

## 短 報

## 有明海湾奥部のメイオベントス群集の 空間変異と関連する環境要因

嶋永元裕<sup>1</sup>・逸見泰久<sup>1</sup>・山田勝雅<sup>1</sup>・島崎英行<sup>1</sup>・前中昭代<sup>1</sup>

### Spatial changes in meiofaunal composition and their associations with environmental factors in the inner Ariake Sea

Motohiro Shimanaga<sup>1</sup>, Yasuhisa Henmi<sup>1</sup>, Katsumasa Yamada<sup>1</sup>,  
Hideyuki Shimasaki<sup>1</sup>, Akiyo Maenaka<sup>1</sup>

**Abstract:** We evaluated preliminarily the spatial difference in total abundance of metazoan meiofauna and their community composition at higher taxonomic level and their associations with environment factors at six sites in the inner Ariake Sea, off the mouths of the Chikugo and Rokkaku Rivers in September 2022. “General” densities of total meiofauna (around 340 ind./10 cm<sup>2</sup> on average) were detected as a subtidal mud bottom, but higher than values observed in the other estuaries in Japan, during the same seasons. In the surface sediment on the bottom (0-1 cm), statistical analyses revealed that water depth, concentration of dissolved oxygen, water temperature, and salinity in bottom water were the primary factors, which were totally associated with 95% of the observed spatial changes in the meiofauna community composition, whereas any investigated sediment parameter, such as median size of sediment, was not chosen. In the subsurface sediment (1-5 cm), the proportion of meiofaunal composition associated with those environment gradients was considerably lower: only 49% in total. These suggest that the meiofaunal communities in surface sediment are influenced by the environmental factors of water mass above the bottom, but those effects are weaker in the deeper sediment in the investigated area (194 words).

**Key words:** Meiobenthos, community structure, Nematodes, Copepods, bottom water

---

<sup>1</sup> 熊本大学合津マリンステーション・Aitsu Marine Station, Kumamoto University, 6061Aitsu, Matsushima, Kami-Amakusa, Kumamoto 861-6102, Japan

\* Corresponding Author

受付日：2025年3月28日，受理日：2025年7月2日，WEB掲載日：2025年7月31日

## はじめに

有明海は、九州西岸に位置する4つの県（長崎・佐賀・福岡・熊本）に囲まれた九州最大の内湾であり、ムツゴロウやハラダクレチゴガニ、ヤベガワモチなど、日本国内では有明海のみ（一部近接する八代海にも分布）に分布する多くの特産種が生息することが広く知られているが（佐藤，2000），魚類や大型底生生物に比べ，微小な底生生物に関する知見は少ない。

メイオベントスもしくはメイオファウナは0.5–1 mmの篩を通過し，31–63  $\mu\text{m}$ の篩に捕えられる底生生物の総称で，ほぼすべての動物門に属する後生動物が含まれる（Giere, 2009）．これらメイオベントスは世代交代時間が短く（数十日程度），生息密度が高く，海底堆積物環境と密接に関わる一方，一般に浮遊幼生期を持たないため，水環境攪乱の影響の研究対象として理想的な生物群とされている（Giere, 2009）．さらにメイオベントス分類群間で環境悪化への耐性が異なるため，群集組成の時空間変異が環境評価などに用いられてきた（Giere, 2009）．日本国内でも，過去に，広島湾の河口域（板岡・玉井，1993；辻野ほか，2008）や真鶴湾（寒川ほか，2008），伊勢湾（梅本・木村，2016）や，有明海と同じ九州内湾である八代海（Shimanaga et al., 2015）や大村湾（Kawano et al., 2021；Nguyen et al., 2018, 2020）の底生環境とメイオベントス群集の関連性が調べられてきたが，有明海に関しては，六角川河口域の線虫類相（松本ほか，1992）や，諫早湾周辺の介形虫の分布などが調べられているもの（東ほか，2019），適切な採集器具を用いて採集したサンプルを元にしたメイオベントス群集全体に関する包括的な知見は乏しい状態であった．

著者らは，筑後川，嘉瀬川，六角川などの一級河川の河口域と接続する有明海奥部の複数の測点において，メイオベントス調査を行った．本研究では，調査海域のメイオベントス群集評価の第一段階として，高次分類群レベルのメイオベントスの群集組成と生息環境の水質・底質との関連性を評価した．

## 材料と方法

メイオベントス採集は2022年9月21日から28日にかけて，有明海奥部の6つの測点で行われた（測点H：33°04'38"N，130°12'39"E，測点J：33°05'48"N，130°15'10"E，測点L：33°03'01"N，130°13'22"E，

測点N：33°04'24"N，130°16'57"E，測点O：33°02'36"N，130°17'16"E，測点Q：33°01'28"N，130°14'14"E，図1，各測点の水深は表1参照）．これらの測点は，有明海湾奥におけるベントス相の長期変動の解析も念頭に，過去マクロベントスの採集調査が行われた測点を参考に選定されたものである（Yoshino et al., 2010）．

各測点において海底直上1 mの水質（水温 temperature，塩分 salinity，溶存酸素濃度 DO）を水質計（the JFE Advantech AAQ-RINKO multi-parameter water quality profiler）で測定後，メイオベントス用のサンプルを得るために，海底直上の堆積物を，不攪乱採泥器（離合社製：内径11 cm，長さ50 cm）を用いて3回採集し，船上にて，堆積物上の表層水をスポイトで注意深く取り除いた後，コア内径と同じ外径をもつプラスチック製押し出し器（静岡大学にて製造：北里洋元教授より寄贈）にセット後，堆積物表層（0–1 cm層）の堆積物をスポイトとステンレス製のヘラを用いて，深層（1–5 cm層）の堆積物サブサンプルを内径4 cmのプラスチックシリンジ（離合社特注）を用いて採集後，それぞれ100%エタノールで固定した（メイオベントスの大多数は0–5 cmまでの海底堆積物層に分布していることが知られている，Itoh et al., 2011）．海底堆積物の中央粒径（Md）と泥分（%Mud）分析用のサンプルは，別途マクロベントス採集に用いられたスミスマッキンタイヤー採泥器（離合社）で採集された堆積物の一部を上記の4 cmプラスチックシリンジで採集したサブサンプルを利用した．ただし採集時に堆積物表層–深層の区別なく保存したので，これらのパラメータは以下の群集構造解析では表層，深層とも同一のデータを用いている．

実験室において，メイオベントスは，Danovaro (2010)の方法を参考に，コロイダルシリカ（Ludox HS40 [1.3 g/ml]，Sigma-Aldrich，St. Louis，MO，USA）を用いて抽出し，双眼実体顕微鏡下で，線虫類，底生カイアシ類など，高次分類群レベルでソーティングを行った．堆積物中央粒径と泥分率は粒度分析装置（LA-920，HORIBA Ltd.，Japan）を用いて行った．メイオベントスの群集組成と環境要因（+水深）との関連性は distance-based linear models (DISTLM) を用いて解析した．この解析は，群集組成を従属変数とし，同時に測定された環境要因の中から群集組成と関連性の高い環境要因を割り出し，その関連性を定量化する方法である（Anderson et al., 2008）．群集組成と選択された環境要因との関連性は distance-

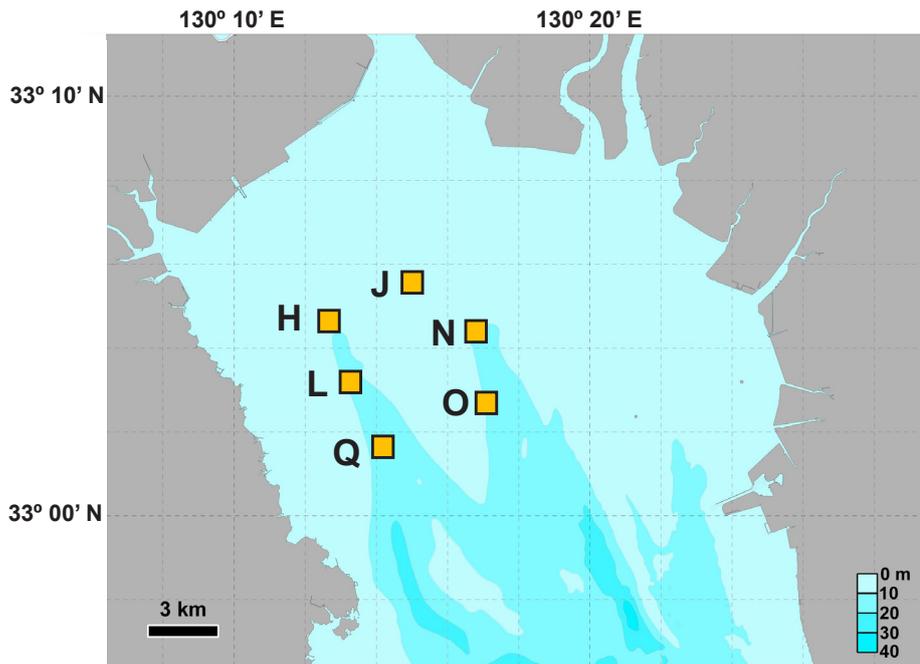


図1 有明海湾奥部におけるサンプル採集測点の位置.  
 Fig.1 Locations of sampling sites in the inner Ariake Sea.

表1 各測点における海底直上の水質と堆積物粒度組成

Table 1 Environmental factors in bottom water and sediment characteristics at each site.

Site	Depth (m)	Temperature (°C)	DO (mg/l)	Salinity	Md (µm)	%Mud
H	9.0	25.5	5.8	31.3	22.5	75.2
L	13.1	25.3	5.2	30.6	22.2	79.7
Q	16.7	25.2	5.3	30.4	37.1	64.5
J	7.8	25.2	5.1	30.6	19.3	85.4
N	11.2	25.3	5.0	30.6	22.3	82.4
O	11.3	25.2	5.4	30.2	18.4	85.4

based redundancy analysis (dbRDA) を用いて図示した。この方法は従来の RDA と異なり、ユークリッド距離以外の類似度指数（本研究では Bray-Kurtis similarity index）を用いたサンプル間の類似性の可視化が可能である（Anderson et al., 2008）。これらの解析には PRIMER7 software with the add-on package PERMANOVA + (PRIMER-E Ltd., Plymouth, UK) を用いた。

なお、各測点で粒度分析用サンプルは、メイオベントスと同一のサンプル由来ではないことから、各測点におけるメイオベントス各分類群個体数、および Md と %Mud の 3 サンプルの平均を、各測点で 1 回測定された底層域の水質パラメータと合わせて上記の多変量解析に用いた（表 1）。

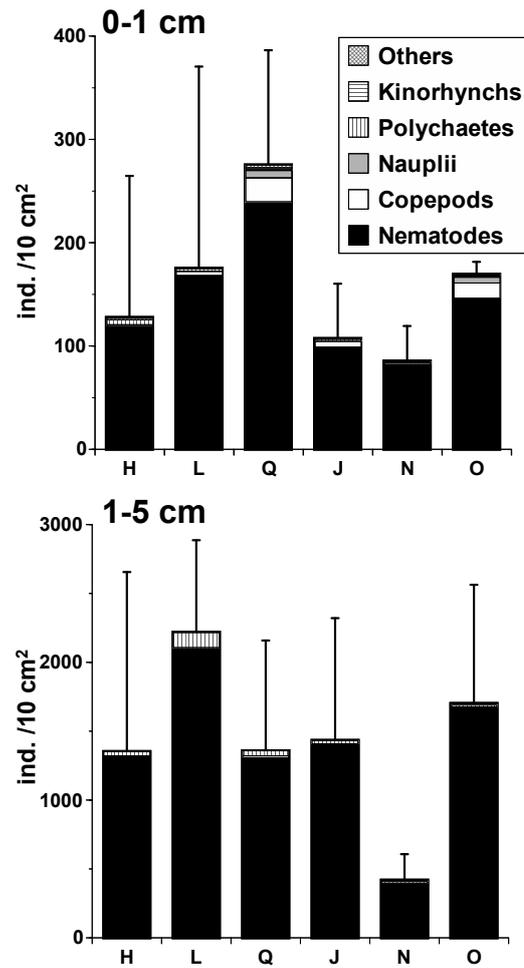


図2 各測点の海底堆積物 0-1cm 層と 1-5 cm 層に生息するメイオベントス各分類群の平均個体密度の積算値。エラーバーは総個体密度の標準偏差を示す。Nematodes 線虫, Copepods 底生カイアシ類, Nauplii ノープリウス幼生, Polychaetes 多毛類, Kinorhynchs 動物動物, Others その他(介形虫類やダニ類など)。

Fig. 2 Spatial differences in total meiofaunal density in the top 0-1cm sediment layer and 1-5cm layer among sites. Bars and error bars denote the cumulative mean density of main metazoan meiofaunal taxa and standard deviations, respectively. Others: other minor meiofauna such as ostracods and mites.

## 結果

全測点におけるメイオベントスの総生息密度の平均値(±標準偏差)は  $1571 \pm 619$  個体/10 cm<sup>2</sup> であった。全ての測点において最も優占したのは線虫類で、平均 96% (最小 95- 最大 98%) を占めた。堆積物表層 (0-1 cm) に限定した場合、メイオベントスの平均生息密度は 157 個体/10 cm<sup>2</sup> (16 個体/ml 堆積物) に対し、堆積物深層 (1-5 cm) は、平

均 1414 個体/10 cm<sup>2</sup> (35 個体/ml) で、全個体数の約 89% が深層に分布していた (図 2)。表層では、線虫類 (平均 142 個体/10 cm<sup>2</sup>, 92%) に次いで底生カイアシ類の優占率が高かった (8 個体/10 cm<sup>2</sup>, 5%)。特に、調査海域に横たわる 2 つの海底谷の麓に位置する測点 (Q, O) でカイアシ類の高い生息密度が観測された。一方、堆積物深層 (1-5 cm) では、線虫類の優占率は平均 97% (1361 個体/10 cm<sup>2</sup>) まで上昇し、多毛類が平均 3% 弱 (39 個体/10 cm<sup>2</sup>)

を占めた以外、底生カイアシ類を含め（平均0.3%、5個体/10 cm<sup>2</sup>）、その他の分類群は生息密度も優占率も低かった（図2）。

DISTLM 解析の結果、堆積物表層（0-1 cm）に分布するメイオベントス群集組成の空間変異と最も高い関連性が検出されたのは水深で群集組成全変異の約46%と関連付けられた。次いで海底直上のDO濃度（同30%）、水温（16%）、塩分（3%）が算出され、合計すると、これらの環境要因で群集組成変異の約95%と関連付けられた。ただし、各環境要因は互いに相関性が高く、他の環境要因を考慮せず各環境要因単独で解析を行うと、塩分や水温も群集組成と高い関連性を示した（それぞれ32%、23%）。dbRDAは、東西2つの海底谷の麓にそれぞれ設置され、かつ同じ海底谷軸にそって近接するより水深の浅い測点よりDO濃度がやや高かった測点（Q、O）でカイアシ類の割合が高かった傾向を示した（図3(a)）。堆積物深層（1-5 cm）の場合、測定された環境要因と関連付けられたメイオベントス群集組成の空間変異の割合は合計約49%で、表層よりも低い値が示された（水温22%、中央粒径10%、DO・水深それぞれ8%）。しかし、他の環境要因を考慮せず各環境要因単独で解析を行うと、水温を含め、すべての環境要因と群集組成との関連性は低い値を示した（3-8%）。dbRDAの結果も、すべての測点で線虫類がほぼ優占し、解析対象とした環境パラメータとの明瞭な傾向は示されなかった（図3(b)）。

## 考 察

調査域全体のメイオベントスの平均生息密度（約1600個体/10 cm<sup>2</sup>）は、時に数千個体を超える場合もある50 m以浅の泥質潮下帯としては極めて一般的な値であるが（Higgins and Thiel, 1988）、年は異なるが同季節の広島県太田川河口沖の3測点で観察された生息密度より高い値であった（1990、1991年の9月：約180-400個体/10 cm<sup>2</sup>、板岡・玉井, 1993）。また、堆積物中の鉛直分布に関しても、底生カイアシ類は堆積物表層でより高い生息密度（単位面積当たり1.6倍、体積当たり6.4倍）を示し、線虫類と多毛類は1 cm以深の堆積物層にも生息する、という泥質海底に典型的なパターンが観察された。

高次分類群レベルの群集組成を見た場合、通常はカイアシ類や動物動物など多様な分類群が集中分布し、線虫の優占率が50%程度になる場合もある堆積物表層においても（例えばItoh et al., 2011）、す

べての測点で線虫類が個体数の9割以上を占有した。その一方で、比較的高いカイアシ類の生息密度が、2つの海底谷の麓に設置された測点OとQで観察された。予備研究では、これら測点から採集されたサンプルからは、共通してクレトデス科カイアシ類が比較的高い頻度で出現することが明らかになりつつある（嶋永ら、未発表）。底生カイアシ類のほとんどは、珪藻など光合成由来有機物の消費者であるが、クレトデス類の一部は化学合成細菌を主たる食料源とすることが知られている（Vafeiadou et al., 2014；Cnudde et al., 2015）。今回の調査では堆積物中の有機物量や細菌数の計測を行っていなかったが、今後は、海底谷の麓に蓄積した有機物やそれを分解する細菌類を起点とした食物網の存在を探求する必要があるだろう。

メイオベントス群集組成の空間変異と環境要因の関連性を多変量解析した結果、堆積物表層においては、測点の水深の他は、DO濃度や水温など、海底直上の水質に関わる環境変数と群集組成との間に高い関連性が示され、堆積物粒子間の空隙に生息するメイオベントスにとっては、群集組成の変化と一般的に関連性が高い堆積物の中央粒径や泥分率は、重要な因子としては検出されなかった。粒度分析用のサンプルとメイオベントス分析用のサンプルが異なる測器で採集された点などの影響も否めないものの、今回採集された底生カイアシ類の低次分類群レベルの予備調査では、クレトデス類以外は、比較的遊泳力の高いフネガタソコミジンコ類など表在性カイアシ類の優占率が高いことが示されているので（嶋永ら 未発表）、これらの堆積物に関する変数との関連性が低かったのかもしれない。一方、水温や塩分などの水質に関わる変数は、測点間の差がわずかであることと、互いに高い相関を示したことから（例えば水温と塩分の一次相関は $R = 0.89$ ）、これらの変数が単独でメイオベントス群集に作用したのではなく、相加・相乗的に堆積物表層のメイオベントスの群集組成に作用したと考えられる。

海底表層部とは異なり堆積物深層部では、環境変数と関連付けられたメイオベントス群集組成の空間変異の割合は約49%と、表層の約半分程度まで下がった。この結果は、海水 - 海底境界面に接する堆積物表層と異なり、堆積物深層に生息するメイオベントスは海底直上の水質の影響はあまり受けないことを示唆する。おそらく酸化還元層の深度や酸素の浸透性など、今回未測定環境要因で分布が制限されているのだろう。一般にメイオベントス

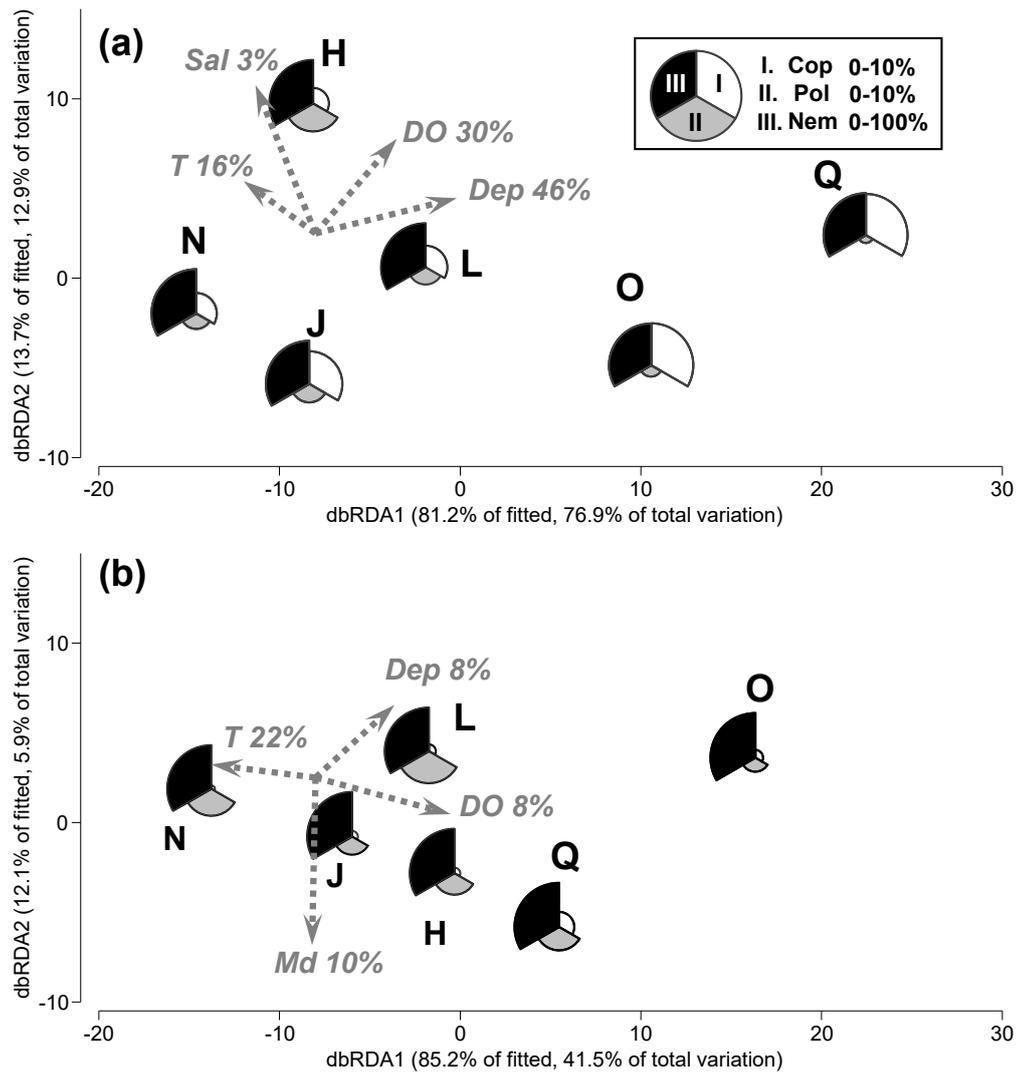


図 3 (a) 堆積物 0-1 cm 層, (b) 1-5 cm 層において, DISTLM により選択された環境要因とメイオベントス群集の空間変異の関連性を図示した dbRDA の結果. ベクトルの方向は環境要因と dbRDA の関連性を, パーセントの数値は, 環境要因の群集組成変異への貢献度を示す.

扇形の大きさは主要分類群の組成の割合を示し, 線虫類は 100% の時, カイアシ類と多毛類は 10% の時に凡例と同じ大きさになる.

**Fig. 3** dbRDA of meiofaunal community composition according to DISTLM with selected environmental factors in 0-1cm (a), and 1-5 cm (b) sediment layers. The percentages of variation in the fitted model and of the total variation in mean abundances of meiofaunal taxa among stations as explained by each of the dbRDA axes are indicated. The direction of each vector and percentage figure overlays denotes the direction of the relationship between the dbRDA axes and each environmental factor, and contribution of the factor to the spatial differences in the meiofaunal composition, respectively. T: water temperature, Sal: salinity, DO: dissolved oxygen, Dep: water depth, Md: median grain size. relative abundance of the three most structuring taxa at each station (I. Copepods, II. Polychaetes, III. Nematodes) superimposed as segmented bubble plot.

は堆積物表層を好むが, thiobiotic meiofauna とよばれる一部の線虫類などは, 堆積物表層下 20-30 cm の還元層まで生息することが知られている (Giere, 2009).

有明海湾奥部において今回計測されたメイオベントスの生息密度よりも低い数値が観測された太田川河口域の場合, 例年 9 月は生息密度が下がる時期であり, これはその直前の高温や底層域の DO 濃度の低下が原因であると考察されている (板岡・玉井, 1993). 我々が調査を行った 2022 年 9 月下旬では, 海底直上の DO 濃度は貧酸素状態の基準値 (2.8 mg/l, Diaz & Rosenberg, 1995) を下回ることはなかったが, 同年 8 月 11 日の我々の測点付近の底層域で上記の基準値を下回る DO 濃度が観測されている (水産技術研究所ウェブサイト [https://ariake-yatsushiro.jp/ariake/danmen/danmen\\_hiduke/danmen\\_top.htm](https://ariake-yatsushiro.jp/ariake/danmen/danmen_hiduke/danmen_top.htm), 2025 年 3 月 21 日閲覧). したがって, 今回観測された 2022 年 9 月下旬のメイオベントス群集のうち, 特に堆積物表層部の線虫以外の分類群の低い生息密度と優占率は, 8 月の貧酸素の影響から回復前の状態であった可能性は否めない. 今後, 別の時期に採集されたサンプルの分析や比較を通じて, メイオベントス群集組成の時間変化と環境要因との関連性を追求する必要があるだろう. さらに, 線虫類やカイアシ類に関しては, より低次分類群レベルの分類結果を元に, 今回解析対象とした環境要因の他, 河口からの距離などとの関連性も加味した再解析を通じて, thiobiotic meiofauna の存在やその分布を制限する環境要因を明らかにする予定である.

## 謝 辞

この研究は, 独立行政法人 環境再生保全機構・環境研究総合推進費・環境問題対応型研究 (課題番号 1 - 2203 体系的番号 JPMEERF20221003) (研究代表: 長崎大学 山口敦子) の助成を受けて行われたものである. また, 本原稿の修正に際して多くの助言をいただいた 2 名の匿名の査読者と LAGUNA 編集委員長の香月興太氏に感謝を申し上げる.

## 引用文献

Anderson, M.J., Gorley, R.N. and Clarke, K.R. (2008) PERMANOVA+ for PRIMER: Guide to software and statistical methods. PRIMER-E, Plymouth, 214p.

東 幹夫・深沢南己・山野紗希・佐藤慎一・市川敏弘・佐藤正典・松尾匡敏 (2019) 諫早湾潮止め後 20 年間の有明海底生動物群集変化の総括的研究. 自然保護助成基金助成成果報告書, 28:1-10.

Cnudde, C., Moens, T., Werbrouck, E., Lepoint, G., Van Gansbeke, D. and De Troch, M. (2015) Trophodynamics of estuarine intertidal harpacticoid copepods based on stable isotope composition and fatty acid profiles. *Mar Ecol Prog Ser*, 524: 225-239.

Danovaro, R. (2010) Methods for the study of deep-sea sediments, their functioning and biodiversity. CRC Press, New York, 428p.

Diaz, R.J. and Rosenberg R. (1995) Marine benthic hypoxia: a review of its ecological effects and the behavioural responses of benthic macrofauna. *Oceanogr Mar Biol Ann Rev*, 33: 245-303.

Giere, O. (2009) Meiobenthology. The microscopic motile fauna of aquatic sediments, 2nd ed. Universität Hamburg, Hamburg, 527p.

Higgins, R.P. and Thiel, H. (1988) Introduction to the study of meiofauna. Smithsonian Institution Press, Washinton, D.C., 488p.

板岡 睦・玉井恭一 (1993) 広島湾におけるメイオベントスの群集構造と富栄養化. *日本ベントス学会誌*, 45: 19-28.

Itoh, M., Kawamura, K., Kitahashi, T., Kojima, S., Katagiri, H. and Shimanaga, M. (2011) Bathymetric patterns of meiofaunal abundance and biomass associated with the Kuril and Ryukyu trenches, western North Pacific Ocean. *Deep-Sea Res I*, 58: 86-97.

Kawano, K., Shimanaga, M., Ueda, R., Nguyen, Q.T.D. and Wada, M. (2021) Impact of seasonal hypoxia on benthic copepod communities in Omura Bay, a highly enclosed coastal sea in southwestern Japan. *Plankton Benthos Res*, 16(2): 93-99.

松本光秀・石橋信義・近藤栄造 (1992) 有明海の河口域及び海岸域の線虫相とムツゴロウ生息地との関連. *日本線虫研究会誌*, 22: 37-42.

Nguyen, Q.T.D., Ueda, R., Mori, F., Kang, T., Kim, D., Shimanaga, M., and Wada, M. (2018) Response of nematode community structure to hypoxia in an enclosed coastal sea, Omura Bay, for three consecutive years. *Plankton Benthos Res*, 13: 59-65.

Nguyen, Q.T.D., Kim, D., Shimanaga, M., Uchida, J., Aoshima, T. and Wada, M. (2020) Horizontal

- distribution of nematode communities in a seasonally-hypoxic enclosed sea (Omura Bay, Japan). *J Oceanogr*, 76: 479–489.
- 佐藤正典 (2000) 有明海の生きものたち. 海遊舎, 東京, 396p.
- Shimamura, M., Maenaka, A., Misonou, T., Masuda, T. and Henmi, Y. (2015) Spatiotemporal changes in meiofaunal composition on soft substrates in the semi-enclosed inner section of the northern Yatsushiro Sea. *J Oceanogr* 71: 177–186.
- 寒川 浩・下出信次・橋本隆司・菊池知彦 (2008) 相模湾真鶴港内におけるメイオベントスおよび自由生活性線虫類を用いた底質環境の評価法の有効性. *日本ベントス学会誌*, 63: 11–22.
- 辻野 睦・有馬郷司・神山孝史・神山卓志 (2008) 広島湾におけるマクロベントス・メイオベントス現存量・生産量の推定. *日本ベントス学会誌*, 63:35–41.
- 梅本祥平・木村妙子 (2016) 三重県田中川干潟における自由生活性線虫類の組成と分布. *日本ベントス学会誌*, 70: 65–74.
- Vafeiadou, A.M., Materatski, P., Adão, H., De Troch, M. and Moens, T. (2014) Resource utilization and trophic position of nematodes and harpacticoid copepods in and adjacent to *Zostera noltii* beds. *Biogeosciences*, 11: 4001–4014.
- Yoshino, K., Hamada, T., Yamamoto, K., Hayami, Y., Yamaguchi, S., and Ohgushi, K. (2010) Effects of hypoxia and organic enrichment on estuarine macrofauna in the inner part of Ariake Bay. *Hydrobiol* 652: 23–38.