C201

ダイナミックステレオ PIV による水棲生物周りの渦構造の可視化

田中 利昌[○], 永山 勝也, 田中 和博 (九州工業大学)

速水 洋, 荒巻 森一郎 (九州大学)

Visualization of Vortex Structure around a Loach using Stereoscopic PIV

Toshimasa TANAKA, Katsuya NAGAYAMA, Kazuhiro TANAKA

Hiroshi HAYAMI, Shinichiro ARAMAKI

ABSTRACT

The propulsion method of the aquatic life is a result of optimization by evolution. Research of the propulsion method is useful for the design of robot that operates efficiently, for example swimming-robot etc. This study is about a loach that swims bending whole body. Our purpose of research is to clarify its swimming mechanism through flow field analysis. We analyzed the three-dimensional flow field around the loach using stereoscopic PIV, about both horizontal cross section and vertical section. As a result, we captured three-dimensional flow field and vortex structure around the loach.

Keywords : Stereoscopic PIV, Loach, Vortex

1. 序論

Lighthill⁽¹⁾をはじめとする生物の推進研究は、アクアバイオメカニクスとして注目されている。このような生物の推進形態などの研究は、遊泳ロボットなどを効率良く動作させる為の設計に役立つものであると考えられる。

魚の泳ぎ方には主に2種類あり、体の後方1/3を振幅させるアジ形泳法、体全体を振幅させて泳ぐうなぎ形泳法がある。アジ形泳法の魚では、胸鰭を使って推進するものもあるが、うなぎ形泳法であるドジョウなどは、胸鰭や腹鰭が未発達で、その影響は非常に少ないものと考えられる。我々は、体の屈曲と尾鰭による影響を調査することを目的とし、うなぎ形泳法で泳ぐドジョウを対象に研究を進めている。

これまでに我々は、屈曲と尾鰭による渦の可視化について⁽²⁾、また尾鰭での縦方向流れや、方向転換に伴う非定常流れについての研究を報告している⁽³⁾。これらの研究では2次元のPIV法を用いて解析を行ってきたが、ドジョウを含む、魚の推進時の流れ場は3次元的存在であることが知られている。そこで今回は、ドジョウ推進時の流れ場の3次元性を調査する為、ステレオ PIV を用いて解析・実験を行った。

Fig.1 Black kuhli loach

2. 実験方法

今回の実験で用いたドジョウを Fig.1 に示す。このドジョウは、東南アジア産のブラッククーリーローチ (学名: *Pangio oblonga*) という種類であり、全長は 60[mm]、体の幅は頭部付近が最大 3[mm]、体の厚みは胸鰭から背鰭までが最も厚く 8[mm]である。

Fig.2 に実験装置図を示す。Fig.2(a)ではドジョウ遊泳の3次元性を捉えることを目的とし、撮影サイズを 100×100[mm²]、50×50[mm²]で、ドジョウ上方からドジョウ全体及び後方の水平断面の可視化・撮影を行った。Fig.2(b)はドジョウ後方垂直断面での流れ場を捉え、Fig.2(a)との対応で渦構造を把握する目的で、撮影サイズ 100×100[mm²]とし、ドジョウ後方から撮影を行った。

両実験において、PIV 法を行う為、ドジョウ周囲の流れ場を粒子懸濁法による可視化を行った。使用粒子はオルガソル(密度 1020~1030[kg/m³]、粒径 48~52[μm])である。照明は出力 150[W]、シート厚 2[mm]のハロゲンシート光を用い、水槽の水位は流れ場に影響が無いように十分な

(a): Horizon plane analysis, (b): Vertical plane analysis

Fig.2. Experimental Equipments

さを確保し、実験を行った。画像は、高速度カメラ(Photron, FASTCAM MAX)2基によって、解像度 1024×1024 [pixel]、サンプリング周波数 500 [Hz] として画像を取得した。

実験方法について、Fig.2(a)では水底に平行なシート光を水底から 2[mm]、3[mm]、5[mm]の3断面に照明し撮影を行った。また、Fig.2(b)ではドジョウの垂直断面、ドジョウがシート光を潜り抜けて泳いでいく際の尾鰭側から撮影を行った。なお、水平断面撮影時のシート光の位置は水底からの高さであるが、ドジョウは主に水底を泳ぐ性質がある為、これはドジョウ厚み方向の位置と同じと考えられる。ここで、シート光の位置が 2[mm]、3[mm]の場合はドジョウの厚み中心付近にシート光がある状態、5[mm]の場合はドジョウの背鰭がシート光より上にある状態となる。両実験において、ドジョウが静止流体中を泳ぐ様子を連続して撮影した(ダイナミック PIV⁽⁴⁾)。解析については PIV 解析ソフト CACTUS 3.1 を用い、結果の可視化には FIELD VIEW 8 を用いた。

3. ステレオ PIV 解析結果

3.1 水平断面の違いによる流れ場の変化

撮影サイズ 100×100 [mm²] で解析した結果をシート光位置 2[mm]、3[mm]、5[mm] で図 3.(a), (b), (c) に示す。(b), (c) に関してシート光位置、ドジョウ遊泳の性質より体の形状を確認できていない。また、各シート光位置における撮影は同時刻ではない為、定量的な一致は無い。しかし、定性的な評価を行うには十分だと考えられる。ここで、表示方法は 2 次元のベクトルに加え、面外速度成分を等高線で示している。なお、図中に記入されている矢印は渦の向きであり、奥行方向の向き $\odot$ 、 $\otimes$ で記入している。

この比較において、シート光を水底から 2[mm] の位置に照明した場合、ドジョウの厚みの中心より下にシート光が当たっている状態にあり、5[mm] に関してはドジョウの尾鰭はシート光よりも低い位置にある。また、各実験におけるドジョウの速度、尾鰭の速度、周波数、尾鰭の振幅を Table.1 にまとめる。

ドジョウ後流に着目すると、渦と渦の間で極端に大きさの異なるベクトルが見られる。また、そのベクトルは大きな面外速度成分を有し、下降して上昇する流れが確認できる。これは垂直面方向に旋回する渦があるのではないかと考えられる。また、高さ方向による 3 次元性の変化に着目すると、シート光位置が高くなるにつれて、後方の渦と渦の間で面外速度成分の生じている範囲が広がる様子を捉えることができた。つまり、垂直方向に旋回する渦が存在し、発達していつている為に現れたものであると考えられる。

3.2 ドジョウ後方の推測される渦構造

ステレオ PIV による解析結果と、水底付近で泳ぐドジョウの性質より、ドジョウ後流の渦構造の発生メカニズムは Fig.4 のようなものと考えられる。

I はドジョウが尾鰭を振ることで周囲の流体を動かす様子、II は発生する渦の 3 次元的な形状、III は渦の発達する様子を示している。

ドジョウが泳ぐ際には、全身を大きく振幅させるため、周囲では I のような流れ場が形成され考えられる。また、ドジョウは通常、水底付近を泳いでいる為、水底の影響も受ける為、II のような渦を作る。このとき渦はドジョウの背中側でも形成される。ここで、尾鰭と流体の接触面積より、背中と流体の接触面積が大きくなる為、背中側の渦は比較的長大なものとなる。これが渦と渦の間に現れた大きなベクトルの原因となると考えられる。そして、このような形の渦となるため、シート光の位置が低いほど水平方向の渦度は明確に現れる。その後、III のように背中側で生じた渦が発達していき、尾鰭を押し出した方向に流れていくことで Fig.4 のような流れ場が現れたと考えられる。

Vectors (V_x, V_y), Color V_z -0.1[m/s] -0.1[m/s]

→ 0.1[m/s]

(a) 2[mm]

(b) 3[mm]

(c) 5[mm]

Fig.3 Velocity map in horizontal plane (100×100 [mm²])

3.3 垂直断面の解析結果

撮影サイズ $100 \times 100 [\text{mm}^2]$ で垂直断面の可視化・撮影を行った実験結果を、水平断面の結果と共に Fig.5(a), (b), (c), (d) に示す。(a) は垂直断面計測時、シート光の上に尾鰭が残った状態であり、(b) はその後ドジョウの振幅が 1 周期程度経過した時刻の解析結果である。ただし、垂直断面の結果と水平断面の結果は同時に撮影を行っていない為、定量的な一致は無い。さらに、垂直断面撮影時にはシート光を過ぎ去った後のドジョウの形状は確認できない為、定性的な比較のみを行う。それぞれの図において、Fig.5(a), (b) は水平断面、Fig.5(c), (d) は垂直断面であり、それぞれの図中の太線 H-H, V-V は対応するシート光の位置である。Fig.5(a) に記入している渦は、Fig.5(c) の面外速度成分にも対応する箇所があり、加えて垂直方向の渦が確認できる。これは Fig.4 の II に示した渦が捉えられたものと考えられる。この渦が Fig.5(b) ではより明確に現れた。一方、水平方向の渦は Fig.5(d) の垂直断面の解析結果からは確認できなくなっている。ここで、図中の記号 A 垂直方向の渦である。この渦は同時計測でないために異なる位置に生じているが、流れ場の回転の方向を考慮すると、垂直方向の渦に相当するものであるといえる。

3.4 撮影サイズの違いによる流れ場の解析結果

撮影サイズ $50 \times 50 [\text{mm}^2]$ で解析した結果を Fig.6(a), (b), (c) に示す。(c) に関してシート光位置、ドジョウ遊泳の性質から、体の形状をはっきり確認できていない為、体の形状は細い。また、同時刻の解析結果ではない為、定量的な一致は無い。ここで、各シート光位置のドジョウの速度、尾鰭の速度、周波数、尾鰭の振幅を Table.2 にまとめる。

EXP.1 と 3 を比較すると、どちらも同じような渦発生構造を形成している。撮影サイズ $100 \times 100 [\text{mm}^2]$ で確認できた垂直方向に旋回する渦は、撮影サイズ $50 \times 50 [\text{mm}^2]$ より、ドジョウの頭部、エラ付近にかけて発生され、ドジョウの推進力によって次第に後方へ移り、後方で確認できたものと考えられる。また、水平断面シート光位置の違いによって、以下の性質を捉えることができた。

- ・ 体周り速度成分に関しては、垂直方向よりも水平方向の成分が大きい。
- ・ 尾鰭以降の速度成分に関しては、水平方向より垂直方向の速度成分が大きい。

このことから、管状の渦構造を発生、成長させる際、主に推進に大きな影響を持つと考えられる水平方向成分が強く、放出する際は体全体を水底に留めさせる為に、垂直方向成分が強くなると考えられる。

Table.1 Loach swim data ($100 \times 100 [\text{mm}^2]$)

Fig. No.	Swim Speed [m/s]	Wave Speed [m/s]	Frequency [Hz]	Amplitude [mm]
(a)2[mm]	0.200	0.2891	6.0	8.2
(b)3[mm]	0.084	0.2891	5.7	10.9
(c)5[mm]	0.163	0.3256	6.6	5.4

Fig.4 Proposed mechanism of vortex generation

Vectors (V_x, V_y), Color V_z -0.1[m/s] 0.1[m/s]
→ 0.1[m/s]

(a) V_z velocity ($t/T=0$), (b) V_z velocity ($t/T=1$)

Vectors (V_x, V_z), Color V_y -0.1[m/s] 0.1[m/s]
→ 0.1[m/s]

Fig.5 Result of horizontal cross section and vertical section

(c) V_y velocity ($t/T=0$), (d) V_y velocity ($t/T=1$)

Table.2 Loach swim data ($50 \times 50 [\text{mm}^2]$)

Fig. No.	Swim Speed [m/s]	Wave Speed [m/s]	Frequency [Hz]	Amplitude [mm]
(a)2[mm]	0.331	0.424	8.33	12.74
(b)3[mm]	0.189	0.336	5.00	10.00
(c)5[mm]	0.257	0.391	7.65	11.75

3.5 ドジョウ周囲に推測される渦構造

これまでのステレオの解析結果より、ドジョウ周囲の渦構造メカニズムは Fig.7 のようなものと考えられる。

ドジョウは屈曲して泳ぐ際、まず頭部付近から尾鰭 (A→B) にかけて、推進力を得る為、水平方向に強い速度成分を持つ管状の渦構造を形成する。そして、遊泳することによって、形成した渦構造は次第に後方へ移動し、尾鰭から放出される (B→C)。そのとき、渦構造の垂直方向速度成分は水平方向よりも強くなる。これは、ドジョウの体全体を水底に押し付ける為の力を得て泳いでいるのではないかと考えられる。

4. まとめ

ステレオ PIV を用いてドジョウ周囲の流れ場の様子を調査した。はじめにドジョウ周囲の流れ場の水平断面を、シート光位置を変えて3断面、可視化・撮影し、調査を行い、ドジョウ後方で垂直方向に旋回する渦を確認することができた。さらにこの結果より3次元的な渦構造を推測し、検証のためにドジョウ周囲の流れ場の垂直断面を可視化・撮影し、調査を行った。この調査の結果では推測した渦構造は正しいものと考えられる。また、水平断面の撮影サイズを $50 \times 50 [\text{mm}^2]$ に拡大し調査した結果、ドジョウ体周りにも垂直方向に旋回する渦を確認することができた。この渦が発達・移動した結果、撮影サイズ $100 \times 100 [\text{mm}^2]$ 、特にドジョウ後方において確認できたものであると考えられる。

今後は、今回推測した渦構造が水底ではどのように影響しているのかを調査する必要がある。

参考文献

- (1) 2, M.J. Lighthill: Annu. Rev. Fluid Mech., vol.44, (1970)
- (2) K. Nagayama and K. Tanaka: The 6th KSME-JSME Thermal and Fluids Engineering Conference, FH.03 CD-ROM, 2005
- (3) 可視化情報, Vol.25 Suppl. No. 1 C204 pp.211-214 (2005)
- (4) 可視化情報, Vol.25, No.96 (2005), pp.20-24

Vectors (V_x, V_y), Color V_z $-0.1 [\text{m/s}]$ $0.1 [\text{m/s}]$
 $\rightarrow 0.1 [\text{m/s}]$

(a) 2[mm]

(b) 3[mm]

(c) 5[mm]

Fig. 6 Velocity map in horizontal plane ($50 \times 50 [\text{mm}^2]$)

Fig. 7 Proposed vortex image around the body