

「新陳代謝」するセラミックスで ジェット機を飛ばそう！

地球温暖化防止に向け、航空機の軽量化が大きな課題となっている。ジェットエンジンの材料を金属からセラミックスに替えることができれば、大幅な軽量化が実現するため、二酸化炭素（CO₂）排出量の削減につながる。しかし、セラミックスは、衝撃に弱い。この弱点が実用化を阻んできた。このような中、超高速で亀裂を自己修復する「自己治癒セラミックス」の開発でセラミックスの弱点を克服したのが、横浜国立大学の中尾航教授と物質・材料研究機構（NIMS）の長田俊郎主任研究員のグループだ。

二酸化炭素削減につながる 航空機の軽量化

現在、航空機のジェットエンジンにはニッケル合金が使われている。一方、セラミックスはニッケル合金に比べて比重が4分の1と軽量な上、高温に強く、耐腐食性がある。しかも、熱伝導性が低いため、エネルギー変換効率が高い。

従って、航空機のジェットエンジンのタービン翼を、ニッケル合金からセラミックスに置き換えることができれば、約15パーセントの燃費向上が見込める。これは国際線の場合で換算すると年間6億トン以上のCO₂削減効果であり、日本の現在の総CO₂排出量である約13億トンの約半分に相当する（図1）。しかし残念ながら、いまだに実用化に

は至っていない。最大の理由は、セラミックスがもろく衝撃に弱いからだ。横浜国立大学大学院工学研究院の中尾航教授と物質・材料研究機構（NIMS）構造材料研究拠点の長田俊郎主任研究員のグループは、ALCA実用技術化プロジェクトでこの弱点を克服し、亀裂を自己修復する「自己治癒セラミックス」の実用化に挑んでいる。

なか お わたる
中尾 航

横浜国立大学
大学院工学研究院 教授

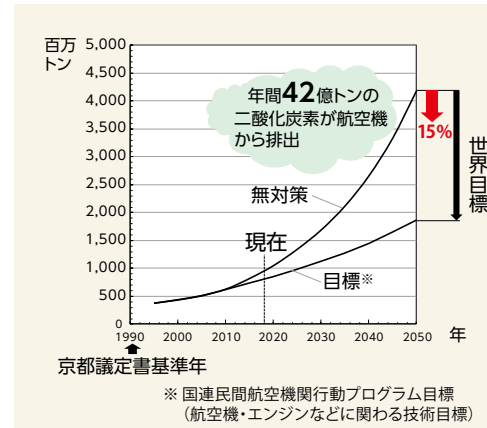
2003年 東京工業大学大学院理工学研究科修了。博士（工学）。横浜国立大学大学院工学研究院准教授を経て、17年より現職。12年よりALCA実用技術化プロジェクトにおいて「自己治癒機能を有する革新的セラミックスタービン材料の開発」に取り組む。

おさだ としお
長田 俊郎

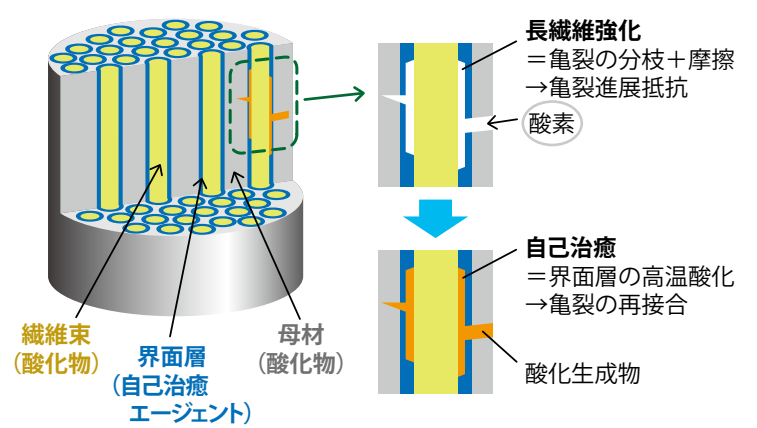
物質・材料研究機構
構造材料研究拠点
超耐熱材料グループ
主任研究員

2009年 横浜国立大学大学院工学研究院修了。博士（工学）。同年、物質・材料研究機構（NIMS）ポスドク研究員、12年 横浜国立大学特任教員、13年 NIMS研究員を経て、17年より現職。16年 オランダ・デルフト工科大学客員研究員（日本学術振興会海外特別研究員）。

■図1 国際航空セクター全体における
旅客機の二酸化炭素排出量



■図2 長繊維強化自己治癒セラミックスの模式図



セラミックスに新陳代謝の 機能を持たせる

自己治癒セラミックスとは、その名の通り、亀裂などの損傷を自己修復する機能を持つセラミックスのことだ。セラミックスの母材であるアルミナ（酸化アルミニウム、Al₂O₃）などの酸化物と、自己治癒機能を発現させる炭化ケイ素（SiC）などの「自己治癒エーゼント」で構成される。

「生物の身体には、新陳代謝の機能が備わっています。傷や病気を自然に治す自己治癒も新陳代謝の一種です。この新陳代謝の機能を人工材料でいかに実現するかということに焦点を当てて、自己治癒セラミックスの研究開発を進めてきました」。こう説明するのは、2012年度よりALCAで研究開発代表者を務める中尾さんだ。

「自己治癒セラミックスでは、亀裂が入った箇所に自己治癒エーゼントをいかに効率良く送り込み、適切な化学反応を起こさせるかが、研究開発の焦点となります。それを実現できたことが、大きなブレークスルーとなりました」と中尾さんは振り返る。

自己治癒セラミックスの研究開発の歴史は古く、1960年代頃から欧米を中心に進められてきたが、亀裂の完治と強度の回復は実現していなかった。これを実現したのが横浜国立大学の安藤柱名誉教授だ。1995年に見いだされたアルミナとSiCで構成された自己治癒セラミックスは一躍脚光を浴びた。

この自己治癒セラミックスでは、亀裂が入ると、自己治癒エーゼントであるSiCが、亀裂に伴い侵入してきた酸素と化学反応を起こし、酸化ケイ素（SiO₂）を生成する。このSiO₂が亀裂を埋めることにより、亀裂が修復されるという仕組みだ。

中尾さんは安藤研究室に助手として着任した2003年から、この研究を始めた。「当時、亀裂はどこで発生するかわからないため、アルミナ全体に均一にSiCを分散させていました。しかし、それでは非効率で自己治癒力が弱いため、実用化には程遠いと感じていました。そこで発想を大きく転換し、自己治癒エーゼントを亀裂に送り込むのではなく、自己治癒エーゼントのあるところに亀裂ができるようにすれば良いと考えたのです」。

繊維状のセラミックスで 新陳代謝を実現

中尾さんはALCAに採択されたのを機に本格的に研究開発に着手し、2014年には「長繊維強化自己治癒セラミックス」を完成させた（図2）。

細長い繊維状のセラミックスを用意し、その表面をSiCでコーティングする。その繊維を束にしたものを一方向にきれいに並べ、さらにその周りをセラミックスの粉（母材）で覆う。一緒に焼き固めれば新陳代謝するセラミックスの完成だ。

SiCの存在する界面層は、芯となるセ

ラミックス繊維に比べて強度が低い。外部からの衝撃を受けると、表面から進行した亀裂は繊維にぶつかると方向を変え、強度の低い界面層に沿って広がる。亀裂をSiCの存在する界面層に誘導するという、界面層の強度の低さを逆手に取った大胆な発想で効率的な自己修復を実現したのだ。

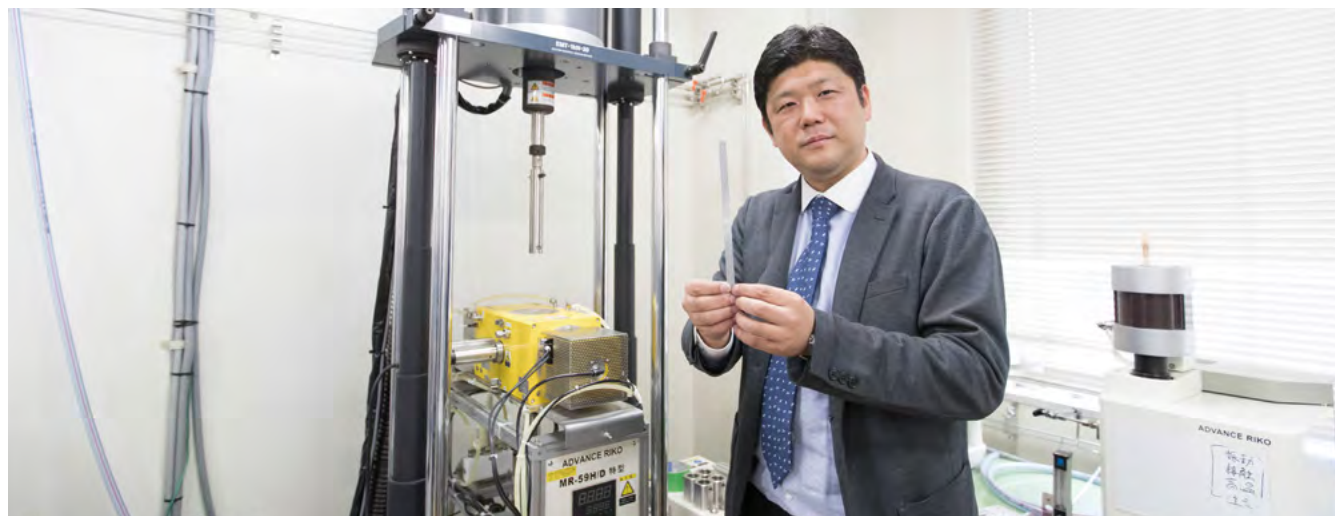
「SiO₂によって修復された箇所は亀裂が入る以前と同等以上の強度を示します。これは骨折が治癒した際に、骨折していない箇所よりも強度が増していることと似ています。つまり、長繊維強化自己治癒セラミックスは、自己治癒機能により使えば使うほど強度が増すという画期的なセラミックスなのです」。

自己治癒の詳細な メカニズムを解明

長繊維強化自己治癒セラミックスの開発の成功により、航空機のジェットエンジンのタービン翼への応用という究



繊維状のセラミックスをコーティングし、束にして焼き固める。右手の細い糸が長繊維強化自己治癒セラミックス。



テスト用のセラミックス片を手にする中尾さん。左の装置で熱や力を加え、強度を調べる。

極の目標が視野に入ったという中尾さん。しかし、実用化に向けては、乗り越えなければならない課題が2つあった。

1つ目の課題は反応する温度域を広げることだ。2014年に完成させた長繊維強化自己治癒セラミックスの場合、SiCと酸素を化学反応させ亀裂を修復できる温度域は、1200～1300度と狭かった。しかし、航空機のジェットエンジンに適用するためには、タービン翼入口の約1500度から出口の約600度まで、幅広い温度域で機能させる必要があった。2つ目の課題は、治癒にかかる時間の短縮だ。1000度の温度域で1000時間という長い治癒時間では、役に立つ材料にはならない。

この課題の解決に向け頼もしい相棒になったのが、NIMSの長田さんだ。2人の出会いは2003年まで遡る。中尾さんが助手として着任し、初めて指導した学生が当時4年生の長田さんだったのだ。自己治癒材料は使いものにならないといわれていたが、「いつかジェット機を飛ばしてやる」という熱い思いで



メカニズムの解明に挑んだ長田さん

研究を続けてきた。

NIMSの研究員として物質の構造や機能の解析に携わっていた長田さんは、まずは自己治癒機構を詳細に明らかにしようと考えた。

「亀裂を修復する際、なぜか1300度付近で液体のようなものが発生していることが知られていました。しかし、その正体は不明でした。そこで当時、日本で唯一、世界最高水準の性能を誇っていたNIMSの走査透過型電子顕微鏡(STEM)やエネルギー分散型X線分析装置(EDS)を使って、観察と分析を試みました。その結果、この液体は『過冷却融体』であることが判明したのです」。

過冷却融体とは融点以下の温度にも関わらず流動性のある物質で、SiO₂が周囲のアルミナと反応してできたガラスだった。さらに細かく観察したところ、この過冷却融体が亀裂の中に広がり充填していくことで、SiCと酸素の反応が進みやすくなり、より多くの過冷却融体が生成されることがわかった。

さらに、STEMによる観察結果から、

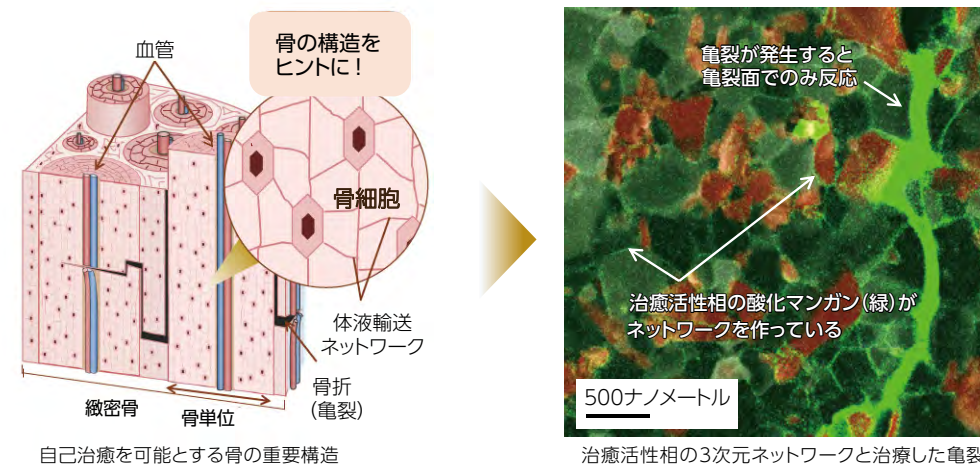
過冷却融体が変化したSiO₂の結晶や、SiO₂とアルミナの化合物でアルミナに匹敵する耐熱性を持つムライトと呼ばれる結晶などが亀裂部分を充填しており、強度が回復していることも確認された。

「骨折の自己治癒に例えると、SiCが酸素と反応してSiO₂が作られる過程を『炎症期』、SiO₂が周囲のアルミナと反応して一時的に過冷却融体を作り、亀裂を充填していく過程を『修復期』、そして過冷却融体が結晶化して強度が回復する過程を『改変期』ということができそうです。自己治癒セラミックスは生体と同じようなプロセスで、組織を修復していたのです」と長田さんは説明する。

微量の酸化マンガンを 修復時間を短縮

自己治癒機構の解明により、反応する温度域の拡大と、治癒にかかる時間の短縮の足がかりが得られた。修復の鍵と

■図4 骨の構造がヒントに! 活性相配置方法



自己治癒を可能とする骨の重要構造

治癒活性相の3次元ネットワークと治療した亀裂

なる過冷却融体をより低い温度で生成する物質を用いてはどうかと考えたのだ。「熱力学平衡計算」と呼ばれる手法を駆使し選んだのは、ガラスへの転移温度が低い酸化マンガ(MnO)だ。

実際にMnOをアルミナに微量に混ぜた自己治癒セラミックスを作ったところ、従来は1000度の温度域で1000時間かかっていた亀裂の完治時間を、なんと最速で1分程度にまで短縮できたのだ(図3)。

「添加するMnOの量によって反応速度は異なりますが、アルミナに対して、体積重量で約1パーセントのMnOを添加しただけで、反応速度を最大6万倍も上げることができた計算になります。また、STEMでこの自己治癒セラミックスを観察したところ、MnOがアルミナの粒子と粒子の間の界面に偏析し、それが3次元の『体液輸送ネットワーク』の役割を果たしていることがわかりました」と長田さん。

私たちの体は骨折すると、血管から血液が流れ出し、折れた箇所に足場を作る。その後、周囲に張り巡らされた体液輸送ネットワークの働きにより、折れた箇所に修復に必要な細胞が効率よく集まるような仕組みを備えている。損傷がどこで起こっても修復に必要な物質が効率良く運ばれ、修復がより速く進むというわけだ(図4)。

それに対しMnOは、過冷却融体といういわば血液の役割を果たす物質を高速で生成するとともに、それを3次元状に配置することにより、損傷がどこで発生しても、効率良く修復に必要な反応

を起こすことができる。

長田さんは同様の方法で、MnO以外の活性化物質の探索も行い、反応する温度域のさらなる拡大にも成功した。

「ジェットエンジンのタービン翼も、設置箇所によって環境温度が大きく異なりますし、最近ではより低温環境での利用ニーズが高まっています。今後は社会のニーズに応じて最適な自己治癒セラミックスを効率良く開発できるように、学術的な整備を進めていきたいと思っています」と今後の抱負を語る。

実用化の鍵は国際標準化

ALCAのプロジェクトは昨年度で2期目を迎え、「実用技術化プロジェクト」の段階に入っている。実用化に向けて、新たな強度基準の提案を進めている。

「従来の構造材料の場合、もともと持っている強度に対して安全率を掛け合わせて設計します。しかし、ここには自己治癒という機能は含まれていません。今後、自己治癒セラミックスを実用化していくためには、自己治癒性を加味した新たな強度基準を設定する必要があります。そのため現在『自己治癒限界応力』というものを提案しています」と中尾さん。

従来の構造材料では、異物衝突など突発的に大きな応力がかかって破壊される場合を除いては、経年劣化による破壊がその多くを占めている。そのため安全率を掛け、構造材料としての強度や寿命を算出し設計に生かしてき

た。しかし自己治癒セラミックスの場合、小さな損傷に関しては自己治癒という機能が発揮されるため、経年劣化は抑制される。とはいえ、損傷の速度や度合いが自己治癒の速度を上回るような応力が加わった場合は、破壊を免れない。その応力を自己治癒限界応力とし、新たな強度基準に設定しようというわけだ。

「航空機の場合、国際標準化が鍵を握ります。世界に先駆けて開発したこの自己治癒セラミックスを国際線の航空機に搭載すべく、まずは自己治癒限界応力を国際規格化していく計画です。実用化の目標は2030年代前半を想定しています。それにより日本の技術力の高さを世界に示すと同時に、地球温暖化防止に貢献したいと願っています」。

自己治癒材料の可能性を信じ、あえてジェット機という高いハードルを据え研究開発に取り組んできた。努力が実を結びつつある今、中尾さんと長田さんは1日も早い実用化に向けて、決意を新たにしている。

■図3 酸化マンガンの添加で完治時間を短縮

