

〈寄稿〉

## 耳石の安定同位体比分析を用いたマイワシ回遊履歴の判別法

尾田昌紀<sup>1†</sup>, 鐵 智美<sup>2</sup>, 坂井三郎<sup>3</sup>, 石村豊穂<sup>2</sup>

## Discrimination of the migration pattern for Japanese sardine in Pacific stock by using microscale stable isotopic analytical technique

Masanori ODA<sup>1†</sup>, Tomomi TETSU<sup>2</sup>, Saburo SAKAI<sup>3</sup> and Toyoho ISHIMURA<sup>2</sup>

マイワシはレジームシフトに伴い大規模な資源変動することが知られており、太平洋系群の資源量は親潮域まで北上回遊する沖合加入群の増減に左右される。そのため、回遊履歴の判別は本種の資源変動機構解明に重要な手がかりとなるが、その判別方法は確立されていない。近年、魚類の耳石の酸素安定同位体比 ( $\delta^{18}\text{O}$ ) は個体が経験した水温履歴の復元に有用であることから、本種でも回遊履歴判別に使える可能性がある。

本研究では太平洋系群の当歳魚（沖合加入群、沿岸加入群）の耳石の中心部と縁辺部の微少領域を切削し、 $\delta^{18}\text{O}$ から算出される水温と生息海域の水温との整合性を検討した。その結果、中心部と縁辺部の $\delta^{18}\text{O}$ から算出された水温は両群の回遊生態を反映していた。さらに炭素安定同位体比 ( $\delta^{13}\text{C}$ ) も両群で違いが検出され、耳石の酸素・炭素安定同位体は本種の回遊履歴判別に有用な指標となることが示された。また、耳石のバルク分析を用いても両群を明瞭に識別できることがわかった。

It is known that there have been large-scale fluctuations in Japanese sardine associated with “regime shifts”. The resource sizes of Pacific stock have been influenced by increases and decreases of offshore groups migrating north to the Kuril Current region. For a better understanding of the mechanisms involved in the fluctuations of this species, determining the migration history is an important clue. But the method of determination has not been established. Recent studies have reported that the stable oxygen isotopes in fish otoliths record the ambient temperature through their life history. Therefore, there is the possibility they can also be used in determining the migration history of this species.

In this study, we employ microscale sampling and microscale analytical techniques to analyze the  $\delta^{18}\text{O}$  of the core and edge of the otoliths of yearlings from Pacific stocks (offshore and coastal groups). Then, the consistency between the water temperature estimated from the  $\delta^{18}\text{O}$  and the water temperature of the waters they inhabited was studied. As a result, the water temperature estimated from the  $\delta^{18}\text{O}$  of the core and edge of the otoliths reflected the migration habit of both groups. In addition, the differences in the carbon stable isotopes ( $\delta^{13}\text{C}$ ) for both groups were detected. It was determined that the stable isotopes of the otoliths from microscale sampling would provide useful information to verify the seasonal migration patterns of this species. Furthermore, it was also found that both groups can be clearly distinguished by using bulk isotopic analysis of the otoliths.

**Key words:** stable oxygen isotope, otolith, water temperature history, Japanese sardine, microscale milling, microscale analysis of stable isotope

2015年10月6日受付, 2016年1月7日受理

<sup>1</sup> 鳥取県水産試験場

Tottori Prefectural Fisheries Experimental Station, 107 Takenouchidan-chi Sakaiminato, Tottori 684-0046, Japan

<sup>2</sup> 独立行政法人国立高等専門学校機構茨城工業高等専門学校

Department of Chemistry and Material Engineering, National Institute of Technology, Ibaraki College, 866 Nakane, Hitachinaka, Ibaraki 312-8508, Japan

<sup>3</sup> 国立研究開発法人海洋研究開発機構

Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology, 2-15 Natsushima-cho Yokosuka, Kanagawa 237-0061, Japan

† oda-m@pref.tottori.jp

はじめに

マイワシ *Sardinops melanostictus* は、我が国の重要な水産資源であり（渡邊, 2012; 水産庁, 2013）、大規模な資源変動を繰り返すことが知られている（川崎, 1989; Kawasaki, 1992; 田中ほか, 2003; 渡邊, 2012）。マイワシは寒冷レジーム期に増加し（川崎, 1989; Kawasaki, 1992; 田中ほか, 2003; 渡邊, 2012）、直近では1980年代に豊漁期を迎え、1984年の漁獲量は約418万トンに上り日本の総漁獲量の36%を占めるほどであった（田中ほか, 2003）。1990

年代に入るとマイワシ漁獲量は急激に減少し低位水準で推移したが（川崎，1989；Kawasaki, 1992；田中ほか，2003；渡邊，2012；川端ほか，2014；大下ほか，2014），2008–2012年に比較的良好な加入が続いたことから資源回復の兆しがみられている（川端ほか，2014；大下ほか，2014）。

日本周辺のマイワシは，遺伝的差違のない（Okazaki et al., 1996）太平洋系群と対馬暖流系群が存在し，系群ごとに資源評価が行われている（川端ほか，2014；大下ほか，2014）。太平洋系群には，生活史の異なる「沿岸加入群（以下，沿岸群）」と「沖合加入群（以下，沖合群）」が存在する。沿岸群は，九州の薩南から神奈川県までの沿岸域で12–5月にかけて産卵し，水温の高い黒潮の沿岸域で生育する（川端ほか，2014）。一方，沖合群は神奈川県沿岸で3–5月に産卵し，当歳魚は黒潮統流によって東方に輸送され，遊泳能力の発達に伴い北上し8–10月を北海道東方の水温の低い親潮域で過ごす（渡邊，2012；川端ほか，2014）。親潮域に豊富に存在するプランクトンを餌として利用することで，沖合群の膨大な資源量が維持される（渡邊，2012；川端ほか，2014）。11月に入ると，水温の低下に伴い北海道東部から常磐沖の海域に越冬のため南下回遊する（渡邊，2012；川端ほか，2014）。

対馬暖流系群では，豊漁期であった1930年代と1980年代には，当時のソ連の沿海州沿岸やオホーツク海，朝鮮半島沿岸でもマイワシが多獲されるなど，寒流域まで分布が広がっていた（黒田，1991, 2014；檜山，1998；大下ほか，2014）。しかしながら，その回遊生態については，太平洋系群と比べると不明な部分が多い。対馬暖流系群にも，太平洋系群の沿岸群や沖合群に相当する生活史多型の存在を明らかにすることは，対馬暖流系群の資源変動機構を解明するうえで重要な手がかりとなる。

酸素安定同位体比（以下， $\delta^{18}\text{O}$ ）は，地球科学の分野において古環境変動を再現するための温度指標として半世紀以上にわたり用いられてきた。例えば，大陸氷床の $\delta^{18}\text{O}$ や，地層中の有孔虫やサンゴの化石の炭酸カルシウム（ $\text{CaCO}_3$ ）の $\delta^{18}\text{O}$ を分析することで，その氷河や地層が形成された時代の気温や水温の推定がなされてきた（Emiliani, 1955）。炭酸カルシウムに関してはマイクロスケールの微少領域分析技術の開発により，これまで測定が困難であった試料や局所の分析が可能になってきている（Ishimura et al., 2012）。近年，水産学の分野にもこの手法が応用されるようになり，炭酸カルシウムで構成される魚類の耳石の $\delta^{18}\text{O}$ を分析することで，その個体の水温履歴を検証することが行われるようになってきた（Hoie et al., 2004；Dorval et al., 2011；Kitagawa et al., 2013；Javor and Dorval, 2014；天野，2014；Kubota et al., 2015）。これは生物源炭酸カルシウムの $\delta^{18}\text{O}$ には温度依存性があり，水温が低いほど $^{18}\text{O}$ が炭酸カルシウムに取り込まれる割合が高くなるためである（Urey, 1947；Urey et al., 1951）。耳石は，骨や

鱗と異なり，一度形成されると一生涯変化することなく保存され，その個体の成長過程，経験環境を正確に記録する（麦谷，1994；新井，2002；渡邊，2012）。

本種においても森本（1998）が指摘しているように，生活型や成熟特性を明らかにするためには耳石の成長軸に沿ったmicrochemistryの手法を用いた解析が必須であると考えられる。そこで本研究では，回遊履歴が明らかとなっている太平洋系群の沿岸群と沖合群の当歳魚の耳石を用いて炭素と酸素の安定同位体比分析を行い，マイワシの回遊履歴の判別可能性を検証した。

## 材料と方法

本研究で用いたマイワシ太平洋系群は，沖合群として2010年9月28日（St.8）と10月1日（St.18）に（国研）水産総合研究センター中央水産研究所の9–10月秋季資源量調査によりオッタートロール網により採集された当歳魚を，沿岸群として2008年8月22日および2010年8月17日に相模湾江ノ島付近の腰越定置網で漁獲された当歳魚を用いた（Fig. 1）。これらのサンプルはいずれも中央水産研究所より提供された。供試魚の被鱗体長の範囲と平均は，沖合群のSt.8が103–126 mm, 117 mm, St.18が109–129 mm, 118 mmであり，沿岸群の2008年が118–138 mm, 129 mm, 2010年が105–128 mm, 114 mmであった。採集時の水温および塩分はCTDにより測定され，沖合群のSt.8が水深20 mで10.0°C, 32.50, St.18が水深20 mで13.3°C, 33.02であった。沿岸群では2008年8月22日が24.1°C, 2010年8月17日が28.0°Cであった。なお，水温は腰越定置網に設置された水温計で計測されたものであり，設置水深（水深1–2 m）は本種の遊泳水深とほぼ同じである（中央水研川端 淳氏，私信）。塩分は神奈川県水産技術センターが2008年8月20日に実施した海洋観測のデータであり，腰越定置網の近傍で潮流の上流に位置する観測点の水深20 mの観測値は34.04であった。

耳石（扁平石）試料は沖合群と沿岸群の当歳魚から摘出し，風乾させた後，スライドガラスに樹脂（P-レジン：ニチカ製）包埋し，サンドペーパー（600–2000番）およびラッピングフィルム（4000番）を用いて耳石核から縁辺部まで日周輪が確認できる状態まで研磨した。研磨とその後の微細分析に用いた耳石は，沖合群が2010年9月に採集された個体，沿岸群は2008年8月に腰越定置網で漁獲された個体から採取したものをを用いた。

耳石研磨標本から高精度マイクロドリル（Geomill326：いずれもWEB社製）（坂井，2015）を用いてダイヤモンド・ビットドリルにより中心部と縁辺部の耳石検体を切削し（Fig. 2），削り出された粉末を回収した後，Ishimura et al.（2004, 2008）に従い，25°Cの恒温槽内で真空の反応管内部で無水リン酸と反応させ試料ガス（ $\text{CO}_2$ ）を発生させた。この反応で得られた $\text{CO}_2$ ガスを精製して水分を除去した

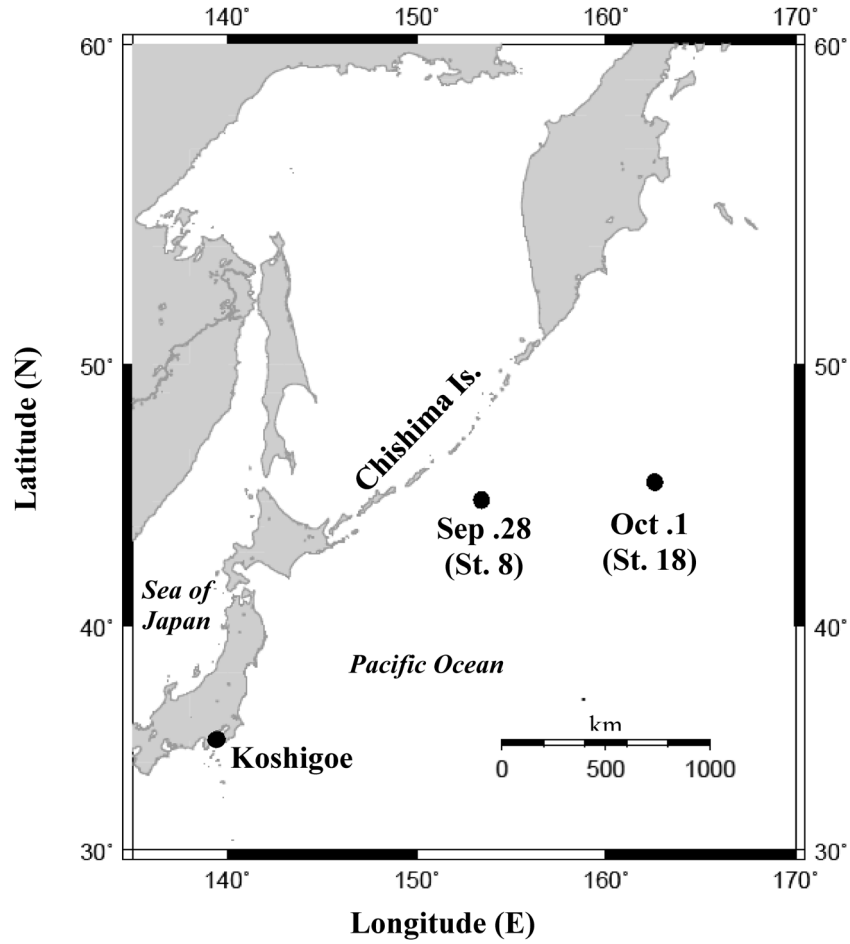


Figure 1. Sampling localities for Japanese sardine.

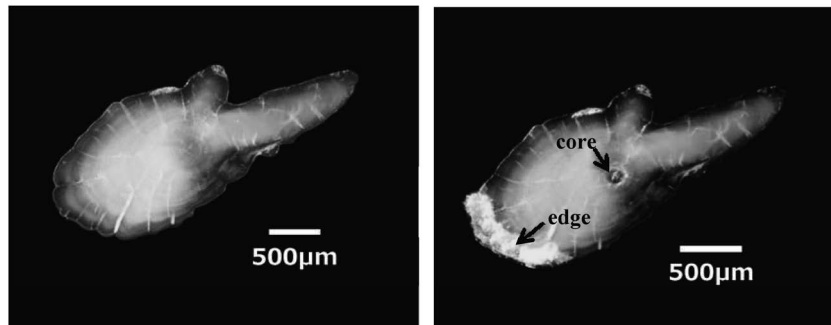


Figure 2. The analyzed samples of polished otolith. Left: before milling. Right: after milling by geomill326.

後, 茨城工業高等専門学校の微量安定同位体比質量分析システム (MICAL3c+ 連続フロー型 IsoPrime100) を用いて  $\delta^{13}\text{C}$  および  $\delta^{18}\text{O}$  を測定した. 本システムは極微量 ( $>0.1\ \mu\text{g}$ ) でも高精度 ( $\pm 0.1\%$ ) 定量が可能なものである (Ishimura et al., 2004, 2008). 同位体値は国際水準である VPDB スケールで標準化し千分率 (%) で示した. なお, 縁辺部は, 光学顕微鏡下 (倍率 100 倍) でその切削幅をマイクロメーター

を用いて測定した.

耳石の  $\delta^{18}\text{O}$  値から海水温を復元するためには海水の  $\delta^{18}\text{O}$  値を知る必要がある. 海水の  $\delta^{18}\text{O}$  値は塩分と相関がよいことが知られていることから (Oba, 1998; Yamamoto et al., 2001), 本研究で用いた海水の  $\delta^{18}\text{O}$  値は, 各海域の塩分から算出した (VSMOW スケール). この水温換算に際して, 沖合群の耳石中心部 (黒潮域) は神奈川県

**Table 1.**  $\delta^{13}\text{C}$  and  $\delta^{18}\text{O}$  values of offshore group (core and edge) and estimated temperature (Sep. 28, 2010).

Sample No.	Milling position	Milling width of edge ( $\mu\text{m}$ )	$\text{CaCO}_3$ weight ( $\mu\text{g}$ )	$\delta^{13}\text{C}$ (‰) relative to VPDB	Diff. between core and edge	$\delta^{18}\text{O}$ (‰) relative to VPDB	Diff. between core and edge	Estimated temperature ( $^{\circ}\text{C}$ )
1	core	180	—	—		—		—
	edge		1.7	-6.71		-0.92		19.6
2	core		0.9	-5.29		+0.14		19
	edge		—	—		—		—
3	core		0.2	-7.85		-1.01		24.6
	edge		—	—		—		—
4	core	140	0.8	-7.57	1.59	+0.12	0.53	19.1
	edge		2.7	-5.98		-0.41		17.2
5	core	170	1.1	-6.96	2.19	-0.05	0.10	19.9
	edge		0.6	-4.77		-0.15		15.9
6	core	50	0.9	-8.29	4.53	-0.84	0.38	23.8
	edge		0.6	-3.76		-0.46		17.4
7	core	170	—	—		—		—
	edge		1.8	-5.49		-0.45		17.3
8	core	50	0.6	-6.98	0.78	-1.02	0.23	24.6
	edge		1.7	-6.20		-0.79		19
9	core	100	0.6	-6.07	0.25	+0.09	0.17	19.2
	edge		2.9	-6.32		-0.08		15.6
10	core	100	1.2	-8.34	1.19	-0.12	0.44	20.3
	edge		4.7	-7.15		-0.56		17.9
11	core	250	2.4	-7.12	0.17	+0.14	0.07	19
	edge		6.1	-6.95		+0.07		14.9
Ave.±SD	core	—	—	-7.16±1.00	1.53±1.51	-0.28±0.51	0.27±0.18	21.1±2.5
	edge	134.44±65.79	—	-5.93±1.10		-0.42±0.32		17.2±1.5

—: no data, loss of sample gas

2008年8月20日に実施した海洋観測の塩分（水深20 m, 34.04）を用い、縁辺部（親潮域）は中央水産研究所の9–10月秋季資源量調査のSt.8のCTDデータ（水深20 m, 32.50）を用いた。沿岸群は中心部、縁辺部（黒潮域）ともに神奈川県水産技術センターの2008年8月に実施した海洋観測値の塩分（水深20 m, 34.04）を用いた。海水の $\delta^{18}\text{O}$ の計算は、黒潮域ではOba (1988)、親潮域ではYamamoto et al. (2001)の換算式を用いた。

$$\text{黒潮域: } \delta^{18}\text{O} = 0.203S - 6.76 \quad (\text{Oba, 1988}) \quad (1)$$

$$\text{親潮域: } \delta^{18}\text{O} = 0.3915S - 13.516 \quad (\text{Yamamoto et al., 2001}) \quad (2)$$

ここでSは塩分を表す。耳石の $\delta^{18}\text{O}$ から絶対水温への換算は、耳石の中心部、縁辺部の $\delta^{18}\text{O}$ 値をKim et al. (2007)が報告した下記の換算式に導入し、それぞれの水温を求めた。

$$1000 \ln \alpha = 17.88 (1000/T) - 31.14 \quad (3)$$

$\alpha$ は同位体分別係数を表しており、耳石の $\delta^{18}\text{O}$ 値と海水の

$\delta^{18}\text{O}$ 値から求められる。 $T$ は絶対温度を示す。水温の低い親潮域まで回遊する沖合群と、水温の高い黒潮域に留まる沿岸群とでは、耳石全体（バルク）の $\delta^{18}\text{O}$ にも差が検出されることが想定されるため (Javor and Dorval, 2014)、バルク分析も行った。分析には、沖合群が2010年10月に、沿岸群が2010年8月に漁獲された個体から採取した耳石を用いた。バルク分析に用いた耳石の炭酸塩量は660–940  $\mu\text{g}$ であった。分析には、茨城工業高等専門学校のDual-Inlet型安定同位体比質量分析計 (IsoPrime100: Isoprime社製) を使用した。同一個体の左右の耳石 $\delta^{18}\text{O}$ 値に有意な差があるかを検証するために、沿岸群については1個体につき左右2個の耳石の $\delta^{18}\text{O}$ を測定した。

## 結果

耳石の中心部と縁辺部の $\delta^{13}\text{C}$ と $\delta^{18}\text{O}$ およびその差分値、換算水温、分析に供した炭酸カルシウムの重量および縁辺部の切削幅について沖合群をTable 1に、沿岸群をTable 2に示した。海水の $\delta^{18}\text{O}$ は現場の塩分から計算され、親潮域のSt.8が $-0.79\text{‰}$ 、黒潮域の神奈川県沿岸が $+0.15\text{‰}$ であった。沖合群と沿岸群の中心部と縁辺部の $\delta^{13}\text{C}$ と $\delta^{18}\text{O}$

**Table 2.**  $\delta^{13}\text{C}$  and  $\delta^{18}\text{O}$  values of coastal group (core and edge) and estimated temperature (Aug. 17, 2008).

Sample No.	Milling position	Milling width of edge ( $\mu\text{m}$ )	$\text{CaCO}_3$ weight ( $\mu\text{g}$ )	$\delta^{13}\text{C}$ (‰) relative to VPDB	Diff. between core and edge	$\delta^{18}\text{O}$ (‰) relative to VPDB	Diff. between core and edge	Estimated temperature ( $^{\circ}\text{C}$ )
1	core		3.6	-5.49	0.65	+0.29	2.32	18.3
	edge	160	1.1	-4.87		-2.03		29.7
2	core		1.4	-5.68	0.93	+0.03	1.17	19.5
	edge	160	2.1	-4.75		-1.14		25.3
3	core		0.8	-5.47	0.66	-1.06	0.93	24.8
	edge	100	1.2	-4.81		-1.99		29.5
4	core		—	—		—		—
	edge	170	0.8	-7.03		-2.68		33.1
5	core		0.5	-7.06	0.55	-0.78	0.86	23.5
	edge	80	0.9	-6.51		-1.64		27.8
6	core		0.5	-5.32	0.30	-0.43	1.12	21.8
	edge	100	2.4	-5.02		-1.55		27.3
7	core		0.8	-3.85	1.34	-0.11	1.55	20.2
	edge	180	4.1	-5.19		-1.66		27.9
8	core		0.3	-6.45	0.17	-1.41	0.35	26.6
	edge	100	0.3	-6.28		-1.76		28.3
9	core		0.6	-6.49	0.34	-1.14	0.95	25.3
	edge	100	0.5	-6.83		-2.09		30
10	core		—	—		—		—
	edge	120	0.5	-6.57		-1.57		27.4
Ave.±SD	core edge	120.00±36.53		-5.73±0.93 -5.79±0.93	0.62±0.38	-0.58±0.61 -1.81±0.41	1.16±0.58	22.5±3.0 28.6±2.1

—: no data, loss of sample gas

の散布図を Fig. 3 に示した。

沖合群では、耳石  $\delta^{18}\text{O}$  の値は中心部で  $-0.28 \pm 0.51\%$  (平均±標準偏差), 縁辺部で  $-0.42 \pm 0.32\%$  であった。縁辺部の切削幅は  $50\text{--}250\ \mu\text{m}$  (平均  $134\ \mu\text{m}$ ) であった。耳石  $\delta^{13}\text{C}$  の値は中心部で  $-7.16 \pm 1.00\%$ , 縁辺部で  $-5.93 \pm 1.10\%$  であった。沿岸群では耳石  $\delta^{18}\text{O}$  値は, 中心部で  $-0.58 \pm 0.61\%$ , 縁辺部で  $-1.81 \pm 0.41\%$  であった。縁辺部の切削幅は  $80\text{--}180\ \mu\text{m}$  (平均  $120\ \mu\text{m}$ ) であった。 $\delta^{13}\text{C}$  の値は, 中心部で  $-5.73 \pm 0.98\%$ , 縁辺部で  $-5.79 \pm 0.93\%$  であった。 $\delta^{13}\text{C}$  値に着目すると, 沖合群では  $-8.34$  から  $-3.76\%$  の範囲に分散したのに対し, 沿岸群では  $-5\%$  付近を示すグループと  $-7\%$  付近を示す二つのグループに分かれる傾向があり, 縁辺部で顕著であった。耳石の中心部と縁辺部の  $\delta^{13}\text{C}$  と  $\delta^{18}\text{O}$  の差分値について, 沖合群の  $\delta^{13}\text{C}$  が  $1.53 \pm 1.51\%$  (平均±標準偏差),  $\delta^{18}\text{O}$  が  $0.27 \pm 0.18\%$ , 沿岸群の  $\delta^{13}\text{C}$  が  $0.62 \pm 0.38\%$ ,  $\delta^{18}\text{O}$  が  $1.16 \pm 0.58\%$  であり,  $\delta^{13}\text{C}$  では沖合群が大きく,  $\delta^{18}\text{O}$  では逆に沿岸群のほうが大きくなった (Mann-Whitney の  $U$  検定  $p < 0.05$ )。換算水温は, 沖合群の耳石の中心部で  $21.1 \pm 2.5^{\circ}\text{C}$  (平均±標準偏差), 縁辺部で  $17.2 \pm 1.5^{\circ}\text{C}$  であった。一方, 沿岸群の耳石からの換算水温は, 沿岸群の中心部で  $22.5 \pm 3.0^{\circ}\text{C}$ , 縁辺部で  $28.6 \pm 2.1^{\circ}\text{C}$  で

あった。沖合群の耳石の縁辺部からの平均換算水温は耳石中心部の平均換算水温よりも低い, もしくは同程度の値を示した。ただし, 同一個体の耳石の中心部と縁辺部の換算水温を比較してみると, すべての個体で縁辺部の方が中心部より  $1.9\text{--}6.4^{\circ}\text{C}$  低い水温を示した (Table 1)。一方, 沿岸群では縁辺部の平均換算水温は中心部の平均換算水温よりも高く, 同一個体で比較しても中心部より縁辺部の方が  $1.7\text{--}11.4^{\circ}\text{C}$  高い水温を示した (Table 2)。

耳石バルク分析の  $\delta^{18}\text{O}$  は (Fig. 4), 沖合群が  $+0.41 \pm 0.12\%$  (平均±標準偏差), 沿岸群が  $-0.95 \pm 0.44\%$  であり, 沖合群の  $\delta^{18}\text{O}$  が沿岸群より有意に大きかった (Mann-Whitney の  $U$  検定,  $p < 0.05$ )。沿岸群の同一個体内の左右の  $\delta^{18}\text{O}$  の差の平均値は  $0.09\%$  であり (Table 3), 左右の  $\delta^{18}\text{O}$  には有意差は検出されず (Paired  $t$ -test,  $p > 0.05$ ), 左右均質であることが示された。

## 考 察

耳石の中心部は産卵期から仔魚期までの水温を示しており, 縁辺部は採集時期の水温を示している。沖合群は, 水温の高い神奈川県沿岸の黒潮域で産卵し幼魚期までを過ごした後, 8–10月 (採集時) には水温の低い親潮域で生活

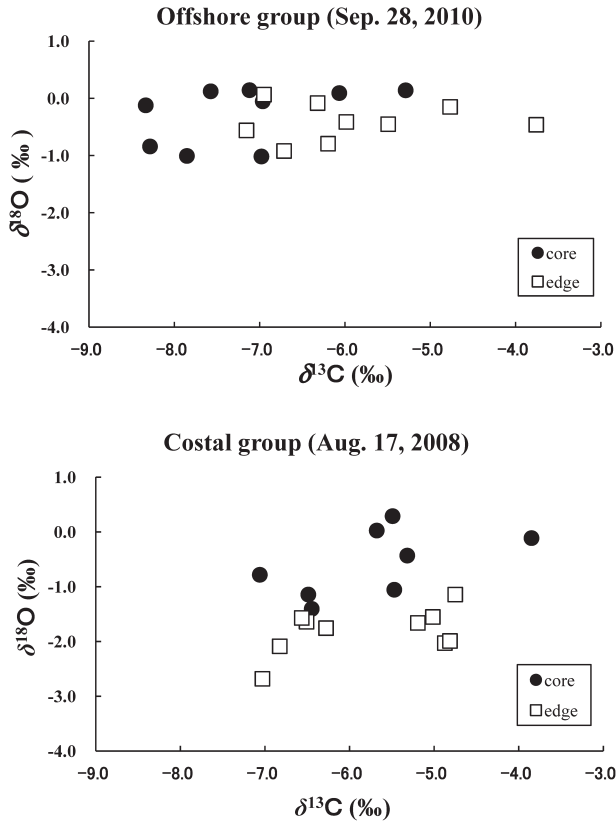


Figure 3. Scatter plot of stable isotopic compositions of otolith by milling sample of core and edge ( $\delta^{13}\text{C}$  vs  $\delta^{18}\text{O}$ ).

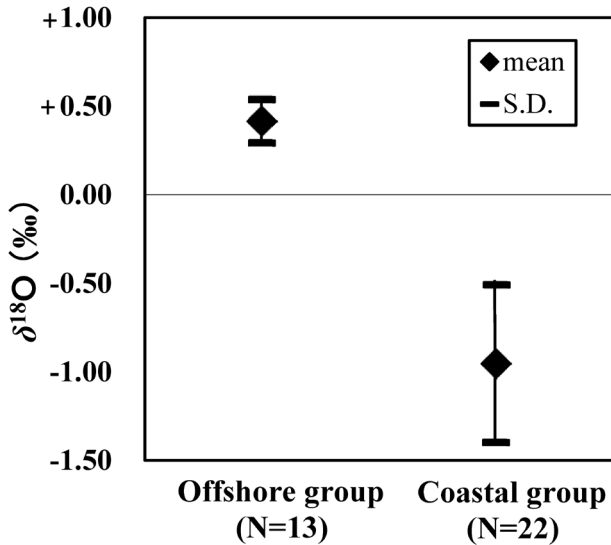


Figure 4. Analytical results of  $\delta^{18}\text{O}$  of bulk otolith (Offshore group and Coastal group). Error bars indicate standard deviations of  $\delta^{18}\text{O}$ .

する (川端ほか, 2014). 沖合群の縁辺部の換算水温 ( $17.2 \pm 1.5^\circ\text{C}$ ) が中心部 ( $21.1 \pm 2.5^\circ\text{C}$ ) よりも低いという結果は, 上記の知見と整合的である. また, 2010年4月下旬の神奈

Table 3. Bulk  $\delta^{18}\text{O}$  analysis otolith both for left and right otoliths of Coastal group (Aug. 17, 2010).

Sample No.	$\delta^{18}\text{O}$ (‰) relative to VPDB	Diff. between right and left
A	-0.64 -0.61	0.03
B	-1.23 -1.03	0.20
C	-1.82 -1.68	0.14
D	-1.39 -1.36	0.03
E	-0.81 -0.87	0.06
F	-0.86 -0.94	0.08
G	-0.50 -0.44	0.06
H	-0.73 -0.62	0.11
I	-0.75 -0.54	0.21
J	-1.63 -1.59	0.04
K	-0.46 -0.49	0.03
Average	$-0.95 \pm 0.44$	0.09

川県沿岸海域の表面水温は $20^\circ\text{C}$ 前後であり (漁業情報サービスセンター, 2010), 耳石中心部の換算水温と矛盾しない.

しかし, St.8の位置する千島沖海域の9月下旬の表面水温は $10\text{--}15^\circ\text{C}$ であり (漁業情報サービスセンター, 2010), 耳石縁辺部の $\delta^{18}\text{O}$ からの換算水温より $2\text{--}7^\circ\text{C}$ ほど低い. これは分析精度によるものと考えられる. 耳石の縁辺部を切削する際に, 高精度マイクロドリルを用いても, ある程度の切削幅 ( $50\text{--}250\ \mu\text{m}$ ) を持ってサンプリングせざるを得ない (Table 1, Fig. 2). そのため, 採集時以前に形成された耳石の $\delta^{18}\text{O}$ を含む換算水温を算出することになるため, 換算水温が採集時の水温より高くなったものと推察される. 当歳魚は黒潮域から混合域を経て親潮域に回遊する際に, 周辺海域より水温の高い暖水渦やそれから派生する暖水ストリーマを通じて北上回遊する (為石・杉本, 1994; 伊藤, 2014). したがって, 採集時直前の北上期に形成された耳石もマイクロドリルでサンプリングした可能性がある.

沿岸群は, 九州の薩南から神奈川県までの沿岸域で $12\text{--}5$ 月にかけて産卵し, 水温の高い黒潮の沿岸域で生活する (川端ほか, 2014). そのため季節の進行に伴い経験

水温も上昇するので、中心部 ( $22.5 \pm 3.0^\circ\text{C}$ ) より縁辺部 ( $28.6 \pm 2.1^\circ\text{C}$ ) で換算水温が高いことは、上記の知見と整合的である。2008年4月下旬の九州の薩南から神奈川県までの沿岸域の表面水温は $20^\circ\text{C}$ 前後であり(漁業情報サービスセンター, 2008), 中心部の換算水温は現況とも矛盾しない。また、腰越定置網の位置する神奈川県沿岸の8月下旬の表面水温は $25^\circ\text{C}$ 前後であった(漁業情報サービスセンター, 2008)。海水の $\delta^{18}\text{O}$ の推定誤差, 耳石分析時の測定誤差 ( $\pm 0.1\%$ ), 水温換算の精度 ( $\pm 2^\circ\text{C}$ 程度の誤差を含む: Kim et al., 2007) を考慮すると、耳石 $\delta^{18}\text{O}$ から推定した水温はおおむね現況と整合的であるといえる。

当歳魚耳石のバルク分析による $\delta^{18}\text{O}$ は、沖合群のほうが沿岸群よりも有意に高い値を示した (Fig. 4)。このことは、沖合群のほうが沿岸群よりも低い水温を経験していることを示しており、耳石のバルク分析においても両群を明瞭に識別できることがわかった。また、沿岸群の左右耳石の $\delta^{18}\text{O}$ を高精度分析したところ有意差がないことが確認され、本種の耳石分析にあたり左右どちらの耳石を用いても支障がないことが明らかとなった。また、北米西部海域に生息するカリフォルニアマイワシ *S. sagax* のバルク分析 (Javor and Dorval, 2014) でも同様の結果であったことから、本分析法の高い汎用性があるといえる。

本研究で採用した高精度マイクロドリルと微量炭酸塩安定同位体比質量分析システムを組み合わせた微少領域切削分析は、高い精度でその個体の水温履歴を検証することが可能で、耳石の日周輪を読み取りながら高精度マイクロドリルを用いて連続切削を行えば時間軸に対応した水温履歴の再現も可能である。しかし、この手法は高感度・高精度の分析技術ではあるものの、高度な技術と分析時間・作業量を要するために大量の検体を処理するには不向きである。また、精度の高い水温復元のためには、分析検体の切削時に成長輪にそって高解像度で切削する必要がある。定量下限値以上の検体量を確保するためには日周輪紋に沿って長い距離を切削する必要もある。そのため、第一段階として個体の片方の耳石を用いて比較的簡便で低コストである耳石バルク分析を数10–100検体程度に対して行い、大まかな集団構造を把握する。第二段階として、バルク分析により低水温経験個体と高水温経験個体と推定された個体について一部抽出し、もう一方の耳石を用いて前述した微少領域切削分析を行い、詳細な水温履歴を復元するのが現実的である。

なお、本手法を対馬暖流系群に応用して、集団構造の詳細な知見を得るには、まず対馬暖流とリマン寒流の海水の $\delta^{18}\text{O}$ 値を推定する必要がある。現在、日本海中央部から北部付近においては太平洋側のように塩分から $\delta^{18}\text{O}$ を求める換算式が得られていない。そのため、まずは新たに採水などして $\delta^{18}\text{O}$ を直接測定する必要がある。

$\delta^{13}\text{C}$ 値に関し、沖合群が広く分散したのに対して沿岸群

では二つのグループにまとまる傾向がみられた (Fig. 3)。また、中心部と縁辺部の $\delta^{13}\text{C}$ と $\delta^{18}\text{O}$ の差分値は、 $\delta^{13}\text{C}$ は沖合群で大きく $\delta^{18}\text{O}$ は沿岸群で大きいという逆の傾向を示した。魚類耳石の $\delta^{13}\text{C}$ は餌資源や個体の代謝など複合的な要因によって左右されると考えられるが(天野, 2014; Amano et al., 2015), 詳細を明らかにするには更に分析検体数を増やすとともに、餌を管理した飼育個体の耳石の同位体値を分析することも不可欠である。耳石の $\delta^{13}\text{C}$ 値の規定要因が解明されれば、餌資源の解析や出生地起源の解明などに資することも可能になり、 $\delta^{13}\text{C}$ と $\delta^{18}\text{O}$ の差分値の組み合わせから両群を識別する手法も確立されるだろう。

## 謝 辞

本研究は、水産庁の「平成26年度我が国周辺水域資源評価等推進委託事業」により実施した。(国研)水産総合研究センター中央水産研究所の川端 淳氏(現水産庁)にはマイワシ太平洋系群当歳魚のサンプルおよび観測データを提供いただき、太平洋系群の生態特性についてご教示いただいた。同西海区水産研究所の西村 明氏(現中央水研)、山田陽巳氏、大下誠二氏(現国際水産研究所)、福若雅章氏、山田東也氏、同本部久保田 洋氏には本研究にご理解とご協力を賜った。神奈川県水産技術センターの清水頭太郎氏には神奈川県沿岸の海洋観測データを提供いただいた。また、マイワシ検討会の皆様には研究を進めるうえで有益な助言をいただいた。鳥取県水産試験場の太田太郎氏(現水産課)には耳石の研磨標本の作製手法についてご教示いただいた。同水産試験場の職員の皆様には本種の測定作業等をお手伝いいただいた。茨城工業高等専門学校の大泉昂之氏、中根雅晴氏、田中崇史氏には同位体分析に関して協力をいただいた。最後に匿名の査読者および本誌編集委員の北川貴士氏には懇切丁寧な助言をいただいた。以上の方々に厚く御礼申し上げます。また、本研究の一部はJSPS 科研費25701002, JSPS 科研費26550016, 造船学術研究推進研究機構の助成を受けたものである。

## 引用文献

- 天野洋典 (2014) 耳石の微量元素組成と安定同位体比を用いたピワマスの回遊生態に関する研究。博士論文, 東京大学, 東京。
- Amano, Y., J. C. Shiao, T. Ishimura, K. Yokouchi and K. Shirai (2015) Otolith geochemical analysis for stock discrimination and migratory ecology of tunas. *Biology and Ecology of Bluefin Tuna*. CRC Press, pp. 225–257.
- 新井崇臣 (2002) 魚類の回遊履歴: 解析手法の現状と課題。魚類学雑誌, **49**, 1–23.
- Dorval, E., K. Piner, L. Robertson, S. C. Ressler, B. Javor and R. Vetter (2011) Temperature record in the oxygen stable isotopes of Pacific sardine otoliths: Experimental vs. wild stocks from the Southern California Bight. *J. Exp. Mar. Biol. Ecol.*, **397**, 136–143.
- Emiliani, C. (1955) Pleistocene temperatures. *J. Geol.*, **63**, 538–578.
- 漁業情報サービスセンター (2008) 日本周辺漁況情報, 第193,

- 209号.  
 漁業情報サービスセンター (2010) 日本周辺漁海況情報, 第293, 314号.
- 檜山義明 (1998) 対馬暖流域での回遊範囲と成長速度. 「マイワシの資源変動と生態変化」渡邊良朗, 和田時夫編, 恒星社厚生閣, 東京, 35-44.
- Hoie, H., E. Otterlei and A. Folkvord (2004) Temperature-dependent fractionation of stable oxygen isotopes in otoliths of juvenile cod (*Gadus morhua* L.). ICES. J. Mar. Sci., **61**, 243-251.
- Ishimura, T., U. Tsunogai and T. Gamo (2004) Stable carbon and oxygen isotopic determination of sub-microgram quantities of CaCO<sub>3</sub> to analyze individual foraminiferal shells. Rapid Commun. Mass Spectrom., **18**, 2883-2888.
- Ishimura, T., U. Tsunogai and F. Nakagawa (2008) Grain-scale heterogeneities in the stable carbon and oxygen isotopic compositions of the international standard calcite materials (NBS 19, NBS 18, IAEA-CO-1, and IAEA-CO-8). Rapid Commun. Mass Spectrom., **22**, 1925-1932.
- Ishimura, T., U. Tsunogai, S. Hasegawa, F. Nakagawa, T. Oi, H. Kitazato, H. Suga and T. Toyofuku (2012) Variation in stable carbon and oxygen isotopes of individual benthic foraminifera: Tracers for quantifying the magnitude of isotopic disequilibrium. Biogeosciences, **9**, 4353-4367.
- 伊藤幸彦 (2014) 黒潮親潮移行域における渦構造と生態系. 「水産海洋学入門」水産海洋学会編, 講談社, 東京, 130-135.
- Javor, B. and E. Dorval (2014) Geography and ontogeny influence the stable oxygen and carbon isotopes of otoliths of Pacific sardine in the California Current. Fish. Res., **154**, 1-10.
- 川端 淳・本田 聡・渡邊千夏子・岡村 寛・市野川桃子 (2014) 平成25年度マイワシ太平洋系群の資源評価. 平成25年度資源評価報告書, 水産庁増殖推進部漁場資源課, 東京, 15-46.
- 川崎 健 (1989) 浮魚の生態と資源変動の解明. 水産海洋研究, **2**, 178-191.
- Kawasaki, T. (1992) Climate-dependent fluctuations in far eastern sardine population and their impacts on fisheries and society. Climate variability, climate change and fisheries (Glantz, M. H. ed.), Cambridge University press, 325-354.
- Kim S., JR. O'Neil, C. Hillaire-Marel and A. Mucci (2007) Oxygen isotope fractionation between synthetic aragonite and water: Influence of temperature and Mg<sup>2+</sup> concentration. Geochim. Cosmochim. Acta., **71**, 4704-4715.
- Kitagawa, T., T. Ishimura, R. Uozato, K. Shirai, Y. Amano, A. Shinoda, T. Otake, U. Tsunogai and S. Kimura (2013) Otolith  $\delta^{18}\text{O}$  of Pacific Bluefin tuna *Thunnus orientalis* as an indicator of ambient water temperature. Mar. Ecol. Prog. Ser., **481**, 199-209.
- Kubota, K., Y. Yokoyama, Y. Kawakubo, A. Seki, S. Sakai, P. Ajithprasad, H. Maemoku, T. Osada and S. K. Bhattacharya (2015) Migration history of an arid Indian catfish reconstructed by otolith Sr/Ca and  $\delta^{18}\text{O}$  micro-analysis. Geochim. J., **49**, 469-480.
- 黒田一紀 (1991) マイワシの初期生活期を中心とする再生産過程に関する研究. 中央水産研究所報告, **3**, 25-278.
- 黒田一紀 (2014) オホーツク海におけるマイワシの分布と回遊. 水産海洋研究, **78**, 176-186.
- 森本晴之 (1998) 成熟. 「マイワシの資源変動と生態変化」渡邊良朗, 和田時夫編, 恒星社厚生閣, 東京, 45-53.
- 麦谷泰雄 (1994) 魚類の耳石情報解析に関する研究. 日本水産学会誌, **60**, 7-11.
- Oba, T. (1988) Paleoceanographic information obtained by the isotopic measurement of individual foraminiferal specimens. Proceedings of the First International Conference on Asian Marine Geology China Ocean Press Beijing, 169-180.
- Okazaki T., T. Kobayashi and Y. Uozumi (1996) Genetic relationships of pilchards (genus: *Sardinops*) with anti-tropical distributions. Mar. Biol., **126**, 585-590.
- 大下誠二・福若雅章・安田十也 (2014) 平成25年度マイワシ対馬暖流系群の資源評価. 平成25年度資源評価報告書, 水産庁増殖推進部漁場資源課, 東京, 47-73.
- 坂井三郎 (2015) 地球化学におけるマイクロサンプリング技術の進歩. 地球化学, **49**, 1-12.
- 水産庁 (2013) 「水産白書 (平成25年度版)」。一般財団法人統計協会, 東京, 216 pp.
- 為石日出生・杉本隆成 (1994) 東北海域におけるマイワシの北上回遊と接岸に果たす暖水渦と暖水ストリーマの役割—航空機調査から—。水産海洋研究, **58**, 77-90.
- 田中昌一・川崎 健・森田 祥・土井長之 (2003) 第2章 水産資源. 「改訂版新水産ハンドブック」川島利兵衛, 田中昌一, 塚原 博, 野村 稔, 隆島史夫, 豊水正道, 浅田陽治編, 講談社, 東京, 97-180.
- Urey, H. C. (1947) The thermodynamic properties of isotopic substances. J. Chem. Soc., 562-581.
- Urey, H. C., H. A. Lowenstam, S. Epstein and C. R. McKinney (1951) Measurement of paleotemperatures and temperatures of upper cretaceous of England, Denmark, and the Southeastern United States. Geol. Soc. Am. Bull., **62**, 399-416.
- 渡邊良朗 (2012) 「イワシ 意外と知らないほんとの姿」。恒星社厚生閣, 東京, 111 pp.
- Yamamoto, M., N. Tanaka and S. Tsunogai (2001) Okhotsk Sea intermediate water formation deduced from oxygen isotope systematics. J. Geophys. Res., **106**, 31075-31084.