

2次元はばたき飛行における剥離秩序渦の役割

飯間 信 柳田達雄 (北大電子研)

飛行機の設計などにも用いられる翼理論では翼の対気並進運動による対気速度 U が揚力 L を得るのに必要である。このとき L と U は $L = \frac{1}{2}\rho U^2 S C_L$ (S は翅の面積、 ρ は空気の密度、 C_L は揚力係数) という関係で結びつけられている。これは $U = 0$ のとき、 $L = 0$ となることを意味する。この意味で、これらの理論では翅の対気速度が不可欠である。

昆虫や小型の鳥などの生物の飛行機構に関しては、この翼理論を基本として説明が試みられて来た。昆虫の揚力係数は単純に昆虫の翅を翼だと考えた時の値より大きい。これを説明するために数多くの理論が提案されてきている。[1,2]

しかし流体力学的には、揚力生成には羽の並進運動は必ずしも不可欠ではなく、羽から剥離した渦の働きだけで揚力を生成することが可能である。[3] ところがこれらの結果ははばたきの一部(閉じた羽が開く場合)の過程に対する限定的な結果であり、単純なはばたき運動が継続的に平均揚力を生成できることはこれまで示されてこなかった。ごく単純に考えると、はばたきの打ち下ろし運動時と打ち上げ運動時で逆向きの揚力が発生し、平均揚力はほとんどゼロになると考えるのが自然だからである。

我々は剥離渦の動力学をとりこめば、はばたきにより継続的に平均揚力を生成できる事を示すため、図1に示すようなモデルを考えた[4]。これは蝶を前から見た状況を模しており、軸を中心に往復振動する2本の線分で翅を表現している。周りの流体は非圧縮で、渦は翅の端から剥離する。また左右の鏡像対称性を仮定しており、モデルは上下運動のみが許される。重力を考える場合、その方向はこの対称線に沿っているものとする。このようなモデルを離散渦法を用いて数値的に計算した。離散渦法は境界と剥離渦を点渦で近似して非粘性流体の運動を計算する方法である。ここでは粘性の影響をモデル化し、剥離した点渦が一定時間(ここでははばたき周期と同じにしたがもっと長くても同じ)たつと消失するという方法で系の運動を計算した。

すると、1) 重力なしかつ運動が対称(図1の $\theta(t)$ に対し $[\theta(t)]_{max} = -[\theta(t)]_{min}$) 2) 重力ありかつ運動が非対称 ($[\theta(t)]_{max} \neq -[\theta(t)]_{min}$) 3) 重力ありかつ運動が対称、という3つすべての場合において、パラメータを適切に選べば以下に説明する機構によって、揚力が一方向に生成されることが示された。とくに1)2)の場合には、はばたき振動数、翅や胴体の質量、翅の長さが実際の蝶と同じ値にした時に、上記の機構が働く。(3)の場合には、翅や胴体の質量、翅の長さが実際の蝶と同じ値にした時にはばたき振動数を実際の蝶の3倍程度にしなくてはならない)。以下では1)の場合についてその機構を説明する。

図2、図3にそれぞれ揚力と、運動のスナップショットを示す。図2に見られるように、第1周期の間の揚力は打ち消しあっている。これは図3(a)(b)に示すように、最初の1周期前半と後半それぞれの渦と翅の位置関係を見たとき、それが上下対称である事からも裏付けられる。一方、第2周期の特に前半で大きな揚力が生み出されている事がわかる(図2)。このとき、渦と翅の位置関係は、図3(c)に示すように、一周目目(図3(a))とは異っている。つまりこの期間に生成されている渦だけでなく、一周目目後半で生成された渦がともに翅の近くに位置し、揚力生成に寄与しているため、生成される揚力は大きくなる。このため系は対称性を崩し、上方に向かい一定の速度を得る。一旦速度を得ると、打ち下ろし時、打ち上げ時に生成される剥離渦と翅の距離が異なる事から、平均揚力は正となり、系は上方に加速する。このようにして初期条件が一周期後の渦配置の非対称性が生み出し、さらには最終的な運動が非対称となる事が示された。

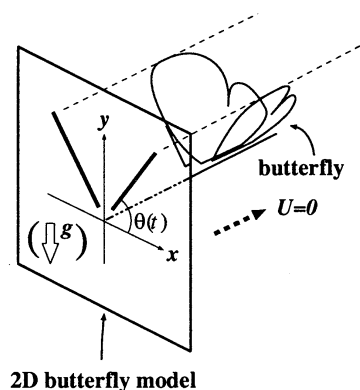


図 1: 蝶のモデルの概念図。

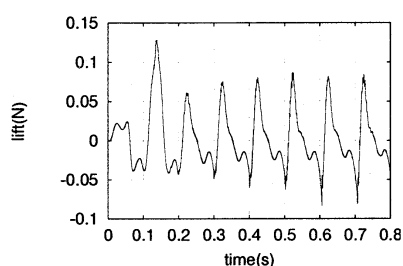


図 2: 揚力の時間に対するグラフ。2 周期目におおきな揚力が発生している事が分かる。

最後に、生物の運動を物理又は数学的に解析することについて私見を述べたいと思う。現実の世界は極めて複雑で多様であるが、そこにある本質は(時に)単純であるべきだ、というのが多くの物理学者や数学者の信念である。本報告を例にとると、蝶の飛行には、はばたき運動の非対称性、翅の剛性、はばたき運動の 3 次元性、二枚の翅があること(とんぼなどのように独立には動いていないが)など重要だと思われる要素は沢山ある。しかしそれらを取り除いて単純なモデルを作り、それでも本質的に同じ運動をすることが分かったら、最も重要なこと(この場合翅から剥離した渦と翅との流体力学的相互作用)が予想できる。そういう意味で、単純化から始まって本質へ迫ろうとする他分野での研究の一例を報告したということが、本研究会での本研究の位置づけといえるのではないかと考えている。

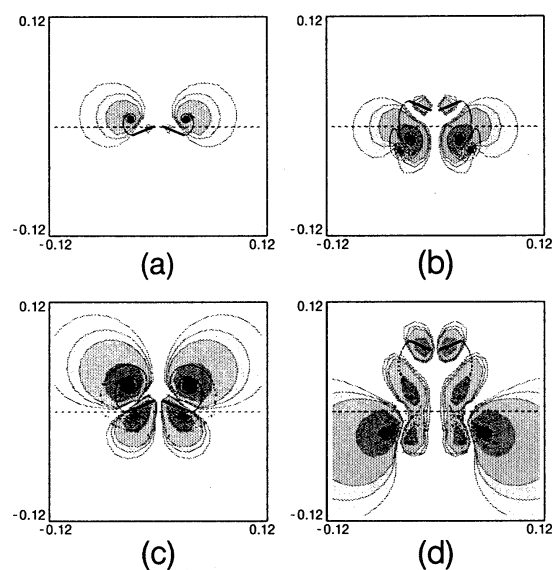


図 3: モデルの運動と剥離渦の位置関係。曲線は流線を表す。(a) $t = T/3$; (b) $t = 5T/6$; (c) $t = 4T/3$; (d) $t = 11T/6$ 。(c)において二つの剥離渦が翼の周りに大きな外向き流を誘起している。

参考文献

- [1] C. P. Ellington, C. Berg, A. P. Willmott, and A. L. R. Thomas, *Nature* **384**, 626 (1996).
- [2] M. H. Dickinson, F-O. Lehmann, and S. P. Sane, *Science*, **284**, 1954(1999)
- [3] S. Sunada, K. Kawachi, I. Watanabe, and A. Azuma, *J. Exp. Biol.* **183**, 217 (1993)
- [4] 飯間 信, 柳田 達雄, 「はばたきによる飛行の物理」, 九州大学応用力学研究所研究集会報告 11ME-S5,35,(2000)