

令和 6 年 6 月 13 日現在

機関番号：12608

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2020～2023

課題番号：20K04283

研究課題名（和文）ペンギン肌リブレット～3次元物体表面におけるリブレットの全抗力低減効果の研究

研究課題名（英文）Penguin-skin riblets - Study of drag reduction effect of riblets on 3D body surface

研究代表者

田中 博人（Tanaka, Hiroto）

東京工業大学・工学院・准教授

研究者番号：80624725

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,400,000円

研究成果の概要（和文）：ペンギンの体表の羽毛を規範とした台形リブレットを提案した。ポリイミドフィルムを紫外線レーザー加工することで、リブ間隔 100 μm および 40 μm のリブレットフィルムを実現した。リブレットフィルムを貼った平板および紡錘体の抵抗を回流水槽で計測して、抵抗低減率を算出した。平板では、無次元リブ間隔 s^+ が 1.59 のときに抵抗低減率は最大となり 1.97% だった。また、リブ配向を流れに対して15度偏差させた方が抵抗低減率は増大した。ただし、30度以上では抵抗は増加した。紡錘体では、 s^+ が 3.9のときに最大低減率は 3.28%となり、平板よりも抵抗低減率は増大した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

これまで、鳥類の体表の羽毛をリブレットと見なして抵抗低減効果を調べた研究は例がない。本研究で模倣リブレットが抵抗低減効果を示したことは、ペンギンの体毛が流体力学的にも適応進化したことを示唆し、生物学的にも意義深い。

また、本研究のリブレットは、流れに対する偏差角に対してロバスト性を示した。さらに、立体的な紡錘体にリブレットを適用した方が、平板に適用したときよりも、高い抵抗低減率を示した。これは、ペンギンと同様に、流れや運動の方向が変化する水中ドローンのような遊泳体に対して、本リブレットが有効であることを示唆し、今後の応用が期待できる。

研究成果の概要（英文）：A trapezoidal riblet inspired by the feathers on the surface of penguins was proposed. Riblet films with rib spacings of 100 μm and 40 μm were created by using ultraviolet laser scanning processing on polyimide film. The drag of flat plates and 3D spindles with the riblet film attached was measured in a circulating water tank to calculate the drag reduction rate. For the flat plates, the maximum resistance reduction rate of 1.97% was achieved when the non-dimensional rib spacing s^+ was 1.59. Additionally, the drag reduction rate increased when the rib orientation was deviated by 15 degrees relative to the flow. However, the drag increased at deviations of 30 degrees or more. For the spindles, the maximum reduction rate was 3.28% when s^+ was 3.9, which was higher than that of the flat plates.

研究分野：遊泳・飛行生物の流体力学とバイオメカニクスおよび工学応用

キーワード：リブレット 壁面摩擦 抵抗低減 ペンギン

1. 研究開始当初の背景

生物と人工物を問わず流体中を移動する物体にとって、流体抗力の低減は移動に要する消費エネルギーをわずかでも節約するために重要な課題である。乱流境界層を伴う高レイノルズ数の流れにおいて、受動的で余計なエネルギーを必要としない流体抗力低減方法としては、流れに平行な微小なリブを物体表面に配列させる方法があり、リブレットとして知られる。これまでに数多くの実験と数値計算がなされ、その基本的な性質は明らかになった。すなわち、適切な間隔と高さで先端が鋭利なリブレットは表面乱流摩擦を最大約 10% 低減できる。ところが、従来研究のほとんどは、壁面乱流の厳密な理解に集中するあまり、十分に長い平行平板間や円管内の内部流れにおける十分に発達した乱流境界層の壁面摩擦力のみを主な研究対象としてきた。これだけでは、実際の移動物体の全抗力に対するリブレットの効果を理解したことになる。なぜなら、全抗力には摩擦抗力だけでなく境界層剥離に伴う圧力抗力も寄与するからである。また、物体表面の境界層は一様ではなく、上流側から下流側に発達する。さらに、物体に対する流れの角度も環境や物体の運動によって変わりうる。このような、実際の移動物体におけるリブレットの効果には未知な点が多い。

2. 研究の目的

本研究では「速度と迎え角が非定常に変化する 3 次元物体において、表面リブレットが全抗力と境界層剥離に及ぼす影響を実験的に明らかにし、最適なリブレット形状を提案する」ことを目的とした。そのアプローチとして、リブレットの設計出発点を非定常に遊泳する生物に求め、胴体が紡錘形状をしたペンギンの胴体表面に配向した羽毛をリブレットの規範とした。

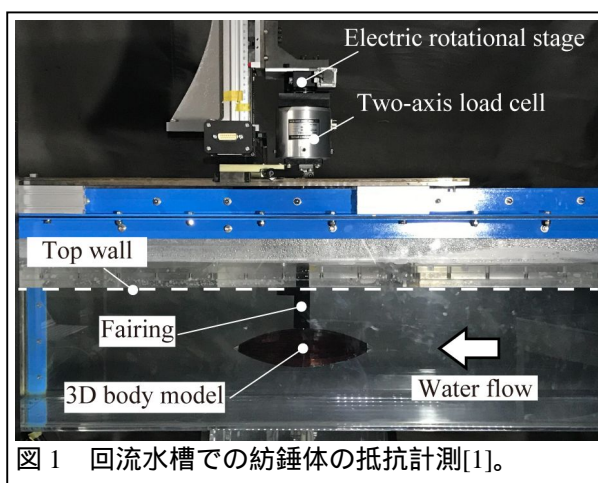
3. 研究の方法

ペンギンの体表の羽毛の形態計測：

博物館標本を用いて、体表の羽毛の間隔を計測した。また、水族館で採取した羽毛を用いて、毛の断面の形状を計測した。

リブレットの製作：

ポリイミドフィルムに紫外線レーザスキャン加工で溝を形成することによって、高速にリブレット形成する製作方法を考案し、利用した。また、株式会社リコーと協同して、紫外線硬化インクのインクジェットプリント(2.5D プリント)による試作も行った。



抵抗低減率の計測：

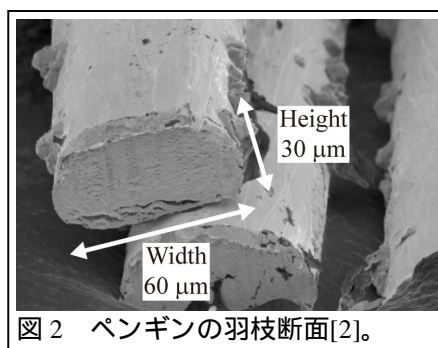
リブレットフィルムを平板および紡錘体に貼り、回流水槽で抵抗を計測し、平滑なフィルムの場合との比較から抵抗低減率を算出した(図1)。流速は 0.5, 1.0, 1.5, 2.0 m/s とした。

4. 研究成果

(1) ペンギンの体表の羽毛を規範としたリブレットの実現[2]

キングペンギン、フンボルトペンギン、コガタペンギンの博物館標本(所蔵：山階鳥類研究所所蔵；協力：山崎剛史博士)の体表の羽毛間隔を計測した結果、約 100 μm だった。ジェンツーペンギンの背中の羽毛(提供：長崎ペンギン水族館)の断面を走査型電子線顕微鏡で観察した結果、断面は幅が約 60 μm 、高さ約 30 μm の台形状だった(図2)。

形態計測結果を基に、ペンギンを規範とした台形リブレットを製作した(図3(B))。リブ形状の影響を調べるために、リブの側面の角度を急にした長方形リブレット(図3(A)) および緩やかにした三角形リブレット(図3(C))も製作した。さらに、回流水槽でペンギンの遊泳時の表面流れを再現するために、寸法を縮小した縮小台形リブレット(図3(D))も製作した。



(2) 平板での抵抗低減[2]

リブレットフィルムを金属平板に貼り、抵抗低減率を計測した。台形リブレットと縮小台形リブレットでは、全ての流速で抵抗が減少した。縮小リブレットで無次元リブ間隔 s^+ が 1.59 のとき(流速 0.5 m/s)に低減率は最大となり 1.97% だった。ペンギンの遊泳速度 1.41 m/s に相当する s^+ が 5.5 (流速 2.0 m/s)のときは、低減率は 0.98% だった。台形リブレットでは、最大低減率は 0.6% ($s^+=10.4$, 流速 1.5 m/s) だった。

台形リブレットのリブ方向の流れに対する偏差角を 15° 、 30° 、 45° と増やすと、 15° のときに 0° よりも抵抗低減率は大きくなり、 s^+ が 3.87 で最大 1.26% の低減を記録した。これは、ペンギンを規範とした台形リブレットが、偏差角に対してロバストであることを意味する。ただし、偏差角 30° と 45° では、すべての s^+ で抵抗が増加した。

長方形リブレットは偏差角 45° のときの抵抗増加が顕著で、三角形リブレットは偏差角 0° のときに抵抗がわずかに増加した。よって総合的に台形リブレットが良好な低減効果を示したと言える。

(3) 紡錘体での抵抗低減

台形リブレットと縮小台形リブレットを紡錘体に貼って抵抗低減率を計測した結果、台形リブレットでは平板の場合よりも低減率が大きくなり、最大低減率は 3.28% ($s^+=3.9$, 流速 0.5 m/s) だった。これは、リブレットが摩擦抵抗だけでなく、境界層剥離に伴う圧力抵抗も低減したことを示唆する。さらに、紡錘体の迎え角(流れに対する偏差角)を 30° まで大きくしても、抵抗低減率は維持された(図4)。これは、紡錘体においてはリブレットの抵抗低減効果が迎え角に対してロバストであることを意味する。

この成果に関する投稿論文を準備中である。

(4) 2.5D プリントによるリブレット試作

株式会社リコーと協同して、同社の 2.5D プリント技術を用いたリブレット製作を試みた。サメを模倣したリブ間隔 $170\ \mu\text{m}$ のリブレットの試作には成功し、平板では最大約 2.4% の抵抗低減率を示した[3]。ペンギンを模倣したリブ間隔 $124\ \mu\text{m}$ のリブレットも試作したが、紡錘体での抵抗低減率は 1% 未満だった。今後は、材料の物性やリブ断面形状の差異の影響を明らかにする必要がある。

< 引用文献 >

- [1] 齋藤遼輔, 田中博人, "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," in 日本機械学会第 100 期流体工学部門講演会, 2022, OS05-04.
- [2] R. Saito, T. Yamasaki, H. Tanaka, "Fluid drag reduction by penguin-mimetic laser-ablated riblets with yaw angles," *Bioinspiration & Biomimetics*, vol. 17, no. 5, 056010.
- [3] 佐山将太郎, 加藤弘一, 香月政徳, 畑中伸一, 亀井稔人, and 田中博人, "ホホジロザメ (*Carcharodon Carcharias*) の楕円鱗を模倣した 2.5D プリントリブレットの抗力低減率の計測," in 日本機械学会第 100 期流体工学部門講演会, 2022, OS05-14.

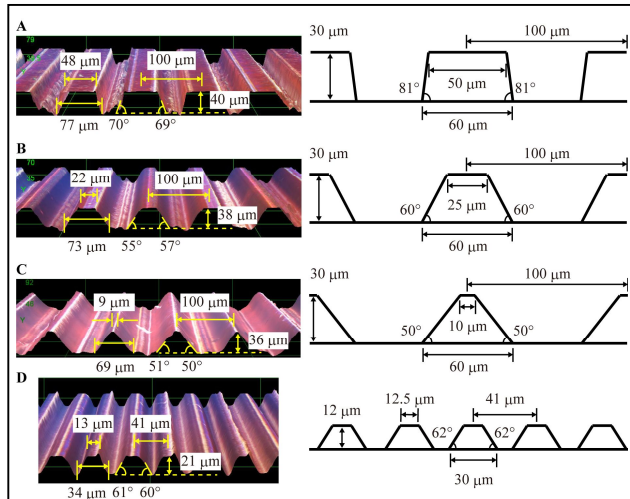


図3 製作したリブレットの表面形状と設計[2]。

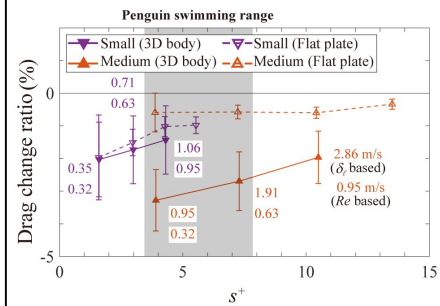


図4 紡錘体での抵抗低減率。

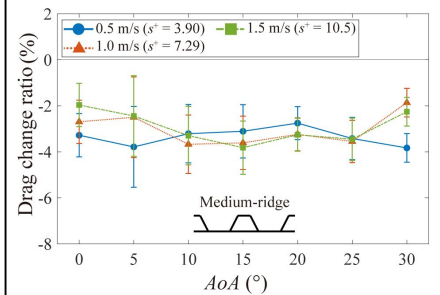


図4 紡錘体での抵抗低減率。

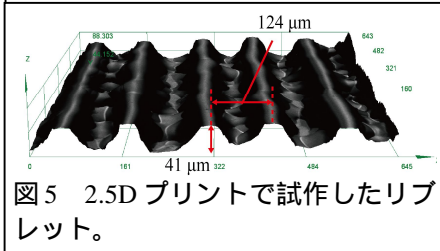


図5 2.5D プリントで試作したリブレット。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Saito Ryosuke, Yamasaki Takeshi, Tanaka Hiroto	4. 巻 17
2. 論文標題 Fluid drag reduction by penguin-mimetic laser-ablated riblets with yaw angles	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Bioinspiration & Biomimetics	6. 最初と最後の頁 056010-056010
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1088/1748-3190/ac7f71	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 田中博人	4. 巻 40
2. 論文標題 遊泳生物のリブレット構造の流体摩擦低減効果と模倣	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 ながれ：日本流体力学会誌	6. 最初と最後の頁 279-284
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

〔学会発表〕 計7件（うち招待講演 1件/うち国際学会 2件）

1. 発表者名 齋藤遼輔, 田中博人
2. 発表標題 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
3. 学会等名 日本機械学会第100期流体工学部門講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Ryosuke Saito, Takeshi Yamasaki, Hiroto Tanaka
2. 発表標題 Drag reduction effect of penguin-feather-mimetic riblets under variation in flow direction
3. 学会等名 SEB Annual Conference 2022（国際学会）
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 齋藤遼輔, 山崎剛史, 田中博人
2. 発表標題 ペンギンの羽を模したリプレットのヨー角に対する摩擦抗力低減効果
3. 学会等名 日本機械学会第 99 期流体工学部門講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 田中博人
2. 発表標題 ペンギン遊泳のバイオミメティクス
3. 学会等名 NBCIテクノロジー委員会バイオミメティクス分科会講演会（招待講演）
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 佐山将太郎, 加藤弘一, 香月政徳, 川嶋保宏, 亀井稔人, 田中博人
2. 発表標題 ホホジロザメ (Carcharodon Carcharias) の楯鱗を模倣したリプレットの流速の変化に対するロバスト性
3. 学会等名 日本機械学会第98 期流体工学部門講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 佐山将太郎, 加藤弘一, 香月政徳, 畑中伸一, 亀井稔人, 田中博人
2. 発表標題 ホホジロザメ (Carcharodon Carcharias) の楯鱗を模倣した2.5Dプリントリプレットの抗力低減率の計測
3. 学会等名 日本機械学会第100期流体工学部門講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Shotaro Sayama, Koichi Kato, Masanori Katsuki, Yasuhiro Kawashima, Toshihito Kamei, Masahito Natsuhara, Hiroto Tanaka
2. 発表標題 Shark-inspired high-low alternating riblets by inkjet printing of UV-curable ink
3. 学会等名 75th Annual Meeting of the APS Division of Fluid Dynamics (APS DFD 2022) (国際学会)
4. 発表年 2022年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

田中博人研究室: Research http://www.tanakah.mech.e.titech.ac.jp/page2.html 東工大ニュース: ペンギンの体表は流体摩擦抵抗を低減 https://www.titech.ac.jp/news/2022/064696

6. 研究組織		
氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------