

レーザー励起ルミネッセンスによる遮熱コーティングの熱酸化検出  
 (第2報) —小型レーザーとLED光源の適用—

Detection of thermal oxidation of thermal barrier coating by laser-induced luminescence (part 2) - application of compact laser and LED light source -

福地哲生, 江藤修三, 岡田満利, 藤井智晴  
 電力中央研究所

T. Fukuchi, S. Eto, M. Okada, T. Fujii

Central Research Institute of Electric Power Industry

**Abstract** Thermal barrier coating (TBC) is applied to high temperature components in thermal power generation, such as gas turbine blades and combustors. A principal defect which occurs in TBC is topcoat delamination, which is often accompanied by formation of thermally grown oxide (TGO) below the topcoat. Therefore, detection of TGO will enable efficient delamination inspection. TGO can be detected using luminescence from  $\text{Cr}^{3+}$ , which occurs upon excitation in the blue or green bands. Luminescence from TBC specimens was measured using a compact, cw Nd:YAG laser of wavelength 532 nm or a green LED light source of center wavelength 540 nm. The results showed that a compact TGO detection system using compact light sources can be constructed.

1. はじめに

ガスタービン火力発電において、高温酸化雰囲気曝されるタービン翼や燃焼器などの高温部品には遮熱コーティング (TBC: Thermal Barrier Coating) が施されている。TBCは Fig. 1 に示すように、セラミックス製のトップコート (厚さ 300 $\mu\text{m}$  程度) と合金製のボンドコート (厚さ 100 $\mu\text{m}$  程度) で構成されており、プラズマ溶射で施される。高温部品の主たる劣化はトップコートの剥離であり、トップコートとボンドコートの界面に生成される熱酸化物 (TGO: Thermally Grown Oxide) の層はその一因とされている。よって、トップコートの剥離の可能性が高い箇所には TGO が存在することが多い。トップコートの剥離検査には赤外線加熱とサーモグラフィの組み合わせが用いられるが、検査時間がかかることから全箇所を検査するのは難しい。そこで、検査対象を TGO が検出された箇所限定することによって剥離検査の効率化が図れる。

ボンドコートは Ni, Cr, Al などで構成されるため、TGO は  $\text{Al}_2\text{O}_3$  を多く含み、 $\text{Cr}^{3+}$  が混在する。 $\text{Cr:Al}_2\text{O}_3$  のエネルギー準位図を Fig. 2 に示す。 $\text{Cr}^{3+}$  は青色光または緑色光を吸収して (吸収帯は blue band, green band と呼ばれる) 赤色光 ( ${}^2\text{E}({}^2\text{A}) \rightarrow {}^4\text{A}_2$ : 694.3nm,  ${}^2\text{E}(\text{E}) \rightarrow {}^4\text{A}_2$ : 692.9nm) を発する。よって、適切な波長の光を TBC に照射し、694nm 付近の発光を計測することによって TGO を検出できる。これまでに、Q スイッチ Nd:YAG パルスレーザーを用いて、加熱した TBC 試験体からのルミネッセンスを計測した<sup>(1,2)</sup>。しかし、パルスレーザーは水冷を必要とし、電源を含めた重量と大きさから、携帯型装置には適していない。小型レーザー、あるいは LED 光源を用いれば光源を小型化・軽量化でき、携帯型装置の構築が可能となる<sup>(3,4)</sup>。

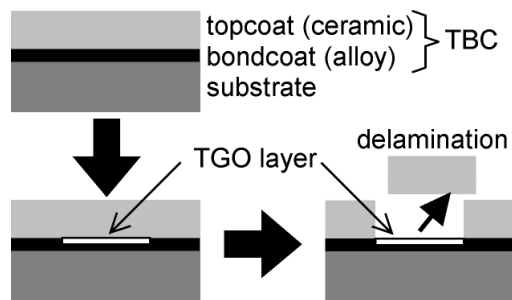


Fig. 1 Schematic diagram of TBC and topcoat delamination following formation of TGO layer

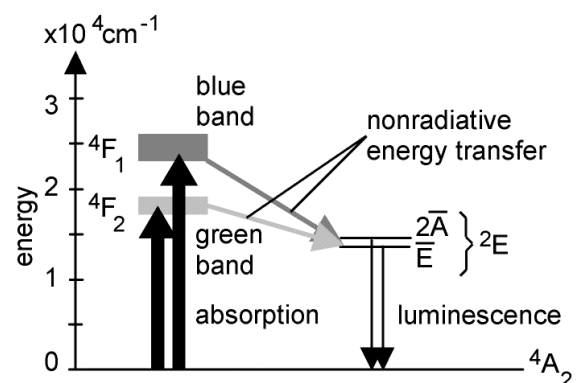


Fig. 2 Energy level diagram of  $\text{Cr}^{3+}$  in  $\text{Al}_2\text{O}_3$

## 2. 装置構成

ここでは、小型連続発振 Nd:YAG レーザ (HC Photonics, GLMP-200A, 波長 532nm, 出力 200mW) 又は緑色 LED 集光照明装置 (美館イメージング, MSPT-12G, 中心波長 540nm) を用いて光ルミネッセンス計測を行った。LED 集光照明装置は 12 個の LED の光出力を一つの照野に集中することができ、警察鑑識用の蛍光式指紋検出や実体顕微鏡の蛍光試薬励起用光源として利用されている。レーザを用いた装置構成 Fig. 3 に、LED を用いた装置構成を Fig. 4 に示す。試験体として、1000°C でそれぞれ 1000, 500, 100hr 加熱した TBC 試験体 A, B, C および加熱なしの TBC 試験体 D (全て 25mm 径, トップコート厚さ約 300 $\mu$ m) を用いた。試験体からの発光をロングパスフィルタ (カットオフ波長 600nm) と光ファイバを介して分光器 (Acton, Spectra-Pro 2300i) で計測した。露光時間は 20s とした。加熱温度 1000°C における TGO の成長は緩やかであり、この条件で TGO が検出できれば実機適用に十分な感度があると考えられる。

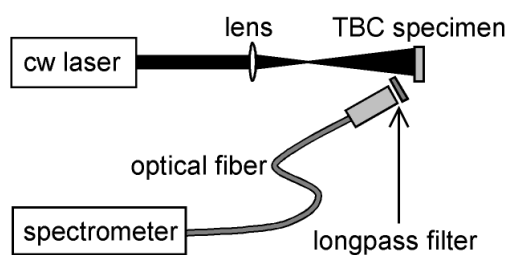


Fig. 3 Setup using compact Nd:YAG laser

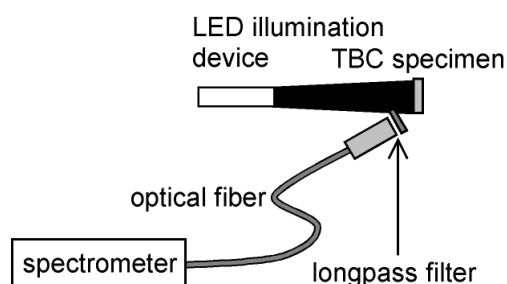


Fig. 4 Setup using green LED illumination light source

## 3. 測定結果

Nd:YAG レーザで得られた  $\text{Cr}^{3+}$  の発光スペクトルを Fig. 5 に示す<sup>(2)</sup>。加熱した試験体 A~C から  $\text{Cr}^{3+}$  の発光が確認され、D からは確認されず、A~C で TGO 層の生成が示唆された。LED 光源で得られた  $\text{Cr}^{3+}$  の発光スペクトルを Fig. 6 に示す。この場合、全ての試験体から  $\text{Cr}^{3+}$  の発光が確認されたが、D からの発光は A~C に比べて弱かった。プラズマ溶射時において薄い TGO 層が形成されることが報告されており、加熱なしの状態でもルミネッセンスが検出されても不思議ではない。本実験においては、LED 光源の照射強度が高かったことから、これを検出したと考えられる。

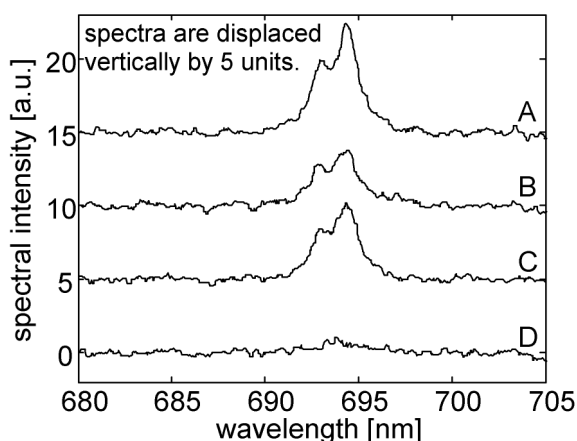


Fig. 5 Luminescence spectra of  $\text{Cr}^{3+}$  using cw Nd:YAG laser (A-C: samples heated at 1000°C, D: unheated)

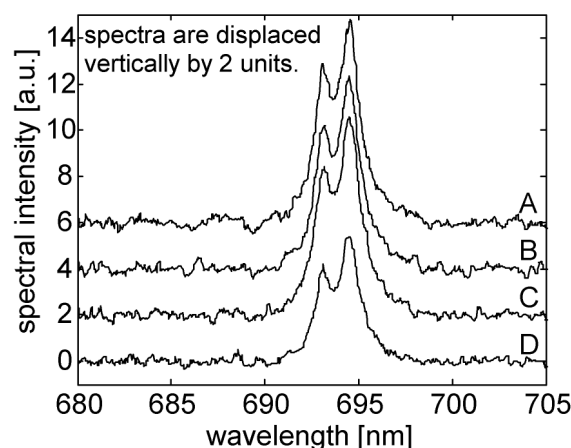


Fig. 6 Luminescence spectra of  $\text{Cr}^{3+}$  using LED light source (A-C: samples heated at 1000°C, D: unheated)

## 参考文献

- (1) 福地, 他: 電気学会論文誌 A, Vol. 133, No. 7, pp. 402-407 (2013)
- (2) 福地, 他: 第 30 回レーザセンシングシンポジウム予稿集, PE-6, pp. 88-89 (2012)
- (3) 福地, 他: 電力中央研究所報告, H12011 (2013)
- (4) 福地, 他: 電気学会光応用・視覚, 計測研究会資料 LAV-13-13/IM-13-13, pp.21-26 (2013)