東京湾多摩川河口干潟におけるムロミスナウミナナフシ *Cyathura muromiensis*
(甲殻綱：等脚目) の分布と生息環境特性

Distribution and Habitat Characteristics of *Cyathura muromiensis* (Crustacea: Isopoda) in the Tidal Flats of the Tama River Estuary, Tokyo Bay, Japan

堀越彩香*・青木 茂・岡本 研

東京大学大学院農学生命科学研究科 〒113-8657 東京都文京区弥生 1-1-1

Ayaka HORIKOSHI*, Shigeru AOKI and Ken OKAMOTO

Graduate School of Agricultural and Life Sciences, the University of Tokyo. 1-1-1 Yayoi, Bunkyo-ku, Tokyo, 113-8657 Japan

Abstract: To clarify the habitat characteristics of the brackish-water isopod *Cyathura muromiensis*, we conducted a field survey of the macrobenthic invertebrates, including *C. muromiensis*, and several environmental variables at 27 sites (3 stations × 9 transect lines) on the tidal flats of the Tama River Estuary (Tokyo Bay, Japan) in summer in 2007 and 2009. *Cyathura muromiensis* was concentrated along certain transect lines between 0.5 km below and 2 km above the river mouth and was often limited to the shoreward stations. Canonical correspondence analysis (CCA) indicated that the major macrobenthic species may be distributed in response to two integrated environmental gradients: one is longitudinal and correlated with distance from the river mouth (as an indicator of salinity), median sediment grain diameter, and elevation; the other is not longitudinal but is correlated with the beach slope and sediment redox potential (ORP). The response pattern of *C. muromiensis* to the latter gradient distinguished this isopod from the other major macrobenthic species. The distribution of *C. muromiensis* along the gradient of each environmental variable selected by CCA was also checked. This isopod occurred abundantly at sites of mesohaline to polyhaline interstitial water in oxidized sandy sediment containing 2–18% mud and showing 60–140 mV ORP at 5 cm depth, in the middle to lower intertidal zone of mildly sloping (<0.8 degree slope) beaches. These results indicate that mildly-sloped and well-oxygenated beach areas are distinctive habitat characteristics of *C. muromiensis*.

Key Words: CCA, *Cyathura muromiensis*, distribution, environment, estuary, geomorphology, redox potential, tidal flat

はじめに

ムロミスナウミナナフシ *Cyathura muromiensis* Nunomura, 1974 (等脚目スナウミナナフシ科) は、黄白色で細長い形態をした体長 1.5 cm 前後の底生の小型甲殻類であり、日本各地の河口域の砂泥底に生息する (布村 1995; 飯島・和田 2007)。本種の属する等脚目は全般的に生息状況に関する過去の調査が少ないため (布村 2007)、地域絶滅や希少性などを判断できる種がほとんどない。その中で本種は、干潟の底生生物調査が進展した 1970 年代以降の調査報告の分析により、東京湾において近年個体数の減少が著しい「危機種」とされている (風呂田 2007, 2011)。しかし、その生態学的研究はほとんど行われておらず、近年の個体数減少の原因や保全に向けた留意点を議論するために不可欠な生息環境特性についても、「河口近くの砂干潟」(市川市・東邦大学東京湾生態系研究センター 2007) としか知

られていない。

本研究では、本種の生息環境特性を明らかにするために、東京湾多摩川河口域の左岸干潟において、本種を含む主要なマクロベントスの分布と環境を調査し、その関係を解析した。他のマクロベントスを解析に含めたのは、生態的知見の得られている種と比較することで、本種の特徴がより明らかになると考えたためである。また環境については、河口域のマクロベントスの分布規定要因としてよく知られる塩分と底質に加え、地形環境も調べることで、より詳細な環境特性の把握を目指した。なお、本研究では環境として上記の物理的環境のみを対象とし、生物的環境は考慮しなかった。

方 法

調査地

調査は、東京湾の西奥に位置する多摩川河口域の左岸側の干潟 (東京都大田区) で行った (Fig. 1)。河口原点 (旧建設省による設置であり、現在はその下流に河口延長水路が存在する) から上流に約 4 km、下流に約 0.5 km の範囲に 0.5–1 km 間隔で 9 本のトランセクトライン (上流から

Received 2 June 2011 Accepted 30 August 2011

*Corresponding author

E-mail: horikoshi1373@yahoo.co.jp

Fig. 1. Maps showing the location of the study area (the Tama River Estuary) in Tokyo Bay, Japan, and the locations of the nine transect lines (arrowheads). Three sampling stations: the shoreward, mid, and near low-water level stations (St. A, B, and C, respectively) were placed on each line (for details see Fig. 4). The river mouth (*) is the point marked as the zero-km origin of the river by the Construction Ministry (currently the Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourism).

ライン1～9)を設け、ラインごとに、岸側・中央・低潮線側の3定点(それぞれ定点A, B, C)を定めた。この27調査地点においてマクロベントスの採集と環境の測定を行った。

マクロベントス調査

ムロミスナウミナナフシを含むマクロベントスの採集は、2007年8月11～26日と2009年7月21～23日の干潮時に行った。夏に採集したのは、ムロミスナウミナナフシの生活史(著者ら 未発表)の中で初期減耗中にあたり個体数把握が難しい春や、日の最干潮時刻が夜間となり調査が難しい秋～冬を避けたためである。各調査地点において現場で一定量の砂泥(2007年: 0.1875 m^2 , 深さ10 cm; 2009年: 0.133 m^2 , 深さ20 cm)を網目0.5 mmの篩にかけ、篩上に残ったサンプルを実験室に持ち帰り、ただちに10%ホルマリンで固定した。後日、サンプルからマクロベントスをソーティングし、肉眼あるいは実体顕微鏡下で種同定をしたのち、種ごとに個体数を計数し、 1 m^2 当たりの密度を

算出した。種同定に際しては鈴木ら(2000)、西・田中(2007)、川合・谷田(2005)を参照し、種まで同定できなかったものはそれよりも上の分類群でとどめた。

環境調査

河川流軸方向の位置情報として、河口原点から各調査ラインまでの距離を地図上で測定し、下流方向にはマイナスの符号をつけた。また、いくつかのラインで底質間隙水または直上水の塩分を測定した。ライン4, 7, 9では2007年の秋(11月20～25日)、2008年の冬(2月22～25日)、春(5月19～23日)、夏(8月17～19日)の干潮時に堆積物を掘り、浸み出た水の塩分を小型水質計(ハンディメーター Model 85, YSI)により測定した。ライン1では2008年の冬(3月8～21日)と春(4月10～23日)に、底質表面から7 cm上に設置した小型メモリー水温塩分計(COMPACT-CT Model ACT-HR, JFEアレック)により、直上水の塩分を1分間隔で2週間連続観測した。

地形環境として、2007年8月27～29日の干潮時に自動レベル(CI₃, ソキア)を用いて各ラインで水準測量をおこない、作成した地形断面図をもとに、各調査地点の標高と斜度、また各ラインの干潟の幅を算出した。測量の際は護岸あるいはアシ原の終わりから低潮線付近までの間に調査地点を含めて9～14測量点を設定し、各測量点の標高は測量時刻の水位との差に基づいて算出した。斜度はライン上で前後の2測量点を結んだ角度とし、岸から低潮線方向に向かって下り勾配であればマイナスの符号をつけた。干潟の幅は護岸あるいはアシ原の終わりから大潮平均低潮面までの水平距離とした。多摩川縦断面図(山本 2008)を参考にすると平均大潮満潮位および平均干潮位のライン1と9の間の差はそれぞれ約10 cmおよび約5 cmと推定されることから、調査範囲における河川流軸方向の水位勾配は無視できる程度と判断し、すべてのラインにおいて、測量時刻水位と大潮平均低潮面・高潮面の標高は、国土交通省河川局の水文水質データベース(<http://www1.river.go.jp/>)で公開されている多摩川河口観測所の毎時水位観測データから計算した。

底質環境として、各調査地点における酸化還元電位(ORP)、泥分率、中央粒径値、含水率、有機炭素含有率(TOC)、窒素含有率(TN)を測定した。ORPは、2009年8月21日の干潮時に、ORP電極(9300-10D, HORIBA)を用いて底質表面から5 cmの深さで2回測定し平均値を算出した。残りの項目の分析には、2007年と2009年のマクロベントス調査時に採取した表層2～5 cmの堆積物を用いた。含水率は、70℃で恒量となるまで乾燥させた堆積物の乾燥重量と湿重量の差から求めた。TOC・TNは、乾燥させた堆積物に1 M塩酸を加えて炭酸塩を除去したあと、CNコーダー(MT-700, 柳本製作所)を用いて測定した。中央粒径値と泥分率は篩分け分析法(石塚 1986)により分析した。これらは2年間の平均値を算出した。

分布と環境の関係の解析

ムロミスナウミナナフシを含む主要なマクロベントスの分布と環境との関係について、その全体的なパターンを把握するため、正準対応分析(Canonical correspondence analysis (CCA))を行った。CCAでは事前に対象種の最適環境についての知見がなくても解析でき、環境間や種間の関係も把握できる(加藤・篠沢 1995)点で、本研究の目的に適していた。種データには、属以下まで同定され、過半数の地点で出現し、最高密度が100個体/m²以上であった、ムロミスナウミナナフシを含む11種(Table 1に○で示す)を用いた。種データの値は2007年と2009年の平均個体数密度($\bar{x}$)をlog($\bar{x}+1$)変換した。環境データには、河口原点からの距離、干潟の幅、標高、斜度、ORP、泥分率、中央粒径値、含水率、TOC、TN、C/N比の11項目を用いた。環境データは、種データの分散に有意に関係している項目に絞るため、Monte Carlo permutation testによるforward selectionを行った。有意水準はKanaya & Kikuchi (2008)に準じ $p < 0.1$ とした。以上の解析ソフトウェアにはCANOCO 4.5 (ter Braak & Smilauer 2002)を用いた。その後、ムロミスナウミナナフシの生息環境の具体値を明らかにするために、CCAのforward selectionで選択された環境要因を中心として、塩分、底質粒度(中央粒径値と泥分率)、標高、斜度、ORPの勾配に対する本種の個体数密度を調べた。

結 果

ムロミスナウミナナフシと主要種の空間分布

マクロベントス調査の結果、2007年と2009年をあわせ多摩川河口左岸干潟には34タクサのマクロベントスが出現した(Table 1)。このうちムロミスナウミナナフシを含む主要種の空間分布をFig. 2に示す。出現種やその分布に年による大きな違いはなかったため、結果はすべて2年の平均値で表した。

Fig. 2iから、ムロミスナウミナナフシの分布の特徴を述べる。河川流軸方向の分布範囲に着目すると、本種はライン1では不在、ライン2では出現量が極めて少なく、主な分布範囲はライン3~9であった。これは河口原点から上流へ約2 km、下流へ約0.5 kmの範囲であった。その中でも本種の分布はライン4, 7, 8, 9に集中し、ライン3, 5, 6における出現量は隣接するラインに比べ顕著に低下していた。またライン内の分布に着目すると、本種はほとんどのラインで岸側の定点Aに限られた、または著しく偏った狭い分布を示した。この岸側限定分布はライン9では見られず、本種はライン上に広く分布した。

以上の特徴を他の主要種の分布(Fig. 2a~h, j, k)と比較する。ムロミスナウミナナフシの河川流軸方向の主な分布範囲は本種に特有ではなく、*Heteromastus* sp., ドロオニスピオ *Pseudopolydora kemp*, ヤマトスピオ *Prionospio japoni-*

Table 1. Macrobenthic invertebrates found at 27 sites in the Tama River Estuary in the summers of 2007 and 2009. For each species, mean ($\pm$ SD) and maximum (Max.) density (number of individuals per m²) of the 27 sites were calculated from the local densities that were estimated at each site by taking the average of the densities in 2007 and 2009. Frequency (Freq.) is the number of sites at which a particular species occurred. Species that were collected from more than 14 sites and had a maximum density of more than 100 individuals per m² were deemed major macrobenthic species (○) for the canonical correspondence analysis (CCA); *Cyathura muromiensis* was one of these.

Taxa	Density (indiv. m ⁻²)		Freq.	CCA
	Mean $\pm$ SD	Max.		
Nemertea				
Nemertea	9 $\pm$ 14	53	14	
Mollusca				
<i>Assiminea</i> sp.	0.9 $\pm$ 4.2	22	2	
<i>Stenothyra edogawaensis</i>	0.1 $\pm$ 0.8	4	1	
<i>Nassarius festivus</i>	0.3 $\pm$ 1.4	8	1	
<i>Xenostrobus securis</i>	0.3 $\pm$ 1.0	4	3	
<i>Musculista senhousia</i>	17 $\pm$ 58	305	12	
<i>Macra veneriformis</i>	39 $\pm$ 71	255	11	
<i>Solen strictus</i>	6 $\pm$ 11	34	9	
<i>Corbicula japonica</i>	166 $\pm$ 158	587	25	○
<i>Mercenaria mercenaria</i>	1 $\pm$ 2.8	12	4	
<i>Ruditapes philippinarum</i>	41 $\pm$ 89	350	16	○
<i>Meretrix lusoria</i>	0.1 $\pm$ 0.8	4	1	
<i>Cyclina sinensis</i>	0.3 $\pm$ 1.1	4	2	
<i>Laternula marilina</i>	7 $\pm$ 12	49	15	
Annelida				
<i>Eteone</i> sp. cf. <i>longa</i>	89 $\pm$ 108	459	23	○
<i>Glycera</i> sp.	2 $\pm$ 4	13	6	
<i>Sigambra phuketensis</i>	2 $\pm$ 6	23	4	
<i>Ceratonereis erythraeensis</i>	9 $\pm$ 23	105	8	
<i>Neanthes succinea</i>	0.1 $\pm$ 0.5	3	1	
<i>Hediste</i> sp. or spp.	1936 $\pm$ 1348	4180	27	○
(<i>diadroma</i> and/or <i>atoka</i>)				
<i>Tylorrhynchus heterochaetus</i>	0.3 $\pm$ 1.7	9	1	
<i>Prionospio japonica</i>	453 $\pm$ 465	1884	27	○
<i>Pseudopolydora kemp</i>	544 $\pm$ 710	2679	27	○
<i>Heteromastus</i> sp.	387 $\pm$ 524	2185	26	○
<i>Notomastus</i> sp.	79 $\pm$ 136	509	16	○
<i>Capitella</i> sp.	27 $\pm$ 39	128	19	○
<i>Capitellidae</i> gen. et sp.	2 $\pm$ 12	65	1	
<i>Armandia amakusaensis</i>	48 $\pm$ 89	361	14	○
Crustacea				
Copepoda	3 $\pm$ 13	66	3	
<i>Cyathura muromiensis</i>	83 $\pm$ 135	451	18	○
<i>Grandidierella japonica</i>	14 $\pm$ 19	71	17	
<i>Melita</i> sp.	3 $\pm$ 13	69	3	
Cumacea	46 $\pm$ 76	286	15	
Insecta				
<i>Dolichopodidae</i> gen. et sp.	0.2 $\pm$ 1.1	6	1	
All macrobenthos	4016			

ca, ホソミサシバ近似種 *Eteone* sp. cf. *longa*, *Capitella* sp. も本種と同様の分布範囲(ライン2~9あるいは3~9)を示した。また本種の分布範囲は、*Notomastus* sp. (主にライン1~4に分布)より海側、ヤマトシジミ *Corbicula japonica*

Fig. 2. Spatial distributions of the 11 major macrobenthic species in the Tama River Estuary. Column length indicates density (indiv. m^{-2}) calculated as the mean of the densities recorded in the summers of 2007 and 2009. Note that scales differ for different species as indicated in the box.

(同, ライン1~8)とは広く重複しながらも全体として海側, アサリ *Ruditapes philippinarum* (同, ライン8~9) とツツオオフエリア *Armandia amakusaensis* (同, ライン6~9) とは部分的に重複しながら全体として上流側であった。一方, 河川流軸方向の主な分布範囲における特定ラインへの集中分布や岸側定点への限定分布は, 他の主要種には見られない, 本種に特有のものであった。ただし, *Capitella* sp. とホソミサシバ近似種は, ライン3, 5, 6において本種と対照的な個体数増加傾向を示した。

調査地の環境

環境調査の結果を Table 2 に示す。これらの環境項目のうち, ORP 以外の底質環境項目間やそれらと河口原点からの距離の間, 標高と河口原点からの距離または中央粒径値の間, 干潟の幅・斜度・ORP の間には有意 ($p < 0.05$) な相関があった。すなわち, 上流側の調査地点ほど底質の粒子が小さく, 泥・水分・有機物の含量が高く, 標高が高い傾向にあり, これらとは独立に, 干潟の幅が広いほど斜度が小さく ORP は高い傾向があった。

Fig. 3 には地形断面図を示す。ライン3, 5, 6 では干潟の幅が 30 m 前後と狭く, 全体的に傾斜が急であった一方, ライン1, 2, 4, 8 では干潟の幅が 100 m 前後と広く, 全体的に傾斜が緩かった。またほとんどのラインで岸側で凹, その後低潮線に向かって凸カーブを描きながら下る地形を示し, そのため定点 A で斜度が 0 に近いかわずかにプラスの値をとる窪地となっていた。例外的にライン9では岸から低潮線の手前まで平坦な地形が続いていた。

Fig. 4 には河口原点からの距離に対する底質間隙水または直上水塩分の年間範囲と平均値を示す。塩分は下流側ほど高い傾向があり, 河口原点からの距離は塩分の指標として考えてよいことが示された。

CCA を用いた分布と環境の関係の解析

CCA の forward selection では, 河口原点からの距離・中央粒径値・標高・斜度 (以上 $p < 0.01$)・ORP ($p = 0.076$) が選択された。これら 5 項目を用いた CCA の結果, 得られたモデルは第 2 正準軸 (以下, 軸と記述) までで種データの分散の 67.0% を説明した (Table 3)。第 1 軸には河口原点からの距離と標高が正の相関, 中央粒径値が負の相関を有し, 第 2 軸には斜度と ORP が正の相関を有していた。つまり, ムロミスナウミナフシを含む主要なマクロベントスは, 河口原点からの距離 (塩分の指標とみなせる)・中央粒径値・標高と相関する環境勾配と, それとは独立で斜度・ORP と相関する環境勾配とにตอบสนองして分布していたことが示された。

CCA で得られたモデルの第 1・第 2 軸に対する地点の配置と種の配置を Fig. 5 に示す。地点の配置 (Fig. 5a) では, 第 1 軸上で右から左にライン 1~9 が順に配置された。これは第 1 軸が河川流軸方向の環境勾配であること, 上流側の

Table 2. Environmental variables at 27 sites in the Tama River Estuary. TOC, total organic carbon content; TN, total nitrogen content; C/N, carbon/nitrogen ratio; ORP, redox potential. Geomorphological characteristics were measured in the summer of 2009 using a level. Sediment ORP is presented as the average of twice-replicated measurements at 5 cm below the surface in the summer of 2009. Other features are shown as the means of measurements made in the summers of 2007 and 2009 from the 3-5 cm layer below the surface.

Site (Line-St.)	Distance from river mouth (km)	Geomorphology			Sediment						
		Width of tidal flat (m)	Slope (degree)	Elevation (cm)	Median grain size (μ m)	Mud content (%)	Water content (%)	TOC (%)	TN (%)	C/N	ORP (mV)
1-A	3.9	82	0.45	8.9	88	40.7	40.9	1.46	0.104	13.7	63
1-B			-0.63	24.4	139	4.7	31.7	0.36	0.045	8.3	108
1-C			-1.32	-15.1	156	3.4	32.3	0.28	0.036	7.4	111
2-A	2.8	107	-0.63	-9.6	75	44.7	31.8	1.01	0.065	15.2	50
2-B			0.01	-10.1	79	35.8	36.9	1.06	0.086	12.2	109
2-C			-0.63	-34.6	127	7.4	30.0	0.42	0.047	8.4	107
3-A	1.8	25	-3.03	-16.0	151	8.1	29.5	0.84	0.056	13.7	94
3-B			-0.33	-27.0	190	3.8	26.0	0.34	0.045	7.7	58
3-C			-4.69	-55.5	104	25.7	36.3	0.95	0.083	10.3	63
4-A	1.6	93	0.24	-1.6	99	18.5	31.9	0.65	0.062	10.8	120
4-B			-0.75	2.9	167	2.9	29.4	0.31	0.035	8.2	96
4-C			-0.75	-28.1	140	10.9	32.6	0.46	0.050	9.6	129
5-A	1.2	26	-3.83	-15.8	269	0.7	21.6	0.14	0.022	5.8	-24
5-B			-2.52	-46.8	216	3.5	24.1	0.20	0.029	7.0	33
5-C			-1.60	-81.8	152	10.4	29.1	0.34	0.037	9.0	116
6-A	0.6	35	-2.75	-18.0	191	1.9	24.7	0.21	0.034	6.5	-59
6-B			-1.26	-47.0	205	4.7	25.4	0.24	0.030	7.5	4
6-C			-1.43	-72.0	229	12.6	27.5	0.47	0.046	9.8	56
7-A	0.3	57	-0.75	-27.8	234	4.5	25.4	0.28	0.032	8.2	115
7-B			-0.80	-45.3	197	4.6	23.8	0.25	0.029	8.2	87
7-C			-1.32	-70.3	116	27.0	32.0	0.65	0.058	11.0	-15
8-A	-0.2	106	0.04	-42.9	288	2.5	26.3	0.27	0.031	8.6	136
8-B			0.07	-42.9	262	2.8	24.6	0.22	0.030	7.6	61
8-C			-0.69	-58.9	240	3.3	26.2	0.27	0.033	8.2	90
9-A	-0.6	69	-0.06	-59.6	234	4.7	26.8	0.23	0.025	8.1	105
9-B			0.03	-58.6	243	2.5	26.3	0.21	0.028	8.0	108
9-C			-0.32	-55.6	232	3.2	27.2	0.24	0.032	7.7	77

ラインほど塩分が低く底質粒子が小さく標高が高いことを意味する。一方、第2軸上では、ライン3, 5, 6が他のラインよりも下方に配置され、ラインごとにみると定点A, B, Cの順で上方から下方に配置される傾向があった。これは第2軸が河川流軸方向の勾配とは独立した、ライン間やライン内の環境勾配であること、ライン3, 5, 6は他のラインより、定点Cは定点Aより傾斜が急でORPが低いことを意味する。また、ムロミスナウミナナフシの河川流軸方向の主な分布範囲であるライン3~9はそれ以外（ライン1・2）と第1軸上で区別され、河川流軸方向の分布範囲内で本種の偏ったまたは限られた分布が見られたライン4, 7, 8, 9および各ライン内での定点Aはそれ以外（ライン3, 5, 6, 定点B, C）と第2軸上で区別された。これは、本種の

河川流軸方向の主な分布範囲には塩分・中央粒径値・標高が関連し、本種の限定分布には斜度とORPが関連していることを意味する。

同様に、種の配置 (Fig. 5b) では、第1軸上でもっとも右に *Notomastus* sp., もっとも左にアサリとツツオオフエリアが配置され、残りの種はそれらの間に散在的に配置された。これは *Notomastus* sp. はもっとも塩分が低く底質粒子が小さく標高が高いところ、アサリはその反対、ムロミスナウミナナフシを含む残りの種はそれらの間で少しずつ異なるところに分布中心をもつことを意味する。一方、第2軸上では、上方にムロミスナウミナナフシ、下方にホソミサシバ近似種と *Capitella* sp., 原点付近に残りの種が配置された。これはムロミスナウミナナフシは傾斜が緩く

Fig. 3. Intertidal profiles of each transect line. Elevation is height above sea level of Tokyo Bay. Circles indicate leveling points, and closed circles indicate sampling stations for macrobenthic invertebrates and environmental variables. Dotted lines indicate the mean high water springs (MHWS, upper) and the mean low water springs (MLWS, lower).

ORPが高いところ, ホソミサシバ近似種と *Capitella* sp. はその反対, 残りの種はこれらの勾配の中央付近に分布中心をもつことを示唆している. また, 以上に述べたようにムロミスナウミナナフシは第2軸上で他の主要種から明瞭に区別されたことから, 主要種の中で本種に特有だったのは斜度とORPに対する応答の仕方であることが示唆された.

各環境要因に対するムロミスナウミナナフシの分布

CCAで抽出された環境要因に対するムロミスナウミナナフシの分布から, 本種の生息環境特性を述べる.

塩分については, 河川流軸方向のムロミスナウミナナフシの主な分布範囲 (Fig. 2i) と, いくつかのラインでの年間塩分範囲 (Fig. 4) を比較する. 本種の主な分布範囲の最上流端であるライン3では塩分測定ができなかったが, この塩分は200 m程度離れたライン4の塩分と大きく変わらないと考えられ, ライン4の間隙水塩分は5.5~27 pptであった. これは Venice system (IUBS 1959) の定義における α -中鹹性 (α -mesohaline) から多鹹性 (polyhaline) 汽水に該当した. 一方, 本種の分布範囲の最下流端であるライン9での間隙水塩分は21~27 pptであり, これは多鹹性汽水に該当した.

底質の粒子サイズについては, 本種が多く出現した地点は, 中央粒径値が100~280 μm で含泥率が2~18%の砂質であった (Fig. 6).

標高については, 本種が多く出現した地点は標高が10

Fig. 4. Annual salinity range and annual average salinity along the Tama River. Arrows indicate the location of each transect line at which the macrobenthos was sampled and several environmental variables were measured. At Lines 4, 7, and 9, salinities of interstitial water of the sediment were measured in the autumn of 2007 and in the winter, spring, and summer of 2008 for use in calculating the mean (closed circles) and minimum and maximum (line caps) salinities. At Line 1, the salinity of water 7 cm above the sediment surface was recorded at 1-min intervals for two weeks from 8 to 21 March 2008 (low-rainfall season) and from 10 to 23 April 2008 (high-rainfall season), also for calculating the mean, minimum, and maximum salinities.

Table 3. Summarized results of canonical correspondence analysis using abundance data for 11 major macrobenthic species (○ in Table 1) and five significant environmental variables selected from among 11 measured variables (Table 2) by forward selection (Monte Carlo permutation test, $p < 0.1$) for 27 sites. Inter-set correlations between the significant first two canonical axes (Monte Carlo permutation test, $p < 0.05$) are shown. Significant correlations between each environmental variable and the axes are indicated with asterisks: ***, $p < 0.001$; **, $p < 0.01$.

	Axis 1	Axis 2
Eigenvalues	0.158	0.035
Species-environment correlations	0.971	0.86
Cumulative percentage variance		
of species data	54.7	67
of species-environment relation	75	91.8
Inter-set correlations of environmental variables with axes		
Distance from river mouth	0.9661***	-0.0728
Beach slope	-0.079	0.6459***
Elevation	0.6866***	0.3421
Median grain size	-0.7638***	-0.0546
Sediment ORP	0.0866	0.5446**

Fig. 5. Canonical correspondence analysis ordination diagrams: (a) site scores and (b) species scores. Arrows indicate environmental variables. Sites are indicated by line number (1–9) and station name (A–C). Species are indicated by the first four letters of their genus name (see Table 1).

Fig. 6. Distribution of *Cyathura muromiensis* along the gradients of median grain size and mud content of the sediment. See Fig. 2 and Table 2 for data.

Fig. 7. Distribution of *Cyathura muromiensis* along the gradients of distance from the river mouth and elevation. MHWS, mean high water springs; MLWS, mean low water springs. See Fig. 2 and Table 2 for data.

Fig. 8. Distributions of (a) *Cyathura muromiensis*, (b) *Prionospio japonica*, and (c) *Capitella sp.* along the gradients of beach slope and sediment ORP. See Fig. 2 and Table 2 for data.

～60 cmで、これは調査地における潮間帯中部～下部であった (Fig. 7).

斜度と底質のORPについては、ムロミスナウミナナフシが多く分布した場所は斜度が $-0.7 \sim -0.2^\circ$ でORPが60～

140 mVのところ、すなわち緩傾斜もしくはわずかな窪地で、底質のORPが調査域の中で最も高く、深さ5 cmでも十分酸化的な場所であった (Fig. 8a). 対照的に、*Capitella sp.*が多く分布した場所は斜度が $-3.8 \sim -0.8^\circ$ でORPが $-60 \sim 120$ mVのところ、すなわち調査域の中で最も傾斜が急で、底質のORPが低く、深さ5 cmでは還元的になっている場所も含んでいた (Fig. 8c). ヤマトスピオは傾斜が緩くORPの高いところに多く分布する点ではムロミスナウミナナフシと同じであったが、傾斜が急でORPの低いところまで広く分布する点で異なっていた (Fig. 8b). 他の主要種の分布は図に示していないが、ホソミサシバ近似種で*Capitella sp.*と同様であったほかは、ヤマトスピオと同様であり、ムロミスナウミナナフシほど緩傾斜・高ORPに厳密な分布をした種はいなかった.

考 察

多摩川河口左岸干潟におけるムロミスナウミナナフシの分布と生息環境特性

本研究によって、多摩川河口左岸干潟におけるムロミスナウミナナフシの分布は、河口原点から上流へ約2 km、下流へ約0.5 kmの範囲であり、その中でも特定のラインに集中し、さらに多くのラインでは岸側の定点に限定されることがわかった (Fig. 2i). CCAは本種を含む主要なマクロベントスが互いに独立する2つの環境勾配に応答して分布することを見出し、それは河口原点からの距離 (塩分の指標とみなせる) および底質の中央粒径値、標高と相関する河川流軸方向の環境勾配と、斜度および底質のORPと相関する環境勾配であった (Fig. 5). CCAはまた、後者の環境勾配に対する本種の応答パターンは、主要なマクロベントスの中で本種に特有であることを示した (Fig. 5b). これら、CCAで分布と関連が示された各環境要因について、本種が多く分布していた定点の値を本種の生息環境特性とみなすと、それは、1) 間隙水塩分が中鹹性～多鹹性 (mesohaline～polyhaline) で、2) 2～18%の泥を含んだ中央粒径が $100 \sim 280 \mu\text{m}$ の砂質、3) 潮間帯中～下部、4) 0.8° 未満の緩傾斜またはわずかな窪地、5) 底質のORPが深さ5 cmで60～140 mVと十分酸化的な底質、であった (Figs. 4, 6, 7, 8).

特性1) からは、本種は淡水～貧鹹性汽水への耐性が低いことが推察される。これは、本種の河川流軸方向の分布範囲が、低鹹性汽水種として知られる*Notomastus sp.* (山室 1996) より海側、高鹹性汽水種として知られるヤマトスピオや*Heteromastus sp.* (山室 1996) とほぼ同じ範囲であった (Fig. 2) ことから支持される。本研究ではライン9より海側には立ち入れず、高塩分側の分布限界は明らかにできなかったが、35 pptの海水中で本種の初期胚を飼育すると発生が完了しない (著者ら 未発表) ことから、本種は海水には分布しないと推測される。特性2) は、砂質

Fig. 9. Two different types of intertidal geomorphology in the Tama River Estuary: (a) mildly-sloping, wide tidal flat with slight depressions, over which small tidal creeks run or pools persist; (b) steep, narrow beach composed of compact sediment without any tidal creeks or pools. Photographs were taken at (a) Line 8 and (b) Line 6 at low tide.

干潟に生息する（市川市・東邦大学東京湾生態系研究センター 2007）という従来の知見と一致した。ただし本調査域では底質の粒子サイズに河川流軸方向の勾配があったため、ライン1・2での本種の不在・個体数低下（Fig. 2i）が高い含泥率によるものか低い塩分によるものかは判別できない。底質粒子サイズについて本種の生息条件を明らかにするには、塩分と粒子サイズが独立している生息地を含む様々な生息地での分布・環境調査を行う必要がある。特性3）は、潮間帯中部に分布するという、小櫃川河口（千葉県）で得られている従来の知見（大嶋・風呂田 1980）と一致した。これは、本種の干出耐性が低いことを示唆する。

特性4）5）は、主要なマクロベントスの中でも本種に特徴的であった（Fig. 8）。ORPは底質の好氣的／嫌氣的状態の指標であり、一般的にORPが負の値をとり還元化した底質では、酸素不足と硫化物の存在が底生生物の生息を制限する（Pearson & Rosenberg 1978）。本種は主要なマクロベントスの中でも特にORPの高い底質に分布し、この分布パターンは汚染指標種として知られる *Capitella* sp. と正反対のものであった（Fig. 8）。このことは、本種の低酸素耐性が特に低いことを示唆する。低酸素耐性の低さを示唆する知見は本種と同じ汽水性スナウミナナフシ属の北米種 *Cyathura polita* (Burbank 1961) や西欧種 *Cyathura carinata* (Cardoso *et al.* 2004) でも得られていることから、これらの種は酸素要求性に関して本種と類似した生理特性をもつと考えられる。

傾斜は波浪または潮流の強さと底質粒子のサイズと相互に複雑に関連するが、概ね、傾斜の緩いところでは底質粒子が小さく、干出時に水が底質に保持されやすい（Raffaelli & Hawkins 1996; McLachlan & Brown 2006）。本調査域では、底質の水分含量に顕著な違いはなかった。しかし、緩傾斜地では底質上に小規模の滞筋や水たまりがみられ、

“ひたひたとした” 景観を呈していた（Fig. 9a）一方、急傾斜地では滞筋や水たまりはみられず、底質は全体に締め固まっているようにみえた（Fig. 9b）。このことから著者らは、緩傾斜地における干出時の底質上の滞筋や水たまりが何らかの形で本種の好適環境を生み出しているのではないかと考える。そのひとつには水の存在そのものが考えられ、これは特性3）から推測された本種の干出耐性の低さからも支持される。もうひとつには、水を介した酸素供給が示唆される。一般的には緩傾斜地では底質は還元的になりやすい（Raffaelli & Hawkins 1996）が、本調査域では傾斜が緩いほどORPが高いという逆の相関がみられた（Fig. 8）。緩傾斜地では水はけが悪いことから、大気からの酸素供給は減少すると考えられる。しかし、緩傾斜地で見られた滞筋や水たまりの水は表層水に由来するものと考えられ、表層水は大気と接し酸素を豊富に含むと考えられる。したがって、緩傾斜地では滞筋や水たまりを介して底質に酸素の豊富な水が保持されることで底質が酸化的になり、急傾斜地ではその水が底質に保持されずに排出されるために底質が還元的になっているのかもしれない。そうだとすれば、本種の緩傾斜への分布は、酸素要求性の高さに起因したと考えられる。

なお、本種の分布規定要因には、上述の物理的環境以外に生物的環境も考えられる。しかし、本種の種内・種間相互作用については知見が乏しいことから、本研究では生物的環境は考慮しなかった。

東京湾における近年の個体数減少の原因

以上をふまえて、東京湾において本種が近年減少している（風呂田 2007, 2011）原因を推察する。

第1の原因には、河口周辺の遠浅の干潟の消失が考えられる。20世紀前半まで、東京湾の海岸線には遠浅の干潟が広がり、河川や水路がときに網目状になりこれらの干潟

に注いでいた（農商務省水産局 1916; 古川 2011）。また当時の空中写真（国土地理院 国土変遷アーカイブ空中写真閲覧システム <http://archive.gsi.go.jp/airphoto/>）から、これらの干潟は滞筋や水たまりのある“ひたひたとした”景観をしていることがわかる。これらの特徴は本種の生息環境特性1) 4) と一致することから、当時、本種は東京湾各地の干潟に広く生息していたと推測される。しかし1945年以降、特に1960～74年には埋め立てが進み河川の直線化も行われ（古川 2011）、その結果本種の生息に適した河口周辺の遠浅の干潟が減少したと考えられる。例えば、東京都の葛西周辺（旧江戸川河口周辺）の干潟では1970年代前半には至るところに本種が分布していた（干潟研究会 1973, 1975; 日本鳥類保護連盟・環境庁 1973; 秋山 1974, 1975b）が、1970年代後半には埋め立てや河川工事、地盤沈下で干潟の多くの部分が消失し、本種の分布地は減少した（秋山 1976, 1977, 1978）。このようなことが東京湾各地の干潟で起こり、東京湾全体として本種の個体数が減少したと推定される。

第2の原因には、東京湾の貧酸素化が考えられる。東京湾の底層では夏季に生じる貧酸素化により無生物域が形成され、特に1960年代後半以降はこれが顕著である（大越・風呂田 2000; 風呂田 2011）。本種の生息環境特性5) から示唆された貧酸素耐性の低さは、東京湾の近年の酸素環境の悪化が、残存する干潟においても本種の分布域を狭めている可能性を示唆する。例えば、谷津干潟（千葉県）では1970年代には本種が出現していたが（干潟研究会 1975）、1990年以降は確認されていない（環境庁ら 1996; 風呂田・鈴木 1999）。小櫃川河口（千葉県）では1970年代には本種が普通に確認されているが（秋山 1975a; 大嶋・風呂田 1980）、近年ではその発見は稀である（風呂田 2007）。小櫃川河口については酸素環境悪化を示すデータはないが、谷津干潟では底質のORPは標準的な干潟の下限値より低く（風呂田・鈴木 1999）、これにより本種が生息できなくなった可能性がある。また、多摩川河口では過去の本種の分布データがないが、多摩川河口域では貧酸素水が観測されていること（八木ら 2007）から、酸素環境の悪化の結果現在の狭い分布になっている可能性があると考えられる。

以上のことから、本種の保全の際には、河川の干潟への注ぎ方や干潟の地形、それにとりまなう滞筋や水たまり、また酸素環境に留意すべきである可能性がある。特に地形や滞筋については、干潟の底生生物の分布と関連する要因として着目した研究は岸野ら（2010）など多くはなく、本研究は、干潟の底生生物の保全を考える際にはこれらにも着目すべき場合があることを示すものである。ただし本研究の結果は1つの生息地における分布・環境調査から得られたものであるため、本種の保全に向けた正確な議論を行うためには、本研究から示唆された生理特性を検証する室内実験や、他の生息地における分布・環境調査を行うことが

必要だろう。

謝辞：本研究を行うにあたり、東京大学大学院農学生命科学研究科の佐野光彦教授には原稿を読んでいただき、修正に有益な助言やコメントをいただいた。同研究科の植松幸希氏には地形測量に協力していただくとともにCCAを行う際のソフトウェア操作方法を教えていただいた。同研究科（現・アクセンチュア(株)）の藤木宣成氏には地形測量に協力していただいた。同研究科（現・東電環境エンジニアリング(株)）の木塚智洋氏には2009年のマクロベントス採集とソーティングに協力していただいた。同研究科の田中裕一氏には2009年のマクロベントスのソーティングに協力していただくとともに原稿の一部の表現の修正に有益なコメントをいただいた。同研究科の杉原奈央子氏と金井貴弘氏には原稿の一部を読んでいただき修正に有益なコメントをいただいた。島根県環境保健公社の戸田顕史氏には考察におけるアイデアを引き出す情報をいただいた。東邦大学東京湾生態系研究センターの風呂田利夫センター長にはムロミスナウミナナフシの過去の生息状況を調べるにあたって必要な多くの文献貸出の労をとっていただいた。以上を記して謝意を表す。

引用文献

- 秋山章男 1974. 底生動物。葛西沖公園野鳥生息現況調査報告書、昭和48年度、日本野鳥の会・干潟研究会、pp. 98-120。
 秋山章男 1975a. 千葉県の干潟の環境と生物相。日本生物教育会第30回全国大会（千葉大会）実行委員会・「千葉県の生物」編集部（編）、千葉県の生物、pp. 172-180。
 秋山章男 1975b. 底生動物。葛西沖公園野鳥生息現況調査報告書、昭和49年度、日本野鳥の会、pp. 43-83。
 秋山章男 1976. 底生動物着生状況調査。東京都港湾局委託調査 葛西沖公園野鳥生息現況調査報告書、昭和50年度、日本野鳥の会、pp. 52-76。
 秋山章男 1977. 葛西人工渚における底生動物着生状況調査。東京都港湾局委託調査 葛西沖公園野鳥生息現況調査報告書、昭和51年度、日本野鳥の会、pp. 37-66。
 秋山章男 1978. 葛西人工渚における底生動物着生状況調査。東京都港湾局委託調査 葛西沖公園野鳥生息現況調査報告書、昭和52年度、日本野鳥の会、pp. 61-80。
 ter Braak, C. J. F. and Smilauer, P. 2002. *CANOCO Reference Manual and CanoDraw for Windows User's Guide: Software for Canonical Community Ordination (version 4.5)*, Microcomputer Power, Ithaca, New York, USA, 500 pp.
 Burbanck, W. D. 1961. The biology of *Cyathura* sp., an estuarine isopod of eastern North America. *Verhandlungen der Internationalen Vereinigung für Theoretische und Angewandte Limnologie*, 14: 968-971.
 Cardoso, P. G., Pardal, M. A., Raffaelli, D., Baeta, A. and Marques, J. C. 2004. Macroinvertebrate response to different species of macroalgal mats and the role of disturbance history. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 308: 207-220。
 風呂田利夫 2007. 東京湾。飯島明子（編）、浅海域生態系調査（干潟調査）報告書、環境省自然環境局 生物多様性センター、山梨、pp. 39-47。
 風呂田利夫 2011. 底生生物とその生息環境。東京湾海洋環境研究委員会（編）、東京湾—人と自然のかかわりの再生、恒星社厚生閣、東京、pp. 136-143。
 風呂田利夫・鈴木嘉平 1999. 東京湾奥部谷津干潟の1986-87年冬期における底質環境ならびにマクロベントスの生息状況と垂直状況。日本ベントス学会誌、54: 36-43。
 古川恵太 2011. 江戸時代以降の埋立と変遷。東京湾海洋環境研究委員会（編）、東京湾—人と自然のかかわりの再生、恒星社厚生

- 関, 東京, pp. 44–46.
- 市川市・東邦大学東京湾生態系研究センター 2007. 干潟ウォッチングフィールドガイド図鑑, 誠文堂新光社, 東京, 144 pp.
- 干潟研究会 1973. 葛西周辺干潟の生態的研究–1972年における生物と環境の現況, 125 pp.
- 干潟研究会 1975. 開発の干潟に及ぼす影響に関する研究II, 98 pp.
- 飯島明子・和田恵次 2007. 干潟底生生物の地理的な特徴. 飯島明子(編), 浅海域生態系調査(干潟調査)報告書, 環境省自然環境局 生物多様性センター, 山梨, pp. 127–144.
- 石塚明男 1986. 粒度分析. 日本海洋学会(編), 沿岸環境調査マニュアル 底質・生物篇, 恒星社厚生閣, 東京, pp. 31–34.
- IUBS (International Union of Biological Sciences) 1959. Symposium on the classification of brackish waters, final resolution, the Venice System for the classification of marine waters according to salinity. *Archivio di Oceanografia e Limnologia*, 11 (suppl): 243–245.
- Kanaya, G. and Kikuchi, E. 2008. Spatial changes in a macrozoobenthic community along environmental gradients in a shallow brackish lagoon facing Sendai Bay, Japan. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 78: 674–684.
- 環境庁・千葉県・習志野市 1996. 谷津干潟環境調査報告書, 179 pp.
- 加藤和弘・篠沢健太 1995. 多変量解析による生物相の分析と, その河川環境管理への応用. *ランドスケープ研究*, 58: 105–108.
- 川合禎次・谷田一三 2005. 日本産水生昆虫–科・属・種への検索, 東海大学出版会, 神奈川, 1342 pp.
- 岸野 底・木邑聡美・唐澤恒夫・國里美樹・野元彰人・和田恵次 2010. 汽水性希少カニ類クマノエミオスジガニ *Deiratonotus kaoriae* とアリアケモドキ *D. cristatus* (ムツハアリアケガニ科) の三重県櫛田川河口域における出現状況. *日本ペントス学会誌*, 65: 6–9.
- McLachlan, A. and Brown, A. 2006. *The Ecology of Sandy Shores*, Academic Press, Boston, 373 pp.
- 日本鳥類保護連盟・環境庁 1973. 干潟鳥類保護対策調査報告書, 64 pp.
- 西柴二郎・田中克彦 2007. 神奈川近海の干潟・汽水域に産する環形動物多毛類. 神奈川自然誌資料, 28: 101–107.
- 農商務省水産局 1917. 浅海利用調査報告 第1報 東京湾, 97 pp.
- Nunomura, N. 1974. A new anthurid isopod from the estuary of the Muro-mi river, northern Kyushu, Japan. *Bulletin of the Osaka Museum of Natural History*, 28: 13–16.
- 布村 昇 1995. スナウミナナフシ科. 西村三郎(編), 原色検索日本海岸動物図鑑 (II), 保育社, 東京, pp. 209–212.
- 布村 昇 2007. 節足動物門 軟甲綱 等脚目. 飯島明子(編), 浅海域生態系調査(干潟調査)報告書, 環境省自然環境局 生物多様性センター, 山梨, p. 200.
- 大越和加・風呂田利夫 2000. 平場の生物. 沼田 真・風呂田利夫(編), 東京湾の生物誌, 築地書館, 東京, pp. 86–109.
- 大嶋 剛・風呂田利夫 1980. 小櫃川河口干潟周辺における底生動物の分布. 東邦大学理学部海洋生物学教室・千葉県生物学会(編), 千葉県木更津市小櫃川河口干潟の生態学的研究I, pp. 45–68.
- Pearson, T. H. and Rosenberg, R. 1978. Macrobenthic succession in relation to organic enrichment and pollution of the marine environment. *Oceanography and Marine Biology: an Annual Review*, 16: 229–311.
- Raffaelli, D. and Hawkins, S. 1996. *Intertidal Ecology*, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, 356 pp.
- 鈴木孝男・木村昭一・木村妙子 2000. 干潟生物調査ガイドブック–東日本編–, 日本国際湿地保全連合, 東京, 120 pp.
- 八木 宏・江連伸明・井瀬 肇・Pokavanich, T.・灘岡和夫・諸星一信・古土井健・有路隆一・森重輝政・小林 聡 2007. 東京湾羽田周辺水域における貧酸素水塊と懸濁物質の時空間変動特性. *海岸工学論文集*, 54: 1036–1040.
- 山本晃一 2008. 多摩川河川汽水域に及ぼした人為作用と汽水域の変化. 財団法人河川環境管理財団(編), 河川汽水域, 技報堂出版, 東京, pp. 5–30.
- 山室真澄 1996. 感潮域の底生動物. 西條八束・奥田節夫(編), 河川感潮域–その自然と変貌–, 名古屋大学出版会, 名古屋, pp. 151–172.