

風車翼型へのリブレット適用による揚力改善効果検証[†]

柳瀬菜穂, 東野嵩也, 倉島高広, 土橋晋太郎, 久保徳嗣, 田中元史

Verification of Lift Improvement by Applying Riblets to Airfoil for Wind Turbines

Naho YANASE, Takaya HIGASHINO, Takahiro KURASHIMA, Shintaro TSUCHIHASHI, Noritsugu KUBO and Motofumi TANAKA

リブレットは、流体機器の粘性摩擦抵抗を低減する生体模倣技術であり、風車ブレード表面に適用することで要素翼の揚抗比の改善が見込まれ、風力発電効率の向上が期待できる。効率向上の基礎的な評価として、二次元断面の風車翼模型に対してリブレットを加工したフィルムを貼付け、風洞実験にてまずは揚力性能の改善量を評価した。その結果、失速前の広範囲の迎角において、揚力が平均3.4%増加することを実証した。

Riblets are a biomimetic technology that reduces the viscous friction resistance of fluid machinery. By applying riblets to the surface of wind turbine blades, an improvement in the lift-to-drag ratio of the blades is expected that, in turn, can enhance the efficiency of wind power generation. As a fundamental evaluation of the efficiency improvement, a film with riblets was attached to a two-dimensional sectional model of a wind turbine blade, and its lift performance improvement was assessed through wind tunnel experiments. The results demonstrated an average increase of 3.4% in lift across a wide range of angles of attack prior to stall.

Key words リブレット, レーザー加工, 流体解析, 粘性抵抗低減, 揚力改善, 風力発電, 風洞試験
riblet, laser processing, CFD, drag reduction, lift improvement, wind turbines, wind tunnel

1 はじめに

現在、地球温暖化の進行に伴い、世界各国で脱炭素社会の実現に向けた再生可能エネルギーの導入が推進されている。日本では“2050年カーボンニュートラルに伴うグリーン成長戦略”が2020年に宣言されており、風力発電は今後成長を期待される分野の一つとされている。このような状況下で、国内の風力発電供給の拡大を維持するためには、風力発電の効率向上が重要な課題となる。

風力発電の効率を向上させる有効な方法の一つに風車ブレードの揚抗比改善がある。揚抗比は、ブレード翼素断面における揚力の向上、および抗力の低減により改善される。風車ブレード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。特にレイノルズ数が高い流れ場は壁面境界層が乱流化しやすく、境界層が乱流化した流れ場は層流に比べて壁面において大きな摩擦力を生じる [1]。この壁面摩擦力は抵抗として流体機器のエネルギーを損失させるので、これを

低減することは揚抗比の改善につながり、さらには流体機器の効率を向上させることを可能とする。

ところで、速く泳ぐ種のサメにおいては、鱗の一つ一つの表面に 35~100 μm 程度の微小な縦溝が存在することが知られている [2], [3]。この流れに沿った縦溝構造はリブレット (riblet) と呼ばれ、平滑面に対して 8~10% 程度の摩擦抵抗の低減をもたらすことが実験的に明らかにされている [4]。

リブレット構造によって摩擦抵抗が低減することは、物体表面に形成される境界層内の速度分布が変化していることを意味する。翼素において境界層速度分布が変化すると摩擦抵抗だけでなく、圧力抵抗および揚力も変化する可能性がある。

しかしながら、実際の流体機器の表面に対してリブレットを適用した例は少ない。リブレットは、そのサイズと形状を流体機器の表面の流れ場に合わせて成形する必要がある。これが実用化の難易度を高くしている。株式会社ニコンでは、自社のコア技術である光・精密技術を発展させ、

[†] 本稿は、著者の引用文献 [5] の日本風力エネルギー学会より転載の許諾を得ている。

レーザー加工による任意形状のリブレットを適用する技術を開発した。Fig. 1 にレーザー加工したリブレットのSEM画像を示す。

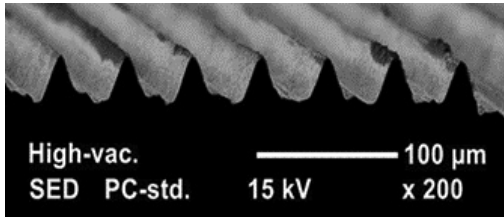


Fig. 1 リブレット加工表面 SEM 画像

現在、我々は様々な流体機器へのリブレット適用の可能性を見出し、その一つとして風車へのリブレット適用に関する研究を進めている。

リブレット適用の困難さから国内における中・大型風車へのリブレット適用の事例は未だなく、それら風車ブレードでの実用化においてはリブレット効果の定量的評価がまず課題として挙げられる。そこで我々は、代表的な風車翼型の二次元翼模型に対して、風洞実験を行い、リブレット適用による翼素の性能特性変化を評価した。本報告では、その中でも特に揚力性能の変化に関する結果を紹介する。

2 実験セットアップ

2.1. 実験装置

風洞実験は、産業技術総合研究所が所有するつくば北風洞にて実施した。本風洞は試験部流路断面 $1.4\text{ m} \times 1.4\text{ m}$ を有する回流式風洞である。最大風速は 48 m/s 、乱れ度は風速 10 m/s 以上において 0.5% 以下である。

実験対象として用いた翼型は、将来フィールド実証試験に使用予定の SUBARU 15/40 (定格出力 40 kW) のブレードにおける代表翼型 MEL18M31 を用いた。供試翼は、コード長 0.3 m 、スパン長 1.4 m のものを使用し、風洞流路中央に上下壁の端から端までを渡すように配置した。翼は

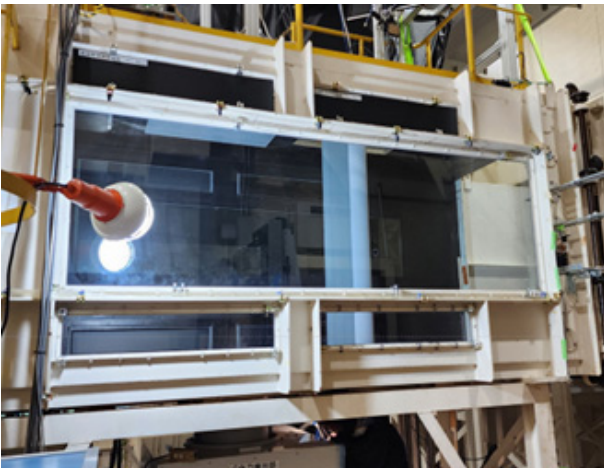


Fig. 2 つくば北風洞 写真

ピッチ軸をモーターつなぎ、迎角を任意に変化させた。迎角は絶対式ロータリーエンコーダーを用いて測定した。また翼表面にはコード方向に直径 0.5 mm の静圧孔を開け、電子式多点圧力スキャナーを用いて表面圧力分布の測定を行った。Fig. 2 に本風洞のテストセクションの外観写真を示す。

2.2. 実験方法

本研究では、5種類の実験条件による揚力特性を比較することで、リブレット効果の定量評価を行った。実験条件ごとにフィルムを用意し、それぞれを同一の翼型に貼り付けて風洞試験を実施し、翼表面の静圧分布を取得した。静圧分布の取得中、翼型は流れの中で静止状態におき、圧力測定が終了する都度、次の迎角姿勢に変化させた。取得した翼面静圧分布をコード方向に積分することで揚力を算出し、同時に取得した流入気流の情報を用いて揚力係数に無次元化して比較した。

リブレット設計にあたり、まず、対象風車ブレードについて MEL18M31 翼型を持つ翼素断面において、設計点である迎角 7 deg で二次元翼の流体解析を行った。その結果をもとに最適なりブレット形状を算出した。設計形状をレーザー加工によりフィルム上に成形し、表面がリブレット成形されたフィルムを翼面に貼り付けた。フィルムには、風車エロージョン保護シートとして実績のある 3M 社製のポリウレタンフィルムを使用した。

2.3. 実験条件

風洞実験は風速 $u = 40\text{ m/s}$ 、レイノルズ数 $Re = 800,000$ 、迎角 $AoA = -6 \sim 27\text{ deg}$ で行った。リブレット貼付条件は Table 1 に示す通りである。流体条件は対象風車の通常の運転条件に相当する。以下に実験条件の一覧を示す。

- ① Reference
フィルム貼付なし
- ② Smooth-Full
未加工フィルムを翼模型全体に巻き付けるように貼付
- ③ Riblet-Full
部分的にリブレット加工が施されたフィルムを全体に巻き付けるように貼付

Table 1 実験条件

① Reference		— フィルム未適用領域
② Smooth-Full		— リブレット未加工 — フィルム適用領域
③ Riblet-Full		— リブレット加工 — フィルム適用領域
④ Smooth-Cut		
⑤ Riblet-Cut		

- ④ Smooth-Cut
未加工フィルムを翼後縁側にのみ貼付
- ⑤ Riblet-Cut
リブレット加工フィルムを翼後縁側にのみ貼付

3 結果および考察

3.1. リブレットによる揚力の変化

まずは純粋なリブレット効果を評価するために条件

- ① Reference, 条件② Smooth-Full および条件③ Riblet-Full を比較する.

Fig. 3 に揚力係数と迎角の関係を示し、Fig. 4 に Reference 条件に対する他 2 条件の揚力係数の増加割合 K_d を示す。

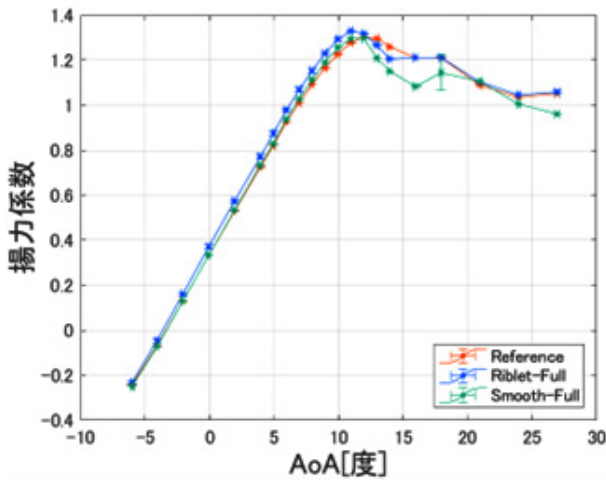


Fig. 3 リブレットが揚力係数に与える影響

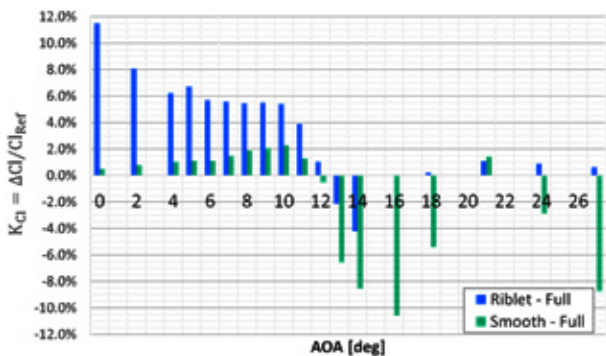


Fig. 4 リブレットが揚力係数の増加割合に与える影響

Fig. 3 より、最大揚力を示す迎角よりも浅い迎角となる、 $0 \leq \text{AoA} \leq 10 \text{ deg}$ の範囲において、Riblet-Full は他のリブレットなし条件に比べ高い揚力係数を示す。その増加割合は Fig. 4 に示す通りであり、Reference に対し Riblet-Full は平均 6.7% であった。一方 Reference と Smooth-Full を比べると、同様に揚力係数は増加するものの、Fig. 4 よりその増加割合は 1.4% であり、リブレットが翼素の揚力を増加させる効果を持つことは明らかである。

リブレットによる揚力増加の要因を特定するには今後さ

らなる研究が必要であるが、現時点で考える要因の一つとして翼後縁側における境界層の整流が挙げられる。リブレットにより整流され、境界層の運動量損失が抑えられると、翼型後縁部での運動量が回復する。これが流れ方向を正とする右手系でみたときの時計回りの翼の循環を増加させ、揚力の増加につながったと考えられる。実際、翼の循環増加は本実験結果における翼面圧力分布にも現れている。Fig. 5 に迎角 7 deg における翼面圧力係数 (C_p) 分布を示す。

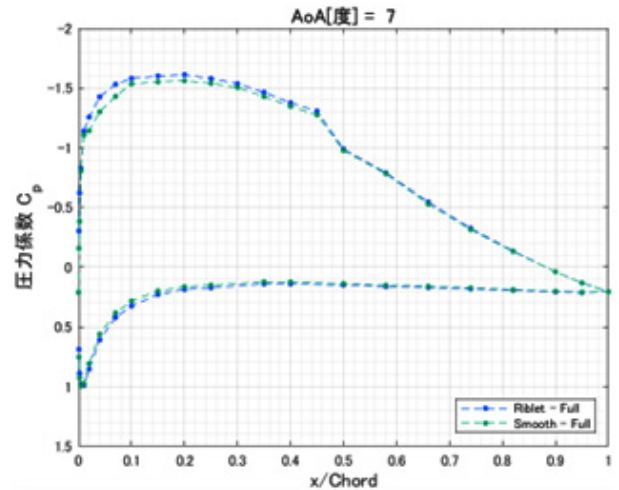


Fig. 5 迎角 7 deg の C_p 分布

※リブレット加工領域：約 $0.5 < x/\text{Chord}$

Fig. 5 にて、Smooth-Full と Riblet-Full を比較すると、 $0 \leq x/\text{Chord} \leq 0.5$ の領域で、圧力が負圧面において低下し、一方で正圧面においては上昇する。この結果はリブレットにより Fig. 5 において時計回りの翼の循環が増加したことを示している。

3.2. Riblet-Cut フィルムによる揚力の変化

次に既存の実機風車にリブレットフィルムを貼り付けることを想定して、良好な施工性を備える小面積なフィルムの実験条件⑤ Riblet-Cut の揚力性能変化を評価する。

Fig. 6 に Reference と Riblet-Cut の揚力係数と迎角の関係を、Fig. 7 に Reference に対する Riblet-Cut フィルムの揚力係数の増加割合 K_d を示す。

Fig. 7 より Reference に Riblet-Cut を適用することで、設計点の迎角 7 deg において揚力係数は 2.9% 増加し、さらに最大揚力付近よりも浅い迎角 $0 \text{ deg} \leq \text{AoA} \leq 10 \text{ deg}$ の範囲において平均 4.5% の揚力係数の増加が示された。従って、Riblet-Cut を貼付けた場合でも、設計点である 7 deg だけではなく、最大揚力よりも浅い広範囲の迎角において揚力増加を得られ、リブレットは迎角に対してロバストな効果を示すと言える。

一方で、最大揚力の迎角 (12 deg) では揚力係数の減少がみられた。その程度は Fig. 7 に示す通り 2.8% であった。これは、Riblet-Cut による揚力係数の変化が単純なリブレット

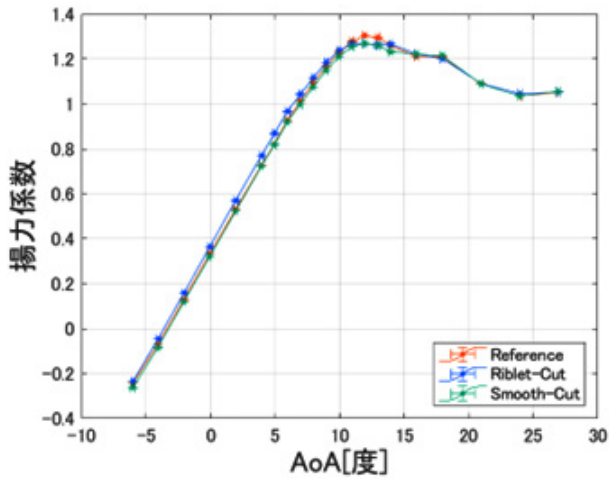


Fig. 6 小面積カットフィルムが揚力係数に与える影響

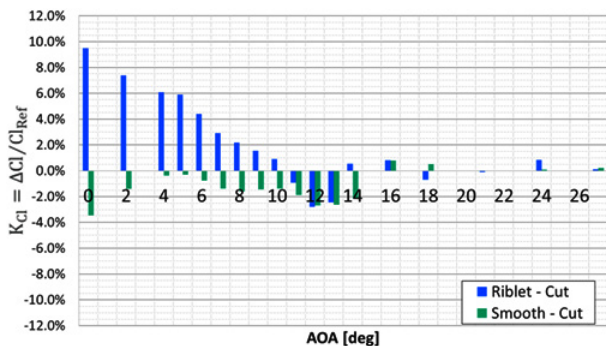


Fig. 7 小面積カットフィルムが揚力係数の増加割合に与える影響

による効果だけではないことが要因と考えられる。次節ではこの要因が Riblet-Cut フィルム端部の段差にあると考え、端部段差が揚力係数に与える影響を評価した。

3.3. フィルム端部の段差が与える影響

Riblet-Cut フィルムの端部は翼素コード方向の中央付近に位置するため、この端部の段差が流れを乱し、翼素の性能が低下する可能性がある。この影響を評価するため、条件① Reference と条件④ Smooth-Cut フィルムの揚力係数を比較した。Fig. 6 に両者に関する揚力係数と迎角の関係を示す。Fig. 7 に揚力係数の増加割合 K_{cl} を示す。

Fig. 6 より、Reference に対し Smooth-Cut フィルムを適用することで揚力係数の減少が迎角 $11 \leq \text{AoA} \leq 14 \text{deg}$ の範囲でみられた。特に迎角 6 度を境に揚力係数の勾配が変化し、最大揚力となる迎角で最も大きな差が見られた。Fig. 6 に示す通り、段差の影響はリブレットの効果を低下させ、最大揚力となる迎角 (12 deg) で揚力係数は 2.7% 低下した。この結果は、Fig. 7 に示した最大揚力付近における Reference に対する Riblet-Cut の揚力係数の減少と定量的にも一致する。従って、3.2 節で評価された Riblet-Cut の最大揚力付近での揚力係数減少はフィルム端部の段差によることが分かった。

4 まとめ

本研究は、風車ブレードにおけるリブレットの実用化に向け、リブレット成形されたフィルムの揚力係数へ効果を二次元翼の風洞試験により定量的に評価した。その結果、以下に示す 3 つの結論を得た。

- I. リブレットによる純粋な効果として、迎角最大揚力よりも浅い迎角範囲で平均 6.7% の揚力係数増加が示された。
- II. 実用化に向け有力な Riblet-Cut フィルムにおいても、設計点の迎角 7 deg だけではなく、広範囲の迎角で平均 4.5% の揚力係数増加を得て、迎角に対するロバストな効果が示された。
- III. フィルム端部に段差がある場合、その影響はリブレットの効果を減じ、最大揚力付近の迎角で顕著に表れることが示唆された。

今後は、本実験結果から抗力を算出し、揚抗比の観点からリブレットがブレード空力性能へ与える影響を評価する。また、この評価結果をもとに風車ブレードへのリブレットフィルム適用による Annual Energy Production (AEP) 改善量を見積る計画である。

謝辞

本成果の一部は、福島県における再生可能エネルギーの導入促進のための支援事業費補助金（福島再生可能エネルギー研究所最先端研究・拠点化支援事業）「風力発電の維持管理等の技術開発・人材育成拠点の形成」における技術研修を活用して得られた。

引用文献

- [1] 三宅裕, “壁乱流の渦,” *ながれ*, vol. 22, no. 1, pp. 29-34, 2003.
- [2] 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.
- [3] 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.
- [4] 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, Sep. 1986.
- [5] 柳瀬菜穂, 東野嵩也, 倉島高広, 土橋晋太郎, 久保徳嗣, 田中元史, “風車翼型へのリブレット適用による揚力改善効果検証,” *第45回風力エネルギー利用シンポジウム*, pp. 376-379, 2023.

柳瀬菜穂 Naho YANASE
次世代プロジェクト本部 第二開発部
2nd Development Department
Next Generation Project Division

東野嵩也 Takaya HIGASHINO
次世代プロジェクト本部 第一開発部
1st Development Department
Next Generation Project Division

倉島高広 Takahiro KURASHIMA
先進技術開発本部
Advanced Technology Research & Development 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

久保徳嗣 Noritsugu KUBO
国立研究開発法人 産業技術総合研究所
National Institute of Advanced Industrial Science and Technology

田中元史 Motofumi TANAKA
国立研究開発法人 産業技術総合研究所
National Institute of Advanced Industrial Science and Technology



柳瀬菜穂
Naho YANASE



東野嵩也
Takaya HIGASHINO



倉島高広
Takahiro KURASHIMA



土橋晋太郎
Shintaro TSUCHIHASHI



久保徳嗣
Noritsugu KUBO



田中元史
Motofumi TANAKA