

# 発電用ガスタービン実験機の翼への最適 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<sup>†</sup>

白石雅之, 土橋晋太郎, Peter A. Leitl, Andreas Flanschger, Stefan Schreck,  
Richard Benauer, Simon Pramstrahler, Andreas Marn

## Numerical and Experimental Investigation of Laser Processed Riblets on Turbine Exit Guide Vanes of Gas Turbine Test Rig and the Impact on the Performance

Masayuki SHIRAIISHI, Shintaro TSUCHIHASHI, Peter A. LEITL, Andreas FLANSCHGER,  
Stefan SCHRECK, Richard BENAUER, Simon PRAMSTRAHLER and Andreas MARN

リブレットは、流体機器の表面に設けられたサメ肌状の構造で流線に沿った溝により乱流境界層の粘性抵抗を低減することが知られている。低圧の発電用ガスタービンを模した実験評価機において、タービン出口案内翼（TEGV）の負圧面にリブレットを施した場合の圧損やwakeの低減を流体解析により求め、流体力学上最適なリブレットデザインを算出した。実際に鉄系ブレードである出口案内翼に直接レーザー加工でデザインを忠実に再現したリブレットを形成し、実験評価機に設置してリブレットの効果や流れへの影響を実測した。出口案内翼で6.3%の圧損低減が得られた。レーザー加工は金属に直接リブレットを加工できるので、発電用ガスタービンのような高温環境でもリブレットを適用でき、発電効率向上などに寄与することができる。

The reduction of pressure loss and wake in a low-pressure turbine test rig containing turbine exit guide vanes (TEGVs) with laser-processed riblet surface were numerically and experimentally investigated. Riblets are streamwise grooved surfaces which reduce the viscous drag in a turbulent boundary layer, similar to shark-skin. An optimized riblet design was calculated by computational fluid dynamics (CFD), and the designed riblets were laser-processed directly onto the suction side of steel TEGVs. The TEGVs with and without riblets were installed on the test rig, and the effect of the riblets on the flow were measured. Pressure loss around the TEGVs was reduced by 6.3%. This result shows the benefit of laser-processed riblets directly fabricated on 3-dimensionally curved parts, such as gas turbine blades, which operate at high temperature.

**Key words** リブレット, レーザー加工, 流体解析, 粘性抵抗低減, 発電効率  
riblet, laser processing, CFD, drag reduction, power generation efficiency

### 1 はじめに

発電用ガスタービンをはじめとする流体機器が受ける流体抵抗は、圧力抵抗（慣性抵抗）と摩擦抵抗（粘性抵抗）に大別される。特に高レイノルズ数の乱流領域においては、壁面境界層に強いヘアピン渦が発生し、それに伴って壁面ごく近傍に低速ストリークとよばれる構造によって連続的に縦渦が生じ、層流に比べて大きな壁面乱流摩擦抵抗が発生する [2]。摩擦抵抗は流体機器の損失の一因であり、こ

れを低減することは流体機器の効率を向上させる大きな課題の1つである。

一方、速く泳ぐ種のサメにおいて鱗の1つ1つの表面に35~100 μm程度の微小な縦溝があることが知られていた [3], [4]。流れに沿ったこの縦溝はリブレット（riblet）と呼ばれ、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]。リブレットは、縦渦が壁面から離れて壁面との相互作用が抑制される効果を持つ [6]。Fig. 1にリブレットと縦渦の

<sup>†</sup> 本稿は、自著の引用文献 [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。

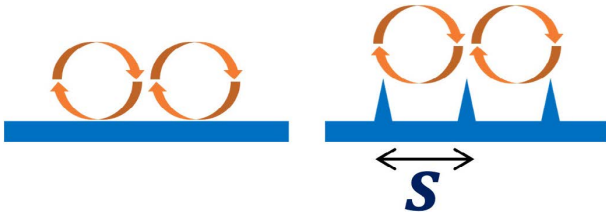


Fig. 1 Eddy-wall interaction without and with riblets. The flow is in the depth direction of the paper.

相互作用の模式図を表す。壁面近傍の縦渦の寸法は壁剪断応力に依存するため、最適なリブレットピッチ（リブレットの嶺トップの間隔）も各所の壁剪断応力に依存し、壁剪断応力が大きいほど最適なリブレットピッチは小さくなる。リブレットによる摩擦抵抗の低減量は縦渦の寸法、すなわち流速によって変化する。リブレットピッチ  $s$  を次の式のように無次元化した  $s^+$  という尺度においては、 $s^+=17$  付近で摩擦抵抗の低減効果が最大となる。

$$s^+ = \frac{s \sqrt{\frac{\tau_w}{\rho}}}{\nu} \tag{1}$$

ここで、 $\tau_w$  は壁剪断応力、 $\rho$  は流体の密度、 $\nu$  は流体の動粘度である。これより流速が相対的に遅く、もしくはリブレットピッチが小さくなると摩擦抵抗の低減効果はゼロに漸減する。一方、流速が相対的に速く、もしくはリブレットピッチが大きくなると摩擦抵抗の低減効果はゼロを超えて逆に摩擦抵抗が増大する。この挙動を表したものが Fig. 2 である [7]。とりわけ表面積が大きく高レイノルズ数領域で乱流摩擦抵抗の寄与が大きな航空機や風力タービン翼の分野でリブレットの研究が進んでおり [8], [9]、産業用コンプレッサーやジェットエンジンなどターボ機械にも有効と考えられている [10], [11]。

リブレットピッチは数  $\mu\text{m}$  ~ 100  $\mu\text{m}$  程度の微小寸法となることから、機械加工によるリブレットの実現は困難であ

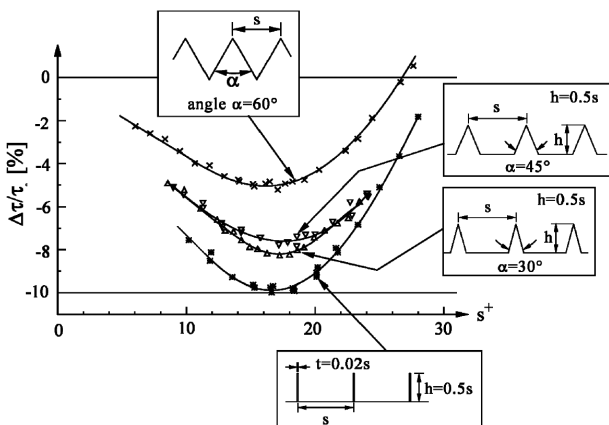


Fig. 2 Drag reduction effect by riblets with various cross section. The number  $s^+$  is a dimensionless riblet size.

り、従来は金型による樹脂フィルム（リブレットフィルム）が用いられた [12]。しかし、対象物の形状や流線が複雑な場合や使用環境が高温である場合にはフィルムは適用が難しく、特に商用ガスタービンにおいてはフィルムでのリブレットの実用化は不可能であった。

そこで我々はレーザーアブレーション加工により所定の形状のリブレットを形成する技術を開発した。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 [13], [14]。この技術と、リブレットの最適寸法を導出し流体への効果を予測する技術 [15] とを組み合わせることで、従来リブレットの実現が難しかった複雑形状で高温環境のタービン翼に対して直接リブレットの形成を行うことができる。我々は実際にこうした環境下で運転される金属製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ており、これまでにタービン実験評価系における出口案内翼（静翼）にリブレットを形成した場合の圧損や流れの変化の評価 [1] や、超小型エンジンにおける圧縮機インペラー（動翼）、ディフューザー（静翼）およびタービンブレード（動翼）にリブレットを形成した場合の推力や燃料効率のエンジン性能の変化の評価 [16] を行い、高温環境におけるタービン部品へのリブレット加工の優位性を示してきた。本稿では、筆者らの評価結果 [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。

## 2 タービン実験評価系概要

リブレットの効果を検証した実験評価系は、オーストリア・グラーツ工科大学 (Graz University of Technology, Graz, Austria) の亜音速テストタービン設備 (Subsonic Test Turbine Facility for Aerodynamic, Aeroacoustic, and Aeroelastic Investigations; STTF-AAAI) である。Fig. 3 に設備概略を示す [17]。共通コンプレッサー設備より最高温度 100°C、流量 2.5~15 kg/s のエアが供給でき、入口案内翼 (IGV) を経て 1 段の低圧タービンステージおよびタービン出口案内翼 (TEGV) を通って排気される。タービン動翼の最大回転数は 6300 rpm である。本設備では全圧、全温、静圧、静温、流速、流量、音響の各項目が測定可能である。

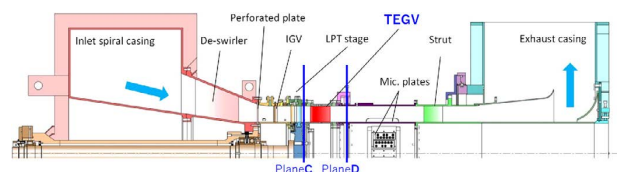


Fig. 3 Experimental turbine test-rig facility of STTF-AAAI and its TEGV section.

今回は、翼が個々に取外し可能でレーザー加工が容易な TEGV をリブレットの効果検証の対象とした。TEGV 部は 15 枚の翼で構成され、翼 1 枚の概略寸法は翼弦長 100 mm × スパン 80 mm で材質は一般構造用圧延鋼材 SS400 である。

### 3 数値的解析

#### 3.1. 解析の概要

リブレット設計および効果予測は CFD により導いた [15]。Fig. 4 にリブレット設計プロセスの概略を示す。まず、過去の実測評価とコリレーションを取りながら、全ての物体表面にリブレットの無いベースライン解析を moving mesh (MM) による非定常 LES<sup>\*1</sup>で行い、これを mixing plane model (MPM) による定常 RANS<sup>\*2</sup>と比較して妥当性を確認した。リブレット有の解析は、リブレットの微小な形状自体はモデル化せず、別途マイクロな非定常解析によって境界層に与える影響を求めた結果を定常 RANS における壁表面特性として与えることでリブレットを再現し、乱流モデルには SST- $k\omega$  を用いた。

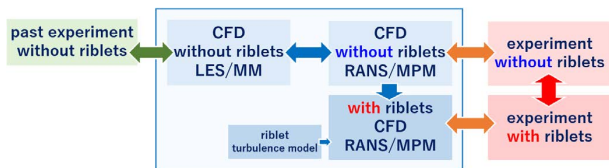


Fig. 4 Scheme of riblet design process and correlation between simulation and experiment.

#### 3.2. 解析条件

解析空間を Fig. 5 に示す。解析セル数は約 680 万である。リブレット断面形状は Fig. 6 に示すような最大 8% の摩擦抵抗低減効果を持つ三角形のリブレットを仮定し、リブレットの適用箇所は TEGV の負圧面とした。

タービンの運転条件は、動翼の回転数 4600 rpm、動作圧 95.5 kPa (ゲージ圧)、密度は圧縮性流体として扱い、動粘度は温度依存の Sutherland 則に従うとした。入口では全圧 17.9 kPa、全温 100°C、流入角度 46.25°、出口では静圧 0 Pa とした。

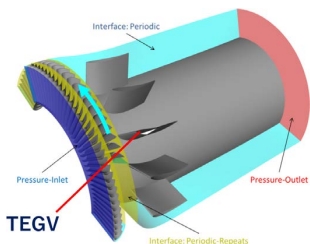


Fig. 5 CFD domain.



Fig. 6 Assumed riblet cross-section in CFD.

TEGV 部の表面積のうち翼面は 25.3% を占めており、そのうちリブレットを適用する対象面積は 12.4% である。

#### 3.3. ベースライン解析

解析および実測の分布表示は Fig. 7 のように TEGV 部全周の 1/15 にあたる一区画の後方視野の扇形で表す。

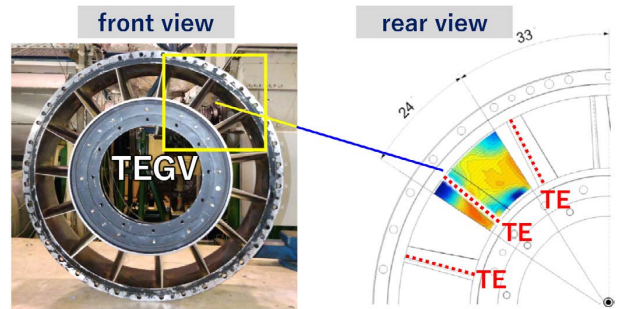


Fig. 7 Display of distribution of physical quantities by a single section of TEGVs. TE is a trailing edge of TEGV.

リブレット無しにおける過去実測値およびベースライン解析 (非定常 LES および定常 RANS) の結果を Fig. 8 に示す。TEGV 部前の Plane C 位置での全圧分布は過去実測値と非定常 LES とは良く似ており、動翼の wake の影響が明確に分かる。定常 RANS は平均化の影響を受けて動翼の影響は消えている。TEGV 部後の Plane D 位置での全圧分布は、過去実測値、非定常 LES、定常 RANS いずれも TEGV の翼の後縁部からの wake の影響が見られ、多少形状は異なるものの同等な wake が再現された。

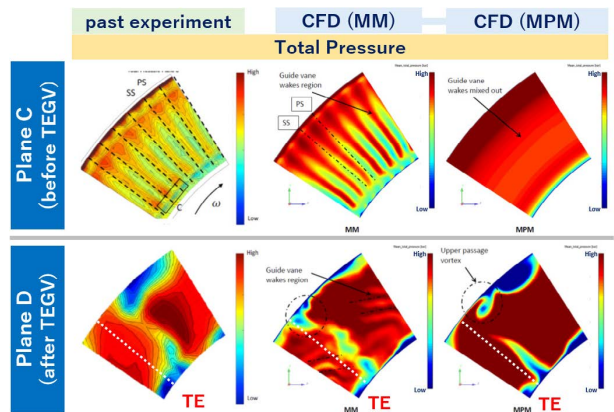


Fig. 8 Comparison of the past experiment and the baseline simulation results without riblets by unsteady-state LES (MM) and steady-state RANS (MPM).

また、Fig. 9 に示すように、全圧、流速、流れのヨー角の径方向分布について定常 RANS の結果は過去実測値と絶対値として同等な値が得られた。なお、流れのヨー角は、動翼回転方向 (Fig. 5 の矢印) に向かう流れの向きを正と

<sup>\*1</sup> Large-Eddy Simulation.

<sup>\*2</sup> Reynolds-Averaged Navier-Stokes.

した。これらの比較を踏まえ、定常 RANS 結果はリブレット無しのベースラインとして妥当である。

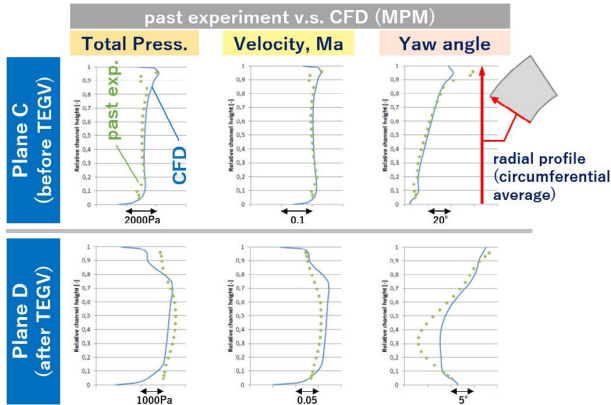


Fig. 9 Validity of the steady-state RANS (MPM) simulation (solid lines) compared to the past experiment (dotted lines).

### 3.4. リブレット解析

定常 RANS によるリブレット有無の比較結果を Fig. 10 に示す。径方向分布では、リブレット無しに比べてリブレット有の方が流速については Plane C, Plane D ともに増大しており、全圧については Plane C で減少, Plane D で増大した。リブレット有無での差は僅かではあるが、リブレット有の方が TEGV 部前後の圧損が低減し、流れやすくなることが予測された。

また、TEGV 後の全圧の周方向分布についてリブレット有無を比較すると、Fig. 11 に示すようにリブレット有のほうが wake の幅が減少することが予測された。

これらの解析結果からは、TEGV 部前後の圧損はリブレットにより 1.2% 低減すると予測された。

### 3.5. リブレット最適寸法

Fig. 12 に CFD によって導出されたリブレット最適寸法

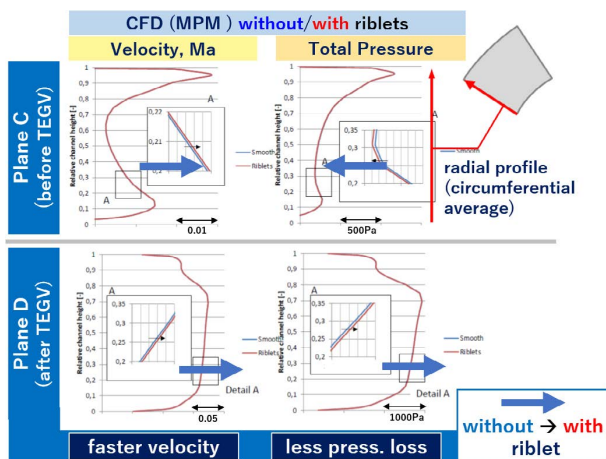


Fig. 10 Comparison of the simulation results without and with riblets by steady-state RANS (MPM).

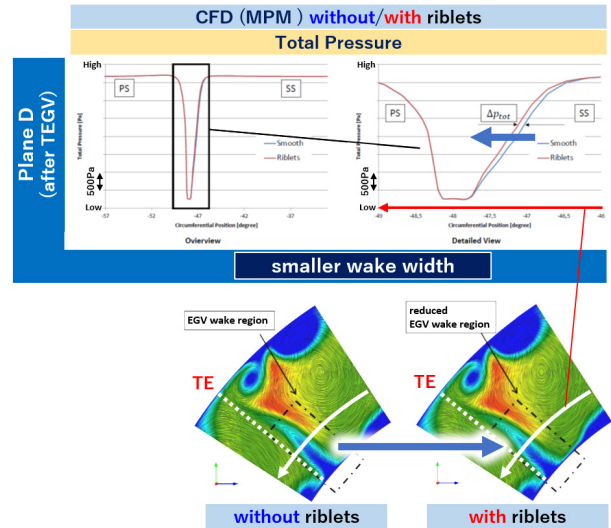


Fig. 11 Simulated wake width without and with riblets.

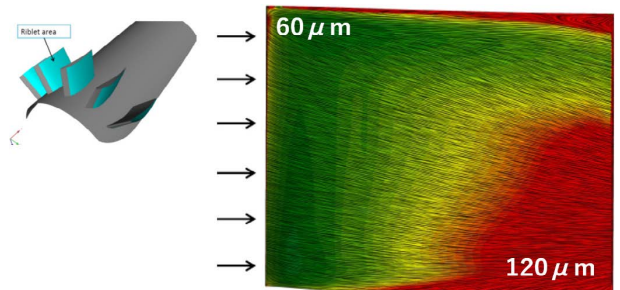


Fig. 12 Riblet design (suction side) obtained by CFD.

を示す。コンターは赤がリブレットピッチが大きく、緑がリブレットピッチが小さい。リブレットピッチは 60~120  $\mu\text{m}$  程度でゆるやかに分布しており、流線も一樣ではない。

## 4 リブレットのレーザー加工

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。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  $f\theta$  レンズによって所定の位置に集光されるが、湾曲した翼表面に沿って焦点を追従させることができる。照射ヘッドは、3 軸ステージによって所定の XYZ 位置に駆動できる。また、加工対象物は 2 軸の傾斜ステージ上で所定の姿勢を示現できる。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。

前節で述べた CFD によるリブレット最適寸法を忠実に再現するため、解析ノードごとのリブレットのピッチと方向の情報から流線に沿ったリブレットのパスを生成した。

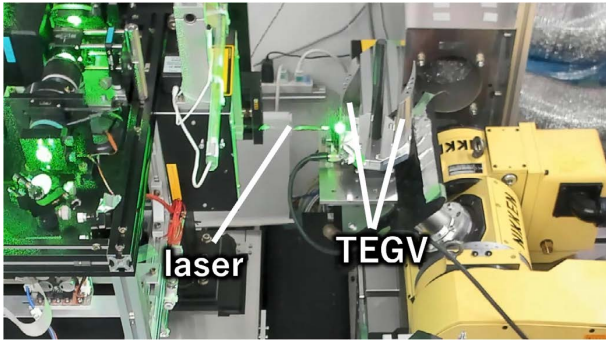


Fig. 13 Laser processing on the surface of TEGV using a development tool with green pulsed laser beam.

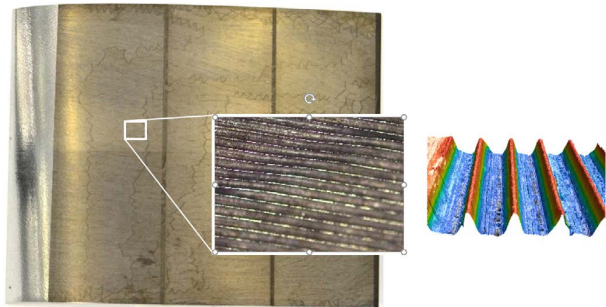


Fig. 14 (left) TEGV (suction side) with lasered riblet. (right) A microscopic profile of lasered riblet sample.

これにより、一様でないリブレットピッチを持つ領域内で、3次元的に計算された流線に沿った曲線上にリブレットを形成できる。Fig. 13にTEGVの翼へのレーザー加工中の様子を示す。

最終的に15枚のTEGVの負圧面にレーザー加工でリブレットを施した。Fig. 14にリブレットを施したTEGVの翼の1枚を示す (Fig. 12のリブレット最適寸法の図と対応する)。TEGVのやや暗い領域にリブレットが加工されている。

## 5 実測評価

### 5.1. 評価概要

実験評価機にリブレット無し翼15枚を設けたテストと、リブレット有翼15枚を設けたテストとで各々別に測定を実施した。タービンの運転条件は、入口温度97℃、動翼の修正回転数4042 rpm (CFDにおける回転数4600 rpmに相当する)、修正流量6.81 kg/sで、レイノルズ数は約34万である。

流れの評価は5孔プローブによるTEGV部前後の圧力、温度、流速測定および後縁プローブによるTEGV後の圧力と流速の測定で行った。Fig. 15とFig. 16に5孔プローブと後縁プローブの配置を、Table 1に5孔プローブと後縁プローブの測定不確かさを示す。

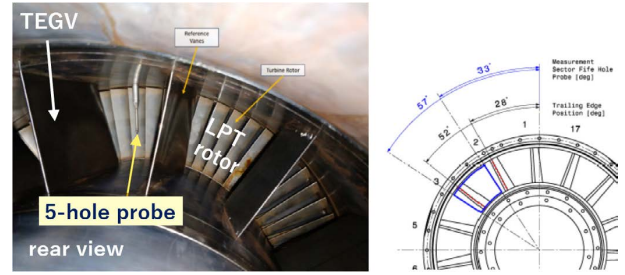


Fig. 15 Configuration of the five-hole probe.

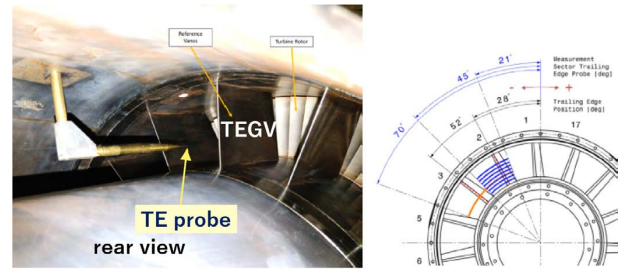


Fig. 16 Configuration of the trailing-edge probe.

Table 1 Measurement uncertainties of the five-hole probe (left) and the trailing-edge probe (right).

Flow variable		Uncertainty, ±	Flow variable		Uncertainty, ±
Mach number		0.002	Pressure	total	28 [Pa]
Pressure	static	63 [Pa]		static	28 [Pa]
	Temperature	total	60 [K]	Velocity	absolute
static		80 [K]	Velocity		axial
Flow angle	pitch	0.70 [deg]		radial	0.90 [m/s]
	yaw	0.70 [deg]		circumferential	0.90 [m/s]

### 5.2. 5孔プローブによる流れ評価

TEGV部前のPlane CおよびTEGV部後のPlane Dにおける全圧と流れのヨー角について周方向平均の径プロファイルの測定結果をFig. 17に示す。リブレット有の方がTEGV部前で全圧が低下、TEGV部後で全圧が上昇したことから、圧損が低減したことが分かった。また、リブレット有の方がTEGV部前後とも流れのヨー角がゼロに近づいていることが分かった。また、扇形領域内の分布におけるリブレット有無の差異からは、リブレットによって全体的に圧損が減り、流れが軸方向に沿うガイド性が向上したことが分かった。

### 5.3. 後縁プローブによるWake評価

後縁プローブは、所定の径位置において周方向に移動させながら分布を取り、wakeの幅を評価できる。Fig. 18に後縁プローブによる50%スパンでの周方向流速プロファイルの測定結果を示す。リブレット有の方がwakeの幅が減少するとともに、よりTEGVの翼に沿った流れとなることが分かった。他の径位置においても同様な傾向が測定された。

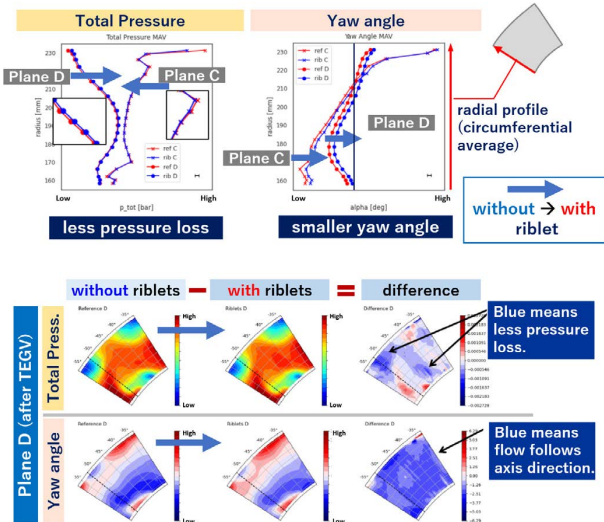


Fig. 17 Difference in total pressure and yaw angle between without and with riblets measured with the five-hole probe.  
 (top) Radial profile (circumferential average).  
 (bottom) 2D cross-sectional profile.

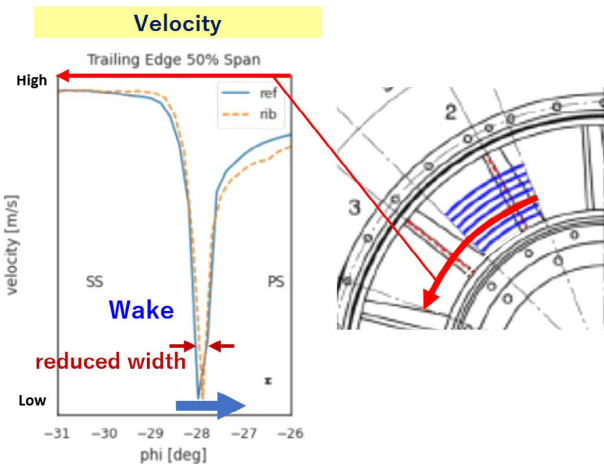


Fig. 18 Difference in velocity profile (wake) between without riblets and with riblets measured by trailing-edge probe.

このことは、負圧面に施したリブレットにより摩擦抵抗が低減して負圧面側の流速が上がることで、Fig. 19 に模式的に示すように後縁で合流した流れにおいて翼後方の流れのヨー角が小さくなって流れを軸方向に向かわせるガイド性が向上したと考えられる。すなわち、リブレットは単に摩擦抵抗を低減させる本質的な効果だけでなく、その結果リブレット適用面に接する流れの流速を増大させ、後流のコントロールをすることも可能といえる。

#### 5.4. リブレットによる圧損低減効果

これらの測定結果から、TEGV 部前後の圧損を求めた。Table 2 に TEGV 部前後の全圧および圧力損失のリブレット有無での比較を示す。全圧の算出には面積加重平均と質量加重平均がよく用いられ [18]、全圧等流速に関係した物

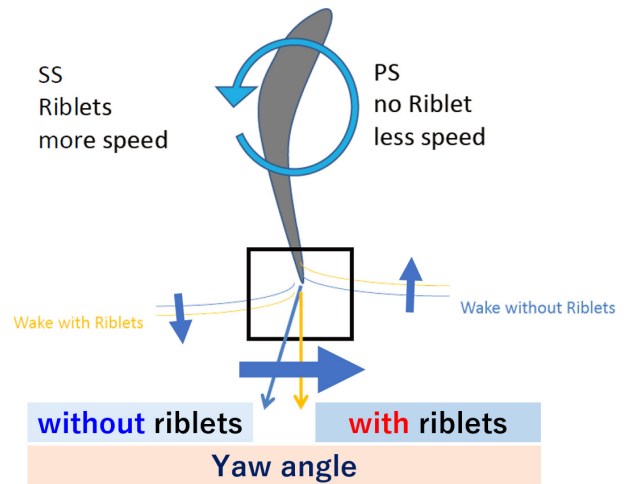


Fig. 19 Schematic concept of assumed effect on the flow velocity and direction by riblets on SS (suction side).

Table 2 Reduction of pressure loss between Plane C (before TEGV) and Plane D (after TEGV) by riblet: (top) Area-weighted, (bottom) Mass-weighted.

	Total pressure loss $\Delta P$ (PlaneC – PlaneD) [Pa]	reduction of pressure loss
without riblets	677.1	ref
with riblets	634.2	-6.3%
without riblets	640.8	ref
with riblets	595.1	-7.1%

理量では質量加重平均が適するとされるが、圧損低減量は、少なくとも面積加重平均の場合であっても6.3%は低減効果があることが求められた。

## 6 まとめ

タービン実験評価機の TEGV にリブレットを適用した場合の TEGV 部前後の圧損低減効果および最適ナリブレット設計を CFD により求めた。TEGV の負圧面にリブレットを適用することで、圧損は1.2%低減すると効果予測された。リブレット設計に従ってレーザー加工によりリブレットを施した TEGV の翼を実験評価機に設置し、リブレット有無の圧損を実測評価した結果、TEGV 部前後の圧損はリブレットを施すことで6.3%低減された。また、リブレットにより流速向上、ガイド性向上の効果が確認できた。これらにより、リブレットによる流れ制御特性を持った翼として、ガスタービンなどのターボ機器等の翼設計に有用であると考えられる。

一方、TEGV 部前後の圧損低減が CFD 予測よりも実測の方が大きかったのは、リブレット有の場合の CFD 予測が定常 RANS 解析に拠っており、特に TEGV 正圧面側の非定

常な流れにおける剥離が定常 RANS 解析では再現し難いことからリブレットが剥離に与える効果が過少見積となったことが要因の1つとして考えられる。現時点では非定常計算によるリブレット効果予測は計算負荷上の課題があるが、計算能力向上、アルゴリズム改善により、非定常におけるリブレット効果予測精度の向上が図られると考えられる。また、今回評価を行った実験評価機はオフデザインポイントでのタービンの挙動の評価が主眼の設備のため、運転条件において翼上に剥離が発生しており、実測と定常 RANS 解析結果に差異が生じた要因と考えているが、通常、タービンはデザインポイントにおいて剥離が生じない翼形状であるため、実用的なタービンに適用した場合は剥離に起因した実測と解析結果の差異は小さくなり、予測精度は向上すると考えられる。実際、超小型エンジンのブレードにリブレットを形成した評価においては、デザインポイントでの運転で実測と解析はよく一致した [16]。すなわち、発電用ガスタービンを対象としてリブレットを適用した場合には、実用的な予測精度でリブレットによる効率向上を予測し、また実際にリブレットを形成して効率を向上することができる。

## 引用文献

- [1] 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.
- [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* (2001), 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*, Sep.1986, pp. 1044–1068.
- [6] B. Dean and B. Bhushan, “Shark-skin surfaces for fluid-drag reduction in turbulent flow: A Review,” *Phil. Trans. Roy. Soc. A*, vol. 368, no. 1929, pp. 4775–4806, 2010.
- [7] D. W. Bechert, M. Bruse, W. Hage, J. G. T. van der Hoeven and G. Hoppe, “Experiments on drag-reducing surfaces and their optimization with an adjustable geometry,” *J. Fluid Mech.*, vol. 338, pp. 59–87, 1997.
- [8] “戦略的省エネルギー技術革新プログラム 省エネルギー技術開発事業の重要技術に係る周辺技術・関連課題の研究 革新的リブレットによる高速移動体の省エネルギー化技術の調査研究,” 成果報告書 2018年3月, NEDO, [https://www.nedo.go.jp/library/seika/shosai\\_201803/20180000000035.html](https://www.nedo.go.jp/library/seika/shosai_201803/20180000000035.html), 2018.
- [9] P. A. Leitl, V. Stenzel, A. Flanschger, H. Kordy, C. Feichtinger, Y. Kowalik, S. Schreck and D. Stübing, “Riblet surfaces for improvement of efficiency of wind turbines,” in *Proc. AIAA Scitech 2020 Forum*, 2020, doi: 10.2514/6.2020-0308.
- [10] P. A. Leitl, E. Göttlich, A. Flanschger, A. Peters, C. Feichtinger, A. Marn and B. Reschenhofer, “Numerical investigation of optimal riblet size for TCF strut flow and their impact on the performance,” in *Proc. AIAA Scitech 2020 Forum*, 2020, doi: 10.2514/6.2020-0307.
- [11] P. A. Leitl, M. L. Garcia De Albeniz and A. Flanschger, “Nano- and microstructured riblet surfaces for centrifugal industrial compressors,” in *Proc. Conf. Sustainable PolyEnergy Generation and HaRvesting (SUPEHR)*, 2019, pp. 32–38.
- [12] A. Sareen, R. W. Deters, S. P. Henry and 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 Exposition*, 2011, doi: 10.2514/6.2011-558.
- [13] 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.
- [14] M. C. Richardson, “New opportunities with intense ultrashort-pulse lasers,” in *Proc. of SPIE*, vol. 1410, 1991.
- [15] P. A. Leitl, S. Kuntzagk, A. Flanschger and K. Pfingsten, “Experimental and numerical investigation of the reduction in skin friction due to riblets applied on the surface of a Taylor-Couette cell,” in *Proc. of AIAA SciTech Forum*, 2018.
- [16] 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.
- [17] M. Zenz, A. Hafizovic, L. Simonassi, P. A. Leitl, R. Benauer, F. Heitmeir and A. Marn, “Aerodynamical and aeroelastic investigations of a riblet design applied on the surface of turbine exit guide vanes of a low pressure turbine,” in *Proc. of 13th European Conference on Turbomachinery Fluid Dynamics and Thermodynamics*, 2019.
- [18] N. A. Cumpsty and J. H. Horlock, “Averaging nonuniform flow for a purpose,” *J. Turbomach.*, vol. 128, no. 1, pp. 12–129, 2006.

白石雅之 Masayuki SHIRAISHI  
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

Peter A. LEITL  
Bionic Surface Technologies 社  
Bionic Surface Technologies, GmbH

Andreas FLANSCHGER  
Bionic Surface Technologies 社  
Bionic Surface Technologies, GmbH

Stefan SCHRECK  
Bionic Surface Technologies 社  
Bionic Surface Technologies, GmbH

Richard BENAUER  
Bionic Surface Technologies 社  
Bionic Surface Technologies, GmbH

Simon PRAMSTRAHLER  
グラーツ工科大学  
Graz University of Technology

Andreas MARN  
グラーツ工科大学  
Graz University of Technology



白石雅之  
Masayuki SHIRAISHI



土橋晋太郎  
Shintaro TSUCHIHASHI



Peter A. LEITL



Andreas FLANSCHGER



Stefan SCHRECK



Richard BENAUER



Simon PRAMSTRAHLER



Andreas MARN