

ウナギ用魚道に設置したブラシ束の間隔と傾斜角がウナギの遡上特性に及ぼす影響

鬼東 幸樹¹・泉 孝佑²・窄 友哉²・峰下 颯也³・宮川 智行³・本松 七海³

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)

³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)

河川環境の悪化がウナギの個体数の減少を招いていると推定されており、ダムや堰にウナギ用魚道の併設が望まれている。欧米のウナギ用魚道の斜面上にはブラシ束や芝生などを配置することが多い。しかし、適切なブラシ束の間隔や直径などを調査した例はほとんど存在しない。本研究では、ウナギ用魚道の斜面上に設置したブラシ束の間隔と傾斜角を系統的に変化させ、ウナギ未成魚の遡上特性に及ぼす影響を検討した。その結果、ブラシ束の間隔および傾斜角の増加に伴い、ウナギの遡上率は減少することやウナギの蛇行度および平均遡上速度が増加傾向にあることが判明した。また、ウナギはブラシ束を利用して遡上する際に、体をブラシ束の外縁に接触させて遡上する場合とブラシ束内部に体を進入させて遡上する場合があることを確認した。

Key Words: *Anguilla japonica*, fish ladder for eels, brush, slope, migration rate

1. はじめに

ニホンウナギ(*Anguilla japonica*)は日本人の食文化上欠かせない魚である。ところが、近年国内の河川や湖沼におけるニホンウナギの個体数や漁獲量は減少の一途を辿っている。この現象は日本に限らず、米国のアメリカウナギ(*Anguilla rostrata*)や欧州のヨーロッパウナギ(*Anguilla anguilla*)においても同様に発生している¹⁾。そのため、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あるいは準絶滅危惧種に指定された²⁾。ウナギの個体数が激減した要因として、海洋環境の変化や乱獲、河川や沿岸域の成育場環境の悪化などが指摘されている^{3,4)}。海洋環境の変化に関し、Kimura *et al.*^{5,6)}や Kim *et al.*⁷⁾は気候変動に伴って産卵場所が移動したこと、Zenimoto *et al.*⁸⁾や Tseng *et al.*⁹⁾はニホンウナギの回遊経路が変化したことを指摘した。河川環境の悪化に関し、Chen *et al.*¹⁰⁾は日本を含む東アジアの16河川で、1970年からの40年間で利用可能な成育場の76.8%が失われたと報告した。Santos *et al.*¹¹⁾はダムや堰等によってヨーロッパ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ニホンウナギの生息に重要と指摘した^{12,13)}。したがって、これらの様々な減少要因に対して、ウナギの遡上を妨げないよう水域の連続性を確保することが重要である。そのため、

ウナギの遡上阻害を軽減する方法の1つとして、ウナギの遡上を容易にするためウナギ用魚道の設置が提案される。

階段式を代表とする既設魚道の多くが、アユ(*Plecoglossus altivelis altivelis*)などの遊泳魚を対象としたものであるため、ウナギなどの底生魚、特に遊泳力の小さいウナギの稚魚や未成魚にとって遡上しやすいか否かは不明である。そのため、ウナギ稚魚や未成魚に適切な魚道の幾何学形状や流速などの水理量の解明が必要である¹⁴⁾。日本ではウナギ用魚道の研究・設置事例は極めて少ないが、欧米では数十年前より研究が始められている。

欧米のウナギ用魚道の斜面上には突起物やブラシ、芝生などを設置することが多く、研究や実証がなされている。Knights & White¹⁵⁾は直径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、ウナギ未成魚の遡上が容易になると指摘した。Porcher¹⁶⁾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、小型ウナギや黄ウナギには14mmが適切と指摘した。Baker & Boubee¹⁷⁾は傾斜15°~30°のウナギ用魚道の斜面上にプラスチック製突起物やナイロン製ブラシを配置した結果、遡上率が向上したと報告した。Solomon & Beach¹⁸⁾はウナギ用魚道内のブラシ束の直径を5~20mm、魚道の傾斜を15°~45°の範囲で設定した例を紹介しているが、これ

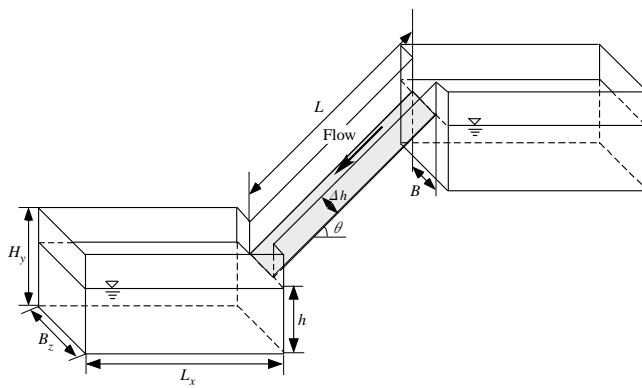


図-1 実験に用いたウナギ用魚道の概要

らの規格が適切かどうかは証明されていない。以上のように、欧米のウナギ用魚道の斜面上においてブラシ束が配置されているが、適切なブラシ束の間隔や直径などは不明なのが現状である。なお、欧米の研究においてブラシまたは突起物のどちらが適切かは現段階では不明であるが、ブラシを配置した実証例は多く比較が容易なため本実験ではブラシを採用した。また、ブラシを配置した魚道についてはメンテナンスコストを要することが懸念されているものの、これに関する検討はほとんどなされておらず、研究の余地がある。

本研究では、ウナギ用魚道の斜面上に設置したブラシ束の間隔と傾斜角を系統的に変化させ、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。

2. 実験装置および実験条件

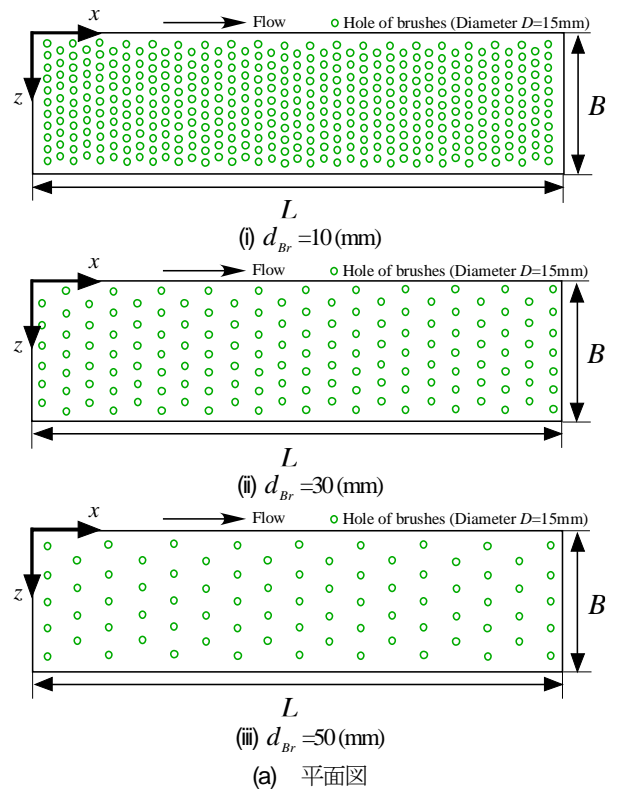
図-1に実験装置の概略を示す。長さ $L_x=0.4\text{m}$ 、幅 $B_x=0.4\text{m}$ 、高さ $H_y=0.3\text{m}$ の2つの水槽が、魚道幅 $B=0.3\text{m}$ 、魚道長 $L=1.0\text{m}$ 、側壁高さ $\Delta h=0.15\text{m}$ のグレーに塗装された木製魚道によって連結されている。魚道幅 B は、ヨーロッパウナギ用に採用されている値、 $0.2\sim 0.3\text{m}$ を参照して決定した¹⁸⁾。

表-1に実験条件を示す。上流側水槽に供給する流量 Q を $160(\text{ml/s})$ とし、下流側水槽からの排水量を調整することで下流側水槽の水深 h を 0.15m に保った。これは魚道下端の位置と下流側水槽の水面の位置を等しくするためである。直径 $D=15\text{mm}$ のブラシ束の間隔 d_{Br} を、 10 、 30 および 50mm の3通りに変化させると共に、魚道の傾斜角 θ を 10 、 20 、 30 、 40 および 50° の5通りに変化させた合計15通りの実験を行った。また、水温は 20°C に保持した。これはヨーロッパウナギを対象にした魚道の水温が $15\sim 25^\circ\text{C}$ であったこと、飼育に適する水温が $20\sim 28^\circ\text{C}$ であったことを踏まえ設定した。

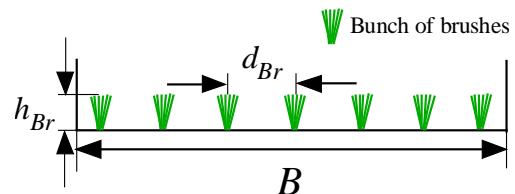
図-2(a), (b)に魚道上に芝丈 $h_{Br}=50\text{mm}$ のポリエチレン樹脂製人工芝シートで作成したブラシ束の状況を示

表-1 実験条件

Space of bunch of brushes d_{Br} (mm)	slope of fish ladder for eels θ (degree)				
	10°	20°	30°	40°	50°
10	d10-10	d10-20	d10-30	d10-40	d10-50
30	d30-10	d30-20	d30-30	d30-40	d30-50
50	d50-10	d50-20	d50-30	d50-40	d50-50



(a) 平面図



(b) 横断面(30mmのケース)

図-2 魚道内のブラシ束の配置図



図-3 実験に用いたウナギ

す。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。なお、本実験で用いたウナギ未成魚の遊泳力が小さいこと、既往の研究においてもブラシなどを設置した方が遡上効率が良いことから、本実験においてもブラシ無しの実験区を設定しなかった。

図-3に本実験で用いた平均体長 $\bar{L}_l=200\text{mm}(\pm 20\text{mm})$ 、ニホンウナギ未成魚を示す。なお、使用したニホンウナギはシラスウナギの段階で捕獲され、その後蓄養によって育てられたものである。ウナギ未成魚は河川への遡上が最も活発な段階である。下流側水槽にウナギ未成魚

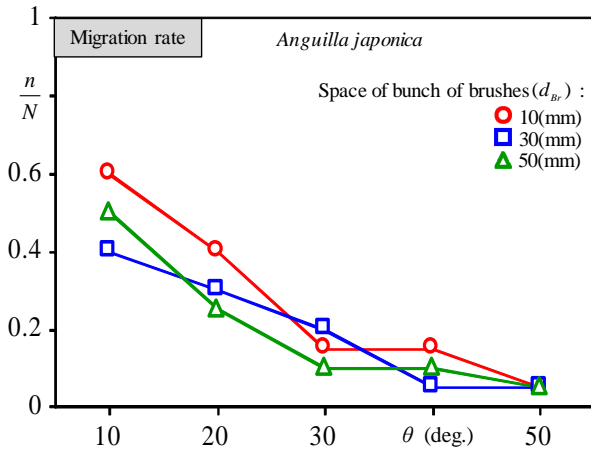


図-4 傾斜角別のウナギの遡上率

($N=20$ 尾)を投入し、30分間の遡上実験を各ケースで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遡上数をカウントした。

3. 実験結果および考察

(1) ブラシ束の間隔および魚道傾斜と遡上率の関係

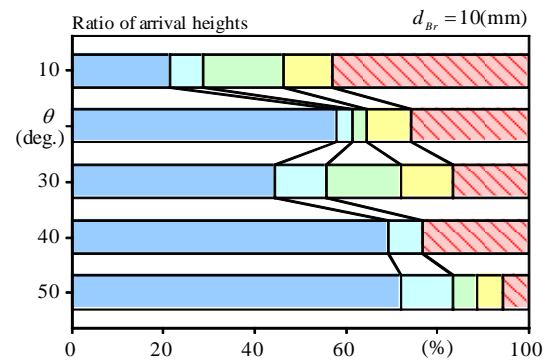
遡上率を式(1)のように定義する。

$$\text{遡上率} = \frac{\text{上流側水槽に到達した尾数 } n}{\text{実験に用いた尾数 } (N=20)} \quad (1)$$

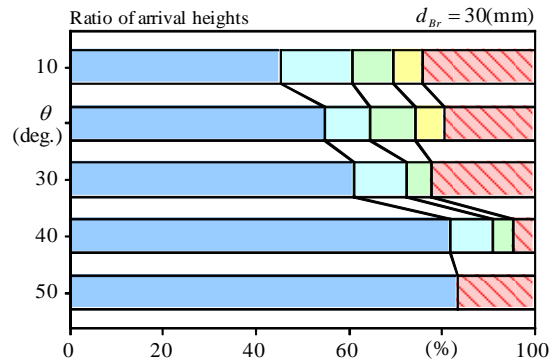
図-4に各ブラシ束の間隔 d_{Br} における傾斜角 θ と遡上率 n/N との関係を示す。いずれのブラシ束間隔 d_{Br} においても傾斜角 θ の増加に伴い遡上率 n/N が減少している。ブラシ束間隔 d_{Br} の最も狭い 10mm における遡上率 n/N がその他のブラシ束間隔 d_{Br} よりも高い傾向にある。一方、ブラシ束間隔 d_{Br} を 30mm から 50mm に変化させた際の遡上率 n/N に顕著な変化は見られない。したがって、ブラシ束間隔 d_{Br} よりも魚道の傾斜角 θ の方が遡上率 n/N に影響を与えることが明らかとなった。

(2) ウナギの到達高さ

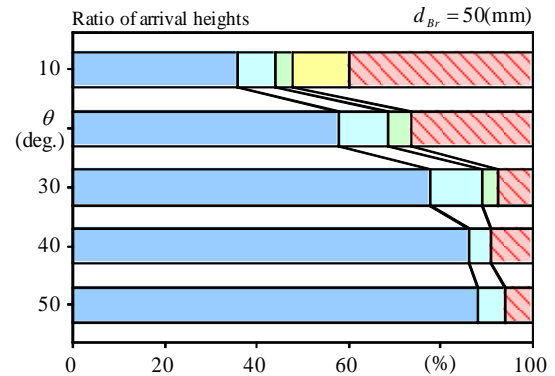
魚道の縦断方向 0.2m 間隔ごとの到達高さ H_c に達したウナギの尾数を算出した。下流側水槽から魚道に進入したウナギの尾数を遡上挑戦延べ数とし、図-5(a)~(c)に各ブラシ束間隔 d_{Br} における、傾斜角 θ 別のウナギの到達高さ H_c に達した尾数を全遡上挑戦延べ数で除した値を示す。ブラシ束間隔 d_{Br} および傾斜角 θ の増加に伴い、到達高さ $H_c = 0 \sim 0.2\text{m}$ の割合が増加するのに対し、到達高さ $H_c = 0.2 \sim 1.0\text{m}$ の割合が減少している。これは、傾斜角 θ の増加によって流速が増加し、傾斜角 θ が小さい



(a) $d_{Br}=10(\text{mm})$



(b) $d_{Br}=30(\text{mm})$



(c) $d_{Br}=50(\text{mm})$

$H_c(\text{m})$: ■ 0~0.2 ■ 0.2~0.4 ■ 0.4~0.6 ■ 0.6~0.8 ■ 0.8~1.0

図-5 ウナギの到達高さ H_c の割合

ケースと比較してウナギが遡上しにくい状態になったためと考えられる。したがって、ブラシ束間隔 d_{Br} と傾斜角 θ の増加が到達高さ H_c の低下を招くと考えられる。

(3) ウナギの遡上経路

図-6(a)~(e)にウナギの遡上経路を示す。全ケースにおいて、遡上時にウナギはブラシ束を利用している。

ウナギの遡上経路の蛇行度合いを評価するため、ウナギの魚道入口の進入地点と出口の到達地点とを直線で結んだ長さを L_{st} (m)、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(2)のように定義した。

$$\text{蛇行度} = \frac{\text{実際のウナギの遡上経路長 } S_{mr}}{\text{魚道の入口から出口までの直線長 } L_{st}} \quad (2)$$

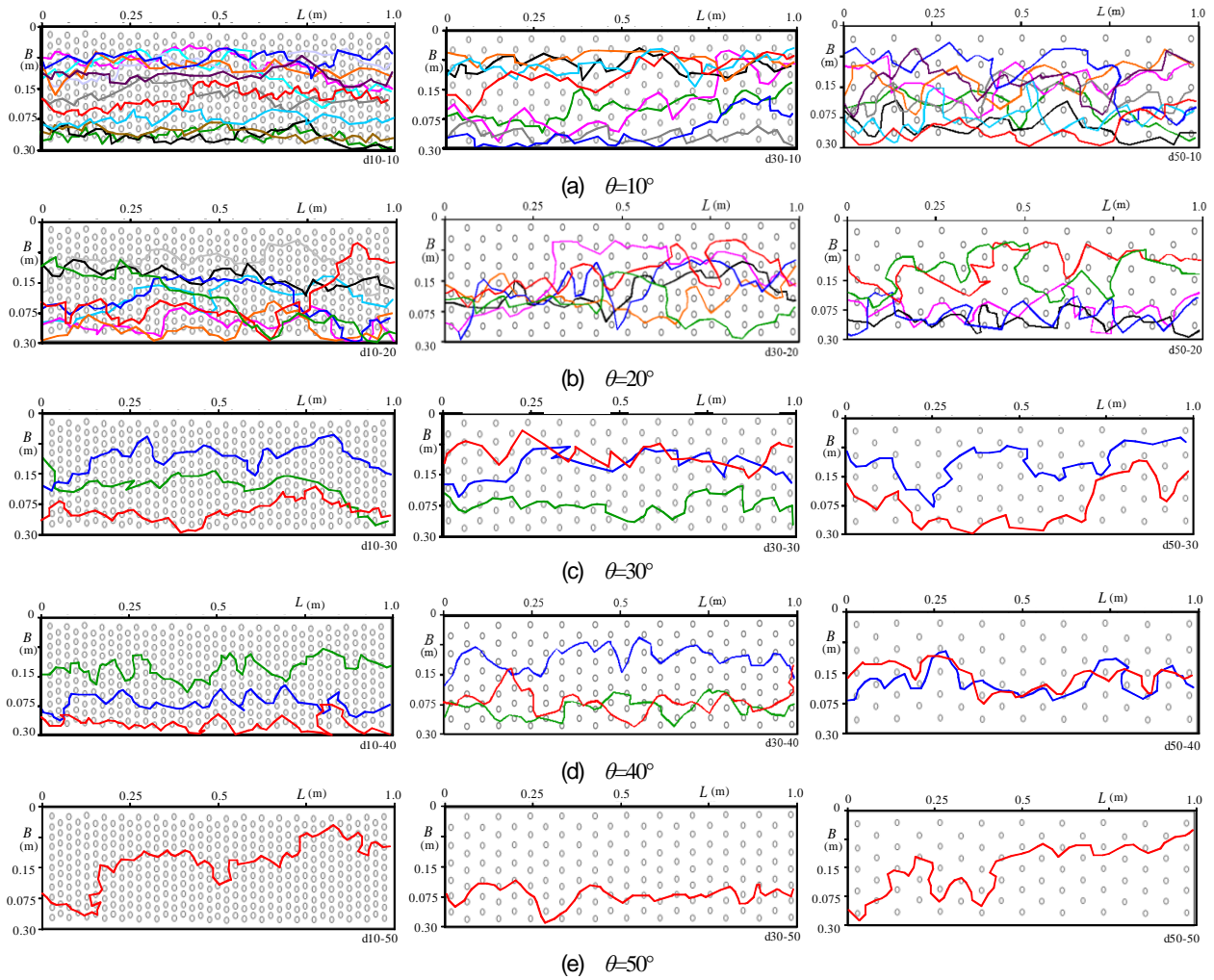


図-6 ウナギの遡上経路

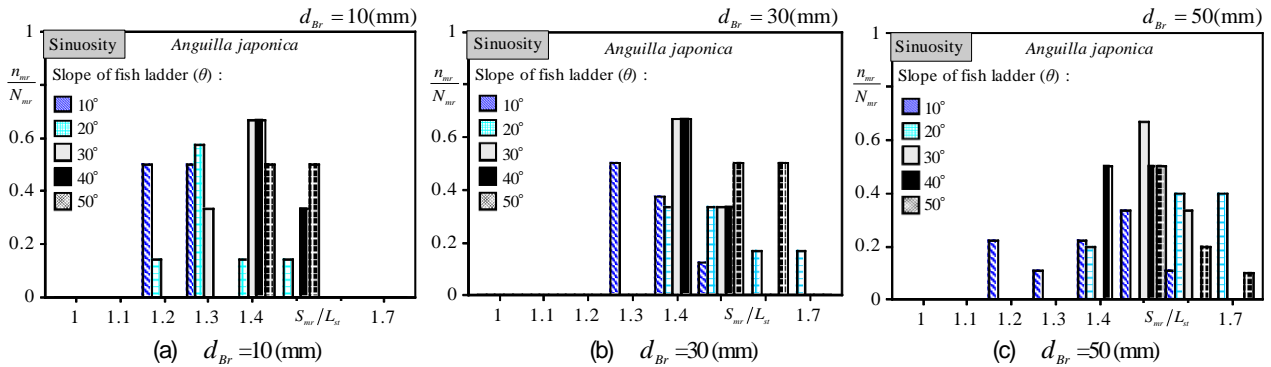


図-7 蛇行度 S_{mr}/L_{st} の頻度分布



図-8 ブラシ束を利用するウナギの様子 ($d_{Br}=30\text{mm}$)

図-7(a)~(c)に各ブラシ束間隔 d_{Br} 別のウナギの蛇行度 S_{mr}/L_{st} の頻度分布を示す。ブラシ束間隔 d_{Br} および傾斜角 θ の増加に伴い、蛇行度 S_{mr}/L_{st} が増加傾向を示している。ブラシ束間隔 d_{Br} が増加すると、ウナギが直近

の横断方向のブラシ束を利用する際に、同方向への移動距離が増加することが原因と推定される。また、傾斜角 θ が増加すると、増加する流速に耐えるために、ウナギが複数のブラシに巻きつくことが必要となり、蛇行度

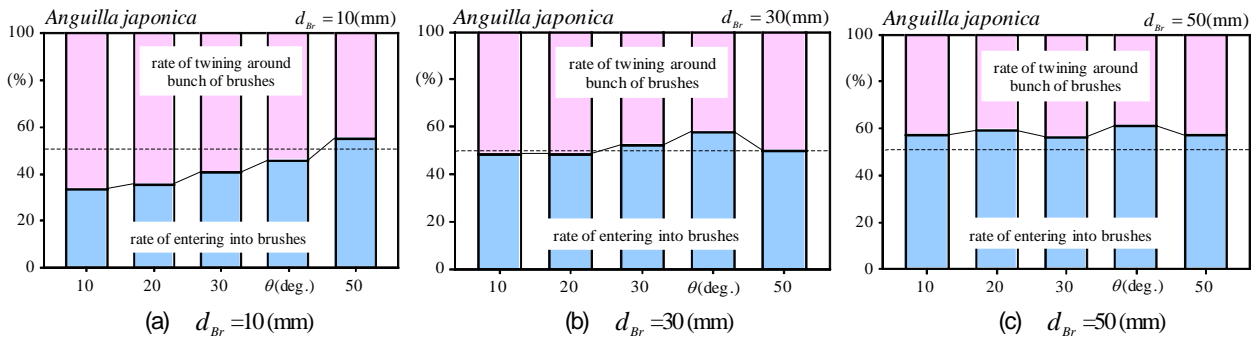


図-9 ブラシ束の利用方法の割合

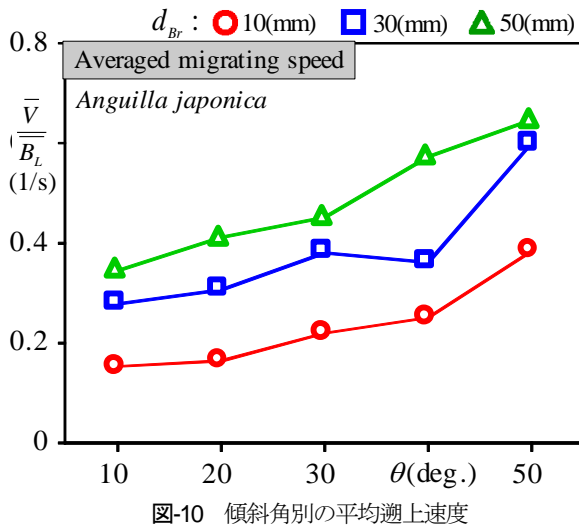


図-10 傾斜角別の平均遡上速度

s_{mr}/L_{st} が増加したと考えられる。

(4) ブラシ束の利用方法

ブラシ束を利用して遡上する際に遡上時にウナギが図-8(a)のように体をブラシ束の外縁に接触させて遡上した場合、図-8(b)のようにブラシ束内部に体を進入させて遡上した場合の2つの挙動を確認した。図-6(e)において $x=0.25\sim 0.4m$ はウナギがブラシ束の外縁と接触しており図-8(a)に該当する状態と確認できる。図-6(e)において $x=0.4\sim 0.75m$ はウナギとブラシが重なっており図-8(b)に該当した状態である。ブラシ束はポリエチレン樹脂製であるため、比較的容易にブラシ束内部に進入することが可能である。

遡上に成功したウナギを対象に、図-9(a)~(c)にブラシ束間隔 d_{br} ごとの傾斜角 θ に対するブラシ束の利用方法の割合、すなわち、体をブラシ束の外縁に接触させて遡上した割合(rate of twining around bunch of brushes)とブラシ束内部に体を進入させて遡上した割合(rate of entering into brushes)を示す。いずれの傾斜角 θ においても、ブラシ束間隔 d_{br} の増加に伴い、ブラシ束内部に進入して遡上した割合が増加している。ブラシ束間隔 d_{br} が大きい場合、ブラシ束内部に進入した方が遡上しやすいことが原因と推察される。加えて、ブラシ束間隔 $d_{br}=10mm$ において

は傾斜角 θ の増加に伴い、ブラシ束内部へ進入する割合が増加している。ただし、この傾向はブラシ束間隔 $d_{br}=30, 50mm$ においては不明確である。これはブラシ束間隔 d_{br} の増加に伴い、巻きつけて遡上することが難しくなったためと推測できる。したがって、ブラシ束間隔 d_{br} および傾斜角 θ が大きい場合は、ブラシ束内部に進入する傾向の増加が見られるが、ブラシ束間隔 d_{br} および傾斜角 θ の変化によるブラシ束の利用方法への影響は不明なことが多く、追加研究が期待される。

(5) ウナギの平均遡上速度

本実験条件において、ウナギは頭部を進行方向に向けて移動していたため、体長とブラシ束に関係があることが推定される。図-10にウナギの平均遡上速度 \bar{V} (m/s)を平均体長 $\bar{B}_L=200mm$ で除した値 \bar{V}/\bar{B}_L (1/s)をブラシ束間隔 d_{br} ごとに示す。傾斜角 θ の増加に伴い \bar{V}/\bar{B}_L が増加している。これは、傾斜角 θ の増加に伴い流速が増加したことで、ウナギが速い遡上速度で進むことが原因であると推測される。また、ブラシ束間隔 d_{br} の増加に伴い \bar{V}/\bar{B}_L が増加している。ブラシ束間隔 d_{br} の増加によってウナギの体長に対して利用できるブラシ束の数が減少するため、ブラシ束を利用しにくく、遡上時に \bar{V}/\bar{B}_L を増加させる必要があったと考えられる。

4. おわりに

本研究では、ウナギ用魚道の斜面上に設置したブラシ束の間隔と傾斜角を系統的に変化させて、ウナギ未成魚(平均体長 $\bar{B}_L=200mm$)の遡上特性に及ぼす影響を解明したものである。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、ブラシ束間隔 $d_{br}=10mm$ 、傾斜角 $\theta=10^\circ$ のケースでウナギの遡上率は最も高くなった。ブラシ束間隔 d_{br} および傾斜角 θ の増加に伴い、ウナギの遡上率は減少する。
- (2) ブラシ束間隔 d_{br} および傾斜角 θ の増加に伴い、蛇行度や平均遡上速度は増加する。

- (3) ウナギは遡上時にブラシ束を利用して遡上するが、ブラシ束の外縁に体を接触させて遡上する場合とブラシ束内に進入して遡上する場合がある。ブラシ束間隔 $d_{Br} = 10\text{mm}$ においては傾斜角 $\theta = 10^\circ$ のケースでブラシ束内に進入して遡上する割合が最も高くなった。ブラシ束間隔 $d_{Br} = 30, 50\text{mm}$ においては傾斜角 θ による利用方法に対する影響はわからなかった。

本研究では、ウナギ用魚道の傾斜角およびブラシ束間隔を小さくすることで遡上率が向上する知見が得られた。そのため、ウナギ用魚道の設置時には、ウナギが安定して遡上できるようにブラシ束間隔を小さくしたり、ブラシ束の直径を大きくしたりすることなどが改善策として挙げられる。

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に謝意を表す。

参考文献

- 1) 望岡典隆：シリーズ・Series 日本の希少魚類の現状と課題 ニホンウナギ：現状と保全，魚類学雑誌，Vol.61, pp.33-35, 2014.
- 2) 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.
- 3) 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.
- 4) 環境省：ニホンウナギの生息保全の考え方，pp.1-16, 2017.
- 5) Kimura, S., Tsukamoto, T. and Sugimoto, T.: A model for the larval migration of the Japanese eel: roles of the trade winds and salinity front, *Marine Biology*, Vol.119, pp.185-190, 1994.
- 6) Kimura, S., Inoue, T. and Sugimoto, T.: Fluctuation in distribution of low-salinity water in the North Equatorial Current and its effect on the larval transport of the Japanese eel, *Fisheries Oceanography*, Vol.10, pp.1-60, 2001.
- 7) Kim, H., Kimura, S., Shinoda, A., Kitagawa, T., Sasai, Y. and Sasaki, H.:

- Effect of El Niño on migration and larval transport of the Japanese eel (*Anguilla japonica*), *ICES Journal of Marine Science*, Vol.64, pp.1387-1395, 2007.
- 8) Zenimoto, K., Kitagawa, T., Miyazaki, S., Sasai, Y., Sasaki, H. and Kimura, S.: The effects of seasonal and interannual variability of oceanic structure in the western Pacific North Equatorial Current on larval transport of the Japanese eel (*Anguilla japonica*), *Journal of Fish Biology*, Vol.74, pp.1878-1890, 2009.
 - 9) Tseng, Y.H., Chen, W.N., Han, Y.S., Hsu, C.C., Chang, C.W., Di Lorenzo, E. and Hsieh, C.H.: Evaluation of multi-scale climate effects on annual recruitment levels of the Japanese eel, *Anguilla japonica*, to Taiwan, *PLoS ONE*, Vol.7, e30805, 2012.
 - 10) Chen, J.Z., Huang, S. L., and Han, Y. S.: Impact of long-term habitat loss on the Japanese eel *Anguilla japonica*. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, Vol.151, pp.361-369, 2014.
 - 11) 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.
 - 12) 平成 26 年度ニホンウナギ保全方策検討委託業務：環境省，2015.
 - 13) 平成 27 年度ニホンウナギ保全方策検討委託業務：環境省，2016.
 - 14) 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.
 - 15) 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.
 - 16) Porcher, J.P.: Fishways for eels, *Bulletin Français de la Pêche et de la Pisciculture*, Vol.364, pp.147-155, 2002.
 - 17) Baker, C.F. and Boubee, J.A.T.: Upstream passage of inanga *Galaxias maculatus* and redfin bullies *Gobiomorphus huttoni* over artificial ramps, *Journal of Fish Biology*, Vol.69, pp.668-681, 2006.
 - 18) Solomon, D.J. and Beach, M.H.: Fish Pass design for Eel and Elver (*Anguilla anguilla*), *R&D Technical Report W2-070/TR*, 2004.

(2018.5.31 受付)

EFFECTS OF SLOPE AND SPACES OF BUNCH OF BRUSHES IN FISH LADDER FOR EELS ON MIGRATION RATE OF *Anguilla japonica*

Kouki ONITSUKA, Kousuke IZUMI, Tomoya SAKO, Souya MINESHITA, Tomoyuki MIYAGAWA and Nanami MOTOMATSU

It is estimated that the number of eels (*Anguilla japonica*) is decreased by the worse of river environment, so fish ladder for eels is necessary in the river. Bunch of brushes or grass are put on fish ladder for eels. However, little is known about typical space, diameter of bunch of brushes and migrating characteristics of eels. This study was made to evaluate the migration rate of eels under the condition that slope and space of bunch of brushes in fish ladder are changed. As a result, it was found that migration rate decreases with an increase of slope and space of bunch of brushes. On the other hand, it was proven that sinuosity of eels and averaged migrating speed tend to increase. Besides, it was confirmed that eels migrated with getting caught by brushes and on the brushes to the upside.