

## 地下湧水が干潟のマクロベントス群集構造に及ぼす影響

梶原楓<sup>1</sup>, 南條楠土<sup>2†</sup>, 阿部真比古<sup>2</sup>, 足利由紀子<sup>3※</sup>,  
山守巧<sup>3</sup>, 和田太一<sup>4</sup>, 須田有輔<sup>2</sup>

### Effects of submarine groundwater discharge on the benthic macrofaunal community on the Nakatsu tidal flat, Japan

Kaede Kajiwara<sup>1</sup>, Kusuto Nanjo<sup>2†</sup>, Mahiko Abe<sup>2</sup>, Yukiko Ashikaga<sup>3※</sup>,  
Takumi Yamamori<sup>3</sup>, Taichi Wada<sup>4</sup> and Yusuke Suda<sup>2</sup>

**Abstract** : To clarify the effects of intertidal groundwater discharge on macrofaunal community structures of tidal flats, the species richness, abundance and biomass of macrobenthos at the groundwater-seepage area were assessed quantitatively, measuring environmental conditions including sediment temperature, median diameter, ORP and ignition loss, and salinity, water temperature and nutrient concentration of pore water at four sites (Nakatsu River mouth, Sanbyakuken, Higashihama, Oshinden) on the Nakatsu tidal flat, Oita prefecture, Japan, at low tides in June and July, 2019. A total of 1,233 individuals, belonging to 51 macrobenthic species (37 families) were collected. Mean species richness and biomass were significantly greatest at Higashihama, whereas mean abundance was greatest at the Nakatsu River mouth. Lower species richness, abundance and biomass were recorded at Sanbyakuken. At Higashihama, infaunal species such as the bivalve *Glaucanome angulata* and polychaete *Ceratonereis erythraeensis* were dominant in the lower salinity and higher nutrient environments. A canonical correspondence analysis showed a positive correlation between nutrients and dominant bivalve abundance. The overall results suggested that intertidal groundwater influences the macrofaunal community structure, providing low salinity and nutrient-rich conditions, which contribute to the high productivity and diversity of marine organisms on tidal flats.

**Key words** : submarine groundwater discharge, tidal flat, salinity, nutrients, macrobenthos

## 緒言

干潟は、内湾や汽水域の潮間帯に干出する平坦な砂泥地である。干潟には、ゴカイ類やカニ類、エビ類、貝類などのマクロベントスや、稚魚を含む魚類などが豊富に生息しており、生物多様性の保全、漁業生産、水質浄化などの重要な役割がある<sup>1,2)</sup>。

干潟には河川や地下水の湧出など、淡水の流入源がある

ことが多い。これらの淡水には、リン酸塩などの栄養塩類やデトリタスを含む懸濁物質が大量に含まれている<sup>3,4)</sup>。韓国のヨジャ湾沿岸では、底質の表層(0-3 m)において1日に約 $2.6 \times 10^7 \text{ m}^3$ の地下水が流入し、地下水を介した栄養塩フラックスでは他のフラックスよりも栄養塩が豊富であると報告されている<sup>5)</sup>。また河口付近には、濁度極大とよばれる浮遊した泥によって強い濁りが発生し、泥が大量に堆積することにより、それらは河川からの有機物を干潟内

2021年5月21日受付, 2021年6月25日受理

1. 国立研究開発法人水産研究・教育機構 水産大学校水産学研究所 学生 (Graduate student, Graduate School of Fisheries Science, National Fisheries University)

2. 国立研究開発法人水産研究・教育機構 水産大学校生物生産学科 (Department of Applied Aquabiology, National Fisheries University)

3. NPO法人 水辺に遊ぶ会 (NPO Nakatsu Waterfront Conservation Association)

4. NPO法人 南港ウェットランドグループ (NPO Nankou Wetland Conservation Group)

※2020年10月14日に逝去

†別刷り請求先 (corresponding author): knanjo@fish-u.ac.jp

に留める一助となっている<sup>6,7)</sup>。このような陸域からの有機物や栄養塩類の供給は、バイオフィームやデトリタスを増加させるbottom-up効果をもたらすため<sup>8,9)</sup>、干潟マクロベントスの多様性や現存量を決定する重要な要因のひとつであると考えられる。

実際、アメリカのケープ・ヘンローベン岬において、砂浜への地下水の湧出が塩分の大幅な低下、温度の安定化、栄養物の流入の増加、堆積物の安定化をもたらし、微細藻類のバイオマスを増加させることが示唆されている<sup>10)</sup>。このような環境条件の変化を介して、地下水はマクロベントス群集構造を局所的に変化させる要因となりえる<sup>11,12)</sup>。

しかし、国内において陸水、特に浅所の不圧地下水（以後、干潟地下水とよぶ）による生物への影響を詳細に調べた研究は非常に乏しい。現在、防災を目的として、不浸透層まで鋼矢板を打設した護岸が各地の海岸で造成されている。このような打設によって、護岸堤内地と干潟間での地下水循環が阻害され<sup>13,14,15)</sup>、陸域と海域間の物質循環が断裂することが懸念される。そのため、干潟地下水がマクロベントス群集構造に及ぼす影響を明らかにし、干潟生態系における地下水の重要性を明示する必要があると考える。

そこで本研究では、大分県中津干潟を調査地点とし、干潟地下水の湧出帯付近におけるマクロベントスの種数、個体数、種組成、および底質間隙水の塩分などの物理環境を調べ、干潟地下水が湧出帯直下のマクロベントス群集構造に及ぼす影響を明らかにすることを目的とした。

## 材料と方法

### 調査地及び調査期間

中津干潟は、合計すると1347 ha<sup>16)</sup>におよぶ広大な干潟である。本研究では中津川河口から大新田海岸までの前浜

域を調査範囲とした。調査サイトとして干潟の西から順に、中津川河口、三百間、東浜、大新田緩傾斜護岸の4カ所を設けた(Fig. 1)。なお中津干潟は、前浜のほぼ全域にわたって地下水の湧出が確認されるため、地下水の湧出する転石のない泥地・砂泥地を調査地点とし、各調査サイトにおいてランダムな4地点でサンプルを採取した(n = 4)。以下に4つの調査サイトの地理的な特徴を記す。

#### (1) 中津川河口

中津干潟西部の中津川河口付近の前浜干潟である(Fig. 1)。潮間帯には転石はみられないが、陸生植物や海藻などの堆積物が多く、後浜にはハマサジ *Limonium tetragonum* などの陸生植物の植生があり、その背後には緩傾斜護岸が造成されている。

#### (2) 三百間

中津干潟西部の三百間海岸にある前浜干潟である(Fig. 1)。東端に自見川が流れ、堆積物は少なく、転石がややみられる。後浜が広くヨシ原などの植生も広範囲に広がっており、その背後には直立護岸が造成されている。

#### (3) 東浜

中津市東浜の前浜干潟である(Fig. 1)。自見川と大江川の間位置し、堆積物は少なく転石がややみられる。後浜には植生が少なく、緩傾斜護岸が造成されているが、その後背には陸生植物による植生が広がる。

#### (4) 大新田

中津市大新田の前浜干潟である(Fig. 1)。転石がややみられ、中津川河口ほどではないが海藻類などの堆積物もみられる。潮間帯の上部より階段状の緩傾斜護岸が造成されており、その後背にはクロマツ *Pinus thunbergii* の防災林が広がる。

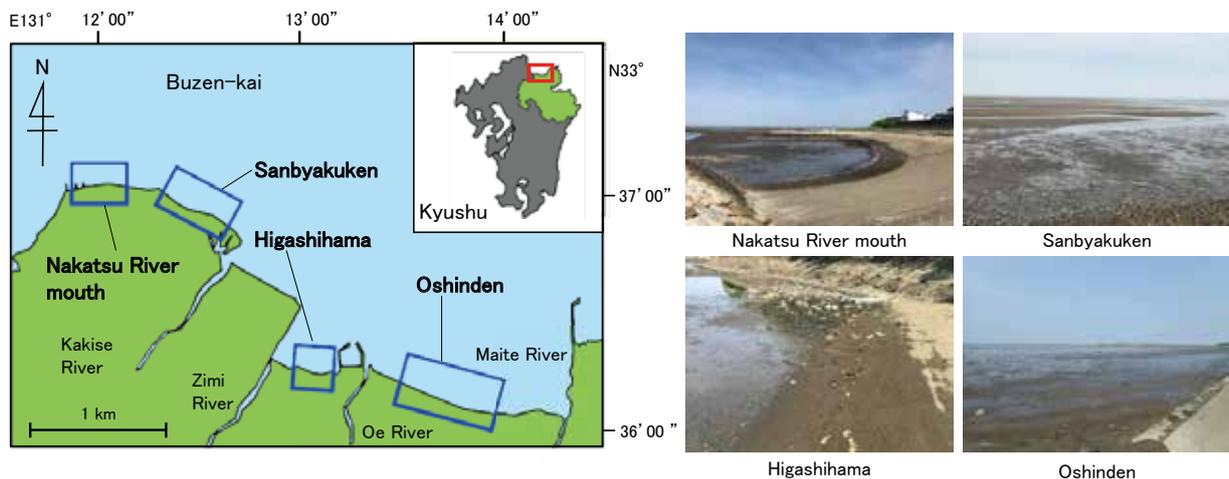


Fig. 1. Map of the Nakatsu tidal flat, Oita Prefecture. Blue boxes indicate study sites.

調査は2019年の6月と7月の大潮、または中潮の干潮時に実施した。

## 物理環境

各サイトにおいて、物理環境として底質の中央粒径値、強熱減量、酸化還元電位、地中温度および間隙水の塩分、水温、栄養塩類（リン酸態リン、アンモニア態窒素、硝酸態窒素、亜硝酸態窒素）の濃度の測定を行った。

中央粒径値の分析用の試料として、コアサンプラー（直径10 cm）を用いて深さ10 cmの底質を採取し、これを4回繰り返した（ $n = 4$ ）。採取した底質は、それぞれをビニール袋に保存し研究室へ持ち帰った。中央粒径値は、ふるい分析法によって求めた。はじめに貝殻やベントスなどを取り除いた試料約200 gをプラスチック容器に入れ、過酸化水素を加えて有機物を除去した。反応終了後、水道水を加え底質沈殿後の上澄みを除去する作業を繰り返し、塩分と過酸化水素を除去し、乾燥機（FS-620型、アドバンテック社製）に入れ60°Cで48時間以上乾燥させた。乾燥後、試料スプーン7杯（70 g）をミクロ型電磁振動ふるい器（M-2型、筒井理化学器機製）を用いて5分間ふるった。ふるいの目合いは2000、850、425、250、106、75  $\mu\text{m}$ のステンレス製のものを用いた。ふるい分け後、電子天秤（GF-300型、エーアンド・デイ製）を用いてそれぞれのふるいに残留した底質を1/1000gまで秤量した。

強熱減量の分析用の底質試料として、表層0.5 cmの底質約10 gをスプーンで採取し、これを4回繰り返した（ $n = 4$ ）。採取した底質はユニパック（生産日本社）に入れて冷凍し、研究室に持ち帰り60°Cで24時間以上乾燥させた。事前に650°Cで6時間、電気炉（NMF-1200型、いすゞ製作所製）にて強熱したルツボを用いて、試料約5 gを650°Cで8時間強熱した。強熱前の試料重量をA、強熱後の試料重量をBとし、下記の方法で強熱減量（%）を求めた。

$$\text{強熱減量 (IL)} = \{(A - B) / A\} \times 100$$

酸化還元電位および地中温度の計測には、ポータブル型pH・ORPメーター（D-72、HORIBA製）を用いた。各地点の底土に電極を深さ5 cmまで差し込み、表示された値を記録し、これを4回繰り返した（ $n = 4$ ）。記録した値は下記の関係式に当てはめ、標準水素電極による値に換算した。

$$\text{酸化還元電位 (ORP)} = E + 206 - 0.7 (t - 25)$$

E：現地で記録したmV（ORP）測定値

t：地中温度（ $t = 0 \sim 60^\circ \text{C}$ ）

水質の測定には水温・塩分計（63-10FT、YSI社製）を

用いた。各地点の底質間隙水の水温・塩分を測定し、これを4回繰り返した（ $n = 4$ ）。

栄養塩類の分析用の試料として、ポリエチレン瓶（アイボーイ100 ml広口、アズワン社製）に約100 mlの湧水を採取し、これを4回繰り返した（ $n = 4$ ）。採取した湧水は冷凍保存をした。研究室において、ガラスフィルター（目合い0.7  $\mu\text{m}$ 、GF/F、Whatman 社）で吸引ろ過をして細かな有機物や粒子を除去した。ろ過後の水を試料として、吸光度方式水質測定器（DR-2800、Hach Co. U. S. A.）を用いて各種栄養塩濃度を測定した。分析方法は、リン酸態リンではアスコルビン酸法、アンモニア態窒素ではサリチル酸塩法、硝酸態窒素ではカドミウム還元法、および亜硝酸態窒素ではジアゾ化法を用いて行い、その結果をリン酸態リンおよびアンモニア態窒素、硝酸態窒素、亜硝酸態窒素の濃度で示した。

## マクロベントスの採集

各サイトにおいて、30×30 cmのコドラートを設置して深さ20 cmまでの砂泥を採集し、これを4回繰り返した（ $n = 4$ ）。まず、コドラート内の表層のマクロベントスを徒手で採集した。その後ショベルを用いて底質を採集し、掘った後に染み出た間隙水を小型ネット（目合い1 mm）で掬いヨコエビ類などを採集した。採集した底質を目合い1 mmのふるいにかけて、残った底質と生物を不織布に入れて冷凍保存した。このサンプルからマクロベントスを選別し、可能な限り下位の分類群まで同定を行った。種同定は、足利<sup>15)</sup>、濱村<sup>17)</sup>、今原<sup>18)</sup>、今島<sup>19-22)</sup>、三浦<sup>23)</sup>、西村<sup>24, 25)</sup>、小川<sup>26)</sup>、奥谷<sup>27, 28)</sup>、鈴木ら<sup>29)</sup>、渡部<sup>30)</sup>などに従った。その後、種ごとに個体数の計数と湿重量の秤量を行った。

## 統計解析

マクロベントスの平均種数、個体数、バイオマスがサイト間でどの程度異なるかを明らかにするために一元配置分散分析を行った。この解析で有意差が生じた場合は、多重比較法（Tukey-Kramer法）を用いて各サイト間の有意差の有無を検討した。

また、マクロベントスの個体数密度にどの環境条件が影響を及ぼしているかを明らかにするために、正準対応分析（Canonical correspondence analysis：以下CCA解析とする）を行った。ここでは、個体数で優占した上位15種を対象とした。事前に各物理環境項目間の相関関係を調べ、項目間に相関の認められなかった中央粒径値、酸化還元電位、

地中温度, 栄養塩類 (リン酸態リン, アンモニア態窒素), 間隙水塩分の6項目をCCA解析に用いた。

## 結 果

### 物理環境

各物理環境の結果をFig. 2に, それらの統計解析の結果をTable 1に示した。

中央粒径値にはサイト間で有意な差は認められなかったものの, 中津川河口と大新田で高く, 三百間と大新田で低い傾向にあった。酸化還元電位はサイト間で有意に異なり, 大新田で三百間, 東浜よりも有意に低かった。

強熱減量では, 東浜が三百間よりも有意に高かった。また, 栄養塩類濃度の総量は東浜で高く, 三百間で低い傾向にあった (Fig. 3)。このうち, リン酸態リンにおいて東浜が三百間よりも有意に高かった。

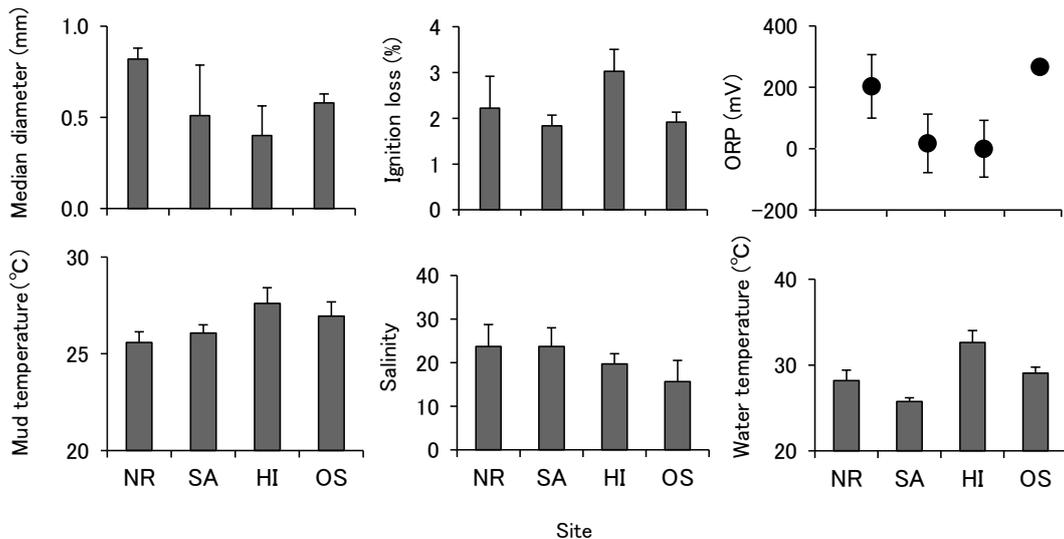
塩分は中津川河口, 三百間と西側のサイトで高く, 東浜, 大新田の東側のサイトで低い傾向を示した。地中温度は中津川河口よりも東浜で有意に高く, 全体的に西側の調査地点で低かった。間隙水の水温も似た傾向を示し, 東浜が中津川河口, 大新田よりも有意に高く, さらに三百間が中津川河口, 大新田よりも有意に低かった。

以上より, 中津川河口と大新田は粒径が大きく酸化的な底質であり, 逆に三百間と東浜は粒径が細かく還元的で, 東浜では強熱減量が高かった。また, 中津川河口と三百間では塩分が高く, 東浜と大新田では塩分が低かった。なお, 栄養塩類濃度は東浜で顕著に高く, 三百間では低かった。

### マクロベントスの群集構造

調査を通して, 総計 37科 51種 1233個体207.76 gのマクロベントスが採集された (Table 2)。

東浜では27種280個138.44 gで総バイオマスが最も多く,

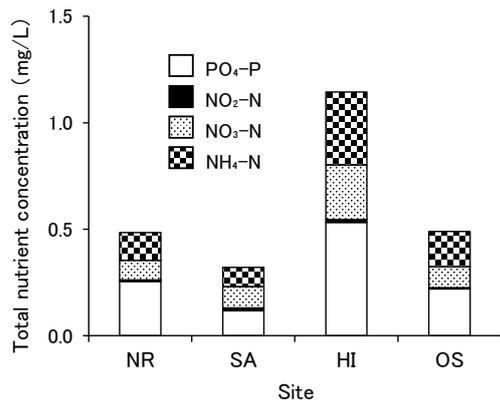


**Fig. 2.** Mean median diameter, ignition loss, oxidation-reduction potential (ORP), mud temperature, salinity, and water temperature at each site on the Nakatsu tidal flat. Bars show standard deviation. NR, Nakatsu River mouth; SA, Sanbyakuken; HI, Higashihama; OS, Oshinden.

**Table 1.** Results of one-way ANOVAs testing differences in physical environments among sites on the Nakatsu tidal flat

	df	MS	F	P	Tukey-Kramer test
Median diameter (mm)	3	59.874	2.486	0.110	
Ignition loss (%)	3	0.170	4.024	0.034*	HI>SA
ORP (mV)	3	71117.757	7.453	0.004*	OS>SA=HI
Temperature (°C)	3	3.252	5.820	0.011*	HI>NR
Water temperature (°C)	3	32.662	24.120	0.000*	HI>NR=OS>SA
Salt content (‰)	3	59.874	2.486	0.110	
PO <sub>4</sub> -P (mg/L)	3	0.126	4.893	0.019*	HI>SA
NO <sub>2</sub> -N (mg/L)	3	0.000	1.391	0.293	
NO <sub>3</sub> -N (mg/L)	3	0.025	2.812	0.085	
NH <sub>4</sub> -N (mg/L)	3	0.050	2.363	0.122	

NR, Nakatsu River Mouth; SA, Sanbyakuken; HI, Higashihama; OS, Oshinden. \*,  $P < 0.05$



**Fig. 3.** Mean total nutrient concentration in groundwater at each site on the Nakatsu tidal flat. NR, Nakatsu River mouth; SA, Sanbyakuken; HI, Higashihama; OS, Oshinden.

個体数においてウミニナ *Batillaria multiformis* やヒモムシ類 *Nemertea* sp. が優占した。三百間では13種164個体5.97 gと種数, 個体数, 総バイオマスが最も少なく, クーマ科 *Diastylidae* sp. やコケゴカイ *Ceratonereis erythraeensis* が優占した。中津川河口は21種477個体11.67 gで個体数が最も多く, クーマ科とニホンドロソコエビ *Grandidierella japonica* が優占した。大新田では29種311個体51.67 gと総種数が最も多く, ヒモムシ類, ヤマトオサガニ *Macrophthalmus japonicus* が優占した。

マクロベントスの平均種数はサイト間で有意に異なり, 東浜が三百間よりも有意に多かった (Tukey-Kramer法, 東浜 > 三百間) (Table 3, Fig. 4)。平均個体数では有意な

**Table 2.** Mean abundance of macrobenthos collected at each site on the Nakatsu tidal flat

Phylum	Family	Species (Acronym)	Site			
			NR	SA	HI	OS
Mollusca	Lottiidae	<i>Patelloida pymaea</i>	0.50			
		<i>Patelloida conulus</i>			0.50	
	Pyramidellidae	Pyramidellidae sp.				0.25
	Nassariidae	<i>Hima festiva</i>	0.25	0.50	0.50	
	Batillariidae	<i>Batillaria multiformis</i> ( <i>Bmul</i> )			13.25	0.50
		<i>Batillaria attramentaria</i>			3.75	
		<i>Batillaria zonalis</i>				0.25
		<i>Batillaria</i> sp.			1.50	
	Potamididae	<i>Cerithidea cingulata</i>			2.00	
		<i>Cerithidea djadjariensis</i>			2.50	
	Assimineidae	<i>Assiminea</i> sp.				0.25
	Iravadiidae	<i>Nozema ziczac</i>				0.75
	Amphibolidae	<i>Lactiformis takii</i>			3.25	
	Mytilidae	<i>Arcuatula senhousia</i> ( <i>Asen</i> )	19.00			1.75
	Arcidae	Arcidae sp.				0.25
	Ostreidae	Ostreidae sp.			0.25	
	Glauconomidae	<i>Glauconome angulata</i> ( <i>Gang</i> )			2.50	
	Mactridae	<i>Mactra veneriformis</i>	0.25			
	Tellinidae	<i>Macoma sector</i>			0.25	
		<i>Macoma incongrua</i>	0.25			
<i>Moerella rutila</i> ( <i>Mrut</i> )		1.00	0.25	1.00		
<i>Serratina diaphana</i>					0.25	
<i>Cyclina sinensis</i>				1.00		
Laternulidae	<i>Ruditapes philippinarum</i>	0.25				
	<i>Laternula anatina</i>			2.25	0.25	
	<i>Laternula marilina</i> ( <i>Lmar</i> )	7.00		1.50		
Annelida	<i>Laternula</i> sp. ( <i>Late</i> )			0.50		
	Nereididae	<i>Ceratonereis erythraeensis</i> ( <i>Cery</i> )	10.00	8.25	1.50	3.25
	Glyceridae	<i>Glycera macintoshi</i> ( <i>Gmac</i> )	0.25	0.50	0.50	1.75
	Capitellidae	<i>Capitella teleta</i>			4.00	
	Pectinariidae	<i>Lagis bocki</i>	1.00	0.25	0.50	
Nemertea	Polychaeta spp.					
	Nemertea sp. ( <i>Neme</i> )	7.00		11.00	42.00	
Sipuncula	Sipunculidae	<i>Sipunculus</i> sp.	1.50	0.50		

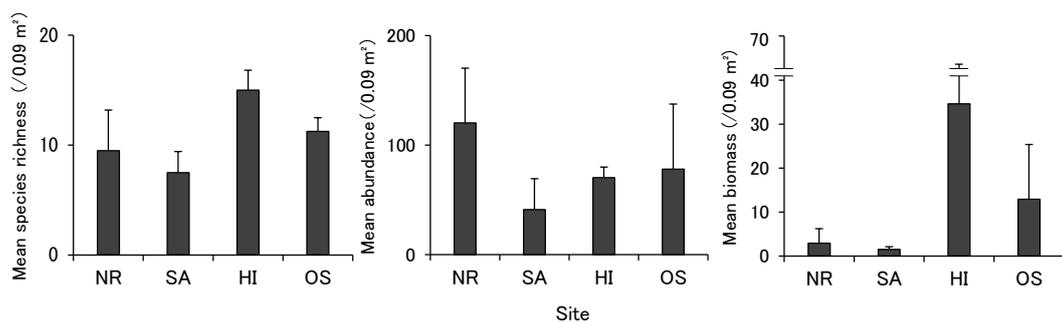
NR, Nakatsu River Mouth; SA, Sanbyakuken; HI, Higashihama; OS, Oshinden  
Acronyms for top 15 species in parentheses used in Figure 5

**Table 2.** Continued

Phylum	Family	Species (Acronym)	Site			
			NR	SA	HI	OS
	Dogielinotidae	Dogielinotidae sp. ( <i>Dogi</i> )	2.50	1.25	0.25	4.25
	Aoridae	<i>Grandidierella japonica</i> ( <i>Gjap</i> )	21.00	5.25	1.50	4.00
	Hyalidae	<i>Ptilohyale barbicornis</i>				0.25
	Anthuridae	<i>Cyathura muromiensis</i>			0.25	
	Sphaeromatidae	<i>Gnorimosphaeroma</i> spp. ( <i>Gnor</i> )	16.00			0.50
	Diastylidae	Diastylidae sp. ( <i>Dias</i> )	23.00	15.25	9.25	0.50
	Caprellidae	<i>Caprella scaura</i>				0.25
	Alpheidae	<i>Alpheus brevicristatus</i>				0.25
	Laomediidae	<i>Laomedia astacina</i>				0.25
	Callianassidae	<i>Nihonotrypaea japonica</i>		0.25		0.25
		<i>Nihonotrypaea harmandi</i>				0.25
		<i>Nihonotrypaea petaluna</i>		0.25		
		<i>Nihonotrypaea</i> sp.		0.25		
	Diogenidae	<i>Clibanarius longitarsus</i>				0.25
	Paguridae	<i>Pagurus minutus</i> ( <i>Pmin</i> )	7.50	1.50	1.50	0.50
		<i>Pagurus</i> sp.		4.25		
	Leucosiidae	<i>Pyrhila pisum</i>			0.75	0.25
	Varuninae	<i>Hemigrapsus sanguineus</i>	0.25			
		<i>Hemigrapsus takanoi</i>	0.50	0.25	0.25	0.50
		Varuninae sp.		0.50		0.25
		Decapoda sp.		0.25		0.25
	Macrophthalminae	<i>Macrophthalmus abbreviatus</i>	0.25	0.50		0.25
		<i>Macrophthalmus japonicus</i> ( <i>Mjap</i> )		1.25	2.75	12.50
		<i>Macrophthalmus banzai</i>				0.50
Total species richness			21	13	27	29
Total abundance			477	164	281	311
Total biomass (mg)			11.67	5.97	138.44	51.67

NR, Nakatsu River Mouth; SA, Sanbyakuken; HI, Higashihama; OS, Oshinden

Acronyms for top 15 species in parentheses used in Figure 5



**Fig. 4.** Mean species richness, abundance and biomass of macrobenthos per quadrat (0.09 m<sup>2</sup>, n = 4) at each site on the Nakatsu tidal flat. Bars show standard deviation. NR, Nakatsu River mouth; SA, Sanbyakuken; HI, Higashihama; OS, Oshinden.

**Table 3.** Results of one-way ANOVAs testing differences in species richness, abundance and biomass of macrobenthos among sites on the Nakatsu tidal flat

	df	MS	F	P	Tukey-Kramer test
Species	3	0.058	5.545	0.013*	HI>SA
Abundance	3	0.180	3.452	0.051	
Biomass	3	0.967	7.383	0.005*	HI>NR=SA

NR, Nakatsu River Mouth; SA, Sanbyakuken; HI, Higashihama; OS, Oshinden.

\*,  $P < 0.05$

差はみられないものの (Table 3), 中津川河口で多く, 三百間で少ない傾向にあった (Fig. 4)。バイオマスでは東浜が中津川河口, 三百間よりも有意に多かった (Table 3, Fig. 4)。

すなわち, マクロベントスの種数は多くの二枚貝や多毛類が出現した東浜で最も多いことがわかった。個体数は中津川河口で最も多く, バイオマスは東浜で最も高かった。なお, 種数, 個体数, バイオマス全てにおいて三百間が有意に低かった。

次に, マクロベントスの分布と物理環境の関係を調べるためにCCA解析を行った (Fig. 5)。その結果, 第1軸の固有値は0.56 (寄与率46.4%), 第2軸の固有値は0.42 (寄与率35.2%) であり, 両軸でマクロベントスの分布データから得られた全分散 (total inertia) 1.201の81.6%を説明した。固有ベクトルが第1軸に対して正の向きであったのは地中温度と栄養塩類 (リン酸態リン, アンモニア態窒素) であり, それ以外の環境要因は負の向きを示した。各種のプロットの座標上の位置をみると, 中津川河口と三百間で優占したホトトギスガイ *Arcuatula senhousia* やニホンドロソコエビ, クーマ科, イソコツブムシ属

*Gnorimosphaeroma* spp. は第1軸に対して負の側に位置し, 酸化還元電位, 塩分と正の関係にあった。これに対して, 大新田に優占したヤマトオサガニ, ヒモムシ類, マキントシチロリ *Glycera macintoshi* などの種は第1軸の正の側に位置し, 酸化還元電位, 塩分と負の関係を示した。

一方, 東浜で優占したウミナナ, ハナグモリ *Glaucanome angulata*, オキナガイ科 *Laternula* sp. などの種は第1軸の正の側に位置した。

東浜の優占種は, 地中温度と栄養塩類に対して正の関係にあり, 逆に中央粒径値とは負の関係にあった。ユウシオガイ *Moerella rutila* は中津川河口, 三百間グループと東浜グループの中間に位置した。

## 考 察

本調査の結果, 中津干潟のサイト間では物理環境に差異が認められ, 東浜と大新田では低塩分で栄養塩濃度が高く, 東浜では強熱減量も高かった。一方, 三百間では高塩分で栄養塩濃度と強熱減量が低かった。これらの違いは干潟地下水の影響によって生じていると推察される。沿岸域に湧出する地下水は, 雨水や河川水を由来とするため淡水もしくは低塩分であり<sup>31)</sup>, 陸由来の有機物や栄養塩類が豊富に含まれている<sup>32, 33)</sup>。このため, 東浜と大新田の環境特性は地下水の影響が大きく反映されたものと考えられる。

東浜と大新田では, ベントスの種数とバイオマスが他のサイトよりも多かった。地下水湧出帯では, 地下水によって干潟へ陸域由来の栄養塩類が供給され<sup>33, 34)</sup>, 栄養塩類を利用して一次生産者である微細藻類が増加し, 微細藻類を摂食するマクロベントスが増加する一連の食物連鎖が存在すると言われている<sup>11, 35, 36)</sup>。本調査において, これらのサイトではウミナナなどの巻貝類, オキシジミ *Cyclina sinensis* などの二枚貝類, イトゴカイ *Capitella teleta* などの多毛類

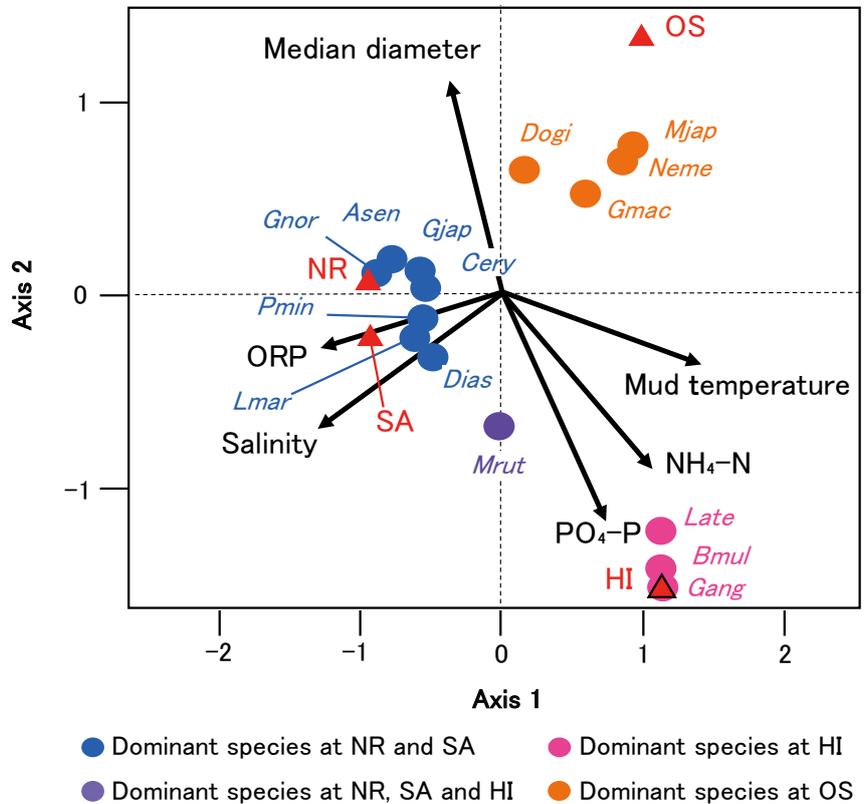


Fig. 5 Canonical correspondence analysis (CCA) ordination diagram based on the densities of dominant species at each site on the Nakatsu tidal flat. Environmental factors represented by vectors. ●, dominant species; ▲, sites. NR, Nakatsu River mouth; SA, Sanbyakuken; HI, Higashihama; OS, Oshinden. Species acronyms shown in Table 2.

が多く出現した。これは、これらの種が湧出帯付近で増加する微細藻類や、湧水から供給された堆積有機物を摂食するためと推測される<sup>37, 38)</sup>。韓国西部の干潟においても、地下水浸透域では微細藻類のバイオマスが多く、それを摂餌する巻貝 *Batillaria cumingi* が多数生息することが報告されている<sup>11)</sup>。

一方、三百間では底質の粒径や還元度が東浜と同条件であるにもかかわらず、ベントスの種数、個体数、バイオマスが少なかった。三百間では底質の強熱減量が低く、栄養塩濃度も低かったことから、干潟地下水の影響が相対的に少なく、それに伴って生息するベントスが少なかったと考えられる。

このような栄養的要因だけでなく、底質の粒径、塩分、温度といった非栄養的要因もマクロベントスの分布に影響を及ぼす。例えば、東浜や大新田で多く出現したオキシジミ、ハナグモリ、オオシンデンカワザンショウ *Assiminea* sp. などは低塩分の環境に生息することが知られている<sup>29)</sup>。したがって、地下水の湧出は淡水を供給することにより、低塩分を好む種が棲みやすい環境を干潟に局所的に作り出していると考えられる。他の地域の干潟においても、地下水流入によって形成された限定的な低塩分環境では、周囲とは異なる多毛類群集構造が形成された<sup>10, 39)</sup>。さらに、ハナグモリとオオシンデンカワザンショウは絶滅危惧Ⅱ類に属しており<sup>40)</sup>、地下水湧出帯はこのような希少な種に好適な生息場を提供していると推察される。

潮汐作用によって冠水と干出を繰り返す干潟は温度変化が激しく<sup>41)</sup>、この温度ストレスによってベントスの種数や個体数はしばしば減少する<sup>9, 42)</sup>。これに対して、干潟地下水は昼夜、季節変動による温度変化が相対的に小さく、年間を通して安定した温度循環を提供する<sup>10, 13, 14)</sup>。本調査地においても、地下水の影響の大きい東浜・大新田と、影響の小さい中津川河口・三百間では間隙水の温度が異なり、調査サイトの西側と東側に大別された。このことから、東浜や大新田で干潟地下水が一定の温度で湧出していることが推測され、地下水の影響によって間隙水の温度が安定したこともベントスの種数とバイオマスが他のサイトよりも豊富であった要因のひとつであると考えられる。

ただし、本研究は春から初夏にかけての時期にしか実施していないため、温度を含めた様々な条件が変化する他の季節における影響を評価することができていない。今後は、干潟地下水がマクロベントス群集構造に及ぼす影響を通年で検討する必要がある。

以上より、中津干潟において干潟地下水は有機物や淡水の供給、栄養塩類の供給による微細藻類の増加を介してマクロベントス群集構造に影響を及ぼすことが示唆された。干潟地下水の影響の大きい東浜においてベントスの種数とバイオマスが豊富であったことから、地下水湧出帯はマクロベントス群集の多様性と生産性を助長する重要な環境要因のひとつであると考えられる。したがって、護岸造成などの際には、地下水湧出帯の存在を考慮し、陸域と干潟間での地下水循環を阻害しないよう配慮する必要がある。また、干潟のマクロベントスは魚介類や渡り鳥、水鳥といった様々な生物の餌となる。広島県加茂川の河口干潟では、水産重要種であるマコガレイ稚魚が地下水湧出下に多く出現し、湧出帯付近の餌生物を摂餌して成長することが示唆されている<sup>43)</sup>。これらの高次捕食者へとつながる干潟生態系の食物連鎖を維持するには、湧出帯のようなミクロな環境を含めて干潟を保全することが重要であると考えられる。

## 謝 辞

本研究を進めるにあたり、フィールド調査の際に、数々な便宜を図っていただいた大分県漁業協同組合中津支店の皆様ならびに中津市の住民の方々に深く感謝いたします。また、令和元年度における沿岸生態系保全研究室の学生諸氏には、重労働であるフィールド調査において惜しみない協力と数々の助言や労いの言葉をいただき、研究を行う上で大きな支えとなりました。心からの感謝の気持ちと御礼を申し上げます。

## 引用文献

- 1) Herman PMJ, Middelburg JJ, Van de Koppel J, Heip CHR: Ecology of estuarine macrobenthos. *Adv Ecol Res*, **29**, 195-240 (1999)
- 2) 花輪信一: 日本の干潟の現状と未来. *地球環境*, **11**, 235-244 (2006)
- 3) Pereira-Filho J, Schettini CAF, Rörig L, Siegle E: Intratidal variation and net transport of dissolved inorganic nutrients, POC and Chlorophyll a in the Camboriú River Estuary. *Estuar Coast Shelf Sci*, **53**, 249-257 (2001)
- 4) 大阪市立自然史博物館・大阪自然史博物館センター: 干潟を考える 干潟を遊ぶ. 東海大学出版会 (2008)

- 5) Dong-Woon H, Guebuem K, Yong-Woo L, Han-Soeb Y: Estimating submarine inputs of groundwater and nutrients to a coastal bay using radium isotopes. *Mar Chem*, **96**, 61–71 (2005)
- 6) 梶原昌弘: 懸濁物質の凝集. 陸学雑誌, **39**, 66–74 (1978)
- 7) 坂倉範彦: 潮汐環境の堆積物: 日本の干潟の理解に向けて. 日本古生物学会, 化石, **76**, 48–62 (2004)
- 8) 桑江朝比呂, 三好英一: 小型シギ類における未知の餌の探求を通じた干潟生態系の再生. 土木学会論文集B2 (海岸工学), **68**, I\_1176–I\_1180 (2012)
- 9) 桑江朝比呂: 造成された干潟生態系の発達過程と自律安定性. 土木学会論文集, **35**, 25–34 (2005)
- 10) Douglas CM, William JU: Ecological consequences of ground water discharge to Delaware Bay, United States. *Groundwater*, **42**, 959–970 (2004)
- 11) Waska H, Kim G: Differences in microphytobenthos and macrofaunal abundances associated with groundwater discharge in the intertidal zone. *Mar Ecol Prog Ser*, **407**, 159–172 (2010)
- 12) Zipperle A, Reise K: Freshwater springs on intertidal sand flats cause a switch in dominance among polychaete worms. *J Sea Res*, **54**, 143–150 (2005)
- 13) 中下慎也, 上野耕平, Touch Narong, 福岡捷二, 日比野忠史: 太田川デルタにおける広域地下水が干潟地下水環境に及ぼす影響. 土木学会論文集B1 (水工学), **69**, I\_547–I\_552 (2013)
- 14) 中下慎也, 中岡孝行, 三上育英, 清家泰, 日比野忠史: 河川感潮域における不圧地下水と干潟地下水との水循環. 土木学会論文集B2 (海岸工学), **69**, I\_1216–I\_1220 (2013)
- 15) 中下慎也, 中本健二, 中澤泉, 福嶋正博, 日比野忠史: 石炭灰造粒物層内における地下水流動と濁質の輸送. 土木学会論文集B3 (海洋開発), **71**, I\_1089–I\_1094 (2015)
- 16) 足利由紀子: 中津干潟レポート2013. 特定非営利活動法人水辺に遊ぶ会, 中津 (2014)
- 17) 濱村陽一: 芸南の海産貝類図鑑. 蘭島文化振興財団, 広島 (2004)
- 18) 今原幸光: フィールド版写真でわかる磯の生き物図鑑. トンボ出版, 大阪 (2013)
- 19) 今島実: 環形動物, 多毛類. 株式会社生物研究社, 東京 (1996)
- 20) 今島実: 環形動物, 多毛類 II. 株式会社生物研究社, 東京 (1996)
- 21) 今島実: 環形動物, 多毛類 III. 株式会社生物研究社, 東京 (1996)
- 22) 今島実: 環形動物, 多毛類 IV. 株式会社生物研究社, 東京 (1996)
- 23) 三浦知之: 干潟の生きもの図鑑. 株式会社南方新社, 鹿児島 (2008)
- 24) 西村三郎: 原色検索日本海岸動物図鑑, I. 株式会社保育者, 大阪 (1992)
- 25) 西村三郎: 原色検索日本海岸動物図鑑, II. 株式会社保育者, 大阪 (1992)
- 26) 小川洋: 東京湾のヨコエビガイドブック. 東邦大学理学部生命圏環境科環境生態学研究室, 千葉 (2011)
- 27) 奥谷喬司: 日本海産貝類図鑑. 東海大学出版会, 東京 (2000)
- 28) 奥谷喬司, 楚山勇: フィールド図鑑貝類. 東海大学出版会, 東京 (1997)
- 29) 鈴木孝男, 木村昭一, 木村妙子, 森敬介, 多留聖典: 干潟ベントスフィールド図鑑. 特定非営利活動法人 日本国際湿地保全連合, 東京 (2013)
- 30) 渡部哲也: 海辺のエビ・ヤドカリ・カニ ハンドブック. 株式会社文一総合出版, 東京 (2014)
- 31) Anne EG & Arthur GG: Nitrogen inputs to a marine embayment: the importance of groundwater. *Biogeochemistry*, **10**, 309–328 (1990)
- 32) Caroline PS, Philippe VC: Nutrient inputs to the coastal ocean through submarine groundwater discharge: controls and potential impact. *J Hydrol*, **295**, 64–86 (2004)
- 33) 塩川麻保, 山口聖, 梅澤有: 有明海西岸域への地下水由来の栄養塩供給量の評価. 沿岸海洋研究, **50**, 157–167 (2013)
- 34) 鶴成悦久, 西隆一郎, 加茂崇, 渡辺卓也, 間世田未来, 浜本麦, 峯俊介, 石川和雄: 重富干潟における栄養塩供給と淡水流入量の推定. 土木学会論文集B3 (海洋開発), **71**, I\_850–I\_855 (2015)
- 35) 菊池泰二: 干潟生態系の特性とその環境保全の意義. 日本生態学会誌, **43**, 223–235 (1993)
- 36) 菊池泰二: 多毛類 *Capitella capitata* の生態, 生活史: “汚染環境指標種” の生態的特性をめぐって (総合抄録). ベントス研究会連絡誌, 33–51 (1979)
- 37) 佐藤正典: 干潟における多毛類の多様性. 地球環境, **11**, 191–206 (2006)

- 38) Reise K: Tidal Flat Ecology: an experimental approach to species interactions. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg (1985)
- 39) Ryan KD, Douglas CM: Hydrologic interactions of infaunal polychaetes and intertidal groundwater discharge. *Mar Ecol Prog Ser*, **363**, 205–215 (2008)
- 40) 環境省: 環境省絶滅危惧種検索. 環境省, 生物多様性センター (2019) (<https://ikilog.biodic.go.jp/Rdb/env>)
- 41) Deppe F: Intertidal mudflats worldwide. *Practical course at the Common Wadden Sea Secretariat (CWSS)*, Wilhelmshaven (1999)
- 42) 森本剣太郎, 矢北孝一, 清田政幸, 滝川清: 干潟における底泥温度特性に関する研究. *海洋工学論文集*, **55**, 1296–1300 (2008)
- 43) Hata M, Sugimoto R, Hori M, Tomiyama T, Shoji J: Occurrence, distribution and prey items of juvenile marbled sole *Pseudopleuronectes yokohamae* around a submarine groundwater seepage on a tidal flat in southwestern Japan. *J Sea Res*, **111**, 47–53 (2016)