

# 論文の内容の要旨

氏名 市川 国弘

コンバインド発電設備の主機であるガスタービンには高効率化が要求され、高い信頼性で運転するためには、特にこれまで損傷評価方法が明確となっていない圧縮機や高温部品の損傷を的確に把握して、設備の保守管理を行うための評価法を確立する必要がある。そこで、本研究では、圧縮機翼、及び高温部品の中で最も過酷条件で運用される動翼の損傷挙動を調べるとともに、損傷評価法について検討した。

第1章「緒言」では、ガスタービン部材の保守管理の実状、損傷評価の問題点などについて述べ、本研究の背景と目的を明らかにした。

第2章「圧縮機翼の実機環境下での腐食損傷評価」では、実機圧縮機翼の腐食ピットの成長挙動を調べた。次に、実機腐食ピットを模擬した人工欠陥付き試験片による腐食疲労試験を実施し、それを基に、寿命評価の際に重要となる腐食ピット寸法と疲労限度の関係を検討した。更に、実機翼にひずみゲージを貼付け、実機振動応力波形を計測した。その結果以下のことが明らかとなった。実機圧縮機の洗浄液へ $\text{Na}^+$ 、 $\text{Cl}^-$ 、 $\text{SO}_4^{2-}$ を各1%添加した腐食環境下では、腐食ピットの発生・成長により平滑試験片の疲労限度が大気中のそれに対して40%低下した。また人工欠陥を導入した試験片の場合、欠陥寸法が大きいほど疲労限が低下した。人工欠陥寸法に対する $10^7$ 回における破断と未破断の応力振幅の境界から限界応力 $\sigma_{th}$ を求め、破壊力学に基づき、本実験における15Cr鋼の腐食環境中でのき裂進展下限界 $\Delta K_{th}$ が $2.4\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$ であることを明らかとした。実機圧縮機翼に作用する応力を実測し、得られた実働応力波形から運用中の等価応力 $\sigma_{eq}$ を算出した。求めた $\sigma_{eq}$ と $\Delta K_{th}$ より、き裂の発生に対応する限界腐食ピット寸法が $0.58\text{mm}$ であることを明らかとした。腐食ピット成長曲線と限界応力-腐食ピット寸法線図を組み合わせた、限界応力-運転時間線図を提案した。この線図は、運転寿命評価、翼の許容応力の策定、さらには腐食ピット補修時期の決定等の保守管理にも用いることができる。

第3章「動翼用熱遮蔽コーティングの熱機械疲労下におけるはく離挙動」では、熱遮蔽コーティング(TBC, Thermal Barrier Coatings)の実機環境下ではく離寿命評価手法の開発を目的として、熱機械的疲労(TMF)負荷条件とはく離進展挙動の関係を明らかとするとともに、皮膜厚さと負荷ひずみ範囲の影響についても同様の検討を行った。さらに、予め実機での長期運用を模擬した高温曝露を行った試験片を用いて、焼結およびTGOの形成がはく離進展挙動へ及ぼす影響についても併せて検討を行った。その結果以下のことが明らかとなった。Out of Phase負荷の下では、実機模擬負荷よりもやや短寿命となる傾向にあったものの、ほぼ同等のはく離挙動を示した。一方 In Phase 負

荷は、短寿命であると同時にばらつきが大きくなる傾向にあった。0.3mm から 0.6mm のセラミック層厚さまでは、はく離進展挙動は大きく変化しなかったことから、冷却性能の向上と信頼性確保を両立できる最適な厚さの存在が示唆され、0.9mm よりも薄いと考えられる。0.5%、0.7%の負荷ひずみ範囲に対して、1.0%では試験開始後早い段階でのほく離が見られており、数回の繰返し負荷でのほく離発生限界ひずみは 0.7%から 1.0%の間に存在すると考えられる。気孔率は初期の 500 時間で大きく低下するものの、以降変化は見られなかったことから、はく離強度の低下に対しては直接的な影響は低いと考えられる。さらに、時間と温度を統一的に扱うことのできる LMP を用いた TGO 厚さの予測式を提案した。任意の運用条件後での TGO 厚さを、加速側の条件にて付与することが可能と考えられる。高温曝露により、はく離の発生後は急速に進展する傾向にあった。これはセラミック層の焼結や TGO の成長などにより、はく離進展抵抗が減少したためではないかと考えられる。

第 4 章「動翼材 Ni 基合金の再生熱処理による曲げ荷重下でのクリープ損傷回復」では、動翼材 Ni 基超合金の再生処理による損傷回復として、曲げ負荷によるクリープ損傷回復について検討した。まずクリープ構成則の開発によりクリープひずみの解析精度の向上を図った。さらにモックアップ曲げクリープ試験を行い。曲げ負荷下でのクリープき裂の発生挙動と再生処理の効果について検討を行った。さらに再生処理の適用可能な範囲についても併せて検討した。その結果、Ni 基耐熱超合金のクリープ構成則として、時間硬化型の構成則を適用し、単軸クリープ試験、モックアップ試験を比較的精度よく再現することができた。曲げクリープ試験により、適切なタイミングで再生処理を行うことで、クリープき裂の発生を抑制できることを明らかにした。クリープき裂発生限界に相当する再生処理材のクリープ変形量は、新材の半分程度であることを明らかとした。これは結晶粒界に偏析した介在物等は、再生処理により完全に除去されないためと考えられる。クリープひずみの増加により、き裂発生部での応力は緩和挙動を示したものの、最大応力発生位置は 1 次応力が作用する表面であり、クリープき裂発生が観察されたと考えられる。単軸クリープ試験により、再生処理時に異常組織を発生する限界ひずみにはある一定のしきい値が存在することを明らかとなった。したがって累積クリープひずみが異常組織およびき裂発生限界値に達する前に再生処理を実施することで、Ni 基耐熱超合金のクリープ損傷を効果的に回復できると考えられる。再生処理に対する HIP 処理の優位性は、クリープき裂の発生に対しては顕著に確認できなかった。曲げ負荷下でのクリープき裂におけるき裂面酸化を考慮すると、コスト的な観点から再生処理の適用が効果的であると考えられる。

第 5 章「結論」では、以上の結果を要約し、提案するガスタービン部材の損傷評価技術の有効性を明示した。