

# 散水が及ぼすウナギの集魚効果に関する研究

鬼束 幸樹<sup>1</sup>・秋山 壽一郎<sup>2</sup>・武田 知秀<sup>3</sup>  
泉 孝佑<sup>3</sup>・窄 友哉<sup>4</sup>・内間 志和<sup>4</sup>

<sup>1</sup> 正会員 九州工業大学大学院教授 建設社会工学研究系 (〒804-8550 北九州市戸畑区仙水町 1-1)

E-mail: onitsuka@civil.kyutech.ac.jp

<sup>2</sup> フェロー会員 九州工業大学教授 建設社会工学研究系 (〒804-8550 北九州市戸畑区仙水町 1-1)

<sup>3</sup> 学生会員 九州工業大学大学院 工学府建設社会工学専攻 (〒804-8550 北九州市戸畑区仙水町 1-1)

<sup>4</sup> 学生会員 九州工業大学 工学部建設社会工学科 (〒804-8550 北九州市戸畑区仙水町 1-1)

ウナギ用魚道において、魚道入口付近に散水することでウナギが集魚する可能性が指摘されているが、定性的にも定量的にもほとんど解明されていない。本研究では静止流体において、散水範囲の直径および流量を系統的に変化させ、散水がウナギの集魚効果に及ぼす影響について検討した。その結果、本実験条件内において、散水しない場合と比べて散水時に集魚効果が確認された。また、流量および散水範囲の直径の増加に伴ってウナギの集魚効果が向上した。

**Key Words:** *Anguilla japonica*, fish gathering, water spraying, discharge, range of water spraying

## 1. はじめに

河川にダムや堰などの河川横断構造物が設置されると上下流の水位が不連続となるため、河川を遡上する水生生物の河川縦断方向の移動が困難になる。魚道を利用する魚種の中でもウナギ(*Anguilla japonica*)の個体数は近年激減しており、2014年には19種のウナギのうち、8種が国際自然保護連合の絶滅危惧種や準絶滅危惧種に指定された<sup>1)</sup>。この原因として、乱獲、河川環境の悪化などが推定されている<sup>2)</sup>。Santos *et al.*<sup>3)</sup>はダムや堰等の河川横断構造物によってウナギの遡上が阻害されていると指摘した。環境省は河川や沿岸域等において、水域の連続性を確保することがウナギの生息に重要と指摘した<sup>4)</sup>。そのため、河川横断構造物には魚道が併設されることが望ましい。

魚道内部において幾何学形状、流量や流速などの水理量、各魚種の遡上特性などを把握することは、魚の遡上率を向上させるのに重要である。一方、魚道外部において魚の遡上率に影響を及ぼす因子として、魚道の設置箇所、魚道への誘導および集魚装置などが挙げられる。特に、魚道入口に集魚させることによって、魚道の遡上率の向上が期待できる。しかし、これまで魚道の形状や魚種による遡上特性の違いなど魚道内部に関する研究事例は数多くなされてきたが<sup>5)</sup>、光や呼び水などを用いた集魚効果に関する研究事例は少ない。

寺菌ら<sup>10)</sup>は様々な波長の光を実験水路の上部から照射し、サクラマス(*Oncorhynchus masou masou*)の挙動を観察した結果、いずれの波長においてもサクラマスが光に集まる性質があることを解明した。また、魚道に関する研究ではないが、イワシの集魚にLEDが有効であることが解明されている<sup>11)</sup>。

一方、佐藤ら<sup>12)</sup>は呼び水により魚道入口への集魚効果が向上すると報告した。青木ら<sup>13)</sup>は呼び水が集魚効果を発揮するには、突進速度以上の流速で呼び水を流す必要があると指摘した。このように、光や呼び水はウナギのような底生魚に対しては必ずしも効果が明確でないものの、遊泳魚に対しては集魚効果があることがある程度判明している。

欧米では数十年前よりウナギ用魚道の研究が始められた。魚道内部にブラシや凹凸等を配置したウナギ用魚道が考案され、その実証も開始されている<sup>14)15)</sup>。これらのウナギ用魚道の一部には、ウナギを集めるために魚道入口付近に水を注いだり、散水することが試みられている<sup>14)15)</sup>。Piper *et al.*<sup>17)</sup>は魚道入口において、水中に注水するよりも水面に散水する方がヨーロッパウナギの集魚効果が高いことを現地観測によって指摘した。また、著者らは養鰻業者から水面への散水によってウナギが集魚するとの指摘を得た(北本, 私信)。このように、魚道入口に散水することでウナギが集魚する可能性が指摘されているものの、適切な散水流量や範囲などを定量的に解明し

た研究事例は無いと思われる。散水によるウナギの集魚効果を解明することにより、ウナギ用魚道の遡上率が向上することが期待される。

本研究では、魚道入口の集魚効果を解明するために、止水条件下における散水範囲、散水流量を系統的に変化させることにより、散水がウナギの集魚効果に及ぼす影響を検討した。

## 2. 実験装置および実験条件

図-1 に実験に用いた長さ  $L=1.0\text{m}$ 、幅  $B=1.0\text{m}$ 、高さ  $H=0.45\text{m}$  のグレーに塗装された木製正方形プールの概略を示す。ただし、 $x=0\text{m}$  の  $y-z$  断面の壁面はアクリル板を用いた。プール隅角部の1つを原点とし、長さ方向に  $x$  軸、鉛直上向きに  $y$  軸、幅方向に  $z$  軸をとる。散水装置(Water spraying device)をプール水面から高さ  $H_s=0.40\text{m}$  の位置に固定した。散水装置から離れた位置の、 $x=1.0\text{m}$ 、 $0.30\text{m} \leq y \leq 0.45\text{m}$ 、 $0\text{m} \leq z \leq 0.1\text{m}$  の側壁部分をくり抜き排水部分を設け、プール内の水深を  $h=0.30\text{m}$  の一定値とした。

表-1 に実験条件を示す。散水範囲(Water spraying area)の直径  $D_s$  を 0.10、0.30 および 0.50m の3通りに変化させると共に、散水流量  $Q$  を 80、160 および 240ml/s の3通りに変化させた。図-2 に示すように散水範囲の中心位置を  $(x, z)=(0.25\text{m}, 0.25\text{m})$  に固定し、ケース別の実験を各5回ずつ行った。なお、散水効果を確認するために同プールで散水しない場合(Non)の実験も行い、Non から順番に実験を行った。このとき、ケース別に別個体のウナギを用いた。また、0.5m 四方の集魚判定域(Fish gathering area)を図-2 に緑四角枠で示した隅角部に設定する。全ケースで水温は  $20^\circ\text{C}$  に保持した。

図-3 に本実験で用いた平均体長  $\bar{L}_L=300\text{mm}$  のウナギ幼魚を示す。なお、使用したウナギはすべて国内で捕獲されており、飼育履歴は約8ヶ月で給餌時に散水は行っていない。ウナギ幼魚はライフサイクル中で河川を活発に遡上する特性を有している<sup>19)20)</sup>。直径 0.30m の円形金網の中心位置が  $(x, z)=(0.85\text{m}, 0.85\text{m})$  となるように設置し、その中にウナギ( $N=15$ )尾を挿入する。10 分間放置しウナギが馴致したのを確認後、円形金網を静かに取り上げる。プール上部および側壁に設置した画素数  $1440 \times 1080$ 、撮影速度 30fps のビデオカメラを用いてウナギの挙動を 180s 間撮影する。撮影後、1s ごとに分割した画像をもとにウナギの遊泳位置を解析した。

## 3. 実験結果および考察

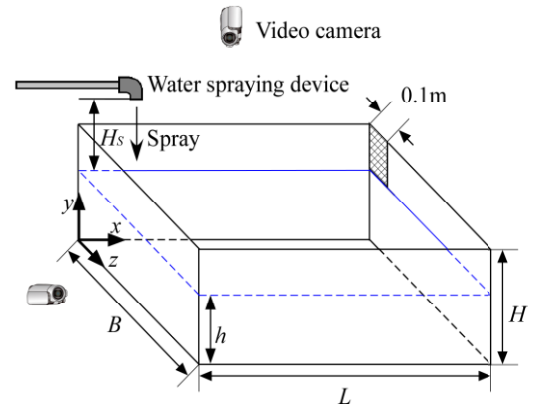


図-1 実験装置の概略

表-1 実験条件

Discharge $Q$ (ml/s)	Range of water spraying $D_s$ (m)		
	0.10	0.30	0.50
0	Non water spraying		
80	Ds10-80	Ds30-80	Ds50-80
160	Ds10-160	Ds30-160	Ds50-160
240	Ds10-240	Ds30-240	Ds50-240

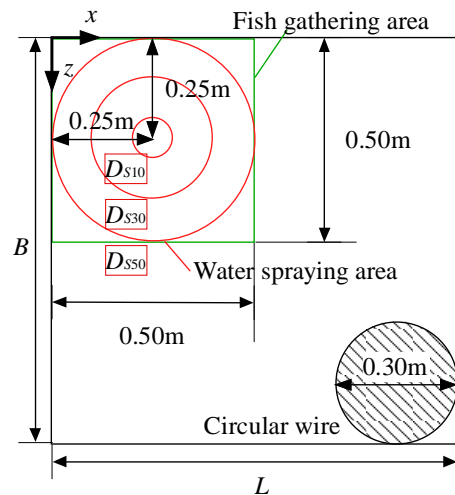


図-2 散水位置と散水範囲(平面図)



図-3 実験に用いたウナギ

### (1) ウナギの存在率コンター

$x$  軸方向および  $z$  軸方向にそれぞれ 0.1m 間隔でメッシュを区切り、各メッシュ内で 1s ごとに存在尾数  $n_m$  をカウントした。時間平均存在尾数  $\bar{n}_m$  を全尾数  $N$  で除した値  $\bar{n}_m/N$  を算出し、図-4(a)に散水しない場合(Non)の、図-4(b)~(j)に散水時のウナギの存在率  $\bar{n}_m/N$  のコンターを示す。散水しない場合(Non)の図-4(a)では、初期位置およびその周辺の壁面付近( $0.80\text{m} \leq x \leq 1\text{m}$ ,  $0.6\text{m} \leq z \leq 1\text{m}$ )の存在率  $\bar{n}_m/N$  が他領域と比べ高くなっている。これは、初期位置および初期位置付近の壁面で止まっているウナギが多いことが原因である。

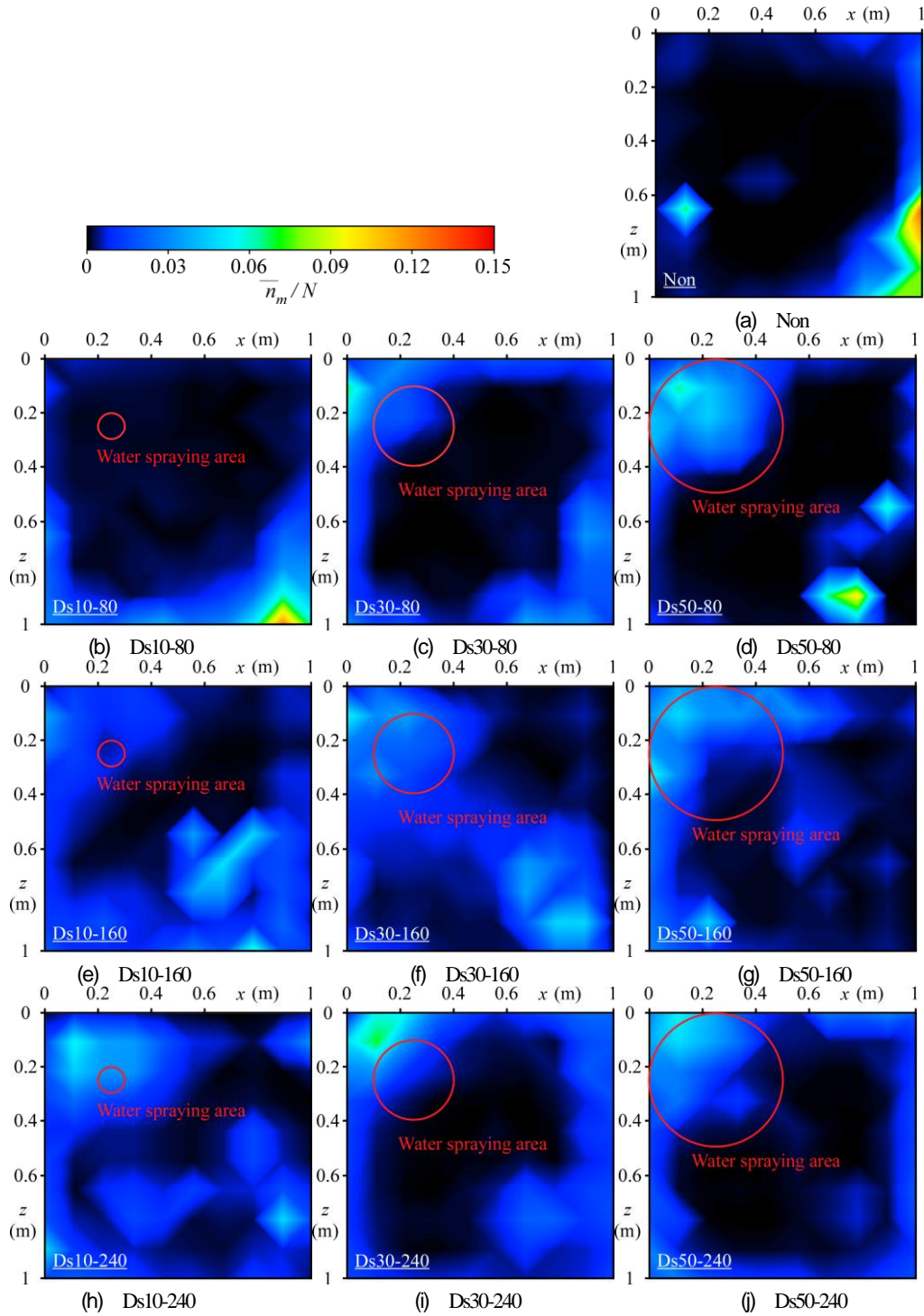


図-4 ウナギの存在率コンター

散水時の図-4(b)～(j)において、各散水直径  $D_s$  と存在率コンターを比較すると、散水流量  $Q=80\text{ml/s}$  の図-4(b)～(d)では散水直径  $D_s$  の増加に伴い、集魚判定域外と比較して集魚判定域内のウナギの存在率  $\overline{n_m}/N$  が高くなることが認められる。散水流量  $Q=160\text{ml/s}$  の図-4(e)～(g)でも、散水流量  $Q=80\text{ml/s}$  の場合とほぼ同様の特徴が観察される。一方、散水流量  $Q=240\text{ml/s}$  の図-4(h)～(j)では、全ての散水直径  $D_s$  において高い存在率  $\overline{n_m}/N$  が確認できる。そのため、本実験条件内において、散水流量  $Q=80, 160\text{ml/s}$  では散水直径  $D_s$  の増加に伴って集魚効

果が高まる傾向があり、散水流量  $Q$  が最も大きな  $Q=240\text{ml/s}$  では、いずれの散水直径  $D_s$  においても集魚効果が高いことが判明した。一方、散水流量  $Q$  の増加による存在率  $\overline{n_m}/N$  の変化に着目すると、集魚判定域内のウナギの存在率  $\overline{n_m}/N$  が高くなることが確認される。

以上のことから、散水流量  $Q$  および散水直径  $D_s$  が増加すると集魚効果が高くなり、一定の散水流量  $Q$  以上では散水直径  $D_s$  よりも散水流量  $Q$  の方が集魚効果に与える影響が大きいことが示唆された。

## (2) ウナギの1尾の遊泳軌跡

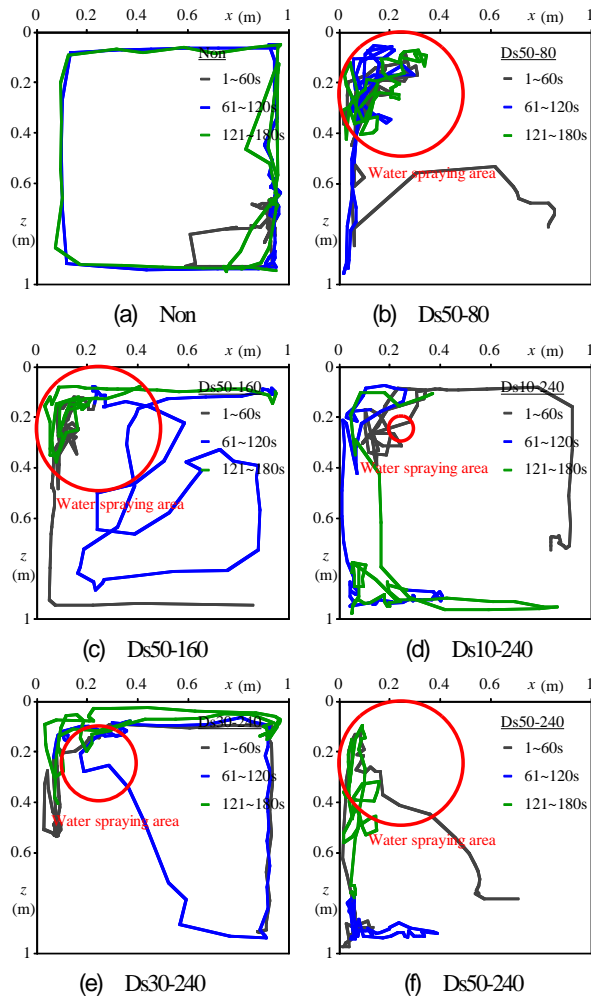


図-5 ウナギの1尾の遊泳軌跡

図-5(a)に散水しない場合(Non)の、図-5(b)～(f)に散水時の1sごとに遊泳位置をプロットしたウナギ1尾の遊泳軌跡を示す。プロットしたウナギは任意に抽出した。実験時間180sを60sごとに分割し、図中の灰色、青色、緑色の線はそれぞれ1～60s, 61～120s, 121～180sを示している。散水しない場合(Non)の図-5(a)において、1～60sではウナギは初期位置周辺に留まっており、時間が経過すると、ウナギは壁面付近を遊泳ようになる。散水時の図-5(b)～(f)では、いずれのケースにおいても、ウナギは集魚判定域に数回侵入しており、集魚判定域外では主として壁際を遊泳している。

したがって、散水時は散水しない場合(Non)と比較し、ウナギは集魚判定域の出入りを繰り返すことが判明した。

### (3) 集魚判定域外におけるウナギの魚向

図-6に示すように集魚判定域外におけるウナギ頭部(Head)と散水範囲の中心点を結んだ直線 $L_c$ と、ウナギ頭部と体長の中心(Center of body)を結んだ直線 $L_b$ とのなす角を魚向 $\theta$ とした。 $\theta$ の正值は時計回、範囲を $-180^\circ \leq \theta \leq 180^\circ$ とした。魚向の絶対値 $|\theta|$ を $20^\circ$ ずつ分割し、各範囲内の時間平均尾数を $\overline{n_\theta}$ を全尾数 $N$ で除した値

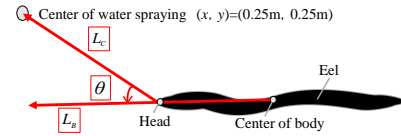


図-6 ウナギの魚向の定義

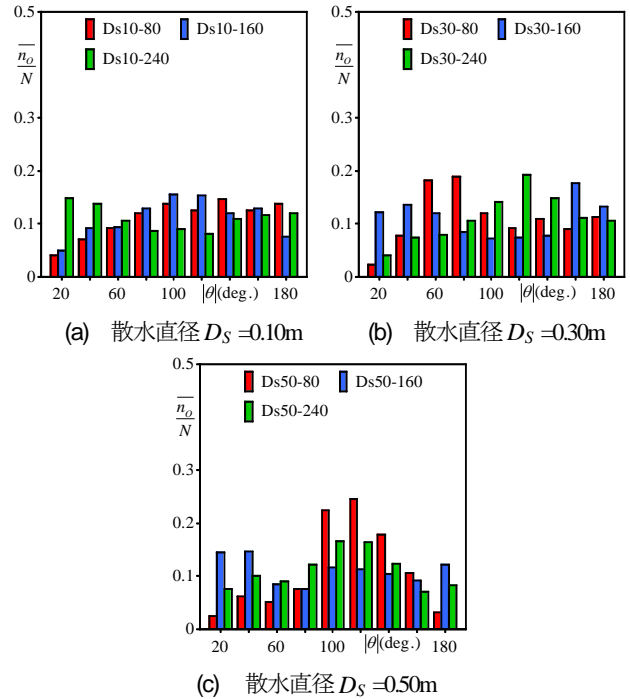


図-7 集魚判定域外におけるウナギの魚向

$\overline{n_\theta}/N$ を求めた。図-7(a)～(c)に、魚向 $|\theta|$ の頻度 $\overline{n_\theta}/N$ を散水直径 $D_s$ 別に示す。同一の散水直径 $D_s$ の場合では、いずれの散水流量 $Q$ において、魚向 $|\theta|$ の頻度分布に明確な傾向は見られない。同一の散水流量 $Q$ の場合でも、いずれの散水直径 $D_s$ において、魚向 $|\theta|$ の頻度分布に明確な傾向は見られない。また、繰り返しのない二元配置分散分析を用いると、流量と散水範囲の有意確率P値はそれぞれ0.698, 0.489となり、有意水準5%で有意ではないことが確認された。

以上より、散水流量 $Q$ および散水直径 $D_s$ が変化しても魚向への影響は確認されなかった。

### (4) ウナギ頭部と散水範囲の中心との距離

散水範囲の中心 $(x, z) = (0.25\text{m}, 0.25\text{m})$ からの距離 $d$ を0.10mごとに分割し、各範囲内を遊泳する尾数の時間平均数 $\overline{n_d}$ を全尾数 $N$ で除した値 $\overline{n_d}/N$ を求めた。図-8(a)～(c)に、散水直径 $D_s$ 別の距離 $d$ における頻度 $\overline{n_d}/N$ を示す。散水しない場合(Non)も散水時と同位置に散水範囲の中心を設定し、距離 $d$ を算出した。散水しない場合(Non)では、 $0.7\text{m} \leq d \leq 0.12\text{m}$ の範囲に距離 $d$ の頻度 $\overline{n_d}/N$ が集中している。これは散水しない場合、ウナギと散水範囲の中心との距離が離れていることを示している。散水時、同一の散水直径 $D_s$ の場合では、散水しない場合(Non)と比較して、Ds10-80に例外が見られるもの



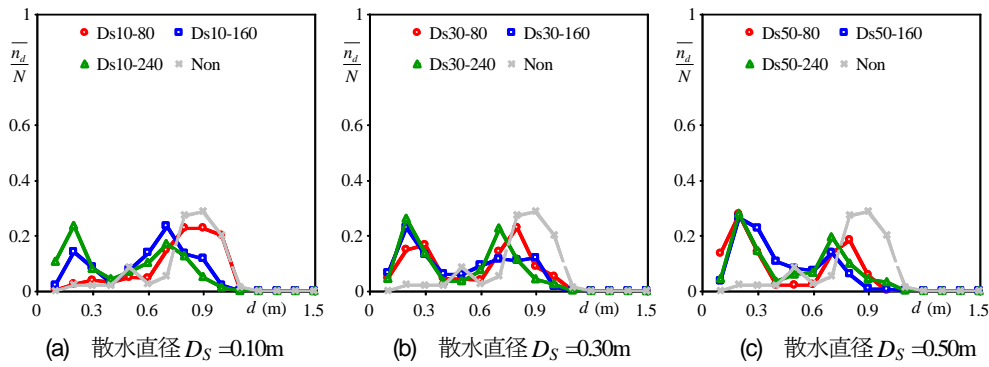


図-8 散水範囲の中心とウナギ頭部との距離

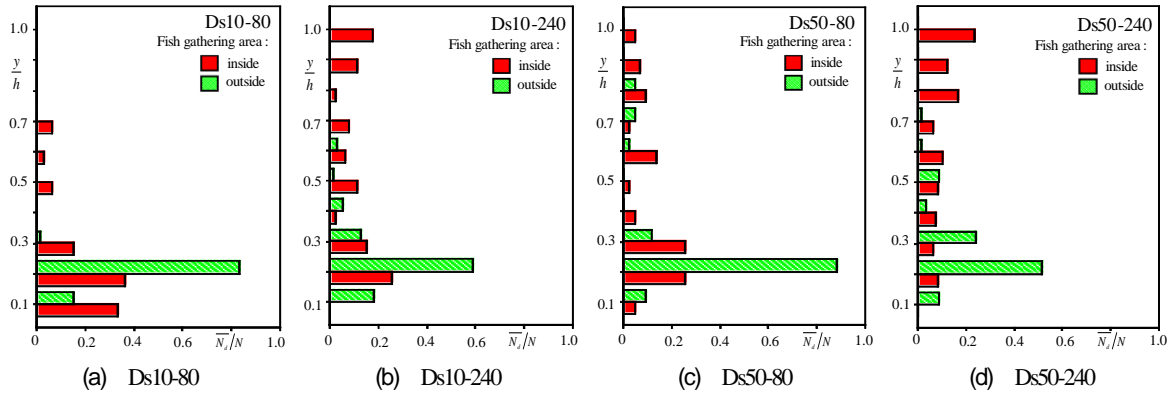


図-9 ウナギと底面との距離の頻度分布(鉛直断面)

の、いずれの散水流量 $Q$ においても、 $0\text{m} \leq d \leq 0.3\text{m}$ の範囲に距離 $d$ の頻度 $\overline{n_d}/N$ が集中している。一方、散水時、同一の散水流量 $Q$ の場合は、散水しない場合(Non)と比較して、いずれの散水直径 $D_s$ においても、同一の散水直径 $D_s$ と同様の範囲に距離 $d$ の頻度 $\overline{n_d}/N$ が集中している。

以上のことは、散水しない場合(Non)と比べ、散水時は散水範囲の中心とウナギとの距離 $d$ が減少していることを意味し、散水によりウナギが散水範囲の付近に集まっていると考えられる。

#### (5) ウナギと底面との距離の頻度分布

集魚判定域(inside)、集魚判定域外(outside)の2領域において、底面から $y$ 軸方向に $0.03\text{m}$ ごとに分割し、各範囲内を遊泳する尾数の時間平均数 $\overline{N_d}$ を全尾数 $N$ で除した値 $\overline{N_d}/N$ を求めた。図-9(a)～(d)に遊泳距離 $y$ を水深 $h$ ( $=0.30\text{m}$ )で除した値 $y/h$ における遊泳頻度 $\overline{N_d}/N$ をDs10-80、Ds10-240、Ds50-80およびDs50-240の4ケースについて示す

同一の散水直径 $D_s=0.10\text{m}$ で、散水流量 $Q$ の異なる図-9(a)、(b)と比較する。集魚判定域外(outside)では、両者の散水流量において $0.1 \leq y/h \leq 0.3$ の範囲に $y/h$ の遊泳頻度 $\overline{N_d}/N$ が集中している。これは、集魚判定域外(outside)ではウナギが底面付近に主として遊泳していることを意味する。一方、集魚判定域内(inside)では、散水流量 $Q$ の増加に伴って $0.7 \leq y/h \leq 1.0$ の範囲において $y/h$ の遊泳頻

度 $\overline{N_d}/N$ が高くなる。同一の散水直径 $D_s=0.50\text{m}$ で、散水流量 $Q$ の異なる図-9(c)、(d)を比較する。集魚判定域外(outside)では両者の散水流量 $Q$ において $0.1 \leq y/h \leq 0.3$ の範囲に $y/h$ の遊泳頻度 $\overline{N_d}/N$ が集中しており、集魚判定域内(inside)では、散水流量 $Q$ の増加に伴い $0.7 \leq y/h \leq 1.0$ の範囲において $y/h$ の遊泳頻度 $\overline{N_d}/N$ が高くなる。これは $y/h$ の遊泳頻度 $\overline{N_d}/N$ の傾向が図-9(a)、(b)の比較と類似していることを示す。これより、散水流量 $Q$ の増加により集魚判定域内(inside)の水面付近に存在するウナギの尾数が増加することが判明した。

同一の散水流量 $Q=80\text{ml/s}$ で、散水直径 $D_s$ の異なる図-9(a)、(c)を比較する。集魚判定域外(outside)では、顕著な差異は見られない。一方、集魚判定域内(inside)では、散水直径 $D_s$ の増加に伴って $y/h$ が高値へ分散している。同一の散水流量 $Q=240\text{ml/s}$ で、散水直径 $D_s$ の異なる図-9(b)、(d)を比較する。集魚判定域外(outside)では顕著な差異は見られず、集魚判定域内(inside)では直径 $D_s$ の増加に伴って $y/h$ が高値へ分散している。これは $y/h$ の遊泳頻度 $\overline{N_d}/N$ の傾向が図-9(a)、(c)の比較と類似していることを示す。これより、散水直径 $D_s$ の増加により集魚判定域内(inside)の水面付近に存在するウナギの尾数が増加することが判明した。

以上より、集魚判定域内(inside)では集魚判定域外(outside)と比較して、散水による効果で水面付近に存在するウナギの尾数が増加することが判明した。また、散水流量 $Q$ および散水範囲の直径 $D_s$ が増加すると集魚効

果が高まることが確認された。

#### 4. おわりに

本研究では、静止流体に対する散水範囲、散水流量を系統的に変化させ、散水がウナギ(平均体長 $\overline{B_L}=300\text{mm}$ )に及ぼす集魚効果について検討した。その結果、以下の知見が得られた。

- (1) 散水しない場合と比較すると、散水時は散水による集魚効果が高まることが確認された。
- (2) 散水範囲の直径 $D_s$ および散水流量 $Q$ の増加に伴って散水範囲付近の集魚効果が向上する。また、一定の散水流量 $Q$ 以上では直径 $D_s$ よりも散水流量 $Q$ の方が集魚効果に与える影響が大きいことが判明した。
- (3) 散水していない箇所と比較して、散水範囲周辺では水面付近に存在するウナギの尾数が増加した。

本研究では、散水範囲および流量の増加に伴って集魚効果が高まることが確認された。したがって、ウナギ用魚道や多自然型魚道等の入口付近に散水することにより、更なるウナギの遡上率の向上が期待される。今後は実河川における遡上実験を行い、研究を発展させる必要がある。

**謝辞：**本研究を実施するに当たり、科学研究費補助金基盤研究(C)17K06580（代表：鬼束幸樹）の援助を受けた。また、本研究で用いた実験魚を無償提供していただいた株式会社丸翔（代表：北本光喜）に謝意を表す。

#### 参考文献

- 1) 塚本勝巳：水産研究における対象生物種と保全意識，日本水産学会誌，Vol.81, No.5, pp.787, 2015.
- 2) Miller, M.J., Kimura, S., Friedland, K.D., Knights, B., Kim, H., Jellyman, D.J. and Tsukamoto, K.: Review of ocean-atmospheric factors in the atlantic and pacific oceans influencing spawning and recruitment of anguillid eels, *American Fisheries Society Symposium*, Vol.69, pp.231-249, 2009.
- 3) Santos, J.M., Rivaes, R., Oliveira, J. and Ferreira, T.: Improving yellow

- eel upstream movements with fish lifts, *Journal of Ecohydraulics*, Vol.1, pp.50-61, 2016.
- 4) 環境省：平成 26 年度ニホンウナギ保全方策検討委託業務，2015.
  - 5) 環境省：平成 27 年度ニホンウナギ保全方策検討委託業務，2016.
  - 6) 安田陽一，大津岩夫，浜野龍夫，三矢奉彦：多様な水生生物の遡上・降河可能な魚道の提案，河川技術論文集，Vol.7, pp.221-226, 2001.
  - 7) 佐藤隆平，菅原政一，大塚勝章，青山裕後：北上大堰付設バーチカルスロット式魚道におけるアユ及びサケの遡上調査，水産工学，Vol.29, No.2, pp.119-122, 1992.
  - 8) 鬼束幸樹，秋山壽一郎，森悠輔，小林達也，飯國洋平：階段式魚道におけるプール間落差と遡上率の関係，応用力学論文集，Vol.11, pp.677-688, 2008.
  - 9) 青木宗之，向井健朗，菊池裕太，松木越：階段式魚道のプール内における礫の堆積が魚類の行動に及ぼす影響について，土木学会論文集，Vol.71, No.4, pp.1099-1104, 2015.
  - 10) 寺菌勝二，越澤治，古屋稔：ダム貯水池におけるサクラマスの光誘導，ダム技術，No.129, pp.10-17, 1997.
  - 11) 梶川和武，西翔太郎，中村武史，毛利雅彦，川崎潤二，濱野明，渡邊俊輝，吉村和正：いわし棒受網漁業における水中集魚灯に蟬集する魚群の好適照度域の推定，日本水産学会誌，doi.org/10.2331/suisan.15-00067, 2016.
  - 12) 佐藤研三，水野雅光，竹内秀二，大石三之，池村彰人：宮中取水ダム魚道の遡上環境改善について，リバーフロント研究所報告，第 15 号，pp.48-55, 2004.
  - 13) 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，Vol.36, pp.457-465, 2008.
  - 14) Clay, C.H.: *Design of fishways and other fish facilities*, CRC Press, pp.121-127, 1994.
  - 15) Solomon, D.J. and Beach, M.H.: Fish pass design for eel and elver (*Anguilla anguilla*), *R&D Technical Report W2-070/TR1*, Environment Agency, pp.1-5, 2004.
  - 16) Legault, A.: Étude de quelques facteurs de sélectivité de passes à anguilles, *Bull. Fr. Pêche Piscic.*, Vol.325, pp.83-91, 1992.
  - 17) Piper, A.T., Wright, R.M. and Kemp, P.S.: The influence of attractin flow on upstream passage on European eel (*Anguilla anguilla*) at intertidal barriers, *Ecological Engineering*, Vol.44, pp.329-336, 2012.
  - 18) 塚本勝巳：ウナギ大回遊の謎，pp.16-46, 2012.
  - 19) 立川賢一，松宮義晴：ウナギ資源の管理と保全—ウナギ資源研究事始め—，月刊海洋号外，No.18, pp.148-155, 1999.

(2017.9.29 受付)

### INVESTIGATION ON FISH GATHERING EFFECTS OF JAPANESE EELS (*Anguilla sp.*) BY WATER SPRAYING

Kouki ONITSUKA, Juichiro AKIYAMA, Tomohide TAKEDA,  
Kousuke IZUMI, Tomoya SAKO, Shiyori UCHIMA

When fish gathering device is set in the entrance of fishway, this may affect the migration rate. It is assumed that eels (*Anguilla japonica*) gather by water spraying. However, little is known about effects of fish gathering by water spraying. This study was made to analysis effect of gathering eels under the condition that range of water spraying and discharge spraying are changed. It was found that water spraying has an effect on gathering fish as compared with non-spraying in this experiments. Besides, effects of gathering eels is increasing with increasing range of water spraying and discharge.