

# 穴道湖・中海の SS (浮遊物質) の地球化学分析からみた 湖水環境の変化

石賀裕明<sup>1\*</sup>・瀬戸浩二<sup>2</sup>

## Geochemical examination of suspended solids for evaluation of lake water environmental changes in Lakes Nakaumi and Shinji, southwest Japan

Hiroaki Ishiga<sup>1\*</sup> and Koji Seto<sup>2</sup>

**Abstract:** The geochemical composition of suspended solids (SS) from surface and bottom waters of Lakes Shinji and Nakaumi, southwest Japan, was examined to evaluate the lake water environment, with particular focus on the stratified water column. MnO and P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> contents are important variables used in the evaluation of anoxic conditions and planktonic productivity. MnO content in SS shows seasonal changes, namely, higher values in summer in both lakes. Variation of MnO content in surface and bottom waters of Lake Shinji was not significantly correlated; and they are lower than that of the bottom water of Lake Nakaumi. This indicates the mixing of water masses in Lake Shinji, and the presence of a relatively stratified water column in Lake Nakaumi due to sea water incursion. MnO contents and DO values of bottom water in both lakes show a logarithmically positive correlation. This suggests that MnO content is a useful parameter related to the redox condition of bottom water. P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> contents of SS in both lakes are considerably higher than reported values for bottom sediments, suggesting enrichment of nutrient salts in the water column. Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> was not detected for most SS samples in either lake, which suggests that sulfide grains may have become too large to be included in suspended particles.

**Key words:** suspended solid, geochemistry, Lake Nakaumi, Lake Shinji

---

<sup>1</sup> 島根大学自然科学研究科地球科学コース・Faculty of Natural Science, Shimane University, 1060 Nishikawatsu-cho, Matsue, 690-8504, Japan.

<sup>2</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, 690-8504, Japan.

\* Corresponding Author

## はじめに

宍道湖・中海は縄文海進以降の海跡湖であり、両湖は塩分や水塊構造は異なるが、汽水湖として豊かな生態系を形成してきた。水質、生物、堆積物ほかの研究から貧酸素水塊の発生やその動態の解明がエスチュアリー研究センター（旧汽水湖研究センター）を核として進められてきた（三梨・徳岡,1988; 三瓶ほか, 1996; 徳岡ほか, 2001; 相崎, 2003; 清家ほか, 2004; 瀬戸, 2017）。筆者の一人（HI）は湖水や沿岸域の水環境の評価の手法の1つとして浮遊物質（suspended solid; SS）の地球化学的検討から、これを構成するプランクトンや粘土鉱物（細粒砕屑物）さらにこれらに吸着する重金属による水環境の評価を行ってきた（石賀ほか, 2015; 石賀・佐野, 2015）。SSの地球化学分析は国内外でもほとんど行われておらず、新しい研究手法である。

共著者（KS）は長年、毎月の水質調査（モニタリング）を継続して行っており、両湖で採水された試料のSSを分析することができた。水質のpH、温度、溶存酸素などから夏場に顕著な躍層が発達することはよく知られており（徳岡ほか, 1994）、特に中海では塩水楔の発達による夏場の貧酸素化は顕著である（徳岡ほか, 2001）。マンガンは酸化還元状態を評価するうえで有効であり、リンは富栄養化とプランクトンなどの基礎生産を知るうえで重要な地球化学的指標である。宍道湖・中海の表層と底層の試料を比較することは、湖水の水塊構造の推定には貴重な情報となる。本論ではこれまでの検討結果をまとめ、両湖の水質特性を考察することとする。

## 調査地点と分析方法

宍道湖では2014年5月～2017年1月に湖心付近（N35°26.986', E132°57.636'; 図1）の表層・底層水サンプル（2 L）を、中海においては2012年7月～2016年8月に湖心付近（N35°28.020', E133°11.458'; 図1）において同様に採水した。採水は、リゴーB型採水器を用い、表層試料は、採水器の中心が、水面下0.5 mになる深度で採水した。底層試料は、採水器の中心が、湖底から1 m上になる深さで採水した。採水は予定深度以下に下げないように配慮した。宍道湖では2015年2月、2016年9月および2017年1月は欠如している（表1）。中海では2013年2月、2013年7月～2014年4月および2015年7月は欠如している（表1）。採水は各月の20日前後に行った。試料は冷蔵保存し12時間以内に石英フィルターにて捕集した。石英

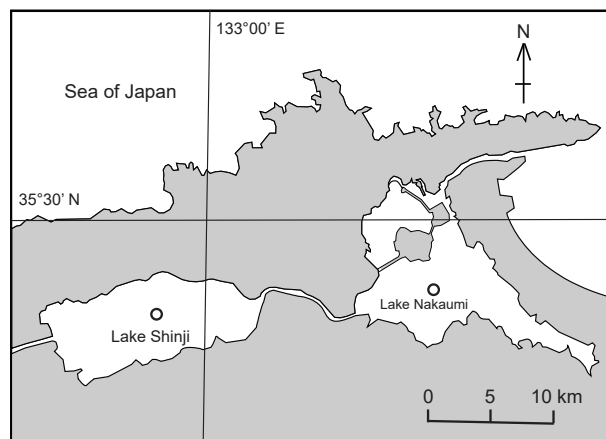


図1 宍道湖・中海における表層・底層水サンプル採取地点（いずれも湖心付近）を示す。

**Fig. 1** Map showing localities of surface and bottom water samples in Lake Shinji and Lake Nakaumi (both sites are at the central part of the lakes).

フィルターにてSSを捕集するのは、メンブランフィルターではバインダーにZnほかの重金属が含まれているためである。フィルターは160 °C、48時間乾燥させた。これはSSの水分並びに揮発性成分を除去するためである。試料乾燥の後、蛍光X線分析装置(Rigaku, RIX 2000)を用いて小笠原(1987)に基づいて多元素組成分析を行った。測定数は宍道湖で32ヶ月、中海で38ヶ月にわたる。蛍光X線分析は全岩化学組成を測定するもので、プランクトンなどの生体に含まれるもの、その表面に付着する微生物が集積した元素すべてを分析するものである。本論では水環境の指標として有効なMnO (wt%) とP<sub>2</sub>O<sub>5</sub> (wt%) について記述する。なお、Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (wt%) も測定したがほとんどの試料で検出されなかった（表1）。これらの元素の分析値は地球化学分析の表記に従い酸化物として示した。

## 結果

### 宍道湖のSS

毎月の宍道湖の表層と底層水サンプルのSSのMnO含有量の季節変化を棒グラフに示す（図2）。グラフ下の数字は測定月を、対をなす棒グラフの左は表層水のMnO含有量を右は底層水のそれを示す。繰り返になるが、MnO含有量はあくまでもSSに含まれるMnの総量を示したもので、Mnの化学種を示したものではない。

2014年は5月、8月と9月の底層水でMnO含有量

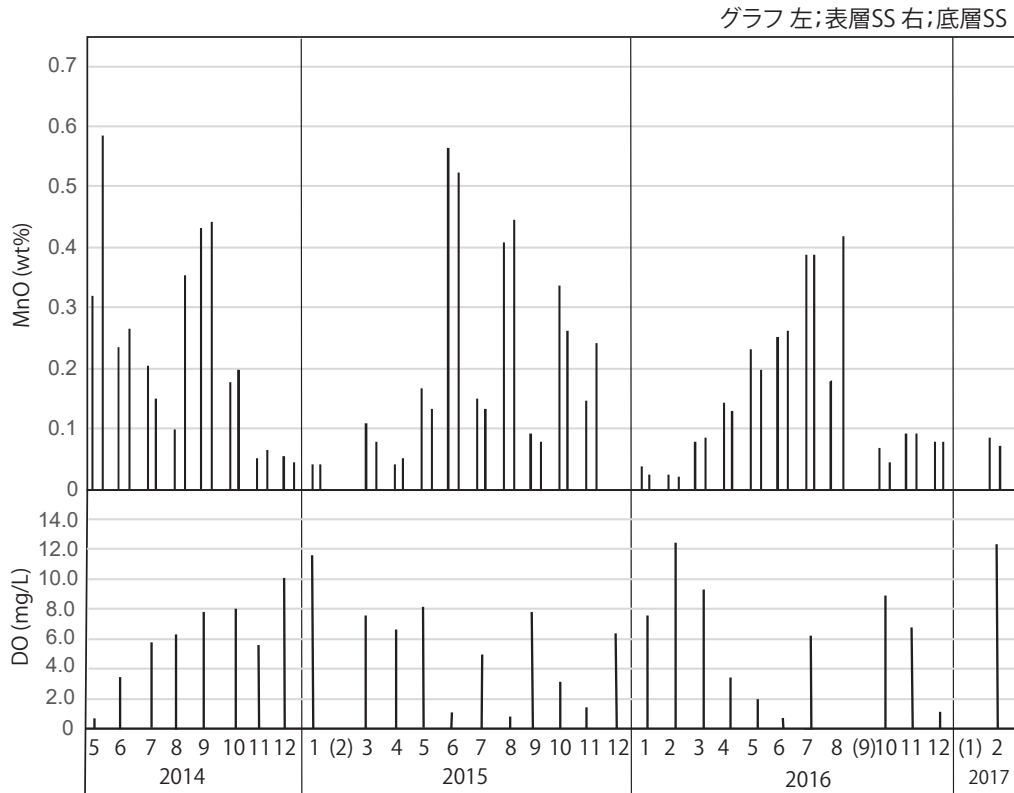


図2 宍道湖湖心の表層・底層水サンプルのSSのMnO含有量と底層水のDO. 2014年5月～2017年1月の結果を棒グラフに示す. グラフ下の数字は測定月を示し, 採水は各月の20日頃に行われた. 2015年2月, 2016年9月および2017年1月はデータが欠如している.

Fig. 2 Figure indicates MnO concentrations of SS and DO values of surface and bottom water samples at central part of Lake Shinji. Data from May, 2014 to January, 2017 are indicated by bar graph. Numbers indicated under horizontal axis are each month of water collections carried out almost on 20th. Data of February, 2015, September, 2016 and January, 2017 are missing.

が高い. 特に9月については表層と底層の試料ともに高かった. 2015年では6月試料で表層と底層の試料ともに急激に高くなり(0.5 wt%以上), 7月, 9月試料では低い値を示すが, 8月, 10月, 11月試料をみれば緩やかに減少する. 一方, 2016年では2月試料(表層0.03 wt%・底層0.03 wt%)から8月(表層0.18 wt%・底層0.42 wt%)まで増加している. ただし, 8月の表層試料ではMnO含有量は低い. また, 10月では急速に減少している(表層0.07 wt%・底層0.04 wt%). また, 表層と底層試料のMnO含有量では, 多少の差異があるものの, ほぼ同じ値を示す.

宍道湖湖心の表層と底層のSSのP<sub>2</sub>O<sub>5</sub>含有量を同じく棒グラフに示す(図3). P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>(wt%)については, 底層試料より表層試料で高くなる月が多かった. その

含有量については分析を行った表層と底層の64試料の内5試料を除いて0.3 wt%以上である. P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>含有量は季節的にも変化するが, 2014年から2016年までは平均的には大きな差異はない.

なお, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>については(表1)表層と底層の64試料の内9試料で0.1 wt%以上である. やや高い値を示したのは, 2015年11月試料で表層(0.46 wt%), 2016年1月試料の表層(0.48 wt%), 底層(0.23 wt%)である. 全体としてはSSでのFe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>含有量は極めて低いことを示す.

### 中海のSS

中海の表層と底層のSSの元素分析結果について宍道湖と同様にグラフに示した(図4, 図5). その結果,

表1 宍道湖・中海の湖心(図1)の表層水および底層水のSSの蛍光X線分析結果および溶存酸素量(DO)を示す。  
**Table 1** Analytical results of SS (X-ray fluorescence analysis) and DO values of surface and bottom water samples at central parts of Lake Shinji and Lake Nakaumi (indicated in Figure 1).

宍道湖	主元素(wt%)			mg/L	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MnO	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	DO	中海	主元素(wt%)			mg/L	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MnO	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	DO	
	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MnO	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	DO						Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MnO	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	DO					
2014/5/24									2012/7/7									
表層	0.32	0.39	9.1			0.09	0.32	10.0	表層	0.07	0.56	7.1	2015/1/22	0.07	0.06	0.32	11.0	
底層	0.58	0.47	0.7			0.08	0.26	7.8	底層	0.28	0.42	1.3	底層		0.07	0.34	4.9	
2014/6/19									2012/8/20				2015/2/26					
表層	0.23	0.35	8.2			0.34	0.33	8.9	表層	0.14	0.53	7.2	表層		0.05	0.40	11.8	
底層	0.27	0.37	3.5			0.26	0.27	3.2	底層	0.95	0.29	0.1	底層		0.02	0.26	5.1	
2014/7/21									2012/9/22				2015/3/25					
表層	0.20	0.37	8.2			0.46	0.15	0.46	9.4	表層	0.12	0.64	7.2	表層		0.09	0.34	11.1
底層	0.15	0.31	5.7			0.24	0.38	1.4	底層	1.07	0.55	0.1	底層		0.06	0.26	5.0	
2014/8/21									2012/10/21				2015/4/19					
表層	0.10	0.39	10.2			0.03	13.8		表層	0.08	0.47	10.9	表層		0.08	0.31	10.4	
底層	0.02	0.36	0.58	6.4		0.02	6.3		底層	1.33	0.53	0.1	底層		0.04	0.20	3.7	
2014/9/21									2012/11/21				2015/5/23					
表層	0.43	0.42	8.4			0.48	0.04	0.42	12.5	表層	0.10	0.68	9.8	表層		0.13	0.22	8.4
底層	0.44	0.47	7.8			0.23	0.02	0.41	7.6	底層	0.08	0.53	3.7	底層		0.10	0.25	2.2
2014/10/18									2012/12/20				2015/06/24					
表層	0.10	0.18	0.41	9.8		0.14	0.03	0.41	13.5	表層	0.08	0.33	10.6	表層		0.07	0.21	8.3
底層	0.15	0.20	0.36	8.0		0.02	0.35	12.4	底層	0.07	0.39	5.7	底層		0.09	0.21	0.6	
2014/11/27									2013/1/20				2015/8/23					
表層	0.05	0.26	12.5			0.08	0.35	11.3	表層	0.06	0.25	10.9	表層		0.07	0.32	7.8	
底層	0.07	0.34	5.4			0.08	0.39	9.3	底層	0.05	0.24	5.8	底層		0.63	0.29	0.0	
2014/12/26									2013/3/20				2015/9/20					
表層	0.06	0.44	13.1			0.14	0.58	10.3	表層	0.07	0.35	10.5	表層		0.06	0.43	8.8	
底層	0.05	0.50	10.1			0.13	0.54	3.4	底層	0.07	0.33	5.0	底層		0.36	0.34	2.3	
2015/1/21									2013/4/20				2015/10/20					
表層	0.06	0.04	0.35	12.8		0.23	0.53	9.6	表層	0.12	0.37	9.4	表層		0.07	0.32	8.5	
底層	0.09	0.04	0.35	11.6		0.20	0.39	2.0	底層	0.08	0.30	2.9	底層		0.13	0.23	1.7	
2015/2/24									2013/5/18				2015/11/22					
表層	0.07	0.05	0.33	13.0		0.25	0.33	8.5	表層	0.16	0.30	7.9	表層		0.07	0.25	8.9	
底層	0.22	0.06	0.37	10.6		0.26	0.35	0.7	底層	0.12	0.24	2.7	底層		0.04	0.13	1.1	
2015/3/25									2013/6/27				2015/12/20					
表層	0.11	0.36	11.9			0.39	0.45	8.6	表層	0.11	0.60	6.7	表層		0.04	0.03	11.3	
底層	0.08	0.24	7.6			0.39	0.37	6.1	底層	0.08	0.59	0.44	0.9	底層		0.03	5.2	
2015/4/18									2014/5/19				2016/1/20					
表層	0.04	0.38	12.5			0.18	0.57	8.0	表層	0.24	0.32	7.6	表層		0.01	0.28	11.6	
底層	0.06	0.05	0.45	6.7		0.42	0.42	0.0	底層	0.30	0.22	1.2	底層		0.04	0.31	7.0	
2015/5/23									2014/6/20				2016/2/23					
表層	0.17	0.35	8.7			0.07	0.38	8.9	表層	0.05	0.22	8.3	表層		0.02	0.36	12.3	
底層	0.13	0.30	8.2			0.04	0.28	8.9	底層	0.06	0.23	0.22	0.5	底層		0.05	0.21	2.2
2015/6/18									2014/7/20				2016/3/23					
表層	0.563	0.374	8.4			0.09	0.32	10.5	表層	0.05	0.37	7.7	表層		0.09	0.41	10.8	
底層	0.522	0.364	1.1			0.09	0.28	6.8	底層	0.13	0.38	0.8	底層		0.09	0.35	3.7	
2015/7/19									2014/8/20				2016/4/24					
表層	0.149	0.355	8.8			0.08	0.32	12.7	表層	0.08	0.46	10.0	表層		0.08	0.34	9.3	
底層	0.134	0.278	5.0			0.08	0.32	1.2	底層	0.13	0.37	0.0	底層		0.06	0.28	2.4	
2015/8/23									2014/9/20				2016/5/21					
表層	0.408	0.559	9.8			0.39	0.09	0.43	12.1	表層	0.18	0.44	7.9	表層		0.10	0.32	8.5
底層	0.447	0.342	0.8			0.16	0.07	0.36	12.3	底層	0.61	0.33	0.0	底層		0.09	0.31	2.4
									2014/10/19				2016/6/24					
									表層	0.08	0.33	10.1	表層		0.05	0.37	8.0	
									底層	0.03	0.33	2.2	底層		0.16	0.21	1.2	
									2014/11/21				2016/7/20					
									表層	0.05	0.46	11.6	表層		0.05	0.36	7.1	
									底層	0.06	0.49	1.3	底層		0.12	0.29	0.0	
									2014/12/24				2016/8/20					
									表層	0.32	0.03	0.40	11.9	表層			0.28	6.1
									底層	0.37	0.03	0.42	6.5	底層		0.16	0.19	0.0

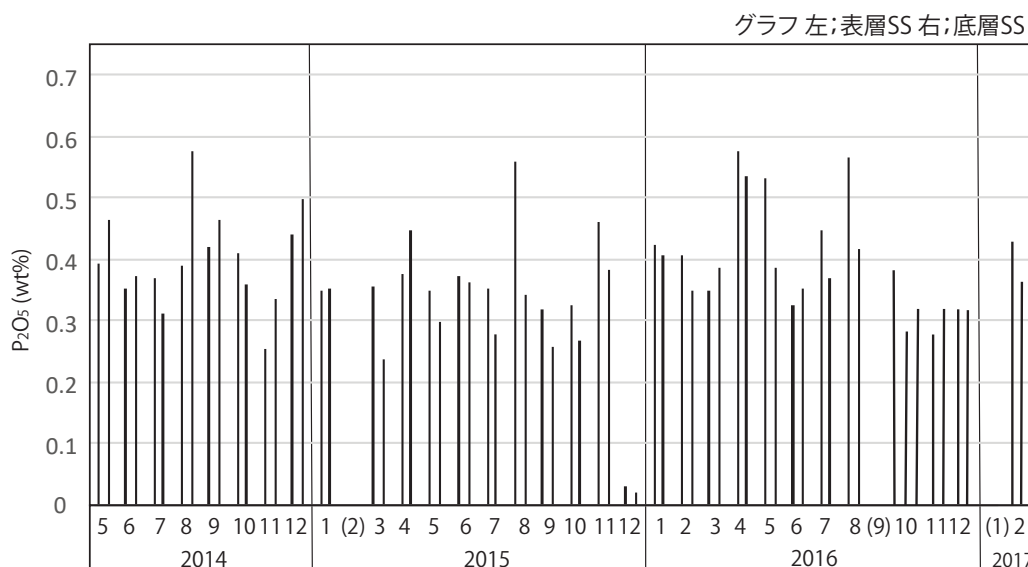


図3 宍道湖湖心付近の表層・底層水サンプルのSSのP<sub>2</sub>O<sub>5</sub>含有量。2014年5月～2017年1月の結果を棒グラフに示す。グラフ下の数字は測定月を示し、採水は各月の20日頃に行われた。2015年2月、2016年9月およびおよび2017年1月はデータが欠如している。

**Fig. 3** Figure indicates P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> concentrations of SS of surface and bottom water samples at central part of Lake Shinji. Data from May, 2014 to January, 2017 are indicated by bar graph. Numbers indicated under horizontal axis are each month of water collections carried out almost on 20th. Data of February, 2015, September, 2016 and January, 2017 are missing.

各年度においてMnO含有量が異なる(図4)。2012年は夏場の8月(0.95 wt%), 9月(1.07 wt%), 10月(1.33 wt%)の底層で非常に高い。2013年の6月, 2014年の9月, 2015年の8, 9月において底層のMnO含有量が高い。2016年では8月においても低い(図4)。

中海のP<sub>2</sub>O<sub>5</sub>含有量(図5)では2012年の試料で表層試料が高くなる月(0.5 wt%以上)がある。2014年から2016年においても表層試料でやや高い値(0.3 wt%以上)を示すものがある。中海での季節的な変化については冬季においても高くなる月があり、一般的な傾向が見られない。

Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>については(表1), 表層と底層76試料の内, 中海の2014年12月試料で表層(0.32 wt%), 底層(0.37 wt%)を検出したのみであり(その他は検出されないか, 3試料で0.1 wt%以下), SSでの含有量は極めて低いことを示す。

## 考察

宍道湖は大橋川でつながる中海から塩水が底層水として侵入して, 夏場には貧酸素水塊が発生する(徳岡ほか, 2001)。そのため貧酸素となった底層水(山室ほか, 2011)は, 底質を還元してリン酸を溶出させる(清家ほか, 2004)。Mnは水環境においては酸化還元環境の変化に敏感に反応する元素の1つであり(Ahmed et al., 2011; Ishiga et al., 2018), 自然界の堆積物や土壌中ではMnO<sub>2</sub>やMnCO<sub>3</sub>として存在する。これらのMn化合物は還元環境では底質から溶出してMn<sup>2+</sup>として水海中に存在する。鉄も還元的な水環境で溶解するが(Fe<sup>2+</sup>), より強い還元環境では間隙水からH<sub>2</sub>Sが発生して(武邊ほか, 2006), 硫化鉄(FeS)として沈殿する。還元的環境にある底層でのFeSやMnSの溶解度積を考慮すると[FeS: 3.7 × 10<sup>-19</sup> (18 °C), MnS: 1.4 × 10<sup>-15</sup> (18 °C)], 日本分析化学会編, 2004) Mn<sup>2+</sup>はFe<sup>2+</sup>のようにH<sub>2</sub>Sとの反応により硫化物を形成せず, 沈殿しにくいと言える。そのため, Mn<sup>2+</sup>は溶出したまま水塊にとどまる。

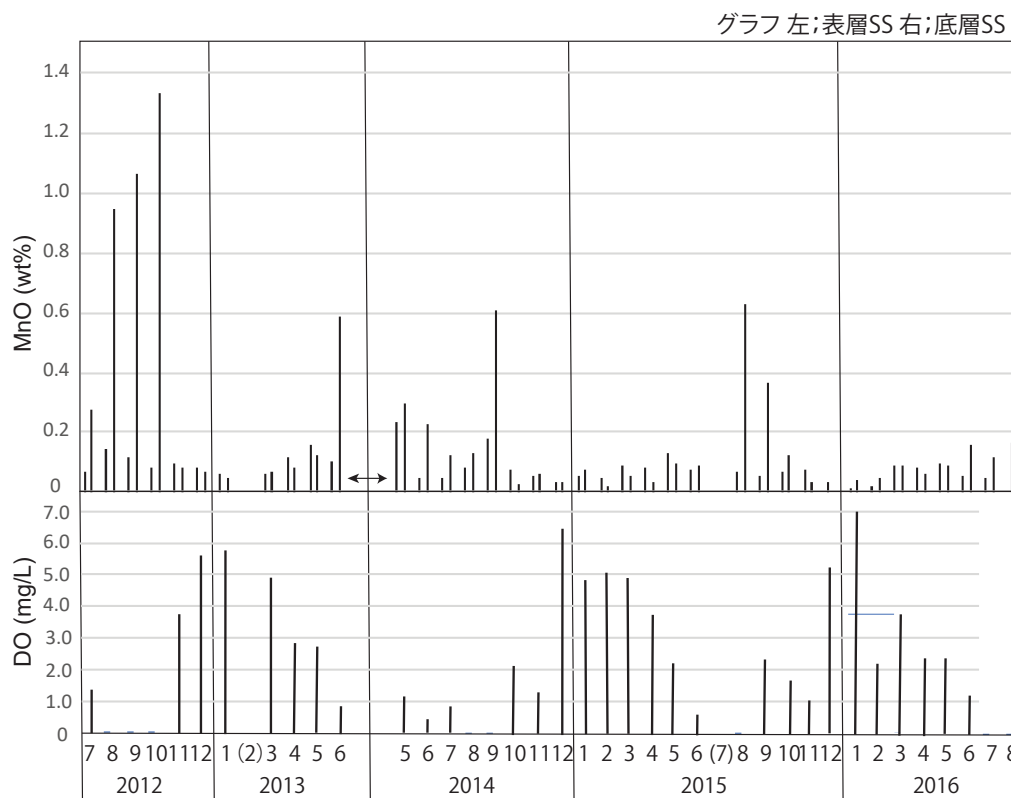


図4 中海湖心付近の表層・底層水サンプルのSSのMnO含有量と底層水のDO。2012年7月～2016年8月の結果を棒グラフに示す。グラフ下の数字は測定月を示し、採水は各月の20日頃に行われた。ただし、2013年2月、2013年7月～2014年4月(矢印)および2015年7月はデータが欠如している。

**Fig. 4** Figure indicates MnO concentrations of SS and DO values of surface and bottom water samples at central part of Lake Nakaumi. Data from July, 2012 to August, 2016 are indicated by bar graph. Numbers indicated under horizontal axis are each month of water collections carried out almost on 20th. Data of February, 2013 and from July, 2013 to April, 2017 (interval indicated by arrow), also July, 2015 are missing.

宍道湖・中海では表層水に比較して底層水は貧酸素化して還元的となることが多い(表1)、どちらの湖においても底層水のSSのMnO含有量は高い(図2, 図4)。宍道湖では2014年5月, 2015年6月, 8月, 11月, 2016年5月, 8月において底層水の溶存酸素(DO mg/L)は極端に低くなり(図2, 表1), SSのMnO含有量は高くなっている。中海のMnO含有量は, 2012年は夏場の7~9月の底層で例外的に非常に高く, 10月に向けても増加する。これは, 底層水のDOが0.1 mg/Lと極めて低いことに関連する(図4)。中海では2013年6月, 2014年9月, 2015年8, 9月の底層のSSのMnO含有量が高いが, 2016年ではいずれの月もこれらの値よりも低い。

w 底層におけるMnO含有量がこのようにおおむね夏場で高くなるのは, 中海において成層構造が発達して, 底層が貧酸素となるためである(森脇・大北, 2003)。中海の表層試料ではMnOが低いのはプランクトンの発生(近藤ほか, 1994)と水循環により好気的環境であるためと考えられる。年によってMnOが変化するの, 境水道からの海水の流入の変化を示している可能性がある(徳岡ほか, 1994; 相崎, 2003)。

宍道湖と中海のSSのMnO含有量の絶対量の比較では(図2, 図4), 2014~2016年の試料において, 中海の試料の方が低い。両湖におけるDOとMnOの関係をより分かりやすくするために, 両者のクロスプロットを作成した(図6)。宍道湖では表層水のDOが

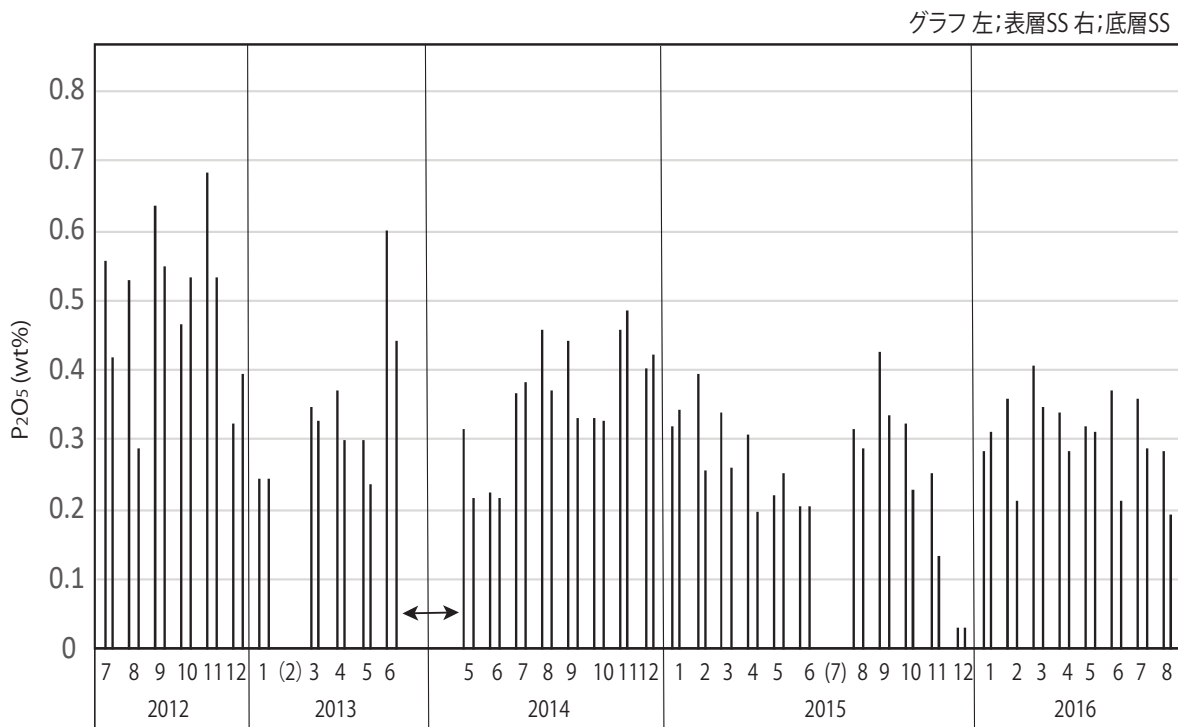


図5 中海湖心付近表層・底層水サンプルのSSのP<sub>2</sub>O<sub>5</sub>含有量. 2012年7月～2016年8月の結果を棒グラフに示す. グラフ下の数字は測定月を示し, 採水は各月の20日頃に行われた. ただし, 2013年2月, 2013年7月～2014年4月(矢印) および2015年7月はデータが欠如している.

Fig. 5 Figure indicates P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> concentrations of SS of surface and bottom water samples at central part of Lake Nakaumi. Data from July, 2012 to August, 2016 are indicated by bar graph. Numbers indicated under horizontal axis are each month of water collections carried out almost on 20th. Data of February, 2013 and from July, 2013 to April, 2017 (interval indicated by arrow), also July, 2015 are missing.

底層水のそれに比べておおむね高い(ほぼ8 mg/L以上). しかし, SSのMnO含有量は表層水と底層水でそれほど大きな差異はない. 宍道湖の底層の試料について, 2014年8月, 9月, 2016年7月についてはDOが6 mg/l以上であるにもかかわらず, MnO含有量は0.3 mg/L以上と高い. この3試料を除くと, DOとMnO含有量には正の相関があるように見える. 相関曲線を図6に示すと, 曲線は  $MnO=0.28-0.20 \log(DO)$ ,  $R=0.74$  となる.

中海の場合では2012年は7～9月の例外的に高いMnO含有量のためにグラフの縦軸の範囲が宍道湖の場合の2倍以上となっているが, これらを除くすれば, MnO含有量が約0.6 wt%までの範囲にあることがわかる. 中海ではDOについては表層水について, 底層水よりも有意に高いことがわかる. 中海においてもDOとMnO含有量には正の相関がある. 相関

曲線を図6に示すと, 曲線は  $MnO=0.23-0.26 \log(DO)$ ,  $R=0.65$  となる. したがって, 両湖ともにほぼ同様の近似式が成り立ち, MnO含有量は汽水湖底層水の酸化還元環境の評価に有用であるといえる.

両湖ともにMnO含有量の季節的な変動は大きいので平均値では議論できないが, 2014～2016年の試料について, 宍道湖(MnO=0.18 wt%), 中海(MnO=0.11 wt%)である. 宍道湖の表層堆積物ではMnO含有量は0.06～0.54 wt%, 平均値0.26 wt%である(Ahmed et al., 2011). 宍道湖ではMnO含有量に季節変化が見られるので直接比較することはできないが, SSの最高値(0.58 wt%; 2014年5月底層)が堆積物のそれと近い. 中海の表層堆積物のMnO含有量は, 0.07～1.09 wt%, 平均値0.19 wt%(Ahmed et al., 2010)であり, SSのMnO含有量は宍道湖の場合と同じく季節変化を示すが, 表層堆積物の値と近いものがある.

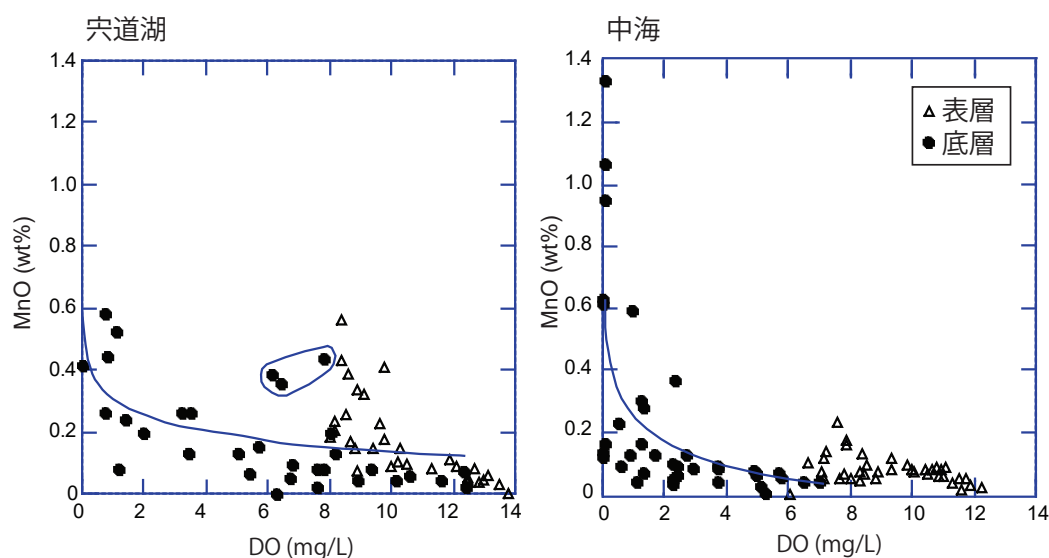


図6 宍道湖および中海の湖心の表層・底層水サンプルのSSのMnO含有量とDOのクロスプロット。宍道湖の底層水の曲線は丸で囲んだ3試料を除いた相関曲線。中海の底層水の相関曲線を示す。

**Fig. 6** Cross plots of MnO concentrations of SS and DO values of surface and bottom water samples at central parts of Lake Shinji and Lake Nakumi. Correlation curve of Lake Shinji is indicated excluding circled three samples. Correlation curve of Lake Nakumi is also indicated.

P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>含有量では2012年の中海の試料で表層試料が高くなる月がある(図5)。これはプランクトンの発生に起因するものと考えられる。2014年から2016年においても表層試料でやや高い値を示すものがあり、Pはプランクトンに吸収され、それがSSとして含まれているといえる。季節的な変化としては2014年、2015年では5月、6月の試料でやや低くなっている。

宍道湖と中海のSSのP<sub>2</sub>O<sub>5</sub>含有量の絶対量の比較では、2014年～2016年の平均値で、宍道湖(P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>=0.37 wt%)、中海(P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>=0.30 wt%)で宍道湖の試料の方が高い。このことは生物生産量が、宍道湖の方で大きい可能性を示す。また、この値は宍道湖の表層堆積物で報告されたP<sub>2</sub>O<sub>5</sub>含有量(0.07～0.34 wt%、平均値0.2 wt%; Ahmed et al., 2011)をはるかに上回る値である。中海の表層堆積物のP<sub>2</sub>O<sub>5</sub>含有量(0.10～0.25 wt%、平均値0.16 wt%; Ahmed et al., 2010)と比較すると宍道湖の場合と同様にSSのP<sub>2</sub>O<sub>5</sub>含有量の方が高い。

宍道湖と中海のそれぞれの表層と底層のSSのMnO (wt%)含有量から考察すると夏場に水塊は貧酸素化して、底層や底質は還元的となっている。しかし、

宍道湖では表層と底層のMnO含有量は大差がないため、SSから見ればMn化合物を含む水塊が表層まで発達していること(底層の貧酸素水が巻き上がっている)を示唆する。また、中海の底層のSSのMnO含有量は、宍道湖のそれと比べて相対的に高い。このことは、中海では塩分の高い底層水がより停滞しやすく貧酸素水塊となり、還元的な環境を生成しているといえる。宍道湖でも底層水は還元的となっていると考えられるが、表層と底層でのMnO含有量に大きな違いがないことは、夏場においても中海より水塊の鉛直循環が活発である可能性がある(徳岡ほか, 2001; 森脇・大北, 2003)。

なお、両湖ともにFe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>がほとんど検出されなかったことは(表1)、Feは底層で硫化物やフランボイダルパイライトを形成すると粒子が大きくなるためSSには含まれない可能性を示唆する。



## ま と め

宍道湖(2014~2017年)および中海(2012~2016年)の湖心で採取された表層と底層の湖水試料についてSS(浮遊物質)の蛍光X線分析を行った。宍道湖および中海におけるSSの地球化学分析から水環境の評価を行ったのは初めての試みである。宍道湖においては表層と底層の試料でMnO含有量については大きな差異は認められなかった。中海では2012年試料で底層のMnO含有量が著しく高いものがある。両湖ともに底層試料のSSのMnO含有量はDO(溶存酸素量)と正の相関がみられ、SSのMnO含有量が湖水の酸化還元環境を評価する良い指標であるといえる。両湖ともにP<sub>2</sub>O<sub>5</sub>含有量は表層試料の方が底層試料よりも高いものがある。また、2014年~2016年の平均値では、宍道湖の試料の方が高く宍道湖内での生物生産量が大きい可能性を示す。

## 謝 辞

国土交通省出雲河川事務所には受託研究「中海宍道湖の湖水の貧酸素改善に関する研究」の事業執行についてご理解とご協力をいただいた。また、代表者の清家 泰特任教授には研究面で世話になった。エスチュアリー研究センターの研究者とは日頃から議論をいただいている。宍道湖・中海湖水のSSの捕集は地球資源環境学領域の学生(坂矢愛美, 坂本 京, 丸山真梨子, 坂田修啓), および大学院生(林 優子)に協力してもらった。最後にLaguna特集号を企画いただいた齋藤文紀編集委員長および編集委員・査読者に感謝します。

## 引 用 文 献

Ahmed, F., Bibi, M.H., Seto, K., Ishiga, H., Fukushima, T. and Roser, B. P. (2010) Abundances, distribution, and sources of trace metals in Nakaumi-Honjo coastal lagoon sediments, Japan. *Environmental Monitoring and Assessment*, 167: 473-491.

Ahmed, F., Bibi, M.H., Fukushima, T., Seto, K. and Ishiga, H. (2011) Recent sedimentary environment of coastal lagoon in southwestern Japan: evidence from major and trace elements. *Environmental Monitoring and Assessment*, 173: 167-180.

相崎守弘(2003) 貧酸素水塊解消のための中海水質シミュレーション. *Laguna (汽水域研究)*, 10: 87-99.

石賀裕明・佐野絵里香(2015) 潮汐変動と浮遊物質量の関係およびアマモの地球化学的検討からみた瀬戸内海笠岡湾干潟の環境評価. *島根大地球資源環境学研究報告* 33:39-47.

石賀裕明・坂矢愛美・坂本 京・畑中祐香・岩永あかり(2015) 三重県伊勢・松坂地域における干潟のアマモ場のバイオマスとしての物質循環の地球化学的検討. *島根大地球資源環境学研究報告*, 33: 49-58.

Ishiga, H., Ahmed, F. and Seto, K. (2018) Geochemical compositions of sediment core sample from brackish Lake Shinji, southwest Japan. *Geoscience Report of Shimane University*, 36: 39-41.

近藤 邦男・清家 泰・橋谷 博(1994) 汽水湖中海における栄養塩類および植物プランクトンの鉛直分布を支配する塩分躍層の役割. *Japanese Journal of Limnology*, 55: 47-60.

三梨 昂・徳岡隆夫(編)(1988) 中海・宍道湖 地形・底質・自然史アトラス, 島根大学山陰地域研究総合センター, 115 pp.

森脇晋平・大北晋也(2003) 中海に出現する貧酸素水塊の海況学的特徴と海洋構造. *LAGUNA (汽水域研究)*, 10: 7-34.

日本分析化学会編(2004) 分析化学データブック, 改訂5版. 220 pp.

小笠原正継(1987) Rh管球を用いた蛍光X線分析による岩石中の微量成分の定量. *地質調査所月報*, 38: 57-68.

三瓶良和・松本英二・徳岡隆夫・井上大栄(1996) 中海における過去8,000年間の有機炭素埋積速度—Carbon Sinkとしての汽水域堆積物—, *第四紀研究*, 35: 113-124.

清家 泰・近藤邦男・奥村 稔・藤永 薫・高安克己(2004) 中海・宍道湖の水質特性とその変化. 国際セミナー「汽水環境の修復と保全に向けて」講演要旨集, 汽水環境国際セミナー実行委員会, 16-22.

瀬戸浩二(2017) 中海宍道湖の湖水の貧酸素改善に関する研究. II. 広域調査による水質・底質の分布調査. 平成28年度国土交通省出雲河川事務所受託研究報告書, 12-24.

武邊勝道・大屋 誠・三村耕一・杉谷健一郎・山本鋼志・亀谷 均・高田龍一・吉田英一(2006) 中海安来港内の有機物に富む堆積物(ヘドロ)とその間隙水の化学組成. *名古屋大学博物館報告*, 22: 19-29.

徳岡隆夫・大西郁夫・三瓶良和・瀬戸浩二・田村嘉之・高安克己・安問恵・土屋洋一・松田滋夫・井内芙

郎・西村清和 (1994) 音波探査による中海・穴道湖の塩分躍層の検討とその意義. *Laguna*(汽水域研究), 1: 11-26.

徳岡隆夫・三瓶良和・板坂尚教・亀井健史 (2001) 中海における塩分躍層の動態についての新知見—1996年度の湖底設置型音波探査装置による観測データから—. *Laguna* (汽水域研究), 8: 57-66.

山室真澄・神谷 宏・石飛 裕 (2011) 汽水湖沼である穴道湖における成層に伴う貧酸素化とCOD (Mn) との関係. *水環境学会誌*, 34: 57-64.