原著論文 ORIGINAL PAPER

段階式水位低下によるダム湖のオオクチバスの繁殖抑制

松崎 厚史¹⁾・沖津 二郎^{2)*}・浅見 和弘³⁾・樋口 貴哉²⁾・鎌田 健太郎³⁾・
大杉 奉功⁴⁾・中井 克樹⁵⁾・松田 裕之⁶⁾・小山 幸男^{1), 7)}

1) 国土交通省東北地方整備局三春ダム管理所 〒963-7722 福島県田村郡三春町大字西方字中ノ内 403-4

2) 応用地質株式会社 地球環境事業部 応用生態工学研究所 〒963-7722 福島県田村郡三春町大字西方字石畑 275

3) 応用地質株式会社 地球環境事業部 自然環境部 〒305-0841 茨城県つくば市御幸が丘 43 番地

4) 一般財団法人 水源地環境センター 〒102-0083 東京都千代田区麹町 2-14-2

5) 滋賀県立琵琶湖博物館 〒525-0001 滋賀県草津市下物町 1091

6) 横浜国立大学 〒240-8501 神奈川県横浜市保土ヶ谷区常盤台 79-7

Atsushi MATSUZAKI¹⁾, Jiro OKITSU^{2)*}, Kazuhiro AZAMI³⁾, Takaya HIGUCHI²⁾, Kentaro KAMATA³⁾, Tomonori OSUGI⁴⁾, Katsuki NAKAI⁵⁾, Hiroyuki MATSUDA⁶⁾, Yukio OYAMA^{1), 7)}: Breeding control of the invasive alien fish *Micropterus salmoides* by stepped water level drawdown operation. *Ecol. Civil Eng.* 21(2), 145-158, 2019

1) Miharu Dam Management Office, Tohoku Regional Construction Bureau, Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourism, Japan, 403-4 Aza Nakanouchi Ohaza Nishikata, Miharu-machi, Tamura-gun, Fukushima 963-7722, Japan

2) OYO Corporation, Global Environment Business Division, Ecology and Civil Engineering Institute, 275 Aza Ishibatake Ohaza Nishikata, Miharu-machi, Tamura-gun, Fukushima 963-7722, Japan

3) OYO Corporation, Global Environment Business Division, Natural Environment Section, 43 Miyukigaoka, Tsukuba, Ibaraki 305-0841, Japan

4) Water resources Environment technology Center, 2-14-2 Kouji-machi, Chiyoda-ku, Tokyo 102-0083, Japan

5) Lake Biwa Museum, 1091 Oroshimo-cho, Kusatsu, Shiga 525-0001, Japan

6) Yokohama National University, 79-7 Tokiwadai Hodogaya-ku, Yokohama, Kanagawa 240-8501, Japan

Abstract: The limited water-level method is used for the reservoir of the Miharu Dam, located in upstream of the Abukuma River, which flows into the Pacific Ocean, and draw-down of the water level is routinely practiced just before the flood season (June to October). At this time of the year, the surface water temperature of the reservoir reaches around 15°C at which spawning of largemouth bass, an invasive species, is thought to begin. Hence, the drawdown period coincides with the spawning period of largemouth bass. Several patterns of drawdown were performed in order to evaluate the effects of the draw-down on the spawning of largemouth bass.

In an ordinary drawdown, the water level is lowered at a constant rate till the onset of the

2017 年 7 月 29 日受付, 2018 年 11 月 18 日受理

*e-mail: okitsu-jiro@oyonet.oyo.co.jp

7) 現所属: 東北地域づくり協会岩手支所 〒020-0114 岩手県盛岡市高松 2-14-28

Present address: Tohoku Regional Development Association Iwate Office, 2-14-28 Takamatsu, Morioka, Iwate 020-0114, Japan

flood season. In the Miharu Dam reservoir, drawdown is temporarily paused for 2 to 4 days in the midst of drawdown to promote the spawning of largemouth bass. Then, drawdown is resumed to dry up the spawning beds established at the maintained water level. As a result, a considerable number of exposed spawning beds were detected by setting a few maintained periods during a drawdown, called “Stepped Water-level Drawdown”, and exposed spawning beds were observed at depths of 0.5 to 2.0 m from the maintained water level.

Fries of largemouth bass were captured and the dates of their spawning were estimated from the relationship between length and daily rings (otoliths). The analysis revealed that spawning during the drawdown period scarcely led to hatching. It was also found that 4-stepped drawdown is more effective for exposing spawning beds than 3-stepped drawdown. Population growth simulated by the Leslie matrix given a scenario of 4-stepped drawdown yielded a stable trend over 50 years.

These analyses suggest that 4-stepped drawdown before the flood season could be an effective management method to control the recruitment of largemouth bass.

Key words: drawdown, spawning bed, breeding control, invasive alien fish, *Micropterus salmoides*

はじめに

日本の淡水環境は、多くの生物群で固有種を含む豊かな生物多様性を育んでいる（渡辺・高橋 2010）。しかし、近年、さまざまな人為的影響によりその存続が脅かされるようになりつつある。なかでも湖沼や溜池などの止水環境においては、外来魚のオオクチバス *Micropterus salmoides* などの分布拡大が顕著であり、在来の魚類や水生昆虫を捕食し、一部の在来魚種の消失など、在来生態系のバランスが大きく崩れる原因となっている（日本生態学会 2002；Maezono & Miyashita 2003；中井 2004）。そのため、オオクチバスなどは 2005 年に施行された外来生物法により特定外来生物に指定されている（環境省 2004；細谷・高橋 2006）。

オオクチバスは流水環境には定着しにくいいため、これまでは河川への影響は限定的であると思われてきた。しかし、河川流程の途中を堰き止めるダム湖（ダム貯水池）に、これらの外来魚が定着した場合、湖内における増殖だけでなく、下流側の河川や湖水の供給源となり外来魚を分散させてしまう可能性がある（中井 2014）。さらに現在も続く意図的放流に用いる個体の調達元となることも懸念される（角田ほか 2011）。

国土交通省の水情報国土データ管理センター河川環境データベースに公開されている河川水辺の国勢調査（ダム湖版）における平成 2 年（1990 年）～平成 16 年（2004 年）の魚類の調査結果では、94 ダム中 49 ダムで特定外来生物に指定された魚類が確認されている。そのうちオオクチバスの確認例が最も多く 45 ダムであり

（大杉ほか 2011）、本種の防除はダム湖では急務である。

オオクチバスの防除手段の例としては、移動の制限に加え、ため池などの水抜き、投網、刺網、地引網、釣り、電気ショック、産卵場の破壊、人工産卵床などがある（環境省 2004；浅見ほか 2008）。三春ダムではこれまで、貯水池内の浅瀬を定置網で囲い、その後の水位低下を利用した捕獲（熊澤ほか 2012）や、蛇石川前貯水池における水抜き（土岐ほか 2013）などでオオクチバスの防除効果が確認されてきた。しかし、効果は三春ダム貯水池の一部であり、貯水池全域には及んでいない。

オオクチバスは繁殖期の春から初夏にかけて浅い場所に集まる性質がある。ダムによっては毎年この時期に、洪水調節のため定期的に水位を下げる（以下、ドローダウン）。洪水調節を含む多目的ダムの運用には、制限水位方式、オールサーチャージ方式などがあり、国土交通省と独立行政法人水資源機構が管理する約 100 の多目的ダムのうち、約 70 が制限水位方式をとっており、三春ダムもこの方式である。

齋藤ほか（2003）は、三春ダムのドローダウン時にオオクチバスの干出した産卵床を観察しており、水位操作パターンに工夫を施すことで、オオクチバスの産卵床を効率的に干出させられるとしている。2008 年より三春ダムでは、ドローダウンを連続的に行わず、水位を少し下げては数日保持し、その期間にオオクチバスに卵を産ませ、それを見計らってさらに水位を下げることを繰り返した（Fig. 1）。

本研究に先立ち、中沢（2011）、大杉ほか（2011）、中井ほか（2014）は、三春ダムにおける段階式水位低下を

Fig. 1. Description of stepped water-level drawdown. Right figure shows 4-stepped drawdown.

利用したオオクチバスの防除方法を紹介している。このうち中沢（2011）と大杉ほか（2011）は、水位操作パターンを変えた初年度（2008年）の結果を、中井ほか（2014）は、貯水池の一部（蛇沢川前貯水池）の結果を報告している。本報告は、三春ダムで最も大きい本貯水池において2パターンの水位操作を行った2008～2014年の7か年にわたる結果を総括し、水位を一定に保つと一定の水深で産卵が見られ、水位低下のタイミングと低下量で効率よく産卵床を干出できること、その結果として稚魚の発生も抑制できており、段階式水位操作の効果が認められることを報告する。

調査地の概況

三春ダム

三春ダムは、北緯37度24分、東経140度28分、東北地方の太平洋に注ぐ阿武隈川水系大滝根川に建設された（Fig. 2）。大滝根川は標高1,192mの大滝根山を源とする幹川流路延長49km、流域面積386.5km²の河川である。三春ダムは、1990年3月に転流工事を着工、1996年10月に試験湛水を開始し、1998年4月にダム運用が開始された。流域面積は226.4km²で、湛水面積は2.9km²、総貯水容量は42,800,000m³である。

三春ダム管理所における2001～2010年の気象観測によると、年平均気温は11.4℃、最暖月の8月は月平均23.2℃、最寒月の1月は月平均-0.2℃であった。降水量は最多月の7月は月平均195.3mm、最少月の2月は月平均27.2mm、年間総降水量は年平均で1194.4mmであった。

三春ダムは制限水位方式のダムであり、非洪水期（毎年10月11日～6月10日）と洪水期（毎年6月11日～10月10日）で貯水位が8m異なる。貯水位は、気象条件などの理由に応じた特別な対応が必要な場合を除き、非洪水期は平常時最高貯水位（326.0m ASL）より上昇しないよう、洪水期は洪水貯留準備水位（318.0m ASL）より上昇しないよう運用されている。これに加え、洪水時最高水位（333.0m ASL）があり、洪水時などの対応を踏まえ貯水位の上限として設定されている。

三春ダムにおけるオオクチバスの産卵行動

オオクチバスは、湖岸沿いの浅い水底に産卵床を造り、15～16℃で産卵を開始し（環境省2004；中井2014）、20℃まで産卵がみられる（津村1989）。産卵水深は1～2mであり（淀2002）、透明度が低い水域は1m程度までに限られ（中井2010；中井ほか2014）、三春ダムの場合は0.5mより浅い場所でも産卵床がみられる（中沢2011）。

Fig. 2. Locations of the Miharu Dam and the study sites. The survey of exposed spawning beds was conducted in the entire downstream of the Hebiishigawa front reservoir.

三春ダムでは、5月上旬から6月上旬に水深1.0 mの水温が15℃に達し、繁殖行動ならびに産卵床を確認できる(熊澤ほか 2012)。6月中旬～下旬には、孵化した稚魚が貯水池の湖岸で群れをなしている。

段階式水位操作

三春ダム本貯水池は、5月中旬から6月上旬にかけて計画的に貯水位をドローダウンさせる。三春ダムの場合、このドローダウンの時期とオオクチバスの産卵開始時期とが重なる。326 m ASL 以下はドローダウン開始直前まで水面下であるが、2007 年のドローダウン直後に干出部分を踏査したところ、産卵床の確認位置は324.0～325.5 m ASL、すなわち保持した水位の0.5～1.5 m 下であった。また、別途、蛇沢川前貯水池において水位を2週間程度320.5 m ASL に保った後、排水ゲートで水位低下させたところ319～320 m ASL、すなわち保持した

水位の0.5～1.5 m 下に干出した産卵床が集中して観察された。どちらの場合も、産卵床の位置はそれぞれ貯水位が一定に維持され、その水面の直下の水深に該当した(中井ほか 2014)。このことは、産卵床の形成には、一定期間、水位が安定していることがよいことになる。

このような結果を受け、筆者らは、ドローダウン期間の貯水位低下を連続的に一定の割合で低下させ続けるのではなく、途中で水位を2～4日程度、一定に保持することで水位保持期間にオオクチバスの産卵床形成を促進でき、その直後の水位低下で効果的に産卵床を干出できると仮定した。2008 年～2009 年はドローダウンの期間中に2回の水位保持期間を、2010 年～2014 年は3回の水位保持期間を設け、水位低下は1日1 m 以内という水位操作の基準を維持しつつ、従来より早い速度で貯水位を低下させる「段階式水位低下」を試行した

(Fig. 1). なお、本研究では、水位保持期間が2回の場合は水位低下が3段となるため3段式水位操作と呼び、水位保持期間が3回の場合は4段となるため4段式水位操作と呼ぶこととする。

方 法

現地調査

産卵床の確認

調査は、Fig. 2に示す本貯水池の蛇石エリア湖岸沿いで行い、船上から湖岸の産卵床の確認に努め、見通しがきかない平坦部では上陸して産卵床を探索した。卵が残っている産卵床を確認した場合は、位置および標高を記録した。

調査日は、各年、三春ダムの貯水池の水位操作（5月中旬～6月10日）の段階にあわせて設定し、5月下旬～6月下旬に計4回とした。調査のタイミングは、ドローダウン期間中は段階式水位低下直後の水位安定時に3回、洪水貯留準備水位に到達し水位が安定してから約2週間後の1回とした。

稚魚の確認

産卵床調査日と同じ日に、Fig. 2の蛇石エリア湖岸沿いを船上又は水中・陸上歩行により観察し、当年生まれのオオクチバスの稚魚の確認に努めた。確認した稚魚はタモ網で捕獲し、個体数と体長（mm）を記録した。稚魚や幼魚は群れになることが多く、各群れの個体数は、目視による観察や捕獲個体数から推定した。体長（mm）は、捕獲した群れごとに作成した体長組成の中央値とした。稚魚の産卵日を推定するため、2011年および2012年に稚魚をそれぞれ20個体、6個体ずつ捕獲し、さらに2003年に別途捕獲してあった26個体の稚魚を加えて、個体の耳石を用いた日齢査定を行い、体長と日齢との関係を求めた。日齢の査定には体長13～64 mmの個体を用いた。齋藤ほか（2003）にならい、薄片法により行い、摘出した耳石（扁平石）を小型研磨機により薄片標本とし、生物顕微鏡を用いてデジタル画像で撮影し、耳石径や輪紋数を読み取り、日齢査定を行った。

捕獲した稚魚の産卵・孵化日の推定

推定産卵日は、川の生物図典（財団法人リバーフロント整備センター 1996）の「ふ化日数は水温16～22℃で7～10日間」を踏まえて、孵化日から7日前とした。孵化日は、捕獲した稚魚サイズと、2003年、2011年および2012年の3か年のデータから作成した回帰式(1)により算出した。

$$y = 28.299 \log x - 53.205 \quad (1)$$

y : 孵化日, x : 体長 (mm)

個体群動態モデル

モデル式

三春ダム貯水池内のオオクチバス個体群の動態を予測するため、松田（2004）にならいモデル式を作成した。段階式水位操作を開始する前年にあたる2007年からの50年間を対象期間とした。モデル式は、以下に示すように、オオクチバスの各年齢級別の生存率 p と産子力 m からなる行列個体群モデルである。本貯水池における繁殖後（秋）の $t+1$ 時点における個体数 $N(t+1)$ は、本貯水池に生息するオオクチバスに関するレスリー行列に $N(t)$ を掛けてオオクチバスの個体を算出した。

Number of individuals in next year ($t+1$)	Leslie matrix	Number of individuals in current year (t)
$\begin{pmatrix} N_0(t+1) \\ N_1(t+1) \\ N_2(t+1) \\ N_3(t+1) \\ N_{4+}(t+1) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & p_3 m_4 V & p_{4+} m_5 V \\ p_0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & p_1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & p_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & p_3 & p_{4+} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} N_0(t) \\ N_1(t) \\ N_2(t) \\ N_3(t) \\ N_{4+}(t) \end{pmatrix}$		(2)

$N_x(t)$: x 歳の t 年の繁殖後（秋）の個体数

初期値を $N_x(2007)$ とし、 $N_x(2008) \sim N_x(2057)$ に至る個体数の変化を予測した。

p_x : x 歳の生存率

m_x : x 歳の産子力

V : 環境変動

モデル式による計算はオープンソースの統計パッケージR3.3.3 (R Core Team 2016)で行った。繰り返し回数は、1,000回とした（戸谷ほか 2004）。予測は、3段式水位操作（Case I）と4段式水位操作（Case II）を2008年から各々継続した場合の2ケースとした。

パラメーターの設定

各パラメーターの設定条件をTable 1に示す。各々、現地で得られたデータをもとにCase I, IIを各々続けた場合のオオクチバス個体群の動態を予測するため、以下のような考え・条件で設定した。

$N_x(2007)$: x 歳の個体数 $N_x(2007)$ は、本貯水池のオオクチバスの推定個体数(2007)と各年齢級別の構成比から

Table 1. Summary of parameters set in Leslie matrix

Parameter	Setting	Details
Time span	T	50 years
No. of age x individuals (Fall 2007)	N_x (2007)	Table 2 “ N_x (2007)”
Survival rate of x age class	p_x	Table 2 “ p_x ”
Fecundity at age x	m_x	Table 3 “ m_x, i ”
Probability of catastrophic events	V	Average $\mu=1$, $SD=0.27$

算出した。

各年齢級別の構成比は、2006年に蛇石川前貯水池で全量捕獲したオオクチバス1,940個体の構成比（土岐ほか 2013）を用いた。なお、高齢なほど個体数が少なく、生存率の算出に大きな推定誤差が生じる。これを避けるため、繁殖可能な個体（4～10歳）で結合年齢級4+歳とした。

本貯水池に生息するオオクチバスの個体数は把握されていない。隣接する蛇沢川前貯水池（湛水面積26,886 m²）では、2007年および2008年に標識再捕獲法により蛇沢川前貯水池の1歳以上のオオクチバスの個体数を231個体と推定している（熊澤ほか 2012）。オオクチバスは「湖沼の地形的特徴によって異なり、琵琶湖では主に水深10 m以浅（稀に水深20 m付近）に分布する。」とされている（環境省 2004）。本貯水池のオオクチバスの推定個体数は下記の式により算出した。

本貯水池でのオオクチバスの推定個体数(2007)(小数点以下切り上げ) =

蛇沢川前貯水池の1歳以上のオオクチバスの推定個体数(2007) × (本貯水池のオオクチバス生息域の面積 / 蛇沢川前貯水池のオオクチバス生息域の面積) / 1歳以上構成比

p_x : x 歳の生存率 p_x は、土岐ほか (2013) の 2006 年の

蛇石川前貯水池での各年齢級別の個体数を用いて、 $x+1$ 歳の個体数を x 歳の個体数で割った値を参考に設定した。

m_x : x 歳の産子力 m_x は、4歳と5+歳の産子力 m_4 と m_{5+} を2種類の水位操作方法 (Case I, II) に対してそれぞれ算出した。

なお、 t 年の繁殖後（秋）の3歳と4+歳の個体は $t+1$ 年の繁殖期（春）までそれぞれ生存率 p_x で生き残り、それぞれの個体が $t+1$ 年に産子力 m_4 と m_{5+} で新生個体（0歳）を産むことになる。ここでは $t+1$ 年を鑑み、5～10歳の個体を結合年齢級5+歳とした。

まず、1親（4+歳）あたりの子（0歳）の産子力 m を求めた。次に、産卵数が体長の3乗（=体重）に比例すると仮定し、構成比（土岐ほか 2013）で重みづけして4歳と5+歳の1親あたりの産子力 m への寄与比重を求め、潜在的な産子力 m'_4 と m'_{5+} を算出した。2種類の水位操作方法 (Case I, II) の産子力 m_4 と m_{5+} は、潜在的な産子力 m'_4 と m'_{5+} に Case I, II の各ケースの産卵床の干出を加味した繁殖成功割合を乗じて算出した。繁殖成功割合は、産卵床数および稚魚群数から下記の式により求めた。なお、ドローダウン終了後も6月下旬までオオクチバスの産卵適温である。ドローダウンは6月10日までに完了するが、その後産卵した場合、親魚は孵化後3週間ぐらいまでの仔稚魚を保護する（中村 1992）ため、水位低下終

了後も少なくとも1回は産卵床を造ると仮定した。

1 親 (4+ 齢) あたりの子 (0 齢) の産子力 $m =$

0 齢の個体数 $[N_0(2007)] / 4+$ 齢の個体数 $[N_{4+}(2007)]$

繁殖成功割合 =

稚魚群数(平均値) / [干出した産卵床数(平均値) + 稚魚群数(平均値) + 水位低下後に造られる産卵床数]

浮上後間もない稚魚は産卵床周辺で群泳し小集団を形成するが、成長に従って大集団になる。ここでの稚魚群数は浮上直後の小群とし、産卵床数と稚魚群数は本貯水池全域での値とした。2008 年には本貯水池全域で現地調査を実施しており、2008 年の産卵床数と稚魚群数は現地の確認数とした。一方、2009～2014 年は、蛇石エリアでの産卵床数と稚魚群数をもとに算出し、2008 年に本貯水池と蛇石エリアで確認された産卵床数と稚魚群数の比率からそれぞれ求めた。

V: 予測不可能な環境の変化が産子力に影響し個体群サイズが変動すると仮定し、環境変動 V には対数正規分布する乱数を計算のつどに発生させて与えた。指定する平均値は 1 とし、標準偏差は 2010～2014 年の干出した卵あり産卵床数 (サンプル数 5 か年) から推定した。

結 果

現地調査

産卵床の確認状況

2008～2014 年の 7 年間のオオクチバスの干出した産卵床の推移を示す (Fig. 3)。蛇石エリアにおける産卵床の干出は 78～189 床であり、3 段式水位操作より 4 段式水位操作で多い。3 段式は 2 か年の実施で、78 床と 90 床であったが、4 段式は 93～189 床であった。

2008～2009 年の 3 段式の水位低下、および 2011～2014 年の 4 段式の水位低下による貯水位、水温およびオオクチバス産卵床の標高を示した (Fig. 4)。干出した産卵床の標高をみると、いずれの年も水位を一定にした貯水位 (標高) から 0.5～2.0 m 深い水深に産卵床数のピークがみられる。例えば、2008 年の場合、貯水位を一段下げた後、324.0 m ASL 付近で貯水位を一定に保ったが、産卵床はこの 1.5～2.0 m 下の 322.0～322.5 m ASL に集中していた。同様に 321.0 m ASL 付近に貯水位を

Fig. 3. Yearly changes of detected exposed spawning beds of largemouth bass.

保った時は、1.0～1.5 m 下の 319.5～320.0 m ASL に集中した。2009 年の場合、貯水位を 323.7 m ASL 付近に保った時、産卵床は 0.7～1.2 m 下の 322.5～323.0 m に、321.0 m 付近に保った時は、0.5～1.0 m 下の 320.5～322.0 m にピークがみられた。これは 4 段式の 2010～2014 年も同様の傾向であった。

Fig. 5 に貯水位の推移と干出した産卵床の確認時期との関係を示した。干出した産卵床 (下図灰色バー) は、段階式水位低下の後に確認している。2008 年の例をみると、5 月 21 日に貯水位の低下が始まり、水位低下後に干出した産卵床は、1 段目 (水位低下 1 回目の直後) で 6 床、2 段目 (同 2 回目の直後) で 43 床、3 段目で 29 床を確認した。確認例は、他の年をみても 2 段目と 3 段目に多く、これらは水温が 15℃ に達し、貯水位を一定に保った後に該当する。

稚魚の確認状況

2008～2014 年のオオクチバスの稚魚の捕獲結果を用いて、産卵時期を推定した (Fig. 5 下図黒色バー)。オオクチバスの産卵推定日をみると、2008～2009 年、2012 年、2014 年はドローダウン前の 5 月上旬～中旬に多かった。このうち 2009 年と 2012 年は、春田大橋より水深の浅い蛇石の水温は、ドローダウン前に、産卵開始水温 15℃ を超えていた。また、2008～2011 年はドローダウンの終了後にも産卵があったと推察された。

一方、ドローダウン期間は、いずれの年も繁殖の成功は少なく、4 段式水位操作は 3 段式水位操作に比べ少ない傾向であった。例えば、3 段式水位操作では、2008～2009 年の 2 か年は、毎年、ドローダウン期間中に産卵され孵化したと推定される稚魚が確認され、2008 年は

<2008> 3-stepped drawdown (# of exposed spawning beds: 78)

<2009> 3-stepped drawdown (# of exposed spawning beds: 90)

<2010> 4-stepped drawdown (# of exposed spawning beds: 93)

Fig. 4. Relation of exposed spawning bed elevation with water level and water temperature. For each year, the left figure shows the water level and water temperature, the right figure shows the exposed spawning bed elevation.

<2011> 4-stepped drawdown (# of exposed spawning beds: 101)

<2012> 4-stepped drawdown (# of exposed spawning beds: 121)

<2013> 4-stepped drawdown (# of exposed spawning beds: 189)

<2014> 4-stepped drawdown (# of exposed spawning beds: 139)

Fig. 5. Relation of spawning dates with water level and water temperature. For each year, the upper figure shows the water level and water temperature. In the lower figure, gray bar shows the number of exposed spawning beds, black bar shows the estimated spawning date.

10日間（調査は5回）で計49,505個体が、2009年は4日間（2回調査）で計17,770個体が確認された。最も稚魚数が多かったのは2008年5月26日で、29,800個体に相当する卵が産卵されたと推定された。29,800個体は孵化し稚魚にまで成長した個体数であり、実際の産卵数はこれより多いと考えられる。3段式の結果に対し4段式では確認された稚魚群が少なく、ドローダウン期間中に産卵され孵化したと推定される稚魚は、2011年と2013年は確認されず、2010年は3日間（2回調査）で計32,047個体、2012年は1日間で500個体、2014年は1日間で9,000個体であった。

個体群動態シミュレーション

パラメーターの推定

N_x (2007)：個体数 N_x (2007) の推定値を Table 2 に示した。蛇沢川前貯水池は231個体が生息すると推定され（熊澤ほか 2012）、最大水深は6.5 m である。オオクチバスの主要な生息水深は10 m 以浅（環境省 2004）であることから、水面面積全域の26,866 m² がオオクチバスの生息域となる。一方、本貯水池では水深10 m 以浅の面積（生息域）は415,827 m² である。これらを本貯水池のオオクチバスを推定個体数(2007)の算出式にあてはめると、推定個体数は8,393個体となった。

p_x ：生存率 p_x の設定値を Table 2 に示した。当歳魚0歳が0.314、1歳魚が0.622、2歳魚が0.669であった。3歳以上では値にバラツキ（0.307～3.125）が認められたため、 p_3 と p_{4+} は p_1 と p_2 の平均値0.646とした。

m_x ：Case I、IIの水位操作方法と産子力 m_4 および m_{5+}

との関係を Table 3 に示した。Case I の産子力 m_4 が2.61、産子力 m_{5+} が6.55であった。Case II の産子力 m_4 が1.95、産子力 m_{5+} が4.88であった。

なお、2008～2014年の7か年のオオクチバスの干出した産卵床数および稚魚群数を Table 4 に示した。干出した産卵床数は本貯水池全体で252～611床であり、稚魚群数は2～52群となった。稚魚群数は3段式水位操作の方が4段式水位操作より多く30～52群となったが、4段式水位操作では2～16群であった。

V ：環境変動 V は、平均値が1、標準偏差が0.27の正規分布の指数の形で対数正規分布する乱数を与えた。

Fig. 6. Projection of largemouth bass population growth.

Table 2. Details of largemouth bass age class in main reservoir of Miharu Dam

“4+” indicates reproductively matured age 4+ individuals.

N_x : Number of age x class individuals.

*Values of p_3 and p_4 were obtained from the average of p_1 and p_2 since a large variance in survival rate was seen at age ≥ 3 .

Age(x)	Length (mm)	Composition ratio (* $N_x / \Sigma N_x$)	No. of individuals (N_x (2007))	Survival rate in fall 2007 (p_x)
0	-134	0.574	4,818	0.314
1	135-170	0.180	1,511	0.622
2	170-208	0.112	940	0.669
3	209-243	0.075	629	0.646*
4+	244-	0.059	495	0.646*
Sum of age 0 to 10 (ΣN_x)		1.000	8,393	—

Table 3. Relation of fecundity m_x and drawdown method

Number of exposed spawning beds of largemouth bass is the number found in the main reservoir (see Table 4). Decimals of B_i and C_i are rounded off.

*The number of spawning beds was calculated assuming m_{4+} age class (495 individuals; male:female = 1:1) crossbred.

**The fecundity m of age 4+ individuals (= fecundity m_{4+}) was calculated to be 9.74 (rounded to two decimal places).

***Supposing that the number of eggs spawned by a female is proportional to the cube of its standard length (= weight), the calculated numbers of eggs in age 4 and age 5+ class were weighted respectively by their composition ratios in the population (Toki et al. 2013). With contributory ratios of age 4 and age 5+ individuals to fecundity m_{4+} , potential fecundity m'_4 and m'_5 were attained. The calculations yielded contributory ratios of age 4 and age 5+ to be 0.521 and 1.306, and fecundity m_{4+} and m'_5 to be 5.07 and 12.72.

****Numbers of exposed spawning beds and fry flocks observed are taken from Table 4.

項 目	Drawdown method (i)	
	I. 3-stepped drawdown	II. 4-stepped drawdown
No. of exposed spawning beds [A_i]	272 (average of 2008 & 2009)	416 (average of 2010-2014)
No. of fry flocks [B_i] (= No. of successful spawning)	41 (average of 2008 & 2009)	11 (average of 2010-2014)
Potential spawning beds [= $A_i + B_i + 248^*$] [C_i]	569 (280 + 41 + 248*)	675 (416 + 11 + 248*)
Successful spawning rate [= $C_i - A_i / C_i$] [D_i]	0.515 (51.5%)	0.384 (38.4%)
Fecundity ($m_{x,i}$)	Age 4 ($m_{4,i}$) [= $m'_4 \times D_I$]	2.61 (5.07*** $\times D_I$)
	Age 5+ ($m_{5+,i}$) [= $m'_5 \times D_I$]	1.95 (5.07*** $\times D_{II}$)
		6.55 (12.72*** $\times D_I$)
		4.88 (12.72*** $\times D_{II}$)

Table 4. Results of survey from 2008-2014.

The entire reservoir was surveyed in 2008. However, survey areas in 2009-2014 were restricted to the Hebiishigawa area, from Hebiishi Bridge to the downstream of the Hebiishigawa front reservoir. The numbers in 2009-2014 were estimated from the area ratio between the Main and Hebiishigawa front reservoir.

*Main: Main reservoir, Hebiishi: Hebiishigawa front reservoir

Year	Operation	No. of exposed spawning beds observed	No. of fry flocks detected
2008	3-stepped	Main: 252 Hebiishi: 78	Main: 30 Hebiishi: 17
2009		Main: 291 Hebiishi: 90	Main: 52 Hebiishi: 29
2010	4-stepped	Main: 301 Hebiishi: 93	Main: 16 Hebiishi: 9
2011		Main: 327 Hebiishi: 101	Main: 2 Hebiishi: 1
2012		Main: 391 Hebiishi: 121	Main: 9 Hebiishi: 5
2013		Main: 611 Hebiishi: 189	Main: 13 Hebiishi: 7
2014		Main: 449 Hebiishi: 139	Main: 11 Hebiishi: 6

オオクチバス個体群の将来予測

2007年から50年間のオオクチバスの個体数変動予測結果の中央値をFig.6に示した。オオクチバスの個体数は、Case Iの3段式水位操作では増加傾向と予測された。一方、Case IIの4段式水位操作では個体数は緩やかな減少傾向と予測された。

考 察

段階式水位低下によるオオクチバス産卵床の破壊

オオクチバスの卵は水温20℃以下では7日前後（財団法人リバーフロント整備センター 1996）、水温21℃において3日間で孵化するが、孵化仔魚はすぐには遊泳せず、孵化後5日目に浮上する（西原・三桢 1989）。孵化直後の仔魚は、遊泳力に乏しく、齋藤ほか（2003）は貯水位低下後のダム湖岸で干出した仔魚を確認している。このため、産卵から8日程度以内に産卵床を干出できれば、卵そのものか移動能力に乏しい仔魚が干出してへい死し、オオクチバスの繁殖は失敗することになる。

今回、3段式水位操作と4段式水位操作で各々、貯水位を一定にする期間を複数日設定した。3段式の場合、貯水位を3～5日間一定に保ち、その後2～3mを数日かけて低下させた。そして再び一定にしたが、貯水位を一定に保持し始めてから、次の貯水位一定保持開始までの一連の操作期間は早い場合で8日、遅い場合は12日間であった。産卵から孵化まで8日程度のため、三春ダムでのオオクチバス産卵床としては深い水深2mに産卵した場合などは、産卵床が干出する前に孵化し、仔魚が泳ぎ出すことが可能である。それに対し、4段式の場合は貯水位を一定に保つ期間は2～3日、貯水位を2m程度低下させるのに5日ほどのため、多くの場合は8日程度で一連の操作が終了する。4段式の場合、貯水位が安定した直後に水深2mでオオクチバスが産卵したとしても8日で産卵床が干出される。仮に孵化したとしても、仔魚が遊泳可能な状態まで成長できないうちに干出されることが可能となり、繁殖が抑制されることが考えられる。

貯水池内を遊泳している稚魚の産卵日からは、3段式の2008年と2009年はいずれも約25日に及ぶドローダウン期間中に繁殖が成功したと推定される。一方、4段式では、2010～2014年のすべての年で、ドローダウン中の繁殖成功は確認されないかまたは少なく、繁殖が抑制されたと考えられる（Fig.5）。2011年と2013年はドローダウン期間中に産卵が成功しなかったと推察され、

2012年と2014年は繁殖に成功した日が各々わずか1日間で、2010年は3日間であり、ドローダウン期間中の繁殖はほぼ抑制されたと考えられる。なお、2014年はドローダウン終了直前の日における産卵が推定されたが、産卵後の水位低下は約0.4mであり、水位の低下幅は産卵床を干出させるには不十分であったと推定される。

表4で繁殖に成功した稚魚群数をみると、3段式水位操作で稚魚群数が多く4段式で少なかった。4段式水位操作により必ずしも繁殖を完全に抑制できるわけではないが、オオクチバスの繁殖抑制には、3段式より4段式で高い効果が得られたと考えられる。

オオクチバス個体群の変化

オオクチバスの産卵床が破壊されない場合、個体数は増加し、在来魚等に影響を与えることになる。

オオクチバスの個体群の将来予測では、3段式水位操作の場合では個体数は増加傾向のままであるが、4段式水位操作の場合では個体数が緩やかに減少するとの計算結果が得られた。これらの計算は密度効果を考慮していないため不確実性を伴うが、今回検討した2つのケースでは、4段式で効果的と考えることができる。現地調査の結果においても、4段式で干出した産卵床が多いこと（Fig.3）、水位操作中に繁殖成功したと考えられる稚魚が少ないこと（Fig.5）から、4段式で効果が高いと示唆される。

ダム施設は大規模な人工構造物で、周辺の自然環境に与える変化は甚大と考えられる。その一方で、ダム貯水池は、多様な水生生物の新たな生息・生育環境としての役割も果たしている。しかし、ダム貯水池においては、外来種の定着と増加がしばしば見られ、生物相のバランスが大きく変化するだけでなく、貯水池自体が外来種の増殖・拡散装置として働いてしまう危険性に対し対策が必要である。

ダム貯水池は、ある程度の人為的な操作が可能であり、本研究の結果、水位低下の方法を工夫することで、オオクチバスの繁殖抑制が可能と示唆された。ただし、オオクチバスの個体数が減少するかは、今後のモニタリングの結果をもって明らかとなり、結果によっては追加の防除対策を講じる必要が想定される。今後もダムの特徴と生物の生態特性を活かし、治水面と利水面とのバランスを考慮しつつ、生態系に配慮した管理方法を見出していきたい。本研究が他の水域での防除対策の一助となれば幸いである。

謝 辞

本研究を進めるにあたり、魚類捕獲調査の同意をいただいた阿武隈川漁業協同組合、素稿に対しアドバイスをいただいた横浜国立大学の佐々木茂樹博士にこの場を借りて御礼申し上げます。

摘 要

福島県阿武隈川水系三春ダムでは、制限水位方式のダム運用を行っており、通常、洪水期の開始直前に貯水位を低下させる。ちょうどこの時期は、外来魚の繁殖期と重複し、オオクチバスの産卵開始の目安とされる 15～16℃に表面水温が達する時期が含まれる。このため、ダム湖に特有の計画的な水位操作パターンに工夫を施し、外来魚の繁殖抑制を試みた。

通常のダム操作は、貯水位を一定の割合で低下させていくが、三春ダムでは、途中で 2～4 日程度、水位を一定に保持してオオクチバスの産卵床形成を促進させ、その後、貯水位を低下させて産卵床を干出した。その結果、貯水位を一定に保った水深から 0.5～2 m 下に産卵床が多く観察され、段階式水位操作により、多くの産卵床を干出できることを確認した。

繁殖に成功した稚魚を捕獲し、個体サイズ、耳石から産卵日を推定すると、水位低下中の繁殖成功は少ない結果となった。また、4 段式水位操作と 3 段式水位操作では、前者で繁殖成功数は少なく、より効率的に繁殖を抑制させる結果となった。個体群数の将来予測では、4 段式水位操作の場合、個体数は横ばいで、増加は抑制されると推定された。

これらのことから、4 段式の水位操作により、貯水池内のオオクチバスの繁殖抑制は可能と考えられた。

引用文献

- 浅見和弘・大杉奉功・五十嵐崇博・西田守一・矢沢賢一 (2008) ダム湖における特定外来魚の生息状況と防除手法の検討. 日本生態学会東北地区会報「特集 東北地方の侵略的外来性生物問題 ―その被害と対策―」**68**: 25-31.
- 細谷和海・高橋清孝 (2006) ブラックバスを退治する。―シナイモツゴ郷の会からのメッセージ―. 恒星社厚生閣, 東京.
- 財団法人リバーフロント整備センター (1996) 川の生物図典. 山海堂, 東京.
- 角田裕志・満尾世志人・千賀裕太郎 (2011) 特定外来生物オオクチバスの違法放流: 岩手県奥州市のため池の事例. 保全生態学研究 **16**(2): 243-248.
- 環境省 (2004) 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. 財団法人自然環境研究セン

- ター, 東京.
- 熊澤一正・大杉奉功・西田守一・浅見和弘・鎌田健太郎・沖津二郎・中井克樹・五十嵐崇博・船橋昇治・岩見洋一・中沢重一 (2012) ダム湖の水位低下を利用した定置網による外来魚捕獲とその効果. 応用生態工学 **15**(2): 171-185.
- Maezono Y. & Miyashita T. (2003) Community-level impacts induced by introduced largemouth bass and bluegill in farm ponds in Japan. *Biological Conservation* **109**: 111-121.
- 松田裕之 (2004) ゼロからわかる生態学―環境・進化・持続可能性の科学. 共立出版, 東京.
- 中井克樹 (2004) ブラックバス等の外来魚による生態的影響. 用水と廃水 **46**: 48-56.
- 中井克樹 (2010) 外来魚問題への対策(4)―外来魚の繁殖を食い止める―. 日本水産資源保護協会季報 **524**: 3-9.
- 中井克樹 (2014) ブラックバス・ブルーギルの生態と生息抑制. 「水辺と人の環境学(中)」(小倉紀夫・竹村公太郎・谷田一三・松田芳夫編), pp.69-71. 朝倉書店, 東京.
- 中井克樹・浅見和弘・大杉奉功・小山幸男 (2014) ダム湖における外来魚問題とその対策. 「ダムと環境の科学Ⅲ エコトーンと環境創出」(谷田一三・江崎保男・一柳英隆編), pp.195-211. 京都大学出版会, 京都.
- 中村智幸 (1992)* ブラックバスとブルーギルのすべて. オオクチバス. (1) 概要. 全国内水漁業協同組合連合会外来魚対策検討委託事業報告書. pp.15-19.
- 中沢重一 (2011) 三春ダムにおける特定外来魚対策を通じた生物多様性保全の取組. 河川 3 月号: 3-7.
- 日本生態学会 (2002) 外来種ハンドブック. 地人書館, 東京.
- 西原隆道・三橋実 (1989) オオクチバス (*Micropterus salmoides* (Lacepeda)) の発生とふ化仔魚の発育過程について. 神奈川淡水魚養殖場報告 **25**: 54-67.
- 大杉奉功・木下誠也・熊澤一正・浅見和弘・中沢重一 (2011) ダム湖の水位低下操作を利用した特定外来魚の防除方法. 大ダム **216**: 68-72.
- R Core Team (2016) R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria.
- 齋藤大・宇野正義・伊藤尚敬 (2003) さくら湖 (三春ダム) の水位低下がオオクチバスの繁殖に与える影響. 応用生態工学 **6**: 15-24.
- 土岐範彦・大杉奉功・中沢重一・鎌田健太郎・熊澤一正・浅見和弘・中井克樹 (2013) オオクチバスが優占する前貯水池の魚類群集構造と水抜きによる駆除とその後の変化. 応用生態工学 **16**: 37-50.
- 戸谷英雄・谷村大三郎・石橋祥宏・宮脇成生 (2004) 個体群存続可能性分析 (PVA) による絶滅危惧植物へのミティゲーションの評価. 河川環境総合研究所報告 **10**: 41-53.
- 津村祐司 (1989) 産卵生態および産卵場分布. 滋賀県水産試験場研究報告 (昭和 60-62 年度オオクチバス対策総合調査報告書) **40**: 27-38.
- 淀太我 (2002) 日本の湖沼におけるオオクチバスの生活史. 「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). pp.31-45. 恒星社厚生閣, 東京.
- 渡辺勝敏・高橋洋 (2010) 淡水魚類地理の自然史 多様性と分化をめぐる. 北海道大学出版会, 札幌.

*: 直接参照できなかった。