

はりとシェルによる昆虫羽ばたき翼のキャンバー生成に対する 形状簡略化モデリング*

A shape simplification modeling of the cambering in insect's flapping wings using beam and shell

石原 大輔¹⁾, 横田 順²⁾, 大西 南斗²⁾, 二保 知也¹⁾, 堀江 知義¹⁾

Daisuke ISHIHARA, Jun YOKOTA, Minato ONISHI, Tomoya NIHO and Tomoyoshi HORIE

¹⁾ 九州工業大学大学院情報工学研究院 (〒820-8502 飯塚市川津 680-4)

²⁾ 九州工業大学大学院情報工学府 (〒820-8502 飯塚市川津 680-4)

In this study, a shape simplification modeling of insect flapping wings is proposed in order to reveal the mechanical roles of the veins in their cambering, since it seems to be unclear how the elastic deformation of insect wings caused by the aerodynamic force results in their camber. In the proposed modeling, the veins are divided into the areas according to their functions, and the macroscopic constitutive relationship in each area is described using the corresponding beam. Furthermore, the wing membrane supported by the veins is described using a rectangular shell. The aerodynamic pressure dominant in the cambering is considered in the static deformation of the model wing. The finite element analysis taking into account the geometric nonlinearity is applied to the proposed model with the setup consistent with the actual insect. As the result, the mechanical roles of the veins in the cambering of insect flapping wings are revealed.

Key Words: Insect Flapping Wing, Camber, Beam, Shell, Finite Element Method

1. 緒言

昆虫は約3億年前に空へ進出した最初の生物である。他の移動手段に対する飛行の優位性により、昆虫は世界中にその生息域を拡大してきた。昆虫羽ばたき飛行は進化の過程で改善されていき、優れた飛行性能を獲得している⁽¹⁾。ゆえに近年、昆虫羽ばたき飛行を規範とする微小飛行機 (Micro Air Vehicles; MAV) の開発が期待されている。

昆虫羽ばたき飛行は、細胞、神経、知覚、筋骨格、駆動、翼運動、空力といった時間・空間スケールが広範囲に渡る多層のかつ複合的な領域から成り立ち、それらが一体となって働くことで、その優雅で繊細な振る舞いを可能にしている。これらの領域毎に、昆虫羽ばたき飛行を理解しようとする試みがなされている⁽²⁾。

本研究の対象となる力学的領域においては、昆虫が飛行し、操縦するための力やトルクを生み出す翼運動と空力的メカニズムを明らかにする必要がある。その基本となるのは、羽ばたきによる前縁渦の生成である⁽³⁾。この羽ばたきの最中に、

翼はスパン方向まわりの回転 (フェザリング運動) や8の字といった特徴的な翼先端軌跡を示す⁽⁴⁾。翼基部の関節は、骨片と筋肉からなる複雑な構造となっている。この関節は飛翔筋による駆動の力やトルクを翼に伝達するトランスミッションとして働くが、その詳細なメカニズムは未だに明らかでない⁽²⁾。翼運動によっては、関節の働きによる能動的なものか、受動的なものか、必ずしも明確ではないようである⁽⁵⁾。しかしながら、フェザリング運動や特徴的な翼先端軌跡は、翼と周囲の空気との連成によって生じる可能性が強く示唆されている⁽⁶⁾⁻⁽¹¹⁾。

これらに加えて、羽ばたきの最中に、翼にはキャンバーが生じる⁽¹⁾⁽⁴⁾⁽¹²⁾⁽¹³⁾⁽¹⁴⁾。翅脈と翼膜で構成された翼は内部に筋肉を持たないので、空気力による翼の弾性変形の結果として、キャンバーが生じると考えられる⁽¹³⁾。キャンバーは空力性能を向上させる⁽¹⁹⁾ので、それが生じるメカニズムを解明することは、昆虫羽ばたき飛行を理解する上で重要といえる。さらに、それは昆虫規範型 MAV の設計原理や外力に対する膜の変形を支持構造によって受動的に制御して特定の形状にする技術につながることを期待される。

これまで昆虫翼の構造を理解するために、そのモデリングが概念モデルから、単純な物理モデルや解析モデル、さらに

* 原稿受付 2018 年 10 月 30 日, 改定年月日 2018 年 12 月 11 日, 発行年月日 2018 年 12 月 27 日, ©2018 年 日本計算工学会.
Manuscript received, October 30, 2018; final revision, December 11, 2018; published, December 27, 2018. Copyright © 2018 by the Japan Society for Computational Engineering and Science.

は詳細な有限要素モデルへと発展していき、それぞれの目的に対して、有効性を発揮してきた⁽¹²⁾。しかしながら、空気力による翼の弾性変形が結果としてキャンバーを生じる力学的詳細は未だ明らかではない。そこで本研究では、昆虫羽ばたき翼のキャンバー生成における翅脈の力学的役割を解明することを目的として、その形状簡略化モデリングを行う。

複数の昆虫の目 (order) で、翼がキャンバーを示す⁽¹⁾⁽¹⁴⁾。それらは形態的に多様なので、上述の目的のために、形態の詳細から離れる必要がある。そこで翅脈を詳細に表す代わりに、それらを機能毎に複数の領域に分け、各領域の大域的構成関係をはりによって表す。翅脈のネットワークによって支持される翼膜はシェルによっても表す。大域的構成関係を異方性材料によっても表す方法も考えられる⁽²⁰⁾が、本研究では、翅脈が与える大域的構成関係を抽出するのに、はりを用いる。キャンバー生成において、空気の動圧が支配的と考えられるので、それによる静的弾性変形を考える。翼形状を長方形とする。その翼面積の断面2次モーメントの無次元半径は、典型的な昆虫翼に近い値を取る。実際の昆虫と整合するように設定された本モデルに、幾何学的非線形性を考慮した有限要素解析を適用する。そして昆虫羽ばたき翼のキャンバー生成における翅脈の力学的役割を明らかにする。

2. はりとシェルによる昆虫羽ばたき翼の形

状簡略化モデリング

2.1 解析の基本的考え方 昆虫羽ばたき翼の概要を Fig. 1 に示す。同図において、羽ばたき軸と y 軸が一致し、翼前縁が xz 面内で羽ばたき運動して、ストローク角 Φ のストローク面を描いており、翼前縁が x 軸と一致するとき、すなわち、羽ばたき角変位 $\varphi = 0$ のとき、各半ストロークの間中であるとする。キャンバーは各半ストロークの間中付近で最も顕著に現れる⁽¹⁵⁾。ゆえに本研究では、 $\varphi = 0$ のときのキャンバーの生成を考える。但し、同図に示すように、翼が y 軸に関して時計回りに羽ばたいているものとする。

ストローク反転後、キャンバーにリコイルが見られる⁽¹⁵⁾ものの、慣性効果の影響は急速に減衰する⁽¹⁰⁾。さらに昆虫羽ばたき翼のレイノルズ数においては、翼に作用する流体力のうち、流体圧力が支配的である⁽³⁶⁾。ゆえに流体圧力による $\varphi = 0$ のときのキャンバーの生成を考える。

カルマン渦列が形成される2次元翼の線形並進⁽³⁵⁾と異なり、3次元翼の羽ばたき並進⁽³⁵⁾においては、軸流が前縁渦を安定化させることにより、流体圧力が安定して翼に作用する⁽³⁶⁾。ゆえに、一定の速度で羽ばたき並進する3次元翼に作用する流体圧力を適切な流体力係数のもとで準定常評価することができる⁽³⁷⁾。

羽ばたき角速度の時刻歴は、実際の昆虫の観測^{(16) - (18)}に基づき、Fig. 2 のように台形波として表すことができ^{(9) - (11)}、 $\varphi = 0$ 付近で、一定の羽ばたき角速度 ω_{\max} を取る。ゆえに $\varphi = 0$ のときのキャンバーを生成する流体圧力を、準定常評価による次式を用いて与えることができる：

$$P = \frac{1}{2} C_D \rho^f V_{\max}^2 \quad (1)$$

$$V_{\max} = \omega_{\max} r = \frac{8\Phi r}{3T_\varphi} \quad (2)$$

ここで C_D 、 ρ^f 、 V_{\max} 、 r 、 Φ 、 T_φ は、それぞれ、平板に作用する抗力係数、空気密度、翼面上の各点における最大羽ばたき速度、翼面上の各点の羽ばたき軸 (y 軸) からの翼スパン方向長さ、ストローク角、羽ばたき周期である。但し、Fig. 2 における加減速時間 t_a を典型的な $T_\varphi/8$ としている^{(9),(10)}。

以上から、本研究では、 $\varphi = 0$ のときのキャンバーの生成を対象とするものとし、そのときの準定常評価された流体圧力を用いて、後述する昆虫翼モデルの静的弾性解析を行う。このとき、キャンバーとともに生じるねじりも解析される。

キャンバーとねじりは Fig. 3 のように定義される。同図 (a) のように、キャンバーの大きさを翼弦中央から翼面までの高さの翼弦長に対する比⁽¹⁵⁾とし、翼の進行方向に対して凹のキャンバーを正とする。また同図 (b) のように、ねじりの大きさを変形後の翼弦の変形前の翼弦に対する角 (フェザリング角 θ ⁽⁹⁾) で定義し、翼スパン方向の反時計回りを正とする。このフェザリング角は迎え角や入射角⁽¹⁵⁾ と 1 次従属関係にあることに注意する。

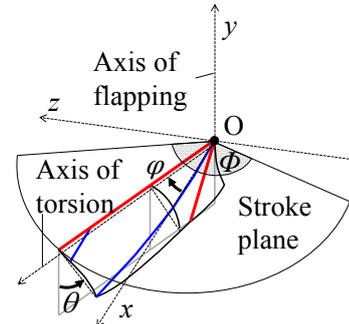


Fig. 1. Schematics of the flapping model wing. The red lines indicate the beams representing the supporting areas at the leading edge and near the trailing edge. The blue lines indicate the beams representing the significant veins distributing in the intermediate area between the supporting areas. Φ is the stroke angle, φ is the flapping angular displacement, and θ is the feathering angle.

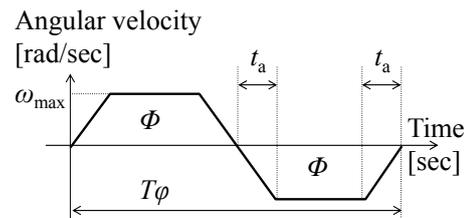


Fig. 2. Time history of the flapping angular velocity. Φ , t_a , and ω_{\max} express the stroke angle, the acceleration time, and the maximum flapping angular velocity, respectively.

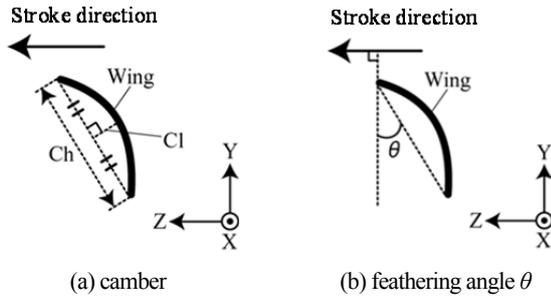


Fig. 3. Evaluations of the camber and the torsion. The black solid lines indicate the wing chord. The black arrows indicate the direction of the flapping motion.

2.2 はりとシェルによる翼構造のモデリング 昆虫翼の形態の詳細を表す有限要素モデルは、その役割を理解するのに役立つ(21)(24)。しかしながら、空気力による昆虫翼の弾性変形が結果としてキャンパーを生じる力学的詳細は未だ明らかではない。昆虫翼の形態は多様であり、その詳細は、翅脈の複雑なネットワークや3次元的なコラゲーション構造(25)(27)といったマクロスコピックな複雑さから、昆虫翼を構成する翅脈の様々な断面形状(28)、翅脈のサンドイッチ構造(29)、微小な翅脈による顕著な翅脈の補強(28)といったミクロスコピックな複雑さまで多岐に渡る。ゆえに本研究では、昆虫羽ばたき翼におけるキャンパー生成に対する翅脈の力学的役割を解明するために、ハナアブをモデル昆虫としつつも、特定の昆虫翼の形態の詳細から離れて、はりとシェルによる昆虫羽ばたき翼の形状簡略化モデリングを以下のように行う：

ハナアブの翼の模式図をFig. 4に示す。同図において、顕著な翅脈が一体となって翼全体を支持する領域を灰色で示す(30)。これらの領域は細長いので、その大域的な挙動は曲げとねじりで特徴付けられる。ゆえに、これらの領域の大域的構成関係を表すためには、はりが適切である。Fig. 4に示すように、これらの間の領域において、翼基部から翼後縁まで翼全体を斜めに横切るように、顕著な翅脈が分布している。さらに、翼先端付近にも顕著な翅脈が分布している。前縁側と後縁側の支持領域と同様に、これらを2本のはりで代表させて、大域的構成関係を表す。翼膜はシェルとして表す。

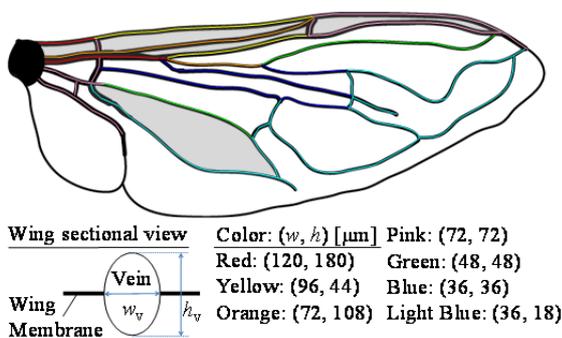


Fig. 4. Schematic view of a hoverfly's wing. The significant veins are drawn using the bold solid lines. The gray areas are the major supporting areas(30). The veins are highlighted using colors to specify their dimensions(34).

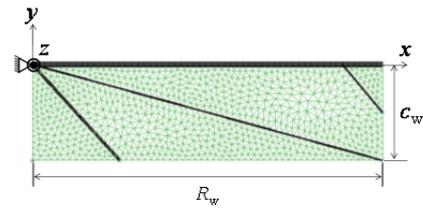


Fig. 5. Shape simplification modeling of insect wings. R_w and c_w express the wing span and chord lengths, respectively. The wing membrane is discretized using the triangular shell elements, which is colored using green, while the beams corresponding to the veins are highlighted using the black bold lines.

Table 1. Analysis parameters of the shell representing the wing membrane.

R_w [mm]	c_w [mm]	h_m [mm]	E_m [GPa]	ν_m
11.3	3.11	2.0	1.0	0.49

(R_w : wing's span length, c_w : wing's chord length, h_m : thickness of wing's membrane, E_m : Young's modulus of the wing's membrane, ν_m : Poisson's ratio of the wing's membrane)

羽ばたき翼に作用する動圧は、翼面積2次元モーメントの無次元半径 r_2 の2乗に比例する。長方形の r_2 は典型的な昆虫翼に近い値を取る。ゆえに簡単化のために、翼面形状を長方形とする。

以上により、Fig. 5に示すように、はりとシェルによるモデル翼を得る。同図において、前縁に配置された1本のはりがFig. 4の前縁側の支持領域を、最も左側に配置された1本のはりがFig. 2の後縁側の支持領域を、その間に配置された2本のはりがFig. 4の中央領域の翅脈分布を代表し、それらの大域的構成関係を表す。

3. 昆虫羽ばたき翼モデルのパラメータ

形態の詳細から離れる一方で、本昆虫羽ばたき翼モデルのパラメータは、現実の昆虫と整合する必要がある。ここでハエ目の昆虫は、最も基本的な飛行モードであるホバリングを行うことができる。その中でハナアブは形態学的データ、運動学的データ、材料力学的データが十分ある。そこで本研究では、ハナアブの実際のデータから、以下のように設定する。

3.1 翼膜を表すシェルの設定 翼長 R_w と平均翼弦長 c_w のデータ(31)から、 $R_w = 11.3\text{mm}$ 、 $c_w = 3.11\text{mm}$ と与える。翼面積 S_w はそれらの積により求められる。さらに翼質量 m_w のデータ(31),(32)から $m_w = 0.350 - 0.543\text{mg}$ 、昆虫の表皮の物性値のデータ(33)から翼の質量密度 $\rho_w = 1.2\text{g/cm}^3$ と与えられる。ゆえに翼体積 V_w が $V_w = m_w / \rho_w$ と求められる。翅脈体積 V_v はFig. 4に示す顕著な翅脈の径(34)による断面積とその長さの積から推定される。ゆえに翼膜体積 V_m が $V_m = V_w - V_v$ と与えられ、翼膜の平均厚さ h_m を $h_m = V_m / S_w$ により近似する。この結果、 $h_m = 1.4 - 5.5\mu\text{m}$ と推定される。本研究では、特に断らない限り、 $h_m = 2.0\mu\text{m}$ とする。昆虫の表皮の物性値のデータ(33)から、翼膜のヤング率とポアソン比をそれぞれ $E_m = 1.0\text{GPa}$ と $\nu_m =$

0.49 とする。以上のパラメータを Table 1 にまとめる。

3.2 前縁側と後縁側の支持領域を表すはりの設定 前縁側と後縁側の支持領域は、いくつかの翅脈が一体となって、その領域を構成している。これらの支持領域は翼全体を支える役割を果たす、すなわち、翼基部を固定したときの外力に対する支配的な剛性を与える。特に、翼スパン方向に関する曲げ剛性 G_s とねじり剛性 G_θ を翼前縁側の支持領域が担い、翼弦方向に関する曲げ剛性 G_c を後縁側の支持領域が担うと仮定する。昆虫翼の曲げ試験⁽²²⁾から、 $G_s = 3.5\mu\text{N m}^2$ 、 $G_c = 0.20\mu\text{N m}^2$ 、昆虫翼のねじり試験⁽¹³⁾から、 $G_\theta = 0.013\mu\text{N m}^2$ と与えられる。これらを各領域のはりの剛性として直接用いる。

3.3 中央領域の翅脈の分布を表すはりの設定 円形断面（直径 d_v ）のはりとする。Fig. 4 に示す中央領域に分布する最も顕著な翅脈の径から、 $d_v = 48\mu\text{m}$ とする。昆虫の表皮の物性値のデータ⁽³³⁾から、翼膜のヤング率とポアソン比をそれぞれ $E_v = 1.0\text{GPa}$ と $\nu_v = 0.49$ とする。

3.4 解析の設定 昆虫翼は有限変形するので、幾何学的非線形を考慮した有限要素法による静的弾性解析を行う。解析プログラムとして、MSC Marc を用いる。要素分割を Fig. 5 に示す。同図において、はりが黒線で強調されていることに注意する。シェル要素とはり要素はそれらの境界において節点を共有させる。3 本のはりが集合する左上端の節点は、昆虫翼基部に対応する。ゆえに、Fig. 5 に示すように、その点において並進および回転の全自由度を拘束する。さらに式 (1)、(2) に基づき、空気の動圧を模擬した圧力を翼上面に作用させる。ここで、これらの式の中のパラメータは、 $C_D = 1.19$ (アスペクト比 4 の平板)、 $\rho^f = 1.2 \times 10^{-3}\text{g/cm}^3$ 、 $\Phi = 108^\circ$ 、 $T_\phi = 1/f_\phi$ 、羽ばたき周波数 $f_\phi = 161\text{Hz}$ ⁽¹⁶⁾ と与える。この C_D の値は 3 次元モデル翼の羽ばたき並進によるもの⁽⁶⁾ と比べても妥当な値である。

4. 昆虫羽ばたき翼モデルの解析

4.1 本モデルの基本的妥当性 3章の設定に基づき、有限要素解析を行ったときのモデル翼の変形を Fig. 6 に示す。同図において、モデル翼の大半で正のキャンバーが生じている。翼基部からの位置が翼長の 50%、70%、90% における翼弦の z 方向変位（翼断面形状）を、Fig. 7 に示す。同図に示すように、翼基部から離れるにつれて、翼先端の変位勾配 $\partial u_z / \partial y$ (u_z は z 方向変位を表す) が増加している。この理由は、翼膜のシェルに作用する動圧のモーメントにより、前縁のはりがねじりを生じるからである。キャンバーの翼スパン方向の分布を、Fig. 8 の黒線に示す。この結果は実際のハナアブの観測結果⁽¹⁵⁾ とよく一致している。さらに翼先端におけるフェザリング角が 27° であり、観測結果と同程度である。

3.1 節で述べたように、推定された翼膜厚さは $1.4\text{--}5.5\mu\text{m}$ の範囲にあるので、それがキャンバーの生成に与える影響を検討する。Fig. 8 に示すように、推定された翼膜厚さの範囲において、キャンバーが適切に生じていることが判る。翼膜厚さが増加すると、翼膜と翅脈の曲げ剛性が近づき、翅脈の力学的効果が相対的に小さくなる。同図に示すように、このときキ

ャンバーが減少する。これは翅脈がキャンバーの生成において、主要な力学的役割を果たしていることを示す。本設定を基準ケースとするパラメトリックスタディにより、その詳細を次節以降で検討する。以上から、本昆虫羽ばたき翼モデルは基本的に妥当である。

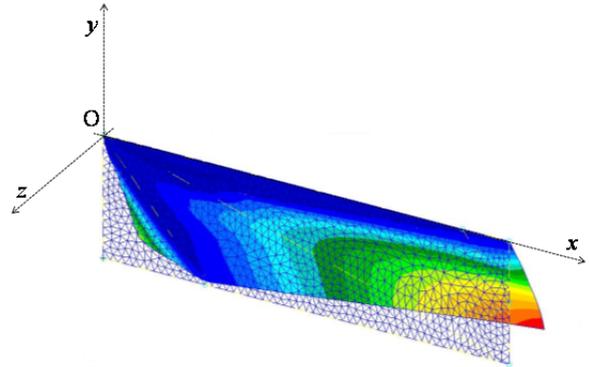


Fig. 6. Deformation of the model wing in the base case. The color contour shows the magnitude of the displacement in the z -direction.

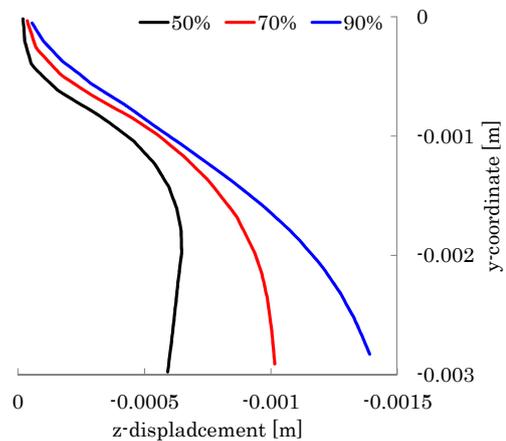


Fig. 7. Displacements in the z -direction of the wing's chords at the positions of the 50% (black line), 70% (red line), and 90% (blue line) wing's span length from the wing's base.

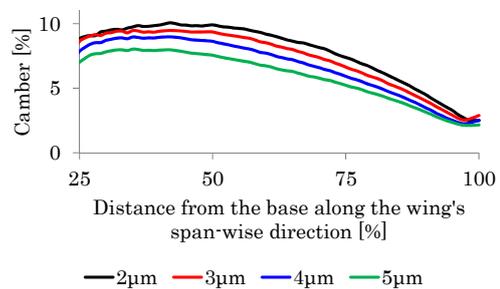


Fig. 8. Camber distribution in the base case (membrane thickness $h_m = 2\mu\text{m}$: black line) and the other membrane thicknesses ($h_m = 3\mu\text{m}$: red line, $h_m = 4\mu\text{m}$: blue line, $h_m = 5\mu\text{m}$: green line). The horizontal axis shows the distance from the wing's base along the wing's span-wise direction divided by the wing's span length, and the vertical axis shows the camber.

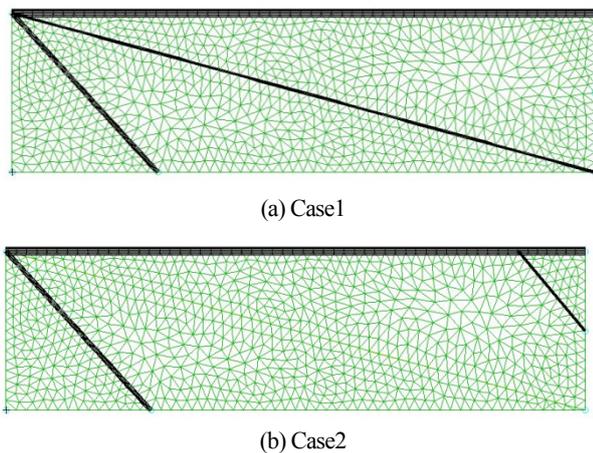


Fig. 9. Meshes for Case1 and Case2.

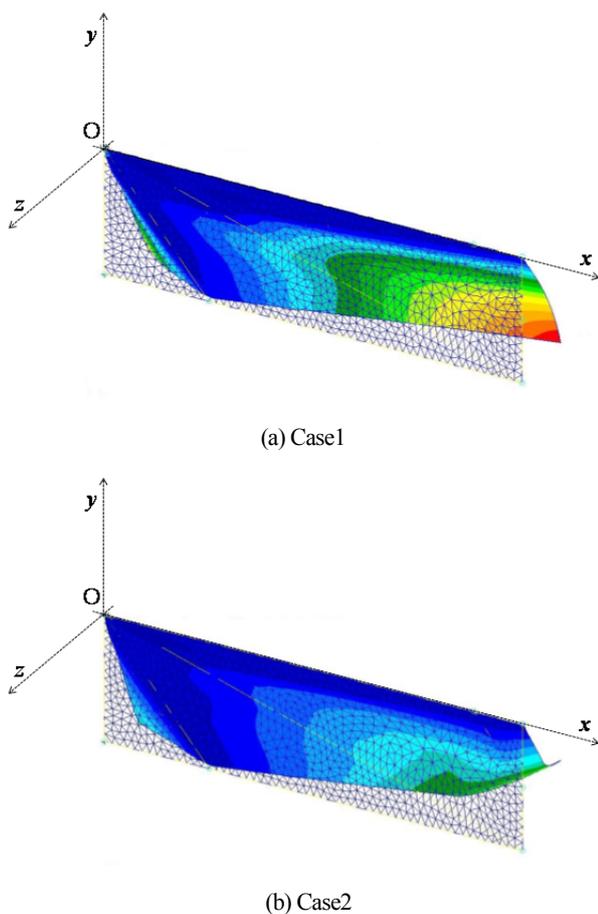


Fig. 10. The deformations of the model wings. The color contour shows the magnitude of the displacement in the z -direction.

4.2 中央領域の翹脈分布の役割 中央領域の翹脈分布の役割を検討するために、Fig. 9 (a) のような中央領域先端のはりを除く場合 (Case1) と、Fig. 9 (b) のような中央領域全体を交差するはりを除く場合 (Case2) を考える。モデル翼の変形とキャンバーの分布をそれぞれFig. 10とFig. 11に示す。Fig. 10 (a) とFig. 11の赤線に示すように、Case1ではキャンバーが翼中央から翼先端にかけて増加する。この理由は、基準ケースの場合、中央領域先端のはりが、その付近の剛性を増加させて、変形を抑制することによると考えられる。一方、

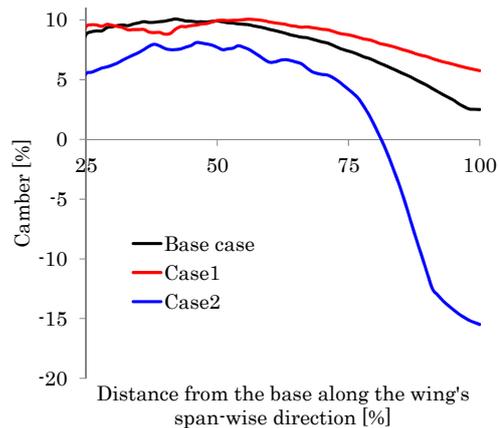


Fig. 11. Distributions of the camber along the wing's span-wise direction.

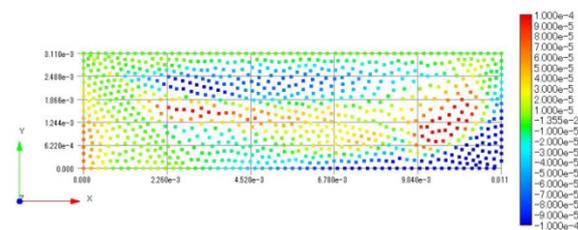


Fig. 12. Distribution of the difference of the z -displacement between the base case and the case without the beam across all of the central area (Case2).

Fig. 10 (b) とFig. 11の青線に示すように、Case2ではキャンバーが顕著に低下する。基準ケースの z 方向変位からCase2のそれを引いた差の分布をFig. 12に示す。同図から、中央領域全体を交差するはりが、各翼弦の中央付近の z 方向変位を増加させ、かつ、その先端付近を中心に、後縁の z 方向変位を減少させていることが判る。この効果により、中央領域全体を交差するはりがキャンバーを増加させている。中央領域全体を交差するはりが各翼弦の中央付近の z 方向変位を増加させるのは、そのはりがその付近から先端までの動圧によるモーメントを伝達するからと考えられる。一方、中央領域全体を交差するはりが先端付近を中心に後縁の z 方向変位を減少させるのは、そのはりがその付近の剛性を増加させるからと考えられる。

4.3 前縁側の支持領域のねじり柔軟性 前縁側の支持領域のねじり柔軟性がキャンバー生成に及ぼす影響について検討する。前縁側の支持領域を表すはりのねじり剛性を基準ケースの0.1倍と10倍に変更した場合の翼断面形状をFig. 13に、キャンバー分布をFig. 14に示す。これらの図に示すように、前縁のはりのねじり剛性が低いほど、キャンバーが増大する。この理由は次のように考えられる：前縁のはりのねじり剛性が低いほど、前縁がより大きくねじり変形することで、Fig. 13に示すように、翼弦のその部分の初期たわみ角が増加し、翼弦のたわみが増加する。それと同時に、Fig. 12に示すように、中央領域全体を交差するはりの効果によって、翼弦の後縁側のたわみが抑制されている。その結果、キャンバー

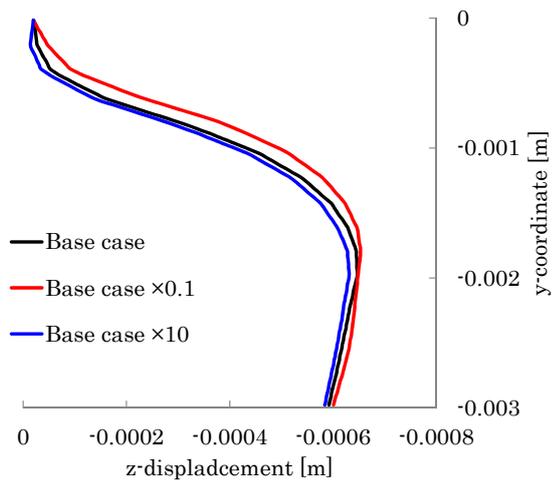


Fig. 13. Displacements in the z -direction of the wing's chord at the positions of 50% wing's span length from the wing's base. The black line indicates the base case. The red line indicates the case using the torsional stiffness 10 times smaller than the base case. The blue line indicates the case using the torsional stiffness 10 times larger than the base case.

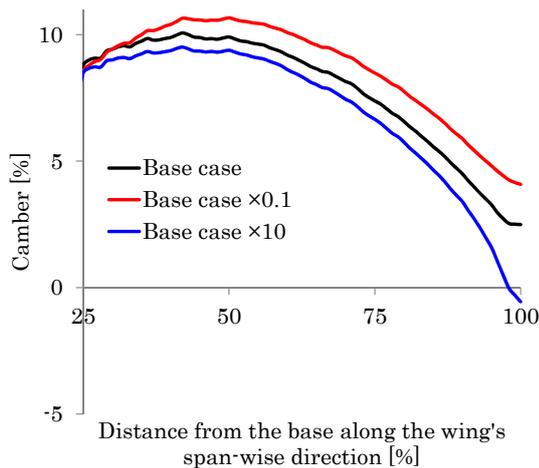


Fig. 14. Distributions of the camber along the wing's span-wise direction. The red line indicates the case using the torsional stiffness 10 times smaller than the base case. The blue line indicates the case using the torsional stiffness 10 times larger than the base case.

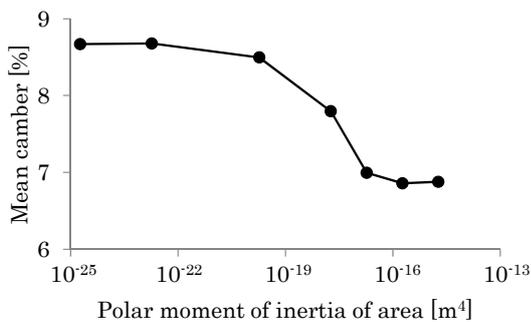


Fig. 15. Relationship between the polar moment of inertia of the area of the beam at the leading edge and the mean camber.

が増加するように、翼弦が変形する。断面2次極モーメントとキャンバーの平均の関係を Fig. 15 に示す。同図に示すように、断面2次極モーメントに対して、キャンバーの平均が単調減少することが判る。但し、断面2次極モーメントの増減の影響は、その両極において飽和する。この理由は、断面2次モーメントが十分大きいと、翼弦のたわみ変形において、前縁のほりとの接続部分が完全拘束の境界条件に収束し、断面2次モーメントが十分小さいと、それがピン支持に収束するからである。

5. 結言

本研究では、昆虫羽ばたき翼におけるキャンバー生成に対する翅脈の力学的役割を解明することを目的として、はりとシェルによる昆虫羽ばたき翼の形状簡略化モデリングを行った。モデル昆虫としてハナアブを用いる一方で、昆虫翼の多様性を考慮して、その形態の詳細から離れるために、翅脈を前縁側と後縁側の支持領域、および、それらの中間領域に分け、各領域が担う大域的構成関係をはりとして表した。また翅脈によって支持される翼膜を、はりによって支持される長方形のシェルとして表した。キャンバーの生成において、支配的と考えられる空気の動圧を、準定常仮定に基づき、翼スパン方向に2次関数的に変化する圧力としてモデル化し、それによるモデル翼の静的大変形問題を考えた。実際の昆虫と整合した解析を行うために、実際のハナアブのデータを本モデルに導入し、幾何学的非線形性を考慮した有限要素解析を行った。その結果、本モデル翼から、実際のハナアブとよく一致するキャンバーの分布が得られたので、本モデル翼は基本的に妥当であると考えられる。さらに昆虫翼のキャンバー生成に対する翅脈の力学的役割として、以下の点について明らかにした：

(a) 中央領域の翅脈分布：この領域全体を交差する翅脈分布は、空気の動圧によるモーメントを伝達することで、各翼弦の中央付近のたわみを促進する。さらに、それは翼のたわみ剛性を増加させることで、その先端付近を中心に、後縁のたわみを抑制する。これらの力学的効果により、それはキャンバーを増加させることができる。一方、この領域先端の翅脈分布は、その付近の剛性を増加させることで、キャンバーを抑制すると考えられる。

(b) 前縁側の支持領域のねじり柔軟性：この領域のスパン方向まわりのねじり柔軟性は、各翼弦のたわみを促進する。この力学的効果と中央領域の翅脈分布の力学的効果により、それはキャンバーを増加させることができる。但し、本研究の範囲では、本モデル翼がハエ目以外の昆虫に適用可能かどうかについて明確になっておらず、今後の十分な検討が必要である。

今後は、より精密な力学的条件下で検討するために、本モデル翼の流体構造連成解析を行ったり、実験的に検討するために、本モデル翼のマイクロマシニングによる作成を行ったりする予定である。

謝辞

本研究は JSPS 科研費 17H02830 の助成を受けたものである。

参考文献

- (1) Brodsky, A. K., *The Evolution of Insect Flight*, Oxford Science Publication, Oxford, 1994.
- (2) Beatus, T., Cohen, I., Wing-pitch modulation in maneuvering fruit flies is explained by an interplay between aerodynamics and a torsional spring, *Physical Review E*, Vol. 92, 2015, 022712 (13pages).
- (3) Ellington, C. P., Van den Berg, C., Willmott, A. P., Thomas, L. R., Leading-edge vortices in insect flight, *Nature*, Vol. 384, 1996, pp. 626-630.
- (4) Ellington, C. P., The aerodynamics of hovering insect flight. III. Kinematics, *Philosophical Transactions of the Royal Society of London B*, Vol. 305, No. 1122, 1984, pp. 41-78.
- (5) Chapman, R. F., *The Insects: Structure and Function 5th Edition*, Cambridge University Press, Cambridge, 2012.
- (6) Ishihara, D., Horie, T., Fluid-structural interaction modeling of insect flight, *Transaction of The Japan Society of Mechanical Engineers B*, Vol. 72, 2016, pp. 1410-1417.
- (7) Ishihara, D., Horie, T., Denda, M., A two-dimensional computational study on the fluid-structure interaction cause of wing pitch changes in dipteran flapping flight, *The Journal of Experimental Biology*, Vol. 212, 2009, pp. 1-10.
- (8) Ishihara, D., Yamashita, Y., Horie, T., Yoshida, S., Niho, T., Passive maintenance of high angle of attack and its lift generation during flapping translation in crane fly wing, *The Journal of Experimental Biology*, Vol. 212, 2009, pp. 3882-3891.
- (9) Ishihara, D., Horie, T., Niho, T., An experimental and threedimensional computational study on the aerodynamic contribution to the passive pitching motion of flapping wings in hovering flies, *Bioinspiratoin and Biomimetics*, Vol. 9, 2014, 046009 (23pages).
- (10) Ishihara, D., Horie, T., Passive mechanism of pitch recoil in flapping insect wings, *Bioinspiratoin and Biomimetics*, Vol. 12, 2017, 016008 (15pages).
- (11) Ishihara, D., Role of fluid-structure interaction in generating the characteristic tip path of a flapping flexible wing, *Physical Review E*, Vol. 98, 2018, 032411 (19pages).
- (12) Wootton, R. J., Herbert, R. C., Young P. G., Evans, K. E., Approaches to the structural modelling of insect wings, *Philosophical Transactions of the Royal Society of London B*, Vol. 358, 2003, pp. 1577-1587.
- (13) Ennos, A. R., The importance of torsion in the design of insect wings, *The Journal of Experimental Biology*, Vol. 140, 1988, pp. 137-160.
- (14) Dudley, R., *The biomechanics of insect flight*, Princeton University Press, Princeton, New Jersey, 2000.
- (15) Walker, S. M., Thomas, A. L. R., Taylor, G. K., Deformable wing kinematics in free-flying hoverflies, *Journal of The Royal Society Interface*, Vol. 7, 2010, pp. 131-142.
- (16) Ellington, C. P., The Aerodynamics of Hovering Insect Flight. III. Kinematics, *Philosophical Transactions of the Royal Society of London B*, Vol. 305, No. 1122, 1984, pp. 41-78.
- (17) Ennos, A. R., Inertial and aerodynamic torques on the wings of Diptera in flight, *The Journal of Experimental Biology*, Vol. 142, 1989, pp. 87-95
- (18) Ennos, A. R., The inertial cause of wing rotation in Diptera, *The Journal of Experimental Biology*, Vol. 140, 1988, pp. 161-169.
- (19) Du, G, Sun, M., Effects of wing deformation on aerodynamic forces in hovering hoverflies, *The Journal of Experimental Biology*, Vol. 213, 2010, pp. 2273-2283.
- (20) Nakata, T., Liu, H., A fluid-structure interaction model of insect flight with flexible wings, *Journal of Computational Physics*, Vol. 231, 2012, pp. 1822-1847.
- (21) Mengesha, T. E., Vallance, R. R., Barraja, M, Mittal, R., Parametric structural modeling of insect wings, *Bioinspiration and Biomimetics*, Vol. 4, 2009, 036004 (15pages).
- (22) Combes, S. A., Daniel, T. L., Flexural stiffness in insect wings I. Scaling and the influence of wing venation, *The Journal of Experimental Biology*, Vol. 206, pp. 2979-2987, 2003.
- (23) Kesel, A. B., Philippi, U., Nachtigall, W., Biomechanical aspects of the insect wing: an analysis using the finite element method, *Computers in Biology and Medicine*, Vol. 28, 1998, pp. 423-437.
- (24) Herbert, R. C., Young, P. G., Smith, C. W., Wootton, R. J., Evans, K. E., The hind wing of the desert locust (*Schistocerca Gregaria* Forskal), III. A finite element analysis of a deployable structure, *The Journal of Experimental Biology*, Vol. 203, 2000, pp. 2945-2955.
- (25) Tanaka, H., Wood, R. J., Fabrication of corrugated artificial insect wings using laser micromachined molds, *Journal of Micromechanics and Microengineering*, Vol. 20, 2010, 075008 (8pages).
- (26) Sunada, S., Zeng, L., Kawachi, K., The relationship between dragonfly wing structure and torsional deformation, *Journal of Theoretical Biology*, Vol. 193, 1998, pp. 39-45.
- (27) Rees, C. J. C., Form and functions in corrugated insect wings, *Nature*, Vol. 256, 1075, pp. 200-203.
- (28) Wood, R. J., Functional morphology of insect wings, *Annual Review of Entomology*, Vol. 37, 1992, pp. 113-140.
- (29) Wang, X. S., Li, Y., Shi, Y. F., Effects of sandwich microstructures on mechanical behaviors of dragonfly wing vein, *Composites Science and Technology*, Vol. 68, 2008, pp. 186-192.

- (30) Wootton, R. J., Support and deformability in insect wings, *Journal of Zoology London*, Vol. 193, 1981, pp. 447-468.
- (31) Ellington, C. P., The aerodynamics of hovering insect flight. II. Morphological Parameters, *Philosophical Transactions of the Royal Society of London B*, Vol. 305, No. 1122, 1984, pp. 17-40.
- (32) Ennos, A. R., The kinematics and aerodynamics of the free flight of some Diptera, *The Journal of Experimental Biology*, Vol. 142, 1989, pp. 49-85.
- (33) Wainwright, S. A., Biggs, W. D., Currey, J. D., Gosline, J. M., *Mechanical design in organisms*, Princeton University Press, Princeton, New Jersey, 1982.
- (34) Tanaka, H., Whitney, J. P., Wood, R. J., Effect of flexural and torsional wing flexibility on lift generation in hoverfly flight, *Integrative and Comparative Biology*, Vol. 51, No. 1, 2011, pp. 142-150.
- (35) Sane, S. P., The aerodynamics of insect flight, *The Journal of Experimental Biology*, Vol. 206, 2003, pp. 4191-4208.
- (36) Dickinson, M. H., Lehmann, F. O., Sane, S. P., Wing rotation and the aerodynamic basis of insect flight, *Science*, Vol. 284, 1999, pp. 1954-1960.
- (37) Whitney, J. P., Wood, R. J., Aeromechanics of passive rotation in flapping flight, *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 660, 2010, pp. 197-220.