

論文内容の要旨

氏名 山岸 郷志

ガスタービンは、発電プラントの主熱機関あるいは航空機の推進装置として広く利用されている。ガスタービンの性能を特徴づける重要な因子のひとつが、ガスタービン動静翼材に代表される、ガスタービン高温部材である。たとえば、タービン動翼材には、内部に精密な冷却構造を持ち、かつ高度に微視的構造が制御された Ni 基超合金が使用され、さらにその表面を合金層とセラミック層からなる遮熱コーティング (Thermal Barrier Coating : TBC) 薄膜によって被覆された TBC 部材が使用される。TBC 部材は優れた高温強度を発揮するが、その寿命は有限であり、部材の健全性を定期的に評価しながら使用する必要がある。一方、その健全性評価の対象となる TBC 部材の損傷は、それら部材が特殊な材料系であることに加えて、その損傷が機械的負荷、熱、流体、など多くの環境的の因子により支配される複雑な現象である。今後さらにガスタービンの利用拡大が見込まれる昨今の社会情勢を鑑みるに、TBC 部材の損傷に係る適切なリスクコントロールが極めて重要であるといえよう。

本論文では、これまで実験的に再現することが困難であった実機使用環境を模擬した条件において TBC 部材の損傷特性を評価するとともに、実機 TBC 部材の損傷の非破壊検出技術に関する基礎検討を行うことを目的とした。本論文は、以下の三部から構成される。

I 部では、TBC 部材に発生する損傷現象の基礎となる各種材料特性の測定を行なった。TBC 皮膜の機械的特性は、その微視的構造に非常に敏感であり、かつ顕著な異方性を示した。また、実際に TBC 皮膜として成膜した場合、その成膜プロセスや各層の材質の組合せによって TBC 皮膜の特性は変化することを明らかにした。これらは、TBC 部材の健全性評価にあたっては特に配慮すべき事象となる。

II 部では、TBC 試験片に対して、熱機械的負荷を加え TBC 損傷の再現実験を行なった。この実験では実機環境に近い試験条件をより高度に再現することに注力し、燃焼器と力学的負荷試験装置とを組み合わせた新試験システムを開発し、実燃焼雰囲気においてクリープ負荷を加えたときの TBC 試験片の損傷を評価した。その結果、本試験システムにより、TBC 試験片内部に、燃焼ガス流れに依存した有意な温度勾配を再現できることができた。一連の試験期間中には、TBC 皮膜にき裂の発生と成長が観察された。それらき裂は主として負荷軸に対して垂直方向に開口する形態のものが多く認められ、温度の高い燃焼ガス流れの上流側よりも温度の低い下流側でき裂の発生密度が高いことが実験的に明らかとなった。これを受け、本研究では温度勾配に注目し、温度勾配下での基材のクリープ変形について解析モデルを構築し実験結果と比較検討した。その結果、変形拘束型のクリープ変形が生じる場合、負荷開始直後に低温側要素に高い引張応力が発達し、時間とともに高温側を上回る大きさのクリープひずみが生じ、優先的に損傷が生じ得ることを明らかにした。ただし、この傾向は機械的負荷および温度条件に強く依存し、かつ経時変化も有意であった。以上のことから、部材内に有意な温度差が生じる実機 TBC 部材の健全性評価は、温度勾配に対する配慮が特に必要であることを示した。

Ⅲ部では、TBC 部材の損傷の非破壊検出技術について検討した。本研究では、実機の保守・点検の作業場においても適用できる技術となり得るに力点をおき、LCR ハイテスタを用い、交流インピーダンス測定から、TBC 部材の静電容量を介した損傷検出手法を試みた。その結果、測定条件を適切に設定すれば、TBC 皮膜の界面はく離を検出できることが明らかとなった。界面はく離は、静電容量値の低下として検知し、TBC 皮膜の表面に付着物がある損傷形態については、静電容量値の上昇として検知できた。また、界面はく離長さが時間とともに変化する場合に対しても適用可能であった。

以上を要約すると、より高い性能が要求されるガスタービン高温部材の設計およびその運用にあたり、TBC 皮膜（部材）の力学的物性の特徴を十分に考慮した上で（Ⅰ部）、温度勾配など実際の部材の使用状態に適した評価手法によって部材の損傷現象、寿命を評価することが重要である。本研究の結果（Ⅱ部）によれば部材内の温度勾配の程度と力学的な外部負荷とのかねあいで、損傷が優先的に起こり得る場所が決まり、それが時間とともに変化しすること、それ故に破壊の起点を特定するにはこれら知見が不可欠であり、かつ第一次的要因となり得ることが明らかとなった。これは従来の実機損傷検査において、結果の『ばらつき』としてみなされていた損傷現象も、明確な力学的背景に基づく再現性高い現象である可能性を示している。このような『ばらつき』はコントロールできない要因として、設計や保守管理上の統計学的処理と安全マージン拡張により対応されることが多いが、それに係わる現象の力学的背景が明らかになれば、安全マージン縮小分を（コスト）パフォーマンス向上へ転換することが可能となるといえよう。Ⅲ部で検討したような破壊検査技術は実機の作業場でも使用可能な健全性評価技術になると期待される。