

回流水槽を用いたルアーの計測

高橋 直也, 関口 航, 谷越 脩生, 高水 祐輔
東京電機大学 工学部 機械工学科 機械工学コース

Naoya Takahashi, Wataru Sekiguchi, Syusei Tanikoshi, Yusuke Takamizu
Dept. Mech. Eng., Tokyo Denki University

野田 茂穂, 姫野 龍太郎
理化学研究所 情報基盤センター
Shigeho Noda and Ryutaro Himeno
Advanced Center for Computing and Communication, RIKEN

1. はじめに

釣り具店などで市販されているルアーは色・形・大きさなど様々な種類があるが、代表的なルアーとして Fig.1 に示すミノ一型と呼ばれる小魚を模したものが挙げられる。このルアーはリップと呼ばれる顎から突き出した板を備えているのが特徴で、このリップは潜行板として水中でのルアーの浮上を抑えるとともにルアーの運動に何らかの影響を与えていると考えられる。このリップ周辺の流れからルアーの運動のメカニズムが流体力学的に解明され、ルアーの設計指針が確立されれば、今後のルアー開発に有益であると考えられる。

ルアーが模擬する魚の研究については、流体力学的な見地(例えば Lighthill[1])、および航空工学的な見地(例えば Azuma[2])から詳しく解析がなされている。一方、ルアーに関してはこれまでにリップの縦横比の影響[3]、ボディ形状と潜行運動[4]についてなどが調べられているが、ルアーの非定常運動について、渦や周辺流れなどの流体力学的な考察はほとんどなく、水中での複雑な運動の原因はよくわかっていない。そこで本研究では水中でのルアーの非定常運動を、回流水槽を用いた実験から解析し、ルアーの流体力学的特性を調べることを目的とする。

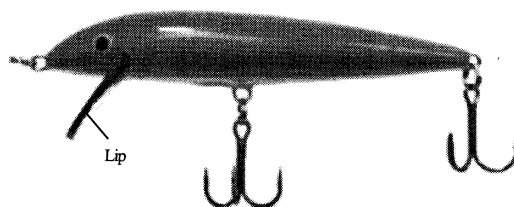


Fig.1 Rapala CD-11

2. 実験解析

実験に使用するルアーは Fig.1 に示す RAPALA CD-11 (全長 112mm) である。ルアーは通常針を装着した状態で使用するが、安全上の理由から取り外して実験を行った。実際の釣りと同様にルアーに結んだ釣り糸の一端を固定するための治具を独自に設計・製作した。レイノルズ数 (Re 数) を Ud/ν 、ストローハル数 (St 数) を fd/U と定義する。ここで U :流速[m/s], d :リップの縦の長さ[m], ν :水の動粘度[m²/s], f :ルアーの振動運動の支配的周波数[Hz], を用いた。

海や河川など実際にルアーが使用される釣り場の流れを再現することは難しいため、Fig.2 に示す回流水槽 (西日本流体技研 検証実験用回流水槽 V2-1A) を用いて人工的に発生させた水流内にルアーを入れ、実験を行う。水槽の流速は 0.04 ~ 1.19[m/s], 観測部の領域は縦×横×最大水深=0.5[m]×1.0[m]×0.2[m], 水量は 1.0[m³]である。

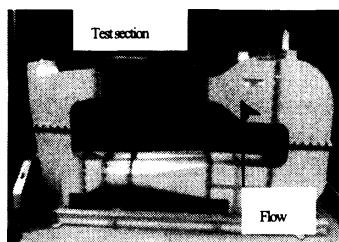


Fig.2 Circulating water channel (CWC)

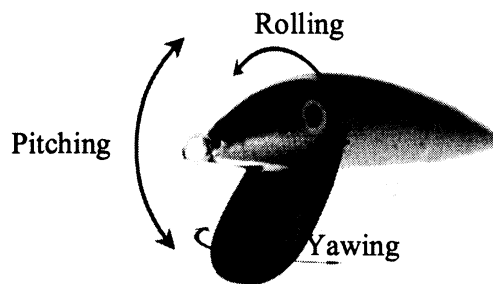


Fig.3 Lure angles

水中を泳ぐルアーの姿勢と運動を調べるため、ルアーに取り付けたマーカーを追尾する実験を行った。マーカーはルアー頭部の金具、リップ先端、リップの根元、重心、尾、尾の金具の6点に装着し、回流水槽観測部の底面および側面から撮影した映像から自動追尾ソフト (DITECT DIPP-Motion Pro2D) を使用して追尾を行い、座標値を取得することでルアーの姿勢・運動の軌跡を求めた。ルアーの姿勢はローリング・ヨーイング・ピッチングの3要素に分解する (Fig.3)。撮影は高速度カメラ (CASIO EX-F1) を用いて 300fps で行い、撮影用照明としてメタルハライドランプ (住田光学ガラス LS-M250, 250[W]) を使った。なお実験は流速一定の定常流で行った。

リップ周辺の流れを調べるため、PIV 計測を試みた。PIV (Particle Image Velocimetry) とは粒子画像流速測定法とも言い、流れの速度分布を計測する方法の一つである[5]。実験概略図を Fig.4 に示す。

計測は水槽観測部内にルアーを固定した状態と自由に泳がせた状態で行った。固定には直径 0.3mm のステンレスワイヤを用い支持した。トレーサ粒子は三菱化学製 HP20SS (粒径 90 μ m)、光源には Nd:YAG レーザー (DANTEC DYNAMICS RayPower5000, 波長 532nm) をラインジェネレータレンズ (レーザークリエイト ハイエスト・グレイド ファンアングル 5°) を介してシート状にし、高速度カメラ (IDT X-Stream VISION XS-3) を用いて粒子画像を撮影した。計測は鉛直断面について、法線が主流速度ベクトルと平行および直角の2方向について行った。

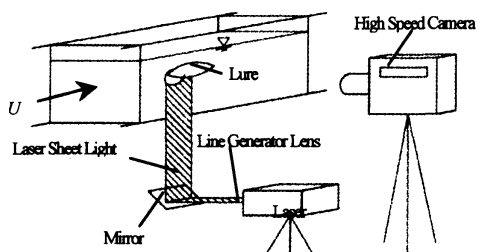
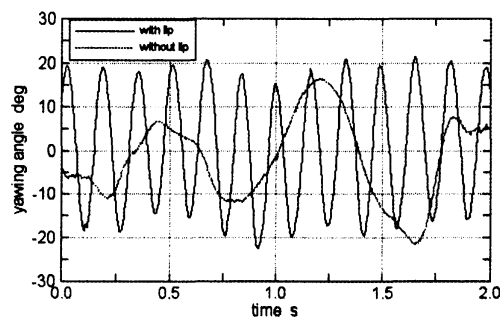


Fig.4 PIV measurement

Fig.5 Time evolution of the yawing, $Re=1.94 \times 10^4$

3 実験結果および考察

ルアーのヨーイング角の時間変化を Fig.5 に示す。これを見ると、リップありのルアーでは水中で周期的な運動をしているのに対し、リップを取り除いたルアーではリップありに比べ周期や振幅が大きく異なり、リップの存在でルアー運動の特徴が変わっていることがわかる。

実験を行う前は Fig.6 (i) のような単純なヨーイングを想像していたが、実際には Fig.6(ii) のようにルアーの重心付近を中心とするヨーイングが見られた。対比実験として行なったリップなしのルアーでは Fig.6(i) のようなヨーイングが見られたことから、リップによって重心周りのヨーイングが発生していると考えられる。次に $Re=1.67 \times 10^4$ におけるリップありのルアーについて、ローリング・ピッチング角も調べてみたところ Fig.7 のようになった。ローリングおよびヨーイングが同じ周期で運動して発生しているのに対し、ピッチングは角度の変動と周期が小さい。高速フーリエ変換による周波数解析したところ

(Fig.8), ローリング・ヨーイングの最大成分の第二高調波が最も強く含まれていることがわかった。

Fig.9に Re 数とローリング・ヨーイングおよびピッチング, それぞれの周波数解析における最大成分の St 数をまとめた。なお $Re < 5.61 \times 10^3$ のヨーイングの結果はルアーの尾に装着したマーカーの y 方向の位置変化から算出した。Fig.9のローリング角とヨーイング角の時間変化においては, 支配的周波数がほとんど一致している。 $Re = 4.62 \times 10^3$ で急激な上昇があるが,

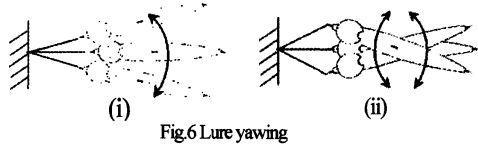


Fig.6 Lure yawing

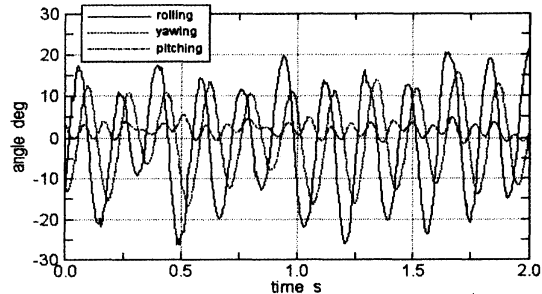


Fig.7 Time evolution of the lure angles, $Re = 1.67 \times 10^4$.

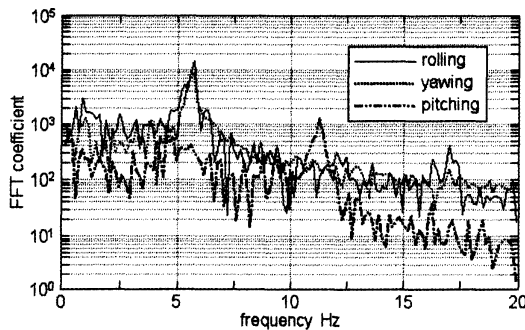


Fig.8 Frequency spectrum, $Re = 1.67 \times 10^4$

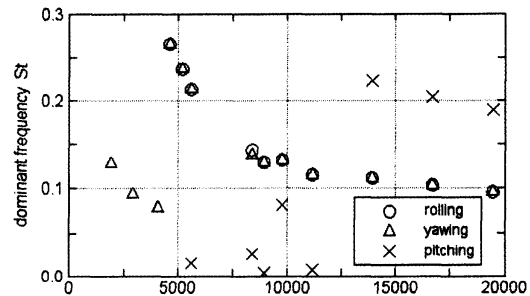


Fig.9 Reynolds number vs Strouhal number of the lure angles

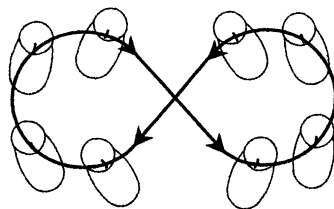


Fig.10 Lure motion pattern (front view, $Re \geq 1.39 \times 10^4$)

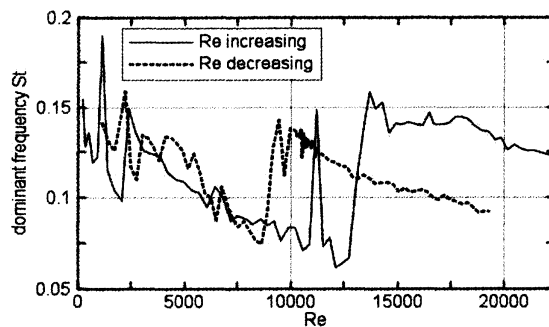


Fig.11 Reynolds number vs Strouhal number of the yawing

Re 数の上昇に対して減少傾向が見られた。またピッチングに注目すると, $Re = 1.39 \times 10^4$ において支配的周波数が急激に増加し, ローリングおよびヨーイングの第二高調波の成分が支配的となっていることがわかった。これは $Re \leq 1.11 \times 10^4$ ではローリングとヨーイングに緩やかなピッチングが加わった運動, また $Re \geq 1.39 \times 10^4$ では Fig.10 に示すようなローリングとヨーイングの2倍波のピッチングが加わった運動をしていることを示す。このように Re 数によって運動パターンが切り替わるのは, Re 数によってボディを主体とする運動と, リップを主体とする運動に切り替わるためではないかと考えている。

Fig.11に Re 数を上昇および減少させながら行ったヨーイングの支配的周波数を示す。所々の周波数の鋭い上昇や二極化の発生する Re 数に違いが見られるのは, 回流水槽の流れが一樣になる前に実験を行い, ルアーが過去に受けた力に依存して St 数が変化したためと考えられる。計測の間隔として十分時間にとったところ, 急激な上昇の回数は減少した。

PIV 計測において, 簡単のため, ルアーを水槽内で固定した状態で計測を行なった。Fig.12に $Re = 803$ における PIV 結果

を示す。計測面はそれぞれリップ側面を通る面とリップの付け根から 10mm 後方の面である。リップ前方で流れはリップを避けるように上方へ跳ね上げられ、強制的に剥離が発生している様子がわかる。この剥離領域内では大きな縦の渦構造や、リップ後方の面には渦対が形成されている様子がわかる。この渦対は Re 数の上昇と共に対称性が崩れより不安定になる傾向が見られた。

次に、ルアーを自由に遊泳させた場合の PIV 結果は Fig.13, 14 のようになった。 $Re=1.11 \times 10^4$ で計測面はヨーイング角が最大となるときのリップ側面を通る面と、ルアー中央のフックを通る面である。固定させた場合と同様、リップによって流れが剥離している様子が確認できる。固定した場合で見られたリップ後方の縦の渦構造は少し前方へ移動し、上下に縦の渦対が形成され、流される様子が見られる。また、ルアー中央のフックを通る面では渦の連続した発生が見られた。発生の周期や渦の大きさに周期性は見られず、同 Re 数におけるヨーイングやローリングの支配的周波数との対応関係は見られていないが、渦は Fig.14 のようにリップ左と右の側面付近に発生し、ローリングやヨーイングの周期と共に左右交互に発生する傾向が見られた。

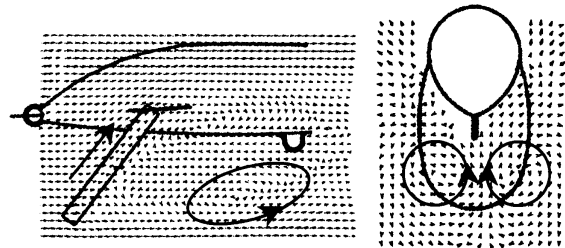


Fig.12 PIV results ($Re=803$, side and view from the downstream)

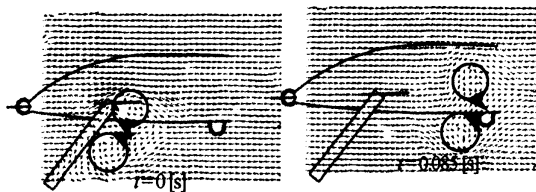


Fig.13 PIV results ($Re=1.11 \times 10^4$, side view)

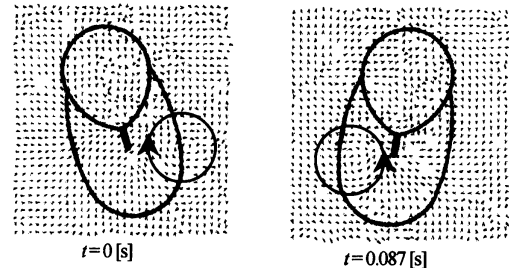


Fig.14 PIV results ($Re=1.11 \times 10^4$, view from the downstream)

4. 結論

水中でのルアーの流体力学的特性をマーカー追尾実験、PIV 計測で調べた。ルアーは水中で周期的な運動をするが、リップを取り除くと周期や振幅が大きく変化し、リップの有無でルアー運動の特徴が変わる。ローリングとヨーイングの支配的周波数の一致が見られ、ピッチングは $Re \geq 1.39 \times 10^4$ においてローリング、ピッチングの第二高調波が支配的周波数となっている。回流水槽の流れが非定常な状態では、 Re 数に対して支配的周波数の急激な上昇および減少多く見られたが、流れの安定時間を十分に取り、定常状態で実験したところ、急激な上昇の回数は減少した。リップ前方ではリップ角度に沿った上昇流が見られ、強制的に剥離が行われている。この剥離領域内では大きな縦の渦構造と渦対の存在があり、 Re 数の上昇と共に渦対はより不安定になる。水中を泳ぐルアーは、リップの左右側面付近からローリングやヨーイングに合わせてリップ左右の側面付近から交互に渦を発生させている。リップ形状を変えることで、狙う魚に合わせて任意の運動特性を持ったルアーが製作できると示唆される。

本研究の一部は東京電機大学総合研究所研究 (Q12K-04) として行ったものである。記して謝意を表する。

5. 参考文献

- [1] Sir J. Lighthill, *Mathematical Biofluidynamics*, SIAM, 1975.
- [2] A. Azuma, *The biokinetics of flying and swimming*, 2nd ed. AIAA, 2006.
- [3] 臺田, 稲田, 胡, 酒井, クランクベイトルアーの流体力特性に及ぼすリップ縦横比の影響, 日本水産学会誌, 68(6), 843-851, 2002.
- [4] 三木, 臺田, 稲田, 酒井, 兼廣, リップ付きハードルアーのボディ形状と潜行運動, 日本水産学会誌, 67(1), 49-57, 2001.
- [5] 森北博巳, PIV ハンドブック, 森北出版, 2010.