

セラミックス熱遮蔽コーティング(TBC 層)を施した耐熱金属材料(TBC システム)はガスタービンで用いられる高温構造部材には欠かせないものである。コーティングの耐熱金属材料からの剥離は耐熱金属材料の変形や破壊を加速する危険性があるために、コーティングの剥離現象を予測することが TBC システムの高信頼性を確保するために重要な課題になっている。本論文は、実使用環境下で TBC 層剥離損傷を評価するために、有限要素法解析を用いて Barb 試験による TBC 層界面剥離エネルギーの解析評価手法及び実使用環境に近い熱機械疲労条件下での TBC システム中の応力状態を求める手法を確立することを目的としたものであり、全 5 章よりなる。

第 1 章では、解析対象とするセラミックス熱遮蔽コーティングの現状と問題点を概説し、本論文の目的を明確にしている。TBC 層の耐熱金属基材からの界面剥離と剥離による TBC システムの寿命予測に関しては、実験手法と解析手法に大別され、TBC 層の剥離に対する解析を用いる場合には、界面力学特性及を組み込んだ手法が必要になることを説明している。同時に、解析手法について、これまでの結果を整理し、残された課題を抽出している。特に、実使用環境下でのコーティング層の剥離に対して、せん断モード下での界面剥離の条件を実験的に求める手法の開発及び界面剥離の条件を用いた実部材での剥離の状態を解析的に求める手法の開発が重要であることを指摘している。これらの状況をふまえて、TBC システムの界面せん断力学特性の測定手法及び実使用環境下での TBC システム中の応力変化の解析手法について、検討すべき課題を整理するとともに本研究の目的を明確にした。

第2章では、Barb 試験による試験片の応力状態を明確するために、有限要素法を用いて試験片中および界面の応力解析を行った。まず、試験片の応力分布を有限要素法を用いて詳細に調べた。試験前の試験片中には、TBC 層と耐熱金属材料基材の熱膨張係数のミスマッチにより熱応力が発生し、Barb 試験片の界面端部に集中していることを明らかにした。Barb 試験時には、試験片で TBC 層が存在する部分の基材中は引張りの応力が小さくなり、TBC 層側の圧縮応力が大きくなる傾向を定量的に示すとともに、熱応力により生じた界面せん断応力が負荷により相殺され反対方向に増加することを明らかにした。この結果から、試験片中に存在する熱応力が試験結果に及ぼす影響を明らかにした。

また、試験時の試験片中の応力分布から Barb 試験における TBC 層の剥離は TBC 層の下端部から発生することを示した。さらに、界面端部の応力特異性を計算し、応力特異性と試験片の材料組合せとの関係を調べた。界面端部での界面せん断応力成分 τ_{xy} は端部からの距離を r とすると、 $r^{-\lambda}$ のみの特異性による分布を示すことを明らかにし、その特異性オーダー λ はコーティング層と基材間のヤング率の差の絶対値が大きくなるに従って値が大きくなることを計算結果から導いている。

第 3 章では、第 2 章の試験片応力解析の結果をもとにして、試験片界面の下端部

からの TBC 層の剥離き裂を想定し、界面剥離を含む場合の TBC 層の基材からの剥離の解析を行った。解析では、試験片の異なる幾何形状、構成素材間の組合せの影響を考慮している。剥離エネルギー解放率と剥離長さ、試験片の幾何条件および材料組合せとの関係を整理して界面剥離を評価するための形状関数を解析的に求めた。この関数を用いて、実験的に Barb 試験法を用いて界面剥離エネルギー解放率を求めるための方法について説明した。さらに、剥離先端での剥離モードについて検討した。TBC 層と基材間の界面剥離長さを a 、TBC 層の長さを L_{tbc} としたときに、 $a/L_{\text{tbc}} < 0.2$ の範囲では、FEM 解析から得られたフェーズアングル ψ はすべての材料組合せに対して 90° の純粹モード II であり、 $a/L_{\text{tbc}} > 0.2$ の範囲でのフェーズアングル ψ は、コーティング層と基材間のヤング率比が大きくなるにしたがって増加することを示した。また、上述の解析結果を Liu らの定常状態の解析結果と比較し、実際の実験に用いられている試験片の幾何形状($L_{\text{tbc}}/h_s = 1$ 、ここで h_s は基材の厚さ)において、試験片のエッジ効果のため定常状態の剥離条件とは異なる場合が生じることを実証するとともに、本章で求めたフェーズアングルと定常状態との関係を明らかにした。

第4章では、第3章で得られた界面剥離の評価方法を実使用環境での TBC システムの損傷評価に適用するために、熱機械疲労(TMF)試験時の TBC システムの内部力学場を詳細に調べた。解析では、まず、温度勾配の存在する多層構造に対する熱応力の解析解を求め、温度勾配下の TBC 系の基本的な力学挙動を明らかにした。ついで、3次元の単位セル有限要素法モデルを用いて TMF サイクル下での TBC システムの非線形解析を行った。各層材料の応力の TMF サイクルによる変化は試験片のクリープ挙動により支配され、異方性を示していることを明らかにした。試験片の全歪みは TMF サイクル数の増加に従い、一定の歪み速度で増加しており、また負荷応力を増やすことにより歪み速度が大きくなる傾向にあることを説明した。

さらに、TMF サイクル中に TBC 層とボンドコート層間に酸化によって生じる酸化物層(TGO 層)の応力状態について検討した。その結果、TGO 層の負荷方向に沿う応力成分はサイクル依存性を示しており、サイクル数の増加にしたがって減少することや、TGO 層応力の変化は負荷応力および界面形状により大きく影響されることを明らかにした。このような結果を整理して、TBC システムの熱機械疲労試験を有限要素法でシミュレーションする手法を確立した。この計算手法では、システムの構成材料特性のみを用いており、さらに界面剥離の条件を組み込むことも可能であり、TBC システムの損傷を解析する手法として汎用性に富むものになっている。

第5章は総括であり、本論文の結果をまとめている。要するに、本論文はセラミックス熱遮蔽コーティングシステムでの界面力学特性及び熱機械疲労試験時の内部力学場を有限要素法を用いて解析し、熱遮蔽コーティングの信頼性向上を図るための手法を解析的に明らかにしたものであり、コーティング材料工学に役立つものである。

よって、本論文は博士(工学)の学位請求論文として合格と認められる。