ウナギ用魚道の傾斜と突起物の間隔がウナギの遡上特性に及ぼす影響

EFFECTS OF SLOPE AND SPACES OF PROTRUSIONS IN FISH LADDER FOR EELS ON MIGRATION RATE OF *ANGUILLA JAPONICA*

鬼束　幸樹[1]・泉　孝佑[2]・窄　友哉[2]
Kouki ONITSUKA, Kousuke IZUMI and Tomoya SAKO

[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）
[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）

Populations of *Anguilla japonica* have been decreasing in recent years. The reasons of the population decreasing are overfishing of *Anguilla japonica*, the deterioration of the river environment and so on. Even among them, there are problems that weirs and dams in the river impede migration of fish. For this problems, fishway has been constructed. However, particular fishway is needed for demersal fish like eels. Besides, studies on fish ladder for eels haven't been conducted. In this study, an investigation on migration rate of *Anguilla japonica* was conducted under the condition that slope of fish ladder for eels and spaces of protrusions are changed. It was found that migration rate decreased with an increase of slope and spaces of protrusions. Besides, *Anguilla japonica* migrated while using protrusions by serpentine movement.

Key Words : *Anguilla japonica, fish ladder for eels, slope, spaces of protrusion, migration rate*

1. はじめに

我が国の河川や湖沼に生息するニホンウナギ(*Anguilla japonica*)はウナギ科ウナギ属の魚類で，アユなどの遊泳魚よりも遊泳能力の低い底生魚である．これまでウナギの産卵場などが不明だったが，Tsukamoto *et al.*[1]は，マリアナ諸島西方海域が産卵場で，東アジアのほぼ全域が生育場であることを解明した．ウナギは孵化後，プレレプトセファルス，レプトセファルスを経て，透明な稚魚であるシラスウナギへと変態し，やがて東アジアの河口域へ接岸する[2]．接岸後，急速に色素が発現し，シラスウナギから背が黒いクロコウナギとなる．クロコウナギは河川を遡上する特性を有しており，遡上後しばらくすると黄ウナギとなり，河川や池に定住する．淡水域で数年から十数年過ごした後，成熟した銀ウナギは産卵回遊のために河川を降下し，生まれ故郷に戻って産卵する．以上のように，ウナギは海洋と河川を行き来する通し回遊魚である．しかしながら，産卵回遊過程において，産卵場が特定されたことを除くと，ウナギの生態はほとんど解明されていない．

日本人は年間約 6 万トンものウナギを消費しており[3]，ウナギは日本人にとって必要不可欠な魚である．ところが，2014 年に 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[4]．ウナギの個体数が激減した要因として，ウナギの乱獲，河川環境の悪化などが推定されている．Santos *et al.*[5]は，河川に建設されたダムや堰等によってウナギの遡上が阻害されていると指摘した．これらの河川構造物に対して，魚類等の遡上・降下を可能にするため，しばしば魚道が併設されてきたが，その多くはアユ(*Plecoglossus altivelis altivelis*)やサケ(*Oncorhynchus keta*)[6]，マス(*Oncorhynchus masou masou*)[6]などの遊泳魚を対象とした階段式魚道である．階段式魚道が底生魚のウナギの遡上に適しているか否かは明確ではない．1912 年に滋賀県瀬田川に日本初のウナギ用魚道が設置されたが[7]，その後，ウナギを対象とした底生魚用の魚道の設置例は多くない．欧米では，ヨーロッパウナギ(*Anguilla anguilla*)を対象として，魚道内部にブラシや凸凹等を配置したウナギ用魚道の設置が試みられている[8)-10)]．これらのウナギ用魚道の事例を参照して，鬼束ら[11),12)]は斜面に配置した粗石の粒径を変化させてウナギの登坂特性への影響や，ウナギ用魚道内の単位幅流量がウナギの遡上特性に及ぼす影響を解明した．しかし，東アジアに生息するウナギの遡上に適した魚道の構造や遡上特性については，依然として未解明な諸量が多い．

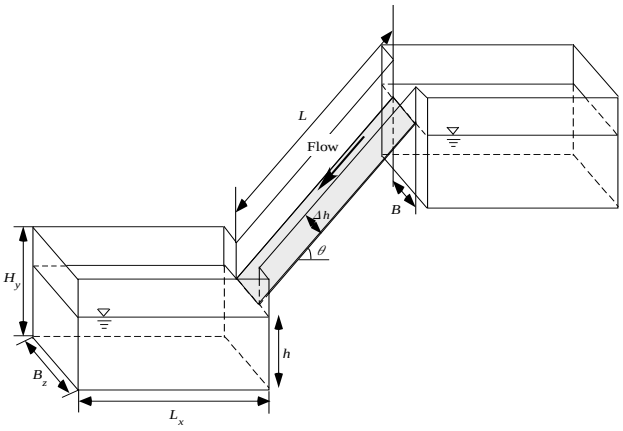


図-1　実験に用いたウナギ用魚道の概要

本研究では，ウナギ用魚道の傾斜角と傾斜面に設置した突起物の間隔を変化させ，ウナギの遡上特性に及ぼす影響を解明したものである．

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=0.6m，幅B_z=0.4m，高さH_y=0.3mの2つの水槽が，魚道幅B=0.2m，魚道長L=0.8m，側壁高さΔh=0.05mのグレーに塗装した木製の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魚道に採用されている値，0.2～0.3mを参照して決定した[8]．

表-1に実験条件を示す．上流側水槽に供給する流量Qを80(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0.2mに保った．**図-2**に示すように，直径30mm，高さ35mmのポリ塩化ビニル製の円柱突起物の間隔dを10，20および30mmの3通りに千鳥状配置させると共に，魚道の傾斜角θを15°，30°および45°の3通りに変化させた合計9通りの実験を行った．このとき，突起物の間隔の下限値は，本実験に用いたウナギが通過可能である最小の間隔に設定した．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．魚道内の水深は，傾斜角θによって多少変化するものの，約5mmであった．また，水温を20℃に保持した．

図-3に実験に用いた平均体長$\overline{B_L}$=200mmのニホンウナギを示す．この成長段階のウナギはクロコウナギと呼ばれ，ライフサイクル中で稚魚の段階にあり，河川を遡上する特性を有している．下流側水槽に，ニホンウナギ(N=20)尾を挿入し，10分間馴致させた後に30分間の遡上実験を行った．魚道上部に設置した画素数1440×1080，撮影速度30fpsのビデオカメラを用いてニホンウナギの挙動を撮影した．撮影後，5sごとに分割した画像に基づき，ニホン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ニホンウナギの遡上数をカウントした．

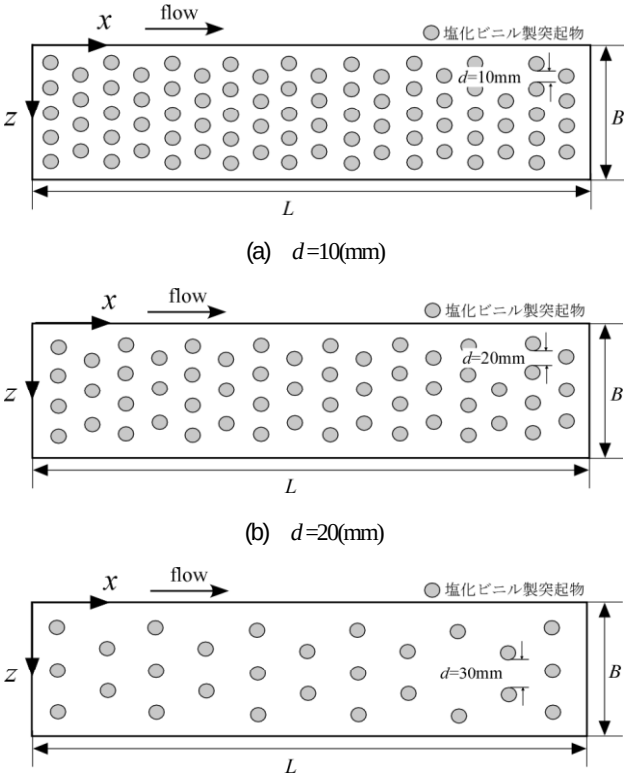


図-2　突起物の配置図

表-1　実験条件

d (mm)	θ(degree)		
	15°	30°	45°
10	d10-15	d10-30	d10-45
20	d20-15	d20-30	d20-45
30	d30-15	d30-30	d30-45

図-3　実験に用いたクロコウナギ

3.　実験結果および考察

(1)　傾斜角および突起物の間隔と遡上率との関係

遡上率を式(1)のように定義する．

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

図-4に突起物の間隔dと遡上率n/Nとの関係を傾斜角θ別に示す．最も遡上率が高いのは，d10-15(d=10mm，θ=15°)のケースであった．突起物の間隔dの増加に伴

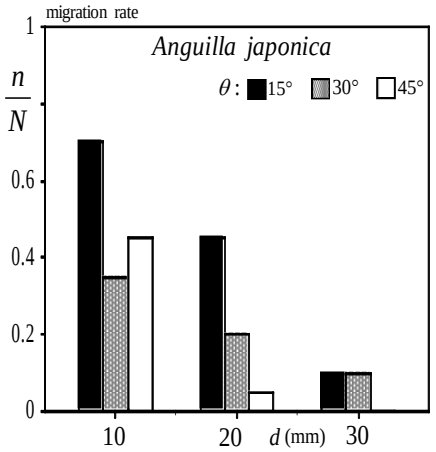


図-4 突起物の間隔別の遡上率

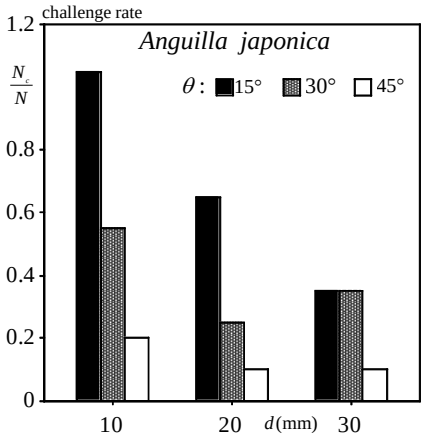


図-5 突起物の間隔別の遡上挑戦率

い，遡上率が減少している．また，同一の突起物の間隔 d において，魚道の傾斜角 θ の増加に伴い遡上数は減少傾向にある．以上のことから，本実験で用いた平均体長 200mm のニホンウナギは傾斜角が小さく，突起物の間隔が狭い場合に最も遡上しやすいことが示唆される．

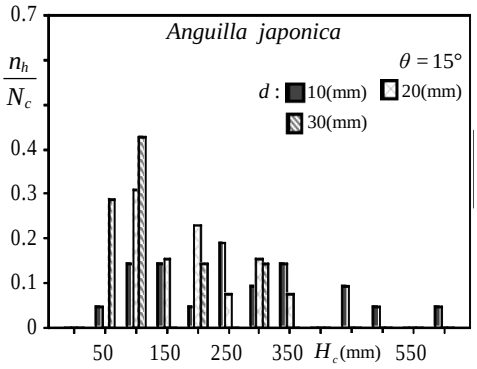
(2) 遡上挑戦率と到達高さ

下流側水槽から魚道に進入したニホンウナギの尾数を挑戦数 N_c とした．遡上挑戦率を式(2)のように定義する．

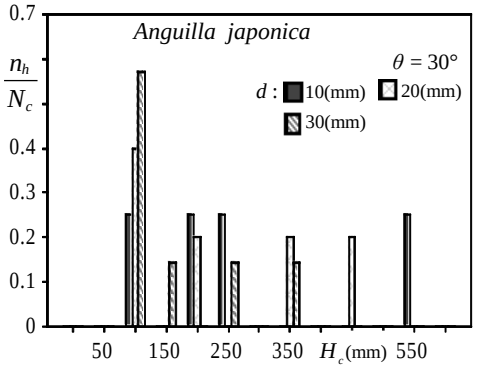
$$\text{遡上挑戦率} = \frac{\text{遡上に挑戦した尾数} N_c}{\text{実験に用いた尾数}(N = 20)} \qquad (2)$$

図-5 に突起物の間隔 d と遡上挑戦率 N_c/N との関係を傾斜角 θ 別に示す．遡上挑戦率が最も高いのは，d10-15 のケースであった．突起物の間隔 d の増加に伴って，遡上挑戦率は減少傾向にある．また，傾斜角 θ が大きなケースと比較して，傾斜角 θ が小さなケースでは遡上挑戦率が高い．

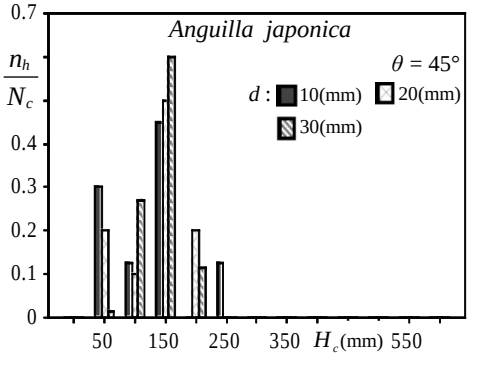
魚道を縦断方向に 50mm ずつ領域分割し，範囲内に到達したウナギの尾数 n_h を求め，挑戦数 N_c で除した到達頻度 n_h/N_c を算出した．**図-6(a)～(c)**に突起物の間隔ごとのウナギの到達高さ H_c とその到達頻度 n_h/N_c を，傾斜角θ別に示す．ニホンウナギの到達高さ H_c (mm)との関係を頻度分布で示す．傾斜角 θ=15°において，到達高さ H_c の頻度にばらつきが生じており，特に突起物の間隔 d=10mm のケースにおいて顕著である．ところが，傾斜角 θ の増加に伴って，到達高さ H_c の頻度は徐々に低い値に集中している．したがって，ニホンウナギは最も高い傾斜角 θ=45°においても遡上には挑戦するが，傾斜角 θ が低いケースと比べると，到達高さ H_c が低下することが判明した．



(a) θ=15°



(b) θ=30°

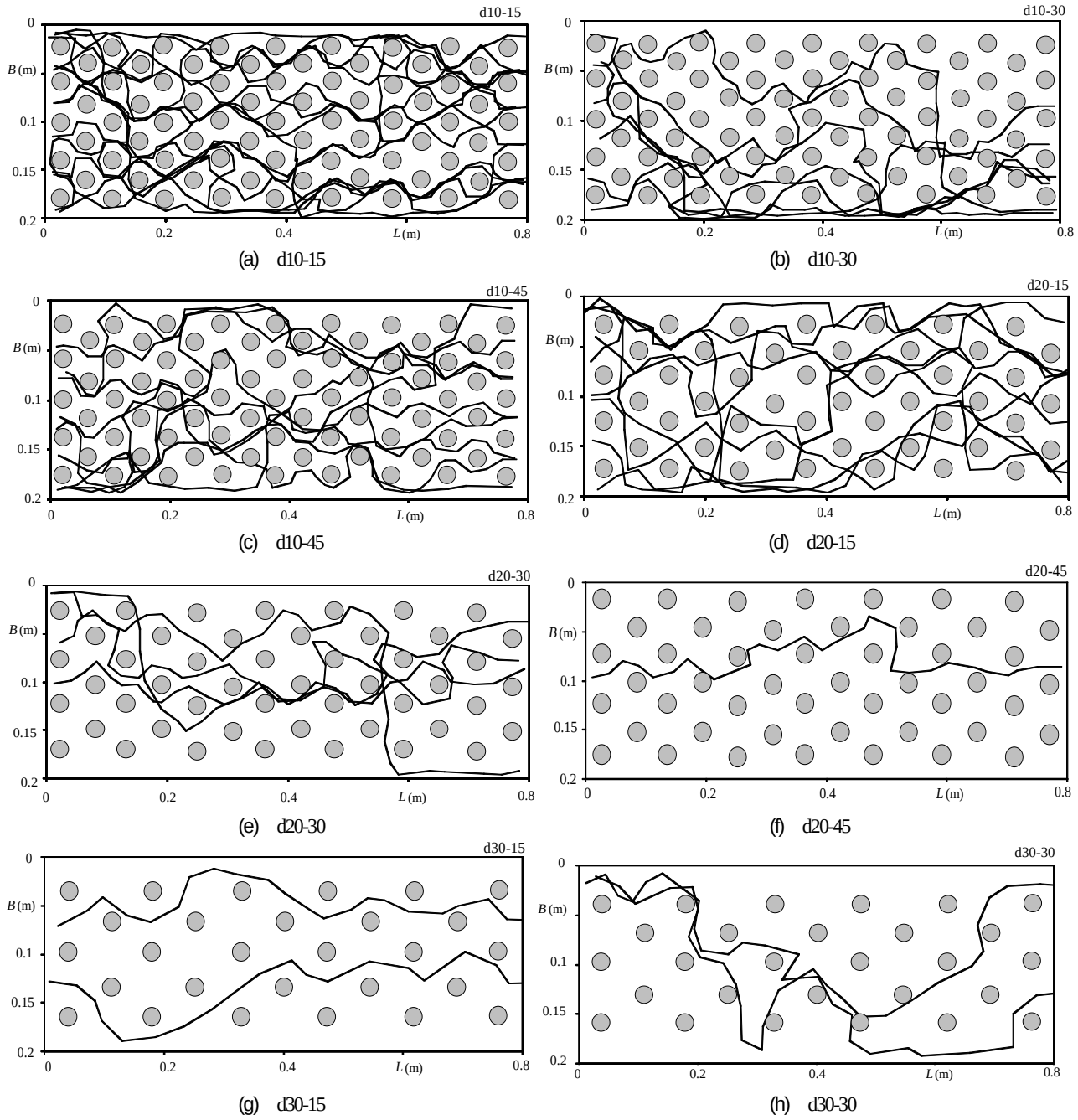


(c) θ=45°

図-6 到達高さ H_c の頻度分布

(3) ウナギの遡上経路

図-7(a)～(h)に各突起物の間隔 d=10，20，30(mm)および各傾斜角 θ =15°，30°，45°におけるニホンウナギの遡上経路をそれぞれ示す．全ケースにおいて，ウ



(a) d10-15　(b) d10-30

(c) d10-45　(d) d20-15

(e) d20-30　(f) d20-45

(g) d30-15　(h) d30-30

図-7　ウナギの遡上経路

ナギが体を蛇行させ，体を引っ掛けながら遡上していることが確認できる．d=10，20mm のときは傾斜角 θ の増加に伴い経路長が短くなる傾向が確認され，d=30mm のときは傾斜角 θ の増加に伴い経路長が長くなる傾向が確認される．また，傾斜角 θ の変化に伴う顕著な傾向は確認されなかった．

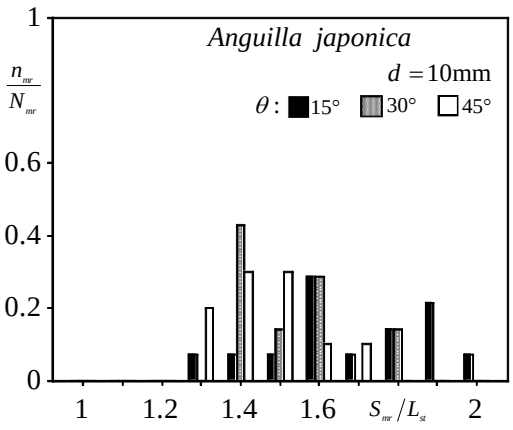
(4)　ウナギの蛇行度と傾斜角との関係

ニホンウナギの魚道入口(x=0.8m)の進入地点と出口(x=0m)の到達地点の2点間を結んだ長さを直線長 L_{st} (m)，実際にニホンウナギが遡上した際の経路長を遡上経路長 S_{mr} (m)とそれぞれ定義し，ニホンウナギの蛇行度 S_{mr}/L_{st} を式(3)のように定義する．

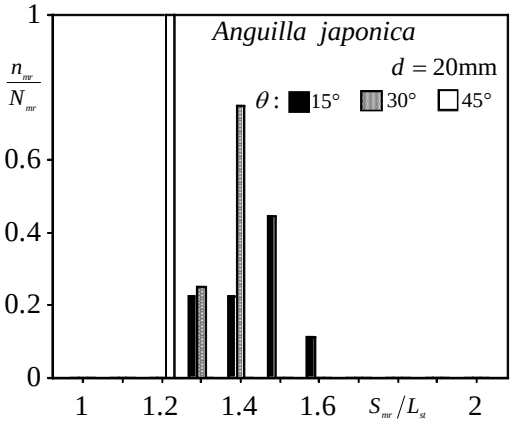
$$\text{蛇行度} = \frac{\text{実際にウナギが遡上した経路長} S_{mr}}{\text{遡上入口から出口までの直線長} L_{st}} \qquad (3)$$

蛇行度は S_{mr}/L_{st} =1に近いほど，ニホンウナギが体を蛇行させずに直進的に遡上していることを意味する．

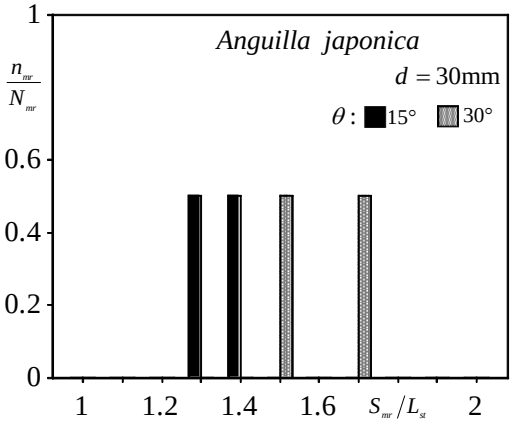
図-8(a)～(c)に傾斜角θごとの遡上したニホンウナギの蛇行度 S_{mr}/L_{st} の頻度分布を，突起物の間隔 d 別に示す．d=10，20mmの場合，傾斜角θの増加に伴い蛇行度 S_{mr}/L_{st} のばらつきが減少すると共に，蛇行度が減少する傾向が確認できる．一方，d=30mmの場合，傾斜角θの増加に伴い蛇行度 S_{mr}/L_{st} が増加することが確認される．これは，突起物の間隔が広くなると，傾斜角θよりも突



(a) d=10mm



(b) d=20mm



(c) d=30mm

図-8 ウナギの蛇行度 S_{mr}/L_{st} の頻度分布

起物の間隔 d の方がウナギに影響を及ぼすようになったことが考えられる．この原因として，傾斜角θが増加するとウナギにかかる重力の斜面方向の力が増加し，特に突起物の間隔 d が広い場合では縦断方向の移動が困難になり，横断方向の突起物も利用しつつ遡上したことが挙げられる．また，傾斜角θの変化に伴う顕著な傾向は確認されなかった．

(5) ウナギの遡上速度

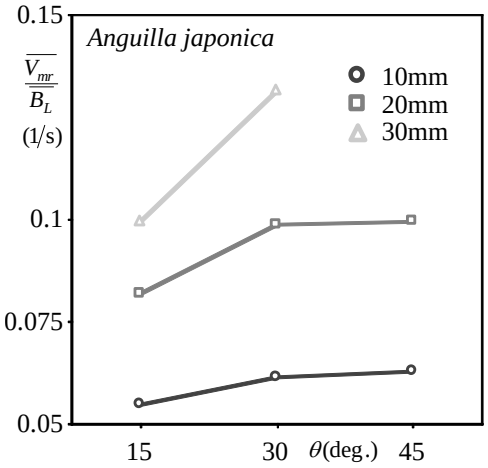


図-9 ウナギの平均遡上速度

魚道内におけるニホンウナギの平均遡上速度$\overline{V_{mr}}$を求め，平均体長$\overline{B_L}$で除した体長倍遡上速度$\overline{V_{mr}}/\overline{B_L}$ (1/s)を算出する．**図-9**に傾斜角θと体長倍遡上速度$\overline{V_{mr}}/\overline{B_L}$の関係を突起物の間隔$d$別に示す．同一の突起物の間隔$d$に着目すると，傾斜角$\theta$の増加に伴って平均遡上速度$\overline{V_{mr}}/\overline{B_L}$が増加する傾向が確認される．これは，傾斜角$\theta$の増加に伴い，ウナギにかかる重力の斜面方向の力が大きくなり，その力に抵抗するために速度を増加させ遡上したと推測される．また，同一の傾斜角θにおいて，突起物の間隔dの増加に伴い平均遡上速度$\overline{V_{mr}}/\overline{B_L}$が増加する傾向にある．これは，突起物の間隔$d$の増加に伴いウナギは突起物に体を絡ませにくくなるため，突起物のない区間を遡上する手段として遡上速度の増加させる方法を選択したと推定される．**図-8**を考慮すると，傾斜角θの増加に伴いニホンウナギは蛇行度S_{mr}/L_{st}を減少させつつ，平均遡上速度$\overline{V_{mr}}/\overline{B_L}$を増加させて遡上することが判明した．

以上より，傾斜角θおよび突起物の間隔dの増加に伴い，遡上速度が増加することが明らかとなった．

4. おわりに

本研究では，ウナギ用魚道の傾斜角と傾斜面に設置した突起物の間隔を系統的に変化させて，ウナギの稚魚であるニホンウナギ(平均体長$\overline{B_L}$ =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，ウナギ用魚道の傾斜角15°で，突起物の間隔10mmの場合に遡上率が最も高くなった．

(2) 傾斜角および突起物の間隔の増加に伴い，ニホンウナギの遡上挑戦数は減少する．

(3) ニホンウナギは体を蛇行させることで，突起物に体を絡ませて遡上する．

(4) 傾斜角の増加に伴って，ニホンウナギは遡上速度を増加させて遡上する．遡上する際に，傾斜角が小さい場合は遡上までの経路長を減少させ，傾斜角が大きい場合は経路長を増加させることが確認された．

本研究では，流量およびニホンウナギの平均体長を変化させずにウナギ用魚道の実験を行った．そのため，本実験で用いたクロコウナギにとって最適な魚道であっても，さらに体長の小さなシラスウナギには効果的でない可能性が考えられる．これを踏まえ，ウナギの遡上に適したウナギ用魚道を実現するために，傾斜角および突起物の間隔の条件幅の変化等の検討だけなく，形状，材質，ウナギの成長段階等の影響についても研究の発展が望まれる．また，本研究で用いた魚道はウナギのみを対象とした魚道であるため，他の魚種に対する有用性，他の魚道との併用等についても今後の検討としたい．

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に謝意を表す．

参考文献

1) 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.
2) 塚本勝巳：ウナギ-大回遊の謎-，PHP サイエンスワールド新書，pp.44-46, 2012.
3) 田中秀樹：ウナギの人工種苗生産に関する研究，日本水産学会誌，Vol.77, No.3, pp.345-351, 2011.
4) 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.
5) 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.
6) 中坊徹次編：日本産魚類検索，東海大学出版会，2013.
7) ダム水源地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.
8) Clay, C.H.: *Design of fishways and other fish facilities*, CRC Press, pp.121-127, 1994.
9) 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, Bristol, pp.1-5, 2004.
10) Legault, A.: Étude de quelques facteurs de sèlectivitè de passes à anguilles, *Bull. Fr. Pêche Piscic*, Vol.325, pp.83-91, 1992.
11) 鬼束幸樹，秋山壽一郎，武田知秀，國崎晃平，泉孝佑：斜面に設置した粗石の粒径がウナギの登坂特性に及ぼす影響，土木学会論文集 G(環境), Vol.73, No.7, pp.III_345-III_350, 2017.
12) 鬼束幸樹，秋山壽一郎，武田知秀，泉孝佑，内間志和，窄友哉：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，土木学会論文集 B1(水工学), Vol.74, No.4, pp.I_403-I_408, 2018.

（2019.4.2 受付）