

## 2016年夏の中海における底生生物相

倉田健悟<sup>1</sup>・園田 武<sup>2</sup>・山口啓子<sup>3</sup>・瀬戸浩二<sup>1</sup>

### Benthic fauna of Lake Nakaumi in summer of 2016

Kengo Kurata<sup>1</sup>, Takeshi Sonoda<sup>2</sup>, Keiko Yamaguchi<sup>3</sup>, Koji Seto<sup>1</sup>

**Abstract:** Benthic fauna of Lake Nakaumi, including the Honjo area, was recorded in the summer of 2016. No benthic individuals were collected from 59 stations out of the total 133 stations. There were 42 stations where only polychaetes including *Pectinaria okudai* were collected. Benthic fauna was classified into five groups (Sakai, Bivalves, Nakaura, PP, Po) using nMDS analysis. Group Sakai had the most diverse fauna with higher values of dissolved oxygen concentrations. Group Bivalves consisted of the stations with shallower depth, resulting suitable habitats for bivalve species. *Arcuatula senhousia* was the predominant species both in number and wet weight. Approximately three fourth of the stations (101/133) of Lake Nakaumi had no individuals or contained only polychaetes, indicating that environmental conditions were severe in the summer of 2016.

**Key words:** benthos, community, estuarine environment, Lake Nakaumi, Honjo area

#### はじめに

斐伊川水系下流部に位置する中海は日本で5番目に大きい約86 km<sup>2</sup>の面積を持ち、境水道を通じて日本海へ繋がる中～高塩分の沿岸汽水湖である。中海では塩分成層が著しく、夏季の下層は貧酸素状態となっている(Ohtake et al., 1982; 橋谷, 1998)。干拓が計画された中海北西部の本庄水域では、1981年までに周囲を囲む堤防が完成し、中海本体とは別の

改変された状態の汽水域となった(大竹ほか, 1980; Ohtake, 1984; 伊達, 1999)。しかし、2002年に干拓淡水化事業が中止され、本庄水域は汽水域として残されることになった。その後、いくつかの修復事業が計画された。2007年に本庄水域の西部承水路堤が撤去され、2009年に森山堤の一部開削が行われた(Nomura et al., 2013, 2015)。

これらの人為的改変と修復事業が底生生物群集に及ぼした影響を検証するには、本庄水域を含む中海

<sup>1</sup> 島根大学エスチュアリー研究センター Estuary Research Center, Shimane University, 1060 Nishikawatsu-cho, Matsue Shimane 690-8504, Japan.

<sup>2</sup> 東京農業大学生物産業学部 Faculty of Bioindustry, Tokyo University of Agriculture, 196 Yasaka, Abashiri, Hokkaido 099-2493, Japan.

<sup>3</sup> 島根大学生物資源科学部 Faculty of Life and Environmental Science, Shimane University, 1060 Nishikawatsu, Matsue, Shimane 690-8504, Japan.

受付日: 2017年9月21日, 受理日: 2018年2月8日, WEB掲載日: 2018年3月21日

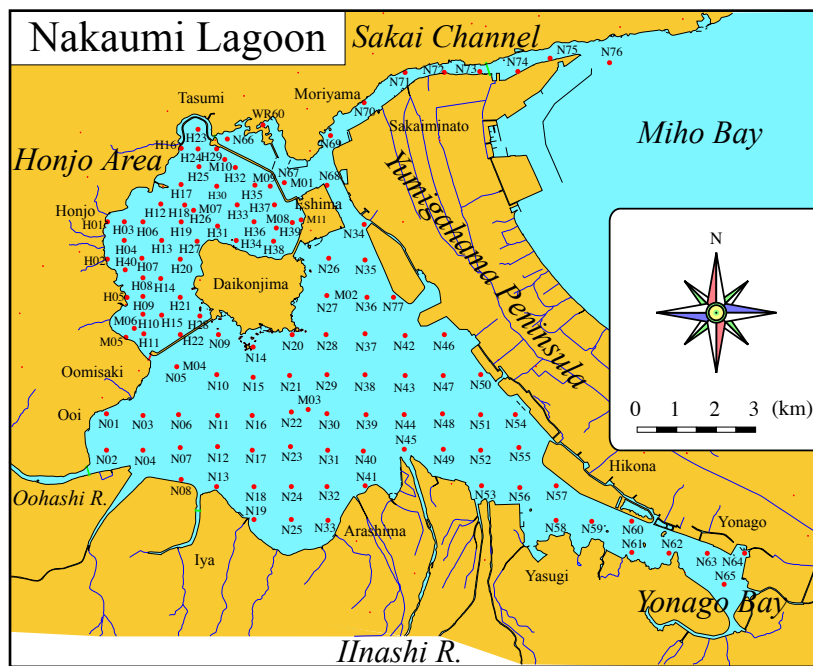


図1 研究対象地域と調査地点.  
Fig. 1 Study area and sampling stations.

の過去の姿を記録した既往の文献を整理し、現在の汽水域の環境変化を追跡する長期的なモニタリングが必要である。なぜならば、汽水域は海況や気候等の外的要因による変動、季節変化、地形や流動の違いによる地点間の差異などが大きく、底生生物群集の経時変化が人為的改変による環境要因の変化に起因すると判断することは容易ではないからである。適切にデザインされたサンプリング計画にしたがって、長期的に対象地のモニタリング調査を行った上で、初めて現状の評価と過去からの変化の傾向を読み取ることができる。そこで、修復事業の実施前後における環境変化と底生生物群集の関係を明らかにすることを主な目的として、2006年より長期的な計画に基づいた調査が開始され、現在も継続中である。

西部承水路堤の撤去(2007年)や森山堤の一部開削(2009年)の前後における底生生物群集を調査した報告としては以下のものがある。山口ほか(2013)は修復事業前である2006年における中海本体と本庄水域の二枚貝類の分布を調べ、両水域とも水深の浅い沿岸部にのみ二枚貝類の生息が確認されたものの、湖盆部の広い範囲に二枚貝類は確認されなかったと述べた。Kurata et al. (2011)は2006年5月から2009年8月までの本庄水域を含む中海の定点における底生生物群集の経時変化を解析し、西部承水路堤の撤去後に本庄水域でアサリ、シズク

ガイ、ヒメシラトリの現存量が増加した傾向を示した。篠原ほか(2016)は森山堤の一部開削前後の調査結果より、本庄水域では堤防開削から5年後の2014年に堤防開削部の近傍から北側にかけての水深が4.5mより深い地点においてホトトギスガイ、アサリ、ヒメシラトリガイなどの二枚貝類が出現したことを報告した。

このように中海本体と本庄水域で行われた調査結果の解析から、修復事業の実施前後における底生生物群集の変化について以上のような知見が得られているものの、2006年以降、中海から穴道湖までの全域の底生生物群集の調査は行われていなかった。なお、穴道湖については、2006年に行われた底生生物群集の全域調査の結果が報告されている(倉田ほか, 2012)。そこで、2006年から10年後の底生生物相の記載を行うことを主な目的とした調査が2016年に実施された。本稿では、長期的な研究計画に基づいて行われている調査のうち、2016年の夏季における本庄水域を含む中海の底生生物群集のデータを示し、堤防で囲まれていた期間の本庄水域に関する既往の文献を踏まえながら現状について考察する。

## 材料と方法

図1に2016年夏に中海で行った全域調査の地点を示す。本稿では、本庄水域を含む中海と境水道に位

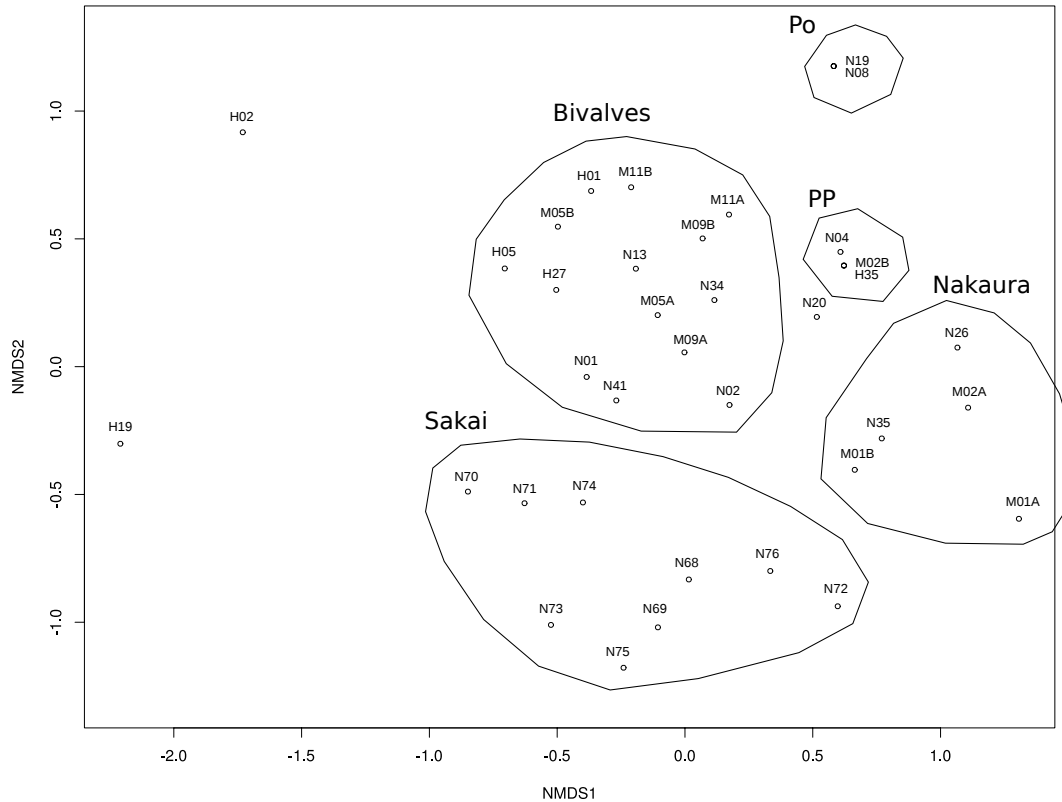


図2 nMDS解析の結果.

Fig. 2 Results of nMDS analysis.

置する地点を対象に解析を行った。中海から境水道まで計125地点(境水道:10地点, 本庄水域:46地点, 中海本体:69地点)を設定し, 2016年8月20日および8月24日に調査を行った。本庄水域では基本的に500 m間隔, その他の水域では基本的に1 km間隔(例えば, 浅くて船が近づけない場合は間隔が1 kmに満たない場所)で地点を設定した。

各地点でエクマンバージ型採泥器により2回の採泥(面積約0.02 m<sup>2</sup>×2, 深さ約5 cm)を行った。ただし, 別に毎月行っている調査地点と重なるM01~M07, M09, M11は4回ずつの採泥で, 2回分(0.04 m<sup>2</sup>)をそれぞれAおよびBと表記し, 解析上は異なる地点の扱いとした。なお, H03は湖底に礫があり, 堆積物を採集することができなかった。

試料は船上で0.5 mmメッシュネットに入れて細かい泥を落とした後, ポリエチレン袋に入れて保冷して実験室へ持ち帰った。10%中性ホルマリンで固定後, 底生生物を選別し, 同定可能な分類群(OTU, operational taxonomic unit, Dittmann et al., 2015)の個体数と湿重量を計測した。多毛類に関しては, 1992年~1993年に本庄水域を含む中海で行われた広範

な分布調査があり(園田ほか, 1998), 以降の多毛類相の変化は別報に譲ることとするが, 中海および穴道湖に分布する多毛類のうち, 体前方に黄金色の棘針がある特徴を持ち同定が容易なオクダイサゴムシ(*Pectinaria okudai*, 西ほか, 2012)については同定を行った。出現したOTUの個体数のデータについて統計分析ツールR 3.3.1(R Core Team, 2016)を用いてnMDS解析を行った。

底生生物の採集時に調査地点の環境要因を測定した。測定した項目は次の通りである:水深, 塩分, 透明度, pH, ORP, 溶存酸素濃度, 溶存酸素飽和度, 堆積物の明度および色度(Lab法)。多項目水質計(AAQ127:JFEアドバンテック製, 測定前に溶存酸素濃度を校正)を湖底から10 cm程度上で固定し, 湖底の直上水の水質項目(水深, 塩分, 溶存酸素濃度, 溶存酸素飽和度, pH, ORP)を自動測定した。測定したデータの中で最後の100データを平均化した。エクマンバージ型採泥器を用いて堆積物を採取し, 堆積物の表層について土色計(コニカミノルタ製:SPAD-503)で色調(明度, 彩度)を計測した。色調は, 明度(L\*値)と彩度(a\*値, b\*値)の三軸の数値として表される。

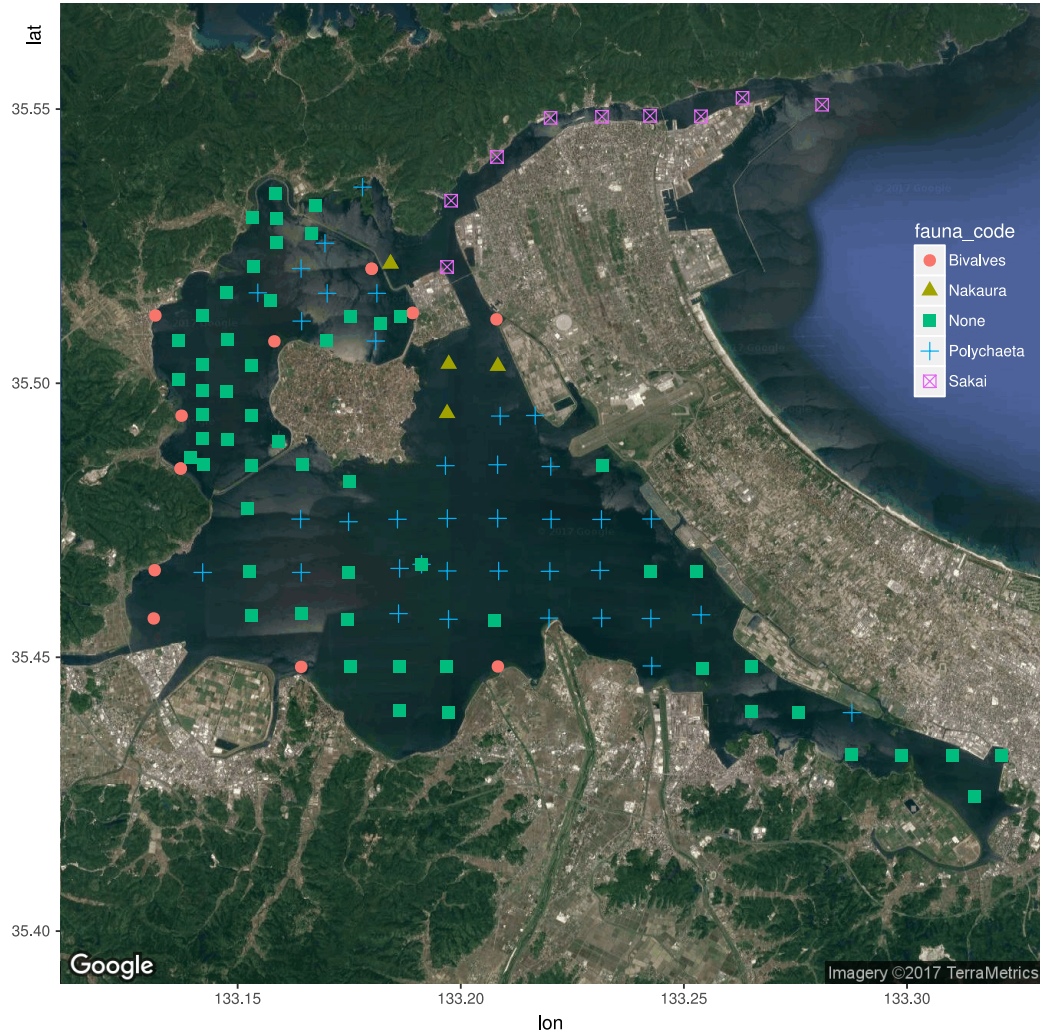


図3 nMDS 解析により分類された各グループの分布.

Fig. 3 Distribution of fauna groups classified according to nMDS analysis.

明度の  $L^*$  値は、0 が黒を示し、100 が白を示す。したがって、 $L^*$  値が低いと、暗い色合いを示している。一方、彩度の  $a^*$  値、 $b^*$  値は、マンセル表色系の色相環を座標として表したものであり、 $a^*$  値は赤色 (+) と緑色 (-) の軸を示し、 $b^*$  値は黄色 (+) と青色 (-) の軸を示す。

### 結果

各地点における底生生物の OTU ごとの個体数 ( $N$   $0.04 \text{ m}^2$ ) および湿重量 ( $g$   $0.04 \text{ m}^2$ ) を示す(表 1~6)。全 133 地点から算出した平均個体数 ( $N \text{ m}^{-2}$ ) が最も大きかったのは、ホトトギスガイ *Arcuatula senhousia* の  $1,690 \text{ m}^{-2}$  であり、以下、多毛綱  $826 \text{ m}^{-2}$ 、端脚目  $79 \text{ m}^{-2}$ 、アサリ *Ruditapes philippinarum*  $40 \text{ m}^{-2}$ 、オクダイサゴムシ  $18 \text{ m}^{-2}$ 、ニッポンワラジヘラムシ *Synidotea nipponensis*  $16 \text{ m}^{-2}$  と続いた。平均湿重量 ( $g \text{ m}^{-2}$ ) が

最も大きかったのは、ホトトギスガイの  $35.5 \text{ g m}^{-2}$  であり、以下、アサリ  $13.0 \text{ g m}^{-2}$ 、多毛綱  $3.1 \text{ g m}^{-2}$ 、アラムシロ *Reticunassa festiva*  $1.9 \text{ g m}^{-2}$ 、ヒメシラトリ *Macoma incongrua*  $1.5 \text{ g m}^{-2}$ 、イヨスダレ *Paphia undulata*  $1.1 \text{ g m}^{-2}$  と続いた。

同定できなかった底生生物を除く OTU 数は 37 であった。全 133 地点のうち、底生生物の個体数が 0 であった地点 (None) が 59 地点、同定できなかった底生生物のみ採集された地点 (Unidentified) が 1 地点あった。これらの 60 地点を除いた 73 地点の内訳を見ると、37 地点がオクダイサゴムシ以外の多毛類のみが採集された地点 (Polychaeta) であった。残りの 36 地点について nMDS 解析を行った。図 2 に nMDS による多変量解析の結果を示す。各地点で出現した底生生物の種類を確認し、共通する特徴を持つ地点を 5 種類のグループ (Sakai, Nakaura, Bivalves, Po,

2016年夏の中海における底生生物相

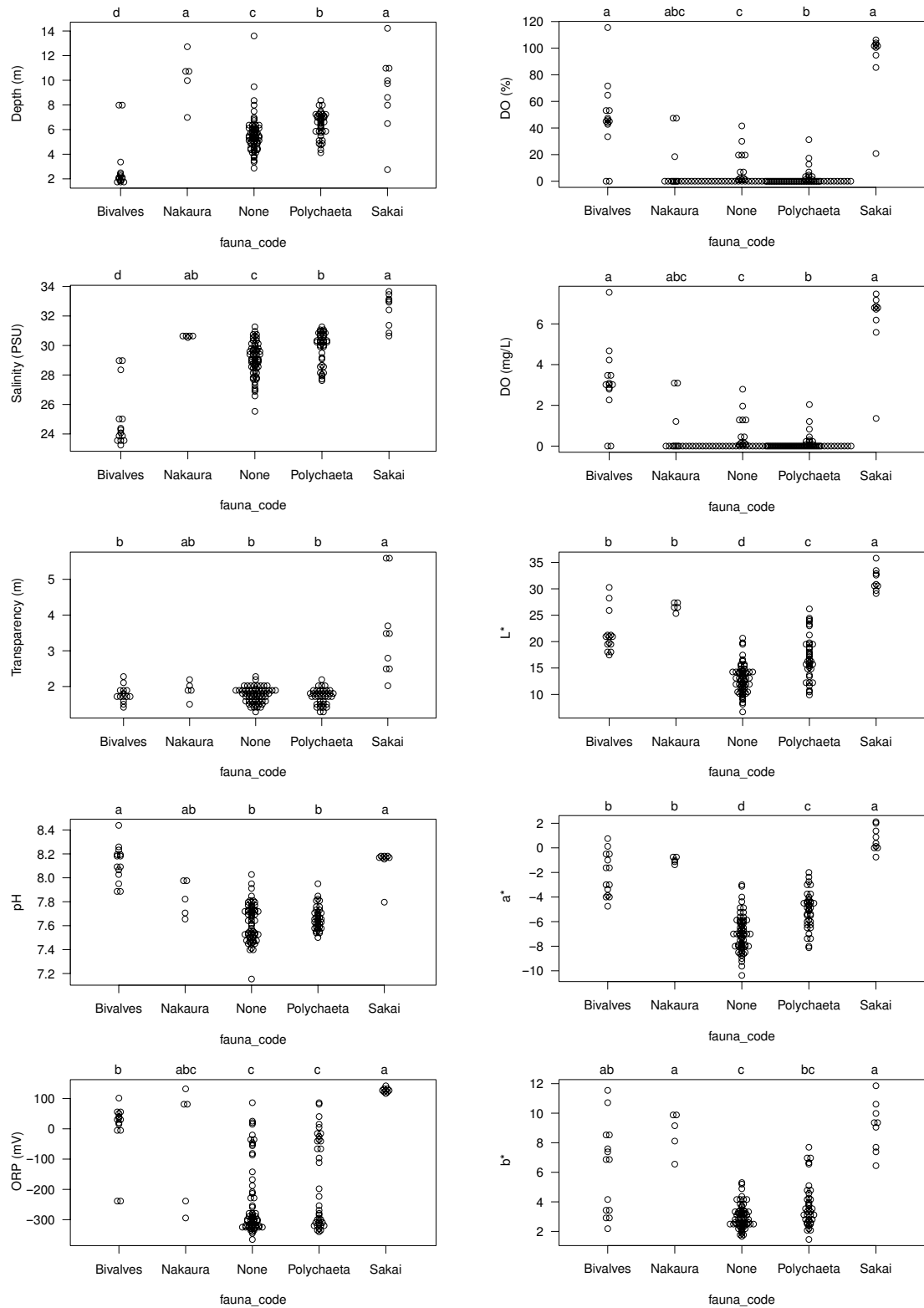


図4 環境要因のグループ間の比較。

アルファベット文字は Kruskal-Wallis rank sum test および Mann-Whitney U test with bonferroni の結果、 $P > 0.05$  で有意差がないと判定された群を示す。

**Fig. 4** Comparisons of environmental variables between the groups.

Alphabet letters indicate the groups with no significant differences ( $P > 0.05$ ) according to the results of Kruskal-Wallis rank sum test and Mann-Whitney U test with bonferroni.



表2 Nakaura グループの各地点における底生生物の OTU ごとの個体数および湿重量。  
Table 2 Number of individuals and wet weight for OTU of benthos in the stations of Nakaura.

Scientific name	Japanese name	Nakaura no. inds. (N/0.04m <sup>2</sup> )				wet wt. (g/0.04m <sup>2</sup> )				count			
		Station	M01A	M01B	M02A	N26	N35	M01A	M01B		M02A	N26	N35
Porifera	海綿動物門						1				0.0939		1
Actinaria	イソギンチャク目												
Sipuncula	星口動物門												
Polychaeta	多毛綱		14	45	79	112	190	0.2005	0.487	0.7295	0.5662	0.3707	5
<i>Pectinaria okudai</i>	オクダイサゴムシ												
Polyplacophora	多板綱												
Gastropoda	腹足綱						1				0.0581		1
Patellogastropoda	カサガイ目												
<i>Fluviocingula elegantula</i>	カアグチツボ												
<i>Reticunassa festiva</i>	アラシシロ												
Bivalvia	二枚貝綱												
<i>Arcuatula senhousia</i>	ホトギスガイ												
<i>Anomia chinensis</i>	ナミマガシウ												
<i>Venemorpha micra</i>	ヒメカノコアサリ												
<i>Ruditapes philippinarum</i>	アサリ												
<i>Paphia undulata</i>	イスタレ		1			1		0.0273		4.4646			2
<i>Raetelops pulchella</i>	チヨノハナガイ												
<i>Theora fragilis</i>	シズクガイ		4					0.0668					1
<i>Macoma incongrua</i>	ヒメシラトリ												
<i>Moerella rutila</i>	ユウシオガイ												
<i>Solen strictus</i>	マテガイ												
<i>Laternula gracilis</i>	ソトオリガイ												
Pycnogonida	ウミグモ綱												
Ostracoda	貝虫綱												
Mysida	アミ目												
Cumacea	クマ目												
Isopoda	等脚目												
<i>Cyathura</i> spp.	スナウミナナフシ属												
Sphaeromatidae	コツムシ科												
<i>Syndotea nipponensis</i>	ニッポンワラジヘラムシ												
<i>Symmia caudatus</i>	ヤリボヘラムシ												
Caprellidae	カレカラ科												
Amphipoda	端脚目						1	0.0049					1
<i>Pleocyemata</i>	抱卵亜目(エビ亜目)												
Anomura	異尾下目												
Brachyura	短尾下目(カニ下目)												
Ophiuroidea	クモヒトデ綱(蛇尾綱)												
count			3	2	2	2	2	3	2	2	2	2	6





表3 Bivalves グループの各地点における底生生物の OTU ごとの個体数 (a) および湿重量 (b).  
Table 3 Number of individuals (a) and wet weight (b) for OTU of benthos in the stations of Bivalves.

Scientific name	Japanese name	Bivalves wet wt. (g/0.04m <sup>2</sup> )								count												
		H01	H05	H27	M05A	M05B	M09A	M09B	M11A		M11B	N01	N02	N13	N34	N41						
Porifera	海綿動物門			1.7321											0.0041				1			
Actinaria	イソギンチャク目																			1		
Sipuncula	星口動物門																				14	
Polychaeta	多毛綱	0.0356	0.3198	0.0902	0.3991	0.2618	1.0175	0.795	0.1146	0.0412	0.5523	0.3004	0.122	1.2867						11		
Pectinaria okudai	オクダイヤゴムシ	0.0431	0.0337	0.0163	0.5367	0.0292	0.3439	0.4146	0.0029		0.101			0.0088	0.0161							
Polylapophora	多板綱																				3	
Gastropoda	腹足綱				0.4011						0.0399											
Patellogastropoda	カサガイ目																					
Fluvioingula elegantula	カワガチツボ		0.0096																			
Retimassa festiva	アラムシロ	0.3926	1.9224	1.8218	0.3099	0.2263	0.069	0.2643			2.4727			0.4655	0.1988							
Bivalvia	二枚貝綱																				1	
Arcuatula senhousia	ホトキスガイ		25.252	1.496	3.4432	3.3379	1.7955	0.6028			26.057	60.071	10.358		56.124						10	
Anomia chinensis	ナミマガシワ																				1	
Venemorpha micra	ヒメカニコアサリ			0.0155																	1	
Ruditapes philippinarum	アサリ	0.2729	22.954	7.4594			10.705	0.8388	0.0153	2.8306	2.1248			6.42	0.3802	14.767					11	
Paphia undulata	イホスタレ							1.3746													1	
Raetelops pulchella	チヨハナガイ																					
Theora fragilis	シズカガイ																					
Maconia incongrua	ヒメシトラトリ	1.1529		0.0798			0.1808	1.8462	2.8895	0.0572	0.2271			0.119	1.2372	0.2247	0.0367				11	
Moerella rutilla	ユウシオガイ	0.2112	0.0622																		2	
Solen stritatus	マテガイ																					
Laternula gracilis	ソトオリガイ																	0.0021				
Pycnogonida	ウミグモ綱																					
Ostracoda	貝虫綱																					
Mysida	アミ目							0.0005													1	
Cumacea	クマ目																					
Isopoda	等脚目																					
Cyathura spp.	スナウミナナフシ属										0.0068	0.0085			0.0525							
Sphaeromatidae	コツムシ科	0.2039	0.0052	0.0465	0.0914						0.0184										5	
Symphyla nipponensis	ニッポンアラジヘラムシ	0.0963	0.059	0.0168	0.0474						0.6015										5	
Symphyla caudatus	ヤリボヘラムシ																					
Caprellidae	フレカラ科						0.0007														1	
Amphipoda	端脚目			0.0137											0.025	0.0375	0.0026	0.0007	0.1193			6
Pleocyemata	抱卵亜目(エビ亜目)															0.0004						
Anomura	異尾下目																					
Brachyura	短尾下目(カニ目)																					
Ophiuroidae	カモヒトデ綱(蛇尾綱)																					
count		6	9	11	7	10	9	6	4	4	9	4	7	6	10						22	

表 4 その他の地点における底生生物の OTU ごとの個体数および湿重量,  
Table 4 Number of individuals and wet weight for OTU of benthos in the rest of stations.

Scientific name	Japanese name	no. inds. (N/0.04m <sup>2</sup> )						wet wt. (g/0.04m <sup>2</sup> )												
		Station	Po	N08	PP	H35	N04	N20	H19	H02	N19	Po	N08	M02B	H35	PP	N04	N20	H19	H02
Porifera	海綿動物門																			
Actiniaria	イソギンチャク目																			
Sipuncula	星口動物門																			
Polychaeta	多毛綱				51	46	77	251												
<i>Pectinaria okudai</i>	オクダイサゴムシ		16	2	2	2	8	9												
Polydora	多板綱																			
Gastropoda	腹足綱																			
Patellogastropoda	カサガイ目																			
<i>Fluvicongula elegantula</i>	カワグチツボ																			
<i>Reticunassa festiva</i>	アラムシロ																			
Bivalvia	二枚貝綱																			
<i>Arcuatula senhousia</i>	ホトトギスガイ								3											0.0265
<i>Anomia chinensis</i>	ナミマガシウ																			
<i>Veneromorpha micra</i>	ヒメカノコアサリ																			
<i>Ruditapes philippinarum</i>	アサリ																			
<i>Paphia undulata</i>	イオスダレ																			
<i>Raetellops pulchella</i>	チヨハナガイ																			
<i>Theora fragilis</i>	シスクガイ																			
<i>Macoma incongrua</i>	ヒメシラトリ																			
<i>Macrella rutia</i>	コウシオガイ																			
<i>Solen strictus</i>	マチガイ																			
<i>Laternula gracilis</i>	ソトオリガイ																			
Pycnogonida	ウミグモ綱																			
Ostracoda	貝虫綱																			
Mysida	アミ目																			
Cumacea	クマー目																			
Isopoda	等脚目																			
<i>Cyathura</i> spp.	スナウミナナフシ属																			
Sphaeromatidae	コツムシ科																			
<i>Synidotea nipponensis</i>	ニッポンアラシヘラムシ																			
<i>Symphysius caudatus</i>	ヤリボヘラムシ																			0.0159
Caprellidae	フレカラ科																			
Amphipoda	端脚目																			
Pleocyemata	抱卵亜目(エビ亜目)																			0.0011
Anomura	異尾下目																			
Brachyura	短尾下目(カニ下目)																			
Ophiuroidea	クモヒトデ綱(蛇尾綱)																			

表5 Polychaeta グループの各地点における  
個体数および湿重量。

Table 5 Number of individuals and wet weight  
in the stations of Polychaeta.

Station	Polychaeta no. inds. (N/0.04m <sup>2</sup> )	Polychaeta wet wt. (g/0.04m <sup>2</sup> )
H18	10	0.0175
H30	30	0.0954
H31	2	0.0154
H32	21	0.062
H33	9	0.008
H37	2	0.0083
H38	4	0.003
M03A	11	0.0761
N03	2	0.0023
N10	152	0.3449
N11	9	0.0104
N15	216	0.4907
N21	71	0.3024
N22	83	0.1215
N23	3	0.0024
N28	165	0.562
N29	130	0.313
N30	80	0.234
N31	6	0.0067
N36	69	0.1397
N37	138	0.9098
N38	134	0.4195
N39	5	0.0049
N42	27	0.0482
N43	38	0.1429
N44	7	0.0111
N45	4	0.0049
N47	22	0.0513
N48	6	0.0179
N49	1	0.0019
N50	16	0.0382
N52	5	0.0035
N53	42	0.0463
N55	3	0.0033
N60	165	0.4236
N77	31	0.0536
WR60	5	0.0587

PP) として区別した。Po はオクダイサゴムシのみが採集された 2 地点, PP はオクダイサゴムシを含む多毛類のみが採集された 3 地点を示す。また, これらのグループのうち, 3 グループ (Sakai, Nakaura, Bivalves) と, Polychaeta, None に含まれる地点の分布を図 3 に示した。なお, Po (N19, N08), PP (M02B, H35, N04), 同定できなかった底生生物のみ採集された地点 (H29), いずれのグループにも属さない地点 (N20, H19, H02) は図 3 に示していない。

Sakai は N68 ~ N76 の地点の集合であり, 境水道に位置する 9 地点が含まれた (表 1)。Nakaura に含まれる 5 地点は中浦水道および江島の南側, 森山堤の開削口の境水道側に分布した (表 2)。Bivalves としたグループは, 主にホトギスガイなどの二枚貝類が採集された地点 (n=14) で, 水深の浅い場所もしくは森山堤の開削口の本庄水域側に分布した (表 3)。いずれのグループにも属さない地点が 3 地点あったが, Po (N19, N08), PP (M02B, H35, N04), 無所属の N20 は, オクダイサゴムシが採集された点で共通している (表 4)。オクダイサゴムシ以外の多毛類のみが採集された地点 (Polychaeta) は, 中海の中央部と本庄水域の東寄りの範囲に多かった (表 5)。底生生物が採集されなかった地点 (None) は, 中海の南西部および米子湾, 本庄水域の西寄りの範囲に多かった (表 6)。

図 4 に各地点で測定された環境要因の値を地点のグループごとに集計し, 地点のグループごとに各環境要因の値を示した。5つのグループ (Sakai, Nakaura, Bivalves, Polychaeta, None) を対象にノンパラメトリック検定 (Kruskal-Wallis rank sum test および Mann-Whitney U test with bonferroni) を行った。アルファベット (a, b, c, d) は  $P > 0.05$  で有意な差が見られなかったグループを示す。その結果, すべての環境要因 (水深, 塩分, 透明度, pH, ORP, 溶存酸素濃度, 溶存酸素飽和度, L\*, a\*, b\*) において群間に有意差があった ( $P < 0.05$ )。Sakai は水深, 透明度, 塩分, ORP, 溶存酸素濃度, 溶存酸素飽和度, L\*, a\* の値が大きかった。Polychaeta と None は pH, ORP, 溶存酸素濃度, 溶存酸素飽和度, L\* の値が小さかった。Bivalves は水深と塩分が他のグループより有意に小さかった。Bivalves の pH, 溶存酸素濃度, 溶存酸素飽和度は Sakai のそれらの値と有意な差がなかった。Bivalves の ORP, L\*, a\* の値は, Sakai と Polychaeta の間に位置した。Nakaura は水深が Sakai と同程度であったが, 堆積物の L\* と a\* は Bivalves のそれらの値に近かった。

## 考 察

133 地点のうち半数近くの 59 地点では底生生物が採集されなかった。夏季に中海の広い範囲で下層は無酸素もしくは貧酸素の条件となるため, 底生生物が採集されない地点の範囲が過去からどのように変化してきたか議論する余地はある。しかし, 2006 年の中海本庄水域全域調査の報告 (山口ほか, 2013) では二枚貝類が採集された地点に絞って解析されており, ここでは詳細な比較が難しい。また, 中海に

表6 底生生物が採集されなかった地点 (None) および未同定の底生生物のみ採集された地点 (Unidentified).

Table 6 Stations of no collected benthos (None) and the station of unidentified benthos only (Unidentified).

Station	Honjo area	Station	Nakaumi
H04	None	N06	None
H06	None	N07	None
H07	None	N09	None
H08	None	N12	None
H09	None	N14	None
H10	None	N16	None
H11	None	N17	None
H12	None	N18	None
H13	None	N24	None
H14	None	N25	None
H15	None	N32	None
H16	None	N33	None
H17	None	N40	None
H20	None	N46	None
H21	None	N51	None
H22	None	N54	None
H23	None	N56	None
H24	None	N57	None
H25	None	N58	None
H28	None	N59	None
H34	None	N61	None
H36	None	N62	None
H39	None	N63	None
H40	None	N64	None
M06A	None	N65	None
M06B	None	N66	None
M07A	None	M03B	None
M07B	None	M04A	None
M08	None	M04B	None
M10	None		
H29	Unidentified		

おいては、有機汚濁の指標種とされるヨツバナスピオ *Paraprionospio pinnata* が優占種とされ (園田ほか, 1998), 本報告においてオクダイサゴムシ以外の多毛類のみが採集された 37 地点は夏季の溶存酸素濃度が低い場所であった (図 4, 最大値: 2.069 mg/l, 中央値: 0.021 mg/l). しかし, 多毛類の同定が行われていないことから, 多毛類に属する種の分布範囲について過去からの変化を詳細に考察することはできない. そこで本稿では残る 36 地点の解析結果を中心に考察する.

Sakai は境水道に位置する地点のグループで, OTU 数が最も高い 13 の地点が 2 地点あり, 延べ 20 OTU が確認された. 美保湾から海水が中海へ流入する経路であることから, 海産の底生生物の存在が OTU 数の増加につながったと考えられる. 多毛綱, 端脚目, 貝虫亜綱, クモヒトデ綱などの出現に特徴づけられる. Nakaura, Po, PP の 3 グループは多毛綱の分布が共通し,

その他にイヨスダレ, シズクガイ *Theora fragilis* などが採集されたが, OTU 数は低かった. 地点としては中浦水道付近の他に中海の南西部のエリア (N04, N08, N19) が該当した. H35 や中浦水道付近は境水道から高塩分水が流入することが期待され, Polychaeta に含まれる地点よりは生息場所としての条件が良いと考えられる. Bivalves の 14 地点は多毛綱に加えて二枚貝類などの生息が目立った地点で, OTU 数は中程度であった. 本庄水域の堤防開削部付近もしくは水深が約 3 m より浅い地点であることが共通し, 溶存酸素濃度が低下しにくい場所に成立する底生生物群集であり, ホトトギスガイの個体数と湿重量が大きいことで特徴づけられる.

中海と本庄水域の底生生物の分布に関しては, 水深が第一に重要であることが既往の文献から読み取れる. 中海においては, 1997 年 8 月に下意東沖と江

島南沖の2地点で行われた底生生物の調査結果によれば、水深2 m程度の地点で多毛類の他にホトギスガイ、アサリ、ソトオリガイ *Laternula gracilis*、ヤマトシジミ *Corbicula japonica*、ヒメシラトリの二枚貝類が採集された(三浦ほか, 1999)。2003年に中海の3地点で行われた底生生物調査の結果を見ると、湖心付近の地点では8月と11月において二枚貝は採集されず、多毛類のみが記録され、他の2地点(意宇川河口沖と米子空港沖)についても二枚貝類は少数のシズクガイやアサリの出現に留まった(後藤ほか, 2004)。境水道を含む中海の沿岸部では2005年9月から2006年11月の間に行われた採集記録により腹足類と二枚貝類が43種確認された(古林, 2007)。一方、堤防で囲まれていた期間の本庄水域における底生生物群集の状況を示唆する文献は非常に限られているが、以下のような報告例がある。藤本ほか(1999)は1997年~1998年の6回にわたる本庄水域の調査結果を示し、1997年7月は多くの地点で底層のDOが2 mg/lを上回りホトギスガイやアサリの生息が見られたが、1998年8月は底層のDOが1 mg/lを下回る地点が多く、二枚貝類はほとんど確認されなかった。1998年8月の中海と本庄水域における水深ごとのホトギスガイ個体群のデータ(Yamamuro et al., 2000)は、本庄水域の2ヶ所で水深4 mまで生息していたものの、水深5 mでは採集されなかったことを示した。これらの研究結果が示すように、水深は中海と本庄水域の底生生物の分布に最も影響する要因であり、夏季に溶存酸素濃度が減少して貧酸素となる水深が底生生物の生息範囲を規定していると考えられる。本研究においても、Bivalvesは水深が浅い地点がほとんどで、夏季の中海および本庄水域において二枚貝類が生息しやすいのは浅い地点であるという状況が再確認された。

次に、水深のほかに底生生物の分布に影響する要因として底質が挙げられる。Nanami et al. (2005)は汽水湖である潤沼において塩分と底質の中央粒径値が大型底生無脊椎動物の分布に関係する重要な要因であることを示した。石松ほか(2017)は諫早湾の底生動物の分布と底質の環境要因との関係を解析し、泥分とTOCが低い好気的な海域において底生動物の種数が多かったことを報告した。本研究においても、SakaiとBivalvesに分類された地点の堆積物のL\*とa\*の値は高い傾向があり、底生生物のOTU数が高いことと二枚貝類の生息が確認されたことと整合した。一方、PolychaetaとNoneは堆積物のL\*の値が小さく、堆積物が還元的であったことが推定され、オク

ダイサゴムシ以外の多毛類のみが生息できるか、無生物であった。堆積物のL\*とa\*の値のように、底質は過去の中海における湖底の状況を推測するのに有用な情報である。中海において過去の底質の様子を記載した貴重な記録である妹尾(1922)の記述によると、「かつて中海は水産資源の増殖に適した有望な水域として、その利活用が大いに期待されていた」「(中海の湖底には)二から五分の黄褐色の腐泥が一面に沈積して居る」とある。本研究では土色計による堆積物表面の明度と色度を測定したが、黄褐色に相当する場所は極めて狭い範囲に限られていた。おそらく黄褐色と表現された湖底の様子は、酸化腐泥が堆積していることを示しており、約100年前と現在の中海の湖底の酸化還元状態の違いを端的に表していると考えられる。一方、佐野(1992)が引用した島根水試(1923)は「馬瀉湾と安来以東米子湾までは泥色が深黒色を呈している」とし、境水道からの潮流の勢いが弱くなる中海南西部や米子湾では、既に約100年前の時点で還元的な底質であったと推測される。

水深と底質の情報は、各地点における溶存酸素濃度に大きく関係している。地点のグループごとに集計した環境要因の値を見ると、下層の水交換が妨げられない特徴を持っているSakaiは、溶存酸素濃度と溶存酸素飽和度が大きかった。これはSakaiにおいてOTU数が高かった結果を支持している。一方、PolychaetaとNoneのグループは水質と底質の測定項目から底生生物の生息には厳しい条件であったことが推定され、これらの環境要因の値(pH, ORP, 溶存酸素濃度, 溶存酸素飽和度, L\*)は、底生生物が採集されないもしくは多毛類のみという結果であったことと整合している。Nakauraは水深や塩分が大きく堆積物のL\*とa\*は底質が酸化的であることを示すものの、溶存酸素量やORPの値は幅が大きく、環境要因の変動が大きいことが示唆された。以上のことから、中海と本庄水域の底生生物の分布は、水深と流動によってその場の底質の酸化還元状態が決まるため、夏季に溶存酸素濃度が減少して貧酸素となる範囲と密接に関係していると考えられる。

ここで、現在の汽水域の環境変化を追跡する長期的なモニタリングの結果を理解するため、中海と本庄水域におけるこれまでの環境変化を示した既往の文献を踏まえ、堤防で囲まれていた期間の本庄水域について考察する。中海の水質の長期的変化について多数の文献を整理して考察を行った佐野(1992)は、1950年代以降に底層の無酸素状態の期間が長期化する傾向にあると述べている。また、同じく中海の

透明度の変化について長期的傾向を文献から調べた Hiratsuka et al. (2007) は、中海湖心付近の透明度は 1955 年頃に既に低下傾向にあったとした。Katsuki et al. (2008) は中海と本庄水域の堆積物コアを分析した結果から、1940 年代に湖の富栄養化が進行し、1950 年代に植物プランクトンが優占する系となり、さらに本庄水域では 1970 年代に堤防が建設されることにより環境変化が引き起こされたと推定した。しかし、既に述べたように、堤防で囲まれていた期間の本庄水域に関する文献やデータは極めて乏しく、「本庄水域の失われた 25 年」とでも言うべき状況にある。1982 年～1984 年の中海と本庄水域の塩分の鉛直分布を見ると、中海では 3～4 m の水深に塩分躍層が見られるのに対し、本庄水域では年間を通じて塩分躍層が見られなかった (Mori et al., 1987)。このように堤防開削前の本庄水域では中海で観測されるような顕著な塩分躍層が形成されにくかったとされる (清家ほか, 1999; 藤本ほか, 1999)。本庄水域では、自然地形の水深は 5～6 m である一方、排水溝として浚渫された約 10 m の水深の場所が存在する (三瓶ほか, 1999)。そこで、本庄水域の溝ではない自然地形に近い水深の場所のデータを見ると、1998 年 8 月には半分以上の地点で底層(水深 4～7 m) の溶存酸素濃度の低下(<2 mg/l) が観測され (藤本ほか, 1999)、1997 年と 1998 年の夏季には本庄水域の水深約 6 m の地点の底上 1 m から中海湖心付近の底層と同程度の濃度のリン酸態リン (PO<sub>4</sub>-P) が測定されている (清家ほか, 1999)。また、森山堤防の一部開削 (2009 年 5 月) の約 1 年前である 2008 年夏季の観測データからは、中海の湖心付近で表層(水深 1 m) と底層(底上 0.5 m) の間に 10 PSU 程度の塩分の差異があるものの、本庄水域の東部の地点では表層と底層に塩分差は認められなかった (鈴木ほか, 2011)。それにも関わらず、中海と本庄水域のいずれの地点においても、8～9 月の底層の溶存酸素濃度は 2 mg/l を下回っていた。これらの断片的な情報から、堤防で囲まれていた期間の本庄水域において塩分躍層は形成されにくかったものの、湖底の直上では溶存酸素濃度が低下する現象は相当程度に起こっていたと考えるのが自然であろう。

本研究で示したデータは、2016 年夏のスナップショットとして重要なデータであるが、底生生物が採集されない地点、オクダイサゴムシ以外の多毛類のみが採集された地点の合計が約 4 分の 3 を占めるため、夏季における中海の底生生物相の限定的な様子を反映していると評価すべきであろう。一方で、中海のエリア別の特徴は夏季においても表出されることが再確認さ

れた。すなわち、境水道からの海水流入の影響を受けやすい場所や水深の浅い場所においては OTU 数が増えるものの、夏季の中海や本庄水域の大部分は多毛類以外の底生生物にとって生息しやすい場所とは言えない。過去からの人為的改変と修復事業の影響を調べるには、生物量が比較的多い冬から春のデータを加味する必要がある。

## 謝 辞

本研究は平成 28 年度河川基金助成事業「斐伊川水系河口部中海・宍道湖における過去 10 年間の底質環境の変化」(研究代表者:瀬戸浩二) によって行われた。水質と底質の測定およびデータ解析は森田健太郎氏の卒業研究として行われた。底生生物の選別および同定作業は島根大学生物資源科学部の学生諸氏に手伝っていただいた。2 名の匿名の査読者からは丁寧な校閲と有益な助言をいただいた。以上の方々に感謝申し上げます。

## 引 用 文 献

- 伊達善夫 (1999) 本庄工区の干拓と淡水化について。LAGUNA (汽水域研究), 6: 189–203.
- Dittmann, S., Baring, R., Baggalley, S., Cantin, A., Earl, J., Gannon, R., Keuning, J., Mayo, A., Navong, N., Nelson, M., Noble, W., Ramsdale, T. (2015) Drought and flood effects on macrobenthic communities in the estuary of Australia's largest river system. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 165: 36–51.
- 藤本真子・高安克己・山口啓子・園田武 (1999) 中海本庄工区におけるベントス相と環境特性 (予報)。LAGUNA (汽水域研究), 6: 107–117.
- 後藤悦郎・藤川裕司・三浦常廣・石田健次・大北晋也 (2004) 漁業環境保全対策事業 (内水面漁業保全対策推進調査事業)。平成 15 年度島根県内水面水産試験場事業報告。pp. 109–123.
- 橋谷博 (1998) 汽水湖中海・宍道湖の水質変動や生物の盛衰に及ぼす気象 5 因子の影響。日本水産学会誌, 64(2): 311–312.
- Hiratsuka, J., Yamamuro, M., Ishitobi, Y. (2007) Long-term change in water transparency before and after the loss of eelgrass beds in an estuarine lagoon, Lake Nakaumi, Japan. *Limnology*, 8(1): 53–58.
- 石松将武・小森田智大・折田亮・堤裕昭 (2017) 諫早湾における春季の底生動物の分布と底質の物理

- 化学的環境要因の対応関係. 日本ベントス学会誌, 71: 55–63.
- Katsuki, K., Miyamoto, Y., Yamada, K., Takata, H., Yamaguchi, K., Nakayama, D., Coops, H., Kunii, H., Nomura, R., Khim, B.-K. (2008) Eutrophication-induced changes in Lake Nakaumi, southwest Japan. *Journal of Paleolimnology*, 40(4): 1115–1125.
- 古林敏彦 (2007) 宍道湖・中海水域における貝類の生息状況. ホシザキグリーン財団研究報告, 10: 261–264.
- Kurata, K., Yamaguchi, K., Seto, K., Sonoda, T. (2011) Changes of benthic community caused by anthropogenic changes in the Honjo area of Lake Nakaumi, western Japan. LOICZ Open Science Conference 2011. Yantai, China, 12 September 2011.
- 倉田健悟・山口啓子・瀬戸浩二・園田武 (2012) 2006年の宍道湖における底生動物の分布. *LAGUNA (汽水水域研究)*, 19: 1–13.
- 三浦常廣・中村幹雄・山根恭道・福井克也・重本欣史・常磐保 (1999) 宍道湖・中海水産振興対策調査事業—有用水産動物生態調査(アサリ・サルボウ) —. 平成10年度島根県内水面水産試験場事業報告. pp. 81–88.
- Mori, T., Ohtake, H., Kondo, K., Seike, Y., Date, Y. (1987) Significance of a halocline to nutrient cycles in shallow brackish Lake Nakanoumi, Japan. *Hydrobiologia*, 146(2): 181–186.
- Nanami, A., Saito, H., Akita, T., Motomatsu, K., Kuwahara, H. (2005) Spatial distribution and assemblage structure of macrobenthic invertebrates in a brackish lake in relation to environmental variables. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 63: 167–176.
- 西榮二郎・片岡大輔・吉田裕之・森敦史・水永勲 (2012) 斐伊川水系宍道湖と中海から採集されたオクダイサゴムシ (新称) *Pectinaria okudai* (多毛綱: ウミイサゴムシ科). *南紀生物*, 54(2): 141–143.
- Nomura, R., Nakamura, K., Seto, K., Inoue, M., Kofuji, H. (2013) Opening of the closed water area and consequent changes of Ra-228/Ra-226 activity ratios in coastal lagoon Nakaumi, southwest Japan. *Applied Radiation and Isotopes*, 81: 310–314.
- Nomura, R., Inoue, M., Kofuji, H. (2015) Inspection of residual flow using Ra-224/Ra-228 ratios in the semi-closed water body of Nakaumi, a coastal lagoon in southwest Japan. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 303(2): 1595–1599.
- 大竹久夫・伊達善夫・近藤邦男・清家泰 (1980) 中海干拓淡水化がその水圏環境に及ぼす影響について—事前調査とその問題点—. *陸水学雑誌*, 41(3): 153–162.
- Ohtake, H., Kondo, K., Seike, Y., Date, Y. (1982) Seasonal and areal features of the lagoonal environment in Lake Nakanoumi, a shallow coastal lagoon in Japan. *Hydrobiologia*, 97(1): 15–26.
- Ohtake, H. (1984) Nakanoumi land reclamation and freshening project. *Water Science and Technology*, 16(1-2): 151–170.
- R Core Team (2016) R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. URL <https://www.R-project.org/>.
- 佐野茂 (1992) 学術論文にみる中海水質の変遷. *山陰地域研究 (自然環境)*, 8: 95–106.
- 三瓶良和・徳岡隆夫・藤森恒至・吉松康仁 (1999) 中海本庄工区の底質環境. *LAGUNA (汽水水域研究)*, 6: 165–177.
- 清家泰・奥村稔・藤永薫・大谷修司・千賀有希子・岡宏樹 (1999) 中海本庄水域の水質特性. *LAGUNA (汽水水域研究)*, 6: 1–9.
- 妹尾秀實 (1922) 宍道湖及中海に於ける水産増殖に就て. *水産研究誌*, 17(11): 247–256.
- 島根縣水産試験場 (1923) 中海調査. 大正9年度島根縣水産試験場事業報告. pp. 71–108.
- 篠原隆佑・山口啓子・瀬戸浩二・倉田健悟 (2016) 干拓堤防の一部撤去が中海本庄水域の二枚貝の分布に与えた影響. *日本ベントス学会誌*, 71: 1–10.
- 園田武・中尾繁・中村幹雄・高安克己 (1998) 宍道湖・中海・神西湖の多毛類相. *LAGUNA (汽水水域研究)*, 5: 101–108.
- 鈴木秀幸・山口啓子・瀬戸浩二 (2011) 閉鎖性の高い中海で垂下養殖されたサルボウガイの成長と生残. *水産増殖*, 59(1): 89–99.
- 山口啓子・倉田健悟・園田武・瀬戸浩二 (2013) 中海における二枚貝群集の特徴と干拓堤防建設により隔てられた汽水域の変化. *日本ベントス学会誌*, 67(2): 82–95.
- Yamamuro, M., Hiratsuka, J., Ishitobi, Y. (2000) Seasonal change in a filter-feeding bivalve *Musculista senhousia* population of a eutrophic estuarine lagoon. *Journal of Marine Systems*, 26(2): 117–126.