

ウナギ用魚道内の突起物の直径と単位幅流量が ウナギの遡上特性に及ぼす影響

鬼東 幸樹¹・秋山 壽一郎²・武田 知秀³
泉 孝佑³・内間 志和⁴・窄 友哉⁴

¹ 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

² 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)

³ 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)

⁴ 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)

近年、ウナギの産卵場が解明され、ウナギの生態に関する研究は進んでいるが、河川におけるウナギの遡上特性についてはほとんど解明されていない。特に、遊泳力の弱いウナギの仔魚や稚魚を対象としたウナギ用魚道の検討が必要とされている。本研究では、ウナギ用魚道内の突起物の直径と単位幅流量を系統的に変化させて、ウナギ未成魚の遡上特性に及ぼす影響について検討した。その結果、いずれの突起物の直径においても単位幅流量の増加に伴って、遡上率が増加傾向を示すことが判明した。また、単位幅流量および突起物の直径の増加に伴い、ウナギの蛇行度は増加し、ウナギの平均遡上速度が減少することが明らかになった。

Key Words: *Anguilla japonica*, fish ladder for eels, diameter, discharge per unit width, migration rate

1. はじめに

ウナギ *Anguilla japonica* は日本人にとって身近で食文化上必要不可欠な魚である。しかし、近年では河川におけるウナギの個体数は激減し、絶滅危惧種に指定された¹⁾。現在、ウナギの研究はウナギの生態を中心に進められている。Tsukamoto *et al.*²⁾はウナギの産卵場がマリアナ諸島西方海域で、東アジアのほぼ全域が育成場であることを解明した。Yokouchi *et al.*³⁾は水系によってウナギの形態が異なり、水域の規模が大きくなるとニホンウナギの性比は雌に偏り、雌雄とも大型となる傾向があることを発見した。また、個体数が激減している原因として、乱獲、河川環境の悪化などが推定されている⁴⁾。以上のようにウナギの生態や環境に関する研究は進んでいるが、河川におけるウナギの遡上特性についてはほとんど解明されていない。ダムや堰における魚の遡上問題の解決手段として、これまで魚道の併設が行われてきた。現在までに階段式やバーチカルスロット式、アイスハーバー式などの魚道が提案・実用化されている⁵⁾。上記の魚道がアユ *Plecoglossus altivelis altivelis* などの遊泳魚の遡上に適しているか否かについて検討した例は多く存在し、ある程度の成果が得られている⁶⁾。しかし、ウナギなどの底生魚、特に遊泳力の弱いウナギの仔魚や稚魚にとって遡上

しやすいか否かは不明であり、仔魚や稚魚を対象としたウナギ用魚道の検討が必要とされている¹⁰⁾。表-1にウナギを対象とした魚道の既往の研究を示した。

数十年前に欧米でヨーロッパウナギ *Anguilla anguilla* やアメリカウナギ *Anguilla rostrata* を対象としたウナギ用魚道の研究が始められた。これらのウナギ用魚道の斜面上にはブラシや円柱突起物を設置したものが多い。ブラシを設置した魚道において、Knights & White¹¹⁾は厚さ 1mm、長さ 40~70mm のナイロン製ブラシを直径 5mm に束ねて 150mm よりも狭い間隔で配置すると、仔魚ウナギの遡上が容易になると指摘した。Porcher¹²⁾はヨーロッパウナギに関し、傾斜面に設置するブラシの間隔はシラスウナギには 7mm、小型のウナギや黄ウナギには 14mm が適していると指摘した。円柱突起物を設置した魚道において、Solomon & Beach¹³⁾は、北米における直径 50.8mm、高さ 101.6mm の円柱を斜面に設置する事例、フランスにおける高さ 30mm の円柱を 14mm の間隔を設けて斜面に設置する事例などを紹介しているが、これらの規格が適確かどうかは不明である。Vowles *et al.*¹⁴⁾は水路中心軸の右岸側および左岸側に直径 4.5cm および 8.5cm の円柱をそれぞれ配置し、ヨーロッパウナギの遡上実験を行った結果、直径が 4.5cm の方が遡上率が高いことを示した。ただし、1 ケースの流量で、上記以外の円柱直径の検討

表-1 既往の研究

著者	種	成長段階	体長(cm)
後藤靖裕, 望岡典隆 ¹⁰⁾	<i>Anguilla japonica</i>	稚魚	6.5
Knights and White ¹¹⁾	<i>Anguilla anguilla</i>	Juvenile	15
Porcher, J.P ¹²⁾	<i>Anguilla anguilla</i>	Elvers Small eels and yellow eels	10-40
Vowles <i>et al.</i> ¹⁴⁾	<i>Anguilla anguilla</i>	Glass eel	7.0

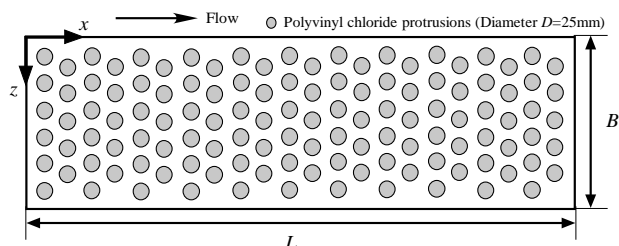


図-2 突起物(D=25mm)の配置図

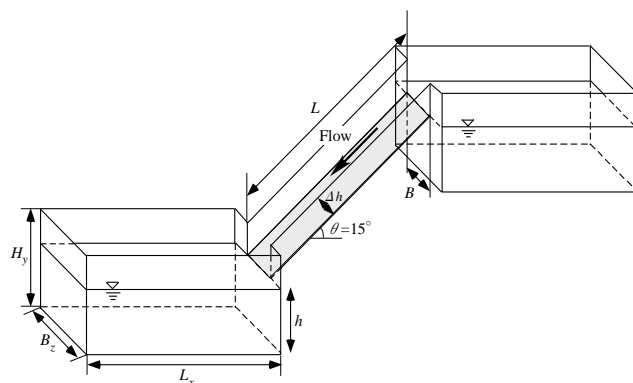


図-1 実験に用いたウナギ用魚道の概要

は行っていない。以上のように、欧米ではウナギ用魚道に対する幾つかの事例が紹介されているものの、魚道内の斜面に設置する円柱突起物の適切な規格を検討した例はおそらく存在しない。ましてや、日本ではウナギ用魚道の設置例、研究事例ともに極めて少ない。

本研究では、ウナギ用魚道内に設置した突起物の直径と水深を系統的に変化させ、ウナギの幼魚であるウナギ未成魚の遡上特性に及ぼす影響について検討したものである。

2. 実験装置および実験条件

図-1に実験装置の概略を示す。長さ $L_x=0.6\text{m}$ 、幅 $B_x=0.4\text{m}$ 、高さ $H_y=0.3\text{m}$ の2つの水槽が、魚道幅 $B=0.3\text{m}$ 、魚道長 $L=1.0\text{m}$ 、側壁高さ $\Delta h=0.15\text{m}$ のグレーに塗装した傾斜角 $\theta=15^\circ$ の木製魚道によって連結されている。魚道幅は、ヨーロッパウナギ用に採用されている値、0.2~0.3mを参照して決定した¹²⁾。また、ヨーロッパウナギ用魚道の傾斜角は $12^\circ\sim 55^\circ$ の範囲であるため、本実験ではその範囲内の比較的緩やかな傾斜角 15° を採用した¹²⁾。

図-2に示すように、魚道底面に高さ 100mm、直径 $D=15, 25, 40$ および 50mm のポリ塩化ビニル製円柱突起物を間隔 10mm で千鳥状に配置した。魚道の上流端の左岸を原点とし、流下方向に x 軸、横断方向に z 軸をとった。表-2に実験条件を示す。円柱突起物の直径を上記の4通り変化させると共に、魚道内の流量を魚道幅 B で除した単位幅流量 q_L を 12, 71, $164\text{cm}^2/\text{s}$ と変化さ

表-2 実験条件

Water depth in fish ladder h_L (mm)	Discharge per unit width q_L (cm^2/s)	Diameter of protrusions D (mm)			
		15	25	40	50
2	12	D15-2	D25-2	D40-2	D50-2
6	71	D15-6	D25-6	D40-6	D50-6
10	164	D15-10	D25-10	D40-10	D50-10



図-3 実験に用いたウナギ未成魚

せた。なお、魚道内の水深はウナギが完全に水に浸からない値とする必要があるため¹⁵⁾、今回の魚道内の水深 h_L を約 2, 6 および 10mm と設定し、単位幅流量がそれぞれ定められた。上流側水槽から水を供給し、下流側水槽から排水量を調整することで下流側水槽の水深 h は約 0.25m に保持した。また、水温は 20°C であった。

図-3に本実験で用いた平均体長 $\bar{L}_e=150\text{mm}$ のウナギ未成魚を示す。また、本実験で用いたウナギ未成魚はすべて国内で捕獲され、飼育履歴は約 8ヶ月である。ウナギ未成魚はウナギの成長段階の中で河川への遡上が最も活発とされている¹⁶⁾。下流側水槽にウナギ未成魚 ($N=20$ 尾) を遊泳させ、30分間の遡上実験を各ケース 1回ずつ行った。魚道上部に画素数 1440×1080 、撮影速度 30fps のビデオカメラを設置し、ウナギ未成魚の挙動を撮影した。撮影後、5sごとに分割した画像をもとにウナギの遊泳位置を解析すると共に、上流側水槽まで到達したウナギの遡上数をカウントした。

3. 実験結果および考察

(1) 突起物直径および単位幅流量と遡上率との関係
遡上率を式(1)のように定義する。

$$\text{遡上率} = \frac{\text{遡上に成功した尾数 } n}{\text{実験に用いた尾数 } (N=20)} \quad (1)$$

図-4に単位幅流量 q_L と遡上率 n/N との関係を突起物直径 D 別に示す。各単位幅流量 q_L において、突起物直径 D の増加に伴い遡上率 n/N が減少する場合と増加す

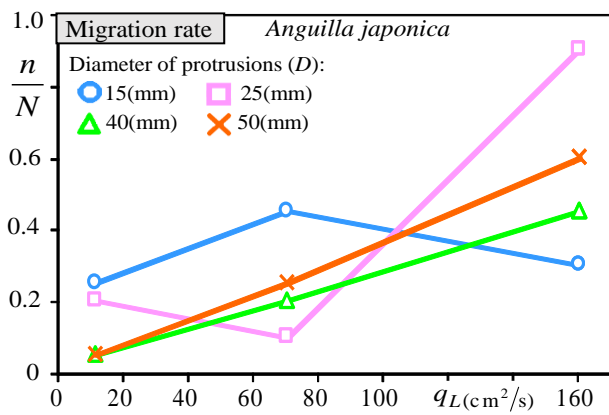


図-4 単位幅流量別のウナギの遡上率

る場合とがあり、突起物直径 D と遡上率 n/N との関係に明確な傾向は確認されない。一方、例外があるものの、突起物直径 D の変化に関わらず、単位幅流量 q_L の増加に伴い遡上率 n/N が増加傾向を示している。したがって、突起物直径 D よりも魚道内の単位幅流量 q_L の方が遡上率に影響を与えることが示唆される。

(2) 遡上挑戦率と到達高さ

下流側水槽から魚道に進入したウナギの尾数を挑戦数 N_c とした。なお、上流側水槽に達することが出来なかったが、魚道に進入したウナギも挑戦数 N_c に含む。遡上挑戦率を式(2)のように定義する。

$$\text{遡上挑戦率} = \frac{\text{遡上に挑戦した尾数 } N_c}{\text{実験に用いた尾数 } (N=20)} \quad (2)$$

図-5 に単位幅流量 q_L と遡上挑戦率 N_c/N との関係突起物直径 D 別に示す。図-4 の遡上率の傾向と異なり、遡上挑戦率 N_c/N に単位幅流量 q_L の変化に伴う顕著な差異は観察されない。一方、各単位幅流量 q_L において、突起物直径 D の増加に伴う遡上挑戦率 N_c/N に明確な傾向は確認されない。

突起物直径と単位幅流量を変化させウナギの到達高さの差異を確認し、また今後の魚道設計を行う際の指標となる可能性があるため到達高さを求めた。各ケースにおける到達高さの尾数を N_{ah} とし、 N_{ah} を遡上挑戦数 N_c で除した到達率 N_{ah}/N_c を算出した。図-6(a)~(c)にウナギの到達高さ H_c (m) と到達率 N_{ah}/N_c との関係の頻度分布を突起物直径 D ごとに示した図を単位幅流量 q_L 別に示す。ここで、到達高さ H_c はウナギが魚道内で到達した距離とし、魚道の下流端を到達高さ $H_c=0$ (m)、上流端を到達高さ $H_c=1.0$ (m)とした。なお、遡上に成功したウナギの到達高さは $H_c=1.0$ とした。いずれの単位幅流量における到達率は、到達高さ $H_c=0\sim 0.2$ m で高い値を示していることが判明した。これはウナギが $H_c=0\sim 0.2$ m で下流側水槽に降下していることを示す。このことから、多くのウナギは遡上挑戦するが魚道入口付近で

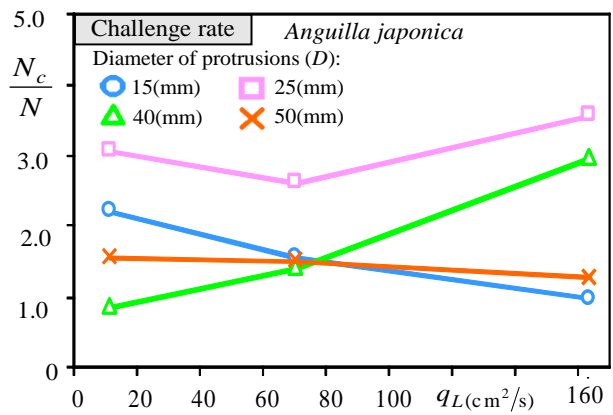
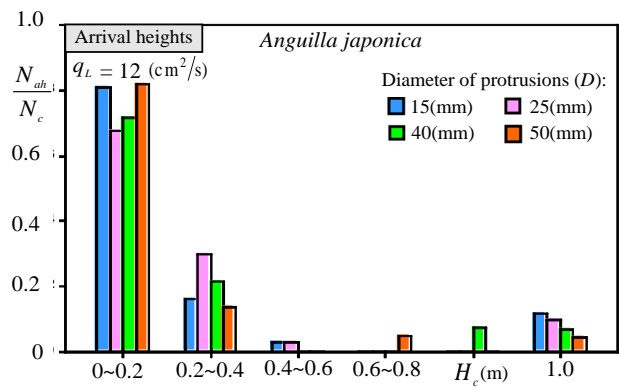
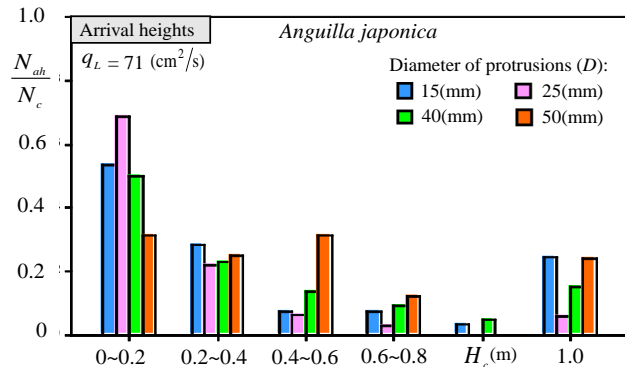


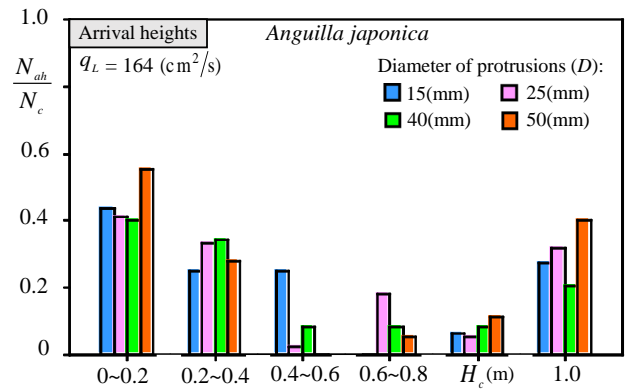
図-5 単位幅流量別のウナギの遡上挑戦率



(a) $q_L=12$ (cm²/s)



(b) $q_L=71$ (cm²/s)



(c) $q_L=164$ (cm²/s)

図-6 到達高さ H_c の頻度分布

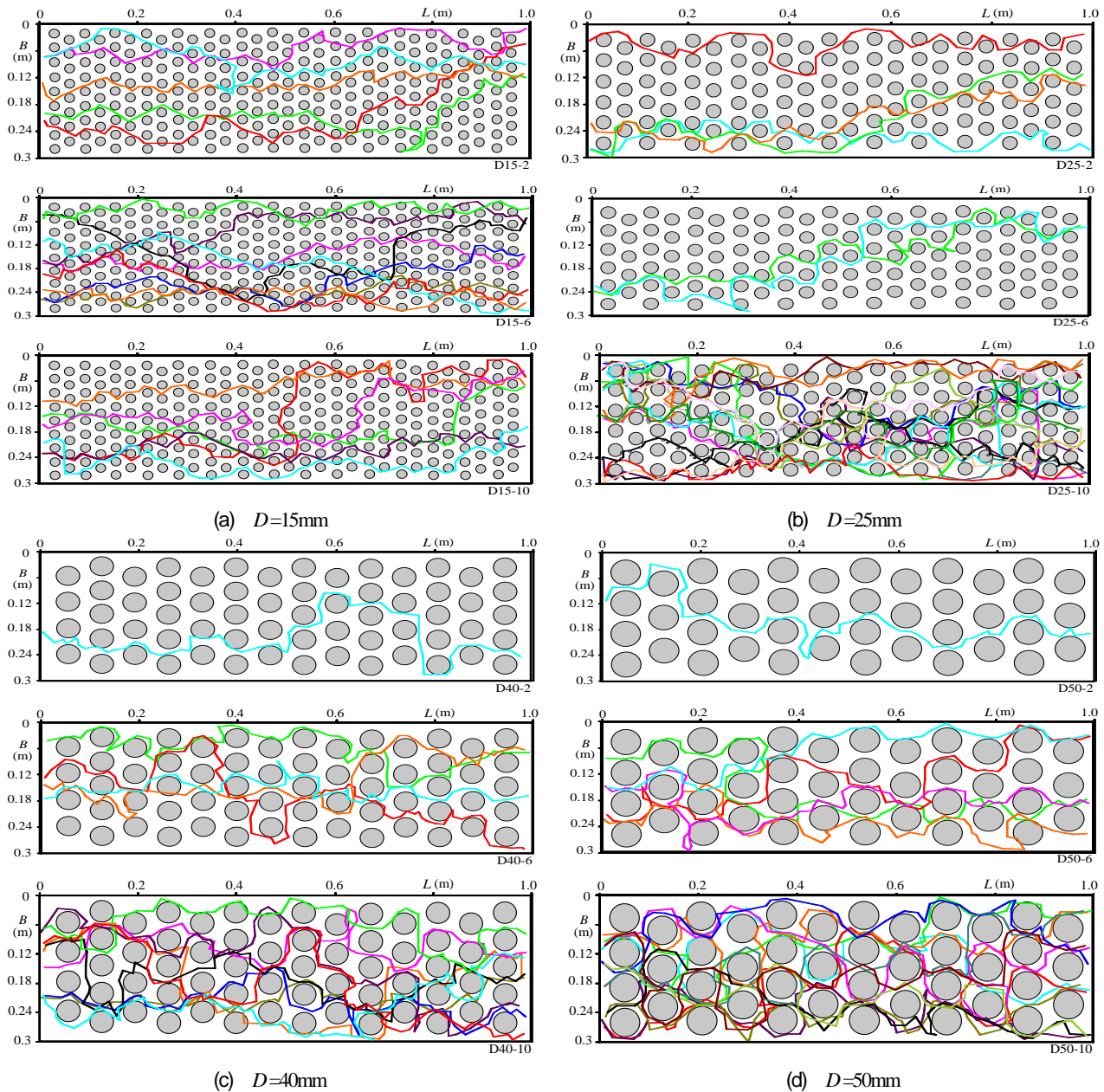


図-7 ウナギの遡上経路

下流側に引き返していることが明らかになった。また、単位幅流量 q_L の増加に伴い、到達高さ H_c の増加に伴う到達率の減少傾向は緩和されていく。したがって、単位幅流量 q_L の増加に伴い、ウナギの到達率にばらつきが生じ、到達高さ $H_c = 0.6 \sim 1.0$ で到達率が高くなったため、遡上率が増加したと考えられる。

(3) ウナギの遡上経路

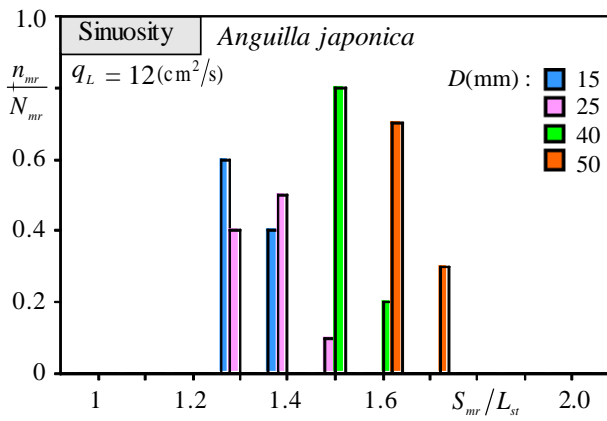
図-7(a)~(d)にウナギの遡上経路を突起物直径 D ごとに示す。いずれのケースにおいても、ウナギは体を蛇行させ、体を引っ掛けながら遡上していることが確認できる。また、各突起物直径 D において単位幅流量 q_L の増加に伴い、ウナギは体をより蛇行させながら遡上していることが観察される。

(4) ウナギの蛇行度

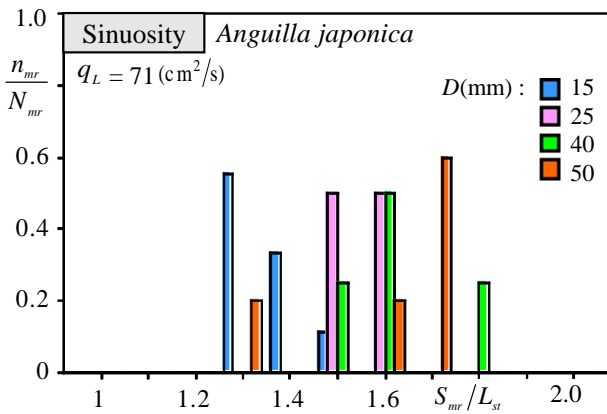
ウナギの魚道入口の進入地点と出口の到達地点の2点を結んだ長さを L_{st} (m)、実際のウナギの遡上経路長を S_{mr} (m)とし、ウナギの蛇行度 S_{mr}/L_{st} を式(3)のように定義する。

$$\text{蛇行度} = \frac{\text{実際にウナギが遡上した経路長 } S_{mr}}{\text{遡上入口から出口までの直線長 } L_{st}} \quad (3)$$

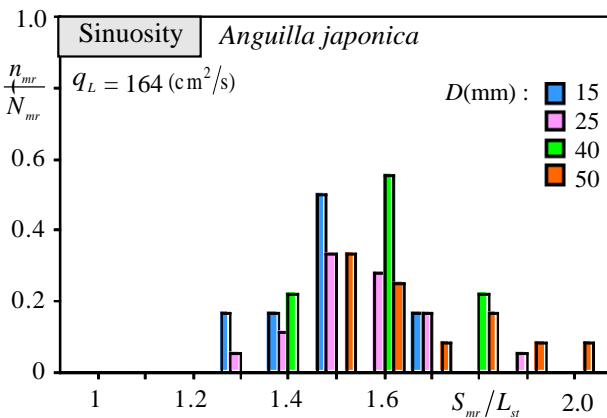
図-8(a)~(c)に突起物直径 D ごとのウナギの蛇行度 S_{mr}/L_{st} の頻度分布を各単位幅流量 q_L 別に示す。いずれの単位幅流量 q_L においても、突起物直径 D の増加に伴い、蛇行度 S_{mr}/L_{st} が増加傾向を示している。ウナギは体を突起物に引っ掛けて蛇行しながら遡上している。そのため、突起物直径 D の増加に対して遡上経路長が増加したと考えられる。図-8(a)~(c)より、いずれの突起



(a) $q_L = 12 \text{ (cm}^2/\text{s)}$



(b) $q_L = 71 \text{ (cm}^2/\text{s)}$



(c) $q_L = 164 \text{ (cm}^2/\text{s)}$

図-8 ウナギの蛇行度 S_{mr}/L_{st} の頻度分布

物直径 D においても、単位幅流量 q_L の増加に伴い、蛇行度 S_{mr}/L_{st} が増加傾向を示している。魚道内の流量の増加に伴い、流れに対してウナギは直線的に遡上すると流下方向に押し流されるため、突起物を利用し蛇行しながら遡上する傾向が確認された。したがって、単位幅流量 q_L の増加に伴い、遡上経路長が増加する可能性があると考えられる。

以上のことから、ウナギは突起物直径 D および単位幅流量 q_L の増加に伴い、突起物を利用しながら遡上し、蛇行度が増加したものと考えられる。

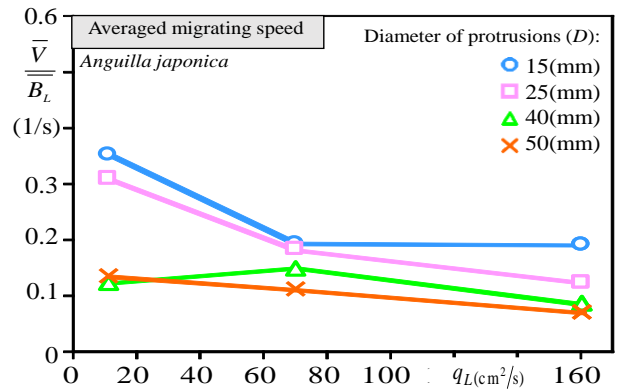


図-9 単位幅流量別の平均遡上速度

(5) ウナギの遡上速度

図-9 に魚道内におけるウナギの平均遡上速度 \bar{V} (m/s) を平均体長 $\bar{B}_L = 150\text{mm}$ で除した値 \bar{V}/\bar{B}_L (1/s) を突起物直径 D ごとに示す。各突起物直径 D において、単位幅流量 q_L の増加に伴い、平均遡上速度 \bar{V}/\bar{B}_L は減少傾向を示している。また、各単位幅流量 q_L において、突起物直径 D の増加に伴い、平均遡上速度 \bar{V}/\bar{B}_L が減少している。(4)より単位幅流量 q_L の増加および突起物直径 D の増加に伴い、ウナギは突起物をより利用しながら遡上し、蛇行度は増加していることが判明した。このことから、ウナギは突起物に体を巻きつけるため、遡上時間が増加し、遡上速度は減少傾向を示したと考えられる。

4. おわりに

本研究では、ウナギ用魚道内の突起物の直径と単位幅流量を系統的に変化させて、平均体長 $\bar{B}_L = 150\text{mm}$ のウナギ未成魚の遡上特性に及ぼす影響について解明を試みた。その結果、以下の知見が得られた。

- (1) 本実験条件内においては、突起物直径 D の変化に関わらず単位幅流量 q_L の増加に伴い、ウナギ未成魚の遡上率が増加する。一方、各単位幅流量 q_L において、各突起物直径 D の増加に伴う遡上率に明確な傾向は確認されない。
- (2) 単位幅流量 q_L が増加するに伴い、ウナギ未成魚の到達高さが高くなる。
- (3) 単位幅流量 q_L および突起物直径 D の増加に伴って、ウナギ未成魚の蛇行度は増加し、平均遡上速度は減少する。

本研究では、突起物直径 D の変化に関わらず、単位幅流量 q_L の増加に伴い、ウナギ未成魚の遡上率が増加したことが判明した。今後、ウナギ未成魚の遡上に適したウナギ用魚道を実現するために、魚道入口の形状、突起物の素材等の影響について研究を行いたい

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（社長：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) Tsukamoto, K., Chow, S., Otake, T., Kurogi, H., Mochioka, N., Miller, M.J., Aoyama, J., Kimura, S., Watanabe, S., Yoshinaga, T., Shinoda, A., Kuroki, M., Oya, M., Watanabe, T., Hata, K., Ijiri, S., Kazeto, Y., Nomura, K. and Tanaka, H.: Oceanic spawning ecology of freshwater eels in the western North Pacific, *Nature Communications*, Vol.2, pp.1-9, 2011.
- 3) Yokouchi, K., Kaneko, Y., Kaifu, K., Aoyama, J., Uchida, K. and Tsukamoto, K.: Demographic survey of the yellow-phase Japanese eel *Anguilla japonica* in Japan, *Fisheries Science*, Vol.80, pp.543-554, 2014.
- 4) 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.
- 5) ダム水源環境整備センター編：最新魚道の設計，信山社サイテック，1998.
- 6) 鬼束幸樹：魚道の流れ特性と魚の遡上特性との関係，ながれ，第31巻，No.1, pp.19-28, 2012.
- 7) 高嶋信博，中村俊六：魚道内のアユの挙動に関する実験的研究，第28回水理講演会論文集，pp.353-358, 1984.
- 8) 鬼束幸樹，秋山壽一郎，松田孝一郎，藏本更織，野口翔平：階段式魚道におけるプール水深がアユの遡上特性に及ぼす影響，土木学会論文集 G(環境)，Vol.68, No.6, pp.II_25-II_31, 2012.
- 9) 和田清，東信行，中村俊六：デニール式およびステーパーバス式魚道における流れ場の特性と稚アユの遡上行動，水工学論文集，第42巻，pp.499-504, 1998.
- 10) 後藤靖裕，望岡典隆：ニホンウナギ稚魚の遡上に最適なブラシ型 Eel-ladder 構造，九大農学芸誌，第71巻，第2号，pp.21-27, 2016.
- 11) Knights, B. and White, E.M.: Enhancing immigration and recruitment of eels: the use of passes and associated trapping systems, *Fisheries Management and Ecology*, Vol.5, pp.459-471, 1998.
- 12) Porcher, J.P.: Fishways for eels, *Bulletin Français de la Pêche et de la Pisciculture*, Vol.364, pp.147-155, 2002.
- 13) Solomon, D.J. and Beach, M.H.: *Fish Pass design for Eel and Elver (Anguilla anguilla)*, R&D Technical Report W2-070/TR, 2004.
- 14) Vowles, A.S., Don A.M., Karageorgopoulos, P., Worthington, T.A. and Kemp, P.S.: Efficiency of a dual density studded fish pass designed to mitigate for impeded upstream passage of juvenile European eels (*Anguilla anguilla*) at a model Crump weir, *Fisheries Management and Ecology*, Vol.22, pp.307-316, 2015.
- 15) Clay, C.H.: *Design of Fishways and Other Fish Facilities*, CRC Press, 1994.
- 16) 塚本勝巳：ウナギ大回遊の謎，pp.16-46, 2012.

(2017.9.29 受付)

EFFECTS OF DIAMETER OF PROTRUSIONS AND DISCHARGE PER UNIT WIDTH IN FISH LADDER FOR EELS ON MIGRATION RATE OF *Anguilla Japonica*

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

Studies on biology and environment of eels *Anguilla japonica* have been advanced in recent years. However, little is known about fish ladder for eels and migrating characteristics of eels. Especially, special fishways are necessary for demersal fish like young eels. This study was made to evaluate effects on migration rate of eels under the condition that diameter of protrusions and discharge per unit width in fish ladder are changed. It was found that migration rate increases with an increase of discharge per unit width in each of diameter of protrusions. Besides, sinuosity of eels are increasing, and averaged migrating speed is decreasing with an increase of discharge per unit width and diameter of protrusions.