

ガスタービン遮熱コーティングの健全性評価技術

Life Diagnosis Techniques for Thermal Barrier Coatings in Gas Turbines

久保 貴博

KUBO Takahiro

高木 圭介

TAKAKI Keisuke

北山 和弘

KITAYAMA Kazuhiro

燃焼ガス温度のますますの高温化により高効率化を目指すガスタービン分野においては、厳しい使用環境に対する健全性や信頼性を確保するための技術開発が進められている。その中で、高温化のキー技術の一つである遮熱コーティング(Thermal Barrier Coating, 以下, TBCと略記)は、回転体である動翼にまで適用が拡大され、その健全性評価は必要不可欠な技術となっている。東芝は、TBCの健全性評価技術開発の一環として、熱機械疲労試験により実機条件を模擬した環境を再現することでTBCの破損形態や寿命評価法について調査、検討し、動翼TBCの剥離(はくり)を効率良く検出できるミラー反射式赤外線検査技術を開発した。

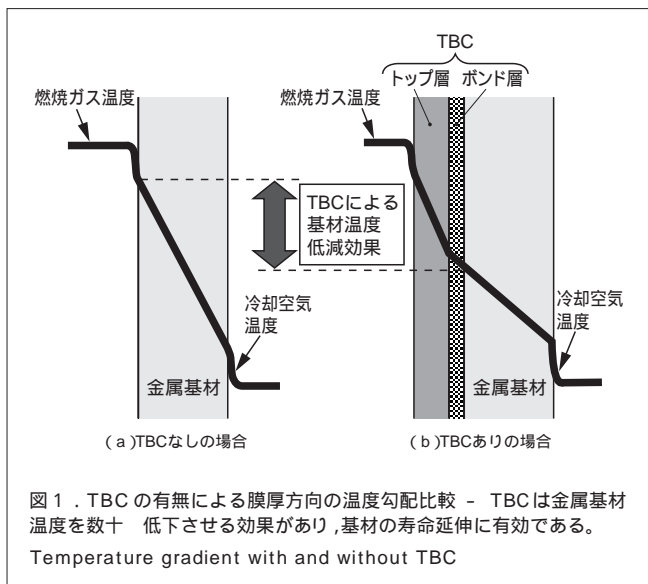
The application of thermal barrier coatings (TBCs) has expanded to include even the rotating blades of the latest gas turbines. TBC damage evaluation and repair techniques are therefore highly important for safe plant operation. Spallation of the coating layer represents critical damage to a TBC. For damage diagnosis, it is necessary to evaluate delamination propagation and detect delamination under the TBC. Toshiba investigated the mechanism of damage by carrying out thermomechanical fatigue (TMF) tests under actual hot parts conditions. In order to detect delamination under a TBC on the entire blade surface, Toshiba has developed a mirror-reflected infrared imaging technique.

1 まえがき

火力発電プラントの主力となっているコンバインドサイクル発電設備において、エネルギーの有効利用及び排出CO₂(二酸化炭素)量削減などの観点から、ガスタービン燃焼ガス温度の高温化へのニーズは高い。この燃焼ガス温度高温化のためのキー技術として、冷却技術とともに挙げられるのがTBCである。このTBCは、燃焼器などの静止部品には適用されていたが、最近では回転体である動翼にまで適用拡大されている。

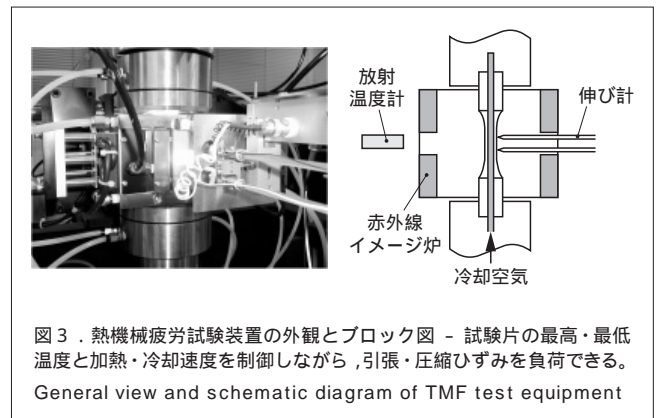
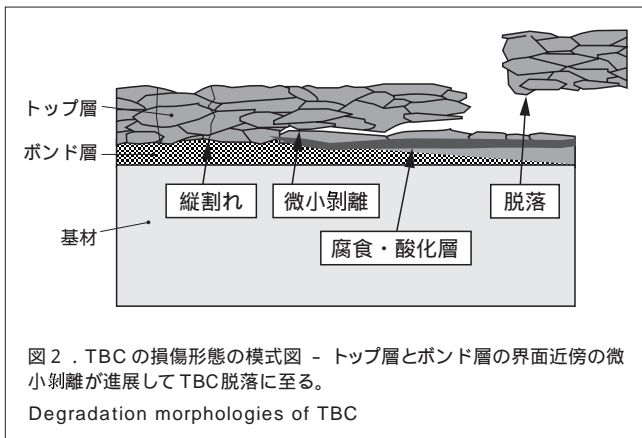
図1は、一般的なTBCの構成と効果を模式的に示したものである¹⁾。TBCは、耐環境性に優れた金属ボンド層と、低熱伝導性のセラミックストップ層から構成されるのが一般的であり、ガスタービン高温部品の金属基材上に施工される。このように、熱伝導率の低いセラミック層をガスタービン高温部品の燃焼ガス通路面に施工することにより、強度部材の金属基材温度を数十程度低下させる効果があり、基材寿命の延伸が可能である。一方、セラミックトップ層が脱落した場合、脱落部で局所的に金属基材温度が上昇するために、特にクリープ強度低下による部品損傷の危険性が高くなる。そのために、TBCの健全性評価技術が極めて重要となっている。

TBCの破損形態の模式図を図2に示す。TBCには、運転時に遠心力と温度勾配(こうばい)や各材料の線膨張率差に



よる熱応力が作用し、同時に腐食や酸化などが進行する。それによりトップ層の縦割れやトップ層とボンド層の界面近傍での層間剥離(以下、剥離と略記)が生じ、最終的には脱落に至る。

ここでは、トップ層とボンド層の界面近傍での微小剥離の進展に着目し、実機を再現した条件での寿命評価と、非破壊的な剥離検出技術について述べる。



2 TBCの剥離進展評価

ガスタービンの動翼には、遠心力と膜厚方向温度勾配による熱応力が、起動・停止と同期して作用する。この実機使用環境を再現するために、熱機械疲労(ThermoMechanical Fatigue, 以下、TMFと略記)試験装置を開発し、TBC破損形態を調査するとともに、寿命評価法を検討した。

2.1 熱機械疲労試験装置の概要

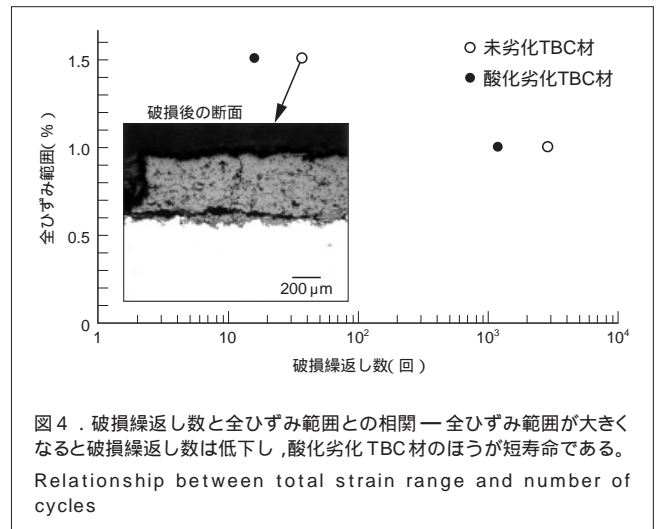
TMF試験装置の加熱炉近傍の外観及びブロック図を図3に示す。試験片は赤外線イメージ炉で加熱し、中空丸棒型試験片の中空孔に高流速空気を流して冷却する。このTMF試験装置では、試験片の最高・最低温度及び加熱・冷却速度を制御することができ、更に温度変化と引張・圧縮ひずみを同期して負荷することができる。

2.2 試験条件

試験片は、結晶成長方向を試験片軸方向と一致させて製作したNi基超合金一方向凝固材に、MCrAlY(M: Ni(ニッケル)やCo(コバルト)が主成分, Cr: クロム, Al: アルミニウム, Y: イットリウム)のボンド層を減圧プラズマ溶射で施工し、イットリア部分安定化ジルコニア($Y_2O_3-ZrO_2$)のトップ層を大気中プラズマ溶射で施工したものである。運転中の酸化損傷を模擬するため、TBC施工後に実機相当の酸化劣化処理を施した酸化劣化TBC材と未劣化TBC材の2種類を供試材とした。試験条件は、実機条件を考慮して温度波形とひずみ波形を同位相とし、温度を400~956℃、全ひずみ範囲を0~1.0%又は0~1.5%に制御して、高温時に最大引張ひずみ保持になるように片振り台形波で実施した。過去の経験を元に、引張側の最大応力が定常時の10%に低下した時点をもTBCの破損繰返し数として定義し、破損繰返し数より短い繰返し数で停止する途中止め試験を実施して断面を観察し、TBCの破損に至る剥離進展形態を調査した。

2.3 試験結果

TBCの破損繰返し数と全ひずみ範囲の関係を図4に示す。全ひずみ範囲が大きくなると、TBCの破損繰返し数が低



下する。また、酸化劣化TBC材の破損繰返し数は、未劣化TBC材に比べて1/3から1/2程度に低下することがわかる。図中には、未劣化TBC材の破損後の断面写真も併せて示す。TBCの最終剥離は、トップ層とボンド層の界面に近いトップ層側で発生及び進展しており、これは、実機損傷事例として報告された剥離発生位置と一致している。

図5には、TMF途中止め試験片(酸化劣化TBC材)におけるTBC断面の微小剥離のトレース図を寿命比(破損繰返し数と途中止め繰返し数の比)ごとに示す。これは、トップ層内に発生したTBC面に平行な長さ2μm以上の微小剥離をトレースしたもので、図中の点線はトップ層とボンド層の界面の位置を示している。微小剥離はトップ層内のほぼ全体にわたり発生しているが、最終的なTBC剥離損傷はトップ層とボンド層の界面付近のトップ層内に発生することから、ここでは界面付近の微小剥離に着目し、その進展挙動を検討した。

図5において、トップ層とボンド層の界面近傍の微小剥離は、繰返し数の増加とともに長くなる。一方、トップ層全体の微小剥離の数は繰返し数の増加とともに増加しているが、トップ層とボンド層の界面近傍に限れば数は減少している。

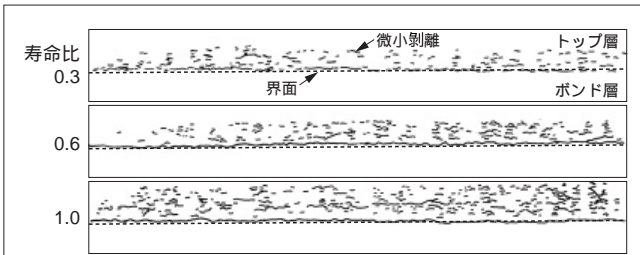


図5 . TMF 途中止め試験片(酸化劣化 TBC 材)におけるトップ層内微小剥離のトレース図 - 最終剥離が発生するトップ層とボンド層の界面付近では,発生した微小剥離が連結して成長していることがわかる。
Delamination of TMF-tested specimens

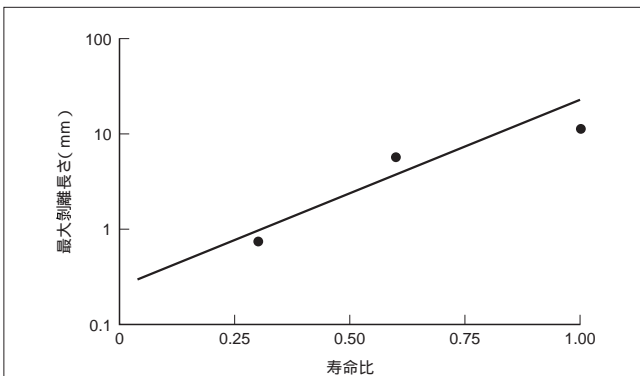


図6 . 寿命比とトップ層/ボンド層界面付近の最大剥離長さの相関 - 最終的に剥離が発生するトップ層とボンド層の界面付近では,寿命の消費とともに最大剥離長さが長くなる。
Relationship between life ratio and maximum delamination length near top coating/bond coating interface

すなわち,界面近傍ではそれぞれの微小剥離が連結して成長しており,疲労損傷を受けた金属表面の亀裂進展動向²⁾と同一とみなせる。また,酸化劣化材の場合には,未劣化材に比べてトップ層とボンド層の界面近傍の微小剥離の数が多。これは,酸化劣化により界面に体積膨張を伴う酸化層(Thermally Grown Oxide層,以下,TGO層と略記)が生成して,トップ層内に応力が発生し,微小剥離の発生が促進されたためであり,破損繰返し数が短くなったものと考えられる。

酸化劣化材の寿命比と最大剥離長さの相関を図6に示す。この関係と,図4に示した繰返し数と全ひずみ範囲の関係をいれれば,繰返し数と全ひずみ範囲から最大剥離長さを定量的に推定できる。したがって,TBC面における起動から,定格運転,停止までの径方向及び軸方向の全ひずみ範囲とTBCの温度を求めておけば,剥離の進展を予測することが可能になると考えられる。

3 動翼 TBC の剥離検出技術

TBCの健全性評価のためには,剥離進展評価を中心とする

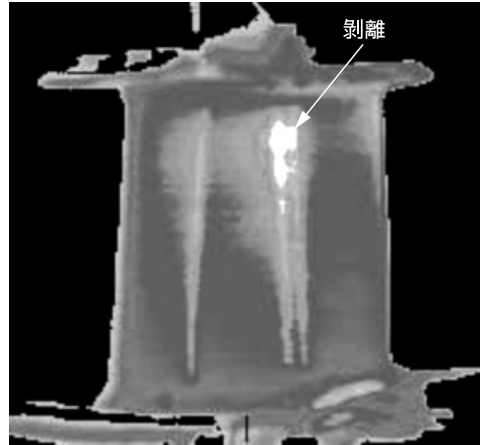


図7 . 赤外線法による静翼 TBC の剥離検出結果 - 腹側冷却孔付近に発生した TBC剥離を,表面温度分布画像として検出した。
Result of delamination inspection under nozzle TBC by infrared imaging technique

寿命評価に加えて,剥離面積を非破壊的に検査する必要がある。ここでは,動翼 TBC を対象にして,繰返しとともに進展する剥離を検出するため,ロータから抜き取らずに動翼全面の TBC を検査できるミラー反射式赤外線検出技術を開発した。

3.1 赤外線法による TBC剥離検出

非破壊的な TBC剥離の検出法としては,主に赤外線法,レーザホログラフィ法,超音波法などが提案されている。ここでは,実機曲面への対応能力などを考慮し,赤外線法を採用した。赤外線法は,剥離部と健全部の熱伝導の差を,TBC表面の温度分布の差として赤外線カメラで検出する手法である。TBC表面を加熱すれば基材金属側に熱が伝導するが,剥離部では基材金属への熱伝導が妨げられ,TBC表面は健全部に比べて高温となる。このとき表面温度分布を赤外線カメラで計測すれば,画像として剥離が検出できる。

図7は,剥離を有する静翼有効部の TBC を,赤外線法で検査した結果であり,TBC表面を加熱して温度分布を計測し,高温部を白色部として表している。切断調査の結果,白色部に剥離が存在しており,表面温度分布の差により目視では確認できない剥離をめいりょうに検出できることが明らかである。

赤外線法による剥離欠陥寸法の検出精度を図8に示す。これは,剥離部分の切断面から計測された剥離長さ,赤外線法で検出された剥離長さを比較したものである。表面温度分布の勾配を用いた高精度剥離寸法計測法により,ほぼ±1mmの誤差で剥離寸法を検出できる。また,剥離部と健全部の温度差と,赤外線カメラの温度分解能から決定される検出可能な最小剥離寸法は,直径約3mmである。

3.2 ミラー反射式赤外線法による動翼 TBC の剥離検査

動翼 TBC の剥離検査は,検査工数低減のため,ロータ植込み状態で実施することが望ましい。しかしロータ植込み状

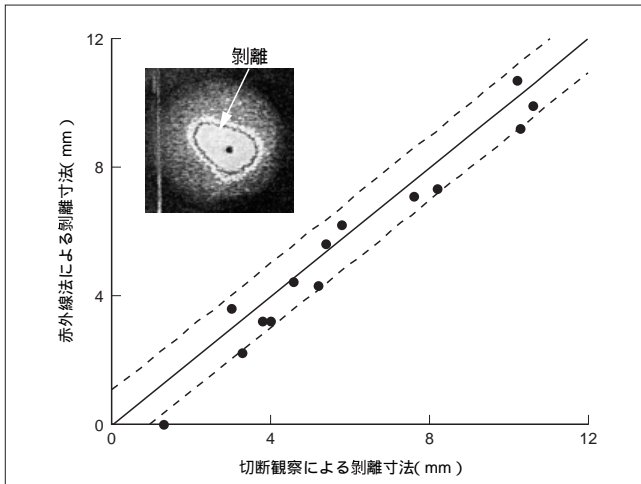


図8．赤外線法による剥離寸法評価精度 - 赤外線法では、TBC剥離寸法を±1mm程度の誤差で検出可能である。

Accuracy of delamination length inspection under TBC by infrared imaging technique

態の場合、通常の赤外線法では、隣接翼により視界が遮られるため、動翼有効部全面の検査は困難である。そこで反射ミラーを利用し、動翼先端側からTBC全面を一度に検査する検査技術を開発した。

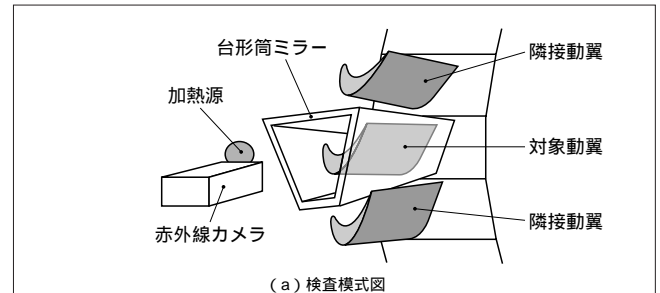
ミラー反射式赤外線法による動翼TBCの剥離検査適用の模式図と、人工剥離の検査結果例を図9に示す。動翼の先端側からルート部に向かって、断面が台形形状の筒型ミラーを設置する。台形筒ミラーは、内面が赤外線を効率良く反射する材料で構成され、加熱源からの熱を反射して動翼TBCを輻射(ふくしゃ)加熱し、動翼TBC面からの赤外線を反射させる。この台形筒ミラーの形状は、動翼検査の際の剥離検出性と、剥離面積評価精度の誤差を解析的に検討し、もっとも有効に動翼を検査できるよう選択している³⁾。図9から明らかなように、ミラーで反射された赤外線を捕らえて、試験体の背側と腹側にそれぞれ9か所導入した5mm角の模擬剥離を、1視野で検出できている。以上から、ミラー反射式赤外線法により、ロータに植込み状態で、動翼TBCの剥離を検出できることが検証できた。

4 あとがき

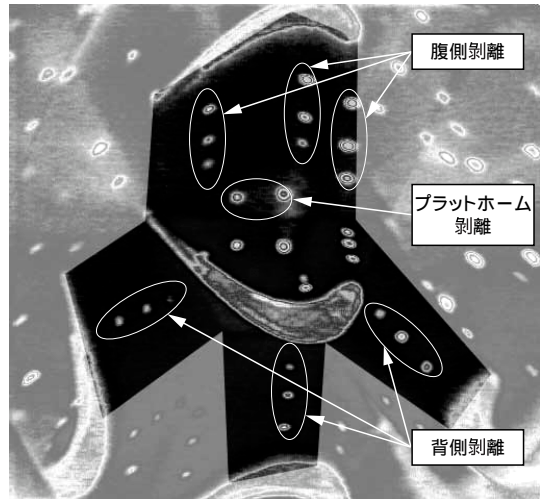
TBC健全性評価技術開発の一環として行ってきた成果として、寿命評価技術と動翼TBCの剥離検査技術をまとめた。今後、継続的にデータを蓄積するとともに、実機適用を推進し、有効性を明らかにする予定である。

文献

- (1) 伊藤義康 . 発電用ガスタービンにおける遮熱コーティング(1). 機械の研究 . 47, 7, 1995, p.746 - 751 .



(a) 検査模式図



(b) 検査結果例

図9．ミラー反射式赤外線法による検査結果例 - ガスタービン動翼の腹側と背側に各9個、プラットホーム部に2個導入した5mm角の人工剥離が1視野で検出できる。

Example of artificial delamination inspection in gas turbine blade TBC by mirror-reflected infrared imaging technique

- (2) 藤山一成,ほか.“多数剥離の発生・成長傾向に基づく超合金の高温低サイクル疲労寿命評価”. 第34回高温強度シンポジウム前刷集. 1996-12, (社)日本材料学会. 1996, p.6 - 10 .
- (3) 久保貴博,ほか.“ガスタービン動翼遮熱コーティングの検査システム開発”. 平成13年度春季大会講演概要集(社)日本非破壊検査協会. 2001, p.67 - 68 .



久保 貴博 KUBO Takahiro

電力・社会システム社 電力・産業システム技術開発センター 金属・セラミックス材料技術開発部主務。材料強度及び非破壊検査技術の研究・開発に従事。日本機械学会,日本材料学会,日本非破壊検査協会会員。

Power and Industrial Systems Research and Development Center



高木 圭介 TAKAKI Keisuke

電力・社会システム社 電力・産業システム技術開発センター 金属・セラミックス材料技術開発部。材料強度及び解析技術の開発に従事。日本材料学会,日本機械学会会員。

Power and Industrial Systems Research and Development Center



北山 和弘 KITAYAMA Kazuhiro

電力・社会システム社 京浜事業所 原動機部主務。ガスタービンの設計・補修業務に従事。日本機械学会,日本ガスタービン学会会員。

Keihin Product Operations