

ガスタービン用 TBC へのレーザー加工による リブレット形成と熱サイクル耐久性評価[†]

綿引健二，蘆田憲一，土橋晋太郎，土橋広和

Riblet Patterning by Laser Ablation on the Thermal Barrier Coating (TBC) for Gas Turbines and Evaluation of Its Resistance to Cyclic Heating

Kenji WATAHIKI, Kenichi ASHIDA, Shintaro TSUCHIHASHI and Hirokazu TSUCHIHASHI

コンプレッサーブレードやタービンブレードの表面にリブレットを形成すると、ガスタービンの性能を向上させることができる。我々は典型的な遮熱コーティング（TBC）上へのリブレット施工の適用性を調査した。レーザー加工により、所定の形状に沿ったリブレット加工が実現できることが確認できた。リブレット構造の耐久性は、熱サイクル試験を実施して評価した。リブレットがある場合とない場合の結果を比較すると、TBC が剥がれるまでの繰り返し回数にも、熱成長酸化物（TGO）層の成長速度にも有意差は見られなかった。また、試験前後でリブレット形状に変化は見られなかった。以上のことから、高温環境下で使用される TBC にレーザー加工を施すことで、耐剥離性に影響を与えることなくリブレットを形成できることがわかった。

Forming riblets on the surface of a compressor blade or turbine blade can improve a gas turbine's performance. We investigated the applicability of patterning riblets on a typical thermal barrier coating (TBC). It was verified that a riblet structure conforming to a predetermined shape can be realized by laser processing. We evaluated the riblet structure's durability by conducting a thermal cycle test. Comparing the results obtained with- and without-riblet cases, no significant difference was observed in the number of repetitions until TBC peel off, nor in the rate of growth of the thermally grown oxide (TGO) layer. In addition, no significant change was observed in the riblet shape before and after the test. Accordingly, it was determined that laser processing can produce riblets on TBCs used in high temperature environments without adversely affecting peel resistance.

Key words ガスタービン，リブレット，レーザー加工，熱サイクル試験，遮熱コーティング
gas turbine, riblet, laser processing, cyclic heating test, thermal barrier coating

1 はじめに

ガスタービンをはじめとする流体機器の効率の向上は大きな課題の一つである。流体抵抗は圧力抵抗（慣性抵抗）と摩擦抵抗（粘性抵抗）に大別され、特に高レイノルズ数の乱流領域においては、層流に比べて大きな壁面乱流摩擦抵抗が発生する [2]。乱流摩擦抵抗を低減させるために、流体機器表面に微小な縦溝を施工する手法がある。リブレット (riblet) と呼ばれる、サメの鱗 [3], [4] のような 35~100 μm 程度の微小な縦溝が表面に存在すると、平滑面に対して、8~10% 程度の乱流摩擦抵抗の低減を引き起こすことが実験的にも明らかにされている [5]。

我々は、上記のリブレット形状をレーザーアブレーション加工により形成する技術を開発し、ガスタービンの圧縮

機やタービン翼への適用を検討している。レーザーアブレーション (laser ablation) とは、ナノ秒、ピコ秒、フェムト秒のパルス幅を持つ極短パルスレーザーによって非熱的に材料表面の物質を除去する技術である [6], [7]。この技術を用いて、任意の形状を材料表面に形成する事ができる。また、ガスタービンの圧縮機やタービン翼には、各種合金の他、金属・セラミックの様々なコーティングが用いられる [8], [9] が、レーザーアブレーション技術を用いれば、それら部材表面にもリブレットの直接加工を行う事が可能である。

我々は、これまでにリブレットの優位性の検証のため、流体解析 (CFD) に基づいて設計したリブレットを金属製のタービン翼にレーザー加工で形成し、その効果の実測を行ってきた。タービンテスト設備の出口案内翼（静翼）に

[†] 本稿は、原著の引用文献 [1] に対して、追加の実験結果と考察を加えたものである。

リブレットを形成した評価で、リブレットによる圧損低減効果の実測を行い、その優位性を示す事ができた [10]. さらに、超小型ジェットエンジンの各翼にリブレット加工を行い、推力や燃料効率の向上を実験で確認する事ができた [11].

ところで、過酷な環境で動作するガスタービン部材に適用する場合、耐久性も重要な要素である。機械特性に関して、これまでに圧縮機部材およびコート材にリブレット加工を施した試験片を準備し、引張・クリープ・疲労試験を実施して、その特性を評価した。その結果、金属部材に直接加工を行うと疲労強度が低下するが適切なコーティングの選択と施工を行う事で、疲労強度を招く事なく低下を防ぎ、リブレット形状を形成できる事が分かった [12].

1000℃以上の高温になるガスタービン翼では、遮熱コーティング (TBC) が広く用いられるが、長期間使用すると TBC のトップコートとボンドコートの界面で thermally grown oxide (TGO) と呼ばれる酸化層が徐々に成長して、やがて剥離が生じる。そのため、TBC では剥離挙動の確認や TGO を抑制する事が重要視されている [13] - [16]. トップコートにリブレットを形成した場合、その表面積の増大による酸化特性や遮熱特性の変化により、剥離挙動が変化する可能性がある。そこで我々は、TBC へリブレットを形成したサンプルを作成し、その適用可能性を評価した。また、サンプルに熱サイクル負荷を掛けて、剥離に至るまでの熱サイクル回数比較や負荷前後の試験片を観察する事で、リブレット形成による剥離挙動の影響を評価した。

2 リブレット加工

リブレットの加工にはレーザーアブレーション加工の開発機を用いた。Fig. 1 にその模式図を示す。このレーザー加工機は、波長 532 nm (緑色)、パルス幅約 15 ps、最大繰返し周波数 4 MHz、最大出力 50 W の短パルスレーザーを持つ。レーザー光は照射ヘッドに導かれ、ガルバノミラーによって同期してスキャンされる。レーザー光は fθ レ

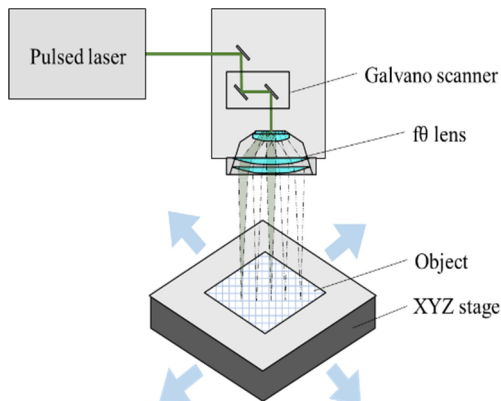


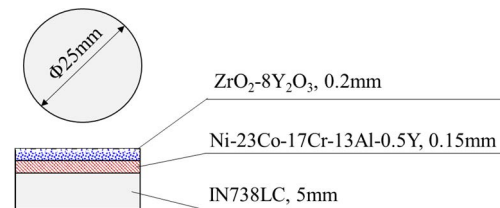
Fig. 1 Schematic diagram of a laser processing machine for forming riblets on the surface of an object

ンズによって所定の位置に集光される。加工対象物は 3 軸ステージによって所定の XYZ 位置に駆動できる。レーザー光が集光した対象物の表面の物質はアブレーションにより除去され、これを連続的にスキャンすることでリブレットの溝が形成される。各条件を制御する事で、ピッチや深さ、リブレット形状を制御する事が可能である。

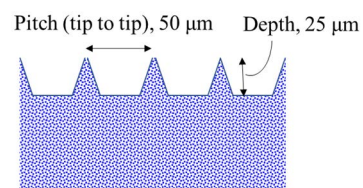
3 実験方法

3.1. 試験片

試験片の模式図を Fig. 2 に示す。基材にボンドコートとトップコートを形成したものを用意し、トップコートの表面にリブレット加工を施した。基材はガスタービン翼で用いられる Ni 基超合金である IN738LC を φ25×5 mm の円柱形状に加工したものをを用いた。試験に用いた IN738LC の組成は Table 1 の通りである。各コートの組成・厚みは Fig. 2 (a) に示す通りである。リブレット加工は、ピッチと深さの目標値をそれぞれ 50 μm, 25 μm として加工を行った。この寸法は、流体低減効果を確認しているものの中で、代表的なサイズである。比較のため、リブレット加工を行っていない試料も用意した。



(a) Materials and geometry



(b) Dimension of riblet

Fig. 2 Test sample

Table 1 Chemical composition of IN738LC (wt%)

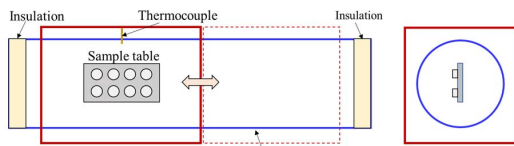
| C | Si | Mn | Ni | Cr | Mo |
|------|-------|-------|------|------|------|
| 0.11 | <0.01 | <0.01 | Bal. | 15.9 | 1.69 |
| Co | W | Al | Ti | Fe | Ta |
| 8.31 | 2.60 | 3.46 | 3.45 | 0.05 | 1.74 |

3.2. 熱サイクル試験

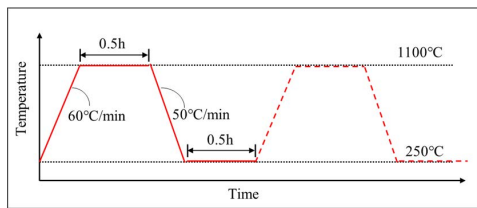
試験は JIS H8451 準拠して実施した。Fig. 3 に試験機および試験条件の模式図を示す。Fig. 3 (a) の通り、円筒状の石英管内に試料台があり、円筒周囲にヒーターと制御用熱電対を備えている。制御温度により、自動でヒーターの

On/Off および位置を動かす事で所定の時間・温度サイクルでの試験が可能である。本試験では、Fig. 3 (b) に示す通り、1100℃と250℃の温度制御で熱サイクルを繰り返し負荷するようにヒーターの動作を調整した。試験機の構成上、円筒軸方向には温度分布が生じるため、リブレット加工有無の試験片を4個ずつ用意し、Fig. 3 (c) のように試料台の上に並べて、同じ温度条件でリブレットの影響を比較できるようにした。Fig. 3 (d) は試験時の様子を示した写真である。

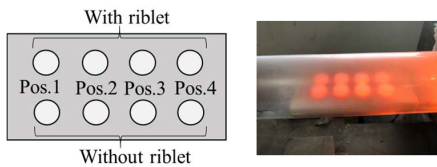
剥離の判定は目視で実施した。夜間を含めて5回/1日の頻度で確認を行い、剥離が観察された場合は、前回の確認時回数と剥離確認時回数の中間の回数を剥離回数として採用し、リブレット加工有無で比較した。また、剥離試験後の試験片をレーザー顕微鏡と電子顕微鏡 (SEM) での観察、エネルギー分散型X線分析 (EDS) による元素分析を行い、試験前後のリブレット形状の変化やボンドコートとトップコートの界面の酸化膜の評価を行った。



(a) Equipment of the heat cycle test equipment



(b) Target temperature profile around the sample table



(c) Sample placement

(d) Photographs of the samples during the test

Fig. 3 Schematic diagram of the test bench for evaluation of the thermal cycle resistance

4 実験結果および考察

4.1. TBC へのリブレット加工の適用可能性

Fig. 4 に加工したリブレット形状をレーザー顕微鏡で評価した結果を示す。目標値の深さ 25 μm、ピッチ 50 μm で周期的な溝構造が形成出来ている事が分かる。SUS304, SUS630に加工した結果 [12] と比較しても、ばらつきや欠陥が少なく、狙い通りの寸法形状に加工が出来ている事が分かる。

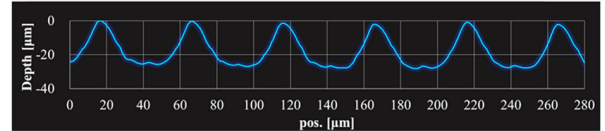
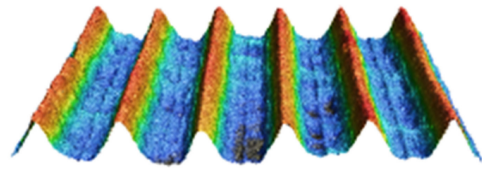


Fig. 4 Microscopic profiles of the lasered riblet TBC sample

4.2. 熱サイクル試験結果

Fig. 5 に熱サイクル試験の結果を示す。1026 サイクルまで試験を実施した所、Pos. 4以外の試験片はボンドコートとトップコートの間で剥離が観察された。剥離に至るサイクル回数は試験片の設置位置により、大きく差異が見られた。一方で、同じ温度条件と考えられる同じ設置位置で比較すると、リブレット加工有無で、剥離回数に差異は見られなかった。

試料位置に温度条件の差異を調べるため、熱サイクル試験後に試料位置付近の温度を計測した結果を Fig. 6 に示す。Pos. 3, 4と比較して、Pos. 1, 2は低温側の到達温度および降温速度が大きく、熱負荷が大きい条件であると推測される。そのため、より少ないサイクル数で剥離が生じたと考えられる。この事から、試料位置による剥離に至るサイクル数の差異は、熱負荷が異なっていたためと考えられる。

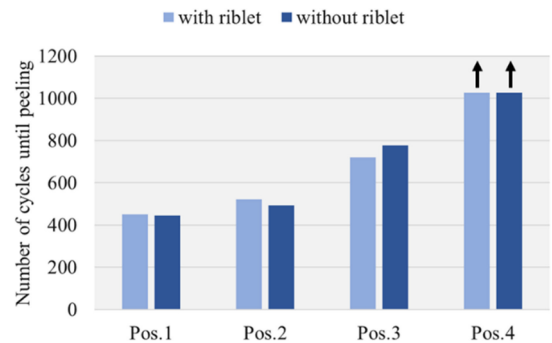


Fig. 5 Comparison of the number of cycles to delamination with riblet and without riblet sample

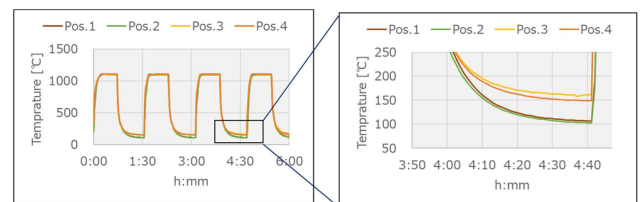


Fig. 6 Differences in temperature profile depending on sample placement position

4.3. リブレットの剥離寿命への影響

剥離した要因を調査するため、剥離が見られなかった Pos. 4の試験片を熱サイクル試験後に SEM/EDXにて、断面観察および元素分析を行った。Fig. 7にSEM 観察結果を示す。リブレット加工有無の試験片のどちらもトップコートとボンドコートの界面付近にき裂が見られた。それぞれき裂が開口していない部分 (1) と開口した部分 (2) の観察結果を示している。このき裂が進展して、全域が開口した時に剥離が生じると考えられる。Pos. 4の試験片は、開口していない部分が残っており、熱サイクル試験で剥離に至らなかったと考えられる。一方で、リブレット加工有無の試料間を比較すると、トップコート全体および表面やリブレット加工周辺のき裂や空孔の大きさや密度に差異は見られなかった。

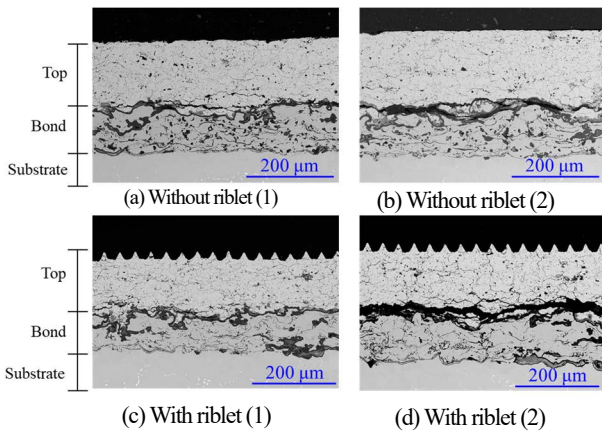


Fig. 7 Cross-sectional microstructure SEM images of lasered riblet TBC sample after heat cycle test (Pos. 4)

Fig. 8にEDS分析結果を示す。Fig. 7のSEM像の(2)の領域でマッピング分析を行った。Zrが検出される領域がトップコート、Ni, Co, Crが検出される領域が、ボンドコートと基材に対応している。ボンドコートとトップの界面にAlとOの成分が観察された。これはTBCを長期間高温で加熱する事で生成した界面酸化物 (Al_2O_3) と考えられる。一般に、このような熱的に生成成長した酸化物をTGOといい、このTGOが剥離寿命に大きく影響すると言われている [13]–[16]。リブレット加工有無の試料でこのTGOの厚みや生成箇所に明確な差異は見られなかった。

以上の事から、今回の熱サイクル試験での剥離は、一般的なTBCの剥離挙動と同様に熱サイクルを繰り返す事で熱応力が生じ、横方向のき裂が発生・成長し、全面に進展したのちに生じたものと考えられる。Pos. 3, 4と比較して、Pos. 1, 2では温度勾配が大きく、き裂の発生・進展速度が速いため、少ないサイクル数で剥離が生じたと考えられる。一方で、リブレット加工有無でき裂やTGOの生成・進展に差異は見られず、リブレット加工はこれらに影響を与え

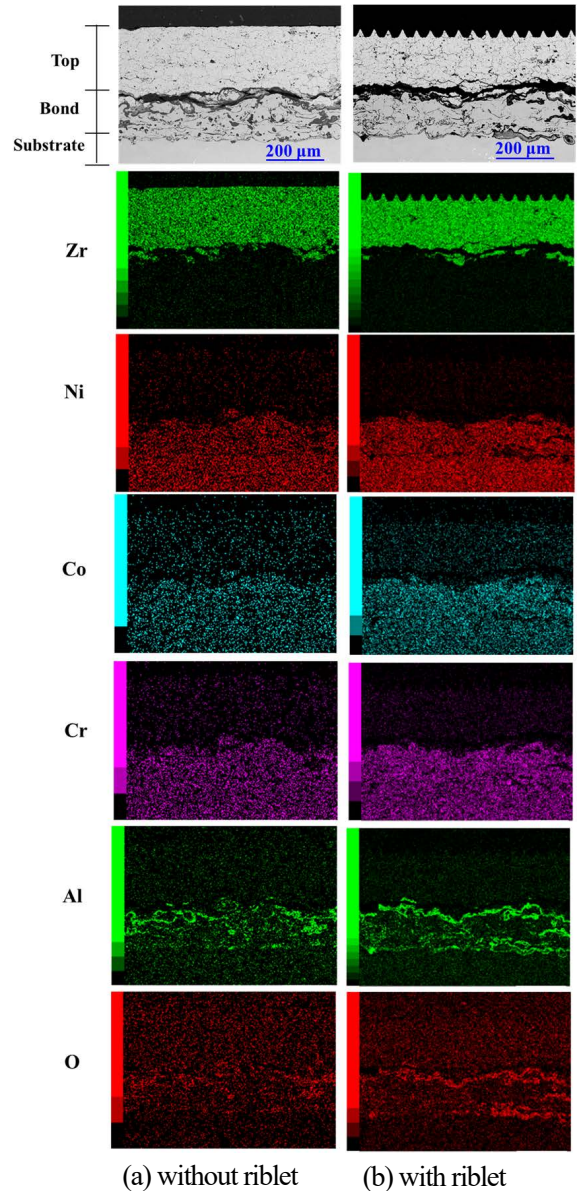


Fig. 8 EDS mapping result of the lasered riblet TBC sample after heat cycle test (Pos. 4)

なかったため、リブレット加工有無で剥離寿命に差異が生じなかったと考えられる。

4.4. リブレットの高温耐久性

高温および熱サイクル負荷によるリブレットの耐久性を評価するため、試験後の試験片をレーザー顕微鏡で評価した。剥離前と剥離後の試験片それぞれ観察を行った。Fig. 9にその結果を示す。どちらの試験片も Fig. 4の熱サイクル試験前の形状から変化は見られなかった。1100℃の高温を伴う熱サイクルで剥離が生じるまで負荷を掛けてもリブレット形状に変化が見られなかった事から、熱サイクル環境下に対するリブレット形状の耐久性は十分であると考えられる。

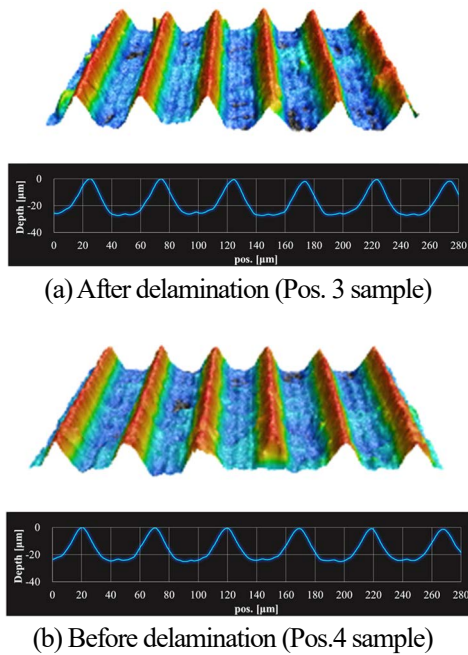


Fig. 9 Microscopic profiles of the lasered riblet TBC sample after heat cycle test

5 まとめ

レーザー加工により、TBCのトップコート上へのリブレット形成を行い、その加工の適用性および熱サイクルによる耐久性を評価した。TBC上にリブレットを形成できる事が分かった。また、リブレット有無で剥離寿命および剥離挙動に差異は見られず、熱サイクル負荷後もリブレット形状は維持できる事が分かった。

以上の事から、性能向上が見込めるリブレットを剥離寿命に影響を与えずにTBC上に形成する事が可能であり、ガスタービンの性能向上策として有用であると考えられる。

引用文献

[1] 綿引健二, 蘆田憲一, 土橋晋太郎, 土橋広和, 内藤兼行, 佐藤真路, 一ノ瀬剛, “ガスタービン用TBCへのレーザー加工によるリブレット形成と熱サイクル耐久性評価,” 第50回日本ガスタービン学会定期講演会, A-14, 2022.

[2] 三宅裕, “壁乱流の渦,” *ながれ*, vol. 22, no. 1, pp. 29-34, 2003.

[3] 鈴木雄二, 笠木伸英, “壁面乱流の知的能動制御,” *セーブレーション・レビュー マイクロフローセンサ特集号*, pp. 50-57, 2001.

[4] D. W. Bechert, G. Hoppe, and W.-E. Reif, “On the drag reduction of shark skin,” in *Proc. 23rd Aerospace Sciences Meeting*, 1985, doi: 10.2514/6.1985-546.

[5] D. W. Bechert, M. Bartenwerfer, G. Hoppe, and W.-E. Reif, “Drag reduction mechanisms derived from shark skin,” in *Proc. 15th Congr. ICAS*, pp. 1044-1068, September, 1986.

[6] B. N. Chichkov, C. Momma, S. Nolte, F. von Alvensleben, and A. Tünnermann, “Femtosecond, Picosecond and Nanosecond Laser Ablation of Solids,” *Appl. Phys. A*, vol. 63, no. 2, pp. 109-115, 1996.

[7] M. C. Richardson, “New Opportunities with Intense Ultra-Short-Pulse Lasers,” in *Proc. of SPIE*, vol. 1410, 1991, pp. 14-25, doi: 10.1117/12.43608.

[8] 吉岡洋明, 土井裕之, 武田淳一郎, 難波浩一, 岡田郁生, 武浩司, 伊藤健之, “発電用ガスタービンの材料技術,” *日本ガスタービン学会誌*, vol. 32, no. 3, pp. 4-47, 2004.

[9] R. Rajendran, “Gas turbine coatings - An overview,” *Engineering Failure Analysis*, vol. 26, pp. 355-369, 2012, doi: 10.1016/j.engfailanal.2012.07.007.

[10] 白石雅之, 土橋晋太郎, 一ノ瀬剛, 柴崎祐一, P. A. Leitl, A. Flanschger, S. Schreck, R. Benauer, S. Pramstrahler, and A. Marn, “タービンをテストリグ出口案内翼への最適リブレット効果予測と、そのレーザー加工によるリブレット性能評価,” 第49回日本ガスタービン学会定期講演会, A-24, 2021.

[11] 稲崎慎也, 佐藤真路, 一ノ瀬剛, P. A. Leitl, A. Flanschger, S. Schreck, and R. Benauer, “超小型ジェットエンジンの最適リブレット計算とそのレーザー加工、およびエンジン性能での効果検証,” 第49回日本ガスタービン学会定期講演会, A-25, 2021.

[12] 綿引健二, 蘆田憲一, 土橋晋太郎, 土橋広和, 佐藤真路, 一ノ瀬剛, “ガスタービン圧縮機部材へのレーザー加工による、リブレット形成と機械特性評価結果,” 第49回日本ガスタービン学会定期講演会, B-27, 2021.

[13] 岡田満利, “発電用ガスタービン高温部品の寿命評価のための材料技術,” *日本ガスタービン学会誌*, vol. 45, no. 6, pp. 452-457, 2017.

[14] K. M. Doleker, Y. Ozgurluk, and A. C. Karaoglanli, “TGO growth and kinetic study of single and double layered TBC systems,” *Surface and Coatings Technology*, vol. 415, 127135, pp. 1-11, 2021, doi: 10.1016/j.surfcoat.2021.127135.

[15] 児島慶享, “ガスタービン耐熱コーティング開発の最新技術動向,” *日本ガスタービン学会誌*, vol. 38, no. 2, pp. 85-90, 2010.

[16] 有川秀行, 児島慶享, 吉岡隆幸, 岡田満利, 久松暢, “遮熱コーティング (TBC) の高耐久化の検討 (柱状組織トップコート及び界面酸化物の成長抑制について),” *日本機械学会 (No. 04-2) 第9回動力エネルギー技術シンポジウム講演論文集 ('04.6.22,23,東京)*, pp. 119-122, 2004.

綿引健二 Kenji WATAHIKI
次世代プロジェクト本部 第一開発部
1st Development Department
Next Generation Project Division

蘆田憲一 Kenichi ASHIDA
次世代プロジェクト本部 第一開発部
1st Development Department
Next Generation Project Division

土橋晋太郎 Shintaro TSUCHIHASHI
次世代プロジェクト本部 第一開発部
1st Development Department
Next Generation Project Division

土橋広和 Hirokazu TSUCHIHASHI
次世代プロジェクト本部 第一開発部
1st Development Department
Next Generation Project Division



綿引健二
Kenji WATAHIKI



蘆田憲一
Kenichi ASHIDA



土橋晋太郎
Shintaro TSUCHIHASHI



土橋広和
Hirokazu TSUCHIHASHI