

ウナギの隠れ場における適切な底質粒径の提案

PREFERABLE DIAMETER OF GRAVEL ON RIVER BED FOR EEL'S DIVING

鬼東 幸樹¹・武田 知秀²・宮川 智行³

Kouki ONITSUKA, Tomohide TAKEDA and Tomoyuki MIYAGAWA

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非会員 清水建設株式会社 (〒104-8370 東京都中央区京橋二丁目16番1号)

³学生会員 九州工業大学大学院 工学府工学専攻 (〒804-8550 北九州市戸畑区仙水町1-1)

It is reported that eels (*Anguilla japonica*) dig holes in order to form their nests, which is crucial for their survival. Some of their nests are in an area with vegetation or a deposited gravel space. However, little is known about the ideal gravel diameter for eels to dive as well as the process of forming nests in each eels' grow stage. In this study, an investigation on behavioral characteristics of eels was conducted according to change in the gravel diameter on a pool bed and the eels' body length. The results showed that eels have a tendency to swim near the sidewall of the pool. In addition, it was observed that eels insert their heads into the gravel and shake their bodies while diving into the gravel. It was also found that eels of 200mm in body length tend to avoid diving into any gravel in the range of 2-5mm diameter. However, they preferably dive into the gravel at 20mm diameter. Lastly, it was found that eels of over 300mm in body length dive into the gravel regardless of the gravel diameter.

Key Words : *Anguilla japonica*, gravel diameter, body length, behavioral characteristics

1. はじめに

河川にはオイカワ (*Opsariichthys platypus*) やアユ (*Plecoglossus altivelis altivelis*) などの遊泳魚やウナギ (*Anguilla japonica*) などの底生魚、底生動物などが生息している。ところが、河川や沿岸域の干拓や埋め立てによりコンクリート護岸が整備されたことで、藻類、ゴカイ類、エビ類、魚類などが生息する干潟は1945年以降の60年間で約40%が失われたと推定されている^{1,2)}。このような沿岸域の開発等の原因で個体数を減少させている魚種の中で、近年ウナギが注目を浴びている³⁾。日本人は年間およそ6万トンのウナギを消費しており⁴⁾、水産価値の高い重要な種である。そのため、ウナギの生態やウナギに適した環境に関する研究が進められてきた。西マリアナ海嶺で孵化したニホンウナギ仔魚は、北赤道海流および黒潮に輸送され、シラスウナギと呼ばれる稚魚へと変態し、東アジア諸国沿岸域に到達する⁵⁾。その後、河川へ進入したシラスウナギは河口部付近で底生生活を送り、ゆっくりと成長しながら上流域および沿岸部を含む下流域へと拡散する。底生生活に移行したニホンウナギの体表には色素が沈着し、黄ウナギと呼ばれる成育期に入る。成育期に入り、数年から数十年経過すると成熟の開始とともに胸鰭や眼径が大きくなり、体に色素が沈着する等

外部形態に変化が生じ、銀ウナギと呼ばれる成長段階となる³⁾。河川や沿岸域でウナギが成長するには隠れ場の確保が不可欠である。ウナギは砂や泥の多い場所ではそれらに潜伏若しくは巣穴を掘り、石および落ち葉等の堆積物が存在する場所ではそれらの隙間を隠れ場とする⁶⁾。しかし、コンクリート化された沿岸域では、ウナギの隠れ場となる空間が乏しい^{7,8)}。ウナギは暗所を選好する特性を有するため、筒や魚巣ブロックなどを設置することで隠れ場を提供することが可能である⁹⁾。ところが、これらの手法ではウナギの成育に必要な餌生物の生息環境を提供することはできない。そのため、ゴカイ類やミミズ類、エビ類等が生息できる砂泥や砂利の堆積した空間²⁾をウナギの隠れ場として整備することが望ましい。

上記で述べたように、ウナギは隠れ場を確保する手段の一つとして、選好する領域に巣穴を形成することが知られており、現在、ウナギの巣穴の形成に関する研究が進められている^{3,10)}。Aoyama *et al.*¹¹⁾は福井川河口に隣接し、河床材料が泥の潮用排水路において、ポリエステル樹脂を用いて体長約600mmのウナギの巣穴を象った。その結果、ウナギの巣穴の最深部付近は水平で、開口部付近では地表に向かって43°~75°の緩やかなカーブを描いていることを解明した。Schepper *et al.*¹²⁾とSmith¹³⁾は、ウナギ目のチンアナゴ (*Heteroconger hassi*) が硬い尾部をド

リル状に回転させて砂層に巣穴を形成することを確認した。上田・岡崎¹⁴⁾は直径70cm、高さ55cmの円形水槽に敷設する砂または泥の粒径を変化させてウナギ目のハモ (*Muraenesox cinereus*)の巣穴形成行動を観察した。その結果、ハモはチンアナゴと異なり胴体をくねらせながら頭部を用いて巣穴を掘ることを解明した。以上のように、ウナギ目のいくつかの魚種の巣穴に関して若干の研究はなされているが、ウナギの隠れ場に関する知見は未だ少ないのが現状である。ウナギが成長するにあたり、重要となる隠れ場の条件を把握することは種の保全に貢献する。

本研究では、ニホンウナギの隠れ場に適した底質粒径を解明するため、矩形プールの底面に敷設する砂利の平均粒径およびウナギの体長を変化させ、ウナギの行動特性を観察した。なお、本研究では、沿岸部から上流域にまで広く分布する黄ウナギと呼ばれる成長段階に着目した³⁾。

2. 実験装置および実験条件

図-1(a), (b)に示す矩形プールを実験に用いた。プール内の撮影を可能にするために4面の側壁のうちの1面はアクリル板で、それ以外の3面および底面はグレーに塗装された木板で作製した。アクリル製側壁と木製側壁で構成される一つの隅角部を原点とし、アクリル製側壁に沿った水平方向を x 軸、プール底面から鉛直上向き方向を y 軸、アクリル製側壁に直角方向を z 軸と設定した。アクリル製側壁の長さは $L=0.9\text{m}$ 、プール側壁の高さは $H=0.5\text{m}$ 、アクリル製側壁に垂直な木製側壁の長さは $B=0.8\text{m}$ で、プール上部での照度を約500lxで固定した。プール内の底面は高さ $y=0.1\text{m}$ まで、グレーに塗装された木製板が設置されたFlat area($0 \leq x/L \leq 0.5$)と、平均粒径 d の砂利を底面から高さ $y=0.1\text{m}$ まで敷き詰めたGravel area($0.5 \leq x/L \leq 1$)の2つの領域に区分され、実験前に境界線に薄いベニア板が鉛直に設置されている。

表-1に実験条件を示す。Gravel areaに敷く砂利の平均粒径 d を2, 5, 20mmの3通りに変化させると共に、ニホンウナギ未成魚の平均体長 $\overline{B_L}$ を200, 300, 350mmの3通りに変化させ、合計9通りの実験を行った。砂利の最小粒径を $d=2\text{mm}$ とした理由は、2mmよりも粒径が小さい場合はウナギが穴を掘る際に水が濁り観察が不可能になるためであり、最大粒径を $d=20\text{mm}$ とした理由はウナギが最も上流に遡上するセグメント1の代表粒径(20mm以上)の最小値だからである。図-2に実験で使用したニホンウナギ稚魚を示す。今回実験に使用した平均体長 $\overline{B_L}=200, 300, 350\text{mm}$ のウナギはライフサイクル中で、活発に河川を遡上する特性を有している段階である。なお、本実験で用いたニホンウナギは、入手後水槽で水温

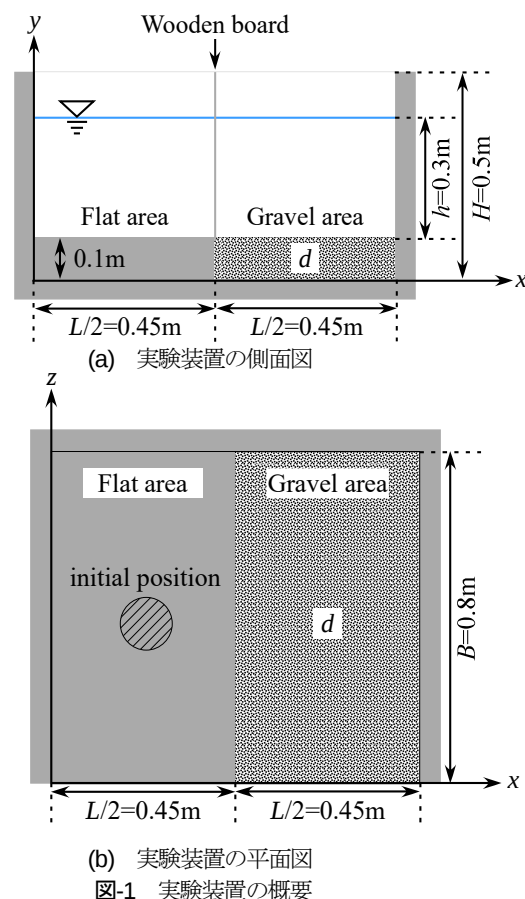


図-1 実験装置の概要

表-1 実験条件

Gravel diameter d (mm)	Averaged body length $\overline{B_L}$ (mm)		
	200	300	350
2	200d2	300d2	350d2
5	200d5	300d5	350d5
20	200d20	300d20	350d20



図-2 実験に用いたウナギ

20°Cのもと約3ヶ月間飼育したものである。プール内の水深を $h=0.3\text{m}$ とし、水温を20°Cに保持した。Flat areaの中心部 ($x=0.225\text{m}$, $z=0.4\text{m}$)に直径0.20mの円筒形金網を設置し、ウナギを5尾挿入した。ウナギを円筒形金網に挿入後、10分程度でウナギの挙動は沈静したため、実験環境に馴致したとみなし、Flat areaとGravel areaとを区分するベニア板と円筒形金網を静かに取り上げ、実験を開始した。水面およびアクリル製側壁からそれぞれ1.7m離れた位置に設置された画素数1440×1080、撮影速度30fpsのビデオカメラを用いてウナギの行動を3時間撮影した。上記の実験を各ケース1回ずつ行った。撮影後、

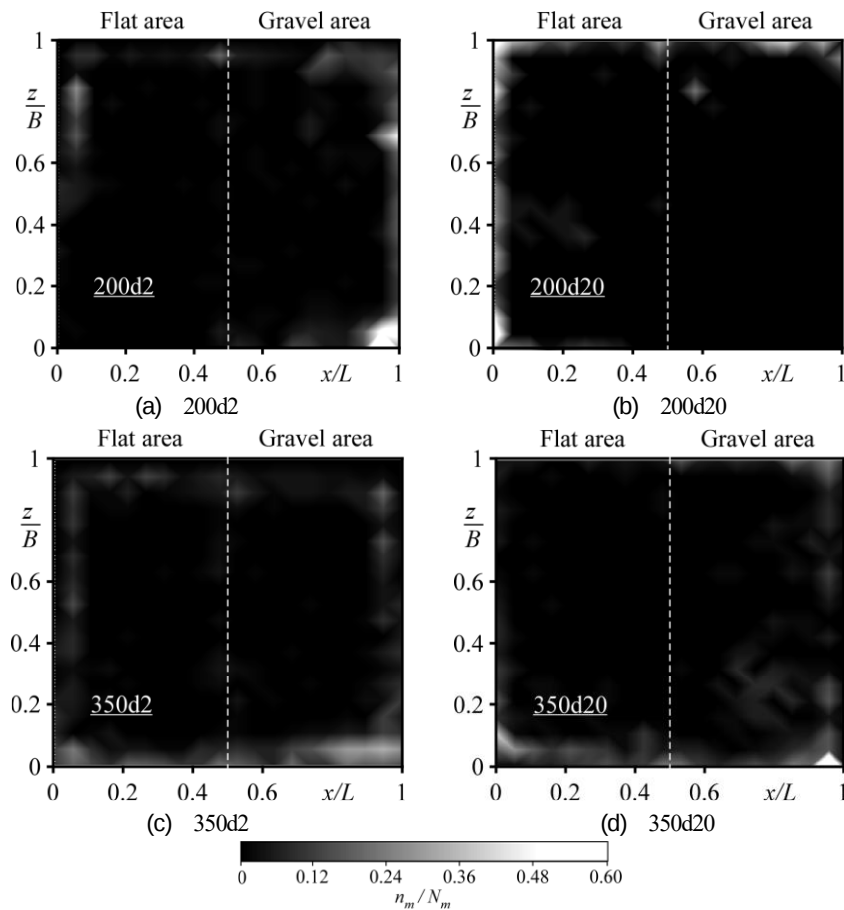


図-3 ウナギの存在率コンター

1sごとにキャプチャされた画像をもとにウナギの遊泳位置を特定した。

3. 実験結果

(1) ウナギの遊泳位置

プール内を x/L および z/B についてそれぞれ0.05間隔で区分し、合計 $20 \times 20 = 400$ メッシュに分割した。1sごとに各メッシュ内を遊泳するウナギの尾数をカウントした。ただし、砂利の中に潜って身を隠した個体はカウントしていない。全実験時間の各メッシュの総尾数 n_m を全メッシュの総尾数 N_m で除した値 n_m / N_m を算出した。

図-3(a)～(d)に砂利の平均粒径 d またはウナギの平均体長 $\overline{B_L}$ が最小または最大のケース(200d2, 200d20, 350d2, 350d20)におけるウナギの存在率 n_m / N_m のコンターを示す。いずれのケースにおいても、Flat areaおよびGravel areaの両領域でウナギは側壁付近に多く存在している。また、図-3に示した以外のケースにおいてもウナギが側壁付近を遊泳する傾向が観察された。

以上より、砂利の平均粒径 d およびウナギの平均体長 $\overline{B_L}$ に関わらず、ウナギは側壁付近を遊泳すること、すなわち側壁選好性が高いことが判明した。

(2) ウナギの各エリアの存在率

図-4(a)～(c)にウナギがFlat areaまたはGravel areaエリアに存在した時間率を、砂利の平均粒径 d およびウナギの平均体長 $\overline{B_L}$ ごとに示す。図-4(a)の $d = 2\text{mm}$ に着目すると、ウナギの平均体長 $\overline{B_L}$ が変化してもGravel areaの存在率に明確な傾向はなく、いずれのケースにおいても存在率は50%以上を示している。図-4(b)および(c)についても同様に、ウナギの平均体長 $\overline{B_L}$ と関連なく存在率が50%以上を維持している。

(3) ウナギの潜入する様子

ウナギが砂利の中に潜入し始める直前から砂利の中で停滞するまでの様子の一例(300d5)を図-5(a)～(e)に示す。ウナギが砂利の中に潜入し始めてからの経過時間を t_b とした。図-5(a)はウナギが砂利の中に潜入を始める直前の様子で、体を緩やかにくねらせながら砂利の上を遊泳している。ウナギの頭部(Head)はアクリル製側壁を向いており、全身を砂利表面に接触させている。図-5(b)はウナギが砂利の中に潜入を始めた直後の様子で、ウナギは頭部(Head)を砂利に潜入させ、頭部と尾部との中間の部位を鉛直上向きに振り上げている。図-5(c)はウナギが砂利の中に潜入し始めてから1s後の様子で、ウナギの頭部

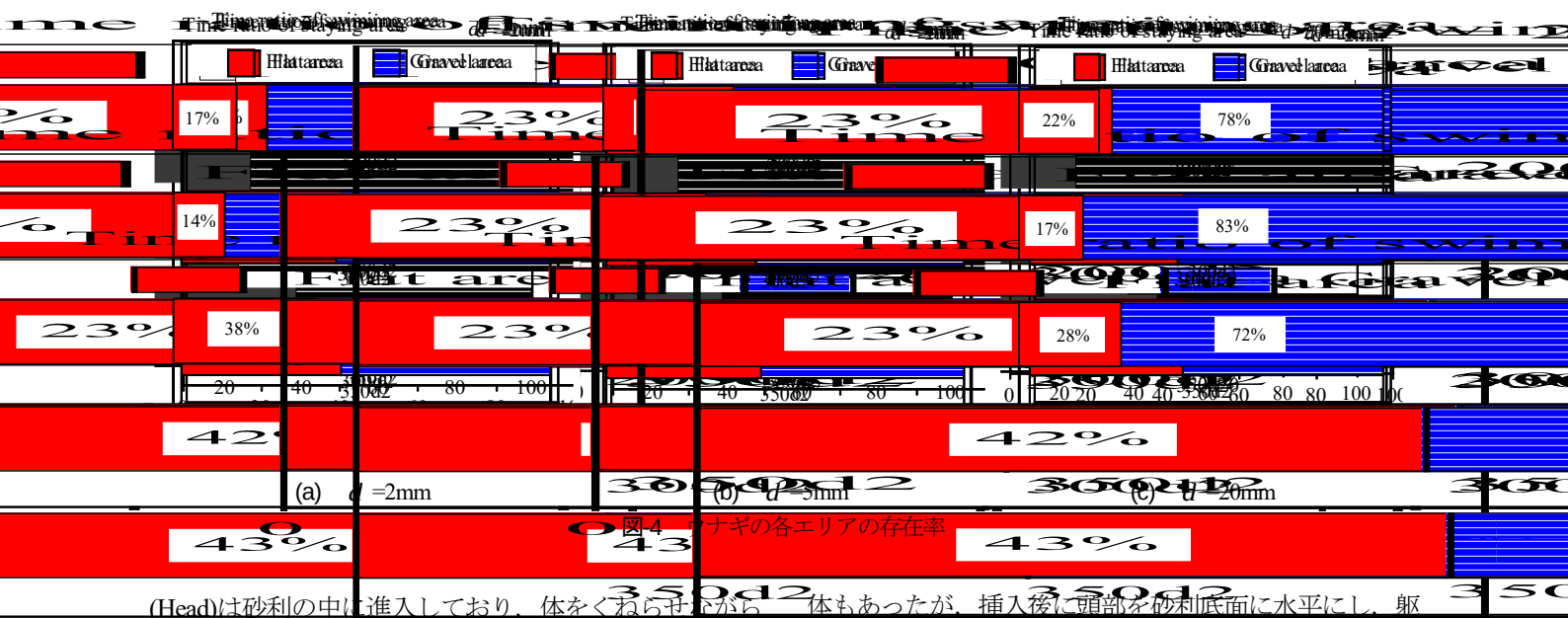


図4 ウナギの各エリアの存在率

(Head)は砂利の中に進入しており、体をくねらせながら深く潜ろうとしている。図-5(d)はウナギが砂利の中に潜り始めてから10s後の様子で、ウナギの頭部(Head)は砂利の中で水平方向を向いている。ウナギは頭部と尾部の中間以降の部位を左右に激しく振りながら砂利の中に潜っていった。砂利の中に頭部と尾部の中間程度まで体が隠れると、尾部付近のみを左右に穏やかに振りながらさらに砂利の中に潜った。図-5(e)はウナギが砂利の中で停滞を開始した時($t_b=60s$)の様子で、ウナギは砂利の中で体をほぼ水平にしている。

その他のケースにおいても、平均体長 $\bar{B}_L$ および平均粒径 d の変化に関わらず、ウナギは上述のようにゆっくりと砂利の上を遊泳した後に、頭部から砂利の中に潜入を試みる。ウナギは頭部を砂利内に挿入した後、砂利内に潜った躯幹を左右に揺らさず、水中に存在する躯幹および尾部を用いて推進力を得ている様子が観察された。

(4) ウナギの隠伏率

ウナギは一度砂利の中に潜って全身を隠すと本実験時間内においては砂利中から水中に浮上することはなかった。そのため、ウナギが砂利に潜って身を隠すことを隠伏(Burrowing)と命名する。ウナギの隠伏率 n/N を式(1)のように定義した。

$$\text{隠伏率} = \frac{\text{隠伏した尾数 } n}{\text{実験に用いた尾数 } N} \quad (1)$$

図-6にウナギの隠伏率 n/N と平均粒径 d との関係を示す。各ウナギの平均体長 $\bar{B}_L$ 別に示す。まず、ウナギの平均体長 $\bar{B}_L=200mm$ のケースに着目する。砂利の平均粒径 $d=2, 5mm$ ではウナギの隠伏率 n/N は0.4, 0.2をそれぞれ示しており、半数以上のウナギが隠伏していない。この2ケースにおいては、頭部を砂利の中に挿入した個

体もあったが、挿入後に頭部を砂利底面に水平にし、躯幹が水中に存在する状態でそのまま砂利の中に潜ることを止める様子も観察された。加えて、時間経過に伴いウナギが砂利の中に潜ろうと試みる回数が減少した。ウナギは身を隠す植生や浮石などが無い環境では砂利や砂泥を掘り起こすことがあるものの、巣穴を掘る能力は決して高いわけではないという Aoyama *et al.*¹¹⁾ の研究結果と一致している。一方、平均体長 $\bar{B}_L=200mm$ で平均粒径 $d=20mm$ のケースではウナギの隠伏率 n/N は1を示しており、全てのウナギが隠伏している。均粒径 $d=2, 5mm$ の場合と大きく異なる結果になった原因は現在不明である。

ウナギの平均体長 $\bar{B}_L=300, 350mm$ のケースに着目する。ウナギの平均体長 $\bar{B}_L$ および砂利の平均粒径 d に関わらずウナギの隠伏率 n/N は全ケースで1を示しており、全てのウナギが隠伏している。これは、平均体長 $\bar{B}_L$ が200mmの個体よりも、300, 350mmの個体の方が躯幹の筋肉が発達しているため、隠伏に成功したものと推定される。

(5) ウナギの隠伏位置

図-7(a)~(c)にウナギの隠伏位置を砂利の平均粒径 d ごとに示す。図中の点線はFlat areaとGravel areaの境界を示す。いずれの平均粒径 d およびウナギの平均体長 $\bar{B}_L$ においても、Gravel areaの側壁付近で多くのウナギが隠伏していることが確認される。これはFlat areaから側壁に沿って遊泳してきたウナギがGravel areaに進入し、壁面付近をそのまま遊泳後、砂利の中に隠伏したことが原因と考えられる。

以上より、砂利の平均粒径 d およびウナギの平均体長 $\bar{B}_L$ によらず、ウナギは側壁付近で隠伏することが判明した。これは、3.(1)の結果と同様で、ウナギは側壁付

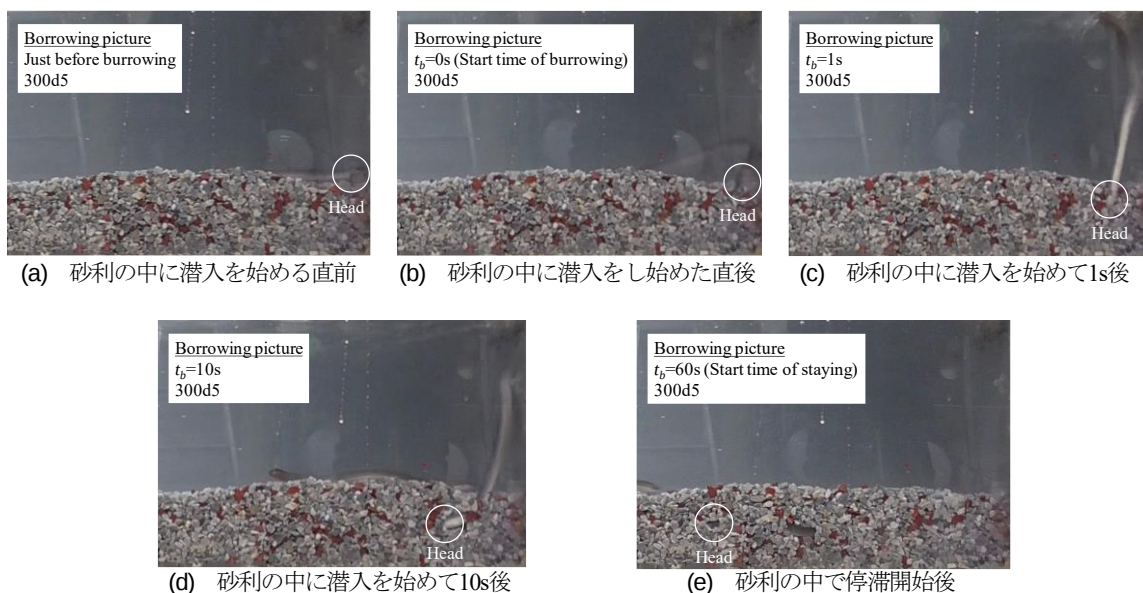


図-5 ウナギが砂利の中に潜る様子

近を選好していることを示している。

4. 考察

本研究では矩形プールの底面に敷設する砂利の平均粒径およびウナギの体長を変化させ、ウナギの行動特性に及ぼす影響を解明した。

ウナギはプール側壁付近を選択的に遊泳し、砂利を敷設した領域の側壁付近に隠伏する傾向がある。これは、一般的に魚類は側壁選好性を有するという研究結果と一致する¹⁾。平均体長が200mmのウナギに関しては砂利の平均粒径が5mm以下の場合、隠伏しようと試みるものの、躯幹の上部が砂利に隠伏した状態でさらなる隠伏を試みなくなる。

ウナギが砂利に隠伏しようと試みる場合、躯幹の下部を底面に対して直角方向に持ち上げる。躯幹の下部が水面よりも上部に位置すると捕食される可能性があるため、躯幹の下部まで水没する水深を確保することが望ましい。

本研究で使用したウナギは黄ウナギと呼ばれる成長段階で、沿岸部から上流にまで広く分布している³⁾。よって、沿岸部を含む下流域および上流域付近における側岸の河床に粒径20mm程度の砂利を敷設し、ウナギの体長分程度以上の水深を確保することが推奨される。一般的に、ニホンウナギは多様な環境に適応して生息できる能力を有しているため、その水系、流域が本来持っていた姿に近づけることにより、ニホンウナギの隠れ場として利用可能な環境が回復されることが望ましいとされている³⁾。ゆえに、本提案は主としてウナギの個体数の減少が著しい沿岸域および河川での緊急対応的な手法である。また、これらは、ニホンウナギが河川や沿岸域で成長する上で不可欠となる隠れ場を確保する一助となり、より

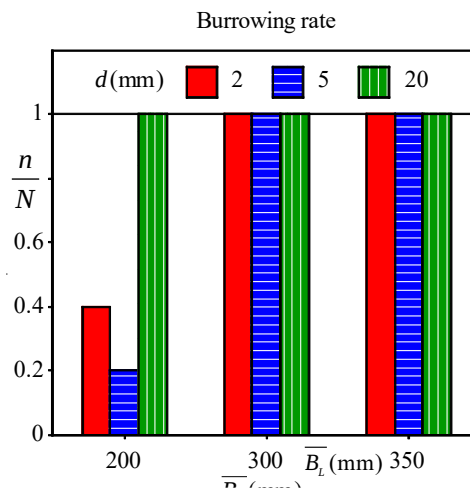


図-6 ウナギの隠伏率

多くのニホンウナギは外敵からの捕食を回避することが可能となる。したがって、個体数の減少は軽減され、種の保全に繋がる。しかし、これらの知見は河川の底質に焦点を当てたものに過ぎず、ニホンウナギの隠れ場を確保する上での十分条件とはいえない。ニホンウナギの隠れ場に適した水理条件等を含む環境条件について新たに解明していくことが今後の課題となる。

謝辞：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) 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.
- 2) 花輪伸一：日本の干潟の現状と未来，地球環境，Vol.11, No.2, pp.235-244, 2006.
- 3) 環境省：ニホンウナギの生息地保全の考え方，2017.

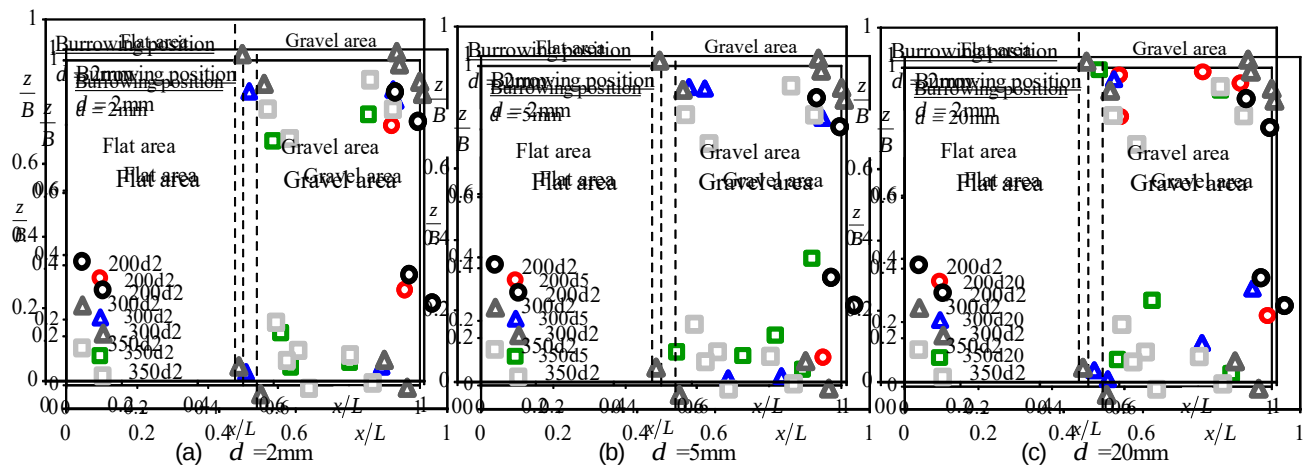


図-7 ウナギの隠伏位置

- 4) 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.
- 5) 米田彬史，板倉光，荒井考磨，海部健三，吉永龍起，三宅陽一，白井厚太郎，木村伸吾：耳石安定同位体比分析と文献調査に基づく日本におけるニホンウナギの自然分布域，日本水産学会誌，Vol.85, No.2, pp.150-161, 2019.
- 6) 水産庁：ウナギのためにできること，2018.
- 7) Labar, G.W. and Facey, D.E.: Local movements and inshore population sizes of American eels in Lake Champlain, Vermont, *Transactions of the American Fisheries Society*, Vol.112, pp.111-116, 1983.
- 8) Rossi, R.M., Bianchini, A., Carrieri, A. and Franzoi, P.: Observations on movements of yellow eels, *Anguilla Anguilla* L., after displacement from coastal waters to sea, *Journal of Fish Biology*, Vol.31, pp.155-164, 1987.
- 9) 丸山為蔵，石田力三：護岸用魚巣ブロックの集魚効果について，日本水産学会誌，Vol.28, No.1, 1991.
- 10) Dou, S.Z. and Tsukamoto, K.: Observations on the nocturnal activity and feeding behavior of *Anguilla japonica* glass eels under laboratory conditions, *Environmental Biology of Fishes*, Vol.67, pp.389-395, 2003.
- 11) Aoyama, J., Shinoda, A., Sasai, S., Miller, M.J. and Tsukamoto, K.: First observations of the burrows of *Anguilla japonica*, *Journal of Fish Biology*, Vol.67, No.6, 2005.
- 12) Schepper, N.D., Kegel, B.D. and Adriaens, D.: Morphological specializations in *Heterocongrinae* (Anguilliformes: Congridae) related to burrowing and feeding, *Journal of Morphology*, Vol.268, No.4, pp.343-356, 2007.
- 13) Smith, D.G.: Family *Moringuidae*, Fish of the Western North Atlantic, *Sears Foundation for Marine Research*, Vol.1, pp.460-567, 1989.
- 14) 上田幸男，岡崎孝博：飼育下におけるハモの巣穴形成行動と底質粒径の関係，日本水産学会誌，Vol.77, No.1, pp.61-67, 2011.
- 15) 鬼束幸樹，秋山壽一郎，松田孝一郎，野口翔平，竹内光：単独で遊泳するアユの挙動に及ぼす側壁の影響，土木学会論文集B1(水工学)，Vol.68, No.4, I_661-I_666, 2012.

(2020. 4. 2受付)