

ニホンウナギ稚魚の遡上に最適なブラシ型Eel-ladder構造

後藤, 靖裕

九州大学大学院生物資源環境科学府資源生物科学専攻動物・海洋生物資源学講座水産増殖学研究室

望岡, 典隆

九州大学大学院農学研究院資源生物科学部門動物・海洋生物科学講座水産増殖学研究室

<https://doi.org/10.15017/1687702>

出版情報：九州大学大学院農学研究院学芸雑誌. 71 (2), pp.21-27, 2016-09-01. 九州大学大学院農学研究院

バージョン：

権利関係：



KYUSHU UNIVERSITY

ニホンウナギ稚魚の遡上に最適なブラシ型 Eel-ladder 構造

後 藤 靖 裕¹・望 岡 典 隆*

九州大学大学院農学研究院資源生物科学部門動物・海洋生物科学講座水産増殖学研究室

(2016年4月28日受付, 2016年5月10日受理)

Suitable Structure of Brush-type Eel-ladder for Upstream of Juvenile Japanese Eel *Anguilla Japonica*

Yasuhiro GOTO¹ and Noritaka MOCHIOKA*

Laboratory of Fisheries Biology, Division of Animal and Marine Bioresource Sciences,

Department of Bioresource Sciences, Faculty of Agriculture, Kyushu University, Fukuoka 812-8581, Japan

緒 言

ニホンウナギ *Anguilla japonica* はウナギ科ウナギ属に属し、北海道太平洋岸から朝鮮半島、中国、海南島まで東アジアに広く分布する (波戸岡, 2013)。本種は西マリアナ海嶺南部海域を産卵場としており (Chow *et al.*, 2009; Tsukamoto *et al.*, 2011), 孵化後、葉形仔魚は北赤道海流、黒潮によって運ばれ (Kimura *et al.*, 1994), 大陸棚近傍海域でシラスウナギ (以下シラス) に変態し、東アジア各地の沿岸に接岸する。接岸後はクロコ期を経て黄ウナギとなり産卵回遊までの間、汽水域・淡水域において数年から十数年を過ごした後、海洋へと産卵回帰する。本種の海洋における初期生活史は近年明らかにされたが、沿岸域加入後の生活史、特に稚魚の遡河回遊や親魚の産卵回遊については未だ不明な点が多い (福田, 2010)。

ニホンウナギは近年、漁獲量が激減しており、環境省は2013年に、国際自然保護連合 (IUCN) は2014年に本種を絶滅危惧IB類に指定した。漁獲量減少の要因には乱獲、生息場所の劣化と減少、海洋環境の変化などが挙げられている (Miller *et al.*, 2009)。生息場所の減少の要因として、ダムや堰といった河川横断構造物によって河川の連続性が物理的に遮断されていることが指摘されており、回遊性無脊椎動物など多くの生

物の遡上・降下に多大な影響を与えることが報告されている (White and Knights, 1997; 三矢・濱野, 1987)。その対策として堰堤やダムの中には魚道が併設されているものも存在し、現在までにアイスハーバー式魚道やバーチカルスロット式魚道など様々な型の魚道が考案・実用化されている。しかし、これらの多くはアユ、サケなどの遊泳能力の高い魚類を対象としたものであり、エビやカニなどの甲殻類や稚ウナギに対しては効果的でないという報告がある (Stuart and Mallen-cooper, 1999)。ニホンウナギ稚魚など遡上能力が弱い水生生物に対しても効果的でないことが考えられるが、その検証例は乏しいのが現状である (竹門, 2000)。

このような中で欧米ではEel-ladderと呼ばれるウナギ用魚道が活用されている (Solomon and Beach, 2004)。Eel-ladderはその魚道内部にブラシや凹凸などの特殊な構造を用いており、ヨーロッパウナギ *Anguilla anguilla* の遡上を助けている。またEel-ladderの最適な条件の研究もなされており、Legault (1991) は全長20cm程度のヨーロッパウナギに対するブラシ型構造の最適条件を、Voegtle and Larinier (2000) はブラシ型も含む異なる型のEel-ladderの評価を報告している。しかしこれらは河川内である程度成長した全長20~30cmの黄ウナギ期のものを用いており、河

¹ 九州大学大学院生物資源環境科学府資源生物科学専攻動物・海洋生物資源学講座水産増殖学研究室

¹ Laboratory of Fisheries Biology, Division of Animal and Marine Bioresource Sciences, Department of Bioresource Sciences, Graduate school of Bioresource and Bioenvironmental Sciences, Kyushu University

*Corresponding author (mochioka@agr.kyushu-u.ac.jp)

川に加入した時点のシラスウナギ期や全長10cm以下の個体を用いた研究例は報告されていない。またEel-ladderに関する研究はヨーロッパウナギを対象としており、ニホンウナギを用いた研究は報告されていない。そこで本研究ではニホンウナギ稚魚（以下クロコ）の遡上に最適なブラシ型Eel-ladder構造の解明を目的とした。

なお供試魚のサンプリングにあたって国土交通省遠賀川河川事務所河口堰管理支所吉永勝彦氏、および遠賀川河川環境保全モニターの渕上信好氏には多大なご協力を賜った。記して厚くお礼申し上げる。

材 料 と 方 法

1. 供試魚

本実験に用いたクロコは2014年7月18日に遠賀川多自然魚道でタモ網によって採捕した155個体である。採集時の気温は30.1°C、水温は22.7°Cであった。155個体のうち8個体の全長の平均値土標準偏差は65.5±5.87mm、湿重量は0.24±0.08gであった。採捕した個体は速やかに実験室へ持ち帰り、約1日淡水中で馴致後、実験に用いた。実験期間中は実験室の81L水槽に収容し、1日の実験終了後に水替えを行った。実験室の室温は約15°Cであり、供試魚の代謝を抑えるために実験を行っていないときは無加温で飼育し、実験時は開始1時間前から徐々に加温し水温20~22°Cを行った。また1日の実験が全て終了した後に冷凍ユスリカ幼虫を給餌した。実験室の照明は7:00点灯、19:00消灯の明期12時間、暗期12時間条件とした。

2. 実験水槽

本実験では2つのプラスチック容器を塩化ビニル樹脂の板でつなぎ合わせた実験水槽を用いた。長さ

30cm、幅10cmの塩化ビニル樹脂板に長さ5cm、太さ1mmのナイロン束（10~15本/束）を等間隔で埋め込みブラシ構造の板（以下、ブラシ板）を作成した。ブラシ板はナイロン束同士の間隔が異なる3種類を作成した。水流は外部濾過フィルターによって上流側の容器から下流側へ流れるように作成し、フィルターのホースにバルブを設置し水量を調節できるようにした。ブラシ板の傾斜はプラスチック容器の位置を変えることで調整した（図1, 2）。これによりブラシ板の下端を流れる水量（以下、流量）、ブラシ板の傾斜（以下、傾斜）およびナイロン束の間隔（以下、間隔）を任意に設定できるようにした。

3. 実験

（1）各群の遡上能力

供試魚は実験に伴う疲労の影響を考慮して無作為に3群（A~C群、1群49個体）に分けたため、3群間および同一群内における時間の経過に伴う遡上能力の差

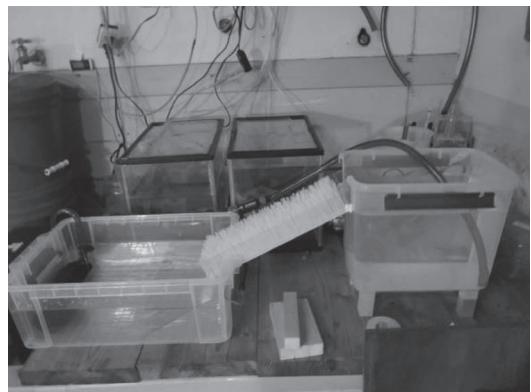


図1 作成した実験水槽

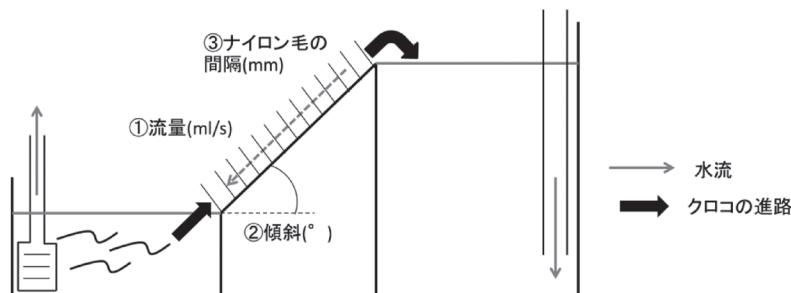


図2 実験水槽の模式図

の有無を検証した。実験は下記実験(2)の前日の7月20日、同実験終了後の25日および26日に行った。実験の条件は流量56ml/s、傾斜30°、間隔14mmに設定し、遡上成功数は下流側の容器へクロコ群を1群放し、20分間に上流側の水槽まで登った個体数とした。実験(1)および(2)で得られたデータはPearson's chi-squared testを行い、有意水準5%で検定した。

(2) 外部条件による遡上行動の違い

実験は2014年7月21日～24日に行い、実験(1)と同様に下流側の容器へクロコを1群放し、20分間に上流側の水槽に到達した遡上成功数を計数した。実験槽の条件は流量が24ml/s、56ml/s、80ml/sの3条件、傾斜30°、45°、60°、75°の4条件、間隔が7mm、14mm、21mmの3条件とし、それぞれを組み合わせた計36試験を行った。なお、本実験では1群につき1日3回(4日間で1群12回)試験を行い、供試魚の疲労を考慮して各試験の間に20分の休憩を設けた。

結果

1. 各供試魚群内および群間の遡上成功数

実験(1)におけるA～C群の採捕後2日目、7日目および8日目の遡上成功数を表1に、各群内および群間における遡上成功数を図3および図4に示した。A群の2日目と8日目、2日目のA群とB群、7日目のA群とC群については有意差が認められたが、それ以外について有意差は認められなかった。

2. 外部条件による遡上行動の違い

(1) 傾斜の違いと遡上成功数の関係

実験(2)における各試験の遡上成功数を表2に、同一流量および同一間隔で傾斜が異なる場合の遡上成功数を図5に示した。流量80ml/sでは間隔21mmと14mmでは遡上に成功した個体はほとんど確認できず、遡上が多数確認された7mmでも全ての傾斜の比較において有意差は認められなかった(図5A)。流量56ml/sではナイロン束間隔が14mmの条件では傾斜が大きくなるにつれて遡上成功数は減少する傾向がみられ、傾斜30°と60°、75°の間で有意差が認められた。しかし7mmの条件では傾斜によって遡上成功数に減少傾向はみられず、いずれの傾斜においても有意差は認められなかった(図5B)。流量24ml/sでは間隔21mmの条件では、傾斜が大きくなるにつれて遡上成功数が減少する傾向がみられ、傾斜30°と75°および45°と75°では有意差が認められた。一方で、間隔が14mmと7mmの条件では逆に傾斜が大きくなるにつれて遡上成

表1 各群の採捕後2、7および8日目の遡上成功数
(n = 49)

群	2日目	7日目	8日目
A	7	9	16
B	15	15	16
C	12	20	16

図3 各群の時間的経過と遡上成功数

(* : p < 0.05, ** : p < 0.01, 図4～7も同様)

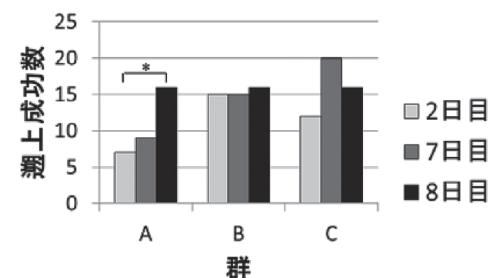
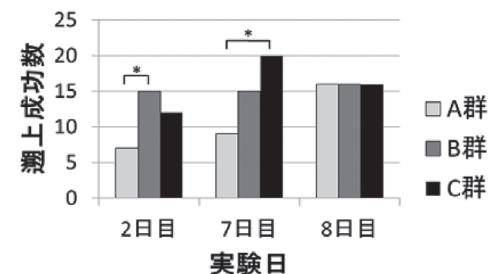


図4 同一日における群間の遡上成功数



功数は増加する傾向がみられ、14mmでは傾斜30°と75°で、7mmでは傾斜30°と75°および45°と75°で有意差が認められた(図5C)。

(2) ナイロン束の間隔の違いと遡上成功数の関係

同一流量および同一傾斜でナイロン束の間隔が異なる場合の遡上成功数を図6に示した。流量80ml/sでは流量56ml/sに比べ間隔7mmの遡上成功数が減少しているものの、いずれの傾斜においても間隔21mmと7mm、14mmと7mmの間で有意差が認められた(図6A)。流量56ml/sではいずれの傾斜においても間隔21mmと7mm、14mmと7mmで有意差が認められた(図6B)。流量24ml/sでは傾斜30°においていずれの比較

表2 実験(2)における各試験の遡上成功数 (n = 49)

流量	間隔	傾斜			
		30°	45°	60°	75°
80ml/s	21mm	1	0	0	0
	14mm	2	3	0	0
	7mm	21	26	15	19
56ml/s	21mm	7	0	1	0
	14mm	9	8	1	1
	7mm	26	31	31	30
24ml/s	21mm	13	8	6	2
	14mm	12	21	24	27
	7mm	19	21	27	35

図5 傾斜の違いと遡上成功数

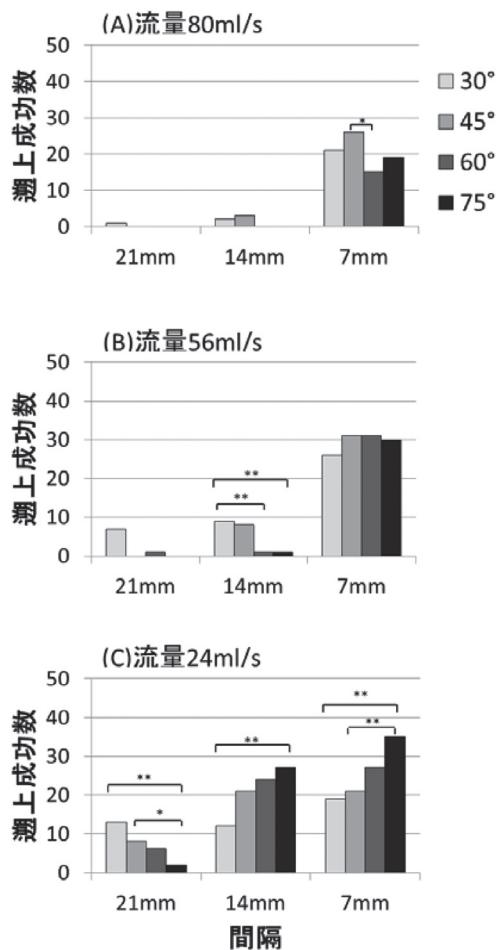
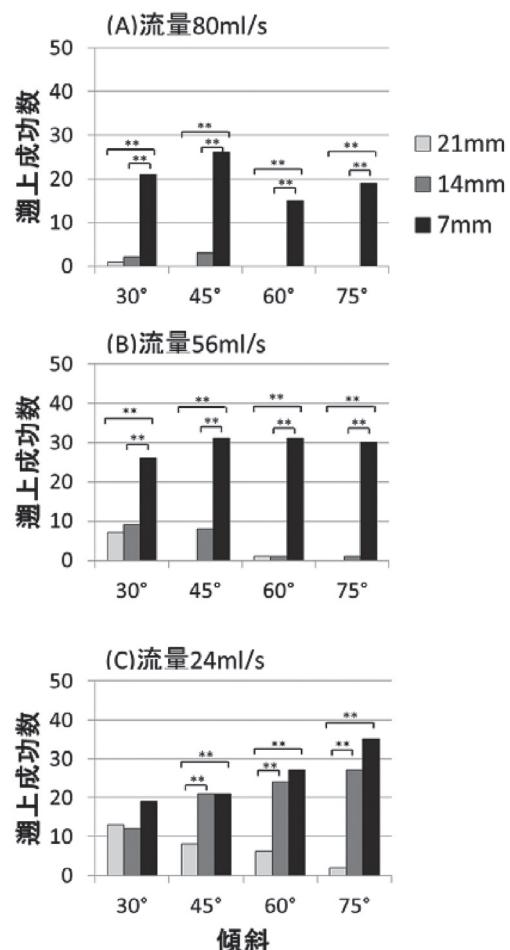


図6 間隔の違いと遡上成功数

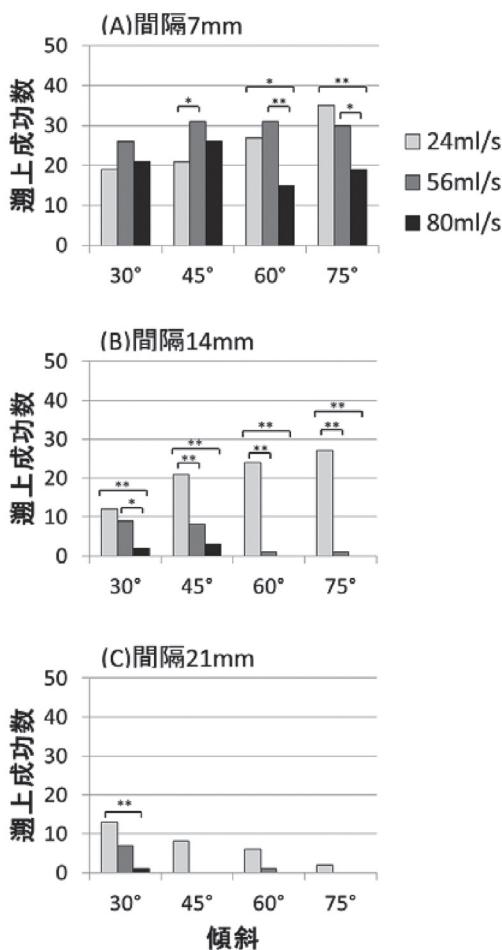


においても有意差は認められなかつたが、傾斜45°, 60°, 75°では間隔21mmと14mm, 21mmと7mmの間において有意差が認められた（図6C）。

（3）流量の違いと遡上成功数の関係

同一間隔および同一傾斜で流量が異なる場合の遡上成功数を図7に示した。間隔7mmでは傾斜30°および45°において有意差はほぼ認められなかつたが、傾斜60°と75°では流量24ml/s, 56ml/sと80ml/sに有意差が認められた（図7A）。間隔14mmでは傾斜30°において流量24ml/s, 56ml/sと80ml/sに、傾斜45°, 60°, 75°において流量24ml/sと56ml/s, 80ml/sに有意差が認められた（図7B）。間隔21mmではいずれの傾斜および流量でもほとんど遡上に成功した個体は確認されず、傾斜30°の流量24ml/sと80ml/sで有意差が認められた（図7B）。

図7 流量の違いと遡上成功数



められた（図7C）。

考 察

1. 群内および群間の遡上能力

実験(1)においてA群の採捕後2日目と8日目、同2日目のA群とB群、同7日目のA群とC群について有意差が認められたが、それ以外では有意差は認められなかつた。このことから1日毎でみると遡上能力に多少の差が認められるものの、実験(2)の期間を通して群間または群内の遡上能力の差は軽微であると判断された。

2. クロコの遡上に関わる外部要因

本実験によって流量、傾斜、間隔の3条件とクロコの遡上行動との関係が明らかとなつた。流量24ml/sでは傾斜が大きくなるにつれて間隔7mmおよび14mm時に徐々に遡上成功数が増加した。これは傾斜が大きくなつたことにより流量または流速が若干上昇し、福田（2010）で述べられているニホンウナギ稚魚の正の流走性が働いたために大きく傾斜が異なる30°と75°では有意差が認められたと考えられた（図5C）。間隔21mmでは14mmおよび7mmとは逆に遡上成功数が減少しているものの傾斜30°、45°と75°では有意差も認められることから、流量24ml/sでは傾斜が影響していたと考えられる。しかし流量56ml/sおよび80ml/sではいずれの傾斜と間隔においても有意差はほとんど認められず、傾斜の影響を受けていないと考えられた（図5A, B）。このことから本実験においてクロコの遡上に傾斜が影響するのは特異的な条件時と考えられた。

一方、ナイロン束の間隔のみで比較してみると明瞭な傾向がみられた。流量24ml/sでは傾斜が上昇するにつれて間隔7mmに比べ14mm, 21mmの遡上成功数が有意に増加した（図6C）。さらに流量56ml/sでは間隔7mm以外でほとんどクロコの遡上が確認できず、その傾向は流量80ml/sではさらに顕著であった（図6A, B）。これは増加する流量と傾斜角に対するクロコの遡上方法の違いによるものと考えられる。流量が少ないまたは傾斜が緩い条件では多くの個体が勢いよく一気に登る行動が主に観察されたが、流量が多く傾斜が大きい条件下ではほとんどの個体がこの登り方では遡上に失敗した。しかしナイロン束の間隔が狭い条件下ではナイロン束を支えにゆっくりと遡上している様子が観察され、遡上に成功した個体のほとんどが後者の登り方であった。このことからナイロン束の間隔は遡上成功の要因と考えられた。

また流量については、間隔7mmの条件ではいずれの傾斜においても遡上に成功した個体がある程度確認され、一部には有意差も認められたが、一定の傾向は見られなかった（図7A）。しかし間隔21mmおよび14mmでは流量が少ない時ほど遡上に成功した個体が多数確認され、特に14mmではいずれの傾斜においても有意差が認められた（図7B, C）。このことから流量もナイロン束の間隔と同様に遡上成功数に一定の影響を及ぼしていると考えられるが、ナイロン束の間隔によっては遡上成功数に有意差は認められなかった。以上より本実験においてクロコの遡上に最も影響を与える要因はナイロン束の間隔であると結論づけられた。

3. 現場への活用

本研究ではナイロン束の間隔がクロコの遡上成功数に最も影響していたと考えられた。このことは実際の河川においてブラシ型Eel-ladderを設置する際に密度が高いプラン構造を活用すれば傾斜を緩めることなく一定の効果が挙げられ、設置コストの低減につながると考えられる。また流量24ml/sでは間隔14mmでも傾斜に関係なく間隔7mmとほぼ変わらない遡上成功数が確認され、両者の間に有意差も認められなかった。ナイロン束の間隔が狭い構造物は内部にゴミなどが溜まり本来の機能が失われる可能性が高いが、人為的に流量を調節できる魚道では間隔を調節することで効果が維持できると考えられた。

本研究では長さ30cmのブラシ板を用いたが、実際の現場で活用するにはより長い魚道が必要である。今回の実験で得られたニホンウナギクロコに対する諸条件はブラシ型Eel-ladderを設計する際の基礎情報になるものと考えられる。また欧米のダムなどにはEel-ladderの途中にタイドプールと呼ばれる遡上個体が休憩できる部分が取り入れられている（Solomon and Beach, 2004）。今後、このような構造と遡上成功数の関係を明らかにする必要がある。さらに本研究では全長10cm未満の個体を用いたが、河川を遡上するニホンウナギは20cm以上の個体もみられるため、より大きいサイズに対する最適なEel-ladder条件について検証する必要がある。

要 約

ニホンウナギの漁獲量は近年著しく減少しており、その要因の一つとしてダムや堰の設置による遡上阻害による生息域の減少が指摘されている。これら河川横

断構造物に併設されている魚道は主に遊泳力の高い魚類を対象としており、遊泳力の乏しいシラスウナギやクロコの遡上には適さない。そこで欧米ではヨーロッパウナギやアメリカウナギ稚魚専用の魚道としてブラシ型などのEel-ladderが開発されており、本研究ではニホンウナギ稚魚にとって最適なブラシ型Eel-ladder構造について検討した。実験は平均全長65.5±5.87mmのクロコ期個体を対象とし、プラン構造の傾斜および流量、そしてブラシを模したナイロン束の間隔について3~4条件を設定し、遡上成功数を計数、比較した。その結果、ナイロン束の間隔が最も遡上成功数に影響を及ぼしていることが明らかとなった。またブラシ板の傾斜は遡上成功数に大きく影響しているとは考えられず、流量の影響も限定的な条件下のみであった。今後、実際の河川を考慮した実験規模や黄ウナギ期の個体で検討することによって現場における活用が期待される。

キーワード

ニホンウナギ, Eel-ladder, クロコ, 遡上

文 献

- Chow, S., H. Kurogi, N. Mochioka, S. Kaji, M. Okazaki and K. Tsukamoto 2009 Discovery of mature freshwater eels in the open ocean. *Fish. Sci.*, **75** (1): 257-259
- 福田野歩人 2010 浜名湖水系におけるニホンウナギの接岸遡河生態に関する研究. <http://hdl.handle.net/2261/49079>
- 波戸岡清峰 2013 ウナギ科. 中坊徹次編: 日本産魚類検索 全種の同定 第3版. 東海大学出版会, 秦野, 240, 1783-1784頁
- Kimura, S., K. Tsukamoto and T. Sugimoto 1994 A model for the larval migration of the Japanese eel: Roles of the trade winds and salinity front. *Mar. Biol.*, **119** (2): 185-190
- Legault, A. 1992 Étude de quelques facteurs de sélectivité de passes à anguilles. *Bull. Fr. Pêche Piscic.*, **325**: 83-91
- Miller, M. J., Kimura, S., Friedland, K. D., Knights, B., Kim, H., Jellyman, D. J. and Tsukamoto, K. 2009 Review of ocean-atmospheric factors in the atlantic and pacific oceans influencing spawning and recruitment of anguillid eels. *American Fisheries Society Symposium*, **69**: 231-249
- 三矢泰彦・浜野龍夫 1988 魚道のないダムが十脚甲殻類の流程分布に与える影響. 日水誌, **54** (3): 429-435
- Solomon, D., and Beach, M. 2004 Fish pass design for eel and elver (*Anguilla anguilla*). *Environment*

- Agency R&D Technical Report W2-070/TR
- Stuart, I.G., and M. Mallen-Cooper 1999 An assessment of the effectiveness of a vertical-slot fishway for non-salmonid fish at a tidal barrier on a large tropical / subtropical river. *Regul. Rivers*, **15**(6) : 575-590
- 竹門康弘 2000 長良川河口堰におけるモクズガニ *Eriocheir japonica* (de haan) の遡上量分析に基づく魚道の評価. 応用生態工学, **3**(2) : 153-168
- Tsukamoto, K., S. Chow, T. Otake, H. Kurogi, N. Mochioka, M. J. Miller, J. Aoyama, S. Kimura, S. Watanabe, T. Yoshinaga, A. Shinoda, M. Kuroki, M. Oya, T. Watanabe, K. Hata, S. Ijiri, Y. Kazeto, K. Nomura and H. Tanaka 2011 Oceanic spawning ecology of freshwater eels in the western North Pacific. *Nat. Commun.*, **2**: 179 doi: 10.1038/ncomms1174
- Voegtle, B., M. Larinier and P. Bosc 2002 Étude sur les capacités de franchissement des cabots bouche-rondes (*sicyopterus lagocephalus*, pallas, 1770) en vue de la conception de dispositifs adaptés aux prises d'eau du transfert salazie (île de la réunion). *Bull. Fr. Pêche Piscic.*, **364** : 109-120
- White, E. M. and B. Knights 1997 Dynamics of upstream migration of the European eel, *Anguilla anguilla* (L.), in the rivers Severn and Avon, England, with special reference to the effects of man-made barriers. *Fish. Manag. Ecol.*, **4**(4) : 311-324

Summary

Currently, catches of the Japanese eel, *Anguilla japonica* (Anguillidae) have decreased drastically compared with those reported previously. Habitat fragmentation in freshwater streams, mainly because of the presence of dams or sluices that block upstream access for juveniles and downstream access for adults, is thought to be a significant factor contributing to population declines, and hence declines in eel fisheries. Fish passageways may allow fast-swimming fish to pass by obstructions in the river but these are not well suited for juvenile eels. In Europe, the Eel-ladder, a form of fish passageway with a slope of consisting of grass, was developed to allow for *A. anguilla* and *A. rostrata* glass eels and elvers to bypass dams and other obstructions. In this study, we investigated the suitability of a brush-type Eel-ladder in an experimental stream to facilitate passage of *A. japonica* elvers. We determined three variables that influence upstream movement by elvers using this device: water volume, the angle of brush structure within the Eel-ladder, and the space between nylon supports in the Eel-ladder that was filled with brush. In our experiments, we manipulated these three variables and measured the number of glass eels that ascended to the top of the Eel-ladder during each manipulation. Our results showed that climbing success was greatest for the brush-filled space between the nylon supports, and we inferred that this variable would promote greater movement upstream by elvers. In contrast, the angle of the brush itself had no effect on movement success and the effect of water volume was limited. We propose that future experiments should test the climbing success rates of post-elvers (yellow eel) individuals using this experimental device and also the effects of brush Eel-ladders built to a larger scale for use in rivers.

Key words: *Anguilla japonica*, eel-ladder, elver, upstream