

# NIMS NOW

NATIONAL INSTITUTE FOR MATERIALS SCIENCE

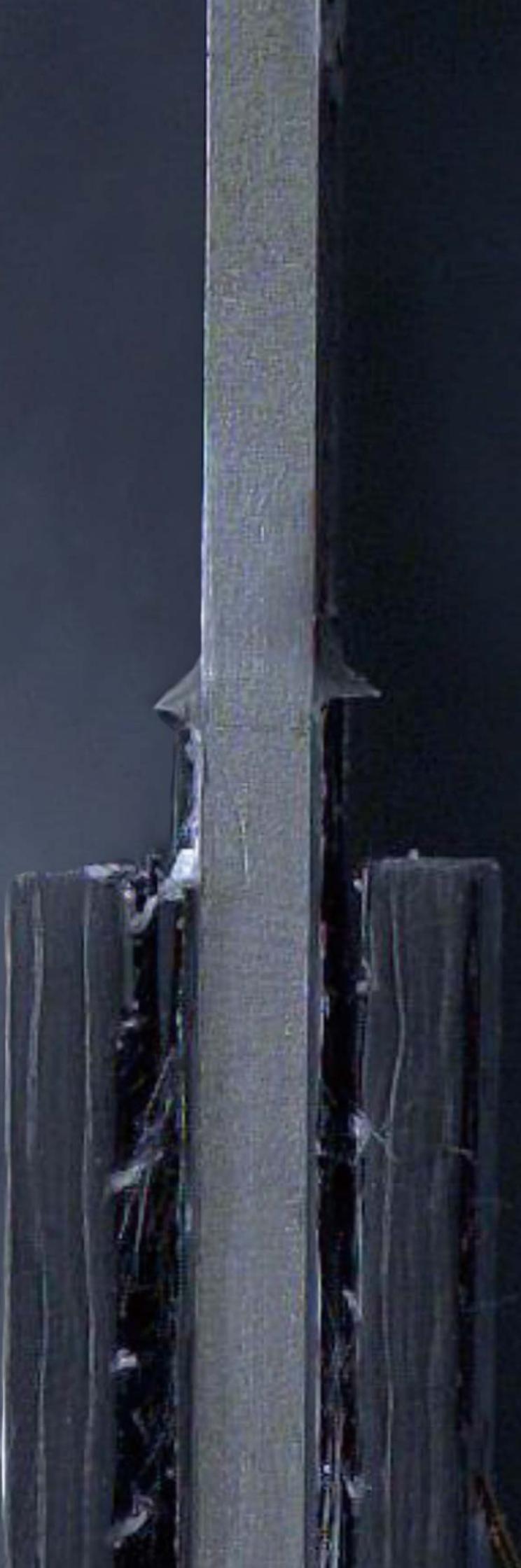
No. 6  
2016

## 「つなげる材料」

適材適所を実現する  
新時代の接着技術



# 「つなげられる」材料



エポキシ系接着剤で接着した鋼材とCFRPの破壊試験の様子。  
写真：内藤公喜

# 適材適所を実現する 新時代の接着技術

材料をつなげる。

ボルト止め、溶接とある中で、今回注目するのは「接着」だ。

「接着」はどんな材料同士でも、相手を選ばずつなげる可能性を秘め、

さらに必要に応じてはがしたり、抗菌性を持たせたり、

単につなげるにとどまらない魅力的な機能を与えることだってできる。

特に今、異なる材料を適材適所に使う

“マルチマテリアル化”を実現する技術として期待されている。

例えば、航空機や自動車。

強度が必要なところには硬くて重い金属を、

そうでないところには軽い金属や樹脂を使うことで、

安全性を保ちながら軽量化やコストを減らすことが可能になる。

異種材料をつなげるには、接着技術は欠かせない。

NIMSでは、そんな接着技術の開発に、生物から学ぶ、水を用いるなど

ユニークな視点から取り組んでいる。

さらに接着材料に対して行なう厳密な評価試験は、

実用化に向け確かな信頼を与えることだろう。

NIMSの“つなげる”材料研究から、

マルチマテリアル化とその先にある未来が見えてくる。

# 接着が “ものづくり”を 変える



川節 望

Nozomu Kawasetsu

三菱重工業株式会社 総合研究所  
製造研究部 部長

## 接着材料の進化と、 NIMSへの期待

小さな半導体から巨大な航空機やロケットまで、ものづくりに接着技術は不可欠である。接着技術のユーザーである三菱重工業の川節望氏と、革新的な接着技術の創発を目指すNIMSの土谷浩一氏。違う立場で接着技術に関わる2人が、その現状、そして未来を語り合う。

### 接着だけで航空機をつくりたい

**土谷** 三菱重工は、工作機械、発電所、化学プラント、船舶、航空機、さらにはロケットまで、さまざまな製品をつくられています。接着材料のユーザー企業としての生の声を聞かせていただきたいと思います。

**川節** 私たちがつくっている製品は非常に幅広く、それらをつくる上で、物と物をつなげる接合技術は欠かせません。以前は金属が主体だったので、金属を溶かしてつなげる溶接を行ったり、ボルトでつなげたりしていました。そうした接合技術のニーズが大きく変わってきたのは、30年ほど前からです。

軽量化や多機能化を求める流れから、樹脂やセラミックス、複合材料などいろいろな材料を適材適所で組み合わせ

たいという、「マルチマテリアル化」のニーズが出てきたのです。樹脂やセラミックスに溶接は使えません。かといってボルトを使ったら重くなってしまいます。そのため、多くの化学メーカーが異種材料同士をつなげる接着材料の開発に取り組んできました。小さな物をつけるのであれば、すでに優れた接着材料ができています。しかし、航空機などの構造材料の接着となると、まだユーザーが満足できるものはできていません。

**土谷** どういう問題があるのですか。

**川節** 一番大きいのは、接着に対する信頼性が“分からない”ということです。

金属の溶接には200年以上の歴史があり、接合方法はすでに規格化され、接合強度や耐久性も調べられています。その規格に従って接合すれば、十分な信頼性が保証されます。



## 土谷 浩一

Koichi Tsuchiya

物質・材料研究機構 (NIMS)  
構造材料研究拠点 拠点長

Adhesives  
bring us  
to the future!



一方、接着材料は歴史が浅いこともあり、その接着強度や耐久性を調べる方法すら確立されていません。だから、信頼性が高い・低いという以前に“分からない”のです。

**土谷** 構造材料の場合、小型の機械とは比べものにならないほど、強力で確実な接着が要求されます。どのように対応しているのでしょうか。

**川節** 航空機でいえば、もちろん航空機用に認可された接着材料を使っています。しかし、認可を受けているから安心して使えるかという、そうでもないのです。接着面に油や汚れがついていると、接着強度が低下します。接着するときの温度や湿度によっても強度が変わってしまいます。そこで、接着したもののすべてについてその接着状態を検査していますが、接着力（強度）については検査方法がない

のが難点です。

**土谷** 接着強度は経過時間や使用環境によって変わっていきます。しかも、すべてについて耐久試験をするわけにもいきません。

**川節** そうなんです。接着強度が使用環境や年月でどのように変化するかというデータは、ほとんどありません。結局、接着だけでは怖いから、安全のためにボルトを併用しているのが現状です。

接着だけで航空機をつくりたい。それが私たちの夢です。

### 接着の原理説明にも挑む

**土谷** NIMSでは2016年7月、構造材料研究拠点内のTOPAS（構造材料つくばオープンプラザ）に「接着材料クラスター」を立ち上げました（P.12参照）。接

着材料の接着力や耐久性の評価方法の確立も、接着材料クラスターで取り組むべきテーマの一つとして掲げています。

**川節** 私にとってNIMSは金属材料のイメージが強く、接着材料の研究開発をしていると聞き、驚きました。

**土谷** NIMSで溶接以外の接合技術の研究開発が始まってから、まだ10年ほどしかたっていません。これは社会の「マルチマテリアル化」というニーズに答えたものです。

**川節** 例えば、接合したいのは鉄とアルミで、使用環境は海の中、使用温度は10°C、というように条件を入力すると、接着材料の候補が出て、接着時の最適な温度や湿度も表示される。そんなデータベースがあるといいのですが。

**土谷** 材料と接着剤のあらゆる組合せについて接着力や耐久性などを試験し

接着剤は  
身近なものになっていますが、  
実は、なぜくっつくのか、  
よく分かっていないのです。

土谷 浩一

て、その測定結果を集めた「接着剤基礎データベース」をつくろうとしています。接着材料の選択に使っていただけるものになりたいと思っています。

**川節** 接着力の評価方法の確立には大いに期待しています。理想的な状態が100だとしたら、これは80なのか50なのかを知りたいのです。それが分かれば、

安心して使うことができます。

**土谷** 接着力や耐久性を評価するには、なぜくっついているのか、物理的な原理を理解することも重要です。接着剤は身近なものになっていますが、実は、なぜくっつくのか、よく分かっていないのです。接着剤は、非常に薄い層になっています。原理を明らかにするには、その中の分子状態や電子状態を解析する必要がありますから、簡単にはいかないでしょう。でも、だからこそチャレンジしがいのあるテーマです。

NIMSには世界最先端のさまざまな計測装置があります。また、放射光、中性子などの新しい解析ツールも出てきました。それらを駆使して、接着の物理的な原理を明らかにしていきます。

**川節** それは私たち企業にはできないことです。ぜひ、やってほしいですね。接着の原理が分かれば、より優れた新しい接着材料や評価方法の開発にもつながるのではないのでしょうか。

## 生物に学んで 革新的な接着材料を

**土谷** 接着材料のもととなる物質はすでに試し尽くされたように感じています。そこで、船底にくっつくムラサキイガイの接着タンパク質(P.8参照)や、壁や天井を移動できるヤモリの足の裏の構造に着目して(P.13参照)、まったく新しい接着材料を開発しようという試みも進めています。

**川節** 生物に学ぶバイオミメティクスですね。面白いですね。私たちが航空機を開発するときにも、フクロウの翼の表面の微細構造を参考にしたりします。生物の中には、とてもヒトにはできないような機能を持つものがあります。それらを、接着材料をはじめ、さまざまなものづくりに活かすべきだと思います。いい接着材料ができれば、ぜひ使わせてください。

## 接着材料クラスターで連携

**川節** 航空機の構造材料に使うことが





できる接着材料は、世界で数社しか認可されていません。すべて欧米の会社です。それもあって、接着材料や接着技術に関する私たちの共同研究先は海外が多くなっています。しかし、日本の化学メーカーの技術力はとても高いですから、航空機用の接着材料の開発も、その気になれば可能でしょう。国内で航空機用の接着材料を調達できるとすれば、大きな魅力です。今後はNIMS、そして国内の化学メーカーとの連携を強めていきたいと思えます。

**土谷** 接着材料クラスターには、NIMSの研究者だけでなく、化学メーカーやユーザー企業、大学などの研究者にも参加いただいています。

**川節** 私たちは化学メーカーの研究者と議論することが多いのですが、NIMSのような研究所の研究者と議論するのも、視点が変わって大きな刺激を得ることができます。また、1企業だけでは解決が難しい技術的な課題もあります。そういう課題の解決にも、接着材料クラス

ターは威力を発揮しそうですね。

## 金属研究の知見も活かして

**土谷** NIMSは金属材料のイメージが強いとおっしゃいましたが、実は私も金属材料が専門です。金属の研究者は顕微鏡で材料内部の微細な組織を視ます。これを視ると、脆いのか強いのかなど、さまざまな性質がだいたい分かるものです。接着材料である高分子も、そういう異分野の視点で見ると、今まで分からなかったことが見えてくるのではないかと。最近、そんなことを考え始めています。

**川節** 私は、複合材料やセラミックス、アルミ、鉄鋼材料など、さまざまな材料を扱ってきました。やればやるほど金属が一番いい(笑)。こんなに使いやすい材料はありません。一方で、省エネや環境保護の対応は世界的な課題であり、この課題解決のためにも、軽量化、多機能化に効果がある「マルチマテリアル化」が重要です。これを実現するためには接着技術

「マルチマテリアル化」実現に向けて  
接着技術が確立されれば、  
“ものづくり”が変わります。

川節望

の確立が不可欠で、それができれば“ものづくり”が変わります。金属材料についての知見とデータを日本で一番持っているのはNIMSではないでしょうか。これまで培ってきた金属材料研究の知見を今度は高分子などにも活かすことで、NIMSらしい接着材料研究を期待しています。(文・鈴木志乃/フotonクリエイト)



# 「超スマート社会」の 一翼を担う「接着材料」 自動車や飛行機の燃費向上に貢献

## 内藤昌信

構造材料研究拠点 輸送機材料分野  
異材接着材料グループ  
グループリーダー



地球温暖化防止に向け、飛行機や自動車など輸送機器の燃費向上が喫緊の課題となっている。そのため、筐体の軽量化に向けた技術開発が加速しているが、その1つが、「マルチマテリアル化」だ。それに伴い、異種材料同士を接着する“接着材料”の重要性が高まっている。このような潮流を受け発足した、構造材料研究拠点 異材接着材料グループの内藤昌信グループリーダーに、現在の状況と研究内容について話を聞いた。

### 「マルチマテリアル化」に向け 組織を新設

金属や複合材料／樹脂など異種材料を組み合わせて適材適所に用いることを「マルチマテリアル化」と呼び、その必要性が高まっている。ジェット旅客機「ボーイング787」の機体の一部に、金属よりも軽くて丈夫な日本発の炭素繊維強化プラスチック（CFRP）が使われたことは、その代表例だ。このような状況を受け、NIMSは2016年4月、構造材料研究拠点の輸送機材料分野の中に、異材接着材料グループを設置した。グループリーダーの内藤昌信はこう語る。

「これまで有機／高分子材料の研究者と金属材料の研究者がお互いのニーズやシーズを語り合い、肩を並べて一緒に研究するということはほとんどありませんでした。今回、異材接着材料グループが構造材料研究拠点の中に設置され、異

なる構造部材のプロフェッショナル同士が協働する場が生まれたことは、大変革新的なことだと感じています」

これまでも異種材料の接着は行なわれてきた。しかし、材料の種類が限られていた上、組合せも限定的だった。それに対し、最近では従来の鋼材に加え、ステンレス鋼や高抗張力鋼などの高性能鋼や、アルミニウムやマグネシウムなど、より軽量の金属へのニーズが高まっている。また、樹脂に求められる特性も多様化している。そのため、汎用性の高い接着材料の開発が強く求められるようになってきているのだ。

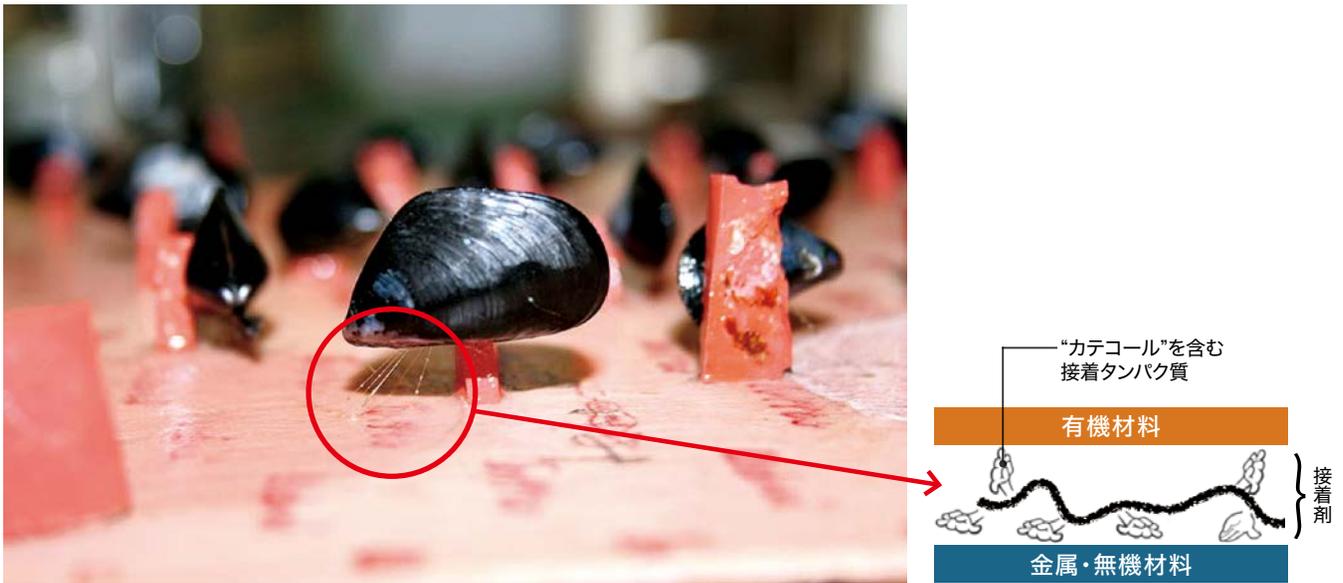
### ムラサキイガイに学ぶ接着技術

このような中、2007年頃から内藤が目しているのが、ムラサキイガイだ。ムラサキイガイは船底や岩礁に群生している海洋付着生物で、接着タンパク質を分泌し

て、それを硬化することで、無機物から有機物までさまざまなものに強力に接着する。「ムラサキイガイは水中で強力に接着する上、その分泌物は生体にも優しいことから、主に生体接着材料としての研究開発が盛んに進められています。しかし、私はあえて構造材料にも使える、汎用性の高い接着材料を目指しました(図1)」

古くから日本では、漆の原料であるウルシオールや渋柿の苦味成分である胆汁酸を塗料や接着材料として活用してきた。「これら同様、ムラサキイガイの接着タンパク質には“カテコール”が含まれています。カテコールはベンゼン環に隣り合う2つの水酸基がついた構造をした有機物で、この2つの水酸基が他の物質の表面と配位結合や水素結合をすることで、強い接着力を示しているのです。生物が長年にわたる進化の過程の中で見つけた最も汎用的で強力な接着材料といえるでしょう」

図1 ムラサキガイが分泌する接着タンパク質。これを模倣した強力にくっつく接着剤を開発している。



現在、内藤は複数の企業とライセンス契約を結び、ムラサキガイの接着タンパク質を模した構造用接着材料の研究開発を進めている。2年以内の実用化が目標だ。

「特に最近では、金属材料の中でもアルミニウムやマグネシウムなどの軽金属と樹脂を接着させる材料へのニーズが高まっています。そのため、幅広い構造部材の組合せに対応できる接着材料の開発を目指しています」

実用化に向けた最大の課題はコストの低減だ。カテコールの原料には高価なドーパミンという物質を使っているため、どうしても高コストになってしまう。そこで内藤が考えたのが、廉価な汎用性高分子にカテコールを少量混ぜるという方法だ。「例えば、10重量%以下の添加量でも高い接着力を示すことがわかりました」

が防水性を発揮することがわかったのだ(図2)。「これにより、鉄筋の錆を抑えることができ、コンクリートの劣化防止につながります」

その他、内藤は、間伐材などバイオマスを使った接着材料の開発も進めている。木材には“タンニン酸”が含まれている。

「これはポリフェノールの一種で、構造がカテコールに似ているため、接着性があります。天然素材ということで安価で環境にもやさしい上、抗菌性や抗酸化性も持ち合わせていることから、ヘルスケアや医療・介護などの用途にも活用できるのではないかと期待しています」と内藤は語る。

これまで接着材料と言えば、単に「つけばいい」といった考え方が主流だった。しかし、抗菌や防錆といった機能性が求められるのも、接着材料における最近のト

レンドだ。

さらに、NIMSでは構造材料研究拠点をハブとして、産官学連携による研究開発を進めており、内藤がリーダーとなって、新たに「接着材料クラスター」(P.12参照)を発足させた。クラスターでは、現在接着材料が抱える課題を産官学の研究者・技術者が共有し、技術開発を加速させていく考えだ。「今後、日本が目指す『超スマート社会 (Society 5.0)』の中で、IoTと結びつくデバイスなど、新たなものが次々と生み出されていくことでしょう。その中で、接着材料が、解体性など高度な機能を持つことで、その用途は広がっていくはずですよ。接着材料クラスターでは、次世代社会に貢献する接着材料を開発していきたいですね」

(文・山田久美)

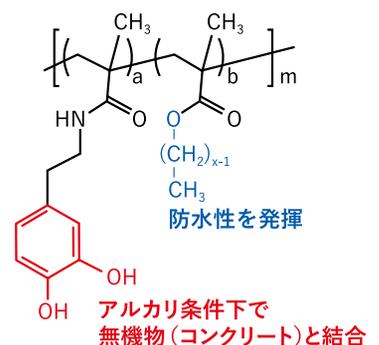
### くっつけるだけではない、 抗菌や防錆の機能ももたせる

また、この接着材料はコンクリートの補修材料としても有用なことが判明した。コンクリート内の環境がアルカリ性の場合、浸透した接着材料が硬化し、それによって表面にできた疎水性の膜

図2 コンクリート内のアルカリ性に反応して硬化し防水性を発揮する補修材



(分子構造)



# マルチマテリアル化しても、 ボルトで留めたのでは 意味がない

## 接着材料の実用化に向けて 急がれる性能評価

内藤公喜

構造材料研究拠点 輸送機材料分野  
高分子系ハイブリッド複合材料グループ  
グループリーダー



異種材料同士を接着する材料へのニーズが高まる中、NIMSでは、新たな接着材料の研究開発に加え、実用化に向けた、接着力や耐久性など性能の統一的な評価および解析手法の確立に取り組んでいる。この役割を担う、構造材料研究拠点 高分子系ハイブリッド複合材料グループの内藤公喜グループリーダーに話を聞いた。

### 同じ条件での評価を迅速に

輸送機器等の構造物を製造する際、部材同士を結合する方法としては、これまでボルトやリベット（ピン）による機械締結、溶接などが一般的だった。しかし、樹脂材料を含めた適材適所の材料の使用、軽量化や最適化を進めるマルチマテリアル化が求められる中、従来の方法では対応できないケースが増えてきている。

内藤は現状をこう語る。「そのための有用な方法として接着材料の使用があるわけですが、製造企業の多くは、ボルト、リベット締結など従来の方法を好みます。最大の理由は、接着材料に対する信頼が低いからです。とはいえ、せっかくマルチマテリアル化をしたにもかかわらず、大量のボルトやリベットを使ってかえって重量が増したのでは本末転倒です。このような状況を打開するには、接着材料の性能を信頼性のある数値で示すことが重要です」

これまでも多くの接着材料メーカーが、

さまざまな接着材料を開発し、その都度、接着力や強度、耐久性など、性能試験を行ってきた。しかし、メーカーが各々に試験を実施していたため、必ずしも同じ条件下で評価されているとは限らず、それらの計測データを信頼してよいかどうか不透明だった。また、新材料の開発や異種材料同士の組合せの多様化が進む中、各メーカーがあらゆる材料に対して、接着材料の性能評価をするのは困難だ。

「このような状況の中、やはり国の研究開発機関であるNIMSが性能評価の方法を統一し、確立する必要があると考え

ました」

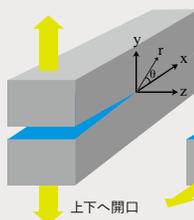
そこで内藤は現在、性能評価の方法を確立するため、市販の接着材料を使ってさまざまな試験を進めている。そうすることで、新たな接着材料が開発された場合にも、迅速かつ信頼性の高い性能評価を行なうことができる。主として行っているのは、材料力学的な評価方法と破壊力学的な評価方法だ。

材料力学的な評価とは、材料に対してどれくらいの力を加えると、どのくらいの応力\*が発生し、材料に破壊が生じるかを計測することで、接着材料が持つ強さを

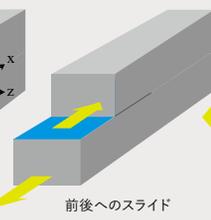
### 破壊力学の “モード”とは

き裂が生じた際の変形様式のこと。一般的には構造材料のひび割れの分類に使われる。き裂の先端を原点として、x、y、z軸方向と、角度 $\theta$ 、原点からの距離 $r$ を用い定量化する。

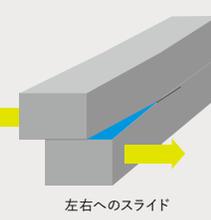
#### MODE I 面内開口型



#### MODE II 面内せん断型



#### MODE III 面外せん断型



を定量化する方法だ。例えばその一つに、引張せん断試験がある。接着材料で二枚の試験片をはり合わせ、両端から引っ張り、応力を計測する(図1)。

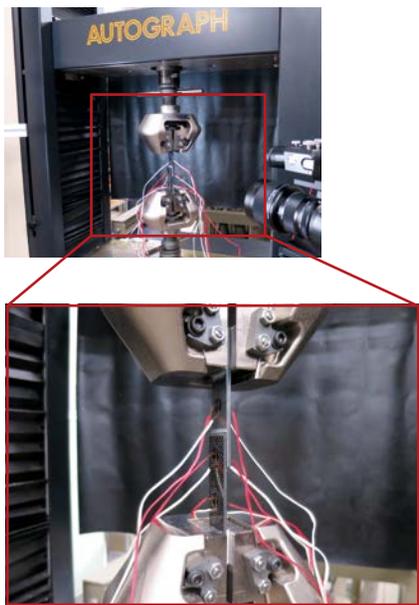
一方、破壊力学的な評価とは、材料には時に欠陥(き裂)が存在するが、これを伴う接着の破壊現象を「破壊力学」に基づいて3つのモードに分類し、き裂先端での応力勾配やき裂が進展する際のエネルギー量を調べる方法だ。例えばその一つのモードがモードI荷重下のDCB(Double Cantilever Beam)試験で、接着材料ではり合わせた試験片に対して上下に開く負荷をかけ、き裂が進展する際のエネルギー量を定量化していく(図2)。

「このように、きちんと学問をベースに同じ条件下で性能を評価していくことで、計測データの信頼性を高めることができると考えています」と内藤は語る。

## 剛性/強度解析用の計測データの充実も課題

性能の評価方法の確立に加え、評価の過程で得られる計測データの充実も重要な課題だ。

図1 引張せん断試験



接着材料の強度試験を行なう装置の一つ。接着材料ではり合わせた試験片をセットして一定の速度で徐々に引っ張り、応力を計測する。

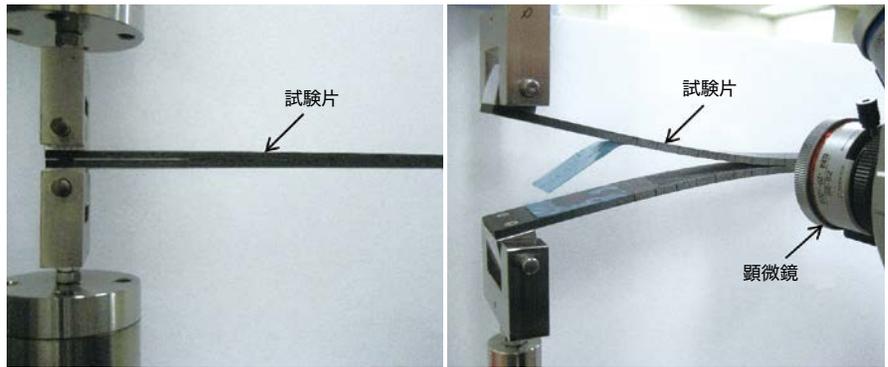


図2 DCB試験

モードI(左ページ下参照)の荷重のもとで、き裂が進展していく際のエネルギー量を定量化する試験。規格をもとにはり合わせた試験片に対して、上下に開く負荷をかけていく。その際の破壊現象を顕微鏡で観察し、き裂の長さを測定する。

自動車や航空機メーカーは、設計段階からすでにマルチマテリアル化を考慮に入れ、3次元CADデータに、部材と部材の間に接着材料を導入するための隙間を数百ミクロン～数ミリ単位で盛り込んでいる。

しかし、このデータを使って解析ソフトによる構造解析(剛性/強度解析)を行なうには、接着材料に関する各種データ(弾性率、強度、破断ひずみ、破壊エネルギー等)を予め入力しておかなければ、より正しい解析結果を得ることができない。

「現在、解析ソフトにのせることができる接着材料の各種計測データの不足が課題となっています。しかし、NIMSには、弾性率、強度、破断ひずみ、破壊エネルギーなどの計測装置に加え、現段階では解析ソフトにはのりませんが、化学的な分析装置、高分解能の電子顕微鏡など高性能な装置が揃っています。今後は確立した評価方法に基づき、詳細かつ信頼性の高い計測データの収集に努めていきます」

さらに内藤が最近注力しているのが「CZM(Cohesive Zone Model)」による解析だ。その学問体系は1960年代と非常に古いが、近年、本解析手法の有効性が認識されるようになったこと、そしてコンピュータの進歩により、世界的に注目されるようになってきた。

「CZMは、き裂先端での分離を、力(合力)の分布と破壊に必要なエネルギーで構成したモデルで、材料力学と破壊力

学をミックスしたような解析手法の1つと言えるでしょう。これまで、材料力学的な解析と破壊力学的な解析は分かれており、私にとっても悩みの種になっていました。理論的な課題があつて連携させることができなかつたのです。しかし、まだまだ問題点はあるものの、CZMの登場によって、工学的な意味で、両者、つまり応力の発生から破壊に至る一連の流れをシームレスに解析できるようになりました。今後は、CZMを使って解析した結果を接着材料の開発や評価にフィードバックしていきたいと考えている。

接着材料は、一般に接着力や耐久性への関心は高いものの、なぜ高い接着力および耐久性を示すのかなど詳細なメカニズムの解明にはあまり関心が寄せられず、そのため未解明の部分も少なくない。それに対し、今後内藤は、2016年7月に新設された接着材料クラスター(P.12参照)をベースに、他のメンバーとタッグを組み、接着に関するメカニズムの解明にも取り組んでいく考えだ。

「最終目標は、信頼性が高く、輸送機器等のインフラメーカーが安心して導入できる接着材料の実現と早期実用化です。それにより、マルチマテリアル化を加速させていきたいですね」

(文・山田久美)

\*応力…物質に外部から力が加わることで生じる変形や破壊に対する物質の抵抗力のこと

# TOPAS接着材料クラスター

クラスターが目指す3つの役割



NIMS構造材料研究拠点では、産官学連携による研究開発を推進するコンソーシアムとして、「TOPAS（構造材料つくばオープンプラザ）」を設置している。

TOPASでは、テーマごとにクラスターを組織し、共同研究、標準化、情報交流、人材育成などの活動を進めている。これまで「インフラ構造材料クラスター」が先行して活動してきたが、2016年7月に、「接着材料クラスター」が、2つめのクラスターとして新設された。

発足の狙いは、接着材料に携わる幅広い分野の方に集ってもらい、それぞれが抱えている課題を情報共有することだ。まずは、皆が活発に意見交換することで、接着材料や接着技術に関する課題を明確にし、基礎研究と実用化研究の両輪を加速させる。接着材料の研究拠点として、オープンイノベーションをリードしていくことが

狙いだ。

現在、参画する企業数は増え続けており、接着材料を開発・販売する化学メーカーに加え、接着材料のユーザー側である、鉄鋼や鉄道、ゼネコン、インフラなど、多岐にわたる業種が参画している。

クラスター長の内藤昌信はこう語る。「今後、NIMSが世界に誇る分析装置などを使って接着界面などをマイクロやナノレベルで細かく分析することにより、今まで未解明であった接着の詳細なメカニズム、例えば接着界面で化学的な結合がどれくらいの割合いで起こっているか、またそれが耐久性にどのような影響をもたらしているかなどを科学的に解明していきたいと考えています。構造材料のマルチマテリアル化が進む中、本クラスターを通じて、是非とも構造材料の産業構造を革新するような接着材料の開発につなげたいと願っています」

また、実用化に向けては、接着材料の劣化や破壊に関する知見が極めて重要だ。その点に関しても、NIMSの性能評価の専門家がチームに加わり、接着力や耐久性などを厳しく評価していく。そして得られた測定結果を集めて、「接着剤基礎データベース」の構築にも着手する計画だ。NIMSでは現在、革新的な構造材料を効率良く開発するため、機械学習による材料探索の計算手法の整備も進めているところだ。接着剤基礎データベースはマルチマテリアルの設計に欠かせない貴重なデータとして、活かされていくことになるだろう。

クラスターでは随時、産官学の幅広い分野から参加者を募っている。

責任者：TOPAS(構造材料つくばオープンプラザ)  
接着材料クラスター 内藤昌信

# ヤモリやハムシに学ぶ “はがせる”接着機構

細田奈麻絵

構造材料研究拠点 構造材料基礎科学分野  
表面・接着科学グループ グループリーダー



環境負荷を低減するには、資源を有効活用することが重要だ。そのためには製品のリサイクルが欠かせない。しかし、これまで製品の多くは、異なる部品同士を強固に接着することばかりに主眼が置かれ、リサイクルの妨げになっていた。このような中、環境を考慮し、分離性も視野に入れた接着・接合技術を研究開発しているのが、表面・接着科学グループの細田奈麻絵だ。

細田が長年にわたり取り組んでいるのは、「バイオミメティクス(生物模倣技術)」と呼ばれる分野だ。生物には高機能で高効率、そして樹木の落葉などに見られるリサイクル性を兼ね備えたさまざまな優れた仕組みが備わっている。それを模倣することで、環境負荷の少ない循環型社会を目指そうというのだ。

中でも現在、細田が目目しているのが、ハムシやハエトリグモ、ヤモリなど小動物の足の接着機構だ。

ヤモリは壁や天井であっても素早く移動できる。ハムシなど昆虫の多くは、窓ガラスのように表面がツルツルで爪が引っかかれられないような場所でも、落ちることなく自在に歩くことができる。これは、足の裏に接着性に優れたマイクロサイズの無数の毛が生えているからだ。

「小動物の足の裏の毛は、接触表面との間に摩擦やファンデルワールス力、毛管力、粘着力といった弱い結合を生じさせます。これによって、ツルツルの面にもくっつく接着性と容易な剥離性という、一見相反する機能を兼ね備えているのです。

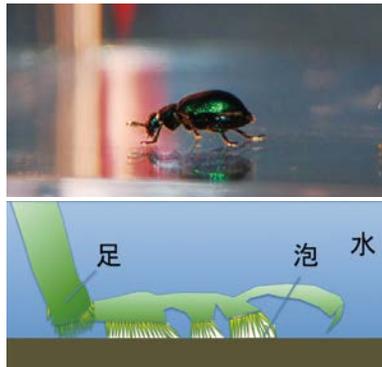
また、葉などの凹凸があるものの上では、その毛が表面の凸凹よりも細かいことで実際の接触部を増やし、強い接着力を発揮しています」と細田は語る。

## 水中を自由に歩行する ハムシの機構を再現

そこで細田は、ハムシの接着の仕組みについて、詳細な研究を行なった。すると、通常は大気中で生息するハムシが、予想に反して水中でも歩行できることを発見し、そのメカニズムを詳細に調査した。

その結果、水中では“泡”を巧みに利用していることを突き止めた。泡にはそれ自身に接着性があり、ハムシは足の裏の細かい毛で泡を固定してこの接着性を利用していること、また、毛が泡によって保護され濡れないため、水中でも大気中と同様の歩行、つまり、毛の接着性と剥離性が発揮できていることが分かったのだ(図1)。

図1



水中歩行するハムシと、足裏の機構の模式図。

そこで実際に、ハムシの足裏の毛の機構をPDMS(ポリジメチルシロキサン)などの高分子材料を使って再現し、部材にはりつけ水中で泡を固定させたとところ、見事に接着することを確認した(図2)。

「このメカニズムを応用すれば、環境にやさしいクリーンな水中接着が実現できると考えています」と細田。

今後、例えば、ロボットの手足などにこの機構を搭載すれば、水中を自由に歩き回りながら、さまざまな作業を行なうロボットが登場するかも知れない。

「これからの接着・接合技術は、最初から分離や剥離も考慮に入れたものであるべきです。このような思いが通じ、2016年度、産業競争力懇談会(COCN)で『循環型社会を実現する革新的接合・分離技術』というプロジェクトが立ち上がりました。今後も環境負荷を低減するような接着・接合技術の研究開発に注力していきます」

(文・山田久美)

図2



模型のブルドーザーの裏に、高分子材料を使って、ハムシの足の毛の形状を再現した機構をはりつけた。水中でスポイトを使い泡を蓄えさせるとガラス面にびたりとはりつく。



# “水”を使って 有機材料と金属や半導体を 強固に接着

重藤 暁津

構造材料研究拠点 構造材料基礎科学分野  
表面・接着科学グループ 主任研究員

自動車の車体軽量化に向け、“軽量複合材料”の開発が加速している。これまでの金属材料同様の安全性を確保するため、危険を感知するセンサなどの電子基板の実装の要請は高まっていくだろう。このような中、異種材料の接着技術を使って、車体の部材と電子基板を接合して一緒に作り込み、一体化してしまおうという研究を進めているのが、表面・接着科学グループの重藤暁津だ。

現在、自動車に搭載されている電子基板はパッケージ化され、部材の上にビス止めや接着剤などの機械的な方法で取り付けられている。しかし、振動や高温、油分が多い苛酷な車載環境ゆえに、取り付け箇所は劣化が起りやすく、短寿命になりがちだ。それに対し重藤が目指すのは、部材と電子基板の一体化だ(図1)。これにより、従来のように、取り付けられた箇所から劣化が発生するということもなく、作りを簡略化しながら、機能を向上させることが可能になるのだ。

しかしそのためには、有機材料や半導体、金属など、いくつもの界面を層状につなげる異種材料接着が不可欠だ。もしそれが、材料ごとに加工が違えば手間もコストも膨大にかかってしまう。そこで重藤が開発したのが、低温・大気圧の環境下で、“水”を使うという画期的な方法だ。一体どのような方法なのだろうか。

## 分子同士の結合で強固に接着

大気圧中では、材料の表面には、さま

ざまな化学物質が付着している。そこでまず、波長200ナノメートル以下の“真空紫外光”を照射する。それにより、ほとんどの有機付着物を除去することができる。そこに水分子を付着させると“架橋性”が発生する。そのため、有機材料については、このような表面同士を貼り合わせることで強固な結びつきが簡単に得られる。低温で行なえることも、熱に弱い有機材料においては欠かせない要素だ。

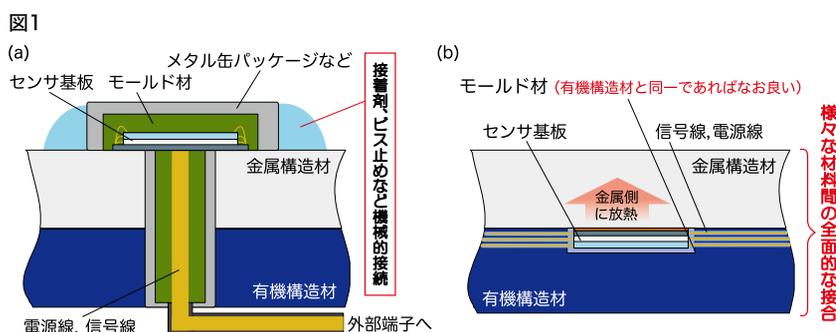
しかしながら、半導体や金属の場合には、表面を酸化物のような安定な物質が厚く覆っていて、単に真空紫外光を照射しただけではこれを除去することができない。そのため、真空紫外光を照射する際に、予め装置の中に水分子を入れておくことにした。「それにより、水分子に真空紫外光が当たり、水分子が“水素ラジカ

ル”と“水酸ラジカル”に分離します。その結果、水素ラジカルが酸化物を還元し、さらに還元された場所に水酸ラジカルが反応して、表面に水和物の薄膜ができます」。この表面同士を接触させ、150°C程度まで温度を上げると水和物間の脱水縮合反応\*が起る。これにより、従来数百°C程度必要だった環境よりも低温かつ大気圧環境下で、異種材料を一括して接着させることに成功した(図2)。

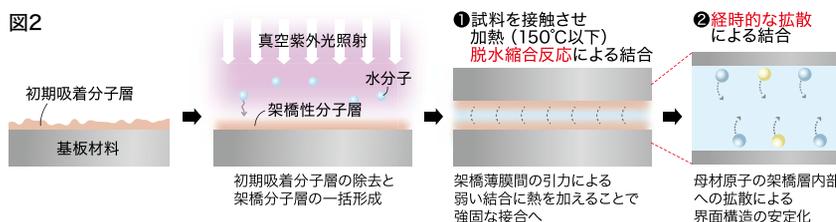
この接着技術の特徴は、水分子を使うため環境にやさしく、また表面を親水化できる材料であれば、なんでも接着することができることだ。「今後は企業との共同開発などにより、5年以内の実用化を目指します」と重藤は意気込む。

(文・山田久美)

\*脱水縮合反応…縮合する2個の分子がそれぞれHとOH基を失って水分子が離脱し、新たな化合物をつくる反応。



ハイブリッド構造部材を接合によって製作する時に、界面に電子基板を埋め込み形で作り込む。  
(a)従来の車載センサ取付構造。(b)センサ機能を内包した構造。





## “人工のクモの糸”

文・えとりあきお  
イラスト・岡田 丈 (vision track)

地球上にはたくさんの種類の生きものがいます。人間はその頂点にいて地球を支配していると考えられていますが、本当にそうなのでしょうか。

いまから何万年、何十万年かたって、地球の生物がすべて滅びてしまったとしましょう。そのあとでやってきた知的生命体が地球を調べたとしたら、「かつて地球は生命の宝庫だったそうだが、その支配者は昆虫であつたに違いない」という結論を出すはずです。

圧倒的な種類と数を誇る昆虫は、長期間にわたって綿々と生命のくさを保ち続けてきたすぐれた生命体です。その多様性に加え、体のつくり、脳や神経のしくみなどが、彼らが数億年という、人間とは比べものにならないほど長期間繁栄してきた原動力となっているのです。

最近、先端科学技術の世界でも、昆虫をはじめとした生物のすぐれた能力を活

用しようという、バイオミメティクス(生物模倣工学)の動きが活発になってきています。

いま注目をあつめているのは、人工のクモの糸を大量につくり出して、衣服をはじめ、さまざまな用途に活用しようという試みです。

クモは体のなかから糸を吐き出して巣をつくり、獲物を待ちます。こうした生き方をなんと4億年もつづけているのです。

一匹のクモが吐き出す糸は7種類もあり、用途によって伸縮自在であったり、引っぱりに強かったり、粘り気があったり、さまざまなすぐれた化学的性質を持っています。それだけに、人間のために利用できないかと多くの人が研究してきました。NASAも宇宙服の材料に使えないかと熱心に開発に挑みましたが、大量につくり出す方法がみつからなくて断念したといえます。

慶應義塾大学で生物学を学んだ関山和秀さんは、このクモの糸を人工につくり出し、それを量産化する技術に挑戦しました。10年かけて血のにじむような努力をした結果、関山さんは画期的な方法でこれに成功したのです。

クモ自身を大量に飼育して糸をつくらせようとすると、クモ同士が共喰いをはじめしてしまうのでうまくいきません。

関山さんはクモの糸を化学的に分析し、遺伝子工学を駆使することでその物質を、微生物を使って大量につくり出すことに成功したのです。遺伝子を注入された微生物は、自らの驚異的な繁殖力によって化学的組成がクモの糸とまったく同じ成分を大量につくり出します。その物質を特殊な溶剤を使って繊維状にひきのばしてやると、人工クモの糸のできあがりです。

この繊維で、ドレスができます。ソックスやネクタイもできます。伸縮性に富み、軽くて衝撃吸収力にもすぐれた夢の繊維の誕生です。将来は、人工血管や手術に使う縫合糸、タイヤや電子機器にいたるまで、幅広い活用が期待されています。

関山さんの会社(スパイバー)には世界各国の研究者が集結するようになりました。出資希望額が140億円もあり、世界中から注目を集めています。

NIMSでもバイオミメティクスに関する研究は長い間なされていますが、私たちの技術は生物に学ぶべき点がたくさんあります。この分野のさらなる発展に期待したいものです。



第14回 ナノ材料科学環境拠点シンポジウム

14th

## GREEN Symposium

社会システム全体を俯瞰した統合型材料開発

～太陽光から始まるエネルギーフローで鍵を握る水素・燃料電池～

開催日：平成29年2月1日(水) [10:30-17:15]

交流会 17:30-19:00(参加費：3,000円)

会場：一橋講堂(学術総合センター 2階)

参加費：入場無料



主催：物質・材料研究機構 エネルギー・環境材料研究拠点 (Greater GREEN)

物質・材料研究機構 ナノ材料科学環境拠点 (GREEN)

文部科学省の「ナノテクノロジーを活用した環境技術開発プログラム」の下で始まったGREEN。今は社会システム全体を俯瞰した技術統合と理論・計測・材料創製を融合した材料研究との協働により研究開発を推進する、統合型材料開発プロジェクトの中核機関として位置づけられています。

14回目をむかえる本シンポジウムでは、太陽エネルギー由来のエネルギーフローにおいて重要な役割を果たす水素・燃料電池にフォーカスします。エネルギーシステム全体の最適化、エネルギーキャリアとしての水素製造、最終的に電力に変換する燃料電池の要素技術開発、燃料電池の実用化のための基礎解析から実際の実用化まで、招待講演とGREEN内での研究紹介を交えて広く議論を行ないます。

## ■主な招待講演者

小島康一氏 トヨタ自動車 FC技術・開発部 主査

「トヨタ自動車における環境チャレンジと水素の果たす役割」

篠原和彦氏 技術研究組合FC Cubic 研究所長

『「触媒・電解質・MEA内部現象の高度に連成した解析、セル評価」(NEDO事業)における燃料電池基盤技術開発』

杉山正和氏 東京大学大学院工学系研究科電気系工学専攻 教授

「太陽光水素発生エネルギー効率向上に向けて：集光型太陽電池と水電解装置の最適接続」

姫田雄一郎氏 産業技術総合研究所 創エネルギー研究部門 上級主任研究員

「ギ酸からの高圧水素製造技術」

※講演タイトルは変更になる場合があります。



NIMS NOW vol.16 No.6 通巻161号 平成28年12月発行

国立研究開発法人 物質・材料研究機構



古紙配合率100%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 © 2016 All rights reserved by the National Institute for Materials Science

表紙写真：内藤昌信グループリーダーとパーソナル有機合成装置 撮影：石川典人 デザイン：lala Salon Associates株式会社