

論文 / 著書情報
Article / Book Information

論題(和文)	ペンギンの体表を模倣したリブレットの3次元胴体モデルにおける抗力低減効果
Title(English)	Drag reduction effect by penguin-feather-mimetic riblet on a 3D body model
著者(和文)	齋藤 遼輔, 田中 博人
Authors(English)	Ryosuke Saito, Hiroto Tanaka
出典(和文)	日本機械学会第100期流体力学部門講演会 予稿集, , ,
Citation(English)	, , ,
発行日 / Pub. date	2022, 11

ペンギンの体表を模倣したリブレットの 3次元胴体モデルにおける抗力低減効果

Drag reduction effect by penguin-feather-mimetic riblet on a 3D body model

○学 齋藤 遼輔^{*1}, 正 田中 博人^{*1}

Ryosuke SAITO^{*1} and Hiroto TANAKA^{*1}

^{*1} 東京工業大学 Tokyo Institute of Technology

Abstract

Penguins have adapted to underwater swimming in the course of evolution. Previous study showed that the riblets mimicking the body feathers of the penguins reduced drag on a flat plate by up to 2.0%. In this study, we measured drag reduction rate of the penguin-mimetic riblets on a 3D body model. Based on a sideview image of a swimming penguin, a 3D spindle model of which cross section was a regular 24-gon shape was created. Riblets were fabricated on flexible polyimide films by laser scanning ablation so that the riblet films were attached to the curved surfaces. Two different cross sections of the riblets were compared: one was the penguin-mimetic trapezoidal cross section (medium-ridge riblet), and the other was a near-rectangular cross section (wide-ridge riblet). Drag of the 3D bodies covered with films with or without riblets was measured in a water channel. As a result, the maximum drag reduction rate of the medium-ridge riblet for the 3D body was 3.5% when s^+ was 7.29, which was higher than the drag reduction rate for the flat plate with similar s^+ (0.58% with s^+ of 7.23) or the maximum value (0.60% with s^+ of 10.4). Moreover, the medium-ridge riblet showed higher drag reduction ratio than the wide-ridge riblet for full range of flow speed in this study. The results suggest that the penguin-feather-mimetic riblet reduces not only frictional drag but also pressure drag for the 3D body.

Key Words : Drag reduction, Riblet, 3D fuselage, Water tunnel, Biomimetics

1. 緒 言

ペンギンは水中を泳ぐ鳥類で、高い遊泳能力をもっている。例えばジェンツーペンギンは採餌時に平均速度 2.3 m/s で遊泳し、キマユペンギンは一日あたり平均 80 km の長距離遊泳を行う⁽¹⁾⁽²⁾。そのため、ペンギンの身体構造は遊泳時のエネルギー消費を抑えるように進化したと考えられる。特に流体摩擦に関しては全身を隙間なく覆う羽毛によって、表面流れを制御している可能性がある。これまで本研究室では、ペンギンの胴体表面の羽毛を模倣したリブ断面が台形のリブレットを製作し、平板において抗力を最大 2.0% 低減することを実験で明らかにした⁽³⁾。本研究では、3次元胴体形状における抗力低減率を調べるために、ペンギン模倣リブレットをフィルム上に製作して紡錘体モデルに貼り、抗力低減率を回流水槽で計測して平板と比較した。

2. 研究方法

2・1 3次元胴体モデルの製作

3次元胴体モデルの設計には遊泳中のジェンツーペンギンを横から撮影した写真⁽⁴⁾を用いた(図 1(A))。胴体を長軸方向に 30 分割し、背中側と腹側の各点の midpoint を一列に並べ、外形点群に円弧をフィッティングした。生成した円弧外形線を、中心線を軸として回転させて紡錘体を作成した。さらに、後述するリブレットフィルムを貼付するために、断面円を 24 分割して正 24 角形の断面を生成し、24 個の曲面からなる 3D (3次元) 胴体モデルを作成した(図 1(B))。モデルの長軸は 220 mm、短軸は 60 mm、外形線円弧の半径は 218 mm である。回流水槽の最大流速 2.0 m/s における長軸の Re (レイノルズ数) は 6.08×10^5 である。これは体長 0.65 m のペン

ギンが 1.2 m/s で遊泳する際の Re と等しい。回流水槽計測部の長方形断面（幅 300 mm, 高さ 200 mm）に対して閉塞率は約 5% であり、閉塞率の影響は小さい⁽⁶⁾。実験用モデルは、シリコーンゴムの雌型にエポキシ樹脂を流し込んで複製した。その際、直径 2 mm の円断面のトリッピングワイヤを前端から 10 mm の位置に取り付けた。

2・2 ペンギン模倣リブレットの製作

ペンギン模倣リブレットには、本研究室で以前に設計したリブ間隔 $s = 100 \mu\text{m}$ の台形リブレット (Medium-ridge riblet⁽³⁾) を用いた (図 2(A))。これは、台形のリブ断面形状と小さな s^+ および小さな h/s (0.3) が特徴である。さらに断面形状の影響を調べるために、台形の上底を長くして長方形に近くした長方形リブレット

(Wide-ridge riblet⁽³⁾) を製作した (図 2(B))。ここで、リブの無次元間隔 s^+ は、 δ_{mean} を粘性底層厚さとして $s^+ = 5s/\delta_{\text{mean}}$ と表される。この s^+ を平板上の乱流境界層を仮定して計算すると、回流水槽の流速範囲 0.5~2.0 m/s においてどちらのリブレットも 3.90~13.6 の範囲で変化する。リブレットは厚さ $125 \mu\text{m}$ のポリイミドフ

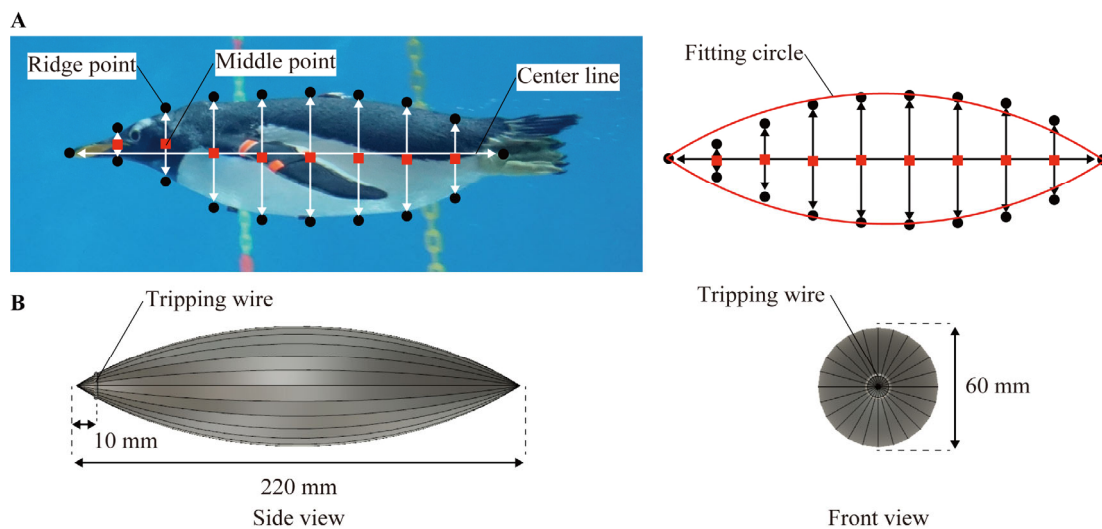


Figure 1 Design methods for 3D body model. (A) The penguin body was divided into 30 segments, the dorsal and ventral middle points were aligned with the center line, and the contour points were fitted with circles. (B) The fitting circle was rotated around the center line. The cross-sectional shape was made into a regular 24-square shape in order to attach the riblet film.

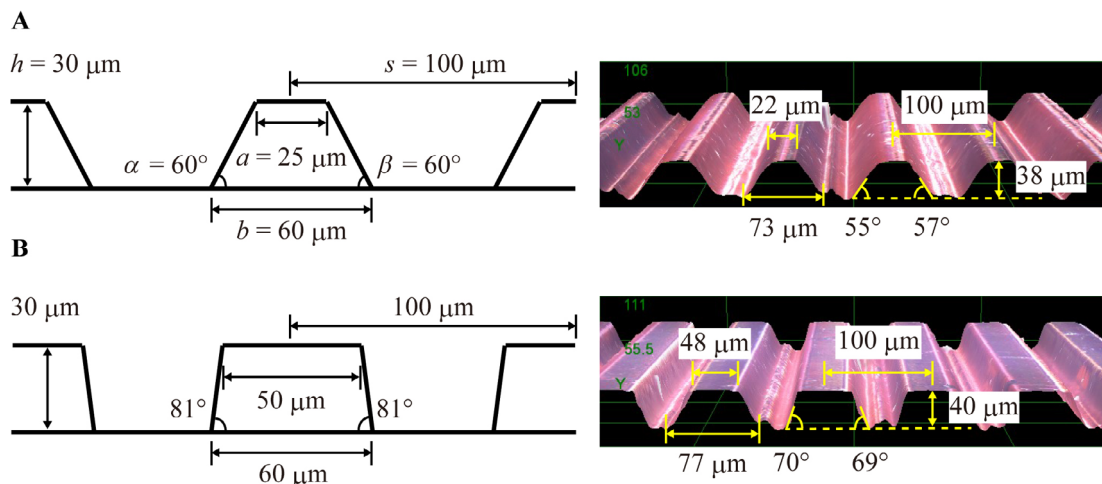


Figure 2 Cross-sectional designs and measured profiles of the riblets. (A) Medium-ridge riblets. (B) Wide-ridge riblets. The surface shape was measured with a laser confocal microscope (SFT-4500, Shimadzu Corp.).

フィルム上にレーザー加工で製作し、3D 胴体モデルに貼付するために外形もレーザーで切り取った。このように、本リブレットは柔軟なフィルム上に製作されるため、様々な曲面に貼付することが可能である。

2・3 抗力計測実験

製作したリブレットフィルムを 3D 胴体モデルに貼付し、モデルをロードセル (LMC-21426-10N, 日章電機) に固定し、回流水槽中で抗力を計測した (図 3)。計測は流速 0.5, 1.0, 1.5, 2.0 m/s ($Re: 1.52, 3.04, 4.56, 6.08 \times 10^5$) で行い、水温は 35°C, 計測回数は 9 回とした。また、モデルを固定する支柱が流体から受ける抗力を無くす為に、中空円筒のフェアリングを取り付けた。

3. 結果と考察

平滑表面の 3D 胴体モデルおよび平板の濡れ面積に対する抗力係数 C_D を図 4(A) に示す。どちらも表面にはリブレット加工がされていない滑らかなポリイミドフィルムを貼った。平板の値は従来研究の値⁽³⁾を用いた。3D 胴体モデルの平均抗力係数は 0.038 で、 Re 依存性は小さかった。平板の平均抗力係数は 0.009 であり、その差 0.029 は主に圧力抗力に起因すると考えられる。

図 4(B) は各リブレットフィルムの 3D 胴体モデルおよび平板における抗力変化率である。オレンジ線は台形リブレット、青線は長方形リブレットを表す。実線は本研究の 3D 胴体モデル、点線は従来研究の平板の値⁽³⁾である。各グラフのエラーバーは 9 回の計測の不確かさ⁽⁶⁾, U_{RSS} (95% 信頼区間), である。各プロットには、 $\delta_{r,mean}$ を基に想定されるペンギンの遊泳速度と、 Re を基に想定されるペンギンの遊泳速度を付記した。

台形リブレットの 3D 胴体モデルにおける最大抗力低減率は 3.5% ($s^+ = 7.29$) だった。全ての s^+ で平板よりも 3D 胴体モデルの方が低減率は大きく、その差は s^+ が 7.29 の時に最大で 2.9% だった。これは、台形リブレットが 3D 胴体モデルにおいては摩擦抗力を低減するだけでなく、境界層剥離の抑制などにより圧力抗力も低減していることを示唆する。

一方、長方形リブレットでは、最大抗力低減率は s^+ が 7.29 の時の 1.3% だった。また、 s^+ が 3.90, 7.29, 10.5 の時は平板よりも抗力を低減したが、 s^+ が 13.6 の時は抗力が増加した (増加率 1.8%)。また、全ての s^+ (ペンギンの中速 0.96 m/s から高速 3.85 m/s の遊泳に相当) において、台形リブレットの方が長方形リブレットよりも高い抗力低減効果を示した。

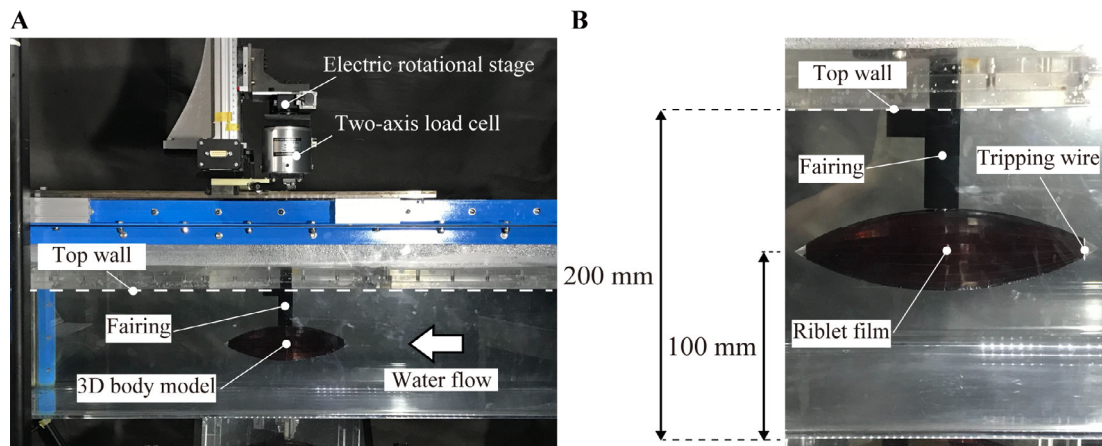


Figure 3 The drag measurement experiment setup in a water tunnel. (A) The 3D body model was fixed to a force gauge by the support rod covered by the fairing. (B) Details of the 3D body model. The riblet film and tripping wire were attached to 3D body model.

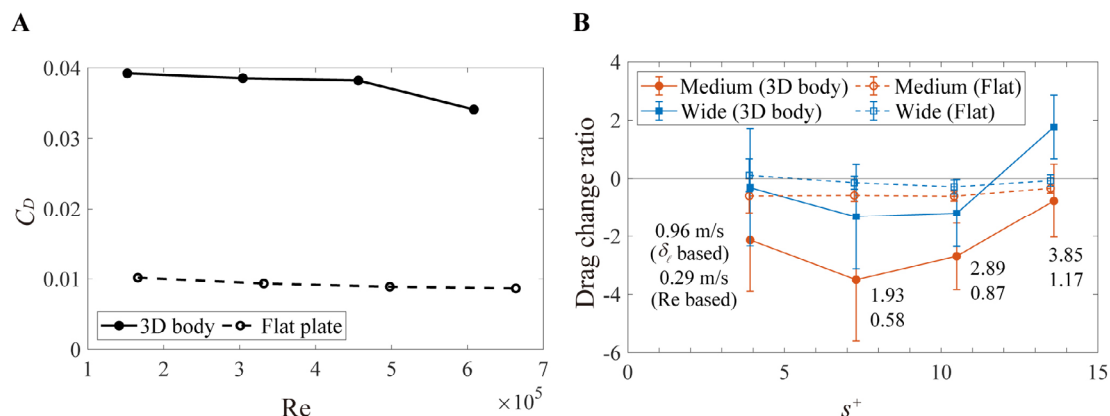


Figure 4 (A) Drag coefficient of 3D body model and flat plate attached smooth film. (B) Measured drag change ratio varying with the s^+ . The orange line is medium-ridge riblet. The blue line is wide-ridge riblet. The solid and dashed lines represent 3D body model and flat plate⁽³⁾, respectively. The error bars represent the uncertainty U_{RSS} (95% coverage)⁽⁶⁾. The numbers next to each plot are the corresponding flow speeds based on the Re and $\delta_{x,mean}$

4. 結論

本研究では、ペンギンの 3D 胴体モデルを、断面が正 24 角形の紡錘体として作成し、ペンギン模倣台形リブレットフィルムを貼り、抗力低減率を回流水槽で計測した。その結果、 s^+ が 7.29 の時に最大で 3.5% の抗力低減率を示した。また、本実験のすべての s^+ (3.90 ~ 13.6) で、平板の場合よりも 3D 胴体モデルの方が大きな抗力低減率を示した。さらに、すべての s^+ において台形断面のリブレットは長方形リブレットよりも高い抗力低減効果を示した。以上より、ペンギンの羽枝の台形断面形状は、ペンギン遊泳速度の 3D 胴体において、平板の場合よりも大きな抗力低減効果を発揮し、摩擦抗力のみならず圧力抗力も減らしていることが示唆された。

謝 辞

本研究は JSPS 科研費基盤研究 (C) JP20K04283, JSPS 科研費新学術領域研究「ソフトロボット学」JP18H05468 の助成を受けた。

文 献

- (1) Mattern, T., Pütz, K., Garcia-Borboroglu, P., Ellenberg, U., Houston, D. M., Long, R., Lüthi, B. and Seddon, P. J. (2018). Marathon penguins—Reasons and consequences of long-range dispersal in Fiordland penguins/Tawaki during the premolt period. *PLoS One*, Vol. 13, e0198688.
- (2) Sato, K., Watanuki, Y., Takahashi, A., Miller, P. J. O., Tanaka, H., Kawabe, R., Ponganis, P. J., Handrich, Y., Akamatsu, T., Watanabe, Y., *et al.* (2007). Stroke frequency, but not swimming speed, is related to body size in free-ranging seabirds, pinnipeds and cetaceans. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, Vol. 274, pp. 471–477.
- (3) Saito, R., Yamasaki, T. and Tanaka, H. (2022). Fluid drag reduction by penguin-mimetic laser-ablated riblets with yaw angles. *Bioinspiration & Biomimetics*, Vol. 17, No. 5, 056010.
- (4) Harada, N., Oura, T. Maeda, M. Shen, Y., Kikuchi, D. M. and Tanaka, H. (2021). Kinematics and hydrodynamics analyses of swimming penguins: wing bending improves propulsion performance. *Journal of Experimental Biology*, Vol. 224, No. 21, jeb242140.
- (5) West, G. S. and Apelt, C. J. (1982). The effect of tunnel blockage and aspect ratio on the mean flow past a circular cylinder with Reynolds numbers between 10^4 and 10^5 . *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 114, pp. 361-377.
- (6) Abernethy, R. B., Benedict, R. P. and Dowdell, R. B. (1985). ASME Measurement Uncertainty. *Journal of Fluids Engineering*, Vol. 107, No. 2, pp. 161-164.