

(論文内容の要旨)

本論文は、ガスタービン用コーティングの酸化および基材との相互拡散に伴う組織変化を把握し、それを用いた実機温度推定および劣化予測手法を開発することを目的に、詳細な実験と解析を行ったものであって、6章からなっている。

第1章は緒論であり、ガスタービン用高温部品に関するコーティングについて概観し、とくに本研究材料と関連して耐食コーティング材料および遮熱コーティング材料の施工方法や機能について述べた後、高温における劣化挙動について説明し、本研究の目的と位置づけを明らかにしている。

第2章では、アルミニウム拡散処理を施した耐食コーティング試験片(コーティング材:CoCrAlY および CoNiCrAlY、基材:動翼用超合金)を用いて高温加熱試験を行い、コーティングと基材の界面の拡散層厚さとアルミニウム含有量の変化を光学顕微鏡および電子プローブマイクロアナライザを用いて、精密に評価した。その結果、界面拡散層の厚さが試験時間の平方根に比例し、各温度における厚さの成長速度係数はアレニウスの関係に従うことを明らかにしている。この関係を定式化し、それより材料が晒された温度を推定する手法を開発・提案し、実機使用済タービン動翼各部位の界面拡散層厚さより使用温度を特定できることを示している。また、界面拡散層厚さのバラツキによって生じる温度推定誤差を解析している。さらに、高温部材の劣化の指標としてコーティング中のアルミニウム含有量が有効であることを指摘し、上記実験に基づいてその含有量の高温による減少量の予測手法を提示するとともに、実機ガスタービンで使用された材料のアルミニウム含有量を調べ、本研究で提示した予測手法の有効性を検証している。

第3章では、遮熱コーティングのボンドコートであるCoNiCrAlYの組織変化を実験的に明らかにするとともに、それを用いた実機温度推定手法を開発・提案している。まず、実験により、ボンドコート外面に酸化層が成長するとともにアルミニウム富裕相が消失した層(外面Al低下層)を観察している。これは、ボンドコートの酸化に伴ってアルミニウムが外面へ拡散したものであり、外面Al低下層厚さは試験時間の平方根に比例するとともに、その成長速度係数はアレニウス型の温度依存性を示すことを明らかにしている。この関係を用いると、実機部品の外面Al低下層を観察することより、寿命に密接な影響を有する実機温度を簡便に推定することができる。また、その層の検出限界や判別限界から本推定法の適用範囲を明確に示している。さらに、ボンドコート表面の凹凸によって生じる外面Al低下層厚さのバラツキが推定温度の誤差に与える影響を解析し、信頼区間99%で20K以下の推定が可能であることを示している。さらに、ボンドコート中の平均アルミニウム含有量が、外面Al低下層の増加に伴って線形に減少することを明らかにして、その劣化予測手法を導出している。

第4章では、コーティング施工方法や基材材質が温度推定等に及ぼす影響について実験的に研究している。まず、高速フレイム溶射による耐食コーティングは、減圧プラズマ溶射によるものと同様の相互拡散による界面拡散層が観察され、2章で提案した温度推定法が適用可能であることを明らかにしている。一方、大気プラズマ溶射による耐食コーティングは、高速フレイム溶射や減圧プラズマ溶射によるものより多くの酸化物や空孔を含んでおり、界面拡散層は著しく小さいため、2章の推定法は適用することができないことを示している。さらに、高速フレイム溶射による遮熱コーティングのボンドコートの外側 Al 低下層は、減圧プラズマ溶射のそれより小さいが、温度推定は十分可能であることを見出している。他方、化学組成が異なる基材に対する加熱実験より、基材が異なっても本研究で提案した温度推定法が適用できることを明らかにしている。

第5章では、プラズマガス流による加熱試験装置を用いた高熱流束の熱サイクル試験を行い、遮熱コーティングの損傷過程を実験観察している。温度勾配下での熱サイクルでは、トップコート中にコーティング厚さ方向の縦き裂が発生し、それがボンドコートとの界面付近にまで成長すると、界面に沿った方向に成長する横き裂が発生する。また、複数の横き裂が合体してボンドコートのはく離をもたらすことを明らかにしている。一方、トップコートの気孔率の変化より、試験初期にトップコートの焼結が進行し、その後は飽和する傾向があることを示し、この焼結による弾性係数の変化が応力分布に及ぼす影響を有限要素法解析によって検討している。この解析より、焼結による弾性係数の増加によるトップコート表面の引張応力が縦き裂発生の原因であることを解明している。また、縦き裂先端近傍で生じる応力集中が横き裂発生を誘引していることを明らかにしている。

第6章は結論であり、本論文で得られた成果について要約している。

氏名	岡田満利
----	------

(論文審査の結果の要旨)

本研究は、高温加熱試験によってガスタービン用コーティングの酸化および基材との相互拡散に伴う組織変化を把握し、それを用いた実機温度推定手法を開発するとともに、コーティングの耐酸化性にとって重要なアルミニウム含有量に着目した劣化予測手法について検討している。得られた主な結果は、以下のとおりである。

1) アルミニウム拡散処理を施した耐食コーティングと基材の界面で成長する界面拡散層の厚さが試験時間の平方根に比例し、各温度における厚さの成長速度係数はアレニウスの関係に従うことを示し、この関係に基づいた温度推定手法を開発している。

2) 遮熱コーティング (TBC) のボンドコートの酸化に伴い、その外面近傍で成長する外面アルミニウム低下層の厚さが試験時間の平方根に比例することを示し、この関係に基づいた温度推定手法を開発している。また、外面アルミニウム低下層の検出限界や成長の飽和に伴う本温度推定手法の適用範囲を示すとともに、厚さのバラツキによって生じる推定誤差を明らかにしている。

3) コーティングの施工方法の相違が温度推定に及ぼす影響を明らかにするため、大気プラズマ溶射 (APS)、減圧プラズマ溶射 (LPSS) および高速フラーム溶射 (HVOF) によって施工された耐食コーティングと LLPS および HVOF によって施工された TBC ボンドコートの高温加熱試験を行っている。施工方法の異なる各コーティングにおける界面拡散層厚さおよび外面 Al 低下層厚さの成長挙動を比較し、温度推定手法の適用性を明らかにしている。

4) TBC トップコートの損傷過程を明らかにするため、TBC 試験片を用いて温度勾配下での熱サイクル試験を行い、トップコート中に厚さ方向の縦き裂が発生、成長し、それが界面近傍に達すると、界面方向の横き裂が発生・成長することを明らかにしている。さらに、有限要素法を用いた弾性解析を行うことにより、縦き裂の発生はトップコートの焼結が大きな要因であり、縦き裂先端近傍の応力集中によって横き裂の発生が促進されることを示している。

以上、要するに本論文は、ガスタービン用コーティングの組織変化を体系的な実験に基づいて詳細に解明し、それに基づいて温度推定手法および劣化予測手法を提案するものであり、学術上、實際上寄与するところが少なくない。よって、本論文は博士 (工学) の学位論文として価値あるものと認める。また、平成 21 年 1 月 22 日、論文内容とそれに関連した事項について試問を行った結果、合格と認めた。