

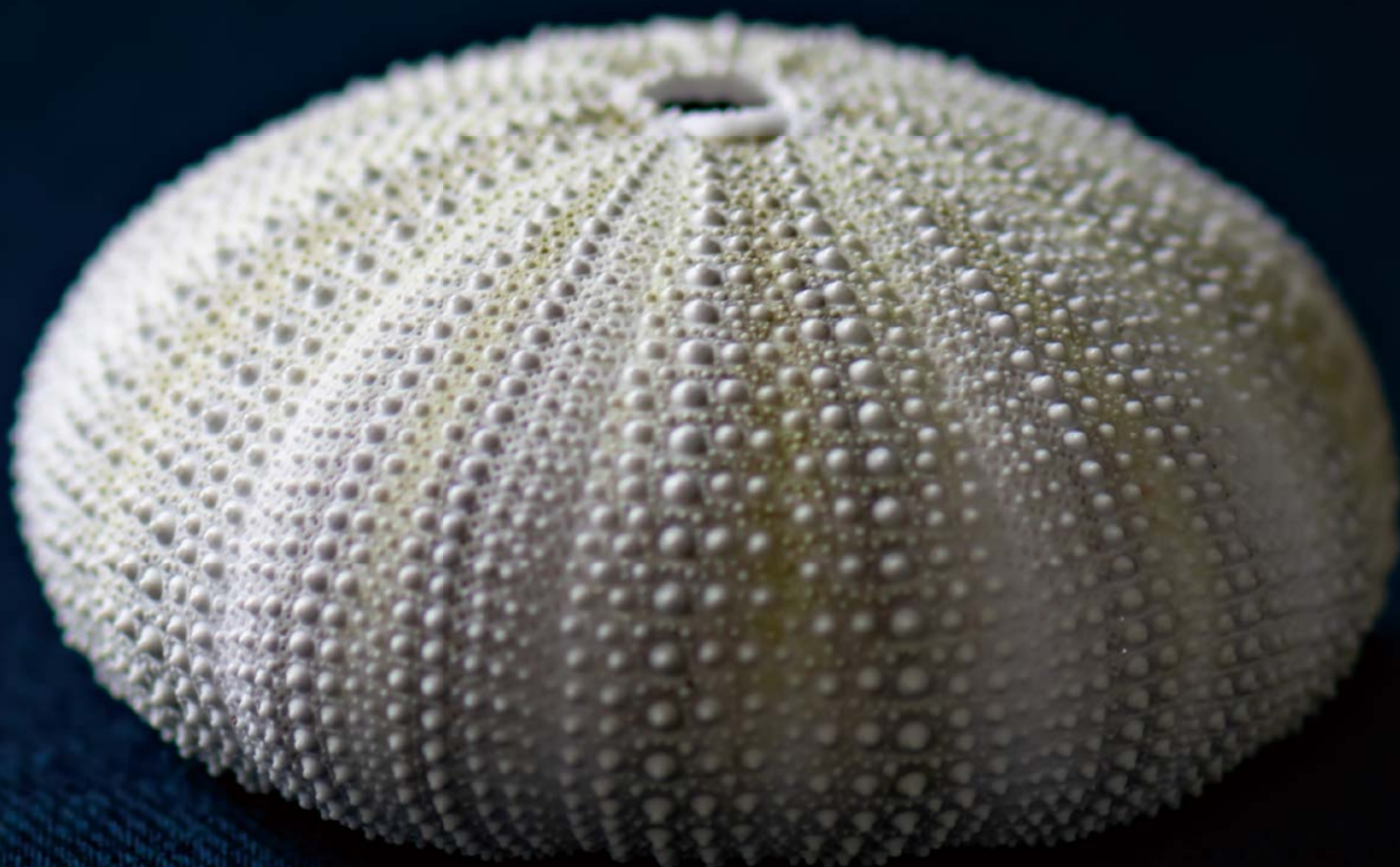
NIMS now

NATIONAL INSTITUTE FOR MATERIALS SCIENCE

No.

1

骨と材料



骨と材料

私たちの体を支え、体内の臓器を守る「骨」。
折れたりひびが生じたりしても、自ら修復する「自己治癒」という優れた機能が備わっている。

だが、ひとたび大きく損傷した場合、もとの形と働きを自然に回復するのは難しい。
そこで使われるのが、欠損部を埋める「人工骨」や、正しい位置に固定する「骨固定材」だ。

NIMSは、それらの材料を“穴埋め役”では終わらせない。
骨本来の治癒力を高め、しかも役目を終えたら自然と消えてなくなる——。
そんな有能な材料を、思いもよらぬ生物からつくり出そうとしている。

さらに、骨をめぐる研究は生体内にとどまらない。
骨が治癒するメカニズムに着目することで、
もろいというセラミックス最大の弱点を克服した驚きの新材料を生み出した。

「骨と材料」をめぐるストーリー。
その全貌がここに。

とげと皮膚を取り除いたウニの殻。
肉眼でもたくさんの孔が確認できるが、実は肉眼では見えない微細な孔も無数にあいている。
今、その微細構造を生かした意外な転身が期待されている(次ページ)。

ウニ殻が秘めた「人工骨」の才能

さまざまな人工骨材料を開発してきた菊池正紀が今、注目しているのは、
ごみとして捨てられてしまうウニの殻である。

ミクロの目で見たウニ殻には、直径が10マイクロメートル(μm)くらいの小さな孔と
200μmくらいの大きな孔が無数にあいている。

その微細な孔の存在こそが、骨を修復する材料に有用だという。



取材協力

菊池 正紀

Masanori Kikuchi

機能性材料研究拠点 バイオ機能分野
バイオセラミックスグループ グループリーダー

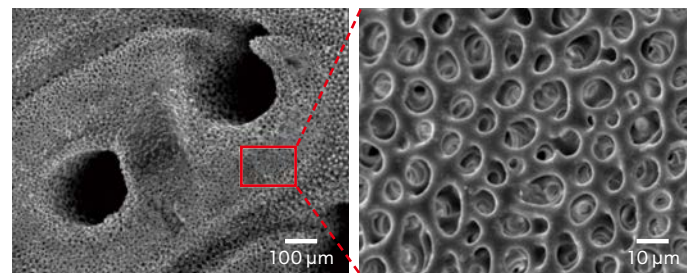


図1 ウニ殻にあいたミクロな孔

電子顕微鏡で観ると、直径約200μmの孔(左)と、直径約10μmの孔(右)が無数にあいていることが分かる。



ウニ殻を1、2 mmに粗く砕いた後、リン酸化処理を施す。

骨は常につくり替えられている

外傷や骨腫瘍の摘出によって骨が欠損した場合、患者自身の腰や足から採取した骨で補填する「自家骨移植」が行われている。自分の骨なので拒絶反応が起こりづらく、治療効果は高い。しかし、健全な組織を傷つけてしまう、使える骨の量に限りがあり大きな欠損には対応できない、といった問題がある。

そうした問題を解決するのが「人工骨」である。金属製の人工骨は体内に異物として残ってしまうが、最近、自分の骨が再生して回復するにつれて消えてゆく人工骨が登場し、患者の負担が軽減されている。菊池正紀は、それを世に送りだしてきた研究者のひとりだ。

「骨は一度つくられたらそのままだと思います。その仕組みを活用すると、人工骨が自分の骨に置きかわることができるのです」と菊池。

骨は「コラーゲン」という有機物質と、「アパタイト」というリン酸とカルシウムを主成分とする無機物質で構成されている。そして、破骨細胞による古い骨の吸収と、骨芽細胞による新しい骨の形成を常に繰り返しているのだ。

「そのサイクルに取りこまれることで、体内に入れた人工骨がいつの間にか本物の自分の骨に置きかわる、それが理想です。そのために重要なのが“孔”です」

たくさんの大きな孔と小さな孔

人工骨に孔があると、古い骨を吸収する破骨細胞や、新しい骨を成長させる骨芽細胞が骨に取りつくための足場になる。孔が多い、つまり気孔率（全体積に占める空間の割合）が高い人工骨ほど、新しい骨が成長しやすい。しかも、大小2種類の孔があると、骨の再生が速く進むことが報告されている。

大きい孔だけの場合、細胞ですべての孔が塞がれてしまうと、体液が人工骨の内部にまで入りこめず、破骨細胞や骨芽細胞に酸素や栄養を供給できなくなってしまう。一方、細胞が入ることができない小さな孔があると、そこから酸素や栄養などが供給されるため、骨の再生が速まると考えられている。実際、私たちの骨には大小の孔がたくさんある。

「大小2種類の孔があり、気孔率が高い人工骨の開発が進められていますが、作製には複雑な工程が必要なため、難航しています。また、気孔率が高くなると強度が低下してしまうため、せっかくなつくた孔に樹脂を入れて補強するという本末転倒なことも起きています。そうした状況の中、私は格好の材料を見つけたのです」

“ごみ”から“材料”へ

菊池は2011年より、北海道大学大学院の客員教授を併任している。
「学生と何の気なしに話をしていたとき、北

海道でウニ殻の廃棄が問題になっていることを知りました。可食部を取りだした後のウニ殻は、ごみとして捨てられます。これが山積みになっているというのです」

捨てられているウニ殻の量は、国内だけで年間8,500トン。その処理に大きな費用がかかっているという。

「学生の話聞いて頭に浮かんできたのが、ウニ殻の微細構造でした。ウニはもともと、生物の構造や機能を材料開発に生かす『バイオミメティクス分野』で注目されていて、私もその微細構造を知っていました。まさに人工骨の材料にうってつけではないか!?とひらめいたのです」

ウニは棘皮動物で、体がとげの生えた殻で覆われている。とげと皮膚を取り除くとウニの骨格ともいえる殻が現れるのだが、ウニ殻には肉眼で見える孔のほかに、直径が約200μmと約10μmの孔がたくさんあり、孔は互いにつながりながら貫通している(図1)。細胞は100μmほどだから、大きい孔には入ることができるが、小さい孔には入ることができない。つまり、人工的につくるのは難しい人工骨に適した構造を、ウニは自然と形づくっているのだ。

ウニ殻はこうして人工骨に生まれ変わる

とげの生えたウニを漂白剤に数時間浸けておくと、とげが落ち、皮膚が溶けてウニ殻が残る。このウニ殻は、マグネシウムを多く含んだ炭酸カルシウムでできている。人工

骨として使うためには、炭酸カルシウムを、骨の主成分であるリン酸カルシウムに変換する必要がある。

菊池は「水熱処理」と呼ばれる方法を用いて、微細構造を壊すことなく炭酸カルシウムをリン酸カルシウムに変換することに成功。このとき、人工骨にウニ殻を使うもうひとつのメリットを見いだしたという。

「ウニ殻に水熱処理を施すと、アパタイトを含むリン酸カルシウムの複合体が得られます。このとき、リン酸カルシウムの一種『リン酸三カルシウム』が多く生成されていました。リン酸三カルシウムとアパタイトが複合化している材料は、骨の再生を促進するという報告があり、人工骨に最適なのです」

リン酸三カルシウムが多く生成された理由は、ウニ殻の成分にある。殻に含まれるマグネシウムが、処理の過程で一部のアパタイトの結晶成長を阻害し、結果として、

リン酸三カルシウムの生成を後押ししていたのだ。

ウニ殻は球形をしているので、そのままでは人工骨として使えない。そこで、ウニ殻を1、2ミリメートル(mm)の大きさに砕いてからリン酸化し、ゼラチンやコラーゲンを結合材にして、ブロックを作製(p4 タイトル横写真)。そのブロック上で骨芽細胞を培養したところ、細胞はブロックの中に入りこんでいった。そして増殖し、骨をつくる機能に関わる遺伝子が発現していることも確認できた(図2)。

菊池は「細胞培養の結果は、ウニ殻が人工骨の材料として使えることを示しています。今後、動物実験によって、大小の孔に細胞がどのように入りこんでいっているのかなど、より詳細に調べていきたい」と意気込む。

ウニ殻を人工骨材料として使うことがで

きれば、お金を払って廃棄していたごみから収入を得ることができる。骨の病気で苦しむ患者の負担を軽減するだけでなく、地域の活性化にもつながると、ウニ殻に熱い視線が注がれている。

(文・鈴木志乃／フォトンクリエイト)

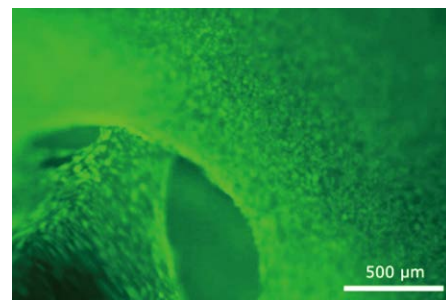


図2 骨芽細胞の培養
ウニ殻からできたブロック上で骨芽細胞を21日間培養した。培養後の細胞を染色して観察したところ、生きた細胞は緑に、死んだ細胞は赤く光るが、ほとんど死んだ細胞は見られず、新しい骨を成長させる機能を維持していることが分かった。

Research 2

役目を終えたら 体内で消える 「骨固定材」をつくる

折れた骨を体内でしっかり固定しつつも、治癒したときには残っていない――。

そんな骨固定材があれば、治癒後に取りだす再手術が不要になり、患者の負担は激減する。

強度があり体内で溶解・吸収されるマグネシウム(Mg)合金がその有力候補だが、骨折が治癒する前に溶けてしまうという問題がある。

廣本祥子は、Mg合金の表面を被覆することで、その難題を解決しようとしている。

Focus

ウニ殻の微細構造を生かして有害イオンの除去フィルターも

菊池がもうひとつウニ殻の用途として考えているのが「フッ化物イオンの除去フィルター」だ。フッ素は半導体やガラスの表面処理に有用だが、飲料水として摂取すると人体に害を及ぼす。

工場排水に含まれるフッ化物イオンを除去する方法は、すでに存在する。排水に塩化カルシウムを加え、フッ化カルシウムとして沈殿させ、回収する。これだけでは環境基準値以下に抑えられないので、リン酸カルシウムの一種、DCPD*の粉末を加え、フッ素アパタイト(FAp)粒子として再び沈殿させ、回収している。

だが、DCPD粉末を使った除去は、効率が悪い。まず、FAp粒子の生成に時間がかかる。また、除去過程でできるリン酸

を取り除くため大量の炭酸カルシウムを加えるので、ろ過しなければならない体積が数倍に増え、結果として廃棄物も増えてしまう。

そこで菊池は、DCPD粉末の代わりにウニ殻を使えば、これらの問題が解決できると考えた。「まず、炭酸カルシウムから成るウニ殻をリン酸化します。その際、炭酸カルシウムが適度に残るようにするのです」と菊池。炭酸カルシウムにはFAp粒子の生成を助ける働きがあり、反応時間を短縮できる上、除去過程で生じる余分なリン酸を取り除く能力もある。

ウニ殻は微細な孔を持ち表面積が大きい。そのため、1、2mmと粗く砕くだけで良い。一方のFAp粒子は、大きさが20μm程度

で5分以内に沈殿するため、ウニ殻顆粒との分離・回収が容易で、顆粒の再利用とFApの資源化が可能だ。

実際にウニ殻を用いた試験では、高いフッ化物イオンの除去率を保ったまま、反応時間を短縮できた。さらに、DCPD粉末を用いた方法では、FAp粒子ができるときに余ってしまうリン酸イオンが問題になっていたが、これを抑制できることも分かった。

インドや東南アジア、中国には、高濃度のフッ化物イオンで汚染された地下水や井戸水が多いことから、菊池は海外展開も視野に入れている。

*DCPD…リン酸水素カルシウム二水和物

取材協力

廣本 祥子

Sachiko Hiromoto

構造材料研究拠点 解析・評価分野
腐食特性グループ 主幹研究員

折れた骨を固定し 新しい骨がつくられるのを待つ

骨折をしたときにギプスをつけた、という人も多いだろう。折れた骨を元の位置に戻して、ずれないように固定しておくためだ。骨は絶えず生まれ変わっているため、折れた骨と骨の隙間にも新しい骨がつくられていき、数ヵ月で元のようにつながる。骨がずれたままつながってしまうと、痛みなどの後遺症が出ることもある。骨折の治療において固定はとても重要だ。

体の外からでは折れた骨の位置を戻せない場合やギプスで固定できない場合は、手術をして折れた骨の位置を戻し、プレートやねじといった「骨固定材」を使って直接固定する。骨固定材には、腐食しにくく強度の高い、チタン(Ti)合金やステンレス鋼がよく使われている。しっかり固定できる反面、体にとっては異物なので、治癒後に再手術をして骨固定材を取りださなければならず、患者にとって大きな負担となっている。

体の中で溶けて吸収され、 なくなる材料

「折れた骨を固定できて、骨折が治癒したときには溶けて吸収されてなくなっている。そんな骨固定材があればいいですね」

そう語るのは、金属の表面で生じる「腐食」と呼ばれる現象を追いつづけてきた廣本祥子だ。大気中で鉄がさびてもらうように、生体内という周囲の環境の影響を受けて金属が化学反応を起こし、溶けていく現象もまた、腐食なのだ。

生体内で溶解・吸収される材料、いわゆる「生体吸収性材料」は、2000年ごろから注目され始めた。ポリ乳酸というプラスチックから成る骨固定材はすでに実用化されているが、強度が低いため使える箇所が限られてしまっている。現在、骨固定材として有望視されている生体吸収性材料が、Mg合金である。Mg合金は、Ti合金ほど強度は高くないものの、軽量で弾性率が骨に近い。また、Mgは生体必須元素であり、生体との親和性

も高い。

しかしMg合金は、そのままでは骨固定材として使うのは難しいことも分かってきた。「体内に埋めこむとすぐに溶け始めてしまい、骨の治癒に必要な期間、固定しておくことができないです」と廣本は説明する。

Mg合金を骨固定材として使うには、ゆっくり溶けるようにする必要がある。ならば、Mg合金の表面を、体液の浸透を抑制する材料で覆えばよいのではないか——。多くの研究者がそう考え、被覆材料について試行錯誤を続けている。

Mg合金をゆっくり溶かすために

さまざまな被覆材料の検討が進む中、廣本が注目したのは「水酸アパタイト」というリン酸カルシウム的一种だ。骨の主成分なので、骨との親和性も高い。しかし、難点があった。骨固定材は複雑な形をしているので、溶液に浸ける方法で被覆をしたい。だが、溶液による1回の処理でMg合金表面に水酸アパタイトの被覆を実現した例はなかったのだ。

「多段階の化学反応を行えば、水酸アパタイトで被覆できるという報告はありました。しかし、簡単にできること、それが私の一番のポリシーなんです」

廣本は、リン酸塩や「金属錯体」とも呼ばれるカルシウムを含んだ分子を溶かした溶液をつくり、これにMg合金をつけて、表面に水酸アパタイトの層を形成させようと試みた。そこで問題となったのが、Mg合金を溶液に浸けるとMgイオンが溶けだして、水酸アパタイトになるべきリン酸イオンと結合してしまうこと。本来、リン酸イオンには溶液中のカルシウム(Ca)イオンと結合し、水酸アパタイトになってほしい。ならば、溶液中にあらかじめCaイオンをたくさん入れておけばよいのではないかと——。

「私は化学出身なので“化学反応の速度は反応物の濃度に比例する”という反応速度論の基本に立ち返りました。反応物AとBのうち、Aの濃度を高くしておく、Aの反応の方がBより速く進んで、多くの生成物ができるのです。Caイオンが多い被覆処理溶液をつくるのには少し苦労しましたが、期待通りに1回の処理で水酸アパタイトの層を形成させることに成功しました」

実際に、水酸アパタイトで被覆したMg合金をラットの大腿骨に埋入する試験を、鹿児島大学歯学部と産業技術総合研究所との共同研究で実施。水酸アパタイト被膜によって、Mgの溶ける速度が抑制されるだけでなく、新しい骨の形成が促進されることが明らかになった(図)。

被覆材料もMg合金も、 すべて骨に置きかわる

期待通りの結果だが、廣本には気になることがあった。ラットの大腿骨に埋入してから4ヵ月後に調べると、水酸アパタイトがまだ残っていたのだ。すでにMg合金は溶けて、骨に置きかわっている時期なので、被覆材料も生体に吸収されていてほしい。

「水酸アパタイト被膜はMg合金と骨との結合を早め、骨固定材の役目を十分助けていますし、いずれ細分化されて生体に吸収されていくでしょう。とはいえ、すべての材料が生体に吸収される“骨の完治”を短期間で実現するには、被覆材料の吸収が、骨の治癒に並行してもっと早いタイミングで進んでいくのが理想です」

そこで、廣本が被覆材料として新たに選んだのが「炭酸アパタイト」である。水酸アパタイトと同様、リン酸カルシウムの一種だが、組成が少し違う。

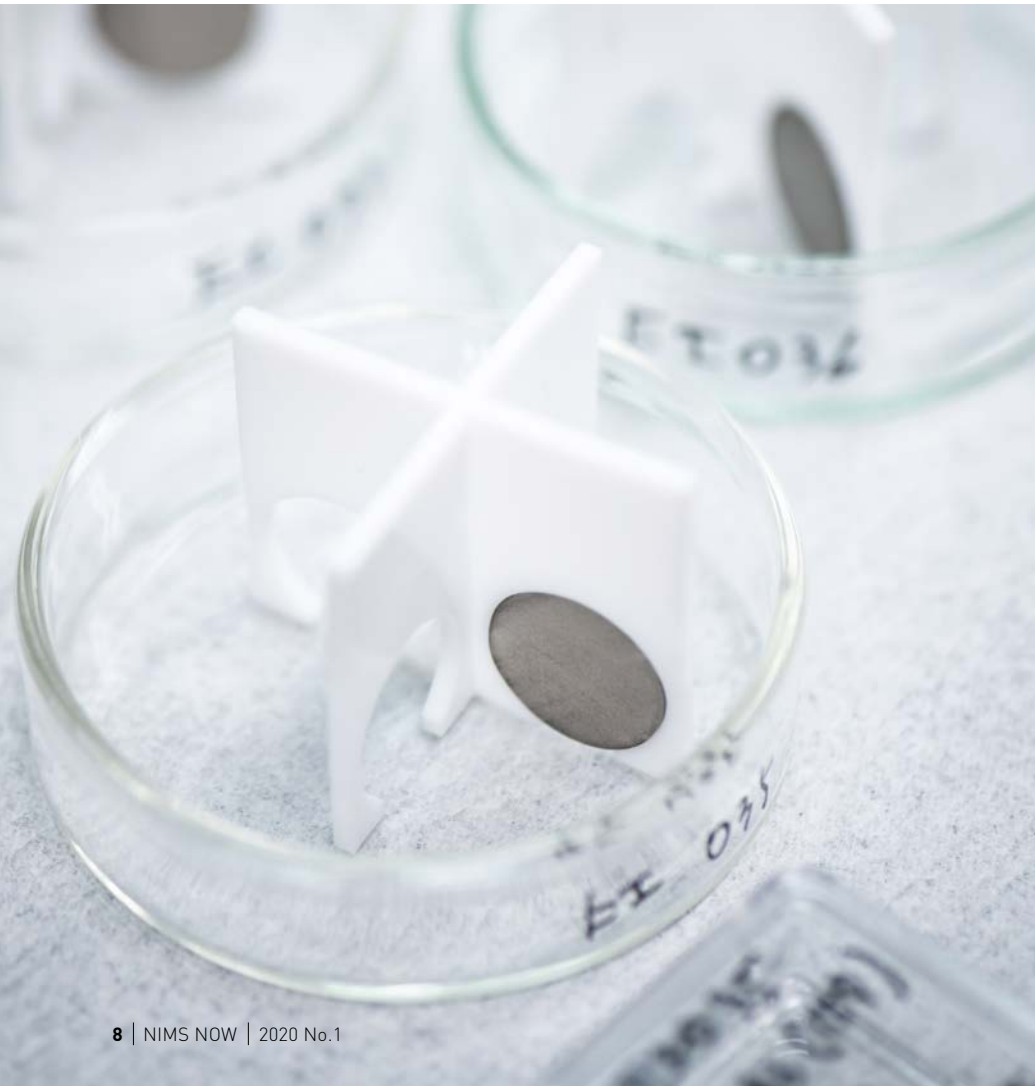
「骨は、破骨細胞による吸収と、骨芽細胞による形成が繰り返されることで、絶えず生まれ変わっています。炭酸アパタイトは、このサイクルの中で破骨細胞によって吸収されることが知られており、新しい骨の成長を助けながら、より早く生体に吸収される被覆材料になると期待できます」と選んだ理由

を語る。

「Mg合金を炭酸アパタイトで被覆することで、折れた骨を体内でしっかり固定しつつも、治癒したときには残っていない、そんな理想的な骨固定材を実現できる。そう考えて研究を進めています」

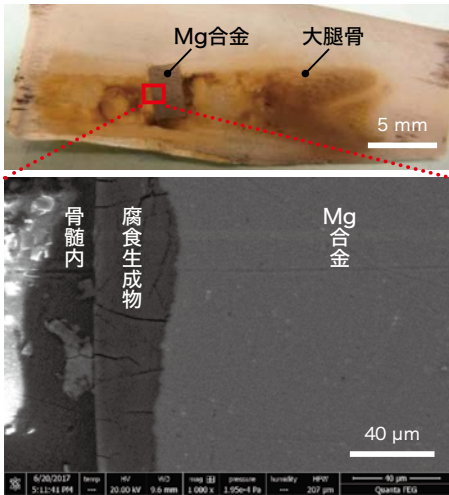
近年、ドイツの企業が開発したMg合金の骨ねじと血管拡張用ステントが、欧州で医療機器を販売するために必要な認証マークを取得している。現在、日本で使われているチタン合金やステンレス鋼製の骨固定材や人工関節の90%近くが、海外からの輸入品である。Mg合金製の医療用デバイスもこのままでは輸入品に頼ることになるだろう。廣本は、「日本の医療費の海外流出がますます増大する」と警鐘を鳴らす。その状況を変えるには、国産の生体吸収性骨固定材の実現が欠かせない。

廣本は静かに、だが力強く語る。「医療機器の場合、実用化までには多くの試験や手続きが必要で、とても大変です。それでも、医療機関や企業とも連携しながら、水酸アパタイトと炭酸アパタイト、それぞれの被覆材料の可能性を探って実用化につなげていきたい。それがNIMSで研究している私の役目だと思います」(文・鈴木志乃／フотокリエイ)



シャーレ内の円形の金属板が、Mg合金。これをプラスチック製のホルダーにはめこみ、溶液につけて、被覆試験を行った(p7写真)。

被覆していないMg合金



水酸アパタイトで被覆したMg合金

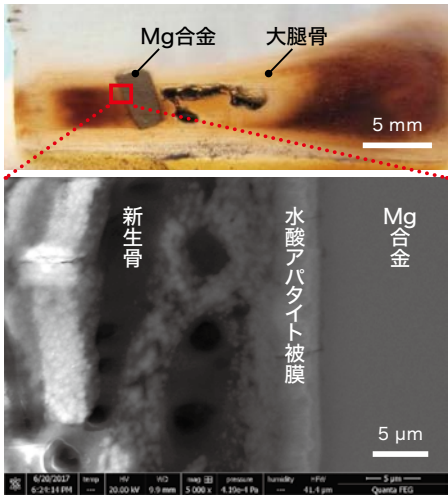


図 ラットの大腿骨へのMg合金埋入試験
Mg合金を埋入した大腿骨を樹脂で固め、断面を切りだした(上段)。そしてMg合金と骨組織との界面を走査型電子顕微鏡で観察したところ、被覆していないMg合金の表面は溶解に伴って生成した腐食生成物で覆われ、新生骨は見られなかった(下段左)。水酸アパタイトで被覆した表面には新生骨が見られた(下段右)。

Research 3

自分で傷を治す 「自己治癒セラミックス」

骨は折れても、時間が経てば修復する。

この自己治癒力を材料にも与えることができれば、
修理・交換の手間は大きく減るだろう。

学生時代から、そうした機能を持つセラミックス材料と
向き合ってきた長田俊郎は、NIMSで原徹、三留正則と出会い、
メカニズムの解明と、材料設計の改良をつづけている。

セラミックスの欠点を補う

けがをしたり、骨が折れたりしても、しばらくすると自然と治る。これは身体に「自己治癒」という機能が備わっているからだ。

物質・材料の宿命と言えるのが、使っていくうち、やがて壊れてしまうこと。長期間にわたって安全に使うために、人間の身体と同様、壊れた箇所が自然と治る材料が欲しい。そんな夢のような材料の研究開発を進めているのが、構造材料研究拠点の長田俊郎だ。その名も「自己治癒セラミックス」である。

セラミックスは、硬い。だがその分、衝撃が加わると亀裂が生じやすく、もろいという欠点がある。もしもセラミックスに自己治癒力が備わり、壊れた部分を自ら修復できるようにすれば、もろさを理由に避けられてきた用途にまで、活用の道が大きく拓けるはずだ。

謎多き自己治癒セラミックス

「自己治癒セラミックスを最初に見いだしたのは、横浜国立大学の安藤柱名誉教授で、1995年のことでした。私は大学4年生の2003年に安藤研究室に入り、自己治癒セラ

ミックスと出会ったのです」と長田。

長田は博士課程修了後、約2年半、超合金の研究に携わったのち、2012年1月、横浜国立大学の教員に着任。自己治癒セラミックスの研究開発に本腰を入れることを決意した。

当時から、自己治癒セラミックスの用途として有力視されてきたのが、航空機エンジンのタービン翼だ。自己治癒セラミックスが治癒力を発揮するのは1000℃以上もの超高温。タービン翼はそうした超高温下に置かれるため、たとえ亀裂が入ってもフライト中に自然に治っていくだろう、というわけだ。「とはいえ、目の前には課題が山積みでした。特に、亀裂を修復するまでに、たとえば1000℃の環境では1000時間も要すること。また、タービン翼は入りの1500℃から出口の600℃まで、幅広い温度域で使われることの2つが大きな課題でした」と長田。

1000時間もの時間は、フライト中の治癒を期待するには長すぎる。また、タービン翼のどの部分で起こるか分からない亀裂に対処するには、より幅広い温度域で自己治癒力を発揮できるよう材料を設計する必要がある。長田はまず、既存の自己治癒セラミックスを詳細に調べていくことにした。

解析装置を駆使して謎に迫る

自己治癒セラミックスは、母材のアルミナ（酸化アルミニウム、 Al_2O_3 ）に、少量の炭化ケイ素（ SiC ）を混ぜ、焼き固めてつくる。これに亀裂が入ると、亀裂から侵入してくる空気中の酸素と SiC が化学反応し、二酸化ケイ素（ SiO_2 ）ができる。この SiO_2 が亀裂を埋めることで、自然と修復されるというのが治癒の仕組みと考えられてきた。とはいえ、まだ謎は多く残されていた。

「安藤教授はよく『亀裂が生じた自己治癒セラミックスを加熱していくと、1200℃付近で液体のようなものが発生しているよなのだが、この正体がよく分からない』とおっしゃっていました。まずはこの液状物質の正体を突きとめようと、NIMSの二人の専門家に相談を持ちかけました」と長田。原徹と三留正則である。

原は、材料の組織・組成解析の専門家だ。電子顕微鏡に独自の改良を施し、優れた解析手法を開発してきた。そんな原が、長田に自己治癒セラミックスの解析を依頼され最初に使ったのが「FIB-SEM」と呼ばれる装置だ。これは、集束イオンビーム（FIB）を照射して試料の表面を削りながら、走査型電子顕微鏡（SEM）で観察。組

織の断面画像を連続的に取得できる装置のこと。これを使い、亀裂を SiO_2 が埋めていく過程を詳細に捉えようというのである。

当時、折しも原は装置メーカーと共同で、高精度に組織の断面画像を三次元化できるFIB-SEMを完成させたばかりだった。「得られた三次元の組織像には、液状物質が移動している痕跡がありありと現れていた(図1)」と原は声を弾ませる。

では、実際に何の元素がどのような動きをしているのか。それを明らかにするためバトンを受けとったのが、三留だ。三留は透過電子顕微鏡（TEM）を用いた結晶構造解析の専門家である。三留は原が撮影した三次元の組織像を基に、TEMを使い、亀裂部分を詳しく解析していった。TEMでは、0.2ナノメートル（nm）以下の分解能で原子配列を観察できる。

「母材と亀裂との界面をより詳細に観察したところ、『ムライト』と呼ばれる、 SiO_2 とアルミナからなる結晶が存在することが分かりました(図2)」と三留。

三留からの報告を受けた長田は「ついに1200℃付近で発生している液状物質の正体をつかんだぞ」と心が躍ったという。「その正体は、 SiO_2 がアルミナと触れることによって生じる『過冷却融体』だったの

です」

過冷却融体とは、融点以下の温度にもかかわらず、流動性のある物質のこと。 SiO_2 の融点は1700℃であるため、1200℃では液体としては存在しないはずだ。だが、三留の解析結果から、治癒反応には無関係と思われていた母材のアルミナが溶けだし、 SiO_2 と反応することによって、融点より低い温度で過冷却融体になっていたことが分かったのだ。

さらに、自己治癒セラミックス自体の強度が、亀裂前と同等以上に回復していることも確認できた。既存の自己治癒セラミックスのメカニズムが詳しく明らかになったことで、長田はさらなる改良の出発点に立った。

自己治癒にかかる時間が6万分の1に!

解析の重要性を改めて認識した長田は、2013年に横浜国立大学からNIMSに移籍した。早速着手したのが、より短時間で治癒させるために、より低い温度で過冷却融体を生成する物質の探索だ。

2015年、長田が「熱力学平衡計算」と呼ばれる手法を使って導き出したのが、酸化マンガン（ MnO ）だった。

「アルミナに、 MnO を約1%混ぜて自己治癒セラミックスをつくってみました。すると約1000℃において、たった1分間で亀裂部分を治癒できることが分かったのです」と長田。

試料をつくる際にヒントになったのが、人体において骨の周りに張りめぐらされた「体液輸送ネットワーク」だという（p14 図3）。これは、骨折した際、修復に必要な物質を効率よく運ぶためのもの。これと同じように、 MnO を母材の中に三次元状に配置できれば、 MnO から過冷却融体ができた後、これを効率よく全体に行きわたらせることができる——長田はそう仮説を立て、試料を焼く温度の調整を行った。

「結果は予想通りでしたが、まさか時間を従来の約6万分の1に短縮できるとは予想もしていなかったので自分でも驚きましたね」と長田。

では、実際に自己治癒セラミックスの内部では、長田が立てた仮説どおりの現象が起こっていたのだろうか。長田は再び、原に解析を依頼した。

「今度は、当時世界最高の分析効率を持つ走査型透過電子顕微鏡（STEM）を使いました。その結果、ごくわずかな量の MnO がアルミナの粒子と粒子の間に存在し、三



取材協力

長田 俊郎 (左, p11)
Toshio Osada

構造材料研究拠点 設計・創造分野
超耐熱材料グループ 主幹研究員

原 徹 (右)

Toru Hara

技術開発・共用部門
構造材料解析ステーション ステーション長／
構造材料研究拠点 解析・評価分野
構造材料組織解析技術グループ グループリーダー

三留 正則 (中)

Masanori Mitome

技術開発・共用部門
ナノテクノロジープラットフォームセンター 副センター長／
国際ナノアーキテクトニクス研究拠点 (WPI-MANA)
ナノチューブグループ 主席研究員

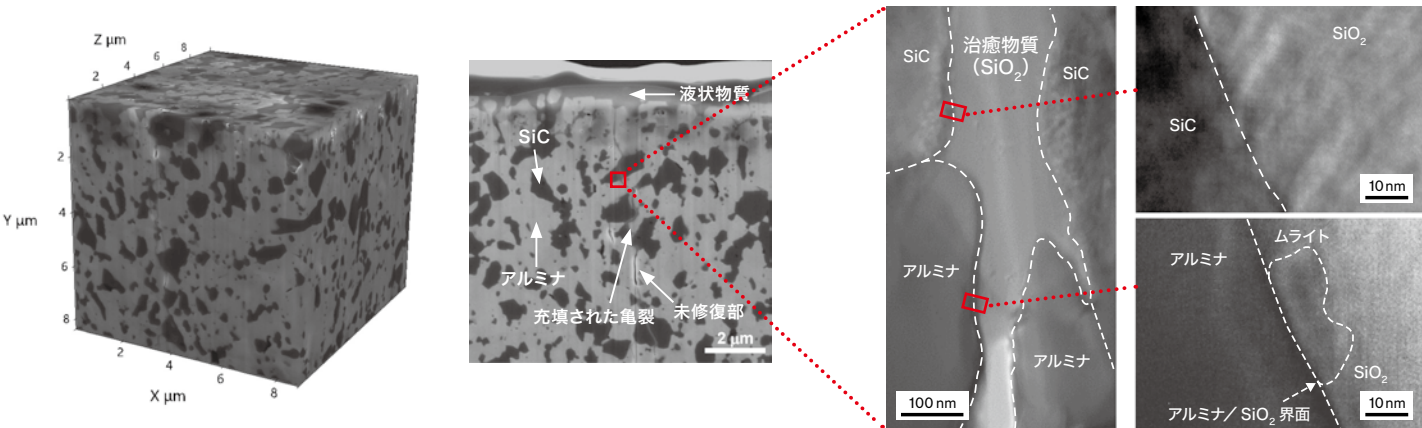


図1 FIB-SEMで捉えた自己治癒セラミックスの三次元組織像

亀裂の周辺組織をFIB-SEMで解析し、三次元の組織像を取得(左)。断面画像の一枚からは、亀裂の内部に液状物質が充填している様子が見てとれる(右)。

図2 TEMで捉えた液状物質の手がかり

母材と亀裂との界面をより詳しく観察すると、アルミナとの界面に、 SiO_2 とアルミナからなる結晶「ムライト」の存在が捉えられた。



自己治癒セラミックスの試験体。

次元ネットワークのような状態で存在している様子を捉えることに成功しました（図3）。長田さんの仮説が正しいことが証明された瞬間です」と原は振り返る。

NIMSの解析技術とサポートが突破口を開いた

こうした成果について、長田は「NIMSが長年培ってきた解析の力があってこそ」と声に力を込める。約10年にわたり、長田

をサポートしてきた三留は「長田さんは運がよくて、最高のタイミングで、挑戦しがいのある試料の解析を依頼してくるのです」と笑う。

長田が、原と三留との共同研究を開始した2012年はちょうど、NIMSに「ナノテクノロジープラットフォームセンター」が新設された年だった。これは、文部科学省が推進する「ナノテクノロジープラットフォーム事業」の一環で、最先端の研究設備を有する全国の機関が、産学官の研究者の設備利

用を支援するというものだ。

「この制度のおかげで、当時大学の教員になったばかりの私でも、NIMSの高性能な装置を使った解析を依頼しやすくなりました。サポート体制も強力で、どのような試料をつくれば欲しいデータを得ることができるか、お二人に細かいところまで相談にのってもらえたことに感謝しています」と語る。

同センターに籍を置く原もまた「開発した装置と我々のテクニックの本領が試され、解析を担当する側としても非常にやりがいを感じましたね」と振り返る。

一方で長田は、自己治癒セラミックスの実用化に向け、まだ課題は多いと気を引き締める。たとえば、構造材料には強度や寿命を定めた国際規格があり、それをクリアすることが求められるが、自己治癒機能を考慮した強度基準は当然ながら存在しないため、新たに国際規格化する必要がある。特に航空機エンジン用材料の規格設計は厳格で、ハードルが高い。

「他の用途開発も同時並行で進めていきつつ、必ずや航空機エンジンへと応用したい」という長田。自己治癒セラミックスが当たり前の材料になる日を目指して、研究を進めていく。

（文・山田久美）

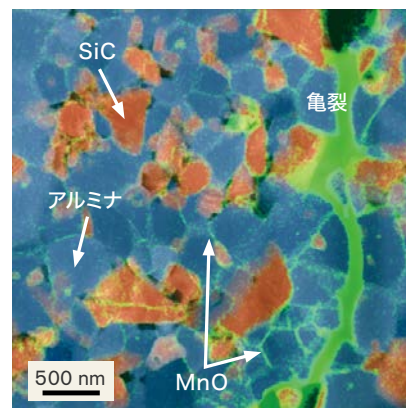
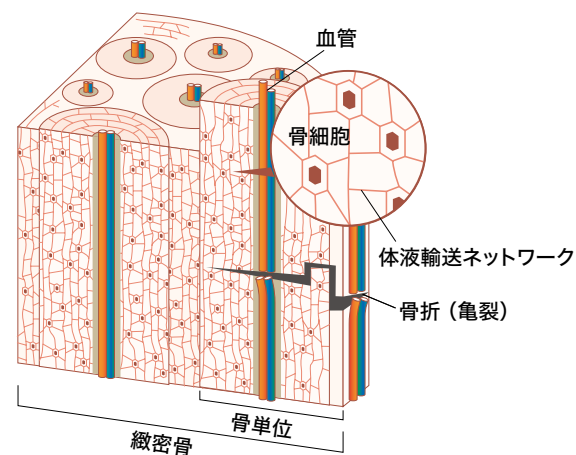


図3 ヒントになった骨の構造(左)とMnOでできたネットワーク(右)

骨折の修復に必要な物質を効率よく運ぶ「体液輸送ネットワーク」が、自己治癒セラミックスのミクロな組織を設計する上でヒントになった。MnOを添加した自己治癒セラミックスに亀裂を生じさせ、STEMで観察。ねらい通り、MnO（図中緑部）がアルミナの粒子と粒子の間に入りこみ、ネットワークを形成していることが分かった。

きみが思っているより
科学はもっとおもしろい



科学放送賞50年

文・えとりあきお

イラスト・岡田 丈 (vision track)

「サイエンスは絶えず進歩する。そこが、他の社会現象とは違うところだ」

ノーベル賞受賞者である江崎玲於奈博士の最近のことばです。

21世紀の今日でも、科学はますます加速度的に進歩をつづけています。重力波の発見、遺伝子編集技術の出現、ブラックホールの撮影、電池の画期的な改良等々……ひとむかし前には想像できなかったようなことが、現実のものになっています。インターネットをはじめとする情報革命の驚くべき進展などは、私たちの暮らしを一変させました。

こうしたサイエンスの進歩に、かげながら極めて大きな役割を果たしてきたものがあります。それは、人間が直接みることのできない現象を描きだす「可視化技術」です。

電子顕微鏡の発明は、私たちの目を極微の世界に導いてくれました。その絶えざる改良によって、現在では分子や原子を直接とらえることさえ可能になっています。

多くの人々の努力によって生みだされた新しいくみの望遠鏡は、遠くの星などの宇宙の姿を描き、宇宙空間の実態の解明や、宇宙の歴史を探るのに大いに役立っています。

はじめて精子と卵子が合体する様子を目にしたとき、私たちは生命の神秘にうちふるえました。

アポロ11号が月面に着陸して、アームストロング飛行士が“静かの海”に人類の初の一步を印したときには、世界8億人以上の人びとが画面をとおしてその様子を見つめ、驚きの声をあげました。

深海底におかれた特殊カメラの前に、生きた姿は決してみられないだろうと考えられていた「ダイオウイカ」の巨大な足がニュッとあらわれた場面に、私たちは思わず歓声をあげました。

さらに、飯島澄男博士によるカーボンナノチューブの発見も、山中伸弥博士のiPS細胞の創成も、古くはワトソン・クリックのDNAの発見も、すぐれた可視化技術があったからこそ成し遂げられた成果です。

そして、そうしたサイエンスの進歩が生んだ感動を津々浦々、多くの人々と分かち合う点で絶大な力を発揮してきたのは、なんといってもテレビです。

テレビの大躍進は、“日本のテレビの父”といわれる高柳健次郎博士がブラウン管に「イ」の文字を映しだすのに成功したことからはじまります。それ以降、目覚ましい進化を遂げたテレビは、きめ細かく

鮮やかな映像とともに、私たちに知的なたのしみを届けてくれています。先に挙げたようなすばらしい映像の数々を盛りこんだ魅力的な科学番組が、たくさんつくられてきたのです。

そうした科学番組を讀みたいと、有志の者があつまって、1971年に「科学放送賞」という賞がつくられました。今年は発足してちょうど50年目にあたります。1月20日が高柳博士の命日なので、その日に毎年表彰が行われます。今年も3本の優秀作品が表彰されました。

第一回目から審査に加わり、数多くの映像をみてきた私にとっては極めて印象深いできごとです。小さな賞ですが、受賞をひとつの励みにして、一層いい映像をつくりたいという制作者の声を聞くと、本当にうれしくなります。科学番組が、多くの方々に科学のおもしろさや重要性を伝えるのに役立っていることはまちがいありません。

科学放送賞50年を機に、可視化技術の進歩や魅力的な番組の制作に寄与された方々に、心から感謝の意をささげたいと思います。

えとりあきお：1934年生まれ。科学ジャーナリスト。東京大学教養学部卒業後、日本教育テレビ（現テレビ朝日）、テレビ東京でプロデューサー・ディレクターとして主に科学番組の制作に携わったのち、『日経サイエンス』編集長に。日経サイエンス取締役、三田出版株式会社専務取締役、東京大学先端科学技術研究センター客員教授、日本科学技術振興財団理事等を歴任。

※今回で当連載は終了となります。ご愛読ありがとうございました。

NIMSと「ピタゴラスイッチ」スタッフとの共同制作！
美しくも興味深い科学映像シリーズ

「未来の科学者たちへ」が DVDブックに！

2/19^{発売}
予約受付中！

NIMS
NOW

2020
No.1

骨と材料特集号

このスプーンは、 結構うるさい

科学映像
DVD-Book

物質・材料研究の最前線！



佐藤雅彦 + ユーフラテス
NIMS (物質・材料研究機構)

「ピタゴラスイッチ」のスタッフが作る、
美しくも興味深い科学映像32分



——未来の科学者たちへ

第55回 科学技術映像祭
文部科学大臣賞 受賞

予約はこちら



厳選映像8本＋解説ブック、

さらに！この本のためだけに撮り下ろした未公開映像7本！



NIMS NOW vol.20 No.1 通巻180号 2020年1月発行

国立研究開発法人 物質・材料研究機構

R270

古紙配合率70%再生紙を
使用しています



植物油インキを
使用し印刷しています

〒305-0047 茨城県つくば市千現1-2-1 TEL 029-859-2026 FAX 029-859-2017 E-mail inquiry@nims.go.jp Web www.nims.go.jp

定期購読のお申し込みは、上記FAX、またはE-mailにて承っております。 禁無断転載 © 2020 All rights reserved by the National Institute for Materials Science

表紙写真：とげと皮膚を取り除いたウニの殻 撮影：石川典人 デザイン：Barbazio株式会社