



材料は生きている!?

若島・細田研究室～精密工学研究所



若島 建司 教授(左) 細田 秀樹 助教授(右)

まだ人々が現代科学技術を開発する以前から、材料には鉄や銅が用いられてきた。その歴史の中で、人々は材料に様々な機能を持たせようと試行錯誤していった。泥の中に糞をまぜて作る日干しレンガもその一つである。そして、現代。材料は飛躍的な発展を遂げた。周りの環境を判断し、それに反応する材料は、まるで生命が存在しているかのような振る舞いを私達に見せてくれる。

ここ若島・細田研究室は、それぞれが持つ独特のアプローチを生かし、次世代の材料、「スマートマテリアル」を研究をしている。



次世代の材料、スマートマテリアル

携帯電話のアンテナを曲げてみるとバネのようにすぐに元に戻ろうとする。これをみて何か気付くことはないだろうか。そう、普通の金属ならこんなに曲がった後に元に戻るはずがないのだ。電波を受信するためにアンテナは金属で出来ていなければならない。しかし、金属を大きく曲げるとバネのように元に戻ることはなく、何回も曲げているとしまいには折れてしまう。このことから分かるとおり、携帯電話のアンテナは普通の金属とは大きく異なる性質を持っている。実はここまで大きく曲がっても元に戻るアンテナは形状記憶合金で出来ているのだ。携帯電話の形状記憶合金は常温で元に戻ろうとする性質(超弾性)を発現するように作られているため、曲げても元に戻るのだ。だから、熱湯などにつけて曲げると元には戻らず、繰り返せば折れてしまう。

この形状記憶合金のように、外部からの刺激を材料自身が感知し、それに対して様々な反応をする材料のことをスマートマテリアルと言う。それはあたかも人間の皮膚のように、寒いときには鳥肌が立ち、傷を負ったときには自然に治っていく、といった生体と同じような機能を備えている

から「賢い」材料なのだ。それゆえに、スマートマテリアルの研究は生体が発現する機能を手本とすることもある。このように、若島・細田研究室では今までにない機能を備えたスマートマテリアルを研究、開発している。

現在、若島先生と細田先生は共に精密工学研究所の先端材料部門を担当している。若島先生は長年、精密工学研究所に勤めているが、細田先生はこれまでに他の大学や研究機関に勤務されていたため、若島・細田研として発足してからまだ2年足らずである。

そのような経緯から、材料研究へのアプローチも両先生では大きく異なっている。若島先生は「微視力学」という固体力学のアプローチをもとに材料の研究を行ってきた。それに対し、細田先生は原子一つ一つのから材料を組み立てていく「アロイデザイン」という方法を取っている。このように、材料に対するアプローチの違う二人がそれぞれの知識を活かし、次世代の材料、スマートマテリアルを共同して研究しているのである。では、各々がどのような手法で研究しているのか二人の今までの研究を通して紹介しよう。



ミクロの視点から材料を探る

細田先生は、前述の通り原子レベルのアプローチからこれまでに様々なスマートマテリアルを研究、開発してきた。通常ならスマートマテリアルを研究する際には一つの元素に他の元素を加えていくのに対し、細田先生の手法は通常とは異なっている。細田先生は最初に目的とする条件をもとに、使用するいくつかの元素を選びだし、使う元素の組成や結晶の構造を組み立てていくのだ。十種類ほどの元素からなる系なら、どんな化合物の物性値でもある程度は周期表から見当がつくと先生は言う。この独特なアプローチ方法から、細田先生はスマートマテリアルを研究してきた。

その中でも、細田先生が進めている研究の一つに、イリジウム-アルミニウム合金被膜という耐熱被膜がある。高温条件下でも耐えられる材料（高温材料）を作る際、一番に求められる性質は高温でも溶けないことである。そこで融点の高い元素を探してみると、タングステン、タンタルなどが挙げられる。これらの金属は融点が高いことに加えて、延性があり、強度にも優れているので高温材料には非常に適している元素だ。しかしこれらの金属にも一つだけ弱点がある。それは、高温で酸素に直接触れると燃焼し、気体になってしまうことだ。地球上で使用する以上、酸素は絶対に存在するため、これらの金属が燃焼しないように、被膜で覆うことが必要になる。そのために開発されたスマートマテリアルが、イリジウム-アルミニウム合金である。イリジウムは化学的に非常に安定で、酸素をほとんど通さないため被膜には適しているのだが、それでも1500以上の高温になると燃焼してしまう。そこで先生はイリジウムにアルミニウムを混ぜることにした。すると、酸素がこの被膜にぶつかると、アルミニウムが先に酸化してアルミナになりアルミニウムが消費され、イリジウムの層ができる。そして、そのイリジウム層をアルミナ層が守るため、1500以上の高温でも酸化しにくくなったのである。さらに、この被膜はもう一つ重要な機能を備えている。例えば飛行機のエンジンに鳥が吸い込まれて被膜が破損したとしても被膜が再生してくれるという、自己修復機能を持つのである（図1）。

また、細田先生は生体用の材料という面でもスマートマテリアルを研究している。生体用の材料、というのは血管の補強や人工の骨に使われるような材料のことだ。これらの材料として変形しても元に戻る形状記憶合金が使われている。現在世に出回っている形状記憶合金は、通常チタンとニッケルを混ぜ合わせることで作られている。しかし、ニッケルは人体にアレルギーを引き起こす場合があるため、使用しないほうがよいのではないか、という議論がたびたび専門家の間で起こっているのだ。そこで細田先生は、他に何か代替できるものはないかと考え、研究をしている。この際、細田先生は使う元素をチタン、モリブデン、ニオブの族を中心とする人体に有害でない元素にしぼり、新しい形状記憶合金をつくった。これにより、ニッケルなどの有害重金属を含まない形状記憶合金を作り上げたのである。これは現在特許を申請している研究なので詳しい組成はまだ言えないとおっしゃっていたが、いずれは世の中で広く使われることになるだろう。

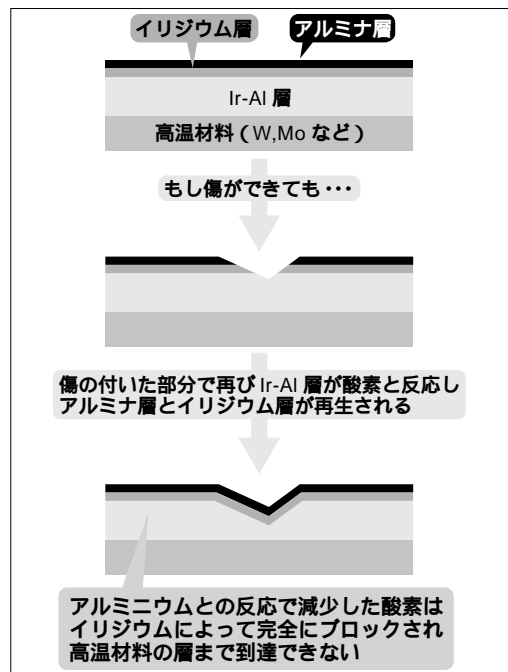


図1 自己修復機能



微視力学からのスマートマテリアル

細田先生は原子、結晶構造という立場に立ってスマートマテリアルを研究している。それに対し、若島先生は異種素材の複合化という立場から複合材料という分野の研究を行なっている。複合材料とは、金属やセラミックス、ポリマーなどの性質の異なる材料を混ぜ合わせた材料のことである。例えば、自動車の内装材は一見プラスチックであるが、実は直径10 μm程度のガラス繊維が中にたくさん入っており、繊維強化プラスチック（FRP）と呼ばれている。昔は木材でできていたボートや漁船も今はFRPでできているのだ。

若島先生は複合材料の中でも特に高温材料の研究をしていた。では、その研究方法とはどのようなものだったのだろうか。

複合材料の物性は、それを構成している物質の物性や量だけでなく形状や向きによっても大きく変わってくる。そのため、「微視力学」という解析方法に基づいて、複合材料を定量的に解析している。具体的には物質の形状を回転楕円体

$$\frac{x^2+y^2}{a^2} + \frac{z^2}{c^2} = 1$$

の a や c の値を変えることで表現している（例えば、円柱なら $c = a$ にすればよいし、球体なら $a = c$ とすればよい）。これにより、いろいろな対称性のある形状を一つの式で表現できる。この式に物質の傾きもあわせて考えることで複合材料の複雑な内部状態でも簡単に記述できるのである。このモデルを用いて複合材料の力学を展開し、構成物質単体での物性値から複合材料全体としての様々な物性値が分かるという仕組みだ。通常材料力学では均質な系しか扱えなかったが、この解析方法によって不均質な系まで扱えるようになったのだ。

この微視力学をベースとして、若島先生はこれまでセラミックスと金属の複合化による新しい高温材料の研究を行ってきた。その一つに傾斜機能材料というものがある。これはセラミックスと金属の組成の割合が違う層を何層も重ねて、熱伝導率や熱膨張率などを段階的に変化させていく、という材料である。もともとこの材料は、将来の超音速宇宙往還機（スペースプレーン）の材料とし

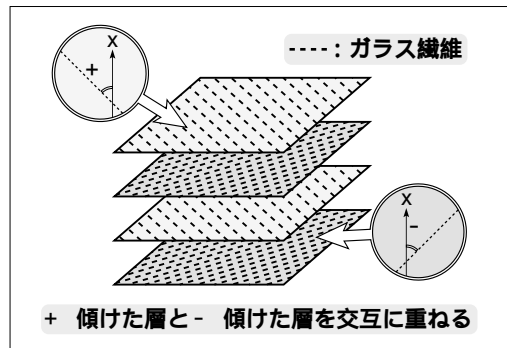


図2 ポリプロピレンのFRPの構造

て日本で発案され研究されたものである。スペースプレーンは、大気圏内でも超音速で飛行するため空気との激しい摩擦によって機体表面の金属が溶け出してしまう。それを防ぐには、金属表面に熱に強いセラミックスをコーティングすればよい。しかし、そのままだと熱伝導率も熱膨張率も違うため、金属とセラミックスの間に熱による力（熱応力）が発生し、セラミックスがはがれてしまうのだ。そういったことを避ける方法として、熱応力が極力少なくなるように徐々に物性を変えていけばよい。この発想から生まれた材料が傾斜機能材料だ。微視力学を活用すれば、発生する熱応力の分布が計算によって推定できるので、どのような構造が最も良いかが判断できるようになる。

また、若島先生はこの微視力学解析を活かし、ガラス繊維とポリプロピレンで新たな複合材料を作った。図2を見て欲しい。このFRPは、ガラス繊維をX軸に対して+ 傾けた状態でポリプロピレンと複合化した層と- 傾けて複合化した層が交互に重なる構造になっている。このような積層構造にすることで、X方向の熱膨張率が0になったり、マイナス、つまり加熱すると収縮してしまうような特異な挙動が発現するのだ。熱膨張率は繊維の傾きが30度付近で極小値となる（図3）では、どうしてこのようなFRPができたのだろうか。ガラス繊維はポリマーに比べて著しく剛性が高く、熱膨張率が小さい。そのためベースとなるポリマーにガラス繊維を加えると、繊維と平行な方向には熱膨張が起こりにくく、繊維に垂直な方

向には大きく熱膨張するようになる。若島先生はこの変形を利用した。先ほどの図2の構造にすることで、+ 層と- 層の熱膨張変形を互いに拘束する力が生じ、X方向の変形に影響を及ぼす。そのため、ある角度でガラス繊維を入れると全く変形しなかったり、縮んでしまったりするのだ。また、先生の話では特に重要なのがポリプロピレンを使ったところだと言う。ポリプロピレンは数多く存在するポリマーの中でも特に剛性が低く、熱膨張率が高い。そのため、FRPの素材としてはあまり利用されてこなかったのだ。ところが微視力学の計算によって、剛性が低く熱膨張率大きいポリマーのほうがFRPにしたときに熱膨張しなくなるという面白い結果が出たのである。エポキシをはじめとするFRPでは絶対に不可能なことも示されており、非常に興味深い発見であろう。

以上のように、微視力学という手法を用いる

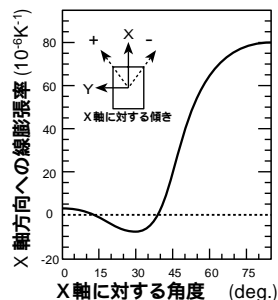


図3 ガラス繊維の傾きと線膨張率

と、複合材料のような複雑な系においても物性の解析ができ、新しいスマートマテリアルが開発できるのだ。さらにこの手法を活かし、細田先生が開発した材料を若島先生が複合材料化する、という方法でも新しい材料の研究を行なっている。



今までにない材料を目指して

以上のように、若島先生や細田先生はユニークな性質を持った材料を研究しているのだ。このように、それぞれ独自のアプローチをもつ先生達は、世の中には無いような機能を持ったスマートマテリアルを共同で作ろうと考えている。

現在、若島・細田研で行われている研究の一つに、圧電体を複合化したスマートマテリアルの開発が挙げられる。圧電体とは力を加えると電圧が生じる材料で、身近な所ではライターの着火部分などに使われている。また逆にこの材料に電圧を加えると変形するので、微小な精密機器の駆動部などにも使われる。若島先生は、圧電体を用いた複合材料では曲げとねじれを別々に制御できる圧電素子が設計できるので、例えば光デバイスのビームリフレクタなどとして利用できるのではないかと考えている。また、先に述べた生体用形状記憶合金以外に、磁気や高温で動く形状記憶合金およびそれらの複合材料なども研究している。

「私達は別々のアプローチだからこそ、協力することで多方面から研究ができる。それが私達の研究室や、この精密工学研究所の特徴です」先生達はこの研究室の特徴をこう語っていた。また、「材料には人の命を預かるようなものがたくさんある。飛行機に使っている材料に欠陥があったので落ちました、では済まされない。だから、新しい材料ができたからといって必ずしもすぐには世の中に出ていくことができない。いろいろな角度から何度も細心のチェックを繰り返して、信頼性を得ることが大事なんです」と、地道な材料研究に対する心構えも語っていた。さらに、材料をリサイクルしやすいようにできるだけ使用する元素の種類を少なくするなど環境についても配慮しているという。先生達の材料に対する真剣な気持ちが伺える。将来、我々の想像を越えるような材料ができてくるのもそう遠い未来の話ではないかもしれない。

日々進化し続ける現代科学技術。その裏側には日夜研究を重ね、開発を続けている人々がいる。その人達がいるからこそ、我々は安全に現代技術を使うことができ、よりよい生活を送ることがで

きるのだ、ということを忘れてはいけない。

最後になりましたが、お忙しい中我々の取材に快く応じて下さった若島先生と細田先生に心より感謝いたします。(三田村 陽平)