

氏名	はやせ ともゆき 早瀬 知行
本籍（国籍）	岩手県
学位の種類	博士(工学)
学位記番号	工博 第321号
学位授与年月日	令和2年9月25日
学位授与の要件	学位規則第5条第1項該当 課程博士
研究科及び専攻	工学研究科 機械・社会環境システム工学専攻
学位論文 題目	遮熱コーティングの弾性係数および残留応力評価法の構築と高温曝露材への適用
学位審査委員	主査 教授 脇 裕之 副査 教授 西村 文仁 副査 教授 花原 和之 副査 理事 水野 雅裕

論文内容の要旨

遮熱コーティング(thermal barrier coating : TBC)は、ガスタービンエンジンや航空機エンジンの高温部材に適用される。TBCは、その低熱伝導性により、高温ガス環境下で基材の温度上昇を抑え、運転温度の高い高効率なガスタービンエンジンの開発に貢献するキーテクノロジーである。TBCシステムは、超合金基材、MCrAlY（MはCo, Niを表す）ボンドコート（BC）、イットリア安定化ジルコニア（yttria-stabilized zirconia : YSZ）トップコート（TC）の三層で構成される。BCは基材の耐酸化・耐腐食性を向上させ、TCは遮熱性を向上させる。

TBCのヤング率・ポアソン比は、TBCシステムの材料力学パラメータの計算に必要不可欠であり、重要な機械的特性である。また、TBCのプラズマ溶射プロセス中の皮膜粒子の急冷凝固や、その後の冷却中の各層の熱ひずみ差により発生する残留応力は、皮膜被覆後の試験片を変形させるほか、皮膜中のき裂やはく離の原因となるため重要である。これらのヤング率・ポアソン比や残留応力は、稼働中のガスタービンエンジンの高温曝露により変化することが知られている。したがって、ヤング率・ポアソン比の評価法の構築とその値の解明、残留応力の評価法の構築と成膜中・高温曝露中の残留応力形成機構の解明は、高機能TBCの設計・開発に必要不可欠である。本研究では、TBCの重要な機械的特性であるヤング率・ポアソン比、残留応力の高精度評価法を提案し、TBC as-spray材に適用した。さらに、提案した各手法を用いて、各機械的特性に及ぼす高温曝露の影響も評価した。

第1章では、TBC as-spray材、高温曝露材のヤング率・ポアソン比、および残留

応力に関する先行研究の状況と課題を整理し、本論文の目的と位置づけについて述べた。

第2章では、二次元の積層板曲げモデルを基材片側のみに被覆した三層板に適用し、TBCの面内ヤング率とポアソン比を評価する手法を構築した。本研究では、基材一体材から評価する三層モデルとして、(i) 皮膜表面二軸ひずみ、(ii) 基材表面二軸ひずみ、(iii) 基材と皮膜両表面の二軸ひずみを用いて評価する手法を提案した。次に、提案した三つの手法で誤差感度解析を行い、誤差感度を比較した。その結果、三層試験片を用いたTCのヤング率・ポアソン比評価では手法(i)、二層試験片を用いたBCのヤング率・ポアソン比評価では手法(i)と(iii)が有効であることを示した。最後に、手法(i)によりBC、TCのヤング率とポアソン比を実験的に評価したところ、各値とも自立膜から評価した結果と一致した。以上のように、本手法に有効性を示した。

第3章では、第2章で提案した曲げモデルを用いて、大気プラズマ溶射(APS)で成膜されたMCrAlY BC、YSZ TCのヤング率・ポアソン比に及ぼす高温曝露の影響を評価した。その結果、CoNiCrAlY BCは600-1000 °C、YSZ TCは800-1000 °Cの熱処理によりヤング率とポアソン比が上昇し、熱処理温度が高くなるにつれてヤング率の上昇率は高くなることが分かった。また、各as-spray皮膜のヤング率とポアソン比は、1サイクル目の熱処理で大きく上昇し、その後の上昇率は低かった。ポアソン比の上昇率はヤング率より低かった。これは、各as-spray皮膜のポアソン比は元々緻密なバルク材に対して差が小さかったためと考えられた。明らかにした各皮膜のヤング率とポアソン比の上昇は、焼結で説明できた。

第4章では、溶射中の曲率履歴を測定しない簡便な残留応力評価法として、Tsui, Clyneの2層累積プロセスモデルをベースに3層ブロックプロセスモデルを提案した。次に、求めた残留応力を用いて皮膜形成過程で生じる急冷応力と、熱応力を評価し、残留応力の形成過程も検討した。その結果、積層過程では、BC、TCともに皮膜粒子の収縮による急冷応力で引張応力が生じることを明らかにした。BC層の急冷応力は高かったが、TCの急冷応力はマイクロクラック発生の結果として低いことが分かった。結果として生じる残留応力は、BC、TCとも急冷応力が支配的となり決定されることが分かった。

第5章では、第4章で提案した三層曲率モデルを高温曝露されたTBCに適用し、高温曝露された皮膜の残留応力を評価した。次に、高温曝露中のas-spray材の複雑な応力形成機構を検討した。その際、高温曝露前後の常温の二層材曲率変化を用いて、高温曝露中のBC薄膜のクリープ特性を逆計算で評価するモデルを提案した。提案したクリープ特性評価モデルにより、BC層の温度・時間依存クリープ特性を高精度に評価できた。得られたクリープ特性を用いたFEAの結果、BCのas-spray材の残留応力は、高温曝露によるクリープで、引張から圧縮に変化することがわかった。また、曝露温度が高いほど熱処理材の残留応力は低くなった。残留応力の低下は曝露初期の短時間で顕著であり、以降の低下率は低かった。一方、

TC as-spray 材の残留応力は高温曝露により変化しなかった。この応力変化は、三層試験片と二層試験片の曲率差で合理的に説明できた。すなわち、TBC システム試験片の曲率変化は、主に下層の応力変化により生じていたことを明らかにした。

第6章では、本研究を総括し、本論文の結論を示した。

論文審査結果の要旨

遮熱コーティング(thermal barrier coating : TBC))は、ガスタービンエンジンや航空機エンジンの高温部材に適用される。TBC は、その低熱伝導性により、高温ガス環境下で基材の温度上昇を抑え、運転温度の高い高効率なガスタービンエンジンの開発に貢献するキーテクノロジーである。TBC のヤング率・ポアソン比は、TBC システムの材料力学パラメータの計算に必要不可欠であり、重要な機械的特性である。また、TBC のプラズマ溶射プロセス中の皮膜粒子の急冷凝固や、その後の冷却中の各層の熱ひずみ差により発生する残留応力は、皮膜被覆後の試験片を変形させるほか、皮膜中のき裂やはく離の原因となるため重要である。これらのヤング率・ポアソン比や残留応力は、稼働中のガスタービンエンジンの高温曝露により変化することが知られている。したがって、ヤング率・ポアソン比の評価法の構築とその値の解明、残留応力の評価法の構築と成膜中・高温曝露中の残留応力形成機構の解明は、高機能 TBC の設計・開発に必要不可欠である。

本論文では、まず、TBC のヤング率・ポアソン比を三層板の曲げから高精度に評価する手法を提案した。また、その手法を用いて、大気プラズマ溶射 (APS) で成膜された MCrAlY BC, YSZ TC のヤング率・ポアソン比に及ぼす高温曝露の影響を評価した。その結果、CoNiCrAlY BC は 600-1000 °C, YSZ TC は 800-1000 °C の熱処理によりヤング率とポアソン比が上昇し、熱処理温度が高くなるにつれてヤング率の上昇率は高くなることが分かった。また、各 as-spray 皮膜のヤング率とポアソン比は、1 サイクル目の熱処理で大きく上昇し、その後の上昇率は低かった。ポアソン比の上昇率はヤング率より低かった。これは、各 as-spray 皮膜のポアソン比は元々緻密なバルク材に対して差が小さかったためと考えられた。明らかにした各皮膜のヤング率とポアソン比の上昇は、焼結で説明できた。

次に、溶射中の曲率履歴を測定しない簡便な残留応力評価法として、Tsui, Clyne の累積プロセスモデルをベースに3層ブロックプロセスモデルを提案した。求めた残留応力を用いて皮膜形成過程で生じる急冷応力と、熱応力を評価し、残留応力の形成過程も検討した。その結果、積層過程では、BC, TC ともに皮膜粒子の収縮による急冷応力で引張応力が生じることを明らかにした。BC 層の急冷応力は高かったが、TC の急冷応力はマイクロクラック発生の結果として低いことが分かった。結果として生じる残留応力は、BC, TC とも急冷応力が支配的となり決定されることが分かった。次に、提案した三層曲率モデルを高温曝露された TBC に適用し、高温曝露された皮膜の残留応力を評価した。さらに、高温曝露中の as-spray

材の複雑な応力形成機構を検討した。その際、高温曝露前後の常温の二層材曲率変化を用いて、高温曝露中の BC 薄膜のクリープ特性を逆計算で評価するモデルを提案した。得られたクリープ特性を用いた FEA の結果、BC の as-spray 材の残留応力は、高温曝露によるクリープで、引張から圧縮に変化することがわかった。また、曝露温度が高いほど熱処理材の残留応力は低くなった。残留応力の低下は曝露初期の短時間で顕著であり、以降の低下率は低かった。一方、TC as-spray 材の残留応力は高温曝露により変化しなかった。この応力変化は、三層試験片と二層試験片の曲率差で合理的に説明できた。すなわち、TBC システム試験片の曲率変化は、主に下層の応力変化により生じていたことを明らかにした。

これらの成果は、TBC 成膜時の残留応力形成機構、TBC の残留応力やヤング率・ポアソン比に及ぼす高温曝露の影響を理解するうえで重要な知見となる。さらに、提案したヤング率・ポアソン比の評価法、および応力形成機構の評価法は、セラミック被覆材一般に適用できるものであり、高機能な新しい皮膜・プロセス開発に貢献できる。このように、これらの研究成果は、学術的かつ工学的に重要な意義をなすものである。

よって、本論文は博士（工学）の学位論文として合格と認める。

原著論文名（課程修了特例適用（1年短縮）の場合は、2編を記載）

- (1) T. Hayase, H. Waki, Measurement of Young's Modulus and Poisson's Ratio of Thermal Barrier Coating Based on Bending of Three-Layered Plate, *Journal of Thermal Spray Technology*, Vol. 27, issue 6, pp. 983-998, 2018.
- (2) T. Hayase, H. Waki, K. Adachi, Residual Stress Change in Thermal Barrier Coating Due to Thermal Exposure Evaluated by Curvature Method, *Journal of Thermal Spray Technology*, doi:10.1007/s11666-020-01032-7, in press