

昆虫飛翔における揚力生成機構解明のための基礎的研究

飯間 信 [北海道大学電子科学研究所／助手]

背景・目的

昆虫の飛翔機構には、多様な飛翔機構を理解したいという知的欲求や、昆虫独特の飛翔機構を応用した飛翔ロボットへの期待など、理学的、生物学的、工学的な興味が古くから持たれてきた。昆虫の揚力生成機構は、飛行機のように翼理論だけでは説明できず、はばたき運動中にはねから剥離した渦とはねとの動的相互作用が本質的役割を果たしているが、その詳細には不明である。そこではばたき運動を単純化する代わりに重心運動と渦運動を考慮する2次元モデルを用い、運動モード（安定飛行状態）の有無やそれらを昆虫がどのように活用しているのかといった点について調べることを目的とする。

内容・方法

本研究では、運動モード（安定な定常運動状態）を調べるために2次元はばたきモデルを用いる。このモデルは、2次元空間内に2本の実線で示されるはねが、軸としてはばたき運動を行うものである。はばたき運動に伴ってはねから渦が剥離し、上下方向の力を生み出す。この力によって、このモデルの重心は上下に運動する。

このモデルに対して数値計算を行った。計算の方法は離散渦法を用いる。この方法は境界および剥離渦を点渦もしくは有限の大きさの渦を用いて離散化するものである。重心速度ゼロの状態からはばたきを初めて十分に長い時間積分を行うことで、定常運動状態をえる。ここでは粘性に着目し、粘性の変化に伴う剥離渦の特性の変化が、モデルの運動にどう影響を与えるかを調べる。特に粘性を変化させたときに定常運動状態を特徴づける量が、どのように変化するのか、また、はばたき運動を途中で変化させた場合に定常運動状態がどのように変化するのか、それは粘性のどのような性質に依存するのか、という点について調べた。

結果・成果

粘性が十分に小さいとき、剥離渦は剥離後十分長い時間流体中に存在し、はねと相互作用を行う。打ち下ろし、打ち上げにおいて生成される剥離渦は最初渦層を作るが、すぐに巻き上がってそれぞれ巨視的な渦を形成する。この巨視的な渦が複数のこる場合には、これらはねとの相互作用により平均速度が非ゼロの重心運動が生じることがこれまでの研究でわかっている。また剥離渦がすぐに消えてしまう（粘性が十分に小さいとき）は平均速度がゼロとなり、対称な系における運動が対称であるという自明な結果を生む。粘性のモデルとして剥離渦が剥離後一定時間経つと消失する（カットオフ型）という形でモデル化した場合、粘性モデルの特徴的な時間をパラメータとし、十分時間が経ったときの平均速度をプロットすると、比較的簡単な分岐図が得られる。

離散渦法における粘性の導入方法はいくつか知られているが、昆虫のように境界（はね）が変形しながら運動する場合に適用できる方法は知られていない。今回は渦の影響を数理的

観点から解析することを目的とした為、粘性モデルを確率型にしたとき分岐図がどのように変わるかを調べ、カットオフ型との比較を行うこととした。確率型の粘性モデルとは、剥離渦を表す点渦を各時間ステップで確率的に消失させるモデルである。

カットオフ型の場合は(a)安定運動状態が存在する(b)パラメータが大きくなる（粘性が小さくなる）とある値で分岐が起こり、それまで安定であった平均速度ゼロの運動状態が不安定となり、平均速度が非ゼロであるような運動状態が安定となる。(c)途中あるパラメータ領域では平均速度ゼロの運動状態が再び安定となる。という結果が得られたのに対し、確率型では特徴(a)(b)は保持していたものの、特徴(c)は再現されなかった。

また、途中ではねの運動を一度止めることにより、異なるモード（安定飛行状態）の存在の有無とモード間の移動のしやすさについて調べた。まず、平均速度でモードを特徴づけた場合、パラメータが臨界値を下回ると平均速度はゼロにはならず、確率性に由来する観測の揺らぎの程度にしか変化は見られない。臨界値を超えた場合には、はねの運動を止める前とは異なる平均速度で特徴づけられるモードに移行する。この場合平均速度の値は一般に増大する。また、速度変動の振幅として、標準偏差でモードを見ると、いったんはねの運動を止めただけで変動の振幅が大きくなり、その割合はあまりパラメータによらなかった。

これらの結果は、(1)渦の存在が非自明な重心運動とある定常運動状態への引き込みを起こすこと、(2)その重要なパラメータとして粘性があげられ、その値が大きい（特徴的時間が小さい）ときには重心運動は対称となり、ある値を越えると対称な重心運動が不安定に成る、という基本的な構造は粘性のモデルに依存しない普遍的なものであることを示している。一方で、分岐図の詳細については差異が見られた。粘性モデルとしてもっとも簡単だと思われるカットオフ型では分岐図は基本構造に加えて小さな安定領域が一つ見られるだけであったが、確率型の粘性モデルにおいては、安定運動状態の分岐図は平均速度や運動の振幅の変化を伴う複雑なものとなった。

現実の昆虫は3次元運動を行うので非常に大きな自由度をもつ。したがって安定飛行状態は非常に多いことが予想される。本モデルの解析結果が示唆するのは、昆虫は渦運動を活用することにより複数の安定飛行状態を持っており、それらを最小限の制御で移り変わることで効率的な飛行を実行しているという描像であり、確率粘性モデルを用いた解析により、その描像はより明確になったと考えられる。

今後の展望

本研究計画の結果、昆虫の飛翔機構を構成している渦とはねの相互作用は、数理的観点から見て本質的に複雑な構造を内包していることがわかった。これまでに判明した渦とはねの相互作用に関してはモデルの変更に関してロバストであったが、運動の変化に伴い新たなモードが発生することが判明した。今後は、(1)複雑さの起源を知るための数理モデルを構築し、その解析を行うこと、また、(2)より現実の昆虫に近づけたときの制御の問題を考察する為、本モデルに対して例えばはねの弾性を考慮に入れた計算を行うなどを考えている。