

論文 / 著書情報  
Article / Book Information

論題(和文)	柔軟なハチドリ規範型羽ばたき翼の流れ場のPIVによる可視化
Title(English)	Flow visualization around hummingbird-inspired flexible flapping wings by PIV
著者(和文)	藤井智矢, 田中博人
Authors(English)	Tomoya Fujii, Hiroto Tanaka
出典(和文)	日本機械学会関東支部第28期総会・講演会予稿集, , ,
Citation(English)	, , ,
発行日 / Pub. date	2022, 3

## 柔軟なハチドリ規範型羽ばたき翼の流れ場のPIVによる可視化

## Flow visualization around hummingbird-inspired flexible flapping wings by PIV

○学 藤井 智矢<sup>\*1</sup>, 正 田中 博人<sup>\*1</sup>Tomoya FUJII<sup>\*1</sup>, Hiroto TANAKA<sup>\*1</sup>,<sup>\*1</sup> 東京工業大学 Tokyo Institute of Technology

Flapping wings are expected to be beneficial to small flying robots in terms of the large lift with large angle of attack in low Reynolds number flow. We are focusing on hummingbirds which are the only birds capable of sustained hovering flight, and are conducting research toward the realization of small flying objects that imitate them. Although the wing flexibility can improve the aerodynamic lift and efficiency, resultant flow field around the flexible flapping wings have not been fully understood yet. Here, we created two types of hummingbird-mimetic wings and compared their lift, efficiency, and flow field by means of an electric flapping mechanism and PIV (particle image velocimetry). The design difference between the two wings was the number of wing shafts: one has four shafts and the other had eight shafts. The flow field on the wing cross sections near the mid-stroke was two-dimensionally visualized at the flapping frequency of 20 Hz. As a result, the leading-edge vortex was found to be attached to the 4-shafts wing at distal region, producing notable downwash. The efficiency of the 4-shafts wing was better than that of the 8-shafts wing while the lifts are similar to each other.

**Keywords:** Hummingbird, Biomimetic wing, Wing flexibility, PIV, Leading edge vortex

## 1. 結 言

ハチドリは持続的にホバリングできる唯一の鳥類であり、急加速や急旋回も可能な優れた飛翔能力を有する。これを可能としているのが柔らかく受動変形する羽ばたき翼である。現在研究されているハチドリ規範型飛翔体においても受動変形する翼を採用しているものが多い<sup>(1)(2)</sup>が、いずれも経験的な設計によるもので、羽ばたき時の翼変形を決める翼面内の剛性分布を考慮して製作された翼は少ない。スズメガのホバリングの数値流体計算研究では、翼の適切なねじれ変形と反り変形が揚力の発生効率を向上させ、曲げ変形が揚力の大きさを大きくすることが明らかにされた<sup>(3)</sup>。しかし実験的に異なる剛性分布の羽ばたき翼の性能と流れ場が比較された例はほとんどない。そこで本研究は、ハチドリの風切羽の剛性を模倣して人工翼を製作し、羽ばたき機で平均揚力と効率を計測し、さらに2次元2成分の時系列PIV (particle image velocimetry) で流れ場を可視化した。人工羽軸の本数が異なる2種類の翼を比較し、模倣時の単純化が揚力と効率および流れ場にどのような影響を及ぼすかを調べた。

## 2. 人工翼の設計と製作

## 2・1 人工翼の基本構造

本研究の人工翼は、翼膜、羽軸、骨、及び羽ばたき機構への取り付け部から構成される (図 1 (a))。翼膜には厚さ 12.5  $\mu\text{m}$  のポリイミドフィルム (カプトン, 東レ・デュボン, 日本) を使用し、羽軸は根元から先端にかけて薄くなるように厚さ 50  $\mu\text{m}$  のポリイミドフィルムを段階的に積層して製作した。フィルム同士の接着には厚さ 13  $\mu\text{m}$  の FR シート接着剤 (Pyralux FR1500, DuPont, USA. 以下、接着シートと呼ぶ) を使用した。骨には厚さ 250  $\mu\text{m}$  の CFRP プレート (マツカーボンプレート綾織, Sano Factory, 日本) を厚さ 100  $\mu\text{m}$  の両面テープ (激薄手両面テープ, WAKI, 日本) で貼り付けた。

翼の平面形は、実際のチャムネエメラルドハチドリ (*Amazilia amazilia*) の計測値<sup>(4)</sup>の1.1倍の大きさ (翼長 77 mm, 最大翼弦長 30 mm の楕円翼) とした。羽軸の曲げ剛性は標本を用いた静的曲げ試験の結果<sup>(5)</sup>より、羽軸の先端からの距離を  $x$  [mm] とし、

$$EI = 1.54 \times 10^{-9} x^{2.5} \quad (1)$$

で表される指数関数に近似した。ここで、 $E$  はヤング率 [Pa],  $I$  は断面 2 次モーメント [ $\text{kg}\cdot\text{m}^2$ ] である。実際のハチドリは 15 本の羽軸を持つが、今回は図 1 のように 4 本の羽軸、または 8 本の羽軸に集約した (図 1 (b)). 曲げ剛性を模倣するため、羽軸の幅は曲線的にテーパをつけ、厚さもポリイミドフィルムの積層枚数を段階的に増やして多段構造にすることで、羽軸断面ができるだけ正方形になるように設計した。ただし、設計の都合上、積層枚数は 2 から 11 枚に制限し、羽軸先端は最小幅  $100 \mu\text{m}$  とした。

## 2・2 製作

翼モデルは上村らの手法<sup>6)</sup>を参考に、微細レーザ加工機で高精度に切り出したフィルムを積層させて製作した。図 2 にその手順を示す。まず始めに羽軸の多段構造を作成するために、フィルムを 1 枚ずつ多段になるように位置合わせ用の穴も併せてレーザ加工で切り出し、位置合わせ用の穴を使って全てのフィルムを接着シートと交互に積層し、熱プレスで接着する。その後、羽軸部分をレーザ加工で切り出し、接着シートを介して翼膜に重ねて再び熱プレスして接着する。接着後に、翼の外形をレーザ加工で切り出す。最後に、両面テープごとレーザで切り出した CFRP 製の骨部を切り出した翼に貼り付けて完成する。なお、実際には 11 層で製作したが、図 2 では見やすさのため 7 層で表している。

完成した 4 本羽軸翼と 8 本羽軸翼の質量はそれぞれ  $0.185 \text{ g}$  と  $0.193 \text{ g}$  となった。PIV 時のレーザ光の反射を抑えるため、翼表面は黒色スプレー塗料 (ブラックガードスプレー FC-153, ファインケミカルジャパン, 日本) で塗装した (図 1 (b)). 塗装後の質量はそれぞれ  $0.212 \text{ g}$  と  $0.218 \text{ g}$  となった。

## 3. 羽ばたき実験

### 3・1 羽ばたき機

製作した人工翼の片翼を羽ばたき機で羽ばたかせ、平均揚力の計測と流れ場の可視化を行った。羽ばたき周波数と羽ばたき振幅は、実際のハチドリの羽ばたき<sup>4)</sup>を参考にて、それぞれ  $20 \text{ Hz}$ ,  $136^\circ$  とした。自由回転するフ

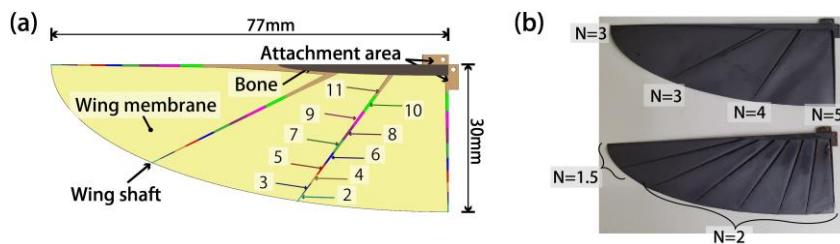


Fig.1 (a) Design of the 4-shafts. (b) Fabricated 4-shafts and 8-shafts wings ( $N$  indicates the number of the representative wing shafts).

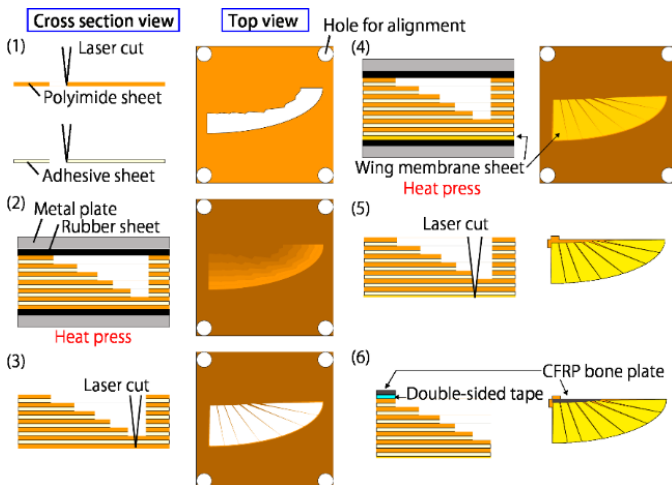


Fig. 2 Process flow

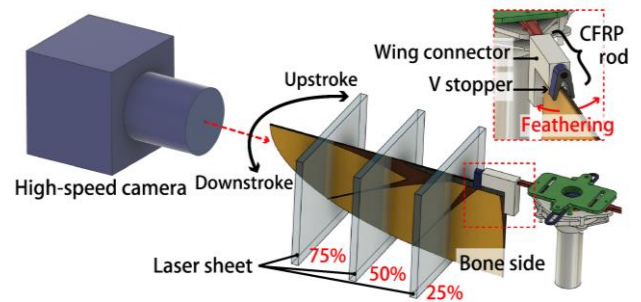


Fig. 3 Target plane and feathering system

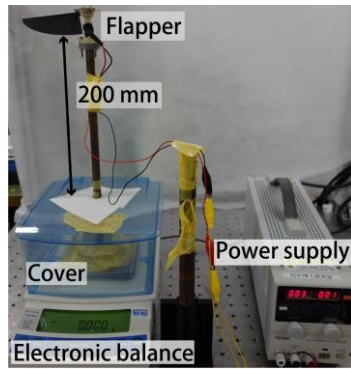


Fig. 4 Lift measurement setup

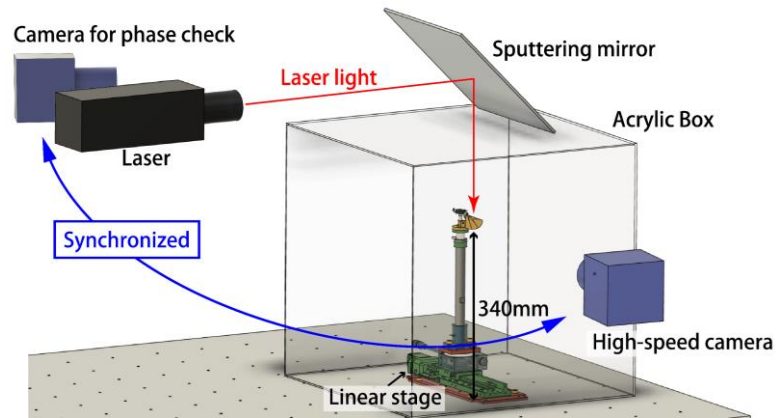


Fig. 5 PIV setup

フェザリングは中立状態から  $\pm 10^\circ$  に制限した。ここでフェザリング角とは、翼の前縁周りの回転角であり、本機構では逆 V 字型のストッパーで制限した (図 3)。機体は、地面効果<sup>(7)</sup>の影響を避けるため、高度が翼の回転半径の 2.5 倍 (200 mm) 以上になるように支柱先端に取り付けた。

### 3・2 揚力と消費電力の計測

平均揚力は、羽ばたき機を精密電子天秤 (UW1020H, 島津製作所, 日本) 上に設置して、静止時と羽ばたき中の表示値の差から算出した。天秤が翼の吹き下ろしによる影響を受けないようにするため、図 4 のように天秤を支柱用穴付きカバーで覆った。消費電力は羽ばたき周波数が 20 Hz になったときの直流安定化電源 (直流安定化電源 PA-B シリーズ, 株式会社テクシオ・テクノロジー, 日本) の設定電圧値と表示電流値から求めた。また、今回の実験では消費電力  $P$  [W] あたりの揚力  $F$  [mN] を効率  $\eta$  [mN/W] と定義し、次式で求めた。

$$\eta = \frac{F}{P} \quad (2)$$

### 3・3 流れ場の可視化と解析方法

ストローク中盤の翼周辺の流れ場を PIV で可視化した。可視化断面の翼幅方向位置は、翼長の 25%, 50%, 75% 位置の 3 箇所である (図 3)。今回使用する翼は翼厚方向に非対称であるため (図 2)、打ち下ろしを翼膜面から骨側の面へのストローク、打ち上げはその逆向きのストロークとして区別し、今回は打ち下ろし時を可視化した。

実験のセットアップを図 5 に示す。シートレーザは、厚さ約 2 mm のグリーンレーザ (PIV Laser G4000, カトウ光研, 日本) で、表面反射鏡を介して翼の前縁から後縁方向に照射した。トレーサには煙粒径  $10 \mu\text{m}$  前後の水溶性グリコール系の粒子を用い、煙発生装置 (PS-2006-K, カトウ光研, 日本) を使用して発生させた。これを、高速度カメラ (Fastcam-MiniAX100, フォトロン, 日本) にマクロレンズ (AF-S VR Micro-Nikkor 105mm f/2.8G IF-ED, ニコン, 日本) を装着して、撮影速度 12500 fps, 解像度  $640 \text{ pixels} \times 480 \text{ pixels}$ , 視野  $68 \text{ mm} \times 51 \text{ mm}$  で撮影した。この時、翼の位置を観察するために、同様の高速度カメラで鏡越しに同期撮影した。可視化位置は、機体を電動並進ステージ (XCVL6200-2-1-F-N, ミスミ, 日本) で動かして調整した。

解析には市販 PIV ソフト (FlowExpert2D2C, カトウ光研, 日本) を用いた。直接相互相関法を用い、検査領域を  $16 \text{ pixels} \times 16 \text{ pixels}$ , 探査領域を  $20 \text{ pixels} \times 20 \text{ pixels}$  として計算した。カメラから見た渦度と、翼から見た流線を可視化した。翼から見た相対流速は、流速ベクトルから翼の並進速度ベクトルを差し引いて算出した。翼の並進速度は、翼前縁の 1 フレーム間 ( $1/12500 \text{ s}$ ) の移動距離から求めた。翼長  $x\%$  位置 ( $x=25, 50, 75$ ) でのレイノルズ数  $Re_x$  は、先ほど求めた翼速度  $U_x$  [m/s] と翼弦長  $L_x$  [m], 室温  $20^\circ\text{C}$  での動粘性係数 ( $\nu_{T=20^\circ\text{C}} = 15.14 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ ) として次式で求めた。

$$Re_x = \frac{U_x L_x}{\nu_{T=20^\circ\text{C}}} \quad (3)$$

Table 1 Results of lift measurement test

Number of wing shafts	Lift, F [mN]	Power, P [W]	Efficacy, $\eta$ [mN/W]
4	64.2	2.37	27.1
8	62.2	2.64	23.6

## 4. 結果と考察

### 4・1 揚力計測と効率の結果

20Hzで羽ばたかせた時の揚力, 消費電力, 効率等は表 1 のようになった. チャムネエメラルドハチドリの体重は約 5.4g エラー! 参照元が見つかりません. なので, ホバリングの際に片翼で体重の半分, つまり 27 mN の揚力を発生させている計算となる. 今回はどちらの翼もその 2 倍以上の揚力を発生させた. また, 4 本羽軸の人工翼の方が 8 本羽軸に対して揚力は 1.03 倍とほぼ同じだったが, 効率は 1.15 倍に向上した.

### 4・2 流れ場計測の結果と考察

図 6 と 図 7 は PIV 解析の結果であり, 上段が渦度, 下段が翼から見た流線を表している. なお, 渦を赤矢印で, 翼後縁付近の流線方向を青矢印で補足した.

まず翼長 50% 位置での流れ場について考察する. 渦度を見ると 4 本羽軸翼, 8 本羽軸翼ともに翼面上に分裂した渦が見られた (図 6(a, c)). 流線を見ると, 4 本羽軸翼では流線が翼上面に沿っており, 後方では斜め下向きで吹き下ろしを示している (図 6(b)). 8 本羽軸翼でも, 翼上面に沿った流線は翼から離れているものの, 後方では斜め下向きの吹き下ろしと思われる流線が見られた (図 6(d)). この違いは, 4 本羽軸翼の迎え角が約  $39^\circ$  に対して, 8 本羽軸翼では約  $56^\circ$  と大きかったためだと考えられる.

翼根に近い 25% 位置では, どちらの翼でも前縁渦が翼上面に付着しており (図 7(a, c)), 流線も翼上面には沿っている (図 7(b, d)). 後方では 8 本羽軸翼では流線が斜め下向きで吹き下ろしを示しているのに対して (図 7(d)), 4 本羽軸翼では流線は横向きで吹き下ろしは無い (図 7(e)). これは吹き下ろしが形成されている途中段階であるからで, この直後に出発渦が後縁から離れ翼後方でも吹き下ろしが確認された.

翼端に近い 75% 位置においては, どちらの翼も上面に連続した渦放出が見られた (図 7(e, g)). 翼後方の流線を見ると 4 本羽軸翼では斜め下向きの吹き下ろしが見られたが (図 7(f)), 8 本羽軸翼では見られなかった (図 7(g)). これは, 4 本羽軸翼の迎え角が約  $34^\circ$  に対して, 8 本羽軸翼では約  $59^\circ$  と過大で流れが剥離したためだと考えられる. さらに, 4 本羽軸翼では, 翼断面のキャンバー (反り) により圧力変化が緩やかになり剥離点がより後縁側に遠ざけられ<sup>3)</sup>, 剥離を防がれた可能性がある. よって, 流速の大きい翼端部では 4 本羽軸翼の方が 8 本羽軸翼よりも大きな揚力を発生していると考えられる.

翼変形について, ホバリング中のチャムネエメラルドハチドリのダウンストローク中盤の翼断面<sup>4)</sup>と比較すると, 各断面の迎え角は 4 本羽軸翼が実際のハチドリの迎え角と近く, 8 本羽軸翼では実際の迎え角よりかなり大きくなった. 4 本羽軸翼で迎え角が小さくなったのは, 翼膜面積に対してそれを支える羽軸の本数が少ない分, 翼膜部分のねじれが大きくなったからだと考えられる. 一方キャンバーに関しては, 4 本羽軸翼は実際のハチドリよりも大きなキャンバーを形成している. これも, 4 本羽軸翼の間隔の広い各翼膜が膨らんだためと思われる. 実際, 図 6(a), 7(a) を見ると, 羽軸で区切られた翼膜が不連続に反っている. 逆に 8 本羽軸翼では, 羽軸で隔てられた各翼膜は狭いため, キャンバーはほとんど形成されておらず, 幅方向の翼面のねじれも小さかった. 従って, 8 本羽軸翼で, 翼膜に伸長しやすい素材を使用するか, たるみを持たせて製作すれば, 翼全体が適切にねじれ, 適度なキャンバーも形成されるのではないかと期待できる.

## 5. 結 言

本研究では, ハチドリを規範とした 2 種類の人工翼が形成する流れ場が, 揚力と効率にどのような影響をもたらすのかを PIV 法を用いて可視化することで比較した. その結果, 流速の大きい翼端でも小さな迎え角と大き

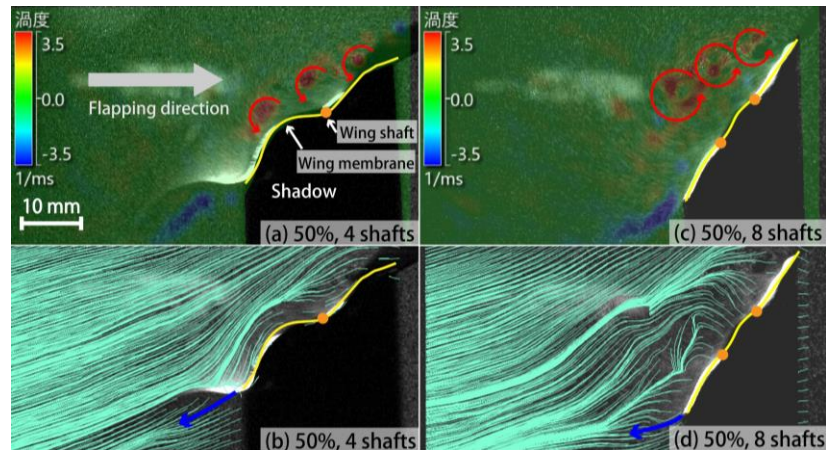


Fig.6 Vorticity of the world coordinate and streamlines at 50% wing length on the wing coordinate for the 4-shafts wing (a, b) and 8-shafts wing (c, d), respectively ( $Re = 1.8 \times 10^4$ ).

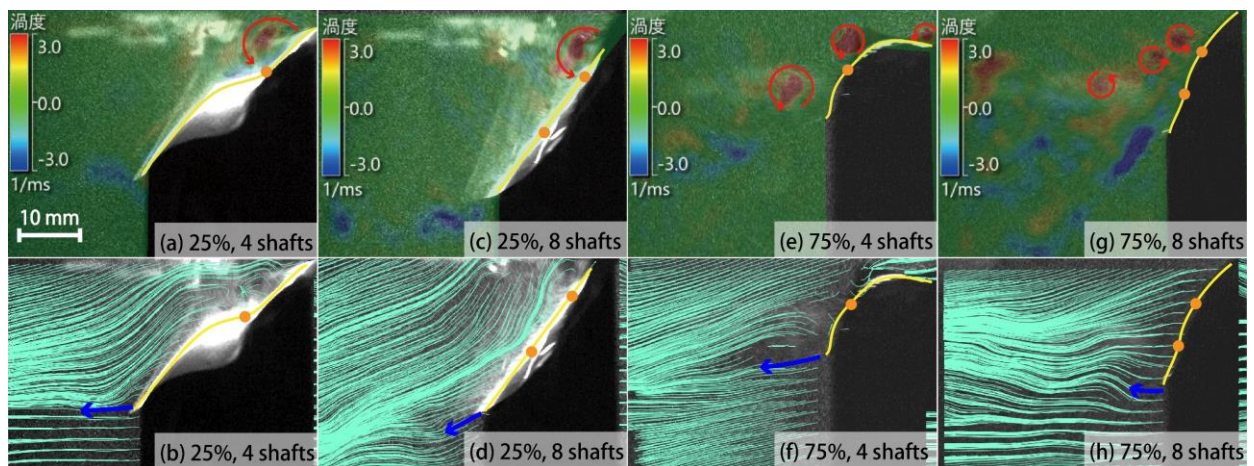


Fig.7 Vorticity on the world coordinate and streamlines on the wing coordinate system. The 4-shafts wing (a, b) and 8-shafts wing (c, d) at 25% wing length ( $Re = 1.3 \times 10^4$ ), respectively. The 4-shafts wing (e, f) and 8-shafts wing (g, h) at 75% wing length ( $Re = 2.0 \times 10^4$ ), respectively.

なキャンバーで渦を保持できる 4 本羽軸翼の方が効率において優れていた。また、羽軸間の翼膜の膨らみが、翼全体のねじれとキャンバーに影響することが示され、羽軸間隔と羽軸剛性の設計によって適切な変形が実現できることが示唆された。

## 文 献

- (1) Prasetiyo Radius Bhayu, Q. Nguyen, H. Park, N. Goo, D. Byun, "Artificial Cambered-Wing for a Beetle-Mimicking Flapper," *Journal of Bionic Engineering*, Vol. 7 (2010), S130-S136.
- (2) Tien Van Truong, Quoc-Viet Nguyen, Heow Pueh Lee, "Bio-Inspired Flexible Flapping Wings with Elastic Deformation," *Aerospace*, Vol.4 (2017), 4030037.
- (3) Toshiyuki Nakata, Ryusuke Noda, Hao Liu, "Effect of twist, camber and spanwise bending on the aerodynamic performance of flapping wings," *Journal of Biomechanical Science and Engineering*, (2018), 17-00618.
- (4) Masateru Maeda, Toshiyuki Nakata, Ikuo Kitamura, Hiroto Tanaka, Hao Liu, "Quantifying the dynamic wing morphing of hovering hummingbird," *Royal Society Open Science, The Royal Society Publishing*, Vol. 4 (2017), 170307.
- (5) 河原暁生, 田中博人, 山崎剛史, "ハチドリ風の風切羽の曲げ剛性分布を規範とした人工羽ばたき翼," 日本機械学会 2018 年度年次大会, (2018), J1510106.
- (6) 上村英隆, 田中博人, "タフで柔軟なハチドリ規範型羽ばたき翼の製作," 第41回エアロ・アクアバイオメカニズム学会講演会, (2020), pp.3-4.
- (7) 東昭, "生物の動きの辞典," 朝倉書店, (1997), p.110.
- (8) Tanaka Hiroto, Haruka Suzuki, Ikuo Kitamura, et al. "Lift generation of hummingbird wing models with flexible loosened membranes." *2013 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, (2013), pp.3777-3783.