

# 中海浚渫窪地に堆積する年縞堆積物が示す 浚渫後の水環境変化

香月興太<sup>1\*</sup>・三瓶良和<sup>2</sup>・瀬戸浩二<sup>1</sup>

## Hydro-environmental change in southern Lake Nakaumi based on annually laminated sediments in a dredged channel

Kota Katsuki<sup>1\*</sup>, Yoshikazu Sampei<sup>2</sup> and Koji Seto<sup>1</sup>

**Abstract:** Dredged channels, trenches, and pits are common in waterways throughout Japan. Lake Nakaumi, located in western Honshu, also has 8 million meter<sup>2</sup> of channels that were dredged after the 1960s for coastal reclamation. Areas normally 3-4 m deep were dredged to depths of 6-15 m during construction. A sediment core, 17N1, was obtained from a dredged area in the southeast end of Lake Nakaumi in order to investigate environmental change after land reclamation and dredging. Core 17N1 is 57 cm in length, and the top 43 cm contains 35 laminated layers. Lithologies were clearly different between the laminated and lower sediments. The laminated layers have high water content (> 80 %) and are high in organic matter derived from plankton. The laminae in core 17N1 are inferred to be annual, meaning that the coring site was dredged in approximately 1982. After that time an anoxic water mass developed in the dredged channel and laminated sediments were preserved due to the absence of bioturbation and high seasonal variation in primary production. Although the total organic carbon and nitrogen contents have continuously increased in core 17N1, diatoms follow a different pattern. The total number of diatom valves increased until 1995, after which they gradually decreased. This pattern suggests that phytoplankton sourced in red-tide

<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, 690-8504, Japan.

<sup>2</sup> 島根大学総合理工学部・Interdisciplinary Faculty of Science and Engineering, Shimane University, 1060 Nishikawatsucho, Matsue 690-8504, Japan.

\* Corresponding Author

events shifted from diatoms to other taxa, perhaps dinoflagellates. In contrast, the C/S ratio has continuously increased in core 17N1, particularly in light laminae layers, suggesting that the anoxic water mass in this deep channel might be gradually dissipating.

**Key words:** Lagoon, annual varve, dredged channel, diatom, CNS

## はじめに

内湾や海跡湖における浅場や水深 10 m 以下の海底・湖底が、埋め立て用土砂採取によって水深が周囲よりも深くなった窪地（以下、浚渫窪地）内では、硫化水素を含む貧酸素水塊が発生し、その湧昇現象によって周囲の水環境や生態系に大きな被害をもたらすことが指摘されている（佐々木, 1997; 和久ほか, 2011）。浚渫窪地は全国の沿岸域で存在が確認されており、修復が求められている（中村, 2010; 斉藤ほか, 2014）。島根県と鳥取県にまたがる大型汽水湖の中海においても浚渫窪地の問題が顕在化しており、自然再生推進法に基づき 2007 年に発足した法定協議会、中海自然再生協議会においても浚渫窪地の復旧は重要な事業と位置付けられ、NPO 法人自然再生センターを主体とし、行政機関や自治体、大学による調査や実証実験が行われている（中海自然再生協議会, 2012）。中海の浚渫窪地では、浚渫窪地の深部（水深 14–16 m）や長く連続した窪地（水深 6–8 m）において水質調査や湖底浮泥の様相（秋葉ほか, 1993）の調査が行われているほか、独立した小型窪地を対象に覆砂実験（木戸ほか, 2014; 桑原ほか, 2016）や高濃度酸素水の導入実験（増木ほか, 2011）など様々な調査・実験が行われている。しかし、その一方で浚渫後窪地内の水質や底質を複数年にわたって継続して観測したデータが存在せず、浚渫窪地内の長期的な環境変化は不明のままである。

湖底や海底には一定条件下で、年縞とよばれる堆積物が形成される。年縞とは「1年に水中で堆積した層、葉理、あるいは葉層の連続体」と定義される堆積層である（福沢, 1995）。年縞はその特性から古環境復元の分野において、水質や動植物プランクトン生産量の経年変動の復元や降水量の変化や災害の発生と湖沼の水環境・生態系変化の関係解明に用いられた研究が行われている（加藤ほか, 1998; Suzuki et al., 2016; Katsuki et al., 2019）。また、年縞は堆積物の年代を決定する上でも重要な役割を果たしており、特に水月湖（福井県）の湖底堆積物の様に長期間にわたって形成された年縞堆積物は炭素 14C 年代の較正に用い

られるなど、編年学への貢献も大きい（Bronk-Ramsey et al., 2012）。湖底に年縞が形成される条件として、1）陸域からの懸濁粒子の供給や水域内の生物生産に強い季節変化があること、2）成層構造の発達により水塊の鉛直混合が起こりにくく、湖底が貧酸素化しているため、生物活動による堆積物の擾乱が起きにくい場所となることが挙げられる（Zolitschka, 2007）。浚渫窪地はその形状から窪地内に貧酸素水塊が存在しやすい為、浚渫窪地へ季節的な堆積物流入があるか、表層水に季節的な生物生産変動がある水域では、浚渫窪地内に沈殿する新生堆積物が年縞を形成することが期待できる。そこで本研究では、中海南東部の米子湾にある浚渫窪地湖底の堆積物を採取し（図 1）、年縞堆積物の有無を確認したのち、年縞堆積物の層序、堆積物の化学組成、堆積物中の珪藻遺骸群集の変動を確認し、浚渫後の浚渫窪地内の水環境変動とその要因について明らかにした。

## 調査地域

調査水域である中海は、島根・鳥取両県に跨る斐伊川水系の下流域に位置している。上流側は連結河川である大橋川を通じて低鹹汽水湖である宍道湖と繋がっており、下流側は境水道を通じて日本海と繋がっている（図 1）。中海は日本第 5 位の大きさがある汽水湖であり（86.8 km<sup>2</sup>）、上流域の宍道湖と合わせて日本最大の汽水湖を形成している。中海は下層に海水起源の高塩分水、表層に河川・宍道湖起源の淡水・低塩分水が入り込む為、平均水深 5.4 m の比較的浅い湖ではあるが年間を通して塩分躍層が形成されており、夏～秋にかけては水温躍層も発達する。中海表層の塩分は 10–20 PSU、下層の塩分はおおよそ 30 PSU である（徳岡ほか, 2001; Ahmed et al., 2010）。

中海は人為的な環境改変の激しい水域である。1963 年から始まった国営中海干拓・淡水化事業に前後して多くの干拓事業が行われ、中海南西部および東部・弓ヶ浜半島沿いや南東部・米子湾の浅場は陸地化し、弓ヶ浜半島や米子湾の沖合の深く掘られた浚渫窪地は中海の面積の 1 割（約 8 km<sup>2</sup>）に及び、特に 1975

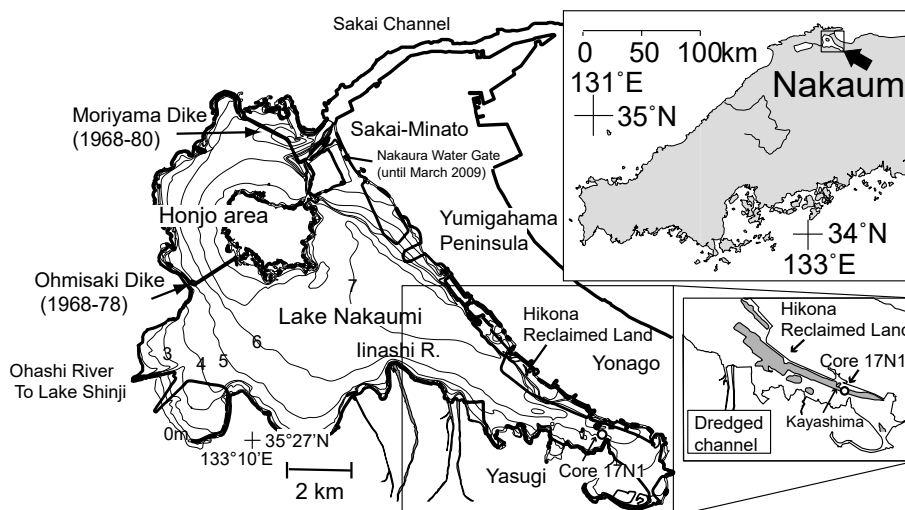


図1 1960年当時の中海の湖底地形(細線)と現在の湖岸線(太線)。右下は米子湾一帯における浚渫窪地(影)。白丸は採取試料17N1コア。

Fig. 1 Bathymetry of Lake Nakaumi in 1960 (contour lines), and the present shoreline (bold line). Shaded areas in inset are dredged areas in Yonago Bay. Core 17N1 location is shown by the open circle.

年以降に干拓された彦名干拓地前の窪地は、ポンプ船を使った浚渫で比較的均一な深さに掘られ、幅約300–600 m、長さ約7 kmに渡り連続している。底泥の除去を目的とした中海浄化浚渫事業として、1979年に彦名底泥処理場の造りが着手され、1985年から米子湾湾奥部で浚渫工事が開始されている。彦名処理場への浚渫底泥の埋め立てでは、1995年までに40万 $m^3$ を、その後安来市の中海処理場への埋め立てでは、1998年までに60万 $m^3$ をそれぞれ浚渫され、米子湾奥部において計100万 $m^3$ を浚渫してこの事業は終了した(中海自然再生協議会, 2010)。これらの浚渫の結果、中海では1960年以前は総面積の約20%を占めた水深3 m以浅の浅場の大部分が失われている。

また、浚渫・干拓事業以外の人為的な環境改変として、水門や堤防の建設とそれらの除去や一部開削が1960年以降中海の各地で行われている。1974年には弓ヶ浜半島境港と江島の中に中浦水門(幅414 m)が竣工されたほか、1968年から1981年にかけて、中海の北西部にあたる本庄工区を囲む堤防(森山堤防・大御崎堤防・西部承水路堤など)が建設されている。その結果、日本海との水交換が大きく制限され、中海や本庄工区の水質は悪化した(石飛ほか, 2000; Katsuki et al., 2008)。一方で、水質悪化問題に加えて国の減反政策の影響を受け、堤防完成後10年を待たずに1988年には干拓・淡水化事業の一時凍結

が、2002年には正式な事業中止が決定している。この事業中止を受けて、中浦水門も2005年に撤去工事が開始され、2009年3月に撤去が完了している。また、2007年には本庄工区西部の西部承水路堤が撤去、2009年には森山堤防の一部開削(開削幅60 m)が行われている。

## 資料と方法

2017年10月26日に中海南東部米子湾の萱島近辺、北緯35度26.084分、東経133度17.915分地点の浚渫窪地内(水深8.7 m)において、佐竹式重力コア採泥器を用いて長さ57 cmの堆積物(Core 17N1)を採取した(図1)。船上から採泥器を湖底上2 mまで降ろし、そこから重力落下させたのち、1.8 kgの専用重りを15 cmほど持ち上げて打ち込み、これを50回ほど繰り返して堆積物コア試料を採取した。採取したコアは底と頭にキャップをつけ、垂直に保ったまま保存箱にいれ震動を与えないようにしながら島根大学の実験室まで運搬した。実験室では、アクリルパイプ試料を半割アクリルパイプに押し出し、半割した。半割した試料の片側は1 cm毎にカットし、もう片側に軟X線ケース(長さ25 cm、幅5 cm、深さ1 cm)を用いて連続試料を採取した。軟X線ケースで採取した試料は軟X線写真を撮影し、堆積物中に明暗互層の縞状構

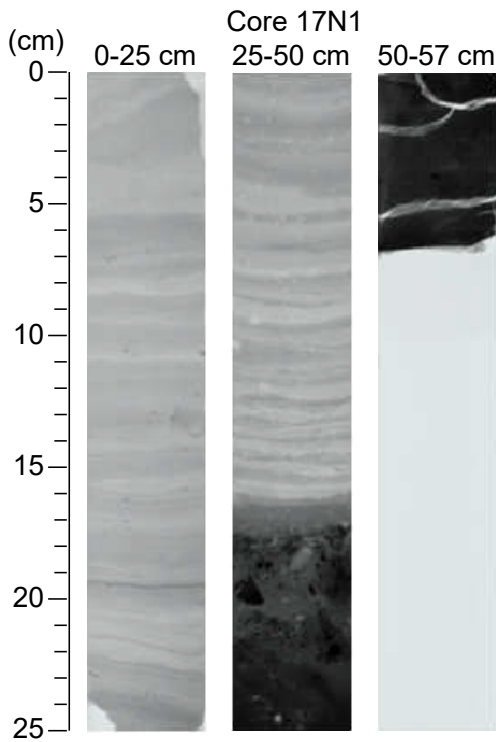


図2 17N1 コアの軟 X 線写真 (写真の明度・彩度はコアを通じて一定。明色が低密度、暗色が高密度)。  
**Fig. 2** Soft-X ray images of core 17N1 (Uniform brightness and intensity through the core. Light and dark indicate low and high sediment densities, respectively).

造を確認したのち (図2), 写真と試料を照らし合わせながら, 各層ごとにカットし, 70 試料を得た。軟 X 線撮影では, 堆積物を X 線が透過した際の密度の差が濃淡として映し出される。本研究では陽画として撮影した後, 画像処理で明暗を逆転させているため, より密度の低い層が白く (明色層), より密度が高い層が黒く (暗色層) 映し出されている。採取した試料は湿潤重量を測定後, それぞれをドラフト内で3日風乾させた後, 70 °C の乾燥機内で2時間乾燥させ, 乾燥重量を測定した。その後, 試料を CNS 元素分析と珪藻群集解析用に分け, それぞれの分析を行った。CNS 元素分析は 1 cm 毎に分割した試料と年層毎に分割した両試料に対し行い, 珪藻群集解析は年層毎に分割した試料のみ行った。

CNS 元素分析用試料は乾燥後に分取してメノウ乳鉢で粉末化し, 約 10 mg を分取し, Ag カップに入れて 1 mol/l HCl を滴下し 105 °C で1時間乾燥した後, Sn カップに包んで島根大学総合理工学部およびエスチュアリーセンターが所有する CHNS Elemental analyzer (Thermo Electron Co., model Flash EA 1112) を用いて

測定した。標準試料には BBOT を用い, 5 点検量線法を採用した。

珪藻群集解析用の試料処理として, 乾燥試料約 20 mg を 100 mL ビーカーにいれ, 10% 過酸化水素水で約 1 時間半加熱し, 堆積物中の有機物を除去したのち, ピロリン酸ナトリウムを加え試料を攪拌した。ビーカーに 100 mL 超まで蒸留水を加え 4 時間安置後に上澄み液 80 mL を廃棄する工程を 3 回繰り返した後, ビーカー内の試料を, マイクロピペットを用いてカバーガラス上に垂らした。カバーガラス上の試料を乾燥させ, マウントメディアを用いてスライドガラスと固定し, 珪藻観察用スライドを作成した。観察した試料は生物顕微鏡 (Olympus BX53) を用いて 1000–2000 倍で観察を行った。

## 結 果

### 17N1 コア層序と化学組成

本研究に用いた 17N1 コアは, 長さ 57 cm の柱状堆積物である。軟 X 線写真ではコアトップから深度 42 cm まで厚さ数 mm から 2 cm 程の明瞭なラミナが認められる (図2)。ラミナを構成する明暗互層は, 暗色層上部と明色層下部の境界が明瞭に区分できるのに対して, 明色層上部と暗色層下部の境界はいくつかの層において漸進的に移行していた。ラミナ層の最下部は暗色層であり, 深度 13–14 cm に殻長約 1.5 cm のチヨノハナガイと思われる化石が見られるが, 生痕は見られない。深度 42 cm 以下は塊状もしくはブロック状の構造であり, 42 cm 以浅の堆積物と比較すると明らかに密度が大きい。この層準の堆積物は貝殻片を多数含む。上部の年縞層との境界付近では削剥面が見られる。

1 cm 毎に分割した試料では含水率はコア下部と比較して上部で明らかに増加する (図3)。コア深度 56–50 cm で 50 % の一定値をとり, 50–42 cm では 50 % から 80 % まで急激に増加し, 42–5 cm では 82–85 % と非常に高い値で安定して推移する。コア上部 5 cm においては 88 % まで増加する。1 cm 毎に分割した試料の全有機炭素 (TOC), 全窒素 (TN), 全硫黄 (TS) の含有量も含水率と類似の変動結果を示す (図3)。50 cm 以下で TOC は約 1.6 %, TN は約 0.11 % で安定しており, 50–40 cm にかけて TOC は 3.5 %, TN は約 0.33 % まで急激に増加する。それより上位では全体として継続的な微増傾向に転じ, コアトップでは TOC が 4.7 %, TN が 0.58 % を示した。ただし, 深度 24–14 cm では TOC が約 3.6 % 程度, TN が 0.40 % 程度と比較



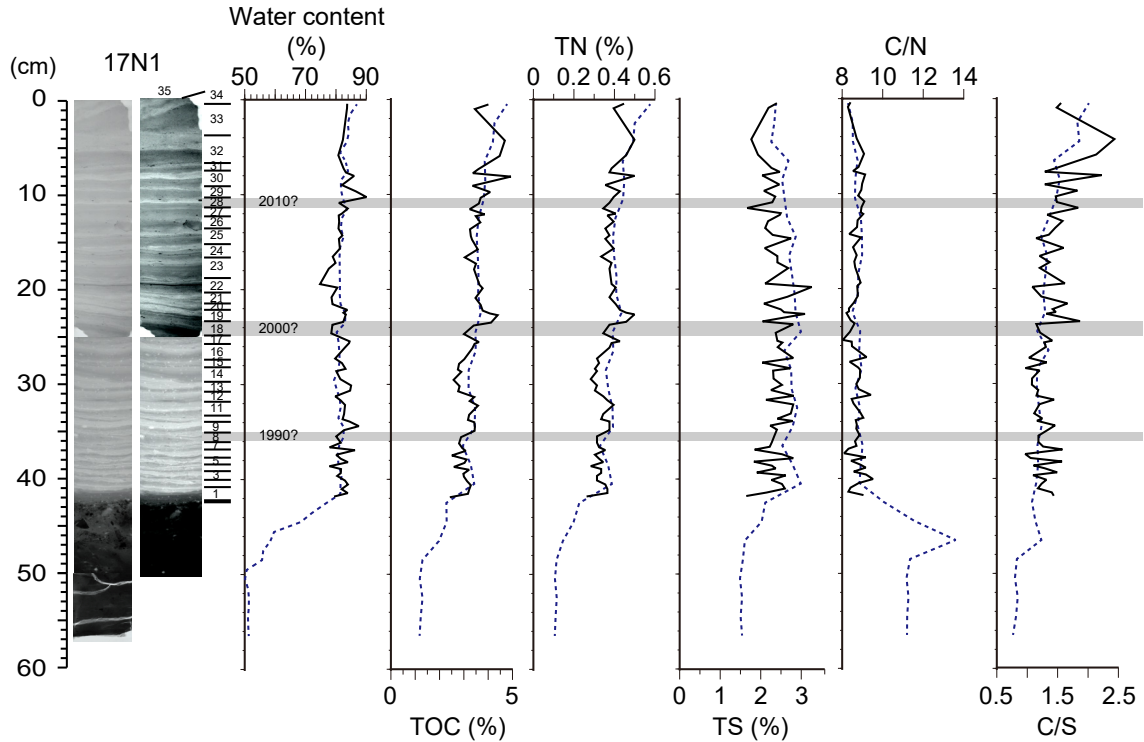


図3 17N1 コアにおける 1 cm 区分毎の含水率ならびに CNS 元素分析結果. 破線は 1 cm 区分の平均値. 実線は各明色層・暗色層毎の値. (右側の軟 X 線コア写真は年縞の変化が分かりやすいように明度・彩度補正したもの).

Fig. 3 Downcore profiles of water and CNS content for core 17N1. Dashed line is the average value of each 1 cm interval, and solid line is the value for each lamina layer (Original soft X-ray image on the left; image on the right is contrast enhanced to clarify the core structure).

的一定した値を共に示す. 各層ごとに分割した試料の TOC, TN は 1 cm 毎に分割した試料と異なって値が増減していたが, 全体的な傾向は両試料において同じであった (図 3). 一方, TS は深度 46 cm 以下では約 1.6 % で安定しており, 44–42 cm 間で 2.0–2.1 % に増加し, 深度 40 cm 以浅において, 1 cm 間隔で採取した試料では 2.3–3.0 % の間で推移する. ただし TS は明色層・暗色層間において値の違いが大きく, 各層ごとに採取した試料においては 1.6 から 3.2 の間で振動していた. コア深度 40 cm からコアトップにおける TS の変動は TOC や TN とは異なり, 深度 40–20 cm では層ごとの振幅は大きいもののほぼ横ばいの傾向を示すのに対して, 深度 20 cm からコアトップにかけては次第に含有量が減少する. C/N 比 (重量比) は 1 cm 間隔で採取した試料では深度 48 cm 以深において約 11.2 で安定して推移し, 深度 46 cm で 13.6 のピーク値を示した後深度 40 cm まで減少し, 40 cm 以浅では 8.6–8.8 間で安定して推移した. ただし, 上記したように TS の

値は明色層・暗色層間において差が激しいため, 層ごとに分析した試料では C/N 比は 8.0–9.5 間で振動した. C/S 比は深度 48 cm 以深において約 0.8, 深度 46–14 cm 間において約 1.2 で安定して推移し, 深度 12 cm 以浅では次第に増加し, 1 cm 間隔で採取した試料では最大 2.0, 層ごとに採取した試料では最大 2.5 をそれぞれ示した.

#### 珪藻群集変動

17N1 コアの年縞層に含まれる乾燥重量 1 g 当たりの珪藻殻数は, 最低で  $57.8 \times 10^6$  個, 最大で  $638.7 \times 10^6$  個, 下部層から深度 29.5 cm にかけて次第に増加し, その後増減を繰り返しながら次第に減少した (図 4). 最も出現頻度が高かった種は *Neodelphineis pelagica* で平均産出頻度は 20.4 %, 次いで *Cyclotella atomus* の 14.9 %, *Skeletonema costatum* の 10.1 % と続いた. いずれかの層準で産出頻度が 5 % を超えた種は *Cyclotella atomus* var. *gracilis* (平均産出頻度 9.9

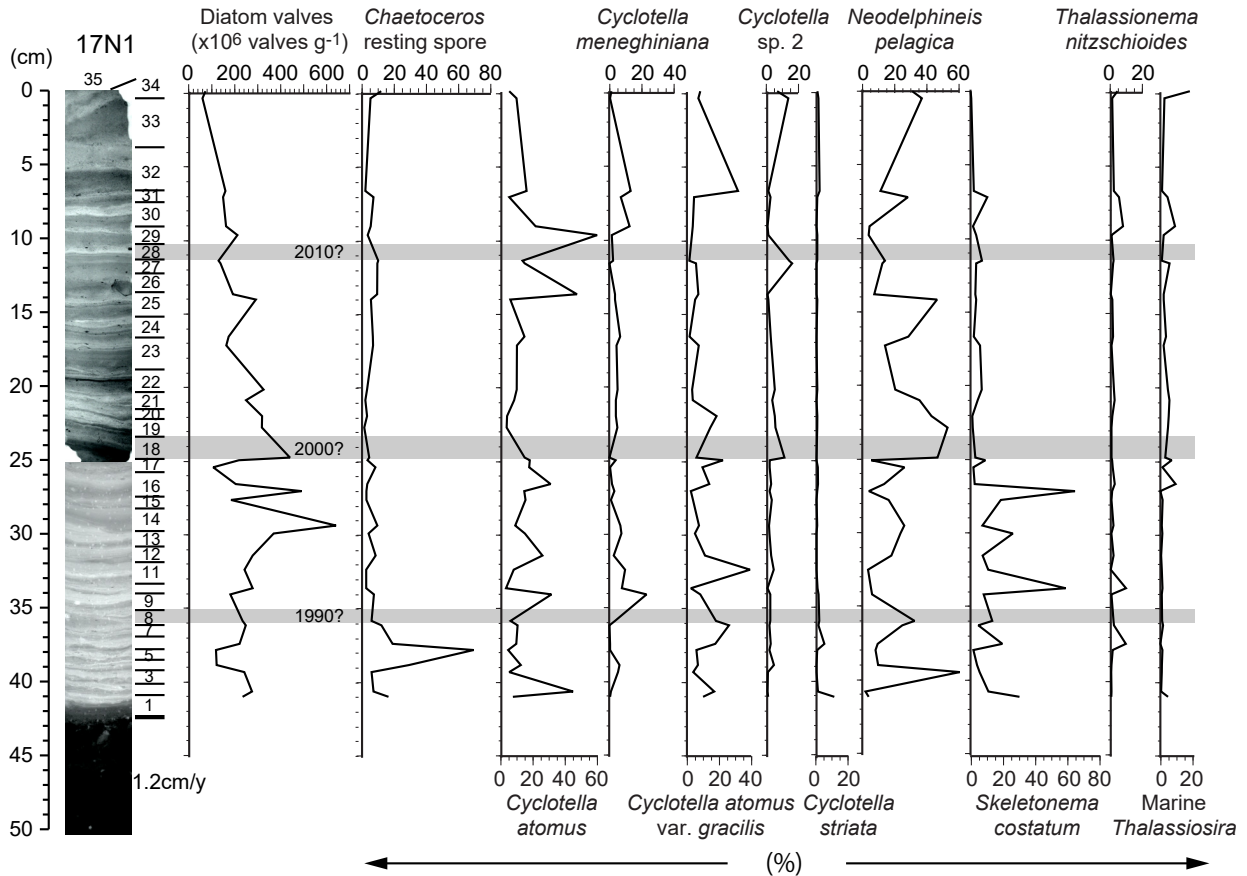


図4 17N1 コア年縞層内における珪藻群集変化。

Fig. 4 Variation in diatom assemblage for the laminated portion of core 17N1.

%), *Cyclotella meneghiniana* (4.4 %), *Cyclotella striata* (0.9 %), *Cyclotella* sp. 2 (未記載種: 大谷修二博士の1997年科研費研究課題報告書の報告による分類) (3.1 %), *Thalassionema nitzschioides* (1.9 %)であった。このほか海洋性の *Thalassiosira* 属 (主に *Thalassiosira lineata*, *Thalassiosira eccentrica* や *Thalassiosira pacifica* を含む) は最大で 17.4 %, 平均で 3.0 % の産出頻度を占め, そのうち最も産出が多かったのは *Thalassiosira lineata* であった。また *Chaetoceros* 属 (*Xanthiopyxis* を含む) の休眠胞子も最大で 69.2 %, 平均で 8.7 % と高い産出頻度を占めた。年縞層の下部と上部では一部の種の産出状況が明らかに異なっており, *S. costatum* はコア深度 27 cm 以下で多産し, 27 cm 以浅で産出頻度が低かったのに対し, 海洋性 *Thalassiosira* 属や *Cyclotella* sp.2 は深度 27 cm あるいは 25 cm 以浅で産出頻度が増加していた。このほか, *Chaetoceros* 属の休眠胞子や *C. striata* は単一の層準, *Chaetoceros* 属の休眠胞子は深度 38 cm, *C. striata* は深度 41.2 cm, でのみ高い産出頻度を示したが, そ

のほかの層準では産出頻度が低かった。最優占種である *N. pelagica* や 2 番目に産出頻度が高かった *C. atomus* は, 産出頻度が深度ごとに大きく増減していたが, 一定の変動傾向は見られなかった。

## 考察

### 浚渫窪地内の新生堆積物

17N1 コアの深度 42cm 以浅には明瞭なラミナ層が発達し, 生物擾乱の痕跡が見られない。そのため, このラミナ層が堆積していた期間は, ほぼ無生物の貧酸素~無酸素環境であったと考えられる。一方で, ラミナ層の下部では塊状構造を示し, 貝化石を伴っていることから, 生物擾乱が激しい酸化環境であったと考えられる。実際, 深度 42 cm 以深の層準では TOC 濃度は 1.6 %, C/N 比は 11 程度を示しており(図3), 17N1 コアが採取された地点では酸化環境による有機物の酸化分解が起きていたか, または陸源有機物が良く堆積するような環境であったことが示唆され

る (Berner, 1984; Sampei and Matsumoto, 2001). この深度 42 cm を境に削剥面がみられ, 上下で含水率が約 80 % から 50 % へと急に変化し密度差が大きいことから, 堆積物の圧密状況に差があり, 42 cm 以深の層と以浅の層では堆積時間に間隙があったと考えられる. 徳岡 (2011) は, 本研究地点に近い米子湾窪地内 (旗ヶ崎埠頭の南約 400 m の地点 NU-E) において同様な削剥面と含水率の段差を報告しており, 音波探査の詳細な解析も加えて浚渫面と認定している. したがって, 本研究の削剥面上のラミナ層は浚渫された後に堆積した腐泥堆積物と考えるのが妥当であり, 浚渫後窪地内の底層水塊は貧酸素~無酸素になったといえる. 実際, 過去に彦名干拓地前浚渫窪地の水質調査を行った研究では, 水深 4 m 以下で水中の溶存酸素濃度が 10 % 以下となり, 水深 16 m において完全な無酸素水塊となっている (秋葉ほか, 1993).

17N1 コアのラミナ層には明暗セットが 35 組認定され, 低密度層と中密度層がリズムカルに繰り返している (図 2 および図 3: 低密度層が明色層, 中密度層が暗色層にあたる). 17N1 コアを採取した連続した浚渫窪地は, 周辺地域の干拓の際に生まれたものである. コア採取地点の目前にある彦名干拓地は 1975 年に干拓を開始し, 1987 年には完成している (中海自然再生協議会, 2012). 17N1 コアを採取した 2017 年をコアトップとした場合, このラミナ層が年縞であるなら, 浚渫窪地内が無酸素になりラミナ層が堆積を開始したのは 1983 年となるため, 彦名干拓地前を浚渫していた時期と一致する. 松江気象台の降水データによる松江の降水パターンは, 夏季 (6-9 月) に降水量が相対的に多く, その他の時期は相対的に降水量が少ない傾向を示す. 徳岡 (2011) は, 米子湾内窪地 NU-E 地点において 17N1 コアと同様なラミナ層を報告しており, 2 mm 毎の詳細な粒度分析を行っている. その結果, 径 4-6  $\mu\text{m}$  のラミナ層堆積物中にところどころそれよりも粗い粒子が薄く挟まれていることから, 豪雨の影響があったことを指摘している. 本研究では 1 cm 程度の明暗層毎の大きな区分で分析しているため, 詳細な mm 単位の豪雨の影響については考察を行うことができなかったが, 徳岡 (2011) の報告を考慮すると, 降水量が多い時期に供給された相対的に粗粒な堆積物が 17N1 コアの中密度層を形成したものと考えられる. 一方, 本コアを採取した彦名干拓地前浚渫窪地近隣の汐手が丘沖浚渫窪地において 2017 年に設置されたセディメントトラップの結果によると, 浚渫窪地内には窪地周辺の新生堆積物が巻きあがり窪地へ堆積している. 沈降粒子に含まれる珪藻群集の Flux 量

は夏季 (9 月) と比較して冬期 (12 月) は約 35 倍高く, 冬季に沈殿した堆積物には再懸濁により窪地まで運搬された珪藻が多量に含まれていることを示している (三瓶ほか, 2019). これらのことを考慮すると浚渫窪地にみられるラミナの暗色層 (中密度層) は主に夏季の降雨期に堆積した比較的粗い粒度の無機碎屑物の多い層であり, 明色層 (低密度層) は主に冬期の巻き上がり・再堆積による細粒あるいは有機物を多く含んだ腐泥層ではないかと考えられる. 浚渫窪地に堆積する季節ごとの粒度と組成の差が明暗層を作り出し, 彦名干拓地前浚渫窪地では, 年縞として 35 年間 (AD1983-2017) の環境変動を記録している.

17N1 コアにおいて年縞であるラミナ層の厚さは合計で 42 cm であるため (図 2), 1983 年以降, 彦名干拓地前浚渫窪地最奥部の堆積速度は  $12 \text{ mm yr}^{-1}$  となる. この値は徳岡 (2011) が本研究地点に近い米子湾窪地内 NU4 (上述の NU-E の西方約 700m の地点) の黒色腐泥層において  $^{210}\text{Pb}$  を用いて求めた値  $10.8 \text{ mm yr}^{-1}$  とほぼ一致する. 1996 年に中海各地において柱状堆積物を採取し,  $^{210}\text{Pb}$  および  $^{137}\text{Cs}$  をもちいて近年の中海における堆積速度を分析した金井ほか (2002) によると, 中海の堆積速度は  $0.2\text{-}19.1 \text{ mm yr}^{-1}$  で中海内の水域ごとに差がみられる. 大橋川から堆積物の流入がある中海南西部と飯梨川から堆積物の流入がある中海南部は堆積速度が大きい, そのほかの地点では基本的に堆積速度は  $5 \text{ mm yr}^{-1}$  以下である. 金井ほか (2002) は彦名干拓地北側沖合でも堆積物を採取しており (Site 51), その堆積速度は  $^{137}\text{Cs}$  による年代測定値を用いると  $1.5 \text{ mm yr}^{-1}$  であった. 金井ほか (2002) には各堆積物の採取地点の水深は記述されていないが, Site 51 から採取した試料では  $^{137}\text{Cs}$  のピークが検出されていることから, 浚渫窪地の外で採取した試料であると推測できる. 中海では堤防建設や干拓・埋め立て事業により堆積物の再移動や外洋への土砂移動量および河川供給量の変化が起きており, 中海の堆積速度は時代ごとに大きく変化している. そのため, 隣接する 2 地点 (浚渫窪地の中と外) であっても, 異なった時代の堆積物では, 堆積速度を単純に比較することはできない. しかし, 1996 年における浚渫窪地外の堆積速度 ( $1.5 \text{ mm yr}^{-1}$ ) に対して, 2017 年における浚渫窪地内の堆積速度 ( $12 \text{ mm yr}^{-1}$ ) は 8 倍となっており, ほぼ同一地点の時系列による差異としては大きすぎるため, 浚渫窪地内の堆積物が周辺地域の表層堆積物が巻きあがり再堆積したものである可能性を示唆している. 実際, 彦名干拓地前浚渫窪地の北東約 25 km 地点, 飯梨川河口域と米子空港の中間地



点で 1996 年に採取された堆積物試料は、0–16 cm で堆積速度が  $1.7 \text{ mm y}^{-1}$ 、深度 0–31 cm で  $3.2 \text{ mm y}^{-1}$  と浚渫窪地が掘られて以来、明らかに堆積速度が減少している（金井ほか, 2002）。同様に 2013 年に飯梨川河口東部で採取された堆積物試料は、過去 100 年間に堆積した層がほとんどなく近年この地域から表層堆積物が削剥されている可能性を示している（Ota et al., 2017）。一方で、17N1 コア内の珪藻遺骸群集をみると継続して淡水浮遊性珪藻 *Cyclotella atomus* および *Cyclotella meneghiniana* が産出しており（図 4）、淡水流入の多い河口域に堆積した珪藻遺骸が再堆積で浚渫窪地まで移動している可能性が高い。これらの結果は飯梨川河口～米子湾の窪地周辺の表層堆積物の多くは巻き上がって窪地に移動し堆積していることを裏付けている。

#### 浚渫窪地内の新生堆積物の化学組成と珪藻量

1983 年以降中海浚渫窪地に堆積した珪藻遺骸群集は 1995 年まで増加傾向にあり、その後次第に堆積する珪藻殻数は減少し続けている（図 4）。この傾向は明色層・暗色層共に変わらないが、堆積量が最大であった 1995 年に堆積した珪藻殻数は暗色層内に堆積した珪藻殻数の方が明色層内に堆積した珪藻殻数よりおよそ 2 倍多い。年縞堆積物内の TOC 濃度や TN 濃度は 2003 年頃に極大期を迎えその後の数年間は横ばい傾向を示すものの、縞状堆積物全体としては下部から上部にかけて増加傾向にあり、堆積物中の全珪藻殻数の変動傾向とは大きく異なっている（図 3）。これは中海の浚渫窪地に埋積する有機物の主要な構成が珪藻ではないことを示している。縞状堆積物中の C/N 比は僅かな例外を除いて常に 8–9 間の値を示しているため（図 3）、有機物の大部分はプランクトンから構成されると考えられる。おそらく、米子湾一帯で発生する赤潮を頻発させている渦鞭毛藻類（Kondo et al., 2000; 嘉藤ほか, 2004; 島根県環境政策課 HP）が堆積する有機物の主要構成物ではないかと考えられる。

年縞堆積物中の化学組成は必ずしも年縞に応じた明暗のリズミカルな変動にはなっていないが、C/S 比は比較的明暗の変化が規則的である（図 3）。C/S 比は主に植物プランクトン起源炭素と堆積性パイライト・硫化物の比であり、汽水湖底の酸化還元環境を反映し、値が 1 を下回ると無酸素環境で 3 を超えると酸化的環境とされている（Berner, 1984; Sampei et al., 1997）。17N1 コアの年縞堆積物では、白い部分は黒い部分よりも C/S が高い値を示すことが多い（その差は

0.3–0.8）。白い部分と黒い部分の肉眼での識別は困難であり、軟 X 線写真との比較によって行った試料分取の位置に誤差が生じた可能性はあるが、その誤差が最も小さいと考えられる No.30 や 32（白い層が最も明瞭で厚い層準：図 4）では白い部分の C/S 比は明らかに高い値（酸化的環境）を示す。従って、白い部分では黒い部分よりも酸化的な底質環境であったことが考えられる。これらのことは夏季に湖底が貧酸素～無酸素環境になっても冬季には酸素が供給されていることを示している。その差が大きいほど酸素供給が大きく、その差が小さいほど冬季でも貧酸素であったことを示す。17N1 コアにおける C/S 比の変動は 1983 年に浚渫窪地ができた後、1998–1999 年頃までは C/S 比の値そのものも低く、明色層と暗色層で C/S 比の差が小さいことから、冬季の湖底も貧酸素～無酸素環境であったことを示唆している。その後、2014 年頃にかけて次第に C/S 比の値が高くなり、明色層と暗色層の差が大きくなっていくことから、冬季の酸素供給状況が改善され、夏季および冬季ともに湖底環境が酸化的に移行したと考えられる。その後も C/S 比は値が高くなっているため、浚渫窪地内の冬期の酸素含有量は次第に増加しているとも考えることもできるが、湖底堆積物の上部 10 cm 程では続成作用によるイオウ固定のプロセスが含まれるため、C/S 比はそれ以下よりもやや高めにでることがあり（Sampei et al., 1997）、実際にこの C/S 比の変化が環境を反映しているかは不明である。

#### 珪藻群集の群集組成変化とその要因

17N1 コアの年縞堆積物に含まれる優占珪藻種の 1 種である *Skeletonema costatum* は 1998 年まで珪藻群集内の第一優占種であり、時折極めて高い産出頻度を示していたが、1998 年以降は 10% 以下しか産出してしない（図 4）。また、堆積物中の全珪藻殻数も 1998 年以降次第に減少している。中海において *S. costatum* は典型的な赤潮構成種であり、度々この種による赤潮が報告されている（Kondo et al., 1990）。17N1 コアの結果は、1998 年頃まで米子湾では *S. costatum* の赤潮が頻発していたが、その後はその頻度あるいは規模またはその両方が減少したことを指し示しているか、あるいは中海全体でそれ以前に頻発していた *S. costatum* の赤潮遺骸を含んだ表層堆積物が浮泥として 1998 年まで浚渫窪地に再堆積していたか、のいずれかを示している。実際に中海の浚渫窪地を 1992 年から 1993 年にかけて調査した秋葉ほか（1993）は、浚渫窪地内の浮泥には *Skeletonema* が多量に含まれていたことを報告している。いずれにせよ 1990 年代に米子湾の



赤潮は珪藻を主要構成とするものから他のプランクトンに移行していったと考えられる。前述したように米子湾一帯では渦鞭毛藻類が赤潮を頻発させているため (Kondo et al., 2000; 嘉藤ほか, 2004; 島根県環境政策課 HP), 1990 年代以降堆積した主要なプランクトンは渦鞭毛藻類が主体ではないかと推測できる。

中海で赤潮を起こす渦鞭毛藻は主に *Prorocentrum minimum* である (島根県環境政策課 HP)。C/N が示すように浚渫窪地に堆積する有機物はプランクトン起源であり、その TOC 濃度は上昇傾向にあるため、*S. costatum* の赤潮とは逆に渦鞭毛藻類などからなる赤潮は次第に規模を増していることが TOC 濃度上昇の要因であると考えられる (但し 2000 年代後半は停滞気味)。中海で主に赤潮を起こす渦鞭毛藻 *P. minimum* による赤潮は、夏季から秋季に水中に蓄えられたリン酸態リン ( $\text{PO}_4\text{-P}$ : リン酸イオンとして存在するリン) を中心とした栄養塩を利用し晩秋から冬期に大量に発生すると考えられている (道上ほか, 2003)。中海下層において夏季から溶存酸素低下による還元状態が 11 月頃まで持続すると底泥から湖水中への栄養塩の溶出が起り、結果としてこの栄養塩を使った赤潮が発生する。*P. minimum* は硝酸態窒素の高い利用能を持っており (嘉藤ほか, 2004)、浚渫窪地内の貧酸素化により湖底からの磷の過剰供給により水質環境が窒素制限に変わったことが *P. minimum* の卓越の要因だと推測される。一方、底泥間隙水中の有機物も底泥から湖水中へ流出するが、渦鞭毛藻 *P. minimum* は堆積物から有機物の添加があった場合その増殖が顕著に促進されるのに対して、珪藻 *S. costatum* は有機物の添加に対する反応が微弱であることが知られている (近藤, 1985)。17N1 コアに含まれる TOC 濃度 1999 年以前はほとんど 3.5% を超えることがなかったが、1999 年以降は逆にほとんど 3.5% を下回っていない (図 3)。浚渫窪地内では、湖底から有機物が供給されることにより *S. costatum* より *P. minimum* の赤潮が優先して発生し、赤潮種の堆積により堆積物中の TOC が増加し、それが次の *P. minimum* の赤潮をよぶといった悪循環が発生していることが懸念される。

*Skeletonema costatum* の出現頻度が減少した 1998 年から 2005 年にかけて、最も出現頻度が高かったのは *Neodelphineis pelagica* であり、海洋性の *Thalassiosira* 属や *Cyclotella* sp.2 も出現頻度が増加した。*Neodelphineis pelagica* は中海において富栄養化の進行と共に 1940 年代以降急激に産出頻度が増加した種であり、中海湖心における表層堆積物では 1980 年代以降第 1 優占種として、群集の過半数を占める種で

ある (Katsuki et al., 2018)。出現頻度数%程度の海洋性の *Thalassiosira* 属や *Cyclotella* sp.2 の堆積も中海では一般的である。1998 年から 2005 年にかけては、珪藻種を主体とする赤潮が落ち着いたことから、中海の浚渫窪地外と同じような珪藻種が堆積するようになったと考えられる。

## ま と め

2017 年に中海南東部の彦名干拓地前浚渫窪地において採取した湖底の 17N1 コアに対して、堆積構造や化学組成、珪藻群集を分析し、浚渫窪地内の水環境および堆積環境の変動を明らかにした。17N1 コアは深度 42 cm を境に堆積構造が大きく変化しており、42 cm 以浅では高含水率・高有機物含有の年縞堆積物が堆積している。年縞は 35 セット確認されていることから、17N1 コアが採取された地点は 1983 年以前に掘削され、その後年縞堆積物が年平均 12 mm の速度で堆積していることが分かる。この速度は中海の堆積速度としては明らかに速く、周辺地域の堆積速度は浚渫が行われて以降減少しているため、浚渫窪地には周辺地域の湖底堆積物が流入し再堆積していると考えられる。17N1 コアにおける C/S 比は 8-9 の間で安定しており、TOC 濃度は 1983 年以降次第に増加しているにも関わらず、堆積物中に含まれる珪藻遺骸群集の個数は 1999 年以降次第に減少している。これは中海湖底に堆積する有機物が珪藻以外の植物プランクトンを主体としており (おそらく渦鞭毛藻の赤潮構成種)、珪藻を主体とする赤潮は 1999 年以降浚渫窪地周辺では減少しているにも関わらず、渦鞭毛藻を主体とする赤潮によって、次第に浚渫窪地内に堆積する量が増加していることが要因だと考えられる。一方で、堆積物中の C/S 比の値は次第に上昇しており、特に年縞の明色層においてその傾向が顕著であった。浚渫窪地内において有機物の堆積量が増えているにも関わらず、冬季には湖底が貧酸素状態から脱している可能性を示唆している。

## 謝 辞

本研究は、国土交通省出雲河川事務所の平成 28 ~ 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り、調査・分析は受託研究費を用いて行った。国土交通省出雲河川事務所にはこの成果の公表を許可していただいた。また、論文提出にあたり 2 名の査読者の方々に丁寧な査読を行っていただいた

き, アリゾナ大学の David Dettman 博士には英文校閲を行っていただいた。ここに記して謝意を表します。

## 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.
- 秋葉道宏・橘田隆史・野田修司・中村幹雄・森忠洋・佐藤利夫 (1993) 中海浚渫跡地に集積した浮泥の特性. *環境工学研究論文集*, 30: 243–249.
- Berner, R.A. (1984) Sedimentary pyrite formation: An update. *Gheochimica et Cosmochimica Acta*, 48: 605–615.
- Bronk-Ramsey, C., Staff, R.A., Bryant, C.L., Brock, F., Kitagawa, H., van der Plicht, J., Schlolaut, G., Marshall, M.H., Brauer, A., Lamb, H.F., Payne, R.L., Tarasov, P.E., Haraguchi, T., Gotanda, K., Yonenobu, H., Yokoyama, Y., Tada, R. and Nakagawa, T. (2012) A complete terrestrial radiocarbon record for 11.2–52.8 kyr BP. *Science*, 338: 370–374.
- 道上隆文・永美敏正・南條吉之・若林健二・森 明寛・奥田益算 (2003) 中海における赤潮発生機構調査について. *鳥取県衛生環境研究所報*, 43: 49–54.
- 福沢仁之 (1995) 天然の「時計」・「環境変動検出計」としての湖沼の年縞堆積物. *第四紀研究*, 34: 135–149.
- 石飛裕・平塚純一・桑原弘道・山室真澄 (2000) 中海・穴道湖における魚類および甲殻類相の変動. *陸水学雑誌*, 61: 129–146.
- 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.
- 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.
- Katsuki, K., Seto, K., Tsujimoto, A., Takata, H. and Sonoda, T. (2019) Relationship between regional climate change and primary ecosystem characteristics in a lagoon undergoing anthropogenic eutrophication, Lake Mokoto, Japan. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 222: 205–213.
- 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.
- 加藤めぐみ・福澤仁之・安田喜憲・藤原治 (1998) 鳥取県東郷池潮底堆積物の層序と年縞. *LAGUNA*, 5: 27–37.
- 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.
- 近藤邦夫 (1985) 底泥間隙水中の溶存性有機物が中海の汽水性植物プランクトンの増殖に及ぼす影響. *水質汚濁研究*, 8: 816–825.
- Kondo, K., Seike, Y. and Date, Y. (2000) Red tides in the brackish lake Nakanoumi (II) Relationships between the occurrence of *Prorocentrum minimum* red tide and environmental conditions. *Bulletin of Plankton Society of Japan*, 37: 19–34.
- 桑原智之・須崎萌実・樋野和俊・安野孝生・木戸健一郎・前野真一 (2016) 石炭灰造粒物により全面覆砂をした中海浚渫窪地の栄養塩・硫化水素溶出速度の評価. *水環境学会誌*, 39: 127–135.
- 増木新吾・矢島啓・清家泰 (2011) WEP を用いた中海(米子湾) 浚渫窪地底層への高濃度酸素水導入実験. *水工学論文集*, 67: 1525–1530.
- 中村由行 (2010) 全国の浚渫窪地の現況と三河湾における埋め戻し修復. *水産工学*, 46: 229–233.
- 中海自然再生協議会 (2010) 中海自然再生マップ解説書. NPO 法人自然再生センター, 22p.
- 中海自然再生協議会 (2012) 中海自然再生事業実施計画. 第 1 期実施計画. 中海自然再生協議会, 30p.
- Ota, Y., Kawahata, H., Sato, T. and Seto, K. (2017) Flooding history of Lake Nakaumi, western Japan, inferred from sediment records spanning the past 700 years. *Journal of Quaternary Science*, 32: 1063–1074.
- 斉藤直・桑原智之・相崎守弘・徳岡隆夫 (2014) 自然再生推進法に基づく中海自然再生事業. *海洋開発論文集*, 70, 1128–1133.
- 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.
- 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.

三瓶 良和・香月 興太・河野 大樹 (2019) 中海南東部の窪地周辺におけるセディメントトラップ堆積物の起源. *LAGUNA*, 26: 59-72.

佐々木 淳 (1997) 東京湾湾奥水塊の湧昇現象と青潮への影響. *海岸工学論文集* 44: 1101–1105.

島根県環境政策課 HP. 宍道湖・中海におけるアオコ及び赤潮等の発生状況 (S39-H30). [https://www.pref.shimane.lg.jp/infra/kankyo/kankyo/kankyo\\_hozen/h30kankyohakusyo.data/sankou005.pdf](https://www.pref.shimane.lg.jp/infra/kankyo/kankyo/kankyo_hozen/h30kankyohakusyo.data/sankou005.pdf) (2019 年 8 月時点)

Suzuki, Y., Tada, R., Yamada, K., Irino, T., Nagashima, K., Nakagawa, T. and Omori, T. (2016) Mass accumulation rate of detrital materials in Lake Suigetsu as a potential proxy for heavy precipitation: a comparison of the observational precipitation and sedimentary record. *Progress in Earth and Planetary Science*, 3: 5.

徳岡隆夫・三瓶良和・板坂尚孝・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*, 8: 57–66.

徳岡隆夫 (2011) B-0804 浚渫窪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.

和久光靖・橋口晴穂・栗田貴代・金子健司・宮向智興・青山裕晃・向井良吉・石田基雄・鈴木輝明 (2011) 三河湾の浚渫窪地における粒子状物質の特異的な集積機構. *海の研究*, 20: 1–17.

Zolitschka, B. (2007) Varved lake sediments. *Encyclopedia of Quaternary Science*, 3105–3114. Elsevier Science.