SIP-SM⁴I MAGAZINE

エスアイピー エスエムフォーアイ マガジン

SIPプログラムとは、内閣府主導の下、府省・分野横断的な取り組みであり、産官学連携により出口まで見据えた一気通貫で研究開発を推進しています

Vol.6

Feature 1

航空機材料最前線――この人に聞く

株式会社IHI 航空・宇宙・防衛事業領域 技術開発センター 副所長 今成 邦之

量産とコスト―生産技術が重要

Feature 2

革新的プロセスを用いた耐熱材料創製技術

SIP 戦略的イノベーション創造プログラム
Cross-ministerial Strategic Innovation Promotion Program

Topics

アメリカで開催された「先進セラミックス基複合材料会議報告」

11月上旬にアメリカのサンタフェ市で５日間にわたって開催された先進セラミックス基複合材料（Advanced Ceramic Matrix Composites）会議に参加した。この会議のチェアは香川豊東京工科大学教授（前SIP革新的構造材料サブPD）、セクレタリーはJAXAの後藤健氏（C42ユニットリーダー）が務めた。

この会議の主題は、昨年７月に航空機エンジンの市販高温部品としては初飛行に成功して、文字通りホットなセラミックス基複合材料（CMC）である。金属材料に代わり、より高温に耐える軽量CMCが航空機の燃費とCO_2排出量の削減等に大きく寄与すると期待される材料になったと言える。

参加者は110名。アメリカ（61名）は研究所と大学、そして航空エンジンメーカー、日本（34名）は三重工（三菱、IHI、川崎）、JAXA、東大、JST、JFCC等、ドイツはDLR、フラウンフォーファ等のCMCに関心を持つ研究者が集まった。他にはフランス・イギリス・イタリアからが数名であった。

48件の招待講演があったが、産業界・政府関連の製品紹介を含めたCMC開発と実用に至る研究成果に係わるオーバービューのような発表が多かった。基礎的な研究発表は少なかったものの、新材料への意気込みと熱気が感じられた。CMC材料・部材の世界的な技術水準とトレンドを知る上で、これ以上はない会議であった。（C領域連携コディネータ水野峰男）

カンファレンス・チェア香川教授の挨拶

MI専門の双方向サイト「STAM MI-Forum」を開設しました！

"STAM MI-Forum"（https://e-materials.net/stam/mi-forum/）は、NIMSを中核に刊行しているScience and Technology of Advanced Materials（STAM）誌が提供するマテリアルズ・インフォマティクスやマテリアルズ・インテグレーションに取り組む研究者のための双方向発信サイトとして、2017年11月22日にオープンしました。STAM 誌では本年（2017年）よりCommunicationsというMI専門のカテゴリを創設致しましたが、本フォーラムはこれと連動してSTAM誌に掲載された論文の紹介をはじめ、STAM誌以外からも幅広く初学者向けの必読情報から専門家向けの最新論文情報まで提供してまいります。また「双方向発信」ならではの取り組みとして、編集者からの一方的な情報提供に留まらず、論文著者によるフォローアップや、読者からも質問や議論の場としてもご利用頂けます。MIという新しい技術の発展と、それを利用した材料研究加速化の一助として、STAM MI-Forumをどんどんご活用ください。

文責：STAM MI-Forum Coordinator、伊藤海太、国立研究開発法人物質・材料研究機構

『革新的構造材料2017成果報告会』

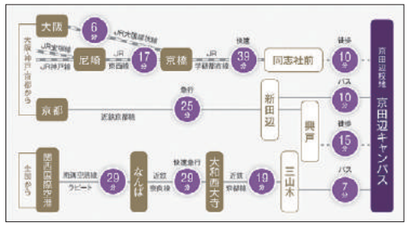
2017年11月28日（火）イイノホール（東京・霞ヶ関）にて、『革新的構造材料2017成果報告会』を開催、約430名にご参加いただきました。午前のセッションでは、D領域「マテリアルズインテグレーション」とA領域「航空機用樹脂の開発とCFRPの開発」、午後のセッションでは、B領域「耐熱合金・金属間化合物の開発」とC領域「セラミックス基複合材料の開発」が発表を行いました。４年目を迎えた研究成果発表会では、本プロジェクトの研究成果を社会実装につなげるための様々な取り組みを各領域の研究者が発表、その後各拠点長が研究成果と今後の展望をまとめました。質疑応答では、会場から多くの質問、ご意見をいただき、熱い議論を進めました。また、オーラルセッションと並行して、カンファレンスセンターのルームＡではポスターセッションも開催。全34ユニットによるポスターでの発表が行われました。オーラルでは紹介しきれなかった詳細な研究成果に、多くの参加者が研究者達と熱心に意見交換を行っていました。

第９回　日本複合材料会議（JCCM-9）

JCCM-9が平成30年２月28日（水）～３月２日（金）に同志社大学京田辺キャンパス（京田辺市多々羅都谷1-3）にて開催されます。

JCCMとは『日本を代表する複合材料に関する会議』の設立を目的に、材料・構造の複合化と機能化に関するシンポジウム「JCOM」を発展、継承させる形で発足したものです。平成22年３月の京都での開催を第１回とし、今回はその第９回目の開催にあたります。母体となる日本材料学会、日本複合材料学会（JSCM）のシンポジウムとしては、JCOM-47、JSCM-2018にあたる歴史あるシンポジウムです。SIPからはＡ領域の武田領域長をはじめ、SIP研究者が多数発表する予定です。

■会議名：第９回日本複合材料会議
■主催：日本複合材料学会、日本材料学会
■会期：平成30年２月28日（水）～３月２日（金）
■会場：同志社大学 京田辺キャンパス　恵道館
■詳細：http://compo.jsms.jp/conference/jccm9/



SIP-SM⁴I MAGAZINE vol.6 通巻６号 2018年１月発行

■発　　行　国立研究開発法人科学技術振興機構 イノベーション拠点推進部SIPグループ
〒102-0076 東京都千代田区五番町７ K's五番町
http://www.jst.go.jp/sip/k03.html
■事 務 局　SIPグループ「革新的構造材料」SIP-SM⁴I MAGAZINE編集部

定期購読のお申し込みおよび停止は、E-mail（sip_structuralmaterial@jst.go.jp）にて承っております。
禁無断転載

国立研究開発法人 科学技術振興機構
Japan Science and Technology Agency

Feature 1

航空機材料最前線――
この人に聞く

株式会社IHI 航空・宇宙・防衛事業領域 技術開発センター 副所長
今成 邦之

今、民間の航空機のマーケットは、年率およそ５％で成長し、この傾向は今後も続くと予想されています。民間企業で長年、航空エンジンの研究開発に携わってきたＣ領域の今成邦之（株式会社IHI）領域長は、航空エンジンのマーケットは技術力がシェアに直結する分野で、世界でトップの技術を持てれば参入できると話します。今成領域長に、事業化という出口を見据えた研究開発の取り組み方について伺いました。

量産とコスト―生産技術が重要

出口に辿り着くには、お客様目線で高い価値の提供が不可欠

技術力がシェアに直結する航空エンジンマーケット

民間の航空機の市場は、今後20年ぐらいは年率５％ぐらいずつ成長しています。20年後には、市場は倍ぐらいになるという勘定です。

航空エンジンという製品の特徴は、自動車で言う所のフルモデルチェンジがあまりないことです。一度飛び始めると、最低でも20年はそのモデルのままで使われます。もちろん、マイナーなモデルチェンジはあります。だから、量産のマーケットに一度入れれば、メーカーは20年以上の長きに渡って仕事を得られます。しかし、参入できなければ、長期間仕事が得られません。事業リスクの大きい製品なのです。

もう一つ特徴を言うと、航空エンジンの市場は、技術力が大きなバーゲニングパワーになります。ボーイング777という大型ジェット機に乗ったことはあるでしょうか。この飛行機には胴の長い「-300」というタイプがあって、そのほとんどに米国GE社のエンジン「GE90」が採用されています。

この開発には弊社も参画しましたが、GE社はファン動翼に世界で初めて炭素繊維複合材料を適用し、世界最大推力の民間用エンジンを製品化しました。複合材のファン動翼は世界で初めてでしたから当初は「安全性は大丈夫なのか」と懸念の声がありましたが、実際に飛び始めると、このエンジンはとても長い距離を安全に多くの乗客を運べると評価されて、他のエンジンメーカーを圧倒する高いシェアを持つようになりました。航空エンジンのマーケットは、技術が持つお客様視点での価値の差がシェアに直接現れるのです。

どんなに素晴らしいアイデアでも少ししか作れないと社会への貢献は限定的

誰が世界で一番あるいは二番でお客様の価値を向上する良いものを安く作れるか。この競争を制して一番、二番に入れれば、航空エンジンのマーケットに参入できるチャンスを得られます。

この航空エンジンの開発で、日本には強みを発揮できる分野があります。材料の分野です。特に複合材料は強いと言って良いでしょう。

今、SIPで取り組む航空機の革新的構造材料の研究開発は、この日本の強みを生かそうとしている点で、方向性はとても良いと思います。Ａ領域で取り組んでいる炭素繊維の複合材料やＣ領域で取り組んでいるセラミックス基の複合材料も、付加価値の高いものを作り出せる可能性が高いと思います。

産学連携で新しい技術を開発するとき、基礎的なところは「学」が重要な役割を担います。「産」は、投資効果のはっきりしない基礎研究には中々手を出しにくいので、「学」の力を頼りにしているのです。なお、「学」とは大学だけでなく、公立の研究所も含むものと考えていただきたいと思います。

ただ、「学」の方たちの多くは、量産のことまではあまり考えてくれません。どちらかと言うと、原理的に新しいアイデアの研究開発に力が入ります。しかし、どんなに素晴らしいアイデアでも、少量生産しかできないならば、社会への貢献は限定されます。私が領域長を務めるＣ領域では、このことを常に言っています。

「学」が新しいアイデアを作り出し、「産」がそれを産業化に結びつける。この形が大事だと思います。良いアイデアがそのままでは産業化できそうにない時は、何か違う方法で同じことをできないかと企業が「学」に問いかけ、「学」と「産」の双方で知恵を出し合って産業化できる方法を模索していく。このやり方がＣ領域ではできるようになってきたと思っています。

技術を作り出す者と技術の価値を評価できる者

技術の産業化において一番大切なのは、ユーザーの立場に立つことです。航空機のエンジンであれば、エアラインの立場を理解しようと努め、どんな技術なら価値として認められるのかと考えていく。

完全な理解は難しいですが、少なくとも私の知っているエアラインの方たちは日々の運行を第一に考えています。毎日、定刻通りに運航しようと、最大限の努力を日々払っています。機体やエンジントラブルは絶対にあってはなりません。だから、航空機には高い信頼性が求められます。

その上で、使い始めてから使い終わるまでの数十年に及ぶライフサイクルコストを少しでも低く抑えようと日々考えています。エンジンに対しては、燃費が良いものや、数十年続くメンテナンスの費用を低く抑えられるものを求めています。

エンジンを作るにはさまざまな技術が必要で、その一つ一つの技術の価値はエンジンのライフサイクルコストの視点から評価できます。

新しい技術を開発するときは、技術の価値をきちんと評価できる者と、技術を作り出す者が一つのチームを組み、ユーザーが求める価値をしっかり高めるようにしていくことが大事と思います。これが研究開発を出口に近づけると考えています。

事業化の最後の関門は製造コストをどう下げるか

研究開発の出口とは、つまり事業化ということです。どうすれば、この事業化に到達できるのか。まずは製造コストです。これをどれだけ下げられるか。

新技術は、それまでの技術に比べて、お客様が一目見て認識できる高い価値あるいは費用対効果を提供できなければなりません。そうでなければ、お客様に選ばれないのです。良い材料を作ることがまず重要なのですが、それを大量に安く作る工夫も不可欠なのです。

ただ、難しいのは、この生産技術は企業のノウハウに関わるということです。特に製造コストに関わるところはメーカーの根幹に関わり、クローズにせざるを得ない。SIPは産と学がうまくコミュニケーションする仕掛けとしてとても良いものと思います。ただ、出口に近づくにつれて製造コストダウンが大きな課題となり、クローズの領域に入ってくるため、多数の組織が参加するオープンな連携はやりにくくなります。

では、企業だけが頑張ればいいのか、あるいは限られたメンバーが参加するクローズの形態で産学連携を支援する仕組みにしていくのか。ここは一工夫が必要です。一方で、新材料をお客様に安心して使っていただくためには、客観的な評価方法に基づいた試験結果とエンジン試験による実証が不可欠です。試験や検査と言った評価技術分野で国内外を含めたオープンな産学連携を促進し、日本中心の国際標準化を進めるという方向性もあるかもしれません。

Profile
1987年株式会社IHI入社（当時は石川島播磨重工業株式会社）。入社後、空力設計、圧縮機要素開発、エンジン開発を経験。エンジン概念設計を通してセラミックス基複合材の高い価値を認識し、その技術開発を主導。2011年エンジン技術部部長。2016年より現職。

Feature 2

セラミックス基複合材料の開発

C領域 JFCC拠点（一般財団法人ファインセラミックセンター）

革新的プロセスを用いた耐熱材料創製技術

領域長
髙田 雅介
1971年東京大学工学部卒業。2012年一般財団法人ファインセラミックスセンターに入所し、専務理事・研究所所長。現在に至る。

Theme Ⅰ

航空機エンジンの動向とJFCC拠点の目論み

航空機用エンジンの内部は、高温の燃焼ガスにさらされます。そこに使用される材料には、安全飛行を可能とするため急激な加熱・冷却、長時間の高温状態に耐え、衝撃と振動に強いという特性が必須となります。それ故、高温強度があり即時破壊がおこりにくい金属材料、特にニッケルを含む耐熱超合金材料が使用されています。しかし、これらの金属材料でも1100℃以上の高温になると軟化して強度が低下します。より高温で使用するため、内部から空気で冷却が可能な部材構造（精密鋳造合金）としたり、金属結晶を一方向に成長させる一方向凝固合金、単結晶合金が開発されてきました。

一方、COP21に象徴されるように、地球温暖化対処策として二酸化炭素（CO_2）の削減は緊急の課題です。2015年の世界のの商用航空分野のCO_2排出量は10億トン／年です。

航空分野のCO_2排出量を削減させる有力な対処法が２つあります。エンジンの軽量化とタービン入口ガス温度の上昇です。Ni基超合金は比重が約９と重い材料です。使用限界温度は現状で1150℃、今後更に改良が進んでも1200℃と考えられています。また使用にあたっては高圧空気での冷却が必要となり燃費が低下します。金属材料の限界がみえてきました。

世界の航空機エンジン市場は、３大メーカー（GE、スミス＆ホィットニー、ロールスロイス）でほぼ寡占状態ですが、彼らは年度毎の改善目標（約束）を定めています。航空機の燃費、騒音等に関する目標はかなり厳しく、達成するため最先端の技術開発力が必要です。金属材料の改善では限界に近づいてきたため、近年セラミックス基複合材料（CMC）が注目されています。そのトップランナーはGEです。

GEは1985年から、航空エンジン用セラミックスの研究を開始しています。それから実に31年後の2016年７月、CMCを使用した市販リープエンジンを載せた航空機が世界初飛行に成功しました。SiC繊維強化SiCが第１段HPT（高圧タービン）シュラウド部材に使用されました。現在１万台以上のリープエンジンの予約をかかえ、搭載予定機種は、Airbus A320neo、Boeing 737MAX、COMAC C919が予定されています。

CMCは比重が３程度と金属材料の1/3程度と大幅に軽量です。タービン入口ガス温度は200℃高い1400℃程度とすることが可能です（図１）。軽量になるとエンジンの設計自体が変わります。金属製エンジンシャフトを細く（軽く）することも可能となり、エンジン重量を大幅に軽量化できます。

更に、CMCの採用により、ホットセクション部材の耐熱性が向上し、冷却に使用する圧縮空気量が削減できます。このため、Ni基超合金使用に対して、エンジンの燃費は～７％向上します。エンジン効率が１％向上すると年間・１基あたり3,000万円の燃料代の削減になり、CO_2削減効果は2,200万トン／年（2030年）ジェット燃料換算：880万klになるとの試算があります。

JFCC拠点ではまさに、航空エンジンのホットセクション部の高圧タービンをターゲットに、軽量なCMC部材を開発しています。タービン入口ガス温度1400℃を実現するためには、CMC部材表面に新規の耐環境性コーティング（EBC：Environmental Barrier Coating）を開発すると共に、基材中のSiC繊維表面に酸化物皮膜をコーティングする技術を開発する必要があります。

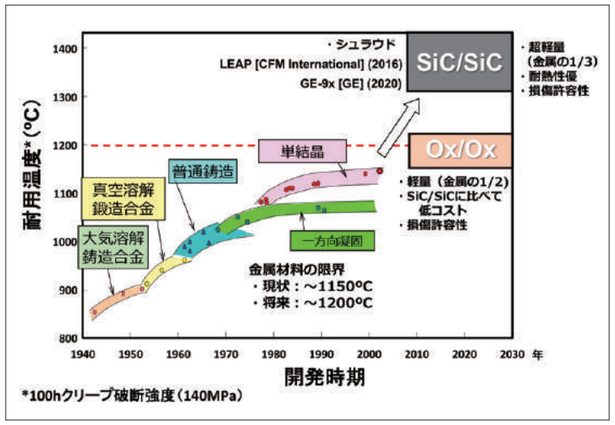


図１ ホットセクション部材の技術変遷と将来動向

ダブル電子ビーム物理的蒸着積層（EBPVD）装置

Theme Ⅱ

高温と脆さへの挑戦 ―耐熱使用温度1400℃を目指したEBC形成―

現状を打ち破るため、本研究で対象とするCMCは、SiC繊維（SiCf）強化SiCマトリックス複合材料（SiCf/SiCm）基板の表面を新開発したEBCで保護した材料／部材（国際特許出願済）です。

我が国が開発し製造技術を持つSiCfの耐用温度は、約1400℃と世界最高性能を誇ります。この繊維を用いたSiCf/SiCm基板は耐熱性に優れ、超合金よりはるかに軽量です。

しかし、SiCf/SiCmは1100℃以上の水蒸気環境下では酸化・減肉による部材の劣化が問題となります。燃焼ガス中には高温の水蒸気を含むため、高圧タービン部材に適用するためには、部材の表面を守り、部材の長期使用を可能にするEBCが不可欠です。

現在、実用化段階にあるEBCの耐用温度は、1300℃と想定されます。SiCfの耐用温度1400℃までCMCを使用するためには、EBCの耐用温度を1400℃以上に上げることが必要です。そのような材料／部材はより高温の過酷環境下において使用でき、現行のGEのCMC材料を越えるこ

とができます。

JFCC拠点には、IHI、東北大学、横浜国立大学、東京工業大学、東京大学、徳島大学、物質・材料研究機構（NIMS）、宇宙航空研究開発機構（JAXA）、超高温材料研究センター（JUTEM）が集まり、一体となり研究を推進しています。10機関が団結し、SiCf/SiCmの高温耐久性を飛躍的に向上させるために、繊維耐用温度1400℃で利用できる世界最高性能のEBCの開発を目指しています。

EBCには、高温の水蒸気に対して耐減肉性に優れることを含めて、酸素や水蒸気に対する環境遮蔽性や、熱機械的耐久性に優れることが要求されます。そこで、本研究開発では、SiCf/SiCm基板上に結合層を介して、酸素遮蔽層、水蒸気遮蔽層、水蒸気による減肉防止層、熱衝撃緩和層からなる多相積層構造を開発しました。これによりSiCf/SiC基材を保護する1400℃の高温高圧燃焼ガス雰囲気においても優れたパフォーマンスを発現するSiCf/SiC部材開発を目指します（図２）。

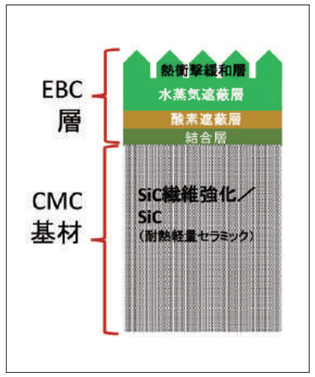


図２ 開発を目指す耐環境・耐熱・軽量CMC材料の模式図

このEBC多相積層構造を部材表面にコーティングする方法として、２つの電子銃を装備した電子ビーム物理的蒸着積層（EBPVD）装置を設計しました。これにより、一連の緻密層の形成と熱衝撃に強い縦割れ構造をもつ層の形成のみならず、二元系化学組成を制御することにより、化学組成の連続的傾斜層を形成させることが可能となりました（図３）。

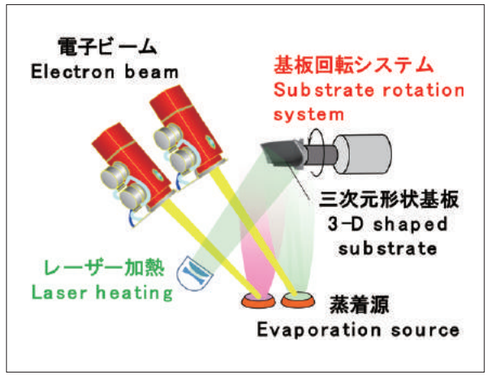


図３ EBPVD装置の原理

更に、SiC繊維への新規コーティング材料とコーティング技術を開発しています。セラミックス基材が即時破壊をしないためには、SiC繊維がマトリックスから繊維の破断なしで引き抜ける必要があります。引き抜けることにより、発生した亀裂の進展が押さえられ、靭性に似た特性が発現します。このためには繊維表面に窒化ホウ素かカーボンでコーティングすることが一般的でした。本研究では高温耐熱性に優れた酸化物によるコーティング技術を開発しています（図４）。

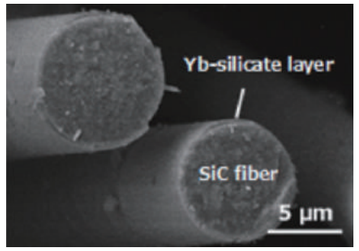


図４ SiC繊維表面への酸化物コーティング

Theme III

業界水準を見据えた拠点構想

JFCCは、SIPプロジェクトが終了する2019年３月の後、我が国におけるCMCの性能向上に貢献する“コーティングセンター”として、航空機エンジンメーカーや一般産業用部品メーカーを積極的に支援したいと考えています。CMC研究開発拠点として本分野の研究開発を牽引するとともに、情報の集約・発信基地となりCMC用コーティングの試作・評価・解析等の機能を担うことを目指しています。

1．技術レベル
　～TRL3：技術的な概念モデルが定量的に検討
2．対象
　EBC、界面制御コーティング　等
3．項目
　材料設計（MI連携成果）
　微構造解析（使用時劣化機構）、
　各種特性評価
　コーティング試作
　コーティング原料試作……等
4．コーティングプロセス
　企業が容易に試すことが困難なコーティング装置・技術の拡充.
　　例）・対象系において最高のパフォーマンスを発現
　　・電子ビームPVD、レーザーCVD、
　　・レーザー静電噴霧、AD、
　　・コーティング原料（噴霧熱分解、粉体解砕）等

JFCCはCMC／コーティングセンターとして日本の未来に貢献する所存です。

Interview 最先端の現場から

一般財団法人ファインセラミックスセンター
材料技術研究所 主幹研究員

北岡 諭

膜の中で移動する物質の動きを理解し新しい方法で膜構造を設計する

C領域は航空機用エンジンの中の高温の燃焼ガスにさらされるホットセクションと呼ばれる領域の部材開発を担当しています。

中でも、SiC繊維強化SiC複合材料（SiC/SiC）等の繊維強化材料は超軽量で耐熱性に優れることから、現用の耐熱合金を凌駕する素材として注目されています。昨年、世界で初めてSiC/SiCが民間航空機用エンジンのホットセクション部品の一部に搭載され始め、今後もさらに多くの部位への適用が計画されています。しかしながら、SiC/SiCを約1100℃以上の水蒸気を含む燃焼環境下に曝すと、酸化により生成したシリカ膜が蒸発するため、部材の著しい減肉が進行します。そのため、SiC/SiCを上記部品に適用するためには、耐環境性コーティング（EBC：Environmental Barrier Coating）が不可欠となります。つまり、EBC性能の向上がSiC/SiCの耐久性向上や適用範囲の拡大、ひいては、エンジン燃費の向上に直結するわけです。

私が担当しているのはEBCの構造設計です。EBCには燃焼ガス中の水蒸気や酸素を遮蔽する機能を有するのはもちろんのこと、エンジンの起動・停止に伴う熱衝撃・熱サイクルに対して優れた耐性を有する必要があります。このような複数の機能を単相のEBCだけで発現させるのは困難です。そのため、EBCを多相積層構造にして各層ごとに機能を分担させてEBC全体として優れたパフォーマンスを発現させます。

従来、この構造設計は各相や異相界面における熱的・化学的安定性、熱膨張係数差に注目して行われてきました。しかしながら、さらなる高温環境下でのEBCの環境遮蔽性や構造安定性を長期間持続させるためには、EBC中の物質移動を定量的に把握し、移動機構を理解した上で、その動きを効果的に制御することが極めて重要になります。

ところが、EBC中の物質移動に関する情報、特に、使用時を想定した高温の酸素濃度勾配下でのデータはほとんどありませんでした。そのため、EBCの環境遮蔽能が“素材”と“微細組織（プロセス因子）”に強く依存するにも関わらず、そもそも素材固有の環境遮蔽能や素材中の物質移動機構が不明であるため、丈夫なEBCにするためには“試行錯誤”的にならざるを得ませんでした。

そこで私たちは、独自の手法でEBC中の物質移動機構の解明に取り組んでいます。例えば、EBC構成層のモデルとなる薄い単相膜を用いて、そこに酸素濃度の勾配をかけて膜を介した極微量の酸素透過量を厳密に測るとともに、酸素透過中の物質移動によって起きる膜構造の変化について調べました。これまでに、EBC構成層を任意の温度・酸素濃度勾配下に曝した際の層中の物質移動量を予測可能にするとともに、物質移動機構を明らかにしました。そして、得られた情報をもとにEBCの積層構造を長期間持続可能にする結合層素材を選定したり、EBCの層構成を決定しました。

実際に、ダブル電子ビーム法を用いて、この設計指針に従いEBCを形成しました。得られたEBCに対して、実機使用を模擬したバーナー加熱による熱サイクル試験を実施した結果、優れた耐熱サイクル性を有することがわかりました。

このように、私どもが提案している環境遮蔽設計手法はEBCの研究開発に大いに有効であると考えております。今後は、この環境遮蔽設計と熱機械的設計を融合した新たな先進設計指針の下、コーティングプロセスの最適化を図ります。そして、SIP終了までに、一層の過酷環境下での熱サイクル試験や高温加湿環境下曝露試験を実施し、EBC性能の目標達成を目指します。

最後に、EBCの環境遮蔽設計で得られた物質移動に関するデータ群は世界的にも報告がなく、SIP独自の極めて貴重な実験データベースになりうると思っています。今後、MIにおけるEBC損傷予測シミュレーション等に活用して頂くことを大いに期待しています。

Profile
一般財団法人ファインセラミックスセンターに入所後、セラミックスやコーティング材料の腐食／防食技術、表面改質技術、固体内の拡散、過熱水蒸気利用技術等の研究に従事。

東京工科大学 片柳研究所長 教授
香川 豊

近年、航空機エンジン部品の材料として注目を集めているセラミックス複合材料(以下CMC)の中でSiC繊維-SiCマトリックス複合材料(以下SiC/SiC)が注目を集めています。2016年にはSiC/SiCをエンジン部品に採用した民間航空機が運航を開始し、今後ますますその存在感は増してくると予想されます。C領域で「高速基材製造プロセス技術の開発」に取り組むC46ユニット代表の東京工科大学片柳研究所所長の香川豊教授をお訪ねし、CMCを取り巻く状況とC46の研究内容についてお聞きしました。

CMC実装後の競争を見据えて

高速・低コスト製造プロセスのコア技術へ挑む

社会的要請と20年に及ぶ研究が、CMCを表舞台に押し上げた

CMCはSiC/SiCや炭素繊維/SiCに代表される非酸化物系とAl_2O_3をマトリックス材料のベースとした酸化物系複合材料に分類されます。この中で、SiC/SiCが航空機エンジン部品の材料として注目を集めているのには、いくつかの理由が考えられます。ひとつは省エネルギーや環境性に配慮した航空機エンジンへの社会的要請です。航空機の燃費の向上にはエンジンの冷却空気の削減や軽量化は有効な手段であり、耐熱合金よりも軽くて耐熱性も高いCMCが材料として役に立つのではないかと長い間注目されてきました。それに加えて、数年前にGE社が「CMCを民間航空機用エンジン部品に採用する」と宣言して、実際にCMCを使ったエンジンを作り始め、2016年に実機搭載されました。世界で一番強い航空機エンジンメーカーが、「CMCで社会的課題を解決していく」という姿勢を本気で打ち出したことの影響も非常に大きかったと思います。

CMCはオールセラミックスですがガラスや瀬戸物のように割れることはなく、材料中に小さな亀裂を蓄えることができます。この点が材料としてユニークな特性を持つものです。このような新しい性質の材料では安全性を保証することが大きな課題でした。最近では、耐久性の検証と実用化のための周辺技術の進展し、CMCを安全に使いこなせることができるようになってきました。CMCという複合材料の原型は約20年ほど前には完成していたと思いますが、実際に航空機エンジンに使うとなると、強度や耐熱性を調べるだけでなく、クリープや疲労など耐久性に関するさまざまな性能を十分に調べ上げないといけません。この期間が随分長くて、新しい性質を持つCMCのそれがようやくわかってきて「これは安全に使える」という状況になってきました。加えて、工業的製造技術やコーティングといったCMCを使うための周辺技術の開発も進んできました。つまり、一時は実用化への機運がなくなったように考えられていましたが、GEをはじめとする何社かの企業の中ではCMC実用化への地道な研究が続いていたということです。見えないところで熟成されてきた技術とそれが役に立ちそうな社会的要請がピタッと整合して、現在のCMCへの期待があるということでしょう。

高速・低コストは、実用化後の競争を勝ち抜くためのテーマ

CMCの中で有望なSiC/SiCの工業的製法を大別すると、PIP※1法、CVI※2法、MI※3法の３種があり、工業的なCMC製造法ではこれらを適材適所に組み合わせる手法が一般的です。その中のMI法を利用して、高速・低コスト製造プロセスのためのコア技術を開発することがC46ユニットのテーマです。航空機エンジンへのSiC/SiC部品の実装が順調に進めば、次の段階ではコストや納期の競争になってきます。今の段階で、汎用SiC繊維をうまく使いこなす低コスト技術のコア部分を研究しておけば、将来の国内産業にとって役に立つはずです。そんな実用化後を見据えた視点で、「原理原則はわかっているが工業製品を作るための技術には達していない」研究要素に取り組んでいます。

狙いをMI法に絞った理由はその高速性。PIP法とCVI法はポリマーやガスの浸透と焼成を何度も繰り返す必要があり、製造にかなり時間がかかります。一方、MI法は溶融Siを部材の形にしたSiC繊維の成型体に含浸させるイメージで速く作ることができますが、製造時に発熱を伴う反応が生じるために技術的に難しい点が多いことが欠点です。SiとCの反応は短時間の発熱反応なため、やみくもに溶融Siを入れても局所的に極端に温度が上がって繊維を劣化させてしまったり、ある部分だけ含浸できない場所が残ったりしてしまいます。マトリックス生成反応と成型を同時に進めますから、大きいサイズのものを作るときの含浸方法や、部品の形状に応じてプロセスを使いこなすための手法の開発が不可欠です。そういう課題のコア部分を解決しようとしています。

高速・低コストで部材をつくるために、一番重要なのは作った後の加工が不要なこと。ネットシェイプと呼ばれる製造プロセスが理想です。これを目指して、三菱重工航空エンジン(株)は部品の設計手法や繊維の入れ方、イビデン(株)は寸法精度やSiC繊維へのダメージを防止する課題に取り組んでいます。これに対して、私はSiC/SiC部品の設計に関する基礎の方法論、製造プロセスに関する繊維劣化と温度の設定条件、さらには理論解析の手法などを供給してサポートしています。

当ユニットの具体的な成果としては、温度などの製造条件を細かく設定できる「SiC/SiC製造装置」がもうすぐ東京工科大学で稼働します。実用的な部材の大きさに対応できるように東京工科大学の佐藤光彦先生が設計したものです。これまでも企業には、類似した装置がありましたが、細かい条件設定ができませんでした。この装置では、製造時の条件を決めるためのパラメータ取得のいろいろな工夫が施されています。本年度に入ってくる「SiC/SiCの健全性評価装置」と組み合わせれば、温度や時間などの最適な製造条件の範囲がわかるはずです。

当ユニットの研究期間は２年間ですので、全ての課題が解決できる訳ではありません。一番難しい課題だけを解決して、プロジェクト終了時にコア技術を企業に残す。あとは難易度が低い課題を各企業で解決して、将来的に部品が製造できるようになる。そんな流れを考えています。

さまざまな技術分野の専門家の参画でオールジャパンの力を示すべき

国内でCMC分野が育つためには、ここ数年間のうちに、日本の重工メーカーが欧米の航空機エンジンメーカーに売れる部品を作れるかどうかが重要です。まず、実用化を支援していくと数多くの研究課題が現れてくるはずです。また、CMCを使う過程で思いもよらなかった技術が必要になることもあるでしょう。この分野は、若い研究者がチャレンジできるよい分野になるのではないかと思います。

残念ですが、現状では多様な技術分野からのCMC研究への参画が少なく、CMCを理解できて特定分野の高度な技術を有する人材が育っていません。以前の「広く浅い」研究がまだ続いているように思えてしまうのですが、それだと企業が実用化のために求めている技術レベルに達しません。今後日本がCMC分野で優位に立つために、さまざまな技術分野の研究者がCMCに参画してほしいと思っています。材料プロセス、材料分析、材料強度、非破壊検査などのいろいろな材料科学の分野、それに、計算機科学や検査のための電子機器などの専門家の参画も必要です。そうしないと、海外ユーザーに太刀打ちできなくなってしまいます。

将来は、CMCを熟知したCMCの専門家であるとともに固有のハイレベル技術を持つ人材が日本で育つことが理想です。エンジン部材ユーザーとの交渉や認証取得の際にCMCの専門家であるとともに深い専門領域を持つ人材が役立ちます。体制では、大学や国研からの高度なサポートが必要な時代に対応した協調領域や競合領域へのサポート体制、それが今の日本のCMC分野の課題だと思います。こういった難しい多くの技術分野の助けが必要な課題は科学技術分野の枠を取り払ったオールジャパン体制で乗り越えて、世界に日本の力を示していかねばならないと思っています。

※1 PIP：Polymer Impregnation and Pyrolysis ※2 CVI：Chemical Vapor Infiltration ※3 MI：Melt Infiltration

Profile
1989年東京大学生産技術研究所教授、2005年同先端科学技術研究センター教授、2015年同大学院工学系研究科教授を経て、2017年より現職東京工科大学教授 片柳研究所長、東京大学名誉教授となる。1999年Word Academy of Ceramics 会員、2004年The American Ceramics Society, Fellow、2010年NIMSフェロー、専門は材料強度学、複合材料、高信頼性材料。特性の異なる材料を組み合わせて新しい特性を生み出す複合材料やコーティングを対象とし力学特性、機能特性に関する研究を行っている。

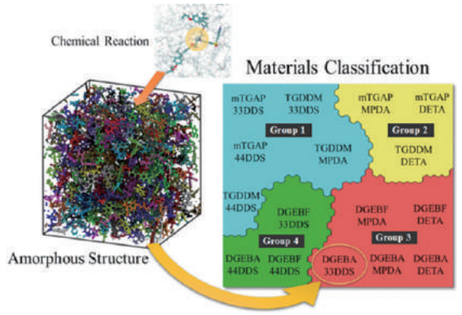
航空機用樹脂の開発とFRPの開発

A領域　大矢　豊大

東北大学工学研究科航空宇宙工学専攻・助教
2014年東北大学理学研究科物理学専攻博士後期課程修了後、博士研究員を経て2015年より現職。

分子動力学法を用いた熱硬化性樹脂の多目的最適設計

航空機用複合材料の代表であるCFRPの物性はマトリクスである熱硬化性樹脂の物性に大きく依存しているため、数ある主剤と硬化剤の候補から適切な組み合わせを選択する必要があります。従来実験により行われていた材料物性取得とそれに続く樹脂選択を数値計算によって代替するために、分子動力学法（MD法）をベースとした多目的材料設計および材料特性メカニズムの特定に取り組んでいます。熱硬化性樹脂をMD法で扱う上で特に困難となるのは、主剤と硬化剤との化学反応の再現です。ミクロには電子の振る舞いから決定されるため、量子化学計算を用いることが望ましいのですが計算リソースの観点から凝縮系における化学反応を再現することは難しい問題です。本研究では、量子化学計算によって取得した活性化エネルギーと反応熱をMD法における反応過程に組み入れることで、従来難しかった凝縮系における正確な架橋構造を再現してきました。MD法で得られた各種材料特性を基に、情報科学分野で発展したクラスタリング手法である自己組織化マップを用いて各種材料特性を分類し、分子構造と材料特性との関連性の解明と新規材料開発を試みています。



分動力学法を用いた架橋構造の再現と、自己組織化マップを用いた材料種のクラスタリング

耐熱合金・金属間化合物の開発

B領域　松本　良

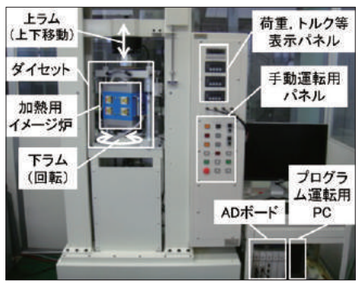
大阪大学大学院工学研究科准教授
大阪大学大学院基礎工学研究科助手（2003年）、助教（2007年）、大阪大学大学院工学研究科助教（2011年）、講師（2012年）を経て、現職。

加工モーション制御による革新的鍛造プロセスの開発

航空機エンジンの多くの部材が鍛造プロセスにより製造されている。素材の高強度化、部材の大型化・複雑形状化に対して、従来の鍛造プロセスでは実現困難な高度な材料流動・材質制御、加工荷重制御が必要である。例えば、加工荷重の10～20%の低減は、負荷能力が１～２クラス高い鍛造プレス機を要する鍛造品の製造を可能とし、数万tonf級の鍛造プロセスにおいて有益性は高い。

本プロジェクトでは、加工モーションを制御した鍛造プロセスの開発に取り組んでいる。鍛造中に振動やねじり（回転）を付加することで、従来にはない材料流動・材質・加工荷重制御技術の確立を目指している。これまでに、振動・ねじりを付加可能な小型鍛造試験機（写真）を作製し、加工荷重の低減や材料流動の促進を得ている。日本エアロフォージ（株）と連携して、NIMSに導入された1500tonf鍛造シミュレータでのモーション制御効果の検証も進めている。

また小型鍛造試験機は複数の応力負荷モードを模擬できる鍛造試験機としても活用でき、鍛造中の加工発熱の高精度計測、数理モデリング化に着手している。材料・プロセスパラメータのデータベース構築に取り組むユニット参画機関とも連携して、成形シミュレーション解析の加工発熱予測技術の確立を目指している。



作製した振動・ねじりモーション付加機構を備えた小型鍛造試験機

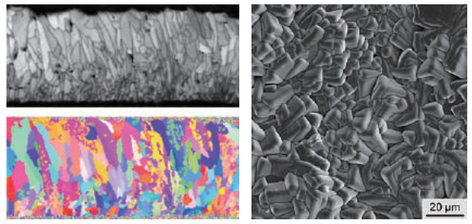
セラミックス基複合材料の開発

C領域　後藤　孝

国立大学法人東北大学金属材料研究所・教授
東北大学金属材料研究所助手（1979年）、同助教授（1988年）、同教授（1998年）、現職。連合王国アバディーン大学客員研究員（1990年）。

耐環境性コーティングの開発

航空機エンジンの構造部材としてSiC繊維強化SiCセラミックス複合材料（SiC/SiC CMC）の開発が求められている。SiC/SiC CMCの実用化のためには、SiC/SiC基材だけでなく、1400°C付近の水蒸気や粉塵による腐食に耐える耐環境性コーティング（EBC）の開発が必要である。これらの部材の製造プロセスとして、化学気相析出（CVD）技術は必須であり、本プロジェクトでは、レーザーCVD、熱CVD、回転CVDなど、種々のCVD技術を駆使して、SiC/SiC CMCの部材を作製している。特に、SiC/SiC CMCとEBCの結合層としてSiAlON層の開発は重要な課題である。SiAlONは日本で世界に先駆けて発見された、Si_3N_4-SiO_2-AlN-Al_2O_3系の広い組成を有する固溶体化合物であるが、これまで、高結晶性のSiAlON膜は作製されていなかった。本プロジェクトでは、レーザーCVDにより初めて高結晶性のα'，β'など種々の構造、組成のSiAlON層の作製に成功している。さらに熱CVDにより大型・複雑形状のSiC/SiC CMCにSiAlON結合層を高速・高効率で作製し、超高温でも優れた特性を有するSiC/SiC CMCの開発を目指している。



レーザーCVDにより作製したα'-SiAlON膜の微細組織

マテリアルズインテグレーション

D領域　田淵　正明

物質・材料研究機構　構造材料研究拠点
クリープ特性グループ　グループリーダー
東京大学工学系研究科修士課程修了後、科学技術庁金属材料技術研究所に入所、インペリアル大学客員研究員などを経て、2001年より現職、工学博士

クリープ性能予測システムの開発

発電プラントや化学プラントで使用される高温構造部材ではクリープが問題となる。クリープ損傷は溶接部に発生する場合が多い（図１）。D62「クリープ性能予測システムの開発」では、①構造部材のクリープ変形・損傷・破壊の計算モジュールの開発、②クリープデータベースの整備、共通試料のクリープ試験、③機械学習（データ科学）によるクリープ破断時間、クリープ曲線の予測、④材料組織とクリープ特性の数理モデルの開発、⑤システムの検証（溶接継手、内圧管等の試験と寿命予測）に取り組んでいる。①では②を基に、損傷力学、破壊力学、拡散方程式等を用いてクリープ損傷や破壊を解析する計算モジュールを開発し、D64システムへの接続を行っている。③ではD63と連携し、②の化学組成や耐力等からデータ科学を利用して、クリープ破断時間やクリープ曲線を予測するモジュールを開発し、D64への接続と高精度化を検討している。④ではMatCalc等を利用してクリープ中の析出物変化を予測し、組織変化を考慮した寿命予測の高精度化を行っている。図２は9Cr耐熱鋼溶接部のクリープ破断時間を予測した結果の一例で、長時間での破断延性の低下や多軸応力下での破断延性の低下を考慮している。

図１　9Cr耐熱鋼HAZに生じたクリープ損傷

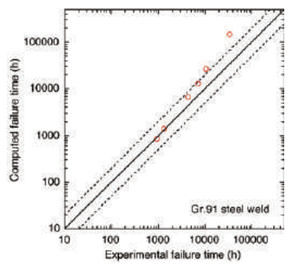


図２　9Cr耐熱鋼溶接継手のクリープ寿命予測