

## 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

米倉竜次

A scientific approach toward effective control and management of invasive exotic bluegill

RYUJI YONEKURA

ブルーギル(*Lepomis macrochirus*)は1960年に日本に移入された北米原産の外来魚であり、<sup>1)</sup>すでに日本国内の湖沼を中心とする淡水域において急速な分布拡大を遂げている。<sup>2,4)</sup>さらに、本種が定着した湖沼等では漁業資源や在来生物群集への影響が懸念されていることから、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月に施行されたいわゆる特定外来生物法では特定外来生物に指定されている。このようなブルーギルを駆除管理するためには、(1)ブルーギルの生態、遺伝、進化学的特徴に関する基礎情報の集積、(2)在来生物群集と生態系の改変に対するブルーギルの影響評価、(3)駆除管理に有用な技術開発とその費用対効果の算定が必要となるであろう。この研究では、現在までに明らかになった科学的知見から、ブルーギルの駆除管理方策について述べたい。本報告書では、研究成果を中心に議論を進めるために、具体的な方法や実験手順などは割愛する。これらの情報に関しては、すでに出版されている他の刊行物を参照されたい。<sup>5,7)</sup>ここでは(1)溜池に生息するブルーギルの推定個体数ならびに平均個体サイズの変化に対する釣りによる駆除努力の効果、(2)人工音響による採餌ならびに繁殖の抑制効果を紹介する。これらにより、効率よく費用対効果の高い（特に駆除に係る人員削減や長期的な抑制管理をめざす場合の）駆除法の確立に向けた1つの技術案を提示する。

キーワード：ブルーギル、外来種、駆除管理、人工音響、釣り

### 釣りによるブルーギル個体群の抑制

既存の漁具や採集法を用いたブルーギルの駆除は、すでに各地で実践されている。<sup>8,9)</sup>しかしながら、対象湖沼に生息するブルーギル個体群の減少に対して、これらの方法がどの程度有効であるのかを定量的に調べた事例は少ない。例えば、漁獲効率（単一時間あたりの捕獲量）、完全駆除までに必要とされる努力量（時間、労力）の推定、捕獲可能な個体サイズ等の情報を漁具や採集法ごとに推定することは、将来の駆除方策へ向けた方針を模索する上で重要な手続きである。しかし、これらの情報はほとんどわかっていない。

そこで、岐阜県中津川市にある樅の湖をモデル湖沼として、釣獲による駆除努力がブルーギルの推定生息個体数、単一努力量あたりの捕獲量、個体サイズの分布にどのような影響を及ぼすかを調べた。また、これらの知見

から完全駆除までに必要とされる労力や時間（人時）を推定した。この調査はブルーギルの駆除管理方策に係る基礎科学の開発や推進というよりも、一般人にとって馴染み深く実践しやすい釣りによる捕獲駆除がブルーギルの駆除方策として有用であるかについて、特にその効率性や限界を探ることを目的とした。

2003年6月、ピーターセン法による樅の湖の推定個体数は約3万2千個体であったが、2004年6月、推定個体数は約1万6千個体となり、2004年9月には推定個体数は約1万3千個体となった（第1表）。2003年6月時点での推定個体数を樅の湖におけるブルーギルの母集団と仮定すると、2004年6月までに推定母集団の約49.5%（約1万6千個体）、2004年9月までに推定母集団の約58.5%（約1万8千個体）が減少したことになる。なお、2003年6月から2004年6月まで、および2003年6月から2004年9

月までの釣獲個体数の合計はそれぞれ13,724個体および15,080個体であったことから、推定母集団の減少数と釣りによる駆除個体数とはほぼ一致する結果となった。

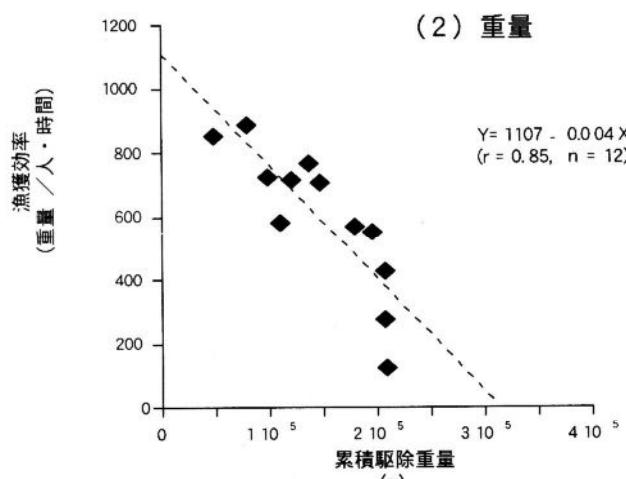
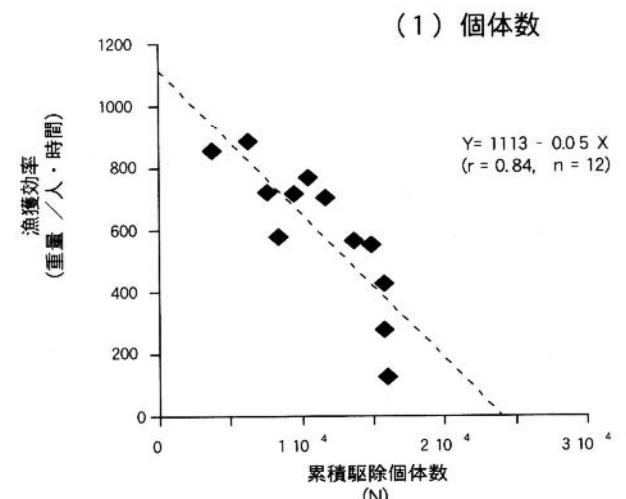
累積駆除個体数および累積駆除重量の増加に従い、釣獲効率（捕獲重量／人／時間）が有意に低下した（第1図）。累積駆除個体数および重量（独立変数）と釣獲効率（従属変数）をもとに最少自乗法により算出された一次回帰式によると、釣獲効率がゼロになるためには（すなわち、ブルーギル個体群が完全駆除されるためには）、総計24,093個体／316kgの駆除が必要であると推定された。駆除調査では、合計15,966個体／209kgを駆除したため、これは完全駆除に必要とされる個体数もしくは総重量の66.3%（個体数換算）／66.1%（重量換算）に相当する。また、駆除に計92名、76.5時間を要したため、この数値により完全駆除までに要する人時（人員×時間）を推定すると、個体数換算／重量換算ともに567.9人時となる（第1表）。これらの推定は単位時間あたりの釣獲効率が今後も上記の一次回帰式で予測できることを前提にしている。しかし、個体あたりの漁獲能率（catchability）は通常、推定個体数が減少するにつれ増大する（つまり、駆除が進むにつれ、釣られづらくなる）。従って、この推定値は、桟の湖における人時の最小値をおそらく意味しており、実際には完全駆除のためにはこれ以上の努力が必要であろうと考えられた。

それぞれの駆除実施日を実施年に階層化させたnested ANOVAの結果によると、捕獲された個体の平均サイズは調査実施年間で違いがなかった ( $F = 1.63, p = 0.196$ )（第2図）。しかし、2004年度には、最大個体と最小個体

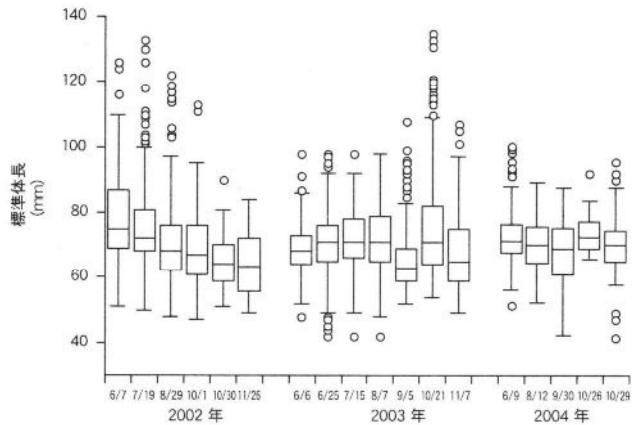
第1表 桧の湖（面積15.6 ha、岐阜県中津川市）におけるブルーギルの推定個体数、駆除達成率および完全駆除に必要な推定努力量

推定個体数（ピーターセン法）	
2003年6月	32308
2004年6月	16304
2004年9月	13456
駆除達成率	
2003年6月－2004年6月	
釣獲駆除した個体数	13724
推定個体数の減少個体数	16004
2004年6月－2004年9月	
釣獲駆除した個体数	15080
推定個体数の減少個体数	18852
完全駆除までの推定努力量	
人時(個体数換算／重量換算)	
567.9	/ 569.6

の範囲が縮小する傾向にあった。例えば、2002年度ならびに2003年度では、標準体長（SL）100mmを超える個体が捕獲されたが、2004年度では、標準体長（SL）100mmを超える個体はほとんど捕獲されなくなった。この結果は、駆除にともない、産卵に寄与する成熟個体（桟の湖における繁殖開始サイズはparental careオスでおおよそSL100mm、メスでおおよそSL95mmである）が減少したことを示唆している。さらに、繁殖個体の抑制により間接的に、新規加入個体が減少した可能性も示唆された。上述のとおり、釣獲駆除により直接説明されるブルーギル



第1図 累積駆除個体数（1）ならびに累積駆除重量（2）と釣りによる漁獲効率との関連性  
最小自乗法による一次回帰式はともに有意な相関を示す。2002年度におけるデータは調査員の不慣れ、湖の水位低下による漁獲効率のバラツキがみられたため、解析から除外した。また、水温17°C以下の調査日はブルーギルの活性が著しく低く、明らかに漁獲効率が過小評価されたため、除外した。それ以外の調査日（n = 12）を記す。

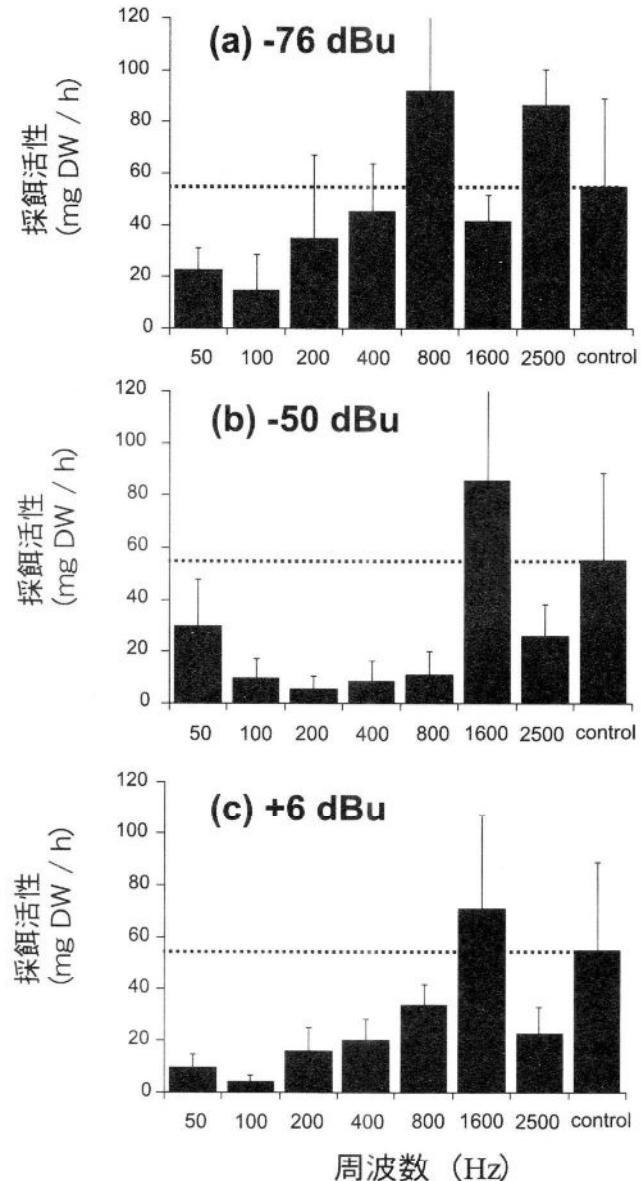


第2図 釣獲調査日とブルーギルの平均標準体長の変化  
ボックスは変数母集団の土25%の限界、ボックス内のラインは変数の中央値、各ボックスの上下間のラインは許容範囲内にある最大値と最小値を示す。この範囲外にある値はアウトライヤとして個々の点として表示してある。2002年11月26日(n=24)、2004年10月26日(n=19)を除いて、全ての調査で45個体以上を測定した。

ル個体群の減少量は45%程度であったことから、2003年から2004年にかけての推定個体数の減少は、繁殖個体の駆除抑制により間接的に新規加入個体が減少したことによる可能性がある。

#### 採餌抑制における人工音響の効果

ブルーギルの定着後、在来魚類群集が減少したり生物群集が変化したりすることが報告されている。<sup>10-12)</sup> ブルーギルが単位時間あたりに捕食する餌資源量(採餌活性)は、これらの程度や変化速度に関して重要な要因となる。なぜなら、在来生物への捕食インパクトや在来生物との種間競争の程度は、ブルーギルの採餌活性に依存して変化するためである。<sup>13)</sup> 従って、ブルーギルを完全に駆除することが技術的に困難な場合であっても、採餌活性さえ抑制させることができれば、在来生物群集に対するブルーギルの影響を低下させることが可能となるかもしれない。本研究では、人工音響がブルーギルの採餌活性に対して影響を及ぼすかを調べた。野外で人工音響によりブルーギルを駆除管理するためには、(1) ブルーギルに負の影響を与える音の選別と抽出、(2) 同じ場所に生息する在来魚類や他生物への影響評価、(3) 野外環境への適用と順応的管理、が必要である。本課題では、まず最初の段階として、ブルーギルに対して最も採餌活性を低下させる人工音響の選別・抽出を目的とした。特に、純音の一種である正弦波を用い、その周波数と音圧の違いがブルーギルの採餌活性にどのような影響を与えるかに注目し、室内実験をおこなった。



第3図 正弦波における周波数と音圧によるブルーギルの採餌活性の違い  
図中の破線はコントロール区(人工音響による暴露を行わない場合)における平均値を示す。

周波数の違いはブルーギルの時間あたりの採餌量(採餌活性)に影響を与えた(2元分散分析: 周波数効果;  $F = 3.99$ ,  $p < 0.01$ )。ブルーギルの採餌活性は、特に低周波を暴露した場合に低くなった(第3図)。3つの異なる音圧間の平均値は100Hzの周波数を暴露した場合に最も低く、200Hzと50Hzがそれに続いた。100Hz, 200Hz, 50Hzにおける採餌量はそれぞれコントロール区と比較して16.9%, 34.0%, および37.6%にまで減少した。対照的に、1.6kHzと2.5kHzといった比較的、高周波の音響を暴露した場合には、採餌活性が促進されるか、あるいは、あま

り影響を受けなかった（第3図）。1.6kHzと2.5kHzにおける平均値はコントロール区と比較して、それぞれ120%と81.3%であった。

音圧の違いもまた、ブルーギルの採餌活性に対して有意な影響を及ぼした（2元分散分析：音圧効果； $F = 4.16$ 、 $p = 0.02$ ）。一般的に、低い音圧下よりも高い音圧下で採餌活性が抑制される傾向にあった（第3図）。最も低い音圧（-76dBu）を暴露した場合と比較して、-50dBuと+6dBuの音圧を暴露した場合には、7つの異なる周波数を平均すると、それぞれ52.2%ならびに52.4%まで採餌活性が抑制された。周波数効果と音圧効果との交互作用に統計的な有意差はみられなかった（2元分散分析：周波数×音圧； $F = 0.81$ 、 $p = 0.64$ ）。このことから、音圧の効果が周波数ごとに異なったりするなど、音圧と周波数との相互作用的な効果はなかったと考えられる。

人間と比較して、魚類の可聴領域はかなり低周波数域に偏っている。一般に、硬骨魚類の可聴領域は100Hz-3kHz程度とされる。本研究では、低周波数を中心にブルーギルの反応を測定したため、実験処理範囲を超えた高周波数に対するブルーギルの反応は判らない。しかしながら、実験で確かめた周波数領域の範囲内においても、ブルーギルの採餌活性を低下させる領域はかなりの低周波に偏っていることがわかった。Scholik and Yan (2002)<sup>14)</sup>は、24時間にわたる142dBのホワイトノイズ(0.3-2.0kHzの周波数を均等に含む音)の暴露実験の中で、ブルーギルの聴覚閾値レベルと周波数との関連性を示している。その結果によると、ある範囲の周波数帯（0.3-2.0kHz）における聴覚の閾値レベルは400Hzを最小に緩やかな2次曲線を描く。このことから、400Hz付近がブルーギルにとって最もよく聞き取れる音であることが予測される。本研究では、400Hzよりさらに低い周波域で採餌活性が最低となり、聴覚特性と採餌抑制とは必ずしも密接な対応関係にないことを示唆する結果となった。この結果は、ブルーギルの採餌活性の抑制効果は単に各周波数における可聴レベルのみにより決定されるのではないことを示唆している。

本研究では、周波数と音圧の影響を採餌活性という尺度で評価した。ブルーギルは、餌生物を捕食し、また、餌資源をめぐり在来種と競争関係にあると考えられる。従って、採餌インパクトはブルーギルの侵入が在来生態系に与える最も深刻な影響のうちの一つである。そのため、採餌インパクトを軽減させる人為的操怍はブルーギルの影響を軽減させる有効な方法となるであろう。本実験で検証した低周波の正弦波による採餌活性の顕著な低

下は、ある限られた人工音響の暴露時間における効果であるものの、その原理は野外のブルーギルを管理する有効な手段として利用できる技術の可能性がある。

### 繁殖抑制におよぼす人工音響の効果

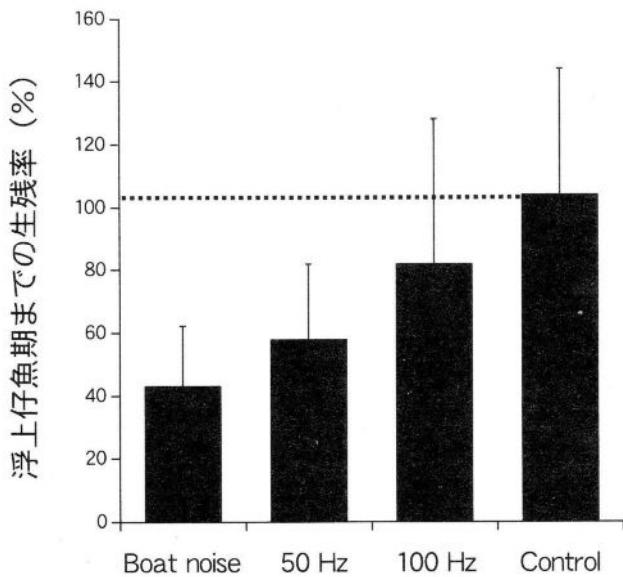
ブルーギルは、産卵床と呼ばれるすり鉢状のくぼみに産みつけられた卵を仔魚が浮上するまでの一定期間、雄親が保護する繁殖システムをもつ。雄親はファンニング行動による酸素供給、サークリングと呼ばれる卵・稚魚に対する被食を防止するための巡回行動、また、チーシングと呼ばれる他個体への威嚇追尾行動を通じて、卵および仔魚の生残に対して決定的な役割を果たしている。従って、何らかの人為的なインパクトを与え、雄親によるこれらの保護行動を抑制することができれば、新規加入個体の減少を通じてブルーギルの個体群が抑制されると思われる。本研究では、人工音響により、卵および仔魚に対する雄親の保護・防衛時間を減少あるいは保護／防衛の時間配分比を変化させ、産卵床から浮上する卵・仔魚の生残率を減少させることができかを室内実験により検証した。

実験期間中、産卵床を形成した雄親のうち産卵床を遺棄した雄親の割合は人工音響を暴露させないコントロール区で0%であったのに対して、100Hzでは50%、50Hzでは20%、Boat Noiseでは40%にのぼった（第2表）。しかしながら、産卵床を遺棄したオスの割合は処理区間で異なることはなかった（Fisher's exact test :  $p = 0.14$ ）。

卵から浮上仔魚期までの生残率に関して、実験処理区間で統計的有意差はみられなかったものの（一元分散分析、 $p = 0.36$ ）、その平均値は実験処理区間でかなり変動した（第4図）。人工音響を暴露させないコントロール区ではおおよそ100%の卵がふ化したのに対して、100Hzの正弦波を暴露させた実験区では80%程度、50Hzの正弦波を暴露させた実験区では58%程度、そして、Boat Noiseを暴露させた場合には40%ほどのふ化率に留まった。

第2表 ブルーギルの繁殖抑制に果たす人工音響の影響

	実験処理区			
	コントロール	Boat noise	50Hz	100Hz
産卵床を形成したオス個体数(n)	7	5	5	6
産卵床を遺棄したオス個体数(n)	0	2	1	3
産卵床を遺棄したオス個体の割合(%)	0	40	20	50
平均推定産卵数(n)	6562	6235	7454	7463
(最小値-最大値)	(798-12757)	(842-10086)	(1624-15642)	(1635-12921)
平均推定ふ化数(n)	6104	3861	5420	3231
(最小値-最大値)	(488-13237)	(0-9246)	(0-14157)	(0-8738)



第4図 各産卵床における卵・仔魚の平均生残率の違い  
生残率=(産卵床に産みつけられた推定卵数／産卵後96時間後の推定孵化仔魚数)。異なる3つ的人工音響暴露区(Boat noise, 50Hzならびに100 Hzの正弦波音響)ならびにコントロール区における値を示す。図中の破線はコントロール区(人工音響による暴露を行わない場合)における平均値を示す。

このように、人工音響の暴露は、オス親による卵・仔魚の保護防衛時間の減少を通じて浮上仔魚期までの生残率を低下させる傾向にある。このことから、ブルーギルの繁殖を抑制する可能性があるが、浮上時期までの生残率(第4図)において、人工音響による統計学上の効果は検出できなかった。この原因としては(1)人工音響による効果が試験個体で異なり、影響をあまり受けない個体はコントロールと同じ程度の保護防衛努力をおこない、卵・仔魚の生残率に顕著な低下がみられなかつたという違いがあり、これが実験処理区間での統計的有意差がみられなかつた原因である可能性がある。(2)帰無仮説の棄却率は同じ母集団からでも標本抽出の回数(つまり自由度の違い)に依存して変化する。一般に、少數の標本抽出では、間違った帰無仮説を受け入れる可能性(第二種の過誤)(つまり、実際は母集団間で違いがあつても有意差が検出されない)が高くなる。今回の繁殖抑制の検証は少ない標本数によるため、第二種の過誤が起きている可能性もある。これを回避するためにはより多くの標本抽出をおこなう必要があつた。

## 今後の課題

釣りによりブルーギルの推定母集団を減少させることは可能であるものの、駆除に必要な人員や労力を継続的

に確保しない限り、長期的に抑制することは難しいかも知れない。仮に母集団の相当数を駆除することが可能であったとしても、駆除努力を止めた場合にブルーギルの母集団が回復する可能性がある。これは、通常、湖沼等に定着したブルーギルは少数の創始者から始まった可能性が高いことを考えれば容易に想像可能である。つまり、駆除に係る人員と労力の長期的な確保が困難な場合には、人間に替わって長期的にブルーギルを抑制することが可能な技術開発が必要となる。

そこで、人に替わり長期的にブルーギルを抑制する手段として人工音響による採餌と繁殖への効果を確かめた。今回報告した実験結果は比較的短期間の研究成果であるために、野外において実際に人工音響を活用するためには、人工音響に対する外来魚の馴化(馴れ)を防止する工夫が必要となるであろう。異なる特性をもつ音響を組み合わせたり、最も効果のある時期(例えば、コイ科魚類の産卵期である春先)や最もブルーギルの影響が懸念される場所(湖沼の浅瀬や沿岸帶)に使用を限定したりするなど、使用を工夫する必要がある。さらに、実際の使用にあたっては魚類をはじめとする在来生物への影響評価が必要となる。現時点では、ブルーギルの採餌と繁殖を抑制させる人工音響がコイ科魚類等の在来生物に対してどのような影響を及ぼすかは定かではなく、このことに関してはさらなる研究が必要である。野外での人工音響の使用にあたっては、在来生物に影響を与えることなく、ブルーギルのみを効果的に抑制させる音響の抽出・選別が必要となる。

## 要 約

- 既存の漁法のひとつである釣りが、ブルーギル個体群の抑制に対してどの程度有効であるかを検証した。3年間にわたる駆除の結果、推定母集団の58.5%に当たる個体数が減少したことから、釣りによる個体群抑制の有効性が示唆された。しかし、釣りによりブルーギルを抑制し続けるためには長期的かつ継続的な努力が必要となることから、人に替わってブルーギルを抑制することができる、より簡便かつ費用対効果の高い技術の開発が必要であると考えられた。
- 水中人工音響を用いて、ブルーギルの採餌と繁殖の抑制が可能であるかどうかを検証した。ブルーギルの採餌活性は100Hzの周波数を暴露した場合に最も低くなり、200Hzと50Hzがそれに続いた。100Hz、200Hz、50Hzを暴露した場合の採餌量はコントロール区と比

較して、それぞれ16.9%、34.0%、および37.6%にまで減少した。単位時間あたりのブルーギルの採餌量は、餌生物や競争生物への影響を規定する要因のひとつと考えられる。そのため、採餌インパクトを軽減させる人為的操作はブルーギルの影響を軽減させる有効な方法となる可能性がある。

3. 人工音響により、卵および仔魚に対する雄親の保護・防衛時間を減少あるいは保護／防衛の時間配分比を変化させ、産卵床から浮上する卵・仔魚の生残率を減少させることができかどうかを室内実験により検証した。卵から浮上仔魚期までの生残率に関して、実験処理区間で統計的有意差はみられなかったものの、人工音響を暴露させないコントロール区ではおよそ100%の卵がふ化したのに対して、100Hzの正弦波を暴露させた実験区では80%程度、50Hzの正弦波を暴露させた実験区では58%程度、そして、Boat Noiseを暴露させた場合には40%まで生残率が減少した。

## 文 献

- 1) Scott WB, Crossman EJ. Freshwater fishes of Canada. *Fish. Res. Board Can. Bull.* 1973;184:1-966.
- 2) 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.
- 3) 東 幹夫. ブルーギルとブラックバスと在来魚の種間関係—川原大池を例に. 「川と湖沼の侵略者ブラックバス—その生物学と生態系への影響」(日本魚類学会自然保護委員会編) 恒星社厚生閣, 東京. 2002; 69-86.
- 4) 中井克樹. ブルーギル—強力な雑食魚. 「外来種ハンドブック」(日本生態学会編), 地人書館, 東京. 2002; 119.
- 5) 米倉竜次, 莢谷哲治, 藤井亮吏, 熊崎 博, 斎藤 薫, 熊崎隆夫, 桑田知宣, 原 徹, 徳原哲也, 景山哲史. 釣りによるブルーギル個体群の抑制. 日水誌 2007;73(5): 839-843.
- 6) 米倉竜次. 釣獲によるブルーギル個体群の抑制. 本誌 2006;51:10.
- 7) 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. 本誌 2007;52:9.
- 8) 財団法人自然環境研究センター. 「ブラックバス・ブルーギルが在来生物群集及び生態系に与える影響と対策」(環境省自然環境局野生生物課編), 東京. 2004;61- 132.
- 9) 竹門康弘, 細谷和海, 村上興正. 深泥池-外来魚の駆除と駆除事業. 「外来種ハンドブック」(日本生態学会編), 地人書館, 東京. 2002;269-271.
- 10) Yonekura R, Kita M, Yuma M. Species diversity in native fish community in Japan: comparison between non-invaded and invaded ponds by exotic fish. *Ichthol. Res.* 2004; 51: 176-179.
- 11) Maezono Y, Miyashita T. Community-level impacts induced by largemouth bass and bluegill in farm ponds in Japan. *Biol. Conserv.* 2003;109: 111-121.
- 12) Maezono Y, Kobayashi R, Kusahara M, Miyashita T. Direct and indirect effects of exotic bass and bluegill on exotic and native organisms in farm ponds. *Ecol. Appl.* 2005; 15: 638-650.
- 13) Yonekura R, Kohmatsu Y, Yuma M. Difference in the predation impact enhanced by morphological divergence between introduced fish populations. *Biol. J. Lin. Soc.* 2007;91: 601-610.
- 14) Scholik AR, Yan HY. The effects of noise on the auditory sensitivity of the bluegill sunfish, *Lepomis macrochirus*. *Comp. Biochem. Physiol. A.* 2002;133: 43-52.