

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[†]

稲崎慎也, Peter A. Leitl, Andreas Flanschger, Stefan Schreck, Richard Benauer

Numerical and Experimental Investigation of Laser Processed Riblets on Ultra-small Jet Engines and the Impact on the Performance

Shinya INASAKI, Peter A. LEITL, Andreas FLANSCHGER, Stefan SCHRECK and Richard BENAUER

リブレットとは、乱流境界層における粘性抵抗を低減する、サメ肌状の流線形の溝面である。超小型ジェットエンジンのコンプレッサー、ディフューザー、タービンブレードにリブレットを形成し、エンジン性能の向上を実験的に確認した。まず、エンジンの3次元モデルを用いた数値流体力学（CFD）により、エンジン性能向上に最適なリブレットデザインを算出し、その性能向上量はエンジン推力で1.81%向上を予測した。算出したリブレットデザインを、直接のレーザー加工によってデザインを忠実に再現するようにエンジン部品に形成した。この部品をエンジンに組み込み、エンジン性能を実測し、レーザー加工されたリブレットはエンジン推力を1.44%向上させるとの結果が得られた。本研究は、高温・高速回転する部品にレーザー加工リブレットを適用し、ターボ機械の性能を向上させた世界初の実験的実証となる。

Riblets are streamwise grooved surfaces which reduce the viscous drag in a turbulent boundary layer, similar to shark skin. We experimentally confirmed improved engine performance by forming riblets on the compressor, diffuser, and turbine blades of an ultra-small jet engine. The optimum riblet design was calculated by computational fluid dynamics (CFD) using a 3D model of the engine, and the improvement was predicted to be 1.81% in engine thrust. The calculated riblet design was formed on the actual parts by laser ablation. It was experimentally confirmed that the laser processed riblets improved engine thrust by 1.44%. This work is the world's first experimental demonstration of improved turbomachinery performance through the application of laser processed riblets on parts exposed to high temperatures and rotating at high speed.

Key words 超小型ジェットエンジン, コンプレッサー, ディフューザー, タービン, 推力, 効率, リブレット, レーザー加工, 粘性抵抗低減, 流体解析
ultra-small jet engine, compressors, diffuser, turbine, thrust, efficiency, riblet, laser processing, drag reduction, CFD

1 はじめに

ガスタービンやジェットエンジンなどターボ機器の燃料消費削減や温室効果ガス排出抑制といった経済性や環境性に対する要求が高まっており、ターボ機器の効率改善は社会的にも重要になっている。効率改善手段として、我々は流体抵抗の低減に着目した。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。壁近傍層では、縦渦と呼ばれる乱流要素渦があり、特に高レイノルズ数の乱流領域においては、渦が壁に向かう強い衝撃流を作り、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効率低下の一因であり、これを低減することは流体機器の効率を向上させる重要な課題のひとつである。

一方、サメの中でも早く泳ぐ種類においては、鱗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る [3], [4]。このサメの鱗の溝はリブレット (riblet) と呼ばれ、平滑面に対して最大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]。

実用に向けた研究としては、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

[†] 本稿は、著者らの引用文献 [1] に対し、タービン翼のエンジン稼働時温度や稼働時間の結果、および金属疲労についての考察を加えたものである。

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 [6], [7], 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 [8], [9]. ただ, これらの機器の最適リブレットは, ピッチが数 μm ~100 μm の微小寸法となることから, 機械加工による壁面へ直接のリブレット付与は実現困難であり, 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 [10]. しかし, 対象物の形状や流線が複雑であったり使用環境が高温である場合, また高速で回転する動体である場合にはフィルムの適用が難しく, 商用ガスタービンやジェットエンジンなどにおいてはリブレットの実用化は困難であった.

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 [11], [12]. 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 [13] 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な形状で高温環境, 高速で回転する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可能である. 我々は実際に, 超小型ジェットエンジンのタービン翼 (動翼) に加えて, 同様に複雑な形状で高速動体のコンプレッサー (動翼), ディフューザー (静翼) の3部品にリブレットを施し, その効果をエンジン性能の改善, 効率の改善として示してきた [1].

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. これに対し我々は, 圧縮機の部材に直接リブレット加工を施した試験片を準備し, 引張試験, クリーブ試験を実施し, 部材への直接のリブレット加工が, 金属の強度特性に影響が無いことを示してきた [14]. 本稿は, 著者らの評価結果 [1] に対し, タービン翼のエンジン稼働時温度や稼働時間の結果, および金属疲労についての考察を加えたものである.

2 評価系概要

2.1. 超小型ジェットエンジン JB220

リブレットの効果を検証した超小型ジェットエンジンは, JB220 (Behotec, Dahau, Germany) である Fig. 1 に形状の概略を示す. エアインテークから吸気し, 遠心型動翼のコンプレッサー, 静翼のディフューザー, 燃焼室, 静翼の Nozzle guide Vane を経て, 動翼のタービン, テールコーンから排気される. 動翼部の最大回転数は 12万 rpm で, 最大推力は 220 N である.

燃焼機部の外形直径は約 11.3 cm で, 全長は 31.3 cm である. コンプレッサーの羽根車径は約 8 cm で, 回転軸方向厚みは約 3 cm, 羽根は14枚. ディフューザーの直径は約 11 cm で, 回転軸方向厚みは約 2 cm. タービンの羽根車径

は約 7 cm で, 軸方向厚みは約 1 cm, 羽根は23枚である. 材質は, コンプレッサー, ディフューザーがアルミ系合金で, タービンのみインコネルである.

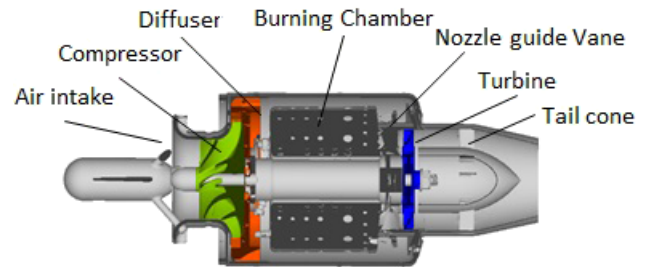


Fig. 1 Ultra-small Jet engine configuration

2.2. エンジン評価ベンチ

エンジン性能評価および, リブレット最適化計算に必要なデータ取得のため, エンジン評価ベンチをフォックスコーポレーション, 日本と共同で作成した. 評価ベンチの概要模式図を Fig. 2 に示す.

本評価ベンチは, エンジン本体, エンジン性能計測部, エンジン内部温度・圧力計測部, 外部環境計測部から構成されている. エンジン本体と性能計測部および内部温度・圧力計測部は室内に設置され, 吸入空気は, 外部環境空気をそのまま使用している. 外部環境計測部は, この外部環境の温度および気圧を計測するものである.

エンジン本体は, 前節の JB220 である. エンジン性能計測部として推力計, 回転計, 燃料流量計, 風速計を配置している. 吸気流量管理のため, エンジンのエアインテーク前に内径 11.4 cm の筒を配置し, この筒を通じてエンジンに吸気するよう接続している. 推力計測のため, エンジン

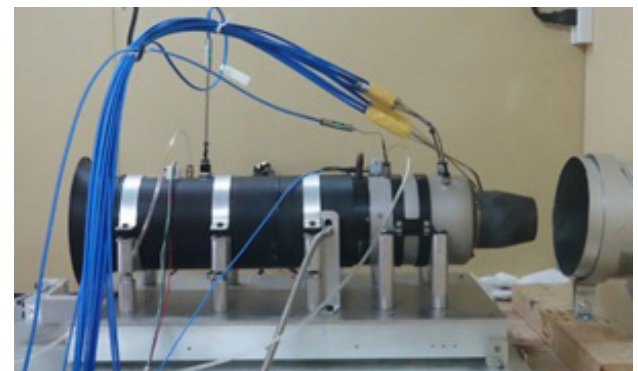
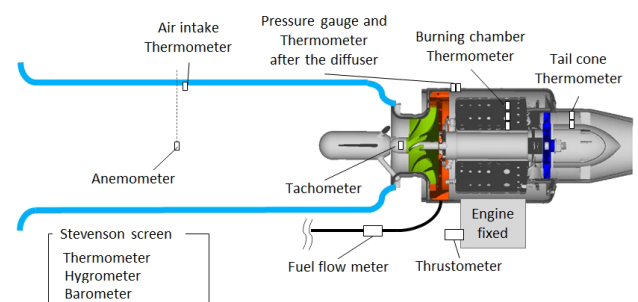


Fig. 2 Ultra-small Jet engine evaluation bench overview

は2本の円径マウンターで固定されている。エンジン内部温度・圧力計測部は、吸入空気の温度、コンプレッサー後の温度・圧力、燃焼室内温度、テールコーン部温度を計測しており、エンジン内部に各センサを配置している。外部環境計測部は、温度、湿度、気圧を百葉箱内で計測している。これらの計測器はすべて1つのデータロガーに接続し、サンプリング周期0.5秒で値を記録している。

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流体解析 (CFD) により導いた。Fig. 3 にリブレット設計プロセスの概略を示す。まず、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 (Large-Eddy Simulation) で行い、次いで mixing plane model (MPM) による定常 RANS (Reynolds-Averaged Navier-Stokes) と比較して妥当性を確認した。リブレットが有る解析は、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た。リブレット有無の比較と効果予測は、定常 RANS の範囲内で行った。

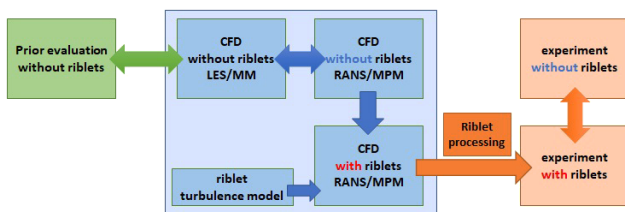


Fig. 3 Scheme of riblet design process and correlation between simulation and experiment

3.2. 解析条件

解析メッシュは約950万である。リブレット断面形状は Fig. 4 に示すような最大 8% の摩擦抵抗低減効果を持つ三角形状のリブレットを仮定し、リブレットの適用箇所はコンプレッサー、ディフューザー、タービン翼、およびタービンのプラットフォームとし、3 部品ともにシュラウド部には未適用とした。



Fig. 4 Assumed riblet cross-section in CFD

エンジンの運転条件は、事前評価の取得条件、実測結果に即しており、回転数 80,624 rpm、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。

それ以外の主要な解析条件は、エンジン空気流入量 0.21853 kg/s、同全温 299.45 K、同全圧 1018.10 hPa、タービン動翼への Gas 流入量 0.22368 kg/s、同全温 985.4 K、同流入角度 34.54°、エンジン出口側の全温 299.45 K、同全圧 1018.10 hPa とした。

3.3. ベースライン解析

前節の解析条件を用いた非定常 LES が、実測結果と一致しているかを確認した。ディフューザー後の温度は、実測 382.15 K、シミュレーション 377.86 K となっており、良く一致している。また、タービン後の温度についても、実測の平均値 912.66 K と計測バラつき ±13.19 K の範囲にシミュレーション値は分布しており、こちらも良く一致している。これらのことから、実測結果と非定常 LES は良く一致していると言える。

次に、非定常 LES と定常 RANS の結果が一致するか確認した結果を Fig. 5 に示す。エンジンパフォーマンスで最大約 6% の差、空力性能で最大約 3% の差が出ているが、全体としては良く一致している。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。

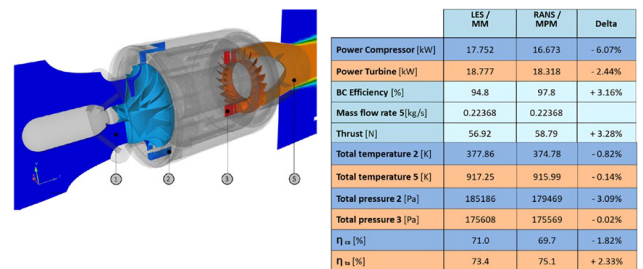


Fig. 5 Baseline simulation results without riblets by unsteady LES (MM) and steady RANS (MPM)

3.4. リブレット最適寸法とリブレットの効果予測

Fig. 6 に CFD によって導出されたリブレット最適寸法のコンターを示す。コンターは赤がリブレットピッチが広く、青がリブレットピッチが狭い。

コンプレッサーとディフューザーのリブレットピッチは 10~100 μm 程度で、15~30 μm のピッチが半数以上を占める。ブレード内の分布としては、周速度の早いエッジ付近のリブレットピッチが狭い傾向がある。

タービンのリブレットピッチは、35~120 μm 程度である。翼腹側 (正圧面、燃焼器側) は 40~60 μm のピッチが半数以上を占めるが、背側 (負圧面、テールコーン側) はブレード根元に広いピッチが多く分布しており、45~120 μm 程度でほぼ均一に分布している。

これらのリブレットを適用した際のエンジン性能の改善は、回転数 80,624 rpm、エンジン吸気量不変の条件において、3 部品ともリブレットを付与した場合、推力が 1.81% 改善、燃料消費量はほぼ変化無しとの予測を得た。

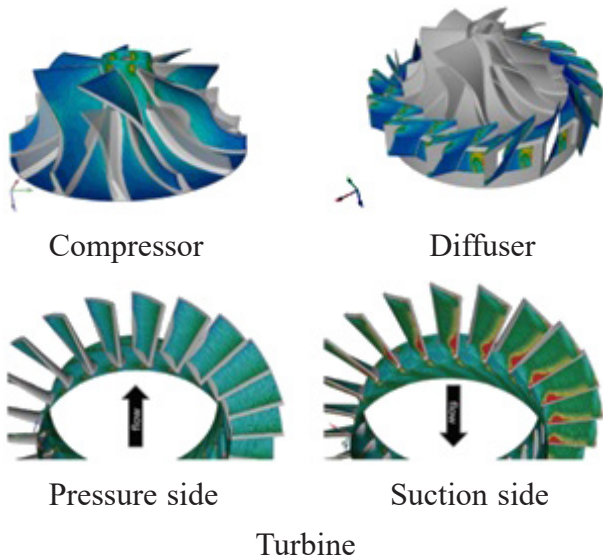


Fig. 6 Riblet design obtained by CFD

4 リブレットのレーザー加工

4.1. レーザー加工の概要

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。この模式図を Fig. 7 に示す。このレーザー加工機は、波長 532 nm (緑色)、パルス幅約 15 ps、最大繰り返し周波数 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、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。

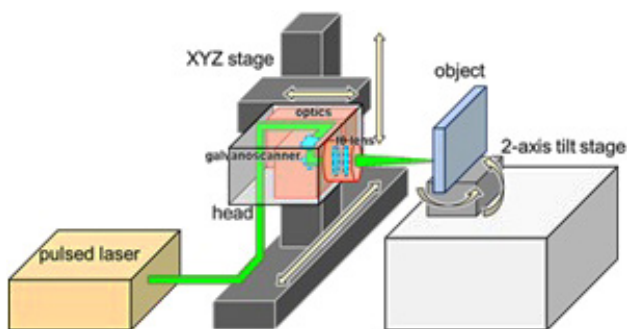


Fig. 7 Overview of riblet processing machine

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。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。

4.2. リブレットの加工結果

最終的にコンプレッサー、ディフューザー、タービンの 3 部品にリブレットのレーザー加工を施した。CFD 条件と同様に、3 部品とも共通して部品外側のシュラウド部は未加工である。

コンプレッサーはブレードの負圧面と正圧面の一部とハブ面の一部に加工を行った。Fig. 8 にリブレットの加工済みのコンプレッサーを示す。見た目の色の濃淡は、リブレットピッチの変化による物である。ブレード間では共通のリブレットデザインを適用しているため、結果として、すべてのブレードで同じ濃淡が描かれている。コンプレッサーブレードはお互いが接近しており、レーザーが照射できない部分があるが、コンプレッサーを傾けるなど可能な限り広い面積に加工を行った。コンプレッサーの空気流路に対するリブレットの加工面積率は約 50.3% である。なお、前節の CFD による推力改善予測量 1.81% は、上記加工面積にリブレットを付与した場合の予測となっている。

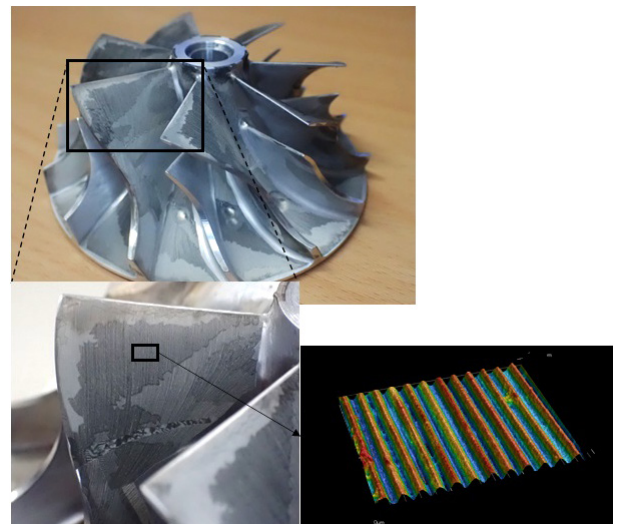


Fig. 8 Compressor with lasered riblet

ディフューザーは 15 箇所所有する空気流路内側に加工を行った。Fig. 9 にリブレットの加工済みのディフューザーを示す。同様に色の濃淡はリブレットピッチの変化によるものであり、同じ濃淡が各流路内に描かれている。ディフューザーの羽根にいくつか存在する穴は、エンジン組み立て用のネジ穴で有り、このネジ部にはリブレットの加工は行っていない。

タービンは、ブレードの腹側 (正圧面)、背側 (負圧面) の両面と、プラットフォームに加工を行った。Fig. 10 にリブレットの加工済みタービンを示す。表面に模様があるように見えているが、模様の入り方はピッチの変化と良く一致しており、これが見えているものと考えられる。前 2 部品と見え方が異なるのは、材質が異なるためと考えられる (前 2 部品はアルミ系合金、タービンはインコネル)。

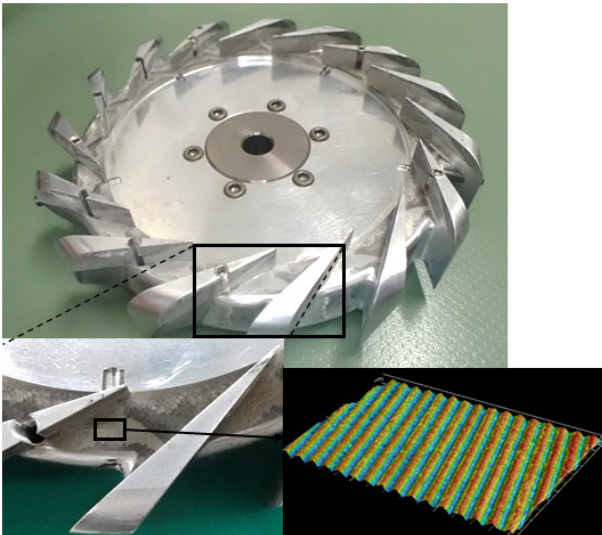


Fig. 9 Diffuser with lasered riblet

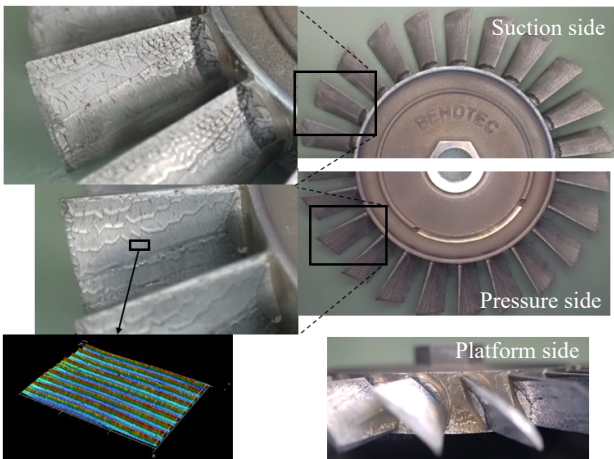


Fig. 10 Turbine with lasered riblet

5 超小型ジェットエンジン実測評価

5.1. 評価方法の概要

エンジン性能の評価は、コンプレッサー、ディフューザー、タービンの3部品にリブレットが無い部品とリブレットが有る部品を用意し、同じ日に部品を入れ替える方法で評価を行った。上記3部品とタービンに付いているシャフト以外の部品は、燃焼室も含め共通で使用している。なお、これらの交換部品によるエンジン性能の差は、推力、燃料消費量ともに計測再現性以下であることを確認している。また、リブレット有りの評価は、上記3部品すべてリブレット有りとする場合のみを評価した。

エンジンの運転条件はCFD解析条件と同様で、回転数80,624 rpm、燃料は灯油（JIS K 2203 1号灯油）にシャフトベアリング向け潤滑剤を約6%配合した物を使用した。吸入空気は外気をそのまま使用しているため、吸気温度、気圧は時間経過により変動してしまうが、リブレット有り/無しの比較検証実施時の平均値は吸気温度305.53 k

(32.38℃)、大気圧1011.48 hPaであった。

5.2. 温度・気圧変動補正

前節にあるように、吸気は外気をそのまま使用しているため、気温変動、気圧変動によりエンジン性能が変化して計測されてしまう。

そこで、気温、気圧の変動を、標準気温、標準気圧相当に換算可能な以下の計算式を使用し、エンジン性能を比較することにした。エンジン運転時の大気状態を気圧： P 、温度： T とし、標準の大気状態を P_0 、 T_0 とし、 $\delta = P/P_0$ 、 $\theta = T/T_0$ とすると、

$$\text{修正回転数 } N_0 = \frac{N}{\sqrt{\theta}} \quad (1)$$

$$\text{修正推力 } F_0 = \frac{F}{\delta} \quad (2)$$

$$\text{修正燃料流量 } mf_0 = \frac{mf}{\delta\sqrt{\theta}} \quad (3)$$

と表すことが出来る [15], [16]。

回転数についても、気温、気圧により修正後の回転数は基準回転数では無い回転数になってしまう。これを基準回転数の80,624 rpmにそろえるため、別途70,000 rpmと90,000 rpmの計測データを取得し、推力と回転数の相関から、常に80,624 rpm相当に換算する補正を行った。

これらの内容を適用、計算した修正推力と、計測した生データの推力との結果の比較をFig. 11に示す。修正前の推力値は約2.8%バラついているが、修正推力の計算後は0.7%のバラつきに収まっており、修正計算が良く機能していることが解る。

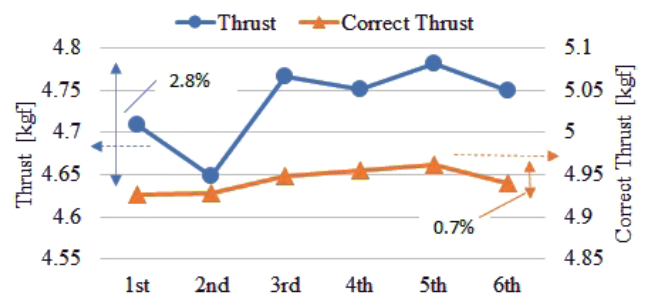


Fig. 11 Verification result of correction calculation

5.3. リブレット付与によるエンジン性能比較

エンジン性能は、修正推力、修正燃料流量、修正燃料効率 (= 修正燃料流量 / 修正推力) の3性能で比較を行った。計測再現性確保のため、リブレット有り/無し共に、7回計測を行っている。

リブレット有り/無しのエンジン性能の比較検証結果をFig. 12に示す。修正推力は、7回計測の平均値で比較すると、リブレット有りが平均1.44%上昇との結果であった。このときの計測再現性は、7回平均時には3σ率で0.42%が

期待でき、計測再現性上も優位な差と言える。次に修正燃料流量は、リブレット有りが平均で0.20%消費量が多いとの結果であったが、計測再現性は3σ率で0.34%であり、こちらは優位差無しと判断した。これらから計算した修正燃料効率率は、リブレット有りが平均で1.22%効率が良いとの結果で、同様に計測再現性は、3σ率で0.59%が期待でき、こちらは優位差と言える。

上記の値と、CFD 予測を比較した結果を Table 1 に示す。実測値と CFD 予測との差は、修正推力で0.37%、修正燃料効率で0.59%である。修正燃料流量は、実測値が優位差では無く、CFD 予想の“変化無し”との差は無いものと判断した。修正推力および修正燃料効率における、実測値と CFD 予想との差の原因は、リブレットの加工結果が完全な理想形状には成っていないことが考えられる。リブレットの深さや、リブレットの峰頂点のとがり具合など加工形状のさらなる改善を行えば、さらにエンジン性能が改善する可能性もある。全体としては、実測値は CFD 予測と近い結果と考えられる。以上のように、比較検証を行った3性能において、リブレットがエンジン性能、効率を改善しているとの検証結果を得た。

Table 1 Riblet improvement effect (experimental value, measurement reproducibility, CFD forecast)

| | Corrected | Corrected fuel flow rate | Corrected fuel efficiency |
|--------------------------------|-----------|--------------------------|---------------------------|
| CFD | 1.81% | 0 % | 1.81% |
| Measured value | 1.44% | -0.20% | 1.22% |
| Measurement reproducibility 3σ | 0.42% | 0.34% | 0.59% |
| CFD - Measured value | 0.37% | 0% | 0.59% |

6 まとめ

超小型ジェットエンジンのコンプレッサー、ディフューザー、タービンにリブレットを適用した場合の、エンジン推力の改善効果および、最適なリブレット設計を CFD により求めた。上記3部品ともにリブレットを適用した場合には、推力は1.81%上昇すると予測された。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コンプレッサー、ディフューザー、タービンを超小型ジェットエンジンに搭載し、リブレット有無のエンジン性能を実測評価した結果、修正推力は1.44%上昇、修正燃料流量は優位差無し、修正燃料効率は1.22%効率が改善した。これらにより、複雑な形状で高温環境、高速に回転するターボ機器内の部品へ、レーザー加工によりリブレットを形成し、その効果をターボ機器性能の改善として示すことに世界で初めて成功した。

また、本評価の稼働時タービン温度は約800-900℃であり、本稿の効率改善結果は、リブレット付与後トータル8時間以上稼働後の評価結果である。本評価後のリブレットは形状が問題無く維持されていることを確認しており、またこれまで示したように、効率改善も十分確認出来ている。我々が行った母材の強度特性試験では、600℃条件の引張試験、クリープ試験において、リブレット有無では強度特性に差が無いことが確認されており [14]、本稿評価のタービンとは材質、温度、負荷時間などが異なるものの、直接加工のリブレットに強度的な問題がないことは同様の傾向となっている。

これらのことから、高温、回転系の空力部品にリブレットを付与し、ターボ機器の効率を改善する事は、確実に実用化に近づいていると考えられる。

7 謝辞

本研究の評価データ取りには、(有) フォックスコーポレーション 橋本様、遠藤科学(株) 馬塚様に多大なるご協力を頂きました。ここに感謝の意を表します。

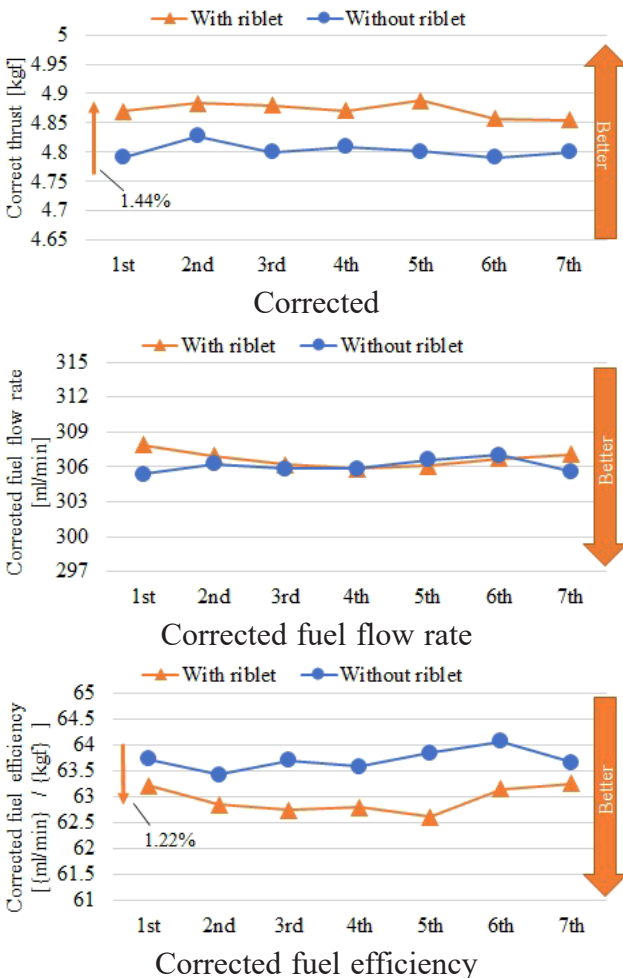


Fig. 12 Results of verification of riblet effect by actual measurement

引用文献

- [1] 稲崎慎也, 佐藤真路, 一ノ瀬剛, P. A. Leidl, 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.
- [2] 三宅裕, “壁乱流の渦,” *ながれ*, vol. 22, 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*, vol. 2, pp. 1044-1068, 1986.
- [6] “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, 2018.
- [7] P. A. Leidl, 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.
- [8] P. A. Leidl, 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.
- [9] P. A. Leidl, 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.
- [10] 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.
- [11] 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, pp. 109-115, 1996.
- [12] M. C. Richardson, “New opportunities with intense ultrashort-pulse lasers,” in *Proc. OPTICS, ELECTRO-OPTICS, AND LASER APPLICATIONS IN SCIENCE AND ENGINEERING*, 1991, doi: 10.1117/12.43608.
- [13] P. A. Leidl, 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 2019Forum*, 2019, doi: 10.2514/6.2019-1625.
- [14] 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.
- [15] 日本ガスタービン学会, *ガスタービン工学*, 改訂第一版, 日本ガスタービン学会, 2017.
- [16] 中村佳朗, 鈴木弘一, *ジェットエンジン*, 森北出版, 2004.

稲崎慎也 Shinya INASAKI
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

Andreas FLANSCHGER
Bionic Surface Technologies 社
Bionic Surface Technologies

Stefan SCHRECK
Bionic Surface Technologies 社
Bionic Surface Technologies

Richard BENAUER
Bionic Surface Technologies 社
Bionic Surface Technologies



稲崎慎也
Shinya INASAKI



Peter A. LEITL



Andreas FLANSCHGER



Stefan SCHRECK



Richard BENAUER