

瀬戸内海の千軒湾地先における炭素・窒素安定同位体比からみた マコガレイ稚魚の食物と食物源の推定

伊藤 靖,^{1*} 吉田 司,² 張間 千鶴²

(2014年12月4日受付, 2015年3月11日受理)

¹(一財)漁港漁場漁村総合研究所, ²(株)シャトー海洋調査

Estimation of diets and food sources of juvenile marbled sole in Sengen Bay,
Seto Inland Sea, Japan, based on carbon and nitrogen stable isotope ratios

YASUSHI ITO,^{1*} TSUKASA YOSHIDA² AND CHIZURU HARIMA²

¹The Japanese Institute of Fisheries Infrastructure and Communities, Chiyoda, Tokyo 101-0032, ²Chateau Marine Survey Co., Ltd., Miyakojima, Osaka, 534-0025, Japan

A study with carbon and nitrogen stable isotope analysis was conducted for inferring the diets and food sources of juvenile marbled sole *Pseudopleuronectes yokohamae*. A field investigation was conducted inside Sengen Bay, the Seto Inland Sea, Japan. The bottom of Sengen Bay has a mix of dotted seaweed bed areas and muddy sand bed areas. In both bed types, juveniles with a total length of about 15 mm fed on Harpacticoida, and sedimentary organic matter was the source of the food chain. Juveniles with a total length exceeding 30 mm in the dotted seaweed beds fed on benthic, sessile and phyla animals, whereas the juveniles in the muddy sand areas fed on only benthos. Particulate organic matter was the food source in both areas.

キーワード: $\delta^{13}\text{C}$, $\delta^{15}\text{N}$, *Pseudopleuronectes yokohamae*, 安定同位体比, 食物, 食物源, マコガレイ

マコガレイ *Pseudopleuronectes yokohamae* は、南北海道から九州、黄海、渤海湾、東シナ海北部の水深 100 m より浅い沿岸の砂泥底に生息し、全長は 450 mm に達する。^{1,2)} 瀬戸内海では全長が 10 mm になる 2-3 月上旬ごろ、水深 9-15 m の砂泥底に着底し、その後は浅場に移動して稚魚期を過ごす。³⁾ 兵庫県瀬戸内海側の淡路島地先では、海津（あいつ）といわれる水深 2-5 m の砂地に直径 0.5-1.0 m の転石が散在し、転石上にはカジメ *Ecklonia cava*, マクサ *Gelidium elegans*, アカモク *Sargassum horneri* などの大型海藻が繁茂する点型藻場がマコガレイ稚魚の生息場として適しているという報告がある。³⁾

マコガレイは、小型底曳網漁業、刺網漁業および釣りの対象として重要である。しかし、全国的にカレイ類の漁獲量は減少傾向にある。瀬戸内海のマコガレイを主体としたカレイ類は、1970 年代の後半以降、長期的に減少しており、⁴⁾ 資源回復が望まれる。資源回復には漁業管理のみならず、生息環境の保全が必要である。

生息環境の一つである食物環境は、魚介類、特に稚魚期の生残に影響を与える環境要素である。マコガレイ稚魚が着底してからの食物は、胃内容物の解析から全長 10-19 mm では主にハルパクチクス類、全長 20-39 mm ではヨコエビ類、そして全長が 40 mm 以上に成長すると多毛類を摂食するとされている。^{3,5,6)}

これまでの魚類の食性研究は、対象種の胃内容物の解析により行われ、胃内容物中にみられる生物の個体数比率などで評価されてきた。しかし、この方法では胃内容物の同定の困難さや時空間的な食性の変化を考慮しない一断面的な把握にとどまり、胃内容物からだけでは実際、食物として同化され、利用されているかどうかはわからないとの指摘もある。近年、水産学や生態学分野で底生動物や魚介類の食性解析に広く利用されるようになった炭素と窒素の安定同位体比は、捕食者-被捕食者間の同位体比値の差である濃縮係数から摂食し同化された食物の推定が可能である。さらに、食物源（食物起源としての一次生産者もしくは有機体を指す）を遡って推定

することもでき、底生性の魚類や無脊椎動物資源を支える食物源として、底生微細藻類が重要な役割を果たしていることが示された。⁷⁻¹¹⁾そこで、マコガレイ稚魚の生息場となる点在型藻場や浅場の砂泥域で、本種稚魚とそこに生息する主な動物群（食物候補）、海域に懸濁する有機物、底生微細藻類および海底に堆積する有機物（食物源候補）を採取して、炭素と窒素の安定同位体比の分析から、マコガレイ稚魚の食物とその食物源を推定した。

材料と方法

調査海域 本研究は、瀬戸内海東部海域に位置する岡山県備前市鹿久居島の南側に開けた千軒湾の水深4.1–4.3 mの砂泥底に人工魚礁30基（1基あたりの大きさ：縦3.4 m×横3.4 m×高2.2 m）が2003年3月に設置され、点在型藻場となったAエリア（34°42.7'N, 134°18.7'Eを中心とした10×10 mの範囲）と、そこから北東に70 m離れた同じ水深帯の砂泥底のBエリア（10×10 mの範囲）で行った（Fig. 1）。

A, Bエリアは2004–2006年に行われた水産庁の「漁場施設の増殖機能の定量化検討調査」¹²⁻¹⁴⁾によると、泥分率が75–90%、強熱減量は11–13%を示し、両エリアでマコガレイ稚魚の生息が確認されている。また、Aエリアでは人工魚礁の天端部に冬季から春季にかけてアカモク *Sargassum horneri* を主体に、ヨレモク *Sargassum siliquastrum*, ワカメ *Undaria pinnatifida* が繁茂する。

測定試料と採取方法 現地調査は2009年4月7日、2012年3月8日および同年4月16日にA, Bエリア（Fig. 1）で行った。炭素と窒素の安定同位体比（以下、 $\delta^{13}\text{C}$, $\delta^{15}\text{N}$ ）分析のために採取した試料は、マコガレイ稚魚（全長14–32 mm）、その食物候補である動物プランクトン、底生カイアシ類であるハルパクチクス類、小型の底生動物、Aエリアでは人工魚礁に付着する小型

の付着動物、大型海藻（アカモク）の葉上に生息する小型の葉上動物とした。

そして、食物源候補である植物プランクトンの指標となる海域の懸濁態有機物（Particulate Organic Matter：以下、POM）、海底面表層に生息する底生微細藻類（Microphytobenthos：以下、MPB）、海底面表層に堆積した有機物（Sediment Organic Matter：以下、SOM）とした（Table 1）。なお、アカモクを含む大型海藻は海域の重要な基礎生産者であるが、砂泥域であるBエリアに出現しなかったこと、食物候補である動物に直接、利用される可能性が少ないことから、食物源として扱わなかった。

マコガレイ稚魚の採取は、網口120×150 mm、目合い3 mmのたも網で潜水士が行った。動物プランクトンは北原式定量プランクトンネット（NXX 13：目合い100 μm ）で水深2 m層を水平曳きした。POMは船上からバケツで表層水1 Lを採水し、250 μm メッシュのネットで濾過した。採取した動物プランクトンとPOMは、実験室で適量をあらかじめ450°Cで3時間加熱処理をしたGF/Fフィルター（Whatman社製：以下、グラスファイバー濾紙）で吸引濾過した。

小型の底生動物、ハルパクチクス類、MPBおよびSOMは底泥とともに透明な直径100 mmのアクリルパイプでそれぞれを潜水士が採取した。小型の底生動物は採取した底泥を船上で1 mmメッシュの篩により選別し、ハルパクチクス類はかきまぜ法、¹⁵⁾ MPBはビーズ法^{16,17)}により実験室で底泥から分離した後、グラスファイバー濾紙で吸引濾過した。Aエリアの人工魚礁壁面や天端部に繁茂する大型海藻に生息する小型の付着動物や葉上動物は、サーバーネット（0.5 mmメッシュ）付のコドラート（0.5×0.5 m）で潜水士が採取した。すべての試料は分析まで–20°Cで凍結保存した。

安定同位体比の分析 $\delta^{13}\text{C}$, $\delta^{15}\text{N}$ の分析部位は、マコ

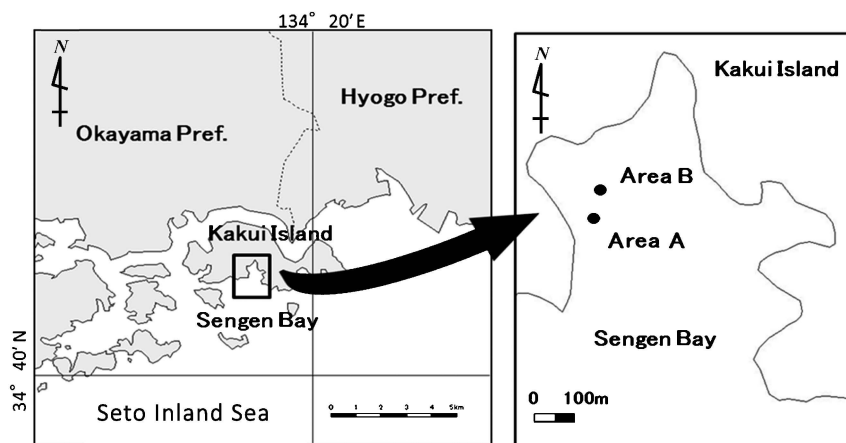


Fig. 1 Locality maps showing the research areas in Sengen Bay at Kakui Island on the eastern coast of the Seto Inland Sea, Japan.

Table 1 Comparison of stable carbon ($\delta^{13}\text{C}$) and nitrogen ($\delta^{15}\text{N}$) isotope ratios (‰, mean \pm SD) of juvenile marbled sole of different total lengths, diets and food sources

General group	Species	Group	Area	Total length (mm \pm SD)	<i>n</i>	Date	Abbreviation	$\delta^{13}\text{C}$ (‰ \pm SD)	$\delta^{15}\text{N}$ (‰ \pm SD)
Fish									
	<i>Pseudopleuronectes yokohamae</i>	I	A	16.1 \pm 2.6	6	Mar. 2012	P-I	-20.1 \pm 0.2	16.0 \pm 0.4
		II	A	30.9 \pm 3.4	9	Apr. 2009	P-II	-18.4 \pm 0.1	14.1 \pm 0.2
		III	A	32.5 \pm 2.0	16	Apr. 2012	P-III	-17.9 \pm 0.4	14.3 \pm 0.4
		IV	B	14.7 \pm 1.8	5	Mar. 2012	P-IV	-20.1 \pm 0.3	15.5 \pm 0.6
		V	B	19.9 \pm 1.5	5	Apr. 2009	P-V	-18.9 \pm 0.1	14.4 \pm 0.2
		VI	B	21.8 \pm 1.4	8	Apr. 2012	P-VI	-18.4 \pm 0.2	14.0 \pm 0.1
		VII	B	32.3 \pm 2.7	8	Apr. 2012	P-VII	-17.8 \pm 0.2	14.8 \pm 0.2
Zooplankton									
			A		3	Apr. 2009	ZP	-20.4 \pm 0.1	11.8 \pm 0.1
			B		3	Apr. 2009	ZP	-20.2 \pm 0.1	12.1 \pm 0.1
Benthic animals									
	Unidentified Harpacticoida		A		1	Apr. 2012	<i>Harpac.</i>	-21.0	12.8
			B		1	Apr. 2012	<i>Harpac.</i>	-21.2	13.2
	Polychaeta	<i>Cirriformia tentaculata</i>	A		3	Apr. 2009	<i>C. ten. (B-P)</i>	-18.9 \pm 0.3	11.8 \pm 0.5
			<i>Lysilla</i> sp.	B		3	Apr. 2009	<i>Ly. sp. (B-P)</i>	-18.8 \pm 0.2
	Amphipoda	<i>Grandidierella japonica</i>	A		3	Apr. 2009	<i>G. jap. (B-A)</i>	-18.7 \pm 0.1	11.5 \pm 0.4
				B		3	Apr. 2009	<i>G. jap. (B-A)</i>	-18.5 \pm 0.3
Sessile animals									
	Amphipoda	<i>Liljeborgia</i> sp.	A		3	Apr. 2009	<i>L. sp. (S-A)</i>	-18.6 \pm 0.1	10.1 \pm 0.5
Phytoplankton									
	Amphipoda	<i>Erichthonius pugnax</i>	A		3	Apr. 2009	<i>E. p. (P-A)</i>	-19.9 \pm 0.3	11.3 \pm 0.3
POM (particulate organic matter)									
			A		3	Apr. 2009	POM	-20.1 \pm 0.2	8.8 \pm 0.1
			B		3	Apr. 2009	POM	-21.1 \pm 0.3	8.5 \pm 0.1
MPB (microphytobenthos)									
			A		1	Apr. 2012	MPB	-17.4	7.5
			B		1	Apr. 2012	MPB	-17.6	7.6
SOM (sedimentary organic matter)									
			A		1	Apr. 2012	SOM	-22.2	10.1
			B		1	Apr. 2012	SOM	-22.1	10.0
<i>ZP</i> , zooplankton		<i>B-P</i> , benthic animals Polychaeta				<i>S-A</i> , sessile animals Amphipoda			
POM, particulate organic matter		<i>B-A</i> , benthic animals Amphipoda				<i>P-A</i> , phytoplankton Amphipoda			
MPB, microphytobenthos									
SOM, sedimentary organic matter									

Study area A (34°42.7'N, 134°18.7'E) and area B (70 m North-East from area A). Both the areas had dimensions of 10 \times 10 m with the same water depth.

ガレイ稚魚では筋肉部、小型の底生動物、付着動物および葉上動物は体全体とした。1個体の重量が小さなハルパクス類は分析試料が乾燥重量で1 mg以上となるように約70個体を集めた。

これらの試料は凍結乾燥後、粉末にして、マコガレイ稚魚はクロロフォルム-メタノール(2:1)溶液で脱脂し、POM, MPBおよびSOMは塩酸処理により炭酸塩を除去し、60°Cで乾燥後、分析に用いた。

各試料とも $\delta^{13}\text{C}$, $\delta^{15}\text{N}$ の分析は、元素分析計(NA 2500, Thermo Fisher Scientific社製)に接続した質量分析計(DELTA plus, Thermo Fisher Scientific社製)で行った。本分析システムの分析精度は $\delta^{13}\text{C}$, $\delta^{15}\text{N}$ ともに $\pm 0.15\%$ 以下である。

炭素と窒素安定同位体比は標準試料からの千分率偏差

で示した(1式)。

$$\delta^{13}\text{C}, \delta^{15}\text{N} = \left(\frac{R_{\text{sample}}}{R_{\text{standard}}} - 1 \right) \times 1000 (\text{‰}) \quad (1)$$

ここで、 R_{sample} は分析試料の $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ あるいは $^{15}\text{N}/^{14}\text{N}$ である。 R_{standard} は標準試料の $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ あるいは $^{15}\text{N}/^{14}\text{N}$ である。 $\delta^{13}\text{C}$ の標準試料はPee Dee Belemnite (PDB), $\delta^{15}\text{N}$ は大気中の窒素を用いた。

マコガレイ稚魚や食物候補同士の3群間以上の $\delta^{13}\text{C}$, $\delta^{15}\text{N}$ の差異検定はKruskal-Wallis testを用いた後、差異が認められた場合にはSteel-Dwass testで多重比較を行った。A, Bエリア2群間の $\delta^{13}\text{C}$, $\delta^{15}\text{N}$ の差異検定はMann-Whitney testを用いた。なお、ハルパクス類, MPBおよびSOMのエリア間の差異検定は、試料数が各エリアで1検体であったため、統計学的な比

較は行うことができなかった。本研究では、マコガレイ稚魚の期待される食物と食物源を求めるため、 $\delta^{13}\text{C}$ 、 $\delta^{15}\text{N}$ の濃縮係数をDeNiro and Epstein^{18,19)}とMinagawa and Wada²⁰⁾に従い、それぞれ1.0%と3.4%とした。

結 果

マコガレイ稚魚の安定同位体比 A, B エリアで採取したマコガレイ稚魚の全長、 $\delta^{13}\text{C}$ および $\delta^{15}\text{N}$ の平均値 \pm SD (以下同じ) を Table 1 に示した。

採取したマコガレイ稚魚の全長の平均値 (\pm SD) は、A エリアでは 16.1 ± 2.6 mm ($n=6$, 2012年3月採取, I群), 30.9 ± 3.4 mm ($n=9$, 2009年4月採取, II群) および 32.5 ± 2.0 mm ($n=16$, 2012年4月採取, III群), B エリアでは 14.7 ± 1.8 mm ($n=5$, 2012年3月採取, IV群), 19.9 ± 1.5 mm ($n=5$, 2009年4月採取, V群), 21.8 ± 1.4 mm ($n=8$, 2012年4月採取, VI群) および 32.3 ± 2.7 mm ($n=8$, 2012年4月採取, VII群) であった。

A, B エリアにみられた総てのマコガレイ稚魚の全長と $\delta^{13}\text{C}$ 、 $\delta^{15}\text{N}$ との間で相関分析を行うと、 $\delta^{13}\text{C}$ はマコガレイ稚魚の全長が大きくなるにつれて増加する傾向が認められた ($r=0.850$, $p=0.001$) が、 $\delta^{15}\text{N}$ は全長 20 mm を超えるとほとんど変化はみられず、全長との間に有意な相関関係は認められなかった ($r=0.152$, $p=0.313$; Fig. 2)。

A エリア I 群の $\delta^{13}\text{C}$ は $-20.1 \pm 0.2\%$ 、 $\delta^{15}\text{N}$ は $16.0 \pm 0.4\%$ であり、 $\delta^{13}\text{C}$ では I、II および III 群の全て、 $\delta^{15}\text{N}$ では I と II 群、I と III 群に差異が認められた (Steel-Dwass test: $\delta^{13}\text{C}$, $\delta^{15}\text{N}$, $p < 0.05$; Table 2)。B エリア IV 群の $\delta^{13}\text{C}$ は $-20.1 \pm 0.3\%$ 、 $\delta^{15}\text{N}$ は $15.5 \pm 0.6\%$ であり、 $\delta^{13}\text{C}$ では IV、V、VI および VII 群の全て、 $\delta^{15}\text{N}$ では IV と VI 群、V と VI 群および VI と VII 群に差異が認められた (Steel-Dwass test, $\delta^{13}\text{C}$, $\delta^{15}\text{N}$; $p < 0.05$; Table 2)。

また、A, B エリア間のマコガレイ稚魚の I と IV 群 (Mann-Whitney test, $\delta^{13}\text{C}$; $U=14$, $p=0.927$, $\delta^{15}\text{N}$; $U=23$, $p=0.171$)、III と VII 群 (Mann-Whitney test, $\delta^{13}\text{C}$; $U=54$, $p=0.540$, $\delta^{15}\text{N}$; $U=22$, $p=0.011$) の $\delta^{13}\text{C}$ に差異は認められなかった。

マコガレイ稚魚の食物候補と食物源候補の安定同位体比 マコガレイ稚魚の食物候補 (Δ) と食物源候補 (\square) の $\delta^{13}\text{C}$ 、 $\delta^{15}\text{N}$ を Table 1, Fig. 3 に示した。

食物候補である動物プランクトンの A, B エリアの $\delta^{13}\text{C}$ はそれぞれ $-20.4 \pm 0.1\%$ 、 $-20.2 \pm 0.1\%$ 、 $\delta^{15}\text{N}$ は $11.8 \pm 0.1\%$ 、 $12.1 \pm 0.1\%$ であり、両エリア間の $\delta^{13}\text{C}$ 、 $\delta^{15}\text{N}$ に差異は認められなかった (Mann-Whitney test: $\delta^{13}\text{C}$, $U=0$, $p=0.081$; $\delta^{15}\text{N}$, $U=0$, $p=0.081$)。ハルパクチクス類の $\delta^{13}\text{C}$ は -21.0% 、 -21.2% 、 $\delta^{15}\text{N}$ は 12.8% 、

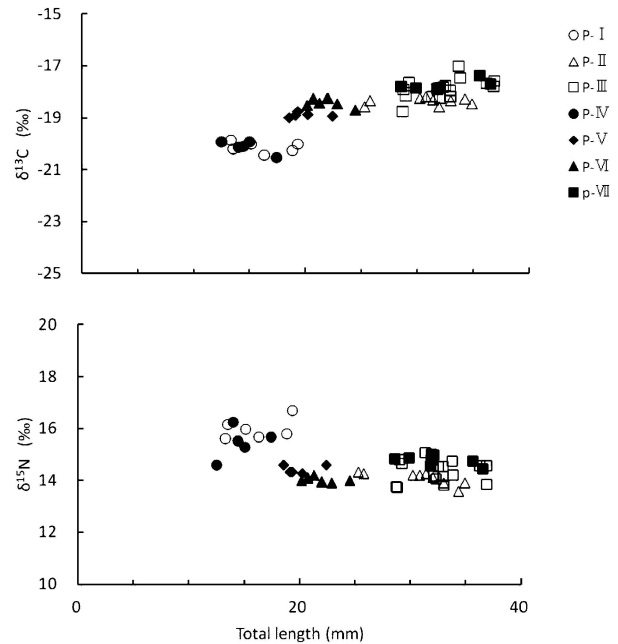


Fig. 2 Relationships between stable carbon and nitrogen isotope ratios and the total length (mm) of juvenile marbled sole collected from Sengen Bay. Abbreviations indicate species, which are shown in Table 1.

Table 2 t -Values of Steel-Dwass test for pairwise differences in $\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{15}\text{N}$ between juvenile marbled sole groups in areas A and B

Area A	I	II	Area B	IV	V	VI
$\delta^{13}\text{C}$			$\delta^{13}\text{C}$			
I			IV			
II	-3.19*		V	-2.61*		
III	-3.54*	-3.43*	VI	-2.93*	-2.93*	
			VII	-2.93*	-2.93*	-3.36*
$\delta^{15}\text{N}$			$\delta^{15}\text{N}$			
I			IV			
II	2.48*		V	2.40		
III	3.54*	-0.51	VI	2.93*	2.93*	
			VII	2.05	-2.34	-3.36*

Asterisk (*) shows a statistically significant difference by juvenile marbled sole group ($p < 0.05$).

13.2% であった。

A, B エリアで食物候補として出現個体数が多く、 $\delta^{13}\text{C}$ 、 $\delta^{15}\text{N}$ の分析試料に供した底生動物の多毛類は *Cirriformia tentaculata*、*Lysilla* sp. であった。 $\delta^{13}\text{C}$ はそれぞれ $-18.9 \pm 0.3\%$ 、 $-18.8 \pm 0.2\%$ 、 $\delta^{15}\text{N}$ は $11.8 \pm 0.5\%$ 、 $11.7 \pm 0.4\%$ となり、両エリア間で差異は認められなかった (Mann-Whitney test: $\delta^{13}\text{C}$, $U=6$, $p=0.663$; $\delta^{15}\text{N}$, $U=5$, $p=1.000$)。A, B エリアで食物候補として出現数が多かった底生動物のヨコエビ類は両エリアともに *Grandidierella japonica* であり、それぞれ $\delta^{13}\text{C}$ は

-18.7±0.1%, -18.5±0.3%, $\delta^{15}\text{N}$ は 11.5±0.4%, 10.8±0.4% となり, 両エリア間に差異は認められなかった (Mann-Whitney test, $\delta^{13}\text{C}$; $U=3$, $p=0.663$, $\delta^{15}\text{N}$; $U=9$, $p=0.121$)。

また, A エリアの *C. tentaculata* と *G. japonica* に差異は認められなかった (Mann-Whitney test: $\delta^{13}\text{C}$, $U=3$, $p=0.653$; $\delta^{15}\text{N}$, $U=5$, $p=1.000$)。A エリアで食物候補として出現個体数が多かった付着動物のヨコエビ類は *Liljeborgia* sp. で, $\delta^{13}\text{C}$ は -18.6±0.1%, $\delta^{15}\text{N}$ は 10.1±0.5%, 葉上動物のヨコエビ類は *Erichthonius pugnax* で, $\delta^{13}\text{C}$ は -19.9±0.3%, $\delta^{15}\text{N}$ は 11.3±0.3% となり, A エリアにおける底生動物と付着動物および葉上動物のヨコエビ類 3 種の $\delta^{13}\text{C}$, $\delta^{15}\text{N}$ に差異は認められなかった (Kruskal-Wallis test: $\delta^{13}\text{C}$, $p=0.051$; $\delta^{15}\text{N}$, $p=0.051$)。B エリアの *Lysilla* sp. と *G. japonica* の $\delta^{13}\text{C}$, $\delta^{15}\text{N}$ に差異は認められなかった (Mann-Whitney test: $\delta^{13}\text{C}$, $U=2$, $p=0.383$; $\delta^{15}\text{N}$, $U=8$, $p=0.190$)。このように, 両エリアや食物候補の間で $\delta^{13}\text{C}$, $\delta^{15}\text{N}$ に差異は認められなかった。

食物源候補の POM の両エリアにおける $\delta^{13}\text{C}$ はそれぞれ -20.1±0.2%, -21.1±0.3%, $\delta^{15}\text{N}$ は 8.8±0.1%, 8.5±0.1% であり, 両エリア間の $\delta^{13}\text{C}$, $\delta^{15}\text{N}$ に差異は認められなかった (Mann-Whitney test: $\delta^{13}\text{C}$, $U=0$, $p=0.081$; $\delta^{15}\text{N}$, $U=9$, $p=0.081$)。MPB の $\delta^{13}\text{C}$ は -17.4%, -17.6%, SOM は -22.2%, -22.1%, MPB の $\delta^{15}\text{N}$ は 7.5%, 7.6%, SOM は 10.1%, 10.0% であった。

マコガレイ稚魚の期待される食物と食物源 瀬戸内海の千軒湾地先に出現したマコガレイ稚魚の A, B エリアごとの $\delta^{13}\text{C}$, $\delta^{15}\text{N}$ に差異が認められたことから (Table 2, 一部に差異は認められていない), 各群のマコガレイ稚魚の $\delta^{13}\text{C}$, $\delta^{15}\text{N}$ (●) をもとに, $\delta^{13}\text{C}$, $\delta^{15}\text{N}$ の濃縮係数をそれぞれ 1.0% と 3.4%¹⁸⁻²⁰) として, その期待される食物 (▲) と食物源 (■) を求めて Fig. 3 に示した。なお, 図中の点線は $\delta^{13}\text{C}$, $\delta^{15}\text{N}$ の濃縮係数を示す。

A エリアに出現したマコガレイ稚魚 I 群 (全長 16.1 mm) の期待される食物の $\delta^{13}\text{C}$ は -21.1%, $\delta^{15}\text{N}$ は 12.6% の位置 (P-I, ▲), II 群 (全長 30.9 mm) は -19.4%, 10.7% の位置 (P-II, ▲), III 群 (全長 32.5 mm) は -18.9%, 10.9% の位置 (P-III, ▲) となった。B エリアのマコガレイ稚魚 IV 群 (全長 14.7 mm) の期待される食物の $\delta^{13}\text{C}$ は -21.1%, $\delta^{15}\text{N}$ は 12.1% (P-IV, ▲), V 群 (全長 19.9 mm) は -19.9%, 11.0% (P-V, ▲), VI 群 (全長 21.8 mm) は -19.4%, 10.6% (P-VI, ▲), VII 群 (全長 32.3 mm) は -18.8%, 11.4% (P-VII, ▲) の位置となった。

A エリアにおけるマコガレイ稚魚 I 群の期待される食物源の $\delta^{13}\text{C}$, $\delta^{15}\text{N}$ はそれぞれ -22.1%, 9.2% (P-

I, ■), II 群は -20.4%, 7.3% (P-II, ■), III 群は -19.9%, 7.5% (P-III, ■) の位置となった。B エリアで期待される食物源の $\delta^{13}\text{C}$, $\delta^{15}\text{N}$ はそれぞれ IV 群で -22.1%, 8.7% (P-IV, ■), V 群では -20.9%, 7.6% (P-V, ■), VI 群は -20.4%, 7.2% (P-VI, ■), VII 群は -19.8%, 8.0% (P-VII, ■) の位置となった。

考 察

マコガレイ稚魚の食物の推定 $\delta^{13}\text{C}$, $\delta^{15}\text{N}$ の濃縮係数を用いて推定したマコガレイ稚魚の主な食物の期待値 (▲) は, A エリアの I 群ではハルパクチクス類の分析値 (△) とほぼ重なり, ハルパクチクス類が主な食物となった (Fig. 3)。II 群の期待値は人工魚礁から採取した付着動物と葉上動物のヨコエビ類の間に位置し, 採取場所の異なるヨコエビ類を食物としていた。III 群では底生動物 (ヨコエビ類と多毛類を含む, 両種の $\delta^{13}\text{C}$, $\delta^{15}\text{N}$ に差異は認められなかった), 付着動物 (ヨコエビ類) および葉上動物 (ヨコエビ類) に囲まれた位置となり, これら 3 種の動物を食物として利用していることが示唆された (Fig. 3)。

B エリアは, 食物の $\delta^{15}\text{N}$ の分析値が期待値より低めに検出されたこと, $\delta^{15}\text{N}$ は全長 20 mm を超えるとほとんど変化はみられず, 全長との間に有意な相関関係は認められなかったこと (Fig. 2) から, $\delta^{13}\text{C}$ の値によりマコガレイ稚魚の食物を推定した。IV 群の期待値 ($\delta^{13}\text{C}$) はハルパクチクス類の分析値 ($\delta^{13}\text{C}$) とほぼ重なり, A エリアと同様にハルパクチクス類が主な食物となった (Fig. 3)。V, VI 群は動物プランクトンと底生動物の多毛類, VII 群では底生動物の多毛類が主な食物となった (Fig. 3)。

マコガレイ稚魚の食物源の推定 B エリアと同様に $\delta^{13}\text{C}$ の値からマコガレイ稚魚の主な食物源を推定した。A エリアの I 群は SOM, II, III 群では POM であった。B エリアの IV 群では SOM, V, VI および VII 群は POM と MPB を利用しているが, POM への依存が高いようである (Fig. 3)。

マコガレイ稚魚と食物連鎖 本研究を行った瀬戸内海の千軒湾地先におけるマコガレイ稚魚を上位の捕食者とした場合の $\delta^{13}\text{C}$, $\delta^{15}\text{N}$ から推定した食物連鎖を Fig. 4 に示した。

本調査で採取されたマコガレイ稚魚は, 3 月には全長が 15 mm (I, IV 群) であった。 $\delta^{13}\text{C}$, $\delta^{15}\text{N}$ からみた主な食物は A エリア (点在型藻場), B エリア (砂泥域) とともにハルパクチクス類で, SOM を食物源とする系列 (Fig. 4, 破線矢印) が示された。全長 15 mm のマコガレイ稚魚の食物は他の海域においてもハルパクチクス類を含むカイアシ類であると報告されている。^{3,5,6} 全長 15 mm の本種稚魚の食物源は SOM と推定された。SOM

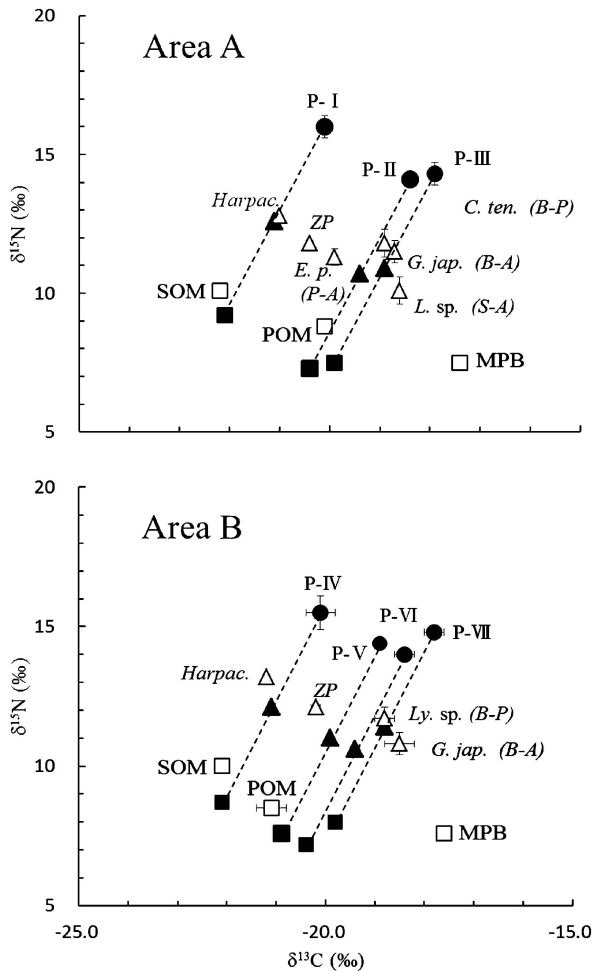


Fig. 3 Distributions of stable carbon ($\delta^{13}\text{C}$) and nitrogen ($\delta^{15}\text{N}$) isotope ratios of juvenile marbled sole in different groups, their diets and food sources. In the figure, plots of juvenile marbled sole, diets and food sources are indicated by filled circles (●), filled triangles (▲) and filled squares (■), respectively. Open symbols indicate analysis value for each. Abbreviations indicate species, which are shown in Table 1. The dotted line shows the isotopic concentration factor of $\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{15}\text{N}$ (1.0‰, 3.4‰).

には植物プランクトン、海藻類、陸上植物および動物の死骸などを含むと考えられる。A, BエリアのSOMの $\delta^{13}\text{C}$ は -22‰ であり、POM ($-20\sim 21\text{‰}$)より低い値を示したことから、陸上由来のデトリティス (Terrestrial Organic Matter, 主に C_3 陸上高等植物, $\delta^{13}\text{C}$, -28.2‰ ; $\delta^{15}\text{N}$, 6.2‰)^{10,21)} が混在して、堆積したものと考えられる。近年、多くの海洋生物において、陸上由来の有機物を分解する酵素を持つことが明らかにされている。^{22,23)} さらに、SOMの $\delta^{15}\text{N}$ は10.1, 10.0‰を示し、POM (8.8, 8.5‰)やMPB (7.5, 7.6‰)より高い値を示したことから、海域で出現した動物などの死骸も含まれていると推定された。

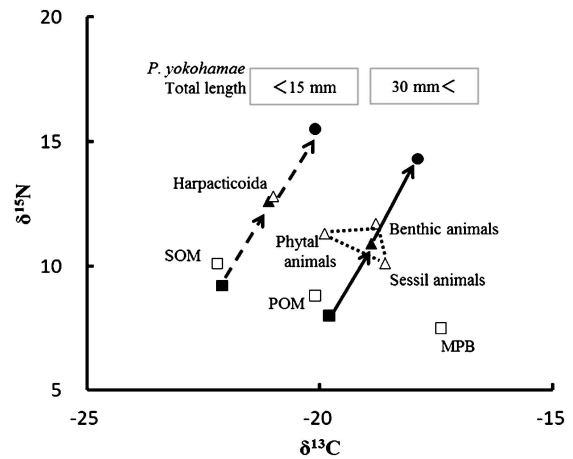


Fig. 4 Food chains at different growth stages of juvenile marbled sole are shown schematically based on carbon ($\delta^{13}\text{C}$) and nitrogen ($\delta^{15}\text{N}$) stable isotope ratios. The dotted line arrows indicate the food chain for juvenile marbled sole of 15 mm total length, and the black line arrows indicate those for marbled sole of 30 mm total length in scattered seaweed bed areas. In the figure, plots of juvenile marbled sole, diets and food sources are indicated by filled circles (●), filled triangles (▲) and filled squares (■), respectively. Open symbols indicate analysis value for each. In the figure POM, SOM and MPB mean particulate organic matter, sedimentary organic matter and microphytobenthos.

4月に入るとマコガレイ稚魚は全長20 mmとなった。このサイズのマコガレイ稚魚 (V, VI群)は、Bエリアの出現のみであった。主な食物は、動物プランクトンと底生動物の多毛類となり、その他全てのマコガレイ稚魚との食物組成が異なっていた。本調査海域で2005年4月に採取された全長20 mmのマコガレイ稚魚の胃内要物にはヨコエビ類や多毛類が約87% (平均出現個体数/マコガレイ稚魚10個体)を占めていた。¹³⁾ この時期の稚魚は成長に伴いより大型で栄養価の高い食物へ移行する時期と考えられる。大阪湾の事例では、この時期のマコガレイ稚魚は小型甲殻類 (ヨコエビ類)を主に食物とするが、その量が少ない場合には多毛類も摂餌する。⁶⁾

4月中旬にはマコガレイ稚魚は全長30 mm以上となった。AエリアのII, III群の主な食物は底生動物、付着動物および葉上動物が利用され、海域の懸濁態有機物を食物源とする系列 (Fig. 4, 実線矢印)が推定された。点在型藻場には反田³⁾が指摘する捕食回避のシェルター機能に加え、マコガレイ稚魚にとって一つの食物が減少しても、生息場所が異なる他の動物に食物を切り替えることにより、必要な食物量を確保できるエリアとなる可能性が見いだされた。

このように、炭素と窒素の安定同位体を用いることにより、マコガレイ稚魚の食物環境 (食物と食物源)の一

端が推定できた。今後、食物環境の的確な把握には対象種の胃内要物を確認しながらのデータ蓄積が望まれる。また、人工魚礁に繁茂する海藻類（アカモクなど）は海域の重要な基礎生産者であり、葉上動物の生息基盤として重要である。Aikins and Kikuchi²⁴⁾ はヨコエビ類が海藻類に着生する微細藻類を摂餌していることを報告しており、大型海藻の葉面に着生する微細藻類をマコガレイ稚魚の食物源として考慮する必要がある。

謝 辞

マコガレイ稚魚の採取など現地調査のご協力を頂きました海洋建設㈱の皆様感謝申し上げます。本研究の一部は、水産庁「水産基盤整備調査委託事業」によって行われたものです。

文 献

- 1) 益田 一, 尼岡邦夫, 荒賀忠一, 上野輝彌, 吉野哲夫. 日本産魚類大図鑑. 東海大学出版会, 東京. 1984; 338 pp.
- 2) 落合 明, 田中 克. 魚類学(下). 恒星社厚生閣, 東京. 1986; 1106-1109.
- 3) 反田 實. 兵庫県瀬戸内海におけるマコガレイの生態と漁業に関する研究. 兵庫県立農林水産技術総合センター研究報告 2008; **40**: 1-96.
- 4) 岡山県水産試験場. マコガレイ漁獲量の減少について. 水試だより 2002; **280**: 1-2.
- 5) 中神正康, 高津哲也, 松田泰平, 高橋豊美. 北海道津軽海峡沿岸におけるマコガレイ稚魚によるハルバクチクス目の捕食. 日本水産学会誌 2000; **66**: 818-824.
- 6) 有山啓之. 大阪湾中部沿岸域におけるマコガレイ稚魚の分布および食性について. 大阪府立水産試験場研究報告 2003; **14**: 17-28.
- 7) 金谷 弦. 炭素・窒素安定同位体比測定法による大型底生動物の餌資源推定—汽水域生態系への適用—. 日本ベントス学会誌 2010; **65**: 28-40.
- 8) 片山亜優, 伊藤絹子, 佐々木浩一, 片山知史. 名取川における安定同位体比を用いたヤマトシジミ *Corbicula japonica* の炭素源と窒素源の推定. 日本水産学会誌 2013; **79**: 649-656.
- 9) 土居内 龍, 安江尚孝, 竹内照文, 山内 信, 奥山芳生, 諏訪 剛, 向野幹生, 小久保友義, 芳養晴雄. 炭素・窒素安定同位体比に基づく紀伊水道におけるタチウオとその他の底生魚類の炭素源の比較. 日本水産学会誌 2011; **77**: 205-214.
- 10) 横山 寿. 温帯の感潮域および沿岸域における動物の食物源—安定同位体研究の成果と課題—. 日本生態学会誌 2008; **58**: 23-36.
- 11) Yokoyama Y, Sakami T, Ishihi Y. Food sources of benthic animals on intertidal and subtidal bottoms in inner Ariake Sound, southern Japan, determined by stable isotopes. *Est. Coast. Shelf Sci.* 2009; **82**: 243-253.
- 12) 伊藤 靖, 中野喜央, 藤沢真也. 人工魚礁およびその周辺における小型動物の分布—漁場施設の漁業増殖効果に関する研究—I—. 水産工学 2008; **45**: 101-110.
- 13) 伊藤 靖, 中野喜央, 藤沢真也. 人工魚礁におけるマコガレイの分布と食性—漁場施設の漁業増殖効果に関する研究—II—. 水産工学 2008; **45**: 129-138.
- 14) 伊藤 靖, 中野喜央, 藤沢真也. 人工魚礁の蛸集魚類と摂餌生態—漁場施設の漁業増殖効果に関する研究—III—. 水産工学 2009; **45**: 195-206.
- 15) 山西良平. かきまぜ法によるメイオベントス抽出の効率. ベントス研究連絡会誌 1979; **17/18**: 52-58.
- 16) Carol A. Couch. Carbon and nitrogen stable isotopes of meiobenthos and their food resources. *Est. Coast. Shelf Sci.* 1989; **28**: 433-441.
- 17) Yokoyama H, Ishihi Y. Feeding of the bivalve *Theora lubrica* on benthic microalgae: isotopic evidence. *Mar. Ecol. Prog. Ser.* 2003; **255**: 303-309.
- 18) DeNiro MJ, Epstein S. Influence of diet on the distribution of carbon isotopes in animals. *Geochim. Cosmochim. Acta* 1978; **42**: 495-506.
- 19) DeNiro MJ, Epstein S. Influence of diet on the distribution of nitrogen isotopes in animals. *Geochim. Cosmochim. Acta* 1981; **45**: 341-351.
- 20) Minagawa M, Wada E. Stepwise enrichment of $\delta^{15}\text{N}$ along food chains: Further evidence and the relation between $\delta^{15}\text{N}$ and animal age. *Geochim. Cosmochim. Acta* 1984; **48**: 1135-1140.
- 21) 和田栄太郎. 生物関連分野における同位体効果—生物界における安定同位体分布の変動. *Radioisotopes* 1986; **35**: 136-146.
- 22) Antonio ES, Kasai A, Ueno M, Kurikawa Y, Tsuchiyi K, Toyohara H, Ishihi Y, Yokoyama H, Yamashita Y. Consumption of terrestrial organic matter by estuarine molluscs determined by analysis of their stable isotopes and cellulose activity. *Est. Coast. Shelf Sci.* 2010; **86**: 401-407.
- 23) Niiyama T, Toyohara H. Widespread distribution of cellulose and hemicellulose activities among aquatic invertebrates. *Fish. Sci.* 2011; **77**: 649-655.
- 24) Aikins S, Kikuchi E. Grazing pressure by amphipods on microalgae in Gamo Lagoon Japan. *Mar. Ecol. Prog. Ser.* 2002; **245**: 171-179.