

摩擦攪拌 (FSW) 接合機
大阪府産業技術総合研究所設置
(大阪府和泉市)



安倍晴明神社
大阪府大阪市阿倍野区



白石城
宮城県白石市益岡町

旧堺燈台 (大阪府堺市堺区)



夏の太陽がまぶしく輝く今日この頃、みなさまはいかがお過ごしでしょうか？ 私ども大阪センターの教職員も大阪と仙台を機軸として暑さに負けずに駆け抜けていく所存ですので、どうかよろしくお願いいたします。

この地球は私たちに豊かな自然と生きるために必要な恵みを与えて続けてくれています。その恩恵を受けているのは人間だけではなくすべての生き物です。一方、人間社会の産業革命以降の急速な発展はその地球環境に大きな変化をもたらしました。土壌汚染や二酸化炭素等の放出による温室効果が自然の自己修復力をはるかに超えたものであることが認識されるにしたがって環境問題がクローズアップされ、これまで便利さのみを追求してきた科学技術も、地球との共存の重視というパラダイムの変換が起こりつつあります。

持続可能な開発という理念は1980年ごろから認知されるようになってきた考え方で、特に1992年に国連の主催で開催された「環境と開発に関する国際連合会議」で具体化され、今日、地球環境問題を考える上での大きな柱となっています。私たち大阪センターでも軽くて強い鉄鋼材料の研究や、大阪府立大学金属系新素材研究センターと協力しながら複相金属間化合物という次世代型耐熱材料の開発に力を入れるなど、環境・エネルギー問題と深くかわりのある活動を続けています。

一方、材料が現在の社会とかかわっているのは環境問題だけではありません。たとえば現在の日本人の平均寿命は80歳を超えています。これに伴って生活のクオリティを支えるための材料開発も発展してきました。ステント材やチタン製の人工関節などがよく知られていますが、近年ではハイドロキシアパタイトという生物由来の素材の研究も盛んです。大阪センターではこのような材料の研究も行っており、今後より広い視野に立って産業界との連携を強化していければと考えております。

夏は生命力の息吹きが最も強く感じられる季節です。私どもも将来に向けて少しでもよい結果が生まれるように頑張る所存ですので、ご指導ご鞭撻のほど、どうかよろしくお願いいたします。

エクセルギーと耐熱合金

熱力学の第1法則として有名な「エネルギー保存則」がありますが、これによれば、様々なエネルギーはその形を変えても系内にある全エネルギー量は保存され、増えもしなければ減りもしないはずですが、現実にはエネルギーは使えばなくなるといことを我々は実感しています。石油を燃やして発電し、その電力を消費することによって石油資源は減少しています。全エネルギーを我々が利用できるエネルギーと利用できないエネルギーに分け、利用できるエネルギーを「エクセルギー」と呼んでいます。熱力学の第2法則によれば、一定温度の一つの熱源から仕事を取り出すことはできません。2つの熱源温度の差が大きければ大きいほど取り出すことのできる仕事量(エネルギー)は大きくなります。それゆえ、化石燃料を燃焼して利用する熱変換システム装置や高温製造装置の高温操業はエネルギー効率と省エネルギーをもたらすこととなります。それにより、地球温暖化を引き起こしているCO₂削減に貢献することができます。より高温に耐える材料、すなわち耐熱合金の開発は21世紀の技術体系を支えるキイ・マテリアルと言われる由縁はここにあります。

我々は、Ni₃X型の金属間化合物同士を複相化することで、高温強度と延性を兼備する新規耐熱合金の開発を行っています。その中にあって、優れた結晶整合性と微細組織を有する合金が好ましい高温力学特性に留まらず優れた耐環境特性を示すことから、これをNi基超・超合金と命名し実用化への道を切り拓こうとしています。

Ni基超合金

現行使用されている最強の耐熱合金が超合金です。ところが、この合金は一般の人にはほとんど知られていないようです。実際、Googleで検索してみると、幼児や児童玩具である合体ロボットのパーツの名称として使われているようです。材料屋さんにとっても聞きなれた言葉とは言えないようです。言葉の由来は「superalloy」の直訳で、原語の「super-strength alloy」を短縮化したものであるといわれています。超合金にはFe基、Co基及びNi基超合金があります。ほとんどの合金は耐熱合金ですが、耐食合金もあります。これら超合金の内、Ni基超合金は現用耐熱材料の中では最も上位に位置する(高温で使用可能な)材料でありコストも高くなります。Ni基超合金はさらに、固溶強化型超合金、析出強化型超合金、分散強化型超合金に分けられます。前2者の合金は鍛造材として、後者の合金は鋳造材として利用されており、おのおの異なる特性と特徴を示しています。

Ni基超合金の典型的な組織を図1に示します。cubic形状を有しているL₁₂型Ni₃Al相(γ'相とも呼んでいます)の間隙(チャンネルとも呼びます)をNi固溶体相(γ)が埋めている組織を呈しています。ジェット・エンジン用タービン・ブレードのような耐熱温度が1000°C以上にもなる先進Ni基超合金では、Ni₃Al相(γ')の体積率が50%以上にも達するものもあります。図1に示されるγ/γ' 2相組織が耐熱合金として理想にして最強の組織と永い間言われてきました。その理由と根拠は、γ相とγ'間の結晶整合が良いため、高温・荷重下で組織の粗大化が起こらず、クリープ強度等の高温力学特性が劣化せず、結果、優れた耐熱特性が長時間維持できるからです。その他、軽量性や耐酸化特性にも優れているためです。

ところが、運転温度(すなわち、タービン・ブレードの耐熱温度)上昇の要請が強くなり、貴金属(Ru,Re)、重金属(W,Ta)、枯渇元素(Cr,Nb)等の特殊な元素を10種近くも添加するようになってきました。その上、この合金の弱点である結晶粒界を排除するために、最近では一方向凝固による単結晶合金を使うようになってきました。その結果、タービン・ブレードのコストはそれがもつ金の重量に匹敵するまでになっているのが現状です。それ以上に問題なのは、γ/γ' 2相組織に基づくコンセプトによる開発が既に数十年経過していますが、その間、新規な合金開発コンセプトの提案が一切なされてこなかったことです。最近のγ/γ' 2相組織からなるNi基超合金の耐熱温度の上昇は数°C/年となり、限界に近づきつつあるとされています。

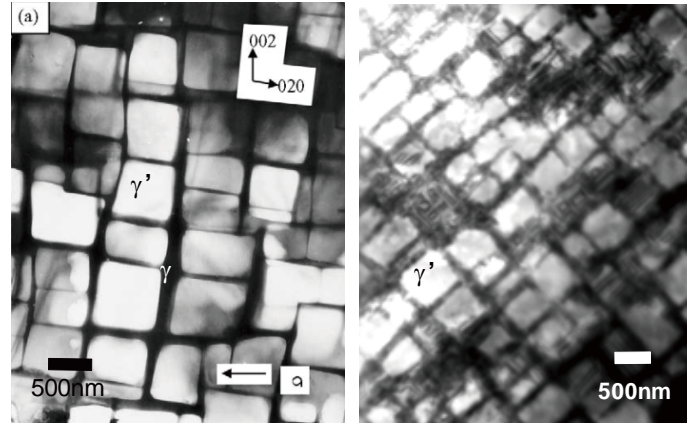


図1 Ni基超合金(γ/γ' 2相組織) 図2 Ni基超・超合金(2重複相組織)

Ni基超・超合金

Ni基超・超合金の組織を図2および図3に示します。組織学的にはNi基超合金に似ていますが、cubic状初析L₁₂型Ni₃Al相(γ')の間隙が、Ni基超合金ではNi固溶体相(γ)からなっているのに対し、Ni基超・超合金ではNi₃Al(γ':L₁₂)+Ni₃V(DO₂₂)の微細な2相組織がなっている点が大きく異なります。2重複相組織(合金)の名称は、ミクロンサイズの初析γ'(L₁₂)相とチャンネル中に存在するナノサイズのγ'(L₁₂)相が2重に共存して階層構造を有していることから名づけました。必須合金としてNi,AlそれにV元素を含むこととなります。2重複相組織は、高温で安定なNi固溶体相(γ)が中間温度(1008~1200°C)でγ+Ni₃Al(γ':L₁₂)の2相組織へと変化し、さらに、約1008°C以下で、γ→Ni₃Al(γ':L₁₂)+Ni₃V(DO₂₂)共析変態により形成されます。普通には、多段階の熱処理を施しますが、特段の熱処理を施さずとも凝固後の普通の冷却速度で2重複相組織は形成されます。これらの組織では、構成相間に決まった方位関係が存在し、その上、整合性の良い相界面構造をとるため、優れた組織安定性と熱安定性を示し、高温・長時間荷重下でも耐熱特性が低化することなく、Ni基超合金を上回る高温力学特性を発現することを見出しました。これまでの観察によれば、チャンネル部の組織と構造は合金成分や時効時間に依存して多様な様相を呈していることが観察されています。

Ni基超・超合金は、950°C付近でNi基超合金よりも高い引張強度、また、Ni基超合金に匹敵あるいは上回るクリープ強度と破断寿命を示すことが明らかにされました。また、引張伸びは広範な温度域で発現しています。2重複相組織中での初析γ'(L₁₂)相は軟質相として、チャンネル部は硬質相として振舞うことが明らかにされ、Ni基超合金での初析γ'(L₁₂)相は硬質相として、チャンネル部は軟質相として振舞う挙動と際立った違いがあります。また、2重複相組織中の異相界面が強化に大きく寄与していることも見出しています。一方、常温域での硬さが900°C付近までほとんど低下することなく維持され、常温域のみならず高温での耐摩耗特性が特段に優れていることが示唆されています。

目下、Ni基超・超合金の優れた特性を活かして図4に示されるような次世代型耐熱部材・部品の開発を行っています。



図4 Ni基超・超合金製、(a)タービンブレード、(b)ボールベアリング、(c)鉄系用摩擦攪拌接合ツール、(d)締結部品

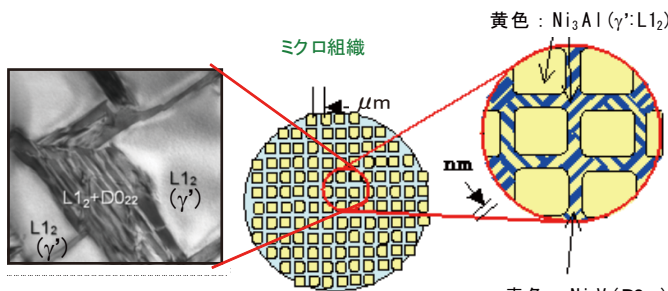


図3 2重複相組織(超・超合金組織)の概念図と実際のTEM像

一般に材料研究は物質創製-構造解析-特性評価というサイクルを繰り返すことにより進められますが、作られた材料が研究者の意図するものであるかを原子レベルで正しく評価する技術として用いられるのが電子顕微鏡です。

この電子顕微鏡は完成された装置ではなく、結像や解析技術に関する理論と技術は日進月歩にあるのが現実の姿です。我々の研究室では電子顕微鏡を主体とした最新の解析技術そのものと得られた知見を未解決の問題に応用することで物質と材料に関する理解を深めることを目標に研究を進めています。本稿では、現在目まぐるしく変化する電子顕微鏡技術の現状を述べ、それがどのような形で材料研究に役立っているかを紹介させていただきたいと思います。

電子顕微鏡の分解能と球面収差

かつて宇宙の彼方に存在する互いに接近した二つ星を分離して見えることを定量的に比較するため、望遠鏡の分解能を決める必要がありました。この時代からすでに分解能は光など見るために必要な波の波長の程度であることが知られていました。たとえば200キロボルトに加速された電子の波長は0.0025 nm、原子間の間隔が0.1 nmのオーダーですから電子の波長だけ考えればとっくの昔に様々な物質の結晶構造を示す像が原子レベルで得られていたこととなります。一方、世の中で高分解能電顕と称されている電子顕微鏡の分解能は0.2 nm程度ですので電子の波長から予測される分解能より二桁も悪いこととなります。この原因は一体どこにあるのでしょうか？

そもそも顕微鏡である限りレンズが必要です。電子に対するレンズ作用は磁場中を通過する電子に付与されるローレンツ力によって得ています。高校で習ったフレミングの左手の法則を思い出してください。針金に電流が流れているとしましょう。この電流の方向に垂直に磁界がかかっているとき、左手の中指、人さし指、親指が電・磁・力に対応します。(ただし電子はマイナスの電荷を持っていますから、電子線の受ける力を考えるときは右手を用います。)いずれにしても、こうしてできたレンズが幾何光学で学んだ理想的なものからはほど遠いものなのです。

衛星放送などを受信するパラボラアンテナ(図1a)は平行な光を集光するには放物面が必要であることを我々に教えてくれます。ところがこのアンテナが球面できていたらどうでしょうか？(図1b)電波を一点に集めることはできず、光というピンボケの像ができてしまうでしょう。この状況を虫眼鏡に例えて示したのが図1cです。今レンズからuの距離にある物体が理想的にはvの位置にきれいに移しだされているとします(この理想的な位置をガウス光学系における像面と呼びます)。ところが実際の電子顕微鏡では試料における散乱角が大きくレンズの外側を通る電子ほど強く曲げられてしまい、本来、点が映されるべきところが円となって現れるのです(この円のことを錯乱円と呼びます)。この誤差は球面収差と呼ばれ、現在のほとんどの電子顕微鏡の分解能を制限する最大の要因となっています。

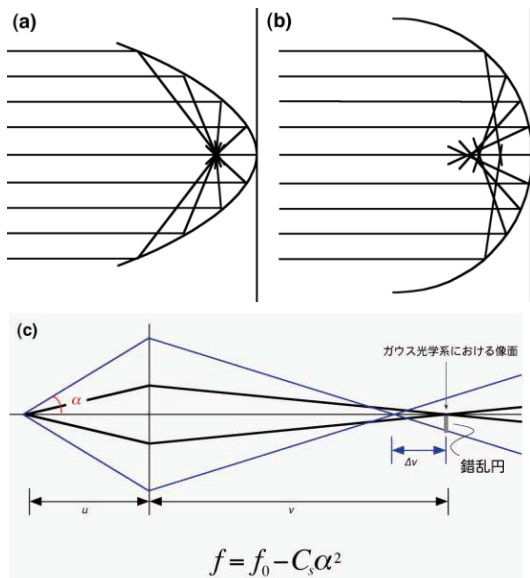


図1 (a) パラボラアンテナ、(b) '球面' アンテナ、(c) 理想的なレンズと球面収差のある場合。

ところが近年、この球面収差を補正する技術が急速に普及し、電子顕微鏡も新たな時代を迎えています。たとえば米国では TEAM (Transmission Electron Aberration-corrected Microscope) と呼ばれるプロジェクトがエネルギー省の支援の下で進んでいますし、東北大学でも百万ボルト電子顕微鏡室に対物レンズに球面収差補正機能がある電子顕微鏡が稼働しています。このほかにも CTスキャンなどで知られている多数の像から対象物体の三次元構造を得るトモグラフィと呼ばれる技術が普及してくるなど電子顕微鏡を取り囲む状況は大きく変わりつつあります。

図2には FePd規則合金磁性微粒子の高分解能電子顕微鏡像を示します。このように微粒子では内部と外部で原子間の間隔が異なることが直接的にわかります。これが単なる歪みの解放によるものなのか、FeとPd という二つの原子の分布に起因するものなのか、あるいは規則度の連続的な変化に起因するものなのか、応用上という観点からも重要で現在も研究は進められています。

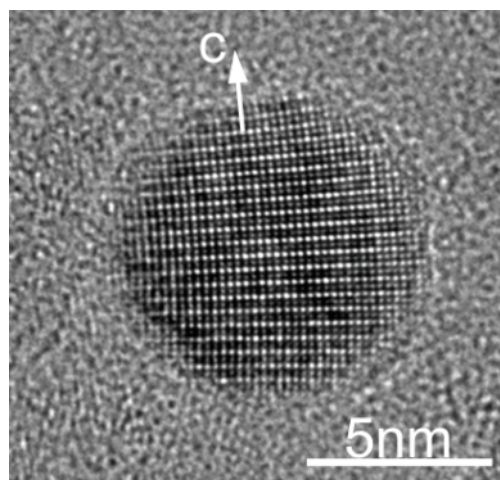


図2 FePd磁性微粒子の高分解能電子顕微鏡像。正方晶に属する結晶のc-軸を図に示した。単位胞の大きさが変位しているのがわかる。

一方、図3はジルコニア(ZrO₂)の正方-単斜晶の界面における構造遷移層の高分解能写真です。この変態では約1.4%もの格子ミスマッチを伴いますが、転位を伴わないため原子変位が連続的は構造遷移層が形成されたものと考えられます。

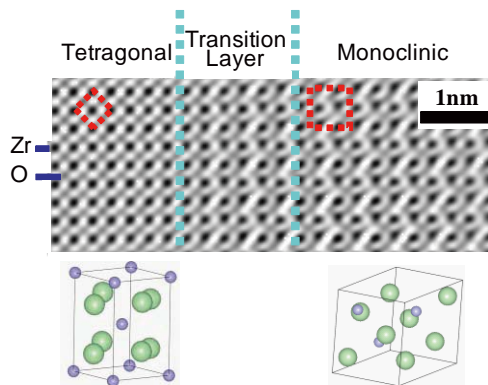


図3 ZrO₂の正方-単斜晶の界面遷移層。黒い点がZr原子カラム 灰色の点が酸素原子カラムに対応。数ユニットセルにわたって格子定数が連続的に変位している。

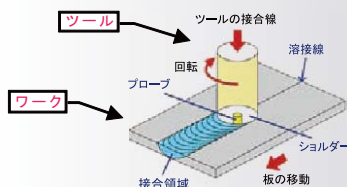
当研究室ではこのように電子顕微鏡を取り囲む最先端の技術を駆使することにより、従来は不可能であった情報を抽出し新しい材料の開発に役立てることを目的に研究を進めています。

大学に存在する様々な先端的な大型研究施設の共用を進めることによりイノベーションを加速しようという文部科学省の試みの一つが「先端研究施設共用イノベーション創出事業」です。東北大学にも全国13の拠点の一つとして「東北大学ナノテク融合技術支援センター」が平成19年度から立ち上がっています。具体的には産学官の協力により(1)MEMSと呼ばれる超微細加工や薄膜生成の技術支援を行う「超微細加工分野」、(2)少量多品種の化学物質を合成する「分子合成分野」、(3)非常に強い磁場環境を提供する「極限環境分野」、(4)最新の電子顕微鏡を用いて行う材料の組織・構造の解析を行う「ナノ計測・分析分野」において、ナノサイエンスのポテンシャルを駆逐することで、新たなイノベーションの創出と発展に寄与することを目的としています。結果を公開できるものに関しては無料で施設を利用できるほか、大学の規程に則った料金で非公開でのご利用も可能です。詳しい内容に関してはホームページをご覧ください。

<http://cints-tohoku.jp/>

イベントスケジュール 第15回ものづくり基礎講座の報告

平成21年6月15日(月)に「硬質・高融点金属の摩擦攪拌接合」と題して、「第15回ものづくり基礎講座」が日本鉄鋼協会・金属学会関西支部材料開発研究会との共催によりクリエイションコア東大阪で開かれました。当日は大阪大学接合科学研究所の藤井英俊氏による「鉄鋼材料の摩擦攪拌接合および摩擦攪拌プロセス」、東北大学の佐藤裕氏による「硬質・高融点金属の摩擦攪拌接合ワークの組織と特性を中心にして」、大阪府立大学金野泰幸氏による「硬質・高融点金属の摩擦攪拌接合ツール開発を中心にして」の講演がありました。70名の参加者があり、企業からも多くの方が参加され溢れんばかりの盛況さでした。アルミニウムやマグネシウムの接合では既に一部実用化されている本技術を鉄系材料、チタン合金、ニッケル合金等の硬質・高融点材料にも是非とも実用化させたいという講演者と参加者の思いが伝わる活発な質疑討論が行われました。本技術の鍵を握るのが接合ツールの開発であるとの共通した認識を抱いて終了した講演会となりました。



摩擦攪拌(FSW)接合機を用いて産学官連携事業により新しい鉄系材料の接合技術開発を行っている。

図)摩擦攪拌(FSW)接合加工説明

第14回技術セミナー

講師・演題:

- テーマ「金属ガラス」の新しい活用法とおさかのアクティビティ」
 - 東北大学金属材料研究所 准教授 福原幹夫氏
「金属ガラスの機能特性」
 - 大阪大学接合科学研究所 助教 川人洋介氏
「レーザー溶接・接合技術の金属ガラスへの展開」
 - 東京工業大学精密工学研究所 准教授 秦 誠一氏
「薄膜金属ガラスのコンビナトリアル創成と高耐食性真空センサへの応用」
 - 東大阪宇宙開発協同組合前理事長 今村博昭氏
「東大阪発!!人工衛星が宇宙へ」
- 場所:クリエイションコア東大阪
時間:講演会 午後2時~4時20分 プース展示・交流会 4時30分~6時

2009年
8月6日
(木)

金研大阪センター News

中平研究室に特別教育研究教員着任

4月1日より、応用生体・機能材料分野(中平助教)に、佐藤充孝研究教員が着任しました。リン酸カルシウムなどを気相法にて薄膜コーティングする研究を進めてきましたが、現在は溶液化学合成などを中心にバイオセラミックスの研究を行っています。

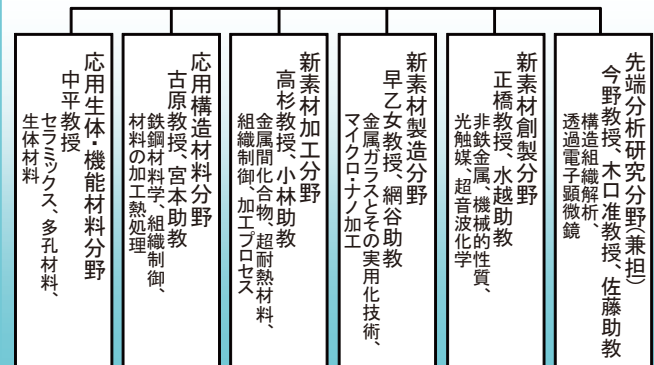


佐藤充孝 特別教育研究教員

Mitsutaka Sato O型・獅子座

2008年 東北大学大学院博士後期課程(博士工学)修了。
学振特別研究員を経て2009年4月より現職。
(専門):生体材料、気相析出法

金属材料研究所附属研究施設大阪センター構成員



金属材料研究所夏期講習会開催

きたる、7月22日(水)から7月24日(金)に、金属材料研究所にて第79回夏季講習会を開催します。22日と23日の両日は金属材料研究所で行っている最先端の研究紹介が9件計画されています。そして24日には6件の実習コースからご希望のコース1件選択頂き、理解を深めていただくことを目指しています。講習会では参加者と教官との交流を通して、産学連携による新たな材料開発研究の促進も期待しています。材料開発・製造に従事する研究者・技術者の方々を始めとする幅広い方々のご参加を心より歓迎いたします。詳細は下記のURLをご覧ください。

<http://www.imr.tohoku.ac.jp/jpn/event/kouen/summersemi79.html>

編集後記

大阪センターの夏は、クマゼミと共にやってきます。アブラゼミ、ミンミンゼミ、ニイニゼミ、ヒグラシなど、なじみのセミを押しよせ、息継ぎする間もなく大音声で合唱するクマゼミが圧倒的です。そのたくましさは、光ケーブルに産卵し、たびたび通信トラブルをひきおこしているほどです。さて、芭蕉が立石寺で詠んだ「閑さや岩にしみ入蟬の声」のセミはニイニゼミのことですが、最近、クマゼミが北上中とのこと、たびたび話題にのぼります。これは地球温暖化の影響もさることながら、緑化のため運ばれた樹木の根についた土と共に幼虫が運ばれることもあるそうです。なにしろ、セミは6~7年もの間地中生活を送るのですから。地上での寿命は僅か10日ばかり。「空蟬」「ものあはれ」の所以です。夏の夕暮れ、ヒグラシやツクツボウシが懐かしい酷暑の大阪です。

新素材製造分野 教授 早乙女康典

大阪府和泉山系「笹百合」 花言葉:清浄・上品



東北大学金属材料研究所

<http://www.osakacenter.imr.tohoku.ac.jp/index.html>

編集・発行

附属研究施設大阪センター

〒599-8531 大阪府堺市中区学園町1-2
大阪府立大学 産学官連携機構8F
TEL 072-254-6372 FAX 072-254-6375
Email imrosaka@imr.tohoku.ac.jp

大阪センター仙台サテライトオフィス

〒980-8577 宮城県仙台市青葉区片平2-1-1
TEL 022-215-2124 FAX 022-215-2126

クリエイション・コア東大阪

〒577-0011大阪府東大阪市荒本北1-4-1(南館2F-2207室)
TEL/FAX 06-4708-3550

