

令和元年5月22日現在

機関番号：32660

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2015～2018

課題番号：15K05692

研究課題名(和文)次世代超高温ガスタービン用多孔質遮熱被膜のはく離強度と熱伝導特性評価

研究課題名(英文) Evaluation of delamination strength and thermal conductivity of porous thermal barrier coating for super high temperature gas turbine in the next generation

研究代表者

金子 堅司 (Kaneko, Kenji)

東京理科大学・工学部機械工学科・教授

研究者番号：40016803

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,700,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では高温での酸化や熱負荷の繰り返しを受ける多孔質遮熱被膜の疲労せん断剥離強度および熱伝導特性を正確に評価し、その気孔率依存性についてねじりピンテスト法により実験的に検討し、かつ有限要素法による特異場解析によって強度基準を明らかにした。まず、多孔質被膜の弾性変形特性を球の押し込み試験と対応する有限要素法解析によって求め、単純せん断負荷による剥離強度をトップコートとボンドコートの界面端における特異応力場の強さを基準にして統一的に評価した。次に、せん断繰り返し疲労試験によって3種類の被膜のS-N曲線を求め、その気孔率依存性を明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究の学術的かつ社会的意義は以下の通りである。(1)溶射被膜のせん断剥離強度を疲労強度の面においても実験的かつ解析的に明確に求めることを可能にするねじりピンテスト法の有用性を確認したもので、学術研究上の意義は大きい。(2)ガスタービンの性能向上のためにポラスな遮熱被膜を実機タービン翼に適用する際の強度と安全性の確認のために必要な被膜の疲労剥離強度曲線を任意の気孔率被膜に対して求め、決定した点。(3)ポラスな遮熱被膜を適用することでガスタービン等の性能向上を図ることはエネルギーの効率的な利用と資源の節約あるいは地球環境の保護・保全等に資する社会的にも極めて意義のある成果である。

研究成果の概要(英文)：In this study, shear fatigue delamination strength and thermal conductivity of porous thermal barrier coatings (TBC's) were investigated experimentally and analytically, using the torsion pin-test method and the finite element method (FEM) analysis. First, elastic deformation properties of the porous TBC's were determined by the spherical indentation method with the corresponding FEM analysis. Second, critical shearing delamination torques were determined by the simple torsion pin-test method for 4 kinds of the porous TBC's and the critical strength of the shear stress singularity around the interfacial edge was decided as the general delamination strength standard. Third, fatigue shearing delamination strength (S-N curves) was obtained for three kinds of the porous TBC's by the cyclic torsion pin-test method and then S-N curves of the porous TBC's of an arbitral porosity were determined.

研究分野：機械工学

キーワード：遮熱被膜 疲労せん断剥離 剥離強度基準 気孔率依存性 熱伝導率 熱負荷依存性 応力場の強さ S-Nせん断疲労曲線

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

溶射被膜技術の発展により、ガスタービン翼・燃焼室壁や先端宇宙機器などの過酷な環境下で使用される重要な構造部材への適用が図られている。また最近ではガスタービン翼などの遮熱性能を上げるために被膜内に空孔を混入した多孔質な溶射皮膜も提案されている。このような多孔質被膜は遮熱性の向上が期待できるが、一方で被膜自体の強度や付着強度の低下が懸念される。こうした多孔質被覆構造システムの強度・寿命設計を精度良く行うためには、被膜と母材との付着力や被膜自体の疲労破壊強度を正確に把握することが必要である。従来、溶射被膜の強度評価に関しては、様々な研究が行われているが、強度設計に直接役立つ被膜システムの疲労損傷強度特性 (S-N 曲線など) を明確に求めることができていなかった。

2. 研究の目的

本研究では4種類の多孔質遮熱被膜に対して単純なせん断負荷による剥離強度を評価すると共にそのうちの3種類の多孔質遮熱溶射被膜の疲労はく離強度をねじりピンテスト法によって実験的に評価すると共に対応する有限要素法解析によって被膜界面に生じるせん断特異場応力分布を求め、任意のポイド率に対する S-N 曲線を得ることなどを目的としている。

3. 研究の方法

本研究ではねじりピンテスト法によって4種類の多孔質遮熱被膜に対して単純なせん断負荷によるせん断剥離強度および疲労せん断はく離強度を実験的に評価すると共に対応する有限要素法解析によって被膜界面(トップコートとボンドコートとの界面)に生じるせん断特異場応力分布を求め、任意のポイド率に対するせん断疲労損傷強度を定量的に評価し、実機の強度設計に用いることができる S-N 曲線を得る。

4. 研究成果

(1)ピン径が大きくなればせん断疲労はく離強度は見かけ上低くなるが、被膜とピンとの界面端近傍の特異場応力を解析的に求め、応力分布曲線から得られる応力場の強さ(界面端の応力分布を $\sigma = K\bar{r}^{-\lambda}$ で近似したときの K , はほぼ一定である)をはく離発生の支配因子と考えることによってピン直径に依存しない疲労はく離強度の評価(正規化された S-N 曲線の決定)が可能である。

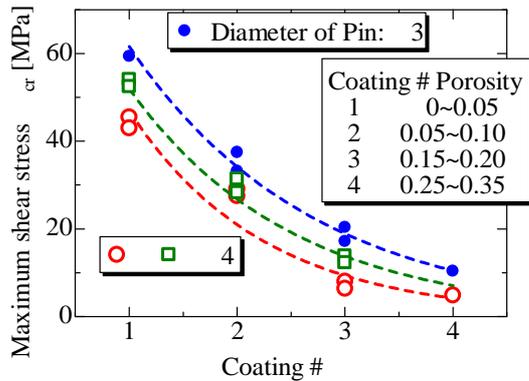


図1 ピン径3および4mmの試料によるピン外周の最大せん断応力で表した4種類の多孔質遮熱被膜の見掛けのせん断はく離損傷強度

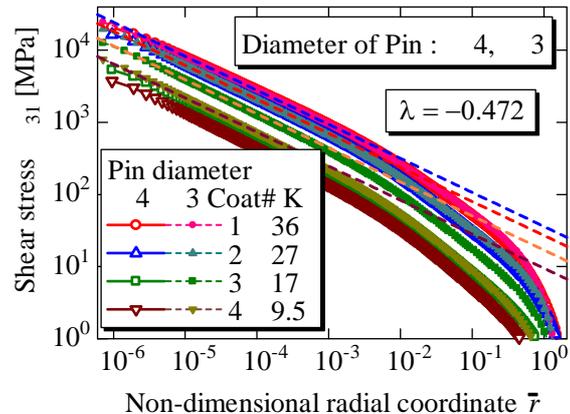


図2 多孔質遮熱被膜の単純せん断負荷でのはく離時の界面端におけるせん断応力分布曲線と応力場の強さ K の決定

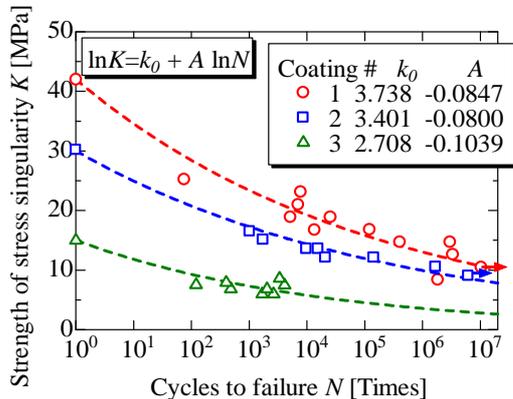


図3 応力場の強さ K で表した多孔質遮熱被膜のせん断疲労はく離損傷曲線 (S-N 曲線)

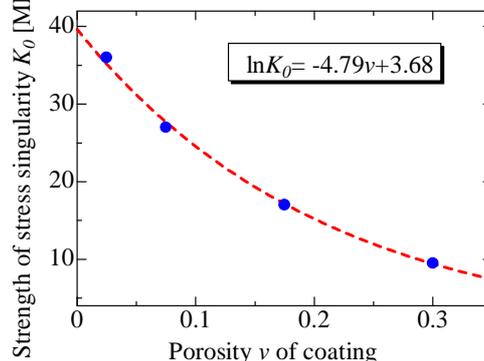


図4 多孔質遮熱被膜の単純せん断負荷でのはく離時の応力場の強さ K_0 の空孔率依存性曲線

- (2)被膜のポイド率が上昇すると疲労はく離損傷強度（ $S-N$ 曲線）は指数関数的に低下する．単純ねじり負荷によるはく離損傷限界応力あるいは応力場の強さ K によって正規化された $S-N$ 曲線はポイド率が異なってもほぼ一定の曲線で表示できる．

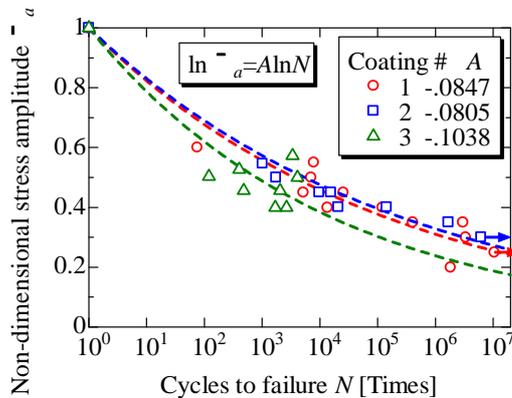


図 5 多孔質遮熱被膜の単純せん断疲労損傷曲線の単純せん断負荷での限界はく離による正規化（空孔率が異なってもほぼ同じ曲線で近似できる）

- (3) 前項の結果と界面端近傍のはく離限界応力場の強さ K とポイド率の関係(図 4)を求め、任意のポイド率の遮熱被膜のはく離損傷 $S-N$ 曲線を求めることに成功した．
- (4) ねじりせん断負荷の繰り返しによる疲労はく離においては、界面ではく離割合が減少し、被膜内での破壊が生じる傾向があることかつこの傾向は被膜のポイド率が上昇すると顕著になることを確認した．これによる影響として、前項で述べた予測された $S-N$ 曲線よりも低い疲労はく離損傷曲線となる恐れがある．
- (5) ねじりピンテスト法による実験と対応する特異場応力解析によって、多孔質遮熱被膜自体の疲労強度を含む精度の高いはく離損傷強度評価が十分に可能であること示した．

5 . 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 9 件)

- (1) Kenji KANEKO, Evaluation of the Shearing Strength of a WC-12Co Thermal Spray Coating by the Scraping Test Method, Coatings, 5, 278-292, (2015.7), Manuscript ID: coatings -89348; DOI: 10.3390/coatings5030278.
- (2) 金子堅司, 荒井正行; 押し込み試験による多孔質遮熱被膜の変形特性評価, 日本機械学会論文集, 84 巻 863 号 (2018) [DOI: 10.1299/transjsme.18-00147].
- (3) Kenji KANEKO, Evaluation of Shear Delamination Strength of Thermal Barrier Coating After Heating by Torsion Pin-Test Method, Reference: EFM4864, Engineering Fracture Mechanics, Volume 148, November 2015, Pages 192–202, DOI information: 10.1016/j.engfracmech.2015.09.004
- (4) DOI:10.1299/transjsme.14-00511: 荒井, 清水, 水津, "高温引張負荷下でのセラミック遮熱コーティングの損傷過程について", 日本機械学会論文集, 81 巻, 825 号 (2015), PP.1 -12.
- (5) DOI:10.1299/transjsme.15-00340: 清水, 荒井, 水津, "高温曝露されたセラミック遮熱コーティングの引張負荷下での損傷過程について", 日本機械学会論文集, 81 巻, 831 号 (2015), PP.1 -11.
- (6) DOI:10.1299/transjsme.15-00614: 小野, 荒井, 水津, "高温下におけるセラミック遮熱コーティングの界面疲労き裂進展挙動", 日本機械学会論文集, 82 巻, 835 号 (2016), PP.1 -13.
- (7) DOI:10.1016/j.surfcoat.2016.07.047: M. Arai, "Microdamage-coupled Inelastic Deformation Analysis of Ceramic Thermal Barrier Coatings Subjected to Tensile Loading", Surface & Coatings Technology, Vol. 304, Vol. 25 (2016), pp. 542-552.
- (8) DOI:10.1016/j.surfcoat.2015.11.022: M. Arai, H. Ochiai, T. Suidzu, "A novel low-thermal-conductivity plasma-sprayed thermal barrier coating controlled by large pores", Surface & Coatings Technology, Vol. 285 (2016), pp.120-127.
- (9) DOI:10.4028/www.scientific.net/KEM.774.137: H. Katori, M. Arai, K. Ito, "Comprehensive Numerical Simulation of Stress and Damage Fields under Thermo-Mechanical Loading for TBC-Coated Ni-Based Super alloy", Key Engineering Materials, Vol. 774 (2018), pp. 137 -142.

〔学会発表〕(計 17 件)

- 1) 安田, 荒井, "圧入法による薄膜界面破壊靱性評価に関する研究", 日本材料学会 第 64 期学術講演会 (2015), 山形大学
- 2) 小野, 荒井, 水津, "その場観察に基づくセラミック遮熱コーティングの高温疲労き裂進展挙動", 日本機械学会 M&M2015 材料力学カンファレンス, (2015-11), 慶応大学

- 3) 落合,荒井,水津,“調和振動的加熱を受ける多孔質セラミックコーティングの熱伝導特性”,日本機械学会 M&M2015 材料力学カンファレンス,(2015-11),慶応大学
- 4) 清水,荒井,水津,“引張負荷を受けるセラミック遮熱コーティングの損傷 - 非弾性連成有限要素解析”,日本機械学会 M&M2015 材料力学カンファレンス,(2015-11),慶応大学
- 5) 荒井,“高効率ガスタービン動翼のトランスピレーション冷却のための多孔質セラミックコーティングの開発”,中部支部 第13期 第4回「溶射技術研究会」,(2016-03),名古屋
- 6) 嶋,荒井,神野,水津,“MCrAlY 溶射皮膜の界面形状が界面破壊靱性値に及ぼす影響について”,日本材料学会 第65期通常総会・学術講演会,(2016-05),富山大学
- 7) 落合,小野,荒井,馬淵,鈴木,水津,神野,“調和振動加熱を受ける多孔質セラミックコーティングの熱伝導特性に関する研究”,日本機械学会 材料力学部門 M&M2016(2016-10),神戸大学.
- 8) 香取,荒井,伊藤,“引張負荷を受けるセラミック遮熱コーティングのき裂進展シミュレーション”,日本材料学会 第66期 通常総会・学術講演会(2017-05),名城大学
- 9) 香取,荒井,伊藤,“熱疲労条件下でのセラミック遮熱コーティングの応力・損傷連成数値解析に関する研究”,日本機械学会 2017年 年次大会(2017-09),埼玉大学
- 10) 金子堅司,荒井正行,“多孔質遮熱被膜の弾塑性変形特性”日本機械学会 M&M2017 材料力学カンファレンス(2017-10),北海道大学
- 11) 香取,荒井,伊藤,“熱疲労条件下でのセラミック遮熱コーティングの疲労き裂進展シミュレーション”,日本機械学会 2018年度 年次大会(2018-09),関西大学
- 12) 金子堅司,荒井正行,“押し込み試験による多孔質遮熱被膜の変形特性評価”日本機械学会 2018年次大会(2018-09),関西大学
- 13) 金子堅司,荒井正行,“ねじりピンテスト法による多孔質遮熱被膜のせん断疲労はく離強度評価”日本機械学会 2019年次大会(2019-09),秋田大学
- 14) Y. Shimizu, M. Arai, T. Suidzu, "Damage Progress of Ceramic Thermal Barrier Coatings Exposed at High-temperature under Tensile Loading", ATEM'15: International Conference on Advanced Technology in Experimental Mechanics (2015-10), Toyohashi, Japan.
- 15) T. Ono, M. Arai, T. Suidzu, "Interfacial Crack Propagation Behavior in TBC System Subjected to Fatigue Loading", ATEM'15: International Conference on Advanced Technology in Experimental Mechanics (2015-10), Toyohashi, Japan.
- 16) H. Katori, M. Arai, K. Itohn, "Numerical simulation of inelastic deformation and crack propagation in thermal barrier coatings subjected to creep-fatigue loading", 4th International ECCC Conference, (2017), Duesseldorf, Germany
- 17) H. Katori, M. Arai, K. Ito, "Comprehensive Numerical Simulation of Stress and Damage Fields under Thermo-Mechanical Loading for TBC-coated Ni-based Superalloy", 17th International Conference on Fracture and Damage Mechanics (2018), Seville, Spain.

〔図書〕(計 0件)

〔産業財産権〕

出願状況(計 0件)

取得状況(計 0件)

6. 研究組織

(1) 研究分担者

研究分担者氏名: 荒井正行

ローマ字氏名: ARAI MASAYUKI

所属研究機関名: 東京理科大学

部局名: 工学部機械工学科

職名: 教授

研究者番号(8桁): 40371314