

明日への トビラ

Vol. 9

割れないセラミックスで ジェットエンジンをつくる

自分でキズを治す自己治癒機能で燃費改善

航空機用ジェットエンジンの二酸化炭素(CO₂)排出量を劇的に減らす画期的な技術ができた。横浜国立大学の中尾航准教授らが開発中のセラミックス製エンジンで、約15%もの燃費が向上するという。

共に研究開発を進める横浜国立大学の研究者と。左から、福富洋志さん、中尾さん、尾崎伸吾さん、梅村鎮男さん。



軽量化と耐熱性の向上で 6億トン以上のCO₂を削減

現在の多くのジェットエンジンは、エンジン前方に配置されたプロペラの回転により推進力を得ている。プロペラを通過した空気の一部は、圧縮機を通過して圧縮され、そこに燃料を吹き込んで燃焼ガスをつくり、タービンを回転させる。そのタービンの回転エネルギーがプロペラと圧縮機の動力源になる。

ジェットエンジンは性質上、タービン入口の温度を高くするほど燃費が良くなるが、高温にするほど窒素酸化物(NOx)の排出が増える。材料自体の限界もあり、燃焼温度の高温化によるこれ以上の燃費改善は難しいのが現状だ。

現在、ニッケル合金で作られているジェットエンジンのタービ

ン翼をセラミックス化す

ることの利点は、「軽量化」と「耐熱性」の向上だ。セラミックスは比重がニッケル合金の4分の1以下と軽い。また合金製の場合、タービン翼を空気で冷却して保護しているのだが、セラミックスは耐熱性にも優れているため、冷却が不要になる。

軽量化と無冷却化によって「最新のジェットエンジンと比べても最大で14.8%もの燃費向上が見込めます」と中尾さんは話す。言い換えれば、航空機の国際線に使われれば6億トン以上のCO₂削減効果があるという。これは現在の日本の総CO₂排出量(約13億トン)のおよそ半分にあたる。

このように優れた環境性能をもつセラミックエンジンも、従来は、異物衝突や熱衝撃により簡単に壊れてしまうことがあり、高い安全性が必要な場面では使うことができなかった。



自ら亀裂を修復して強度を回復する

中尾さんらが開発しているのは、亀裂が入っても、最終破壊まで広がらないように制御し、しかも人間や動物の骨のように“自己治癒機能”を持つ高度な材料で、「長繊維強化自己治癒セラミックス」と呼ばれる。

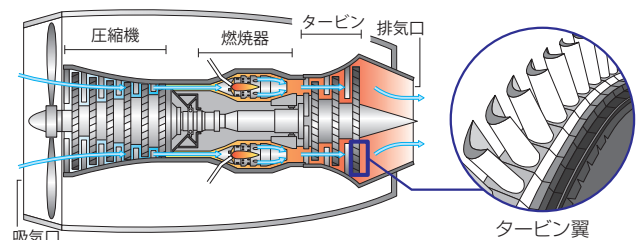
酸化物の母材の中に酸化物の繊維束を入れて

中尾 航 なかお・わたる
横浜国立大学大学院工学研究院准教授
1998年、東京工業大学工学部金属工学科卒業。2003年、東京工業大学大学院理工学研究科博士課程修了。博士(工学)。横浜国立大学助手を経て、11年より同大学大学院准教授。12年度よりALCA研究開発代表者。



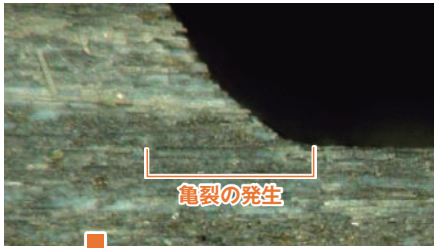
実験室にて。手にしているのはセラミックスで作製したジェットエンジンのタービン翼。

ジェットエンジンの仕組み



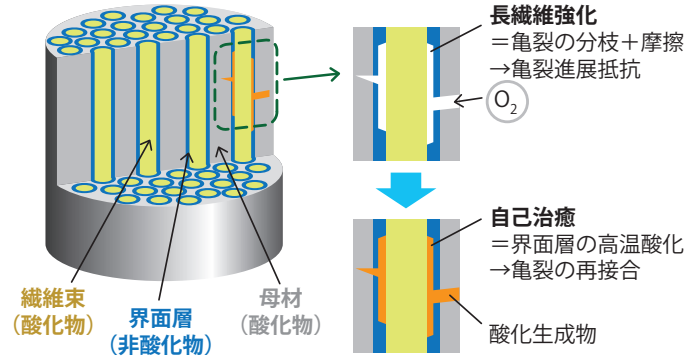


自己治癒の様子

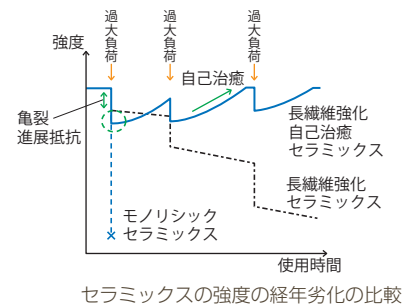


衝撃が加わると割れるのではなく界面層に亀裂が走る(上)。これを1100℃の高温下に10分置くと、自己治癒が始まる。

長繊維強化自己治癒セラミックスの模式図



界面層(非酸化物)は、亀裂によって外気に触れると、化学反応を起こす。酸化生成物が亀裂部を修復し、自発的に強度を回復する(上図)。既存のセラミックス材料は、大きな負荷によって唐突に破壊が起こる。一方、自己治癒セラミックスは、強度が落ちても回復するため、金属材料と同じように寿命が算出できる(右図)。



あるもので、繊維束のまわり(界面層)は炭化ケイ素(SiC)などの、強度を弱めた非酸化物で覆ってある。外から衝撃が入ると、亀裂は強度が弱い界面層に発生し、繊維束をよけるように枝分かれするため、セラミックスを割れにくくしている。さらに、界面層を構成する非酸化物は、亀裂が達することで初めて外気に触れ、酸化する。たとえばSiCの場合、酸化すると発熱反応を起こしてSiCが二酸化ケイ素(SiO₂)に変化し、傷口をふさぐ効果がある。「簡単に言うと、炭素が1つしかついていなかったのが酸素2つに換わり、体積が膨張するため亀裂の隙間が埋まります。さらに発熱によって融解するため溶接されたような形でくっつきます」と説明する。亀裂が接合されると、最終的には強度が完全に回復するという。

この材料を航空機のジェットエンジンのタービン翼として使おうとしているのだ。タービン入口温度は1500℃に、出口温度は600℃に達すると言われている。現在は、この全温度域を3領域に分け、それぞれの温度域で使用可能な材料の開発に取り組んでいる。実験上では1000℃で強度回復が生じる材料も開発済みだ。

一方で、「バーベキューの火でも自己治癒できるセラミックス」の開発も計画しているという。



逆転の発想で道がひらく 2033年には実用化したい

開発中のセラミックス材料では、繊維束のまわりの界面層だけが自己治癒機能を持つ。この界面層を弱くつくり、亀裂を導くことが開発のポイントだ。「傷を治せるところに傷をつくり、亀裂の進展を止めるという発想です」。

以前は、亀裂がどこにできるかわからないので、全体が自己治癒機能を持つ必要があったと考えていた。しかし当時の試みはなかなかうまくいかなかった。あるとき「亀裂が走る場所が限定されるようにしてしまえば良いのではないかと」のひらめきをもとに試してみたら、うまくいったのだという。

ただ、そのように界面層を弱くつくり、今回の開発でも最も難しい。「界面層が強くなりすぎると、そこに亀裂が逃げなくなってしまうので、そのバランスを取るのが非常に困難で、試行錯誤しているところです」と中尾さんは苦勞を話す。

さらに材料開発だけで終わらず、実際にジェットエンジンに実用化されるまで仕上げていきたいと考えている。

「JST ALCAでの課題は2016年までですが、材料開発が完了するのはその3年後くらいでしょう。この後、5年かけてタービンの稼働試験や異物衝突に対する耐久試験などを行います。2023年頃にはジェットエンジンの形になったとして、その後さらに10年ほどかかり、実用化は2033年頃だと考えています」。

実用化への最大の課題を聞いたところ「とにかく仲間をたくさんつくること」という答えが返ってきた。ジェットエンジンのタービン翼として実用化するまでには、材料の開発以外にも製造プロセスの開発、耐久試験や熱サイクル試験といったさまざまな試験が必要になる。それらの仕事はとても1人ではできないからだ。さらに長期間にわたる計画なので、次の世代の研究者を育てることに力を入れたと中尾さんは力強く語る。

想定している実用化は20年後だ。多くの協力者とともに、長期にわたるチャレンジングな研究開発が続けられていく。