C111

羽ばたき飛翔する蝶の翅の運動解析

淵脇 正樹[○] (九州工業大学), 井村 忠継 (九州工業大学), 田中 和博 (九州工業大学)

Visual Motion Analysis of a Butterfly Wing

Masaki FUCHIWAKI, Tadatsugu IMURA and Kazuhiro TANAKA

ABSTRACT

A number of researchers have attempted to develop small flap flying objects and MAV with various actuators and devices however they have not reached practical use at the present time. One of the reasons is that flying mechanism of birds and insects has not been clarified sufficiently. In this study, we evaluate dynamic behaviors of a wing observed from the butterfly's viewpoint in its flight. We conduct a flight observation experiment of *Cynthia cardui* performing a free flight and an image analysis and calculate flapping angles, lead-lag angle and feathering angles of the butterfly performing flapping flight to clarify the relation between them.

Keywords: Butterfly, Wing, Flapping motion, Visual motion analysis

1. 結 論

近年、構造物の保守点検や被災地での人命救助支援を目的とした小型羽ばたき飛翔体およびMicro Air Vehicle (MAV) の開発が国内外で盛んに行われているが、実用化に至っていないのが現状である。その理由に、鳥や昆虫の飛翔メカニズムが明らかにされていないことが挙げられる。蝶は、翅の羽ばたき運動と滑空を組み合わせる飛翔し、飛翔の姿が美しいことでも知られている。また、トンボのように直線的な飛翔ではなく、低周波数の羽ばたき運動により舞うように飛翔することが知られているが、未だその詳細は明らかにされていない。Dickinsonら⁽¹⁾は、飛翔に重要な3つの翅の運動について報告した。また、Sunada⁽²⁾らは、離陸飛翔するスジグロチョウの翅の挙動について報告している。これまでに、飛翔するヒメアカタテハの翅の挙動を明らかにし、また、翅まわりの二次元渦流れ構造を定性的に評価した⁽³⁾。しかしながら、これらの結果は空間的評価である。

本研究では、自由飛翔するヒメアカタテハの飛翔観察実験とその画像解析により、蝶自身から見た翅のフラッピング角、リードラグ角およびフェザリング角を算出し、これらの関連性を明らかにすることを目的とする。

2. 実験装置および方法

本研究に用いたヒメアカタテハ(学名: *Cynthia cardui*)を図1に示す。その翅弦長 c 、翅スパン長さ l 、翅面積 s および体重 m はそれぞれ25 [mm], 65 [mm], 655 [mm²] および160 [mg]である。蝶はアクリル容器(300×500 mm²)

Fig. 1 *Cynthia cardui* used in our study

(a) Measuring points (b) Coordinate conversion

Fig. 2 Measuring points on a butterfly wing and coordinate conversion to viewpoint from butterfly

内を自由に飛翔し、その翅の羽ばたき運動をハロゲンライトを照明として、高速度カメラ(1125 [fps])で撮影した。飛翔観察実験により得られた画像を図2(a)に示すように蝶の重心●(CG:胸部と腹部の間)、頭部■(Head)および右前翅先端▲(Right wing tip)の座標と右翅のスパン長さ l に対して、 $l/4$, $l/2$, $3l/4$ の位置の前縁●および後縁■の座

Fig. 3 Flapping angle β , lead-lag angle ζ and feathering angle θ of a butterfly

標をフレーム毎に抽出した。これらの座標点を図 2(b)に示すように、重心を原点とするXYZ 空間座標系からY 軸周りに姿勢角 θ_r [rad.] (重心と頭部を結んだ直線と空間的水平線のなす角)だけ回転させることにより、蝶自身から見た視点の座標系へ変換する。変換した座標点と蝶の翅スパン長さより、図 3(a), (b)および(c)に示すように、翅の上下方向の運動であるフラッピング角 β [rad.], 前後方向の運動であるリードラグ角 ζ [rad.]およびねじり運動であるフェザリング角 θ [rad.]をそれぞれ算出した。

3. 実験結果および考察

自由飛翔する蝶の翅先端の軌跡を図 4 に示す。横軸および縦軸にそれぞれリードラグ角 ζ [rad.]およびフラッピング角 β [rad.]を示す。また、図の細線はそれぞれ翅の打ち下ろし時および打ち上げ時の軌跡を示し、また、太線はその平均の軌跡を示す。

自由飛翔する蝶は、翅の打ち下ろし時は緩やかなカーブを描き、打ち上げ時はほぼ真直ぐな軌跡を描いていることがわかる。すなわち、打ち下ろし時には、リードラグ角を大きく変化させ、打ち上げ時には、フラッピング角だけを素早く変化させて羽ばたいている。これまでに、羽ばたき運動の打ち上げと打ち下ろしの時間比が約 1:1.25 であることを明らかにしているが⁽¹⁾、この結果からも証明できる。

自由飛翔する蝶の翅のフェザリング角 θ の時間変化を図 5 に示す。横軸に時間 t [sec]を、縦軸にフェザリング角 θ [rad.]を示す。赤線、青線および緑線はそれぞれ翅基点より $3/4$, $1/2$ および $1/4$ の位置におけるフェザリング角を示す。また、●および■はそれぞれフラッピング角の上死点および下死点を示している。

自由飛翔する蝶の翅は、いずれの位置においてもフェザリング角に周期性が見られるが、翅スパン方向の位置によってその大きさは異なる。胴体に最も近い $1/4$ から翅スパン中心 $1/2$ 、翅先端に最も近い $3/4$ になるに従ってフェザリング角も大きくなる。すなわち、翅先端に近づくにつれて、翅を大きくねじっていることがわかる。また、 $t = 0.03, 0.11, 0.18$ および 0.27 付近では、翅スパン中心 $1/2$ および翅先端に近い $3/4$ におけるフェザリ

Fig. 4 Traces of the wing tip of the butterfly performing a free flight

Fig. 5 Time variations of feathering angle θ of the butterfly's wing performing a free flight

ング角は増加しているが、胴体に最も近い $1/4$ では減少していることがわかる。すなわち、翅の打ち下ろし時の下死点付近では、翅前縁の翅脈を胴体に近い部分と翅先端では逆方向にねじっている。これまでに、翅前縁の翅脈は弾性変形することを明らかにしているが⁽¹⁾、逆方向にねじるほどの大きな弾性変形であることがわかる。

4. 結言

自由飛翔する蝶は、翅を上下に打ち上げ/打ち下ろし運動を行うだけでなく、前後方向にも運動させており、リードラグ角が飛翔の重要なパラメータの一つである。また、フェザリング角を翅スパン方向に大きく変化させており、胴体付近と翅先端付近では、翅先端の翅脈は逆位相のねじり運動を行っている。

参考文献

- 1) Dickinson M.H., Lehmann F.O. and Sane S. P., *Science*, Vol. 284, pp. 1954-1960, (1999)
- 2) Sunada S., Kawachi K., Watanabe I. and Azuma A., *J. Exp. Bio.*, Vol. 183, pp. 249-277, (1993)
- 3) Fuchiwaki M. and Tanaka K., *12ISFV-156*, (2006)