

「次世代航空機エンジン用 CMC の耐環境性セラミックスコーティング」 ～日本唯一のダブル電子ビーム蒸着装置を用いて組成・組織の精密制御を実現～

一般財団法人 ファインセラミックスセンター

I 【概要】

① 現状

- ・ 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、高圧タービンなどのホットセクション部材の軽量化と耐熱性向上が不可欠。これらを達成するための新しい材料として期待されているのが、SiC 繊維強化 SiC マトリックス複合材料（注 1）（以後、CMC と称す）。
- ・ CMC は現用の Ni 基系超合金より軽量で耐熱性に優れるが、高温の燃焼ガス環境下においては酸素や水蒸気による酸化を伴う蒸発により減肉することが問題。そのため、CMC を適用するためには、耐環境性コーティング（EBC : Environmental Barrier Coating）（注 2）が不可欠。
- ・ EBC には酸素遮蔽性、水蒸気遮蔽性、並びに、耐熱衝撃性が必要。
- ・ EBC 候補材料である複合酸化物（Yb シリケートや Al シリケート）は、高温における蒸発のしやすさが、その構成成分により大きく異なる。そのため、複合酸化物と同じ組成の原料を用いるコーティングでは、得られる層の組成制御が困難である点が課題。

② 本研究の成果

- ・ ダブル電子ビームを用いた蒸着法により先述の組成制御の問題を解決（図 1: ダブル電子ビームを用いた蒸着装置の概略）。*セラミックコーティングが可能な大出力ダブル電子ビームを備えた蒸着装置は国内唯一。
- ・ コーティング形成時に基板を加熱することにより、成膜直後の状態で結晶性の Yb シリケートや Al シリケート層を得ることに成功。
- ・ また、基板加熱により表面拡散を促進し、緻密な Al シリケート層や Yb シリケート傾斜組成層の形成に成功。
- ・ 高速成膜により、配向した柱状セグメント構造を有する Yb シリケート層を形成（図 2）。

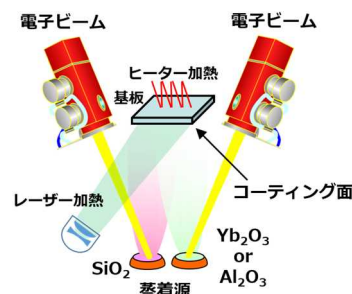


図 1. ダブル電子ビームを用いた蒸着装置の概略

③ 今後の展開

- ・ EBC 構成層の積層化による優れた環境遮蔽性の発現。
- ・ 燃焼温度の高温化と部材冷却ガス削減による航空機エンジン燃費向上と CO₂ 排出量の削減への貢献。

本研究は総合科学技術・イノベーション会議の SIP（戦略的イノベーション創造プログラム）【革新的構造材料】（管理人：JST）の一環として実施したものです。

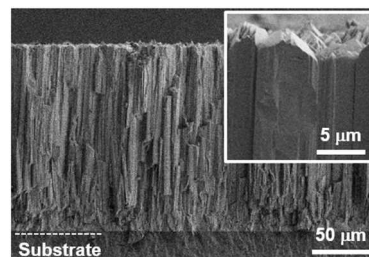


図 2. 柱状セグメント構造を有する Yb シリケート層

本研究成果は、下記に開催する 2017 年度 JFCC 研究成果発表会で発表します。

7 月 7 日（金）（東京会場：東京大学 武田先端知ビル 武田ホール）

7 月 14 日（金）（名古屋会場：愛知県産業労働センター（ウインクあいち 2F、5F））

7 月 21 日（金）（大阪会場：梅田スカイビル（タワーウエスト 36F））

本成果の一部は 2017 年 2 月 3 日に「Materials Letters」誌に掲載されました。

II【本研究の詳細】

① 現状と課題

(1) 現用材料の限界

- ・ 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、高圧タービンなどのホットセクション部材の軽量化と耐熱性向上が不可欠。特に、高圧タービン部材は高温の水蒸気を含む燃焼環境に曝されるため、上記特性に加えて耐食性に優れることも必要。
- ・ 現用の Ni 基系超合金の耐用温度は約 1100°C であり、空気冷却等の措置を講じても現在の合金技術の延長では将来的にも 1200°C の耐用温度が限界。

(2) 今後期待される材料

- ・ この壁を打ち破るための新しい材料として期待されているのが、世界最高性能の炭化ケイ素繊維（耐用温度は約 1400°C、我が国において製造）の複合材料である「SiC 繊維強化 SiC マトリックス複合材料（注 1）（以後、CMC と称す）」。
- ・ CMC は超合金よりはるかに軽量で耐熱性に優れるが、約 1100°C 以上の酸素や水蒸気を含む高温環境下では酸化により生成したシリカが揮散・消失するため、部材の著しい減肉が進行することが問題。したがって、これを高圧タービン部品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耐環境性コーティング（EBC : Environmental Barrier Coating）（注 2）が不可欠。
- ・ EBC の耐用温度を上げることができれば、より高温の過酷環境下において CMC を使用することが可能。
- ・ EBC には、高温の燃焼ガス環境において、優れた酸素遮蔽性や水蒸気遮蔽性、さらには、耐熱衝撃性を併せ持つことが要求される。これを一つの素材で達成することは困難である。そこで、SIP（戦略的イノベーション創造プログラム）「【革新的構造材料】」では、図 1 に示すように、層毎に機能を分担させて EBC 全体として優れた性能を発現させることを目指してきた。
- ・ 各層間の熱化学的安定性と熱機械的特性を考慮して、酸素遮蔽層には緻密な Al シリケート（Al₆Si₂O₁₃）、水蒸気遮蔽層には緻密な Yb シリケートの傾斜組成層（Yb₂Si₂O₇→Yb₂SiO₅）、熱衝撃緩和層には低熱伝導かつ耐減肉性に優れる柱状セグメント構造を有する Yb シリケート（Yb₂SiO₅）を配置。また、結合層には EBC の構造安定性を向上させる機能を有する緻密な Si,Al 含有材料を使用。
- ・ EBC を構成する Yb シリケートや Al シリケートは複合酸化物。複合酸化物をコーティングする難しさは構成酸化物種の蒸気圧が異なる点。例えば、SiO₂ の蒸気圧は Yb₂O₃ の蒸気圧よりも 3 桁以上も大きい（図 2）。したがって、複合酸化物と同じ組成の原料を用いるコーティングでは、得られる層の組成制御が困難である点が課題。

② 研究成果

- ・ ダブル電子ビームを用いた蒸着法により蒸気圧差による組成制御の問題を解決し、組成と組織を精密に制御した複合酸化物層の形成を目指した。（ダブル電子ビームを用いた蒸着装置の概略を図 3 に示す。*セラミックコーティングが可能な大出力ダブル電子ビームを備えた蒸着装置は国内唯一。）
- ・ コーティング形成時に基板を 1000 °C 以上に加熱することで、成膜直後の状態で結晶性の Yb シリケートや Al シリケート層を得ることに成功。
- ・ 電子ビームを用いた蒸着法の強みを生かした高速成膜により、配向した柱状セグメント構造を有する Yb シリケート（Yb₂SiO₅）層を形成（図 4）。
- ・ 基板加熱によりコーティング表面における拡散を促進し、従来の電子ビームを用いた蒸着法では形成が困難であった緻密な Yb シリケートや Al シリケート層の形成に成功。

- ダブル電子ビームを用いた蒸着法の強みを生かし、コーティング中に SiO_2 蒸気量を減少させることで緻密な Yb シリケート傾斜組成層 ($\text{Yb}_2\text{Si}_2\text{O}_7 \rightarrow \text{Yb}_2\text{SiO}_5$) を形成 (図 5)。

③ 今後の展開

- EBC 構成層の積層化による優れた環境遮蔽性の発現。
- 燃焼温度の高温化と部材冷却ガス削減による航空機エンジン燃費向上と CO_2 排出量の削減への貢献。

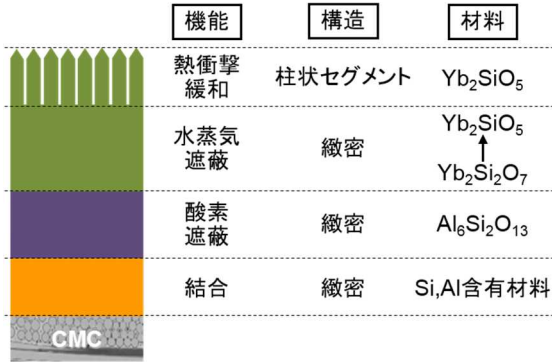


図 1. EBC の構造の模式図

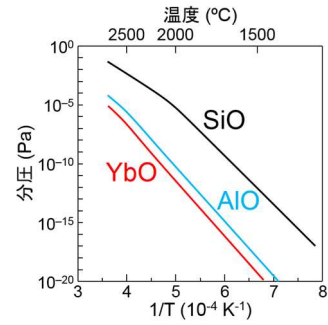


図 2. 熱力学計算によって算出した Yb-Si-Al-O 系の平衡蒸気圧

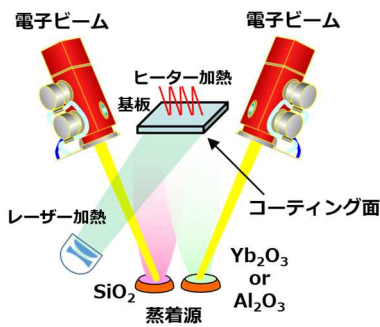


図 3. ダブル電子ビームを用いた蒸着装置の概略

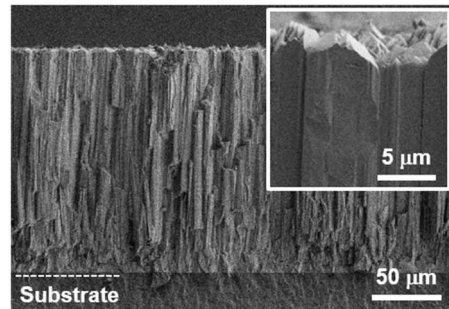


図 4. 柱状セグメント構造を有する Yb シリケート層

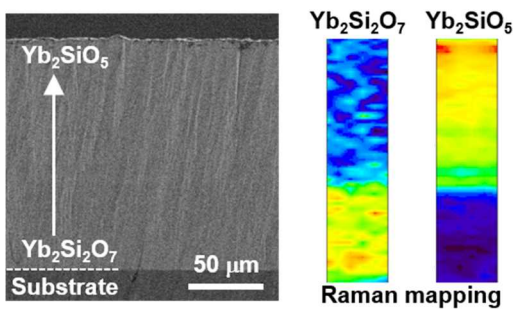


図 5. 緻密な Yb シリケート傾斜組成層の断面組織写真および $\text{Yb}_2\text{Si}_2\text{O}_7$ と Yb_2SiO_5 のラマンマッピング

[用語説明]

(注1) **SiC 繊維強化 SiC マトリックス複合材料**: 密度は Ni 基超合金の 1/3 で耐熱温度は 100℃ 以上も高い。また、SiC 繊維表面に一般的に施されている窒化ホウ素 (BN) 層が繊維-マトリックス界面にて亀裂を偏向させる効果を発揮するとともに、繊維がマトリックスから引き抜かれる現象も生じるため、損傷許容性に優れる。

(注2) **Environmental barrier coating (EBC)**: 耐環境性コーティングなどと呼ばれるセラミックス製の保護膜。類似したセラミックスコーティングに遮熱コーティング (thermal barrier coating, TBC) がある。EBC は高温の水蒸気や酸素に対するバリアー層や、酸化物イオンの拡散を抑制するバリアー層として作用して母材を保護する目的で使用され、TBC とは区別されている。

<本研究に関する問い合わせ>

〒456-8587 名古屋市熱田区六野二丁目 4 番 1 号

(一財) ファインセラミックスセンター 研究企画部

TEL 052-871-3500

FAX 052-871-3599

e-mail:ressup@ (※メール発信は@の後ろに jfcc.or.jp を付けて送付ください)