

レーザを用いたガスタービン用遮熱コーティングの非破壊検査法の開発
Development of nondestructive testing method for examining the performance of thermal barrier coatings with laser heating

尾関高行, 藤井智晴, 酒井英司, 福地哲生, 布施則一
電力中央研究所

T. Ozeki, T. Fujii, E. Sakai, T. Fukuchi, N. Fuse
Central Research Institute of Electric Power Industry

Abstract A nondestructive testing method for examining the performance of thermal barrier coatings (TBCs) on gas turbine blades has been developed. This method is based on active thermography using carbon dioxide laser heating and the surface temperature measurement by an infrared camera. In this nondestructive testing method, the laser nozzle is attached at the end of the robot arm which controls the nozzle positioning. This method was applied to a blade with TBC, and the result showed that the method could examine the thermal resistance, which represents the performance of TBC, within an error range of 4%, as compared to destructive testing. The result also showed high repeatability.

1. はじめに

発電効率の向上のため、ガスタービンは高温化が進み、その動翼には基材を高温ガスから保護するための遮熱コーティング (TBC: Thermal Barrier Coating) が施工されている。TBC はトップコート (TC) とボンドコートの2層からなり、TC には遮熱性能の高いセラミックスの多孔質層が用いられる。しかし、TBC は経年的に TC の焼結による気孔の減少や減肉が生じ、その遮熱性能が劣化することが知られており⁽¹⁾、動翼の耐久性に影響することが懸念される。そのため、TBC の経年劣化を非破壊で検査する手法が望まれている。

TBC の遮熱性能は TC の厚さ d と熱伝導率 λ の関係から求められる熱抵抗 R で表される。

$$R = \frac{d}{\lambda} \quad (1)$$

式(1)に示したように、熱抵抗は減肉による TC 厚さの減少と、焼結による熱伝導率の上昇を表す指標である。熱抵抗の検査にはレーザ加熱によるアクティブサーモグラフィの手法が用いられる⁽²⁾。Fig.1 に示したように、レーザビームによって TC 表面を加熱すると、健全な TBC では熱抵抗が高いため、熱が TC 表面に留まる。一方で減肉や焼結で損傷劣化した TBC は熱抵抗が低いため、熱が基材側に伝導し、TC が健全な場合と比較して表面温度が低くなる。この表面温度の違いを赤外線カメラで計測することで、TBC の熱抵抗を検査することができる。

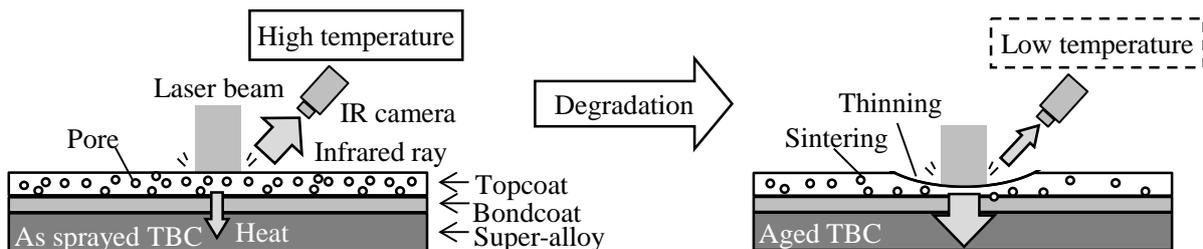


Fig. 1 Basic concept of nondestructive testing method

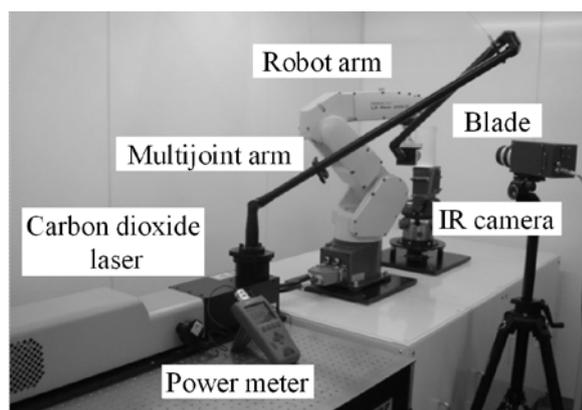


Fig. 2 Overview of nondestructive testing system

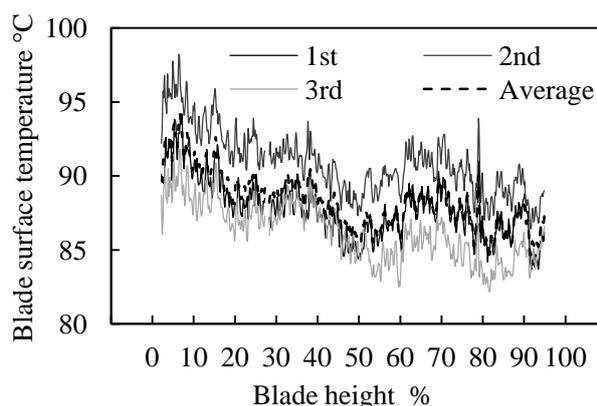


Fig. 3 Surface temperature distribution along the blade height

2. 非破壊検査装置

非破壊検査装置の外観を Fig.2 に示す。レーザには連続発振可能な CO₂ レーザ（波長 10.6 μ m, DC 放電方式, 出力安定度 \pm 3%）を用いており、多関節アーム内を伝送されたレーザビームはホモジナイザによりフラットトップ形状の強度分布に変換されている。動翼の翼面に対してレーザ照射位置を一定に制御するため、照射ノズルはロボットアームの先端に取り付けられ、ロボットアームの動作プログラムで照射ノズルが翼面に対して垂直かつ等距離を保ちながら、翼面を沿うように走査される。このため、本検査装置は同一照射条件で一定の熱流束を与えることができ、同時に翼面に沿って走査することで、連続的な検査を可能にしている。翼面の温度は短波長赤外線カメラ（検出波長 2.0-5.0 μ m, 計測精度 \pm 2 $^{\circ}$ C または \pm 2%）で計測した。なお、本計測では翼面の放射率を一定とするために黒体塗料（放射率 0.94）を一様に塗布している。

3. 検査結果

翼先端から翼根部にレーザを走査して得られた翼面の表面温度分布を Fig.3 に示す。表面温度分布を 3 回計測した結果、翼高さ方向の温度分布は定性的にそれぞれ一致した。本検査法の原理より、この温度分布は翼高さ方向の熱抵抗分布を表していると考えられる。また、同一位置における表面温度のばらつきは \pm 5 $^{\circ}$ C であり、この誤差の要因はレーザの出力安定度と赤外線カメラの計測精度によるものと考えられる。

表面温度から熱抵抗を求めるために、本検査と同一条件の数値解析モデルを作成し、熱抵抗をパラメータとした非定常熱伝導解析を実施することで、表面温度と熱抵抗の関係を表す検定線を作成した。翼高さ 70%を対象に、表面温度を検定線に代入して求めた熱抵抗と、対象点で切断して計測した熱抵抗はそれぞれ、204.4mm²K/W, 196.8mm²K/W となり、本検査では破壊検査の結果と比較して約 4%以内の誤差となった。ただし、本検査では黒体塗料により放射率を補正しており、検査後も塗料が残存する。このため、今後は洗浄可能な放射率補正塗料の適用を検討する予定である。

参考文献

- (1) 藤井智晴, 高橋毅, “ガスタービン用コーティング層の熱特性 —第 1 報 コーティング層と耐熱超合金の熱物性測定および新旧材の比較—”, 電力中央研究所報告(W97017), (1998)
- (2) M. Morinaga and T. Takahashi, “Development of non-destructive inspection for the performance of thermal barrier coating”, *Annals of the New York Academy of sciences*, Vol.934, pp.489-496 (2001)