

燃費改善, CO₂ 排出量削減を実現する, 航空機向けリブレット技術の開発

小野明人, 懸田隆史

Development of Riblet Technology for Aircraft to Improve Fuel Efficiency and Reduce CO₂ Emissions

Akito ONO and Takafumi KAKEDA

リブレットはサメ肌構造を模した生物模倣技術の一種であり、流体機器表面の流線に沿って設けられた微細な溝により、乱流境界層の粘性抵抗が低減することが知られている。これを輸送機器や回転機器に応用することにより、その燃費改善や CO₂ 排出量削減を実現することができる。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においては、実用化に向けた取り組みが盛んに進められているが、いまだ本格的な実用化には至っていない。我々は、レーザーによるリブレット施工技術を開発し、その実用化を目指している。本稿では、航空機へのリブレット技術適用に向けた我々の取り組みについて紹介する。

Riblets are a type of biomimetic technology with shark-skin structure. Riblets reduce the skin friction in a turbulent boundary layer due to the fine grooves provided along the streamlines on the surface of objects in fluids. Applying this technology to transportation and rotating devices, for example, can improve fuel efficiency and reduce CO₂ emissions. For aircraft in particular, where the surface area is large and the contribution of skin friction is significant at high Reynolds number, efforts to practical use of riblets are actively progressing. However, this is yet to be achieved. We have developed a riblet processing technology using laser and our goal is to put it into practical use. In this paper, we introduce our efforts towards the application of riblet technology to the aircrafts.

Key words リブレット, レーザー加工, 粘性抵抗低減, CO₂ 排出量削減, 航空機
riblet, laser processing, drag reduction, CO₂ emissions reduction, aircraft

1 はじめに

航空機をはじめとする高速移動体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 [1]。この摩擦抵抗を低減することは航空機のエネルギー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 [2], [3]。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 [4]。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 [5]。Fig. 1 にリブレットと縦渦の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、最適ナリブレットピッチ（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ナ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。

$$s^+ = \frac{s \sqrt{\tau_w}}{\nu} \quad (1)$$

ここで、 τ_w は壁剪断応力、 ρ は流体の密度、 ν 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 [6]。とりわけ表面積が大きく高レイノルズ数領

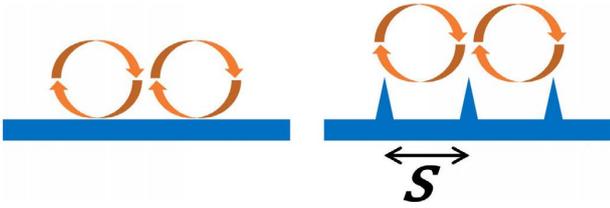


Fig. 1 Eddy-wall interaction without and with riblets. The flow is in the depth direction of the paper.

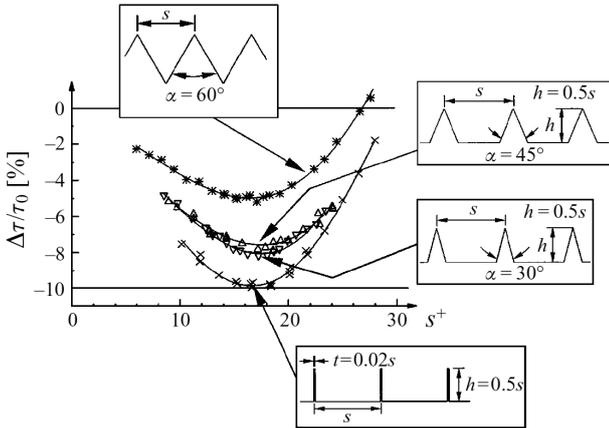


Fig. 2 Drag reduction effect by riblets with various cross section. The number s^+ is a dimensionless riblet size.

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 [7], [8], 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 [9], [10], [11]. 民間用航空機の飛行条件において最適なリブレットピッチはおよそ $100 \mu\text{m}$ で、人の髪の毛の太さとほぼ同等である。

2 航空機とリブレット

航空機におけるリブレットの効果は以前から注目されており、1990年代には Boeing, Airbus 各社によって実機テストが行われるなど [7], 今日に至るまで技術開発が進められているが、施工性や耐久性の課題によって未だに本格的な実用化には至っていないのが現状である。

遷音速巡航飛行時の空力抵抗内訳のうち粘性抵抗が占める割合は50%を超える [12]. リブレットの粘性抵抗低減率は6%程度であり、機体表面積の80%にリブレットを施工した場合、全抵抗の約2%を削減することが出来る。これを国内大手エアライン1社が保有する全飛行機に展開した場合、ジェット燃料を年間9.5万トン節減でき、年間の燃油費は80億円削減、 CO_2 排出量は30万トン削減できる効果があると試算されている。これは、平均して1機当たり年間で数千万円の燃料費削減効果に相当する。カーボンニュートラルの実現が社会課題となっている今、リブレット加工は地球に優しいテクノロジーとも言える。

リブレット技術は、リブレットフィルムによる適用、または、機体塗装面への直接施工を行うことにより、既存航空機に対してレトロフィットが可能な技術であることも重要な利点である。

航空機へのリブレット技術を実用化するためには、施工性、空力性能、耐久性をバランスよく兼ね備える必要がある。ニコンはこれらの技術開発を、研究機関、エアライン、他企業と協業し進めている。以降の章より、各技術課題に対する我々の取り組みについて紹介していく。

3 施工性

リブレットによって得られる運行利益は燃費削減効果から施工コストを差し引いたものとなるため、施工コストを十分に抑えることが重要となる。また航空機は待機時間の増加に伴い莫大な営業損失が発生する。そのため、大型・大面積の対象物に対し、リブレット施工を短時間で行うことが重要となる。現時点で実用化されているリブレットフィルム方式は、フィルム貼付作業のみでおよそ2週間を要し、数千万円のコストがかかっている。

航空機への大面積施工を実現する手段の一つとして、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].

Fig. 3 にレーザーによるリブレット施工の模式図を示す。fθ レンズによって数十 μm 程度に集光したレーザービームスポットをワークに対し照射すると、照射された部分の材質が瞬時に溶解、気化し、除去される。ガルバノミラーによってビームスポットをリブレット方向に高速で連続的にスキャンし、所望の寸法、深さのリブレット形状を作成することが出来る。

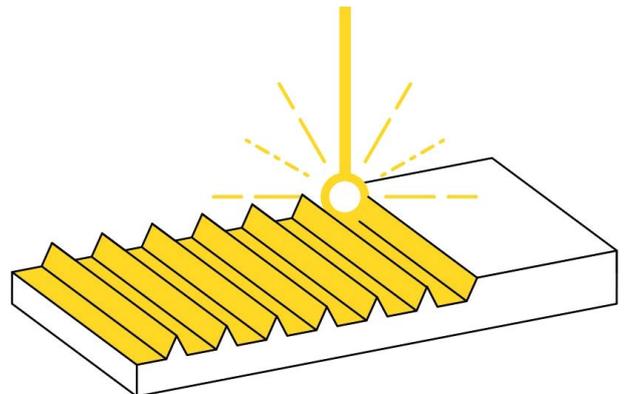


Fig. 3 Schematic diagram of a laser processing for forming riblets on the surface of an object

レーザーによるリブレット施工には以下に示すような利点がある。

最適なレーザー光源（波長, 出力, パルス幅, 等）を選択することで, 塗料やフィルム, 金属といった様々な材質に対して高精度な除去加工が可能となる。

ガルバノミラーによるスキャンパターンを工夫することで様々なリブレット形状が作成可能となる。直線だけでなく, 流体解析 (CFD) に基づき, Fig. 4 に示すような最適な流線でリブレットを施工することが可能である。また, 従来型の台形溝リブレットだけでなく, より高効率な次世代リブレット形状の作成も可能となる。

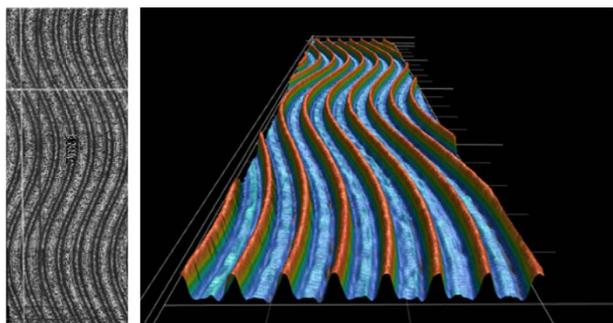


Fig. 4 Smooth curved riblets generated by laser processing

加工ワークの形状に対する自由度も高く, 湾曲したワーク面の形状に沿って最適な加工パスを作成し, レーザー光をワーク表面に沿って焦点を追従させながらスキャンすることで, 物体の形状に合わせたリブレット施工が可能である。Fig. 5 に複雑形状へのリブレット施工事例を示す。



Fig. 5 Riblet processing on a 3D curved surface

レーザーアブレーション加工は熱影響が少ないため, 材質を変質させず, 塗膜やフィルムといった材質本来の耐久性を維持したままリブレットを施工することが可能である。これにより, 交換サイクルが長い部品でも長期的なリブレットの効果が見込める。

また, レーザー施工はワークに対し非接触で反力を受けることなく加工ができることから, 自動化との親和性が高い施工方法と言える。大型マニピュレータとレーザー加工ヘッドを組み合わせることで, 自律制御の加工機が, 航空機に自ら近づき, 自動でリブレット加工を行うことが可能になる (Fig. 6)。

我々はレーザーを用いた大面積リブレット施工の実現に

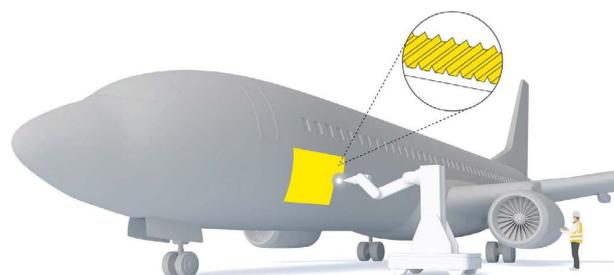


Fig. 6 Conceptual diagram of riblet processing on a large object

向け, 各種要素技術の開発を進めている。

レーザー加工ヘッドにおいては, 既存のリブレット加工機に対し飛躍的に加工速度を高めた光学系の開発を進めている。レーザー加工機において一般的なシングルビームを用いた光学系は, 単位時間当たりの除去体積が小さく加工速度に課題があった。我々はこの課題を解決するため, マルチビームを形成しそれをスキャンしてリブレットを加工する技術を開発中である。この技術を用いて将来的には航空機 1 機 (Boeing737-800型機を想定) へのリブレット施工を 1 日で完了させることが目標である。

また, 数 μm オーダーの加工精度を達成するためには, 振動への対策が不可欠となる。大型マニピュレータとレーザー加工ヘッドを組み合わせた加工機を用いて整備場内で機体に対しリブレット施工を実施する際, 整備場内の環境振動がマニピュレータによって増幅されることで加工ヘッドと機体間の相対振動が発生する。これによって加工精度が悪化するリスクがある。このため, 整備場にて採取した床振動データを用いてマニピュレータの振動応答解析を行い, マニピュレータの最適な構成の検討を進めている。さらに, 相対振動をキャンセルするアクティブ除振システムの開発を進めている (Fig. 7)。

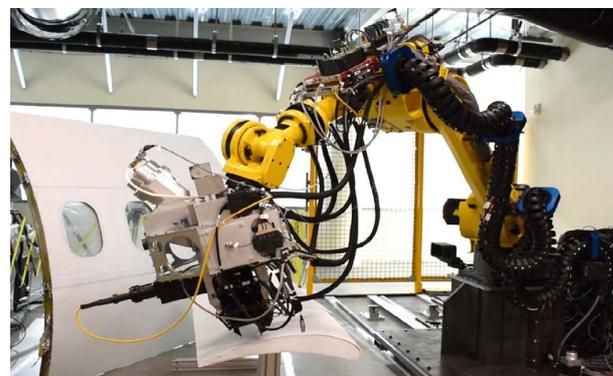


Fig. 7 Riblet processing technology development for large objects

4 空力性能評価 (風洞実験)

施工したリブレットによってどれだけの燃費削減効果を得られるかは空力性能によって決まる。空力性能はリブ

レット形状、形状精度、適用箇所、適用面積に依存する。形状に関しては効果が高く、かつ、施工性、耐久性に優れたリブレット形状の研究が各社で進められている [15], [16]。形状精度に関しては理想形状からの形状変化が及ぼす影響について実験、解析両面で様々な研究がおこなわれている [17]。また、効果を生みやすい場所に対し、場所によって異なる最適リブレット形状設計を実現するCFD解析技術や、広い範囲に対して適用可能で、高い形状精度を実現できる施工技術の開発が求められている。航空機の機体表面のどの部位にでも施工できたとした場合、胴体よりも主翼の方がリブレット施工面積当たりの抵抗低減効果が大きいという研究報告がなされている [18]。

ニコンはレーザー施工リブレットの抵抗低減効果に関する検証を宇宙航空研究開発機構（以下「JAXA」）と共同で進めている。JAXAが設計したリブレット形状を、ニコンがレーザー施工技術により作成し、JAXA所有の風洞（Fig. 8）において抵抗低減効果の評価を行っている。計測手法はピトーレイクを用いた境界層内の速度分布計測である。また、JAXAがDirect Numerical Simulation（DNS）を用いて設計した次世代高効率リブレット形状での効果検証も行っている。これまでに、従来型の台形溝リブレットで5%以上の抵抗低減効果を確認しており、さらなる効果改善のため、リブレット形状精度の改良を進めている。

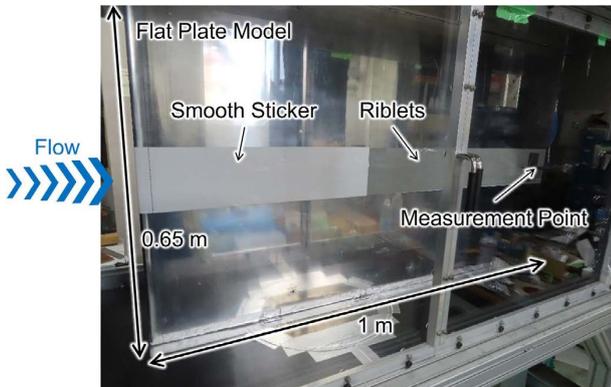


Fig. 8 Riblets on the flat plate model installed in the wind tunnel test section

5 耐久性評価（飛行試験）

前章で述べた通り、リブレットの空力性能はリブレットの形状に応じて変化することが分かっている。よって、施工したリブレット形状が航空機の実運用環境においてどれだけ初期形状を維持できるかによって長期的な燃費改善効果は変化する。機体上のリブレットがさらされる環境は極めて特殊である。高度 10000 m を巡航時、機体は -50°C の大気中を時速約 900 km で飛行し、高強度の紫外線にさらされる。汚染の観点ではオイル、グリース、エンジン排気ガス、黄砂などの大気汚染物質、離着陸時の泥はね、タイヤ摩耗による飛散にさらされる。定期的実施される機体

洗浄に対する耐久性も求められる。我々はこのような実運用環境におけるリブレットの耐久性を評価するため、国内主要エアライン2社、および、JAXAと協業で飛行実証試験を進めている。

ニコンは全日本空輸株式会社（以下「ANA」）と2022年10月よりリブレットフィルムを機体表面に試験装着した合計2機のBoeing787型機の運航を開始し（機体番号：国際線JA871A、国内線JA874A）、形状を定期的に測定する耐久性飛行試験を行っている。リブレットフィルムを試験装着した航空機の運航は、日本の航空会社としてANAが初めてとなる。当該機体では、運航中、気流の激しい部分である「主翼付け根付近」と「胴体上面」に、ニコンがレーザー技術により施工した155 mm角のリブレットフィルムをそれぞれ6枚ずつ、合計12枚を試験的に装着している（Fig. 9）。今後は、数年規模の長期間運航における各種データを取得し、リブレットフィルムの耐久性評価をはじめとした継続的検証を行っていく。なお、機体装着から100日以上経過した時点（JA871A：2023年1月、JA874A：同年3月）においても有意な形状変化がないことを確認している。

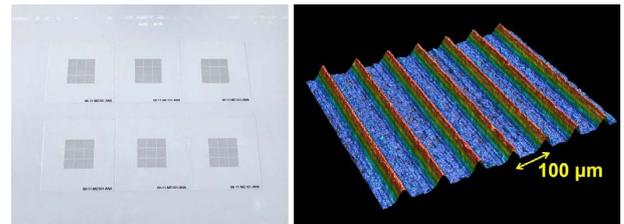


Fig. 9 Riblet film attached to the fuselage and its surface shape

更にニコンは日本航空株式会社（以下「JAL」）、JAXAと共同で、世界で初めて、機体外板の塗膜表面にレーザーによって直接リブレットを施工した航空機による飛行実証試験を2022年10月より開始した。リブレット形状の研究、開発を行うJAXAが、ニコンのレーザー加工技術に着目し、JALグループが所有する航空機の運用経験、および、機体塗装知識や経験を用いてリブレットの実機適用に向けた取り組みを推進している。Boeing737-800型機（機体番号：JA334J）の機体胴体下部のサービスパネル上に、ニコンのレーザー加工技術を活用した直接施工により75 mm角のリブレットを2面施工し（Fig. 10）、形状を定期的に測定する耐久性飛行試験を行っている。2023年4月時点で機体装着から150日以上が経過し、飛行による有意な形状変化がないことを確認している。この評価においてニコンは、空港内整備場においてサービスパネルに対するリブレット施工を行うため、可搬型のレーザー加工機を開発した。この加工機にて施工したリブレット加工サンプルを用いた塗膜の付着性試験、美観性試験、ヒートダメージチェック等の基礎評価を行い、レーザー施工による塗膜への影響がない事を実証した。これらのエビデンスを基に、機体への施工に対

し技術的な懸案はないとの見解を Boeing より取得した。

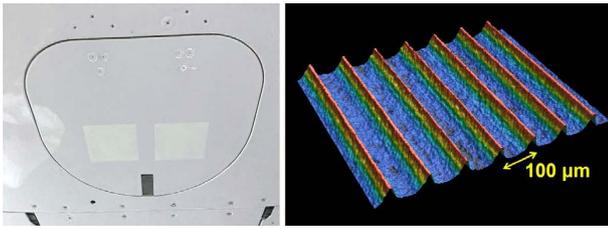


Fig. 10 Riblet application area (2 locations) and its surface shape

6 まとめ

航空機へのリブレット技術適用に向けたニコンの取り組みを紹介した。ニコンは独自のレーザー加工技術を活用し、航空機やタービンブレードなど、様々な対象に適したリブレットを素材表面に直接加工するほか、リブレット加工されたフィルムを装着することによってエネルギーロス低減を実現していく。さらに、ニコンが得意とする光学技術やレーザー加工技術にモビリティを組み合わせることで、将来的には自律制御の加工機が、航空機や風力タービンブレードなどの大型な対象物に自ら近づき、自動でリブレット加工を行う、そんな未来を実現したいと考えている。ニコンは、リブレット加工技術を活かした事業開拓を進め、燃費改善や CO₂ 排出削減などを通じ、持続可能な社会の実現に貢献していく。

引用文献

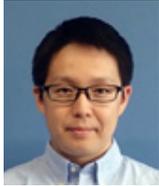
- [1] 三宅裕, “壁乱流の渦”, *ながれ*, vol. 22, no. 1, pp. 29–34, 2003.
- [2] 鈴木雄二, 笠木伸英, “壁面乱流の知的能動制御”, *セーブレーション・レビュー マイクロフローセンサ特集号*, pp. 50–57, 2001.
- [3] D. W. Bechert, G. Hoppe and W.-E. Reif, “On the drag reduction of shark skin,” in *Proc. 23rd Aerospace Sciences Meeting*, 1985, doi: 10.2514/6.1985-546.
- [4] D. W. Bechert, M. Bartenwerfer, G. Hoppe and W.-E. Reif, “Drag reduction mechanisms derived from shark skin,” in *Proc. 15th Congr. ICAS*, Sep.1986, pp. 1044–1068.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] “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, 2018.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] 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.
- [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] “エコな航空機を実現するための空力技術,” 平成23年度, IADF.
- [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] Kie OKABAYASHI, “Direct numerical simulation for modification of sinusoidal riblets,” *JFST*, vol. 11, no. 3, 2016.
- [16] B. R. Smith, P. Yagle and P. D. McClure, “Computational simulation of staggered 3-D riblets for skin friction drag reduction,” *AIAA SCITECH 2023 Forum*. doi: 10.2514/6.2023-1763.
- [17] P. A. Leitl, C. Feichtinger, G. Schatzdorfer and A. Flanschger, “Numerical study of riblet defects and their impact on performance,” *AIAA SCITECH 2023 Forum*. doi: 10.2514/6.2023-1764.
- [18] P. A. Leitl, A. Flanschger, *et al* (2021) “Investigation of the impact of different Riblet layouts on a long- and medium-range Aircraft model,” *AIAA SCITECH 2022 Forum*. doi: 10.2514/6.2022-0919.

小野明人 Akito ONO
次世代プロジェクト本部 第一開発部
1st Development Department
Next Generation Project Division

懸田隆史 Takafumi KAKEDA
次世代プロジェクト本部 第二開発部
2nd Development Department
Next Generation Project Division



小野明人
Akito ONO



懸田隆史
Takafumi KAKEDA