

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的特性評価[†]

綿引健二，蘆田憲一，土橋晋太郎，土橋広和

Riblet Formation by Laser Ablation on Gas Turbine Compressor Materials and Evaluation Results of Mechanical Properties

Kenji WATAHIKI, Kenichi ASHIDA, Shintaro TSUCHIHASHI and Hirokazu TSUCHIHASHI

圧縮機翼やタービン翼表面にリブレット形状を形成する事は、ガスタービンの効果率改善の可能性があるが、機械的な強度特性への影響が懸念される。我々はレーザーアブレーション加工で、表面にリブレット形状を施した材料の強度試験を実施した。引張強度およびクリープ特性への影響は見られなかったが、疲労強度の低下を確認した。その対策として、コーティング施工とリブレット加工を組み合わせる手法の検討を行った。我々は、アルミ系の耐食コーティングやTiAlN系の硬質コーティングを用いて作成したサンプルで評価を行い、疲労強度低減を抑制できる事を実験的に確認した。適切なコーティングの選択と施工を行う事で、疲労強度低下を抑制して、リブレット形状を形成できると考えられる。

Forming riblets on the surface of a compressor blade or turbine blade can improve a gas turbine's performance, but there is concern about detrimental effects on mechanical strength characteristics. We conducted strength tests on a material with riblets formed on the surface by laser ablation. No effect on tensile and creep properties was seen, but fatigue strength was decreased by riblet processing. To prevent fatigue strength reduction, we examined a method that combines coating and riblet processing. We evaluated samples prepared with either an aluminum-based corrosion-resistant coating or a TiAlN-based hard coating, and experimentally confirmed that the effect on fatigue strength can be reduced. It is proposed that selecting an appropriate coating, optimizing the coating method, and optimizing the process of riblet formation can yield performance improvements without sacrificing tensile, creep, or fatigue strength.

Key words ガスタービン, リブレット, レーザー加工, 高サイクル疲労試験, コーティング
gas turbine, riblet, laser processing, high cycle fatigue test, 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]。また、産業界への応用に関して、風力タービン向けに金型を用いた樹脂

フィルムでリブレット形状を作成した事例がある [6]。

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 [7], [8]。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 [9], [10]。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任意の微細形状の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

[†] 本稿は、原著の引用文献 [1] に対して実測と解析の乖離の要因、および実用条件を想定した場合の影響に考察を加えたものである。

レットの優位性の検証のため、金属性のタービン翼に直接、流体解析 (CFD) に基づいて設計したリブレットをレーザー加工で形成し、その実測を行った。タービンテスト設備の出口案内翼 (静翼) に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った [11]。また、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確認した [12]。

一方、材料表面にリブレットのような切欠きを形成すると、材料の強度特性の低下が懸念される。特に疲労強度は、一般に表面の微小な切り欠き形状により影響を受ける事が知られている [13]。そこで、我々は圧縮機部材に直接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。また、母材の疲労強度低減の防止策として、コーティングにリブレットを形成する手法を検討し、その加工の適用性と疲労強度特性を評価した。本稿では、筆者らの評価結果 [1] に対して、リブレット形状による応力集中について追加評価結果と解釈を加えたものである。

2 リブレット加工

リブレットの加工にはレーザー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。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。

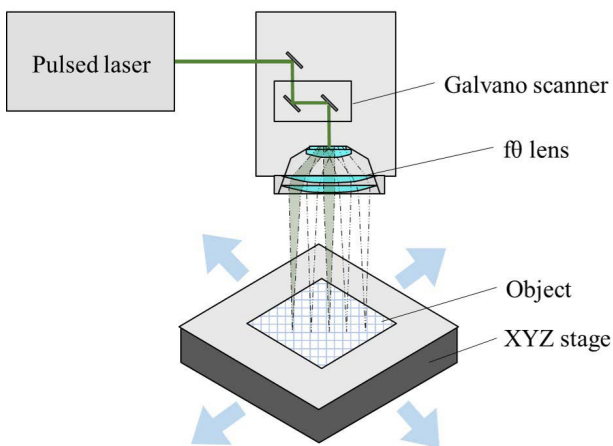


Fig. 1 Schematic diagram of a laser processing machine for forming riblets on the surface of an object

3 実験方法

3.1. 試験片

試験片は、各強度試験に合わせた形状の平板を用意して、そこにリブレット加工を施した。材質は圧縮機の前段側の翼で用いられる SUS630 [9] を用いた。コーティングと組み合わせた試験片には SUS304 を用いた。試験片形状、加工領域の模式図を Fig. 2 に示す。リブレット加工は、平行部の 25 mm の領域に行い、ピッチと深さは、それぞれ 50 μm、25 μm を目標値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。また、1 本の試験片でリブレット加工の影響の有無を評価するため、リブレット加工は片面にのみ行った。

リブレット形成後の疲労強度の低下対策として、Fig. 3 に示す 2 種類のコーティングを検討した。リブレットのサイズに対して十分に厚い膜のコーティングと、薄いタイプである。薄いタイプはリブレット加工後にコーティングを施工した。

厚膜のタイプは圧縮機翼のコーティングとして用いられるものを用いた。母材に Al 粒子を含んだ中間コーティングを塗布、中間コーティングにリブレット加工を実施し、その上からトップコーティング (~5 μm) を施工した。

薄膜のタイプは TiAlN 膜を用いた。一般に工具や刃物に用いられる非常に高硬度のものである。Ti 合金へ施工し、ガスタービン向けへの検討例もある [14]。母材にリブレット加工を行ったあとに、PVD でコーティング (~3 μm) を行った。リブレット加工した上に高硬度のコーティングを施工する事で、表面のクラック生成を防ぎ、疲労強度を改善できると考えた。なお、コーティングの施工条件によっては良好な疲労強度を示す結果が得られている [13]。

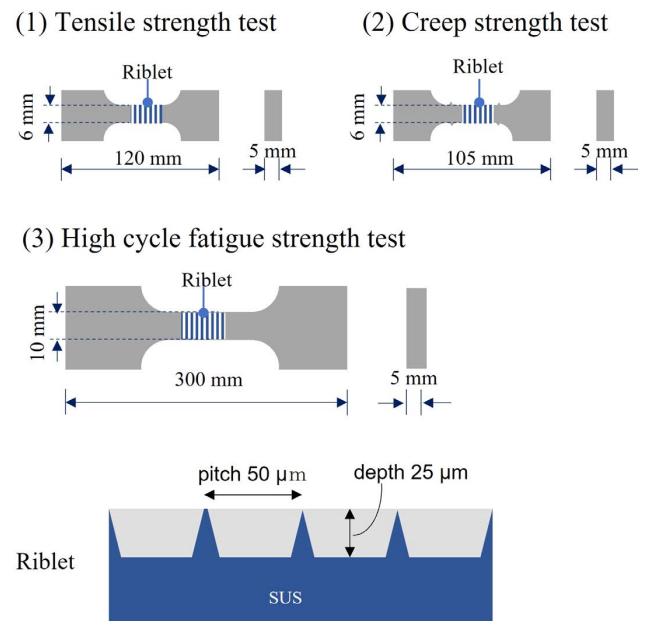


Fig. 2 Dimensions of each strength test sample and riblet

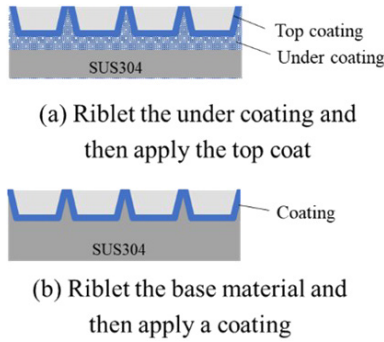


Fig. 3 Coating methods for test samples

3.2. 機械試験の条件

Table 1 に今回実施した機械試験項目と条件を示す. 各試験は試験機関にて JIS Z2241, 2271, 2273 に則り実施した. 圧縮機へのリブレット加工の適用を想定し, 引張試験は室温と600℃の2条件で実施した. クリープ試験は600℃, 200 MPa の条件で実施した. 高サイクル疲労試験の試験モードは軸方向荷重制御で, 応力比は0, 波形は sim 波である.

Table 1 Strength test condition

Test item	Test condition	Sample
Tensile strength test	(1) RT	SUS630
	(2) 600℃	
Creep strength test	600℃, 200 MPa	(1) SUS630 (2) SUS304 without coating (3) SUS304 with Al including coating (4) SUS304 with TiAlN coating
High cycle fatigue test	RT, pulsating tension (Tensile)	

また, 破壊メカニズム等の調査のため, 試験後に光学顕微鏡, 走査型電子顕微鏡 (SEM) 等を用いて破面の表面および断面観察を行った. 試験片は, 引張試験とクリープ試験は SUS630 で実施し, 高サイクル疲労試験は SUS630 と SUS304, SUS304 にコーティングを施工した試験片を用意し, 計4条件で実施した. なお, 各試験片で, リブレット加工が有るものと無いものをそれぞれ用意して, 試験を実施した.

4 実験結果および考察

4.1. リブレット加工の適用性

Fig. 4 に SUS630 にリブレット加工を行い, その形状をレーザー顕微鏡で評価した結果を示す. 目標値に対して, 深さがやや大きい, 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.

同様に Fig. 5 にコーティングとリブレット加工を組み合

わせた試験片のリブレット形状を評価した結果を示す. コーティング前後の結果も載せている. いずれの試験片でも, 周期的な溝構造が作成できており, コーティングの上からでもリブレット加工が出来ている事が分かる. また, コーティング前後の結果を見ると, 2種類とも形状の差異がほとんど見られず, リブレット加工後に薄膜をコーティングする手法でも, リブレットを形成する事が可能である事が分かる. なお, 試験片で, リブレット形状にバラつきがあるが, 加工条件を調整する事で, このバラつきは小さくすることができる.

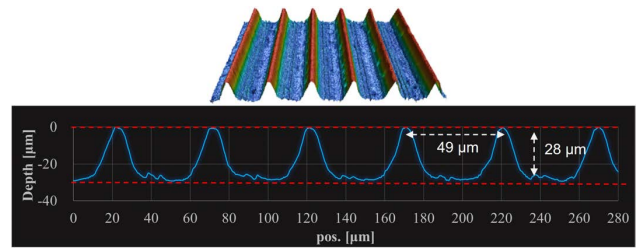


Fig. 4 Microscopic profiles of lasered riblet SUS630 sample

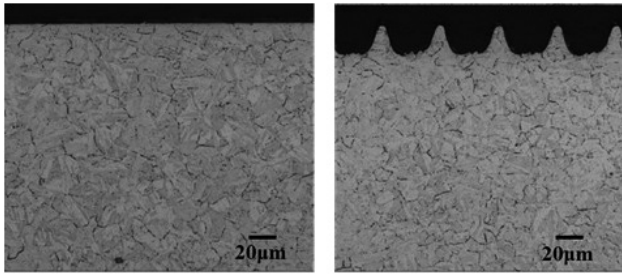
Sample	3D image	Cross section profile
Without coating		
Al including coating	Before top coating 	
	After top coating 	
TiAlN	Before coating 	
	After coating 	

Fig. 5 Microscopic profiles of lasered riblet SUS304 with and without coating sample

リブレット加工前後の断面を光学顕微鏡で観察した結果を Fig. 6 に示す. 室温にて高サイクル疲労試験を実施した後の破断部から離れた位置での観察結果である. リブレット加工面の直下での金属組織の変化や, 加工変質層などは見られなかった. レーザーによる溶接や切断等, 熱影響が生じる加工では, 強度が低下する事例が知られているが, リブレットの形成はアブレーション加工であるため, 熱影響が小さいことが伺える.

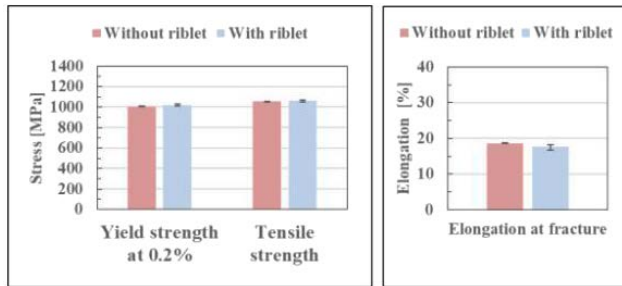
4.2. リブレット加工材の機械的特性

Fig. 7, Fig. 8 にリブレット加工有無の引張試験およびクリープ試験の結果を示す. 各試験とも N 数 3 で実施し, そ

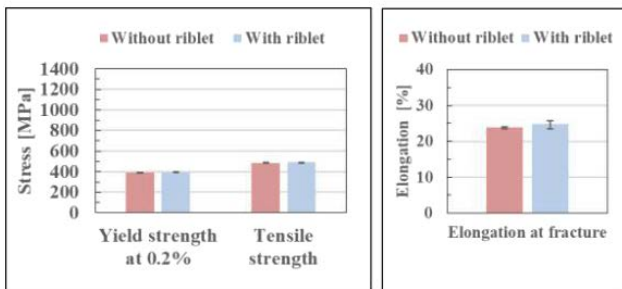


(a) Before (b) After

Fig. 6 Metallographic observation of SUS630 stainless steel before and after riblet processing

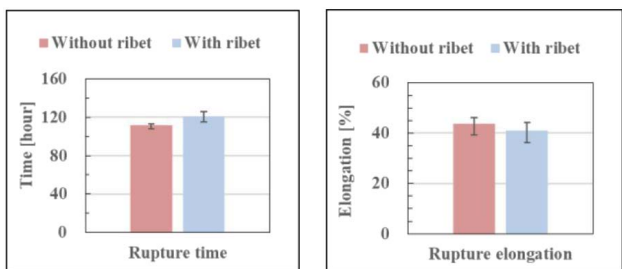


(a) Strength (RT) (b) Elongation (RT)



(c) Strength (600°C) (d) Elongation (600°C)

Fig. 7 Tensile strength and elongation for with and without riblet



(a) Rupture time (b) Rupture elongation

Fig. 8 Creep rupture time and rupture elongation for with and without riblet

の平均値でグラフをプロットした。引張強さ、0.2%耐力、伸びともにリブレット加工の有無で有意差は見られず、リブレット加工により引張特性の低下は見られなかった。

クリープ試験の結果を Fig. 8 に示す。破断時間および伸びともほぼ同等の値を示し、リブレット加工によりクリー

プ特性の低下は見られなかった。

リブレット加工による疲労強度への影響は負荷応力を変えて、破断までの繰返し数を求め、S-N 曲線を作成し、 10^7 サイクル以上の疲労限を求めた。その結果を Fig. 9 に示す。リブレット加工により、強度低下している事が分かる。なお、リブレット加工が有る試験片の試験応力の算出は、試験片の厚みからリブレット加工深さ (約 25 μm) 分を除いた値で算出した。

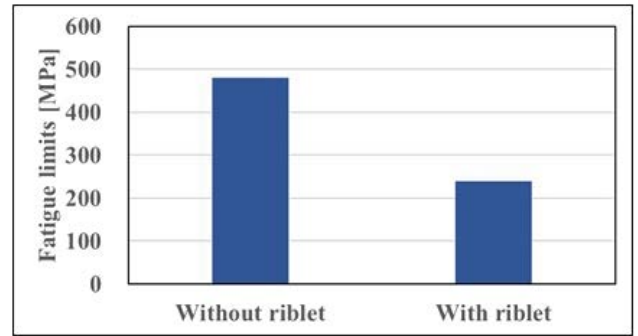


Fig. 9 Fatigue limits for with and without riblet SUS630 sample

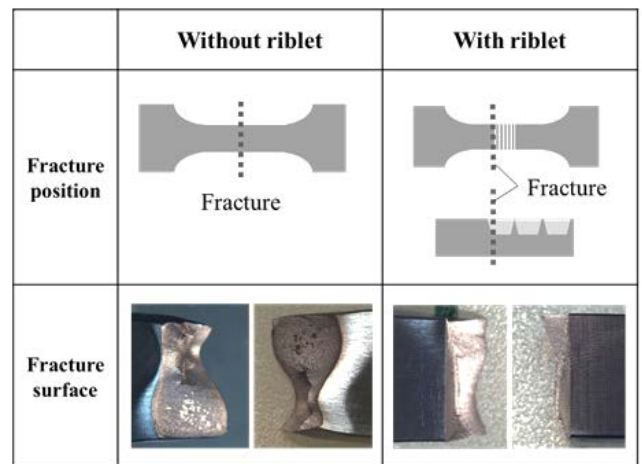


Fig. 10 Fracture surface observation result of SUS630 samples

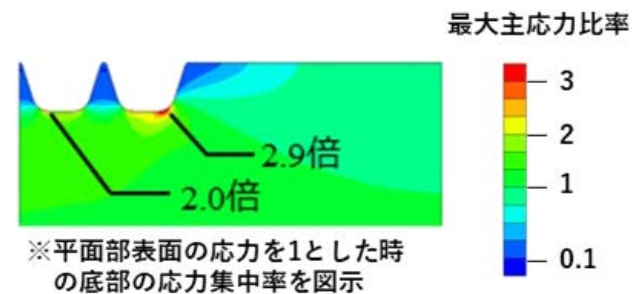


Fig. 11 Stress distribution analysis result of riblet

リブレット加工による疲労限が減少した要因を考察するため、破面観察と応力解析を行った。結果をそれぞれ破断 Fig. 10, Fig. 11 に示す。リブレット加工がない試験片の破

面は、内部に平坦な脆性破壊部がわずかに認められ、それ以外は大きく塑性変形が生じており、ほとんどが延性破壊を呈していた。内部の介在物を起点として、クラックが発生、成長して疲労破壊が生じ、その後、塑性変形を伴って破断したと推測される。一方、リブレット加工が有る試験片では、リブレット加工部と非加工部の境界で破断が生じていた。破断の形態は直線的で、リブレットの溝に沿って脆性的に破壊、その後は塑性変形を伴って破壊している事を確認できた。次に応力解析から、リブレットの各底部で応力が集中する事が分かった。また、最も応力が集中する部分は加工の際部分であり、実験での破断位置と一致した。以上の事から、リブレット形状による切り欠きにより、溝部で応力集中が生じ、クラックが発生し、進展したと推測される。

4.3. コーティングとリブレット加工材の高サイクル疲労特性

コーティングとリブレット加工を組み合わせた材料の疲労強度を調べた。その結果を Fig. 12 に示す。試験応力を算出するための試験片の厚みは、コーティング皮膜の厚さを考慮せず、母材の値とした。また、SUS304試験片は、SUS630の場合と異なり、リブレット加工深さは未考慮とした。同条件で複数の試験片で試験を行った結果は、平均値でグラフをプロットしている。コーティングを付与する事で、疲労強度に違いが見られた一方で、リブレット有り・なしの差は見られなくなった。

コーティングがない試験片の観察結果を Fig. 13 に示す。リブレット加工なしの試験片では、角部が起点となり、クラックが進展、その後、塑性変形を伴って破断している。一方、リブレット加工が有る試験片では、破断位置は加工部の境界で、リブレット溝部が起点となり、クラックが進展、その後、塑性変形を伴って破断したと考えられる。応力集中により、リブレット加工なしと比較して、早期にクラックが発生、進展したため破断までの繰り返し数が低下したと考えられる。

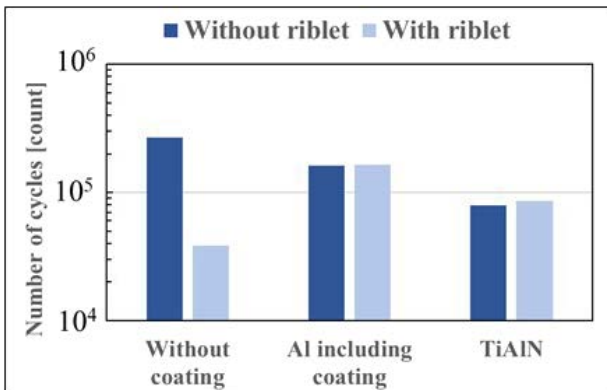


Fig. 12 Comparison of the number of cycles to fracture at 225 MPa stress amplitude of SUS304 samples

Fig. 14 に厚膜のタイプのコーティングを施工した試験片の観察結果を示す。リブレット加工有り・なし共に、破断

位置は試験片の中心付近であった。この形態はコーティングなし・リブレット加工なしの結果と同様である。破断部付近はコーティングの剥離が生じていた。SEM 観察で、表面に無数のクラックが生じていたが、そのクラックが母材に進展している様子は見られなかった。

以上の事から、試験初期にコーティングにクラックが生じて、クラックが母材に進展することなく、コーティングの剥離が生じ、母材表面が露出、その後、破断したと推測される。クラックの進展特性は、コーティングの種類や母材との密着性で変化し、ヤング率の低いコーティングは進展しにくいとされる [15], [16]。今回、用いたコーティン

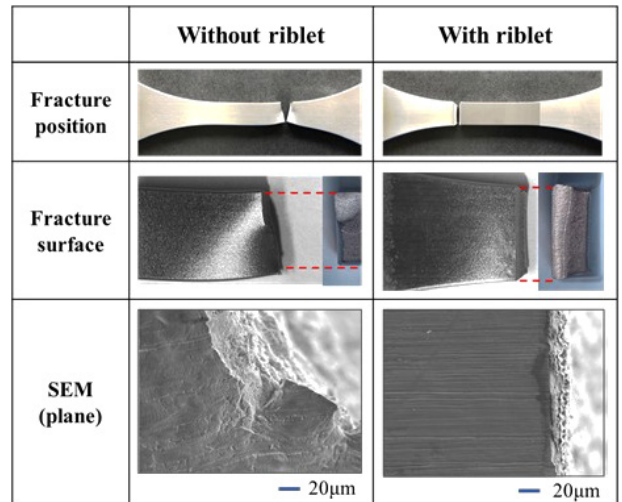


Fig. 13 Fracture surface observation result of SUS304 without coating

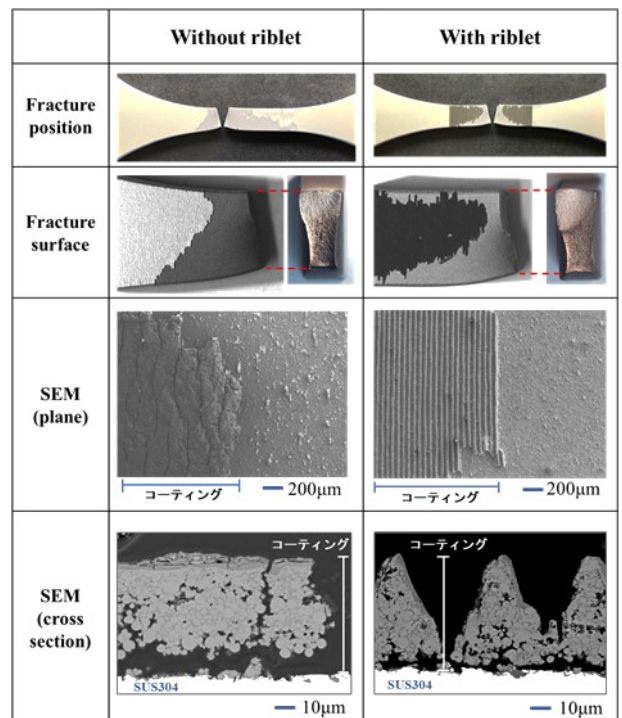


Fig. 14 Fracture surface observation result of SUS304 with Al including coating

グは、表面にクラックが生じやすいが、母材との密着力が比較的小さく、母材へのクラックの進展が生じなかったと考えられる。なお、リブレット加工がない試験片で、コーティング施工あり・なしを比較すると、コーティング施工で疲労強度が若干低下している。同様の例は古くから知られている [17]。表面残留応力の変化、クラックの発生しやすいコーティングを付加した時など複数の要因が考えられる。今回のケースでは、コーティング施工過程内で残留応力の変化もしくは界面の粗さの変化によるものとする。今回実施している疲労試験では引張応力を負荷しているため、あらかじめ引張の残留応力が生じていると、その分、疲労強度が低下する事が考えられる。後者は、粗さの変化により、クラックの生成がしやすくなった事が考えられる。これらの要因を調査し、コーティング施工方法を適正にする事で、疲労強度を維持し、リブレット加工を行う事が可能であると考えられる。

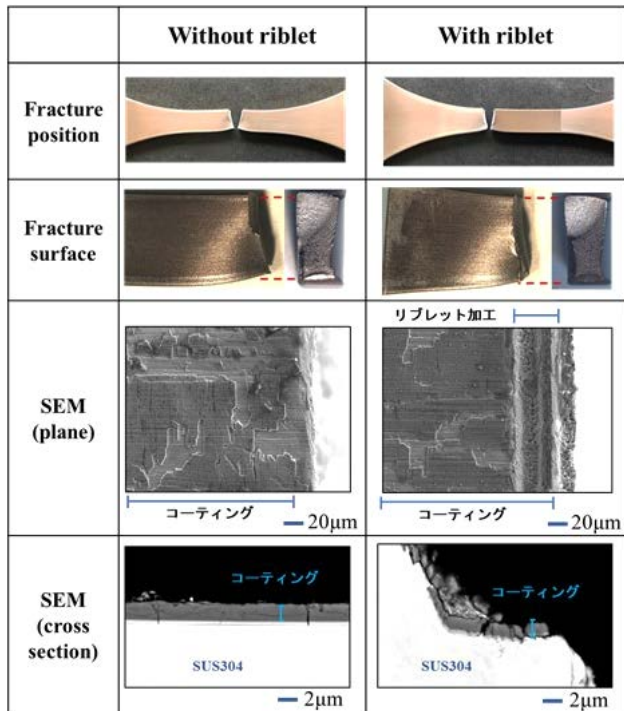


Fig. 15 Fracture surface observation result of SUS304 with TiAlN coating

Fig. 15 に薄膜タイプのコーティングを施した試験片の観察結果を示す。破断位置はリブレット有り・なしで異なり、リブレット加工がない試験片は中心付近、リブレットが有る試験片は加工部の境界であった。SEM 観察より、リブレット加工なしでは、コーティング部において、応力方向に垂直な無数のクラックが観察され、一部は母材にまで進展しているクラックも見られた。リブレット加工が有る試験片では、リブレット溝部を中心にコーティングが剥離している様子が見られた。

コーティングを施工していなく、リブレット加工もない

試験片と比較すると、疲労強度が低下している。無垢の母材表面よりも TiAlN コーティングは非常に硬く、延性が低いため、母材の大きな変形に追従せず、クラックが生じ、その後、一部のクラックが母材に進展し易くなったと考えられる。延性が異なるコーティングや、他の母材に適用する事で疲労強度が改善する可能性があると考えられる。リブレット加工しても疲労強度がさらに低下しないのは、応力集中部を含め、リブレット加工部の表面が硬質膜で保護されたためと考える。

5 まとめ

レーザーアブレーション加工でリブレット形状を施した材料の加工の適用性および強度評価を実施した。金属表面の他、アルミ系の耐食コーティングや TiAlN 系の硬質コーティングにもリブレット加工が適用できることを確認した。

機械的特性に及ぼすリブレット加工の影響について、引張およびクリープ特性への影響は認められなかったが、高サイクル疲労強度は、リブレット形状により、応力集中部が生じて低下した。その対策として、コーティング施工とリブレット加工を組み合わせる手法の検討を行った。その結果、母材までクラックが進展しにくいコーティングにリブレット加工する手法、またはリブレット加工後にクラックが母材まで入りにくい薄いコーティングを付加する手法により、疲労強度の低下を抑制できると考えられる。母材との組み合わせを含む、最適なコーティングの施工方法の開発を引き続き行っていく予定である。

引用文献

- [1] 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.
- [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,” *セーブメーション・レビュー マイクロフローセンサ特集号* (2001), pp. 50-57, 2001.
- [4] D. W. Bechert, G. Hoppe, 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, W.-E. Reif, “Drag reduction mechanisms derived from shark skin,” in *Proc. 15th Congr. ICAS*, Sep. 1986, pp. 1044-1068.
- [6] A. Sareen, R. W. Deters, S. P. Henry, M. S. Selig, “Drag Reduction Using Riblet Film Applied to Airfoils for Wind Turbines,” in *Proc. 49th AIAA Aerospace Sciences Meeting including the New Horizons Forum and Aerospace*, doi:10.2514/6.2011-

- 558.
- [7] B. N. Chichkov, C. Momma, S. Nolte, F. von Alvensleben, A. Tünnermann, "Femtosecond, Picosecond, and Nanosecond Laser Ablation of Solids," *Appl. Phys. A*, vol. 63, no. 2, pp. 109-115, 1996.
- [8] M. C. Richardson, "New Opportunities with Intense Ultra-Short-Pulse Lasers," in *Proc. of SPIE*, vol. 1410, 1991.
- [9] 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.
- [10] R. Rajendran, "Gas turbine coatings - An overview," *Engineering Failure Analysis*, vol. 26, pp. 355-369, 2012, doi:10.1016/j.engfailanal.2012.07.007.
- [11] 白石雅之, 土橋晋太郎, 一ノ瀬剛, 柴崎祐一, P. A. Leitzl, A. Flanschger, S. Schreck, R. Benauer, S. Pramstrahler, 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.
- [12] 稲崎慎也, 佐藤真路, 一ノ瀬剛, P. A. Leitzl, A. Flanschger, S. Schreck, 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.
- [13] 日本機械学会, *金属材料 疲労強度の設計資料1*, 改訂第2版, 東京: 日本機械学会, 1982.
- [14] N. P. Sivagnanam Chandra, Y. Otsuka, Y. Mutoh, K. Yamamoto, "Effect of coating thickness on fatigue behavior of TiAlN coated Ti-alloys," *International Journal of Fatigue*, vol. 140, pp. 105767, 2020. doi:10.1016/j.ijfatigue.2020.105767.
- [15] 伊藤義康, 斎藤正弘, 石渡裕, "MCrAlY 合金コーティング部材の高サイクル疲労寿命特性," *溶接学会論文集*, vol. 15, no. 2, pp. 359-364, 1997.
- [16] 伊藤義康, 斎藤正弘, 宮崎松生, "減圧プラズマ溶射皮膜の機械特性とき裂進展特性," *日本機械学会論文集 [A編]*, vol. 60, no. 579, pp. 2538-2543, 1994.
- [17] 日本機械学会, *金属材料 疲労強度の設計資料2*, 改訂第2版, 東京: 日本機械学会, 1984.

綿引健二 Kenji WATAHIKI
次世代プロジェクト本部 第二開発部
2nd Development Department
Next Generation Project Division

蘆田憲一 Kenichi ASHIDA
次世代プロジェクト本部 第二開発部
2nd Development Department
Next Generation Project Division

土橋晋太郎 Shintaro TSUCHIHASHI
次世代プロジェクト本部 第二開発部
2nd Development Department
Next Generation Project Division

土橋広和 Hirokazu TSUCHIHASHI
次世代プロジェクト本部 第二開発部
2nd 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