

PIV 法を用いたミズスマシ遊泳の流れ場調査

[研究代表者] 北川一敬 (工学部機械学科)

研究成果の概要

近年、生物模倣技術の向上から生物の行動を模倣したロボットの開発が進んでいる。本研究では、小型かつ高い遊泳能力があり体表面もなめらかである水生昆虫ミズスマシ(*Gyrinus japonicus*)に注目した。ミズスマシは、水面を素早く遊泳する水生昆虫であり、ゲンゴロウやメダカなど他の遊泳生物とは遊泳方法が大きく異なる。その遊泳方法は、高い旋回性を有する、高速移動ができる、潜水性能を保有するという特徴がある。本研究では、ミズスマシの遊泳メカニズムの解明及び小型遊泳ロボットの開発を最終目的とし、ミズスマシ遊泳時の流れ場調査を行う。ミズスマシの遊泳特性は、ハイスピードカメラを用いた遊泳時における脚の可視化実験を行い、遊泳軌跡及び遊泳速度調査を行った。また、粒子画像流速測定法を用いて遊泳時の胴体周り及び胴体後方の流れ場の可視化を行い、遊泳時の水面に与える流れ場の影響を調査した。本年度の研究から以下の結論を得た。ミズスマシ遊泳の可視化実験から、ミズスマシの遊泳は脚を打ち上げるリカバリーストローク、脚を打ち下ろすパワーストロークの2行程から構成されている。PIV法による可視化結果より、直進遊泳時は、頭部付近の最大速度は $0.156[\text{m/s}]$ となり、このとき、Reynolds 数： $\text{Re}=9.44 \times 10^2[-]$ 、Weber 数： $\text{We}=2.02[-]$ 、Froude 数： $\text{Fr}=0.643[-]$ となった。また、遊泳時に2つの渦が胴体後方に発生している。旋回遊泳時は、頭部付近の最大速度は $0.220[\text{m/s}]$ となり、このとき、Reynolds 数： $\text{Re}=1.33 \times 10^3[-]$ 、Weber 数： $\text{We}=4.02[-]$ 、Froude 数： $\text{Fr}=0.907[-]$ となった。また、遊泳時に旋回方向と同様の向きに回転する渦を内側に発生させている。今後の課題として、3次元の流れ場への影響を調査する必要がある、3次元モデルを用いた数値解析及びPIV法による3次元の流れ場調査を行う必要がある。

研究分野：流体力学

キーワード：Whirligig Beetle, Swimming Insect, Aquatic Insect, Flow Visualization, PIV, Biomimetics

1. 研究開始当初の背景

近年、生物模倣技術の向上により、産業・医学分野への応用が期待されている。生物の運動は、鳥や昆虫に見られる翼や翅による飛翔、魚や水生昆虫に見られるヒレや脚による遊泳、人間やその他の動物に見られる脚による歩行など、様々な形態を持っており、多種多様な生物の運動について研究が進められている。

本研究では、ミズスマシの遊泳メカニズムの解明及び小型遊泳ロボットの開発を最終目的とし、ミズスマシ遊泳時の流れ場の調査を行う。

2. 研究の目的

Fig.1 は、本研究に使用したミズスマシ(*Gyrinus*

japonicus)の写真を示す。本研究では、水面を素早く遊泳する水生昆虫であるミズスマシに注目した。ミズスマシは、高い旋回性を有し高速移動することができる特徴がある。この遊泳方法は、エネルギー効率がが高く、小型遊泳ロボットへの応用に適している。本研究では、ミズスマシの遊泳特性を調査するために、粒子画像流速測定法(以下 PIV: Particle Image Velocimetry)による可視化を行った。

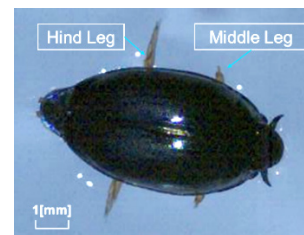


Fig.1 Photograph of Whirligig Beetle(*Gyrinus japonicus*)
可視化結果よりミズスマシの直進運動及び旋回運動にお

ける遊泳特性を調査する。

3. 研究の方法

Fig.2 は、実験装置の概略図と撮影画像を示す。本実験では、シート光を作成するため CW-Nd:YAG (DPSS) レーザ (MGL-W-532A-10W) を使用し、45[°]パウエルレンズでシート状にすることで厚み 2.0[mm]のシート光を製作した。放射したシート光を、透明アクリル容器[W126mm×D126mm×H80mm]中の水面から 1[mm]下に照射した。そして、可視化粒子からの散乱光をハイスピードカメラで撮影した。撮影条件は、撮影速度 6,000[fps]、シャッタ速度 100[μsec]、解像度 2,048×1,952[pixels](47×45[mm])とした。PIV 解析アルゴリズムには、FFT 相互相関法を用い、計算格子の 50[%]オーバーラップさせた。また、再帰的相関法を用いて複数回解析を行った。速度場の解析条件は、空間分解能 3.46[mm]、速度ベクトルピッチ 1.73[mm]で解析後、空間分解能 1.73[mm]、速度ベクトルピッチ 0.87[mm]で解析、最後に空間分解能 0.87[mm]、速度ベクトルピッチ 0.43[mm]で計 3 回解析を行った。

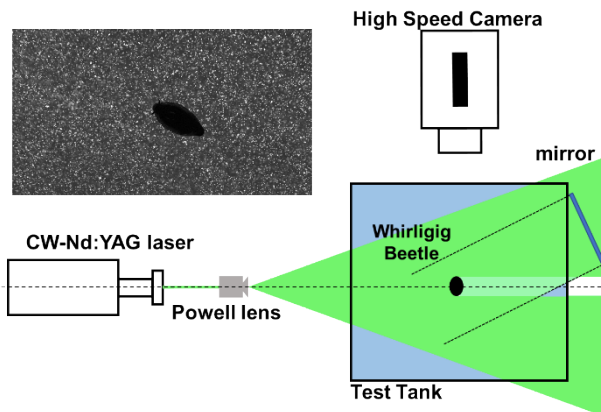


Fig.2 Experimental setup of PIV

4. 研究成果

(1) 直進遊泳

Fig.3(a),(b)はミズスマシ直進遊泳時における速度分布結果を示す。直進遊泳は、左右の中脚及び後脚を同時にストロークすることで、まっすぐ進む遊泳である。Fig.3(a)はストローク直前の推進状態で $T=0$ [ms]とする。Fig.3(b)はストローク後の推進状態で $T=59$ [ms]を示す。各図は静止状態からの撮影ではなく、遊泳途中から撮影したものであるため、それ以前の遊泳による流れ場が存在する。直進時の頭部付近の最大速度は 0.156[m/s]である。このとき、Reynolds 数: $Re=9.44 \times 10^2$ [-], Weber 数: $We=2.02$ [-], Froude

数: $Fr=0.643$ [-]である。Weber 数は流れの慣性力と表面張力の比をとった無次元数であり、 $We \geq 1$ であれば、慣性力の影響が大きいので、粘性抵抗が生じている。Froude 数は流体に作用する慣性力と重力の比をとった無次元数であり、Froude 数が 0.5 であるときに造波抵抗は最大となり、0.5 を超えると徐々に造波抵抗は低下していくことが知られている。このことから、ミズスマシ遊泳時に造波抵抗が発生していると考えられる。Fig.3(a)では、ミズスマシの後方にある流れ場が遊泳と同じ方向に発生している。これは遊泳時、ミズスマシ胴体周りの流れによって粘性の影響を受け遊泳方向に引っ張られたためと考える。Fig.3(b)では、中脚及び後脚をストロークすることで、胴体後方に 2 つの渦が発生し、右は反時計回り、左は時計回りの渦になっている。このように渦を発生させ、流れを変化させることで推進力を得ている。

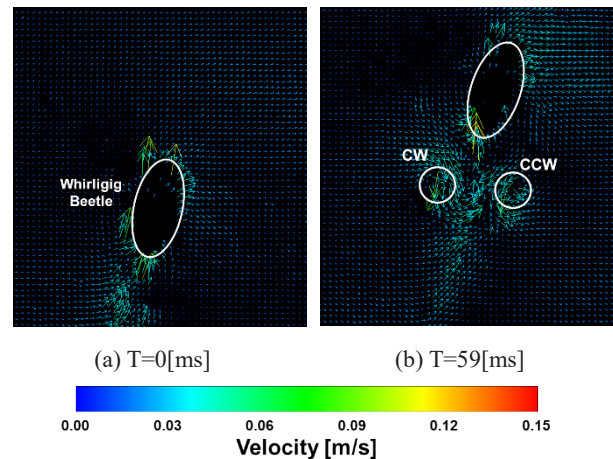


Fig.3 Velocity distribution of swimming when going straight of *Gyrinus japonicus*

(2) 旋回遊泳

Fig.4(a)~(d)はミズスマシ旋回遊泳時における速度分布結果を示す。旋回遊泳は、左右の中脚及び後脚のストロークを変化させることで旋回している。Fig.4(a)を $T=0$ [ms]とする。Fig.4(b)は $T=84$ [ms]、Fig.4(c)は $T=132$ [ms]、Fig.4(d)は $T=198$ [ms]とし、ミズスマシが画角内で、旋回遊泳が確認できるまでの速度分布結果を示す。旋回時の頭部付近の最大速度は 0.220[m/s]である。このとき、Reynolds 数: $Re=1.33 \times 10^3$ [-], Weber 数: $We=4.02$ [-], Froude 数: $Fr=0.907$ [-]である。Fig.4(a)から Fig.4(b)にかけては、波の発生と伝播が確認できる。Fig.4(b)から Fig.4(c)にかけては、右後脚を左後脚に比べ、約 1.75 倍大きな軌跡を描いて漕ぐことで左旋回している。このとき、Fig.4(b)で旋回中心付近に渦が

発生していることが確認できる。発生した渦は Fig.4(d)でも確認できる。このとき発生した渦は旋回方向と同様の向きに回転しており、旋回運動に効果的に作用すると考える。また、このときの旋回半径は、約 15[mm]である。

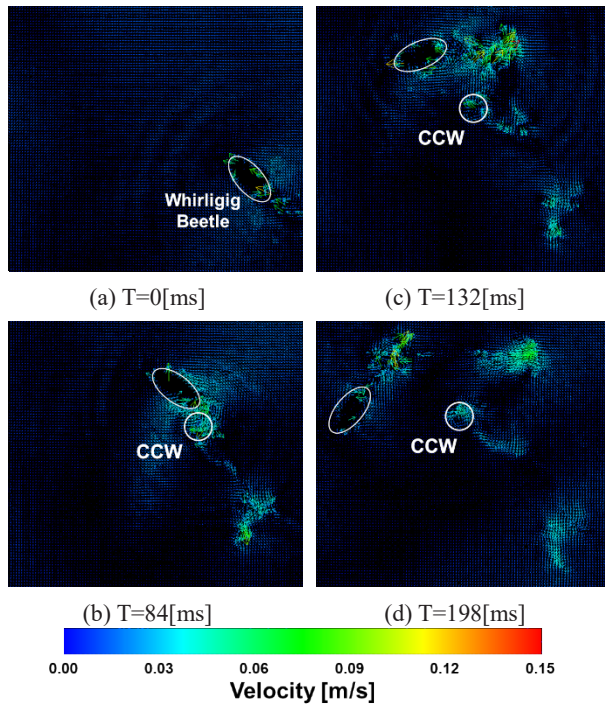


Fig.4 Velocity distribution of swimming during rotation of *Gyrogonus japonicus*

研究成果を要約すると以下のようなになる。

本研究では、ミズスマシが遊泳時特性調査を目的として、PIVによる、遊泳時における流れ場の可視化を行った。その結果を以下に示す。

- I. 直進遊泳は、胴体後方に 2 つの渦を発生させることで、流れを変化させ推進力を得ている。
- II. 旋回遊泳は、旋回中心付近に旋回方向と同様の向きに回転する渦を発生させることで、流れ場により遊泳を補助し推進力を得ている。
- III. 3 つの無次元数から、ミズスマシは大きな慣性力と推進力を発生させることで、水面での高速移動を可能にしている。

今後の課題として、本研究は 2 次元な流れ場調査であり、3 次元な流れ場への影響は確認できていない。そのため、ステレオ PIV や数値解析による 3 次元な流れ場調査を行うことで、より詳細な遊泳特性について明らかにする。

5. 本研究に関する発表

- (1) 長谷川純大 他 3 名, “ミズスマシ遊泳時の流れ場調査”, 第 45 回エアロ・アクアバイオメカニズム学会講演会, 2022 年 3 月 22 日