

昆虫のホバリング飛行の空気力学的メカニズムに関する研究  
 —数値シミュレーションと実験による検証—

磯貝紘二\*、山崎正秀\*、宇塚 智\*、齋藤 拓\*

**Study on Aerodynamic Mechanism of Hovering Insects  
 - Numerical Simulation and Evaluation by Experiments -**

By

Koji ISOGAI\*, Masahide YAMASAKI\*, Satoshi UZUKA\* and  
 Taku SAITOH\*

ABSTRACT

In order to clarify the fundamental mechanism of the hovering flight of a dragonfly, the numerical simulation of unsteady viscous flow around a tandem airfoil configuration oscillating in still air has been conducted by using a two-dimensional Navier-Stokes code. It is shown that the mutual flow interactions between the fore- and hind- airfoils are playing the dominant role in generating the time mean aerodynamic force acting in the direction of the stoke-plane, which is indispensable for the dragonfly to hover with the body axis horizontal. Total amounts of the lifting force and the necessary power are also estimated and shown to be very close to those estimated by other researchers. In order to validate this numerical simulation, the experimental flow visualization around the tandem airfoil configuration has been performed in the water by using the electrolytic precipitation method. It has been shown that the flow patterns obtained are very close to those predicted by the numerical simulation. The total time mean aerodynamic force predicted by the numerical simulation has also been evaluated by using a dragonfly robot machine which can hover in the water, validating that the numerical prediction of the total lifting force is within the error of about 12 percent.

1. はじめに

トンボは機軸（体の軸）を水平に保ったまま、空中の一点に静止する（ホバリング）することができる<sup>1)</sup>。何故このようなことが可能なのか、その空気力学的なメカニズムは、過去に多くの実験的<sup>2)</sup> -<sup>4)</sup>、理論的<sup>5)</sup> -<sup>7)</sup> 研究がなされて来たにもかかわらず十分には解明されていない。特に、トンボは2対の羽根を持っているが、この2対の羽根の間の

空気力学的相互干渉が揚力生成においてどのような役割を演じているか未解明のままである。そこで筆者ら<sup>8)</sup> は、トンボの翼のスパン方向のある代表翼断面まわりの流れは、局所的に2次元流と仮定して、静止流体中で振動する2枚の2次元平板翼まわりの非定常粘性流れを2次元のナビエ・ストークス・コードを用いて解析した。その結果、2枚の翼の空気力学的な相互干渉は、トンボが機軸

\* 九州大学大学院工学研究院  
 (Kyushu University)

を水平に保ってホバリングするために必要なストローク面方向の時間平均空気力の生成において本質的な役割を演じていること等が明らかになった。このように文献 8 で行われた解析によって、トンボのホバリング飛行の基本的なメカニズムが明らかにされた訳であるが、仮定された翼の運動に、実際のトンボ（ギンヤンマ：*Anax parthenope Julius*）についての観察結果<sup>9)</sup>とは、若干異なる点が幾つか指摘された。すなわち、文献 8 では翼のピッチング振動の振幅が 80% セミスパン位置で打ち上げ時 40 度打ち下ろし時 10 度と仮定されたが、実際の観察結果<sup>9)</sup>によれば、打ち上げ打ち下ろし伴にこれらの値より大きな値をとっている（具体的な数値は 2 節で与える）。この他、前翼と後翼の間のギャップも文献 8 で仮定された 10% よりも大きいこと、前翼と後翼の翼弦長は文献 8 で仮定されたように同じではなく、後翼のその方が前翼より大きいこと等が指摘された。また、文献 8 における解析の結果予測された 1 g ホバリングに必要なパワーの値が、実験式によって推定された有効馬力を 43% 上回る結果となった。

今回の解析では、文献 8 におけるこれらの欠点は全て取り除いてある。特に、ピッチ角が最大で 64 度にもなる翼の運動を適切に取り扱うために、文献 8 で用いた解析コードにおける格子生成法に大幅な改善を行った。その結果、後に述べるように、前翼と後翼の間の空気力学的相互干渉がトンボのホバリング飛行において重要な役割を演じているという文献 8 の解析で得られた結論に変わりはないものの、推定された必要馬力は有効馬力の範囲内となり合理的な結果が得られた。また、今回の数値シミュレーションの結果を実験的に検証するために、スケールモデルを用いた流れの可視化実験を行うと共に、水中でホバリングを行うロボットマシンを製作し、数値シミュレーションの

予測通りの時間平均揚力が生成されていることおよび機軸を水平に保ったホバリングが可能であることを実証する実験を行った。

## 2. 数値シミュレーション

図 1 に、ホバリング中のトンボに作用する力と座標系の定義を示す。スパン方向のある翼断面の運動に注目すると、前翼と後翼は、夫々、水平面に対して 20 度–40 度傾いたストローク面に沿って、上下振動とピッチング振動が連成した所謂羽ばたき運動をしている。ピッチング振動は上下振動に対して約 90 度の位相の進みがあり、また、後翼の上下振動は前翼に対しては約 40 度(Azuma and Watanabe の実験結果<sup>9)</sup>からの外挿)位相が進んでいる。本稿では、トンボの翼まわりの流れは局所的には 2 次元と仮定し、ある代表的なスパン位置における 2 枚の翼断面まわりの流れを 2 次元のナビエ・ストークス・コードを用いて解析する。図 2 に、X-Y 平面（ストローク面）における翼の運動の定義を示す。図 2 で、前翼の上下振動およびピッチング振動は夫々次式で与えられる。

$$H_f = H_{f0} \sin(\omega T) \quad (1)$$

$$\alpha_f = \alpha_{f1} + \alpha_{f0} \sin(\omega T + \phi_f) \quad (2)$$

また、後翼の上下振動およびピッチング振動は次式で与えられる。

$$H_h = H_g + H_{h0} \sin(\omega T + \Psi) \quad (3)$$

$$\alpha_h = \alpha_{h1} + \alpha_{h0} \sin(\omega T + \Psi + \phi_h) \quad (4)$$

ここで、 $\omega$  は円振動数、 $T$  は時間である。

ナビエ・ストークス方程式は、上下振動の最大速度、前翼の 2 分の 1 翼弦長および空気密度を用いて無次元化され、それをマルチ・ブロック法、GCL(Geometric Conservation Law<sup>10)</sup>)等を用いて解いた。翼は平板翼と仮定し、格子は各時間ステップ毎に代数的手法を用いて生成した。格子数は全空間で 280x160 である。

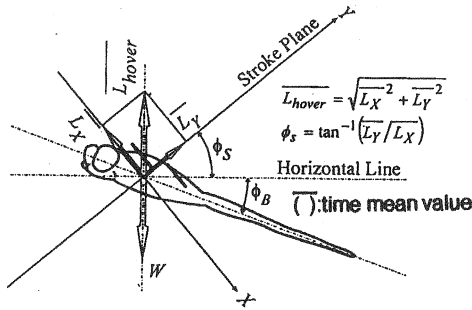


図1 座標系と力の定義

ホバリング飛行の非定常粘性流を支配する相似パラメータは、レイノルズ数  $R$  と無次元振動数  $k$  で、次式で定義される。すなわち、

$$R = (b_f V_f) / \nu \tag{5}$$

$$k = (b_f \omega) / V_f = (b_f / H_{fo}) \tag{6}$$

ここで、 $b_f$  は前翼の2分の1翼弦長、 $\nu$  は動粘性

係数、 $V_f$  は前翼の上下振動の最大速度で、次式

で与えられる、すなわち、

$$V_f = \omega H_{fo} \tag{7}$$

今回の解析では、典型的なトンボのモデルとして、*Anax parthenope julius*<sup>9)</sup> を用い、その75%セミスパン位置における流れを解析する。前翼および後翼の上下振動の振幅は、共に、0.0241m であり、2分の1翼弦長は、夫々、0.005m および0.0057m である。ピッチング振動の振幅は、前翼が、上向き64度、下向き40度であり、後翼が、上向き51度、下向き24度である。翼の振動数は28Hz である。前翼と後翼の間隙は、96%翼弦長である。(これらのデータは、Azuma and Watanabe<sup>9)</sup> による論文より採った。) また、相似パラメータは、 $R=1.45 \times 10^3$ 、 $k=0.207$  である。トンボ全体の質量は  $7.9 \times 10^{-4}$  Kg で

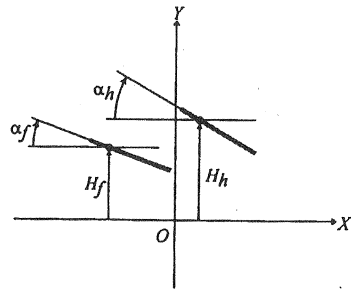


図2 翼の運動の定義

ある。このようなモデルに対して、ナビエ・ストークス・コードを用いた数値シミュレーションを実施した。また、2枚の翼の干渉効果を見るために、2枚翼の他に、前翼あるいは後翼のみが振動している場合(干渉効果が無い場合)のシミュレーションも行った。得られた時間平均空気力および時間平均の仕事率  $\bar{W}$ 、等を以下に示す。

(時間平均空気力の定義については、図1を参照されたい。)

イ) 2枚翼の場合：

$$\begin{aligned} \text{前翼：} \quad \bar{L}_{x,f} &= 0.0868 \text{ N/m} & \bar{L}_{y,f} &= 0.0285 \text{ N/m} \\ \bar{W}_f &= 0.375 \text{ W/m} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{後翼：} \quad \bar{L}_{x,h} &= 0.0908 \text{ N/m} & \bar{L}_{y,h} &= 0.0309 \text{ N/m} \\ \bar{W}_h &= 0.598 \text{ W/m} \end{aligned}$$

前翼と後翼の合計：

$$\bar{L}_x = 0.178 \text{ N/m} \quad \bar{L}_y = 0.0594 \text{ N/m}$$

$$\bar{L}_{\text{hover}} = 0.187 \text{ N/m}$$

$$\phi_s = 18.5 \text{ deg} \quad \bar{W}_t = 0.973 \text{ W/m}$$

ロ) 前翼または後翼のみの場合(干渉効果無し)：

$$\begin{aligned} \text{前翼：} \quad \bar{L}_{x,f} &= 0.0686 \text{ N/m} & \bar{L}_{y,f} &= 0.0092 \text{ N/m} \\ \bar{W}_f &= 0.279 \text{ W/m} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{後翼：} \quad \bar{L}_{x,h} &= 0.0783 \text{ N/m} & \bar{L}_{y,h} &= 0.0074 \text{ N/m} \\ \bar{W}_h &= 0.477 \text{ W/m} \end{aligned}$$

前翼と後翼の合計：

$$\bar{L}_x = 0.147 \text{ N/m}$$

$$\bar{L}_y = 0.0166 \text{ N/m} \quad \bar{L}_{\text{hover}} = 0.148 \text{ N/m}$$

$$\phi_s = 6.4 \text{ deg} \quad \bar{W}_t = 0.756 \text{ W/m}$$

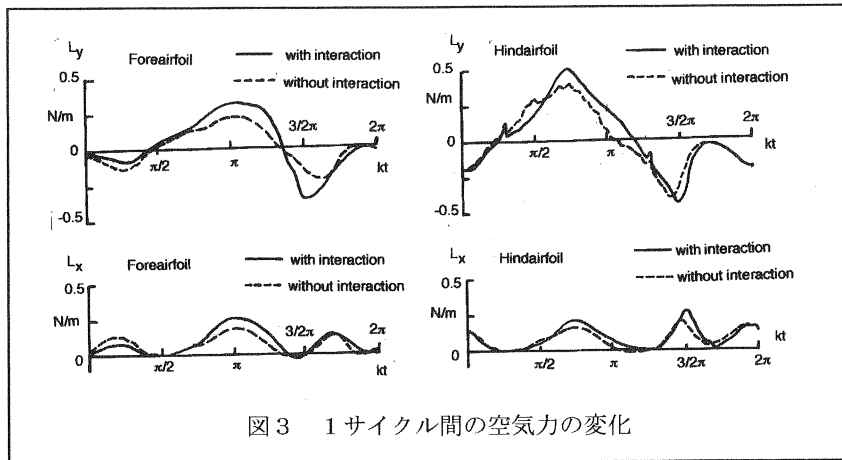


図3 1 サイクル間の空気力の変化

2枚翼の場合の  $\overline{L_{hover}}$  の値は、干渉が無い場合の  $\overline{L_{hover}}$  に対して 27% の増加を示し、特に、 $\overline{L_y}$  の増加は干渉が無い場合の 260% に達する。図3には、前翼と後翼の夫々に作用する  $L_y$  と  $L_x$  の1サイクル間の変動を示す。図から明らかなように、前翼と後翼が伴に下降運動をしている過程すなわち、 $kt = \frac{\pi}{2} \sim 1.28\pi$  で、 $L_y$  と  $L_x$  (特に  $L_y$ ) の干渉による増加が認められる。

このことは、図5に示す様に、下降運動中に翼上面に形成される渦による吸引力が、干渉効果によって、強められることによるものと思われる。(ただし、 $t$  は無次元時間)

75%セミスパン位置で行ったのと同様な解析を50%セミスパン位置についても行い、時間平均の空気力および平均仕事率のスパン方向の分布を推定し、このトンボモデルに作用する全空気力およびそれを生成するために必要なパワーを推定することができる(ただし、3次元効果はもちろん無視されている)。このようにして推定された時間平均の全空気力は、 $12.0 \times 10^{-3} N$  である。一方、今回のトンボモデルの自重は  $7.74 \times 10^{-3} N$  であるから、全空気力の推定値はトンボの自重を支えることができることを意味している。また、1gホバーに必要なパワーの推定値<sup>8)</sup>は0.0307Wであった。一方、有効パワーは、経験式<sup>11)</sup>によると0.0514W

になる。また、1Kgの筋肉当たりの必要パワーは、155W/Kgとなり、これはWakelingら<sup>7)</sup>が、アクチュエータ・ディスク理論によって求めた値、160W/Kgに極めて近い値になっている。

### 3. 実験による検証

1節でも述べたように、今回行った数値シミュレーションの結果を実験的に検証するために、スケールモデルを用いた流れの可視化実験と水中でホバーすることの出来るロボットマシンを用いた実験を行った。これらの実験はいずれも実際のトンボとは異なるスケールのモデルを用いて水中で行ったので、相似パラメータであるレイノルズ数と無次元振動数を合わせた実験を行う必要がある。また、力については、代表長さ、代表速度、流体の密度、で無次元化された量が、実際のトンボとスケールモデルの双方で等しいと云う条件から相互に変換できる。すなわち、(5)式と(6)式を使って、スケールモデルの振動数は次式によって与えられる。すなわち、

$$(\omega'/\omega) = (H_{fo}'^2 v') / (H_{fo}^2 v) \quad (8)$$

ここで、( ) は実際のトンボの諸量であり、

( ) ' はスケールモデルの諸量である。一方、スケールモデルの時間平均揚力  $\overline{L}'$  は、次式で与えられる。すなわち、

$$\overline{L}' = (\rho'/\rho)(\omega'/\omega)^2 (b_f'/b_f)^4 \overline{L} \quad (9)$$

ここで、 $\rho$  は空気または水の密度である。

結果と実験結果との比較を示す。両者は定性的に良く一致していることが分かる。

### 3. 1 流れの可視化実験

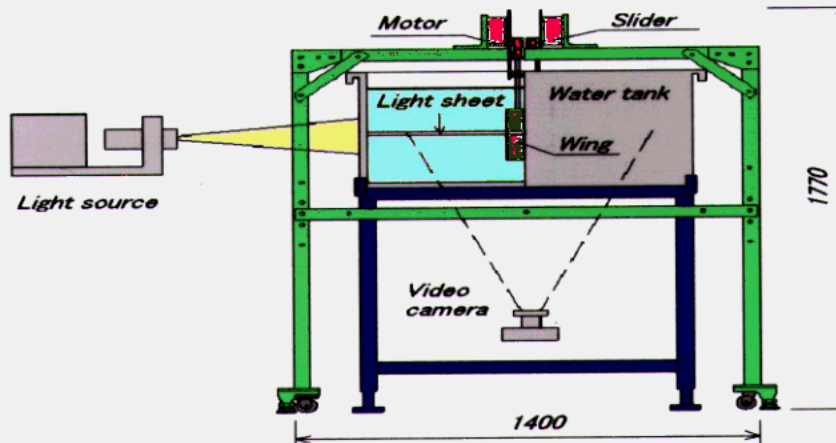
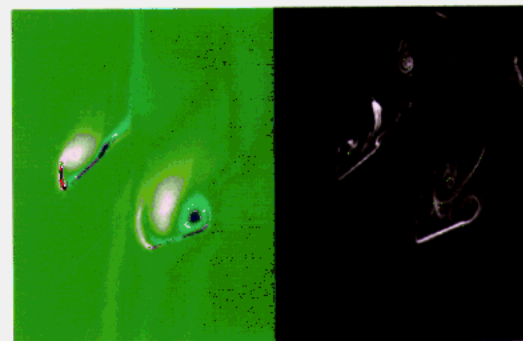


図4 可視化装置の概略図

流れの可視化実験は、数値シミュレーションを行った75%セミスパン位置での2次元翼断面の動きとまったく同じ動きをする2枚の2次元翼模型を作成し実験を行った。翼模型のスケールは、実際のトンボの4倍とした。すなわち、前翼は翼弦長0.04m、後翼は翼弦長0.046m、前翼と後翼のギャップは0.039mとした。両翼のスパン長は0.18mとし、流れの可視化の手法として、電解沈澱法を用いて翼中央スパン位置の流れを可視化した。前述のように流れの相似パラメータのうち無次元振動数 $k$ (0.207)は上下振動の無次元振幅によって決まるので実際のトンボとスケールモデルで完全に合せることが可能であるが、(8)式で与えられるスケールモデルの振動数0.1116 Hzでは、翼の動きが速すぎて可視化が困難なため、実験はその1/4、すなわち、0.0279 Hzで行った。したがって、実際のトンボのレイノルズ数が $1.45 \times 10^3$ に対して、可視化実験のレイノルズ数は $0.363 \times 10^3$ である。図4に装置の概略を示す。翼の上下振動はスライダーで与え、ピッチング振動はステッピングモーターで与えた。流れのパターンはデジタルビデオで記録した。図5に、打ち下し時における数値解析



数値シミュレーション

実験

$$kt = \pi$$

図5 打ち下ろし時に於ける流れのパターン

### 3. 2 水中ホバーマシンによる検証

図6に今回の実験で用いたトンボロボットの緒元を示す。羽根は前後翼伴に翼弦長0.03m、スパン長0.15mの矩形平板翼で板厚0.001mのジュラルミン製である。したがって、このマシンの前後翼は実際のトンボの前翼の3倍のスケールになっている。(実際のトンボは、後翼は前翼より若干大きい、トンボマシンではこれは無視されている。)また、前翼と後翼のギャップは一定で、翼弦長の30%としている。フラッピング運動の振幅は数

値解析のトンボモデルと同様に、前後翼伴に40度である。一方、ピッチ角は前後翼伴に打ち上げ時64度打ち下ろし時40度とした。(数値解析で

### 実験装置

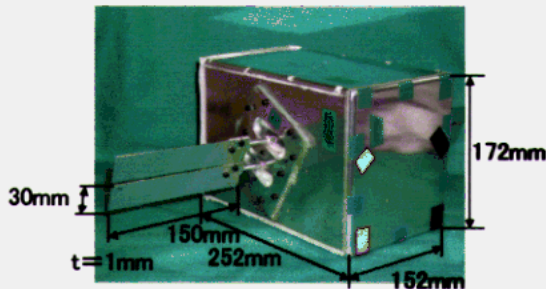


図6 水中ホバーマシン

では、後翼のピッチ角は上げ時51度、打ち下ろし時24度である。)後翼のフラッピング運動の前翼に対する位相の進みは、数値解析モデルと同様に40度である。これらの2対、計4枚の羽根のフラッピング運動およびピッチング運動は、ラジコン模型用の高性能サーボモータによって与えた。図6の箱型のボデーには計8個のモータとバッテリーおよびモデムを搭載し、サーボモータの制御信号は機外のパソコンから無線で送信された。水中におけるホバリングは、浮力と羽ばたきによって発生した揚力が機体の重量と釣り合うことによって可能となる。マシンの水中におけるトリムは、試行錯誤によって錘によって重心位置を調整することによって行い、特にトリムのための自動制御等は行っていない。本マシンの設計に当たっては、2節で述べた数値解析の結果を全面的に用いている。

今回行った幾つかの試行の中で、ほぼホバリングに近い飛行が実現したケースのデータは以下のとおりである。総重量:67.91 N, 浮力:65.26 N, 振動数:1.52 Hz, ストローク面の角度:20度、発生した揚力は総重量と浮力の差から、2.65 Nになる。一方、2節で述べた数値解析による予測値から、(9)

式を用いて推定した揚力は2.43 Nになり、誤差は約12%である。以上の結果から、水中ホバーマシンを用いた今回の実験によってトンボが機軸を水平に保ってホバできることの基本的なメカニズムの実証と数値解析による力の予測が信頼し得るものであることが間接的ではあるが実証された。

### 謝辞

本研究は、独立行政法人航空宇宙技術研究所との共同研究「並列ベクトル計算機による非定常粘性流の数値シミュレーション技術に関する研究」の一環として行われたものである。関係各位に感謝致します。また、九州大学の松原学技官および博士課程の有菌仁氏にはホバーマシンの製作に当たり大変お世話になった、ここに記して感謝の意を表します。

### 参考文献

1. Weis-Fogh, T., *Journal of Experimental Biology*, 59, pp. 169-230 (1973).
2. Soms, C., and Luttges, M., *Science*, Vol. 228, 14, pp. 1326-1329 (1985).
3. Freymuth, P., *Experiments in Fluids* 9, pp. 17-24 (1990).
4. Wakeling, J.M. and Ellington, C.P., *Journal of Experimental Biology*, 200, pp. 557-582 (1997).
5. Norberg, R.A., *Swimming and Flying in Nature*, Vol. 2, New York: Plenum, pp. 763-781 (1975).
6. Savage, S.B., Newman, B.G. and Wong, D.T.-B., *Journal of Experimental Biology*, 83, pp. 59-77 (1979).
7. Wakeling, J.M. and Ellington, C.P., *Journal of Experimental Biology*, 200, pp. 583-600 (1997).
8. Isogai, K. and Shinmoto, Y., PF023, *Proceedings of the 2<sup>nd</sup> Pacific Symposium on Flow Visualization and Image Processing 1999, PSFVIP-2, Honolulu, Hawaii, 16-19 May (1999)*.
9. Azuma, A. and Watanabe, T., *Journal of Experimental Biology*, 137, pp. 221-252 (1988).
10. Thomas, P.D. and Lombard, C.K., *AIAA J.* Vol. 17, No.10, pp. 1030-1037 (1979).
11. Azuma, A., *The Biokinetics of Flying and Swimming*, Springer-Verlag (1992).