

外来魚ブルーギルの捕食量抑制に与える人工音響の効果

順応と集団比較

米倉 竜次

Effect of underwater acoustic sounds on the predation impact of invasive bluegill sunfish

The influence of accommodation and population difference

RYUJI YONEKURA

外来生物は生物群集や生態系に不可逆的な影響を与える場合があるため、健全な自然環境の維持や持続的な生態系サービスの享受という観点から、外来生物の駆除・管理に関する研究が進んでいる。^{1,2)}ブルーギル (*Lepomis macrochirus*) は 1960 年に日本に導入され、現在では全ての都道府県での定着が確認されている北米原産の淡水魚である。³⁻⁶⁾日本の侵略的外来種ワースト 100 に選定されたほか、2005 年 6 月に施行された外来生物法 (特定外来生物による生態系等に係る被害の防止に関する法律) では特定外来生物に指定され、輸入・保管・飼育・運搬・放逐などの行為が制限されている。これらの処置により、未侵入地への人為的な移動・拡散は今後、抑制されると思われる。しかし、ブルーギルはすでに日本国内の広範囲な定着が確認されていることから、未侵入地への分布拡大を抑制するだけでは十分ではなく、すでに定着が確認されている侵入地での影響緩和に向けた対策も同時に行う必要がある。

岐阜県では、主に美濃地方のため池や河川を中心にブルーギルの定着が確認されており、侵入地での積極的な駆除活動が NPO、一般市民、国土交通省、岐阜県などにより行われている。ため池などの水位操作が可能な場所では主に池干しにより、河川やダム湖などでは、刺網、投網、釣り、トラップなどを使用した駆除が実施されている。しかし、これらの方法には限界がある。例えば、池干しによる駆除はブルーギルの効率的な駆除ができる反面、他の水域へのブルーギルの逸脱や同じ場所に棲む水生生物への影響が看過できない場合がある。一方、刺し網、投網、釣り、トラップなどを使用した駆除では、全ての生息個体を根絶やしにすることは通常、困難である。さらに、厄介な問題として、駆除活動は通常、ごく限られた空間スケールにおいて個別的な対策が実施される。そのため、大きな個体群が他の場所に存在すれば、その場所からの個体の移入・供給により、駆除を実施した場所でも速やかに個体群が回復する場合がある。このように、すでに広範囲な定着が確認されているブルーギルのような外来生物を駆除する場合、非常に多くの労力・費用・時間がかかる反面、期待できる駆除効果や生物群集や生態系の復元効果が少ないという問題点がある。しかし、ブルーギルの影響を緩和させる技術がないため、現在では、費用対効果の低い個体除去による集団の抑制に依存している状況にある。

岐阜県河川環境研究所では、ブルーギルの捕食量や産卵行動を阻害する技術として、水中人工音響を利用した基礎研究をおこなってきた。科学的知見は非常に少ないものの、⁷⁾人為的活動にともなう水中音響は、難聴^{8,9)}、行動の変化¹⁰⁾、内分泌学的なストレス反応¹¹⁾など、海洋・陸水域の水生生物に対して影響を及ぼす可能性が指摘されてい

る。こうした水生生物に与える水中音響の特性をブルーギルに適用することで、ブルーギルを完全に駆除できない環境下で、ブルーギルの侵略的影響を緩和させることができるかもしれない。水中人工音響の特徴として、(1)水中では減衰率が少なく、広範囲での効果が期待できる、(2)技術・労力の負担が少なく継続的に実施できる、(3)スイッチのオン/オフにより制御可能であり在来生物や生態系への不可逆的な悪影響を回避できる、といった利点がある。

現在までに、ブルーギルの捕食量を抑制させる音響の抽出（最も効果的な音圧と周波数の抽出）、ブルーギルの産卵行動ならびに受精卵のふ化率を低下させる音響の抽出（最も効果的な音圧と周波数の抽出）を報告した。¹²⁻¹³⁾しかし、これらの成果はある特定のブルーギル集団を用いた短期的な実験結果に基づいている。そのため、抽出した音響の効果が異なるブルーギルの集団でも有効であるのかといった問題や、より長期的な効果があるのかといった問題がわかっていない。本報告では、今までに抽出した音響に関する効果の持続性（どれほど、効果が持続するのか？）と効果の汎用性（どの集団でも効果的であるのか？）についての室内実験を行ったので報告する。

キーワード：影響緩和、外来生物、人工音響、ブルーギル、捕食

方法

本報告では、先に述べたとおり (1) 音響効果の持続性に関する実験、(2) 音響効果の汎用性に関する実験、の成果を報告する。ここでは、まず、(1)と(2)に共通の実験方法について説明を行う。次に、(1)と(2)に特有の方法論について、個別に説明を行う。なお、この研究は「特定外来生物による生態系等に係る被害の防止に関する法律（平成16年法律第78号）」第5条の規定に基づき、特定外来生物の飼養等の許可を受け実施した。

実験方法（共通）

音響実験には、室内に設置した角形 FRP 水槽（0.6 t）を用いた（第1図）。水槽の水深は0.6 m、水温は20–22°Cに保った。採餌場所として、水中スピーカー（US300; FOSTEX, USA）の前面から約10cm離れた水槽の底面に1枚の円形容器（半径20cm、深さ5cm）を沈めた。容器の基質として、直径15cmほどの砂利を1cmの厚さに敷き詰めた。容器の中に、餌として2ブロック分の冷凍赤虫（平均620 mgDW、UVアカムシ、キョウリン）をゆっくりと解凍しながら均等に沈めた。

実験には野外から採集したブルーギルの未成熟個体を用いた。実験までの期間、配合飼料等を与えブルーギルを飼育した。その後、蓄養水槽から任意に選んだブルーギル1個体をできるだけストレスを与えないようすみやかにタモ網ですくい、実験用の FRP 水槽に放流した。放流後、ただちに音響による実験処理を開始した。各実験は、ミネレーター（MR1; NTI, Europe）により調節した特定の周波数（Hz）ならびに音圧（dBu）をもつ正弦波をパワーアンプ（WA-H60; Panasonic, Japan）により音圧を増強させた後、それを水中スピーカーから連続して暴露させる方法を採用した。

また、実験処理区の有効性を評価するための対照実験（コントロール）も行った。対照実験は、水中スピーカーから音を鳴らさないでそのまま放置する以外、実験区と同様の設定を施した。

実験方法（持続性に関する実験）

人工音響の持続的効果を検証する実験では、上記の手順による人工音響の実験を12日間に渡り、繰り返した。実験では、過去の実験¹²⁻¹³⁾で最も効果の認められた周波数と音圧（すなわち、100Hzならびに+6dBu）を選び暴露した。実験処理区ならびにコントロールともに異なる3個体を用い実験反復とした。この実験では、岐阜県中津川市にある柵の湖から採集した個体を用いた。実験に用いた個体の標準体長（±SE）は、122±1.2 mmである。実験は1日につき4時間連続の暴露とし、その時間のみ採餌場所に餌を投入し採餌させた。実験期間中、計12回にわたり、音響を暴露した4時間に採餌した捕食量を算出した。捕食量の算出は、実験中のブルーギルにストレスを与えることを極力回避するために、容器の中に残された残餌量を集め、高温乾燥機により一定条件下（60°C、24時間）で乾燥させた後に残餌量を測定し、採餌量（mgDW）を推定した。

実験方法（汎用性に関する実験）

人工音響の汎用効果を検証する実験では、岐阜県内の3つのブルーギル集団から採集した個体を用いた。柵の湖（中津川市）、コギロ池（海津市）、濁池（各務原市）である。個体の平均標準体長（±SE）は120±1.5 mm、ならびに平均湿重は65.1±2.8gである。集団間で標準体長や湿重の違いはなかった（ANOVA; $F = 23.1$, $P = 0.65$ ）。

人工音響の汎用性に関する実験では、正弦波の周波数による捕食量抑制の効果が集団間で異なるかどうかを検証した。そのため、音圧は過去の研究で最も捕食量の抑制効

(1) 人工音響の実験風景



(2) 胃洗浄法による捕食量の測定



第1図 人工音響実験の様子(1)と胃洗浄法による捕食量の測定(2)。(1)の写真には複数のブルーギルがみられるが、実際の実験では、各実験につき1個体のブルーギルを放逐した。

果がみられた+6 dBuに保ち、周波数のみを計5段階(50 Hz、100Hz、200Hz、800Hz、1.6kHz)に操作した。それぞれの周波数に対して、異なる4-6個体を用い実験反復とした。実験には計90個体(椈の湖26個体、コギロ池、32個体、濁池32個体)を用いた。1回の実験は4時間とし、1日あたり最大2回、8:30-12:30もしくは13:00-17:00に実験を行った。

実験終了後、実験に用いた個体にストレスを与えないようすみやかにタモ網ですくい、水産用麻酔薬(FA-100)で麻酔した。採餌活性を測定するため、試験魚の胃内容物を胃洗浄法により採集した。採集した胃内容物は0.01mmメッシュの網で集めた。集められた胃内容物は高温乾燥機を用い一定条件下(60℃、24時間)で乾燥させた後、採餌量

(mgDW)を定量した。

結果と考察

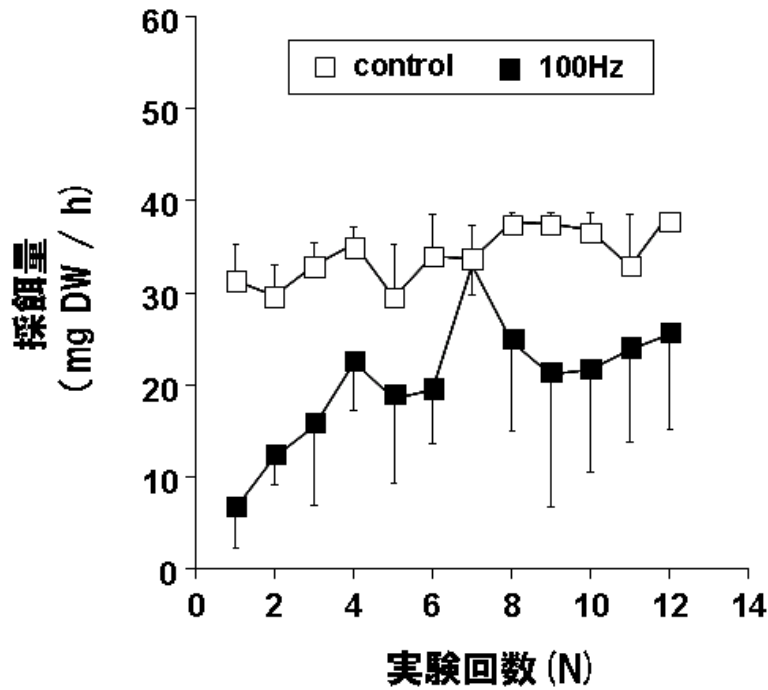
持続性に関する実験

実験期間中の平均として、人工音響を暴露しない環境と比べて、音響を暴露した環境では、約43%の捕食量の低下が認められた。実験回数(計12回)を繰り返しの変動内効果(within subject effect)として統計処理した分散分析(繰り返しのある分散分析)によると、おおよそ2%の水準で帰無仮説が棄却され、実験処理区(100Hzならびに+6dBuの音響を暴露した実験区)とコントロール(音響を暴露しない対照区)とで捕食量の違いが認められた(第2図)。この傾向は、先に行われた研究の結果¹²⁻¹³⁾を支持し、改めて人工音響(100Hzならびに+6dBuの音響)の捕食量抑制に対する有効性が確認された。

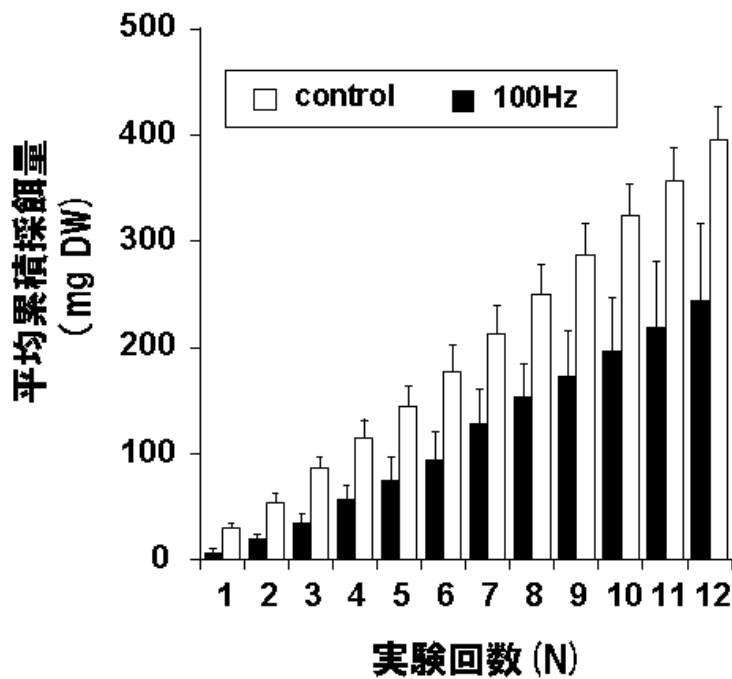
各処理区(実験処理区ならびにコントロール)の変動内効果をみると、ブルーギル個体の捕食量は12回の実験ごとに異なる傾向を示した。コントロールでは、平均捕食量は12回の実験にわたり比較的、安定していたが、実験処理区ではブルーギル個体の捕食量は実験回数が増えるにつれ増加する傾向にあった(第2図)。しかし、変動内効果と実験処理との交互作用(変動内効果×実験処理)では危険率86%ほどであることから、実験回数が捕食量の増減に与える影響は、実験処理区とコントロールとのあいだで顕著に変わらない可能性があった。すなわち、人工音響が継続的にブルーギル個体の捕食量を抑制していたと解釈できる。言い換えれば、ブルーギルの馴化による人工音響の効果減退はなかったとも言える。

実験最終日までのブルーギルの累積捕食量は、コントロールで平均390mgDWに対して、実験区で220mgDWであった(第3図)。12日間の累積捕食量でも実験区ではコントロールの約56%に捕食量が留まった。過去に行った4時間の人工音響の暴露では、今回の実験と同じ周波数・音圧の場合、ブルーギルの捕食量は約16%に抑制されている¹²⁻¹³⁾。このことから、捕食量抑制の程度は若干、減少する可能性も示唆された。

残念なことに、水中スピーカーの耐久性に問題があったため、12回以上の実験を行うことが困難であった。そのため、人工音響によるより長期的な捕食量への影響については把握できていない。そのため、この報告は少なくとも12日間(1日につき4時間)の人工音響の暴露という条件



第2図 人工音響の暴露回数（実験回数）と平均捕食量との関係。特定の正弦波音響（100Hz ならびに+6dBu）を暴露した場合（実験区）と暴露しなかった場合（コントロール）との比較。図中のエラーバーは標準誤差（SE）を示す。



第3図 人工音響の暴露回数（実験回数）と平均累積捕食量との関係。図中のキャプション等は、第2図と同様。

つきで立証されていることに留意しなくてはならない。

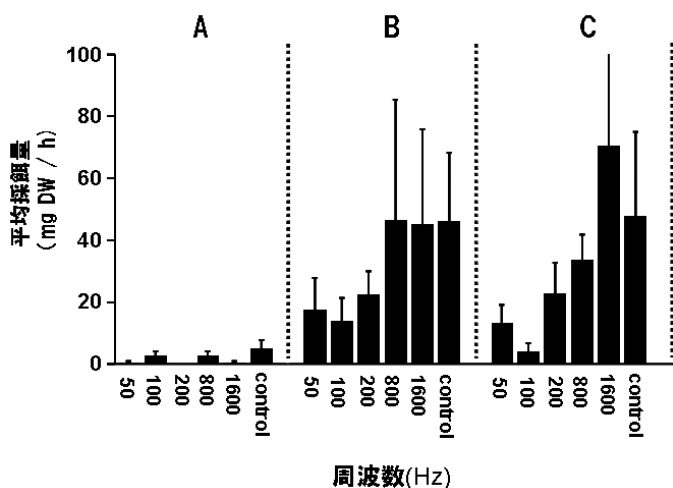
汎用性に関する実験

ブルーギルの集団間で実験期間中の捕食量に顕著な違いがみられた。捕食量の平均で見ると、椈の湖>コギロ池>濁池の順に平均捕食量が多かった(ANOVA, 集団の効果, $F = 4.16$, $P = 0.002$) (第4図)。特に、濁池の集団では周波数の違いに関係なく、また、人工音響を暴露しなかったコントロールでも、かなりの捕食量の低下がみられた。他の2集団と比較して、濁池からの個体は実験手順に対して非常にナイーブであり、人工音響の有無にかかわらず平均捕食量が低下したと考えられる。

波数であることが検証された。

要約

1. 淡水生物群集に侵略的な影響を及ぼす可能性のあるブルーギルの影響を緩和させるため、ブルーギルの捕食量を人工音響により抑制できるかを検証した。本報告では、特に、人工音響の効果の持続性(どれほど、効果が持続するのか?)と効果の汎用性(どの集団でも効果的であるのか?)について報告を行った。
2. 人工音響の効果の持続性を検証するため、計12日間にわたる人工音響の暴露実験を行った。人工音響を暴露した実験区と暴露しないコントロールの比較から、少なくとも12日の実験期間中では、人工音響に対するブルーギルの順応は確認されず、捕食量が抑制できることが検証された。
3. 人工音響の効果の汎用性を検証するため、岐阜県の3集団から採集したブルーギルを用いた人工音響の暴露実験を行った。50–100Hzの周波数の正弦波を暴露させた場合に、3集団のブルーギルともに平均捕食量が最も抑制された。このことから、捕食量を抑制させる人工音響の特性は集団ごとに違いはなく、捕食抑制に汎用的効果のある人工音響の特性が検証された。



第4図 異なる周波数をもつ正弦波音響を暴露した場合のブルーギル集団の平均捕食量の比較。濁池(A)、コギロ池(B)、椈の湖(C)。図中のエラーバーは標準誤差(SE)を示す。

周波数の違いによる平均捕食量への影響は、椈の湖ならびにコギロ池でみられた。両集団ともに、低周波(50–100Hz)の音響を暴露した場合に最も捕食量が抑制され、先行研究の結果¹²⁻¹³⁾を支持する結果となった。しかし、濁池の集団では、先述のとおり、暴露した周波数の違いに関係なく捕食量の低下が認められたため、周波数の違いの効果は危険率8%程度であった。

濁池では顕著な効果が検証できなかったものの、集団に顕著な違いもなく、暴露する周波数の違いにより、捕食量の抑制効果が異なることが示唆された。今回の実験、ならびに、過去の実験を考慮すると、ブルーギルの捕食量を最も抑制させる効果のある人工音響は50~100Hz程度の周

文献

- 1) Clavero M, Garcia-Berthou E. Invasive species are a leading cause of animal extinctions. *Trends Ecol. Evol.* 2005; 20:110.
- 2) Leung B, Lodge DM, Finnoff D, Shogren JF, Lewis MA, Lambertini G. An ounce of prevention or a pound of cure: bioeconomic risk analysis of invasive species. *P. Roy. Soc. B.* 2002; 269:2407-2413.
- 3) Froese R, Pauly D. (Editors). *FishBase*. World Wide Web electronic publication. www.fishbase.org, version (10/2008).
- 4) Scott WB, Crossman EJ. Freshwater fishes of Canada. *Fish. Res. Board Can. Bull.* 1973; 184: 1-966.
- 5) 桐生 透. 第1章移入された外来魚の問題点 第3節ブルーギル(2)分布と生息域. 「ブラックバスとブルーギルのすべて—外来魚対策検討委託事業報告書」全国内水面漁業協同組合連合会, 東京. 1992; 89-91.
- 6) 日本生態学会編集. 村上興正・鷺谷いづみ監修 「外

来種ハンドブック」地人書館, 2002.

- 7) Popper AN, Hastings MC. The effects of anthropogenic sources of sound on fishes. *J. Fish. Biol.* 2009; 75:455-489.
- 8) Scholik AR, Yan HY. Effects of boat engine noise on the auditory sensitivity of the fathead minnow, *Pimephales promelas*. *Environ. Biol. Fish.* 2002a; 63:203-209.
- 9) Scholik AR, Yan HY. The effects of noise on the auditory sensitivity of the bluegill sunfish, *Lepomis macrochirus*. *Comp. Biochem. Phys. A* 2002b; 133:43-52.
- 10) Engas A, Lokkeborg S, Ona E, Soldal AV. Effects of seismic shooting on local abundance and catch rates of cod (*Gadus morhua*) and haddock (*Melanogrammus aeglefinus*). *Can. J. Fish. Aquat. Sci.* 1996; 53: 2238-2249.
- 11) Wysocki LE, Dittami JP, Ladich F. Ship noise and cortisol secretion in European freshwater fishes. *Biol. J. Conserv.* 2006; 128: 501-508.
- 12) 米倉竜次. 人工音響を用いた外来魚ブルーギルの採餌抑制. 岐河環研研報. 2007; 52 : 9
- 13) 米倉竜次. 侵略的外来種ブルーギルの有効的な駆除管理に向けた科学的検討. 岐河環研研報. 2008; 53 : 7-12.