C204

泳いでいるドジョウ周りの渦構造の可視化

永山 勝也[○](九州工業大学), 篠原 和行(九州工業大学), 田中 和博(九州工業大学)

Visualization of Vortex Structure around a Swimming Loach

Katsuya NAGAYAMA, Kazuyuki SHINOHARA and Kazuhiro TANAKA

ABSTRACT

A loach has unique propulsion technique by bending its long body and using its tail fin. Its motion and flow around it have been experimentally visualized by particle image velocimetry (PIV). Generating and growing vortices by bending its body, it pushes water backward to gain repulsing force. After moving forward it leaves a vortex street like reverse Karman vortices which means loach gains propulsion. Vortex structure around tail fin is also studied in both horizontal and vertical cross section. Furthermore, flow field in direction change is also studied and large vortex at the side of the head is shown.

Keywords: Visualization, Loach, Vortex, PIV

1. 序論

水中生物の推進形態は、進化による最適化の結果であり、例えば Heltel⁽¹⁾によるまとめがある。また Lighthill⁽²⁾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。生物の機能を理解することで、泳ぐロボットの設計などに役立てるものである。

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は、胸鰭や腹鰭の発達が未発達で、その影響は非常に少ないものと考えられる。よって、ドジョウ周囲の流れ場を捉えることで、体の屈曲と尾鰭による影響を見ることができる。

我々はうなぎ形泳法であるドジョウを対象として研究を進めており、屈曲と尾鰭での渦のPIV可視化について報告している⁽³⁾。今回体と渦との動きの相互関係を更に詳しく調査し、また尾鰭での縦方向流れ、更に方向転換に伴う非定常流れなどについても解析し報告する。

2. 実験方法

実験で用いたドジョウは、東南アジア産のブラッククーリーローチ(学名: *Pangio oblonga*) Fig.1 を用いて行った。ドジョウの全長は60[mm]、体の幅が最も大きいのは頭部付近であり、その幅は3[mm]である。また、胸鰭から背鰭までが最も体が厚く、その厚さは8[mm]である。

Fig.1. Black kuhli loach

実験1では、泳いでいるドジョウ周囲の流れ場を撮影する事を目的として実験を行った。また、魚などの形成する渦は三次元的であることが知られており、ドジョウも例外ではないと考えられる。そこで、実験2では尾鰭周囲の三次元性を捉えることを目的として実験を行った。

実験1で使用した実験装置を Fig.2 に示し、実験装置の位置関係を Table.1 の Experimental number 1 に示す。使用した水槽は幅150[mm]、奥行き150[mm]、高さ165[mm]のものを使用し、水深はドジョウの厚さにあわせて、8[mm]に設定し、水槽は動かないように固定した。撮影には高速度カメラを使用した。また、ドジョウが泳ぐことによって生じる水面の揺らめきをおさえるため、水面にアクリルシートを乗せて撮影を行った。可視化には粒子懸濁法を用い、トレーサ粒子はオルガソル(粒子径48~52[μm])を使用した。その際、水面に乗せたアクリルシートにトレーサ粒子が付着するため、界面活性剤を流れ場に影響しない範囲で微量投入した。

Fig.2. Experimental device

Table.1.Light and photography position

Experimental number	Lights	Light position	Camera position
1	Halogen sheet lights (150W)	Side	Top
2	Argon laser (2W)	Top	Side

実験 2 での実験装置の位置関係を Table.1 の Experimental number 2 に示す。使用した水槽は幅 200[mm]、奥行き 350[mm]、高さ 250[mm]のものを用い、水深を 8[mm]から 150[mm]に変え、撮影位置を水槽上部から、水槽側面に変えて実験を行った。このとき、ドジョウがレーザーシートに対して垂直に前進するところを撮影した。

3. PIV 処理結果

3.1 放出された渦列

まず後方の渦を含む全体で考える。実験 1 において全体視野 100[mm]を 1024[pixel]で得た画像を PIV 処理した結果のドジョウ付近図を、Fig.3 に速度ベクトル分布と、渦度分布で示す。解析条件は、相関領域を 35[pixel]、探査領域を 5[pixel]に設定した。ドジョウは約 5[Hz]で屈曲また 0.2[m/s]で前進しながら、渦列を残している。しかもその配列は逆カルマン渦列に近く、渦を回転させまた後方に押しやりながら、推進力を得ている様子がわかる。つまりドジョウの軌跡中心線上で、渦の周辺で後方への流れが生じ、その反力で前進する。ドジョウは渦の回転を加速すると同時に渦を後方に押しやってもいる。

なお、実験 1 に用いたハロゲンシートライトのシート幅は 10[mm]程度あり、二次元と捉えるのに十分な厚さではない。そのため、三次元性の影響がでていることが考えられる。また、水面に乗せているアクリルシートの影響も考えられる。そこで、シート幅が約 2[mm]であるアルゴンレーザを使用し、水深を 150[mm]に変えて、もっとも三次元性が強く現れると考えられる尾鰭周辺を解析したところ、Fig.3 とまったく同じ結果が得られたため、Fig.3 の結果において三次元性の影響はないと考えられる。

(a) Vector plots (b) Vorticity plots
Fig.3 Flows around a swimming loach

Figure 4 には、放出直後の渦と、その前の渦との相対的な位置関係の変化を、周波数 3 ケースについて示す。渦が尾びれ先端中心にきたときを時間の基準に、また進行中心線を位置の基準に、直行方向渦距離 H 、進行方向渦距離 L をとる。カルマン渦列の場合は H/L は約 0.3 であるが、今回の逆カルマン方向の渦列では必ずしも 0.3 付近ではない。またドジョウの渦放出直後からしばらくは H が小さくなる、つまり渦が渦列の中心線に近づいていることがわかる。これは渦と渦の間に後方への強い流れが生じ、圧力が低下し引力が働いたためと考えている。一方 7.35[Hz]のデータでは、渦が時間 0.1[s]以降離れていくが、この場合 L が小さくなったことと、何らかの反発力が働いたかもしれない。今後は更にデータを増やし詳細を調べる予定である。

Fig.4 Number of Karman

3.2 屈曲により成長する渦

ここでは詳しく体の動きと流体の相互干渉を調べるため、実験1の条件で全体視野を 50[mm]と拡大し 1024[pixel]で得た画像を PIV 処理した結果のドジョウ付近図を Fig.5 に示す。解析条件は、相関領域を 35[pixel]、探査領域を 5[pixel]に設定した。

黒く表示されている部分はドジョウを示している。ドジョウは左から右へ約 0.1[m/sec]で進行している。また、ドジョウの体の上にもベクトルが表示されているが、これは、ドジョウにハログンシートライトを当てた際にできる影の濃淡を捉えて解析しているためである。ドジョウ内部のベクトルの大きさを見ると、約 0.1[m/sec]であり、実際に数枚の画像から速度を算出すると、約 0.1[m/sec]であったので、ドジョウ内部に出ているベクトルは正しいと言える。順番にみていくと Fig.5(a)では、頭後方の体の側面に渦の中心をもつ、小さな渦が生成されていることが確認できる。時間は撮影後 100[ms]だった。次に 150[ms]での Fig.5(b)において Fig.5(a)で形成された渦が、体の中央手前の側面まで到達している。また、速度ベクトルも大きく渦が成長していることがわかる。更に 250[ms]での Fig.5(c)では、体側面にあった渦が更に成長し、尾鰭に到達している。しかも渦は尾鰭の側面にあるのではなく、尾鰭をまたがっている。体側面に形成された渦は絶対座標で見ても、後方に移動していることが確認できる。このことから、ドジョウは全体を使って流体を押しつけて推進していることがわかる。

Fig. 5 (a) Loach motion and vector plots ($t = 100$ ms)

Fig. 5 (b) Loach motion and vector plots ($t = 150$ ms)

Fig. 5 (c) Loach motion and vector plots ($t = 250$ ms)

3.3 尾鰭からの渦の放出

Fig.5(c)で渦は尾鰭に到達したが、ここでは尾鰭からの渦の放出について更に詳しく見ていく。Fig.6の(a), (b), (c), (d)はそれぞれ 40[ms]おきの画像である。300[ms]の(a)では 100[ms]Fig.5(a)で形成された渦が放出され、尾鰭中心手前に次の渦が B が移動してきている。このとき、渦の中心は Fig.5(b)のような体の側面ではなく、体の中心付近に位置していることがわかる。40[ms]経過した(b)では尾鰭を中心とした渦が形成されている。(c)では、成長した渦の勢いにのせて尾鰭を振り上げ、(d)において渦を尾鰭から切り離していることがわかる。渦 B に対して尾鰭先端は、(a)では左側を加速し、(c)では右側を加速するなど、常に渦を加速するように尾鰭は動いている。また渦回転の流れと尾鰭の運動は同じ方向であり、比較的大きな労力無しに尾鰭を動かしているとも考えられる。

(a) 300[ms]

(b) 340[ms]

(c) 380[ms]

(d) 420[ms]

Fig.6. Velocity vector around tail fins

3.5 尾鰭付近での縦渦構造

これまでは平面内での流れを分析したが、ここでは尾鰭付近の垂直断面での流れを、Table 1 の実験2条件です。PIV 処理結果を Fig.7 に示す。解析条件は、相関領域 41[pixel]、探査領域 7[pixel]に設定した。この図で表示されている黒い部分は、ドジョウの尾鰭を示し、ドジョウが画像の奥行き方向に前進しているところを捉えている。このときの尾鰭を振る速度は最大で、約 0.1[m/sec]であった。この画像から、ドジョウは尾鰭を底面に対して左右に垂直に動かしているのではなく、尾鰭を傾けて振り、渦が形成されていることが確認できる。底面に対して垂直な場合を 0° とおくと、Fig.7.1 での最大の傾きが 25° 、Fig.7.2 での最大の傾きは 30° であった。傾けることで下方向への力が働くと考えられるが、これは砂や泥に潜るブラッククーリーローチの習性にあっていいる。なお以上のことから、ドジョウの尾鰭周辺においては、三次元的な渦が形成されているため、横断面、縦断面だけでの解析だけでなく、三次元的な解析が必要であると考えられる。

Fig.7.1 Vertical cross sectional velocity vector (0 s)

Fig.7.2 Vertical cross sectional velocity vector (0.13s)

3.6 方向転換に伴う渦の発生

以上は定常的に全身運動をしている結果だが、ここでは非定常運動を扱う。非定常運動には、急発進と方向転換などが考えられるが、ここでは方向転換の計測例であり、結果を Fig.8 に示す。まず上図で曲がる方向と、逆方法に頭を振る。次に中央図で頭を曲がる方向に向ける。この時頭横に、強い渦が発生していることがわかる。そして下図で渦を回り込むようにして、方向転換をしていく。渦を回り込むことで、方向転換の省力化をはかっている可能性も考えられる。ただし以降、この渦は成長せ

ず減衰していくので、前述の推進の渦とは異なり、方向転換に特有な渦と考えられる。

Fig.8 Velocity vectors in direction change (0s, 0.16s, 0.32s)

4. まとめ

泳いでいるドジョウ周り流れの PIV 可視化解析を行った。胸鰭周辺から小さな渦が見られ、渦は成長しながら尾鰭まで成長し放出された。残った渦列は逆カルマン状であり推進力を裏付ける。屈曲と尾鰭の動きで、常に渦を成長させまた後ろに押しやることの反力で推進していると考えている。また、尾鰭周辺の三次元的な渦を捉え、ドジョウが尾鰭を傾けて振っていることを確認した。更に方向転換において、頭横に強い渦が発生していることも確認した。

参考文献

- (1) Heinrich Hertel 著、土屋喜一訳、Biologie und Technik Struktur Form Bewegung 朝倉書店出版(1963)
- (2) M.J. Lighthill: Annu. Rev. Fluid Mech., vol.44, (1970),
- (3) K. Nagayama and K. Tanaka: The 6th KSME-JSME Thermal and Fluids Engineering Conference. FH.03 CD-ROM, 2005