

論文 / 著書情報
Article / Book Information

論題(和文)	複数の風切羽で構成されるハチドリ規範羽ばたき翼
Title(English)	Hummingbird-inspired flapping wings composed of multiple flight feathers
著者(和文)	吉田 颯, ダン ジンシャン, 田中 博人
Authors(English)	Hayato Yoshida, Jinqiang Dang, Hiroto Tanaka
出典(和文)	日本機械学会2022年度年次大会予稿集, , ,
Citation(English)	, , ,
発行日 / Pub. date	2022, 9

複数の風切羽で構成されるハチドリ規範羽ばたき翼

Hummingbird-inspired flapping wings composed of multiple flight feathers

○学 吉田 颯^{*1}, ダン ジンシャン^{*1}

正 田中 博人^{*1}

Hayato YOSHIDA^{*1}, Jinqiang DANG^{*1}

Hiroto TANAKA^{*1},

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

Hummingbirds can hover by flapping their wings composed of multiple flight feathers and wings consisting of multiple separate flight feathers are considered robust against collision. However, most of hummingbird-inspired wings developed so far were composed of one membrane and the feathers are not separate. Therefore, in-plane deformation of a hummingbird-inspired wing would be difficult, and the wing would not be easily twisted like a real hummingbird, causing large angle of attack and low efficacy. In this study, we propose a hummingbird-inspired wing composed of multiple separate flight feathers and discuss the difference from one composed of one membrane from the viewpoint of efficacy and angle of attack. First, we fabricated a wing with 8 flight feathers and one composed of one membrane for comparison. Then, we conducted flapping tests for the two wings and measured time-averaged efficacy and angle of attack at 57% wing chord. As a result, there was no difference of time-averaged efficacy between the two wings. However, angle of attack at 57% chord was different between the two wings. A wing with 8 flight feathers maintained lower angle of attack during first half of downstroke and upstroke because of wing twist. However, during last half of each stroke, the angle of attack for a wing with 8 flight feathers was larger. This may be caused by elevation of a wing. By preventing wing elevation, we would be able to realize a wing composed of multiple flight feathers more efficient than one composed of one membrane.

Key Words : Biomimetics, Unmanned aerial vehicle, Soft wing, Aerodynamics

1. 背景と目的

ハチドリは羽ばたき翼で持続的なホバリングを行う鳥として知られる。翼面は多数の風切羽で構成され、風切羽同士は互いにスライドして重なり具合が変化する⁽¹⁾。そうした翼面が分割された構造の可動性によって、効率的に空気力を発生する翼変形が実現される可能性がある。従来研究により、羽ばたきホバリングにおいて、受動的な翼変形は空気力の大きさや発生効率を向上させることが明らかになっている⁽²⁾。しかし、鳥の風切羽のように分離した翼面構造が、単一の翼面構造に対して、受動的変形や空気力発生にどのように影響するのかは未知である。そこで本研究は、ハチドリを規範とした複数の風切羽で構成された人工翼（分離翼）を製作し、1枚の翼面で構成された人工翼（1枚翼）と比較実験を行って、羽ばたき中の翼変形・迎え角・空気力発生効率の違いを調べた。

2. 研究手法

2・1 人工翼の設計・製作

複数の風切羽で構成される人工翼（分離翼）と1枚の膜で構成される人工翼（1枚翼）の設計・製作を行った。製作した2種類の人工翼の写真を図1に示す（ともに右翼を背中側から見たもの）。分離翼の翼外形の設計には、チャムネエメラルドハチドリ（*Amazilia amazilia*）のホバリング中の翼形状データを参考にした⁽¹⁾。チャムネエメ

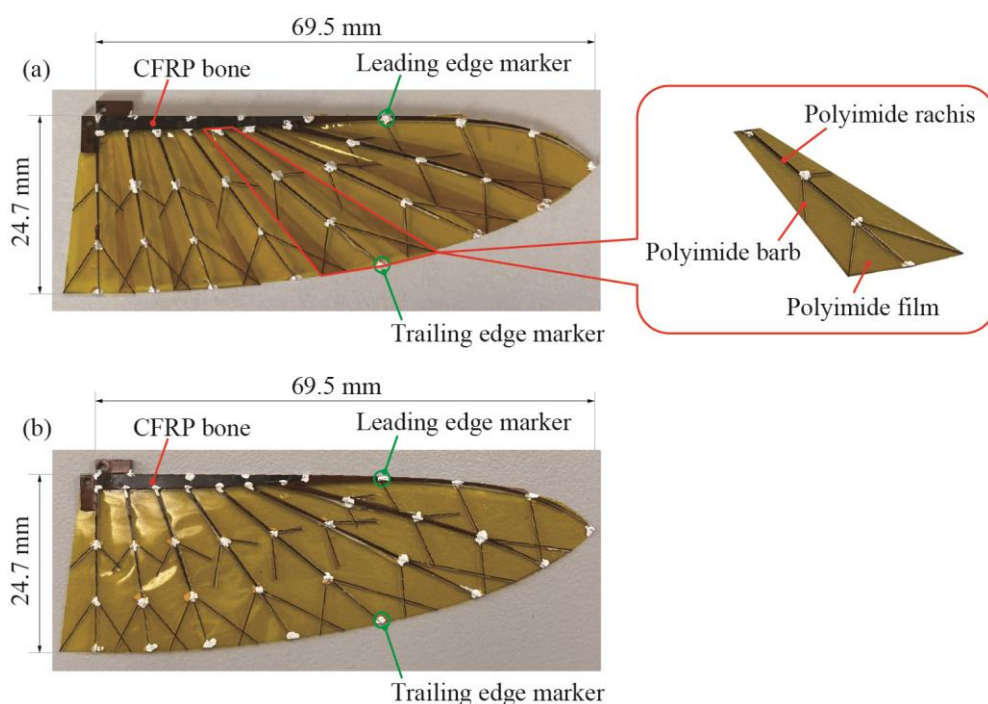


Fig. 1 Fabricated wings. White points indicate markers for 3 dimensional motion analysis. (a) A wing composed of 8 flight feathers (multi-feather wing). (b) A wing composed of one membrane (one-membrane wing).

ラルドハチドリの片翼は 15 本の風切羽で構成されるが⁽¹⁾，分離翼では，作りやすさのため，8 本の風切羽で構成した．風切羽は内側から，「風切羽 1，風切羽 2，...，風切羽 8」と名付けた．風切羽は外側ほど腹側に位置するように取り付けた．各風切羽は図 1-(a) に示すように羽軸，羽枝，膜で構成されている．羽軸は，チャムネエメラルドハチドリの羽軸の曲げ剛性計測の結果を基に厚さと幅の分布を決定した⁽²⁾．羽枝は膜を支えるのに必要最小限となるように経験的に設計した．羽軸，羽枝，膜の材料はポリイミドを用いた．前縁の曲げ変形を抑制して翼の回転半径を大きくするため，骨部分には，ポリイミドの上から背中側に 1 つの CFRP の骨を取り付けた．3 次元運動解析に用いるため，分離翼の特徴点を 38 点マーキングした（図 1 中の白い点）．

1 枚翼の翼外形，羽軸の配置と剛性分布，羽枝の配置と剛性分布は，基本的に分離翼と同じである．ただし，作りやすさのため，一部の羽枝は延長し，2 本の羽枝が重なっているところは結合した．分離翼と同じように，羽軸，羽枝，膜の材料はポリイミドとし，CFRP の骨を取り付け，特徴点のマーキングをした．

分離翼，1 枚翼ともに，後述する 57%位置迎え角計算に使用する前縁点および後縁点を図 1 中に示した．これらは，翼幅を 100%とした時，根元から 57%の位置にある翼弦上に位置する．

2・2 羽ばたき試験による運動解析と揚力計測

製作した 2 枚の人工翼の羽ばたき試験を行った．試験では，精密天秤（UW1020H，島津製作所）上に支柱を介して固定された直流モータ駆動羽ばたき機に，右翼の人工翼のみを取り付けて羽ばたかせた．直流モータには定電圧電源（PA18-2B，株式会社テクシオ・テクノロジー）で電力を供給し，羽ばたき周波数は電圧設定値を手動で調整して設定した．羽ばたき振幅は，178°，羽ばたき周波数は約 18 Hz（電圧 3.0 V）とした．入力電圧と電流は電源の表示を読み取り，羽ばたきが発生する鉛直上向きの力（平均揚力）は電子天秤の表示を読み取って計測した．また，3 台の高速度カメラ（Fastcam-miniAX，フォトロン）で羽ばたき中の翼を撮影し，3 次元運動解析ソフトウェア（DIPP-MotionV，ディテクト）で解析し，57%位置迎え角を求めた．57%位置迎え角は図 1 に示した翼前縁点と翼後縁点を作る翼弦の運動学的迎え角を表し，前縁点と後縁点を結ぶ線分と，前縁点における流速ベク

トルのなす角として定義した．流速ベクトルは，前縁点の速度ベクトルを2次中心差分で求めたものの逆ベクトルとして求めた．打ち上げ，打ち下ろしの終盤は，流速が小さくなるため，打ち上げでは $0.1T \sim 0.4T$ ，打ち下ろしでは $0.6T \sim 0.9T$ のみの迎え角を求めた (T は羽ばたき周期， $0T$ は打ち下ろしはじめを表す)．また，翼の上下運動が迎え角に及ぼす影響を調べるため，流速の俯角を求めた．流速の俯角は，流速とストローク平面のなす角とし，流速が下向きの時を正とした．翼効率 η [gf/W] を，平均揚力を消費電力で割った値で定義し，翼性能の指針とした．

3. 結果と考察

3・1 翼質量と羽ばたき試験の結果

翼質量と羽ばたき試験の結果を表1に示す．風切羽の膜の重なるの分，分離翼の質量の方が大きくなるはずだが，翼製作の際に用いたエポキシの量が共通でないため，わずかな差しか生まれなかった．羽ばたき周波数，消費電力，平均揚力，効率はほぼ一致した．

3・2 57%位置迎え角

図2に，57%位置迎え角の変化を，図3に流速の俯角をそれぞれ示す．迎え角の変化を，打ち下ろし前半，打ち下ろし後半，打ち上げ前半，打ち上げ後半の4つに分けて議論する．それぞれの代表的な時刻として， $t=0.2T$ ， $0.3T$ ， $0.7T$ ， $0.8T$ を図2，3中に示した．また，同時刻における翼のスナップショットを図4中に示した．

まず，打ち上げ前半では，分離翼は小さな迎え角 ($30 \sim 40^\circ$ 程度) を維持できていた一方，1枚翼の迎え角は大きかった ($60 \sim 80^\circ$ 程度)．これは，図4に示すように，分離翼では1枚翼と異なり，風切羽2と風切羽3の間に大きな隙間が生じ，その間で大きくねじれたためだと考えられる．

打ち上げ後半では，分離翼の迎え角は大きくなり (80° 程度)，1枚翼では小さな迎え角 (50° 程度) が維持された．図4に示すように，翼形状に大きな違いは見られなかったが，図3に示すように，分離翼では，1枚翼と比べて流速が上向いていたためだと考えられる．

打ち上げ前半では，分離翼では小さな迎え角 (40° 程度) が維持され，1枚翼では迎え角が大きくなっていった (40° 程度から 80° 程度へ)．これは，図4に示すように，分離翼では，1枚翼よりも，根元のフェザリングが大きかったことに加え，図3に示すように，分離翼では，1枚翼と比べて，流速が上向いていないことが原因だと考えられる．

打ち上げ後半では，分離翼では，迎え角が大きくなり (80° 程度まで)，1枚翼では，小さな迎え角 (40° 付近) が維持された．図4に示すように，翼形状に大きな違いは見られなかったが，図3に示すように，分離翼では，1枚翼と比べて流速が上向いていたためだと考えられる．

Table 1. Wing mass and result of flapping test.

	One-membrane wing	Multi-feather wing
Mass [mg]	189.5	191.5
Flapping frequency [Hz]	18.2	18.3
Consumed power [W]	2.13	2.13
Mean lift force [mN]	45	44
Efficacy [mN/W]	21	21

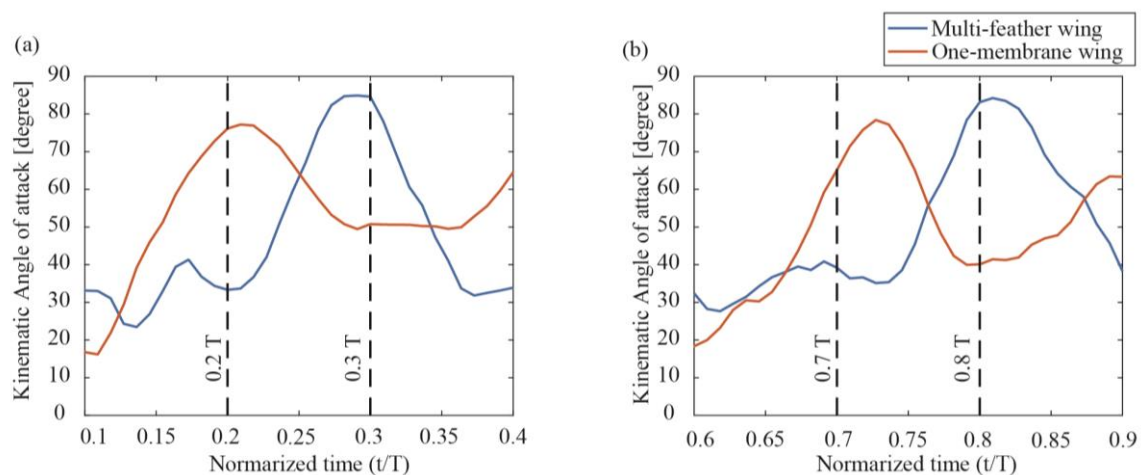


Fig. 2 Calculated kinematic angle of attack during downstroke (a) and during upstroke (b).

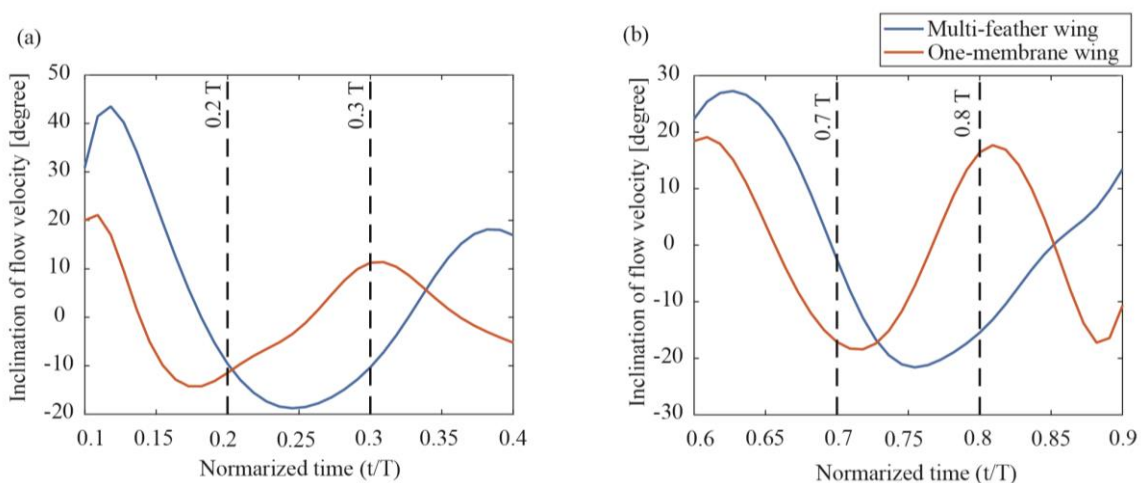


Fig. 3 Calculated inclination of flow velocity during downstroke (a) and upstroke (b).

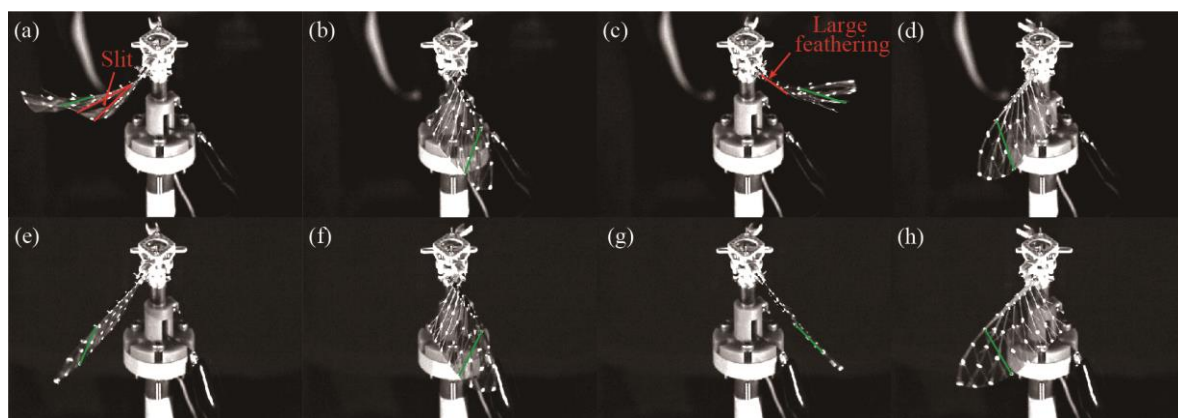


Fig. 4 Wing deformation of the two kinds of wings. (a) Multi-feather wing at $t = 0.2 T$. (b) Multi-feather wing at $t = 0.3 T$. (c) Multi-feather wing at $t = 0.7 T$. (d) Multi-feather wing at $t = 0.8 T$. (e) One-membrane wing at $t = 0.2 T$. (f) One-membrane wing at $t = 0.3 T$. (g) One-membrane wing at $t = 0.7 T$. (h) One-membrane wing at $t = 0.8 T$.

4. 結論

本研究では、ハチドリ規範羽ばたき翼において、翼が複数の分離した風切羽で構成されることによる迎え角と効率に対する影響を調べた。その結果、複数の風切羽で構成される翼は、打ち上げと打ち下ろしの前半にて、1枚翼と比べて迎え角が小さかったが、それぞれの後半では、1枚翼と比べて迎え角が大きくなったことが分かった。時間平均効率は、分離翼と1枚翼で差は小さかった。

5. 謝辞

本研究は JSPS 科研費新学術領域研究「ソフトロボット学」JP18H05468 の助成を受けたものです。

文 献

- (1) Maeda M., Nakata T., Kitamura I., Tanaka H., and Liu H., “Quantifying the dynamic wing morphing of hovering hummingbird”, *Royal Society open science*, Vol.4., No.9 (2017)
- (2) Nakata T., Noda R., and Liu H., "Effect of twist, camber and spanwise bending on the aerodynamic performance of flapping wings" *Journal of Biomechanical Science and Engineering*, Vol.13, No.2 (2018), pp. 17-00618-17-00618.
- (3) 河原暁生, 田中博人, 山崎剛史, ”ハチドリの風切羽の曲げ剛性分布を規範とした人工羽ばたき翼”, 年次大会 2018. 一般社団法人 日本機械学会, 2018.