

礫河床における魚類の遊泳速度に関する基礎的研究

A study on cruising speed of fishes in gravel water bed

房前和朋^{*}、島谷幸宏^{**}、萱場祐一^{***}、傳田正利^{****}

By Kazutomo FUSAMAE, Yukihiro SHIMATANI, Yu-ichi KAYABA, Masatoshi DENDA

This paper describes the cruising speed of fresh water fishes. Most of the previous studies about measurement the cruising speed have not consider spatial and temporal distributions of velocity of water flow. We made experiments on cruising speed in open channel which has gravel water bed.

The experiment result indicated that the cruising speed was a few times as fast as the cruising speed measured in the past. This difference is thought to be due to non-uniform distribution of flow velocity. This result indicates that small spaces with low velocity area are important for aquatic organism. This study shows that the spatial distribution of flow velocity is more important than the mean velocity to understand behavior of aquatic life.

Keyword: cruising speed, open channel, gravel water bed, spatial distribution of flow velocity

1. はじめに

近年川の自然環境が着目され、多くの環境の保護や創出の試みがなされている。しかし、現在なされている試みにおいては生物学的な情報と水環境的な情報がリンクされておらず、どちらかの情報にかたよった処理がなされているように思われる。本研究では、どういった点がリンクしていないかという一例について、魚の遊泳速度と流速分布という観点から迫ってみた。例えば遊泳速度の測定は魚類学者により各国で行われているが、その実験の多くがパイプの中の流速と魚類の遊泳能力の関係について調べたものであるため、流速の空間的・時間的分布について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、これらの実験結果をそのまま用いることが必ずしも適切であるとは考えられない。本研究で筆者らは、礫河床をもった開水路で遊泳速度に関する実験を行った。この実験において、魚類の遊泳速度は従来の知見と比べて場の平均流速で数倍の値となるものであった。これは流速が一様に分布していないために起こった現象と考えられる。こ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。本研究の成果は従来の魚道などの設計論等を見直すことの必要性を示唆するものとともに、水理学の新たな展開をうながすものと思われる。

* 正会員 建設省土木研究所 河川環境研究室 研究員
** 正会員 工修 建設省土木研究所 河川環境研究室 室長
*** 正会員 工修 建設省土木研究所 河川環境研究室 研究員
**** 正会員 建設省土木研究所 河川環境研究室 技官
(〒305茨城県つくば市大字旭1番地)

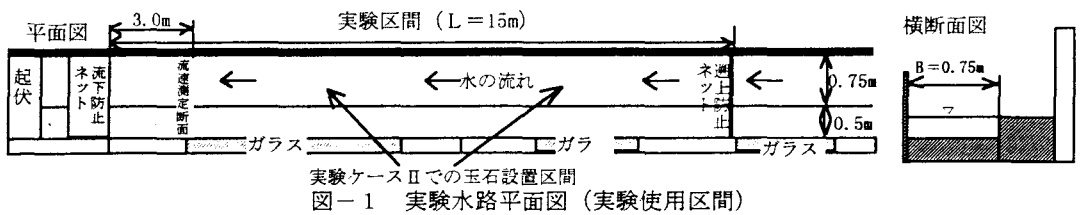


図-1 実験水路平面図 (実験使用区間)

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)で行った。実験水路(図-1)は、水路全長20m、実験区間延長15m、水路幅0.75m、河床勾配1/100である。河床は、実験シリーズⅠでは河床材料に礫(粒径30mm)を1/100勾配に均一に、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(図-2)し、実験を行った。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ビデオカメラで撮影し魚の行動を解析した。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、断面平均流速を1m/sを初期値として5分ごとに0.1m/s刻みで上昇させ、1.8m/sまで実験を行った。実験の対象魚種及び魚数を表-1に示す。本研究では、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」と定義する。既存の研究¹⁾では魚の遊泳速度は、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)あるいは突進速度(burst speed)、②20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)あるいは耐久速度(endurance speed)に分類している。また実験シリーズⅠ、実験シリーズⅡにおける流速分布の測定を行った。流速分布の測定は三次元の電磁流速計を用いた。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。測定断面は実験シリーズ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。

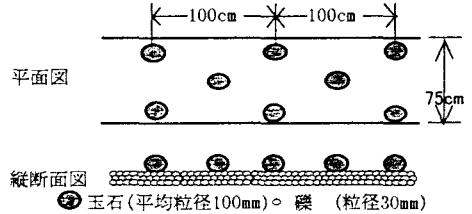


図-2 玉石の配置(下流部)

表-1 実験に用いた魚数

	ウグイ个体数	コイ个体数	フナ个体数
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

3. 実験結果

実験シリーズⅠ 礫河床での実験

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、上流を向き河床付近(河床との距離が数センチ以内)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。これに対して河床付近に位置している魚が流される場合、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、下流端のネット際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ついには流失する。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。また、魚は主に壁際を利用しており、中央付近はあまり利用しなかった。このような行動は対象魚種の全てに共通して見られた。

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。断面平均流速の最大値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。また図-3に流失した魚の遊泳限界速度と体長の関係を示す。図中の点線は従来の研究による突進速度(体長の約十倍程度)、巡航速度(体長の約三倍程度)を示している。このように既存の研究によって魚の遊泳速度は体長に比例する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れなかった。

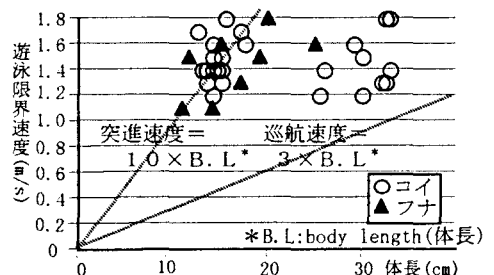


図-3 遊泳限界速度

③水路内の流れ 図-4に断面平均流速1.0m/sの流速分布、図-5に断面平均流速1.5m/sの流速分布を示す。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-4でそれぞれ0.83m/s, 0.71m/s, 図-5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

①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。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、最下流の玉石の下流の空間にはいつて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と比較して増加した。図-6に実験シリーズIと実験シリーズIIのコイの遊泳限界流速と流失数の全体に占める割合を示した。実験シリーズIでは1.2m/sから流失が見られるが、実験シリーズIIでは1.3m/sから流失が始まっている。また、遊泳限界流速の平均値は実験シリーズIで1.46m/s、実験シリーズIIで1.57m/sであった。よって、設置した玉石は魚が流速に耐えるのに有利な影響を与え、これによって魚の遊泳限界速度が増加することがわかった。また、図

7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-8に断面平均流速1.0m/sの流速分布、図-9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-8では0.57m/s, 0.40m/sで、図-9では0.50m/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。

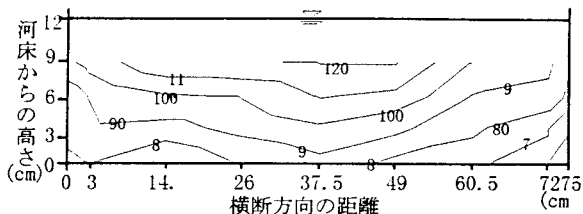


図-4 流速分布(断面平均流速1.0m/s)

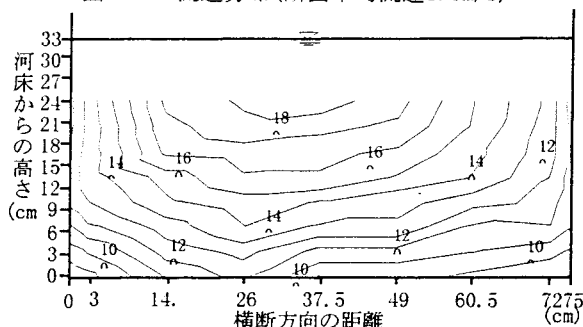


図-5 流速分布(断面平均流速1.5m/s)

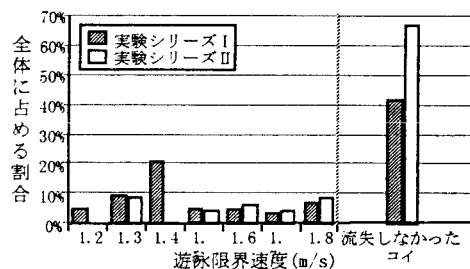


図-6 コイの遊泳限界流速と全体に占める割合

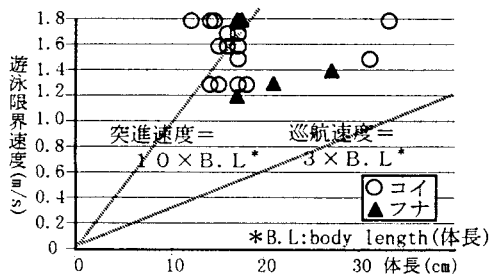


図-7 遊泳限界速度

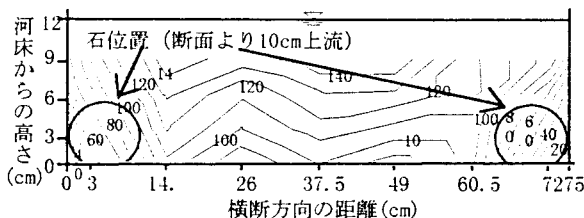


図-8 流速分布(断面平均流速1.0m/s)

4. 考察

本実験の結果をまとめると、以下の通りである。①開水路においては流速が速くなると魚は水路内の流速の遅い箇所に移動するため、遊泳速度は断面平均流速では評価し得ない。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。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。

①については、河床や側壁などの境界や玉石の下流側では局所的な低速域が生じること、魚はその低速域を嗜好して遊泳することにその原因がある。この結果は、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については以下の様に推測される。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、魚にかかる流体力は流速、魚の断面積に関係すると考えられる。流速に空間的分布を持たない一様流速中では、魚が受ける抵抗は体長の2乗に比例する。一方、尾鰭からの推進力も体長の増加に伴い大きくなるため、通常の実験では体長に比例して遊泳速度が大きくなるものと考えられる。しかし、本実験のように魚が流量増加時に遊泳する河床や側壁近傍では河床付近の流速は小さいが、鉛直方向に急激に流速が増加する。魚の体高は既ね体長に比例するため体長の増加は、遊泳位置での流速の増加を招き流体力の増加を招くことになる。また、小さい魚は河床の窪み等を利用して遊泳していることも、局所的な低速域の利用という以外だけでなく、魚自身の流体力を減少させている可能性がある。また、③についても同様に考えることができる。

このように河川や魚道等における流れの中では、既往の研究で指摘されてきた体長から遊泳速度を推定する方法に問題がある。今後は一様でない流速分布を持つ流れの中での遊泳速度を定式化する必要があるだろう。本実験で用いた遊泳限界速度の測定は5分間と巡航速度の定義より短い測定時間となっている。塚本ら²⁾が行った魚の遊泳時間と遊泳速度の実験結果では、遊泳時間が長くなるにつれ急速に遊泳速度が小さくなっており、コイにおける遊泳速度は300秒でおよそ90 (cm/s)である。しかし、本実験では、シリーズ1では41%、シリーズ2では67%の魚が遊泳限界速度1.8 (m/s)以上を記録しており、既往の研究結果と比較すると明らかに大きな値となっている。遊泳速度に関する既往の研究では、境界の影響がない海洋での野外観測や境界があっても極めて粗度の小さい装置で実験を行ってきたため、空間的に大きな流速差がある場合や、流速差がある場合に魚がどのような場所を嗜好するかについては考慮されていなかった。しかし、水路内では横断面内の流速差だけでなく、魚が流速の小さい場所を嗜好して遊泳するため、実験条件が大きく異なっている。つまり、魚は流速に差がある横断面内を均等に利用するのではなく、河床や側壁、玉石等の局所的な低速域を嗜好して遊泳するため、断面平均流速で測定した遊泳速度は過小に評価される。シリーズ1における実験結果でも、遊泳位置での流速は1.5 (m/s)時でおよそ0.9 (m/s)であり、局所的な流速で評価するとほぼ既往の研究と一致する。

従来の魚道設計、河道計画では、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、魚等水生生物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。

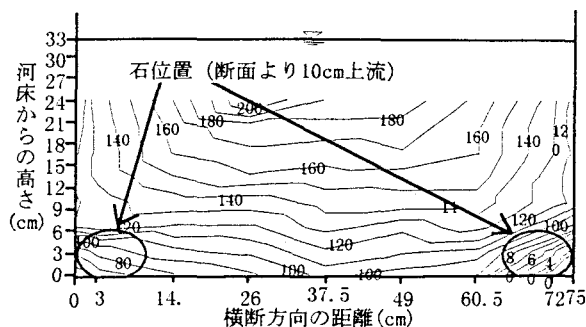


図-9 流速分布 (断面平均流速1.5m/s)

参考文献

1. 板沢靖男・羽生功:魚類生理学, 恒星社恒性閣, 1991
2. 廣瀬利雄・中村中六編著:魚道の設計, (株)山海堂, 1991
3. 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.
4. 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
5. Katumi Tsukamoto・Takeshi Kajihara・Masaharu Nishiwaki: Swimming ability of fish. Bulletin of Japanese Society of Scientific, 1974
6. 塚本勝巳:魚の遊泳運動. 月刊海洋科学, Vol.15 No4, 1983
7. 塚本勝巳:遊泳速度と筋活動. 月刊海洋科学, Vol.15 No4, 1983
8. W.S. Hoar・D.J. Randal: FISH PHYSIOLOGY, Vol.7. Locomotion. ACADEMIC PRESS, 1978