日本金属学会会報　2020年11月1日発行（毎月1回1日発行）　Vol.59 No.11 ISSN 1340-2625

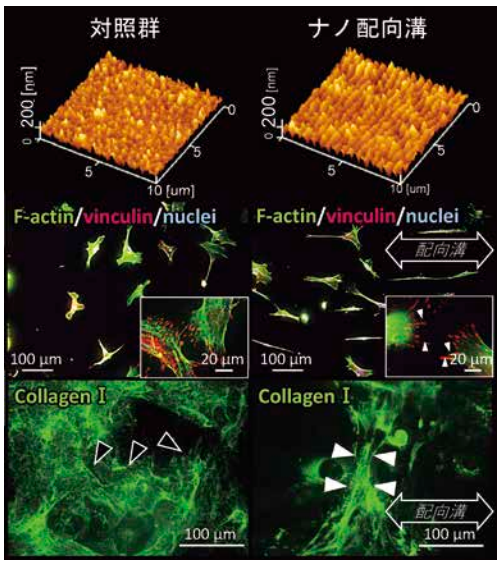
Materia Japan

- 表彰 受賞者紹介（秋）
- 微細切削加工で挑んだ 0.3 mm 角のサイコロ
- 金属素描　～アルミニウム～
- 特集「バイオアダプティブマテリアル
  ～生体の仕組みに根差した金属系生体材料の設計～」
- 入門講座 微小領域における金属材料の材料力学
  ～Ⅲ.微小金属材料の機械的特性への
  集合組織・合金化・双晶および不純物の効果～

まてりあ

Vol.59 MTERE2 59 (11) 571～646 (2020)

2020 11



https://jim.or.jp/
https://www.jim.or.jp/journal/m/（←まてりあ記事オンライン）

FUJIFILM
Value from Innovation

Wako

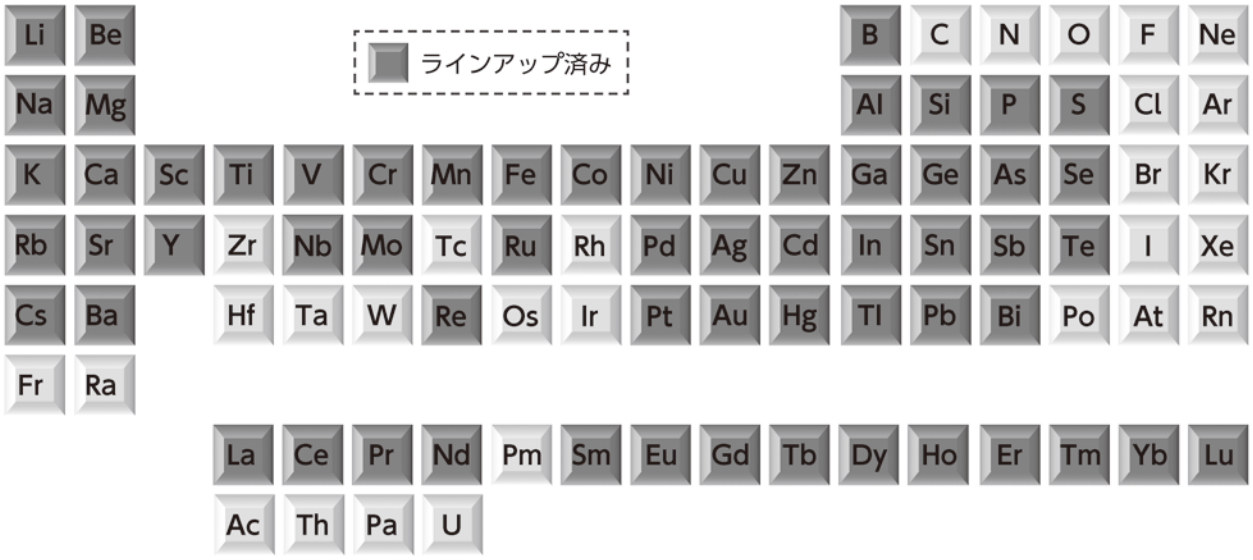
ICP分析用 元素標準液

高純度な標準液で元素分析をサポート

- JCSS 実用標準液または NIST SRM にトレーサブル
- 現品説明書に不純物元素情報をロット毎に記載
- 不純物元素の測定を ICP-MS で実施、目標値はすべて 0.05mg/L 以下

カタログダウンロードは
こちら☞
元素標準液　カタログ　検索

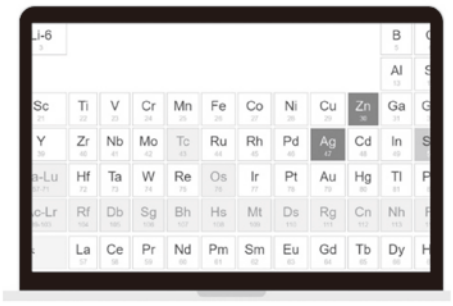
61 元素ラインアップ！今後も順次追加予定です。



ポチっと簡単！
多元素(金属)混合標準液検索システム

当社の多元素混合標準液を Web 上で簡単に検索できます。
測定したい元素(金属)を周期表から選び、検索すると、カタログラインアップのある混合標準液を瞬時に見つけることができます。
また、希望される混合標準液の取り扱いがない場合でも特注調液の見積りが可能です。

詳細はこちら☞
多元素　検索システム　検索



富士フイルム和光純薬株式会社

本　　社　〒540-8605 大阪市中央区道修町三丁目１番２号　TEL：06-6203-3741（代表）
東京本店　〒103-0023 東京都中央区日本橋本町二丁目４番１号　TEL：03-3270-8571（代表）

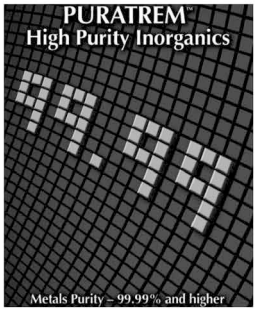
フリーダイヤル　0120-052-099
試薬 URL：https://labchem-wako.fujifilm.com
E-mail：ffwk-labchem-tec@fujifilm.com
営業所：九州・中国・東海・横浜・筑波・東北・北海道

Strem Chemicals社　高純度金属化合物

PURATREM™ シリーズ

STREM CHEMICALS, INC.

米国所在の高純度金属に特化した試薬メーカーです。



金属純度99.99%以上

(Trace metal basis)

500品目以上の豊富なラインアップ！

アルカリ金属／土類金属・遷移金属・卑金属・
ランタノイドなど豊富に取り揃えています。

詳細は弊社ホームページをご覧ください。

合成・材料 ＞ 無機材料 ＞ 高純度無機化合物 PURATREM™シリーズ

富士フイルム 和光純薬株式会社

本　　社　〒540-8605 大阪市中央区道修町三丁目１番２号　TEL：06-6203-3741（代表）
東京本店　〒103-0023 東京都中央区日本橋本町二丁目４番１号　TEL：03-3270-8571（代表）

フリーダイヤル　0120-052-099
試薬 URL：https://labchem-wako.fujifilm.com
E-mail：ffwk-labchem-tec@fujifilm.com
営業所：九州・中国・東海・横浜・筑波・東北・北海道

株式会社豊島製作所

TOSHIMA

全固体リチウム電池材料

要望に応じた形状で提供可能

粉末・薄膜用ターゲット材・シート状への加工が可能。

掲載製品以外も可能

金属加工も得意としています。
特注対応についてはご相談ください。

製品例

■ **正極材料**
$LiCoO_2$、$LiNiO_2$、$LiCo_{1/3}Ni_{1/3}Mn_{1/3}O_2$

■ **固体電解質**
$Li_7La_3Zr_2O_{12}$、$Li_{0.33}La_{0.55}TiO_3$

■ **負極材料**
$Li_4Ti_5O_{12}$、Nb_2O_5

詳細は弊社ホームページをご覧ください。

合成・材料 ＞ 電池 ＞ リチウムイオン二次電池 ＞ 豊島製作所　電極材料・電解質

富士フイルム 和光純薬株式会社

本　　社　〒540-8605 大阪市中央区道修町三丁目１番２号　TEL：06-6203-3741（代表）
東京本店　〒103-0023 東京都中央区日本橋本町二丁目４番１号　TEL：03-3270-8571（代表）

フリーダイヤル　0120-052-099
試薬 URL：https://labchem-wako.fujifilm.com
E-mail：ffwk-labchem-tec@fujifilm.com
営業所：九州・中国・東海・横浜・筑波・東北・北海道

微細切削加工で挑んだ 0.3mm角のサイコロ

肉眼では確認することのできない0.3 mm角の驚異！
サイコロの右に映っているのはスケールの目盛部分.

2004年9月, 立方体の1辺が0.3 mmという世界最小（当時）の
真鍮製サイコロが日本で製作された.
それまで誰もなし得なかった精密微細加工技術はどのようにして生まれたのか.
企画・開発に携わった人間は何を考え, いかにしてそこに辿り着いたのか.
「MC造形システム」というオンリーワンの技術力を武器に
ものづくりの新領域を開拓し続ける姿を追った.

世界初の製品を産み出した オンリーワンの技術力

ものづくりに革命を起こす MC造形システムの開発

肉眼では容易に確認することのできない0.3 mm角のサイコロの製造を手掛けたのは，埼玉県入間市に本社・工場を置き，自動車，航空宇宙，医療機器などの分野を得意とする精密部品メーカー，株式会社入曽精密である．

同社は1995年から1997年にかけて，3D CAD/CAMソフトで製作した大容量の加工データを，マシニングセンター機（MC機，多種類の加工を連続して行うことができる数値制御工作機械）に接続したデータサーバにネットワーク経由で伝送し，それまで不可能とされていた複雑形状の金属部品を高精度かつ安定的に作り出す製造システムを独自に開発した．データサーバに付与されたIPアドレスを活用することで，ワークステーション，データサーバ，MC機が同一ネットワーク上でシームレスに接続することができ，MC機で削り出されるワークの形状自在性と加工時間の短縮化と，MC機が作り出すワークの飛躍的な高付加価値化を実現した．

サブミリ（1 mm以下）の切削加工にも革新をもたらすこのシステムを，同社の斎藤清和代表取締役社長は「MC造形システム（ミニマムグリッドコントロール・マニュファクチュアリング：MGCM）」と名付けた．

MC造形システムは，微細で精緻な切削加工の際に生じる工作機械と切削工具とワークの位置合わせ誤差や切削による歪みや振動など，様々な外乱要因を適切に管理して，その影響を極小化し，また，1台のコンピュータに複数台のMC機を接続して同時加工を可能にした．1996年当時，IPアドレスを使用してMC機とコンピュータをネットワーク接続するシステムは画期的であり，その独自性や先端性，効率の良さ，地域や地球環境との調和などが認められ，2005年度「日経ものづくり大賞」を受賞した．

MC機による独自の精密切削技術で世界最高峰の製品を次々と生み出している（株）入曽精密の工場．

MC機による 微細加工の限界に挑戦

MC造形システムは，MC機による加工の限界に挑戦したいという斎藤社長の想いから実現したものであり，0.3 mm角のサイコロ（図1）は，複雑形状の微小な加工物の精度に誤差を生じさせることなく管理できるこのMC造形システムによって生まれた．

サイコロをモデルに選んだのは，以前に12 mm角のサイコロを3D切削加工で製作した実績があったからだ．また，サイコロでは6面体の各面には規則を持った形状加工があり，例えば2と3の賽の目の向きは決まっている．しかも天地の目の数の和が7になならなければならないなど，細かな条件をクリアする必要があり，これがチャレンジ精神に火を付けた．さらに，サイコロには歴史があり，世界中の人に知られているツールだったことも選択理由の一つであった．材料には，アルミニウムよりも硬く熱膨張率が低い真鍮が用いられた．

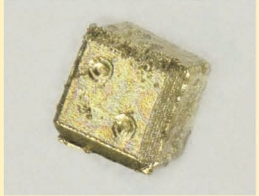
最小の切削工具で狙う 最小のサイズ

製造工程の構築に際し，MC造形システムで加工可能な最小の部品を作ろうということは決まっていたが，サイズの決定は切削に使用する機械の性能や工具を選定することから始まった．

工作機械には，同社が保有するMC機の中から，1 μm単位の最小移動量を持ち，かつ高精度位置決め機能を装備している機種を選定した．切削工具（刃物）には，非売品の刃径φ0.06 mmボールエンドミル（BE）を使用した（図2）．

当時市販されていた最小サイズのBEはφ0.1 mmR0.05（刃径0.1 mm，曲率0.05を意味する）だったが，工具メーカーに問い合わせたところ，φ0.06 mmR0.03のBEを作

0.3 mm角のサイコロ作製に係るデータ(図1)



- 材質＝C3604（快削黄銅）
- 一辺の長さ＝0.300 ± 0.002 mm
- 2〜6の賽の目の一個の大きさ＝φ0.05 mm
- 重さ＝0.00016 g（埼玉県産業技術総合センターで計測）
- 角の面取り形状（C面12カ所）＝C0.008（元の辺を各0.008 mm切削）
- 使用工作機械＝NVD4000DCG（森精機）
- 使用工具＝BE φ0.06 mmR0.03（日進工具）

ボールエンドミルの例 （写真は刃径φ0.05 mmのもの）(図2)

回転させながら先端部分で材料の表面を切削する工具．実際の加工は髪の毛の細さほどの刃径φ0.06 mmが使用された．

斎藤清和社長（左）と加工に携わった野口和俊さん（右）．

12 mm角と0.3 mm角の各サイコロ作製時の切削条件の違い(表1)

サイズ	12 mm	0.3 mm
BE直径	φ2.5 mm	φ0.06 mm
対比	1	1/40
パスピッチ	0.12 mm	0.003 mm
切削深さ	0.2 mm	0.005 mm

製できることが判明した．このことから，以前の12 mm角サイコロに使用したBEサイズと最小径BEサイズとの比（40分の1）が決まり，0.3 mm角というプロダクトデザインにおけるサイズが決定した．またサイコロの一面を削るパスの往復回数を最初から100 回と決めていたのでパスピッチが0.003 mm，賽の目の彫りの深さは12 mm角のサイコロとの比によって0.005 mmに決定した（表1）．パスピッチが0.003 mmというのは，0.3 mm幅の表面や賽の目の中に100本のツールマーク（切削痕）が形成されていることを意味している．このツールマークが乱れなく整然と形成されていることこそが，MC機の精度の高さと加工条件の設定が適切であったことを実証している．

なお，サイコロの表面だけでなく，賽の目や角の面取りの切削加工においても刃径φ0.06 mmのBEを用いた．

0.3 mm角のサイコロ製作において鍵となった独自設計の治具

0.3 mm角のサイコロは，次のような製造工程によって生まれた．

まず，MC機に設置する細長い四角柱を作り，その先端を細く削り出して0.3 mm角のサイコロの5面（賽の目2〜6）を作る．その後，5面の部分を切り落とし，切り口を上にして2つの部品がぴったり合わさる治具に挟み，賽の目の1の面を切削する．

工作機械，切削工具，製造工程，治具の段取りといった，0.3 mm角のサイコロを作るためのレシピは，斎藤社長によってわずか3週間で完成した．しかも，そのレシピを基に実際の加工に携わったのは，入社2年余りの若手技術者だった．斎藤社長があえてベテラン職人に任せなかったのは，MC造形システムを使えば世界の常識を破る微細加工を誰もができることを実証したかったためである．

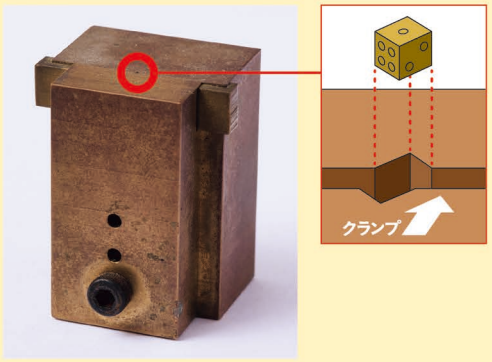
「社長からレシピを渡され，刃物も治具も用意されたものの，いきなり0.3 mm角のサイコロを作れと言われた時はさすがに戸惑った．途中で，これは厳しいなと思ったこともあったが，治具を社長の指示通りに変えたことが成功への鍵となった．不可能だと思っていたことが可能になり，やればできるという自信につながった」．技術者の野口和俊さんが16年前を振り返ると，斎藤社長はそれを「意識革命だ」と続けた．

最終工程の面を切削する際の治具は当初，四角い溝にサイコロを入れるものだったが，これではサイコロが微妙に動いてしまうため，寸法の誤差が生じた．そのため，サイコロの隣り合う2辺をV字で両側から押さえる特殊治具を製作したところ，ガタつきを解消することができた（図3）．また，サイコロを掴む最適なクランプ力や締め付けるねじの位置も，12 mm角のサイコロの場合に対して40分の1になるように工夫した．それでも0.3 mm角という大きさは肉眼での確認が困難であるため取り扱いに時間がかかり，1個を加工するのに15時間を要した．

斎藤社長は，出来上がったサイコロを走査型電子顕微鏡（SEM）で確認してもらうために埼玉県産業技術総合センターに持参した．すると，SEMによって映し出された画像が精密工学を専門とする東京大学の元教授であった樋口敏郎氏に送られた．そこで初めて「あなたは世界中の大学の研究所ができないことを実現した」と，この0.3 mm角のサイコロが切削加工物としては世界最小の作品であることを告げられたという．また，サイコロの表面にφ0.06 mmのBEによるスピンドル（回転軸）の痕跡が観察されたことから，このサイコロが成型加工されたもので

0.3 mm角のサイコロの切削加工に実際に用いられた治具(図3)

赤枠内にサイコロが挟み込まれている．
寸法：横幅25 mm×厚さ25 mm×高さ35 mm



不可能が可能になるという「意識革命」

スケールの目盛と0.3 mm角のサイコロの大きさの比較．吹けば飛んでしまうような0.3 mm角のサイコロを撮影した際には，思わず息が止まる．

はなく，MC機によって切削加工によって作られたことが証明された．

精密切削のレベルをどこまでも上げ続けて

その後も，（株）入曽精密は切削工作機器や3DおよびIT技術を駆使して，自社の強みである超微細切削技術の可能性を飛躍的に広げている．

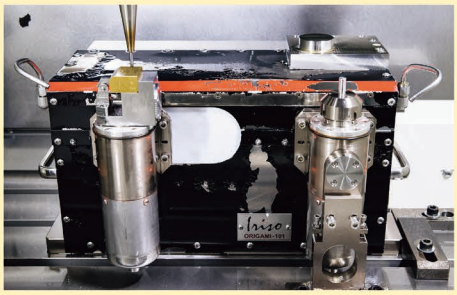
2017年には，MC機の主軸に装置し，ワークを取り付けた状態で様々な角度から観察できるWiFi接続ワイヤレスデジタル顕微鏡セット「AMATERASU」を開発した（特許取得）．これを用いて，世界最小の0.1 mm角のサイコロを誕生させた．また2018年には，両手首型の持ち替え機能によって加工プロセス内での繰り返し精度（ばらつき）を最小化し，高精度小物部品の全方位切削加工を自動化する「ORIGAMI」の製造販売も開始している（図4）．

斎藤社長は，「技術の天井の高さが決められていたのでは技術者が腕を振るおうとする気持ちがなくなり，結局は価格競争になってしまう」と言い，常に世界最高峰の精密切削技術を追求し続けている．その挑戦は留まることを知らない．

（取材協力：株式会社入曽精密）

全方位切削加工の位置決めプロセスを自動化した「ORIGAMI」(図4)

左右2箇所に手首型の加工ユニットを持ち、第1ユニットでの加工終了後，第2ユニットに自動的に製品を持ち替えて加工を行い，最終的に6面加工を実現する．



INTERVIEW

ものづくりの面白さを伝えたい

斎藤 清和 さん
株式会社入曽精密
代表取締役社長

MC造形システムを確立したことで，他では難しい加工でも，製作できるようになった．0.3 mm角のサイコロはそれを実証するためのものであり，始めから世界初や世界一を目指したわけではない．これは私たちが開発したシステムではあるが，他の工場でも導入できるようになってほしいと思う．産業界全体が活性化しなければ，そこで生計を立てている我々も将来の展望を描くことができなくなってしまうからだ．

ものづくりで重要な概念に“グリッド（格子）”があり，そこには必ず空間がある．空間を塗りつぶしてしまったらグリッドではなくなる．その空間の部分を“妙”といい，妙の世界のものづくりをしているのが日本人ではないだろうか．ヨーロッパではグリッドで物を考えるが，私は妙の部分とグリッドの両方を知っていることが大切だと思っている．格子の交点を数値にして物を作るだけでなく，それをさらに良くするために，点と点の間の空白の部分に想いを入れる．その想いは，数値では判断できない職人の感性である．今後はMC造形システムが世界のスタンダードになり，妙の部分で差別化をするのが当たり前になるようにしたい．さらに，妙の部分で，格子が新しい知見を実現することが，MGCMの目的であり進化につながる．

最大の目標は，若い人たちにものづくりは面白いと思ってもらうことだ．私は「情熱は飛び火する」という言葉が好きである．自分一人では何もできないが，飛び火して賛同者が現れれば，若い人たちにものづくりの楽しさや可能性をもっと理解してもらえると思う．我々が先輩から受け継いだものを若い人たちの目や耳といった五感に響く形で見せていくことが，これからの自分に与えられた使命だと思っている．

より良い正確さは、より良いデーターを意味します

Park NX10は最高レベルの正確さと再現性を実現し、最高のナノ分解能をもたらします。
世界で唯一の"**真のノンコンタクトモード™**"を採用することで、サンプルを非破壊で観察し、
かつ、探針の寿命を飛躍的に伸ばすことが可能となりました。
また、**フレクチャー式で分離型のXY/Zスキャナ**により、湾曲無く、フラットに観察できます。

より良い正確さは、より良い生産性を意味します

サンプルのセットからイメージング、計測および解析までを、Park NX10は簡単なステップで実行できます。
ユーザーフレンドリーなインターフェースと解析ソフトウェア、初心者でも失敗のないレーザーアライメントと
チップ交換が迅速な結果を得ることにつながり、生産性の向上に寄与します。

より良い正確さは、より良い研究を意味します

かつてない操作性と正確な結果がもたらす新しい知見は、革新的な研究を加速させます。
Park NX10は基礎研究から製品の不良解析まで、幅広い用途で貢献できるシステムです。

パーク・システムズ・ジャパン株式会社

〒101-0054 東京都千代田区神田錦町一丁目17番地1
TEL: 03-3219-1001 **FAX:** 03-3219-1002 **E-MAIL:** psj@parksystems.co.jp

Park SYSTEMS
parksystems.co.jp

Materia Japan

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

11

2020
Vol.59
No.11

まてりあ

巻頭企画

微細切削加工で挑んだ 0.3 mm 角のサイコロ……571

金属素描

No. 12　アルミニウム（Aluminum）　平木岳人 ……575

表彰

第43回技術開発賞受賞者……576
第30回奨励賞受賞者……578
第10回まてりあ賞受賞者……579
第17回村上記念賞受賞者……580
第17回村上奨励賞受賞者……580
第68回論文賞受賞者……581
第33回若手講演論文賞受賞者……583
第35回優秀ポスター賞受賞者……584
第４回高校・高専学生ポスター賞受賞者……586

特集「バイオアダプティブマテリアル ～生体の仕組みに根差した金属系生体材料の設計～」

企画にあたって
上田恭介　石本卓也　堤　祐介　池尾直子　趙　研　山中謙太　小幡亜希子　野山義裕……587

β 型 Ti–Nb 基合金の低ヤング率化の要因と医療応用研究の現状
仲井正昭　新家光雄……588

細胞および骨基質の配向化機序に基づく骨機能化誘導　松垣あいら　中野貴由 ……594

材料―組織間の相互作用の理解に基づく生体吸収性金属材料の生体内分解特性評価　山本玲子 ……600

骨芽細胞の活性化機序に基づく金属イオン徐放足場材の創製
小幡亜希子　春日敏宏……606

光触媒活性による細菌の不活化機序の理解に基づくチタン系生体材料の抗菌機能化：酸化チタンコーティングの可視光応答化　上田恭介　上田隆統志　成島尚之 ……612

入門講座

微小領域における金属材料の材料力学
―Ⅲ．微小金属材料の機械的特性への集合組織・合金化・双晶および不純物の効果―
曽根正人……618
微小金属材料における様々な結晶組織，合金化さらに不純物がどのように材料の機械的特性に影響を与えるかについて実験結果に基づいて議論解説．

思い出の教科書，この一冊！

“若い技術者のための機械・金属材料”　田中秀明 ……624

本会記事

会告……625
2021年春期講演大会募集……626
掲示板……638
2020年秋期講演大会記録……640
訂正……641
会誌・欧文誌11号目次……642
次号予告……643
新入会員……644
行事カレンダー……645

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　チタン合金表面へのナノ配向溝導入（上段；SPM 像）による骨芽細胞（中段）および骨基質（下段）の配向化誘導．
（松垣あいら　中野貴由　著　596頁　図３より改変）

表紙デザイン：北野　玲

複写をご希望の方へ　本会は，本誌掲載著作物の複写に関する権利を一般社団法人学術著作権協会に委託しております．本誌に掲載された著作物の複写をご希望の方は，（一社）学術著作権協会より許諾を受けて下さい．但し，企業等法人による社内利用目的の複写については，当該企業等法人が社団法人日本複写権センター（（一社）学術著作権協会が社内利用目的複写に関する権利を再委託している団体）と包括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．

2020年秋期講演大会

付設展示会(オンライン版) レポート

日本金属学会2020年秋期講演大会は、新型コロナウィルス感染症の影響を踏まえ、初のオンライン開催となった。開催期間は、従来の大会より1日増え9月15日から18日の4日間であった。大会参加数は1,300名を上回り、これまでの現地開催と同等に盛会となった。大会のオンライン開催に伴い、付設展示会を大会ホームページ上にてオンライン版として開催し、10社の出展（掲載）があった。
続いて、出展内容を紹介する。

・㈱池上精機
精密試料の自動仕上げ専用機の新製品について紹介。

・㈱伊藤製作所
マルチモーションボールミルの紹介。

・伊藤忠テクノソリューションズ㈱
熱力学計算ソフトウェアの紹介。

・茨城県中性子ビームライン
J-PARC MLFに設置された中性子ビームラインの産業利用について紹介。本大会用のホームページも開設し、会議システムを使った利用相談会も実施した。

・オックスフォード･インストゥルメンツ㈱
電子顕微鏡付属の最先端の分析装置を用いた金属アプリケーションと、EBSD後処理ソフト紹介。
技術セミナーでもデータ解析例の解説があった。

・サーモフィッシャーサイエンティフィック
材料科学向け電子顕微鏡を中心に紹介。

・㈱新興精機
シリアルセクショニング3D顕微鏡と材料情報統合システムの紹介。
技術セミナーでも動画による解説があった。

・㈱ＴＳＬソリューションズ
OIM結晶方位解析装置･EBSD観察用insituステージを紹介。
技術セミナーでの解説もあった。

・㈱モルシス
材料設計支援統合システムを中心に分子シミュレーションソフトウェアを紹介。

・㈱ＵＮＩＣＯ
国産のステンレス製グローブボックスやガス循環精製装置を紹介。

講演大会のオンライン開催に伴い、今後もオンライン展示会の開催が増えることが予想される。
オンライン展示会のメリットは、
・時間や場所の制約を受けない＝参加者のアクセスが容易
（展示会場に出向かなくてよい）
・出展コストが抑えられる
（人件費、ブース装飾、他経費）
・天候や災害の影響を受けにくい
・来場者（閲覧者）の分析が可能
等があげられる。
リアル展示会の中止や延期が続く中、各企業は営業機会の増加を求め、オンライン分野でのPR機会を模索している。
その受け皿となるべくオンライン展示会では、今後、
会議システムを活用したオンタイムでの説明会等のコンテンツ面の拡充やオンライン展示会場への集客向上（導線設計）が期待される。

次頁からは、「誌上展示会」として、材料研究に役立つ機器等の情報を掲載する。展示会出展社以外の情報も掲載した。
大会ホームページの展示会ページもご参照頂き、今後の研究開発にお役立て頂きたい。

付設展示会（オンライン版）
https://confit.atlas.jp/guide/event/jim2020autumn/exhibitorslist/ja

まてりあ「誌上展示会」

IS-POLISHER　ISPP-3000

使いやすさを追求したニューモデル ISPP-3000

●人の手による研磨の限界を改善します
●レシピの見える化で人によるバラツキをなくし技術の継承が容易になりました

【ISPP-3000の特長】
■画面に従って操作するだけで簡単に条件を設定できる
■低負荷で試料作製できる「電磁式自動荷重コントロール」
■削り量を1μm単位で設定できる「削り過ぎ防止機能」
■豊富な「試料ホルダ」

株式会社 池上精機

〒223-0057　神奈川県横浜市港北区新羽町 543-1-2F　TEL.045-717-5136　FAX.045-717-5137
URL : https://is-polisher.com　E-mail：sales3@ikegamiseiki.co.jp

CMOS 搭載高速 EBSD 検出器「Symmetry S2」

製品紹介

CMOSカメラを搭載した最新型超高速・高感度EBSD検出器です。
最速で毎秒4500ポイントの超高速でのマップ収集を実現します。
毎秒4500ポイント収集時でも156x88の高解像度でキクチパターンが可能であり、光ファイバーを使った光学系により高い感度でパターンを収集し、高いヒット率と高精度な方位解析を可能にします。
最大1244x1024の高解像度キクチパターンを収集可能で、材料のひずみ解析にも最適です。
チルト機構を搭載し、サイズの大きい試料の測定や、短ワーキングディスタンスの測定にも対応します。
近接センサーを内蔵しており、SEMステージや試料との衝突を未然に防ぐことができます。
Symmetry S2は最高の性能と革新的な機能で、効率的なEBSD分析を実現します。

オックスフォード・インストゥルメンツ株式会社

〒140-0002 東京都品川区東品川3-32-42 ISビル5F　www.oxinst.jp
TEL.03-6732-8967　FAX.03-6732-8939　E-Mail : na-mail.jp@oxinst.com

価格（税別）：2,500,000円～

自由共振式ヤング率及び内部摩擦測定装置　JE シリーズ

いろいろなヤング率測定装置があるなかで最も優れた装置です。

★ 最も高精度です。
★ 最も操作が簡単です。
★ 試料形状が最もシンプルです。
★ 内部摩擦も同時測定できます。
★ 剛性率測定、薄板細線測定などの付加、増設が簡単です。
★ 小型、小電力でどこでも設置できます。
★ JISやASTM準拠の業界標準装置です。
★ 基礎物性測定として研究室に1台は必須の装置です。

日本テクノプラス株式会社

〒532-0012　大阪市淀川区木川東 3-5-21 第三丸善ビル（新大阪）
TEL.06-6390-5993　URL : http://www.nihon-tp.com

ネオオスミウムコータ　Neoc-Pro/P

電子顕微鏡前処理の必須アイテム　チャージアップの無い極薄膜コートを実現

●プラズマCVD方式によるアモルファス（非晶質）コーティングで、
　回り込み良くチャージアップの無い極薄膜を形成
●膜厚制御は試料ステージ全域で均一に、再現性高くコーティング
●1nm以下の極薄膜成膜で、EDS、AES、EPMA、EBSDなどの前処理に最適
●発熱の無いコーティング方法で、生体や繊維試料も熱ダメージはゼロ

メイワフォーシス株式会社

〒160-0022　東京都新宿区新宿 1-14-2　KI 御苑前ビル
TEL.03-5379-0051　FAX.03-5379-0811　E-Mail：infot@meiwanet.co.jp
URL : http://www.meiwafosis.com/

まてりあ「誌上展示会」

カーボンコータ　CADE−4T

蒸着源は超高純度（99.995%）カーボンファイバーでSEM観察、各種元素分析、FIB保護膜など各種分析に最適

●「ちきゅう」船上で海底下数千メートルから掘削された岩石試料のSEM観察に
　CADE-Eが活躍中！
●同一真空下でのカーボン蒸着＋親水化処理機能搭載（CADE-E）
●低電流・短時間コーティングで熱ダメージなし
●全工程をわずか5分で完了
●再現性の高いワンショットコート

メイワフォーシス株式会社
〒160-0022　東京都新宿区新宿 1-14-2　KI 御苑前ビル
TEL.03-5379-0051　FAX.03-5379-0811　E-Mail：infot@meiwanet.co.jp
URL : http://www.meiwafosis.com/

ソフトプラズマエッチング装置　SEDE

親水化やクリーニングをダメージなく処理 PDMSも簡単に接着

●CF_4を利用したエッチング対応

●高出力モデルが新登場！高効率なドライエッチングが可能に

●卓上型で広範囲均一照射

●陽極・陰極の特殊設計により、低電流での安定したプラズマ放電を実現

メイワフォーシス株式会社
〒160-0022　東京都新宿区新宿 1-14-2　KI 御苑前ビル
TEL.03-5379-0051　FAX.03-5379-0811　E-Mail：infot@meiwanet.co.jp
URL : http://www.meiwafosis.com/

多機能ダイヤモンドワイヤーソー　DWS 3500P

断面精度はNo.1！乾式カット可能なラボ用精密ワイヤーソー

●断面粗さは５μm以内！解析に至るまでの大幅な処理作業の短縮を実現
●デジタルマイクロスコープ、実態顕微鏡観察による高精度位置合わせで、
　CP・断面ミリ　ングの前処理に最適
●乾式カットで水による変成や酸化しやすい試料に最適
●タッチスクリーンによる簡単操作で高い操作性と再現性
●アングルセンサー搭載により、装置の傾きを検知し荷重調整を厳密に制御

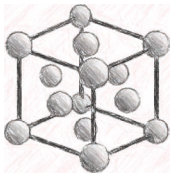
メイワフォーシス株式会社
〒160-0022　東京都新宿区新宿 1-14-2　KI 御苑前ビル
TEL.03-5379-0051　FAX.03-5379-0811　E-Mail：infot@meiwanet.co.jp
URL : http://www.meiwafosis.com/

マルチスペクトル・エリプソメーター　FS-1

LED光源と特許取得の新MWE技術で短時間にサブモノレイヤーの極薄膜を高精度に解析

●特許取得の新光学経路を採用した新エリプソメーター
●薄膜(0Å～5μm)の膜厚、屈折率、消衰係数を計測
●新製品の6色LED光源システムリリース！！
　可視光領域の4波長LEDにＵＶもしくはＩＲ領域の2波長LEDを選択可能！
●サンプル本来の膜厚をin situでリアルタイム計測を実現
●全自動マッピングモデルで迅速に膜厚分布計測を実現

メイワフォーシス株式会社
〒160-0022　東京都新宿区新宿 1-14-2　KI 御苑前ビル
TEL.03-5379-0051　FAX.03-5379-0811　E-Mail：infot@meiwanet.co.jp
URL : http://www.meiwafosis.com/



シリーズ「金属素描」

No. 12 アルミニウム(Aluminum)

東北大学 平 木 岳 人

元素名：Aluminum，原子番号：13，質量数：26.98，電子配置：[Ne] $3s^2\,3p^1$，密度：2.70 $Mg\cdot m^{-3}$(293 K)，結晶構造：面心立方(～933 K)，融点：933 K，沸点：2750 K[1]，地殻存在量：15.9 wt%(Al_2O_3 換算)[2]
【写真】高純度アルミニウム，後方中央立方塊は超高純度アルミニウム(純度99.999%)(日本軽金属㈱ 写真提供)

【輸送分野を主としてさらなる活躍が期待される軽金属】

アルミニウムの説明にあたり特筆すべき点は，軽量性と生産性のバランスの良さである．鉄，銅の約1/3の比重(2.7)であり，鉄に次ぐその世界生産量は年間6千万トンに迫る勢いである[3]．極めて軽い(軽金属)材料であることに加え，加工性に優れ，合金元素の添加・組織制御・表面加工などにより強度や耐食性を付与することができ，既に地下鉄や新幹線の車体などには積極的に用いられている．軽量化による燃費・走行距離向上のため自動車車体におけるアルミニウムのさらなる市場拡大は間違いない．ただし，鉱石を原料として製錬したアルミニウムは多量の CO_2 排出を伴っているため[3]，後述の真のリサイクルを達成することが市場拡大の鍵となる．

また，アルミニウムは熱伝導率が鉄の約3倍(純アルミニウムで237 $W\cdot m^{-1}\cdot K^{-1}$)であり，この性質を巧みに利用した製品として，車用のラジエーターやエアコン用のフィンはよく知られているが，最近では体温を効率よく伝えて固く凍ったアイスクリームを滑らかに掬うアルミニウムスプーンが販売されており，人気を集めている[4]．

【リサイクルのメリットと課題】

アルミニウムはリサイクルの優等生と言われている．これはボーキサイトと呼ばれるアルミニウム鉱石からアルミニウム塊を製造するときのエネルギーと比較して，回収したアルミニウムスクラップを加熱溶解することでアルミニウム塊を製造するときのエネルギー消費量が非常に少ない(約3%)からである．また，鉄よりもはるかに融点が低く(純アルミニウムで660℃)，表面に薄く緻密な酸化物層を形成できるため，マグネシウムのように燃えやすくないことがリサイクル性を高めている．

ところが，このリサイクルには重大な問題点がある．それは，ボーキサイトを原料とする場合は酸化アルミニウムとしての抽出操作を経由するため高純度のアルミニウム塊を製造できるが，スクラップを原料とした加熱溶解によるリサイクルプロセスでは，アルミニウム浴に混入して溶解した不純物の除去が非常に難しいことである[5]．例えば鉄が混入すると金属間化合物を形成して耐食性等に悪影響を及ぼすため，展伸材と呼ばれる薄板や押出材用の合金では概ね0.4%Fe以下に規格化されている．アルミニウムリサイクルプロセスにおいて工業的に鉄を0.4%以下程度に除去する技術や，不純物を含んでいるアルミニウムの高機能化などを実現できれば，その恩恵は計り知れない．真の持続的なアルミニウム循環を達成するには，まだまだ新しいアイデアや研究が必要である．

文　献

(1) 金属データブック改訂4版，日本金属学会，丸善(2004)．
(2) R. L. Rundnick, S. Gao: "The Crust", Elsevier Ltd. (2004), 1–64.
(3) アルミニウム協会 WEB サイト https://www.aluminum.or.jp/basic/worldindustry.html
(4) 例えば，https://www.15percent.jp/
(5) T. Hiraki *et al.*: Materials, **7**(2014), 5543–5553.

次号　金属なんでもランキング！ No. 12　原子半径

表彰（日本金属学会）

（2020年9月15日）

～2020年9月15日（火），下記の方々が本会の賞を受賞されました．おめでとうございます．今回は賞状の発送をもって，贈呈式に代えさせていただきました．～

第43回　日本金属学会技術開発賞　受賞記事（4件24名）　（2020年9月15日）

1.　薄ゲージ化と製缶時の加工自由度に貢献する高強度・高加工性缶用鋼板「JATT®」の開発

（まてりあ59巻1号）

JFEスチール㈱
スチール研究所
主任研究員
齋藤勇人君

JFEスチール㈱
スチール研究所
主任研究員
假屋房亮君

JFEスチール㈱
スチール研究所
部長
鈴木善継君

JFEスチール㈱
缶用鋼板セクター部
主任部員
川合　稔君

JFEスチール㈱
東日本製鉄所
（現：ドバイ事務所）
主任部員
中村紀彦君

JFEスチール㈱
東日本製鉄所
主任部員
杉田一久君

JFEスチール㈱
東日本製鉄所
主任部員
石井健太郎君

JFEスチール㈱
西日本製鉄所
主任部員
大谷大介君

JFEスチール㈱
西日本製鉄所
主任部員
神宮貴文君

JFEスチール㈱
西日本製鉄所
中田有紀君

2. ニッケル水素化物電池の出力特性改良技術開発

（まてりあ 59 巻 1 号）

㈱槌屋
技術開発本部
課長
平光規行君

㈱槌屋
技術開発本部
常務執行役員
林　宏明君

㈱GF イノベーション
代表取締役社長
金原雅彦君

ケミオ㈱
代表取締役社長
澤　春夫君

トヨタ自動車㈱
EHV 電池設計部
技範
中西治通君

トヨタ自動車㈱
EHV 電池設計部
室長
高橋泰博君

広島大学大学院
先端物質科学研究科
山口匡訓君

広島大学
自然科学研究支援開発センター
教授
小島由継君

3. 亜鉛ダイカスト金型用アモルファス炭素膜の開発

（まてりあ 59 巻 2 号）

YKK㈱
工機技術本部
PJ マネージャー
水林　舞君

YKK㈱
工機技術本部
専門役員
櫻木卓也君

YKK㈱
工機技術本部
エンジニア
渡邉直樹君

4. 過酷環境下で測定可能な水素センシング技術の開発

（まてりあ 59 巻 2 号）

㈱鈴木商館
技術部
リーダー
木村浩隆君

㈱鈴木商館
顧問
鈴木　譲君

名古屋大学大学院
工学研究科
助教
湯川　宏君

第 30 回　日本金属学会奨励賞　受賞者(6 名)　（2020 年 9 月 15 日）

（部門別 50 音順）

[学術部門]

［金属材料工学に基づく生体硬組織の集合組織形成機構に関する研究］

大阪大学大学院工学研究科 助教　小　笹　良　輔

受賞者は，高機能性を有する究極的な生体構造材料としての硬組織に着目し，機能発現に必須の結晶集合組織形成機構の解明に向けて，結晶学的観点からの結晶核生成・成長機構，それらに対する細胞・遺伝子の関与について，研究活動を推進している．金属材料工学的立場から細胞の代謝現象を理解，さらには硬組織の配向化制御因子を同定しており，生物による極めて巧妙な材料創製メカニズムの一端を解明している．材料工学と生物学の両輪により，生体材料科学ともいうべき新規学術分野の創出に向けて，今後のさらなる研究の展開が期待される．

［機能性粉体の合成と結晶構造解析に関する研究］

北海道大学大学院工学研究科 特任助教　齊　藤　元　貴

受賞者は，液中プラズマ法および燃焼合成法による機能性粉体の合成，および電子顕微鏡法による結晶構造解析に基づく粒子形成メカニズムおよび特性発現機構の解明に取り組んできた．主な業績として，(1)スルーフォーカス HAADF–STEM 法による蛍光体材料中ドーパント原子の 3 次元分布解析，(2)STEM–EELS 法によるブラウンミラーライト型酸素吸蔵材料の局所電子状態の解析，などが挙げられる．現在は電子顕微鏡による金属材料中の析出物の析出挙動解明に取り組んでおり，今後の更なる展開が期待される．

［マルテンサイト変態を有する材料の組織制御に関する研究］

東京工業大学科学技術創成研究院 助教　篠　原　百　合

受賞者は相変態と変形の幾何学を軸に，合金設計，組織制御に関する研究を行った．以下に主要な業績を述べる．(1)変形の連続性(Rank–1 接続)に基づいた鉄鋼材料のマルテンサイトにおける組織解析，(2)集合組織の制御による生体用チタン合金の低ヤング率化，(3)巨大な形状回復歪みを有する β 型チタン基生体用形状記憶合金の開発．現在は，鉄鋼材料のより高度な組織制御・予測を行うために必須である「バリアント選択則」の解明に取り組んでおり，今後の更なる展開が期待される．

［低合金鋼における合金炭化物のナノ析出と強化に関する研究］

東北大学金属材料研究所 助教　張　　咏　杰

受賞者は，熱力学・速度論・結晶学な観点から鉄鋼材料の組織制御に関する理論的・実験的研究を行ってきた．特に，低合金鋼におけるナノ合金炭化物の析出挙動とその強化に取り組んできた．近年金属材料の組織解析に活用されている三次元アトムプローブを応用し，析出物の分布や組成などを定量解析する手法を確立した上で，析出物の分布は駆動力の増加とともに微細となり，より大きな強化量が得られることが明らかとなった．現在は，鉄合金における溶質元素の粒界偏析に取り組んでおり，今後の更なる発展が期待される．

［数値解析による視覚化を利用したアルミニウム溶湯処理・鋳造プロセスの迅速化と定量化］

東北大学大学院工学研究科 助教　山　本　卓　也

受賞者は，アルミニウムの溶湯処理，鋳造プロセスの数値モデル化，数値解析を活用した詳細なメカニズム解明に取り組んできた．主な業績として，(1)フラックスやガス吹き込み時の油滴，気泡の微細化メカニズムを乱流渦から整理し，(2)超音波鋳造時の音響流を含む諸現象を数値モデル化し，超音波鋳造時の鋳肌モルフォロジーを音響流による乱流渦の観点から定量的に初めて説明した．これらにより，金属生産プロセスにおける数値解析の可能性を広げ，基礎メカニズムを解明することで生産プロセス改善指針を示した．

［技術部門］

［金属粉末射出成形により作製されたNi基耐熱合金の結晶粒制御技術の開発］

川崎重工業㈱技術研究所 主任研究員　日比野　真　也

受賞者は，金属粉末射出成形(MIM)により作製されたNi基耐熱合金の高温強度向上を実現する結晶粒制御技術の開発に従事してきた．主な業績として，(1)旧粒子境界に存在するMC炭化物によるピン止め効果の低減による，結晶粒成長促進に向けた炭素量の決定，(2)原料粉末の平均粒子径および結晶粒成長熱処理条件の最適化を通じた高温クリープ強度の大幅な向上などが挙げられる．現在はNi基耐熱合金粉末を用いた金属3Dプリンタ等の次世代の生産技術への応用に取り組んでおり，今後の更なる展開が期待される．

第10回　日本金属学会まてりあ賞　受賞論文・記事(3編6名)(2020年9月15日)

［第10回まてりあ論文賞］(2編5名)

1.　チタンならびにチタン合金の Additive Manufacturing プロセス　（まてりあ58巻4号）

大阪大学大学院
工学研究科
教授
中 野 貴 由 君

大阪大学大学院
工学研究科
准教授
石 本 卓 也 君

2.　準安定ラメラ組織の疲労き裂進展抵抗　（まてりあ58巻4号）

東北大学
金属材料研究所
准教授
小 山 元 道 君

九州大学大学院
工学研究院
教授
野 口 博 司 君

物質・材料研究機構
構造材料研究拠点
招聘研究員
津 崎 兼 彰 君

［第10回まてりあ啓発・教育賞］(1編1名)

放射光による工業材料評価(全3回)　（まてりあ58巻7号，8号，9号）

(公財)高輝度光科学研究センター
安全管理室
室長
廣 沢 一 郎 君

第 17 回　日本金属学会村上記念賞　受賞者(1 名)　　(2020 年 9 月 15 日)

［相変態と強加工による金属系構造・機能材料の特性制御］

物質・材料研究機構若手国際研究センター センター長　土　谷　浩　一

受賞者は様々な金属系材料について，相変態や強加工による特性制御に関する先駆的な研究を行ってきた．Zr 系金属ガラスを強加工する事で強度やヤング率が大きく低下する現象を世界に先駆けて見出し，その原因が“構造若返り”であることを明らかにした．TiNi 系形状記憶合金について強加工による非晶質化/ナノ結晶化により相変態挙動や生体適合性が大きく変化する事を明らかにした．さらには β 型チタン合金における偏析を活用した強度–延性バランスの向上など，独自な視点からの研究で金属材料学の進展に貢献してきた．

第 17 回　日本金属学会村上奨励賞　受賞者(3 名)　　(2020 年 9 月 15 日)

(50 音順)

［金属系材料の生体応用に向けた表面および組織創製プロセスの開発］

東北大学大学院工学研究科 准教授　上　田　恭　介

受賞者は，金属系材料の生体応用を目的としたドライプロセスによる表面創製プロセス開発および晶析出物制御に関する研究を推進してきた．非晶質リン酸カルシウムの生体内溶解性を活用した抗菌元素徐放型薄膜や可視光応答型光触媒活性チタニア膜作製プロセスを開発し，骨形成能と抗菌性を両立したチタン系材料の表面を創製した．加えて，軽元素に着目した生体用金属材料の晶析出物制御プロセスを提案し，機械的特性向上に貢献した．実用化を意識した金属材料の生体応用分野を開拓してきており，今後の更なる発展が期待される．

［閉じたき裂の高精度計測のための非線形超音波フェーズドアレイ映像法の開発］

東北大学大学院工学研究科 准教授　小　原　良　和

受賞者は，超音波探傷における最難関課題である閉じたき裂の高精度計測法の開発に継続的に取り組んできた．従来の 10 倍以上の大振幅超音波入射により，閉じたき裂面が開閉振動することを実験的に見出し，界面物理や接触の力学に基づき理論基盤を構築した．この知見をベースに，き裂面の開閉振動を利用した非線形超音波とアレイ映像法を融合することで，非線形超音波フェーズドアレイ映像法を開発し，その有効性を実証してきた．この一連の成果は国内外で高く評価されており，今後のさらなる飛躍と卓越した成果の創出が期待される．

［エネルギー変換・貯蔵材料への応用を目指した金属および金属酸化物の液相合成プロセス設計］

東京大学生産技術研究所 准教授　八　木　俊　介

受賞者は，金属および金属酸化物の液相合成プロセスに関する数多くの研究成果を上げてきた．特に，液相合成反応場における電位を，混成電位の概念を発展させて解釈し，生成物の酸化状態を高精度で予測する手法を確立した．さらに，次世代蓄電池用活物質や電気化学触媒の研究に本研究成果を応用し，優れた材料を数多く創出している．基礎から応用にわたる受賞者の一連の研究成果は国内外で高く評価されており，将来にわたって材料科学分野を背負う人物となることが期待される．

◇　　◇　　◇

第 68 回　日本金属学会論文賞　受賞論文(5 編 15 名)　　(2020 年 9 月 15 日)

［物性部門］1 編(3 名)

1. Solid Solutions with bcc, hcp, and fcc Structures Formed in a Composition Line in Multicomponent Ir–Rh–Ru–W–Mo System
(Materials Transactions, Vol. 60, No. 11)

東北大学大学院
工学研究科
特任教授(研究)
竹 内　章 君

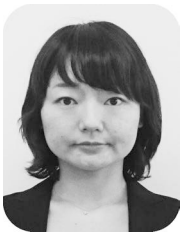
東北大学
金属材料研究所
准教授
和 田　武 君

東北大学
金属材料研究所
教授
加 藤 秀 実 君

［組織部門］1 編(4 名)

2. *Ex Situ* Electron Microscopy Study of the Lithiation of Single–Crystal Si Negative Electrodes during Charge Reaction in a Lithium–Ion Battery
(Materials Transactions, Vol. 60, No. 11)

JFE テクノリサーチ㈱
経営企画部長
島 内　優 君



JFE テクノリサーチ㈱
機能材料ソリューション本部
副課長
池 本　祥 君

JFE テクノリサーチ㈱
機能材料ソリューション本部
課長
大 森 滋 和 君

千葉大学大学院
工学研究院
教授
糸 井 貴 臣 君

［力学特性部門］1 編(3 名)

3. Modeling and Crystal Plasticity Simulations of Lath Martensitic Steel under Fatigue Loading
(Materials Transactions, Vol. 60, No.2)

東京大学大学院
工学系研究科
特任助教
Fabien Briffod 君

東京大学大学院
工学系研究科
講師
白 岩 隆 行 君

東京大学大学院
工学系研究科
教授
榎　　学 君

［材料プロセシング部門］1編(3名)

4. High-Entropy Alloys with Hexagonal Close-Packed Structure in $Ir_{26}Mo_{20}Rh_{22.5}Ru_{20}W_{11.5}$ and $Ir_{25.5}Mo_{20}Rh_{20}Ru_{25}W_{9.5}$ Alloys Designed by Sandwich Strategy for the Valence Electron Concentration of Constituent Elements in the Periodic Chart（Materials Transactions, Vol. 60, No. 8）

東北大学大学院
工学研究科
特任教授(研究)
竹内　章君

東北大学
金属材料研究所
准教授
和田　武君

東北大学
金属材料研究所
教授
加藤秀実君

［工業材料部門］1編(2名)

5. Nb添加フェライト系ステンレス鋼の熱疲労挙動と組織変化に及ぼす熱サイクル中の最高温度およびMo添加の影響（日本金属学会誌83巻11号）

日鉄ステンレス㈱
研究センター
研究員
多久島睦子 君

日鉄ステンレス㈱
研究センター
室長
濱田純一君

◇**日本金属学会秋賞の概要**◇（英語表記はホームページ：表彰関係 ご覧下さい）

技術開発賞	まてりあ“新技術・新製品”の著者で，創意あふれる開発研究を推奨する目的で，金属工学ならびにこれに関連する新技術・新製品などの独創的な技術開発に携わった技術者に対して授賞する．
奨励賞	金属材料工学ならびに関連分野で卓越した業績を挙げつつある5月末時点で**33歳以下**の次世代を託する優れた若手研究者(工業技術部門は企業の研究者または技術者)に授賞する． 部門：物性，組織，力学特性，材料化学，材料プロセシング，工業材料，工業技術
まてりあ論文賞	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で且つ金属及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．
まてりあ啓発・教育賞	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，金属及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．
村上記念賞	村上記念会からの寄付を基に金属工学の分野における先駆的研究および開発に格段の功績を挙げた方に授賞する．
村上奨励賞	村上記念会からの寄付を基に金属工学の分野で卓越した業績をあげつつある5月末時点で**40歳以下**の若手研究者に授賞する．
論文賞	前年1ヵ年の会誌または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て授賞する． 部門：物性，組織，力学特性，材料化学，材料プロセシング，工業材料
若手講演論文賞	**35歳以下**の春秋一般講演発表者またはポスター発表者で，会誌または Materials Transactions に掲載された学術上または技術上特に優秀な論文に対して授賞する．
優秀ポスター賞	ポスターセッション発表者を対象に，優秀なポスターおよび発表者に対して授賞する．本賞の贈呈は各大学，研究所に委託しこれを行う．
高校・高専ポスター賞	高校生・高専(3年生以下)学生の優秀なポスターおよび発表者に対して授賞する．本賞の贈呈は各学校に委託しこれを行う．

第 33 回　日本金属学会若手講演論文賞　受賞者（3 編 3 名）（2020 年 9 月 15 日）

（機関誌別掲載号順）

1. Al–Mg–Zn 3 元系状態図の熱力学的解析　（日本金属学会誌 84 巻 5 号）

東北大学大学院工学研究科 ○林　直宏 君
九州工業大学大学院工学府（現在㈱UACJ）中島一喜 君
東北大学多元物質科学研究所 助教 榎木勝徳 君
東北大学多元物質科学研究所 教授 大谷博司 君

2. High Temperature Deformation and Microstructure Evolution of Ni–Co Base Superalloy TMW–4M3
（Materials Transactions, Vol. 61, No. 4）

㈱日立製作所研究開発グループ 研究員 ○原　誉明 君
日立金属㈱冶金研究所 研究員 石田俊樹 君
東北大学大学院工学研究科 教授 及川勝成 君

3. Magnetic Properties of Nd–Fe–B Sintered Magnets Produced by Reduction–Grain Boundary Diffusion Process with Heavy Rare–Earths Compounds and Ca Metal Vapor

（Materials Transactions, Vol. 61, No. 4）

日産自動車㈱パワートレイン生産技術開発本部・大阪大学大学院工学研究科 ○上之原　勝 君
大阪大学大学院工学研究科 鄭　翰林 君
大阪大学大学院工学研究科（現在：磁気物性評価法研究所）西尾博明 君
大阪大学大学院工学研究科 教授（現在：大阪大学産業科学研究所　特任教授）町田憲一 君

◇　◇　◇

第35回　優秀ポスター賞受賞者　36名

（2020年 9 月18日授賞）（五十音順）

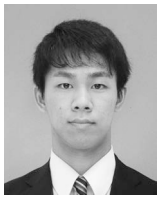
1　熱溶融積層法を用いて作製した17–4PH 鋼部品の工学的特性（P89）
山形大学 **阿部喜史 君**，黒瀬　隆 君，
太盛工業株式会社 Marcelo V.A. Santos 君，
金谷陽太 君，
山形大学 石神　明 君，
太盛工業株式会社 田中茂雄 君，
山形大学 伊藤浩志 君

2　Al–Mg–Zn 3 元系合金のT–$Al_6Mg_{11}Zn_{11}$ 相の析出に及ぼす第 4 元素添加の影響（P8）
名古屋大学 **石井大貴 君**，高木力斗 君，
髙田尚記 君，鈴木飛鳥 君，小橋　眞 君

3　純鉄へのショットピーニングにて形成する集合組織に及ぼす投射条件の影響（P114）
名古屋工業大学 **石黒雄大 君**，
佐藤　尚 君，渡辺義見 君，森谷智一 君，
九州工業大学 本塚　智 君

4　Ni–Sn–Si 系の二液相分離による Ni–Sn 系めっき残渣からの錫の分離回収（P79）
早稲田大学 **稲玉侑里子 君**，
山口勉功 君

5　Fe–Co 基合金の磁気特性および磁歪特性に及ぼす引張り応力印加の影響（P112）
大阪大学 **井上森平 君**，岡田　拓 君，
藤枝　俊 君，
東北大学 長内史也 君，杤 修一郎 君，
石山和志 君，
大阪大学 清野智史 君，中川　貴 君，
山本孝夫 君

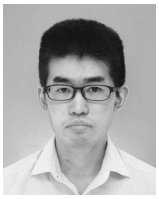


6　新規亜酸化物 Ti_6Sn_5O，Ti_5Sn_3O の合成と結晶構造解析（P45）
東北大学 **井上蒼太 君**，山根久典 君，
山田高広 君

7　ミルフィーユ型 Mg 合金単結晶の力学特性（P15）
大阪大学 **上山椋平 君**，萩原幸司 君，
熊本大学 山崎倫昭 君，河村能人 君，
大阪大学 中野貴由 君

8　bcc 型ハイエントロピー合金（TiZrNbHfTa）における辷りの固執評価（P51）
九州大学 **岡丈慎治 君**，森川龍哉 君，
田中將己 君

9　低磁性 Al/graphene 複合材料の作製（P93）
東北大学 **小佐野公佑 君**，周　偉偉 君，
野村直之 君



10　Pt–M（111）（M = Co, Ni）の垂直磁気異方性と酸素還元反応活性（P37）
東北大学 **木村功輝 君**，長尾哲郎 君，
轟　直人 君，和田山智正 君

11　Co–MgO 系ナノコンポジット薄膜の電気および磁気特性（P109）
東北大学 **木村　萌 君**，曹　洋 君，
青木英恵 君，大沼繁弘 君，小林伸聖 君，
増本　博 君

12　Nd_2O_3 – CaB_2O_4 系および Nd_2O_3 – BaB_4O_7 系状態図に基づいたネオジム磁石のリサイクル（P22）
早稲田大学 **桑葉秀一 君**，和田浩樹 君，
日産自動車株式会社 荒井誠也 君，
小川和宏 君，
早稲田大学 山口勉功 君

13　Evaluation of bonding strength of explosive welded W/F82H by ultra–small tensile and compression tests（P34）
東北大学 **WU XIANGYU 君**，
笠田竜太 君，近藤創介 君，余　浩 君，
量子科学技術研究開発機構 安堂正己 君

14　Mg–Ce 合金における二次錐面すべりの温度依存性（P69）
熊本大学 **坂本雅史 君**，
（現神戸製鋼所）林　昂佑 君，
熊本大学 津志田雅之 君，北原弘基 君，
安藤新二 君

15　アルミニウムフレーク充填複合材料におけるフレーク表面処理の影響(P101)
山形大学 **迫 優太朗 君**，黒瀬　隆 君，伊藤浩志 君

16　ペクチンを基材とした水酸アパタイトシェル結晶面制御(P25)
中部大学・産業技術総合研究所 **杉本佳彦 君**，産業技術総合研究所 李　誠鎬 君，加藤且也 君，宮島達也 君，中部大学 櫻井　誠 君，産業技術総合研究所 永田夫久江 君

17　疎水性薬剤内包コアシェル型ポリ乳酸/アパタイト粒子による薬剤放出制御(P64)
中部大学・産業技術総合研究所 **鈴木聖也 君**，産業技術総合研究所 李　誠鎬 君，加藤且也 君，宮島達也 君，名古屋大学 鳴瀧彩絵 君，中部大学 櫻井　誠 君，産業技術総合研究所 永田夫久江 君

18　錯体水素化物 Na_2BNH_6 のイオン伝導特性の改善(P140)
関西学院大学 **砂田宗一郎 君**，今井翔太 君，片山　昇 君，松尾元彰 君

19　水素チャージによるSiCの防食効果の検討(P136)
東北大学 **関 航太朗 君**，近藤創介 君，鹿児島大学 佐藤紘一 君，東北大学 余　浩 君，奥野泰希 君，笠田竜太 君

20　Sm_2Fe_{17} の窒化プロセスにおける圧力効果(P91)
鹿児島大学 **髙橋巡季 君**，尾上昌平 君，小林領太 君，三井好古 君，小山佳一 君

21　Ti_3AlC および TiC を構成相とするTi基合金の組織制御(P68)
東京工業大学 **高橋真道 君**，渡邉　学 君，Chai Yaw Wang 君，木村好里 君

22　異種金属接触水中光合成法による機能性ヘテロナノ構造体の作製(P113)
北海道大学 **高橋優樹 君**，ジェーム メルバート 君，渡辺精一 君

23　Sn を添加した Al–Mg–Si 合金におけるクラスタ形成挙動の軟X線XAFS測定(P132)
兵庫県立大学 **田中芹奈 君**，足立大樹 君，岡井大祐 君

24　工業用純チタンの変形過程における電気抵抗率の推定(P26)
関西大学 **中迫未菜美 君**，木下達也 君，上田正人 君，池田勝彦 君

25　SUS304鋼のイオン照射誘起相変態の結晶方位関係(P44)
岩手大学 **鶴田華子 君**，中川一沙 君，村上　武 君，清水一行 君，鎌田康寛 君

26　CrFeCoNi 系高エントロピー合金における添加元素の化合物形成への影響(P21)
関西大学 **中所弘晶 君**，西本明生 君

27　高品位エピタキシャル窒化クロム薄膜の作業に向けた中間層の選定(P17)
長岡技術科学大学 **新田純也 君**，菅井　匠 君，中山忠親 君，末松久幸 君，鈴木常生 君

28　強磁場中スリップキャストによる配向ポーラス Ti_3SiC_2 焼結体の作製とそのキンク変形組織(P13)
北海道大学 **橋本菜々 君**，池田賢一 君，三浦誠司 君，物質・材料研究機構 森田孝治 君，鈴木　達 君，目　義雄 君

29　質量分析計搭載反応科学超高圧電子顕微鏡による Rh/ZrO_2 系自動車排気ガス浄化モデル触媒の NO 還元反応オペランド計測(P88)
名古屋大学 **前出淳志 君**，トヨタ自動車株式会社 田中展望 君，菅沼拓也 君，名古屋大学 荒井重勇 君，日本電子 樋口哲夫 君，名古屋大学 武藤俊介 君

30　積層造形用 Ti 合金粉末の流動性評価(P63)
東北大学 **増田呼人 君**，鎌田航平 君，周　偉偉 君，野村直之 君

31　マクロファージ活性に応じた骨芽細胞配列変化(P92)
大阪大学 **松本　峻 君**，松垣あいら 君，
中野貴由 君

32　熱電特性向上を目指した金属六ホウ化物の微細粒子合成と低温焼結手法の開発(P105)
長岡技術科学大学 **宮川知也 君**，
馬場将亮 君，武田雅敏 君

33　フェライト系ステンレス鋼単結晶における疲労き裂形態と格子回転との関係(P53)
大阪市立大学 **森上雄尊 君**，
兼子佳久 君，内田　真 君

34　レーザ積層造形法を用いた階層的構造制御による異方性機能設計(P129)
大阪大学 **森田尚昂 君**，石本卓也 君，
木村恒太 君，中野貴由 君

35　リン代謝不全における骨微細構造と骨力学機能の破綻(P23)
大阪大学 **山岡祐介 君**，小笹良輔 君，
中野貴由 君

36　析出強化型 Mg 合金における変形中の活動すべり系に及ぼす析出粒子の影響(P30)
兵庫県立大学 **吉川友貴 君**，平田雅裕 君，
岡井大祐 君，足立大樹 君

◇　　◇　　◇

第 4 回高校・高専学生ポスター賞受賞者(最優秀賞 1 件，優秀賞 5 件)

(2020年 9 月15日発表)

最優秀賞

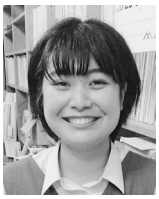
1．黄銅の色調変化の研究(HSP2)
宮城県仙台第三高等学校
木村昌弘君，渡邉　律君，柳内悠吾君，
川勝祐貴君，二階堂智明君
菅原佑介君(指導教員)

優秀賞

1．酸化還元反応による無機顔料の色の変化(HSP3)
京都府立洛北高等学校
増田　琳君，神田七穂君，
坂本弘樹君(指導教員)

2．卵殻膜を用いた銅(Ⅱ)イオンの吸着(HSP5)
岩手県立水沢高等学校
村上もも君，及川美結君，
佐藤安沙美君，鈴木萌晏君，豊嶋成葉君，
高橋一成君(指導教員)

3．アルミニウムと亜鉛のイオン化傾向と溶解度の関係(HSP7)
兵庫県立宝塚北高等学校
島津ひな君，山本史佳君，
井上日南子君，杣谷篤紀君，田中　翔君
木村智志君(指導教員)



4．Beautiful Metallic Flower! ～2 次元的金属結晶の形成～(HSP8)
茨城県立水戸第二高等学校
仲田姫菜君，武田春維君，
冨永ひすい君，
冨澤英士君(指導教員)

5．金銀色の銅樹の作成　～安価な金銀樹作成の研究～(HSP9)
東京都立小石川中等教育学校
柗元洸樹君，
土屋　徹君(指導教員)

特集

バイオアダプティブマテリアル～生体の仕組みに根差した金属系生体材料の設計～

企画にあたって

上田恭介[1*]　石本卓也[2]　堤　祐介[3]　池尾直子[4]
趙　　研[5]　山中謙太[6]　小幡亜希子[7]　野山義裕[8]

生体材料はこれまでの，為害性をできるだけ小さくしつつ，生体内の欠損部分を「空間」的に代替するもの，という位置づけから，生体に能動的にはたらきかけ，生体内の機序に取り込まれて「機能」的に代替するもの，へと進化している．

生体内で真に機能する材料を創製するためには，材料科学をバックボーンとしつつ，生体内での生物学的機序を理解し，それに直接的・間接的にアプローチするような仕組みを材料科学の立場から生体材料に導入する必要がある．科学技術振興機構（JST）研究開発戦略センター（CRDS）が2018年度に掲げた戦略プロポーザル「バイオ材料工学～生体との相互作用を能動的に制御するバイオアダプティブ材料の創製～」[(1)]においても取り組むべき研究開発課題として①生体/材料相互作用によって生じる現象の理解，とそれに基づく②バイオアダプティブ材料の設計・創製，が提唱されている．そこで本特集では，第7分野（生体・医療・福祉）で最前線の研究に携わっている研究者から，関連する生体内での機序とそれに基づく自身の材料開発について解説を執筆頂いた．

仲井正昭先生（近畿大学）には「**β型Ti–Nb基合金の低ヤング率化の要因と医療応用研究の現状**」と題して，著者らが開発した生体用β型チタン合金の設計指針，低ヤング率化する要因とともに，本合金の実用化へ向けた状況を解説して頂いた．松垣あいら先生（大阪大学）には「**細胞および骨基質の配向化機序に基づく骨機能化誘導**」と題して，生体用金属材料が最も多く置換・代用される骨について，遺伝子・タンパク質レベルから細胞レベルにかけての配向化骨形成機序と，それに基づいた材料学的異方性制御による骨機能化誘導の方法論について解説して頂いた．山本玲子先生（物質・材料研究機構）には「**材料–組織間の相互作用の理解に基づく生体吸収性金属材料の生体内分解特性評価**」と題して，材料埋入時に生じる異物反応と，それを回避するための生体吸収性金属材料開発，さらにはその評価方法まで解説して頂いた．小幡亜希子先生（名古屋工業大学）には「**骨芽細胞の活性化機序に基づく金属イオン徐放足場材の創製**」と題して，骨形成に対してポジティブにはたらく金属イオンと，その相互作用にまで着目したセラミックス系足場材料開発について解説して頂いた．上田恭介先生（東北大学）には「**光触媒活性による細菌の不活化機序の理解に基づくチタン系生体材料の抗菌機能化：酸化チタンコーティングの可視光応答化**」と題して，歯科用インプラント等で問題視されている細菌由来の感染症について，光触媒を使用した抗菌性発現機序と熱酸化法を用いた可視光応答型酸化チタンコーティングの作製・評価について解説して頂いた．

本特集の構成を見て頂いてお分かり頂けるように，第7分野では，金属・セラミックスといった無機的な材料に限らず，対象となる生体の生物学的機序，材料と生体の相互作用，材料そのものの設計・評価まで，バイオマテリアル研究において須要である関連分野を横断する研究対象に対して，材料科学を軸足としながらも生物工学を相補的に駆使しながらアプローチし，開かれたセッションを展開している．すなわち，生体材料分野においても本学会会員の皆様がこれまでに習得してきた材料科学の専門知識を十分に発揮し活躍できることを意味している．本特集を機会に，是非生体材料の分野にも足を踏み入れてみては如何でしょうか？

文　献

（1）科学技術振興機構研究開発センター戦略プロポーザル：バイオ材料工学，CRDS–FY2018–SP–02,（2018）.

上田恭介

石本卓也

堤　祐介

池尾直子

趙　研

山中謙太

小幡亜希子

野山義裕

[1]東北大学 大学院工学研究科；准教授*（〒980–8579 仙台市青葉区荒巻字青葉 6–6–02）
[2]大阪大学 大学院工学研究科；准教授，[3]物質・材料研究機構 構造材料研究拠点；主席研究員
[4]神戸大学 大学院工学研究科；助教，[5]大阪大学 大学院工学研究科；講師，[6]東北大学 金属材料研究所；准教授
[7]名古屋工業大学 大学院工学研究科；准教授，[8]帝人ナカシマメディカル㈱；課長

Preface to the Special Issue on ‘‘Bioadaptive Materials, Design of Biomaterials Based on the Biological Mechanisms’’; Kyosuke Ueda[1*], Takuya Ishimoto[2], Yusuke Tsutsumi[3], Naoko Ikeo[4], Ken Cho[5], Kenta Yamanaka[6], Akiko Obata[7], Yoshihiro Noyama[8]（[1,6]Tohoku University [2,5]Osaka University [3]National Institute for Materials Scinece [4]Kobe University [7]Nagoya Institute of Technology [8]Teijin Nakashima Medical Co., Ltd.）

Keywords: *biomaterials, bio–adaptive, biological functions, Ti alloys, cell, gene pathway, ion, surface/interface, dissolution, antibacterial*
2020年6月17日受理［doi:10.2320/materia.59.587］

β型Ti–Nb基合金の低ヤング率化の要因と医療応用研究の現状

仲井正昭* 新家光雄**

1. はじめに

骨と金属との大きなヤング率差により生じるとされる応力遮蔽による過剰な骨吸収を抑制するための低ヤング率を志向した医療用β型チタン合金（低ヤング率β型チタン合金）の開発は1990年代から始まり，その後，世界中で精力的に研究・開発がなされ，これまでに数多くの新合金が開発されてきている[1]．このようなコンセプトで開発された，ごく初期の合金には，Ti–15Mo–5Zr–3Al合金（以下，合金中の数字は断りがない限りmass%を表す），Ti–12Mo–6Zr–2Fe合金およびTi–13Nb–13Zr合金などが挙げられ，これらの合金のヤング率は74～79 GPaと報告されている[2]．β型チタン合金の高強度化では時効処理が多用され，ヤング率は時効処理条件に強く依存することが知られている[3]．一般的には時効処理前（溶体化処理後）のヤング率が最も低くなるが，70 GPa代後半のヤング率は代表的な工業用β型チタン合金であるTi–15V–3Cr–3Sn–3Al合金の溶体化処理を施した状態のヤング率である82 GPa[4]と大差はない．低ヤング率β型チタン合金として強い印象を残した最初の合金は，1995年に開催された第8回世界チタン会議で発表された，Rackらによる開発合金であるTi–35Nb–7Zr–5Ta合金[5]であろう．同会議のプロシーディングスには，同合金のヤング率が55 GPaと記載されている．Niinomiらにより開発された日本を代表する低ヤング率β型チタン合金であるTi–29Nb–13Ta–4.6Zr（TNTZ）合金に関する論文が最初に発表されたのは1998年である[6]．発表はRackらよりもわずかに遅れたものの，ほぼ同時期に研究・開発され，その後の継続的な研究により，現在では世界で最も認知度の高い低ヤング率β型チタン合金の一つとなっている．

低ヤング率β型チタン合金の開発が始まってから約30年が経過し，その間に数多くの新合金が開発されてきただけでなく，β型チタン合金の低ヤング率化現象の理解が進んだ．さらには，材料開発の段階から医療器具開発の段階へと進み，医療に対する低ヤング率の有効性の検証がなされるようになってきている．本稿では，Niinomiらが開発し，現在，医療器具への応用研究が進められているTNTZ合金を題材に取り上げ，同合金の設計思想，同合金が低ヤング率となる要因および同合金の医療応用における有効性の実証状況について概説する．

2. TNTZ合金の設計思想

TNTZ合金の設計では，まず毒性・アレルギー性のない合金元素が選択され，次に森永らにより提唱されているd電子合金設計理論[7][8]を用いて化学組成が決定されている．d電子合金設計理論は，最初に発表されてから30年以上経過しているが，価電子濃度（e/a）やMo当量とともに，チタン合金の設計では現在でもなお利用されている[9]．この設計理論では，第一原理計算の一つであるDV–X_αクラスター法により求められる，原子間の結合の強さを表す結合次数（Bo）と，電気陰性度や原子半径と関係のあるd軌道エネルギーレベル（Md）の2つのパラメータが用いられる．これらの二つのパラメータは，チタン原子からなるクラスター（bcc格子の場合は，中心となる原子とその原子から見て第一近接に位置する8個の原子および第二近接に位置する6個の原子の計15個の原子により構成される）の中心の1個だけを合金元素の候補となる別の原子に置換して求められている．合金元素ごとに求められたBoとMdを用いて，各実用チタン合金のBoの組成平均値（$\overline{Bo}$）およびMdの組成平均値（$\overline{Md}$）を

* 近畿大学理工学部；准教授（〒577–8502 東大阪市小若江3–4–1）　** 東北大学；名誉教授
Factors Leading to Low Elastic Modulus and Current Status of Medically Applied Research of β–type Ti–Nb–based Alloys; Masaaki Nakai* and Mitsuo Niinomi**(*Faculty of Science and Engineering, Kindai University, Higashiosaka．**Tohoku University, Sendai)
Keywords: *biomaterial, β–type titanium alloy, low Young's modulus, phase stability, stress shielding, bone, spinal fixation*
2020年6月29日受理[doi:10.2320/materia.59.588]

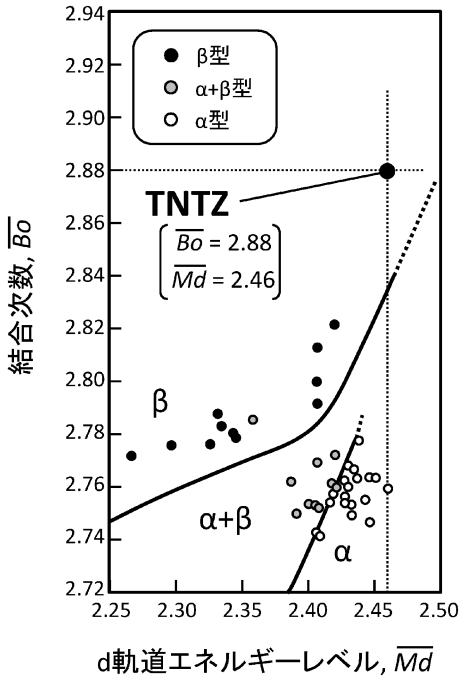


図1　チタン合金の $\overline{Bo}$–$\overline{Md}$ 図と TNTZ の位置．（文献(7)を改変引用）

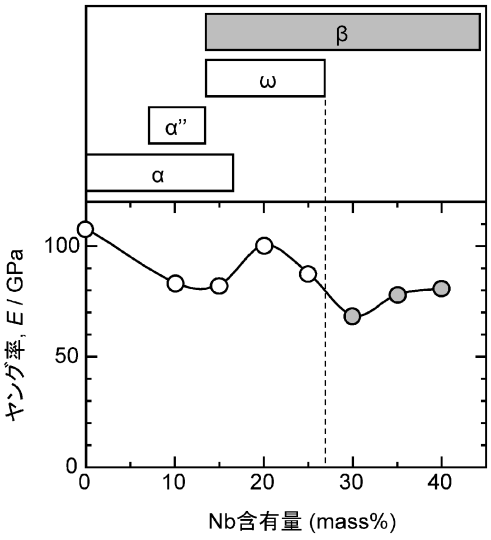


図2　溶体化処理を施した Ti–xNb–10Ta–5Zr 合金（x＝0～40 mass%）の相構成およびヤング率に及ぼす Nb 含有量の影響．（文献(10)を改変引用）

求め，縦軸に $\overline{Bo}$，横軸に $\overline{Md}$ をとり，プロットすると，**図1**に示すように，α型，α+β型および β型といった実用チタン合金のタイプをプロット領域で分類することができる．そこで，各領域の境界線を引くと，未知の化学組成のチタン合金のタイプを予測することができる．さらに，実用チタン合金のヤング率をこの $\overline{Bo}$–$\overline{Md}$ 図中に書き込んでいくと，ヤング率が低い合金は，β型となる領域内で $\overline{Bo}$ と $\overline{Md}$ とが共に高い位置にプロットされる．TNTZ 合金の化学組成は，β型とα+β型の領域の境界線を延長して，β型となる領域内で既存の合金にはないほど高い $\overline{Bo}$ と $\overline{Md}$ となるように決定された[6]．TNTZ 合金は，d 電子合金設計理論の適用による新合金開発の重要な成功例の一つとされている．ただし，d 電子合金設計理論では，所望の特性となる化学組成を予測することができるが，その理由までは与えられない．すなわち，合金開発時点では，TNTZ 合金が低ヤング率となる理由はまだ明確ではなかったと言える．

3.　TNTZ 合金が低ヤング率となる要因

低ヤング率β型チタン合金は，チタン合金の中でも準安定β型チタン合金に分類される．準安定β型チタン合金の室温からβトランザスまでの温度範囲における熱力学的平衡相はα+β相であるため，β相単相の状態は，溶体化処理としてβトランザス以上の温度から急冷して高温相を凍結することにより得られる．すなわち，非平衡β相がヤング率の低い状態であるため，β相の安定性は，低ヤング率β型チタン合金において特徴的に低いヤング率が得られる理由として最も重要な因子となる．

実験事実として，**図2**に溶体化処理を施した Ti–xNb–10Ta–5Zr 合金（x＝0～40 mass%）の相構成とヤング率を示す[10]．溶体化処理を施した Ti–xNb–10Ta–5Zr 合金のヤング率は，Nb 濃度に強く依存し，β相単相となる化学組成の中でも，非熱的ω相が形成されない最少の Nb 濃度であるとき（Ti–30Nb–10Ta–5Zr 合金）に極小値が得られる．同様のヤング率の化学組成依存性は，Ti–Nb 二元系合金においても報告されている[11]．Nb はβ相安定化元素（βトランザスを低下させる合金元素）であることから，Nb 濃度が高いほどβ相の安定性は上昇する．したがって，β型チタン合金において低ヤング率を得るためには，非熱的ω相が形成しない範囲でβ相安定化元素の含有量を極力少なくし，安定性の低いβ相単相を形成させることが重要となる．

チタン合金の相安定性と弾性特性との関係については，最近，多根により詳細に解説されている[12]．立方晶系の bcc 格子からなるβ相の弾性特性は，3 つの独立な弾性スティフネス C_{11}，C_{12} および C_{44} により記述できるが，特にこれらの 3 つの弾性スティフネスにより表されるせん断弾性率 C' および弾性特性異方性の指標となる異方性因子 A の e/a 依存性が重要となる．C' および A は以下の式（1）および式（2）により求められる．

$$C' = \frac{C_{11} - C_{12}}{2} \qquad (1)$$

$$A = \frac{C_{44}}{C'} \qquad (2)$$

まず，bcc 格子からなる遷移金属およびその合金の C' が e/a と強い相関があり，以下の式（3）で表される関係が古くから知られている[13]．

$$C' = 1.391 \times (e/a - 2)^{3.34} \qquad (3)$$

Ti は遷移金属の中では周期表の左側（4 族）に位置するため，3 族および 4 族以外の遷移金属を合金元素として添加すると e/a は増加することになる．遷移金属の中でもチタン合金の合金元素としてよく用いられる V，Cr，Mn，Fe，Nb，Mo，Ta などはすべてβ相安定化元素であるため，これら

の合金元素を添加することによる e/a の増加は β 相の安定性の上昇を意味する．したがって，式(3)によると，β 相の安定性が低下するほど C' が低下することになる．この C' と e/a との関係については，Tane らにより，現在までに報告されている Ti–V 二元系，Ti–Cr 二元系および Ti–Nb 二元系 β 型チタン合金単結晶の C' の e/a 依存性が整理され，確かに e/a の減少により C' が低下することが示されている[14]．さらに Tane らは，C_{44} は e/a が変化してもほとんど変化しないため，C' が低下すれば，それに伴い A が上昇することを示し，β 型チタン合金の低ヤング率化では，この A の上昇が重要であることを主張している．すなわち，立方晶系では，弾性特性が等方的であれば $A=1$ となるが，A が 1 よりも大きいか小さい場合は弾性特性が異方的になる．したがって，β 型チタン合金単結晶のヤング率異方性は e/a の減少に伴い強くなると言える．**図 3** に弾性スティフネスを用いて計算した，e/a の異なる Ti–V 二元系合金単結晶の〈100〉と〈110〉との間のヤング率異方性を示す[12]．e/a が最も小さい Ti–28V 合金(mol%)では，ヤング率が結晶方位に強く依存しており，〈100〉において最小となり，〈111〉において最大となる．これに対して，Ti–28V 合金(mol%)よりも e/a が大きい Ti–53V 合金(mol%)では，ヤング率異方性が弱まる．e/a が最も大きい Ti–79V 合金(mol%)では，$A<1$ となるため，ヤング率異方性が Ti–28V 合金(mol%)とは逆に〈100〉において最大となり，〈111〉において最小となる．さらに，これらの 3 つの合金の曲線を比べると〈111〉ではほとんど違いがないこともわかる．すなわち，β 相の安定性を低下させることによる低ヤング率化は，どの結晶方位にも生じるわけではなく，ある特定の結晶方位で生じる現象であると理解することができる．さらに，多根による解説の中で，Ti–Nb 二元系 β 型チタン合金単結晶の C' および C_{44} が，β 型チタン合金単結晶で得られる C' および C_{44} の e/a 依存性の全体的な傾向から外れ，$e/a=4.26$～4.30付近で特異的に大きく低下することが低ヤング率 β 型チタン合金を特徴づけることを指摘している．Ti–Nb 二元系 β 型チタン合金の特異性については，花田による準安定 β 型チタン合金の変形モード(変形双晶，すべり変形)に関する解説中でも触れられている[15]．準安定 β 型チタン合金では，β 相の安定性が低いときに変形双晶が発現し，β 相安定化元素濃度が高くなるとすべり変形に移行する．この変形モードの移行境界付近となる化学組成の合金中では，溶体化処理時の急冷により非熱的 ω 相が形成し，その ω 相の存在に由来する透過型電子顕微鏡の電子線回折斑点の強度と位置が化学組成に依存して変化する．そこで，この現象を利用して，β 相の{222}斑点の位置で規格化した ω 相の{0002}斑点の位置を β 相の安定性の指標とすることが花田により提案されている．その際，Ti–Fe 二元系，Ti–Cr 二元系，Ti–Mo 二元系および Ti–V 二元系 β 型チタン合金のすべり変形が支配的な化学組成範囲では，どの合金系においても合金元素濃度の上昇により ω 相の{0002}斑点の位置が同相の{0001}斑点に近づくが，Ti–Nb 二元系 β 型チタン合金だけは，例外的に，合金元素濃度が上昇しても ω 相の{0002}斑点の位置がほとんど変化しないことが指摘されている．ごく最近出版された Morinaga による成書[16]の中で，bcc 格子からなるチタンへの合金元素の添加により発生する局所格子歪み値が第一原理計算による構造最適化により求められている(**図 4**)．局所格子歪みとは，中心の原子をチタンから合金元素に置換することにより，中心の原子から見て第一近接と第二近接の原子の位置が元のチタンだけの状態からどれだけ変化したかを示す値である．Zr および Hf 以外の合金元素の添加は，第二近接のチタン原子を遠ざけ(〈100〉への変位)，第一近接のチタン原子を中心に引き寄せるように作用するが(〈111〉への変位)，合金元素の種類により，それらのどちらの作用がどれだけ強いかが異なる．Zr および Hf 以外の合金元素のうち，V や Cr などの多くの合金元素は第一近接のチタン原子を中心に引き寄せる作用のほうが強いが，Nb あるいは Ta を含む合金は共に局所格子歪み値が小さく，かつ第一近接のチタン原子を中心に引き寄せる作用と第二近接のチタン原子を遠ざける作用の強さがほぼ同等となっている．なお，第一近接のチタン原子と第二近接のチタン原子との間の距離については合金元素の添加によりほとんど変化しない．さらに，この局所格子歪みとマルテンサイト変態($\beta\rightarrow\alpha'$)の生じやすさとの関係についても議論がなされている．合金元素を添加したときに生じる第一近接のチタン原子の〈111〉への変位および第二近接のチタン原子の〈100〉への変位によりそれらの原子が並ぶ面(1 枚おきの(110))がねじれると，マルテンサイト変態の第一段階で生じる$(1\bar{1}2)[\bar{1}11]$シアーが生じにくくなると考察さ

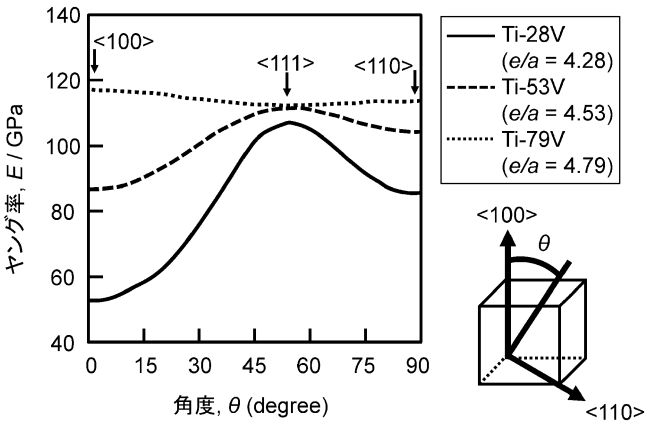


図 3　Ti–V 二元系合金単結晶における β 相のヤング率異方性．(文献(12)を改変引用)

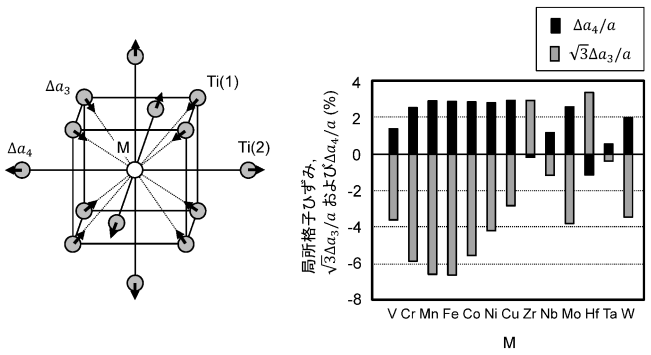


図 4　bcc 格子からなるチタンへ添加した合金元素まわりの局所格子ひずみ．(文献(16)を改変引用)

れている(**図5**)[16]．このMorinagaによる考察と同様の考え方が，低ヤング率β型チタン合金のC'の低下現象に及ぼすNbの特異性にも適用できるのではないだろうか．すなわち，図4からわかる通り，Nbは局所格子歪みの発生が小さな合金元素であるため，結晶格子をほとんど歪ませずに添加することができる．したがって，同じe/aのチタン合金であったとしても，Nbを含む合金は(110)が大きくねじれていないために同面内の$\langle 1\bar{1}0\rangle$に弾性的柔軟性がもたらされると考えられる．もしこの考え方が正しければ，TaにもNbと同様の効果が期待される．**図6**にTNTZ合金単結晶のヤング率異方性を示す[14]．TNTZ合金のe/aは4.25であり，同合金単結晶においても低ヤング率β型チタン合金の特徴である大きなヤング率異方性が認められ，〈111〉のヤング率が最も高く，〈100〉のヤング率が最も低い．最も低い値となる〈100〉のヤング率は約35 GPaであり，骨のヤング率である10～30 GPa[17]に近い値を実現している．TNTZ合金のこのような低いヤング率は，e/aが低く，主要合金元素にNb(およびTa)が含まれていることにより，特異的にC'が小さく，かつAが大きくなるためであると理解される．以上がTNTZ合金のヤング率の物性値としての理解であるが，実際の材料は多結晶からなっていたり，多相であったりする．

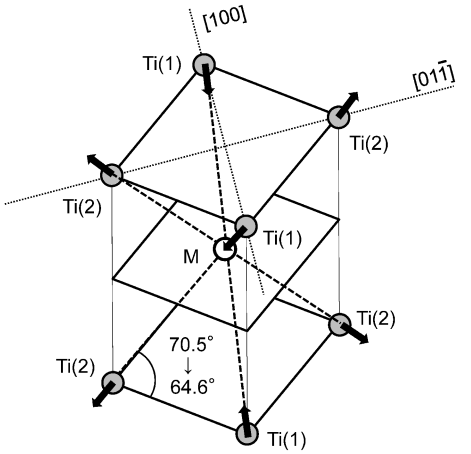


図5　チタン中に合金元素としてFeを添加したときの構造最適化による原子の移動方向．(文献(16)を改変引用)

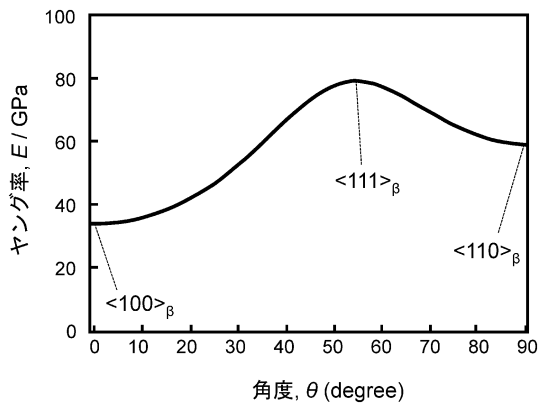


図6　TNTZ合金単結晶のヤング率異方性．(文献(14)を改変引用)

したがって，単結晶で得られている知見を基に，多結晶・多相へと発展させる必要がある．多根による解説には多結晶・多相のモデル計算についても詳細に記載されているので，興味のある読者は参照されたい．

室温で外部負荷によりマルテンサイト変態($\beta\rightarrow\alpha''$)が生じる超弾性β型チタン合金もヤング率が低いことが知られている．例えば，Matsumotoらにより，Ti-35Nb-4Sn合金のヤング率は55 GPaと報告されており，低ヤング率β型チタン合金とほぼ同等のヤング率を有する[18]．超弾性β型チタン合金を開発する上ではマルテンサイト変態開始温度の把握が重要であり，合金の化学組成とマルテンサイト変態開始温度との関係が調査されている．マルテンサイト変態開始温度は，ヤング率の温度依存性からも知ることができる．例として，**図7**にTi-24Nb-3Al合金(mol%)のヤング率の温度依存性を示す[19]．通常は温度低下に伴いヤング率は上昇するが，Ti-24Nb-3Al合金(mol%)のヤング率は，通常とは異なり，温度を低下させているにもかかわらずマルテンサイト変態開始温度に近づくにつれて低下する．同様のヤング率の温度依存性はTi-35Nb-4Sn合金においても報告されている[18]．これらの実験事実から，室温あるいは体温で低ヤング率となるβ型チタン合金の化学組成の探索は，マルテンサイト変態開始温度依存性の調査により可能になるとされている[20]．この超弾性β型チタン合金における，通常とは異なるヤング率の温度依存性はマルテンサイト変態の前駆現象として生じる結晶格子の軟化によるものであるとする解釈が強く支持されている[21][22]．β型チタン合金のマルテンサイト変態は熱弾性的であり，この場合の特徴として，マルテンサイト変態開始温度よりも少し高い温度から既に前駆現象として母相に種々の異常現象が現れることがある．その一つとして，マルテンサイト変態が生じるβ型チタン合金では，C'がマルテンサイト変態開始温度に近づくにつれて低下し，結晶格子が軟化するとされている．このC'の低下現象は，超弾性β型チタン合金と低ヤング率β型チタン合金とでは，それぞれ温度変化および化学組成変化により生じてい

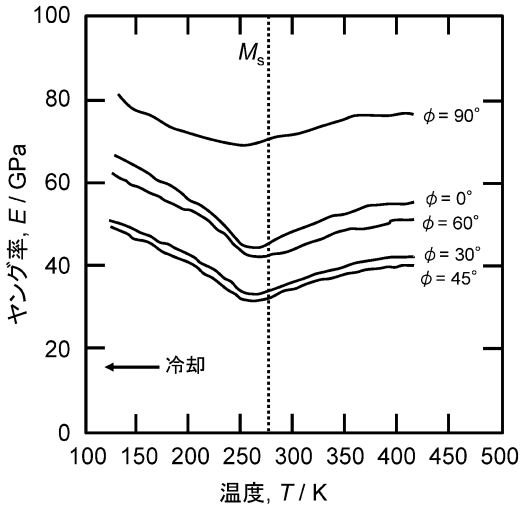


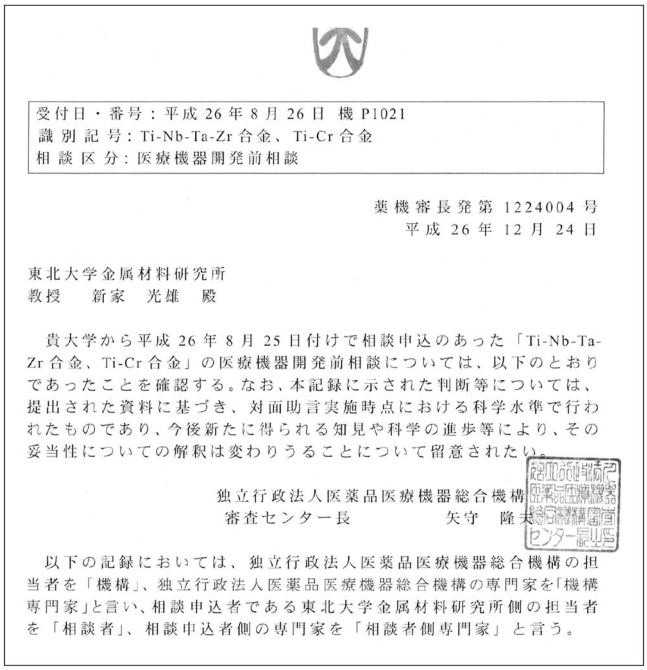
図7　Ti-24Nb-3Al合金(mol%)のヤング率温度依存性(ϕ：試験片の長手方向と圧延方向との角度，M_s：α''マルテンサイト変態開始温度)．(文献(19)を改変引用)

るという点が異なるが，現象自体はほぼ同じと解釈できると思われ，低ヤング率となる理由となっていると考えられる．

TNTZ 合金では，ほとんどの場合，溶体化処理時の急冷によりβ相単相となるが，開発当初の頃にはマルテンサイト相が形成したとする報告も存在する[23]．同一合金で同一条件の熱処理を施しているにもかかわらず異なる組織が形成するというのは好ましい状況ではないが，その後の研究により，わずかな化学組成の違いによりマルテンサイト相ができることが実験的に明らかにされている[24]．すなわち，この現象は，TNTZ 合金がそもそも溶体化処理によりβ相単相となるかならないかの境界付近の化学組成であり，低ヤング率を得るために最適に近い化学組成であることを示唆している．

4. TNTZ 合金の医療応用における有効性の実証状況

TNTZ 合金の医療器具への応用による実用化は未だ達成されていない．しかし，その実用化は著者らの長年の悲願であり，2014年には，脊椎固定器具への応用を想定して，独立行政法人医薬品医療機器総合機構(PMDA)において，医療機器開発前相談を行った．**図 8** はそのときの議事録(一部抜粋)である．相談に行き，最も強く印象に残っていることは，材料系の論文や学会では金属材料の低ヤング率化が整形外科における治療において有効であるということが当たり前のように扱われているが，実際の医療現場では，用途によっては，そのような認識が一般的ではなかったということである．2014年に企画された，まてりあミニ特集「医療材料開発ニーズの現在と未来」によると，整形外科の中でも，関節外科においては応力遮蔽が問題視されているが[25]，脊椎外科においては，最も重視されているのは骨癒合(脊柱と脊椎固定器具との一体化)の完成であり，脊椎固定器具が脊柱を安定化させる役割を担うのは骨癒合までで良いと考えられている[26]．ただし，骨癒合の完成を最重視しながらも，あまりに強く固定すると，骨癒合後の隣接椎間障害や固定範囲内における椎体骨粗鬆化も懸念されるとも述べられている．そのため，低ヤング率β型チタン合金の応用先として脊椎固定器具を想定する場合は，隣接椎間障害や固定範囲内における椎体骨粗鬆化の抑制に対して低ヤング率が有効であることを実証することが求められる[27]．隣接椎間障害にかかわる検討の一環として，有限要素法を用いた TNTZ 合金製，Ti–6Al–4V 合金製および Co–Cr 合金製脊椎固定器具による腰椎固定のバイオメカニクス解析結果が報告されている[28]．この解析では，TNTZ 合金，Ti–6Al–4V 合金および Co–Cr 合金のヤング率として，それぞれ58 GPa，127 GPa および220 GPa が用いられている．**図 9** に示すように，材料として TNTZ 合金や Ti–6Al–4V 合金を用いると，Co–Cr 合金を用いた場合に比べて，屈曲・伸展，回旋，側屈に対する脊椎固定器具としてのスティフネスが，TNTZ 合金では平均で15%，Ti–6Al–4V 合金では平均で5%低下するため，隣接椎間障害の抑制が予想されている．さらに，材料のヤング率に応じて脊椎固定器具に加わる静的荷重に違いが生じ，ヤング率が高いほど負荷が大きくなるため，脊椎固定器具の損傷



受付日・番号：平成 26 年 8 月 26 日 機 P1021
識別記号：Ti-Nb-Ta-Zr 合金、Ti-Cr 合金
相談区分：医療機器開発前相談

薬機審長発第 1224004 号
平成 26 年 12 月 24 日

東北大学金属材料研究所
教授　新家　光雄　殿

貴大学から平成 26 年 8 月 25 日付けで相談申込のあった「Ti-Nb-Ta-Zr 合金、Ti-Cr 合金」の医療機器開発前相談については、以下のとおりであったことを確認する。なお、本記録に示された判断等については、提出された資料に基づき、対面助言実施時点における科学水準で行われたものであり、今後新たに得られる知見や科学の進歩等により、その妥当性についての解釈は変わりうることについて留意されたい。

独立行政法人医薬品医療機器総合機構
審査センター長　矢守　隆夫

以下の記録においては、独立行政法人医薬品医療機器総合機構の担当者を「機構」、独立行政法人医薬品医療機器総合機構の専門家を「機構専門家」と言い、相談申込者である東北大学金属材料研究所側の担当者を「相談者」、相談申込者側の専門家を「相談者側専門家」と言う。

図 8　PMDA との医療機器開発前相談の議事録(一部抜粋)．

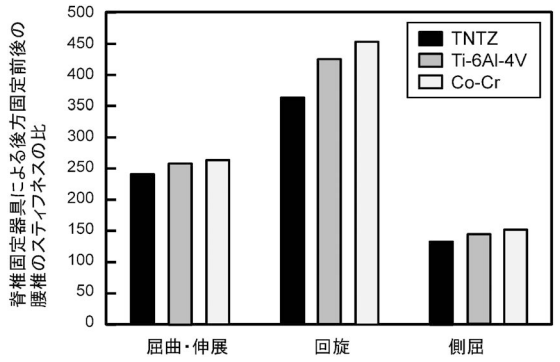


図 9　脊椎固定器具により後方固定した腰椎のスティフネスに及ぼすロッド材料の影響．(文献(28)を改変引用)

リスクを静的荷重負荷/疲労限比で評価すると，TNTZ 合金や Ti–6Al–4V 合金の方が Co–Cr 合金よりも損傷リスクが低くなると考えられている．一方，脊椎固定器具による固定範囲内における椎体骨粗鬆化については未だ実証検討がなされていないが，これは応力遮蔽により生じる障害であると考えられる．TNTZ 合金の応力遮蔽抑制効果については，これまでに髄内釘[29]や骨固定プレート[30]での検証が動物実験によりなされてきており，長期間埋入により材料のヤング率の違いによる骨改変に差が生じることが示されている．ただし，TNTZ 合金の応力遮蔽抑制効果が得られるのは長期間埋入したときであることに注意すべきである．**図10**に最近著者らが行った動物実験の結果を示す．ウサギの大腿骨に人工的に半欠損を導入し，厚さ0.5 mm の Ti–6Al–4V ELI 合金製プレート(Ti64–0.5t)，厚さ0.5 mm の TNTZ 合金製プレート(TNTZ–0.5t)および厚さ1.5 mm の TNTZ 合金製プレート(TNTZ–1.5t)で 3 週間固定後の欠損部における骨治癒状況である．厚さが同じで材料が異なる場合を比較すると，ヤン

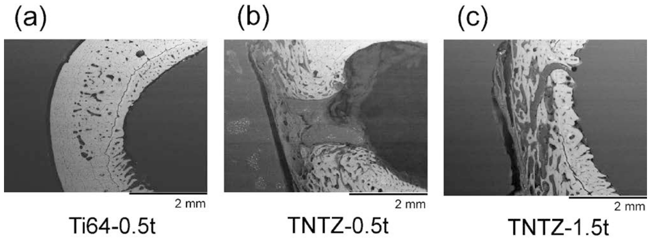


図10　ウサギ大腿骨に人工的に導入した半欠損部の，チタン合金製プレートによる３週間固定後の骨治癒状況；(a)厚さ0.5 mm の Ti64合金製，(b)厚さ0.5 mm の TNTZ 合金製，(c)厚さ1.5 mm の TNTZ 合金製．

グ率の高い Ti64–0.5t では骨治癒が完了しているのに対して TNTZ–0.5t では欠損が残存していることがわかる(図10(a)と(b))．さらに，同じ材料同士でプレート厚さが異なる場合を比較すると，厚さが大きい TNTZ–1.5t の方が TNTZ–0.5t に比べて欠損部の修復が進んでいることがわかる(図10(b)と(c))．以上の実験結果は，プレートの剛性が高い方が骨治癒の進行が速いことを示唆している．すなわち，骨に及ぼす影響の観点からすると，低ヤング率 β 型チタン合金を医療器具の材料として利用する恩恵は，骨改変(長期間の埋入)時に得られ，骨折治療や脊椎矯正などのように不安定な状態を安定化させる場合(短期間の埋入)には逆に不利になる可能性がある．したがって，低ヤング率 β 型チタン合金の医療器具への応用による実用化のためには，低ヤング率であることのメリット・デメリットを明確化し，適切な用途に使用することが重要であると考えられる．

5. おわりに

著者が TNTZ 合金に関する研究に携わるようになってから，今年で15年目となる．その間に TNTZ 合金の組織制御，特性改善，表面処理，医療器具開発など，基礎から応用に至るまでの幅広い研究を行ってきた．しかし，TNTZ 合金の実用化は未だ道半ばである．医療器具としての実用化には，認可の問題もあり簡単ではない．現在主流の Ti–6Al–4V ELI 合金でない別のチタン合金が敢えて使用されるには，少しの特性改善では難しく，大幅な特性改善か新たな機能付与などのブレークスルーが必要だと思われる．本稿では，TNTZ 合金の核心部分を著者なりに整理したつもりである．本稿が，今後の画期的な新合金開発や日本発合金製医療器具開発のきっかけになれば幸甚である．

本稿の執筆内容に関して，名古屋大学名誉教授　森永正彦博士からご助言をいただいた．ここに深謝の意を表する．

文　　献

(1) M. Niinomi, M. Nakai and J. Hieda: Acta Biomater., **8**(2012), 3888–3903.
(2) 日本金属学会：金属データブック 改訂４版，丸善，東京，2004.
(3) K. Narita, M. Niinomi, M. Nakai, J. Hieda and K. Oribe: J. Mech. Behav. Biomed. Mater., **9**(2012), 207–216.
(4) J.C.M. Li: Microstructure and Properties of Materials, World Scientific, (2000).
(5) T. Ahmed, M. Long, J. Silvestri, C. Ruiz and H.J. Rack: in: P.A. Blenkinsop, W.J. Evans, H.M. Flower (Eds.), Titan. '95 Sci. Technol., The Institute for Materials, Birmingham, UK, (1996), 1760–1767.
(6) D. Kuroda, M. Niinomi, M. Morinaga, Y. Kato and T. Yashiro: Mater. Sci. Eng. A, **243**(1998), 244–249.
(7) 森永正彦，湯川夏夫，足立裕彦：鉄と鋼，**71**(1985)，1441–1451.
(8) 森永正彦，湯川夏夫，足立裕彦：日本金属学会誌，**27**(1988)，165–172.
(9) L.C. Zhang and L.Y. Chen: Adv. Eng. Mater., **21**(2019), 1–29.
(10) 坂口信人，新家光雄，赤堀俊和，斎藤　卓，古田忠彦：日本金属学会誌，**67**(2003), 681–687.
(11) T. Ozaki, H. Matsumoto, S. Watanabe and S. Hanada: Mater. Trans., **45**(2004), 2776–2779.
(12) 多根正和：軽金属，**68**(2018), 286–293.
(13) E.S. Fisher and D. Dever: Acta Metall., **18**(1970), 265–269.
(14) M. Tane, S. Akita, T. Nakano, K. Hagihara, Y. Umakoshi, M. Niinomi and H. Nakajima: Acta Mater., **56**(2008), 2856–2863.
(15) 花田修治：日本金属学会会報，**25**(1986), 755–764.
(16) M. Morinaga: A Quantum Approach to Alloy Design: An Exploration of Material Design and Development Based Upon Alloy Design Theory and Atomization Energy Method, Elsevier, (2018).
(17) M. Niinomi: J. Mech. Behav. Biomed. Mater., **1**(2008), 30–42.
(18) H. Matsumoto, S. Watanabe and S. Hanada: Mater. Trans., **46**(2005), 1070–1078.
(19) T. Inamura, H. Hosoda, K. Wakashima and S. Miyazaki: Mater. Trans., **46**(2005), 1597–1603.
(20) 花田修治：まてりあ，**47**(2008), 242–248.
(21) 宮崎修一：まてりあ，**53**(2014), 197–208.
(22) 倉本　繁，西野和彰，斎藤　卓：軽金属，**55**(2005), 618–623.
(23) Y.L. Hao, M. Niinomi, D. Kuroda, K. Fukunaga, Y.L. Zhou, R. Yang and A. Suzuki: Metall. Mater. Trans. A, **33**(2002), 3137–3144.
(24) T. Akahori, M. Niinomi, M. Nakai and H. Tsutsumi: J. Biomech. Sci. Eng., **4**(2009), 345–355.
(25) 坂井孝司：まてりあ，**53**(2014), 139–142.
(26) 長谷川和宏：まてりあ，**53**(2014), 134–138.
(27) 織部一弥，長谷川和宏，北原　恒，田村貴志，成田健吾，山中　茂，仲井正昭，高久田和夫，新家光雄：まてりあ，**55**(2016), 142–146.
(28) R.N. Natarajan, K. Watanabe and K. Hasegawa: J. Biomech. Eng., **140**(2018), 091011.
(29) M. Niinomi, T. Hattori, K. Morikawa, T. Kasuga, A. Suzuki, H. Fukui and S. Niwa: Mater. Trans., **43**(2002), 2970–2977.
(30) N. Sumitomo, K. Noritake, T. Hattori, K. Morikawa, S. Niwa, K. Sato and M. Niinomi: J. Mater. Sci. Med., **19**(2008), 1581–1586.

★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★
仲井正昭
2005年11月　名古屋大学大学院工学研究科博士後期課程修了
2005年12月　日本学術振興会特別研究員(PD)
2006年４月　東北大学金属材料研究所助手
2010年12月　東北大学金属材料研究所准教授
2016年４月– 現職
専門分野：金属系生体材料，チタン合金
◎主にチタン合金の組織制御による力学的特性の改善や新合金開発に従事．
★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★

仲井正昭

新家光雄

特集

バイオアダプティブマテリアル～生体の仕組みに根差した金属系生体材料の設計～

細胞および骨基質の配向化機序に基づく骨機能化誘導

松垣あいら[*1)] 中野貴由[*2)]

1. はじめに

生体内では核酸やタンパク質，細胞が有機的に連携し相互作用し合うことで機能的な組織・臓器を構築し，個体レベルでの健全な生命活動を可能としている．疾患や損傷によりいったんその機能が破綻すると，組織の修復には，生体機能を回復させるための医療デバイスが大きな力を発揮する[1]．人工材料である医療デバイスが生体本来の機能発現を導くためには，細胞やそれをとりまく環境に応じて生体組織・臓器が形づくられる仕組みを理解した上で，その機序を人為的にコントロールし，積極的に発動させる材料の創製が求められる．とりわけ，硬組織である骨は有機・無機成分および多数の細胞要素が，複雑に絡み合いながら作り上げられた生体組織であり，荷重支持といった力学的機能のみならず，生体内でのカルシウムやリン代謝を担う動的な臓器としても機能する[2]．筆者らは，こういった骨の高度な機能が，その配向化微細構造に基づいて発揮されることを見出し，骨機能化をもたらす生物学的機序の理解，およびその仕組みを誘起するための材料創製を目指し，次世代の生体材料研究に取り組んでいる．本稿では，骨機能化のための配向性形成について，現在明らかになりつつあるその細胞・分子機序，およびそれに基づく骨医療デバイスの創製に関する筆者らの最新の知見について紹介する．

2. 骨の配向化微細構造に基づく機能発現

骨に代表される生体硬組織は，生物が無機化合物を形成するバイオミネラリゼーションのプロセスに基づき，精緻な階層構造を有する有機/無機複合化材料として構成される．骨再建プロセスでは，失われた骨の量的充填とともに，構造的な回復が鍵を握り，NIH（米国国立衛生研究所；National Institutes of Health）により骨密度以外の骨強度を支配する因子として提唱された「骨質」の概念を考慮する必要がある[3]．筆者らは，材料工学的立場から骨研究に取り組むことで，コラーゲン線維/アパタイト結晶からなる骨組織が示す特有の3次元配向化構造が，必要な方位に特異的な力学機能の発揮を可能とする重要な骨質因子のひとつであることを見出している（**図1左**）[4)-6)]．これは，コラーゲンおよびアパタイトが，ともに高度な力学的異方性を示す構造材料であることに由来する．コラーゲン線維は，3重らせん構造をもつコラーゲン分子が自己組織化したナノスケールの線維状構造体であり，線維方向に沿った強い力学特性を示す．正常骨では，こういった配向化コラーゲン線維上での結晶のエピタキシャル成長に基づき，アパタイト結晶 c 軸はコラーゲン線維に沿った優先配向性を示す．アパタイトは六方晶系の結晶構造に由来する力学的異方性を発現することから，骨はそのコラーゲン線維/アパタイト結晶配向性構造に基づいた力学特性を発揮する．

興味深いことに，骨はその種類や解剖学的部位に応じて異なる配向性を示す．図1右には，尺骨，頭蓋骨，下顎骨，腰椎骨の皮質骨部における代表的な3方向でのアパタイト結晶 c 軸配向度を示す[4]．尺骨や腰椎骨では重力方向に基づいた一軸的荷重負荷に応じて，骨長軸・頭尾軸に沿った優先配向性を示す．一方，下顎骨は咀嚼荷重に応じた配向性分布を示し，応力分布と骨配向性の密接な関係性を示唆している．しかしながら，こういった骨配向性の自発的な再構築は困難であり，その再生は骨密度に大幅に遅れて回復する[7]．そのため骨微細構造の再生を人為的に誘導する医療デバイス創製が必要不可欠であり，材料工学を基軸としつつ，細胞生

* 大阪大学大学院工学研究科；1)助教 2)教授（〒565-0871 吹田市山田丘2-1）
Bone Functionalization Based on the Cellular Mechanisms Controlling the Ordered Arrangement of Cells and Bone Matrix Microstructure; Aira Matsugaki and Takayoshi Nakano（Graduate School of Engineering, Osaka University, Suita）
Keywords: *biomedical device, collagen/apatite, surface topography, bone cells, cell signaling, intercellular communication, metallic implant*
2020年7月9日受理[doi:10.2320/materia.59.594]

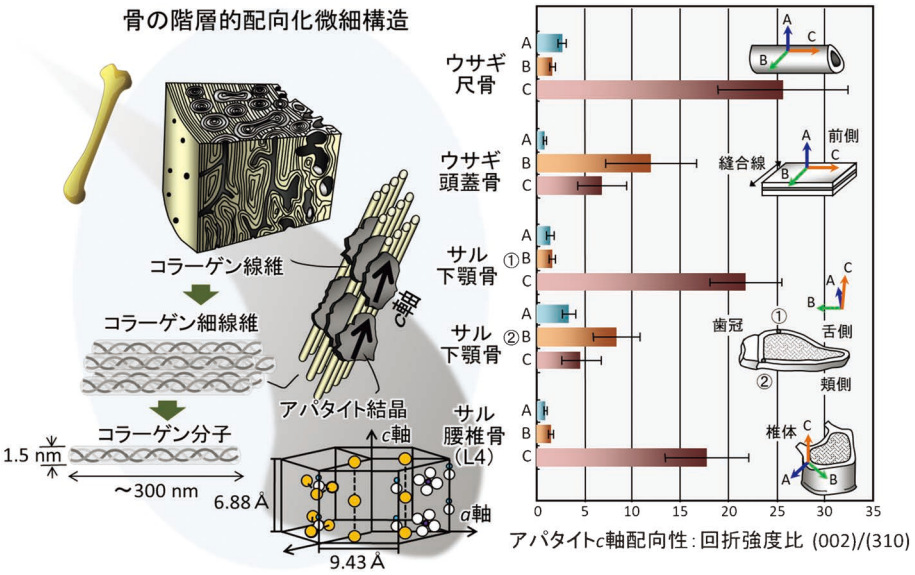


図1　(左)骨は主にコラーゲン線維/アパタイト結晶からなる配向化微細構造を有する．(右)骨のアパタイト配向性は，解剖学的部位や種類に応じて異なる配向化方向・配向度を示し，骨に負荷される応力分布と密接に関係する．(文献(4)より改変引用.)(オンラインカラー)

物学的観点との融合に基づいた生体組織制御の方法論と，それに基づく材料創製が求められる．とりわけ，材料を起点とした細胞接着の異方性制御に基づき，材料の特性を生物シグナルへと転換し，生体骨の機能化を誘導する新しい金属生体材料開発の指針が見出されてきた．

3.　医療デバイス材料表面への細胞接着制御に基づく骨配向化誘導

細胞接着は人工材料と生体との相互作用の起点となり，その後の組織再生を支配する最重要因子のひとつである[8]．再生骨組織の機能発現には，材料表面から骨の細胞へと働きかけ，その接着挙動の能動的制御が求められる．骨アパタイトの秩序だった結晶学的配向性を作り出すには，個々の細胞配列パターンの制御が必要不可欠である[9][10]．骨芽細胞はコラーゲン産生とその後の石灰化プロセスを担い，その配列化度は基板材料の異方性の度合と相関し，さらに，骨配向性の強さは，骨芽細胞配列化度と相関する[11]．すなわち，基板の異方性を材料工学的手法に基づき制御することで，任意の骨配向性を得ることが可能となる．材料表面への異方性の導入は，金属単結晶の塑性変形[12][13]や超高速レーザ加工技術[14]，応力場[15]の制御によって可能であり，細胞制御に基づく骨基質配向化方向や配向度の自在な制御を実現している．いずれの場合も，材料の異方性表面形状，たとえば一方向性溝構造が，骨芽細胞の優先配列化をもたらし，アパタイトが配向化した再生骨を短期間で形成可能であることが期待される．実際，異方性材料を足場とすることで，iPS細胞(人工多能性幹細胞：induced pluripotent stem cells)を用いて，幹細胞から直接配向化骨の創製をも可能である[16]．こうした材料による骨配向化誘導は，材料―生体界面において細胞構成要素のサイズに応じてマルチスケールで統制されている．すなわちナノメートルスケールの分子(核酸やタンパク質)からマイクロメートルスケールの細胞内小器官(アクチン骨格や接着斑)を個別に考慮した細胞制御の方法論確立が必要である(**図2**)．たとえばリソグラフィーによるナノオーダーの表面微細加工は，細胞サイズよりもはるかに極微細な起伏であるものの，細胞表面の接着分子へとダイレクトに働きかけることで，細胞伸展方向を制御する．さらには，インテグリン(細胞接着を司る司令塔的タンパク質)の集合化を制御し，コラーゲン分子の特異的アミノ酸配列を認識することで，コラーゲン基質配向化を制御する．さらに細胞サイズへと表面形状を拡張すると，エレクトロスピニング法による直径10 μm程度のファイバー形成や金属単結晶の塑性変形に基づく数十 μm程度の表面起伏は，細胞膜構造や細胞骨格形成に対して3次元的に作用し分子シグナルを発動することで細胞の一方向配列化，ひいては骨基質の配向化を達成可能である[17]．近年では，3次元形状の任意制御による医療デバイスのカスタム化に欠かせない技術となった金属積層造形法によるサブミリオーダーの表面起伏制御により，マクロには体液の流入を可能としデバイス表面への細胞成分の誘導を促し，さらには細胞体サイズに合致した表面形状に基づく細胞配列化を誘導可能であることが示された[18]．こういった配列化骨芽細胞による骨配向化は，表面形状やそのスケールに応じて遺伝子レベルから緻密な統制のもとに発現することが判明してきた．

4.　材料を起点とした細胞配列化制御が骨基質配向化をもたらす仕組み

材料工学的方法論に基づいた細胞の一方向配列化制御は，

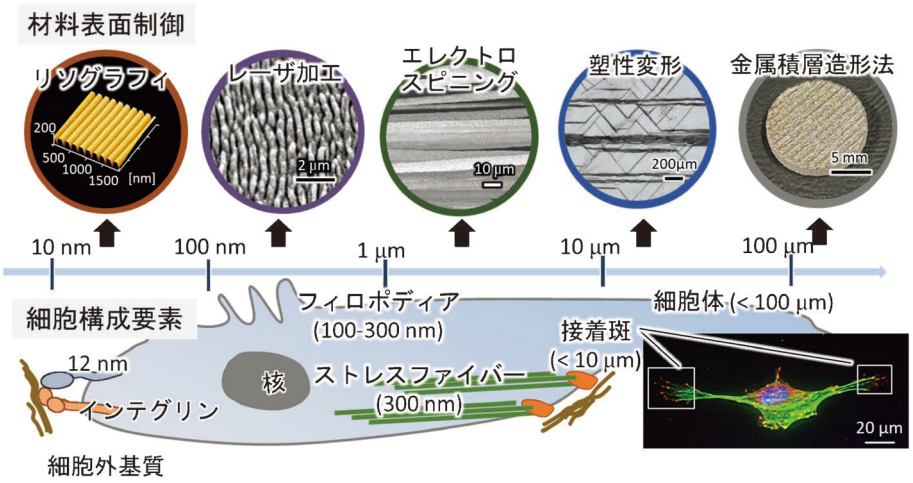


図 2　ナノメートルスケールの分子(核酸やタンパク質)からマイクロメートルスケール(接着斑や細胞体)まで，細胞構成要素のスケールに応じた細胞配列化のための材料学的方法論．

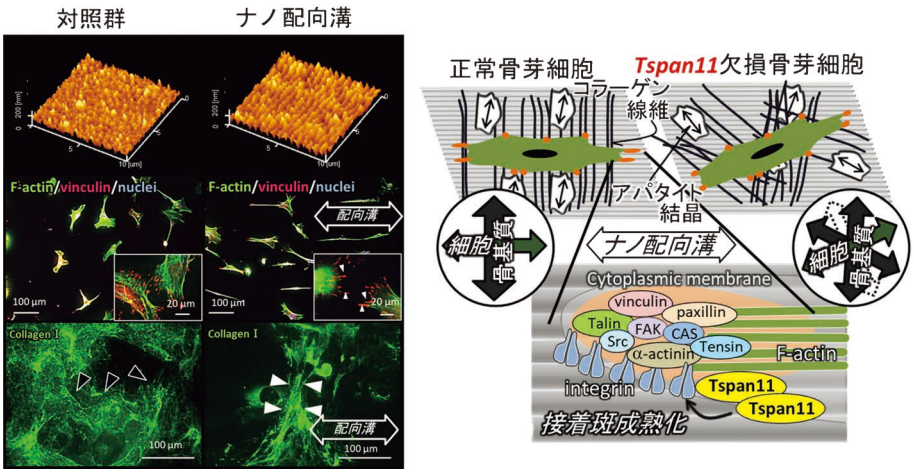


図 3　(左)チタン合金表面へのナノ配向溝導入(上段；SPM 像)による骨芽細胞(中段)・骨基質配向化誘導(下段)．(右)Tspan11 による接着斑成熟化を介した骨配向化機構．正常な骨芽細胞は，ナノ配向溝に対して配列化する一方で，細胞方向に垂直に骨基質を形成する．Tspan11 欠損状態においては，溝方向への接着斑成熟化が妨げられ，直交性の骨基質形成に破綻をもたらす．(文献(19)より改変引用．)

インテグリンを介した細胞と基質との接着機構や細胞内小胞輸送プロセス(細胞内にてコラーゲン分子を合成し，小胞形成により細胞外へと分泌，線維形成する過程)に基づき，緻密にその配向性が形成される可能性が示唆された．一方，ナノメートルスケールの一方向溝形状は，細胞接着の特異性を生み出し，従来の科学的常識を覆して細胞方向に垂直に骨基質を形成する．筆者らはこういった特異垂直化現象を見出すとともに，平行/垂直配向化が遺伝子のはたらきによりコントロールされることを発見し，骨配向化の分子機序理解は飛躍的な進展をみせている．

超短パルスレーザによる高速溝加工 LIPSS(レーザ誘起周期表面構造)を用いることで，Ti–6Al–4V 合金表面にナノメートルスケールの配向溝形状(幅およそ500 nm，高さ250 nm)を付与すると，骨芽細胞は配向溝に沿って配列化する．驚くべきことに，ナノ配向溝上で配列化した骨芽細胞は，細胞配列に直交する方向へコラーゲン/アパタイト配向化基質を形成することが見出された[14]．マイクロアレイ法による網羅的遺伝子発現解析の結果，こういった特異垂直配向化には，*Tspan11*(Tetraspanin11)遺伝子が制御する接着斑成熟化のナノ構造依存性が関与することを発見した[19](**図 3**)．こうした知見は，人工関節等の医療デバイス表面への微細構造付与により，インプラント周囲に形成する新生骨組織の微細構造を自在に制御できる可能性を示している．さらには，これまでまったく未知であった配向化機序の解明は，最終的には骨疾患治療の新たな方法論や，材料から積極的に細胞シグナルを誘導，骨配向化の発現を自発的に促すような材料創出につながる可能性を秘めている．

一方でデバイス周囲への骨形成が達成されると，骨の健全化には最大主応力ベクトルをホストボーンへ連続的に伝達することが不可欠となる．材料表面への配向溝構造の設計によ

り，溝内への配向化骨誘導を可能とするインプラントとして，電子ビーム積層造形法により骨配向化誘導を期待できる人工股関節(2018年薬事承認)[20]，および切削での表面加工により骨配向化の誘導が期待できる歯科インプラント(2017年薬事承認・上市化)[21]を提案しており，いずれの場合も，骨中のオステオサイトによる応力感受を起点とした細胞間相互作用に基づき配向化骨形成を誘導することが期待される．骨に負荷された応力は，骨内部に張り巡らされた，体液の流路である骨細管ネットワーク内の流体流動をオステオサイト突起表面で感受，骨芽細胞や破骨細胞へと生化学シグナルを伝達することで骨の微細組織形成を調整している[22][23]．こうした骨健全化のための細胞間相互作用は，正常な細胞機能が連携して骨異方性構築をもたらす生物システムを意味しており，一方で細胞の異常化は重篤な骨劣化をもたらし，その多くが骨の異方性微細構造破綻に起因することが近年明らかになりつつある[24]．

5.　細胞間相互作用制御に基づく配向化誘導

がんは正常細胞の遺伝子変異により異常化した細胞集団がもたらす疾患であり，その多様性と他臓器への転移能の高さを最大の特徴とする．骨はその主要な転移標的臓器であり，造骨性がん転移骨では骨形成過剰による高骨密度を示すにもかかわらず非常にもろく，易骨折性の難治病態を示す．こういったがん転移は現在の骨医学において最も大きな課題の一つであり，転移骨における骨機能破綻の機序は依然として不明であり，課題解決の糸口さえ得られていない．一方で既存のがん医療は骨密度のみに対応しており，がん転移による骨機能異常の本質理解には至っていない．こうした中，筆者らは，結晶学的アプローチを駆使することで，ベクトル量としての結晶配向性の低下が，がん転移による骨折リスク上昇の重要因子であることを発見した[25]-[27]．造骨性転移を示す前立腺がん骨転移マウスモデルにおいて，骨長軸に沿ったコラーゲン線維走行/アパタイト結晶 *c* 軸配向性の顕著な乱れとともに，それに起因した力学機能の低下が見出された(**図4**)．すなわち，がん転移による骨の脆弱化が，従来の治療指標である骨密度ではなく，骨配向性の低下によりもたらされることを意味している．このとき，正常骨では骨表面に一層に配列した骨芽細胞の規則的な作用により秩序だった骨形成が行われた一方，造骨型転移骨では，骨内膜・外膜の両側で分化亢進し積層化した骨芽細胞による無方向性の骨形成が生じており，骨芽細胞配列化不全が転移骨の配向性低下をもたらした可能性が示された[25]．

がん細胞はいかにして骨芽細胞配列破綻をもたらしたのか？筆者らは，*in vitro* 異方性がん転移モデルを構築し，そのダイナミクス解明にアプローチしている．筆者らの確立した異方性共培養システムをがん転移モデルへと拡張し，がん細胞存在下での骨芽細胞配列化への影響に系統的に取り組むことで，がん骨転移の新たな機序を見出している．がん細胞は可溶性タンパク質の産生を介して間接的に骨芽細胞へと働きかけることで，骨形成や骨溶解に関わる細胞増殖・分化を調整した．一方でがん細胞との直接接触が骨芽細胞配列化低下を招き[28]，その主要因は細胞間のギャップジャンクションを介した分子レベルの相互作用による細胞骨格制御に基づく[29](**図5**)．こうした発見は，材料工学的観点からのがん研究の必要性を顕在化し，がん転移骨における骨配向化異常のメカニズムの解明に基づき，骨配向性を基軸にしたがん転移の抑制，創薬や骨がん転移に対応したカスタム金属人工関節材料の開発にダイレクトにつながることが期待される．

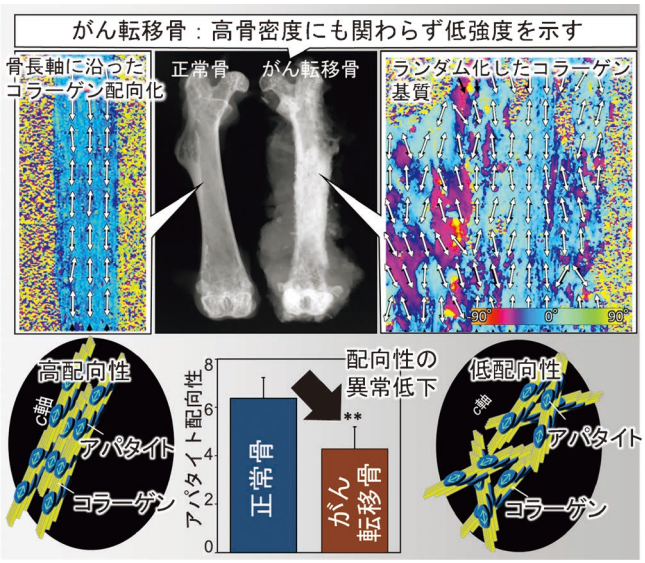


図4　がん転移による骨の脆弱化は，従来の治療指標である骨密度ではなく，コラーゲン基質(上段)/アパタイト結晶(下段)配向性の低下によりもたらされる．(文献(25)より改変引用.)

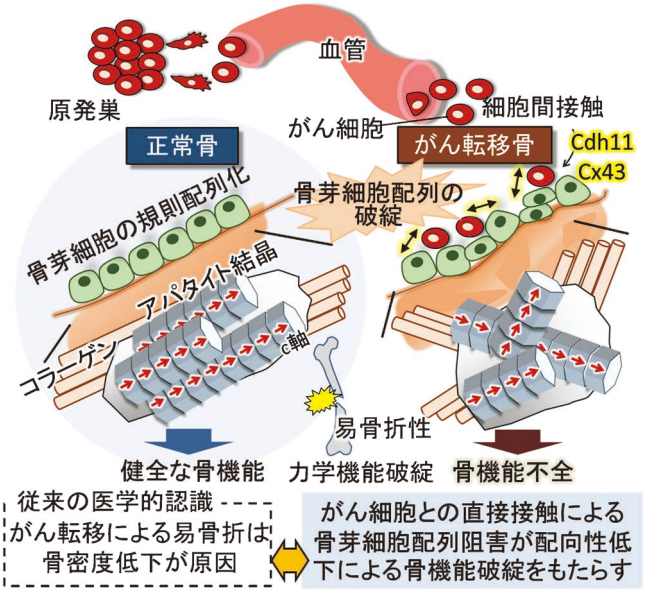


図5　がん細胞との細胞間結合が骨芽細胞配列低下を招き，ひいてはがん転移による骨配向化破綻による機能不全を招く．(文献(29)より改変引用.)

6. 骨配向化アダプティブマテリアルが切り拓く次世代骨医療

本稿では，分子や細胞レベルで骨配向性が形づくられる生物学的仕組みの理解に基づいた骨医療デバイス開発の現状について，筆者らの最新の知見を交えて紹介した．次世代の骨医療デバイスには，人工材料でありながら，生体内の仕組みに取り込まれ，骨機能化発現の生物学的機序を誘導する特性が求められる．さらに近年では，生きた細胞やタンパク質を適材適所に3次元配置することで生体組織や臓器模倣構造体を作製するバイオプリンティング技術の研究も進められ，金属医療デバイスと複合的に用いることで，再生医療分野への効果的な応用が期待されている．バイオプリンティング技術は細胞・タンパク質の配置制御により，応力応答可能な配向化ミニ骨臓器の創製を可能とする[30]とともに，応力を起点として骨配向化を司る生物シグナルの同定にもつながる[31]．こういった金属材料や細胞のプリンティング技術を駆使した細胞制御は骨機能化誘導のための医療デバイス創出につながるのみならず，生体内で異方性が形成される仕組み解明にもつながることが期待され，創薬や医療デバイス開発に向けたその応用的展開が見込まれる．骨配向化のための生物学的機序は他臓器との関連を含めて多岐にわたるものの，近年筆者らにより見出された複数の配向化制御因子は，その徐放システムの確立や細胞・遺伝子医療との組み合わせにより，骨配向化アダプティブマテリアルの実現に向けた幅広い展開が期待される(**図6**)．

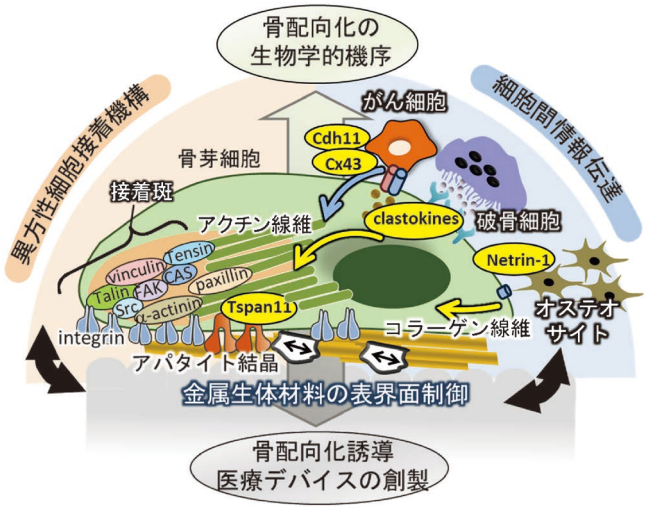


図6　骨配向化は材料を起点とした異方性細胞接着機構および細胞間での情報伝達により，複数の配向化因子の関与のもとで達成される．配向化に基づく骨の機能化誘導のためには，こういった生物学的仕組みの理解に基づいた骨医療デバイス開発が求められる．(オンラインカラー)

7. おわりに

骨代替材料は，いまや単に骨を置換する役割を担うのではなく，材料を起点として生物が持つ特性を引き出し，生体機能化を誘導する，生体組織の再建に必要不可欠な機能性材料として次世代骨医療を切り拓く大きな役割と期待を担う．合金・形状設計～人工材料/生体表界面制御～細胞・分子応答まで，材料科学と生物学の連続的な融合により構築される「バイオマテリアル科学」を基盤として，バイオアダプティブマテリアルの創出が先端医療革新実現の鍵を握ることは間違いない[32]．一例として，超多成分系元素からなるBioHEA(生体用ハイエントロピー合金)の開発は，材料科学に基づく合金設計と細胞―材料界面反応の人為的制御の融合により，元素選択的に細胞接着の分子シグナルを発動することで，細胞制御をも可能とする[33]-[35]．生体機能を生み出す細胞・分子や遺伝子のはたらきを人為的に促すような，バイオアダプティブマテリアルの創製は，溶解性や力学的特性，結晶学的組織といった金属材料ならではの特長を活かしつつ，融合的アプローチから次世代医療への展開が大いに期待される．

本稿で紹介した研究の一部は，日本学術振興会科学研究費補助金基盤研究(S)「骨異方性誘導のための「異方性の材料科学」の構築」(研究代表者：中野貴由)(平成30(2018)年度～令和4(2022)年度)の支援により実施された．ここに謝意を示します．

文　献

(1) 山岡哲二，大矢裕一，中野貴由，石原一彦：バイオマテリアルサイエンス　第2版-基礎から臨床まで，東京化学同人，(2018).
(2) E. F. Morgan, G. L. Barnes, T. A. Einhorn: Osteoporosis (Forth Edition), (2013), 3–20.
(3) NIH Consensus Development Panel on Osteoporosis Prevention, Diagnosis, and Therapy, Osteoporosis prevention, diagnosis, and therapy, JAMA, **285**(2001), 785–795.
(4) T. Nakano, K. Kaibara, Y. Tabata, N. Nagata, S. Enomoto, E. Marukawa and Y. Umakoshi: Bone, **31**(2002), 479–487.
(5) 中野貴由，石本卓也，松垣あいら，小笹良輔：BIO　Clinica, **35**(2020), 651–657.
(6) T. Nakano, K. Kaibara, T. Ishimoto, Y. Tabata and Y. Umakoshi: Bone, **51**(2012), 741–747.
(7) T. Ishimoto, T. Nakano, Y. Umakoshi, M. Yamamoto and Y. Tabata: J. Bone Miner. Res., **28**(2013), 1170–1179.
(8) 石原一彦，塙　隆夫，前田瑞夫(監修)：バイオマテリアルの基礎，日本バイオマテリアル学会，(2010).
(9) 當代光陽，石本卓也，松垣あいら，中野貴由：まてりあ，**56**(2017), 584–588.
(10) 松垣あいら，中野貴由：まてりあ，**55**(2016), 579.
(11) A. Matsugaki, Y. Isobe, T. Saku and T. Nakano: J. Biomed. Mater. Res. A, **103**(2015), 489–499.
(12) A. Matsugaki, G. Aramoto and T. Nakano: Biomaterials, **33**(2012), 7327–7335.
(13) A. Matsugaki and T. Nakano: Crystals, **6**(2016), 73.
(14) A. Matsugaki, G. Aramoto, T. Ninomiya, H. Sawada, S. Hata

and T. Nakano: Biomaterials, **37**(2015), 134–143.
(15) A. Matsugaki, N. Fujiwara and T. Nakano: Acta Biomater., **9**(2013), 7227–7235.
(16) R. Ozasa, A. Matsugaki, Y. Isobe, T. Saku, H–S Yun and T. Nakano: J. Biomed. Mater. Res. A, **106**(2018), 360–369.
(17) S. Lee, A. Matsugaki, T. Kasuga and T. Nakano: J. Biomed. Mater. Res. A, **107**(2019), 1031–1041.
(18) 松垣あいら，中野貴由：スマートプロセス学会誌，**9**(2020), 164–168.
(19) Y. Nakanishi, A. Matsugaki, K. Kawahara, T. Ninomiya, H. Sawada and T. Nakano: Biomaterials, **209**(2019), 103–110.
(20) GS－Taperステム（医療機器製造販売承認番号：22900BZX00364000），http://www.info.pmda.go.jp/downfiles/md/PDF/510462/510462_22900BZX00364000_A_01_01.pdf
(21) FINESIA BLフィクスチャー ファイナフィックス(医療機器承認番号：22800BZX00034000)，http://www.info.pmda.go.jp/downfiles/md/PDF/230934/230934_22800BZX00037000_A_02_03.pdf
(22) 中野貴由：バイオマテリアル―生体材料―，**35**(2017), 10–13.
(23) 松垣あいら，中野貴由：現代化学，**580**(2019), 56–59.
(24) R. Ozasa, T. Ishimoto, S. Miyabe, J. Hashimoto, M. Hirao, H. Yoshikawa and T. Nakano: Calc. Tissue Int., **104**(2018), 449–460.
(25) A. Sekita, A. Matsugaki and T. Nakano: Bone, **97**(2017), 83–93.
(26) A. Sekita, A. Matsugaki and T. Nakano: Mater. Trans., **58**(2017), 266–270.
(27) A. Sekita, A. Matsugaki, T. Ishimoto and T. Nakano: J. Struct. Biol., **197**(2016), 260–270.
(28) Y. Kimura, A. Matsugaki, A. Sekita and T. Nakano: Sci. Rep., **7**(2017), 44824.
(29) A. Matsugaki, T. Harada, Y. Kimura, A. Sekita and T. Nakano: Int. J. Mol. Sci., **19**(2018), 3474.
(30) A. Matsugaki, T. Matsuzaka, A. Murakami, P. Wang and T. Nakano: Int. J. Bioprint., **6**(2020), 293.
(31) A. Matsugaki, D. Yamazaki and T. Nakano: Mater. Sci. Eng. C, **108**(2020), 110391.
(32) 日本学術会議　第24期学術の大型研究計画に関するマスタープラン（マスタープラン2020），計画番号134，バイオマテリアル国際先導研究拠点の構築
(33) M. Todai, T. Nagase, T. Hori, A. Matsugaki, A. Sekita and T. Nakano: Scr. Mater., **129**(2017), 65–68.
(34) T. Hori, T. Nagase, M. Todai, A. Matsugaki and T. Nakano: Scr. Mater., **172**(2019), 83–87.
(35) T. Nagase, Y. Iijima, A. Matsugaki, K. Ameyama and T. Nakano: Mater. Sci. Eng. C, **107**(2020), 110322.

★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★

松垣あいら
2013年９月　大阪大学大学院工学研究科博士後期課程修了
2013年10月– 大阪大学大学院工学研究科　特任助教
2020年７月– 現職
専門分野：生体材料学・細胞生物学
◎細胞・遺伝子の観点から骨配向化機序解明を目指し，生物学的仕組みに根差した骨機能化誘導のための生体材料開発に精力的に取り組んでいる．

★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★

松垣あいら

中野貴由

特集

バイオアダプティブマテリアル～生体の仕組みに根差した金属系生体材料の設計～

材料―組織間の相互作用の理解に基づく生体吸収性金属材料の生体内分解特性評価

山　本　玲　子*

1. はじめに

生体は，体内に侵入した異物に対して防御反応を示す．治療目的で用いられる医療用材料であっても，生体にとっては異物であり，生体の防御反応は避けられない．本稿では，医療用材料に対する生体反応について俯瞰し，材料が体内に残存するリスクについて述べる．さらに，このリスクを避けるために近年研究開発が進められている生体吸収性金属材料について，生体内における腐食挙動と生体安全性を概説する．

2. 医療用材料と生体反応

材料が体内に埋植されると，その直後から生体は様々な応答反応を示す．急性期には血栓形成や炎症反応を生じ，慢性期には組織反応(被包化)や石灰化反応を生じる．さらに埋植後数年～数十年を経て，がん化することもある．医療用材料では，リンパ腫発生リスクによる人工乳房および組織拡張器(ティッシュ・エキスパンダー)の自主回収が記憶に新しい†(1)．医療用材料ではないが，アスベストによる肺がんならびに中皮腫の発生(2)も，材料による異物性発がんの例である．

埋植材料による異物反応の概要を図1に示す．異物反応の強さは，材料の種類によって異なる．体内に埋植された材料の多くは，埋植に伴う組織の損傷や，材料表面における補体系・凝固系の活性化により炎症反応を生じる．補体系は血漿や組織中に高濃度で存在する20種以上のタンパク質が協働する仕組みであり，活性化すると膜侵襲複合体(membrane attack complex: MAC)を形成して異物の細胞膜に穴をあけたり，食細胞による異物の取り込み(貪食)を促進したり(オプソニン化)，血液中から食細胞を呼び寄せる(アナフィラトキシン)役割を果たす(3)．埋植材においては，材料表面に非特異的に吸着した抗体タンパク質や，材料表面のヒドロキシ(OH)基・アミノ(NH_2)基と補体タンパク質が結合することにより活性化すると考えられている(4)．

内因系凝固反応は，カリクレイン，高分子キニノーゲン，第XII因子の働きにより開始される．これらのタンパク質分子が材料表面に吸着すると，血漿中に存在している状態よりも効率的に反応が進行するため，材料表面で血液凝固反応が生じると推測されている(4)．反応の結果産生されるブラジキニンは炎症メディエーター(媒介物質)の一つである．さらに，材料表面に吸着したタンパク質を介して血小板が結合，活性化すると血栓形成因子と共に凝固系活性化・白血球走化性因子を放出する．

埋植部位にてブラジキニン等の炎症メディエーターやアナフィラトキシンが放出されると，血管壁の透過性が増し，血液中から好中球や単球などの食細胞が集まってくる．そこで単球はマクロファージに分化し，異物を貪食，細胞内のリソソームにて分解処理する．オプソニン化によりマクロファージは活性化し，貪食能が亢進する．さらに，特定のタンパク質(インターフェロンγ)やリポ多糖(lipopolysaccharide: LPS)により超活性化されると，リソソーム酵素や活性酸素を細胞外に放出する．これらの酵素や活性酸素は，埋植材だけでなく周辺組織にも損傷を与える．一方，好中球は血管内では不活性状態であるが，血管壁を通り抜ける際に活性化され，貪食能が亢進しリソソーム酵素・活性酸素を放出できる

* 物質・材料研究機構　機能性材料研究拠点；上席研究員(〒305-0044 つくば市並木1-1)
Evaluation of Biodegradability of Bioabsorbable Metallic Materials Based on the Understanding of Material–tissue Interaction; Akiko Yamamoto(Managing researcher, Research Center for Functional Materials, National Institute for Materials Science, Tsukuba)
Keywords: *bioresorbable metals, magnesium alloys, foreign body reaction, biocompatibility, biocorrosion, gas cavity formation, pseudo tissue*
† アラガン社のインプラントのうち，Biocellというザラザラとした表面構造を有するものが該当する．インプラント埋植後平均9年で発生するが，発症リスクは0.030–0.045%と低いため，摘出手術は推奨されていない．
2020年6月24日受理[doi:10.2320/materia.59.600]

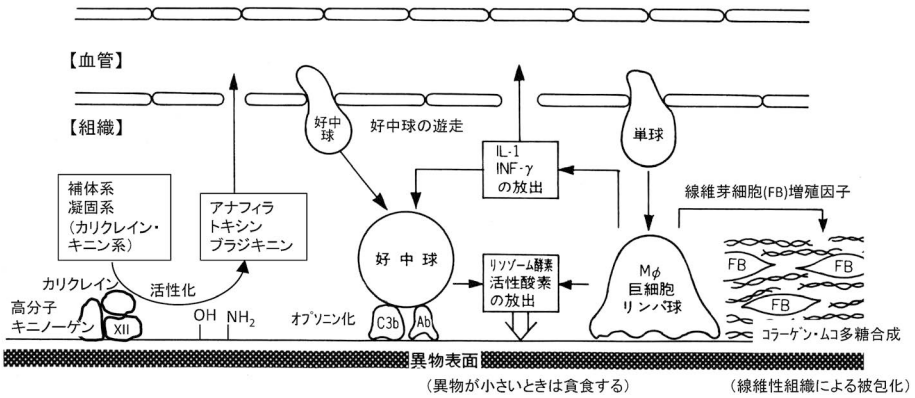


図1　埋植材料による異物反応(文献(5)より一部改変).

状態にある(3).

好中球およびマクロファージの働きにより異物が処理されると，炎症反応は終焉し，損傷した組織の修復過程(組織反応)に移行する．マクロファージは線維芽細胞増殖因子と呼ばれるタンパク質を産生し，線維芽細胞を招き寄せる．線維芽細胞の働きにより細胞外マトリックス(主としてコラーゲンやムコ多糖)が産生され，それに伴い毛細血管が再生し，やがて実質細胞(元の組織の細胞)の構築に至る(4)．このとき形成される組織は，必ずしも当初の組織と同一ではない．損傷が軽微で炎症反応が弱かった場合は当初に近い組織が再生されるが，損傷が大きく炎症反応が強かった場合には，線維性組織が残り瘢痕となる．修復過程で線維性組織が過剰に増殖すると，肥厚性瘢痕や良性腫瘍であるケロイドとなる(4)．

埋植材の多くは炎症反応によって消滅することはなく，線維性組織により被包化された状態で安定化する．このときの被包化組織の厚さは，炎症反応の強さや生体内における力学的刺激に依存すると考えられている．例えば人工血管では，生体血管との吻合部において，拍動により絶えず荷重負荷を受けるため，埋植期間の増加に伴い被包化組織が厚くなる(4)．組織反応の強さは埋植部位にも依存し，高分子微小球の注入試験では，皮下組織＞筋肉＞肝臓＞腎臓＞脾臓の順であった(5)．また，線維芽細胞の少ない腹腔内や水晶体内では，被包化は生じにくい(4)．組織反応は埋植材の面積が大きいほど強く，断面は円形よりも三角形のように組織との接触部位が鋭角の方が強い(5)．埋植材を覆う線維性組織は，硬組織への埋植でも形成される．例えば，ステンレス鋼では埋植1か月後には骨との間に35 μm 程度の線維性被膜を有したが，埋植期間の増加と共に減少し，埋植後6か月では5～10 μm であった(6)．

3.　材料の体内残存リスク

人工関節や人工血管等の生体組織を置換する材料では，埋植後終生体内に残存し，目的とする機能を果たす必要がある．しかし，初期の炎症反応・組織反応が収まっても，異物の影響はゼロではない．先述したように，人工血管では埋植期間の増加に伴い吻合部が肥厚化し，血管径によっては狭窄を生じる．人工関節では，荷重負荷分布の変化に伴い骨の硬化や吸収が生じる．骨組織の維持には荷重負荷が不可欠である．骨の弾性率は皮質骨で10～30 GPa(7)であり，材料の弾性率(ステンレス鋼で約200 GPa，チタン合金で約110 GPa)とは大きく異なる．そのため，負荷荷重を金属のみで支えるストレスシールディングが生じ，骨量が減少する．さらに，人工関節では術後数か月～1年程度での早期感染と，術後数年経過してからの遅発性感染の発生例がある．人工関節周囲で生じた感染の多くは病巣掻爬・洗浄では解決せず，人工関節の除去・再置換が必要となる(8)．

生体組織中の防御反応は主として組織中に滞在するマクロファージが担っている．異物である細菌が侵入すると，貪食し細胞内で分解，その一部を免疫細胞(ヘルパーT細胞)に抗原提示し，免疫応答を開始させる．すると，毛細血管から白血球や単球が現れ，炎症反応を生じ細菌を除去する．しかし，埋植材は生体組織ではないため血管はなく，白血球・単球が到達しにくい．また，埋植材に対する炎症反応が続くと，マクロファージの細菌への対応力は低下する．このような状況は，細菌にとって好条件である．材料表面に粘着・増殖して感染叢を形成し，バイオフィルムと呼ばれる菌体外多糖類を含む細菌集合体が形成されると，抗菌薬はその内部に浸透できず，かつ菌表面の抗原が隠れてしまうため免疫反応での除去も困難であり，埋植材の抜去が必要となる(9)．

医療用材料ではないが，体内に材料が滞留するリスクは無機繊維材料による肺障害事例でも示されている．天然の鉱物繊維であるアスベストは吸引により肺組織の線維化を生じ，20～30年を経て中皮腫や肺がんを生じる(2)ことは述べた．アスベストおよびその代替品である人造鉱物繊維(Man-made mineral fiber: MMMF)について，ラット肺への吸入暴露試験を実施した結果，アスベストと一部のMMMFは肺に残留し腫瘍を形成したが，肺内での半減期が短い繊維では腫瘍形成は認められなかった(10)．吸引された材料が肺胞マクロファージに貪食されず肺内に留まると，呼吸に伴う肺の収縮・拡張により機械的刺激が生じ，炎症反応が遷延化し線維性組織が肥厚化する．この状態が長期間継続することにより，発がん過程を経て腫瘍形成に至ると考えられる．現在では，動物試験での肺内半減期が短い材料が，安全性の高い生

体溶解性繊維として上市されている．

材料が分解・除去されず長期間留まることのリスクは，生体内だけではない．マイクロプラスチックによる海洋汚染や，有機フッ素化合物(Perfluorooctanesulfonic acid: PFOS, Perfluorooctanoic acid: PFOA 等)の水・土壌汚染問題は，環境中で分解されない材料が生態系に取り込まれ体内に蓄積し，安全を脅かす例である．

医療用埋植材の中でも骨接合材や血管ステント等では，埋植時には損傷した組織の保持が求められるが，組織が修復した後には不要となる．しかし，埋植材の抜去には手術が必要であり，その負担が大きい場合や抜去が困難な場合は埋植材を体内に残したままにする．その場合，埋植材による治療ベネフィットは終了し，リスクのみが存続する．血管ステントでは，拍動による機械的刺激のために炎症が遷延化し，血管細胞の過剰増殖による再狭窄が懸念される．骨接合材でも，ストレスシールディングによる骨吸収や感染の恐れがある．したがって，不要になった埋植材は抜去すべきであり，それが叶わない部位や再手術の負担を避けるためには，体内で徐々に分解・吸収される材料の適用が望ましい．既に生体吸収性高分子・セラミックスが血管ステントや骨補填材，非荷重負荷部位の骨接合材として実用化されている．しかし，機械的強度の不足から全ての金属製部材の代替には至っていない．そこで，金属材料であり，かつ体内で腐食による分解・消失が期待できるマグネシウム(Mg)や鉄(Fe)，亜鉛(Zn)の医療応用が検討されている．最も研究が進んでいるのは Mg 合金であり，冠動脈ステントおよび骨接合用スクリューの臨床例がある[11][12]．

4. 生体吸収性金属材料としての Mg，Fe，Zn

Mg，Fe，Zn のいずれも標準電極電位は卑であり，水と反応して容易に腐食する．これらの金属(M)の水溶液環境における腐食反応を以下に示す．

$$M + 2H_2O \rightarrow M^{2+} + 2OH^- + H_2\uparrow \quad (1)$$

Fe の場合は酸性溶液中では上記の反応が進むが，中性溶液中では溶存酸素が必要である[13]．

$$2Fe + 2H_2O + O_2 \rightarrow 2Fe^{2+} + 4OH^- \quad (2)$$

腐食反応の進行に伴い OH^- が生じ，溶液の pH が上昇すると，金属水酸化物[$M(OH)_2$]の溶解度が低下し，試料表面に沈殿する．この不溶性塩の層が拡散障壁となり，次第に腐食速度が低下する．体液には種々の無機塩やアミノ酸・タンパク質等の有機物が含まれており，酸素や二酸化炭素，窒素などの気体も溶解している．体内における酸素や二酸化炭素の濃度(分圧)は，大気中とは異なる．抹消組織中の酸素濃度は大気中の 1/4 以下であり，動脈血中の二酸化炭素濃度は約5%である[14]．血中の二酸化炭素は重炭酸イオンと平衡状態にあり，血液の pH を7.4に保つ働きをする[14]．体液の pH や溶存ガス濃度，また無機塩・有機物は，生体吸収性金属材料の腐食に大きな影響を及ぼす．血漿中では難溶性のリン酸塩，炭酸塩等が中性付近の pH でも析出しうるため，不溶性塩の層を形成し腐食速度を低下させる．例えば，血漿とほぼ等しい無機塩組成を有する疑似体液中の Mg の腐食速度は，同濃度の食塩水中の速度の約 1/50である[15]．また，アミノ酸等の有機物は Mg の腐食を促進するが，タンパク質は抑制する[15]．血流も溶出イオンやガスの拡散に影響を与えるため，腐食速度に影響する．

5. 生体吸収性金属材料の生体安全性[12][16]

Mg，Fe，Zn は生体必須元素であり，体内存在量が比較的多いため，体内に埋植した材料から溶出した金属イオンの生体為害性が低いことが期待されている．**表1**に，Mg，Fe，Zn の体内存在量・吸収・排泄バランスをまとめた．Mg は腸管にて吸収された後，細胞外液を介して細胞内や骨に分布し，過剰分は尿として排泄される．尿中排泄量は血漿中 Mg 濃度が上昇すると増加するため，Mg の過剰症は起こりにくいと考えられるが，腎機能障害を有する場合は高 Mg 血症を起こす恐れがある．

Mg の細胞内の濃度は 5～20 mM であり，血漿・細胞外液中よりも高い．細胞内の Mg の80～90%はアデノシン三リン酸(ATP)と結合している．Mg の代表的な生理機能は，(1)エネルギー代謝に関係した多数の酵素の補因子，(2)カルシウムの拮抗剤，(3)骨代謝への関与である．したがって，Mg の代謝異常は高血圧症や動脈硬化症，不整脈などの循環器疾患，ならびにてんかんなどの神経疾患，糖代謝やインスリン感受性に関係する．Mg を含む薬剤として MgO，$Mg(OH)_2$，$MgCO_3$，$MgSO_4$(の水和物)等が制酸・緩下剤として上市されている．$MgSO_4$ は子癇の発症抑制や治療にも使用される．適切な分解速度を有する Mg 合金では，動物埋植試験において良好な骨形成が報告されている．

Fe の血清中濃度は17–18 μM であり，ほとんどがヘモグロビンとして存在する．体内の Fe はほぼ全てがタンパク質と結合しており，機能鉄と貯蔵鉄に分けられる．ポルフィリン—Fe 錯体(ヘム鉄)を含むタンパク質は，酸素の運搬や電子伝達(酸化反応)への関与，過酸化水素の分解や基質の水酸化など，多彩な機能を有す．非ヘム鉄タンパク質の中にはイオウを含むものがあり，脂肪酸の水酸化や呼吸における電子伝達，窒素分子の固定化を行う．その他の非ヘム鉄タンパク質には，フェリチンやトランスフェリンのように Fe の貯蔵を担うものがある[17]．貯蔵鉄は主に肝臓・脾臓・骨髄および筋肉に存在し，必要に応じて血液中に放出される．Fe は難吸収性かつ難排泄性であり，遺伝性疾患や慢性アルコール中毒による過剰蓄積が知られている．貯蔵鉄量は健常人では 1 g 以下であり，その数倍以上の蓄積は危険を及ぼす恐れがある．難排泄性のため，過剰な Fe は瀉血やキレート剤注射により排泄させる．したがって，埋植材から溶出した Fe はほとんど排泄されないと予想される．

Zn の血清中濃度は12–18 μM であり，Fe とほぼ同濃度である．多くはアミノ酸やタンパク質と結合し，筋肉・骨に貯蔵される．主たる排泄は小腸からの分泌であり，1 日当たり

表1　亜鉛，鉄，マグネシウムの体内存在量・吸収・排泄バランス[12]．

元　素	マグネシウム	鉄	亜　鉛
体重1 kg 当たりの存在量	500 mg	85.7 mg	25 mg
主な分布組織	骨（約55％）	赤血球（約65％）	筋肉（約61％）
血漿（血清）中の濃度と状態	0.5–1 mM（12–24 mg/L）65％ Mg^{2+}, 15％ Mg 塩 20％ タンパク質と結合	17–18 μM（0.95–1.0 mg/L）ほとんどがヘモグロビン	12–18 μM（0.8–1.2 mg/L）ほとんどがタンパク質・アミノ酸と結合
過剰症の原因	非経口による過剰投与	遺伝性疾患・過剰摂取・慢性アルコール中毒・輸血	食器からの過剰摂取，非経口による過剰投与
過剰症	悪心・嘔吐・筋力低下・血圧低下	肝障害・糖尿・色素沈着	下痢・腹痛・血便・嘔吐・黄疸・腎不全・低血圧・意識低下・不整脈
過剰症時の血漿（血清）中濃度	＞2.5 mM（＞60.8 mg/L）	貯蔵鉄量 20–30 g（健常人は1 g 以下，正常値の数倍以上の蓄積で要警戒）	31.5–640 μM（2.06–41.84 mg/L）
1日当たりの摂取量	250–350 mg	15 mg	7.4–11.5 mg
1日当たりの吸収量	75–180 mg	1 mg	2.6–2.9 mg
1日当たりの排泄量	112–174 mg	0.6–1 mg	2.5–2.8 mg
主たる排泄経路	尿	胆汁（0.3–0.5 mg），皮膚・消化管上皮細胞脱落（0.6–1 mg），尿（0.1 mg），月経（12–15 mg/回）	小腸（膵臓）からの分泌（1.7 mg）汗（0.5 mg）尿（0.3–0.6 mg）

の排泄量は尿中排泄と合わせて2.0–2.3 mg，汗として0.5 mgである．過剰症における血清中 Zn 濃度は31.5–640 μM であり，正常値の2倍強しかなく許容濃度範囲は狭い．Zn は炭酸脱水酵素，DNA/RNA ポリメラーゼ，アルカリホスファターゼ，アルコール脱水素酵素等，多くの酵素に含まれており，タンパク質の3次元構造の維持や活性発現への関与が明らかにされている．Zn 含有酵素は，銅や Fe 含有酵素とは異なり加水分解反応への関与が多い[17]．

Mg，Fe，Zn のいずれも，強度向上や分解特性制御のため合金化が検討されている．しかし，生体吸収性部材では最終的には全てが体内で腐食・溶出し，生体組織に吸収あるいは体外に排泄されなければならない．したがって，合金添加元素の安全性も考慮する必要がある．現在上市されている生体吸収性冠動脈ステントおよび骨接合材には，希土類元素（RE）を含む Mg 合金が使用されている．しかし，RE の生理機能や生体内動態はほとんど解明されていない．RE はその電子配置から化学的性質が似ており，いずれも難溶性リン酸塩を形成する．それゆえ体液に対する溶解度が低く，組織中に残留する恐れがある．LAE442（Mg–4％Li–4％Al–2％RE）合金試料のウサギ脛骨髄腔内への3.5年埋植例では，材料はほとんどが不溶性のリン酸塩に置換された状態で残存しており，RE は不溶性塩中に検出された[18]．さらに，埋植動物の肝臓，腎臓，脳，脾臓中からも RE の蓄積が確認された[18]．特に脾臓中濃度が高く，正常値の100～630倍であった[18]．このことは，溶出 RE は尿中には排泄されず不溶性リン酸塩として組織に沈着し，一部がマクロファージに貪食され免疫細胞の集まる脾臓に運搬，蓄積したことを示唆している．

RE の一つであるガドリニウム（Gd）の錯体は，既に MRI（核磁気共鳴画像法）造影剤として汎用されている．しかし，体内安定性の低い Gd 造影剤を腎機能が低下した患者に用いると，Gd が臓器中に蓄積し線維化を引き起こす．これは腎性全身性線維症（Nephrogenic systemic fibrosis: NSF）と呼ばれており，治療法がなく最悪死に至る重篤な副作用である．ごく最近，腎機能が正常の患者でも脳内に Gd が残留することが判明した[20]．マウスを用いた検討では Gd はほぼあらゆる臓器から検出され，脳よりも肝臓・脾臓・腎臓中濃度が高かった[20]．この結果は上述の LAE442 合金のウサギ埋植例と合致しており，他の RE でも同様の障害が生じる可能性が懸念される．

6.　生体吸収性材料の生体内分解挙動とその評価

生体吸収性材料を用いた治療が成功するためには，生体内における材料の分解・消失過程の制御が重要である．生体吸収性金属材料では腐食に伴い不溶性塩が形成されるが，最終的にはこの不溶性塩の層も溶解・消失しなければならない．そこで，本稿では両過程合わせて分解挙動・特性と記す．Mg，Fe，Zn の腐食は体液中の無機塩・有機物の組成や pH 恒常性，さらには血流の影響を受ける．したがって，これらの材料の生体内における分解特性を調べるためには，材料が埋植される部位の生体環境を再現する必要がある．しかし，血流量は組織や部位によって異なるのは勿論，同じ組織・部位であってもヒト―動物間，さらには個々の患者によって異なると予想される．実際に Mg 合金臨床例では，分解特性の埋植部位や患者依存性が判明しており[21]，生体吸収性金

属材料の臨床使用における分解挙動予測は非常に困難である．

しかし，そうだとしても，生体吸収性治療部材の開発プロセスにおいては開発材の生体内分解特性を評価する必要が生じる．そのため，生体外における生体内分解特性評価法が開発・検討されている．ステント適用時には材料が血液と接触するため，血栓が形成される．そこで，Fe および Mg ワイヤをフィブリン被覆し疑似体液に浸漬，引張試験を実施した結果，フィブリン被覆の方が非被覆よりも強度低下が小さいことが判明した[22]．また，ブタ大動脈内腔または血管壁に Mg ワイヤを挿入し，疑似体液の還流（*ex vivo*）試験を実施し，何もせずにそのまま疑似体液中に浸漬した（*in vitro*）場合，ならびにラット大動脈内腔/血管壁に埋植した（*in vivo*）場合との比較が報告されている[23]．血管壁（軟組織）への埋植では *ex vivo* と *in vivo* 間で分解速度に差は見られず，*in vitro* とほぼ一致した．しかし，血管内腔への挿入では *in vivo* よりも *ex vivo* の方が，分解速度が大きかった．腐食形態も異なり，*in vivo* では全面腐食が主であったが，*in vitro* および *ex vivo* では局部腐食が多数認められた．*Ex vivo* では血管内腔に挿入されたワイヤは疑似体液に晒されていたが，*in vivo* では血栓で覆われ，5d では全体が新生内膜に取り込まれていた．そのため，*in vivo* では腐食が抑制されたと考えられる．これらの結果は，生体組織による被覆が生体吸収性金属材料の腐食を抑制することを示している．

そこで，培養細胞を用い生体吸収性金属材料の腐食に及ぼす影響が検討されている．Mg 合金試料表面で線維芽細胞あるいは骨由来細胞を培養し腐食試験を実施した結果，培養初期（6～24h）では細胞の存在により材料の腐食は抑制される傾向が認められたが，以降は溶出イオン量の増加が認められた[24][25]．初期の腐食抑制は不溶性塩と同様に細胞が拡散障壁となったため，24h以降の腐食促進は代謝に伴い細胞から放出された H^+ により細胞近傍の pH が低下したためと考えられる．培養試験系では生体内のような毛細血管による微小循環がなく，そのため時間経過に伴い pH 変化が生じうること，また実際の線維性組織・骨組織中よりも細胞密度が高いため，前述した生体組織の腐食抑制効果よりも細胞の代謝の影響が大きく現れた可能性がある．

これらの生体外における試験結果は，体内における生体吸収性金属材料の分解特性評価には，生体組織と同様に拡散障壁となりうる疑似的な組織の使用が有効であることを示唆している．疑似組織の有用性は分解特性評価に留まらず，腐食反応に伴い発生する水素の挙動評価にも当てはまる．式（1）に示すように，Mg および Zn については腐食の進行に伴い水素が発生する．発生した水素は体液に溶解し，血流により拡散すると推測される．しかし，液体中への気体の溶解量には限度がある．体内における水素分圧が上昇すると一部は体液に溶解するが，他の気体（窒素，酸素，二酸化炭素）の分圧が低下し，溶け切れなくなった分が溶け残った水素と共に組織中に空孔を形成すると予想される．Mg 合金試料の動物埋植例[26]や臨床例[27]で，空孔形成が報告されている．

組織中に空孔が形成されるか否かは，水素の発生量すなわち腐食速度と組織中拡散速度のバランスで決まる．したがって，腐食試験と同様に生体組織（とその血流量）が影響を及ぼすことが推測できる．Mg 合金製骨接合材の臨床例では，組織中に形成された空孔により骨癒合が遅延したと考えられる症例も報告されており[28]，空孔形成挙動についての事前評価・検討も必要である．そのためにも，疑似組織を用いた手法が有効であると思われる．我々の研究室では，疑似体液に増粘剤を添加することにより疑似組織を作製し，Mg 合金試料の腐食や空孔形成挙動に及ぼす影響を検討している[29]．このような評価技術を開発・汎用化することにより，生体吸収性金属材料の生体内分解特性理解が深まり，医療応用の成功に貢献することが期待される．

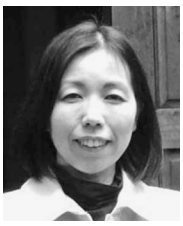
7. おわりに

これまで医療用金属材料として生体内での安定性・耐久性に優れた材料が，人工関節や人工血管等の生体組織置換材として用いられ，優れた治療成績により広く普及してきた．しかし，医療の発展は患者の長寿命化とそれに伴う埋植期間の増加をもたらし，生体組織置換材の残存リスクという難題を明らかにした．埋植材による遅発性感染や発がんの問題は解決に至っておらず，これらのリスク避けるために骨接合材や血管ステント等の一時使用目的の埋植材について，生体吸収性材料の適用が進められている．しかし，生体吸収性材料では埋植後に材料の腐食やそれに伴う金属イオンの溶出，さらには体液からの難溶性炭酸塩・リン酸塩の析出等が生じる．これらは従来の生体組織置換材は最大限避けてきた事象であり，それを制御しつつ最終的に組織の治癒と材料の消失を達成するのは，従来の生体組織置換材の成功以上に困難な挑戦である．その実現のためにも，革新の進む生命科学・技術と材料科学・工学の更なる融合を期待したい．

文　献

（1）https://allergan-web-cdn-prod.azureedge.net/allerganjapan/allerganjapan/media/allergan-japan/patients/患者様へのお知らせ_ナトレル製品の自主回収_20190802_v2.pdf.
（2）日本トキシコロジー学会教育委員会編：トキシコロジー，朝倉書店，(2002), 175–185.
（3）L. Sompayrac（大澤利明訳）：免疫系のしくみ―免疫学入門―，東京化学同人，(2001), 23–41.
（4）筏義人：生体材料学，産業図書，(1994), 25–50.
（5）吉川暹：バイオマテリアル入門（筏義人編），学会出版センター，(1993), 95–123.
（6）佐藤温重，石川達也，桜井靖久，中村晃忠編：バイオマテリアルと生体―副作用と安全性，中山書店，(1998), 39–46.
（7）林紘三郎：バイオメカニクス，コロナ社，(2000), 16–25.
（8）松下和彦，青木治人，嶋田甚五郎：VI.人工関節などのインプラント，日本内科学会雑誌，**89**(2000), 2273–2278.
（9）塙隆夫編著：医療用金属材料概論，日本金属学会，(2010), 43–46.
(10) T. W. Hesterberg, R. Anderson, D. M. Bernstein, W. B. Bunn, G. A. Chase, A. L. Jankousky, G. M. Marsh and R. O. McClellan: Reg. Toxicol. Pharmacol., **62**(2012), 257–277.
(11) 山本玲子：アルトピア，**48**(2018), 9–14.
(12) 山本玲子：化学と工業，**68**(2017), 903–909.

(13) H. H. ユーリック，R. W. レヴィー(松田精吾，松島巌訳)：腐食反応とその制御(第3版)，産業図書，(1989), 92–123.
(14) 金井泉原，金井正光：臨床検査法提要(第31版)，金原出版，(1998), 702–708.
(15) A. Yamamoto and S. Hiromoto: Mater. Sci. Eng. C, **29**(2009), 1559–1568.
(16) 山本玲子：軽金属，**58**(2008), 570–576.
(17) 桜井弘：金属は人体になぜ必要か　なければ困る銅・クロム・モリブデン……，講談社，(1996), 81–94.
(18) N. Angrisani, J. Reifenrath, F. Zimmermann, R. Eifler, A. Meyer–Lindenberg, K. Vano–Herrera, C. Vogt: Acta Biomater., **44**(2016), 355–365.
(19) 対馬義人：J. Jpn. Soc. Pediatr. Radiol., **33**(2017), 91–96.
(20) 神田知紀：脳外誌，**26**(2017), 776–781.
(21) D. Zhao, F. Witte, F. Lu, J. Wang, J. Li and L. Qin: Biomater., **112**(2017), 287–302.
(22) P. K. Bowen, J. A. Gelbaugh, P. J. Mercier, J. Goldman and J. Drelich: J. Biomed. Mater. Res. PartB: Appl. Biomater., **100B**(2012), 2101–2113.
(23) J. Wang, L. Liu, Y. Wu, M. F. Maitz, Z. Wang, Y. Koo, A. Zhao, J. Sankar, D. Kong, N. Huang and Y. Yun: Acta Biomater., **50**(2017), 546–555.
(24) M. B. Kannan, A. Yamamoto and H. Khakabz: Colloids Surf. B, **126**(2015), 603–606.
(25) A. Witecka, A. Yamamoto and W. Święszkowski: Colloids Surf. B, **150**(2017), 288–296.
(26) F. Witte, V. Kaese, H. Haferkamp, E. Switzer, A. Meyer–Lindenberg, C. J. Wirth and H. Windhagen: Biomater., **26**(2005), 3557–3563.
(27) C. Plaass, S. Ettinger, L. Sonnow, S. Koenneker, Y. Noll, A. Weizbauer, J. Reifenrath, L. Claassen, K. Daniilidis, C. Stukenborg–Colsman and H. Windhagen: J. Orthopaedic Res., **34**(2016), 2207–2214.
(28) R. Meier and M. Panzica: Handchir. Mikrochir. Plast. Chir., **49**(2017), 37–41.
(29) 山本玲子，菊田明美，F. Witkowski, W. Święszkowski：第41回日本バイオマテリアル学会概要集，(2019), 349.



山本玲子

★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★
1993年　国際基督教大学大学院理学研究科修士課程修了
同年　科学技術庁金属材料技術研究所　入所
1998年　博士(工学)取得(京都大学)
2001年　独立行政法人　物質・材料研究機構(改組)
2015年4月– 現職
専門分野：生体材料学
◎生体―材料間相互作用について *in vitro* 評価を中心に研究中.
★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★

骨芽細胞の活性化機序に基づく金属イオン徐放足場材の創製

小　幡　亜希子[*1)]　春　日　敏　宏[*2)]

1. はじめに

生体組織の再生を促す機能を有した生体材料開発が長年進められている．これまでに様々なアプローチが報告されているが，そのうちの一つにイオンの効果に着目した例がある．特に，数種のイオンが骨や皮膚などの再生を担う細胞である骨芽細胞や線維芽細胞に対し，ポジティブな作用を及ぼすことが見出されており，この効果を積極的に利用した新規生体材料の開発が近年増えつつある[(1)]．材料から溶出されるイオンによる細胞への作用が着目されるきっかけとなったのが，45S5 Bioglass®に関する研究報告である．45S5 Bioglass®は，生体活性を示す人工材料として世界で初めて開発されたガラス材料であり，その組成は，46.1 SiO_2–26.9 CaO–24.4 Na_2O–2.6 P_2O_5（mol%）である[(2)]．ここで生体活性とは，特に硬組織再建用の材料において自家骨と材料が化学的な結合を介して直接接合する機能を意味する．この機序はいくつか報告されているが，45S5 Bioglass®においては主に材料表面で起こる骨類似アパタイトの形成や，材料から溶出されるイオンによる細胞の活性化効果といわれている[(2)]．

45S5 Bioglass®を生体内に埋め込むと徐々に溶解を始め，ガラス組成に由来した種々のイオンを周囲の体液中へ放出する．本ガラスの様なシリカの含有量が低いケイ酸塩ガラスにおいては，生体内に埋め込むと周辺体液の中に存在するプロトンと迅速にイオン交換を行い，これによりガラス中の Na^+ や Ca^{2+} イオンが溶出される．これに続いてシラノール基が形成され，さらにシラノール基同士の縮合によりシリカゲル層が形成される[(2)]．そのため，一定期間が経過した後は溶出が緩やかとなる特徴がある．

45S5 Bioglass®から溶出するイオンのうち，Na^+ や Ca^{2+} イオンは体液中に比較的多量に存在するが，一方でケイ酸イオンにおいてはほとんど含まれていない．しかし，骨組織にはごく微量だけ含まれており，この微量のケイ酸イオンの存在は，骨の成長に影響をもたらすことが見出されている[(3)]．細胞単位で見てみると，例えばヒト由来の骨芽細胞を培養した際，45S5 Bioglass®から溶出したイオンを含む細胞培養培地において細胞の増殖が促進されることがわかっている[(4)]．この時，イオンによってもたらされたと考えられる細胞の遺伝子発現の変化が，このような促進効果に寄与したと報告されている[(5)]．

2. イオンが骨形成を促進するメカニズム

各イオンが細胞に作用を及ぼすメカニズムについては，いまだ不明な部分は多い．特に，体液中には本来ほとんど含有されていないケイ酸イオンなどについては，現在研究が進められていると言える．しかしこれまでの報告より，少なくとも骨芽細胞においては，ある特定の遺伝子発現がケイ酸イオンによって有意に増大されることがわかっている．Hench らは，45S5 Bioglass®から溶出するイオンで処理した初代骨芽細胞の遺伝子を網羅的に解析した結果，7 つのファミリーが増大されていることを見出している[(2)]．この中には，成長因子，転写制御因子，そしてシグナル伝達に関係するものが含まれる．Han らはケイ酸イオンで処理した骨髄間質細胞において，骨形成に関連する遺伝子だけでなく WNT および SHH シグナル伝達経路に関連する遺伝子の発現が増大すると報告しており[(6)]，Shie らはケイ酸イオンによって骨芽細胞様細胞の MAPK–ERK 経路の関連遺伝子の発現が増大すると報告している[(7)]．一方で Varanasi らは，骨形成に必須な転写制御因子である osterix/Sp7 が，ケイ酸イオンによ

* 名古屋工業大学大学院工学研究科生命・応用化学系プログラム：1)准教授　2)教授
（〒466–8555 名古屋市昭和区御器所町）
Development of Scaffold Materials with Ion–releasing Ability for Stimulating Osteoblasts; Akiko Obata and Toshihiro Kasuga (Life Science and Applied Chemistry, Department of Engineering, Nagoya Institute of Technology, Nagoya)
Keywords: *biomaterials, osteoblast–like cells, Ions, ceramic, cell cunctions*
2020年 6 月17日受理[doi:10.2320/materia.59.606]

るコラーゲン産生の促進作用に関与していると報告している[8]．この様にケイ酸イオンにおいては，ある種のシグナル伝達経路や転写制御因子の活性化を介して，細胞機能や骨形成を促進すると考えられている．その他のイオンについても，イオンの種類に依存した特有のメカニズムが存在すると予想される．

3. イオン徐放足場材の設計に向けて

上述のように，45S5 Bioglass®から溶出したイオンに対する報告を皮切りとして，イオンによる細胞へのポジティブな作用に関する研究が広く実施されるようになった．現在までに，様々な種類のイオンがその種類に依存した作用をもたらすことも見出されてきている．そしてこれらの研究成果をベースに，新規ガラス・セラミック材料も開発研究されている．特にガラス材料は組成の自由度が高いため，任意のイオンの供給源として設計しやすいだけでなく，組成をデザインすることで化学的耐久性の制御も可能なため供給スピードを調整しやすい．また，ガラス単体で利用するだけでなく，金属系基板材料や有機ポリマー材料との複合化の例も数多く報告されており，様々な材料に対して「イオン供給源」として機能することが可能といえる．

これまで多くの知見が報告されてきたイオン種として，ケイ酸イオン，Ca^{2+} イオン，Mg^{2+} イオンなどがあげられる．特に骨形成に寄与する骨芽細胞や骨髄由来間葉系幹細胞に対する各イオンの作用について，イオンの濃度依存性にも着目しながら詳細なデータが報告されており，ある特定濃度条件においてポジティブな作用をもたらすことが分かっている[1]．しかし，これら報告内にて着目されたイオンの種類は一種ずつであり，異なる種類のイオンが同時に細胞に供給された際の相互作用についてはほとんど着目されていなかった．しかし，例えばガラス材料の場合，その多くは複数種の元素から構成されており，これが溶解した際は程度の差こそあれ複数種のイオンが同時に溶出することが予想される．この複数種のイオンによる細胞への作用が組み合わさった際，例えば単一種が供給された時と比較してどのような違いがあるか考察することは，生体組織の再生に対する理想的なイオン供給システムをデザインするのに重要と考えた．

以上のことをふまえ，我々のグループではケイ酸イオン，Ca^{2+} イオン，Mg^{2+} イオンの3種に着目し，これらのイオンが単独で供給された際，および複数種が同時に供給された際の組合せ効果について検討してきた[9]．本稿では，マウス由来骨芽細胞様細胞（MC3T3-E1細胞）を用いた培養試験により得られた成果を中心に紹介する．なお以降にて，上記3種のイオンをそれぞれSi，Ca，Mgイオンと表記する．

4. 細 胞 の 接 着

はじめに，培養試験および評価方法について説明する．系統的な条件にて培養試験を実施すべく，細胞培養培地にイオン源となる化合物を溶解させることで「イオン添加培地」を作製し，これを用いて細胞を培養することで，イオンによる細胞機能への影響を調査した．用いた化合物は，Si源としてシリカゲル（3-アミノプロピルトリエトキシシランを加水分解および縮重合させて得たもの），Ca源として $CaCl_2$，Mg源として $MgSO_4 \cdot 7H_2O$ である．

各イオンの濃度範囲は，過去の報告にて骨芽細胞や間葉系幹細胞に対して作用することが見出されている条件を参照して設定し，組合せ効果におけるイオン濃度依存性も検討した．具体的には，Siイオンは10～70 ppm，Caは80～400 ppm，そしてMgは25～500 ppmとした[10)-12)]．上記の各濃度範囲内にてそれぞれ4～5段階の濃度条件を設定し，1，2，そして3種のイオンを添加した培地を作製した．サンプル名は各イオンの濃度数値を用いて表記し，例えば10 ppmのSiイオンのみを添加した培地の場合は10Siと表記し，一方で10 ppmのSiイオン，80 ppmのCaイオン，そして25 ppmのMgイオンを組み合わせて添加した場合は，10Si-80Ca-25Mgと表記する．また，何も添加していない通常の細胞培養培地をコントロールサンプルと表記する．

細胞の接着過程に対するイオンの作用を検討するために，まずは上記のように作製した各イオン添加培地またはコントロールサンプルを用いて細胞懸濁液を作製した．得られた細胞懸濁液を播種し，37℃の CO_2 インキュベーターにて3時間培養した．培養後，リン酸緩衝液でリンスした後にウェル底に接着している生細胞の数を代謝活性値から算出すべく，Cell Counting Kit-8を用いて吸光度測定から求めた．

上述のような方法により得られた接着生細胞数の測定結果を用いて，複数種のイオンの供給による組み合わせ効果を評価した．評価方法は既報を参照して，**図1**に示す通り実施した[13]．まず，複数種のイオンを組み合わせて供給した培養系から実測値（$P_{observed}$）を求める．一方で，各種イオンを単独で供給した培養系の結果を用いて，複数種のイオンを組み

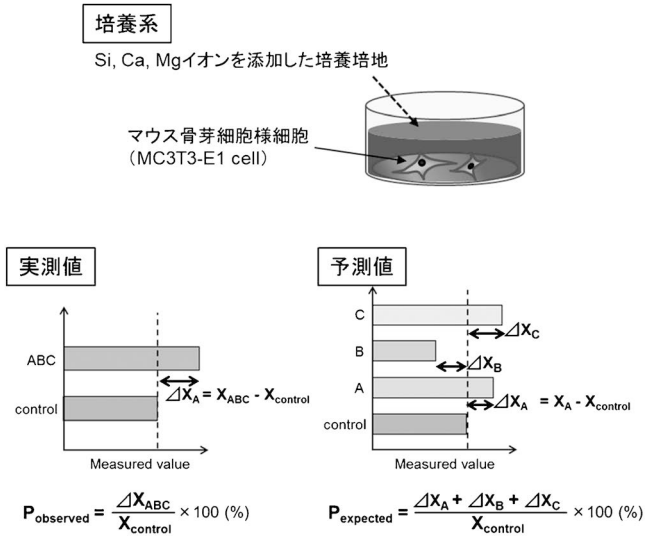


図1　本研究の培養系と組み合わせ効果の評価方法の概略図．

合わせた場合の結果の予測値($P_{expected}$)を算出する．最後に，得られた数値の差分(実測値−予測値)を算出する．この値が正の値の場合は「相乗効果」，負の値の場合は「拮抗作用」が生じたと判断した．

接着生細胞数の測定結果および，複数種のイオンの組み合わせによる効果の検討結果を**図2**および**3**に示す[9]．まず，単一種を供給した際の結果より，多くの条件においてコントロールサンプルと有意差のない値を示した．一方で，30Siおよび50Siにおいて有意に高い値が，240Caにおいて有意に低い値が確認された．また，図3中の左列のグラフが示すように，複数種のイオンを供給した培養系での実測値はほぼ全条件において正の値を示しており，接着に対して促進効果があることがわかった．さらに，図3中の中列のグラフが示すのは単一種を供給した結果から算出した予測値であり，これら予測値と実測値を用いて組み合わせによる効果を評価した結果を右列に示す．得られたグラフより，Mgイオンの濃度が支配的に影響を及ぼしていることがわかった．また，Mgイオン濃度が高くなるにつれて組み合わせによる相乗効果が大きくなっていることから，SiおよびCaイオンと共に多量のMgイオンを供給することで，細胞の接着をより促進させることが可能と示唆された．一方で，SiおよびCaイオンについては，各々の量に依存した組み合わせによ

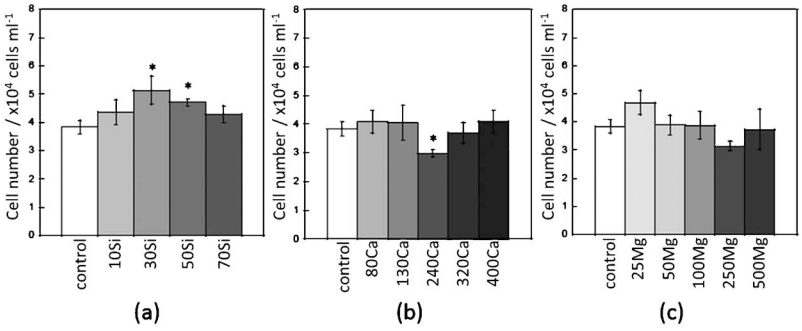


図2　単一種のイオンを添加した培地を用いて3時間培養した時の接着生細胞数の測定結果[9]．Siイオン(a)，Caイオン(b)，Mgイオン(c)．(*$p<0.05$)．

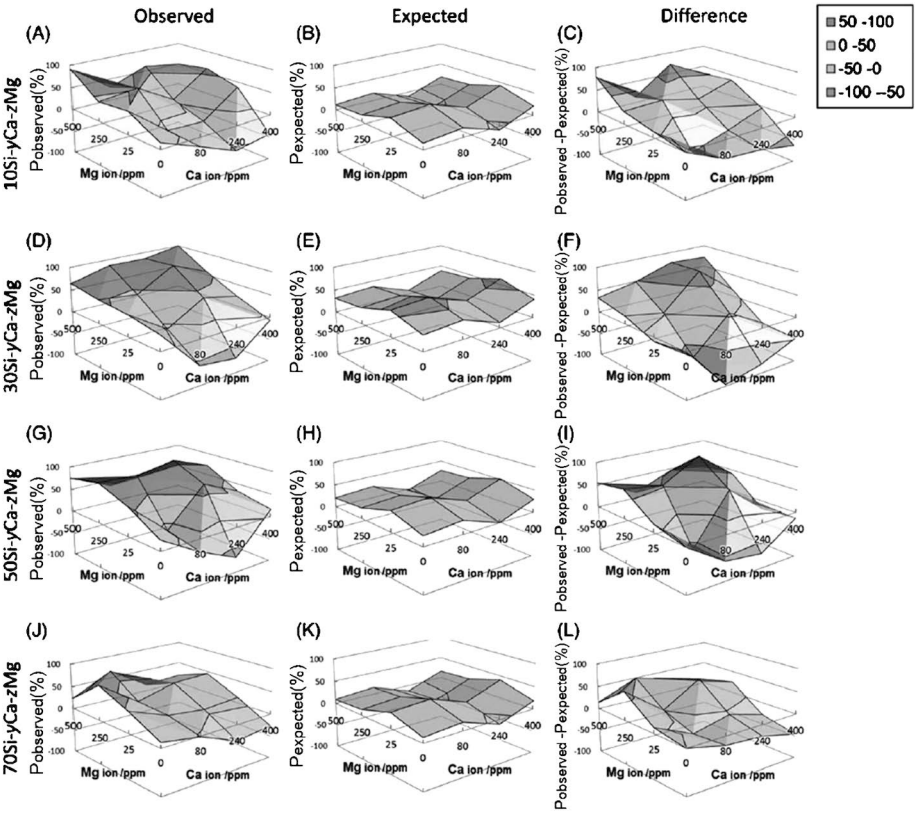


図3　細胞の接着に対するイオンの組み合わせ効果の評価結果[9]．3種のイオンを添加した培地を用いて3時間培養した時の接着生細胞数の実測値(左列)，単一種のイオンを添加した時の結果から算出した予測値(中列)，実測値と予測値の差分(右列)．

る効果への影響は観察されなかった．しかし，単一種を供給した時に一部の条件でしか促進効果が観察されず，一方で3種を供給した時に促進効果が確認されたことから，一定量以上のSiおよびCaイオンの同時供給は接着の促進に重要といえる．

5. 細胞の増殖

細胞の増殖に対する組み合わせの効果を検討すべく，上述とほぼ同様な方法にて5日間まで培養を行い，培養開始後1，3，5日目の生細胞数をカウントすることで増殖挙動を観察した．なお，接着過程におけるイオンの影響を排除すべく，本実験ではコントロールサンプルである通常培地を用いて細胞懸濁液を作製および播種し，培養3時間後に各種イオン添加培地に入れ替えた．培養期間中においては，1および3日目にフレッシュなイオン添加培地に交換した．

測定結果を**図4**および**5**に示す．単一種を供給した結果において，70Siを除くSiおよびCaイオン添加培地では増殖が促進される様子が観察された．一方でMgイオン添加培地においては，100Mgを除く条件においてコントロールサンプルと同等もしくは抑制されたことがわかった．複数種のイオンが供給された系においては，多くの条件において促進されたことがわかった．一方で，組み合わせの効果に着目すると，70Siが添加された条件を除くほぼ全ての条件におい

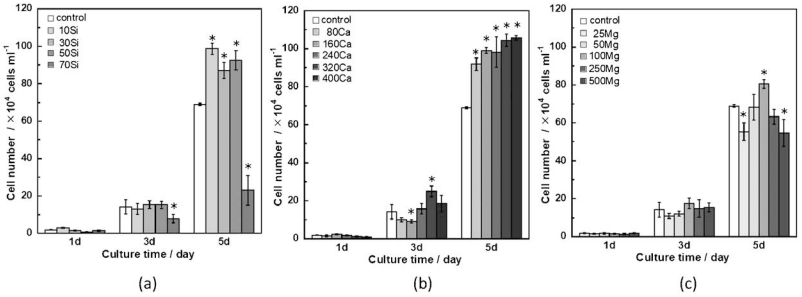


図4　単一種のイオンを添加した培地を用いて5日間培養した時の接着生細胞数の測定結果[9]．Siイオン(a)，Caイオン(b)，Mgイオン(c)．(*$p<0.05$)．

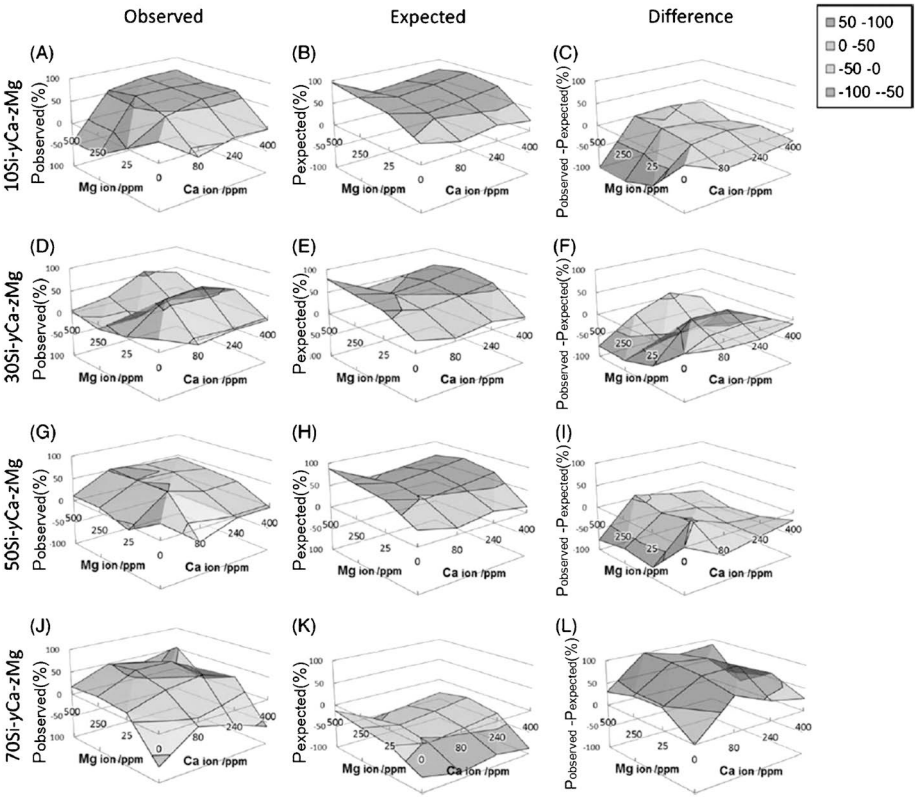


図5　細胞の増殖に対するイオンの組み合わせ効果の評価結果[9]．3種のイオンを添加した培地を用いて5日間培養した時の接着生細胞数の実測値(左列)，単一種のイオンを添加した時の結果から算出した予測値(中列)，実測値と予測値の差分(右列)．

て拮抗作用が観察された．つまり，増殖に対するイオンの組み合わせの効果においては，Si イオン濃度が支配的に影響を及ぼすことがわかった．また，Si イオン濃度が高い条件にて組み合わせによる相乗効果が確認されたことから，Ca および Mg イオンと共に多量の Si イオンを供給することで，細胞の増殖をより促進させることが可能と示唆された．

以上のように，単一種のイオンによる影響および複数種のイオンの組み合わせの効果において，細胞の接着と増殖に対する作用は異なることがわかった．特に組み合わせの効果においては，接着に対しては Mg イオンが，増殖に対しては Si イオンがより強く影響を及ぼすことが示唆された．さらに，単一種のイオン供給では促進効果が観察されなくとも，複数種を供給した場合には観察されたことから，今回着目した 3 種のイオンにおいては，どれもある一定量以上の供給が促進効果を発現するには必要であると考えられる．

6. 組み合わせの効果

イオンの組み合わせの効果に着目した報告例はまだ数少ないが，このうちの一つに，Mg と Ca イオンによる細胞の接着に対する影響に関する報告がある．Grzesiak らは，コラーゲン結合インテグリンの一種である $\alpha 2\beta 1$ インテグリンを介した線維芽細胞(線維性組織の形成を担う細胞)の移動において，Mg イオンを供給した場合に促進効果を観察したことを報告している．さらに，Mg と Ca イオンを同時に供給した際，Mg イオン単体を供給した時に比べてさらに 2 倍の促進効果を確認している[14]．本稿で紹介した実験結果と比較すると，Mg イオンのみを供給した際の促進効果の発現の有無に違いはあるが，2 種を組み合わせた際に促進効果が観察されている点においては共通する．実際，我々のグループで開発された Si と Ca イオンの供給機能を有するセラミック粒子であるシロキサン含有バテライトに，Mg イオン供給機能をさらに加えた材料を作製し培養試験を行ったところ，細胞の接着を促す効果があることを見出している[15]．

一方で，Shie らはケイ酸カルシウムセメント上にてヒト由来間葉系幹細胞および歯髄細胞を培養した際，セメント組成中のケイ酸量の割合が高いほど細胞表面でのインテグリンの発現が促進され，加えてインテグリン媒介シグナル伝達に関与する focal adhesion kinase（FAK)なども活性化されることを報告している[16]．しかし，我々の実験結果において接着に対する Si イオンの濃度依存性は確認されなかった．

これら報告例においては，促進・抑制効果の発現における各イオンの濃度依存性について具体的な数値をもって検討されておらず，また，用いた細胞の種類も各々異なるため，一概に我々の実験結果と比較するのは難しいかもしれない．しかし我々の実験結果と合わせて考察するに，イオンによる細胞の接着に対する作用は，濃度だけでなく同時に供給されるイオン種の組み合わせも重要であることは明らかと考える．

細胞の増殖に対するイオンの組み合わせの効果に関する報告例については，著者の知る限りでは，上記した接着に関する報告例ほど明確に“組み合わせ”を見据えた内容のものはない．しかし，例えば Si イオンによる細胞の活性化効果を利用して，既存のリン酸カルシウム系や炭酸カルシウム系材料に新たに Si を添加し，その結果，より高い活性化効果を得たといった報告例はある[17][18]．敢えて“組み合わせ”を意識したものではないにせよ，結果的に組み合わせによる効果を反映した結果といえる．我々の実験結果においても，今回着目した 3 種のイオンについては，2 種または 3 種が同時に供給されることで促進効果が確認されており，既報と共通する部分があると考える．これに加えて今回，この促進効果を高める因子として Si イオンが支配的であるという事実も新たに見出すことができた．このことから，今後は標的とする細胞の挙動に対してより有効な材料組成の設計が可能になると考える．

7. おわりに

本稿では細胞の接着および増殖に対する 3 種のイオンの効果，およびそれらの組み合わせの効果について紹介した．一方で，今回は取り上げなかったが，分化および石灰化に対する効果についても同様に検討している．詳細は割愛するが，細胞の各挙動に対してポジティブな作用を示すイオンの供給条件は異なることを見出している．さらに，今回は骨芽細胞様細胞を用いた試験結果を紹介したが，破骨細胞様細胞を用いた検討も進めている．以上の様な検討を進めることで，骨形成のプロセスに対して理想的なイオンの種類や組み合わせを導くことが可能と考えている．さらに，骨組織に限らず皮膚や血管などの軟組織の再生に対しても今後は展開していく予定である．

本研究の一部は，泉科学技術振興財団の助成を受けたものです．ここに感謝申し上げます．

文　献

（1）A. Hoppe, N. S. Guldal and A. R. Boccaccini: Biomaterials, **32**（2011), 2757–2774.
（2）L. L. Hench and I. Thompson: J. R. Soc. Interface, **7**(2010), S379–S391.
（3）E. M. Carlisle: Silicon biochemistry, Novartis Foundation Symposium, ed. by D. Evered and M. O'Connor, Wiley, Chichester,（1986), 123–139.
（4）I. D. Xynos, A. J. Edgar, L. D. K. Buttery, L. L. Hench and J. M. Polak: Biochem. Biophys. Res. Commun., **276**(2000), 461–465.
（5）I. D. Xynos, A. J. Edgar, L. D. K. Buttery, L. L. Hench and J. M. Polak: J. Biomed. Mater. Res., **55**(2001), 151–157.
（6）P. Han, C. Wu and Y. Xiao: Biomatr. Sci., **1**(2013), 379–392.
（7）M. Y. Shie, S. J. Ding and H. C. Chang: Acta Biomater., **7**（2011), 2604–2614.
（8）V. G. Varanasi, T. Odatsu, T. Bishop, J. Chang, J. Owyoung and P. M. Loomer: J. Biomed. Mater. Res. PartA, **104A**（2016), 2605–2615.
（9）A. Obata, T. Ogasawara and T. Kasuga: J. Biomed. Mater. Res. PartA, **107A**(2019), 1042–1051.

(10) A. Obata, N. Iwanaga, A. Terada, G. Jell and T. Kasuga: J. Mater. Sci., **52**(2017), 8942–8956.
(11) S. Maeno, Y. Niki, H. Matsumoto, H. Morioka, T. Yatabe, A. Funayama, Y. Toyama, T. Taguchi and J. Tanaka: Biomaterials, **26**(2005), 4847–4855.
(12) S. Keim, J. G. Brunner, B. Fabry and S. Virtanen: J. Biomed. Mater. Res. B Appl. Biomater., **96B**(2011), 84–90.
(13) J. C. Wataha, C. T. Hanks and R. G. Craig: J. Biomed. Mater. Res., **26**(1992), 1297–1309.
(14) J. J. Grzesiak, G. E. Davis, D. Kirchhofer and M. D. Pierschbacher: J. Cell Biol., **117**(1992), 1109–1117.
(15) S. Yamada, Y. Ota, A. Obata and T. Kasuga: Bio-Med. Mater. Eng., **28**(2017), 47–56.
(16) M. Y. Shie, H. C. Chang and S. J. Ding: Int. Endod. J., **45**(2012), 337–345.
(17) K. A. Hing, P. A. Revell, N. Smith and T. Buckland: Biomaterials, **27**(2006), 5014–5026.
(18) A. Obata, S. Tokuda and T. Kasuga: Acta Biomater., **5**(2009), 57–62.

★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★
小幡亜希子
2004年　東京医科歯科大学大学院医歯学総合研究科博士後期課程修了
2008年　名古屋工業大学大学院工学研究科　助教
2015年　現職
専門分野：バイオマテリアル，無機材料
◎セラミックス，ガラス，そして無機有機複合材料を用いた新規バイオマテリアルの開発研究に従事.
★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★

小幡亜希子

春日敏宏

光触媒活性による細菌の不活化機序の理解に基づくチタン系生体材料の抗菌機能化：酸化チタンコーティングの可視光応答化

上田恭介*1)　上田隆統志*2)　成島尚之*3)

1. はじめに

世界的な高齢者人口の増加を受けて，骨や歯といった硬組織疾患数も増加している．硬組織は運動機能および食生活の根幹をなすものであり，生活の質(QOL)や健康寿命に直結する．これらの疾患に対して，人工関節や歯科用インプラント等の硬組織代替デバイスを用いた治療は有効であり，症例数は年々増加している．硬組織代替デバイスは骨や歯等の人体における構造部材であり，機械的強度と破壊靱性に優れた金属が用いられている．特に歯科用インプラントについては，ほぼ全てがチタン(Ti)およびTi合金製である[1]．これは，Tiの優れた耐食性，強度・延性バランスに加えて，他の金属には無い，骨と直接接合する性質，オッセオインテグレーション[2][3]を有するためである．

一方，これらのデバイス表面に細菌が付着すると，埋入後に感染症を引き起こし，デバイス周囲の骨融解や骨破壊によるデバイスの緩みを生じる．特に歯科用インプラントの場合，皮膚(口腔粘膜)を貫通して用いる(経皮)デバイスであり，かつ口腔内には細菌群が多く存在するため，埋入時のみならず埋入後においても細菌の付着による感染症のリスクに晒される[4]．生体と細菌との反応については，本特集の山本先生の解説をご参照いただきたい[5]．臨床においては重篤度によりインプラント周囲粘膜炎やインプラント周囲炎と呼ばれるが，埋入から10～15年間における発症率は14％にも上るとされている[6]．インプラント周囲炎の予防・治療にあたっては，感染症の原因となる細菌の除去ならびに後退した軟組織および骨組織の回復，再接合(再オッセオインテグレーション)が要求される[7]．そのため，細菌の付着および増殖の段階で抑制することが重要であり，デバイス表面への抗菌性付与は有効である．骨組織では食細胞が少なく生体防御機構が弱いことに加え，加齢に伴い免疫機能および骨形成能も低下することから，埋入デバイスの固定に時間を要することもある．そのため，デバイス埋入術成功のためには，抗菌性に加えて骨形成能の両方を具備する必要がある．

2. Ti製インプラントへの抗菌性付与

歯科用インプラントの感染症対策に関連して，Grischkeら[8]はTi表面の抗菌機能化に関するレビューを報告している．**図1**はGrischkeら[8]の示した抗菌性表面処理の分類を参考に，Ti基材上における抗菌性表面の設計についてまと

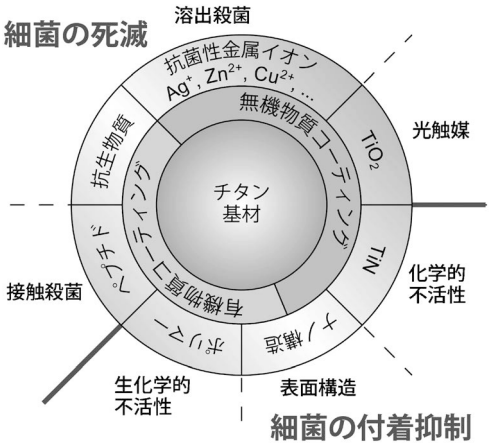


図1　Ti製歯科用インプラントへの抗菌性表面処理の分類．(参考文献(7)を改変)

* 東北大学大学院 工学研究科　1)准教授　2)博士課程(現㈱ジーシー)　3)教授(〒980-8579 仙台市青葉区荒巻字青葉 6-6-02)
Antibacterial Functionalization of Ti-based Biomaterials Based on the Understanding of the Inactivation Mechanisms of Bacteria via Photocatalytic Activity of Titanium Oxide: Visible-light Responsive Reaction of Titanium Oxide Coating; Kyosuke Ueda, Takatoshi Ueda and Takayuki Narushima(Department of Materials Processing, Tohoku University, Sendai)
Keywords: *antibacterial, photocatalytic activity, titanium oxide, visible-light activity, Au nanoparticles, oxidation, radical formation*
2020年7月3日受理[doi:10.2320/materia.59.612]

めたものである．抗菌性表面は，細菌の付着を抑制するものと細菌を死滅させるものに大別できる．細菌付着抑制表面としては，TiNコーティング，ポリマーコーティング，ナノ構造表面などが挙げられる．TiNやポリマーコーティングは，表面電荷や親水性を制御することで細菌付着の抑制を図るものである．ナノ構造表面は，100 nm未満の凹凸構造を利用し，細菌と材料表面との接触面積低減による細菌付着の抑制を意図している．このような細菌の付着を抑制する表面において共通する課題として，細菌と同様に骨形成に必要な骨芽細胞の接着数が低減し，骨形成をも抑制してしまうことが挙げられる．細菌を死滅させる表面としては，ペプチド，抗生物質，抗菌性金属イオン，酸化チタン(TiO_2)の担持やコーティングが挙げられる．ペプチドは化学的・生物学的に不安定であるため，定常的な抗菌性の発現は困難である．抗生物質や抗菌性金属イオンは，他のコーティング膜に担持してそこから放出することで抗菌性を発現する．しかし，抗生物質は薬剤耐性菌の発生が懸念されることから過度の利用は避ける方向にある．抗菌性金属イオンとしてはAg^+，Zn^{2+}，Cu^{2+}等が検討されており，薬剤耐性菌を生じない，多くの種類の細菌に対して抗菌性を発現する(抗菌スペクトルが広い)という利点を有している．しかし，埋入後の放出速度や放出量の制御は通常困難であり，細胞毒性や抗菌性発現期間といった観点から，放出挙動の最適化が課題である[9]．

Tiの酸化物である酸化チタン(TiO_2)は本多–藤嶋効果[10]で知られるように，紫外光(UV)照射により光触媒活性を示す材料である．水との反応により生成した各種ラジカルは高い酸化力を有するため，有機物，すなわち細菌を酸化分解して死滅させる．さらに，細菌を構成するタンパク質そのものを酸化分解でき，たとえば大腸菌の死滅後に発生するエンドトキシン(リポ多糖類の一種)等の毒素をも分解できる．一方，酸化チタンは食品添加物に認められていることでも明らかなように，それ自身は無害である[11]．むしろ，Tiの骨適合性向上に寄与することが知られており[12]，硬組織代替デバイスの表面処理方法として積極的に使用されている．すなわち，光照射により光励起したときのみ抗菌性を発現させる，スイッチングが可能な表面を創製できる．

3. 酸化チタンによる抗菌性発現の原理

酸化チタンは半導体であり，バンドギャップはルチル相において3.02 eV，アナターゼ相において3.23 eV，波長に直すとそれぞれ411 nm，384 nmと紫外光(UV)の波長域に相当する[11]．詳細は割愛するが，式(1)，式(2)に示すように，光照射により生成した電子(e^-)と正孔(h^+)が酸化チタン表面に吸着した水，酸素と反応し，ヒドロキシラジカル(・OH)とスーパーオキシドアニオン($\cdot O_2^-$)を生成する．

$$e^- + O_2 \rightarrow \cdot O_2^- \quad (1)$$

$$h^+ + H_2O \rightarrow \cdot OH + H^+ \quad (2)$$

これらのラジカルが抗菌性を発現する．酸化チタンの抗菌効果については，1985年に松永ら[13]の酸化チタン粉末を用いた検討から始まり，薄膜等の表面処理膜へと研究が進んでいる．酸化チタン薄膜を用いた抗菌性発現機序については，Sunadaらが詳細な検討を行っている[14]．

細菌は細胞壁の構造の違いにより，グラム陽性菌とグラム陰性菌に大別できる．グラム陽性菌は細胞膜上に厚いペプチドグリカン層(数十nm)を有しており，このペプチドグリカンがグラム染色に呈色する(陽性)．黄色ブドウ球菌や肺炎球菌はグラム陽性菌に分類される．一方，グラム陰性菌は細胞膜上に薄いペプチドグリカン層(数nm)があり，その外側に細胞外膜がある(**図2**(a)[14])．ペプチドグリカン層が薄いため，グラム染色に対して陰性である．細胞外膜はリポ多糖類で覆われており，細菌が死滅した際にこのリポ多糖類が遊離し毒素となることで毒性を示す[15]．

Sunadaらはグラム陰性菌である大腸菌を用い，酸化チタン皮膜したソーダガラスのUV照射時間と大腸菌の生存率の関係を調査した(**図3**[14])．UV照射時間に対して，大腸菌の生存率は初期では緩やかに低下し，その後大きく低下する，2段階の反応速度を有することを見出した．これは，初期菌濃度を変化させた場合においても同様であった．このときの菌液中エンドトキシン濃度を測定したところ，菌の生存率と同様に2段階で低下したが，ペプチドグリカン濃度はほぼ一定であり，細胞外膜が細菌の死滅に関連していることがわかった．次いで，細胞壁のペプチドグリカンと細胞外膜を欠損させた大腸菌(スフェロプラスト)を用いて同様の試験を行ったところ，未処理大腸菌で見られた2段階の生存率低下は見られず，1段階で低下した．これらの結果から，以下の細菌死滅機序を示した．

- 第1段階：酸化チタンの光触媒活性により生成したラジカルは細胞外膜の部分分解(図2(b))に用いられトラップされるため，細菌を死滅させるために必要なラジカルが細胞膜に到達せず，死滅速度は小さい．
- 第2段階：ラジカルが細胞膜に到達し，構造変化および機能破壊が生じる．さらにラジカルがDNAの損傷，補酵素(コエンザイム)Aレベルの低下を引き起こし，細菌が死滅する(図2(c))．

酸化チタンの光触媒活性によりヒドロキシラジカル(・OH)およびスーパーオキシドアニオン($\cdot O_2^-$)が生成する．このうち，ヒドロキシラジカルは寿命が短いものの，多くの生体分子に対して効果を示し，細胞膜を透過しDNAを損傷させる[15]．すなわち，ヒドロキシラジカルが細胞外膜を部分分解し，その後細胞膜を透過してDNAを損傷し，細菌を死滅させる．

4. チタン上への可視光応答型酸化チタン皮膜の作製

前述のとおり，酸化チタンの光触媒活性は光が照射されなければ発現しない．生体応用を考えた場合，人工関節のような完全埋入型デバイスにおいては，術前の光照射によるデバイス表面の殺菌は可能であるが，埋入後の抗菌性は期待できない．一方，歯科用インプラントにおいては，インプラント

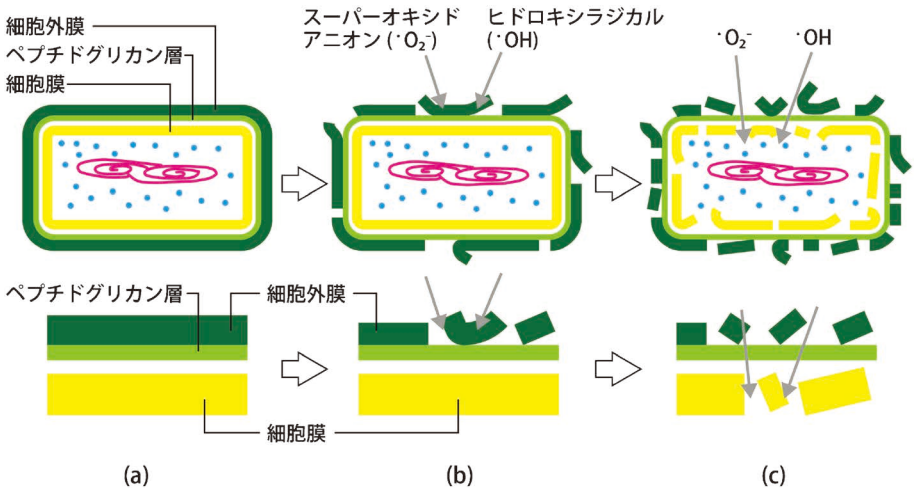


図 2　グラム陰性細菌の模式図(a)およびラジカルによる細菌死滅機序の模式図(b), (c). (参考文献(13)を改変)

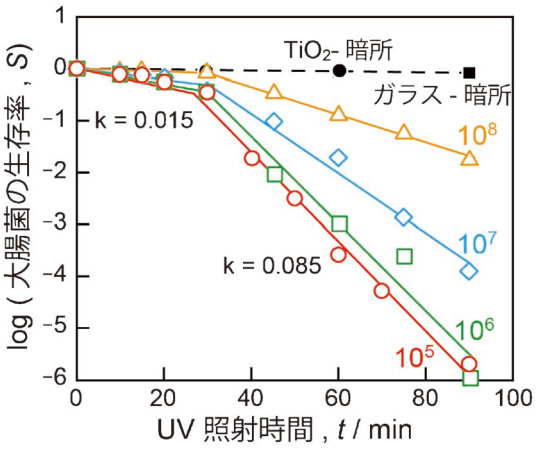


図 3　UV 照射時間と大腸菌生存率の関係. Open：初期菌濃度を変化させて UV 照射, Closed：ガラスもしくは酸化チタンコーティング材暗所保持. (参考文献(13)を改変)

周囲炎のように歯肉や骨の後退によりデバイス表面＝酸化チタン面が露出した部位に対して，ファイバーを用いることで光照射は可能である．そのため，有害な UV ではなく，可視光において光触媒活性を示す可視光応答性は，安全性の観点から求められる．

酸化チタンの可視光応答性については，元素ドープによる不純物準位形成や金属ナノ粒子担持による表面プラズモン共鳴を利用した方法が知られている[16]．後者は，金属ナノ粒子が半導体(この場合[17]は酸化チタン)と接している場合，金属ナノ粒子が特定の波長の入射光と共鳴を起こすことで電荷分離が生じる現象を利用している．共鳴状態にある金属から半導体の伝導帯への電子移動が生じ，可視光照射下で光触媒活性を示す[18]-[20]．金属ナノ粒子としては貴金属が挙げられるが，酸化チタンに対しては金(Au)ナノ粒子担持が多く報告されている[18]-[20]．

Ti への酸化チタンコーティングについては，陽極酸化[21]に代表される水溶液を用いたウェットプロセスが多く報告されている．ウェットプロセスでは溶液に元素を添加することで，酸化チタン膜中にも容易に元素を添加できる．

一方，著者らのグループでは，水溶液を用いないドライプロセスの一つである熱酸化法に着目し，酸化チタンコーティングに関する研究を行ってきた．ガスを用いた熱酸化法は，簡便，安価，複雑形状の基板への適用が可能，結晶性が高い皮膜が得られる，膜厚にもよるが密着力に優れる，といった利点がある．酸化チタン皮膜中への軽元素および遷移金属元素添加という観点に加え，酸化チタンの多形のひとつであるアナターゼ相形成を目的として，二段階熱酸化法を考案した[22]-[26]．炭素・窒素含有雰囲気中における第一段階処理により Ti(C,N,O)膜を作製し，大気雰囲気における第二段階処理によりこの Ti(C,N,O)膜を酸化させる．得られた酸化チタン膜には，第一段階処理雰囲気からの炭素・窒素に加え，基板である Ti 合金元素も含有することができる．Ti–Au 合金を基板として用いた場合には，Au ナノ粒子が担持された Au 固溶酸化チタン膜を得ることができた[25]．この結果に着目し，二段階熱酸化法を用いずとも，Ti–Au 合金の大気中熱酸化だけでも Au ナノ粒子担持酸化チタン皮膜が作製できると考えた．

Ti–xAu 合金(x＝0, 1, 5, 10 at%)の873 K における大気中熱酸化実験の一例を紹介する[27]．873 K にて大気酸化後の Ti–xAu 合金基板表面の SEM 像を**図 4**[27]に示す．Ti–5Au および Ti–10Au 合金表面からは微細な粒子が確認された．これら微細粒子の TEM 観察から粒径は50 nm 以下であり，高速フーリエ変換像から Au (FCC)であることが分かった．なお，表面 SEM 像から観察された網目状の凹凸はいずれも酸化により生成した酸化チタン層(ルチル)であり，酸化時間を制御することで膜厚約 1 μm とした．**図 5**[27]に，同試料表面の XPS スペクトル(Au 4f)を示す．Au 含有試料からは 0 価の Au が，Ti–1Au および Ti–5Au 試料からは 3 価の Au も検出された．これはそれぞれ金属 Au[28]および酸化チタン中に固溶した Au イオン[29]であると考えられ，表面観察の結果と合わせて，Ti–Au 合金の大気酸化という簡便な手法

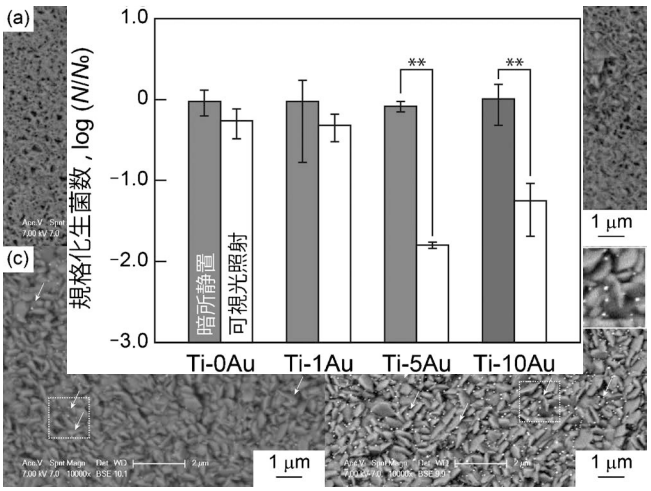


図4　873 K 大気中にて酸化処理した(a) Ti–0Au，(b) Ti–1Au，(c) Ti–5Au および(d) Ti–10Au 合金の

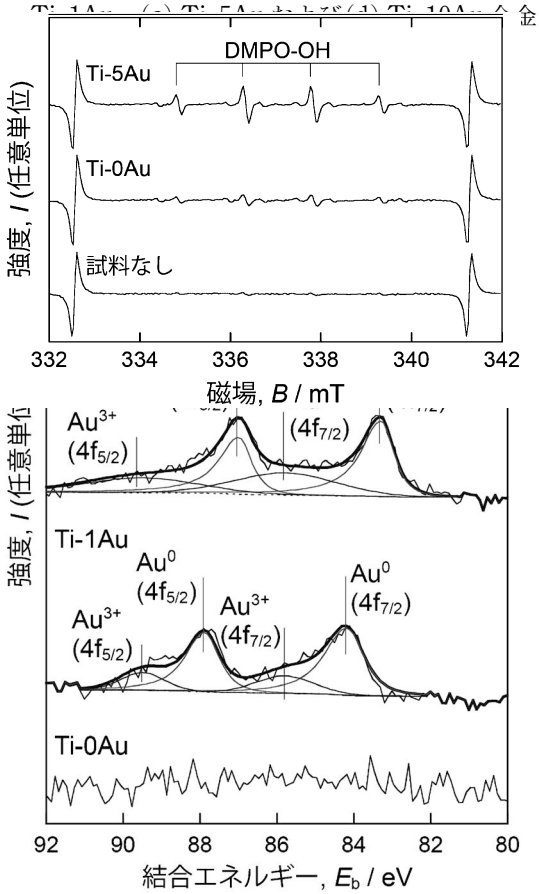


図5　873 K 大気中にて酸化処理した Ti–*x*Au 合金表面の XPS Au(4f)スペクトル．(参考文献(26)を改変)

により，Au ナノ粒子担持酸化チタン皮膜を作製できることを明らかにした．

得られた酸化チタン皮膜の光触媒活性の可視光応答性を調査するため，可視光照射下における水接触角測定を行った．光誘起親水性は，酸化還元反応による表面汚染の除去および表面における水酸基の増加に起因し，いずれも光照射による光電子の励起が反応の起点となる[30]．抗菌性も光電子の励起が反応の起点となり発現することから[31]，優れた光誘起

表1　873 K 大気中にて酸化処理した Ti–*x*Au 合金の UV 照射後，暗所静置後および7.2 ks 可視光照射後の水接触角(°±S.D.)

	UV照射後	暗所静置後	7.2ks可視光照射後
Ti-0Au	3.2±0.5	66.4±4.8	27.3±6.1
Ti-1Au	3.8±0.5	71.2±2.0	34.7±2.3
Ti-5Au	3.7±0.6	60.5±1.2	4.2.±0.2
Ti-10Au	3.3±0.5	63.7±2.8	4.4±0.4

親水性を示す酸化チタン皮膜は，優れた抗菌性を示すことが期待される．**表1**に，作製した皮膜の UV 照射(7.2 ks)後，暗所デシケーター内1週間静置後および可視光照射7.2 ks 後の水接触角を示す．いずれの試料においても，水接触角は UV 照射により5°以下となり，その後の暗所静置により60～70°まで増加した．これはそれぞれ UV 照射による酸化チタンの光誘起親水性によるもの，静置中に大気中の有機系汚染物質が表面に付着したためと考えられる．可視光照射により再度水接触角は減少したが，表面 SEM 像から Au ナノ粒子が観察されなかった Ti–0Au および Ti–1Au 試料では30°程度であった．一方，Au ナノ粒子が観察された Ti–5Au および Ti–10Au 試料では 5°以下まで減少した．以上の結果から，大気中酸化により作製した Au ナノ粒子担持酸化チタン皮膜は，可視光誘起親水性を発現しており，可視光照射下における光触媒活性が示唆された．

5.　酸化チタン皮膜の可視光照射下における抗菌性評価

可視光照射下における抗菌性は，JIS R 1702，JIS R 1752および ISO 17094に準拠した大腸菌を用いたガラス密着法により評価した．ϕ12 mm の試料に初期菌濃度 10^8 CFU・mL^{-1} (CFU: Colony forming unit)の菌液を 5 μL 播種し(5×10^5 CFU)，その上から ϕ10 mm のカバーガラスを被せ菌液と基板とを密着させた．その後すぐに菌液をリン酸緩衝液(PBS)中に回収し，塗抹平板培養法により生菌数を測定した．このときの値を初期生菌数(N_0)とした．カバーガラスを被せ14.4 ks の可視光照射もしくは暗所静置後，上記と同様に菌液を回収し生菌数を測定した．このときのそれぞれの生菌数を N_{vis}，N_{dark} とし，本研究では初期生菌数 N_0 で除した値を規格化生菌数として評価した．**図6**[27]は，各試料の可視光照射もしくは暗所静置後の規格化生菌数を示したものである．いずれの試料においても，暗所での培養では規格化生菌数は100 (=1)であり，細菌は死滅していないことを示している．一方，Au ナノ粒子担持酸化チタン皮膜である Ti–5Au および Ti–10Au 試料では，可視光照射により，暗所静置よりも有意に低い規格化生菌数となった．すなわち，これらの皮膜は光照射時のみ抗菌性を発現することが分かった．

抗菌性発現機構解明のため，可視光照射時に生成したラジカルの同定を行った．一般にラジカルの寿命は短いため，

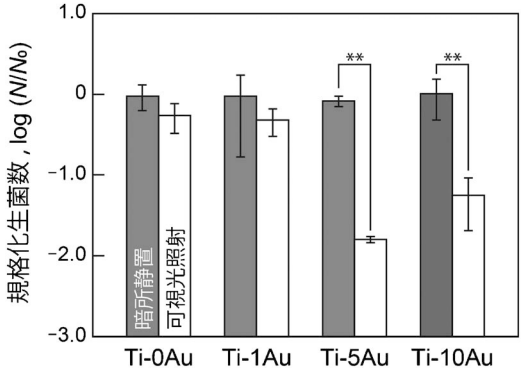


図 6　873 K 大気中にて酸化処理した Ti–*x*Au 合金の 14.4 ks 暗所静置および可視光照射後の規格化生菌数．（参考文献(26)を改変）

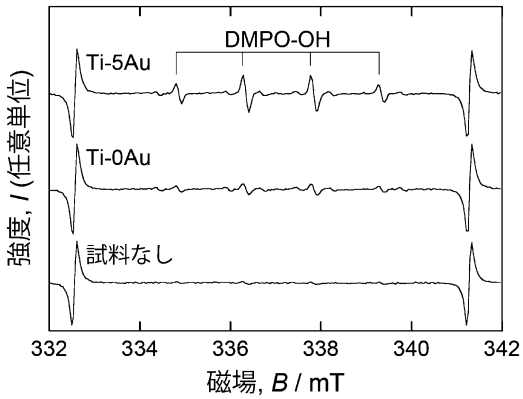


図 7　873 K 大気中にて酸化処理した Ti–5Au，Ti–0Au 合金および試料なし溶液の ESR スペクトル．（参考文献(26)を改変）

DMPO（5,5–Dimethil–1–pyrroline N–oxide）をスピントラップ材として用いた ESR 分析により行った．得られた ESR スペクトルを**図 7**[27]に示す．Ti–5Au 試料からは DMPO–OH に由来するピークが確認され，ヒドロキシラジカルの生成が確認された．

以上の結果から，Ti–Au 合金基板の大気中酸化処理により得られた Au ナノ粒子担持酸化チタン皮膜は光触媒の可視光応答性を有し，ヒドロキシラジカルを生成することで抗菌性を発現することが確認された．2 節で紹介した Sunada らの報告[14]では，UV を用いた場合に1.8 ks 培養までで第一段階の細胞外膜の部分分解が生じ，その後第二段階の細菌の死滅が生じていた．本研究では可視光を用いており，経時変化の検討は行っていないため比較はできないが，14.4 ks の可視光照射では既に第二段階の細菌の死滅が生じていたと考えられる．

6. おわりに

本報では，チタン製硬組織代替デバイスへの抗菌性付与の観点から，抗菌性付与方法および酸化チタンの光触媒活性に着目した抗菌性発現機序を概説した．酸化チタンの光触媒活性は，細菌のみならずウイルスも不活化できる．不活化の機序については，解説論文を参照されたい[15]．ウイルスは表面に脂質と糖タンパクからなるエンベロープを持つエンベロープ型と，持たない非エンベロープ型がある．2019年末から世界的なパンデミックを引き起こした新型コロナウイルス（SARS–CoV2）はエンベロープ型であるが，同じエンベロープ型であるインフルエンザウイルスは酸化チタンの光触媒活性により不活化できることが報告されている[15]．今後，SARS–CoV2 に対しても不活化に関する研究が進み，酸化チタンの光触媒活性が適応できることが期待される．本報で紹介した酸化チタンの光触媒可視光応答化を，ドアノブや手摺り，スイッチ等の生活の中で手に触れる部分に適用することで，照明程度の光照射によりウイルスを自然に不活化できれば感染拡大に有効である．

Ti–Au 合金の大気酸化という単純なプロセスにより，可視光応答型光触媒活性酸化チタン皮膜を作製できることを紹介した．歯科用インプラントへの応用に関しては，機械的特性とコストの観点から，インプラント全体を Ti–Au 合金にする必要は無く，表層のみを Ti–Au 合金化し，その酸化処理により Au ナノ粒子担持酸化チタン皮膜が作製できれば十分であり，その検討を行っている．

本研究の抗菌性評価は，東北大学加齢医学研究所，小笠原康悦教授，伊藤甲雄助教との共同研究の成果である．科学研究費補助金，基盤（B）（18H01718）（20H02448），（公財）軽金属奨学会研究補助金，東北大学加齢医学研究所共同利用・共同研究，東北大学金属材料研究所新素材共同研究開発センター共同利用研究の支援を受けて実施された．厚く御礼申し上げる．

文　献

（1）成島尚之，新家光雄：医療用金属材料概論，日本金属学会，(2010), 92.
（2）H. E. Götz, M. Müller, A. Emmel, U. Holzwarth, R. G. Erben and R. Stangl: Biomaterials, **25**(2004), 4057–4064.
（3）P.–I. Brånemark: J. Prosthet. Dent., **50**(1983), 399–410.
（4）M. A. Atieh, N. H. M. Alsabeeha, C. M. Faggion and W. J. Duncan: J. Periodontol., **84**(2012), 1–15.
（5）山本玲子：まてりあ，**59**(2020), 600–605.
（6）P. A. Norowski and J. D. Bumgardner: J. Biomed. Mater. Res. B, **88B**(2009), 530–543.
（7）A. Mombelli: Periodontol. 2000, **28**(2002), 177–189.
（8）J. Grischke, J. Eberhard and M. Stiesch: Dent. Mater. J., **35**(2016), 545–558.
（9）J. Wu, K. Ueda and T. Narushima: Mater. Sci. Eng. C, **109**(2020), 110599.
(10) A. Fujishima and K. Honda: Nature, **238**(1972), 37–38.
(11) 渡部俊也，砂田香矢乃，橋本和仁：無機マテリアル，**6**(1999), 532–540.
(12) M. Degidi, G. Daprile and A. Piattelli: Clin. Implant Dent. Relat. Res., **14**(2012), 501–507.
(13) T. Matsunaga, R. Tomoda, T. Nakajima and H. Wake: FEMS Microbiol. Lett., **29**(1985), 211–214.

(14) K. Sunada, T. Watanabe and K. Hashimoto: J. Photochem. Photobiol. A: Chem., **156**(2003), 227–233.
(15) J. Bogdan, J. Zarzyńska and J. Pławińska–Czarnak: Nanoscale Res. Lett., **10**(2015), 309(15 pages).
(16) A. L. Linsebigler, G. Lu and J. T. Yates: Chem. Rev., **95**(1995), 735–758.
(17) R. Asahi, T. Morikawa, T. Ohwaki, K. Aoki and Y. Taga: Science, **293**(2001), 269–271.
(18) Y. Tian and T. Tatsuma: J. Am. Chem. Soc., **127**(2005), 7632–7637.
(19) W. Hou and S. B. Cronin: Adv. Funct. Mater., **23**(2013), 1612–1619.
(20) Z. Lin, Z. X. Wang, J. Liu, Z. Tian, L. Dai, B. He, C. Han, Y. Wu, Z. Zeng and Z. Hu: Nanoscale, **7**(2015), 4114–4123.
(21) Y. Mizukoshi and N. Masahashi: Surf. Coat. Technol., **240**(2014), 226–232.
(22) T. Okazumi, K. Ueda, K. Tajima, N. Umetsu and T. Narushima: J. Mater. Sci., **46**(2010), 2998–3005.
(23) N. Umetsu, S. Sado, K. Ueda, T. Tajima and T. Narushima: Mater. Trans., **54**(2013), 1302–1307.
(24) S. Sado, T. Ueda, K. Ueda and T. Narushima: Appl. Surf. Sci., **357B**(2015), 2198–2205.
(25) T. Ueda, S. Sado, K. Ueda and T. Narushima: Mater. Lett., **185**(2016), 290–294.
(26) S. Sado, T. Ueda, Y. Tokuda, N. Sato, K. Ueda and T. Narushima: Mater. Trans., **60**(2019), 1814–1820.
(27) T. Ueda, K. Ueda, K. Ito, K. Ogasawara, H. Kanetaka, T. Mokudai, Y. Niwano and T. Narushima: J. Biomed. Mater. Res. A, **107**(2019), 991–1000.
(28) C. Wang, C. Liu, J. Chen and T. Shen: J. Colloid Interface Sci., **191**(1997), 464–470.
(29) X. Z. Li and F. B. Li: Environ. Sci. Technol., **35**(2001), 2381–2387.
(30) L. Zhang, R. Dillert, D. Bahnemann and M. Vormoor: Energy Environ. Sci., **5**(2012), 7491–7507.
(31) J. Podporska–Carroll, E. Panaitescu, B. Quilty, L. Wang, L. Menon and S. C. Pillai: Appl. Catal. B Environ., **176–177**(2015), 70–75.

★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★

上田恭介
2008年3月　東北大学大学院工学研究科博士課程修了
2008年4月　東北大学大学院工学研究科　助教
2019年8月–2020年8月　Imperial College London　Visiting Researcher
2013年4月– 現職
専門分野：医用材料工学
◎生体用金属材料の高機能化を目指した表面処理および組織制御プロセス開発に従事.

★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★

上田恭介

上田隆統志

成島尚之

入門講座

微小領域における金属材料の材料力学

—Ⅲ．微小金属材料の機械的特性への集合組織・合金化・双晶および不純物の効果—

曽　根　正　人*

この講座では，第一回に微小材料を扱うための組織解析方法を説明し，光学顕微鏡・X線回折法・走査型電子顕微鏡及び透過型電子顕微鏡の相補的解析とそれぞれの計測限界の重要性を議論した．第二回では微小材料の機械的特性を測定する上でのサンプルサイズや結晶粒サイズの効果を議論するとともに，マイクロメートルサイズの大きさに独特の問題を議論した．議論する金属材料としては，基本的に純物質の金属，特に電気めっき材料を対象にした．電気めっき材料は，基本的に結晶粒が小さく，同時に集合組織も小さい．したがって，材料として均質な部類に分類されるため，機械的特性の議論に対しては扱いやすい．

今回の講座では，この微小金属材料における様々な結晶組織，合金化さらに不純物がどのように材料の機械的特性に影響を与えるかについて，実験結果に基づいて議論する[1]．金属材料のサンプルサイズが小さい場合には，金属材料の結晶組織および不純物はバルク材料とは異なる影響を機械的特性に与える可能性がある．今回は特に，電気めっき材料の機械的強度への集合組織，合金化，双晶及び不純物の影響をマイクロメートルサイズで議論する．

3・1　微小金属材料における集合組織の影響

第二回目の講座で，微小材料試験，特に微小圧縮試験を用いることで，金属の結晶粒がどのようにマイクロメートルサイズの金属材料における機械的特性に影響するかを明らかにした[2][3]．**図3.1**に，めっき材料のような薄膜材料から集束イオンビーム(FIB)加工機を用いた微小角柱試験片の加工方法を示す[4]．この図より薄膜に対してFIBをどの方向から照射するかにより，マイクロメートルレベルの角柱試験片を薄膜に対して様々な方向に作製できることはわかる．

典型的な例として，**図3.2**にシアン金めっき浴から作製した純金めっきの微小角柱試験片(微小金角柱試験片)の走査イオン顕微鏡(SIM)像を示す[5][6]．ここでシアン金めっきは金めっきの代表的なものであり，我々が日常で触れる機会のある金めっき材料であることを強調しておきたい．SIM像を用いることで，結晶粒の方位の違いが色の違いとして示される．図3.2(a)は結晶成長の方向(すなわちめっき膜に鉛直の方向)と角柱の長軸が垂直であり，図3.2(c)では平行である．これらの図から，シアン金は繊維状集合組織を呈しており，結晶粒方位の一致する柱状領域(柱状ドメイン)の直径はおよそ数マイクロメートルであることがわかる．これを圧縮した結果が，それぞれ図3.2(b)および(d)である．図3.2(b)においては微小金角柱試験片では圧縮変形において脆性破壊が見られている．純金バルク材料は典型的な延性材料であるにもかかわらず，脆性破壊が見られている．特に集合組織における結晶方位の異なる領域の境界で破壊が起こっている[7]．

図3.3に図3.2の微小圧縮試験で得られた公称応力—ひずみ曲線を示す．ここでは，ひずみをクロスヘッドの変位から算出している．この図より，3つの大きな知見が得られた．まず図3.2(a)に示す結晶成長の方向が角柱の長軸に対して垂直な試験片では650 MPaの降伏強度を示し，一方で図3.2(b)すなわち結晶成長の方向が角柱の長軸に対して平行な試験片では300 MPaの降伏強度を示している．純金バルク材料の降伏強度は50～200 MPaとして報告されており[8]，どちらも純金の強度より大きい．また脆性破壊を示すにもかかわらず，純金バルク材料より強度が大きい．次に重要な点は，結

* 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　III.　Effects of Texture, Alloying, Twin and Impurity on Mechanical Property of Micro-size Metal; Masato Sone (Institute of Innovative Research, Tokyo Institute of Technology, Yokohama)
Keywords: *micro-size, mechanical property, texture, twin structure, alloying, impurity, strengthening*
2020年7月7日受理[doi:10.2320/materia.59.618]

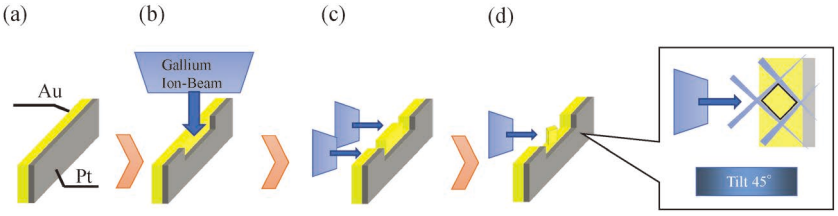


図3.1　FIB による微小角柱試験片の作製工程．(a)プラチナ上にめっきした材料の切断および断面研磨，(b) FIB による端面からのめっき部分の切り出し，(c)角柱の粗加工，(d)精密加工．

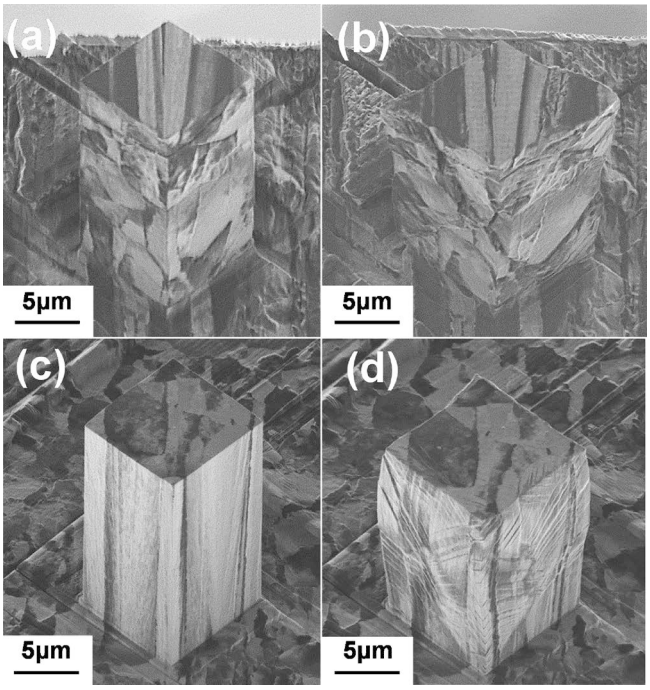


図3.2　微小圧縮試験前後のシアン金めっき浴で作製した微小金角柱試験片(10 μm×10 μm×20 μm)のSIM 像．(a)，(b)：めっき成長方向と角柱長軸が垂直，(c)，(d)：平行，(a)，(c)：試験前，(b)，(d)：試験後．

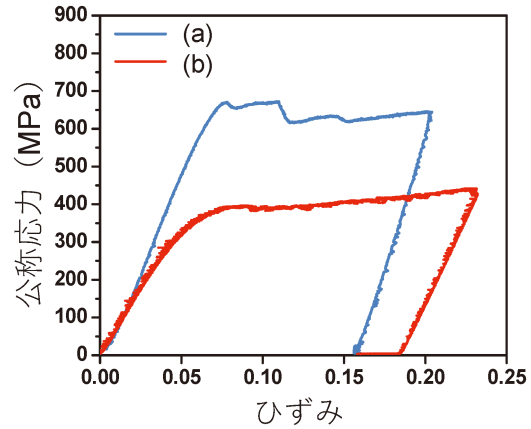


図3.3　シアン金めっき浴で作製した微小金角柱試験片の公称応力–ひずみ曲線．めっき成長方向と角柱長軸が垂直(a)および平行(b)．

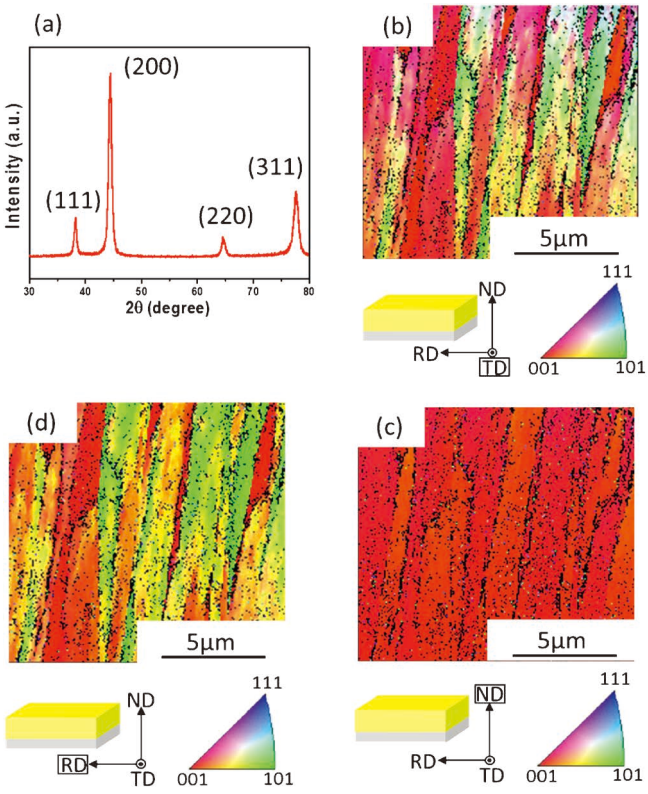


図3.4　シアン金めっき浴で作製した金めっきのX 線回折パターン(a)，および EBSD 像(b)TD，(c)ND，(d)RD．

晶成長の方向と角柱の長軸の方向との関係で二倍程度異なる降伏強度を示すことである．これに関しては，集合組織の違いが影響している可能性がある．最後に，650 MPa という降伏強度であり，数マイクロメートルの柱状ドメインの影響としては，あまりにも大きく強化されていることがわかる．

そこで，**図3.4**に示すX 線回折パターンと電子線後方散乱回折(EBSD)パターンを計測した[6]．X 線回折パターンからはその大きな半値幅からナノ結晶の存在が示され，Scherrer の式から14.7 nm の結晶粒径が計算された．この結晶粒径は650 MPa という高い降伏強度を説明する．しかし EBSD からは1～3 マイクロメートルの方位の異なる柱状ドメインの存在を明示している．これは矛盾しているように見える．そこで，**図3.5**にこの金めっき材料の透過型電子顕微鏡(TEM)像を示す．この TEM 像から約10ナノメートル直径の柱状微細粒を確認できる．この TEM 像はX 線回折パターンか

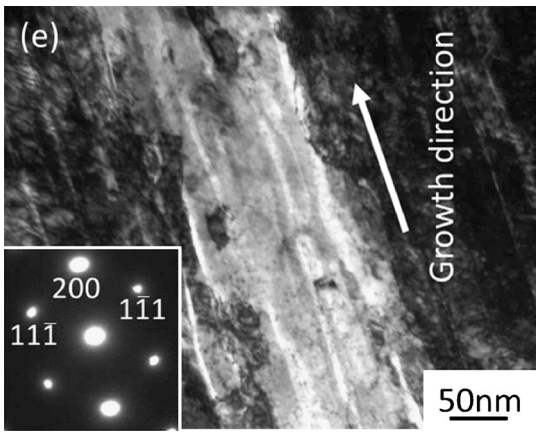


図3.5　シアン金めっき浴で作製した金めっきの TEM 像.

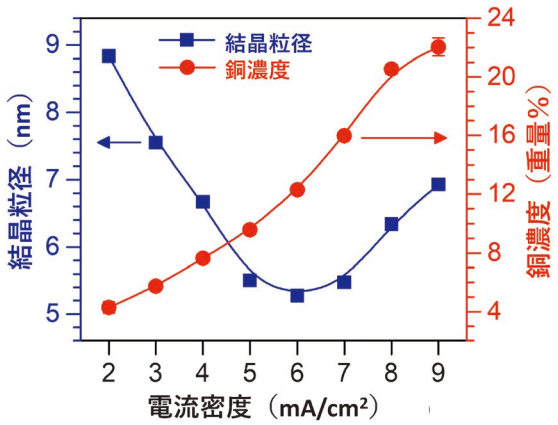


図3.6　亜硫酸金銅合金めっきの電流密度に対する結晶粒径および銅濃度.

ら得られる結晶粒径の値と一致している．従って，シアン金という最もありふれた金めっき材料でも，約10ナノメートルの柱状ナノ結晶粒と数マイクロメートルの柱状ドメインからなる複雑な繊維状集合組織を階層的に有しているのである[6]．また，EBSD パターンでは，当然ながら約10ナノメートルの等軸な柱状ナノ結晶粒を判別することはできない．これは，EBSD パターンを計測する SEM の分解能から起因している．

更にこの結果から，興味深いことがある．降伏強度650 MPa という高い降伏強度は10ナノメートルの柱状ナノ結晶組織に起因しており，脆性は数マイクロメートルの柱状ドメインの境界に起因している．シアン金めっきの集合組織に対する降伏強度の変化は，マイクロメートルサイズの柱状粒を有するニッケルの研究結果[9]と比較しても非常に大きいものであり，ナノ柱状結晶粒が大きく影響している．従って，集合組織と結晶組織は別々に金めっき材料の機械的特性に影響している．

このような興味深いシアン金めっき材料の機械的特性は，金属材料に被覆されている金めっきの形状では顕在化しない可能性が高い．なぜなら硬度測定におけるインデンターの印加方向は，めっき被膜の成長方向に沿っている．これは，図3.3(c)から(d)の圧縮変形に対応しているからである．硬度測定では，このような脆性は見えにくいと思われる．

3・2　微小金属材料における合金化の影響

前節でシアン金めっきという極めてありふれた金属めっき材料を議論した．純金めっきであってもこれほどに複雑な結晶構造を有する場合がある．それでは，合金化によってどのような現象が起こるのかは興味深い．ここでは，金めっき浴においてシアン浴と並び一般的な亜硫酸めっき浴を選択し，金銅合金といったありふれた金合金めっき材料の特徴的な結果を議論する[10][11]．

前回において，一般的にはシリコンで作製されている MEMS 加速度センサを金で作製することにより，感度を飛躍的に上昇できることを示すと同時に，金材料の高強度化が重要であることを記述した[12]．金めっき材料の結晶粒微細化強化によって600～800 MPa の降伏強度，すなわち 3～4 倍程度の強化は実現できる．しかし，シリコンは破断強度が 2.6 GPa なので，更なる強化が必要である．金属材料を結晶粒微細化強化しても理論的限界があり，純金の場合は1.2 GPa を超えることはない[5]．しかし合金化した場合においては，固溶強化機構により純金よりも高い降伏強度が得られることが予想できる．興味深いことは，電気めっき反応においては，めっきの反応条件により合金組成が変えられることである．

図3.6に，市販の硬質亜硫酸金銅合金めっき浴を用いて，電流密度を変化させ得られた金銅合金の合金組成(銅濃度)と X 線回折パターンの半値幅から得られた結晶粒径の値をプロットした結果を示す[10]．第一回で，X 線回折パターンの半値幅から得られた結晶粒径をそのまま使うのは危険があると議論したが，これに関しては後ほど詳細に議論するので，お許し願いたい．この図より，2～9 mA/cm² の領域の電流密度の増加に伴い，銅の濃度は 4 から22重量％へと単調に増加している．電気めっき法により幅広い組成の金銅合金が作製できることがわかる．同時に興味深いことは，X 線回折パターンの半値幅から得られた結晶粒径が，電流密度 2～6 mA/cm² まで単調に減少し，その後増加することである．更にその大きさが最小で 4 ナノメートルまで減少する．4 ナノメートルの結晶粒は通常アモルファス金属の領域[2]であり，信じがたい値である．

図3.7には，電流密度3.0，5.0，6.0，8.0 mA/cm² で作製した金銅合金めっきの微小圧縮試験前後の SIM 像である．銅の組成はそれぞれ16，10，5.0，10重量％に対応している．特に8.0 mA/cm² では変形前に，シアン金とは異なる粒状ドメインが見られる．電流密度3.0，5.0，6.0 mA/cm² では，典型的なナノ結晶に見られる変形であり[3]，それに対して8.0 mA/cm² では脆性破壊している．シアン金の微小圧縮

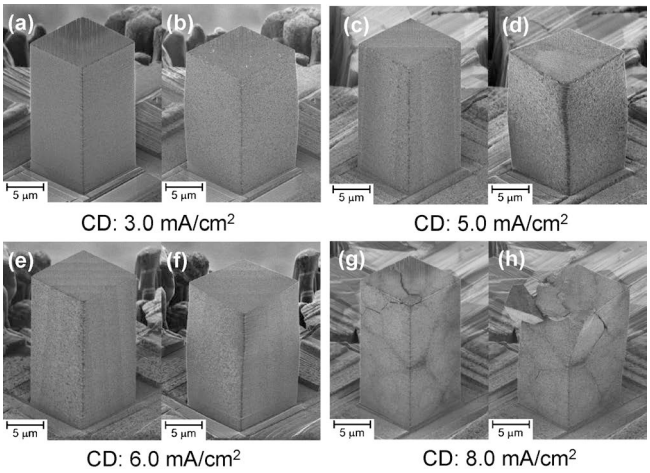


図3.7　亜硫酸金銅合金めっきの電流密度に対する微小圧縮試験前後の SIM 像．各左（a），（c），（e），（g）：試験前，各右（b），（d），（e），（g）：試験後．

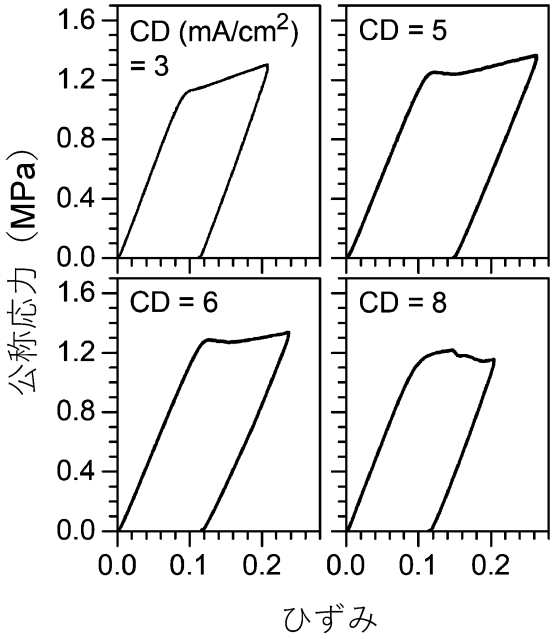


図3.8　亜硫酸金銅合金めっきの電流密度に対する微小圧縮試験の公称応力–ひずみ曲線の変化．

試験の結果とは破壊の仕方が異なっているが[6][7]，明確に粒状ドメイン境界での破壊が観察できる．このような延性―脆性転移は他の合金系でも報告されている[13][14]．

この微小圧縮試験で得られた公称応力–ひずみ曲線を**図3.8**に示す．電流密度3.0，5.0，6.0，8.0 mA/cm² では降伏強度は，それぞれ1.03，1.14，1.15，0.95 GPa と非常に高い値を示している．脆性破壊を示した8.0 mA/cm² においても純金めっきでは得られない高い降伏強度を示している．得られた降伏強度を結晶粒径と銅組成でプロットした結果が，**図3.9**である．既報の文献値も比較対象のために併記している．この図より，我々の金銅合金めっきの降伏強度の結果は，既報のいずれのものより高い値を示していることがわかる．ただし図3.9の結晶粒径に対する降伏強度の相関に関して，Jankowski らの研究[15]と我々の結果は十分一致しているが，Lohmiller らの研究[16]とは全く一致していない．これは，結晶粒径の計測方法に起因している．Jankowski らの研究[15]と我々の結果は X 線回折パターンの半値幅から得られた結晶粒径を用いており，Lohmiller らの研究[16]は SEM による結晶粒径を用いている．一方，図3.9の銅濃度に対する降伏強度の相関に関しては，Lohmiller らの研究[16]は我々の結果と一致している．ここでまた，X 線回折パターンの半値幅から得られた結晶粒径をそのまま使うのは危険があると議論した議論に戻る．すなわち我々の金銅合金の X 線回折パターンの半値幅から得られた結晶粒径とは何かということである．

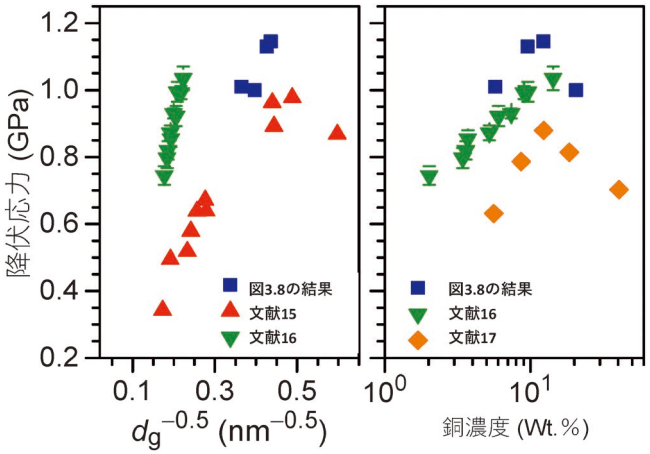


図3.9　亜硫酸金銅合金めっきの結晶粒径（d_g）および銅濃度に対する降伏強度の変化．

3・3　微小金属材料における双晶の影響

図3.10に亜硫酸金銅合金めっき浴を用いて作製した $Au_{85}Cu_{15}$ と $Au_{68}Cu_{32}$ の合金の TEM 像および高分解能 TEM（HRTEM）像を示す[17]．図3.10（a）および（b）の TEM 像から計測された平均結晶粒径は，それぞれ25.6，16.6ナノメートルである．同じ試料の X 線回折パターンの半値幅から得られた結晶粒径は，それぞれ7.8，4.7ナノメートルである．この場合でも，TEM の結晶粒径と X 線回折パターンの半値幅から得られた結晶粒径は大きく異なる．

図3.10（a）および（b）の TEM 像の図中の矢印で示しているのは双晶である．図3.10（c）および（d）の HRTEM 像からナノ結晶粒の中に双晶が見られる．ここからわかることは，X 線回折パターンの半値幅から得られた結晶粒径とは，ナノ結晶粒サイズと双晶間隔の組み合わされた数値である．ここで，前回のナノ結晶ニッケルの場合は X 線回折パターンの半値幅から得られた結晶粒径と TEM で計測された結晶粒径とは一致していたが，ニッケルの積層欠陥エネルギーが高いため双晶が形成されにくいことが理由として挙げられる[3]．それに対し，積層欠陥エネルギーが低い金および金銅合金で

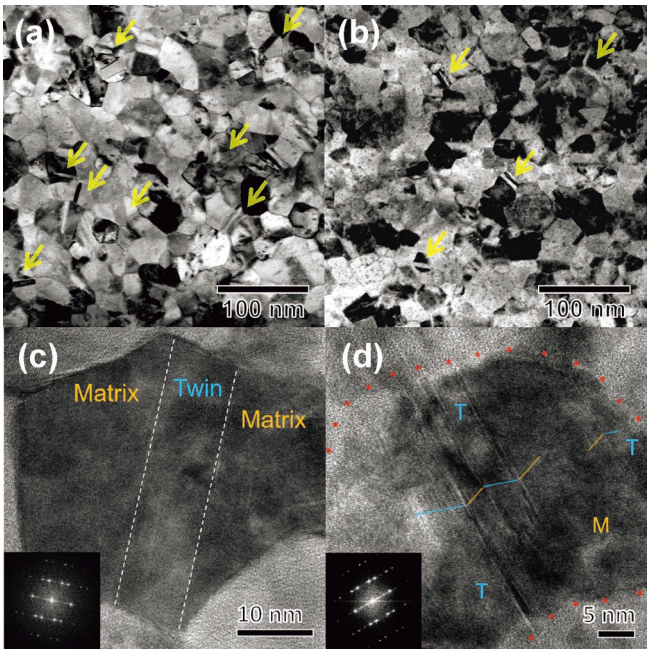


図3.10　亜硫酸金銅合金めっきの TEM 像．(a)$Au_{85}Cu_{15}$，(b)$Au_{66}Cu_{34}$ 及び HRTEM 像，(c)$Au_{85}Cu_{15}$，(d)$Au_{68}Cu_3$．

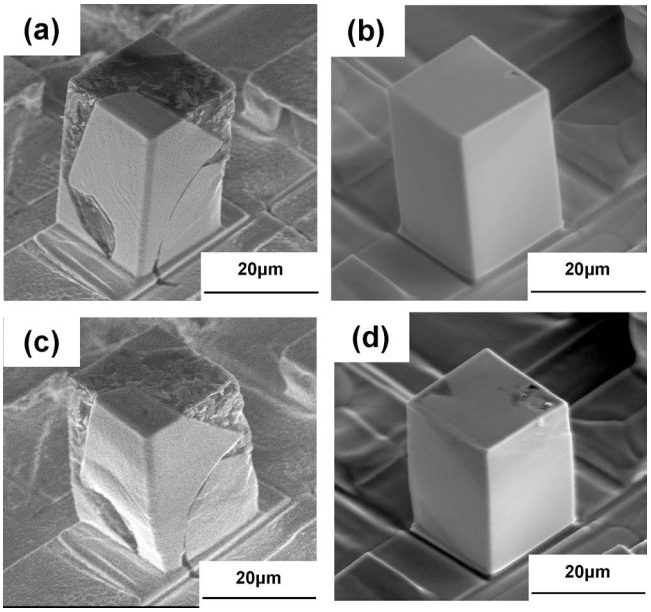


図3.11　微小圧縮試験前後のすずめっきの微小すず角柱試験片の SIM 像．(a)，(c)：通常法，(b)，(d)超臨界二酸化炭素めっき浴，(a)，(b)試験前，(c)，(d)試験後．

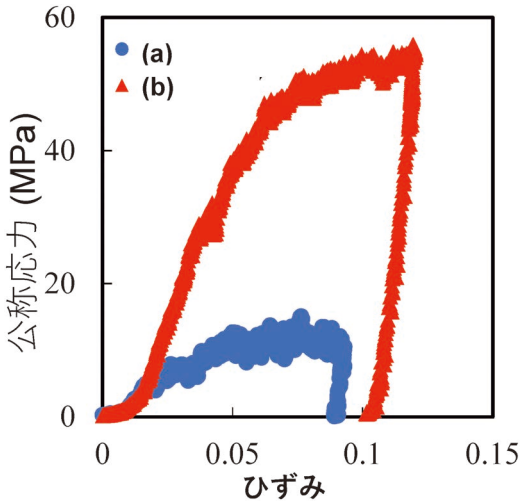


図3.12　超臨界二酸化炭素めっき浴より作製したスズめっき(a)及び通常電気めっき(b)の公称応力−ひずみ曲線．

は，X 線回折パターンの半値幅から得られた結晶粒径は双晶を含む値であるということである．上記で異常に小さな結晶粒径と記述したが，双晶形成を考慮に入れると理解ができる．Lohmiller らの研究[16]は電気化学の分野で非常に丁寧に研究したものであり，めっき分野で引用数も多い論文である．材料工学において材料工学の理解を革新する HRTEM の破壊力の一端を見ることができる．

3・4　微小金属材料における不純物の影響

これまでに，微小圧縮試験片を用いて様々な金属の微細組織の影響を議論してきた．結晶粒や集合組織・双晶などは金属材料の本質的な構造であり，副次的な反応に起因する不純物とは区別するものである．しかし，不純物が微小金属材料に含まれる場合，どのような結果になるのかは興味深い．**図3.11**に一般的なスズめっきと，本講座第一回目で述べた超臨界二酸化炭素めっき浴によるスズめっきの微小角柱試験片の SIM 像を示している[18][19]．超臨界二酸化炭素めっき浴では，めっきの副反応の水素発生が抑制できピンホールと言われるボイドの発生を抑制できる．X 線光電子分光法で元素分析した結果，通常のスズめっきの表面と内部には多量の酸化スズの形成が見られ，超臨界二酸化炭素めっき浴では表面のみ観測された．図3.11(a)は通常のスズめっきであるが，黒い欠陥が含まれており，ボイドの形成が表面に見られる．一方図3.11(b)には欠陥がない．微小圧縮試験後は双方ともに変形が見られる．**図3.12**に図3.11に対応する公称応力−ひずみ曲線を示す．超臨界二酸化炭素めっき浴によるスズめっきの降伏応力は 8 MPa であるのに対し，通常のスズめっきは40 MPa と 5 倍の値を示している．これは，通常のスズめっきはボイドの形成とともに酸化スズがボイド内部および表面に大量に形成され，この酸化スズがめっき被膜の強度を向上させていると解釈できる．従って，スズめっきの場合，副反応に起因する酸化スズという不純物が複合材料強化しているのである．スズめっきは薄膜であるため，硬度測定を通してこのような奇妙な現象が見逃されてきたことは興味深い．

3・5　微小金属材料へ影響を与える様々な要素

前回の講義において金属の結晶粒サイズやサンプルサイズが微小金属材料に及ぼす影響について議論し，今回は更に集合組織や双晶など金属の本質的な構造および合金化という金属の機械的強度に大きな影響を与える因子について議論した．さらにバルク材料ではほとんど無視できる表面酸化物という不純物が微小金属材料にいかに強力に影響を与えるかを示した．この内容のほとんどは，金属学を学ぶ研究者にとって常識的な組み合わせであると思う．異なっているのはサンプルサイズであり，サイズの変化に伴い顕在化する現象の強弱が変わるのである．集合組織やボ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である．

また，金属種の積層欠陥エネルギーの大小で，X線回折法により得られる結晶粒径の解釈を変更する必要があることも重要な知見である．TEMやHRTEMの出現によって，それまでの結晶組織そのものの見方も変わっている．従って単純な結晶粒径の文献値すらも，方法論や時代を考慮して，何が信頼できるのか，どの結果が現在の研究に通用するものであるのかを評価して文献として採用すべきである．

文　　献

（1）加藤雅治，熊井真次，尾中晋著：材料強度学，朝倉書店，(1999)，69–86.
（2）J. R. Greer, W. C. Oliver and W. D. Nix: Acta Mater., **53**(2005), 1821–1830.
（3）T. Nagoshi, M. Mutoh, T.–F. M. Chang, T. Sato and M. Sone: Mater. Lett., **117**(2014), 256–259.
（4）T. Nagoshi, T.–F. M. Chang, T. Sato and M. Sone: Microelectron. Eng., **110**(2013), 270–273.
（5）C.–Y. Chen, M. Yoshiba, T. Nagoshi, T.–F. M. Chang, D. Yamane, K. Machida, K. Masu and M. Sone: Electrochem. Commun., **67**(2016), 51–54.
（6）M. Yoshiba, C.–Y. Chen, T.–F. M. Chang, T. Nagoshi, D. Yamane, K. Machida, K. Masu and M. Sone: Mater. Trans., **57**(2016), 1257–1260.
（7）M. Yoshiba, C.–Y. Chen, T.–F. M. Chang, T. Nagoshi, D. Yamane, K. Machida, K. Masu and M. Sone: Materials Letters., **202**(2017), 82–85.
（8）H. D. Espinosa, B. C. Prorok and B. Peng: J. Mech. Phys. Solids, **52**(2004), 667–689.
（9）H. Imamura, T. Nagoshi, A. Yoshida, T.–F. M. Chang, S. Onaka and M. Sone: Microelectron. Eng., **100**(2012), 25–27.
(10) 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.
(11) 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.
(12) K. Machida, T. Konishi, D. Yamane, H. Toshiyoshi and K. Masu: ECS Trans., **61**(2014), 21–39.
(13) T. E. Tiez and J. W. Wilson: Behavior and Properties of Refractory Metals, Univ. Tokyo Press, (1965).
(14) Y. Hiraoka, T. Inoue, H. Hanado and N. Akiyoshi: Mater. Trans., **46**(2005), 1663–1670.
(15) A. F. Jankowski, C. K. Saw, J. F. Harper, B. F. Vallier, J. L. Ferreira and J. P. Hayes: Thin Solid Films, **494**(2006), 268–273.
(16) J. Lohmiller, N. C. Woo and R. Spolenak: Mater. Sci. Eng. A, **527**(2010), 7731–7740.
(17) E. Brun, F. Durut, R. Botrel, M. Theobald, O. Legaie, I. Popa and V. Vignal: J. Electrochem. Soc., **158**(2011), D223–D227.
(18) 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.
(19) M. Tanabe, T.–F. M. Chang, H. Hosoda, T. Sato and M. Sone: ECS Electrochem. Lett., **3**(2014), D44–D45.
(20) M. Tanabe, T.–F. M. Chang, T. Nagoshi, S. T. Chung, W. T. Tsai, H. Hosoda, T. Sato and M. Sone: Microelectron. Eng., **141**(2015), 219–222.

曽根正人

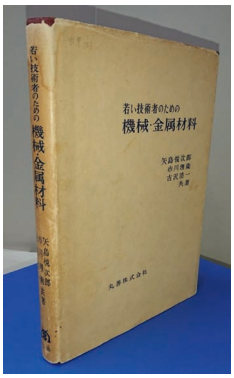
★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★
1996年　東京工業大学・理工学研究科博士課程修了（博士（工学））
1996～2000年　日本石油株式会社・中央技術研究所・研究員
2000～2005年　東京農工大学・工学部・助教
2005～2017年　東京工業大学・精密工学研究所・准教授
2017年～現職
専門分野：材料工学
◎エレクトロニクスや医用MEMSセンサ用材料創成と材料評価技術開発を中心に活動.
★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★

思い出の教科書，この一冊！

“若い技術者のための機械・金属材料”

矢島悦二郎　市川理衛　古沢浩一（共著）　丸善　1967年

産業技術総合研究所　田 中 秀 明



■現在の本書（筆者蔵書）の外観．長年ブックカバーを被せていたため，半世紀にわたり親子２代で使ったわりには状態良好．

■本書の最新版の表紙(1)

会報編集委員会でこのコラムの企画が出された際，その趣旨として，「大学時代の専門課程で教材に使われていたなど各位の印象に残った書籍を挙げ，単なる書評でない，読者の想いのようなものを示してほしい」とあった．しかし，筆者がかつて大学の講義などで用いた教科書など，いわゆる導入書や専門書についてはそれを講義や実践で使用される大学の先生方が紹介されるであろうから，教育者でない筆者はやや目先を変え，筆者が恐らく生涯初めて「金属」に学問として接したこの書籍を本稿では挙げることにする．

筆者がこの本（1967年刊行の初版）を目にしたのは，小学生の頃であった．機械の設計技術者であった父親の本棚に他の多くの専門書とともに収まっていることは早くから知っていて，たまに手に取ってみたことはあったが，掲載されている組織写真や図表は白黒で，子供にとってはお世辞にも面白い内容ではなく，図鑑や読み物にはなり得なかった．ただ，何となく見ていただけでも意外と頭に残るものである．本書の内容にある程度の関心を持つようになったのは，中学生の頃であった．それまでは単に身近に「在る」だけであった金属が，理科の授業での実験や技術・家庭科での電気工作や板金工作を通じて，自分の手で変形させたり熔かしたり，材料毎の性質や性能の違いを現象や数値として実感できるようになったことで興味が増し，それに連れて視野・知識が広がってきた．高校に進み，物理や化学において金属を扱う授業が増えると，本書は様々な要素を網羅していることもあり，＋αの知識を得る参考書として役立った．この頃になってもまだ，自分が後年，金属の分野に進むなど思いもしなかった（そもそも高校２年頃まで文科系志望）が，紆余曲折があって，大学では（第３希望の）金属工学科に進むことになった．

筆者の出身大学では当時，１年次に一般教養科目とともに「金属組織学概論Ⅰ・Ⅱ」という専門課程への導入的な必須科目があった．そこでは，状態図，固溶体，相律，拡散，結晶構造，欠陥など多岐にわたる基礎を教わった．正規の教科書（朝倉書店の某書）は勿論あったが，幼少の頃からの“予習”の効果もあってか“拒否反応”は無かったように思う．この科目に限らず，専門科目の履修に当たって本書（当時は1979年版が最新）が教科書として指定されることは大学時代を通じて無かったが，親から借りたこの本は引き続き，片道１時間の通学電車の中でのチョイ読みなどに繰り返し役立った．

本書はその名が示す通り，機械で使用される金属材料，すなわち構造材料を対象として，初版刊行以来，1979年，2002年及び2017年に増補・改訂を重ね，大学学部や高専などで教科書として半世紀以上にわたって受け入れられてきた．

さて，その構成であるが，

第１編　金属材料の基礎（金属と結晶構造，金属の変態と合金の構造，相律と二元系平衡状態図，金属の塑性変形と格子欠陥，金属の強化機構概説，金属材料の試験方法）　88頁

第２編　鉄鋼材料（炭素鋼の基礎，鋼塊・鋼材，鋼の塑性加工，炭素鋼の熱処理と実用炭素鋼，鋼の表面処理，特殊鋼の基礎，特殊鋼の炭化物と熱処理，低合金特殊鋼，高合金特殊鋼，磁性材料，鋳鉄）　152頁

第３編　非鉄材料（アルミニウム合金，マグネシウム合金およびチタニウム合金，銅合金，スズ，鉛および亜鉛合金，ニッケル合金，貴金属および希有金属，特殊金属材料）　78頁

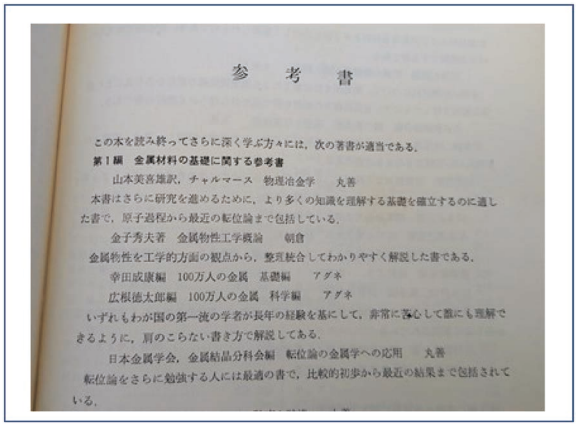
に続き，付録（元素の物理的性質，温度換算表，硬さ換算表）９頁が収録されている．そして，参考文献が１点も示されていない代わりに，各編の理解を深めるための参考書が２ページにわたって示され，より広く深い探究を促している（**写真１**）．

本書では材料科学の基礎が丁寧に解説されていることに加え，現場技術者による実用的な知見が多分に収録されている．ある書評に「基本方針として，従来の基本形態は変更せず，時代に合わないものを刷新し，新しいものが採り入れられてきたといえる．」とあるように，書店に並んでいる最新版と比較してみても，表紙(1)はともかく，初版を基礎として構成されていることが分かる．

本書は「若い技術者のための」と冠し，読者の年齢層をあえて指定している．しかし，そこは「（青春）18きっぷ」が18歳など遠い昔となった世代でも楽しめるのと同じで，かつては若かった技術者にとっても金属学の基礎を顧みるのに十分役立つ内容である．小職は今でも時々お世話になっている．

文　　献

（１）https://www.maruzen-publishing.co.jp/item/b295138.html


参　考　書

この本を読み終ってさらに深く学ぶ方々には，次の著書が適当である．

第１編　金属材料の基礎に関する参考書

山本美喜雄訳，チャルマース　物理冶金学　丸善

本書はさらに研究を進めるために，より多くの知識を理解する基礎を確立するのに適した書で，原子過程から最近の転位論まで包括している．

金子秀夫著　金属物性工学概論　朝倉

金属物性を工学的方面の観点から，整頓統合してわかりやすく解説した書である．

幸田成康編　100万人の金属　基礎編　アグネ

広根徳太郎編　100万人の金属　科学編　アグネ

いずれもわが国の第一流の学者が長年の経験を基にして，非常に落ち着いて誰にも理解できるように，肩のこらない書き方で解説してある．

日本金属学会，金属結晶分科会編　転位論の金属学への応用　丸善

転位論をさらに勉強する人には最適の書で，比較的初歩から最近の結果まで包括されている．

■写真１　参考書紹介ページ（一部）．本書は1967年版であるが，今でも目にする書名がみられる．

（2020年８月11日受理）[doi:10.2320/materia.59.624]

本 会 記 事

会　告　終身会員制度のお知らせ ……625
今後の講演大会開催予定 ……625
2021年度会費お払込みのお願い ……625
2021年春期講演大会講演募集 ……626
2021年春期講演大会公募シンポジウムテーマ要旨 ……634
2021年春期講演大会高校生・高専ポスター発表募集 ……636
2021年春期講演大会参加申込みについて ……637
研究集会 ……638
2020年秋期講演大会記録 ……640

掲示板 ……638　次号予告 ……643
訂正 ……641　新入会員 ……644
会誌・欧文誌11号目次 ……642　行事カレンダー ……645

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をしております．

会　告(ホームページもご参照下さい)

終身会員制度のお知らせ

入会歴が40年に満たないために永年会員となっていただけない方のために，満60歳以上満65歳以下の会員が70歳までの会費を前納いいただくと終身会員の称号を贈り，以降の会費を免除することとしました．前納会費の額は70歳までの会費の総額に比べて割安となっておりますので，ぜひご利用下さい．

年齢(2021年１月１日時点)	前納会費	通常会費
60歳	80,000円	110,000円
61歳	70,000円	100,000円
62歳	65,000円	90,000円
63歳	55,000円	80,000円
64歳	50,000円	70,000円
65歳	40,000円	60,000円

ご希望される方は，11月30日までに生年月日をそえて，下記連絡先にご連絡下さい．
連絡先：(公社)日本金属学会　会員サービス担当　E-mail: member@jim.or.jp

2021年度会費お払込みのお願い

2021年の会費納入時期となりました．個人会員の方は，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」を郵送いたします．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，手続きをして下さい．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・会員→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

今後の講演大会開催予定

- 2021年 春期 (第168回)
日程：2021年３月16日(火)～19日(金)
オンライン開催(詳細次頁)

- 2021年 秋期 (第169回)
日程：2021年９月２日(木)～４日(土)
会場：名城大学天白キャンパス

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ことが懸念されます．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，参加者用 ID とパスワードを配信いたします.

講演申込受付・概要原稿提出を下記日程で行います.

講演を申込される前に下記をご確認下さい

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が必要です．期日までに参加費を納入下さい.
□原則，講演申込者＝講演発表者であること.(「申込要領」5. を参照)
□本会の会員パスワードを紛失または忘れた方は，本会ホームページより再発行を行うこと．セキュリティ上，電話やメールでの発行は出来ません.

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・大会参加事前予約期間	11月25日(水)13時～1 月 7 日(木)17時
講演についての問合先：公益社団法人日本金属学会　講演大会係　annualm@jim.or.jp 〒980–8544 仙台市青葉区一番町 1–14–32	

これから入会して講演申込をされる方へ

□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.
□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.

入会申込 URL	https://www.jim.or.jp/member/mypage/application.php
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)
入会申込期限	12月28日(月)
年会費納入期限	1 月29日(金)
入会・会費の問合せ：会員サービス係　member@jim.or.jp	

講演申込要領

※一般講演およびポスターセッションの申込は，講演セッションキーワード一覧から，第１希望および第２希望のセッションキーワードを選択する．キーワードへの申込数および内容を参考に最終的に組入れるセッションを確定する．

※申込方法について

すべて **WEB** 申込とする．

※講演時間・概要サイズについて

すべての概要原稿のサイズは **A4** 版縦１ページ．

講演種別	概要サイズ	申込方法	発表件数	講演資格	講演時間	討論時間
公募シンポジウム	A4版　1頁	WEBのみ	一般講演のみ２件可．それ以外は全種別のうちで１件※	• 個人会員 • 非会員は登壇費が必要	10分～20分	5分～10分
一　　般					10分	5分
ポスターセッション					…	…
共同セッション					15分	5分

※ 発表件数：公募シンポジウム，ポスターセッション，共同セッション１人１件とする．一般講演に限り１人２件応募可．ただし，一般講演１件と他の講演種別１件のトータル２件は不可．講演種別を選択し申込をする．
ただし，受賞講演，基調講演，招待講演等の特殊講演は上記の適用外とする．

1. 発表内容

(1) **内容**：未発表のもので，講演としてまとまったものに限る．

(2) **言語**：日本語もしくは英語．

2. 講演資格

講演者は，**年会費および参加費納入済の本会個人会員(登壇費不要)**，非会員および個人会員ではない維持員会社社員は下記大会参加費と登壇費の前納を条件とし，講演申込ができる．ただし，期日までに年会費の支払いのない場合は，申込の講演を不許可とする．

大　会　参　加　費	
会　員　資　格	料　金
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
個人会員で2021年３月１日時点で65歳以上の方*	無　料
学生員**	6,000円

非会員の申込方法：

「講演申込」の各講演メニューにある「新規登録」の「非会員の方はこちらからお申込み下さい」から講演申込ができます．

		年　会　費	大会参加費	**1講演登壇費**	合　　計
非会員	一　般	—	**前納　24,000円**	**10,000円**	**34,000円**
	学　生	—	**前納　14,000円**	**5,000円**	**19,000円**
非会員(個人会員ではない維持員会社社員)	一　般	—	**前納　10,000円**	**10,000円**	**20,000円**

3. 講演者変更および講演取消しについて

(1) **申込後の安易な講演者変更や取り消しは認めない．**

(2) **やむを得ない理由により講演者を変更する場合は，事前に事務局に連絡する．**当日，変更が生じる場合は，座長の了解を得ること．ただし，変更する講演者は概要著者(共同研究者で且つ会員)であること．

4. 連続講演の希望について(下記条件全てを満たす申込のみ配慮する．)

(1) 同一のセッション名で申込みすること．

(2) 申込備考欄に連続希望する講演の順番，発表者名，タイトル，(可能なら受理番号)を記入する．

(3) 申込締切前の希望であること．(備考欄に記入であること．)

(4) 原則，**同一研究室内で３件以上の連続講演は認めない．**

5. 講演日の希望

申込時に備考欄に記入のこと．ただし，セッションの日程上，希望に添えないこともある．申込締切後の希望は受付けない．

6. 講演発表の際の注意事項

(1) 講演時間はご自身で管理し，厳守する．

(2) 発表者マニュアルに沿って講演を行うこと．

7. プログラム

プログラムは**２月３日頃**ホームページに掲載予定(会報付録は３月１日発行号)．

ポスターセッションについて

1. **発表方法**：2月にホームページに掲載の最新の「ポスター発表資料作成要領」参照.
2. **優秀ポスター賞：エントリー制です．エントリーした発表を審査員が採点して優秀ポスターを選出し，「優秀ポスター賞」を贈呈する.**

エントリーの要件

①発表時点で，30歳以下の学生および30歳以下の若手研究者．（年齢はポスター発表時点で，30歳以下の者）

②過去のこの賞の授賞者は授賞対象外とする.

3. **選考対象外のポスター：発表者が病欠等の場合，申し出があれば代理発表は可能.**
   その旨を事前に事務局へ連絡する．ただし，優秀ポスター賞の授賞対象から外れる.

鉄鋼協会との共同セッションについて

本会と日本鉄鋼協会と下記の共同セッションを実施している.

発表に際しての注意：相互聴講参加申込による講演発表は不可.

プログラムは両会のプログラムに掲載.

① 「チタン・チタン合金」(2021年春の会場は金属学会会場)
② 「超微細粒組織制御の基礎」(　〃　鉄鋼協会会場)
③ 「高温溶融体の物理化学的性質」(　〃　金属学会会場)

講演概要原稿作成方法と公開について

題目・著者・本文の完成版 PDF でのアップロードとなります.
(大会受付システムトップページ(WEB 画面)のテンプレートの最新版をご利用下さい.)
講演申込と講演概要原稿は同時提出下さい.
(※同時に行わない場合は，講演申込として受理されません)
言語：日本語または英語.
原稿分量：A4 判縦 1 頁(最新のテンプレートをご利用下さい.)
講演概要公開日：**2021年 3 月 2 日(火)**
※提出された概要原稿分量が規定サイズより大小する場合は，上記サイズに縮小または拡大して掲載いたします.

(1) **PDF 形式**の原稿で提出(画面上でテンプレートを利用し作成下さい)．ファイルを PDF 形式へ変換する際は，フォント埋め込み作業を必ず行って下さい.
(2) 発表者氏名の前に必ず○印を付ける(WEB 申込では画面上で講演者をチェックして下さい).
(3) 原稿修正：原則，提出期限を過ぎた原稿修正・差替は出来ない.
(4) アップロードの際，文字，図表等の品質を確認する.
(5) **原稿のサイズ：A4 縦 1 頁**(別記参照)

【留意点】本留意点は，作成の際は削除下さい．Please delete unnecessary words from template.
日本語の方は見出しの英訳(Introduction など)を削除して下さい．If you would write in English, please remove heading Japanese words like“緒言，実験方法，結果”.

- タイトル，著者名は Web 入力の登録データと同一のものを入力して下さい.
- タイトル，著者名，所属は可能な限り日本語・英語併記が望ましい.
- キャプションは日本語・英語どちらかで結構です.
- ポイントサイズは自由ですが，タイトル，著者，所属，本文，図面を A4 縦サイズ 1 枚に収めて下さい.
- 本文フォントは明朝と Times Roman を推奨します.
- 図面のカラー作成可能です.
- 最終的には PDF ファイルに変換しアップロードして下さい.
- アップロードされたまま公開されますので，PDF 作成の際はご注意下さい.
- ファイルを PDF 形式へ変換する際は，フォントの埋め込み作業を必ず行って下さい.

サンプル：概要原稿テンプレートで作成できます

日本金属学会講演題目

Title of Abstract of The Japan I nstitute of Metals and Materials

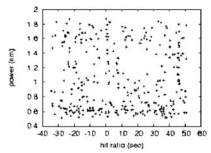
勤務先所属略称[1]**、勤務先所属略称**[2]　**○発表者氏名**（M2）[1]**、共同研究者氏名**[2]･･･

Kinzoku Univ.[1], Inst. of Kinzoku[2], ○Speakaer （M2）[1], co-author[2], ･･･

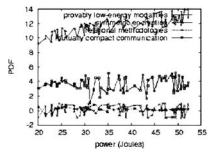
※学生表記区分（記載例：姓名(M2)[1]）

学部生：B、**修士課程**：M、**博士課程**：D、**ポスドク**：P

【緒言 Introduction】＊＊＊＊＊＊＊＊＊＊＊＊＊＊＊＊



【実験方法 Experimental】＊＊＊＊＊＊＊＊＊＊＊＊＊＊＊



【結果 Results】＊＊＊＊＊＊＊＊＊＊＊＊＊＊＊＊

講演概要の WEB 公開

期日までに参加申込をし，参加費を納入された方へは，概要公開日に参加者個別認証 ID とパスワードをメール配信いたします．
特許関係のお手続きは，公開日までにお済ませ下さい．

講演大会概要の投稿要領

講演大会概要への投稿を公正かつ適切に行うため，投稿要件に従って講演概要を作成願います．

（投稿の要件）

⑴ 未発表でかつオリジナリティがあること．
⑵ 金属とその関連材料の学術および科学技術の発展に寄与するものであること．
⑶ 軍事研究であると判断される内容を含んでいないこと．
⑷ 作成方法に基づいて作成された原稿であること．
⑸ 著作権をこの法人に帰属することに同意すること．
⑹ ミスコンダクトをしないことおよびミスコンダクトをした場合は，この法人の定めるところにより処分または措置を受けることに同意すること．
⑺ 宣伝や商用目的とする内容でないこと．

講演大会概要の査読

講演大会概要に投稿された全ての概要は，査読基準に基づき，その分野の専門家が査読する．査読者は次の項目を考慮し，採否を判定する．査読結果が「掲載不適当」に該当する場合は，理由を示して著者に返却する．

（査読の基準）

⑴ 講演大会概要の投稿の要件に準拠していること．
⑵ 内容が正確で，記述に問題がないこと．
⑶ 軍事研究であると判断される内容を含んでいないこと．
⑷ 題目が妥当であること．
⑸ 研究不正行為及び不適切行為をしていないこと．
⑹ 誹謗中傷に類する内容を含まないこと．

会誌2021年春期大会講演精選論文原稿募集
欧文誌 Selected Papers from JIM Spring Meeting
(2021)原稿募集

◎日本金属学会誌「2021年春期大会講演精選論文」85巻10号および11号(2021年)掲載
◎Materials Transactions 「Selected Papers from JIM Spring Meeting(2021)」63巻10号および11号(2021年)掲載
◎原 稿 締 切 2021年 5 月13日(木)
◎予備登録，投稿および審査方法は，一般投稿論文に準ずる(ホームページの会誌・欧文誌投稿の手引き・執筆要領参照)．
◎欧文誌掲載論文は投稿掲載費用を必ず負担する．(会誌掲載論文は投稿掲載費用無料です)

☆すべての講演申込がインターネット申込となりますので，
ご協力をお願い申し上げます．ご不明な点はお問合せ下さい．

連絡先：TEL 022-223-3685 FAX 022-223-6312
E-mail: annualm@jim.or.jp
(公社)日本金属学会 講演大会係

インターネットによる講演申込・概要原稿提出手順

入力された情報および登録された概要原稿は，プログラムにそのまま反映されますので，お間違えのないようにご登録下さい．

インターネット申込者は，講演者本人に限る．ID(会員番号)，パスワードを使用して，金属学会「大会受付システムトップページ(https://www.jim.or.jp/convention/2021spring/)から申込みする．なお，申込締切日の3日前から申込みが集中殺到し，回線が混雑するので，早目に申込み下さい．

春期講演大会受付システムトップページ → ID認証画面※1 → 講演申込 → 内容確認・修正 → 登録 → メール通知(申込受理通知)

※1：**本会会員のID**(会員番号)，パスワード

《講演内容の確認・修正》

概要提出日までにWEB画面の内容確認・修正で変更した場合，講演大会プログラムに反映される．

春期講演大会受付システムトップページ → 講演大会MyPage → ID認証画面※2 → 内容確認・修正 → 登録 → メール通知(修正受理通知)

※2：申込受理通知に記載された，**春期講演大会用の**参加登録番号，パスワード

講演の分類	
セッションキーワード(一般，ポスターのみ)	セッション名はまてりあ第59巻第11号631頁の講演セッションキーワード一覧から**第1希望(必須)および第2希望(必須)**のセッションキーワードを選択する． セッションキーワードへの申込数および内容を参考に最終的に組入れるセッションを確定する．
シンポジウム講演	まてりあ第59巻第11号634頁のテーマ要旨を参照の上，応募するシンポジウム番号を選択する．
キーワード	• キーワードを1語以上入力する．(最大10語入力可．) • 特に対象とする材料，物質，合金名をキーワードの中に含める．
申込研究者数 所属機関数	共同研究者人数：最大15名まで，所属機関数：10施設まで
申込研究者一覧	インターネット申込は，「申込者」が「講演者」となるようにチェックする． 共同研究者は非会員でも可．
ローマ字氏名	名姓の順で，フルネームで記入する．
所属機関略称	**慣用の略称で記入**する．研究場所と現勤務先が異なる場合は両方記入する． [例：東北大工(現日立中研)] • 大学院生と学生の区別：それぞれ(院生)，(学生)と所属の後に表示する． [例：東北大工(学生)　東北大工(院生)]
講演題目	和文題目は150バイト(全角75文字)まで，外国人講演の英文題目は200バイトまで． 概要原稿の題目と同一のもの．
要旨	プログラム編成の参考となる内容を記入する． 要旨欄に入力できるのは100文字(全角)まで．
概要原稿	**全講演A4版1頁．PDF(雛形あり)で作成し，アップロードする概要原稿の内容と申込欄に入力した題目・著者名が同じになるようにすること．ファイルをPDF形式へ変換する際は，フォント埋め込み作業を必ず行う．** 内容変更の場合は概要原稿の修正版を期日内に再提出する．
その他・備考欄	• 連続講演を希望する場合(条件有り)は，連続を希望する講演の順番，発表者名，タイトル，(可能なら受理番号)を記入し，同一のセッションキーワード名で申込みをする．申込締切後の希望は受付けない． • その他の連絡事項など．
会員番号	講演者は必ず会員番号(ID)を記入する． 共著者はわかる範囲で可．
著作権	同意できない場合は申込出来ない．
プログラム公開	同意できない場合は申込出来ない．
講演概要のWEB公開	講演概要のWEB公開に同意できない場合は，申込出来ない． 公開は開催日2週間前に参加申込者のみに公開．

講演大会セッション（委員専門分野）

新分野	大分類	中分類	No	セッションキーワード	キーワード
1分野	1.材料と社会	材料と社会	1.1	教育	専門教育、共通教育、企業での教育、生涯教育、小・中・高校生への教育、カリキュラム、授業の実際、教材・教育の評価、社会人教育
			1.2	歴史・材料考古学	金属学・材料科学の歴史、金属技術の歴史・変換、材料考古学、文化財保存
			1.3	技術革新・技術伝承	IoT、マテリアルインターフェース、マテリアルソフトエンジニアリング、材料情報、知的所有権、その他の金属学・材料学に関連した新分野・境界分野
			1.4	環境	LCA、リスクマネージメント、資源経済、環境・資源政策、材料の環境信頼性評価、製造物責任、環境低負荷材料、易リサイクル材料・設計、易解体設計、マテリアルセレクション、省材料設計、高寿命材料・設計、材料のリサイクルシステム、材料資源環境システム、再資源化用途開発、土壌浄化、環境修復
			1.5	ダイバーシティ	男女共同参画、LGBTI、国際化、学際協力、世代間・業種間融合
			1.6	新領域・その他	
	12.先進機能材料	先進機能材料	12.1	萌芽材料	
			12.2	新領域・その他	
2分野	2.物性	物性	2.1	磁気機能・磁気物性	磁気的性質，磁気光学的性質，電子状態，熱磁気効果（スピンゼーベック効果、異常ネルンスト効果，磁気熱量効果，磁気ハイパーサーミア等），核物性等
			2.2	半導体機能・電気物性	誘電的性質，光学的性質，電子輸送、薄膜・表面・界面物性、熱的性質（ゼーベック効果，ペルチェ効果等），原子輸送，金属絶縁体転移等
			2.3	構造物性	結晶成長、結晶構造、準結晶構造、非晶質固体構造、格子ダイナミクスと安定性、相転移（変態）、不整合・整合構造，格子欠陥，粒界等
			2.4	物性評価	照射効果、ナノスケール量子効果、トンネル効果、メスバウアー効果、核磁気共鳴、分光・発光・回折一般等
			2.5	新領域・その他	
	9.電気・磁気関連材料	電気・電子・光関連材料	9.1	伝導・実装材料	電気伝導材料、電極材料，電子実装材料、配線材料、マイクロ接合材料，フラーレン，カーボンナノチューブ，熱伝導材料等
			9.2	半導体・誘電体材料	半導体材料、誘電体材料、圧電体材料、センサー材料、太陽電池、High-k材料，低次元物質，ナノ粒子・（超）微粒子，原子クラスター等
			9.3	光・電磁波関連材料	光学結晶材料、光記録材料、液晶材料、光ファイバー材料、光学ガラス材料、テラヘルツ等
			9.4	強相関電子系材料	超伝導材料，トポロジカル絶縁体，強相関電子系材料，マルチフェロイック材料等
		磁性材料	9.5	ソフト・ハード磁性材料	ソフト磁性材料（高透磁率材料（合金系、フェライト系、アモルファス、ナノ結晶等）、永久磁石材料（希土類系、合金系、フェライト系等）、電波吸収体・ノイズ抑制体材料等
			9.6	スピントロニクス・ナノ磁性材料	磁気抵抗効果（AMR、GMR、TMR等）材料、スピンメモリー・センサー材料，スピンカロリトロニクス材料、スピン注入技術、スピン流制御技術，スピン（軌道）トルク制御技術、磁気記録・磁気デバイス用材料，磁性（超）薄膜・多層膜・磁性金属人工格子，磁気スキルミオン等
			9.7	磁気機能材料	磁歪材料、磁気冷凍材料，フラストレーション材料、反強磁性材料，相転移誘起材料（磁場誘起相変態等）等
			9.8	新領域・その他	
3分野	3.組織	相安定性・相変態	3.1	熱力学・状態図・相平衡	熱力学、状態図、相平衡、準安定、非平衡、相転移、金属間化合物、規則-不規則転移、磁気転移 等
			3.2	拡散・相変態	拡散、偏析、析出、拡散変態、規則-不規則変態、不連続析出、粒界・相界面上析出 等
			3.3	マルテンサイト変態・変位型相変態	マルテンサイト変態，変位型相変態（ベイナイト変態含む），形状記憶・超弾性材料，磁性形状記憶合金，TWIP・TRIP，エージング・テンパリング，双晶変形，熱・応力・磁場・電場誘起相変態，組織制御，組織形成と機械的性質，プロセッシング（粉末冶金・複合材料含む），SMAアクチュエータ・応用，マルテンサイト変態に関わる材料機能（ダンピング，磁気・弾性熱量効果等）
			3.4	合金・アモルファス・準結晶	アモルファス、金属ガラス、準結晶、高エントロピー材料 等
		組織制御	3.5	組織制御技術	時効・析出、熱処理、加工、加工熱処理、合金元素添加、急冷凝固、メカニカルアロイング、界面接合強さ、複合化、多層化、薄膜、積層造形、ミルフィーユ構造、コーティング、シミュレーション 等
			3.6	再結晶・粒成長・集合組織	回復・再結晶、集合組織、粒成長、粒界、異相界面、双晶　等
		分析・解析・評価	3.7	組織観察・分析	電子顕微鏡、STM、AFM、FIM、3次元アトムプローブ、X線・中性子線回折、EPMA、XPS、イメージング・マッピング技術、放射光 等
			3.8	計算材料科学・材料設計	理論、シミュレーション等
			3.9	新領域・その他	
	11.計算科学	構造・組織・特性・物性	11.1	計算材料科学・材料設計	計算材料科学・材料設計、第１原理電子論計算、分子シミュレーション、分子動力学法、モンテカルロ法、CALPHAD法、フェーズフィールド法、有限要素法、境界要素法、セルラーオートマトン、マルチスケール解析、マルチフィジックス解析　等
		データ科学	11.2	データ科学	マテリアルズインフォマティクス、マテリアルズインテグレーション、機械学習、深層学習、強化学習、転移学習、逆問題、データ同化、ニューラルネット、最適化、データベース、ビッグデータ、人工知能 等
			11.3	新領域・その他	

新分野	大分類	中分類	No	セッションキーワード	キーワード
4分野	4.力学特性	力学特性の基礎	4.1	強度・力学特性	力学（格子欠陥、弾性、塑性、破壊力学、有限要素法、分子動力学、マイクロメカニックス等）、転位の基本的特性（運動、増殖、相互作用等）、転位と各種格子欠陥の相互作用、変形（弾性、擬弾性、塑性、粘性、粒界、変形双晶等）、各種強化機構、破壊機構（き裂やボイド発生・成長・合体等）
			4.2	塑性・疲労・破壊	延性、靭性、静的および動的破壊、破壊靭性値、疲労、応力腐食割れ、水素脆性、遅れ破壊、寿命
			4.3	高温変形・クリープ・超塑性	高温変形、クリープ、クリープ疲労、超塑性
			4.4	力学特性評価	力学特性の評価法、力学的挙動の予測（応力−ひずみ曲線、クリープ曲線等の予測、寿命予測等）、合金設計、複合材料（材料システム）設計、データベース
		力学特性と組織	4.5	欠陥と組織	転位組織、転位セル、変形帯、強加工、双晶、ボイド、亀裂
			4.6	多結晶組織	粒成長、再結晶、双晶、偏析、粒界析出、粒界反応型析出
			4.7	金属間化合物	金属間化合物、規則相、高温変形
			4.8	超微細粒組織	微細粒、バルクナノメタル、強化機構
			4.9	新領域・その他	プラストン、キンク変形、ディスクリネーション、ミルフィーユ構造
5分野	5.材料化学	耐食性・耐酸化性	5.1	腐食・防食	水溶液腐食、電気化学測定、表面皮膜、腐食環境解析、孔食、すき間腐食、応力腐食割れ、大気腐食、高温高圧水腐食、水素脆化、異種金属接触腐食、エロージョンコロージョン、腐食事例、耐食合金、耐食コーティング、腐食抑制・防錆剤、電気防食、等
			5.2	高温酸化・高温腐食	高温ガス腐食、溶融塩腐食、水蒸気酸化、エロージョン・コロージョン、超臨界環境等、耐熱材料、耐熱コーティング、超合金、金属間化合物、 セラミックス材料、酸化物の特性
		表面・界面	5.3	湿式表面処理・湿式めっき	電解・無電解めっき、アノード酸化、エッチング、化成処理、電気化学的な成膜、ぬれ性、摩擦・摩耗・潤滑等
			5.4	気相プロセス・薄膜・厚膜作製技術	PVD、CVD、スパッタリング、プラズマプロセス、イオン注入・イオン打込み、イオンミキシング、コーティング、クラスター制御、表面処理、表面改質等、エッチング、アッシング、リソグラフィー、マイクロ・トライボロジー、マイクロ・マシニング、マイクロ・ボンディング、ケミカルメカニカルポリッシング（CMP）、溶射、肉盛り、拡散浸漬処理、ぬれ性、摩擦・摩耗・潤滑等
			5.5	表界面反応・分析	表面物性・反応、表面の構造と結晶学、吸着・脱離、表面の熱・統計力学、表面の電子状態およびエネルギー・計算科学、電気化学反応、表面・界面の作製技術、表面分析法（各種化学分析・機器分析、極微量分析、極小領域分析、状態分析、プローブ顕微鏡、顕微分光、環境やプロセスのその場分析、成分画像解析等、各種分析装置の開発、化学センサー、モニタリング法等）、コロイド材料
			5.6	触媒	触媒材料(貴金属・卑金属触媒、金属間化合物触媒、ナノ構造触媒、規則性多孔体、有機金属、光触媒等)、触媒反応(酸化、水素製造、C-H活性化、クロスカップリング、界面分子変換、排気ガス浄化等)、触媒技術と反応プロセス開発、触媒理論
			5.7	新領域・その他	
6分野	6.材料プロセシング	環境・リサイクルプロセス	6.1	環境・リサイクル技術	LCA、リスクマネジメント、資源経済、環境・資源政策、材料の環境信頼性評価、製造物責任、事故解析、材料安全など，環境低負荷材料、易リサイクル材料、易リサイクル設計、易解体設計、マテリアルセレクション、省材料設計、高寿命材料、高寿命設計など，分離プロセス、再資源化プロセス、材料のリサイクルシステム、材料資源循環システム、リサイクル化学、クローズドプロセス、再資源化用途開発など,
		溶融・凝固プロセス 高温プロセス	6.2	製・精錬の物理化学	資源・原料、各種および新製・精錬法、冶金熱力学、化学反応工学、移動速度論、高温プロセス解析、数値流体力学、高純度化、分離・回収・精製、環境・リサイクル等
			6.3	融体・高温物性	熱力学的諸量、融体物性、モデリング等
			6.4	凝固・結晶成長・鋳造技術	結晶成長、過冷却、非晶質、準結晶、輸送現象、高純化、鋳造、鋳物、ダイキャスト、単結晶製造技術、半溶融加工、溶射，反応性溶射，溶射素過程，等
		固相プロセス 固相・溶接プロセス	6.5	塑性変形・塑性加工技術	塑性加工、高ひずみ速度加工、強加工プロセス、極限環境プロセス等
			6.6	粉末・焼結・造形技術	粉体製造、超微粉、粉体成形・粉末冶金（焼結プロセスを含む）、メカニカルアロイング、焼結合成プロセス、粉末射出成形（金属射出成形、セラミック射出成形），3次元造形（3Dプリンター）、コールドスプレー，スプレーフォーミング，エアロゾルデポジション，アトマイズ等
			6.7	接合・溶接・実装・接着・複合技術	メカノケミカルプロセス、常温接合、拡散接合、超音波接合、摩擦圧接、摩擦攪拌接合、爆発圧接、電磁圧接、溶接、ろう付け、接着、精密接着、メッキ・プロセス、はんだ付け、実装、マイクロ接合、力学特性、信頼性　等
		材料評価、プロセス評価技術	6.8	材料評価技術	非破壊検査、非破壊定量評価、残留応力解析、センシング技術、信頼度評価等，各種プロセス・シミュレーション，テラヘルツ
			6.9	新領域・その他	

新分野	大分類	中分類	No	セッションキーワード	キーワード
7分野	7.生体・医療・福祉	生体材料基礎・生体応答	7.1	細胞機能・組織再生	細胞機能、細胞間相互作用、シグナル伝達、細胞・生体組織評価、細胞増殖・分化、組織修復（Tissue Engineering）、DDS（Drug Delivery System）、ゲノム解析・編集、細胞適合性、細胞配向、代謝回転、恒常性、石灰化、各種臓器、骨・歯牙、血管、骨芽細胞、破骨細胞、OCY（オステオサイト）、骨系細胞、細胞外基質、がん、細胞小器官、RNA、DNA、遺伝子組み換え、細胞培養、骨形態計測法、染色法、足場材料、機能性タンパク質等
			7.2	構造生体機能化	機能発現、バイオメカニクス、計算科学、金属組織・組織制御、弾性・塑性変形機構、力学機能発現（弾性率、強度、延性、疲労、破壊）、スキャフォールド、インプラント、双晶変形、生体組織、組織配向性、人工関節、人工歯根、熱処理、多孔化、機能・組織評価法、Co-Cr合金、ステンレス鋼、生体用セラミックス、リン酸カルシウム系材料、PEEK、整形外科用材料等
			7.3	表界面生体機能化	生体/材料界面、表面修飾、ナノ表面・界面、感染防御・制御、表界面機能、骨伝導・骨誘導、バイオセンサー、抗菌性、タンパク質吸着、コーティング、化学処理、表面分析・評価、PVD、CVD、コーティング材料等
		生体材料設計開発・臨床	7.4	生体・医療・福祉材料	バイオマテリアルサイエンス、生体情報・計測、リハビリテーション医学、ユニバーサルデザイン、バリアフリー、生体機能代替、福祉用具・支援機器、ウェアラブル、IoT、AI、非磁性・低磁性、低弾性・高弾性、生体活性ガラス、生分解性材料、耐摩耗性材料、歯科用合金、生体用ハイエントロピー合金等
			7.5	生体用Ti・Ti合金	Ti・Ti合金、低弾性率、形状記憶、超弾性、オッセオインテグレーション、集合組織、人工骨・関節、相変態・組織制御、機能評価法、電子顕微鏡、β型Ti合金、ユビキタス元素、計算機シミュレーション等
			7.6	Additive Manufacturing・テーラーメード医療材料	付加製造、3Dプリンタ、金属積層造形、金属粉末、異方性/等方性、形状/組織制御、力学特性、残留応力、生体モデリング、形状計測、格子構造、薬物送達システム、マイクロマシン、マスカスタマイゼーション、テーラーメイド医療、遠隔地診療、レーザービーム、電子ビーム、順シミュレーション・逆問題解析、溶融池シミュレーション、リアルタイムモニタリング等
			7.7	生体安全性・有効性評価	医用画像・バイオイメージング、生体シミュレーション、レギュラトリーサイエンス、生体情報・計測、医療技術倫理、細胞毒性、疾病、代謝異常、骨吸収、金属アレルギー、耐食性、疲労、疾病治療、医療機器、臨床研究、臨床応用、GLP等
			7.8	新領域・その他	
8分野	8.構造材料	金属材料	8.1	Fe・Fe合金	Fe・Fe合金の原理・原則、鉄鋼材料、ステンレス合金、相変態（パーライト、ベイナイト、マルテンサイト、マッシブ等）、組織制御、力学特性、計算材料科学
			8.2	Cu・Cu合金	Cu・Cu合金の原理・原則、配線材料、熱伝導材料、相変態、組織制御、力学特性、計算材料科学
			8.3	Ti・Ti合金	Ti・Ti合金の原理・原則、相変態、組織制御、強化機構、成型性、ゴムメタル、耐食性、表面処理、計算材料科学
		軽金属材料	8.4	Mg・Mg合金	Mg・Mg合金の原理・原則、相変態、長周期積層構造、組織制御、強化機構、キンク変形、ミルフィーユ構造、成型性、集合組織、耐食性、計算材料科学
			8.5	Al・Al合金	Al・Al合金の原理・原則、相変態、GPゾーン、クラスター、組織制御、強化機構、成型性、集合組織、耐食性、計算材料科学
		セラミックス材料	8.6	セラミックス材料	セラミックス材料の原理・原則、相変態、構造相転移、焼結、組織制御、機能材料、強化機構、破壊、成型性、耐熱性、計算材料科学
		耐熱材料	8.7	ジェットエンジン・ガスタービン耐熱材料	耐熱鋼、超合金、耐熱合金、高融点金属、金属間化合物、セラミックス、超高温材料、金属基複合材料，金属間化合物基複合材料、セラミックス基複合材料、プラスチックス基複合材料、炭素繊維強化型複合材料、SiC繊維強化型複合材料、ジェットエンジン、ガスタービン、コーティング、組織制御、相安定性、状態図、拡散、粒界、クリープ、疲労、破壊、寿命予測、高温酸化・腐食、鋳造、鍛造、粉末冶金、積層造形、熱間プロセス、計算材料科学、データベース
			8.8	蒸気発電耐熱材料	耐熱鋼、超合金、耐熱合金、蒸気タービン、コーティング、組織制御、相安定性、状態図、拡散、粒界、クリープ、疲労、破壊、寿命予測、高温酸化・腐食、鋳造、鍛造、粉末冶金、積層造形、熱間プロセス、計算材料科学、データベース
			8.9	耐熱特性	耐熱合金、耐熱セラミックス、超高温材料、耐熱複合材料，コーティング、組織制御、相安定性、状態図、拡散、粒界、クリープ、疲労、破壊、寿命予測、高温酸化・腐食、熱機関、燃焼、熱伝導、熱膨張、熱衝撃、熱遮蔽、鋳造、鍛造、粉末冶金、積層造形、熱間プロセス、計算材料科学、データベース
		機能性構造材料	8.10	機能性構造材料	アモルファス材料、金属ガラス材料、準結晶材料、制振材料、インテリジェント・スマートマテリアル、積層造形、計算材料科学
		複合材料	8.11	複合材料	複合材料、スポーツ用品材料、積層造形、接合、組織制御、トポロジー最適化、力学特性、熱特性、電磁気特性、計算材料科学
			8.12	ポーラス材料	ポーラス材料、積層造形、接合、組織制御、トポロジー最適化、力学特性、熱特性、電磁気特性、計算材料科学
			8.13	新領域・その他	
9分野	10. エネルギー関連材料	原子力材料	10.1	原子力材料	原子炉材料、核融合炉材料、ビーム関連材料、照射損傷、照射効果
		熱電材料	10.2	熱電材料	熱電変換、熱電素子、ゼーベック効果、ペルチェ効果、熱伝導、電気伝導、など
		水素・電池関連材料	10.3	電池材料・イオン伝導材料	電極材料、電解質材料、イオン伝導材料、電池設計、電池関連物性、など
			10.4	水素化物・水素貯蔵・水素透過・水素関連物性	金属水素化物、錯体水素化物、水素貯蔵、水素透過、水素脆化、水素利用、水素関連物性、機能・プロセッシング、金属－水素相互作用、同位体効果、など
		新領域・その他	10.5	新領域・その他	センサー材料、熱伝導材料、など

2021年春期講演大会公募シンポジウムテーマ要旨

春期講演大会(オンライン開催におけるテーマ公募によるシンポジウム講演は，下記7テーマで実施することになりました．
講演申込要領は前記のとおりです．多数の有益な講演と活発な討論を期待いたします．

S1　永久磁石開発の元素戦略8　―次世代新材料に向けた基礎・基盤研究―

Element strategy for high performance permanent magnets 8 ―Fundamental and basic research toward next-generation novel materials―

永久磁石は，自動車の電動化に加え，風力発電機，小型ロボット，電動航空機など，中長期的な応用の多様化と使用量の増加により，重要性がますます高まっている．材料性能，資源リスク，価格等の多面的な要求に応じて，Nd–Fe–B焼結磁石を筆頭に，様々な磁石材料の開発・性能向上が望まれる．一方，材料開発の観点から見ると，近年，プロセス，計測，計算の各種の先端的な研究手段が整備され，永久磁石研究が深化している．このような背景のもと，本シンポジウムでは，希土類系(Nd–Fe–B, Sm–Fe–N, 1–12系等)，非希土類系(ハードフェライト等)を含む広い磁石材料を対象として，材料開発の最新の成果や，材料組織形成，保磁力発現機構の解明，熱力学解析・自動データ蓄積とマテリアルズインフォマティックスによる材料開発加速などの基礎・基盤研究を含め，広範な磁石研究の発表と活発な討論を期待する．

テーマ責任者

(シンポジウムchair)：
物質・材料研究機構グループリーダー 大久保忠勝
E-mail: OHKUBO.Tadakatsu@nims.go.jp

(シンポジウムco-chairs)：
TDK 榎戸　靖　東工大 合田義弘　物材機構 高橋有紀子
東北大 松浦昌志　産総研 三宅　隆　日立金属 西内武司

S2　医療・福祉のためのAdditive manufacturingの材料科学Ⅳ

Materials science of additive manufacturing for biomedical and welfare applications (part Ⅳ)

Additive Manufacturing(AM)による医療・福祉デバイスの研究開発は，テーラーメード医療を実践する上で必要不可欠となっている．材料科学の観点からAMを議論するには，AMによる特異組織形成への理解や，素材となる粉粒体の流動性や粒度分布を考慮した造形プロセスを評価する必要がある．一方で，医療の観点からは，生体適合性に加え基礎的な力学特性評価や耐食性など数多くの検討事項が存在する．国内外の学協会で数多くのAMに関する講演が多くなされているが，医療用AMに関係する研究者が一堂に会して講演と討論を行うことができるのが本シンポジウムの大きな特徴である．今回は，積層造形用合金設計や粉末開発，造形時に生ずる課題に焦点を当て，独自の切り口で解決しようとする最先端の研究を進めている国内の研究者に基調講演をいただき，討論を行う．

テーマ責任者

(シンポジウムchair)：
東北大学大学院工学研究科教授 野村直之
E-mail: nnomura@tohoku.ac.jp

(シンポジウムco-chairs)：
愛媛大 小林千悟　関西大 上田正人　東北大 山本雅哉
名大 黒田健介　物材機構 堤　祐介

S3　ナノ・マイクロスペーステイラリングⅤ

Tailoring of Nano/Micro-Space for Advanced Functions Ⅴ

極限場下での非平衡状態や散逸構造化などを利用したナノ～マイクロオーダーで空間制御した材料の創成・特性評価のさらなる発展に向け，高エネルギー線照射によるナノ構造体形成や物理・化学的なナノスペース／層間への原子挿入技術を通じて特徴的なナノ・マイクロ構造創成について，これまでも公募シンポとして討論してきており，直前の2020年秋期大会でも基調2件と一般9件の講演申し込みがあった．今回は基調講演でナノマイクロ構造制御によるエネルギー変換効率や対候性向上に関する最新情報に触れるとともに，これまでのナノ・マイクロ構造体形成・特性・機能制御についてさらに情報交換し議論を深めることから，新規ナノ・マイクロスペーステイラリング技術や新機能発現について検討する．

テーマ責任者

(シンポジウムchair)：
筑波大学数理物質系物質工学域准教授 谷本久典
E-mail: tanimoto@ims.tsukuba.ac.jp

(シンポジウムco-chairs)：
東北大 森戸春彦　中村貴宏　大阪府立大　堀　史説
東北大 田中俊一郎

S4　ハイエントロピー合金の材料科学Ⅴ

Materials Science and Technology in High-Entropy Alloys Ⅴ

近年，国内においても科研費・新学術領域研究が立ち上がり，ハイエントロピー合金に関する研究が世界的に活況を呈している．ハイエントロピー合金では，配置のエントロピーが固溶体相を安定化するとの考えを基に，不均一に歪んだ結晶格子に由来した高い変形強度，トラップ効果に由来した遅い原子拡散から生じる高いクリープ特性，多様な構成原子間の非線形相互作用に起因する物性発現に関するカクテル効果など，材料科学の基礎・応用の両面で興味深い現象が期待されている．現実に優れた高温強度，低温靭性，高耐摩耗性を示す一連の合金が見出されているが，その物性発現機構などには未だ不明な点も多い．ここ数年間で新たに得られたハイエントロピー合金の基礎及び応用に関する講演を広く募り，大学，企業，研究所の研究者の活発な議論の場を提供するために，第5回の公募シンポジウムを企画する．

テーマ責任者

(シンポジウムchair)：
九州大学工学研究院材料工学部門教授 田中將己
E-mail: tanaka.masaki.760@m.kyushu-u.ac.jp

(シンポジウムco-chairs)：
金沢大 下川智嗣　東北大 井上耕治　JAEA 都留智仁

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―
Materials Science in Surface Chemistry on Metals

金属表面と溶液や気体などとの化学反応は，めっき，化成処理，腐食，高温酸化，触媒などの分野で重要な研究対象となっている．また，表面化学反応を積極的に利用したナノポーラス材料などの開発も活発化している．しかし，金属と溶液・気体との化学反応の本質にせまるためには，その場解析が不可欠であるが空間・時間分解能や分析精度などには制約がある．しかも，不均一反応であるため理論的な取り扱いも発展途上にある．反応起点や律速段階の学理の深化には課題が多く，関連分野の研究者および企業での開発者が一同に会して問題点を抽出・議論することが必要な時期にきている．本シンポジウムでは金属表面の化学に関して，主にめっき・触媒・耐食性・耐酸化性の分野から講演を募り，研究者間での意見・情報交換，討論を行う．

テーマ責任者

（シンポジウム chair）：

東北大学大学院工学研究科教授 武藤　泉

E-mail: mutoi@material.tohoku.ac.jp

（シンポジウム co-chairs）：

兵庫県立大 八重真治　北大 林　重成　東北大 亀岡　聡

阪大 土谷博昭　東北大 竹田　修　UACJ 野瀬健二

S6　プラストンの材料科学Ⅷ
Materials Science on Plaston VIII

「転位論」は材料科学・工学における重要な学問基盤であり，金属系結晶材料の変形は転位(dislocation)の運動により議論される．一方近年，転位の概念だけでは必ずしも理解しきれない変形現象が顕在化しつつある．例えば，ナノ結晶材料においては複数の結晶粒の協調的なせん断や回転が生じている可能性がある．また，原子のシャフリングを必要とする六方晶，あるいは複雑な規則相における双晶変形の原子的メカニズムや，せん断帯，粒界すべり，アモルファス・金属ガラスの変形，マルテンサイト変態もこの範疇に入る．我々は，転位や回位(disclination)を内包し結晶性材料の変形現象を包括的に理解する上位概念として，変形子(プラストン：plaston)を提案し，それに基づいて材料の変形と破壊を基礎的に理解しようとしている．本公募シンポジウムは，過去7回の公募シンポジウムに引き続き，最新の実験研究及び計算材料科学の成果に関する講演を集め，材料の変形と破壊に関する理解の進展を議論することを目的としている．

テーマ責任者

（シンポジウム chair）：

京都大学大学院工学研究科教授 辻　伸泰

E-mail: nobuhiro-tsuji@mtl.kyoto-u.ac.jp

（シンポジウム co-chairs）：

京大 田中　功　乾　晴行　九大 津崎兼彰　東大 幾原雄一

阪大 尾方成信　京大名誉教授 落合庄治郎

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―組織制御プロセスの理論と実験に基づく予測と解析―
Architecture construction for functions and properties of materials II ―Prediction and analysis based on theoretical and experimental approaches for microstructure controlling process―

「材料機能特性のアーキテクチャー研究会」の活動の一環として企画する公募シンポジウムの第Ⅱ弾である．原子レベルでの結晶構造や格子欠陥から相界面を含む組織に至るまで，マルチスケールにわたる材料の構造全体をアーキテクチャーとして捉える．構造用と機能性の区別なく多彩な材料における組織制御プロセスに焦点をあて，理論および実験による予測と解析という切り口で，材料の機能特性を向上させる鍵となる組織因子の理解に努め，その組織形成過程とプロセスに関する学理の再認識と深化を目指す．研究会メンバーに限らず，多様な専門分野の研究者に広く参加いただく機会を提供し，異なる専門分野を融合させた多角的視点からの議論を期待する．当該研究会では時間をかけて納得できるまで議論することを意識しているが，今年度は開催を見送ったので公募シンポジウムにその特徴を反映させたい．博士課程学生と若手研究者には発表時間を長く設定して議論を深め，制度上可能であれば優秀な発表に対して表彰を行いたいと考えている．

テーマ責任者

（シンポジウム chair）：

東京工業大学物質理工学院材料系教授 木村好里

E-mail: kimura.y.ac@m.titech.ac.jp

（シンポジウム co-chairs）：

足利大 小林重昭　東北大 関戸信彰　産総研 田中孝治

熊本大 連川貞弘　東工大 細田秀樹　東北大 吉見享祐

◇　◇　◇

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)

本会では最新の研究成果を発表・討議する場として毎年春秋2回の「講演大会」を開催しており，2021年3月16日(火)～19日(金)にオンラインにて2021年春期(第168回)講演大会を開催します．

この講演大会に於いて，若い学生に金属および材料学分野に対して興味や理解を高めてもらうため「高校生・高専(3年生以下)学生ポスター発表」のセッションを開催いたします．

ポスター発表は，生徒の研究成果の発表を大学の教授や企業の研究者等の専門家に直接聴いてもらい，質疑応答が受けられる貴重な機会であり，さらにポスターの出来栄えや発表の受け答えなどを審査して，優秀な発表には会長による賞を授与します．金属および材料学分野に興味があり，本講演大会でポスター発表していただける生徒がおられましたら，奮ってご応募下さい．

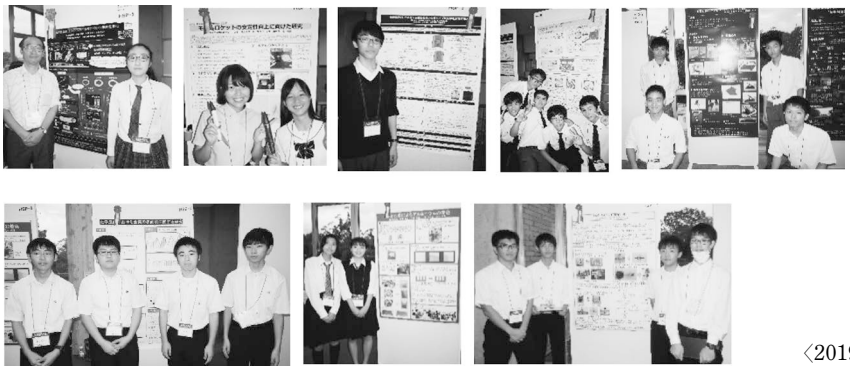
発表者と指導教員には本大会の参加費を無料で参加いただき，研究者の最新の研究成果の発表を聴講いただけます．詳細は，「高校生・高専学生ポスター発表要領」でご確認下さい．

「高校生・高専学生ポスター発表」要領

学 会 名　日本金属学会2021年春期(第168回)講演大会
行 事 名　「高校生・高専学生ポスター発表」
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．(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)日本金属学会　講演大会係
〒980-8544 仙台市青葉区一番町1-14-32
☎ 022-223-3685　FAX 022-223-6312　E-mail: annualm@jim.or.jp



〈2019年秋期講演大会より〉

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下さい．

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
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

参加申込要領

インターネットによる大会事前参加申込：〈登録期間〉11月25日(水)～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，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．

参加費の消費税扱いについては，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)
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
個人会員で2021年3月1日時点で65歳以上の方*	無　料
学生員**	6,000円
非会員***　一般	24,000円
非会員***　学生(大学院生含む)	14,000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下さい．会員情報に生年月日をご登録させて頂きますので，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．

◆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，概要公開日に閲覧するための参加者個別認証 ID とパスワードを配信いたします．

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．

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

研究集会

研究会 No. 81

第 3 回　材料機能特性のアーキテクチャー研究会
(@オンライン)開催のご案内

本研究会では材料のマルチスケールにわたる構造全体をアーキテクチャーとして捉え，ナノの原子配列を起源とする物性からマクロな連続体としての応答まで，機能特性の制御に必要な学理の再構築について議論を深めることを目的としています．構造用や機能性を問わず，多彩な材料を対象として，格子欠陥や異相界面など共通の組織因子にフォーカスした多角的視点からの議論を期待いたします．本年度は，COVID-19感染拡大防止の観点から，開催の是非を含め検討しておりましたが，本研究会の最大の特徴である，しっかりとした議論を行うことは，若手研究者・大学院生には貴重な機会であると考え，下記のように第 3 回研究会をオンラインで開催することといたしました．奮ってご参加いただければと存じます．特に，博士課程の大学院生，ポスドク，企業等の若手研究者の皆さんにご発表いただくことを奨励いたします．多くの皆様にご参加いただけることを心よりお待ち申し上げます．

研究会代表世話人　東京工業大学 物質理工学院材料系 木村好里

日　時　2020年12月17日(木)(本年は 1 日開催とします)
場　所　オンライン開催
参加費　無料
定　員　40名程度(発表者数　十数名)
発　表　申込締切　2020年12月 3 日(木)
1 件につき30分発表15分質疑応答(件数により変動あり)．大学院生，ポスドク，企業等の若手研究者の方々は，Distinguished Paper Award for Young Scientists の受賞選考対象となります．なお，1 日開催のため，発表件数に限りがありますので，早めにお申し込み下さい．発表希望者多数の場合は若手研究者・申し込み順を優先いたします．
参加申込締切　2020年12月10日(木)
申込方法　申込フォームをダウンロードし，グループ毎に必要事項を記入し，世話人 E-mail にて細田宛とし，お申込下さい．
http://j3www.materia.titech.ac.jp/mishima-kimura/architecture.html
世 話 人　細田秀樹　東京工業大学　科学技術創成研究院
吉見享祐　東北大学　大学院工学研究科　知能デバイス材料学専攻
申込・問合先　細田秀樹　E-mail: hosoda.h.aa@m.titech.ac.jp

◇　　◇　　◇

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(受け取りメールの確認をして下さい)
• 原稿送信先：FAX 022-223-6312　E-mail : materia@jim.or.jp

公　募

◇東北大学大学院工学研究科教員(助教)公募◇

公募人員　助教 1 名
所　　属　知能デバイス材料学専攻　材料電子化学講座
専門分野　電気化学に基づき，高耐食材料の創製や構造・エネルギー材料の信頼性向上などに関する教育・研究を行う
応募資格　当該分野の教育・研究に意欲と熱意があり，博士の学位を有する，または着任までに取得見込みの方
担当授業科目　「学部」: 材料科学総合学実験，材料科学総合学基盤研修，知能デバイス材料学コース研修等
「大学院」: (前期)知能デバイス材料学修士研修等，(後期)知能デバイス材料学博士研修等
任　　期　5 年(再任可)
公募締切　令和 2 年11月20日(金)
着任時期　令和 3 年 4 月 1 日(木)
提出書類　(1)履歴書，(2)学位論文題目，(3)研究業績概要(A4 版 2 頁以内)と主要論文 5 編の別刷り(コピー可)，(4)研究業績リスト，(5)獲得外部研究資金(科研費等)一覧，(6)受賞，(7)招待講演等，(8)教育業績(担当科目等)，(9)所属学会，(10)学会活動歴(委員会等)，(11)研究活動，(12)社会活動等に関する一覧表，(13)今後の研究計画(A4 版 2 頁以内)，(14)教育活動に関する抱負(A4 版 2 頁以内)，(15)照会可能な方 2 名の氏名と連絡先(住所，電話，E-mail)，(16)応募者の連絡先(住所，電話，E-mail)
(マテリアル・開発系ホームページ上に掲載した「公募提出書類作成の注意点」に留意して書類を作成すること
http://www.material.tohoku.ac.jp/news/jobs.html)
書類送付先　〒980-8579 仙台市青葉区荒巻字青葉 6-6-02
東北大学大学院工学研究科　マテリアル・開発系長
成島尚之
☎&FAX 022-795-7294
E-mail: narut@material.tohoku.ac.jp
問合せ先　〒980-8579 仙台市青葉区荒巻字青葉 6-6-02
東北大学大学院工学研究科　知能デバイス材料学専攻長
杉本　諭
☎&FAX 022-795-3785
E-mail: sugimots@material.tohoku.ac.jp
※封筒に「教員公募(知能デバイス材料学専攻　材料電子化学講座)」と朱書きし，郵送の場合は書留とすること．なお，応募書類は返却致しませんのでご了承下さい．

◇東北大学大学院工学研究科教員(准教授)公募◇

公募人員　准教授１名

所　　属　知能デバイス材料学専攻　ナノ材料物性学講座　極限材料物性学分野

専門分野　組織や格子欠陥制御により，金属やセラミックスなどを用いた構造・機能材料の力学的および機能的特性やその信頼性の向上に関する教育・研究を行う

応募資格　当該分野の教育・研究に意欲と熱意があり，博士の学位を有する，または着任までに取得見込みの方

担当授業科目　「学部」：材料学概論，材料理工学概論，情報処理演習，材料科学総合学実験，材料科学総合学基盤研修，知能デバイス材料学コース研修等「大学院」：(前期)ナノ構造制御機能発現工学，ナノ材料物性学セミナー，知能デバイス材料学修士研修等，(後期)ナノ材料物性学特論，ナノ材料物性学特別研修，知能デバイス材料学博士研修等

任　　期　なし

公募締切　令和２年11月20日(金)

着任時期　令和３年４月１日(木)

提出書類　(1)履歴書，(2)学位論文題目，(3)研究業績概要(A4 版２頁以内)と主要論文５編の別刷り(コピー可)，(4)研究業績リスト，(5)獲得外部研究資金(科研費等)一覧，(6)受賞，(7)招待講演等，(8)教育業績(担当科目等)，(9)所属学会，(10)学会活動歴(委員会等)，(11)研究活動，(12)社会活動等に関する一覧表，(13)今後の研究計画(A4 版２頁以内)，(14)教育活動に関する抱負(A4 版２頁以内)，(15)照会可能な方２名の氏名と連絡先(住所，電話，E-mail)，(16)応募者の連絡先(住所，電話，E-mail)
(マテリアル・開発系ホームページ上に掲載した「公募提出書類作成の注意点」に留意して書類を作成すること
http://www.material.tohoku.ac.jp/news/jobs.html)

書類送付先　〒980-8579 仙台市青葉区荒巻字青葉 6-6-02
東北大学大学院工学研究科　マテリアル・開発系長
成島尚之
☎&FAX 022-795-7294
E-mail: narut@material.tohoku.ac.jp

問合せ先　〒980-8579 仙台市青葉区荒巻字青葉 6-6-02
東北大学大学院工学研究科　知能デバイス材料学専攻長
杉本　諭
☎&FAX 022-795-3785
E-mail: sugimots@material.tohoku.ac.jp

※封筒に「教員公募(知能デバイス材料学専攻　極限材料物性学分野)」と朱書きし，郵送の場合は書留とすること．なお，応募書類は返却致しませんのでご了承下さい．

集　会

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)主催

◇材料分野における SDGs シンポジウム◇

@渋谷 QWS＋On Line 配信

■日　　程：2020年11月27日(金) 14：00～18：00

■開催会場：渋谷スクランブルスクエア(東棟)15階
SCRAMBLEHALL
https://shibuya-qws.com/(渋谷 QWS：渋谷駅直上)

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

■共　　催：東京大学，渋谷スクランブルスクエア株式会社

■協　　賛：(一社)軽金属学会，(一社)資源・素材学会，(公社)日本化学会，(公社)日本金属学会，(一社)日本鉄鋼協会

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

■開催内容：材料，とくに金属材料分野における SDGs(持続可能な開発目標)についての特別講演会を企画．講演会の後，非鉄金属分野のオピニオンリーダーを加え，講演者とのパネルディスカッションを行う．講演や討論会は，ライブ Web 配信を予定．参加登録・参加費等，詳細は，JX 金属寄付ユニットの HP を参照下さい．
JX 金属寄付ユニット HP: http://www.metals-recycling.iis.u-tokyo.ac.jp/

■問合わせ：東京大学 生産技術研究所　岡部研究室
E-mail: okabelab@iis.u-tokyo.ac.jp

■プログラム：

司会：所　千晴　早稲田大学 理工学術院 教授，東京大学 生産技術研究所 特任教授

14：00～

開会の挨拶：岡部　徹
東京大学　副学長，東京大学 生産技術研究所 教授

なぜ企業は SDGs に取り組むのか(50分)

沖　大幹　東京大学 教授，国際連合大学 上級副学長

国連大学上級副学長として，また，環境科学の第一人者として国連が取り組む SDGs と日本が取り組むべき課題について，大所高所のご講演をお願いしている．

SDGs 実現のための金属資源循環利用の方向性と課題(50分)

星野 岳穂　東京大学 大学院工学系研究科 マテリアル工学専攻
特任教授(元　経済産業省 資源エネルギー庁 審議官)

材料の動的マテリアル・フロー分析や資源循環の将来予測等の研究成果を基に，基盤材料マネジメントの最適な姿を見いだし，その実現のための政府および産業界に対する政策提言をお願いしている．

未来社会デザインとメタラジー(50分)

田中 敏宏　大阪大学 統括理事 副学長(前　日本鉄鋼協会 会長)

鉄鋼材料を中心として，SDGs の観点から多角的なご講演をお願いしている．

17：00～

パネルディスカッション：
上記講演者３名に加え，民間企業のオピニオンリーダーからもご意見をいただく予定．

大井　滋　JX 金属株式会社　特別理事

モデレータ：所　千晴　および　岡部　徹
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 特任教授

閉会の挨拶：藤井輝夫
東京大学 理事・副学長

2020年秋期(第167回)講演大会記録

2020年秋期講演大会は，9月15日(火)から18日(金)の期間，オンライン(Zoom)で開催した．

9月15日(火) 9：00～17：30 第35回ポスターセッション，第4回高校生・高専学生ポスターセッション
9月16日(水) 9：00～ 9：05 開催にあたって
9：05～10：05 第65回学会賞受賞記念講演
10：30～11：30 第65回本多記念講演
13：00～17：40 一般講演，各種シンポジウム講演，受賞講演，技術セミナー
9月17日(木) 9：00～17：15 一般講演，各種シンポジウム講演，受賞講演，共同セッション，技術セミナー
9月18日(金) 9：00～17：00 一般講演，各種シンポジウム講演，受賞講演，共同セッション，技術セミナー
常時開設 オンライン展示会

開催にあたって(9月16日)

高梨弘毅会長より秋期講演大会オンライン開催にあたっての挨拶があった．

第65回学会賞受賞記念講演(9月16日)

「希土類鉄(R-Fe)磁石が世界を支える」

大同特殊鋼株式会社顧問 佐川眞人 君

第65回本多記念講演(9月16日)

「医療と金属材料」

東京医科歯科大学教授 塙 隆夫 君

贈呈式：オンライン開催のため下記授賞の贈呈式は開催しなかった．

第43回技術開発賞 4件24名(受賞者；本誌576頁)
第30回奨励賞 6名(学術部門5名，技術部門1名)(受賞者；本誌578頁)
第10回まてりあ論文賞 2編5名(受賞者；本誌579頁)
第10回まてりあ啓発・教育賞 1編1名(受賞者；本誌579頁)
第17回村上記念賞贈呈式 1名(受賞者；本誌580頁)
第17回村上奨励賞贈呈式 3名(受賞者；本誌580頁)
第68回論文賞贈呈式 5編15名(物性部門1編，組織部門1編，力学特性部門1編，材料プロセシング部門1編，工業材料部門1編)(受賞者；本誌582頁)
第33回若手講演論文賞贈呈式 3編3名(受賞者；本誌583頁)

第35回優秀ポスター賞(受賞者：本誌584頁)
第4回高校・高専学生ポスター賞(受賞者；本誌586頁)

日本金属学会・日本鉄鋼協会合同懇親会：オンライン開催のため開催しなかった．

大会参加者

1,369名(一般688名 学生576名 非会員75名(一般59名 学生16名)，協賛学協会参加者3名，高校生ポスター参加者9名，オンライン展示企業・技術セミナー企業15名，その他3名)
※オンライン開催のため日本鉄鋼協会との相互聴講は実施しなかった．
※今大会より3月1日時点で65歳の会員は参加費無料とした．
※今大会に限り，新型コロナウイルス感染拡大の影響で経済的に影響のある学生員に対し，参加費無料とした．

学術講演会(9月15日～18日)

最終講演件数718件
欠講2件(講演番号：一般講演 No.103, 124)
第65回学会賞記念講演1題
第65回本多記念講演1題
公募シンポジウム講演7テーマ154題
企画シンポジウム5テーマ 24題
一般講演364題(奨励賞受賞講演6題，技術開発賞受賞講演4題，村上奨励賞受賞講演3題，村上記念賞受賞講演1題，招待講演1題含む)
共同セッション25題
ポスターセッション140題
高校生・高専学生ポスター 9題
講演会場 17会場(A～Q会場)

第35回ポスターセッション(9月15日)

日時：9月15日
第1部 9：00～11：00
第2部 11：10～13：10
第3部 13：20～15：20
第4部 15：30～17：30
140件のポスター発表を4部制の時間帯に分けて行い，優秀ポスター賞審査対象となっている137件の内容・発表についてオンラインにより審査が行われた．ポスター発表者は本来A0サイズで作成するポスター発表内容を16枚以下のスライドにまとめ，オンラインで各講演ルームへ訪れた聴講者に発表を行った．
9月18日「優秀ポスター賞」36名が決定し，9月23日に受賞者を本会秋期講演大会公開プログラムサイトに掲載した．

第4回高校生ポスターセッション(9月15日)

日時：9月15日
第3部 13：20～15：20
第4部 15：30～17：30
9件の高校生・高専学生(3年生以下)ポスター発表はポスター発表時間帯の第3部に5件および第4部に4件行われ，同時に審査も行われた．審査結果は9月18日に最優秀賞1件，優秀賞5件が決定し，9月23日に受賞者を本会秋期講演大会公開プログラムサイトに掲載した．
オンラインによる発表でありながらも，しっかりとした研究内容の発表がなされており，審査員や聴講者は興味深く質疑する様子が見受けられ，盛況であった．

金属学会・鉄鋼協会共同セッション

「チタン・チタン合金」10題(金属9題，鉄鋼1題)は9月17日鉄鋼協会会場10(オンライン会議ツール Webex 利用)で開催した．
「超微細粒組織制御の基礎」6題(金属5題，鉄鋼1題)は9月18日に金属学会O会場で開催した．
「マルテンサイト・ベイナイト変態の材料科学と応用」22題(金属11題，鉄鋼11題)は9月17日～18日に金属学会Q会場で開催した．

オンライン機器・カタログ等展示会(第48回)

機器展示10社の出展の協力を得た．各社のご厚意に感謝いたします．

第10回技術セミナー(現地開催時の名称：企業ランチョンセミナー)(9月16日～18日)

講演大会参加者に最新の技術情報を聴講いただく，技術セミナーを開催した．
以下の企業がオンライン会場で30分程度のセミナーを行い，参加者数はのべ合計124名であった．

（参加企業・団体：参加数）

9/16(水)

- カールツァイス㈱：15
- ㈱新興精機：19
- 伊藤忠テクノソリューションズ㈱：26

9/17(木)

- オックスフォード・インストゥルメンツ㈱：14
- カールツァイス㈱：10
- ㈱TSL ソリューションズ：16

9/18(金)

- カールツァイス㈱：10
- ㈱東陽テクニカ：14

World Materials Day Award：オンラインのため開催しなかった．

大会雑記

本来は1992年ぶりに 4 回目となる富山大学五福キャンパスでの秋期講演大会開催の予定であったが，今年に入ってから拡大している新型コロナウイルス感染防止のため，2020年秋期講演大会はオンライン会議ツール Zoom を利用したオンライン形式で開催した．初めてのオンラインによる講演大会開催のため，他学会の状況など情報を収集し，講演大会委員会において何度も協議を重ね，開催までの工程やルール，マニュアル等の骨子および肉付けを行い，実施することが出来た．

開催前の 9 月 8 日には各種マニュアル確認のための事前レクチャーを実施．また，翌日 9 月 9 日～10日はマニュアルに基づいた Zoom 操作をレクチャーするリハーサルを行い，多くの方にご参加頂き，開催前の事前確認を行って頂いた．9 月 9 日～11日および 9 月15日～18日の会期中もテスト会場を設け，事前に Zoom 操作等のチェックを十分にして頂けるよう環境を用意した．

オンラインでの日本金属学会講演大会開催にあたり，座長，副座長，会場係の皆様，また参加者の皆様には事前にマニュアルを確認頂いたり，操作テストを行って頂きありがとうございました．また当日はマニュアルのルールに沿ってご参加頂き，臨機応変にご対応下さり，無事に開催することができました．衷心より厚くお礼申し上げます．

【お詫びと訂正】

会報 9 号付録秋期講演大会プログラム(冊子版)において，
「企画シンポジウム K4：若手科学者へ贈る研究のヒント Ⅲ～未踏領域へ到達するために～」の英語表記に誤りがございました．
正しくは，**Gifts from pioneers to young scientists III: ～ To hitch your wagon to star ～**
となります．

お詫びして訂正させて頂きます．申し訳ございませんでした．

◇　　◇　　◇

〈訂　正〉

まてりあ　第59巻(2020)　第 8 号　413～421頁

最近の研究

多価カチオンを利用した新型蓄電デバイス開発に向けた基礎的研究

李　弘毅　下川航平　岡本範彦　市坪　哲

当該論文の418ページ　右カラム　下から13–14行目の文章で，文献(19)の記載が抜け落ちましたので下記の通り，訂正します．

(誤)　図 6(c)に正則溶体モデルを用いて，Li–Mg 二元系合金の電極電位を計算した結果を示す[34]．

↓

(正)　図 6(c)に正則溶体モデルを用いて，Li–Mg 二元系合金の電極電位を計算した結果を示す[19][34]．

日本金属学会誌掲載論文
Vol. 84, No. 11 (2020)

——論　　文——

アコースティック・エミッションを用いた炭素鋼レーザ焼入れの観察
安田武司　魁生　誠　西本浩司　奥本良博

マグネシウム単結晶の曲げ変形挙動に対するイットリウム添加の影響　岡　健太　福森亮太　津志田雅之　北原弘基　安藤新二

旧大和水銀鉱山産の辰砂鉱石の微細構造
北田正弘　高橋平七郎　桐野文良　建石　徹

——速 報 論 文——

光加熱を用いた異種合金からなるポーラスアルミニウムの発泡挙動　永井孝直　半谷禎彦　大橋政孝　宇都宮登雄　吉川暢宏

Materials Transactions 掲載論文
Vol. 61, No. 11 (2020)

——*Special Issue on SIP Materials Integration Project*——

SIP-Materials Integration Projects (*Overview*)
Masahiko Demura and Toshihiko Koseki

Development of Microstructure Simulation System in SIP-Materials Integration Projects (*Overview*)
Toshiyuki Koyama, Munekazu Ohno, Akinori Yamanaka, Tadashi Kasuya and Susumu Tsukamoto

Development of Performance Prediction System on SIP-MI Project (*Overview*) Manabu Enoki

Development of Data-Driven System in Materials Integration (*Overview*) Junya Inoue, Masato Okada, Hiromichi Nagao, Hideo Yokota and Yoshitaka Adachi

Development of the Materials Integration System for Materials Design and Manufacturing (*Overview*)
Satoshi Minamoto, Takuya Kadohira, Kaita Ito and Makoto Watanabe

Simulations of Non-Equilibrium and Equilibrium Segregation in Nickel-Based Superalloy Using Modified Scheil-Gulliver and Phase-Field Methods
Masayuki Okugawa, Daichi Izumikawa and Yuichiro Koizumi

——*Regular Article*——

Materials Physics

Vacancy Control and Enhancement of Thermoelectric Properties of Al–Ir Cubic Quasicrystalline Approximant via High-Pressure Synthesis
Yutaka Iwasaki, Koichi Kitahara and Kaoru Kimura

Prediction System for Solid Solubility Limits of Ag-, Cu-, Al-, and Mg-Based Alloys Using Artificial Neural Networks and First-Principles Calculations Takafumi Mochizuki, Tokuteru Uesugi and Yorinobu Takigawa

Influence of Thermal Annealing Media on Optical and Electrical Properties of FTO, ITO and TiO_2 Films Tien Thanh Nguyen, Khac An Dao, Thi Thuy Nguyen, Chung Dong Nguyen, Si Hieu Nguyen and Thi Mai Huong Nguyen

Effect of Cr Addition on Microstructure and Mechanical Properties at Elevated Temperature of Al–Mn–Mg–Si Alloys
Zhen Li, Jian Qin, Bo Zhang and Hiromi Nagaumi

Microstructure of Materials

Hot Compression Behavior of Mg–14Li–6Al–1Ca Alloy Ryo Tsukane, Hiroyasu Tamai, Masahiro Nogawa, Yoshihisa Harada, Kunio Matsuzaki and Takashi Nagoshi

Comparison of *In Situ* SEM and TEM Observations of Thermoelastic Martensitic Transformation in Ti–Ni Shape Memory Alloy
Y. Soejima, A. Heima, H. Akamine, T. Inamura and M. Nishida

Effect of Cooling Rate on Precipitation during Homogenization Cooling in Balanced Al–Mg_2Si Alloy Shuaishuai Qin, Artenis Bendo, Taiki Tsuchiya, Seungwon Lee, Yong Zou and Kenji Matsuda

Mechanics of Materials

Mechanism for Excellent Shape Fixability in Hot Stamping Process
Kazuhisa Kusumi, Shuji Yamamoto and Kohsaku Ushioda

Effect of Punch Shape on Multiprocess Tube Flaring for Eccentric Parts
Shohei Tamura, Keinosuke Iguchi and Masaaki Mizumura

Precise Permeability Measurement for High Strength and Ultra Low Permeability Concrete under Controlled Temperature
Masaji Kato, Yoshitaka Nara and Kazutoshi Shibuya

A Mechanism of Carbon-Cluster Strengthening through Atomic Simulations
Tomotsugu Shimokawa, Kiichiro Yasui, Tomoaki Niiyama, Keisuke Kinoshita and Hideaki Sawada

Reaction Process and Influence of WC Content on Microstructure and Mechanical Properties of Ti(C, N)-Based Cermets Xianrui Zhao, Zhanjiang Li, Qintao Li, Dunwen Zuo, Qiangyong Zhang, Zhengyu Zhu, Guixiang Liu, Yong Chen and Feng Xu

Influences of Carbon Addition on Mechanical Properties and Hydrogen Evolution of Thixomolded AM60B and AZ91D Magnesium Alloys
Yoshiaki Hashimoto, Makoto Hino, Takehiko Yanagiya, Takeshi Yamaguchi, Yutaka Mitooka and Teruto Kanadani

Materials Chemistry

Erosion-Corrosion Behavior and Mechanism of Heated Electroless Ni–P Coating under Flow
Yi-Rong Tang, Qin-Ying Wang, Hai-Chang Guo, Yu-Chen Xi, Li-Jin Dong and Xian-Zong Wang

Effect of Polyethylene Glycol on Electrodeposition of Zn Active Metal Oxide Composites from a Particle-Free Solution Daiki Ueda, Satoshi Oue, Tomio Takasu and Hiroaki Nakano

Engineering Materials and Their Applications

Development of VGCF/MP Reinforced Al Matrix Composite by Low Pressure Infiltration Method and Their Thermal Property
Fei Gao, Yongbum Choi and Kazuhiro Matsugi

Morphology Evolution of γ' Precipitates for Wrought Ni-Based Superalloys
Yoshiya Yamaguchi, Ryotaro Tajima and Yoshihiro Terada

Effect of Microstructure on the Coercivity of $SmCo_5$ Intermetallic Compound
Saleem Akhtar, Mushtaq Khan, A. Nusair Khan and Syed Husain Imran Jaffery

Preparation of Highly Heat–Resistant Sm–Fe–N Magnetic Powder by Reduction–Diffusion Process
Ruka Matsuda, Masashi Matsuura, Nobuki Tezuka, Satoshi Sugimoto, Takashi Ishikawa and Yukinobu Yoneyama

Environment

A Novel Process for Recycling of Aluminum Dross Using Alkali Fusion Takaaki Wajima

Preparation of Eco-Friendly Fe_2VAl-Based Thermoelectric Materials Using Cast Iron Scrap Chips as a Source Material
Assayidatul Laila, Makoto Nanko and Masatoshi Takeda

——Technical Article——

Comprehensive Nondestructive Evaluation Technology for Safety and Reliability of Engine Crankshaft Shi Changliang, Lin Yimin, Guan Rutao and Yang Hongyan

Interface Characteristics of GCr15/45 Carbon Steel Composite Billet Produced by Electroslag Remelting Cladding
Yulong Cao, Guangqiang Li, Zhouhua Jiang, Yanwu Dong, Zhengrong Zhao and Chenrui Niu

Extrusion Freeforming-Based 3D Printing of Ceramic Materials Chen Jinsong, Bao Enquan, Huang Dazhi, Ding Yunfei and Qiu Xuhui

——Current Trends in Research——

Severe Plastic Deformation for Nanostructure Controls Zenji Horita and Kaveh Edalati

——Express Rapid Publication——

A Corrosion Resistant Sintered Stainless Steel: Type 304L Containing Mo-Rich Phases
Haruka Saito, Izumi Muto and Yu Sugawara

Announcement

まてりあ　59巻12号　予告

［金属なんでもランキング ?］　No. 12　原子半径
［最近の研究］TT690 合金の長期耐応力腐食割れ性に関する研究
……東北大　米澤利夫
アモルファス GeSn の結晶化における Sn の振る舞い……九工大　石丸　学他
［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～……東工大　曽根正人
―他―

（編集の都合により変更になる場合がございます）

◇　◇　◇

～日本金属学会誌，Mater. Trans. へ投稿しませんか？～

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

新入会員

（2020年8月21日～2020年9月18日）

正　員

安東博幸　住友化学株式会社
伊串　実　株式会社淀川製鋼所
板橋成政　日本トムソン株式会社
桑田秀典　株式会社東北マグネットインスティテュート
鈴木　凌　横浜市立大学
白　玉　京都大学
平山雅章　東京工業大学
桃井　元　JX金属株式会社
森　努　YKK AP株式会社
山本卓也　東北大学

学　生　員

青木秀人　東京大学
浅野秀斗　名古屋大学
淺野　翔　東京工業大学
淺間智広　北海道大学
阿部尚馬　東北大学
石塚誠也　豊橋技術科学大学
石塚智也　茨城大学
石原聡啓　大阪大学
伊藤広貴　東京工業大学
今泉　尚　大阪大学
岩本紘佳　茨城大学
岩谷孟学　大阪大学
上野春喜　豊橋技術科学大学
梅田晃平　東北大学
榎戸康人　茨城大学
大野智樹　愛媛大学
奥嶋正浩　愛媛大学
尾上勝彦　豊橋技術科学大学
樫村知之　東京大学
加藤勇介　茨城大学
加納航太　山形大学
季　洋　大阪大学
黒木颯仁　茨城大学
玄地真悟　大阪大学
上坂菜々子　関西大学
小林哲也　東北大学
駒井亮太　大阪大学
近藤輝一　大阪大学
酒井諒二　長岡技術科学大学
坂口健大　愛媛大学
坂田裕笙　愛媛大学
佐近隆介　茨城大学
貞安朋樹　愛媛大学
佐藤将義　熊本大学
佐藤優太　豊橋技術科学大学
佐藤　陸　東北大学
清水優歌　茨城大学
庄司泰佳　関西学院大学
杉浦幹亮　豊橋技術科学大学
鈴木玲士　愛媛大学
炭崎晴香　関西大学
高尾竜弥　大阪大学
田﨑陽斗　豊橋技術科学大学
田中成奈　北海道大学
田辺耕太郎　豊橋技術科学大学
谷川武瑠　愛媛大学
千葉竜涼　京都大学
堤　陸朗　愛媛大学
寺島慎吾　東北大学
徳澄　翼　九州大学
鳥生大樹　愛媛大学
内藤誠至　愛媛大学
内藤楓貴　千葉工業大学
永山　隼　大阪大学
西　侃　北海道大学
西尾竜士　関西大学
野口敦司　大阪大学
能勢和史　大阪大学
野間天馬　豊橋技術科学大学
吐田虹作　北海道大学
濱名亮太　豊橋技術科学大学
原　輝　豊橋技術科学大学
東浦健人　愛媛大学
平尾　成　大阪大学
廣田将一　広島工業大学
福田　玲　愛媛大学
藤田　嶺　豊橋技術科学大学
藤本大毅　東京大学
二見洋孝　北海道科学大学
佛生智哉　豊橋技術科学大学
古城優也　大阪大学
ポア　ユーユー　東京大学
堀川貴矢　大阪大学
政木　確　豊橋技術科学大学
松田　岳　愛媛大学
松村隆太郎　東京工業大学
水野真悟　北海道大学
三田　樹　関西大学
宮田航英　豊橋技術科学大学
山川海斗　茨城大学
山口紘輝　愛媛大学
山口達也　富山県立大学
行宗詳規　愛媛大学
吉岡尚輝　大阪大学
吉川晃平　愛媛大学
LIU Shiqi　東京工業大学
渡部雅大　豊橋技術科学大学

外国学生会員

LI Zehao　国立研究開発法人物質・材料研究機構
謝　玉麟　東北大学
馬　鵬程　横浜国立大学
楊　夢楠　東京工業大学

住所変更等の手続きは，ホームページ：入会・会員→会員マイページをご利用下さい．

◇　◇　◇

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	問合先	締切
2020年11月				
6	第93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	
6～8	軽金属学会第139回秋期大会（東京都立大）	軽金属学会	http://www.jilm.or.jp/	予約申込 9.30
9	2020年度溶接工学企画講座　～産業分野のものづくりのトレンド～「圧力設備（圧力容器・配管）の溶接技術」～（Web）	溶接学会	TEL 03-5825-4073 jws-info@tg.rim.or.jp http://www.jweld.jp/	定員 45名
9	**第17回ヤングメタラジスト研究交流会（Web）**	**日本金属学会関東支部**	**miyazawa.t.ab@m.titech.ac.jp** **https://forms.gle/Gg2B9pkuWCZYDUYo6**	
9～11	第49回結晶成長国内会議（JCCG-49）（Web）	日本結晶成長学会	TEL 070-5047-3339　jacg-49@jacg.jp https://www.jacg.jp/jp/event/conference.html	
10	第48回先端科学セミナー　電気化学のための計算化学入門（Web）	電気化学会関東支部	TEL 045-481-5661（内線3885） kanto@electrochem.jp https://kanto.electrochem.jp/pages/notice/seminar/page-seminar_202011.html	
11	日本希土類学会第38回講演会（東京）	日本希土類学会	TEL 06-6879-7352 kidorui@chem.eng.osaka-u.ac.jp http://www.kidorui.org/	10.21
11～12	第42回安全工学セミナー「プラント安全講座」（Web）	安全工学会	TEL 03-6206-2848　jsse-2004@nifty.com http://www.jsse.or.jp/	
11～13	トライボロジー会議2020秋（別府）	日本トライボロジー学会	TEL 03-3434-1926 jast@tribology.jp	
13	2020年度 薄膜・表面 基礎講座 情報データ科学に基づく結晶材料・界面・プロセス工学の新展開～実験との連携運用術～（Web）	応用物理学会	TEL 03-3828-7723　igarashi@jsap.or.jp http://www.jsap.or.jp/	定員 200名
14～15	第71回塑性加工連合講演会（鳥取大）	日本塑性加工学会	http://www.jstp.jp/	
16～17	2020年度「デジタルラジオグラフィに関する技術講習会」（東京）	日本溶接協会	TEL 03-5823-6324 http://www.jwes.or.jp/	32名
17	2020年度 溶接工学専門講座（WEB開催）ナノ・マイクロ接合における材料・プロセスと微小領域の評価法（Web）	溶接学会	TEL 03-5825-4073 jws-info@tg.rim.or.jp http://www.jweld.jp/	定員 45名
19～21	2020年日本表面真空学会学術講演会（Web）	日本表面真空学会	TEL 03-3812-0266　taikai@jvss.jp https://www.jvss.jp/annual/mtg2020/	
20	第242回塑性加工技術セミナー「板・管の圧延の先進解析技術」（Web）	日本塑性加工学会	http://www.jstp.or.jp	定員50名
20～21	日本顕微鏡学会第63回シンポジウム（Web）	日本顕微鏡学会	m-forum2020@eng.hokudai.ac.jp	
22	日本機械学会関東支部山梨講演会（山梨大）	日本機械学会関東支部	TEL 055-220-8471 http://society.me.yamanashi.ac.jp/jsme/2020/	8.18
24～25	第170回塑性加工学講座「板材成形の基礎と応用～応用編～」（Web）	日本塑性加工学会	https://www.jstp.or.jp	定員 80名
25～27	第41回　超音波エレクトロニクスの基礎と応用に関するシンポジウム（阪大）	超音波エレクトロニクス協会	TEL 042-443-5166　h.nomura@uec.ac.jp https://www.use-jp.org/	講演 8.21
26～27	第2回粉末冶金基礎講座（京都），第2回粉末冶金実用講座（京都）	粉体粉末冶金協会	TEL 075-721-3650	定員 各100名
27	材料分野におけるSDGsシンポジウム（東京）（本号639頁）	東京大学　生産技術研究所　非鉄金属資源循環工学寄付研究部門	okabelab@iis.u-tokyo.ac.jp	
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 touronkai61@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	
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	

開催日	名称・開催地・掲載号	主催	問合先	締切
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) &ICSPM28(Web)	応用物理学会薄膜・表面物理分科会	https://dora.bk.tsukuba.ac.jp/event/ICSPM28/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	
17	**第3回材料機能特性のアーキテクチャー研究会(Web)(本号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)(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	
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/	
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/	
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/	
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**	
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11月				
28～12.2	The 9th International Symposium on Surface Science (ISSS-9)(高松)	日本表面真空学会	isss9@jvssjp https://www.jvss.jp/isss9/	

まてりあ 第59巻 第11号 (2020)　発行日　2020年11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

公益社団法人 **日本金属学会** The Japan Institute of Metals and Materials

〈刊行物のご案内〉

●日本金属学会誌（月刊） https://www.jim.or.jp/journal/j/

オンラインジャーナルは，全論文フリーダウンロード可能．投稿・掲載費用無料．各種データベース搭載（Web of Science, CrossRef..）．レビュー・オーバービューの定期的な掲載．速報論文等早期公開のカテゴリも充実（受付から掲載まで最短 45 日で公開）．

●共同刊行欧文誌：Materials Transactions（月刊） https://www.jim.or.jp/journal/e/

材料系 14 学協会での共同刊行を実施．公開から 6 ヶ月経過した論文は，フリーダウンロード可能（J-STAGE）．さらに，2018 年 2 月より，公開後すぐにフリーダウンロード可能となるサービスを開始．各種データベース登載（Web of Science, CrossRef...）. Review･Overview の定期的な掲載．Express Rapid Publication 等早期公開のカテゴリも充実（受付から掲載まで最短 39 日で公開）．

●日本金属学会会報「まてりあ」（月刊） https://www.jim.or.jp/journal/m/

会員の情報交換や啓発・教育を目的とした会報誌「まてりあ」．啓発を促す「最近の研究」・「講義ノート」，若手の活躍を紹介する「新進気鋭」「はばたく」「スポットライト」記事，大学・企業の現場を紹介する「研究室紹介」などバラエティに富んだ内容を毎月お届けしております．その他，「金属素描」「金属なんでもランキング！」など『金属』に視点を当てた記事も掲載しております．オンラインジャーナルでの閲覧も出来ます．是非，ご活用下さい．

〈学術図書類出版案内〉

- ●金属化学入門シリーズ
- ●講座・現代の金属学 材料編
- ●講座・現代の金属学 製錬編
- ●金属工学シリーズ
- ●セミナーテキスト
- ●シンポジウム予稿集
- ●単行本

◇日本金属学会春秋講演大会　開催予定◇

★2021年 3 月16日（火）～19日（金）　オンライン開催
★2021年 9 月 2 日（木）～ 4 日（土）　名城大学

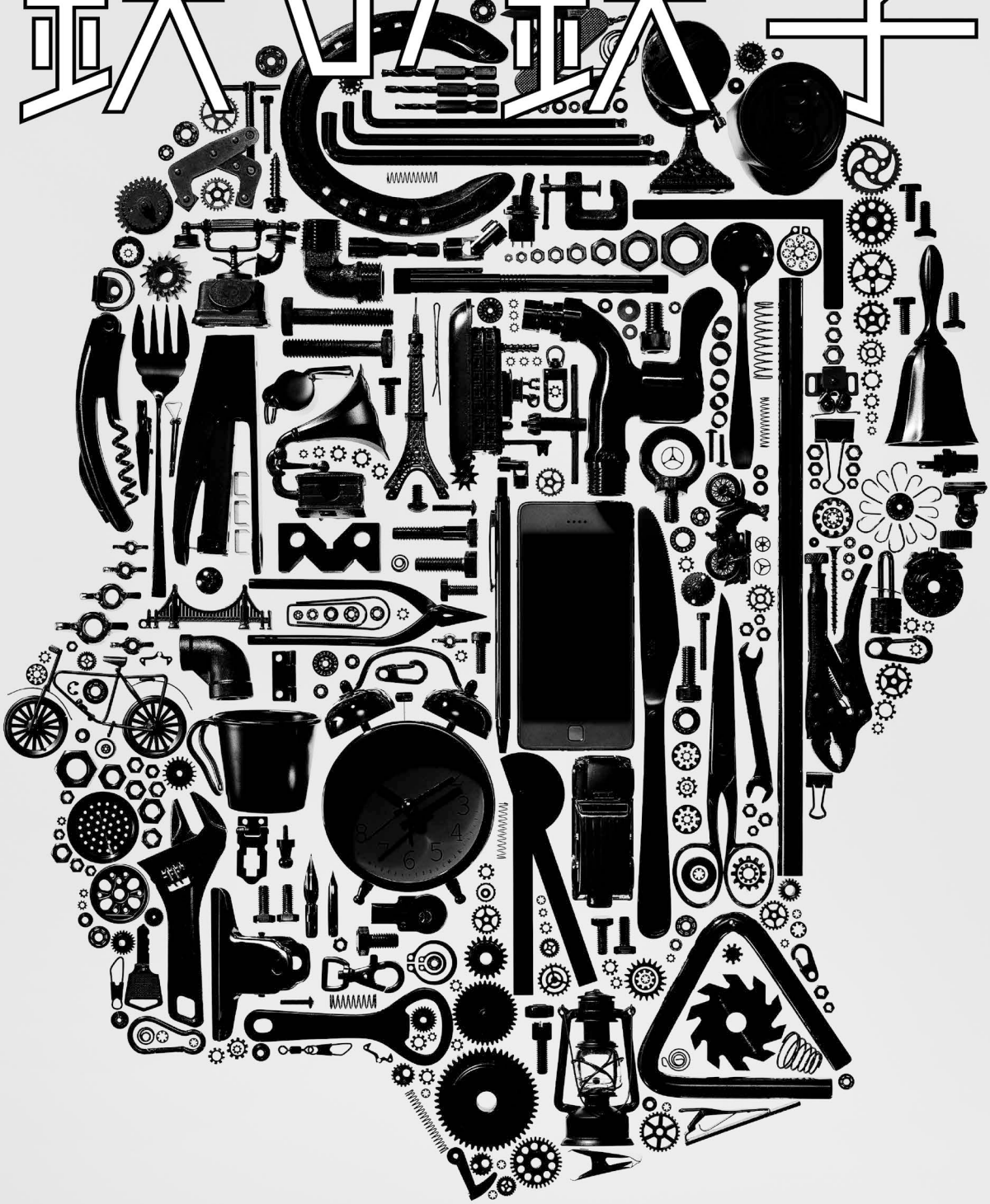
〈多彩な学会活動〉

- ●講演大会（年２回）・調査研究活動
- ●セミナー/シンポジウム・研究会・若手研究グループ活動
- ●支部活動（全国７支部）
- ●表彰事業（論文賞/金属組織写真賞etc・・）
- ●World Materials Day Award 事業
- ●男女共同参画活動　　等

熱気溢れるポスター発表

～ ご入会をお待ちしております．https://jim.or.jp/ ～

鉄の鉄学



世界は鉄でできている。

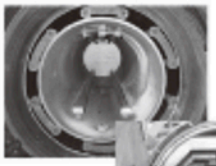
NIPPON STEEL

あらゆるサイズ、あらゆる場所で活躍する私たち、鉄。実は私たちには
独自の“鉄学”があります。それは人の想像力をカタチにすること。
長い歴史の中で、人間のアイデアを実現する役割をずっと
鉄はしてきたのです。鉄とともに、進化してきた人々の暮らし。
さて、次はなにを想像し、一緒になにをつくりましょうか？

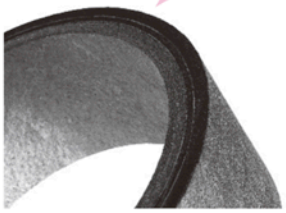
高温真空 3000℃への挑戦

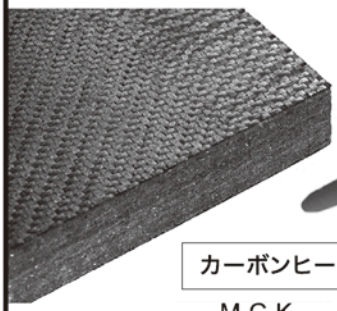
URL:http://www.mechanical-carbon.co.jp/

■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




6面シート貼り

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、高温真空炉内冶具、消耗品等のご相談はスペシャリストにお任せください。

M.C.K

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

日本金属学会発行誌 広告のご案内

まてりあ（会報）

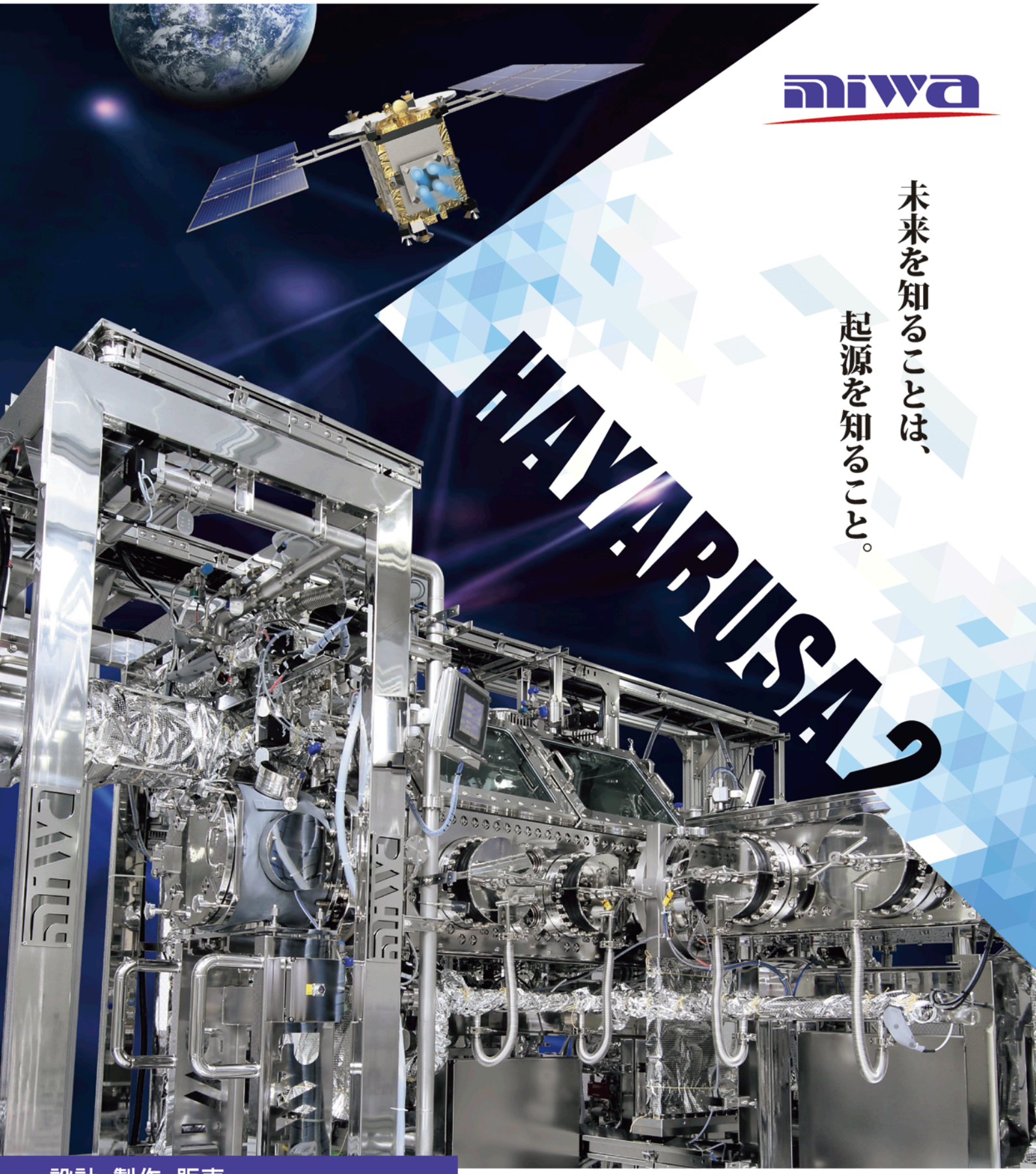
前付）１色１Ｐ　￥１００,０００　１/２Ｐ　￥６０,０００
後付）１色１Ｐ　￥９５,０００　１/２Ｐ　￥５５,０００
※表紙回り、カラー料金等お問い合わせ下さい。

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



設計・製作・販売

●グローブボックス　●ガス循環精製装置
●クリーンオーブン　●ドライルーム
●アイソレーター　●ラミネート装置
●高気密恒温恒湿室

※当社のすべての製品は、日本国内でのみご利用いただけます。

株式会社 美和製作所

本社・工場　〒567-0028　大阪府茨木市畑田町11番50号
TEL：072-625-1138　FAX：072-625-1178
東京営業所　〒101-0042　東京都千代田区神田東松下町32番地
TEL：03-5256-1138　FAX：03-5256-1145
URL：http://www.miwass.co.jp　E-mail：info@miwass.co.jp