

## 特 集

ホトトギスガイ：生態系への影響と研究の動向

ホトトギスガイ個体群に対する塩分の影響 —  
宍道湖と大橋川における長期モニタリングから倉田健悟<sup>1\*</sup>・平塚純一<sup>2</sup>・川上 豪<sup>3</sup>・桑原正樹<sup>4</sup>・飯塚洋平<sup>3</sup>・桑原弘道<sup>3</sup>**Effects of salinity on *Arcuatula senhousia* population:  
long-term monitoring in Lake Shinji and the Ohashi River****Kengo Kurata<sup>1\*</sup>, Junichi Hiratsuka<sup>2</sup>, Go Kawakami<sup>3</sup>, Masaki Kuwabara<sup>4</sup>,  
Yohei Iiduka<sup>3</sup> and Hiromichi Kuwabara<sup>3</sup>**

**Abstract:** The present paper describes the detailed results of long-term monitoring on changes in population density and biomass of *Arcuatula senhousia* in Lake Shinji and the Ohashi River. Routine quantitative samplings were almost monthly conducted for 8 years from November 2005 to October 2013 at selected stations in Lake Shinji and the Ohashi River. *A. senhousia* inhabited the lower reaches in the Ohashi River over the years with high density and biomass, sometimes forming mat aggregations, while the numbers of individuals were lower level at Lake Shinji and the upper reaches of the Ohashi River. The higher abundance in the lower reaches in the Ohashi River was attributed to the source population in Lake Nakaumi, where *A. senhousia* was the predominant benthic species. Population density and biomass of *A. senhousia* were increased along the deeper riverbed, causing its distribution expanded from the middle reaches to the upper reaches. The distribution was likely to expand toward Lake Shinji when the salinity in Lake Shinji was over at least 6 PSU during May and July. The 8-years investigation of the present study revealed that population dynamics and shifts in distribution of *A. senhousia* were tightly related with salinity regime in Lake Shinji.

**Key words:** *Arcuatula senhousia*, estuarine river, long-term monitoring, Ohashi River, population dynamics

<sup>1</sup> 島根大学 生物資源科学部 環境共生科学科・Department of Environmental and Sustainability Sciences, Institute of Environmental Systems Science, Shimane University, 1060 Nishikawatsu-cho, Matsue, Shimane 690-8504, Japan.

<sup>2</sup> 株式会社地域システム研究所・Research Institute for Regional System, 5-31-1 Higashihonmachi, Matsue, Shimane 690-0842, Japan.

<sup>3</sup> 認定 NPO法人自然再生センター・Certified NPO Organization Nature Restoration Center, 114 Tenjinmachi, Matsue, Shimane 690-0064, Japan.

<sup>4</sup> 宍道湖漁業協同組合・Shinji Lake Fishermen's Cooperative Association, 6-9 Sodeshi-cho, Matsue, Shimane 690-0049, Japan.

\* Corresponding Author

受付日：2018年9月23日，受理日：2018年12月22日，WEB掲載日：2018年12月31日

## はじめに

山陰地方の斐伊川水系に位置する宍道湖と中海は日本最大の汽水域として知られる。両湖は全長約 7.6 km の大橋川を通じて塩水の交換がなされる「連結汽水湖」であり、河川河口域や単独の汽水湖とは異なる汽水環境である。宍道湖は全国でも有数のヤマトシジミ (*Corbicula japonica*) の産地で、ヤマトシジミの漁獲量が島根県の水産業や地域経済に及ぼす影響は大きい(日本シジミ研究所, 2007)。ヤマトシジミ漁は宍道湖の下流側に位置する大橋川でも行われている。一方、中海における底生生物の優占種はホトギスガイ (*Arcuatula senhousia*) であり、大橋川から宍道湖にも生息が確認されている(三浦ほか, 2004; 細澤ほか, 2015; Kurata and Hiratsuka, 2018)。ホトギスガイは水中の懸濁物をろ過摂食し、基質や個体間で足糸を絡ませて高密度に集合した状態(マット)をたびたび形成する(伊藤・梶原, 1981; Crooks, 1998; Crooks and Khim, 1999; Mistri, 2002; Mistri, 2003; Mistri et al., 2004)。このような特性から、本種が生息する水域の湖底や川底において底質や底生生物に及ぼす影響が指摘されている(北岡ほか, 2018; 小森田ほか, 2018)。宍道湖の表層塩分の値が高い年には、ホトギスガイが宍道湖へ進入して湖底でマットが形成され、マットで覆われた場所でヤマトシジミのへい死が起こるとされる(三浦ほか, 2004)。宍道湖や大橋川のホトギスガイの生息場所と重なるヤマトシジミの漁場では、鋤簾による採集作業中、ホトギスガイを取り除きながらヤマトシジミを選別する必要がある(宍道湖漁業協同組合, 私信)。このような理由により、宍道湖のヤマトシジミ漁に関してホトギスガイ個体群の分布の変化を明らかにすることが求められている。

宍道湖と中海は、日本海の潮位差が小さいことから天文潮に加えて季節や気圧といった気象潮の影響を受けやすい(橋谷, 1994; Hashitani, 1998; 福岡, 2005)。大橋川では中海からの塩水が遡上して成層し、通常、潮汐に応じて中海の上層水の大橋川への進入と後退が観測される(e.g., 石飛, 1994; Ishitobi et al., 1999; 森脇ほか, 2003)。高潮や強い西風などの条件によっては中海の下層水が大橋川を遡上することもある(e.g., 橋谷, 1994; 福岡, 2005; Ishitobi et al., 1993; Ishitobi et al., 1999; 森脇ほか, 2003)。一方、斐伊川流域に降った大雨は宍道湖の水位を上昇させ、宍道湖側からの流れが大橋川において卓越する。このように、大橋川で観測される塩水進入の状態は宍道湖の塩分を左右し、大橋川の底生生物の生息に影響している

と考えられる(Kurata and Hiratsuka, 2018)。

宍道湖と中海という「連結汽水湖」において、塩分の違いによる生息する生物の分布に関して多くの研究があるが(e.g., Ohtani and Ohga, 1997; Ishitobi et al., 2000)、大橋川における生物の分布について報告した研究例は少ない(e.g., Uye et al., 2000; Godhantaraman and Uye, 2003)。大橋川では中海に近く塩分の高い下流側にホトギスガイの個体数が多く、中流付近が宍道湖方向への分布の境界とみなされている(大橋川の汽水環境を調べる会, 2007; 2008)。しかし、大橋川は塩分の時空間変化が非常に大きく、また年によって中海から遡上する塩水量が変動するため、単一年の分布調査で得られる情報は限定的であると考えられる。斐伊川水系の汽水域においては、宍道湖の大部分を占める低塩分水と呼ばれる水塊の塩分が宍道湖のヤマトシジミの生息条件として重要であり、宍道湖の表層塩分が重要な指標とされる(Somura et al., 2009)。大橋川改修事業における環境調査では、数値計算の対象項目として宍道湖の表層塩分の変化が選ばれ、河道改修により中海からの塩水遡上の状況が変化して宍道湖の塩分が上昇する可能性が示された(出雲河川事務所, 2006)。

宍道湖の表層塩分は赤潮やアオコの発生と関係していることが指摘されるなど(大谷, 2005)、斐伊川水系の汽水域の今後の環境変化をモニタリングするために重要な指標であると言える。今後の気候変動の影響により、宍道湖から中海までの汽水域生態系の塩分バランスが変化した場合、ヤマトシジミやホトギスガイといった優占種の分布が変化する可能性が考えられる。また、ヤマトシジミに代表される水産資源の管理や持続的な生物生産機能の維持には、両種の分布が重なる大橋川の底生生物群集の動態と分布域変動の要因を解明する必要がある。しかし、これまで大橋川におけるホトギスガイの個体群動態と宍道湖の塩分の関係を調べた研究は行われていなかった。そこで本研究では、島根県大橋川におけるホトギスガイ個体群の密度と現存量の変化を長期的にモニタリングし、特に宍道湖の塩分の変動に着目してその変動パターンと本種の個体群動態との関連性を明らかにすることを目的とした。

## 方法

2005年11月から2013年10月までの8年間、大橋川および宍道湖において定点(合計13地点)を設定し、ほぼ1ヶ月に1回の頻度で定量的な生物調査を行った。

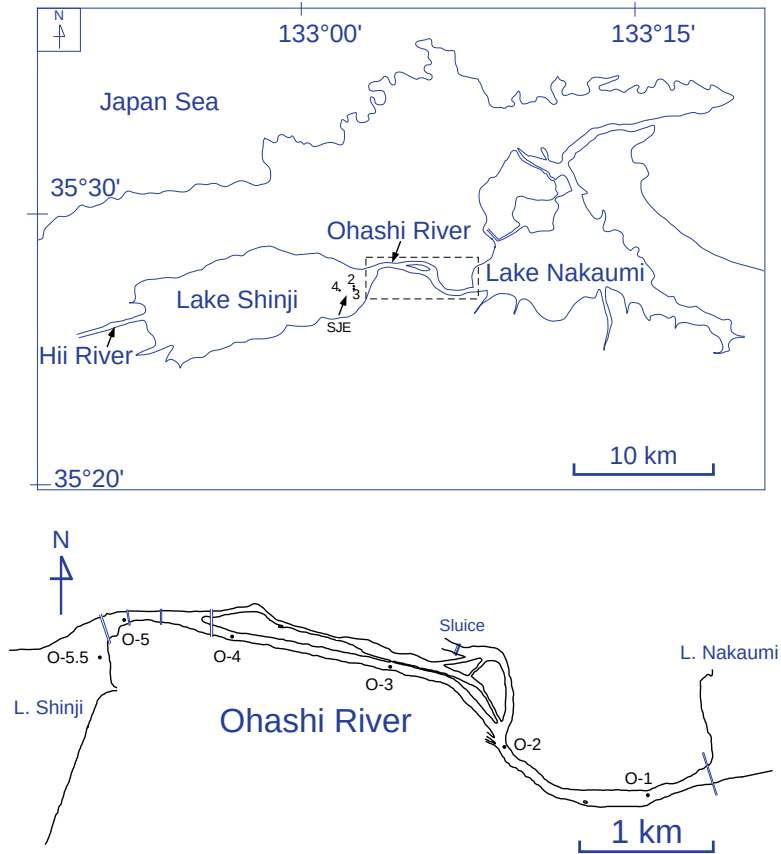


図1 島根県に位置する研究地域と研究地点. 下方の地図の場所は上方の地図の破線で示されている.

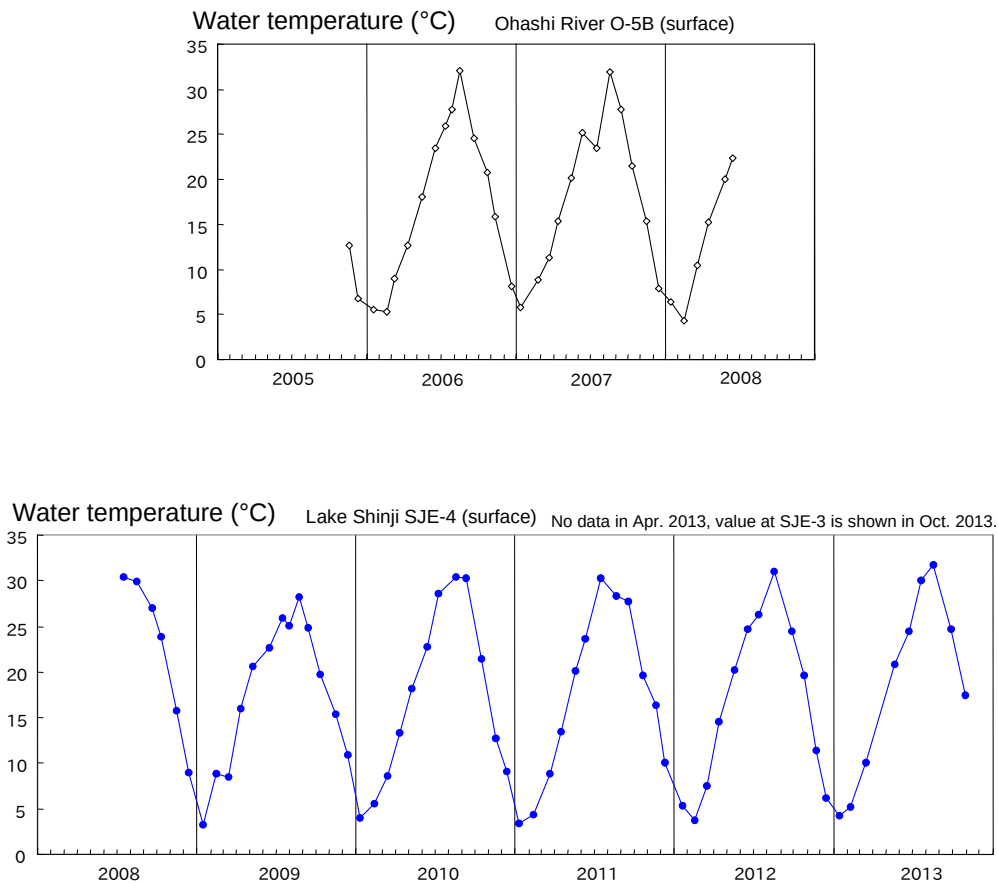
Fig. 1 Study area and study stations located in Shimane Prefecture. Location of the lower map is shown in the upper map with broken line.

大橋川の流心部の水深は平均して 5 m 程度で河床は砂泥質の堆積物である (出雲河川事務所, 2006). 大橋川の流心部に相当する水深約 4.5 ~ 5.5 m の地点を下流側から上流側にかけて O-1B ~ O-5B と表記した (Fig. 1). 2007 年 12 月に大橋川の水深 2 m の場所に地点 (O-1\_2m ~ O-5\_2m) を追加し, 2008 年 6 月からほぼ 1 ヶ月に 1 回の頻度で定量的な生物調査を行った. 2008 年 7 月から宍道湖東部の水深 2 ~ 4 m の場所に地点 (SJE-2 ~ SJE-4) を追加し, SJE-2 と SJE-3 においてほぼ 1 ヶ月に 1 回の頻度で定量的な生物調査を, SJE-4 において次に述べる水質の測定を行った. また, 2009 年 7 月 31 日, 2009 年 8 月 23 日, 2009 年 9 月 13 日に宍道湖東部の水深 5 m の場所に O-5.5 地点を設定し, 次に述べる水質の測定を行った.

大橋川と宍道湖の各地点において, 表層から底層まで 1 m 間隔の水深における水温と塩分を, 携帯型水質センサー (YSI Model 85 または 600QS) を使用して測定した. 2005 年 11 月から 2008 年 6 月までの期間

は本研究では宍道湖で観測を行っていなかったため, 島根県水産技術センター (2014) によって観測されている水質データのうち, 宍道湖の主な水塊である低塩分水として測定される表層水の値を引用した. 島根県水産技術センターの宍道湖表層平均値と本研究の大橋川上流 O-5B 地点の表層の値は, 宍道湖東部の表層塩分の観測データを補完するために用いた. 大橋川では基本的に下げ潮時は宍道湖の低塩分水を表層付近で測定していることになるため, 中海から進入する塩水の塩分を観測したと判断された場合は大橋川上流 O-5B 地点の表層の値を採用しなかった.

ホトトギスガイの採集と試料の分析を以下のように行った. 小型船舶からスミスマッキンタイヤ型採泥器を河床に下ろし, 0.05 m<sup>2</sup> の面積の堆積物を 1 回分採取し, 船上で 0.5 mm 目合いのサーバネットを用いて細かい粒子を落とした後にサーバネットに残ったものをポリエチレン袋に入れて実験室へ持ち帰った. 実験室で 2 mm と 0.5 mm のふるいを用いてサイズによる



**図2** 2005年11月から2013年10月までの大橋川(O-5B)と宍道湖東部(SJE-4)における水温の経時変化。表層(0.2 m)の値を示す。2013年4月はデータが得られなかった。2013年10月の値はSJE-3で記録された。  
**Fig. 2** Temporal changes of water temperature in the Ohashi River (O-5B) and in the eastern part of Lake Shinji (SJE-4) from November 2005 to October 2013. Values in the surface layer (0.2 m) are shown. No data were obtained in April 2013. The value in October 2013 was recorded at SJE-3.

分面を行って2 mm ふるいに残った試料からホトトギスガイを選別した。0.5 mm ふるいに残った試料は後日ホトトギスガイを選別するために10% 中性ホルマリンで保存した。2 mm ふるいに残ったホトトギスガイの湿重量を測定し、個体数を計数した。この時、基本的に全個体を個体数計数の対象としたが、およそ300個体以上が含まれると見積られる場合は、試料をよく混ぜて偏りがないように分割し、その分割したサンプル(分画)の湿重量  $W_{sub}$  を測定して分画に含まれる個体数  $N_{sub}$  を計数した。分画の湿重量  $W_{sub}$  に対する各試料の湿重量  $W$  の比  $W/W_{sub}$  と分画に含まれる個体数  $N_{sub}$  から各試料の個体数  $N (=N_{sub} * W/W_{sub})$  を算出した。これまでの調査で、 $0.05 \text{ m}^2$  の面積のスミスマッキンタイヤ型採泥器で1,000個体もしくは湿重量100 gを超えた場合、目視によるマット形成とはほぼ整合していた。そこで、 $1 \text{ m}^2$  あたりの個体数と湿重量

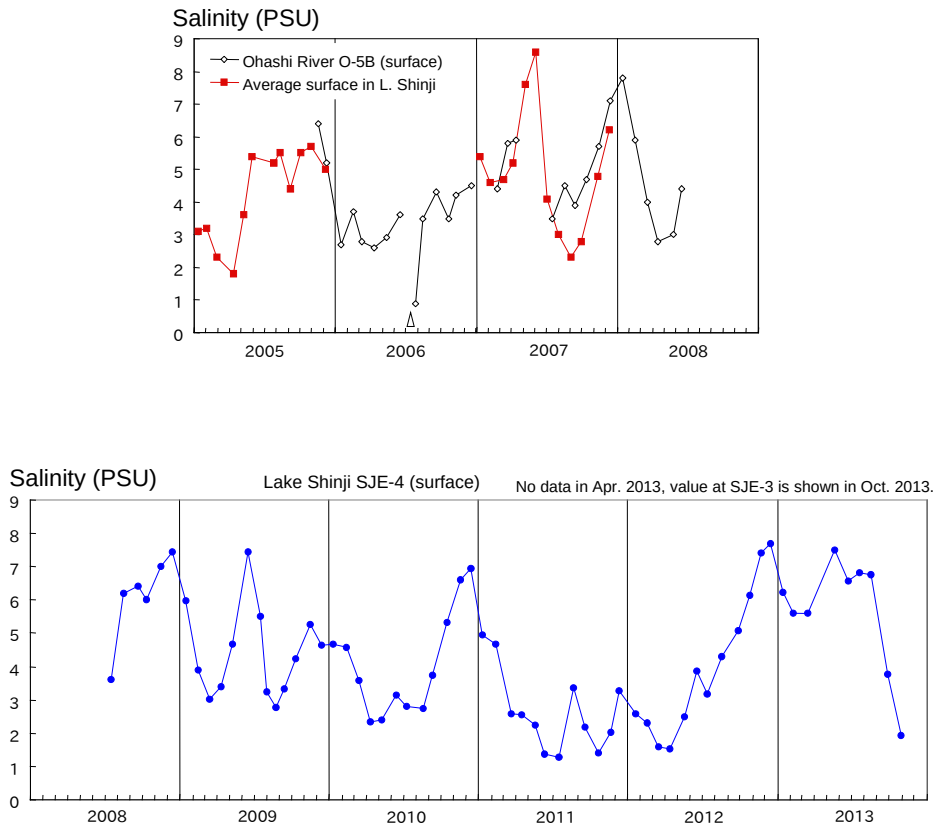
がそれぞれ20,000個体または2,000 gを超えるような時、マットの状態であると本稿では定義した。

## 結果

### 水温と塩分の変化

2005年11月～2013年10月の期間における大橋川と宍道湖東部の水温の経時変化を示す(Fig. 2)。底生生物の生存に影響すると考えられる冬季の水温低下に着目すると、2006年～2007年の冬の極小値である2007年1月13日の $5.8^\circ\text{C}$ が最も高く、二番目に冬の極小値が高かったのは2005年～2006年の冬の $5.3^\circ\text{C}$ 、その他の冬の極小値は $4.3^\circ\text{C}$ 以下であった。2005年1月～2013年10月の期間における大橋川と宍道湖の塩分の経時変化を示す(Fig. 3)。塩分の上昇と低下のパターンは年によって異なり、また季節的





**図 3** 2005 年 1 月から 2013 年 10 月までの大橋川 (O-5B, 空いたダイヤ) と穴道湖における塩分の経時変化. 表層 (0.2 m) の値を示す. 著者らは 2008 年 6 月まで穴道湖東部 (SJE-4, 閉じた円) で研究地点を確立していなかったため, 島根県水産技術センター (2014) によって測定された穴道湖表層の平均値をグラフに追加した (閉じた正方形). 大橋川の O-5B における塩分が成層の観測から穴道湖由来の値なのか中海由来の値なのかを区別できる場合, 中海から来た水の塩分と推定される値はグラフから取り除いた. 2013 年 4 月はデータが得られなかった. 2013 年 10 月の値は SJE-3 で記録された. 空いた三角形は 2006 年 7 月の洪水を示す.

**Fig. 3** Temporal changes of salinity in the Ohashi River (O-5B, open diamond) and in Lake Shinji from January 2005 to October 2013. Values in the surface layer (0.2 m) are shown. Average values of surface layer in Lake Shinji measured by Shimane Prefectural Fisheries Technology Center (2014) are added in the graph (closed square), since the authors had not established study stations in the eastern part of Lake Shinji (SJE-4, closed circle) until June 2008. In case that salinity at the O-5B in the Ohashi River can be distinguished whether the value was derived from Lake Shinji or Lake Nakaumi according to the observation of stratification, the value estimated to be from Lake Nakaumi was omitted in the graph. No data were obtained in April 2013. The value in October 2013 was recorded at SJE-3. Open triangle indicates the flood in July 2006.

な変化も認められなかった. 2006 年 7 月の斐伊川の洪水によって穴道湖の塩分は淡水近くまで大きく低下した. この 2006 年 7 月の洪水は 7 月 16 日から 19 日までの流域平均総雨量が 378 mm を記録し (島根県土木部河川課, 2007), 穴道湖の水位が観測開始以降 2 番目の水位を記録する規模であった (国土交通省中国地方整備局, 2010).

大橋川における塩水の進入状況を説明するため,

代表的な例として 2009 年 7 月 31 日, 2009 年 8 月 23 日, 2009 年 9 月 13 日の鉛直断面における塩分分布を Fig. 4 に表した. 2009 年 7 月 31 日では, 穴道湖からの約 3.3 PSU の塩水が大橋川下流方向まで広がっており, 表層から底層までほぼ一様な塩分分布であった. 大橋川下流の O-1 地点で底層の約 4 m の水深で中海からの約 7.1 PSU の塩水が観測された. 2009 年 8 月 23 日の観測では, 穴道湖東部の SJE-4 の表層が

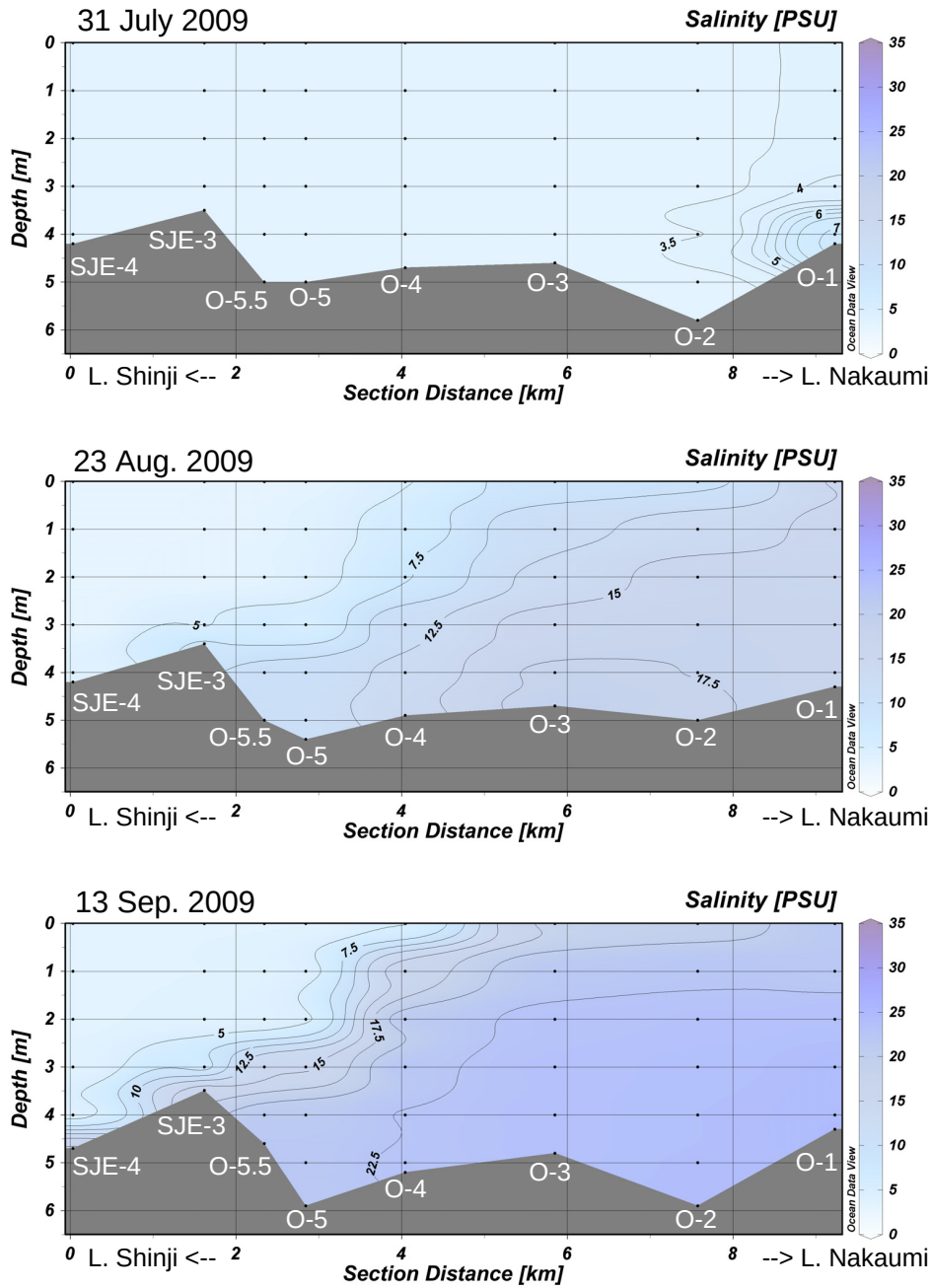


図4 2009年7月31日,8月23日,9月13日の大橋川から穴道湖にかけての断面における塩分の分布。塩分の範囲を色の階調の変化で示した。断面の距離はSJE-4を起点とした。

Fig. 4 Salinity profiles along the Ohashi River and Lake Shinji on July 31, August 23 and September 13, 2009. Salinity ranges were indicated by the gradations. Section distance was plotted from SJE-4.

約 2.8 PSU の塩分で、この水塊は大橋川上流の O-5 地点の表層付近まで分布した。大橋川下流 O-1 では中海上層水に由来する 17 PSU 程度の塩水が表層から底層まで観測され、この水塊は塩水くさびの形状で大橋川上流方向まで進んでいる様子が見られた。2009 年 9 月 13 日には中海からの塩水くさびは 24 PSU 程度

の塩分を示し、水深 4 m で約 21.3 PSU の塩水の進入が大橋川上流 O-5 から穴道湖東部付近まで確認された。この水塊より塩分が低い 12 PSU 程度の塩水が穴道湖東部の SJE-3 の底層付近と SJE-4 の底層で確認された。SJE-4 の表層の塩分は 8 月 23 日より高い約 3.3 PSU であった。

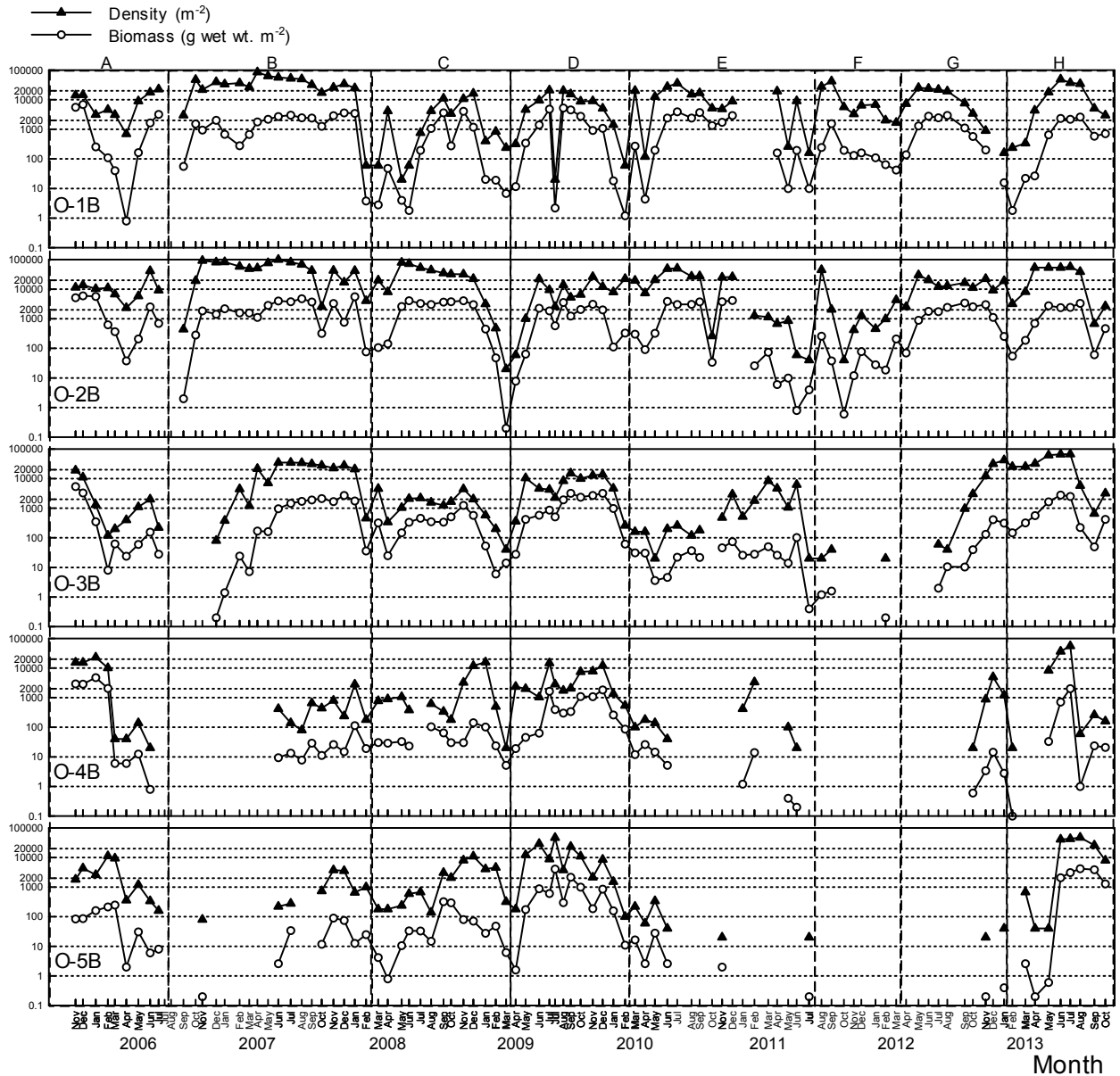


図5 2005年11月から2013年10月までのO-1B～O-5Bにおけるホトトギスガイの個体群密度(閉じた三角形)と現存量(空いた円)の経時変化。縦軸は対数表記。サンプリングが行われた日について月を表示し、ホトトギスガイが採集されなかった時は点をプロットしていない。個体群密度と現存量のひと続きの変化(期間AからHまで)を破線によって示している。

Fig. 5 Temporal changes in density (closed triangle) and biomass (open circle) of *Arcuatula senhousia* at stations O-1B to O-5B from November 2005 to October 2013. Vertical axis is logarithmic. Month is indicated on the day when a sampling was done and no plots means no individuals of *A. senhousia* collected. Consecutive changes in density and biomass (the periods A to H) are indicated with broken lines.

### ホトトギスガイの個体群動態の特徴

2005年11月～2013年10月の期間におけるホトトギスガイの個体群密度と現存量の経時変化を Figs. 5～7 に示した。大橋川のO-1Bはほぼ通年、ホトトギスガイが生息し、ほぼ似たような状況がO-2Bでも観

察された。これらの2地点は個体群密度や現存量が大きく、たびたびマットの形成が見られた。一方で大橋川でマットが見られた場合においても、穴道湖では個体数が少なかった。このように大橋川におけるホトトギスガイの個体群動態と分布のパターンは、時間的

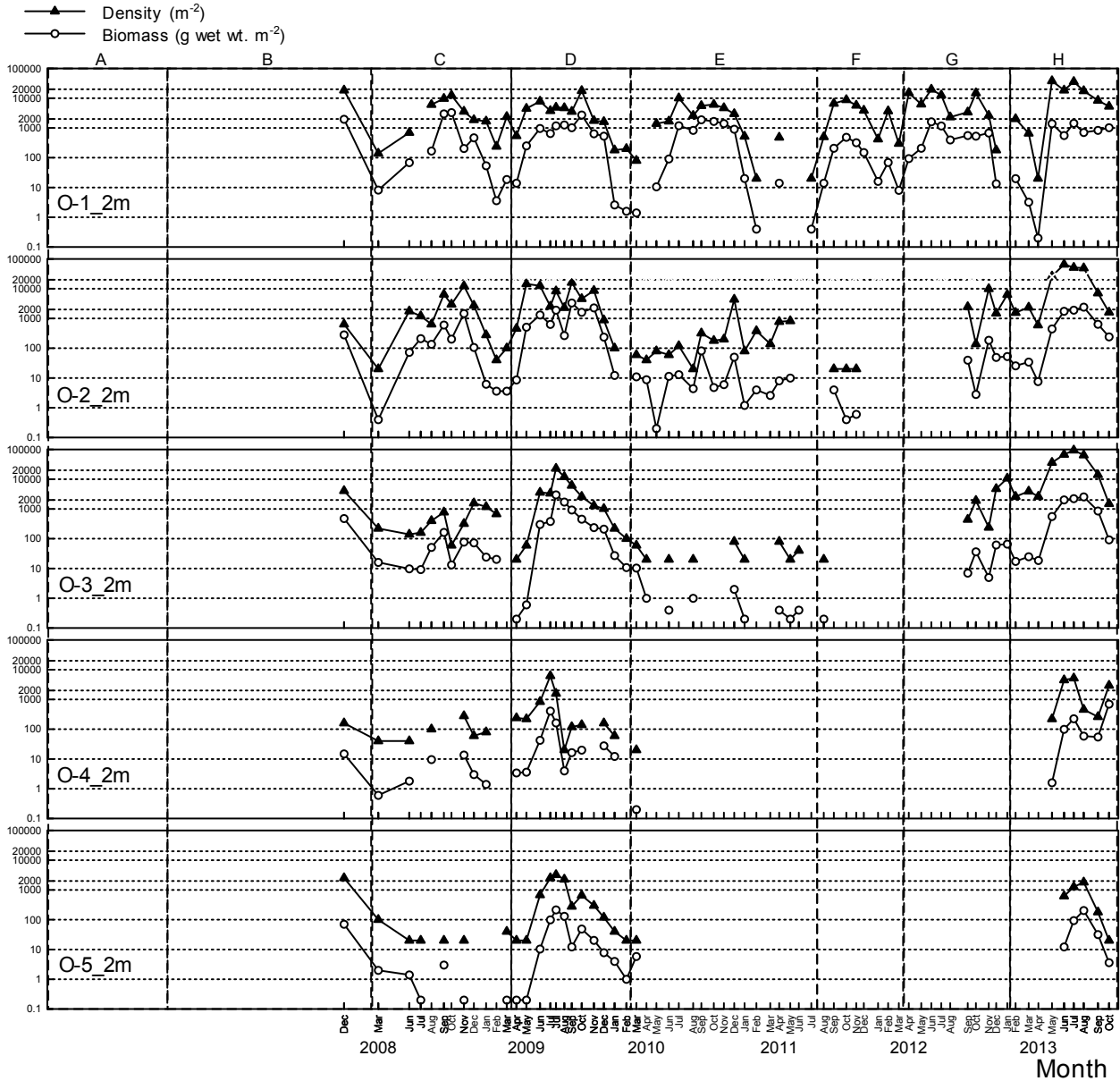


図6 2007年12月から2013年10月までのO-1B\_2m～O-5B\_2mにおけるホトギスガイの個体群密度(閉じた三角形)と現存量(空いた円)の経時変化。縦軸は対数表記。サンプリングが行われた日について月を表示し、ホトギスガイが採集されなかった時は点をプロットしていない。個体群密度と現存量のひと続きの変化(期間AからHまで)を破線によって示している。

Fig. 6 Temporal changes in density (closed triangle) and biomass (open circle) of *A. senhousia* at stations O-1\_2m to O-5\_2m from December 2007 to October 2013. Vertical axis is logarithmic. Month is indicated on the day when a sampling was done and no plots means no individuals of *A. senhousia* collected. Consecutive changes in density and biomass (the periods A to H) are indicated with broken lines.

にも空間的にも大きく変動していた。8年間の調査期間中に、個体群密度と現存量の増減は複数回に亘って断続的に起こっていた。これらの個体群密度と現存量の増減の特徴を把握するため、特に本調査地の中心付近に位置する大橋川中流のO-3Bにおける経時変

化に着目した。また、ホトギスガイのマット形成の有無やその変化を追うことにより、O-3Bにおける個体群密度と現存量の増減の傾向が他の地点でも見られるかを確認した(Figs. 5～7)。すなわち、本調査地における調査期間全体の個体群動態を、大橋川下流



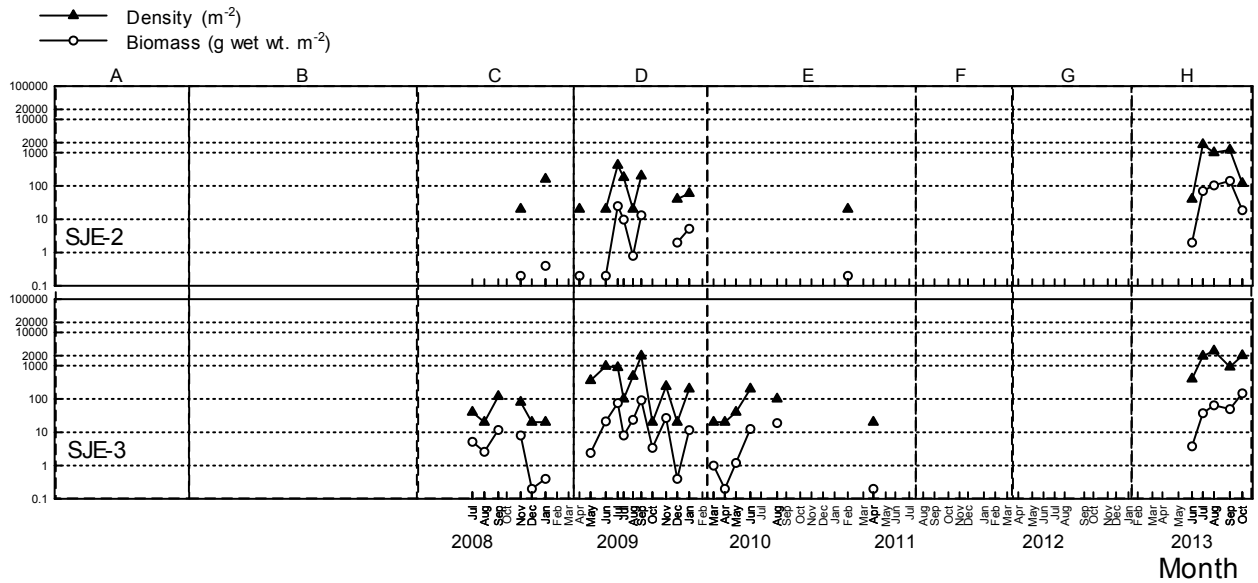


図7 2008年7月から2013年10月までのSJE-2とSJE-3におけるホトトギスガイの個体群密度（閉じた三角形）と現存量（空いた円）の経時変化。縦軸は対数表記。サンプリングが行われた日について月を表示し、ホトトギスガイが採集されなかった時は点をプロットしていない。個体群密度と現存量のひと続きの変化（期間AからHまで）を破線によって示している。

Fig. 7 Temporal changes in density (closed triangle) and biomass (open circle) of *A. senhousia* at stations SJE-2 and SJE-3 from July 2008 to October 2013. Vertical axis is logarithmic. Month is indicated on the day when a sampling was done and no plots means no individuals of *A. senhousia* collected. Consecutive changes in density and biomass (the periods A to H) are indicated with broken lines.

から宍道湖までの範囲におけるホトトギスガイ個体群の拡大および縮小の現象として捉えることとした。調査期間中のマット形成を含むホトトギスガイの個体群密度と現存量の変化について、個体群密度もしくは現存量が極小となる時期を区切りとしてA～Hの期間に分割し、以下に記述する。

[A: 2005年11月～2006年7月]

本調査の開始時よりホトトギスガイの分布は大橋川上流まで広がっており（2005年11月にO-5Bで1,820 inds. m<sup>-2</sup>）、後に調査期間中で個体数が相対的に多かった年と分かった。また、2006年7月11日のサンプリング時に見られた個体（例えばO-1Bで22,604 inds. m<sup>-2</sup>）は2006年7月28日には全く採集されず、2006年7月の斐伊川の洪水によって大橋川の個体群が消滅した事例であった。

O-1BとO-3Bでは2005年12月（O-1B: 14,562 inds. m<sup>-2</sup>, 6,908 g wet wt. m<sup>-2</sup>; O-3B: 11,104 inds. m<sup>-2</sup>, 3,282 g wet wt. m<sup>-2</sup>）から2006年1月（O-1B: 3,140 inds. m<sup>-2</sup>, 256 g wet wt. m<sup>-2</sup>; O-3B: 1,300 inds. m<sup>-2</sup>, 348 g wet wt. m<sup>-2</sup>）にかけて密度と現存量が減少し、O-2Bはこれら

2地点より遅れて2006年1月から2月に現存量が5,694 g wet wt. m<sup>-2</sup>から628 g wet wt. m<sup>-2</sup>へ減少した。O-1BとO-2Bでは5月から再び密度と現存量が増加し始め、2006年4月から6月において個体群密度がO-1Bでは700 inds. m<sup>-2</sup>から17,674 inds. m<sup>-2</sup>に、O-2Bでは2,340 inds. m<sup>-2</sup>から41,555 inds. m<sup>-2</sup>にそれぞれ増加した。O-3Bは2005年11月に19,083 inds. m<sup>-2</sup>であったのが2006年2月に120 inds. m<sup>-2</sup>と減少した後、2006年4月から6月にかけて400 inds. m<sup>-2</sup>から2,000 inds. m<sup>-2</sup>に増加した。一方、O-4Bは2006年2月（10,043 inds. m<sup>-2</sup>, 2,065 g wet wt. m<sup>-2</sup>）まで密度と現存量があまり減少せずに3月（40 inds. m<sup>-2</sup>, 6 g wet wt. m<sup>-2</sup>）に急減し、O-5Bは密度と現存量が2006年3月（9,380 inds. m<sup>-2</sup>, 248 g wet wt. m<sup>-2</sup>）まで増加した後4月（360 inds. m<sup>-2</sup>, 2 g wet wt. m<sup>-2</sup>）に急減した。

[B: 2006年8月～2008年2月]

2006年7月の洪水後は一時的に大橋川からホトトギスガイが採集されなくなったが、2006年9月には下流側のO-1BとO-2Bで採集され始め、O-1Bでは10月に、O-2Bでは11月にマットが形成された。O-1Bでは

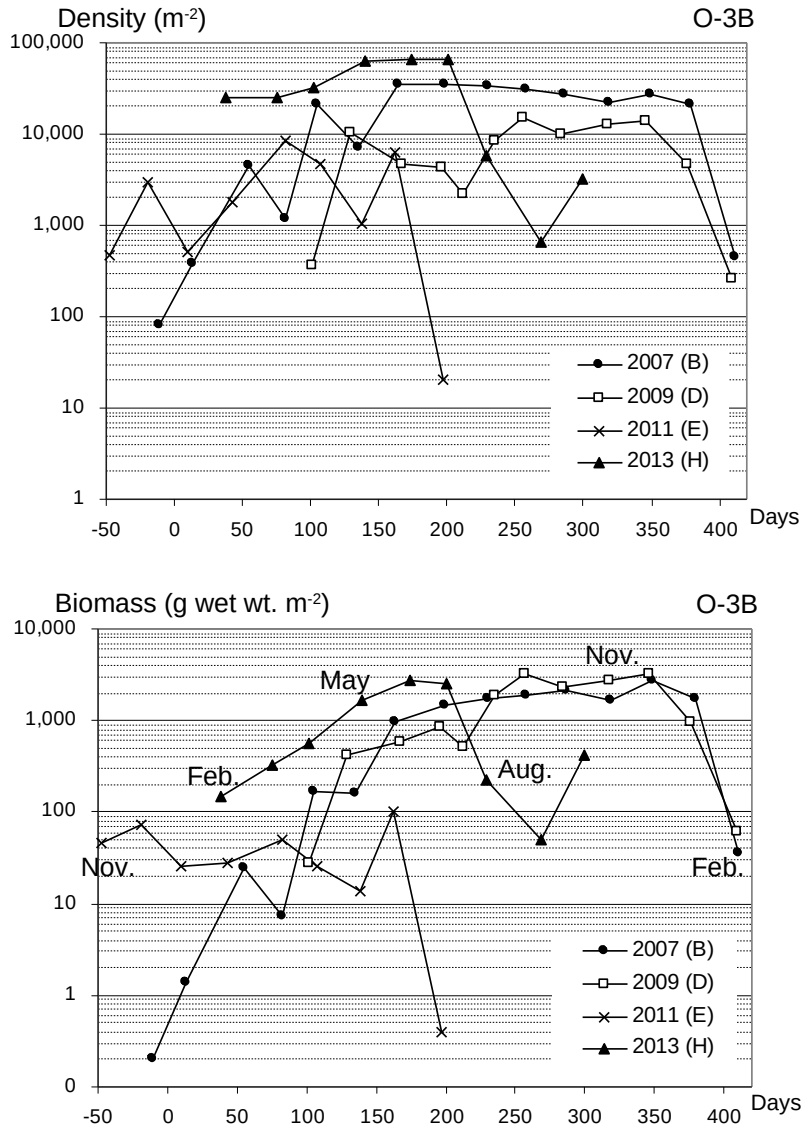


図8 ホトトギスガイの個体群密度と現存量の変化の比較。横軸は各年の1月1日からの経過日数を示す。O-3Bにおける期間B(閉じた円), 期間D(空いた正方形), 期間E(十字), 期間H(閉じた三角形)のデータを示す。

Fig. 8 Comparisons of changes in density and biomass of *A. senhousia*. Horizontal axis indicates the elapsed days from January 1st of each year. Data obtained at the O-3B from the periods B (closed circle), D (open square), E (cross) and H (closed triangle) are shown.

2006年12月の2,013 g wet wt. m<sup>-2</sup>から2007年2月の278 g wet wt. m<sup>-2</sup>まで現存量が減少したものの、2006年11月の21,712 inds. m<sup>-2</sup>から2007年3月の26,433 inds. m<sup>-2</sup>までいずれの月もマットの形成が確認された。O-2Bは2006年12月の1,418 g wet wt. m<sup>-2</sup>から2007年2月の1,586 g wet wt. m<sup>-2</sup>まで現存量が減少せず、2006年11月の92,651 inds. m<sup>-2</sup>から2007年3月の49,153 inds. m<sup>-2</sup>までいずれの月もマット形成の状態であった。

大橋川中流のO-3Bでは2006年12月にホトトギスガイが採集され始め、翌年の初夏(2007年6月)にマット(34,639 inds. m<sup>-2</sup>)が形成された。大橋川上流のO-4BとO-5Bで再びホトトギスガイが採集され始めたのは2007年6月であった。大橋川下流～中流の3地点のマットは2008年2月の時点で消滅した。

[C: 2008年3月～2009年3月]

O-1Bでは2008年9月と11月に現存量が2,000 g

wet wt.  $m^{-2}$  を超えたものの密度が 20,000 inds.  $m^{-2}$  を上回る月はなかった。一方、O-2Bでは2008年5月(79,500 inds.  $m^{-2}$ ) にマットの形成が確認されて12月(22,500 inds.  $m^{-2}$ ) までその状態が継続したが、2009年3月(20 inds.  $m^{-2}$ ) には個体群がほぼ消滅した。O-3Bでは2008年3月から2009年3月までの期間にマット形成と判断される個体群密度や現存量に達することはなかった。O-1\_2mの2008年9月と10月における現存量は2,000 g wet wt.  $m^{-2}$  を超えた。

[D: 2009年4月～2010年2月]

2009年3月頃に密度(40 inds.  $m^{-2}$ ) と現存量(14 g wet wt.  $m^{-2}$ ) が極小となったホトトギスガイ個体群は2009年4月頃から再び増加し始めた。この期間には穴道湖でも比較的多くの個体が見られ、O-1B、O-2B、O-1\_2m、O-2\_2mを含む7地点においてマットの形成が確認された。O-3Bでは、2009年4月に360 inds.  $m^{-2}$  (28 g wet wt.  $m^{-2}$ ) であったのが2009年5月に10,500 inds.  $m^{-2}$  (420 g wet wt.  $m^{-2}$ ) と急増し、その後の7月の出水で2009年7月15日の4,280 inds.  $m^{-2}$  および862 g wet wt.  $m^{-2}$  から7月31日の2,260 inds.  $m^{-2}$  および513 g wet wt.  $m^{-2}$  へといったん減少したものの、2009年8月の8,420 inds.  $m^{-2}$  および1,915 g wet wt.  $m^{-2}$  から12月の13,720 inds.  $m^{-2}$  および3,188 g wet wt.  $m^{-2}$  へと再び増加して12月までマットを形成した。

大橋川上流のO-5Bにおいてもホトトギスガイのマットが観察された。そこで、O-3B、O-5B、O-3\_2m、O-5\_2mの4地点を比べると、O-3B、O-5Bの順に密度と現存量が増加し、1～2ヶ月遅れでO-3\_2m、O-5\_2mの密度と現存量が増加した。O-3Bは2009年8月から12月までマットの形成が見られたのに対し、O-5B、O-3\_2m、O-5\_2mの3地点は7月31日が密度と現存量のピークだった。7月15日と7月31日の比較では、O-3Bは7月15日に4,280 inds.  $m^{-2}$  (862 g wet wt.  $m^{-2}$ ) であったのが7月31日には2,260 inds.  $m^{-2}$  (513 g wet wt.  $m^{-2}$ ) と減少した。一方、O-3\_2m、O-5B、O-5\_2mの3地点においては、O-3\_2mが381 g wet wt.  $m^{-2}$  から2,985 g wet wt.  $m^{-2}$  へ、O-5Bが609 g wet wt.  $m^{-2}$  から4,071 g wet wt.  $m^{-2}$  へ、O-5\_2mが100 g wet wt.  $m^{-2}$  から214 g wet wt.  $m^{-2}$  へ、それぞれ7月15日から7月31日にかけて現存量の値が大きくなった。

[E: 2010年3月～2011年7月]

2010年6月～9月にO-1BとO-2Bではマットの形成が観察されたものの、O-3Bで採集されたホトトギスガイの個体数は少なく、2010年7月に260 inds.  $m^{-2}$  (22

g wet wt.  $m^{-2}$ )、2010年8月に120 inds.  $m^{-2}$  (37 g wet wt.  $m^{-2}$ ) であった。その後、2010年11月から2011年6月までの期間にO-3Bで採集されたホトトギスガイは、概ね10～100 g wet wt.  $m^{-2}$  の現存量でありながら密度が480～8,375 inds.  $m^{-2}$  という状態であった。これは殻長が5 mm未満の小さい個体が多数、冬季から初夏にかけて存続したからである。また、O-4BとO-5Bではホトトギスガイの個体数が少なく、O-4\_2mとO-5\_2mではほとんど個体が採集されなかった。2011年7月までにO-3Bの個体群がほぼ消滅した。

[F: 2011年8月～2012年3月]

O-3Bでは2011年8月から2012年3月までの間、ホトトギスガイがほとんど採集されなかった。O-1BとO-2Bではマットの形成に至る月も見られたが(O-1B: 2011年9月の42,480 inds.  $m^{-2}$ ; O-2B: 2011年8月の44,660 inds.  $m^{-2}$ )、個体数が少ない月が長く続いた。

[G: 2012年4月～2013年1月]

O-3Bでは2012年7月から再びホトトギスガイが採集され始めた。2012年9月以降に個体数が増加し、2012年12月に31,467 inds.  $m^{-2}$ 、2013年1月に42,242 inds.  $m^{-2}$  と個体群密度の基準ではマット形成に相当する個体数となったものの、現存量はそれぞれ412 g wet wt.  $m^{-2}$ 、313 g wet wt.  $m^{-2}$  と2,000 g wet wt.  $m^{-2}$  を大幅に下回った。これは期間Eと同様に、殻長5 mm未満の個体が多かったためである。一方、O-1BとO-2Bの個体群密度と現存量の経時変化を見てみると、2013年1月もしくは2013年2月に極小となっていることから、2013年1月までを期間G(2012年4月～2013年1月)とした。O-1BとO-3Bにおける変化は対照的で、O-1Bでは2012年9月から密度と現存量が減少したのに対してO-3Bでは増加した。O-2Bのマットは2012年5月から形成されたものが続き、2012年12月より減少に転じた。

[H: 2013年2月～2013年10月]

2013年2月に約25,000 inds.  $m^{-2}$ 、約150 g wet wt.  $m^{-2}$  であったO-3Bでは、その後に密度と現存量がともに増加し、2013年6月に66,317 inds.  $m^{-2}$  (2,796 g wet wt.  $m^{-2}$ )、2013年7月に66,553 inds.  $m^{-2}$  (2,495 g wet wt.  $m^{-2}$ ) の値であった。2013年9月はマットが形成されたO-5Bにおいて現存量3,870 g wet wt.  $m^{-2}$  を記録し、全地点の中で最も大きい結果になった。O-1\_2m、O-2\_2m、O-3\_2mにおいてもマットの状態が2～4ヶ月間観察された。穴道湖の地点でもホトトギ



スガイの個体数は多く、宍道湖東部 SJE-3 地点で 2,780 inds.  $m^{-2}$  であった。

### 調査期間における経時変化の比較

2007 年, 2009 年, 2010 年 11 月～2011 年 6 月, 2013 年におけるホトトギスガイの個体群密度と現存量の変化のパターンを比較するため, 各年の 1 月 1 日を 1 日目とした日数を横軸として, 大橋川中流の O-3B における個体群密度と現存量の変化を示した (Fig. 8). 2007 年と 2009 年の増加と減少のパターンは, 100 日目から 200 日目にかけて現存量が増加してマットが形成されたこと, 350 日目を過ぎると密度と現存量が減少に転じた点で類似していた。2013 年の場合は, 2 月に 25,203 inds.  $m^{-2}$  で 149 g wet wt.  $m^{-2}$  であったのが 6 月には 66,317 inds.  $m^{-2}$  で 2,796 g wet wt.  $m^{-2}$  と変化した。2010 年 11 月から 2011 年 6 月にかけての期間の密度と現存量の変化を見ると, O-3B には殻長の小さい個体の個体数の増加が認められたものの, その後のマット形成には至らなかった。

## 考 察

### 大橋川と宍道湖の塩分の変化

宍道湖の水塊の大部分を占める低塩分水の塩分は, Fig. 3 で示されるように 1 PSU を切るレベルから 8.5 PSU を超えるレベルまでの範囲で変動した。このような塩分の変動の原因は, 宍道湖に接続している大橋川と斐伊川の影響によるものと考えられた。中海から大橋川を経て進入した塩水は, 宍道湖の底層に 30～60 cm 程度の厚さで存在するが, この塩水は観測される時と観測されない時がある (出雲河川事務所, 2006)。宍道湖では風速 10  $m s^{-1}$  以上の風が吹くと上層と下層が混合し, 塩分躍層が消滅するとされ, この時の混合が結果的に宍道湖の大部分を占める水塊の塩分を上昇させていると考えられている (福岡ほか, 2005)。一方, 斐伊川やその他の支川から宍道湖へ流入する淡水は, 宍道湖の塩分を低下させる方向に作用する。本研究の結果でも, 2006 年 7 月の大規模な出水により宍道湖の塩分は大きく低下した (Fig. 3)。このように, 基本的には宍道湖の塩分は, 斐伊川を主とした周辺河川を含む流域における降水量と, 中海から大橋川を経て進入する塩水の流入量により規定されている。地元の漁業関係者の間でも宍道湖の塩分というのは通常, 水塊の大部分を占める低塩分水の塩分のことを指しており, 宍道湖の表層の観測値により代表される。これらのことから, 大橋川における塩水

の遡上の程度の大きさと宍道湖の塩分は密接に関連し, 宍道湖の塩分は大橋川の塩分フラックスを反映する指標となっていると言える。

大橋川と宍道湖の鉛直断面の塩分分布 (Fig. 4) から, 大橋川を流れる水塊は宍道湖からの塩水と中海からの塩水の両者があることが分かる。ここで, 大橋川のある地点で底生生物が経験する塩分環境はどのような状況か検討した。大橋川では, 宍道湖の容積の大部分を占める上層の低塩分水が流下し, 中海から中塩分もしくは高塩分の水塊が遡上している (Fig. 4)。基本的に潮汐によって水塊が移動していることを考えると, 10 分～1 時間の間隔で連続的に上流から下流まで観測しないと底生生物が経験する塩分を示すことができない。しかし, 既に述べたように宍道湖の塩分は大橋川の塩分流入量を反映する指標と考えられることから, 宍道湖の塩分は大橋川のある地点で底生生物が経験する塩分 (濃度と継続時間の積分) を間接的に表している。つまり, 宍道湖の塩分が高い時, 大橋川のある地点で底生生物が経験した塩分は他の期間より高く, 宍道湖の塩分が低い時, その地点で底生生物が経験した塩分は他の期間より低かったと言える。宍道湖からの低塩分水と中海からの中～高塩分水が大橋川を移動している水理動態を踏まえると, 大橋川の河床に生息する底生生物が経験する塩分の指標として宍道湖の表層塩分が妥当であると考えられる。

### 宍道湖の塩分が大橋川のホトトギスガイ個体群に及ぼす影響

宍道湖にホトトギスガイの個体数が多かった時は, 宍道湖の塩分が高い時期と一致した (Fig. 9)。2006 年 7 月の大規模な出水の時は, ホトトギスガイ個体群が一時的に消滅し, 約 2 ヶ月後に下流側から進入した個体群が冬を越して中流まで分布を広げた。急激な個体数の増加やマット形成に特徴づけられるホトトギスガイの生態的特性は, 不安定な環境要因にその都度, 反応しているようであった。2006 年 7 月の大規模な洪水で大橋川の個体群が消滅したのは, 宍道湖の塩分が淡水に近くなったことが影響したためであり, 宍道湖でホトトギスガイの個体数が多かった時 (2013 年 8 月に SJE-3 で 2,780 inds.  $m^{-2}$ ) は, 宍道湖の塩分が高い時期であった (5 月 7.5 PSU～8 月 6.8 PSU)。また, 2005 年 10 月までの大橋川におけるホトトギスガイの状況は本調査の開始以前であるため不明であるが, 2005 年 11 月の現存量は 8 年間でも大きい方でマットが形成されていた。島根県水産技術センターの宍道

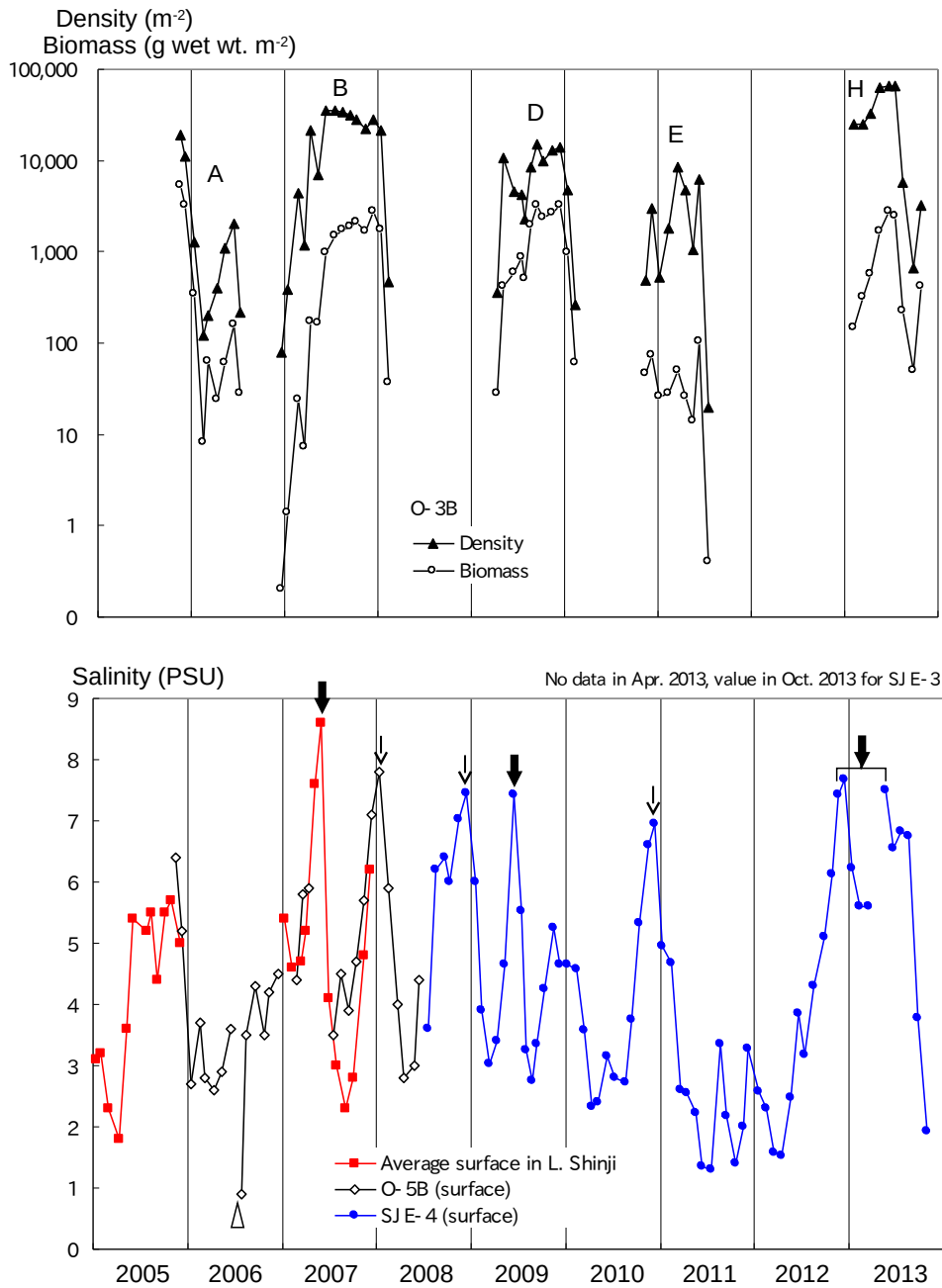


図9 ホトトギスガイの個体群密度と現存量の変化と塩分の変化の比較。塩分（穴道湖表層の平均値、閉じた正方形;O-5B, 空いたダイヤモンド;SJE-4, 閉じた円）と比較するため、O-3Bにおける期間A, 期間B, 期間D, 期間E, 期間Hのホトトギスガイの値（個体群密度, 閉じた三角形;現存量, 空いた正方形）が選ばれた。太い矢印はマット形成が見られた時の塩分上昇を示し、細い矢印はマット形成が見られなかった時の塩分上昇を示す。空いた三角形は2006年7月の洪水を示す。

**Fig. 9** Comparisons between changes in density and biomass of *A. senhousia* and changes in salinity. In comparison with salinity (average surface in Lake Shinji, closed square; O-5B, open diamond; SJE-4, closed circle), values of *A. senhousia* at the O-3B (density, closed triangle; biomass, open square) are selected from the periods A, B, D, E and H. Thick arrows indicate the increase in salinity when aggregation was formed and thin arrows indicate the increase in salinity when aggregation was not formed. Open triangle indicates the flood in July 2006.



湖表層の塩分平均値 (Fig. 3) を見ると 5 PSU の値が 2005 年 6 月から半年ほど続いており、この期間における宍道湖の塩分が高かったため大橋川のホトトギスガイ個体群は現存量が大きかったと推測される。このように、大橋川におけるホトトギスガイの個体群密度と現存量の変化は、宍道湖の塩分を指標として説明できる。

野外におけるホトトギスガイの分布と塩分の関係については、庄内湖では塩分の変動の大きい奥部でロープへの付着個体数が多かったことから、ホトトギスガイの分布を制約する要因として第一に塩素量が挙げられるとした (千葉, 1977)。また、大橋川の下流地点で調査を行った細澤ほか (2015) は、ホトトギスガイの個体群が年によっては出水や低塩分により縮小することがあることを報告した。中村ほか (1997) は中海で採集したホトトギスガイの塩分耐性を室内実験によって調べ、塩分 5 PSU の条件で 6 日目に半数が死亡した結果を得た。2006 年 7 月洪水時には低塩分に晒されることでホトトギスガイの個体群は一時的に消滅したが、2009 年 7 月の出水の場合は同じような結果にはならなかった。2009 年 7 月中旬の出水時、O-3B では湿重量と個体数が一度減少した傾向の後にマットが形成された (Fig. 8, 期間 D: 2009 年 4 月～2010 年 2 月)。気象庁の松江地点の降水量のデータを見ると、2009 年 7 月 15 日～30 日の合計は 237.5 mm であった。O-3\_2m, O-5B, O-5\_2m の 3 地点では出水前の 7 月 15 日に採集した時より 7 月 31 日に採集した時の方が個体数が増加していた (Figs. 5～6, 期間 D)。これらのことは、ある側面においては出水の影響が河床の個体群を攪乱し、個体群の再構築に繋がっている可能性を示唆している。必ずしも出水によりホトトギスガイの個体群が縮小するとは限らないと考えられる。O-3B における現存量の増加を見ると (Fig. 8), 2007 年では 3 月から 6 月にかけて 7 g wet wt. m<sup>2</sup> から 959 g wet wt. m<sup>2</sup> に、2009 年では 4 月から 8 月にかけて 28 g wet wt. m<sup>2</sup> から 1,915 g wet wt. m<sup>2</sup> に、2013 年では 2 月から 6 月にかけて 149 g wet wt. m<sup>2</sup> から 2,796 g wet wt. m<sup>2</sup> にそれぞれ増加した。前年から続く塩分の条件によっては、2013 年のように 5 月の時点で 61,906 inds. m<sup>2</sup>, 1,652 g wet wt. m<sup>2</sup> のマットが O-3B において形成されることもあった (Fig. 8)。以上のような結果から示された爆発的とも言えるホトトギスガイの現存量の増加は、環境の変化に対応して個体群が激しく変動する本種の特性を顕著に表したものと言える。

中海で優占種の本種は、大橋川から見て下流側に比較にならないほどの大きな母集団の個体群を擁し

ている。したがって分布範囲の端に位置する大橋川では、環境の変動によって個体数は激しく変化するものの、条件が変われば下流側の中海から幼生が直ぐに加入できる状況であると考えられる。中海からの塩水の遡上は下流側の O-1B と O-2B において常に好適な塩分をもたらすことから、これらの 2 地点は個体数が多く現存量が大きい。大橋川中流の O-3B は主に塩水の進入と関連していることが示唆されたが (Fig. 9), O-1B や O-2B より塩水の遡上の程度が小さくなることから、生息場所の条件としては変化が大きい。上流側の O-4B や O-5B では、結果的に宍道湖の塩分が高くなる時期に個体数が増加する。塩水の遡上の程度がホトトギスガイの分布の拡大と関連していることを示す証拠として、O-3B と O-5B, それにそれぞれの水深 2 m の地点における個体群動態が塩水の遡上の現象と整合していることが挙げられる (Figs. 5～6, 期間 D)。2009 年 4 月～6 月の急激な塩分上昇 (約 3.4 PSU から約 7.4 PSU, Fig. 3) は、この期間に中海から大橋川を経て宍道湖に入る塩水の量が多かったことを示唆している。すなわち、塩水が大橋川の下層を上流側へ進むことに合わせて、O-3B, O-5B の順にマットが形成され、その後に 2 m 地点の個体数が増えたと見られる。より浅い場所は塩分の高い状態が続く時間が相対的に短いことから、加入や移動の機会がより少ないものと考えられる。このように大橋川におけるホトトギスガイの中流から上流への分布拡大は、まず深いところが先行し、次第に浅い場所へと続くことが分かった。大橋川下流の個体群を調査した細澤ほか (2015) は、潜水観察による被度の経時変化を詳細に記載し、川の中央部で形成されたホトトギスガイのマットが現存量を増加させ、その後に両岸に向けて分布が広がることを報告した。

調査期間中に冬季の塩分が高いケースが何回か見られたものの、マット形成に到らない場合がほとんどであった。例えば、2010 年 12 月には高塩分が観測されて殻長の小さい個体が多数見られたがマットを形成しなかった (Fig. 8, 期間 E: 2010 年 3 月～2011 年 7 月)。一方、2012 年から 2013 年にかけては、2012 年後半からの高塩分が冬の間も継続して 2013 年のホトトギスガイの現存量の増加に繋がった。ホトトギスガイの浮遊幼生や着底後の個体は、中海からの好適な塩分の環境が広がった時に宍道湖方向へ分布を拡大し、マットが形成される時間や季節などは塩水の遡上の程度の大きさと関連していると考えられる。大橋川における冬を挟んだホトトギスガイの生残は、前年の夏から秋にかけての宍道湖の塩分やその後の春から

夏にかけての穴道湖の塩分の状況に左右され、結果的にマット形成の有無やマットの拡大または縮小の現象に影響している可能性が高い。このような迅速に加入を行うホトトギスガイの生活史特性は、大橋川のような不安定な環境下の個体群動態に深く関係し、本種の生態的特性は変動する環境において良く適応しているように見える。大橋川は塩分の変動が大きく、年によっては低塩分や高塩分の状態が継続することもある (Fig. 3)。塩分の変化にすばやく対応できる生活史形質を備えたホトトギスガイの生活史戦略は、分布の端である大橋川の生息場所において効果的に機能していると考えられる。

本研究による8年間のモニタリング調査の結果、ホトトギスガイの個体群動態は穴道湖の塩分と対応していることが明らかになった。穴道湖の表層塩分の経時変化との関係から、5月～7月に穴道湖の塩分の値が少なくとも6 PSUを超える状況では加入と成長が促されてホトトギスガイの分布が穴道湖方向へ広がる可能性が高い。本研究の結果が示唆することは、河川改修等により大橋川において塩水の遡上状況に変化が生じた場合、塩分の変化に対応してホトトギスガイの分布が変わる可能性があるということである。ホトトギスガイは、このような環境変化の指標種として有用であると考えられる。

## 謝 辞

本研究は、プロ・ナトゥーラ・ファンド第16期助成および同第17期助成、平成20年度～平成23年度科学研究費補助金(若手研究(A), 20681001)、平成25年度地(知)の拠点整備事業(大学COC事業)の支援を受けて行われた。穴道湖漁業協同組合からはサンプル処理の作業を行う施設の使用の許可を頂いた。島根県水産技術センターからは穴道湖の塩分データの使用の許可を頂いた。木村妙子氏にはホトトギスガイの同定について助言を頂いた。本論文に使用したデータを得ることができたのは、サンプリング、ソーティング、計測、データ入力等の作業において以下の方々から非常に多くの協力を頂いたからである(敬称略、順不同)。東井啓、中村建作、國井加代子、小倉加代子、佐藤木郎、中野篤子、中野秋鹿、錦織はるき、佐藤自由、曾我明子、桑原成美、岡田千恵、Mohit Chhetri、辻幸佑、藤井千里、尾崎志帆、吉田洋子、福原千晴、三木彬、北邨敬弥、森祐樹、角谷久雄、萩島洋、丸山浩平、本田直樹、中橋芳彦、石川紘軌、小笹薫、古田奈々、井上宏之、渡部学、矢

島恵津美、神庭文子、飯塚梨紗、舩來桂子、清水正子、中山大介。皆様に心より御礼を申し上げます。

## 引用文献

- 千葉健治(1977) ホトトギスガイの生態について. 海洋科学, 9(4): 13-17.
- Crooks, J. A. (1998) Habitat alteration and community-level effects of an exotic mussel, *Musculista senhousia*. Marine Ecology Progress Series, 162: 137-152.
- Crooks, J. A., Khim, H. S. (1999) Architectural vs. biological effects of a habitat-altering, exotic mussel, *Musculista senhousia*. Journal of Experimental Marine Biology and Ecology, 240: 53-75.
- 福岡捷二(2005) 気象変化が連結系汽水湖の流動と水質場に及ぼす影響評価と汽水湖の管理技術への適用. 平成14年度～平成16年度科学研究費補助金(基盤研究(A)(1)) 研究成果報告書. 151 pp.
- 福岡捷二・山本絢子・岡村誠司・溝山勇(2005) 穴道湖に流出入する塩分フラックスと湖内塩分濃度の変化. 水工学論文集, 49: 1249-1254.
- Godhantaraman, N., Uye, S. (2003) Geographical and seasonal variations in taxonomic composition, abundance and biomass of microzooplankton across a brackish-water lagoonal system of Japan. Journal of Plankton Research, 25: 465-482.
- 橋谷博(1994) 各種の気象条件が中海・穴道湖の水環境に及ぼす影響. 陸水学雑誌, 55: 75-76.
- Hashitani, H. (1998) Effect of meteorological five factors on the water quality and the behavior of organisms in brackish Lakes Shinji and Nakaumi. Nippon Suisan Gakkaishi, 64: 311-312.
- 細澤豪志・國井秀伸・中村幹雄・尾島徹哉・杉山ゆかり・山口啓子(2015) 島根県大橋川におけるホトトギスガイ(*Arcuatula senhousia* Benson) 個体群の空間分布とその時間的变化. 日本ベントス学会誌, 70: 1-12.
- 石飛裕(1994) 大橋川と境水道における水、塩分、栄養塩のフラックス. 陸水学雑誌, 55: 74-75.
- Ishitobi, Y., Hiratsuka, J., Kuwabara, H., Yamamuro, M. (2000) Comparison of fish fauna in three areas of adjacent eutrophic estuarine lagoons with different salinities. Journal of Marine Systems, 26: 171-181.
- Ishitobi, Y., Kamiya, H., Itogawa, H. (1993) Tidal, meteorological and hydrological effects on the water level variation in a lagoon, Lake Shinji. Japanese

- Journal of Limnology, 54:69–79.
- Ishitobi, Y., Kamiya, H., Yokoyama, K., Kumagai, M., Okuda, S. (1999) Physical condition of saline water intrusion into a coastal lagoon, Lake Shinji, Japan. Japanese Journal of Limnology, 60: 439–452.
- 伊藤信夫・梶原武 (1981) 横須賀港におけるホトトギスガイの生態—II 足糸および足糸マットの構造. 附着生物研究, 3(1): 43–46.
- 出雲河川事務所 (2006) 大橋川改修事業環境調査計画書. <http://www.cgr.mlit.go.jp/izumokasen/iinkai/oohashigawa/kaishu-chousa/keikakusho/index.html> (2014年12月15日閲覧)
- 北岡匠・山田勝雅・逸見泰久 (2018) 八代海球磨川河口干潟における底生動物相の時空間変化: ホトトギスガイのマット形成が群集構造に与える影響. Laguna, 25: 93–103.
- 小森田智大・猪島頌太・堤裕昭 (2018) 生産量より見積もったホトトギスガイによる基礎生産者への摂餌圧の定量的評価. Laguna, 25: 105–110.
- Kurata, K., Hiratsuka, J. (2018) Spatiotemporal changes in distributions of the two dominant bivalve species in an estuarine river connecting two brackish lakes, Japan. Marine Biology Research, 14(5): 484–496, <https://doi.org/10.1080/17451000.2018.1428754>
- 国土交通省中国地方整備局 (2010) 斐伊川水系河川整備計画. <http://www.cgr.mlit.go.jp/izumokasen/jimusho/suikai-seibi/index.html>(2014年12月15日閲覧)
- Mistri, M. (2002) Ecological characteristics of the invasive Asian date mussel, *Musculista senhousia*, in the Sacca di Goro (Adriatic Sea, Italy). Estuaries, 25: 431–440.
- Mistri, M. (2003) The non-indigenous mussel *Musculista senhousia* in an Adriatic lagoon: effects on benthic community over a ten year period. Journal of the Marine Biological Association of the United Kingdom, 83: 1277–1278.
- Mistri, M., Rossi, R., Fano, E. A. (2004) The spread of an alien bivalve (*Musculista senhousia*) in the Sacca di Goro Lagoon (Adriatic Sea, Italy). Journal of Molluscan Studies, 70: 257–261.
- 三浦常廣・開内洋・南浦範子・中村幹雄 (2004) 宍道湖・中海水産振興対策検討調査事業—ホトトギスガイ駆除対策調査—. 平成14年度島根県内水面水産試験場事業報告. pp. 78–91.
- 森脇晋平・藤井智康・福井克也 (2003) 大橋川における高塩分水塊の遡上現象. LAGUNA(汽水域研究), 10: 35–45.
- 中村幹雄・品川明・戸田顕史・中尾繁 (1997) 宍道湖および中海産二枚貝4種の環境耐性. 水産増殖, 45: 179–185.
- 日本シジミ研究所 (2007) 宍道湖と中海の魚たち. 山陰中央新報社. 211 pp.
- 大橋川の汽水環境を調べる会 (倉田健悟・堀之内正博・戸田顕史・平塚純一・布村昇・品川明) (2007) 島根県大橋川の汽水環境の保全に関する研究. プロ・ナトゥーラ・ファンド第16期助成成果報告書. 財団法人自然保護助成基金・財団法人日本自然保護協会, pp. 25–34.
- 大橋川の汽水環境を調べる会 (倉田健悟・堀之内正博・戸田顕史・平塚純一・品川明・瀬戸浩二・高田裕行・香月興太・石飛裕) (2008) 島根県大橋川の汽水環境の保全に関する研究(継続). プロ・ナトゥーラ・ファンド第17期助成成果報告書. 財団法人自然保護助成基金・財団法人日本自然保護協会, pp. 3–35.
- 大谷修司 (2005) 宍道湖・中海の植物プランクトンの種組成と現存量の経年変化. 相崎守弘 編 湖沼水質保全総合レビュー報告書 宍道湖・中海の水質保全, pp. 23–42.
- Ohtani, S., Ohga, M. (1997) Species composition and seasonal variation of planktonic diatoms from Brackish Lakes Shinji and Nakaumi, Japan. Phycologia, 36: 80–80.
- 島根県土木部河川課 (2007) 平成18年7月豪雨について～斐伊川, 神戸川における災害復旧と今後の出水対応～. 河川, 平成19年2月号: 35–40.
- 島根県水産技術センター (2014) 宍道湖・中海水質情報. [https://www.pref.shimane.lg.jp/industry/suisan/shinkou/kawa\\_mizuumi/suisitu/](https://www.pref.shimane.lg.jp/industry/suisan/shinkou/kawa_mizuumi/suisitu/) (2014年12月15日閲覧)
- Somura, H., Arnold, J., Hoffman, D., Takeda, I., Mori, Y., Di Luzio, M. (2009) Impact of climate change on the Hii River basin and salinity in Lake Shinji: a case study using the SWAT model and a regression curve. Hydrological Processes, 23: 1887–1900.
- Uye, S., Shimazu, T., Yamamuro, M., Ishitobi, Y., Kamiya, H. (2000) Geographical and seasonal variations in mesozooplankton abundance and biomass in relation to environmental parameters in Lake Shinji-Ohashi River-Lake Nakaumi brackish-water system, Japan. Journal of Marine Systems, 26: 193–207.