

チチブを対象とした長時間の全層貧酸素化の生態影響を緩和させる生物避難場に関する調査実験

上月 康則¹・田辺 尚暉²・岩見 和樹²・平川 倫²・齋藤 稔³・山中 亮一⁴

¹正会員 徳島大学 環境防災研究センター 教授

(〒770-8506 徳島県徳島市南常三島 2-1) E-mail: kozuki@tokushima-u.ac.jp

²学生会員 徳島大学大学院 先端技術科学教育部

(〒770-8506 徳島県徳島市南常三島 2-1) E-mail: c501501030@tokushima-u.ac.jp

³徳島大学生物資源産業学部水圏教育研究センター

(〒771-0361 徳島県鳴門市瀬戸町堂浦字地廻り壱 96-14) E-mail: caridina.ms@gmail.com

⁴正会員 徳島大学 環境防災研究センター 講師

(〒770-8506 徳島県徳島市南常三島 2-1) E-mail: ryoichi_yamanaka@tokushima-u.ac.jp

底層から表層までの全層にわたって貧酸素化が起こる水環境中で、その貧酸素化の影響を緩和することのできる構造物の形状についての検討を行った。尼崎運河は、慢性的に貧酸素化しており、時には全層で貧酸素化し、年間を通して生存が確認される魚種は底生魚のチチブだけであった。空隙を有する構造物を表層に設置すると、底層のみが貧酸素化するときには、そこを代替の棲み処とし、また全層で貧酸素化したときには水面付近に沈められた板の上に乗る、再曝気されたわずかな酸素を求めて水面に向かって鼻上げ行動をすることがわかった。この時、空隙への選好行動やなわばり行動などのチチブの一般的な行動は認められなかった。以上のことより、貧酸素化する水域では、空隙と定位可能な底面を有する構造物を水面付近に設置するとチチブの避難場として機能することがわかった。

Key Words : *Tridentiger obscurus*, hypoxia, Amagasaki Canal, shelter

1. 緒論

大阪湾湾奥にある尼崎運河では、壁面が直立の矢板でつくられているために生物の生息場の多様性に乏しく、かつ水門による水位管理下にあるため、水交換もされにくい状態にある。また、慢性的な底層での貧酸素化や、底質のヘドロ化、ときには全層の貧酸素化による魚類の大量死が確認されるなど生物にとっては非常に過酷な環境であると考えられる。このような環境の改善対策として、酸素曝気、底質改善、浅場の造成、水交換を促すことなどが考えられるが、当運河が航路として利用されていることや費用面を考えると講じることのできる方法は限られている。

著者らは、運河の直立の壁面を利用し、酸素不足が生じにくい表層部に適当な構造をした生物生息場を設けることで貧酸素化の影響を緩和させることを考えた。ここで、適当な構造とは、底層の貧酸素化の際に生物のすみかとなり、かつ全層貧酸素化したときにはその影響を緩

和させるように作用するものとした。

対象とした生物は、ハゼ科チチブ (*Tridentiger obscurus*) である。本種は、汽水域に生息する底生魚の一種であり、当運河では周年生存が見られる種であり、卵から成魚までの全生活史が確認できる唯一の魚種でもある。またチチブの食性が肉食性の強い雑食であることから、この種を対象とすることによって食物網を通した物質循環をより活性化させ、運河内の環境改善につながるものが考えられる。なお、運河で行ったチチブの胃内容調査(未発表)では、藻類、ヨコエビ類、スジエビ類しか確認されていないことと、これらの餌資源は当運河内には豊富に存在していること、さらに捕食行動にエネルギーを消費する仔稚魚を食する機会は少ないことなどからチチブを保全することによる生態系への悪影響は小さいと考えられる。

著者らのこれまでの調査では、2016年5月から毎月1回行っているカゴによる魚類採捕調査において貧酸素化が発生したときにも少数ではあるものの、表層部でカゴに入る様子が確認されている¹⁾。また、室内実験では高い貧

酸素耐性を有する魚種であること²⁾や、空隙に対して強い選好性がある³⁾ことを明らかにしている。

以上のことを踏まえて、本研究では、運河での設置に適した生息場の構造を把握するために調査実験を行った。具体的には、現場に近い環境で同種間の攻撃行動、貧酸素時の構造物に対する行動を観察するため、多数の個体を用いた水槽実験を行った。また、尼崎運河での月1回の水質、魚類調査を継続して行った。

2. 実験方法

(1) 運河内での魚類相

運河(図-1)の水面下1mを表層、水底(水深約3m)を底層として毎月水質と魚類相の調査を行った。魚類相調査では、簡易なカゴを表層と底層に設置し採捕された魚種を記録した。

(2) ハゼ科チチブ(*Tridentiger obscurus*)の生態

チチブは、汽水域に生息するハゼ科魚類であり、礫・転石、各種人工物などをすみかにし、その場所を占有する傾向がある。満一年で体長約4cmとなる。最小成熟体長は雌2.7cm、雄3.0cmである⁴⁾。また既往の知見より、チチブは、頭幅の2~5倍の大きさの穴を好むことが知られている⁴⁾。実験に用いたチチブは、兵庫県尼崎運河で採捕したものであり、大学の水槽で適宜水を換え、1日に1度、乾燥赤虫を与えながら飼育した。

(3) 攻撃行動と空隙の関係

成魚である体長約5cmの個体識別したチチブA~Eの5尾(表-1)を実験に用いた。実験では縦55cm、横60cm、高さ90cmの水槽に、水温 $16\pm 0.2^{\circ}\text{C}$ 、塩分25psuの人工海水を深さ20cmまで注いで使用した(図-2)。実験中のDOは $8.75\pm 0.5\text{mg/L}$ であった。

この水槽にチチブ2尾を入れ、塩ビ管を設置した場合と、そうでない場合で実験を行った。観察は、供試魚導入から18時間経過してから始め、そこから6時間の行動を対象に、ビデオカメラで録画し、行動解析を行った。行動に関しては、塩ビ管の利用時間や攻撃行動の回数を計測した。ここで、塩ビ管利用とは、塩ビ管の中に入る、

行動、攻撃行動とは相手に向かって突進、あるいは噛みまたは外側にいて塩ビ管の側面沿いに定位するといったことを指す。なお、実験ケースは、5尾のチチブの総当たりとなる10通り行った。

(4) 構造物の設置位置と酸素環境による行動変化

実験には、運河の10月ごろの水温にあたる 20°C の人工海水を深さ60cmまで注いだ不透明の円筒水槽($\phi 60\text{cm}$)と簡易な円形の構造物を用いた。構造物には、直径40cmの円盤2枚の間に、放射状に高さ2cmの仕切り板をはさみ、16個の空隙を設けた。他に酸素曝気等の仕組みを持たず、空隙を複数持つのみといった簡易な構造物である。また対象地の矢板護岸の凹部に収まることを想定し、このサイズの円形状とした。以下「構造物」という(図-3)。

構造物を水面付近(水面下3cm)においたケースsと水槽底面においたケースb、全層に酸素のあるケース1(DO $7.5\sim 8.5\text{mg/L}$ 、塩分25psu)、底層のみ貧酸素化させたケース2、全層貧酸素化させたケース3(DO 1.0mg/L 以下、塩分25psu)の3種類の組み合わせで、計6種類の条件下で実験を行った(図-4)。ケース2の貧酸素水塊は低塩分の海水(水温 20°C 、塩分10psu)を高さ30cmまで注いだ後、窒素曝気した無酸素の海水(水温 20°C 、塩分25psu)を水底からチューブを用いて高さが60cmとなるよう注入することで作成した。

表-1 実験で使用したチチブ

個体	体長 (cm)	重量 (g)	性別
A	5.56	2.06	雄
B	5.27	1.95	雄
C	5.21	2.02	雄
D	5.34	1.92	雌
E	5.18	1.92	雄

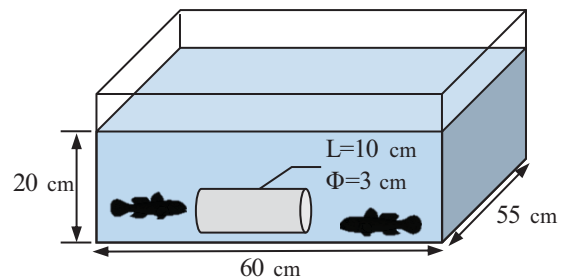


図-2 塩ビ管を用いた実験

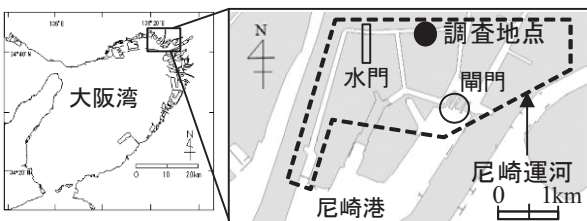


図-1 調査地点図

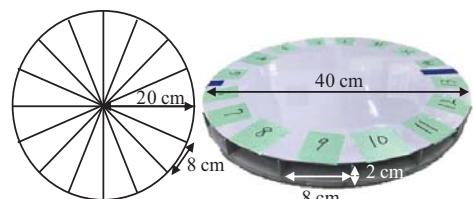


図-3 円盤構造物

ここに尼崎運河で採集したチチブを16尾(体長 5.03 ± 1.31 cm, 体重 3.77 ± 2.53 g) 入れ, デジタルカメラで構造物周辺のチチブの行動を撮影した. 実際には, 水槽内でチチブを12時間馴致した後に1時間撮影し, 映されたチチブの位置を1秒間隔で計3600回観察した. 結果では, 構造物内の空隙にいた個体の数(以下, 空隙内個体数)と構造物の天板上にいた個体の数(以下, 天板上個体数)の合計個体数を構造物の利用個体数とした. この実験をそれぞれの条件で6回繰り返した. また, 各実験の最終10分間については天板上の個体の攻撃行動回数を計測し, さらに最終1分間についてチチブを1尾無作為に選出し, 呼吸数を計測した.

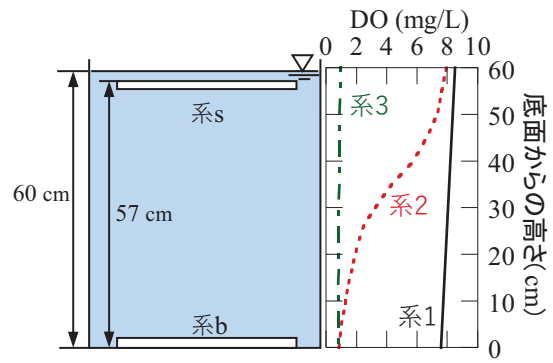


図4 実験水槽の概要と各ケースでのDO分布

3. 調査実験結果

(1) 水質, 魚類相

水質調査では9月に表層DOが低下しており, 2018年9月14日の水質調査では全層で貧酸素化(図-5)がみとめられた他, 多くの月で底層DOが3 mg/Lを下回る貧酸素化が発生していた(図-6).

魚類調査ではチチブが毎月確認された他, 冬季にはシマイサキの幼魚がよく見られた. 全層で貧酸素化した9月には魚の大量死が認められ, チチブのみが採捕された(図-7). ただし, チチブも水面付近で漂う, 矢板の壁面に張り付く, または浮遊物の上に乗る鼻上げ行動をとる個体が多かった.

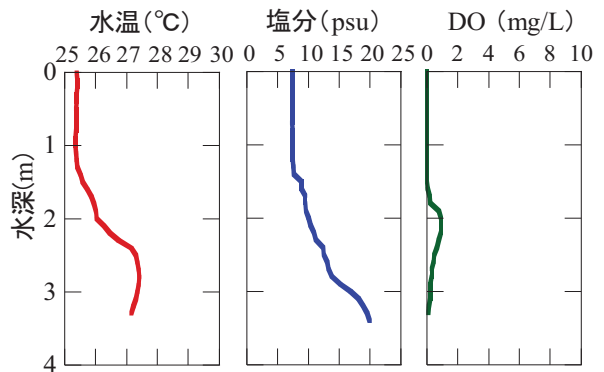


図5 2018年9月14日の水質

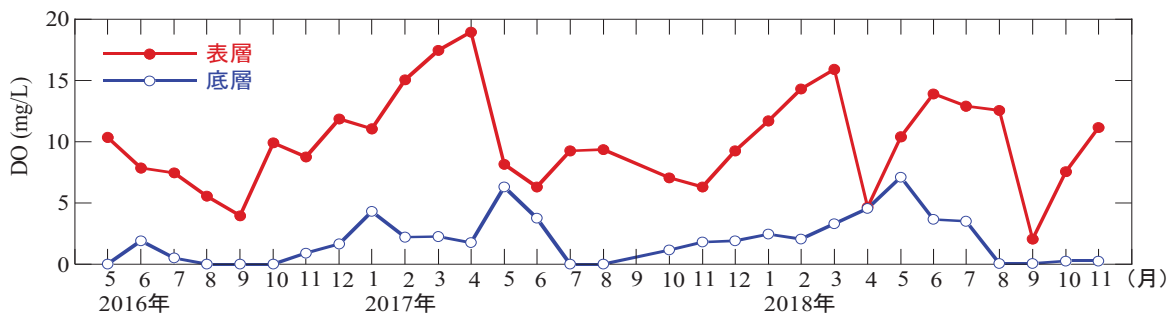


図-6 月ごとの表層と底層の溶存酸素

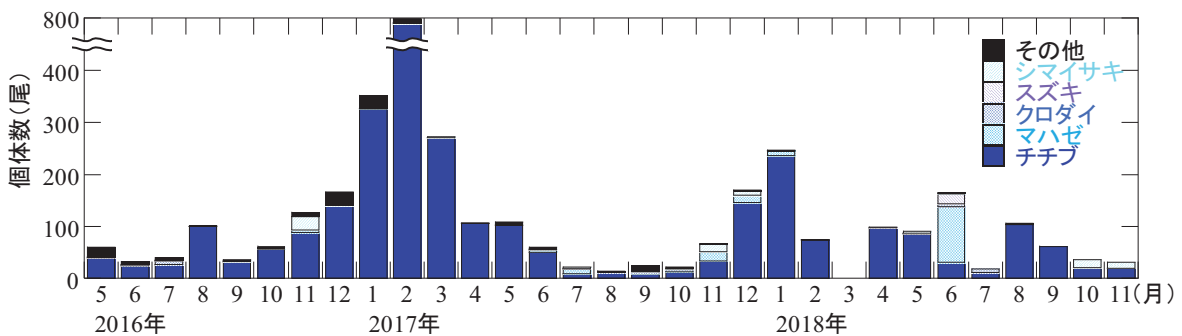


図7 魚類採捕調査

(2) 空隙の使用率と攻撃行動回数

水槽にチチブを2尾入れた場合の個体間の行動を観察した結果、攻撃する個体は決まっていた(図-8)。なお図-8の表記は矢印(→)の左側の個体が右側の個体を攻撃していたことを表す。その関係は組み合わせによって異なっていた。例えば、個体BとAを一緒に入れたケースでは個体BがAに27回攻撃を行い、その逆はなかったが、個体BとDを一緒に入れた場合にはBが一方向的に攻撃される個体となった。

ここに塩ビ管を設置すると、攻撃する、される関係は変わらなかったものの、ケースB→C、ケースC→Aを除く8ケースで攻撃行動は減少し(図-8)、平均すると攻撃行動回数は半分以下(46%)となった(図-9)。

また攻撃行動を行う個体と塩ビ管を占有する個体は一致し、一方のチチブのみが塩ビ管を占有することがわかった。観察時間(6時間)を100%としたときの、各チチブの塩ビ管の利用時間の割合を求めたところ、ケースE→A、ケースE→B、ケースE→C以外では観察時間の80%にわたって、一方の個体が塩ビ管を占有していた(表-2)。また、個体Eは、個体Aや個体Cと一緒に入れた場合には空隙の利用時間は短かったものの、頻繁に中を通過するなど、空隙を強く意識したような行動を示し、他の個体を塩ビ管に近付けさせなかった。

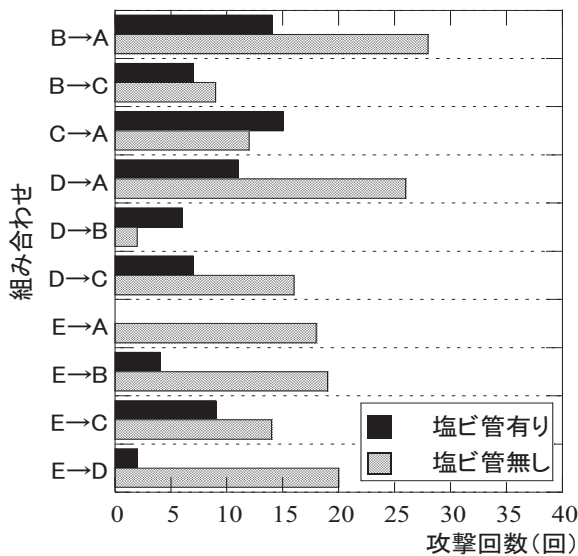


図-8 組み合わせごとの攻撃行動回数

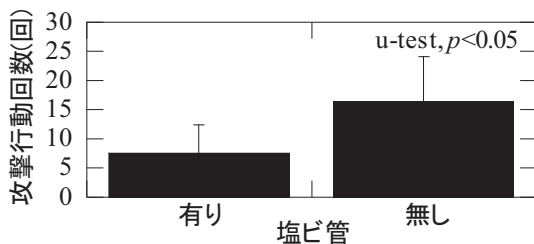


図-9 塩ビ管の有無と攻撃行動回数

(3) 酸素環境と構造物利用

酸素が十分に有り構造物を水面付近に置いたケース1sと同様の酸素環境で構造物を底面に置いたケースと比較すると、空隙内個体数、天板上個体数のいずれでもケース1bの方が多かった。一方、底層を貧酸素化させたケース2では、底層を多くのチチブが忌避し、水面付近に設置したケース2sの方が底面に置いたケース2bよりも空隙内個体数は多くなり、個体数の傾向は逆転した。全層酸素化させたケース3では、構造物位置が水面付近のケース3sではケース3bに比較して天板上個体数は多くなり、利用個体数もケース3sの方が多くなるといった特徴が見られた(図-10c)。

また、ケース1bとケース2bでは天板上でチチブの個体同士の攻撃行動が多く見られたが、全層が貧酸素化すると水面付近での個体数密度が高くなったにもかかわらず、ケース3sでは、チチブの攻撃行動はほとんど見られなくなった(図-11)。図-12より、円盤上の個体数が増加するほど攻撃行動回数も増加する傾向が見られるが、全層貧酸素化したケース3sのみ、大きくその傾向から外れていることがわかる。

全層が貧酸素化したケース3では、水面付近に構造物を置いたケース3s内の大半のチチブは円盤上に腹鰭をつけ、鼻上げ行動を示したのに対し、底面に構造物を置いたケース3bのチチブは壁面に張り付き鼻上げ行動をとっていた。このとき、チチブの呼吸数を比較するとケース3sの方が有意に少なかった(図-13)。

4. 考察

(1) 空隙を持つ構造物の設置と攻撃行動の変化

チチブ2尾と1本の塩ビ管を置いたケースで、一方の個体のみが塩ビ管を占有したこと(表-2)は縄張りを持つチチブの性質⁴⁾として理解できる。ただし、攻撃、被攻撃の関係は体長の大小のみでは説明できず、その要因を明らかにすることはできなかった。このような一方のみが攻撃行動を行うような階層的な関係はブリやヒラメの稚魚でも見られ、攻撃行動が多い個体

表-2 塩ビ管の占有率

個体	組み合わせ相手と塩ビ管利用率 (%)				
	A	B	C	D	E
A	-	0	0	0	0
B	97	-	97	0	0
C	79	0	-	0	0
D	95	86	94	-	0
E	0	89	25	42	-

は仔魚の段階で特徴のある行動を示していた⁵⁾。また、塩ビ管を設置すると攻撃行動は収まる傾向にあった。チチブはガラスで遮られた反対側の個体にも反応して呼吸数が上昇する⁶⁾ことなどから、視覚的情報に強く頼って行動する種であると言える。塩ビ管があると自身がそこに身を隠すとともに、相手を視認する機会が減少すること、また塩ビ管から離れた開けた場所で行動する時間も減少することから、他の個体への攻撃行動回数が減少したと考えられる。

(2) 全層での貧酸素化の影響を緩和させる構造物

酸素が十分にあり水槽底面に構造物があるケース 1b は河床の転石の空隙などを住処とするチチブにとって今回の実験設定の中で最も好ましい条件であると考えられる。これに対し、構造物の位置が水面付近となった 1s の利用個体数が少なかった結果は底生魚であるチチブの性質を反映させたものと考えられる。

しかし、底層のみを貧酸素化させたケース 2 の水槽内では、貧酸素水塊を忌避して、チチブは表層に集まる傾向にあり、特に空隙内を選好していた(図-10)。このことから表層に十分に酸素がある環境では、表層部に置かれた構造物の空隙であっても一時的な避難場所として機能することがわかった。

全層が貧酸素化したケース 3 では、構造物の空隙よりも天板上の方がより多くの個体に使用されていた。また、天板上では個体数密度が高くなっているにもかかわらず攻撃行動はほとんど見られなくなっていた。この時、天板上の多くの個体が水面付近で再曝気されたわずかな溶存酸素を求めて鼻上げ行動を示していた。なお、室内実験と同じようなチチブの行動は、2018年9月14日に運河で全層貧酸素化した時の運河内でも見られた。このことより、全層で貧酸素化するような生命の危機にあるときには、空隙の選好性や縄張り行動といった性質は失われ、個体の維持に必要な酸素を求める行動を優先して示すことがわかった。以上のことから、底層から表層までの全層で貧酸素化するような環境では、チチブの鼻上げ行動を支えることができるように水面付近に天板を持つ構造物を設置すると、そこが貧酸素の影響を緩和するように作用することを明らかにすることができた。

5. 結論

尼崎運河は慢性的に貧酸素化しており、周年個体が確認できたのはチチブのみであった。

2尾のチチブを用いた水槽実験では、決まった個体だけが攻撃行動を示した。空隙をもつ構造物を水槽内に

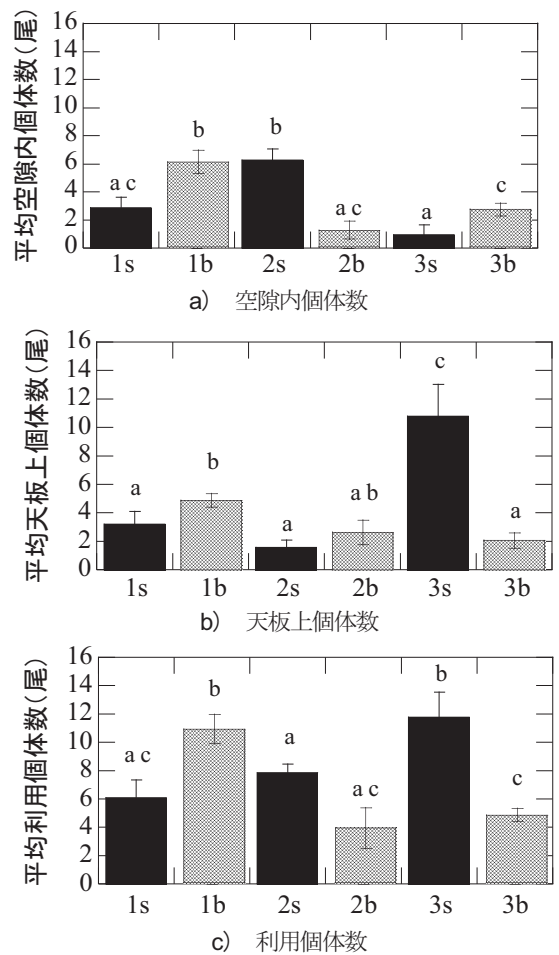


図-10 ケースごとの各個体数

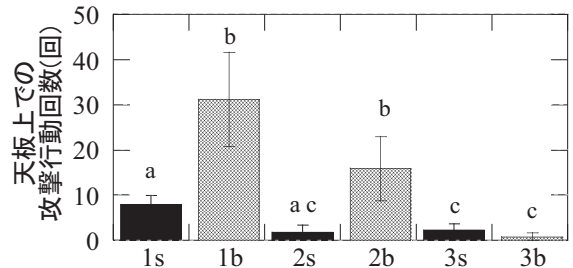


図-11 天板上の攻撃行動回数

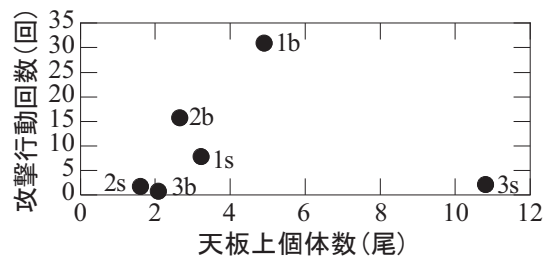


図-12 天板上の個体数と攻撃行動回数

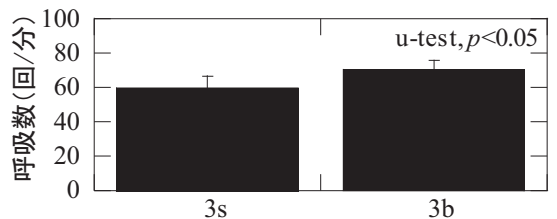


図-13 全層貧酸素化したケースでの呼吸数

置くと、攻撃をした個体が構造物を占有するものの、攻撃行動の回数は減少した。

16尾のチチブを用い、貧酸素環境下での行動を解析した。DOが十分にある場合には底層の空隙を強く選好したが、底層が貧酸素化するとDOのある表層において構造物に集まり、代わりの住処として機能することが示唆された。また、全層で貧酸素化したときには水面付近に沈められた構造物の天板上に乗ることで、再曝気されたわずかな酸素を求めて水面に向かって鼻上げ行動を支える効果があることもわかった。この行動は、尼崎運河で全層貧酸素化したときにも見られた。なお、全層貧酸素化すると、空隙への選好行動やなわばり行動などのチチブの特徴は確認されなくなったため、天板部分は単純な板で良いと考えられる。

以上のことから、「水面付近に設置した円盤構造物」のように表層に空隙を持ち、水面付近に天板が存在することは、当運河に設置する適当な構造物に求められる特徴と考えられる。

謝辞：本研究はJSPS 科研費 17K01921，調査にご協力いただいた元徳島大学大学院 鶴江智彦氏，上田敦史氏，瀧口裕己氏，徳島大学大学院 藍澤夏美氏，宮内尚輝氏，戸

田涼介氏，五洋建設(株) 竹山佳奈氏，尼崎運河〇〇クラブ，尼崎港管理事務所の支援を受けて行われた。ここに謝意を表す。

参考文献

- 1) 竹山佳奈, 山中亮一, 河野博, 岩本裕之, 宮本一之, 平川倫, 上月康則: 都市部運河域を利用する魚類を対象とした生物共生護岸に関する実験的検討, 海洋開発論文集, 33号, No.2, pp.845-850, 2017.
- 2) 上月康則, 平川倫, 竹山佳奈, 松重摩耶, 西上広貴, 岩見和樹, 山中亮一, 宮本一之: 酸素塩分勾配水槽を用いたチチブの貧酸素応答に関する実験的研究, 海洋開発論文集, 33号, No.2, pp.839-844, 2017.
- 3) 上月康則, 岩見和樹, 平川倫, 齋藤稔, 竹山佳奈, 西上広貴, 田辺尚暉, 山中亮一: 貧酸素時における底生魚チチブの水面近傍の空隙利用に関する実験的研究, 海洋開発論文集, 34号, No.2, pp.498-503, 2018.
- 4) 川那部浩哉, 水野信彦, 細谷和海編: 日本の淡水魚, p605, 山と溪谷社, 2001.
- 5) 阪倉良孝: 魚類の攻撃行動の個体発生に関する研究, 日本水産学会誌, 67巻, 4号, pp.605-609, 2001.
- 6) 神田猛, 板沢靖男: チチブの酸素消費量における負の群効果と個体間距離, 九州大学農学部学芸雑誌, 40巻, 4号, pp.191-196, 1985.

(2019.2.7 受付)
(2019.4.24 受理)

A STUDY ON THE SHAPE OF A STRUCTURE FOR MITIGATING THE IMPACT OF LONG-TERM HYPOXIA OCCURRING IN ALL LAYERS ON *TRIDENTIGER OBSCURUS*

Yasunori KOZUKI, Naoki TANABE, Kazuki IWAMI, Rin HIRAKAWA
Minoru SAITO and Ryoichi YAMANAKA

The shape of a structure capable of mitigating the impact of hypoxia in water environments where hypoxia occurs in all layers from the bottom to the top was studied. The Amagasaki Canal is chronically hypoxic; occasionally all layers are hypoxic. The only fish confirmed to live in this canal throughout the year is the benthonic fish *Tridentiger obscurus*. This study showed that if a structure with gaps is installed in the surface layer, when only the bottom layer is hypoxic, the fish uses it as a substitute habitat. When all layers are hypoxic, the fish swims above the plate submerged near the water's surface to obtain a minute amount of re-aerated oxygen and raise its nose to the surface. Under this condition, *Tridentiger obscurus*' preference for and tendency to occupy gaps is absent. The aforementioned observations show that an effective means to mitigate the impact of hypoxia on *Tridentiger obscurus* is installation of structures with gaps and a bottom surface that the fish can settle on near the water surface.