

炭素および窒素同位体比分析による大阪湾の人工島に形成された動物群集の食物網構造

米田佳弘^{1†}, 金子健司^{2*}, 松井光市³, 鈴木輝明⁴, 高倍昭洋⁵

Food web structure of animal communities formed on seawalls of artificial islands in Osaka Bay as determined by analyses of carbon and nitrogen stable isotope ratios

Yoshihiro YONEDA^{1†}, Kenji KANEKO^{2*}, Koichi MATSUI³, Teruaki SUZUKI⁴ and Teruhiro TAKABE⁵

Coastal artificial structures are demanded for a consideration of environmental protection in recent years. Although gradually sloped seawalls were adopted in various parts of Japan, little is known on the food web of the community around such structures. In the present study, the food web and food source were estimated on the seawalls of artificial islands in Osaka Bay as determined by analyses of carbon and nitrogen stable isotopes. Clustering of $\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{15}\text{N}$ values of animals on the seawalls showed five feeding groups: fish, suspended feeders, suspended and surface deposit feeders, carnivores and herbivores. The dual isotope plot of $\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{15}\text{N}$ showed that the three food sources (phytoplankton, microbenthic algae and macrobenthic algae) were eaten by herbivores, suspended feeders, surface deposit feeders, and that these animals were ingested by carnivores and fish, both occupying the highest trophic levels.

Key words: food web, food source, stable isotope, coastal artificial structures, Osaka Bay

はじめに

海岸保全施設においては、生態系に配慮した構造物の設計が求められ、様々な機能を持つ構造物が考案されている(例えば、横山ほか, 2003; 三好ほか, 2004; 三好ほか, 2007; 村上ほか, 2007)。中でも緩傾斜護岸は直立護岸に代わって多くの護岸に採用され、藻場が形成されやすいことが報告されている(明田ほか, 1997; 寺脇ほか, 1998; 阪上ほか, 2003)。大阪湾南部に位置する海上空港である関西国際空

港においても、空港島護岸の多くに緩傾斜護岸が採用されている。その護岸の機能を評価するために、1期空港島では護岸が概成した1988年以降、2期空港島でも護岸が概成した2001年以降、藻場、魚介類、底生動物に関するモニタリング調査が継続的に実施されている(阪上ほか, 2003)。その結果、海藻については移植されたカジメ *Ecklonia cava* やホンダワラ属褐藻 *Sargassum* spp., およびワカメ *Undaria pinnatifida* やその他海藻により 0.34 km² におよぶ大

2012年6月28日受付, 2013年7月16日受理

¹ 大阪府環境農林水産部水産課

Fisheries Division, Department of Environment, Agriculture, Forestry and Fisheries, Osaka Prefectural Government, 1-14-16 Nankokita, Suminoe-ku, Osaka, Osaka 559-8555, Japan

² 株式会社日本海洋生物研究所

Marine Biological Research Institute of Japan Co., Ltd., 3-9-2 Kobai-cho, Showa-ku, Nagoya, Aichi 466-0031, Japan

³ 新関西国際空港エンジニアリング株式会社

New Kansai International Airport Engineering Co., Ltd., 1 Senshu-kuko kita, Izumisano, Osaka 549-0001, Japan

⁴ 名城大学大学院総合学術研究科

Graduate School of Environmental and Human Sciences, Meijo University, 1-501 Shiogamaguchi, Tempaku-ku, Nagoya, Aichi 468-8502, Japan

⁵ 名城大学総合研究所

Research Institute of Meijo University, 1-501 Shiogamaguchi, Tempaku-ku, Nagoya, Aichi 468-8502, Japan

* 現住所: 東北大学大学院農学研究科

Graduate School of Agricultural Science, Tohoku University, 1-1 Tsutsumidori-Amamiya, Aoba-ku, Sendai, Miyagi 981-8555, Japan

† E-mail: YonedaYo@mbox.pref.osaka.lg.jp

阪湾で有数の規模の藻場が形成されていることが確認されている。魚類については、1期空港島で40種、2期空港島で45種の出現が報告され、マナマコ *Apostichopus armata* やムラサキウニ *Anthocidaris crassispina* 等の多くの有用魚類の生息も確認されていることから、大阪湾の生物多様性の確保や魚介類の産卵場、生育場として機能している可能性がある（阪上ほか、2003）。しかし、大阪湾の海上に造成された護岸に形成されたこれらの動物群集がどのような食物源を利用し、どのような食物網構造により成立しているのかについては未解明である。これを明らかにすることは、関西国際空港の護岸の生物生産機能や水質浄化機能の評価、および今後実施される新たな人工島の造成あるいは環境修復として新たな生態系の創出を行う場合に重要な知見となる。

そこで我々は、関西国際空港の空港島護岸に形成された動物群集の炭素および窒素の安定同位体比 ($\delta^{13}\text{C}$, $\delta^{15}\text{N}$) を調べることにより、食物網構造を把握したので報告する。

材料と方法

調査地点

調査地点は大阪湾泉州沖5 kmに造成された関西国際空港の1期空港島（以降、1期島と呼ぶ）である（Fig. 1）。造成海域の平均水深は18.0 mであり、護岸は1988年12月に概成した。

1期島は幅1,250 m、長さ4,370 mであり、護岸は主に緩傾斜護岸と直立護岸で構成されている。直立護岸は北東側護岸に採用され、それ以外の護岸は傾斜部と水平部からなる緩傾斜護岸である。1期島造成後約11年が経過した1999年の藻場の観察では、直立護岸で33種、湿重量で $88 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$ 、南東側の緩傾斜護岸で71種、湿重量で $1,740 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$ の海藻が出現し、直立護岸では緑藻類と紅藻類、緩傾斜護岸では紅藻類と褐藻類が主に出現している（尾崎ほか、2000）。南東側の緩傾斜護岸では藻場は水深約7 mまでみられ、全

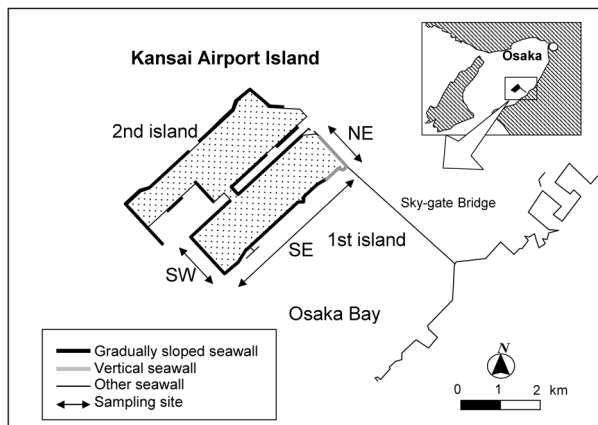


Figure 1. Map showing the study site.

体的に小型多年生紅藻類が優占するが、浅所にはホンダワラ属褐藻、ワカメ等も多くみられ、深所に向かうにつれ、カジメ属褐藻が増加する（金子ほか、2007）。

試料の採集

2001年9月6日から2002年9月30日にかけて、および2011年3月9日から11日にかけて1期島周辺海域において海藻と動物の試料の採集を行った（Fig. 1）。

海藻については、護岸に繁茂する代表的な海藻類を試料とした。

動物試料については、メガベントス（目視で容易に観察できる大型の移動性の動物）およびマクロベントス（被覆石等に付着する動物やそこに生息する小型の移動性の動物）とした。また、動物プランクトンと予備調査において現存量の多かった魚類も試料とした（Table 1）。

海藻、メガベントス、マクロベントスの採集は、1期島の北東側護岸（NE）、南東側護岸（SE）、および南西側護岸（SW）においてスキューバにより行った（Fig. 1）。海藻とメガベントスは直接採集し、マクロベントスは、護岸の被覆石の付着物を枠取りし、船上で選別し採集した。試料は各生物の現存量の多い護岸および水深から採集した。

動物プランクトンについては、北原式プランクトンネット（網目幅100 μm ）を用いて、1期島近傍の海域において、海底面上0.5 mから海面まで鉛直曳きを行った。試料は燃焼済みのWhatman GF/Cガラスファイバーフィルタにより吸引濾過した。

魚類についても、NE、SE、およびSWにおいて釣りにより採集した。さらに、空港島周辺海域で操業していたパッチ網で得られたカタクチイワシ *Engraulis japonicus* およびイカナゴ *Ammodytes personatus* の稚魚も試料とした。

すべてのサンプルは分析に供するまで -30°C で凍結保存した。

安定同位体比の測定

安定同位体比の測定部位は、ウニ類については生殖腺、マナマコおよびアカマコ *Apostichopus japonicus* については体壁、魚類および貝類については筋肉、それ以外の動物については体全体、海藻類については葉状部とした。

メガベントス、マクロベントスおよび魚類は凍結乾燥した後、粉末にし、クロロホルム-メタノール（2:1）溶液で脱脂した。海藻は表面の付着物を取り除いた後、 60°C で乾燥し粉末にした。動物プランクトン試料については塩酸処理により炭酸塩を除去した。各試料の $\delta^{13}\text{C}$ および $\delta^{15}\text{N}$ 値の測定には元素分析計（FLASH 2000, Thermo Fisher Scientific）に接続した質量分析計（DELTA V Advantage, Thermo Fisher Scientific）を用いて測定した。本分析システムの分析精度は $\delta^{13}\text{C}$, $\delta^{15}\text{N}$ とともに $\pm 0.15\%$ 以下である。ただし、一部の測定は、元素分析計（NA-1500, Fisons）に接続した質量分析計（MAT DELTA Plus, Finnigan）を用いた。本分析システムの分析精度は $\delta^{13}\text{C}$ が $\pm 0.1\%$ 以下、 $\delta^{15}\text{N}$ が $\pm 0.2\%$ 以下で

Table 1. Stable carbon ($\delta^{13}\text{C}$) and nitrogen ($\delta^{15}\text{N}$) isotope values (‰ , mean \pm SD).

General group	Species	Japanese name	Abbreviation	$\delta^{13}\text{C}\pm\text{SD}$	$\delta^{15}\text{N}\pm\text{SD}$	<i>n</i>	Date
Macroalgae							
Rhodophyceae	<i>Chondrus</i> sp.	Tsunomata	Rh-1	-16.1 \pm 1.2	9.3 \pm 0.2	3	Mar. 2011
	<i>Gelidium elegans</i>	Makusa	Rh-2	-14.3 \pm 0.6	10.6 \pm 0.7	3	Mar. 2011
	<i>Gracilaria textorii</i>	Kabanori	Rh-3	-15.7 \pm 0.3	9.8 \pm 0.5	3	Mar. 2011
Phaeophyceae	<i>Ecklonia kurome</i>	Kurome	Ph-1	-15.1 \pm 0.6	10.7 \pm 1.1	3	Mar. 2011
	<i>Sargassum horneri</i>	Akamoku	Ph-2	-15.7 \pm 2.3	9.2 \pm 0.4	3	Mar. 2011
	<i>Undaria pinnatifida</i>	Wakame	Ph-3	-13.6 \pm 0.4	9.5 \pm 0.2	3	Mar. 2011
Zooplankton			ZP	-18.6 \pm 0.3	12.8 \pm 0.2	4	Sep. 2002
Mollusca							
Polyplacophora	<i>Acanthopleura japonica</i>	Hizara-gai	Po	-12.1 \pm 0.3	14.9 \pm 0.1	3	Mar. 2011
Bivalvia	<i>Arca boucardi</i>	Koberuto-funegai	B-1	-16.8	12.7	2	Mar. 2011
	<i>Mytilus galloprovincialis</i>	Murasaki-igai	B-2	-16.8 \pm 0.3	11.9 \pm 0.2	3	Mar. 2011
	Ostreidae	Itabogaki-ka	B-3	-15.3 \pm 0.2	12.7 \pm 0.3	3	Mar. 2011
Gastropoda	Nassariidae	Oriireyofubai-ka	G-1	-12.9	15.7	2	June 2002
	<i>Thais bronni</i>	Reishi-gai	G-2	-13.3 \pm 0.2	15.3 \pm 0.7	3	Mar. 2011
	<i>Turbo cornutus</i>	Sazae	G-3	-15.2 \pm 0.3	11.4 \pm 0.1	3	June 2002
Polychaeta							
	<i>Cirriiformia tentaculata</i>	Mizuhiki-gokai	P-1	-18.1 \pm 0.4	12.4 \pm 0.4	3	Sep. 2002
	<i>Glycera</i> sp.	Chirori-zoku	P-2	-13.5	15.5	2	June 2002
	Nereididae	Gokai-ka	P-3	-17.0 \pm 1.8	14.3 \pm 0.2	3	Sep. 2002
	Polynoidae	Urokomushi-ka	P-4	-16.8 \pm 0.5	14.2 \pm 0.6	3	Sep. 2002
	Terebellidae	fusa-gokai-ka	P-5	-17.2 \pm 0.5	13.3 \pm 0.5	3	Sep. 2002
Arthropoda							
Maxillopoda	<i>Megabalanus rosa</i>	Aka-fujitsubo	M	-16.5 \pm 0.2	15.1 \pm 0.2	3	Mar. 2011
Malacostraca							
Amphipoda	<i>Caprella penantis</i>	Maruera-warekara	Am-1	-16.3	12.0	2	Mar. 2011
	Hyalidae	Mokuzu-yokoebi-ka	Am-2	-13.9 \pm 0.5	14.1 \pm 0.4	3	Mar. 2011
Decapoda	<i>Alpheus</i> sp.	Teppou-ebi-zoku	D-1	-14.2 \pm 1.5	14.6 \pm 0.5	3	Sep. 2002
	Hippolytidae	Mo-ebi-ka	D-2	-14.1 \pm 0.9	14.5 \pm 0.8	4	Sep. 2002
	<i>Pilumnus minutus</i>	Himekebuka-gani	D-3	-11.4 \pm 1.3	13.7 \pm 0.4	3	Sep. 2002
	<i>Pugettia quadridens</i>	Yotsuhamo-gani	D-4	-12.0 \pm 0.5	12.9 \pm 0.3	3	Sep. 2002
	<i>Thalmita sima</i>	Futababenitsuke-gani	D-5	-13.7 \pm 0.4	13.5 \pm 0.2	4	Sep. 2002
Echinodermata							
Echinoidea	<i>Anthocidaris crassispina</i>	Murasaki-uni	E-1	-13.1 \pm 0.1	11.2 \pm 0.5	3	June 2002
	<i>Hemicentrotus pulcherrimus</i>	Bafun-uni	E-2	-14.3 \pm 0.8	11.4 \pm 0.2	3	June 2002
Holothuroidea	<i>Apostichopus japonicus</i>	Aka-namako	H-1	-14.8 \pm 0.4	14.5 \pm 0.4	3	Mar. 2011
	<i>Apostichopus armata</i>	Ma-namako	H-2	-15.0 \pm 0.3	13.2 \pm 0.6	3	Mar. 2011
	Synaptidae	Ikari-namako-ka	H-3	-14.0	13.3	2	June 2002
Chordata							
Ascidacea	<i>Halocynthia roretzi</i>	Ma-boya	As	-17.8 \pm 0.2	13.6 \pm 0.7	3	Mar. 2011
Vertebrata							
Fish							
Adult	<i>Acanthopagrus schlegelii</i>	Kurodai	F-1	-14.1	17.0	2	Mar. 2011
	<i>Chromis notata</i>	Suzumedai	F-2	-14.5 \pm 0.4	16.2 \pm 0.0	3	Sep. 2002
	<i>Lateolabrax japonicus</i>	Suzuki	F-3	-14.8 \pm 0.5	18.0 \pm 0.3	6	Sep. 2001
	<i>Rudarius ercodes</i>	Amimehagi	F-4	-15.5	13.7	2	Sep. 2002
	<i>Sardinops melanostictus</i>	Ma-iwashi	F-5	-15.1 \pm 0.5	16.0 \pm 0.5	3	Sep. 2002
	<i>Sebastes inermis</i>	Mebaru	F-6	-15.6 \pm 0.4	16.8 \pm 0.3	6	Sep. 2001
	<i>Sebastes marmoratus</i>	Kasago	F-7	-13.8 \pm 0.3	17.5 \pm 0.2	6	Sep. 2001
	<i>Trachurus japonicus</i>	Ma-aji	F-8	-15.2 \pm 1.3	16.5 \pm 0.6	6	Sep. 2002
Juvenile	<i>Ammodytes personatus</i>	Ikanago (Juveniles)	Fj-1	-16.2 \pm 0.1	14.9 \pm 0.2	3	Mar. 2011
	<i>Engraulis japonica</i>	Katakuchi-iwashi (Juveniles)	Fj-2	-16.0 \pm 0.5	15.3 \pm 0.3	6	Sep. 2002

ある。安定同位体比は標準試料から千分偏差で以下のように示される。

$$\delta^{13}\text{C}, \delta^{15}\text{N} = [(R_{\text{sample}}/R_{\text{standard}} - 1)] \times 1000$$

R_{sample} : 分析試料の $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$, $^{15}\text{N}/^{14}\text{N}$, R_{standard} : 標準試料の $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$, $^{15}\text{N}/^{14}\text{N}$, $\delta^{13}\text{C}$ と $\delta^{15}\text{N}$ の標準試料はそれぞれ世界標準物質である PDB (Peedee 層産ベレムナイト化石) と大気中の窒素である。

また、各動物の安定同位体比 $\delta^{13}\text{C}$, $\delta^{15}\text{N}$ についてクラスター分析を行うことで食性のグループ化を行った。分析の際、 $\delta^{13}\text{C}$, $\delta^{15}\text{N}$ をそれぞれ標準化し、結合距離にはユークリッド距離を、結合方法にはウォード法をそれぞれ用いた。

結果

安定同位体比

各試料の $\delta^{13}\text{C}$, $\delta^{15}\text{N}$ は Table 1 の通りである。海藻の $\delta^{13}\text{C}$ は -16.1 から -13.6% , $\delta^{15}\text{N}$ は 9.2 から 10.7% の範囲にあり、動物プランクトンの $\delta^{13}\text{C}$ は -18.6% , $\delta^{15}\text{N}$ は 12.8% であった。

動物群集は $\delta^{13}\text{C}$, $\delta^{15}\text{N}$ のクラスター分析の結果、5つのグループと9のサブグループに大別された (Fig. 2)。

各グループの位置関係についてみると (Fig. 3), $\delta^{13}\text{C}$ では、グループAが -18.1 から -16.0% と最も低く、動物プランクトンよりやや (0.5 から 2.6%) 高かった程度であったのに対して、グループEでは -13.5 から -11.4% と、動

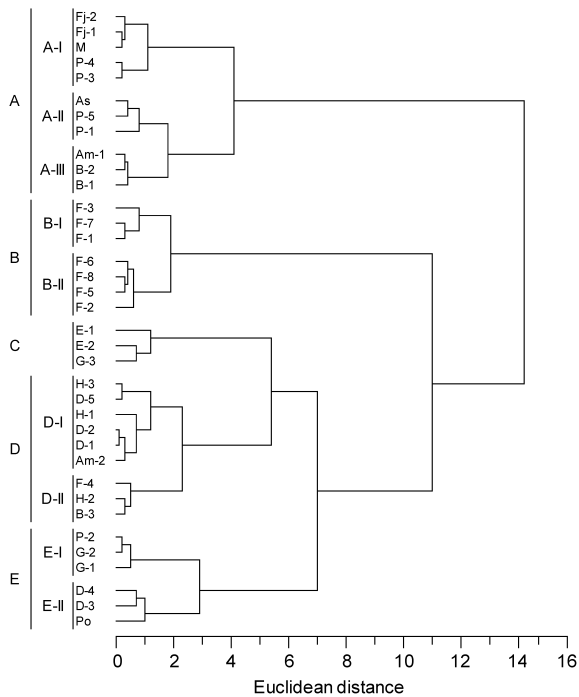


Figure 2. Cluster analysis dendrogram of $\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{15}\text{N}$ for organisms in the community on the seawalls in Kansai international airport using Ward's method.

物プランクトンよりも 5.1 から 7.2% も高く、海藻の範囲よりも高かった。グループB, D, Cは、それぞれ -15.6 から -13.8% , -15.5 から -13.7% , -15.2 から -13.1% であり、グループA, Eのほぼ中間的な値であった。

$\delta^{15}\text{N}$ では、グループCが 11.2 から 11.4% と最も低く、動物プランクトンよりも 1.5% 程度低く、海藻よりも 0.5 から 2.2% 程度高かったのに対して、グループBでは 16.0 から 18.0% と最も高く、動物プランクトンよりも 3.2 から 5.2% 高かった。グループA, D, Eは、それぞれ 11.9 から 15.3% , 12.7 から 14.6% , 12.9 から 15.7% であり、グループC, Bのほぼ中間的な値であった。グループDの $\delta^{13}\text{C}$ と $\delta^{15}\text{N}$ は他の4グループのほぼ中間的な値であり ($\delta^{13}\text{C}$: -15.5 から -13.7% , $\delta^{15}\text{N}$: 12.7 から 14.6%), $\delta^{13}\text{C}$ は海藻と $\delta^{15}\text{N}$ は動物プランクトンとそれぞれ同程度であった。

グループごとに内訳をみると、グループCは $\delta^{13}\text{C}$ が -15.2 から -13.1% , $\delta^{15}\text{N}$ が 11.2 から 11.4% 程度の範囲にあり、ムラサキウニ、バフンウニ *Hemicentrotus puicherrimus*, サザエから構成され、海藻よりも $\delta^{15}\text{N}$ が高く、 $\delta^{13}\text{C}$ についてはほぼ同じ範囲にある。

グループAは多様な分類群から成り、 $\delta^{13}\text{C}$ と $\delta^{15}\text{N}$ の値の大きいアカフジツボ *Megabalanus rosa*, イカナゴおよびカタチイワシ *Engraulis japonicus* の稚魚, ゴカイ科 *Nereididae* およびウロコムシ科 *Polynoidae* の多毛類から構成されるA-I ($\delta^{13}\text{C}$: -17.0 から -16.0% , $\delta^{15}\text{N}$: 14.2 から 15.3%), $\delta^{13}\text{C}$ の値が小さいマボヤ *Halocynthia roretzi*, ミズヒキゴカイ *Cirriformia tentaculata* およびフサゴカイ科 *Terebellidae* 多毛類から構成されるA-II ($\delta^{13}\text{C}$: -18.1 から -17.2% , $\delta^{15}\text{N}$: 12.4 から 13.6%), $\delta^{13}\text{C}$ が高く、 $\delta^{15}\text{N}$ の小さいコベルトフネガイ *Arca boucardi*, ムラサキイガイ *Mytilus galloprovincialis*, マルエラワレカラ *Caprella penantis* から構成されるA-III

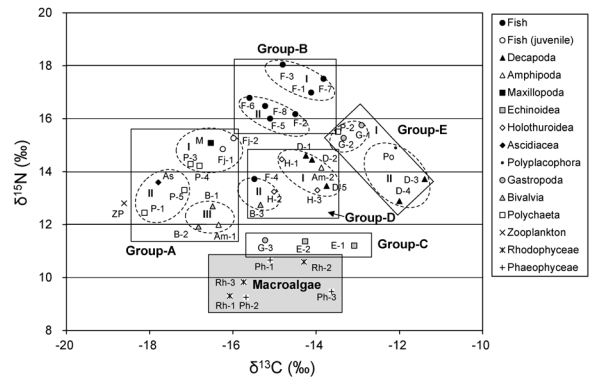


Figure 3. Dual isotope plot of $\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{15}\text{N}$ for organisms in the community on the seawalls in Kansai international airport. Abbreviations indicate species which are shown in Table 1. Groups A-E are feeding groups which were determined by the cluster analysis in Fig. 2. A dark area shows the range of the macroalgae.

($\delta^{13}\text{C}$: -16.8 から -16.3% , $\delta^{15}\text{N}$: 11.9 から 12.7%)の3つのサブグループに区分された。

グループDは $\delta^{13}\text{C}$ と $\delta^{15}\text{N}$ の値が相対的に大きいテッポウエビ属 *Alpheus* sp., モエビ科 Hippolytidae, フタバベニツケガニ *Thalamita sima*の十脚類, アカナマコおよびイカナマコ科 Synaptidaeのナマコ類, モクズヨコエビ科 Hyalidaeのヨコエビ類から構成されるD-I ($\delta^{13}\text{C}$: -14.8 から -13.7% , $\delta^{15}\text{N}$: 13.3 から 14.6%)とマナマコ, イタボガキ科 Ostreidaeの二枚貝類, アミメハギ *Rudarius ercodes*から構成されるD-II ($\delta^{13}\text{C}$: -15.5 から -15.0% , $\delta^{15}\text{N}$: 12.7 から 13.7%)の2つのサブグループに区分された。

グループEは相対的に $\delta^{13}\text{C}$ が低く, $\delta^{15}\text{N}$ が大きいオリイレヨフバイ科 Nassariidae, レイシガイ *Thais bronni*の腹足類, チロリ属 *Glycera* sp.の多毛類から構成されるE-I ($\delta^{13}\text{C}$: -13.5 から -12.9% , $\delta^{15}\text{N}$: 15.3 から 15.7%)と, 逆に相対的に $\delta^{13}\text{C}$ が高く, $\delta^{15}\text{N}$ が小さいヒメケバガニ *Pilumnus minutus*, ヨツハモガニ *Pugettia quadridens*の十脚類とヒザラガイ *Acanthopleura japonica*から構成されるE-II ($\delta^{13}\text{C}$: -12.1 から -11.4% , $\delta^{15}\text{N}$: 12.9 から 14.9%)の2つのサブグループに区分された。

グループBは魚類の成魚が分類され, $\delta^{13}\text{C}$ と $\delta^{15}\text{N}$ の値の大きいスズキ *Lateolabrax japonicus*, カサゴ *Sebastes marmoratus*, クロダイ *Acanthopagrus schlegelii* ($\delta^{13}\text{C}$: -14.8 から -13.8% , $\delta^{15}\text{N}$: 17.0 から 18.0%)から構成されるB-Iと値の小さいメバル *Sebastes inermis*, スズメダイ *Chromis notata*, マイワシ *Sardinops melanostictus*, マアジ *Trachurus japonicus* ($\delta^{13}\text{C}$: -15.6 から -14.5% , $\delta^{15}\text{N}$: 16.0 から 16.8%)から構成されるB-IIの2つのサブグループに区分された。

考察

安定同位体比のクラスター分析の結果, 関西国際空港の護岸の動物群集は, 5つのグループと9のサブグループに分類された。これらの各グループの食物の起源を推定するため, ^{13}C と ^{15}N の濃縮係数をそれぞれ1.0 (DeNiro and Epstein, 1978) および3.4 (Minagawa and Wada, 1984)とし, 植物プランクトン, 海藻, および底生微細藻類起源の食物を摂食した動物の安定同位体比の予測値あるいは範囲を示すとFig. 4のようになる。ここでは, 植物プランクトンの $\delta^{13}\text{C}$ および $\delta^{15}\text{N}$ は大阪湾湾央の表層と10 m層で観測された懸濁物 (0.7から15 μm)の値の平均値 -21.7% および 9.2% (Meksumpun et al., 1998)を用い, 底生微細藻類の $\delta^{13}\text{C}$ および $\delta^{15}\text{N}$ は広島湾の石面付着有機物 (0.7から125 μm)の値の平均値 -15.4% および 8.4% (Takai et al., 2002b)を用いた。この図から, $\delta^{13}\text{C}$ が大きいほど, 海藻や底生微細藻類の底生系の食物源を利用しており, 小さいほど植物プランクトンを起源とする浮遊系の食物源を利用していることは明らかである。この範囲から推測すると, グループAおよびBは浮遊系と底生系の食物源の両方を利用し, グループ

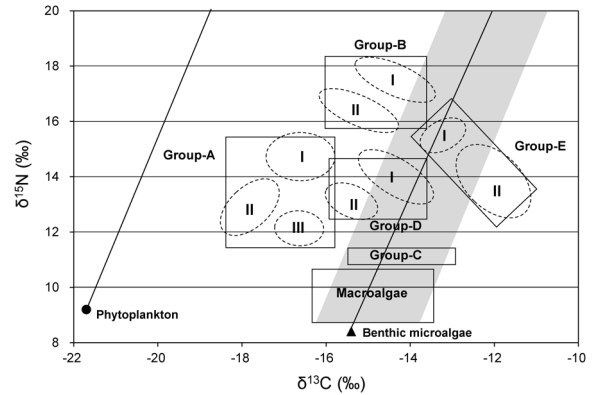


Figure 4. Range of dual isotope plot of $\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{15}\text{N}$ for feeding groups and expected food sources taking trophic enrichment into consideration in the community on the seawalls in Kansai International Airport. Groups A–E are feeding groups, which were determined by the cluster analysis. Solid lines show expected $\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{15}\text{N}$ of organisms feeding phytoplankton and benthic microalgae, respectively. A dark area shows range of expected $\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{15}\text{N}$ of organisms feeding macroalgae. Filled circle and triangle denote $\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{15}\text{N}$ of phytoplankton and benthic microalgae cited from Meksumpun et al. (1998) and Takai et al. (2002b), respectively.

C, D, Eは底生系の食物源を主に利用していることになる。

各グループの食性について検討すると, $\delta^{13}\text{C}$ が最も小さいA-IIは動物プランクトンに近い位置にあることから (Fig. 3), 植物プランクトンのような海中の細かい懸濁態粒子あるいは海底表面に堆積した細かい有機物を摂食するグループであると考えられる。構成種には, 懸濁物食者であるマボヤ, および表層堆積物食者であるフサゴカイ科およびミズヒキゴカイ科多毛類 (Fauchald and Jumars, 1979)が含まれることとも一致する。A-IはA-IIよりも $\delta^{15}\text{N}$ が高く, アカフジツボ, イカナゴおよびカタクチイワシの稚魚で構成されることから, A-IIよりも大きい懸濁態粒子を摂食していることが推測される。一方, A-IIよりも $\delta^{13}\text{C}$ の大きいA-IIIやD-IIにも, コベルトフネガイ, ムラサキイガイ, イタボガキ科の二枚貝類という明らかな懸濁物食者が含まれている一方, D-IIには表層堆積物食者とされるマナマコ (五嶋, 2012)も含まれていた。このことから, それらの懸濁物食者は海中の植物プランクトンよりも海底から巻き上がった底生微細藻類や海藻起源のデトライタスの影響を強く受けていると考えられる。さらに, テッポウエビ属, フタバベニツケガニ等の十脚類, アカナマコが含まれるD-Iや肉食者であるレイシガイ等の腹足類, チロリ属の多毛類から構成されるE-IはD-IIよりも $\delta^{13}\text{C}$ が大きいことから, さらに底生系起源の食物の影響を強く受けていると推測される。最も大きい $\delta^{13}\text{C}$ を示したE-IIは, 海藻や底生微細藻類起源から想定される範囲よりも $\delta^{13}\text{C}$ が大きかつ

た。このグループにはヒメケブカガニ、ヨツハモガニ、ヒザラガイが含まれていた。ヨツハモガニはアワビの稚貝のような小型の貝類を摂食し(干川, 2003)、ヒメケブカガニが属するオウギガニ科のカニ類も、カサガイ類等を摂食することが報告されている(富川・渡邊, 1990)。アワビの稚貝は底生微細藻類(岡部, 1982)、カサガイ類は底生微細藻類、海藻、小型甲殻類等を摂食することから(Latyshev et al., 2004)、底生微細藻類がE-IIの動物群の主な食物源になっていることが推察される。したがって、ここでは底生微細藻類の $\delta^{13}\text{C}$ について広島湾の値を用いて検討したが、本調査地点の底生微細藻類の $\delta^{13}\text{C}$ が広島湾のものよりも大きな値である可能性が考えられる。

$\delta^{15}\text{N}$ が最も大きい魚類で構成されるグループBは海藻や底生微細藻類起源に近く(Fig. 4)、底生系の食物源の割合が高いことを示しているが、B-IIはメバル、マアジ等から構成されることから、アミ類等の大型のプランクトンを摂食するグループと考えられる。さらに、B-Iは魚類等の大型動物を摂食するスズキやカサゴから構成されることから、A-II、A-I、B-II、B-Iという流れは、主に浮遊系の食物が高次の栄養段階の魚類へつながる流れであると解釈される。高次になるにつれて底生系の食物源の割合が高くなったことは、空港等周辺海域の魚類は、浮遊系起源の食物とともに底生系起源の食物も利用していることを示唆している。実際にB-IIに属するメバルの胃内容物からはアミ類やカイアシ類とともに多毛類の出現が確認されており(関西国際空港株式会社, 未発表)、B-Iに属するカサゴが $\delta^{13}\text{C}$ の大きいヒメケブカガニ(-11.4‰)を多く摂食していることも報告されている(日下部ほか, 2005)。ただし、本研究では動物を脱脂したが、脱脂を行うことで $\delta^{13}\text{C}$ が高くなること、および筋肉の $\delta^{13}\text{C}$ は他の部位と比較して高くなることから(Yokoyama and Ishihi, 2006)、特に筋肉部を試料とした魚類と貝類で濃縮係数が実際よりもやや大きく見積もられ、底生系の食物が若干過大評価されたことも影響している可能性がある。

大阪湾を含む瀬戸内海の $\delta^{15}\text{N}$ 値は外洋に面した沿岸域よりも同一種でも大きい値を示すことが知られており、都市排水起源の ^{15}N に富んだ窒素の影響が原因であると考えられている(Takai et al., 2002a)。さらに、瀬戸内海の中でも $\delta^{15}\text{N}$ 値に海域間で違いが認められる例が報告されている(高井, 2005)。安定同位体比に関する研究例が豊富な広島湾と本研究結果を比較してみると、海藻では本研究の測定範囲9.2から10.7‰に対し、7.0から12.0‰(測定した種の94%、高井ほか, 2001)、懸濁物食者では本研究のマボヤの13.6‰に対しシロボヤ *Styela plicata* の13.4‰(Takai et al., 2002b)、本研究のイタボガキ科の12.7‰に対しマガキ *Crassostrea gigas* の11.0から12.9‰(Takai et al., 2002b)、魚類では本研究のマアジの16.5‰に対し16.0‰(Takai et al., 2002b)、本研究のクロダイ17.0‰に対し16.6‰(藤田ほか,

2011)とほぼ同様の値を示した。このように大阪湾と広島湾が類似した $\delta^{13}\text{C}$ および $\delta^{15}\text{N}$ 値を示すことは、大阪湾と広島湾の都市排水の影響が強いという類似した環境を反映した結果と考えられる。

以上の解釈から、空港島護岸の食物網構造を推察すると、Fig. 5のようになる。空港島護岸の動物群集の食物源は周辺海域から供給される植物プランクトン、護岸上で生産される底生微細藻類と海藻の3つがあり、それを利用する懸濁物食者、表層堆積物食者、海藻食者、および肉食者を通じて、最終的に最も高次の魚類につながっている構造と考えられる。また、空港島は大阪湾泉州沖5 km沖の平均水深18 mの海上に造成されたにも関わらず、底生微細藻類や海藻起源の寄与が意外にも大きいことが推察された。このことは、空港島護岸の多くが緩傾斜護岸で構成されているため、緩傾斜護岸上で生産された底生微細藻類や海藻起源のデトリタスの巻き上げなどの物理過程を通じて、動物群集の生産に大きく寄与している可能性を示唆している。今後は、動物群集の食物の供給源としての緩傾斜護岸の重要性を評価するために、緩傾斜護岸上での海藻や底生微細藻類の生産量も別途算出し、それが空港島の動物群集の現存量にどの程度利用されているのかについても検討を加える。また、直立護岸と緩傾斜護岸といった護岸別の機能を評価するために、各護岸において藻場や動物群集の現存量を明らかにし、さらにその起源を定量的に見積もることで、動物群集の現存量や食物源が、護岸構造の違い、あるいは波あたりの強さ等の環境の違いによってどのように異なるのかについても検討する予定である。

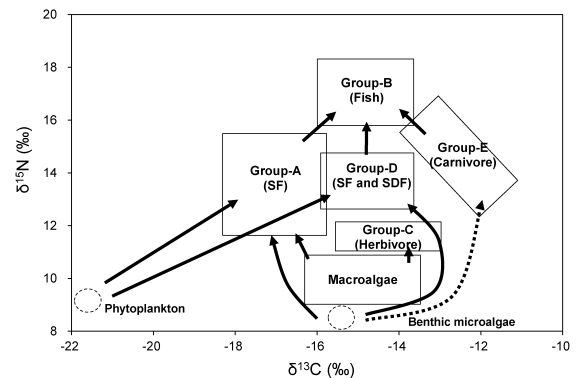


Figure 5. Community structure on the seawalls of Kansai International Airport Islands in Osaka Bay. SF and SDF show suspension feeders and subsurface deposit feeders, respectively. Groups A–E are feeding groups, which were determined by the cluster analysis. Arrows show food chain between feeding groups. Dotted arrows show indirect food chain. $\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{15}\text{N}$ of phytoplankton and benthic microalgae are cited from Meksumpun et al. (1998) and Takai et al. (2002b), respectively.

謝 辞

本調査を実施するにあたりご協力頂いた関西国際空港株式会社, ならびに試料の採集にご協力頂いた株式会社シャトー海洋調査の各位に感謝いたします。

引用文献

- 明田定満・山本泰司・小野寺利治・鳴海日出人・斉藤二郎・谷野賢二 (1997) 複断面構造を有する港湾構造物への海藻群落形成について. 海岸工学論文集, **44**, 1131-1135.
- DeNiro, M. J. and S. Epstein (1978) Influence of diet on the distribution of carbon isotopes in animals. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **42**, 495-506.
- Fauchald, K. and P. A. Jumars (1979) The diet of worms: A study of polychaete feeding guilds. *Oceanogr. Mar. Biol. Ann. Rev.*, **17**, 193-284.
- 藤田辰徳・海野徹也・斉藤英俊・小櫃剛人・徳田雅治・奥 宏海・吉松隆夫・石丸恵利子・陀安一郎 (2011) 広島湾における天然クロダイの筋肉成分の季節変化. 日水誌, **77**, 1034-1042.
- 五嶋聖治 (2012) 第2章 生態. 「ナマコ学—生物・産業・文化—」高橋明義, 奥村誠一共編, 成山堂書店, 東京, 19-34.
- 干川 裕 (2003) エゾアワビ人工種苗に対するヒトデ類3種およびヨツハマガニの捕食 (室内実験). 北水試研報, **64**, 121-126.
- 金子健司・豊原哲彦・藤田種美・米田佳弘・中原紘之 (2007) 大阪湾の人工護岸に形成された海藻群落の維持と高密度に生息するウニ類の摂食活動. 日水誌, **73**, 443-453.
- 日下部敬之・有山啓之・大美博昭・天野玉雄 (2005) 関西国際空港人工傾斜護岸と自然岩礁海岸におけるカサゴ成魚の摂食生態の比較. 日水誌, **71**, 594-600.
- Latyshev, N. A., A. S. Khardin, S. P. Kasyanov and M. B. Ivanova (2004) A study on the feeding ecology of chitons using analysis of gut contents and fatty acid markers. *J. Mollus. Stud.*, **70**, 225-230.
- Meksumpun, S., C. Meksumpun, A. Hoshika, Y. Mishima and T. Tanimoto (1998) Stable isotope technique for evaluation of organic matter movement and coastal environment status. In D. Almorza and H. M. Ramos (eds), *Applied Sciences and the Environment*. WIT Press, Southampton, 189-204 pp.
- Minagawa, M. and E. Wada (1984) Stepwise enrichment of ^{15}N along food chains: Further evidence and the relation between ^{15}N and animal age. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **48**, 1135-1140.
- 三好順也・上月康則・森 正次・亀田大悟・矢間北斗・倉田健悟・村上仁士 (2004) 岸壁付帯式テラス型海岸構造物によるムラサキイガイ由来の汚濁負荷削減効果. 海洋開発論文集, **20**, 1061-1066.
- 三好順也・上月康則・村上仁士 (2007) 大阪湾奥部における自律的環境修復を促す護岸付帯式海岸構造物の機能評価. 日本海水学会誌, **61**, 331-336.
- 村上仁士・水口裕之・上月康則・伊福 誠・野田 巖・岩村俊平・山本秀一 (2007) エコシステム式海域環境保全工法を導入した直立構造物の環境配慮機能の評価. 海岸工学論文集, **54**, 1281-1285.
- 岡部三雄 (1982) アワビ初期稚貝の硅藻摂餌量について (短報). 京都海洋センター研報, **6**, 53-54.
- 尾崎正明・伊藤利加・奥田泰永・二宮早由子 (2000) 関西国際空港島護岸の藻場造成による環境創造効果について. 海岸工学論文集, **47**, 1196-1200.
- 阪上雄康・浅山英章・北澤壮介 (2003) 関西国際空港2期空港島における藻場造成について. 海洋開発論文集, **19**, 13-18.
- 高井則之 (2005) 瀬戸内海の生態系解析における有機物質フローの指標としての炭素・窒素安定同位体比. 日本生態学会誌, **55**, 269-285.
- 高井則之・星加 章・今村賢太郎・萬 明美・谷本照巳・三島康史 (2001) 広島湾における海藻の炭素・窒素安定同位体の分布特性. 日本生態学会誌, **51**, 177-191.
- Takai, N., Y. Mishima and A. Hoshika (2002a) Habitat use and trophic positions of kobe Squid *Loliolus sumatrensis* in the western Seto Inland Sea in late spring inferred from carbon and nitrogen stable isotope ratios. *Bull. Jpn. Soc. Fish. Oceanogr.*, **66**, 1-10.
- Takai, N., Y. Mishima, A. Yorozu and A. Hoshika (2002b) Carbon sources for demersal fish in the western Seto Inland Sea, Japan, examined by $\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{15}\text{N}$ analyses. *Limnol. Oceanogr.*, **47**, 730-741.
- 寺脇利信・吉田吾郎・玉置 仁・薄 浩則 (1998) 広島湾の石積み護岸マウンド沿いに成立した海草・藻類植生. 南西水研報, **31**, 13-18.
- 富川なす美・渡邊清一 (1990) 岩礁域でのイボイワオウギガニ *Eriphia smithii* MacLeay の食性. 甲殻類の研究, **19**, 69-71.
- Yokoyama, H. and Y. Ishihi (2006) Variation in $\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{15}\text{N}$ among different tissues of three estuarine bivalves: implications for dietary reconstructions. *Plankton Benthos Res.*, **1**, 178-182, 2006.
- 横山隆司・小國嘉之・藤原吉美・中原紘之 (2003) 環境配慮型岸壁に形成される生物群集構造の評価. 海岸工学論文集, **50**, 1211-1215.