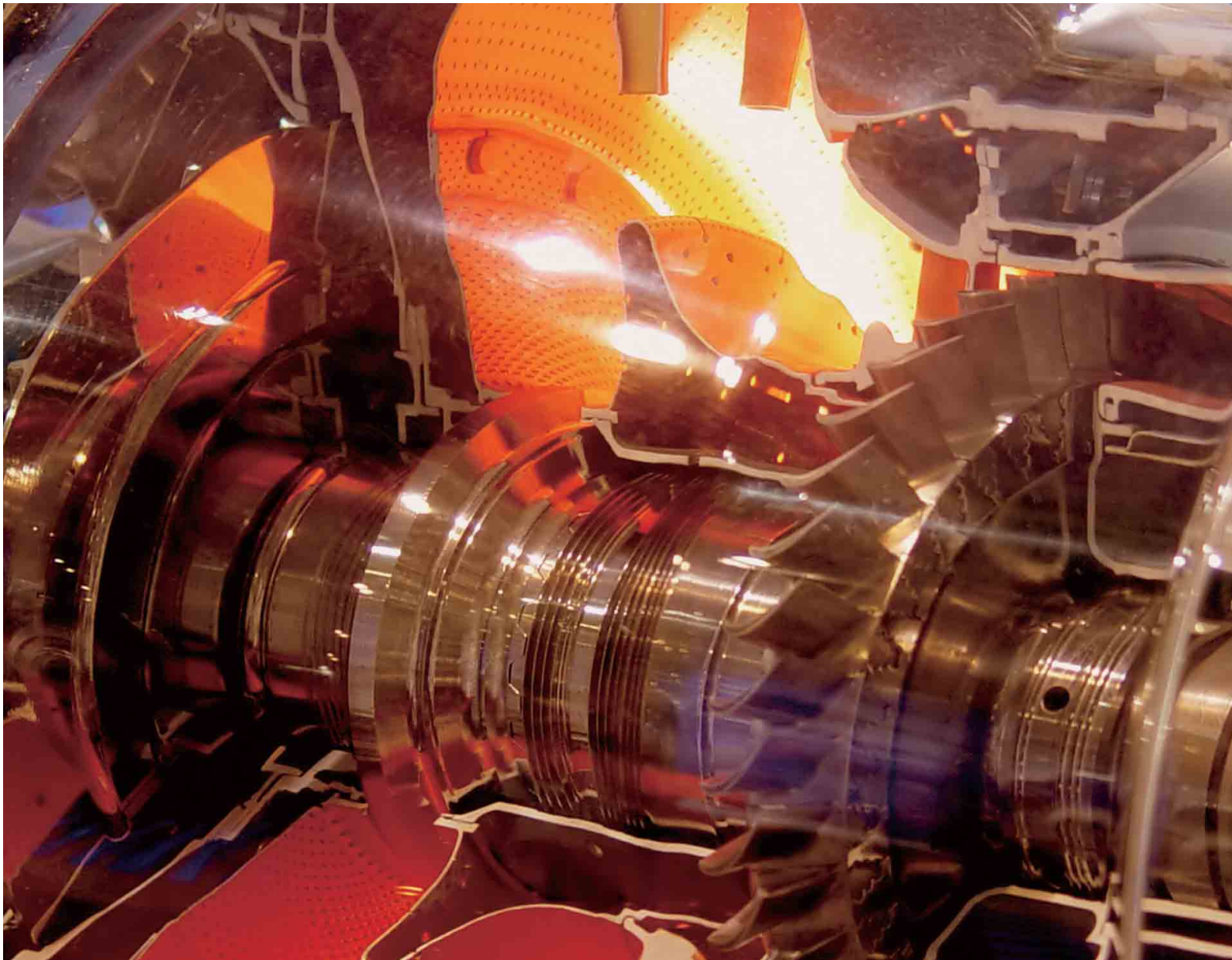


セラミックスコーティング

Development of Ceramic Environmental Barrier Coating

耐環境性セラミックスコーティングの開発

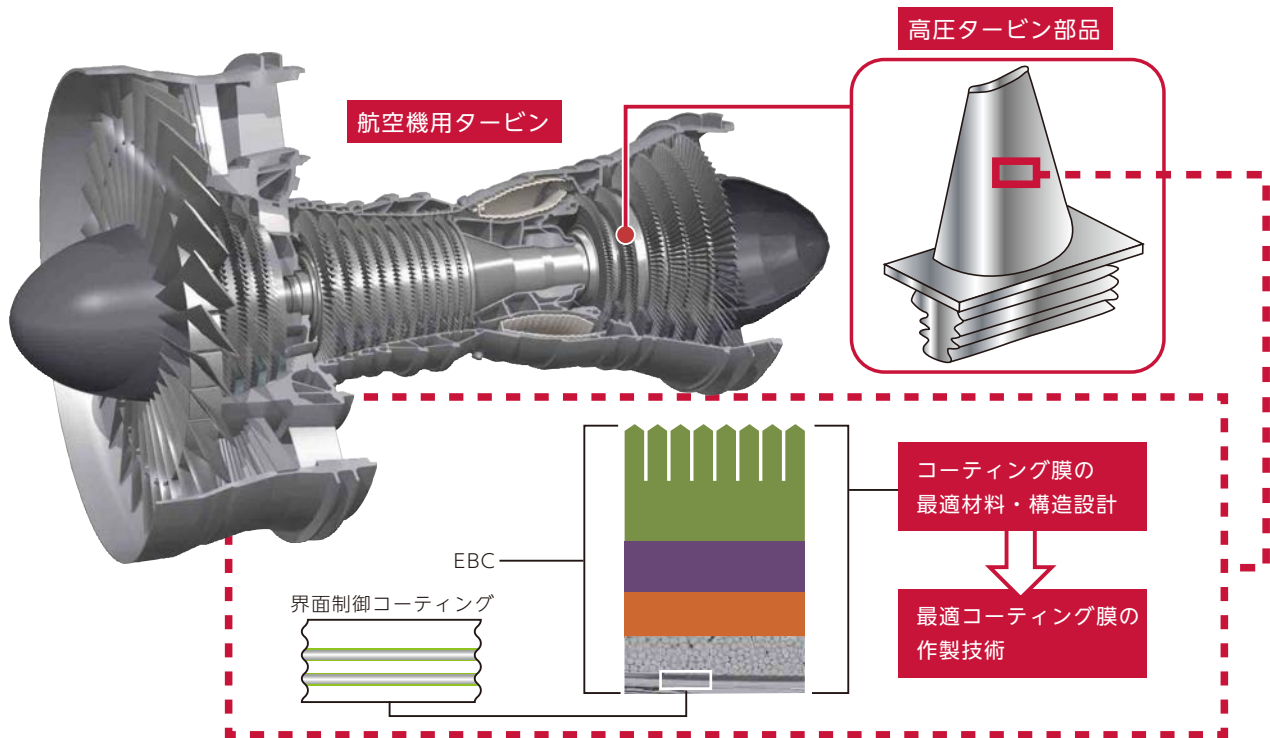


- 航空機エンジン用の耐熱軽量セラミックス部材の耐久性を大幅に向上させるために、コーティング材料とその構造を最適化させて、実用的に利用可能な世界最高性能のEBCと界面制御コーティング技術を開発します。
- 我が国の航空機エンジン開発において、次フェーズの実用化研究（高圧タービン部品開発）を飛躍的に促進し、素材から製品化までの一貫した国内サプライチェーン強化を支援します。

革新的構造材料

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

コンセプトとアプローチ



CMC耐用温度1400℃の酸素・水蒸気を含む環境下において長時間曝露後も、EBC構造と界面制御コーティング構造を維持し、軽量セラミックス部材の力学特性（損傷許容性）を持続させるために、以下の技術を開発する。

- (1) 熱・水蒸気・酸素遮断性に優れる多層セラミックスコーティング膜の最適材料設計。
- (2) 最適多層セラミックスコーティング膜を具現化するEBC技術の開発。
- (3) 部材内部の基材となるSiC繊維表面への界面制御コーティング技術の開発。
- (4) EBC膜の使用限界の把握と、世界最高水準の部材特性の実証。

テーマ構成と役割

テーマ1：

コーティングの最適構造設計を基にしたEBC技術と界面制御コーティング技術を開発します。

テーマ2：

企業メンバーを入れたユニットの運営体制にすることにより、開発コーティング材のパフォーマンス評価・解析、及び、実機システムへの適用可能性評価を行います。

テーマ1：コーティング技術の開発



セラミックスコーティングの研究開発

環境遮蔽設計：成果

JFCC

①多相積層構造のEBCを構成するムライトとYbシリケートの高温酸素遮蔽性を評価・解析するとともに、使用環境下におけるムライト層の安定性を向上させるためのEBC構造を提案・実証しました。

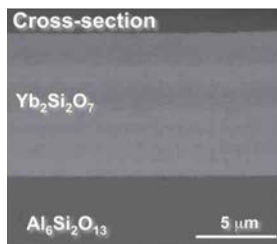
コーティングプロセス技術：成果

■EBC (耐環境コーティング)

①ダブル電子ビームPVD法

JFCC

Ybシリケートの単相膜を形成することに成功するとともに、成膜後の高温曝露後も層構造を維持するための指針を得ました。



電子ビームPVD
成膜例

②エアロゾルデポジション法

横国大

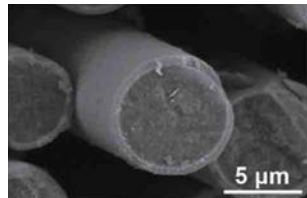
室温にて酸素遮蔽効果が期待される緻密質のムライト膜を形成することに成功しました。

■界面制御コーティング

①レーザーCVD法

横国大

Ybシリケートの成膜条件を系統的に調べ、SiC繊維上に緻密膜を形成させるための技術データを蓄積しました。



レーザーCVD
成膜例

②化学溶液堆積法

JFCC

コーティング前駆体溶液と熱処理条件を検討し、SiC繊維上にYbシリケート膜(緻密質、多孔質)の形成を可能にしました。

コーティングの評価・解析：成果

■EBC

①実機システムへの適用可能性評価

IHI

熱サイクル試験を実施するために必要な試験治具の準備や試験条件等を検討し、予備試験を行いました。

②コーティング材の特性評価

JUTEM

高温加湿環境下耐久試験を実施するために必要な試験システムの改造と試験手法を検討するとともに、1400℃の加圧加湿環境下においてEBC構成素材の長時間曝露試験を開始しました。

③健全性評価解析

NIMS

EBCのベンチマークモデル材を用いて、標準化に展開可能な界面破壊靱性測定法を検討しました。

④力学特性評価

東工大

レーザー局所加熱ナノインデンテーション法を用いて、EBC構成素材の弾性特性の温度依存性を評価しました。

⑤熱機械的負荷損傷シミュレーション

東大

EBCモデル積層材について、エネルギー解放率計算の有限要素解析モデルを決定し、荷重方向とき裂進展方向に対するエネルギー解放率を得ました。

■界面制御コーティング

①健全性評価解析

JAXA

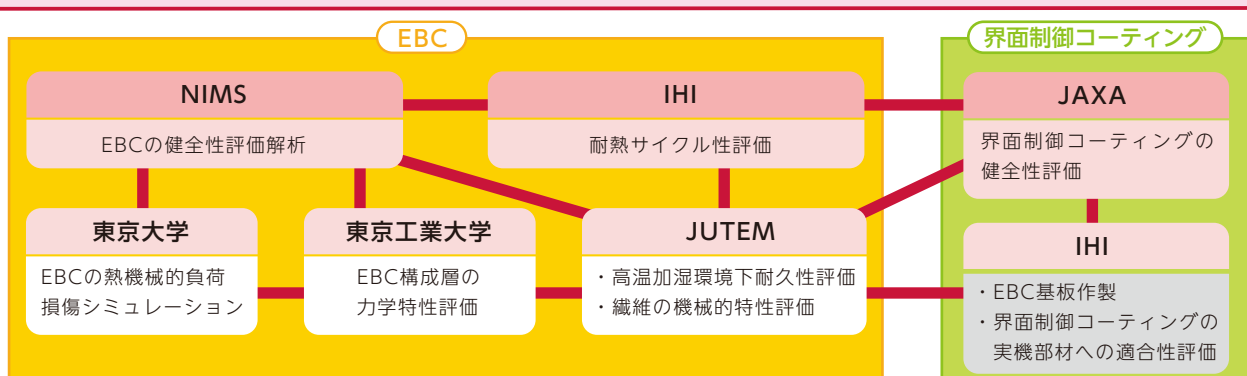
界面制御コーティング繊維束からなる複合材料を作製し、その基本特性を評価することにより、成膜プロセス改良のための指針を示しました。また、界面力学特性評価方法を決定しました。

②実機部材への適合性評価

IHI

EBCに供試する軽量セラミックス部材を製造する装置を設計・製造するとともに、製造施工性の予備検討を実施しました。

テーマ2：実機システム適用可能性 評価・解析



環境遮蔽性と熱機械的特性の最適化を可能とする先進構造設計

航空機エンジンの燃費を改善しCO₂排出量を大幅に削減するためには、ホットセクションを構成する部材の“軽量化”と“耐熱性向上”が不可欠です。軽量セラミックス部材は、現用のNi基合金よりも遙かに軽量で耐熱性に優れますが、これを適用するためには、部材の表面を守り長期使用を可能にする耐環境性コーティング（EBC：Environmental Barrier Coating）が不可欠です。優れた環境遮蔽性と耐熱衝撃性を併せもつように多相積層構造とし、各層毎に特徴的な機能をもたせ、全体として優れたパフォーマンスを発現させます。

ここで、優れた環境遮蔽性は緻密質膜により発現しますが、その結果として、膜中を構成物質が移動するため、積層構造の維持が困難になります。EBCの現状性能を打破するためには、これまでの素材適合性や熱機械的特性の観点からの構造設計に加えて、高温ガス透過法等を用いたEBC内の物質移動の定量的かつ精密評価に基づく環境遮蔽設計が極めて重要です。本研究では、この環境遮蔽設計と熱機械的構造設計とを融合した先進構造設計により、1400℃の燃焼ガス環境下において実用的に長期間使用が可能なEBC構造を提案します。



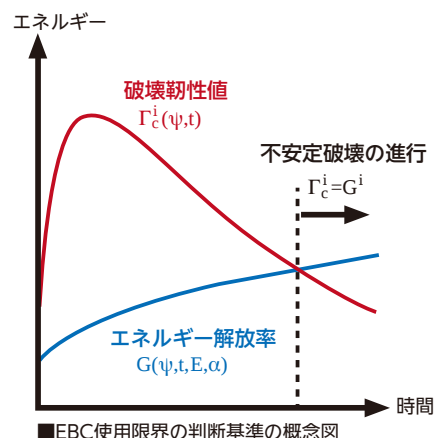
■多相積層構造EBCの概念図

新規破壊靱性評価法を用いたEBC使用限界の把握

航空機エンジンの信頼性を高めるには、EBCの使用限界を正確に把握し運用することが必要ですが、その方法は確立されていません。

本研究では、模擬使用環境下における耐久性試験後のEBCの破壊靱性値を計測するとともに、EBC構成材料の物性変化を考慮したエネルギー解放率の計算を行います。そして、使用中の損傷や構造変化によって生じるこれら値の経時変化から、EBCの剥離や割れが生じる条件を予測する方法を提案するとともに、この手法を用いてEBCの最適構造設計を行います。

破壊靱性値の測定については、将来の認証、標準化支援を考慮して、実機コーティングに適用可能な、簡便で小型の試験片で破壊モードを再現できる新規試験方法にすることを目指します。



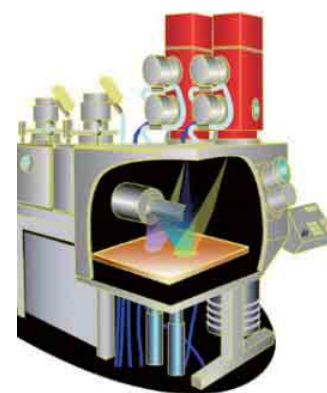
■EBC使用限界の判断基準の概念図

新EBCマルチコーティング技術

先進構造設計に基づき、多相積層構造EBCを電子ビームPVD法等により形成するプロセス技術を開発します。

電子ビームPVD法は、現在の航空機エンジン用Ni基系合金部材の遮熱コーティングにおいて主流の成膜方法です。本研究では、複数の電子銃と原料インゴットからなるシステムを採用することで、成分蒸気圧の大きく異なる複合酸化物や、膜組成の傾斜化、複合化が可能です。

この装置を用いて、1400℃の燃焼ガス環境中でも長時間安定的に使用可能な新規のEBCを実現します。



■ダブル電子ビームPVD 成膜装置の概念図

セラミックスコーティング 研究者紹介

耐環境性セラミックス
コーティングの開発への期待岸 輝雄 TERUO KISHI
SIP革新的構造材料PD

耐熱・耐環境コーティング(EBC)を開発し、軽量セラミックス部材に適用することにより、航空機エンジン部材のタービン動翼・静翼等の大幅軽量化と使用環境下における部材の耐熱性、耐久性、並びに信頼性の飛躍的向上が可能になります。SIPの研究により、国際的に未到達の1400℃級の使用環境下で酸素遮蔽性や水蒸気遮蔽性を最大にすることができる新規セラミックス材料をコーティングとして使いこなすための技術を開発し、材料開発にとどまることなく、工業材料としての実機適用に速やかにつなげることを期待しています。

領域長／拠点長
高田 雅介 MASASUKE TAKATA
一般財団法人
ファインセラミックスセンター (JFCC)

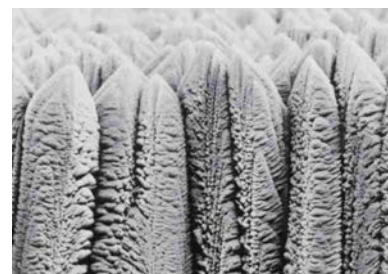
天然資源・エネルギー資源に恵まれない日本が生き残るためには頭をフル活用する他はありません。幸い日本人は勤勉で教育レベルも高い国民です。本研究の開発目標であるEBC部材が開発されれば、省エネルギーに有用でありCO₂の大幅な削減が見込め、日本の航空機産業の育成に貢献できます。領域長としては産官学の英知を集めて日本初の新規EBC部材を開発するために邁進します。

コーティングの環境遮蔽設計及びプロセス技術の開発

キーワード：コーティング、拡散、粒界、表面、電子ビームPVD

北岡 諭 SATOSHI KITAOKA
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

多相積層構造を有する耐環境性保護膜(EBC)を構成する複合酸化物について、高温使用環境下における物質移動を定量的に評価・解析し、環境遮蔽性と構造安定性に優れたEBCの設計指針を構築します。この指針等に基づき、軽量セラミックス基板上に環境遮蔽性と耐熱サイクル性を併せ持つEBCを、電子ビームPVD法により形成するプロセスを開発します。さらに、化学溶液堆積法により、軽量セラミックスを構成する繊維の表面に界面制御コーティングを施すことで、高温環境下に長時間曝露しても軽量セラミックスの損傷許容性を維持するプロセスを開発します。右図は電子ビームPVD法により形成した組織の例であり、EBCの最表面層を羽毛構造にすることで、EBCに優れた耐熱サイクル性を発現させることができます。

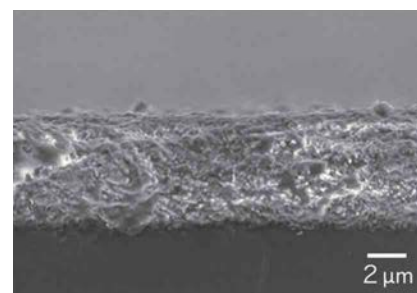


AD法による酸素遮蔽コーティング技術の開発

キーワード：エアロゾルデポジション(AD)法、コーティング、酸化、材料組織、熱的安定性

長谷川 誠 MAKOTO HASEGAWA
横浜国立大学大学院 工学研究院

環境バリアコーティング(EBC)の構成層であるムライトを製膜するにあたり、従来の製膜法では製膜面が高温環境に曝されるため、基材表面の酸化が懸念されます。本研究で取り組んでいるエアロゾルデポジション(AD)法は、室温の減圧環境下にて音速程度でセラミックス粉末を基材に衝突させて製膜する技術であり、組成のずれ無く、緻密質かつ結晶化した膜の形成が室温で可能となります。なお、AD法はμmオーダーの薄膜形成には有効ですが、本研究の対象とする100μmもの厚膜形成には長時間を要し現実的ではないため、本研究では、AD法を厚膜製膜前の“プレコーティング”として位置づけています。右図はムライトを製膜した時の一例です。界面上に基材の酸化は見られず、ムライト膜は緻密質であることがわかります。また、XRDの解析より室温製膜での膜の結晶化が認められました。



AD法により作製した緻密質なムライト膜

レーザーCVDによる界面制御コーティング技術の開発

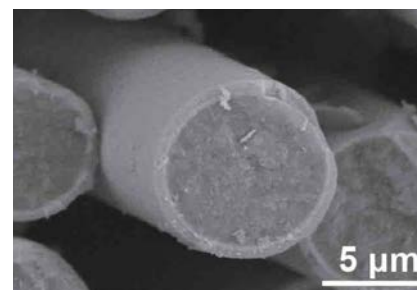
キーワード：界面制御コーティング、化学気相析出法、希土類シリケート



伊藤 暁彦 AKIHIKO ITO

横浜国立大学大学院 環境情報研究院

繊維強化セラミックスコンポジット部材を安心して使うためには、繊維表面に界面制御コーティングを施し、部材に損傷許容性を発現させる必要があります。現行の界面制御コーティングは、高温水蒸気酸化による損傷許容性の消失が課題であり、より安定な界面制御材料とそのコーティング手法の開発が必須です。本研究では、レーザーを援用した化学気相析出 (CVD) 法を基盤技術として用い、コーティングの微細組織と結晶配向の制御により、環境遮蔽性向上と部材中のき裂伝播方向制御を同時に達成できます。これによりSIPが提案する世界最高性能のコーティングシステムの構築に寄与します。これまでの研究では、模擬基板上での結晶配向制御が可能であることを示しました。右図は、本手法を用いてSiC繊維束上に施したYb₂Si₂O₇コーティングです。今後は、連携機関と共にコーティングの性能評価・解析を進め、コーティング条件を最適化します。



EBCの健全性評価解析

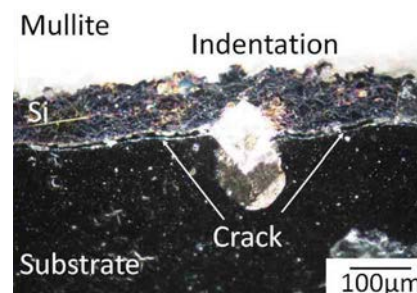
キーワード：コーティング、EBC使用限界、界面破壊靱性試験



垣澤 英樹 HIDKEI KAKISAWA

国立研究開発法人 物質・材料研究機構 構造材料研究拠点

EBCの化学的損傷（反応や物質移動による構造崩壊）と熱機械的損傷（剥離、厚さ方向のき裂進展）の評価・解析を実施し、EBC損傷の支配因子を明らかにすると共に、得られた結果をもとにEBCの使用限界を把握することを目指しています。このために、使用環境を模擬した環境下で損傷を受けたEBCに対して界面破壊試験を行い、EBCの破壊靱性値を熱機械負荷時間に依存する関数として取得する方法を開発しています。具体的な試験方法については将来の標準化・認証支援も考慮し、実機部材から切り出したできるだけ小さな試験片で現実の破壊モードを再現できるよう検討を重ねています。右図は、インデンテーション法によって多層構造のEBCの任意の界面に予き裂を導入する手法をベンチマーク材を用いて試行した結果の一例を示したものです。



コーティング材と界面制御コーティング繊維の適用可能性評価

キーワード：実機適用性評価



中村 武志 TAKESHI NAKAMURA

株式会社IHI 航空宇宙事業本部

拠点内の研究機関に対し、評価用のセラミック複合材 (CMC) 基板を提供します。また、これまで取り組んできた研究成果・実績をもとに、1400℃の環境下において、開発中の繊維上界面制御コーティングやCMCの水蒸気減肉を防ぐ耐環境コーティング (EBC) が、航空エンジンに適用可能なポテンシャルを有するか評価を行います。界面制御コーティングに関しては、マトリックスを含浸してCMCに成形後に、疲労試験やクリープ試験を行って材料としての強度評価を行います。また、EBCに関しては、右図に示すバーナーリグ装置を用いた熱サイクル評価試験を行い、CMC基板との密着性および耐久性を評価します。これまでにCMC基板の製造用に熔融含浸炉の導入と、1000℃以上の評価を可能とする熱サイクルの予備試験を行いました。



セラミックスコーティング 研究者紹介

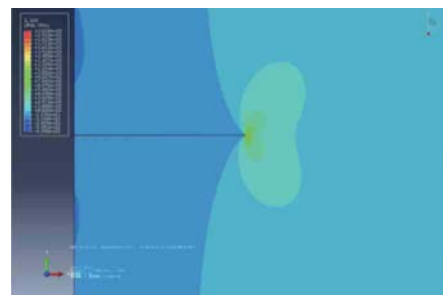
EBCの熱機械的負荷損傷シミュレーション

キーワード：有限要素法、熱力連成解析、亀裂

梅野 宜崇 YOSHITAKA UMENO

東京大学 生産技術研究所

実機において、EBCコーティング材は強い温度勾配条件・熱サイクル条件に曝されるため、コーティング層に強い熱応力が生じることによって破壊が生じることが考えられます。EBCコーティング材の信頼性を確保するため、有限要素法解析を用いて界面き裂・層内き裂進展条件を算出することで、設計を理論から支援することが求められます。そこで、EBCコーティングを施した実部材が受ける環境影響を考慮したシミュレーションを実施し、EBCの構造設計指針の高度化を図ります。熱機械的負荷条件のもとでの力学解析を実施することにより、現実に即した強度評価を行い、破壊のメカニズムおよび条件を明らかにします。この解析結果に基づき、高度化されたEBC構造設計指針を得ることを目指します。



Stress distribution near crack tip

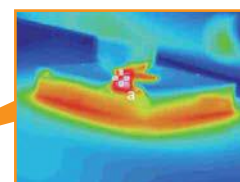
EBCの力学特性評価と構造設計

キーワード：ナノインデンテーション、ヤング率の温度依存性、内部応力

赤津 隆 TAKASHI AKATSU

東京工業大学 物質理工学院

EBCで覆われたタービン翼を安全に使用するためには、破壊の駆動力となるEBCのエネルギー解放率とその経時変化を知り、使用期間中、エネルギー解放率が破壊エネルギーを超えないように設計する必要があります。エネルギー解放率は、材料中の亀裂寸法、負荷応力、弾性率や残留応力などの関数として与えられます。この研究テーマでは、EBC構成層の材料定数の温度依存性および残留応力を調査することにより、各層に発生する応力を有限要素シミュレーションで定量的に把握し、エネルギー解放率の推定に貢献します。具体的には、EBCを構成する各層に対してナノインデンテーションを室温から高温まで行い、ヤング率の温度依存性を評価します。さらに、長時間または繰り返し高温暴露されたEBCに対しても同様な実験を行い、各層のヤング率の暴露時間依存性を評価します。



加熱時、圧子周囲のサーモグラフィー

高温ナノインデンテーションシステム

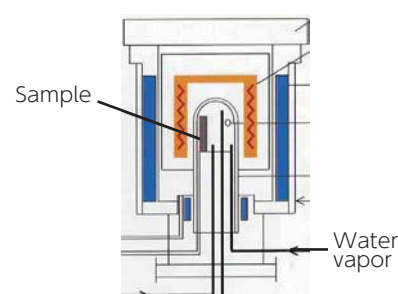
高温加湿環境下曝露評価、
単繊維および繊維束の力学特性解析

キーワード：高温熱力学、耐環境特性、力学特性

杉浦 幸彦 YUKIHIKO SUGIURA

株式会社超高温材料研究センター（JUTEM）岐阜事業所

界面制御コーティング繊維を用いた軽量セラミックス部材にEBCを付与したサンプルに対して、高温加湿環境下曝露試験1400℃を実施し、外観観察及び質量変化等によりコーティングの耐水蒸気性能を巨視的に評価します。また、界面制御コーティング繊維（高温加湿環境下曝露評価前後）の引張強さを測定し、コーティングプロセスに伴う繊維劣化の程度や界面制御コーティングの環境遮断性を評価します。弊社は国内唯一の高温部材専門の評価機関であり、10年以上の長きにわたり、軽量セラミックスの耐食性や繊維の力学特性を評価してきました。JUTEMで開発された技術はCMCやEBCの改善を支援し、評価結果は実機システムに確実かつ速やかに展開可能とします。



界面制御コーティングの健全性の評価解析

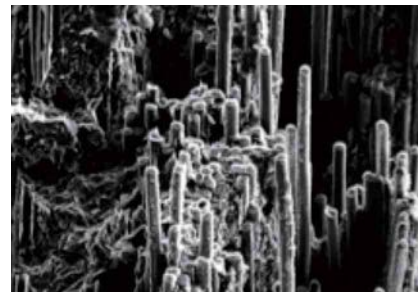
キーワード：界面、力学特性、破壊様式



後藤 健 KEN GOTO

国立研究開発法人 宇宙航空研究開発機構 (JAXA) 宇宙科学研究所

軽量セラミックス部材の繊維-マトリックス界面には、界面に到達したき裂を繊維-マトリックス界面方向に偏向させて、繊維の高い強度により部材の壊滅的破壊を抑制する機能（損傷許容性）が求められます。界面制御コーティングを施した軽量セラミックス部材を用いて、界面制御コーティングの力学特性および破壊様式の評価解析を実施しています。界面制御コーティングの力学特性評価にはフラクトグラフィー法やpush-out法を用いています。また、界面制御コーティングの残存厚さ、繊維の反応等の界面組織変化を評価する予定です。さらに、界面の組織形態と界面力学特性の関係を理解し、界面制御コーティングプロセス実施機関と結果を共有し、「コーティングプロセスの最適化」に役立てます。



水野 峰男
MINEO MIZUNO

連携コーディネータ

連携コーディネータの水野です。担当領域で開発するSiC長繊維強化SiC材料（SiC/SiC）にはかなり思い入れがあります。1990年から7年間行われた100kW級自動車用セラミックスガスタービン開発プロジェクト（PEC-CGT）の中で、セラミック複合材料（CMC）の評価方法を開発する研究の責任者をしていました。SiC/SiCを含むCMCに関わる十数報の論文を出し、最終1997年には14編のCMC特性評価規格を作成し業界規格として国内外に発表しました。これらはその後始められたCMCのJIS・ISO規格化の際

の基礎規格となりました。当時のSiC/SiCは海外企業の特許で高価な材料であり、軍事用以外の実用化は困難視されていました。しかし現在では様変わりし航空機用エンジン部材として空を飛ぶ日が間近となりました。日本独自の先端技術で更に進化させたEBC-SiC/SiC部材の開発にできる限り寄与したいと思っています。

問い合わせ先

e-mail/mizuno@jfcc.or.jp

セラミックスコーティング 研究者紹介

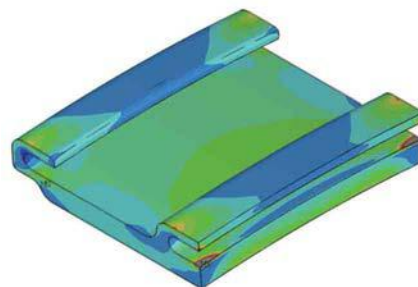
軽量耐熱高靱性耐環境コーティングの開発

キーワード：酸化物系セラミックス、高靱性、低コスト、アブレーダブル、シュラウド

牛田 正紀 MASANORI USHIDA

三菱重工航空エンジン株式会社 技術部

酸化物系セラミックス基複合材料をモノリシック・セラミックス基材のコーティングとすることにより、アフォーダブルな構造開発を目指します。新規開発の低コスト・高耐熱酸化物繊維を利用した酸化物系セラミックス基複合材料の低コスト複合化プロセス（コーティング・プロセス）を開発します。また、シュラウド構造として必要とされるアブレーダブル特性を備えたTBC（熱遮蔽コーティング）形成のためのボンドコート、トップコートを開発します。さらには、各種物理・力学的特性の取得とそのデータを利用した伝熱・構造解析を実施します。これらにより、低コストの酸化物系セラミックス基複合材料を利用したシュラウド構造を設計・製造・評価していきます。



シュラウド構造応力分布解析例

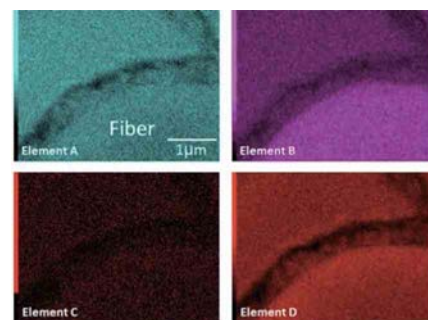
軽量耐熱高靱性耐環境コーティングの設計・評価

キーワード：酸化物系セラミックス、高靱性、設計・評価

垣澤 英樹 HIDEKI KAKISAWA

国立研究開発法人 物質・材料研究機構 構造材料研究拠点

酸化物系セラミックス部材に高靱性を付与する薄肉セラミックス基複合材料（CMC）コーティングの物性測定、構造評価および破壊挙動の評価を行っています。これまで、薄肉CMCコーティングの原料およびプロセス条件と組織の関係を調べ、曲げ試験時の破壊挙動との関連付けを行いました。薄肉CMCコーティングの破壊は繊維とマトリックスの界面の密着性や繊維間の空孔に依存していることを明らかにし、非脆性的な破壊を発現させる条件を示しました。また、高温で破壊挙動の観察やひずみ分布の測定が出来る技術の開発を行いました。これらから得られた知見をプロセス条件にフィードバックすることでプロセス最適化を支援するとともに、設計に必要な材料情報の取得を進めています。



繊維近傍の元素分布の例

低コスト高靱性化材料プロセス技術の開発

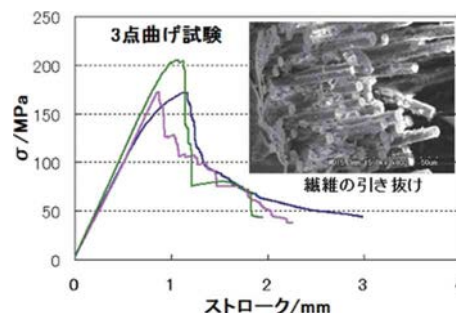
キーワード：酸化物系セラミックス複合材料、高靱性、低コスト、ポリマー含浸焼成法、界面層



長谷川 良雄 YOSHIO HASEGAWA

株式会社アート科学 研究開発部

モノリシック・セラミックス基材を高靱性化するための軽量耐熱高靱性耐環境コーティングの中間層を形成するCMC（酸化物系セラミックス基複合材料）薄板の開発を行っています。使用環境を考慮して1000℃以上でも強度低下が起こらない耐熱性が必要です。CMC薄板は、低コストで特殊な形状にも対応できるPIP（ポリマー含浸焼成）法で作製していますが、現在、界面層を制御した繊維を用い、図に示すように高強度CMCが得られています。今後、マトリックス形成のための前駆体ポリマーの最適化と、繊維の界面層の改良を行います。さらにCMC薄板の基材への貼付技術を開発し、最表面に施されるTBC（熱遮蔽コーティング）とのマッチングを図り、部材化を目指します。



軽量耐熱高靱性耐環境コーティングの開発

キーワード：酸化物繊維、アルミナ系長繊維



桑田 和弘 KAZUHIRO KUMETA

株式会社ニチビ 技術部

軽量耐熱高靱性耐環境コーティングの一構成材として耐熱性に優れる酸化物繊維が求められています。これまでアルミナ系長繊維を製造・販売してきた実績をもとに、原料の見直しや製造条件の調整により既存製品の耐熱性改良や新品種の開発に取り組んでいます。現在までに、耐熱性を改良したアルミナ系長繊維を試作し、酸化物系セラミックス基複合材料あるいは耐熱高靱性耐環境コーティングの試作・評価用として、その織物を提供しています。さらに、繊維の性能を向上させるための研究開発を進め、求められる酸化物系セラミックス基複合材料の性能を支えるアルミナ系長繊維の開発を目指していきます。



アルミナ系長繊維織物試作例