

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

鬼東 幸樹¹・秋山 壽一郎²・國崎 晃平³・武田 知秀⁴・泉 孝佑⁵

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 建設社会工学科 (〒804-8550 北九州市戸畑区仙水町1-1)
E-mail: juichiro@tobata.isc.kyutech.ac.jp

³非会員 新日鐵住金株式会社 (〒100-8071 千代田区丸の内2丁目6-1)
E-mail: n105032k@mail.kyutech.jp

⁴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)
E-mail: m105039t@gmail.com

⁵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)
E-mail: n105007k@mail.kyutech.jp

近年、河川におけるウナギの個体数が激減している。この原因として、乱獲や河川環境の悪化などが推定されており、改善の必要性が指摘されている。ところが、ウナギの生態やウナギ用魚道に関する研究がほとんど進んでいないのが現状である。ウナギ用魚道はウナギの遊泳能力に加えて、水で濡れた斜面の登坂能力を考慮して設計することが合理的である。本研究では斜面の傾斜を一定にし、斜面に配置する粗石の粒径を変化させて、クロコウナギの登坂特性を解明した。その結果、本実験条件の範囲内では粗石長径が20mmの場合によじ登り成功率が最大となった。また、クロコウナギは体を左右に屈曲させて、斜面上の粗石に体を引っ掛けるようによじ登っていることが確認された。加えて、粗石長径の増加に伴い、屈曲頻度のばらつきが増加し、平均よじ登り速度が減少することが判明した。

Key Words : *Anguilla japonica*, slope, boulder, grain diameter, climbing, fish ladder for eels

1. はじめに

日本人は年間およそ6万トンものウナギ(*Anguilla japonica*)を消費しており¹⁾、ウナギは日本人にとって必要不可欠な魚である。ウナギ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、海洋と河川とを往来する通し回遊魚である。近年までウナギの産卵場などが不明だったが、Tsukamoto *et al.*²⁾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。2010年には実験室レベルでウナギの完全養殖に成功した³⁾。以上のように、主に産卵場や養殖などに関する研究は進められているが、河川におけるウナギの生活史、特に稚魚の遡河回遊や遊泳特性など、ウナギの生態については未だ解明されていない点⁴⁾が多い。

現在、河川におけるウナギの個体数は激減しており、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⁵⁾。個体数激減の原因として、乱獲、河川環境の悪化などが推

定されている⁶⁾。Santos *et al.*⁷⁾は河川に建設された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。そのため、魚類の遡上・降下を容易にするために魚道が併設されてきた。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様々な魚道が提案・実用化されているが⁸⁾⁹⁾、我が国の既設魚道の90%以上は階段式である¹⁰⁾¹¹⁾。上記の魚道をアユ(*Plecoglossus altivelis altivelis*)、サケ(*Oncorhynchus keta*)¹²⁾、マス(*Oncorhynchus masou masou*)¹²⁾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するが、ウナギなどの底生魚の遡上に適しているか否かについてはほとんど検討されていない。

近年、ウナギ用魚道に関する研究事例は無いものの、数十年前に、欧州でヨーロッパウナギ(*Anguilla anguilla*)を対象とした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、その実証も試みられている¹³⁾¹⁴⁾。これらの魚道はどちらも有効とされている。また、凹凸等を配置したウナギ用魚道に関しては、塩化ビニルやコンクリート製の円柱突

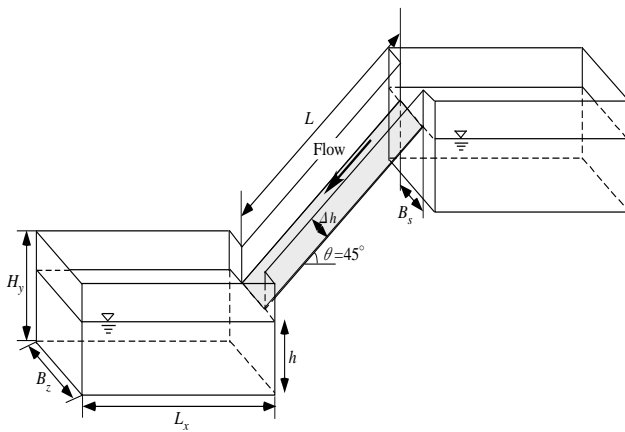


図-1 実験に用いた装置の概要

起物を配置したものが多い。ウナギの稚魚の遊泳速度は遊泳魚よりも低い、ウェットな急斜面をよじ登る登坂能力に優れている¹³⁾。したがって、ウナギ用魚道的设计にはウナギの遊泳能力だけでなく、登坂能力も利用することが合理的である。しかし、ウナギの登坂能力やウナギが斜面をよじ登るのに最適な表面の状態は解明されていない。ウナギ用魚道の表面は、フラットな状態よりも何らかの突起物があった方が遡上に有利であることは想像に難くない。突起物の候補は無数にあるが、安価なこと、入手が容易なこと、魚道内に設置するものとして異質でないことを考慮すると、粗石がその候補の上位に位置するであろう。以上のことから、粗石を用いることで既設の魚道においても容易に改良できるという利点に加え、クロコウナギを対象とした魚道の研究事例は無いため、本研究を行った。

本研究では、斜面上に様々な粒径の粗石を設置し、ウナギの稚魚であるクロコウナギの登坂特性に及ぼす影響を解明したものである。クロコウナギの登坂能力を知ることで、既設の魚道やウナギ用魚道の斜面の最適な状態を得ることを目的としている。

2. 実験装置および実験条件

図-1に実験装置の概要を示す。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、幅 $B_s=0.2\text{m}$ 、長さ $L=0.7\text{m}$ 、側壁高さ $\Delta h=0.05\text{m}$ のグレーに塗装した木製の傾斜角 $\theta=45^\circ$ の斜面によって連結されている。斜面幅 B_s 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⁸⁾。また、ウナギ用魚道には $12^\circ\sim 55^\circ$ と様々な傾斜が用いられており¹⁴⁾、その中でも傾斜角 45° 前後の魚道が多かったため、傾斜角 $\theta=45^\circ$ に決定した。

図-2(a)～(d)に斜面上に設置した粗石の配置の様子を示す。粗石付き斜面の上流端の左岸を原点とし、流下方向

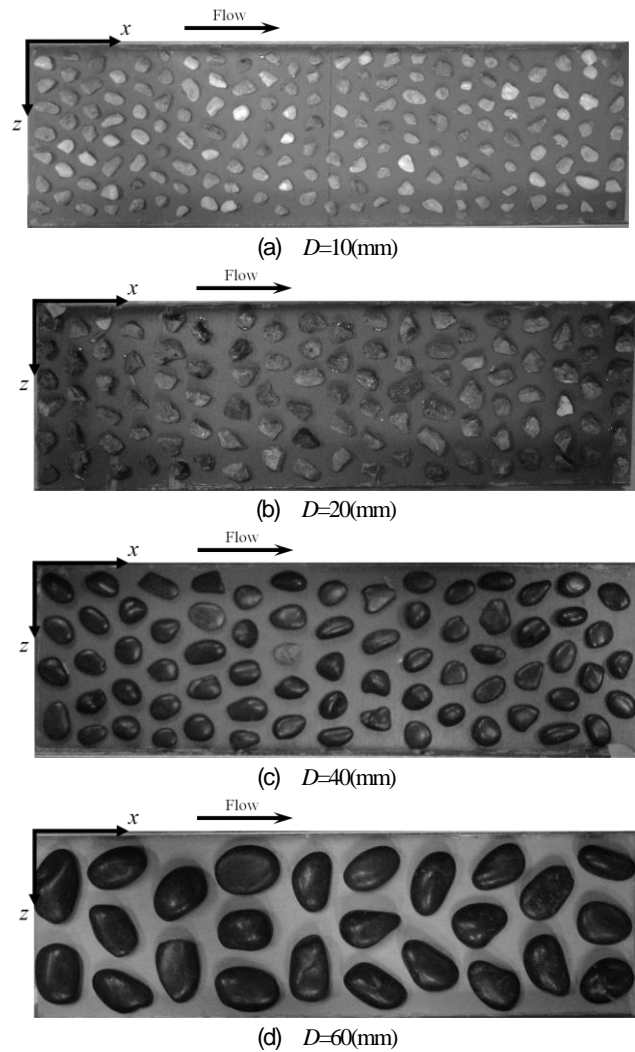


図-2 斜面上に設置した粗石の配置図

表-1 実験条件

case name	major axis of boulders D (mm)	averaged height of boulders $\overline{H_b}$ (mm)	width of slope B_s (mm)
D-10	10	8.92	200
D-20	20	11.9	
D-40	40	14.5	
D-60	60	19.1	



図-3 実験に用いたクロコウナギ

に x 軸、横断方向に z 軸をとった。なお、粗石は球ではないため、各粗石の平均粒径を求めるには膨大な労力が必要である。そのため、粗石粒径を表す代表値として長径 D を採用した。これまでウナギ用魚道における円柱突起物の直径には $10\sim 40\text{mm}$ が用いられてきた^{14),16)}。ク

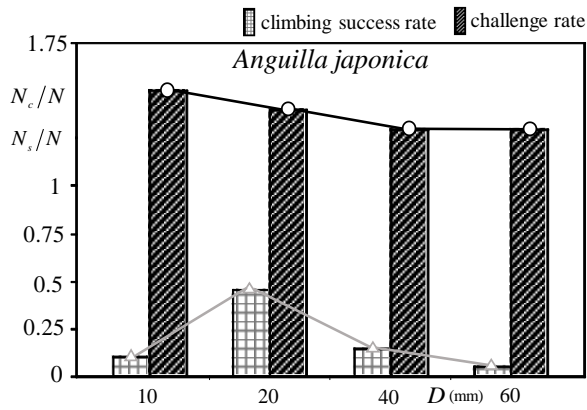


図4 よじ登り挑戦率および成功率

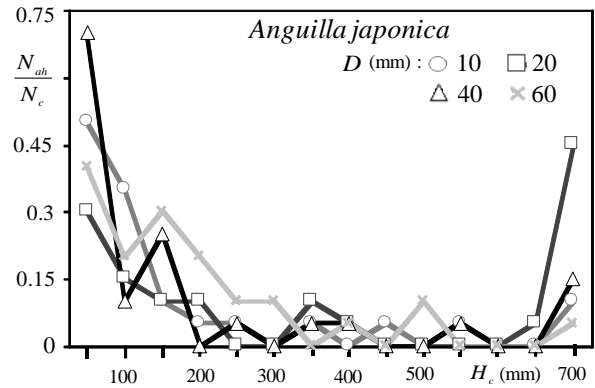


図5 クロコウナギの到達高さ H_c の頻度分布

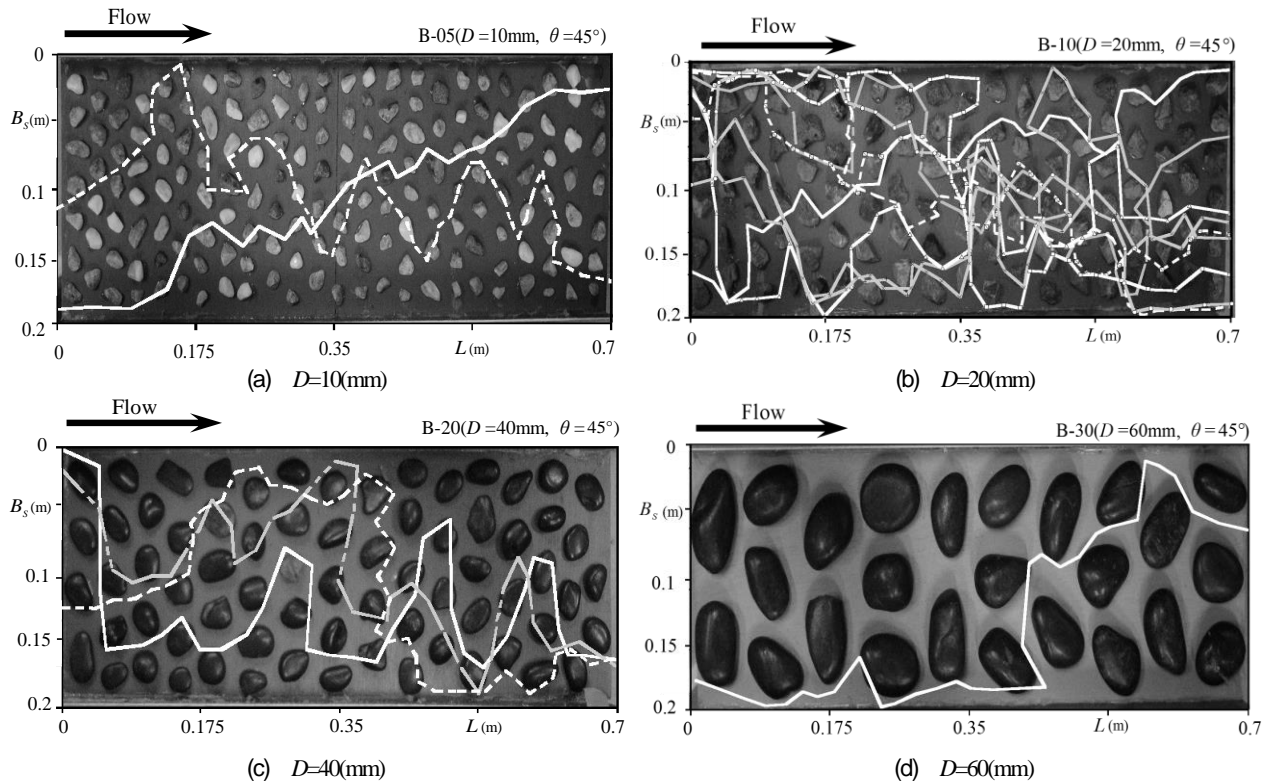


図6 クロコウナギのよじ登り経路

ロコウナギの遡上に適した粗石長径に関する研究事例は無いため、これらを参照値として決定した。粗石は斜面設置面を平らにしているため、粗石と斜面との間に空隙は無く、埋没することなく斜面に配置されている。表-1に実験条件を示す。粗石長径 D を10, 20, 40および60mmの4通りに変化させ、各ケースとも粗石間の最小距離が15mmとなるよう千鳥状に斜面に配置した。また、各ケースで粗石の高さを測定し、粗石の平均高さ $\overline{H_b}$ とした。上流側水槽に供給する流量 Q を80ml/sとし、下流側水槽の水深 h を0.2mに保持した。この流量、水深はウナギの遡上において、完全に体が水中に埋もれないような流量を流すことが良いとされているため¹³⁾、本実験でも遡上しやすいように調整した。粗石付き斜面内の水深

は全ケースで約5mmであった。また、水温を20°Cに保持した。

図-3に実験に用いた平均体長 $\overline{B_L} = 200$ mmのクロコウナギを示す。クロコウナギはライフサイクル中の稚魚の段階であり、河川を活発に遡上する特性を有している。下流側水槽に、クロコウナギ ($N = 20$ 尾) を挿入し、10分間馴致させた後に30分間のよじ登り実験を各ケースで行った。斜面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クロコウナギのよじ登りの様子を撮影した。撮影後、5sごとに分割した画像をもとに、クロコウナギがよじ登った位置を解析すると共に、上流側水槽まで到達したクロコウナギの尾数をカウントした。

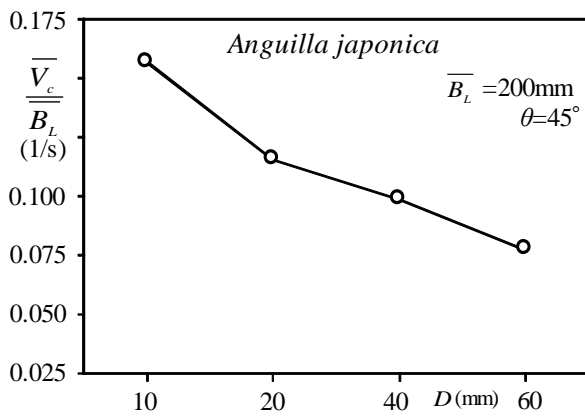


図-7 クロコウナギの平均よじ登り速度

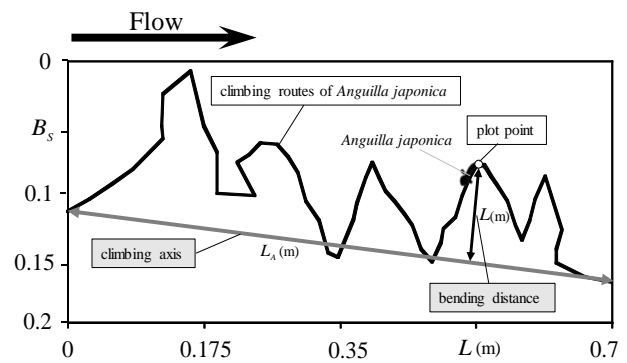


図-8 屈曲距離およびよじ登り軸の模式図

3. 実験結果および考察

(1) よじ登り挑戦率および成功率

下流側水槽から斜面上端(\$x=0.7\text{m}\$)に進入したクロコウナギの尾数を挑戦数 N_c 、斜面上端(\$x=0\text{m}\$)まで到達した尾数を成功数 N_s とそれぞれ定義した。そのため、クロコウナギのよじ登り挑戦率および成功率を式(1)、(2)のように定義した。

$$\text{挑戦率} = \frac{\text{よじ登りに挑戦した尾数 } N_c}{\text{実験に用いた尾数 } (N = 20)} \quad (1)$$

$$\text{成功率} = \frac{\text{よじ登りに成功した尾数 } N_s}{\text{実験に用いた尾数 } (N = 20)} \quad (2)$$

図-4 に粗石長径 D とクロコウナギのよじ登り挑戦率 N_c/N およびよじ登り成功率 N_s/N との関係をそれぞれ示す。

挑戦率 N_c/N に着目すると、粗石長径 D の増加に伴い若干の低下傾向を示しているものの、その減少率は微小である。一方、成功率 N_s/N は、粗石長径 D が 10mm から 20mm に増加すると急増している。これは、粗石長径 D の増加によりクロコウナギが体を引っ掛けやすくなったことが原因と考えられる。ところが、粗石長径 D が 20mm よりも増加すると、成功率 N_s/N は逆に減少している。これは、粗石長径 D の大きなケース(粗石長径 $D=40, 60\text{mm}$)の場合、一度にクロコウナギの体を支える粗石数が粗石長径 D の小さなケース(粗石長径 $D=10, 20\text{mm}$)と比べて減少したこと、およびクロコウナギが体を引っ掛けることのできる粗石までの距離が増加したことでクロコウナギの疲労が蓄積したために登坂に失敗したと考えられる。

以上のことから、斜面の傾斜角 θ が 45° の場合、本実験条件内においては、粗石長径 $D=20\text{mm}$ のケースでクロコウナギの成功率が最大となり、粗石長径がそれよりも大きくても小さくても成功率が低下することが解明された。

(2) ウナギの到達高さ

各ケースにおいて、斜面下端から 50mm ずつ領域分割し、各範囲内でのクロコウナギのよじ登り到達尾数を N_{ah} 、到達高さを H_c とした。各範囲内の到達高さ H_c において、到達尾数 N_{ah} を挑戦数 N_c で除した頻度 N_{ah}/N_c を算出し、図-5 に各到達高さ H_c の頻度 N_{ah}/N_c を粗石長径 D ごとに示す。粗石長径の大きな $D=40, 60\text{mm}$ では、到達高さ H_c の頻度は $H_c=50\sim 150\text{mm}$ の低値に集中している。一方、粗石長径 $D=20\text{mm}$ では、到達高さ H_c の頻度が $H_c=650\sim 700\text{mm}$ の高値に集中している。また、粗石長径 D が最小の $D=10\text{mm}$ では、到達高さ H_c は $D=40, 60\text{mm}$ のケースと同様に $H_c=50\sim 150\text{mm}$ の低値に集中している。これは粗石長径 D が小さい場合、クロコウナギが体を物理的に引っ掛けにくくなったことに加え、表-1 より粗石の平均高さ \bar{H}_b が低いいため斜面上の流水の作用により下流方向に流されやすくなったことが原因と考えられる。

(3) ウナギのよじ登り経路

図-6(a)~(d)に各ケースでよじ登りに成功した個体のよじ登り経路を示す。いずれのケースにおいても、クロコウナギは左右に体をくねらせ、斜面上の粗石に体を引っ掛けるようにして、よじ登っていることが理解できる。また、粗石長径 D の増加に伴って、クロコウナギが大きく屈曲する傾向が確認される。

(4) ウナギのよじ登り速度

図-7 に斜面上端($x=0\text{m}$)まで到達したクロコウナギのよじ登り速度の平均値 \bar{V}_c (cm/s)をクロコウナギの平均体長 $\bar{B}_L=20\text{cm}$ で除した値 \bar{V}_c/\bar{B}_L (1/s)をケース別に示す。平均よじ登り速度は粗石長径が最小である粗石長径 $D=10$ のケースで最大で、粗石長径 D の増加に伴い減少している。これは、粗石長径 D の増加に伴い、クロコウナギが体を引っ掛けることのできる粗石までの距離が増加したことでより大きく屈曲しながら遡上したため

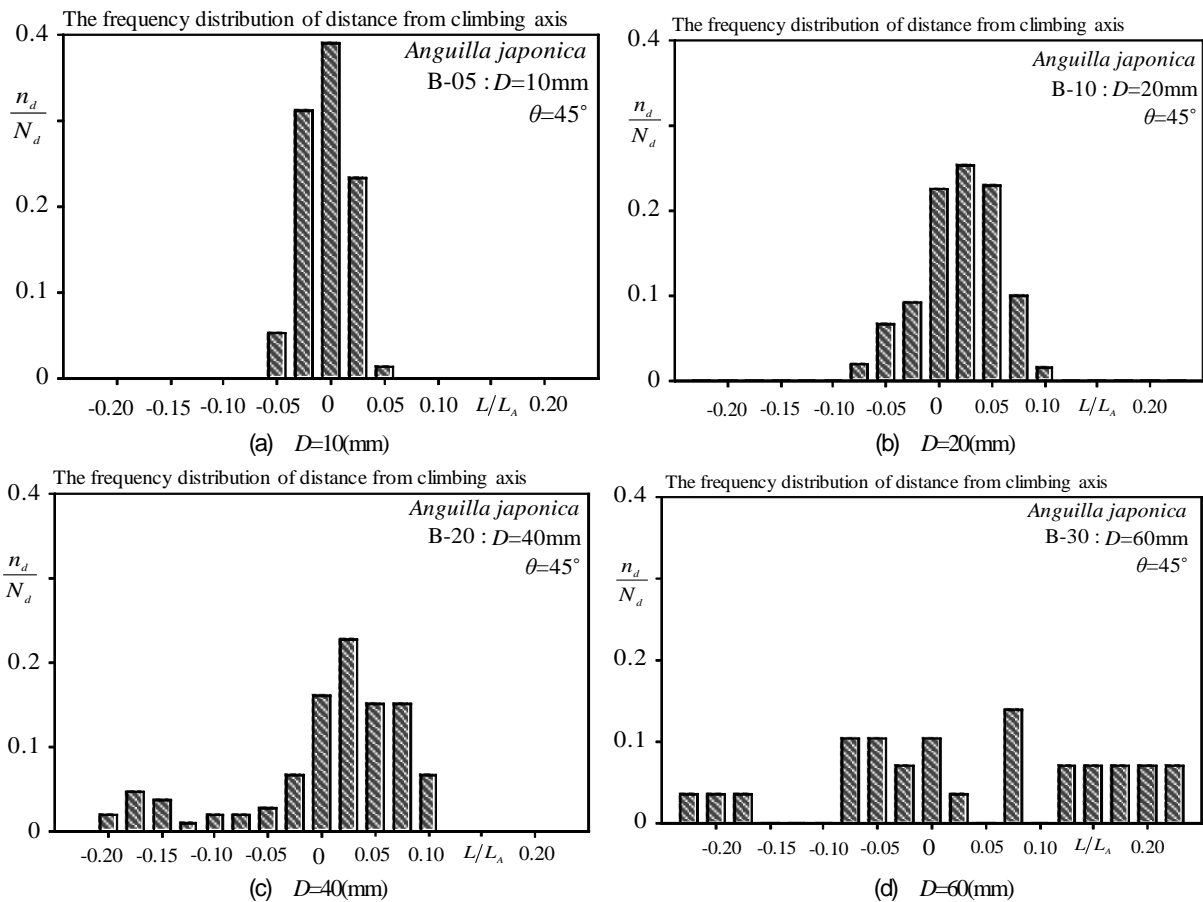


図-9 長径別のクロコウナギの屈曲頻度

平均よじ登り速度が減少したと考えられる。

以上のことから、粗石長径 D の増加に伴って、クロコウナギのよじ登り速度は単調減少することが明らかとなった。

(5) ウナギの屈曲頻度

図-8 に屈曲頻度を算出する際に用いた屈曲距離およびよじ登り軸の模式図を示す。クロコウナギのよじ登り経路における斜面下端位置と上端位置とを結ぶ直線(図中の灰色の矢印線)をよじ登り軸(climbing axis)とし、よじ登り軸の長さを L_A とした。また、よじ登り軸から、よじ登り経路を 5s ごとにプロットした各点(plot point)までの距離を屈曲距離 L と定義した。

図-9(a)~(d)に屈曲距離 L をよじ登り軸の長さ L_A で除した値 L/L_A の頻度分布を粗石長径 D 別に示す。屈曲頻度 L/L_A は、よじ登り軸よりも z 軸の正方向に屈曲した場合を正、 z 軸の負方向に屈曲した場合を負とした。粗石長径 D の増加に伴い、 L/L_A の分布のばらつきが大きくなっている。これは、粗石長径 D の大きいケース($D=40, 60\text{mm}$)ほどクロコウナギが左右に大きく進路を変えながらよじ登ることを示している。

第3章の(1)において、粗石長径 D が大きいケース(粗石長径 $D=40, 60\text{mm}$)ほど遡上しているクロコウナ

ギの体を支える粗石数が減少したことに加え、次にクロコウナギが体を引っ掛けることのできる粗石までの距離が増加したことでよじ登り成功率が減少していたことが判明した。このことも考慮すると、クロコウナギは体を屈曲させて左右へ移動し、他の粗石に体を引っ掛けることで安定してよじ登ることができるため、屈曲頻度 L/L_A のばらつきが大きくなったと考えられる。一方、粗石長径 D が小さいケース(粗石長径 $D=10, 20\text{mm}$)では、粗石が小さいため粗石に体が接触する頻度が増加し、斜面上流方向に配置された次の粗石に到達できるため、屈曲頻度のばらつきが小さくなったと考えられる。

4. おわりに

本研究では、一定の傾斜角45°の斜面に設置した粗石長径を4通りに変化させ、ウナギの稚魚である平均体長200mmのクロコウナギの登坂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) 粗石長径の増加に伴って、よじ登り挑戦率は低下傾向を示すものの、その減少率は微小である。一方、よじ登り成功率は粗石長径 $D=20\text{mm}$ のケースで最

大となり、粗石長径がこの値よりも大きくても小さくても低下することが判明した。

- (2) クロコウナギは左右に体を屈曲させて、斜面上の粗石に体を引っ掛けるようにしながらよじ登る。
- (3) 粗石長径の増加に伴って、クロコウナギの屈曲する頻度のばらつきが大きくなり、平均よじ登り速度が減少する。

本研究では、平均体長が200mmのクロコウナギを用いて実験を行った。今後、様々な成長過程のウナギを用いて、さらに実験を進めることで、ウナギの登坂能力を活かしたウナギ用魚道について検討していきたい。また、本実験で得られた知見を踏まえ、既設の多様な水生生物が遡上できる魚道において、クロコウナギも含めた水生生物がさらに遡上しやすい魚道になると考えている。今後、実河川において本実験で用いた魚道や既設魚道を改良して適用できるか検討が必要である。

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に謝意を表す。

参考文献

- 1) 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.
- 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) Tanaka, H.: Progression in artificial seedling production of Japanese eel *Anguilla japonica*, *Fisheries Science*, Vol.81, pp.11-19, 2015.
- 4) Tsukamoto, K. and Arai, T.: Facultative catadromy of the eel *Anguilla japonica* between freshwater and seawater habitats, *Marine Ecology Progress Series*, Vol.220, pp.265-276, 2001.
- 5) 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.
- 6) 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.
- 7) 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.
- 8) 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.
- 9) 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.
- 10) 井良沢道也，石川芳治，水山高久，本間久枝：砂防における魚道の実態調査，砂防学会誌，第44巻，6号，pp.12-20, 1992.
- 11) 中村俊六：魚道のはなし，山海堂，pp.42-49, 1995.
- 12) 中坊徹次編：日本産魚類検索，東海大学出版会，2013.
- 13) Clay, C.H.: *Design of fishways and other fish facilities*, CRC Press, pp.121-127, 1994.
- 14) 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.
- 15) Legault, A.: Étude de quelques facteurs de sélectivité de passes à anguilles, *Bull. Fr. Pêche Piscic.*, Vol.325, pp.83-91, 1992.
- 16) Environment Agency: *Eel and Elver passes: A manual for the design and implementation of passage solutions at weirs, tidal gates and sluices*, England, pp.4-8, 2011.

(??? 受付)

EFFECTS OF GRAIN DIAMETER OF BOULDERS IN SLOPES ON CLIMBING CHARACTERISTICS OF *ANGUILLA JAPONICA*

Kouki ONITSUKA, Juichiro AKIYAMA, Kouhei KUNISAKI, Tomohide TAKEDA and Kousuke IZUMI

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. However, in the present circumstances, studies on the ecology of eels and fish ladder for eels mostly haven't advanced. Fish ladders for eels have been designed by considering that not only swimming capacity of eels, but also climbing capacity on a slope. In the present study, an investigation on climbing characteristics of *Anguilla japonica* was conducted under the condition that grain diameter of boulders in slopes are changed at a constant slope. As a result, it was found that climbing success rate is the maximum at 20mm of major axis. Also, *Anguilla japonica* climbed while using boulders by serpentine movement, and the averaged climbing speed has been decreasing with the increase of major axis.