 合金の PWR 一次冷却模擬水中での SCC き裂進展速度やき裂進展のメカニズムに関するここ10数年間の研究報告や、種々の国際会議での議論等について纏めると下記のように要約できよう。

(1) 耐 PWSCC 性に優れた材料として、従来の MA600 合金に替わり TT690 合金は多用されてきており、TT690 合金は世界の PWR の一次冷却水環境下で現在迄に既に30年近く全く SCC は検出されておらず、優れた成績を収めている。しかし、近年一部の研究者から、「強加工(20%以上の冷間圧延)を施した TT690 合金の PWR 一次系模擬水中での SCC き裂進展速度は比較的大きく、MA600 合金の 1/5～1/10 程度となる」との報告が出され、PWR 事業関係者や規制当局に多大の衝撃を与えた。しかし、そのデータは PWR 実機に用いられている TT690 合金とは異なる溶製方法で製造されたものを用いており、また、実機では12%を超える冷間加工部材は用いられておらず、たとえグラインダ加工等により一次系水接液面が強加工された部材であっても、母材が正常であれば SCC き裂は発生しても伝播停止するか無視し得る程度の遅いき裂進展速度になり、部材の全肉厚を SCC が貫通することは無いと考えられる。

(2) PWR 実機用 TT690 合金でも、強加工を施すと、PWR 一次冷却系模擬水中での SCC き裂進展速度は増大する。この強加工 TT690 合金の SCC き裂進展速度が大きくなるメカニズムについては、未だ多くの議論がなされている過程にある。しかし、クリープ損傷によるとの仮説を唱える向きもあるが、材料力学的にクリープ損傷によるとは考え難く、筆者は「高度の冷間圧延を受けると、基質がせん断変形を受けて、粒界炭化物周辺で小さなキャビティを生じたり、多くの格子欠陥を生じ、これらの格子欠陥は熱を加えると集合して、さらに新たなキャビティを生成する。それらの小さなキャビティは、PWR 一次系模擬水中に含まれている溶存水素によって、固定され、粒界炭化物近傍キャビティ数が増大したり、大きさが増したりする。」と考えている。

なお、これらの研究の一部は、科学研究費補助金基盤研究 B (課題番号：22360396、25289348) の支援を受けて実施した。

アモルファス GeSn の結晶化における Sn の振る舞い

石 丸 学* 仲 村 龍 介**

1. は じ め に

半導体デバイスの高性能化は、微細化および高集積化により達成されてきた。しかしながら、デバイスサイズの減少により、微細化技術による対応は限界を迎えつつあり、更なる高集積化は困難となっている。現在の半導体デバイスの主役はシリコン(Si)であるが、世界初のトランジスタはゲルマニウム(Ge)により実現された。GeはSiよりも高いキャリア移動度を有し、同じIV族半導体であるためSiテクノロジーとの相性が良く、有力なポストSi材料として再び脚光を浴びている。またSiよりも融点が高いため、プロセス温度の低減が可能である。

アモルファスIV族半導体の結晶化により得られる多結晶薄膜は薄膜トランジスタとして実用化され、ディスプレイ素子として重要な役割を演じている。アモルファスGeに金属元素を接触あるいは添加して熱処理を施すと、結晶化温度が著しく低下することが知られている⁽¹⁾。特にスズ(Sn)の添加は200℃以下での結晶化を誘起するため⁽²⁾、軟化温度の低いプラスチック基板上への成膜も可能となり、フレキシブルディスプレイへの応用が期待される。また、Sn濃度が6~10at%でバンド構造が間接遷移型から直接遷移型に変化することが報告されている⁽³⁾⁻⁽⁵⁾。しかしながら、Ge-Sn合金はGe中のSnの固溶度が1at%程度の共晶系(共晶温度: 231.1℃)で⁽⁶⁾、固溶限以上のSnは容易に析出することが問題となっている。

アモルファスGeを低温熱処理により結晶化させると、固溶限を超えるSnを含むGe多結晶薄膜が得られることが報

告されている⁽⁷⁾⁻⁽¹²⁾。Snの析出を抑制し、高Sn濃度GeSn多結晶薄膜を実現するには、アモルファスの構造変化および結晶化時のSnの挙動に関する知見が必要不可欠である。透過電子顕微鏡法(TEM)は組織や原子配列等の構造情報、組成や結合状態等の化学的情報を、試料の同じ場所から高い空間分解能で得ることができる。更に、加熱ホルダーを用いることにより、結晶化過程の「その場」観察が可能である。我々は、様々なアモルファスの結晶化過程をTEMにより調べている⁽¹³⁾⁻⁽¹⁸⁾。本稿では、スパッタリング法で作製した厚さ40nmのアモルファスGeSn薄膜の熱処理および電子線照射による結晶化過程を、その場観察により調べた結果について紹介する。

2. アモルファス構造の電子線動径分布解析

直径約100mmのGeターゲット上に5mm×5mmのSnチップを置き、チップ枚数を変化させることによりSn濃度を制御した。高分解能像および電子回折図形より、得られたスパッタリング試料はアモルファスであること、エネルギー分散型X線分光法(EDX)よりアモルファスGe中には結晶の固溶限をはるかに超えるSnが含まれていることが確認された⁽¹⁹⁾⁽²⁰⁾。

アモルファスの構造は動径分布関数により評価されるが、この関数は回折手法により得ることができる。電子線は物質との相互作用がX線に比べると非常に大きく、波長が短い。そのため、短時間で逆格子空間の広い範囲に渡る散乱情報の取得が可能である⁽²¹⁾⁻⁽²³⁾。図1(a)は、回折強度を定量解析することにより得られた還元干渉関数 $F(Q)$ である⁽²⁰⁾。強度に

* 九州工業大学大学院工学研究院; 教授(〒804-8550 北九州市戸畑区仙水町 1-1)

** 大阪府立大学大学院工学研究科; 准教授

Behavior of Sn Atoms During Crystallization of Amorphous GeSn; Manabu Ishimaru* and Ryusuke Nakamura** (*Department of Materials Science and Engineering, Kyushu Institute of Technology, Kitakyushu. **Department of Materials Science, Osaka Prefecture University, Sakai)

Keywords: germanium-tin, amorphous, crystallization, transmission electron microscopy, in situ observations

2020年9月18日受理[doi:10.2320/materia.59.662]

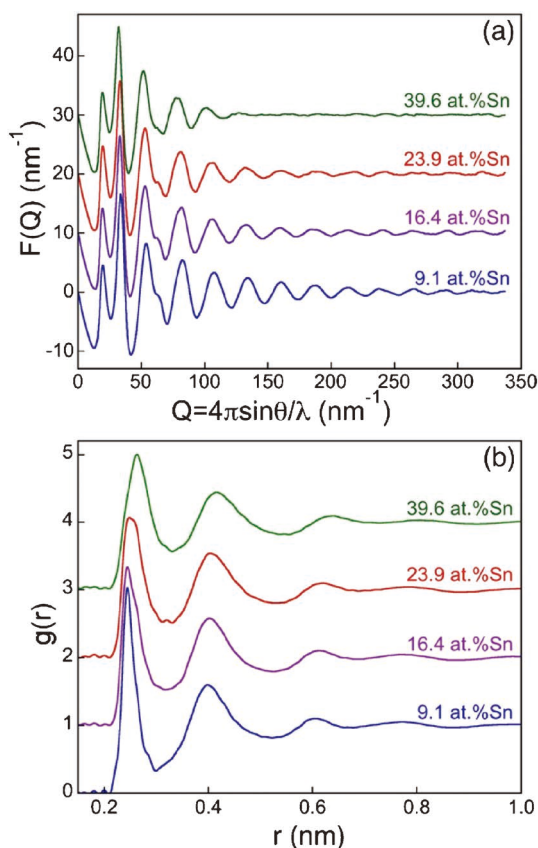


図1 異なる Sn 濃度を有するアモルファス GeSn から得られた (a) 還元干渉関数 $F(Q)$ および (b) 2 体分布関数 $g(r)$. 組成は EDX により測定した. (オンラインカラー)

散乱ベクトル Q が掛けられているため高角度側の強度が強調されており, <16.4 at% Sn 試料では $Q=320 \text{ nm}^{-1}$ まで十分な強度振動が見られる. Sn 濃度が高くなると高散乱角側の強度振動が小さくなっている. 金属ガラスの様な金属結合を有するアモルファスでは高角側の散乱強度が著しく減衰することから⁽²⁴⁾⁽²⁵⁾, Sn 濃度の増加により金属的な結合が増えていると推察される.

$F(Q)$ をフーリエ変換することにより得られた 2 体分布関数 $g(r)$ を, 図 1(b) に示す⁽²⁰⁾. $g(r)$ は, 任意の原子から距離 r 離れた位置に原子を見出す確率を表わしており, 1 より大きい場合 (小さい場合) は完全なランダム状態よりも原子の存在確率が大きい (小さい) ことを意味する. 長距離側で $g(r)$ は 1 に収束しており, 長距離秩序が欠如していることが分かる. 短範囲規則構造の存在を反映して, 顕著な第 1 および第 2 ピークがそれぞれ 0.25 および 0.40 nm 付近に存在し, 四面体配位の原子間距離と一致している. これらのピークは Sn 濃度の増加とともに長距離側に移動している. これは第 1 隣接において Ge-Ge 原子対が減少し, Ge-Sn および Sn-Sn 原子対が増加していることを意味している. なお, Sn 濃度が高くなると 0.30~0.32 nm の $g(r)$ が大きくなっており, 一部の Sn はクラスターとして存在することが示唆される.

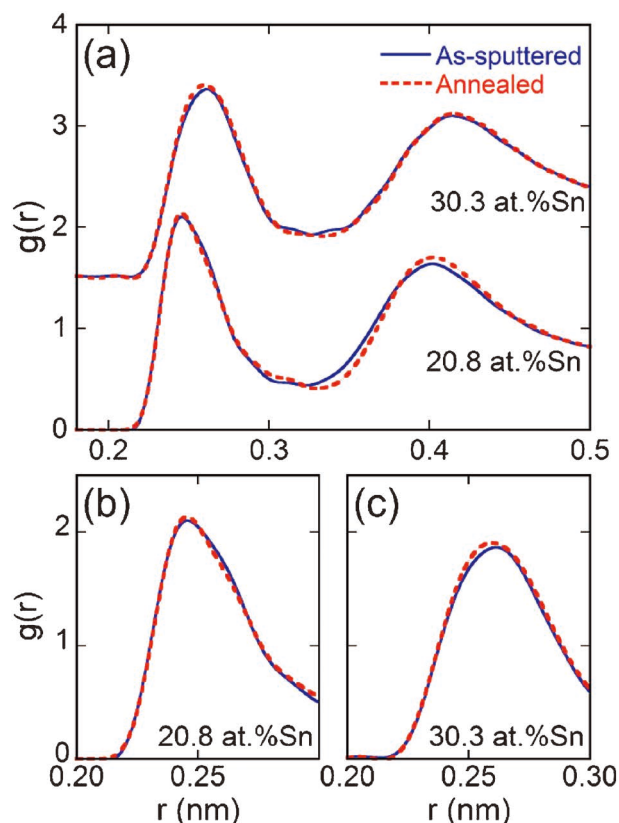


図2 (a) 熱処理前 (実線), 熱処理後 (破線) の 2 体分布関数および (b, c) 第 1 ピークの拡大図. 20.8 at% Sn 試料では熱処理前後でピーク位置は同じであるが, 30.3 at% Sn 試料では熱処理により Sn が排出され, 原子間距離が短い側に第 1 ピークが移動する. (文献(20)より転載) (オンラインカラー)

3. 熱処理に伴うアモルファスの構造変化と結晶化

加熱ホルダーを用いてアモルファス GeSn の熱処理に伴う構造変化のその場観察を行った. 観察に際して, 加速電圧は 300 kV とした. 後述する様に, 本物質では電子線照射によっても結晶化が誘起される. この場合の構造変化は電子励起効果により誘起され, 低加速電圧の時に顕著になる⁽¹⁹⁾. したがって, 今回の加熱実験の条件では結晶化に及ぼす電子線照射の影響は無視できる. 図 2(a) は, アモルファス GeSn の熱処理前後の $g(r)$ である⁽²⁰⁾. 熱処理温度は, 20.8 at% Sn の試料では 230°C, 30.3 at% Sn の試料では 200°C である. 前者の試料は GeSn の共晶温度 (231°C) 以上, 後者は共晶温度以下で結晶化した⁽⁶⁾. 2 体分布関数を得るための回折図形は室温にて撮影している. 20.8 at% Sn のアモルファス GeSn から得られた $g(r)$ の第 2 ピークは, 230°C 熱処理試料 (破線) の方がスパッタ試料 (実線) よりも高くなっており, 構造緩和が起こっている. 一方, 30.3 at% Sn 試料では熱処理前後でピークの高さはほぼ同じである.

第 1 ピークの拡大図を, 図 2(b) および 2(c) に示す. 20.8 at% Sn 試料の $g(r)$ では, ピークトップ位置には顕著な変化

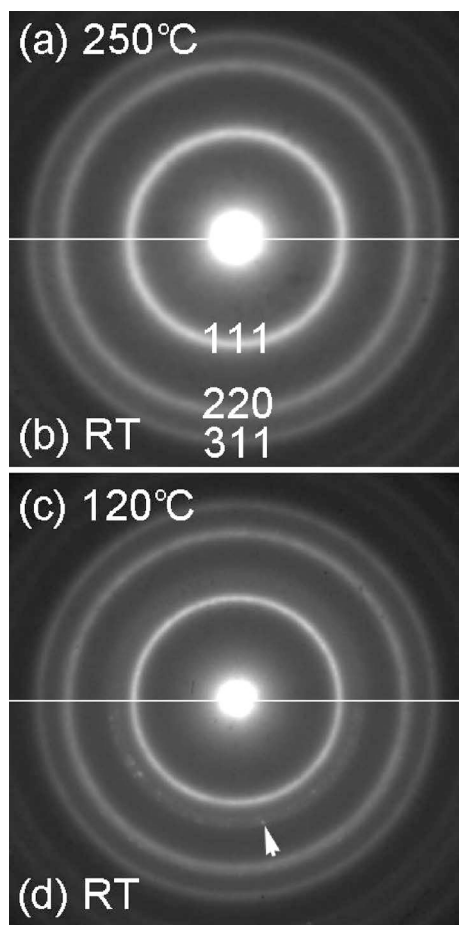


図3 (a, b) 20.8および(c, d) 40.9 at% Sn 試料の加熱、冷却に伴う構造変化. (a, c) は高温, (b, d) は室温で撮影した. デバイシェラーリングはダイヤモンド型構造により指数付けできる. 40.9 at% Sn 試料では120°Cにおいて液体 Sn によるハローリングが見られ, 室温では凝固によりブラッグ反射に変化する.

は見られなかった. 対照的に, 30.3 at% Sn 試料の第1ピークは, 熱処理後に短距離側に移動している. これは, 第1隣接において長い原子対(Ge-Sn と Sn-Sn)の数が減少していることを意味し, 熱処理によりアモルファス自身で相分解が起こっていることを示唆している. 第1ピーク位置の変化は, Sn 濃度の増加および結晶化の進行とともに顕著になることが確認された.

図3(a)は, 250°Cでの熱処理中に取得された20.8 at% Sn 試料の制限視野電子回折図形である⁽²⁰⁾. デバイシェラーリングが出現しており, 結晶化が起こっていることが分かる. リングは内側から, ダイヤモンド型構造の111, 220, 311反射に相当し, 第2相による反射は存在しない. この試料を室温まで冷却して撮影した電子回折図形を, 図3(b)に示す. この回折図形は図3(a)とほぼ同じであり, Sn 原子がGe 格子の置換型サイトに組み込まれていることを示唆している. 120°Cで結晶化した40.9 at% Sn 試料の回折図形を, 図3(c)に示す. ダイヤモンド型構造によるデバイシェラーリングに加えて, 111リングの直ぐ外側に弱いハローリング

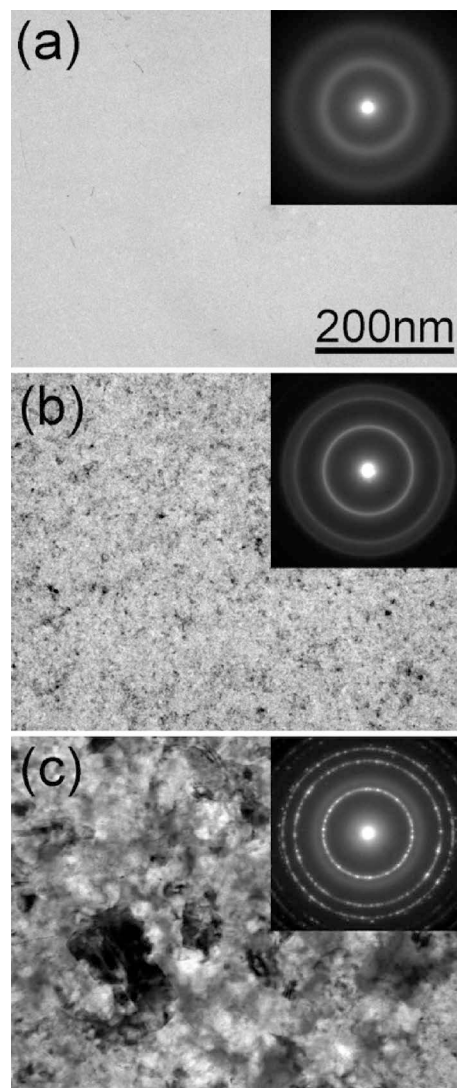


図4 21.7 at% Sn 試料の熱処理に伴うミクロ組織および構造変化. (a) 240°C, (b) 260°C, (c) 300°C. (a) と (b) の間の温度で結晶化が起こっている. (c) の回折図形にはハローリングが現れており, マトリックスから排出された Sn が液体状態にあることを示している. (文献(20)より転載)

が観測される. このことは, 共晶温度(231°C)より低い温度にもかかわらず, マトリックスから排出された Sn が熔融状態にあることを示唆している. この試料を室温まで冷却すると, β -Sn に対応するブラッグ反射が出現し(図3(d)), Sn の液相から固相への相変化が起こっていることが分かる. 熱処理時の Sn の振る舞いは2体分布関数の結果(図2)と一致している. 詳細な解析の結果, >25 at% Sn のアモルファス GeSn では結晶化前に相分離が起こることが確認された.

アモルファス状態で相分離が生じなかった<25 at% Sn 試料の結晶化過程をより詳細に調査した. 図4は, 21.7 at% Sn を含む GeSn の熱処理に伴うミクロ組織および構造変化である⁽²⁰⁾. 図4(a)の240°Cで得られた回折図形はハローパターンを呈し, 明視野像には結晶による回折コントラストは見られない. すなわち, 共晶温度以上でアモルファス構造が

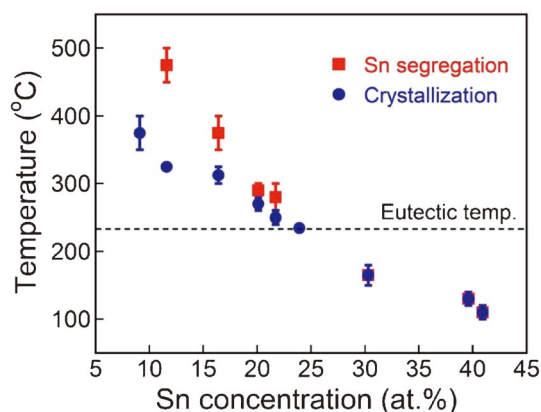


図5 結晶化温度(丸), Sn 排出温度(四角)の Sn 濃度依存性. 破線は Ge-Sn 状態図の共晶温度を示している. 25 at%Sn を境に結晶化挙動が異なることが分かる. (文献(20)より転載)(オンラインカラー)

維持されている. 一方, 260°Cで熱処理した試料の回折図形にはデバイシェラーリングが現れ, 明視野像には結晶による回折コントラストが観測される(図4(b)). 更に高温で熱処理を施すと, この連続的なリングパターンは不連続なスポットパターンに変化し(図4(c)), 結晶粒が成長していることを示している. 実際, 対応する明視野画像には 100 nm 以上の結晶粒が確認された. 図4(c)の回折図形の111リングの外側にはハローリングが出現しており, マトリックスから放出された Sn が液体として存在していることが示唆される. 同様な挙動は, 16.4 at%Sn 試料の結晶化過程でも観察されている⁽²⁶⁾.

図5は, 異なる Sn 濃度を有するアモルファス GeSn の結晶化温度である. 熱処理に際しては, 20~50°C刻みで温度を連続的に上昇させ, 試料を特定の温度で10分間保持した. (図2と図5の結晶化温度の違いは, 熱処理過程の違いに起因するが, 詳細は原著論文⁽²⁰⁾を参考にされたい.)アモルファス Ge の結晶化温度は400~650°C⁽²⁷⁾であるが, アモルファス GeSn はそれより低い温度で結晶化し, 結晶化温度は Sn 濃度の増加とともに低下する. 特に, 25 at%Sn 以上では結晶化温度は共晶温度(231°C)よりも低くなっている.

図5には, マトリックスから Sn が排出される温度もプロットしている. 液体 Sn によるハローリングの強度は弱すぎるため, 結晶化後に試料を室温から高温まで繰り返し熱処理することにより, Sn の排出される温度を決定した. 25 at%Sn 以上の試料では, Sn の排出が結晶化と同時に生じる. 図2(b)の2体分布関数において, 相分離はアモルファス状態で既に誘発されていることが確認されており, この結果は妥当である. 結晶化温度と Sn 排出温度の差は Sn 濃度が低くなるほど大きくなる. Ge/Si 基板上にエピタキシャル成長させた結晶 GeSn についても Sn の挙動が調べられており, 12 at%Sn の結晶 GeSn では350°Cで Sn の排出が起こることが報告されている⁽²⁸⁾. 同じ Sn 濃度のアモルファス GeSn では480°Cまで Sn の排出が抑制されており, アモルファスの再結晶が高 Sn 濃度 GeSn 固溶体を得るのに効果的な方法であ

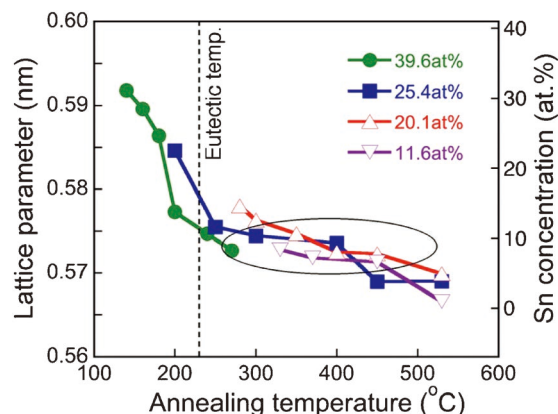


図6 熱処理に伴う格子定数および Sn 濃度の変化. 凡例は, 熱処理前アモルファス GeSn の Sn 濃度. Sn 濃度はベガード則により見積もった. 丸で囲った温度領域では, 固溶度よりも Sn 濃度が高いにも関わらず, Sn の排出が抑制されている. (文献(20)より転載)(オンラインカラー)

ることを示唆している.

図6は, 結晶化した GeSn の室温における格子定数と熱処理温度の関係である⁽²⁰⁾. 凡例には, EDX で測定したアモルファス状態の初期 Sn 濃度を示している. 共晶温度以下で結晶化した試料では格子定数が結晶化後に急激に減少しており, GeSn 結晶からの Sn 原子の排出が顕著である. 25.4 at%Sn 試料の格子定数は結晶化直後に大幅に減少するが, 250°Cから400°Cの範囲ではその減少は小さい. 格子定数のわずかな減少は, 共晶温度以上で結晶化する11.6および 20.1 at%Sn の GeSn でも同様の温度範囲で確認された.

ベガード則を用いて格子定数から Sn 濃度を見積もった. Ge および α -Sn (いずれもダイヤモンド型構造) の格子定数は, それぞれ 0.5658 nm および 0.6493 nm と仮定した. 結晶化直後で Sn がほとんど析出していない試料(<25 at% Sn)においても, 格子定数から推定される Sn 濃度は, EDX により見積もったアモルファス GeSn スパッタ試料の濃度より低い. この原因として, ベガード則からのずれ⁽²⁹⁾および標準試料を用いていないことによる EDX の定量誤差が挙げられる. このため, 図6の Sn 濃度は, Ge マトリックスに含まれる最小量であると考えられる. 丸で囲んだ温度領域では Sn 濃度が 7~10 at% の範囲で変化しておらず(温度ウィンドウ), Sn 排出が抑制されていることが示唆される.

アモルファスからの結晶化により, 固溶限を超える Sn がダイヤモンド型構造の Ge に置換的に組み込まれることが明らかとなった. ただし, 結晶化直後の GeSn 結晶の粒径は数 nm であり(図4(b)), キャリアの粒界散乱により十分な性能を引き出せない可能性がある. Takeuchi ら⁽¹⁰⁾は, 粒径 20~30 nm の多結晶 $\text{Ge}_{0.98}\text{Sn}_{0.02}$ 膜が高いキャリア移動度を示すことを報告している. 今回見出された Sn の排出が抑制される温度(400°C)にて 12.0 at%Sn のアモルファス GeSn 薄膜の熱処理を行ったところ, 9.9 at%の Sn を含む 30~50 nm の GeSn 結晶が得られた⁽²⁰⁾. このことは, 温度ウィンド

ウを使用することにより、Sn 濃度の高い粗大 GeSn 結晶を形成できることを示唆している。

4. 電子線照射下における液体媒介結晶化

照射場を利用した材料創製技術は非熱的過程で平衡状態から離れた材料を実現することが可能である。例えば、アモルファスアルミナ(Al_2O_3)は 700°C まで安定に存在するが⁽¹⁴⁾、電子線下では室温照射で準安定相の $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ に結晶化する⁽¹⁵⁾。また、我々は Ge が電子線照射により高速で結晶化する、いわゆる爆発的結晶化が誘起されることを確認している⁽³⁰⁾。GeSn に関しても電子線照射により結晶化が誘起される。電子線照射誘起結晶化は電子励起効果により生じているが、詳細については他の解説記事⁽³¹⁾⁽³²⁾を参照にされたい。

図 7 は、24 at% Sn のアモルファス GeSn に室温で 100 keV の電子ビームを照射した時の構造変化である⁽³³⁾。結晶化の臨界フラックス($5.2 \times 10^{21} \text{ e/m}^2\text{s}$)で照射された試料では、照射領域全体で均一に結晶化が起こっている(図 7(a))。結晶領域の拡大像(図 7(b))より、直径が 10 nm 以下の微細なナノ結晶の形成が確認された。図 7(c)は、より高いフラックス($2.5 \times 10^{22} \text{ e/m}^2\text{s}$)で照射された試料の明視野像である。中央部(領域 I)の小さな結晶粒は大きな結晶(領域 II)に囲まれており、不均一な微細構造が得られた。同様の構造は、シングルショットレーザーにより結晶化させた Ge 薄膜でも観察されている^{(34)–(36)}。図 7(d)は、領域 I から取得した拡大像であるが、直径が 100 nm を超えるナノ結晶が形成されている。以下、低フラックスおよび高フラックスで生成されるナノ結晶を、それぞれ「微細ナノ結晶」および「粗大ナノ結晶」と呼ぶ。粗大ナノ結晶を囲む大きな結晶は、後述する様にサイズが数百ナノメートルから数マイクロメートルであるため、領域 II の結晶を「マイクロ結晶」と呼ぶ。

図 8(a)は、微細ナノ結晶領域(領域 I)から得られた制限視野電子回折図形である。ダイヤモンド型構造のデバイシェラーリングに加え、一番内側の 111 リングのすぐ外側には弱いハローリングが存在する。このことは、Ge マトリックスから排出された Sn がアモルファスあるいはナノ結晶として存在することを示唆している。図 7(c)の領域 I から得られた回折図形でも同様のデバイシェラーリングが得られるが、粗大ナノ結晶による強いブラッグ反射が重なっている(図 8(b))。111 リングの直ぐ外側には $\beta\text{-Sn}$ による反射が観察される。一方、図 7(c)の領域 II から得られた電子回折図形は単結晶によるパターンを示した。例えば、図 8(c)の回折図形は、ダイヤモンド型構造の(110)逆格子面に対応する。この回折図形は直径が約 $0.6 \mu\text{m}$ の領域から取得されており、結晶領域の外側部分で顕著な粒成長が起こっていることを示している。図 8(c)の回折図形には四角形で示した様に方位の異なる 2 つの(110)パターンが重なっており、双晶が存在することが分かる。EDX 測定の結果、領域 II のマイクロ結晶は 15~20 at% Sn の濃度を有することが確認された⁽³³⁾。

今回観察された不均一な組織の形成過程を明らかにするた

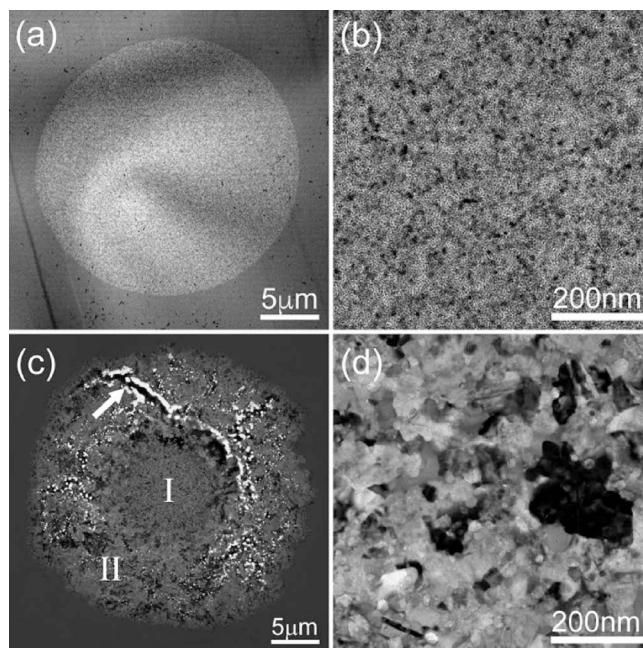


図 7 100 keV の電子線照射により結晶化した 24 at% Sn 試料の明視野像。照射フラックスは (a, b) 5.2×10^{21} , (c, d) $2.5 \times 10^{22} \text{ e/m}^2\text{s}$ 。(a) では照射領域全体で微細ナノ結晶が出現するのに対し、(c) では粗大ナノ結晶(領域 I)、マイクロ結晶(領域 II)から成る不均一な組織が形成されている。(c) の矢印で示した所は最終結晶化部に相当する。(b, d) 照射領域の中心付近の拡大図。(文献(33)より転載)

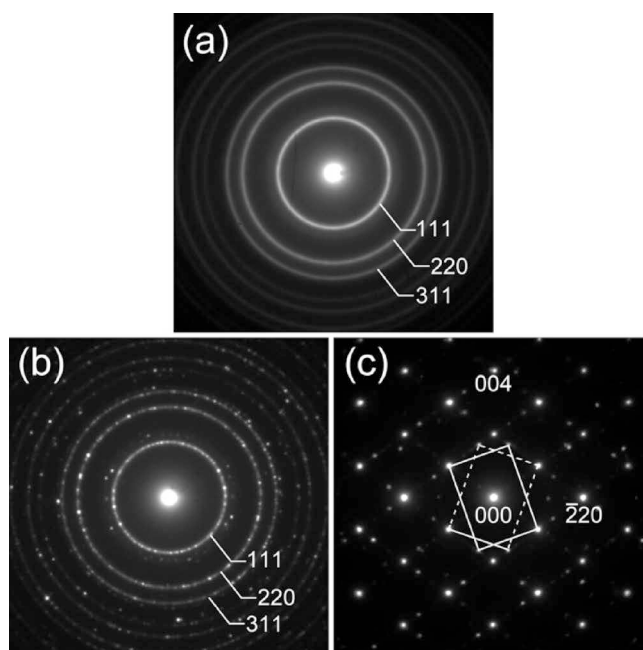


図 8 (a) 微細ナノ結晶、(b) 粗大ナノ結晶、(c) マイクロ結晶領域から得られた制限視野電子回折図形。(a) ではダイヤモンド型構造の 111 リングの直ぐ外側にハローリングが存在するのに対し、(b) では同じ位置に $\beta\text{-Sn}$ によるブラッグ反射が見られる。(c) の単結晶パターンは双晶の存在を示している。(文献(33)より転載)

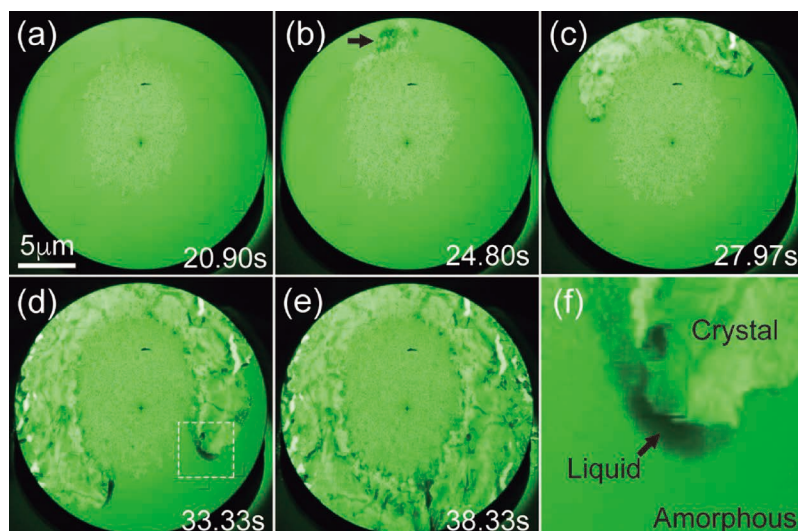


図9 (a-e) 24 at%Sn 試料の電子線照射誘起結晶化過程のスナップショット．照射領域の中心付近で粗大ナノ結晶粒が生成した後に (b) の矢印の所からマイクロ結晶が発生し，粗大ナノ結晶領域を取り囲むように結晶化が進行する．(f) (d) の四角の領域の拡大図．結晶とアモルファスの間に液体と思われるコントラストが存在する．(オンラインカラー)

めに，電子線照射下での構造変化のその場観察を行った．観察に際しては，蛍光板に映し出された像をデジタルカメラにより直接記録した(動画は文献(33)を参照)．図9は，24 at%SnのアモルファスGeSnにフラックス約 $2 \times 10^{22} \text{ e/m}^2\text{s}$ で電子線照射を施した時の結晶化過程のスナップショットである．結晶化が始まった時間を「0秒」としている．臨界フラックス以上では，照射領域の中心付近で結晶の核生成が生じ，外側に向かって結晶化が徐々に進行する(図9(a))．その後，粗大ナノ結晶領域に隣接して突然大きな結晶粒が現れ(図9(b)の矢印)，領域Iを取り囲むように急速な結晶化が起こる(図9(c, d))．結晶化はアモルファス/結晶界面で進行し，時計回りと反時計回りに進む結晶成長先端部が接すると結晶化が完了する(図9(e))．

24 at%のSnを含むアモルファスGeSnは，熱処理により約230°Cで結晶化する⁽²⁰⁾．これに対して，電子線照射による温度上昇は小さく，Snの融点までは上昇していない⁽¹⁹⁾⁽³³⁾．実際，アモルファス Al_2O_3 に蒸着したインジウム(融点：156°C)が，電子線照射実験により溶融しないことを確認している⁽¹⁵⁾．更に，照射領域の電子線強度は，ビームの中心付近で最大値をとるガウス分布となっているが，急速な結晶化は照射領域の外側，すなわちフラックスが小さい所で起こっている．これらの結果は，領域IIにおけるマイクロ結晶の形成は温度上昇によるものではないことを示唆している．

図9(f)は，図9(d)の四角で囲った領域を拡大したものである．結晶成長先端部は全体的にぼんやりとした黒いコントラストを呈し，結晶の様な顕著な回折コントラストは見られない．このことは，結晶化先端部に液体が存在することを示唆している．アモルファスおよび液体のコントラストは原子番号と密度に依存するため，結晶化先端部はアモルファスマトリックスよりも重い元素から構成されていると考えられ

る．またEDX測定の結果，結晶化終端部(時計回りと反時計回りに進む結晶成長先端部が接した所)はSnの濃度が著しく高くなっていることが確認され，液体Snの形成を支持している．

上述した様に領域Iから得られた電子回折図形(図8(a))にはアモルファスあるいはナノ結晶によるハローリングが観察された．このことは一旦形成した液体Snが凝固したことを示唆している．排出されたSnは電子線照射下では過冷却液体状態で存在し，結晶化の進行とともに蓄積する．液体Snの量がある臨界値を超えると，粗大ナノ結晶からマイクロ結晶の形成へと成長モードが変化し，領域IIの組織が形成されると考えられる．この妥当性を検証するため14 at% Snおよび31 at%SnのアモルファスGeSnに100 keVの電子線を室温にて照射した．前者では照射領域にて結晶核生成がランダムに生じ，領域Iに相当する組織が得られた．これとは対照的に，後者では核生成と同時に結晶/アモルファス界面の黒いコントラストを伴って急速に結晶化が進行し，領域IIの組織が得られた．(動画は文献(33)を参照)．この結果は液体Snを介してマイクロ結晶が形成されていることを支持するものである．

5. まとめと今後の展望

本稿では，熱処理および電子線照射によるアモルファスGeSnの結晶化過程を透過電子顕微鏡その場観察により調査した結果を紹介した．Ge中のSnの固溶度は約1 at%であるため，結晶化に伴い相分離が生じる．Snの析出を抑制し，高Sn濃度GeSn結晶を実現するには結晶化時におけるSnの挙動に関する知見が必要であるが，我々は25 at%以上のSnを含むアモルファスGeSnでは，熱処理，電子線照射いずれの場合もアモルファス状態で相分離が生じていること

通常の熱処理の場合、Sn 析出を抑制しながら 25 at% Sn 以上の GeSn 多結晶薄膜を得ることは困難であると考えられる。一方、電子線照射誘起結晶化においては、結晶/アモルファス界面に存在する過冷却液体 Sn を介して、粗大な結晶が急速に成長し、Sn は最終結晶化部に偏析することが確認された。この現象を制御することにより、熱処理試料よりも高濃度の Sn を含んだ GeSn 粗大結晶を実現できると考えられ、現在研究を進めている。

文 献

- (13) M. Ishimaru, A. Hirata, M. Naito, I.-T. Bae, Y. Zhang and W. J. Weber: *J. Appl. Phys.*, **104**(2008), 033503 (5 pages).
- (14) R. Nakamura, T. Shudo, A. Hirata, M. Ishimaru and H. Nakajima: *Scr. Mater.*, **64**(2011), 197–200.
- (15) R. Nakamura, M. Ishimaru, H. Yasuda and H. Nakajima: *J. Appl. Phys.*, **113**(2013), 064312 (7 pages).
- (16) M. Okugawa, R. Nakamura, M. Ishimaru, H. Yasuda and H. Numakura: *J. Appl. Phys.*, **120**(2016), 134308 (7 pages).
- (17) R. Takase, M. Ishimaru, N. Uchida, T. Maeda, K. Sato, R. R. Lieten and J.-P. Locquet: *J. Appl. Phys.*, **120**(2016), 245304 (9 pages).
- (18) M. Okugawa, R. Nakamura, H. Numakura, M. Ishimaru and H. Yasuda: *J. Appl. Phys.*, **128**(2020), 015303 (9 pages).
- (19) T. Kimura, M. Ishimaru, M. Okugawa, R. Nakamura and H. Yasuda: *Jpn. J. Appl. Phys.*, **56**(2017), 100307 (3 pages).
- (20) M. Higashiyama, M. Ishimaru, M. Okugawa and R. Nakamura: *J. Appl. Phys.*, **125**(2019), 175703 (8 pages).
- (21) Y. Hirotsu, M. Ishimaru, T. Ohkubo, T. Hanada and M. Sugiyama: *J. Electron Microsc.*, **50**(2001), 435–442.
- (22) M. Ishimaru, I.-T. Bae, Y. Hirotsu, S. Matsumura and K.E. Sickafus: *Phys. Rev. Lett.*, **89**(2002), 055502 (4 pages).
- (23) M. Ishimaru: *Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. B*, **250**(2006), 309–314.
- (24) A. Hirata, Y. Hirotsu, T. Ohkubo, T. Hanada and V. Z. Bengus: *Phys. Rev. B*, **74**(2006), 214206 (9 pages).
- (25) A. Hirata, Y. Hirotsu, K. Amiya and A. Inoue: *Phys. Rev. B*, **78**(2008), 144205 (6 pages).
- (26) M. Higashiyama, M. Ishimaru, M. Okugawa and R. Nakamura: *Proc. Mater. Sci. Technol. 2018 (MS&T18)* (2018), 284–287.
- (27) Z. H. Cao, P. Liu, X. K. Meng, S. C. Tang and H. M. Lu: *Appl. Phys. A*, **94**(2009), 393–398.
- (28) P. Zaumseil, Y. Hou, M. A. Schubert, N. von den Driesch, D. Stange, D. Rainko, M. Vigilio, D. Buca and G. Capellini: *APL Mater.*, **6**(2018), 076108 (10 pages).
- (29) A. V. G. Chizmeshya, M. R. Bauer and J. Kouvetakis: *Chem. Mater.*, **15**(2003), 2511–2519.
- (30) M. Okugawa, R. Nakamura, H. Numakura, A. Heya, N. Matsuo and H. Yasuda: *Jpn. J. Appl. Phys.*, **58**(2019), 045501 (6 pages).
- (31) 石丸 学, 仲村龍介: *日本結晶学会誌*, **61**(2019), 29–34.
- (32) 石丸 学, 仲村龍介: *顕微鏡*, **54**(2019), 126–130.
- (33) K. Inenaga, R. Motomura, M. Ishimaru, R. Nakamura and H. Yasuda: *J. Appl. Phys.*, **127**(2020), 205304 (9 pages).
- (34) G. C. Egan, T. W. Heo, A. Samanta and G. H. Campbell: *Acta Mater.*, **179**(2019), 190–200.
- (35) L. Nikolova, M. J. Stern, J. M. MacLeod, B. W. Reed, H. Ibrahim, G. H. Campbell, F. Rosei, T. LaGrange and B. J. Siwick: *J. Appl. Phys.*, **116**(2014), 093512 (9 pages).
- (36) M. K. Santana, S. Raoux and G. H. Campbell: *Appl. Phys. Lett.*, **107**(2015), 252106 (5 pages).

1994年3月 九州大学大学院総合理工学研究科博士課程修了
1994年4月 九州大学工学部助手
2000年5月 大阪産業科学研究所助教授(准教授)
2013年4月- 現職
専門分野: 透過電子顕微鏡法による構造解析
◎照射場と材料の相互作用を利用した材料創製およびアモルファス材料の構造解析に関する研究に従事。



仲村龍介

微小領域における金属材料の材料力学

—Ⅳ．微小金属材料の引張及び曲げ変形とヤング率の計測—

曾 根 正 人*

第三回講座において、微小圧縮試験を通して、金属材料の集合組織や双晶などの微細構造および合金化の影響や、表面酸化物などの不純物が微小金属材料の機械的特性にいかに関与に影響を与えるかを議論した。金属学を学ぶ研究者にとって常識的な議論であるが、異なるのはサンプルサイズであり、サイズの減少に伴い顕在化する現象の強弱が変わるのである。集合組織やポイド更に表面酸化層は、微小金属材料にとっては致命的に大きな欠陥となる場合がある。また、金属種の違いにより、X線回折法により得られる間隔と、結晶粒径の相関を厳密に議論する必要があることも示した。

同時に本講座では、これらの微小金属材料の機械的特性について、マイクロメートルサイズの微小圧縮試験を通して議論してきた。微小圧縮試験片を用いる機械的特性試験は、試験片の作製手法の簡便性や実験再現性の高さなど様々なメリットを有している。しかし、MEMSなどの電子デバイスを構成する微小構造部材に起こる変形は圧縮だけでなく、引張や曲げ変形がある。今回は、微小金属材料の引張変形や曲げ変形挙動を議論する。更に、微小圧縮試験で容易には決定できないヤング率について、最新かつ簡便な方法を説明する。

4.1 微小金属材料の引張試験

金属材料の微小材料試験において、世界的に主流な方法は圧縮試験であり、多くの研究が報告されている⁽¹⁾⁽²⁾。集束イオンビーム(FIB)加工機を用いて数10ナノメートルから数百マイクロメートルまでの幅広いサイズで試験片を作製する場合、柱状の圧縮試験片作製が最も簡便であり、工程数も少ないというメリットがある。更に微小材料試験においては、試験片とインデンターの微細な位置合わせが難しくかつ重要で

あるが、その点においても相対的に簡単である。しかし、引張試験はそもそも圧縮試験とは変形モードが異なる以外にも金属材料に関する多くの知見を与えることが知られている⁽³⁾⁻⁽⁹⁾。

微小領域の金属材料において、降伏強度に関して圧縮変形と引張変形でどの程度異なるかは、興味ある問題である。図4.1(a)に、ナノ結晶ニッケル⁽²⁾から作製した微小引張試験片(変形部分 $10 \times 10 \times 20$ マイクロメートル)と、ダイヤモンドから作製した微小グリッパをセッティングした微小引張試験の様子を示している⁽⁵⁾。微小引張試験片及び微小グリッパを見ると、試験片作製の困難さと同時に、位置決めを含めた引張試験の実施そのものの難易度の高さが理解できると思う。図4.1(b)に、引張変形後のナノ結晶ニッケル試験片のSEM像を示しているが、高分子などの等方的な非晶材料にしばしば観察される滑らかなネッキングが見られる。

図4.2に、上記の微小引張試験片を用いて得られた公称応力-ひずみ曲線(a)を、更に同じ材料から作製した微小圧縮試験片を用いて得られた結果(b)とともに示す⁽⁵⁾。この結果から引張試験では3.0 GPa、圧縮試験では3.8 GPaの降伏強度が得られた。材料においても変形モードによって異なる降伏強度値を与えることは知られている。この引張試験における降伏強度が圧縮より低かったのは、次の理由が考えられる。ナノ結晶ニッケルでは微細な結晶粒の中で転位は移動できず、そのため加工硬化が抑制される。結果として引張変形の初期に塑性不安定条件に到達するため、引張変形の流動応力は圧縮変形より低くなる。従って、圧縮試験から得られる降伏応力は、引張試験で得られる降伏応力より、1.1~1.2倍程度大きくなる⁽⁶⁾。

* 東京工業大学 科学技術創成研究院；教授(〒226-8503 横浜市緑区長津田町4259-R2-35)

Mechanics of Metallic Materials in Micro-Scale —IV. Tensile and Bending Deformation of Micro-size Metal and the Young Modulus Measurements—; Masato Sone(Institute of Innovative Research, Tokyo Institute of Technology, Yokohama)

Keywords: *micro-size specimen, mechanical property, tensile, bending, laser Doppler method, young modulus*

2020年7月27日受理[doi:10.2320/materia.59.669]

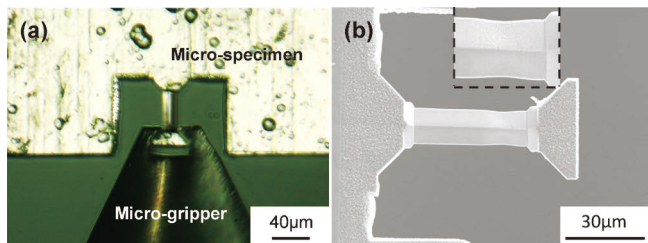


図4.1 微小金属材料試験片の引張試験の様子(a)およびナノ結晶ニッケルの試験後の SEM 像(b).

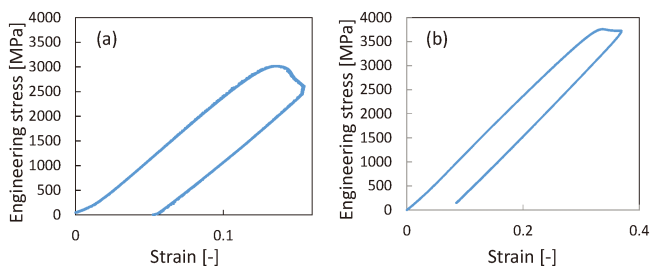


図4.2 ナノ結晶ニッケルめっきの微小引張試験(a)および微小圧縮試験(b)による公称応力-ひずみ曲線.

4.2 単結晶ニッケル材料の微小引張試験

ナノ結晶金属は等方的な材料であり、材料の変形に結晶方位の異方性は表れない。図4.3に単結晶ニッケルの微小引張材料試験前後の SEM 像を示す⁽⁷⁾。図4.3(a)および(b)に、引張方向(応力負荷方向)に対してそれぞれ $\langle 223 \rangle$ および $\langle 111 \rangle$ 結晶方位を合わせた単結晶ニッケル微小引張材料試験片の結果を示す。図4.3(c)に示すように引張方向が $\langle 223 \rangle$ 結晶方位の場合すべり線が見られる。同様に $\langle 111 \rangle$ 結晶方位(図4.3(d))の場合、沢山のすべり線が見られ、交差も観察される。

単結晶中に複数存在するすべり系において、最初に活動するすべり系、すなわち、主すべり系は、シュミット因子が最大のものであり、その時の応力は臨界分解せん断応力(Critical Resolved Shear Stress: CRSS : τ_c)と定義される。CRSS は、以下の式で表すことができる。

$$\tau_c = \sigma_y \cos \varphi \cos \lambda$$

ここで、 σ_y は引張における降伏応力、 φ は負荷軸とすべり面の法線のなす角、 λ は負荷軸とすべり方向のなす角である。純ニッケルの CRSS は3.24–7.35 MPa である。表4.1に FCC 金属で起りやすいすべり系である $\langle 110 \rangle$ 方向と $\{111\}$ 面のすべり系に属する最大 Schmid 因子を示す。図4.4(a)および(b)に、それぞれ $\langle 223 \rangle$ および $\langle 111 \rangle$ 結晶方位のサンプルに対して測定した微小引張試験の公称応力-ひずみ曲線を示す。なお再現性のため各々二本の同じ結晶方位サンプルに対して微小引張試験を実施した。 $\langle 223 \rangle$ 結晶方位のサンプルの公称応力-ひずみ曲線は幾何的な折れ曲がりを示しており、領域1の右端の応力値は約23 MPa となり、表4.1の[101]

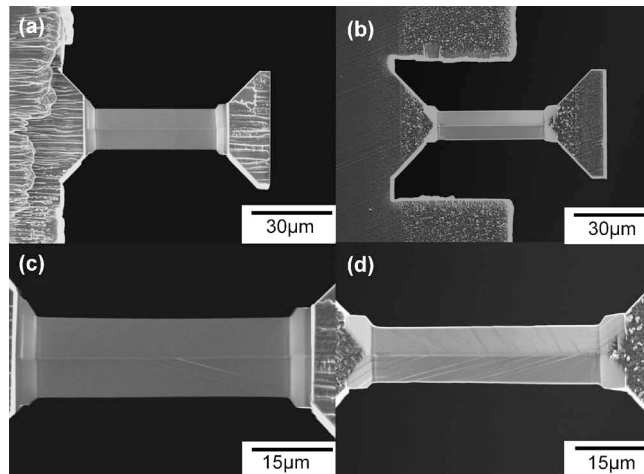


図4.3 (a) $\langle 223 \rangle$ および(b) $\langle 111 \rangle$ の単結晶ニッケルの微小引張試験片および試験後の試験片の変形部分((c) $\langle 223 \rangle$ 、(d) $\langle 111 \rangle$)の SEM 像.

表4.1 単結晶ニッケルの $\langle 110 \rangle$ 方向と $\{111\}$ 面のすべり系に属する最大 Schmid 因子.

Loading axis $\langle 223 \rangle$

Slip system	Schmid factor
[101](-1-11)	0.44
[1-10](11-1)	0.43
[-101](1-11)	0.35
[110](-11-1)	0.35
[0-11](111)	0.09
[0-11](-111)	0.08

Loading axis $\langle 111 \rangle$

Slip system	Schmid factor
[110](-11-1)	0.33
[0-11](111)	0.32
[-101](1-11)	0.30
[-101](111)	0.28
[0-11](-111)	0.19
[110](-111)	0.19

(-1-11)あるいは[1-10](11-1)に対応している。次の領域2は、[-101](1-11)あるいは[110](-11-1)に対応していると考えられる。図4.4の二つの同じ結晶方位サンプルがほぼ重なった公称応力-ひずみ曲線を示しているのは、同じニッケル単結晶のほぼ同じ場所に並べて引張試験片を作成して比較しているためである。一方、 $\langle 111 \rangle$ 結晶方位の場合、表4.1の

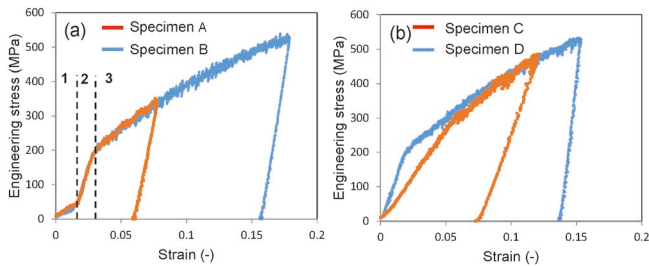


図4.4 (a)<223>および(b)<111>の単結晶ニッケルの微小引張試験による公称応力-ひずみ曲線。

最大 Schmid 因子はほとんど差がない．このため，交差すべりが発生したと考えられる．このように単結晶金属の微小引張試験では，CRSS に基づくすべり変形が明確に見られる．

4・3 純銅および Cu-Ni-Si 合金の微小引張試験

前節では，ニッケルのナノ結晶と単結晶の引張試験結果を議論した．また前講座での微小圧縮試験の研究結果でも，二元系 Au-Cu 合金めっきのような単純系金属材料のみ議論している．従って，微小金属材料の機械的強度への集合組織，合金化，双晶及び不純物の効果は議論してきたが，析出強化型金属材料に関しては議論していない．ここで，析出強化型合金として Cu-Ni-Si 合金⁽¹⁰⁾を選択し，微小引張試験による研究結果を議論する．この合金の組成は Cu-2.4Ni-0.51Si-9.3Zn-0.15Sn-0.13Mg(重量%)であり，析出相は δ -Ni₂Si である．図4.5に多結晶純銅および多結晶 Cu-Ni-Si 合金の多結晶材料の微小引張試験前後の SEM 像を示す⁽⁸⁾．この純銅の結晶粒のサイズは10マイクロメートル前後であり，変形後にはネッキングと，各結晶粒に様々な方位にすべり線が観察される．一方，図4.5(c)に示す Cu-Ni-Si 合金の微小引張試験片は，二つの結晶粒からなっている．引張変形後の SEM 像は上部の結晶粒だけにせん断が起きている．図4.3に示す単結晶ニッケルの引張試験の結果と比較すると，多重のすべりと複雑なネッキングが生じたことがわかる．

図4.6に純銅および Cu-Ni-Si 合金の微小引張試験の加工硬化挙動を示す．微小引張試験における塑性変形の初期においてはネッキングが小さく，従って加工硬化挙動を議論することができる．降伏後には，純銅も Cu-Ni-Si 合金も最大 Schmid 因子を持つすべり面で，転位は容易に滑ることができる．しかし純銅と比較し，Cu-Ni-Si 合金は非常に大きな加工硬化が見られた．これは，析出物である δ -Ni₂Si がすべり面に対し，強い障害物として働いていることがわかる⁽¹⁰⁾．このような微細析出物に起因する加工硬化挙動は，微小圧縮試験では確認できない．

以上，金属材料の微小引張試験の結果を議論したが，微小試験片の作製方法が複雑であり，微小材料試験そのものも難易度が高いが，微小圧縮試験と比較して単結晶の CRSS に基づく情報や微小析出物による加工硬化等の様々な情報を得ることができる．

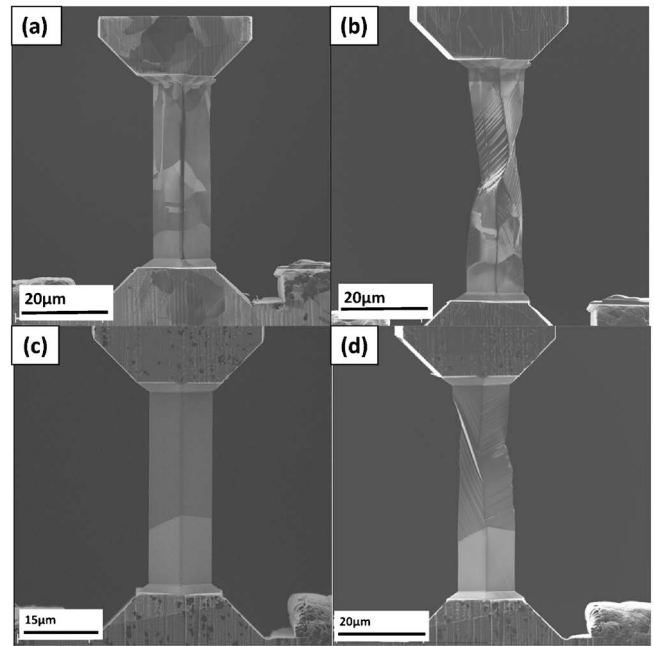


図4.5 純銅((a), (b))および Cu-Ni-Si 合金((c), (d))の微小引張試験前後 SIM 像，試験前((a), (c))および試験後((b), (d))．

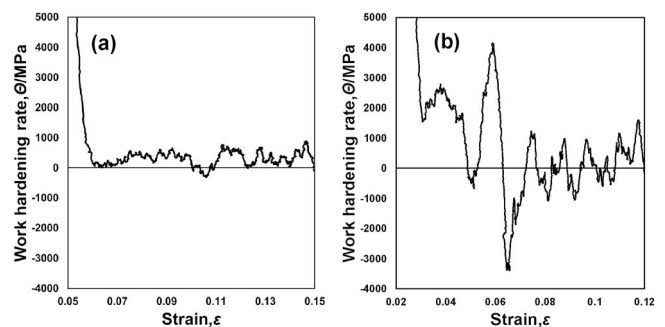


図4.6 微小引張試験による純銅(a)および Cu-Ni-Si 合金(b)の加工硬化挙動．

4・4 金銅合金の微小曲げ変形

第二回講座において，MEMS 加速度センサの構成材料をシリコンから高密度の金属材料に変更することで，超高感度化を実現すること⁽¹¹⁾⁽¹²⁾，および複雑な三次元金属構造からなる MEMS においてその構造部材の信頼性を保証するための機械的特性評価が必要なことを記述した．しかし，この MEMS 中の三次元金属構造において，その構造部材の主な変形モードは，圧縮や引張変形ではなく曲げ変形である．ここでは，金属材料の微小曲げ試験の研究結果⁽¹³⁾⁻⁽¹⁹⁾について議論する．

第三回講座では，微小圧縮試験によって最大で1.15 GPaの降伏強度を有する金銅合金めっきについて議論した．そこで，三つの組成 Au_{94.4}Cu_{5.6}，Au_{87.5}Cu_{12.5}，Au_{85.0}Cu_{15.0} の金銅合金めっきに関して，微小曲げ試験の結果を微小圧縮試

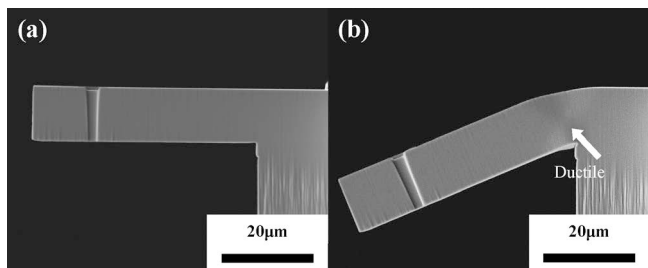


図4.7 金銅合金めっき (Au_{94.4}Cu_{5.6}) の微小曲げ試験前後 SEM 像, 試験前(a)および試験後(b).

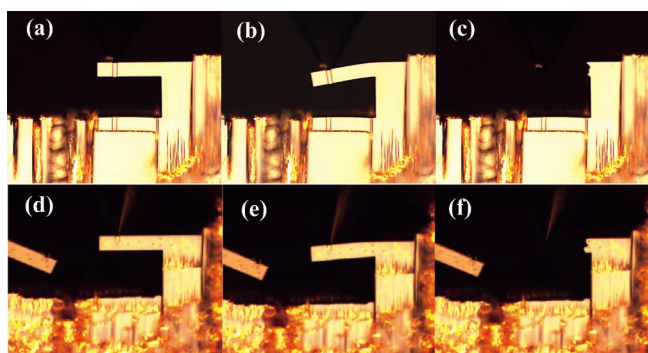


図4.8 金銅合金めっき (Au_{87.5}Cu_{12.5}), (Au_{85.0}Cu_{15.0}) の微小曲げ試験の光学顕微鏡像, 順番 (Au_{87.5}Cu_{12.5}): (a)→(b)→(c), (Au_{85.0}Cu_{15.0}): (d)→(e)→(f).

験^{(20)–(22)}と比較して議論する⁽¹⁸⁾. 微小曲げ試験片は、梁部分10×10×50マイクロメートルのカンチレバーである。図4.7に Au_{94.4}Cu_{5.6} の金銅合金めっきの微小曲げ試験前後のSEM像を示す。カンチレバーの付け根部分に降伏が見られる。この組成において破断は起こらなかった。図4.8に、Au_{87.5}Cu_{12.5}, Au_{85.0}Cu_{15.0} の金銅合金めっきの微小曲げ試験の光学顕微鏡写真を示す。この二つの合金に関しては、破断まで変形を行った。ここで、Au_{85.0}Cu_{15.0} の微小曲げ試験では降伏前に脆性破壊が見られた。Au_{87.5}Cu_{12.5} の微小圧縮試験では脆性破壊は見られなかったのに対し、微小曲げ試験では見られた点は、集合組織を含む欠陥に敏感であることを意味し、総じて変形モードによる違いと言える。

この三つの金銅合金の微小曲げ試験から得られる公称応力-ひずみ曲線を図4.9に示す。ここで公称応力は、Euler-Bernoulli 梁理論を用いて計算した^{(18) (23)}。

$$\sigma = 6Fy/wh^2$$

ここで、 F は負荷力、 y , w および h はそれぞれカンチレバーのモーメントアーム(回転軸と力の作用線を結んだ垂線の距離), 幅および厚さである。ひずみは以下の式で計算した⁽²⁴⁾。

$$\varepsilon = d/y$$

ここで d は変位、 y はモーメントアームである。金銅合金めっきの微小曲げ強度の降伏強度(0.2%耐力)を、微小圧縮試験の結果と合わせて、表4.2にまとめている。金銅合金の

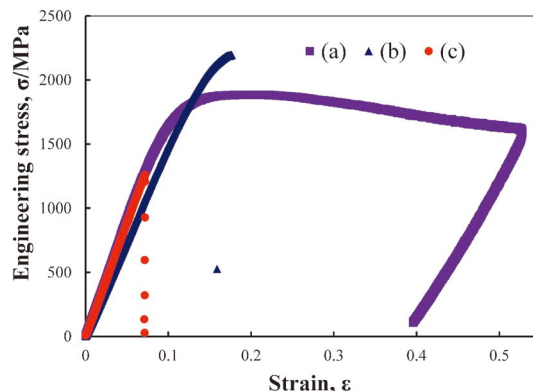


図4.9 金銅合金めっきの微小曲げ試験による公称応力-ひずみ曲線, (a) Au_{94.4}Cu_{5.6}, (b) Au_{87.5}Cu_{12.5}, (c) Au_{85.0}Cu_{15.0}.

表4.2 電流密度を変えて作成した金銅合金めっきの組成, 降伏強度(圧縮および曲げ), X線回折法から得られた組織間隔。

Current density (mA/dm ²)		3.0	5.0	8.0
Alloy Composition (at.%)		Au _{94.4} Cu _{5.6}	Au _{87.5} Cu _{12.5}	Au _{85.0} Cu _{15.0}
Yield strength (GPa)	Compression	1.05	1.15	1.00
	Bending	1.42	1.83	1.26
D (nm): X-ray Diffraction		7.6	5.3	7.8

微小曲げ試験で得られる降伏強度は、微小圧縮試験から得られるものと比較すると全体として高い値である。曲げ強度と圧縮強度とは定義が異なり、降伏強度が異なることは自明である。ただし、これらの三つの金銅合金の中で、降伏強度が最も大きいのは Au_{87.5}Cu_{12.5} である。

これまでに、金属材料の微小圧縮試験、微小引張試験および微小曲げ試験を議論してきた。微小圧縮試験と微小曲げ試験は公称応力やひずみの計測方法は基本的に同じであり、画像処理を利用したひずみの計測手法を精密化するなどの手法の違いはあっても、本質的な違いはない。しかし、今回では微小曲げ試験は Euler-Bernoulli 梁理論を用いて計算しており、それらとは定義そのものが異なっている。微小曲げ試験に関するひずみの計算に関する上記の式は、現在でも完全に確立された方法ではなく、研究対象として議論を残している。

4.5 金銅合金めっき材料のヤング率測定

第二回講座において、微小材料試験では、試験片の基板材料の剛性および、試験機のインデンターやロードセルの剛性が試験結果に干渉するため、微小圧縮試験ではヤング率の難しいことを述べた。ヤング率は基本的に結晶粒のサイズには大きく影響を受けない。またサンプルサイズ効果もヤング率には強い影響を与えないはずである。しかし、材料の微小化は比表面積を増加させること、またヤング率への幾何異方性の影響は興味すべき研究課題である。

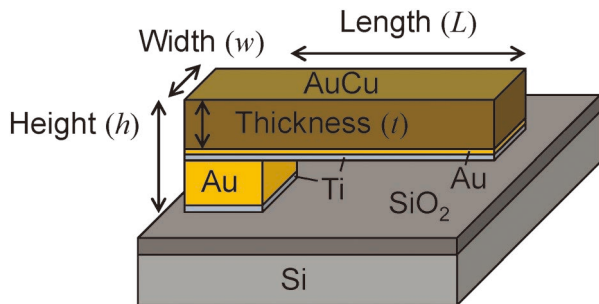


図4.10 金銅合金めっきのレーザードップラー法によるヤング率測定に用いた微小曲カンチレバー試験片.

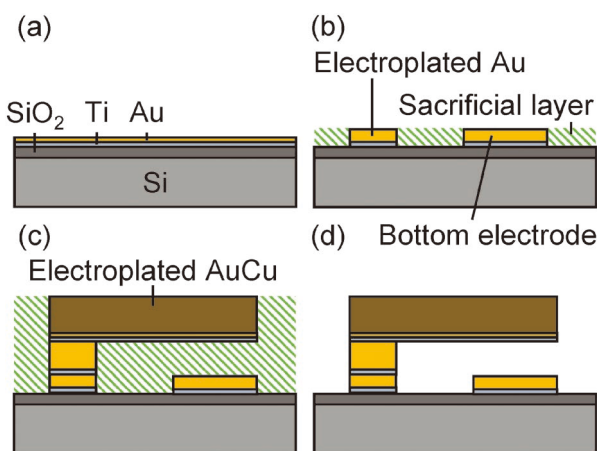


図4.11 金銅合金めっき微小曲カンチレバー試験片の作製スキーム (a) Ti 層と金シード層の析出, (b) レジストパターン形成と金めっき電極の作製, (c) レジストパターン形成と構成部材のめっきによる形成, (d) ドライエッチング.

材料試験機や試験片の基盤の剛性からの測定系への干渉を抑える方法を考えると、変形モードとして曲げ変形が理想的である。その点から金属カンチレバーを作成することでレーザードップラー法を利用することができる。図4.10に我々が提案している MEMS 構成部材の微小カンチレバー試験片を示す⁽¹¹⁾⁽²⁵⁾。いままでの FIB によって作製する微小材料試験片の構造より、材料構成が複雑であることは理解していただけるだろう。このレーザードップラー法用微小カンチレバー試験片のリソグラフィーによる作製手順を図4.11に示す⁽²⁶⁾。電気めっきを用いてこのように三次元構造を形成する方法は、高感度 MEMS 加速度センサの作製方法と同じものである⁽¹¹⁾⁽¹²⁾。この点において、今回議論する方法から得られるヤング率は、実際の MEMS 加速度センサの構成部材の値を反映していると言える。

レーザードップラー法^{(27)–(29)}の実験装置を図4.12に示す。この装置を利用して、カンチレバーの振動波形とそのフーリエ変換した結果を図4.13に示す。ここから得られる共鳴周波数 f_c は以下の式で表現される⁽²⁷⁾。

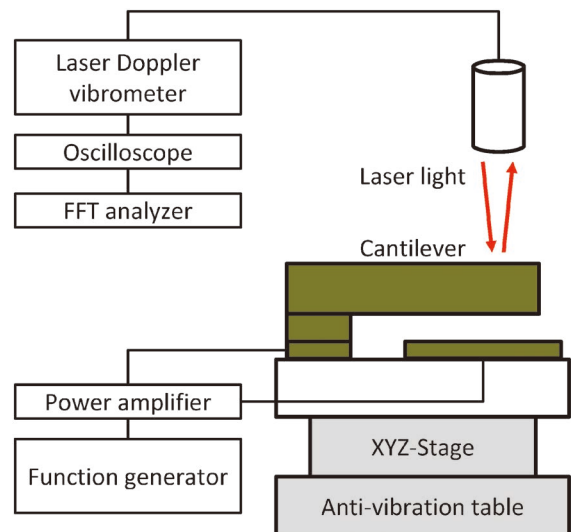


図4.12 レーザードップラー法によるヤング率測定装置.

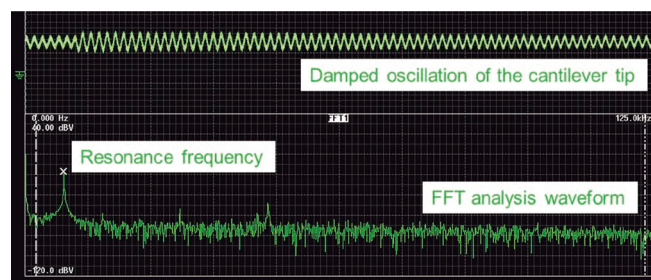


図4.13 レーザードップラー法による金属カンチレバーの振動波形とそのフーリエ変換結果.

$$f_c = 0.162 \frac{t}{L^2} \sqrt{\frac{E}{\rho}}$$

E は金属カンチレバーの実効ヤング率、 L はカンチレバーの長さで $50 \sim 1000 \mu\text{m}$ 、 t は金銅合金カンチレバーの厚さ、 ρ は金銅合金の密度である。実効ヤング率の計算は、 L^{-2} と共鳴周波数化 f_c を最小二乗法プロットし、精度を上げている。図4.14にその例を示す。算出された金銅めっきの実効ヤング率は表4.3に示す通り、 $70 \sim 80 \text{ GPa}$ である。純金のヤング率 79 GPa ⁽³⁰⁾ と純銅のヤング率 129 GPa ⁽³¹⁾ と比較するといずれより低い。また単結晶金属材料の結晶方位性依存性は、 $E\langle 111 \rangle = 117$ および $E\langle 100 \rangle = 43 \text{ GPa}$ ⁽³²⁾ であり、構成する結晶粒の結晶方位の影響も考えられる。ここで、実効ヤング率と記述したことについて説明すると、レーザードップラー法で計測した実効ヤング率は、カンチレバーの長軸に対し鉛直上下方向のものとなり、形状異方性も含む値である。現実の MEMS にとってこの方向の振動が主体となり、この方向のヤング率こそが最も重要なものである。従って微小領域の金属材料のヤング率にバルクの金のヤング率をそのまま利用することが危険であることは理解できる。

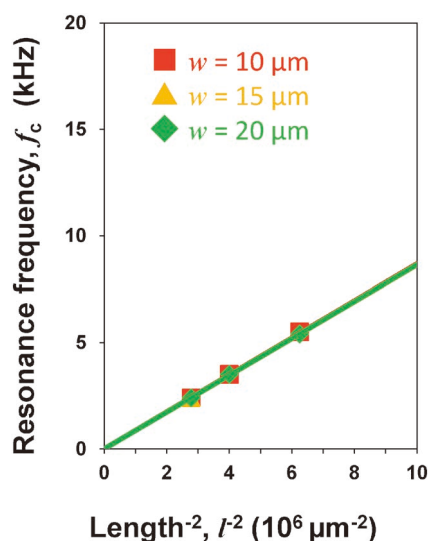


図4.14 レーザードップラー法による金銅合金(Au₈₅Cu₁₅)カンチレバーの共鳴周波数(f_c)とカンチレバーの長さ(L^{-2})の相関.

表4.3 様々な組成の金銅めっきのレーザードップラー法による実効ヤング率.

Alloy(at%)	Effective Young's modulus, E (GPa)		
	$w = 10 \mu\text{m}$	$w = 15 \mu\text{m}$	$w = 20 \mu\text{m}$
Au _{95.2} Cu _{4.8}	69.4 ± 1.9	71.3 ± 0.3	74.2 ± 2.2
Au ₉₀ Cu ₁₀	71.3 ± 6.6	68.5 ± 1.2	72.0 ± 0.6
Au ₈₅ Cu ₁₅	76.2 ± 1.4	75.0 ± 1.0	75.5 ± 1.0

は、微細配線としての導電性金属材料から、機械的構成部材へ応用が展開したことである。微小領域の金属材料の材料工学について、最も重要なことはサンプルサイズが金属の変形の核心である転位の動きに対して相対的に敏感であること、同時に結晶粒・双晶および集合組織の影響がバルク材料と比較し相対的に大きくなることが挙げられる。すなわち、マイクロメートルサイズの金属材料では結晶欠陥である転位および他の微細組織の影響がより顕在化しやすいのである。その意味において、微小領域の金属材料の機械的物性は、利用するサイズで研究および計測する必要がある。講座の内容を含め、いままでに様々な新しい知見が得られてきたが、微小領域の金属材料の材料工学について解明すべき課題は多く残っている。

本講座の研究成果は、非常に多くの共同研究者によってなされたものである。共同研究者である、肥後矢吉名誉教授、里達雄名誉教授、益一哉学長、町田克之教授、伊藤浩之准教授、山根大輔准教授(立命館大学)、年吉洋教授(東京大学)、Tso-Fu Mark Chang 助教、名越貴志 AIST 博士研究員、柴田暁伸 NIMS・評価分野 鉄鋼材料グループグループリーダー、唐浩峻氏、野田炎氏、唐澤佑粹氏、上村泰紀氏、今村洋仁氏、武藤雅英氏、木梨光氏、木原好昭氏、田辺万奈氏、鄭伯倫氏、寺西美波氏、柳田佐理氏、葭葉将治氏、石塚陽大氏、鈴木拓真氏、橘 航一朗氏、Ken Hashigata 氏、浅野啓介氏、中島英亮氏、山本貴大氏、新田京太郎氏、渡邊隆氏、鈴木康介氏に心からの感謝を示す。

また、本稿は、NEXT プログラム(課題番号: GN037)(2010~2013)、科学研究費補助金 S(課題番号: 26220907)(2013~2018)、JST-CREST(課題番号: JPMJCR1433)(2014~2020)の成果を含む。

(完)

4.6 微小領域における金属材料の材料力学について

この4回の講座において、微小領域の材料力学を電解めっき金属と単結晶金属を中心にして、微小材料試験法を通して解説した。まず、金属の微細組織は、光学顕微鏡、X線回折法、SEMあるいはTEMなどを相補的に利用して解析する必要がある、その上で各分析法の分解能を理解する必要があることを述べた。次に、微小材料試験法について単結晶材料と多結晶材料を対象としてサンプルサイズ効果と結晶粒サイズの影響について説明した。第三回は、結晶粒、双晶及び集合組織など微細結晶組織および合金化が、微小金属材料の機械的特性にどのように影響するかを議論した。今回は、前三回をベースにした異なる変形モードである引張および曲げ変形挙動を微小材料試験法で解析し、その典型的違いを説明するとともに、曲げモードから計測可能なヤング率測定法について述べ、実効ヤング率を説明した。

金属学はこの20年間で半導体からMEMSなど最先端のエレクトロニクスへと対応し、マイクロサイズの材料工学へと展開し発展してきた。半導体工学の金属学との大きな違い

文 献

- (1) J. R. Greer and J. T. M. De Hosson: Pro. Mater. Sci., **56** (2011), 654-724.
- (2) T. Nagoshi, T.-F. M. Chang, T. Sato and M. Sone: Microelectron. Eng., **110**(2013), 270-273.
- (3) D. Kiener, W. Grosinger, G. Dehm and R. Pippan: Acta Mater., **56**(2008), 580-592.
- (4) H. J. Lee, H. S. Choi, C. S. Han, N. K. Lee, G. A. Lee and T. H. Choi: J. Mater. Process. Technol., **187**(2007), 241-244.
- (5) Y. Kihara, T. Nagoshi, T.-F. M. Chang, H. Hosoda, T. Sato and M. Sone: Microelectron. Eng., **141**(2015), 17-20.
- (6) T. Nagoshi, T.-F. M. Chang and M. Sone: Mater. Trans., **57** (2016), 1979-1984.
- (7) Y. Kihara, T. Nagoshi, T.-F. M. Chang, H. Hosoda, T. Sato and M. Sone: Mater. Lett., **153**(2015), 36-39.
- (8) S. Yanagida, A. Araki, T.-F. M. Chang, C.-Y. Chen, T. Nagoshi, E. Kobayashi, H. Hosoda, T. Sato and M. Sone: Mater. Trans., **57**(2016), 1897-1901.
- (9) S. Yanagida, T.-F. M. Chang, C.-Y. Chen, T. Nagoshi, D. Yamane, K. Machida, K. Masu and M. Sone: Microelectron. Eng., **174**(2017), 6-10.
- (10) A. Araki, W. J. Poole, E. Kobayashi and T. Sato: Mater. Trans., **55**(2014), 501-505.

- (11) D. Yamane, T. Konishi, T. Safu, H. Toshiyoshi, K. Sone, K. Machida, H. Ito and K. Masu: Sensors and Materials, **31** (2019), 2883-2894.
- (12) T. Koga, T. Ichikawa, N. Tanaka, T. Ogata, H. Ora, D. Yamane, N. Ishihara, H. Ito, M. Sone, K. Machida, Y. Miyake and K. Masu: 2019 IEEE Biomedical Circuits and Systems Conference (BioCAS), IEEE proceedings, (2019), 1-4.
- (13) A. Shibata, T. Nagoshi, M. Sone, S. Morito and Y. Higo: Mater. Sci. Eng. A, **527** (2010), 7538-7544.
- (14) H. Inamura, T. Nagoshi, A. Yoshida, T.-F. M. Chang, S. Onaka and M. Sone: Microelectron. Eng., **100** (2012), 25-27.
- (15) K. Asano, H.-C. Tang, C.-Y. Chen, T. Nagoshi, T.-F. M. Chang, D. Yamane, K. Machida, K. Masu and M. Sone: Microelectron. Eng., **180** (2017), 15-19.
- (16) K. Asano, H.-C. Tang, C.-Y. Chen, T. Nagoshi, T.-F. M. Chang, D. Yamane, T. Konishi, K. Machida, K. Masu and M. Sone: Microelectron. Eng., **196** (2018), 20-24.
- (17) K. Hashigata, H.-C. Tang, T.-F. M. Chang, C.-Y. Chen, D. Yamane, T. Konishi, H. Ito, K. Machida, K. Masu and M. Sone: Microelectron. Eng., **213** (2019), 13-17.
- (18) K. Asano, T.-F. M. Chang, H.-C. Tang, T. Nagoshi, C.-Y. Chen, D. Yamane, H. Ito, K. Machida, K. Masu and M. Sone: J. Solid State Sci. Tech., **8**(8) (2019), 412-415.
- (19) K. Suzuki, T.-F. M. Chang, K. Hashigata, K. Asano, C.-Y. Chen, T. Nagoshi, D. Yamane, H. Ito, K. Machida, K. Masu and M. Sone: MRS Commun. (2020), doi:10.1557/mrc.2020.38
- (20) H.-C. Tang, C.-Y. Chen, M. Yoshiba, T. Nagoshi, T.-F. M. Chang, D. Yamane, K. Machida, K. Masu and M. Sone: J. Electrochem. Soc., **164** (2017), D244-D247.
- (21) H.-C. Tang, C.-Y. Chen, T.-F. M. Chang, T. Nagoshi, D. Yamane, T. Konishi, K. Machida, K. Masu and M. Sone: J. Electrochem. Soc., **165** (2018), D58-D63.
- (22) H.-C. Tang, T.-F. M. Chang, Y.-W. Chai, C.-Y. Chen, T. Nagoshi, D. Yamane, H. Ito, K. Machida, K. Masu and M. Sone: Metals., **9** (2019), 987.
- (23) E. Demir, D. Raabe and F. Roters: Acta Mater., **58** (2010), 1876-1886.
- (24) W. F. Hosford: Mechanical Behavior of Materials, 2nd edition, Cambridge University Press, New York, (2010).
- (25) K. Nitta, H.-C. Tang, C.-Y. Chen, T.-F. M. Chang, D. Yamane, S. Iida, K. Machida, H. Ito, K. Masu and M. Sone: IEEE SENSORS, IEEE proc., (2020), 1-4.
- (26) K. Machida, T. Konishi, D. Yamane, H. Toshiyoshi and K. Masu, ECS Trans., **61** (2020), 21-39.
- (27) C. W. Baek, Y. K. Kim, Y. Ahn and Y. H. Kim: Sens. Actuators, A, **117** (2005), 17.
- (28) H. Nakajima, T.-F. M. Chang, C.-Y. Chen, T. Konishi, K. Machida, H. Toshiyoshi, D. Yamane, K. Masu and M. Sone: A Study on Young's Modulus of Electroplated Gold Cantilevers for MEMS Devices, Proceedings of the 12th IEEE International Conference on Nano/Micro Engineered and Molecular Systems, LA, USA (2017).
- (29) K. Nitta, H.-C. Tang, T.-F. M. Chang, C.-Y. Chen, S. Iida, D. Yamane, K. Machida, H. Ito, K. Masu and M. Sone: J. Electrochem. Soc., **167** (2020), 082503.
- (30) C. A. Volkert and E. T. Lilleodden: Philos. Mag. A, **86** (2006), 5567-5579.
- (31) P. G. Sanders, A. Eastman and J. R. Weertman: Acta Mater., **45** (1997), 4019-4025.
- (32) T. H. Courtney: Mechanical Behavior of Materials, McGraw-Hill, New York, (1990), 60.
- ★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★
1996年 東京工業大学・理工学研究科博士課程修了
(博士(工学))
1996~2000年 日本石油株式会社・中央技術研究所・研究員
2000~2005年 東京農工大学・工学部・助教
2005~2017年 東京工業大学・精密工学研究所・准教授
2017年～現職
専門分野：材料工学
◎エレクトロニクスや医用MEMSセンサ用材料創成と材料評価技術開発を中心に活動。
★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★
- 
曾根正人

曾根正人

若手研究グループ活動報告

～鉄鋼メタラジー研究グループ～

中 田 伸 生*

1. はじめに

約30年前、日本の大学で40以上を数えた金属系学科は減少の一途を辿り、とくに“冶金学(メタラジー)”を冠する学科名は全国から消えてしまった。大学院重点化や国立大学法人化による名称変更を伴った組織改革が背景にあるものの、我が国の大学教育において、冶金学のプレゼンスが相対的に埋没しつつあることを示す事実である⁽¹⁾。しかしながら、冶金学の必要性がなくなったわけではない。事実、これを支える熱力学、反応速度論、結晶学、固体力学、金属物理学などの基礎学問は、材料系学科の必須科目として大学で講義が続けられている。これに加えて、少子化と国際競争の激化に伴い、産業界からは冶金学を習得した優秀な人材の輩出がより一層望まれている。すなわち、冶金学の学術的および工学的な存在意義は依然として大きい。社会の中堅世代となった我々が、このような状況の変化を鑑みて、今後も冶金学を修め、発展させるためには、自身の専門分野の探究によって高まる「個の力」に加えて、同世代の金属材料研究者が互いに切磋琢磨できる研究コミュニティを充実させ、「組織の力」を育むことが必須であると常々考えていた。そんな折、2018年度より若手主体の研究グループの募集が始まると知り、本研究グループの申請を決断した。本稿では、このような背景から始まった「鉄鋼メタラジー研究グループ」の活動の一端を紹介する。

2. 目的と活動

上述した背景もあり、研究グループの名称には「メタラジー」を冠したいと心に決めていた。そして、多くの会員を擁する鉄鋼関連企業からの参加者を交えた産学交流を期待し、最終的に鉄鋼メタラジー研究グループと名称を決定した。このような設立の趣旨に表1のメンバーが賛同し、次の3点を基本事項として活動を開始した。

- ① メンバーでの議論(勉強会)を活動の中心とする。
- ② 議論を深めるため、勉強会は少人数制とする。

- ③ 産学の枠を超えて互いの活動を尊重し、必要に応じて協力する。

これは、活動期間が2年間に限定されるものの、本研究グループの交流が長期的に続くことを期待し、取り決めたものである。ちなみに、これは「ストラクチャーダイナミックス研究会(2000年3月～2003年2月)」⁽²⁾の影響を強く受けたものであり、その活動スタイルも大いに参考にさせていただいた。

産学の違いに加えて、研究手段や対象材料も異なるメンバーではあったが、それぞれの専門となる研究課題について話題提供し、時間を制限せず議論を深めた。塑性変形と結晶回転の幾何学、水素脆化や低温破壊、CALPHAD法ならびにフェーズフィールド法などの計算科学による相変態・組織予測、第一原理計算・機械学習による材料探索、最先端分析機器による組織解析、次世代高機能鉄鋼材料の開発など、いずれの話題も先進的であると同時に冶金学のプリミティブな課題を含んでおり、議論が尽きることはなかった。当然ながら、話題は研究に留まらず、大学での教育や企業における研究の課題、さらに今後の冶金学の趨勢など、各人が抱える疑問や課題について胸襟を開いて朝まで語り合った。ちなみに、

表1 本研究グループの参加者氏名と所属組織(敬称略)。

上路 林太郎	物質材料研究機構	田路 勇樹	JFE スチール
大森 俊洋	東北大学	中田 伸生	東京工業大学
柴田 暁伸	京都大学 (現 物質材料研究機構)	名古屋 秀徳	神戸製鋼所
世古 敦人	京都大学	南部 将一	東京大学
田中 将己	九州大学	林 邦夫	新日鐵住金 (現 日本製鉄)
田中 優樹	大同特殊鋼	光原 昌寿	九州大学
塚田 祐貴	名古屋大学	宮本 吾郎	東北大学

活動の中心となる勉強会は、年2回のペースで下記の通りに実施した。

第0回 勉強会	2018年(平成30年)1月4, 5日	神奈川県足柄下郡
第1回 勉強会	2018年(平成30年)9月18日	宮城県仙台市
第2回 勉強会	2019年(平成31年)1月12, 13日	兵庫県淡路市
第3回 勉強会	2019年(令和元年)6月29, 30日	静岡県浜松市

* 東京工業大学; 准教授(〒226-8503 横浜市緑区長津田町4259)

Report of Young Researcher Group No. 1 ~Steel Metallurgy Research Group~; Nobuo Nakata(Tokyo Institute of Technology, Yokohama)

Keywords: metallurgy, steel, industry-academia collaboration, young researcher

2020年9月24日受理[doi:10.2320/materia.59.676]

表2 国際シンポジウムのプログラム.

Opening address	
Session I	Chair: Kunio Hayashi
Keynote speech	Modelling microstructure and properties in steels with complex structures <u>Enrique G. N</u> /University of Cambridge
Invited talk	Prediction of the deformation induced martensitic transformation behavior in TRIP steel <u>Shoichi Nambu</u> and <u>Clement Corthier</u> /The University of Tokyo
Invited talk	Influence of rare-earth metal addition on microstructure and toughness of electro slag weld metal using 12% Ni-based wire <u>Hidehiko Nako</u> , <u>Keito Ishizaki</u> , <u>Tomoko Sugimura</u> and <u>Yoshihiko Kitagawa</u> /Kobe Steel
Session II	Chair: Akinobu Shibata
Keynote speech	Flash heating of advanced high strength steels: Phase transformations and microstructure control <u>Hao Chen</u> /Tsinghua University
Invited talk	Interaction of alloying element with migrating ferrite/austenite interface <u>Goro Miyamoto</u> and <u>Tadashi Furuhashi</u> /Tohoku University
Invited talk	Growth behavior of intergranular carbides in martensitic heat-resistant steel <u>Masatoshi Mitsuhara</u> , <u>Shigeto Yamasaki</u> , <u>Ryoga Arakane</u> and <u>Hideharu Nakashima</u> /Kyushu University, <u>Kyohei Nomura</u> and <u>Keiji Kubushiro</u> /IHI Corporation
Invited talk	Effect of AlN particle size on abnormal grain growth in carburizing steel <u>Yuki Tanaka</u> , <u>Naohide Kamiya</u> and <u>Keisuke Inoue</u> /Daido Steel
Invited talk	Abnormal grain growth induced by phase transformation <u>Toshihiro Otori</u> and <u>Ryosuke Kainuma</u> /Tohoku University
Session III	Chair: Yuki Toji
Keynote speech	First principles study of martensite start temperature for austenite to epsilon transformation <u>Jae Hoo Jang</u> /Korea Institute of Materials Science
Invited talk	Phase-field simulation for gaining in-depth understanding of pearlite transformation in Fe-C system <u>Yuki Tsukada</u> , <u>Takumi Mizutani</u> and <u>Toshiyuki Koyama</u> /Nagoya University
Invited talk	Dynamic observation of slip bands developed in austenitic stainless steels using digital image correlation supported by deep learning based image processing <u>Nobuo Nakada</u> and <u>Shoutarou Takahashi</u> /Tokyo Institute of Technology
Closing address	

本研究グループの正式な活動開始は2018年3月であるが、それに先んじて第0回目となる勉強会を開催したことは、本活動に対するメンバーの意気込みの表れであろう。

当初、勉強会だけの活動を計画していたが、各メンバーが取り組んでいるいずれの研究も秀逸であることに加えて、我々の活動を広く公開することで新たな仲間が糾合できるのではないかと考え、二年間の活動終了直後の講演大会にてシンポジウムを開催することを検討した。その結果、2020年春期(第166回)講演大会にて企画シンポジウムとして、「International workshop of young researchers for steel metallurgy」と題する国際シンポジウムの発案に至った。これには、我々と同世代で国際的に活躍する海外研究者として、Enrique G.N 先生(英国 ケンブリッジ大学)、Hao Chen 先生(中国 清華大学)、Jae Hoo Jang 博士(韓国 材料科学研究所)の三名が基調講演をご快諾いただき、本研究グループのネットワ

ークを海外へ広げる結果にもつながった。シンポジウムのテーマは、鉄鋼材料を中心にその組織形成と力学特性に関する最近の話題とし、3セッション、11演題という充実した内容で準備を進めた(表2)。開催にあたり、本会のみならず日本鉄鋼協会の講演大会参加登録者も無料で参加できる形式を採用いただき、興味を持つ多くの方にご参集いただけることが期待された。しかしながら、新型コロナウイルス感染症の拡大による海外渡航の自粛ならびに講演大会の中止を受け、本シンポジウムは残念ながら流会となった。まさに、幻のシンポジウムとなった。

3. おわりに

アイザック・ニュートンが、ペストの大流行から逃れるため故郷への避難を余儀なくされたが、そこで過ごした約20

文 献

- (1) 辻 伸泰：JRCM ニュース，大学における構造用金属材料研究を取り巻く情勢，**313**(2012)，1-3.
- (2) 古原 忠，尾中 晋，小池淳一，中島英治，佐藤裕之，佐藤英一：まてりあ，**39**(2000)，416.



中田伸生

超高耐食性金属材料の開発研究

—レーザ積層造形によるマルテンサイト系ステンレス鋼の
高耐食性化—堤 祐介^{1,2)} 石本 卓也³⁾ 上田 恭介⁴⁾ 丸山 晋平⁵⁾
久世 哲嗣⁶⁾ 松垣あいら²⁾ 蘆田 茉希²⁾ 陳 鵬²⁾

1. はじめに

本研究は、日本金属学会の若手研究グループ公募に採択していただき、2018年3月から2020年2月までの2年間の活動期間に実施されたものである。金属3Dプリンティングの名称により近年急速に研究開発の関心が高まっている付加製造(AM: Additive Manufacturing)は、新たな製造プロセスとしての応用拡大が大いに期待されている。本研究では、AMプロセスにおける特有の金属組織と耐食性との関係についての知見が不足している状況に鑑み、これを明らかにすることを目指した。耐食性がとりわけ重要視される医療用途の金属材料を対象に、合金組成、結晶粒径、介在物など、耐食性に影響を及ぼすと考えられる因子に着目し、AMにより形成する金属組織が、従来プロセスで製造した材料と比較して優れた耐食性を発揮する新規材料の開発に活用できるか検証することを目的とした。

医療分野や航空宇宙分野をはじめ、多くの産業分野において種々の過酷な環境で使用される金属材料に対する耐食性への要求は日々高まっている。熱力学的に不活である貴金属を除外すれば、一般的な耐食材料は、保護性の皮膜、すなわち不働態皮膜を自発的に表面に形成することで、内部が保護されている。一方、製造プロセスにおいて導入される介在物などの欠陥因子の存在により不働態皮膜は破壊され、耐食性が損なわれる場合があることから、この現象が材料の長期信頼性・安全性を決定づける因子となっている。従来のプロセスにおいても、このような欠陥因子の導入を抑制する種々の対

策が施されており、各種材料において、耐食性を可能な限り発揮できるよう調整がなされているが、現在においても、腐食を原因とする製品や構造材の劣化や損傷の問題は完全に解決するには至っていない。

AMプロセス、とりわけ粉末床溶融結合(Power Bed Fusin: PBF)法では原材料の粉末を高エネルギーのレーザや電子ビームの照射により局所的かつ瞬間的な溶融・凝固を行うため、照射エネルギー密度や走査速度、積層厚さ、ピッチなど、さまざまな造形条件を調整することで、材料の耐食性を損なう欠陥因子の導入の抑制により、耐食性の向上が期待される⁽¹⁾。さらに、造形条件の多様性に基づき、AMは等方性から強い異方性に至る特有の金属組織形成と機能性発現を可能とする⁽²⁾⁽³⁾。加えて、従来法で作製された部材に対する、AM材の優れた耐食性が解明され、その制御が可能となれば、AMの新たな価値が示されるのみならず、ステンレス鋼の高機能化・用途拡大が期待される。

2. 活動の概要

本研究グループには、AM(とりわけPBF)プロセスの原材料となる金属粉末の製造、AM装置を用いた試料の造形、耐食性の評価、金属組織の解析、細胞・動物を用いた生物学的評価など、各領域に精通した40歳以下の産学の若手研究者が参画した。

第1回会議は2018年4月23日に東京医科歯科大学駿河台地区において開催され、対象とする金属材料の選定や役割分担について議論した。第2回会議は2018年9月6日に大阪

¹ (現所属)物質・材料研究機構構造材料研究拠点; 主席研究員(〒305-0047 つくば市千現 1-2-1)

² 東京医科歯科大学生体材料工学研究所; 1) 准教授 2) 助教

³ 大阪大学大学院工学研究科マテリアル生産科学専攻; 1) 准教授 2) 助教

⁴ 東北大学大学院工学研究科材料システム工学専攻; 准教授

⁵ 大阪冶金興業株式会社粉末加工部造形メディカル推進室; 主任

⁶ 山陽特殊製鋼株式会社粉末事業部粉末技術部技術2グループ; 係長

Development of Ultrahigh Corrosion Resistant Metallic Materials —Improvement of Corrosion Resistance of Martensitic Stainless Steel by Selective Laser Melting Process—; Yusuke Tsutsumi^{1,2}, Takuya Ishimoto³, Kyosuke Ueda⁴, Shinpei Maruyama⁵, Tetsuji Kuse⁶, Aira Matsugaki³, Maki Ashida² and Peng Chen²⁽¹⁾ (Current affiliation) Research Center for Structural Materials, National Institute for Materials Science, Tsukuba. ² Institute of Biomaterials and Bioengineering, Tokyo Medical and Dental University, Tokyo. ³ Division of Materials and Manufacturing Science, Graduate School of Engineering, Osaka University, Suita. ⁴ Department of Materials Processing, Tohoku University, Sendai. ⁵ Osaka Yakin Kogyo Co., Ltd, Miki. ⁶ Metal Powder Manufacturing & Sales Division, Sanyo Special Steel Co., Ltd., Himeji)

Keywords: stainless steel, martensitic, corrosion resistance, additive manufacturing, selective laser melting, biomaterials, anodic polarization, inclusions, physiological saline, hardness

2020年8月28日受理[doi:10.2320/materia.59.679]

大学吹田キャンパスにおいて開催され、本研究での試料作製を担う PBF 方式のレーザ積層造形(選択的レーザ溶融, Selective Laser Melting, SLM)装置をはじめ、異方性カスタム設計・AM 研究開発センターの所有する AM 装置群の見学を行った。第 3 回会議は2019年1月18日東北大学青葉山キャンパスにおいて開催され、同大学大学院工学研究科知能デバイス材料学専攻の菅原優准教授にステンレス鋼の腐食の機序についてご講演いただいた。第 4 回会議は2019年6月4日に大阪市北区の貸会議室で開催され、進捗報告と研究方針について議論を行った。2019年9月12日に「医療・福祉のための Additive Manufacturing の材料科学Ⅲ」と題した公募シンポジウムを本学会第7分野と共同で開催した。基調講演として、市村誠氏(株式会社松浦機械製作所)による「金属光造形複合加工の医療応用への取り組み」、久森紀之教授(上智大、慶應大)による「3D プリンティングと医療・福祉・スポーツ材料」、山下満好氏および石水敬大氏(京セラ株式会社)による「医療業界における付加製造の利用状況」、柳谷彰彦氏(山陽特殊製鋼株式会社)による「金属 3D 積層造形へのガスアトマイズ粉末の適用」、高田雄京准教授(東北大)による「医療・歯科分野におけるステンレス鋼の用途と耐食性の重要性」の5件が行われた。一般公演として AM に関する研究14件が報告され、別会場で行われていた生体・医療分野のセッションと平行であったにもかかわらず、123名収容の会場の席はほぼ常時満席であり、AM に対する本学会会員や参加者の高い関心が伺われた。わが国の AM の研究開発の現状と将来展望について、さらに、AM 造形による特異的な金属組織形成と特性変化を医療・福祉・スポーツ分野に応用する取り組みについて、産学の研究者を交えて議論する場となった。第 5 回会議は2019年10月25日に大阪市北区の貸会議室で開催され、進捗報告と成果のとりまとめについて議論を行った。最終会議となる第 6 回会議は2020年2月21日に大阪大学吹田キャンパスにおいて開催され、成果の発信について議論したほか、本グループの活動期間終了後の研究協力体制について意見交換を行った。

3. 医療用金属材料とステンレス鋼

現在、医療分野において使用される金属材料は主に、ステンレス鋼、コバルトクロム(Co-Cr)系合金、工業用純チタン(Ti)または Ti 合金、および貴金属系合金に大別される。これらのうち貴金属系合金は、鋳造による都度形状付与が容易であることから、サイズバリエーションからの選択では対応できない歯科補綴物として主に用いられる。金や銀を主成分とする銅、パラジウム、白金との多元合金である貴金属合金は、イオン化傾向の低い元素で構成されているため、口腔内の厳しい腐食環境においても十分な耐食性を有している。これに対して、ステンレス鋼、Co-Cr 系合金、Ti、Ti 合金の場合、主成分である鉄(Fe)、Co、Ti のイオン化傾向は比較的高く、熱力学的には腐食環境において溶解すると判断されるが、溶解反応後ただちに金属表面に自発的に形成される

不動態皮膜により内部が保護されるため、実用上では高い耐食性を発揮する。ステンレス鋼は100年以上の歴史を有するもっとも古い不動態化型実用合金である。生体内に埋入して用いられるインプラント材料は、ステンレス鋼の導入により耐久性の飛躍的な改善が実現し、現代的な治療術への革新がもたらされた。しかしながら、生体内環境は塩化物イオンが体液の主成分として存在するだけでなく、約37℃という室温より高い温度、炎症反応による pH 低下、アミノ酸やタンパク質等有機成分の存在、歩行や咀嚼等の行動に伴う摩擦、摩耗などの物理的外因、免疫系の代謝による活性酸素の産生、血管中では体液の流れ、低溶存酸素濃度など、金属材料にとって非常に複雑かつ過酷な腐食環境であるため、ステンレス鋼の耐食性も必ずしも盤石とは言い難い。インプラント用のステンレス鋼は、オーステナイト系の SUS302 からはじまり、SUS304、SUS304L へと低炭素化により、さらに SUS316、SUS316L へとモリブデン(Mo)添加により耐食性を高めた鋼種で置き換えられてきた。近年では、高窒素(N)含有型である XM-19 など、更なる高耐食性化を実現した鋼種や、F2229 などニッケル(Ni)フリー化を実現した鋼種の実用化、さらには塩化物イオンによる局部腐食の感受性の低い Co-Cr 系合金や Ti、Ti 合金での置き換えが進められている。

インプラントのような長期間生体内に留置されるデバイスではなく、手術用の器械、注射針などは、生体組織との接触が比較的短時間であるため、加工性や経済性に優れるステンレス鋼が多用されている。特にメス、ドリル、鉗子など、鋭利な刃の付与や大荷重への耐久性が必要な器具には、熱処理により硬化が可能なマルテンサイト系ステンレス鋼(SUS420J1、SUS420J2 など)や析出硬化系ステンレス鋼(SUS630、SUS631 など)が用いられる。これらの鋼種は熱処理が可能な反面、オーステナイト系ステンレス鋼より耐食性に劣るという問題を抱えている。マルテンサイト相を利用するためには炭素(C)を添加する必要があるが、耐食性は低下する。加えて、耐食性を向上させるためには Cr とともに金属アレルギー性の高い Ni 含有量を増やす必要がある。このため、医療用ステンレス鋼の硬度と耐食性および生体安全性には、これらのジレンマの解決という難題が控えている。

4. 本活動の成果

(1) 耐食性と硬さの評価

第 1 回会議においてグループメンバーと協議した結果、本研究で対象とする金属はマルテンサイト系ステンレス鋼の代表鋼種である SUS420J2 に、AM プロセスは SLM に決定した。これは、当時の AM 用粉末の入手の容易さ、これまでに実績のあるプロセス条件からの応用性、医療機器での実績、冷却過程における鋭敏化の影響、および熱履歴による硬化性が主な理由であった。

表 1 に本研究で使用した SLM 用の粉末(PSS420J2、粒45 μm 未満、山陽特殊製鋼)の組成を示す。図 1 に SLM により作製した分析用試験片の写真を示す。緻密度の高い造形条件

表1 本研究で使用した SUS420J2 の SLM 用粉末および市販棒材の組成と JIS 規格値(mass%).

Sample	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Fe
Powder	0.336	0.53	0.38	0.005	0.003	0.11	12.93	Bal.
Rod (HRC27)	0.28	0.29	0.44	0.030	0.013	0.25	12.02	Bal.
Rod (HRC54)	0.28	0.31	0.44	0.030	0.012	0.25	12.07	Bal.
Standard (JIS G 4303)	0.26-0.4	<1	<1	<0.04	<0.03	<0.6	12-14	Bal.



図1 SUS420J2のレーザ積層造形体験片(サイズ: 11 mm×11 mm×11 mm). (オンラインカラー)

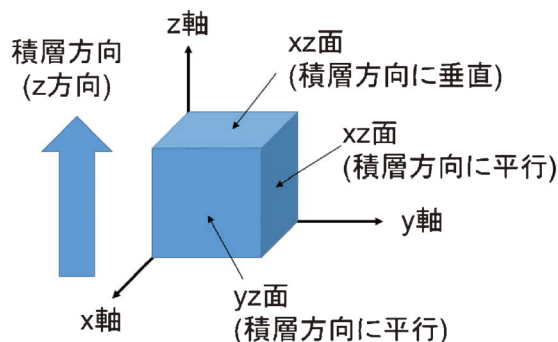


図2 AM プロセスによる異方性を考慮した測定対象面の区別. (オンラインカラー)

を確立した結果、真密度比は99.6~99.8%であり、空隙のほとんどない試験片が得られた。積層方向をz軸、それと垂直な方向をx, y軸とすると、積層方向に対して水平な面であるxz面およびyz面と、積層方向に対して垂直な面であるxy面では露出する金属組織の方位が異なるため、厳密に区別する必要がある(図2参照)。一方、本研究におけるSUS420J2の造形では、1層ごとに照射するレーザの走査をx方向, y方向, x方向...と交互に入れ替える, xy スキャン戦略を採用したため, xz面とyz面は等価であり区別の必要がない。このため, 評価はxz面とxy面に対して実施した。

図3に代表的な擬似体液である生理食塩水(0.9 mass% NaCl水溶液, 液温310 K)中で実施したSUS420J2のSLM材のアノード分極試験結果の代表例を示す。試料を溶液に浸

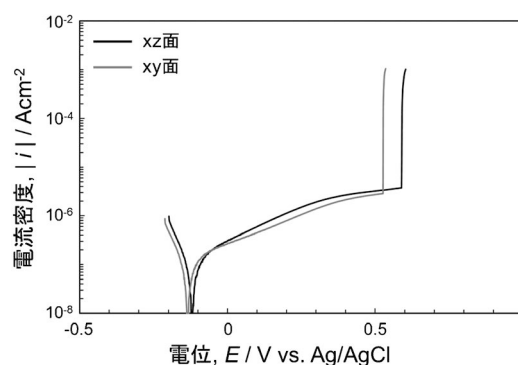


図3 生理食塩水中におけるSUS420J2のSLM材の分極曲線。

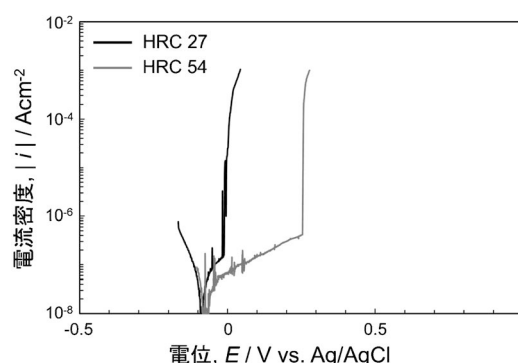


図4 生理食塩水中におけるSUS420J2の市販材の分極曲線。

漬した後10分間の開回路保持後, 腐食電位の最終値より100 mV 卑な電位を分極初期電位として, +1 mVs⁻¹ の速度で動電位アノード分極を行った。約0.5 V までは印加電圧の上昇に対して10 μAcm⁻² 未満の低い電流密度に抑えられており, 明確な不働態域を示していることから, この試料は溶液に浸漬した直後から不働態化しており, 生理食塩水中でも優れた耐食性を維持していたことがわかった。印加電圧が一定値以上になると, 急激に電流密度が上昇しており, これは局部的に不働態皮膜が破壊され, 集中的な溶解が発生したことを意味している。アノード分極試験後の顕微鏡観察により, 腐食が発生した位置は, 試料と溶液を隔てるOリングのすき間である場合と自由表面である場合が混在していたことが確認されたため, SLM材の腐食はすき間腐食と孔食の複合型と判断された。図4は図3と同一の条件において, 市販のSUS420J2の熱処理条件の異なる棒材(920-1050℃範囲で

の一次焼入れ後、180–750℃範囲で焼き戻しを行い、ロックウェル硬さ(HRC)をそれぞれ27, 54に調整したものを用いてアノード分極試験を行った結果を示す。また、各試料の組成分析結果と SUS420J2 の規格値(JIS G4303)を表 1 に示す。いずれも加工軸方向に対して水平となる面を切り出して試験を実施した。図 3 の SLM 材の結果と比較すると、これらの試料は不働態域が狭く、局部腐食発生前にもたびたび一時的な電流密度の増加、すなわち準安定な腐食の発生と再不働態化が繰り返されていたことがわかった。一般的には焼き戻し温度が高く軟化が進行するほど耐食性が低下する傾向にあると認識されており、本実験結果はこの傾向と一致した。アノード分極試験は同一条件で 5 回繰り返し実施した。分極曲線から得られた各試料の孔食電位($100 \mu\text{Acm}^{-2}$)を計測した最も貴な電位として定義をまとめたものを図 5 に示す。SLM 材は比較的大きなばらつきを示したが、市販の棒材より数百 mV 高い電位まで孔食が発生しておらず、局部腐食に対する抵抗が明確に向上していることが明らかとなった。一方、露出する面による違いには有意差が認められなかった。これは、通常のプロセスにより製造されたステンレス鋼において、加工軸方向に垂直な面で優先的に腐食が生じる、通称「端面腐食」のような耐食性の低下が、SLM では生じないことを意味している。すなわち、従来プロセスの材料では必要であった、端面を腐食環境に曝さないようにする対策が SLM 材では不要であるといえる。

以上の結果から、SLM で作製した SUS420J2 は、従来のプロセスで製造されたものと比較して、塩化物イオン環境中における局部腐食への耐性が特異的に向上していることが本研究により明らかとなった。同一条件で測定した市販のオーステナイト系ステンレス鋼(SUS316L)の孔食電位が、図 3 の SUS420J2 のレーザ積層造形材の値と同等であったことから、本研究で作製された SUS420J2 は、擬似生体内環境において、SUS316L と同等の耐局部腐食性を有すると評価できる。

SLM 材の硬さを測定するため、試料中央で yz 面が露出するように切断し、表面を研磨した(図 6)。中心および周囲の計 5 点の硬さ(HRC)は 53.50 ± 0.25 (平均値 $\pm$ 標準偏差)であり、測定箇所による偏りは認められず、内部は均質であることがわかった。これらの値は SUS420J2 の熱処理で到達しうる最高の硬度に近いことから、レーザ照射による溶融池の

形成から凝固過程における冷却速度が著しく速かったこと、それ以降の積層工程による再溶解や熱伝達による再加熱においても軟化することなく、高い硬度が維持されることがわかった。

(2) 耐食性向上の機構

上述の通り、ステンレス鋼の優れた耐食性は表面に自発的に形成する不働態皮膜に由来する。一方、塩化物イオンを含む環境中では、表面に露出した欠陥部を起点に皮膜が局所的に破壊され、耐食性が損なわれる。したがって、ステンレス鋼の耐食性は、不働態皮膜の緻密性や自己形成能・修復能だけでなく、金属素地の最表面に皮膜形成を阻害し、腐食反応を促進する欠陥がどれほど露出しているかにも大きく左右される。前者は主に不働態皮膜中の Cr 濃度や素地金属中の Ni, Mo, N の有無により決定されるため、これらの元素をより多く含有する、高級なステンレス鋼種ほどその効果は高くなる。一方、後者は金属組織形成に影響を受けるため、たとえ同じグレードの鋼種やロットの材料であっても、熱処理によって耐食性が大きく変化する。例えば、オーステナイト系ステンレス鋼を 500–800℃の範囲で加熱保持すると耐食性が損なわれる鋭敏化と呼ばれる現象が生じる。また、図 4 に示した SUS420J2 の焼き戻し熱処理による耐食性の差は、鋼内部の腐食誘発性の欠陥の違いに由来するものである。ステンレス鋼の局部腐食を誘発する欠陥については、古くから研究が進められており、主に M_{23}C_6 で構成される炭化物系介在物や、MnS 介在物であることが解明されている。本研究では、SLM により作製した SUS420J2 の耐局部腐食性が、市販のものと比較して大幅に向上していることを前節で説明した。Cr 以外の耐食性向上に有効な元素を含有しないこの鋼種において、これほどの耐食性を示す結果となった要因として、SLM プロセスにおける介在物形成の抑制が考えられる。そこで、電解抽出法により、SUS420J2 の SLM 材および市販材の内部に分布する介在物の可視化を試みた。白金製の籠に試料を乗せ、電解抽出用の溶液中で適切な条件で通電することで試料中のマトリックスを電気化学的に溶解し、容器の底部に沈殿した残渣をフィルターで捕集し、乾燥した。

図 7 に SUS420J2 の SLM 材および市販材から抽出した介在

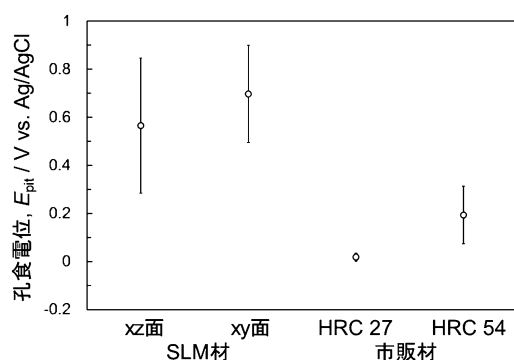


図 5 SLM 材と市販材の孔食電位の比較。

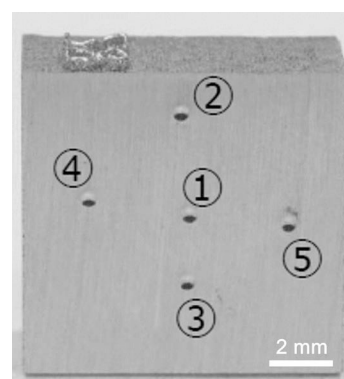


図 6 SLM 材の断面(yz 面)とロックウェル硬さ試験位置。

物の SEM 像を示す。市販材はフィルター上に大量の介在物が堆積していたのに対し、SLM 材から抽出した介在物量は少なく、フィルターの表面が露出していた。電解抽出により溶解した総重量に対するフィルター上に捕集した介在物の重量の割合は、市販材で6.89%，積層造形体で2.96%であったことから、積層造形体では介在物形成が抑制されていたことが確認された。図8にこれらの介在物の XRD 分析結果を示す。いずれの試料からも、 $M_{23}X_6$ を示すピークが確認された。本試料はステンレス鋼の中では比較的炭素を多く含む鋼種(規格値：0.26~0.4%)であること、また窒素添加型ステンレスではなく窒素はほとんど含有されていないと考えら

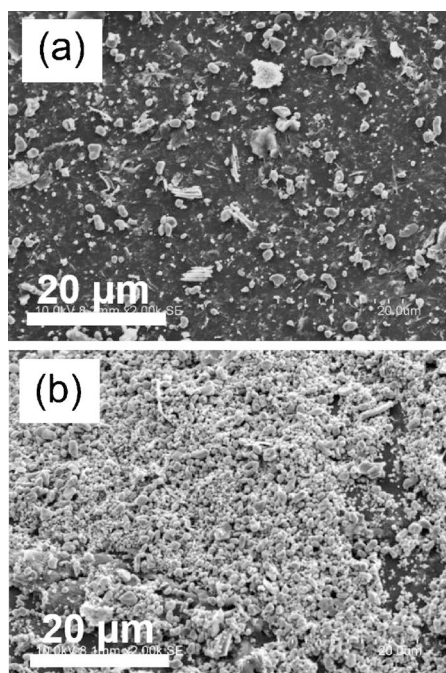


図7 電解抽出法により得られた SUS420J2中に存在する介在物 (a) SLM 材 (b)市販材(HRC27)。

れることから、この結晶性の介在物は主に炭化物の $M_{23}C_6$ (M: Cr, Fe)であると考えられる。以降、 $M_{23}C_6$ と表記することとする。参考のため、SUS420F(切削性向上のためSを添加した類似鋼種)を用いて電解抽出した残渣からは、 $M_{23}C_6$ に加えて MnS の微小なピークが確認された。このことから、本研究における電解抽出法により MnS の抽出が可能であることが予め確認されていたが、SUS420J2中に含まれる MnS は微量であったためか、図8のチャート中には SLM 材、市販材のいずれも MnS のピークは検出されなかった。そこで、図7(a)の SLM 材のフィルター上の残渣を用いて EDS マッピング分析を行った。この結果を図9に示す。Fe, Cr, Mn の合金成分に加えて O, Si などの不純物元素(Cはフィルターからの検出量が大きく測定不可)が検出されたことから、抽出された介在物は $M_{23}C_6$ の炭化物系だけでなく、 SiO_2 などの酸化物との複合体を形成していることがわかった。一部の粒子からは S が検出されたことから、

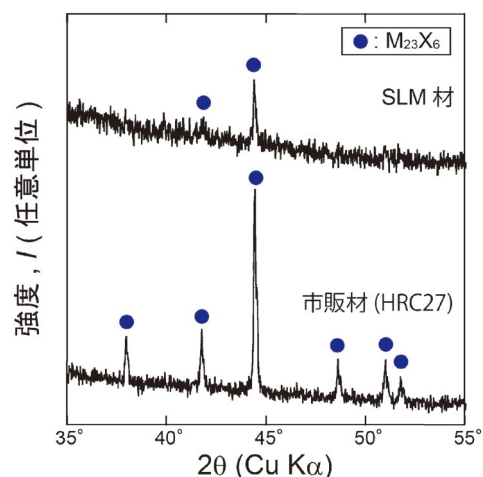


図8 SUS420J2 SLM 材および市販材(HRC27)より抽出された介在物の XRD 分析結果。(M: Fe または Cr, X: C と推定)。

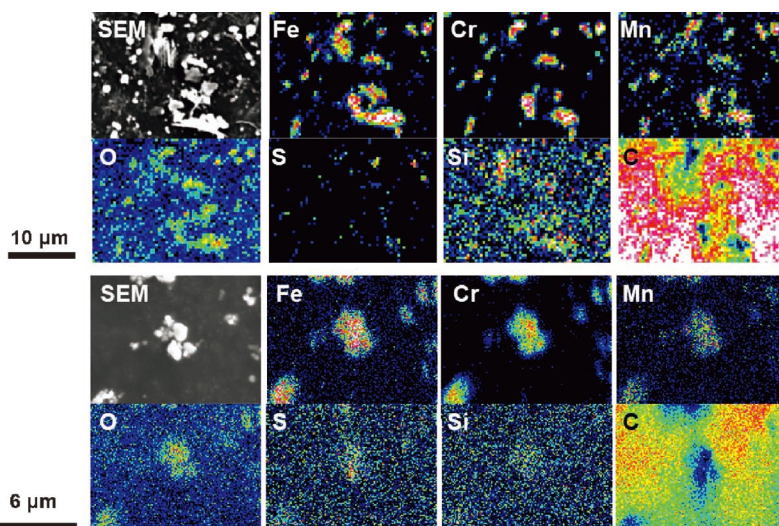
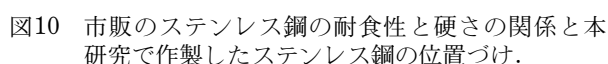


図9 SUS420J2の SLM 材より抽出された介在物の EDS マッピング分析結果。



5. おわりに

本グループではメンバー同士の協力関係を今後も維持することで考えが一致しており、これらの課題についての研究を継続し、得られた成果については今後も講演大会や学会誌で発信する予定である。

最後に、本制度への応募の勧奨から研究の推進、シンポジウム開催に至るまで度重なるご協力を賜った大阪大学の中野貴由教授、東京医科歯科大学の塙隆夫教授、グループ創立およびシンポジウム講演に多大なご協力を賜った山陽特殊製鋼株式会社の柳谷彰彦様、シンポジウムおよび進捗会議にて貴重なご講演を頂いた株式会社松浦機械製作所の市村誠様、上智大学、慶応大学の久森紀之教授、京セラ株式会社の山下満好様、石水敬大様、東北大学の高田雄京准教授、東北大学の菅原優准教授、本学会第7分野とのシンポジウム共催にあたりご協力いただいた愛媛大学的小林千悟教授、関西大学の上田正人教授、東北大学の野村直之教授、名古屋大学の黒田健介准教授、東北大学の山本雅哉教授、帝人ナカシマメディカル株式会社の野山義裕様をはじめ、本活動にお力添えいただいたすべての皆様方、および貴重な機会をご提供いただいた公益社団法人日本金属学会に、この場をお借りして感謝と御礼を申し上げます。

文 献

- (1) S.-H. Sun, T. Ishimoto, K. Hagihara, Y. Tsutsumi, T. Hanawa and T. Nakano: *Scripta Mater.*, **159**(2019), 89–93.
- (2) O. Gokcekaya, N. Hayashi, T. Ishimoto, K. Ueda, T. Narushima and T. Nakano: *Addit. Manufact.*, (2020), 101624.
- (3) T. Ishimoto, K. Hagihara, K. Hisamoto, S.-H. Sun and T. Nakano: *Scripta Mater.*, **132**(2017), 34–38.

2006年3月	東京工業大学大学院理工学研究科材料工学専攻 博士課程修了
2006年4月	東京医科歯科大学学生体材料工学研究所 特別助手
2007年4月	東京医科歯科大学学生体材料工学研究所 助教
2013年1月	東京医科歯科大学学生体材料工学研究所 准教授
2019年4月	物質・材料研究機構構造材料研究拠点 主席研究員(現職)
専門分野:	腐食電気化学、生体材料学

★★★



多様な先端観察・測定法を用いた組織の 定量と力学特性解析への適用

宮嶋 陽司* 宮澤 知孝**

1. はじめに

構造用金属材料の研究において用いられる観察法や測定法は、新しい手法の開発や高度化が進められており、非常に多様になっている。各種先端観察・測定法は強力な分析・解析ツールであり、その適用範囲の拡大が進められていた。それらの観察・測定法を最前線で用いている若手研究者が集まったのが、本若手研究グループとなる(表1)。

本研究グループの各構成員が扱う技術・手法を具体的に示すと、超高圧走査透過型電子顕微鏡法(首藤)、ピークブロードニング解析(赤間・宮澤・増村)、局所応力測定(宮澤)、高速集合組織観察(小貫)、デジタル画像相関法(古賀)、精密電気抵抗率測定や高精度熱分析(宮嶋)、マイクロピラー試験(高田)等が挙げられる。これらの手法を、実用合金の設計(高田)、鉄鋼材料の設計(増村)、耐熱合金開発(山

崎・赤間)、疲労(首藤)、クリープ(山崎)、巨大ひずみ加工(紙川)といった、幅広い構造用金属材料の研究に適用することで、組織を定量的に扱う事が可能な状況であった。さらに各種手法から得られる結果は結晶塑性モデルの構築(奥山)にも寄与し、力学特性の理解が深まる事も期待された。しかしながら、当時は複数の先端観察・測定法・計算を相補的に用いることは極めて少なく、シナジー効果の創出は喫緊の課題であった。

本研究グループの構成員には、多様な先端観察・測定法に加えて巨大ひずみ加工(紙川・宮嶋)、3D 積層造形(高田)などの種々の加工プロセスを専門とするメンバーも入っている。そのため、鉄・非鉄を問わず、幅広い金属材料に種々の加工プロセスを適用して作製した組織に対して、各種先端観察・測定法を相補的に用いるための検討を行うことが可能である。つまり、これらのメンバーが一堂に会すること自体に意義があると考え、交流を深めることを目的の一つとしていた。さらに、本研究会では従来の枠組みではなし得なかったシナジー効果の創出を目指し、構造用金属材料の力学特性や組織評価における課題をメンバーがお互いに学び、複数の先端観察・測定法の適用によって課題解決への議論を行う場を提供することを目的とした。

設立当初に想定した本研究グループによって得ることのできる成果・目標は、各種最先端観察・測定法を相補的に適用する為の基礎指針を確立することである。また、これと併せて30代の研究者を幅広く集めたため、実際の測定に最も精通している若手研究者同士の共同研究の活発化、および、将来、競争的資金に応募する際の研究グループ形成の基礎となる事を期待して、グループの活動を開始した。

2. 活動

表2に示すように、初年度は2回の研究会を開催した。第1回目の研究会において、構成員がそれぞれの研究内容の発表を行った(図1)。また、講師として東京工業大学の藤

表1 若手研究グループの構成員。

No.	氏 名	所 属
1	宮嶋 陽司	東京工業大学(現:金沢大学)
2	宮澤 知孝	東京工業大学
3	首藤 洋志	新日鐵住金株式会社(現:日本製鉄)
4	紙川 尚也	弘前大学
5	高田 尚記	名古屋大学
6	古賀 紀光	横浜国立大学(現:金沢大学)
7	小貫 祐介	茨城大学
8	山崎 重人	九州大学
9	奥山 彰夢	九州大学(現:木更津高等専門学校)
10	赤間 大地	三菱重工業株式会社
11*	増村 拓朗	九州大学

* 2年度目に加入。

* 金沢大学理工研究域機械工学系; 准教授(〒921-1192 金沢市角間町)

** 東京工業大学物質理工学院材料系; 助教

Application on the Analysis of Mechanical Properties and Quantification of Microstructure Using Various Advanced Observations/Measurements; Yoji Miyajima* and Tomotaka Miyazawa**(*School of Mechanical Engineering, College of Science and Engineering, Kanazawa University, Kanazawa. **School of Materials and Chemical Technology, Tokyo Institute of Technology, Tokyo)

Keywords: *microstructure observation, in-situ measurement, structural materials, mechanical properties*

2020年10月14日受理[doi:10.2320/materia.59.685]

表2 若手研究グループの研究会活動.

行 事	開催日	会 場
第1回研究会	2018年4月27日	弘前大学 理工学部1号館 第5講義室
第2回研究会	2018年11月2日	新日鐵住金株式会社 コミュニケーションセンター ゲストルームC
第3回研究会	2019年5月31日 ~6月1日	いこいの村 能登半島 小会議室「高浜」
第4回研究会	2019年11月25日	プロム松山市駅前 第3会議室



図1 第1回研究会の様子.

居俊之教授をお招きし、科研費新学術領域研究に採択されている「ミルフィーユ構造の材料科学」に関して説明していただいた。第2回目の研究会においては、先端観察・測定の各種材料への適用に関して検討を行うため、講師として京都大学の辻伸泰教授をお招きし、科研費新学術領域研究の「ハイエントロピー合金」についてご講演いただいた。また、構成員の1人である名古屋大学の高田尚記准教授が、近年注目を集める積層造形材に関する発表を行った。

これら2回の研究会を通じて、構成員それぞれが専門とする多様な先端観察および測定法、試料作製、シミュレーションについて、情報を共有した。また、上述したミルフィーユ構造材料、ハイエントロピー合金および積層造形材のように構造用金属材料において近年精力的に研究が進められている材料について学ぶとともに、先端手法の適用可否や課題を検討した。その結果、次年度への課題として、これらの新材



図2 第3回研究会の様子.

料・構造・手法に対して、各構成員の持つ先端手法の相補的活用について検討が必要であることが明らかとなった。余談ではあるが、新学術領域研究については本若手研究グループから一部メンバーがそれぞれの公募研究に採択されていることも追記しておきたい。

また、若手研究者が定期的集まることで、新たなネットワークの構築が進み、共同研究の芽が出始めていた。若手研究グループとして申請時に設定した目標達成に向かって着実に歩みを進めつつある状況であった。

初年度に続き2年度目も2回の研究会を開催した。第3回目の研究会では、講師として金沢大学の川智嗣教授と渡邊千尋教授をお招きし、「ナノ組織材料の変形と強化機構の解明に向けた原子シミュレーション」および「極低積層欠陥エネルギー FCC 金属中のヘテロナノ組織」に関してそれぞれ講演していただいた。また、構成員である古賀紀光助教と金沢大学の若手研究者である國峯崇裕助教が研究内容の発表を行い、金属材料における課題解決に向けた各種先端観察・測定法の相補的活用によるシナジー効果の創出について討論した(図2)。

第4回目の研究会においては、先端観察・測定法の各種材料への適用に関して、新規材料での測定結果の報告やまとめを行った。また、講師として兵庫県立大学の足立大樹教授と九州大学の田中將己教授をお招きし、「アルミニウム合金の引張変形中における転位密度変化に及ぼす結晶粒径、固溶原子、析出粒子の影響」と「低炭素鋼マルテンサイト鋼で見られる低温焼き戻し脆性とその応力遮蔽効果に基づく理解」についてそれぞれご講演いただいた。また、構成員である増村拓朗と紙川尚也が、それぞれ発表を行った(図3)。

2年度目のこれら2回の研究会を通じて、構成員それぞれ

トヨタ産業技術記念館(名古屋市)

文責：名古屋大学大学院 山本剛久

今回ご紹介する博物館は、名古屋駅からすぐ近くにある「トヨタ産業技術記念館」です。経済産業省によって近代化産業遺産にも認定されている博物館です⁽¹⁾。初めに申し上げておきますが、機会があればぜひ足をお運び下さい。自信をもってお勧めできます！

トヨタグループは、いくつかの博物館を運営していますが、その中でもここに紹介する「トヨタ産業技術記念館」は、豊田佐吉氏が明治44年(1911)に織機の研究開発のために創設した試験工場の場所と建物の一部を利用して建設されています⁽¹⁾。トヨタグループ発祥の地であり、創業者である豊田佐吉氏との縁が深い場所という点で、トヨタグループとしても思い入れの強い博物館ではないかと勝手に思っています。この博物館は、当時この場所に建てられていた赤煉瓦建物の外壁等をうまく取り入れた外観が壮観で、これから入場する人たちのわくわく感を煽ります。繊維機械館から入場し、進路に従って進んでいくと、自動車館へと入るように構成されていて、レストランや休憩場所、レクチャールームなども整備されています。

期待しながらチケット売り場へ向かうと、糸を織り上げるための巨大な織機(環状織機)が、いきなり、動態保存された状態で現れます。一般の織機は、たて糸に対してよこ糸を往復運動で織り込みます。環状織機は、たて糸に対してよこ糸を回転運動でらせん状に織り込んでいく織機です。ぜひ実物をご覧ください！ここは博物館内にいくつかある撮影スポットのひとつです。この巨大な織機の横を回り込んで進むと、いよいよ繊維機械館への入館です。入館すると、やや照明を落とした広いスペースに旧豊田紡織本社工場を再現したミニチュア模型があり、その先には、豊田グループのものづくりの歴史が映像で流れています。思わず通り過ぎるともったいないので是非ご覧ください。そのスペースを抜けると、パッと明るくなって、もう、これでもかというぐらい、繊維関係の機械が様々に展示されています。入場するとすぐに目に付くのが、糸を紡ぐ手順を実演してくれるブースです。うっかりここに進んでしまうのですが、そのブース手前にも、織物に関する展示があるのでお見逃しなく。この展示をじっくり見てから、そのブースへ向かいましょう。そこには説明役の方がおられて、糸を撚っていくまでの工程(よりの原理)を昔の道具を使って実演、体験させてくれます。なるほど！と納得させられます。今まで紡績という言葉は知っていても、その中

身についての知識はほとんどありませんでした。原料の綿がふわふわになり、それを、言葉通りに撚っていき、最終的に強度を持った糸になっていく工程が実によく理解できます。ここで一気に紡績に興味が沸いてきます。このブースを過ぎると、今度は、水車の動力を利用して自動で紡績を行う木製の大きな機械、“ガラ紡(ガラ紡績)”，が現れます。回転する円筒の中に入れられた綿が、上に引き上げながら適度な太さに紡がれていきます。この時のガラガラ音から、この名前が付いたそうです。ここでも、実にうまい説明を受けて、糸の太さが一定となる機構などについて、なるほどなあ、と感心させられます。感心しながら進むと、時代が進んで工業製品としての紡績機械がドーンと配置されているスペースになります。綿から糸までの工程に沿った機械がずらーと並んでいます。どの機械でどんなところまで準備できるのかという工程が、展示されている加工品を触ることで具体的に実感できますよ。それ以外にも、工業化以前の手作業での織機や、豊田佐吉氏が発明したG型自動織機(機械を停止させることなくよこ糸を補給できるように工夫された織機⁽¹⁾)も展示されています。これらを見てからその先にある現代の織機を見ると、技術の発展がよく理解できます。ここでは、自動車のシートなどを織る織機を見ることができます。

このスペースを過ぎると、自動車館への連絡通路となりますが、そこに、また、面白い展示物が置かれています。機械加工にかかわる様々な工具類がずらりと展示されているのです。これは一見の価値ありです！筆者は、ここだけで一時間かけられる自信があります。この展示を見ずに通り過ぎる人がいて、本当にもったいないです。この廊下に面して、鍛造工程を実演してくれるガラス張りのスペースがあります。鍛造機の前には観客用のいすが並べられていて、電磁誘導で加熱した鉄塊を鍛造で成形し、実演用の大きさですが、小ぶりのコンロッドが作られていく様子を間近で見ることができます。

さあ、次は自動車館です。この入口を入ってすぐに、冶金関係の研究者であれば絶対に興味を持つであろう展示物が待っています。当時純国産の自動車製造を目指していたトヨタが立ち上げていた材料研究所の試験機類です。実際に使用されていた、固さ試験機、シャルピー試験機、ドイツ製の光学顕微鏡、珍しいところでは、ねじり試験機(図1)など年代物の各種測定機が並んでいます。その展示物の片隅には、鋼の熱処理に関する当時の手書きノートも展示されています(図2)。“まてりあ”の読者であれば、ここだけで、相当の時間楽しめますよ。

さらに進むと、初期の車であるトヨタ(のちトヨタ)AA型の外板パネル加工工程が出てきます。木型で作られた形状に合わせて、手作業で外板パネルの加工をしていく様子を実物大で見ることができます。ここから、エスカレーターを使って2階に上がって現れてくるのが、歴代エンジンの実物と自動車の各種機構の展示物です。これは、車好きにはたまらない展示で、時間が経つのを忘れていつまでも見入ってしまう方も出てくるでしょう。もちろん、筆者もその一人です。

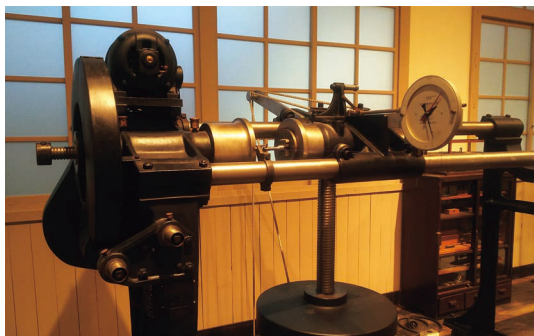


図1 ねじり試験機の外観.

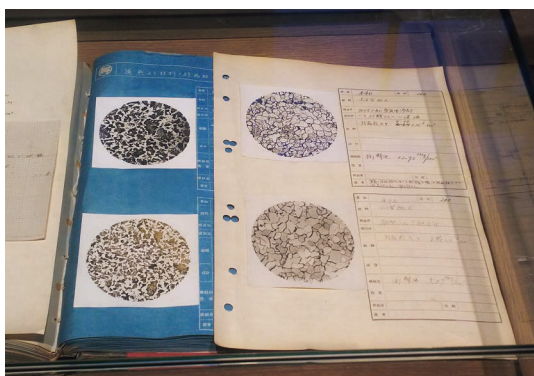


図2 当時の実験データノート.

が、展示物は一部がカットされていて、中身が見えるように実にうまく工夫されています(図3)。本当によく考えられた展示だと感心させられます。初期の頃のエンジンは、シリンダーヘッドカバーが丸みを帯びていて、その形に愛嬌を感じます。ところで、この階から1階の展示物の一部を見渡すことができます。このスペースには、10台ほどの歴代の車の展示と合わせて、自動車製造にかかわる大型の工作機械、射出成型機、スポット溶接ロボットなどが所狭しと並んでいます。ともすれば、展示されている自動車の方に目が奪われがちですが、めったに見ることのできない製造設備の方も見ないと絶対損をしますよ！展示物のいくつかは大型設備で、その一つは、量産に大きく貢献した2000トンクラスの打ち抜き機です。テンポの良い説明のうまい方がいて、面白おかしくその特徴や役割を説明してくれます。その他、鑄造過程や、ロボット溶接機がフレームに外板を自動で溶接していく様子などが実物大で観察できます。

という具合に色々を見て回って、いよいよ、自動車展示のスペースです。ここには懐かしい名車が並んでいます。今では国内に数台しか無いであろう、あの名車トヨタ2000GTや、知る人ぞ知るT型エンジンの名器2T-Gが搭載された初代セリカ1600GT、一世を風靡したソアラ(4代目ですが)などが展示されています。小生は、大学生時代にこの初代セリカの1600STに乗っていたこともあり、非常に懐かしく、しばしの間、見入っていました。さらにです。あのLFA(Lexus F Sports Apex)も展示されています。残念ながら、

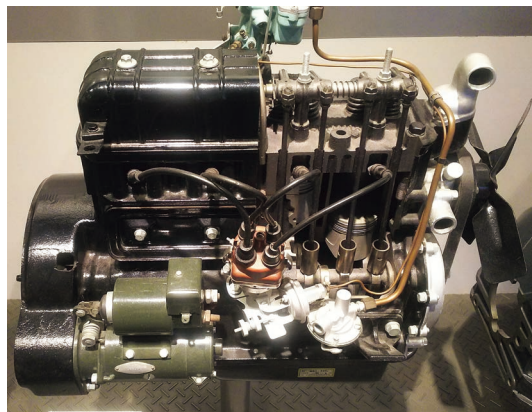


図3 初代クラウンに搭載されていたR型エンジンのカットモデル.

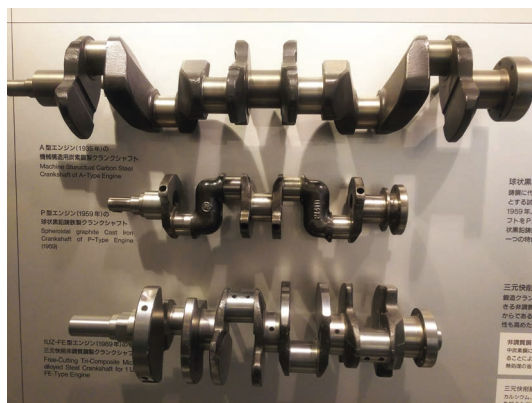


図4 クランクシャフトの変遷. 写真上段はA型エンジンの鑄鋼製クランクシャフト, 写真中段はP型エンジンの球状黒鉛鑄鉄製クランクシャフト, 写真下段は1UZ-FE型エンジンの三元快削非調質鋼製クランクシャフト.

あのV型10気筒エンジンが奏でる何とも言えないむせび泣くような独特のエンジン音を聞くことはできませんが、一応頼んでみたのですが、だめでした... ↑

さて、最後になりましたが、この「トヨタ産業技術記念館」を取り上げた理由に移ります。この名車の展示スペースの奥、壁側にある目立たないところに、実は非常に面白い展示があります。自動車部品に使われている鉄鋼材料の歴史に関する展示です。図4の写真はその一部で、クランクシャフトに使用されてきた鉄鋼材料の変遷です。掲示されている説明を拝見すると、初期の1935年製A型エンジン(図4上段)には、機械構造用炭素鋼の鍛造品が使用されていたようです。軸受(シリンダー数)の増加に伴って、機械加工から鑄鋼品へと変化していった様子が分かります。これが、1959年製のP型エンジン(図4中段)では、球状黒鉛鑄鉄製に代わり、やがて、1989年の1UZ-FE型エンジン(図4下段)の三元快削非調質鋼へと変化しています。このように、自動車部材に使用される金属材料の、実際の変遷が展示されているなんて、おそらくこの博物館だけではないでしょうか。この展示だけ

でも一時間は使ってしまうそうです。筆者が見入っているときに、カメラ片手に撮影しまくっている人がいたのが印象的でした。

一通り展示物や実演を体験して自動車館から出ると、中庭に沿った廊下に出ます。ここにはカフェのスペースがあって、ちょっと休憩となるのでしょうか。ところが、その先には、巨大な水蒸気機関がちらりと姿を現します。近づくと、これがまた壮観で、実際にドイツの繊維工場で当時使われていた機関で、なんと、今でも稼働します！その実演時間が提示されていますので、ぜひ！一見の価値あります。この博物館には上述した展示以外にも、ロボットによる演奏や、射出成型の実体験、お子様用の遊戯スペースなどもあり、盛りだくさんです。時間が許せば(許さなくても)、ぜひ、中庭に出てみることもお勧めします。当時の赤レンガ工場の壁が保存されていますし、その蒸気機関が置かれていた場所の遺構も保存されています。

この博物館は機械好きにとっては絶対に一度は行く価値のある博物館であることは間違いありません。申し訳なくなるほど丁寧に、かつ、詳しく説明して下さるスタッフの方が、いたるところに配置されていて、気軽に質問はできますし、展示物に掲示されている、小生のような年寄りには厳しい小さな文字を読むことなく、展示物の中身をあれこれ掘り葉掘り聞くこともできます。実演もあれば体験もできます。それに何より、コストパフォーマンスが高すぎます！場所は、名古屋駅からすぐ近く。歩いて20分程度。歩くのがしんどければ、地下鉄東山線の名古屋駅から一駅の亀島駅から数分です。出張のついでにもふらっと立ち寄ることができます。ぜひぜひ！

科学館で見つけた金属材料

自動車部品にはいろんな種類の鉄鋼材料が使用されています。用いられる鉄鋼材料は、同じ部材でも時代とともに大きく変わってきました。図4で述べたようにクランクシャフトであれば、铸鋼から球状黒鉛铸铁、そして、三元快削非調質鋼へと変化していったそうです。

铸鋼⁽²⁾は、鋼の成分で铸造(溶かして铸込む)した鉄鋼材料

のこと、球状黒鉛铸铁⁽³⁾は、強度や延性を高めるために組織に含まれる黒鉛の形状が球状となるように調整された铸铁のことを指します。そして铸込んだ部材の加工精度がより問われるようになってくると、被削性を向上させるために鉄鋼材料も工夫されてきました。その一つが、快削鋼と呼ばれるものです。ここでは、その中でも三元快削非調質鋼が紹介されていました。この三元快削非調質鋼⁽⁴⁾は、被削性を高めるために鉛や硫黄さらに第三の元素(テルル、セレン、ビスマスなど)を添加した成分に工夫を施した鋼のことを指します。なお、非調質とは焼き入れ-焼き戻し処理を必要としないことを意味しています。炭素鋼やステンレス鋼などにおいて快削鋼の規格がJIS G 4804に定められています。また、環境問題の観点から鉛を含まない快削鋼の開発も行われています⁽⁵⁾⁽⁶⁾。

文 献

- (1)「トヨタ産業技術記念館」, <https://www.tcm.it.org/>.
- (2) 日本金属学会：講座・現代の金属学 材料編4 铸造凝固, (1999), 204.
- (3) 日本金属学会：講座・現代の金属学 材料編4 铸造凝固, (1999), 167.
- (4) 日本金属学会：講座・現代の金属学 材料編10 鉄鋼材料, (1999), 110.
- (5) 藤松威史：特殊鋼, **63**(2014), 11.
- (6) 染川雅実, 鹿儀正人, 松島義武, 家口 浩：神戸製鋼技報, **51**(2001), 13.

↑ 展示物は適宜変更されています。来場の際には、ご注意下さい。

(2020年2月25日受理)[doi:10.2320/materia.59.688]

トヨタ産業技術記念館へのアクセス

*名鉄：名古屋本線「栄生駅」下車、徒歩3分

*なごや観光ルートバス“メーグル”：

名古屋駅バスターミナル11番のりば

「なごや観光ルートバス“メーグル”」乗車

「トヨタ産業技術記念館」(敷地内)下車すぐ

*タクシー：「名古屋駅」から5分

URL <https://www.tcm.it.org/>



本 会 記 事

会 告	2021年度会費納入のお願い	691
	2021, 2022年度監事選挙中止のお知らせ	691
	事務局の年末・年始休業のお知らせ	691
	村上記念賞(第18回)候補者推薦のお願い	692
	村上奨励賞(第18回)候補者推薦のお願い	692
	奨励賞(第31回)候補者推薦のお願い	692
	論文賞(第69回)候補論文推薦(自薦)のお願い	693
	新進論文賞(第1回)候補論文推薦(自薦)のお願い	693
	まてりあ賞(第11回)推薦(自薦)のお願い	694
	各種学術賞・助成等候補者推薦について	694
	2021年春期(第168回)講演大会講演募集および参加申し込みについて	696
	第5回「高校生・高専学生ポスター発表募集」	698
	2021年秋期講演大会公募・企画シンポジウムテーマ提案募集	699
	会報編集委員会からのお知らせ	701
	2021, 2022年度の代議員候補者選挙投票のご依頼	702
掲示板		695
次号予告		706
新入会員		702
行事カレンダー		707
会誌・欧文誌12号目次		705
追悼		708

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

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

- ・投稿規程・出版案内・入会申込はホームページをご利用下さい。
- ・支部行事、公募情報等ホームページにて随時掲載しております。

会 告 (ホームページもご参照下さい)

2021年度会費納入のお願い

2021年の会費納入時期となりました。下記いずれかの方法にてお払い込み下さいますようお願い申し上げます。

- ◎自動払込: 2020年12月12日予定でご登録の口座から引き落としされます。
- ◎郵便振込み: 上記以外の方は、本年11月中旬頃、「ゆうちょ銀行郵便振込み用紙」を郵送いたしました。ゆうちょ銀行にてお支払い願います。
- ◎クレジットカード・コンビニ支払:
会員マイページにログインの上、お手続きして下さい。領収書もホームページで発行できます。

会費のお支払い確認

ホームページ→入会・変更・会員制度→会員マイページ(ID・パスワード入力)でお支払いと確認ができます。

問合先 会員サービス係 E-mail: member@jim.or.jp

2021, 2022年度監事選挙中止のお知らせ

2020年度事業に関する定時社員総会(2021年4月23日予定)で選任される東北地区在住の、本会監事選挙立候補者を求めましたが、立候補がありませんでしたので、2021, 2022年度監事候補者選挙を中止いたします。

本会定款に基づき、2021年4月23日開催予定の定時社員総会において選任いたします。

2021, 2022年度の代議員候補者選挙投票のご依頼

この度、正会員の皆様へ本会の2021, 2022年度代議員候補者選挙をご依頼する運びとなりました。詳細は本誌702頁にてご案内しております。

投票の締切は、2020年12月31日です。

皆様のご協力を何卒よろしくお願い申し上げます。

事務局の年末・年始休業のお知らせ

事務局は、下記日程で休業いたします。宜しくお願いいたします。

2020年12月29日(火)～2021年1月5日(火)



各種賞推薦(自薦)のお願い

◎下記の国会各賞のご推薦をお願い申し上げます。ご推薦方法が Web 利用のものもございますので是非、ご利用してご推薦下さい。

【問合せ】 ☎980-8544 仙台市青葉区一番町 1-14-32 (公社)日本金属学会 各種賞 ☎ 022-223-3685 award@jim.or.jp

第18回村上記念賞 候補者推薦のお願い

本会では財団法人村上記念会からのご寄付を基に金属および関連材料の工学の分野における先駆的研究および開発に格別の功績を挙げたものに対する「日本金属学会村上記念賞」を2004年より設けており、第18回の授賞式を2021年の秋期講演大会(名城大学)の折、9月2日に行います。多数の優秀な候補者を積極的にご推薦下さい。

■推薦要領

候補者の対象 金属および関連材料の工学の分野における先駆的研究および開発に格別の功績を挙げた、2021年5月31日時点で46歳以上の研究者を対象とします。

推薦資格 本会代議員による推薦

推薦方法 推薦に際しては、①推薦書、②業績の概要と推薦理由、③主要論文リストを添付書類として提出する。

①推薦書は所定の様式により、候補者氏名、ふりがな、生年月日、勤務先・所属、職名(役職名)、最終学歴、学位、候補者略歴、受賞歴、業績主題、本会活動への貢献、候補者連絡先(住所、勤務先、電話番号、E-mail)、推薦者情報(氏名、住所、勤務先所属、電話番号、E-mail)を記載し、提出する。

・最終学歴：卒業年次および学校名(学部名)を記入、また大学院修了者は修了年次と大学名を併せて記入する。

・本会活動への貢献：本会委員会、シンポジウム、セミナー企画等の活動実績を300字程度で記入する。

②業績の概要と推薦理由は、1,000字程度、A4版1頁で記載し、提出する。

③論文リストは特に主要な論文を「原著論文」「解説論文」「国際会議論文」に分別し、計30編以内を選び、論文題目、発表誌名、巻号頁、共著者を記載の上、A4版1～2頁で提出する。

審査基準 この賞の審査基準は下記の通り

- (1) 金属および関連材料の工学分野における先駆的な研究または先端技術の開発に格別の業績をあげたか
- (2) 学術上または技術上の業績が顕著か
- (3) 学術上の意義が大きい論文を発表したか
- (4) 技術上の効果が大きい重要な発明をしたか
- (5) 金属学会の活動に貢献しているか

登録完了 推薦者のメールアドレス宛に登録完了通知を送信します。

推薦締切 2021年2月26日(金)

推薦 mail 送信先 award@jim.or.jp

第18回村上奨励賞 候補者推薦のお願い

～Web フォームによる推薦です!!～

本会では、財団法人村上記念会からのご寄付を基に金属工学の分野で卓越した業績を挙げつつある若手研究者を奨励するため「日本金属学会村上奨励賞」を設けており、第18回の授賞式を2021年の秋期講演大会(名城大学)の折、9月2日に行います。多数の優秀な候補者を積極的にご推薦下さい。

■推薦要領

候補者の対象 金属および関連材料の工学の分野で卓越した業績を

挙げつつある、2021年5月31日時点で40歳以下の若手研究者。

推薦資格 本会代議員1名、講演大会委員1名または正員3名による推薦

受賞人数 若干名

推薦方法 下記 URL の推薦フォームにより入力して下さい。

1. 推薦フォーム

- ・推薦者資格を選択する。
- ・入力項目は、全て必須。
- ・最終学歴：卒業年次および学校名(学部名)を入力、また、大学院修了者は修了年次と大学名も併せて入力する。
- ・本会活動への貢献：本会の委員会、シンポジウム企画、セミナー企画、論文投稿等の活動実績を300字以内で入力する。

2. 業績の概要と推薦理由

- ・1,000字以内にまとめ、入力する。

3. 論文リスト

- ・特に主要な論文を「原著論文」「解説論文」「国際会議論文」に分別し、計15編以内を選び、論文題目、発表誌名、巻号頁、共著者を入力する。

審査基準 この賞の審査基準は下記の通り

- (1) 意欲的かつ主体的に粘り強く研究や開発に取り組んでいるか
- (2) 創造性・独創性が高い研究や開発に取り組んでいるか
- (3) 意義の大きい新たな発見や発明があるか
- (4) 今後の発展が見込まれる研究や開発か
- (5) 金属学会で活動しているか(金属学会で論文や発表をしているか、委員会委員として活動しているか)

登録完了 推薦者のメールアドレス宛に登録完了通知を送信します。

推薦締切 2021年2月26日(金)

推薦 URL <https://murasho.jim.or.jp/entry>

第31回奨励賞 候補者推薦のお願い

～Web フォームによる推薦です!!～

本会では、次世代を託する優れた若手研究者を顕彰するために1991年から「日本金属学会奨励賞」を設けており、第31回の授賞式を2021年の秋期講演大会(名城大学)の折、9月2日に行います。

歴史の転換期にある今日、若い世代の意識の高揚こそが何よりも望まれております。

金属・材料工学ならびに関連分野で活躍しつつある若手研究者の中から将来性豊かな人材をご推薦下さいますようお願いいたします。

■推薦要領

候補者の対象 2021年5月31日時点で35歳以下の方で、金属・材料工学並びに関連分野において優れた業績を挙げつつある将来性豊かな研究者・技術者を対象とします。

対象部門 学術部門、技術部門*の2部門

※技術部門は企業の研究者または技術者を対象とします。

推薦資格 本会代議員1名、講演大会委員1名または正員3名による推薦

推薦方法 下記 URL の推薦フォームにより入力して下さい。

1. 推薦フォーム

- ・推薦者資格を選択する。
- ・入力項目は、全て必須。
- ・応募部門：2部門から該当する部門を選択する。

- 最終学歴：卒業年次および学校名(学部名)を入力、また、大学院修了者は修了年次と大学名も併せて入力する。
 - 本会活動への貢献：本会の委員会、シンポジウム企画、セミナー企画、論文投稿等の活動実績を300字以内で入力する。
2. 業績の概要と推薦理由
- 1,000字以内にまとめ、入力する。
 - 技術部門は企業人としての実績(特許・社内表彰等)も入力する。
3. 論文リスト
- 特に主要な論文を「原著論文」「解説論文」「国際会議論文」に分別し、論文題目、発表誌名、巻号頁、共著者を入力する。
4. 取得済特許リスト
- 特に主要な取得済特許の番号、題目、発明者、登録日を入力する。
5. 論文リストおよび取得済特許リストは、計15編以内を選び、入力する。

審査基準 この賞の審査基準は下記の通り

学術部門

- (1) 意欲的かつ主体的に研究に取り組んでいるか
- (2) 創造性・独創性が高い研究に取り組んでいるか
- (3) 新たな発見や発明があるか
- (4) 今後の発展が見込まれる研究か
- (5) 金属学会で活動しているか(金属学会で論文や発表をしているか、委員会委員として活動しているか)

技術部門

- (1) 意欲的かつ主体的に研究開発に取り組んでいるか
- (2) 新規性・進歩性の高い研究開発に取り組んでいるか
- (3) 新たな発見や発明があるか
- (4) 今後の発展が見込まれる研究開発か
- (5) 金属学会で活動しているか(金属学会で論文や発表をしているか、委員会委員として活動しているか)

登録完了 推薦者のメールアドレス宛に登録完了通知を送信します。

推薦締切 2021年2月26日(金)

推薦 URL <https://shourei.jim.or.jp/entry>

第69回論文賞 候補論文推薦(自薦)のお願い

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

第69回論文賞の対象論文

日本金属学会誌：第84巻 1～12号(2020年)掲載分

Materials Transactions: Vol. 61 No. 1～12(2020年)掲載分

注：次の要件をすべて満たした原著論文を対象といたします。

- (1) 日本金属学会誌掲載論文は、「学術論文」または「技術論文」のカテゴリーに属する論文であること。
Materials Transactions 掲載論文は、「Regular Article」または「Technical Article」のカテゴリーに属する論文であること。
- (2) Materials Transactions に英文発表後に和訳して日本金属学会誌に掲載された論文、もしくは日本金属学会誌に掲載後に英訳して Materials Transactions に投稿された論文ではないこと。
- (3) コピーライトが本会に帰属していること(本会に著作権を委譲している論文)。
- (4) 過去に本会の若手講演論文賞を受賞していない論文。

推薦数の要件

- ① 推薦者は、同じ論文を複数の部門に推薦することはできない。
- ② 1名の推薦者がこの賞に推薦出来る論文数は、一部門につき1論文である。

審査基準 この賞の審査基準は下記の通り。

- (1) 独創性に富んでいるか
 - ① 研究方法が独創性に富むか
 - ② 問題の取上げ方、考え方が独創性に富むか
 - ③ 新しい境地を開拓しているか
 - ④ 精緻な方法で行われているか
- (2) 発展性があるか
 - ① 方法、測定装置が他に広く利用されているか
 - ② 得られた結果が他の問題に大きく影響するか
 - ③ その方法をもってすれば新しい発展が期待されるか
- (3) 長年の懸案を解決したか
- (4) 他の追随を許さないほど広く深く研究されているか

推薦方法 下記 URL のフォームにより推薦内容を入力して下さい。

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

登録完了 推薦者のメールアドレス宛に登録完了通知を送信します。

推薦締切：2021年2月26日(金)

照会先 会誌・欧文誌編集委員会 E-mail: sadoku@jim.or.jp

推薦 URL <https://data.jim.or.jp/jim/shou/>

第1回新進論文賞 候補論文推薦(自薦)のお願い

本会では、秋の講演大会で前年1カ年の会誌、欧文誌に掲載された若手の著者による論文の中から、学術上または技術上特に優秀な論文に対し、新進論文賞を授賞することとなりました。新進論文賞候補論文の推薦は会誌、欧文誌の「編集委員」または「当該論文の査読者」あるいは「代議員」の方々をお願いいたします。また、より広く推薦していただくため、「著者本人」からの自薦も認めております。つきましては、下記ご参照の上、奮ってご応募をお願いいたします。

第1回新進論文賞の対象論文

日本金属学会誌：第84巻 1～12号(2020年)掲載分

Materials Transactions: Vol. 61 No. 1～12(2020年)掲載分

注：次の要件をすべて満たした原著論文を対象といたします。

- (1) 2021年5月31日時点で、第1著者が35歳以下の日本金属学会誌及び Materials Transactions 掲載論文を対象とする。
- (2) 対象部門は「日本金属学会誌」「Materials Transactions」の2部門とする。
- (3) 日本金属学会誌掲載論文は、「学術論文」又は「技術論文」のカテゴリーに属する論文であること。
- (4) Materials Transactions 掲載論文は、「Regular Article」又は「Technical Article」のカテゴリーに属する論文であること。
- (5) Materials Transactions に英文発表後に和訳して日本金属学会誌に掲載された論文、もしくは日本金属学会誌に掲載後に英訳して Materials Transactions に投稿された論文ではないこと。
- (6) コピーライトが本会に帰属していること(本会が著作権を保有している論文)。
- (7) 過去に本会の若手講演論文賞を受賞していない論文。

推薦数の要件 ①推薦者は、同じ論文を複数の部門に推薦することはできない。
②1名の推薦者がこの賞に推薦出来る論文数は、一部門につき1論文である。

審査基準 この賞の審査基準は下記の通り。

- (1) 科学的・技術的に質の高い、新規な興味ある内容(結果、理論、手法等)が十分含まれているか。
- (2) 当該分野の研究の発展に貢献しうるものであるか。

推薦方法 下記 URL のフォームにより推薦内容を入力して下さい。

- (1) 論文題名
- (2) 著者名
- (3) 掲載・巻・号・頁
- (4) 対象部門(日本金属学会誌, Materials Transactions から選択) 掲載された部門で選考されます
- (5) 推薦理由(400字以内)
- (6) 推薦者名(勤務先・連絡先 TEL・E-mail も記入下さい)

登録完了 推薦者のメールアドレス宛に登録完了通知を送信します。

推薦締切 : 2021年2月26日(金)

推薦 URL <https://data.jim.or.jp/jim/shinshin/>

照会先 会誌・欧文誌編集委員会 E-mail: sadoku@jim.or.jp

〈まてりあ啓発・教育賞〉

- (1) 一般読者の理解度: 読みやすさ, 分かりやすさ, 簡潔さ等
- (2) 一般読者の関心度: 話題性, 核心性, 革新性等
- (3) 記事の独創性: 問題の抽出およびその解析・解説の適切さと独創性等
- (4) 啓発又は教育への貢献度: 社会への材料の重要性の啓発または高等教育機関における教育への貢献度
- (5) 情報発信度および注目度: マスコミ報道, 本会の講演大会や学術誌での発表(自己申告), まてりあデータベースアクセス件数(事務局調査)等

授 賞 2021年秋期講演大会(名城大学)にて。

推薦資格 「会報編集委員」または「著者ご本人」あるいは「正員3名」

推薦方法 ①種別②タイトル③著者名④掲載巻号頁⑤推薦理由(300~400字)⑥推薦者名をオンラインで入力する。ホームページ: [まてりあ](#) より入力して下さい。または、郵送・FAX, E-mail で送信する。

推薦締切 2021年2月26日(金)

推薦 URL <https://data.jim.or.jp/jim/materiashou/ronbun.html>

<https://data.jim.or.jp/jim/materiashou/kyoiku.html>

照会先 会報編集委員会 E-mail: materia@jim.or.jp

第11回まてりあ賞 推薦(自薦)のお願い

会報編集委員会では毎年、会報「まてりあ」に論文または記事を掲載し、金属およびその周辺材料の学術および科学技術の振興に顕著な貢献をしたと思われる方に授賞をする「まてりあ賞」を設けております。会報「まてりあ」に掲載された記事(過去3ヵ年)の中から、授賞候補論文および記事を「会報編集委員」または「著者ご本人」あるいは「一般会員(正員3名以上の連名)」から推薦してもらい選考の上、授賞いたします。下記推薦要領により、皆様からの積極的なご推薦をお願いいたします。

■第11回「まてりあ賞」推薦要領

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

授賞対象記事 2018年~2020年掲載済記事(授賞済記事は除く: 授賞済記事はホームページに掲載します。)

- 記事種別** (1) **まてりあ論文賞**: 解説, 最近の研究, 技術資料, 集録, 新進気鋭, 特集記事, 物性・技術データ最前線, プロジェクト報告
- (2) **まてりあ啓発・教育賞**: 講義ノート, 入門講座, プロムナード, 実学講座, 材料教育, 材料科学のバイオニたち

審査基準 この賞の審査基準は下記の通り。

〈まてりあ論文賞〉

- (1) 研究者および技術者の理解度: 読みやすさ, 分かりやすさ, 簡潔さ等
- (2) 研究者および技術者の関心度: 話題性, 核心性, 革新性等
- (3) 論文の独創性: 問題の抽出およびその解析・解説の適切さと独創性等
- (4) 研究および技術の振興への貢献度: 当該分野の研究の指針の提供等
- (5) 情報発信度および注目度: マスコミ報道, 本会の講演大会や学術誌での発表(自己申告), まてりあデータベースアクセス件数(事務局調査)等

各種学術賞や助成等の候補の推薦について

本会には下に示す各種の学術賞や奨励、助成等の候補の推薦者に指定されており、積極的な推薦を行っております。会員各位にはこれらの候補として適当と思われる方の推薦または自薦をお願いいたします。

推薦または自薦は次の各号によるものとします。

- (1) 推薦または自薦の資格は、本会会員とする。
- (2) 推薦または自薦に際しては、各学術賞等の所定の書式の推薦書及び資料を提出する。
- (3) 推薦または自薦の期限は、原則として各学術賞等の推薦締切の2ヶ月前とする。

推薦又は自薦しようとするときは「〇〇賞に推薦(自薦)」と明記の上、上記(3)の期限までに、各学術賞等の所定の推薦書及び資料を添えて、本会事務局までお申し出下さい。書類審査の後、理事会で推薦を決定いたします。

本会が推薦者に指定されている各種学術賞等	募集者	各賞等の推薦締切(2020年の例)(本会締切は2ヶ月前)
文部科学大臣表彰 科学技術賞, 若手科学者賞 http://www.mext.go.jp/	文部科学省	7月27日
文部科学大臣表彰 創意工夫功労者賞 http://www.mext.go.jp/	文部科学省	9月30日
日本学術振興会賞 https://www.jsps.go.jp/jsps-prize/	日本学術振興会	4月12日
育志賞 http://www.jsps.go.jp/j-ikushi-prize/	日本学術振興会	6月9日
朝日賞 http://www.asahi.com/shimbun/award/asahi/	朝日新聞社	8月25日
日本産業技術大賞 http://corp.nikkan.co.jp/p/honoring/nihonsangyogijyutsutaishou	日刊工業新聞社	1月31日
東レ科学技術賞, 東レ科学技術研究助成 http://www.toray-sf.or.jp/	東レ科学振興会	10月10日
本多記念賞, 本多フロンティア賞, 本多記念研究奨励賞 http://hondakinenkai.or.jp/	本多記念会	9月16日
大河内賞 http://www.okochi.or.jp/hp/top.html	大河内記念会	8月12日

本会が推薦者に指定 されている各種学術賞等	募集者	各賞等の推薦締切 (2017年の例) (本会締切は 2ヶ月前)
全国発明表彰 http://koueki.jiii.or.jp/hyosho/top/hyosho_top.html	発明協会	8月31日
地方発明表彰 http://koueki.jiii.or.jp/hyosho/top/hyosho_top.html	発明協会	3月31日
井上學術賞 http://www.inoue-zaidan.or.jp/f-01.html	井上科学振興財団	9月20日
井上春成賞 http://inouesho.jp/	科学技術振興機構	3月31日
岩谷直治記念賞 http://www.iwatani-foundation.or.jp/	岩谷直治記念財団	8月31日
浅田賞、三島賞 https://www.isij.or.jp/commendation/	日本鉄鋼協会	9月30日
風戸賞 http://www.kazato.org/application/	風戸研究奨励会	10月21日
風戸研究奨励賞 http://www.kazato.org/application/	風戸研究奨励会	12月9日
グリーン・サステナブルケミストリー賞 http://www.jaci.or.jp/gscn/page_03.html	新化学技術推進協会	11月18日
工学教育賞 https://www.jsee.or.jp/award/	日本工学教育協会	7月13日
KONA 賞、研究助成、援助 http://www.kona.or.jp/jp/	ホソカワ粉体工学振興財団	7月20日
サー・マーティン・ウッド賞 http://www.msforum.jp/about_sir_martin/	ミレニアム・サイエンス・フォーラム	8月1日
機械振興賞 http://www.jspmi.or.jp/tri/prize/index.html	機械振興協会	5月31日
素形材産業技術賞 https://sokeizai.or.jp/japanese/award/skill_h22.html	素形材センター	5月19日
日本塑性加工学会賞 http://www.jstp.jp/about/award/	日本塑性加工学会	8月27日
日本溶接協会 貢献賞、技術賞、溶接注目発明賞 https://www.jwes.or.jp/jp/somu/award/index.html	日本溶接協会	11月10日
熱・電気エネルギー技術に関する研究助成 http://www.teet.or.jp/08_4.html	熱・電気エネルギー技術財団	10月28日
藤原賞 http://www.fujizai.or.jp/index.htm	藤原科学財団	12月20日
報公賞、工学研究奨励援助金 http://www.hattori-hokokai.or.jp/	服部報公会	5月10日
睦賞 http://www.jsndi.jp/honor_award/	日本非破壊検査協会	12月31日
山崎貞一賞 http://www.mst.or.jp/Portals/0/prize/index.html	材料科学振興財団	4月30日
山田科学振興財団研究援助 http://www.yamadazaidan.jp/jigyo/kenkyu.html	山田科学振興財団	2月23日
江崎玲於奈賞 https://www.i-step.org/prize/esaki/	茨城県科学技術振興財団	3月10日
薄膜技術に関する研究助成 https://www.samco.co.jp/foundation/recruitment/	サムコ科学技術振興財団	4月30日
工学教育賞 https://www.jsee.or.jp/award/	日本工学教育協会	1月12日

掲 示 板

〈公募類記事〉
 無料掲載：募集人員、締切日、問合先のみ掲載。
 有料掲載：1/4頁(700～800文字)程度。
 ・「まてりあ」とホームページに掲載；15,000円＋税
 ・ホームページのみ掲載；10,000円＋税
 〈その他の記事〉 原則として有料掲載。
 ・原稿締切・掲載号：毎月1日締切で翌月号1回掲載
 ・原稿提出方法：電子メール(受取りメールの確認をして下さい)
 ・原稿送信先：E-mail: materia@jim.or.jp ☎ 022-223-3685

集 会

◇レアメタル研究会◇

- 主 催 レアメタル研究会
 ■主 宰 者 東京大学生産技術研究所 教授 岡部 徹
 ■協 力 (一財)生産技術研究奨励会(特別研究会 RC-40)
 ■共 催 東京大学マテリアル工学セミナー
 レアメタルの環境調和型リサイクル技術の開発研究会
 東京大学生産技術研究所 持続型エネルギー・材料統合研究センター
 東京大学生産技術研究所 非鉄金属資源循環工学寄付研究部門(JX 金属寄付ユニット)
 ■協 賛 (一社)軽金属学会、(一社)資源・素材学会、(一社)新金属学会、(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
 ■参加登録・問合わせ 岡部研 学術支援専門職員 宮崎智子
 (tmiya@iis.u-tokyo.ac.jp)

〈2020年度レアメタル研究会等の今後の予定〉 (2020年11月11日現在)

- 第94回 2021年1月8日(金) (2020年度 第4回)
 ★貴金属シンポジウム(第8回)＋新年会★(合同開催)
 ■第95回 2021年3月12日(金) (2020年度 最終回)

- レアメタル研究会(第94回) 2021年1月8日(金)
 ★貴金属シンポジウム(第8回)＋新年会★(合同開催)
 ZOOM 等で行う「Online 講演会＋Web 交流会」

テーマ：貴金属の製錬・リサイクル
 午後2：00～ 講演会 【講演依頼中】

コロナウイルス感染防止対策のため、Zoom システム等を利用したオンライン開催とさせていただきます。

詳細については今後ホームページに掲載いたします。

＊レアメタル研究会ホームページ＊

https://www.okabe.iis.u-tokyo.ac.jp/japanese/rc40_j.html

2021年春期(第168回)講演大会講演募集

◎2021年春期講演大会を下記の通り開催いたします。

会 期：2021年3月16日(火)～3月19日(金)

開催方法：オンライン開催(Zoom 利用)

オンライン開催にあたり、通常とは異なる発表形式となります。

下記注意事項をご確認頂き、十分ご注意頂き講演のお申込みをお願いいたします。

オンライン開催に伴うリスクについての注意

講演大会での発表には、現地開催とオンライン開催とにかかわらず、以下のようなリスクがあります。ところが、オンライン開催では、密室から参加することが可能で講演会場のような衆人監視が行われないこと及び講演が Web 上で配信されることから、これらのリスクが高まるのが懸念されます。本会では、リスクの高まりに対処するために、考えうる対策を取りますが、最後は参加者のモラルに訴えざるを得ません。これらを理解の上、十分に注意して講演の申し込み及び発表をして頂きますようお願いいたします。

・発表に伴うリスク

1. 研究情報を不正に取得される

不正聴講、講演の録画・録音・撮影(スクリーンショットを含む)が行われてしまう

※パスワード発行によって参加者を限定するとともに、録画・録音・撮影等の禁止を周知徹底しますが、最終的には参加者にモラルを守っていただくことになります。

※本大会で使用するオンライン会議ツールでは録画機能は使えません。

2. 著作権を侵害してしまう

他人が著作権を持つ音声、映像、画像、写真の安易な使用(引用)により、著作権を侵害してしまう

※文献などはこれまでの講演大会と同様、適切な引用がされていれば問題ありません。

下記事項もご確認頂き、お申込下さい。

- ① 「一般講演」に限り、2 件申込することができます。
- ② 最新の概要原稿フォーマットを利用し、PDF 変換後、アップロード下さい。
- ③ 同一研究室の3 件以上の連続講演は認められておりません。
- ④ 参加者(講演者含む)へは参加申込み締切後に、参加者個別認証 ID とパスワードを配信いたします。

☐ 非会員でも大会参加費と登壇費を前納すれば、講演申込ができます(詳細は「申込要領」の「講演資格」参照。)

☐ 講演申込は同時に大会参加の事前予約となります(相互聴講申込での発表は不可)。2月26日までに参加費を納入下さい。

講演申込ホームページアドレス	https://www.jim.or.jp/convention/2021spring/
講演申込および概要原稿提出期限(締切厳守！)	講演申込と講演概要提出は同時に行う。(同時に行わない場合は、講演申込として受理されない)
講演種別	全講演(公募シンポジウム、一般、ポスター、共同セッション)
講演申込締切	2021年1月7日(木)17時

講演についての問合せ先：公益社団法人日本金属学会 講演大会係 annualm@jim.or.jp

これから入会して講演申込をされる方へ

☐ インターネットで入会申込み下さい。入会申込確認後は ID (会員番号) とパスワードが即日メール返信されます。

☐ 会員認定：期限内に入会手続きを行い、年会費を納入下さい。

☐ 年会費納入期日までに2021年会費の払込がない場合は、プログラムに掲載されていても、講演不許可の措置をとります。

入会申込 URL	https://www.jim.or.jp/member/mypage/application.php
入会申込期限	12月28日(月)

入会・会費の問合せ：会員サービス係 member@jim.or.jp

2021年春期(第168回)講演大会ご案内ならびに参加申込みについて

春期講演大会は、3月16日(火)から19日(金)までオンラインにて開催します。
尚、参加申込みは、すべてインターネット申込となります。詳細は、下記申込要領をご覧ください。

日 程	
日 時	行 事
3月16日(火)	ポスターセッション、高校生・高専学生ポスターセッション、オンライン懇親会
3月17日(水) 9:00~12:00 13:00~17:00	学会賞受賞記念講演、本多記念講演 学術講演
3月18日(木) 9:00~17:00	学術講演会
3月19日(金) 9:00~17:00	学術講演会

《2021年春期講演大会 開催予定の各種シンポジウム》

公募シンポジウム7テーマ

- | | |
|--|--------------------------------------|
| S1 永久磁石開発の元素戦略 8 一次世代新材料に向けた基礎・基盤研究 | S5 金属表面の材料化学Ⅳ—めっき・耐食性・耐酸化性・触媒研究の新展開— |
| S2 医療・福祉のための Additive manufacturing の材料科学Ⅳ | S6 プラスチックの材料科学Ⅷ |
| S3 ナノ・マイクロスペーステラリングⅤ | S7 材料機能特性のアーキテクチャー構築シンポジウムⅡ |
| S4 ハイエントロピー合金の材料科学Ⅴ | —組織制御プロセスの理論と実験に基づく予測と解析— |

企画シンポジウム2テーマ

K1 どこまで実現したか、超スマート社会Ⅱ(仮題)

Road to Smart Society ~State-of-the-art and prospectus of materials in smart device~

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

K2 工業製品における材料選択とマルチマテリアル構造~航空機機体~

Materials selection and multi-material structure in commercial products

~aircraft fuselage~

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

参加申込要領

インターネットによる大会事前参加申込締切：2021年2月26日(金)

大会参加申込み URL <https://www.jim.or.jp/convention/2021spring/>

参加申込締切後、参加方法や講演概要ダウンロードについては、下記をご参照下さい。なお、領収書は、決済完了後に申込画面から各自印刷して下さい(WEB画面：講演大会 MyPage よりダウンロード)。

◆大会参加費(講演概要ダウンロード権含む)※年会費とは異なります。

事前参加申込締切後の後期(当日)申込を設定しました。

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

予約申込締切日	2月26日(金)(申込および入金期日)	
会 員 資 格	事前申込 (インターネット申込・事前支払い)	後期(当日)申込 (3月3日~会期最終日)
正員・維持員会社社員、シンポジウム共催・協賛の学協会会員(本会非会員)	10,000円	13,000円
個人会員で2021年3月1日時点で65歳以上の方*	無 料	無 料
学生員**	6,000円	7,000円
非会員*** 一般	24,000円	27,000円
非会員*** 学生(大学院生含む)	14,000円	16,000円

・お支払後の取消は、準備の都合上ご返金いたしかねますのでご了承下さい。

* **65歳以上の個人会員**：会員情報に生年月日のご登録がない場合は、課金されますのでご注意ください。会員情報に生年月日をご登録させていただきますので、大会参加登録の前に annualm@jim.or.jp まで会員番号・お名前・ご連絡先・生年月日をお知らせ下さい。

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

*** 非会員の(有料)参加申込者には、1年間の会員資格を付与します。ただし特典は重複して付与いたしません。

◆支払方法

お支払いはクレジットカードおよびコンビニ振込決済をご利用頂けます。また、入金後のご返金は致しかねます。2月26日(金)の入金日をもって事前参加申込完了となります。

◆参加方法および講演概要の WEB 公開

講演概要の公開日は、大会2週間前の2021年3月2日(火)です。参加申込みをされ、参加費を納入された方へは、概要公開日にオンライン参加に必要な参加者個別認証 ID とパスワードを配信いたします。講演大会公開サイトにログイン後、講演概要の閲覧ができます。特許関係のお手続きは、公開日までにお済ませ下さい。

◆講演概要集購入について

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

◆懇親会開催案内(※金属学会単独開催)

開催日時 3月16日(火) 18:30~

開催方法 オンライン会議ツールRemo(予定)

参加費 無料

参加登録期間 事前登録(11月25日(水)~2月26日(金)) および当日申込

登録方法(事前に参加者人数をある程度把握するため、下記のとおりとする。)

事前参加申込 大会参加申込みの際、「懇親会に参加する」で申込。

申込者へは、3月上旬に会場 URL と参加方法の案内を配信する。

当日申込 大会プログラムサイトの懇親会会場リンクから直接入場してもらう。

参加申込・問合先

〒980-8544 仙台市青葉区一番町 1-14-32

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

日本金属学会2021年春期(第168回)講演大会 第5回「高校生・高専学生ポスター発表」募集案内

申込締切日：2021年1月14日(木)

開催方法 オンライン

開催予定日時 2021年3月16日(火) 13:00~17:30の間で2時間程度を予定

対象者 高校生および3年以下の高専学生

発表方法 オンライン会議ツール

テーマ 材料に限定せず、フリーテーマです。(課題研究の成果、科学技術の取組等)

ポスター発表資料作成について：別途連絡

講演申込 <https://www.jim.or.jp/convention/2021spring>

講演概要原稿 不要

参加費および講演聴講

① 発表者、共同研究者および指導教員の参加費を免除し、講演大会の発表を聴講できる。

② 希望があれば、高校生・高専ポスター発表の関係者(親、友人)5名程度までの参加費を免除し、講演大会の発表を聴講することができる。

③ 指導教員は、事前に参加者リストを提出する。(別途用紙を送付予定)

④ 指導教員宛てに、参加者用 ID とパスワードおよびプログラム1部を事前送付する。

問合せ・連絡先 公益社団法人日本金属学会 講演大会係

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

◇2021年春期講演大会に関する情報は、随時ホームページでもお知らせして参ります。皆様のご参加をお待ちしております。

2021年秋期講演大会(名城大学)公募シンポジウムテーマ提案募集

提案期限：2021年2月19日(金) 期日厳守

会員の研究活動の一層の活性化を図ることを目的として、春秋大会において会員からの提案テーマによるシンポジウム講演を実施いたしており、活況を呈しております。明年の秋期大会の公募シンポジウムテーマを募集いたします。次の要領をご参照のうえ、活発な討論が期待できる有益なテーマを積極的にご提案下さい。(提案様式はホームページよりダウンロードして下さい。)

【募集対象の大会】

2021年秋期講演大会(名城大学(予定))

【実施要領】

- 境界領域を取り込むもの、最新の情報を含むもの、適時な討論展開ができるもの。
- 一般会員、若手・中堅研究者の、斬新なアイディアによる提案を期待する。
- これまでの金属学会になかったテーマを歓迎する。一つのシンポジウムの講演件数は10件以上であることを目安とする。
- 採択したテーマは、公募シンポジウムとして、講演申込を募集会告する。
- 採択された場合、提案者(企画責任者)はテーマ責任者として、積極的に講演募集を行い、また講演プログラムを編成する。シンポジウムの企画に積極的な方々が将来、調査研究・講演大会などで主導的に活躍されることを期待する。

1. 講演の種類：基調講演と応募講演
2. 提案書の内容：①テーマ、②テーマ英語名、③趣旨、④基調講演の予定題目と講演者、⑤推定講演数、⑥希望会場広さ・開催希望日、⑦提案者所属・役職/氏名、⑧通信先住所・TEL・FAX、E-mail
3. 提案書送付先：下記宛て E-mail で送付して下さい。2,3日過ぎても受理返信通知のない場合はご連絡下さい。
4. テーマの選定：講演大会委員会で選定し、結果は提案者に通知します。
5. 採択テーマの告知と講演募集：「まてりあ」5号2021年秋期大会講演募集会告ならびに本会ホームページで行う。
6. 講演申込締切日：2021年6月中旬 予定
7. 講演プログラム：テーマ責任者がプログラム編成し、講演大会委員会へ提出する。
8. 講演時間：応募講演：15～25分(+討論時間5～10分=合計20～35分)、基調講演：30分(+討論時間10分=合計40分)
9. 講演概要原稿分量：A4判1ページ(応募講演、基調講演とも)

【公募シンポジウム企画の採択基準】

- (1) 企画責任者(シンポジウム chair)およびテーマ責任者(シンポジウム co-chair)
 - ①企画責任者は会員であること。
 - ②テーマ責任者は複数テーマを兼任しないこと。
 - ③企画責任者またはテーマ責任者には、了解を得た講演大会委員が入っていること。
 - ④講演大会委員(専門分野)リストは HP に掲載し、連絡先等は事務局に問合せする。
- (2) 講演大会委員会でテーマ責任者(代理者可)は企画提案の説明を行うこと。
- (3) 継続テーマの採択条件(上記に追加)

今後も同一テーマのシリーズ化で公募シンポジウムを希望する場合は、会員の研究活動一層の活性化を図ることを目的とした下記の採択基準の条件を満たす提案が求められます。

 - ①全講演数の半数以上の応募講演数が見込まれること。
 - ②基調講演の非会員枠は原則、1～2件とし、会員の発表の場とすること。
 - ③提案書の趣旨にどのような科学的知見が得られるかの記載があること。
 - ④継続テーマ提案が採択条件を満たさない場合、採択を否決する。否決テーマに対しては、一般講演を容認することもある。

【参考】2020年秋期講演大会における公募テーマ

S1	ミルフィュー構造の材料科学Ⅲ
S2	機能コアの材料科学Ⅰ
S3	ハイエントロピー合金の材料科学(Ⅳ)
S4	材料変形素過程のマルチスケール解析(Ⅲ)
S5	ナノ・マイクロスペースステイリングⅣ
S6	材料技術史から見るこれからの技術展開Ⅲ—アルミニウム合金
S7	超高温材料の科学技術Ⅰ

問合・照会先 E-mail: stevent@jim.or.jp

☎ 022-223-3685 FAX 022-223-6312

日本金属学会講演大会委員会宛



2021年秋期講演大会(名城大学)企画シンポジウムテーマ募集

提案期限：2021年2月19日(金)

最新の研究や技術を発信し、多くの研究者・技術者が集い交流する魅力ある講演大会を目指して、2017年秋期講演大会より企画シンポジウムを実施しています。従来の公募シンポジウムとは違い、企業の方に積極的に講演頂くため、講演概要原稿の提出は問いません。講演発表は、一般(応募)講演枠は設けず、依頼講演および基調講演に限定いたします。

次の要領をご参照のうえ、活発な討論が期待できる有益なテーマおよび他学会との連携企画等積極的にご提案下さい。(提案様式はホームページよりダウンロードして下さい。)

【実施要領】

1. 企画責任者：企画責任者は会員であること
2. 共同責任者：共同責任者は、公募シンポジウムの co-chair と重複してもよいが、同時期開催の企画責任者(代表者)と重複しないこと。
3. 講演の種類：依頼講演および基調講演(一般会員からの講演募集は行わない)
4. 講演時間：依頼講演(15分、20分、25分)、基調講演(25分～30分)
5. 質疑応答時間：5分または10分
6. 概要原稿：A4 サイズ1枚(他の講演種別と同じ) または提出不要
7. 非会員講演者の取扱い：参加費、交通費、謝金は公募シンポジウムに準ずる。
8. テーマの決定：講演大会委員会において採択を決定し、結果は提案者に通知します。テーマ責任者(代理者可)は、講演大会委員会で企画提案の説明を行うこと。
9. 採択テーマの案内：「まてりあ」ならびに本会ホームページで行う。
10. 講演プログラム：企画責任者がプログラム編成し、講演大会委員会へ提出する。
11. 提案書送付先：下記あて E-mail で送付して下さい。2,3日過ぎても受理通知のない場合は、ご連絡下さい。

問合せ・照会先

E-mail: stevent@jim.or.jp

☎ 022-223-3685

(公社)日本金属学会 講演大会委員会宛

各締切日等：下記表参照

	2021年秋期大会
企画募集案内	12月1日(12号会告)
応募締切	2021年2月19日
企画テーマの決定	2021年3月末頃
講演者リスト提出期日	2021年5月初予定
プログラム提出期日(講演登録締切)	2021年6月中旬予定
講演大会企画委員会(会場決定)	2021年6月末頃
プログラム公開	2021年7月上旬頃

○講演時間(討論時間)：15分～30分(5分～10分)

○非会員の取扱い(参加費、交通費、謝金)：公募シンポジウムに準ずる

○プログラム編成および送付方法：テーマ責任者が WORD で作成し事務局にメール添付で送付する。

◇2021年秋期講演大会(2021年9月2日(木)～4日(土))のご案内は、「まてりあ」60巻5号会告を予定しております。

会報「まてりあ」第60巻(2021年)第1号からの新表紙デザイン決定!!

本会報「まてりあ」は、来年(2021年)で創刊60年を迎えます。これを記念して、会報編集委員会では、来年(第60巻第1号)から本誌の表紙を変更することとし、新デザインを募集したところ68作品のご応募を頂きました。たくさんのご応募をありがとうございました。厳選なる審査を行った結果、新表紙デザインには下記の作品が選ばれました。おめでとうございます! 素晴らしいデザインをしてくださった柳瀬桃子様には賞金20万円を授与させていただきます。

審査員からは「金属の研究が若い学生等に新鮮かつクールであるといったイメージを持ってもらえるような表紙」、「金属材料の持つ硬さ・展延性・光沢などがよく表現」、「メビウスの輪が材料の無限の可能性を表現」、「記憶に残る印象的な表紙」などの声が寄せられており、高評価を得ております。

会報「まてりあ」は、新表紙デザインと共に心機一転、これからも魅力ある企画を編集してまいります。今後とも会報「まてりあ」をどうぞ宜しくお願いいたします。

会報編集委員会 委員長 大塚 誠



作製者：柳瀬桃子様(ビーコンコミュニケーションズ株式会社 グラフィックスタジオ)

コンセプト

「その先に広がる未来」。研究によりさらなる発展が期待される金属素材の未来を感じる表紙を目指した。使用した画像は、金属が放つ光の「メビウスの輪」で、限りなく進化する素材の未来を表現している。毎号ごとにNo.部分の色を変化させる。

2021, 2022年度代議員候補者選挙投票のご依頼

投票締切日 2020年12月31日(当日消印有効)

正 員 各 位

2021, 2022年度の代議員選挙候補者を募ったところ、次頁の立候補者がありましたので、関係する規程に基づき代議員の選挙を行います。

本会ホームページの「情報公開」の「主要規程」に公開してある「代議員選挙規程」を予めご承知願います。

よろしくご投票下さいますようお願いいたします。

2020年12月 1 日
公益社団法人 日本金属学会
会長 高梨 弘毅

投票に際しての注意事項

1. 地区別代議員候補者の投票

- 全ての地区に投票下さい。
- 地区別の改選数に過不足なく投票下さい。
- 当該地区の立候補者以外の候補者を記載しないで下さい。

2. 本部枠代議員候補者の投票

- 改選数に過不足なく投票下さい。

3. 次の投票は無効になります。

- 所定の用紙を使用していないものは全て無効(コピーなど)。
- 期日までに投票しなかったものは無効。

4. 投票方法

- (1) 中国四国地区以外の地区の投票は、各地区の上段左欄に○を付けて下さい。
- (2) 中国四国地区は、改選数の候補者名または番号に○を付けて下さい。
- (3) 投票は無記名です。投票用紙に記名しないで下さい。
- (4) 投票用封筒は本紙に綴じ込んであるものを使用の上、封筒の裏面に氏名・住所をご記入下さい。
この封筒にこの選挙の投票用紙以外のものを同封しないで下さい。



(2020年 9 月19日～2020年10月20日)

正 員

小 松 真 士 住友電気工業株式会社

田 中 秀 直 中外炉工業株式会社

学 生 員

稲 垣 佑 樹 大同大学

稲 船 智 仁 大同大学

梅 原 弘 平 福井大学

竹中崇一郎 金沢大学

田 中 秀 俊 大同大学

土田真之介 大同大学

西田貴美花 大阪大学

古 川 章 人 熊本大学

公益社団法人日本金属学会 2021, 2022年度代議員候補者選挙投票用紙

投票締切日：2020年12月31日(当日消印有効)

表面

投票の注意事項

1. 地区別代議員候補者および本部枠代議員候補者の全てに投票する(裏表)。
2. 投票について
 - (1) 中国四国地区を除いて、改選数の投票は、各地区の上段左欄に○を付ける。
 - (2) 中国四国地区は、改選数の候補者名または番号に○を付ける。

会費支払い済の正員のみ投票できます。

役職等は届出書に基づいて記載しています。

代議員候補者

(敬称略：受付順)

北海道地区(改選数 3 名)		
投票欄		投票は、左欄に○を付ける
1 橋本直幸	北海道大学大学院工学研究院教授	
2 三浦誠司	北海道大学大学院工学研究院教授	
3 大野宗一	北海道大学大学院工学研究院教授	
東北地区(改選数10名)		
投票欄		投票は、左欄に○を付ける
1 鈴木茂	東北大学マイクロシステム融合研究開発センター教授	
2 加藤秀実	東北大学金属材料研究所教授	
3 今野一弥	仙台高等専門学校総合工学科教授	
4 柴田悦郎	東北大学多元物質科学研究所教授	
5 高梨弘毅	東北大学金属材料研究所教授	
6 福山博之	東北大学多元物質科学研究所教授	
7 吉見享祐	東北大学大学院工学研究科教授	
8 成島尚之	東北大学大学院工学研究科教授	
9 齋藤嘉一	秋田大学大学院理工学研究科教授	
10 高村仁	東北大学大学院工学研究科教授	
関東地区(改選数36名)		
投票欄		投票は、左欄に○を付ける
1 宝野和博	物質・材料研究機構理事	
2 阿部英司	東京大学大学院工学系研究科教授	
3 糸井貴臣	千葉大学大学院融合理工学府教授	
4 伊藤公久	早稲田大学理工学術院基幹理工学部教授	
5 岩本知広	茨城大学大学院理工学研究科教授	
6 梅澤修	横浜国立大学大学院工学研究院教授	
7 榎学	東京大学大学院工学系研究科教授	
8 大村孝仁	物質・材料研究機構構造材料研究拠点副拠点長	
9 長田俊郎	物質・材料研究機構構造材料研究拠点主幹研究員	
10 梶谷敏之	日本製鉄㈱技術開発本部部長	
11 荻谷義治	芝浦工業大学工学部教授	
12 北園幸一	東京都立大学システムデザイン学部教授	
13 木村好里	東京工業大学物質理工学院教授	
14 葛巻徹	東海大学工学部教授	
15 桑原孝介	㈱日立製作所研究開発グループ主任研究員	
16 小林能直	東京工業大学科学技術創成研究院教授	
17 重里元一	日本製鉄㈱技術開発本部部長	
18 染川英俊	物質・材料研究機構構造材料研究拠点グループリーダー	
19 高井健一	上智大学理工学部教授	
20 土屋由美子	東芝エネルギーシステム㈱材料技術開発部エキスパート	
21 出村雅彦	物質・材料研究機構統合型材料開発・情報基盤部門長	
22 中尾航	横浜国立大学大学院工学研究院教授	
23 仲道治郎	JFE スチール㈱スチール研究所分析・物性研究部長	
24 野田和彦	芝浦工業大学工学部教授	
25 秦昌平	日立金属㈱機能部材事業本部部長	
26 久森紀之	上智大学理工学部教授	
27 平田秋彦	早稲田大学理工学術院教授	
28 平田茂	日本冶金工業㈱技術研究所所長	
29 藤居俊之	東京工業大学物質理工学院教授	
30 船川義正	JFE スチール㈱理事・主任部員	
31 御手洗容子	東京大学大学院新領域創成科学研究科教授	
32 本保元次郎	千葉工業大学工学部教授	
33 森田一樹	東京大学大学院工学系研究科教授	
34 遊佐覚	㈱IHI 技術基盤センター部長	
35 横田毅	JFE スチール㈱スチール研究所薄板研究部長	
36 吉田英弘	東京大学大学院工学系研究科教授	

*裏面は、東海、北陸信越、関西、中国四国、九州、全国区の投票用紙

裏面に続く(裏面も投票して下さい)

公益社団法人日本金属学会 2021, 2022年度代議員候補者選挙投票用紙

裏面

東海地区(改選数11名)			中国四国地区(改選数 6 名)		
投票欄		投票は、左欄に○を付ける	*投票は <u>6 名</u> に○をつける		
1	木 島 秀 夫	JFE スチール(株)スチール研究所部長	1	市 川 貴 之	広島大学大学院先進理工系科学研究科教授
2	岡 本 力	日本製鉄(株)名古屋技術研究部部長	2	小 林 千 悟	愛媛大学大学院理工学研究科教授
3	君 塚 肇	名古屋大学大学院工学研究科教授	3	松 本 洋 明	香川大学創造工学部教授
4	西 川 友 章	愛知製鋼(株)技術統括部部長	4	陳 中 春	鳥取大学大学院工学研究科教授
5	植 田 茂 紀	大同特殊鋼(株)技術開発研究所副所長	5	濱 田 純 一	日鉄ステンレス(株)研究センター部長
6	嶋 睦 宏	岐阜大学工学部教授	6	松 木 一 弘	広島大学大学院先進理工学系科学研究科教授
7	戸 高 義 一	豊橋技術科学大学大学院工学研究科教授	7	赤 井 誠	日立金属(株)冶金研究所主管研究員
8	日 原 岳 彦	名古屋工業大学大学院 工学研究科教授	九州地区(改選数 5 名)		
9	宇佐美 初彦	名城大学理工学部教授			
10	細 川 裕 之	産業技術総合研究所磁性粉末冶金センター研究チーム長	投票欄		投票は、左欄に○を付ける
11	前田 千芳利	トヨタ自動車(株)第1材料技術部プロフェッショナルパートナー	1	波 多 聰	九州大学大学院総合理工学研究院教授
北陸信越地区(改選数 5 名)			2	金 子 賢 治	九州大学大学院工学研究院教授
投票欄		投票は、左欄に○を付ける	3	河 村 能 人	熊本大学先進マグネシウム国際研究センター長・教授
1	大 鳥 範 和	新潟大学理学部教授	4	高須 登実男	九州工業大学工学部教授
2	喜 多 和 彦	YKK(株)工機技術本部専門役員	5	田 中 將 己	九州大学大学院工学研究院教授
3	榊 和 彦	信州大学学術研究院(工学系)教授	本部枠代議員候補者(改選数 4 名)		
4	羽 木 秀 樹	(株)ナカテック研究開発室執行役員・研究開発室室長	投票欄		投票は、左欄に○を付ける
5	渡 邊 千 尋	金沢大学大学院自然科学研究科教授	1	井頭 賢一郎	川崎重工業(株)本社技術開発本部部長(理事)
関西地区(改選数18名)			2	吉 永 直 樹	日本製鉄(株)技術開発本部フェロー
投票欄		投票は、左欄に○を付ける	3	後 藤 光 宏	住友電気工業(株)常務執行役員
1	浅 野 和 典	近畿大学理工学部教授	4	岡 崎 喜 臣	(株)神戸製鋼所技術開発本部所長
2	飴 山 恵	立命館大学理工学部教授	*表面は、北海道、東北、関東地区の投票用紙		
3	有 賀 康 博	(株)神戸製鋼所材料研究所室長			
4	川 崎 健 史	(株)島津製作所試験機ビジネスユニット長			
5	河 野 佳 織	日本製鉄(株)技術開発本部フェロー			
6	岸 田 恭 輔	京都大学大学院工学研究科准教授			
7	小泉 雄一郎	大阪大学大学院工学研究科教授			
8	佐 野 恭 司	福田金属箔粉工業(株)研究開発部副部長			
9	瀧 川 順 庸	大阪府立大学大学院工学研究科教授			
10	竹 中 俊 英	関西大学化学生命工学部教授			
11	鳥 塚 史 郎	兵庫県立大学大学院工学研究科教授			
12	中 野 貴 由	大阪大学大学院工学研究科教授			
13	平 藤 哲 司	京都大学大学院エネルギー科学研究科教授			
14	安 田 秀 幸	京都大学大学院工学研究科教授			
15	安 田 弘 行	大阪大学大学院工学研究科教授			
16	山 崎 強	日本製鉄(株)技術開発本部部長			
17	山 本 正 敏	山陽特殊製鋼(株)粉末事業部粉末事業部長			
18	山 本 隆 一	三菱重工業(株)総合研究所首席チーム統括			

キ
リ
ト
リ

日本金属学会誌掲載論文

Vol. 84, No. 12 (2020)

—論文—

金属粉末レーザ積層造形法で製造された Al-10%Si-0.35%Mg 合金における緻密化・組織形成の実験的評価と機械学習

柳瀬裕太 宮内 創 松本洋明 横田耕三

Cu-Zn 合金の転位強化因子に及ぼす結晶粒径の影響

中川康太朗 林 桃希 高野(佐藤)こずえ 松永裕隆
森 広行 北原 周 小貫祐介 鈴木 茂 佐藤成男

リチウムイオン2次電池におけるシリコン負極の充放電反応により生成する固体電解質界面膜の大気非暴露電子顕微鏡観察

島内 優 池本 祥 大森滋和 糸井貴臣

Mg-8%Al-1%Zn-1%Ca 合金中板材の機械的特性に及ぼす圧延温度および焼鈍温度の影響

斎藤尚文 鈴木一孝 福田裕太 伊藤友美 野田雅史
権田善夫 千野靖正

二相 α -Mg/C14-Mg₂Ca 合金におけるラメラ組織安定性

阿部俊太郎 大石航司 寺田芳弘

Al-Fe 合金における加工軟化現象の起源: θ -Al₁₃Fe₄ 相による不純物スカベンジング効果

原 聡宏 江草大佑 三原麻未 田中宏樹
大沼郁雄 阿部英司

Materials Transactions 掲載論文

Vol. 61, No. 12 (2020)

—Regular Article—

Microstructure of Materials

Color Metallography of Characteristic Microstructure in High-Speed Twin-Roll Cast Al-Mn-Si Alloy Strip Using Weck's Reagent

Thai Ha Nguyen,
Ram Song, Yohei Harada and Shinji Kumai

Dry Sliding Wear Behavior of 38CrNi3MoV Steel at Elevated Temperatures

Yong Lian, Wen Gao,
Chao Zhao, Minyu Ma, Jinfeng Huang and Jin Zhang

Texture Formation through Thermomechanical Treatment and Its Effect on Superelasticity in Mg-Sc Shape Memory Alloy

Keisuke Yamagishi,
Daisuke Ando, Yuji Sutou and Yukiko Ogawa

Mechanics of Materials

Estimation of Texture-Dependent Stress-Strain Curve and r -Value of Aluminum Alloy Sheet Using Deep Learning

Kohta Koenuma, Akinori Yamanaka,
Ikumu Watanabe and Toshihiko Kuwabara

Microstructural Characterization and Wear Behavior of Sintered Compacts Fabricated from Plasma-Nitrided Commercially Pure Titanium Powder

Shoichi Kikuchi, Shiori Suzuki and Hiroyuki Akebono

A Novel Joint of 18-8 Stainless Steel and Aluminum by Partial Welding Process to Ni-Plated Carbon Fiber Junction

Masataka Tomizawa, Michael C. Faudree,
Daisuke Kitahara, Sagiri Takase, Yoshihito Matsumura,
Itaru Jimbo, Michelle Salvia and Yoshitake Nishi

Effect of Baking on Hydrogen Embrittlement for High Strength Steel Treated with Various Zinc Based Electroplating from a Sulfate Bath

Makoto Hino, Shunsuke Mukai, Takehiro Shimada,
Koki Okada and Keitaro Horikawa

Effect of Bonding Temperature on Microstructure and Mechanical Properties of Zircaloy-4/Ti/Ag/304L Diffusion Bonded Joints

Yinglong Jiang, Yangyang Guo, Baoshuan Liu,
Houhong Pan, Yan Liu and Gaofeng Quan

Lap Joining of Titanium to Galvanized Steel by Cold Metal Transfer Technology

Jinghuan Chang, Yingjie Yan and Rui Cao

Dependences of Grain Size and Strain-Rate on Deformation Behavior of Commercial Purity Titanium Processed by Multi-Directional Forging

S. Yamamoto, Y. Miyajima, C. Watanabe, R. Monzen,
T. Tsuru and H. Miura

Materials Chemistry

Electrochemical Dy-Alloying Behaviors of Ni-Based Alloys in Molten LiF-CaF₂-DyF₃: Effects of Constituent Elements

Kouji Yasuda, Terumichi Enomoto, Yusaku Watanabe,
Tetsuo Oishi and Toshiyuki Nohira

Formation of a Diffusion Barrier Coating on Ni-Based Alloy and Thermal Cycle Oxidation Property

Shigeru Saito, Shigenari Hayashi, Takuro Narita,
Yasumichi Kato, Motohiro Ohtsuka, Mayumi Ara and
Toshio Narita

Corrosion Mechanism of Q235A under 3.5% NaCl Salt Spray

Jiantao Wang, Bochen Jiang and Jiangdong Cao

Atmospheric Corrosion Monitoring Sensor in Corrosion Rate Prediction of Carbon and Weathering Steels in Thailand

Wanida Pongsaksawad, Namurata S. Palsson,
Piya Khamsuk, Sikharin Sorachot, Amnuaysak Chianpairot,
Ekkarut Viyanit and Tadashi Shinohara

Determination of Gibbs Energies of Formation of Cr₃B₄, CrB₂, and CrB₄ by Electromotive Force Measurement Using Solid Electrolyte

Hiroaki Yamamoto, Yoshitaka Wada, Kazuto Nishiyama,
Yoshitsugu Taniguchi, Ai Nozaki and Masao Morishita

Materials Processing

Influence of Nb and V Addition on Abrasive and Impact Wear Properties of 16%Cr-3%Mo White Cast Iron
Ngo Huynh Kinh Luan, Koreaki Koizumi and Tetsuya Okuyama

Viscosity Properties Prediction of Semi-Solid Aluminum Alloys Using Finite Element Analysis Based on Quenched Solidified Structure, and Experimental Validation

Naofumi Takatori, Mami Amano, Ryousuke Miyachi, Yoshihiro Nagata, Muhammad Khairi Faiz and Makoto Yoshida

Simulation and Experimental Study on Temperature and Flow Field in Friction Stir Welding of TC4 Titanium Alloy Process

Yiming Qi, Junping Li, Yifu Shen and Wentao Hou

Floating Grain Characterization and Its Effects on Centerline Segregation of Direct-Chill Cast Al-Mg-Si Alloy Billets

Qipeng Dong, Xiaming Chen, Jun Xia, Xinzhong Li, Bo Zhang and Hiromi Nagaumi

Reduction of Blister Occurrence after Plating in Zinc Alloy Die Casting by Optimization of Gating System

Takuya Sakuragi, Daiki Fuwa, Ichiyou Nakayama and Takumi Nagamori

Engineering Materials and Their Applications

Development of High-Performance Solid-State Thermal Diodes Using Unusual Behavior of Thermal Conductivity Observed for Ag_2Ch ($\text{Ch} = \text{S}, \text{Se}, \text{Te}$)

Keisuke Hirata, Takuya Matsunaga, Singh Saurabh, Masaharu Matsunami and Tsunehiro Takeuchi

Chalcocite Single-Crystal CuSbS_2 as High-Performance Thermoelectric Material

Akira Nagaoka, Manato Takeuchi, Yusuke Shigeeda, Koki Kamimizutaru, Kenji Yoshino and Kensuke Nishioka

Novel Fatigue Crack Propagation Analysis of Solder Joint Using Singularity of Strain Energy Density in the Crack Tip Near Field

Yuta Nakajima, Yoshiharu Kariya and Keisuke Ono

Effect of Acetic Acid on Wear Properties of Ferrous and Titanium-Based Materials under Ethanol Lubrication

Yuko Hibi and Hiroki Mano

Environment

Analysis on the Utilization of Opinion of Bridge Inspection Results Using Topic Model for Maintenance and Management

Fukutsugu Ogawa and Yasuo Chikata

Current Trends in Research

Recent Progress in Nanostructured Functional Materials and Their Applications

Tomoyuki Yamamoto, Masato Yoshiya and Hoang Nam Nhat

Express Rapid Publication

Interconnection Mechanism of Ni-Reinforcement Particle Filled Solderable Polymer Composites with Low-Melting-Point Alloy Filler

Hee Jun Youn, Jeong Il Lee, Jong-Min Kim and Byung-Seung Yim
Announcement



—< オンラインジャーナルでご覧頂けます >—

- 日本金属学会誌 <https://www.jstage.go.jp/browse/jinstmet/-char/ja/> (毎月25日更新)
- Materials Transactions <https://www.jstage.go.jp/browse/matertrans/-char/ja/> (“ ”)

まてりあ 60巻1号 予告 ～新しい表紙に変わります！～

特集「ナノスケール動的挙動の理解に基づく力学特性発現機構の解明」

異種変形モードの核生成制御による高強度・高延性金属の実現

……………辻 伸泰 志澤一之 下川智嗣 村山光宏

ナノ～マクロを繋ぐトモグラフィ：界面の半自発的剥離

……………戸田裕之 山口正剛 都留智仁 清水一行 松田健二

セラミックスにおける強電界ナノダイナミクス

……………吉田英弘 増田紘士 森田孝治 山本剛久

原子シミュレーションに基づく力学特性評価と材料設計

……………都留智仁

無機半導体材料の力学特性に及ぼす光環境効果のマルチスケール

計測 ……………中村篤智 大島 優 松永克志

その場ならびに原子分解能透過型電子顕微鏡法による変形・破壊現象の解析

……………栃木栄太 苗 斌 近藤 隼 佐藤隆明 柴田直哉

〔一般記事〕

〔新技術・新製品〕

—他—

(編集の都合により変更になる場合がございます)

行事カレンダー

太字本会主催(ホームページ掲載)

開催日	名称・開催地・掲載号	主催	問合せ先	締切
2020年12月				
1～2	第30回 傾斜機能材料シンポジウム(徳島大)	傾斜機能材料研究会	http://www.fgms.net/	10.30
2～4	第61回高圧討論会(Web)	日本高圧力学会	TEL 070-5658-7626 tounkai61@highpressure.jp http://www.highpressure.jp/new/61forum/	講演 9.15
3～4	第53回安全工学研究発表会(Web)	安全工学会	TEL 03-6206-2840 jsse-2004@nifty.com https://www.jsse.or.jp/	
3～4	第58回高温強度シンポジウム(和歌山)	日本材料学会	TEL 075-761-5321 http://www.jsms.jp/	
5	第32回信頼性シンポジウム—安心・安全を支える信頼性工学の新展開—(Web)	日本材料学会	TEL 075-761-5321 RESYMPO2020@jsms.jp http://www.jsms.jp/index_4.html	
7～8	2020年度 JCOM 若手ウェビナー(Web)	日本材料学会	TEL 075-761-5321 JCOM2020wakate@jsms.jp http://compo.jsms.jp/	
7～11	Materials Research Meeting 2020 (MRM2020) (横浜)	日本 MRS	TEL 03-6264-9071 info_mrm2019@jmru.org https://mrm2020.jmru.org	
7～13	第11回社会人のための表面科学ベーシック講座(Web)	日本表面真空科学会	TEL 03-3812-0266 office@jvss.jp https://www.jvss.jp/	
8～10	第46回固体イオニクス討論会(Web)	固体イオニクス学会	TEL 045-924-5591 hirayama@echem.titech.ac.jp https://www.ssi-j.org/symp/ssij46/index.html	
8～11	COMPSAFE2020(第3回安心・安全・環境に関する計算理工学国際会議)(神戸)	COMPSAFE2020 実行委員会	secretary@compsafe2020.org http://www.compsafe2020.org	
9	第86回 塑性加工技術フォーラム「塑性加工技術者に伝えておきたい自動車の工学(Web)	日本塑性加工学会	http://www.jstp.or.jp	定員 80名
9～11	第47回炭素材料学会年会(Web)	炭素材料学会	TEL 03-5227-8632 tanso-desk@bunken.co.jp http://www.tanso.org/contents/event/conf2020/index.html	
10～11	走査型プローブ顕微鏡(34) & ICSM28(Web)	応用物理学会 薄膜・表面物理分科会	https://dora.bk.tsukuba.ac.jp/event/ICSM28/index	参加 11.15
11	第19回ナノテクノロジー総合シンポジウム(JAPAN NANO 2021)(東京 & Web 併用)	文科省ナノテクノロジープラットフォーム他	japannano@nims.go.jp TEL 029-859-2777 https://www.nanonet.go.jp/pages/japannano/2021/	
14	女子大学院生・ポスドクのための産総研所内紹介と在職女性研究者との懇談会(Web)	産業技術総合研究所イノベーション人材部	diversity-event-office-ml@aist.go.jp https://unit.aist.go.jp/innhr/diversity2020/ja/events/201215_event.html	
14～17	第1回地球環境のための炭素の究極利用技術に関するシンポジウム(奈良)	日本鉄鋼協会	TEL 075-223-2311 http://web.apollon.nta.co.jp/CUUTE-1/cuute-1@nta.co.jp	
14～20	第410回講習会「超精密加工/計測技術—光学部品の高精度要求に応える先端事例と最新動向」(Web)	精密工学会	TEL 03-5226-5191 https://www2.jspe.or.jp/	
17	第3回材料機能特性のアーキテクチャー研究会(Web)(11号638頁)	研究会 No. 81	hosoda.h.aa@m.titech.ac.jp	12.3
22	第339回塑性加工シンポジウム「超軽量構造への挑戦 ～眼鏡からロケットまで～」(Web)	日本塑性加工学会	http://www.jstp.or.jp	12.15
2021年1月				
8	第94回レアメタル研究会(東大生産技研)(Web)(本号695頁)	レアメタル研究会	TEL 03-5452-6314 tmiya@iis.u-tokyo.ac.jp https://www.okabe.iis.u-tokyo.ac.jp/japanese/index_j.html	
21	第84回技術セミナー リスクベースメンテナンス入門—RBM(早稲田大)	腐食防食学会	TEL 03-3815-1161 naito-113-0033@jcorr.or.jp https://www.jcorr.or.jp/	
22	関西支部第23回塑性加工基礎講座「プロセッシング計算力学分科会特別共催セミナー「入門結晶塑性シミュレーション」」(Web)	日本塑性加工学会 関西支部	TEL 090-9280-0383 kansosei@mail.doshisha.ac.jp	1.8
22～23	第26回電子デバイス界面テクノロジー研究会—材料・プロセス・デバイス特性の物理—(Web)	応用物理学会薄膜・表面物理分科会他	http://www.edit-ws.jp/	
23	第26回高専シンポジウム in Yonago(米子)	高専シンポジウム協議会	TEL 0859-24-5161 date@yonago.kosen-ac.jp https://kosen-sympo.org/	
25～26	第28回超音波による非破壊評価シンポジウム(Web)	日本非破壊検査協会	TEL 03-5609-4015 nakamura@jsndi.or.jp	
28	関西支部第33回技術研修会「伸線とねじ加工の先端技術動向と実例」(Web)	日本塑性加工学会 関西支部	TEL 090-9280-0383 kansosei@mail.doshisha.ac.jp	1.14
28～29	第42回安全工学セミナー「安全マネジメント講座」(Web)	安全工学会	TEL 03-6206-2848 jsse-2004@nifty.com http://www.jsse.or.jp/	

開催日	名称・開催地・掲載号	主催	問合せ先	締切
2021年 2 月				
2～3	Mate2021第27回『エレクトロニクスにおけるマイクロ接合・実装技術』シンポジウム(横浜)	スマートプロセス学会他	TEL 06-6878-5628 mate@sps-mste.jp http://sps-mste.jp/	
2～15	Mate2021 27th Symposium on "Microjoining and Assembly Technology in Electronics"(Web)	スマートプロセス学会他	TEL 06-6879-7568 mate@sps-mste.jp http://sps-mste.jp/mate2021/src/	
3	第341回塑性加工シンポジウム「製品の強度向上～素材と加工技術と製品～」(Web)	日本塑性加工学会	http://www.jstp.or.jp	1.25
2021年 3 月				
1～4	The 8th conference of Crystal Growth and Crystal Technology (CGCT8)第8回アジア結晶成長・結晶技術国際会議(Web)	アジア結晶成長および結晶技術学会他	a-yokotani@cgct-8.com https://www.cgct-8.com	
12	第95回レアメタル研究会(東大生産技研)(10号565頁)	レアメタル研究会	TEL 03-5452-6314 tmiya@iis.u-tokyo.ac.jp https://www.okabe.iis.u-tokyo.ac.jp/japanese/index_j.html	
16～19	日本金属学会春期講演大会(Web開催)	日本金属学会	TEL 022-223-3685 FAX 022-223-6312 annualm@jim.or.jp	講演 参加 1.7 2.26
27～31	The International Conference on Sintering 2022 (Sintering 2022国際会議)(岐阜)	Sintering 2022 国際会議組織委員会	https://www.sintering2022.org	
2021年 6 月				
3～5	2021年度塑性加工春季講演会(Web)	日本塑性加工学会	http://www.jstp.or.jp	
2021年 7 月				
5～8	The 7th International Conference on the Characterization and Control of Interfaces for High Quality Advanced Materials (ICCCI2022)(富士吉田)	粉体工学会	http://ceramics.ynu.ac.jp/iccci2022/index.html iccci2022@ynu.ac.jp	
2021年 9 月				
2～4	日本金属学会秋期講演大会(名城大学)	日本金属学会	TEL 022-223-3685 FAX 022-223-6312 annualm@jim.or.jp	
2021年11月				
28～12.2	The 9th International Symposium on Surface Science (ISSS-9)(高松)	日本表面真空学会	iss9@jvssjp https://www.jvss.jp/iss9/	

追 悼

本会元会長 本間基文先生を偲んで



本会元会長、名誉員、東北大学名誉教授本間基文先生は2020年10月4日にご逝去されました。享年84歳でした。会員の皆様にご報告申し上げますとともに、先生のご生前のご功績を偲び、謹んで哀悼の意を表します。

先生は、1936年長野県でお生まれになられ、1959年東北大学工学部金属工学科をご卒業、1964年同大学大学院工学研究科金属工学専攻博士課程を単位取得満期退学された後、同年に東北大学工学部助手、1968年同講師、1969年同助教授、1979年同金属材料工学科特殊金属学講座担当助教授を経て、1980年同教授に昇任され同講座を担当されました。その後、学科改組、大学院重点化を経て、1993年に新設された材料物性学専攻高機能材料学講座磁性材料学分野を担当され、2000年3月に定年によってご退職されました。この間、東北大学附属図書館工学分館長も併任し、管理・運営に尽くされるとともに、東北大学ご退職後の2000年より6年間は、東北職業能力開発大学校校長に就任して人材育成に貢献されました。

学会活動では、本会会長、副会長、理事、日本応用磁気学会評議員、日本材料学会評議員、などとして当該学会の発展に多大なる貢献をされる一方、公的活動でも文部省大学設置・学校法人審議会専門委員、全国大学材料関係教室協議会会長、公益財団法人電気磁気材料研究所理事などを務められ、材料科学の発展に寄与されました。

研究においては、Mn-Al 系合金、Pt-Co 系合金、Fe-Cr-Co 系合金、希土類-Fe 系化合物などに代表される永久磁石を中心とした研究に注力されました。特に、Fe-Cr-Co 系磁石においては、その発明者として歴史に名を刻み、その功績は世界から称賛されています。この他にも Fe-Mn 系合金に代表される半硬質磁性体、永久磁石を用いた GHz 帯対応電磁波吸収磁性体、動脈瘤処置のための磁気誘導子やクリップ、双極型電気焼灼子、膀胱・腎臓癌を対象とした網状マイクロカプセルなどの開発などで多大な功績を挙げられました。このような優れた業績により、本会より1979年功績賞、1995年増本量賞、日本鉄鋼協会より1979年西山記念賞、1992年三島賞、1970年の服部賞、1980年米国泌尿器学会より 1st Prize Exhibition Lab. Research, 1981年 C. E. ALKEN 財団よりアルケン賞など、数多くの賞を受賞されています。

教育では、常に学生の声に耳を傾け、一緒に寄り添って下さる先生として、多くの学生に慕われておりました。まさに学生を信じ、学生の優れた素質や個性を引き出す教育を実践されてきた方といえ、ご指導された若い研究者の実社会での活躍は先生の教育の賜物といえます。ここに、先生のご遺徳を偲び謹んでご冥福を心からお祈り申し上げます。



- 2021年春秋講演大会では、交流室をRemoというツールで設ける予定です。懇親会もオンライン(Remo利用)開催する予定です。是非この機会に、交流室やオンライン懇親会を通して交流の機会を復活させませんか。申込詳細は、本号会告をご覧ください。沢山のご参加をお待ちしております。
- 各種賞(2021年秋賞：名城大学にて授賞式)の募集を行います。皆様の積極的なご推薦をお待ちしております。(本号会告)
- 第2回日本金属学会フロンティア研究助成を募集します。
募集期間は、2021年2月1日(月)～3月31日(水)までとなります。
教育・研究機関での金属及びその関連材料分野の学術研究及び技術研究の発展や若手研究者の育成や奨励を主な目的として、金属及びその関連材料分野に関連する材料又はプロセスに関する研究に助成金を交付します。(詳細は10号会告に掲載)
- 会誌/欧文誌では、ただ今下記の特集企画を募集しております。皆様のご投稿をお待ちしております。

会誌	貴金属のリサイクル関連技術の最前線II(2021年2月1日(月)締切)
欧文誌	Structural Analysis and Measurements of Physical Properties on Advanced and Fundamental Materials (2021年9月1日(水)締切)
- まてりあの来年1号からの新表紙デザインが決定いたしました。20年振りの変更となります。この表紙デザインで発行する『まてりあ』は、本号が最後となります。長年このデザインに慣れ親しんで頂きまして、大変ありがとうございました。日本金属学会会報『まてりあ』はおかげさまで、来年創刊60巻となります。来年からの表紙のデザインは、趣がかなり変わりますが(会告701頁をご覧ください)、内容はこれまで同様、それ以上に会員に愛される会報誌を目指して発行して参ります。今後とも、ご愛読を宜しくお願いいたします。
- まてりあ59巻(2020)の総目次はホームページに掲載となります。

◇ 事務局年末年始休業のお知らせ ◇

2020年12月29日(火)～2021年1月5日(火)

◇事務局より◇

～ 本年は大変お世話になりました。来年もどうぞ宜しくお願い致します。～

2019, 2020年度会報編集委員会 (五十音順, 敬称略)

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

まてりあ 第59巻 第12号 (2020) 発行日 2020年12月1日 定価(本体1,700円+税)送料120円

発行所 公益社団法人日本金属学会

〒980-8544 仙台市青葉区一番町一丁目14-32

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

発行人 山村英明

印刷所 小宮山印刷工業株式会社

発売所 丸善雄松堂株式会社

〒160-0002 東京都新宿区四谷坂町 10-10

ALLOYS & METALS

品名	純度	形状	品名	純度	形状	品名	純度	形状
純 金 属			高 純 度 金 属			中 間 合 金		
高純度アルミニウム	99.99%	約1kgインゴット	アルミニウム	99.999%	粒状100g入	銅	P>14.5%	粒 状
アルミニウム	>99.7%	〃	アルミニウム	〃	約100g塊	シリコン銅	Si 15%	約1kgインゴット
アルミニウム粒	99.99%	粒状1kg入	銀	99.999%	粒 状	マンガン銅	Mn 25%	〃
アルミニウム粉	99.7%	粉末	ビスマス	99.9999%	粒状100g入	マグネシウム銅	Mg 50%	約800gインゴット
銀	99.99%	粒 状	ビスマス	〃	約100g塊	クロム銅	Cr 10%	約1kgインゴット
ボロンクリスタル	99.4%	3~8mm小塊	高純度クロム(4N5)	99.995%	薄 片 状	テルル銅	Te 50%	〃
ボロンアモルファス	95~97%	粉末	無 酸 素 銅	99.99%	10X10X1mm	コバルト銅	Co 10%	〃
ビスマス	99.99%	針 状	鉄(マイロンSHP)	99.99%	25X25X2mm	ニッケル銅	Ni 30%	〃
コバルト粒(ロシア産)	99.3%	粒 状	ガリウム	99.9999%	粒状25g入	鉄	Fe 10%	〃
電解コバルト(従来品)	99.9%	フレーク状	ゲルマニウム	99.999%	約50g塊	チタン銅	Ti 50%	〃
電解コバルト(FB)	99.9%	約25X25X10mm	インジウム	99.999%	粒状100g入	ジルコニウム銅	Zr 50%	〃
金属クロム	99%	塊 状	インジウム	〃	約100g塊	ボロン銅	B 2%	粒 状
電解クロム	99%	薄 片 状	マンガン	99.999%	薄 片 状	アルミ銅	Cu 40%	約5~7kgインゴット
クロム粉	99%	粉末500g入	錫	99.999%	粒状100g入			
電気銅	99.99%	約25X50X10mm	錫	〃	約100g塊	アルミマグネシウム	Mg 20%	約2kgインゴット
電解鉄(アトミロンMP)	99.9%	小片状	アンチモン	99.9999%	粒状100g入	アルミマンガン	Mn 10%	約5kgインゴット
電解鉄(アトミロンYL)	〃	〃	アンチモン	〃	約100g塊	アルミニウム	Ni 20%	〃
電解鉄(アトミロンFP)	〃	〃	テルル	99.9999%	粒状100g入	アルミクロム	Cr 5%	〃
電解鉄(アトミロンXL)	〃	〃	ル	〃	約100g塊	アルミチタン	Ti 5%	約4~5kgインゴット
電 解 鉄 粉	99%	粉末1kg入	亜鉛	99.999%	約100g塊			
ハフニウム	99.6%	スポンジ小塊	亜鉛	〃	約100g塊	アルミシリコン	Si 25%	〃
インジウム	99.99%	塊 状	亜鉛	99.9999%	粒状100g入	アルミコバルト	Co 5%	〃
マグネシウム200	99.9%	約200g塊	亜鉛	〃	約100g塊	アルミモリブデン	Mo 5%	〃
マグネシウム100	99.9%	約100g塊	亜鉛	99.9%	約100g塊	アルミタングステン	W 2.5%	〃
電 解 マ ン ガ ン	99.9%	薄 片 状	チタン	99.999%	塊 状	アルミベリリウム	Be 2.5%	約50gインゴット
モリブデン粉	99.9%	粉末	高純度シリコンスクラップ	99.999%	塊 状	アルミ鉄	Fe 50%	塊 状
ニオブグラニュー	99.9%	3~10mm小塊	レアアースメタル			アルミジルコニウム	Zr 5%	約5kgインゴット
ニオブ粉	〃	粉末	イットリウム	99.9%	塊状、削状、粉状	アルミボロン	B 4%	約200gインゴット
電気ニッケル	99.99%	25X25X10mm	ランタン	〃	〃	アルミバナジウム	V 50%	3~10mm小塊状
ニッケルベレット	99.97%	6~12mm球状	プラセオジウム	〃	〃	アルミストロンチウム	Sr 10%	約100gインゴット
レニウム粉	99.99%	粉末	ネオジウム	〃	〃	アルミカルシウム	Ca 10%	約2.5kgインゴット
ルテニウム粉	99.9%	〃	サマリウム	〃	〃	ニッケルボロン	B 15%	1~30mm小塊状
アンチモン	99.9%	塊 状	イッテルビウム	〃	〃	ニッケルニオブ	Nb 60%	塊 状
金属シリコン(中国産)	99%	〃	テルビウム	〃	〃	ニッケルマグネシウム	Mg 50%	約1.5kgインゴット
金属シリコン(ブラジル産)	〃	〃	ジスプロシウム	〃	〃	コバルトボロン	B 15%	1~30mm小塊状
錫インゴット	99.99%	約1kgインゴット	ホルミウム	〃	〃	燐	P 5%	インゴット
錫粒	〃	粒 状	エルビウム	〃	〃			
タンタル塊	99.9%	3~10mm小塊	ガドリニウム	〃	〃			
タンタル粉	〃	粉末	ツリウム	〃	〃			
テルル	99.99%	小 球 状	ルテチウム	〃	〃			
スポンジチタン	99.7%	スポンジ塊	セリウム	〃	塊 状 の み			
チタン板	JIS 1種	250X250X1mm	ユーロビウム	〃	〃			
バナジウム	99.7%	3~10mm小塊	ミッシュメタル	TRE>97%	5.4φ×6mm 200g入			
バナジウム粉	〃	粉末						
タングステン	99.9%	〃						
タングステンスクラップ	99.9%	板 状						
亜鉛インゴット	99.99%	約2kgインゴット						
亜鉛粒	〃	粒 状						
ジルコニウム	>99.5%	スポンジ塊						

お問い合わせは、必ず下記事項をご記入の上、FAXしてください。

「社名」または「大学名」、および「所属と名前」、個人の方は「名前」
「郵便番号・住所・電話・FAX」・「商品名・純度・形状・希望数量」
見積・注文でお急ぎの場合は「至急」と明記して下さい。

FAX (03)
3294-9336

株式会社 **平野清左衛門商店**
〒101-0047 東京都千代田区内神田1丁目5番2号 TEL(03)3292-0811

商品の詳細はホームページでご覧になれます。
<http://1921seizaemon.jp/>

●土曜・日曜・祭日休業 ●手形取引はいたしません
●輸出はせず国内取引のみ

高温真空 3000℃への挑戦

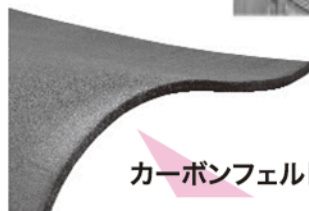
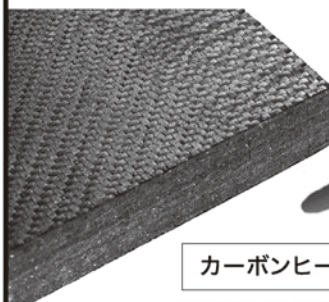
URL: <http://www.mechanical-carbon.co.jp/>

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



炉の改修

ハイブリット成形断熱材



カーボンフェルト

高断熱+省エネ

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

6面シート
貼り



メカニカルカーボン工業株式会社

本社: 247-0061 神奈川県鎌倉市台5-3-25 TEL.0467-45-0101 FAX.0467-43-1680

工場: 新潟工場・本社工場・野村工場(愛媛)・広見工場(愛媛) 事業所: 郡山・東京・大阪・松山・周南・福岡

お問い合わせEメール mck@mechanical-carbon.co.jp

公益社団法人 日本金属学会

The Japan Institute of Metals and Materials

2021年
春期

第168回講演大会

会期: 2021年3月16日(火)~19(金)

開催方法: オンライン開催

付設展示会(オンライン版)、技術セミナー 開催予定。
大会プログラム広告等も募集予定。

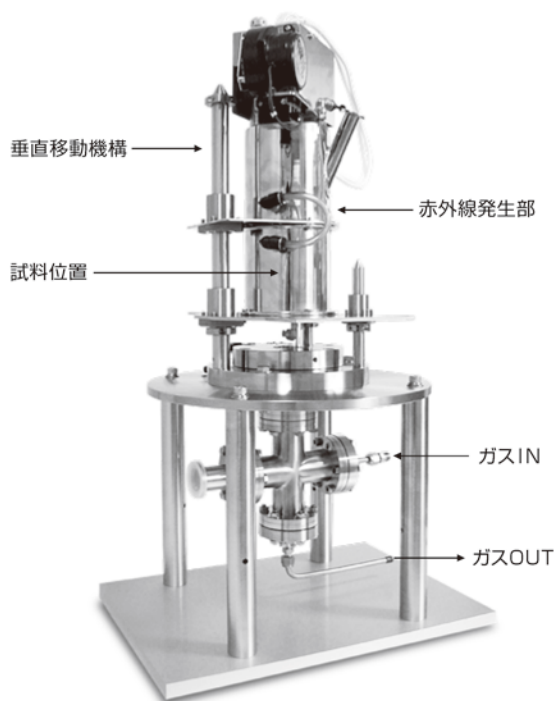
詳細は、下記までお問合せ下さい。

株式会社 明報社 TEL: 03-3546-1337

www.meihosha.co.jp

超高温・高速昇温・超高温複合材料・耐熱合金等の熱処理！

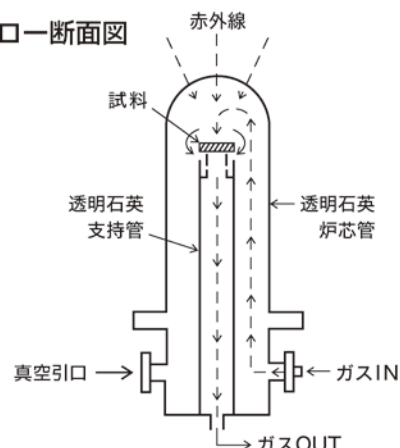
超高温スーパーRTA装置 SR1800G



特長

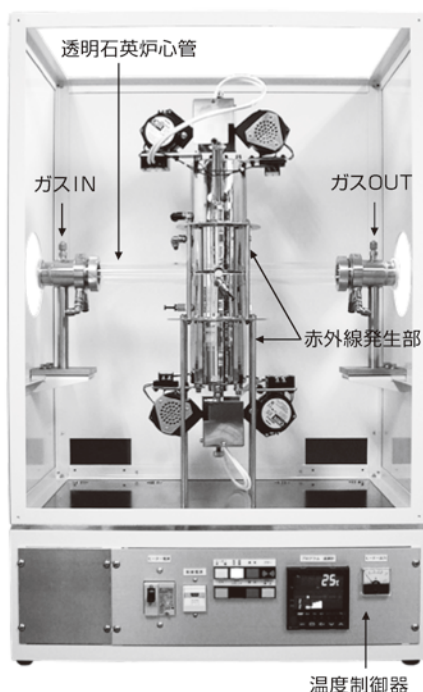
- ◆超高速昇温 1800℃まで1分以内
- ◆真空、ガスパージ、ガスフロー中熱処理
- ◆赤外線ランプ電力わずか2kWの省エネです

ガスフロー断面図



雰囲気ガスの流れは試料表面に放射します。試料は上方から赤外線の集光放射を受け、短時間で超高温度に到達します。

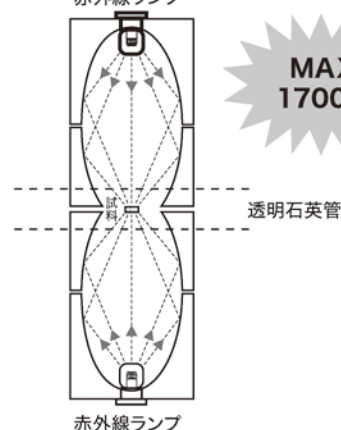
対面照射式 赤外線真空炉 IVF298CV



特長

- ◆超高温・超高速熱処理 1700℃
- ◆立体状試料も均一加熱
- ◆連続昇降温制御可能

赤外線ランプ



透明石英管内試料に上下両面から赤外線を照射・昇温。クリーン加熱ができます。真空・ガス中の昇温もできます。

★昇温試験も受け付けております。詳細はホームページをご覧ください。

サーモ理工

 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
<https://www.thermo-r.co.jp/>
E-mail: sekigai@thermo-r.co.jp

