S053011

蝶の翅上を発達する渦輪から見積もる非定常揚力*黒木 太一^{*1}, 渕脇 正樹^{*2}, 田中 和博^{*2}**Dynamic lift estimated by a vortex ring developed over a butterfly wing**Taichi KUROKI^{*1}, Masaki FUCHIWAKI^{*2} and Kazuhiro TANAKA^{*2}^{*1} Kyushu Institute of Tech. Dept. of Mechanical Information Science and Technology
680-4 Kawazu, Iizuka-city, Fukuoka 820-8502, Japan

In nature, flight organisms change flow field around the wing and produce fluid force according to flapping motion of flight organism wing. Therefore, the flow field around the flight organism wing and fluid force are remarked academically. We clarified a vortex ring generated over a butterfly wing in downward and upward flapping motion using PIV measurement. We estimated the dynamic lift from the circulation of a vortex ring generated over a butterfly wing. After that, we measured the dynamic lift to verify the estimation result. The estimation and measurement result are almost same in downward flapping motion. However, estimation result of dynamic lift doesn't correspond to the measurement result of dynamic lift. The reason is that we just evaluated a vortex ring over the butterfly wing but we didn't evaluate a vortex ring generated wake field of the butterfly. So we estimated the dynamic lift using the vortex ring over a butterfly wing and wake field of the butterfly. Therefore, we clarified that estimation result of dynamic lift correspond to the measurement result of dynamic lift.

Key Words : Butterfly, Vortex Ring, Dynamic lift**1. 緒 言**

自然界に生息する飛翔生物は翅の羽ばたき運動により、翅まわりの流れ場を変化させ、その流れ場から飛翔生物にとって有益な非定常流体力を生み出すことが知られている。この飛翔生物が翅を羽ばたかせてから非定常流体力を生み出すまでの一連の過程に関する学術的な関心が高まっており、国内外の様々な研究者らによって飛翔生物の飛翔メカニズムに関する研究が行われてきた。Bomphrey らはスズメガの翅まわりの流れ場を PIV 計測することにより、スズメガの翅上には一つの渦輪が形成されることを明らかにした。また、計測した渦輪の循環の一周平均から見積もった非定常揚力はスズメガが生み出す非定常揚力の一周平均と等しいことを報告している⁽¹⁾。この報告より、飛翔生物の翅の羽ばたき運動に伴って翅上に渦輪が形成されること、また、渦輪の形成が非定常揚力の生成に強く寄与することが明らかにされてきた。しかしながら、非定常的に運動する飛翔生物の翅から巻き上がる渦輪の構造および生み出される非定常揚力は時間的に変化することから、それぞれの時間的な変化を関連付けることは困難とされている。

これまでに、本研究室では脚を固定した状態で羽ばたき運動する蝶の翅まわりの流れ場の PIV 計測を行い、蝶の翅の打ち下ろし/打ち上げ時には翅上に一つの渦輪が形成されることを明らかにした。また、翅の打ち下ろし/打ち上げに伴い、渦輪は翅上で発達し、翅の下死点/上死点を蝶全体を通り抜けるように、後流へと移動することも明らかにした。その渦輪の一連の挙動から蝶が羽ばたき運動一周を通して生み出す非定常揚力を見積もった。その見積もった非定常揚力の妥当性を検証するために、蝶が生み出す非定常揚力の直接計測を行ったところ、翅の打ち下ろし時に生み出される非定常揚力の計測結果および見積もった結果はよく一致することがわかった。しかしながら、翅の打ち上げ時に生み出される非定常揚力の計測結果および見積もった結果はわずかに差異が生じ

^{*1} 正員, 日本機械大学 (〒160-0016 東京都新宿区信濃町 35)^{*2} 学生員, 日本機械大学 工学部

E-mail: taro@jsme.or.jp

Fig.1 Measurement system of dynamic lift

ることがわかった。これは非定常揚力を見積もる際に、翅上に形成される渦輪のみを評価し、後流に形成される渦輪が生み出す非定常揚力を評価していないことが原因と考えられる。Brodsky らは脚を固定した蝶の翅まわりの流れ場をスモークワイヤ法により可視化することで、蝶は翅上の渦輪を後流へと放出し、その放出した方向とは逆方向に飛翔することを明らかにしている⁽²⁾。蝶は翅の下死点で翅上の渦輪を下方へと放出するため、蝶が羽ばたき運動一周周期を通して生み出す非定常揚力を見積もる際には蝶の翅上の渦輪だけでなく、翅の下死点で後流へと放出される渦輪の影響も考慮する必要があると考えられる。

本研究では蝶が羽ばたき運動一周周期を通して生み出す非定常揚力を蝶の翅上および後流の渦輪から予測することを目的とする。具体的には小型六軸力覚センサを用いて、蝶が羽ばたき運動一周周期を通して生み出す非定常揚力の直接計測を行う。その後、PIV 計測結果で得られた蝶の翅上および後流の渦輪の循環から非定常揚力を見積もる。非定常揚力の見積もった結果および計測結果を比較することにより、蝶が羽ばたき運動一周周期を通して生み出す非定常揚力を予測することが可能であるかを検討する。

2. 実験装置および実験方法

本研究の非定常揚力の計測システムを図 1 に示す。非定常揚力を計測する際に用いた蝶はオオゴマダラであり、その翅弦長 c 、翅スパン長さ l 、アスペクト比 AR 、体重 m 、翅面荷重 W/S および羽ばたき周波数 f はそれぞれ 60[mm]、140[mm]、2.3、0.4[g]、0.6[N/m²] および 6[Hz] である⁽³⁾。蝶の脚を小型力覚六軸センサに取り付けたシャフト上に固定し、その状態で羽ばたき運動する蝶が生み出す非定常揚力を計測した。蝶は翅上の渦輪だけでなく、後流の渦輪からも非定常揚力を生み出すことが予想されるため、蝶を固定するシャフトの形状により蝶の後流の渦輪の挙動が異なり、生み出される非定常揚力の傾向に影響することが考えられる。そのため、3 種類の形状の異なるシャフトを用いることで、蝶の後流に形成される渦輪が非定常揚力の生成に寄与すること、蝶の後流の渦輪の挙動を考慮して作製したシャフトを用いて計測した非定常揚力に含まれるシャフトの影響は小さいことを検証した。また、LabView を用いて、小型力覚六軸センサおよび高速度カメラを同期することで、蝶が非定常揚力を生み出す際の翅の羽ばたき運動の様子を撮影した。

Fig.2 Dynamic lift measured by straight shaft

Fig.3 Dynamic lift measured by small L shaped shaft

3. 実験結果および考察

3.1 非定常揚力の直接計測結果

図 1(a)に示す直線型のシャフトを用いて計測した非定常揚力を図 2 に示す。グラフの横軸および縦軸はそれぞれ翅の羽ばたき運動の周期および非定常揚力である。また、グラフ中の点(a)および(c)は翅の下死点であり、点(b)は翅の上死点である。

蝶の翅の打ち下ろし時には上向き非定常揚力が生み出され、翅の打ち下ろしが進むに伴い、非定常揚力は急勾配で増加することがわかる。非定常揚力は翅の打ち下ろしの羽ばたき角 $0[\text{deg.}]$ 付近で最大となり、その後は翅の下死点まで急勾配で減少する。翅の打ち上げ時には蝶に対して下向き非定常揚力が生み出され、大きさおよび傾向は翅の打ち下ろし時に生み出される非定常揚力と上下対称であることがわかる。これは翅の下死点で後流へと放出される渦輪の運動がシャフトによって妨げられ、翅上の渦輪の影響が支配的になるためと考えられる。すなわち、直線型のシャフトによる計測結果に含まれる翅の下死点で後流へと放出される渦輪の影響は小さいといえる。そのため、翅の下死点で翅上の渦輪が蝶を完全に通り抜けるように作製した L 字型のシャフトを用いて非定常揚力の計測を行った(図 1(b))。L 字型のシャフトを用いて計測した非定常揚力を図 3 に示す。グラフの横軸および縦軸はそれぞれ翅の羽ばたき運動の周期および非定常揚力である。また、グラフ中の点(a)および(c)は翅の下死点であり、点(b)は翅の上死点である。

蝶の翅の打ち下ろし時には大きな凸状の非定常揚力が生み出され、直線型のシャフトによる計測結果とよく一

Fig.4 Dynamic lift measured by large L shaped shaft

Fig.5 Dynamic lift estimated by vortex ring over the wing and in wake field

致することがわかる。その一方で、翅の打ち上げ時に生み出される非定常揚力は直線型のシャフトによる計測結果と大きく異なることがわかる。直線型のシャフトを用いた場合では翅の下死点で蝶を通り抜けようとする翅上の渦輪がシャフトにより運動を妨げられ、L字型のシャフトを用いた場合では翅の下死点で翅上の渦輪が完全に蝶を通り抜けるためと考えられる。しかしながら、翅の下死点で後流へと放出される渦輪は蝶の下方および後方へと移動するために、翅の下死点で後流へと放出された後の渦輪はL字型のシャフトにより運動を妨げられることが考えられる。そのため、翅の打ち上げが進むに伴い、緩やかに減少する非定常揚力は瞬間的に大きく減少するのではないかと考えられる。すなわち、L字型のシャフトを用いた場合においても計測結果にはシャフトの影響が含まれると考えられる。そのため、翅の下死点で後流へと放出される渦輪の挙動を考慮して作製した角度を有するL字型のシャフトを用いて、蝶が生み出す非定常揚力の計測を行った(図1(c))。角度を有するL字型のシャフトによる計測結果を図4に示す。グラフの横軸および縦軸はそれぞれ翅の羽ばたき運動の周期および非定常揚力である。また、グラフ中の点(a)および(c)は翅の下死点であり、点(b)は翅の上死点である。

蝶の翅の打ち下ろし時には大きな凸状の非定常揚力が生み出され、直線型およびL字型のシャフトを用いて計測した非定常揚力とよく一致することがわかる。その一方で、翅の打ち上げ時には緩やかに減少する非定常揚力が生み出され、他のシャフトによる計測結果と大きく異なることがわかる。これは翅の下死点で後流へと放出される渦輪の運動を妨げないように設計した角度を有するL字型のシャフトを用いることで、翅の下死点で後流へと放出された渦輪が生み出す非定常揚力を計測できたためと考えられる。Cloupeauらは垂直に設置した棒状のシャフトにバットを固定し、その状態で羽ばたき運動するバットが生み出す非定常揚力を計測した。それより、バットの翅の打ち下ろし時には大きな凸状の非定常揚力が生み出され、翅の打ち上げ時には緩やかに減少する非定常揚力が生み出されることを明らかにしている⁽⁴⁾。このことから、角度を有するL字型のシャフトによる計測結

果は蝶が羽ばたき運動一周期を通して生み出す非定常揚力として妥当であり、計測結果に含まれるシャフトの影響は非常に小さいと考えられる。すなわち、蝶の翅上に形成される渦輪の挙動だけでなく、翅の下死点で後流へと放出される渦輪の挙動も非定常揚力の生成に強く寄与するといえる。

3.2 蝶の翅上および後流の渦輪から見積もった非定常揚力

蝶が羽ばたき運動一周期を通して生み出す非定常揚力を見積もるにあたり、渦輪がもつ運動量に注目した。渦輪がもつ運動量 M およびその時間変化によって生み出される非定常揚力 L の式をそれぞれ(1)および(2)に示す。式中の ρ , A および Γ はそれぞれ流体の密度、渦輪内の面積および渦輪の循環である。

$$M = \rho A \Gamma' \quad (1)$$

$$L = \rho \left(A \frac{d\Gamma'}{dt} + \Gamma' \frac{dA}{dt} \right) \quad (2)$$

蝶が羽ばたき運動一周期を通して生み出す非定常揚力を見積もる際には蝶の翅上に形成される渦輪だけでなく、翅の下死点で後流へと放出される渦輪の影響も考慮する必要がある。そのため、蝶の翅上および後流に形成される渦輪の循環および渦輪内の面積の時間的な変化を調べた。蝶の翅から巻き上がる渦輪は各断面のスケールが異なり、三次元的に変形した構造である。そのため、渦輪の各断面の循環を平均化することにより、各断面のスケールが均一な渦輪と見なし、その際の渦輪の循環を算出した。渦輪内の面積においては渦輪の各断面の中心の座標を結んだ際に囲まれる領域の面積を算出した。これらの過程から得られた渦輪の循環および渦輪内の面積を用いて、蝶の翅上および後流に形成される渦輪から生み出される非定常揚力をそれぞれ見積もった。その後、これらの非定常揚力を差し引くことで、蝶の翅上および後流の渦輪の影響を含む非定常揚力を見積もった。蝶の翅上および後流の渦輪から見積もった非定常揚力を図5に示す。図5の横軸および縦軸はそれぞれ羽ばたき運動の周期および非定常揚力である。また、グラフ中の点(a)および(c)は翅の下死点であり、点(b)は翅の上死点である。

蝶の翅の打ち下ろし時に生み出される非定常揚力の見積もった結果は角度を有するL字型のシャフトによる計測結果とよく一致することがわかる。その一方で、翅の打ち上げ時に生み出される非定常揚力の見積もった結果は角度を有するL字型のシャフトによる計測結果と大まかに一致することがわかる。このことから、非定常揚力の生成に起因する蝶の翅上および後流の渦輪から非定常揚力をそれぞれ見積もり、それらを差し引くことで蝶が羽ばたき運動一周期を通して生み出す非定常揚力を見積もることが可能であることがわかった。また、非定常揚力の見積もった結果は計測誤差が約2.3%のPIV計測結果から見積もった非定常揚力である。その精度でPIV計測した渦輪から見積もった非定常揚力の一周期平均は直接計測した非定常揚力の一周期平均に対して、約6~13%の誤差が生じる。Bomphrey⁽¹⁾らも計測誤差が約5%程度のPIV計測結果から非定常揚力の一周期平均を見積もっており、見積もった値は直接計測した非定常揚力の一周期平均に対して、約15%の誤差が生じることを報告している。このことから、本研究のPIV計測結果から見積もった非定常揚力の結果は妥当であるといえる。

4. 結 言

蝶の翅上に形成される渦輪だけでなく、翅の下死点で後流へと放出される渦輪の挙動も非定常揚力の生成に強く寄与する。そのため、蝶の翅上および後流の渦輪から非定常揚力をそれぞれ見積もり、それらの非定常揚力を差し引くことで、蝶が羽ばたき運動一周期を通して生み出す非定常揚力を予測することが可能である。

文 献

- (1) Bomphrey RJ, et al., (2006) Application of digital particle image velocimetry to insect aerodynamics: measurement of the leading-edge vortex and near wake of a hawkmoth. *Exp Fluids* 40; 546-554
- (2) Brodsky A. K., et al., (1991) Vortex formation in the tethered flight of the peacock butterfly *Inachis IO* L. (Lepidoptera, Nymphalidae) and some aspects of insect flight evolution. *J. Exp. Biol.* 161, 77-95
- (3) 黒木 太一 他, “羽ばたき運動する蝶の翅上に形成される渦輪とその挙動”, 可視化情報, Vol. 30, No. 1 (2010), pp. 395-396
- (4) Cloupeau M., et al., (1979) Direct measurements of instantaneous lift in desert locust, comparison with Jensen's experiments on the detached wings. *J. Exp. Biol.* 80; 1-15