

蝶の羽ばたき飛翔の縦方向運動の時間スケール

横山 直人¹, 飯間 信², 泉田 啓¹, 平井 規央³

¹京大工, ²広大理, ³阪府大生命環境科学

Timescales of longitudinal motion of butterfly's flapping flight

Naoto Yokoyama¹, Makoto Iima², Kei Senda¹, Norio Hirai³

¹Faculty of Engineering, Kyoto Univ., ²Faculty of Science, Hiroshima Univ.,

³Grad. School of Life & Environmental Sciences, Osaka Pref. Univ.

1 はじめに

蝶の優美な飛翔は, 羽ばたき運動と流体の相互作用によって作り出される. 数値的にモデル化した蝶に, 実験観測された周期的な関節運動をさせても, 縦方向に不安定な飛翔となり, 周期的な飛翔は実現されない.[1]

羽ばたき飛翔する生物は, 感覚器から体の姿勢や位置の情報を得る.[2, 3] この情報に基づいて, 羽ばたき方を陽に変えることによって生物は姿勢や位置を能動的に制御する. 例えば, モンシロチョウは胸部と腹部の間の関節角を変えることによって, 胸部姿勢を安定化すると考えられている.[4] また, 受動的に引き起こされる, 翅の弾性変形が蝶の羽ばたき飛翔の安定化に寄与することが報告されている.[5]

本研究では, 2次元の蝶モデルを作成し, 縦方向不安定性の特性を数値的に明かにする. この特性を用いて, 能動的な制御によらない飛翔安定化の機構を構築する.

2 計算方法

本研究で用いる2次元蝶モデルを図1に示す. 蝶の胸部, 腹部, 翅は2次元化によって, スパン方向に無限に長い板に置き換えられる. モデル化された蝶は, 長さ l_t , 質量 m_t の胸部に, 腹部関節によって長さ l_a , 質量 m_a の腹部が接続されている. 翼弦長 c_m を持つ翅は, 質量を持たないとする. 翅は簡単のために, 常に胸部と平行であるとし, 胸部と翅の距離を β とする. また, 3次元の蝶のリードラグ角に相当する胸部前端と翅前縁のずれの量を η とする. $\beta = 0$ かつ $\eta = 0$ のとき, 翅の前縁と胸部の前端が一致するものとする. 羽ばたき運動 β が時間的に与えられるとき, この蝶の状態は, 胸部重心の x 座標 x_t , y 座標 y_t , 胸部の姿勢角 θ_t および腹部関節角 θ_a とそれらの時間微分で与えられる.

本研究では, 空気の密度, アサギマダラの翅の空力平均翼弦長, 前進飛翔速さを用いて無次元化する. また, アサギマダラの諸元より, $l_t = 3/8$, $l_a = 3/4$, $c_m = 1$ とする. 同様に, $m_t = 3$ および $m_a = 8$ とし, 翅の質量は無視する. また, 胸部と腹部は2次元の板とモデル化したので, 胸部重心まわりの慣性モーメントと腹部関節まわりの慣性モーメントは, それぞれ, $I_t = m_t l_t^2 / 3$, $I_a = m_a l_a^2 / 12$ である.

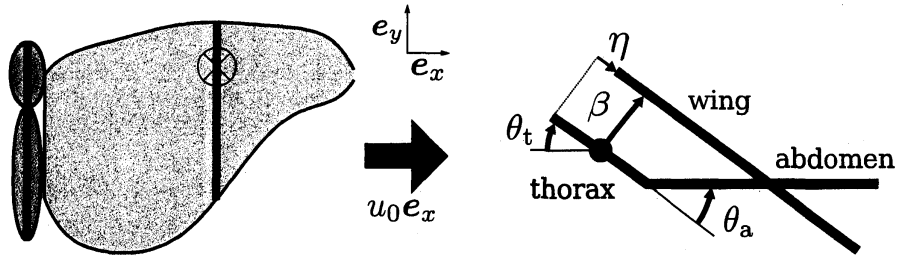


図 1: 2次元蝶モデル.

蝶の運動に対する Lagrangian は以下のように与えられる:

$$L = \frac{1}{2}m_t(\dot{x}_t^2 + \dot{y}_t^2) + \frac{1}{2}I_t\dot{\theta}_t^2 + \frac{1}{2}m_a(\dot{x}_t^2 + \dot{y}_t^2) + \frac{1}{2}I_a\dot{\theta}_a^2 + \frac{1}{8}m_a l_t^2 \dot{\theta}_t^2 - \frac{1}{2}m_a l_t \dot{\theta}_t (\dot{x}_t \sin \theta_t + \dot{z}_t \cos \theta_t) + \frac{1}{4}m_a l_t l_a \dot{\theta}_t (\dot{\theta}_t - \dot{\theta}_a) \cos \theta_a - \frac{1}{2}m_a l_a (\dot{\theta}_t - \dot{\theta}_a) (\dot{x}_t \sin(\theta_t - \theta_a) + \dot{z}_t \cos(\theta_t - \theta_a)). \quad (1)$$

ここでは時間微分を表す. 蝶の運動に対する Euler-Langrange 方程式は,

$$\frac{d}{dt} \frac{\partial L}{\partial \dot{\theta}_i} - \frac{\partial L}{\partial \theta_i} = \tau_i \quad (2)$$

である. ここで, θ_i は, x_t, y_t, θ_t および θ_a のいずれかを表す一般化座標である. τ_i は一般化座標 θ_i に対応する一般化力であり, 翅に作用する力およびトルクを変換した, x 方向の力 F_x , y 方向の力 F_y , 胸部重心まわりに作用するトルク τ_{air} と, 腹部関節に生じるトルク τ_a からなる. 流体が翅に作用する力およびトルクは, 埋め込み境界法によって得られる. また, 逆動力学法を用い, θ_a を与えることによって, 腹部関節に生じるトルク τ_a を得る. このとき, Euler-Lagrange 方程式 (2) によって, $\ddot{x}_t, \ddot{y}_t, \ddot{\theta}_t$ が得られ, これを数値積分することによって, 胸部の状態変数 x_t, y_t, θ_t およびこれらの速度が得られる.

速度を \mathbf{u} , 圧力を p として, 非圧縮流れの支配方程式は, Navier-Stokes 方程式

$$\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + (\mathbf{u} \cdot \nabla) \mathbf{u} = -\nabla p + \frac{1}{Re} \nabla^2 \mathbf{u} + \mathbf{f}_{\text{IB}}, \quad (3a)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{u} = 0, \quad (3b)$$

で与えられる. ここで, \mathbf{f}_{IB} は, 埋め込み境界法を用いて流体と蝶の相互作用を体積力に置き換えたものである. 流れ方向の速度場の境界条件には, 一様流入 $u_0 = 1$ と Sommerfeld 流出境界条件を用い, 圧力の境界条件には, Neumann 境界条件を用いる. また, 主流に垂直な境界には周期境界条件を用いた. Reynolds 数は $Re = 500$ とした. また, 周期的な羽ばたき運動を十分な時間繰り返した後の, 周期的な状態を初期条件として与える. 主流方向 e_x の計算領域の長さは 40 とした. 主流と垂直な方向 e_y の境界条件には周期境界条件を用い, その周期は 10 とした.

計算領域は, 主流方向に 1024 点, 主流と垂直な方向に 256 点の等間隔格子によって離散化される. 主流方向の微分は 4 次精度中心差分によって得られ, 主流と垂直な方向の微分は Fourier 級数によって評価される.

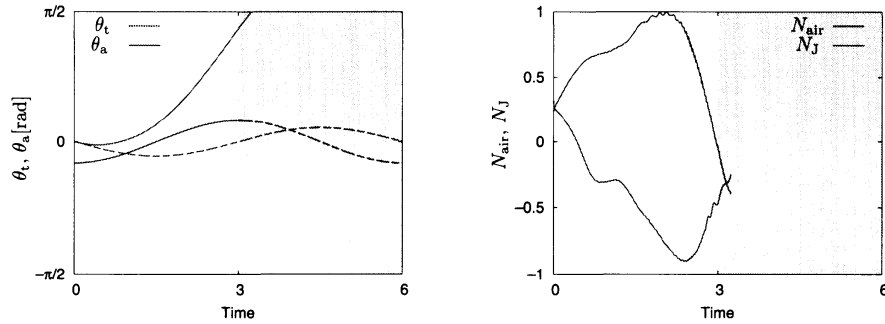


図 2: $\eta = 0$ の場合の, 胸部姿勢角および腹部関節角. 点線は 3 次元の蝶の観測から与えられる理想的な胸部姿勢角の関数形. (左) 流体による胸部重心まわりのトルクと腹部関節まわりのトルク. (右)

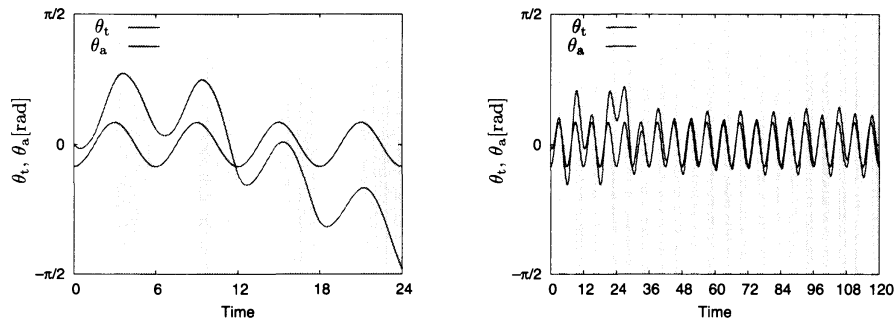


図 3: 胸部姿勢角. 左: $\eta = l_t/4$, 右: $\eta = l_t/2$.

3 数値計算結果

まず, 実際の蝶の運動に近い $\eta = 0$ の場合を考える. 羽ばたき運動は $\beta = C_\beta \cos \omega t$, $\theta_a = -C_a \cos \omega t$ を与えた. ここで, $C_\beta = 7/10, C_a = \pi/12$ を用いた. 羽ばたき運動 β と腹部運動 θ_a は, 実際のアサギマダラの運動より関数形を決定した. 羽ばたき周期 $T = 6$ であり, 換算振動数は 0.52 程度である. また, $t < 0$ では $\theta_t = -C_t \sin \omega t$ ($C_t = \pi/18$) を与え, 初期の場を生成した.

蝶の胸部姿勢角 θ_t と, 流体による胸部重心まわりのトルクと腹部関節まわりのトルクを図 2 左に示す. 初期から半周期程度後の $t \approx 3$ において, $\theta_t > \pi/2$ となり, 3 次元の蝶モデルの飛翔計算同様に縦方向に不安定化していることがわかる. このとき, 流体が蝶胸部に生成するトルクは負のトルクの大きさが, 腹部関節の生成するトルクが正のトルクに比べて小さいために, 蝶の胸部が立ち上がってしまう不安定性が生じた.

次に, 3 次元の蝶のリードラグ角に相当する η を増加させ, 翅の位置を相対的に下流に位置させる場合を考える. $\eta = l_t/4$ の場合には, $\eta = 0$ に見られた初期に胸部が立ち上がる不安定性は抑えられたものの, 約 4 周期後に $\theta_t < -\pi/2$ となり, 頭部が下がり姿勢が維持できず不安定となる.(図 3 左) さらに, 翅を下流に移動させた $\eta = l_t/2$ (図 3 右) では, 初期から 5 周期程度の揺らぎは大きい, その後, 胸部姿勢角はほぼ周期的な振動を繰り返し, 飛翔は安定となる.

翅を下流に移動させることは、流体が翅上に及ぼす力の作用点、いわゆる空力中心や圧力中心を相対的に下流に移動させることに対応する。静止翼の場合、重心よりも空力中心が下流にある場合、飛行が安定となることが知られている。[6] 振動翼の場合も、定性的には静止翼の場合と同様に、流体力の作用点を下流にすることが飛行安定化をもたらすことがわかる。ただし、振動翼の場合は、流体が及ぼす力の向きや大きさの変動が大きいため、空力中心の移動を含めた動的な解析が必要である。

実際、翅の前縁から剥離した渦が下流に移流されるにしたがって、圧力中心は下流に移動する。このとき、前縁剥離渦が生成され、剥離渦が $c_m = 1$ の翅上を移動するのに要する時間は3程度である。これは、羽ばたき運動の半周期程度であり、飛行運動と剥離渦の移流との強い相関を表している。飛行や遊泳を行う生物で、換算振動数が $1/4$ から $1/2$ 程度に限られているのは、飛行運動と渦運動の時間スケールの比が適切な領域にあることが求められるためだと考えられる。

4 まとめ

本研究では、蝶の羽ばたき飛行の縦方向安定化機構を調べるために、2次元モデルを構築し、その数値シミュレーションを行った。このモデルにおいて、完全に周期的な羽ばたき動作は、ピッチ方向に不安定であり、3次元の蝶の飛行を再現した。一方で、翅を相対的に下流に移動させ、流体が及ぼす力の作用点をより下流にすると、能動的な制御を行わない周期的な羽ばたき運動も安定な飛行を可能とすることがわかった。

本研究の数値計算は京都大学基礎物理学研究所の計算設備にて行った。

参考文献

- [1] Yokoyama, N., Senda, K., Iima, M., and Hirai, N., "Aerodynamic forces and vortical structures in flapping butterfly's forward flight," *Phys. Fluids*, Vol. 25, 2013, pp. 021902.
- [2] Sane, S. P., Dieudonné, A., Willis, M. A., and Daniel, T. L., "Antennal mechanosensors mediate flight control in moths," *Science*, Vol. 315, 2007, pp. 863.
- [3] Srinivasan, M., Zhang, S., Lehrer, M., and Collett, T., "Honeybee navigation en route to the goal: visual flight control and odometry," *J. Exp. Biol.*, Vol. 199, 1996, pp. 237-244.
- [4] Dudley, R., *The biomechanics of insect flight: form, function, evolution*, Princeton Univ. Pr., Princeton, 2002.
- [5] Tanaka, H. and Shimoyama, I., "Forward flight of swallowtail butterfly with simple flapping motion," *Bioinsp. Biomim.*, Vol. 5, 2010, pp. 026003.
- [6] John D. Anderson, J., *Introduction to flight*, McGraw-Hill, 6th ed., 2008.