

論文 / 著書情報  
Article / Book Information

論題(和文)	ハチドリを模倣した小型羽ばたき飛翔体における高性能弾性翼の研究
Title(English)	Study of high-performance elastic wings for hummingbird-inspired flapping-wing aerial vehicles
著者(和文)	相澤誠浩, 田中博人, 山崎剛史
Authors(English)	Masahiro Aizawa, Hiroto Tanaka, Takeshi Yamasaki
出典(和文)	バイオフィロントニア講演会講演論文集, , ,
Citation(English)	The Proceedings of the JSME Conference on Frontiers in Bioengineering, , ,
発行日 / Pub. date	2018, 10

## Study of high-performance elastic wings for hummingbird-inspired flapping-wing aerial vehicles

○学 相澤 誠浩<sup>\*1</sup>, 正 田中 博人<sup>\*1</sup>, 山崎 剛史<sup>\*2</sup>Masahiro AIZAWA<sup>\*1</sup>, Hiroto TANAKA<sup>\*1</sup>, Takeshi Yamasaki<sup>\*2</sup><sup>\*1</sup> 東京工業大学 Tokyo Institute of Technology<sup>\*2</sup> 山階鳥類研究所 Yamashina Institute for Ornithology**Key Words** : Hummingbird, MAV (Micro Aerial Vehicle), Flexural stiffness, Feathering, Flapping

## 1. 緒 言

ハチドリは最大の種でも 20 g と軽量で、持続的なホバリングや乱れた気流中での安定飛行などの優れた飛行能力で知られる。ハチドリの羽ばたき飛行の軽量性と飛行性能を将来の飛行ドローンに応用できれば入り組んだ環境や人口密集地域での利用が可能になると考えられる。しかし、現在の羽ばたき翼飛行体はペイロード比が小さく、揚力や効率は実用化には不十分である。羽ばたき時に弾性変形する柔らかさが、ハチドリの羽ばたき飛行に活用されていると考えられているが<sup>(1)</sup>、羽の剛性と翼性能の関係は不明な点が多い。鳥の翼は複数の風切羽で構成され、風切羽は羽軸と羽弁で構成されている<sup>(2)</sup>。本研究では、ハチドリの翼の主な支持構造体である羽軸の曲げ剛性分布を基にした「模倣翼」と、同じ質量で各羽の羽軸太さが一様の「一様翼」を製作し、電動機構でハチドリと同様に羽ばたかせて、変形と翼性能の関係を調べた。両人工翼を比較する事で、ハチドリの剛性分布の効果を明らかにした。

## 2. 人工翼の製作

人工翼は、CFRP(素繊維強化プラスチック)の人工羽軸をフィルムの翼膜に接着して製作した。翼膜には、厚さ 7.5  $\mu\text{m}$  のポリイミドフィルムを用いた。人工羽軸は、厚さ 200  $\mu\text{m}$  の CFRP 板を紫外線レーザー加工機で切り出して製作した。翼の外形は、チャムネエメラルドハチドリ (*Amazilia amazilia*) を規範として翼長 70 mm, 最大翼弦長 27 mm の楕円翼とした。このハチドリの羽軸の曲げ剛性  $EI$  [ $\text{Nm}^2$ ]は、標本を用いた静的曲げ試験の結果、羽軸の先端からの距離を  $x$  [ $\text{mm}$ ]とすると、

$$EI = 2.0 \times 10^{-9} x^{2.65} \quad (1)$$

で表される指数関数に近似できた<sup>(3)</sup>。式(1)に基づいて羽軸幅が先細りになるように設計した「模倣翼」と、模倣翼と同じ質量で各羽軸幅が一定の「一様翼」を製作した。ただし、人工羽軸の最小幅は、製作中の破損を防ぐため 100  $\mu\text{m}$  に制限した。製作した人工翼を図 1(a)(b)に示す。羽ばたき軸回りの慣性モーメントは、一様翼が  $1.53 \times 10^{-7} \text{kgm}^2$  であるのに対して、模倣翼は羽軸の先細り形状のため  $1.05 \times 10^{-7} \text{kgm}^2$  と約 0.68 倍に小さくなった。3次元運動解析の為の特徴点は、根元から 0 mm, 20 mm, 40 mm, 60 mm における前後縁と、翼端の 70 mm とした。

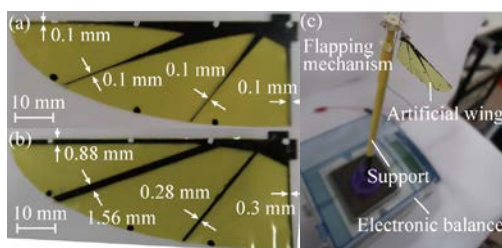


Figure 1. Flapping-wing experiment. (a) Fabricated Mimic wing. (b) Simple wing. (c) Setup for lift measurement using electric flapping mechanism.

### 3. 羽ばたき試験

#### 3・1 計測方法

製作した翼モデル1枚を、1自由度の羽ばたきを行う電動羽ばたき機<sup>(4)</sup>に取り付け、電子天秤と直流安定化電源を用いて羽ばたき時の平均推力・電流・電圧を計測した(図1(c))。性能評価の指標として、平均推力と推力発生効率(単位消費電力あたりの平均推力、以下、効率と呼称する)を算出した。羽ばたき振幅の設計値と羽ばたき周波数は、チャムネエメラルドハチドリと同じ110°、30Hz<sup>(5)</sup>で計測を行った。周波数は電源の出力電圧値によって周波数を調整した。フェザリング方向の運動は制御されていないが、V字ストッパーにより運動を±15°に制限した。3台の高速度カメラで同期撮影し、翼の3次元運動解析を行った。

#### 3・2 平均推力と効率

各人工翼の平均推力と効率を表1に示す。模倣翼の平均推力は一様翼の176%で、効率は170%だった。この結果より、ハチドリと同じ大きさの羽ばたき翼を設計する場合、曲げ剛性分布を一樣にするより、ハチドリの曲げ剛性分布を再現する方が高い推力・効率を得られる事が分かった。模倣翼を2枚で羽ばたかせることを想定して推力値を2倍すると92mNとなる。チャムネエメラルドハチドリの体重は53mN<sup>(4)</sup>であり、想定推力は体重の約1.7倍に相当する。

#### 3・3 3次元運動解析

羽ばたき時の翼の位置データより、ポジショナル角 $\phi$ 、バンディング角 $\beta$ 、フェザリング角 $\theta$ 、迎え角 $\alpha$ を計算した。それぞれの角度の定義を図2に示す。また、各人工翼の1羽ばたきにおける角度データは図3のように得られた。

Table 1. Average thrust and efficacy of each artificial wing

	Mimic wing	Simple wing
Frequency [Hz]	30.8	30.8
Average thrust [mN]	46.0 (SD = 0.21)	26.2 (SD = 0.36)
Power consumption [W]	2.95	2.86
Efficacy [mN/W]	15.6 (SD = 0.05)	9.18 (SD = 0.14)

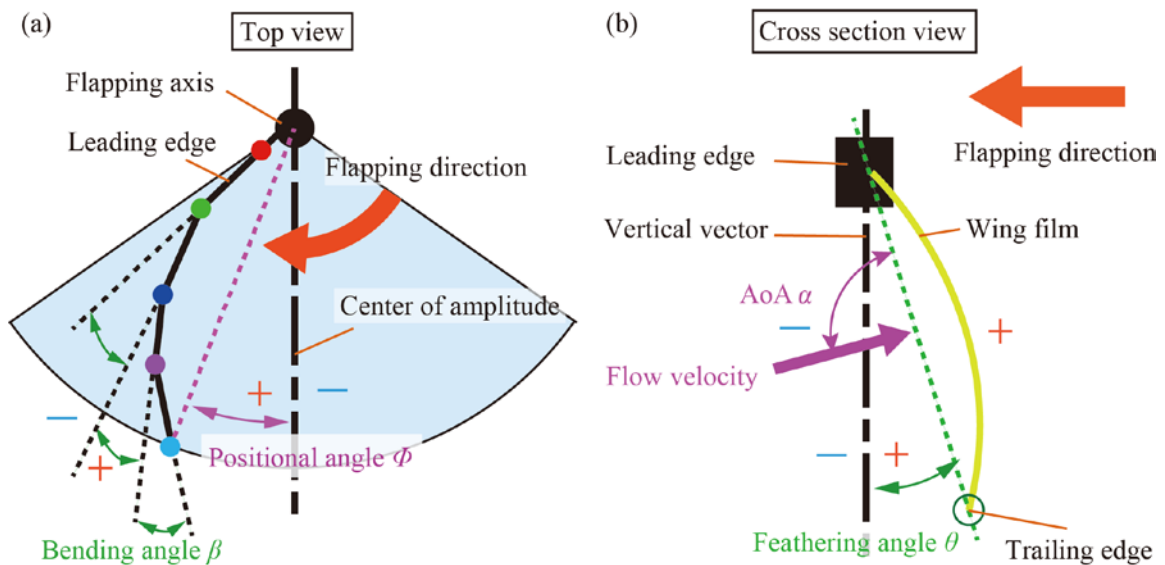


Figure 2. Definition of kinematic parameters. (a) Positional and bending angle. (b) Feathering angle and angle of attack.

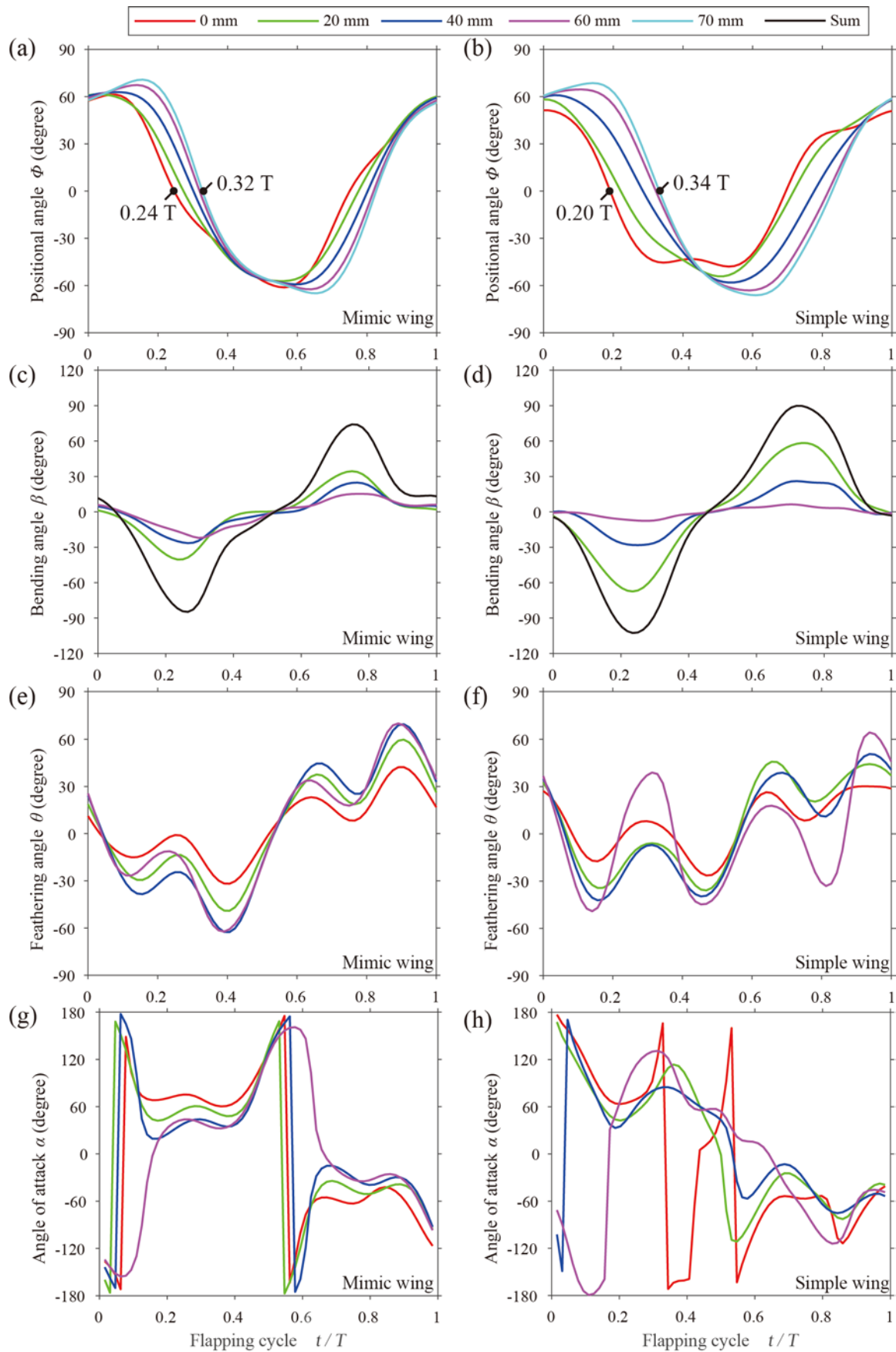


Figure 4. Measured wing motions. (a, b) Positional angle. (c, d) Bending angle. (e, f) Feathering angle. (g, h) Angle of attack. Left column is for Mimic wing, and right column is for Simple wing

ポジショナル角が  $0^\circ$  を通る時刻は、根元は一樣翼の方が早く、先端は模倣翼の方が早い(図 4(a, b))。ベンディング角は両翼共に先端より根元の方が曲がっている(図 4(c, d))。模倣翼はそれぞれの差が小さく、一樣翼は根元の曲げが小さく先端の曲げが大きい。これらの原因は、模倣翼より一樣翼の方が、曲げ剛性と慣性モーメントが根元で小さく先端で大きい為と考えられる。ハチドリ羽の曲げ剛性分布は、各羽の根元を太く、先端を細くする事で、慣性モーメントを減少させると共に根元の剛性を高め、翼全体を同程度に変形させるのだと考えられる。

模倣翼のフェザリング角は、ストローク終盤に 40 mm と 60 mm の翼弦で最大約  $60^\circ$  を取る(図 4(e))。一樣翼では、ストローク初期または終盤に最大約  $45^\circ$  を取る(図 4(f))。さらに、ストローク中盤には 60 mm の翼弦が羽ばたきに逆らった変形を生じている。鳥のフェザリング運動は羽ばたき中の迎え角を一定に保つ為とされている<sup>6)</sup>。模倣翼の迎え角は、ストローク中盤から終盤にかけてほぼ一定の値を取っており、根元からそれぞれ  $69^\circ$ ,  $52^\circ$ ,  $35^\circ$ ,  $22^\circ$  である(図 4(g))。一樣翼ではこのような効果は見られない(図 4(h))。従って、ハチドリ羽の曲げ剛性分布には、羽ばたき中の迎え角を一定に保つ効果があることが示唆された。

#### 4. 結 語

本研究では、ハチドリ羽の曲げ剛性分布を模倣した翼と、一樣な分布をした翼を製作した。製作した人工翼を電動機構で羽ばたかせ、変形と翼性能の関係を評価した。その結果、ハチドリ羽の剛性分布を模倣する事で、高い推力と効率得られる事が分かった。また、ハチドリ羽の曲げ剛性分布は、羽ばたき中の翼全体の変形を同程度にし、迎え角を一定に保つ効果があることが示唆された。

#### 文 献

- (1) H. Tanaka, H. Suzuki, I. Kitamura, M. Maeda, H. Liu., "Lift generation of hummingbird wing models with flexible loosened membranes", IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS), pp. 3777-83, 2013
- (2) フランク・B. ギル, 鳥類学, 新樹社, 2009
- (3) 相澤誠浩, 前田将輝, 山崎剛史, 田中博人, "ハチドリ羽の弾性羽ばたき翼の空気力学的性能の研究", 第 35 回ロボット学会, 2017
- (4) 北村郁生, 田中博人, 前田将輝, 劉浩, "ハチドリを規範とした羽ばたき装置の空気力学的性能評価", 第 27 回バイオエンジニアリング講演会, pp. 353-354, 2015
- (5) M. Maeda, T. Nakata, I. Kitamura, H. Tanaka, H. Liu., "Quantifying the dynamic wing morphing of hovering hummingbird", R. Soc. Open Sci. 4: 170307.
- (6) エアロ・アクアバイオメカニクス研究会, エアロアクアバイオメカニクス, 森北出版, 2010