

魚類の遊泳速度と河床の状態に関する研究

土木研究所 環境部 河川環境研究室長 島谷幸宏

研究員 萱場祐一

傳田正利

1. はじめに

魚類の遊泳速度は様々な構造物等の設計に用いられるが、特に魚道の設計を行う上では最も重要な基礎的データとされている。

既存の遊泳速度の研究は、フィールドにおける観察と実験による測定によるものがある。実験による遊泳速度の測定は、流速とその継続時間のコントロールが可能であること、遊泳時間の測定が容易であること、遊泳中の行動の観察が容易であること等のメリットがある。実験手法としては、円管の中に魚を入れて流速を与える方法、円形の水槽を回転させ魚に流速を与える方法、背景を移動させて魚を泳がせる（偽走流性）方法がある。これらの方法は、海水域という均一な流速場における引き網の速度を求めるために開発されたものである。したがってこうした実験は、可能な限り均一な流れを魚に与えることを前提として、実際の河川のような流速の空間的・時間的分布が一様でない状況は殆ど考慮されていないのが実態である。しかし、実際の河川においては、流速は時間的・空間的にばらついており、これらの実験結果によって得られた遊泳速度がそのまま河川でも適用可能であるとは必ずしも考えられない。

既存の研究では、魚は同種であれば体長が大きいほど遊泳能力が高いとされている。遊泳速度は、①きわめて短時間（1～5秒）維持できる最大速度を最大速度（maximum speed）または突進速度（burst speed）、② 20分～60分の間維持できる最大速度（またはある流速での耐久時間）を巡航速度（cruising speed）または耐久速度（endurance speed）と分類されることが多い。一般的には①の瞬発的

な最大速度は体長の約10倍/秒、②の持続的な最大速度は体長の約2～3倍/秒程度とされている。

この遊泳速度と体長の関係をもちいて魚道の設計を行うと仮定すると、対象魚が持続的に遊泳して魚道を遡上する場合には対象魚の体長の約2～3倍/秒が遡上可能な流速の限界値となると考えられる。また、ごく短い魚道や魚道内で魚が十分に休憩できうる構造であれば、対象魚の体長の約10倍/秒が遡上可能な流速の限界値となると考えられる。

では実際の魚道ではどうだろうか。実際に魚道を設計・施工・管理している現場からは、設計流速よりも流速が速い場合であっても魚の遡上が見られるといわれていた。また金子らの研究¹⁾では秋川にある実際の魚道を遡上した魚類の体長と流速を測定したところ、遊泳速度は体長の10倍よりも大きい傾向にあり、なかでもアイスハーバー式の魚道では最低でも体長の21.1倍/秒、最高では49.7倍/秒という非常に大きな値でも遡上したという報告がなされている。既存の研究よりも遙かに大きい体長の約50倍/秒の流速で魚の遡上が可能なのはなぜだろうか。この問題は生物学的情報と水理的情報の双方から考えなければならない。

そこで、従来の実験よりも実際の河川の流れに近い礫河床をもった開水路において流速分布のある場合の魚類の遊泳速度とその行動の関係について実験した結果について述べるものである。

2. 研究の方法

本実験は平成8年9月23日～平成8年11月21日の期間（水温17度～20度）行った。実験には土木研究所内にある



写真1 実験水路全景



写真2 地下貯水槽、高水槽

河川環境実験水路（写真－１、２）を用いた。この実験水路内に延長15m、水路幅0.75mの実験区間を設置した。実験に用いた河床の形態は２タイプであり、河床のタイプによって実験シリーズⅠ・Ⅱに大別した。

実験水路側面は一部がガラス張りで、側面から魚の遊泳状況を観察できるようになっている。実験シリーズⅠの河床は、河床材料に礫（粒径30mm）を用いて河床勾配1/100となるように均一の厚さで敷きならした（写真－３）。実

験シリーズⅡではそれに加えて玉石（平均粒径100mm）をガラス壁面区間に設置した（写真－４）。実験中はビデオカメラによって魚の行動を撮影し解析を行った。水路内の流れは等流になるように下流端の起伏堰で水位を調節した。流速は、初期値を断面平均流速を1 m/sとし、5分ごとに0.1m/s刻みで上昇させ、流速1.8m/sまでの流速で実験を行った。



写真－３ 実験シリーズⅠ河床



写真－４ 実験シリーズⅡ河床

実験の対象魚種及び魚数を表－１に示す。本研究では遊泳速度を測定する上で、ある流速を与えたとき実験区間に５分間留まらず下流端の流下防止ネットに打ち上げられる事を「流失」、このときの流量に対する代表断面における平均流速を「遊泳限界速度」と定義した。流速分布の測定は三次元の電磁流速計を用いた。流速分布の測定は実験シリーズⅠ、実験シリーズⅡともに、断面平均流速 $V=1.0\text{m/s}$ 、 $V=1.5\text{m/s}$ において実験区間最下流から上流へ3mの位置の横断面で実施した。なお、測定断面位置は実験シリーズⅡで最も高い頻度で魚が見られた位置であり、最下流に設置した玉石の下流10cmである。

３．実験結果

実験シリーズⅠ 礫河床での実験準備

①遊泳行動 実験に用いた魚は魚種に関係なく実験中ほとんどの時間、流れの上流に向かって河床付近（河床からの距離が数センチ程度）を遊泳していた。河床付近より浮上した魚は速やかに流される。こうした魚は河床付近に戻

	ウグイ個体数	コイ個体数	フナ個体数
実験シリーズⅠ	32個体	53個体	9個体
実験シリーズⅡ	31個体	45個体	9個体

* 体長は10～30cm程度のものを用いた

表－１ 実験に用いた魚種・魚数

り体勢を立て直すことが多く、流失にまで至ることは少ない。これに対して河床付近に位置している魚が下流に流される場合、流れに対して一定の姿勢を保ちながら、次第に流される。流失した魚の多くは河床付近を泳いでおり、下流端の流下防止ネットの直前まで流された後数秒間勢よく遡上する行動を繰り返し、次第に勢よく遡上する距離が短くなり流失する。この行動は、流速が巡航速度的な遊泳力を越えた場合には突進速度的な遊泳力を用いるが、突進速度はごく短時間しか使用できない上に疲労も大きいため、体力を失って突進速度が使用できなくなり流失するものと推測される。こうした流失形態をとった魚は体力を大きく消耗しており、流失直後に再び水路に戻しても数秒も

泳ぐことができなかった。このことから魚はその遊泳能力の限界近くまでを使用していたと考えられる。また側方からの観察によって、魚は河床の微妙な凹凸を利用していることがわかった。魚はこうした河床のへこみや盛り上がり部の背後の空間にしばらく留まり、上流にある次の窪みなどの空間へ瞬間的に勢よく泳いで移動する。しかし、こうした凹凸は全ての体長の魚が利用していたわけではなく、おおむね体長10数cm程度以上の魚はこれを利用できなかった。これらの比較的大きい魚は実験中同じ位置に留まらず縦断的に移動を行っていた。また全ての魚は主に壁際を利用しており、水路中央付近はあまり利用しなかった。

②遊泳速度 遊泳限界速度は魚種によって大きく異なる結果となった。断面平均流速1.8m/sで、フナで11.1%、コイで41.5%、ウグイで100%が流失しなかった。つまりこれらの流失しなかった魚はこの実験の条件下では、1.8m/s以上の遊泳限界速度を持つことになる。次に流失した魚の遊泳限界速度と体長の関係を図-1に示す。参考のために従来の研究による突進速度（体長の約10倍）、巡航速度（体長の約3倍）を図中に赤い線で示した。既存の研究では魚の遊泳速度は体長に比例する結果という結果が得られているが、本研究の実験シリーズIの結果からは既存の研究結果とは異なり体長と遊泳速度の間に明瞭な関係は見ら

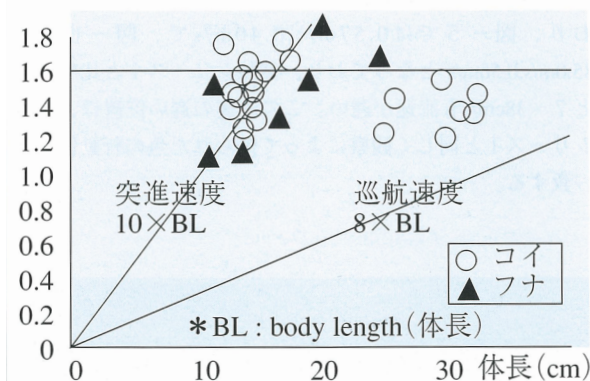


図-1 実験シリーズIの遊泳限界速

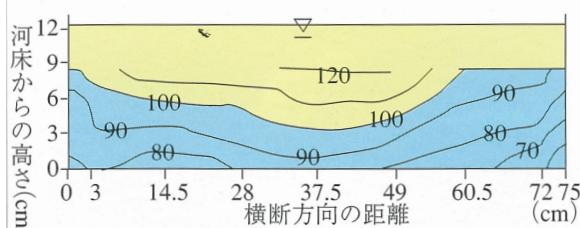


図-2 流速分布（断面平均流速1.0m/s）

れなかった。また、この結果から遊泳限界速度は既存の研究による体長から推測される遊泳速度と比較して大きな値が得られた。

③水路内の流れ 図-2に断面平均流速1.0m/sの流速分布、図-3に断面平均流速1.5m/sの流速分布を示す。（図中の黄色部分は流速1m/s以上、青色部分は1m/s以下）メッシュは鉛直方向に3cm毎、横断方向に両壁から3cmを起点にして11.5cm幅である。図は横断方向成分、鉛直方向成分を除いた流軸方向の成分によって作成した。下流から見て左端の河床を原点としている。水深が深く壁面から近い(3.3) , (72.3)の測定位置では流速が周囲よりも遅くなっており、図-2でそれぞれ0.83m/s, 0.71m/s, 図-3でそれぞれ0.92m/s, 0.94m/sとなっている。この流速の遅い位置は、観察によって得られた魚の利用頻度の高い位置と一致する。

実験シリーズ2 礫河床+玉石設置での実験

④遊泳行動 全ての魚種について玉石の下流側約30cm以内の空間に留まっていることが実験中多く観察された。玉石の利用頻度は設置した位置によって違いが見られ、横断的には壁際に設置した玉石では多くの利用が見られ、中央においた玉石ではほとんど利用されない。また、流速が速くなるに従って下流部の玉石の使用頻度が高くなる。これは下流端の流下防止ネット際まで流された魚が数秒間上流に勢よく遡上し、最下流部に設置した玉石の下流の空間でしばらく留まった後、遡上を開始するからである。魚はこうした空間でしばらく留まった後、上流にある次の空

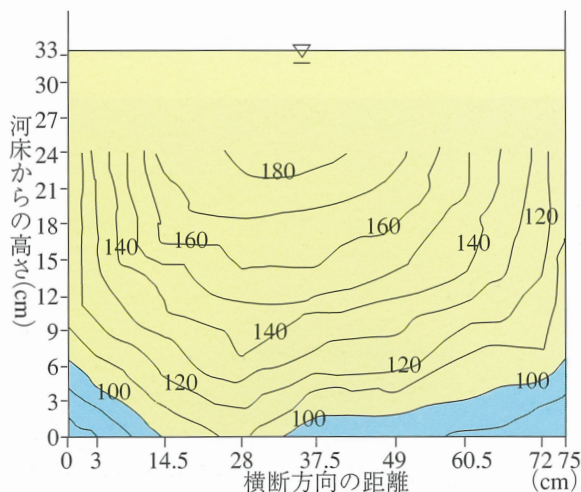


図-3 流速分布（断面平均流速1.5m/s）

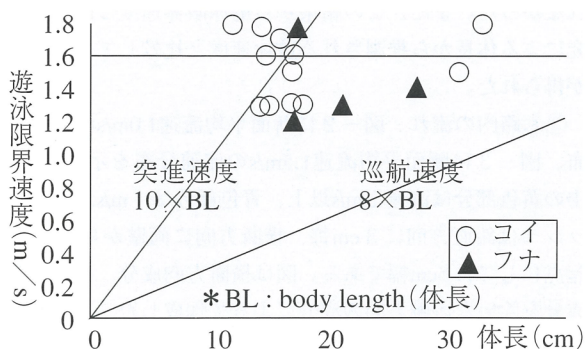


図-4 実験ケースⅡの遊泳限界速度

間へ移動する。また、玉石下流部の空間は、大きい魚と小さい魚では利用位置が異なる。大きい魚は玉石のごく近くに位置し、小さい魚は10~20cm離れた河床から数ミリに位置する。

②遊泳速度 断面平均流速の最大値1.8m/sで流失しなかった魚はフナで33.3%、コイで66.6%、ウグイで100%であり、実験シリーズⅠと比較してフナで22.2%、コイで25.1%も増加した。実験シリーズⅠとⅡとの違いは設置した玉石だけのため、この増加分は玉石の効果といえる。図-4に流失した魚の遊泳限界速度と体長の関係を示す。実験シリーズⅠの結果と同様、体長と遊泳速度の間に明瞭な関係は見られなかった。

③水路内の流れ 図-5に断面平均流速1.0m/sの流速分布、図-6に断面平均流速1.5m/sの流速分布を示す。測定断面の10cm上流に玉石が設置されており、玉石の横断・鉛直方向の位置は図に示すようになっている。水深が深く壁面から近い上に玉石の流軸方向下流10cmに位置してい

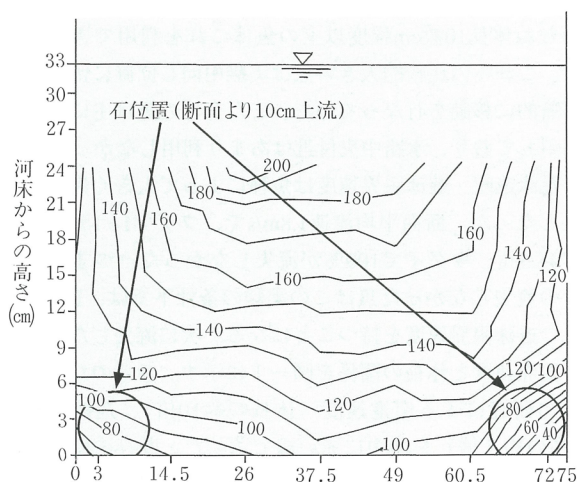
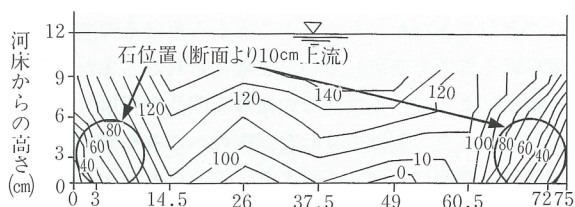


図-6 流速分布(断面平均流速1.5m/s)

る(3.3), (72.3)の測定位置では流速が最も遅くなっており、図-5では0.57m/s, 0.40m/sで、図-6では85.0m/s, 0.56m/sとなっており、実験シリーズⅠと比較すると7~38cm/sも流速が遅い。この流速の遅い位置は、実験シリーズⅠと同じく観察によって得られた魚の行動位置と一致する。

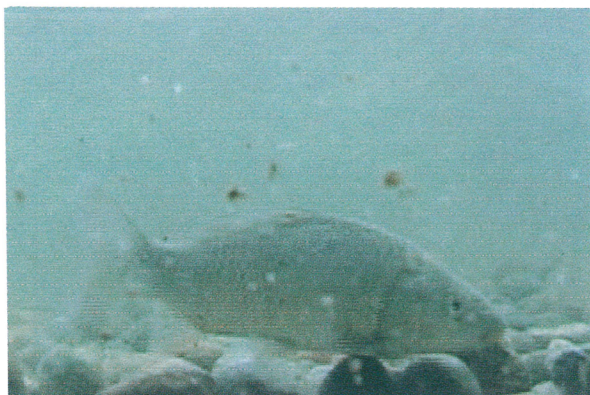


写真-5 実験シリーズⅠにおけるフナの遊泳



写真-6 実験シリーズⅡにおけるフナの遊泳

4. 考察

本実験の結果をまとめると、以下の通りである。

①遊泳速度は断面平均流速では評価し得ない。

本実験では、河床および側壁付近や玉石の下流側で局所的な低速域が生じた。実験の対象魚は遊泳力の限界に近いような状況では流れの遅いところを選んで遊泳するため、断面平均流速によって魚の遊泳速度は評価し得ないと言える。この結果から、魚類等の水生生物の生息等を考える際には局所的な環境と生物の生息の双方の関係を考慮する必要があることを示唆している。

②流量増加による魚の流失に対する抵抗は体長に関係ない。

今回実験に用いた魚の遊泳力は主として尾鰭からの推進力による。一方、流体力は均一な流れの中では魚の断面積に関係する。しかし、尾鰭からの推進力も体長の増加に伴い大きくなるため流速が均一な場合には体長の増加に伴って遊泳速度が大きくなるものと推測される。

しかし、本実験のように、河床や側壁近傍では流速は小さいがそこから離れるに従って流速が急激に増加する。特に鉛直方向への流速の増加が大きいと、魚の体高の増加は、流体力の著しい増加を招く事になる。(図-7)。よって、本実験のような流速が均一ではない流れでは体長増加による遊泳力の増加と流体力の増加が、均一な流れの場合と大きく異なるため体長と流失時の平均流速に明瞭な関係が認められなかった一因と考察される。

③河床内に玉石のような突起物があると魚は更に高流量に耐える。

実験シリーズⅠにおいて、体長がおおむね十数センチ以下の魚は河床の僅かな凹凸によって生じた局所的な低流速域を利用していたが、それ以上大きな魚はこうした局所的な低流速域を利用できなかった。しかし、実験シリーズⅡ

においては実験対象魚の全てが、玉石によってつくられた局所的な低流速域を利用していた。つまり、玉石を設置したことによって実験シリーズⅠでは局所的な低流速域を利用できなかった魚が利用できる低流速域が生じたわけである。また、小さな魚は低流速域の中で更に遊泳しやすい空間を選ぶことができるだろう。

まとめ

従来の河道計画、魚道設計では、断面平均流速等空間の平均的な値を用いて検討を行ってきた。しかし、魚等の生息を考えた場合、空間の平均量だけではそれを評価することが難しく、その分布特性を把握する事が重要と考えられる。本研究で扱った遊泳速度もこのような問題の一つと考えられる。本実験の結果から水域の生物にとっては、微少な空間であっても流速の遅い空間の存在が、生息環境として大きな違いとなることを示している。このことから、平均的な流れの理解だけでは生物現象をとらえることができず、流れの空間的な分布の把握や予測が必要であることを示している。

参考文献

1. 金子義明・和泉清・土屋十圀・大竹義男：水工学論文集第41巻P265-270,1997
2. 板沢靖男・羽生功：魚類生理学、恒星社恒性閣、1991
3. 廣瀬利雄・中村中六編著：魚道の設計、(株)山海堂、1991
4. 玉井信行・水野信行・中村俊六：河川生態環境工学、東京大学出版会、1993
5. Isao Hanyu・Katumi Tsukamoto・Kunio Yamamori・Phan Van Ngan Kiyoshi Furukawa・Takahashi Hibiya:Simultaneous Recording of Physiological Information from Swimming Fish, Bulletin of Japanese Society of Scientific, 1979
6. Katumi Tsukamoto・Takeshi Kajihara・Masaharu Nishiwaki:Swimming ability of fish. Bulletin of Japanese Society of Scientific, 1974
7. 塚本勝巳：魚の遊泳運動、月刊海洋科学,Vol.15 No4,1983
8. 塚本勝巳：遊泳速度と筋活動、月刊海洋科学,Vol.15 No4,1983
9. W.S.Hoar D.J.Randal:FISH PHYSIOLOGY, Vol.7, Locomotion, ACADEMIC PRESS1, 1978

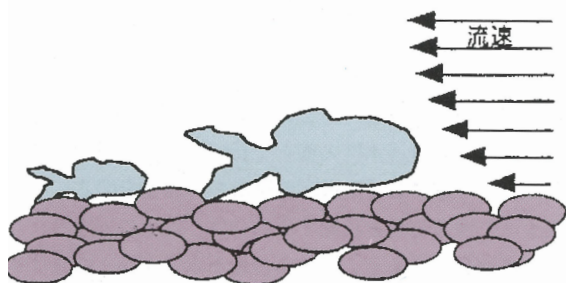


図-7 魚のサイズと流速分布