

中海南東部の窪地と中海中央部における セディメントトラップ堆積物の堆積量と起源

三瓶良和^{1,2*}・香月興太²・河野 大樹³

Flux and origin of sediments in Lake Nakaumi, southwest Japan, sediment-trap studies of the lake center and dredged depressions

Yoshikazu Sampei^{1,2*}, Kota Katsuki² and Daiki Kono³

Abstract: Sediment trap experiments were performed from winter 2016 to winter 2017 at the dredged depressions 'Shiodegaoka-oki' and 'Hosoi-oki', southeastern Lake Nakaumi, and in central Lake Nakaumi, southwest Japan. The apparent sedimentation rate, organic matter content, diatom assemblages, and origin of the sediments were investigated. The apparent sedimentation rates in dredged depressions were abnormally high, up to 43 mm/y (average: 23.9 mm/y), based on the sediment trap samples. On the other hand, the apparent sedimentation rates in central Nakaumi were low, about 0.5-4.8 mm/y, and consistent with the ²¹⁰Pb sedimentation rate of 2-4 mm/y reported by Kanai et al. (2002). As a result, the abnormally high sedimentation at the dredged depression could be caused by reworking of low density sapropel mud from nearby sediments, lofted by wave action and bottom water flow. This remobilization of sapropel by bottom water currents can be seen at the lake water surface, and reworking is stronger in the winter season than in the summer. If this reworking of bottom sapropel muds occurs across a wide area of the lake, a rapid decrease in dissolved oxygen in lake water could result with a negative impact on the lake environment. The sediment trap samples showed uniform C/N ratios, about 8-8.5, from lower part to upper part of the water column, suggesting that the origin of organic matter in the trapped

¹ 島根大学大学院自然科学研究科・Graduate School of Natural Science and Technology, Shimane University, 1060 Nishikawatsucho, Matsue 690-8504, Japan.

² 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.

³ 島根大学総合理工学部地球資源環境学科(現 地球科学科)・Interdisciplinary Faculty of Science and Engineering, Shimane University, 1060 Nishikawatsucho, Matsue 690-8504, Japan.

* Corresponding Author

samples are phytoplankton and algae. During the summer season, the large proportion of diatoms in the plankton/algae assemblages could originate in seawater inflow from the Sakai-strait. However, during winter season, large numbers of diatoms with Lake Shinji origins are likely sourced in remobilized bottom sapropel mud due to strengthened wave energy and bottom water flows. These reworked diatom assemblages were characterized by estuarine species with a significant number classified as brackish water/freshwater species. In summer, the abundance of diatoms in the sediment trap samples was about half of that during winter season.

Key words: sediment-trap, flux, dredged depression, organic carbon, sapropel, reworking, diatom

はじめに

島根県～鳥取県に位置する中海の南東部においては、1960年代に多量の湖底堆積物が干拓地造成等のために採取され、その結果、浚渫窪地が形成された。中海南東部の米子空港沖から米子湾奥には、その大小複数の浚渫窪地が弓ヶ浜砂州に沿うように広く分布している(図1)。それらの総面積は約4.4 km²におよび(徳岡, 2011)、中海の窪地全体面積(約8 km², 中海の面積の約1割: 徳岡, 2011)の半分強を占める。中海の窪地は長大なものも小さく独立しているものがあるが、特に後者では湖水が停滞しやすいため貧酸素化が起りやすく、黒色有機質腐泥が溜まりやすいので周辺水環境への影響が指摘されている(徳岡, 1993; 木戸ほか, 2014)。この黒色有機質腐泥がいわゆる‘ヘドロ’である。‘ヘドロ’は学術用語ではなく社会的造語であり本来はサプロペル(sapropel)と呼ばれるべきであるが(三瓶, 2001)‘ヘドロ’という言葉の日本での社会的認知度は高いので、ここでは‘ヘドロ’と呼称することにする。

窪地では多量の‘ヘドロ’質堆積物が存在し、それらの酸化によって溶存酸素は消費され、夏季には硫酸還元菌の活性が高まって硫化水素が多く発生するために還元環境となることが多い。中海では、‘ヘドロ’質堆積物のTOC(Total Organic Carbon)濃度が3%程度を超えると湖底から硫化水素が溶出することがSakai et al. (2013)によって指摘されている。米子空港沖から米子湾に分布する窪地全体の約1/2の地域ではTOC濃度は3%を超え、同地域の原地形のTOC濃度3%を超えの地域面積(同地域原地形の約1/3の地域)を上回っている(徳岡, 2011)。その結果、窪地を中心に硫化水素の発生の範囲が拡大している(相崎・木戸, 2010; 清家, 2010)。このような硫化水素の発生しやすい窪地の底質および水質環境を魚介類が棲息しやすい環境へと改善させるため、孤立した窪地

である細井沖窪地と錦海沖窪地において自然再生センターは2013年2月にハイビーズを用いた覆砂を試験的に行い(木戸ほか, 2014)、2015年3月にハイビーズ・ハイロックによる覆砂を細井沖窪地で再度行った。しかし、その後、窪地内ではすぐに‘ヘドロ’質堆積物が周辺原地形の10倍以上の堆積速度で積もっていることが推察された。したがって、中海において、その窪地に溜まりやすい‘ヘドロ’質堆積物の起源を明らかにする必要があるが生じている。本研究では、窪地とその対象地にセディメントトラップを設置することで、‘ヘドロ’質堆積物の起源とその特徴を明らかにした。

研究対象地域と分析方法

セディメントトラップの設置深度

中海の細井沖窪地(図1)は、水深約7mの窪地とその周辺の水深約3~4mの原地形からなっていて、‘ヘドロ’質堆積物が窪地内に堆積している。その水中を沈降する‘新生堆積物’を採取するため、自作型のセディメントトラップ(著者らの研究室が作成したセディメントトラップ:以降、島根大学YS型セディメントトラップと呼ぶ:図1写真)を用いた。セディメントトラップ装置は海洋では大型で市販のものが用いられているが(例えば、角皆, 2011)、湖沼を対象とした小型軽量で扱いやすいものは普及しておらず自作される場合が多い。この島根大学YS型セディメントトラップの特徴は、採取面積ができるだけ大きく取れること、試料の酸化分解が押さえられること、軽量で交換が容易なことである。トラップ最上部の直径は16cm(採取面積201 cm²)、全長は60cmであり(図1)、先端部に向けて長細くなる形状が採用された。トラップ下部の交換はワンタッチの押し込み式で簡単に行うことができる。このセディメントトラップを細井沖窪地では湖底から1m(水深6m)、2m(水深5m)、4m(水深3m)、6m(水深1m)のところにおくように4

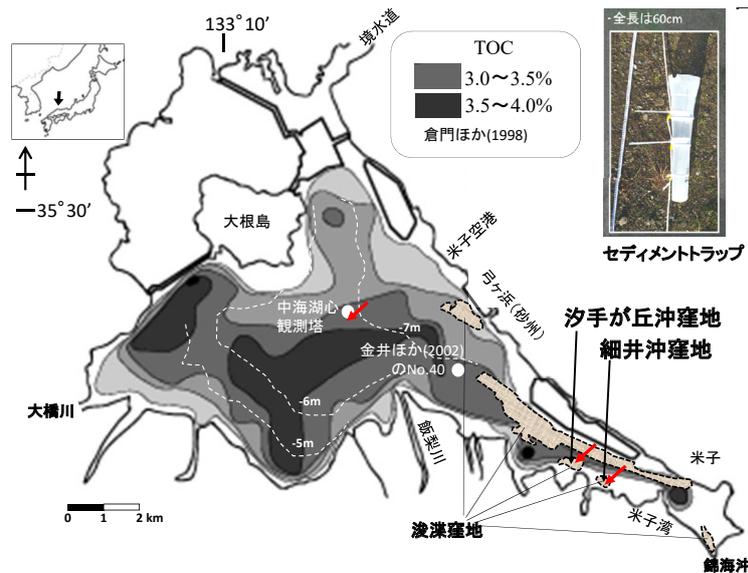


図1 セディメントトラップの設置位置，島根大学 YS 型トラップ写真，中海南東部の窪地の分布および倉門ほか（1998）による中海表層 1cm 堆積物の TOC 濃度分布（倉門ほか，1988 に加筆）。

Fig. 1 Locations of sediment traps, picture of Shimane YS type sediment trap, distribution of the dredged depressions in Lake Nakaumi, and contour map of TOC content of the top 1cm of sediment in Lake Nakaumi (modified after Kurakado et al., 1988).

セットをロープに固定した。このロープには水深 0.5 m のところに約 1.5 リットルの中立浮をつけて水中で直立するようにし，直下には 4 kg の鉄アレイ重りを設置した。底の重りからは横に約 10 m のロープを伸ばして 1 kg の鉄アレイ重りを沈め，そこからロープを直立させて台船にくくりつけた。汐手が丘沖窪地では水質測定筏に隣接させ，湖底から 2 m（水深 13 m），6 m（水深 9 m），10 m（水深 5 m）でロープに付け 6～8 kg のシンカーで固定した。この島根大学 YS 型セディメントトラップは約一ヶ月単位の採取に用い，一方，三ヶ月程度の長期にわたるものには耐久性の高い環境システム（株）型を用いた。環境システム（株）型のセディメントトラップは，直径 10 cm（採取面積 78.5 cm²），全長 120 cm の塩化ビニル製パイプであり，約 200kg のシンカーで固定された。汐手が丘沖窪地および中海湖心の設置回収については環境システム（株）に委託した。中海湖心は，許可を得て国土交通省観測所とし，近接させて湖底から 2 m（水深 4.5 m），4 m（水深 2.5 m），6 m（水深 0.5 m）でロープに付け 6～8 kg のシンカーで固定した。

設置位置と設置期間

設置位置は，細井沖窪地では中央部の水質測定用台船の南東約 20 m（図 1: N35.433933°, E133.28215°, 水深 7.0 m）とした。汐手が丘沖窪地では安来港沖東側（図 1: N35.436228°, E133.273567°, 水深 15.0 m）に設置した。対照地は中海湖心とし，国土交通省中海観測所（N35.474471°, E133.203740°, 水深 6.5 m）に設置した。

設置期間は全期間では 2016/12/25～2018/3/5 である。細井沖窪地，汐手が丘窪地および中海湖心のそれぞれの設置期間は表 1 および表 2 に示した。細井沖窪地では 2016/12/25～2017/1/21 の 28 日間，汐手が丘沖では長期は 2 回（2017 9/2-2018 1/29: 150 日間，2018 1/29-3/5: 35 日間），短期は 4 回（2017 9/2-9/16: 14 日間，2017 11/28-12/22: 24 日間，2018 1/29-2/19: 22 日間，2017 2/19-3/5: 14 日間）それぞれ行った。中海湖心国土交通省中海観測所では 2 回（2017 9/2-9/16: 14 日間，2017 11/28-12/22: 24 日間）実施した。

試料処理と CNS 元素分析・GC-MS 分析

採取されたセディメントトラップ試料は，島根大学総合理工学部において約 20 cm×30 cm のトレイに薄く

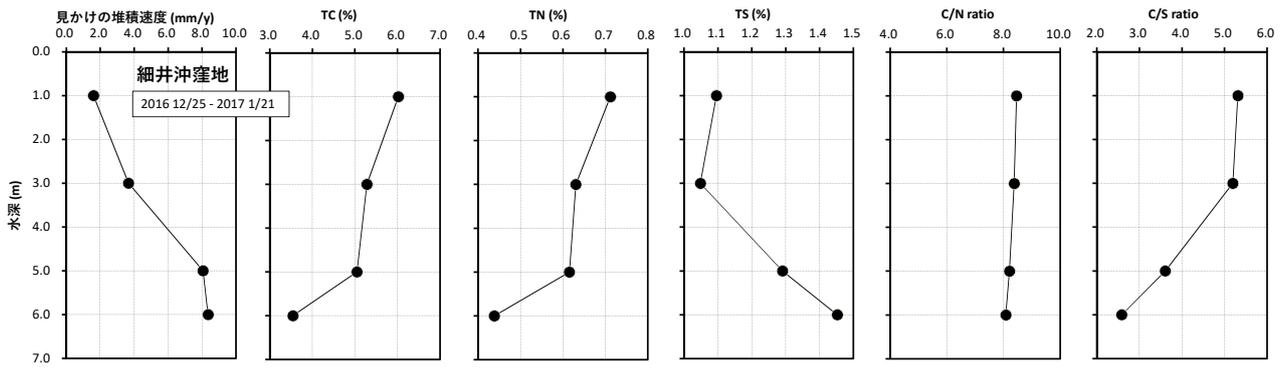


図2 細井沖窪地セディメントトラップから推算された見かけの堆積速度と CNS 元素濃度の鉛直分布。

Fig. 2 Apparent sedimentation rates and vertical distribution of carbon, nitrogen and sulfur content in sediments trapped in the Hosoi-oki dredged depression.

引き伸ばして、それぞれドラフト内で常温下2日間の送風乾燥を行い、その後、70℃の乾燥機で2時間乾燥し含水率を測定した。試料の約3分の1はメノウ乳鉢でシルトサイズ以下に粉末化し、CNS元素分析とGC-MS分析に供した。残りは珪藻群集分析(Katsuki et al., 2008)に用いた。

CNS元素分析は、粉末試料から約10mgを分取してAgカップに入れ、1mol/l HClを滴下しドラフト内で105℃のホットプレート上において1時間の乾燥を行った後、Snカップに包んで測定した。なお、今回、細井沖試料については塩酸処理を行わなかったためTCと表記した(表1)。汐手が丘沖と中海湖心の試料については全て塩酸処理を行った。

GC-MS分析については、粉末化した試料から約1gを分取してビーカーに入れ、ジクロロメタン+メタノール=9+1(体積比)の混合溶液50mLを加え、蓋をつけて超音波によって45分間の抽出を行った。抽出物は分画を行わずに乾固後にヘキサンで抽出し全量を100μlにしてShimadzu-QP2010を用いてGC-MS分析を行った。キャピラリーカラムは30m長のDB5msを用い、昇温は50℃で5分保持後、8℃/分の条件で300℃まで昇温し、その後20分保持した。

珪藻分析については、珪藻解析用の試料として各試料から少量(約50mg)の試料を秤量した。試料は100mlビーカーを用いて過酸化水素を加えて1時間煮沸し、有機物を取り除いたのち、界面活性剤(ピロリン酸ナトリウム)を加えて、殻表面の汚れの除去と分散を行った。その後、試料に蒸留水を加えた後試料が沈殿するのを待ち、上澄み液を捨てる工程を3度繰り返した。ビーカー内の試料は攪拌させたのちマ

イクロピペットを用いて、カバーガラス上に適量添加し、マウントメディア(和光製薬製)を用いてスライドガラスに封入して、観察用スライドを作成した。観察スライドは、光学顕微鏡を用いて1000倍及び2000倍で観察し、珪藻殻の計測を行った。

結果と考察

堆積速度

細井沖窪地の冬季2016/12/25～2017/1/21(28日間)のセディメントトラップ試料は、乾燥重量では水深1mで2.72g、水深3mで6.21g、水深5mで13.65g、水深6mで14.16gであり(表1)、これを1cm²あたりの年間値に換算すると水深1mで0.18g/cm²/y、水深3mで0.40g/cm²/y、水深5mで0.89g/cm²/y、水深6mで0.92g/cm²/yとなる(表1)。さらに‘ヘドロ’の湖底表層での含水比重を1.14(含水率90%、乾燥固形物の比重を2.45とした。乾燥固形物の比重は、無機鉱物粒子の比重を2.6、有機物の比重を1.5(仲谷・横井, 1974)とし、TOC濃度を5%、有機物の組成式をCH₂Oとして2.45を得、これらを用いて含水比重を計算した)と仮定すると、見かけの年間堆積速度への換算値は水深1mで1.6mm/y、水深3mで3.7mm/y、水深5mで8.1mm/y、水深6mで8.4mm/yとなる(表1)。金井ほか(2002)は本地点に最も近いNo.51地点の²¹⁰Pbによる堆積速度を1.0mm/y(0.04g/cm²/y)と報告しているの、圧密の影響を考慮してもセディメントトラップ試料下層では²¹⁰Pbによる堆積速度の数倍の堆積速度となる。

一方、中海湖心では0.5～4.8mm/y程度(短期下

表 1 細井沖窪地セディメントトラップの水深, 試料重量, 年間堆積重推算量, 全有機炭素(TOC) 濃度, 全窒素(TN) 濃度, 全イオウ (TS) 濃度, C/N 比および C/S 比 (設置期間 2016 年 12 月 25 日 -2017 年 1 月 21 日 (28 日間)).

Table 1 Water depth, sample weight, annual trap weight estimated based on the sediment trap samples, TOC-TN-TS contents, C/N ratio and C/S ratio in the sediment trap samples from Hosoi-oki dredged depression (period: 2016/12/25-2017/1/21, 28days).

	設置日	回収日	日数	トラップ面積 (cm ²)	設置深度	乾燥重量(g)	含水率(%)	設置期間の堆積量 (g/cm ²)	年間換算の堆積量 (g/cm ² /y)	比重1.14と仮定したときの堆積速度 (mm/y)
[細井沖 (N35° 26.036', E133° 16.929')] 水深7.0m										
凹地	2016/12/25	2017/1/21	27	200.96	上層(湖底から6m, 水深1.0m)	2.72	63.9	0.014	0.183	1.61
					中上層(湖底から4m, 水深3.0m)	6.21	77.8	0.031	0.418	3.66
					中下層(湖底から2m, 水深5.0m)	13.65	95.5	0.068	0.918	8.05
					下層(湖底から1m, 水深6.0m)	14.16	92.5	0.070	0.953	8.36

	設置日	回収日	日数	トラップ面積 (cm ²)	設置深度	TN(%)	TC (%)	TS (%)	C/N ratio	C/S ratio
[細井沖 (N35° 26.036', E133° 16.929')] 水深7.0m										
凹地	2016/12/25	2017/1/21	27	200.96	上層(湖底から6m, 水深1.0m)	0.71	6.02	1.10	8.46	5.31
					中上層(湖底から4m, 水深3.0m)	0.63	5.28	1.05	8.38	5.19
					中下層(湖底から2m, 水深5.0m)	0.62	5.05	1.29	8.21	3.61
					下層(湖底から1m, 水深6.0m)	0.44	3.54	1.45	8.08	2.58

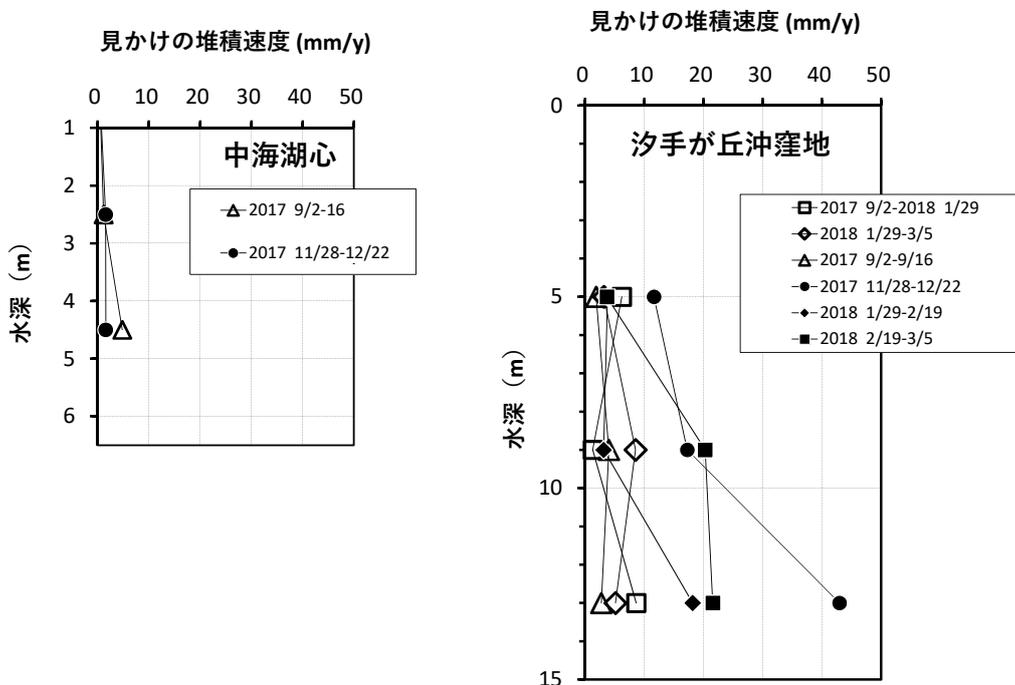


図 3 セディメントトラップから推算された中海湖心と汐手が丘沖窪地の各深度における見かけの堆積速度.

Fig. 3 Apparent sedimentation rates estimated based on sediment trap data from central Lake Nakaumi and the Shiotegaoka-oki dredged depression.

表 2 中海湖心と汐手が丘沖窪地セディメントトラップの水深、試料重量、年間堆積重推算量。

Table 2 Water depth, sample weight, and annual trap weight estimated based on the sediment trap samples from central Lake Nakaumi and Shiotegaoka-oki dredged depression.

短期型トラップ

	設置日	回収日	日数	トラップ面積 (cm ²)	設置深度	乾燥重量 (g)	含水率 (%)	設置期間の堆積量 (g/cm ²)	堆積量の年間換算値 (g/cm ² /y)	比重1.14と仮定したときの堆積速度 (mm/y)
[中海湖心観測塔 (N35.474471, E133.203740)] 水深6.5m										
中海湖心	2017/9/2	2017/9/16	14	200.96	上層(湖底から6m, 水深0.5m)	0.41	97.7	0.002	0.053	0.47
					中層(湖底から4m, 水深2.5m)	1.02	96.7	0.005	0.132	1.2
					下層(湖底から2m, 水深4.5m)	4.22	95.8	0.021	0.547	4.8
中海湖心	2017/11/28	2017/12/22	24	200.96	上層(湖底から6m, 水深0.5m)	0.72	96.5	0.004	0.054	0.48
					中層(湖底から4m, 水深2.5m)	2.33	96.5	0.012	0.176	1.5
					下層(湖底から2m, 水深4.5m)	2.4	94.3	0.012	0.182	1.6
[汐手が丘沖 (N35.436228, E133.273567)] 水深15.0m										
凹地	2017/9/2	2017/9/16	14	200.96	上層(湖底から10m, 水深5m)	1.65	95.5	0.008	0.214	1.9
					中層(湖底から6m, 水深9m)	3.54	95.4	0.018	0.459	4.0
					下層(湖底から2m, 水深13m)	2.42	95.2	0.012	0.314	2.8
凹地	2017/11/28	2017/12/22	24	200.96	上層(湖底から10m, 水深5m)	17.55	91.2	0.087	1.328	11.7
					中層(湖底から6m, 水深9m)	26.01	88.4	0.129	1.968	17.3
					下層(湖底から2m, 水深13m)	64.71	85.9	0.322	4.897	43.0
凹地	2018/1/29	2018/2/19	22	200.96	上層(湖底から10m, 水深5m)	5.24	91.6	0.026	0.433	3.8
					中層(湖底から6m, 水深9m)	4.33	90.5	0.022	0.357	3.1
					下層(湖底から2m, 水深13m)	25.08	86.8	0.125	2.071	18.2
凹地	2018/2/19	2018/3/5	14	200.96	上層(湖底から10m, 水深5m)	3.25	96.1	0.016	0.422	3.7
					中層(湖底から6m, 水深9m)	17.82	90.4	0.089	2.312	20.3
					下層(湖底から2m, 水深13m)	18.96	89.8	0.094	2.460	21.6

長期型トラップ

	設置日	回収日	日数	トラップ面積 (cm ²)	設置深度	乾燥重量 (g)	含水率 (%)	設置期間の堆積量 (g/cm ²)	堆積量の年間換算値 (g/cm ² /y)	比重1.14と仮定したときの堆積速度 (mm/y)
[汐手が丘沖 (N35.436228, E133.273567)] 水深15.0m										
凹地	2017/9/2	2018/1/29	150	78.5	上層(湖底から10m, 水深5m)	22.84	95.5	0.291	0.708	6.2
					中層(湖底から6m, 水深9m)	4.86	95.4	0.062	0.151	1.3
					下層(湖底から2m, 水深13m)	31.87	95.2	0.406	0.988	8.7
凹地	2018/1/29	2018/3/5	35	78.5	上層(湖底から10m, 水深5m)	2.74	95.5	0.035	0.364	3.2
					中層(湖底から6m, 水深9m)	7.32	95.4	0.093	0.972	8.5
					下層(湖底から2m, 水深13m)	4.41	95.2	0.056	0.586	5.1

層の重み付平均値は 2.8 mm/y) と小さく、汐手が丘沖窪地では 1.3 ~ 43 mm/y (短期下層の重み付平均値は 23.9 mm/y, 長期下層の重み付平均値は 8.0mm/y) と大きい結果を示した (表 2)。中海湖心の ²¹⁰Pb 堆積速度は、三梨・徳岡 (1988) および金井ほか (2002) によれば 2 ~ 4 mm/y (0.04 ~ 0.12 g/cm²/y) であるから、今回の夏季および冬季の二つの期間を年間と仮定して外挿した値は湖心ではほぼ一致する。このことは、中海湖心では‘ヘドロ’質堆積物の巻き上がりの影響は大きくないことを示している。一方、汐手が丘沖窪地の下層平均値 8.0 ~ 24 mm/y の値は、金井ほか (2002) が示した 1mm/y に比べて異常に高い値を示している。またこれらセディメントトラップ試料ではイオウ濃度が

高く、底質起源であることを示唆している。したがってこの地域の‘新生堆積物’はその多くの部分が巻き上がり再堆積性の‘ヘドロ’質堆積物からなっているものと解釈される。さらに、巻き上がりの影響は、夏季よりも冬季で大きいことが示された (表 2 の短期トラップの汐手が丘沖凹地のデータ参照; 図 3)。

以上のことから、中海南東部の安来沖~米子湾の窪地周辺にかけての地域では、水中で沈降する碎屑粒子の多くは、巻き上がった湖底の‘ヘドロ’質堆積物に起源をもつと考えられる。

セディメントトラップ試料の有機炭素濃度とその起源
今回、細井沖試料については塩酸処理を行わなかつ

表 3 汐手が丘沖窪地セディメントトラップの TOC 濃度, TN 濃度, TS 濃度, C/N 比および C/S 比.

Table 3 TOC-TN-TS contents, C/N ratio and C/S ratio in the sediment trap samples from central Lake Nakaumi and Shiotegaoka-oki dredged depression.

短期型トラップ

	設置日	回収日	設置深度	No.	TN (%)	TOC (%)	TS (%)	C/N ratio	C/S ratio
[中海湖心観測塔 (N35.474471, E133.203740)] 水深6.5m									
中海湖心	2017/9/2	2017/9/16	上層(湖底から6m, 水深0.5m)	st1a	0.305	1.562	1.684	5.13	0.93
			中層(湖底から4m, 水深2.5m)	st1b	0.637	3.980	1.370	6.24	2.90
			下層(湖底から2m, 水深4.5m)	st1c	0.308	1.640	1.733	5.33	0.95
中海湖心	2017/11/28	2017/12/22	上層(湖底から6m, 水深0.5m)	st2a	0.360	1.952	1.334	5.42	1.46
			中層(湖底から4m, 水深2.5m)	st2b	0.508	3.580	1.517	7.04	2.36
			下層(湖底から2m, 水深4.5m)	st2c	0.559	3.553	1.436	6.36	2.47
[汐手が丘沖 (N35.436228, E133.273567)] 水深15.0m									
凹地	2017/9/2	2017/9/16	上層(湖底から10m, 水深5m)	st3a	0.492	3.564	1.627	7.24	2.19
			中層(湖底から6m, 水深9m)	st3b	0.407	2.821	1.805	6.93	1.56
			下層(湖底から2m, 水深13m)	st3c	0.507	3.513	1.715	6.93	2.05
凹地	2017/11/28	2017/12/22	上層(湖底から10m, 水深5m)	st4a	0.503	3.754	2.282	7.46	1.64
			中層(湖底から6m, 水深9m)	st4b	0.470	3.646	2.346	7.75	1.55
			下層(湖底から2m, 水深13m)	st4c	0.384	3.159	2.685	8.22	1.18

長期型トラップ

	設置日	回収日	設置深度	No.	TN (%)	TOC (%)	TS (%)	C/N ratio	C/S ratio
[汐手が丘沖 (N35.436228, E133.273567)]									
凹地	2018/1/29	2018/3/5	上層(湖底から10m, 水深5m)	st8a	0.710	5.040	1.952	7.10	2.58
			中層(湖底から6m, 水深9m)	st8b	0.520	4.092	1.996	7.87	2.05
			下層(湖底から2m, 水深13m)	st8c	0.491	3.734	1.617	7.61	2.31

たが石灰質の生物片等は認められず、塩酸を滴下して注視しても微弱な発砲も認められなかったため、炭酸塩炭素は極めて少量と判断して TC を TOC と同等に扱った。細井沖窪地の冬季 2016/12/25 ~ 2017/1/21(28 日間) のセディメントトラップ試料の TC 濃度 (%) は水深 1 m で 6.02 %, 水深 3 m で 5.28 %, 水深 5 m で 5.05 %, 水深 6 m で 3.54 % と、下方ほど低くなる (図 2, 表 1)。水深差 5 m で二倍近い TC 濃度の差は、巻き上がり再堆積泥による希釈効果によるものと解釈される。上層での約 6% の高い値は真の新生堆積物の影響を示している。TN% も同様な深度変化傾向を示しているが、C/N 比は 8-8.5 程度でほぼ一定の値を示すことから、有機物の起源は全て植物プランクトン・藻類 (Bordowskiy, 1965a, b; Ertel et al., 1986; Sampei and Matsumoto, 2001; 嘉藤ほか, 2004) が優勢であることを示唆し、上層から下層までその起源に大きな変化はないことを意味する。TS% は上部で低くなる傾向を示していて、これは底質表層の巻き上がり堆積物中の硫化物が溶存酸素の豊富な上部で酸化された影響と考えられ、C/S 比で見ても下部の約 2 から上部の 6

程度まで増加することは上部ほど酸化的環境になっていたことを示している。セディメントトラップの全期間を合わせた重量堆積速度 (表 1 および表 2) でみれば、例えば汐手が丘沖窪地の短期を総合した 74 日間では下層で 0.553 g/cm²/74day および上層で 0.138 g/cm²/74day と、金井ほか (2002) による年間重量堆積速度の 0.04 g/cm²/y を既に大きく超え、それぞれ約 14 倍および 3.5 倍の値を示している。このことは巻き上がり堆積物の再堆積による影響を直接的に示す証拠となり、水深 1 m の浅いところまで巻き上がりの影響が及ぶことが示された。以上のことから、窪地周辺で巻き上がった堆積物が側方移動によって窪地に供給され、窪地内で側方移動と沈降が生じる効果と底層に沿って窪地の中に運搬される効果が合わさる堆積システムが考えられる。

汐手が丘沖窪地の長期トラップ (2018/1/29~3/5) では、TOC 濃度が最も高いものは冬季の窪地上層の 5.0 % であった (表 3, 図 3)。この値は通常の中海表層堆積物の約 4 % (倉門ほか, 1998: 図 1) よりも高いので、巻き上がり堆積物と真の新生堆積物が合わさった

ものと考えられる。汐手が丘沖窪地の下層は 3.2~3.7 % であり (表 3, 図 3), これらはほとんどが巻き上がり堆積物の値を示す。一方, 中海湖心では逆に夏季 (2017/9/2~9/16) および冬季 (2017/11/28~12/22) の上層は 1.56 ~ 1.95 % とかなり低い。恐らくこの試料はトラップ量が非常に少なかったため, セディメントトラップ容器内に現地で留まっている間に何らかの影響を受けたものと思われるが, 不明な点が多いため現時点での言及は避ける。

巻き上がり堆積物の供給源の収支計算

細井沖窪地と汐手が丘沖窪地の両地域で, 上述のとおり同様に顕著な巻き上がり堆積物の影響が確認された。安来港沖から米子湾にかけては水深が比較的浅く風の影響も受けやすいため, 予想していた以上に巻き上がりが起こりやすい地域であるということが推察される。そのマスバランスの妥当性を検討するため, この巻き上がり堆積物の供給源をすべて周辺の原地形と仮定して, 収支計算を行うと以下のとおりとなった。

今回の窪地周辺対象地域である米子空港沖~米子湾奥までの近隣の原地形地域は, 飯梨川河口と米子空港西部端を結ぶ直線 (飯梨川-米子空港線) よりも米子湾側であり, その総面積を地図上で仮に計算すると 20.5 km² となる。同地域内の全窪地面積は 4.4 km² であるから, 同地域内の窪地を差し引いた原地形の総面積は 16.1 km² となる。よって同地域の原地形面積 / 窪地面積比は 3.7 となり, この地域の窪地ではその約 4 倍弱の周辺地域湖底表層から 'ヘドロ' 質堆積物の供給を受けることができる。巻き上がり堆積物はそのまま原地形にも再堆積するが, 窪地ではそれらをトラップしやすく (寺島ほか, 1991), 巻き上がりの回数が多くなるほど, または風や潮流による移流が強くなるほど, 巻き上がり堆積物は窪地に集積することになる。

本研究地域内で窪地から最も離れている飯梨川-米子空港線の間中点 (安来港沖窪地の北西約 2.5 km) において金井ほか (2002: No.40 地点) が示した ²¹⁰Pb 堆積速度は深度 0-16 cm で 1.7 mm/y および深度 0-31 cm で 3.2 mm/y である。深度 0-16 cm で堆積速度がそれより深よりも小さい理由は, 堆積物表層が巻き上がって窪地に移動した "原地形での見かけ上の低堆積速度化の期間 (1960 年代以降, 金井ほか 2002 が中海コアを採取した 1996 年までの約 40 年弱の期間)" を含むためと考えられ, 不確かさは伴うものの窪地ができる前の安来港沖周辺の堆積速度を 3 ~ 4

mm/y 程度と仮定することは妥当と考えられる。そのように考えれば, その減少した分の巻き上がり堆積物 (16.1 km² の原地形起源のもの) は移動して窪地 (4.4 km²) にトラップされたと解釈すると, 16.1 km² × 2 ~ 3 mm/y 分 (原地形に堆積する 1 mm/y 分を差し引いている) の巻き上がり堆積物は 4.4 km² に積もることになるので, その窪地での堆積速度は単純な比例計算で 7.3 ~ 11.0 mm/y となる。さらに浚渫後の真の Flux は現在も 4 mm/y 程度 (圧密差を考慮すれば実際にはもう少し大きい) と仮定すれば, それに加わると窪地での見かけの総堆積速度は 11.3 ~ 15.0 mm/y となる。この値は, 今回のセディメントトラップによる堆積速度と平均値では矛盾はない。ただし野村ほか (2007) および野村・瀬戸 (2008) の結果も参考にすれば, 窪地内部でも巻き上がりは時折発生し, その規模が大きい場合には逆に原地形にその堆積の影響を及ぼしている可能性もある。底質の 'ヘドロ' 質堆積物が頻繁に巻き上がり, 以上の計算のようにその規模が大きい場合, その影響は透明度を下げるだけではない。'ヘドロ' 質堆積物には硫酸還元過程で生じた硫化水素や反応性に富む一硫化鉄などが含まれているため (Berner, 1984; Sampei et al., 1997) に, 溶存酸素も急速に消費されて湖水の上層部まで貧酸素化が短時間で進行することが推察され, 湖水環境の悪化の主要因の一つになる可能性がある。

炭化水素等組成に基づく有機物の起源推定

セディメントトラップ試料中の有機物の起源を推定するために, 非結合態の溶媒抽出性有機物を検討した。その主なものは, *n* アルカンとステロール類であった (図 4 の●点と a, b および c)。今回の分析は抽出後に分画を行っていないため, ステロール類の一部も一緒に検出されたものと考えられる。珪藻に由来する HBI (Highly Branched Isoprenoid *n*-alkanes: 山本, 1999; 荻原・芦, 2003; Simon et al., 2007) については, それに類似するイソアルカン類と思われるピーク (図 4, UK1 および UK2) を確認したが, HBI としての正確な同定は困難であったのでここでは表記しない。ステロール類で最も多かったのは cholesterol であり, 次いで ergosterol, stigmasterol の順となった (図 4 の TIC の点線四角内と右側の a, b および c)。この分布傾向は, 植物プランクトンのもつ特徴 (Meyers, 1997; 近藤ほか, 1991) と一致する。後述の珪藻分析の結果と併せて考えれば, 植物プランクトン由来の未変質有機物が, 真の新生堆積物および巻き上がり堆積物に多量に含まれていることを示唆している。

中海南東部の窪地と中海中央部におけるセディメントトラップ堆積物の堆積量と起源

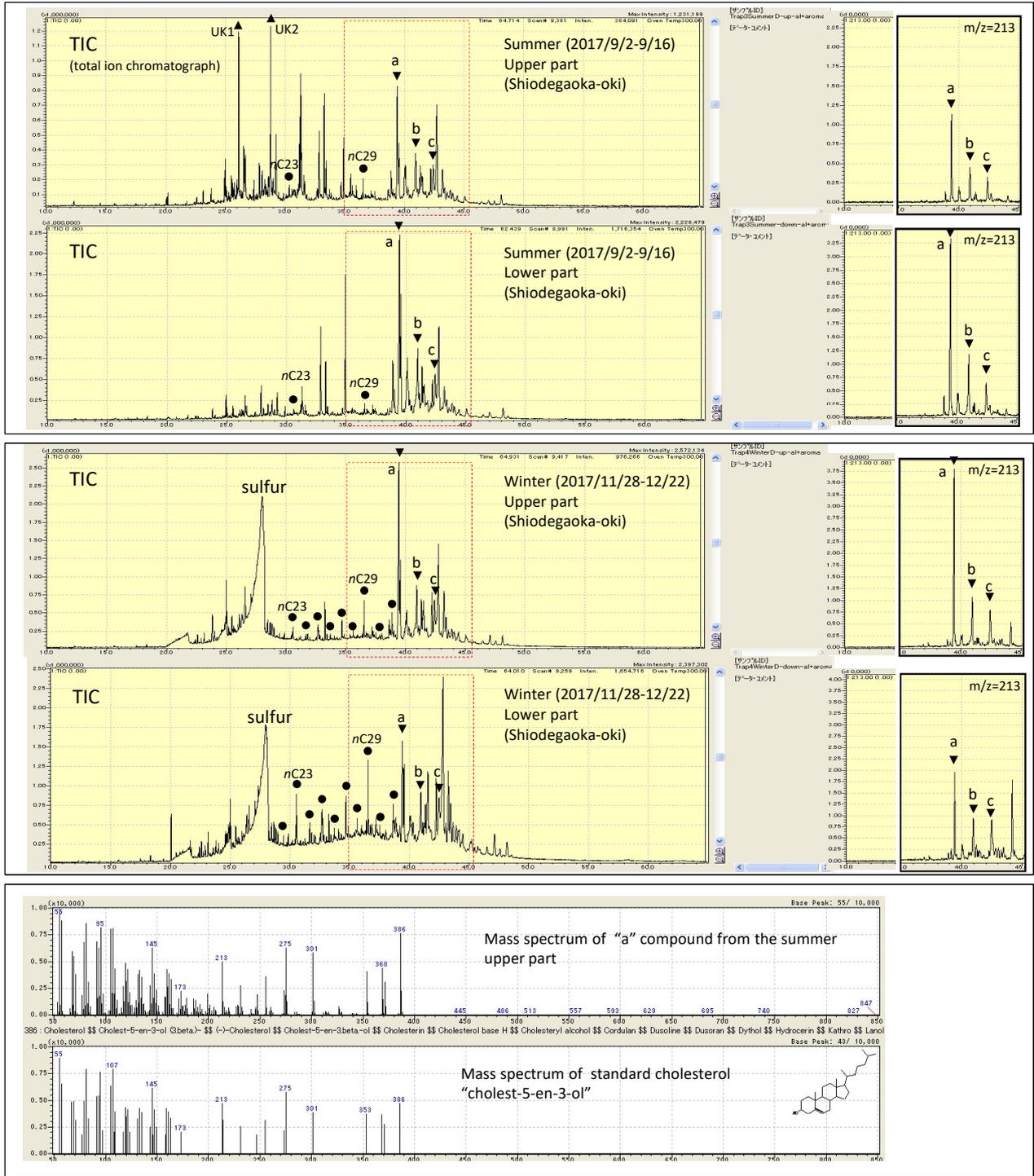


図4 汐手が丘沖窪地セディメントトラップの夏季(2017/9/2-9/16)上層・下層および冬季(2017/11/28-12/22)上層・下層の未分画抽出性有機物GC-MS分析TICとその $m/z=213$ クロマトグラムおよび化合物aのマススペクトラム。
Fig. 4 TIC and $m/z=213$ chromatograms of GC-MS analysis on extracted organic matter without fractionation, and mass spectrum of the "a" compounds in the upper and lower sediment trap samples from Shiotegaoka-oki dredged depression during summer season (2017/9/2-9/16) and winter season (2017/11/28-12/22)
 UK1 and 2: unknown compound (iso-alkanes), nC₂₉: nC₂₉-alkane (●: n-alkanes), sulfur: elemental sulfur, a: cholesterol (M=386), b: ergosterol (M=400), c: stigmaterol (M=414).

有機溶媒抽出性の元素態イオウ(図4のTICのsulfurピーク)は、夏季(2017/9/2-9/16)には検出されていないが冬季(2017/11/28-12/22)では上層・下層ともに明瞭に検出されている。元素態イオウは硫化物が酸化されるときに生成され、硫黄コロイドになること(例えば、三浦ほか, 2009)を考慮すれば、冬季には巻き上がりの影響が上層にまで顕著に及ぶことを示している。上述したように堆積速度も冬季で大きくなっており、これと調和的である。なお、冬季では泥質分に含まれる植物プランクトン由来の nC_{20} 以下のアルカンは図4では明瞭に見えておらず nC_{23} 以上の陸源有機物由来のうち特に nC_{29} アルカン(Meyers, 1997)がピークとなっているが、これがそのまま有機物総量として陸源有機物が相対的に多いことを示すわけではない。陸源有機物と植物プランクトン有機物では単位炭素あたりの炭化水素量が異なっており、ステロール類組成とその大きなピークが示しているように総有機物量で見れば植物プランクトン有機物の方が多くものと推察される。したがって、植物プランクトン有機物の優勢を示す前述のC/N比の値(8-8.5)と矛盾はしない。

汐手が丘沖窪地の珪藻群集の夏季と冬季の相違

汐手が丘沖窪地のセディメントトラップの下層を対象として、夏季試料(2017/9/2~9/16, 14日間)と冬季試料(2017/11/28~12/22日, 24日間)の珪藻群集の相違を検討した。夏季試料の1日1平方センチメートルあたり全珪藻沈降殻数(Flux:表4)は、42,861個体(valves/cm²/day)であり、冬季試料は1,487,412個体(valves/cm²/day)であった。これは上述の見かけの堆積速度(ここでは主に巻き上がり堆積物の影響の度合い)が冬季試料で大きいことと一致している。夏季試料・冬季試料それぞれにおける上位優占5種は次の通りである(表4, 図5)。夏季試料で最も多いもの(Relative abundance, %:表4)は、*Chaetoceros* spp. resting spore (27.9%)、続いて、*Thalassionema nitzschioides* (23.1%)、*Thalassiosira tenera* (10.9%)、*Neodelphineis pelagica* (8.3%)、*Thalassiosira lineata* (5.2%)の順となった。また、冬季試料では、*Neodelphineis pelagica* (27.1%)、*Chaetoceros* spp. resting spore (12.4%)、*Cyclotella atomus* var. *atomus* (11.5%)、*Cyclotella atomus* var. *gracilis* (11.2%)、*Cyclotella choctawhatcheeana* (4.6%)の順となった。

*Neodelphineis pelagica*と*Chaetoceros* spp. resting sporeは共に優占種としてあらわれるが、残り6種はいずれか一方でしか優占しない。夏季試料に多く見ら

れる*Thalassionema nitzschioides*, *Thalassiosira tenera*, *Thalassiosira lineata*はいずれも沿岸域から内湾にかけて多く見られる種である(ただし、*T. nitzschioides*は外洋域でも栄養が豊富な場所では優占する)。一方、冬季試料に多く見られる種は、小型の*Cyclotella*属の珪藻種であり、*Cyclotella atomus* var. *gracilis*は宍道湖における最優占種、*Cyclotella atomus* var. *atomus*は淡水から低鹹汽水湖で卓越する種、*Cyclotella choctawhatcheeana*は宍道湖から中海にかけて広く生息する広塩性汽水種となっている。これらの優占種以外の群集組成においても、夏季試料では*Bacteriastrium elongatum*, *Thalassiosira subtilis*といった沿岸海洋性の珪藻種が産出しているのに対し、冬季試料は淡水種である*Achnanthes*属や*Amphora*属が良く産出する。上述のように冬季試料の大部分は巻き上がり堆積物の再堆積と考えられるため、この冬季試料は、冬季の真の珪藻生産性を反映しているわけではなく、巻き上がり堆積物を構成する過去の一〜数年間程度の表層腐泥中の平均値を示すものと考えられる。

従って、夏季は境水道側からの海水の流入に伴って流入し増加した群集の影響があることが分かるが、冬季では真の新生堆積物としての珪藻種の特徴は巻き上がり堆積物によって見えなくなっているものと判断される。冬季試料のほとんどが過去数年間程度の表層‘ヘドロ’質堆積物の平均値とすれば、その特徴は、主に宍道湖川からの低塩分の流入に伴って流入し増加した群集が顕著に影響していることである。

なお、冬季試料の珪藻の沈降殻数(珪藻殻の見かけの堆積速度)は夏季の約35倍となっているが、これは前述のとおり冬季の巻き上がり堆積物の影響が強いためである。一方、堆積物1gあたりの珪藻殻数(珪藻殻の濃度)は、夏季で 49.8×10^6 個、冬季で 110.9×10^6 個であり、冬季は夏季よりも2.2倍ほど高い。一般的に海域に生息する珪藻群集の現存量は、内湾・汽水域に生息する珪藻の現存量よりかなり少ないため(例えばKatsuki et al., 2008)、海水の流入量が増加し希釈されたと考えられる夏季は、宍道湖や河川からの流入水の増加によって生産性が増加した時期より珪藻の生産性が低いと考えられる。

ま と め

(1) 堆積速度と沈降粒子の起源

細井沖窪地および汐手が丘窪地のセディメントトラップの結果は、見かけの平均堆積速度が²¹⁰Pb堆積

中海南東部の窪地と中海中央部におけるセディメントトラップ堆積物の堆積量と起源

表 4 汐手が丘沖セディメントトラップ下層の夏季(2017/9/2-9/16) と冬季(2017/11/28-12/22) の珪藻群集分析結果。
Table 4 Result of diatom group analysis in the lower sediment trap samples from Shiotegaoka-oki dredged depression during summer (2017/9/2-9/16) and winter (2017/11/28-12/22) seasons.

Sample name	汐手が丘	汐手が丘	汐手が丘	汐手が丘	汐手が丘	汐手が丘
	沖窪地_夏	沖窪地_冬	沖窪地_夏	沖窪地_冬	沖窪地_夏	沖窪地_冬
	2017 9/2-9/12	2017 11/28-12/22	2017 9/2-9/12	2017 11/28-12/22	2017 9/2-9/12	2017 11/28-12/22
SS weight (g)	2.42	64.71				
Sediment volume (g)	0.0518	0.0594	Relative abundance (%)		Flux (valves / cm ² / day)	
Sectional area (cm ²)	200.96	200.96				
Sampling duration (day)	14	24				
<i>Achnanthes brevipes</i>	1	1	0.437	0.288	187	4286
<i>Achnanthes lanceolata</i>		3	0.000	0.865	0	12859
<i>Achnanthes lanceolata</i> spp. <i>rostrata</i>		1	0.000	0.288	0	4286
<i>Achnanthes sptentrionalis</i> var. <i>subcapitata</i>		1	0.000	0.288	0	4286
<i>Achnanthes</i> spp.		1	0.000	0.288	0	4286
<i>Actinocyclus</i> sp.1	2		0.873	0.000	374	0
<i>Amphora polita</i>		4	0.000	1.153	0	17146
<i>Amphora</i> sp.1		1	0.000	0.288	0	4286
<i>Amphora</i> spp.		4	0.000	1.153	0	17146
<i>Aulacoseira</i> spp.		4	0.000	1.153	0	17146
<i>Bacteriastrium elongatum</i>	5		2.183	0.000	936	0
<i>Chaetoceros</i> spp. resting spore	64	43	27.948	12.392	11978	184319
<i>Cocconeis placentula</i>	5	2	2.183	0.576	936	8573
<i>Cocconeis scutellum</i>	4	3	1.747	0.865	749	12859
<i>Cocconeis speciosa</i>	1	1	0.437	0.288	187	4286
<i>Cocconeis</i> spp.		2	0.000	0.576	0	8573
<i>Cymbella novaezeelandiana</i>	1		0.437	0.000	187	0
<i>Cymbella</i> spp.		1	0.000	0.288	0	4286
<i>Cyclotella atomus</i> var. <i>atomus</i>		40	0.000	11.527	0	171460
<i>Cyclotella atomus</i> var. <i>gracilis</i>		39	0.000	11.239	0	167173
<i>Cyclotella choctawhatcheeana</i>	2	16	0.873	4.611	374	68584
<i>Cyclotella meneghiniana</i>	1	4	0.437	1.153	187	17146
<i>Cyclotella striata</i>		1	0.000	0.288	0	4286
<i>Cyclotella</i> sp.2	1	1	0.437	0.288	187	4286
<i>Fallacia forcipata</i>		1	0.000	0.288	0	4286
<i>Fragilaria pinnata</i>	1		0.437	0.000	187	0
<i>Gomphonema obscurum</i>	2		0.873	0.000	374	0
<i>Gomphonema pervulvum</i>	1	1	0.437	0.288	187	4286
<i>Gomphonema</i> spp.		1	0.000	0.288	0	4286
<i>Melosira lineata</i>		1	0.000	0.288	0	4286
<i>Melosira nummuloides</i>		1	0.000	0.288	0	4286
<i>Navicula cryptotenella</i>		1	0.000	0.288	0	4286
<i>Navicula recens</i>	3		1.310	0.000	561	0
<i>Navicula</i> sp.1		1	0.000	0.288	0	4286
<i>Navicula</i> spp.	2	4	0.873	1.153	374	17146
<i>Neodelphineis pelagica</i>	19	94	8.297	27.089	3556	402930
<i>Nitzschia amphibia</i>		1	0.000	0.288	0	4286
<i>Nitzschia sigma</i>	1		0.437	0.000	187	0
<i>Nitzschia</i> spp.	1	4	0.437	1.153	187	17146
<i>Palaria sulcata</i>		2	0.000	0.576	0	8573
<i>Roicosphenia abbreviata</i>	2		0.873	0.000	374	0
<i>Skeletonema costatum</i>		2	0.000	0.576	0	8573
<i>Tabularia fasciculata</i>		2	0.000	0.576	0	8573
<i>Tabularia</i> spp.		1	0.000	0.288	0	4286
<i>Thalassionema nitzschioides</i>	53	11	23.144	3.170	9920	47151
<i>Thalassiosira allenii</i>	2		0.873	0.000	374	0
<i>Thalassiosira eccentrica</i>	3	1	1.310	0.288	561	4286
<i>Thalassiosira lineata</i>	12	7	5.240	2.017	2246	30005
<i>Thalassiosira pacifica</i>	3		1.310	0.000	561	0
<i>Thalassiosira subtilis</i>	7	1	3.057	0.288	1310	4286
<i>Thalassiosira tenera</i>	25	15	10.917	4.323	4679	64297
<i>Thalassiosira</i> spp.		1	0.000	0.288	0	4286
<i>Tryblionella constricta</i>	1		0.437	0.000	187	0
			0.000	0.000	0	0
Other Centric	1		0.437	0.000	187	0
Pennate 1	3		1.310	0.000	561	0
Other Pennate		21	0.000	6.052	0	90016
Number of counted diatom	229	347				
Total diatom flux (valves / cm ² / day)	42861	1487412				

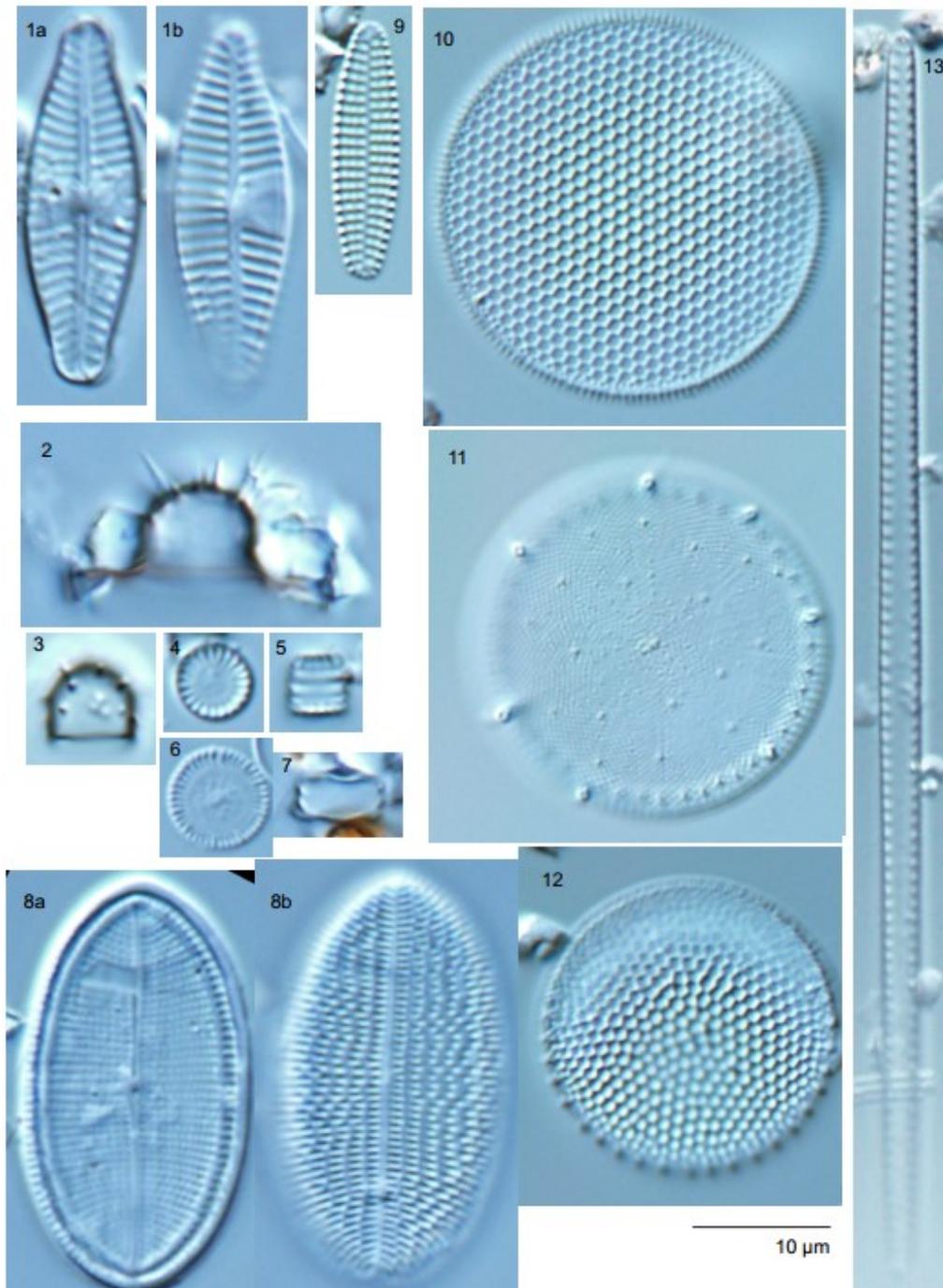


図5 汐手が丘沖窪地セディメントトラップ下層の夏季(2017/9/2-9/16)と冬季(2017/11/28-12/22)の代表的珪藻殻。1. *Achnanthes lanceolata*, 2-3. *Chaetoceros* spp. resting spore, 4-5. *Cyclotella atomus* var. *atomus*, 6-7. *Cyclotella atomus* var. *gracilis*, 8. *Cocconeis placentula*, 9. *Neodelphineis pelagica*, 10. *Thalassiosira lineata*, 11. *Thalassiosira subtilis*, 12. *Thalassiosira tenera*, 13. *Thalassionema nitzschioides*.

Fig. 5 Representative diatoms in the lower sediment trap samples from Shiotegaoka-oki dredged depression during summer season (2017/9/2-9/16) and winter season (2017/11/28-12/22). 1. *Achnanthes lanceolata*, 2-3. *Chaetoceros* spp. resting spore, 4-5. *Cyclotella atomus* var. *atomus*, 6-7. *Cyclotella atomus* var. *gracilis*, 8. *Cocconeis placentula*, 9. *Neodelphineis pelagica*, 10. *Thalassiosira lineata*, 11. *Thalassiosira subtilis*, 12. *Thalassiosira tenera*, 13. *Thalassionema nitzschioides*.

速度 1mm/y の最大 24 倍となり、下方ほど巻き上がり再堆積の影響が大きいことを示した。一方、中海湖心では、巻き上がりの影響は少なかった。これらのことは、中海南東部の安来沖～米子湾の窪地周辺にかけての‘新生堆積物’には多くの巻き上がり‘ヘドロ’質堆積物が起源として関わっていることを示している。

(2) セディメントトラップ試料の有機炭素濃度とその起源
細井沖窪地の冬季セディメントトラップ試料の TC 濃度 (%) は、水深 1 m で 6.02 %, 水深 3 m で 5.28 %, 水深 5 m で 5.05 %, 水深 6 m で 3.54 % と、下方ほど低くなる傾向を示した。TS% は下部で高くなる傾向を示し C/S が下部の約 2 から上部の 6 程度まで増加することは上部ほど巻き上がり堆積物の硫化物イオウが酸化したことを示唆した。C/N 比は 8-8.5 程度ではほぼ一定の値を示すことから、有機物の起源は全て植物プランクトン・藻類が優勢であることを示唆し、上層から下層までその起源に大きな変化はなかった。非結合態の溶媒抽出性有機物中にステロール類が多く認められ、湖水上層の新生堆積物中には分解・変質を免れた植物プランクトン有機物が多く存在するものと考えられる。

(3) 巻き上がり堆積物の供給源の収支計算

中海南東部の窪地周辺の巻き上がり堆積物の供給源をすべて周辺の原地形と仮定して収支計算を行ったところ、窪地における見かけの総堆積速度は 11.3 ~ 15.0 mm/y と算出され、今回のセディメントトラップによる堆積速度見積りに近い値を示した。

(4) 汐手が丘沖窪地の珪藻群集の夏季と冬季の相違

汐手が丘沖窪地において、真の新生堆積物の影響が見える夏季試料では、*Chaetoceros* spp. resting spore や *Thalassionema nitzschioides* などが多く、巻き上がり堆積物の影響が強い冬季試料では、*Neodelphineis pelagica* や *Chaetoceros* spp. resting spore などが多かった。夏季試料は境水道側からの海水の流入に伴って増加した群集の影響があり、冬季試料では巻き上がり堆積物（主に穴道湖等からの低塩分の流入に伴って流入し増加した群集を伴うもの）を示唆した。堆積物 1 g あたりの珪藻殻の濃度は、冬季試料は夏季試料よりも 2.2 倍ほど高かった。

謝 辞

本研究は、国土交通省出雲河川事務所の平成 28 年度～平成 30 年度委託研究（受託者：島根大学）の一部をまとめたものである。国土交通省出雲河川事

務所にはその成果の公表を許可していただいた。中海漁協の三沢船長には平成 28 年度のセディメントトラップ設置回収時の操船をしていただいた。平成 29 年度のセディメントトラップ設置回収は環境システム（株）の鮎川氏と三上氏に行っていただいた。二名の匿名の査読者には大変に有益なコメントを多数いただき、本論文は改善された。以上の方々に、記して、謝意を表します。

引用文献

- 相崎守弘・木戸健一郎 (2010) 中海米子湾の浚渫窪地の水質特性. 平成 19 年度～平成 21 年度科学研究費補助金 [基盤研究 (A)] 研究成果報告書 (研究課題番号 19201016), p. 34–39.
- Berner, R.A. (1984) Sedimentary pyrite formation: An up-date. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 48: 605–615.
- Bordowskij, O.K. (1965a) Source of organic matter in marine basins. *Marine Geology* 3: 5–31.
- Bordowskij, O.K. (1965b) Accumulation of organic matter in bottom sediments. *Marine Geology*, 3: 33–82.
- Ertel, J.R., Hedges, J.I., Devol, A.H., and Richey, J.E. (1986) Dissolved humic substances of the Amazon River system. *Limnology and Oceanography*, 31: 739–754.
- 金井 豊・山室真澄・井内美郎・徳岡隆夫 (2002) 島根・鳥取県中海における堆積速度と堆積環境. *地球化学*, 36: 161–178.
- 嘉藤健二・神門利之・景山明彦・芦矢 亮・三島幸司 神谷 宏・朱 根海・大谷修司・石飛 裕 (2004) 水質の年間変動と植物プランクトンの C:N:P 比から見た中海における赤潮発生. *陸水学雑誌*, 65: 69–82.
- Katsuki, K., Miyamoto, Y., Yamada, K., Takata, H., Yamaguchi, K., Nakayama, D., Coops, H., Kunii, H., Nomura, R., and Khim, B.K. (2008) Eutrophication-induced phase changes of the ecosystem in a Lake Nakaumi, southwestern Japan. *Journal of Paleolimnology*, 40: 1115–1125.
- 木戸健一郎・斉藤 直・魚谷律人・桑原智之・相崎守弘 (2014) 中海浚渫窪地における N・P・S の溶出速度の見積もりと石炭灰造粒物を用いた覆砂の効果. *水環境学会誌*, 37: 71–77.
- 近藤 寛・石渡良志・山本修一・上村 仁 (1991) 現世海洋堆積物中のステロール I—おもなステロールの

- GC/MSによる解析一. 長崎大学教育学部自然科学研究報告, 44: 57-75.
- 倉門由紀子・三瓶良和・高安克己・徳岡隆夫・井内美郎 (1998) 中海および浜名湖表層堆積物の有機炭素・窒素・イオン濃度分布. LAGUNA (汽水域研究), 5: 123-135.
- Meyers, P. A. (1997) Organic geochemical proxies of paleoceanographic, paleolimnologic, and paleoclimatic processes. *Organic Geochemistry*, 27: 213-250.
- 三浦 心・堀田 哲夫・根岸 均・鶴田 泰士 (2009) 都市河川汽水域における青潮の発生機構に関する調査と解析. 水工学論文集, 53: 1453-1458.
- 三梨 昂・徳岡隆夫 (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, 115p.
- 野村 律夫・瀬戸浩二 (2008) 中海湖心部における湖底の水中映像 (その2): 冬季の季節風に対する底層水の動態. LAGUNA (汽水域研究), 15: 57-67.
- 野村 律夫・瀬戸浩二・堀江 譲・高田裕行 (2007) 中海湖心部における湖底の水中映像 (その1): 風速変化に対する底層水の動態. LAGUNA (汽水域研究), 14: 17-24.
- 仲谷紀男・横井 肇 (1974) 土壌有機物の比重 真比重と仮比重. 日本土壌肥料学会誌, 45: 273-278.
- 荻原成騎・芦 寿一郎 (2003) 東海沖竜洋海底谷より採取されたバクテリアマットに被覆される深海堆積物の脂質組成. JAMSTEC 深海研究, 24: 25-36.
- Sakai, S., Nakaya, M., Sampei, Y., Dettman, D.L., and Takayasu, K. (2013) Hydrogen sulfide and organic carbon at the sediment-water interface in coastal brackish Lake Nakaumi, SW Japan. *Environmental Earth Sciences*, 68: 1999-2006.
- 清家 泰 (2010) 高濃度酸素水生成水装置を用いる汽水湖貧酸素水塊の水質改善及び湖底の底質改善 平成19年度～平成21年度科学研究費補助金 [基盤研究 (A)] 研究成果報告書 (研究課題番号19201016), p. 1-4.
- Simon T. B., Guillaume M., Steven J. R., Michel P., Christine M., and Bernard L. (2007) A novel chemical fossil of palaeo sea ice: IP25. *Organic Geochemistry* 38: 16-27.
- 三瓶良和 (2001). 汽水域の底質特性 -“ヘドロ”と湖底環境-. 高安克己編「汽水域の科学」, たたら書房, 米子, pp. 38-47.
- Sampei, Y., and Matsumoto, E. (2001) C/N ratios in a sediment core from Nakaumi lagoon, southwest Japan — usefulness as an organic source indicator —. *Geochemical Journal*, 35: 189-205.
- Sampei, Y., Matsumoto, E., Kamei, T., and Tokuoka, T. (1997) Sulfur and organic carbon relationship in sediments from coastal brackish lakes in the Shimane peninsula district, southwest Japan. *Geochemical Journal*, 31: 245-262.
- 寺島 滋・井内美郎・斎藤文紀・宮田雄一郎・片山 肇・寺島美南子 (1991) 湖沼浚渫域の底質における元素の垂直分布と化学的性質. 地質調査所月報, 42: 387-407.
- 徳岡隆夫 (1993) 汽水湖の“望ましい環境づくり”における地質学の役割—中海・宍道湖を例として—. 地質学論集, 39: 167-172.
- 徳岡隆夫 (2011) B-0804 浚渫地埋め戻し資材としての産業副産物の活用 —住民合意を目指した安全性評価に関する研究—. 環境省環境研究総合推進費 (2008-2010) 報告書, 112p.
- 角皆 静男 (2011) 海洋を介した物質循環と気候変化に関する研究. 地球化学, 45: 45-59.
- 山本正伸 (1999) 秋田県矢島地域新第三系堆積岩の各種結合態バイオマーカーの組成とその起源. 地質調査所月報, 50: 329-359.