トンボ型羽ばたき飛行における羽ばたき位相差と飛行速度*

高橋 英俊^{*1}, 田中 博人^{*2}
松本 潔^{*3}, 下山 勲^{*4}Flight Mode Change with Wing Phase Relationship of
Dragonfly-Type FlightHidetoshi TAKAHASHI^{*5}, Hiroto TANAKA,
Kiyoshi MATSUMOTO and Isao SHIMOYAMA^{*5} Graduate School of Information Science and Technology, The University of Tokyo,
7-3-1 Hongo, Bunkyo-ku, Tokyo, 113-8656 Japan

In this research, Dragonfly-type Ornithopters (DTOs) were developed to reveal the effect of the phase relationship between forewings and hindwings on flight performance. The DTO has high aspect four wings. The Reynolds number of the ornithopter is the same order as that of real dragonflies (10^3-10^4). The DTO's phase relationship ranges from 0° to 315° with 45° intervals. Flights of DTOs with various phase relationships were recorded with a high speed video camera, and their motions were analyzed. In the stable flight, the flight speed varied depending on the phase relationship. We also visualized the airflow around the wings in a wind tunnel. It was revealed that there were suitable phase relationships for accelerating flight (45°), low speed flight (180°) and high speed flight ($270^\circ, 315^\circ$). This relationship between the flight mode and the phase relationship was in good agreement with that of dragonflies.

Key Words: Dragonfly, Phase Relationship, Ornithopter, Flapping Flight, Bio-Fluid Mechanics, Unsteady Flow, Biomechanics

1. 緒 言

昆虫は羽ばたき運動によって飛行し、ホバリング、急旋回などを行うことができる。長年、これら昆虫の羽ばたき飛行のメカニズムを解明しようと多くの研究がなされている⁽¹⁾⁻⁽⁷⁾。しかし羽ばたき飛行においては、非定常な空気力⁽⁴⁾⁻⁽⁷⁾が発生するため、飛行メカニズムは未だに解明されていない部分が多い。

昆虫の中でも、トンボはホバリング、急加速、急旋回など非常に優れた機動力を実現している⁽⁸⁾。トンボの特徴は、翅の運動自由度が大きく、4枚の翅がそれぞれ独立にフラッピング、リードラグ、フェザリング運動できることである。この中で前翅の後翅の羽ばたき運動に位相差をつけることが、前翅が発生する流れと後翅の流れが干渉し、優れた機動力を実現する重要な要因の1つになっていると考えられている。実際、トンボの前翅と後翅の羽ばたき運動の位相差(以後、

位相差と略す)は飛び方に応じて異なることが知られている⁽⁸⁾⁻⁽¹⁰⁾。エリントンら⁽⁹⁾によるとトンボは高速で前進飛行する場合、羽ばたき位相差 260° から 306° の間で飛行する。ホバリングや旋回運動といった飛行の場合、位相差 180° で飛行する。また離陸や急加速といった飛行の場合、前翅と後翅は同期し、位相差 0° で飛行する。しかしトンボは位相差だけでなく、フラッピング角やフェザリング角、羽ばたき周波数などを同時に変えているため、トンボの観察による研究では羽ばたき位相差のみの影響を抽出することは難しい⁽¹¹⁾⁻⁽¹³⁾。

羽ばたき位相差が飛行にとって、どのような役割を持つかを調べるために数値計算による解析⁽¹⁴⁾⁽¹⁵⁾も行われているが、前翅が発生する流れと後翅の流れが干渉し合うため複雑で、計算手法は完全には確立していない。また羽ばたき運動時のレイノルズ数を合わせた油中での人工の翅を用いた羽ばたき運動の解析⁽¹⁶⁾も行われているが、羽ばたき位相差の違いによる力の発生計測にとどまっている。

そこで本研究では、羽ばたき位相差の違いによる飛行の変化を調べるために、羽ばたき位相差のみが異なるトンボ型羽ばたき機を試作し、その飛行を高速度カメラで撮影し計測する。人工の羽ばたき機を用いるこ

* 原稿受付 2010年2月12日。

^{*1} 正員、東京大学大学院情報理工学系研究科(〒113-8656 東京都文京区本郷7-3-1)。^{*2} 正員、ハーバード大学工学応用科学大学院(60 Oxford Street 407, Cambridge MA 02138, USA)。^{*3} 正員、東京大学IRT研究機構。^{*4} 正員、フェロー、東京大学大学院情報理工学系研究科。

E-mail: takahashi@leopard.t.u-tokyo.ac.jp

とによって、飛行と羽ばたき位相差の関係を明確に捕らえることが可能となり、再現性のある実験を行える。また羽ばたき位相差が流れに与える影響を調べるために、風洞内で羽ばたき機まわりの流れの可視化実験を行う。これらの実験からトンボ型羽ばたき飛行における羽ばたき位相差の役割を明らかにする。

2. トンボ型羽ばたき機

2・1 パラメータの定義 本研究では絶対座標系における x 方向の速度を V_x とする [図1(a)]。体軸角 α は体軸と水平面がなす角度である。また羽ばたき位相差を以下のように定義する。本研究では前翅と後翅の羽ばたき周波数 ω と羽ばたき振幅 A を一定とし、前翅および後翅の体軸に対する角度 θ_f, θ_h が

$$\theta_f = A \sin(\omega t) \dots\dots\dots (1)$$

$$\theta_h = A \sin(\omega t - \varphi) \dots\dots\dots (2)$$

であると仮定する [図1(b)]。このときの φ を羽ばたき位相差と定義する。すなわち前翅に対する、後翅の位相遅れ分を羽ばたき位相差 φ として定義している。

2・2 トンボのモデル化 本節ではトンボの特徴を抽出し、トンボ型羽ばたき機的设计指針とする。本研究で対象とするのは、オニヤンマのような大型のトンボである。

飛行する生物の翼は、翼の形状、飛行時におけるレイノルズ数、翼面荷重(重量/翼面積)によって分類できる。

トンボの翅はチョウやセミなどに比べ翼長方向と翼弦方向のアスペクト比が大きく、3.0 から 5.0 程度である。また飛行中のレイノルズ数は翼幅方向半分の位置では 10^3 から 10^4 のオーダーである。構造は、網状の細い梁と薄い膜で形成されている。

東らはトンボ、チョウ、セミの羽ばたき周波数と翼面荷重の関係を調べている⁽¹⁷⁾。これによると翼面荷重は、トンボやチョウは小さく、 0.5 N/m^2 から 4 N/m^2 である。セミは 5 N/m^2 から 20 N/m^2 と大きい。

Fig.1 Definition of parameters. (a) Side view, (b) Front view along stroke plane

したがって、トンボの特徴を以下のようにモデル化し、トンボ型羽ばたき機的设计指針とした。

- (1) レイノルズ数: $10^3 \sim 10^4$
- (2) 翅の形状: アスペクト比が 3 から 5
- (3) 翼面荷重: $0.5 \sim 4.0 \text{ N/m}^2$

2・3 トンボ型羽ばたき機の構成 2・2 節で示した設計指針を満たすトンボ型羽ばたき機を試作した。その外観を図2に示す。また表1に羽ばたき機の各パラメータを示す。翅はゴムの回転をスライダクランク

Table 1 Characteristics of the DTO

Wing span (mm)	100
Wing loading (N/m^2)	1.3
Aspect ratio of wing	3.3
Reynolds number	10^3
Flapping frequency (Hz)	10
Weight(g)	0.8

Fig.2 Photograph of a Dragonfly-type Ornithopter (DTO)

Fig.3 (a) Front view of the design of slider crank mechanism, (b) Side view of the design, (c) Relationship between the phase relationship and the crank angle, (d) Design of the wing

機構で上下運動に変換し羽ばたく [図 3(a), (b)]. 従来トンボの羽ばたき周波数は 20 Hz から 40 Hz 程度であるが⁽⁹⁾, レイノルズ数を合わせるために, 羽ばたき機の羽ばたき周波数は 10 Hz に設計した. 前翅と後翅の羽ばたき運動に位相差を与えるために, 各羽ばたき機のピアノ線で製作したクランクの腕の角度を変えて取り付け [図 3(c)]. (180°-取り付ける角度)が前翅と後翅の位相差となる. 羽ばたき位相差を 0° から 315° まで 45° 刻みで位相差の異なる機体を試作した.

機体の構造には断面 0.5×2.0 mm と断面 1.0×1.5 mm の 2 種類のシナ材をそれぞれ場所に応じて使用した. 総重量は 0.8 g である. 翅の前縁には 0.5 mm 角のシナ材を軸として用い, 翼面は厚さ 0.01 mm のポリエステルフィルムを用いた [図 3(d)]. このとき羽ばたき機の翼面荷重は 1.3 N/m^2 となる.

3. 飛行実験

羽ばたき位相差による飛行への影響を調べるために, 各羽ばたき位相差を持った機体の飛行を高速度カメラで計測した. まず羽ばたき機に手で初速を与えた飛行を計測した. 次に初速がない状態からの飛行を計測し, 各位相差における加速運動の違いを観察した.

3.1 定常前進飛行 羽ばたき機は初速が遅すぎると墜落し, 初速が速すぎると機体は上向きに反り返る. 適切な初速を与えると, 機体は前方に安定して飛行する. 各位相差における定常飛行速度を計測するために, その中で安定した飛行が得られた場合について, 真横から高速度カメラ (500 frame/s または 1125 frame/s) で撮影し, 運動を解析した. 撮影した動画を

パソコンに取り込み, モニター上でフレーム毎に羽ばたき機の機首, 機尾の座標を手動で抽出した. 座標抽出に伴うノイズはカットオフ周波数 25 Hz のローパスフィルタで平滑化した. これらの座標から速度を求めた.

各羽ばたき位相差における飛行軌跡と水平飛行速度を図 4 に示す. 飛行軌跡は機体の位置と姿勢を 20 ms ごとにプロットしている. どのような位相差の機体であっても適切な初速を与えれば, ほぼ水平に飛行した. 図 4 の各飛行における平均前進飛行速度を図 5 に示す. 位相差 180° のとき全ての機体の中で最も遅い速度で飛行し, 平均速度は 0.6 m/s であった [図 5(a)]. 羽ばたき位相差が大きい 270°, 315° のとき, 速度は他の位相差の機体より速く飛行し, 平均速度は 2.0 m/s 程度であった [図 5(b), (c)]. 位相差 0° から 225° の場合の平均速度は 180° の場合を除いて 1.0 m/s から 1.5 m/s 程度であった. 羽ばたき機は発進時の初期条件などの影響を受けるのでまったく同一の飛行を繰り返すことはないが, 羽ばたき位相差による飛行速度が異なることは再現性があった.

3.2 加速前進飛行 各羽ばたき位相差における加速前進運動を計測するために, 初速 0 m/s の状態からの飛行を 3.1 節と同様に高速度カメラを用いて撮影した. 座標データの作成やフィルタリングによるノイズの除去は 3.1 節と同様に行った. 機体をピンで支柱に固定した状態で羽ばたきを開始した後, 機体を固定するピンを抜くことで, 羽ばたき機は初速度を 0 m/s の状態から発進する (図 6).

その結果, 位相差 45° と位相差 180° の機体のみが飛行可能であった [図 7(a), (b)]. なお, 定常前進飛行実験と同様に飛行軌跡は機体の位置と姿勢を 20

Fig. 4 Flight path of the DTOs in steady flight. (a) $\varphi=0^\circ$, (b) $\varphi=45^\circ$, (c) $\varphi=90^\circ$, (d) $\varphi=135^\circ$, (e) $\varphi=180^\circ$, (f) 225° , (g) $\varphi=270^\circ$, (h) $\varphi=315^\circ$

Fig. 5 Relationship between average velocity and phase relationship. (a) $\varphi=180^\circ$, (b) $\varphi=270^\circ$, (c) $\varphi=315^\circ$

Fig. 6 Experimental setup of acceleration flight

Fig. 7 Flight path of the ornithopters in acceleration flight. (a) $\varphi=45^\circ$, (b) $\varphi=180^\circ$, (c) $\varphi=315^\circ$, (d) Forward velocity

ms ごとにプロットしている。位相差 45° の機体は初速 0 m/s から 0.5 s 後には 0.8 m/s まで加速し飛行した [図 7(d)]。一方位相差 180° の機体は初速 0 m/s

Table 2 Summary of flight experiment

Phase relationship	Forward velocity	Acceleration flight
45°	1.5 m/s	High acceleration
180°	0.6 m/s	Low acceleration
$270^\circ, 315^\circ$	2.0 m/s	Fall

から 0.5 s 後には 0.4 m/s まで加速する程度で、飛行速度は位相差 45° の機体に比べ遅く、加速度が小さかった。位相差 45° と位相差 180° 以外の位相差の機体は、適切な初速を与えると機体は安定して飛行するが、初速 0 m/s の場合、体軸のバランスを崩して墜落、または揚力が不足し下降した。図 7(c) のように墜落した機体においては機体の体軸角が後翅の打ち下げによって急激に減少していた。定常飛行の実験と同様に、羽ばたき位相差により加速前進飛行速度が異なることは再現性があった。

3.3 飛行実験のまとめ 定常前進飛行および加速前進飛行の実験において、位相差ごとに定常飛行速度および初速 0 m/s の状態からの飛行軌跡が異なった。その中でも位相差 45, 180, 270, 315° の機体の飛行は特徴的な飛行であった(表 2)。

位相差 45° では定常飛行速度は 1.5 m/s 程であったが、初速 0 m/s の状態からの加速飛行実験においては他の位相差と違って墜落も下降もせず加速し飛行した。

位相差 180° では低速飛行を行う傾向が観察された。定常飛行速度が遅く、0.6 m/s 程度であった。また加速飛行実験においては、墜落または下降はせず遅い加速度で加速し飛行した。

位相差 270, 315° では速度は、他の位相差の機体より速い傾向があり、2.0 m/s 程であった。加速飛行実験においては、体軸のバランスを崩して墜落した。

4. 流れの可視化

4.1 実験装置と方法 3 章の飛行実験で特徴的な飛行を行った羽ばたき位相差について、羽ばたき位相差が翅まわりの流れへ与える影響を調べるために、風洞で煙による流れの可視化を行った [図 8(a)]。羽ばたき位相差 45, 180, 315° について、羽ばたき運動時の翅まわりの流れを観察した。位相差 270° と位相差 315° は同じ傾向を示すので、 315° を 2 つの位相差の代表値とした。羽ばたき機の飛行速度は 0.6 m/s から 2.0 m/s であるが、使用した風洞の特性上、流速 1.0 m/s と 1.5 m/s の 2 種類の一定な流速で実験を行った。風洞内流速 1.0 m/s と 1.5 m/s での実験は、それぞれ低速、高速な飛行速度での羽ばたき機の飛行に

Fig. 8 Photographs of experimental setup to visualize airflow around the wings. (a) A wind tunnel and a high speed video camera, (b) Tethered ornithopter in the wind tunnel

対応する。

風洞内で羽ばたき機が羽ばたき運動を行う際、重心まわりに回転できるように固定した [図 8(b)]。機体の位置は固定されるが、体軸角は自由に動く。体軸角が変化することで、完全に固定した状態で観察するよりも自由飛行に近い状態で観察できる。そのために機体の重心位置に穴を開け、ピンを通し、ピンを固定することで重心まわりに回転できるようにした。

風洞は開放型吹出式風洞を使用した。測定部の大きさは縦 600 mm、横 1 200 mm、幅 250 mm である。煙はスモークワイヤ法で発生させた。ワイヤは直径 0.32 mm のニクロム線を用い、トレーサとして流動パラフィン塗布した。翅が水平状態のときに左翼の付け根から翼幅方向に 50 mm の位置を煙が横切るようにワイヤを設置した。

4.2 羽ばたき位相差の違いによる流れの変化

各羽ばたき位相差における翅まわりの流れを図 9 に示す。翅まわりの流れの状態として、流れが剥がれずに翼面に沿って流れているか、流れが前翅および後翅の前縁から剥離しているか、また LEV (Leading Edge Vortex) が発生しているかに注目する。

位相差 45° では低速の場合、高速の場合ともに後翅は前翅に追従し、前後翅まわりの空気の流れは剥がれずに翼面に沿っていた [図 9(a), (b)]。流れが剥がれずに翼面に沿っている場合、定常翼理論では、飛行に適度な揚力が発生すると考えられている。この仮定

Fig. 9 Photographs of the airflow around the wings. (a) $\phi=45^\circ$ with 1.0 m/s flow, (b) $\phi=45^\circ$ with 1.5 m/s flow, (c) $\phi=180^\circ$ with 1.0 m/s flow, (d) $\phi=180^\circ$ with 1.5 m/s flow, (e) $\phi=315^\circ$ with 1.0 m/s flow, (f) $\phi=315^\circ$ with 1.5 m/s flow

に基づけば、位相差 45° は低速、高速ともに飛行に適する位相差であると考えられる。

位相差 180° では流速 1.0 m/s のとき前翅打ち下ろしの際、前翅の上に LEV が発生した [図 9(c)]。打ち下ろしの際の LEV の付着は羽ばたき飛行において、揚力が增大する効果があるといわれている⁽²⁾。流速 1.5 m/s のとき前翅の流れが剥離した [図 9(d)]。流れの剥離は、定常翼理論では、抗力が增大し、飛行に不適である流れであると考えられている。したがって位相差 180° は飛行にとって、低速飛行の場合は、前翅に LEV が発生することにより揚力が增大するが、

Table 3 Summary of visualization experiment

Phase relationship	Slow speed flow	High speed flow
45°	Smooth	Smooth
180°	LEV on forewing	Separation
315°	Separation	LEV on hindwing

高速飛行の場合は流れが剥離することにより失速することになると考えられる。

位相差 315° では流速 1.0 m/s のとき後翅打ち下ろしの際、後翅の流れが剥離した [図 9(e)]。流速 1.5 m/s のとき流れは剥離せず後翅の上に LEV が発生した [図 9(f)]。このことにより、位相差 315° は飛行にとって、低速飛行の場合は失速するが、高速飛行の場合は揚力が増大することになると考えられる。

この実験から、表 3 のように各羽ばたき位相差によって、翅まわりの空気の流れの様子が異なり、流速の変化に応じて、飛行に適するもの、適さないものが存在することが分かった。

5. 羽ばたき位相差と飛行速度

飛行実験と可視化実験をまとめて考察する。位相差 45° は初速 0 m/s から加速し、低速、高速ともに流れが剥がれずに翼面に沿っていた。したがって低速域から高速域へ遷移する加速飛行に適していると考えられる。

位相差 180° では、低速飛行の場合は前翅に LEV が発生することにより揚力が増大するが、高速飛行の場合は流れが剥離することにより失速すると考えられる。したがって低速飛行に適していると考えられる。

位相差 270, 315° では、初速 0 m/s からでは飛行しなかった。また低速飛行の場合は、後翅の流れが剥離することにより失速するが、高速飛行の場合は、後翅の上に LEV が発生することにより揚力が増大すると考えられる。したがって位相差 270, 315° は高速飛行に適していると考えられる。

このように飛行速度によって適する羽ばたき位相差が存在すると考えられる。

6. 結 言

本研究では、羽ばたき機を用いて、トンボの羽ばたき飛行における前翅と後翅の羽ばたき位相差の役割を明らかにした。まずトンボの羽ばたき飛行の特徴をモデル化し、トンボ型羽ばたき機的设计指針とした。その設計指針を満たす翼長 100 mm、質量 0.8 g、羽ばたき周波数 10 Hz のトンボ型羽ばたき機を試作した。羽ばたき位相差が 0° から 315° まで 45° 刻みで位相差

Table 4 Relationship between the phase relationship of dragonflies^{(9),(10)} and that of the DTO

Flight mode	Dragonfly	DTO
High speed	260°-306°	270°, 315°
Low speed	180°	180°
Accelerating	0°	45°

の異なる機体の飛行を計測したところ、定常飛行速度及び加速運動の様子は位相差によって異なった。また機体まわりの流れの可視化を行ったところ、羽ばたき位相差によって、流れの様子が異なった。流速の変化に応じて、飛行に適するもの、適さないものが存在した。これらの結果から試作した羽ばたき機では位相差 45° は加速飛行に、位相差 180° は低速飛行に、位相差 270, 315° は高速飛行に適していることが示された。これらの関係は、実際のトンボが使い分ける羽ばたき位相差と飛行の関係にはほぼ一致する(表 4)。以上の結果からトンボ型の羽ばたき飛行において、飛行速度によって適する羽ばたき位相差が存在することが示された。このことはトンボが羽ばたき位相差を利用して、機動的な飛行を行っていることを示唆する。

謝 辞

風洞実験に関して助言、協力していただいた東京大学大学院工学系研究科航空宇宙工学専攻 河内啓二教授に感謝する。また本研究は、文部科学省科学研究費補助金基盤研究(S)(課題番号 18100002)の交付を受けて行われた。

文 献

- (1) Ellington, C. P., The Novel Aerodynamics of Insect Flight: Applications to Micro-Air Vehicles, *Journal of Experimental Biology*, Vol. 202 (1999), pp. 3439-3448.
- (2) Combes, S. A. and Daniel, T. L., Flexural Stiffness in Insect Wings II, Spatial Distribution and Dynamic Wing Bending, *Journal of Experimental Biology*, Vol. 206 (2003), pp. 2989-2997.
- (3) Lehmann, F.-O., Sane, S. P. and Dickinson, M., The Aerodynamic Effects of Wing-Wing Interaction in Flapping Insect Wings, *Journal of Experimental Biology*, Vol. 208 (2005), pp. 3075-3092.
- (4) Birch, J. M. and Dickinson, M. H., Spanwise Flow and the Attachment of the Leading-Edge Vortex on Insect Wings, *Nature*, Vol. 412 (2001), pp. 2257-2272.
- (5) Ellington, C. P., Van den Berg, C., Willmott, A. P. and Thomas, A. L. R., Leading-Edge Vortices in Insect Flight, *Nature*, Vol. 384 (1996), pp. 626-630.
- (6) Dickinson, M. H., Lehmann, F. O. and Sane, S. P., Wing Rotation and the Aerodynamic Basis of Insect Flight, *Science*, Vol. 284 (1999), pp. 1954-1960.
- (7) Sane, S. P. and Dickinson, M. H., The Aerodynamic Effects of Wing Rotation and a Revised Quasi-Steady

- Model of Flapping Flight, *Journal of Experimental Biology*, Vol. 205 (2002), pp. 1087-1096.
- (8) Alexander, D. E., Unusual Phase Relationships Between the Forewings and Hindwings in Flying Dragonfly, *Journal of Experimental Biology*, Vol. 109 (1984), pp. 379-383.
- (9) Wakeling, J. M. and Ellington, C. P., Dragonfly Flight II, *Journal of Experimental Biology*, Vol. 200 (1997), pp. 557-582.
- (10) Azuma, A. and Watanabe, T., Flight Performance of a Dragonfly, *Journal of Experimental Biology*, Vol. 137 (1988), pp. 221-252.
- (11) Wang, H., Zeng, L., Liu, H. and Yin, C., Measuring Wing Kinematics, Flight Trajectory and Body Attitude During Forward Flight and Turning Maneuvers in Dragonflies, *Journal of Experimental Biology*, Vol. 206 (2003), pp. 745-757.
- (12) May, M. L., Dragonfly Flight: Power Requirements at High Speed and Acceleration, *Journal of Experimental Biology*, Vol. 158 (1991), pp. 325-342.
- (13) Tomas, A. L. R., Taylor, G. K., Srygley, R. B., Nudds, R. L. and Bomphrey, R. J., Dragonfly Flight: Free-Flight and Tethered Flow Visualizations Reveal a Diverse Array of Unsteady Lift-Generating Mechanism, Controlled Primarily Via Angle of Attack, *Journal of Experimental Biology*, Vol. 207 (2004), pp. 4299-4323.
- (14) Wang, J. K. and Sun, M., A Computational Study of the Aerodynamics and Forewing-Hindwing Interaction of a Model Dragonfly in Forward Flight, *Journal of Experimental Biology*, Vol. 208 (2005), pp. 3785-3804.
- (15) Sun, M. and Lan, S. L., A Computational Study of the Aerodynamic Forces and Power Requirements of Dragonfly Hovering, *Journal of Experimental Biology*, Vol. 207 (2004), pp. 1887-1901.
- (16) Maybury, W. J. and Lehmann, F. O., The Fluid Dynamics of Flight Control by Kinematic Phase Lag Variation Between Two Robotic Insect Wings, *Journal of Experimental Biology*, Vol. 207 (2004), pp. 4707-4726.
- (17) Azuma, A., *Encyclopaedia of Biomechanics* (in Japanese), (1997), p. 129, Asakura shoten.