

論文 / 著書情報  
Article / Book Information

論題(和文)	柔軟な風切羽を持つクイナ模倣翼の空力特性計測
Title(English)	Measurement of aerodynamic characteristics of rail-mimetic wings with flexible flight feathers
著者(和文)	小林航己, 山崎剛史, 中田敏是, 田中博人
Authors(English)	Kazuki Kobayashi, Takeshi Yamasaki, Toshiyuki Nakata, Hiroto Tanaka
出典(和文)	第49回エアロ・アクアバイオメカニズム学会講演会資料, , pp. 10–11
Citation(English)	, , pp. 10–11
発行日 / Pub. date	2025, 3

## 柔軟な風切羽を持つクイナ模倣翼の空力特性計測

### Measurement of aerodynamic characteristics of rail-mimetic wings with flexible flight feathers

○小林航己 (東京科学大学), 山崎剛史 (山階鳥類研究所),  
(正) 中田敏是 (千葉大学), (正) 田中博人 (東京科学大学)

Kazuki KOBAYASHI, School of Engineering, Institute of Science Tokyo, 2-12-1 Ookayama, Meguro-ku, Tokyo.  
Takeshi YAMASAKI, Yamashina Institute for Ornithology, 115 Konoyama, Abiko, Chiba.  
Toshiyuki NAKATA, Graduate School of Engineering, Chiba University, 1-33 Yayoi-cho, Inage-ku, Chiba.  
Hiroyuki TANAKA, School of Engineering, Institute of Science Tokyo, 2-12-1 Ookayama, Meguro-ku, Tokyo.

Most birds can sustain flight in the air with wings, while some bird species cannot. To understand the cause of the flight capability in birds, we focused on the flexibility of the flight feathers. It was observed that the tips of the flight feathers of the flightless rail bird, Okinawa rail (*Gallirallus okinawae*), were softer than those of the flying rail bird, white-breasted waterhen (*Amaurornis phoenicurus*). In this study, to explore the effect of the flexibility of flight feather tips on steady aerodynamic characteristics of the wings, we fabricated rail-mimetic wings with artificial flexible flight feathers and measured the lift and drag coefficients in a wind tunnel. The results showed that the stiff flight feather tips realized high lift coefficient and high lift-to-drag ratio at any speed. In contrast, the flexible flight feather tips led to the less maximum lift coefficient, less lift-to-drag ratio, and smaller stall angle at high speeds, suggesting that it was not suitable for flight at high speed.

**Key Words:** Bird flight, Biomimetic wing, Flight feather, Wind tunnel experiment

#### 1. 緒言

鳥類には、自力での持続的な飛行が可能な種と不可能な種が存在する。この飛行の可否の違いを生む要因については、風切羽の羽軸の配置<sup>(1)</sup>や羽枝の幾何学的特性(長さおよび角度)<sup>(2)</sup>などが提唱されているが、未だに定説はなく議論が続けられている。本研究では、新たに風切羽の柔軟性に注目し、ツル目クイナ科(Gruiformes Rallidae)の鳥(rail)の中で、飛べる種であるシロハラクイナ(*Amaurornis phoenicurus*)と飛べない種であるヤンバルクイナ(*Gallirallus okinawae*)の翼を比較した。標本の風切羽の柔らかさを調べると、飛べないヤンバルクイナは飛べるシロハラクイナよりも初列風切羽の先端が柔軟で次列風切羽の先端はより顕著に柔軟だった。そこで本研究は、風切羽先端の柔軟性が翼の空力特性に及ぼす影響を実験的に明らかにすることを目的とし、柔軟な人工風切羽で構成された模倣翼を製作し、風洞で揚力と抗力を計測して空力特性の違いを比較した。

#### 2. 方法

**2-1 クイナ模倣翼の製作** 山階鳥類研究所が所蔵するシロハラクイナの翼標本(標本番号 YIO-63229)をもとにクイナ模倣翼を製作した(図1)。翼長は218 mm、翼面積は22109 mm<sup>2</sup>、アスペクト比は約4.3である。基部および風切羽の羽軸は、熱溶解積層方式の3Dプリンタ(Ultimaker S3, Ultimaker B.V.)で製作した。基部の材料は、Tough PLA (Polylactic acid)

(Tough PLA Black, Ultimaker B.V.)とした。羽軸の材料は、PETCF (Carbon fiber reinforced polyethylene terephthalate) (3F PET-CF 9780 BK, Lehmann & Voss & Co. KG.)を基本とし、比較用の翼の一部にはCPE+ (Chlorinated polyethylene) (CPE+ Black, Ultimaker B.V.)も使用した。風切羽の羽弁と雨覆は、厚さ50 μmのポリイミドフィルム(カプトン200H, 東レ・デュポン)を紫外線レーザー加工機(OLMUV-355-7W-K, OPI)で切り出して製作した。

風切羽先端の柔軟性の異なる3種類の翼を製作した。形状は全て同一であり、羽軸先端の有無および材料を変えた(図2)。羽軸先端が硬い翼を基準翼(Standard wing)、羽軸先端を柔軟なCPE+に変えた翼を柔軟先端翼(Soft-tip wing)、羽軸先端を無くした翼を先端無し翼(Tipless wing)とする。基準

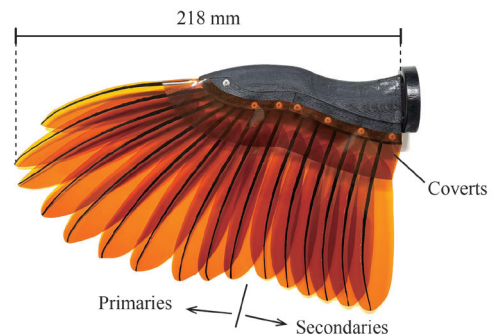


Fig. 1 Top view of the fabricated rail-mimetic wing.

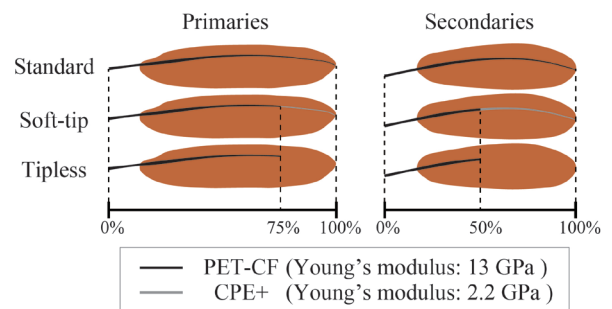


Fig. 2 Design of the artificial flight feathers with three different flexibilities.

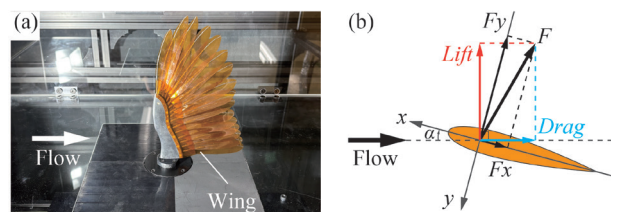


Fig. 3 (a) Wing fixed in wind tunnel. (b) Schematic of the measured aerodynamic forces viewed in the spanwise direction.

翼は飛べるシロハラクイナを、他2つの翼は飛べないヤンバルクイナを想定した。

**2-2 風洞実験** 風洞内でクイナ模倣翼を3分力計(LMC-3501A-20A, 日章電機株式会社)に立てて固定し、2方向の空気力 $F_x, F_y$ を計測した(図3)。分力計は電動回転ステージ(RMWG100C, ミスミ)上に設置して迎角を可変とし、 $F_x$ と $F_y$ の計測値と回転角から揚力と抗力を算出した。分力計の値は、直流型歪増幅器(DSA-100A, 日章電機株式会社)で増幅してカットオフ周波数3 Hzのローパスフィルタをかけて出力し、DAQ(USB-2404-10, Measurement Computing Corporation)を介してPCで取得した。サンプリングレートは2000 Hzとし5秒間の平均値をとった。風速は、鳩の滑空飛行時の速度<sup>(3)</sup>を参考に、10 m/s, 12 m/s, 14 m/s, 16 m/sとした。各風速において翼の迎角を $-46^\circ$ から $46^\circ$ まで変えた。

### 3. 結果と考察

**3-1 揚力係数と抗力係数** 揚力係数および抗力係数を図4に示す。迎角が正の範囲の時、風速10 m/sでは柔軟先端翼の最大揚力係数が基準翼よりわずかに大きく、失速角は基準翼と柔軟先端翼でほぼ等しかった。風速が大きいほど、柔軟先端翼の最大揚力係数は低下したが、基準翼は0.8程度の値を保持した。失速角は、基準翼が柔軟先端翼より大きくなった。迎角が負の場合、どの風速でも揚力係数の絶対値は基準翼が柔軟先端翼より大きかった。先端無し翼については、どの場合においても他の翼と比較して揚力係数の絶対値が小さくなった。これらの結果より、風切羽先端が柔軟だと、高速時に揚力係数の絶対値が小さく失速角も小さく、飛行に適さないことが分かった。一方で、風切羽先端が硬いと、高速時でも低速時と同程度の揚力を生成できた。また、風切羽先端が硬い場合は迎角が負でも生成する揚力が大きかった。

**3-2 揚抗比** 最大揚抗比を表1に示す。揚抗比は、揚力係数の抗力係数に対する比であり、定常滑空飛行では滑空比(単位高度あたりに滑空できる水平距離)と等しい<sup>(4)</sup>。風速が10, 12, 14 m/sの時は柔軟先端翼の最大揚抗比が基準翼より大きかった。しかし、風速が16 m/sの時は基準翼の最大揚抗比が柔軟先端翼よりも大きくなった。先端無し翼は風速の増加とともに、最大揚抗比が低下した。これらの結果より、低速時には風切羽先端が柔軟である方が滑空に適しているが、高速時には風切羽先端が硬い方が滑空に適していることが示唆された。

### 4. 結言

本研究では、シロハラクイナを模倣した基準翼、柔軟先端翼、先端無し翼の3種類の翼を製作し、風洞実験で定常流中の揚力係数と抗力係数および揚抗比が風切羽先端の柔軟性によってどう変化するか調査した。その結果、風切羽先端が硬い場合、低速時でも高速時でも最大揚力係数と揚抗比が大きく、飛行に適している可能性が示唆された。風切羽先端が柔軟な場合、高速時に最大揚力係数と失速角そして揚抗比が小さくなり、飛行には適さないことが示唆された。

### 謝辞

本研究はJSPS 科研費24K21277の助成を受けたものです。

### 参考文献

- (1) A. Feduccia, H. B. Tordoff, Feathers of *Archaeopteryx*: Asymmetric Vanes of Indicate Aerodynamic Function, *Science*, Vol.203, No.4384 (1979), pp. 1021–1022.
- (2) T. J. Feo *et al.*, Barb geometry of asymmetrical feathers reveals a transitional morphology in the evolution of avian flight, *Proceedings of the Royal Society B*, Vol. 282, No. 1803 (2015).
- (3) C. J. Pennycuik, A wind-tunnel study of gliding flight in the pigeon *Columba livia*, *Journal of Experimental Biology*, Vol.

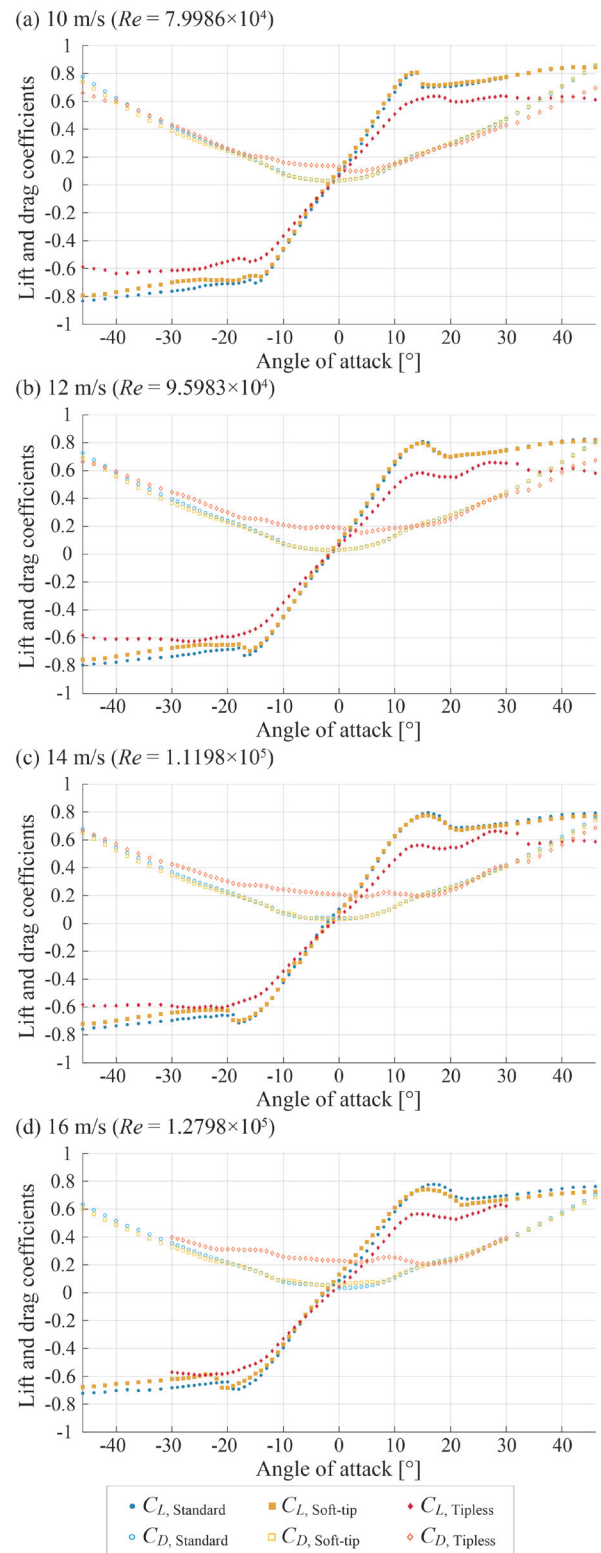


Fig. 4 Lift and drag coefficients.

Table 1 Maximum lift-to-drag ratio.

Flow velocity [m/s]	10	12	14	16
Standard wing	6.1	6.2	6.5	6.6
Soft-tip wing	6.3	6.4	6.7	6.4
Tipless wing	3.5	2.9	2.8	2.7

49, No. 3 (1968), pp. 509–526.

- (4) 東昭, 生物の動きの事典, 朝倉書店 (1997).