

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 2 日現在

機関番号：11201

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2012～2014

課題番号：24560084

研究課題名(和文) 遮熱コーティングシステム材の高温共鳴超音波弾性計測に基づく界面損傷評価法の開発

研究課題名(英文) Development of the high temperature evaluation method for interfacial damage of a thermal barrier coating system by resonance ultrasound spectroscopy

研究代表者

脇 裕之(WAKI, Hiroyuki)

岩手大学・工学部・准教授

研究者番号：30324825

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,200,000円

研究成果の概要(和文)：基材一体の遮熱コーティングシステム材のコーティングの弾性係数を共鳴超音波スペクトロスコピーにより評価し、損傷が発生した際の見かけの弾性係数の変化から、損傷を非破壊でその場評価する手法の開発を行った。まず、各種損傷が生じた際の見かけの弾性係数の変化を有限要素解析した。表面に現れる縦割れき裂に対しては見かけの弾性係数(特に面内方向のヤング率)の変化が大きく、それを利用すれば、縦割れの深さや長さを定量的に評価可能であることを示した。また、実験的にもそれを確認した。

研究成果の概要(英文)：A new nondestructive evaluation method of the damage in a thermal barrier coating (TBC) system was developed. The method used the apparent change in the elastic moduli of a TBC if damaged by resonance ultrasound spectroscopy. First, the changes in the apparent elastic moduli of various damages were calculate by FEM. It was found that the change in the in-plane elastic modulus if a surface crack occurred was significant, and the crack depth and length were able to be evaluated using the change. It was also confirmed experimentally.

研究分野：高温強度学

キーワード：遮熱コーティング 弾性係数 損傷評価 共鳴超音波スペクトロスコピー 高温 はく離 き裂

1. 研究開始当初の背景

ガスタービンエンジンのタービン入口温度は 1500 に達しており、動・静翼、燃焼器などの高温部品は遮熱コーティング(Thermal barrier coating: TBC)が必修技術となっている。この様なガスタービンの入口温度の高温化は直接タービンの効率向上につながることから、熱効率の向上を目指し、更なる高温化が進められている。そのための手段の1つとして、高機能コーティングの材料開発や新プロセス開発が盛んに推し進められている。また TBC の適用実績の増加に伴い経年劣化した TBC の余寿命予測も重要な課題となっている。

一方、このような新材料の開発や余寿命予測には、破壊機構に基づいた指針が必要となる。しかし、TBC システムの損傷機構は、力学的負荷、熱的負荷、高温劣化などが複合化した複雑なものであり不明な点が多い。また従来技術では、高温下において正確な損傷過程を連続的にその場評価することが困難であった。このような背景で、TBC の複雑な損傷過程の解明に寄与できる損傷評価法の研究開発は重要な課題である。

2. 研究の目的

共鳴超音波スペクトロスコピー(Resonance Ultrasound Spectroscopy: RUS)は多数の共鳴周波数を得て、その共鳴周波数群を満足する全方向の弾性係数を逆計算で決定する方法である。本研究では、基材一体のコーティングシステム材のコーティングの弾性係数を RUS により評価し、損傷が発生した際の見かけの弾性係数の変化から、損傷を非破壊でその場評価する手法の開発を主目的とする。

具体的には、次のような構想である。(1) 皮膜に損傷が発生した場合、皮膜の見かけの弾性係数が変化すると予想される。また、見かけの弾性係数の変化量と損傷規模は相関関係があると考えられ、損傷規模も推定できると考えられる。(2) 損傷タイプに対応する方向の弾性係数が変化すると予想され、損傷タイプも推定できると考えられる。

以上のように、周波数の変化で損傷を検出するのではなく、全方向の見かけの弾性係数の変化を媒介して、損傷のタイプや規模を評価する構想である。

3. 研究の方法

本研究の手法は、以下の手順に大別できる。

(1) 共鳴超音波スペクトロスコピーにより、高温下におけるコーティングの全方向弾性係数を基材一体のシステム材のまま計測する新しい手法を構築する。

(2) 構築した上記システムで、TBC の弾性係数評価を行い、その妥当性を機械的負荷法との比較で確認する。

(3) 有限要素法を用いて損傷が発生した場合の振動解析を行い、損傷が生じた際のコーティングの見かけの弾性係数の変化を調査す

る。すなわち、内部損傷(界面ではなく離れと裂)と表面損傷(表面の縦割れき裂)に対して、全方向の見かけの弾性係数の変化の大きさを調査する。このように、各種損傷に対してどの方向の弾性係数の変化が大きくなり、どのタイプの損傷が評価可能かを明らかにする。また、損傷の規模を変化させた場合の見かけの弾性係数変化も解析し、本手法の損傷の検出能力も評価する。

(4) 人工的に表面縦割れき裂を導入した TBC システム試験片で損傷評価を実施し、見かけの弾性係数の変化から縦割れき裂を定量的に評価可能かどうかの確認実験を行う。

4. 研究成果

本研究の主な成果は、以下の4つに大別できる。

(1) 高温下における基材一体のシステム材の計測システムの構築

弾性定数群(C_{ij})は試料寸法、密度、共鳴周波数群から逆計算で決定することができる。すなわち、弾性定数群を仮定し、測定した共鳴周波数群と計算で求めた共鳴周波数群が一致するまで繰り返し計算し、弾性定数群を決定するのが RUS 法である。

RUS により、高温下におけるコーティングの全方向弾性係数を基材一体のシステム材のまま計測する手法を構築した。試験片は支持棒3本で支持する。そのうちの1本は圧電素子を取り付けてあり、試験片を加振できるようにしてある。高周波誘導加熱と円筒型のサセプターによる間接的な加熱により試験片を加熱した。加振の周波数をスイープさせ、試験片が共振する周波数群を同定する。円筒の内径から試験片を観察することができ、レーザードップラー振動計で振動分布(振動モード)を測定した。このシステムの特徴は、試験片の振動分布を上方から直接同定しており、間違いなく試験片自身の共振周波数と振動モードを同定でき、外乱に強靱で弾性係数の決定精度が常温同様に高いことである。

開発したシステムは熱サイクル負荷も与えることができ、今後、熱サイクルの繰返しによる皮膜の損傷発達過程の解明へも適用可能なものである。

(2) 弾性係数の評価結果

耐熱コーティング CoNiCrAlY および TBC (Yttria stabilized Zirconia)の全方向弾性係数を基材一体のまま評価した。結果は以下のようになりまとめられる。

TBC セラミックは金属と比べ相対的に鏡面状態が悪いため、常温においては、TBC 単体試験片での計測より、基材一体試験片の鏡面基材側を計測することが有効であることが分かった。特に、非常にポーラスな特殊 TBC においては鏡面研磨が困難であり、このような材料では基材一体試験片での評価が有効であると分かった。一方、高温において

は、金属基材は酸化して鏡面状態が悪くなるのに対して、セラミックスは鏡面を維持するので、セラミックス側を測定すれば良いことも分かった。

CoNiCrAlY および TBC について、本手法で求めた値（面内方向弾性係数）を曲げ負荷法と比較し、その妥当性を確認できた。

(3) 損傷が生じた際の見かけの弾性係数の変化

図 1 に損傷評価法の流れ図を示すが FEM と実験に分かれている。まず FEM 解析を述べる。皮膜が損傷した場合の共鳴周波数群 (f_k) を求める。損傷が発生していない健全材の弾性定数群を変化させ、上記の共鳴周波数群と一致する見かけの弾性定数群を求める。このとき、共鳴周波数群の一致の判断は、共鳴周波数群それぞれの誤差を求め、それらの合計が最小値となるときとする。損傷率を変化させ同様の解析を行い、それぞれの損傷率に対応する見かけの弾性係数の変化率を求める。以上のように皮膜の損傷率と見かけの弾性係数の変化率の関係を明らかにする。

次に損傷評価実験について述べる。実際に損傷を受けたコーティング材の共鳴周波数群を測定する。見かけの弾性定数の評価は皮膜が健全であるとみなして行う。FEM 解析によって得られた、皮膜損傷率と見かけの弾性係数変化率の関係に照らし合わせることで、皮膜の損傷状態を推定することができる。

本節では、FEMの解析結果について述べる。図2中に示すようなトップコーティングに縦割れ貫通のき裂（十字型）が生じたモデルについて、見かけの弾性係数の変化を評価した。図2に、縦割れき裂モデルについて、見かけの弾性係数の変化を示す。縦軸は図1中の f_k の一致度(誤差)を表しており、この値が極小のときが見かけの弾性定数を意味する。解析結果を見ると、 ν_{yz} , ν_{xy} , E_z , G_{yz} が変化しても共鳴周波数誤差がほとんど変化しないため、これらの変化と縦割れき裂は相関関係が低いことが分かる。一方、面内ヤング率 E_x を変化させると、共鳴周波数の誤差に最小値が現れる。すなわち、見かけの E_x が約75%に低下しており、これがき裂が発生したときの見かけの弾性係数の変化である。このようにRUS法で見かけの E_x の変化率を見ることで、表面縦割れき裂の損傷評価が可能と考えられる。

次に、表面き裂の合計長さをき裂長さ、膜厚方向の寸法をき裂深さとして、図2の貫通十字き裂モデルに対してそれぞれ損傷率50%のモデルを評価した。FEM 解析による各モデルの E_x の変化率を図3に示す。図3より、き裂長さ50%モデル、き裂深さ50%モデルは、いずれも100%モデルと比較して変化率が約半分となった。このことから、事前に損傷のタイプが分かれば、き裂長さやき裂深さについて概算の評価も可能と考えられる。また、

膜厚が厚い方が見かけの弾性係数の変化率が高く、損傷を検出しやすいことも確認できる。

その他に、内部の損傷（界面はく離、界面き裂）に対して、見かけの弾性係数の変化を解析した。界面はく離に対しては、全方向の見かけの弾性係数はほとんど変化しなかった。一方、界面き裂については、 E_x の変化が現れたが比較的厚い皮膜でも数%程度であったため、実験的にそれを検出することは困難と考えられた。

以上のように、表面に現れる縦割れき裂に対しては見かけの弾性係数（特に面内方向のヤング率）の変化が大きく、その変化を利用すれば、縦割れの深さや長さを評価可能であることが分かった。逆に言えば、これ以外の損傷には不敏感であるので、このタイプの損傷の発達をモニターできると考えられる。

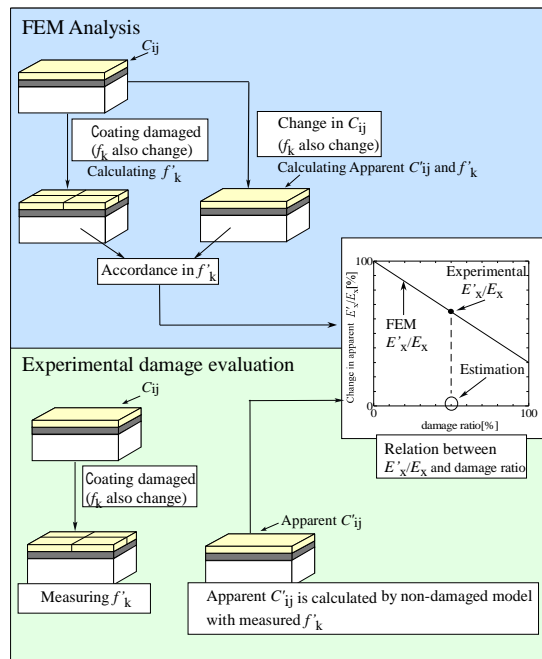


図1 見かけの弾性係数の変化を用いた損傷評価法のフローチャート

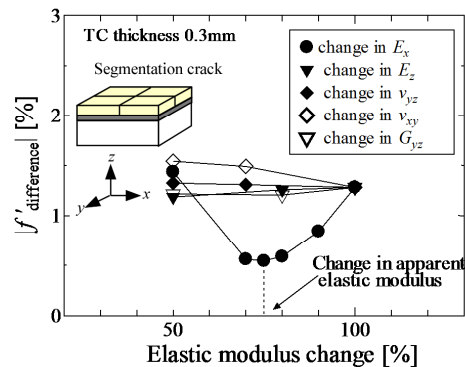


図2 表面縦割れき裂による見かけの弾性係数の変化

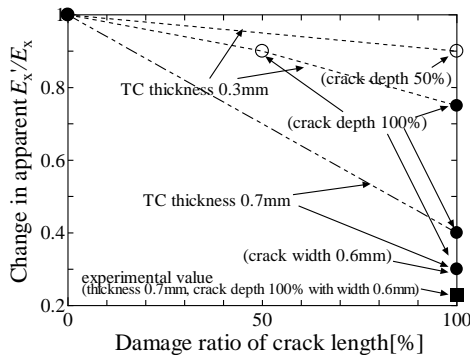


図3 損傷規模と見かけの面内ヤング率の変化の関係

(4) 損傷評価実験

損傷評価実験として、図2中に示すような十字型の表面縦割れ貫通き裂を有するコーティング材を評価した。厚さ約2mmのSUS基材にボンドコートとして厚さ約0.1mmのCoNiCrAlYをAPS溶射し、その上にトップコートとして厚さ約0.7mmのYSZをAPS溶射した。その後約5.0mm×4.0mmの寸法に切断した。最後に、ダイヤモンドやすりによって幅約0.6mmのスリットを導入した縦割れき裂材(TC層を貫通)を作製した。

図1の実験手順で示したとおり、見かけの弾性定数の評価は皮膜が健全であるとみなして行う。評価された見かけの弾性係数が本来の弾性係数からどの程度変化しているかを求める。図3に示す皮膜損傷率と見かけの弾性係数変化率の関係に照らし合わせることで、皮膜の損傷状態を推定することができる。実際の確認実験のき裂は、機械加工によるスリットき裂となるため、その幅を0.6mmとした解析結果も示している。

実験による見かけの弾性係数 E_x の変化比を図3に示す。図3より、 E_x の計算結果は膜厚0.7mm、き裂幅0.6mmの貫通き裂モデルと近い値を示した。このことから、縦割れき裂の定量的損傷評価が可能であることが確認できる。

以上のように、人工的に表面縦割れき裂を導入したTBCシステム試験片で損傷評価を試み、見かけの弾性係数(面内方向のヤング率)の変化から縦割れき裂を定量的に評価できることを実験的にも示した。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計4件)

H. Waki, A. Oikawa, M. Kato, S. Takahashi, Y. Kojima, F. Ono, Evaluation of the Accuracy of Young's Moduli of Thermal Barrier Coatings Determined on the Basis of Composite Beam Theory, Journal of Thermal Spray Technology, 査読有, Vol. 23, 2014, pp.1291-1301.

DOI: 10.1007/s11666-014-0145-7

脇 裕之, 小林 明, 石井徳章, 遮熱コー

ティングが基材の高温低サイクル疲労寿命に及ぼす影響, 材料, 査読有, Vol.62, 2013, pp.125-130.

DOI: 10.2472/jsms.62.125

脇 裕之, 小林 明, HVOF 溶射による耐熱コーティング CoNiCrAlY の高温疲労特性, プラズマ応用科学, 査読有, Vol.20, 2012, pp.120-125.

〔学会発表〕(計7件)

瀧澤健介, 脇 裕之, 荻博次, 小林明, プラズマ溶射 CoNiCrAlY の内部摩擦の組織依存性, 日本機械学会 2014年度年次大会講演会, 2014.9.7-10, 東京電機大学(東京都足立区)。

M. Saitoh, H. Waki, H. Ogi, A. Kobayashi, Temperature Dependence of Internal Friction in Thermal Barrier Coatings, 7th International Workshop on Plasma Application and Hybrid Functionally Materials, 2014.3.7-10, 香港理工大学(香港)。

脇 裕之, 溶射皮膜の弾性係数評価法 - 標準法から全方向係数評価まで -, 日本溶射学会関東支部平成25年度第3回講演会, 2013.12.11, 首都大学東京(東京都千代田区)(招待講演)。

齊藤淳, 長澤隆明, 脇裕之, 荻博次, 小林明, 共鳴超音波弾性計測に基づく遮熱コーティングの損傷評価の基礎研究, 日本機械学会東北支部第49期秋期講演会, 2013.9.20, 岩手大学(盛岡市)。

H. Waki, M. Saitoh, H. Ogi, A. Kobayashi, Anisotropic Elastic Modulus of TBC by Resonance Ultrasound Spectroscopy at High Temperature, Third German-Japanese Workshop on Thermal Barrier Coating Systems for Gas Turbines, 2013.6.25-27, ミュンヘン(ドイツ)。

脇 裕之, 荻 博次, 小林 明: 超音波共鳴法による遮熱コーティングの高温異方性弾性係数の焼結特性評価, 日本機械学会 M&M2012 材料力学カンファレンス, 2012.9.22-24, 愛媛大学(松山市)。

6. 研究組織

(1) 研究代表者

脇 裕之 (WAKI Hiroyuki)

岩手大学・工学部・准教授

研究者番号: 30324825

(2) 連携研究者

荻 博次 (OGI Hirotsugu)

大阪大学・基礎工学研究科・准教授

研究者番号: 90252626