

# トンボに観察される幾つかの流体力学的現象とリズム

Some Hydrodynamic Phenomena and Rhythm Observed on the Dragonfly

須藤 誠一, 露木 浩二

いわき明星大学工学部

Seiichi Sudo and Koji Tsuyuki

Department of Mechanical Engineering, Iwaki Meisei University

E-mail:sudou@iwakimu.ac.jp and koji@iwakimu.ac.jp

## 1 はじめに

一般に、大きなトンボは巧みな飛行を行うため、理想飛行体として流体力学的な観点から様々な特性が調べられてきた[1]。例えば、Azuma 等はアキアカネの飛行動画解析データを用いて、運動量理論と翼素理論に基づいてはばたき翼の力学的な特性を求め[2]、さらに飛行性能の理論解析も行っている[3]。また、Okamoto 等は風洞試験によってトンボの翼と体の空力特性を求めている[4]。Alexander は風洞を使用してトンボの方向転換飛行を研究し、左右の翼の気流に対する迎角の変化の測定から、生成する力の非対称性を示した[5]。Wakeling & Ellington はトンボの飛行に関する一連の研究を行い、滑空や定常飛行時の揚力係数と抗力係数[6]、はばたき自由飛行時の速度、加速度、はばたき運動[7]、自由飛行時における揚力とパワー[8]などを求めた。著者らもトンボの翼構造に関して詳しく観察した[9, 10]。さらに、Kawachi グループは独特な計測手法によって風洞内ではばたくトンボの非定常力、トンボの翅の固有振動数、翅のはばたき角度、ねじり角度、変形などを測定している[11-14]。

しかしながら、トンボの翅への雨滴衝突特性に関しては全く研究がなされておらず、トンボの翅と液滴の衝突現象に関する論文は見当たらない。他方、固体平板や液体自由表面に液滴が衝突する場合に発生する現象は自然科学における基本的な課題であり[15]、Worthington[16]によって落下液滴によるスプラッシュが精力的に研究されて以来、現在でも非常に多くの研究者によって液滴衝突界面流動現象が活発に研究されている[17-22]。しかしながら、生体あるいは生体材料と液滴の衝突問題に関する研究は重要な課題であるにもかかわらず、ほとんど研究がなされていない。ましてやトンボの翅と雨滴衝突の現象を調べた研究報告は皆無である。本報では、生きているトンボの翅に蒸留水の液滴が衝突する場合に発生する現象を示すことにする。トンボは空中を飛翔するための 2 対の長大な翅を有し、飛びながら餌を捕り、交尾、産卵など行動の大半を空中で行う飛行生活に最も適応した昆虫群である。そのため雨滴衝突によって翅を破損したりしないような何らかの機構や機能を備えている可能性があり、トンボの翅と液滴の衝突現象を調べることは意義深い。

また、トンボは不完全変態の昆虫で幼虫は若虫 (nymph) と呼ばれ、水棲生活をし、成虫になるときに水から上がり、体の形も大きく変化して空中生活へと移行する[23]。トンボは成

虫，幼虫ともに肉食性である。著者らの観察では，幼虫は月齢が若いほど巧みに遊泳し，脱皮を繰り返して成長し，成長するほど遊泳から水中歩行に移行するようである。水棲生物の遊泳は流体力学的観点からも興味があり，多くの研究者によって調べられてきた[23, 24]。ごく最近でも，ウナギの遊泳の流体力学[26]，アメンボの歩行メカニズム[27]，ゼブラフィッシュの稚魚の遊泳[28]，カゲロウの幼虫の遊泳の流体力学[29]などの研究報告が知見される。しかしながら，巧みな遊泳を行う月齢の若いトンボの若虫の詳細な遊泳挙動などは調べられていないようである。本報では，マイクロマシンなどへの適用も考えて比較的月齢の浅いトンボの若虫の遊泳挙動を示すことにする。

さらに，最近では微小な生物の動きや機構などを調べ，その成果をマイクロマシンの実現に結びつけようとの試みもなされ，マイクロマシンに関する研究も活発に行われていることから[30, 31]，マイクロマシン開発に関連する著者らのトンボ型はばたきメカニズムについても紹介する。

## 2 液滴衝突現象

液滴衝突の流動現象は一見して単純に思えるが，基本的な物理は極めて複雑なものである。現在では，高速度録画技術の発展により，瞬時に完結してしまう液滴衝突現象のダイナミックな流動を比較的容易に観察することができる。そのため，この魅惑的な液滴衝突現象を数値計算によって忠実に再現しようとする研究が多数見られるようになってきた。著者らも SMAC 法を用いて液滴自由界面に大きさの異なる 2 個の液滴がわずかの時間差で衝突することによって液体内に気泡がエントレイメントされることを示した[32]。ごく最近でも，前述したように液滴衝突現象に関する多くの研究がなされ，数値シミュレーションと実験との比較検討が続けられている[33-39]。

本報では，まだ誰によっても研究がなされていないトンボの翅と液滴との衝突現象を示し，この問題の数値シミュレーションに取り組んでいただける研究者の出現に期待する。まず初めに，トンボの翅が受けるであろう液滴衝突の衝撃に関して，これまでの知見に基づいて簡単に考察しておく。

一般に，落下液滴が固体平板に衝突してスプラッシュを形成する場合，衝突前後で液滴のエネルギーおよび質量は等しく式(1)が成り立つ[40]。

$$\left. \begin{aligned} E_k + E_p + E_s &= E'_k + E'_p + E'_s + E'_d \\ m &= m' \end{aligned} \right\} (1)$$

ここで，左辺は衝突前，右辺は衝突後の状態を表し， $E_k$ ， $E_p$ ， $E_s$ ， $E_d$  はそれぞれ運動エネルギー，ポテンシャルエネルギー，表面エネルギー，散逸エネルギー， $m$  は液滴の質量を表す。後章で示す実験では，液滴はゆっくりと生成したため，液滴生成時の初期状態において  $E_k = 0$  と考えてよい。また， $E_p$  および  $E_s$  は，液滴の落下高さを  $H$  とすると，それぞれ次式によって記述される。

$$E_p = mgH = \frac{1}{6} \pi g \rho d^3 H \quad (2)$$

$$E_s = \pi d^2 \sigma \quad (3)$$

ここで、 $g$  は重力加速度、 $\rho$  は液体の密度、 $\sigma$  は表面張力である。式(2)の  $E_p$  は液滴が衝突する直前には式(4)の運動エネルギーに変換される。

$$E_k = \frac{1}{2} m v^2 = \frac{1}{12} \pi g \rho d^3 v^2 \quad (4)$$

ここで、 $v$  は衝突速度であり、 $v_i$  を終端速度として式(5)によって記述される[41].

$$v = v_i \left\{ 1 - \exp\left(\frac{-2gH}{v_i^2}\right) \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (5)$$

さらに、式(4)の  $E_k$  は、衝突後の液滴の最大拡がりを  $S$  とすると、次式で記述されるエネルギーに変換される。

$$E'_s = S \sigma \quad (6)$$

$$E'_d = f(\mu, v, h, \dots) \quad (7)$$

式(7)の  $E'_d$  は理論的に求めることは一般に困難であるが、おおよそ次式によって求められている[42].

$$\left. \begin{aligned} E'_d &= \int_0^{t_e} \int_V \phi dV dt \approx \phi V t_e \\ \phi &= \mu \left( \frac{\partial u_x}{\partial y} + \frac{\partial u_y}{\partial x} \right) \frac{\partial u_x}{\partial y} \approx \mu \left( \frac{v}{h} \right)^2 \\ v &\approx Sh \\ t_e &\approx d/v \end{aligned} \right\} (8)$$

ここで、 $\phi$  は流体の単位質量当たりの散逸、 $\mu$  は粘度、 $h$  は流体層の厚さ、 $t_e$  は変形時間である。このように液滴が剛体平板に衝突する場合、高圧  $P$  が生成される。衝突速度が大きい場合には、衝撃波が発生し、 $P$  は次式によって記述される[43].

$$P = \frac{v \rho_1 c_1 \rho_2 c_2}{\rho_1 c_1 + \rho_2 c_2} \quad (9)$$

ここで、 $c$  は音速、添字の 1 は液体、2 は固体を表す。平板が変形のない完全な剛体であるとすると式(9)は式(10)の水撃圧に帰着される。

$$P = \rho c v \quad (10)$$

さらに液滴が非圧縮流体として衝突する場合には式(11)のようになる。

$$P = \frac{1}{2} \rho v^2 \quad (11)$$

トンボの翅に液滴が衝突する場合、トンボの翅の受ける衝撃圧は式(10)と式(11)の間の値であろうと推察される。

### 3 実験装置および実験方法

#### 3.1 液滴衝突における実験装置および実験方法

液滴とトンボの翅との衝突現象を調べる実験装置の概略図を図 1 に示す。実験装置はトンボ、液滴生成装置、および高速度ビデオカメラ解析装置から構成されている。標的となるトンボの翅は生体機能を調べる目的から生きている状態で実験を行った。トンボは生きたまま木製の棒に腹部を接着固定し、翅は自由にはばたける状態とした。本実験で使用したトンボは 9 月中旬に採集したアキアカネであり、体長  $L = 41.7$  mm, 前翅長  $l_f = 31.9$  mm, 後翅長  $l_h = 30.8$  mm の大きさとなっている。

雨滴を模擬した衝突液滴は、特性を保証するために蒸留水を使用した。液滴はビュレットを使用して生成し、トンボの翅から計測して  $H = 1.0$  m の高さから落下衝突させた。本実験において生成した液滴の初期直径は  $d = 4.64$  mm である。落下衝突位置の微調整を可能とするためビュレットは 3 次元ステージに取り付け、0.1 mm の精度で位置合わせの調整が可能である。試料トンボおよび落下高さをいろいろ変えて実験を行ったが、本報では上記の代表的な場合のみを示す。

#### 3.2 トンボの翅の表面形状

トンボは飛行生活に適応した昆虫であり、雨滴衝突によって翅が損傷するようであれば、種の存続にかかわってくる。そのため、トンボの翅は雨滴衝突に対して何らかの耐性を有しているものと考えられる。本報ではアキアカネの前翅および後翅のそれぞれ数箇所液滴を

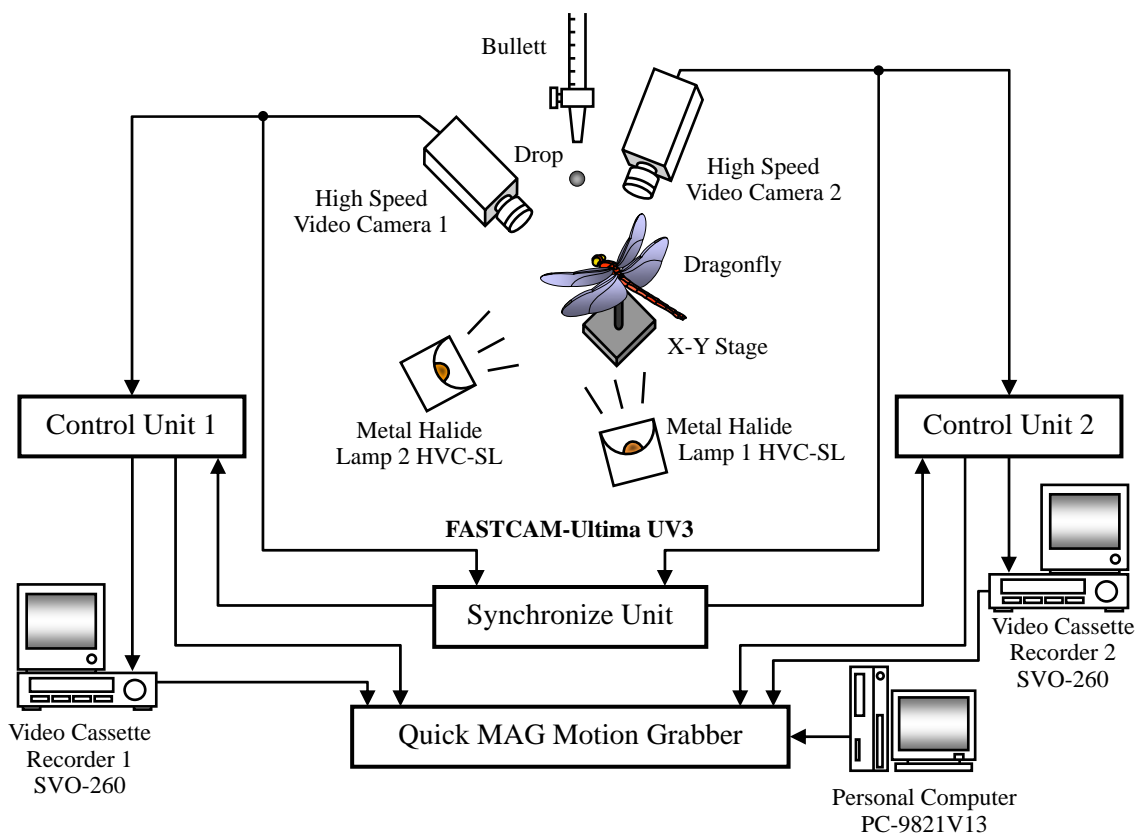


Fig. 1 Schematic diagram of experimental apparatus.

衝突させて流動現象を調べる実験を行った。翅における衝突位置を図 2 に示す。

一般に、トンボの翅は航空機などの翼と異なり、揚力の作用に対する強度，衝撃吸収作用，航空力学的な性能性などのために凹凸のある表面形状となっている。一例として，3 次元曲面形状計測装置により計測したアキアカネの翅の表面形状を図 3 に示す。トンボの翅の前縁部分で特に起伏の激しい構造となっており，起伏はおおよそ翅端部に向かってまた後縁部に向かって小さくなっていることが明らかである。このような翅の表面形状の場所による相異や翅全体の体に対する傾斜角などが液滴衝突現象の翅の各箇所による特性の相異をもたらすものと考えられる。以上のような考察に基づいて図 2 に○印で示した箇所に液滴を衝突させて流動現象と翅の変形挙動を調べた。

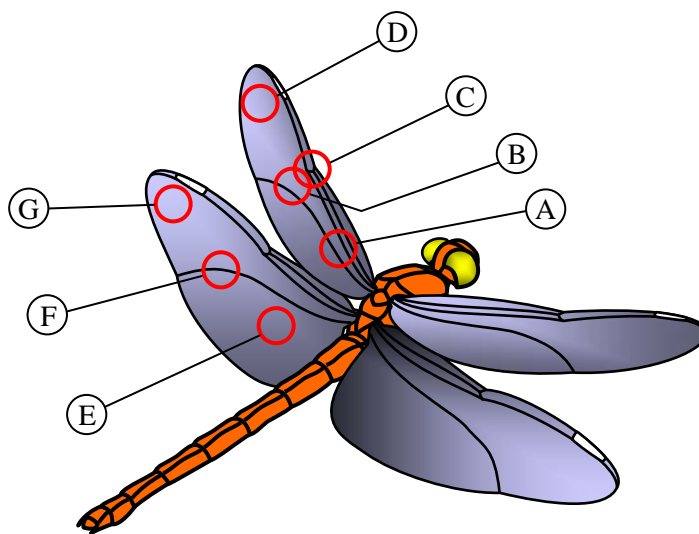


Fig. 2 Positions of the droplet collision on dragonfly wings.

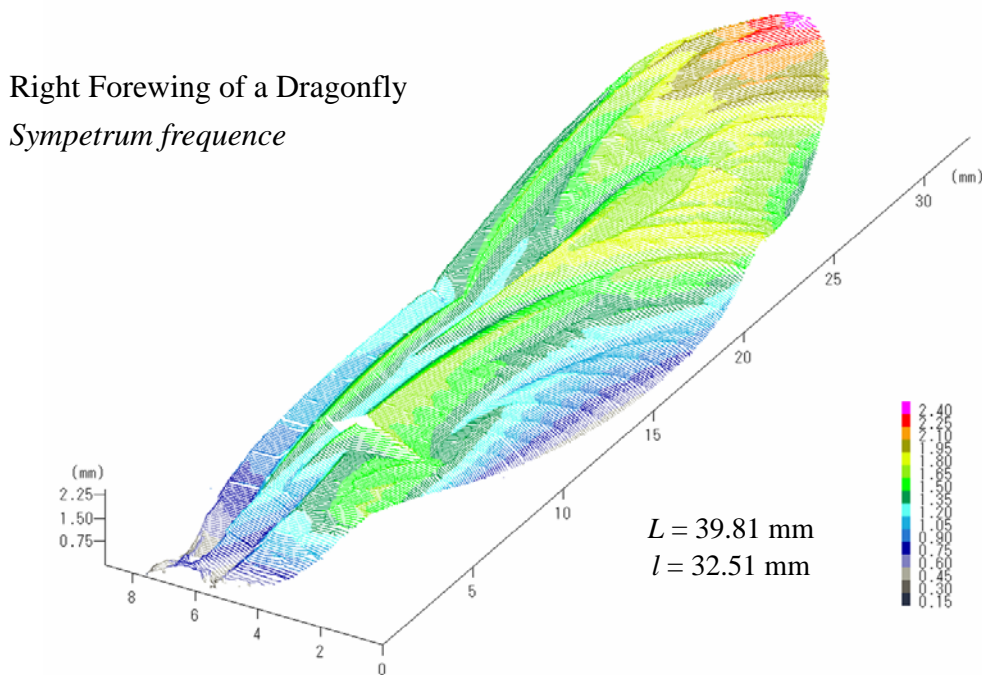


Fig. 3 Surface shape of the dragonfly wing.

### 3.3 液滴衝突における諸量の定義

液滴衝突現象を定量的に評価するために、図 4 に示すような座標系を設定し、翅および液滴の時間的な変化を調べた。落下高さ  $H$  は、トンボの前翅先端部から上方にとった。座標  $z$  は前翅の先端部を原点として下方に向かって正、上方に負と設定した。この 1 次元座標系において結節の位置  $z_n$ 、翅端  $z_t$ 、および液滴の最下点  $z_d$  の時間変化を調べた。また、画像記録における液滴の横方向の拡がり  $d_s$  の時間変化も調べた。

### 3.4 若虫の遊泳解析における実験装置および方法

トンボは不完全変態を行い、幼虫は淡水または汽水域にすみ、肉食性で、運動性が強い[44]。そのため遊泳特性に優れていると予想され、アキアカネの若虫（幼虫）の自由遊泳挙動を調べた。実験装置は図 1 に示した高速度ビデオカメラ解析装置をそのまま使用し、若虫の遊泳は透明プラスチック容器に所定の深さまで水を満たした中で行わせた。実験で使用したアキアカネの生きている若虫を図 5 に写真で示す。幼虫の口器は下唇が発達し、捕獲仮面となり、

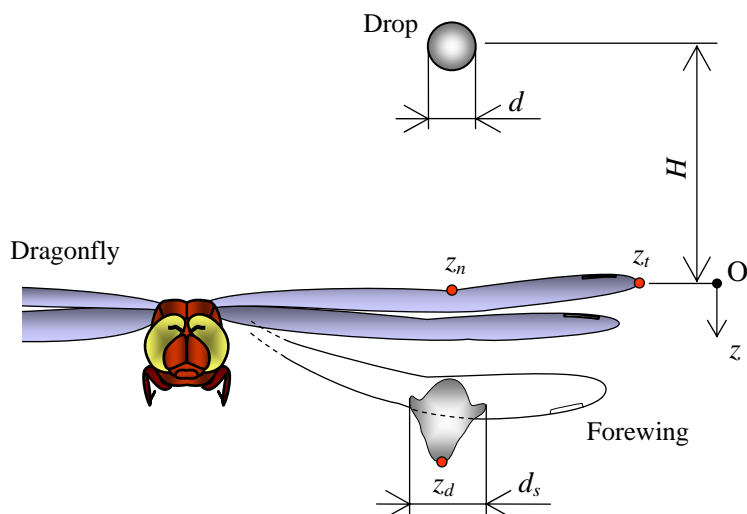


Fig. 4 Coordinate system and definition of nomenclature.



Fig. 5 Photograph of a dragonfly nymph.

複眼は小さく、単眼は欠如し、触角は長くて主要な感覚器官となっている[44]。また、図 5 では分かりにくいですが、若虫の脚には細毛が生えていて、特に脚先端部で細毛は長くて比較的密に生えている。試料若虫は図 5 から明らかなように若齢の幼虫であり、追い立てることにより自由水泳の挙動を録画解析した。

### 3.5 昆虫のはばたき機構の再現

生物は一定のリズムのもとで生命を維持し、運動している[45]。そのため様々な機器を生物をまねて開発する場合、微小振動が重要となる。本報では著者らが進めているマイクロメカニズムの構築に関連して、昆虫型はばたきメカニズムの簡単な画像を紹介する。映像の録画は図 1 で示した高速度ビデオカメラ解析装置を用いて行った。

## 4 ヤゴの自由遊泳

トンボは蛹の時期がない不完全変態の昆虫で、幼虫、成虫ともに肉食で運動性が強い。幼虫の時期は水生で、歩行と水泳によって移動する。図 5 で示した比較的若齢であるアキアカネの若虫の水泳挙動を示す。若虫は  $L = 7.62$  mm である。若虫は前脚と中脚の 2 対をほぼ同時に櫂をかくように運動して前進していることがわかる（中脚がやや早めにパワ・ストロークに入る）。文献[44]には、トンボ亜目の幼虫が鰓室から水を噴射してすばやく前進し、突発的な逃避行動を可能にしているとの記述があるが、図 6 に示した水泳挙動は脚運動のみによる推進と思われる。若虫の自由水泳時における頭部、右前脚、および右後脚の各先端部の位置をプロットして図 7 に示す。各プロットは時間間隔  $\delta_t = 8.43$  ms 毎の位置を示している。



Fig. 6 High speed movie of swimming dragonfly nymph ([./swimming.avi](#)).

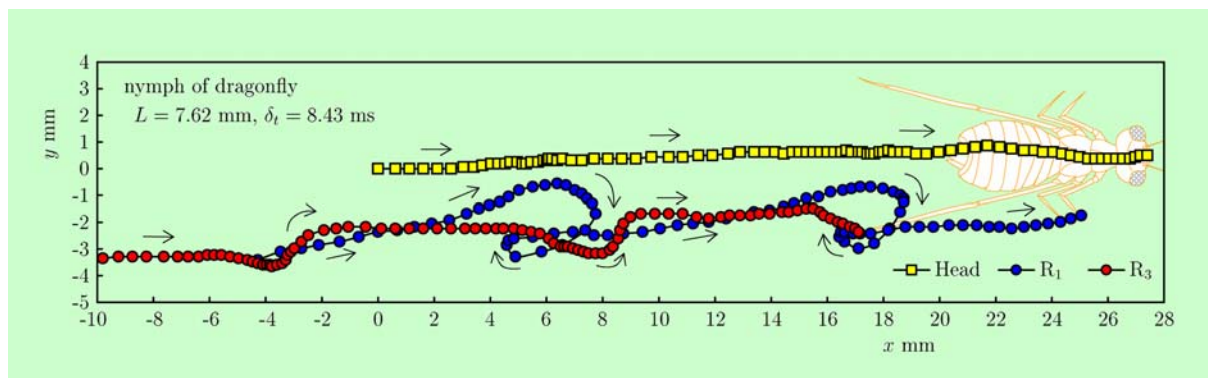


Fig. 7 Swimming trajectories of some body points of dragonfly nymph.

また、時間経過は図 7 において矢印方向に向かっている。頭部（図中口印）の軌跡から若虫は右に向かって直進遊泳していると判断でき、その時の脚の運動軌跡が明らかである。すなわち、前脚は弧を描くように後方に移動させ、体から離れた位置から次第にゆっくりと脚先を体側に寄せてくる。後脚は数 mm の幅で開閉を行う軌跡を示している。若虫の体に固定した座標系で前脚先端および後脚先端の運動軌跡を示すと図 8 のようになる。すなわち、パワ・ストローク（推力行程）で前脚を一気にすばやく打ち下ろしながら推力を得て、リカバリ・ストローク（回復行程）で推力を失わないように徐々に脚先を体側に寄せながら頭上まで持ってくる。このような遊泳の場合、若虫の脚が得る推力  $T_s$  は次式のように記述され得る [24, 44].

$$T_s = \alpha \rho S v_p^2 \tag{12}$$

ここで、 $\alpha$  は比例定数、 $S$  は脚の面積、 $v_p$  はパワ・ストロークにおける脚の動く速度である。

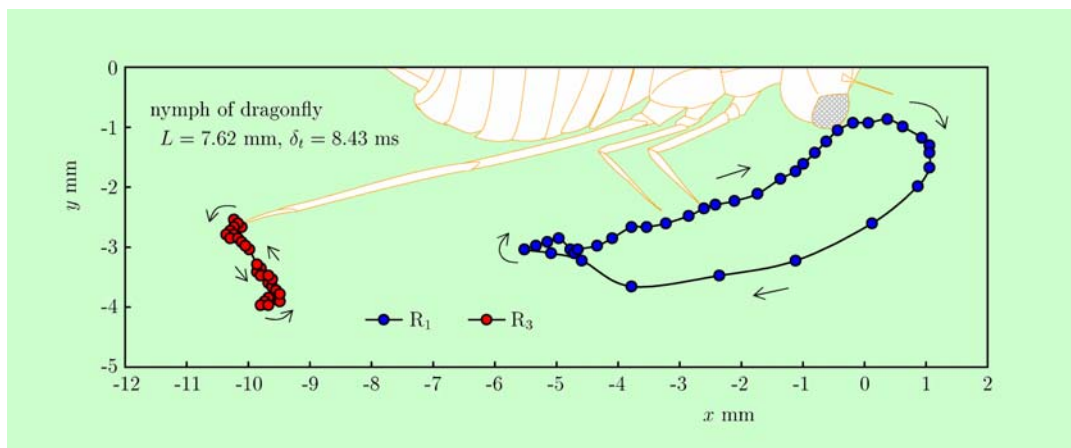


Fig. 8 Leg tip motions during a swimming stroke.

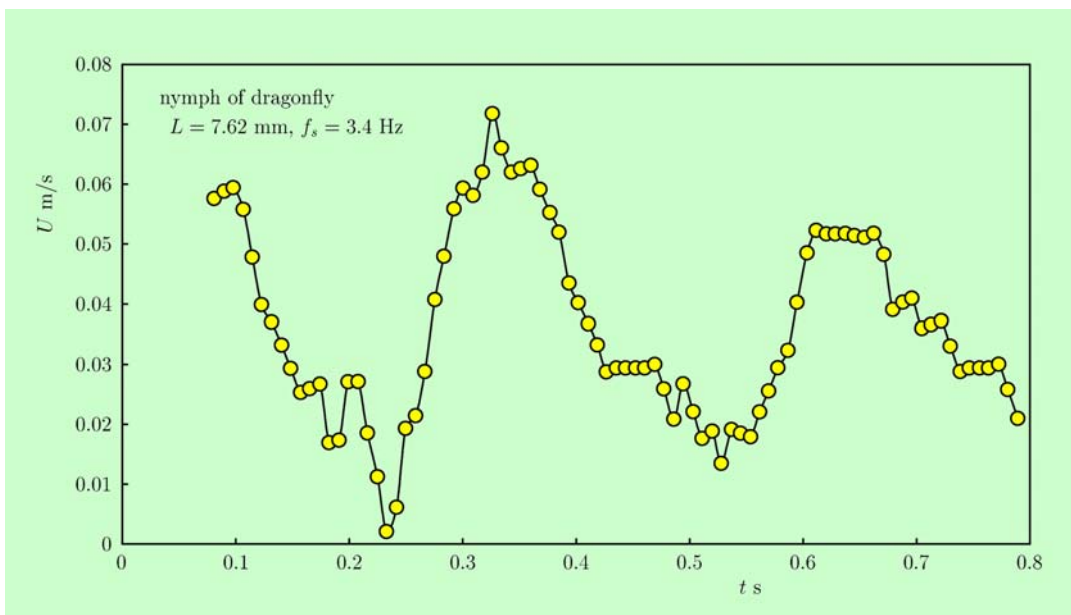


Fig. 9 Velocity variation during swimming motions of dragonfly nymph.



ゲンゴロウも同じような泳法を行うが、ゲンゴロウの場合は推力を得るのにほとんど後脚のみを使用する[24, 44]. そのためゲンゴロウの脚は遊泳毛で覆われ、パウ・ストロークで細毛を広げて脚を打ち下ろし、リカバリ・ストロークで脚の細毛を閉じて折り曲げながら前方に戻す. アキアカネの若虫の場合、比較的大きく長い後脚はわずかに開閉するが、全く折り曲げることとはせず、後脚と比較して短い前脚と中脚をほぼ同時に動かすことによって前進推力を得る（厳密には中脚を先に動かし、前脚は中脚を追いかけるように動かす. 前脚の動きのつくる乱れの影響を中脚が受けないようにしている). 若虫の歩行は他の陸生昆虫と同様に交互三点支持で歩行するが、遊泳時の脚の動きは歩行とは全く異なっている.

図 9 は若虫の遊泳時の速度変動を示している. パウ・ストロークで前進推力を得て、リカバリ・ストロークで速度を失う様子が明らかである. 図 9 の若虫の最大遊泳速度  $v_s$ , 平均遊泳周波数  $f_s$ , 若虫の体長  $L$  からおよそその泳動数  $S_w$  を求めると、式(13)のようになる.

$$S_w = \frac{v_s}{f_s L} = \frac{0.07}{3.4 \times 7.62 \times 10^{-3}} \approx 2.7 \quad (13)$$

この値は、魚の平均泳動数  $S_w = 0.6$  [25]と比較すると極端に高い値となっている. 平均遊泳速度で計算しても式(13)の 1/2 程度であり、アキアカネの若虫の遊泳機能は高いといえる.

## 5 トンボ翅面への液滴衝突

静止している生きたトンボの翅面に落下液滴が衝突した際に発生する代表的な現象を図 10 に示す. 液滴はトンボの前翅の結節付近 (図 2 におけるⒷ) に衝突している. 液滴が衝突した翅部分は時間経過にともない下方に変位してゆく. 他方, 翅端部は, 上方に変位する. この事実はトンボの翅が液滴衝突によって大きく屈曲することを示している. しかしながら, 屈曲の状況はある程度の進行後, 次第に回復する. 全く同じ現象をもう一台のカメラによって斜め上方から観察した画像記録を図 11 に示す. 固体平板に衝突する液滴の場合とは異なり, トンボの翅面に衝突する液滴はあまり水平に拡がらないことがわかる. これは, 平板に衝突する液滴の場合と比較して, 液滴の運動エネルギーを効果的に散逸するメカニズムが働いているものと考えられる. このメカニズムの 1 つが翅の変形であろう. 図 11 において, 液滴衝突によって翅面に濃い影のような部分が見られる. これは翅面に折りの発生していることを表し, より翅の変形を可能にしていることを意味している. 多くの昆虫の翅で変形しやすい特定部位の存在することが知られており[46], このような変形が液滴のエネルギーを吸収す



Fig. 10 Sideview movie of wing behavior in the drop impact at ⑦ ([./dropl.avi](#)).

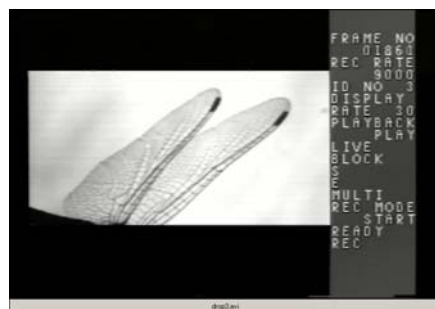


Fig. 11 Overview movie of wing behavior in the drop impact at ㊸ ([./drop2.avi](#)) .

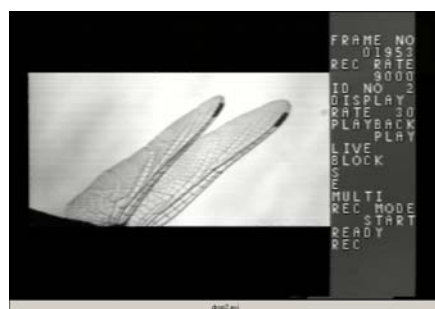


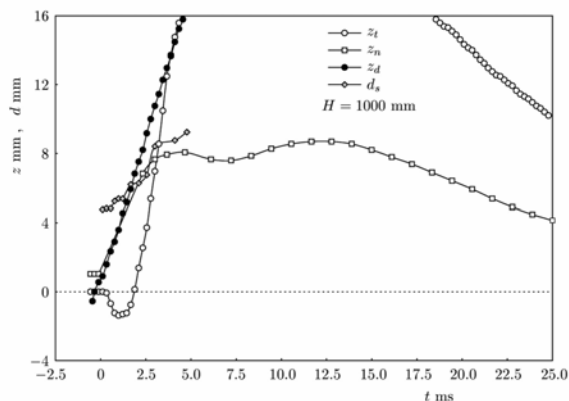
Fig. 12 Sideview movie of wing behavior in the drop impact at ㊹ ([./drop3.avi](#)) .

ると予想される。また、前述の図 3 に示した翅の表面凹凸も液滴衝突時に変形して同様にエネルギー散逸に寄与する衝撃吸収作用の役割を果たしているものと考えられる。

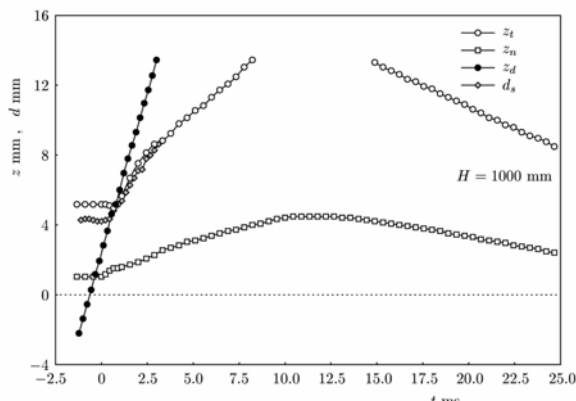
トンボの翅の先端部分に液滴が衝突する場合には、前述した現象とは大分異なっている。図 12 に斜め上方から観察した翅端における液滴衝突の画像記録を示す。この図において、図 2 に示した㊹点に液滴が衝突している。液滴衝突によってトンボの翅は変形するが、前縁は少し上方に変位するだけで大きな変形は見られない。しかし、後縁は大きく下方に傾き、翅面全体をねじった形に変形する。そのため、液滴は翅面を転がり落ちるように落下し、液滴衝突による衝撃を受けないものと考えられる。このような翅特性は前縁の強じん性と後縁部のしなやかさに由来する。また、液滴が大きく変形しないで落下していることから、翅面は実験で使用した程度の液滴に対して撥水性を有していることもわかる。

前述の液滴衝突現象を定量的に評価するために、図 4 で定義した諸量の時間経過における変化を調べた。時刻  $t$  は、液滴の翅面への最初の接触時を  $t = 0$  と設定した。図 13 は前述の図 10 で示したような画像記録に基づいて作成したものであり、トンボの前翅の 3 箇所（図 2 における㊸、㊹、㊺）にそれぞれ液滴が衝突した場合の諸量の変化を示す。トンボの翅の付根付近に近い方から翅端に向かう順番に並べてあり、液滴衝突における諸量の変化の傾向が明らかである。途中で途切れているデータプロットは映像がカメラの視野外に出てしまったことを意味している。一般に、固体平板における衝突現象と比較して、トンボの翅との液滴衝突現象では、翅の変位や液滴の移動が大きいため比較的広い視野が要求される。図から、翅の付根に近い部分に液滴が衝突した場合、 $z_n$  の変化は一旦減少した後に増大し、その後徐々に 0 に向かって復元する状況がわかる。しかし、翅端部に向かうに従って初めの減少部分が小さくなり、翅端部付近への衝突の場合には、このような初めの減少は見られない。 $z_n$  の変

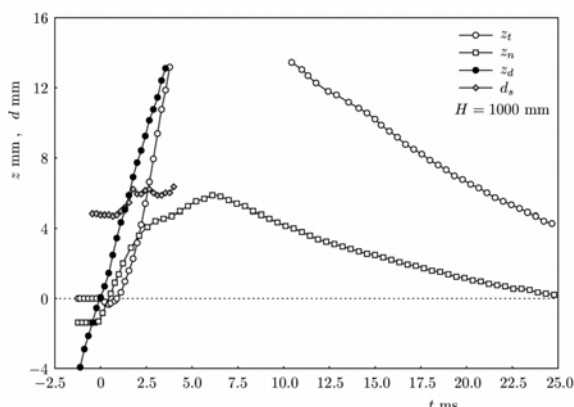
化は、翅の付根に近い部分に液滴が衝突した場合、時間経過とともに増大し、最大値を示した後に徐々に復元に向かう変化となる。しかし、翅端部付近に液滴が衝突した場合には、 $z_n$  は衝突後の初めに減少を示す。 $z_d$  の変化はいずれも一貫して増大方向にあり、衝突後も液滴は下方に向かって降下を続けることがわかる。 $d_s$  の変化は複雑で、多少変動を示すが、一般に翅の付根に近い部分に液滴が衝突した場合、その時間変化  $dd_s/dt$  は大きな値を示す。結節付近に液滴が衝突した場合には、 $d_s$  の変化に 2 つの山が見られ、変動が大きいのが、これは翅の動きや変形との相互作用のためである。



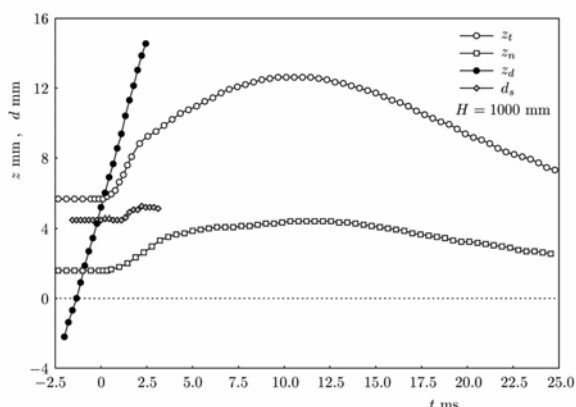
(a) The droplet collision at ㉑



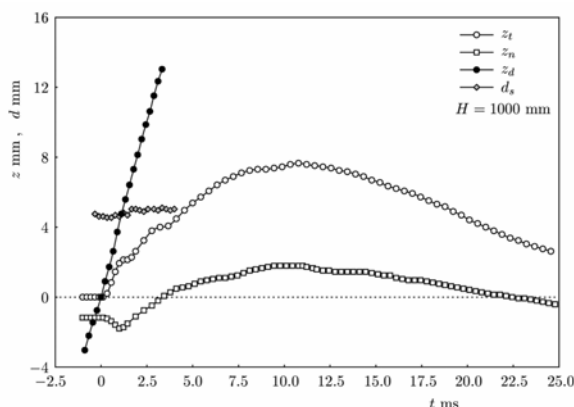
(a) The droplet collision at ㉕



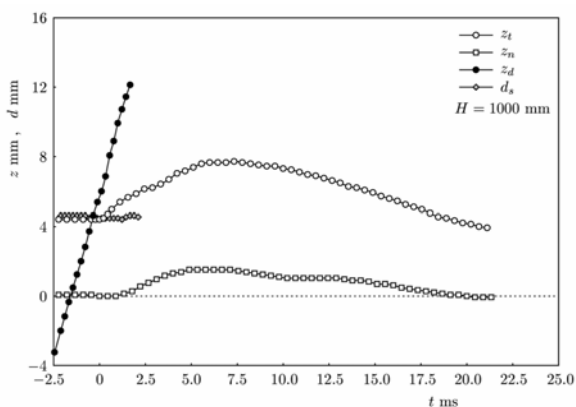
(b) The droplet collision at ㉒



(b) The droplet collision at ㉖



(c) The droplet collision at ㉔



(c) The droplet collision at ㉓

Fig. 13 Time evolution of the droplet collision on the forewing.

Fig. 14 Time evolution of the droplet collision on the hindwing.

トンボの後翅に液滴が衝突した場合の諸量の変化を図 14 に示す。図 14(a)は液滴が比較的翅の付根に近い部分に衝突した場合（図 2 における㊸）、(b)は結節付近に衝突した場合（図 2 における㊹）、(c)は翅端に近い部分に衝突した場合（図 2 における㊺）の諸量の時間経過における変化を示している。これらの図を比較して見た場合、各諸量の各時間変化の値は翅端に向かって小さくなっていることがわかる。これは、液滴の衝突による翅への衝撃の大きさが翅端に向かって小さくなっていることを意味している。また、前翅の㊴、㊵、㊶の部分に液滴が衝突した場合と比較すると、大まかな変化の傾向はほぼ同様であるが、変化量は小さい。これは、前翅を水平に保った場合、後翅の後縁が下方に傾いた形状となっているためであると考えられる。すなわち、液滴衝突の衝撃を斜め方向に分散させる構造であると考えられる。トンボの後翅は面積が大きく、またキャンバーも有しており、揚力を得るのに好都合な構造が、そのまま液滴の衝撃を逃がしやすい構造ともなっている。

## 6 トンボ型はばたきメカニズム

著者らは、外部交流磁界と微小な NdFeB 磁石を用い非接触でエネルギー供給を行い移動するマイクロマシン・システムの構築に取り組んでいる。これまでも、水あるいはグリセリンを満たした微小直径（mm オーダ）を有するパイプ内を泳動する磁気マイクロマシンについて報告してきた[47-49]。これらは NdFeB 磁石に作用する磁気トルクを正弦波状に制御する事によって微小生物の有する微小振動のメカニズムをまねたものであり[45]、マイクロマシンを実現する手法として極めて有望である。

本報では、現在著者らが進めているトンボ型はばたきメカニズムに関する現状をごく簡単に紹介する。はばたきメカニズムのアクチュエータは直径 5 mm、高さ 6 mm の NdFeB 磁石を 2 個連結して使用し、外部から微小な交流磁場（十数 mT）を印加することによって磁石を振動させるメカニズムである。すなわち、磁石が磁場の作用を受けた場合、式(14)で記述される磁気トルクが作用する。

$$\mathbf{T} = \mathbf{M} \times \mathbf{H} \quad (14)$$

ここで  $\mathbf{M}$  は磁気モーメント、 $\mathbf{H}$  は印加磁場である。実験では式(15)で記述される交流磁場を印加した。

$$\mathbf{H} = H_0 \mathbf{e} \cos(2\pi f_0 t) \quad (15)$$

ここで  $H_0$  は変動磁場の振幅、 $\mathbf{e}$  は単位ベクトル、 $f_0$  は交流磁場の周波数である。磁石にはゴム紐を介して翅軸を連結してある。全てが学生による手作りであり、1 台毎に磁石-ゴム紐-翅軸の連結の仕方によってそのはばたき特性が異なる。図 15 にトンボ型はばたきメカニズムのはばたきの様子を示す。図 15 から磁気トルクによってはばたく本メカニズムは比較的トンボのはばたきに似ていることがわかる。このはばたきメカニズムに関して、はばたき振幅の周波数特性はシステムの共振を利用すれば、効率的であることが明らかになっている。また、磁石-ゴム紐-翅軸の連結の仕方によって、はばたきがパラメタ振動、調和振動、高調波振動の応答特性を示す。このような研究から逆に、本物の昆虫のはばたきメカニズムが解明される可能性もあり、極めて興味深い。

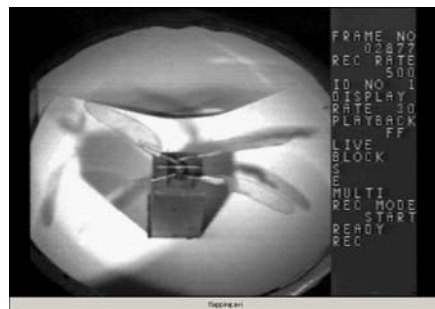


Fig. 15 High speed movie of flapping dragonfly wing model ([./flapping.avi](#)) .

## 7 おわりに

本報では、トンボの運動に関連して観察される流体力学的現象として、アキアカネの若虫の遊泳挙動、アキアカネの翅に落下液滴が衝突した場合に発生する液滴衝突流動現象を示した。また、昆虫のリズムをまねたワイヤレス・エネルギー供給システムによるトンボ型はばたきメカニズムを示した。生物と流体との相互作用には興味深い未解明な多数の課題が山積している。本報が数値流体力学の分野で仕事をなさっている研究者の研究意欲の向上に少しでもお役に立てれば幸いである。

## 謝辞

著者らは、磁気マイクロマシンに関する研究において九州工業大学の本田崇先生と共同研究を行っている。ここに記し、謝意を表す。また、トンボの翅と液滴の衝突に関する実験ではいわき明星大学理工学部機械工学科小林達弥君、トンボのヤゴの遊泳に関する実験では本間義則君と前田健伍君、トンボ型はばたきメカニズムの製作および実験では大越崇生君と橋本康直君の助力を得た。ここに記し、謝意を表す。

## 参考文献

- [1] Hertel, H., “バイオエンジニアリング (土屋喜一訳)”, 朝倉書店, (1985), 73-86.
- [2] Azuma, A., Azuma, S., Watanabe, I. and Furuta, T., “Flight Mechanics of a Dragonfly”, *J. Exp. Biol.*, Vol. **116**, (1985), 79-107.
- [3] Azuma, A. and Watanabe, T., “Flight Performance of a Dragonfly”, *J. Exp. Biol.*, Vol. **137**, (1988), 221-251.
- [4] Okamoto, M., Yasuda, K. and Azuma, A., “Aerodynamic Characteristics of the Wings and Body of a Dragonfly”, *J. Exp. Biol.*, Vol. **199**, (1996), 281-294.
- [5] Alexander, D. E., “Wind Tunnel Studies of Turns by Flying Dragonflies”, *J. Exp. Biol.*, Vol. **122**, (1986), 81-98.
- [6] Wakeling, J. M. and Ellington, C. P., “Dragonfly Flight I. Gliding Flight and Steady-State Aerodynamic Forces”, *J. Exp. Biol.*, Vol. **200**, (1997), 543-556.
- [7] Wakeling, J. M. and Ellington, C. P., “Dragonfly Flight II. Velocities, Accelerations and Kinematics of Flapping Flight”, *J. Exp. Biol.*, Vol. **200**, (1997),

- 557-582.
- [8] Wakeling, J. M. and Ellington, C. P., “Dragonfly Flight III. Lift and Power Requirements”, *J. Exp. Biol.*, Vol. **200**, (1997), 583-600.
- [9] 須藤誠一, 露木浩二, 橋本弘之, 片桐一成, “トンボの翅構造に関する研究”, 日本機械学会論文集 (B 編), **62** 巻 599 号, (1996), 2674-2678.
- [10] 須藤誠一, 露木浩二, 井小萩利明, 太田福雄, 信田重成, 谷順二, “トンボの翅構造に関する研究 (第 2 報, トンボ翼とはばたき)”, 日本機械学会論文集 (C 編), **64** 巻 625 号, (1998), 3526-3533.
- [11] Zeng, L., Matsumoto, H. and Kawachi, K., “Two-colour Compensation Method for Measuring Unsteady Vertical Force of an Insect in a Wind Tunnel”, *Meas. Sci. Technol.*, Vol. **7**, (1996), 515-519.
- [12] Zeng, L., Matsumoto, H., Sunada, S., Ohnuki, T. and Kawachi, K., “Two-dimensional, Noncontact Measurement of the Natural Frequencies of Dragonfly Wings using a Quadrant Position Sensor”, *Opt. Eng.*, Vol. **34**, (1995), 1226-1231.
- [13] Zeng, L., Matsumoto, H., Sunada, S. and Kawachi, K., “High-resolution Method for Measuring the Torsional Deformation of a Dragonfly Wing by Combining a Displacement Probe with an Acousto-optic Deflector”, *Opt. Eng.*, Vol. **35**, (1996), 507-513.
- [14] Zeng, L., Matsumoto, H. and Kawachi, K., “A Fringe Shadow Method for Measuring Flapping Angle and Torsional Angle of a Dragonfly Wing”, *Meas. Sci. Technol.*, Vol. **7**, (1996), 776-781.
- [15] 須藤誠一, 橋本弘之, 片桐一成, “磁性液滴と液体自由表面の衝突”, 日本機械学会論文集 (B 編), **5** 巻 536 号, (1991), 1277-1283.
- [16] Worthington, A. M., “*A Study of Splashes*”, Longman Green and Company, (1908), 1-169.
- [17] Mehdizadeh, N. Z., Chandra, S. and Mostaghimi, J., “Formation of Fingers Around the Edges of a Drop Hitting a Metal Plate with High Velocity”, *J. Fluid Mech.*, Vol. **510**, (2004), 353-373.
- [18] VanDam, D. B. and Clerc, C. L., “Experimental Study of the Impact of an Ink-Jet Printed Droplet on a Solid Substrate”, *Phys. Fluids*, Vol. **16**, (2004), 3403-3414.
- [19] Hsu, C. F. and Ashgriz, N., “Impaction of a Droplet on an Orifice Plate”, *Phys. Fluids*, Vol. **16**, (2004), 400-411.
- [20] Fedorchenko, A. I. and Wang, A.-B., “On Some Common Features of Drop Impact on Liquid Surface”, *Phys. Fluids*, Vol. **16**, (2004), 1349-1365.
- [21] Roisman, I. V., “Dynamics of Inertia Dominated Binary Drop Collisions”, *Phys. Fluids*, Vol. **16**, (2004), 3438-3449.
- [22] Leal, L. G., “Flow Induced Coalescence of Drops in a Viscous Fluid”, *Phys. Fluids*, Vol. **16**, (2004), 1833-1851.

- [23] 内田亨, “動物系統分類学”, 中山書店, Vol. 7(下 A), (1970), 1-203.
- [24] 東昭, “生物の動きの事典”, 朝倉書店, (1997), 141-183.
- [25] 田中一郎, 永井實, “抵抗と推進の流体力学—水棲動物の高速遊泳能力に学ぶ—”, シップ・アンド・オーシャン財団, (1996), 1-219.
- [26] Tytell, E. D. and Lauder, G. V., “The Hydrodynamics of Ell Swimming I. Wake Structure”, *J. Exp. Biol.*, Vol. 207, (2004), 1825-1841.
- [27] Denny, M. W., “Paradox Lost: Answers and Questions about Walking on Water”, *J. Exp. Biol.*, Vol. 207, (2004), 1601-1606.
- [28] Müller, U. K. and van Leeuwen, J. L., “Swimming of Larval Zebrafish: Ontogeny of Body Waves and Implications for Locomotory Development”, *J. Exp. Biol.*, Vol. 207, (2004), 853-868.
- [29] Brackenburg, J., “Kinematics and Hydrodynamics of Swimming in the Mayfly Larva”, *J. Exp. Biol.*, Vol. 207, (2004), 913-922.
- [30] 樋口俊郎, “マイクロマシン技術総覧”, 産業技術サービスセンター, (2003), 1-753.
- [31] 江刺正喜, “マイクロマシン”, 産業技術サービスセンター, (2002), 1-669.
- [32] Hashimoto, H. and Sudo, S., “Surface Disintegration and Bubble Formation in Vertically Vibrated Liquid Column”, *AIAA J.*, Vol. 18, (1980), 442-449.
- [33] Morton, D., Rudman, M. and Jong-Leng, L., “An Investigation of the Flow Regimes Resulting from Splashing Drops”, *Phys. Fluids*, Vol. 12, (2000), 747-763.
- [34] Harvie, D. J. E. and Fletcher, D. F., “A Hydrodynamic and Thermodynamic Simulation of Droplet Impacts on Hot Surfaces, Part II: Validation and Applications”, *Int. J. Heat and Mass Transfer*, Vol. 44, (2001), 2643-2659.
- [35] Wang, Y. and Tsai, H. L., “Impingement of Filler Droplets and Weld Pool Dynamics during Gas Metal Arc Welding Process”, *Int. J. Heat and Mass Transfer*, Vol. 44, (2001), 2067-2080.
- [36] Elmore, P. A., Chahine, G. L. and Oguz, H. N., “Cavity and Flow Measurements of Reproducible Bubble Entrainment Following Drop Impacts”, *Exp. Fluids*, Vol. 31, (2001), 664-673.
- [37] Fujimoto, H. Ogino, T., Takuda, H. and Hatta, N., “Collision of a Droplet with a Hemispherical Static Droplet on a Solid”, *Int. J. Multiphase Flow*, Vol. 27, (2001), 1227-1245.
- [38] Reznik, S. N. and Yarin, A. L., “Spreading of a Viscous Drop due to Gravity and Capillarity on a Horizontal or an Inclined Dry Wall”, *Phys. Fluids*, Vol. 14, (2002), 118-132.
- [39] Mehdi-Nejad, V., Mostaghimi, J. and Chandra, S., “Air Bubble Entrapment under an Impacting Droplet”, *Phys. Fluids*, Vol. 15, (2003), 173-183.
- [40] Sudo, S, Funaoka, M., Nishiyama, H. and Katagiri, K., “The Effect of Target Roughness on the Impact Phenomena of Magnetic Drops”, *Energy Conversion and*

- Management*, Vol. **43**, (2002), 289-297.
- [41] Pumphrey, H. C. and Elmore, P. A., “The Entrainment of Bubbles by Drop Impacts”, *J. Fluid Mech.*, Vol. **220**, (1990), 539-567.
- [42] Mundo, C., Sommerfeld, M. and Tropea, C., “Droplet-Wall Collisions: Experimental Studies of the Deformation and Breakup Process”, *Int. J. Multiphase Flow*, Vol. **21**, (1995), 151-173.
- [43] Dear, J. P. and Field, J. E., “High-Speed Photography of Surface Geometry Effects in Liquid/Solid Impact”, *J. Appl. Phys.*, Vol. **63**, (1988), 1015-1021.
- [44] 三橋淳, “昆虫学大事典”, 朝倉書店, (2003), 71-286.
- [45] 板生清, “情報マイクロシステム”, 朝倉書店, (1998), 1-197.
- [46] Wootton, R. J., “Support and Deformability in Insect Wings”, *J. Zool. Lond.*, Vol. **193**, (1981), 447-468.
- [47] Sudo, S., Orikasa, R. and Honda, T., “Locomotive Characteristics of Swimming Mechanism Propelled by Alternating Magnetic Field”, *Int. J. Appl. Electromagn. Mech.*, Vol. **19**, (2004), 263-267.
- [48] 須藤誠一, 瀬川真也, 本田崇, “磁気マイクロマシンの移動速度の周波数依存性”, 実験力学, Vol. **3**, (2003), 234-240.
- [49] Sudo, S. Segawa, S. and Honda, T., “A Study of Micro Moving Mechanism for Medical Application”, *Proc. Int. Symp. Micro-Mech. Engn.*, (2003), 385-391.