201 トンボの羽ばたきにより生じる流れの可視化

鹿児島大 望月博昭[○]、宮里満、鹿児島県環境技術協会 小牧博文

Visualization of Flow Generated by Flapping of Dragonfly

Hiroaki MOCHIZUKI^{*}, Mitsuru MIYAZATO^{*} and Hirofumi KOMAKI^{**}

This paper reports on the visualization of the flow generated by flapping of the dragonfly, *Sympetrum frequens*, fixed in a uniform flow velocity 0.6 m/s with smoke wire method. Two types of flapping, smaller and larger rotational angular oscillations with mean angle 3~5 degree and about 80 degree, respectively, were observed. For smaller flapping, regular and irregular types of a sheet of shed vortices were observed. One in the regular type showed the locking phenomenon, in which the flapping frequency agreed with that of vortices as observed in Karman vortex. For larger flapping, it was clearly observed that the uniform flow was induced toward the dragonfly and the wake led into largely disturbed region. Also, it was identified that the wake velocity was faster than that of uniform flow, and then the flow exerted forward force on the dragonfly.

1. まえがき

近年、昆虫のもつ機能に注目し、昆虫をモデルとしたマイクロロボットの研究が活発に行われている。しかし、昆虫は従来の機械に比べてサイズがかなり小さいために、その研究は多くの分野の技術や研究の発展を必要とする。特に飛行する昆虫の場合、その構造だけでなく運動の様子を知ることが極めて重要であり、また慣性力に比べ粘性力が飛行に大きく関与するために、飛行状態や飛行により生じる流れの様子は流体力学的にも興味深い研究対象である。飛行する昆虫の中でもトンボは飛翔能力が秀れており、羽ばたきや運動の様子も複雑である。このようなトンボの飛行性能や機構^{1)~4)}について、また羽ばたきによる流れの変動⁴⁾や可視化^{1), 3)}について報告されているが、まだ十分明らかでない。

このため、本研究ではトンボが羽ばたくことにより生じる後流やトンボに流入する流れの様子をスモークワイヤ法によって調べた。

2. 実験装置と方法

実験装置の概要を図1に示す。図の矢印で示すように、大気より流入した流れは断面積

* Kagoshima University, 1-21-24, Korimoto, Kagoshima

** Kagoshima Environmental Research and Service, 1-1-5, Nanatujima, Kagoshima

330×330 mm²、長さ1500 mmの正方形断面の測定部を通過後、大気に放出される。また測定部入り口から下流550 mmの位置に、直径0.28 mmのステンレス製のスモークワイヤを風胴の上壁と下壁の中心線に垂直に置いた。またトンボはV字形に折ったアルミ箔で肢を押えクリップで直径3 mmの支柱の上端に固定した。

次に、本実験で使用したトンボの幾何形状を図1の右側に示す。トンボは不均翅亜目トンボ科アキアカネである。図の一点鎖線はトンボが静止した状態における前翅の中心位置を示しており、この位置における前縁とスモークワイヤの距離は20 mmである。

実験において一様流の速度は0.6 m/secで、前翅の中心位置における翼弦長でとったレイノルズ数は約390である。トンボが静止している状態から翅を羽ばたかせ始めると、スモークワイヤに電圧20 V、電流2.2 Aをかけた状態で、流動パラフィンのスモークワイヤの上部から連続的に滴下させて流れ場を可視化した。カメラは焦点距離50 mm、シャッター速度1/1000 secで撮影し、またハイスピードビデオカメラ (HSV-500) を用いて125コマ/secで観測した。

3. 実験結果と考察

3.1 羽ばたきの状態 本実験でハイスピードビデオカメラを用いて調べたトンボの羽ばたきには平均の角度振幅が3~5度の回転振動（小羽ばたき）と約80度の回転振動（大羽ばたき）の二つが観察された。また羽ばたき周波数は小はばたきの場合、40 Hz前後で、大羽ばたきの場合約33 Hzであった。トンボの場合、翅が羽ばたくとき、胴体側と翼端側では振動振幅が異なり、従って流れの様相も異なってくるが、本実験では前述のように前翅翼幅の中心位置を通過する流れに焦点を絞って可視化を行った。

3.2 小羽ばたきにより生じる流れ場 小羽ばたきにより生じる流れ場の一例を図2の(a)~(c)に示す。図(a)においてカルマン渦列は上下ほぼ対称に配列しており、上の列の渦は時計方向に回転しているが、下の渦は反時計方向に回転している。このような渦列が生じるときの羽ばたきの周波数は約41.7 Hz、ストラハル数は約0.68、また渦の発生周波数は約42 Hzである。従って後流の周波数は翅の振動に同期しており、ロッキング現象が生じていると思われる。次に図(b)において、上側の渦は下側の渦よりかなり大きく、また上下の各渦は全て反時計方向に回転している。次に図(c)における後流は、図(a)と(b)の場合に比べいろいろな大きさの渦が生じて

Fig.1 Experimental apparatus and geometry of dragonfly

Fig.2 Flow pattern generated by smaller flapping

いるときの一例で、これは前後翅の羽ばたきが一定でないためと思われる。

以上示した図 (a) ~ (c) において、図 (a) のような渦列が最も頻繁に観察され、図 (b) と (c) は図 (a) の場合より発生頻度は小さい。この理由はアキアカネの性質によるものか、それともトンボを流れの中に固定したことによるものか、明らかでないが、実際にトンボが空中を遅い速度で飛行するときの羽ばたき角はかなり小さく、従って本実験の小羽ばたきで見られるような流れが生じていると思われる。

3.3 大羽ばたきにより生じる流れ場 大羽ばたきによって生じる流れ場の観察の一例を図3と図4に示す。図3は小羽ばたきが終了して大羽ばたきが始まった瞬間を示し、また図4は羽ばたき中の流れ場を示す。大羽ばたきの場合、二つの図から明らかなように、流れはトンボの上下の方向からトンボに向かって大きくカーブを描いているが、これはトンボの羽ばたきによりトンボの周囲の圧力が低下するためにトンボに向かって流れが吸引されるためである。

図3において、尻端の下流には小羽ばたきにより生じた渦が観察されるが、これに続いて大羽ばたきにより生じた大きな渦の始まりが尻端近傍の上下に観察される。次に図4はスモークワイヤからの煙の先端が下流に移動中の様子を示しているが、先端はトンボの下方から右斜め上方に、また上方からは右斜め下方にほぼ直線状になっている。しかし、煙の一部は翅を通過してすでに後流まで達しており、従って後流の速度は一樣流の速度より速く、トンボは流れから前向き力を受けていることがわかる。また後流は大きく乱れていることがわかる。

以上の実験結果は、風速が 0.6m/s で、流れが静止状態の前翅の翼弦にほぼ平行に流入す

Fig.3 Transient flow pattern from smaller to larger flapping

Fig.4 Flow pattern generated by larger flapping

るときの場合で、今後種々の条件の下でトンボの羽ばたきにより生じる流れを調べる必要がある。

4. 結論

本実験の結論は次のとおりである。

- (1) 羽ばたきには角度振幅が3~5度の小羽ばたきと約80度の大羽ばたきが観察された。
- (2) 小羽ばたきにより生じる後流には、規則的な配列のカルマン渦と不規則的な渦列が観察され、規則的な渦列では、翅の振動数と後流の周波数が一致するロッキング現象が現われる場合がある。
- (3) 大羽ばたきを行うとき、トンボ上流の流れがトンボに吸引され、後流は大きく乱れる。また後流の速度は一樣流の速度より大きく、従ってトンボは前向の力を受けることが確認された。

参考文献

- (1) Savage, S.B., J.exp.Biol., 83(1979)59. (2) Azuma, A., Azuma, S., Watanabe, I. and Furuta, T., J.exp.Biol., 116(1985), 79. (3) Azuma, A. and Watanabe, T., J. exp.Biol., 137(1988), 221. (4) 須藤誠一, 橋本弘之, 太田福雄, 片桐一成, 機論, 60-579 (1994), 3600.