

令和 3 年 6 月 16 日現在

機関番号：32692

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2018～2020

課題番号：18K04735

研究課題名（和文）酸化物系耐環境コーティングのSiC/SiC基材からの耐剥離特性の定量評価技術

研究課題名（英文）Measurement of delamination toughness of oxide environmental barrier coatings from SiC/SiC substrate

研究代表者

香川 豊（KAGAWA, Yutaka）

東京工科大学・片柳研究所・教授

研究者番号：50152591

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,400,000円

研究成果の概要（和文）：航空機ガスタービンエンジンに應用されるSiC繊維/SiCマトリックス複合材料（SiC/SiC）とそれに施す耐環境コーティング（EBC）を対象に、EBCのSiC/SiC基材からの剥離抵抗の定量的評価方法を提案したものである。実験的手法を開発し、測定時の留意点を明らかにした。特に、SiC/SiCの不均一構造がEBCの剥離に及ぼす影響についてはモデル実験と有限要素法（FEM）を用いて詳細な考察を行った。EBCの三次元的な剥離挙動の影響を明らかにした。これらの結果は実際に使用される材料系であるSiC/SiC上に施行されたEBC材料系での剥離抵抗の評価に役立つものである。

研究成果の学術的意義や社会的意義

航空機ガスタービンエンジンの燃費向上のために、軽量で耐熱性を持つSiC繊維/SiCマトリックス複合材料（SiC/SiC）が用いられるようになった。SiC/SiCを用いた部品では、使用時にガスタービンエンジン内の高温燃焼環境におけるSiC/SiCの損傷を防ぐ目的で、表面に耐環境コーティング（EBC）の施工が必要である。使用時にEBCのSiC/SiCからの剥離が生じると、SiC/SiCの著しい劣化を加速するために剥離しにくい材料の選択と施工方法の確立は重要である。本研究の成果である剥離抵抗の定量的評価方法はEBCを施工するSiC/SiC材料やSiC/SiC部品の開発に役立つものである。

研究成果の概要（英文）：SiC/SiC has been applied to gas turbine aero-engines. In this study, a new experimental method for quantitative evaluation of delamination resistance of EBC layer on SiC/SiC substrate has been developed. Effect of heterogeneous structure of SiC/SiC substrate on the delamination resistance is discussed from a set of FEM results and model experimental results. Effect of three-dimensional delamination behavior on the delamination resistance is also revealed. These results are useful for measurement of delamination resistance in real EBC systems on SiC/SiC substrate.

研究分野：材料強度学

キーワード：耐環境コーティング EBCs セラミックス複合材料 CMCs SiC/SiC 界面力学 界面剥離抵抗 測定方法

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

航空機用ガスタービンエンジンにはエンジン自体の性能に加えて省エネルギーや有害排気ガス削減が求められている。これを実現するためには、エンジンの軽量化、タービン入り口温度の高温化やバイパス比等の向上が必要である。この要求を実現する手段として、軽量で耐熱性のある SiC 繊維/SiC マトリックス複合材料 (以下、SiC/SiC と記す) が航空機用エンジン材料として、広範囲の部位への適用を期待されている。SiC/SiC を実際に用いるためには、ガスタービンエンジン内の高温燃焼環境における SiC/SiC の損傷を防ぐ必要がある。そのため、表面に耐環境コーティング (EBCs: Environmental Barrier Coatings、以下、EBC と記述する) を施すことが必要である。現在までに、EBC は酸化物系の化合物による複層構造となっているものが数多く開発されてきた。例えば、最表面に BSAS ($(1-x)\text{BaO} \cdot x\text{SrO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$, $0 < x < 1$) を用いた第一世代 EBC、最表面にレアアースシリケート ReSiO_5 、 $\text{Re}_2\text{Si}_2\text{O}_7$ を用いた第二世代 EBC などである。

2. 研究の目的

EBC についての研究では、EBC の材料選択に関するものや、エンジン内の高温燃焼環境を模擬した長時間の熱暴露試験による劣化挙動を観察したことが多い。また、最近では空気中の塵や火山噴出物に含まれる CMAS (Calcium-Magnesium-Aluminosilicate) による変性、損傷が報告されている。これら EBC の劣化に関する研究では、劣化した EBC は最終的に剥離することが確認されている。その一方で、EBC の剥離自体に焦点を絞った研究は極めて少ない。EBC の最も重要な役割が SiC/SiC 基材の保護ということを考えれば、この剥離現象の観察および剥離抵抗の評価は EBC の性能を把握する上で不可欠である。しかし、EBC の剥離抵抗を定量的に評価するための研究は極めて少ない状況である。そこで、本研究では、EBC の SiC/SiC 基材からの剥離抵抗を定量的に評価するための方法と、評価する際の留意点を調べることを目的とした。

3. 研究の方法

EBC の SiC/SiC 基材からのせん断力による剥離抵抗は実用上重要であると考えられる。ここでは、EBC の SiC/SiC 基材からの剥離を定量的に評価する際の問題点を、従来の EBC に関する研究や予備的に行った実験の結果をもとに検討した。その結果、SiC/SiC 上に施工した EBC 特有の挙動を考慮することが必要であることが明らかになった。特に重要な点は、(a) SiC/SiC 中の SiC 繊維の幾何学的構造 (主に織物構造に由来) により EBC に荷重を加えた際に発生する EBC 層内の応力やひずみの分布の考慮、(b) SiC/SiC では織物層間剥離や織物層中での不均一変形に依存するミクロ損傷を抑えた EBC の剥離を発生させる試験方法の適用、になる。

本研究では、SiC/SiC のミクロ損傷を抑えるために、SiC/SiC の変形を拘束するという方法を採用した。Fig.1 は採用した方法を模式的に示したものである。採用した試験方法では試験時の SiC/SiC の変形を拘束するために金属製のホルダー中に埋め込むようにした。

4. 研究成果

(1) SiC/SiC を拘束する方法を用いた剥離抵抗測定試験

SiC/SiC を基材とし、ムライト層と BSAS 層を持つ EBC 層を溶射法でコーティングした試験片を用いた剥離抵抗の測定を行った。その結果、Fig.1 に示した方法で EBC 層の剥離現象を安定して発生させることが可能であることが確認できた。また、定常状態と考えられる剥離現象が生じる時には負荷荷重と剥離長さの測定も可能であった。また、EBC の剥離に対する定常状態が明らかに存在しており、本試験方法の有効性が検証された。

定常状態の剥離が生じている状態で、剥離長さ、負荷荷重、構成材料の材料定数を用いて剥離抵抗 Γ_{ss} を求めた。求めた剥離抵抗は $\Gamma_{ss} \sim 1.2\text{-}2.4 \text{ J/m}^2$ の範囲であり、平均は 1.5 J/m^2 であった。この値は、熱遮蔽コーティングの剥離抵抗の場合に比較して一桁小さな値であるとともに剥離界面の経路は複雑であることが明らかになった。

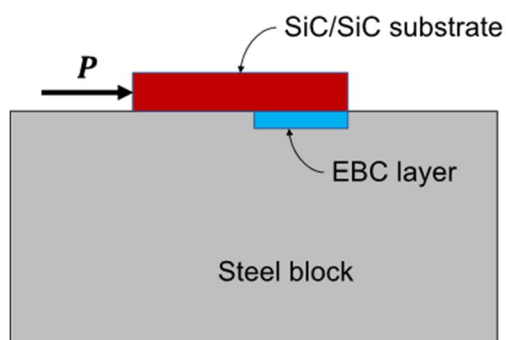


Fig.1 Schematic drawing of loading procedure for delamination test. P : applied load

(2)二次元モデルを用いた有限要素法解析

本研究では二次元モデルを用いた有限要素法（FEM）解析を行い、基材の材料定数の変化により発生する応力分布がコーティングの剥離に与える影響について調べた。SiC/SiC に用いられている SiC 繊維の織物構造を考慮して、SiC/SiC が二つの異なる特性の SiC/SiC から構成されていると考え二次元モデルを作成した。

計算結果より、SiC/SiC 基材中の不均一応力分布（ひずみ分布）が EBC 層中の応力状態（ひずみ状態）に影響を及ぼしていることが明らかになった。また、基材が不均一材料特性を持つ場合、FEM 解析から求めた剥離抵抗（ひずみエネルギー解放率）は一定にならずに、SiC/SiC の不均一構造を反映していた。一連の計算結果を整理することにより、剥離長さが定常状態のき裂進展の条件を満たしている場合でも、フェーズアングルおよびひずみエネルギー解放率は一定とならないことがわかった。また、剥離部先端は基材の応力分布を反映した形状を有することも予想された。

(3)モデル材料を用いた検証

モデル実験を行い予測結果と比較検討を行うことにした。モデル材料として、アルミニウム合金の基材に不均一な構造を持たせるため、直径および深さが数 mm の穴を周期的に導入した。EBC 層のモデルにはホウケイ酸ガラスの板を用いた。ガラス板はエポキシ樹脂系接着剤によりアルミニウム合金基材に貼り付けた。また、安定なき裂進展を発生させるため、アルミニウム合金基材とガラスとの界面にノッチを導入した。

室温・大気中においてせん断荷重負荷試験と同様の要領でガラス板に圧縮負荷を加え、試験中の荷重と変位を測定した。ガラス板をアルミニウム合金基材から剥離させ、このときの剥離先端の様子を表面から観察した。実験により観察された現象を考察するために FEM を用いて三次元モデルの解析も行った。この結果、基材が不均一な構造を持つ場合にはき裂先端のフェーズアングルおよびひずみエネルギー解放率は一定とならず、き裂先端は基材の応力分布を反映した形状を有することがわかった。

(4)まとめ

以上の結果より、基材が不均一な構造を持つ場合に実験によって得られる荷重、フェーズアングル、ひずみエネルギー解放率は平均値であり、き裂先端の各点における値は異なっている。このような場合に実験のみで剥離の評価をすることは不十分であり、FEM 等と組み合わせることで多角的な観点から評価を行う必要があることが示された。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計2件（うち招待講演 1件 / うち国際学会 2件）

1. 発表者名 Y. Kagawa
2. 発表標題 DELAMINATION PROBLEM IN EBCs: RECENT ACHIEVEMENT AND CHALLENGES
3. 学会等名 PACRIM - 13 (The 13th Pacific Rim Conference of Ceramic Societies) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Y. Arai, Y. Aoki, H. Hatta, Y. Kagawa
2. 発表標題 Effect of stress/strain distribution on quantitative measurement of delamination toughness in oxide EBCs on SiC/SiC substrate system
3. 学会等名 43rd International Conference & Exposition on Advanced Ceramics & Composites (国際学会)
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計1件

1. 著者名 Y. Kagawa, M. Tanaka, M. Hasegawa	4. 発行年 2019年
2. 出版社 Springer	5. 総ページ数 40
3. 書名 Handbook of Mechanics of Materials	

〔産業財産権〕

〔その他〕

東京工科大学 セラミックス複合材料センター
<https://www.teu.ac.jp/karl/cmc/>

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
--	---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------