

間伐材を用いた杭水制の水理機能と 魚の生息について

青木 宗之¹・染井 香栄²・小原 誠²・吉野 隆³・福井 吉孝⁴

¹ 学生員 修(工) 東洋大学大学院 工学研究科 博士後期課程 (〒350-8585 埼玉県川越市鯨井 2100)
E-mail : dd061001x@toyonet.toyo.ac.jp

² 学生員 東洋大学大学院 工学研究科 博士前期課程 (〒350-8585 埼玉県川越市鯨井 2100)

³ 正会員 博(工) 東洋大学准教授 理工学部機械工学科 (〒350-8585 埼玉県川越市鯨井 2100)

⁴ 正会員 工博 東洋大学教授 理工学部都市環境デザイン学科 (〒350-8585 埼玉県川越市鯨井 2100)

杭水制の水理機能と、魚の生息に対して杭水制がどのような役割を果たすのかを模型実験から評価した。

本研究では、杭水制が持つ水理機能と、魚の生息に好ましい最適な杭水制の配置や配列を見出すことを目的としている。水理実験において、千鳥配列と整列配列との治水機能を比較検討した結果、流速低減効果は千鳥配列が高いことが分かった。実魚を用いた挙動実験では、魚の走流性を発揮させるためには、その場の流速が魚の体長の約7倍の数値を毎秒以上当たりにした速度が好ましいことが分かった。また、魚が好んで遊泳する速度は、魚の体長の4倍の数値を毎秒以下当たりにした速度である。なお、杭水制は、採餌場所や外敵からの避難場所、休憩場所として利用される可能性がある。

Key Words : pile dike, fish habitat, fish behavior, thinned wood, *Tribolodon hakonensis*

1. はじめに

1997年の河川法改正により、河川管理は治水・利水に加え、河川環境の保護と保全が位置付けられた。さらに、多自然川づくりが求められている。これは、河川全体の自然の営みを視野に入れ、河川が本来有している生物の生息・成育・繁殖環境などを保全・創出するために河川管理を行うというものであり、全ての川づくりの基本である¹⁾。つまり、魚や小動物などに優しく、人も楽しめる、まさしく人と生物が共生できる川が求められている。

本研究では、河川中に生息している水生生物、特に魚類に着目した。魚の行動は、主に、1)流速、水深などの水理量、2)河川構造物の有無、3)河床、河岸の形状および構成材料、4)水質、5)日照、水温などの気候条件、そして6)他の動物などの外敵の出現等、に大きく影響を受ける²⁾。また、上述した1)は、2)によって大きく変化する。河川中には、様々な構造物が数多く設置されている。例えば水制であり、それらを設置することで、その場やその周辺の流れは三次元的な複雑な流れになる。水制は、流速低減や水剝、流路固定、導流といったような水理機能を持っており³⁾、杭出しや牛枠、ケレップなど様々な形状がある。これら水制に関する研究事例は数多く、複雑な流れの現象の解明がなされてきた^{4,5,6)}。しかし、水制

があることによって作り出される流れと魚の行動との関係を明らかにされたものは見られない。

一方、2005年2月に京都議定書が発効され、日本は1990年を基準とし、温室効果ガス排出量を2008年から2012年の5年間で6(%)の削減を目標としている⁷⁾。このうちの3.8(%)の温室効果ガスを森林によって削減するとしている⁸⁾。なお林野庁は、この削減を行うため、2007年から2012年にかけて、330万(ha)の間伐を目標としている⁹⁾。この間伐によって生じた木材をいかに有効利用するかも重要なことである。

そこで本研究では、その有効利用方法の一つとして、間伐材を用いた杭水制を考えた。杭水制は、水制工のなかで最も簡単な工法である¹⁰⁾。木材を用いた杭水制は、河川景観の面から好ましく、魚の生息場としても有効であると考えた¹¹⁾。本研究の目的は、杭水制が持つ水理機能と、魚の生息に好ましい最適な杭水制の配置や配列を見出すことである。そのために、水理実験および実魚を用いた挙動実験を行った。

2. 実験概要

実験に使用した水路は図-1に示すとおりであり水路幅

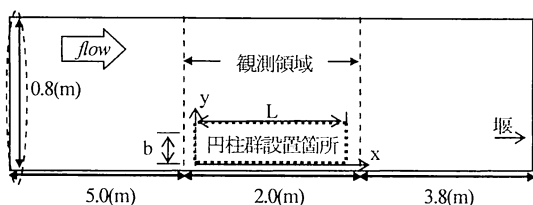
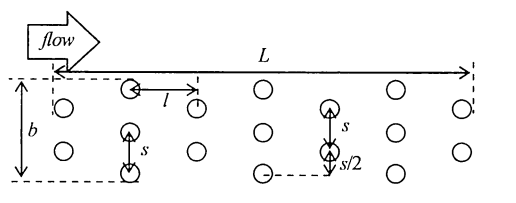


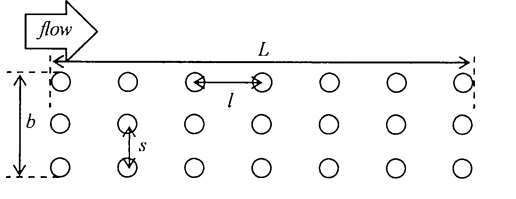
図-1 実験水路平面図

表-1 実験ケース

	配列	円柱 本数 (本)	流量 Q (l/s)	横断方向 設置間隔 s (cm)	縦断方向 設置間隔 l (cm)
Run1	なし	-	28	-	-
Run2	千鳥	122	28	4	4
Run3	整列	147	28	4	4



a) 千鳥配列(Run2) (密度 $\lambda=1.46 \times 10^{-2}$)



b) 整列配列(Run3) (密度 $\lambda=1.76 \times 10^{-2}$)

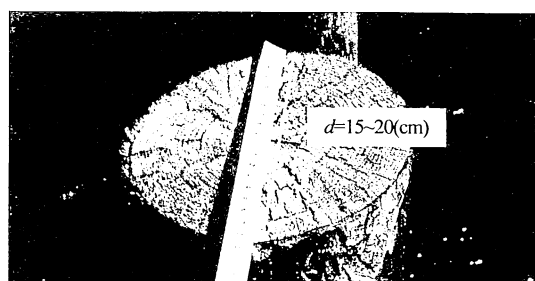
図-2 円柱群の配列

0.8(m), 長さ 10.8(m)の矩形断面開水路である。なお, 観測領域は 0.8×2.0 (m)とした。表-1 に実験ケースを示す。擬似杭水制として用いた円柱は, 高さ 15(cm), 直径 $d=0.5$ (cm)の木製円柱であり, 観測領域内の水路右側岸側に設置した。そして, 円柱群設置面積($=b \times L=0.085 \times 1.925$ (m^2))を一定とし, 円柱群の配列を変化させた(図-2)。つまり, 密度 λ が変化している。なお, 密度 λ は以下の式で定義される。

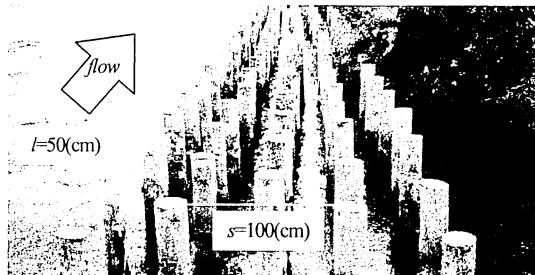
$$\lambda = \frac{T \cdot \pi d^2}{4 \cdot b \cdot L} \quad (1)$$

ここに, T : 円柱本数, d : 円柱の直径(cm), b : 円柱群設置箇所の横断距離(cm), L : 円柱群設置箇所の縦断距離(cm)である。

また, 実際の河川に設置されている杭水制の例は, 直径 d が 15(cm)~20(cm)であり, 横断方向設置間隔 s および



a) 杭水制の直径



b) 杭水制の設置間隔

図-3 北上川水系砂鉄川(岩手県一関市)での実施例(マツ)

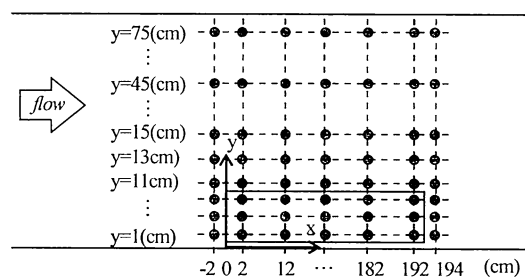


図-4 測点の簡略図

縦断方向設置間隔 l は 50(cm)~100(cm)が多い(図-3)。本実験で採用した d, s, l は, 水理模型実験に対して推奨されている縮尺模型 $1/10 \sim 1/30$ ^[2]に対応している。

(1) 水理実験について

水理実験は, 杭水制が持つ水理機能を評価するため, 図-4 に示した測点 ($x=-2, 0, 194$ (cm)および $x=2 \sim 192$ を 10(cm)毎, $y=1 \sim 11$ (cm)を 1(cm)毎, $y=13$ (cm), $y=15 \sim 75$ (cm)を 10(cm)毎)において, 流速および水深の測定を行った。なお, 実験時の平均水深は 10(cm)である。流速の測定には, 二次元電磁流速計 (KENEK 製, VM2001) を使用した。サンプリング周波数を 100(Hz)とし, $z=2, 4, 8$ (cm)の各点において測定した 512 個のデータを単純平均した。また, 現地では, 杭水制内への土砂の進入, 堆積, 洗掘が生じることがあるため, 移動床実験も行った。なお, 移動床実験に用いた砂礫は, 代表粒径 $D_{50}=0.73$ (mm) (図-5), 比重 2.0 であり, 初期河床高 3.0(cm)とし, 通水時間は 30 分間である。

(2) 実魚を用いた挙動実験について

実魚には、ウグイ(*Tribolodon hakonensis*)を使用した。ウグイは、ほぼ日本全国の河川や湖沼に多く分布しており、アユと同様に強い走流性を持っている^{11, 13)}。なお、走流性とは魚が流れに逆らって泳ぐ性質である¹⁴⁾。今回の実験に用いたウグイの平均体長 BL は、5.0(cm)である。

実験は、ウグイを水路下流域に放流し、30 分間流水に馴れさせた。その後、ウグイの行動をビデオカメラで30 分間撮影した。また、ウグイは魚群行動をとるため¹⁵⁾、個体数を 10 とした。なお、魚の学習能力¹⁶⁾を考慮し、毎回異なる個体を用いた。実験条件は、水面の照度 200~250(lx)、水温 13~17℃である。この条件において、ウグイは比較的行動的であった。また、魚の遡上期は、3 月上旬から 6 月上旬であり、この時期の水温と類似している。さらに、ウグイは水温 $11 \pm 1^\circ\text{C}$ 以下になると、遊泳能力が極端に低下する¹⁷⁾ことから、本実験条件は良好であると判断した。

生物を用いた模型実験は、相似則の適用が困難である。本実験では、模型水路を用いて行っているが、流れ(の場合)の規模に合わせて魚のサイズを決めることは、同じ魚種でも稚魚と成魚もしくは未成魚では、その行動特性を異にしているため、容易ではない。海洋部門では、コイやメダカなどを使用した例もあるが¹⁸⁾、河川で考えると成魚のサイズは縮尺模型水路では稚魚もしくは卵のサイズになってしまう。そのため、魚の行動特性の把握には問題がある。しかし、魚の遊泳行動は流速に大きく支配されることから、実際場で生じている流速を考慮することにした^{11, 19)}。和田ら²⁰⁾も同じ理由から、現地の流速を考慮して室内実験を行っている。また、ウグイは体長が 4.0(cm)以上になると、成魚とほぼ同じ流速を好んで遊泳する²¹⁾。そのため、十分な回数の実験を行うことで、ウグイの遊泳特性は把握できると考えられる。

なお、pH、DO、BODはそれぞれ8.8、6.7(mg/l)、5(mg/l)という値である。これは、環境基準類型C(水産3級)²²⁾に相当するため、ウグイが生息できる条件を満たしている。

3. 実験結果

(1) 水理実験

a) 流速低減効果について

図-6 に円柱群内部の縦断方向の平均流速変化図を示す。流速は円柱群内を流下するにつれて、減少している。従って、水制の機能を満たしているといえる³⁾。また、図-7 に円柱群の流速低減率を示す。Run2(千鳥配列)は、Run3(整列配列)の約 0.8 倍の円柱本数、つまり、密生度 λ が約 0.8 倍で Run3 よりも小さくなっているが、流速低減率は約 80%と、Run3 同様の値となった。これは、

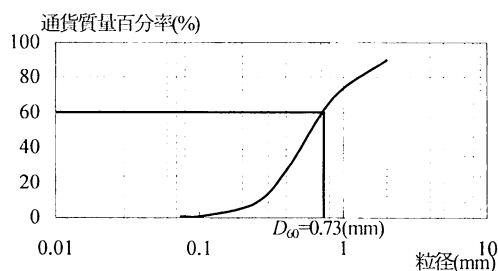


図-5 移動床実験に用いた砂礫の粒径加積曲線

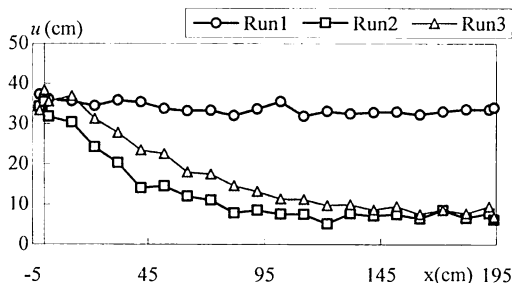
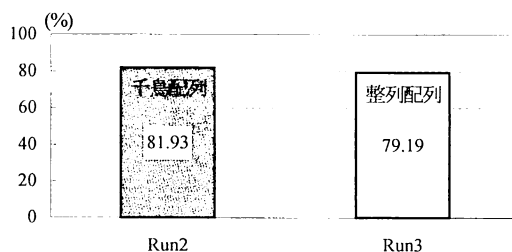
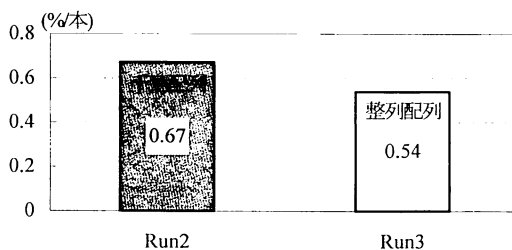


図-6 円柱群内の縦断方向の平均流速変化図 ($y=9(\text{cm})$)



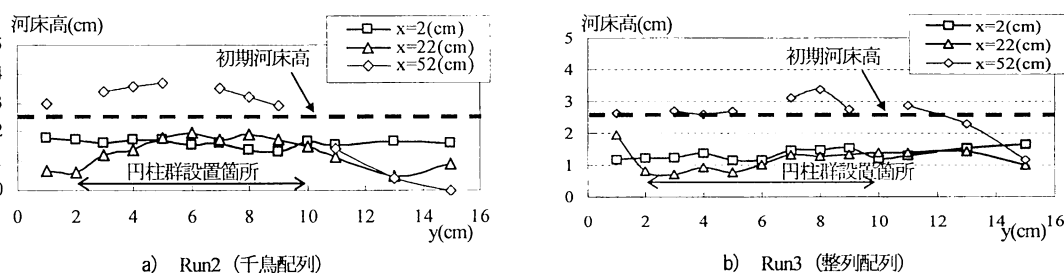
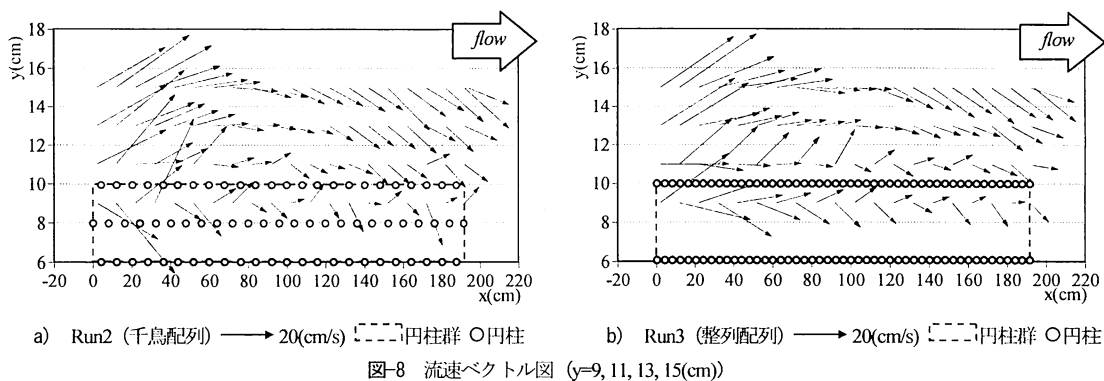
a) 円柱群の流速低減率



b) 円柱一本当たりの流速低減率

図-7 流速低減率

Run2 の密生度 λ は Run3 の約 0.8 倍であるが、Run2 の円柱配列は、上下流でジグザグになっているため、Run2 は Run3 に比べて円柱群内を直線的に流下しにくい配列になっているためである。また、円柱一本当たりの流速低減率を見てみると、Run3 に比べ Run2 は、約 1.2~1.3 倍の流速低減率があることが分かる。なお、図-7 は円柱群流入前の流速 u が、流入後に低減された群全体と一本



当たりでの割合を示している。

以上より、流速低減効果が大なのは、千鳥配列であることが分かる。

b) 水刃について

図-8に流速ベクトルを示す。Run2,3ともに、円柱群によって流れが阻害され、流向が主流部へ向いていることが分かる。また、Run2,3での偏流規模に大きな差異は見られない。ここで、円柱群の流速低減率は、Run2,3ともに約80%(図-7 a))であることが分かっている。水剣の規模は、円柱群の流速低減率によって決定されると考えられる。そのため、流速低減率が大きければ、水剣の規模も大きくなる、つまり、偏流規模も大きくなると考えられる。そのため、Run2,3の偏流規模に大きな差異は見られなかった。

c) 河床変動について

図-9に移動床実験においての河床高を示す。Run2、Run3ともに円柱群の先端部分で洗掘され、流下するにつれて堆積する。この現象は、先ず、先端部分で円柱群によって水位上昇し(図-10)、それによって生じた大きな水面勾配によって洗掘される。そして、秋草ら³⁾が記すとおり、その後の流速減少の効果の結果によって堆積が生じた結果である。なお、Run2の円柱群内の堆積量は、Run3のおよそ1.6倍の堆積量であった。

(2) 実魚を用いた挙動実験

実魚を用いた挙動実験では、各ケースにおいて6回の

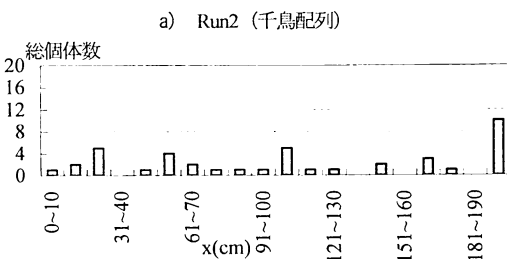
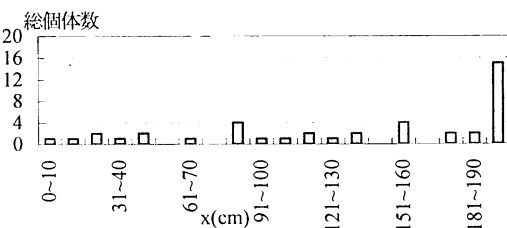
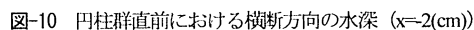
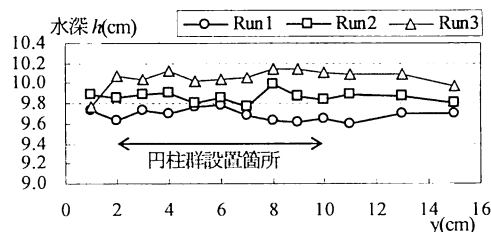


図-11 円柱群への進入箇所とその総個体数

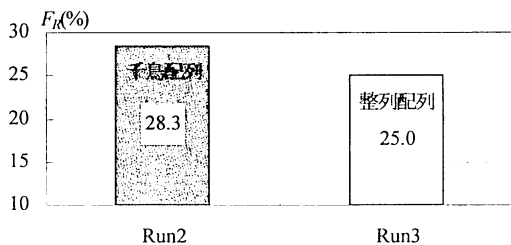


図-12 円柱群内を遡上したウグイの割合

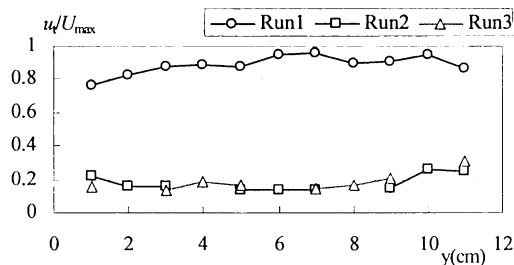


図-13 円柱群最後列の横断方向の流速変化図 ($x=2(\text{cm})$)

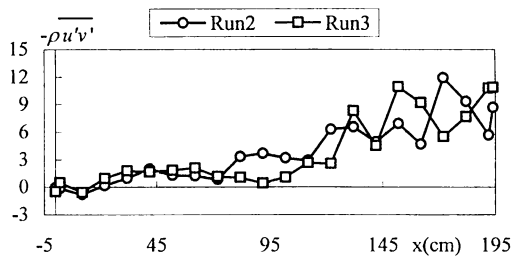
実験を行った。つまり、各ケースに使用した魚の総個体数は60である。また、6回という実験回数に関わらず、魚の遊泳行動に大きな差異は見られなかった。

a) ウグイの遡上行動について

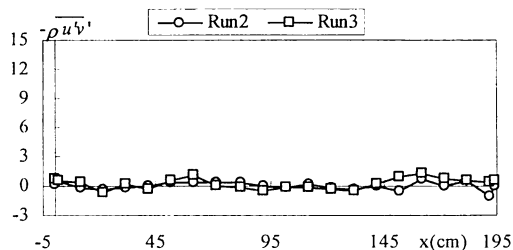
図-11にウグイの円柱群内への進入箇所とその個体数を示す。縦断方向設置間隔 $l=40(\text{cm})$ のときと同様に、円柱群最後列からの進入が多い。しかし、 $l=40(\text{cm})$ のケース（密生度 $\lambda=0.157 \times 10^{-2}$ ）に比べて、円柱群内へ進入したウグイの総個体数は減少している。また、円柱群内を遡上したウグイの割合は図-12である。ここで、円柱群内を遡上したウグイの割合 F_R は、以下のように定義している。

$$F_R = \frac{F_A}{F_T} \times 100(\%) \quad (2)$$

ここに、 F_A ：円柱群内へ進入し退出したウグイの総個体数であり、途中で出入りしたウグイも含んでいる。 F_T ：実験に使用したウグイの総個体数である。密生度 $\lambda=0.157 \times 10^{-2}$ のとき、円柱群内を遡上したウグイの割合が70%¹¹⁾に対して、今回の密生度 $\lambda=1.46 \times 10^{-2}$ （Run2：千鳥配列）および $\lambda=1.76 \times 10^{-2}$ （Run3：整列配列）では、それぞれ28.3(%)、25.0(%)であった。これは円柱群が密になり、ウグイは円柱群内へ進入しにくくなったためである。かつ、円柱群最後列からの流速が遅くなったことから（図-13）、走流性を発揮できずに円柱群最後列から進入した割合が減少したと考えられる。なお、図-13における u 、 U_{max} はそれぞれ、円柱群最後列の円柱近傍の流速、各ケースの横断面の最大流速である¹¹⁾。また、魚の遊泳箇所が水路底面部（ $z=2(\text{cm})$ ）であったため、実魚を用いた挙動実験に使用する流速は、 $z=2(\text{cm})$ のものとする。さらに、

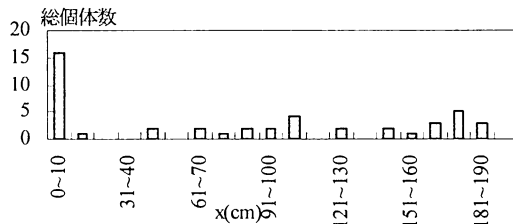


a) $y=11(\text{cm})$

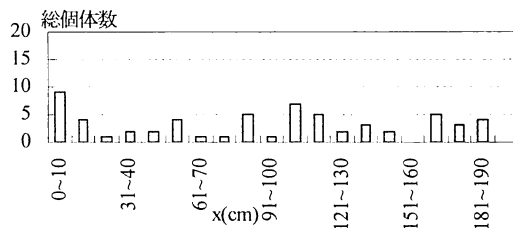


b) $y=45(\text{cm})$

図-14 円柱群際、主流部での縦断方向の流れの乱れ($-\rho \overline{u'v'}$)



a) Run2 (千鳥配列)



b) Run3 (整列配列)

図-15 円柱群からの退出箇所とその総個体数

魚がなぜ円柱群へ進入するかを検討を加えた。魚は、側線で流れの変化を感知すると知られているため¹⁴⁾、流れの乱れ $u(-\rho \overline{u'v'})$ に着目した。図-14に、円柱群際、主流部での縦断方向の流れの乱れ $-\rho \overline{u'v'}$ を示す。円柱群際では、Run2, 3ともに、流下するにつれて乱れが大きくなっていることが分かる。一方で、主流部では、Run2, 3ともに乱れないことが分かる。魚は、変化を好む²³⁾ことから、円柱群があることによって生じた流れの乱れを側線で感知し、円柱群へ進入していくものだと考えられる。

図-15にウグイが円柱群から退出した箇所とその総個

体数を示す。Run2,3とも、円柱群内へ進入したウグイは、円柱群最上流端から退出していることが分かる。これは、円柱群内の流速は上流部ほど速いため（図-6）、魚の走流性が働きやすくなったと考えられる。また、円柱群際の流れは、魚が円柱群際から比較的多く進入、退出している箇所の流速 v を見てみると（図-16 a）, 時間的にプラスとマイナスへ大きく変動している。魚は、この流れの変化を感知し、円柱群際から円柱群内へ進入、また円柱群際から退出したと考えられる。また、円柱群際から進入、退出がなかった箇所での流速 v は（図-16 b）, 進入、退出が比較的多かった箇所と比べて、時間的に大きな変動はない。つまり、魚は流速 v の時間的な変動が大きな箇所の流れを感知し、円柱群内へ進入し、円柱群から退出すると考えられる。

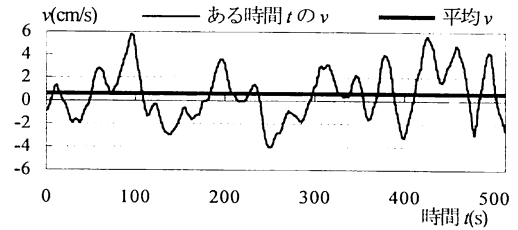
走流性を発揮したウグイは、側壁部^{11, 13, 24)}（図-17）や主流部を一気に遡上し、図-1の青い破線で示した水路最上流端まで辿り着いた。なお、魚は側壁部で最も走流性を発揮した。この場の流速は約35~40(cm/s)であり、魚の体長の約7~8倍の数値を毎秒当たりにした流速であった。魚の遊泳能力と流速の関係は、魚の大きさの違いを標準化するために¹⁰⁾、魚の体長と流速の比を用いて整理されてきている¹⁴⁾。そのため、他魚種との遊泳能力の比較も容易に行える。なお、以下の記述において、「数値を毎秒当たりにした」は省略することとする。

また、移動床の実験において、砂堆の後方や深掘れ部に、ウグイが定位していることを確認した。なお、定位とは魚がその場に留まることである。定位箇所の流速は、約15~20(cm/s)であり、魚の体長の約3~4倍の流速であった。この流速のとき、魚が定位しやすいことが分かった。

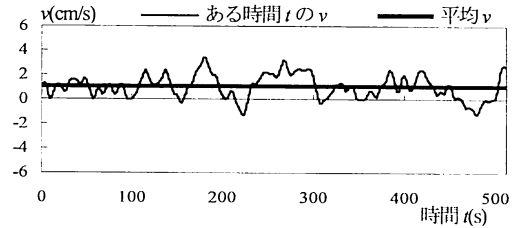
b) 杭水制のマイクロハビタット評価について

杭水制が魚の生息場として、どのような役割を果たすのかを明らかにするため、魚の遊泳可能領域を図-1の観測領域内（ $0.8 \times 2.0(m^2)$ ）のみとし、表-2に示すケースで実験を行った。これは、杭水制のある場が果たして魚にとって良好な生息場、つまり、マイクロハビタットになっているのか否かを検討したものである。言い方を変え、魚が杭水制をどのように利用するのかを検討したものである。ここで、マイクロハビタットとは、河床の石礫や水制・沈床などの石積みの隙間、水生植物や水中の倒木の枝などがつくる複雑な小空間などであり、数十センチから一メートル付近のすみ場の大きさである²⁵⁾。また、流速の違いによる魚の行動も検討するため、流量を変化させた。なお、円柱配列は、整列配列よりも流速低減効果の高い千鳥配列で実験を行った。

杭水制のマイクロハビタット評価方法は、観測領域を図-18に示したように分割し、魚がどの箇所是否存在するかを検討した。図-19に、Run4~9においてのウグイが存在した箇所の割合を示す。ウグイの存在は、1分毎でのウ



a) Run3 ($x=102(cm), y=11(cm)$)



b) Run2 ($x=52(cm), y=11(cm)$)

図-16 円柱群際における流速 v の時間変化

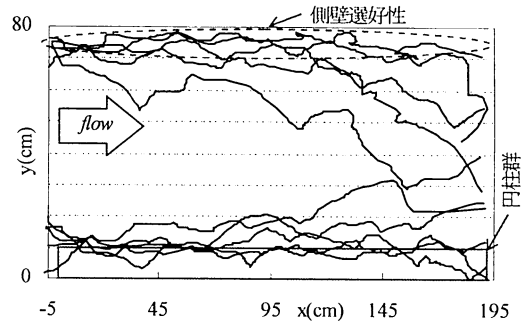


図-17 撮影開始直後におけるウグイの行動軌跡図(Run2)

表-2 実験ケース（魚の遊泳可能領域 $0.8 \times 2.0(m^2)$ ）

	配列	円柱本数 (本)	流量 $Q(l/s)$	横断方向 設置間隔 $s(cm)$	縦断方向 設置間隔 $l(cm)$
Run4	なし	-	4	-	-
Run5	千鳥	122	4	4	4
Run6	なし	-	12	-	-
Run7	千鳥	122	12	4	4
Run8	なし	-	28	-	-
Run9	千鳥	122	28	4	4

グイの個体数(=10)をカウントした。そのため、1回の実験においては計300個体であり、各ケースでは計1800個体となる。なお、Run4, 6, 8では円柱群が設置されていないため、円柱群内は右岸側の側壁部となる。このRun4, 6, 8に比べ、円柱群が設置されているRun5, 7, 9では、円柱群内でのウグイの存在割合が1.3~2.4倍ほど増加している。さらに、その場でのウグイの存在割合が最も高いことが分かる。そこで、円柱群内の流れの乱れ($-\rho \bar{u} \bar{v}$)に着目し、

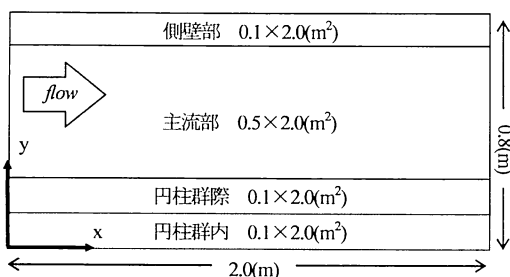


図-18 水路の分割図

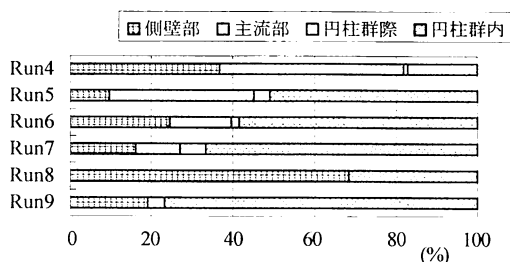


図-19 ウグイが存在した箇所の割合

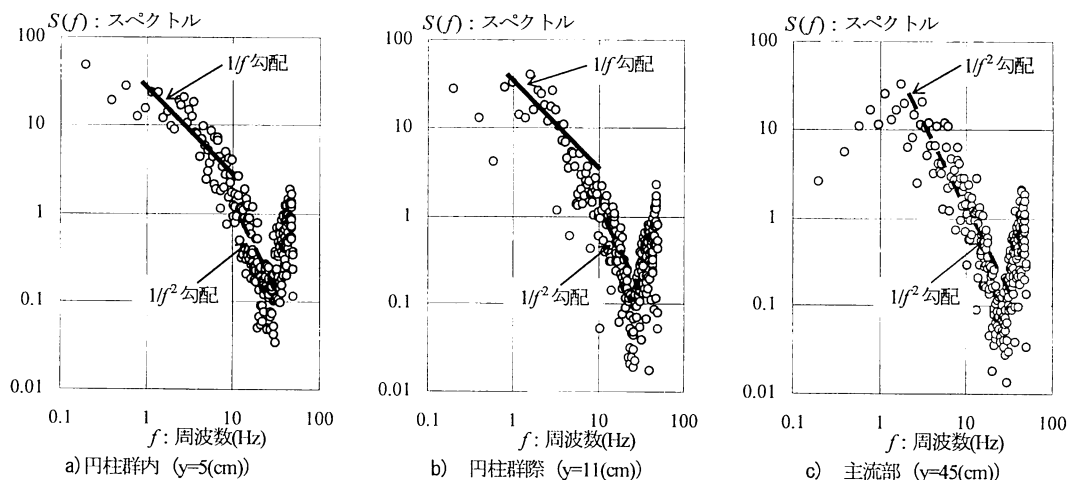


図-20 Run9 (千鳥配列) における円柱群内、円柱群際および主流部の流れの乱れ $(-\overline{\rho u'v'})$ のスペクトル

FFT解析を行った。FFT解析におけるデータ数およびサンプリング周波数は、それぞれ512個、100(Hz)である。

図-20に、Run9における円柱群内、円柱群際および主流部の流れの乱れ $(-\overline{\rho u'v'})$ のスペクトルを示す。ここで、10(Hz)付近でデータの傾きが変化していることが読み取れる。そこで、周波数が10(Hz)以下および10~25(Hz)でのスペクトルに着目し、その範囲における勾配を算出した。算出方法は、累乗近似を使用した。すなわち、近似式は

$$S(f) = f^a \quad (3)$$

である。ここで、 f : 周波数、 $S(f)$: スペクトルである。この両辺を対数にとると

$$\log(S(f)) = a \log(f) \quad (3')$$

となり、 $X = \log(f)$ 、 $Y = \log(S(f))$ とくと(3)'式は

$$Y = aX \quad (3'')$$

であり、以下に示した式より指数 a が求められる。

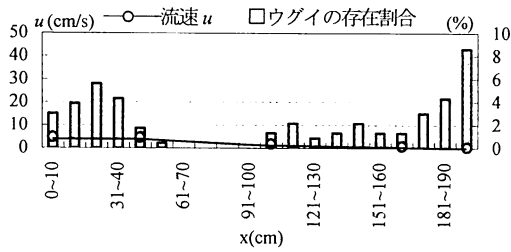
$$a = \frac{n \sum_{i=1}^n X_i \cdot Y_i - \sum_{i=1}^n X_i \sum_{i=1}^n Y_i}{n \sum_{i=1}^n X_i \cdot X_i - \left(\sum_{i=1}^n X_i \right)^2} \quad (4)$$

表-3 各箇所におけるスペクトルの指数 a とそれに対する相関係数 R^2 値

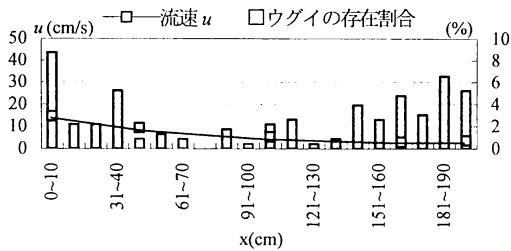
	円柱群内 $y=5(\text{cm})$	円柱群際 $y=11(\text{cm})$	主流部 $y=45(\text{cm})$
10(Hz)以下の指数 a	-1.01	-1.04	-2.07
相関係数 R^2 値	0.620	0.611	0.717
10~25(Hz)の指数 a	-2.22	-2.05	-2.17
相関係数 R^2 値	0.528	0.420	0.790

ここで、 n : 解析データ数である。表-3に、(4)式より算出した指数 a とそれに対する相関係数 R^2 値を示す。各箇所での相関係数 R^2 値は0.4以上であり、 a の値の信頼性は高い。

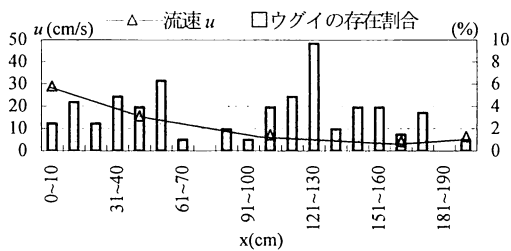
10(Hz)以下では、円柱群内および円柱群際において、スペクトルは $1/f$ 勾配であり²⁶⁾、流れが $1/f$ ゆらぎを持っていることが分かる。一方、主流部においてはスペクトルが $1/f^2$ 勾配である²⁶⁾。円柱群が設置されていない主流部では、その場における流れの時間的な変化が小さいため、 $1/f$ ゆらぎが発生しないものだと考えられる。 $1/f$ ゆらぎは、全ての生体に対して、心地良さや快適な感覚を与えるものとして知られている²⁷⁾。また、スペクトルが $1/f$ 勾配に比べて $1/f^2$ 勾配では、意外性が少なく退屈であるとされている²⁸⁾。ゆえに、魚は側線で $1/f$ ゆらぎを感知し、快適な空間である、円柱群(構造物)を選好すると考えられる。



a) Run5



b) Run7



c) Run9

図-21 Run5, 7, 9における円柱群内の縦断方向の流速変化図 (y=9(cm), z=2(cm)) およびウグイの存在割合

本実験では、円柱群（疑似杭水制群）のある流水中での魚の遊泳特性（走流性を主として）を明確にするために実験を行っている。そのため、相似則という点では問題が残るが、実験では実際の場合、現地河川で生じている流速値を採用している。そして、Run9のように現地の流速を模した流れでは、円柱群内に1/fゆらぎが発生している。つまり、流れの時間的な変化が顕著である場に、1/fゆらぎが発生している。実際に杭水制がある場では、流れの時間的な変化が非常に顕著であると考えられる。ゆえに、現地においても、1/fゆらぎは発生すると容易に考えられる。

次に、円柱群内の流速とウグイの存在割合の関係をしてみると（図-21）、Run5, 7, 9の各ケースにおいて、円柱群内の流速は20(cm/s)以下であり、魚の体長の4倍以下の流速である。この流速の箇所に、ウグイは多く存在した。また、流量が多くなるにつれて、側壁部に存在したウグイの割合が高くなっていることが分かる。そこで、側壁部の流速を見てみると（図-22）、Run5では約5(cm/s)、

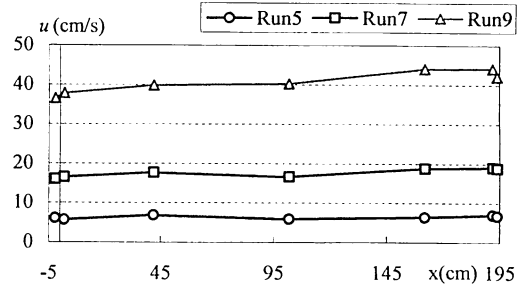
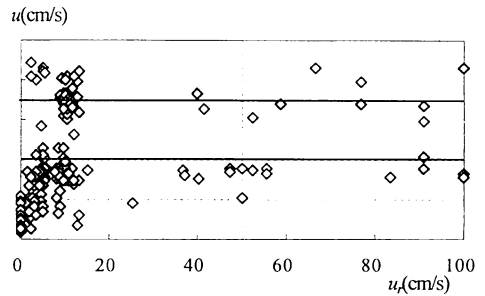
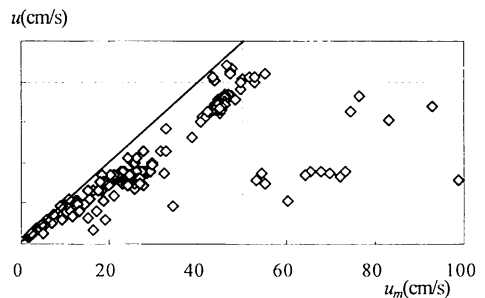


図-22 Run5, 7, 9における縦断方向の流速変化図 (y=75(cm), z=2(cm))



a) 流速 u と見かけの魚の移動速度 u_r



b) 流速 u と魚の遊泳速度 u_m

図-23 流速と魚の移動速度の関係

Run7では約20(cm/s)であり、それぞれ体長の約1倍および約4倍の流速であった。この流速値は、魚が走流性を発揮する速度ではなく、定位しやすい速度である。つまり、魚の遡上には好ましくない流速であった。しかし、Run7はRun5よりも流速が速いことから、魚には走流性が働き、側壁部でのウグイの存在割合が増加した。また、Run9では、側壁部の流速が約35~40(cm/s)であり、魚の体長の約7~8倍の流速であった。この流速値は、魚が走流性を発揮するのに適している。ゆえに、遡上する魚が増加し、側壁部でのウグイの存在割合がさらに増加した。なお、Run5では、全体的な流れが約5(cm/s)であり、静水状態に近いので、魚の遊泳特性（走流性、側壁選好性）が見られなかった。つまり、流速が魚の体長の約1倍の流速では、魚の遊泳特性が見られない。

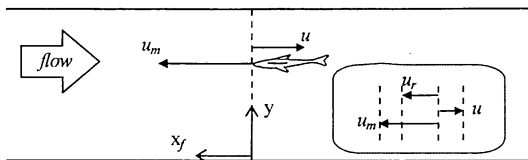


図-24 魚の遊泳速度について

図-23 に流速と魚の移動速度の関係を示す。魚の遊泳速度 u_m (図-24) は以下の式で定義する。

$$u_m = u_r - (-u) = u_r + u \quad (5)$$

ここで、 u_r : 見かけの魚の移動速度(cm/s), u_m : 魚の遊泳速度(cm/s), u : その場の流速(cm/s)である。なお、魚の見かけの移動速度 u_r は、撮影された動画から測定した魚の移動速度であり、移動距離および移動時間から算出したものである。また、図-23 においての座標 x_f は、魚を主体として考えた場合の座標である。そのため、通常の座標 x とは異なり、上流側が正となっている。

見かけの魚の移動速度 u_r は、流速 u に関わらず 94(%) が 15(cm/s)以下であった。魚の遊泳速度 u_m は、72(%)が 20(cm/s)以下、つまり魚の体長の 4 倍の速度で遊泳しており、この速度で遊泳することを好むことが分かった。また、魚が最も高い割合 (88(%)) で存在していた箇所の流速は、20(cm/s)以下、つまり魚の体長の 4 倍以下の流速の箇所であった。ゆえに、魚が最も好む流速は、魚の体長の 4 倍以下の流速であり、今回の実験では 20(cm/s)以下の流速である。

魚にとっての杭水制利用方法は、主に走流性を発揮している魚、つまり、遡上し続ける魚にとっては、休憩場所として利用されると考えられる。また、全体の流れが魚の体長の 4 倍以下の速度のとき、主に採餌場所や外敵からの避難場所、隠れ場として利用される可能性がある。

4. まとめ

本研究で得られた知見を以下に集約し、まとめとする。

1)杭水制の流速低減、水刻の水理機能を確認した。また、千鳥配列と整列配列において、その設置面積および設置間隔が同様であれば、流速低減効果は千鳥配列にすることで増進する。なお、千鳥配列は杭水制の本数が、整列配列よりも少ないため経済的である。

2)魚の遡上は、その場の流速が、魚の体長の約 7-8 倍の流速であると、魚が走流性を発揮するのに好ましい。

3)魚が好んで遊泳する流速は、魚の体長の 4 倍以下である。なお、魚が定位しやすい箇所の流速は、魚の体長の約 3-4 倍の流速である。

4)魚の遊泳特性(走流性、側壁選好性)は、その場の流速が、魚の体長の約 1 倍の流速では見られない。

5)魚は、流れの乱れ($-\rho u'v'$)を側線で感知し、円柱群内へ進入していく。

6)円柱群内は、1/f ゆらぎを持つ快適な空間であるため、魚が円柱群を好む。

7)杭水制は、休憩場所として利用されると考えられる。また、採餌場所や外敵からの避難場所、隠れ場などに利用される可能性がある。

謝辞：本研究は東洋大学校友会奨学金、東洋大学特別研究の助成を受けて行った。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 国土交通省河川局 HP：多自然川づくり基本指針、http://www.mlit.go.jp/river/press_blog/past_press/press/200607_12/061013/s02.pdf
- 向坊 隆：東京大学公開講座 27 魚、東京大学出版会、pp.93-110, 1978
- 秋草 勲、吉川秀夫、坂上義太郎、芦田和男、土屋昭彦：水制に関する研究、土木研究所報告、第 107 号の 6、pp.2-3, 1960
- 福岡捷二、渡辺明英、西村達也：水制工の配置法の研究、土木学会論文集、No.443/II-18, pp.27-36, 1992
- 崇田憲彦、清水康行：水制を含む流れの準 3 次元数値計算モデルの開発、土木学会論文集、No.497/II-28, pp.31-39, 1994
- 道典康治、石垣泰輔、前野詩朗、南條雅志、池松 健：透過型水制の周辺・内部の流れに関する実験と解析、水工学論文集、第 48 巻、pp.799-804, 2004
- 環境省 HP：京都議定書の概要、http://www.env.go.jp/earth/ondanka/mechanism/gaiyo_k.pdf
- 林野庁 HP：地球温暖化防止に向けて 京都議定書とは、<http://www.rinya.maff.go.jp/seisaku/sesakusyoukai/ondanka/a-3.html>
- 林野庁 HP：地球温暖化防止に向けて 京都議定書の目標達成に向けて、<http://www.rinya.maff.go.jp/seisaku/sesakusyoukai/ondanka/a-4.html>
- 富野 章：日本の伝統的河川工法 [I]、新山社サイテック、pp.197-203, 2002
- 高水克哉、栗原朋之、青木宗之、内山文哉、福井吉孝：杭水制内外の流れと魚の挙動、水工学論文集、第 51 巻、pp.1273-1278, 2007
- 山本晃一：護岸・水制の計画・設計——歩先そして歩手前——、山海堂、pp.327-330, 2003
- 下村 充、白川裕之、福井吉孝、関谷 明：迷入防止法の開発 ランダムウォークによる魚の挙動解析とその応用、河川技術論文集、第 8 巻、pp.337-342, 2002
- 中村俊六：魚道のはなし、山海堂、pp.84-90, 1995
- 石川雅明：ウグイの魚群行動特性に関する実験的研究、河川技術論文集、第 6 巻、pp.101-106, 2000

- 16) 有元貴文：魚はなぜ群れて泳ぐか，大修館書店，pp.84-127，2007
- 17) 鈴木興道：魚道の設計に資する淡水魚類の耐久遊泳速度，土木学会論文集，No.622/VII-11，pp.107-115，1999
- 18) 小池 篤：漁具に対する魚群行動の研究手法，恒星社厚生閣，pp. 120-121，1989
- 19) 青木宗之，福井吉孝，小原 誠，染井香栄：階段式魚道の呼び水がつくり出す流れとそれに対する魚の行動，環境システム研究論文集，第 36 巻，pp.457-465，2008
- 20) 和田 清，桑原真吾，稲川啓太，寺町 茂：在来魚類の遊泳能力算定と農業用水路網の避難場所における個体群集，河川技術論文集，第 12 巻，pp.371-376，2006
- 21) 鈴木興道：魚の住みやすい川づくりに資する魚類の生息分布とその場の流速，土木学会論文集，No.593/II-43，pp.21-29，1998
- 22) 環境省 HP：別表 2 生活環境の保全に関する環境基準 1 河川，<http://www.env.go.jp/kijun/wt2-1-1.html>
- 23) 皆川 哲，加藤康一：初めての釣り遊び，山と溪谷社，pp.56-57，2000
- 24) 関谷 明，福井吉孝，下村 充，打田 剛：魚類の迷入とその防止方法，土木学会論文集，No.782/II-70，pp.81-91，2005
- 25) 桜井善雄：川づくりとすみ場の保全，信山社サイテック pp.20-21，2003
- 26) 武者利光編：ゆらぎの科学 6，森北出版，pp.94-95，1996
- 27) アットホーム（株）HP：教授対談シリーズ こだわりアカデミー 数学・物理 F 分の 1 ゆらぎの謎にせまる，http://www.athome-academy.jp/archive/mathematics_physics/00000230_all.html
- 28) 武者利光：ゆらぎの世界 自然界の 1/f ゆらぎの不思議，ブルーバックス，pp.96-97，198

ON THE HYDRAULIC FUNCTION OF PILE DIKE USING THINNED WOOD AND ITS EFFECTIVENESS AS FISH HABITAT

Muneyuki AOKI, Kae SOMEI, Makoto KOHARA, Takashi YOSHINO
and Yoshitaka FUKUI

In this research, an attempt has been made to find the best arrangement of an array of pile dikes that enhances their hydraulic function and effectiveness as a good habitat for fish. A hydraulic model experiment is performed, and it is shown that a zigzag alignment of the pile dikes is advantageous for decreasing the flow velocity. It became clear that to demonstrate the unique behavior against the flow, the flow velocity considered is greater than seven times the length of the fish under consideration. Moreover, the swimming speed of the fish is assumed to be four times its length. It is thought that a pile dike is used by fish as a feeding and resting place and as a safe haven that offers protection from enemies.