

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

Detection of thermal oxidation of thermal barrier coating by laser-induced luminescence

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 such as gas turbine blades to protect the metal surface. Formation of the thermally grown oxide (TGO) between the topcoat and bondcoat is a cause for delamination. The presence of TGO can be detected using luminescence from Cr^{3+} which can be excited in the blue or green bands. Luminescence induced by a pulsed Nd:YAG laser of wavelength 532 nm was successfully detected for a thermally processed sample. The time variation of the luminescence showed two time constants (1.1 ms and 2.7 ms), and could be approximated by a linear combination of two exponential decay functions.

1. はじめに

ガスタービン翼など、高温環境において使用される金属部品には、その表面を保護するために遮熱コーティング (TBC: Thermal Barrier Coating) が施されている。TBCは **Fig. 1** に示すように、トップコートとボンドコートで構成される。トップコート材料 (セラミック) はイットリア安定化ジルコニア、ボンドコート材料は MCrAlY (MはCo, Ni, 又はその組み合わせ) であり、プラズマ溶射で施される⁽¹⁾。トップコートには空孔が存在し、酸素がトップコートとボンドコートの界面まで侵入する可能性があるため、TBCを高温にて連続使用すると、ボンドコートの上面が熱酸化され、熱酸化物 (TGO: Thermally Grown Oxide) の層が生成される。TGOによってトップコートとボンドコートの接合が低下し、トップコートの剥離の原因となることから、TGOの早期検出が望まれる。

TGOを構成する元素のうち、Alが最も酸化され易いため、熱酸化が起こるとAlが Al_2O_3 となり、Crは Cr^{3+} となる。これはルビーレーザー結晶 ($\text{Cr:Al}_2\text{O}_3$) と同様の状態であるため、**Fig. 2** に示すように、 Cr^{3+} は青色 (Blue Band) または緑色 (Green Band) の光を吸収し、赤色 (694nm 付近) で発光する。この特性を利用し、青色または緑色のレーザー光を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。 Cr^{3+} の発光スペクトルは二つの輝線 (R1, R2) から成り、それらの中心波長はTGO中の残留応力によって異なるため、これを利用した残留応力計測が行われている^(2,3)。本手法は一般的に光ルミネッセンス法と呼ばれている。

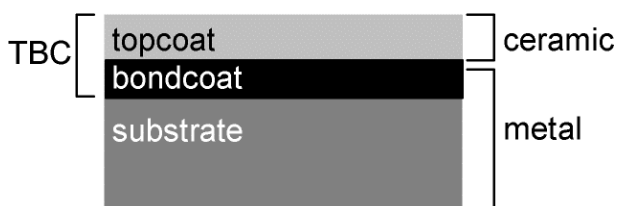


Fig. 1 Schematic diagram of thermal barrier coating (TBC)

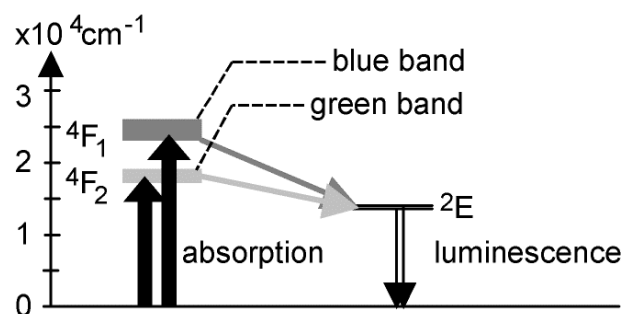


Fig. 2 Energy level diagram of Cr^{3+} showing absorption in the blue and green and luminescence in the red

2. 装置構成

レーザ励起ルミネッセンス計測に用いた装置構成を **Fig. 3** に、使用した TBC サンプル(径 25mm, トップコート膜厚約 300 μ m) を **Fig. 4** に示す。Nd:YAG パルスレーザの出力光(波長 532nm, パルスエネルギー約 30mJ, パルス幅約 10ns) をビームエキスパンダによって径 50mm に拡げてサンプルに照射し, Cr³⁺からの発光を光ファイバを介して ICCD 付きの分光器を用いて計測した。分光器の露光時間は 0.2ms とした。

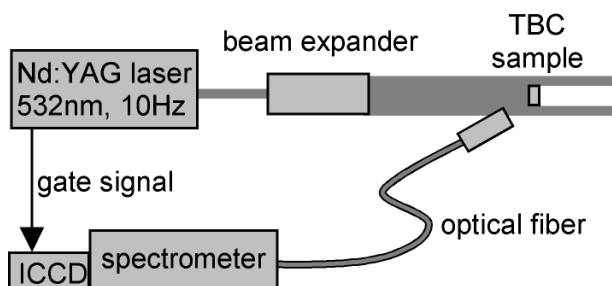


Fig. 3 Schematic diagram of experimental apparatus used for the laser-induced luminescence measurement

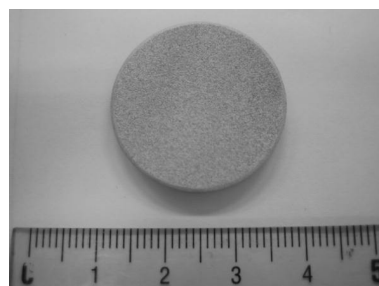


Fig. 4 Thermal barrier coating sample used in the laser-induced luminescence measurement

3. 測定結果

得られた Cr³⁺の発光スペクトルを **Fig. 5** に示す。熱処理なしのサンプルから Cr³⁺の発光は確認されなかった。一方, 1100°Cにおいて 200 時間熱処理したサンプルから Cr³⁺の発光が確認され, TGO の生成が示唆された。熱処理したサンプルからの Cr³⁺の発光強度(波長 692~697nm の積分値)のレーザ照射時に対する時間変化 $I(t)$ を **Fig. 6** に▲印で示す。 $I(t)$ の Semilog plot から二つの寿命 $T_1=1.1$ ms, $T_2=2.7$ ms が得られたことから, 二つの緩和過程が存在することが示唆された。発光強度は **Fig. 6** に実線で示した $I(t) = A_1 e^{-t/T_1} + A_2 e^{-t/T_2}$ (A_1, A_2 : 定数) で近似できた。今後, 寿命と TGO 膜厚の関係を調べる予定である。

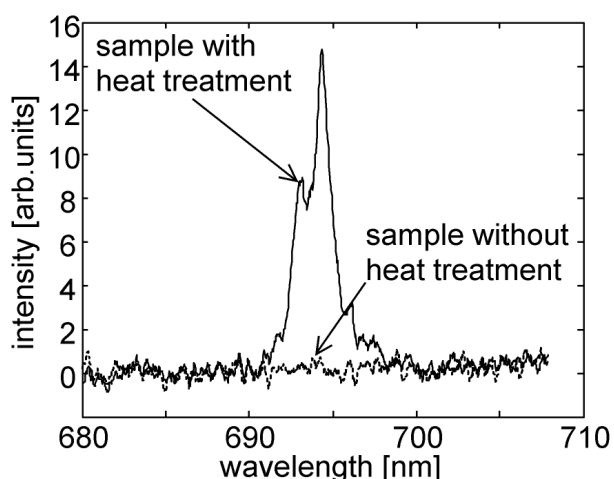


Fig. 5 Laser-induced luminescence spectra of Cr³⁺ for sample with (1100°Cx200hr) and without heat treatment

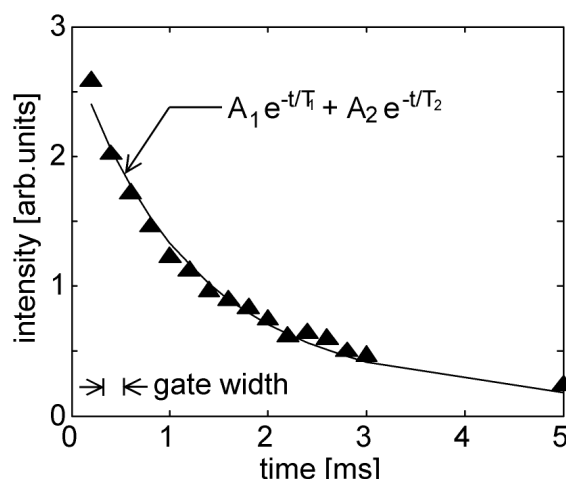


Fig. 6 Time dependence of the intensity of laser-induced luminescence of Cr³⁺ for sample with heat treatment

参考文献

- (1) S. Bose: "High Temperature Coatings", Butterworth-Heinemann (Elsevier), Burlington (2007)
- (2) K. Schlichting, K. Vaidyanathan, Y. Sohn, E. Jordan, M. Gell, N. Padture, "Application of Cr³⁺ photoluminescence piezo-spectroscopy to plasma-sprayed thermal barrier coatings for residual stress measurement", *Materials Science and Engineering*, Vol. A291, pp. 68-77 (2000)
- (3) B. Heeg, D. Clarke: "Non-destructive thermal barrier coating (TBC) damage assessment using laser-induced luminescence and infrared radiometry", *Surface & Coatings Technology*, Vol. 200, pp. 1298-1302 (2005)