

空のゲームチェンジャー CMC (セラミックス基複合材料)

民間航空機の需要増等を背景に競争激化する航空機産業界。

その中で日本の競争力を高めるため、NEDOは次世代材料の研究開発を進めています。

その一つとして期待されているのがCMC (セラミックス基複合材料) です。

航空機の核となるジェットエンジンに変革をもたらし、

航空機産業の構図を刷新する可能性を秘めています。

航空機産業の課題に対し 次世代材料への期待が高まる

成長軌道にある航空機産業において 材料分野で日本の強みを発揮

民間航空機産業における競争力強化は、日本が抱える課題の一つです。増加する世界の旅客需要を背景に(図1)、ジェット旅客機も増加が見込まれる中(図2)、2015年度、国が発表した「航空産業ビジョン」では、国内航空機産業を2020年までに2兆円にほぼ倍増、2030年までには売上高3兆円達成を目指すとしています。

厳しい国際競争の中で、安全性や信頼性を大前提とした省エネルギー化や環境負荷低減といった市場ニーズに対し、燃費向上を実現するための航空機の軽量化は、次世代航空機実現に向けて、大きなミッションとなっています。そこでNEDOは、経済産業省のプロジェクトを引き継ぎ、2015年度から「次世代構造部材創製・加工技術開発」を開始。次世代航空機に使われることを想定した材料開発を推進してきました。

「日本は戦後、航空機開発が禁止され、1952年から再開しました。それがずっと尾をひいて、技術的に米欧に遅れをとっている状況です。特に航空機材料は、開発してから使われ始めるまでに時間がかかるため、今から10年、15年先を見据えて市場ニーズに応える高度な先進技術を開発できれば、日本は世界に追いつくと考えています」と話すのは、同プロジェクトのプロジェクトリーダーを務める東京大学航空宇宙工学専攻教授の青木隆平氏。「炭素繊維等、これまで航空機産業でも材料分野は日本企業が牽引し、世界で大きなシェアを保ってきました。今後、飛躍的な燃費向上を求められる次世代航空機に

も、日本は優れた材料で市場に食い込んでいけると考えています」

航空機の未来を描き 日本の航空機産業発展を目指す

そして、材料が変われば使い方も変えなければなりません。単に今ある材料の使われ方で材料だけを革新的なものに置き換えても、最適なパフォーマンスにつながりません。そこで、本プロジェクトでは材料開発のみならず、航空機のどこに何の材料をどのように使うか、また、それぞれの使い方がどう影響し合うか、製造コストや製造時間といったことも踏まえて、最適構造設計や加工技術といった開発も同時に行っています。

本プロジェクトの社会的インパクトとして、プロジェクトマネージャーを務めるNEDO材料・ナノテクノロジー部の伊藤浩久主査は、中小企業を含む日本の航空機産業界の発展に貢献するものであることも強調します。

「航空機に使われる部品は約300万点。自動車ですら3万点と言われており、自動車に比べて携わる部品メーカーはとても多い。裾野の広い航空機産業の一翼を、中小企業にも担っていただくべく、開発した技術の普及にもNEDOは力を入れていきます」

航空機エンジンの部材として 実用化を目指すCMC

航空機に使う材料といっても、複合材料や金属等、その種類はさまざま。中でも、次世代材料の一つとして、NEDOが研究開発を進めているのが「セラミックス基複合材料」(CMC:

Ceramic Matrix Composites) です。セラミックスの繊維とセラミックスのマトリクス(母材)を複合的に組み合わせることで、軽い上に熱に強く、かつ壊れにくいといった複数の特徴を引き出し、航空機エンジン部材としての実用化を目指しています。

技術開発のゴールとして、「移動体を軽くすれば、使う燃料も減り燃費は良くなる。そして、エンジン作動も負担が減るので、さらに燃費が良くなります。航空機全体で軽量化と耐久性が向上すれば、安全性もさらに増します。航空機部材の開発はそのパーツだけではなく、航空機全体のコンセプトを変えるだけの存在だと思っています」と伊藤主査は語ります。

一つの材料が、航空業界を大きく変える——“空のゲームチェンジャー”と呼ばれる、そんな可能性を持つCMCとはどの



青木 隆平氏
NEDO「次世代構造部材創製・加工技術開発」プロジェクトリーダー
東京大学大学院工学系研究科
航空宇宙工学専攻 教授



伊藤 浩久
NEDO材料・ナノテクノロジー部
主査/プロジェクトマネージャー

航空機産業の市場ニーズ

省エネルギー

環境負荷低減

安全航行

軽量化

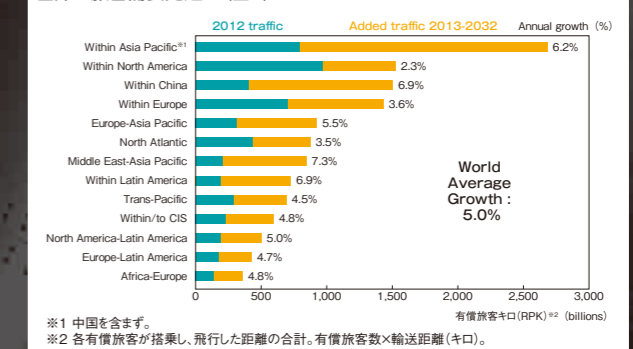
低コスト化

信頼性
向上

耐久性
向上

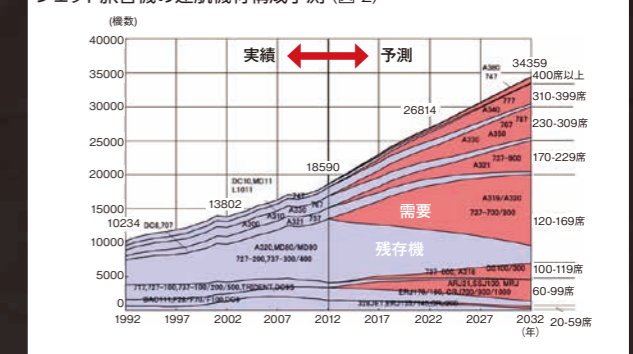
ような材料なのか、材料の特徴とNEDOプロジェクトの開発内容について、6ページ以降で紹介します。

世界の旅客需要見通し(図1)



出典：Boeing

ジェット旅客機の運航機材構成予測(図2)



出典：一般社団法人日本航空機開発協会 (JADC)
「民間航空機に関する市場予測2013-2032」

CMC入門

航空機新素材

陶器のように脆いイメージがある「セラミックス」ですが、軽くて、丈夫で、高温にも耐えられるCMCは、航空機エンジンにも使える新材料としての可能性を持ちます。そんなCMCの材料としての特徴や製法、技術的課題などを聞きました。

NEDOプロジェクトで開発中の CMC (Ceramic Matrix Composites)

材 料：SiC (炭化ケイ素) 繊維+SiCマトリクス (母材)
 強 度：室温引張強度200MPa
 耐 用 温 度：1400°C (1400°C×100時間水蒸気曝露後も良好な強度)
 特 徴：強度と靱性を両立。軽量かつ高温に耐えられる。

複雑な内部組織にすることで 強度と靱性の両方を高めたCMC

CMCは「セラミックス基複合材料」と呼ばれるように、セラミックス、つまり焼き固めた焼結体が基となります。同じセラミックスでも、新機能や特性を持たせた「ファインセラミックス」という材料もありますが、従来のファインセラミックスには、「靱性」が低いという弱点がありました。

靱性とは、材料の粘り強さのこと。材料に亀裂が発生しにくく、かつ伝播しにくい性質を指します。また、形を変えずにどのくらい力を支えられるかというのが強度ですが、本来、強度を高めると靱性は低くなり、逆に材料の靱性を高めると強度は低

くなるといった対立の関係があります。この課題を打破したのがCMCです。

「内部を複雑な組織にして亀裂が進まないようにする。これがCMCの基本的な考えです」と説明するのは、2015年度、2016年度にNEDO「次世代構造部材創製・加工技術開発」の技術推進委員長を務め、現在、プロジェクトの実施先の一つでもある東京工科大学CMCセンター長の香川豊氏です。

この発想は、古くは縄文式土器にも見られ、身近なところでは、コンクリートは砂利を混ぜ込むなどして靱性を上げているとのこと。「強度と靱性の両立」という課題に対し、CMCは、強化材としての繊維にマトリクス (母材) を含ませた構造をとります。これにより、セラミックス本来の強さを保ちながら、加えて靱性も高めることを目指してきました。

1400°Cの高温にも耐えられるため 航空機エンジンにも応用可能

今回のNEDOプロジェクトでは、CMCの原料として炭化ケイ素 (SiC) を繊維とマトリクスの両方に使っています。「炭素もケイ素も希少金属ではなく、かつ高温に強く軽い。利点の大き

い原料と言えます」(香川氏)。

燃料の燃焼で1000°C前後の温度まで上がる航空機エンジンには、これまでニッケル (Ni) を主原料とする合金 (Ni基合金) が使われてきました。一方、SiCを原料とするCMCは、研究開発によって約1400°Cの高温にも耐えることが分かっており、かつ、CMCの重量はNi基合金の約3分の1と、かなり軽量です。こうした特性から、次世代の航空機エンジンの材料として本格的に使われることへの期待が高まっています。

信頼性の高いCMC開発に向けて 各プロセスの技術向上を追求

CMCの製造法は、まずCMCに必要なSiC繊維を作ります。そして繊維をタービン翼やタービンを囲むシュラウドなどの形状に合わせて3次元に織り込みます。そうして作った織物に、マトリクス (母材) を含浸、さらに焼結させて、エンジン部材として完成させます。また、耐久性を高めるために、SiC繊維とマトリクスが固着しないよう界面にコーティングを行うことも重要です。こうしたプロセスの一つ一つをそれぞれのメーカーが担い、技術力を結集することで、初めてCMCができあがります。

すでに米国の航空機エンジンメーカーが、2012年から独自のCMC製造に向けて動き出しています。ただし、「CMCは1種類を指すものではない」と香川氏は強調します。「温度範囲、強度、靱性等の点で、さまざまな特性を持ったCMCが必要です。航空機エンジンについても多様な要求特性があり、NEDO

がCMCを研究開発していく意義がここにあります」。

また、軽量かつ高温に耐える特性から、航空機エンジンのみならず、発電用タービンや工業炉などのエネルギー機器、自動車の部品等、技術波及が幅広い点も重要なポイントとして挙げられます。香川氏は技術的課題として「長時間CMCの特性が保たれるようにすること」を挙げ、効率的な耐久性測定の方法の確立が必要と言います。「金属は、実用化された現場で経験等を経て強くなってきた長い歴史がありますが、CMCは実環境で使用された経験がない状態で、いきなり高温の過酷な場所での実用化を目指しています。それくらい、これまでにない革新的な材料であることが「空のゲームチェンジャー」と言われるゆえんです。その分、メンテナンス性も含めて、確かなものが求められます。これまでの延長線ではない日本独自の技術として、NEDOプロジェクトの成果で世界を驚かせたいですね」。

香川 豊氏
工学博士
東京工科大学
片柳研究所長/教授
CMCセンター長



航空機エンジンに

エンジン内でも高温なタービン静翼、シュラウド、燃焼器ライナ等、現在、Ni基合金が使われている部材においてCMC部材の採用を目指す。さらに高性能なCMCが実現すれば、エンジンのタービン動翼等での応用の可能性が高まる。

3 CMC部材開発

3次元プリフォーム化されたSiC織物の表面コーティング材を開発するほか、試作した部材の高温での曝露試験等を実施。また、高レート・低コスト化を実現するため、「燃焼器ライナ」をパネル交換可能な形状で開発。



1300°Cの環境で100時間経過したCMCサンプル。



CMCの特徴 (対Ni基合金)

- 重量が1/3
- 耐熱温度が20~30%アップ
- 強度が2倍

- ▶▶▶ 飛行機の燃費向上
- ▶▶▶ 環境負荷低減



東京工科大学「セラミックス複合材料センター (CMCセンター)」に展示されたさまざまな材料。繊維織物、成形された部材など。



SiC繊維から CMC部材 実用化まで

1 SiC繊維の開発

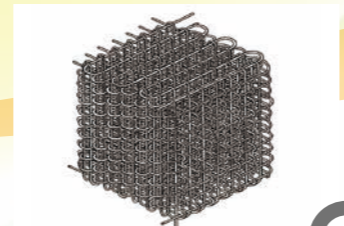
液体ポリマーを繊維状に加工し、高温で焼結させることで高強度繊維であるSiC (炭化ケイ素) 繊維となる。繊維の直径は10ミクロンと人の毛髪の10分の1程度。SiC繊維を作ることができるのは世界でも日本のメーカー2社のみ。



P.8

2 3次元プリフォーム開発

SiC繊維を織り込んで、タービン翼やシュラウドなどのエンジン部材の形状を3次元に作り出すプロセス。縦横方向だけでなく、厚み方向にも繊維が構成され、複雑な形状のプリフォームが製作可能。



P.9

CMCの実用化に向けて

次世代航空機エンジン用として本格的な実用化を目指している
NEDOプロジェクトのCMC開発。

製造工程ごとに、どのような技術開発を行っているのか、最先端の取り組みを紹介します。

1 [CMC] 繊維を作る

NEDOプロジェクト
宇部興産株式会社

**世界に誇る
唯一無二のSiC繊維**

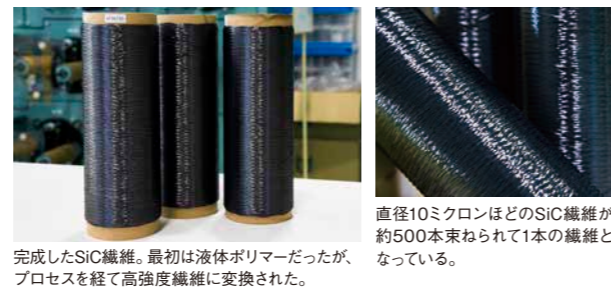
POINT

- > 強度と耐熱温度を向上
- > 安定供給のための生産技術確立

SiC繊維開発当初から目標としてきた 航空機分野参入が現実

軽くて耐熱性が高く、強度と共に靱性も兼ね備える。そのようなCMCを実現するには、まず強化材となる繊維を用意する必要があります。NEDOプロジェクトでその役割を担うのが、宇部興産(株)です。SiC(炭化ケイ素)を原料とする繊維を作れるのは、世界でも宇部興産を含め2社しかありません。同社は、繊維の強度向上を目指してNEDOプロジェクトでの研究開発を進めています。

1980年代から同社が開発してきたSiC繊維(チラノ繊維)の技術をベースに、さらに高性能化したものが本プロジェクト



完成したSiC繊維。最初は液体ポリマーだったが、プロセスを経て高強度繊維に変換された。
直径10ミクロンほどのSiC繊維が約500本束ねられて1本の繊維となっている。

のSiC繊維です。「SiC繊維の開発をスタートした当初から、高温で使える材料としての応用は考えていました。当時は航空機エンジンなど夢のような話でしたが、こうして世の中の要請があり、当社内でも技術力が蓄積されてきたことから、エンジンに使われる材料への道が開けました」と話すのは、同社でSiC繊維開発を担当する山岡裕幸氏。

同社の中安哲夫氏は「SiC繊維開発において当社が注力してきたのは、強度と生産性の向上です。本プロジェクトで航空機エンジンという具体的な目標ができたことで、さらに特性の高いSiC繊維の実現を目指しています」と話します。

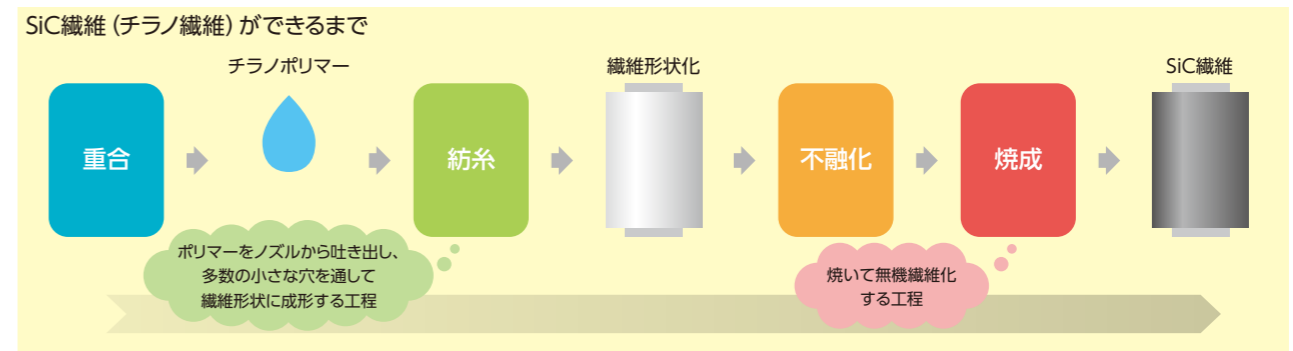
強度と耐熱温度をさらに高め 安定した量産体制を構築する

プロジェクトでの目標は、引張強度に優れたSiC繊維を実現すること。プロジェクトでは2016年度までに、引張試験で繊維の破断面を観察・分析し、欠陥が生じる要因を調べました。また、原料の熱分解、粒成長、焼結等の各過程を分析しました。2017年度は、引張強度2.0GPa以上、また、表面の粗さが2~3ナノメートル程度のSiC繊維を安定的に試作し、そのサンプルを同プロジェクトの実施者に供給しています。

また、生産性に優れた連続プロセスを実現するため、2018年度からは、連続高温炉等の試作設備を設計し、実際に試作

量産を行う計画です。NEDO材料・ナノテクノロジー部の片山隆主任は「航空機は安全性と信頼性が最も重要であることから、高い品質が求められます。安定した量産体制を構築することも、重要な項目の一つだと位置づけています」と話します。
「SiC繊維という材料については確かなアドバンテージが

あります。また、今回のNEDOプロジェクトは、各プロセスの事業者が情報共有しながら、全体で品質向上ができる良さがあります。最終的には、エンジンメーカーが使わざるをえなくなるほどの高品質な材料を作り上げたいと考えています」(山岡氏)。



2 [CMC] 繊維を織り込む

NEDOプロジェクト
シキボウ株式会社

**繊維をタービン翼などの
形状に3次元プリフォーム**

POINT

- > 織技術により高強度に貢献
- > 加工しやすいネットシェイプ成形

伝統的な織物の技術をベースに 複雑な成形が可能な3次元織を開発

精密に作られたSiC繊維を織り込んで、タービン翼やシュラウド等のエンジン部材の形状を3次元に作ります。この完成前段階の予備成形物を「3次元プリフォーム」といいます。NEDOプロジェクトにおいて、脆くて織りにくい高性能SiC繊維の3次元プリフォームの開発を担っているのが、シキボウ(株)です。

高温・高圧環境に耐えられるタービンをCMCで作るには、3次元のプリフォームを作る技術が極めて重要となります。CMC材料は加工が困難であるため、可能なかぎり事前に繊維を3次元に成形しておくことが望ましいからです。

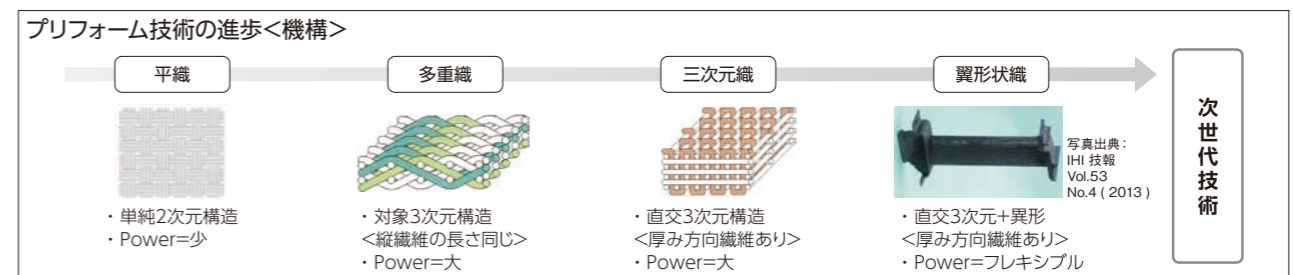
シキボウはこれまで、独自の織物製織技術を培ってきました。さらに同社はNEDOプロジェクトで、高性能SiC繊維のよう

な脆くて織りにくい繊維に対しても、より難度の高い、厚み方向にも繊維を構成した「3次元織」や、より複雑な形状の「翼形状織」によるプリフォームの実現を目指しています。縦方向や横方向だけでなく、厚み方向にも繊維が構成されることにより、タービン翼等の複雑な形をしたプリフォームが実現します。

プロジェクトでは2016年度に、プリフォームの製造を前提としたSiC繊維の特性の把握や、繊維のダメージを低減するためのコーティング方法の検討をしました。また、2017年度には、実際に3次元プリフォームを試作し、繊維体積の割合30%以上を実現しています。



3次元プリフォームにより、このような複雑な形状でも製作可能になる。



山岡 裕幸氏
宇部興産株式会社
化学カンパニー
ポリイミド・機能品事業部
無機材料開発部
無機繊維開発グループ
グループリーダー

片山 隆
NEDO
材料・ナノテクノロジー部
主任

中安 哲夫氏
宇部興産株式会社
化学カンパニー
ポリイミド・機能品事業部
チラノ繊維グループリーダー

特集 1 空のゲームチェンジャー CMC (セラミックス基複合材料)

3 [CMC] 部材を作る

NEDO
プロジェクト

株式会社 IHI

CMCの機能を最大限生かした
高圧タービン部材

POINT

- > 1400℃使用を想定した材料開発
- > 試作材料にて性能を評価

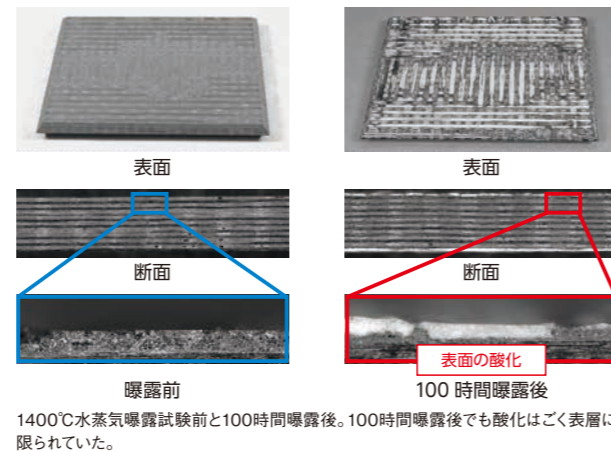
過酷な環境でも長期間安全に使うため
マトリクスやコーティングを開発

最終的にエンジン部材という完成形に仕上げるプロセスでは、プリフォームにマトリクス(母材)を含ませます。NEDOプロジェクトで、この工程を担う1社が(株)IHIです。

IHIは1400℃で使用できる高圧タービンへの適用に向けたCMC材料・部材の開発を目指しています。そこに適用可能なCMCのマトリクスは、耐高熱性だけでなく、繊維や界面層と化学的に安定で、繊維や界面の酸化を防ぐシール性が必要となります。そこでIHIは、開発したマトリクスでCMC材料を試作し、1400℃加圧水蒸気雰囲気における曝露試験に成功しました。右画像では、曝露試験で表面が酸化され白く変色していますが、断面を見ると、酸化はごく表層に限られていることがわかります。

また、CMCが水蒸気と反応して減肉しないよう、CMC表面

をコーティングする必要があります。このコーティングの技術は、試験装置を備えている同プロジェクトの参画機関である宇宙航空研究開発機構(JAXA)等と協力しながら、評価試験を行うなどして改良を進めています。



1400℃水蒸気曝露試験前と100時間曝露後。100時間曝露後も酸化はごく表層に限られていた。

NEDO
プロジェクト

川崎重工業株式会社

耐熱性向上で環境負荷低減
利便性を発揮する燃焼器ライナ

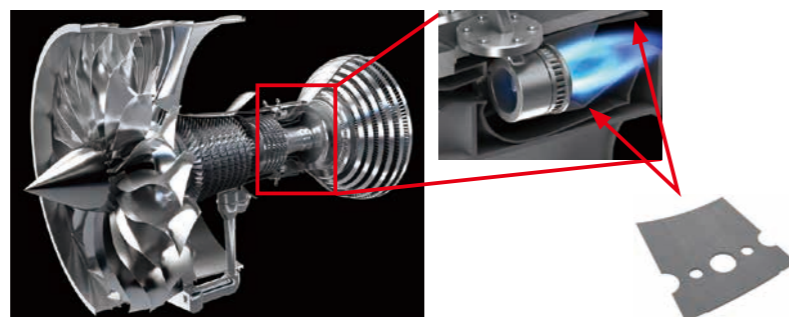
POINT

- > 金属製より200℃高い耐熱性を実現
- > 交換可能パネルを採用

燃料を燃焼させる燃焼器ライナで
金属より高い耐熱性と利便性を発揮

今回のNEDOプロジェクトでは、川崎重工業(株)も航空機エンジン部材の開発を担当しています。特に、燃料を圧縮空気とともに燃焼させる「燃焼器ライナ」とよばれるエンジン部材について、交換可能なパネルにするための技術の確立を目指しています。

従来の燃焼器ライナには金属のNi基合金が使われていますが、燃焼用空気のほかに冷却用空気を多く必要とし、結果的に窒素酸化物(NOx)を多く排出しています。一方、CMCで燃焼器ライナを作ると、耐熱性が金属製より200℃高い約1200℃まで向上するため、冷却用空気の量を減らすことができ、それにより



燃焼器の内側にあたるライナは超高温環境にあり、CMCの耐熱性が生かせる。

NOxの排出量を減らし、高効率のエンジンシステムを実現することができます。

また、この燃焼器ライナを交換可能なパネルにすることで、生産や検査の効率を高めたり、使用時に補修が困難なパネルのみを交換することにつながるため、製造面と利用面の両方で利便性が高まります。

その他、NEDO プロジェクトにおける
航空機構造部材の設計、加工、検査に関わる技術開発

多くの技術が組み合わさってできあがる航空機では、構成する材料がより高性能なものになるのに合わせて、特性を踏まえた設計、加工、検査が必要になります。常に空の安全を最優先とした上で、NEDOは航空機に最適な材料開発のみならず、さまざまな課題解決に向けた技術開発も行っています。

設計 航空機の設計時に、より多角的な性能評価を可能に

【東北大学】

航空機の設計を行う際には、空気力学やエンジンの推進力学、各種材料を使った機体の構造力学等、さまざまな分野の解析が必要となり、トレードオフの関係にあるそれらの分野をどう最適化するかが、航空機設計プロセスにおいて重要になります。そこで、より高性能な航空機設計を目指し、各種データを用いてシミュレーション技術や解析ツールを開発し、最適な設計技術の確立を目指します。

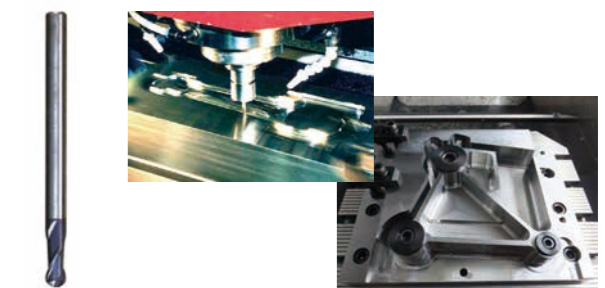


航空機設計においては、複合最適化(連成問題の最適化)を目指して、各分野の妥協が必要。

加工 難削材切削加工技術の高速化で加工効率向上へ

【東京大学】

航空機の軽量化のため、機体の構造部分に高強度かつ軽量な先進材料が導入されています。加工の難しい先進材料でも複雑な形状の高速切削加工が求められる中、部品の加工段差であるミスマッチや、びびりと呼ばれる工具と被削物の間で継続的に発生する振動により生じる精度不良の解消等を目指し、加工時間・エネルギー・環境負荷・コストの総合的な低減と加工の高効率化を実現し、航空機の効率良い製造への貢献を目指します。

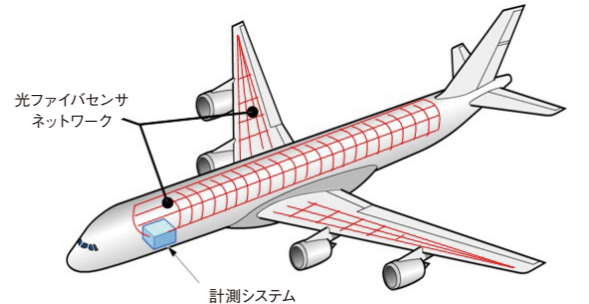


単なる高速切削ではない、回転工具を使った高回転切削法を実現。小径エンドミルによる低切り込み高送りによる切削を可能に。

検査 構造健全性診断 SHM システムの実用化へ

【RIMCOF 技術研究組合】

航空機の安全で効率的な運航を行う上で、点検期間の短縮と点検コストの低減が課題となっています。そのため、より精度・信頼性を向上させた航空機の構造健全性診断技術を目指して、光ファイバを用いたSHM(Structural Health Monitoring)システムを開発し、認証に必要なデータを取得して、実用化することを目指します。具体的には、広域分布歪み計測システム、複合材構造衝撃損傷検知システム、超音波ラム波による損傷検知システムの3種類を用いたSHM技術です。



SHMシステムの一例。