

안정동위원소 비를 이용한 하구 갯벌에 있어서 저서 무척추 동물의 유기물 기원의 공간적 특성

신우석^{1,†} · 이용두²

¹일본 동북대학 대학원 공학 연구과 생태공학 연구실

²제주국립대학교 해양과학대학 환경공학과

Spatial Characteristic in Food Sources for Benthic Invertebrates in an Estuary Tidal flat: Carbon and Nitrogen Stable Isotope Analyses

Woo-Seok Shin^{1,†} and Yong-Doo Lee²

¹Graduate school of Engineering Department of Ecological Engineering, Tohoku University, Aoba 6-6-06,
Sendai 980-8579, Japan

²Department of Environmental Engineering, Jeju National University, Ara 1-dong, Jeju 690-756, Korea

요 약

일본 나나키다 하구 갯벌에 있어서 탄소·질소 안정동위원소를 이용해 먹이 연쇄의 공간적 가변성에 대해 조사했다. 서로 다른 특징을 갖고 있는 갯벌에서 잠재적인 유기물(육상식물, 해양 입자성 유기물, 저서 부착 미세조류 및 하구 입자성 유기물), 퇴적유기물 및 저서 무척추 동물(*Nuttallia olivacea* and *Nereidae*)에 대한 샘플링을 행했다. 본 연구의 목적은 좁은 공간적 가변성에 따른 *Nuttallia olivacea*와 *Nereidae*의 먹이원을 결정하는 것이다. 육상식물($\delta^{13}\text{C}=-26.6\pm 0.76$, $\delta^{15}\text{N}=2.7\pm 0.31$) 과 하구 입자성 유기물($\delta^{13}\text{C}=-25.5\pm 0.13$, $\delta^{15}\text{N}=5.2\pm 0.46$)은 저서 부착 미세조류($\delta^{13}\text{C}=-16.3$, $\delta^{15}\text{N}=6.2$)와 해양 입자성 유기물($\delta^{13}\text{C}=-19.6\pm 0.08$, $\delta^{15}\text{N}=8.9\pm 1.70$)의 탄소·질소 안정동위원소비 보다 낮았다. 퇴적물의 탄소 안정동위원소 비는 -27.4~-22.8% 나타났으며, 하구에서 하천 방향으로 갈수록 낮은 탄소 안정동위원소비를 나타냈다. 저서 무척추 동물의 탄소·질소 안정동위원소비는 각각 -22.8~-18.4%, 8.1~11.9% 범위를 나타냈다. 이러한 결과와 더불어 혼합 모델을 이용해 저서 무척추 동물의 먹이원의 기여율을 추정할 결과 해양 입자성 유기물과 저서 부착 미세조류의 기여율은 높았지만, 육상식물과 하구 입자성 유기물의 기여율은 비교적 낮았다. 이러한 저서 무척추 동물의 먹이 기여는 각 장소마다 계절 및 물리적 환경 요소의 영향을 받는다고 사료된다.

Abstract – The spatial variability in the food chain structure of an estuarine environment(Nanakita estuarine, Japan) was investigated using stable carbon and nitrogen isotope. Potential organic matter sources(TP:Terrestrial Plant, MPOM:Marine particulate organic matter, BMA:Benthic microalgae, EPOM:Estuarine particulate organic matter), sedimentary organic matter and benthic invertebrates(*Nuttallia olivacea* and *Nereidae*) were sampled at four locations with different tidal flat types(e.g. sandy, sandy-muddy and muddy). The main objective of the present study was to determine food sources of *Nuttallia olivacea* and *Nereidae* along with small-scale spatial variability within the community of benthic invertebrates. TP($\delta^{13}\text{C}=-26.6\pm 0.76$ and $\delta^{15}\text{N}=2.7\pm 0.31$) and EPOM($\delta^{13}\text{C}=-25.5\pm 0.13$ and $\delta^{15}\text{N}=5.2\pm 0.46$) were isotopically distinct from BMA($\delta^{13}\text{C}=-16.3$ and $\delta^{15}\text{N}=6.2$) and MPOM($\delta^{13}\text{C}=-19.6\pm 0.08$ and $\delta^{15}\text{N}=8.9\pm 1.70$). $\delta^{13}\text{C}$ values of sedimentary organic matter showed a distinct gradient in the range of -27.4 to -22.8‰, with a declining trend from the upstream to the downstream stations. The stable carbon and nitrogen isotope values of benthic invertebrates in the study site was -22.8 to -18.4‰ for $\delta^{13}\text{C}$ and 8.1 to 11.9‰ for $\delta^{15}\text{N}$, respectively. Mixing model(Isosource) calculations based on stable isotope measurements showed that benthic invertebrates of *Nuttallia olivacea* and *Nereidae* were found to be dominated by MPOM and BMA in stations. Whereas, TP and EPOM showed little influence to benthic invertebrates. The current result suggests that the

[†]Corresponding author: s_woosuk@hotmail.com

different contribution for benthic invertebrates should be affected by both seasonal variation and physical factor among stations.

Keywords: Estuary(하구), Feeding Mode(섭식양식), Food Chain(먹이연쇄), Benthic Ecosystem(저서생태계)

1. 서 론

저서 무척추 동물은 하구 생태계에 있어서 환경 변화를 예측하는 생물 지시자뿐만 아니라 이차 생산자로서도 중요한 위치를 차지하고 있다(Warwick[2002], Rooker[2006]). 하구 생태계에서 환경인자의 변화와 저서 무척추 동물의 공간적 분포에 대한 연구는 많이 행해지고 있다(Tomiyama[2008], Sakamaki[2009]). 이들 연구는 물리학적 변동(표고와 입경도)과 화학적 변동(염분과 유황 함유량)에 초점을 두고 저서 무척추 동물의 분포에 미치는 영향을 조사했다. 게다가, 하구 갯벌은 해양과 하천으로부터 영양염과 유기물이 수송, 퇴적되고 있는 지리적 특성을 갖고 있다. 이러한 지리적 특성에 의한 다량의 유기물과 기원의 다양성은 저서 무척추 동물의 잠재적 먹이 가능성을 시사하고 있다. 이런 이유로, 저서 무척추 동물의 식성과 관련해 먹이원의 다양성은 식성과 먹이 선택에 영향을 미칠 가능성이 높다(Doi[2005]). 많은 연구자들은 저서 무척추 동물의 동화와 먹이원의 기원과의 관련성을 조사해 왔다(Alfaro[2006]). 그러나 종래의 소화관 성분 분석과 직접적인 식성 관측만으로는 이해하기 어려운 부분이 많았다. 그 예로, 지금까지 해오던 전통적인 방법인 소화관 성분 분석은 먹이의 미소한 단편화 때문에 소형 무척추 동물에게 적용하는 것은 어려웠다. 또한, 이 전통적인 방법의 테크닉이 적절했다고 한들, 얻을 수 있는 정보는 최근 섭취된 먹이에 제한된 것 일뿐, 보다 긴 기간에 걸쳐 동화된 음식물에 대한 정보는 얻을 수 없을 것이다(Sauriau[2000]). 최근 이러한 전통적인 문제점을 보완할 수 있는 연구방법인 안정동위원소 분석이 많이 이용되고 있다. 안정동위원소의 사용은 비슷한 식성을 갖고 있지만 다른 먹이 선택성의 저서 무척추동물을 위해서 실제 먹이원을 추정하는데 추천되고 있다. 먹이 연쇄에 대한 안정동위원소비 연구를 통한 보다 구체적인 영양구조 해석과 먹이원에 대한 동종-이종간의 먹이원의 이용도를 이해함으로써, 하구 저층 퇴적물내의 물질순환과 에너지 흐름에 대한 좀 더 구체적인 이해를 한층 높여줄 것이다.

하구 갯벌에서의 저서 무척추 동물은 크게 여과성 식자와 퇴적물 식자로 구분된다. 특히, 여과성 식자는 주 먹이가 식물 플랑크톤으로 알려져 왔다. 그러나 최근 연구된 결과를 보면, 여과성 식자는 식물 플랑크톤뿐만 아니라 저서부착조류도 중요한 먹이원으로 이용되고 있음이 밝혀지고 있다(Stanislas[2007]). 이런 현상과 관련해 고려하면 퇴적물 식자의 주 먹이인 저서 부착조류가 여과성 식자와의 경쟁을 통한 스트레스를 받고 있을 가능성도 생각할 수 있다.

본 연구에서는, 표층 퇴적물, 잠재적인 유기물과 더불어 저서 무척추 동물의 안정동위원소비를 측정·비교하였다. 이 분석을 통

해 공간적 유기물의 기원 해석과 함께 하구 갯벌에 서식하고 있는 저서 무척추 동물의 식성과 관련해 먹이원의 기여를 추정했다. 저서 무척추 동물의 안정동위원소비는 그들의 먹이 습성과 먹이원을 따를 것이고, 이러한 결과는 먹이 식성이 다른 여과성 식자와 퇴적물 식자의 안정동위원소 비를 구분시킬 것이다.

2. 재료 및 방법

2.1 대상 하구역의 특징

나나키타강은 일본 미야기현 센다이시 북부를 걸쳐 태평양에 흘러 들어가는 도시 하천으로 하구에서 상류 약 20 km부근에 처리 수량 약 1만 m³/day의 하수처리장뿐만 아니라 하구 남쪽 해안에도 처리 수량 약 50만 m³/day의 하수처리장이 있어, 하구의 남쪽 지점 약 500 m의 위치에서 해양으로 하수처리수를 방류하고 있다. 이와 같이, 본 조사를 실시한 하구역은 특정의 부하원을 가지는 특색을 가지고 있으며, 더불어 나나키타강의 감조역은 하구에서 상류로 약 4 km까지 존재하고 있다. 하구역의 조석은 0.4-1.4 m이다. 또한, 나나키타강의 유량 데이터는 미야기현 하천과에서 하구에서 상류 약 30 km의 지점(이와키리)에서 매 시간마다 측정하는 데이터(기간: 2007년 1월 1일부터 12월 31일까지)를 이용하였다(Fig. 2). 지점 A(0.23%; Grain size(<74 μm))는 주로 모래질 갯벌이 형성되어 있으며, 지점 C(61%; Grain size)는 저니질 갯벌이 형성되어 있다. 그리고 지점 B(16%; Grain size), D(25%; Grain size)는 지점 A, C의 중간적인 특징을 보였다(Sakamaki[2007]). 안정동위원소를 이용한 퇴적유기물의 기원을 추정한 결과에 따르면 연구 조사 지점에서는 주로 저서 부착 미세조류와 함께 해수 POM 유래의 유기물이 퇴적했다(Shin[2008]).

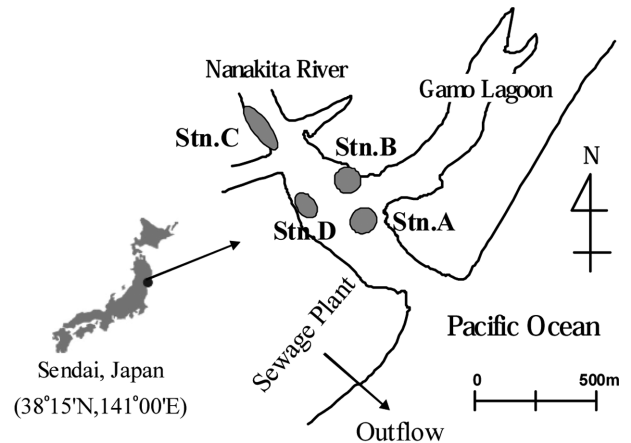


Fig. 1. The study site and sampling points in tidal flats of the Nanakita River estuary.

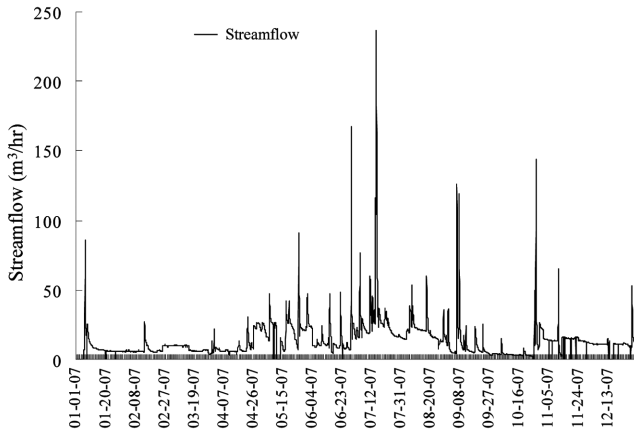


Fig. 2. Temporal variations of streamflow on the study area.

2.2 퇴적물 및 저서 무척추 동물의 안정동위원소 분석

조사 지점인 하구 갯벌의 4지점(Fig. 1, Stns. A, B, C, D)을 2008년 2월에 직경 12 cm개×높이 20 cm의 아크릴재질 코어샘플러를 이용해 갯벌 표층 퇴적물(0.5 cm)과 퇴적물을 공경 1 mm 체를 이용해 저서 무척추 동물인 두툼빛조개(*Nuttallia olivacea*)와 참갯지렁이(*Nereidae*) 종을 채취했다. 채취된 무척추 동물은 여과식자인 *Nuttallia olivacea*와 퇴적물 식자인 *Nereidae*로 분류하였다. 퇴적물 식자는 각각 동정이 어려워 *Nereidae*로 나타났고, 조사 지점에서는 퇴적물 식자인 *Hediste* 종이 우점종으로 보고 되고 있다(Sakamaki[2009]). 퇴적물과 저서 무척추 동물의 채취시 공간적 불균일성으로 인한 오차를 줄이기 위해, 조사 지점에 대해 3회의 샘플링을 실시하였다. 채취한 시료는 얼음박스를 이용해 실험실에 복귀 후, 안정동위원소 분석을 위한 시료는 냉동건조를 행했다. 그 후, 탄소-질소 안정동위원소 비의 측정을 위해, 퇴적물은 염산으로 전처리를 행하고 저서 무척추동물은 클로로포름을 이용해 전처리를 행했다. 탄소-질소 안정동위원소 비($\delta^{13}C$, $\delta^{15}N$) 측정에는 안정동위원소 질량 분석장치(Finnigan MAT사, Delta plus)를 이용해 측정했다. 또한, 퇴적물과 저서 무척추 동물 및 잠재적 유기물의 C/N비 측정은 염산으로 전처리 후, 원소 분석 장치(Elementar사, vario EL III)을 이용해 분석을 행했다. 단, 퇴적물은 무기성 질소를 포함하고 있다.

탄소-질소 안정동위원소 비의 값을 다음 식 (1)에 의해 결정했다.

$$\delta^{13}C, \delta^{15}N(\%) = \left\{ \frac{R_{\text{시료}}}{R_{\text{표준시료}}} - 1 \right\} \times 10^3 \quad (1)$$

여기서, $R_{\text{시료}}$ 는 측정 대상 시료의 $^{13}C/^{12}C$ 및 $^{15}N/^{14}N$ 비율, $R_{\text{표준시료}}$ 는 국제 표준 시료(PDB: Pee Dee Belmrite)의 $^{13}C/^{12}C$ 및 공기의 $^{15}N/^{14}N$ 비를 나타내고 있다. 또한, 측정 정밀도와 재현성은 탄소와 질소 각각 $\pm 0.2\%$.

저서 무척추 동물 즉 소비자의 안정동위원소비 값은 섭식하는 먹이원의 비 값에 대해서 한 영양단계(trophic level) 당 $\delta^{13}C$ 는 $0.8 \pm 1.1\%$, $\delta^{15}N$ 은 $3.4 \pm 1.1\%$ 평균 증가하는 안정동위원소 분별효과를 나타낸다(DeNiro[1978], Minagawa[1984]).

2.3 잠재적인 유입 유기물의 채집 및 기원 해석방법

퇴적물(SOM, sedimentary organic matter)의 기원으로서 육상식물(TP, terrestrial plant), 해수 부유성 입자물질(MPOM, Marine particulate organic matter), 하수처리 부유성 입자물질(SPOM, Sewage particulate organic matter), 하구역 부유성 입자물질(EPOM, Estuarine particulate organic matter) 및 저서 부착 미세조류(BMA, Benthic microalgae)를 선택했다. 우선, 육상식물은 조사 지점 주변의 갈대(*Phragmites australis*)를 측정해 결과, 갈대의 $\delta^{13}C$, $\delta^{15}N$ 은 -26.63% , 2.79% 을 얻었다. 이 결과의 안정동위원소 비를 토대로 육상 식물의 $\delta^{13}C$ 와 $\delta^{15}N$ 의 값으로 선정했다. 또한, MPOM 측정에 있어서는 하천의 영향을 받지 않는 샌다이항의 표층수를 약 2L 채취하였으며, 채취한 해수는 필터(GF/F)로 여과한 후, $\delta^{13}C$, $\delta^{15}N$ 를 측정하였으며, 각각의 값은 -19.62% , 8.96% 이었다. 하구 갯벌에 있어서 BMA의 $\delta^{13}C$, $\delta^{15}N$ 은 퇴적물의 표층 부착 조류를 Richard[1996]방법에 따라 배양해 측정했다. 그 결과, $\delta^{13}C$, $\delta^{15}N$ 은 -16.3% , 6.2% 을 얻었다. 또한, EPOM 측정은 조사 지점 부근의 하천수를 대상으로 삼았으며, 각각의 $\delta^{13}C$, $\delta^{15}N$ 은 -25.58% , 5.20% 값을 나타냈다. SPOM 측정은 샌다이시 남카모(南蒲生)하수처리장의 처리과정 중 염소 소독전 처리수에 대해서 GF/F여과기로 여과한 것을 분석하였으며, $\delta^{13}C$, $\delta^{15}N$ 의 값은 각각 -24.5% , -0.6% 를 나타냈다. 또한, SDOM(sewage dissolved organic matter)의 $\delta^{13}C$, $\delta^{15}N$ 값은 참고문헌을 인용하였다(Waldron[2001]). 이상의 데이터를 이용해, MPOM, EPOM, BMA 및 TP 유래 유기물 4개의 기여율을 IsoSource 프로그램을 이용해 산출했다(Phillips[2002]). 여기서, SPOM은 염분을 함유 할뿐만 아니라 해양으로 방류하고 있기 때문에 MPOM만을 이용했다.

3. 결 과

3.1 잠재적 먹이원의 안정동위원소 비 구성

잠재적인 유입 유기물인 TP의 안정동위원소 비($\delta^{13}C = -26.63\%$ and $\delta^{15}N = 2.79\%$)는 MPOM($\delta^{13}C = -19.62\%$ and $\delta^{15}N = 8.96\%$)이나 EPOM($\delta^{13}C = -25.58\%$ and $\delta^{15}N = 5.20\%$) 및 BMA($\delta^{13}C = -16.3\%$ and $\delta^{15}N = 6.2\%$) 보다 낮았다(Table 1, Fig. 3). 그리고 *Ulva. sp*의 안정동위원소 비는 $\delta^{13}C = -15.81\%$, $\delta^{15}N = 11.34\%$ 을 나타냈다. 또한, SPOM과 SDOM은 각각 $\delta^{13}C = -24.50\%$, $\delta^{15}N = -0.60\%$, $\delta^{13}C = -21.40\%$, $\delta^{15}N = 11.6\%$ 을 나타냈다(Table 1, Fig. 3). 특히 안정동위원소 비중에서 TP의 안정동위원소 비와 MPOM의 안정동위원소 비는 큰 차이를 보였다. 이러한 결과는 저서 무척추 동물의 잠재적인 먹이원의 평가를 위한 안정동위원소 분석의 편리성을 확인 할 수 있다. SOM의 안정동위원소 비는 공간적 차이를 나타냈다. 먼저 하구 입구와 가장 가까운 곳에 위치하고 있는 지점 A($\delta^{13}C = -22.82\%$ and $\delta^{15}N = 7.67\%$)가 가장 높은 값을 나타냈고, 하천 방향인 지점 C($\delta^{13}C = -27.48\%$ and $\delta^{15}N = 3.03\%$)에서 낮은 값을 나타냈다. 중간 지점에 위치하고 있는 지점 B($\delta^{13}C = -25.69\%$ and $\delta^{15}N = 5.90\%$), D($\delta^{13}C = -25.09\%$ and

Table 1. Carbon and nitrogen stable isotope ratios (‰) and C/N (mol/mol) ratios for the Benthic invertebrate, potential OM and sediment

Material	station	n	$\delta^{13}\text{C}$ (‰)	$\delta^{15}\text{N}$ (‰)	C/N ratio
<i>Nuttallia olivacea</i>	A	3	-18.45 ± 0.16	9.33 ± 0.11	4.8 ± 0.73
	B	3	-18.94 ± 0.47	9.75 ± 0.29	6.0 ± 1.04
	D	3	-20.01 ± 0.66	8.07 ± 1.47	5.5 ± 0.08
<i>Nereidae</i>	B	3	-19.58 ± 1.54	11.45 ± 0.98	4.1 ± 0.15
	C	3	-22.54 ± 0.16	9.39 ± 0.45	3.8 ± 0.10
	D	3	-19.47 ± 1.11	11.93 ± 1.38	3.8 ± 0.05
Sediment	A	3	-22.82 ± 0.85	7.67 ± 0.62	3.9 ± 0.67
	B	3	-25.69 ± 0.11	-25.69 ± 0.11	15.0 ± 0.76
	C	3	-27.48 ± 0.09	-27.48 ± 0.09	10.3 ± 2.04
	D	3	-27.48 ± 0.09	4.71 ± 0.15	12.1 ± 0.53
MPOM		3	-19.62 ± 0.08	8.96 ± 1.70	5.6
EPOM		3	-25.58 ± 0.13	5.20 ± 0.46	3.1
Benthic microalgae		3	-16.3	6.2	-
<i>Phragmites australis</i>		3	-26.63 ± 0.76	2.79 ± 0.31	25.51 ± 0.05
<i>Ulva. Sp</i>		3	-15.81 ± 0.26	11.34 ± 1.43	12.15 ± 0.50
Sewage DOM		3	-24.5 ± 0.42	-0.6 ± 2.18	1.2 ± 0.40
Sewage DOM		4	-21.4 ± 0.60*	11.6 ± 0.50*	1.2 ± 0.15*

n, no. samples analyzed; MPOM, marine particulate organic matter; EPOM, estuarine part iculate organic matter; *, Gaston *et al.* (2004). Values are mean ± SD.

$\delta^{15}\text{N} = 4.71\text{‰}$)는 안정동위원소 비도 중간적인 값을 나타냈다(Fig. 3).

MPOM의 C/N비는 5.6이다(Table 1). 이 값과 식물플랑크톤의 Redfield ratio(=6.6)와 비교 평가하면 MPOM의 주 구성성분은 식물 플랑크톤 또는 그 파편임을 시사하고 있다. 대조적으로, TP(=25.5)는 높은 C/N비를 나타냈다. 또한, EPOM의 C/N비(=3.1)는 MPOM보다 낮은 값을 나타냈다(Table 1).

3.2 저서 무척추 동물의 안정동위원소 비 특성

저생 무척추동물의 탄소 동위원소비는 좁은 범위에서 표시되었다. *Nuttallia olivacea*는 -20.01‰ ~ -18.45‰의 범위를 나타냈으며,

퇴적물 식자인 *Nereidae*는 -22.54‰ ~ -19.58‰의 범위를 나타냈다. 또한, 질소 동위원소 비는 *Nuttallia olivacea*와 *Nereidae*에서 각각 8.07‰ ~ 9.75‰, 9.39‰ ~ 11.93‰의 범위를 나타냈다(Fig. 3). 이러한 저서 무척추동물의 탄소-질소 안정동위원소 비의 결과는 각 영양단계가 한 단계 상승할수록 $\delta^{13}\text{C}$ 는 $0.8 \pm 1.1\text{‰}$, $\delta^{15}\text{N}$ 은 $3.4 \pm 1.1\text{‰}$ 가 평균 증가한다. 부유성 유기물을 주먹이로 하는 *Nuttallia olivacea*의 $\delta^{13}\text{C}$ 의 값은 하구하류에서 상류로 갈수록 감소했다. 이것은 하구하류에서 상류로 갈수록 물속염분의 감소에 따른 입자성 유기물 중의 MPOM과 TP의 기여율의 변화와 관련한 것으로 판단된다.

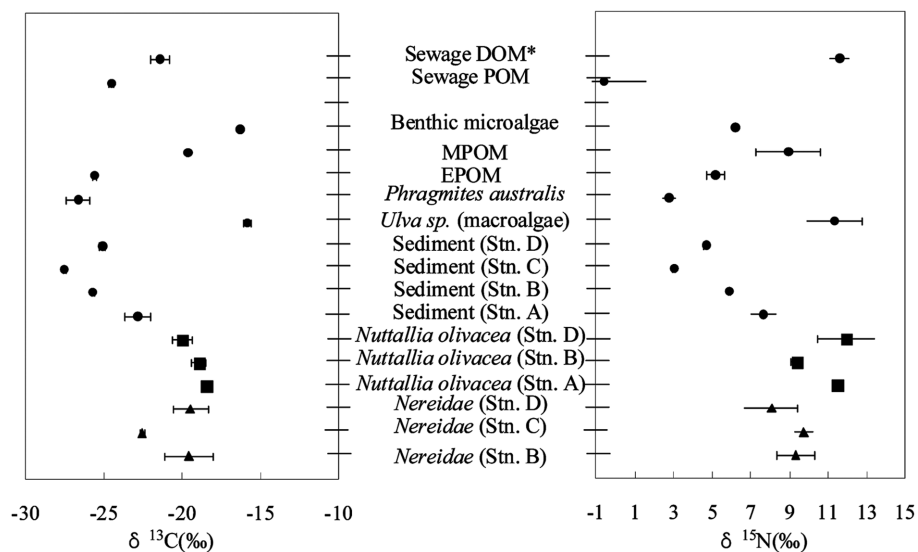


Fig. 3. $\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{15}\text{N}$ of benthic invertebrate, sediment and potential POM sources in Nanakita Estuary. *, Gaston *et al.* (2004). The plots and error bars indicate mean and SD, respectively.

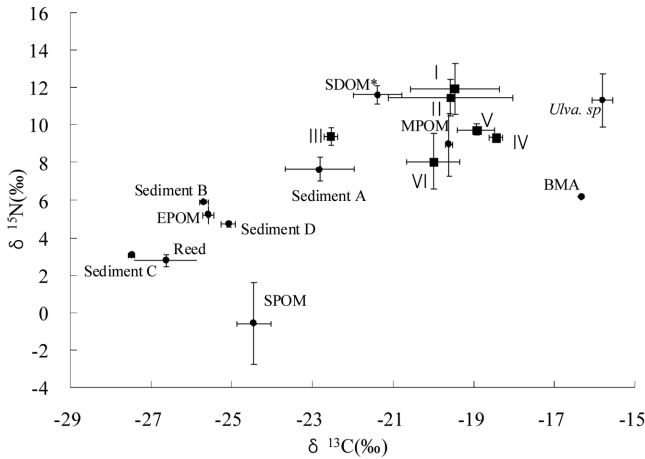


Fig. 4. Dual isotope plots of $\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{15}\text{N}$ (mean \pm SD) for Nereidae, *Nuttallia olivacea*, sediment and its potential food sources in the four sampling stations (based on Table 1). BMA=benthic microalgae. I=Nereidae of station B. II=Nereidae of station C. III=Nereidae of station D. microalgae. IV=*Nuttallia olivacea* of station A. V=*Nuttallia olivacea* of station B. VI=*Nuttallia olivacea* of station *=*Gaston et al.*(2004).

적인 먹이원의 기원 기여율을 Fig. 5에 나타냈다. 그 결과, 하구 갯벌에 서식하는 저서 무척추동물에 대한 기여율은, Stn.A의 *Nuttallia olivacea*에서 TP는 12.7(0~30)%, MPOM는 12.5(0~35)%, EPOM는 13.6(0~37)%, BMA는 61.2(43~75)%를 나타냈고, Stn.B의 *Nuttallia olivacea*에서는, TP는 11.4(0~30)%, MPOM는 24.3(0~50)%, EPOM는 15.9(0~41)%, BMA는 48.4(28~68)%였다. 또한, Stn.D의 *Nuttallia olivacea*의 TP는 36.2(22~48)%, MPOM는 4(0~15)%, EPOM는 8(0~29)%, BMA는 51.7(42~61)%였다. 이 결과로부터 비교적 MPOM과 BMA의 기여율이 높음을 알 수 있었다. 단, 지점 D에서는 BMA 다음으로 MPOM보다 TP의 기여율이 높게 나타났다.

한편, *Nereidae*에 있어서 기여율을 보면, Stn.B에서 TP는 6.6(0~20)%, MPOM는 74.5(56~93)%, EPOM는 9.9(0~27)% 및 BMA는 9(0~25)%였고, Stn.C에서 TP는 20.6(0~56)%, MPOM는 29(0~54)%, EPOM는 41.9(0~79)%, BMA는 8.5(0~29)%였다. 또한, Stn.D의 *Nereidae*에서 TP는 4.5(0~15)%, MPOM는 83.1(71~97)%, EPOM는 7.4(0~21)%, BMA는 5.1(0~17)%로 MPOM과 EPOM의 기여율이 높게 나타났지만, 지점 C에서는 MPOM 및 EPOM과 더불어 TP의 기여가 큼을 알 수 있었다.

4. 고찰

전통적으로 행해져 온 소화관 내용물 조사 등에서는 피식 - 포식에 관련해 정보에 관한 수집을 할 때에 일시적인 정보만 얻을 수 있었고, 또한 소화관내의 전체적인 먹이 생물의 종 조성을 동정하는 것이 곤란 했었다(Hall[2000]). 그러나 최근의 탄소-질소 안정 동위원소비를 이용한 수권생태계의 먹이연쇄에 관한 연구에 의한 생물의 체성분중의 안정동위원소는 수개월간에 섭취한 먹이 생물의 값을 반영하는 것으로 명확하게 밝혀졌다(Sakano[2005], Gustafson[2007]). 따라서 수집된 생물의 안정동위원소는 수집일 전의 수개월간에 걸쳐 섭취한 먹이 생물의 평균적인 값을 반영하고 있다고 생각할 수 있다.

TP의 $\delta^{13}\text{C}$, $\delta^{15}\text{N}$ 의 값은 각각 -26.63‰, 2.79‰였다. 이 값은 C3형 광합성을 행하는 일반 대부분 식물군의 C3 식물 유기물($\delta^{13}\text{C} = -23\text{‰} \sim -30\text{‰}$, $\delta^{15}\text{N} = -5\text{‰} \sim 5\text{‰}$)과 비교하면 그 범위 안에 포함하고 있다(Yokoyama[2003]). 또한, 실제 본 연구 대상 하구역 주변에서도 많은 C3 계통 식물이 서식하고 있음이 관찰 되었다. 한편, Fig. 3의 $\delta^{13}\text{C}$ 의 결과로 미루어 보면, EPOM은 TP와 조석간만에 의해 이송된 MPOM의 혼합물임을 시사하고 있다. 하천에 비해 하구 역은 내부 생산비가 높기 때문에 하구에서는 내부생산 유기물이 EPOM에 중요한 공급원일지도 모른다. 그러나 Fig. 3의 탄소안정동위원소비를 보면 EPOM은 MPOM보다 낮은 값을 나타내고 있으며, 육상식물에 가까운 값을 나타내고 있다. 그리고, 일본 하천에서는 급경사에 의한 체류시간이 짧기 때문에 담수 식물 플랑크톤이 EPOM에 대한 기여는 적다고 판단된다(Kasai[2005]). 또한, EPOM의 C/N비가 낮은 이유는 상하류에 위치하고 있는 하수처리장으로부터 배출되는 유기물의 영향을 받고 있을 가능성이

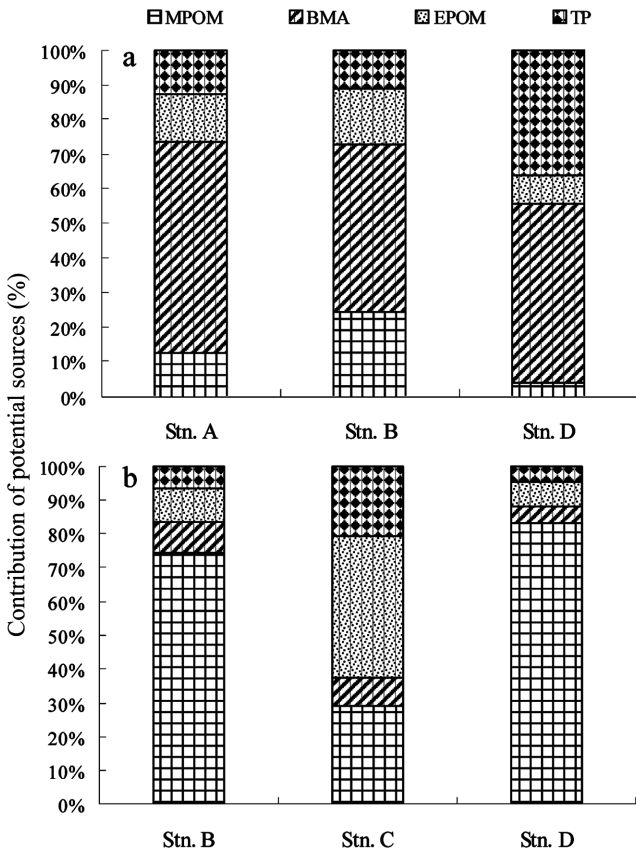


Fig. 5. Percentages of contributions of potential POM sources to sediment and diets of primary consumer, estimated by IsoSource, in estuaries. a: *Nuttallia olivacea*, b: *Nereidae*.

갯벌에 서식하고 있는 저서 무척추 동물에 있어서 잠재적인 먹이원의 안정동위원소 비와 *Nuttallia olivacea* 및 *Nereidae*의 안정동위원소비를 기초로, TP, MPOM, EPOM 및 BMA 4개의 잠재

있다고 사료된다(Table 1).

식물 플랑크톤 이외에, BMA는 최근, 하구역에 서식하고 있는 저서 무척추 동물 중에서도 여과성 식자에 있어서 중요한 먹이원로서 높게 인식 되고 있다(Stanislas[2007]). 일부 연구자에 의하면 수심이 얇은 지역에서의 BMA의 생산은 식물 플랑크톤의 생산에 필적하거나 그 이상의 생산성을 갖고 있음을 지적했다(Cahoon[1992], Jahnke[2000]). Yokoyama[2003]의 조사에 의하면, Gokasho Bay에서 저서 규조류의 안정 동위원소의 값을 조사해, 조개류에 있어서 저서 규조류의 이용도가 식물 플랑크톤에 필적하고 다른 먹이원보다 우위에 있음을 나타냈다. 따라서, MPOM에 더해, BMA는 *Nuttallia olivacea*에 중요한 먹이원으로 생각된다. BMA가 *Nuttallia olivacea*의 먹이원이 될 수 있는 요인으로 조석에 의한 밀물시 물리적인 재부유 현상에 의해 저서 퇴적층으로부터 수중으로 재부유 된 것을 여과성 식자(*Nuttallia olivacea*)에 의해 이용되고 있을 가능성이 시사되고 있다. 결국, *Nuttallia olivacea*의 먹이원은 수중에 포함하고 있는 부유물질이거나 조석에 의해 재부유 된 BMA과 TP 등의 유기물질을 포함한 혼합물이라고 사료된다(Alfaro[2006]).

반면, 퇴적물식자로 잘 알려진 *Nereidae*의 먹이원으로는 BMA와 더불어 SOM이 일반적으로 지시되고 있다(Doi[2005]). 하지만 Fig. 5의 결과에 의하면 BMA보다 MPOM의 기여율이 높았다. 이 결과의 원인으로 계절적인 요인과 함께 물리적인 영향을 한 요인으로 생각할 수 있다. 하구 갯벌에 있어서 BMA의 주 우점종은 규조류로 봄과 가을에 가장 높은 생물량을 나타내지만 겨울에 있어서는 생물량이 감소할뿐만 아니라, 겨울철에는 비교적 건기가 장기화 되는 상태를 보여 하천의 수량 또한 적은 상태를 유지했다(Fig. 2). 이러한 계절적인 특성과 함께 강풍에 의한 높은 파도와 같은 비일상적 이벤트적인 현상에 의해서 MPOM이 상대적으로 하구 갯벌에 퇴적하기 쉬운 물리적 환경 조성을 일으키고 있다고 사료된다(Shin[2008]). 이러한 현상으로 *Nereidae*의 먹이원이 BMA보다 MPOM의 기여가 높았다고 사료된다.

해양과 가깝게 접하고 있는 하구역 갯벌에 있어서 저서 무척추 동물의 먹이 이용율은 물리적 환경요소 변화뿐만 아니라 계절적인 특성 즉, 일차 생산자의 생산량 변화에 큰 영향을 받고 있다고 판단된다.

5. 결 론

일본 나나키다 하구역에서 서식하고 있는 저서 무척추 동물의 먹이원의 기원해석 결과, 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 조사 지점들의 퇴적유기물 기원은 지점A에서 지점C로 갈수록 MPOM의 영향에서 TP의 영향이 증가했고, 서로 근접해 있지만 퇴적유기물의 공간적 기원 특징은 서로 다른 경향을 나타냈다.

2) 하구 갯벌에서 서식하고 있는 *Nuttallia olivacea*과 *Nereidae*는 주로 MPOM과 BMA를 주로 먹이원으로 이용하고 있었다. 단, 지점D의 *Nuttallia olivacea*와 지점C의 *Nereidae*는 타 조사 지점보

다 TP의 높은 기여율을 알 수 있었다.

3) 여과성 식자인 *Nuttallia olivacea*와 퇴적물 식자인 *Nereidae*가 계절 및 비일상적인 이벤트 현상에 의한 퇴적물 기원 변화에 영향을 받고 있음이 시사되었다.

결론적으로 근접해 있음에도 불구하고 서로 다른 저질 환경을 나타내고 있는 하구 갯벌에 서식하는 저서무척추 동물에 있어서 먹이원의 기여율의 변화는 계절 및 비일상적인 이벤트현상에 의한 유기물의 기원차이에 의한 요인으로 판단된다. 이러한 계절적인 특성과 더불어 이벤트적인 현상이 저서 무척추 동물의 분포와 먹이원의 변화에 어떠한 영향을 주고 있는지에 대해서 이후 보다 명확하게 밝힐 필요가 있다고 사료된다.

참고문헌

- [1] Alfaro, A.C. Alfaro, Thomas, F., Sergent, L., Duxbury, M. 2006, "Identification of trophic interactions within an estuarine food web(northern New Zealand) using fatty acid biomarkers and stable isotopes. Estuarine Coastal and Shelf Science", Vol 70, 271-286.
- [2] Bachock, Z., Mfilinge, P.L., Tsuchiya, M. 2003, "The diet of the mud clam *Geloina coaxans*(Mollusca, Bivalvia) as indicated by fatty acid markers in a subtropical mangrove forest of Okinawa, Japan. Journal of Experimental Marine Biology and Ecology", Vol 292, 187-197.
- [3] Doi, H., Matsumasa, M., Toya, T, Satoh, N, Mizota, C., Maki, Y, Kikuchi, E. 2005, "Spatial shifts in food sources for macrozoobenthos in an estuarine ecosystem: Carbon and nitrogen stable isotope analyses. Estuarine, Coastal and Shelf Science", Vol 64, 316-322.
- [4] Donald, L., Phillips, Paul, L., Koch. 2002, "Incorporating concentration dependence in stable isotope mixing models. Oecologia", Vol 130, 114-125.
- [5] Gustafson, L., Showers, W., Kwak, T., Levine, J. and Stoskopf, M. 2007, "Temporal and spatial variability in stable isotope compositions of a freshwater mussel: implications for biomonitoring and ecological studies, Oecologia", Vol 152, 140-150.
- [6] Hall, O., R., Jr., Wallace, J. B. and Eggert, S. L. 2000, "Organic matter flow in stream food webs with reduced detrital resource base. Ecology", Vol 81, 3445-3463.
- [7] Jahnke, R. A., Nelson, J. R., Marinelli, R. L., Eckman, J. E., 2000, "Benthic flux of biogenic elements on the southeastern US continental shelf: influence of pre water advective transport and benthic microalgae. Cont. Shelf Res.", Vol 20, 109-127.
- [8] Kasai, A. and Nakata, A. 2005, "Utilization of terrestrial organic matter by the bivalve *Corbicula japonica* estimated from stable isotope analysis. Fisheries Science", Vol 71, 151-158.
- [9] DeNiro, M. J. and Epstein, S., 1978, "Influence of diet on the distribution of carbon isotopes in animals. Geochim. Cosmochim. Acta", Vol 42, 495-506.
- [10] Minagawa, M. and Wada, E., 1984, "Stepwise enrichment of

- $\delta^{15}\text{N}$ along food chains Further evidence and the relation between $\delta^{15}\text{N}$ and animal age. *ibid.*”, Vol 45, 341-351.
- [11] Meziane, T. and Tsuchiya, M., 2002, “Organic matter in a subtropical mangrove estuary subjected to wastewater discharge: origin and utilisation by two macrozoobenthic species. *Journal of Sea Research*”, Vol 47, 1-11.
- [12] Riera, P. and Richard, P., 1996, “Isotopic Determination of Food Sources of *Crassostrea gigas* Along a Trophic Gradient in the Estuarine Bay of Marennes-Oleron. *Estuarine Coastal and Shelf Science*”, Vol 42, 347-360.
- [13] Rooker, J. R., Turner, J. P. and Holt, S. A., 2006, “Trophic ecology of Sargassum-associated fishes in the Gulf of Mexico determined from stable isotopes and fatty acids. *Marine Ecology Progress Series*”, Vol 313, 249-259.
- [14] Sakamaki, T. and Nishimura, O., 2009, “Is sediment mud content a significant predictor of macrobenthos abundance in low-mud-content tidal flats? *Marine and Freshwater Research*”, Vol 60, 160-167.
- [15] Sakamaki, T. and Nishimura, O., 2007, “Physical control of sediment carbon content in an estuarine tidal flat system (Nanakita River, Japan) : A mechanistic case study, *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, Vol 73, 781-791.
- [16] Sakano, H., Fujiwara, E., Nohara, S. and Ueda, H. 2005, “Estimation of nitrogen stable isotope turnover rate of *Oncorhynchus nerka*, *Environ. Biol. Fish.*”, Vol 72, 13-18.
- [17] Sauriau, P.G. and Kang, C.K., 2000, “Stable isotope evidence of benthic microalgae-based growth and secondary production in the suspension feeder *Cerastoderma edule* (Mollusca, Bivalvia) in the Marennes-Oléron Bay. *Hydrobiologia*”, Vol 440, 317-329.
- [18] Shin, W.S., Fujibayashi, M, Nomura, M, Nakano, K. and Nishimura, O. 2008, “The origin and characteristics of sediment organic matters at three tidal flats in estuary of Nanakita River. *Environmental Engineering Research (Japan)*”, Vol 45, 547-552.
- [19] Waldron, S., Tatner, P., Jack, I. and Arnott, C., 2001, “The Impact of Sewage Discharge in a Marine Embayment: A Stable Isotope Reconnaissance. *Estuarine Coastal and Shelf Science*”, Vol 52, 111-115.
- [20] Stanislas, D., Francis, O., Julio, C.M.L., Michel, R., Sebastien, L., 2007, “Small-scale spatial variability of food partitioning between cultivated oysters and associated suspension feeding species, as revealed by stable isotopes. *Marine Ecology Progress Series*”, Vol 336, 151-160.
- [21] Tomiyama, T., Komizunai, N., Shirase, T., Ito, K. and Omori, M., 2008, “Spatial intertidal distribution of bivalves and polychaetes in relation to environment conditions in the Natori River estuary, Japan. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*”, Vol 80, 243-250.
- [22] Warwick, R.M., Ashman, C.M., Brown, A.R., Clarke, K.R., Dowell, B., Hart, B., Lewis, R.E., Shillabeer, N., Somerfield, P. J. and Tapp, J.F. 2002, “Inter-annual changes in the biodiversity and community structure of the macrobenthos in Tees Bay and the Tees estuary, UK, associated with local and regional environmental events. *Marine Ecology Progress Series*”, Vol 234, 1-13.
- [23] Yokoyama, H. and Ishihi, Y. 2003, “Feeding of the bivalve *Theora lubrica* on benthic microalgae: isotopic evidence. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*”, Vol 255, 303-309.

2009년 12월 1일 원고 접수

2010년 2월 4일 심사완료

2010년 2월 8일 수정본 채택