

羽ばたき運動の安定性とエナジェティクス

北海道大学 電子研 柳田達雄 Tatsuo Yanagita Hokkaido Univ.

北海道大学 電子研 飯間 信 Makoto Iima Hokkaido Univ.

昆虫など羽ばたき飛行をする生物は一様流中の受動的な翼により生成される揚力より大きいな揚力を生成する事が知られており、多くのメカニズムが提案されている [1, 2, 3]。羽ばたき飛行に関して多くの研究があるが、「一様流+羽ばたき運動」という観点から揚力が羽ばたきによりどの程度増大するかを論じる場合が多い。ここでは一様流が無い”純粹”に羽ばたきのみによる揚力生成機構を調べるための数理モデルを導入し、渦点法による数値解析結果を報告する。

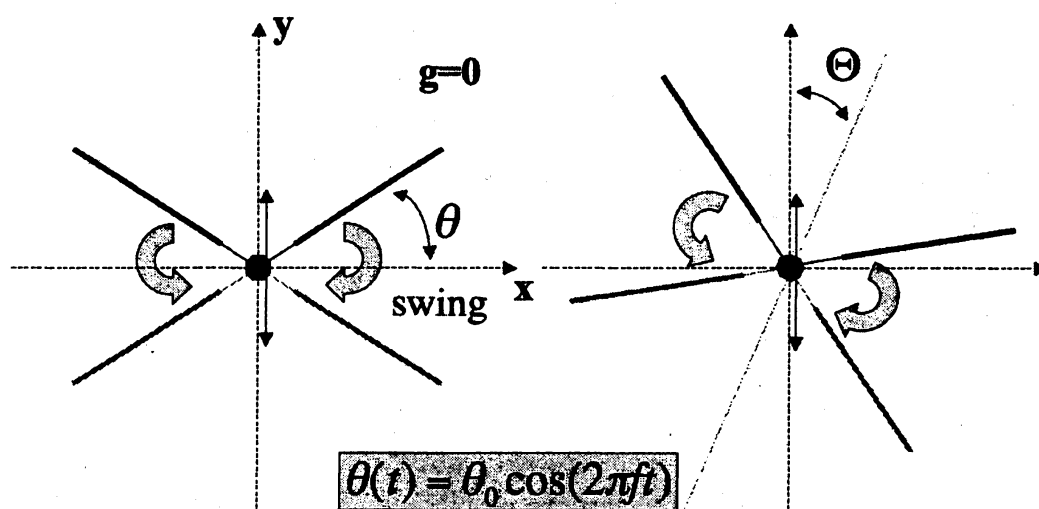


図 1: 羽ばたきの数理モデル

羽ばたきモデル。翼に対する一様流がなく、生物的な詳細を総て切り捨て、剛体翼、 y 軸対称を仮定し、羽ばたき運動も対称 $\theta = \theta_0 \cos(2\pi f t)$ としたモデル (左図)。 y 軸に対して対称ではなく回転方向 θ の自由度を持つモデル (右図)。

1 我々の数理モデル (図 1) の特徴は 1. 2次元流 2. 剛体翅 3. 重力無し 4. 流れは y 軸対称 5. 対称羽ばたき ($\theta = \theta_0 \cos(2\pi f t)$) 6. 重心運動有り (y 軸沿う VTOL (垂直離着陸機)) であり、生物学的詳細 (羽ばたきの仕方や翅の柔軟性など) を総て簡略化したモデルである。(ただし、重力がある場合でも以下の定性的結果は不変という意味においては飛行と呼べるであろう) 重力がない場合、我々の数理モデルは「対称にオールを漕いだ場合のボート」と同等である。このモデルを離散渦法により数値解析を行った。離散渦法 [4, 5] は翅 (物体境界) と流れ場を離

散的な渦点で近似する方法であり、任意の点の流れは渦点（翅と剥離渦）が励起する流れの総和として表す手法であり、要点をまとめると以下になる。1. 翅上で境界条件を満たすように渦度 Γ_i を決定する 2. 翅の端点から渦密度保存する条件で渦剥離を起こす 3. 剥離渦は励起された速度場により運動する 4. 揚力により重心運動する 5. 粘性による剥離渦の消失（剥離渦が生成されてから消失するまでの時間をここでは”寿命”と呼ぶ）

シミュレーションの結果、羽ばたき運動が対称であるにもかかわらず揚力生成が非対称となることである。この対称の破れは重心運動を考慮するかしないかで大きく異なる。重心運動が無い場合は対称な羽ばたきによる揚力生成は対称であり我々の直感と一致するが、重心運動がある場合は揚力生成が非対称となり一方向性の運動が現れる（図 2）。

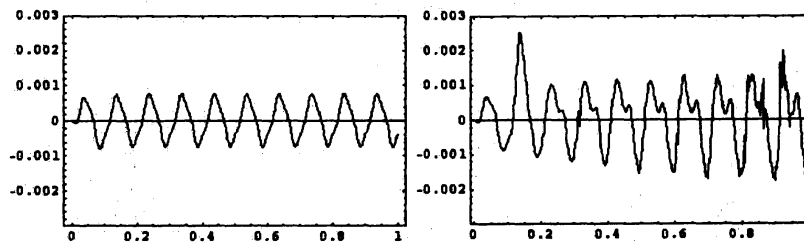


図 2: 羽ばたきの運動によって生成させた揚力

左図：重心運動なし。揚力生成は対称に生成される。右図：重心運動あり。非対称の揚力が生成され、一方向性の運動が現れる。

剥離渦と翅周りの渦との相互作用、そして重心運動があることにより一方向性の運動が現れている。感覚的には「翅で生成した剥離渦を踏み台にして」動的に対称性を破っているように見える（詳しくは文献 [6, 7]）。粘性（剥離渦の生存時間）をパラメータとしてある時間での重心位置をみると図 4 なる分岐が見える。

以下、羽ばたき運動の安定性についていくつかの場合について述べる。

1. 水平に開いた翅の回転 ($\theta_0 = 0$) に対する安定性（羽ばたき無し）：剥離渦が無い場合は完全流体においては抗力が効かず、揚力のみ生成されるため初期に与えられた回転 $\dot{\theta}_0$ が維持される。一方、翼端からの剥離渦が存在する場合には渦の寿命により異なる定常状態となる。渦の寿命が小さい場合には本質的に剥離渦が存在しない場合と同等であり定常回転となるが、寿命がある閾値を超え大きくなると回転速度は時間とともに減衰し定常回転運動となる。このとき、減衰の仕方は剥離渦の寿命により減衰振動しながら定常状態に達する場合がある。

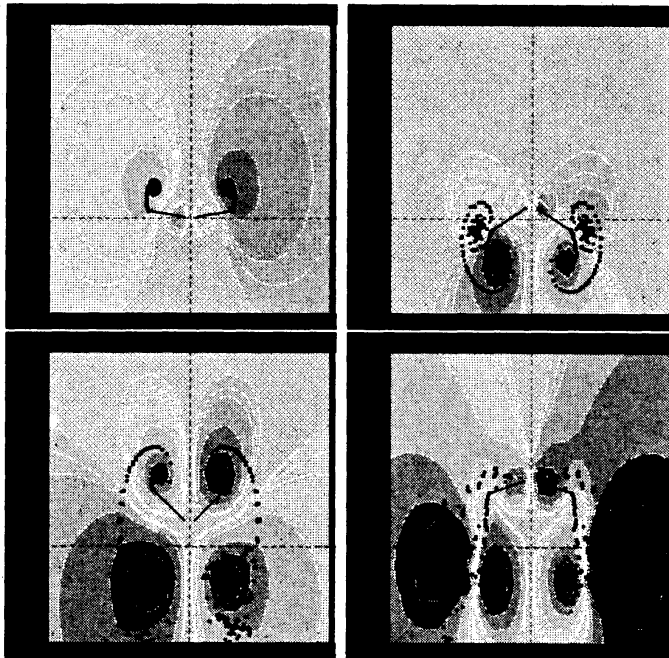


図 3: 空間パターン

上左：はじめの打ち下ろし羽ばたき。剥離渦が生成される。上右：はじめの打ち上げ。始めに生成された剥離渦との相互作用によって重心下に二つの渦が停滞する。下左：2 番目の打ち下ろし。翅の下に2つの渦が存在する。下右：翅下に渦が存在するため大きな揚力を得て重心が運動する。その後は常に翅下に渦が停滞し定常的に一方向運動が現れる。

2. 重心移動が無く、羽ばたき運動を行う場合で Θ 回転方向の自由度がある場合 (y 軸に関しての対称性の仮定はなく、左右の翅端から異なる渦度の剥離渦を生じる)：剥離渦の寿命が十分に短い場合には、初期に与えられた回転は最終的には減衰し、ある回転角 Θ_{st} (剥離渦の寿命や初期回転速度によって決まる) の周りで羽ばたきにより微小振動する。寿命 η の増加に伴い (準) 周期的に剥離渦と翅の相互作用によって回転運動が生じる。

3. 重心運動があり回転自由度がある場合：剥離渦の寿命が十分小さい場合は重心運動が無く蝶番を固定している場合と同じく定常回転角 $\Theta = 0.0$ の周りで揺らぐ、 Θ 回転に対して安定である。寿命の増加とともに Θ が大きく傾き振動しながら対称性が破れる運動モードが現れるが詳細は今後の課題である。

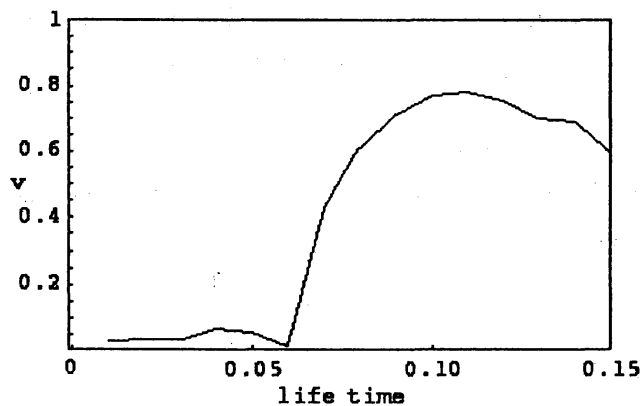


図 4: 分岐図

剥離渦の“寿命”を分岐パラメータとして変化させたときの $T = 1.0$ での重心速度。剥離渦が全くないときは明らかに揚力生成は対称であるので重心の移動はない。一方、“寿命”が閾値を超えると一方向性運動が生じる (運動の方向は初期値で決定される)。

羽ばたきによる揚力生成機構に関する実験や観測において重心固定している場合が多いが、自由飛行 (重心非固定) と定性的に大きく異なる事を我々の数理モデルによる解析結果は示唆している。また、自ら (翅) で外部に (流れ) 場を生成し相互作用により自らの状態を変化させるモデルと成り得るかもしれない。

参考文献

- [1] T.Weis-Fogh. Quick estimates of flight fitness in hovering animals, including novel mechanisms for lift production. *J.Exp.Bio.*, 56:79–104, 1972.

- [2] T.Weis-Fogh. Energetics of hovering flight in hummingbirds and drosophila. *J.Exp.Bio.*, 56:79–104, 1972.
- [3] C.P.Ellington. Unsteady aerodynamics of insect flight. *Symp.Soc.Exp.Biol.*, 70:5–8, 1 2001.
- [4] G-H Cottet and P.D.Koumoutsakos. *Vortex methods*. Cambridge Univ. Press, 1999.
- [5] R.R.Clements. An inviscid model of two-dimensinal vortex shedding. *J.Fluid. Mech.*, 57-2:321–336, 1973.
- [6] M.Iima and T. Yanagita. Is a two-dimensional butterfly able to fly by symmetric flapping. *J.Phys.Soc.Japan*, 70:5–8, 1 2001.
- [7] M.Iima and T. Yanagita. An analysis of a symmetric flapping model : A symmetry-breaking mechanism and its universality. *Theor. and Appl. Mech.*, 50:237–245, 2001.